

2021

工程永續與土木防災研討會

Conference of Civil Disaster Prevention and Environmental Sustainability

論文集

主辦單位：國立屏東科技大學土木工程系



2021 工程永續與土木防災研討會

主辦單位:

國立屏東科技大學土木工程系

共同主辦:

國立高雄科技大學土木工程系

國立高雄科技大學營建工程系

國立高雄大學土木與環境工程系

國立嘉義大學土木與水資源工程系

義守大學土木與生態工程學系

協辦單位:

國立金門大學土木與工程管理學系

正修科技大學土木與空間資訊系

高苑科技大學土木工程系

序 言

2006 年義守大學土木與生態工程學系舉辦了第一屆「土木與生態工程研討會」，提供了國內土木營建相關科系師生，尤其是南部高屏地區學校，一個良好的學術交流平台。隨著「防災」與「永續」意識崛起與相關政策推展，每年參與師生人數逐漸增加，研討會徵文領域拓展至結構與大地、環境工程、工程材料、營建與交通、防災與重建、永續與生態工程和其他土木相關議題。經由南部幾所大專校院土木營建相關科系教師們討論後，決議以「工程永續與土木防災研討會」為名，由各夥伴學校輪流主辦，促成了迄今已具有 15 年歷史的南台灣土木營建領域年度交流盛會。

遵循前例與過去主辦學校所建立之優良成果，「2021 工程永續與土木防災研討會」由國立屏東科技大學土木工程系主辦，國立高雄科技大學土木工程系、國立高雄科技大學營建工程系、國立高雄大學土木與環境工程系、國立嘉義大學土木與水資源工程系、義守大學土木與生態工程學系共同主辦，並由國立金門大學土木與工程管理學系、正修科技大學土木與空間資訊系、高苑科技大學土木工程系共同協辦。2020 年因為 Covid19 疫情關係無法舉辦實體研討會，原本期待今年能與各校師生好友再度於研討會中相逢敘舊。然而，不料看似趨於穩定的疫情在五月中旬突然爆發，在全國疫情第三級警戒規定下只能無奈停辦，改採與去年相同的網路發表方式進行。即便如此，今年承蒙各界不吝賜稿，經大會各領域學術專家嚴格審查後，共收錄 119 篇於本研討會論文集，並由其中推薦 24 篇優秀論文。

最後，感謝共同主辦與協辦夥伴學校們的鼎力相助，讓今年論文集能順利出刊，謹此致謝。明年度「2022 工程永續與土木防災研討會」將移師國立嘉義大學舉辦，衷心盼望屆時疫情早已趨緩，讓久未聚會的各校好友代表能再度齊聚。

國立屏東科技大學土木工程系教授兼系主任 蔡孟豪
2021 年 06 月 30 日

籌備委員會

榮譽主席	戴昌賢博士	國立屏東科技大學校長
召集人	蔡孟豪主任	國立屏東科技大學土木工程系
	黃忠發主任	國立高雄科技大學土木工程系
	林建良主任	國立高雄科技大學營建工程系
	吳明溟主任	國立高雄大學土木與環境工程學系
	陳清田主任	國立嘉義大學土木與水資源工程學系
	鄭瑞富主任	義守大學土木與生態工程學系
	陳棟燦主任	國立金門大學土木與工業管理學系
	田坤國主任	正修科技大學土木與空間資訊系
劉坤松主任	高苑科技大學土木工程系	
庶務組	黃識頻小姐	國立屏東科技大學土木工程系
	沈玉婷小姐	國立屏東科技大學土木工程系
	莊子誼小姐	國立屏東科技大學土木工程系
	顏崑泰先生	國立屏東科技大學土木工程系
	李若縵小姐	國立屏東科技大學土木工程系
	鄭育珍小姐	國立屏東科技大學土木工程系

論文委員會

蔡孟豪教授	國立屏東科技大學土木工程系
王弘祐副教授	國立屏東科技大學土木工程系
徐文信副教授	國立屏東科技大學土木工程系
韋家振副教授	國立屏東科技大學土木工程系
葉文正助理教授	國立屏東科技大學土木工程系
陳智謀助理教授級研究員	國立屏東科技大學研究總中心
陳昆廷助理教授級研究員	國立屏東科技大學研究總中心
林智強助理教授	國立高雄科技大學土木工程系
黃凱翔助理教授	國立高雄科技大學土木工程系
林錦隆助理教授	國立高雄科技大學營建工程系
林彥宇助理教授	國立高雄科技大學營建工程系
林秋良教授	國立高雄大學土木與環境工程學系
陳韋志助理教授	國立高雄大學土木與環境工程學系
陳清田副教授	國立嘉義大學土木與水資源工程學系
劉玉雯教授	國立嘉義大學土木與水資源工程學系
周良勳副教授	國立嘉義大學土木與水資源工程學系
蘇東青教授	國立金門大學土木與工業管理學系
高志瀚副教授	國立金門大學土木與工業管理學系
王金鐘教授	正修科技大學土木與空間資訊系

大會論文獎評審委員會

王弘祐副教授	國立屏東科技大學土木工程系
徐文信副教授	國立屏東科技大學土木工程系
韋家振副教授	國立屏東科技大學土木工程系
葉文正助理教授	國立屏東科技大學土木工程系
陳智謀助理教授級研究員	國立屏東科技大學研究總中心
陳昆廷助理教授級研究員	國立屏東科技大學研究總中心
林智強助理教授	國立高雄科技大學土木工程系
黃凱翔助理教授	國立高雄科技大學土木工程系
林錦隆助理教授	國立高雄科技大學營建工程系
林彥宇助理教授	國立高雄科技大學營建工程系
林秋良教授	國立高雄大學土木與環境工程學系
陳韋志助理教授	國立高雄大學土木與環境工程學系
陳清田副教授	國立嘉義大學土木與水資源工程學系
蘇東青教授	國立金門大學土木與工業管理學系
高志瀚副教授	國立金門大學土木與工業管理學系

目 錄

序 言.....	I
籌備委員會.....	II
論文委員會.....	III
大會論文獎評審委員會.....	IV
論文集.....	1
【A】結構與大地.....	2
土石流扇狀堆積區之演化探討.....	3
多光譜 UAV 在草嶺 149 甲線崩塌地監測與地形變化調查與分析.....	12
珊瑚礁岩深開挖減震孔與減震溝的應用研究.....	23
電磁阻尼器於近斷層隔震之理論與實驗研究.....	34
應用壓電片於彈性柱挫屈變位健康檢測之理論探討.....	43
壓電智能彈性柱挫屈變位健康檢測之有限元素分析.....	51
應用 ETABS 程式模擬惰性減震擋土牆系統之研究.....	62
高嶺土壓密及滲透特性研究.....	73
利用多層次外牆恆溫裝置降低室內溫度之初步研究.....	81
屏東地區沉積土壤透水係數和水文參數之研討.....	95
建山部落邊坡長期監測.....	110
臺灣 SRC 構造建築施工實務探討與研究-以 A 建築為例.....	118
水下單樁基礎行為探討與模擬.....	136
惰性減震擋土牆之初步研究.....	147
高樓軟弱層初探.....	157
低降服鋼板與混凝土複合剪力牆之耐震性能研究.....	162
運用 AHP 於高雄市區道路修復後發生損壞之風險評估.....	169
均勻係數和細料含量對土壤液化孔隙水壓力之影響.....	175
0206 美濃地震台南安南區建築物沉陷量分析與探討.....	184
高雄地區之 SPT-CPT 相關性研究.....	193
CPT 與 SPT 及 Vs 之液化潛能指數分析的差異性探討.....	200
由 0206 花蓮地震與 921 集集地震探討近斷層地震對街屋結構的影響.....	210
含凹槽和管線之區域受振後的訊號分析.....	219
太陽能電滲在浮木卵石地質改良工法之研究.....	227
山坡地條型基礎承载力探討.....	238
【B】環境與工程.....	245
未使用既有污水下水道幹管狀況調查與修繕-以臺東市幹管為例.....	246
公共污水處理廠下水污泥減量處理及再利用現況.....	256
公共污水處理廠擴建工程分包類型對成本超支之影響.....	264
不同二階床質對流體化床產氣之影響.....	275
運用光譜儀估計葉綠素 a 濃度.....	281
衛生掩埋場整治方式之探討.....	289
燃燒拜香特徵之研究.....	305
再生能源躉購制度對電力結構之影響分析.....	314

【C】 工程材料	322
膨潤土飽和循環條件下的材料參數變化研究	323
熱浸鍍鋅鋼筋運用於高性能混凝土之探討	335
綠色混凝土在溫泉水養護環境之工程性質	342
自來水管線淺層埋設初探	350
蔗渣灰應用於水泥砂漿之硬固性質探討	358
無機聚合廢液晶磚產製技術之研究	371
廢陶瓷粒製作成無機聚合物工程性質之研究	383
含爐石粉之再生瀝青水泥砂漿工程性質研究	395
含飛灰粉之再生瀝青水泥砂漿工程性質研究	406
鋼纖維運用在梁上線彈性行為探討	412
鋼纖維混凝土梁之有限元素分析	418
以雙向壓孔試驗探討鋼纖維含量對超高性能混凝土拉伸性質之影響	423
混凝土用機械式緊固件歐盟 EOTA 與美洲 ACI 評估系統比較分析-以新型植筋錨栓為例	430
離島混凝土材料及施工品質探討	443
高水化熱巨積混凝土之價值分析	457
機器學習應用於由混凝土相關影響因子抗壓強度迴歸與分類	464
以聚氨酯發泡材料為輕質隔間牆之壁掛能力探討	473
石墨烯應用於防水塗料之可行性探討	483
添加無機色粉製成彩色水泥砂漿工程性質之研究	491
添加卜作嵐材料及玻璃砂製成水泥砂漿之新拌及硬固性質之研究	499
含膜蛋殼粉應用於水泥砂漿之強度發展	504
價值工程於農舍住宅興建案之研析	513
高強度熱浸鍍鋅鋼筋混凝土工程性質之研究	521
Experimental Comparative Study on the Behavior of Reclaimed Cement in Pavement Subgrade CBR Tests with Special Additives	528
【D】 營建與交通	540
建築預鑄結構體吊裝過程施工現場危險因子與因子排除研究	541
台灣南部民眾購屋偏好之研究：基於層級分析法的調查與基於統計檢定的進階分析	559
以公路交通系統模擬模式探討行向改變對出口匝道運轉績效之影響	571
運輸規劃支援系統維運成果簡介	579
Sketchup 軟體於實務設計施工界面整合之研究-以透天建築物為例	584
水土保持工程數量計算指引與要領之探討	592
自動化 BIM 施工圖建置程式之研究-以機電施工圖為例	605
建築物生產履歷應用於以太坊智能合約之探討	613
委外設計監造對於工程公務人員專業與管理能力減損之初探	619
房屋修繕資料之變項關聯性分析及視覺化的實作	627
營造業對待分包商公平性與長期合作關係之影響：以華人關係為調節變項	637
集合住宅大樓價值工程之探討	644
FWD 檢測探討不同回彈模數對鋪面反應之影響	651
以深度學習方法評估人行道受阻礙程度	658

【E】 防災與重建	665
國軍動員機制支援災害防救任務之研析-以 2018 年 823 水災為例.....	666
新城活動斷層與桃園新竹地區地震危害潛勢分析	685
高屏溪斜張橋頻率分析與監測	696
消防人員執行山域事故案件統計分析及工作壓力影響之研究-以高雄市政府消防局為例	702
可撓性水平救生母索之後裝式末端錨具抗拉強度研究	709
消防主管人格特質、工作壓力與工作適應之研究	717
違章建築嚴重性之問卷設計	730
以社區居民為本位探討韌性社區推動成效	737
運用無人飛行載具與影像辨識定位磁磚剝落位置	744
安全母索不同材質差異性之研究	753
鋼纜(鋼索)應用研究	760
使用無人飛行器檢測及基於卷積神經網路辨識建築物外牆裂縫之研究	767
應用構件預鑄化降低營造業職災風險之探討	777
由懸臂式擋土牆之傾倒探討土壤剪力強度參數之適用性	784
協助郊山山區人命搜救作業程序最適化探討(以高雄市鼓山區為例)	797
應用價值工程技術評估工程設計方案可行性-以達德安橋上下游整治工程為例	803
台南市永康液化區案例探討	811
都會區內建築物災害曝險量體推估-以台北市土壤液化潛勢圖為例	819
高科技廠房消防搶救分析	826
高雄市桃園區某國民小學校舍興建工程價值工程之探討	836
紅外線熱顯像儀於消防救災應用之探討	841
【F】 永續與生態工程	852
梅山鄉圳南村大樹腳崩塌案例調查分析	853
我國製造業推動 ISO 50001 能源管理系統成效分析	860
沖刷後泥岩製成無機聚合物之工程性質研究	865
從使用者觀點探討綠建築產品-以高雄市為例	875
重載交通量路段之不銹鋼氧化渣瀝青混凝土成效	881
焚化底渣取代部分黏土產製普通磚之技術初探	887
枯水期水資源最佳化分配-以內門區五里為例	893
剛性鋪面沉陷及唧水破壞之維護措施探討-以中鋼 CBP 造粒積剛性鋪面破壞為例	900
廢石英磚拋光粉製成無機聚合物工程性質之研究	917
鹼活化脫硫渣磚之產品碳足跡	928
底泥添加轉爐石之物理性質探討	933
【G】 其他議題	939
工程安全衛生協議組織會議教育宣導成效與教學滿意度之研究	940
台灣營造業男性從業人力斷層及薪資低下之因應對策	960
分析門神畫作武將甲冑紋理特徵之研究	965
萃思理論應用於軍事觀光景點開發方案規劃-以金門九宮坑道為例	975
施工架繫牆桿(壁連座)之拉伸試驗研究	984
半導體超純水設備維護工程之成本估價模式	990

提升管線業者參與市地重劃工程共同管道建置意願之研究	1003
監造單位以編碼表單在模板工程安全衛生查核的執行探討	1012
共同管道-幹管型式規劃探討	1017
自我效能、學習投入與專業能力成長關係之研究-以高中職生參與抗震競賽為例	1023
土木科系在學生學習動機、學習投入與學習成效之分析	1032
UAV 影像應用在掩埋場之容積監測	1041
建築外掛石材飾面中插銷類型及石材種類組合之安全性探討	1047
未設置雨量觀測站地點之雨量資料推估-以 0828 寶業里滯洪池為例	1055
彈性黏著劑應用於台灣磁磚外牆系統之應變行為探討-以不同日射能量結合降溫試驗做比較	1061
以稜鏡折射為基礎之三維數位影像量測技術開發之研究	1070

論

文

集

【A】結構與大地

土石流扇狀堆積區之演化探討

陳振軒¹ 王振宇¹ 蔣佳伶¹ 陳建元²

¹國立嘉義大學土木與水資源工程學系專題生

²國立嘉義大學土木與水資源工程學系教授

摘 要

台灣地質構造複雜，位於颱風侵襲頻繁區位，豪雨事件頻傳，特殊的氣候條件及地質特性，發生土石流與崩塌的情況屢見不鮮。近年來氣候變遷，發生集中性強降雨之機率逐年漸增，因此每逢豪大雨，土石流災害亦隨之發生。土石流形成扇狀堆積的議題前人研究甚多，不論是針對土石流扇狀地危險度分析或是潛勢溪流的研究。本研究針對研究區火炎山自然保留區土石流扇狀地進行演化分析，利用歷年衛星影像來探討扇狀堆積區之變化，分析歷年地形坡度及雨量資料與扇狀堆積區變化之相關性，並利用統計分析方法，預測未來的變化面積與趨勢，以期找出雨量與堆積區面積變化之相關性。

關鍵字：土石流、扇狀堆積區、迴歸分析

Evolution and Topography Changes Analysis of a Debris Flow Deposition Fan Area

Zhen-Xuan Chen¹ Zhen-Yu Wang¹ Jia-Ling Jiang¹ Chien-Yuan Chen²

¹Department of Civil and Water Resources Engineering, National Chiayi University

²Corresponding Author, Department of Civil and Water Resources Engineering, National Chiayi University

ABSTRACT

The occurrences of landslides and debris flows are frequent in Taiwan due to the complex geologic conditions and torrential rains brought by typhoons. Climate change causes high rainfall intensity that is prone to initiate debris flows with massive depositions. Numerous studies have focused on the formation of debris fans downstream in the aftermaths of debris flows for risk and potential analyses. This study carried out debris fan evolution and morphology changes analysis of the gravel debris fan at the Huoyanshan Nature Reserve area in Sanyi Village, Miaoli County. Satellite images and rainfall data from recent years were used for the regression analysis of rainfall and debris fan area changes. The exponential smoothing method was used to predict future changes of the debris fan area.

Keywords: debris flow, debris fan, regression analysis

一、緣起

台灣位處菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊之間，島內地形呈南北走向，以中央山脈為分水嶺，河川多為東西向且坡陡流短。此外台灣為亞熱帶海洋性氣候，春季的梅雨鋒面、夏季的颱風侵襲，年平均降雨量高達兩千五百餘公釐，但降雨時間分布不均，造成河川豐枯流量懸殊，汛期開始屢釀洪災事件。山區地質破碎，地盤年輕、構造發達，這種氣候條件及地質特性，使得台灣發生土石流與山崩的情況屢見不鮮。

台灣地質條件複雜多樣，且位於颱風侵襲頻繁區位，豪雨事件頻傳，近年來，發生集中性降雨之機率逐年漸增，因此幾乎每逢豪大雨，土石流災害亦隨之發生。例如，民國 105 年莫蘭蒂颱風在臺東縣延平鄉紅葉村發生土石流災害，造成 30 多戶民宅慘遭沖毀，所幸提前撤離因應，使此次災害事件並無人傷亡。雖然不是每次的土石流事件都會造成人命傷亡，但土石流仍為我國必須面對的主要天然災害課題之一。

二、文獻回顧

土石流是由土、砂、礫、石、岩屑等固體材料與水體之混合物，受重力作用所產生之流動體，沿坡面或溝渠由高處往低處流動之自然現象(水土保持手冊, 2005)。此外，土石流並不即是土石流災害，土石流是一種「自然現象」，狹義來說，若因發生土石流時，導致人員傷亡，造成生命威脅或財產損失，建築物、橋梁、公共建設毀損，才可稱為「土石流災害」。由於溪谷出口的坡度緩且寬度大，能有效降低土石流的流動速度，因此土石流常於此形成扇狀堆積。而後續也有許多專家學者對於土石流及扇狀堆積區提出之相關研究(如 Iverson, 1997)。

土石流發生原因主要有三個(詹錢登, 2000)：

1. 豐富的堆積物：足夠的鬆散土砂提供土石流中所需的固態物質。
2. 充分之水分：充分之水分是很好的潤滑劑，能降低土石流中土砂之間的摩擦力，促進水

土混合體作持續性流動。

3. 足夠的坡度：足夠大的斜面坡度讓土石流有流動的動力，使土石流能克服土石的摩擦力後繼續向低處流動。

土石流的運動方式可以分成發生區、輸送區與堆積區(圖 1)(土石流防災資訊網, 2019)：

1. 發生區：坡度最陡，經常以峭壁或崩塌地等之形態存在。發生在上游谷壁崩坍的碎屑會大量堆積的地方，受重力作用，以摩擦力下切地表，橫剖面形狀多呈 V 字形，谷壁崩坍的碎屑會大量堆積在這裡，所以四周的植生常顯得相當稀疏。
2. 輸送區：土石流快速流動之區段，以既有野溪之河道為主要影響範圍，多為 U 字形，通常位於山溝河谷流域的中下游，河床上會有河谷兩岸崩坍下來的碎屑物。
3. 堆積區：為山麓邊緣地形平坦之地形，水源充沛，常為人口密集之聚落分布，因此當土石流發生時，也成為災害影響最大之區段。



圖 1 土石流區段定義及分配圖 (行政院農委會水土保持局網站)

土石流堆積特性包括：

1. 扇狀堆積區：土石流經陡坡及狹窄斷面的溪谷後，於谷口突擴大的溪床斷面(溢流點)，常形成掃流狀或由流心開始堆積漸向兩側攤平，形成扇狀堆積(費立沅等, 2012)。
2. 巴西果效應(Brazil nut effect) (Yan et al., 2003; 楊馥菱, 2010)：如果把兩種顆粒的混合物置於容器中，然後由外部施加振盪，體積比較大的顆粒會上升到表層，而較小的顆粒

會沉降到底部。同樣地，當土石流發生時，巨大石頭也因此將被抬升至混合體之表面，因此相較於底床的小顆粒擁有更高的重力位能，而填充空隙的小顆粒，提供大顆粒一個比滑動摩擦更省力的滾動接觸(圖 2)。

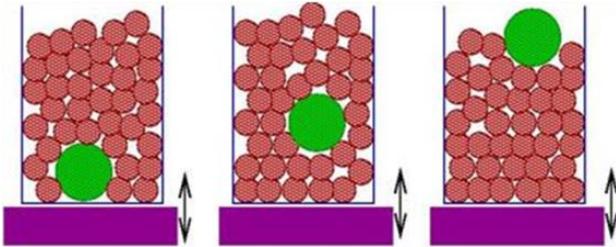


圖 2 巴西果效應(行政院農委會水土保持局網站)

三、研究區域與方法

本研究首先整理有關土石流及形成扇狀堆積區之文獻，透過衛星影像判釋扇狀堆積區之範圍進行疊圖分析，以及雨量蒐集以期找出相關性，再針對坡度分析來探討其變化。本研究利用歷年衛星影像來判釋扇狀堆積區面積之變化，並且藉由歷年雨量資料來分析其與扇狀堆積區之相關性，建立年雨量與扇狀堆積區長度與面積之線性迴歸分析，並利用指數平滑法預測未來的演化趨勢。最後歸納研究成果並提出本研究之結論，與後續相關研究之建議，研究流程如圖 3。

3-1 研究區域概述

本研究利用衛星影像尋找土石流下游有明顯扇狀堆積地且不受人為影響區域，因此選擇火炎山自然保留區下游堆積區作為研究對象，探討其扇狀堆積區之演化。

火炎山自然保留區位於苗栗縣三義鄉和苑里鎮的交界處，行政劃分隸屬苗栗縣三義鄉西湖村及苑里鎮南勢里，在林業經營區分上屬新竹林區管理處大安溪事業區第 3 林班，全區面積為 219.04 公頃(林務局自然保育網，2019)。其南側濱臨大安溪，由於風化與雨水的侵蝕作用，切割成許多尖銳山峰的組合。谷地內則堆滿沖刷下來的礫石，有如礫石河流，往往沖蝕堆積到山麓下的 140 縣道，因此公路總局於 2005 年築起 780m 的火炎山隧道來防範土石流阻塞道路。

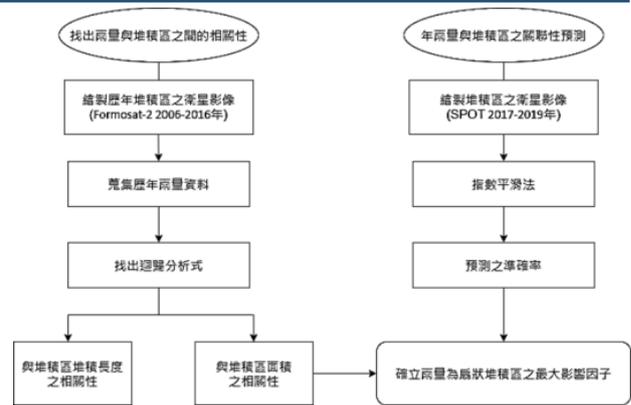


圖 3 研究流程架構

火炎山脈是孤立的山脈，在本區以南多為平原區，北邊則為苗栗丘陵區，西南季風向北吹襲至此時，受地形之影響突然被舉昇，導致本區多霧且濕度大。依據中央氣象局資料顯示，本區平均年溫度高 23.7°C ，最高平均溫為 7 月的 34.5°C ，最低平均溫為一月的 16.15°C 。此區年平均降雨量約為 1800 毫米，梅雨季雨量頗多，7-8 月雨量最多，冬季受東北季風影響而多雨(林務局自然保育網，2019)。

火炎山在地質上屬於第四紀的頭嵙山層、紅土台地堆積層、台地堆積層以及現代沖積層(何春蓀，2006)。主要組成是由礫石混雜砂土組合而成，因含鐵質甚高，所以風化之後呈現紅棕色的火焰顏色，是劇烈造山運動的產物，因本區岩層主要由厚層礫石組成，間或夾雜薄層砂岩，膠結力極弱，加上風化、侵蝕作用不斷，地形切割得支離破碎，又因雨水的沖蝕，切割面往往極為平整，因此在外形上，形成尖銳山峰的組合及深谷裡佈滿卵石的景象。在 1986~2002 年間，以 2001 年的變遷幅度最大，主要的原因是受到桃芝颱風及納莉颱風影響(鄭遠昌，2004)。

3-2 繪製歷年堆積區範圍

本研究利用 BigGIS (<https://gis.swcb.gov.tw/>) 選擇 Formosat-2 衛星影像來繪製歷年扇狀堆積區之影像(2006-2016 年)。

於選定的扇狀堆積區由下游往上游畫出溝谷縱剖面線(如圖 4)，將斷面數值匯出

Excel 檔，利用每 20m 為一基準點，計算出坡度，並配合衛星影像選擇合理之溢流點(約 10°)，由判釋最可能溢流點，做為劃設扇狀地頂點。

繪製好之扇狀面積圖，匯出成 kml 檔，於 Google Earth 開啟使用，做更進一步的疊圖分析。以 2009 年及 2010 年堆積扇狀區為例描繪分別如圖 5 及 6 所示。

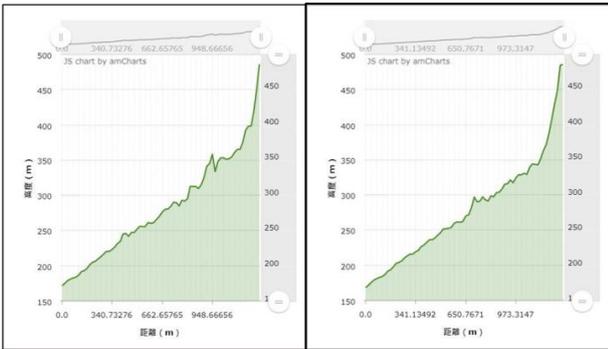


圖 4 溝谷縱剖面圖(左-2009 年，右-2010 年)

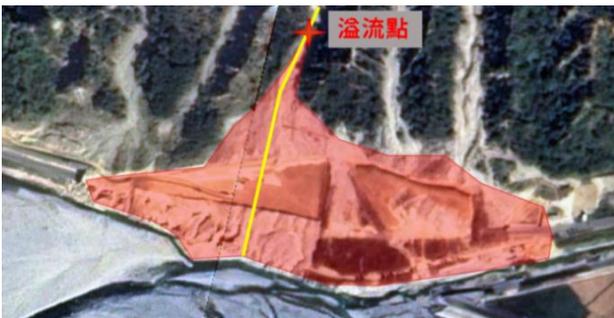


圖 5 2009 年描繪扇狀區

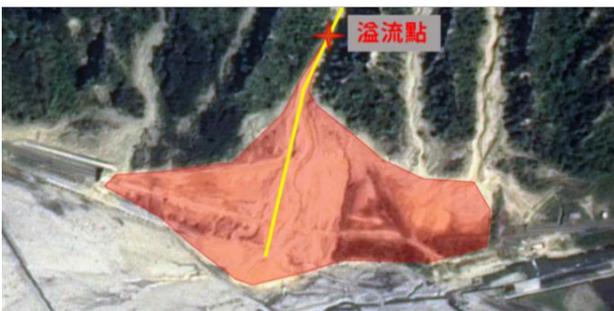


圖 6 2010 年描繪扇狀區

3-3 GIS 疊圖分析

開啟於 Google Earth 繪製好之扇狀面積圖，做更進一步利用 GIS 作圖層套疊分析(圖 7); 並且計算面積，分析歷年堆積面積之變化。



圖 7 2009 年(白色)與 2010 年(灰色)堆積區套疊

3-4 雨量統計

本研究中參考的雨量來源自中央氣象局，在地圖上尋找火災山鄰近的測站取平均當作火災山該月雨量，參考測站為苑裡測站(2005~2010 及 2014~2016)、通宵測站(2005~2016)、三義測站(2007~2016)、三義 2 測站(2005~2016)、及外埔測站(2012~2016) 如表 1。

表 1 火災山鄰近雨量站年降雨量

測站 年份	苑裡	苑裡	通宵	三義	三義 2	外埔	年平均雨量 (mm)
2005	1780.5	-	1838.5	-	2770	-	2129.67
2006	1897.5	-	2022	-	2567	-	2162.17
2007	1929.5	-	1939	2838	1842	-	2137.125
2008	1366.5	-	1825.5	2680	2941	-	2203.25
2009	933.5	-	1124.5	1610	1810	-	1369.5
2010	1331	-	1321.5	1809.5	2037	-	1624.75
2011	-	-	-	-	1278	-	1278
2012	-	-	1773.5	2621.5	2648	2012.5	2263.875
2013	-	-	2060.5	2743.5	2609	1981.5	2348.625
2014	-	1318.5	1344	1391	1296	1236	1317.1
2015	-	1241	1280.5	1648.5	1511	1397.5	1415.7
2016	-	1549	1616.5	1910	1909	1383.5	1673.6

此外，本研究參考的颱風降雨事件，資料來自中央氣象局，僅蒐集大於 100 毫米之颱風降雨量事件，並記錄陸上警報發布與結束時間，以利統計降雨量，如表 2。

表 2 研究區颱風降雨事件降雨量統計

年份	颱風名稱	雨量測站	總雨量(mm)	陸上警報發布時間
2005	海棠	苑裡	199	2005/07/16 23:30:00 - 07/20 02:30:00
	瑪莎	苑裡	162.5	2005/08/04 02:30:00 - 08/06 08:30:00
2006	碧利斯	苑裡	131.5	2006/07/12 08:30:00 - 07/15 02:30:00
2007	聖帕	苑裡	145	2007/08/16 20:30:00 - 08/19 14:30:00
	拿帕	苑裡	119.5	2007/09/17 14:30:00 - 09/19 08:30:00
	柯羅莎	苑裡	165.5	2007/10/05 05:30:00 - 10/07 20:30:00
2008	卡玫基	苑裡	177.5	2008/07/16 14:30:00 - 07/18 20:30:00
	辛樂克	苑裡	104.5	2008/09/12 05:30:00 - 09/15 20:30:00
	薔蜜	苑裡	191	2008/09/27 08:30:00 - 09/29 17:30:00
2009	莫拉克	苑裡	255	2009/08/06 08:30:00 - 08/10 05:30:00
2012	泰利	三義	100	2012/06/19 20:30:00 - 06/21 02:30:00
	蘇拉	三義	744	2012/07/31 20:30:00 - 08/03 14:30:00
2013	蘇力	三義	575	2013/07/11 20:30:00 - 07/13 23:30:00
	潭美	三義	333	2013/08/20 20:30:00 - 08/22 08:30:00
	康芮	三義	211.5	2013/08/28 11:30:00 - 08/29 17:30:00

四、分析結果與討論

本研究利用歷年衛星影像來探討扇狀堆積區之變化，藉由歷年地形坡度與雨量資料來分析其與扇狀堆積區變化之相關性，並利用統計分析方法，預測未來的變化面積與趨勢，分析結果與討論如下。

4-1 坡度分析

2005 年至 2016 年整個溝谷長度大約為 1.6km，而 BIG GIS 軟體中共有兩張數值分析圖，分別為 2003-2005 年與 2010-2015 年，而恰好火炎山隧道於 2006 年完工，故本研究取 20m 為一基準點，由此計算平均坡度，於大安溪河畔以 1.3km 為間隔畫縱剖面線，共 11 條(圖 8)，拉至火炎山頂部，從中便可清楚看出隧道在完工前後的坡度變化及是否發生向源侵蝕之現象。

取編號 8 之縱剖面線如圖 9 所示，而圖可看出在隧道面向河岸那側的堆積高程，隧道完工前高於隧道完工後；反之，面向火炎山側是完工後比完工前高。且在源頭區有持續向源侵蝕情形。

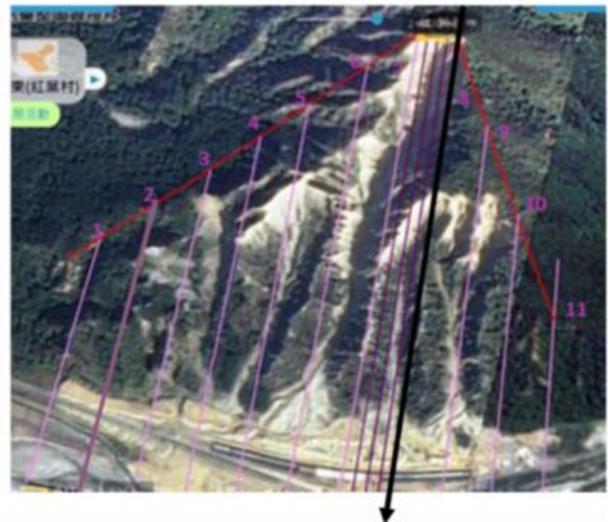


圖 8 研究區縱剖面線

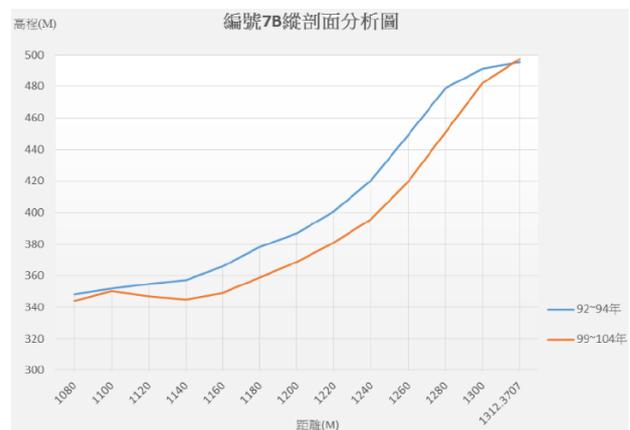
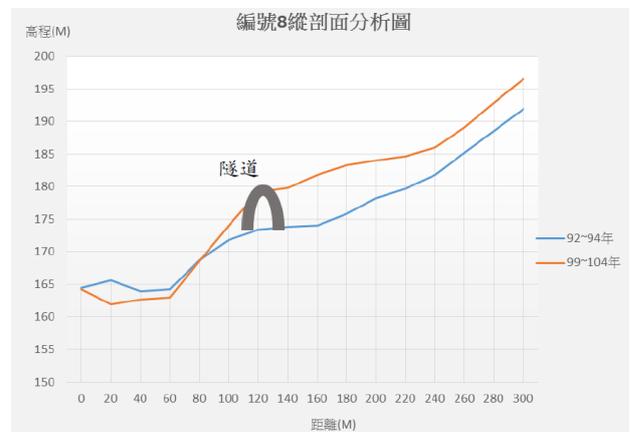


圖 9 扇狀地縱剖面(a)編號 8 剖面(b)編號 7B 剖面

4-2 堆積範圍之變化

由 Google Earth 得知 2009 年面積 161,058 平方公尺，2010 年面積 125,651 平方公尺，計算面積減少 35,407 平方公尺，減少 21.98%。歷年(2006-2016)扇狀地面積判釋與其變化如圖 10。

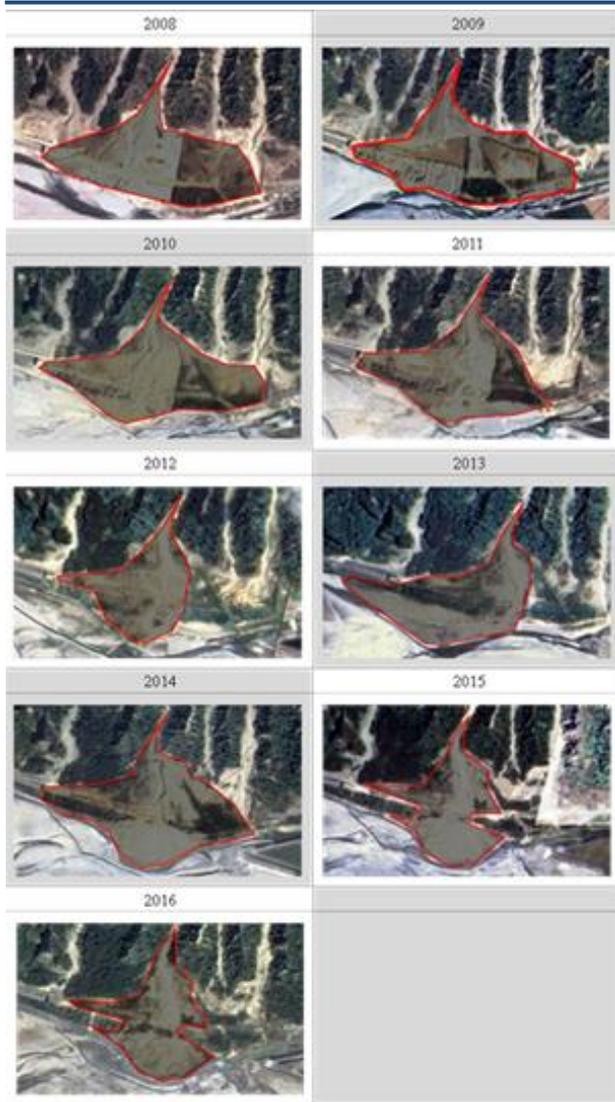


圖 10 歷年(2006-2016 年)扇狀堆積區之面積判釋

資料顯示以 2013 年堆積扇狀區面積增加最多達+54.6%，而 2015 年減少最多達-42.3%(表 3)。

圖 11 為利用 Formosat-2 衛星影像所繪製的歷年(2006 年-2016 年)扇狀堆積區之面積，可以發現堆積方向的移動變化，在 2006 年火炎山隧道完工後，堆積區兩側逐年向內縮減，可以避免土石流災害發生造成交通中斷導致行車危險。

表 3 2006-2016 年歷年的扇狀面積與變化

年份	扇狀面積(m ²)	面積變化(m ²)	面積變化率(%)
2006	148,505	-	-
2007	143,522	-4,983	-3.36
2008	122,834	-20,688	-14.41
2009	161,058	+38,224	+31.12
2010	125,651	-35,407	-21.98
2011	122,516	-3,135	-2.50
2012	77,231	-45,285	-36.96
2013	119,426	+42,195	+54.63
2014	158,240	+38,814	+32.50
2015	91,311	-66,929	-42.30
2016	99,136	+7,825	+8.57

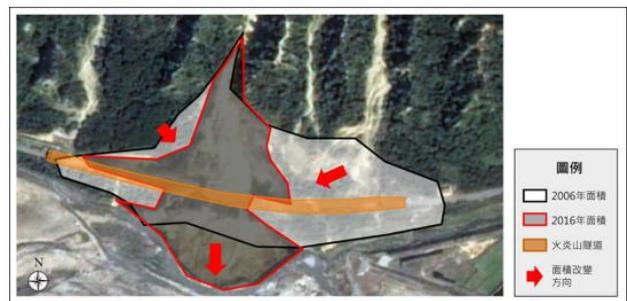


圖 11 堆積區面積變化(2006 年 vs. 2016 年)

4-3 降雨量與扇狀堆積區面積變化

為了以量化的方式來描述變數之間的關係，本研究將各年的扇狀面積變化率(%), 先由大排至小，再給予假設：前一年之年平均雨量(mm)為影響當年份扇狀面積的因素之一。在此假設的前提下，將各年的年平均雨量依序與次年的扇狀面積作排列(例如：2012 年平均雨量對應於 2013 年扇狀面積)，得到表 4。

表 4 歷年扇狀面積與其對應之年平均雨量

年份	扇狀面積(m ²)	面積變化率(%)	前一年	年平均雨量(mm)
2013	119,426	+54.63	2012	2263.875
2014	158,240	+32.50	2013	2348.625
2009	161,058	+31.12	2008	2203.25
2016	99,136	+8.57	2015	1415.7
2011	122,516	-2.50	2010	1624.75
2007	143,522	-3.36	2006	2162.17

2008	122,834	-14.41	2007	2137.125
2010	125,651	-21.98	2009	1369.5
2012	77,231	-36.96	2011	1278
2015	91,311	-42.30	2014	1317.1

由表 4 大致可以觀察出：扇狀面積變化率(%)較大者，年平均雨量(mm)也較大；反之，面積變化率(%)較小者，年平均雨量(mm)也較小。

本研究欲加以驗證此假設，觀察颱風在短時間內能帶來高降雨強度的特性，是否也影響土石堆積。同理，以總雨量大於 100 毫米之颱風事件，與次年的扇狀面積作排列，且加總各颱風事件之總雨量(mm)，表 5。

從表 5 中可以看出，扇狀面積變化率(%)較大者，颱風總雨量(mm)也較大；反之，面積變化率較小者，當年度颱風總雨量也較小。

表 5 各年度扇狀面積與其對應之颱風降雨事件

年份	扇狀面積 (m ²)	面積變化率(%)	颱風事件	颱風總雨量(mm)
2013	119,426	+54.63	泰利、蘇拉	844
2014	158,240	+32.50	蘇力、潭美、康芮	1,119.5
2009	161,058	+31.12	卡玫基、辛樂克、薔蜜	473
2016	99,136	+8.57		
2011	122,516	-2.50		
2007	143,522	-3.36	碧利斯	131.5
2008	122,834	-14.41	聖帕、韋帕、柯羅莎	430
2010	125,651	-21.98	莫拉克	255
2012	77,231	-36.96		
2015	91,311	-42.30		

若再將表 4 與表 5 作交叉比對，更能明顯描述雨量的多寡影響著扇狀地面積的變化，兩者之間有可能存在正比關係。

而扇狀面積變化率下降的原因，除了對應年份的年平均雨量較少，猜測為火炎山下游位於大安溪之凹岸，水流的侵蝕作用強烈，將土石帶入河川，當土石堆積速率低於河川

沖刷速率，導致該年扇狀面積變化率負成長。

若雨量與扇狀面積之間有關聯性的假設合理，則年總雨量年份應產生相似規模與能量的土石流。而 2008 年的扇狀面積變化率尤其特殊，該年對應的年平均雨量約為 2137mm，颱風總雨量為 430mm，跟 2009 年的資料比較，2009 年對應的年總雨量約為 2203mm，颱風總雨量為 473mm，兩者數據不相上下，面積變化率卻相差甚遠，分別為 -14.1% 與 +31.12%。推測該差異為 2008 年於火炎山隧道西側出口處有加勁土堤的工程，並設有沉砂池(柳政男等，2011)，減緩了當年度的土石堆積範圍。

4-4 年雨量與堆積區之線性迴歸分析

基於年雨量與扇狀堆積區面積有正相關的可能，為了驗證此猜想，本研究將此兩個變數作線性迴歸分析。結果顯示出判定係數 $R^2=0.816$ ，相關係數 $R=0.903$ 。

若 R^2 大於 0.75，表示模型擬合度很好，可解釋程度較高；而 R^2 小於 0.5，表示模型擬合有問題，不宜採用進行迴歸分析。若相關係數 R 越接近於 ± 1 ，兩個變量之間相關性越強，一般認為：當 R 值為 ± 0.7 或以上時，兩個變量視為高度相關(圖 12)。

本研究另外將年雨量與堆積長度作線性迴歸，得出結果判定係數 $R^2=0.0771$ ，迴歸線趨於水平，可以說兩者幾乎沒有相關性(圖 13)。

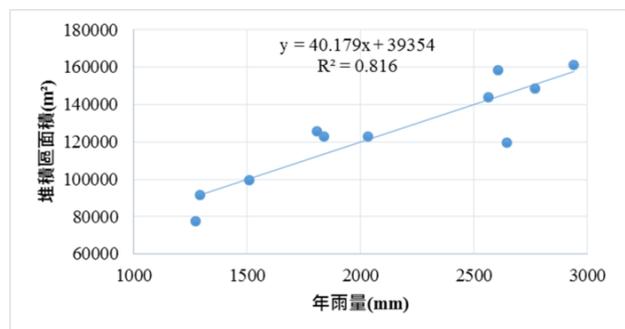


圖 12 年雨量與堆積區面積之線性迴歸

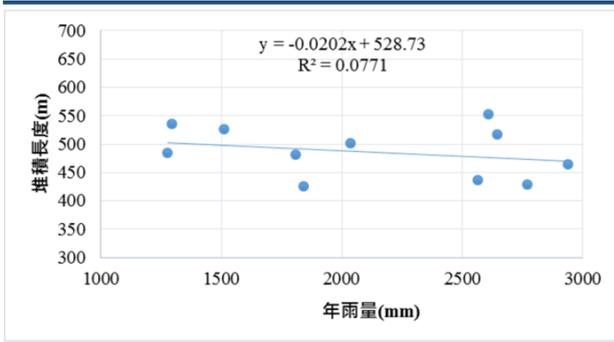


圖 13 年雨量與堆積長度之線性迴歸

4-5 年雨量與扇狀堆積區之關聯性預測

為了達到鑑往知來的效益，本研究須對扇狀堆積區作預測，由 2006-2016 年扇狀堆積區面積作趨勢外推，預測出 2017-2019 年扇狀區面積大小。

因 Formosat-2 衛星影像資料目前在 BigGIS 系統僅收錄至 2016 年，本研究後續以系統中 SPOT 衛星影像繪製 2017-2019 年堆積區面積(圖 14)，作為預測準確率之檢驗依據。



圖 14 SPOT 衛星影像 2017-2019 年扇狀堆積區之面積

指數平滑法(Brown, 1956)是在預測資料時常用的方式之一，可以依照時間序列對未來的每一年作預測。預測必然會產生誤差，而此方法加入平滑係數 α 來盡可能消除誤差。式子如下：

$$F_{t+1} = F_t + \alpha(D_t - F_t) \quad (1)$$

其中 F_t 為預測值， D_t 為實際值， α 為平滑係數，介於 0 和 1.0 之間。

此式的意義為下一期的預測量等於當期

的預測量作修正，修正方法即為乘以百分比- α 值。據經驗判斷， α 值普遍不會設低於 0.5，而 α 值越大，對實際值的變化越敏感，即對預測結果的調整越大。本研究在此 α 值取 0.8。

運算結果如下圖 15，預測趨勢顯示近年(2017-2019)扇狀堆積區面積有減少趨勢，準確率分別為 81%(2017 年)，79%(2018 年)，85%(2019 年)。

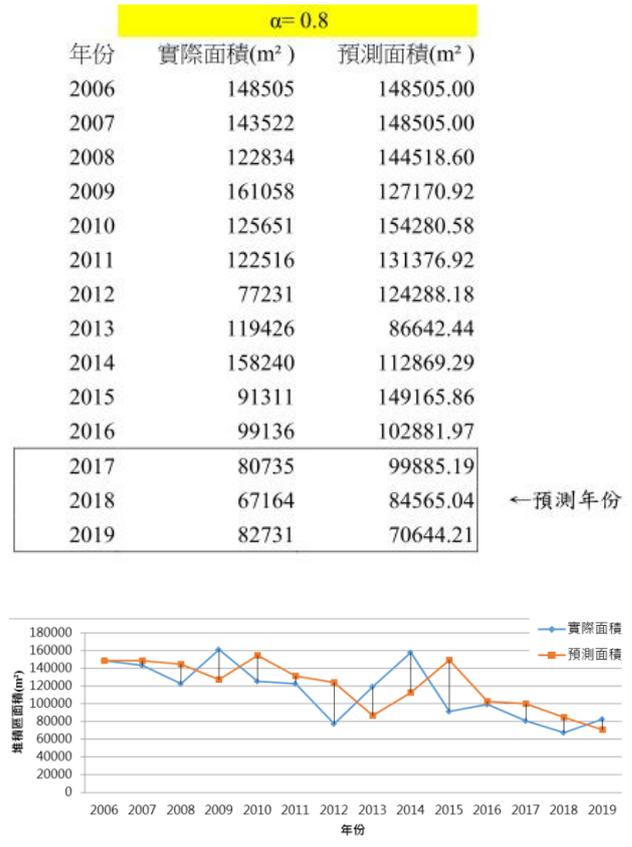


圖 15 應用指數平滑法的預測結果

五、結論與建議

5-1 結論

本研究主要利用雨量因子來分析與扇狀堆積區之間的相關性，由線性迴歸的結果來看，因此可以判定雨量與堆積區面積為高度正相關。利用指數平滑法分別預測 2017-2019 年共三年的總面積，其準確率分別為 81%、79%、85%。由於本研究因尚未考量其他因子，故部分誤差無法消除，但也間接佐證了雨量對於扇狀堆積區之面積變化影響甚劇，為最大的影響因子。除了自然因素，人為的工程施作也會影響土石流流動範圍，本研究蒐集

的資料與數據均取於隧道完工後(2005 年)，可以看出興建隧道對於減少土石向左右兩側堆積有部分效果，避免土石流災害造成交通中斷導致行車危險。

5-2 建議

本研究因資料不全，僅簡易的利用雨量來分析與堆積區之間的相關性，後續可考慮更多因子(例如：坡度、坡向、地質等)，改以判別分析、不安定指數法、邏輯迴歸等方法分析各個因子，或計算影響因子之權重。於雨量統計時，只有採用各測站平均，未考量火炎山相較於平地的雨量差異，若能使用其他適合山區的平均雨量求法(例如：高度平衡多邊形法)，應能再縮小結果的誤差。實際土石流為三維問題，本研究僅以二維作分析，未來應可將本研究之演化面積擴充為土方量，增加預測扇狀區流動範圍的可行性。

參考文獻

1. 土石流防災資訊網，<https://246.swcb.gov.tw/>，2019。
2. 水土保持手冊，中華水土保持學會，共 692 頁，2005。
3. 何春蓀，臺灣地質概論：臺灣地質圖說明書，2006。
4. 林務局自然保育網，苗栗三義火炎山自然保留區，<https://conservation.forest.gov.tw/0000116>，2019。
5. 柳政男、曾志企、陳金洲、何國彬，加勁擋土牆之設計與施工—以火炎山土石防治工程為例，水土保持技術公會，2011。
6. 楊馥菱，土石流簡介，<http://www.yct.com.tw>，2010。
7. 詹錢登，2000，土石流概論，共 156 頁。
8. 費立沅、紀宗吉、吳文隆、楊智堯，2012，「土石流扇狀地危險度分析案例探討」，中華技術專題報導，第 93 期。
9. 鄭遠昌，地形變遷之研究：以苗栗火炎山地區為例，臺灣大學地理環境資源研究所碩士論文，2004。
10. Brown, R.G.. Exponential Smoothing for Predicting Demand, <http://legacy.library.ucsf.edu/tid/dae94e00>, 1956.
11. Iverson R.M., "The physics of debris flows," Reviews of Geophysics, Vol. 35, pp.245~296, 1997.
12. Yan, X., Shi, Q., Hou, M., Lu, K., and Chan, C.K., "Effects of Air on the Segregation of Particles in a Shaken Granular Bed," Phys. Rev. Lett., Vol. 91, 014302, 2003.

多光譜 UAV 在草嶺 149 甲線崩塌地監測與地形變化調查與分析

呂侑儒¹ 陳建元²

¹國立嘉義大學土木與水資源工程學系碩士

²國立嘉義大學土木與水資源工程學系教授

摘 要

山坡地經常受到自然界的外力，如重力、降雨、風力、地震等作用，而產生落石、崩塌、滑動等塊體運動之現象，此外人為的過度開發亦是導致坡地災害因素之一，故常以監測山坡地變動情形，作為判定穩定與否之依據，進而預防坡地災害的發生。隨著科技進步，可採用多種遙測影像分析發生崩塌的區域，除了衛星影像的應用亦可運用無人飛行系統(UAS)，對於大型崩塌地監測或者突發性的災害調查，並搭配地理資訊系統(GIS)，以瞭解崩塌的成因並觀測崩塌的裸露狀況及估計滑動土體的規模。本研究利用 GIS 配合遙測所得之數值地形模型(DTM)分析崩塌地地表裸露與變動位置，以判釋草嶺崩塌地崩塌後地表持續變化情形。經 UAS 影像比較分析與植生指標(NDVI)計算後可知該處崩塌受清水溪向源侵蝕的影響，在地表有明顯侵蝕溝與小規模崩塌現象，資料顯示草嶺崩塌地雖經整治後因為陡坡地形與坡腳鬆軟崩積層堆積而呈現持續破壞情形，分析結果可提供相關單位在防災和崩塌治理之參考。

關鍵字：GIS、無人飛行系統、數值地形模型、NDVI

Investigation and Analysis of Causes and Triggered Mechanism of Caoling No. 149 Expressway Progressive Landslide

You-Ru Lu ¹ Chien-Yuan Chen ²

¹*Department of Civil and Water Resources Engineering, National Chiayi University*

²*Corresponding Author, Department of Civil and Water Resources Engineering, National Chiayi University*

ABSTRACT

Mountain slopes are often subjected to natural external forces, such as gravity, rainfall, wind, earthquakes, etc., resulting in rockfall, collapse, sliding and other block movements. In addition, man-made overdevelopment is also one of the factors that cause slope disasters, so monitoring is often used. The fluctuation of the hillside land is used as a basis for judging whether it is stable or not, so as to prevent the occurrence of slope disasters. With the advancement of science and technology, in addition to the application of satellite imagery, Unmanned Aerial System (UAS) can also be used. When monitoring large collapsed areas or investigating sudden disasters, a variety of telemetry images can be used to analyze the collapsed area and use Geographic Information System (GIS) to understand the cause of collapse and observe the distribution of collapse and estimate the volume scale of sliding soil. In this study, GIS combined with the Digital Terrain Model (DTM) obtained by remote measurement was used to analyze the exposed and changed positions of the collapsed land surface to determine the continuous change of the surface after the collapse of the Caoling progressive landslide. After comparison and analysis of UAS images and calculation of vegetation index (NDVI), it can be seen that the collapse is affected by the erosion of the Qingshui River towards the source. There are obvious erosion ditches and small-scale collapses on the surface. With the accumulation of soft and collapsed layers at the foot of the slope and presenting continuous damage, the analysis results can provide the basis for relevant units in disaster prevention and collapse management in the future.

Keywords: GIS, Unmanned Aerial System, DTM, NDVI

一、緣起

台灣位於環太平洋地震帶屬於地質年代較輕的地區，而且位於副熱帶季風與熱帶季風氣候地區，全年降雨豐沛，年降雨量約 2500 毫米，但降雨多集中在夏季。因全球氣候變遷使得梅雨、颱風挾帶之降雨量有逐漸增大、強度逐漸增強且降雨延時增長的趨勢，因此經常發生大規模崩塌災害。2009 年莫拉克颱風侵台期間，小林村獻度山的崩塌與堰塞湖的潰決，導致近 500 位居民遭土石掩埋，不僅破壞了當地的公共設施，亦造成許多生命的消亡。因此本研究以可見光與多光譜來監測草嶺地區崩塌情況，探討大規模崩塌地持續向源侵蝕產生緩慢滑動機制，讓大規模崩塌地之整治設計能考量後續向源侵蝕，減少坡地災害的發生以減少公共設施毀損與人民生命財產的損失。

二、文獻回顧

無人航空系統(Unmanned Aerial System, UAS)或稱無人飛機系統(Unmanned Aircraft System, UAS)是近年來航太產業的熱門項目。無人飛行載具(UAV)定義為駕駛員不須於載具上即可操作，其操作藉由其他方法(遙控、自動控制)執行特定任務的飛行器。發明於 1917 年，目的為軍事用途。自 80 年代以來，隨著資訊科技的迅速發展(後處理軟體)與各種新型感測元件的不斷問世(相機、多光譜儀、熱顯像儀等)，使得無法單以無人飛行載具表述，故現以無人航空系統稱之。而現今逐漸演進並普及於民生用途上，並有多樣化應用(葉怡成，2015)。

無人飛行載具(UAV)一般可分成「定翼型」與「旋翼型」兩大類(簡榮興，2010)，近年來被廣泛運用於各類的災害調查及防災監測，由於其具有重量輕、體積小、機動性高、維修容易且成本低廉，可在研究人員無法到達區域或是其他高風險區域執行勘查任務。搭配技術純熟的航空攝影測量，將拍攝之空拍影像以後處理軟體接合後，再製成數值地表模型以及正射影像圖等，若有邊坡發生破壞前的潛變行為，亦可由不同時序測量分析結果

進行比較發現(黃志傑，2015)。

無人航空系統(UAS)隨著相關技術的開發，使用上也不再侷限於軍事應用一途，於民生運用與太空探測中，得到了更廣泛的用途，包括應用在環境監測(如：山林保育、水土保持、海洋保護等)、氣象監控(如：蒐集氣流、大氣變化之相關氣象資訊)、即時救災(如：海難搜救、水災土石流道路破壞等災難應變與調查)、城市發展(如：道路交通監視、商業空中攝影)以及農業運用(如：噴灑農藥、農作物病害防治、海域漁場巡視保護)等工作(葉怡成，2015；王聰榮、李繼泓，2006)。

崩塌(Landslide)係指邊坡材料經風化、崩解或人為等外力作用影響後，再受重力作用進而順著地形的坡度由山坡上掉落、滑落、滾落或移動之運動現象，統稱為塊體運動或稱斜坡運動(何春蓀，1985)。重力是塊體運動的主要驅動力，然而除了重力之外，水與地震亦會觸發或加速塊體運動。塊體運動的速度區間可小至每年的數公分潛移大到每小時數百公里的崩塌現象皆有可能。

大規模崩塌指崩塌面積超過 10 公頃或土方量達十萬立方米或崩塌深度在 10 米以上的崩塌地；此類深層的崩塌，近於高速運動的地滑，大規模崩塌的發生，因其有特殊的地形、地質、水文等內在條件，因此可經坡地之地形、地質、水文調查分析，做出如敏感度分析等應用，進而推測出潛在大規模崩塌發生的區域

數值地形模型(Digital Terrain Model, DTM)就是以數值的形式來表示實際地形特徵的空間分布。最初是於 1957 年由 Roberts 提出電腦技術應用於攝影測量，以獲取高速公路的規劃設計數據，並於 1958 年由 Miller 和 Laflamme 將電腦技術應用於攝影測量，解決道路工程的電腦輔助設計問題，並提出數值地形模型(DTM)的概念。數值地形模型(DTM)的地形特徵點若僅指地面點的高程，則將這種數值地形模型稱為數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)，另外將地物保留下來並製作而成的數值地形模型稱為數值地表模型(Digital Surface Model, DSM)(周

啟鳴、劉學軍，2006)。

數值地形模型的資料表示方式，一種方式以規則網格(Grid)呈現，其以規則大小並帶有高程值的方格組成數值地形模型；另一種方式則以不規則三角網(Triangular Irregular Network, TIN)的格式表示空間資料(葉怡成，2015)。

歸一化植被指數(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)，又稱常態化植被指數，是目前應用最為廣泛的植生指數，其他常見的有修正型簡單比植生指數(Modified Simple Ratio, MSR)、亮度指數(Brightness Index, BRI)等。多數植物中皆含有葉綠體使植物在太陽輻射照射下將光譜中綠光波段阻擋並反射，並且吸收紅光與藍光而使葉子呈現綠色。而因綠色植物藉由吸收紅光與藍光以進行光合作用累積生物量其綠葉具有較強的反射紅外光之特性，其吸收之紅光愈多而反射之近紅外線愈強，紅光及近紅外線之差及愈大，也就是說可見光中的紅光與近紅外線常被用來測定植物之生產力。

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (1)$$

NDVI 指數是近紅外波段(NIR)與紅色波段(RED)的差異經二者之和校正後的結果，其數值介於-1~1 之間；0 代表該區域基本沒有植被生長；負值代表非植被覆蓋的；正值代表屬於植被覆蓋的。

NDVI 對土壤背景的變化較為敏感；它是單位像元內的植被類型、覆蓋形態、生長狀況等的綜合反映，其大小取決於植被覆蓋度和葉面積指數等要素；NDVI 對植被覆蓋度的檢測幅度較寬，有較好的時間和空間適應性，因此應用較廣泛。

三、研究區域與方法

3-1 地形與地質

本研究區域屬雲林縣古坑鄉草嶺村，位於濁水溪支流清水溪中游的右岸，距離竹山鎮南方約 17 公里，自斗六市文化路開始銜接尖山路至古坑後，續往東南方約 18 公里處，向東沿途經過內湖村、草嶺村、豐山村等聚

落，舊草嶺國小位於東北方，正南方為草嶺隧道連接草嶺村，如圖 1 所示。崩塌區域面積約為 39.26 公頃，其中雲 149 甲線途經研究區中央位置。



圖 1 研究區域位置圖(擷自 Google Earth)

研究區域的海拔高度為 650~1200 公尺，地勢由東向西傾斜，為東高西低之地形，坡向傾向西。崩塌區地層位態為西北-東南走向，且鄰近有社後坪斷層，為一逆斷層其位於研究區東北方，由地調所圖資顯示研究區域北側與西北方向有順向坡地形分布，如圖 2。

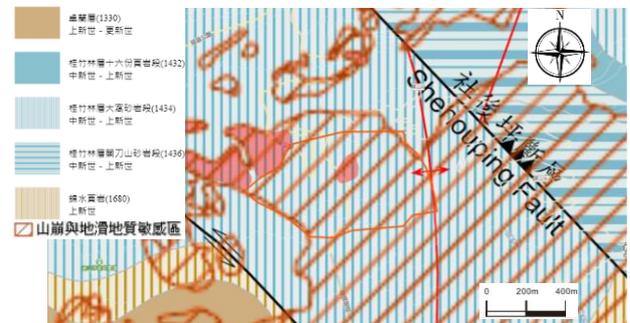


圖 2 研究區域與順向坡及地質敏感區分布圖(擷自中央地質調查所)

依據經濟部中央地質調查所之雲林地質圖幅。本研究區域位屬台灣西部麓山帶，出露地層中新世晚期至上新世，主要成分包含大窩砂岩、上新世有錦水頁岩及卓蘭層所組成層理面發達，因受地形與坡度影響，砂岩層次厚度變化劇烈，因此形成混合組成帶狀層。地質結構以土砂岩為主且地質不穩屬於山崩與地滑地質敏感區，草嶺地區有多處向斜、背斜及斷層之地質構造，草嶺背斜通過崩塌區冠部，崩塌區因受地形、地質構造等

因素的影響，風化嚴重，除節理發達外岩體非常破碎，頁岩受風化成洋蔥狀剝落，砂岩沿節理成塊狀破壞(台灣世曦，2000)。

3-2 雨量與崩塌歷史

依據中央氣象局草嶺觀測站(COK240)1998~2007年的觀測資料，推測草嶺地區年平均溫度約為 18.2°C ，全年月均溫介於 13°C ~ 22°C ，年平均降雨量約為 2900mm 。每年受梅雨及颱風季節影響，多數集中在5~9月佔全年約有80%的雨量，其中以7月份 500mm 平均雨量最大，年平均降雨天數約130餘天。

97年9月12日辛樂克颱風來襲，最大時雨量為 46.5mm ，連續24小時最大累計雨量達 625.5mm ，累計總雨量達 1129.5mm ，並於9月14日中秋節晚間，遂發生道路路基流失、走山崩塌事件。同年9月28日蕃蜜颱風又來襲，最大時雨量為 48mm ，連續24小時最大累計雨量達 566.5mm ，累計總雨量達 644mm ，雖然連續24小時最大累積雨量及累積總雨量，小於辛樂克颱風，但如此連續高累積雨量之降雨型態，造成本研究區域土石鬆軟，坡地崩塌面積擴大，且地表逕流加劇侵蝕坑溝，甚而轉為土石流，以致崩塌面積及路基流失災害加劇(林彤珈，2017)。

近年降雨情形，依中央氣象局草嶺觀測站(COK240)2016~2020年雨量資料，年平均降雨量約為 2700mm ，每年受梅雨及颱風季節影響，多數集中在5~9月，約有80%的雨量集中，其中總降雨量以6月最多，其次為8月，並以6月份年平均雨量 665.4mm 為最大值(圖3)。而歷年降雨量以2020年為最少，年降雨量僅有 1684mm 。

研究區域位於雲林縣古坑鄉草嶺村，縣道149甲線道自民國78年通車後，為雲林草嶺地區運送農產品及主要聯外道路，草嶺風景區為重要之觀光勝地，每年吸引眾多國內外遊客前來觀光、遊憩與度假。民國88年921大地震後，造成地質結構鬆動，於民國97年9月又因辛樂克颱風後，造成山區地層滑動，導致雲林縣古坑鄉149甲線道路多處山壁崩塌、路基淘空流失，其中又以 $32\text{k}+250\sim+750$

及 $33\text{k}+250\sim+950$ 、舊草嶺公路 500m 、雲220鄉道 300m 順向坡滑動破壞甚為劇烈，使得交通阻斷(台灣世曦，1999)。

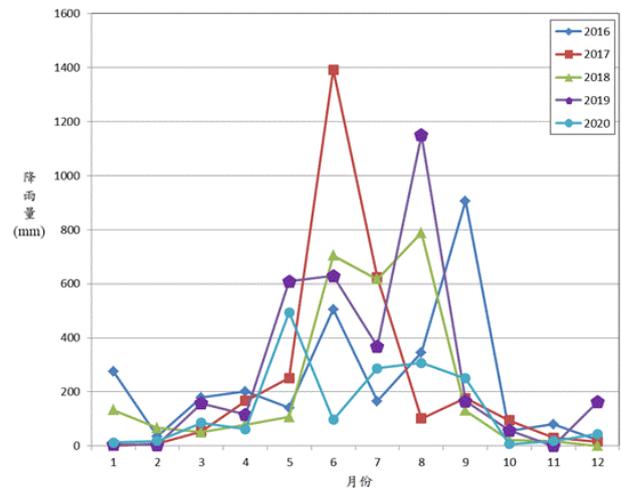


圖3 草嶺雨量觀測站月平均降雨量圖

其中以民國97年9月辛樂克颱風來襲前，7月間同時有兩個颱風侵襲研究區域，卡玫基颱風最大時雨量約 76.5mm ，連續24小時最大累計雨量達 632.0mm ，累積總雨量 703.5mm 。而鳳凰颱風最大時雨量約 39mm ，連續24小時最大累計雨量達 294mm ，累積總雨量 309.5mm 。兩個颱風5日累積雨量達 1144.5mm 。同年9月12日辛樂克颱風來襲，最大時雨量為 46.5mm ，連續24小時最大累計雨量達 625.5mm ，累計總雨量達 1129.5mm ，於9月14日中秋節晚間，遂發生道路路基流失、走山崩塌事件。同年9月28日蕃蜜颱風來襲，最大時雨量為 48mm ，連續24小時最大累計雨量達 566.5mm ，累計總雨量達 644mm ，雖然連續24小時最大累積雨量及累積總雨量，小於辛樂克颱風，但如此連續高累積雨量之降雨型態，造成本研究區域土石鬆軟，坡地崩塌面積擴大，且地表逕流加劇侵蝕坑溝，甚而轉為土石流，以致崩塌面積及路基流失災害加劇(台灣世曦，2000)。

3-3 研究方法

本研究利用無人飛行載具拍攝可見光及多光譜影像對崩塌地坡面作監測，以不同時間拍攝來研究該區域崩塌後地表變動情況，研究流程如圖4所示。

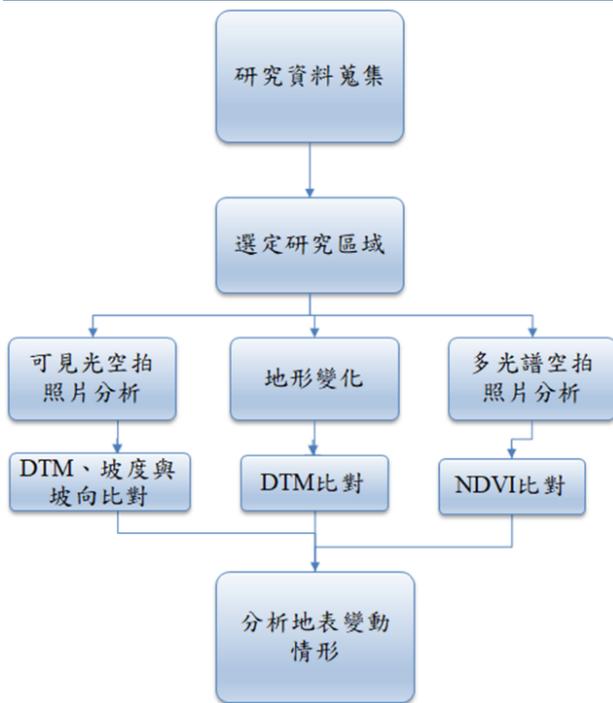


圖 4 研究流程圖

多光譜空拍機 DJI Phantom 4 Multispectral 是大疆創新科技有限公司(簡稱: DJI) 生產之空拍機。DJI Phantom 4 Multispectral 擁有優異的避障系統,對於低空或複雜地形飛行時,讓使用者操作時可以更加安心並精準蒐集數據。此外其即時影像回傳功能,可於飛行間隨時切換成可見光、NDVI,對於即時掌握拍攝區域的環境狀況有非常大的幫助。另外其搭載多光譜成像系統是由 RGB 相機與多光譜相機(藍光、綠光、紅光、紅邊與近紅外)組成;並且頂部搭載光強感測器,用於即時記錄太陽輻照度,以便在後期處理時,可針對影像進行光照補償,進而排除環境光的干擾,提高不同時段採集數據的準確度與一致性。

資料處理軟體 Pix4Dmapper 是由瑞士 Pix4D 公司研發,是一款全自動快速且高精度的無人機數據與空拍處理軟體。將照片與數據導入後,即可將影像快速轉至為專業的二維圖形或建置三維模型算出劃設區域的 3D 面積、挖方體積與填方體積。

空間分析 QGIS 是一個地理資訊系統的開源軟體,使用者可用其來收集、組織、管理、分析、交流和發布地理信息。QGIS 可讓所有人將地理知識應用各個領域,諸如政府、

企業、科技、教育和媒體等亦可以發布地理信息使所有人都可以查看以及應用。此應用程式可進行製圖、編輯、空間分析甚至可運用 Python 編寫插件以滿足使用者需求。而本研究是分析具有 GPS 定位的 DTM 及 NDVI 影像。運用從 Pix4Dmapper 所製作的 DTM 及 NDVI 圖。導入 QGIS 後,運用程式將我們可以辨識出崩塌區及覆蓋植生的區域邊界,而本研究運用 QGIS 的 Clip raster by mask layer 剪出相同位置以便探討與分析。

運用從 Pix4Dmapper 所製作的研究區域的 DTM 圖來做分析,分析拍攝圖片產製出的 DTM 作為相減,能夠看出其崩塌位置、高程變化及方向。因草嶺崩塌地為一大崩塌區域,因應安全及測量所以取圖上(圖 5)四個位置點作為本次研究的控制點,運用 Pix4Dmapper 導入經緯度及高程,則可提高製圖精度,製作出準確的 DTM。



圖 5 研究區控制點位置

四、結果與討論

本研究運用可見光空拍機拍攝時間基本訂定為早上 8:30~11:00,拍攝高度約為 80 公尺高,天氣晴朗的時候進行拍攝,而研究空拍位置在雲 149 甲線草嶺地區,空拍成果為運用 Pix4Dmapper 將圖片組合起來以供我們研究計算崩塌面積以及製作 DTM 以供分析使用。

4-1 空拍成果

空拍照片依序從 2020 年 6 月至 2020 年 11 月,此照片是經手動及自動拍攝,並由 Pix4Dmapper 程式建模計算組合而成(圖 6、

7)。因裸露地與含水土壤具有吸收近紅外線的特性使得光強數值較低，故採用近紅外線圖進行判釋，從圖 8 可發現道路與水系顏色較深，可與圖 6 及 7 相互參照可找出沖蝕溝分布區位。因此研究區域內分佈著大小不一沖蝕溝為此區域地表排水主要路徑。坑溝於下游匯流後導入石鰻坑溪，最後流入清水溪。而清水溪主流由東往西流，切經崩塌區坡腳，流至雙溪嘴轉流向北，於竹山西北側匯入濁水溪。



圖 6 研究區域之空拍圖(2020/06/30 拍攝)



圖 7 研究區域之空拍圖(2020/11/24 拍攝)



圖 8 研究區域近紅外線空拍圖

4-2 數值地形模型(DTM)

本研究由可見光無人飛行載具拍攝照片所製成的 DTM(圖 9、10)，由於選取自動製成模型其 GSD 不一定是相同尺寸，因此需自訂為相同數值，故 GSD 大小設定為 7.5cm/pixel，以便後續進行分析亦減少問題產生。

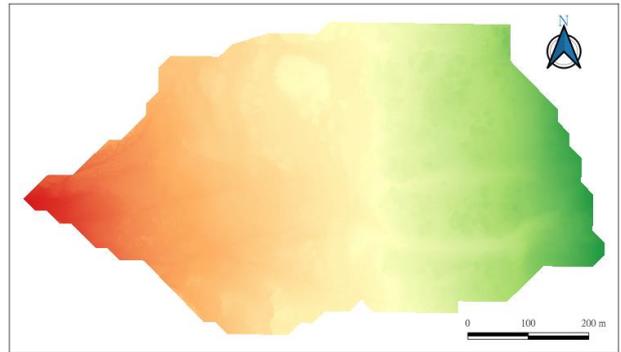


圖 9 空拍產製 DTM(2020/06/30 拍攝)(單位：公尺)

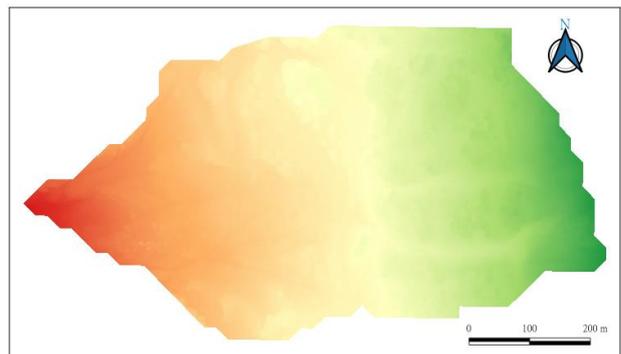


圖 10 空拍產製 DTM(2020/11/24 拍攝)(單位：公尺)

4-3 坡度與坡向分析

以 DTM 於 QGIS 產製坡度圖與坡向圖，由坡度圖可看出整個研究區坡級分類情形，由此可知五至七級坡佔比為 60% 以上，此外東側坡勢較陡峭而西側則要於下游段坡度才較大。整體坡向則是有逐漸面向西方的趨勢。由表 1 中可知研究區的一至四級坡佔比變化不大，而五級坡與六級坡有增加的情況，七級坡佔比則為減少，故由此推斷坡度有稍變緩的傾向。此外由表 2 可知研究區的坡向有逐漸向西與西南的傾向。

表 1 兩時期坡度級別百分比

2020/06/30	坡度級序	2020/11/24
3.6%	一級坡	4.0%
10.1%	二級坡	9.6%
13.9%	三級坡	13.9%
8.7%	四級坡	9.5%
11.8%	五級坡	13.4%
23.8%	六級坡	27.6%
28.0%	七級坡	22.0%

表 2 兩時期坡向百分比

2020/06/30	坡向	2020/11/24
9.7%	北	8.2%
5.8%	東北	4.6%
5.1%	東	3.8%
6.8%	東南	5.1%
11.8%	南	10.2%
20.0%	西南	22.3%
23.6%	西	28.8%
17.2%	西北	17.0%

4-4 地形剖面變化分析

本研究區主要是受清水溪侵蝕進而導致崩塌，故選擇河道縱剖面，此外為探討各區段崩塌情況，故選擇三個橫剖面分析上下游的崩塌情況。研究區域剖面劃設如圖 11 所示，分別為三個河道縱剖面與三個研究區域橫剖面，共有六個剖面，剖面變化如圖 12~圖 13 所示。

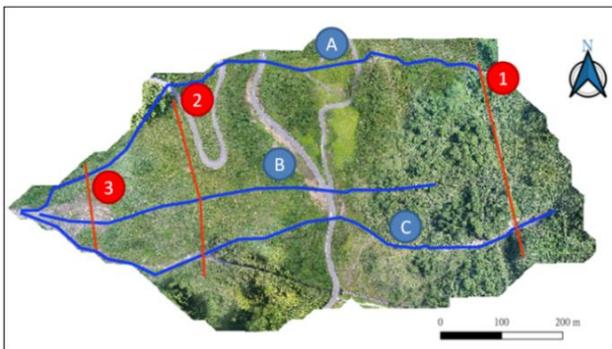


圖 11 研究區剖面位置圖

剖面 A，由圖 12(a)可知在 600 公尺開始高程差有逐漸增大的趨勢直到 800 公尺處兩剖面才再度重合；剖面 B，由圖 12(b)可知在

400 公尺開始高程差有較大情況直到結束；剖面 C，由圖 12(c)可知在 400 公尺開始高程差有逐漸增大，但幅度相當小一直持續到剖面終點。

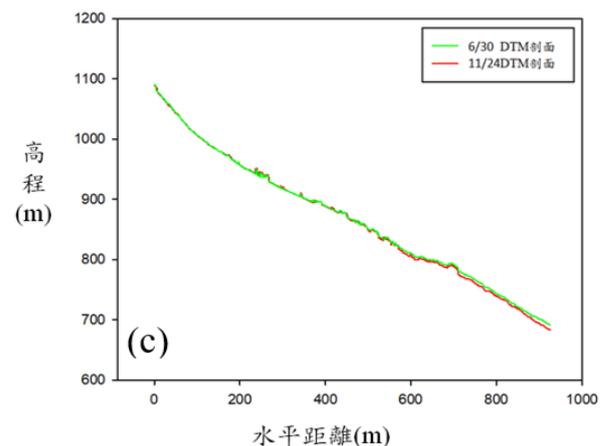
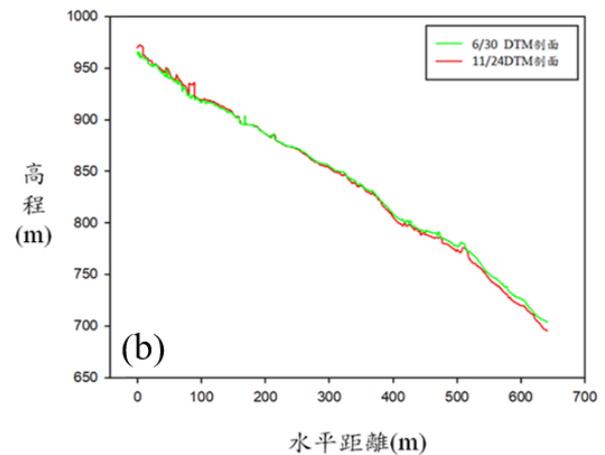
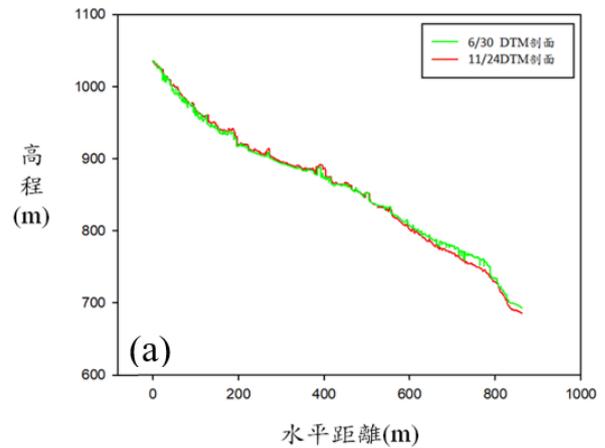


圖 12 崩塌地縱向剖面分析(a)A剖面，(b)B剖面，(c)C剖面

剖面 1，由圖 13(a)可知基本上地形無較大變化，除了部分位置有高程些微變動情況；剖面 2，由圖 13(b)可知於 120 公尺開始有突然的高程差變化情形，除了約 170 公尺處有重合以外，大抵上是維持差不多的變化；剖面 3，由圖 13(c)可知整體而言有約 5 公尺的高程值差距情形，除此之外在 0 至 40 公尺的區間 6/30 的剖面有大幅波動的情形。

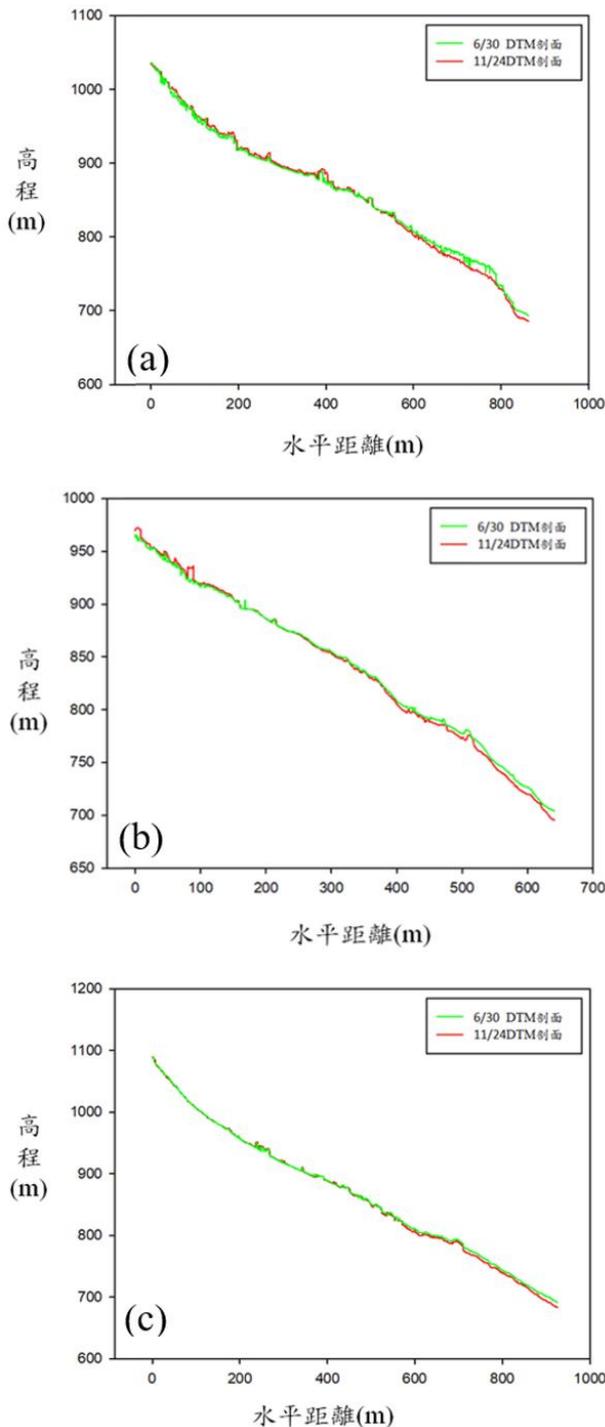


圖 13 崩塌地橫向剖面分析(a)1 剖面，(b)2 剖面，(c)3 剖面

由三個河道縱剖面圖可知於上游段地形並未有大幅度的地形變化。但在下游段有逐漸變化的趨勢，可判斷於道路下邊坡有崩塌的情況。三個橫剖面排列順序由東至西，從圖 13 也能明顯看出越接近下邊坡變動情形越大，此外剖面 3 靠近匯流處有較大的變動變化，經由可見光影像可判斷該處有明顯崩塌情形。

4-5 植生指標 NDVI 變化

本研究運用搭載多光譜感測器之空拍載具，拍攝研究區域，拍攝時間基本上訂定為早上 8:30~11:00，天氣晴朗的時候做拍攝，以 80 公尺高拍攝本研究區域，透過拍攝地物的光譜吸收率與反射率產製該區位之標化植被指數(圖 14)。由圖中可知 NDVI 在道路與水系有較低的趨勢。

透過拍攝地物的光譜吸收率與反射率產製該區位之 NDVI。由圖中可知 NDVI 整體有較低的情況，但仍可看出在道路與水系與部分區域有特別低的趨勢，其中以藍色圈選的區域經判斷為裸露區。

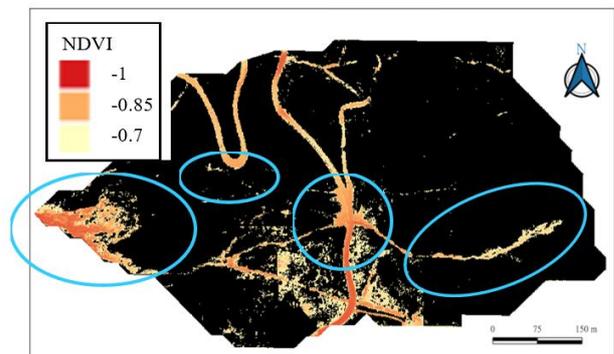


圖 14 研究區域裸露區 NDVI (2020/11/24 拍攝)

4-6 崩塌地監測與分析

由空拍所產製的 DTM 進行相減可知五個月的高程變化，其中可大致看出崩塌多為水系下游端，而於靠近道路處並沒有此崩塌情形。此外，有部分極值發生在一些區域，經判斷可能是樹木植被生長所致，進而造成下方地表無法被拍到，由於 Pix4Dmapper 製作 DTM 是以同一經緯度的最低點為基礎進行製作，進而使 DTM 高程有較大差距，致使兩次

拍攝結果有所差異。

此外由可見光影像數化的水系與道路(圖 15)套疊在地政司所提供之 20m DTM 相減所得結果(圖 16)經分析發現 2018 年與 2016 年相減結果有大規模的崩塌情形，此崩塌情形並不是僅發生於水系，故判斷此崩塌應屬地層滑動與水系侵蝕所致；崩塌區位於水系上，而且主要是以南側的坑溝有崩塌量較多的趨勢，並於下游處有堆積情形，判斷為水系向源侵蝕造成。



圖 15 崩塌區可見光影像數化道路與水系

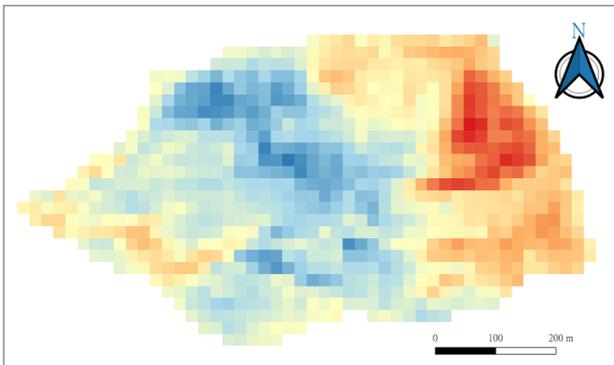


圖 16 2018 年與 2016 年相減之 DTM(單位：公尺)

五、結論與建議

5-1 結論

本研究運用多光譜無人載具空拍草嶺崩塌地，利用空拍可見光影像可以明顯地觀察出研究區域每個時間的地形外貌及相隔時間後的差異，並利用產製之數值地形模型(DTM)，可以得出相距五個月地形變化，除了

因該處地植生長變化使得有因植被部分區域高程有大幅差異的情況外，大致上為區域東北方的高程堆積較多，而西側(研究區域清水溪下游段)有明顯高程變化的現象發生。運用空拍多光譜照相機拍攝影像，並製成植生數值(NDVI)圖，可看出裸露地與植生區域，因當日拍攝時偶有雲霧飄至研究區域致使 NDVI 值有較低的趨勢，但仍可看出道路與水系的植生指數特別低的情況，故再與可見光影像圖進行比對，從而判斷此研究區域植生恢復情形良好。接下來以內政部地政司提供之 20m DTM 分析出近年崩塌區位，並用可見光之空拍影像比較出造成該處崩塌之原因並探討。經由比較後可知該處崩塌主要是受清水溪的影響且越接近下游段特別明顯，而上游有向源侵蝕的情況並且高程變化較少。運用多光譜儀拍攝研究區域時，建議選擇天氣晴朗、日照光線充足，並於當日須無雲霧干擾才進行拍攝，產製的 NDVI 會比較清晰與正確。

參考文獻

1. 葉怡成 (2015)，現代測量學，台灣東華書局股份有限公司，2015。
2. 簡榮興、王天佑、曹鼎志、辜炳寰、簡志凱，應用無人飛行載具 UAV 技術進行土石災區之調查-以 88 水災後之六龜鄉大智瀑布為例，Taiwan Rock Engineering Symposium' 2010。' 2010。
3. 黃志傑，應用無人載具進行邊坡調查與分析初探，國立暨南國際大學土木工程學系碩士論文，2015。
4. 王聰榮、李繼泓，無人飛機發展現況與展望，機械工業月刊，第 281 期，2006。
5. 何春蓀，普通地質學，五南圖書出版股份有限公司，1989
6. 周啟鳴、劉學軍，數字地形分析，科學出版社，2006。
7. 經濟部中央地質調查所，地質資料整合查詢，<http://www.moeacgs.gov.tw/main.jsp>
8. 台灣世曦，辛樂克風災 -149 甲線

- 32K+250 ~ 750 ~ 750 及 33K+250 ~ 33K+950 災害復健工程委託規劃、測量、地質探查及設計監測工程報告書, 2000。
9. 林彤珈, 應用地理資訊系統探討雲 149 甲線崩塌滑動規模, 碩士論文, 國立嘉義大學土木與水資源工程學系, 2017。
10. 台灣世曦, 辛樂克風災 -149 甲線 32K+250 ~ 750 ~ 750 及 33K+250 ~ 33K+950 災害復健工程規劃報告, 1999。

珊瑚礁岩深開挖減震孔與減震溝的應用研究

陳文明¹ 沈茂松²

¹國立高雄科技大學土木系碩專研究生

²國立高雄科技大學土木系教授

摘要

建築物深基礎施工中，遇到堅硬地盤之擋土壁施工，與開挖出土作業震動，常引發地盤振動與液化損鄰。

本研究於高雄市鼓山區之珊瑚礁岩順向坡基地，又臨近三級古蹟鼓山洞與壽山洞，與週邊 30 年~50 年的老舊建築物，不能使用連續壁(順向坡與入岩衝擊振動)與振動下的基礎開挖 8.7m 深，以鑄鋼牙排樁擋土，及利用深 9m、直徑 50cm、間距 1m 之減震孔減振，與深 9m、寬 50cm 之減震溝隔震之工法，對基坑內 2/3 區皆為珊瑚礁岩的打擊破碎開挖出土，經地表速度的振動量測，最大地表振動速度只有 1.37mm/sec，遠低於古蹟的容許振動 4mm/sec，得到沒有損鄰、順利完成開挖作業。

研究中，量測的最大地表振動速度傳遞中，徑向(X 向)與切線(Y 向)振動波，距離基地 6.15~7.15 倍開挖深度 H 波峯會抬高，垂直向(Z 向)振動波，則距離基地 6.05~7.15 倍開挖深度 H 波峯會抬高，此波峯抬高處即為鄰房受震最大處，此為珊瑚礁石灰岩地盤採用減震溝與減震孔的減震特性。

Seed 與 Idress(1983、1985)年評估地盤液化中，取地表振動振幅的平均面積 rms(mm/s) (Root Mean Square)為 0.65(100%)，本研究珊瑚礁石灰岩地盤採用減震溝與減震孔的量測的 rms(mm/s)為徑向(X 向)為 0.14(21.53%)、切線(Y 向)為 0.07(10.76%)、垂直向(Z 向)為 0.03(4.61%)，代表珊瑚礁石灰岩地盤採用減震溝與減震孔的地下室開挖減振效果良好。

本研究珊瑚礁岩膠結的顆粒直徑從 5cm~50cm、岩石的品質指標 RQD=74%~86%，非完整新鮮岩盤，平均岩石的單軸抗壓強度為 185.2 kg/cm^2 ，落杉磯磨耗率為 48.97%~67.27%，本研究採用直徑 50cm 的減震孔與減震溝確實可隔震與減震。

Applied Study of Damping Hole and Damping Ditch in Deep Excavation of Coral Reef

Cheng Wen-Ming¹ Mau-Song Sheen²

¹ Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

² Corresponding Author, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

In the deep excavation of the building, if the construction site of the soil retaining wall is located on hard foundation. The vibration of excavation work often causes ground vibration and liquefaction damaged adjacent building.

This research is located at the foundation of the dip-slope of the coral reef in Gushan District, Kaohsiung City, which is close to Gushan Cave and Shoushan Cave, the third-class historic sites, and there are many old buildings around 30-50 years old. We cannot use continuous wall (downward slope and rock-entry shock vibration) and foundation excavation 8.7m deep under vibration. The construction method of using tungsten steel threaded piles to retain the soil, using damping holes with a depth of 9m, a diameter of 50cm, and a spacing of 1m, and a 9m deep, 50cm wide seismic ditch for seismic isolation, two-thirds of the area is coral reef rock. The foundation is crushed and excavated. According to the vibration measurement of the surface velocity, the maximum surface vibration speed was only 1.37mm/sec, which was far lower than the allowable vibration of the historic site, 4mm/sec. The coral reef rock excavation was successfully completed without damage to neighbors.

Measure the maximum surface vibration velocity transmission. The elevation of the H wave peak will occur at 6.15~7.15 times the excavation depth from the base in the X direction and the Y direction, 6.05~7.15 times in the Z direction. The elevation of this wave peak is the maximum ground vibration of adjacent buildings, which can be regarded as the damping characteristics of the coral reef limestone site using damping hole and damping ditch.

Seed and Idriss (1983、1985) evaluated ground liquefaction, the average area rms (mm/s) (Root Mean Square) of the vibration amplitude of the ground surface is 0.65 (100%). The rms (mm/s) measured by the damping hole and damping ditch of the coral reef limestone site in this study is 0.14 (21.53%) in the radial direction (X direction), 0.07 (10.76%) in the tangent line (Y direction), and vertical The direction (Z direction) is 0.03 (4.61%), which means that the basement excavation with damping ditches and damping holes on the coral reef limestone site has a good vibration damping effect.

The diameter of the cemented coral reef rocks varies from 5cm to 50cm. Rock Quality Designation (RQD) of the specimen varies from 74% to 86%, which is not a complete rock mass. The average uniaxial compressive strength of the rock is 185.2 kg/cm². The results of the Los Angeles abrasion test are 48.97%~67.27%.

Conclusion In this study, the damping hole and damping ditch with a diameter of 50cm has an excellent effect on seismic isolation and energy dissipation.

一、緒論

1-1 研究動機

都會區人口密集，地下擋土開挖施工時振動損及鄰房，沈茂松【1】提到在民國 80 年至 82 年期間，高雄地區因為擋土開挖而造成鄰房損壞的工地共有 295 個、其受災戶高達 2024 戶、賠償金額約為新台幣 20 億。尤其是採用打擊式鋼版樁振動損鄰，受損戶更多，本研究在提供堅硬岩盤進行深開挖工程時，其擋土壁如何無振動深入岩盤、與大面積的岩盤地下室如何不振動出土，如何進行安全有效的減振輔助工法，進而減少鄰損事件，是為本研究的動機。

1-2 研究目的

建築物地下室深開挖遇到堅硬岩盤，常使用油壓振動槌擊碎硬岩盤、然後再由挖土機清除，過程中因振動槌敲擊造成振動與地盤液化引起鄰損，本研究在泥岩岩盤及變質珊瑚礁岩之咕啞石的地下室開挖時，研擬減震的輔助工法，希望有效阻絕振動波傳遞以避免鄰損，日後可供業界參考。

1-3 研究方法

本研究在泥岩岩盤及變質珊瑚礁岩之咕啞石的地下室開挖，首先由地質調查鑽探孔中，以內插法計算出地下室開挖 8.7m 之岩盤範圍，在鄰近三級古蹟的鼓山洞、壽山洞與海巡署大樓，規劃減震溝、及地下室佔 2/3 區的咕啞石岩盤採用減震井、再以鑽掘機以旋轉無震動方式鑽入至設計深度，以挖土機振動槌破碎開挖時，以 1 組三向度振動量測儀量測打擊振動槌時，減震溝、減震井等工法之減震效果，並進行地表振動波在珊瑚礁岩(咕啞石)的減振特性分析，且為建立減振溝與減振孔的岩石背景值，故進行了膠結顆粒直徑描述、岩心樣岩石的品質指標、岩石的單軸抗壓強度、岩石旁土壤單軸抗壓強度、落杉磯磨耗試驗...等，用以建立減振溝與減振孔在珊瑚礁岩(咕啞石)之地下室擋土開挖輔助工法之資訊，研究流程，如圖 1.1 所示。

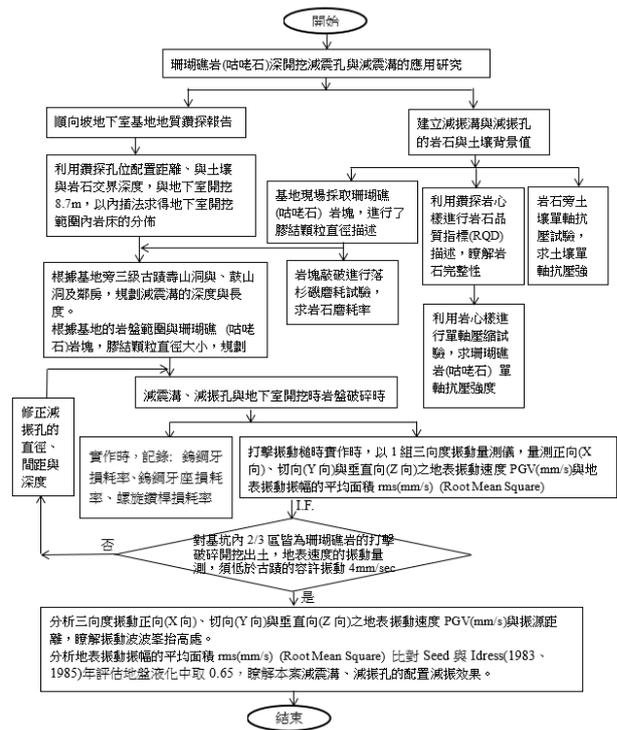


圖 1.1 珊瑚礁岩深開挖減震孔與減震溝的應用研究流程

二、珊瑚礁岩深開挖減震孔與減震溝的應用

本工程案例為高雄市鼓山二路 AA 大樓新建工程，設計地下室二層，樓高 8 層之結構，地下室二層、採用筏式基礎，地下開挖深度為 8.7 米，因位處壽山公園東南山麓，基地大部份為珊瑚礁岩(咕啞石)，經地質鑽探報告確定為順向坡，故地下室的擋土與開挖較特殊。

本基地大部份為順向坡的珊瑚礁岩(咕啞石)，基地開挖面上方約有 2/3 區域皆為珊瑚礁岩(咕啞石)，故需研擬破除珊瑚礁岩(咕啞石)的輔助工法，以避免地下室開挖破除岩盤時，引起振動與地盤液化損鄰。

2-1 基地調查

本基地位於高雄市鼓山區鼓山一路，為壽山山麓與平地交界處，也是珊瑚礁與土壤相結合區，附近有三級古蹟及老舊住宅，基地北側僅間隔 2m 為某機關辦公大樓(透天三樓、無地下室)，有於本基地為於山坡地與平地相會處，也是暴雨來襲時常沖刷淹水之處，地理位置。本基地地質為珊瑚礁夾泥岩之崩積層。預定地下開挖 GL-8.7m，將遇到珊瑚礁

岩、泥岩順向坡。

3-1-2 調查內容及目的

本新建案由於地質複雜，為更進一步瞭解地層及珊瑚礁岩分佈狀況，規劃擋土壁施工工法及減震工法，以防治減震方式保護古蹟及鄰房安全，本基地調查，基地內原設 7 孔鑽探孔(B1~B7)，因發現基地內位處珊瑚礁岩(咕啞石)區，懷疑為順向坡，故又增加 4 孔鑽探孔(B9~B12)，協助了解岩層分佈。

2-3 地層鑽探分析

根據現場鑽探資料，本基地地質分佈珊

瑚礁岩層、泥岩、與沈泥交雜分佈非常不均，上方有些直接是咕啞石或覆蓋黏土及磚塊，但貫穿咕啞石後下方就有泥岩，所以本基地要有較密集之鑽探才能判定咕啞石與順向坡的走勢。順向坡增加的鑽探，其岩心土樣，檢視珊瑚礁岩層的特性，其為膠結多孔的岩塊、透水性大，岩心樣鑽取時會破碎、其岩石品質指標 RQD 大都小於 90%、甚至 RQD=0。

2-3-1 地層剖面圖及岩盤走向判別

由圖 3.7b 可知近山區之 B5、B7、到近鼓山路之 B6 孔之土層剖面圖可知，地面為平地，但地下為順向坡。

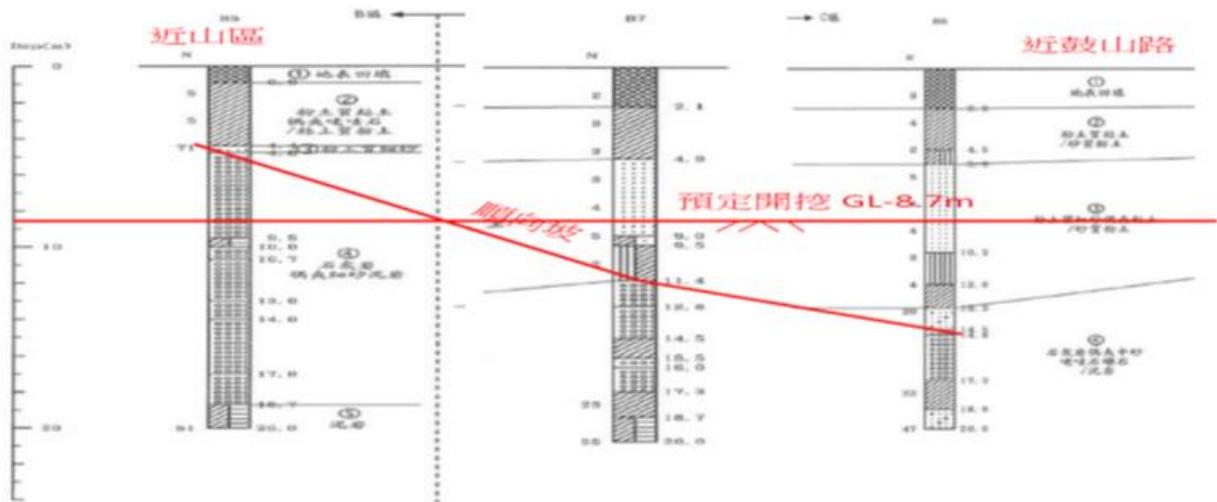


圖 3.7b B5、B6、B7 孔之土層剖面圖

2-4 預壘樁、減震溝、減震井，平面規劃設計及配置圖

本工程為順向坡的深開挖，考慮防順向坡擋土壁須貫入珊瑚礁岩及泥岩中，並在地下室出土時，預防振動與液化，故設計以鑄鋼牙排樁、並設置直徑 50cm、間距 1m、深到 9m 之減震孔(1158 孔)、寬 50cm、深到 9m 減震溝(200 孔)，總計 1,358 孔，如、圖 3.9b 所示。排樁擋土壁、減震溝及減震孔之配置，如圖 3.10 所示。在開挖時挖土機之油壓打擊槌破碎咕啞石時隔絕振動，如圖 3.11 所示。

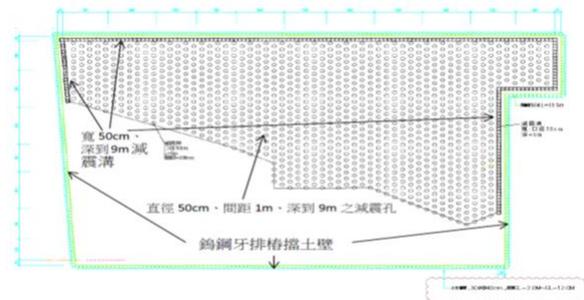
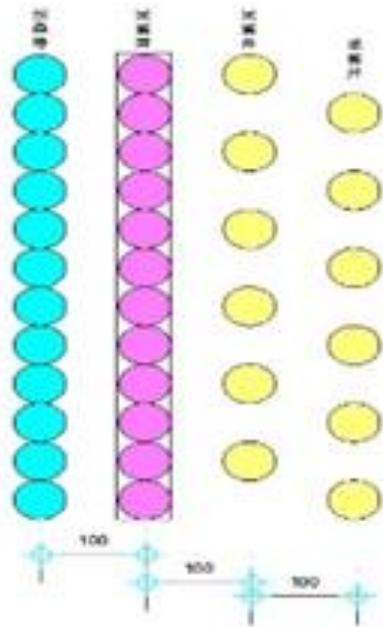
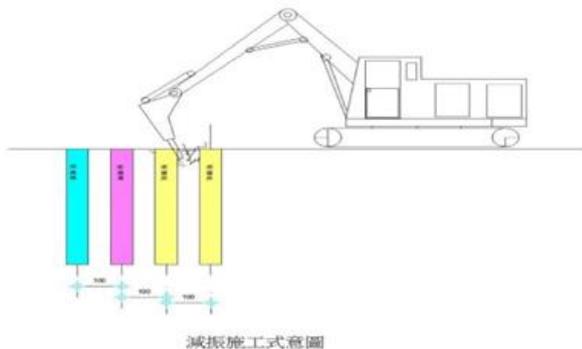


圖 3.9b 利用減震溝及減震孔，在開挖時挖土機之油壓打擊槌破碎咕啞石時隔絕振動



減震井減震溝規劃配置圖

圖 3.10 排樁擋土壁、減震溝及減震孔之配置示意圖



減振施工示意圖

圖 3.11 減震溝及減震孔，在開挖時挖土機之油壓打擊槌破碎咕啞石時隔絕振動

2-5 振動測量

規劃設計減震溝及減震孔是否在挖土機之油壓打擊槌破碎咕啞石時可減、降、或隔絕振動，故規劃開挖時，委託公信單位進行量測地表振動速度，本規劃預定量測 11 點。

2-6 地下室出土時，順向坡的變位量測

地下室出土時，為監測順向坡的變位，故在基地靠山側上中下三點 EL+21.02(B01 管)、EL+8.22(B02 管)與 EL+3.36(B03 管)，共埋設 3 支傾斜管，並委託專業廠商監測。

三、減振孔與減振溝施工成效評估

本研究在順向坡及基坑內約 2/3 區域佈滿的珊瑚礁岩(咕啞石)開挖，規劃設計鎢鋼牙排樁擋土、及設置減振孔與減振溝，讓挖土機之油壓打擊槌破碎咕啞石時可減、降、或隔絕振動。以上皆為規劃構想，從姑規劃到施工存在需研究建立的事項如下：

1. 依現場觀察，珊瑚礁岩(咕啞石)膠結的顆粒約為直徑 5cm~50cm 之岩塊，規劃減振孔採用直徑 50cm、間距 1m、深到 9m 之減震溝、及寬 50cm、深到 9m 減震溝，是否可減、降、或隔絕振動？讓地表振動速度降至古蹟的容許地表振動速度 4mm/sec 以下？
2. 規劃的減振孔採用直徑 50cm、間距 1m、深到 9m 之減震溝、及寬 50cm、深到 9m 減震溝，若真的可減、降、或隔絕振動，應建立其岩盤的背景值，如岩心的單軸抗壓強度、相臨的土壤單軸強度、岩層的岩石品質指標 RQD、岩石的落杉礮磨耗率…等。
3. 規劃減振孔與減震溝，在地下 GL0~GL-8.7m 不同深度開挖時，挖土機之油壓打擊槌破碎岩層，地表振動波傳遞之徑向(X 向)、切向(Y 向)與垂直向(Z 向)振動波會揚起增大的距離多遠？該距離處的鄰房，為日後振動監測的重點位置。
4. 減振的效能，如何評估？
5. 評估鎢鋼牙損耗率、鎢鋼牙座損耗率與螺旋鑽桿損耗率，留做日後施工成本估算的參考。
6. 地下室出土時，順向坡的變位量測。

3-1 鎢鋼牙排樁、減振孔與減振溝施做與耗損率評估

本工程使用之鎢鋼牙螺旋鑽頭與鎢鋼牙(俗稱子彈頭)。減振溝施做，如照片 4.3b 所示。減振孔施做，如照片 4.3a 所示。受損鑽頭、受損烏鋼牙與受損斷鑽桿如照片 4.4a~照片 4.4d 所示。受損統計如下：

自 108 年 11 月 9 日施工至 108 年 12 月

10 日止，統計：

1. 設計鑽孔數： 402 支
2. 岩盤鑽孔孔數： 230 支
3. 砂土層鑽孔孔數： 190 支(不損耗鎢鋼牙)
4. 鎢鋼牙斷座數： 15 座
5. 鎢鋼牙磨耗數： 133 支
6. 螺旋鑽桿斷裂 7 支
 - ▶ 平均斷座之百分比： 8.57% 座
 - ▶ 平均鎢鋼牙磨耗數： 1/6.57 支(含斷座損耗)

鎢鋼牙損耗率為 57.82%，平均約每鑽孔 5 支，損耗 3 支鎢鋼牙。

鎢鋼牙座損耗率為 6.52%，平均約每施作 15 支樁，斷座 1 支。



照片 4.4a 受損鑽頭



照片 4.4b 受損烏鋼牙



照片 4.3a 減震井施工 1



照片 4.3b 減震溝施工 2

3-2 減振孔與減震溝的地質背景值試驗

3-2-1 現場採集咕佬石膠結的顆粒大小描述

現場採集咕佬石膠結的顆粒大小，約在短直徑 5cm~50cm，如照片 4.6a~照片 4.6d 所示。



照片 4.6a 現場取回的咕佬石



照片 4.6b 破碎後咕佬石粒徑量測



照片 4.8a 咕佬石(珊瑚礁岩)洛杉磯試驗 1

3-2-2 岩石品質指標量測



照片 4.7a 岩心 RQD 量測 1



照片 4.8b 咕佬石(珊瑚礁岩)洛杉磯試驗 2



照片 4.7b 岩心 RQD 量測 2

表 4.1 岩石品質指標量測記錄(試驗日期:2021.01.25)

岩心 1	岩心 2
$RQD1 = \frac{19\text{ cm} + 67\text{ cm}}{100\text{ cm}} \times 100\% = 86\%$	$RQD2 = \frac{35\text{ cm} + 25\text{ cm} + 14\text{ cm}}{100\text{ cm}} \times 100\% = 74\%$

3-2-3 咕佬石洛杉磯磨耗試驗

本工區的洛杉磯磨耗試驗,如照片 4.8a、照片 4.8b 所示。咕佬石(珊瑚礁岩)洛杉磯磨耗試驗紀錄,表 4.2 所示。本工區珊瑚礁岩(咕佬石)的洛杉磯磨耗率為 48.97% 與 67.27%。

表 4.2 本工區咕佬石(珊瑚礁岩)洛杉磯磨耗試驗紀錄

	#1 $\frac{1}{2}$ " (37.5mm)~ #1" (25mm)	#1" (25mm)~# $\frac{3}{4}$ " (19mm)	12 顆鐵球(磨球總質量 5000±25g)、30~33rpm、500 轉 後,停留#12 篩(1.2mm)上方洗 淨、烘乾重 W2(g)	洛杉磯磨損率 $\frac{W1-W2}{W1} \times 100\%$ (%)
試樣 A	1250	(1250±25g)	637.86	48.97%
試樣 B		1250	409.10	67.27%

3-2-4 咕佬石單軸抗壓試驗

本工區的洛咕佬石單軸抗壓試驗,如照片 4.9a、照片 4.9d 所示。8 個岩心樣的應力應變曲線,如照片 4.10a~照片 4.10h 所示。咕佬石(珊瑚礁岩)單軸抗壓試驗紀錄,如表 4.3 所示。本工區珊瑚礁岩(咕佬石)的單軸抗壓試驗強度最大 $q_u = 322.67 \text{ kg/cm}^2$ 、最小 $q_u = 84.39 \text{ kg/cm}^2$ 、平均 $q_u = 185.20 \text{ kg/cm}^2$ 。



照片 4.9c 咕咾石單軸抗壓試驗 3(壓後試體)



照片 4.9 咕咾石單軸抗壓試驗 4(抗壓後試體)

3-3 開挖振動監測與分析

3-3-1 開挖振動監測

本工區珊瑚礁岩(咕咾石)以怪手之油壓振動槌破碎開挖，振動量測設置 11 點，為委託台灣檢驗科技股份有限公司 SGS，震動量測位置，如圖 4.2 所示。量測照片，如照片 4.12a~照片 4.12a~所示。



照片 4.12a 震動量測情形



照片 4.12b 震動量測情形

3-3-2 開挖振動監測分析

開挖振動監測點分佈距離，如圖 4.3 所示。量測紀錄，如圖 4.4a~圖 4.4k 所示。

將各點量得之距離(m)、徑向(X 向)、切向(Y 向)、垂直向(Z 向)之地表振動速度紀錄表，如表 4.5 與表 4.6 所示。

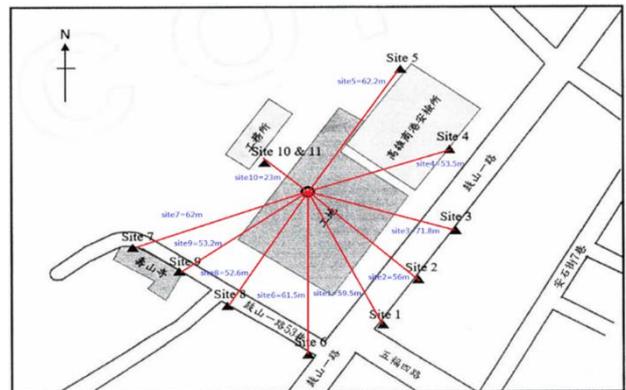


圖 4.3 開挖振動監測點分佈距離

表 4.6 振動量測點依距離(m)大小之徑向(X向)、切向(Y向)、垂直向(Z向)之地表振動速度紀錄表

編號	距離/米	距離/徑向 (X向)		距離/切向 (Y向)		距離/垂直向 (Z向)	
site	m	PGV(mm/s)	rms.(mm/s)	PGV(mm/s)	rms.(mm/s)	PGV(mm/s)	rms.(mm/s)
10	23	0.12	0.01	0.15	0.02	0.09	0.01
11	23	0.02	0.01	0.04	0.01	0.02	0.01
8	52.6	0.18	0.01	0.28	0.01	0.29	0.02
9	53.2	0.09	0.02	0.09	0.01	0.3	0.01
4	53.5	0.21	0.01	0.21	0.01	0.4	0.02
2	56	1.37	0.14	0.66	0.07	0.65	0.03
1	59.5	0.09	0.01	0.07	0.01	0.15	0.01
6	61.5	0.12	0.01	0.27	0.01	0.14	0.01
7	62	0.86	0.01	1.03	0.01	0.79	0.01
5	62.2	0.29	0.01	0.31	0.02	0.16	0.01
3	71.8	0.16	0.01	0.13	0.01	0.26	0.01

3-4 小結

本研究以減震溝與減震孔進行珊瑚礁岩(咕啞石)區，地下室開挖 GL-8.7m 之減震效果說明如下：

(一).三向度之最大地表振動速度，如下：

1. 徑向(X向)地表最大振動速度 $v=1.37(\text{mm}/\text{sec})$ ，距離開挖基地 6.44H(開挖深度)。
2. 切向(Y向)地表最大振動速度 $v=1.03(\text{mm}/\text{sec})$ ，距離開挖基地 7.13H(開挖深度)。
3. 垂直向(Z向)地表最大振動速度 $v=0.79(\text{mm}/\text{sec})$ ，距離開挖基地 7.13H(開挖深度)。

皆小於打樁地盤振動之容許振動量標準值古蹟容許地表最大振動速度 $v=4(\text{mm}/\text{sec})$ 。

(二).振動量測點之距離(m)與徑向(X向)、切向(Y向)、垂直向(Z向)最大地表振動速度在傳遞過程中上揚位置，如下：

1. 徑向(X向)振動速度 $v(\text{mm}/\text{sec})$ 在傳遞過程中上揚位置為 6.15~7.15H(開挖深度)。
2. 切向(Y向)振動速度 $v(\text{mm}/\text{sec})$ 在傳遞過程中上揚位置為 6.15~7.15H(開挖深度)。

3. 垂直向(Z向)振動速度 $v(\text{mm}/\text{sec})$ 在傳遞過程中上揚位置為 6.05~7.15H(開挖深度)。

(三).振動量測點之距離(m)與徑向(X向)、切向(Y向)、垂直向(Z向)最大地表振動能量在傳遞過程中上揚位置，如下：

1. 徑向(X向)振動能量 rms(mm/sec)為 0.14 在傳遞過程中上揚位置為 6.44H(開挖深度)。
2. 切向(Y向)振動能量 rms(mm/sec)為 0.07 在傳遞過程中上揚位置為 6.44H(開挖深度)。
3. 垂直向(Z向)振動能量 rms(mm/sec)為 0.03 在傳遞過程中上揚位置為 6.05~6.44H(開挖深度)。
4. 若以 Seed 與 Idress(1983、1985)年評估地盤液化中，取地表振動振幅的平均面積 rms(mm/s) (Root Mean Square) 為 0.65(100%)，本研究珊瑚礁石灰岩地盤採用減震溝與減震孔的量測的 rms(mm/s) 為徑向(X向)為 0.14(21.53%)、切線(Y向)為 0.07(10.76%)、垂直向(Z向)為 0.03(4.61%)，代表珊瑚礁石灰岩地盤採用減震溝與減震孔的地下室開挖減振效

果良好。

(四). 錐鋼牙損耗率為 57.82%，平均約每鑽孔 5 支，損耗 3 支錐鋼牙。

錐鋼牙座損耗率為 6.52%，平均約每施作 15 支樁，斷座 1 支。

(五). 減震溝與減震孔進行珊瑚礁岩(咕咾石)區之背景參數，如下:

1. 現場採集咕咾石膠結的顆粒大小，約在短直徑 5cm~50cm。
2. 岩石品質指標 RQD(rock quality designation)= 74%~86%。
3. 本工區珊瑚礁岩(咕咾石)的洛杉磯磨耗率為 48.97%與 67.27%。
4. 本工區珊瑚礁岩(咕咾石)的單軸抗壓試驗強度最大 $q_u = 322.67 \text{ kg/cm}^2$ 、

$$\text{最小 } q_u = 84.39 \text{ kg/cm}^2、$$

$$\text{平均 } q_u = 185.20 \text{ kg/cm}^2。$$

5. 本工區土壤單軸抗壓試驗強度最大 $q_u = 5.520 \text{ kg/cm}^2$ 、最小 $q_u = 0.932 \text{ kg/cm}^2$ 、平均 $q_u = 2.605 \text{ kg/cm}^2$

四、結論與建議

4-1 結論

本研究於高雄市鼓山區之珊瑚礁岩順向坡基地，又臨近三級古蹟鼓山洞與壽山洞，與週邊 30 年~50 年的老舊建築物，不能使用連續壁(順向坡與入岩衝擊振動)與振動下的基礎開挖 8.7m 深，以錐鋼牙排樁擋土，及利用深 9m、直徑 50cm、間距 1m 之減震孔減振，與深 9m、寬 50cm 之減震溝隔震之工法，對基坑內 2/3 區皆為珊瑚礁岩的打擊破碎開挖出土，經地表速度的振動量測與分析，得以下結論。

1. 三向度之最大地表振動速度，徑向(X 向)

$v=1.37(\text{mm/sec})$ 、切向(Y 向) $v=1.03(\text{mm/sec})$ 、垂直向(Z 向) $v=0.79(\text{mm/sec})$ ，皆小於打樁地盤振動之古蹟容許地表最大振動速度 $v=4(\text{mm/sec})$ 。

2. 振動量測點最大地表振動速度在傳遞過程中上揚位置距離基地，徑向(X 向)為 6.15~7.15H(開挖深度)、切向(Y 向)為 6.15~7.15H(開挖深度)、垂直向(Z 向)為 6.05~7.15H(開挖深度)。
3. 振動量測點最大地表振動能量 rms(mm/sec)在傳遞過程中上揚位置距離基地，徑向(X 向)為 0.14 距離為 6.44H(開挖深度)、切向(Y 向)為 0.07 距離為 6.44H(開挖深度)、垂直向(Z 向)為 0.03 距離為 6.05~6.44H(開挖深度)。
4. 若以 Seed 與 Idress(1983、1985)年評估地盤液化中，取地表振動振幅的平均面積 rms(mm/s) (Root Mean Square) 為 0.65(100%)，本研究珊瑚礁石灰岩地盤採用減震溝與減震孔的量測的 rms(mm/s) 為徑向(X 向)為 0.14(21.53%)、切線(Y 向)為 0.07(10.76%)、垂直向(Z 向)為 0.03(4.61%)，代表珊瑚礁石灰岩地盤採用減震溝與減震孔的地下室開挖減振效果良好。
5. 錐鋼牙損耗率為 57.82%，平均約每鑽孔 5 支，損耗 3 支錐鋼牙。錐鋼牙座損耗率為 6.52%，平均約每施作 15 支樁，斷座 1 支。
6. 減震溝與減震孔進行珊瑚礁岩(咕咾石)區之背景參數，如下:
 - (1). 現場採集咕咾石膠結的顆粒大小，約在短直徑 5cm~50cm。
 - (2). 岩石品質指標 RQD(rock quality designation)= 74%~86%。
 - (3). 本工區珊瑚礁岩(咕咾石)的洛杉磯磨耗率為 48.97%與 67.27%。
 - (4). 本工區珊瑚礁岩(咕咾石)的單軸抗壓試驗強度最大 $q_u = 322.67 \text{ kg/cm}^2$ 、

最小 $q_u = 84.39 \text{ kg/cm}^2$ 、平均

$$q_u = 185.20 \text{ kg/cm}^2。$$

(5). 本工區土壤單軸抗壓試驗強度最大 $q_u =$

$$5.520 \text{ kg/cm}^2、\text{最小 } q_u = 0.932 \text{ kg/cm}^2、$$

$$\text{平均 } q_u = 2.605 \text{ kg/cm}^2$$

4-2 建議

1. 本研究之工地位於高雄市鼓山區之珊瑚礁岩(咕啞石)順向坡基地之深開挖，並不多見，使用鑄鋼牙排樁擋土，減震孔減振與減震溝隔震所得之施工資料，僅只一例，若有臨近工地，可嘗試改變減震孔與減震溝之直徑與間距，或許有更經濟或效率更高的成果。

電磁阻尼器於近斷層隔震之理論與實驗研究

林錦隆¹ 李奕寰² 黃譯醇³ 林子婷⁴ 林其璋⁵

¹ 國立高雄科技大學營建系助理教授

² 國立高雄科技大學營建系碩士

³ 國立高雄科技大學營建系研究生

⁴ 國立中興大學土木系碩士

⁵ 國立中興大學土木系(退休)特聘教授

摘要

近斷層震波之長周期速度脈衝，可能會導致過大的基礎位移以及受隔離結構之加速度。文獻建議使用傳統的黏滯型阻尼器來減緩隔震系統的反應。但是，長衝程黏滯阻尼器之設計與生產精度的要求較短衝程的阻尼器高很多，為滿足近域隔震系統的長衝程和高阻尼比的需求，本研究旨在開發電磁式隔震系統(Electromagnetic Seismic Isolation System, EMSIS)，透過使用齒輪齒軌機構，帶動電磁阻尼器旋轉，因此衝程不受限制。本研究首先建立 EMSIS 的數學模型和理論公式，接著製作 EMSIS 雛型機構，再利用振動台進行測試。實驗利用簡諧掃頻震波進行 EMSIS 之等效阻尼比之校定，試驗結果表示，電磁阻尼器可以提供與其兩端的相對速度成比例的阻尼力。因此，電磁阻尼器的行為類似於線性黏滯阻尼器，十分適用於隔震系統。最後，本研究利用振動台測試 EMSIS 於近、遠域震波作用下的減震效果，實驗證實 EMSIS 可以有效減緩近斷層地震作用下之基礎位移與結構加速度。此外，理論模擬與實驗數據之擬合結果良好，驗證理論之正確性。

關鍵字：電磁阻尼器、隔震、近斷層地震、振動台試驗

An Experimental and Theoretical Study on Application of Electromagnetic Dampers for Near-fault Seismic Isolation Systems

Ging-Long Lin¹ Yi-Huan Li² Yi-Chun Huang³ Tzu-Ting Lin⁴ Chi-Chang Lin⁵

¹ Assistant Professor, Department of Construction Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

² Master, Department of Construction Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

³ Graduate student, Department of Construction Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

⁴ Master, Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University

⁵ Distinguished Professor, Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University

ABSTRACT

With a long-period velocity pulse component, a near-fault earthquake may induce exceeded base displacement and structural acceleration to a base-isolated structure. Traditional viscous dampers are usually being used to mitigate the excessive responses of an isolated system. However, the requirements of the design specification and production accuracy for a large stroke damper are much higher than a typical viscous damper. To meet the requirements of long stroke and high damping ratio of isolation systems in near-fault region. This study aims to develop an electromagnetic seismic isolation system (EMSIS). By using rack and pinion mechanism, the rotational electromagnetic (EM) damper is without the limitation of stroke. The mathematic model and theoretical formulas of the EMSIS was established firstly, a prototype EMSIS was then manufactured and tested by a shaking table. The equivalent EM damping ratio of the EMSIS was calibrated based on a series of sine sweep tests. The test results demonstrated that each EM damper is able to provide a damping force proportional to the relative velocity of its two ends. Therefore, a EM damper behaves like a linear viscous damper, which is suitable for seismic isolation systems. Finally, both near-fault and far-field earthquakes were imposed on the EMSIS. The theoretical results are well agreed with the experimental results. The shaking table test results also reveal the EMSIS can effectively mitigate the base displacement and structural acceleration under near-fault earthquakes.

Keywords: electromagnetic damper, seismic isolation, near-fault earthquakes, shaking table tes

一、前言

隔震技術已被公認是建築物及橋樑抗震的一種有效方法(Kelly, 1999; Jangid, 2008)。然而，當隔震系統受到近斷層震波作用時，由於震波之長週期脈衝分量(Baker 2007; Shahi and Baker, 2014)，造成過大之隔震位移及上部結構加速度。由於近斷層震波具有較大的速度脈衝分量，因此研究人員建議在隔震系統中安裝黏滯型阻尼器。黏滯型阻尼器之阻尼力與其兩端的相對速度成正比，有利於隔震系統對抗近域震波。另外，由於黏滯型阻尼器不會增加隔震層之勁度，因此與位移相依型的阻尼器相比，設計隔震週期受黏滯型阻尼器之影響較小。

學者(Kelly, 1999)研究黏滯型阻尼器對基礎隔震結構性能的影響，結果顯示，隨著隔震阻尼的增加，隔震位移及結構基底剪力可能會降低，但地表加速度和層間位移會增加。文獻(Politopolous, 2007)指出，當阻尼比高達35%時，可以減少隔震結構之加速度及剪力。文獻(Makris and Chang, 2000)比較隔震系統具備黏滯性、黏塑性以及摩擦阻尼之減震性能。他們得出的結論是：相對較低的摩擦力和黏滯阻尼之組合，對於近域隔震是更有效的，可在小幅增加上部結構加速度之情況下，降低基礎位移。學者(Jangid and Kelly, 2001)指出，儘管增加隔震層阻尼可以降低隔震位移，但其可能會引致較大的上部結構加速度，且存在一個最佳隔震阻尼值，使上部結構加速度達到最小值。學者(He and Agrawal, 2008)之研究結果顯示，當脈衝週期接近隔震週期時，黏滯型阻尼非常有效。由以上的討論可知，在高阻尼的情況下，可能會對隔震結構產生更明顯的高頻反應，但其可以有效降低隔震位移，保護隔震系統(Hall, 1999)。

基於以上討論，本研究旨在發展一種新型的電磁式隔震系統(Electromagnetic Seismic Isolation System, EMSIS)。透過齒輪齒軌機構，電磁阻尼器可帶動馬達旋轉，且不受衝程限制。由於電磁阻尼器之減震相關研究，多為理論研究(Guo et al, 2020)，因此，必須要有更多的實驗，證明其在近斷層地震

中之效能。本研究目的即在利用振動台試驗，驗證 EMSIS 於近、遠域震波作用下之減震性能。

二、具電磁阻尼之隔震系統

2-1 電磁阻尼之隔震系統物理模型

圖 1 為 EMSIS 之物理模型示意圖。隔震平台由彈簧及線性滑軌組成。電磁阻尼器則是安裝於隔震平台上，可為隔震系統提供電磁阻尼力。電磁阻尼器由直流馬達、齒輪箱以及一對齒輪齒軌所組成。需注意的是，隔震平台之質量內含受隔震物體之質量，使用剛體作為受隔震物體，可讓本研究聚焦於探討電磁阻尼器之作用。由於電磁阻尼器是以永磁直流馬達之旋轉產生電磁阻尼，但隔震系統之平移運動速度較低，因此必須透過齒輪箱增加馬達之轉速，以提高電磁阻尼密度。

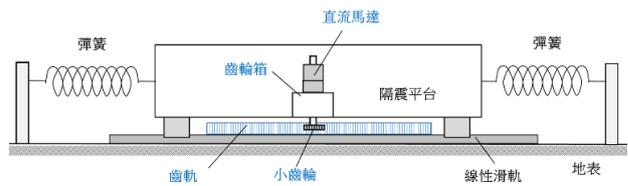


圖 1 電磁隔震系統

2-2 電磁阻尼力

透過電磁相關理論，可推導馬達之電磁扭矩為

$$\tau_{gen}(t) = \frac{k_e k_t}{R_{gen} + R_{load}} \dot{\theta}_{gen}(t) \quad (1)$$

其中，馬達之電磁扭矩 $\tau_{gen}(t)$ 與轉速 $\dot{\theta}_{gen}(t)$ 成正比。式(1)中， R_{load} 為外接電阻值， R_{gen} 馬達既有電阻值。 k_e 為馬達反電動勢常數， k_t 為馬達扭力常數。再由圖 2 之扭矩平衡，電磁阻尼力 $F(t)$ 可表示為(Hung et al., 2017)：

$$F(t) = \left(\frac{I_{pin}}{r_{pin}^2} + \frac{n_{gh}^2 I_{gh}}{\beta_{pin} r_{pin}^2} + \frac{n_{gh}^2 I_{gen}}{\beta_{gh} \beta_{pin} r_{pin}^2} \right) \dot{x}_b(t) + \left(\frac{k_e k_t n_{gh}^2}{\beta_{gh} \beta_{pin} r_{pin}^2} \frac{1}{R_{circ}} \right) \dot{x}_b(t) \quad (2)$$

其中， I_{pin} 、 r_{pin} 、 β_{pin} 分別為齒輪之轉

動慣量、半徑、傳遞效率； n_{gh} 、 I_{gh} 、 β_{gh} 分別為齒輪箱之齒輪比、轉動慣量、傳遞效率； I_{gen} 為馬達之轉動慣量； R_{circ} 為串聯電路的總電阻值； $\dot{x}_b(t)$ 、 $\dot{x}_b(t)$ 為隔震層之相對地表加速度與速度。

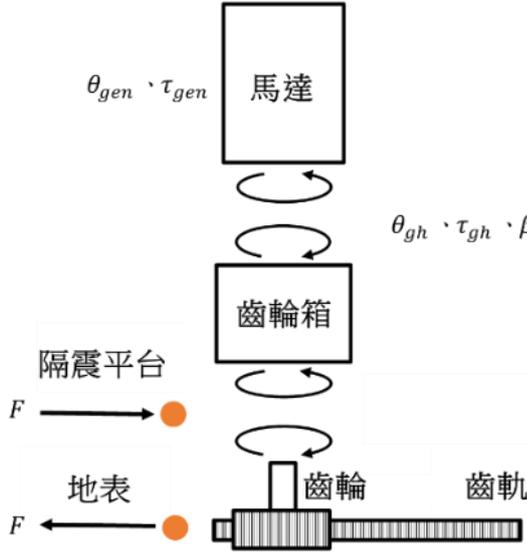


圖 2 電磁阻尼器的側向力平衡

由式(1)可知，電磁阻尼器產生兩個等效的線性參數，分別是慣質 b_s 和電磁阻尼係數 c_{em} ，如下所示(林子婷, 2018; 李奕寰, 2020)。

$$b_s = \frac{I_{pin}}{r_{pin}^2} + \frac{n_{gh}^2 I_{gh}}{\beta_{pin} r_{pin}^2} + \frac{n_{gh}^2 I_{gen}}{\beta_{gh} \beta_{pin} r_{pin}^2} \quad (3)$$

$$c_{em} = \frac{k_e k_t n_{gh}^2}{\beta_{gh} \beta_{pin} r_{pin}^2} \frac{1}{R_{circ}} \quad (4)$$

$$R_{circ} = R_{load} + R_{gen} \quad (5)$$

其中，慣質 b_s 與電磁尼器之轉動慣量、齒輪比、齒輪半徑之參數有關，其單位與質量相同，因此會影響隔震系統之頻率。此外，由於存在齒輪箱及齒輪的傳遞效率，因此 b_s 及 c_{em} 之實際值，必須透過實驗進行校定。

三、EMSIS 數學模型與運動方程式

圖 3 為 EMSIS 之數學模型。符號 $x_b(t)$ 、 m_b 、 k_b 、 c_{em} 、 b_s 分別為隔震系統之隔震位移、質量、勁度、電磁阻尼係數以及慣質；符號 $u_f(t)$ 代表滑動隔震平台之非線性摩擦力； \ddot{x}_g 則代表地表加速度。EMSIS 之運動方程式可以表示為

$$(m_b + b_s)\ddot{x}_b(t) + c_{em}\dot{x}_b(t) + k_b x_b(t) = -m_b \ddot{x}_g(t) - u_f(t) \quad (6)$$

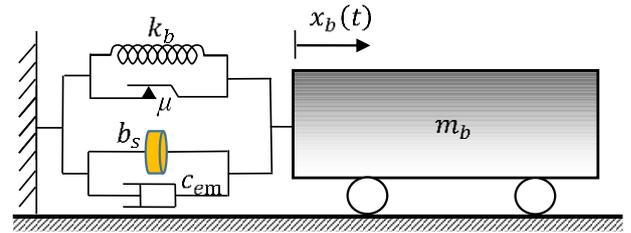


圖 3 電磁阻尼隔震系統之數學模型

四、隔震系統簡諧掃頻試驗與參數識別

4-1 實驗試體說明

圖 4 為雙向電磁阻尼隔震系統之照片，每個方向安裝兩個電磁阻尼器。在本研究中，僅分析 x 方向之反應，因為兩個位移方向是獨立的。如前所述，使用剛體受隔震物的原因在於聚焦 EMSIS 之行為，而不是上部結構的動態行為。表 1 列出電磁阻尼器之規格，表 2 列出 EMSIS 之參數。藉由比較安裝與不安裝電磁阻尼器時，隔震系統之振動頻率，即可識別電磁阻尼器之慣值。摩擦係數則是由隔震系統自由振動反應所推估。

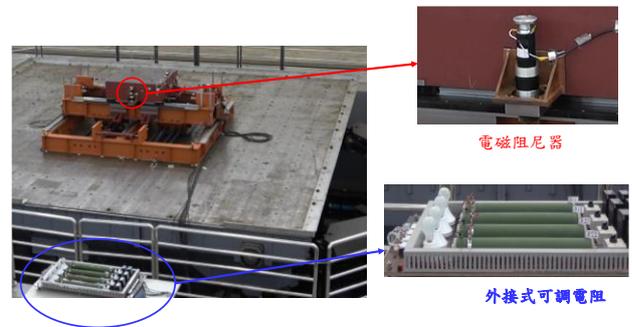


圖 4 電磁阻尼隔震系統

表 1 電磁阻尼器構件之相關參數

構件	參數
直流馬達	$I_{gen} = 1.3 \times 10^{-4} \text{ (kg} \times \text{cm}^2)$ $k_e = k_t = 0.2455 \text{ (N} \times \text{m/A)}$ $R_{gen} = 1.41 \text{ (}\Omega)$
齒輪箱	$I_{gh} = 1.25 \times 10^{-4} \text{ (kg} \times \text{m}^2)$ $n_{gh} = 25$
齒輪	$I_{pin} = 4.04 \times 10^{-4} \text{ (kg} \times \text{m}^2)$ $r_{pin} = 0.03396 \text{ (m)}$

表 2 EMSIS 之參數

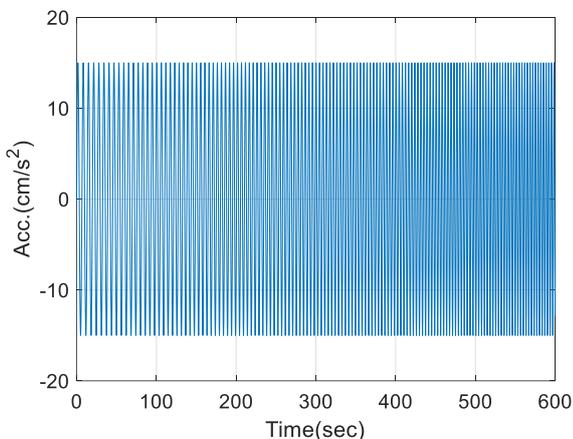
參數	值
質量 m_b (kg)	4160
慣質 b_s (kg)	160.4
週期 T_b (sec)	4.3
摩擦係數 μ	0.004

4-2 實驗配置

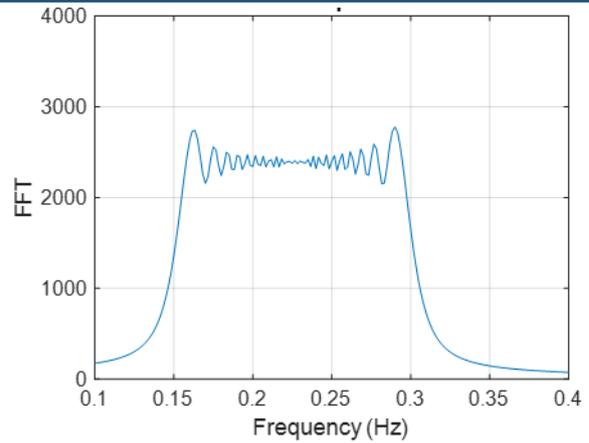
振動台試驗於國家地震工程研究中心台南實驗室進行。EM SIS 安裝於振動台上，並架設位移計 (LVDT) 量測隔震位移、加速規及速度計於隔震系統頂部及振動台上，以量測 EMSIS 及地表之加速度與速度。

4-3 隔震系統頻率響應曲線擬合

為了校定 EMSIS 之等效電磁阻尼比，實驗使用掃頻簡谐波之地表加速度，以激發 EMSIS 之反應。圖 5 為其波形與其傅立葉譜，掃頻總共持續了 600 秒，頻率範圍在 0.15-0.3 Hz 之間。於簡諧掃頻震波作用下，圖 6 與圖 7 繪製具有 1000 及 15 歐姆總電阻值 (R_{circ}) 時，隔震系統之位移歷時擬合結果。圖 8 與圖 9 顯示相對應之轉換函數 (輸入：地表加速度、輸出：基礎位移)。由圖可知，理論結果與實驗結果擬合良好，因此，所識別的等效電磁阻尼比是可信的。圖 8 與圖 9 亦顯示電磁阻尼器與線性黏滯型阻尼器之特性相同，在相對較大之電磁阻尼比之下，例如圖 9 中的 $\xi_{em} = 37\%$ ，轉換函數之峰值較不明顯。

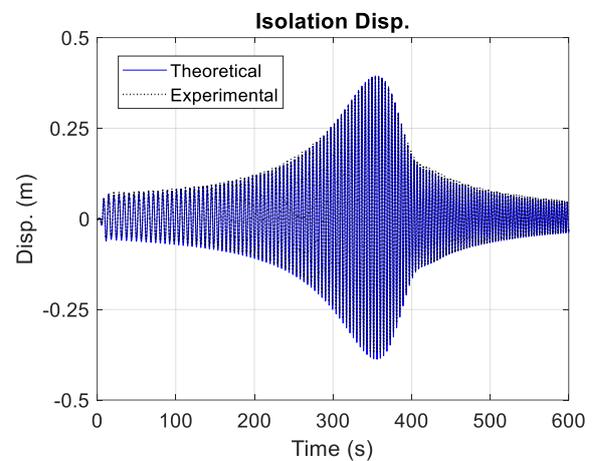
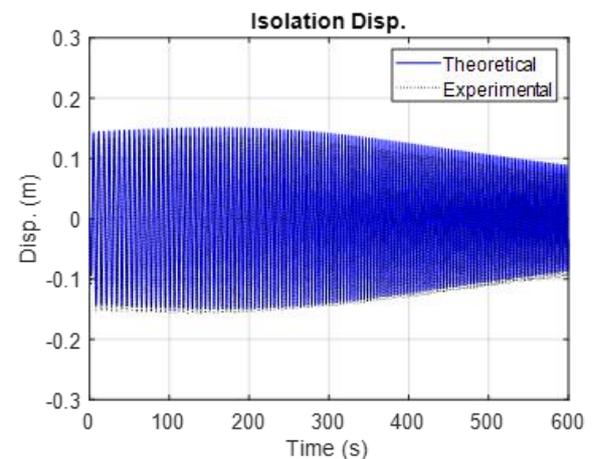


(a) 地表加速度歷時圖



(b) 傅立葉譜

圖 5 簡諧掃頻地表加速度

圖 6 簡諧掃頻之位移反應 ($R_{circ} = 1000 \Omega$, 識別之 $\xi_{em} = 1.8\%$, PGA=9gal)圖 7 簡諧掃頻之位移反應 ($R_{circ} = 15 \Omega$, 識別之 $\xi_{em} = 37.0\%$, PGA=28gal)

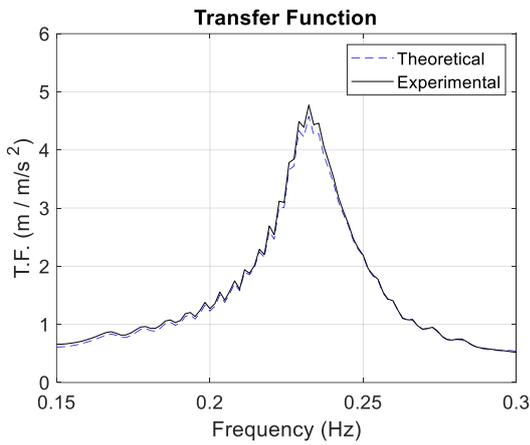


圖 8 位移轉換函數($R_{circ} = 1000 \Omega$, 識別之 $\xi_{em} = 1.8\%$, $PGA=9gal$)

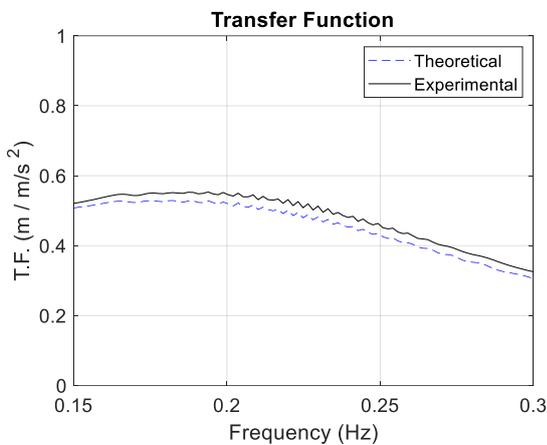


圖 9 位移轉換函數($R_{circ} = 15 \Omega$, 識別之 $\xi_{em} = 37.0\%$, $PGA=28gal$)

4-4 總電阻與電磁阻尼比之關係

圖 10 繪製實驗之電路總電阻(R_{circ})與其對應之等效電磁阻尼比(ξ_{em})的關係曲線，電路中之總電阻是利用外接可變電阻(R_{load})進行調整。由圖可知，藉由調整式(5)中之外接電阻值，可改變隔震系統之電磁阻尼比。

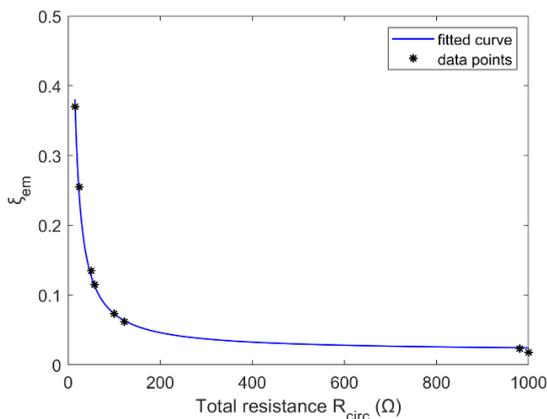


圖 10 ξ_{em} 與 R_{circ} 之擬合曲線

五、隔震效能測試

5-1 試驗用震波

在振動台測試中，使用兩筆實測震波資料作為輸入之外力。分別為(1) Imperial Valley (Array 06) 震波：具有強烈近斷層特徵之地表加速度(Shahi and Baker 2014)、(2) El Centro (SooE) 震波：典型遠域地表加速度。

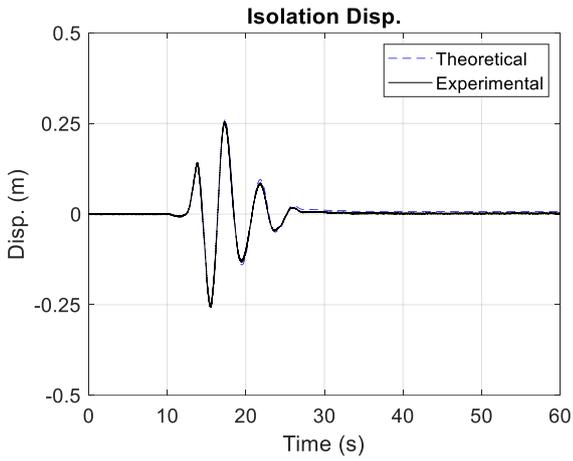
5-2 實驗與理論歷時反應之比較

為確保實驗結果準確，首先利用理論模型擬合實驗結果。利用振動台上測得之加速度訊號作為輸入理論程式之外力。圖 11 比較 EMSIS 在 Imperial Valley 近域震波作用下，實驗及理論模擬之反應。其中，子圖(a)為隔震位移，子圖(b)為隔震加速度，子圖(c)為電磁阻尼器之遲滯迴圈。由這些圖可觀察到：量測數據與預測之行為一致，即實驗數據是可靠的，且理論模型可正確預測 EMSIS 之動態反應。

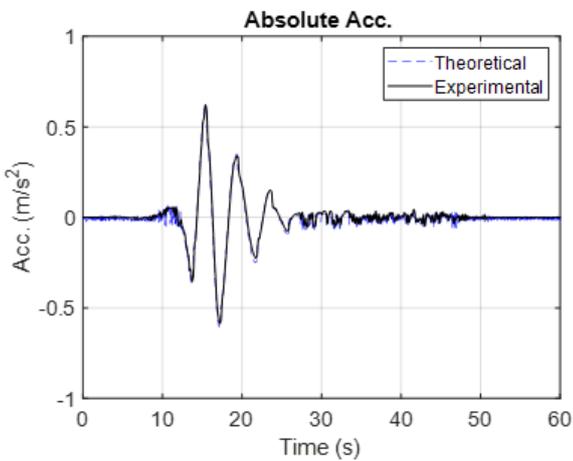
5-3 電磁隔震系統之實驗峰值反應

本節探討 EMSIS 振動台試驗之峰值反應。試驗震波的尖峰地表加速度(peak ground acceleration, PGA)值逐漸增加。由於離型 EMSIS 之容許基礎位移限制為 ± 0.5 m，因此 Imperial Valley 和 El Centro 震波可進行之 PGA 極限值為 1.4 m/s^2 與 8.0 m/s^2 。

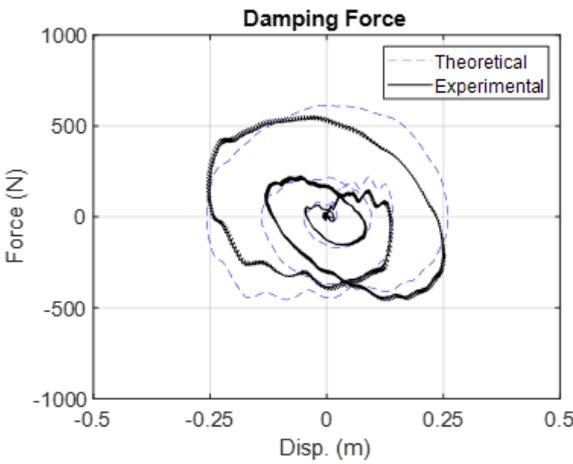
圖 12 與圖 13 比較 EMSIS 於電磁阻尼比 $\xi_{em} = 2.3\%$ 、 6.3% 、 11.5% 時之峰值隔震位移及加速度反應。由圖可知，電磁阻尼比越大，隔震系統之最大隔震位移及加速度越低。在實驗選擇之兩筆近斷層及遠域震波中，EMSIS 具電磁阻尼比為 $\xi_{em} = 11.5\%$ 者，在不同 PGA 下，具有最佳減震性能。



(a) 隔震位移

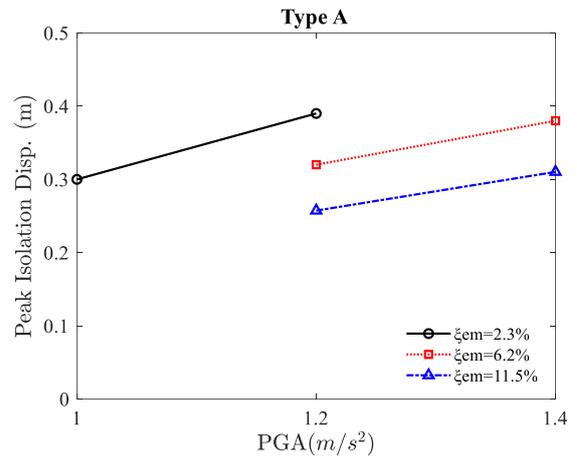


(b) 隔震加速度

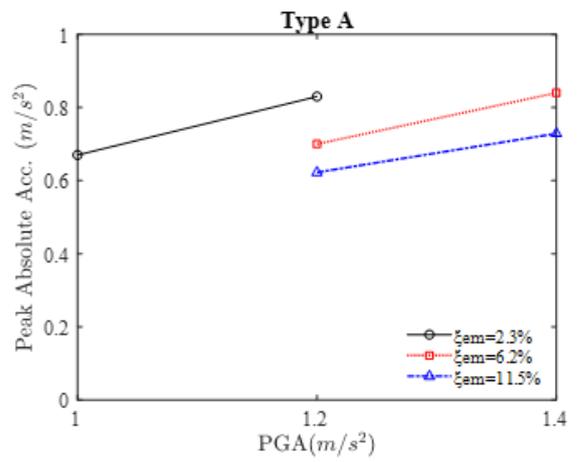


(c) 電磁阻尼器遲滯迴圈

圖 11 電磁隔震系統之反應($\xi_{em} = 11.5\%$, Imperial Valley , PGA = 120gal)

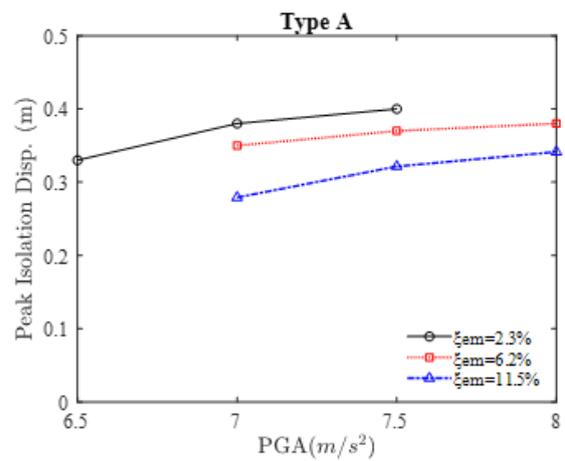


(a) 最大隔震位移

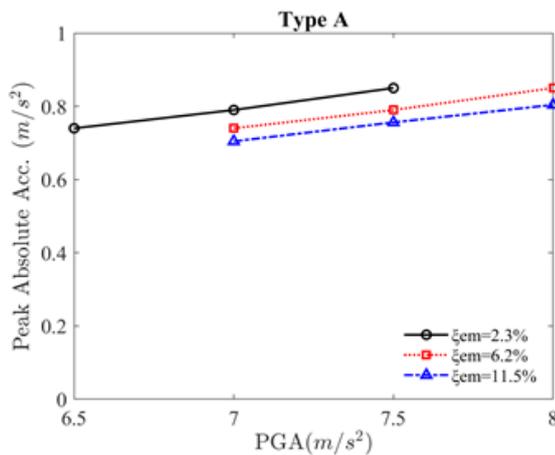


(b) 最大隔震加速度

圖 12 EMSIS 在不同 ξ_{em} 下之最大反應 (Imperial Valley)



(a) 最大隔震位移



(b) 最大隔震加速度

圖 13 EMSIS 在不同 ξ_{em} 下之最大反應 (El Centro)

六、結論

為符合近斷層隔震系統之長衝程及高阻尼比要求。本研究旨在開發電磁式隔震系統 (Electromagnetic Seismic Isolation System, EMSIS)，透過使用齒輪齒軌機構，帶動旋轉電磁阻尼器，此型阻尼器可不受衝程之限制。本研究首先建立理論公式，接著設計製作離形 EMSIS，並根據簡諧掃頻試驗，識別等效電磁阻尼。試驗結果顯示，電磁阻尼器可提供與其兩端相對速度成比例之阻尼力，十分適用於隔震系統。最後，並進行 EMSIS 於近斷層及遠域震波的性能測試，理論模擬值與實驗數據擬合結果良好，驗證實驗結果及理論公式的正確性。試驗結果亦顯示，透過在隔震系統中增加電磁阻尼比，可以有效地降低隔震系統在近斷層地震下的反應。

參考文獻

1. Baker JW. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2007; 97: 1486-1501.
2. Guo W, Wu X, Wei X, Cui Y, Bu D. Inductance effect of passive electromagnetic dampers on building-damper system subjected to near-fault earthquakes. *Advances in Structural Engineering* 2020; 23(2): 320-333.

3. He WL, Agrawal AK. Analytical model of ground motion pulses for the design and assessment of seismic protective systems. *Journal of Structural Engineering (ASCE)* 2008; 134: 1177-1188.
4. Hung TC, Lin GL, Lin CC, Liu YL, Zuo L. Vibration control of seismic structures using electromagnetic multiple tuned mass dampers with rotary transducers. *The World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM17) 2017; Seoul, Korea.*
5. Jangid RS. Equivalent linear stochastic seismic response of isolated bridges. *Journal of Sound and Vibration* 2008; 309: 805-822.
6. Jangid RS, Kelly JM. Base isolation for near-fault motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2001; 30: 691-707.
7. Kelly JM. The role of damping in seismic isolation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 28 (1999), 3-20.
8. Makris N, Chang SP. Effect of viscous, viscoplastic and friction damping on the response of seismic isolated structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2000; 29: 85-107.
9. Naeim F, Kelly JM. *Design of seismic isolated structures*. New York: John Wiley and Sons; 1999.
10. Politopolous I. A review of adverse effects of damping in seismic isolation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2007; 37: 447-465.
11. Shahi SK, Baker JW. An efficient algorithm to identify strong-velocity pulses in multicomponent ground motions, *Bulletin of the Seismological Society of America* 2014; 104(5): 2456-2466.
12. 李奕寰，具飛輪之電磁式隔震系統之抗震研究，國立高雄科技大學營建工程系

碩士學位論文，2020。

13. 林子婷，雙向具慣質電磁式調諧質量阻尼器之最佳設計與振動台試驗，國立中興大學土木工程系碩士學位論文，2018。

應用壓電片於彈性柱挫屈變位健康檢測之理論探討

黃立政¹ 梁元馨² 郭峻豪²

¹國立高雄科技大學土木工程系教授

²國立高雄科技大學土木工程研究所碩士生

摘要

本文探討應用壓電材料貼片於彈性柱挫屈變位檢知之結構健康監測技術。首先進行理論推導，並使用軸向負載梁(四種支承條件)及 PZT 壓電陶瓷貼片為案例分析。結果顯示使用壓電陶瓷貼片可以量測出輸出電壓，進而估計出最大應變，最大應力，斷面彎矩，並進一步推求各挫屈模態之變位，描繪出變位曲線與挫屈第一模態比較，從而判斷是否發生挫屈，達到結構挫屈變位健康監測之目的。分析結果顯示：(1)各模態變位曲線相當接近理論曲線，模態越低越準確。(2)壓電片之輸出電壓很小(小於 50 V)，不至於發生損壞壓電片。(3)以壓電片做為結構挫屈變位健康監測應屬可行。

關鍵字：結構健康檢測、壓電材料、彈性柱、理論分析

Theoretical Study on Application of Piezo-electric Attachment to Buckling Deflection Monitoring of Elastic Columns

Li-Jeng Huang¹ Yuan-Shin Liang² Jun-Hao Kuo²

¹Corresponding Author, Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

²Master Student, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

In this paper, we analyzed a structural health monitoring (SHM) technique using piezo-electric attachment on elastic columns to detect their buckling modes. Theoretical formulation and analysis procedures are first developed using simply-supported column. Case study considered are different support conditions, such as S-S, C-F, C-S, and C-C, using 9 PZT piezoelectric attachments are employed. Result show that columns embedded with PZT piezoelectric attachments can depict voltage outputs, maximal strains, maximal stresses, moments and lateral deflections at desired points of attachments. And thus buckling deflection of the columns can be estimated from the output voltages of PZT piezoelectric attachments and offer the warning if it is satisfies buckling modes. Results show that (1) all the estimated lateral deflections fit well to the theoretical buckling modes for all support conditions, and the errors are smaller for lower modes, (2) output voltages of piezoelectric sensor are very small (within 50 V) and safe, (3) application of piezoelectric attachments to SHM is feasible.

Keywords: structure health monitoring, piezoelectric materials, elastic columns, theoretical analysis

一、前言

1-1 問題背景

梁與柱在房屋結構中構成框架主結構系統，其中柱擔負著垂直負載傳遞的主要作用，而且它的破壞通常瞬間帶來整體結構之傾斜坍塌，缺乏如梁破壞時緩慢變形的預警時間。因此在鋼筋混凝土分析與設計規範中，對於受壓構件之折減係數為 0.7，遠低於拉力構件之 0.9。雖然實務上，一般柱設計會考慮軸立與彎矩聯合作用，但對於細長柱產生之挫屈仍須檢核，以確保安全。如何設計建構好之房屋對其立柱進行側向變位監測為本研究之主題。

壓電材料於發生機械變形時擁有產生電勢的能力，稱為正壓電效應，壓電材料可以製成感應器；施加電壓時有變形之能力，稱為逆壓電效應，壓電材料可製成制動器。而隨技術日新月異不斷進步，大位移高強度的壓電材料研製開發，壓電材料應用才漸漸擴展到土木工程領域，也是近年來許多學者研究之熱門課題[1-7]。

結構健康監測適用於診斷建築物健康狀況之自動化策略，近幾十年因為感應技術及數據採集技術的快速發展使這個領域也有了重大進展。本研究團隊曾探討應用壓電貼片於不同支承條件下彈性梁承受均佈與集中力橫向變位監測，結果相當理想[3,4,9]。本文融合壓電技術與健康監測進行彈性柱之變位監測，首先進行理論推導，並使用 PZT 壓電陶瓷貼片於四種不同支承：鉸滾(S-S)，懸臂(C-F)，固滾(C-S)，固固(C-C) 條件下彈性柱為案例分析。

1-2 文獻回顧

王社良等(2010)，隨著建築型式的多樣化以及結構高度、地震和風等動力荷載作用下的振動問題也日益突顯出跨度的增大、結構在智能材料的研究與應用成為結構抗震控制技術領域最具前瞻性的發展方向之一。從研究結果顯示，壓電主動桿的控制效果與輸入地震波的關係不大，而與結構本身參數關係較為密切；則抗震效果顯著，於結構各層

的位移最大抑制達到 14%，加速度最大抑制達到 21%。

任建亭等(2002)，主要建立於梁上黏貼一段壓電片實現振動控制的動力學方程式，定義壓電層合梁的壓電之消耗功率，針對懸臂梁這一分佈參數控制系統，提出確保控制系統閉環穩定的設計方法。最後利用數值案例證明該方法的可行性。

呂堃豪(2020)，使用解析解與有限元素法應用於結構梁並使用壓電感測器進行梁變位之結構健康監測分析技術。以 PZT 壓電陶瓷貼片作為應變感測器。在梁受力變形後量測輸出電壓，進而估計出應變及變位，達到結構變位健康監測之目的。

高橋敏隆(1948)，認為歐拉長柱屈曲理論所使用的二階微分方程： $EI d^2 y/dx^2 + Py = 0$ 並不適用於長柱在複雜邊界條件下的情況，因此根據重建微分方程，確定在每種情況下屈曲極限值的通用公式可通過設定的邊界條件，例如，彎曲剛度和軸頸以漸進的方式和手指狀的方式逐漸變化，證實了屈曲已通過研究的方法進行了處理，並且是一致的。

陳彥邦(2012)，探討方形薄殼柱受軸力作用之挫屈變形形態及挫屈應力，利用三維彈性穩定變分式推導彈性穩定三維有限元素分析模式，在其兩端固定邊界條件下之多組不同長度、方形邊長及厚度臨界荷重之變化，並歸納出完整挫屈變形形態及計算挫屈應力迴歸公式。文中所建立的有限元素分析結果經由與薄殼圓柱以及板挫屈理論比較後，可發現三者之挫屈應力為厚度與寬度(半徑)比之次方成比例，並由變形比對方形薄殼柱軸向波浪變形挫屈變形與板之挫屈變形較相近，因此其寬度厚度比之次方值也較為接近。

康總帆(2011)，由自由振動之模態可了解階數越高半波長越小；而純粹探討壓電片黏貼梁之影響，頻率一搬比未貼壓電片之梁來得高。而常數部分來說，可看出加入壓電片後之頻率會上升，卻不會隨著常數之提高而有變化，原因是從本構方程式可以觀察到介電長數為電廠與電位移一關係係數，基本上對應變及頻率影響不大。

黃方俞(2011)，本研究建立了一套含壓電貼片智能梁動力系統之兩種有限元素模式，利用線性控制原理將系統化為一階狀態方程式，並採用基於 SSLQR 原理之最佳主動控制方法，時間解域以 Runge-Kutta 求解系統在初始條件以及各種外力作用下之歷時反應。張琳楠、石志飛(2003)，採用逆解法求解了均佈荷載作用下壓電材料簡支梁的解析解。首先給出應力函數和電位移函數的多項式表達式進而根據相容方程以及應力、電位移、位移及電勢的邊界條件，同時考慮材料彈性參數、密度參數和壓電參數。簡支梁在均佈荷載作用下呈梯度變化時，解析解作為特例還得到了材料參數為常數時的解答，並對結果進行了討論。

Song, et al. (2006)，近年來，使用形狀記憶合金(SMA)材料，特別是鎳鈦諾，用於民用結構控制的研究工作越來越多。已經證明，以線和桿的形式的 SMA 可以用作錨固件，隔離器，支架，限制器和用於民用結構的連接元件。本文提出用實驗成功證明 IRCS 的自感知和自我修復能力。

Piotr KliNowicz, et al. (2016)，結構健康監測(SHM)是一種用於連續監測結構技術狀況的測量系統。通過監測和分析測量的物理量，可以用於結構管理和維護工作的優化，從而延長結構物生命週期並更有效地利用資金進行翻新。

二、問題描述

設有一跨度為 L ，寬為 b ，深度為 h 之矩形斷面彈性柱，剛度 EI 為常數，在某些位置之上或下表面配置壓電感知器(Piezoelectric sensors)，位置假設為 x_{Ci} (如圖 1 所示，以簡支為例)。

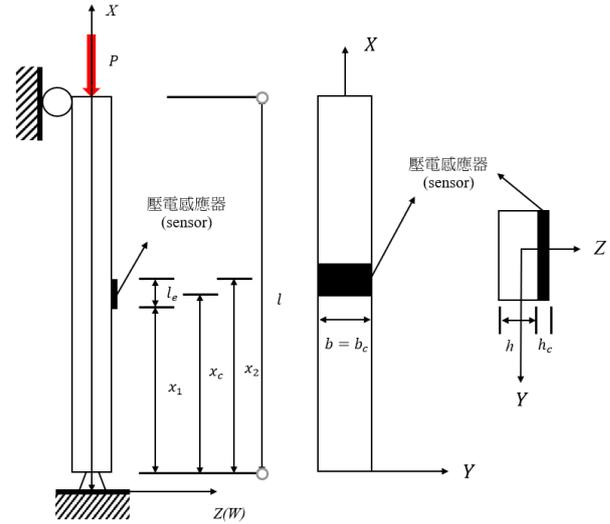


圖 1 含壓電感知器貼片之矩形斷面彈性柱

三、理論推導

3-1 基本假設

- (1) 柱為微小變形, Euler-Bernoulli 假設適用。
- (2) 材料符合 Hooke 定律。
- (3) 壓電片與梁為理想黏貼, 不發生脫層 (Debonding)。
- (4) 壓電間無電場交互作用 (Interference effect)。

3-2 數學模式推導

壓電材料之本構方程為

$$\begin{Bmatrix} \sigma_C \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_C & -e_{31} \\ e_{31} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_C \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

其中 σ_C 為壓電片應力 (N/m^2)， D_3 為壓電片電位移 (C/m^2)， E_C 為壓電片彈性模數 (N/m^2)， e_{31} 為壓電片壓電應力常數 (C/m^2)， ϵ_{33} 為壓電片介電常數 (C/m)， ϵ_C 為壓電片應變 (無單位)， E_3 為壓電片電場強度 (V/m)。

彈性簡支柱承受軸向壓力之變位統御方程為

$$EI \frac{d^2 W}{dx^2} + PW = 0 \quad 0 \leq x \leq L \quad (2)$$

邊界條件為

$$W(0) = W(L) = 0, \quad (3)$$

此為特徵值問題 (Eigen-value Problem)，其特徵值 $\lambda = \sqrt{P/EI}$ 與模態分別為

$$\lambda_n L = n\pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

$$W_n(x) = D \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right), \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

其中 D 為任意實數。由 (4) 式可知簡支柱之臨界挫屈負載為

$$(P_{cr})_n = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

從壓電片感測器導出之電位移轉為電壓為

$$\begin{aligned} (\phi_{OUT})_n &= \frac{-Q}{C_C} = \frac{-1}{C_C} \int_{A_c} D_3 dA \\ &= \frac{-1}{C_C} \int_{h/2}^{h/2+h_c} \int_{A_c} e_{31} \varepsilon_C dA dz \\ &= \frac{-1}{C_C} \int_{h/2}^{h/2+h_c} \int_{A_c} e_{31} \left(-z \frac{d^2 W_n}{dx^2} \right) dA dz \\ &= \frac{b_C e_{31} h_C}{C_C} \left(\frac{h+h_C}{2} \right) \int_1^2 \left[\frac{d^2 W_n}{dx^2} \right] dx \\ &= \frac{b_C e_{31} h_C (h+h_C)}{2C_C} \left[\frac{dW_n}{dx}(x_2) - \frac{dW_n}{dx}(x_1) \right] \\ &= K_C \left[\frac{dW_n}{dx}(x_2) - \frac{dW_n}{dx}(x_1) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

此處

$$K_C = \frac{b_C e_{31} h_C (h+h_C)}{2C_C}$$

從壓電片感測器導出之電位移轉為電壓為

$$(\phi_{OUT})_n = K_C \left(\frac{n\pi}{L} \right) D \left[\cos\left(\frac{n\pi x_2}{L}\right) - \cos\left(\frac{n\pi x_1}{L}\right) \right], \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

該處之應變，應力，彎矩可估得為

$$(\varepsilon_C)_n = \frac{-C_C (\phi_{OUT})_n}{e_{31} b_C (x_2 - x_1)}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

$$(\sigma_C)_n = E_C (\varepsilon_C)_n = \frac{-E_C C_C (\phi_{OUT})_n}{e_{31} b_C (x_2 - x_1)}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

$$(M)_n = \frac{(\sigma_C)_n}{S} = \frac{(\sigma_C)_n}{(bh^2/6)}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

求得量測出之彎矩後，可利用解析解彎矩與變位之關係推得於測之挫屈變位：

$$W_n(x) = \alpha_n(x) M_n(x) \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

此處

$$\alpha_n = \frac{W_n(x)}{M_n(x)} = \frac{-1}{EI \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (13)$$

工程實務上，若負載由零逐漸增加，則只有第一模態具有意義。量測得壓電片感測器電壓 $(\phi_{OUT})_1$ ，可反推得該點之應變 $(\varepsilon_{xx})_1(x_{Ci}, h/2)$ ，然後可得該點知正向應力 $(\sigma_{xx})_1(x_{Ci}, h/2)$ ，由材料力學原理可估算該斷面之彎矩值 $M_1(x_{Ci}, h/2) = (\sigma_{xx})_1 / (bh^2/6)$ ，然後利用可描繪出 9 點之變位曲線，如接近第一模態之挫屈曲線可之已發生挫屈，此時可提早發出預警。監控流程示意圖如圖 2。

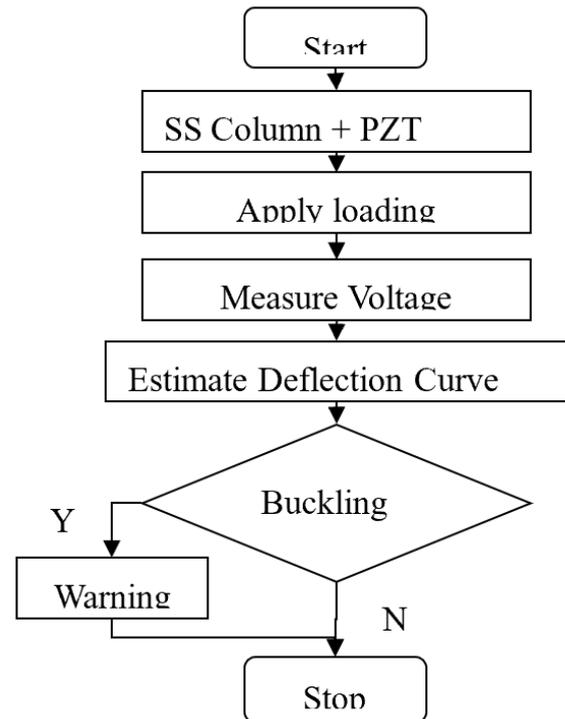


圖 2 含壓電感知器貼片之彈性柱挫屈變位\監控流程圖

其他三種支承柱挫屈支解析解如下[10]:

(a) C-F 柱:

$$\text{B.C: } W(0) = W'(0) = 0, W(L) = D \quad (14a)$$

$$\lambda_n L = \frac{(2n-1)\pi}{2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (14b)$$

$$W_n(x) = D[(1 - \cos(\lambda_n x))], \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (14c)$$

$$(P_{cr})_n = \frac{(2n-1)^2 \pi^2 EI}{(2L)^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (14d)$$

(b) C-S 柱:

$$\text{B.C: } W(0) = W'(0) = 0, W(L) = 0 \quad (15a)$$

$$\lambda_n L = 4.493, \quad 7.725, \quad 10.904 \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (15b)$$

$$W_n(x) = \frac{D}{\lambda_n L} [\sin(\lambda_n x) - \lambda_n L \cos(\lambda_n x) + \lambda_n (L - x)], \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (15c)$$

$$(P_{cr})_n = \frac{\lambda_n^2 EI}{(L)^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (15d)$$

(c) C-C 柱:

$$\text{B.C: } W(0) = W'(0) = 0, W(L) = W'(L) = 0 \quad (16a)$$

$$\lambda_n L = 2n\pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (16b)$$

$$W_n(x) = D(1 - \cos(\lambda_n x)), \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (16c)$$

$$(P_{cr})_n = \frac{\pi^2 EI}{(L/2n)^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (16d)$$

四、案例分析與結果討論

設有一高度為 L ，寬為 b ，深度為 h 之矩形斷面彈性柱(四種支承)，剛度 EI 為常數，在某些位置之上表面配置壓電感知器(Piezoelectric sensors)，位置假設為 x_c (如圖 3 所示為僅貼一片於中點上下表面之簡支柱情況)。考慮軸向負載 P 。為預測可能之挫屈，我們沿軸方向表面貼有 g 片壓電感知器。位置如下:

$$x_c = [0.05, 0.12, 0.2, 0.375, 0.5, 0.625, 0.8, 0.875, 0.95]$$

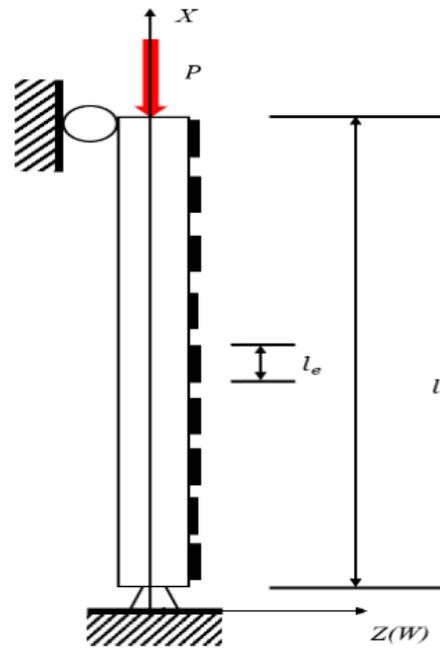


圖 3 含壓電感知器貼片承受軸壓負載之矩形斷面簡支柱

材料參數為

(1) 梁:

$$L = 1 \text{ m}$$

$$b = 0.03 \text{ m}$$

$$h = 0.003 \text{ m}$$

$$E = 70 \text{ GPa}$$

(2) 壓電陶瓷片(鋇鈦酸鉛 (Lead Zirconate Titanate, PZT):

$$L_C = 0.05 \text{ m}$$

$$b_C = 0.03 \text{ m}$$

$$h_C = 0.0003 \text{ m}$$

$$E_C = 61.8 \text{ GPa}$$

$$d = (h + h_C) / 2 \text{ m}$$

$$e_{31} = 5.6 \text{ C/m}^2$$

$$\epsilon_{33} = 11.51 \times 10^{-9} \text{ F/m}$$

$$C_C = 138 \times 10^{-9} \text{ F}$$

在理論模擬中，我們取 $D = 0.01 \text{ m}$ ，換言之我們允許挫屈時最大位移為 1 cm 。於是求得壓電片 PZT 量得之輸出電壓(ϕ_{OUT})，反推最大應變 ($\epsilon_{\max} \approx \epsilon_C$)，最大應力 ($\sigma_{\max} \approx \sigma_C$)，及各點彎矩 (M_T) 分別繪如圖 4、6、8、10。可看出壓電片之輸出電壓很小(最大約正負 50 V)，不至於發生損壞壓電片。

預測之前三模態與解析解曲線繪於圖 5、7、9、11。各模態變位曲線相當接近理論曲線，模態越低越準確。實務上只有第一模態具有意義，且模態之正負都可能發生。

此外，我們核算出四種支承條件下之臨界挫屈載重理論值如表 1。可作為實驗研究之參考。從第一模態結果觀察，C-C 柱與 C-F 柱之挫屈臨界負載為 S-S 柱之 4 倍與 1/4 倍，符合彼此有效長度之關係。

表 1 四種彈性柱前三挫屈模態之臨界負載 (理論解)

(Pcr)n, N	Mode 1	Mode 2	Mode 3
S-S Column	46.6339	186.5355	419.7049
C-F Column	11.6585	104.9262	291.4618
C-S Column	95.3838	281.9673	561.7893
C-C Column	186.5355	746.1421	1678.8197

(1) S-S 柱:

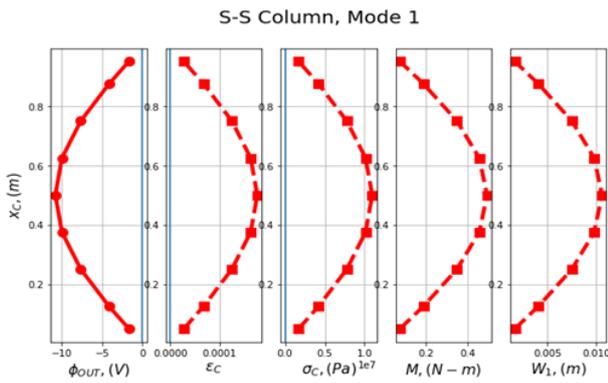


圖 4 由壓電片量測電壓反推估計所得之 S-S 柱各點應變應力彎矩與變位(第一模態)

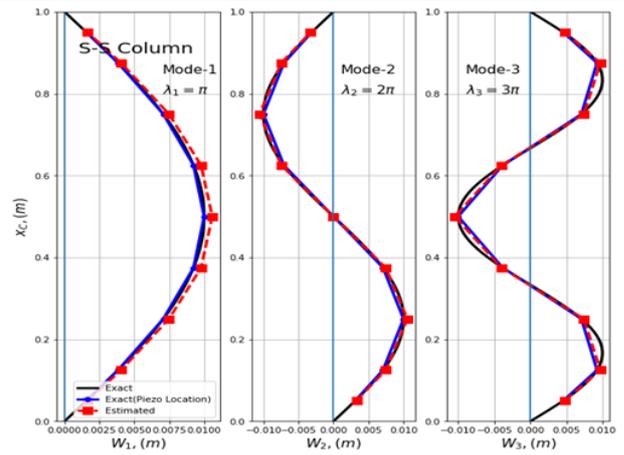


圖 5 由壓電片反推估計所得之 S-S 柱前三模態各點變位與解析解比較

(2) C-F 柱:

C-F Column, Mode 1

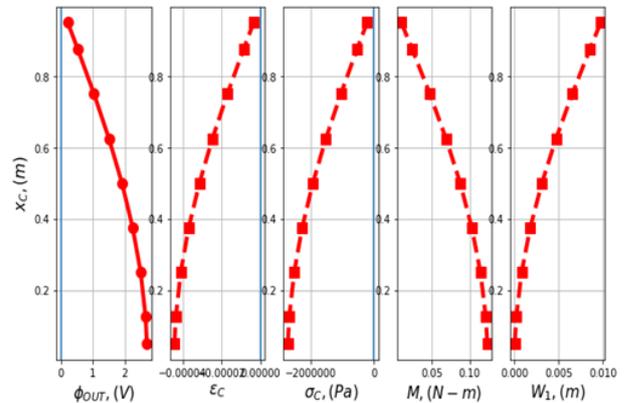


圖 6 由壓電片量測電壓反推估計所得之 C-F 柱各點應變應力彎矩與變位(第一模態)

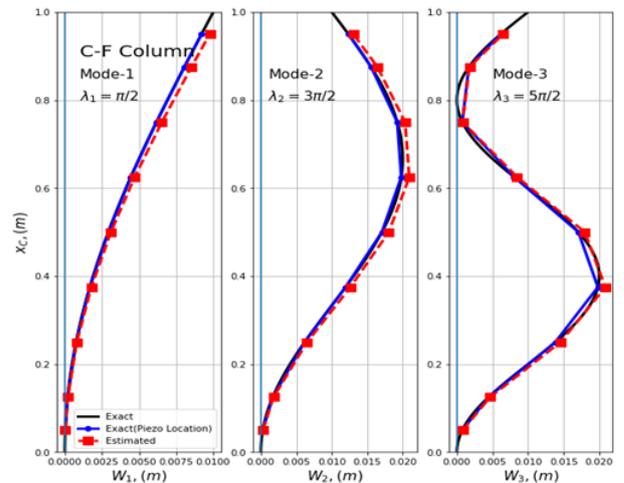


圖 7 由壓電片反推估計所得之 C-F 柱前三模態各點變位與解析解比較

(3) C-S 柱:

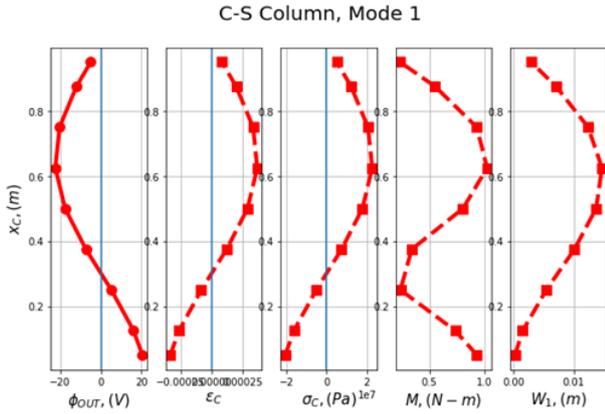


圖 8 由壓電片量測電壓反推估計所得之 C-S 柱各點應變應力彎矩與變位(第一模態)

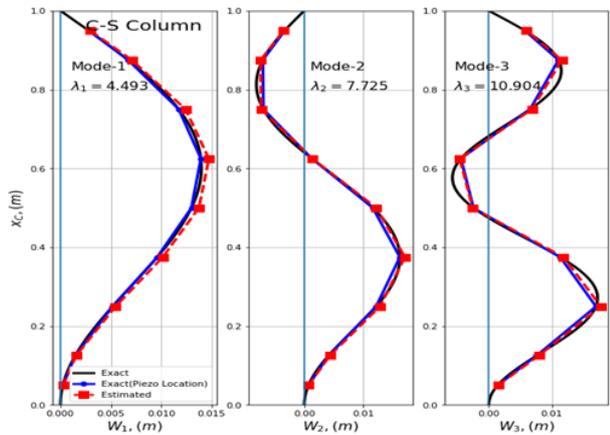


圖 9 由壓電片反推估計所得之 C-S 柱前三模態各點變位與解析解比較

(4) C-C 柱:

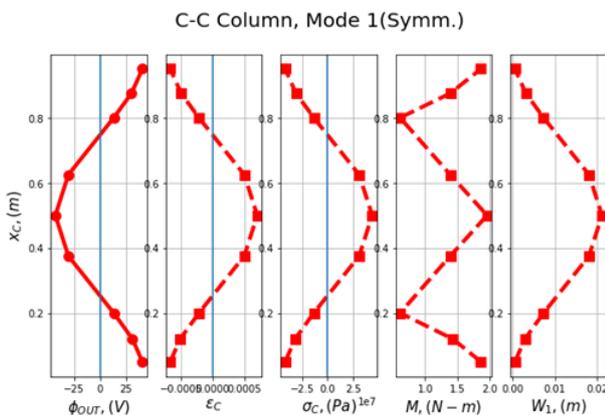


圖 10 由壓電片量測電壓反推估計所得之 C-C 柱各點應變應力彎矩與變位(第一模態)

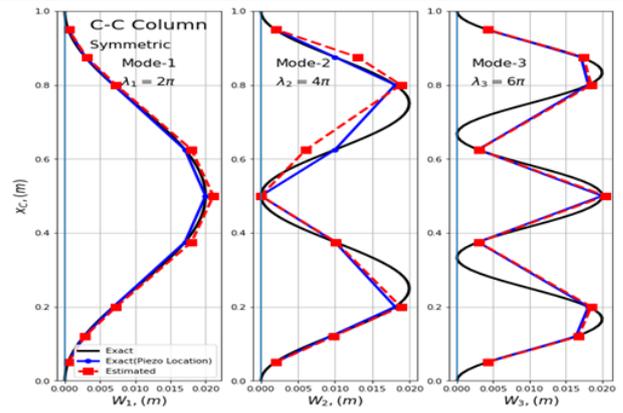


圖 11 由壓電片反推估計所得之 C-C 柱前三模態各點變位與解析解比較

五、結論與建議

本研究得到結論如下:

- (1) 以 PZT 壓電陶瓷作為彈性柱之應變感知器，推求柱挫屈之發生獲得理論上之驗證。
- (2) 各模態變位曲線接近理論曲線，模態越低越準確。
- (3) 壓電片之輸出電壓很小(50V 以內)，不至於發生損壞壓電片。
- (4) 以壓電片做為結構變位健康監測應屬可行。

未來研究建議如下:

- (1) 設法進行實驗驗證。
- (2) 延伸至裂縫監測。
- (3) 延伸至動態應力或共振監測。
- (4) 加配 PVDF 作為壓電制動器 (Actuators)，配合主動控制原理，進行結構健康控制。

參考文獻

1. 王社良，馬乾瑛，朱軍強，田鵬剛，「壓電主動桿件在結構抗震控制中的優化設計及實驗研究」，地震工程與工程震動，第三十卷，第二期，第 113~118 頁，2010。
2. 任建亭，閻云聚，姜節勝，「分布參數壓電層合梁的震動主動控制」，機械強度學報，第 22 卷，第 4 期，第 303~306 頁，2002。
3. 呂堃豪，「壓電智能梁結構健康監測變位之理論與數值分析」，國立高雄科技大學土木工程碩士論文，2020。

4. 呂堃豪，梁元馨，黃立政，「壓電智能梁健康監測之變位有限元素分析」，中華民國第 15 屆結構工程及第 5 屆地震工程研討會，台南市，2020 年 9 月 2-4 日。Paper No. 269，2020。
5. 高橋敏隆，「關於長柱挫屈理論的推廣」，日本力學論文，第十三卷，第四十五期。1948。
6. 陳彥邦，「軸壓作用下之方形薄殼柱挫屈應力有限元素法分析」，中興大學土木工程學系碩士論文。2012。
7. 康總帆，「含壓電致動器與感應器貼片智能梁之動力特性與控制模擬」，高雄科技大學土木與防災科技研究所論文，2011。
8. 黃方俞，「有限元素法應用於含壓電致動器與感應器貼片智能梁動力分析與控制模擬」，高雄科技大學土木與防災科技研究所論文，2011。
9. 黃立政，呂堃豪，蕭至桀，「應用壓電黃片於簡支梁變位健康檢測之初步探討」，2019 生態永續與土木災研討會。2019 年 6 月 14 日，2019。
10. 黃立政，材料力學，第 11 章，全華科技圖書公司，台北，2000。
11. 張琳楠，石志飛，「均部荷載作用下壓電材料簡支梁的解析解」，應用數學和力學，第十期。2003。
12. Piotr KliNowicz, K, MareN SalamaN, Grzegorz Poprawa，"Structural Health Monitoring of Urban Structures," 原子能工程，第 116 卷，第 958~962 頁。2016。
13. Song, G., Mo, Y-L, Otero, K. and Gu，H. "Health Monitoring and Rehabilitation of a Concrete Structure Using Intelligent Materials," Smart Material Structure. Vol. 15，pp. 309~314. 2006.

壓電智能彈性柱挫屈變位健康檢測之有限元素分析

梁元馨¹ 郭峻豪¹ 黃立政²

¹國立高雄科技大學土木研究所碩士生

²國立高雄科技大學土木系教授

摘要

本文探討使用有限元素法應用於結構彈性柱使用壓電貼片感測器進行柱挫屈檢知之結構健康監測分析技術。考慮以 PZT 壓電陶瓷貼片作為應變感測器。在柱受力變形後量測輸出電壓，進而估計出應變及挫屈模態變位，達到結構變位健康監測之目的。首先以 Python 開發一維有限元素法程式，分別建立彈性柱與含壓電片柱元素(EB₄, EBP₆)，建立各系統矩陣及特徵值問題，並完成有顯元素法壓電片柱挫屈之監測模擬程序。案例分析考慮四種不同支承條件(S-S, C-F, C-S, C-C)。有限元素建模方面，使用 40 個元素。數值案例分析結果顯示：結果顯示：(1)一維有限元素法所得到之壓電智能柱模態變位圖、輸出電壓圖、應變圖、應力圖以及彎矩圖，其預測無壓電片柱之挫屈模態趨勢皆非常符合。(2)要使用含壓電貼片柱預測彈性柱之挫屈，壓電片之楊氏模數不可太高。(3)以 PZT 壓電陶瓷作為柱之應變感測器，推求柱之挫屈變位獲得數值模擬分析上之驗證可行。

關鍵字：結構健康檢測、壓電材料、彈性柱、有限元素分析

Finite Element Analysis of Buckling Deflection of Piezo-electric Smart Columns for Structural Health Monitoring

Yuan-Shin Liang¹ Jun-Hao Kuo¹ Li-Jeng Huang²

¹Master Student, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

²Corresponding Author, Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

In this paper, we analyzed a structural health monitoring (SHM) technique using PZT piezo-electric attachments on elastic columns to detect their buckling modes. Finite element formulations and analysis procedures are first developed for elastic column without and with piezoelectric attachments (EB₄ and EBP₆). Case studies including different support conditions, such as S-S, C-F, C-S, and C-C, using 9 PZT piezoelectric attachments are conducted. Result show that columns embedded with PZT piezoelectric attachments can depict voltage outputs, maximal strains, maximal stresses, moments and lateral deflections at desired points of attachments and then estimated buckling modes can be predicted. The estimated buckling modes from piezoelectric columns are close to those without piezoelectric attachments. Results also show that the Young's modulus of piezo-electric attachments cannot be too high, output voltages of piezoelectric sensor are very small and safe, and application of piezoelectric attachments to SHM is feasible.

Keywords: Structure health monitoring, piezoelectric materials, elastic columns, finite element analysis

一、前言

壓電材料於發生機械變形時擁有產生電勢的能力，稱為正壓電效應，壓電材料可以製成感應器；壓電材料應用才漸漸擴展到土木工程的領域，也是近年來許多學者研究之熱門課題(Song, et al. 2006; Piotr KliNowicz, et al., 2016)。應用壓電片於結構靜態負載造成之變位監測與動態負載已有不少文獻予以探討(何小龍, 2013; 吳進寶, 2012)。在房屋結構系統中，梁主要負擔來自平板傳遞之橫向載重，以壓電貼片用於預測梁變位之理論與數值模擬也已有人嘗試過(婁利飛等, 2005; 黃方俞, 2011; 呂堃豪, 2020; 呂堃豪等, 2020)。

柱在房屋結構中擔負著垂直負載傳遞的主要作用，而且它的破壞通常瞬間帶來整體結構之傾斜坍塌，缺乏如梁破壞時緩慢變形的預警時間。因此在鋼筋混凝土分析與設計規範中，對於受壓構件之折減係數為 0.7，遠低於拉力構件之 0.9。雖然實務上，一般柱設計會考慮軸力與彎矩聯合作用，但對於細長柱產生之挫屈仍須檢核，以確保安全。

本研究團隊曾探討應用壓電貼片於不同支承條件下彈性梁承受均佈與集中力橫向變位監測，結果相當理想(黃立政等, 2019)。此外對於融合壓電技術與健康監測進行彈性柱於四種不同支承: 鉸滾(S-S)，懸臂(C-F)，固滾(C-S)，固固(C-C)條件下之挫屈模態變位監測之理論探討也獲得良好之結果(黃立政等, 2021)。

有限元素法被應用於結構分析(含挫屈)已有許多文獻。陳彥邦(2012)，探討方形薄殼柱受軸力作用之挫屈變形形態及挫屈應力，利用三維彈性穩定變分式推導彈性穩定三維有限元素分析模式，在其兩端固定邊界條件下之多組不同長度、方形邊長及厚度臨界荷重之變化，並歸納出完整挫屈變形形態及計算挫屈應力迴歸公式。婁利飛等(2005)，在壓電原理和材料力學理論的基礎上，使用簡化的等效微器件結構建立了數學分析模型，並採用微懸臂梁結構研究 PZT 壓電感測器，將有限元方法應用於壓電材料的結構分析中，並運用有限元軟體 ANSYS 對 PZT 壓電薄膜微

懸臂梁結構的傳感性能和線性度進行了模擬，同時分析了微懸臂梁結構的幾何參數對輸出電壓的影響，這些分析結果和解析預測是一致的。

本研究接續之前壓電片應用於量測柱挫屈變位監測解析解(黃立政等, 2021) 至數值解法。首先以 Python 開發一維有限元素法程式，分別建立線性兩節點及矩形平面元素。案例分析考慮 S-S, C-F, C-S, C-C 四種不同支承柱。

二、問題描述

設有一跨度為 L ，寬為 b ，深度為 h 之矩形斷面彈性柱，剛度 EI 為常數，在某些位置之上或下表面配置壓電感知器(Piezoelectric sensors)，位置假設為 x_{Ci} (如圖 1 所示，以簡支為例)。我們將以一維有限元素進行柱挫屈預警之結構健康監測應用數值模擬。

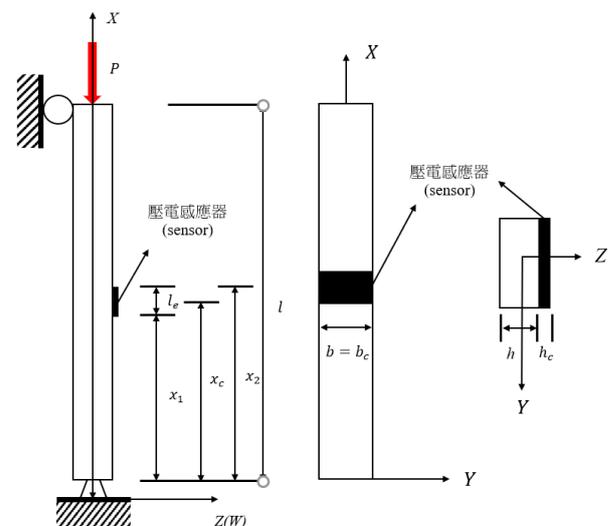


圖 1 含壓電感知器貼片之矩形斷面彈性柱

三、理論推導

3-1 基本假設

- (1) 柱為微小變形，Euler-Bernoulli 假設適用。
- (2) 材料符合 Hooke 定律。
- (3) 壓電片與柱為理想黏貼，不發生脫層(Debonding)。
- (4) 壓電片間無電場交互作用(Interference effect)。

3-2 一維 Euler-Bernoulli 壓電柱之分析有限元素建模

(1) 變分原理

假設整個解域已細分成 NE 個元素，系統之位能與功可視為個別元素位能與功之總合。根據最小勢能原理(Principle of Minimal Potential Energy)，個別元素之變分式可寫為：

$$\sum_{e=1}^{NE} \delta \int_{V^e} (U^e - W^e) dV^e = 0 \quad (1)$$

其中 U^e 是勢能(Potential Energy)， W^e 是功(Energy)， δ 代表變分(Variation)。對 Euler-Bernoulli 柱而言，含壓電貼片智能柱系統的能量由系統勢能和虛功兩部分組成，在此勢能為：

$$\begin{aligned} U^e &= \int_{V^e} \left[\frac{1}{2} \{\sigma^e\}^T \{\varepsilon^e\} - \frac{1}{2} \{D^e\} \{E^e\} \right] dV^e \\ &= \int_{V^e} \left[\frac{1}{2} \{\varepsilon^e\}^T [E_c]^e \{\varepsilon^e\} - \{\varepsilon^e\}^T [e]^T \{E^e\} \right. \\ &\quad \left. - \{E^e\}^T [e] \{\varepsilon\} - \frac{1}{2} \{E^e\}^T [\epsilon] \{E^e\} \right] dV^e \end{aligned} \quad (2)$$

含壓電貼片智能柱系統外力所作的虛功 δW 表示為：

$$\delta W^e = P \int_{V^e} \{\delta w_{,x}\}^T \{w_{,x}\} dV^e - \int_{A^e} \{\delta \psi^e\}^T \{q^e\} dA^e \quad (3)$$

(2) 壓電材料本構方程式

壓電材料簡化後之本構方程式為：

$$\begin{Bmatrix} \sigma_C \\ D_3 \end{Bmatrix}^e = \begin{bmatrix} E_C & -e_{31} \\ e_{31} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_C \\ E_3 \end{Bmatrix}^e \quad (4)$$

其中 σ_C 為壓電片應力(N/m²)， D_3 為壓電片電位移(C/m²)， E_C 為壓電片彈性模數(N/m²)， e_{31} 為壓電片壓電應力常數(C/m²)， ϵ_{33} 為壓電片介電常數(C/m)， ε_C 為壓電片應變(無單位)， E_3 為壓電片電場強度(V/m)。

將本構方程式(4)、勢能(2)及虛功(3)代入最小勢能原理式(1)經過整理化簡可得變分式：

$$\begin{aligned} \delta U^e - \delta W^e &= \int_{V^e} \{\delta \varepsilon^e\}^T [E_c]^e \{\varepsilon^e\} - [e]^T \{E^e\} \\ &\quad - \{\delta E^e\}^T [e] \{\varepsilon\} + [\epsilon] \{E^e\} dV^e \\ &\quad - P \int_{V^e} \{\delta w_{,x}\}^T \{w_{,x}\} dV^e + \int_{A^e} \{\delta \psi^e\}^T \{q^e\} dA^e = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

(3) 形狀函數選擇

由於所分析之柱單元本身屬於薄柱，因此基於 Euler-Bernoulli 變形假設，柱之垂直變位其形狀函數(Shape Functions)採用傳統之二節點柱元素，節點自由度為 $\{w, \theta (= \partial w / \partial x)\}$ ，即每個單元有兩個節點，每個節點上有兩個自由度(EB4)(Weaver and Johnston, 1984):

$$w^e(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 = [N_w(x)] \{q^e\} \quad (6)$$

其中 $[N_w(x)]$ 為柱的形狀函數， $\{q^e\}$ 為元素廣義位移向量：

$$[N_w(x)]^T = \frac{1}{L_e^3} \begin{bmatrix} 2x^3 - 3x^2 L_e + L_e^3 \\ x^3 L_e - 2x^2 L_e^2 + x L_e^3 \\ -2x^3 + 3x^2 L_e \\ x^3 L_e - x^2 L_e^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

依 Euler-Bernoulli 假設，軸向位移和應變分別為

$$u^e(x, z) = -z \frac{\partial w^e}{\partial x} \quad (8)$$

$$\varepsilon^e(x) = \frac{\partial u^e}{\partial x} = -z \frac{\partial^2 w^e}{\partial x^2} = -z [B_w(x)] \{q^e\} \quad (9)$$

其中應變位移轉換矩陣(Strain-Displacement Transformation Matrix)為

$$[B_w(x)]^T = -\frac{z}{L_e^3} \begin{bmatrix} 12x - 6L_e \\ L_e(6x - 4L_e) \\ -12x + 6L_e \\ L_e(6x - 2L_e) \end{bmatrix} \quad (10)$$

考慮壓電貼片中電場之變化較大之可能性，本研究引用電場強度 $E_3(x, z) = -\frac{\partial\phi(x, z)}{\partial z} = -\frac{\partial\psi(x, z)}{\partial z}$ ，直接以電壓 $\psi(x, z)$ 作為因變數，此時之電壓在空間變化上為 x, z 之函數，其中電壓分佈每個單元都有兩個節點，每個節點上有兩個自由度。Euler-Bernoulli Piezoelectric DOF6(EBP-6)的壓電場部份採用線性函數，其元素內之節點編號如圖 3 所示，其中每個單元都有一個節點，每個節點上有一個自由度，亦即電場強度

$$E_3(x, z, t) = -\frac{\partial\phi(x, z, t)}{\partial z} = -\frac{\psi(x, t)}{h_c} \quad (11)$$

$$\psi^e(x, t) = a_4 + a_5 x = [N_\psi(x)]\{\psi^e(t)\} \quad (12)$$

壓電片形狀函數：

$$[N_\psi(x)] = \frac{1}{h_c L_e} [L_e - x \quad x] \quad (13)$$

(4) 元素矩陣

將式(5)(8)(10)代入式(4)，經簡化後可得靜力方程如下：

$$\begin{bmatrix} [K_{ww}^e] & [K_{w\psi}^e] \\ [K_{\psi w}^e] & [K_{\psi\psi}^e] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{q^e\} \\ \{\psi^e\} \end{Bmatrix} = [F_I^e] \quad (14)$$

其中各元素矩陣定義如下：

$$\begin{aligned} [K_{ww}^e] &= \int_V z^2 C_{11} [B_w(x)]^T [B_w(x)] dV \\ &= \frac{EI}{L_e^6} \int_0^{L_e} [B_w(x)]^T [B_w(x)] dx \\ &= \frac{EI}{L_e^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L_e & -12 & 6L_e \\ & 4L_e^2 & -6L_e & 2L_e^2 \\ & & 12 & -6L_e \\ \text{symm.} & & & 4L_e^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15a)$$

$$\begin{aligned} [K_{w\psi}^e] &= \int_V \frac{ze_{31}}{h_c} [B_w(x)]^T [N_\psi(x)] dV \\ &= -\frac{(h_b + h_c)e_{31}A_c}{2h_c L_e^4} \int_0^{L_e} [B_w(x)]^T [N_\psi(x)] dx \\ &= \frac{-e_{31}A_c(h + h_c)}{2h_c L_e} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -L_e & 0 \\ 1 & -1 \\ 0 & L_e \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15b)$$

$$[K_{\psi w}^e] = [K_{w\psi}^e]^T \quad (15c)$$

$$\begin{aligned} [K_{\psi\psi}^e] &= \int_V \frac{\epsilon_{33}}{h_c^2} [N_\psi(x)]^T [N_\psi(x)] dV \\ &= -\frac{\epsilon_{33}A_c}{L_e^2 h_c^2} \int_0^{L_e} [B_\psi(x)]^T [B_\psi(x)] dx \\ &= -\frac{L_e \epsilon_{33} A_c}{6h_c^2} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15d)$$

$$[K_G^e] = \frac{1}{30L_e} \begin{bmatrix} 36 & 3L_e & -36 & 3L_e \\ & 4L_e^2 & -3L_e & -L_e^2 \\ & & 36 & -3L_e \\ \text{symm.} & & & 4L_e^2 \end{bmatrix} \quad (15e)$$

其中

$$EI = \begin{cases} E_b I_b & \text{for column without piezo} \\ E_b I_b + E_c I_c & \text{for column with piezo} \end{cases} \quad (16)$$

(5) 系統矩陣

經過合成(Assemblage)程序，可得系統方程式為

$$\begin{bmatrix} [K_{ww}] & [K_{w\psi}] \\ [K_{\psi w}] & [K_{\psi\psi}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{q\} \\ \{\psi\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} P[K_G] \\ [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{q\} \\ \{\psi\} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

消掉後，整理可得

$$[K_{ww}^*] \{q\} = P[K_G] \{q\} \quad (18)$$

其中

$$[K_{ww}^*] = K_{ww} - [K_{w\psi}] [K_{\psi\psi}]^{-1} [K_{\psi w}] \quad (19)$$

(6) 代入邊界條件

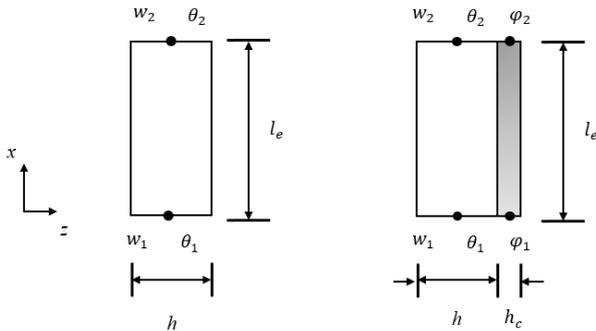
本研究採用乘大數法 (Big Number Multiplication) 處理固定不動之變位或旋角，相當於在該自由度給予一個無窮大之彈簧。經此處理後之系統方程(20)兩邊再除以助之剛度變成

$$\frac{1}{E_b I_b} [\tilde{K}_{ww}^*] \{q\} = \kappa [K_G] \{q\} \quad (20)$$

其中

$$\kappa = \lambda^2 = \frac{P}{E_b I_b} \quad (21)$$

(20) 式構成廣義特徵值問題 (Generalized Eigen-Value Problem)，撰寫 Python 程式，並利用數學套件 `numpy.linalg.eigen()` 函數，可以求出特徵值 (EigenValues) 及特徵向量 (Eigen Vectors)。經過排序，可以取得對應由小到大之前三個挫屈模態。



(a) 無壓電片元素(EB4) (b) 有壓電片元素(EBP6)

圖 2 有限元素節點自由度定義

3-3 Euler-Bernoulli 柱之變位監測之有限元素模擬

利用前節之有限元素法，可以得到含壓電片之柱挫屈模態之變位。得到變位後，利用差分法求得旋轉角。由差分法推得各點之旋轉角，左邊第一節點使用前向差分 (Forward Finite Difference; FFD)，右邊最後一節點使用後向差分 (Backward Finite Difference, BFD)，其餘使用中央差分 (Central Finite Difference, CFD)。

將其代入下式，下式為感測器導出之電位移轉為電壓之大小：

$$\begin{aligned} \phi_{out} &= \frac{-Q}{C_c} = \frac{-1}{C_c} \int_{A_c} D_3 dA \\ &= \frac{-1}{C_c} \left[\int_{A_c} e_{31} \varepsilon_c dA \right] \\ &= \frac{-1}{C_c} \left[\int_{A_c} e_{31} \left(-z \frac{d^2 w}{dx^2} \right)_{z=\frac{h}{2}+h_c} (b_c dx) \right] \\ &= \frac{b_c e_{31}}{C_c} \left(\frac{h}{2} + h_c \right) \int_{x_1}^{x_2} \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right) dx \\ &= \frac{b_c e_{31} (h + 2h_c)}{2C_c} \left[\frac{dw}{dx} (x_2) - \frac{dw}{dx} (x_1) \right] \\ &= K_c \left[\frac{dw}{dx} (x_2) - \frac{dw}{dx} (x_1) \right] \end{aligned} \quad (22)$$

由此可得 ϕ_{out} 、 ε_c 、 σ_c 及 M 之估計值，計算如下：

$$\varepsilon_c = \frac{-C_c \phi_{out}}{e_{31} b_c (x_2 - x_1)} = \frac{-C_c \phi_{out}}{e_{31} b_c L_c} \quad (23)$$

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c = \frac{-E_c C_c \phi_{out}}{e_{31} b_c L_c} \quad (24)$$

$$M = \frac{\sigma_c}{s} = \frac{\sigma_c}{(bh^2/6)} \quad (25)$$

由此能求得柱之變位與彎矩比例係數 α ：

$$\alpha_{ex} = \frac{w(x_c)}{M(x_c)} \quad (26)$$

$$\alpha_{FEM} = \frac{w_{FEM}}{M(x_c)} \quad (27)$$

得到比例係數 α 後便能求出估計之柱變位 Δ_{ex} 及 Δ_{FEM} ，並以此與利用有限元素法所得到之 w_{FEM} 相互比較。

另外有限元素法亦可推求彎矩之近似值：

$$M_i = EI \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)_i = EI \frac{d}{dx} \left(\frac{dw}{dx} \right)_i \quad i = 0, 1, 2, \dots, NN-1 \quad (28)$$

即將所得之旋轉角再進行一次差分再乘

以 EI 可得中性軸斷面之近似彎矩值，或由節點變位直接進行二階差分。由此反推各節點應力，應變，及壓電片輸出值。

工程實務上，若負載由零逐漸增加，則只有第一模態具有意義。利用可描繪出 9 點之變位曲線，如接近第一模態之挫屈曲線可之已發生挫屈，此時可提早發出預警。監控流程示意圖參見文獻 []，圖 2。

四、案例分析與結果討論

設有一高度為 L ，寬為 b ，深度為 h 之矩形斷面彈性柱(四種支承)，剛度 EI 為常數，在某些位置之上表面配置壓電感知器(Piezoelectric sensors)，位置假設為 x_c (如圖 3 所示為僅貼一片於中點上下表面之簡支柱情況)。考慮軸向負載 P 。為預測可能之挫屈，我們沿軸方向表面貼有 9 片壓電感知器。位置如下：

$x_c = [0.05, 0.12, 0.2, 0.375, 0.5, 0.625, 0.8, 0.875, 0.95]$

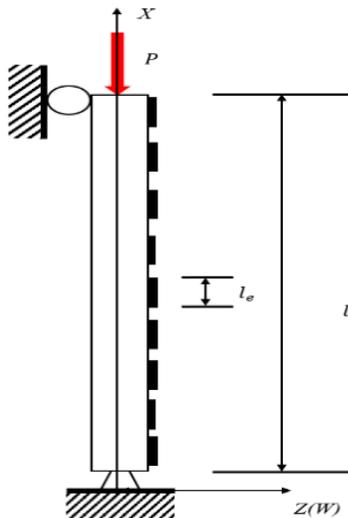


圖 3 含壓電感知器貼片承受軸壓負載之矩形斷面簡支柱

材料參數為

(1) 柱:

$$\begin{aligned} L &= 1 \text{ m} \\ b &= 0.03 \text{ m} \\ h &= 0.003 \text{ m} \\ E &= 70 \text{ GPa} \end{aligned}$$

(2) 壓電陶瓷片(鋇鈦酸鉛 (Lead Zirconate

Titanate, PZT):

$$\begin{aligned} L_C &= 0.05 \text{ m} \\ b_C &= 0.03 \text{ m} \\ h_C &= 0.0003 \text{ m} \\ E_C &= 0.618 \text{ GPa} \\ d &= (h + h_C) / 2 \text{ m} \\ e_{31} &= 5.6 \text{ C/m}^2 \\ \epsilon_{33} &= 11.51 \times 10^{-9} \text{ F/m} \\ C_C &= 138 \times 10^{-9} \text{ F} \end{aligned}$$

4-1 收斂性分析

為證實本研究開發之 1D FEM 程式求解挫屈特徵值(Eigen-values) 與特徵模態隨元素增加之收斂性。本研究針對 EB4 元素，分別選取 5、10、20、40 個元素，求解 S-S 無壓電貼片之柱，第一個特徵值之收斂結果示於圖 4。前三特徵模態收斂結果示於圖 5。可明顯發現無論是特徵值及特徵模態都隨元素數目增加而收斂至解析解，選取 $NE = 40$ 時已接近解析解。

值得注意的是，在 Python `numpy.linalg.eig()` 中求出之特徵值 `Diag` 與特徵向量 `VV` 是由大而小，所以需要重新排序改成由小而大，語法如下：

```
GK1 = GK1/EbIb
Diag, VV = np.linalg.eig(np.linalg.inv(GK1)@GKG1)
#---sorting
TopN = 9999999
eigva_ind = np.argsort(Diag)
Diag_sorted = Diag[eigva_ind]
VV_sorted = VV[:, eigva_ind]
```

Convergence of 1D FEM 1st eigen-values of S-S column

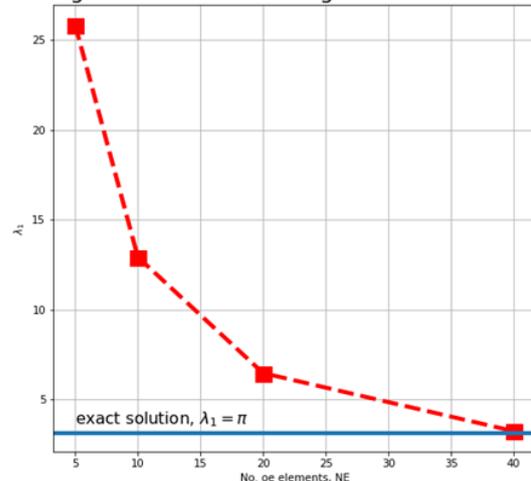


圖 4 S-S 柱 1D FEM 第一特徵值收斂分析結果

Convergence Study of 1D FEM buckling modes of columns (SS)

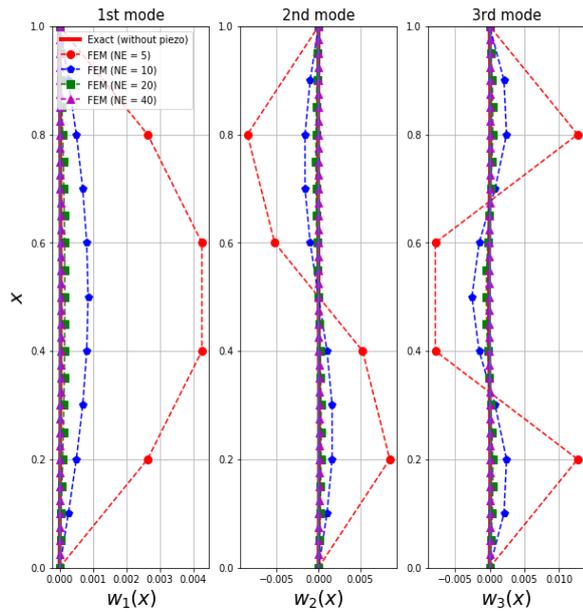


圖 5 S-S 柱 1D FEM 前三特徵模態收斂分析結果

4-2 不同邊界條件使用壓電片之柱挫屈模擬分析

在有限元素模擬中，我們對彈性柱取 40 個元素，82 個自由度，另外 9 壓電片有 18 個元素(參見圖 6)。設定邊界條件後，求解特徵值問題 (20)，獲得前三模態。於是可以求得壓電片 PZT 量得之輸出電壓(ϕ_{OUT})，反推最大應變 ($\epsilon_{max} \approx \epsilon_C$)，最大應力 ($\sigma_{max} \approx \sigma_C$)，及各點彎矩 (M_T) 分別繪如圖 7、9、11、13。可看出壓電片之輸出電壓很小(約 mV)，不至於發生損壞壓電片。預測之前三模態與解析解曲線繪於圖 8、10、12、14。各模態變位曲線相當接近理論曲線，模態越低越準確。實務上只有第一模態具有意義，且模態之正負都可能發生。

1D FEM Mesh of beams without and with piezo(SS)

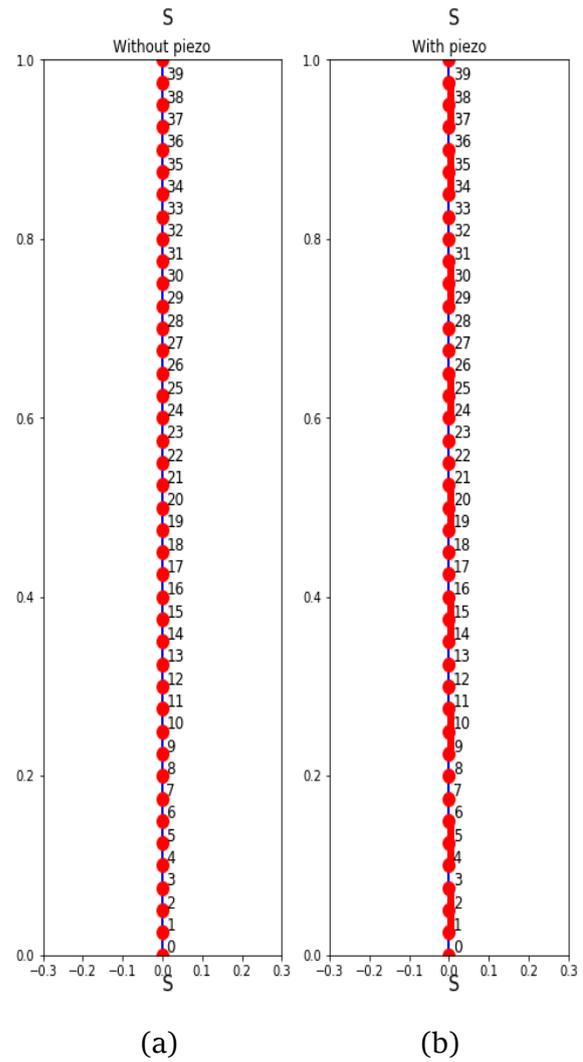


圖 6 一維有限元素網格 (a) 無壓電片柱 (b) 有壓電片柱

(1) S-S 柱:

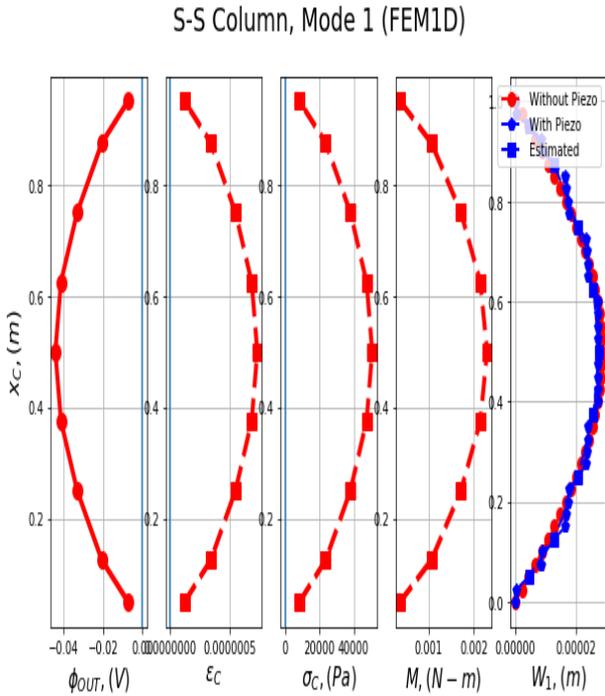


圖 7 由壓電片量測電壓反推估計所得之 S-S 柱各點應變應力彎矩與變位(第一模態) (FEM1D)

1D FEM solutions of buckling modes of columns (SS)

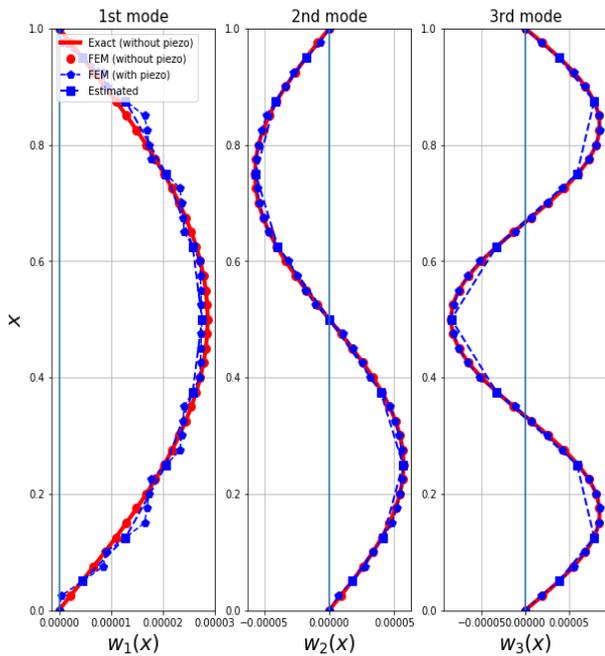


圖 8 由壓電片反推估計所得之 S-S 柱前三模態各點變位與解析解比較(FEM1D)

(2) C-F 柱::

C-F 柱第一模態之含壓電片柱挫屈曲線由於壓電片之存在造成鋸齒狀。然而其預測之挫屈模態仍然合理。

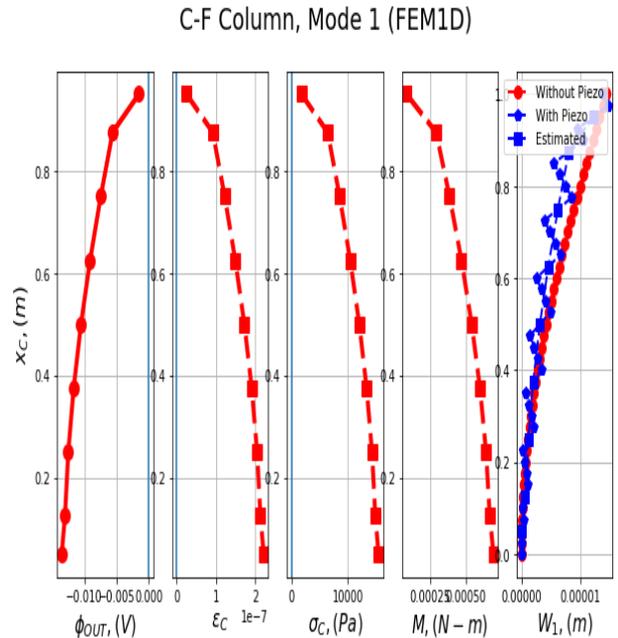


圖 9 由壓電片量測電壓反推估計所得之 C-F 柱各點應變應力彎矩與變位(第一模態) (FEM1D)

1D FEM solutions of buckling modes of columns (CF)

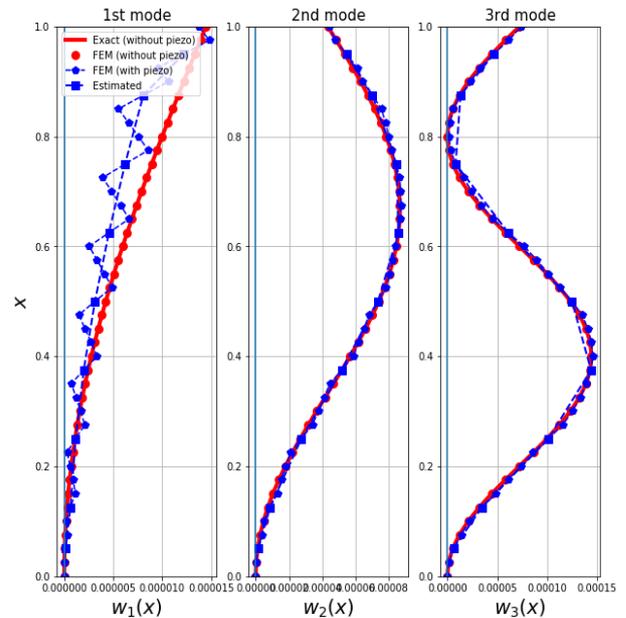


圖 10 由壓電片反推估計所得之 C-F 柱前三模態各點變位與解析解比較(FEM1D)

(3) C-S 柱:

C-S 柱之結果非常符合。

C-S Column, Mode 1 (FEM1D)

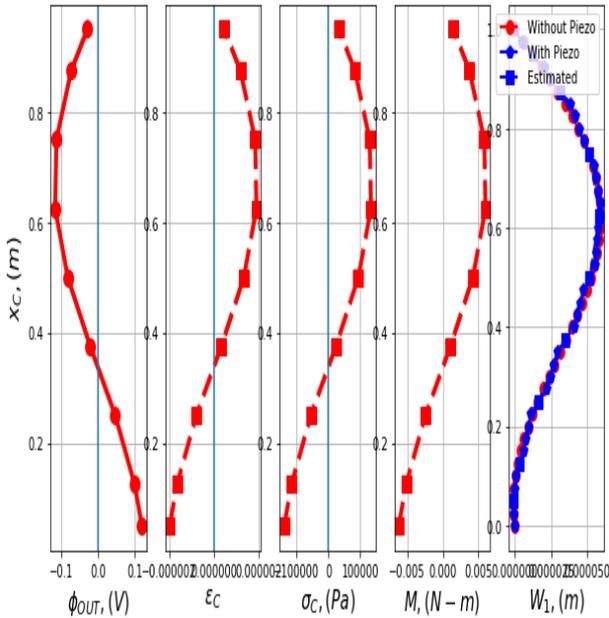


圖 11 由壓電片量測電壓反推估計所得之 C-S 柱各點應變應力彎矩與變位(第一模態) (FEM1D)

1D FEM solutions of buckling modes of columns (CS)

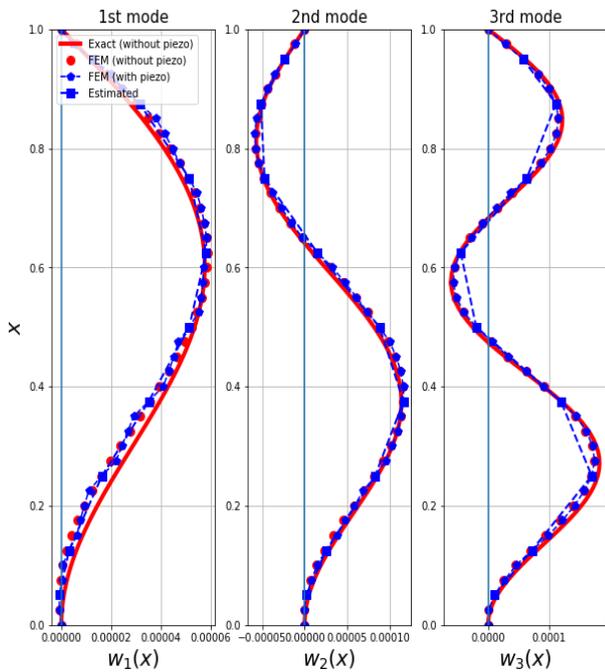


圖 12 由壓電片反推估計所得之 C-S 柱前三模態各點變位與解析解比較(FEM1D)

(4) C-C 柱:

值得注意的是，在 FEMD 中可以同時獲得 C-C 柱對稱與反對稱模態，如圖 11 是取模態 5, 7, 9 對應於對稱前參模態。

C-C Column, Mode 1 (FEM1D)

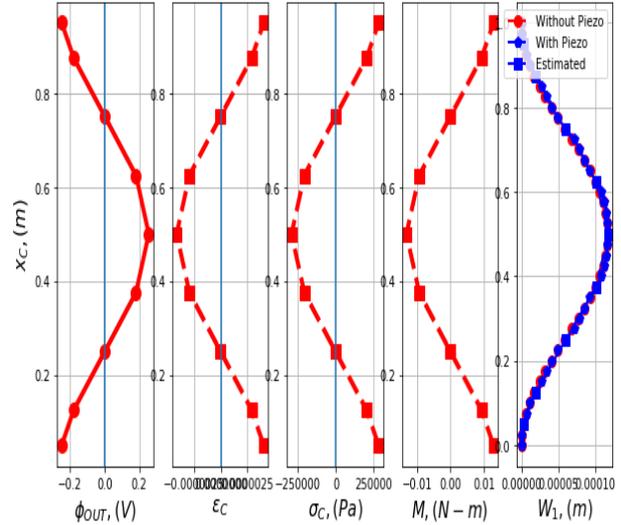


圖 13 由壓電片量測電壓反推估計所得之 C-C 柱各點應變應力彎矩與變位(第一模態) (FEM1D)

1D FEM solutions of buckling modes of columns (CC)

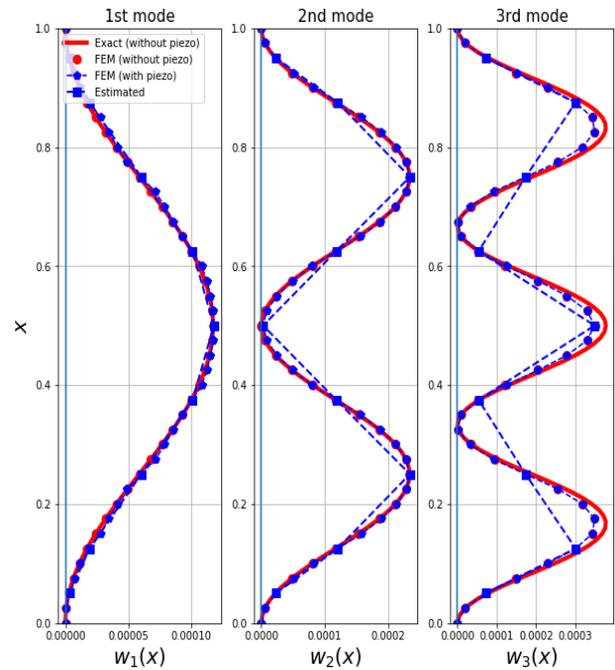


圖 14 由壓電片反推估計所得之 C-C 柱前三模態各點變位與解析解比較 (FEM1D)

4-3 參數探討

(a) 不同 Young 氏模數比

為了解含壓電片柱中壓電片 Young 氏模數與梁自身之 Young 氏模數比值對前三模態之影響，我們選取參數 $E_c/E_b = 0.01$ 、 0.1 、 1 三組，分析結果如圖 15。結果發現比值如果太接近，會因為壓電片存在影響模態。

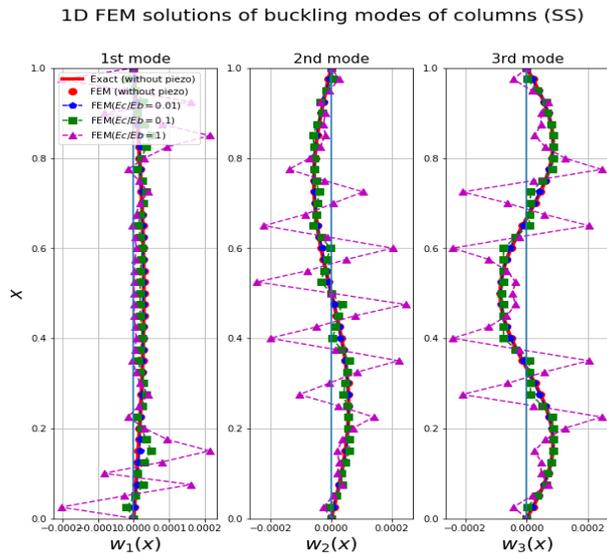


圖 15 S-S 柱 Young 氏模數比 (E_c/E_b) 對含壓電片前三個模態之影響

(b) 不同剛度比

為了解含壓電片柱中壓電片剛度與梁自身之剛度比值對前三模態之影響，我們選取參數 $E_c I_c / E_b I_b = 0.01$ 、 0.1 、 1 三組，分析結果如圖 16。結果發現比值如果太接近，會因為壓電片存在影響模態。

1D FEM solutions of buckling modes of columns (SS)

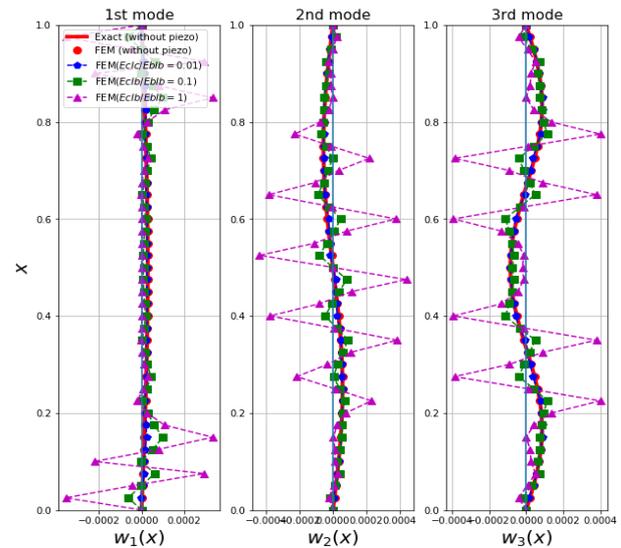


圖 16 S-S 柱 剛度比 ($E_c I_c / E_b I_b$) 對含壓電片前三個模態之影響

五、結論與建議

本研究得到結論如下：

- (1) 以含壓電片一維有限元素法(採用 EBP6 元素)，總共切了 40 個柱元素、18 個壓電片元素，得到之數值近似模態結果，反推壓電片位置之彎矩、表面應力、表面應變、電壓輸出值，並推估無壓電片柱之模態曲線，與使用 EB4 元素之結果非常符合。
- (2) 一維有限元素(EB4) 求得之前三態非常接近解析解。且證實數值解法符合收斂分析要求。
- (3) 由分析可知，欲使用壓電片進行挫屈監測，壓電片之楊氏模數及剛度不可太高。以免造成斷面剛度變化劇烈，影響預測正確性。
- (4) 有限元速分析模擬中，壓電片之輸出電壓很小，不至於發生損壞壓電片。

未來研究建議如下：

- (1) 採用別種的壓電材料(如 PVDF、BaTiO... 等) 做為感應器。
- (2) 使用二維平面應力有限元素進行分析模擬。
- (3) 嘗試其他三維軟體如 Abaqus、FreeCAD 等進行數值模擬分析。

- (4) 嘗試更複雜的結構如桁架(Trusses)、殼(Shells)、樓板(Floors)...等，進行變位監測模擬。
- (5) 延伸至動態應力或共振監測。
10. 黃立政，材料力學，第 11 章，全華科技圖書公司，台北，2000。
11. Piotr KliNowicz, K, MareN SalamaN, Grzegorz Poprawa, "Structural Health Monitoring of Urban Structures", 原子能工程，第 116 卷，第 958~962 頁。2016。

參考文獻

1. 何小龍，「應用基於解析嘗試函數 Mindlin-Reissner 板元素含壓電貼片智能板之最佳振動控制模擬」，國立高雄應用科技大學土木工程碩士論文，2013。
2. 呂堃豪，「壓電智能梁結構健康監測變位之理論與數值分析」，國立高雄科技大學土木工程碩士論文，2020。
3. 呂堃豪，梁元馨，黃立政，「壓電智能梁健康監測之變位有限元素分析」，中華民國第 15 屆結構工程及第 5 屆地震工程研討會，台南市，2020 年 9 月 2-4 日。Paper No. 269，2020。
4. 吳進寶，「應用 ANSYS 於含壓電致動器及應變計感測器智能梁之主動振動控制模擬」，高雄科技大學土木工程碩士論文，2012。
5. 婁利飛，楊銀堂，張軍琴，李躍進，「ANSYS 在 PZT 壓電薄膜微傳感器壓電分析中的應用」，機械科學與技術，第 7 期，第 875-878 頁。2005。
6. 陳彥邦，「軸壓作用下之方形薄殼柱挫屈應力有限元素法分析」，中興大學土木工程學系碩士論文。2012。
7. 黃方俞，「有限元素法應用於含壓電致動器與感應器貼片智能梁動力分析與控制模擬」，高雄科技大學土木工程碩士論文。2011。
8. 黃立政，呂堃豪，蕭至桀，「應用壓電片於簡支梁變位健康檢測之初步探討」，2019 生態永續與土木災研討會。2019 年 6 月 14 日，2019。
9. 黃立政，梁元馨，郭峻豪，「應用壓電片於彈性柱挫曲變位健康檢測之理論探討」，2021 生態永續與土木災研討會。2021 年 6 月 4 日，2021。
12. Song, G., Y-L Mo, Otero, K. and Gu, H., "Health Monitoring and Rehabilitation of a Concrete Structure Using Intelligent Materials, "Smart Material. Structures, Vol. 15, pp. 309~314. 2006.
13. William Weaver, Paul R. Johnston, Finite Elements for Structural Analysis, Prentice-Hall, 1984.

應用 ETABS 程式模擬惰性減震擋土牆系統之研究

沈茂松¹ 張志誠² 陳宗翰³

¹ 國立高雄科技大學土木工程系教授

² 國立高雄科技大學土木工程系助理教授

³ 國立高雄科技大學土木工程系碩士研究生

摘要

本研究以 ETABS 程式模擬「利用無凝聚力之卵石，附加在懸臂式擋土牆側邊，形成之惰性減震擋土牆，在地震臨時產生之惰性力抵銷側向地震力行為」。配合 1:20 壓克力模型在六軸振動台之模型試驗所量得之應變，進行 ETABS 程式動力分析模擬。在模擬中加入 HOOK 消能元件，模擬縮小壓克力模型的受力行為，並進一步還原 1:1 尺寸之變位，以探討未來惰性擋土牆在 ETABS 程式的分析模擬方式。在 1:20 之模擬當中，壓克力模型於振動台監測得變位值，較 ETABS 程式模擬之結構變位相差約一百萬倍，但受力處有相近之趨勢，本研究進行了 16 次的 HOOK 模擬，在應變與位移的趨勢線的轉折、斜率都有類似的情形。將此嘗試後的結果放大回 1:1 模型模擬出惰性減震混凝土擋土牆，分析其變位，以利日後設計使用。本研究並利用力學原理，計算出 1:20 壓克力模型放大後的尺寸效應，計算其變位，與 ETABS 程式模擬出之結果互相比較及驗證。將混凝土 1:1 擋土牆尺寸效應放加入 ETABS 程式分析，得到模型試驗所得與 ETABS 程式分析，兩者受力行為結果極為相近，表示本研究 ETABS 程式模擬之受力行為有相當可靠度，但此新創惰性減震之概念工法，仍有許多力學性質參雜其中，建議乘上安全係數，以便使用。

關鍵字：惰性減震、HOOK 消能元件、尺寸效應

Study on Application Mode of Inert Damping Retaining Wall System by ETABS Program

Mau-Song Sheen¹ Chih-Cheng Chang²

¹ National Kaohsiung University of Science and Technology Department of Civil Engineering

² National Kaohsiung University of Science and Technology Department of Civil Engineering

³ National Kaohsiung University of Science and Technology Department of Civil Engineering

ABSTRACT

This study uses the ETABS program to simulate "the use of non-cohesive pebbles attached to the side of the cantilevered retaining wall to form an inert shock-absorbing retaining wall. The inert force generated during the earthquake offsets the behavior of the lateral seismic force." Cooperate with the strain measured by the 1:20 acrylic model in the six-axis shaking table model test, and perform ETABS program dynamic analysis simulation. The HOOK energy dissipation element is added to the simulation to simulate the force behavior of the reduced acrylic model, and further restore the 1:1 size displacement, in order to explore the analysis and simulation method of the inert retaining wall in the ETABS program in the future. In the 1:20 simulation, the displacement value of the acrylic model monitored on the shaking table is about one million times different from the structural displacement simulated by the ETABS program, but the force is similar. This research carried out 16 In the second HOOK simulation, there are similar situations in the transition and slope of the trend line of strain and displacement. The result of this attempt was enlarged back to a 1:1 model to simulate an inert shock-absorbing concrete retaining wall, and its displacement was analyzed to facilitate future design and use. The result of this attempt was enlarged back to a 1:1 model to simulate an inert shock-absorbing concrete retaining wall, and its displacement was analyzed to facilitate future design and use. In this research, using the principles of mechanics, the scale effect of the 1:20 acrylic model is calculated, the displacement is calculated, and the results simulated by the ETABS program are compared and verified. The size effect of the concrete 1:1 retaining wall is added to the ETABS program analysis, and the results of the model test and the ETABS program analysis are obtained. The force behavior results of the two are very similar, indicating that the force behavior simulated by the ETABS program in this study is quite reliable. , But this new concept method of inert shock absorption still has many mechanical properties involved. It is recommended to multiply the safety factor for easy use.

Keywords: inert damping wall, hook energy dissipation attribute method, size effect

一、緒論

1-1 研究動機

在真實的邊坡懸臂式擋土牆使用得最多，但懸臂式擋土牆受地震振動後之位移與變形是最大的，故如何將懸臂式擋土牆減震與消能，是本研究動機。

1-2 研究目的

ETABS 結構分析軟體中，在地震模擬有 HOOK 消能屬性法之減振阻尼元件可套用，但 ETABS 程式中並沒有分析懸臂式擋土牆之減震應用，故欲使用 ETABS 程式來分析惰性擋土牆，勢必由擋土牆模型試驗，配合 ETABS 程式的 HOOK 消能阻尼的測試，才能達到利用 ETABS 程式分析惰性減震擋土牆的目的。

1-3 研究流程

為達到利用 ETABS 程式分析惰性減震擋土牆的目的，首先在 1:20 縮小壓克力模型懸臂式擋土牆側邊，加入無凝聚力可滾動之卵石，在地震來時產生惰性力抵銷側向地震力；再利用六軸振動台進行模型擋土牆牆身上、中、下之應變監測，並利用 ETABS 結構分析軟體+HOOK 元件模擬惰性減震擋土牆之變位趨勢，比較利用尺寸效應估算的變位，發展出 ETABS 程式使用模擬惰性減震擋土牆的方式，以達到未來實務設計使用的便利性。

二、文獻回顧

台灣地處菲律賓海板塊及歐亞板塊之邊界，菲律賓海板塊每年以 7~8 公分的活耀速度向歐亞板塊推進，因此活動斷層遍佈且活動頻繁，中央氣象局資料顯示 1994~2015 年中，台灣合計發生了 528139 次的地震，其中有感地震為 23020 次。如何有效的提升建築結構物耐震能力，隔震、減震及制震之工法逐漸成為了現今學界之趨勢。

本次研究動機為接續沈茂松、顏子原(2019)[1]之建築結構的惰性減震工法之研究，延伸至大地工程中常見之懸臂式擋土牆，並嘗試利用結構分析軟體 ETABS 程式模擬，讓惰性減震工法之使用符合現今土木營建之設

計趨勢。

2-1 惰性減震工法

沈茂松、顏子原(2019)[1]在 ETABS 模型當中，設置不同排序配置之惰性減震牆進行建模，並加入不同地震加速度，19 種組合在 0.25G、0.5G、0.75G、1.0G、1.25G 等 4 種加速度下，根據反向惰性理論推倒設計之模型，對比無設置惰性減震牆之位移皆呈現減少之趨勢，可判定 4 種加速度下，若在線性狀態下，惰性減震確實能達到減少位移之情形。

2-2 消能元件

沈茂松、劉欣岳(2017)[2]加入 HOOK 消能屬性構架由彈性階段進入降伏階段的監測位移量為 20mm，機抵剪應力為 224.3038kgf，側向力為 538.329Kn，由降伏階段制架構塑性鉸破壞點的監測位移量為 77.305mm，基底剪應力為 424.1236kgf。進行實體外加八卦彈簧 RC 構架測推與 ETABS 八卦彈簧疊代法、HOOK 消能屬性元件之助應變對比，對比發現加入 HOOK，側推分析梁應變相差 21%，柱應變相差 16%加入 HOOK 消能屬性架構梁、柱所受到之應力來得小。

林佳正(2017)[3]ETABS 內建許多非線性連接(Link)，用來模擬結構體內部元件的非線性行為，僅在非線性動力分析當中會摻入計算，倘若進行動力反應譜分析、非線性或線性分析時，連接(LINK)只在線性性質當中加以計算。

在 ETABS 中能夠設置阻尼連接(LINK)吸收或消耗地震能，方便進行隔震、減震之設計。ETABS 的線性阻尼元件有限性彈簧(Linear)、阻尼器(Damper)、縫(Gap)、鉤(Hook)、塑性單元(Plastic1)、滯回隔震器(Isiatoe1)、摩擦隔震器。

2-3 隔震、減震、制震相關原理

地震震度與建築耐震能力，可用水桶和水族箱來類比：水桶中的水如同地表震動能量，水越多，震動能量越大；水族箱的容量如同建築的耐震能力，容量越大，耐震能力越大。下文藉水桶與水族箱的關係來說明耐震建築、不耐震建築、減震建築、隔震建築、補

強建築等原理。

(一) 隔震

沈盈秀(2016)[4]-隔震層阻尼-西元1993Skinner,Robinson and McVerry 研究成果表示,建築結構物可利用基礎隔震拉長該建物之自然頻率週期,能夠避開地震的主震週期,有效縮減地震能量之影響。

廖健閔(2004)[5]敘述地震發生時地殼所釋放之能量,藉由結構基礎上傳至上部結構,而造成主體結構物的破壞。結構隔震技術是於上部結構與結構基礎間安置柔性介面(隔震元件)藉以拉長振動週期,進而減緩激烈地表運動對上部結構的影響。當地震發生時,可藉由隔震元件將地震能量傳入結構體之路徑截斷,阻隔地震能量傳入上部結構所造成之破壞。故能夠延長建築物基本週期,和給予適當阻尼將使結構物的加速度反應大幅減弱,同時讓結構的相對位移由結構物底部與基礎之間的隔震系統提供,而不由結構自身的相對位移承擔地震能量,則結構物損傷則能降至最低。

(二) 減震

楊振宗(2007)[6]指出利用消能減震元件來消散地震對結構所輸入之能量,是目前最經濟有效的方法之一。消能設計主要著重於增加結構物之阻尼以提高結構物消散地震能量之能力,方法上則是於結構體上額外加裝消能元件,使地震能量按照既定之設計路徑疏導進入所加裝之消能元件中,並利用消能元件所產生之遲滯迴圈消散能量。而消能元件依其特性又可分類為與速度反應相關之黏滯性阻尼(Viscous Damping)的速度相依型(Velocity-dependent)消能器,及透過金屬降伏時所產生之遲滯阻尼(Hysteretic Damping)與摩擦式阻尼(Friction Damping)的位移相依型(Displacement-Dependent)消能器兩大類。

(三) 制震

直接改變結構物之質量、勁度、增加阻尼、輸入控制外力。

楊佳儒(2009)[7]指出設法藉由調整質量、改變勁度、增加阻尼或施加控制外力輸入等

方式,消滅由外力激擾產生之結構系統振動,如液流阻尼器、調諧質量阻尼器(TMD)……等,一般制震方法可分為被動控制(Passive Control)及主動控制(Active Control)兩大方向,其中被動控制不需藉由外部提供能量及有控制效果,並具有成本低且穩定可靠之優點,但無法隨時針對情況做出回應。而主動控制優點能隨時根據實際擾動及結構動態反應做出即時性調整,對外在環境適應性及自主性佳。但缺點為控制方法須額外輸入能量,導致成本相對提升,且外部能源受破壞而中斷提供時,將無法達到最佳制震效果。

2-4 ETABS 結構分析軟體

ETABS 已經發展成為一個建築結構分析與設計的集成化環境:系統利用圖形化的用戶界面來建立一個建築結構的實體模型對象,通過先進的有限元模型和自定義標準規範接口技術來進行結構分析與設計,實現了精確的計算分析過程和用戶可自定義的(選擇不同國家和地區)設計規範來進行結構設計工作。

(一) 靜力分析

國家地震研究中心-林聖學等人(2016)[8]底部極限剪力法是根據地震反應譜概念,以結構底部之總地震剪力與等效單質點的水平地震作用相等,以計算結構總地震作用的方法。

一種利用靜力學方法近似求解動力學問題的簡易方法,它發展較早,迄今仍然被廣泛使用。其基本概念是在靜力計算的基礎上,將地震作用簡化為一個慣性力系附加在研究對象上,其核心是設計地震加速度的確定問題。

(二) 動力分析

時程分析法是20世紀60年代發展的抗震分析方法。進行進行超高層建築的耐震分析和工程耐震研究等。現今已成為國家抗震設計主要規範或法規程的分析方法之一。

翁元滔、蔡克銓、詹雅嵐(2019)[9]在建築耐震設計與分析檢核程序中,動力歷時分析提供耐震相關設計可進行更完整的檢核,

特別是對於高層建築、特殊構造建築物或不規則建築物，結構審查時常被要求採用動力歷時分析或反應譜動力分析結果，更詳細說明結構耐震性能。

2-5 尺寸效應

沈茂松、古聖忠(2012)[10]本研究採六軸振動台進行模擬試驗，採用 1/20 縮小比例之壓克力均質模型。模型試驗之尺寸效應會造成模型與實際建築物受力行為會有落差，稱為尺寸效應系統誤差，本研究為量測柱之應變量，以下推導出尺寸效應之誤差值：

$$\pi = \frac{\varepsilon_{原}}{\varepsilon_{模型}} = \frac{(\sigma/E)_{原}}{(\sigma/E)_{模型}} \quad (1)$$

$$\pi = \frac{\varepsilon_{原}}{\varepsilon_{模型}} = \frac{(\sigma/E)_{原}}{(\sigma/E)_{模型}} \quad (2)$$

$$\pi = \varepsilon_{原} \times (\sigma/E)_{模型} = \varepsilon_{模型} \times (\sigma/E)_{原} \quad (3)$$

$$\pi = \frac{(F/L^2)_{原}}{(F/L^2)_{模型}} \times \frac{E_{模型}}{E_{原}} \quad (4)$$

$$\pi = \left(\frac{F_{原}}{F_{模型}} \right) \times \left(\frac{L_{模型}}{L_{原}} \right)^2 \times \left(\frac{E_{模型}}{E_{原}} \right) \quad (5)$$

式中：

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \text{應變} & \sigma &= \text{應力} \\ P &= \text{力} & E &= \text{彈性模數} \\ L &= \text{長度} & \gamma &= \text{材料單位重} \end{aligned}$$

三、應用 ETABS 程式模擬惰性減震擋土牆系統研究之試驗方法與規劃

3-1 模型製作與建模

(一) 尺寸

製作 1:20 之壓克力懸臂式擋土牆模型，高度為 25 公分，底座高 3 公分，長度為 57.5 公分，壁體厚度為約 2.5 公分。ETABS 依照 1:20 縮小壓克力模型建置模型，上視圖為圖 3-1 所示，側視圖為圖 3-2 所示。

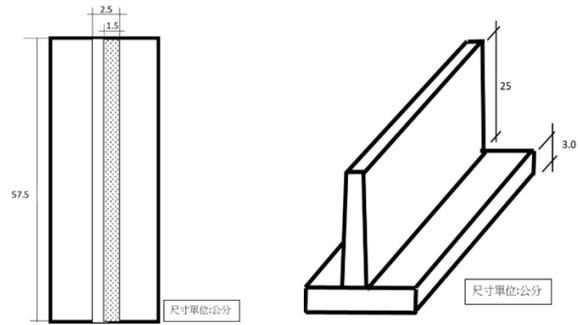


圖 3-1 上視圖

圖 3-2 側視圖

(二) 材料參數

本次研究所採用之材料為壓克力及混凝土，模擬惰性減震強之阻尼參數沿用顏子原(2019)[1]計算出來之 0.5。

	壓克力材料參數	混凝土材料參數
體積重量	11.6699KN/M ³	23.5631KN/M ³
體積質量	1190KG/M ³	2402.77KG/M ³
彈性模數	2940MPa	26301.86MPa
蒲松比	0.4	0.2
剪力模數	1050MPa	10959MPa

3-2 監測儀器及施力設備

(一) 監測儀器-應變計

應變計是由 Kyowa 公司所製造，型號為 KFG-30-120-C1-11；應變感應器長度為 30 mm；應變電阻為 120 Ω；Gage Factor：2.07 ± 1.0 %。

(二) 監測儀器-應變片

本研究於模型表面加裝九宮個排列之單軸向應變計，如圖 3-3 所示，亦以了解模擬卵石之玻璃珠產生之惰性力對於壁體變為之影響範圍及成效性。

點位名稱令前項之數字為左、中、右，後項數字為上、中、下。在後續點位分析時，排列順序為由左到右、由上到下，以 A-3-1→A-2-1→A-1-1→A-3-2→A-2-2→A-1-2→A-3-3→

A-2-3→A-1-3 順序為後續趨勢線橫軸，前段三個為最上層之點位，中間三個為中間層之點位，後段三個為最下層之點位。

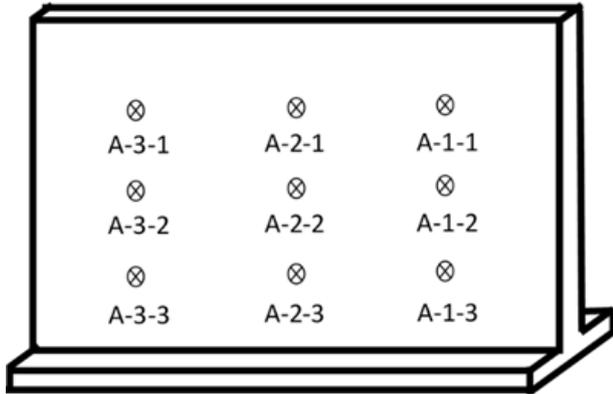


圖 3-3 應變計黏貼位置

3-3 計算 DATA 量測之應變

應變計監測出來的數據為該點之應變量，無法直接與 ETABS 作比較，故利用 $\delta = \epsilon \times L$ 將監測到的數據轉化成位移量。L 是從底部往上計算到該點之垂直高度。1:20 壓克力模型惰性減震牆在間距為 0.25 不同加速度下應變計監測到之位移作為縱軸，點位從上而下，由左而右排列為橫軸繪製下圖 3-4。

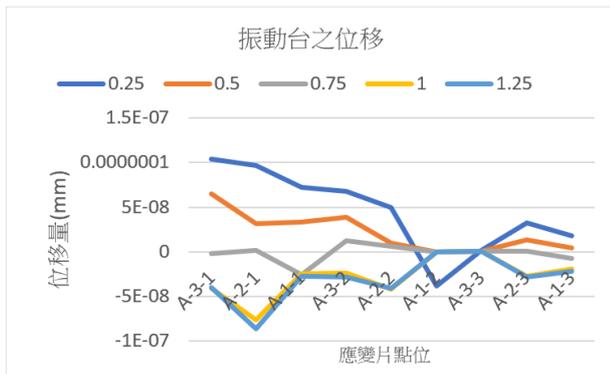


圖 3-4 應變計監測模型之變位

在 0.25G 及 0.5G 加速度下，變位趨勢由上排往下排減少，其餘較大之地震加速度，監測到之數據較無規律，且一般建築物之地震力軟體分析並不需要模擬如此大之加速度，擋土牆也不是高層建築，故後續模擬僅以 0.25G 單以討論。

0.25G 加速度下之位移趨勢中可觀察到，在 A-3-1、A-2-1、A-1-1 變位最高，A-3-2、A-

2-2 中間層之點位變位次之，A-3-3、A-2-3、A-1-3 最下層點位變位最小，與各層之 L 長度不同應為主要之關係，唯獨 A-1-2 之數據急遽下跌，經過從新換過應變片後，數據仍然一樣，故排除儀器故障之可能，在後續 ETABS 模擬此趨勢線時，為重點之一。

3-4 決定 HOOK 之相關參數

為了了解 HOOK 對於擋土牆的影響範圍以及程度，針對 K 值及添加位置兩個主要變數，執行多種嘗試比較其變化，以利增加之後使用的精準度。

(一) 連接位置之測試

分別在九宮格當中輸入 0.25G 地震加速度，加入 K 值為百萬的 HOOK，再分別判斷其變化。結果如圖 3-5。

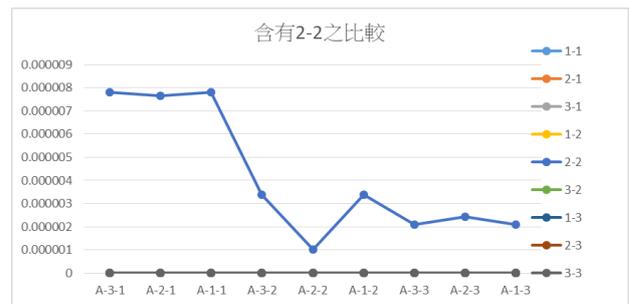


圖 3-5 九個點之比較

由表 2 得知。HOOK 連接在 A-2-2，也就是擋土牆的中心點，就會將整體變位大幅拉高，且影像力較其他點位近百倍。倘若將 A-2-2 剔除，比較剩下 8 個點位，如圖 3-6 所示。

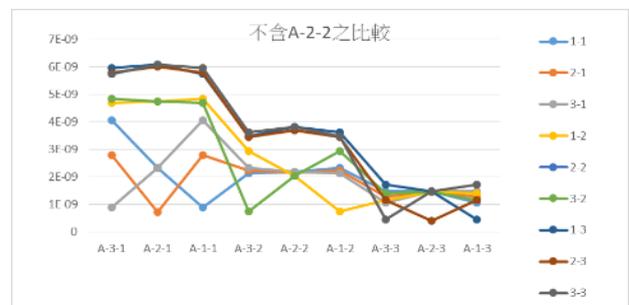


圖 3-6 不含 A-2-2 之比較

(二) K 值大小之測試

於牆的中央點加入長度為 1 公尺之 HOOK 連接，再以十進位為間距，嘗試個、十、百、千、萬、十萬、百萬、千萬之 K 值，比較其變化趨勢，以了解 HOOK 之使用性。如圖 3-7。

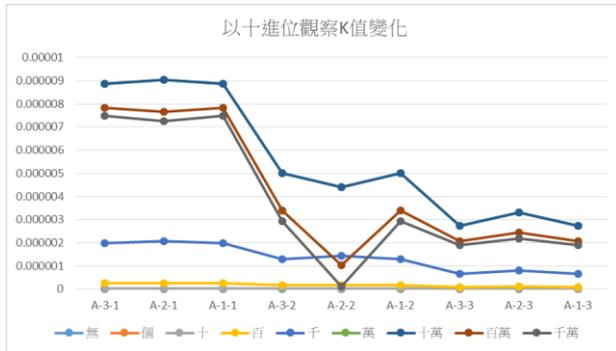


圖 3-7 以十進位觀察 K 值變化

在 K 參數輸入個、十、百、千、萬、十萬時，整體變位有放大趨勢。百萬、千萬放大幅度也很大，除了連接 HOOK 之點位被明顯降低趨勢；十萬之整體放大趨勢最為明顯，千萬之趨勢與十萬相近，僅大小比例改變。小總結可得：

1. 放大整體趨勢之影像力為

十萬 > 百萬 > 千萬 > 萬 > 千 > 百 > 十 > 個

2. 若要單一點位降低變位則採用百萬、千萬代入 K 值。

(三) 計算尺寸效應

模型為 1:20 縮小比例之均質壓克力模型，實際尺寸之擋土牆會與壓克力模型之受力行為有落差，此為尺寸效應之系統誤差，本研究為量測擋土牆之應變量，故採下列公式推導尺寸效應造成之系統誤差 π 。

$$\pi = \frac{\varepsilon_{原}}{\varepsilon_{模型}} = \frac{(\sigma/E)_{原}}{(\sigma/E)_{模型}} = \varepsilon_{原} \times (\sigma/E)_{模型} = \varepsilon_{模型} \times (\sigma/E)_{原} \quad (6)$$

$$\pi = \frac{(F/L^2)_{原}}{(F/L^2)_{模型}} \times \frac{E_{模型}}{E_{原}} = \left(\frac{F_{原}}{F_{模型}}\right) \times \left(\frac{L_{模型}}{L_{原}}\right)^2 \times \left(\frac{E_{模型}}{E_{原}}\right) \quad (7)$$

其中令 $\phi = \left(\frac{F_{原}}{F_{模型}}\right)$

$$\phi = \frac{F_{原}=(ma)_{原}}{F_{模型}=(ma)_{模型}} = \frac{\left(\frac{W}{g}\right)_{原} \times a}{\left(\frac{W}{g}\right)_{模型} \times a} = \frac{W_{原}}{W_{模型}} \quad (8)$$

$$\phi = \frac{W_{原}}{W_{模型}} = \frac{(L_{原})^3 \times (\gamma_{原})^3}{(L_{模型})^3 \times (\gamma_{模型})^3} \quad (9)$$

$$\phi = \left(\frac{L_{原}}{L_{模型}}\right)^3 \times \left(\frac{\gamma_{原}}{\gamma_{模型}}\right)^3 \quad (10)$$

$$\text{則 } \pi = \left(\frac{\gamma_{原}}{\gamma_{模型}}\right) \times \left(\frac{L_{原}}{L_{模型}}\right) \times \left(\frac{E_{模型}}{E_{原}}\right) \quad (11)$$

式中：

ε =應變 σ =應力 F =力

E =彈性模數 L =長度 γ =材料單位重

四、應用 ETABS 程式模擬惰性減震擋土牆系統之研究實驗數據與分析

4-1 分析 HOOK 相關參數

(一) 連接影響位置

在不同的位置連接 HOOK，K 值統一帶入百萬，分析每個位置的影響，並與沒有 HOOK 之變位做比較。

圖 3-5 其中發現於牆壁中央之 A-2-2 點位裝置 HOOK 連接之後，其變位趨勢與其他位置連接之結果有明顯之不同。設於 A-2-2 時，在 HOOK 連接處變位同樣與其他點位設置一樣都被往下限縮。原因應該為 A-2-2 點位剛好位於形心，當作用力於形心上時，力會均佈作用在該物體上。

在利用 HOOK 元件試圖微量改變趨勢時，應該避免選用位於形心上之 A-2-2 點位，以防影響力過大，造

成整體變位走樣。但是合用於判定 K 值大小時使用，可以減少變因，觀察 K 值大小影響時更為直觀。

(二) K 質大小之影響

在形心處 A-2-2 設置分別為個、十、百、千、萬、十萬、百萬、千萬之 K 值，並加入 5 種加速度，於下圖中逐一討論，並列表討論

其 K 質之影響力。

將以上 7 種 K 值變化趨勢線，提取 0.25G 加速度下之變化，共同分析如表 4-22，在 K 參數輸入個、十、百、千、萬、十萬時，整體變位有放大趨勢。百萬、千萬除了連接 HOOK 之點位被明顯降低趨勢。

可得下列兩點。

1. 放大整體趨勢之影像力為

十萬 > 百萬 > 千萬 > 萬 > 千 > 百 > 十 > 個

2. 若要單一點位變位降低的話則採用百萬、千萬做為 K 值之參數。

4-2 加入 HOOK 使 ETABS 趨勢線吻合振動台

(一) 兩者原始數據

將兩種方式選取 0.25G 加速度之結果，列於下表 4-1。並換算兩者之倍數差距，並繪製表 4-24，以便後續比較。

表 4-1 兩者 1:20 原始數據之比較

	A-3-1	A-2-1	A-1-1	A-3-2	A-2-2	A-1-2	A-3-3	A-2-3	A-1-3
應變計	1.04E-01	9.67E-02	7.21E-02	6.78E-02	4.98E-02	-3.85E-02	1.19E-03	3.26E-02	1.83E-02
ETABS	3.08E-08	3.23E-08	3.08E-08	1.99E-08	2.21E-08	1.99E-08	1.02E-08	1.25E-08	1.02E-08
兩者百分	3.37E+06	3.00E+06	2.34E+06	3.41E+06	2.25E+06	-1.93E+06	1.17E+05	2.61E+06	1.79E+06

由表 4-1 得知，在 0.25G 加速度之下兩者趨勢線之差異很大，變位差異很大之情況之下，無從比較兩者之趨勢線，比較數據後發現兩者差異大約落在 10⁶ 倍，故將振動台上模型監測之變位除上 10⁶，以便於後續分析，最後計算變位再乘上 10⁶，以求得實質變位。振動台上之數據降低後，分別於 5 種加速度下，比較其趨勢線。

如圖 4-1，在 0.25G 之加速度下，兩者趨勢都從左上到右下，但振動台之監測變位趨勢線明顯比 ETABS 陡峭很多，但在 A-1-2 振動台有明顯下凹之趨勢，為之後 ETABS 模擬之重點。

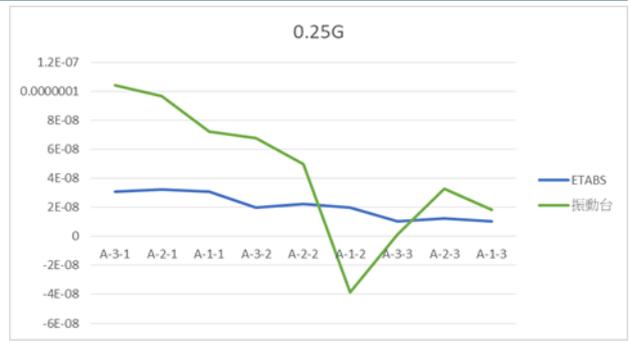


圖 4-1 0.25G 加速度下兩種方法之趨勢線

如圖 4-2，在 0.5G 加速度下趨勢線斜率接近，但振動台監測變位趨勢線轉折更多更無規律，且同樣在 A-1-2 時趨勢線明顯往下凹。

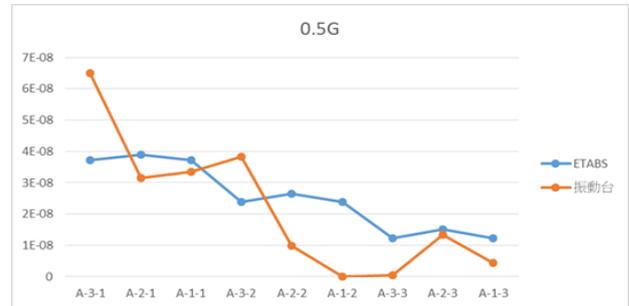


圖 4-2 0.5G 加速度下兩種方式之趨勢線

0.75G、1.0G、1.25G 之振動台監測變位趨勢，已無明確規律，且一般矮樓房之地震加速度計算 0.25G 已經屬於相當保守了，故其他四種不以為考慮。

(二) 在 0.25G 加速度模擬 1:20 模型之變位趨勢

在不同點位加入不同 K 值之 HOOK 嘗試 16 種不同排列組合，列出最符合 0.25G 加速度下振動台之監測變位(圖 4-1)之第 14 號、第 15 號、第 16 號 HOOK 參數(表 4-2)及趨勢線(圖 4-3)。

表 4-2 第 14 號、第 15 號、第 16 號 HOOK 參數

	A-3-1	A-2-1	A-1-1	A-3-2	A-2-2	A-1-2	A-3-3	A-2-3	A-1-3
14	8萬	萬	15萬	0	0	白萬	0	0	萬
15	8萬	萬	15萬	0	0	白萬	0	0	8萬
16	8萬	萬	20萬	0	0	白萬	0	0	8萬

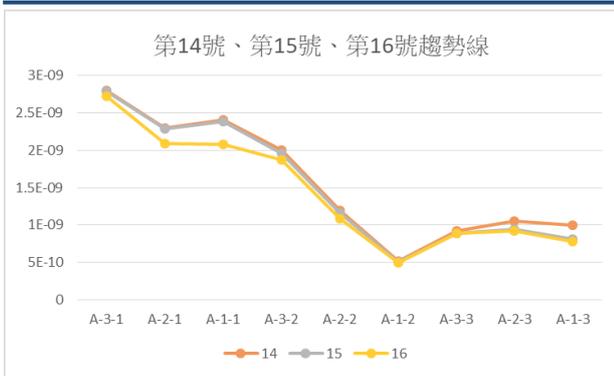


圖 4-3 第 14 號、第 15 號、第 16 號趨勢線

4-3 ETABS 放大 20 倍至原尺寸

(一) 1:1 壓克力建模

將壓克力建模放大 20 倍，加入最符合趨勢之 14、15、16 號之 HOOK 參數，並比較表 11 合理性。放大後趨勢線明顯都低於零，但上層之變位一樣為最大，只是為受壓變位轉成負值。在 14 號之 HOOK 加入下，除了最下層之 A-3-3、A-2-3、A-1-3，變位最小，其餘 6 點位之變位相同。如圖 4-4。

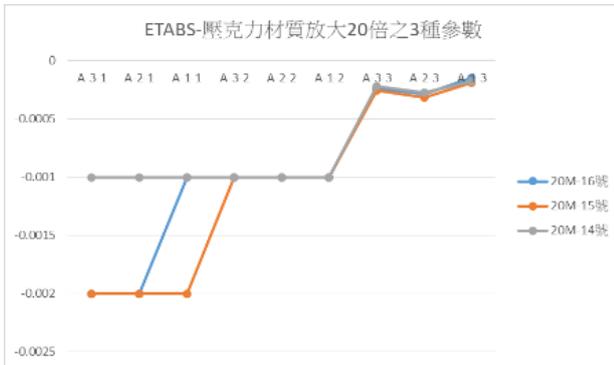


圖 4-4 ETABS-1:1 比例壓克力材質

(二) 1:1 混凝土建模

放大模型，並將材料參數改置為混凝土之參數，觀察放大後之趨勢線如表 12 趨勢線整體都呈為負值，變位方向與 1:20 縮小模型相反，但趨勢線與 1:20 縮小壓克力模型之變位相近。14 號與 16 號 HOOK 參數之趨勢線一模一樣，15 號之趨勢線變位要在更大一點。且都在 A-1-2 變位趨近於 0，與 1:20 壓克力模型之受力行為相同。將上述 6 種變位值列於圖 4-5。

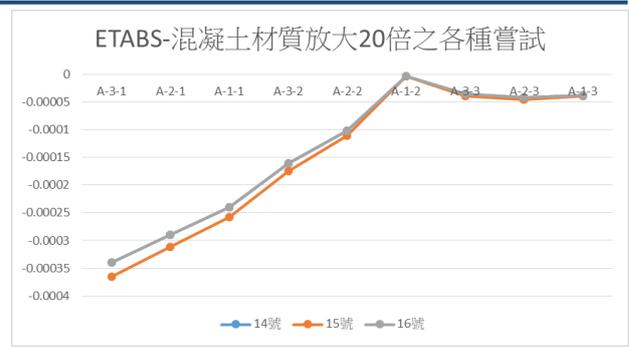


圖 4-5 ETABS-1:1 比例混凝土材質

4-4 1:20 壓克力模型乘上尺寸效應

(一) 計算 1:1 壓克力模型之尺寸效應參數 π

$$\left(\frac{Y_{原}}{Y_{模型}}\right) = 1, \left(\frac{L_{原}}{L_{模型}}\right) = 20, \left(\frac{E_{模型}}{E_{原}}\right) = 1 \quad (12)$$

$$\pi = \left(\frac{Y_{原}}{Y_{模型}}\right) \times \left(\frac{L_{原}}{L_{模型}}\right) \times \left(\frac{E_{模型}}{E_{原}}\right) = 20 \quad (13)$$

將 1:20 振動台監測之變位數據乘上尺寸效應參數

$\pi = 20$ 之結果列於表 11

(二) 計算 1:1 混凝土模型之尺寸效應參數 π

$$\left(\frac{Y_{原}}{Y_{模型}}\right) = \frac{2.4}{1.19} = 2.0168, \left(\frac{L_{原}}{L_{模型}}\right) = 20 \quad (14)$$

$$\left(\frac{E_{模型}}{E_{原}}\right) = \frac{2940}{26301.86} = 0.1118 \quad (15)$$

$$\pi = \left(\frac{Y_{原}}{Y_{模型}}\right) \times \left(\frac{L_{原}}{L_{模型}}\right) \times \left(\frac{E_{模型}}{E_{原}}\right) = 4.510 \quad (16)$$

將 1:20 壓克力模型分別乘上 $\pi = 4.510$ ，並列於表表 4-3。

表 4-3 尺寸效應之影響

π	A-3-1	A-2-1	A-1-1	A-3-2	A-2-2	A-1-2	A-3-3	A-2-3	A-1-3
20	2.081	1.934	1.442	1.357	0.995	-0.770	0.024	0.653	0.367
4.510	0.469	0.436	0.325	0.306	0.224	-0.174	0.005	0.147	0.083

4-5 小結

本研究製作 1:20 壓克力懸臂式擋土牆模型，加了模擬惰性減震卵石的玻璃珠後，施加 0.25G 之加速度，並利用應變計監測其變位量。嘗試利用 ETABS 結構分析軟體模擬此新興工法之受力行為。採用 3 種參數之 HOOK

元件使 ETABS 分析變位結果與 1:20 模型受
力行為相近後。將其放大回 1:1 壓克力擋土牆
及混凝土擋土牆，分別加入第 14 號、第 15 號、
16 號之 HOOK 元件，共 6 項變位數據。如表
4-4。

表 4-4 2 種材質 3 種 HOOK 參數

	A-3-1	A-2-1	A-1-1	A-3-2	A-2-2	A-1-2	A-3-3	A-2-3	A-1-3
ETABS-壓克力放大14號(mm)	-0.001000	-0.001000	-0.001000	-0.001000	-0.001000	-0.001000	-0.000222	-0.000274	-0.000175
ETABS-壓克力放大15號(mm)	-0.002000	-0.002000	-0.002000	-0.001000	-0.001000	-0.001000	-0.000255	-0.000316	-0.000187
ETABS-壓克力放大16號(mm)	-0.002000	-0.002000	-0.001000	-0.001000	-0.001000	-0.001000	-0.000238	-0.000285	-0.000148
ETABS-混凝土放大14號(mm)	-0.000340	-0.000290	-0.000240	-0.000161	-0.000102	-0.000003	-0.000035	-0.000042	-0.000037
ETABS-混凝土放大15號(mm)	-0.000365	-0.000312	-0.000257	-0.000175	-0.000110	-0.000003	-0.000039	-0.000045	-0.000040
ETABS-混凝土放大16號(mm)	-0.000340	-0.000290	-0.000240	-0.000161	-0.000102	-0.000003	-0.000035	-0.000042	-0.000037

將 1:20 壓克力模型之監測變位乘上尺寸
效應參數，也是一種可靠之模擬方法，故計
算 1:1 之壓克力材質及混凝土之材質之尺寸
效應參數，利用尺寸效應模擬原尺寸，如圖
4-6。

單獨討論壓克力材質之兩種模擬方式，
其結果如表 13。兩種結果相差約 1000 倍，故
先將 ETABS 數據放大 1000 倍做比較，繪製
趨勢圖。尺寸效應為等比例放大，故趨勢大
致與 1:20 模型相同，都是上層變位最大，往
下層縮小，但尺寸效應放大之 A-1-2 點位仍然
有下凹趨勢，但受力行為都大同小異。

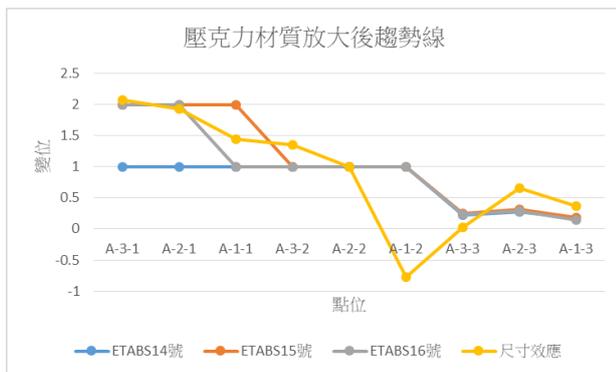


圖 4-6 ETABS 壓克力放大後趨勢線之比較

單獨討論混凝土材質之兩種模擬方式，
其結果如圖 4-7。ETABS 之放大模擬後受力行
為與壓克力及尺寸效應不同，相差一個負號，
僅代表變位方向相反，且數值落在 10^{-3} ~ 10^{-4}
之間。故將 ETABS 之參數與壓克力分析相同
放大 1000 倍，且將正負號變號，方便與另
一方法做比較。如圖，整體趨勢線很接近，也
都在 A-1-2 有下凹趨勢，雖轉折角度有些許差

異，但互相印證受力行為之可靠度。

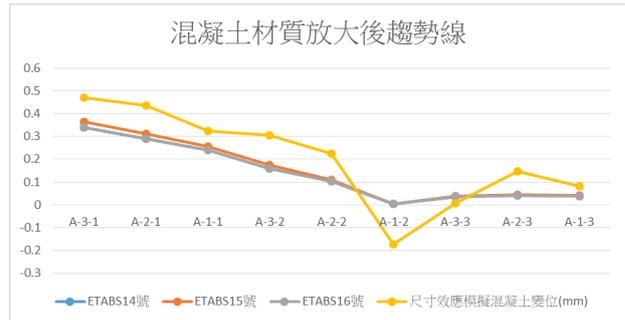


圖 4-7 ETABS 混凝土放大後趨勢線之比較

在壓克力材質之放大過程中得到 ETABS
模擬較尺寸效應模擬之結果有約 7000 上下
之倍數差異，但趨勢受力行為相近，表示此
壓克力模型之模擬為合理，但此新興工法，
仍有許多更詳細的變因考慮不周全。

最後進行混凝土之模型，得到 ETABS 與
尺寸效應之模擬趨勢極為相近，可說是合理
詮釋受力之行為之真實性，僅差異在變為之
方向相反，以及應變計與 ETABS 之結果倍數
差異，倘若再未來使用時加入安全係數，就
可以利用此依據設計惰性減震擋土牆。

五、結論

5-1 結論

製作 1:20 壓克力懸臂式擋土牆模型，加
了模擬惰性減震卵石的玻璃珠後，施加 0.25G
之加速度，並利用應變計監測其變位量。嘗
試利用 ETABS 結構分析軟體模擬此新興工法
之受力行為。採用 3 種參數之 HOOK 元件使
ETABS 分析變位結果與 1:20 模型應變行為相
比較。並將其放大回 1:1 壓克力擋土牆及混
凝土擋土牆，分別加入不同之 HOOK 元件，共
6 項變位數據。

將 1:20 壓克力模型之監測變位乘上尺寸
效應參數，也是一種可靠之模擬方法，故計
算 1:1 之壓克力材質及混凝土之材質之尺寸
效應參數，利用尺寸效應模擬原尺寸變位，
本研究分析得以下結論：

1. 單獨討論壓克力材質之兩種模擬方式，兩
種結果相差約 1000 倍，將 ETABS 數據放
大 1000 倍做比較，並將模型尺寸效應等
比例放大，ETABS 程式模擬的趨勢大致與

- 1:20 模型試驗相同，都是上層變位最大，往下層縮小，但尺寸效應放大某一模型點位仍然有下凹趨勢，但受力行為都大同小異。
- 單獨討論混凝土材質之兩種模擬方式，ETABS 之放大模擬後受力行為與壓克力及尺寸效應不同，相差一個負號，僅代表變位方向相反，且數值落在 10^{-3} ~ 10^{-4} 之間。
 - 將 ETABS 之參數與壓克力分析相同放大 1000 倍，且將正負號變號，方便與另一方法做比較，整體趨勢線很接近，也都在同一模型有下凹趨勢，雖轉折角度有些許差異，但互相印證受力行為之可靠度。
 - 在壓克力材質之放大過程中得到 ETABS 模擬較尺寸效應模擬之結果有約 7000 上下之倍數差異，但趨勢受力行為相近，表示此壓克力模型之模擬為合理。
 - 混凝土之模型，得到 ETABS 與尺寸效應之模擬趨勢極為相近，可說是合理詮釋受力之行為之真實性，僅差異在變位之方向相反，以及應變計與 ETABS 之結果倍數差異。

5-2 建議

- 混凝土之模型，得到 ETABS 與尺寸效應之模擬趨勢極為相近，可說是合理詮釋受力之行為之真實性，僅差異在變位之方向相反，以及應變計與 ETABS 之結果倍數差異。倘若再未來使用時加入安全係數，就可以利用此依據設計惰性減震擋土牆。
- 本研究只模擬懸臂式擋土牆，其他重力式與扶壁式擋土牆，可再進行分析研究。
- 模型擋土牆背後可再加上土壤，再去模擬分析。

六、參考文獻

- 沈茂松、顏子原，「應用 ETABS 模擬惰性減震強系統之研究」，碩士論文，國立高雄應用科技大學土木工程系，2019。
- 沈茂松、劉欣岳，「外加式八卦彈簧減震系統之 ETABS 模擬應用模式推演」，碩士論文，國立高雄應用科技大學土木工程系，2017。
- 林佳正，「校舍結構耐震之結構」，碩士

論文，朝陽科技大學，2011。

- 沈盈秀，「隔震層阻尼對基礎隔震建築之影響」，碩士論文，國立中興大學，2016。
- 廖健閔，「TMD 應用於橋梁受車輛與地震載重之減振研究」，碩士論文，國立雲林科技大學，2015。
- 楊振宗，「方向優化之摩擦單擺隔震器模擬分析與應用」，碩士論文，逢甲大學土木工程所，2008。
- 楊佳儒，「樓房採用基礎與層間複合隔震系統之振動抑制」，碩士論文，國立高雄應用科技大學，2009。
- 林聖學等人，2016，「校舍結構外加 RC 構架補強耐震分析」，國家地震研究中心報告編號:NCREE-16-006。
- 翁元滔、蔡克銓、詹雅嵐，「結構歷時動力分析之自然地震強度調整方法研究」，國家地震工程研究中心研究成果報告，第 98 期，第 9~12 頁，2010。

高嶺土壓密及滲透特性研究

王佑禎¹ 許懷後²

¹國立高雄科技大學營建工程系研究生

²國立高雄科技大學營建工程系副教授

摘要

土壤的壓密沉陷在工程上一直以來都是一個重要的課題，本研究以高嶺土來探討土壤的壓密行為與滲透特性。本研究利用高嶺土進行單向度壓密試驗，探討土壤的壓縮與滲透特性。藉不同加壓狀態下量測土壤的壓密沉陷變化，並將各階段載重的壓密係數(c_v)以及滲透係數(k)進行比較，來探討不同壓密載重下土壤參數的變化；同時使用不同分析方法推求壓密係數並比較其數值之差異。結果顯示當有效應力增加時，壓密係數增加，滲透係數減少；傳統平方根法求壓密係數值最小，初期 $\log-t$ 法最大。由此可知初期 $\log-t$ 法推算壓密係數，對於沉陷量時間之推估將為較保守。

關鍵字:壓密、滲透、高嶺土

The Compressibility and Permeability of Kaolinite Clay

You-Zhen Wang¹ Huai-Houh Hsu²

¹ Master Student, Department of Construction Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

² Associate Professor, Department of Construction Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

Soil consolidation behavior has always been an important subject in geotechnical engineering. This study uses kaolinite clay to discuss soil consolidation behavior and permeability characteristics. This study uses kaolinite clay to carry out a series of one-dimensional consolidation tests to explore the compression and permeability characteristics of the soil. Measure the change of soil settlement under different pressure conditions, and compare the coefficient of consolidation (c_v) and permeability coefficient (k) of each stage loading to explore the changes of soil parameters under different surcharge. After that, use different analysis methods to calculate the c_v values and compare the difference of its values derived from different approach method. Results show that when the effective stress increases, the c_v value increases, and the k value decreases; Taylor's square-root-of-time method finds the smallest c_v value, and the early stage $\log-t$ method obtains the largest c_v . It can be seen that the early stage $\log-t$ method to estimate the c_v value will be more conservative in the estimation of the necessary elapsed time of soil settlement.

Keywords: compressibility, permeability, kaolinite clay

一、前言

1-1 研究動機與目的

壓密試驗一直是土壤力學中很重要的一環，其最大的目的就是用於求取有關土壤壓縮性參數，不管是基礎沉陷計算、都市土木工程或是公共工程(如高鐵、捷運、水壩、離岸風電基礎)，都需要獲得土壤壓密沉陷的參數。

本研究選擇高嶺土此種已知特性的材料，由於其土壤特性可充分掌握，因此選用高嶺土來進行壓密試驗，並計算試驗土壤在每個不同載重狀態下，它的壓密係數(c_v , coefficient of consolidation)會怎麼呈現，同時也採用了不同推算壓密係數(c_v)的方法，比較其不同推估方法的 c_v 值差異，同時也探討壓密係數(c_v)與滲透係數(coefficient of permeability, k)的關聯。

二、文獻回顧

2-1 土壤的壓密

土壤在承受載重後會產生壓密沉陷，因為土壤的種類不同，完成壓密沉陷的時間也有所不同。當土壤在承受載重時，因為其孔隙水壓沒有辦法立即消散，產生了超額孔隙水壓，經過一段時間，孔隙水壓漸漸消散而造成土壤體積減少，稱為壓密沉陷。砂土由於排水性好，所以能快速完成壓密沉陷；反之，黏土排水性能較差，因此要完成其壓密沉陷則需要較長的時間。

1925年由Terzaghi所提出的單向度壓密理論(Das, 2017)，對單向度壓密土壤的基本假設為以下：土壤為飽和且均質、土壤孔隙中水的流動符合達西定律、土壤顆粒和水的壓縮性可以忽略、土壤中水分的排出是單向的、滲透係數和壓縮係數視為常數，而推導出壓密係數 c_v 為定值如式(1)表示，但實際上在不同荷重下的壓密係數不一定是定值。

$$c_v = \frac{k}{\gamma_w m_v} \quad (1)$$

其中

m_v : 體積壓縮係數 (coefficient of volume compressibility)。

C_c : 壓縮指數 (compression index, C_c) 為 e 對 $\log \sigma'$ 曲線中，過預壓密壓力後直線的斜率。

C_s : 回脹指數 (recompression index, C_s) 為 e 對 $\log \sigma'$ 曲線中，解壓段的斜率，一般建議 C_s 為 C_c 值的 $1/5 \sim 1/10$ 之間 (Das, 2017)。

Terzaghi and Peck (1967) 提出由液性限度 (liquid limit, LL) 所推算之壓縮指數 (C_c)，未擾動黏土如式(2)所示，重模黏土如式(3)所示。

$$C_c = 0.009(LL-10) \quad (2)$$

$$C_c = 0.007(LL-10) \quad (3)$$

Rendon-Herrero (1983) 提出壓縮指數 C_c 與比重 (specific gravity, G_s) 和初始孔隙比 (initial void ratio, e_0) 的關係式如式(4)。

$$C_c = 0.141 G_s^{1.2} \left(\frac{1+e_0}{G_s} \right)^{2.38} \quad (4)$$

Nagaraj and Murty (1985) 提出了由液性限度 (LL) 與比重 (G_s)，兩者與壓縮指數 (C_c) 與膨脹指數 (C_s) 之關係式如式(5)。

$$C_c = 0.2343 \left[\frac{LL(\%)}{100} \right] G_s \quad (5)$$

三、研究方法

本研究採用高嶺土乾燥粉狀材料，加水拌合成為飽和黏土材料，再將土壤進行物理試驗，如比重試驗、阿太堡液塑性限度試驗、含水量以及乾單位重計算。再透過單向度壓密試驗，求得土壤的壓縮參數。

3-1 試驗材料

本研究試驗材料為高嶺土，高嶺土為典型的黏土礦物材料，因為黏土壓密完成所需的時間較長，所以選擇此材料可以更清楚的觀察到土壤的壓縮過程。透過壓密試驗所得到的數據經過計算後，可以得到土壤壓縮的相關參數。本研究使用之高嶺土基本性質如： γ_d : 乾單位重 (dry unit weight)、PL: 塑性限度 (plastic limit)、PI: 塑性指數 (plasticity index) 等，

詳細如(表 1)所示。

表 1 高嶺土之基本性質

$\gamma_d(\text{g/cm}^3)$	Gs	LL(%)	PL(%)	PI
1.025	2.598	56	38	18

3-2 試驗儀器

本研究試驗的儀器為單軸壓密試驗儀如圖 1，儀器的組成由壓密環(內環、導溝)、壓密盒、電阻尺、透水石、濾紙及砝碼。

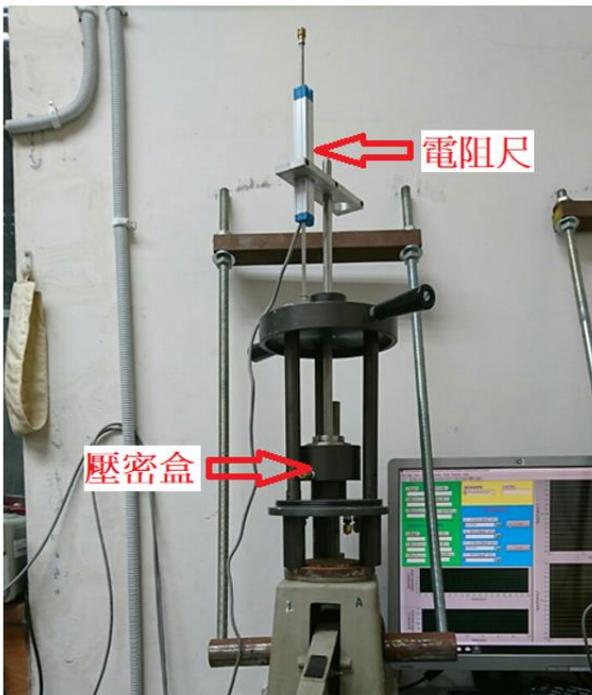


圖 1 單軸壓密試驗儀

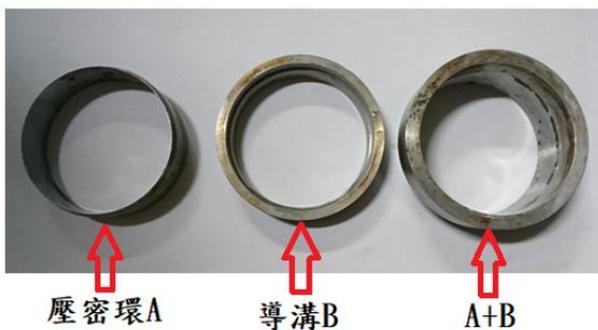


圖 2 壓密環

3-3 試體製作

本研究使用乾燥高嶺土與除氣水於容器內充分拌合後，來製作高嶺土飽和試體。先在模具底部放置透水石及濾紙，將拌合後的高嶺土放入模具，再將模具頂部放入透水石及濾紙如(圖 3)，並在上層透水石放置加壓裝置如(圖 4、圖 5)，完成後於模具上放置砝碼如(圖 6)，靜置二至三天，靜置期間為了讓試體保持飽和，必須在試體頂部跟底部加入試量的水，保持試體濕潤。

靜置後，將模具內之土樣取出，將土樣輕輕壓入壓密環，並將頂部及底部整平如(圖 7)，完成後將壓密環放於壓密儀器上，並且在壓密環上下放置透水石及濾紙(圖 8)，為了不讓壓密過程中，壓桿與壓密環偏離，因此必須加裝壓密環導溝，將導溝與內環組合，再放置壓桿，讓壓密桿能夠順著導溝進入內環下壓土體(圖 9)。



圖 3 於模具內放置濾紙及透水石



圖 4 加壓導棒



圖 7 整平環之頂部及底部



圖 5 加壓裝置



圖 8 將土放入壓密盒，並放置濾紙及透水石



圖 9 放置壓桿及頂蓋並與導環對齊



圖 6 放砝碼使其靜置

3-4 試驗操作

先開啟電腦及資料擷取軟體，再打開電源供應器(供應 LVDT 電源)，先測試 LVDT 作動是否正常，確認設備作動正常後，按下紀錄數據的按鍵，並同時放下第一階載重 0.25kg，接著依序加壓，加壓順序為 0.25、0.5、1、2、4、8kg，解壓至 4、2、1kg，再加壓至 2、4、8、16、32 kg，每級加壓時間至少 24 小時，每級解壓時間至少 4 小時。實驗期間必須保持加入適量水量，維持壓密盒水位高於試體以維持試體飽和狀態。

壓密完成後將電腦擷取資料整理，繪製壓密曲線圖並找出壓密係數，以及計算壓縮指數及回脹指數。

四、試驗結果與討論

壓縮指數(C_c)與膨脹指數(C_s)是計算土壤沉陷量不可或缺的參數，而一般會進行單向度壓密試驗來求得，但單向度壓密試驗所需花費的時間較漫長，因此出現了很多經驗公式，藉由帶入簡單參數，就能得到壓縮指數(C_c)與膨脹指數(C_s)。本節主要將壓密試驗所得到的壓縮指數(C_c)、膨脹指數(C_s)與經驗公式做比較，看是否能透過簡單的物理試驗就能推算出 C_c 值，以節省時間。

4-1 壓縮指數(C_c)與膨脹指數(C_s)

將試驗數據計算後可以得到各別之孔隙比與有效應力圖(如圖 10、圖 11)，並以斜率計算得到壓縮指數(C_c)，再以割線法求出膨脹指數(C_s)值。本研究 C_c 值分別為 0.305 和 0.346， C_s 值為 0.031 和 0.039，將 C_s/C_c 之比值求出，兩個數據平均值 0.107，符合建議之 C_s 為 C_c 值的 1/5~1/10(Das, 2017)，計算結果如表 3。

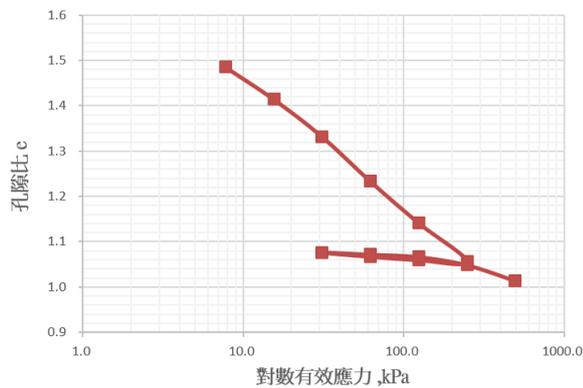


圖 10 Test No.1 之孔隙比與有效應力圖

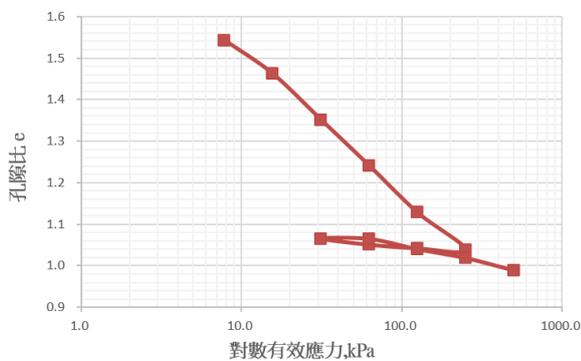


圖 11 Test No.2 之孔隙比與有效應力圖

表 3 單向度壓密試驗數值

Test No.	C_c	C_s	C_s/C_c
No.1	0.305	0.031	0.101
No.2	0.346	0.039	0.113
Average	0.326	0.035	0.107

將試驗結果之壓縮指數(C_c)與 Terzaghi and Peck(1967)公式計算之值做比較(如圖 12)，將 $LL=56\%$ ，代入未擾動黏土(式(2))，得到 $C_c=0.414$ ，代入重模黏土(式(3))，得到 $C_c=0.322$ 。本研究的壓縮指數 $C_c=0.305$ 與 0.346 ，平均值 $C_c=0.326$ ，經比較後發現本研究的平均值 $C_c=0.326$ 較接近重模黏土方程式所計算之值 0.322 (圖 12、表 4)，與我們的試體經過重模製作的條件相符。

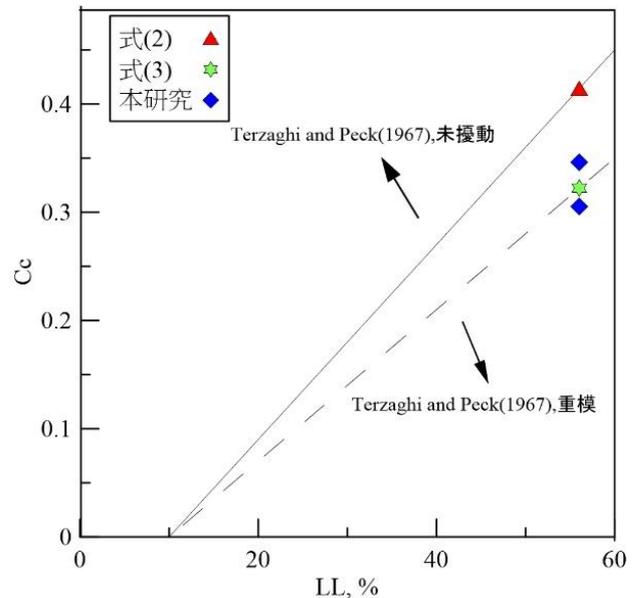


圖 12 試驗數值與與 Terzaghi and Peck(1967)經驗式比較

表 4 試驗數值與 Terzaghi and Peck(1967)經驗式之數值比較

LL(%)	C_c			
	式(2)	式(3)	Test No.1	Test No.2
56	0.414	0.322	0.305	0.346

與 Rendon-Herrero(1983)所提經驗式(式(4))相比，將比重=2.59 和初始孔隙比=1.519 與 1.549 代入公式，得到 $C_c=0.412$ 與 0.423 ，與本研究的壓縮指數 $C_c=0.305$ 與 0.346 相比來的高約 20%(圖 13、表 5)。

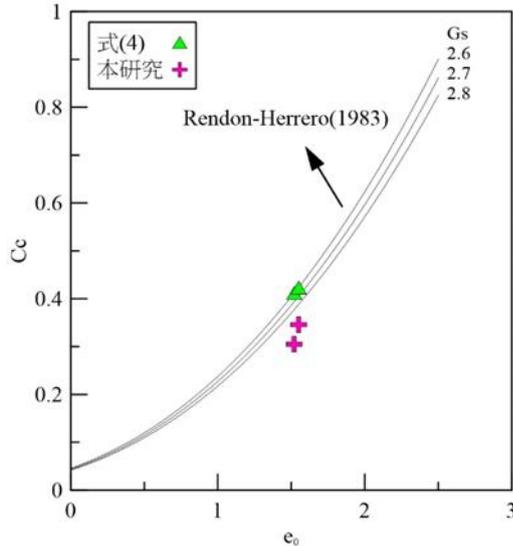


圖 13 試驗數值與 Rendon-Herrero (1983)經驗式(式(4))之 C_c

表 5 試驗數值與 Rendon-Herrero (1983)經驗式(式(4))之 C_c

Gs	C_c			
	式(4)		Test	Test
	$e_0=1.519$	$e_0=1.549$	No.1	No.2
2.59	0.412	0.423	0.305	0.346

與 Nagaraj and Murty(1985)經驗式(式(5))相比，將 $LL=56\%$ 代入經驗式(式(5))，得到 $C_c=0.340$ ，而本研究數據 $C_c=0.305$ 與 0.346 ，將兩次數據平均後 $C_c=0.326$ ，相當接近經驗公式所求得之 $C_c=0.340$ (圖 14、表 6)。

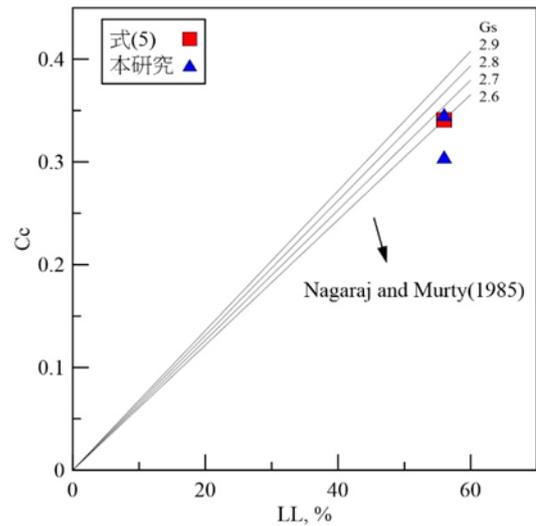


圖 14 試驗數值與 Nagaraj and Murty(1985)經驗式(式(5))之 C_c

表 6 試驗數值與 Nagaraj and Murty(1985)經驗式(式(5))之 C_c

Gs	LL(%)	C_c		
		式(5)	Test No.1	Test No.2
2.59	56	0.340	0.305	0.346

4-2 壓密係數 c_v

黏土的沉陷量與沉陷所需花費的時間，在工程上一直是重要的參數，透過式(6)可藉由壓密係數 c_v 將土壤沉陷所需花費的時間求出。

$$T_v = c_v t / (H_{dr})^2 \quad (6)$$

其中 T_v :時間因子

t :時間

H_{dr} :有效排水路徑

將試驗數據以三種作圖法計算各階載重下的壓密係數 c_v ，方法分別為對數時間法、根號時間法及初期 $\log-t$ 法，以相同載重不同方法所得到的 c_v 值做比較如圖 15、圖 16，得知壓密係數 c_v 並不是定值，可以看出 c_v 值皆隨著有效應力的變化而有所改變，從有效應力 15.5kPa 開始，有效應力增加 c_v 值也會跟著增加，此外，在大部分有效應力載重下，若使用初期 $\log-t$ 法所求得之 c_v 值較其他方法之值高一些，但若是使用根號時間法所得之

c_v 值相較其他兩種方法而言是較低的。

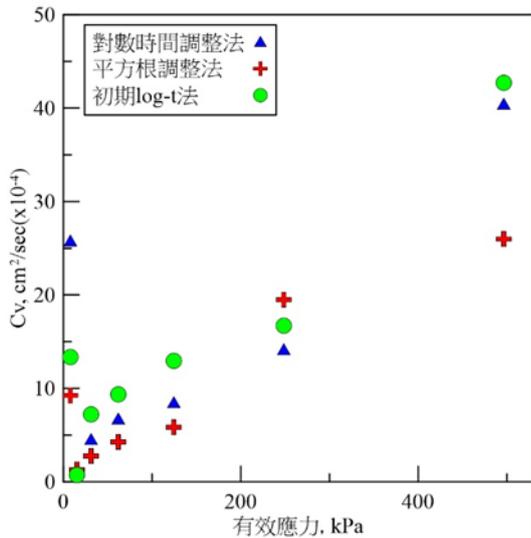


圖 15 Test No.1 以三種方法求得 c_v 值比較

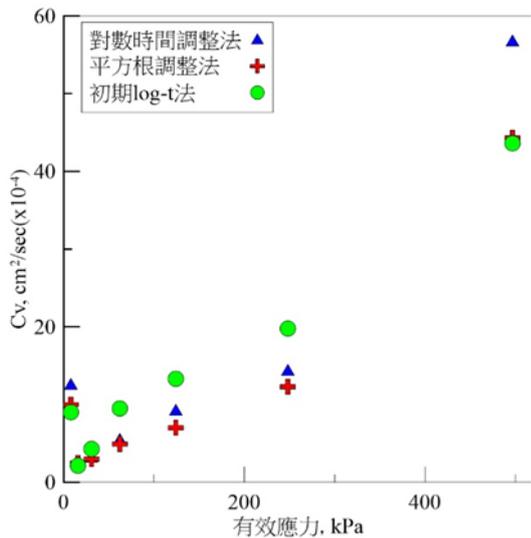


圖 16 Test No.2 以三種方法求得 c_v 值比較

4-3 滲透係數 k

單向度壓密試驗得到之結果除了求取 c_v 、 C_c 、 C_s 值以外，還可以藉由式(1)來推估滲透係數 k 值，如圖 17、圖 18 得知， k 值呈現之趨勢與有效應力之趨勢相反，也就是當載重越大時滲透係數越小，推測是因為載重加大時，土壤內的孔隙變小，造成水在土體內的移動變慢，所以滲透係數會變小。

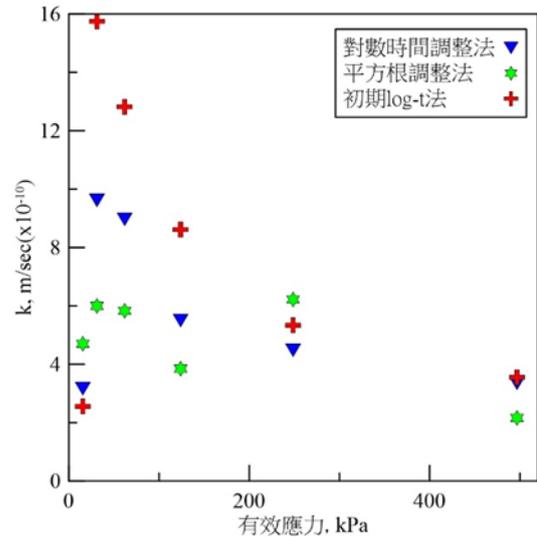


圖 17 Test No.1 不同方法下滲透係數值比較

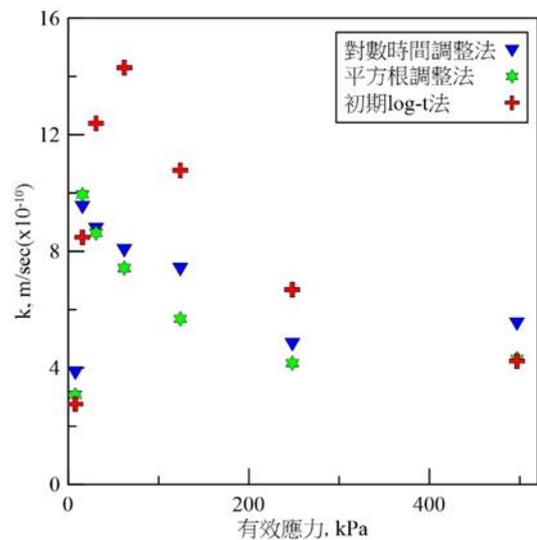


圖 18 Test No.2 不同方法下滲透係數值比較

五、結論與建議

5-1 結論

本研究主要是針對單向度壓密試驗的結果進行工程參數的探討，可得到以下幾點：

1. 依據試驗結果得到 C_c 、 C_s 與經驗公式 Terzaghi and Pack(1967) 和 Nagaraj and Murty(1985) 所求得相當接近，由此若是在無法操作試驗的情況下，可以使用公式當作參考指標；而和 Rendon-Herrero(1983) 相比，我們的數據則是比經驗公式低。
2. 隨著有效應力增加時，壓密係數 c_v 也會隨著增加。滲透係數則會減少。
3. 傳統平方根法其 c_v 值大多為最小的，初期 log-t 為最大。假設使用初期 log-t 法推算

壓密係數，因所得之數值較大，故對於後續沉陷量時間之推估將為較保守之狀態，由此可得知壓密係數對沉陷量推估時間具有一定的影響程度。

5-2 建議

有關於高嶺土壓密特性之探討，藉由高嶺土已知特性，來研究黏土在壓密計算時，藉由不同方法求得壓密參數之比較，以及直接使用經驗公式，是否與實際實驗數據有極大的差異。另外，本實驗由式(1)推論得出 k 值，後續也可以結合變水頭試驗來驗證，將其試驗數據計算出 k 值是否與本試驗符合。

參考文獻

1. Braja M. Das, Khaled Sobhan, Principles of Geotechnical Engineering ,9/e Edition, Chapter 11, pp.382~401,2017.
2. Nagaraj, T., and Murty, B. R.S. "Prediction of the Preconsolidation Pressure and Recompression Index of Soils," Geotechnical Testing Journal, Vol. 8, No. 4, pp.199-202,1985.
3. Rendon-Herrero, O. "Universal Compression Index Equation," Discussion, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.109, No.10, pp.1349, 1983.
4. Terzaghi, K., and Peck, R. B, Soil Mechanics in Engineers Practice, 2nd Edition, Chapter 3, pp.100~116,1967.
5. 許澤善，電腦輔助繪圖功能之土壤力學試驗，第 10 章，第 123~137 頁，2007。

利用多層次外牆恆溫裝置降低室內溫度之初步研究

沈茂松¹ 張志誠² 許雅筑³

¹ 國立高雄科技大學土木工程系教授

² 國立高雄科技大學土木工程學系助理教授

³ 國立高雄科技大學土木工程系碩士班

摘要

本研究模仿橘子皮之多肉、保濕之特性，發展出多層次外牆恆溫裝置，利用導水版與不織布外包密封的帆布，由上打入冷卻水，用以降低室內溫度。

透過屋頂與外牆覆蓋多層次外牆恆溫裝置的接觸，用水流的方式帶走外牆的熱源，在案例研究上，選擇屋頂陽台加蓋的鐵皮屋作為實驗對象，並透過此案例驗證多層次外牆恆溫裝置得以降低室內溫度。

本研究從 2020 年 3 月 15 日量測至今 2121 年 5 月 2 日，一年多來得知覆蓋 1/3 的多層次外牆恆溫裝置的七樓屋頂鐵皮屋，冬天室內溫度確實比室外溫度高，且維持在 23 ~ 28 °C 之間。而在夏天有明顯的降溫效果，跟外牆輻射溫度 40 ~ 45 °C 比起室內溫度最高溫落在 33 ~ 35 °C 降低了許多，若鐵皮屋體全部包覆，其效果更好。

本研究證實，年耗電量比原先空調設備降低許多，在溫度上更是有效隔絕熱源與調節室內溫度，減少了能源消耗與增加室內舒適度，為一項節能減碳與降低環境負擔的技術。

關鍵字：空調系統、多層次、恆溫裝置

Preliminary Study on Using Multi-layer External Wall Constant Temperature Device to Reduce Indoor Temperature

Mau-Song Sheen¹ Chih-Cheng Chang² Ya-Chu Hsu³

¹ Professor, Department of Civil Engineering, Kaohsiung University of Sciences and Technology

² Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Kaohsiung University of Sciences and Technology

³ Graduate student, Department of Civil Engineering, Kaohsiung University of Sciences and Technology

ABSTRACT

This research imitates the fleshy and moisturizing properties of orange peels, and develops a multi-layered external wall thermostat, which uses a water guide plate and a non-woven fabric to wrap a sealed canvas, and cool water is injected from the top to reduce the indoor temperature.

Through the contact between the roof and the external wall covering multi-level external wall thermostats, the heat source of the external wall is taken away by water flow. In the case study, the tin house covered with the roof balcony is selected as the experimental object, and the multi-level is verified through this case. The external wall thermostat can reduce the indoor temperature.

This research has been measured from March 15, 2020 to May 2, 2021. For more than a year, it has been learned that the 7th-floor roof tin house with a multi-layer external wall thermostat covering 1/3 of the exterior wall has a higher indoor temperature than the outdoor temperature

in winter. , And maintained between 23 ~ 28 °C. In the summer, there is a significant cooling effect. Compared with the outer wall radiation temperature of 40 ~ 45 °C, the highest indoor temperature is 33 ~ 35 °C, which is much lower. If the iron skin house is fully covered, the effect will be better.

This research confirms that the annual power consumption is much lower than that of the original air-conditioning equipment, and it effectively isolates the heat source and regulates the indoor temperature in terms of temperature, reduces energy consumption and increases indoor comfort, and is a technology that saves energy, reduces carbon and reduces environmental burdens.

Keywords: air conditioning system, multi-level, constant temperature device

一、緒論

1-1 研究動機

台灣位於北緯 23.5 度 (北迴歸線) 之間氣候多變，夏天濕熱、冬天濕冷，年平均溫度 23 °C~25 °C，但夏季高溫曾達 39.7 °C，夏季人體的舒適溫度為 25 °C~28 °C，而且人一天有 3/4 活動的時間在室內，混凝土的熱傳導細數高、熱傳導率比較慢，混凝土在日間吸熱後，會慢慢釋放熱能，太陽輻射熱直接傳導或間接穿透鋼筋混凝土牆或屋頂進入屋內，故在大量鋼筋混凝土建築物的都市產生熱島效應(每棟鋼筋混凝土建築物是一個散熱的島嶼)。而在寒冷的冬天，經過一夜寒風，輻射冷溫會從鋼筋混凝土中釋放出來，雖然冬季的白天豔陽高照，但室內低溫仍令人難耐。

1-2 研究目的

為隔離太陽輻射熱，在綠建築的概念上：在建築物外牆上設計一個隔離空間放置植物，或以隔熱塗料塗抹在鋼筋混凝土外牆上，依目前的效果約可降低室溫約 3 °C~5 °C(39.7-5=34.7 °C，仍超過夏季人體的舒適溫度為 25 °C~28 °C)，故室內人體仍需以冷氣來降溫。

混凝土建築物的散熱慢，導致夏天氣溫升高容易且有熱島效應的產生，氣溫的升高間接導致空調的使用率，然而空調設備系統耗電量佔建築整體耗電 30% 以上，對於建築節能有很大的影響，主因在於建築生命週期為六十年，其中佔整體建築生命週期營運管理的比例是最高的，因此，節約空調設備系統能源效益是最有效率，與此同時降低空

調使用率或提高其使用效率是本研究的目的。

1-3 研究方法

本研究模仿橘子皮之多肉、保濕之特性，發展出多層次外牆恆溫裝置，利用導水版與不織布外包密封的帆布，由上打入冷卻水，用以降低室內溫度。本多層次外牆冷卻系統安裝在大樓屋頂陽台上增建的鐵皮屋的外牆與屋頂上，將氣冷式冰水機或水冷式冰水機製作 6~30 °C 的水，經由水管進入以模組化的多層次外牆恆溫裝置，從屋頂向兩側外牆循環降溫，在降溫過程中，利用 24 小時 12 點自動記讀的溫度量測儀，記錄鐵皮屋室內之側牆、屋頂、室內空間之 24 小時溫度變化；同時在鐵皮屋外牆、屋頂面及室外空間，量測一年四季的溫度變化，用以瞭解本研究多層次外牆冷卻系統的降溫情形，並與一般冷氣系統的耗電諒做比較分析，瞭解其節能的結果，研究流程。

1-4 研究流程

本研究流程將從一開始的緒論到最後的結論與建議，其中包含文獻回顧，將說明台灣各地區溫度、綠建築、建築生命週期與空調設備構造等，方法將設計一完善的冷卻系統與結合系統與牆面外層改善，實驗將分為實驗組與對照組，並收集與整理資料，依序完成每階段後，在最後對此實驗進行結論與建議，此研究流程圖，如圖 1 所示。



圖 1 研究流程圖

1-5 論文架構

依據前述的研究背景、動機與目的確立了研究範圍及方向，再者收集利於本研究的相關文獻，並實現本研究系統設計方法，透過系統設計的驗證做資料分析與說明，最終提出對於本研究的結論與建議，其架構主要分為以下幾項：

第一章：敘述本研究的研究背景、研究動機、研究目的、研究流程及論文架構。

第二章：相關研究文獻回顧，針對台灣各地區溫度、綠建築、建築生命週期之二氧化碳排放量與空調設備構造

第三章：說明本研究所提出的設計方法與理念，包含冷卻系統設計與結合系統與牆面外層改善。

第四章：實驗資料收集與分析，並驗證冷卻系統設計與牆面外層改善效果。

第五章：根據本研究之實驗結果進行討論與說明，並提出未來研究方向與建議。

二、文獻回顧

台灣多數都市地形不同與居住人口密度差異甚大，近年受到環保意識的高漲，綠建

築也隨之被多數建築師所採納，不僅戶外綠地空間提升，政府也嘗試建立都市綠廊道，以減低都市熱島效應的影響，隨之而來的能源議題與碳排放量等問題，造就耗電家具的發展，如空調設備使用效率與系統最佳化的改善，降低了能源的消耗，使未來面臨能源耗竭有更好的應付方式。

2-1 熱島效應影響

熱島效應是世界上多數大城市常見的問題，如台北、高雄、上海與東京等地區。主要受到都市地區的汽機車廢氣排放與冷氣設備等影響，配上高密度建築物外牆與柏油路面比熱小容易吸收輻射，造成熱源不易消散，尤其都市原本綠地就少，植物或樹木無法透過蒸發過程使大氣溫度降低，使得都市地區溫度較鄰近郊區高，此現象即稱為都市熱島效應 (urban heat island effects)，如圖 2 所示。



圖 2 熱島效應示意圖

He (2018); 林炯明 (2010) [1] [2] 表示此影響範圍甚廣可從環境因素探討，即溫度、日照時數、降雨等。在不同的城市或許有些許的差別，整體來說對人或其他敏感生物是可能造成不可逆的影響，茲分述如下：

2-1-1 溫度

談珮華&曾雅琪(2014) [3] 指出溫度受到多種因素的影響，如台灣為海島型氣候，容易受到季風與洋流等影響，而陸地上的影響在於人口密集度、都市化程度、工廠數量等，皆是改變局部地區氣溫或台灣整體氣溫的變化然而，都市熱島效應是全球都市所面臨的問題。

孫振義 & 林憲德 (2006) [4] 如要辨別都市化程度是一項參考指標，而過去溫度測站顯示溫度較區域性，綜觀台灣人口密集且高樓林立，量測點位不易足以代表一確切鄉

鎮。

孫振義 (2008) [5]認為遙測法可提升準確度與大範圍量測且即時性，以利於顯示鄉鎮與都市熱島效應在台灣中央氣象局，有著 20 年的長期監測，如表 1。

表 1 台灣 1991 - 2020 各地區月均溫 (°C)，資料取自中央氣象局

地區	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	平均
臺北	16.6	17.2	19	22.5	25.8	28.3	30.1	29.7	27.8	24.7	22	18.2	23.5
基隆	16.1	16.4	18.1	21.6	24.8	27.6	29.5	29.1	27.2	24.2	21.5	18	22.8
宜蘭	16.6	17.1	19	21.9	24.7	27.3	28.9	28.6	26.8	23.8	21.1	17.9	22.8
新竹	15.7	16	18	21.9	25.2	27.9	29.3	28.9	27.3	24.4	21.5	17.7	22.8
臺中	17	17.7	20.1	23.5	26.4	28.1	28.9	28.4	27.8	25.5	22.6	18.7	23.7
嘉義	16.8	17.7	20.2	23.5	26.3	28.3	28.9	28.4	27.4	24.9	22	18.4	23.6
臺南	17.8	18.9	21.6	24.9	27.5	28.9	29.4	28.9	28.6	26.3	23.4	19.6	24.7
高雄	19.7	20.7	23	25.7	27.8	28.9	29.4	28.9	28.5	26.9	24.5	21.2	25.4
花蓮	18.3	18.7	20.3	22.8	25.3	27.5	28.7	28.4	27	24.9	22.5	19.7	23.7
臺東	19.7	20.2	21.8	24.1	26.4	28.3	29.1	28.8	27.7	25.8	23.6	20.8	24.7
澎湖	17.1	17.4	19.9	23.2	25.9	27.9	28.9	28.6	28	25.5	22.7	19.1	23.7

雖只有某些縣市觀測站，但我們從中可發現都市與鄉鎮差異，如同為北部地區 (亞熱帶) 的台北 (都市) 與宜蘭 (鄉鎮)，七月平均溫度相差 1.2 °C，南部地區 (熱帶) 的高雄 (都市) 與台東 (鄉鎮)，七月平均溫度相差 0.3 °C，如從 4 月份即可看出相差 1.6 °C，如圖 3。

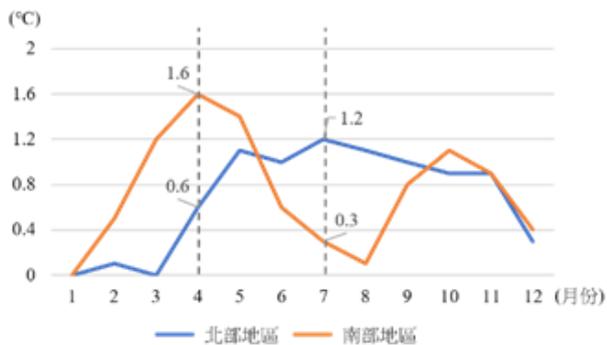


圖 3 北部與南部地區都市與鄉鎮月平均溫差 (1991 - 2020)

2-1-2 日照時數

在城市的發展快速下，台灣多數城市面臨著空氣汙染問題，尤其近年台灣 PM2.5 日漸嚴重，日照時數也隨著濃度升高而減少，生產力上植物可能受到日照不足的影響導致收成效果不佳，火力發電廠需降載降低 PM2.5 濃度，而太陽能更受到日照不足而降低發電的總量。

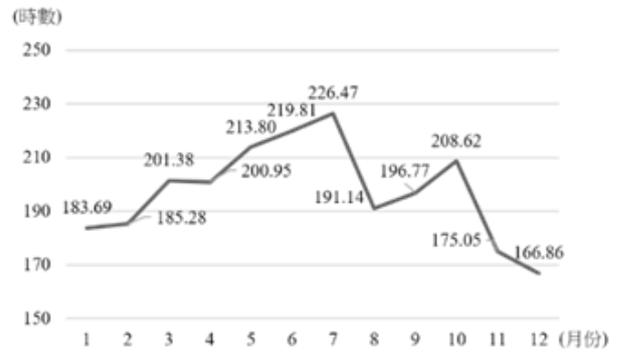


圖 4 高雄日照月均時數 (2000-2020)，資料取自中央氣象局

如圖 4 所示，我們可以發現在這 21 年的每月平均時數中，七月與八月差異相當大，兩者相差 35.33 小時，而溫度僅差了 0.5 度，由此可知，日照的減少對於溫度差異不大，熱空氣仍存留都市中消散不去。表 2 各地月日照時數。

表 2 台灣 2000 - 2020 各地區月平均降雨量，資料取自中央氣象局

地區	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	全年日照	平均
臺北	81.4	80.7	98.2	95.3	111.3	115.4	178.7	182.9	156.7	118.8	93.3	82.2	1395.0	116.2
基隆	55.6	59.7	86.8	96.0	117.4	146.1	243.2	216.7	149.3	88.5	63.3	51.3	1374.0	114.5
花蓮	69.6	71.4	88.0	97.8	125.8	185.3	265.4	230.5	169.7	131.8	92.4	76.4	1604.2	133.7
宜蘭	69.4	71.3	97.8	99.6	117.9	159.5	245.0	218.0	155.1	96.3	67.5	66.4	1463.6	122.0
澎湖	99.6	94.0	137.4	150.8	184.3	212.8	270.6	228.3	212.7	190.8	126.4	116.6	2024.2	168.7
臺南	176.8	168.1	182.9	177.7	196.9	198.9	205.1	173.3	187.0	206.2	168.4	170.3	2211.6	184.3
高雄	183.7	185.3	201.4	201.0	213.8	219.8	226.5	191.1	196.8	208.6	175.1	166.9	2369.8	197.5
嘉義	164.0	146.4	164.5	156.3	179.8	186.3	206.1	179.8	190.5	207.4	160.8	165.8	2107.8	175.6
臺中	176.8	153.6	156.7	134.0	154.0	159.9	191.4	152.4	173.3	210.1	176.3	177.7	2016.2	168.0
新竹	110.6	90.9	106.9	112.9	151.4	186.1	244.6	210.5	190.5	192.7	142.0	125.8	1864.9	155.4
臺東	91.2	89.4	95.3	114.7	150.7	213.0	258.0	225.0	179.1	163.4	121.5	97.2	1798.4	149.9

2-1-3 降雨

降雨是降低城市內溫度最好的辦法之一，月降雨量與月平均溫度成反比。

Chow & Roth (2006) [6] 表示降雨量越多溫度越低，尤其年降雨量減少 1mm，Arifwidodo et al. (2015) [7] 指出都市熱島強度 (Urban Heat Island Intensity, UHII) 則會提升 0.0021K，Zhao et al. (2014) [8] 指出降雨量減少約 500mm 差異可到 1.1K，降雨確實是可以降低城市熱島效應，原因主要是受到地表熱量被溫度較低的雨水以潛熱的方式蒸發，然而，都市不透水層的增加，減少了雨水停留在地表的時間，使雨水沒有足夠的時間來延長蒸發時間，使降雨過後城市溫度快速回到未降雨前之溫度。

如表 3 台灣各地降雨量，高雄月降雨量與溫度七月與八月確實 200.15mm 與 0.5 °C 差異，如圖 5 所示。

表 3 台灣 2000 - 2020 各地區月平均降雨量，資料取自中央氣象局

地區	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	年降雨量
臺北	92.9	123.1	156.9	146.3	236.3	328.9	214.4	343.5	343.8	134.2	95.9	96.5	2312.6
基隆	337.2	334.1	247.7	200.1	292.5	294.5	123.7	219.8	433.0	354.5	408.4	373.6	3619.2
花蓮	60.1	63.5	79.5	77.2	179.7	161.2	210.1	256.2	350.8	320.6	160.2	85.8	2004.8
宜蘭	165.0	141.2	117.5	112.0	234.4	201.4	146.7	255.4	409.6	393.3	318.4	256.5	2751.4
澎湖	20.3	22.4	47.2	79.4	124.7	152.5	185.8	258.7	126.0	25.0	31.3	31.2	1104.6
臺南	19.4	13.8	23.5	58.1	156.1	346.9	338.3	469.8	172.5	34.5	30.0	16.1	1679.1
高雄	18.7	11.7	21.6	54.6	224.6	401.4	360.5	562.1	242.5	54.6	32.7	22.1	2007.1
嘉義	27.5	27.9	45.3	80.0	166.8	316.2	405.3	444.5	253.7	31.5	26.4	28.8	1854.1
臺中	38.1	45.7	74.5	131.8	266.3	335.8	321.0	359.4	172.6	26.7	30.8	35.7	1838.5
新竹	78.3	101.1	151.6	167.0	241.5	244.9	128.8	205.8	208.3	53.3	64.1	66.3	1711.0
臺東	34.8	33.8	35.4	57.4	140.5	208.1	252.8	321.1	279.6	193.6	115.8	48.9	1721.7

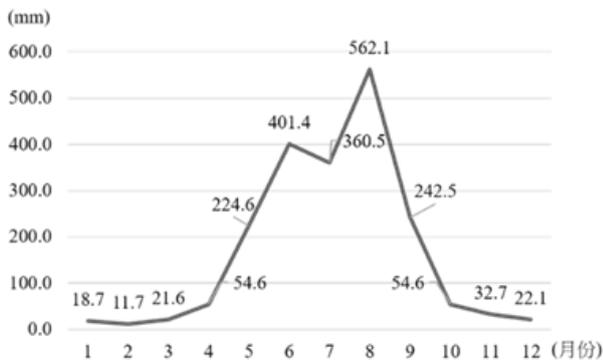


圖 5 高雄月平均降雨量 (2000-2020)，資料取自中央氣象局

2-2 BTM-4208SD 12 點記憶溫度計

BTM-4208SD 是一款專業 12 點頻道的熱電偶測溫記錄器，可同時測量 12 個不同溫度點的溫度，支持 K/J/T/E/R/S 類型熱電偶輸入，內置 SD 記憶卡插槽，支持 1GB/16GB 記憶卡，用戶可自行選擇採樣率進行測溫數據的自動記錄，適用於實驗室及工業製造溫度的測溫與記錄，機體如圖 8 所示，規格如表 4 所示。



圖 8 BTM-4208SD 12 點記憶溫度計

其特點如下：

1. 12 點溫度測量及記錄。
2. 支持 K/J/T/E/R/S 類型-100~1300 °C 熱電偶輸入測溫。
3. 可外接 SD 記憶卡進行數據儲存，最大 16GB。
4. 可手動或自動記錄儲存。
5. 可設置 1~3600 秒記錄間隔時間。
6. 內建萬年曆及時鐘功能。
7. 數據保持及記錄最大/最小值功能。
8. 內置 RS232/USB 連接界面，可連接電腦下載及分析數據。
9. 內置直流 9V 電源接口，可選配電源配接器供電使用。
10. 超大帶背光 LCD 數字顯示，可同時顯示 8 個測溫點溫度。
11. 超量程指示。

表 4 BTM-4208SD 12 點記憶溫度計規格說明

一般規格		
線路	大型積體電路,內建式軟體修正功能,取代傳統硬體電路。	
顯示器	82mm*61mm 超大型液晶顯示器。	
感應器形式	熱電偶測棒,Type K 及 Type J/T/E/R/S。	
輸入通道	12 點式輸入, T1,T2,T3,T4,T5,T6,T7,T8,T9,T10,T11,T12。	
功能	攝氏/華氏單位切換,讀值鎖定,記錄功能(最大值/最小值),比較值。	
解析度	0.1°C/1°C 或 0.1°F/1°F。	
記錄取樣時間設定	自動	1 秒~3600 秒。@當設定 1 秒時會有機率資料遺漏
	手動	按一次資料記錄鍵儲存一筆資料與時間。@當設定 0 秒時適用
資料錯誤	總比數最大 0.1%。	
鎖定功能	能將測量顯示值固定於顯示器上	
記憶記錄功能	記錄測量中之最大值及最小值	
零點調整	可校正溫度零點調整值	
測棒輸入插孔	熱電偶測棒:標準雙針式熱電偶插孔.T1~T12	
過載指示	顯示"-----"	
顯示器取樣時間	大約 1 秒	
資料輸出	RS-232 電腦連接介面	
工作電源	直流 3 號(UM3/AA)電池 8 顆或直流 9 伏特轉換器	
消耗電流	無使用記憶卡/背光約直流 7.5mA 當記憶卡時約直流 25mA 使用背光約直流 11mA	
工作環境溫度	0°C~50°C(32°F~122°F)	
工作環境溼度	需低於相對溼度 80%R.H	
外觀尺寸	225×125×64 mm	
重量	944 公克/2.1 磅	
電氣規格		

感應器型式	解析度	測量範圍	精確度
Type K	1°C	1000°C ~1300°C	±(0.4%+1°C)

三、多層次外牆恆溫裝置降低室內溫度之研究

本研究方法源自於導水版，透過導水版架高與不織布使水可以均勻流至預留管道或下水孔。此作法在景觀工程與屋頂工程最為常用，景觀工程在一般陽台上如要建造花園常遇到排水阻塞問題，通過架高的導水版使多餘的水可以順利流至下水孔，而不織布阻隔泥沙流至下水孔，另一功能可藉由毛吸現象，使水快速擴散至整個花園，減少澆水分布不均的問題，因此，本研究利用不織布的毛吸現象減少水分散不均，而不織布飽和時，把水引至回流管回收，再透過冷卻水塔與馬達進行循環，以此形成本研究恆溫裝置之方法。

本多層次外牆冷卻系統為將氣冷式冰水機(88cm×55cm×110cm) 水冷式冰水機(90cm×50cm×100cm) 可製作 6~30°C 的水經由水管進入以模組化的:

1. 溫、冰水導水模組:包含厚 10mm 導水版外包 1mm 不織布再外包 6mm 橡皮墊(總厚度 24mm)，及 T 型導水器及接頭(含開關),圖 9 為溫、冰水導水模組示意圖,圖 10 為導水板外包不織布製作,圖 11 為 T 型導水器連接導水版,圖 12 為橡皮墊包覆內部模組。

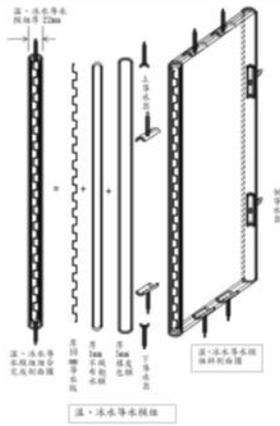


圖 9 溫、冰水導水模組示意圖



圖 10 導水板外包不織布



圖 11 T 型導水器



圖 12 橡皮墊包覆

2. 溫、冰水導水模組外面以孔目 10cm 之 #2 點焊鋼絲網固定於牆面，圖 13 為導水板固定於牆壁示意圖，圖 14 為導水板實際固定於牆面之情形。

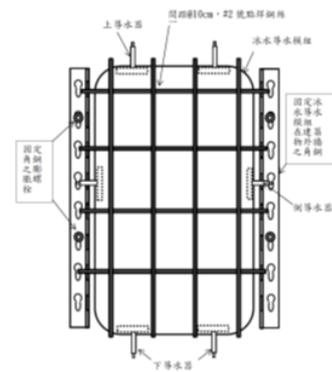


圖 13 導水板固定示意圖



圖 14 導水板固定於牆面

3. 氣冷式或水冷式冰水機，溫度控制範圍：6~30°C，冰水泵流量：108 公升/分~162 公升/分(市面現有冰水機)，如圖 15 所示。
4. 溫、冰水機供水與補水系統，包含自來水供水管與開關、尾水回收筒、滿水溢流管，如圖 15 所示。



圖 15 冰水機、供水與補水系統

5. 分水器，將冰水機製造的冰水分水到各個導水模組，如圖 16 所示。



圖 16 分水器 圖 17 回水合流器

6. 尾水回收系統(回收冰水進入導水模組下方流出的尾水)，包含一水筒與滿水抽水系統(如同屋頂水塔之浮筒馬達抽水系統)，尾水回收抽入冰水機供水筒，如圖 18 所示。



圖 18 回水合流器

3-1 導水版

導水版材質為聚乙烯 (HDPE) 或聚苯乙烯 (PVC) 取代過往的礫層作為洩水通道，在上面通常會鋪一層質地緊密不織布，阻止泥沙微粒滲入到下水孔，預防下水孔因泥沙而堵塞，相較於礫石導水版更加的省錢、省時與節能，在施工上成本也較礫石排水低許多，且更適合用於屋頂綠化防水層，質量輕且具有隔音與隔熱之效果，可快速把多餘水份從泥沙中排出，應用範圍廣泛，如屋頂花園、綠化斜屋頂、機場跑道、隔熱層與人行道等，在目前導水版有尺寸眾多，已能符合各種大眾需求，因此，演化出不同的使用方式，如防水、蓄水、生長介質與植栽等，在屋頂防水上，多數人會藉由防水漆作為防水的塗料，但長期的日曬下防水漆容易產生裂縫甚至脫

落，導致每隔數年需重新粉刷，如在防水漆上層再鋪設一層導水版，阻隔陽光直接照射且能使防水漆保持通風，亦能延長防水漆使用年限，再透過土層的覆蓋與種植喬木與植物等，增加基地綠化量降低都市熱島效應，可謂是一舉多得。蓄水主要作為雨水回收第一道過濾，減少雨水回收桶中的雜質延長使用年限，生長介質意指植物的生長媒介(有機無土與無機無土)，土壤太少會導致植物因根裸落而死亡，太多會使屋頂或陽台有載重的疑慮，使用生長介質能代替土壤減少病蟲孳生，再藉由無機與有機無土介質混合，既能保有透水與提供植物養分生長。

3-2 多層次外牆恆溫裝置設計

多層次外牆恆溫裝置分為恆溫組件與冷卻系統，恆溫裝置主要裝設在一建築物牆體上緊靠著牆面，並藉由主架將恆溫組件固定於牆體上。恆溫組件由墊體、包覆層、導流板與導水管組成，如圖 3-1，導水管把冷卻裝置之冷水引進，以滴流的方式進入導流板，藉由導流板外的包覆層(不織布)，把水均勻分布在墊體內側，使墊體外側的牆體達到降溫的功效。冷卻系統設於建築物外並連通恆溫組件，輸送特定溫度的水進恆溫組件，再從恆溫組件中流出至回流管最終到儲水槽，並已無限循環的方式讓水在冷卻系統與恆溫組件中流通，如圖 19 所示。

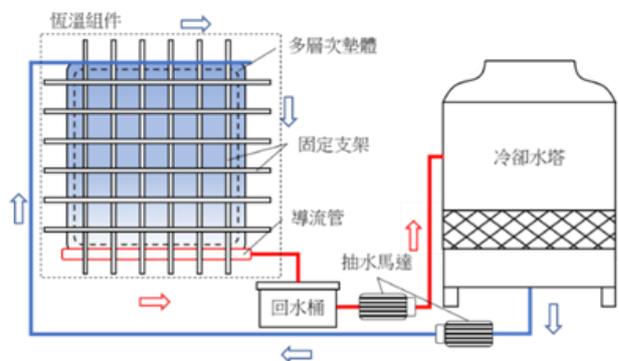


圖 19 多層次外牆恆溫裝置配置

3-3 實驗準備

本實驗基地位於高雄科技大學建工校區土木二館頂樓的鐵皮屋，實驗場地大小為 102.4 (8 × 12.8) 平方公尺，樓高為 3.85 公

尺，整體主要以鋼骨、型鋼與浪板組成，屋頂形式為雙斜屋頂，實驗基地在北面與另一側屋頂相連接，主要開口在西面與南面，皆屬於日照充足牆面，由於此實驗基地為於七樓樓頂，四周並無其他高樓遮擋，導致本實驗基地內部在長期的陽光照射下內部溫度高且熱源不易消散，因此，本研究選擇此位置作為實驗基地以改善室內溫度使舒適度提升，利於室內後續作為實驗場地，如圖 20 為未加裝本系統現況圖，圖 21 為加裝本系統後現況圖。



圖 20 實驗基地未加裝系統現況圖



圖 21 實驗基地加裝系統現況圖

室內偵測器則採用 BTM-4208SD 12 點溫度偵測器，如圖 22 所示。



圖 22 室內數據採集

室外溫則採用酒精溫度計，並以人工的方式做紀錄，量測範圍 $0 \sim 100^{\circ}\text{C}$ ，準確度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，圖 23。



圖 23 室外數據採集

3-4 樓板載重分析

本多層次外牆恆溫裝置設備有冷卻水塔與恆溫組件組成，在建築技術規則建築構造編對於活載重有相關之規定，如表 4-1，教室活載重因小於 $250\text{kg}/\text{m}^2$ ，設備形式尺寸如下：

1. 冷卻水塔：底座直徑 86cm ，高 80cm (內有馬達)，使用金日實業有限公司之 KST-N-8RT 冷卻水塔，含水總重 $W=120\text{kg}$ ，圓盤底座直徑 $d=86\text{cm}$ ，底座下傳載重

$$q_0 = W/A = 120\text{kg}/(\pi * 86^2/4) = 0.02067\text{kg}/\text{cm}^2 = 0.207\text{t}/\text{m}^2, \text{ 每平方公尺受力 } 207\text{kg}/\text{m}^2。$$

2. 恆溫組件：水重 $W_w = 1\text{t}/\text{m}^3 \times 1\text{m} \times 1\text{m} \times 0.013\text{m} = 13\text{kg}/\text{m}^2$ ；厚 10mm 導水版 (塑膠製厚 1mm)，外包 $1\text{mm} \times 2$ 不織布，共 2mm 約 $0.1442\text{g}/\text{cm}^2$ ，再外包 0.5mm 防水帆布，約 $0.1002\text{g}/\text{cm}^2$ ，總厚度 $13\text{mm}=0.013\text{m}$ ，及 T 型導水器及接頭 (含開關)。試驗通水時，鐵皮屋牆壁與屋頂每 m^2 受力為 2.444kg (W_p)。
3. 線徑 5mm 點焊鋼絲網，網目 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ ，重 $W_s = 3.09\text{kg}/\text{m}^2$ 。
4. 外牆或鐵皮屋外牆或鐵皮屋頂，固定角鋼主架， $40\text{mm} \times 20\text{mm} \times 5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ 重 $W_a = 2.16\text{kg}/\text{m}^2$ 。

5. 恆溫組件總重 $W_o' = W_w + W_p + W_s +$
 $W_a = 13 \text{ kg/m}^2 + 2.444 \text{ kg/m}^2 +$
 $3.09 \text{ kg/m}^2 + 2 \text{ 支} \times 2.16 \text{ kg/m} =$
 22.854 kg/m^2 。

四、多層次外牆恆溫裝置降低室內溫度之初步研究結果分析

本章節主要說明實驗準備與實驗結果分析，透過一年室內 12 個監測點，室外 6 個與 1 個監測大氣溫度監測點，實驗結果證明，室內溫度比起室外確實下降不少，而在整體恆溫裝置營運成本也較一般室內空調機降低許多，也證實此方法確實有實用的效能。

4-1 實驗分析

本研究在室內偵測點位與室外點位相對應，室外為 6 個點與室內 12 個點，如表 5 所示。

表 5 室內量測日均溫

位置	點1	點2	點3	點4	點5	點6	點7	點8	點9	點10	點11	點12
室外	OT	OT	OT									
	1	2	3	4	5	6	W4	-	-	-	-	-
室內	IT	IT	IT									
	4	1	5	3	2	9	8	11	6	12	10	7

其中點位 3 以室內 (5) 作為室外兩點 (T3 與 T4) 的對應點位，在配置上我們分為三個階段，分別為前、後與儲藏室，前半部為使用多層次恆溫系統且可有或無冷水通過，後半部則為原本浪板無其他遮蔽，基地儲藏室並不在本研究實驗範圍內，以此比較恆溫組件在有開與沒有開冷卻系統間的溫度變化，最終與後半部無多層次恆溫系統做出兩者間的差異，如圖 24 所示為室外監測點位，如圖 25 所示為室內監測點位。

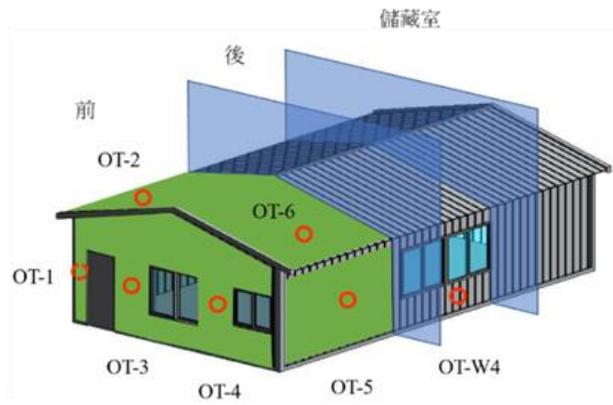


圖 24 實驗基地室外監測點位

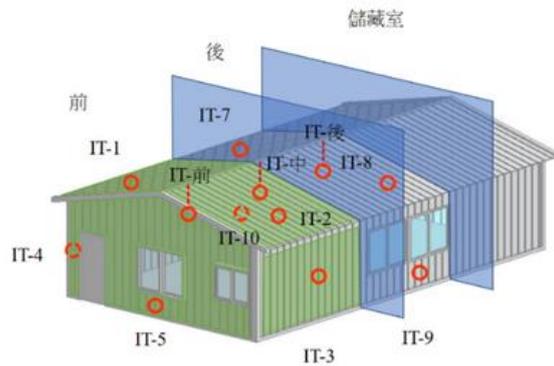


圖 25 實驗基地室內監測點位

本實驗也分為三個區間一是僅有恆溫組件、恆溫組件加冷卻系統 (多層次恆溫系統) 與多層次恆溫系統加開窗，時間分別為 2020/03 ~ 2020/06、2020/07 ~ 2021/01 與 2021/05 ~ 2021/06，由於室內為電子量測，可收集長時間資料，相較於室外量測需透過人做紀錄，因此，資料依照室外人員量測為主，量測區間介於每天早上 7:00 ~ 17:00，主要是受到日出與日落的關係，尤其台灣夏天日出與日落區間較冬天長，因而把時間訂在此刻。

4-2 恆溫組件

在僅有恆溫組件時，共紀錄 39 天，室外量測溫度最高點在 OT-2，量測溫度為 60.5°C (2020/06/04)，最低點在 OT-1，量測溫度為 23.0°C (2020/03/15)，如表 6 及圖 26。

在最低溫時我們可以發現西面室外溫度皆低於室內溫度，但在其他位置卻相反，我們可以解釋為室內處於恆溫且西面多數時間為陰影處，但室外其他點位受到太陽日照的因素與室內溫差最高差了 7.3°C ，證明僅有恆溫組件確實可以有效降低溫度，且可以讓室內達到恆溫效果（約 27.4°C ）。

4-3 恆溫組件與冷卻水塔

在恆溫組件與冷卻水塔搭配時，共紀錄 44 天，室外量測溫度最高點在 OT-2，量測溫度為 45.44°C (2020/07/24)，最低點在 OT-4，量測溫度為 24.17°C (2021/01/26)，如表 9。

表 9 室內量測日均溫

日期	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12
2020/7/9	33.62	37.08	35.08	34.53	33.61	35.50	37.15	38.07	35.61	37.36	35.43	35.94
2020/7/10	33.81	37.10	34.97	34.77	34.18	35.73	37.57	38.30	35.47	38.30	35.66	36.00
2020/7/11	34.36	39.51	36.21	35.87	37.07	37.49	39.14	40.40	36.31	39.92	37.25	37.87
2020/7/12	34.70	39.54	36.20	35.80	36.20	37.46	38.73	40.09	36.36	38.10	37.13	37.73
2020/7/17	32.35	36.53	34.05	33.73	32.98	34.91	36.34	37.47	34.54	35.72	34.78	35.27
2020/7/20	33.01	35.13	33.18	32.85	32.55	33.95	35.56	35.95	33.17	35.32	33.76	34.15
2020/7/22	33.48	37.44	35.25	34.55	34.73	36.02	36.67	37.49	35.47	36.31	35.69	36.30
2020/7/23	33.36	37.80	34.97	34.23	33.46	35.91	37.20	38.59	35.94	36.75	35.77	36.34
2020/7/24	33.53	38.25	35.57	35.22	34.44	36.62	38.02	39.17	36.07	38.52	36.35	36.99
2020/7/27	33.11	36.11	34.24	33.78	33.38	34.91	36.63	37.22	34.80	37.21	34.90	35.25
2020/7/29	31.74	35.07	33.14	32.38	31.46	33.58	34.68	35.68	33.58	34.38	33.48	33.94
2020/8/14	31.55	35.80	33.44	32.53	31.89	34.05	35.15	36.62	34.23	34.34	33.89	34.44
2020/8/18	31.72	35.60	34.04	33.03	32.38	34.27	35.50	36.65	35.25	35.98	34.18	34.57
2020/8/20	32.03	35.95	33.93	33.24	32.88	34.47	35.93	37.09	34.98	36.82	34.35	34.74
2020/9/7	35.08	35.99	34.36	33.28	33.54	34.45	35.78	37.22	35.49	36.07	34.32	34.59
2020/9/8	35.22	36.97	35.36	34.21	33.63	35.49	36.62	38.06	37.05	37.29	35.33	35.79
2020/9/9	36.21	37.95	36.19	34.83	34.71	36.14	37.04	39.01	38.05	37.03	35.99	36.45
2020/9/10	34.89	35.54	34.70	33.68	33.59	34.37	35.70	36.95	36.54	36.06	34.27	34.53
2020/9/15	34.02	34.84	33.25	33.42	32.77	34.17	34.75	36.81	37.25	36.03	33.67	33.81
2020/9/21	33.35	34.06	33.61	32.35	32.55	34.17	33.79	35.22	36.40	35.03	32.73	32.83
2020/9/22	34.89	35.04	33.69	32.56	33.44	34.93	34.22	35.38	36.59	35.54	32.93	32.98
2020/9/24	32.69	33.65	33.79	32.72	32.45	33.95	33.69	35.31	36.74	34.39	32.80	32.81
2020/9/25	31.57	32.40	32.54	31.45	30.95	32.75	32.63	34.10	35.26	33.36	31.60	31.69
2020/9/29	31.55	32.38	32.57	31.46	31.27	32.61	32.62	34.23	36.33	33.61	31.44	31.56
2020/10/6	32.18	33.60	33.60	32.08	31.42	33.11	33.86	35.50	37.48	33.60	32.53	32.83
2020/10/12	31.84	32.95	32.63	31.48	31.20	32.09	32.73	34.11	36.35	32.75	31.69	31.87
2020/10/15	31.67	33.03	32.91	31.51	31.09	32.63	32.93	34.52	36.84	32.66	31.80	32.12
2020/10/16	30.96	32.13	31.95	30.96	30.39	31.86	32.18	33.43	35.69	31.90	31.23	31.39
2020/10/20	29.89	31.11	31.38	30.04	29.44	30.50	31.47	32.91	34.69	31.23	30.22	30.56
2020/10/27	30.18	31.24	31.30	30.23	29.81	29.18	31.22	32.57	34.27	31.32	30.22	30.48
2020/10/30	29.12	29.78	29.73	29.12	28.57	29.23	29.95	30.62	30.33	29.73	29.27	29.48
2020/11/3	28.81	30.23	30.62	29.06	28.33	28.65	30.12	31.83	34.58	29.26	29.15	29.53
2020/11/10	30.29	31.86	30.21	28.67	29.81	29.64	30.60	32.23	33.23	30.41	29.34	30.37
2020/11/17	30.13	31.33	31.35	29.66	29.56	30.09	31.24	32.82	36.33	30.62	30.27	30.75

在室內量測溫度最高點在 IT-8，量測溫度為 40.40°C (2020/07/11)，最低點在 IT-4 (2020/12/22)，量測溫度為 23.07°C ，如表 10。

表 10 室內外量測日均溫差

日期	點 1	點 2	點 3	點 4	點 5	點 6	平均
2020/7/9	1.24	4.50	0.33	-1.39	1.30	0.08	1.01
2020/7/10	1.05	7.74	-0.55	-0.38	-1.42	5.71	2.02
2020/7/11	0.59	6.37	-2.82	-1.09	-2.93	3.61	0.62
2020/7/12	-1.13	3.52	-4.62	-0.20	-3.93	2.47	-0.65
2020/7/17	1.35	6.50	0.48	-0.16	3.40	0.08	1.94
2020/7/20	0.37	6.05	0.01	0.60	4.21	1.38	2.10
2020/7/22	0.95	3.35	0.19	0.42	-1.44	1.19	0.78
2020/7/23	-0.28	7.75	-1.91	0.47	3.20	0.29	1.59
2020/7/24	3.06	11.92	1.17	1.54	6.30	2.15	4.36
2020/7/27	1.92	6.39	1.17	1.36	4.19	1.10	2.69
2020/7/29	-0.51	5.89	-1.99	-0.01	2.93	-0.21	1.02
2020/8/14	-0.81	8.24	-1.71	-0.15	4.06	-0.51	1.52
2020/8/18	0.16	6.78	-0.76	2.09	3.21	0.57	2.01
2020/8/20	3.64	9.47	3.09	3.45	5.80	2.46	4.65
2020/9/7	3.55	4.08	4.09	2.47	1.51	2.43	3.02
2020/9/8	2.29	3.78	1.34	1.82	2.34	2.27	2.31
2020/9/9	3.76	4.62	3.21	1.98	0.71	2.29	2.76
2020/9/10	1.75	2.89	1.12	1.94	1.61	1.18	1.75
2020/9/15	2.64	6.54	2.39	5.63	4.94	2.13	4.05
2020/9/21	3.05	3.85	2.95	3.59	2.54	1.60	2.93
2020/9/22	2.79	2.75	2.17	3.81	2.04	2.05	2.60
2020/9/24	2.12	9.48	2.13	7.88	8.35	-2.90	4.51
2020/9/25	2.10	6.18	1.28	4.31	5.65	1.29	3.47
2020/9/29	5.54	6.78	8.31	6.43	5.95	6.17	6.53
2020/10/6	2.42	7.73	0.53	6.50	6.80	3.27	4.54
2020/10/12	2.29	4.32	1.69	4.76	2.49	2.04	2.93
2020/10/15	2.05	4.27	1.41	3.72	3.29	0.66	2.57
2020/10/16	2.15	4.82	2.16	4.72	4.43	2.70	3.50
2020/10/20	2.79	7.33	2.28	5.84	6.56	-0.03	4.13
2020/10/27	2.03	4.64	2.18	5.95	5.57	5.17	4.26
2020/10/30	1.10	3.17	1.18	2.28	3.51	2.12	2.23
2020/11/3	2.94	7.19	2.14	6.88	6.59	4.85	5.10
2020/11/10	1.54	5.64	3.01	6.57	3.43	2.34	3.76
2020/11/17	2.19	2.80	0.44	2.94	2.60	0.32	1.88

4-4 小結

從表中我們無法看出溫度高與溫度低的差別，由於受到本系研究方法的影響，能從各點位的平均溫差中發現最高溫差（室外-室內）可以差到 12.41°C ，但也發現溫差卻有負值兩者相差了有 4.62°C ，從總溫差平均來看此系統確實使室內溫度下降了 3.13°C ，如表 11。

表 11 室內外量測日均溫差

日期	點 1	點 2	點 3	點 4	點 5	點 6	平均
2020/7/9	1.24	4.50	0.33	-1.39	1.30	0.08	1.01
2020/7/10	1.05	7.74	-0.55	-0.38	-1.42	5.71	2.02
2020/7/11	0.59	6.37	-2.82	-1.09	-2.93	3.61	0.62
2020/7/12	-1.13	3.52	-4.62	-0.20	-3.93	2.47	-0.65
2020/7/17	1.35	6.50	0.48	-0.16	3.40	0.08	1.94
2020/7/20	0.37	6.05	0.01	0.60	4.21	1.38	2.10
2020/7/22	0.95	3.35	0.19	0.42	-1.44	1.19	0.78
2020/7/23	-0.28	7.75	-1.91	0.47	3.20	0.29	1.59
2020/7/24	3.06	11.92	1.17	1.54	6.30	2.15	4.36
2020/7/27	1.92	6.39	1.17	1.36	4.19	1.10	2.69
2020/7/29	-0.51	5.89	-1.99	-0.01	2.93	-0.21	1.02
2020/8/14	-0.81	8.24	-1.71	-0.15	4.06	-0.51	1.52
2020/8/18	0.16	6.78	-0.76	2.09	3.21	0.57	2.01
2020/8/20	3.64	9.47	3.09	3.45	5.80	2.46	4.65
2020/9/7	3.55	4.08	4.09	2.47	1.51	2.43	3.02
2020/9/8	2.29	3.78	1.34	1.82	2.34	2.27	2.31
2020/9/9	3.76	4.62	3.21	1.98	0.71	2.29	2.76
2020/9/10	1.75	2.89	1.12	1.94	1.61	1.18	1.75
2020/9/15	2.64	6.54	2.39	5.63	4.94	2.13	4.05
2020/9/21	3.05	3.85	2.95	3.59	2.54	1.60	2.93
2020/9/22	2.79	2.75	2.17	3.81	2.04	2.05	2.60
2020/9/24	2.12	9.48	2.13	7.88	8.35	-2.90	4.51
2020/9/25	2.10	6.18	1.28	4.31	5.65	1.29	3.47
2020/9/29	5.54	6.78	8.31	6.43	5.95	6.17	6.53
2020/10/6	2.42	7.73	0.53	6.50	6.80	3.27	4.54
2020/10/12	2.29	4.32	1.69	4.76	2.49	2.04	2.93
2020/10/15	2.05	4.27	1.41	3.72	3.29	0.66	2.57
2020/10/16	2.15	4.82	2.16	4.72	4.43	2.70	3.50
2020/10/20	2.79	7.33	2.28	5.84	6.56	-0.03	4.13
2020/10/27	2.03	4.64	2.18	5.95	5.57	5.17	4.26
2020/10/30	1.10	3.17	1.18	2.28	3.51	2.12	2.23
2020/11/3	2.94	7.19	2.14	6.88	6.59	4.85	5.10
2020/11/10	1.54	5.64	3.01	6.57	3.43	2.34	3.76
2020/11/17	2.19	2.80	0.44	2.94	2.60	0.32	1.88

在使用此系統下出現了兩天的總溫差為負值，分別為 2020/07/12 與 2020/11/26，回溯到原本資料顯示 11/26 溫度資料差別在於取平均時的誤差，導致日均溫差而有所不同，室內與室外溫度相比則較低，如表 12。

表 12 2020/11/26 室內外量測日均溫差負值詳細資料

位置	日期	測點	OT-1	OT-2	OT-3	OT-4	OT-5	OT-6	OT-6A	OT-7mm	CWB	平均	
室外	2020/11/26	OT01	32	35	36.5	35.5	37	36	36.5	38	38.6		
		OT02	31	35	31	32.5	36	36	46.5	38	38		
		OT03	32	34.5	32	32.5	32	32	35.5	38	37		
		OT04	30	28	29	28	29	29	36	37	36.6		
室內	2020/11/26	OT05	27	34.5	36	35	35.5	35	32.5	36	36.3		
		OT06	27	34.5	36	35	35.5	35	32.5	36	36.3		
		OT07	27	34.5	36	35	35.5	35	32.5	36	36.3		
		OT08	27	34.5	36	35	35.5	35	32.5	36	36.3		

但 07/12 本研究懷疑為實驗場所為密閉情況，且逢高雄最熱的月份，導致室內溫度較室外溫度高，如表 13。

表 13 2020/07/12 室內外量測日均溫差負值詳細資料

位置	日期	測點	OT-1	OT-2	OT-3	OT-4	OT-5	OT-6	OT-6A	OT-7mm	CWB	平均	
室外	2020/07/12	OT01	32	36	32	32	33	33	36	39	38.6		
		OT02	35	40	32	32	36	36	39	32	36.9		
		OT03	37	46	33	32	38	38	42	32	32.4		
		OT04	37	46	34	32	40	40	46	32	32.1		
		OT05	36	42	33	33	39	39	42	32	32.8		
		OT06	35	38	33	33	38	38	38	32	31.4		
		OT07	36	38	33	33.5	37	37.5	38	33	36		
		OT08	36.5	35.5	33	30	33	32	35.5	32	32.8		
室內	2020/07/12	OT09	32.5	36.5	38	38	37	33	39	32.4			
		OT10	32.5	36.5	38	38	37	33	39	32.4			
		OT11	32.5	36.5	38	38	37	33	39	32.4			
		OT12	32.5	36.5	38	38	37	33	39	32.4			
		OT13	32.5	36.5	38	38	37	33	39	32.4			
		OT14	32.5	36.5	38	38	37	33	39	32.4			
		OT15	32.5	36.5	38	38	37	33	39	32.4			
		OT16	32.5	36.5	38	38	37	33	39	32.4			

因此，本研究在 2021 年度 5 月起，探討打開窗戶是否會降低室內與室外溫度間得差異，此次的探討主要專注在中午時段，應證室內在通風下並搭配本研究方法，是否能降低室內溫度。

五、結論與建議

5-1 結論

本研究模仿橘子皮之多肉、保濕之特性，發展出多層次外牆恆溫裝置，利用導水版與不織布外包密封的帆布，由上打入冷卻水，用以降低室內溫度。

透過屋頂與外牆覆蓋多層次外牆恆溫裝置的接觸，用水流的方式帶走外牆的熱源，在案例研究上，選擇屋頂陽台加蓋的鐵皮屋作為實驗對象，並透過此案例驗證多層次外牆恆溫裝置得以降低室內溫度。

本研究從 202 年 3 月 15 日量測至今 2121 年 5 月 2 日，一年多來得知覆蓋 1/3 的多層次外牆恆溫裝置的七樓屋頂鐵皮屋，經實驗結果證實得以下結論：

1. 本方法確實是可以降低室內溫度，也創造出了冬暖夏涼的效果，由溫度連續觀測結果，指出在僅有恆溫裝置的冬天室內溫度確實比室外溫度高，且維持在 23 ~ 28 °C 之間。
2. 多層次外牆恆溫裝置在夏天有明顯的降溫效果，在僅包覆鐵皮屋體 1/3 的效果，就將外牆輻射溫度 40 ~ 45 °C，降至室內溫度最高溫落在 33 ~ 35 °C，降低了約 10 °C，因此，在若全屋包覆，降溫效果會更加的可觀。

3. 本研究證實，多層次外牆恆溫裝置之年耗電量比原先空調設備降低許多，在溫度上更是有效隔絕熱源與調節室內溫度，減少了能源消耗與增加室內舒適度，為一項節能減碳與降低環境負擔的技術。 195, 423-428.
8. Zhao, L., Lee, X., Smith, R. B., & Oleson, K. J. N. (2014). Strong contributions of local background climate to urban heat islands. 511(7508), 216-219.

5-2 建議

本研究在實驗上也遇到些許的問題，可提供給未來想要有裝設本系統的使用者參考，以下依序為室外、設備至屋內建議項目：

1. 本研究只覆蓋 1/3 的多層次外牆恆溫裝置的七樓屋頂鐵皮屋，若在鐵皮屋上裝設且完整包覆屋體，能有更可觀的效果。
2. 屋體周遭允許下，種植喬木或用有遮蔭效果的設備。
3. 在屋簷旁集水槽能確實達到不漏水，使系統在運行上可有更經濟且節能。
4. 設備可透過美化使更貼近符合大眾喜好。
5. 外部設備如與本次實驗可增加一對一空調增強本系統功效與達到預定溫度。

六、參考文獻

1. He, B.-J. J. U. c. (2018). Potentials of meteorological characteristics and synoptic conditions to mitigate urban heat island effects. 24, 26-33.
2. 林炯明. (2010). 都市熱島效應之影響及其環境意涵. 環境與生態學報, 3(1), 1-15.
3. 談珮華, & 曾雅琪. (2014). 臺灣局部地區溫度分布的影響因子. 地理學報(73), 1-27.
4. 孫振義, & 林憲德. (2006). 台南地區都市熱島強度全年變動之研究. 都市與計劃, 33(1), 51-68.
5. 孫振義. (2008). 運用遙測技術於都市熱島效應之研究
6. Chow, W. T., & Roth, M. J. I. J. o. C. A. J. o. t. R. M. S. (2006). Temporal dynamics of the urban heat island of Singapore. 26(15), 2243-2260.
7. Arifwidodo, S. D., Tanaka, T. J. P.-S., & Sciences, B. (2015). The characteristics of urban heat island in Bangkok, Thailand.

屏東地區沉積土壤透水係數和水文參數之研討

黃亮元¹ 蕭達鴻²

¹國立高雄科技大學土木工程與防災科技研究所碩專班研究生

²國立高雄科技大學土木工程系研究所教授

摘要

屏東市區比鄰於高屏溪、隘寮溪流域，地層大多為砂礫石層，地質含水層深且透水性佳，經案例工程以抽水試驗求取屏東市區土層透水係數 $2.45 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 及水理參數導水係數 $T=4.416 \text{ m}^2/\text{min}$ 和儲水係數 $S=6.842 \times 10^{-5}$ ，所求得的透水係數再與其他文獻探討，數值均在合理範圍，進而研擬工程抽降水方式及數量，為掌控抽水期間地表沉陷量狀況以保護鄰屋之安全。本文也進一步分析 k 值對地下水位洩降與含水層厚度之關係，而理論沉陷量會與含水層厚度關係呈正比，距抽水井距離愈近，含水層越少沉陷量越大，100 公尺範圍內沉陷量介於 $0 \sim -1.6 \text{mm}$ 之間，與案例工程監測沉陷量平均值 1.8mm 約略符合。

關鍵字：透水係數、抽水試驗、祛水工程

Research on Permeability Coefficient and Hydrological Parameters of Sedimentary Soil in Pingtung Area

Liang-Yuan Huang¹ Darn-Horng Hsiao²

¹Master of Engineering Program in Civil Engineering and Disaster Mitigation, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

²Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

Since Pingtung City is adjacent to both drainage areas of Gaoping Creek and Ailiao Creek, their stratum is mostly belonging to sands and gravels. Thus it is found that they have a deep geological aquifer and good water permeability layers as well. Some valuable engineering parameters such as k (permeability coefficient) $= 2.45 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$, T (conductivity coefficient) $= 4.416 \text{m}^2/\text{min}$ and S (water storage coefficient) $= 6.842 \times 10^{-5}$ can be obtained by means of the pumping tests in the site. Permeability coefficient measured seems in a reasonable range when compared with other literatures. We used the results from pumping tests in control of ground subsidence and protect neighboring houses by the way. This paper also further analyzes the relationship between k value and groundwater level discharge and aquifer thickness. The pumping test shows that the theoretical subsidence is proportional to the groundwater level during pumping periods. Once the less the aquifer thickness is, the greater the subsidence will be. The subsidence within 100 meters from the well ranged between $0 \sim -1.6 \text{mm}$, the average settlement of 1.8mm measured from the site is approximately close to them.

Keywords: permeability coefficient, pumping test, drainage engineering

一、緒論

1-1 前言

屏東縣的國家前瞻基礎建設大多集中於屏東平原，屏東市為屏東縣的行政區，人口佔全縣 1/4，屏東地區有豐富的地下水，地層由砂礫石沉積土壤組成且排列疏鬆，透水性高，而在基礎開挖施工過程中可能會因地下水引發直接或間接災害，因此藉由屏東公園停車場工程案例採降低地下水位的祛水工法，以確保開挖面穩定及施工安全。

1-2 研究動機

屏東平原主要位於高屏溪、隘寮溪、東港溪、林邊溪等河川內，過去由於洪水泛濫，中上游帶來未膠結岩石碎屑，沉積複合而成沖積平原，因此地質含水層深且透水性佳，對於大地工程是重要的考慮因素。

1-3 研究目的

處理地下水是基礎開挖施工的成敗關鍵，故藉由案例工程利用抽水試驗求取合理的水理參數來配置地下水抽降系統。祛水工程包刮：水理參數決定、抽水井配置及抽水量計算、影響範圍(監測結果)等。

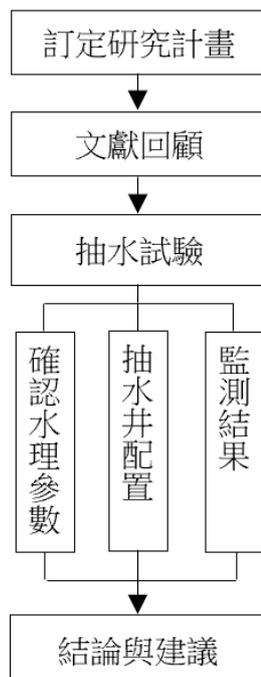


圖 1 研究流程

二、文獻回顧

2-1 屏東平原地質

Cheh-Shyh Ting(1997) [1]依屏東平原的沉積地質及地下水文定義了四個不同的區域：Zone1：山麓帶。

Zone2：粗粒料區屬自由含水層。

Zone3：礫石和砂土交替的區域，深度約為 30 至 45m 的半透性黏土層將上、下含水層分隔。

Zone4：細砂區。

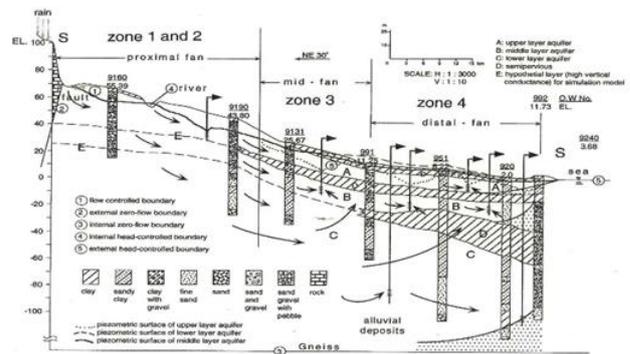


圖 2 水文地質概念模型斷面示意圖

(Cheh-Shyh Ting, 1997)[1]

經濟部(2014) [2]屏東平原集水區之地層以中新世廬山層板岩為主，分布在主要 4 個上游流域。地下水層由嶺口礫岩及上方的現代礫石和砂層所構成，自北北東向東南沖積，漸沒入平原，是構成深層地下水層之主要地層。淺部數十公尺厚之現代沖積層礫石粒徑大，排列疏鬆，為構成屏東平原淺層地下水層之主要地層。

經濟部(2014)依地形等高線顯示屏東平原與中央山脈接壤處，由北至南有荖濃扇、隘寮扇、林邊扇與力力扇等 4 大沖積扇分布，另夾有三個小沖積扇。依據所設 53 站地下水觀測井量測水位資料，繪製出 F1 層平均地下水區之等水位線，F1 為屏東平原水文地質之表層，以粗至中砂為主，其次為礫石和細砂。地下水等水位線高區位於沖積扇頂附近，同樣成扇狀分布。地下水流線從扇頂區，朝西南或南流向沿海地區，沖積扇頂區為地下水流之源頭區。

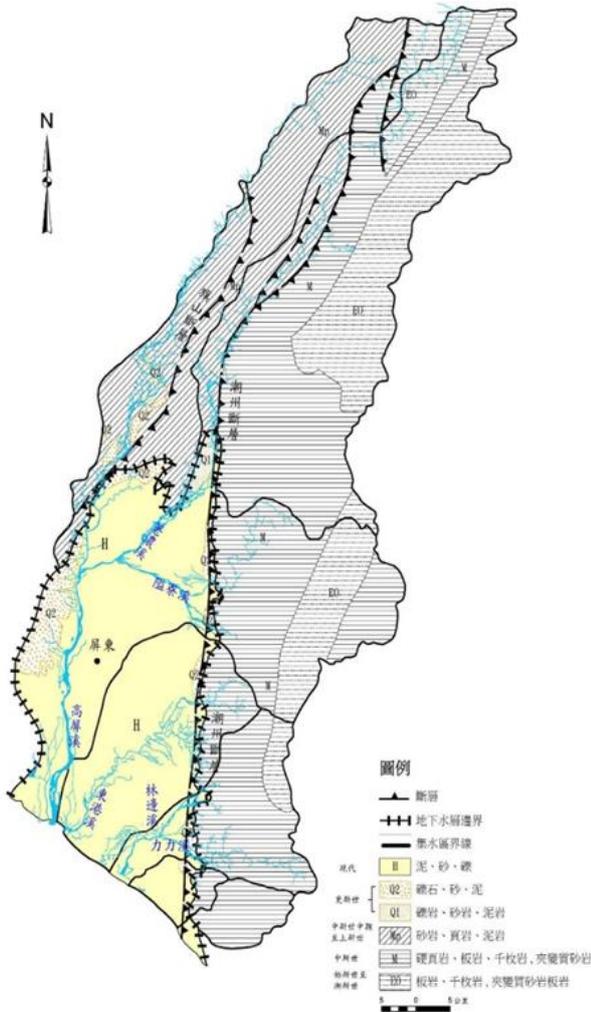


圖 3 屏東平原集水區地質略圖
(經濟部，2014)[2]

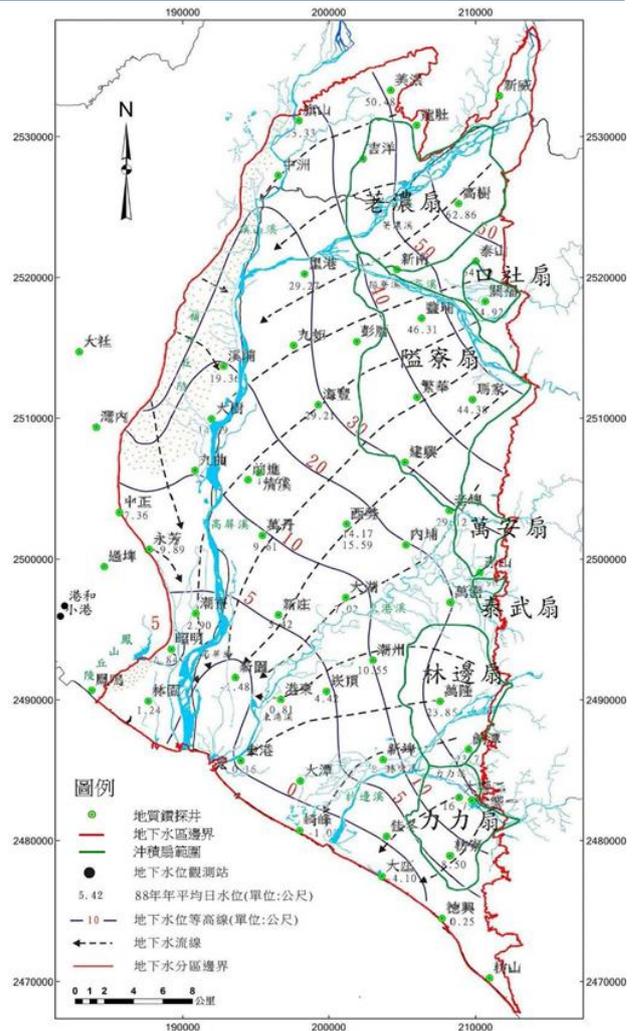


圖 4 屏東平原沖積扇與 F1 地下水等水位線套繪圖(套繪經濟部，2014)[2]

2-2 地質鑽探

2-2-1 案例工程位置及地質概述

案例工程位於屏東市屏東公園，基地涵蓋面積約 6,144m²，依據經濟部中央地質調查所地質整合查詢[3]，本基地及鄰近地區之地質年代為全新世 (Holocene) 約 11,700 年前開始形成是最年輕的地質年代，地層屬沖積層，地層組成由泥、砂及礫石(mud、sand and gravel)所組成的全新世沖積層。

本基地地勢平坦，並無發現明顯層面，根據經濟部中央地質調查所之活動斷層分佈圖，本工址並無活動斷層通過，鄰近主要活動斷層為東側約 11.5 公里之潮州斷層。



圖 5 工程案例位置及地質圖【經濟部中央地質調查所】(經濟部中央地質調查所網站，2021/05/29) [3]

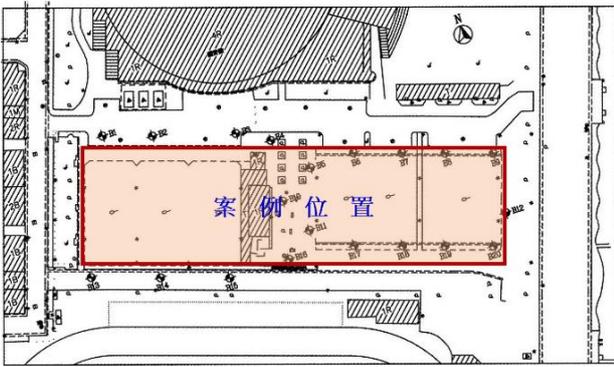


圖 6 案例工程地質鑽探孔位位置圖
(開通大地工程股份有限公司，2020) [4]

2-2-2 土層狀況

本地基調查採現場地質鑽探方式進行，由於地形平坦，地質均勻，因此地質鑽探共設 20 孔，鑽探孔位置如圖 2-5 所示。

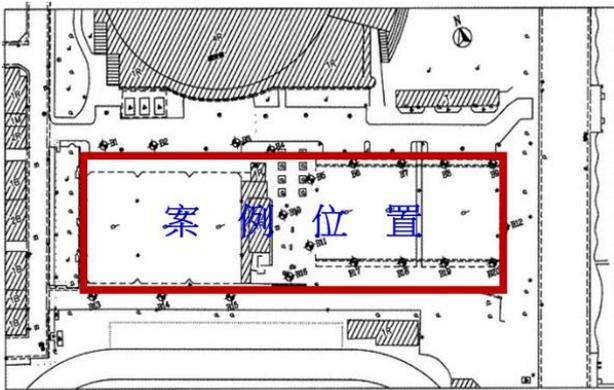


圖 7 案例工程地質鑽探孔位位置圖
(開通大地工程股份有限公司，2020) [4]

根據鑽探資料與試驗結果研判，本基地之土層狀況大致如圖 8 至圖 10 之地層剖面圖所示，由地表至地表下 30 公尺(鑽探終止深度)約可歸納為 4 層。茲將各層次土壤之物理性質及工程特性分述如下：

第一層：地表回填層：

本基地地表回填厚度約為 0.6 至 2.5 公尺之間。

第二層：中密粉土質中細砂礫石偶夾粘土粉土層：

本層次分佈於地表下約 0.6/2.5 公尺至 14.3 公尺之間，主要為粉土質中細砂礫石偶夾粘土粉土所組成，呈灰黃色。本層次現場標準貫入試驗之 N 值在 4 至 40 之間，平均約在 14 左右，屬中密程度，自然含水量

平均為 11.7%，而平均濕土單位重約為 2.16 t/m³。依據土壤統一分類法則，本層次之土壤分類為 SM/SW-SM。

第三層：中密粉土質中細砂礫石偶夾粘土層：

本層次分佈於地表下約 14.3 公尺至 20.0 公尺之間，主要為粉土質中細砂礫石偶夾粘土所組成，呈灰色。本層次現場標準貫入試驗之 N 值在 11 至 29 之間，平均約在 19 左右，屬中密程度，自然含水量平均為 14.4%，而平均濕土單位重約為 2.17 t/m³。依據土壤統一分類法則，本層次之土壤分類為 SM/SW-SM。

第四層：中密粉土質中細砂礫石層：

本層次分佈於地表下約 20.0 公尺至 30.0 公尺(最終鑽探深度)之間，主要為粉土質中細砂礫石所組成，呈灰黃色。本層次現場標準貫入試驗之 N 值在 14 至 35 之間，平均約在 20 左右，屬中密程度，自然含水量平均為 17.8%，而平均濕土單位重約為 2.12 t/m³。依據土壤統一分類法則，本層次之土壤分類為 SM/SW-SM。

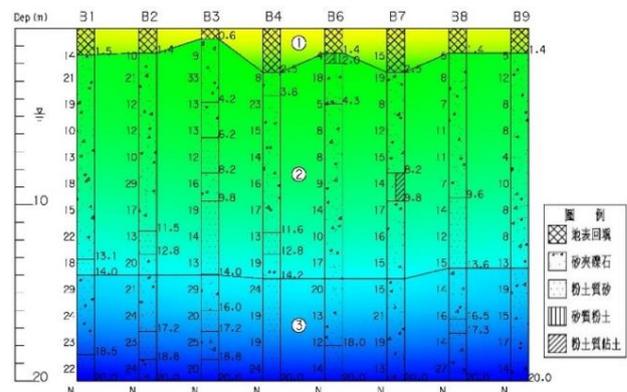


圖 8 地質剖面圖(基地北側)
(開通大地工程股份有限公司，2020) [4]

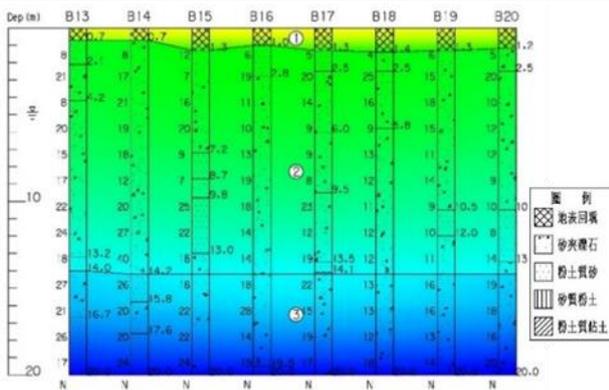


圖 9 地質剖面圖(基地南側)
(開通大地工程股份有限公司，2020) [4]

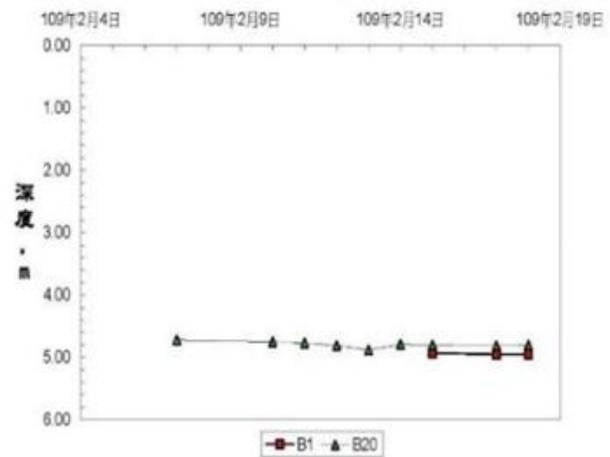


圖 11 地下水水位量測記錄
(開通大地工程股份有限公司，2020) [4]

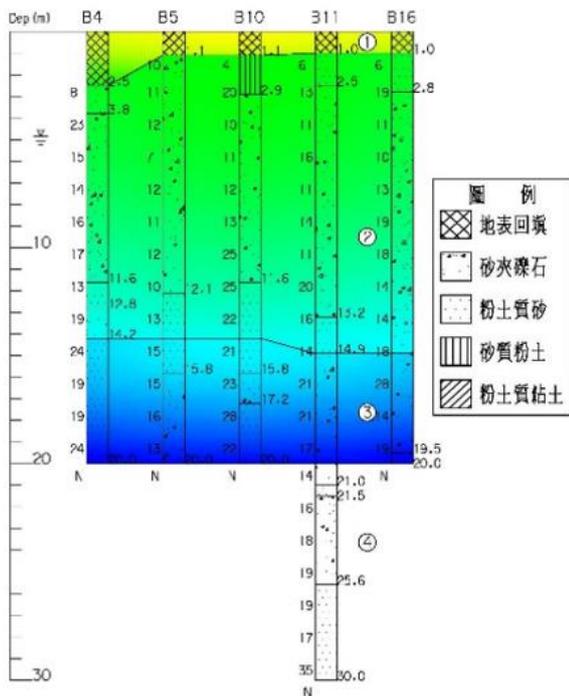


圖 10 地質剖面圖(基地二中間)
(開通大地工程股份有限公司，2020) [4]

2-2-3 地下水位

為瞭解基地土層之水位及水壓變化，於鑽探後在 B1 及 B20 鑽孔埋設水位觀測井。本基地地下水深度於鑽探時量測約為現地面下 4.56 公尺至 5.01 公尺之間，水位量測記錄如圖 1.12 所示。由於地下水位呈季節性變化，並可隨豪雨而上升，因此於基礎開挖期間儘可能避開汛期。

2-2-4 滲透係數概略值

依據案例工程鑽探報告顯示：抽水高度位第二層中密粉土質中細砂礫石偶夾粘土粉土層，其地質剖面地質圖大多屬砂夾礫石，故參照表 1 土壤滲透係數之概略值(林耀煌,2000)[5]，概估該區域之透水程度約屬中低透水性之間，滲透係數範圍約 10^{-3} 左右，後續依抽水試驗及相關文獻紀錄比較後使用。

表 1 滲透係數之概略值(林耀煌，2005) [5]

透水程度	滲透係數範圍	土壤性質
高	10^{-1} 以上	礫石
中	$10^{-1} \sim 10^{-3}$	粗砂、中級砂、微細砂
低	$10^{-3} \sim 10^{-5}$	極微細砂、沉泥值砂、鬆散沉泥
極低	$10^{-5} \sim 10^{-7}$	應質沉泥、黏土質沉泥、黏土
不透水	10^{-7} 以下	完全均一黏土

2-2-5 一般砂採 D20 與透水係數關係

依據沈茂松(2015)[6]摘自林耀煌(1983)表 2 D20 與滲透係數關係(根據 Creager)，參照圖 12、圖 13 粒徑分析曲線圖 B10 顯示，統一土壤分類大多屬於沉泥質砂(SM)，偶有優良級配砂(SW-SM)，以通過 20%之粒徑，初估透水係數介於 $1.05 \times 10^{-5} \sim 4.00 \times 10^{-5}$ (cm/sec) 之間，平均值為 2.53×10^{-5} cm/sec 即 2.53×10^{-3} m/sec。

表 2 D₂₀ 與滲透係數之關係(根據 Creager)
(沈茂松, 2015) [6]

D ₂₀ (mm)	k(cm/sec)	土壤分類
0.005	3.00×10 ⁻⁶	粗粒黏土
0.01	1.05×10 ⁻⁵	細粒沉泥
0.02	4.00×10 ⁻⁵	粗砂沉泥
0.03	8.50×10 ⁻⁵	
0.04	1.75×10 ⁻⁴	
0.05	2.80×10 ⁻⁴	
0.06	4.60×10 ⁻⁴	
0.07	6.50×10 ⁻⁴	極微粒砂
0.08	9.00×10 ⁻⁴	
0.09	1.40×10 ⁻³	
0.10	1.75×10 ⁻³	
0.12	2.6 ×10 ⁻³	
0.14	3.8 ×10 ⁻³	微粒砂
0.16	4.1 ×10 ⁻³	
0.18	6.85×10 ⁻³	
0.20	8.90×10 ⁻³	
0.25	1.40×10 ⁻²	
0.3	2.20×10 ⁻²	中粒砂
0.35	3.20×10 ⁻²	
0.4	4.50×10 ⁻²	
0.45	5.80×10 ⁻²	
0.5	7.50×10 ⁻²	
0.6	1.10×10 ⁻¹	粗粒砂
0.7	1.6 ×10 ⁻¹	
0.8	2.15×10 ⁻¹	
0.9	2.8 ×10 ⁻¹	
1.0	3.60×10 ⁻¹	
2.0	1.80	細 礫

圖 12 粒徑分析曲線圖(一)B10

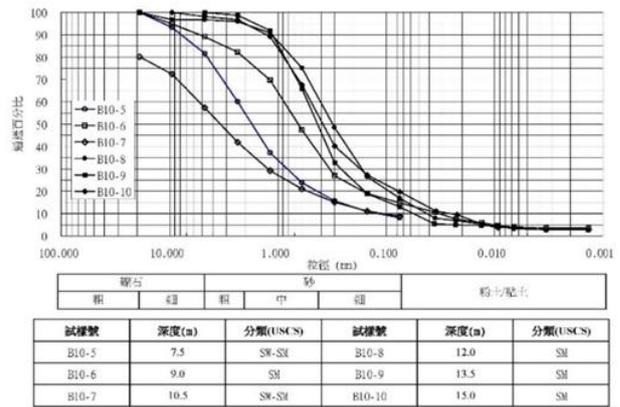
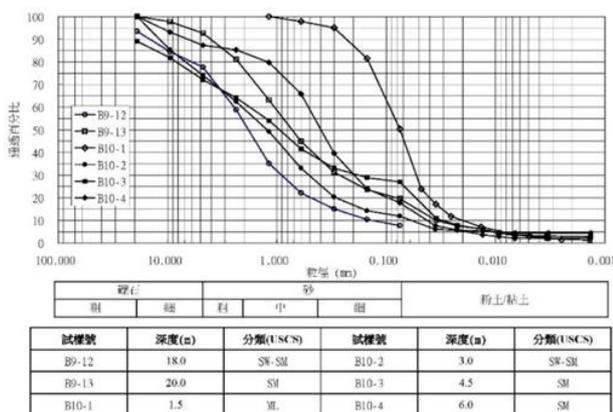


圖 13 粒徑分析曲線圖(二)B10
(開通大地工程股份有限公司, 2020) [4]

2-3 水理文獻

2-3-1 水理參數說明

1. 導水係數(T)為水力坡降 $i=1$ 時, 單位時間內的單位「寬度」含水層所能通過之水量。
2. 透水係數(k)表示水利坡降 $i=1$ 時, 單位時間內單位「面積」含水層所能通過之水量。
3. 當含水層厚度為 b 時, $T=K*b$ 。
4. K 值與土壤性質及孔隙有關, T 值則與土壤性質、孔隙及含水層厚度有關。
5. 透水係數(K)可藉由導水係數(T)除以含水層厚度 b 得知, $K=T/b$ 。
6. 土壤滲透性與 K 值有直接相關, 透水係數(K)高代表地下水流經由土壤的流速較快, 出水量較佳。

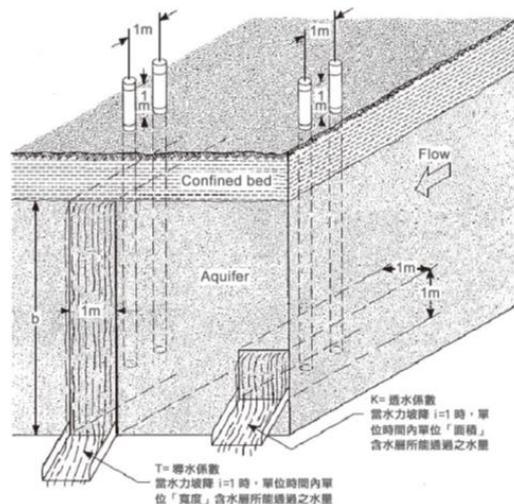


圖 14 導水係數及透水係數示意圖
(高世錄, 2014) [6]

2-3-2 水理公式

林耀煌(2000)[5] 以 Darcy 定律以 Theis 非穩定狀態之抽水導出定流量抽水時的單井非穩定流計算分式。其假設條件為：

- ① 含水層為等厚且均質各向同性而無限延伸的
 - ② 鑽井井徑為無窮小的完整井
- 表示公式如下：

$$S = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (1)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}, \quad W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (2)$$

- s：地下水位洩降(m)
- r：抽水井至觀測點之距離(m)
- t：抽水延續時間
- T：含水層的導水係數
- S：含水層的儲水係數
- Q：水井出水量或抽水量
- W(u)：水井函數

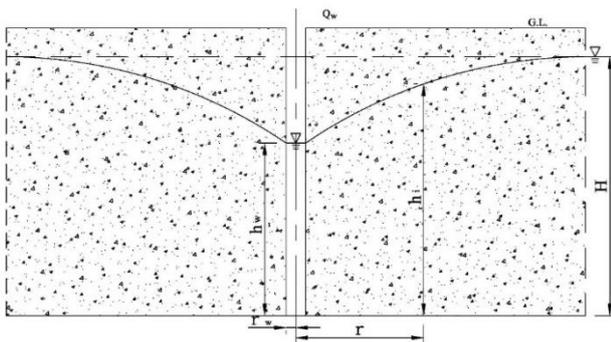


圖 15 地下水位抽降關係圖
(改繪林耀煌,2000)[5]

$$\text{地下水位關係式 } Q_w = \frac{\pi k(H^2 - h_w^2)}{2.30 \log(R/r_w)} \quad (3)$$

$$\text{求得 } H^2 - h^2 = \frac{2.3Q_w}{\pi k} \log(R/r) \quad (4)$$

$$h_i^2 - h_w^2 = \frac{H^2 - h_w^2}{\log(R/r_w)} \log(r/r_w) \quad (5)$$

2-3-3 地盤抽水引起地盤下陷之分析

沈茂松(2015)[7]營建工程防災技術(基礎施工篇)11-8-3 地盤抽水引起地盤下陷與鄰房沉陷量分析(圖 28)，探討地盤沉陷量與案例工程含水層厚度之關係：

採即時沉陷公式：

$$\Delta H_i = \frac{\Delta q \cdot B(1 - \mu^2) I_s}{E} \quad (6)$$

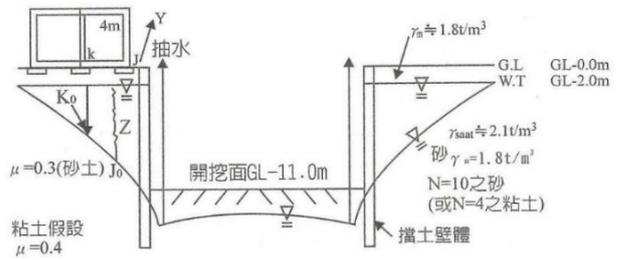


圖 16 抽水引起鄰房沉陷分析案例
(沈茂松, 2015)[7]

三、研究方法

抽水試驗係利用抽水井抽水時，觀察抽水井和觀測井的水位洩降隨時間變化關係，量測各井水位洩降量(s)及與抽水井距離®，隨時間(t)變化之關係，以供水理參數分析使用，為求取水理參數較可靠的方法。(圖 17)

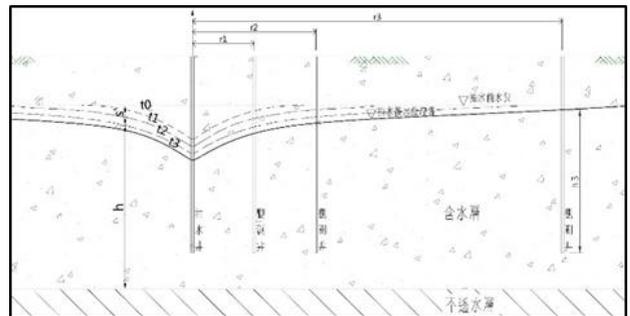


圖 17 抽水試驗示意圖

3-1 抽水試驗配置

抽水試驗自 109 年 9 月 10 日現場裝置抽水試驗設備後，所有試驗於 109 年 9 月 14 日完成。試驗項目共辦理抽水試驗 1 組包含 1 口抽水井(PW01)與 3 口觀測井(OW1~3)，各井基本資料詳表 3，設置位置詳圖 18 所示。

表 3 抽水試驗井基本資料表(井帝工程股份有限公司, 2020)[8]

井編號	井徑 (m)	井深 (m)	開篩位置 (m)	篩管長 (m)	材質	距抽水井距離(m)
抽水井 PW01	8	16	1-16	15	PVC	0
OW01	6	16	8-16	8	PVC	5
OW02	6	16	8-16	8	PVC	10
OW03	6	16	8-16	8	PVC	30

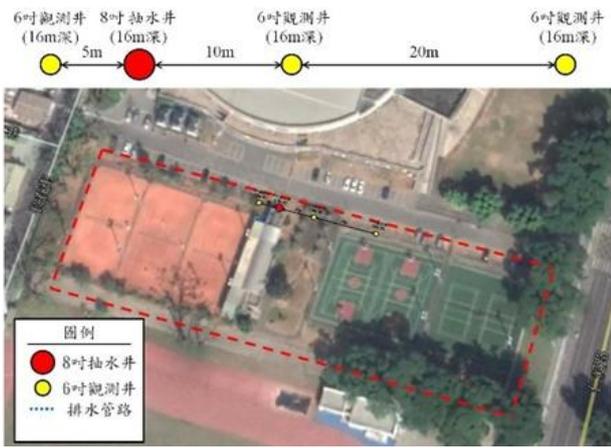


圖 18 抽水試驗井孔位位置圖 (井帝工程股份有限公司，2020)[8]

滲入濾層，無法達到透水及過濾功能，故採用流量分級試水，流量分級以 45、50、55、60CMH 進行試水，目的為了解地層含水情況，以確知安全出水量，故先進行不同水量(由小到大)的分級試水，藉地下水的洩降情形，以確定水井安全出水量(詳圖 20)。由圖 21 分級試水之井內洩降與抽水量關係圖，可知流量自 $Q=45$ 至 $Q=55$ 成接近正比直線上升，突至線段 $Q=60$ 線段斜率偏高，代表抽水流量到達 60CMH 時，洩降急遽降低屬過度抽水，故分級試水結果採用 55CMH，作為抽水試驗的安全出水量。

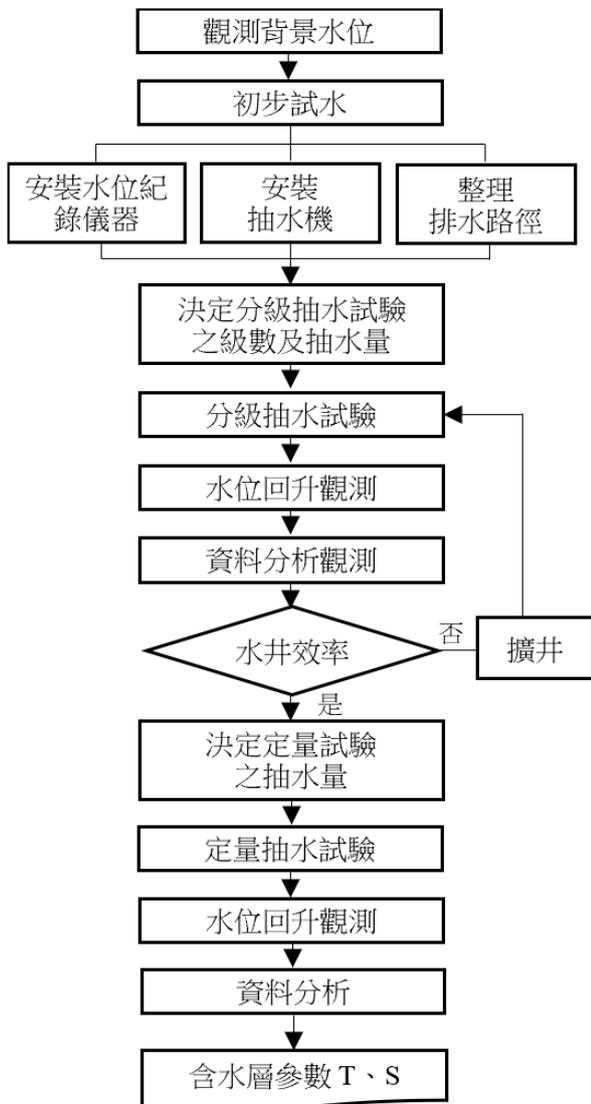


圖 19 抽水試驗流程圖

3-2 分級試水

為避免抽水機浦功率過大，使抽水井的水力坡降太高，以致抽水時帶動井外的土壤

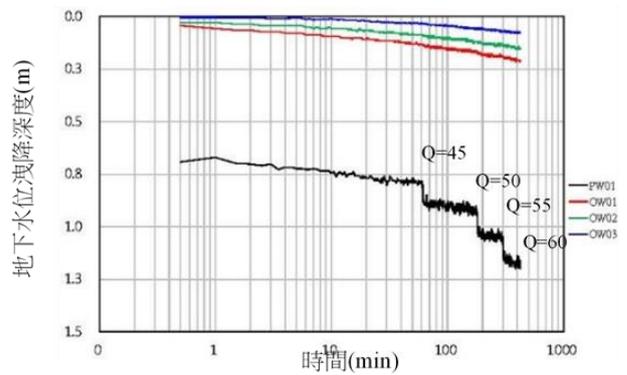


圖 20 分級試水水位洩降與時間關係圖 (井帝工程股份有限公司，2020)[8]

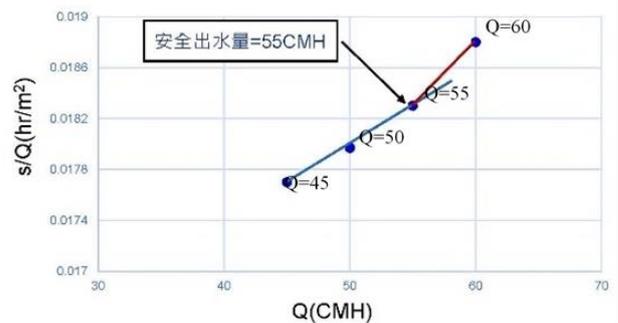


圖 21 分級試水之井內壓降與抽水量關係圖

3-3 定量抽水

根據分級抽水結果，決定一適當抽水量連續長時間定量試水，觀測水位洩降情形，再將試水結果點繪成半對數洩降與時間曲線，用以計算地層導水係數。定量抽水 36 小時，抽水量 55m³/hr，試驗過程以電子水壓計及水位自動記錄設備紀錄水位之連續變化。由圖 22 定量試水之水位洩降圖，水位洩降與時

間之半對數關係，可了解：抽水量隨時間增加而遞減，洩降量則隨著時間而增加，水位起伏最大下降近 1.15 公尺，其餘抽水井最大下降量僅有 0.2 公尺。

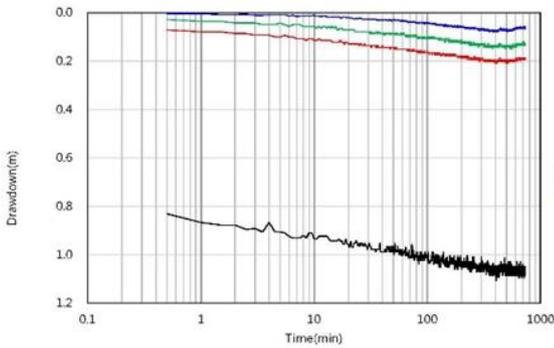


圖 22 定量試水之水位洩降圖
(井帝工程股份有限公司，2020)[8]

四、結果與討論

4-1 確認水理參數

4-1-1 案例工程之透水係數結果

案例工程透過抽水試驗求取沉積土壤的水理參數，本基地含水層屬自由含水層，在全對數圖上繪製 Neuman 標準曲線進行分析，圖 23 抽水井(PW01)分析結果：導水係數 $T=2.583\text{m}^2/\text{min}$ ，基地含水層厚度約 30 公尺，可求得透水係數 $k=1.57\times 10^{-3}\text{m}/\text{sec}$ ，抽水試驗之各井分析水理參數結果，請詳圖 23~圖 26 及表 4。

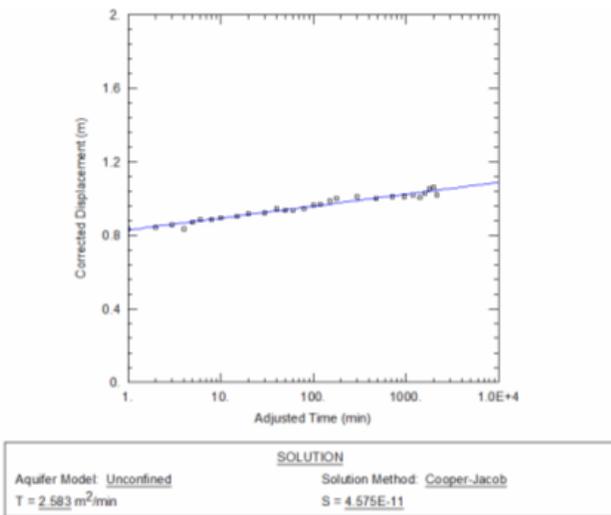


圖 23 抽水井(PW01)分析結果圖

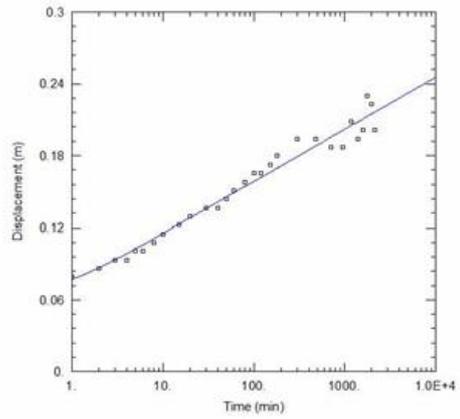


圖 24 觀測井 1(OW01)分析結果圖

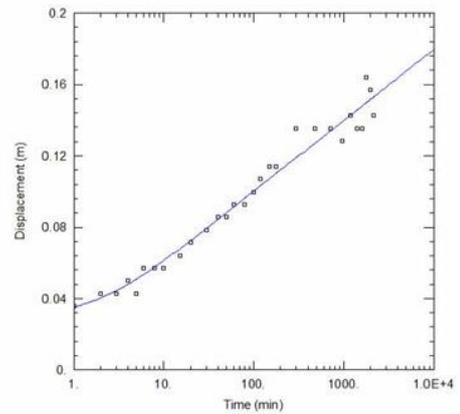


圖 25 觀測井 2(OW02)分析結果圖

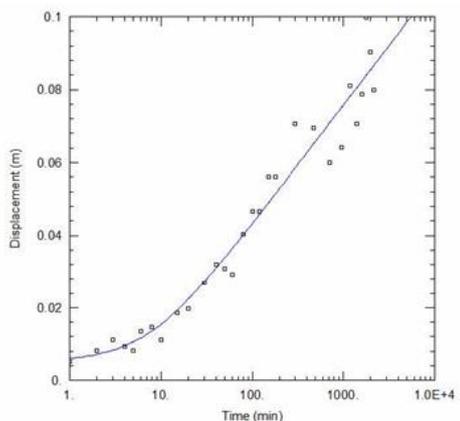


圖 26 觀測井 3(OW03)分析結果圖
(井帝工程股份有限公司，2020)[8]

表 4 抽水試驗水理參數結果表

井編號	導水係數 T(m ² /min)	儲水係數 S	透水係數 k(m/sec)
抽水井 PW1	2.583	4.575×10 ⁻¹¹	1.57×10 ⁻³
觀測井 OW1	3.878	6.842×10 ⁻⁵	2.15×10 ⁻³
觀測井 OW2	4.232	6.842×10 ⁻⁵	2.35×10 ⁻³
觀測井 OW3	5.137	6.842×10 ⁻⁵	2.85×10 ⁻³
平均 (OW1~OW3)	4.416	6.842×10 ⁻⁵	2.45×10 ⁻³

4-1-2 Zone2 透水係數

丁澈士(1997) 依屏東平原的地質及地下水文定義了四個不同的區域 Zone1~Zone4，Zone1 為山麓帶；Zone2 為粗粒料區屬自由含水層；Zone3 為礫石和砂土交替的區域，深度約為 30 至 45m 的半透性黏土層將上、下含水層分隔；Zone4 為細砂區。再根據台灣省水利局(TPGDB,1961) 對屏東平原的抽水試驗分析水文地質參數：導水係數(T)、儲水係數(S)及最大地下水流量(Q) 的平均值，詳圖 27 屏東平原含水層特性圖。

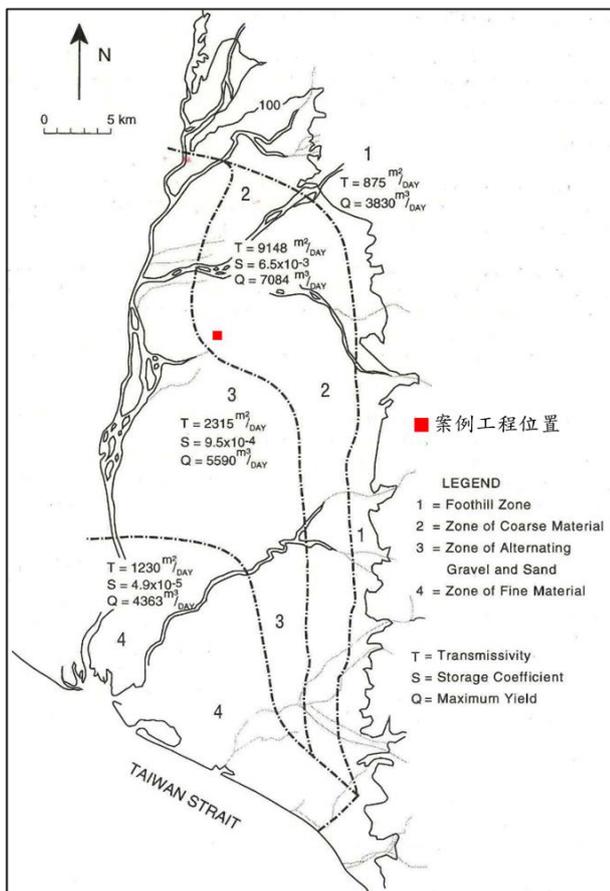


圖 27 屏東平原含水層特性圖(丁澈士,1997)

案例工程位於 Zone2 與 Zone3 之間，介於自由含水層與半透性黏土層分隔上、下含水層介面處，故採 Zone2 導水係數(T)=9148m²/DAY (6.353m²/min)，並以含水層厚度 30 公尺，推算滲透係數 k=3.53×10⁻³ m/sec。

4-1-3 海豐觀測站透水係數

經濟部(2014)地下水層一(F1)為屏東平原水文地質系統之表層，以鄰近屏東市海豐觀測站之水文地質剖面圖顯示透水係數 k=2.68×10⁻³。

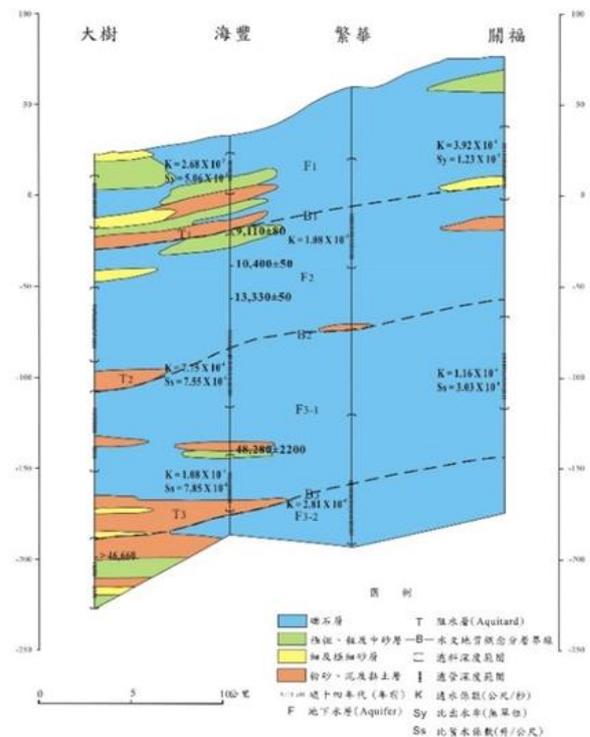


圖 28 水文地質剖面圖(經濟部，2014)

4-1-4 透水係數比較

案例工程抽水試驗依分析結果：各井的導水係數 T 值及透水係數 k 值(詳表 5)，其中以觀測井平均值相較丁澈士 Zone2 區(圖 27)及經濟部(103)海豐 1 觀測站(圖 28)，案例工程試驗後的透水係數(k 值)亦較近似，後續可藉以計算案例工程之抽水量及抽水井配置。

表 5 透水係數(k 值)比較表

	井編號	導水係數 T (m ² /min)	儲水係數 S	透水係數 k (m/sec)
抽水試驗	抽水井	2.583	4.575×10 ⁻¹¹	1.57×10 ⁻³
	觀測井 1	3.878	6.842×10 ⁻⁵	2.15×10 ⁻³
	觀測井 2	4.232	6.842×10 ⁻⁵	2.35×10 ⁻³
	觀測井 3	5.137	6.842×10 ⁻⁵	2.85×10 ⁻³
	1~3 平均	4.416	6.842×10 ⁻⁵	2.45×10⁻³
經濟部(海豐)	4.824	---	2.68×10⁻³	
丁澈土 Zone2	6.353	6.5×10 ⁻³	3.53×10⁻³	
根據 Creager			2.53×10⁻³	

4-2 抽水量計算

4-2-1 抽水井配置

案例工程基地範圍長 146.8m，寬 41.85m (詳圖 29)，擋土壁深度 19m，開挖深度 8.4M，常時水位 GL-4.5M，預定降水至開挖面以下 (詳圖 30)。採用深井抽水工法，第一、二階段設置 5Hp 深水馬達@20m，共 20 處；第三階段再加設 5Hp 深水馬達@20m，共 8 處。

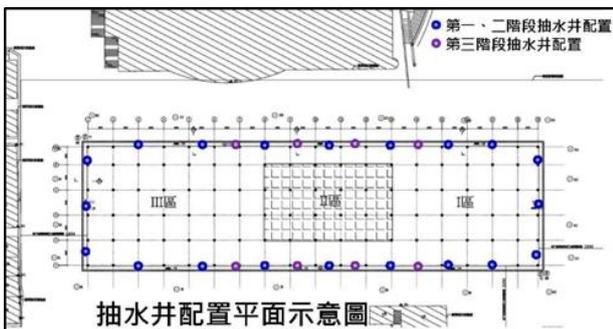


圖 29 抽水井配置平面示意圖



圖 30 抽水井配置剖面示意圖

4-2-2 基地總抽水量計算

依據抽水試驗採用導水係數 T 取觀測井 1~3 之平均值計算導水係數 $T=0.0736 \text{ m}^2/\text{s}$ 、儲水係數 $S=6.842 \times 10^{-5}$ ，s 水位洩降深度，代入 Theis 公式以非平衡公式進行抽水量計算。假設井半徑 r 計算如下：

$$r = \max(r_1, r_2) \quad (7)$$

$$r_1 = \sqrt{(a \times b) / \pi} \quad (8)$$

$$r_2 = (a+b) / \pi \quad (9)$$

上式中 a、b 為基地之邊長，基地面積 $A=a \times b$ 基地周長 $\div 2=(a+b)$

水井函數的參數 u 值計算：

$$u = (r^2 s) / 4Tt \quad (10)$$

其中 r=假想井半徑 S=儲水係數 T=導水係數(m²/sec) t=抽水時間(sec)，抽水持續時間為配合施工需求之假設值，為使水位抽降至設計值所需之時間，實際抽水時仍以觀測井量測達設計值後才可進行該階段開挖。

由水井函數表求得水井函數

$$W(u) = -0.5772 - \ln(u) \quad (11)$$

基地總抽水量 $Q(\text{m}^3/\text{min})$

$$Q = 4 \pi T s / (W(u)) \quad (12)$$

表 6 抽水量計算表

抽水量計算表	第一階段	第二階段	第三階段
地表高程(m)	0	0	0
初始地下水水位高程(m)	-4.5	6	-7.6
目標水位高程(m)	-6	-7.6	-8.7
井底高程(m)	-12	-12	-12
洩降深度, s(m)	1.5	1.6	1.1
砂石層儲水係數, S	6.84E-05	6.84E-05	6.84E-05
砂石層導水係數, T (m ² /sec)	0.0736	0.0736	0.0736
基地邊長 a(m)	146.8	146.8	33.6
基地邊長 b(m)	41.85	41.85	25.2
假想井半徑, r (m)=max(r1, r2)	60.05	60.05	18.72
r1 (m)=√(ab/π)	44.22	44.22	25.2
r2 (m)=(a+b)/π	60.05	60.05	18.72
抽水時間(天)	7	7	7
水井函數參數, u=r ² S/4Tt	1.39E-06	1.39E-06	1.35E-07
CHECK u<0.01	YES	YES	YES
水井函數, W(u)=-0.5772-ln(u)	12.912	12.912	15.244
基地總抽水量 (m ³ /min), Q=4πTs/W(u)	6.4466	6.8764	4.0044

4-2-3 抽水井計算

其中 s 為依據上舉檢核成果之測壓水位洩降深度

每口井的抽水量 $Q_w = Q \div \text{井口數}$ (13)

考慮抽水井摩擦損失及群井干擾，每口井之理論抽水量除以井效率 50%

求得設計抽水量 Q_{wo} (14)

特定進水管開孔率之入流量計算：

$$Q = E \times V \times A \quad (15)$$

Q = 進水管流量 (m^3/min)

E = 濾水管進水效率 (60~70%)

V = 地下水通過濾水孔之流速 (m/sec)，一般採用 $0.0395m/sec$

A = 濾水管開孔總面積 (m^2) = $\pi \times \text{進水管直徑} \times \text{進水管開孔長度} \times \text{開孔率}$ (16)

$Q = E \times V \times A \geq Q_{wo} \cdots OK$ (詳表 7)

表 7 抽水井計算表

抽水井計算表	第一階段	第二階段	第三階段
井數	20	20	20+8
每口井抽水量, $Q_w(m^3/min)$	0.3223	0.3438	0.1483
井效率	50%	50%	50%
$Q_{wo}=Q_w/\text{井效率}$	0.6447	0.6867	0.2966
每口井抽水量, $Q_{wo}(US.GPM)$	170	182	78
濾水管進水效率, $E(60\% \sim 70\%)$	65%	65%	65%
濾水孔流速, V (一般採 $0.0395m/sec$)	0.0395	0.0395	0.0395
進水管直徑(井徑, m)	0.15	0.15	0.15
井深度(m)	12	12	12
進水管開孔長度(m)	11	11	11
進水管開孔率	15%	15%	15%
進水管開孔總面積(m^2)	0.7775	0.7775	0.7775
進水管入流量(m^3/min), $Q=EVA$	1.1978	1.1978	1.1978
$Q \geq Q_{wo}$	OK	OK	OK

4-2-4 抽水馬達配置

彙整表 7 抽水井計算表所得每口井最大抽水量 $Max.Q_{wo}=182 GPM$ ，將採用沉水式抽水馬達型號 BS-18，抽水馬力 3HP，出水口採 5 英吋 PVC 管，揚程介於 $14m \sim 22m$ ，出水量可達 $170 \sim 280 GPM$ ，規格詳圖 31。

表 8 抽水設計結果摘要表

抽水設計結果摘要	第一階段	第二階段	第三階段
井數	20	20	20+8
進水管直徑(井徑, m)	0.15	0.15	0.15
進水管開孔長度(m)	11	11	11
進水管開孔率	15%	15%	15%
井孔直徑(m)	0.2	0.2	0.2
井深度(m)	12	12	12
抽水馬達型式	BS-18	BS-18	BS-18
抽水馬達馬力	3HP	3HP	3HP
抽水馬達標準出水量(US.GPM)	170	170	170
抽水馬達標準揚程(m)	14	14	14
出水量(US.GPM)Check	OK	OK	OK
受壓水層之測壓水位深度, D (m)	0	0	0
揚程, (m) = D + s + 管摩擦損耗	43	43	43
抽水馬達揚程 Check	OK	OK	OK
抽水馬達直徑(出水口徑, inch)	5"	5"	5"

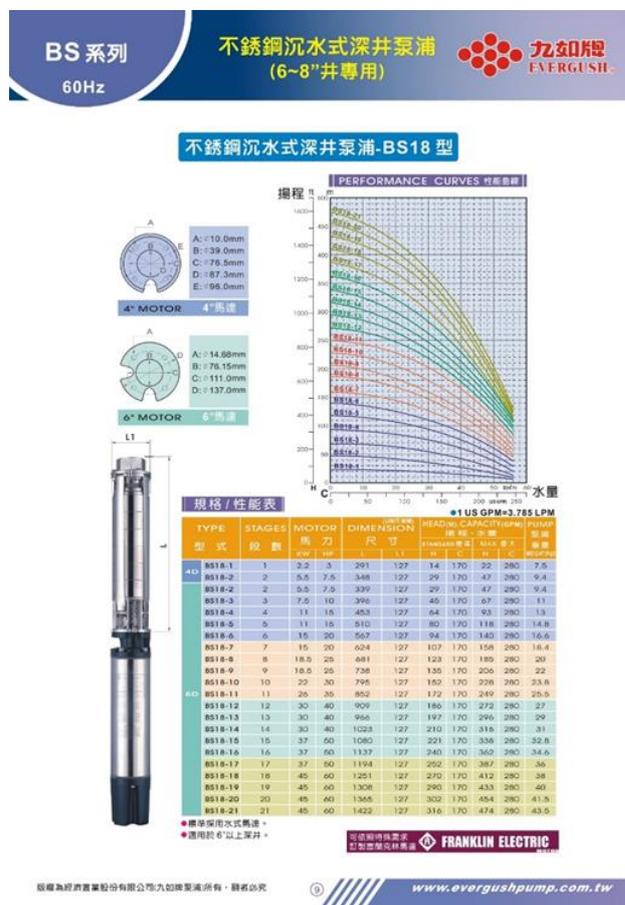


圖 31 不銹鋼沉水式深井泵浦型錄 (經濟實業股份有限公司, 2021)[9]

4-3 透水係數及水位洩降影響半徑檢討

以抽水動力方式使地下水位降低，其洩降可影響之距離稱影響半徑 R ，而抽水井影響半徑會受到地質透水性、抽水時間以及水位洩降量等因素有所影響，一般設計抽水系統時抽水影響半徑，以 Schoklick 經驗值詳表 9。

表 9 抽水影響半徑(以 Schoklick 經驗值)

地質種類	抽水影響半徑
細砂	R=5~10m
中砂	R=50m
粗砂	R=50~100
礫石	R=500m

據林耀煌(2000)[5]地下水位關係式

$$h_i^2 - hw^2 = \frac{H^2 - hw^2}{\log(R/r_w)} \log(r/r_w) \quad (5)$$

$$\text{導出: } h_i = \sqrt{\frac{H^2 - hw^2}{\log(R/r_w)} \log(r/r_w) + hw^2} \quad (17)$$

hi=抽水井距觀測點之含水層厚度(m)

H=原地下水位含水層厚度(m)

hw=地下水洩降後抽水井之含水層高度(m)

R: 抽水影響半徑(m), 以表 9 代入各地質種類影響半徑

r: 抽水井距觀測點之半徑(m)

rw: 抽水井半徑(m)

計算繪製各地質含水層厚度(h1)與抽水井距離(ro)之關係圖(詳圖 32)。

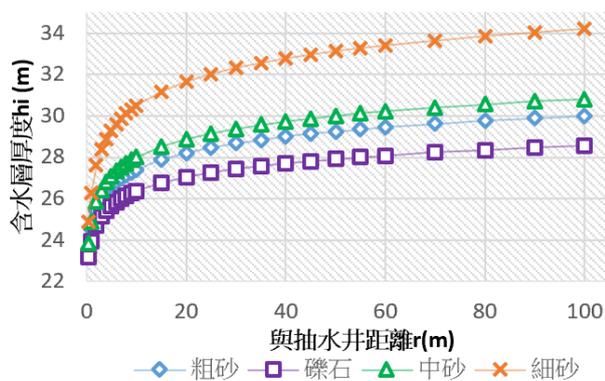


圖 32 含水層厚度與抽水井距離圖

圖 32 以抽水影響半徑 r 為 100m 範圍內, 檢討各地質種類含水層厚度與抽水井距離之關係, 可發現礫石地質透水性高, 經抽水洩降後, 含水層厚度較其他地質低; 細砂地質透水性較低, 相較其他地質的含水層厚度越高。

4-4 監測結果與即時沉陷檢討

4-4-1 監測結果

案例工程於基地擋土壁外側之東北及西

南側各設置水位觀測井 2 處, 並於周遭設置地表沉陷點 26 處, 配置如圖 33。

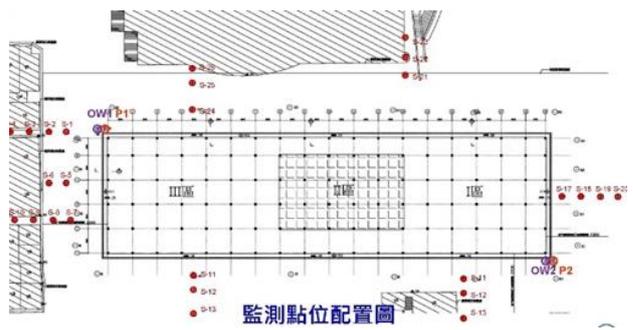


圖 33 監測點位配置圖

地下水位及沉陷點自 109 年 12 月 16 日起開始監測作業, 抽水前平均地下水位 GL-4.41m, 自 110 年 1 月 11 日開始抽水後, 直至基地內降水位 GL-8.7m, 基地外最低水位 GL-7.12m(詳圖 34) 地表沉陷點自監測期間, 以沉陷點 S19 為最大差異沉陷量-2.8mm(詳圖 35)。

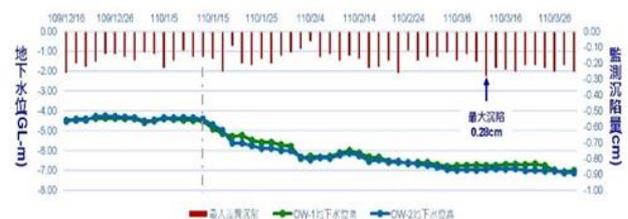


圖 34 地下水位與沉陷點最大差異沉陷量統計圖

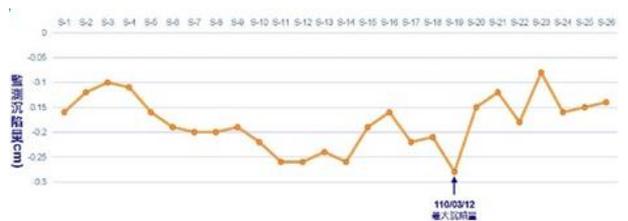


圖 35 監測點最大差異沉陷圖

4-4-2 即時沉陷檢討

本案地質屬砂質土壤, 故抽水引致之地表沉陷係屬彈性理論之即時沉陷, 依據沈茂松(2015)營建工程防災技術(基礎施工篇)11-8-3 地盤抽水引起地盤下陷與鄰房沉陷量分析(圖 36), 探討地盤沉陷量與案例工程含水層厚度之關係:

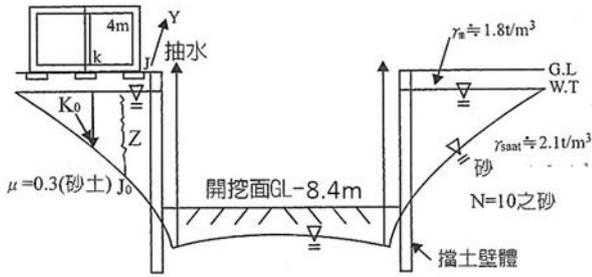


圖 36 抽水引起鄰房沉陷分析案例【沈茂松，2015】

$$\text{採即時沉陷公式：}\Delta H_i = \frac{\Delta q \cdot B(1-\mu^2)I_s}{E}$$

鄰房建物因抽水引致地表沉陷 ΔH_i

降水位高度 $Z=H-h_1$ (代入圖 32 含水層厚度)

有效應力增量 $\Delta q = [\gamma_m - (\gamma_{sat} - \gamma_w)] \times Z$

B =鄰房建物兩柱寬(4m)

柏松比 $\mu=0.3$ (砂土)

地盤彈性係數 $E=2.5 \times 40 \times 10 = 1000 \text{ t/m}^2$ (引用

沈茂松老師)

基腳影響係數 $I_s=1.0$

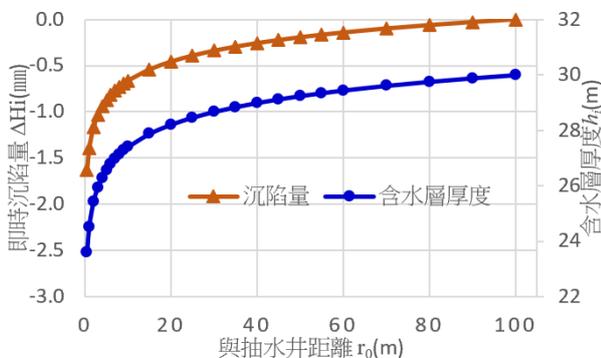


圖 37 理論沉陷量與含水層厚度關係圖

從案例工程鑽探報告可知地質多為砂礫石層，故按圖 32 之粗砂地質含水層厚度結果，代入即時沉陷公式檢討，從圖 37 可知：含水層厚度與理論沉陷量關係呈正比，距抽水井距離愈近，含水層愈少沉陷量愈大，100 公尺範圍內沉陷量介於 0~-1.6mm 之間，案例工程各監測沉陷點最大沉陷量介於 -0.8mm 至 -2.8mm 之間，平均監測沉陷量為 -1.8cm 約略符合。

五、結論與建議

5-1 結論

- (一) 由案例工程抽水試驗所得之透水係數 $k=2.45 \times 10^{-3}$ ，與丁澈士(1997)及經濟部(2014)海豐 1 觀測站之建議值近似，可供屏東市屏北地區之透水係數參考。
- (二) 案例工區開挖面積約 6,144 平方公尺，依現地定量抽水試驗所得之導水係數及儲水係數，並利用 Theis 公式計算基地總抽水量約 9,902CMD (6,082.8CMD/ha)，可供鄰近區域抽水規劃參考及非汛期期間地下水再利用水量參考。
- (三) 圖 32 可知：各種地質的透水程度均有不同，礫石層透水性較高，經地下水位抽降後所影響的範圍也較大，細砂地質相較中砂與粗砂、礫石地質之曲線等距偏差較大，透水性也相較的低。
- (四) 圖 37 可知：即時沉陷曲線與含水層厚度呈正比關係，距抽水井愈近，含水層愈低，沉陷量也愈大；距抽水井愈遠，則視各種地質透水性影響有所不同。
- (五) 現場監測沉陷變化曲線(圖 35)與理論沉陷變化曲線(圖 37)不同，從鑽探報告可知含水層之地質及地表回填層分佈略有不同，以及測量之誤差值、地表受壓情形均有不同影響，故與理論沉陷曲線不同。

5-2 建議

- (一) 基礎開挖進行時為避免因地下水產生災害，常以降低地下水位以確保施工開挖面之穩定，依案例工程每日 9,902CMD 之抽水量，如可將地下水回收再利用，可符合多元取水目標，以減輕缺水危機。
- (二) 本文藉抽水試驗所得水理參數，代入案例工程抽水量計算，並以 Schoklick 經驗值判斷各種地質因抽水影響範圍檢討含水層厚度與抽水井距離之關係，後續建議以相關軟體演算比較。

- (三) 案例工程之沉陷觀測點配置，因受地形、地物影響，所監測範圍侷限 20m 以內，後續如於粗砂或礫石等高透水性地質區進行抽水，建議沉陷點設置於原地面，監測範圍再加大，可進一步探討因抽水致地表沉陷之實際關係。

參考文獻

1. Ting, C.S, Groundwater resources evaluation and management for Pingtung plain Taiwan, Chapter 3, pp.35~41, Free University, Amsterdam, Netherlands, PhD. Dissertation, 1997.
2. 經濟部，2014，地下水補注地質敏感區劃定計畫書(G0002 屏東平原)，第 10~36 頁。
3. 經濟部中央地質調查所地質整合查詢，<https://gis3.moeacgs.gov.tw> (May.7, 2021)。
4. 開通大地工程股份有限公司，屏東公園立體停車場統包工程鑽探報告書，第 1~19 頁，屏東，2020。
5. 林耀煌，「高層建築－基礎開挖施工法與設計實例」，增訂九版，第 8 章，第 551~582 頁，長松出版社，台北，2000。
6. 高世鍊，現地抽水試驗漫談-規劃、執行、分析及配井設計，大地技師，第 8 期，台北，第 24-25 頁，2014。
7. 沈茂松，「營建工程防災技術(基礎施工篇)」，修訂第五版，第十一章，第 429~432 頁，文笙書局，台北，2015。
8. 井帝工程股份有限公司，「屏東公園立體停車場統包工程抽水試驗成果報告書」，第 1~20 頁，屏東，2020。
9. 經濟實業股份有限公司，九如牌不銹鋼沉水式深井泵 ST/BS/BC 型錄，第 7 頁，2021。

建山部落邊坡長期監測

黃彥齊¹ 許懷後²

¹國立高雄科技大學營建工程系研究生

²國立高雄科技大學營建工程系副教授

摘要

建山部落位於高雄市桃源區的偏鄉，依照地質調查資料來看，此地區有許多災害潛勢，有必要在此處做社區安全的長期監測，我們使用的設備有一支 30m 測傾管及一台傾度盤來進行，在監測完成後我們彙整了監測數據、地下水位變化、降雨量變化，並利用建議之監測管理值，判斷監測數據是否在合理之範圍之內，經過 2019 年與 2020 年兩年之監測，監測結果如下，建山部落主要的降雨季節是在夏季，地下水位變化介於地表下 15.7~28.8m，最大落差有 13.1m，測傾管觀測結果顯示滑動方向為東北方，滑動因素可能包含：1 壓密沉陷導致 2 梅雨季節降雨 3 擋土牆側向滑移，傾度盤傾斜方向為西南方，測傾管及傾度盤的監測數據都未超過在建議之監測管理值。

關鍵字：邊坡監測、測傾管、傾度盤

A Longterm Slope Stability Monitoring at Jianshan

Yen-Chi Huang¹ Huai-Houh Hsu²

¹ Department of Construction Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

² Department of Construction Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

Jianshan Community located in Taoyuan District, Kaohsiung City. According to geological data, there are many potential areas of geological hazards in this area. It is necessary to conduct long-term safety monitoring for Jianshan Community. This study was conducted two years (2019 and 2020) to monitor the slope safety of the community. The monitoring location was set up at Jianshan Elementary School. The monitoring method used included a 30m inclinometer casing and a tiltmeter. The monitoring work of this study integrates monitoring data, groundwater level, and rainfall amount, and refers to monitoring management values to determine whether the monitoring location is within the safe range of slope stability. This study summarizes the long-term monitoring data of the Jianshan Community in 2019 and 2020. The monitoring results presented show that summer is the main rain season, the groundwater level changes between 15.7-28.8m below the ground surface, and the maximum difference is 13.1m; Observation results of the inclinometer casing show that the slope sliding direction is northeast, and the tilting direction of the tiltmeter is southwest; the causes of sliding may include: 1 strata settlement; 2 rainfall; 3 lateral movements of the retaining wall. The monitoring data of the inclinometer casing and the tiltmeter are all within the safe value range of the monitoring management value.

Keywords: monitoring, slope stability, inclinometer, tiltmeter

一、緒論

台灣位處亞洲東部、太平洋西側的島嶼並且位於菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊交界上，台灣有 70% 的土地是屬於山地與丘陵，只有 30% 是屬於平地，地形起伏大。加上台灣四面環海的地理因素，每到夏、秋兩季都是颱風侵襲的高峰期。

1999 年 9 月 21 日發生 921 地震，造成地表多處破裂鬆動，2009 年 8 月莫拉克颱風挾帶著狂風暴雨侵襲了高雄市甲仙區小林村造成當地邊坡深層滑動四百餘人被活埋，歷經了這兩次的大災害已經使得山坡地地層變的破碎不堪，近年來氣候變遷導致許多致災性的豪大雨時常發生，有鑑於此，本研究希望能喚起大家對於山區防災的重視。

二、研究目的

本研究山坡地有滑動徵兆或滑動疑慮時，為確保邊坡長期穩定，採用各種不同科學儀器與感測器，掌握目視無法掌握的地滑徵兆，例如：邊坡坡體變化、地下水位變化、設施的位移狀況等，來做危害度的評估，進而保護偏鄉學校及當地居民的安全，藉由每一次的現地監測數據，了解邊坡變化情形，也讓當地居民能夠直接了解自己生活環境的變化。研究地點選在高雄市桃源區的建山國小，使用測傾管與傾度盤的兩者效用，判斷此一區域山坡是否有滑動的可能性，並藉由定時的回報此區山坡的傾斜狀況判斷是否有安全上的疑慮需要請當地居民撤離。

藉由一個月一至兩次的現地監測，把所有的監測數據及資料統整在一起，不僅僅可以使我們更加了解現地的山坡滑動情形，更重要的是當地國小的師生與當地居民可以了解到監測的成果。

三、文獻回顧

3-1 山崩與地滑分類與特性

Varnes (1978) 依據山坡地材料向下移動方式分類為：(a)墜落 (b)傾倒 (c)滑動 (d)側落 (e)流動

渡正亮(1971)定義山崩與地滑的差別在

於：「山崩主要是發生在大於 20 度的傾斜地且通常都是突發性的發生，土體移動速度快，發生原因與降雨強度有很大關係；地滑主要發生在 5 到 20 度的緩坡面且通常發生都是連續的且會再次發生，土體移動速度慢，發生原因受地下水影響大。」

日本國土交通省砂防部依據崩塌災害規模大小分為「深層崩壞」及「表層崩壞」兩類。其中「表層崩壞」定義為滑動深度介於 0.5 至 2 公尺之間，反之則屬「深層崩壞」的範圍。又日本獨立行政法人土木研究所 (2008) 將深層崩壞定義為崩塌長度及寬度皆大於 100 公尺、崩塌深度超過 5 公尺、總崩塌量超過 105 立方公尺。

行政院水土保持局定義大規模崩塌為崩塌面積超過 10 公頃、崩塌土方量達 10 萬立方公尺、崩塌深度在 10 公尺以上。

洪如江 (1999) 認為邊坡在崩塌前的前兆有：

1. 樹木傾斜
2. 邊坡坡面出現張力裂縫
3. 邊坡坡面出現沖蝕孔或管湧
4. 擋土構造物出現位移或開裂
5. 邊坡坡面或坡趾突出
6. 邊坡波趾平地隆起
7. 經常出水之排水孔突然停止出水
8. 監測或預警系統顯示出加速位移

Han 等人 (2004) 所提出深層滑動破壞、一般邊坡滑動破壞、局部滑動破壞及表層滑動破壞(圖 2-1)。深層滑動之滑動面較深，平均厚約 10-20 公尺，其滑動速度通常較慢，滑動後滑動體受擾動較少，一般圓弧滑移常屬之。深層滑動常發生在坡度 5 到 30 度的緩坡面，但在陡坡地區也有發生大規模深層滑動的案例。

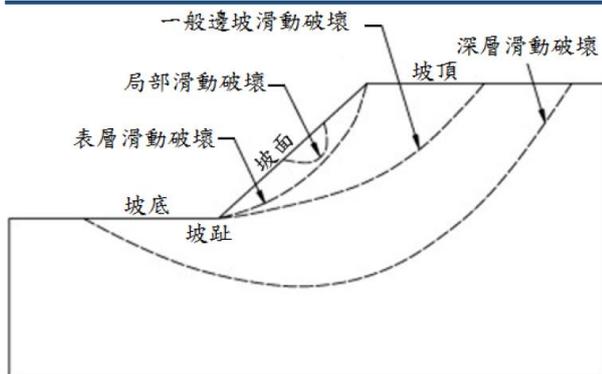


圖 3.1 各種不同邊坡滑動破壞型式(Han 等人 2004)

3-2 監測管理值建議

訂定管理控制值之主要目的在於確保邊坡安全，並據此提供邊坡或擋土牆整體穩定之重要參考，並擬定後續防災相關計劃之依據。但該標準係暫訂安全研判基準，任何觀測結果仍需由專業技師就相關儀器之特性及地質條件，就整體穩定性加以研判，該研判基準在執行過程應視實際觀測行為變化，做必要之調整及修正。

本觀測系統各項目均有其觀測上之特性，相互間皆亦有其關聯性，茲以準確性較高及與安全性較有直接關之觀測儀器與地表、擋土牆及結構物外觀現象觀測為參考。監測管理值採用累積變形量與變形速率兩種模式依照監測設備特性，進行量測資料之交叉比對，並建立雙重警戒門檻基準。本年度參考坡地社區開發安全監測手冊(內政部營建署，1999)與山坡地監測準則(中華民國大地工程學會，2017)建議值，訂定安全管理建議值，作為警戒與預警之門檻管理基準。

開發安全監測手冊和中華民國大地工程學會在 2017 年 3 月出版的山坡地監測準則中針對監測管理值有給出了建議，測傾管滑動 0.2mm/日以上或 2mm/月以上為警戒值，滑動 1/mm 日以上或 10mm/月以上為行動值，傾度盤傾斜 300 秒/月以上為警戒值，傾斜 40 秒/日以上為行動值，傾度盤累積傾斜量為 0.1 度(360 秒)以上為警戒值，0.2 度(720 秒)以上為行動值。

滑動或傾斜在地表達到警戒值在可能會出現頭部出現裂隙或下陷，電桿、圍牆等

發生變形，開挖面出露層面或滑動面，邊坡出現湧水，當達到行動值時可能會出現邊坡上緣張力裂隙互相連通，且裂隙寬度與錯動不斷增大，滑動體趾部出現隆起、放射狀壓力裂隙、小規模崩塌，趾部突然出現湧泉，或已有之泉水變濁或乾涸等，地體震動、地鳴、沒風但樹林的枝葉沙沙作響、電桿搖動等，動物異常反應等，以上各種前兆通常多與不正常的集中降雨有關。

四、研究場域及方法

建山部落位於高雄市桃源區建山里，鄰近六龜、寶來、甲仙，以海拔 600-1000 公尺的山脈居多，建山部落兩側有荖濃溪支流環繞，主要河流為下方荖濃溪主流(圖 4.1)。



建山部落地層屬於階地堆積層，是由泥、砂及礫石組成，地層年代屬於全新世，位在土壠灣斷層上，資料顯示建山國小校園西側有局部順向坡，東北側有土石流潛勢溪流等地質災害(圖 4.2)。



圖 4.2 建山國小地質地層圖(摘自中央地質調查所)

由於校園建物興建受限地形高低起伏，需進行整地，部分區域須以擋土牆、相關坡地排水設施穩定土體，才可於上方興建建築物。圖 4.3 為建山國小其中一棟教師宿舍現況照片，該宿舍坐落於坡地砌石護坡上方，因長期經歷颱風、暴雨，又處於坡地排水路徑，使得砌石護坡內側土壤粒料部分流失，導致教師宿舍地基發生差異沉陷狀況，結構體局部應力過大而產生裂隙及錯位情況。經調查結果，結構體有許多裂隙且持續延伸，部分有與主結構發生錯位，約有 1~3 公分左右。觀察外觀與裂縫發生位置，結構物明顯向砌石護坡側傾斜。



圖 4.3 建山國小教師宿舍現況

根據台灣歷史影像平台可以清楚觀察到 2008 辛樂克風災及 2009 年莫拉克風災所造成的土石傾瀉及路橋損毀都在發生在離建山國小不遠的地方。其中離建山國小最近的是五龍宮，在 2009 年莫拉克風災後遭遇土石流傾瀉而下，倘若土石量再更大的話，有可能五龍宮就會掩埋，甚至是連旁邊的建山國小都會遭受到嚴重的影響(圖 4.4)。

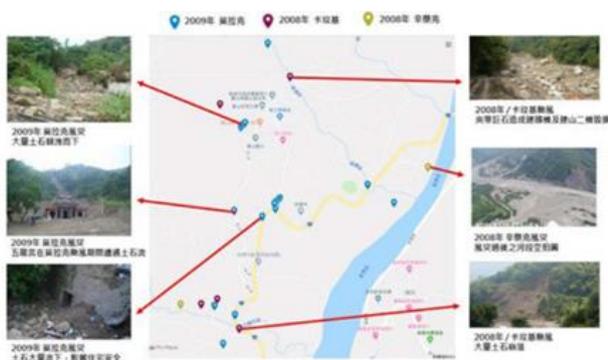


圖 4.4 建山國小附近 2008 年辛樂克風災及 2009 年莫拉克風災導致災害(災害圖片摘自台灣歷史影像平台)

我們經由鑽探來了解附近地底下地層，經由鑽探報告顯示，此地區地層 0 到 4m 的回填層部分幾乎都是泥土夾雜小石塊，2.8~2.9m 有夾雜些許頁岩，4~5.6m 和 6~6.5m 岩心是較為完整的，但大多還是岩塊夾雜棕黃色粉土質砂，8~12m 主要呈現棕黃色粉土質砂，但開始出現灰色粉土質的岩心，12~13.7m 維持著灰色粉土質完整的岩心，14m 時轉變成棕黃色破碎的岩心，16~24m 是呈現碎顆粒的土讓及小石頭，較為鬆散及破碎，僅有局部較為完整，24~28m 轉變為較完整的岩心，28~28.5 的岩心轉變為較深的顏色，28.8~30m 變回棕黃色的岩心。

此研究的研究方向是為了掌握建山部落之監測數據並根據監測數據了解當地的邊坡滑度情形，研究方法為蒐集有關建山部落的資料，其中包含：地質資料、鑽探報告中的 SPT-N 值及 RQD 值，以及附近歷史災害照片、航空照片，並訂定監測管理值以達到防災的效益。此研究使用測傾管以及傾度盤來作為監測的工具，利用每一次監測所記錄下來的數據，經過彙整及討論來判斷滑動的方向。

五、監測數據及討論

建山國小之測傾管及傾度盤是分別設立於教師宿舍旁，測傾管的 A+ 方向是往下邊坡東南方向；傾度盤的 Y+ 項是指牆壁固定端西南方向(圖 5.1)

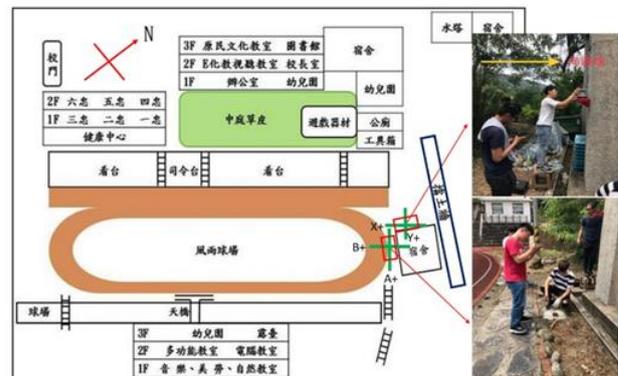


圖 5.1 建山國小測傾管與傾度盤之方向位置圖

5-1 降雨量

該監測場域 2019 年降雨量集中於 5 月到 8 月，其中八月降雨量高到 1146.5mm，夏季降雨量偏高，年平均降雨量為 258.25mm(圖 5.2)。

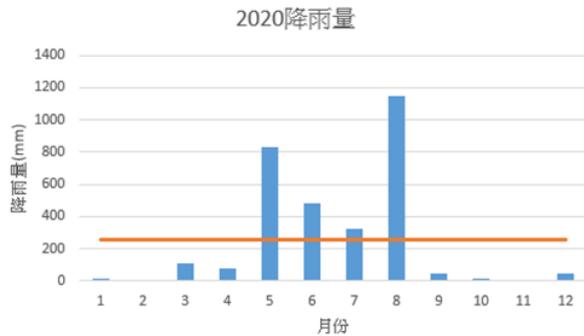


圖 5.2 2019 年降雨量(摘自高中測站 C1V231)

該監測場域 2020 年降雨量集中於 5 月到 8 月，其中 5 月累積降雨量高到 689mm，夏季降雨量較高，降雨主要集中在夏季，年平均降雨量為 147mm(圖 5.3)。

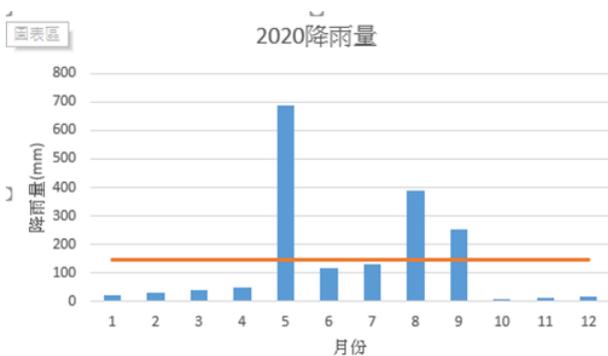


圖 5.3 2020 年降雨量(摘自高中測站 C1V231)

5.2 傾度管量測結果

傾斜觀測管埋設完成後，可得不同深度之位移值。以第一次量測之記錄為基準，則可計算出以後各次量測之地層總位移量，並可對深度繪製深度—位移圖。其位移與深度關係圖如(圖 5.4)與(圖 5.5)所示

本研究自 2019 年 4 月 22 日開始量測至 2019 年 12 月 4 日為止，以 4 月 22 日為參考基準點計算，A 方向平均最大月變位量為 -0.24mm / 月，B 方向平均最大月變位量為 -0.40mm / 月，綜合 A 向與 B 向後，平均最大月變位量為 0.46mm / 月，依照警戒值

(2.0mm/月)判斷仍在安全範圍內(表 5.1)。自 2020 年 3 月 12 日開始量測至 2020 年 10 月 15 日為止，以 3 月 12 日為參考基準點計算，A 方向平均最大月變位量為 0.05mm / 月，B 方向平均最大月變位量為 -0.20mm / 月，綜合 A 向與 B 向後，平均最大月變位量為 0.20mm / 月，依照警戒值(2.0mm/月)判斷仍在安全範圍內。相較於 2019 年監測結果(0.46mm/月)，本年度之最大月變位量(0.20mm/月)趨緩(表 5.1)。

對於相鄰兩次量測日期所統計之短期地層滑移速率以日變化量為參考，2019 年度相鄰量測週期最大日變位量發生於 6/10~7/17 期間，為梅雨季節(表 5.2)，尚未達到警戒值(0.2mm/日)門檻。2020 年度相鄰量測週期最大日變位量發生於 5/7~5/21 期間，為梅雨季節(表 5.2)，尚未達到警戒值(0.2mm/日)門檻。

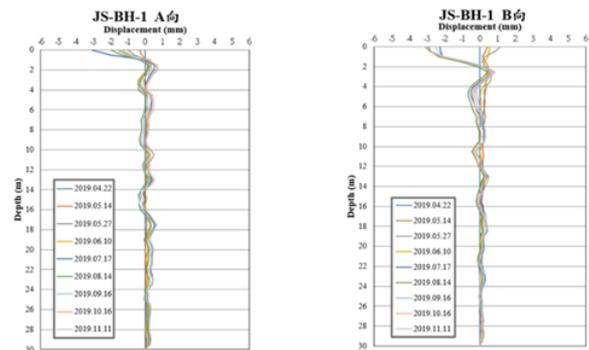


圖 5.4 2019 年 JS-BH-1 測傾管數據曲線

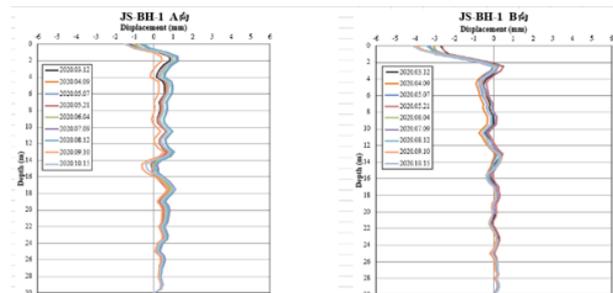


圖 5.5 2020 年 JS-BH-1 測傾管數據曲線

表 5.1 JS-BH-1 傾斜管變化量統計表(年度平均最大月變位量)

年度	觀測起迄日期	平均最大月變化量 mm/月			黃燈 (警戒) mm/月	紅燈 (行動) mm/月
		A 向	B 向	綜合 A 與 B 向		
2019	4/22~12/4	-0.24	-0.40	0.46	2	10
2020	3/22~10/15	0.05	-0.20	0.20	2	10

表 5.2 JS-BH-1 傾斜管變化量統計表(相鄰量測週期最大日變位量)

相鄰量測週期	平均最大月變化量 mm/月			黃燈 (警戒) mm/月	紅燈 (行動) mm/月
	A 向	B 向	綜合 A 與 B 向		
6/10~7/17	-0.04	-0.08	0.09	0.2	1
5/7~5/21	-0.03	0.05	0.06	0.2	1

綜合長期監測(表 5.1)與短期監測變化(表 5.2)判斷,地層滑移速率仍在安全範圍內。由深度-位移圖中可看出整支傾斜管往一側偏移之現象,位移方向為 A-與 B-之間向東北方移動,其觀測值在警戒值範圍內。對照其 A 與 B 方向監測數據,判斷可能之滑動因素包含:1.傾斜觀測管埋設後之壓密沉陷所導致之變形;2.颱風梅雨季節降雨;3.教師宿舍後方擋土牆支撐強度弱化引致之側向滑移。惟仍需佐以後續長期觀測,以釐清此移動量之主要影響因子。

5.3 地下水位監測

2019 年地下水位變化介於地表下 15.7m~7.3m(圖 5.5),最高與最低約有 7.4m 的變化,水位變化差異極大,長期觀測之平均

水位位於地下 23.1m 處。配合高中雨量站之降雨觀測紀錄,於 5 月 18 日(降雨量:188mm)至 5 月 20 日(降雨量:154mm)期間,以及 8 月 11 日(降雨量:139mm)、8 月 15 日(降雨量:293.5mm)與 8 月 16 日(降雨量:196mm),降雨後水位明顯上升,後又降低至水位約 27m 處。

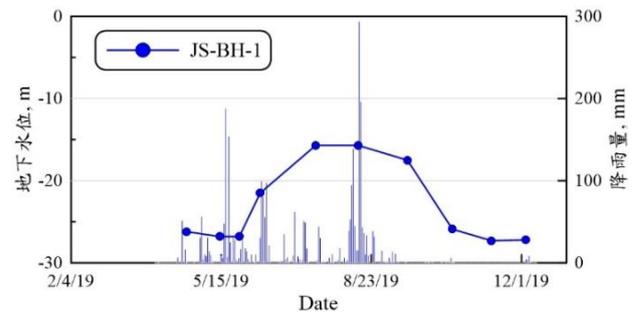


圖 5.5 2019 年 JS-BH-1 地下水位歷時紀錄

2020 年地下水位變化介於地表下 19.2m~28.8m(圖 5.6),最高與最低約有 9.6m 的變化,水位變化差異極大,長期觀測之平均水位位於地下 25.3m 處。配合高中雨量站之降雨觀測紀錄,於 5/21~6/4 期間,以及 8/12~9/10 期間,降雨後水位明顯上升,後又降低至水位約 25m 處。

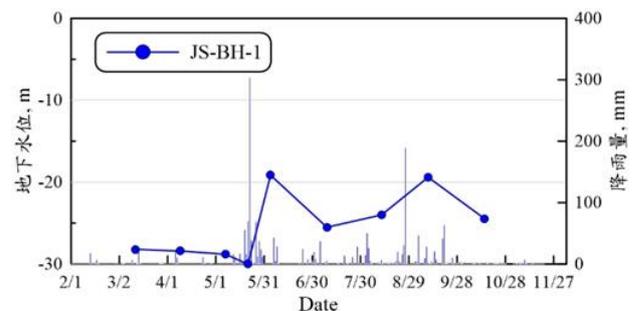


圖 5.6 2020 年 JS-BH-1 地下水位歷時紀錄

5.4 傾度盤監測系統量測結果

教職員宿舍外牆採取人工現地監測傾度盤(TI_01)。表 5.5 及 5.6 分別為長期觀測與短期觀測之紀錄。2019 年長期觀測與短期觀測之平均變化量顯示教師宿舍之傾斜變化情形目前在警戒值範圍內。

表 5.5 傾斜計與傾度盤變化量統計表(年度平均月變化量)

編號	X 向(2-4) 秒/月	Y 向(1-3) 秒/月	黃燈(警戒) 秒/月
TI_01	7.61	1.90	300
TI_01	5.45	3.22	300

表 5.6 2019 年傾斜計與傾度盤變化量統計表(相鄰量測週期最大日變化量)

編號	相鄰量測週期	X 向(2-4) 秒/月	Y 向(1-3) 秒/月	紅燈(行動) 秒/月	備註
TI_01	4/22~5/14	1.49	-0.16	40	5,6 月 梅雨季
TI_01	8/12~9/10	0.78	2.46	40	米拉克颱風 (8/10~8/11)

2019 年傾度盤長期觀測之平均月變化量顯示傾度盤 TI_01 在安全變化範圍內。根據傾度盤量測結果顯示(圖 5.7)，傾度盤 TI_01 之傾斜方為西偏南向，向操場跑道方向傾斜。

2020 年傾度盤長期觀測之平均月變化量顯示傾度盤 TI_01 在安全變化範圍內。根據傾度盤量測結果顯示(圖 5.8)，傾度盤 TI_01 之傾斜方為西偏南向，向操場跑道方向傾斜。

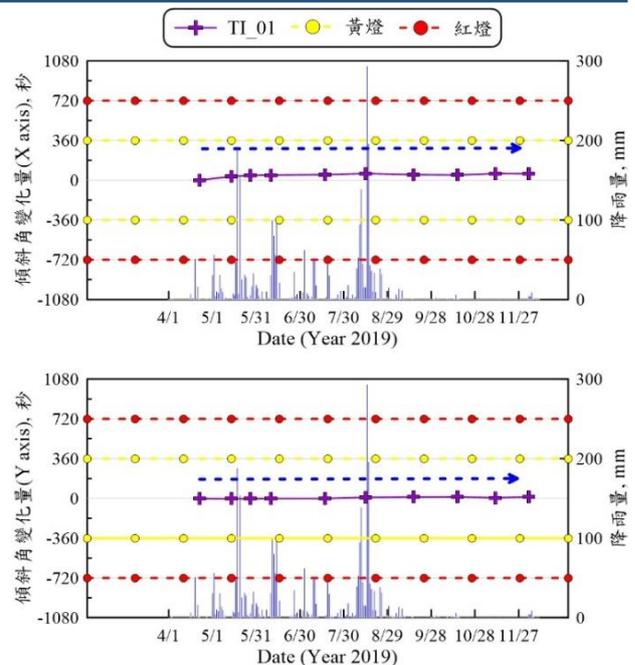


圖 5.7 2019 年 TI_01 傾度盤歷時紀錄

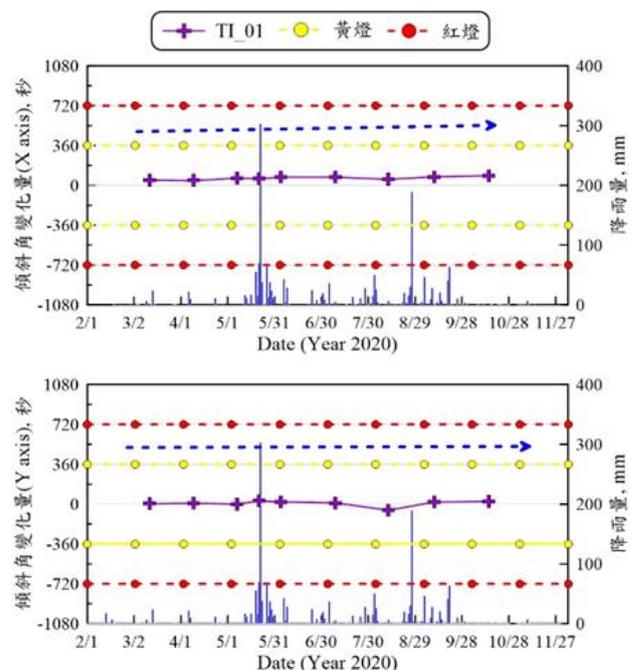


圖 5.8 TI_01 傾度盤歷時紀錄

六、結論與建議

(一)、傾斜觀測管量測結果分析

1. 本研究 2019 年 4 月 22 日開始量測至 2020 年 10 月 15 日為止，以 2020 年 3 月 12 日為參考基準點計算，平均最大月變位量為 0.20mm/月，依照警戒值(2.0mm/月)判斷仍在安全範圍內。相較於 2019 年監測結果(0.46mm/月)，2020 年之最大月變位量(0.20mm/月)趨緩。

2. 相鄰兩次量測日期所統計之短期地層滑移速率以日變化量為參考，2019 年發生於 6/10~7/17 期間，2020 年發生於 5/7~5/21 期間，皆為梅雨季節，尚未達到警戒值 (0.2mm/日) 門檻。
 3. 由深度-位移圖中顯示位移方向為 A-與 B-之間向東北方移動，其觀測值在警戒值範圍內。判斷可能之滑動因素包含：1. 傾斜觀測管埋設後之壓密沉陷所導致之變形；2. 颱風梅雨季節降雨；3. 教師宿舍後方擋土牆支撐強度弱化引致之側向滑移。惟仍需佐以後續長期觀測，以釐清此移動量之主要影響因子。
- (二)、地下水位變化
1. 地下水位變化於 2019 年介於地表下 15.7m~7.3m，最高與最低約有 7.4m 的變化，水位變化差異極大，長期觀測之平均水位位於地下 23.1m 處。2020 年介於地表下 19.2m~28.8m，最高與最低約有 9.6m 的變化，水位變化差異極大，長期觀測之平均水位位於地表下 25.3m 處。
 2. 配合高中雨量站之降雨觀測紀錄，2019 年於 6 月中降雨後水位明顯上升，後又降低至水位約 27m 處。2020 年於 5/21~6/4 期間，以及 8/12~9/10 期間，降雨後水位明顯上升，後又降低至水位約地表下 25m 處。
- (三)、傾度盤量測結果分析
1. 本年度傾度盤之平均月變化量與平均日變化量均顯示教師宿舍之傾斜變化情形目前在警戒值範圍內。
 2. 根據傾度盤量測結果，傾度盤 TI_01 之傾斜方為西偏南向，向操場跑道方向傾斜。

參考文獻

1. 洪如江(1999), 坡地災害防治, 行政院國家科學委員會, 第 36-37 頁
2. 高振誠(2006), 邊坡滑動面判釋方法之研究-以烏山嶺地區為例, 國立台北科技大學碩士論文
3. 董文保(2017), 邊坡滑動破壞型式之探討-以小林村為例, 逢甲大學碩士論文
4. Han, J., Sheth, A. R., Porbaha, A., Shen, S. L., (2004), Numerical analysis of embankment stability over deep mixed foundations, ASCE Geotechnical Special Publication No. 126: Geotechnical Engineering for Transportation Projects, GeoTrans 2004, ASCE, Los Angeles, California, USA, pp. 1385-1394
5. Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., Reich-enbach, P., and Rossi, M. (2008). Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, central Italy. *Geomorphology*, 96: 105-102
6. 詹勳全、張嘉琪、陳樹群、魏郁軒、王昭堡、李桃生(2015), 台灣山區淺層崩塌地特性調查與分析, 中華水土保持學報, 第 19-28 頁
7. 鍾明劍、王金山、譚志豪(2014), 測傾管量測數據釋疑暨地滑機制研判應用, 中興工程技術學報, 第 43-54 頁
8. 山坡地監測準則(2015), 中華民國大地工程學會
9. 台灣歷史影像平台, <http://art2.tnnua.edu.tw/filmarchives/>
10. 行政院農業委員會水土保持局, <https://www.swcb.gov.tw/>
11. 經濟部中央地質調查所, <https://www.moeacgs.gov.tw/main.jsp>
國家災害防救科技中心 <https://dmap.ncdr.nat.gov.tw/>
12. Varnes, D. J., Slope Movements and Types and Processes, In: Landslides: Analysis and Control, Transportation Research Board Nat., Ac. Sci. Washington Special Report, Vol. 176, pp. 11-13, 1978.
13. 渡正亮、小橋澄治, 「地すべり斜面崩壊の予知と對策」, 山海堂, pp. 37~40, 1987°

臺灣 SRC 構造建築施工實務探討與研究-以 A 建築為例

顏士欽¹ 曾世雄²

¹國立高雄科技大學土木系碩專班研究生

²國立高雄科技大學土木系教授

摘要

臺灣歷經九二一大地震之後，政府積極檢討修正相關技術規則及規範，以提升建築結構的耐震能力，為符合修正後的建築耐震標準，將傳統鋼骨構造結合鋼筋混凝土構造稱為 SRC 構造，成為超高樓層建築結構主流；兩種構造的相結合理論上對於結構有雙重保障，但若鋼骨與鋼筋混凝土兩者相互干擾處理不當，則同時存在兩者的雙重缺點。

本研究以 A 建築 B6FL~1FL 為例，結構設計為包覆填充型鋼管柱+包覆型 SRC 梁+RC 梁構造，以逆打工法施作；由於逆打工法必須分層開挖，使得柱主筋的延伸受到 PC 層阻擋，因此柱主筋搭接範圍受到限制；以及當包覆填充型鋼管柱與鋼筋混凝土梁銜接為使應力平順，梁端應先以 SRC 構造漸變為 RC 構造梁，倘若柱面若先行加工托梁構件，則造成逆打鋼柱施工不易，因而 RC 梁未採取漸變式設計。

本研究蒐集 A 建築 B6FL~1FL，梁柱之鋼骨及鋼筋施工所產生之構件衝突及缺失實務，探討歸納施工疑慮於規範、設計及施工尚需整合之處；且 SRC 結構建築若採用逆打工法施作，增添其設計複雜性及施工困難度，因此基於使設計與施工皆能符合相關技術規則，SRC 結構建築不宜採用逆打工法。

關鍵字：SRC、包覆填充型鋼管柱、逆打工法。

Discussion and Research on Construction Practicing of Taiwan SRC Structure Building-take Building a as an Example

Shih-Chin Yen¹ Shih-Hsiung Tseng²

¹Graduate student, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

²Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

After the suffering of the 921 earthquake in Taiwan, the government was aggressive to study and revise the technical rules standards of construction, to upgrade the seismic capability, in order to comply with this revised standard of seismic capability, to combine the traditional steel structure and reinforced concrete structure is called SRC structure, to become a mainstream of super high-rise building construction; in theory, this combination of these two structures has a double guarantee for the structure, but, if the steel frame and reinforced concrete interfere with each other and deal with improperly, will occur double defects at the same time.

This study taking Building AB6FL-1FL as an example, the structure is designed as a covered filled steel pipe column + covered SRC beam + PC beam structure, using a top-down construction method; since the top-down construction method must be excavated by layer, making the

extension of the main bar of the column be stopped by the PC layer, therefore, making the lap range of the main bar of the column be limited and when the filled steel tube column and the reinforced concrete beam are connected to make the stree smooth, the beam end must be changed at first from SRC structure to RC structure beam progressively, if the cylindrical surface is processed with street framed beam first, then become not easy to construct on the inverted steel column, therefore, the gradual change design on RC beam was not adopted.

This study collecting Building AB6FL-1FL range, the conflicts and lack of practice of components caused by the construction of beams and columns and steel reinforcement, discussing and summarring the doubts of construction on specification, design and construction that need to be integrated, furthermore, if the top-down construction method is used to the construction of SRC structure, will increase the complicity of design and difficulty of construction, as a result, to make the design and construction comply with the relative technical rules, the top-down method is not suitable for SRC structure building.

Keywords: SRC, mixed with filled steel pipe column, top-down construction method

一、緒論

1.1 研究動機與目的

臺灣地狹人稠，為滿足人們對於空間的需求，建築構造必須往縱向發展，迫使超高樓層建築不斷於這片土地上逐日而升；臺灣位處於數十條活動斷層之上，且大多分佈於人口密度較高的西部平原地區，建築物的耐震安全為結構體的首要之務；臺灣歷經九二一大地震之後，政府積極檢討修正相關技術規則及規範，以提升建築結構的耐震能力。

為符合修正後的建築耐震標準，將傳統鋼骨構造(Steel Structure)結合鋼筋混凝土構造(Reinforced Concrete)，稱為鋼骨鋼筋混凝土構造(Steel Reinforced Concrete，簡稱 SRC)；由於鋼結構建築存在挫屈(buckling)、耐火性不佳、構件腐蝕等缺點，以鋼筋混凝土包覆鋼骨結構除了提供部分強度，亦提供鋼骨良好之圍束力降低構件挫屈發成，鋼筋混凝土亦形同鋼骨之保護層，增強其耐火性及阻絕空氣接觸所產生之腐蝕，因此 SRC 構造建築成為超高樓層建築結構主流。

兩種構造的結合相對增加設計與施工的難度，樑柱接頭(Beam-Column Joint)處通常是應力最大的地方，卻也是鋼骨與鋼筋混凝土最容易相互干擾之處；鋼骨結合鋼筋混凝土理論上對於結構有雙重保障，但若鋼骨與

鋼筋混凝土兩者相互干擾處理不當，則同時存在兩者的雙重缺點[1]。本研究收集 A 建築施工中鋼骨與鋼筋混凝土相互干擾之實務，加以探討與研究做為未來修訂規範、設計及施工之參考。

1.2 研究範圍與方法

某企業集團於高雄市左營區興建二棟商辦混合大樓，本研究係以 2019 年申報開工二期工程 A 建築為例，該建築地上 28 層(不含屋突層)、地下 6 層，建築高度 156.14 公尺、開挖深度 25.60 公尺、建築面積 5,399.16m²；B6FL~1FL 為包覆填充型鋼管柱+包覆型 SRC 梁+RC 梁構造，1FL 以上則為填充型鋼管混凝土柱+H 型鋼梁構造，以逆打工法施作。

B6FL~1FL 之 SRC 柱係採用包覆填充型鋼管設計，由於 BOX 鋼管外需要焊接剪力釘增加混凝土的握裹力，並以鋼筋混凝土包覆圍束，大量鋼筋的使用及鋼筋與鋼骨的干擾，加上地下層開挖係採用逆打工法施作，更增加設計的複雜性及鋼筋綁紮施工的困難度，因此施工過程中容易產生鋼骨與鋼筋的構件衝突及缺失，本研究係以 B6FL~1FL 作為研究範圍，探討鋼骨與鋼筋施工過程所產生之疑慮。

本研究蒐集整合 A 建築 B6FL~1FL，梁柱之鋼骨及鋼筋綁紮施工過程，所產生之構件

衝突及缺失實務；1.回顧 SRC 施工疑慮及規範規則相關文獻，2.依據規範規則蒐集施工缺失及疑慮現場照片，3.分別以規範、設計及施工三面向議論，透過相關規則、規範、及學術研究探討其施工疑慮，4.以施工實務回饋比較其差異，並對相關處理方式提出結論與建議。

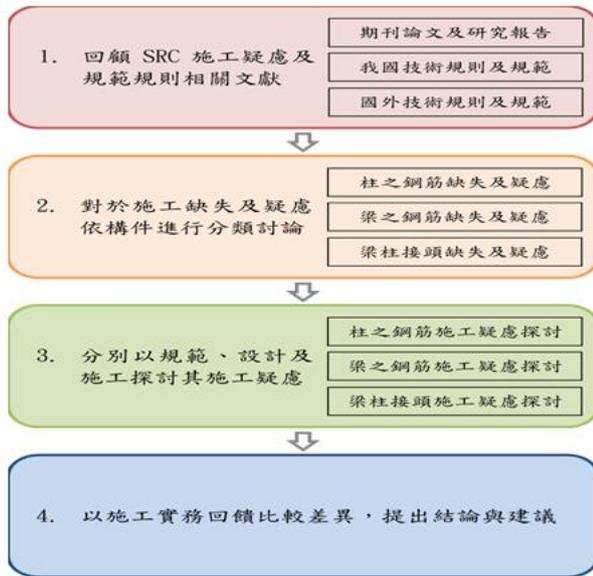


圖 1 研究方法流程圖

1.3 論文架構

本論文以 SRC 構造建築為研究背景，蒐整合 SRC 施工實務所產生之構件衝突及缺失，分別以規範、設計及施工三面向進行相關探討，其論文架構如下：

第一章 緒論

為本研究說明主要大綱、研究動機與目的、研究範圍與方法，以利讀者快速了解論文概要。

第二章 文獻回顧

回顧 SRC 施工衝突及缺失相關論文、期刊及研究，以及國內外相關技術規則、設計規範等資料，做為後續研究探討之重要依據。

第三章 SRC 施工疑慮實務

依據規範規則，蒐整合 A 建築 B6FL~1FL 鋼骨吊裝及鋼筋綁紮施工過程，所產生 SRC 相關構件衝突及缺失，以現場施工照片、設計圖說，說明施工疑慮發生情形。

第四章 SRC 施工疑慮探討

分別以規範、設計及施工三面向，透過

技術規則、規範、學術研究，探討施工疑慮對於結構行為影響，以及後續處理方式討論空間，並提出個人觀點與意見。

第五章 結論與建議

總結本文研究探討事項，對於相關技術規則、規範、設計及施工，提出可供再議之議題，期許本研究能為台灣 SRC 技術盡一份力。

二、文獻回顧

2-1 期刊論文及研究報告

陳純森(2011)鋼骨鋼筋混凝土構造在結構安全似乎有雙重的保障，相對的，但如果設計或施工都不在行，卻可能同時存在「鋼骨」與「鋼筋混凝土」2 者的缺點，利弊相抵反而得不償失。SRC 最常碰到的問題是鋼筋受到鋼骨的阻擋，而無法貫通，特別是在梁柱接頭處。國內常見的作法是在鋼骨鐸一個續接器，並將鋼筋外表車牙鎖進續接器以完成錨錠續接。這種接法就材質而言，鋼骨與續接器都是鋼的材質，鐸接技術固然沒問題，但是就複合構造的力學行為卻是不合理的。

陳純森(2017)鋼骨鋼筋混凝土之建築結構，若採用 RC 梁與 SRC 柱相銜接時，其鋼柱面必須妥善設置鋼骨托梁，讓 RC 梁之應力逐漸傳遞至 SRC 柱，不應將 RC 梁直接與 SRC 鋼柱連接。……鋼骨鋼筋混凝土之梁柱接頭，業界常用 RC 梁之主筋續接器，直接鐸在 SRC 之鋼柱上，其實並不符合建築技術規則與 SRC 規範之規定，如欲符合規範之設計，日本建築學會務實之設計細則與指針，是頗值得參考的。

陳純森、張嘉祥、嚴崇文(2005)雖然在臺灣實務界早已大量採用 SRC 結構形式，然而相對於鋼骨與鋼筋混凝土結構而言在學術上仍有許多不明確的地方，有必要進行更多的研究與探討。特別針對工地發生之缺失及與規範作法互相衝突部分加以指正並提出建議作法。總結提出違反規範公訂之行為：1.鋼筋量設置過多及位置不正確 2.鋼骨與鋼筋之保護層厚度考慮不夠周詳，忽略了彎鈎之影響 3.主筋於樑柱接頭區受鋼骨阻擋切斷並無直通 4.梁柱接頭區直接以 SRC 柱接 RC 梁而無

設置托梁。

陳正誠、陳生金(2002)影響 SRC 結構建築之耐震能力，耐震細部之施工最為關鍵，結構之耐震細部影響構材之延展性進而影響構材之耐震能力，尤其是 SRC 結構內涵鋼骨及鋼筋，使得配筋及澆置混凝土之施工困難度更高，不僅設計者須對 SRC 結構之細部有深入之瞭解，施工品質之確保更易為重要關鍵。研究中探討 SRC 構造於施工中常見之影響施工品質問題，例如：1.使用者或設計者鎖定尺寸不合理，導致施工困難 2.梁柱接頭施工困難或灌漿不易 3.梁、柱腹板穿孔影響接頭區強度 4.鋼筋續接器品質不良，無法達到預期效果。

陳正誠、周佳希、吳品達(2014)包覆填充型箱型柱強度與韌性之優劣往往與其混凝土受圍束之有效性。過去研究指出，箍筋之圍束能有效防止主筋挫屈且能為核心混凝土產生圍壓，大大提升其抗壓強度與韌性。由於鋼梁及 SRC 梁需要接到包覆填充型箱型柱中之箱型柱，因此縱向主筋必須避開梁的位置，而往往只能配置在柱角隅處。該研究採取「接力式繫筋」方式，替代包覆填充型箱型柱橫向繫筋無法直通疑慮，研究結果顯示輔助角隅繫筋之功能與一般繫筋不同，不能取代一般繫筋，接力式繫筋的概念相當具有可行性。

2-2 我國技術規則及規範

內政部營建署(2019)我國內政部於 2004 年正式公布修訂「建築技術規則」於建築構造篇中增列「第七章:鋼骨鋼筋混凝土構造」；九二一集集大地震發生後，建築耐震結構更被人們所重視，國內建商開始大量採用 SRC 構造建築，多年來我國「建築技術規則」並未對 SRC 構造設計明訂專章，使得 SRC 構造設計缺乏完整可依循的規範標準；內政部建築研究所推動國內 SRC 構造設計規範草案，於 2003 年底經過內政部建築技術審議委員會審議通過，2004 年公佈修正我國「建築技術規則」，增列「第七章:鋼骨鋼筋混凝土構造」，由第 496 條至 520 條明訂 SRC 構造設計專章，為 SRC 構造設計基本依循規則，本節回

顧「建築技術規則 第七章:鋼骨鋼筋混凝土構造」與本研究相關規則，了解其設計依據及衝突。

內政部營建署(2011a)內政部自 2004 年 1 月 26 日號令修正「建築技術規則」後，隨即於同年 4 月 26 日號令，依據建築技術規則建築構造編第四百九十七條訂定「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」；由於 SRC 發源於日本[7]，對於 SRC 結構的研究相對完整，且我國與日本同屬地震頻繁地區，因此我國「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」，多數參考沿用日本「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」，為我國第一本 SRC 設計規範；2011 年經部份條文修正頒布第二版，內容詳載各肢材細部設計規範與解說，對於國內 SRC 設計者主要依循規範，回顧與本研究施工實務相關之規範依據，以探討施工疑慮之處。

內政部營建署(2011b)由於設計完成之 SRC 結構，常有難以施工之情況，致施工品質無法達到原設計要求，因此內政部自 2004 年依據建築技術規則建築構造編第四百九十七條訂定設計規範，同時訂定「鋼骨鋼筋混凝土構造施工規範」，SRC 結構施工應遵循本規範要求施工，設計者亦應參酌本規範對所作之設計檢討施工之可行性。本文回顧與本研究相關之 SRC 施工規範，比對設計規範探討施工疑慮產生之歸咎。

2-3 國外相關設計規範

美國鋼結構協會(American Institute of Steel Construction, AISC) (2016)，自 1923 年出版第一本以容許應力法(Allowable Steel Design, ASD)為設計原則，至 1986 年發行第一版以極限狀態設計法設計規範手冊(Load and Resistance Factor Design, LRFD)，逐漸淘汰 ASD 以 LRFD 為主流；美國 AISC-LRFD 規範對於 SRC 之設計理念係將構材中之 RC 部分，以修正係數轉換成等值鋼骨，再直接以 AISC-LRFD 設計公式計算 SRC 構材之強度。AISC-LRFD 規範僅對合成構材(Steel + Reinforced Concrete)之強度計算明確規定，但在耐震設計與構造細則並未明確規定。

美國混凝土學會 (American Concrete Institute, ACI) (2016)，訂定 ACI-318 結構混凝土建築規範，對於設計理念大至承襲鋼筋混凝土之設計方法，將 SRC 構材中的鋼骨視為等量的鋼筋來設計，並依據應變相合之假設來計算 SRC 構材的彎矩與軸力強度。對於樑柱接頭區之彎矩強度，ACI-318 規範在耐震設計規定中明定應符合「牆柱弱梁」之要求；ACI-318 規範對於梁柱接頭之剪力強度，僅考慮接頭之圍束情況，並未考慮鋼骨強度貢獻。

日本建築學會 (Architectural Institute of Japan, AIJ) (2014)，SRC 構造設計規範係以「強度疊加法」計算 SRC 構材之強度，將 SRC 構材中的鋼骨與 RC 視為獨立的個體，分別計算其強度再予以疊加，由於我國對於日本的計算邏輯及公式較為陌生不易採用，因此大多以美國 AISC-LRFD 及 ACI 規範計算；日本 AIJ-SRC 規範之主要優點在於具有豐富的經驗及研究成果，且規範對 SRC 構造細則之規定較為明確，構造細則特別是配筋部分於「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」第 3 章詳細解說，為我國 SRC 設計細則主要參考規範。

三、SRC 施工疑慮實務

SRC 建築包含鋼骨與鋼筋結構，由於為滿足施工所需之臨時承重強度需求，施工順序必須先完成鋼骨安裝作業，再進行鋼筋綁紮及混凝土灌漿，因此鋼筋綁紮常因鋼骨的阻擋而無法直通；及耐震規範的要求，鋼筋的搭接及錨定使鋼筋施工更為繁鎖，倘若於設計階段未以適當之設計考量，施工時常因施工難度及繁瑣因而造成施工不確實等疑慮。

3.1 施工順序

本研究標的係採用逆打鋼柱工法施工，於地下室開挖前先行施作箱型鋼柱逆打，待開挖至設計高程後以設計強度 $140\text{kg}/\text{cm}^2$ 混凝土澆置底版，型鋼梁之吊裝分別以高張力螺栓固定再以全滲透焊焊固，以達施工所需臨時承重之施工強度；完成上述工序後依次進行柱、梁、剪力牆、樓版鋼筋綁紮工程，後

再進行柱與剪力牆、梁與樓版之混凝土澆置工程(詳圖 2)。

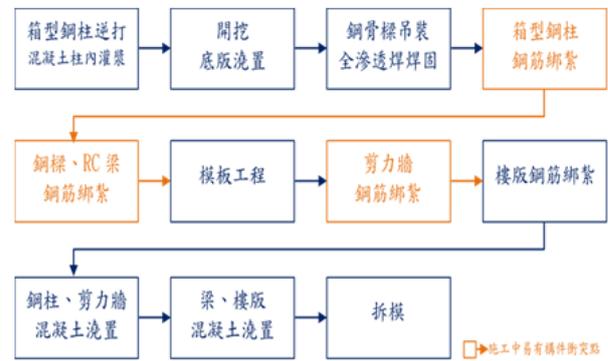


圖 2 結構體施工順序

3.2 柱之鋼筋施工疑慮

本研究範圍柱之設計係採用包覆填充型鋼管設計，並採取逆打工法將箱型鋼柱打入地下設計深度，並澆灌填充高強度混凝土，待分層開挖後以鋼筋混凝土將其包覆，主要提供鋼柱之圍束作用；由於開挖深度的限制，影響柱主筋的續接位置，以及輔助主筋的最大容許間距，常因工作性不佳的環境下被忽略，柱之箍筋因逆打工法及柱面寬，而無法於樑柱接頭處採取閉合箍筋；雖然填充鋼管承擔大多數的軸向壓力，但已經有太多的前例因為柱失去圍束力而破壞，本節以設計圖說及現場施工照片，說明上述施工疑慮情形。

3.2.1 柱筋續接

內政部營建署(2011a) 8.6.1 通則：「2. 鋼骨鋼筋混凝土構材中鋼骨及鋼筋之續接應避開應力較大之處，且兩者應避免設於同一斷面上。」又，8.6.2 主筋之續接與錨定：「2. 鋼骨鋼筋混凝土柱之主筋續接應距梁之混凝土面 500mm 以上，且任一斷面之主筋續接面積百分比不得大於 50% 。」構材之續接原則，首先應確保續接處有足夠之強度且能有效的傳遞應力。梁或柱之主筋續接位置應避開應力較大之處，故不宜在梁柱接頭處續接主筋。

(圖 3)地下三層結構平面圖，位置 X5/Y2、X5/Y1 柱，地下二層進行柱筋續接時，因大梁底下臨時 PC 層的阻擋，使柱筋向地下三層延伸斷點大致集中於同一斷面(梁底至 PC 層之

間)，且斷點距離梁底小於 500mm (詳圖 4、5)；位置 X2/Y1、X2/Y2 柱，現場實際量測鋼筋續接處，距離梁底小於 500mm(詳圖 6、7)。

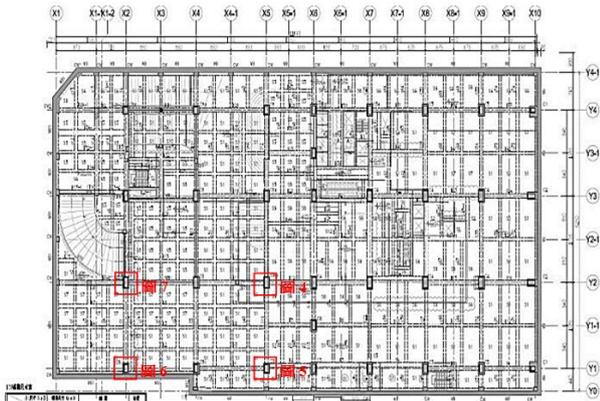


圖 3 地下三層結構平面圖



圖 4 柱筋斷點集中於同一斷面



圖 5 柱筋斷點集中於同一斷面



圖 6 柱筋續接位置距梁底 ≤ 500 mm



圖 7 柱筋續接位置距梁底 ≤ 500 mm

3.2.2 柱筋間距

內政部營建署(2011a) 4.3.3 柱之主筋：
「2. 鋼骨鋼筋混凝土柱中之主筋間距不得大於 300 mm。若主筋間距大於 300 mm 時，則須加配 D13 以上之軸向輔助筋，輔助筋可以不用錨定，且輔助筋應不計其對柱強度之貢獻。」



圖 8 輔助筋間距過大之施工品質缺失



圖 9 輔助主筋因施工造成偏位



圖 10 輔助主筋因施工造成偏位

若 SRC 柱主筋的間距大於 300 mm 時，鋼筋對混凝土的圍束效果將會明顯減弱，特別於梁柱接頭處若鋼筋圍束力不足，產生塑性變形時混凝土恐有爆裂之虞。(詳圖 8)輔助筋間距過大之施工品質缺失，及(圖 9~10)鋼筋工程施工現場拍攝照片，輔助主筋因鋼筋排置、模板組立及混凝土澆注等因素偏位，造成輔助筋間距過大，施工工人未經調整適當輔助筋間距之施工品質缺失。

3.3 梁之鋼筋施工疑慮

本研究範圍梁之設計分別有 SRC 梁與 RC 梁設計，SRC 梁之主筋因箱型鋼柱阻擋而無法直通，梁筋因搭接、錨定等因素而造成間距密集排列不易，梁端未使用閉合箍筋等施工疑慮；RC 梁之梁端與 SRC 梁側銜接，SRC 梁之型鋼加工階段未於腹版穿孔，以及高程差等問題導致錨定長度不足，本節以設計圖說及現場施工照片，說明上述施工疑慮

情形。

3.3.1 梁筋續接

(內政部營建署,2019)第 509 條：矩形斷面鋼骨鋼筋混凝土構材之主筋，以配置在斷面四個角落為原則；在梁柱接頭處，主筋應以直接通過梁柱接頭為原則，並不得貫穿鋼骨之翼板。(內政部營建署,2011b) 8.5.1 梁柱接頭之主筋配置：1. 鋼骨鋼筋混凝土梁柱接頭處之主筋應以直接通過接頭為原則，宜儘量避免以鋼筋續接器銲於鋼柱翼板上以續接主筋。

現場施工情形如(圖 11~15)，逆打鋼柱先行將續接器母頭焊接於鋼柱對應位置並加護蓋防護，以逆打工法將鋼柱植入地下，待開挖完成後拆除護蓋，於梁端以續接器公頭鎖入鋼筋，再以搭接方式連結兩端鋼筋。由於梁端鋼筋係以續接器公頭固定於鋼柱，因此續接器鋼筋如採用同一長度，則有同一斷面搭接問題；梁鋼筋以續接器銲於鋼柱代替梁主筋的直通，此為梁柱接頭應力較大處安全性是否妥適？



圖 11 開挖過程部分續接器護蓋掉落



圖 12 RC 梁鋼筋以續接器代替鋼筋直通



圖 15 續接器鋼筋等長所致於同一斷面搭接



圖 13 RC 梁鋼筋以續接器續接情形



圖 14 SRC 梁鋼筋以續接器續接情形

3.3.2 梁筋間距

粗骨材的使用能增加混凝土強度，但粒徑大小則影響混凝土澆置的成敗，為使混凝土澆置時，粗骨材能順利通過鋼筋間隙，避免混凝土產生粒料析離問題，混凝土配比設計大多採用 20mm (6 分)粗骨材，並以其最大粒徑 1.25 倍為鋼筋間距要求。依據[8] 4.3.1 主筋之一般要求：「3. 主筋與主筋之淨間距應大於以下之最小者：(1) 25 mm，(2) 主筋標稱直徑之 1.5 倍，(3) 粗骨材最大粒徑之 1.25 倍。」

梁筋配置施工現場，梁端以續接器固定於柱面，鋼筋間距皆能符合標準(詳圖 13)，但延伸至中央搭接位置開始有間距不足現象，因鋼筋材料的彎曲調整不易、搭接、錨定、版筋及小梁的交錯處，鋼筋間距不足問題尤其嚴重(詳圖 15~18)；由於 RC 梁構造中分別由鋼筋與混凝土承受拉力及壓力，因此上層梁筋搭接避開梁端 $L/4$ (拉應力較大處)，於梁中央主要由混凝土承壓處搭接，然實務上鋼筋間距不足問題亦集中於梁中央處，若混凝土澆置過程於梁中央處因鋼筋間距不足產生粒料析離，混凝土於鋼筋降伏前壓力破壞降低梁之抗彎矩能力。



圖 15 梁筋搭接上下配置不易造成間距不足



圖 18 梁版交錯錨定配置不易造成間距不足



圖 16 梁筋搭接上下配置不易造成間距不足



圖 17 梁筋錨定受制大梁箍筋配置不易造成間距不足

3.4 樑柱接頭施工疑慮

內政部營建署(2019)第 513 條：「鋼骨鋼筋混凝土梁柱接頭處之鋼梁，應直接與鋼骨鋼筋混凝土柱中之鋼骨接合，並使接合處之應力能夠有效平順傳遞」。又，內政部營建署(2011a) 8.7 構材斷面之轉換續接：「2. 當設計鋼骨鋼筋混凝土柱與鋼筋混凝土梁相接時，為使應力傳遞平順，應使鋼筋混凝土梁之應力先傳遞至鋼骨鋼筋混凝土梁上，再由鋼骨鋼筋混凝土梁與鋼骨鋼筋混凝土柱相接合。」

由於不同構材斷面之力學行為相異，為避免於應力較大之樑柱接頭處產生應力集中現象，因此當鋼骨鋼筋混凝土柱欲接合鋼筋混凝土梁，宜先由鋼骨鋼筋混凝土柱接合一段鋼骨鋼筋混凝土梁，再轉換為鋼筋混凝土梁，避開應力較大處並使應力傳遞平順(詳圖 19)內政部營建署(2011a) SRC 梁與 RC 梁之斷面轉換示意圖。

經查設計圖說及現場施工方式，鋼筋混凝土梁僅以鋼筋續接器與鋼骨鋼筋混凝土柱直接接合(詳圖 35~36)；鋼柱設計配置剪力釘(19 ϕ *76@150)防止圍束混凝土與鋼柱產生軸向滑動，惟鋼骨鋼筋混凝土柱與鋼筋混凝土梁之混凝土為分段澆置，兩者混凝土之接合性不佳；且鋼筋與剪力釘之握裹力及延展性相異，鋼筋混凝土梁反覆承受軸向拉力，湛淵源(2002)混凝土斷面受力不一致之不連續性產生龜裂現象或崩裂之虞。

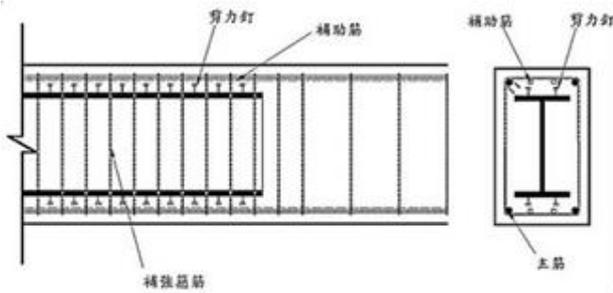


圖 19 SRC 梁與 RC 梁之斷面轉換示意圖



圖 20 SRC 柱與 RC 梁未採取漸進方式接合

四、SRC 施工疑慮探討

本章將第三章所提出之施工疑慮實務，分別以規範、設計及施工三面向，透過技術規則、規範、學術研究加以探討現場施工疑慮對其結構之影響，及後續處理方式討論空間，並提出個人觀點與意見。

4.1 柱筋續接疑慮探討

3.2.1 柱筋續接施工疑慮，柱主筋以續接器續接，續接位置距梁之混凝土面小於 500mm，且同一斷面續接超過 50%，顯與內政部營建署(2011a)8.6.1 通則「2. 鋼骨鋼筋混凝土構材中鋼骨及鋼筋之續接應避開應力較大之處，且兩者應避免設於同一斷面上。」、8.6.2 主筋之續接與錨定「2. 鋼骨鋼筋混凝土柱之主筋續接應距梁之混凝土面 500mm 以上，且任一斷面之主筋續接面積百分比不得大於 50%。」之規定有所衝突。由於續接處為應力較大的塑性絞區，且鋼筋混凝土包覆主要提供柱的圍束作用，因此該施工方法是否符合結構行為，尚有疑慮。

4.1.1 規範探討

早期臺灣鋼筋混凝土技術承襲於日本，且同屬地震帶國家的日本對於建築結構的耐震規範也較為嚴謹，因此我國鋼筋混凝土、續接器設計及施工規範，大多引自於日本建築協會「鐵筋配筋指針同解說」、「鐵筋繼手指針」。國內超高樓層建築普遍採用 SRC 結構，鋼筋續接器更為頻繁的被使用於鋼筋的續接及鋼骨的錨接，耐震性能更好的機械式續接器不斷推陳出新，但國內缺乏有效的試驗及研究，續接器的設計及施工規範並未與時並進。

機械式續接器大致上分為兩類，第一類機械式續接器相當於慣用之 B 級續接，第二類機械式續接器相當於慣用之 SA 級續接；內政部營建署委託建築研究所，對塑性絞區使用續接器之柱構材的耐震行為進行研究。內政部建築研究所(2004)該研究結論指出：全數柱主鋼筋在塑性絞區以續接器進行 SA 級續接，基本上是可行的，不過基於降低風險的考量，在可能的範圍還是盡量避免之。又，需要在塑性絞區續接時，若可以的話，以隔根續接為佳。

內政部建築研究所於 2004 年發表「鋼筋續接器續接設計規範與施工規範及解說研修」，並提出施工規範及設計規範之草案提送內政部營建署審議，附錄 B 鋼筋續接器續接設計規範(草案)，「2.2.1 規則結構—SA 級機械式續接器得使用於構材淨長之任何斷面……」、「3.2 鋼筋續接器續接等級……解說：……SA 級續接器續接得不必隔根錯開配置……」。審議階段，工程界對於 SA 級續接設計與施工爭議多年，內政部營建署於 2011 年修正「結構混凝土設計規範」為「混凝土結構設計規範」，並修訂第十五章 耐震特別規定「15.3.6.5 ……第二類機械式續接則准許使用於任何位置。」但 SA 級續接器是否得於同一斷面續接持保留態度，因此即便能在任何位置續接，對於應力較大的塑性絞區仍需錯開續接。

4.1.2 設計探討

本研究範圍柱主筋的續接位置及續接方式，礙於採取逆打工法因素，梁下施工空間有限，因此柱主筋續接方法採用機械式續接器設計；依(圖 21)安全措施剖面示意圖，完成第一次開挖方能進行 1FL 版、梁施工，並依據設計圖說之開挖深度及梁深計算鋼筋延伸至梁底施工空間，如(表 1)開挖深度及梁底施工空間關係表所示。

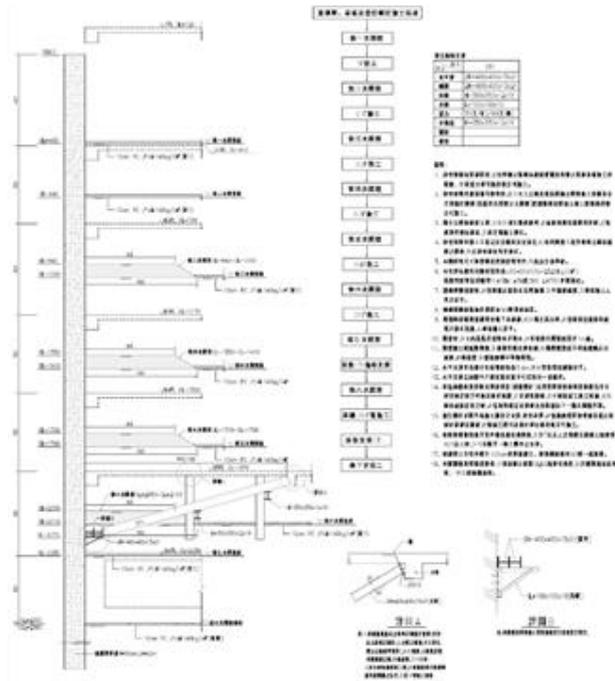


圖 21 安全措施剖面示意圖

表 1 開挖深度及梁底施工空間關係表

	開挖面 高程	PC 厚度 (cm)	PC 完成面 高程	梁板 高程	最大梁深 (cm)	梁底 高程	梁底施工空間 (cm)
第一次開挖	GL -400	10	GL -390	GL 120	140	GL -20	-370
第二次開挖	GL -640	10	GL -630	GL -410	180	GL -590	-40
第三次開挖	GL -940	10	GL -930	GL -760	120	GL -880	-50
第四次開挖	GL -1350	10	GL -1340	GL -1170	140	GL -1310	-30
第五次開挖	GL -1700	10	GL -1690	GL -1520	100	GL -1620	-70
第六次開挖	GL -2050	10	GL -2040	GL -1870	100	GL -1970	-70
第七次開挖	GL -2250	10	GL -2240	--	地梁 180	--	--
第八次開挖	GL -2550	10	GL -2540	--	筏式基礎	--	--

第二次、第三次、第四次開挖後，PC 完成面到梁底的施工空間高度只有 30~50cm，依據[8] 9.6.3 柱之設計細則 2. 柱之主筋：「(3) 構材同一斷面處最多只能隔根續接，且隔根續接處應相距 600mm 以上。」結構設

計階段缺乏施工空間考量，若以安全考量隔根續接，PC 完成面至梁底至少需要預留 120cm 以上。

4.1.3 施工探討

鋼筋工程採用倍數搭接容易造成鋼筋排列過密，以致鋼筋間隙不足混凝土灌漿引起蜂巢、箍筋綁紮困難、水電配管不易等問題，且 SRC 施工常以機械式續接器取代樑柱接頭鋼筋無法直通問題，大幅減少施工的困難度加速工程進展，以續接器續接鋼筋確實解決鋼筋工程的許多問題。

機械式續接器技術的演進，及使用於鋼筋工程的適切性，使得機械式續接器更頻繁的被採用，續接器材料與生產的品質控管通過嚴格的試驗標準，證實使用續接器續接的抗拉強度優於母材的抗拉強度；但由於進行試驗的謹慎心態，因此操作續接器續接時大多為力求標準，而實務上施工品質卻不易控管，(詳圖 22~27)為監造單位執行鋼筋續接抽查驗時，抽查出續接器鎖固扭力未達標準等缺失，而更多的私人營建工程監造單位只執行重點監造，若是實際現場施工品質未達(SA 級續接)試驗標準，卻將其使用於應力較大處恐有疑慮。



圖 22 監造單位執行鋼筋續接品質抽查驗



圖 23 續接器鎖固扭力未達標準



圖 24 監造單位執行鋼筋續接品質抽查驗



圖 25 續接器鎖固扭力未達標準



圖 26 監造單位執行鋼筋續接品質抽查驗



圖 27 續接器鎖固扭力未達標準

4.2 柱筋間距疑慮探討

本研究範圍之包覆型填充鋼管柱係採用箱型鋼管，採用包覆型填充箱型鋼管柱普遍斷面積較大(詳表 2) B1F~B6F 鋼骨鋼筋混凝土柱尺寸表；以 C9 柱最小柱寬 1400mm 為例，四個角隅各配置 3 根縱向主筋，扣除圍束區及保護層 2 主筋間距尚達 1000mm (詳圖 28) C9 柱筋配置圖；由於 SRC 柱外圍鋼筋主要係圍束作用，因此倘若鋼筋間距過大恐對混凝土圍束不足。

表 2 B1F~B6F 鋼骨鋼筋混凝土柱尺寸表

編號	RC 尺寸(cm)	鋼骨尺寸(mm)	輔助主筋
C1	190*210	□-1100*1000	12-#5
C2	250*150	□-1700*1000	6-#5
C4	140*250	□-1050*2200	20-#5
C5、 C5a、C6	140*220	□-1000*1800	18-#5
C8、C8a	140*240	□-1050*2000	18-#5
C9	140*200	□-1000*1600	16-#5
C9a	140*180	□-1050*1400	14-#5
C9b	140*240	□-1000*2000	18-#5

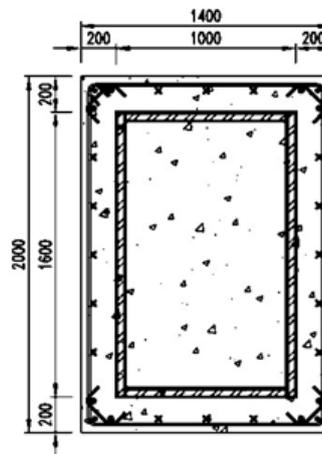


圖 28 C9 柱筋配置圖

4.2.1 規範探討

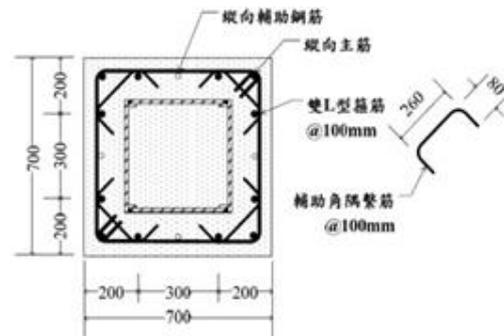
內政部營建署(2011a)4.3.3 柱之主筋：「1. 矩形斷面之鋼骨鋼筋混凝土柱至少應於斷面四個角落各配置一根主筋。一般柱內之主筋排列，以在每個角落各配置三根主筋為原則。……2. 鋼骨鋼筋混凝土柱中之主筋間距不得大於 300 mm。若主筋間距大於 300 mm 時，則須加配 D13 以上之軸向補助筋，補助筋可以不用錨定，且補助筋應不計其對柱強度之貢獻。」

上述設計規範乃參考自日本建築學會 AIJ (2014)所頒佈之「鉄骨鉄筋コンクリート造配筋指針・同解説」，將主筋配置於柱之四個角隅，主要為避免柱主筋遭受 SRC 梁鋼骨翼板阻擋而無法直通，但若將柱主筋配置於四個角隅，對於柱寬較大者則有柱筋間距過大之疑慮；由於包覆型填充鋼管柱之鋼筋主要係圍束混凝土作用，若鋼筋間距過大對混凝土之圍束力將明顯降低，因此規範柱之主筋間距大於 300mm 則須配置補助鋼筋。

對於補助筋不須錨定並不計其對柱強度之貢獻，若構件組合為 SRC 柱與 SRC 梁之接合，SRC 柱之鋼筋混凝土亦受 SRC 梁之鋼筋混凝土所圍束，由於兩構件力學行為相近，若接合適宜則對於作用力具連續性且具良好之圍束；但實務上與 SRC 柱接合之構件除 SRC 梁之外，尚有 SRC 柱接合型鋼梁及 SRC 柱接合型鋼斜撐，若柱之補助筋未與之錨定，SRC 柱臨型鋼梁及型鋼斜撐之圍束區是否減弱其圍束力？

參考相關研究報告及論文，陳正誠、周佳希、吳品達(2014)、許瑜麟(2017)研究結果指出，包覆型填充箱型柱橫向鋼筋配置垂直於柱面之接力式繫筋，其對混凝土延展性及圍束效果良好，於陳正誠、周佳希、吳品達(2014)研究報告中未採用繫筋之試體 T2，鋼筋配置相似於本研究配置方式且補助筋未錨定(詳圖 29)，試驗結果 T2 試體的延展性較其他試體差，顯示輔助角隅繫筋之功能與一般繫筋不同；由此可證，SRC 柱若無繫筋設計其圍束效果較差，如補助筋於梁柱接頭處能加以錨定，將增強柱之圍束區內混凝土圍

束效果。



(b) T2 試體

圖 29 陳正誠、周佳希、吳品達(2014)研究報告 T2 試體鋼筋配置方式

4.2.2 設計探討

查設計圖(圖 30)SRC 柱配筋圖，SRC 柱軸向鋼筋之主筋、補助主筋僅標註號數與數量，並以圖示柱主筋配置於 4 個角隅，對於輔助主筋配置及錨定方式未加以說明，若僅依圖說粗略概算每支輔助主筋淨間距約 < 250mm 優於設計規範；惟，由於無法得知設計者對於輔助筋之設計是否承擔其柱之強度，倘若設計者未於圖說註明補助筋之配置及錨定方式，構件之實際強度恐不如設計者所預期，造成施工品質管理窒礙。

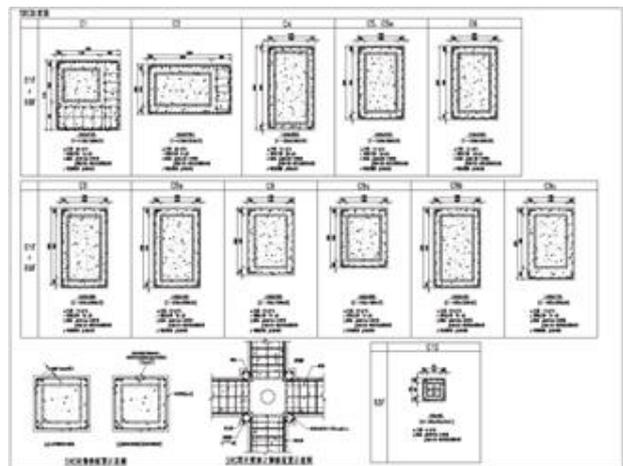


圖 30 SRC 柱配筋圖

4.2.3 施工探討

依施工實務探討柱筋施工疑慮，除 4.1 節所討論之柱筋續接，由於梁下至 PC 面施工不足所致柱筋無法錯接，本節柱筋間距疑慮仍受梁下施工空間不足所影響，其影響柱輔助鋼筋間距之因素如下：

- (1) 施工空間不足，鋼筋配置不易。
- (2) 綁紮不確實，模板及混凝土施工時移位。
- (3) PC 開挖，遭機械折彎未扳正。

詳(表 1)開挖深度及梁底施工空間關係表，除梁下施工高度不足之外，包括模板組立及支撐更使梁下施工空間受到壓縮，由於輔助主筋遭遇 SRC 梁之型鋼而無法直通，因此樑柱接頭澆置混凝土前，於梁下部分需先配置柱輔助筋以供搭接，梁下空間不足以致鋼筋配置施工不易，若未加強管理易有草率施工情形。

因受制於開挖深度，柱輔助筋於梁下施工僅能固定於 2~3 支柱箍筋，若現場施工未確實綁紮，於模板組立過程及混凝土澆置施工時，易造成柱輔助筋的移位，當梁下柱輔助筋綁紮固定模板組立完成，檢查不易且難以再調整柱輔助筋。

混凝土澆置完成、拆模、進行下一階段開挖，此時柱主筋、輔助筋外露未受保護且貼近於 PC 層，重型機具破碎 PC 層及開挖稍有不慎，鋼筋易遭機械或車輛折彎，由於鋼筋緊鄰鋼柱不易扳正，且扳正過程恐損及尚未達標準強度之混凝土。

4.3 梁筋續接疑慮探討

本節探討 3.3.1 梁筋續接施工疑慮，依據設計及現場施工，梁主筋未採取直通方式通過梁柱接頭，而是以鋼筋續接器焊接於鋼柱上，梁主筋透過鋼筋續接器代替鋼筋直通，此種不符合 SRC 規範精神的設計方式對於力之傳遞是否可靠？以及此設計方式之施工疑慮一併探討。

4.3.1 規範探討

依據內政部營建署(2011a) 8.5.1 梁柱接頭之主筋配置 1. 鋼骨鋼筋混凝土梁柱接頭處之主筋應以直接通過接頭為原則，宜儘量避免以鋼筋續接器銲於鋼柱翼板上以續接主筋。若不得已必須採用時，應符合以下之規定：(1) 鋼筋續接器之種類、材料、品質與施工均應符合內政部頒佈之「混凝土結構設計規範」之相關規定。由於續接器材料經過許多研究，一再驗證續接器材料生產技術及品

質之可靠，因此鋼筋續接大量的被運用於結構設計當中，滿足以往不易克服之工程難題，但，如 4.1 節所探討柱筋續接，鋼筋續接器施工品質不易控制，對於鋼筋續接器的使用仍需審慎，如梁鋼筋不得以使用鋼筋續接器代替直通，除符合「混凝土結構設計規範」之相關規定外，建議以增加型鋼斷面方式將鋼筋使用量降低(4 個角落各一支)。

4.3.2 設計探討

由於結構設計，施工階段由鋼骨承受施工載重，且柱與柱之間的最大跨距超過 16m 長，鋼管柱於施工階段需承載較大彎矩，因此研究範圍柱面寬度遠大於梁斷面寬(詳圖 31、表 3)，地下一層結構平面圖及結構尺寸表。梁主筋受到大面寬鋼柱阻擋無法直通。設計採取以鋼筋續接器焊接於鋼柱方式，代替鋼筋於梁柱接頭直通，並於鋼柱加工時，以內隔板焊接於梁柱接頭區作為傳遞梁鋼筋之應力(詳圖 32)逆打鋼柱平面詳圖。

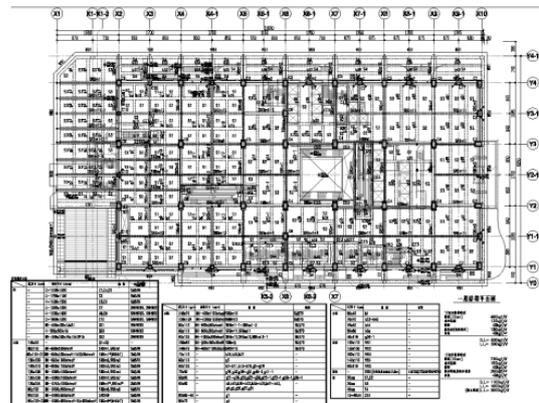
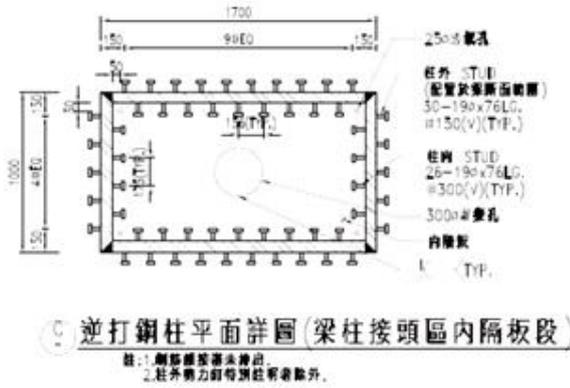


圖 31 一層結構平面圖

表 3 地下一層結構尺寸表

	RC 尺寸(cm)	鋼骨尺寸(mm)	編號	材質
柱	190*210	□-1100*1000	C1	SM570
	250*150	□-1700*1000	C2	SM570
	140*250	□-1050*2200	C4	SM570
	140*220	□-1000*1800	C5,C6,C5a	SM570
	140*240	□-1050*2000	C8	SN490YC
	140*240	□-1000*2000	C8a	SN490YC
	140*200	□-1000*1600	C9	SN490YC
	140*180	□-1050*1400	C9a	SN490YC
	140*240	□-1000*2000	C9b	SN490YC
	140*215	□-1000*1600	C9c	SN490YC
-	□-1000*1000	C10	SN490YC	
大梁	110*70	-	CW	-
大梁	80*110	BH-800*500*tw*tf	SRB1,SRG1	SN490YC
	80*110	BH-800*500*tw*tf	SRBm1,SRGm1	SM570



	130*110	BH-800*1000*tw*tf	SRBm2	SM570
	180*110	BH-800*500*tw*tf	SRB1-1	SN490YC
	185*110	BH-800*500*tw*tf	SRGm6	SM570
	80*90	-	G3	-
	80*110	-	B7,B12~B14,B20~B23	-
	60*110	-	G15,G16,G18,G19	-
	100*70	-	B25,G8,G13,G20,G25,G30,G35	-
	100*110	-	B8,B15,B16,B24	-
	120*70	-	G9,G14,G21,G26,G31	-
小梁	40*80	-	g38-1	-
	50*80	-	b0,g0,g42-1,b0a,g0a	-
	50*110	-	b17	-
	60*70	-	b24,b28,b37,g30~g32	-
	60*80	-	未特別標註者	-
	60*110	-	b3~b6,b10~b13,b19,b20,b22,b22-1,b23,b25,b26,b27, g2~g5, g7~g9,g11~g13,g16~g18,g21~g23,g23-1	-
	70*70	-	g9,g14,g15,g19,g20,g24,g25,g33,g39,g40,g47,g48,g55	-
	70*80	-	B30	-
	70*110	-	B1,b2,b14~b16,b18,b36	-
	80*70	-	G63	-
80*110	-	B7~b9,b31~b33	-	
邊梁	60*80	-	WB	-
	60*110	-	WB1	-
	100*70	-	WB2	-
斜撐	BH-800*1000*tw*tf+2PL50	-	BR3	SM570
版	20cm	-	S1~S4,CS1	-
牆	40cm	-	W40	-

圖 32 逆打鋼柱平面詳圖

以鋼筋續接器焊接於鋼柱，透過鋼柱內隔板傳遞梁筋應力，此理論乃係由內隔板與續接器焊接於鋼柱同一水平位置，以有效傳遞梁筋之水平力，力之傳遞途徑如內隔板、柱內混凝土及續接器若皆能有效施工，依強

柱弱梁之設計柱之構件強度大於梁，且兩相對應梁之水平垂直於同一斷面，可合理認為梁之有效應力傳遞具可靠度；但若兩相對應梁之位置未於同一斷面(詳圖 33~34)，此設計梁之應力傳遞仍缺乏相關研究佐證其應力是否能有效傳遞，以及當產生往復作用力下，對其結構行為有何種影響尚須透過試驗研究。



圖 33 兩相對應梁未於同一斷面



圖 34 兩相對應梁未於同一斷面

4.3.3 施工探討

梁鋼筋施工方式依據設計圖說，梁端鋼筋以鋼筋續接器鎖固於鋼柱；鋼柱於廠內加工焊接組裝包含剪力釘、內隔板及鋼筋續接器等必要之組件，並設為檢驗停留點於監造單位查驗後方能進場安裝；而梁端鋼筋續接器乃由續接器廠商於廠內加工組裝於鋼筋，並於材料進場時會同監造單位取樣會送試驗室做拉力試驗；上述前置作業皆受加工廠商良好品質管制，尚未有不符合標準、規範之

情況。惟現場施工品質管控不易，常見施工疑慮有二：1. 於開挖時，大型機具操作不當以致鋼柱面之續接器受損；2. 現場施工，鋼筋續接器公母單元鎖固未達扭力標準。

梁端以鋼筋續接器固定於鋼柱面代替鋼筋直通方式，梁之鋼筋必須透過搭接方式連接兩端鋼筋，依據中華民國結構工程技師公會(2019)為避開梁端 $L/4$ 處搭接，搭接範圍僅餘 $L/2$ 不易滿足兩端 L_d 長度及 $\geq 1.3L_d$ 之相鄰鋼筋錯接距離之配置方式，因此採取 $1.3L_d$ 乙級搭接方式於同一斷面搭接配置鋼筋。

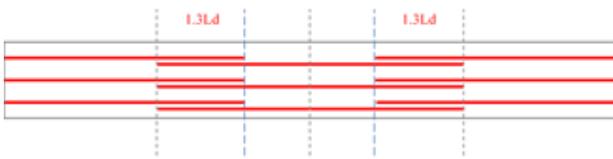


圖 35 梁筋搭接示意圖

梁筋以續接器接合位置乃係應力較大之樑柱接頭區，由於現場施工品質不易管控(詳 4.1.3 節鋼筋續接器現場施工未達扭力值標準)，以鋼筋續接器代替鋼筋直通，對於梁鋼筋應力是否能有效傳遞，未能達到可靠之施工標準。另，鋼筋因搭接範圍不足以隔根搭接，採取同一斷面以乙級搭接方式配置，雖符合結構技師公會 RC 標準圖要求，卻也因此造成鋼筋配置間隙過密問題(詳 4.4 節梁筋間距疑慮)；同一構件存在著多種施工疑慮，在鋼筋無法直通梁柱接頭情況下，以增加型鋼斷面減少鋼筋使用量較為可靠。

4.4 梁筋間距疑慮探討

依 3.3.2 梁筋間距施工實務紀錄，梁筋兩端因以續接器配置於鋼柱而間距無虞，但延伸至搭接位置開始因鋼筋材料彎曲調整不易、錨定、版筋及小梁交錯處，鋼筋間距嚴重不足，且於大小梁交錯處間距不足更為嚴重，若混凝土澆置搗實不足恐造成粒料析離、蜂窩情形，損及構件混凝土抗壓強度。

4.4.1 規範探討

內政部營建署(2019)第 501 條 鋼骨鋼筋混凝土構造設計，除考慮強度、勁度及韌性之需求外，應檢討施工之可行性；決定鋼骨

鋼筋混凝土構造中鋼骨與鋼筋之關係位置時，應檢核鋼筋配置及混凝土施工之可行性。內政部營建署(2011a) 3.1 配筋基本原則 4. 鋼骨鋼筋混凝土構材之鋼筋與鋼骨之間應保持適當之間距，以利混凝土之澆置及發揮鋼筋之握裹力。內政部營建署(2011a) 4.3.1 主筋之一般要求 3. 主筋與主筋之淨間距應大於以下之最小者：(1) 25 mm，(2) 主筋標稱直徑之 1.5 倍，(3) 粗骨材最大粒徑之 1.25 倍。相關規範一再強調鋼筋間距之重要性，而鋼筋間距不足之疑慮卻時常出現於施工現場，主要尚須由設計及施工檢討。

4.4.2 設計探討

依結構設計圖說 SRC 梁及 RC 梁之配筋，鋼筋淨間距均符合設計規範要求，(詳圖 13) 鋼筋淨間距受制於鋼筋續接器間距，但由於鋼筋配置乃係以單一構件個別設計，鋼筋之錨定、搭接及其他構件之交錯，不易納入考量；且本設計採用 D26 #10 鋼筋，若鋼筋材料因彎曲變形等因素，現場施工人員不易調整，例如鋼筋未以上下交疊方式搭接、配置錨定彎鉤等，極易造成鋼筋淨間距不足問題(詳 3.3.2 節)現場施工照片。如(4.4.1 節)梁筋續接規範探討，若設計者於設計階段，增加型鋼斷面以減少鋼筋使用，可降低鋼筋間距不足之疑慮發生。

4.4.3 施工探討

根據梁筋配置施工造成鋼筋淨間距不足之疑慮，由現場施工照片可歸納因素如下：1. 搭接未採取上下疊接方式施工，2. 大小梁交錯錨定，3. 大小梁及版筋交錯重疊；雖然上下疊接能有效控制水平間距，但鋼筋自重若採用鐵線不易固定，若以焊接方式施工則增加成本，且採用上下疊接影響有效梁深乃須慎重；其二項因素則不易以施工方式克服，僅能由設計階段減少鋼筋使用量。

4.5 樑柱接頭疑慮探討

研究範圍之梁柱接頭，採 SRC 柱接 SRC 梁、SRC 柱接 RC 梁二種形式；SRC 結構與 RC 二種相異結構力學行為亦有所不同，兩者相接於應力較大之梁柱接頭，若遭受反覆作用

力時是否因應力集中，致梁柱接頭處之構件受損為本節之探討。

4.5.1 規範探討

內政部營建署(2019)第 508 條 鋼骨鋼筋混凝土構造之柱採用包覆型鋼骨鋼筋混凝土設計時，其相接之梁，得採用包覆型鋼骨鋼筋混凝土梁或鋼梁；建築技術規則鋼骨鋼筋混凝土構造專章之構材設計規則，包覆型鋼骨鋼筋混凝土柱相接之梁，可以採取包覆型鋼骨鋼筋混凝土梁或鋼梁，並未提及鋼筋混凝土梁。

內政部營建署(2011a) 8.7 構材斷面之轉換續接 2. 當設計鋼骨鋼筋混凝土柱與鋼筋混凝土梁相接時，為使應力傳遞平順，應使鋼筋混凝土梁之應力先傳遞至鋼骨鋼筋混凝土梁上，再由鋼骨鋼筋混凝土梁與鋼骨鋼筋混凝土柱相接合；鋼骨鋼筋混凝土設計規範針對鋼骨鋼筋混凝土柱，採取與鋼筋混凝土梁相接時，為使應力傳遞平順應採取漸進方式，鋼筋混凝土梁先接一段鋼骨鋼筋混凝土梁，再與鋼骨鋼筋混凝土柱接合。

4.5.2 設計探討

由於本工程採用逆打工法施作，為使逆打鋼柱順利植入地下層，無法設置托梁構件，且未另設置鎖件進行托梁二次施工，鋼骨鋼筋混凝土柱與鋼筋混凝土梁之接合方式，未採取拖梁設計明顯與規範不符(詳圖 36 逆打鋼柱詳圖)。

4.5.3 施工探討

鋼骨鋼筋混凝土柱與鋼筋混凝土梁接合施工，並未採取任何漸進式方式施作，同鋼骨鋼筋混凝土梁以鋼筋續接器將梁主筋鎖固於鋼柱面；混凝土澆置採取梁版與柱分段澆置，梁版一次澆置完成後再進行包覆鋼管柱混凝土澆置；鋼骨鋼筋混凝土柱與鋼筋混凝土梁的接合方式，及混凝土分段澆置方式，於梁柱接頭處均有應力集中之疑慮。

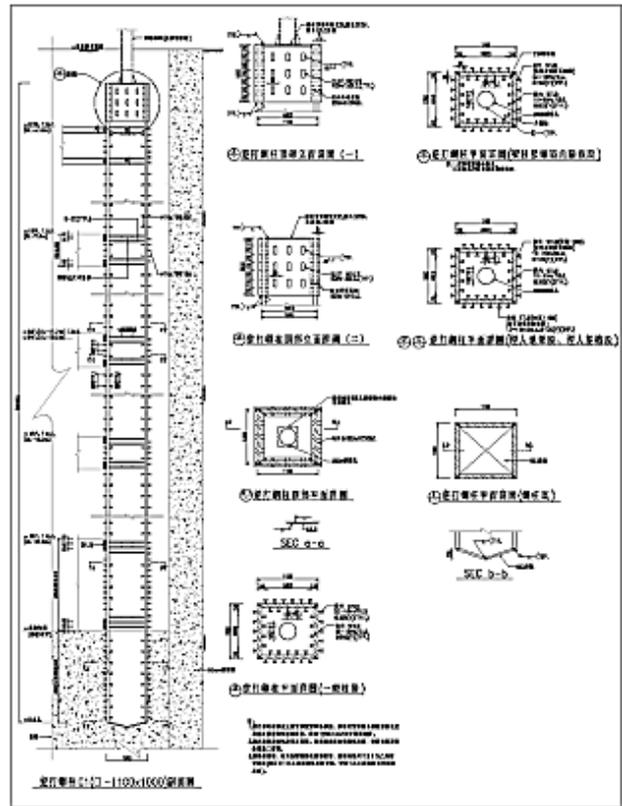


圖 36 逆打鋼柱詳圖

五、結論與建議

本文依個案施工實務探討 SRC 構件之施工疑慮所得結論提出建議，柱主筋之續接受限於逆打工法之分段開挖深度，以致有同一斷面鋼筋錯接之困難；及 SRC 柱接 RC 梁為使應力平順，需先接一段 SRC 梁再漸變為 RC 梁，但由於逆打柱施工無法先行加工托梁構件，因此 SRC 柱接 RC 梁未採取漸變方式銜接；SRC 構造係結合鋼骨與鋼筋混凝土構造，二種構件之接合施工有諸多不易，宜盡量選擇較易施工之工法，不宜採用逆打工法施作。如梁主筋必須採取續接器代替直通梁柱接頭，以增加型鋼斷面方式降低鋼筋使用量，減少續接器之使用，可排除因現場施工品質不易控制，及鋼筋排列困難所造成間距不足等施工疑慮。

本研究個案之鋼骨鋼筋混凝土結構，乃係以鋼骨為主鋼筋混凝土為輔，由鋼骨負責施工載重及整體多數負重，鋼筋混凝土僅提供部分載重、圍束及包覆功能，以增強鋼骨結構耐火及防蝕能力，本文探討之施工疑慮雖有討論改進之處但尚無安全之虞，藉由施

工實務探討提供臺灣鋼骨鋼筋混凝土結構技術之精進。

參考文獻

1. 陳純森,「正視 SRC 之結構行為」, 土木技師公會技師報, 755 期, 2011。
2. 陳純森,「鋼骨鋼筋混凝土結構 RC 梁與 SRC 柱之接合設計」, 土木技師公會技師報, 1370 期, 2017。
3. 陳純森、張嘉祥、嚴崇文,「台灣 SRC 構造發展與構法探討與研究」, 國立成功大學, 碩士論文, 2005。
4. 陳正誠、陳生金,「鋼骨鋼筋混凝土建築結構施工實務手冊之研究」, 財團法人台灣營建研究院, 內政部建築研究所委託研究報告。', 2002
5. 陳正誠、周佳希、吳品達,「包覆填充型箱型柱橫向鋼筋配置方式之軸向強度與韌性」, 國立台灣科技大學營建工程研究所, 內政部建築研究所委託研究報告, 2014。
6. 內政部營建署,「建築技術規則」, 2019。
7. 林瑞棋,「AIJ 標準 SRC 結構構造計算簡介」, 土木技師公會技師報, 231 期, 5 月 7 日, 2005。
8. 內政部營建署,「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範及解說」, 2011a。
9. 內政部營建署,「鋼骨鋼筋混凝土構造施工規範」, 2011b。
10. 美國鋼結構學會 (American Institute of Steel Construction, AISC),「鋼結構建築規範 (Specification for Structural Steel Buildings)」, 2016。
11. 美國混凝土學會 (American Concrete Institute, ACI),「結構混凝土建築規範與解說 ACI 318-14 (Building code requirements for structural concrete ACI 318-14)」, 2016。
12. 日本建築學會 (Architectural Institute of Japan, AIJ),「鐵骨鐵筋混凝土構造計算規準同解說 (鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説)」, 2014。
13. 湛淵源,「影響鋼筋握裹行為主因素—混凝土品質、強度和界面密實性」, 土木技師公會技師報, 289 期, 6 月 8 日, 2002。
14. 內政部建築研究所,「鋼筋續接器續接設計與施工規範條文及解說研修」, 2004。
15. 許瑜麟,「包覆填充型箱型柱接力式繫筋對混凝土圍束的有效性」, 碩士論文, 國立台灣科技大學營建工程研究所, 台北, 2017。
16. 中華民國結構工程技師公會,「全聯會 RC 結構標準圖」, 2019。

水下單樁基礎行為探討與模擬

林澤佑¹ 熊彬成²

¹ 國立高雄科技大學土木系學生

² 國立高雄科技大學土木系教授

摘要

單樁基礎由於設計與施工上相對簡單，所以在海事工程經常被使用。本文先就所選擇研究案例的背景作說明，使用三維有限元素分析軟體 PLAXIS3D，選擇不同之土壤與結構元素組成律，且就相關組成律推導出可能之結構及土壤分析參數等等。之後，就分析結果與現場監測資料作比對，依比較結果對組成律就水下單樁基礎的適用性、可能原因以及引致之應變大小作探討。後續研究發展將利用校正完成的模型，在改變地層條件下，針對去探討不同外來因素或載重對水下單樁基礎行為之影響，並找出對基樁行為影響最大之因子為何。

關鍵字：水下單樁基樁行為、PLAXIS3D、三維有限元素、組成律、應變、外來載重因素

Simulation and Behavior of Offshore Monopile Foundation

Tzu-Yu Lin¹ Benson Hsiung²

¹Graduate student, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

²Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

As it is comparatively simple in aspects of design and construction, monopile foundation is widely adopted for offshore engineering. In this paper, it first describes the background of selected cases and three-dimensional finite element method software, PLAXIS3D is chosen for analyses of behaviours of the foundation. Various soil constitutive models and structure elements are used and relevant soil and structure parameters are interpreted. The predicted results and monitoring data are compared and discussed and the applicability of the constitutive model for offshore monopile foundation together with possible reasons and range of induce strain are therefore determined. For later works, the calibrated model is intended to be used for monopile foundation with a different ground condition to determine influences from several external factors/loads and then expect to determine the one affects the most significantly.

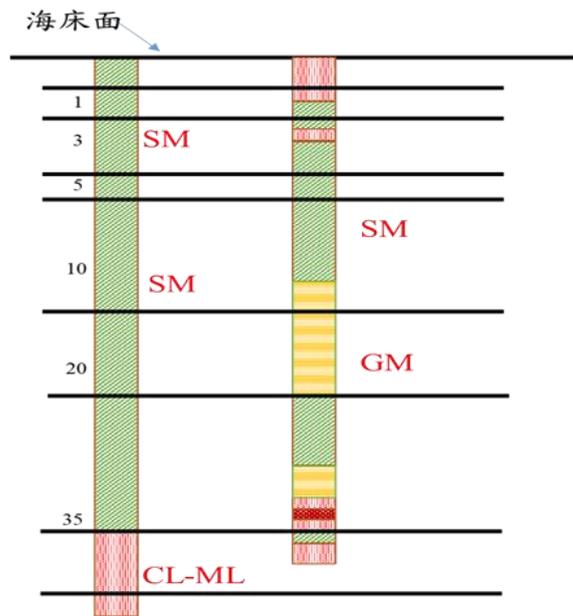
Keywords: behaviour of offshore monopile foundation, PLAXIS 3D, 3D finite element method, constitutive model, strain, external load

一、前言

為了達到永續發展與綠色能源的目的，離岸風電產業目前在台灣正快速發展當中，各離岸風場也如雨後春筍般的被建立在台灣

西部的海岸(如圖一)。該區域被認定為具有高單位風能、旺盛的風速、廣闊的大陸棚面積和海面到海床面深度恰好等優勢，但風場位置幾乎都在台灣中南部的堆積層砂土上

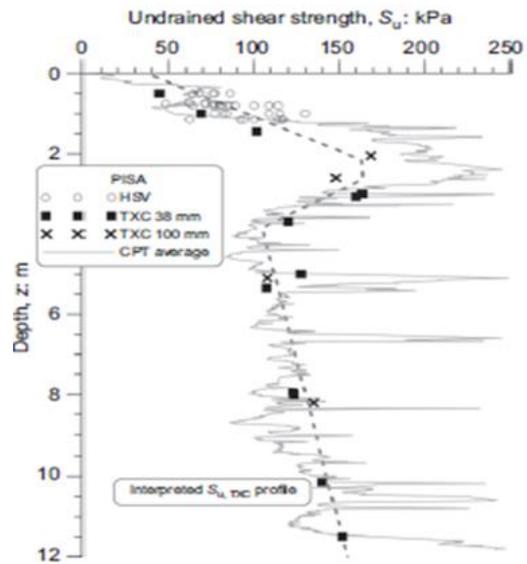
(如圖二)，且同時要面對強大的風力、波浪力和地震力等影響，和過去擁有大量離岸風電產業之歐洲大陸而言，不論內在和外在環境而言(如圖三)，都有相當大的差異，所以有需要做進一步的研究與探討；而水下基礎在離岸風電工程佔有非常大的比重，尤其在地層相對軟弱，且有特殊外在條件，如地震、颱風、大量海床漂移及沖刷等等的情形下，重要性會增加，且將提高設計與施工困難度，故有對水下基礎行為與其模擬做探討之需要，雖說目前台灣的水下基礎主要以管架式基礎為主，但由於單樁式基礎有設計與施工容易的優勢，仍有少數離岸風場採用單樁式基礎(如圖四)；據目前資料指出基樁尺寸可能與歐洲的大小類似，但是樁長可能達 3- 4 倍，整體體積增加許多，也更有深入探討其行為之必要。



圖二 台灣西部海岸地區代表地層



圖一 台灣目前離岸風場之位置圖(經濟部能源局資料，2018)



圖三 歐洲大陸建置離岸風場區域代表地層 (Zdravkovic et al., 2020)



圖四 水下單樁基礎

二、背景說明

2.1 分析的目的和方式

如前文所說明的，台灣風場地層多為河川沖積而成之沖積砂土或粉土，堅硬的岩盤深度都非常深。然如圖三所示，歐洲如荷蘭、英國、德國等離岸風場較普及的國家，海床下的岩盤深度相對較淺，故達到樁體穩定深度是相對容易的，兩者在單樁基礎尺寸上會因此有一定區別，所適用的土壤組成律與結構元素也可能因此而需要一定的討論，在本節將首先說明選擇背景案例，以及如何進行參數推導。

2.2 案例說明、模型尺寸、組成律選擇與模擬

有關土層參數之定義，首先收集相關文獻中的有關資料，再將獲得的資料彙整及推導成不同組成律，如莫爾-庫倫模式(MC Model)、小應變硬化土壤模式(HSS Model)或是模擬土壤液化模式(UBC3D-PLM)等等所需要的輸入參數，並利用 PLAXIS 3D 進行模擬，再將模擬結果與原先文獻中的室內或現場實驗結果做比較；根據蒐集資料的可行性和可靠性，選擇 MC 模式和 HSS 模式來進行模擬，也探討利用兩種不同組成律模擬結果之異同。至於單樁樁體則使用 Beams 元素(海床面上)和 Embedded beams 元素(海床面下)來模擬；採用這兩種結構元素的原因是分析上會相對貼近基樁的實際行為，和既有 Plate 元素的最大不同之處是 Embedded beams 元素需要額外考慮樁土間摩擦力和樁底承载力，而不在只是單純的利用 R_{inter} 值來模擬土壤與基樁間的互制關係。

本文分別使用 Cuéllar (2012)與 Byrne (2019)等兩篇參考文獻的資料，來進行回饋分析；所需要的主要土壤輸入參數，包含 MC 模式中的楊氏模數 E 、卜松比 ν 和剪力模數 G 等；至於 HSS 模式則需要以三軸加載極限強度 50% 之正割楊氏模數 E_{50} 、單向壓密楊氏模數 E_{oed} 、三軸解壓再加壓楊氏模數 E_{ur} 、極小應變等於 ε 下在圍壓等於 P 時之參考剪力模數 G_0 和 $G_s/G_0=0.722$ 時之剪應變 $\nu_{0.7}$ 等等。

2.2.1 Cuéllar (2012)

實際基樁尺寸為樁深 50 公尺、樁徑 6 至 8 公尺的大口徑基樁，基樁上方的風機本身則假設為高 50 公尺，樁體需同時承受垂直和水平方向的雙重載重，考慮到自重的影響，將風機的高度和尺寸做了調整，試驗本身是將實際風機與基樁尺寸縮小為 1/30。因此，回饋分析時即配合比例各為 1:1、1:30 兩種方式，分別進行模擬。土層方參數則是參考相關文獻中的資料和轉換來假設(如表 1 所示)，並簡化為單一土層，所選擇的組成律為 MC 模式，並參考 Nikolinakou (2011)的研究結果，來進行假設，但 ν 、有效應力摩擦角 ϕ 和剪脹角 ψ 則不依比例改變而改；然考慮到尺寸效應，必須對特定參數做一定調整，以防縮小的尺寸無法正常產生變位或影響到穩定性，在 1:30 尺寸的模擬中，分別對楊氏模數 E 和剪力模數 G 降調了約 22.5 倍左右。

表 1. 土壤參數表(*:單位為 kN/m^2)

比例	Soil	E^*	G^*
1:1	SM	90e3	36e3
1:30	SM	4e3	1.6e3

註: ν 為 0.3； ϕ 為 37 度； ψ 則為 7 度

土層的部分樁體的材質也一樣需要考慮此情況，將楊氏模數 E 和慣性舉 I 做了調降的動作，而此調整則是按照原文獻中的建議做調整。

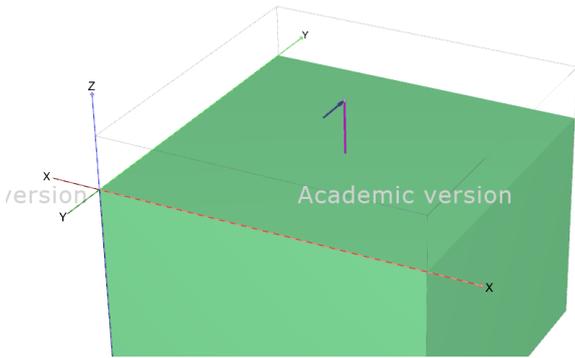
表 2. 以 Culler (2012)為背景之基樁結構元素分析參數

樁號	E (kN/m^2)	γ (kN/m^3)	D (m)
Pile#1	73.58e3	76.00	0.25
樁號	W (m)	T_{max} (kN/m)	F_{max} (kN)
Pile#1	0.1	820	1400

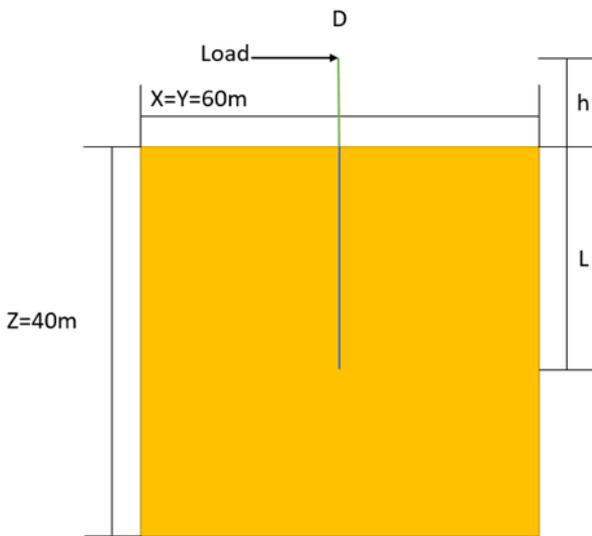
註: 此為 1:30 數值，調降程度參考文獻設計

2.2.2 Byrne (2019)

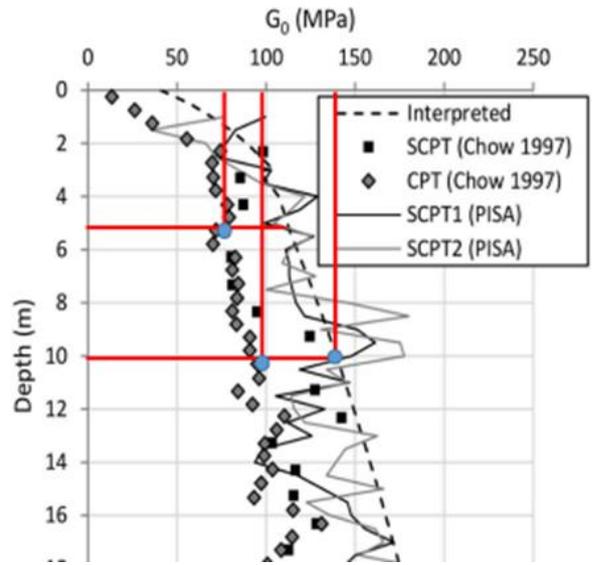
從本文獻中的內容彙整出基樁的設置條件分別探討了長徑比 L/D 在 3、5.25 和 8 三種比例時與土壤組成律 MC 和 HSS 模式兩種類型，彙整出六種情況做成果的比較，藉由這些組合能夠找出 L/D 長徑比影響位移、彎矩和應變的程度，而組成律的比較則能看出兩者分別合適那些條件下做分析。



圖五-a 3D 設置模擬圖



圖五-b 2D 設置模擬圖



圖六 G_0 和深度關係圖(Byrne,2019)

表 3-(a). 文獻中之土層參數和轉換後(*:單位為 kN/m^2)

土壤類型	E^*	ν^*	G^*	Φ°	Ψ°
57% sand MC	138e3	0.3	52.8e3	32	2

表 3-(b). 文獻中之土層參數和轉換後(*:單位為 kN/m^2)

土壤類型	E_{50}^*	E_{oed}^*	E_{ur}^*	$Y_{0.7}$	G_0^*
57% sand HSS	13.8e3	13.8e3	41.5e3	0.01	76.0e3

樁體的參數在原文獻中有詳細且不同的設計規格，樁長 L 多為 15 公尺以下的短樁，樁內徑在 2 公尺以內作為設計基準，材質方面為合金鋼鐵為主合適於海上設置，土層以原文獻內的敘述中的砂土和英國地區土壤參數做參考分別設計出 MC 模式和 HSS 模式的砂土土層設置，載重為已經彙整的風和波浪力，在風機的受力位置以側向載重的方式模擬，結果的位移和彎矩與原文獻的實驗數據圖做比較找出差異性和計算誤差值，應變則是為了對應 HSS 模式的使用條件，需要將應變規範在 $\nu_{0.7}=0.722$ 才可符合此模式的應用。樁代號分別為 DM3、DL2 和 DM7，對應的長徑比 L/D 為 8、5.25 和 3 三種做模擬。

表 4-(a). 以 Byrne (2019) 為背景之基樁結構
元素分析參數

樁號	E' (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	D(m)	t(mm)
DL2	210e6	76.00	2	38
DM3	210e6	76.00	0.762	25
DM7	210e6	76.00	0.762	10

表 4-(b). 以 Byrne (2019) 為背景之基樁結構
元素分析參數

樁號	L(m)	h(m)	T_{max} (kN/m)	F_{max} (kN)
DL2	10.57	9.89	6264	33547
DM3	6.02	10.06	2171	8064
DM7	2.24	10.00	2111	3238

三、回饋分析結果與討論

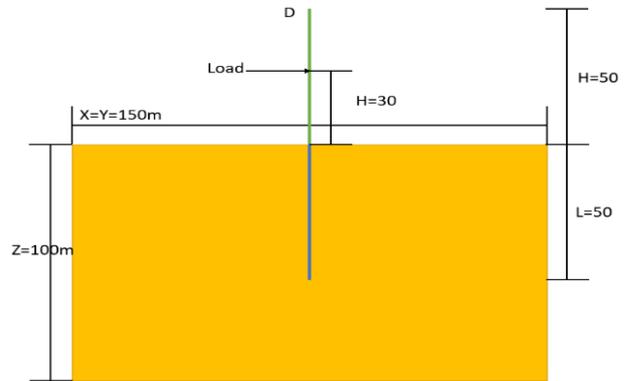
3.1. Cuéllar(2012)

以位移結果為主做對照分析，從土層參數設計的方向研究基樁的受力情形，文獻中基樁同時受垂直和側向載重影響，研究方向以垂直位移的差異來探討。

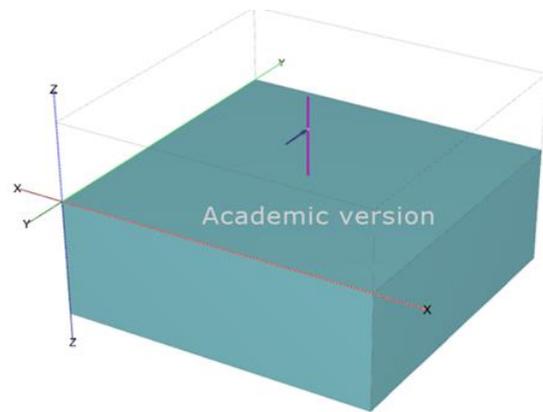
為了確認 1:1 和 1:30 尺寸效應的起因，尺寸縮減後需要測試土壤和基樁受影響程度和該如何調整，分別測試了單位重、楊氏模數、剪力模數等相關數值，確認到了雖然有限，但縮減楊氏模數和剪力模數能夠減少尺寸效應的影響，而縮減程度則因土壤的性質而變，而藉由改變楊氏模數和剪力模數兩種土壤參數後使尺寸效應帶來的位移誤差縮減到了可無視的程度。

設置方面為了合適觀察以 1:30 為主，設置方式調整為簡化的基樁形式如圖七所示，以 1:30 為主觀察和模擬，土壤性質以柏林地區的砂土為主設計，地層方面簡化為單層土層，為了方便表達和測試將原先圖八中的風機設置方式簡化成樁體本身和風機轉換成垂直載重兩部分考慮和原先的側向載重同時作用在海浪和風的受力點上，而圖十為文獻中之結果畫面，可看到兩側標示出了垂直變位

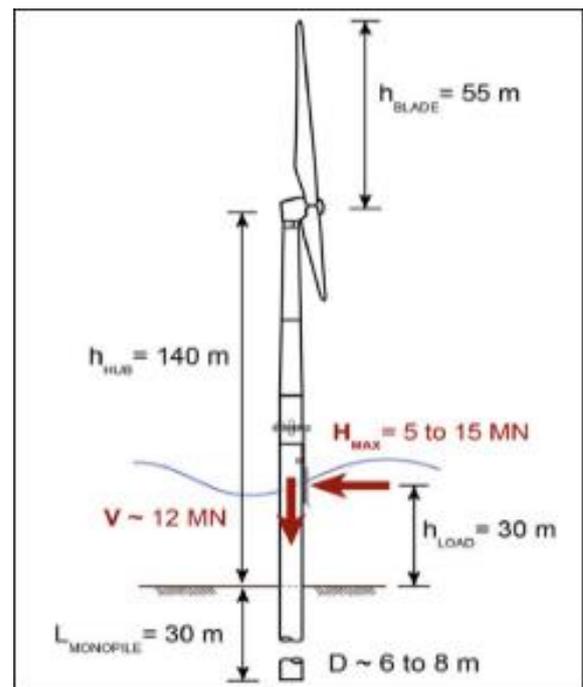
的結果約為 20 至 30 公分的位移，而 PLAXIS 的結果如圖十二所示約有 35 公分和 27 公分左右的影響，此偏差可能與設置的條件簡化有關，但就誤差比例來說仍是可接受的情況。



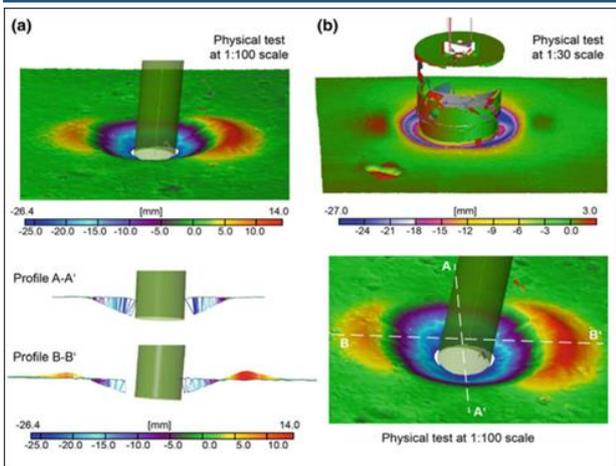
圖七-a 2D 模型模擬圖(1:1)



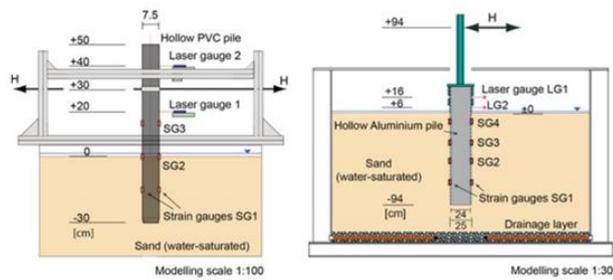
圖七-b 3D 模型模擬圖(1:30)



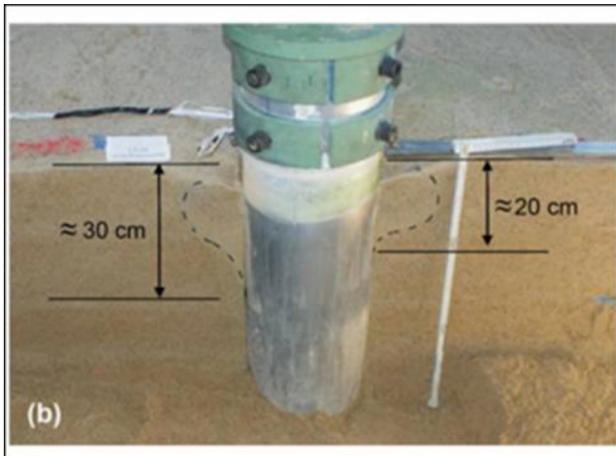
圖八 文獻中風機設置(Cuéllar,2012)



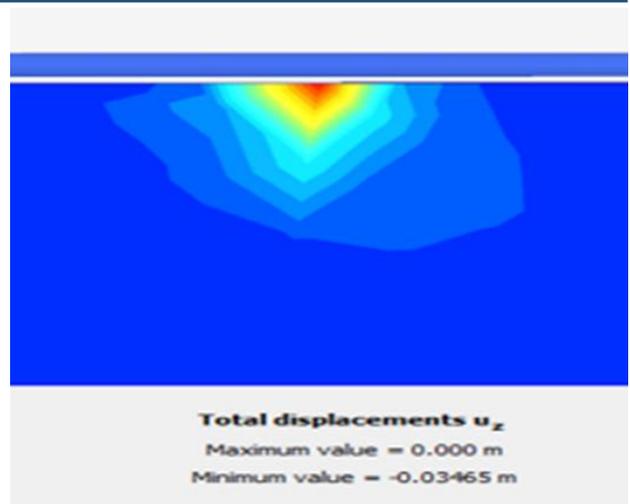
圖九 文獻中程式模擬結果(Cuéllar,2012)



圖十 1:1 和 1:30 尺寸模擬示意圖
(Cuéllar,2012)



圖十一 文獻中實驗結果畫面(Cuéllar,2012)



圖十二-a Plaxis 模擬結果(1:30)

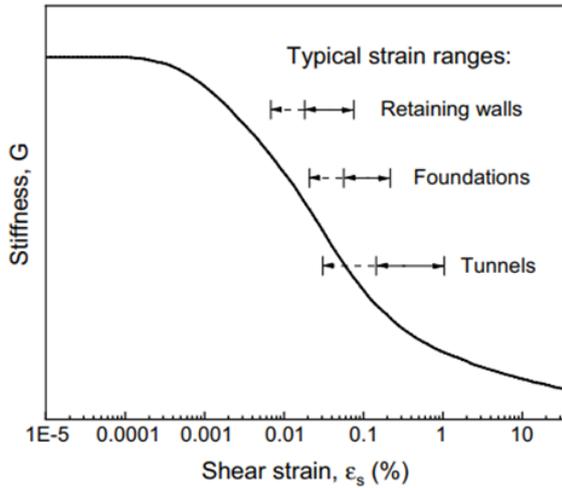


圖十二-b Plaxis 模擬結果(1:1)

3.2. Byrne(2019)

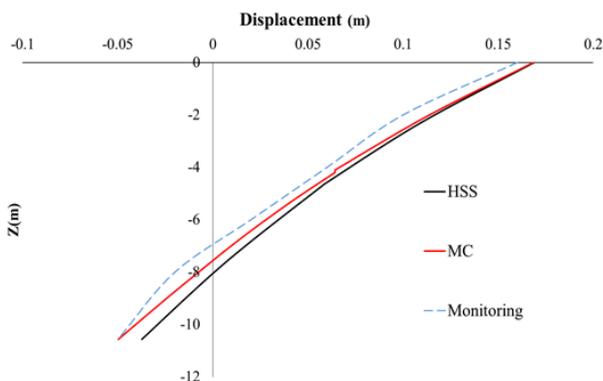
從文獻中設計的基樁選擇有完整結果的做模擬，DL2 為設計條件和體積最大的基樁，內徑 D 達到 2 公尺，長徑比 L/D 來到 5.25，稍大於大口徑樁 L/D=4 以上的範圍，位移方面 MC 和 HSS 都稍大於文獻中的數據，可能是不同組成律受影響程度的不同但都沒有超過側向位移 0.1D 的限制，而三者的彎矩則幾乎等值，僅有載重條件來到 3970 千牛頓時會在最大彎矩點上發生偏差(如圖十五)，且兩

種組成律都會受影響，此影響可能與應變數值有關，此部分可看到圖十三中不同應變下的分類和範圍，回歸到 DL2 應變結果的圖十六中兩模式的應變的數值範圍多落在 0.01 至 0.001 的範圍內符合小應變的需求但彎矩卻有誤差，這可能是文獻和模擬的應變結果有所不同造成的。

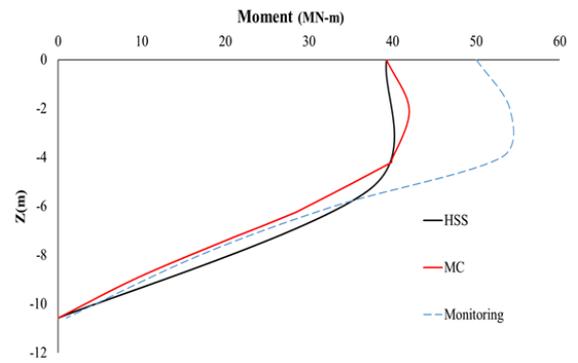


圖十三 各類型應變範圍示意(Zhang, 2019)

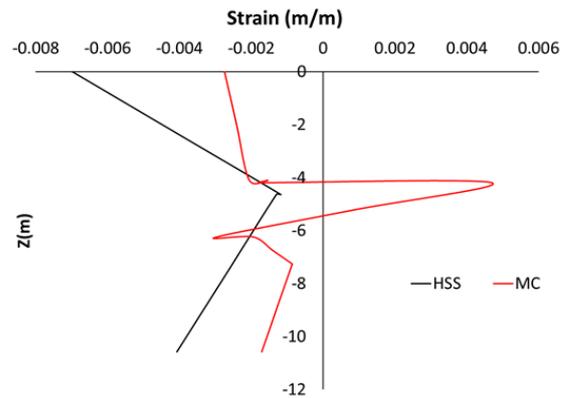
DM3 和 DM7 兩樁的內徑同樣是 0.762 公尺，而長徑比 L/D 分別為 8 和 3，以此差距來比較長徑比造成的影響，重複前述 DL2 研究方式，對位移、彎矩和應變彙整了比較結果(如圖十七至圖二十二)，兩基樁的兩種組合律在和文獻的比較上 DM7 的 HSS 模式更接近文獻而 DM3 則反之是 MC 模式更接近，而彎矩方面兩者同樣相差無幾，可從此情形判斷長徑比的差距會對基樁位移影響擴大，但對彎矩則不具有明顯影響，組成律的影響則不明顯，主要受影響條件是載重強度或應變的數值和範圍。



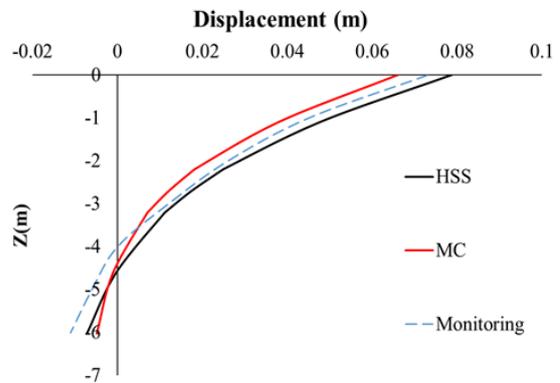
圖十四 DL2 H=3970kN 時位移結果圖



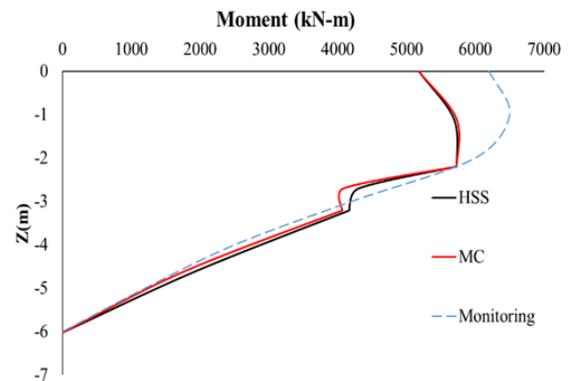
圖十五 DL2 H=3970kN 時彎矩結果圖



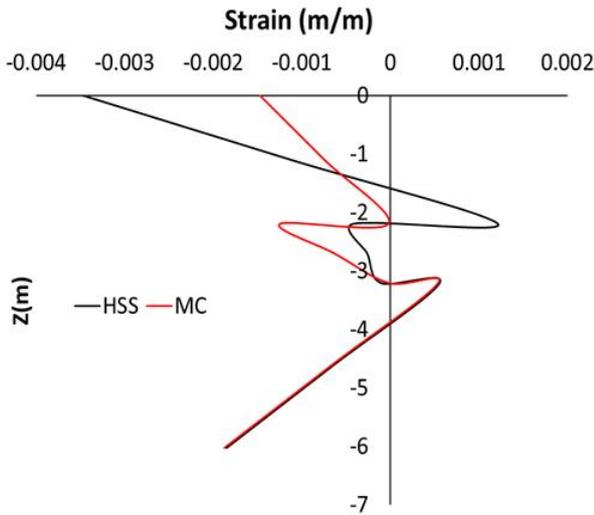
圖十六 DL2 H=3970kN 時應變結果圖



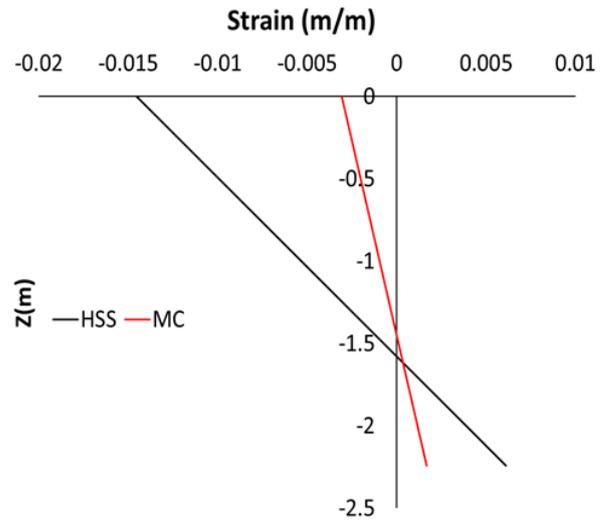
圖十七 DM3 H=515kN 時位移結果圖



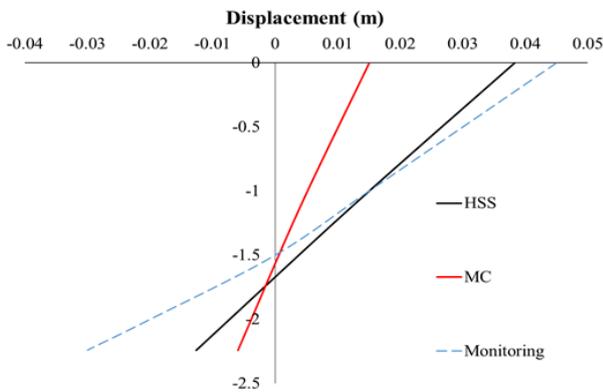
圖十八 DM3 H=515kN 時彎矩結果圖



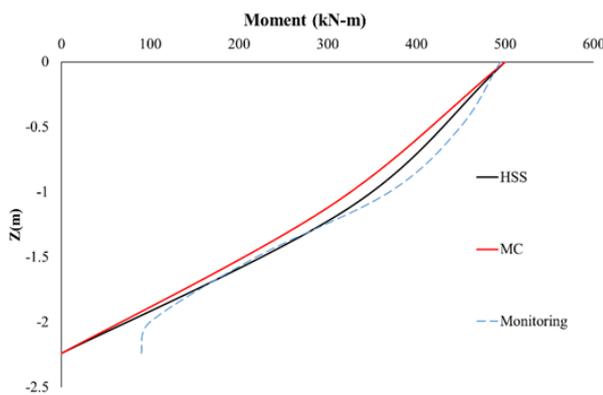
圖十九 DM3 H=515kN 時應變結果圖



圖二十二 DM7 H=50kN 時應變結果圖



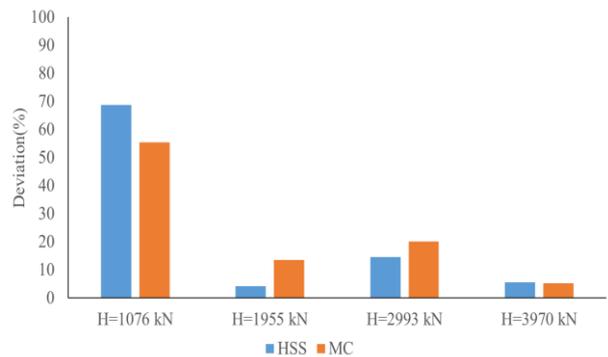
圖二十 DM7 H=50kN 時位移結果圖



圖二十一 DM7 H=50kN 時彎矩結果圖

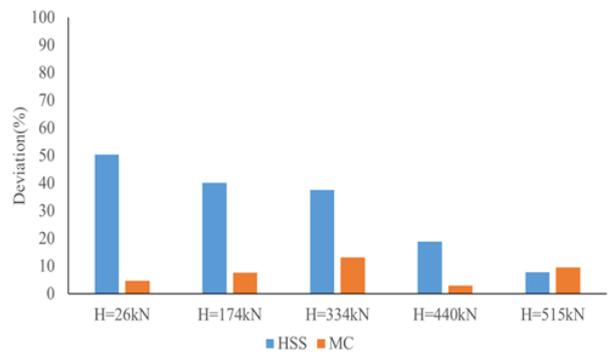
而圖二十三至二十五為針對位移的誤差比例做出的比較圖，圖二十三中 DL2 的載重強度越大誤差差距就越小，可知道載重到一定數值強度後誤差的影響便不明顯了，圖二十四和圖二十五的誤差比例數值中 DM3 的 HSS 模式明顯比 MC 模式誤差更大，但同樣於 DL2 的性質載重增加誤差下降，而 DM7 不受影響幾乎沒有差別。

L/D=5.25

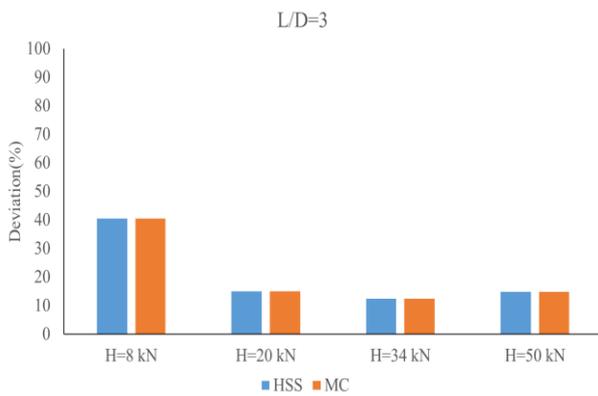


圖二十三 DL2 位移誤差比例圖

L/D=8



圖二十四 DM3 位移誤差比例圖



圖二十五 DM7 位移誤差比例圖

3.3 分析結果探討

將各試驗的成果彙整後，得出了以下幾點結論：HSS 模式的位移結果仍會高於 MC 模式些許，但都在允許範圍 0.1D 內，彎矩結果上兩者差距不大且接近重合的狀態，因此土壤在不同模式下對彎矩的影響並不明顯甚至不具影響，應變成果兩者同樣差別不大，此外，HSS 模式雖符合小應變範圍內，但沒有足夠的應變差範圍表示適用於此情，而 γ 0.7=0.722 的限制也有吻合，可得出應變若不完全符合 HSS 條件可能是土層變位不同的影響關鍵。

彙整結論後的後續模擬，在台灣地層時會優先使用 MC 模式測試，並放上相對應的鋼製大口徑單樁，額外載重以風力和波浪力的側向載重，變化以上條件來做多種模擬，將會是後續的主要研究方向，以此將國外土層和大口徑單樁的可行性結果回歸到台灣的條件，以此證明以同樣或類似方式設置離岸風電及水下基樁是可行的。

四、後續模擬

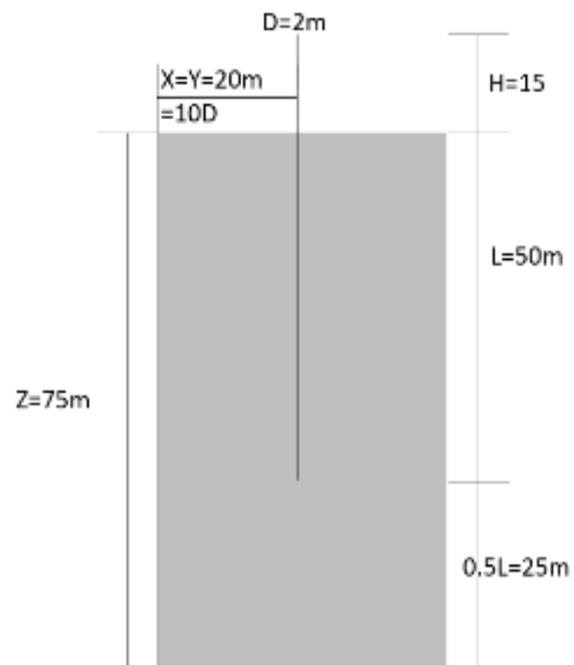
土壤分析上 MC 模式方面對參數的要求並不複雜，只需足夠的鑽探資料或簡單的土壤力學試驗即可取得需要數據，如：楊氏模數 E、剪力模數 G 和泊松比 ν 等，藉此帶入到 PLAXIS 中使用，而 HSS 模式則是藉由三軸試驗才可求得相對應數據，但也可利用經驗公式推敲出來，只要有 E 值和泊松比即可，求出相對應的三軸加載極限強度 50% 之正割楊氏模數 E_{50} 、單向壓密楊氏模數 E_{oed} 、三軸

解壓再加壓楊氏模數 E_{ur} 、小應變等於 ϵ 下在圍壓等於 P 時之參考剪力模數 G_0 和 $G_s/G_0=0.722$ 時之剪應變 γ 0.7 等主要數據，回歸於前文的結論在模擬台灣地層時會以 MC 模式為主進行模擬並確認各結果是否符合法規。

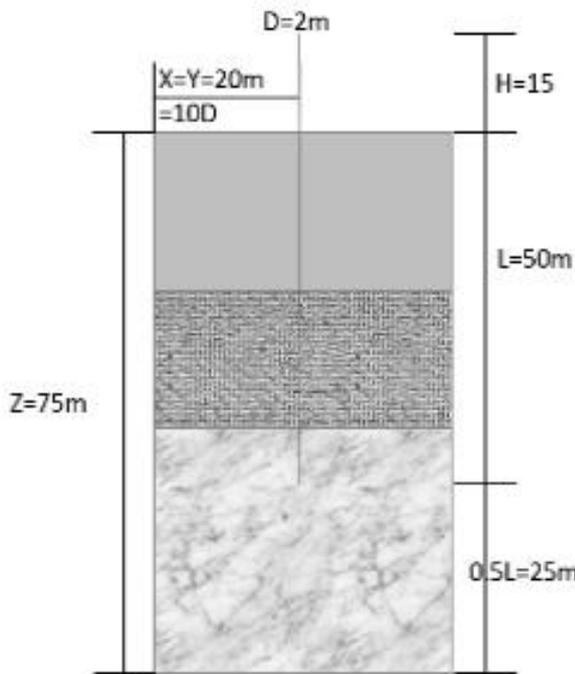
回饋分析後從中整理出以下條件，合適的多種土層組成律、樁體的設計規格、載重的類型及受力方位等，彙整到 PLAXIS 模擬中，分析台灣西海岸線周邊受不同外力的模擬情形與現地的可能危害或破壞，結合上述條件和結果後探討大口徑單樁樁體的可行性和需求性。

4.1 地層背景

土層的參考以彰化沿岸地層為主，組成律類型考慮到效率和合適性選擇了以 MC 模式為主模擬，而 HSS 模式的需求數據需要三軸試驗的數據較難以取得準確數據因此為次要考慮但仍以計算的方式取得數據並測試，取得的條件包含前述的楊氏模數 E 與剪力模數 G 外，還包含了鑽探後所得到的 SPT-N 等額外細節，而藉由 SPT-N 也可推導出 UBC3D 模式的參數，但模擬的方式仍以 MC 模式和 HSS 模式為主。



圖二十六 單種土壤地層模擬圖(黃民智, 2016)



圖二十七 多種土壤地層模擬圖(黃民智，2016)

表 5-(a). 台灣西海岸鑽探土層參數之一(*:單位為 kN/m^2)

土壤類型	E^*	ν^*	G^*	Φ°	Ψ°
TW sand MC	16.5e3	0.3	6346	33	3

表 5-(b). 台灣西海岸鑽探土層參數之一(*:單位為 kN/m^2)

土壤類型	E_{50}^*	E_{ocd}^*	E_{ur}^*	$\gamma_{0.7}$	G_0^*
TW sand HSS	1650	1650	4950	0.01	9274

4.2 基樁尺寸

樁體方面則以歐洲合金鋼鐵的常用參數和樁徑尺寸為主，樁長則配合黃民智(2016)中模擬的西台灣沿岸中相對歐洲地區較深的岩盤延伸至地下，是以樁號 DL2 的大口徑樁為主體設計，僅有樁深度 L 和風機高度 H 按照台灣西海岸地層鑽探資料改變延長而已，設置的方式一樣為土上方的 Beams 模型和地

下的 Embedded beams 模型兩種來模擬單樁的狀態，而兩者差別在和土接觸時另外的支撐力和摩擦力。

表 6-(a). 台灣西海岸模擬樁數據(黃民智，2016)

樁號	$E'(\text{kN/m}^2)$	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	D(m)	t(mm)
TW1	210e6	76.00	2	38

表 6-(b). 台灣西海岸模擬樁數據(黃民智，2016)

樁號	L(m)	h(m)	$T_{\max}(\text{kN/m})$	$F_{\max}(\text{kN})$
TW1	50	15	7106	57.4e3

4.3 各載重影響

考慮到海上的風、海浪和海流，分別使用高雄、台中、嘉義和成功等地的觀測站數據彙整計算常態的側向的單點作用力，最大值則考慮到了颱風來襲時的數據，颱風的數據為 2000 年至 2012 年期間的各個颱風的監測結果，結論來說主要的影響條件以風力為主作用在基樁頂點位置上方風機的馬達，而海浪作用在浪高位置約為海平面上方 15 公尺左右，海流作用在海平面上，並試驗出風力的影響遠大於另外兩者，因此在程式模擬時會合併為單一力並作用於風機的頂點位置。除了颱風所產生的側向載重外，也考慮到台灣地區容易發生地震的影響，從各地地震測站的資料回歸模擬出了穩定的人工地震的平面波狀載重做測試，可藉此看出地震的危害程度和帶來的其他災害影響，如土壤液化或地層沉陷，但目前缺乏於合適的資料對照而還未做深入探討。

表 7. 監測站風速、波高、海流資料(董東璟, 1999) (*:單位為 m/s)

地區	平均風速*	最大陣風*	最大波高(m)	海流流速*
臺中	21.7	39	>14(已知最大 23.8)	設計最大 1.2
高雄	35.3	53		
嘉義	27.5	42.7		
台南	31	45.6		
平均	28.9	45.1		

表 8. 風力形狀係數(黃民智, 2016)

樑	1.5
建築物之側面	1.5
圓柱形結構	0.5
平台總投影面積	1.0

表 9. 各海上影響係數(黃民智, 2016)

	C_d	C_m
光滑	0.65	1.6
粗糙	1.05	1.2

五、結論

文獻回顧後, 分別知道了 MC 模式和 HSS 模式在應變影響不足時差別有限, 但會缺乏使用 HSS 模式的必要性, 比較下 MC 模式需求條件較低可優先在簡化的地層類型使用, 而延長的大口徑單樁坐落在岩盤上帶來安定的握裹力和摩擦力, 所以了解鑽探資料才能在施工和設置後最大安全化, 在各載重中最常作用且最具有影響力的項目是風力, 其中在夏秋季節的颱風帶來的強力陣風和雨勢更是危險, 為此可另外設置防風手段和增加底座的強度來防範。

後續的目標確定了基樁尺寸的設計和材質類型, 風力、波浪力和海流轉換成側向載

重的量化, 人工地震方面雖已有資料但考慮到缺乏前車之鑑暫且不考慮, 整體土壤性質目前為了確認不同性質的問題點正循序漸進以單種土壤地層慢慢延伸成多種土壤地層努力, 考慮到地層的複雜性相信日後的模擬和試驗能有更多新的發現。

參考文獻

1. 黃民智與林德貴(2016), 台灣彰化濱海離岸風機支撐結構樁基礎之力學及變形分析, 國立中興大學水土保持系碩士論文
2. 董東璟、張春梅、莊士賢、高家俊(1999), 颱風波浪之時頻域特性, 第 21 屆海洋工程研討會論文集
3. 饒國清、施孟憲、黃清哲、滕春慈(2014), 台灣東部外洋颱風季節海流觀測資料的初步探討, 第 36 屆海洋工程研討會論文集
4. 謝榮華與李忠潘(2001), 波浪作用下柱體受力行為及減力設施之實驗研究, 第 21 屆海洋工程研討會論文集
5. Fabio Silva (2019), Foundation Design of Wind Turbines With 3D FEM Modelling, Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia
6. Byron W. Byrne (2019), Monotonic laterally loaded pile testing in a dense marine sand at Dunkir, Department of Engineering Science, Oxford University, Oxford, UK.
7. Pablo Cuéllar (2012), On the quasi-static granular convective flow and sand densification around pile foundations under cyclic lateral loading, Springer-Verlag.
8. Maria A. Nikolinakou (2011), Prediction and Interpretation of the Performance of a DeepExcavation in Berlin Sand, American Society of Civil Engineers
9. Shuai Zhang and Xiaohui Cheng (2019), Small strain shear moduli modeling of sand: a non equilibrium thermodynamic approach, including an application to Leighton Buzzard sand, Department of Civil Engineering, Tsinghua University.

惰性減震擋土牆之初步研究

沈茂松¹ 涂錦穆²

¹國立高雄科技大學土木工程學系教授

²國立高雄科技大學土木工程學系碩士班研究生

摘要

本研究將沒有背填土之重力式、懸臂式與扶壁式擋土牆模型，利用無凝聚力之彈珠，附加在擋土牆側邊，形成之惰性減震擋土牆，經六軸振動台測試在不同地震加速度之減震行為。

本研究以壓克力製成之比例 1/20 之三種擋土牆模型，分別為重力式、懸臂式、及扶壁式擋土牆模型，並以強化玻璃製成中空牆壁放置彈珠配置在擋土牆側邊作為惰性減震牆，以六軸振動模擬平台來模擬 15 種不同配置、及地表加速度 0.25g~1.25g 之地震，並以應變計黏貼於模型上，藉以測量其應變，並分析及比較不同惰性減震牆配置之影響。

應變之數據進行分析後發現，無論有無配置惰性減震牆，應變趨勢在 0.25g 至 0.75g 時產生下降，再從 0.75g 至 1.25g 時提高，且 0.75g 時的應變幾乎皆為最低；而懸臂式模型之最佳配置為放滿十層彈珠(每層 28 顆)，其應變抑制效果為全部配置裡最佳且最穩定；扶壁式模型之最佳配置為間隔放滿彈珠(從上往下第 2、4、6、8、10 層放置彈珠)，在總共 55 種條件之數據裡，共有 32 個為最佳，且只有 3 個條件下為應變放大，其餘皆為應變抑制效果。

重力式擋土牆模型、懸臂式無配置惰性減震牆模型、扶壁式無配置惰性減震牆模型，在 0.25g 至 0.5g 時，懸臂式模型之應變小於重力式模型之應變，扶壁式應變最大；而扶壁式模型中，扶壁上之點位應變小於兩扶壁間之點位。

重力式擋土牆模型、具惰性減震牆模之懸臂式滿彈珠配置、及惰性減震牆模型扶壁式間隔配置彈珠之比較，懸臂式滿彈珠及扶壁式間隔彈珠在 0.25g 至 0.5g 之應變大幅下降，小於重力式之應變，但在 0.75g 至 1.25g 時，仍然為重力式模型之應變最小。

關鍵字：擋土牆、惰性減震牆、地震、減震

Abstract

In this study, the gravity, cantilever and buttress retaining wall models made of acrylic and without backfill, and the glass marbles without cohesion used to attach by the side to be a inert damping retaining wall, uses the 6-axes shaking table to test the model's behavior in different earthquake acceleration.

Three types of retaining wall models with scale of 1/20 made of acrylic, and the hollow wall made of tempered glass stick to the wall side and the glass marbles are placed in the hollow wall, A 6-axis shaking table test to simulate 15 different configurations and ground accelerations of 0.25g to 1.25g earthquakes, measuring the strain by strain gauge, compare the effect in different configurations.

After analyzing the strain data, it is found that whether with or without inert damping walls, the strain trend decreases from 0.25g to 0.75g, and then increases from 0.75g to 1.25g, and the strain at 0.75g is almost the lowest; The best configuration of the cantilever model is filled with ten layers of glass marbles (28 per layer), its strain is the most stable of all configurations; The

best configuration of the buttress model is filled with glass marbles at intervals(placed glass marbles on the 2, 4, 6, 8, 10 layers from top to bottom). Among the data of 55 conditions, it's the best in 32 conditions, and only 3 conditions are strain amplification.

Gravity type model, cantilever type without inert damping wall model and buttress type without inert damping wall model at 0.25g to 0.5g, the strain of cantilever type is less than gravity type, and the strain of buttress type model is maximum in the 3 models; in the buttress type model, the strain of the point on the buttress is smaller than the point between the two buttresses. Comparison of the 3 models, gravity type, the cantilever type with full marble inert damping wall and buttress type filled with marbles at intervals, the strain of cantilever type and buttress type is significantly decrease at 0.25g to 0.5g, which is smaller than the strain of gravity type, which is smaller than the strain of gravity type; But the strain of gravity type is still the smallest at 0.75g to 1.25g.

Keywords : retaining wall, inert damping wall, earthquake

一、緒論

1-1 研究動機

擋土牆為台灣常見之擋土結構，用於攔阻天然或填築之土石、砂礫及類似的粒狀物質所構築之構造物(水土保持技術規範 258 條)，而最常使用的擋土牆有重力式、扶壁式、懸臂式、蛇籠式等等；擋土牆又容易因施工錯誤或地震影響而毀損、破壞，進而導致土石坍塌等危害。故發展一種可外加之擋土牆減震的輔助工法為本研究之動機。

1-2 研究目的

本研究目的在於針對台灣擋土牆結構之補強，在原有擋土牆結構增設一片中空牆，牆壁內填充無凝聚力且可自由移動之圓卵石，藉由圓卵石受到地震是影響時，產生與受到地震力影響之建築物位移方向相反之惰性力，以抵消地震力對結構體產生之側向力來達到惰性減震效果。

1-3 研究方法

本研究使用壓克力製成三種擋土牆模型，分別為重力式、懸臂式、扶壁式，尺寸為長 57.5 公分、寬 20 公分、高 25 公分、底厚 3 公分，擋土牆後方無回填土，如圖 1-1~1-3 所示，以彈珠模擬圓卵石；使用六軸振動儀進行振動模擬試驗，分析惰性剪力牆共八種配置裝設在懸臂式及扶壁式擋土牆上的減震效

果，並探討其應變量及實際變位之關聯，找出最有效減震之惰性減震牆配置。

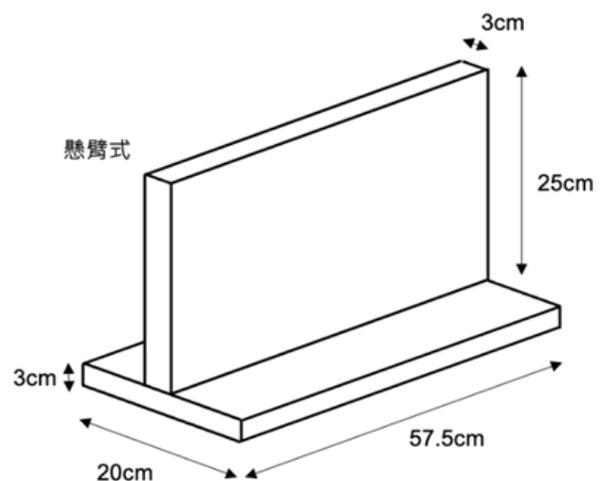


圖 1-1

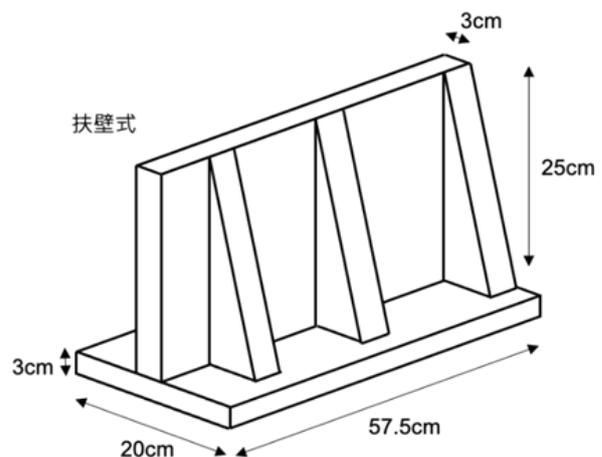


圖 1-2

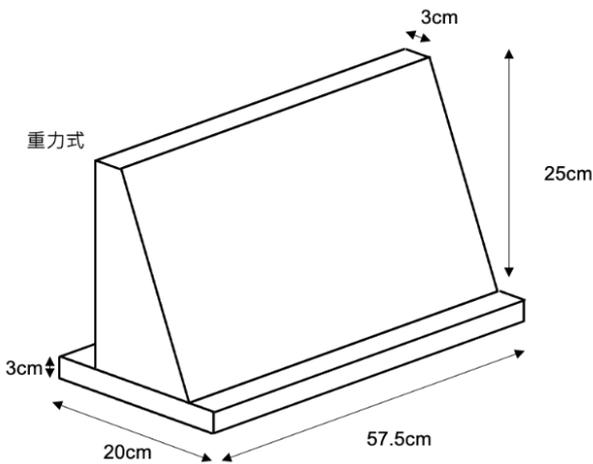
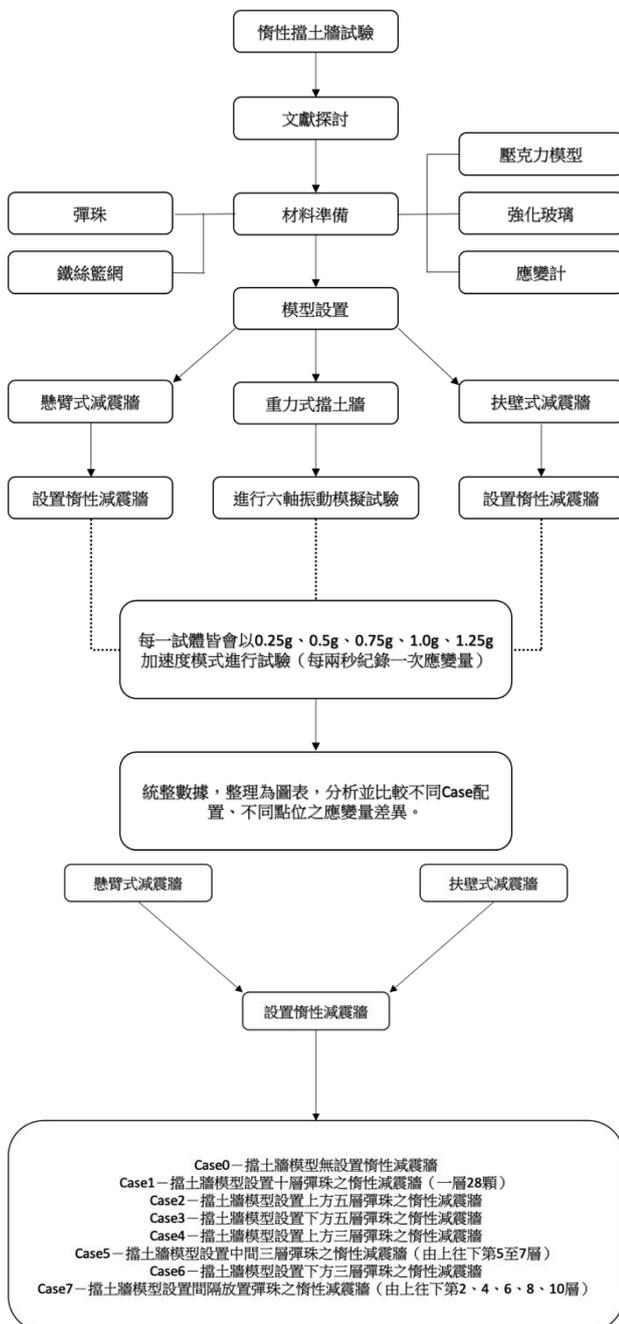


圖 1-3

1-4 研究流程



1-5 論文架構

以台灣的地理環境及曾經發生的事故及相關數據作為研究背景，發想出對擋土牆的抗震補強結構，惰性減震擋土牆，並預先假設其理論減震效果，再做出縮小壓克力模型進行模擬試驗，分析數據並做三種常見擋土牆之比較。

第一章：敘述本研究的研究背景、研究動機、研究目的、方法、流程及論文架構。

第二章：相關研究文獻回顧、地震相關資料收集，以及隔震、減震、制震等原理概述。

第三章：說明本研究之研究原理及使用之設備儀器、模型與擋土牆之配置。

第四章：試驗數據之統整，並進行分析與三種擋土牆模型之比較。

第五章：根據本研究之試驗結果進行討論與說明，並提出未來研究方向與建議。

二、文獻回顧

台灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊的交界處，處於環太平洋火山地震帶，因板塊互相擠壓，造成斷層活動的能量釋放，使地震頻繁，根據中央氣象局地震測報中心自 2011 到 2020 年 9 月 15 號為止的數據顯示，台灣地區平均每年發生 34704 次地震，平均有 1207 次有感地震，且四級以上地震平均有 126 次；而台灣在 1999 年發生過 921 集集大地震，震度 7.3 級，以及 2016 年美濃大地震，震度 6.6 級，可見台灣飽受地震之困擾。（中央氣象局地震測報中心【1】）

2-1 隔震原理概念

地震發生時地殼所釋放之能量，藉由結構基礎上傳至上部結構，而造成主體結構物的破壞。結構隔震技術是在上部結構與結構基礎間安置柔性介面(隔震元件)藉以拉長振動週期，進而減緩地表運動對上部結構的影響。當地震發生時，可以藉由隔震元件將地震能量傳入結構體之路徑截斷，阻隔地震能量傳入上不結構所造成之破壞。故能延長建

築物基本的振動週期，使振動速度變慢和給予適當阻尼將使結構物的加速度反映大幅減弱，同時讓結構的相對位移由結構物底部與基礎之間的隔震系統提供，而不由結構自身的相對位移承擔地震能量，結構物損傷則能降至最低(廖健閔，2004【2】)

2-2 減震原理概念

利用消能減震元件來消散地震對結構所輸入之能量，是目前最經濟有效的方法之一。消能設計主要著重於增加結構物之阻尼，以提高結構物消散地震能量之能力，方法上則是於結構體上額外加裝消能元件，使地震能量按照既定之設計路徑疏導進入所加裝之消能元件中，並利用消能元件所產生之遲滯迴圈消散能量。而消能元件依其特性又可分類為與速度反應相關之黏滯性阻尼(Viscous Damping)的速度相依型(Velocity-dependent)消能器，即透過金屬降伏時所產生之遲滯性阻尼(Hysteretic Damping)與摩擦式阻尼(Friction Damping)的位移相依型(Displacement-Damping)消能器兩大類(楊振宗，2007【3】)

2-3 制震原理概念

指出藉由條整質量、改變勁度、增加阻尼或施加控制外力等方式，消滅由外力激擾產生之結構系統振動，如液流阻尼器、調諧質量阻尼(TMD)……等，一般制震方法可分為被動控制(Passive Control)及主動控制(Active Control)兩大方向，其中被動控制不需藉由外部提供能量即有控制效果，並具有成本低且穩定可靠之優點，但無法隨時針對情況作出回應。而主動控制優點能隨時根據實際擾動即結構動態反應做出即時性調整，對外在環境適應性及自主性佳。但缺點為控制方法需額外輸入能量，導致成本相對提升，且外部能源受破壞而中斷提供時，將無法達到最佳制震效果(楊佳儒，2009【4】)

2-4 建築結構惰性減震牆研究成果

研究得出，三棟三層三跨的壓克力建築模型在地震加速度 0.25g~0.75g 下，惰性減震牆加在最高樓層或中間樓層減震效果最好；

地震加速度大到 0.75g 以上時，惰性減震牆只有部分梁、柱有減震效果，而部分梁、柱則會有增大應變；建築物模型第一樓中間兩跨之兩面牆設為惰性減震牆的梁柱應變抑減及放大，在 0.25g~1g 加速度模式下皆在梁、柱強度設計法(USD)容許設計($M_u = \phi \cdot M_n$)範圍內，即代表減震效果最穩定(王浩鈞，2019【5】)

2-5 應用 ETABS 模擬惰性減震牆系統之研究成果

研究得出，在 ETABS 程式分析中，設置惰性減震牆皆呈現應變減少的趨勢，最大位移減量百分比達-25.15%，最少位移減量百分比也有-2.8%，可判定配置惰性減震牆建築物與原建築物在 0.25g~1g 四種地震加速度模式下，如構件均無降伏開裂且仍然保持彈性段，則配置惰性減震牆確實能達到減少建築物位移之效果(顏子原，2019【6】)

三、惰性減震擋土牆之試驗與儀器配置

3-1 研究原理

本研究使用壓克力製成三種擋土牆模型，分別為重力式、懸臂式、扶壁式，尺寸為長 57.5 公分、寬 20 公分、高 25 公分、底厚 3 公分，擋土牆後方無回填土，使用六軸振動儀進行振動模擬試驗，如圖 3-1 所示，分析惰性剪力牆共八種配置裝設在懸臂式及扶壁式擋土牆上的減震效果，並探討其應變量及實際變位之關聯，找出最有效減震之惰性減震牆配置。

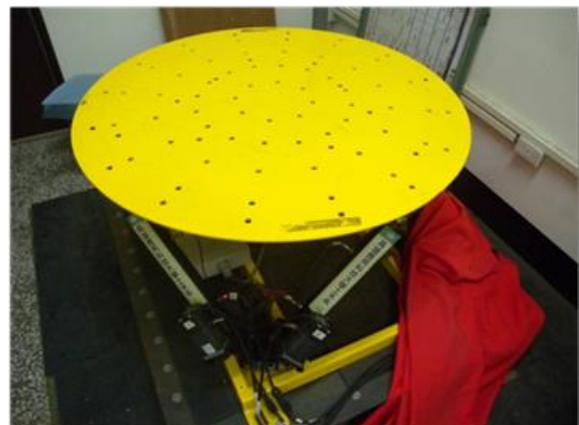


圖 3-1

3-2 惰性減震牆之減震原理

在鋼筋混凝土建築物之中空牆(壁)，分層填充凝聚力自由滾動的圓卵石(粒徑約為 0.7~0.9 牆淨寬，如圖 3-2 所示，不可使用碎石，可能越振越密實，失去顆粒的自由度，惰性減震牆中的圓卵石需具有自由滾動的自由度，才能發揮惰性減震功能)，藉由地震來襲時自由滾動的圓卵石發揮惰性產生與建築物振動位移方向不同的惰性力，來抵消部分地震對建築物產生的側向力。此惰性牆可出當建築物的剪力牆，新、舊建築物皆可使用，尤其是舊建築物結構補強設計中配合擴柱工法或增設剪力牆工法皆可使用。

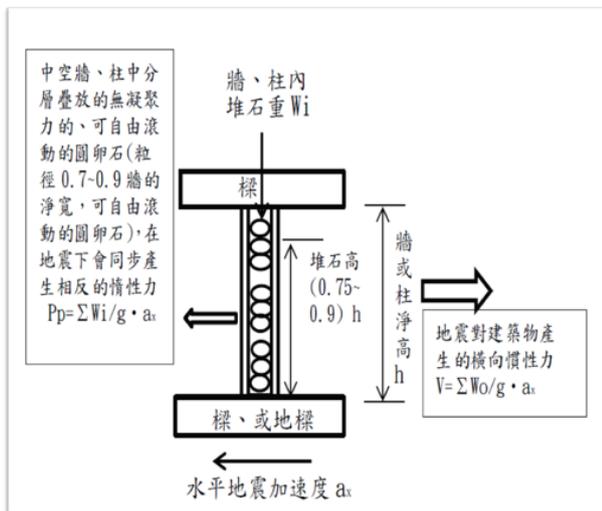


圖 3-2

3-3 壓克力模型描述

本研究採用最常見之三種擋土牆形式，重力式、扶壁式及懸臂式擋土牆，並縮小為 1/20 比例之壓克力模型，並在重力式、懸臂式的壁體上貼 9 個量測點位，扶壁式則貼 9 個點位在扶壁之間的壁體、3 個貼在對應扶壁位置之壁體上。

三種壓克力模型皆為長 57.5cm、寬 20cm、壁體高 25cm、底版厚 3cm，且在懸臂式、扶壁式背面貼上玻璃槽，懸臂共一槽、扶壁式共三槽，並用鐵絲網做成之彈珠籃作為彈珠分層，總共十層，如圖 3-3 所示。



圖 3-3

3-4 應變資料擷取器(DataTaker)

應變計之資料擷取系統為 DT80，如圖 3-3 所示，由 dataTaker 公司製造，可透過 CEM20 擴充模組增加擷取頻道，一個擴充模組可增加 20 個頻道。含監測軟體，可同時紀錄荷重計、電子位移計、應變計；每個通道最快可每秒擷取 25 筆資料，利用內建網路系統將資料傳輸到電腦內儲存。

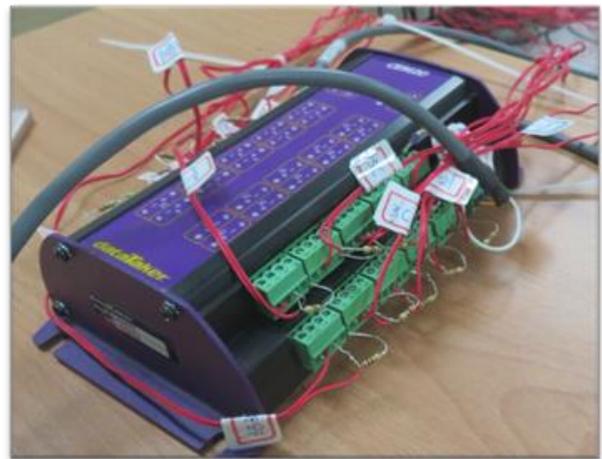


圖 3-4

3-5 應變計(Strain Gage)

應變計是由 Kyowa 公司所製造，型號為 KFG-30-120-C1-11L5M2R，如圖 3-5 所示；應變計長度為 3mm；應變計電阻為 120Ω；Gage Factor：2.05±1.0%，並利用電壓式之接法，將應變計與電阻線接至資料擷取器(Data Logger)，如圖 3-6 所示。本研究於壓克力模型牆面上黏貼單軸向應變計測量，如圖 3-7 所示，以了解惰性減振擋土牆之影響與成效。



圖 3-5

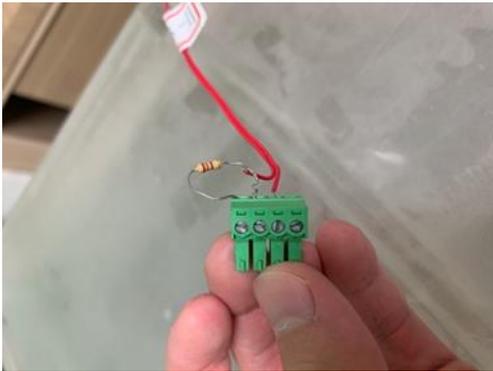


圖 3-6

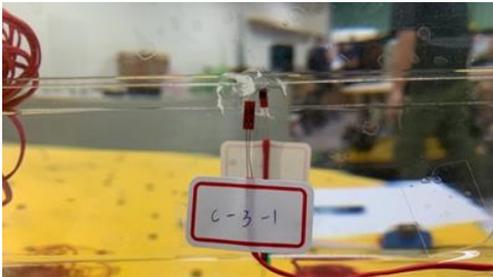


圖 3-7

3-6 試驗方法

本試驗將三種壓克力擋土牆模型放置於六軸振動儀上，在壁體上黏貼數個應變計，將應變計連接至資料擷取器，將重力式擋土牆及懸臂式、扶壁式擋土牆 8 種配置依序以加速度 0.25g、0.5g、0.75g、1g、及 1.25g 五種模式量測，最後進行數據分析並比較不同配置方式下之應變量。

3-7 惰性擋土牆配置

本研究以不同的彈珠配置方式，找出對擋土牆減震效果最佳之組合，彈珠最多放置十層，且懸臂式每層放置 28 顆彈珠；扶壁式每層放置 8 顆、8 顆、3 顆彈珠，少放則會使彈珠無法有效提供惰性力，故不減少彈珠量，

進行以下 8 種配置。

1. CASE0 - 擋土牆無放置彈珠。
2. CASE1 - 擋土牆放置十層全滿彈珠 (懸臂式單層 28 顆；扶壁式由左至右為 8 顆、8 顆、3 顆)。
3. CASE2 - 擋土牆放置上面五層全滿彈珠。
4. CASE3 - 擋土牆放置下面五層全滿彈珠。
5. CASE4 - 擋土牆放置上面三層全滿彈珠。
6. Case5 - 擋土牆放置中間三層(由上往下第 5 至 7 層)全滿彈珠。
7. Case6 - 擋土牆放置下間三層全滿彈珠。
8. Case7 - 擋土牆依照間隔放置全滿彈珠(從上往下第 2、4、6、8、10 層放彈珠)。
9. Case9 - 重力式擋土牆，如照片 3-13 所示。

3-8 應變計配置

本試驗所使用之應變計型號為 KFG-30-120-C1-11L5M2R；應變感應器長度為 3mm，重力式擋土牆共黏貼 9 片，如圖 3-8 所示、懸臂式共黏貼 9 片，如圖 3-9 所示、扶壁式共黏貼 12 片，如圖 3-10 所示。

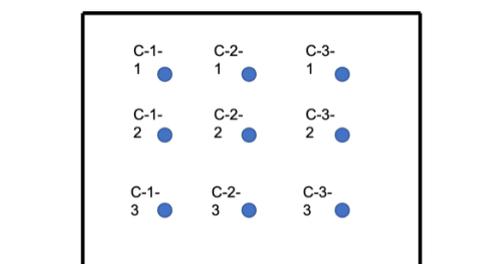


圖 3-8

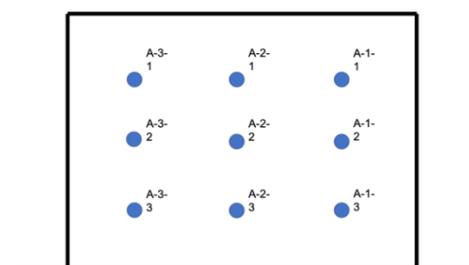


圖 3-9

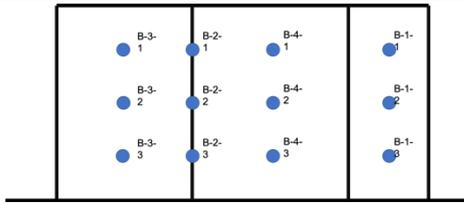


圖 3-10

3-9 六軸振動模擬平台試驗

將長 57.5cm、寬 20cm、高 28cm 的三種壓克力擋土牆放置於六軸振動儀上且用螺栓將其固定住，並將應變計黏貼在選擇的位置，重力式 18 片、懸臂式 9 片、扶壁式 12 片，最後將應變計與量測設備連接，目的為了解壓克力模型試體在受到地震力時，擋土牆整體應變之變化量。

1. 將惰性擋土牆依照 CASE0 - CASE7 分別放置在六軸振動儀上。
2. 每項 Case 放置於六軸振動儀上，分別使用 0.25g、0.5g、0.75g、1g、1.25g 五種加速度模式進行試驗。
3. 利用電腦連接至應變資料擷取系統 DT80 量測擋土牆之應變量，並每 2 秒鐘紀錄一次擋土牆各點位應變量。

3-10 惰性減震牆之理論減震效果

在擋土牆內設置不同位置的惰性減震牆，會影響其減震效果，依照擺放不同配置之惰性擋土牆，以理論公式推測其最佳減震效果配置。

1. 在 A-1 懸臂式擋土牆模型無設置惰性減震牆(Case0)情況下，如圖 3-3(a)所示，其建築物模型在地震時產生之慣性力為

$$F = \frac{\bar{w}}{g} \times \frac{1}{2} \ell$$

2. 在 A-2 懸臂式擋土牆設置惰性減震牆(Case1)情況下，如圖 3-3(b)所示，其建築物模型在地震時產生之慣性力為

$$F = \frac{\bar{w}}{g} \times \frac{1}{2} \ell - \frac{\omega_c \times 1}{g} \times \frac{1}{2} \ell$$

3. 在 A-3 懸臂式擋土牆設置惰性減震牆(Case2)情況下，如圖 3-3(c)所示，其建築

物模型在地震時產生之慣性力為

$$F = \frac{\bar{w}}{g} \times \frac{1}{2} \ell - \frac{\omega_c \times 5}{g} \times \frac{3}{2} \ell$$

4. 在 A-4 懸臂式擋土牆設置惰性減震牆(Case3)情況下，如圖 3-3(d)所示，其建築物模型在地震時產生之慣性力為

$$F = \frac{\bar{w}}{g} \times \frac{1}{2} \ell - \frac{\omega_c \times 5}{g} \times \frac{1}{4} \ell$$

5. 在 A-5 懸臂式擋土牆設置惰性減震牆(Case4)情況下，如圖 3-3(e)所示，其建築物模型在地震時產生之慣性力為

$$F = \frac{\bar{w}}{g} \times \frac{1}{2} \ell - \frac{\omega_c \times 3}{g} \times \frac{5}{6} \ell$$

6. 在 A-6 懸臂式擋土牆設置惰性減震牆(Case5)情況下，如圖 3-3(f)所示，其建築物模型在地震時產生之慣性力為

$$F = \frac{\bar{w}}{g} \times \frac{1}{2} \ell - \frac{\omega_c \times 3}{g} \times 0.53 \ell$$

7. 在 A-7 懸臂式擋土牆設置惰性減震牆(Case6)情況下，如圖 3-3(g)所示，其建築物模型在地震時產生之慣性力為

$$F = \frac{\bar{w}}{g} \times \frac{1}{2} \ell - \frac{\omega_c \times 3}{g} \times \frac{1}{6} \ell$$

8. 在 A-8 懸臂式擋土牆設置惰性減震牆(Case7)情況下，如圖 3-3(h)所示，其建築物模型在地震時產生之慣性力為

$$F = \frac{\bar{w}}{g} \times \frac{1}{2} \ell - \frac{\omega_c \times 5}{g} \times \frac{5}{2} \ell$$

四、惰性減震擋土牆之試驗分析與討論

4-1 懸臂式擋土牆模型數據分析

經擋土牆模型試驗，絕大多數狀況下，CASE1 之惰性減震效果較佳，而懸臂式模型中間點位在 0.75g 加速度下會異常增大，如圖 4-1 所示，可能為共振效果造成，只要加入

彈珠，皆可以降低中間點位之應變；且放置彈珠之 CASE，從 0.25g~1.25g 之加速度模式下皆展現 0.75g 時，應變皆會是 5 種加速度模式下最小之應變量，如圖 4-1 所示。

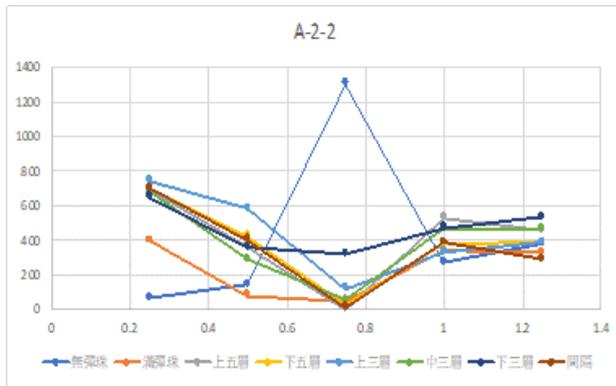


圖 4-1

不管何種情況皆顯示，從 0.25g 到 0.75g 時，應變量會逐漸下降，表示彈珠惰性力逐漸產生效果，而應變量從 0.75g 到 1.25g 開始增大，表示彈珠逐漸與震動同步，反而放大應變，如圖 4-2 所示。

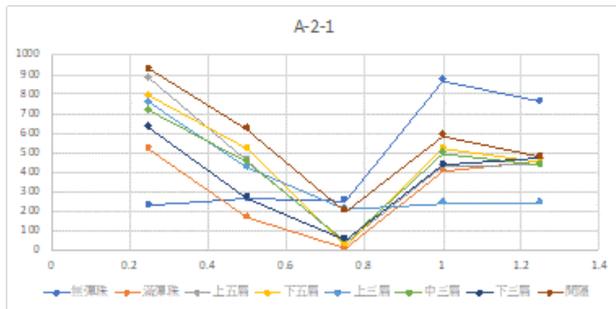


圖 4-2

4-2 扶壁式擋土牆模型數據分析

扶壁式擋土牆模型試驗絕大多數情況下 CASE7 之惰性減振效果較佳，僅在 1g 加速度模式下時 B-3-3 點位有放大 3%，其餘皆是應變抑制效果；且大多數 CASE 在 0.75g 加速度模式下之應變較小，如圖 4-3 所示；較特殊的像 B-4-1 點位，除了 CASE2、CASE6 以外，其他 CASE 在 0.75g 時應變反而放大，如圖 4-4 所示。

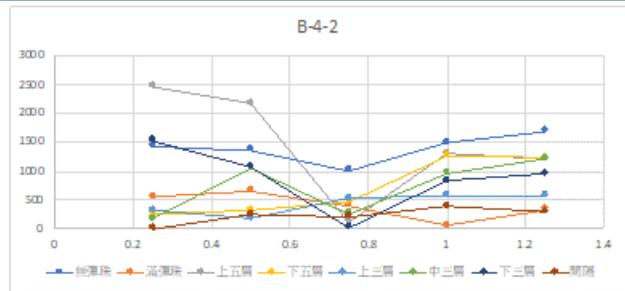


圖 4-3

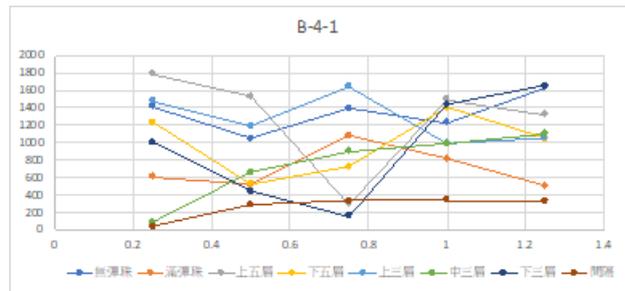


圖 4-4

與懸臂式相同的是，大部分 CASE 在 0.25g 加速度到 0.75g 加速度時會呈現應變逐漸減小的狀況，而從 0.75g 加速度到 1.25g 加速度時應變會逐漸變大。

其餘較有應變抑制效果的配置為 CASE1、CASE3、CASE5、CASE6，但僅限於 0.25g~0.75g，到 1g~1.25g 時皆會造成應變放大，而 CASE2、CASE4 配置皆為將彈珠放置在上方，下方為中空，使上方重量增加，力矩變大，應變幾乎都放大。

4-3 重力式、懸臂式、扶壁式擋土牆之模型試驗數據比較

模型試驗中以重力式擋、懸臂式及扶壁式擋土牆之各牆身正中間點做比較，整體趨勢下，在 0.25g 到 0.5g 時，懸臂式的應變最小，重力式次之，但是 0.75g 時懸臂式的應變異常增大，可能為共振效果造成，懸臂式在 1g 及 1.25g 時應變皆有降下來，而其他 Case 在 0.75g 時的應變皆為所有模式中最小的；在 0.75g 到 1.25g 時，重力式的應變最小，懸臂式次之，再來是扶壁上，最差是扶壁式壁體中間點，如圖 4-5 所示。

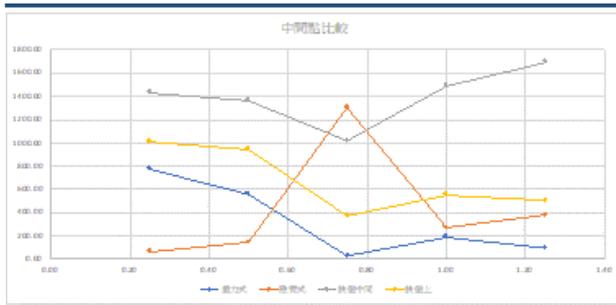


圖 4-5

4-4 重力式、懸臂式與扶壁式惰性減震擋土牆最佳配置之比較

惰性減震擋土牆模型試驗中以重力式中間點、懸臂式中間點在全滿彈珠時的配置、扶壁式中間點在間隔放置彈珠配置下的應變數值以絕對值做比較，可以看到懸臂式及扶壁式擋土牆裝設最佳配置之惰性減震牆時，應變在地震加速度 0.25g~0.5g 時大幅下降，但是在 0.75g~1.25g 時依舊是重力式擋土牆的應變最小，如圖 4-6 所示。

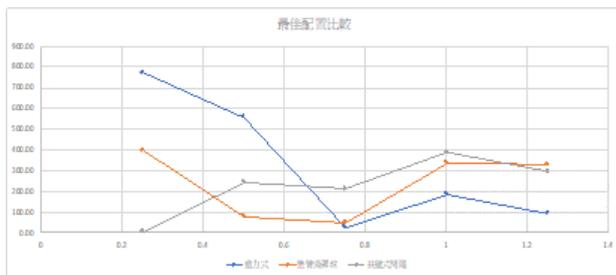


圖 4-6

五、結論與建議

重力式、懸臂式與扶壁式惰性減震擋土牆模型，以不同的減震彈珠配置，經六軸振動台，由 0.25g 加速度到 1.25g 加速度之振動試驗與應變量測，得以下結論

5-1 結論

1. 大部分的 Case 在整體趨勢上，從 0.25g 加速度到 0.75g 加速度時，應變會逐漸降低，且 0.75g 時的應變通常為最低，而在 0.75g 加速度到 1.25g 加速度時，應變會逐漸增大。
2. 懸臂式擋土牆模型的最佳配置為十層全放滿彈珠，此 Case 在 30 個數據中只有 6 個數據為應變放大效果，且其中三個應變放

大效果的數據中也是放大比率最少的。

3. 扶壁式擋土牆模型的最佳配置為間隔放置彈珠(從上往下第 2、4、6、8、10 層放滿 28 顆彈珠)，此 Case 在 55 個數據中只有 4 個數據是應變放大效果，且其中三個應變放大效果的數據中也是放大比率最少的，此外 55 個數據裡有 32 個為應變減小效果最佳的。
4. 重力式擋土牆在加速度 0.25g 及 0.5g 時的應變會大於懸臂式擋土牆無設置惰性擋土牆時的應變，但是從加速度 0.75g 開始，重力式擋土牆的應變皆會小於懸臂式及扶壁式擋土牆；另外發現扶壁上的點位其應變比兩個扶壁之間的壁體的點位之應變還小，但是仍然比懸臂式的應變還大。
5. 以懸臂式最佳配置(十層全滿彈珠)以及扶壁式最佳配置(間隔配置彈珠)與重力式進行比較，在加速度 0.25g 時扶壁式之應變最小，懸臂式次之，加速度 0.5g 時懸臂式之應變最小，扶壁式次之，但從加速度 0.75g 至 1.25g，仍然為重力式之應變最小。

5.2 建議

1. 本研究模型擋土牆無背填土，若模型擋土牆有背填土，其試驗結果會較符合實際擋土牆行為。
2. 惰性減震擋土牆模型中分層擺放彈珠之方法，此研究使用鐵絲網製成之籃子，其尺寸不一，會影響彈珠傾斜、擺動。
3. 模型底部用於鎖定之孔位，應在一開始即考慮對稱，因孔位之附近應變片量測值會有應力集中放大之現象。

參考文獻

1. 廖建閔，「設備運用滑動摩擦增補阻尼器隔震研究」，(2004)。
2. 楊振宗，「方向優化之摩擦單擺隔震器模擬分析與應用」，(2007)。
3. 廖瑞堂，「坡地災害防治對策與案例」，(2008)。
4. 楊佳儒，「樓房採用基礎與層間複合隔震系統之振動抑制」，(2009)。
5. 沈茂松等人，「土木的天工開物二」，

- (2017)。
6. 王皓鈞,「建築結構惰性減震牆之研究」, (2019)。
 7. 顏子原,「應用 ETABS 模擬惰性減震牆系統之研究」, (2019)。
 8. 行政院農業委員會水土保持局,「水土保持技術規範」。
 9. 美國材料和試驗協會 ASTM,「ASTM D-4802-15」。
 10. 美國材料和試驗協會 ASTM,「ASTM C-1349-17」。

高樓軟弱層初探

陳 辰¹ 陳冠雄² 周立勤³

^{1,3} 國立金門大學土木與工程管理系碩士生

² 國立金門大學土木與工程管理系副教授

摘 要

高樓應為使用機能的需求，軟弱層變成不可避免的挑戰。本研究結構模式採用有限元素法，梁柱元素、板殼元素模擬樓板。地震加速度，採用 1999 年地震紀錄。利用歷時反應分析，求得高樓受地震力的層間變位角，藉以探討軟弱層之特性。層間變位角作為一個指標，選擇消能器，藉以降低軟樓層的影響。

關鍵字：軟弱層、歷時反應分析、地震、層間變位角

Pilot Study on Soft-story of High-rise Buildings

Chen Chen¹ Kuan-Hsoun Chen² Li-Chin Chou³

^{1,3} Graduate Student, Department of Civil Engineering and Engineering Management, National Quemoy University

² Corresponding Author, Associate Professor, Department of Civil Engineering and Engineering Management, National Quemoy University

ABSTRACT

A soft-story on the high-rise building becomes a challenge in the structure design. A finite element model is created. These models consist of beam-column elements and shells for slabs. One record of the ground acceleration from the 1999 Chi-Chi earthquake. This pilot study aims to find its feature of a soft-story of the high-rise building on the mid-height. The modal analysis is performed to find the first ten modes. A time history analysis is performed to achieve the drift ratio of the seismic responses. The drift ratio serves as an indicator to find a strategy reduce the impact due to the soft-story.

Keywords: soft-story, time history analysis, earthquakes, drift ratio

1. Motivation

The damage of the first soft-story has been occurred during previous severer earthquakes. However, high-rise buildings may encounter for the mid-high soft story because residents need a public space for their daily usage.

Several questions are needed to answer for the mid-height soft story on the high-rise

buildings.

First, which modes would begin to initiate the soft-story on the high-rise buildings?

Second, how much drift ratio can be produced on the soft-story?

Third, which devices can reduce drift ratios on the soft-story buildings?

This is a motivation of this study.

2. Building Model

In this study, we use a building under construction in Taipei, Taiwan, which was designed by Jin Yirong Architect (2021). However, for pilot study, the sections of beams and columns have been simplified without reducing the section with an increase of the height. In addition, the basements are also not incorporated in the model. Moreover, roof top penthouse is also excluded in the model. Figure 1 illustrates this building, 34.8 m wide, 23.24 m length and 123.2 high.

The structure consists of SRC beams, SRC columns and RC slabs. A FEM model has 1581 beam-column elements and 372 shell elements.

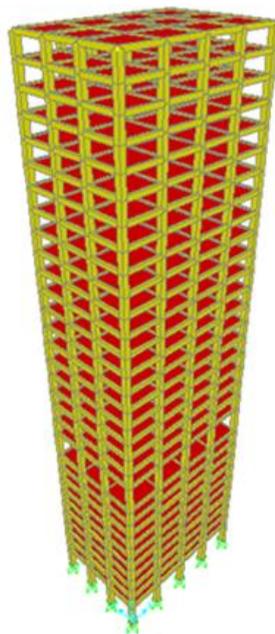


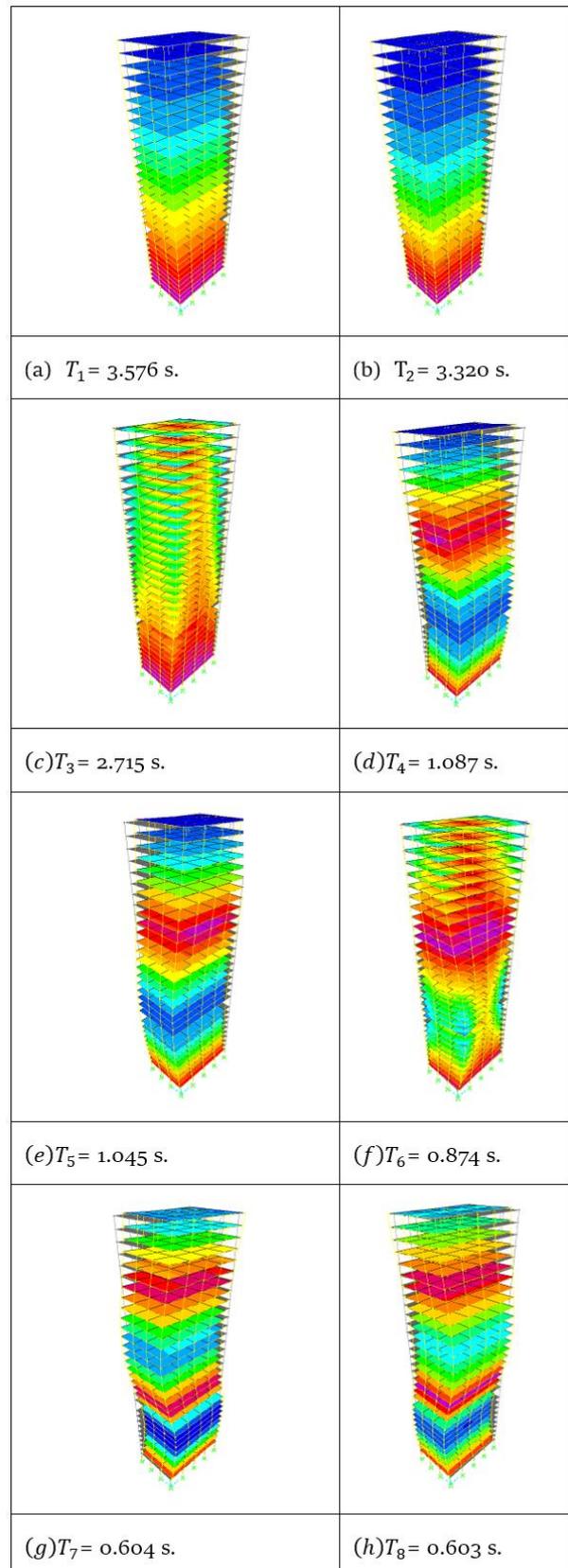
Figure 1. An illustrated building.

3. Modal Analysis

The natural period s of first ten modes range from $T_1=3.576$ s to $(j)T_{10}=0.420$ s as illustrated in Figure 2. The longer periods in the first couple modes mean that wind-control design rather than those of earthquake-control.

The main concern of the mid-height soft-story is not presented on the first ten modes. In other words, the global modes are not

pronounced with the local soft-story vibrational modes.



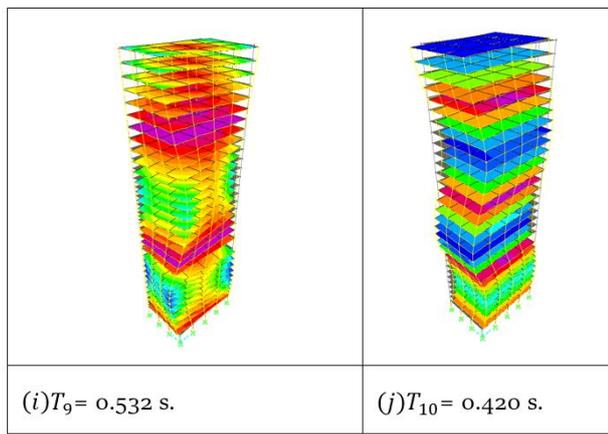


Figure 2. First ten modes.

4. Drift Ratio on Soft-Story

The drift ratios on this building are needed several specified joints on the different floors to achieve as illustrated in Figure 3. The drift ratios consist of the above soft-story, soft-story and the first story. Their displacement in the weak axis (y-axis) can be presented as Figure 4.

The 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan at Station CHYo47 has been scaled to 1g as input ground accelerations.

The displacements of the building in the weak axis (y-axis) are illustrated in Figures 4~7. The general trend may be observed on the basis of these figures. The displacements on the first floor are different from the other floors. However, the other floors except the first floor have mostly identical movements. Moreover, this indicates that the responses on the first floor may be contributed from the higher modes.

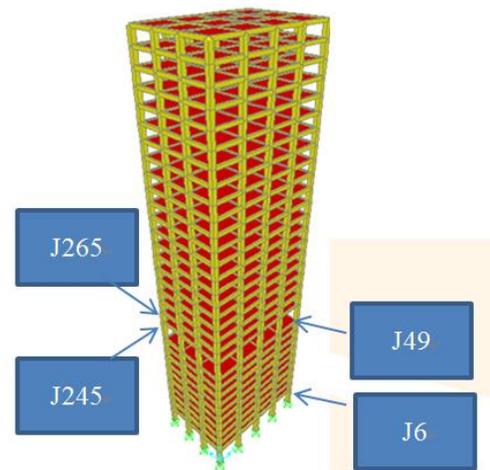


Figure 3. Specified joints on the floors.

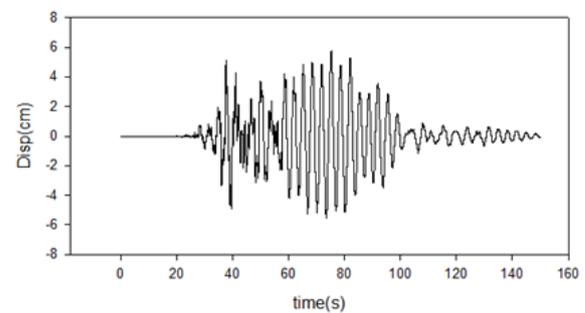


Figure 4. Displacements of Joint 6.

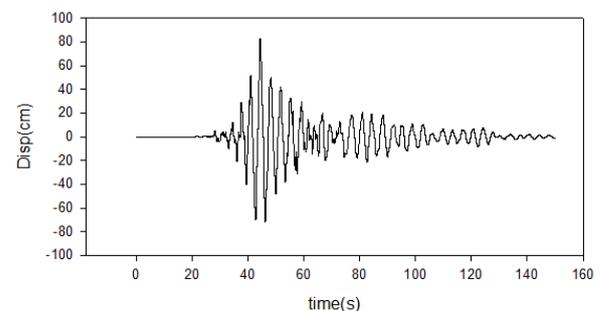


Figure 5. Displacements of Joint 49.

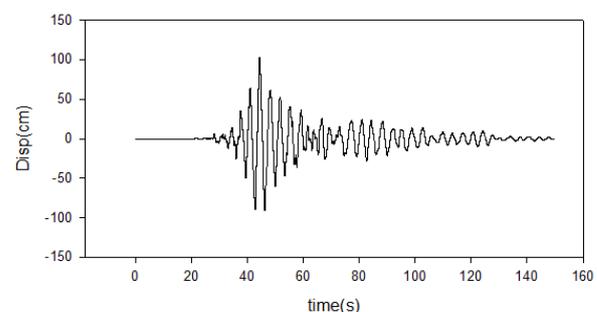


Figure 6. Displacements of Joint 245.

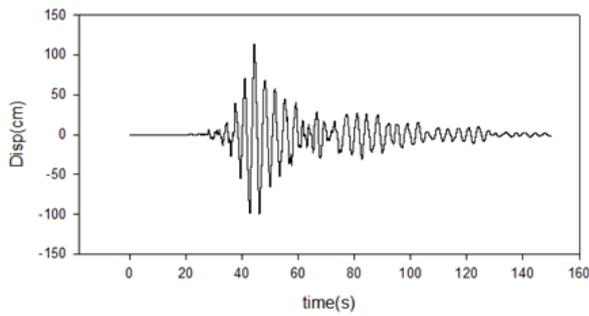


Figure 7. Displacements of Joint 265.

The drift ratios on this building may be compared with the above soft-story, soft-story and the first story as illustrated in Figures 8~9.

The drift ratios have less difference of between the soft-story and above the soft-story as illustrated in Figure 8. However, the drift ratios reveal great varying between the soft-story and the first story as illustrated in Figure 9. Moreover, the higher modes are incorporated in these two floors to make them difference. Generally, the heights of columns are 6 m and 6.8 m for the first floor and the soft-story, respectively. Therefore, the drift ratios on the soft-story are greater than those of the first-story.

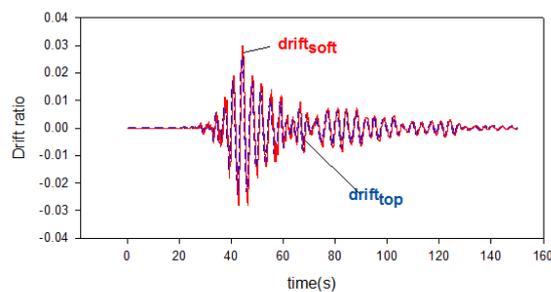


Figure 8. Drift ratios on the soft-story and above the soft-story.

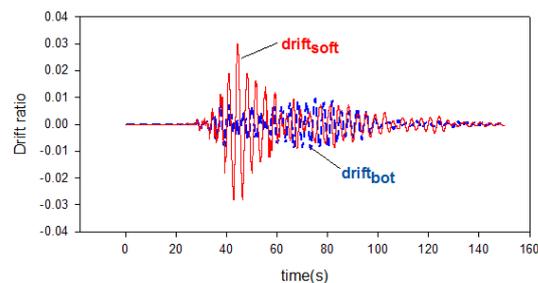


Figure 9. Drift ratios on the soft-story and the first story.

The difference of drift ratios can be further identified their difference on the basis of the soft-story. This can be demonstrated with Figure 10.

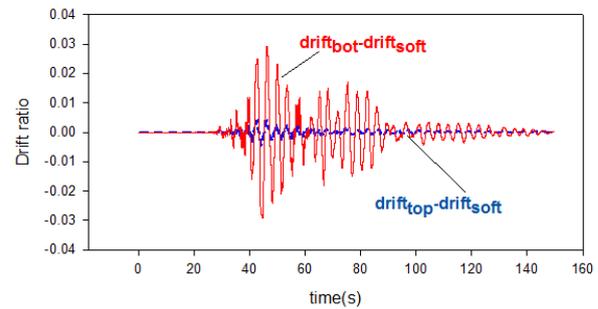


Figure 10. Comparison of drift ratios.

5. Conclusions and Final Remarks

After a pilot study, the conclusions can be addressed as follows:

- ✧ The first ten modes vibrate with global modes; therefore, no local soft-story modes are presented.
- ✧ The wind-control rather than the seismic-control results from the long first natural period.
- ✧ The greater drift ratios of the building are identified on the soft-story.
- ✧ The difference of drift ratios can be further identified their difference on the basis of the soft-story. This can be demonstrated with Figure 10.
- ✧ The future study will focus on the energy dissipaters to reduce the drift ratios on the soft-story.

References

1. Hanheng Wu, et al. (2021), A novel self-centering energy-dissipating wall panel with framed beams as boundaries, *Engineering Structures* 232 (2021) 111864.
2. Fatemeh Aliakbari, et al. (2020), An energy based method for seismic design of frame structures equipped with metallic yielding dampers considering uniform

- inter-story drift concept, Volume 205, 15 February 2020, 110114.
3. Ailin Zhang, et al. (2019), Design and testing of prefabricated steel frame with an innovative re-centering energy dissipative brace, Volume 201, 15 December 2019, 109791.
 4. Shao-Dong Shen, et al. (2019), Development of prefabricated composite energy-dissipating slotted shear wall, Engineering Structures 199 (2019) 109577.
 5. Andrea Beller, et al. (2017), Dissipating and re-centering devices for portal-frame precast structures, Engineering Structures 150 (2017) 736–745.
 6. Vincenzo Gattulli, et al. (2020), Dissipative coupling for the seismic enhancement of adjacent structures, Engineering Structures Volume 199, 15 November 2019, 109520.
 7. Mansour Alturki, et al. (2020), Equivalent viscous damping for a system with energy dissipation via elastic instabilities, Engineering Structures 220 (2020) 110753.
 8. Chun-Lin Wang, et al. (2018), Experimental and numerical studies on hysteretic behavior of all-steel bamboo-shaped energy dissipaters, Engineering Structures 165 (2018) 38–49.
 9. Chun-Lin Wang, et al. (2019), Experimental investigation of a precast concrete connection with all-steel bamboo-shaped energy dissipaters, Engineering Structures 178 (2019) 298–308.
 10. Victor Melatti, et al. (2021), Methodology for the assessment and refinement of friction-based dissipative devices, Engineering Structures 229 (2021) 111666.
 11. S. Dehghani, et al. (2021), Performance evaluation of curved damper truss moment frames designed using equivalent energy design procedure, Engineering Structures 226 (2021) 111363.
 12. Xue-Chun Liu, et al. (2020), Performance of prestressed T-type self-centering energy-dissipation brace, Engineering Structures 223 (2020) 111174.
 13. Tianshu Sun, et al. (2018), Practical displacement-based seismic design approach for PWF structures with supplemental yielding dissipaters, Engineering Structures 172 (2018) 538–553.

低降服鋼板與混凝土複合剪力牆之耐震性能研究

鄭錦銅¹ 黃昇賢² 俞肇球³

¹高雄科技大學營建系教授

²高雄大學土木與環境工程學系研究生

³高雄大學土木與環境工程學系教授

摘要

本文研究的鋼板混凝土複合牆，是由兩片鋼面板內填充混凝土，兩者間以剪力傳遞連接器組合而成，研發早期多用於核電廠及船殼作為抵抗外力及增加勁度使用，近期研究多為應用於超高樓層結構。而超高樓層結構將面臨高軸力作用，其影響不容小覷，而現有規範並無考慮軸力參數之影響，故本研究以軸力為核心，進行複合牆之耐震性能研究。另外，近斷層載重對牆體耐震能力影響也是本研究重點。

本研究於國家地震中心台南實驗室進行四座高寬比皆為 1.0，兩種不同厚度之複合剪力牆試體，試體鋼面板使用低降伏鋼製作，以提高牆體韌性能力，並測試其耐震能力。同時可滿足 BATS 機台使用限制及減少昂貴試體部分成本。研究主要參數為牆體厚度(鋼材比)、軸力比、剪力釘間距(細長比)及模擬近斷層之動態試驗，並探討以上參數對試體之影響。

由試驗結果得知，牆體厚度會影響剪力釘錨定能力，故混凝土的厚度及剪力釘的尺寸需於試驗前設計中多加注意。軸力比會影響剪力峰值後強度衰退程度及韌性消能能力。本次試驗顯示並未發生錨定效果不佳問題，故細長比之設計，已能滿足需求。動態載重會稍微增加試體極限強度，且有較優異的韌性消能能力。

關鍵字：鋼板混凝土複合剪力牆、反覆載重試驗、鋼材比、軸力比、細長比、近斷層、低降伏鋼

Seismic Behavior of Low-yield Steel and Concrete Composite Shear Walls

Cheng Chin-Tung¹ Huang Sheng-Xian² Yu Chau-Cho³

¹ Department of Constructional Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

² Institute of Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Kaohsiung

³ Institute of Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Kaohsiung

ABSTRACT

In this research, steel plate-concrete composite wall is consisted of two steel faceplates with concrete infill, which are connected by shear connector. In the early research and development, it was mostly used in nuclear power plants and ship hulls to resist lateral forces and increase stiffness. Recent research focuses on the application in high-rise buildings. The structures of skyscrapers need to account for the effect of higher axial load, which is not considered in the existing code. Therefore, this paper investigates the effect of the axial force on seismic performance of composite walls. In addition, the effect of near-fault dynamic load is another

investigate parameters.

Four specimens were constructed and tested in NCREE Tainan Laboratory, having the same aspect ratio of 1.0 and two different thicknesses. The steel faceplate of the specimens was made of low-yield steel with high ductility properties. It can lower its shear strength to satisfy the operating limit of BATS and reduce the cost of specimens. The investigate parameters include wall thickness (reinforcement ratio), axial load ratio, shear stud spacing (slenderness ratio) and dynamic effect by simulating near-faults load.

Based on test results, the wall thickness may affect the anchoring ability of the shear studs. Therefore, wall thickness and the size of the shear studs should be carefully designed before tests. The axial load ratio will increase the deterioration of strength after peak and decrease the energy dissipation capacity. In this test, spacing of shear stud is appropriate, so poor anchoring effect due to larger spacing of shear stud is not occur. The dynamic test will increase the ultimate strength of composite walls, resulted in a better energy dissipation capacity of the specimens.

Keywords: steel plate-concrete composite shear wall, in plane cyclic loading, reinforcement ratio, axial load ratio, slenderness ratio, near-fault effect, low-yield steel

一、研究目的

台灣位於環太平洋地震帶上，大小地震出現的頻率是相當的頻繁，故結構物的耐震性能至關重要，像是 1999 年 9 月 21 日的集集大地震就造成 5 萬多棟房屋倒塌及 5 萬多棟房屋嚴重受損。建築結構物應達到《建築物耐震設計規範》中，「小震不壞、中震可修、大震不倒」的基本耐震標準，即設計中小地震需保持於彈性限度內，而大地震可容許有塑性變形，但不得超出容許韌性容量。因此，減震消能系統被常態的使用於結構體上，而為了防止地震力作用時，結構物之層間位移過大，造成結構物之損壞，結構物的勁度也是耐震設計中重要的一部分，而在高樓結構中，能同時滿足這兩需求的減振消能系統者，即為斜撐構架系統及剪力牆系統，而此兩系統能提供優異的勁度與強度，改善純抗彎矩構架(SMRF)勁度不足的問題，且地震力大部分由剪力牆系統承擔，不但能使主構架輕量化，亦能於地震過後更換受損的鋼板即可，再者，鋼板剪力牆可安裝於高樓結構之電梯間減少了空間的使用，故在安全性、經濟性及美觀性上，都有良好的水準。

鋼板剪力牆系統(SPSW)具有良好韌性變形能力，能於遭受地震力時，透過剪力牆的

側向變形發展出一拉力場來抵抗地震力，並藉由鋼板拉力場方向的受拉降伏來消散地震能量，然而垂直於拉力場方向亦同時出現亦壓力場，且地震力為一反覆作用力，拉力場及壓力場方向會隨著地震力反覆而改變，當鋼板處於壓力場時，會迫使鋼板挫屈，降低鋼板的抗震消能能力。

為了改善鋼板受壓挫屈問題，本研究採用鋼板混凝土複合牆系統，鋼板混凝土複合牆為一兩片鋼板夾著混凝土的結構體，鋼板、混凝土間藉由剪力連接器(剪力釘、螺桿)所連接，如圖 1，當複合牆受地震力作用時，受壓方向能藉由混凝土夾層及內支撐，延緩外層鋼板挫屈，進而提升複合牆整體能力，鋼板內層須銲接上一定距離之剪力釘，且錨定於混凝土層內，避免鋼板與混凝土於挫屈時分離。複合牆除了能解決以上問題外，還擁有可縮短工期、施工現場空間及施工人力等優點，如(Fukumoto, 1987)提出，可將複合牆作為模組化元件，於異地進行預鑄、銲接，且複合板鋼板能充當模板，節省工期、施工空間及人力應用。

隨著科技發展，創新材料也日新月異，已有不少工程實例使用高性能鋼材提升結構物的耐震能力，而本研究採用低降伏鋼(LYS100)，為一種降伏強度不高於 130Mpa 之

鋼材，由於其拉伸能力較一般鋼材優異，故常用於製作消能器及制震元件，若能以此取代一般鋼材，即能減少鋼材使用量，減輕全球能源短缺的問題。

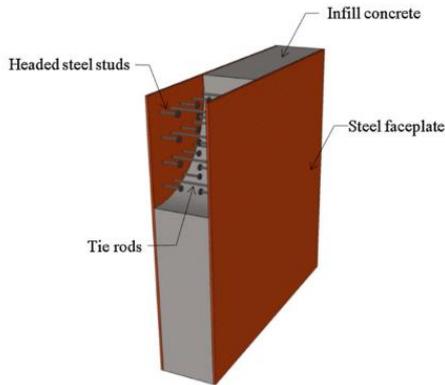


圖 1 鋼板混凝土複合牆示意圖 (Epackachi,2015)

二、研究方法

本試驗計畫於國家地震工程研究中心台南實驗室進行，試驗內容為試體進行模擬近斷層及遠域斷層之反覆側推試驗，以試驗來驗證文獻中的結果及修正文獻中不足的部分。為了讓試體破壞模式呈現剪力控制，試體高寬比設計皆為 1.0，減少高高寬比複合牆容易產生之彎矩破壞。現有核電廠複合牆鋼材比 $2tp/T$ 約為 1.5-5%，其剪力釘採正反面頭對頭對稱配置，若本次試驗也採用頭對頭對稱配置，會由於縮尺後的混凝土厚度，導致剪力釘錨定深度不足，故本次試驗剪力釘採正反面交錯配置，鋼材比則會落在 3.0-10% 之間。試驗採用 8 mm 低降伏鋼板，牆體總厚度為 116 mm 及 166 mm，其鋼材比分別為 13.8% 及 9.6%。細長比由 (K. Zhang et al., 2014) 提出之 $s/tp \times \sqrt{(F_y/E)} \leq 1.0$ 進行設計，經考量材料應變固化及施加軸力，改為 $s/tp \times \sqrt{(F_u/E)} \leq 0.8$ 進行設計。以此找出之剪力釘間距設計試體設計圖如圖 2，試體牆面剪力釘與螺桿立面配置圖如圖 3，剪力釘平面圖如圖 4。

軸力比為試體承受極限軸力 P_u 及實際承受軸力 P 之比值， P_u 採斷面強度進算如式 (1)

$$\text{軸力比} = \frac{P}{P_u} = \frac{P}{0.85f'_c A_c + F_y A_s + F_{yb} A_{sb}} \quad (1)$$

試驗參數如表 1，表中試體編號中，第一個編號皆為 L，為鋼面板使用低降伏鋼材，研究使用韌性較高鋼材之耐震性能，第二個編號 N，為混凝土厚度 100mm 及編號 B，混凝土厚度 150mm，研究混凝土厚度對複合牆體強度及錨定能力之影響，第三個編號 A，為試體承受 30% 極限軸力及編號 H，試體承受 50% 極限軸力，研究承受高軸力時對複合牆挫屈行為及強度之影響，第四個數字編號 20 及 EQ，分別代表採用靜態及動態歷時，靜態歷時之代號 20，為剪力釘間距。本次試驗側推歷時共分為兩類，一類為模擬遠域斷層之靜態載重側推歷時，如圖 5，及模擬近斷層之動態載重側推歷時，如圖 6。試驗若由於牆體及頂底板間局部銲道撕裂或牆體挫屈導致強度下降至極限強度 85% 者或試體由於挫屈導致機台抬升軸向允位移用盡者，試驗終止。

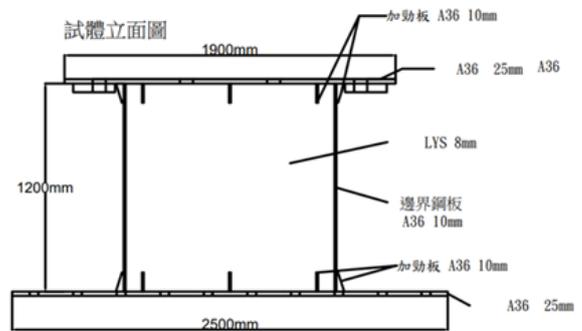


圖 2 試體設計圖

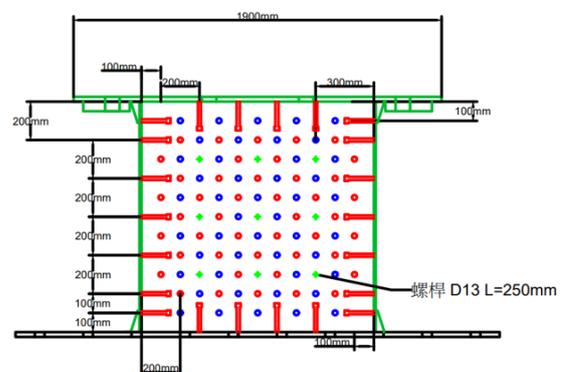


圖 3 剪力釘與螺桿立面配置

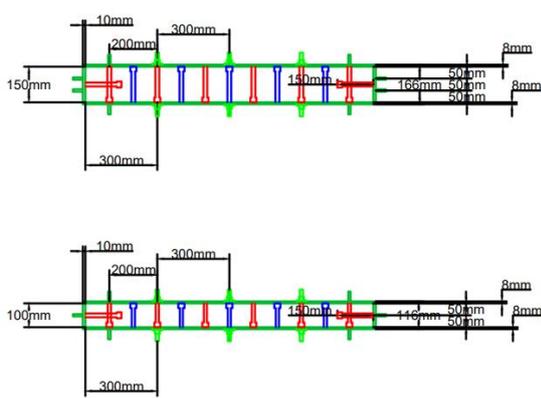


圖 4 剪力釘平面圖

表 1 試驗數據

試體編號	加载速率 (rad/sec)	軸力比 P/Pu	總厚度 T(cm)	鋼板厚 t_p (cm)	鋼材比 $2t_p/T(\%)$	螺桿間距 s(cm)	配置細長比 s/tp	需求細長比
LNA-20	0.003	0.3	11.6	0.8	13.8	20	25	25.3
LNA-EQ	0.3	0.3	11.6	0.8	13.8	20	25	25.3
LBH-20	0.003	0.5	16.6	0.8	9.6	20	25	25.3
LBH-EQ	0.3	0.5	16.6	0.8	9.6	20	25	25.3

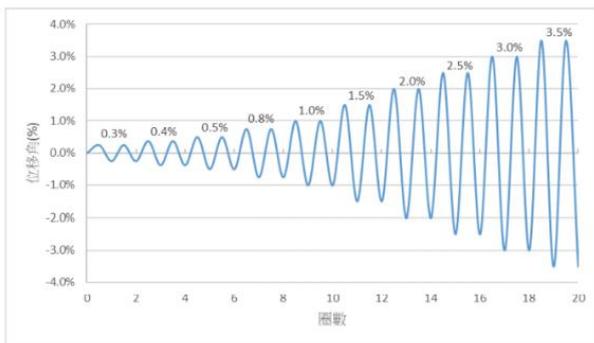


圖 5 靜態側推歷時

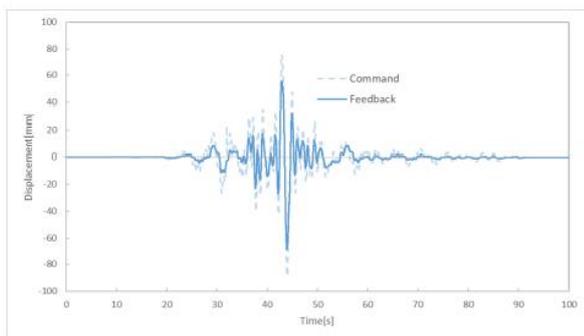


圖 6 動態側推歷時

三、試驗結果

試體遲滯迴圈圖如圖 7 至圖 10，按順序分別為 LNA-20、LNA-EQ、LBH-20、LBH-EQ，第一組試體 LNA-20 承受 30%極限軸力，在

側推位移 1.4%時強度達到峰值，在強度達峰值後，隨側推位移增加，試驗強度下降至峰值強度 85%時終止。第二組試體 LNA-EQ 亦承受 30%極限軸力，強度在 EQ1 迴圈中側推位移達 2.5%時達到峰值，並隨位移增加強度緩慢下降，於 EQ2 迴圈，試驗強度下降至峰值強度 85%後，機台千斤頂軸向允許壓位移用盡，軸力無法維持穩定時終止。破壞模式與 LNA-20 相同，為鋼面板挫屈及邊界板上下端挫屈延伸，導致鋼面板下方大面積挫屈。

第三組試體 LBH-20 承受 50%極限軸力，在側推位移 1.3%時強度達到峰值並隨位移增加強度緩慢下降，直到機台千斤頂軸向允許壓位移用盡時終止。第四組試體 LBH-EQ 亦承受 50%極限軸力，強度在 EQ1 迴圈中側推位移達 2.5%時達到峰值，並隨位移增加強度緩慢下降，於 EQ3 迴圈，試驗強度下降至 85%後試驗終止。破壞模式與 LBH-20 相同，為鋼面板 x 形對角大面積挫屈及邊界板上下端挫屈延伸。

表 2 列出四座試體最終結果之數據，其中試體初始勁度以 0.1%位移量與側推力進行計算，而極限位移為正負向強度下降至極限強度 85%之位移量，延展性則是極限位移除上降伏強度之百分比。

由表中發現混凝土的厚度高低會影響試體之極限強度及初始勁度，像是 LBH-20 極限強度及初始勁度皆大於 LNA-20，而軸力的高低，則會影響試體橫向變形的消能能力，能從表中觀察 LBH-20 試體比 LNA-20 試體極限強度多 75.4 ton 極限位移卻少 0.049%，LBH-EQ 試體極限強度多 63.0 ton 極限位移卻少 0.321%。

LNA 的兩試體，破壞模式皆為鋼面板下方大面積挫屈及邊界板下端挫屈延伸導致強度快速下降，且挫屈位置落在底板與第一排剪力釘之間，表示 10 cm 混凝土厚度會使剪力釘錨定效果不佳，使得鋼板承受軸力時較容易挫屈變形，無法發揮完整的剪力牆功效。

而比較動態與靜態試驗差距，發現動態試驗極限強度都比靜態試驗大，像是試體 LNA-EQ 比 LNA-20 極限強度多 41.3 ton，極

限位移多 1.826%，試體 LBH-EQ 比 LBH-20 極限強度多 28.9 ton，極限位移多 1.554%，表示在強度與位移接近的狀態下，可以推測動態試驗下的韌性消能能力表現會比靜態試驗來的好。

LNA-20 試體為混凝土厚度 10 cm 承受 30%極限軸力之試體並進行靜態載重側推歷時。當測推位移達 1.5%時，鋼面板出現明顯石膏漆剝落現象，位置出現在側邊上下角落加勁板附近及鋼面板四個角落，直到 3.0%時，鋼面板角落區、邊界板及鋼板下方皆有部分挫屈現象，側推位移達 3.5%時，鋼板下方出現大面積挫屈，強度無法再提升且下降超過 15%極限強度，故試驗中止，試體最終破壞模式如圖 11。

LBH-20 試體為混凝土厚度 15 cm 承受 50%極限軸力之試體並進行靜態載重側推歷時。當測推位移達 1.5%時，邊界板出現石膏漆剝落現象，側推位移達 2.5%時鋼面板及加勁板周圍皆出現石膏漆剝落現象，且邊界板上方加勁板下端出現部分挫屈現象，側推位移達 3.0%時，鋼面板出現部分挫屈現象，直到 3.5%，鋼面板呈現 X 形對角大面積挫屈，且機台千斤頂軸向允許壓位移用盡，故 3.5% 只進行一次反覆側推即試驗終止，試體最終破壞模式如圖 12。

LNA-EQ 試體為混凝土厚度 10 cm 承受 30%極限軸力之試體並進行動態載重側推歷時。當進行第一次地震歷時(EQ1)時，鋼面板下方石膏漆明顯剝落，且出現大面積挫屈，邊界板之加勁板上下端鋼板，也出現挫屈現象，而試驗結束時，強度未下降超過 15%極限強度，故再進行一次相同動態載重側推歷時。進行第二次地震歷時(EQ2)時，兩側邊界板上方加勁板銲道熱影響區開裂，裂縫由邊界板一路延伸至鋼面板上方第一個加勁板處，鋼面板下方挫屈更加嚴重，也導致邊界板下方加勁板上端挫屈，試驗結束時，強度下降超過 15%極限強度，故試驗中止，試體最終破壞模式如圖 13。

LBH-EQ 試體為混凝土厚度 15 cm 承受 50%極限軸力之試體並進行動態載重側推歷

時，當進行第一次地震歷時(EQ1)時，鋼面板及邊界板上下端石膏漆剝落，無明顯破壞，故進行第二次相同動態載重側推歷時。進行第二次地震歷時(EQ2)時，鋼面板呈現 X 形對角大面積挫屈，鋼面板上下方都有部分挫屈跡象，邊界板加勁板上下端亦有部分挫屈現象，而試驗結束時，強度未下降超過 15%極限強度，故再進行第三次動態載重側推歷時。進行第三次地震歷時(EQ3)時，鋼面板呈現更明顯 X 形對角大面積挫屈，鋼面板上下方大面積挫屈，邊界板挫屈也較第二次時嚴重，試驗結束時，強度下降超過 15%極限強度，故試驗終止，試體最終破壞模式如圖 14。

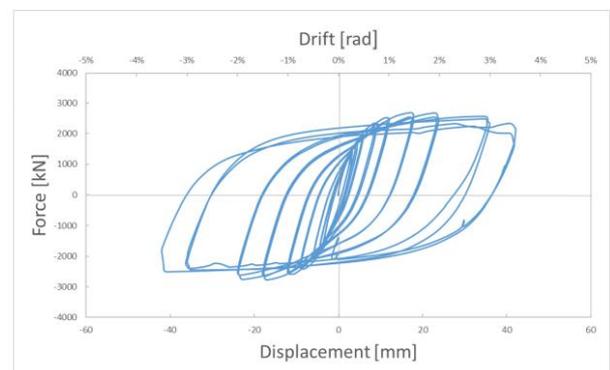


圖 7 LNA-20 遲滯迴圈圖

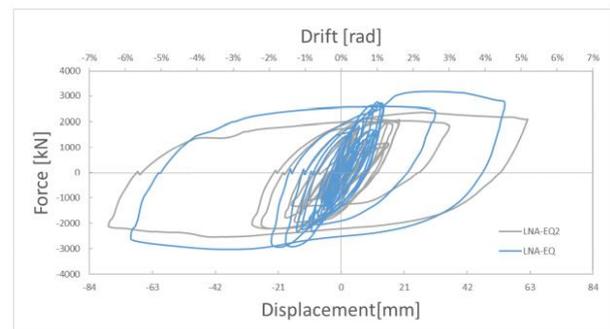


圖 8 LNA-EQ 遲滯迴圈圖

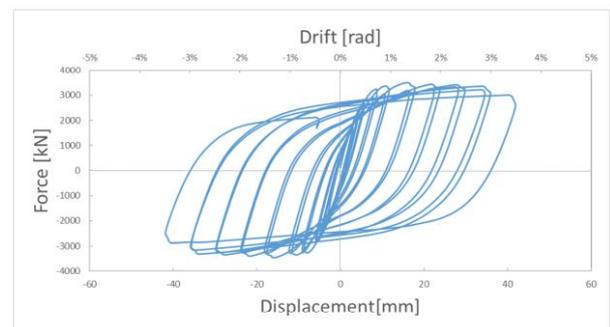


圖 9 LBH-20 遲滯迴圈圖

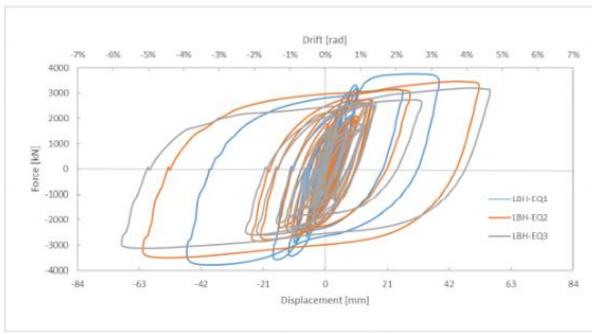


圖 10 LBH-EQ 遲滯迴圈圖



圖 13 LNA-EQ 底部大面積挫屈

表 2 試驗結果

試體編號	初始勁度 (kN/mm)	降伏強度		極限強度		極限位移		延展性
		Force (kN)	Δ_y (%)	Force (kN)	Δ_{max} (%)	Δ_u (%)	Δ_u/Δ_y (%)	
LNA-20	465	+1154.4/ -1272.1	+0.191/ -0.173	+2683/ -2764	+1.430/ -1.402	+3.505/ -3.204	18.35/ 18.52	
LNA-EQ	554	+1261.1/ -1270.8	+0.225/ -0.255	+3170/ -3028	+2.541/ -3.011	+4.607/ -5.331	20.48/ 20.91	
LBH-20	574	+1591.4/ -1674.4	+0.209/ -0.160	+3504/ -3472	+1.317/ -1.317	+3.264/ -3.456	15.62/ 21.60	
LBH-EQ	730	+1438.8/ -1498.3	+0.172/ -0.204	+3759/ -3788	+2.503/ -3.252	+4.246/ -5.010	24.69/ 24.56	



圖 11 LNA-20 底部大面積挫屈



圖 12 LBH-20 鋼面板 X 形大面積挫屈



圖 14 LBH-EQ 鋼面板 X 形大面積挫屈

四、結論

本研究透過反覆載重試驗模擬鋼板與混凝土複合牆之耐震性能，總共製作四座試體，探討試體其鋼材比、軸力比及靜動態試驗程序，綜合試驗結果分析與理論分析，得以下結論及建議：

1. 試體於不同混凝土厚度狀態下，發現混凝土厚度會影響試體的極限強度，故混凝土厚度與極限強度成正比關係，且混凝土厚度不足，會導致剪力釘錨定效果不佳，影響剪力牆的完整韌性消能能力。
2. 施加軸力的大小，會影響試體剪力強度峰值後的衰退速度，進而影響了橫向變形的消散能力。且軸力施加還需注意，試體厚度造成的剪力釘錨定能力，若錨定能力不足，可能會使牆體提早挫屈，影響試驗結果。
3. 相同混凝土厚度及相同軸力條件下，比較靜動態試體之行為模式，發現兩動態試體之極限強度及極限位移皆比靜態試體高，可見得在近似位移的反覆載重下，動態試

驗韌性消能的能力比靜態試驗優異。

4. 剪力釘間距經過去年計畫改良，本次試驗已無因剪力釘間距不足所造成鋼面板的嚴重挫屈現象，故此細長比設計能滿足此試體強度與韌性需求。

參考文獻

1. 高翊書，「受軸力影響之鋼板混凝土複合牆耐震行為分析研究」，台灣大學土木系碩士論文，2019。
2. 張詠欽，「低降伏鋼板與混凝土複合剪力牆耐震性能研究」，高雄大學土環系碩士論文，2020。
3. 陳泊文，「鋼板與混凝土複合剪力牆系統耐震性能研究」，高雄科技大學營建工程系碩士論文，2018。
4. 陳柏安，「低矮型鋼板混凝土複合牆之耐震性能試驗與分析」，台灣大學土木系碩士論文，2015。
5. 曾皓鼎，「鋼板混凝土複合剪力牆之耐震性能研究」，交通大學土木工程學系碩士論文，2014。
6. 鄭錦銅、林衍宏、盧煉元，「圓形鋼管混凝土樑柱接頭之剪力傳遞行為」，國家地震工程研究中心研究報告，NCREE 01-018，2001。
7. Amit H. Varma, Kai Zhang, Hoseok Chi, Peter Booth, Tod Baker. "In-Plane Shear Behavior of SC Composite Walls: Theory vs. Experiment." Transaction, SMiRT 21,6-11 November, New Delhi, India,2011.
8. Lanning, J. Benzoni, G. and Uang, C.-M. "Using buckling-restrained braces on long-span bridges. II: Feasibility and development of a near-fault loading protocol," Journal of Bridge Engineering, 21(5), 04016002,2016.
9. Zhang, K. Varma, A.H. Malushte, S.R. and Gallocher, S. "Effect of shear connectors on local buckling and composite action in steel concrete composite walls," Nuclear Engineering and Design, 269, pp. 231-239,2014.
10. Fukumoto, T. Kato, B. and Sato, K. "Concrete filled steel bearing wall," IABSE Symposium, 1987
11. Epackachi, S. A. Whittaker, S. and Huang, Y.-N. "Analytical modeling of rectangular SC wall panels,"Journal of Constructional Steel Research, pp.49-59, 2015b.
12. Ozaki, M. Akita, S. Osuga, H. Nakayama, T. and Adachi, N. "Study on steel plate reinforced concrete panels subjected to cyclic in-plane shear," Nuclear Engineering and Design, 228, pp. 225-244,2004.

運用 AHP 於高雄市區道路修復後發生損壞之風險評估

林宗曾¹ 李政隆²

¹ 國立高雄科技大學土木工程系教授

² 國立高雄科技大學土木工程與防災科技在職碩士班研究生

摘要

台灣道路多屬於高度使用情形，載重車輛反覆輾壓更加速道路鋪面之破壞，近年來受到氣候變遷及全球暖化之影響，高強度降雨經常發生，以致每逢大雨道路均出現許多坑洞，除影響用路人生命財產安全，甚而牽涉國賠事件之責任歸屬。本研究以高雄市三民區及鼓山區市區道路為研究主體，以轄內所發生道路修復後再發生破壞之案例，透過專家及資深從業人員意見回饋，分析道路發生二次損壞原因，運用層級分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)作風險權重計算，將問卷資料輸入 EXCEL 得知風險係數以環境構面中「駕駛行為或重載車輛頻繁造成」項目之最高(52.26%)；其次為施工構面中「施工時修補過程未確實」項目之風險係數(17.91%)；再者為環境構面中「施工時天候狀況不佳」項目之風險係數(10.44%)。藉此深入研究探討運用過往經驗，有助於使道路養護及管理能事先預防或排除修補過的道路損壞因素，以提高養護效能，降低不必要預算支出。

關鍵字：市區道路養護、層級分析法、風險評估。

An Application of AHP to Risk Assessment of the Damages Caused after Urban Road Maintenance and Rehabilitation in Kaohsiung City

Lin Tzong-Tzeng¹ Lee Jheng-Long²

¹ National Kaohsiung University of Science and Technology of Science and Technology

² National Kaohsiung University of Science and Technology of Science and Technology

ABSTRACT

For the roads in Taiwan mostly are used in high frequency, the repeated rolling of loading vehicles causes the deterioration of roadway pavement. Besides, due to the climate change and global warming, torrential rain happens more frequently and cause the potholes on pavements. It not only threatens the security of people but is also involved with the liability of state compensation. This research gathers the cases of the damages caused after urban road maintenance and rehabilitation in Sanmin District and Gushan District, Kaohsiung City. With the opinions and feedbacks from experts and senior practitioners, the reasons of second damages of pavements are analyzed. Analytic Hierarchy Process (AHP) is conducted to calculate the risk weight. By entering the questionnaire data in EXCEL, we get the results that the highest risk weight is “driving behaviors and heavy-loading vehicles (52.26%)” in environmental facet, the second highest factor is “the inaccuracy of rehabilitation in construction (17.91%)” in constructive facet, and the following one is the “the foul weather when constructing (10.44%)” in environmental facet. With the results, it can help the maintainer or managers of roadway

pavements to prevent or exclude the factors of damages caused after maintenance and rehabilitation, to improve the efficiency of maintenance and rehabilitation, and to cut down the unnecessary budgets.

Keywords: urban road maintenance and rehabilitation, Analytic Hierarchy Process (AHP), risk assessment

一、研究目的

食衣住行是國民生活中的四大要素，行的部分不外乎為每個國民每日都會使用的道路，稱道路為國家交通建設的基石亦不誇大，由於生活水準日益提升，對交通的品質要求也越來越高，政府為滿足市民行的需求，對市區道路養護作業的品質也越加重要。發生於 107 年颱風季的連日豪雨，使南部地區受豪大雨侵襲，高雄的市區道路受到強烈重創；爰此，市區道路之例行性養護成效不僅關係到用路安全，亦關係到道路養護主辦單位檢討國賠責任等問題，故提升道路品質及延長道路壽命，避免引發國賠事件為道路主管機關之重要工作及課題，期得知影響道路二次損壞因素之關鍵，以降低市區道路修復後再發生損壞之事件發生率，以達減災之成效。

二、文獻回顧

2-1 市區道路修復後損壞因素評估系統的建置

台灣屬於海島型氣候，四面環海，所以一年四季有雨且全球暖化，劇烈天氣發展導致極端氣候發生，道路經久旱又面臨暴雨同時身處工業城市的高雄，龐大超載車流的反覆載重，造成路面形成各種破壞且迅速增加。實務上應就施工、管理、環境等因素納入因素管理分析，建立一量化分析決策的因素評估系統，期望能使道路養護管理人員做為參考依據。俾利後續作為損壞因素管理參酌考量，運用取得最佳資料及有助於決策者作為優先排序決擇考量。

2-2 使用層級分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP)

最早是由美國匹茲堡大學教授 Thomas, L.Saaty，於 1971 年替美國國防部從事應變計

劃問題的研究中所提出，研擬出層級分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP)，其可應用在具有多個評估準則難以評斷及不確定性情況下決策時分析用(林原宏, 1995)。層級分析法(AHP)廣泛被實務應用，可提供決策者作方案評估之有效分析法，成功被運用在政治分析、投資組合的應用、推廣運用在大規模系統(Large-Scale Systems)設計及處理風險與不確定性之問題(褚志鵬, 2009)利用層級結構處理複雜的問題時，先界定問題再建構層級結構，從高層級往低層級逐步分解，彙整有關決策人員及專家意見經量化有效的兩兩成對比較，以名目尺度數值(Nominal Scale)作各準則間相對應重要程度的評選，再作一致性檢定來檢定整個層級結構的一致性，來求取綜合評點優勢程度比重，可協助決策者對事物瞭解，減少決策下錯的風險性(Saaty, T.L. 1980)。

Saaty 提出，藉由層級分析法(AHP)特性能解決的決策為下列問題：

1. 規劃(Planning)
2. 決定優先順序 (Setting Priorities)
3. 替代方案的產生 (Generating a Set of Alternatives)
4. 選擇最佳方案 (Choosing a Best Alternatives)
5. 系統設計 (Designing System)
6. 決定需求 (Determining Requirements)
7. 資源的分配 (Allocating Resources)
8. 風險評估 (Risk Assessment)
9. 系統穩定確保 (Insuring the Stability of a System)
10. 衝突的解決 (Resolving Conflict)
11. 最適化 (Optimization)
12. 績效評量 (Measuring Performance)

2-3 層級分析法(AHP)評估尺度

層級分析法(AHP)的評估,基本上是由每個層級的上一層要因準則影響因子,作為對下一層評估影響因子的依據,倘同一層級內,各要因準則因子間即以兩兩比較,換言之,即是以成對比較的方式來評量要因準則因子之間的相對應重要性。依據 Saaty 建議成對比較是取九個評分尺度;評分尺度設計為絕對重要、極為重要、頗為重要、稍微重要及同等重要,其餘之評分尺度則於這五個尺度間。尺度的律定可視實際狀況調整,上限為九個尺度,以免混淆判斷者造成無效問卷。

層級分析法(AHP)的評估以成對比較的方式來評量要因準則因子間的相對重要性,尺規從 1 至 9 的權衡值,數字愈大代表其重要性愈高,其詳細評估尺度及說明(表 1):

表 1

評估尺度	定義	說明
1 或(1:1)	同等重要	兩因素的貢獻程度具同等重要性。(等強)
3 或(3:1)	稍微重要	經驗與判斷稍微傾向喜好某一因素。(稍強)
5 或(5:1)	頗為重要	經驗與判斷強烈傾向喜好某一要素。(頗強)
7 或(7:1)	極為重要	實際顯示非常傾向喜好某一要素。(極強)
9 或(9:1)	絕對重要	具足夠證據絕對肯定喜好某一因素。(絕強)
2, 4, 6, 8	相鄰尺度之 中間值	需要折衷權衡時。

三、市區道路修補後損壞案例分析與改善對策

3-1 引言

發生於 107 年颱風季的連日豪雨,使南部地區受豪大雨侵襲,高雄的市區道路受到強烈重創,出現大量損壞及坑洞,使市民及用路人怨聲載道,連日下雨後的高雄道路已是千瘡百孔,新聞上稱的五千個坑洞亦是自那時而起,修復後仍不敵強降雨及車載,造成不少二次損壞。有鑒於此,深入研究探討運用過往的施工及管理經驗,透過事前防範,有助於降低不良施工及發現損壞因素,有助於養護單位提前擬定預防措施或研議改善方式,以達提升市區道路養護品質及維護用路安全。

高雄市市區道路修補養護時有修補完成

又造成損壞情事,本研究藉實際修補後損壞之案例探討發生破壞之可能要因,除考量天候環境、道路使用特性等,實務上工程施工中因人的因素、不良習性、施工環境因素影響施工品質的關鍵將為本研究所探討分析之「影響施工品質因素評估」重點。

3-2 事件案例一

民國 109 年 3 月 17 日,三民區民族一路與十全路口(十全治洪池旁)慢車道近機車停等區位置辦理小面積道路刨鋪修補作業,以刨除路面約 5cm,鋪築路面 5cm 方式,並採標準程序噴灑黏油及機械滾壓方式辦理路面修補,民國 109 年 10 月 24 日接獲民眾反映該修補路面有不平整情事(損壞確切時間無法確定,依民眾通報時間點),經派員現場勘查路面情況,離停等區較近且於輪跡處路面有發生推擠皺褶疑似波浪情事,並非坑洞、老化、龜裂等(圖 1)。



圖 1

3-2-1 事件災害原因探討

- (一) 直接原因：重車行駛及駕駛行為(緊急煞車)導致路面推擠損壞。
- (二) 間接原因：
 1. 路面鋪築完成後養護時間不足。
 2. 新鋪 AC 與刨除面結合力不足。
 3. 黏層材料異常、用量不足。
 4. 刨除面不夠乾淨、粗糙度不夠等。
 5. 施工人員未依規定及施工步驟確實執行。
 6. 監造人員未對施工人員確實督促及抽查。
 7. 主辦單位工地督導頻率不足。

8. 施工及監造人員對於專業知識及施工觀念不佳。

3-2-2 事件檢討及改善對策

(一) 路面刨除後應確實清掃路面，避免過多刨除料殘留影響新舊鋪面結合(圖 2)。



圖 2

(二) 黏層應噴灑均勻避免漏噴或局部過量(圖 3)。



圖 3

- (三) 鋪築後路面應確實滾壓且不得任意撒水降溫。
- (四) 監造單位應於現場確實監造，並於路面壓實完成後要求確實養護 6 小時或路面溫度低於 50 度使得開放通車。
- (五) 工程主辦單位應增加工地督導頻率。

3-3 事件案例二

民國 109 年 3 月 17 日，三民區民族一路南下車道(近十全路口)快車道公車停等區位置辦理小面積道路刨鋪修補作業，以刨除路面約 5cm，鋪築路面 5cm 方式，並採標準程序噴灑黏油及機械滾壓方式辦理路面修補，民國 109 年 10 月 13 日接獲民眾反映該修補路面有不平整情事(損壞確切時間無法確定，依民眾通報時間點)，經派員現場勘查路面情況，公車亭上下車位置路面有發生車轍情事(圖 4)。



圖 4

3-3-1 事件災害原因探討

- (一) 直接原因：公車停等區較接近路口且公車載重較大，頻繁煞停造成路面車轍。
- (二) 間接原因：
1. 路面鋪築完成後養護時間不足。
 2. 黏層材料異常、用量不足。
 3. 施工人員未依規定及施工步驟確實執行。
 4. 施工及監造人員對於專業知識及施工觀念不佳。

3-3-2 事件檢討及改善對策

- (一) 監造單位應於現場確實監造並於路面壓實完成後要求確實養護 6 小時或路面溫度低於 50 度使得開放通車。
- (二) 層應噴灑均勻避免漏噴或局部過量。
- (三) 鋪築後路面應確實滾壓且不得任意撒水降溫。
- (四) 刨除面不夠乾淨、粗糙度不夠等。
- (五) 基底目視無異狀，可考慮調整 AC 粒徑料配比增加承载力(圖 5)。



圖 5

四、研究結果與討論

本章節依據市區道路養護相關單位任職設計規劃、監造、施工現場管理、主辦單位人員領域經驗豐富專家，針對市區道路修復後

再發生損壞因素評估分析，透過領域專家給予意見進行研討，經實際案例研究層級分析法評估各項損壞因素之影響，降低修補後再發生損壞頻率，提升道路品質及使用壽命。

4-1 AHP 相關風險指標分析

(一) 建構層級分析架構，本研究共分三層：

1. 第一層為目標層
2. 第二層為主要因素層
3. 第三層為評估之危害子因素層

(二) 目標層：避免市區道路修復後造成二次損壞損壞因素。

(三) 主要因素層分三構面：

1. 構面一：B1.施工構面
2. 構面二：B2.環境構面
3. 構面三：B3.管理構面

(四) 評估之危害子因素層

1. B1.工作者構面：
 - (1) C11.施工時修補過程未確實
 - (2) C12.施工完成面未確實養護
 - (3) C13.現場施工人員專業知識不足及學習意願低
2. B2.環境構面：
 - (1) C21.施工時天候狀況不佳
 - (2) C22.道路車流量大
 - (3) C23.駕駛行為或重載車輛頻繁造成
3. B3.管理者構面：
 - (1) C31.監工或主辦人員法規不熟及職能不足
 - (2) C32.監工或主辦人員督導頻率過低
 - (3) C33.施工預算編列不足

4-2 AHP 評價判斷矩陣表

經過彙整各專家及資深從業人員所訪談的問卷彙整後，將其結果統合分析以評估尺度語意，建構出成對比較矩陣 A，藉此分析其特徵值及計算特徵向量，經鍵入 EXCEL 軟體計算經一致性檢定及各個層級結構一致性檢定所得出數值的回饋修正後，便可計算出各要因準則之權重，以提供未來決策方案參酌(表 2)。

表 2

表 AHP-高雄市市區道路修復後再破壞之損壞因素評估構面成對比較矩陣 A

矩陣 A	B1	B2	B3
B1.施工構面	1	2/7	6/9
B2.環境構面	3 1/2	1	8
B3.管理構面	1/6	1/8	1
CI 值：0.0548 ≤ 0.1 檢定 ok ; CR 值：0.0944 ≤ 0.1 檢定 ok			

表 AHP(施工構面影響因素準則評比)成對比較矩陣

B1.施工構面	C11	C12	C13
C11.施工時修補過程未確實	1	3	7
C12.施工完成面未確實養護	1/3	1	2
C13.現場施工人員專業知識不足及學習意願低	1/7	1/2	1
CI 值：0.0504 ≤ 0.1 檢定 ok ; CR 值：0.0869 ≤ 0.1 檢定 ok			

表 AHP(環境影響因素準則評比)成對比較矩陣

B2.環境構面	C21	C22	C23
C21.施工時天候狀況不佳	1	6	6
C22.道路車流量大	1/6	1	1/2
C23.駕駛行為或重載車輛頻繁造成	1/6	2	1
CI 值：0.0475 ≤ 0.1 檢定 ok ; CR 值：0.0819 ≤ 0.1 檢定 ok			

表 AHP(管理影響因素準則評比)成對比較矩陣

B3.管理構面	C31	C32	C33
C31.監工或主辦人員法規不熟及職能不足	1	8	1
C32.監工或主辦人員督導頻率過低	1/8	1	1/5
C33.施工預算編列不足	1	5	1
CI 值：0.0492 ≤ 0.1 檢定 ok ; CR 值：0.0849 ≤ 0.1 檢定 ok			

4-3 AHP 計算相對風險要因準則分析百分比統計分析

經過層級分析法(AHP)分析，經由專家的判斷，若每一成對比較矩陣均符合判斷一致性要求時，以一致性指標 C.I.及一致性比率 C.R.為基準。當 C.I.=0 時表示評估者前後判斷完全具有一致性，而 C.I.<0.1 時表示為最佳可接受之誤差，若 C.R.<0.1 時，則認為矩陣的一致性程度令人滿意，本研究得 C.I.<0.1 與 C.R.<0.1，依分析結果歸納前三大風險為 C23. 駕駛行為或重載車輛頻繁造成>C21. 施工時天候狀況不佳>C22 道路車流量大等三項相對損壞因素(表 3)(圖 6)，即是造成道路修復後二次損壞的關鍵因素，換言之就是道路養護單位要特別需要重點管理要項。

表 3

項目	B1.工作者	B2.環境	B3.管理者	V	RRI = M * V	RRI*100(%)
C11	0.673			0.266	0.17907	17.91
C12	0.264			0.674	0.07023	7.02
C13	0.063			0.06	0.01685	1.69
C21		0.155			0.10443	10.44
C22		0.069			0.04671	4.67
C23		0.776			0.52255	52.26
C31			0.238		0.01432	1.43
C32			0.696		0.04187	4.19
C33			0.065		0.00393	0.39

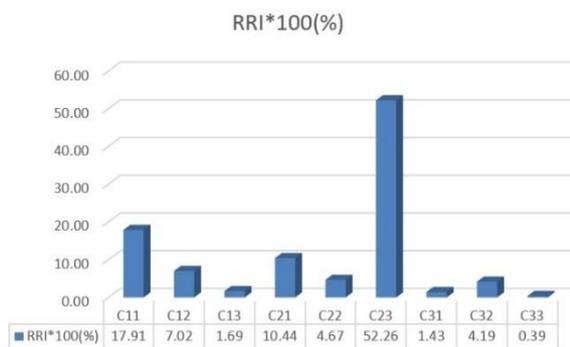


圖 6

五、結論與因應對策

高雄市大多道路開通久遠，隨著都市之開發與進展，道路承受著更龐大之車流與車軸負載重且工業城市多有超重車輛的情勢，原有道路基底層承受之負載益形沉重，道路鋪面所遭受之破壞或弱化愈來愈嚴重，又道路損壞原因眾多，包含材料結構內部因素及環境交通外部影響，未來極端氣候所造成之短時間強降雨與高溫態樣，恐成為未來氣候變遷常態。經過層級分析法(AHP)分析訪談問卷所得結果，以 C23.駕駛行為或重載車輛頻繁造成、C11.施工時修補過程未確實、C21.施工時天候狀況不佳等三項相對損壞因素為前三大風險。

綜上，道路再損壞事件多發生於鄰近路口停等處，重載車輛加上不當的駕駛行為時常導致道路的推擠及車轍損壞，未來在劇烈天候的情況底下以及重載車輛加上不當的駕駛行為，都會造成減緩道路壽命及使用年限，對道路養護工作將造成非常大的衝擊。爰此，對於如何改善或減緩重載車輛及駕駛行為對路面的影響，建議確實修復路面施工程序及

用料，施工完成面確實養護穩定路面強度，並視情況調整 AC 粒料配比加強路面結構性承載性，最後管控重載車輛的行駛路線及速度，倘若穩定道路修復品質及加強交通層面的管理，定可大幅降低道路修補後再造成推擠破壞風險，提升市區道路安全及用路品質。

發生道路修復後再損壞的因素不外乎重車外力、施工人員便宜行事及施工天候等，不論是重載車輛或是施工未確實等問題大多再於人為，在實務管理無法全面防阻。應對於施工從業人員的教育訓練，提升施工環境及福利，勞資共同用心，提升並建立施工人員自我約束力，讓工程人員能用心工作並同時獲得成就感，進而改善及增進市區道路工程的品質。

參考文獻

1. 林原宏，「層級分析法：理論與應用之探討(一)」，測驗統計簡訊，第8期，第31-34頁，1995。
2. 高雄市政府工務局養護工程處，「瀝青混凝土刨鋪作業手冊」，2021。
3. 財團法人中國生產力中心、國立台灣大學土木工程研究所，「市區道路管理維護與技術規範手冊研究」，內政部營建署，台北，2002。
4. 褚志鵬，「Analytic Hierarchy Process Theory 層級分析法(AHP)理論與實作」，國立東華大學企業管理學系教學講義，2009。

均勻係數和細料含量對土壤液化孔隙水壓力之影響

蕭達鴻¹ 李祐緯²

¹ 國立高雄科技大學土木工程系研究所教授

² 國立高雄科技大學土木工程系碩士班研究生

摘要

本文嘗試探討土壤均勻係數 C_u 和細料含量 FC 二者對液化過程產生之孔隙水壓力的影響，並以反覆三軸試驗進行研究，試體有效圍壓為 100kPa 並且相對密度 D_r 為 30%， C_u 分別為 2、8 和 20，細料分別為 0%、15% 和 30%。試驗結果指出均勻係數 C_u 對土壤液化過程產生之孔隙水壓力無明顯不同，而添加細料後孔隙水壓力上升速度會隨細料含量增加而有明顯上升，而反覆三軸結果如以反覆應力比與反覆次數關係圖表示，發現均勻係數 C_u 為 2 時液化強度所需反覆次數較少，而均勻係數 C_u 為 8 和 20 二者結果相似。

關鍵字：土壤液化、均勻係數、孔隙水壓力

Effect of Uniform Coefficient and Fines Content on Pore Water Pressure within Soil during Liquefaction

Darn-Horng Hsiao¹ You-Wei Li²

¹ Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

² Master student, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

A series of cyclic triaxial test were conducted, the article attempts to investigate the influence of uniform coefficient C_u and fines content FC on the pore water pressure generated during liquefaction. Meantime the effective confining pressure of all the specimen is 100kPa and the relative density D_r is 30%. The parameter C_u was chosen as 2, 8 and 20 respectively and fines content are 0%, 15% and 30%. The test results indicate that the uniformity coefficient C_u has no significant influence on the pore water pressure generated when soil liquefaction process, however the pore water pressure rising speed will increase significantly with the increase of the fines content added the samples. The cyclic triaxial results indicated with the relationship between the cyclic umber with CSR (cyclic stress ratio) shows that the liquefaction strength is less when C_u is 2. On the contrary the liquefaction strength is higher when C_u is 8 and 20, and their results are similar.

Keywords: liquefaction, uniform coefficient, pore water pressure

一、前言

近年來由於 921 集集大地震和 0206 高

雄美濃地震後，造成台灣多處因土壤液化而產生的房屋沉陷和倒塌，國內開始重視對土壤液化的研究。近年來土壤液化為實驗室熱

門研究主題項目之一，呂純慧(2020)[1]指出高雄地區土層粒徑分布曲線對土壤特性、土壤參數等土層變化可能造成的影響，早期土壤液化的相關研究大多數集中於純砂和細料的添加對土壤液化的影響，並且研究以初始液化為主軸，對於由孔隙水壓力上升的文章較少探討，近年也有論文選擇粒徑分布曲線對於孔隙水壓力上升進行研究，本文主要對於均勻係數 C_u 和細料含量 F_c 等因素進行控制，並且進行反覆三軸試驗(cyclic triaxial test)，探討均勻係數 C_u 以及細料含量 F_c 對孔隙水壓力上升的影響，最後再探討不同均勻係數 C_u 和控制 C_u 時添加細料含量 F_c 對於土壤液化相關之影響，研究流程如下圖 1 所示。

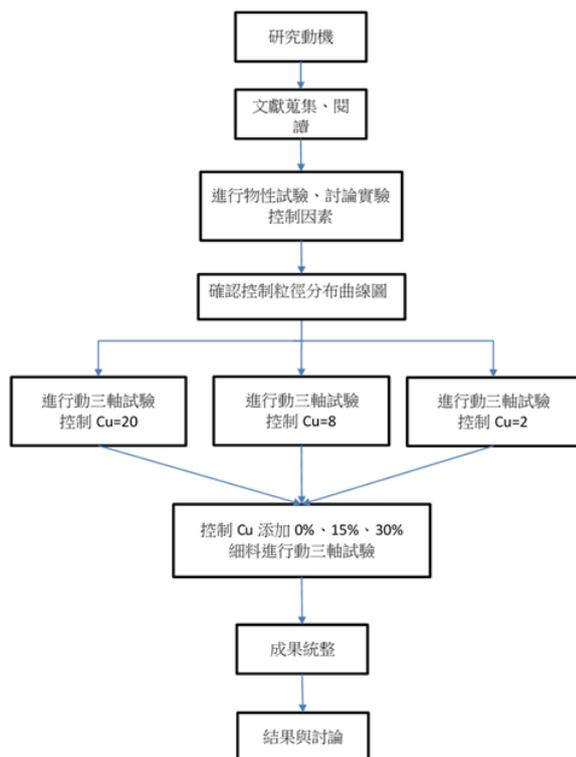


圖 1 研究流程圖

二、文獻回顧

過去在許多研究者的努力下，土壤液化之研究已相當清楚，近年來的研究方向皆以研究土壤初始液化、添加細料對土壤初始液化之關係為主軸，但較少文章以土壤液化時孔隙水壓力為主軸進行探討，本文將以此方向進行研究。

2-1 土壤添加非塑性細料對尖峰值強度影響

Belkhatir et al. (2011)[2]研究指出砂土混合粉土後，土樣尖峰值的不排水剪切強度和不排水的殘餘剪切強度隨著均勻係數的增加和平均直徑的減小以及細粉含量的增加而降低，最高可達 50%，並且尖峰值強度和殘餘強度隨著均勻係數的增加和平均直徑的減小而線性降低，如下圖 2 所示。

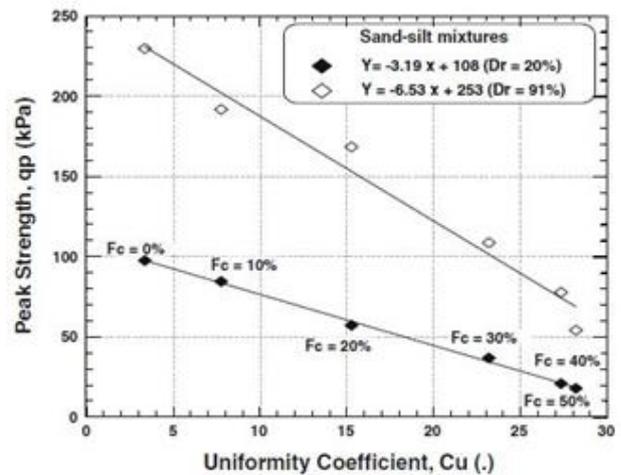
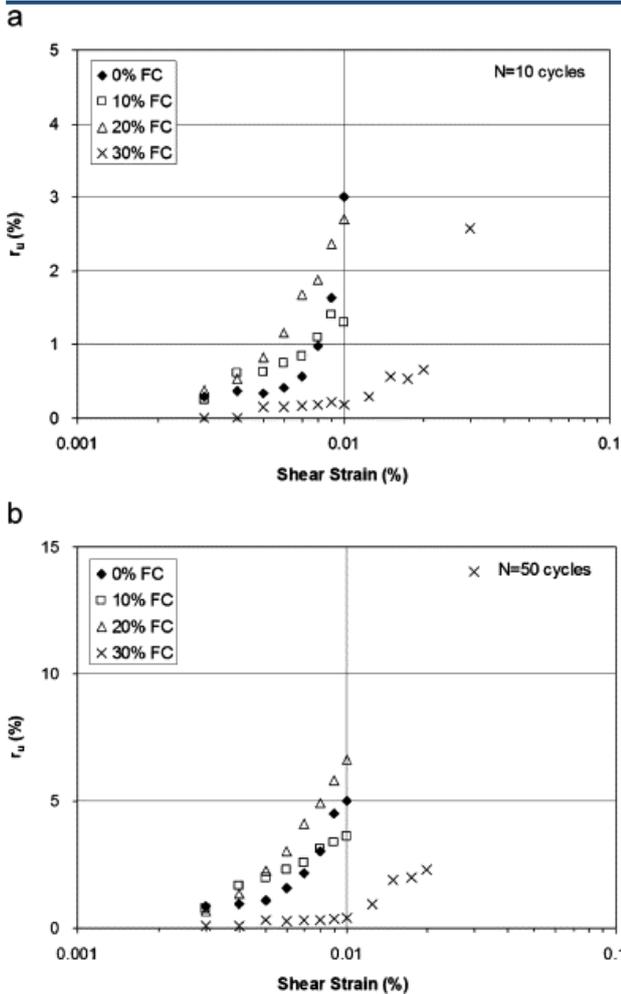


圖 2 Belkhatir et al. (2011)文中所敘述尖峰值強度呈線性下降

2-2 土壤添加塑性細料對孔隙水壓力影響

Derakhshandi et al. (2008)[3]研究指出，塑性細料對飽和砂土進行循環三軸試驗後，發現塑性細料含量於 20%之樣品產生的孔隙水壓力比較乾淨砂土產生之孔隙水壓力比更大，當塑性細料含量為 30%時，孔隙水壓力比產生低於乾淨砂土的孔隙水壓力比，如圖 3 所示，並且於實驗中發現當塑性細料為 10% 和 20%時，孔隙水壓力比上升趨勢相似，隨著試驗的進行，添加細料之土壤試體的孔隙水壓力比變化比乾淨的砂土樣品略大，但剪切應變小的情況下，塑性細料為 30%時，土樣孔隙水壓力比上升比乾淨沙土之孔隙水壓力更少，而造成此行為差異是因為砂土結構孔隙比在添加較多的塑性細料含量下，砂土結構孔隙比遠大於無添加細料之砂土，使該砂土顆粒不再完全接觸，並且不會在土壤基本性質中佔主導地位，並且觀察到該性質與高嶺土相似。



(a) 反覆次數 N=10 下 (b) 反覆次數 N=50 下
圖 3 孔隙水壓比與應變控制的關係

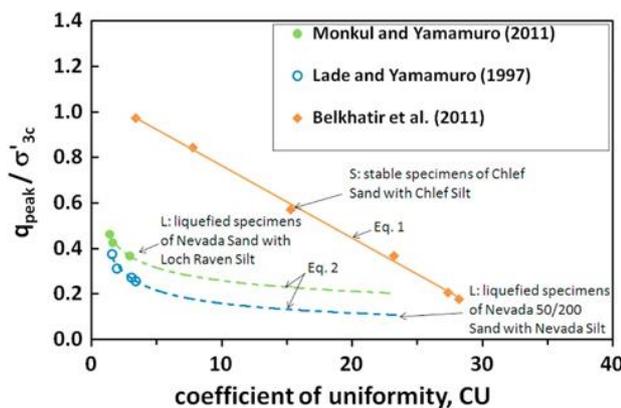


圖 4 文獻中不同類型土壤的歸一化峰偏應力 (q_{peak} / σ'_{3c}) 隨均勻係數(CU)的變化

2-3 均勻係數 C_u 對正規化尖峰值強度影響

Monkul et al.(2016)[4]研究指出，正規化尖峰值強度(q_{peak} / σ'_{3c})會隨著 C_u 增加，而有顯著下降，並且與 Lade and Yamamuro (1997)提出之成果吻合，但與 Belkhatir et al.(2011)所提出之成果有些許差別，如圖 4 所

示，可明顯看出 Monkul et al 與 Lade and Yamamuro 所提出之成果較於接近，其趨勢皆有明顯的使強度下降，但與 Belkhatir et al. 所提出之有趨勢並且呈線性下降成果有出入。

2-4 土壤細料含量對孔隙水壓力之影響

Porcino et al. (2017)[5]研究指出，較高的細料含量土壤，並且以最大 30% 為限，具有更佳的收縮性，無論循環次數如何，都會導致孔隙水壓力更快的產生，並且可由試體土壤顆粒間孔隙比越大，造成土壤孔隙水壓有更快上升之趨勢，當試體添加細料後，土壤孔隙比會有明顯變大之趨勢，造成孔隙水壓例更容易上升，如圖 5 所示。

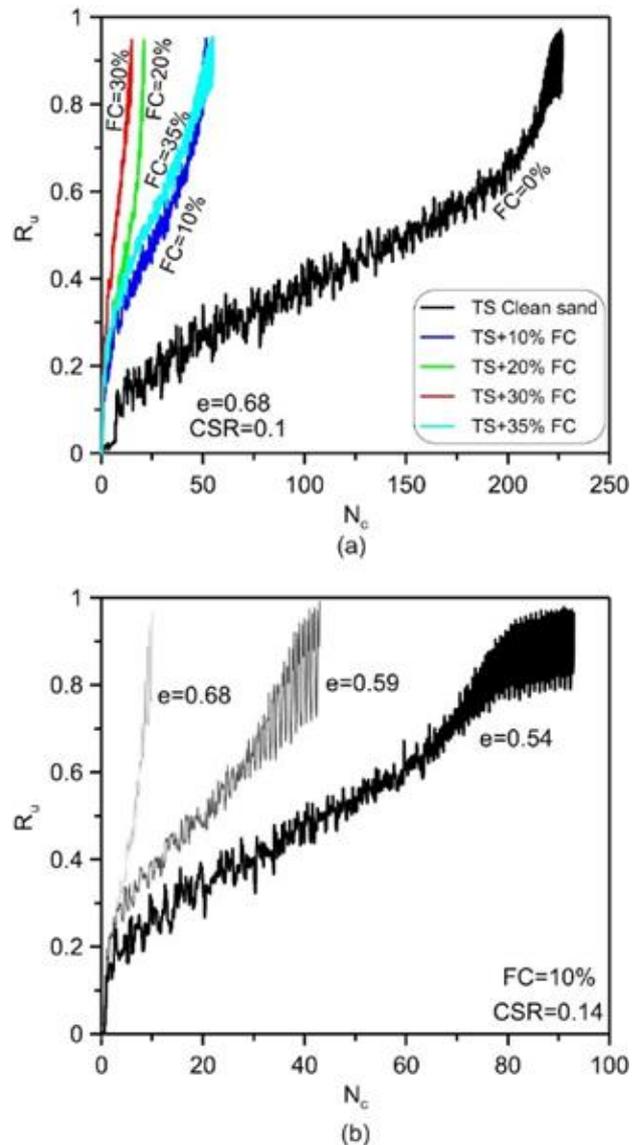


圖 5 具有(a)不同的細料含量和(b)添加 10% 細料後孔隙比和循環次數的變化趨勢

由圖 6 中可看出當添加的細料含量超過了極限細料含量(LFC)時，土壤抗液化強度上升趨勢將會由下降轉變為上升，這表示 Porcino et al.所敘述之極限細料含量為土壤添加細料後，導致孔隙比隨添加細料的量而下降至大約 30%後，趨勢由下降改為上升，並且影響孔隙水壓力產生，產生此變化之細料含量稱為極限細料含量(LFC)。

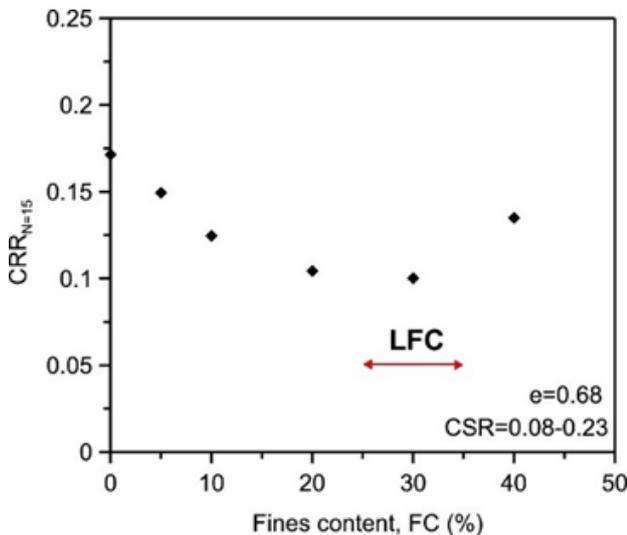


圖 6 文中所敘述之極限細料含量示意圖

2-5 粒徑分布曲線控制均勻係數

Wichtmann et al. (2015) [6] 文中對粒徑分布曲線進行研究，以粒徑 d_{50} 為中心點，將其以旋轉方式繪製出較為規律之粒徑分布曲線，如下圖 7 所示，再以此具有相同的平均顆粒尺寸 d_{50} 研究均勻係數 1.5~8 之間的變化，因試驗內容與本研究差異較大，故只參考其粒徑分布曲線配置。

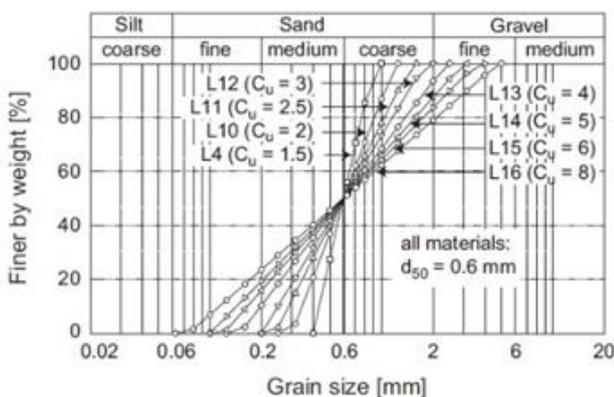


圖 7 Wichtmann 試驗參考用粒徑分布曲線圖

三、研究目的與方法

本研究以粒徑分析曲線之均勻係數 C_u 、控制 C_u 時添加細料含量 FC 進行反覆三軸試驗研究試體內部孔隙水壓力上升之行為，土壤以六龜砂進行篩分析試驗後將其區分為 #4、#10、#20、#40、#60、#100、#200 以及通過 #200 號篩之細料，並且依照設定的均勻係數、相對密度 30%，抓取所需之級配砂，並且參考 Wichtmann[6] 方法進行粒徑分布曲線控制，如下圖 8 所示。

(一) 均勻係數 C_u 控制參數：2、8 和 20

(二) 細料含量：0%、15%、30%

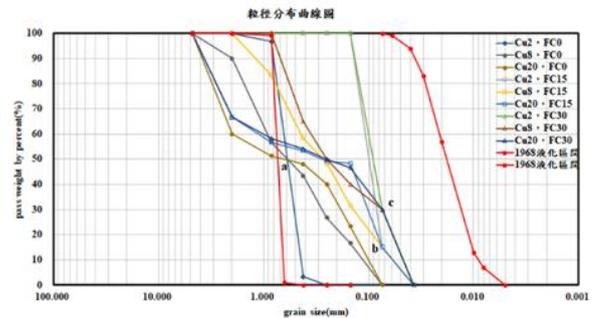


圖 8 各配比粒徑分布曲線

3-1 研究目的

- (一) 砂土於不同均勻係數下所產生的孔隙水壓力之比較。
- (二) 砂土於不同均勻係數下添加細料後所產生的孔隙水壓力之比較。

3-2 試驗材料準備

本研究使用之土壤取自於高雄市六龜區，並將土壤使用篩分析試驗進行不同粒徑分類堆置，再依照設定好的均勻係數控制粒徑分布曲線，並且進行相對密度試驗，確認該均勻係數之土樣 e_{max} 和 e_{min} 值如表 1，並且計算該均勻係數土樣 $Dr=30\%$ 時所需要的土量，因均勻係數 2 之試體須配合添加細料後之粒徑分布曲線，導致試體粒徑皆以較小粒徑之砂土構成，導致無法使用相對密度儀進行試驗，後以改良型夯實試驗取得 e_{min} 值。

表 1 各級配孔隙比

C _u	FC(%)	d ₅₀	Dr(%)	e _{max}	e _{min}	e
2	0	0.6	30	1.009	0.659	0.904
2	15	0.1	30	1.281	0.712	1.110
2	30	0.09	30	1.312	0.817	1.164
8	0	0.6	30	0.682	0.334	0.578
8	15	0.25	30	0.837	0.447	0.720
8	30	0.25	30	0.901	0.441	0.763
20	0	0.6	30	0.634	0.316	0.539
20	15	0.25	30	0.778	0.378	0.658
20	30	0.25	30	0.770	0.363	0.647

在控制均勻係數下土壤添加細料後會經由砂結構孔隙比進行修正，當土樣中細料含量添加越多，則修正後孔隙比越大如圖 9 所示，表示土壤顆粒間之細料可視為部分孔隙，而本研究所參考之砂結構孔隙比計算式如下公式 1 表示：

$$e_s = \frac{e+(1-b) \times FC}{e-(1-b) \times FC} \quad (1)$$

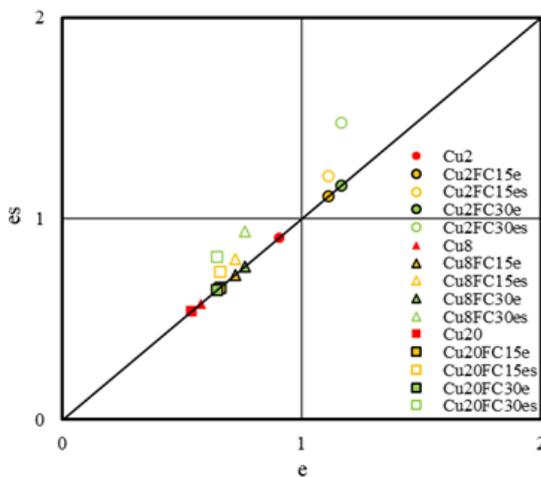


圖 9 結構孔隙比與孔隙比關係

由上圖 9 中可發現，尚未進行砂結構孔隙比修正之土樣孔隙比較低，並且可以發現土樣進行結構孔隙比修正後，細料添加量越多，修正後之結構孔隙比越高，這也可能影響該土樣之土壤性質，並且影響該土樣對土壤液化之影響。

其中公式內 b 為 Yang(2006)提出，當細料含量低於 30%，其 b 係數以 0.25 進行計算，當細料含量大於 30% 以上時，則以 0.4

進行計算，就本文而言，添加細料最大為 30%，故建議 b 係數使用 0.25 進行計算即可，在依照表原始砂土孔隙比表 1 進行修正，得出表 2 之結果。

表 2 各級配修正後結構孔隙比

C _u	FC(%)	d ₅₀	Dr(%)	e _{max}	e _{min}	e _s
2	0	0.6	30	1.009	0.659	0.904
2	15	0.1	30	1.388	0.793	1.210
2	30	0.09	30	1.717	0.997	1.479
8	0	0.6	30	0.682	0.334	0.578
8	15	0.25	30	0.923	0.516	0.801
8	30	0.25	30	1.090	0.584	0.938
20	0	0.6	30	0.634	0.316	0.539
20	15	0.25	30	0.862	0.443	0.736
20	30	0.25	30	0.945	0.497	0.810

3-3 試驗儀器介紹

本研究所使用之動態三軸試驗設備為英國 GDS 公司所開發的土壤液化研究試驗設備，其組裝套件由動態圍壓控制器、反水壓壓力體積控制器、ELDyn 主機、GDS 電腦控制系統所組成，而動態體積控制器可控制之圍壓，最大可達 2MPa，ELDyn 主機最大可設定頻率可達 5Hz，最小可設頻率為 0.001Hz，最大荷重可達 5kN。

3-4 研究方法及步驟

本研究目的主要以不同均勻係數 C_u 和控制均勻係數的情況下添加細料進行反覆三軸試驗，其均勻係數分別為 2、8 和 20，並且將設定好之土壤及配進行重模，探討試體於反覆三軸試驗下之孔隙水壓力上升之研究。實驗步驟如下：

- (一) 秤取該均勻係數所控制之粒徑分布曲線土樣所需之土壤，並且加入其 8% 乾土重量之除氣水進行拌合。
- (二) 將土壤分層，並以濕搗法製作三軸試驗所需之試體，並且依照 163mm、135mm、106mm、78mm、49mm，所需之土量分層搗實。每層搗實後須於搗實完成後之平面以刮刀刮出縱向、橫向之切面，以確保每層分層搗實後產生不連續之弱面。

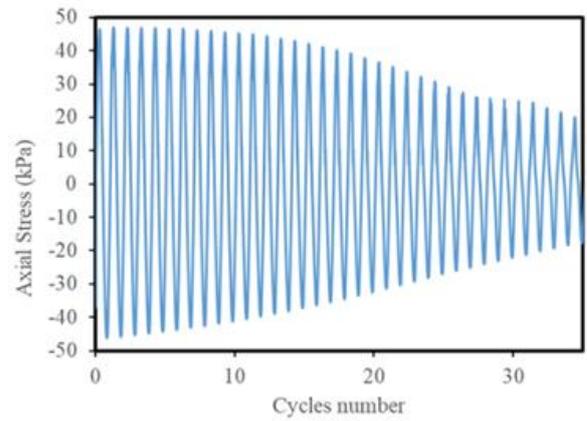
- (三) 實驗試體製作完成後，會將試體由下部灌入 CO₂，並且將內部原有空氣由試體上部排出，並且使試體內部充滿 CO₂，以避免試體上機後因內部空氣過多，導致試體無法飽和之情形。
- (四) 試體上機後，同步驟三由下部灌水，並且開啟試體上部閘門，將試體於灌水時可將多餘空氣由下部開始往上部推擠，最終由上部閘門排出，達到飽和度參數 B 值更容易上升之目的，並且由飽和度參數 B 值大於 95% 以上視為該試體已達到飽和。
- (五) 試體飽和後進行試體壓密，並且施予相對應之有效圍壓進行均向壓密，於壓密期間將試體排水閘門打開，達到試體壓密排水目的，一般砂土大約為 20 分鐘可完成壓密，其壓密速率大約為 1mm³/min，若排水速率小於壓密速率，則已完成壓密。
- (六) 當試體完成壓密後，以動力三軸採應力控制方式進行三軸壓密不排水試驗，並且由電腦控制系統進行試驗加載之頻率、振幅大小、循環次數等進行精準控制，當試體達到預先設置之目標時，電腦將自動停止，並記錄此次試驗。

四、研究結果與分析

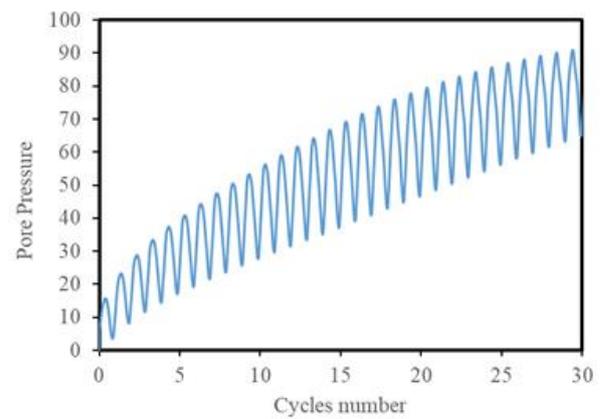
4-1 反覆三軸成果與實驗組數

本研究使用高雄市六龜區之砂土，並且由反覆三軸試驗分析均勻係數、細料對於土壤液化產生之影響，如下圖 10 所示，並經由，孔隙水壓力上升的情形，進行試驗交叉比對後進行研究。全試驗數據如下表 4 所示，其中 CSR 為反覆剪應力比(cyclic stress ratio)，計算公式如下式 2 所示， $N_f(R_u=0.9)$ 為孔隙水壓力比到達 0.9 時，所需之反覆次數，NR 則表示該試體孔隙水壓力比未達到 0.9。

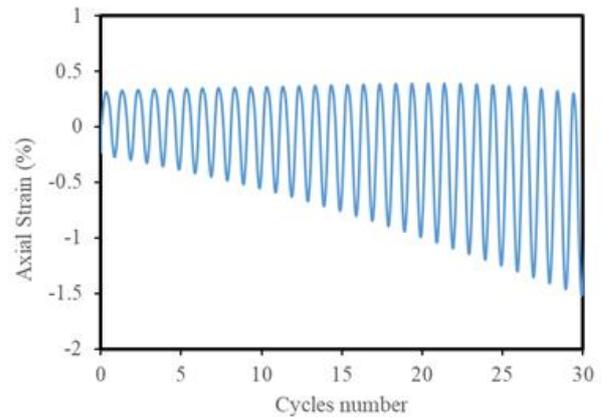
$$CSR = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \times \sigma'_c} \quad (2)$$



(a) 軸向應力與反覆次數關係



(b) 孔隙水壓力與反覆次數關係



(c) 軸向應變與反覆次數關係

圖 10 六龜砂試體編號 12 反覆三軸試驗結果

表 4 試驗數據

試體編號	均勻係數	FC	CSR	$N_f(R_u=0.9)$
1	2	0	0.26	NR
2	2	0	0.23	12
3	2	0	0.17	NR
4	2	15	0.24	18
5	2	15	0.15	NR
6	2	15	0.11	NR
7	2	30	0.19	3
8	2	30	0.15	11
9	2	30	0.11	15
10	8	0	0.27	25
11	8	0	0.20	18
12	8	0	0.15	32
13	8	15	0.26	24
14	8	15	0.17	29
15	8	15	0.11	42
16	8	30	0.22	21
17	8	30	0.16	11
18	8	30	0.11	41
19	20	0	0.27	15
20	20	0	0.17	32
21	20	0	0.1	NR
22	20	15	0.23	26
23	20	15	0.14	NR
24	20	15	0.11	NR
25	20	30	0.19	31
26	20	30	0.14	43
27	20	30	0.11	66

4-2 均勻係數與反覆次數研究結果

根據控制均勻係數、細料的添加後，所繪置出 CSR 與反覆次數關係圖，可發現成果如圖 11 中，均勻係數 2 的試體 CSR 與反覆次數皆為偏小，且有明顯與均勻係數 8 和 20 的試體成果有不同趨勢，而均勻係數 8 和 20 的試體無較大差別。

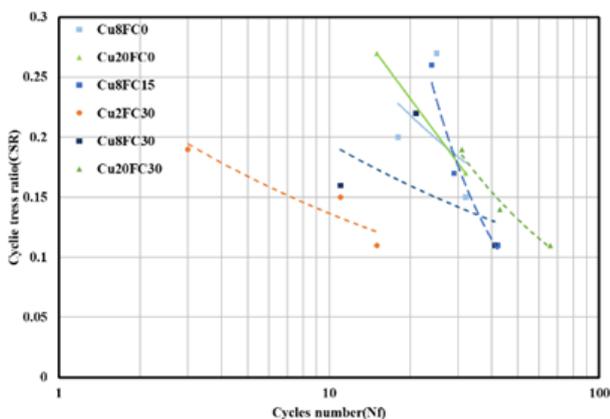
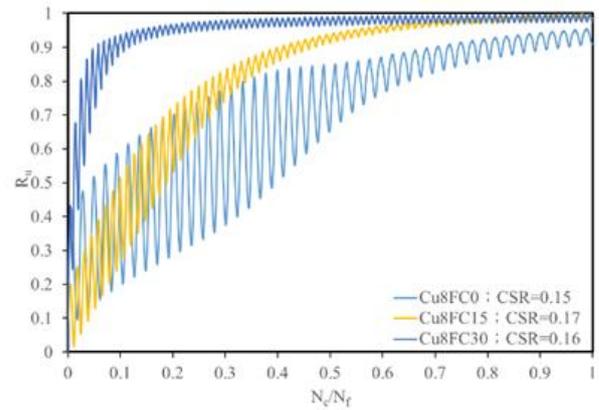


圖 11 CSR 與反覆次數關係圖

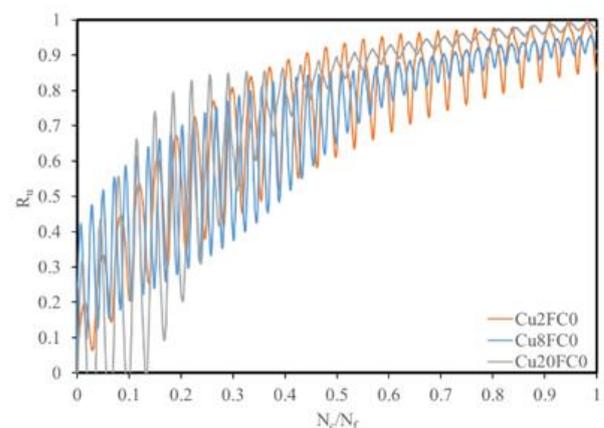
4-3 細料與孔隙水壓力比之關係

根據試驗結果，當試體控制均勻係數下添加不同比例之細料後，成果如下圖 12 所示，可明顯看出試體添加細料後孔隙水壓力比上升速度整體趨勢隨添加的隙料增加而明顯上升。

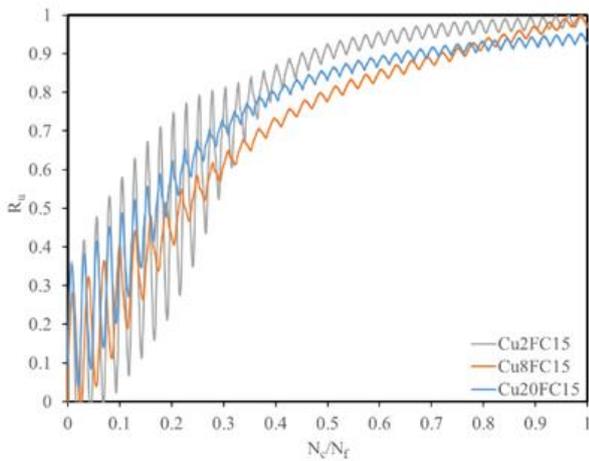
圖 12 均勻係數 8，添加不同比例細料孔隙水壓力比(R_u)

4-4 均勻係數與孔隙水壓力比之關係

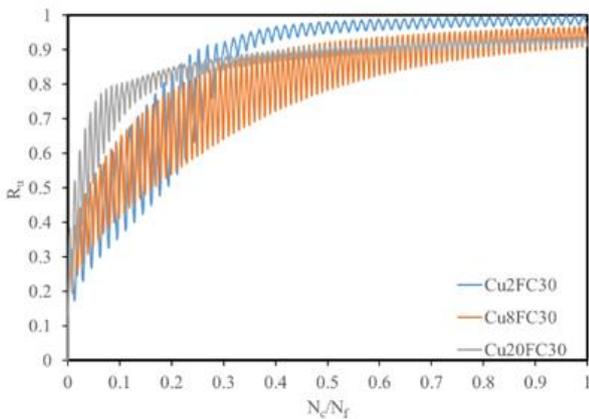
試驗結果於圖 12 中顯示，細料對於孔隙水壓力比有顯著的影響，再與不同均勻係數下與相同細料比例進行比對，如圖 13 所示，可以發現到，在控制不同的均勻係數下，添加相同的細料比例，對液化產生之孔隙水壓比沒有太顯著的影響。



(a) 無添加細料，不同均勻係數結果



(b) 添加 15% 細料，不同均勻係數結果



(c) 添加 30% 細料，不同均勻係數結果

圖 13 不同均勻係數，相同比例細料之孔隙水壓比

五、結論

從反覆三軸試驗中可以發現到幾個現象，並且將其做為討論重點。

1. 由圖 11 中可以發現均勻係數 2 的試體做出來的反覆三軸成果 CSR 值偏小，並且反覆次數較低，而均勻係數 8 和 20 的試體成果差異不大，可明顯的看出試驗數據分為 2 個群體，可能是因為均勻係數 2 與均勻係數 8 和 20 的孔隙比有較大差異，而均勻係數 8 和 20 孔隙比相近所造成，此部分需要在進一步研究、討論，建議應該有更多數據驗證孔隙比和均勻係數對土壤液化相關行為研究。
2. 由圖 12 可發現，將均勻係數控制於相同的條件下，隨著增加細料含量比例，會明顯的使孔隙水壓力明顯的往左上趨勢發展，

這就表示在相同的均勻係數下，隨著細料含量的增加，會使孔隙水壓力上升速度增加，使土壤更快達到液化。

3. 圖 13 中可以發現，均勻係數對土壤液化之孔隙水壓力並無明顯的影響，由圖 13(a) 中可以看出在均勻係數為 2、8 和 20，並且無添加細料的情況下，孔隙水壓力幾乎沒有影響，再由圖 13(b) 和圖 13(c) 中可發現，均勻係數 2、8 和 20 同時添加細料 15% 和 30% 時，孔隙水壓力上升的速度皆比無添加細料時有顯著的提升，但與均勻係數對孔隙水壓力無明顯的影響。

六、參考文獻

1. 呂純慧，以物性和顆粒分布曲線分析高雄地區土壤特性和動態性質，國立高雄科技大學，土木工程與防災科技研究所，碩士論文，2020。
2. Belkhatir, M., and A., Arab, and T., Schanz, and H., Missoum, N., Della, "Laboratory study on the liquefaction resistance of sand-silt mixtures: effect of grading characteristics," Granular Matter Vol.13, pp. 599-609, 2011.
3. Derakhshandi, M., and E.M., Rathje, K., Hazirbaba, S.M., Mirhosseini, "The effect of plastic fines on the pore pressure generation characteristics of saturated sands," Soil Dynamics and Earthquake Engineering Vol.28, pp. 376-386, 2008.
4. Monkul, M.M., and E. Etminan, and A. Şenol, "Influence of coefficient of uniformity and base sand gradation on static liquefaction of loose sands with silt," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.89, pp. 185-197, 2016.
5. Porcino, D.D., V. Diano, "The influence of non-plastic fines on pore water pressure generation and undrained shear strength of sand-silt mixtures," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.101, pp. 311-321, 2017.

6. Wichtmann, T., A., Niemunis, T., Triantafyllidis, “Improved simplified calibration procedure for a high-cycle accumulation model,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* Vol.70, pp. 118-132, 2015.

0206 美濃地震台南安南區建築物沉陷量分析與探討

蕭達鴻¹ 劉耕溥² 熊彬成³ 簡維宏⁴

^{1,3} 國立高雄科技大學土木工程系教授

^{2,4} 國立高雄科技大學土木工程系研究生、大學部學生

摘要

台南地區土層形成受到沉積歷史影響很大，而其將對土壤液化也產生影響，本文嘗試以不同方法計算土壤液化後沉陷量，探討各方法對分析結果的差異性，以及計算公式和分析軟體二者之比較。本研究以 0206 美濃地震時受到影響最大的台南安南區一建築物為案例，首先研究台南地區沉積環境變化，及其對地震後液化災害之影響，並用 Seed (1985) 簡易評估法和國震中心 HBF(2012)法，評估該建築物下方各土層液化情形，再以 Iwasaki (1982) 依據此二法的成果判斷液化潛勢，並以 Ishihara and Yoshimine(1992)法、Sawicki and Mierczynski (2009)法和 Shahir and Pak (2010)法計算液化後沉陷量，最後與 Plaxis 3D 有限元素法(載重與否)和文獻中實際量測值進行比較和討論。該建築物當時實際沉陷量在 19 公分至 50 公分之間，根據本研究的計算和數值解其沉陷量在 18.8 公分至 35.38 公分之間，本文並討論其間差異。

關鍵字：美濃地震、土壤液化、沉陷量

Analysis and Investigation of Building Settlement at Annan District in Tainan for 0206 Meinong Earthquake

Darn-Horng Hsiao¹ Geng-Pu Liu² B.C Hsiung³ Wei-Hong Jian⁴

^{1,3} Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

^{2,4} Master Student, Undergraduate student, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

The soil layer formation in Tainan is greatly affected by local sedimentation history, and it will also have significant effect on soil liquefaction. The paper tries to calculate the amount of soil settlement post liquefaction by different methods, then explores their differences between all the methods. We also used the results compared with the calculated from software. This study selected a building in Tainan Annan District, at which was the most affected by 0206 Meinong Earthquake. In the past studies the sedimentary environment in Tainan City changes very huge, certainly it will easily induce the liquefaction disaster when earthquake takes place for sandy soils. On the beginning we uses Seed (1985) method to assess the liquefaction of the soil layers below the building as well as HBF (2012) method popular in Taiwan. Subsequently Iwasaki (1982) method based on the results of this two methods are used to judge the liquefaction potential index. Simultaneously Ishihara and Yoshimine (1992) method, Sawicki and Mierczynski (2009) method and Shahir and Pak (2010) method were used to calculate the settlement amount of liquefied subsidence, which were finally used to compare and discuss with ones of Plaxis 3D (FEM method;

load or not) and the actual measured in the field. The measured settlements of the building ranged 19 to 50 cm at that time, but the settlement from calculated and numerical solution is between 18.8 and 35.38 cm.

Keywords: Meinong earthquake, liquefaction, settlement post liquefaction

一、前言

1-1 研究動機

2016年2月6日於美濃發生規模6.4的強震，台南多地區更是因此出現了大量的區域性土壤液化，許多的民房因此發生傾斜而造成結構受損，危及到民眾的居住安全。本次台南災情會如此嚴重，可能是因為台南地區的地層的形成歷史較為特殊，許多地區都是因為海岸線的遷移後才逐漸形成陸地，因此本研究會先針對其地形的形成歷史進行初步的討論後，再進一步的使用 Seed 簡易液化評估法、國震中心 HBF 法和有限元素分析程式 Plaxis 3D 計算出該區的沉陷量，比較其三種方法成果的差異並與文獻討論。

1-2 研究目的

2016年2月6日受到美濃地震的影響，台南許多地方發生液化，依據台南市政府調查後統計，在本次災害中估計有76%的液化點都集中在安南區，因此本研究主要目的在探討該區的土層形成歷史對土壤液化的關係，並針對土壤和淺基礎兩種不同觀點因為液化而產生的沉陷量比較兩者之間的差異性。

1-3 研究流程

本研究選擇這次土壤液化較為嚴重的安南區進行討論，使用圖解法(Seed 簡易液化評估法、國震中心 HBF 法)評估該區土層的液化情況後，用深度加權(Iwasaki (1982))評估該區液化嚴重程度，在計算出其沉陷量和液化土層厚度。建立 Plaxis 模型與傳統法比較差異，確認模型邊界條件、地下水位、地震力等等參數設定是否合理且符合現場狀況，圖1為本研究之研究流程。

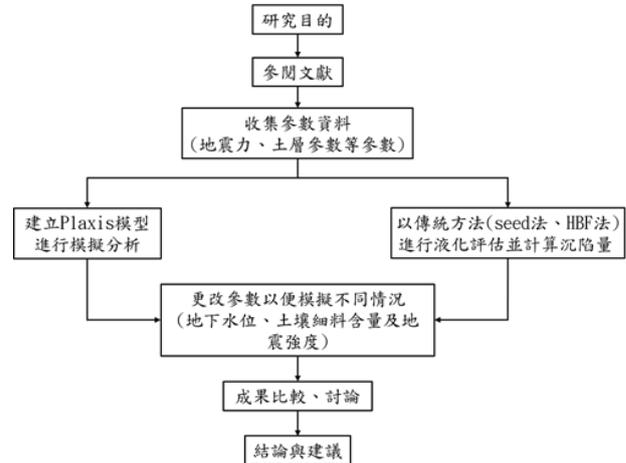


圖 1、研究流程

二、文獻回顧

2-1 台南沉積環境及海岸線變化

據李德河等人(2016)[1]提出台南地區的沉積環境主要受到曾文溪(舊址)、二仁溪、鹽水溪堆積作用而逐漸形成陸地。依照各區中具代表性的工程鑽探資料，可理解各區的地層構造和土質種類不同的特性，並比較其資料能概略區分出台南台地的北側、西側及東北側，因地表下30-40m內未發現岩盤，具有較厚的軟弱土層，屬於軟地盤。若將台南台地和台南車站與新化連成一線(如圖2所示)可發現土壤液化點位多集中於線的北側，依照液化點位的分佈，再對比該區土層形成的歷史，可發現台南土層的形成歷史對該區土壤液化的影響甚大。

在數百年前台南多數的平原依然是汪洋一片，再經過不斷的地形變化及海陸遷移後，造成新形成之地層的複雜性。荷西時期(西元1624年至1662年)之間的海圖及地圖記載，可了解到近四百年內的地形變化。而圖3為十九世紀時所紀錄台南地區當時的海岸線圖，如圖可知，台南許多地區於當時尚未形成陸地，直到一百多年前才逐漸成形，可見其土壤之穩定性較差。



圖 2、台南液化點位置分佈圖(摘自李德河等人(2016)[1])

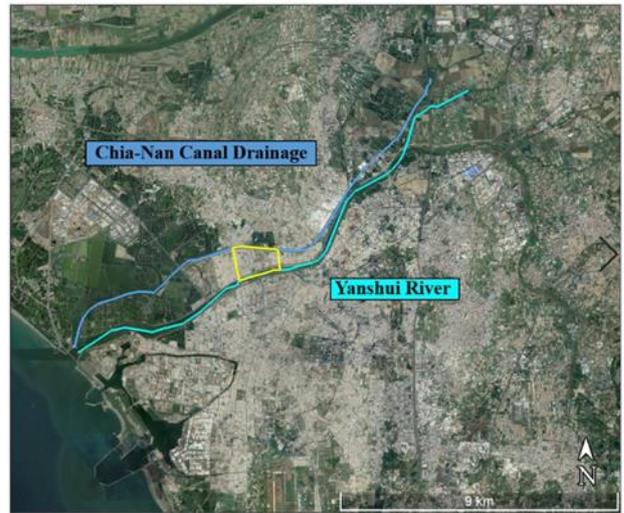


圖 4、安南區溪頂里地理位置

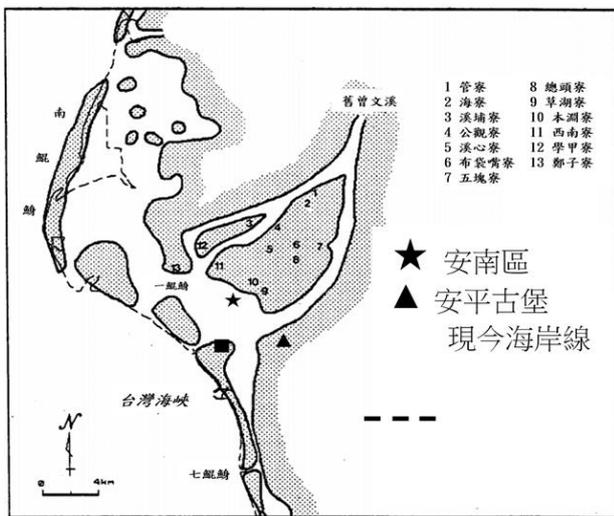


圖 3、十九世紀海岸線圖(摘自台江國家公園及周緣地區人文歷史調查及保存之先期規劃成果報告(2010)[2])

安南區頂溪里介紹

根據統計安南區溪頂里是當時 0206 發生土壤液化最嚴重的地區，因此本研究將針對此區的地理位置和土層進行分析、討論。安南區溪頂里一帶是夾在嘉南大圳排水線及鹽水溪間如圖 4，舊址原本是灣裡溪南側，地下水經常受嘉南大排及鹽水溪的供給，平時地下水位就不低。由下表可知在地表下 15 m 以內主要的土層，含砂量約為 70~90%，粉土含量最多是 17.8%，黏土含量約在 6~8% 之間，統一土壤分類屬 SM, SP-SM 的土壤，其 N 值在 5~6，明顯屬於軟弱的砂土層。

2-2 國震中心 HBF (2012)[4] 液化評估法

HBF 法是黃俊鴻等人(2012)[4] 參考 Seed 法為基底比照出來的本土評估法，藉由 Seed 法的資料並納入台灣本島的相關資料，製成雙曲線函數回歸分析，可分析土壤液化強度差異等，並統一國內評估判斷依據。主要可分析安全係數、液化潛能指數、液化沉陷量、土質折減係數等，而計算公式針對標準貫入之能量、深度、地震規模等作出適當修正，並透過安全係數 FL，將 FL<1 作為潛在液化可能的判斷依據。如圖 5 為國震中心 HBF 2012 液化評估法之流程圖。

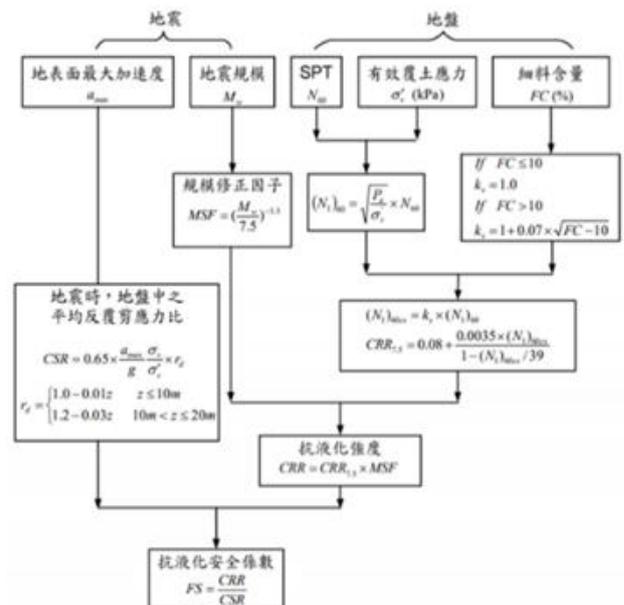


圖 5、HBF 2012 液化評估法流程圖

2-3 Ishihara & Yoshimine(1992)[5]評估法

經由室內試驗可模擬現地土壤之受震行為，較常見為反覆三軸(Cyclic triaxial)試驗與扭剪(Torsion shear)試驗兩種試驗，而再壓密之體積應變量即為孔隙水壓激發至有效圍壓後消散所排出的水量。Ishihara(1992)整理 Tatsuoka (1984)、Sasaki (1982)與 Kokusho (1984)之試驗結果取其平均(其中，軸向應變依 $\gamma = 1.5 \varepsilon_d$ 轉換成剪應變， ε_d 為軸向應變)，得到最大剪應變與體積應變在不同的相對密度下之關係曲線(參考圖 6)。由圖 6 可知，在任一相對密度之下，儘管最大剪應變不斷增加，體積應變量都會達到一臨界上限值。

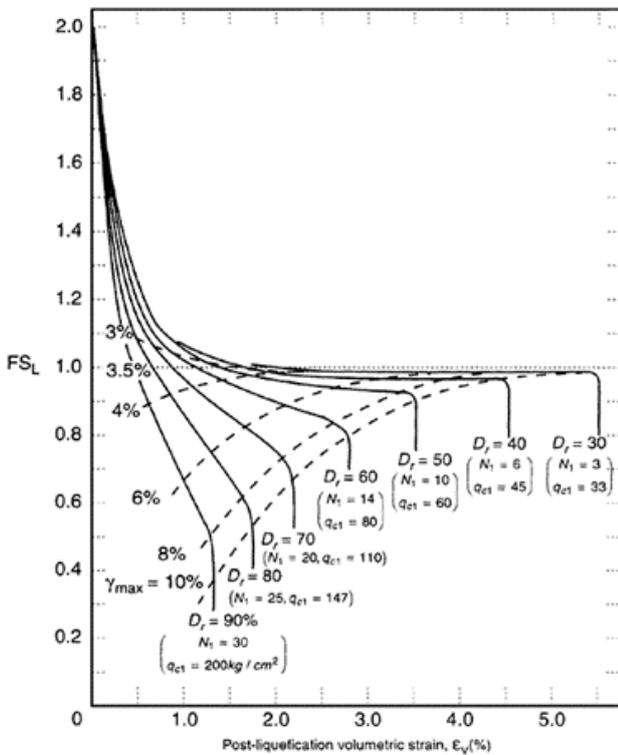


圖 6、Ishihara & Yoshimine (1992)評估法流程圖

2-4 Iwasaki 液化潛能指數

Iwasaki(1982)[6] 提出液化潛能指數 LPI(Liquefaction Potential Index)來評估土壤液化之嚴重程度，其定義如式(1)所示。

$$LPI = \int_0^{20} F(z) w(z) dz \dots \dots (1)$$

式內 LPI 為液化潛能指數，z 為地盤深度 (m)，考慮深度範圍為 0~20m，F(z)為抗液化係數，介於 0~1 之間，以下式估計，F(z) = 1

- FL，若 FL>1，則F(z) = 0，W(z)為深度權重係數，以式(2)計算

$$W(z) = 10 - 0.5z \dots \dots \dots (2)$$

Iwasaki (1982)[5]根據日本地震案例之研究，定義地盤液化之損害程度可分為四級，如表 2 所示。

根據 Iwasaki(1982)[5]的定義，代入兩種不同評估法(表 4 和表 7)的兩組不同安全係數 FL，由表 5 和表 8 結果可知在 Seed 法的評估下，安南區的液化潛能指數為 29.83，屬於嚴重液化，但在 HBF 法評估，其液化潛能指數為 9.92，屬於中度液化。可見兩種評估法對於液化評估的差異性。

表 1、Iwasaki 建議指標值

液化潛能範圍	建議指標
LPI = 0	液化危險度極低
0 < LPI ≤ 5	輕微液化；液化危險度低
5 < LPI ≤ 15	中度液化；液化危險度高
15 < LPI	嚴重液化；液化危險度極高

2-5 Seed 簡易液化評估法[7]

Seed 等人依據美國西岸、阿拉斯加、南美地區、中國大陸及日本等地區之地震液化及非液化現地資料，發展出液化潛勢評估模式。以地震規模(M_w)、細料含量(FC%)、現地土層深度(m)、土壤修正標準貫入試驗值(SPTN)透過安全係數 FL 進行液化評估，根據 Seed 法判斷，若安全係數 FL<1，即判斷該土層為潛在液化可能。如圖 7 為 Seed 簡易液化評估法之流程圖。

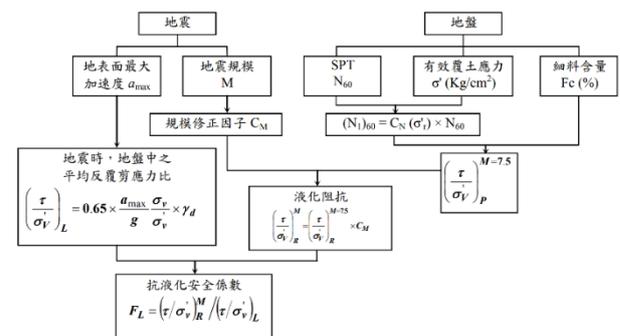


圖 7、Seed 簡易液化評估法流程圖

2-6 Shahir and Pak (2010)[8]淺基礎評估法 沉陷量計算

Shahir and Pak (2010)[8]利用不同淺基礎基本條件，包括淺基礎寬度、長度、乘載力，並加入地震波、地震時間、土層參數來討論淺基礎受震後沉陷量，並根據不同的基礎長寬度和液化土層厚度，推算出該淺基礎之沉陷量，並提出公式(3)，其公式如下：

$$\frac{S_f}{Z_l} = 0.018 \exp\left(-0.5 \frac{B_f}{Z_l}\right) - 0.029 \exp\left(-0.3 \frac{B_f}{Z_l}\right) + 0.019 \quad (3)$$

上式中 S_f 為基礎沉陷量 cm， Z_l 為液化土層厚度 m， B_f 為基礎寬度 m。根據不同的基礎寬度和承載力，評估受震後的沉陷量，並與文獻和現場實際量得的沉陷量進行比較，表 1 為美濃地震後，陳宗瑋(2016)[3]於災區實際測得的建築物沉陷量與淺基礎的資料。表 1 中 B_f 為基礎寬度(m)， L_f 為基礎長度(m)， Q 為基礎承載力(kPa)， A_{max} 為最大水平加速度 gal， S 為實際沉陷量 m。

表 2、淺基礎資料(摘自陳宗瑋，(2016)[4])

B_f (m)	L_f (m)	Q (kPa)	Z_l (m)	A_{max} (gal)	S (m)
6.0~ 9.8	6.0~ 9.8	42~74	40	233	0.19~ 0.50

2-7 Sawicki and Mierczyn'ski (2009)[9]

Sawicki and Mierczyn'ski (2009)[9]提出反覆三軸試驗和振動台試驗的成果狀態，與土壤液化所產生的黏滯度相似。根據這些結果，黏滯值 η 大約是 10^6 N/m^2 。圖 8(a)為結構在液化之前處於初始平衡狀態；此外，假設此時的時間為零，並且 Q 是結構的重力。在圖 8(b)中，結構處於沉入液化土壤的狀態，在此狀態下的每個時間步，重力(Q)，浮力(W)和阻尼力(V)均處於平衡狀態。可以獲得控制微分方程式。如式 4、5 和 6 所示。

$$Q = W + V \quad (4)$$

$$W = \gamma_m B L z \quad (5)$$

$$V = 8 \bar{D} \eta \frac{dz}{dt} \quad (6)$$

當所有參數都被替換為控制後微分方程，微分方程的解式可以得到如下：

$$z(t) = \frac{b}{a} [1 - e^{-at}] \quad (7)$$

上式中 $z(t)$ 為基礎沉陷量(cm)； a 為結構尺寸與臨界參數的比值 $\gamma mBL/\zeta$ ， b 為結構重力與臨界參數的比值 Q/ζ 。其中參數 a 與 b 都包含黏滯度。

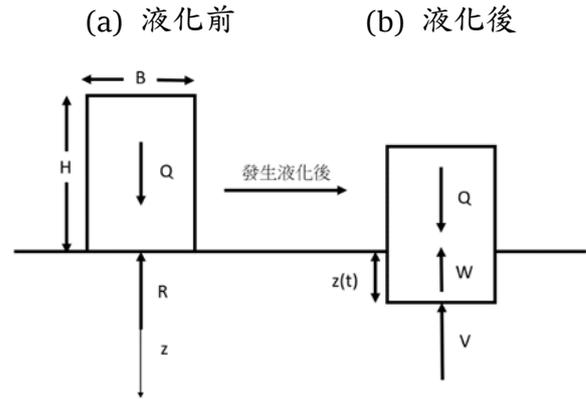


圖 8、土壤液化造成結構沉陷示意圖

三、研究方法

3-1 Plaxis 3D

本研究主要模擬 0206 美濃地震災害區在地震後，發生土壤液化產生沉陷量的情形，因此除了選用動態分析的計算，並對動態邊界進行定義，其定義條件如：黏性(Viscous)、自由邊界(Free-Field)等兩種形式，為模擬發生地震的情況，因此本研究選用黏性(Viscous)邊界，使地震在傳遞過程中能量只會消減而不會消散。而為模擬液化後土壤體積應變的情形，在計算孔隙水壓模式選用排水(drained)，使模型能呈現發生土壤液化後，且超額孔隙水壓消散之後土壤沉陷的變化情形。為符合現地狀況，在土壤模型上方加上了均佈載重，以模擬房子在土壤上的狀況(如圖 11)。面積為 144 平方公尺(約 43 坪)、均佈載重假設為 40 kN/m^2 以模擬四層樓民房，地震位置設置在土層模型下方，如圖 9 所示。

表 3、土壤模型尺寸

長(m)	寬(m)	高(m)	地下水位(m)
30	30	15	1.9

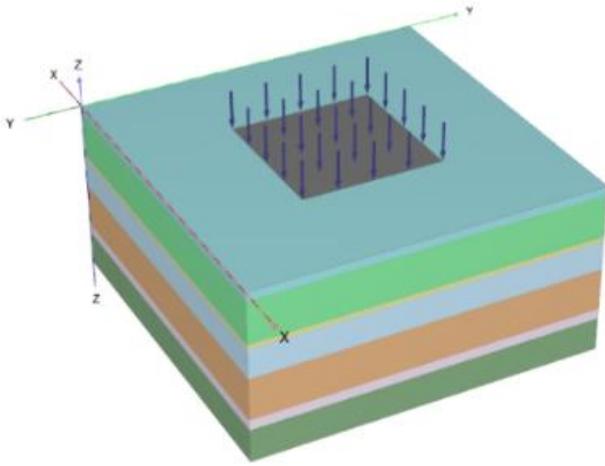


圖 9、Plaxis 3D 模型圖

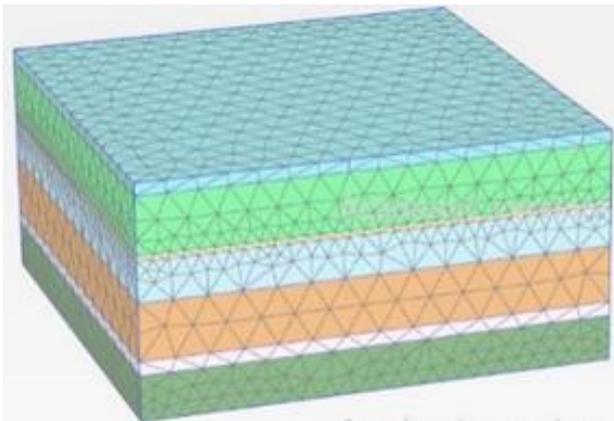
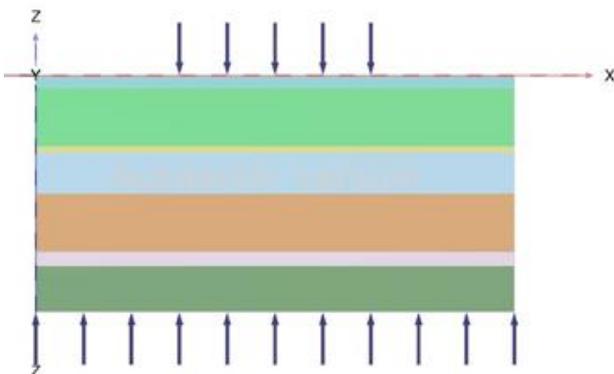


圖 10、模型網格化

圖 11、模型上方為承载力(40kN/m²)，下方為地震力(0.25G)

四、研究結果

4-1 Seed 簡易液化評估法

以土層細料含量(FC%)及深度(m)求得修正後之 N_1 ，並求得安全係數 F_L 進行液化評估。如表 4，並以 Iwasaki 和 Ishihara & Yoshimine 推算出該區的液化嚴重程度和沉陷量，如表 5 和表 6。由表可知此區發生液化的土層幾乎集中地下水位 1.9m 至 9.3m 的土層，液化土層厚度約 7.4m。

表 4、Seed 法液化評估成果

土層	FC(%)	layer(m)	N_1	F_L	comment
ML	68.4	0-1.5	6.1	1.6	N
SM	19.8	1.5-3.0	5.0	0.5	L
SP-SM	12	3.0-4.5	4.9	0.3	L
SM	26.1	4.5-6.2	3.7	0.4	L
SM	12.2	6.2-7.5	10.8	0.5	L
SP-SM	8.6	7.5-9.3	12.2	0.6	L
ML	52.3	9.3-11.1	31.0	2.5	N
CL	98.3	11.1-12.0	9.3	2.3	N
SM	17.4	12.0-13.5	38.4	2.5	N
SM	18.8	13.5-15.0	41.5	2.7	N

表 5、Iwasaki 液化潛能指數(Seed 法)

dz (m)	Layer (m)	$F(z)=1-F_L$	$W(z)=10-0.5z$	$F(z)*W(z)*dz$
1.5	0-1.5	0	9.25	0
1.5	1.5-3.0	0.5	8.5	6.24
1.5	3.0-4.5	0.7	7.75	8
1.7	4.5-6.2	0.6	6.93	7.3
1.3	6.2-7.5	0.5	6.25	4.1
1.8	7.5-9.3	0.4	5.38	4.19
1.8	9.3-11.1	0	4.48	0
0.9	11.1-12.0	0	4.0	0
1.5	12.0-13.5	0	3.25	0
1.5	13.5-15.0	0	2.5	0

表 6、安南區一建築物沉陷量(Seed 法)

土層	layer(m)	dz(m)	H(cm)
ML	0-1.5	1.5	0
SM	1.5-3.0	1.5	7.2
SP-SM	3.0-4.5	1.5	7.2
SM	4.5-6.2	1.7	8.67
SM	6.2-7.5	1.3	4.29
SP-SM	7.5-9.3	1.8	5.58
ML	9.3-11.1	1.8	0
CL	11.1-12.0	0.9	0
SM	12.0-13.5	1.5	0
SM	13.5-15.0	1.5	0
			32.94

4-2 國震中心 HBF(2012)法

以土層細料含量(FC%)及深度(m)求得修正後之 N_1 ，並求得安全係數 F_L 進行液化評估液化評如表 7，並以 Iwasaki 和 Ishihara & Yoshimine 推算出該區的液化嚴重程度和沉陷量，如表 8 和表 9。由表可知此區發生液化的土層幾乎集中地下水位 1.9m 至 6.2m 的土層，液化土層厚度約 4.3m。

表 7、HBF 法液化評估成果

土層	FC(%)	layer(m)	N_1	F_L	comment
ML	68.4	0-1.5	13.3	1.9	N
SM	19.8	1.5-3.0	8.9	0.9	L
SP-SM	12	3.0-4.5	7.8	0.7	L
SM	26.1	4.5-6.2	5.7	0.6	L
SM	12.2	6.2-7.5	15.9	1.0	N
SP-SM	8.6	7.5-9.3	17.5	1.0	N
ML	52.3	9.3-11.1	24.2	7.4	N
CL	98.3	11.1-12.0	6.9	1.0	N
SM	17.4	12.0-13.5	26.3	3.7	N
SM-5	18.8	13.5-15.0	25.8	3.8	N

表 8、Iwasaki 液化潛能指數(HBF 法)

dz(m)	layer(m)	$F(z)=1-F_L$	$W(z)=10-0.5z$	$F(z)*W(z)*dz$
1.5	0-1.5	0	9.25	0
1.5	1.5-3.0	0.1	8.5	1.26
1.5	3.0-4.5	0.3	7.75	3.42
1.7	4.5-6.2	0.4	6.93	4.38
1.3	6.2-7.5	0	6.25	0
1.8	7.5-9.3	0	5.38	0
1.8	9.3-11.1	0	4.48	0
0.9	11.1-12.0	0	4	0
1.5	12.0-13.5	0	3.25	0
1.5	13.5-15.0	0	2.5	0

表 9、安南區沉陷量(HBF 法)

土層	dz(m)	layer(m)	H(cm)
ML	1.5	0-1.5	0
SM	1.5	1.5-3.0	5.4
SP-SM	1.5	3.0-4.5	6
SM	1.7	4.5-6.2	7.48
SM	1.3	6.2-7.5	0
SP-SM	1.8	7.5-9.3	0
ML	1.8	9.3-11.1	0
CL	0.9	11.1-12.0	0
SM	1.5	12.0-13.5	0
SM	1.5	13.5-15.0	0
			18.88

4-3 Shahir and Pak (2010)淺基礎沉陷量

根據 Shahir and Pak (2010)提出液化土層厚度來計算其沉陷量，表 10 為使用 Seed 法和 HBF 法不同的液化土層厚度(Z_L)，來比較不同厚度間沉陷量的差別，由表 10 可知當液化厚度越厚實其沉陷量會越大。

表 10、Shahir and Pak (2010)沉陷結果

B(m)	L(m)	Q(kPa)	Z_L (m)	S(m)
6	6	42	7.4	0.21
6	6	42	4.3	0.12

4-4 Sawicki and Mierczyn'ski (2009)

Sawicki and Mierczyn'ski (2009)提出以結構在液化前後重力不變的情況下，考慮土壤液化時產生的黏滯值，計算其沉陷量。表 11 為安南區一建築物之參數，B 為結構寬度(m)，L 為結構長度(m)，H 為結構高度(m)，Q 為結構重力(N)， η 為土壤黏滯度(N/m³)， γ_m 為土壤之單位重(N/m³)。

表 11、建築物參數表

Q (N)	B (m)	L (m)	H (m)	η (N/m ³)	γ_m (N/m ³)
1.7*10 ⁷	9.8	9.8	9	10 ⁶	19000

以表 11 之參數推算出尺寸比 a 與重力比 b 後，本文假設地震時間為 20 秒，代入公式後可得沉陷量，其成果如表 12 所示。

表 12、Sawicki and Mierczyn'ski (2010)沉陷結果

a	b	t(s)	z(cm)
0.019	0.021	20	31

4-5 Plaxis 3D

為模擬現場實際狀況，假設土壤上方有 40kN/m² 的承載力，以模擬四層樓的民房，以 Plaxis 軟體進行模擬分析，並將成果與其他方法做比較。圖 10 為 Plaxis 模擬成果，當有添加載重時沉陷量為 35.38 公分，沒有添加載重時，其沉陷量為 30.42 公分，兩者相差約 5 公分，因此對於在評估液化沉陷量時，除了針對土壤進行評估外，也建議將載重的影響一併討論。

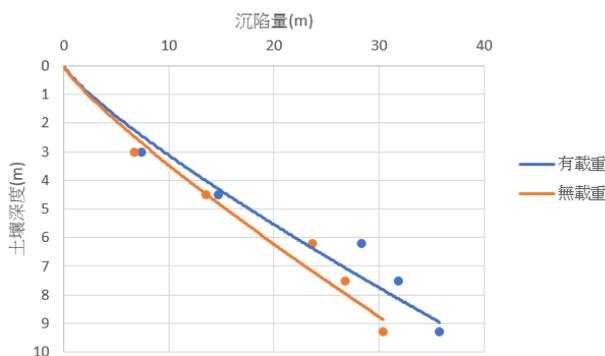


圖 10、Plaxis 成果圖

4-5 與實際案例比較

根據表 6 中所敘述，Seed 液化評估法進行計算時可以發現其液化土層範圍大約在 3~9 公尺，而國震中心 HBF 法液化土層範圍只在 3~6 公尺，造成 Seed 法與 HBF 法沉陷量產生極大的差異，如下圖 12 中所示，而 Shahir and Pak 於 2010 年所提出的方法計算，因考慮到計算時添加淺基礎，對液化評估與前三者不同，所以使用 Plaxis 軟體進行添加淺基礎、無添加淺基礎進行模擬，發現 Plaxis 軟體進行分析時，添加淺基礎後成果與 Seed 法計算成果相近，而無添加淺基礎時，沉陷量則偏小，同時再以比較成果如下表 13 所示。

表 13、安南區沉陷量(無載重)

研究方法	沉陷量(cm)
現場實際沉陷量	19 ~ 50
Seed(1985)和 I&Y 法 (1992)	33.0
HBF(2012)和 I&Y 法 (1992)	18.8
Plaxis 3D(無載重)	30.42

表 14、安南區沉陷量(有載重)

研究方法	沉陷量(cm)
Sawicki and Mierczyn'ski (2009)	33.0
Shahir and Pak(2010)	21.0
Plaxis 3D(有載重)	35.38

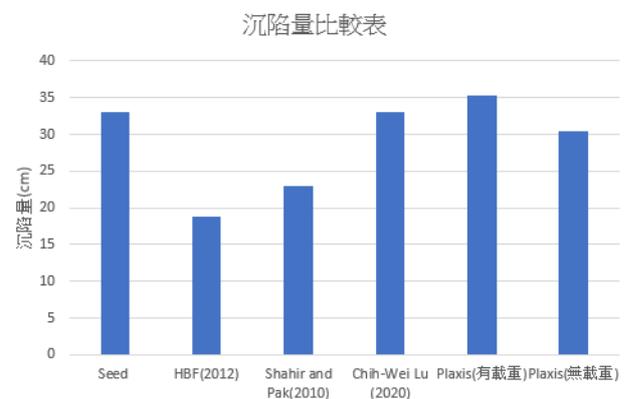


圖 12、沉陷量比較圖

五、結論

依據表 4 的評估結果發現，該區主要發生液化的土層集中在深度 1.5 公尺至 9.3 公尺的土層之間，液化土層厚度接近於 8 公尺厚，導致其液化土層較厚的主因，可能是其地理位置所影響，長期受到鹽水溪和嘉南大圳排水線沖刷及堆積作用的影響，且地下水位長期偏高，才會導致該區沉陷狀況較為嚴重。

根據表 13 所示，以 Seed(1985)法、Sawicki and Mierczyn'ski (2009)和 Plaxis 3D 三者成果較為相近，且符合現地實際沉陷量的範圍。綜合五種方法的計算成果，整體而言其結果皆符合現地實際量測得之沉陷量。HBF 法在於土壤評估的情況較為保守，導致其沉陷量相較於其他方法來說偏低。以 Plaxis 的沉陷量來看，有載重的成果相較無載重的相差 5 公分，雖然以數字來看並不大，但以現場來說足以造成很大的影響，因此在探討沉陷量時建議將淺基礎所造成的影響一並加入討論。

參考文獻

1. 李德河、吳建宏、蔡百祥，「美濃地震台南震害區之大地環境特性」，*土工技術*，第 148 期，第 45~58 頁，2016。
2. 翁佳音、劉益昌、黃文博、許清保，「台江國家公園及周緣地區人文歷史調查及保存之先期規劃成果報告」，*台江國家公園管理處*，委託研究報告，2010。
3. 陳宗偉，「修改 Meyerhof 評估法計算淺基礎受土壤液化引致之沉陷」，*國立高雄科技大學*，營建工程系研究所碩士論文，2016。
4. 黃俊鴻、陳正興、莊長賢，「本土 HBF 土壤液化評估法之不確定性」，*土工技術*，第 133 期，第 77-86 頁，2012。
5. Ishihara, K. and M. Yoshimine, "Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Liquefaction during Earthquake," *Soils and Foundations*, Vol. 32, No. 1, pp. 173-188, 1992.
6. Iwasaki, T., K. Tokida, F. Tatsuoka, S. Watanabe, S. Yasuda, and H. Sato., "Soil Liquefaction Potential Evaluation with Use

of the Simplified Procedure," *Microzonation Conference*, Seattle, p.p. 1319-1330, 1982.

7. Seed, H.B., K. Tokimatsu, L.F. Harder and R.M. Chung, "The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluation," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111, No.12, pp.1425-1445, 1985.
8. Shahir, H. and A. Pak, "Estimating liquefaction-induced settlement of shallow foundations by numerical approach," *Computers and Geotechnics*, Vol. 37, pp. 267-279, 2010.
9. Sawicki, A. and J. Mierczyn'ski, "On the behavior of liquefied soil," *Computers and Geotechnics*, Vol. 36, pp. 531-536, 2009.

高雄地區之 SPT-CPT 相關性研究

許少凡¹ 吳啓綸² 古志生*

¹義守大學土木與生態工程學系碩士班

²義守大學土木與生態工程學系碩士班

*義守大學土木與生態工程學系教授

摘要

標準貫入試驗與圓錐貫入試驗都是現地測量常用的試驗，為了調查 CPT 與 SPT 試驗數據在高雄地區的相關性關係。本研究利用高雄 29 處場址，共 559 筆 CPT 與 SPT 平行調查資料，透過大數據統計方式，採用平均及代表點兩種對應方式，通過錐尖阻抗 q_c 之變異係數作為篩選條件，篩選位在均勻土層的 CPT 及 SPT 數據進行對比。建立合理的 CPT、SPT 土壤數據相關性對照公式，並且探討兩種試驗數據在不同土壤中的相關性對應情況。試驗結果可作為日後 SPT、CPT 試驗之參考數據使用。

關鍵字：標準貫入試驗、圓錐貫入試驗、相關性

The Correlation of SPT-CPT and its Application in Kaohsiung

ShaoFan-Xu¹ Chi Lun-Wu¹ Chih Sheng-Ku*

¹Master Student, Department of Civil and Ecological Engineering, I-Shou University

*Professor, Department of Civil and Ecological Engineering, I-Shou University

ABSTRACT

There are two experiments normally used in situ measurement which are SPT and CPT. In order to research the correlation between the experimental data of CPT and SPT in Kaohsiung. This study will utilize 29 places in Kaohsiung, in total 559 parallel investigation data of CPT and SPT, big data analysis, two methods of average and representative point, and variable coefficient of q_c as screening conditions. Then comparing the data of CPT and SPT in homogeneous soil layer via these screening conditions. And rational correlation model of CPT and SPT soil data will be established, furthermore, this paper discusses the correlation condition of these two experimental data in different soil. The result of this experiment can be used as reference data in future SPT and CPT experiments.

Keywords: correlation, standard penetration test, cone penetration test

一、前言

標準貫入試驗是現場勘測和岩土設計中最常見的試驗之一。它操作簡單、適用場地範圍廣、技術成熟，且可以在試驗期間獲得土壤樣品，便於進行進一步的實驗室實驗。

但 SPT 存在著再現性及可靠性之問題，使得在應用上仍有猶豫。而 CPT 以簡易，準確以及記錄連續之優點，廣泛用於地質調查及基礎工程設計之中，為使 CPT 在地質調查初期能與 SPT 在設計上運用相輔相成，兩者關係

之建立當屬需要。

本研究通過收集整理高雄現地實驗數據，依照 USCS 統一土壤分類法對土壤進行分類並依照平均點對應法與代表點對應法對數據進行篩選後與現有不同地區之 SPT-N 值與 CPT 經驗式進行比對，分析討論不同篩選方法面對不同土層之優劣與各經驗公式在高雄地區之實際應用可行性，並建立適用於高雄地區之 SPT-CPT 相關經驗式。

二、文獻回顧

2-1 SPT

標準貫入實驗(Standard Penetration Test)是國內外應用較為廣泛的一種現場測試手段，該試驗屬於動力貫入的一種。標準貫入試驗幾乎適用於各種土層，包括地下水位及地下水位以上的土層，也包括部分強風化岩石，同時根據標準貫入實驗的錘擊數，可以判定岩石的風化程度、砂土的密度、黏土的稠度、地基的承载力標準值、樁基承载力等等。

2-1-1 標準貫入試驗的演進

標準貫入試驗(Standard penetration test)起源於 1902 年的歐洲，Charles R. Gow 利用 110 磅落錘將直徑一吋之取樣器以乾鑽取樣方法，取代了傳統的沖洗鑽探法，到 40 年代末，工程師 Terzaghi 和 Peck 憑藉著 20 年來的工程經驗，提出一系列與岩石參數相關的經驗公式，將 N 值推廣至淺基礎之設計上，並製造出相應的設備，如今已變成世界範圍內最常見的現地土壤試驗法。

2-2 CPT

圓錐貫入試驗最早出現在二十世紀二十年代，1935 年荷蘭開發出荷式圓錐貫入試驗，並且用於樁承载力試驗研究。1965 年圓錐貫入儀增加了摩擦力之測量，以及後續電子式圓錐貫入儀之發展，都增加了該試驗對土壤性能判定之功能與可靠性。

圓錐貫入試驗具備下列優點：

- 1、操作容易，迅速且經濟，並且試驗及設施標準化，人為誤差小。
- 2、提供土層之連續變化記錄，所獲得

資料較標準貫入試驗更有理論依據，能夠進行後續研究室實驗，對土層判斷及工程設計有較大幫助。

- 3、適用於不擾動土樣採取困難之土層調查。

因此圓錐貫入試驗已逐漸在世界範圍內受到重視與採用。

2-2-1 圓錐貫入試驗的基本原理

圓錐貫入試驗基本原理是通過一定的機械裝置，用靜力將標準規格的金屬探頭垂直均勻的壓入土層中，通過探頭傳感器實現一系列量的轉化，並由儀器記錄下來。由於地層中各種土壤的軟硬不同，探頭所受阻力也會發生變化，土壤的強度越高，探頭所受到的壓力也越大。感測器將大小不同的貫入阻力通過電信號輸入到記錄儀器中記錄下來，因此建立傳感器之應變值與貫入阻力的數值關係，從而得到土體的力學性質。

2-2 回顧 SPT-CPT 相關式

許多研究人員都已指出 spt-cpt 相關性經驗公式之重要性。不同的研究人員此前提出了不同的相關性與不同的參數並且考慮到了不同的因素(如 Robertson et al. 1983; Kulhawy and Mayne 1990; Akca 2003; Kara and Gunduz 2010 等)，為了便於分析，許多研究人員都採用綫性回歸來建立 SPT 與 CPT 之相關性，即 $q_c = nN$ 並且截距為零。該方法的優點是 CPT 試驗之 q_c 可以輕鬆、直接的轉換成 SPT-N 值，反之亦然。但這種方法也由於其簡單性與精度較低而受到爭議。

表 1 為此前不同研究人員根據不同地區土壤地址情況得出之綫性 SPT-CPT 相關經驗式。

表 1 現有不同土壤 SPT-N 值與 CPT 之經驗公式

Soil Types	Relationship	References
SM	$n=qc/N=0.35$	De Alencar Velloso D. (1959)
	$n=qc/N=0.5$	Franki Piles (Akca, 2003)
	$n=qc/N=0.7$	Akca (2003)
S	$n=qc/N=1.0$	Franki Piles (Akca, 2003)
	$n=qc/N=0.57$	Danziger et al. (1998)
	$n=qc/N=0.42$	Kara and Gunduz (2010)
C	$n=qc/N=0.2$	Franki Piles (Akca, 2003)
	$n=qc/N=0.45$	Danziger et al. (1998)
	$n=qc/N=0.19$	Kara and Gunduz (2010)
ML	$n=qc/N=0.2$	Schmertmann (1970)
	$n=qc/N=0.38$	Kara and Gunduz (2010)
	$n=qc/N=0.58$	(Akça, 2003)

三、現地案例資料庫

3-1 研究區資料、鑽孔資料分佈

本研究 29 處場址皆位於高雄市範圍，高雄位處臺灣西南部，2010 年縣市合併後，面積達 2952 平方公里，其中高山面積約占 1535 平方公里(52%)，丘陵與平原面積占 1417 平方公里(48%)。研究場址分別於茄萣區、路竹區、湖內區、岡山區、燕巢區、左營區、前金區、鹽埕區、新興區以及林園區共計十區，合計 29 處 CPT 及 SPT 平行調查資料，孔位分佈情形如圖 1 所示。

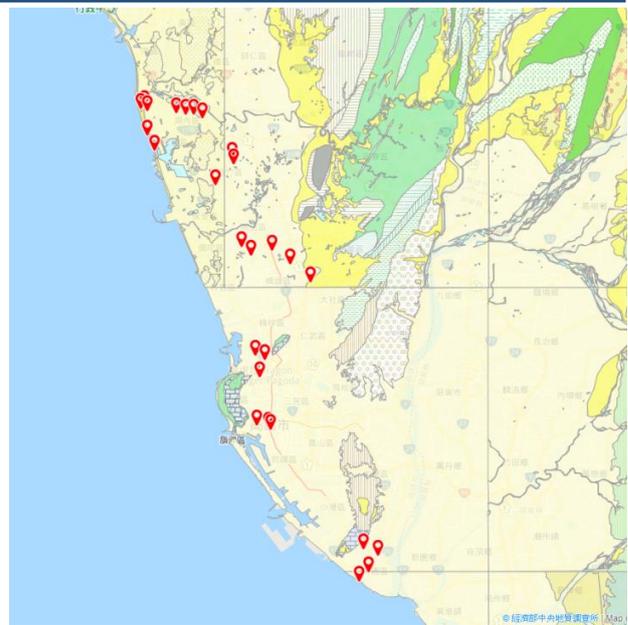


圖 1 研究區孔位分佈圖(經濟部中央地質調查所)

3-2 研究方法

國內大地工程地質調查，大部分以 SPT 試驗為主，SPT-N 值為試驗 45 公分深度之後 30 公分累積打擊次數，由 SPT-N 值能瞭解土層之土壤強度，且 SPT 試驗能夠取得土壤試樣進行物性試驗判斷土壤分類，其試驗頻率為每一或一點五公尺進行一次。SPT-N 值和銅圈試樣之物性分析結果，即代表該段的土壤力學性質和土壤分類，SPT 試驗應用在均勻土層之調查結果影響較不明顯，但國內沿海地區大多為沖積地層具有較多夾層或互層，在此類地層上，SPT 試驗無法得知較為詳細的地層強度及分佈，調查結果可能會與真實的地質狀況有所差異。

CPT 試驗具備簡單、快速且精準之特性，能夠取的連續且不間段的貫入阻抗，能清楚地得知地層分佈情形，因此相較於傳統 SPT 試驗，CPT 試驗會更適合應用在國內沿海之地質調查。

本研究利用高雄地區 29 處 CPT 及 SPT 平行調查資料，分為兩個階段，建構良好之 CPT 及 SPT 土壤分類對應模式，第一階段使用平均對應法和代表點對應法，利用不同的方式去代表 CPT 數據，而後計算變異係數(CV)與正規化均方根誤差(NRMSE)，以進行土層均勻性的探討，並藉此決定篩選係數；第二

階段運用相似概念，以對應段內 45 公分(十筆)CPT 數據 q_c 之變異係數，篩選掉位於變層或夾層之不具代表性土壤，在均勻土層進行 CPT 及 SPT 土壤相關性之結果探討。

3-2-1 數據比對及合理性探討

因 CPT 與 SPT 兩種試驗之取樣頻率及範圍不同，無法進行一對一的資料比對(如圖 2)，而土壤分類比對時，1 筆 SPT 數據會對應 10 筆 CPT 數據，此種多對一的狀況通常會取多筆資料之平均和單筆資料進行比對，以土壤分類來說，此做法位於均勻土層或許可行，但高雄地區位處沖積平原，地層較為複雜，無法直接用平均方式進行資料比對，因此本研究建置了平均對應法及代表點對應法兩種方法，利用不同之代表方式去代表 CPT 數據，而後計算兩種方法之標準差與變異係數進行比較，可以藉此得知兩種不同方法之差異以進行合理性探討。

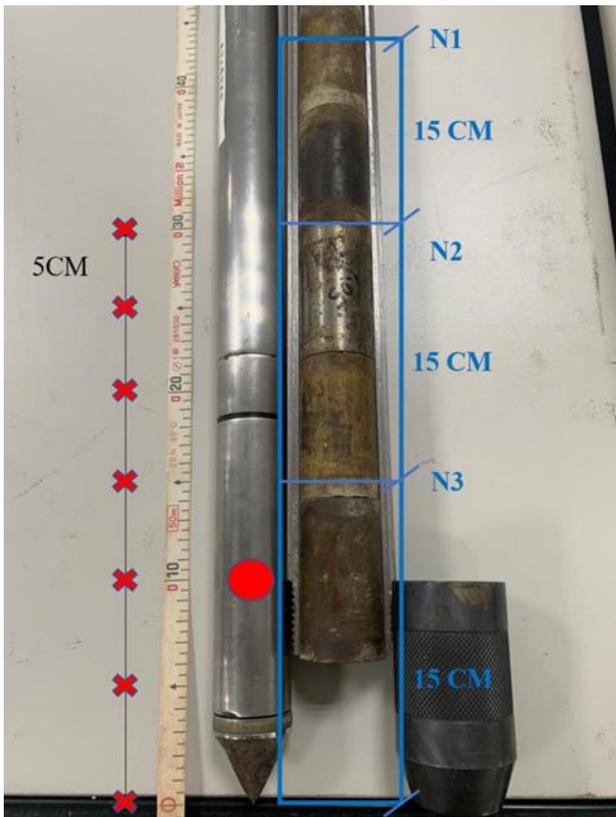


圖 2 CPT 與 SPT 數據對應示意圖(引自鄭伯緯，2020)

(1)平均對應法：

SPT-N 試驗深度為(15+15+15)，而每筆原始 CPT 數據包含錐尖阻抗 q_c 、摩擦阻抗 f_s 、孔隙水壓 u_2 ，因此選用與對應段之後 30 公分內七筆 CPT 原始數據進行平均，可得平均錐尖阻抗 \bar{q}_c 、平均摩擦阻抗 \bar{f}_s 及平均孔隙水壓 \bar{u}_2 。平均對應法應用對應段 30 公分內七筆 CPT 數據的標準差與七筆數據平均的比值，計算出 q_c 、 f_s 、 u_2 、 I_c 的變異係數，此結果能直觀的得知對應段中七筆數據與平均值之離散程度。

變異係數(Coefficient of Variation, CV)又稱「離散係數」，在統計學中能夠表示離散程度之規一化量度，其定義為：

$$CV = \frac{\sigma}{\mu}$$

$$\text{其中：標準差 } \sigma = \sqrt{\sum \frac{1}{n} (x - \mu)^2}$$

μ = 平均值

(2)代表點對應法：

代表點對應法選用與 SPT 銅圈取樣段平行之單筆 CPT 數據為代表(q_c 、 f_s 、 u_2)，以此單筆數據做為代表點進行對應(Ku et.al, 2009)，相較於平均對應法，採取樣段單筆數據進行對應之方式，能得到較直接的結果。代表點對應法運用與平均對應法相同的概念，使用均方根誤差(Root-mean-square error, RMSE)進行離散程度之計算，均方根誤差代表的是預測值與觀測值之差的平方根，而正規化均方根誤差(Normalized root mean square error, NRMSE)定義式如下：

$$NRMSE = \frac{RMSE}{x_p}$$

$$\text{其中：均方根誤差 } RMSE = \sqrt{\sum \frac{1}{n} (x - x_p)^2}$$

x_p = 預測值(代表點)

正規化後之均方根誤差，代表的是對應段中各數據和代表點之離散程度，與變異係數概念相同，因此此兩種方法的分析結果可

以用做變異程度比較。變異係數越小，代表離散程度越低，運用在土壤對應上，及能代表該段土層的變化越小，位處較為均勻之土層。在 CPT 試驗的數據中，以錐尖阻抗 q_c 的準確度最高且最具代表性，因此本研究以 q_c 之變異係數為依據，以設定平均對應法與代表點對應法之篩選係數，作為第二階段土壤分類之篩選依據，當對應段內代表之 q_c 變異係數值大於篩選係數值時，則視該筆數據為無效資料。表 2 為個篩選係數 q_c 篩選後之結果。依土層均勻性探討，平均及代表點對應法之 $q_{c,CV}$ 及 $q_{c,NRMSE}$ 約在 0.3 時，對應段中七筆數據偏差程度約在可接收之範圍，因此本研究依此結果以 $q_c=0.3$ 作為篩選依據。

表 2 q_c 各係數篩選結果

q_c	平均對應篩選後%	代表點對應篩選後%
不篩	100	100.0
1	99.8	91.0
0.9	99.3	90.1
0.8	98.3	88.0
0.7	97.0	86.3
0.6	94.0	85.0
0.5	86.9	82.6
0.4	80.1	77.5
0.3	71.7	68.9
0.2	60.1	56.2
0.1	34.6	28.3

將對應段 SPT 土壤分類之結果中，資料筆數較小之土壤併入性質相似之土壤中，經合併後四類筆數較多之土壤，分別為粉土質砂 SM 共 226 筆，砂 S 共 79 筆(含 SC 兩筆、SC-SM 一筆、SP 五筆、SP-SM 五十六筆、SW-SM 十五筆)、粘土 C 共 137 筆(含 CH 四筆、CL 一百零四筆、CL-ML 二十九筆)、低塑性粉土 ML 118 筆，後再以 $q_c = 0.3$ 作為篩選條件將土壤進行篩選，探討兩種對應方法在不同土壤類型中篩選前後 SPT-CPT 相關性之對應情況。

四、SPT-CPT 相關性

土壤液化是導致生命損失與財產破壞的一個重要因素，液化潛力評估是 SPT-CPT 經驗公式的一個重要應用，即 SPT 是某些評估公式中的一個重要參數(Boulanger, RW. and Idriss, 2014)。而土壤類型是影響液化發生的一個重要因素，因此本研究選擇了砂土、低塑性粘土、低塑性粉土作為研究對象。

本研究通過平均對應法、代表點對應法、 $q_c < 0.3$ 篩選法三種方法進行高雄市 29 處調查點之 CPT-SPT 平行調查資料之實際值 q_c 與此前研究人員之 SPT-CPT 相關性經驗公式得出之理論值 q_c 進行均方根誤差 RMSE 計算，以 RMSE 大小來評估前研究人員之 SPT-CPT 相關性經驗公式是否適合用於高雄地區之不同土壤類型。RMSE 是用來衡量觀測值與真值之間的偏差，越接近 0 表示兩係數相關性越大。

4-1 對應點 CPT q_c 與 SPT-N 相關性

表 3 對應點理論值與實際值均方根誤差

Soil Types	Relationship	RMSE
SM	$n=q_c/N=0.35$	4.13
	$n=q_c/N=0.5$	3.85
	$n=q_c/N=0.7$	5.37
S	$n=q_c/N=1.0$	8.66
	$n=q_c/N=0.57$	3.81
	$n=q_c/N=0.42$	3.57
C	$n=q_c/N=0.2$	2.69
	$n=q_c/N=0.45$	2.66
	$n=q_c/N=0.19$	2.71
ML	$n=q_c/N=0.2$	3.54
	$n=q_c/N=0.38$	2.71
	$n=q_c/N=0.58$	3.28

表 3 為代表點對應法篩選數據後，4 種土壤在不同經驗公式之 RMSE，由表格可以得知：

1. 黏土土壤較其他類型土壤表現出更好的相

關性，並且其不同經驗公式之 RMSE 波動較小。

- 粉土質砂(SM)幾種經驗公式之 RMSE 較其他土壤均比較高，說明其經驗公式在高雄均不適合使用。圖 3 為對應點法 SM 土壤三種經驗公式散點圖，有圖可知 Franki Piles 之 SM 土壤經驗公式散佈較為均勻的分散在斜率為 1 之參考線兩端。符合表 2 之 RMSE 數據。

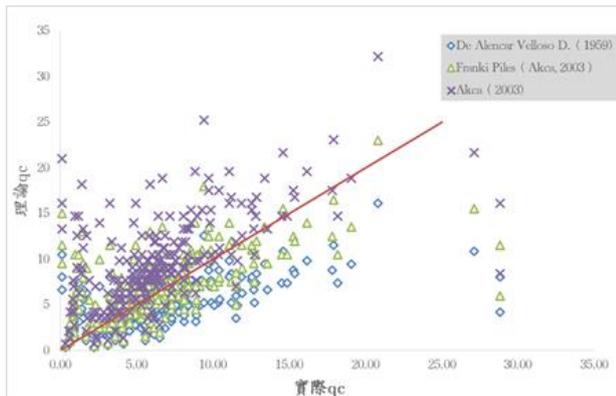


圖 3 對應點法 SM 土壤三種經驗公式散點圖

4-2 平均點 CPTqc 與 SPT-N 相關性

表 4 平均點點理論值與實際值均方根誤差

Soil Types	Relationship	RMSE
SM	$n=qc/N=0.35$	3.728
	$n=qc/N=0.5$	3.37
	$n=qc/N=0.7$	4.99
S	$n=qc/N=1.0$	8.47
	$n=qc/N=0.57$	3.45
	$n=qc/N=0.42$	3.20
C	$n=qc/N=0.2$	2.61
	$n=qc/N=0.45$	2.44
	$n=qc/N=0.19$	2.64
ML	$n=qc/N=0.2$	3.36
	$n=qc/N=0.38$	2.58
	$n=qc/N=0.58$	3.38

表 4 為代表點對應法篩選數據後，4 種土壤在不同經驗公式之 RMSE，由表格可以得知：

- 相較於代表點法，平均點法得到的 RMSE

更小，表明平均點法相較對應點法得到的數據相關性更高。

- 黏土土壤較其他類型土壤表現出更好的相關性，並且其不同經驗公式之 RMSE 波動較小。
- ML 之 RMSE 較對應點法無大幅度變化。

4-3 $q_c < 0.3$ 篩選後 CPT q_c 與 SPT-N 相關性

表 5 為代表點對應法篩選數據後，4 種土壤在不同經驗公式之 RMSE，由表格可以得知：

- 經過 $q_c < 0.3$ 篩選後，粉土質砂(SM)與其他種類砂土之 RMSE 均有提高，表明篩選後現地數據與經驗公式計算出之理論數據相關性有提高。
- 黏土土壤較其他類型土壤表現出更好的相關性，並且粘土之 RMSE 無明顯變化。
- ML 之 RMSE 較篩選前數據反而出現上升。

表 5 $q_c < 0.3$ 篩選後點理論值與實際值均方根誤差

Soil Types	Relationship	RMSE
SM	$n=qc/N=0.35$	3.94
	$n=qc/N=0.5$	2.90
	$n=qc/N=0.7$	4.00
S	$n=qc/N=1.0$	7.49
	$n=qc/N=0.57$	2.72
	$n=qc/N=0.42$	3.13
C	$n=qc/N=0.2$	2.64
	$n=qc/N=0.45$	2.69
	$n=qc/N=0.19$	2.66
ML	$n=qc/N=0.2$	3.99
	$n=qc/N=0.38$	2.89
	$n=qc/N=0.58$	2.80

五、結論與建議

本研究通過高雄地區現地 SPT-N 與 CPT 平行試驗資料，參考現有學者之 SPT-N 與 CPT 經驗公式選擇三種篩選方法對高雄地區不同土壤類型進行相關性研究，經過探討分析得出以下結論：

1. 以 $q_c < 0.3$ 篩選法在三種方法中砂土之 RMSE 為最小，可以認為如想在砂土中進行相關性分析可以使用以 q_c 之某個定值為標準進行的篩選方法。
2. 三種方法在粘土中均保持 RMSE 穩定，故三種方法在粘土之相關性研究中均可使用。
3. 對於低塑性粉土 ML 而言，平均法有著較低的 RMSE。故如想在砂土中進行相關性分析可以使用平均對應法。
4. 現有 SPT-N 與 CPT 相關經驗公式在高雄地區試驗資料之 RMSE 均超過 2，顯示現有經驗公式在高雄地區之應用不理想，有待進一步建置適用對應式。

參考文獻

1. 鄭伯緯，“高雄地區土壤分類特性研究”，義守大學，土木與生態工程學系，碩士論文，2020。
2. 經濟部中央地質調查所，「基本地質圖」，地質雲台，<https://www.geologycloud.tw/map/Stratum/zh-tw>
3. Akca, N. “Correlation of SPT-CPT data from the United Arab Emirates”. *Engineering Geology* 67: 219-231,2003.
4. Boulanger, RW. and Idriss, I.M. “CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures,” Report No. UCD/CGM-14/01, 2014.
5. Chang, M.F., “In-Situ Testing of residual soils in Singapore”. *Proceedings 2ND International Conference Geomechanics in Tropical Soils. VI.* 97-108, Singapore, 1988.
6. Feda Aral, Ekrem Gunes, “Correlation of Standard and Cone Penetration Tests: Case Study from Tekirdag (Turkey)”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245,2017
7. Fauzi Jarushi, S. AlKaabim, “A New Correlation between SPT and CPT for Various Soils,” *International Journal of Environmental, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, Vol:9 No:2, 2015
8. Kasim, A. G., C. Ming-Yau, and N. J. Curtis. “Field correlation of cone and standard penetration tests”. *Journal of Geotechnical Engineering* 112(3): 368-372,1986
9. Kulhawy, F. H. and P. H. Mayne. “Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design”. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute,1990.
10. Robertson, P.K., R.G. Campanella, and A. Wightman. “SPT-CPT Correlations”. *Journal of Geotechnical Engineering* 109(7): 1449-1459,1983.
11. Robertson, P.K. and Cabal, K.L., “Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering”, Gregg Drilling & Testing, Incorporation,2015.
12. Zhao, X., & Cai, G. “SPT-CPT Correlation and Its Application for Liquefaction Evaluation in China,” *Marine Georesources & Geotechnology*,33(3), 272-281.2014.

CPT 與 SPT 及 Vs 之液化潛能指數分析的差異性探討

古志生¹ 陳易廷² 歐昱賢²

¹義守大學土木與生態工程學系教授

²義守大學土木與生態工程學系專題生

摘要

土壤液化是大地工程的重要研究議題，採用現地試驗資料的簡化分析法為工程界廣泛應用於液化分析。目前現地地質調查以圓錐貫入試驗(Cone Penetration Test, CPT)、標準貫入試驗(Standard Penetration Test, SPT)、剪力波速(Shear-wave velocity, Vs)為主，也都發展出各自的液化潛能評估法。為了探討 CPT、SPT 及 Vs 三類液化潛能評估法應用於液化潛能指數之差異性，本文將利用中部某場址之鑽探及震測錐貫入試驗(Seismic Cone Penetration Test, SCPT)平行調查孔資料進行分析。本研究特別針對砂性土層、黏性土層及砂黏土互層探討各類評估法計算的液化潛能指數之差異，研究成果可以提供各類液化潛能評估法應用於不同土層之液化潛能指數分析及地盤液化風險評估之參考。

關鍵字：土壤液化、圓錐貫入試驗、標準貫入試驗、剪力波速

Evaluation of In-Situ Based Methods for Liquefaction Potential Assessment under Different Soil Conditions

Chih-Sheng Ku¹ Yi-Ting Chen² Yu-Sian Ou²

¹Professor, Department of Civil and Ecological Engineering, I-Shou University

²Project Studen, Department of Civil and Ecological Engineering, I-Shou University

ABSTRACT

Soil liquefaction is an important issue for geotechnical engineering. Simplified method was the popular for engineers. Two in situ testing methods, SPT, SCPT were conducted in different geological conditions ground. SPT-based, CPT-based, and Shear wave (Vs) based simplified methods were applied to evaluate the liquefaction potentials in study sites. This paper focus on evaluating the performance of the in situ based methods for liquefaction potential assessment in two type soil conditions.

Keywords: liquefaction, cone penetration test, standard Ppenetration test, shear wave velocity

一、前言

土壤液化是大地工程的重要研究議題，採用現地試驗資料的簡化分析法為工程界廣泛應用於液化分析。目前現地地質調查以圓錐貫入試驗(Cone Penetration Test, CPT)、標

準貫入試驗(Standard Penetration Test, SPT)、剪力波速(Shear-wave velocity, Vs)為主，也都發展出各自的液化潛能評估法。液化潛能指數(Liquefaction potential index, LPI)廣泛應用於評估地盤液化災害風險，為了探討 CPT、SPT 及 Vs 三類液化潛能評估法應用於液化潛

能指數之差異性，本文將利用篩選後砂性土壤地盤及砂性土壤和粘性土壤互層地盤之鑽探及震測錐貫入試驗 (Seismic Cone Penetration Test, SCPT) 平行調查孔資料進行分析。三類試驗資料各選兩種較常應用之簡易分析法進行各調查點之液化潛能指數分析，本研究特別針對砂性土層及砂黏土互層探討各類評估法計算的液化潛能指數之差異，研究成果可以提供各類液化潛能評估法應用於不同土層條件液化潛能指數分析及地盤液化風險評估之參考。

二、液化評估簡易法

2.1 SPT 液化評估法

液化分析簡易法的始祖 Seed and Idriss (1971) 提出的液化潛能半經驗評估方式之地震造成液化的作用剪力(反覆剪應力比 Cyclic stress ratio, CSR) 計算方式(式 1)，利用液化案例資料決定地層土壤的液化阻抗 (Cyclic resistance ratio, CRR)，並以公式(2)調整為震矩規模 7.5 的地震造成土壤液化之作用剪力比。

Seed and Idriss(1971)利用數個大地震發生液化案例資料定出土壤抗液化強度曲線，後續修定而成為應用 SPT-N 估算土壤抗液化強度 CRR 的常用評估方式(Seed et al., 1985)，1997 年舉辦的土壤液化國際專家會議中一致認可此強度曲線的修正(Youd et al. 2001)。日本道路橋示方書及日本建築學會均有建議之液化評估法，道路橋示方書建議之方法簡稱為 NJRA(1996)，日本建築學會建議之評估法簡稱 AIJ2001 法，兩者分析方法有些差異，但都採用之標準能量均為 72% (N72)，這與其他方法採用之標準能量為 60% (N60) 有所差異。日本道路橋 NJRA 法計算反覆阻抗比 CRR 之方式如公式 3、4，公式 3 適用於修正 N 值小於 14 之條件，大於 14 則採用公式 4。此法之反覆剪應力比 CSR 採用不折減的最大剪應力比之計算方式亦與其他方法採用平均剪應力比(公式 1)不同。AIJ 法計算反覆阻抗比 CRR 之方式如公式 5，其反覆剪應力比 CSR 之計算方式亦與其他方式不同，直接將震矩規模

納入計算如公式 6。Youd et al. (2001) 將 1998 土壤液化專家會議共識整理提出 Seed et al. (1985) 法為基礎的液化評估模式，將各種參數公式化方便進行計算，其反覆阻抗比 CRR 計算方式如公式 7。黃俊鴻等(2012)參考 Seed et al.(1985) 簡易評估法之架構提出雙曲線函數(Hyperbolic Function, HBF) 液化評估法，其反覆阻抗比 CRR 計算方式如公式 8。Boulanger and Idriss (2012) 利用最大似然統計法(maximum likelihood approach) 及液化案例資料庫提出機率式 SPT-N 液化評估法，設定液化機率為 0.15 時可推導出定值式反覆阻抗比 CRR 計算方式如公式 9。各種方法之詳細評估流程及相關參數可參考對應之文獻。

$$CSR = \left(\frac{\tau_{av}}{\sigma_{vo}} \right) = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma_{vo}} \right) r_d \quad (1)$$

$$CSR_{7.5} = \left(\frac{\tau_{av}}{\sigma_{vo}} \right) = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma_{vo}} \right) r_d \cdot \left(\frac{1}{MSF} \right) \quad (2)$$

$$CRR = 0.0882 \sqrt{(N_{1,72cs} / 1.7)} \quad (3)$$

$$CRR = 0.0882 \sqrt{(N_{1,72cs} / 1.7)} + 1.6 \times 10^{-6} \cdot (N_{1,72cs} - 14)^{4.5} \quad (4)$$

$$CRR = 0.2565 \cdot \left(\frac{16 \sqrt{N_{1,72cs}}}{100} + \left(\frac{16 \sqrt{N_{1,72cs}}}{80} \right)^{14} \right) \quad (5)$$

$$CSR = \left(\frac{\tau_{av}}{\sigma_{vo}} \right) = 0.1 (M_w - 1) \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma_{vo}} \right) r_d \quad (6)$$

$$CRR_{7.5} = \left(\frac{1}{34 - N_{1,60cs}} + \frac{N_{1,60cs}}{135} + \frac{50}{(10 \cdot N_{1,60cs} + 45)^2} - \frac{1}{200} \right) \quad (7)$$

$$CRR_{7.5} = 0.08 + \frac{0.0035 \cdot (N_{1,60cs})}{1 - (N_{1,60cs} / 39)} \quad (8)$$

$$CRR_{7.5} = \exp \left(\frac{\frac{N_{1,60cs}}{14.1} + \left(\frac{N_{1,60cs}}{126}\right)^2 - \left(\frac{N_{1,60cs}}{23.6}\right)^3}{\left(\frac{N_{1,60cs}}{25.4}\right)^4 - 2.80} \right) \quad (9)$$

2.2 CPT 液化評估法

圓錐貫入試驗 (Cone Penetration Test, CPT) 是公認較可靠的貫入試驗調查方法，試驗簡單、快速，可以取得準確而近似連續的試驗數據。Robertson and Wride (1998) 將其 CPT 土壤分類表之分類界限以同心圓公式表示，就是所謂的土壤行為分類指數 (soil behavior type index, I_c)，進而推導修正係數 (Kc) 調整而得的乾淨砂正規化錐尖阻抗 ($q_{c1N,cs}$)，並建議液化阻抗 (CRR) 為乾淨砂正規化錐尖阻抗之計算式 (式 10、式 11)。Robertson (2009) 參考 Boulanger and Idriss (2007) 細粒土壤液化或軟化的評估方式而推導出細粒土壤的液化評估模式，其反覆阻抗比 CRR 計算方式如公式 12。利用 Robertson and Wride 的砂性土壤 CPT 分析法為基礎及細粒土壤反覆阻抗比 CRR 計算方式而提出砂性與細粒土壤適用之 CPT-based 液化評估法。

Juang et al. (2008) 提出孔隙水壓錐試驗 (CPTu) 資料 (錐尖阻抗、摩擦阻抗、孔隙水壓) 為主的液化評估法，此種液化阻抗 CRR 計算方式直接將孔隙水壓參數納入考量 (式 13)，且分析案例包含細粒土壤，故適用於砂性類土壤與粘性類土壤。Ku and Juang (2012) 修正其正規化錐尖阻抗 (qt_{1N}) 計算方式及考慮覆土應力的修正上限 ($C_N \leq 1.7$) 重新分析案例資料，提出 CRR 評估模式中相關係數修正如公式 13a、13b、13c。

Idriss and Boulanger (2008) 檢視修正應力折減係數 (Stress reduction factor, r_d)、震矩尺度因子 (Magnitude scaling factor, MSF) 及覆土應力正規化參數 (Overburden normalization factor, C_N)，提出乾淨砂的液化阻抗曲線之計算。Boulanger and Idriss (2016) 更新細料含量修正方式並利用更新案例資料庫提出乾淨砂的機率式 CPT 液化阻抗計算式，建議液化機率 (P_L) = 15% 時可以推導定值式反覆阻抗比 CRR 之計算如式 14。

$$CRR_{7.5} = 0.833 \cdot \left(\frac{q_{c1N,cs}}{1000}\right) + 0.05 \quad (q_{t1N,cs} < 50) \quad (10)$$

$$CRR_{7.5} = 93 \cdot \left(\frac{q_{c1N,cs}}{1000}\right)^3 + 0.08 \quad (50 \leq q_{t1N,cs} < 160) \quad (11)$$

$$CRR_{7.5} = 0.053 Q_m \quad (12)$$

$$CRR_{7.5} = 0.05 + \exp \left(A + B \cdot \left(\frac{q_{t1N}}{100}\right)^C \right) \quad (13)$$

$$A = I_{c,BJ} \cdot (q_{t1N}/100) - 14.7 \quad (13a)$$

$$B = 0.909 \cdot I_{c,BJ}^3 - 7.47 \cdot I_{c,BJ} + 19.28 \quad (13b)$$

$$C = 0.059 + 0.015 \cdot I_{c,BJ}^2 \quad (13c)$$

$$CRR_{7.5} = \exp \left(\frac{q_{c1N}}{113} + \left(\frac{q_{c1N}}{1000}\right)^2 - \left(\frac{q_{c1N}}{140}\right)^3 + \left(\frac{q_{c1N}}{137}\right)^4 - 2.80 \right) \quad (14)$$

2.3 Vs 液化評估法

剪力波速 (Shear Wave Velocity, V_s) 也是土壤重要性質參數，可以藉由現地量測取得，例如震測錐貫入試驗 (SCPT) 即可在圓錐貫入試驗過程中進行震測試驗，試驗結果可評估土層剪力波速。有研究者根據剪力波速液化案例推導類似 SPT 或 CPT 的剪力波速液化評估方式。Andrus and Stokoe (2000) 提出簡易的正規化剪力波速計算反覆液化阻抗比 CRR 模式 (式 15)，其正規化方式與傳統簡易法類似 (式 16)，不過其指數 n 調整為 0.25，而且其修正係數 C_v 上限為 1.4。Kayen et al. (2013) 利用 422 個有剪力波速資料液化案例推導機率式剪力波速液化評估法，其反覆液化阻抗比 CRR 模式如公式 17，將液化機率設為 0.15 則該公式可用來計算定值式反覆液化阻抗比 CRR。

$$CRR = 0.022 \cdot \left(\frac{V_{s1}}{100}\right)^2 + 2.8 \cdot \left(\frac{1}{V_{s1}^* - V_{s1}} - \frac{1}{V_{s1}^*} \right) \quad (15)$$

$$V_{s1} = C_v \cdot V_s = \left(\frac{P_a}{\sigma_v}\right)^n \cdot V_s \quad (16)$$

$$CRR = \exp \left[\frac{\left((0.0073 \cdot V_{s1})^{2.8011} - 2.618 \cdot \ln(M_w) \right) - 0.0099 \cdot \ln(\sigma_v') + 0.0028 \cdot FC}{+ 0.4809 \cdot \Phi^{-1}(P_L)} \right] / 1.946 \quad (17)$$

2.4 液化潛能指數

地震液化可能引致地盤破壞 (Ground failure) 或造成結構物損壞 (Structural Damage)，液化潛能指數 (Liquefaction Potential Index, LPI) 是地盤液化災害風險評估的重要參考。液化潛能指數 (18 式) 是 Iwasaki et al. (1978) 提出之場址液化潛能評估方法，此指數主要考慮地表至深度 20 公尺深度內土層液化程度，液化層深度及液化土層累積厚度。根據日本 6 次地震 64 個液化與 23 個無液化之案例資料分析歸納而建議液化潛能指數 5 與 15 可作為低、高液化風險之判定依據。

Iwasaki 等人陸續在 1981、1982 之國際研討會中介紹此方法，最後 1982 研討會論文蒐錄在 1984 出版的 Soil Dynamics and Earthquake Engineering 國際期刊。此種液化危害度評估方式合乎邏輯且淺顯易懂，也相當簡單實用，因此許多研究者採用此指數作為區域性地震災害風險評估的參考 (Heidari and Andrus, 2010; Maurer et al. 2014; Rahman et al. 2015)。然而，各種評估法在地震條件及土層性質均相同情況下分析所得安全係數可能有所差異，將安全係數應用至液化潛能指數分析也會得到不同結果，是否仍然參考 Iwasaki et al. 建議的液化風險分級準則 (LPI=0、5、15) 值得探討。不過，本文研究重點在檢視各種評估法應用於液化潛能指數分析結果之差異，此議題另案探討。

$$LPI = \int_0^{20} F_L \times W(z) dz \quad (18)$$

三、研究區土壤特性及研究方法

3.1 研究區土壤特性

為了檢視各種評估法在液化潛能指數架構下之分析結果，本研究特別選取兩類不同地層之鑽探與 CPT 平行調查資料進行液化潛能指數分析。

圖 1-3 為砂性土壤地盤的案例地層剖面資料，(a)、(b) 兩小圖分別為 CPT 調查之錐尖阻抗及摩擦阻抗之剖面，(c) 小圖為孔隙水壓剖面，紅色線為靜態地下水壓分布，(d) 小圖

為土壤行為分類指數剖面， $I_c = 2.6$ 為砂性類與黏性類土壤的分類界線，(e) 小圖為鑽探資料。三個砂性土壤地盤調查點的地下水位分別為 1.95、4.12、3.72 公尺。地下水位下土層的平均錐尖阻抗分別為 6.81、5.48、8.44 MPa，平均摩擦阻抗分別為 63.4、65.0、78.1 kPa。孔隙水壓大部分都小於等於靜態水壓，顯示出砂性土壤之孔隙水壓不易激發之特性。

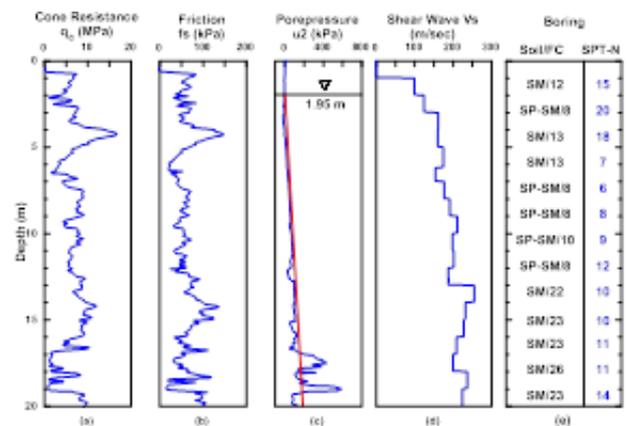


圖 1 砂性土壤地盤 Test 1 地層剖面-LH002

平均剪力波速分別為 196、213、220 m/sec，屬於剪力波速介於 180-270 m/sec 的第二類普通地盤。地層土壤大都為細料含量 8% 至 26% 之砂性土壤，平均細料含量分別為 15、13、15%。SPT-N 值介於 6 至 31 之間，平均 SPT-N 分別為 12、16、20。三處砂性地盤之土壤性質詳見表 1。

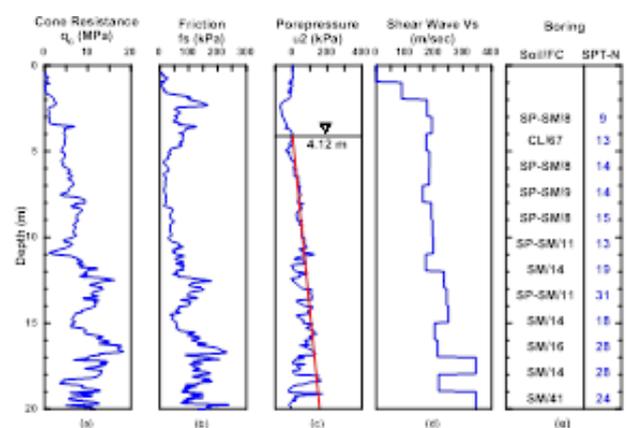


圖 2 砂性土壤地盤 Test 2 地層剖面-LH081

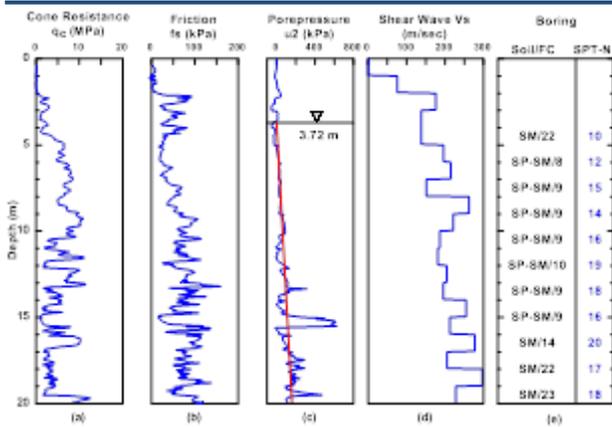


圖 3 砂性土壤地盤 Test 3 地層剖面 LH084

表 1 砂性土壤地盤調查點土壤性質

	LH002 Test-1	LH081 Test-2	LH084 Test-3
qc (MPa)	0.85 ~ 16.76 6.81 ± 3.02	1.16 ~ 18.25	0.96 ~ 12.58 5.48 ± 2.83
fs (kPa)	13.6 ~ 147.1 63.4 ± 26.6	8.44 ± 3.46	15.0 ~ 159.6 65.0 ± 29.0
u2 (kPa)	-21 ~ 588 82 ± 98	12.3 ~ 238.7	-49 ~ 625 84 ± 114
Vs (m/s)	99 ~ 255 196 ± 33	78.1 ± 51.4	138 ~ 297 213 ± 42
FC (%)	8 ~ 26 (15)	-38 ~ 173	8 ~ 23 (13)
SPT-N	6 ~ 20 (12)	46 ± 45	10 ~ 20 (16)

圖 4-6 為粘性土壤及砂性土壤交互出現之地層剖面資料，三處調查點鑽探水位分別為 4.5、1.8、0.95 公尺，經由 CPT 土壤分類發現三處調查點地下水水位下之砂性類土壤與粘性類土壤之總厚度分別為 7.6m/7.9m、8.2m/10m、7.25m/11.8m。三處調查點砂性類土層及粘性類土層之平均錐尖阻抗分別為 7.54/1.38 MPa、5.94/1.23 MPa、6.37/1.47 MPa。平均摩擦阻抗分別為 39.5/55.1 kPa、50.4/39.6 kPa、42.5/60.5 kPa。三處調查點在地下水水位之下交互出現孔隙水壓大於紅色線靜態水壓之情形，顯示出粘性類土層孔隙水壓激發特性，黏土層之平均孔隙水壓分別為 229 kPa、209 kPa、169 kPa。在砂性土層之孔隙水壓大都小於靜態水壓，平均孔隙水壓介於 35 kPa 至 45 kPa。

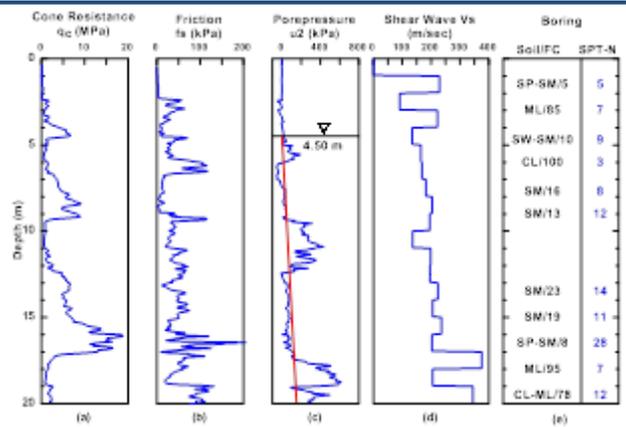


圖 4 砂/黏土互層地盤 Test 4 地層剖面

YH006

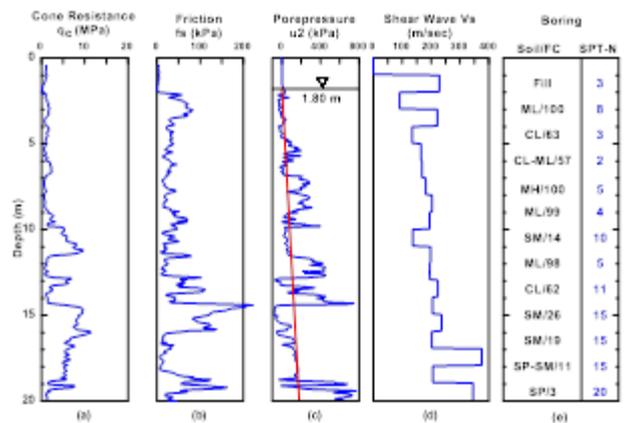


圖 5 砂/黏土互層地盤 Test 5 地層剖面

YH010

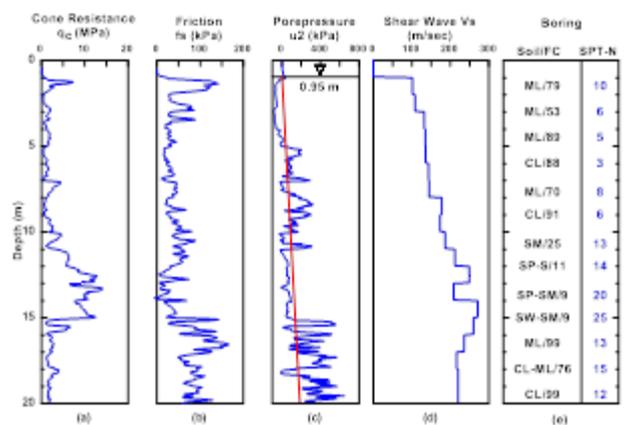


圖 6 砂/黏土互層地盤 Test 6 地層剖面

YH016

砂土層及黏土層平均剪力波速分別為 208/219 m/s、216/196 m/s、201/176 m/sec，大致上亦屬於剪力波速介於 180-270m/sec 的第二類普通地盤。三處砂性類地層的平均細料含量相近約為 15%。粘性類土層的平均細

料含量則介於 83% 至 91%。砂性類土層之平均 SPT-N 值介於 14 至 18 之間，粘性類土壤之平均 SPT-N 值介於 5 至 9 之間。三處砂性土壤及粘性土壤互層之詳細土壤性質詳見表 2。由表 2 之參數性質可以發現砂性類與粘性類之錐尖阻抗、孔隙水壓、細料含量、SPT-N 值等有顯差異，兩種土層的摩擦阻抗與剪力波速的差異較小。

3.2 研究方法

Iwasaki et al. 提出液化潛能指數的同時亦發表計算安全係數的簡易評估法應用在其指數之評估，此簡易評估法與日本道路橋液化評估方法類似，都是採用最大剪應力比。一般常用的液化簡易評估法大都採用平均剪應力比，分析所得安全係數應用於的 Iwasaki et al. 的液化潛能指數分析架構，可能會得到不一樣的液化潛能指數分析結果。圖 7、8、9 分別為 SPT、CPT、Vs 簡易法之液化阻抗比 CRR 曲線，可以發現各種方法在同一土壤阻抗下之 CRR 可能有所差異，在較高阻抗條件下之差異更明顯。

為了初步檢視各種評估法的 CRR 之差異，有些條件必須說明。日本兩種方法的修正能量均採用 N_{72} 而非 N_{60} ，因此日本兩種方法的 CRR 曲線係經能量修正後之計算結果。此外，日本道路橋(NJRA)法採用最大剪應力比而非平均剪應力比，因此將其 CRR 乘以 0.65 倍之修正。圖 7 至圖 9 為各種方法的 CRR 曲線，圖 7 可以發現除了日本道路橋之的 CRR 曲線與其他法有明顯差異外，其他 SPT 法之 CRR 曲線趨勢相同但數值略有差異，日本道路橋之 CRR 曲線在 N 值較高時之 CRR 明顯低於其他方法，屬於較保守的評估方法。HBF 法為國內黃俊鴻教授等由本土案例研究建立，國內工程師亦較熟悉日本日本相關規範，因此本文選用 HBF、AIJ、NJRA 三種 SPT 法與三種 CPT 法及兩種 Vs 法進行後續分析探討。由圖 7 至圖 9 均可發現不同方法之 CRR 曲線在同樣條件下之數值有所差異，同時，各種方法採用之 CSR 計匯方式也不完全相同，進而造成各種分析法評估所得之安全係數也會不同。

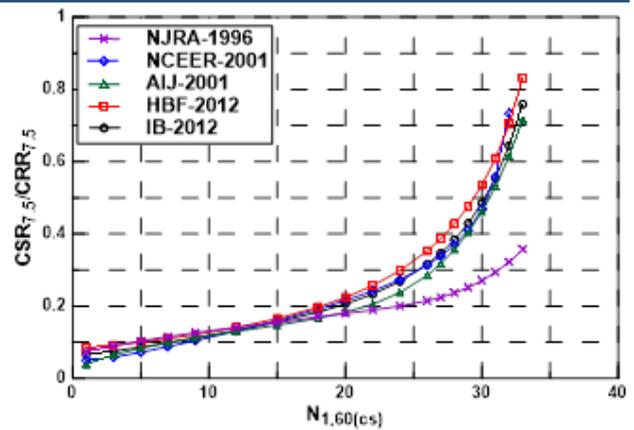


圖 7 SPT 法液化阻抗比 CRR 曲線

表 2 粘性/砂性土壤互層地盤調查點土壤性質

		Test-4 Sand =7.6m Clay =7.9m	Test-5 Sand =8.2m Clay =10.0m	Test-6 Sand =7.2m Clay =11.8m
Qc (MPa)	Sand	2.50 ~ 18.85 7.54 ± 3.80	1.20 ~ 11.44 5.94 ± 2.43	1.24 ~ 14.2 6.37 ± 3.63
	Clay	0.45 ~ 3.72 1.38 ± 0.66	0.15 ~ 5.06 1.23 ± 0.63	0.35 ~ 4.06 1.47 ± 0.71
Fs (kPa)	Sand	1.9 ~ 205.3 39.5 ± 31.1	5.8 ~ 222.3 50.4 ± 47.0	1.0 ~ 142.0 42.5 ± 28.2
	Clay	17.3 ~ 132.0 55.1 ± 29.5	1.0 ~ 160.0 39.6 ± 27.1	10.1 ~ 166.3 60.5 ± 36.9
U2 (kPa)	Sand	-52 ~ 130 41 ± 36	-81 ~ 179 45 ± 74	-86 ~ 445 35 ± 57
	Clay	-54 ~ 616 229 ± 170	-45 ~ 774 209 ± 206	-83 ~ 649 169 ± 183
Vs (m/s)	Sand	135 ~ 375 208 ± 34	135 ~ 375 216 ± 69	101 ~ 271 201 ± 51
	Clay	135 ~ 375 219 ± 81	91 ~ 345 196 ± 60	101 ~ 260 176 ± 47
Fc (%)	Sand	8 ~ 23 (15)	3 ~ 26 (15)	9 ~ 25 (14)
	Clay	78 ~ 100 (91)	57 ~ 100 (83)	53 ~ 99 (83)
SPT-N	Sand	8 ~ 28 (14)	10 ~ 20 (15)	13 ~ 20 (18)
	Clay	3 ~ 12 (7)	2 ~ 11 (5)	3 ~ 15 (9)

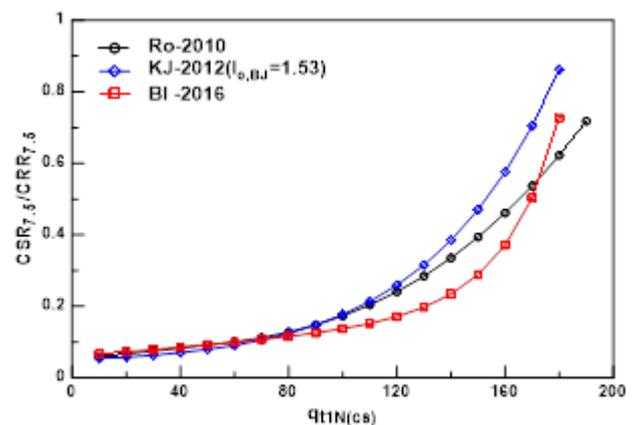


圖 8 CPT 法液化阻抗比 CRR 曲線

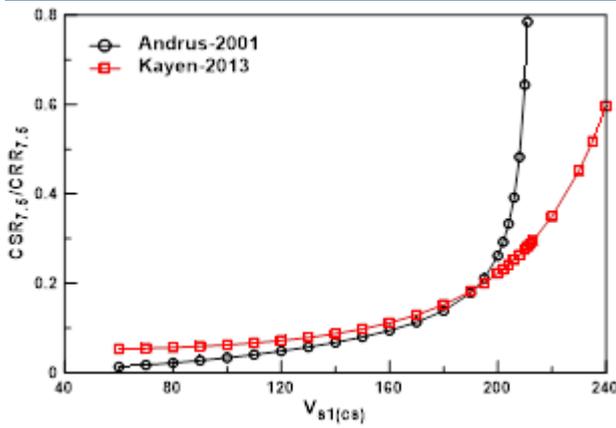


圖 9 Vs 法液化阻抗比 CRR 曲線

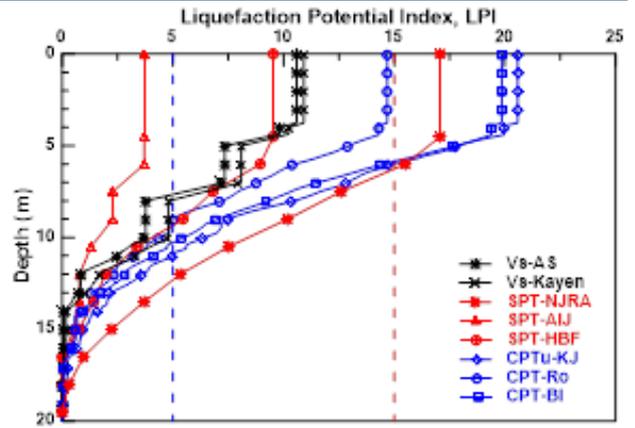


圖 11 LHO84 液化潛能指數曲線

四、分析與討論

本研究案例分析採用設計地震之震矩規模(Mw)7.1，最大水平加速度為 0.28g，地下水位為鑽探調查水位。圖 10 至圖 12 為砂性土壤地盤液化潛能指數成長曲線。黑色符號實線是 Vs 法之分析結果，紅色符號實線是 SPT 法分析結果，藍色符號實線則是 CPT 法分析結果。在砂性土壤地盤的分析結果可以發現 Vs 法由 20 公尺起至地表的 LPI 成長曲線與其他分法有較明顯差異，分析所得的 LPI 值相對其他方法之 LPI 值較小。Andrus and Stokie (AS)法之分析結果均小於 Kayen et al. (Kayen)法之 LPI 值，主要原因在於三處調查點之平均剪力波速介於 196-220 m/s，AS 法在此範圍以上之 Vs 對應之 CRR 較高所致(圖 9)。

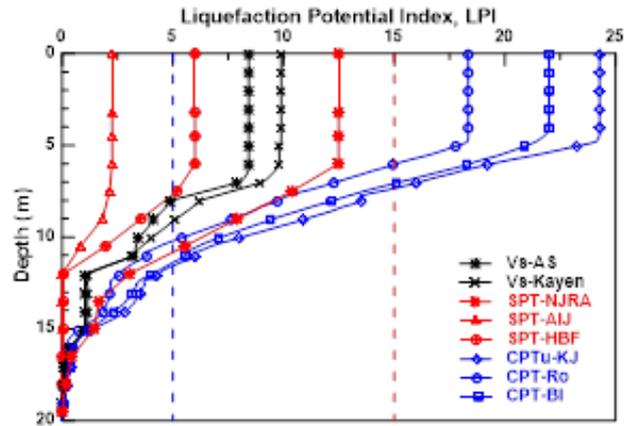


圖 12 LHO81 液化潛能指數曲線

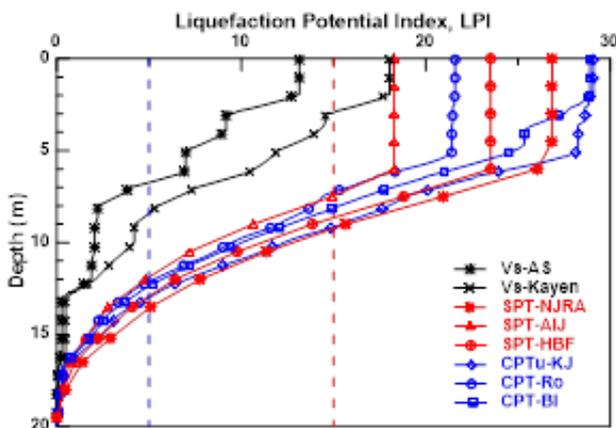


圖 10 LHO02 液化潛能指數曲線

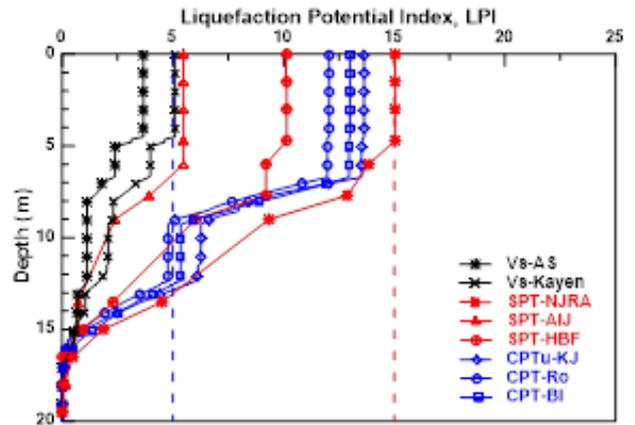


圖 13 YH006 液化潛能指數曲線

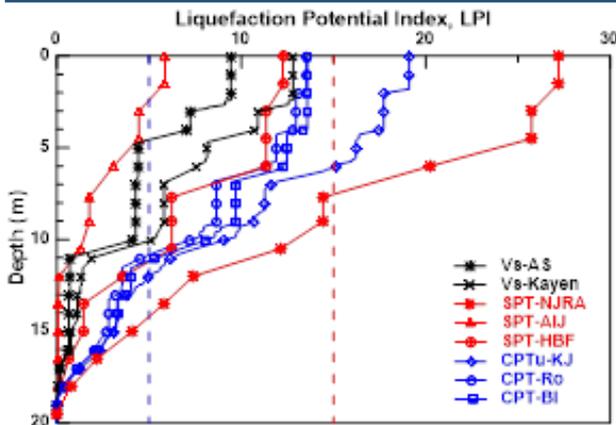


圖 14 YH010 液化潛能指數曲線

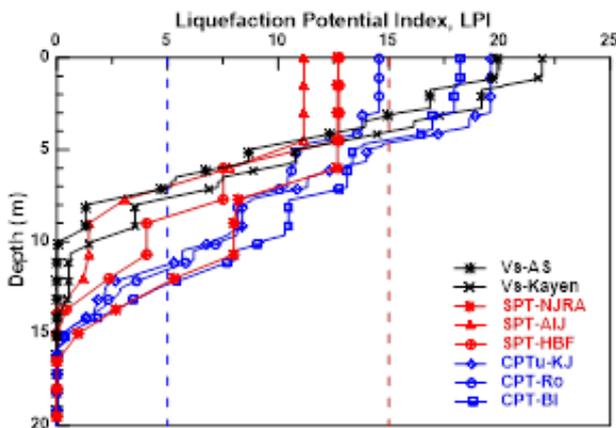


圖 15 YH016 液化潛能指數曲線

圖 7 的液化阻抗比曲線顯示 SPT 法除了 NJRA 法與其他方法有較顯著差異外，其他方法之 CRR 曲線相近，但實際應用到液化潛能指數架構時，會產生會差異更大，主要的原因在於各種方法考慮細料含量的修正方式不同。在選定的三種 SPT 法之中，三處調查點均呈現相同趨勢，LPI 值由大至小分別為 NJRA、HBF、AIJ。AIJ 的分析結果較 SPT 及 CPT 其他法之 LPI 值小，在 Test 2、3 的 LPI 值更是所有方法中最低者。NJRA 分析所得之 LPI 值是 SPT 法中最大值，NJRA 與 AIJ 兩種分析所得之 LPI 最大值與最小值之差異顯著，可能造成不同液化風險之分級。分析結果顯示 AIJ 相對不保守，HBF 相對於其他兩法似乎較為中道，而 NJRA 相對較為保守。

三處調查點的 CPT 法分析結果呈現相同趨勢，LPI 值由大至小分別為 KJ、BI、Ro 法。KJ 及 BI 兩法的分析結果相近，而且普遍高於其他方法。整體而言，各種方法分析所得之 LPI 分布範圍甚大，液化風險由低到高，各調

查孔液化潛能指數分析結果詳如表 3。同樣是 SPT 的方法，也有分析得到不同的液化潛能指數，更何況是不同類調查方式的分析法可能得到差異更大的分析結果，這是應用液化潛能指數採用 Iwasaki 建議準則進行液化風險分級必須克服的問題。Vs 分析所得 LPI 偏低的情形符合 Liu and Mitchell (2006) 之研究結果，Vs 液化評估法對含無塑性細料之砂性土層之液化分析結果過度保守。Liu and Mitchell (2006) 研究結果也顯示 CPT 及 SPT 液化分析方法比 Vs 液化評估法可靠。

圖 13 至圖 15 為粘性砂性土壤交互出現地盤液化潛能指數成長曲線。兩種 Vs 法分析之 LPI 成長曲線相似，但 Kayen 法分析所得之 LPI 值均大於 AS 法之分析結果。三個孔分析結果的變異性甚大，在 Test4 分析得到最低的 LPI 值，而在 Test6 分析得到最大 LPI 值，與其他兩類方法相較之下分析結果的穩定性較差。因此，Liu and Mitchell (2006) 研究結果說明 CPT 及 SPT 液化分析方法比 Vs 液化評估法可靠。

表 3 各調查點液化潛能指數分析結果

No. Methods	Test-1	Test-2	Test-3	Test-4	Test-5	Test-6
Vs-AS	13.1	10.6	8.4	3.7	9.4	19.9
Vs-Kayen	18.0	10.9	9.9	5.1	14.8	21.9
SPT-NJRA	26.8	17.1	12.5	15.0	27.2	12.7
SPT-AIJ	18.3	3.7	2.3	5.5	5.8	11.2
SPT-HBF	23.5	9.5	6.0	10.1	12.3	12.8
CPT-KJ	29.1	20.6	24.3	13.6	19.1	19.6
CPT-Ro	21.6	14.7	18.3	12.1	13.5	14.6
CPT-BI	28.9	19.9	22.0	13.0	13.5	18.2

SPT 三種方法分析所得 LPI 值大小順序與砂性土壤相同，依序為 NJRA、HBF、AIJ。CPT 三種方法分析所得 LPI 值大小順序也與砂性土壤相同，依序為 KJ、BI、Ro。雖然說細粒土壤的液化或軟化分析尚未獲得一致共識，但理論上粘性類土壤的液化敏感性應該低於砂性類土壤。而且 Test4、Test5、Test6 調查孔之砂性類土壤性質與 Test1、Test2、Test3

調查孔之砂性類土壤 Test4、Test5、Test6 性質相近，因此，粘土砂土交互出現地盤(Test1、Test2、Test3)之液化潛能指數分析結果應該小於砂性地盤之 LPI 值。三類現地試驗的液化評估方法只有 CPT 法之分析結果符合前述之情形，也就是說，CPT 法可以應用於複層(砂土、粘土)地盤之液化潛勢評估。

表 3 中各調查點所有方法的 LPI 平均值分別為 22.4、13.4、13.0、9.8、14.5、16.4，若以各種方法之平均值為基準計算的均方根誤差(mean square error, MSE)來排序，前三名依序為 CPT 的 Ro 法(6.7)、SPT 的 HBF 法(13.7)、Vs 的 Kayen 法(14.6)。當然各種分析法得到不同的分析結果(液化潛能指數)，這是應用液化潛能指數採用 Iwasaki 建議準則進行液化風險分級必須克服的問題。也許，律定各種分析結果之差異進行液化潛能指數之修正，或者各種液化分析法自行律定其液化風險分類準則，可能是克服各種分析結果差異之解決方案。

五、結論與建議

根據前述之案例分析討論獲致以下幾點結論：

1. 三類現地試驗發展之液化評估方法應用於案例分析之液化潛能指數之差異性顯著。
2. 三種 SPT 法中 NJRA 分析結果與 AIJ 及 HBF 兩種方法分析結果差異較大，屬於偏向保守側之評估方法。
3. CPT 法分析所得之液化潛能指數值相對較高，特別是 KJ 法分析所得之 LPI 值大都高於其他方法，顯然採用 CPT 法評估之液化潛能指數不適合直接應用 Iwasaki 建議之準則進行地盤液化風險評估。
4. 以各種方法之平均值為基準計算 6 個調查點的最小方差總和來排序，前三名依序為 CPT 的 Ro 法、SPT 的 HBF 法、Vs 的 Kayen 法。
5. 各種液化評估方法應用到液化潛能指數之分析結果不同，此種分析方法造成 LPI 之不確定性需要進一步探討。

誌謝

感謝科技部計畫經費補助，使得本研究得以順利進行，補助計畫編號為 MOST108-2625-M-214-001。

參考文獻

1. 黃俊鴻、陳正興、莊長賢(2012)，「本土 HBF 土壤液化評估法之不確定性」，*地工技術*第 133 期，第 77-86 頁。
2. Andrus, R.D., and Stokoe, K.H. II. (2000). "Liquefaction Resistance of Soils from Shear-wave Velocity," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(11), 1015-1025.
3. Boulanger, R. W., and Idriss, I. M. (2007). "Evaluation of Cyclic Softening in Silts and Clays," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(6), 641-652
4. Boulanger, R. W., and Idriss, I. M. (2012). "Probabilistic SPT-based Liquefaction Triggering Procedure," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(10), 1185-1195.
5. Boulanger, R.W., and Idriss, I.M. (2016) "CPT Based Liquefaction Triggering Procedure," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(2), 04015065.
6. Iwasaki, T., Arakawa T., and Tokida, K., (1982). "Simplified Procedures for Assessing Soil Liquefaction During Earthquakes," *Proceeding, Soil Dynamics and Earthquake Engineering Conference*, pp. 925-939.
7. Juang, C.H., Chen, C.H., Mayne, P.W. (2008). "CPTU Simplified Stress-based Model for Evaluating Soil Liquefaction Potential," *Soils and Foundations*, Vol. 48 (6), pp. 755-770.
8. Kang, G.C., Chung, J.W., and Rogers, J.D. (2014) "Re-calibrating the Thresholds for

- the Classification of Liquefaction Potential Index Based on the 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake,” *Engineering Geology*, Vol.169, pp. 30-40.
9. Kayen et al. (2013). “Shear-Wave Velocity-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Potential,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 139(3), 407-419.
 10. Ku, C.S., and Juang, C.H. (2012). “Cyclic Liquefaction and Softening Susceptibility of Soils – A Unified CPTU-based Approach,” *Geotechnique*, Vol. 62(05), pp. 457-461.
 11. Maurer, B.W., Green, R.A., Cubrinovski, M., and Bradley, B.A. (2014). “Evaluation of the Liquefaction Potential Index for Assessing Liquefaction Hazard in Christchurch, New Zealand,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 140, No 7, 04014032.
 12. Robertson, P. K., and Wride, C. E. (1998). “Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test,” *Canadian Geotechnical Journal* 35, pp. 442-459.
 13. Robertson, P.K. (2009). “Performance Based Earthquake Design Using the CPT,” *Proceedings, IS-Tokyo 2009, June 2009, Tokyo, Japan*, pp. 3-20.
 14. Seed, H.B., and Idriss, I.M. (1971). “Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential,” *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 97(9), pp. 1249-1273.
 15. Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., Chung, R.M. (1985). “The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluation,” *Journal of Geotechnical Engineering* 111 (12), 1425-1445.
 16. Toprak, S., Holzer, T.L. (2003). “Liquefaction Potential Index: field assessment” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 129, No. 4, pp. 315-322.
 17. Youd et al. (2001) “Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, No. 10, pp. 817-833.

由 0206 花蓮地震與 921 集集地震探討近斷層地震對街屋結構的影響

郭耕杖¹ 郭俊翔² 林星宇³

¹ 國立高雄科技大學營建工程系助理教授

² 國立中央大學地球科學系助理教授

³ 國立高雄科技大學營建工程系碩士生

摘要

2018 年 2 月 6 日發生的花蓮地震和 921 集集地震為包含速度脈衝的近斷層地震。本文以 5 樓以下街屋為對象，探討最大地表速度 PGV 與結構震損之關係。本團隊於地震後進行現場震損調查，調查花蓮地震中低層建築物損壞情形，分別建立單質點模型以模擬地震造成的層間變位量，並確認近斷層強地動對於街屋結構的影響。

關鍵字：近斷層地震、強地動指標

Discussion on the Impact of Near-fault Earthquakes on Low-rise Buildings from Hualien Earthquake and ChiChi Earthquake

ABSTRACT

Near-fault Ground motions with velocity pulses in the 0206 Hualien and ChiChi earthquakes that occurred on February 6, 2018, This article takes street houses below the 5th floor as the object to discuss the relationship between the maximum surface velocity PGV and structural seismic damage, the team conducted disaster investigation activities after the earthquake, investigating the damage of low-rise buildings in the Hualien earthquake, create single-mass point models to simulate story drift and confirm the impact of strong near-fault ground motion on the structure of street houses.

Keywords: near-fault ground motions, velocity pulses

一、前言

2018 年 2 月 6 日發生的花蓮地震，造成花蓮市區強震動達到震度 7 級，並導致多棟建物傾斜與倒塌。本次地震發生錯動的米崙斷層通過花蓮市區，許多測站紀錄到近斷層的強地動紀錄。921 集集地震同樣屬於近斷層的地震，且在當時造成了嚴重的損壞，兩次的地震皆為珍貴的強震紀錄。近斷層會造成較大的地表速度 PGV，所以本文將以 PGV 及最大地表加速度 PGA 評估對建築物的影響。

PGV 對建物損壞的威脅反應在新制度的震度分級也開始使用 PGA 和 PGV 的雙門檻，

近斷層會有上盤效應、破裂方向性效應等特殊強地動特性及指標[1]，破裂方向性效應使得垂直斷層方向的測站有長週期高振幅的脈衝波，稱為近斷層速度脈衝，而沿斷層走向的地面速度會比垂直斷層走向來的更高，且遞減的更慢，為了能夠從近斷層地震得到更多強地動指標對建築物的影響，除了 0206 花蓮地震本文也從 921 地震的日本調查團隊[2]的文獻裡面統整了當時的損壞紀錄，分析兩次地震的強地動對建物震損的影響，並且建立 Takeda model 的單質點模型，配合上各測站的歷時模擬層間變位量與近斷層地震強

地動指標的關係。

二、花蓮地震建築物震損與分析

2-1 花蓮地震現地調查

2018 年 2 月 6 日發生的花蓮地震，造成花蓮市區強震動達到震度 7 級，並導致多棟建物傾斜與倒塌。本團隊於地震後進行兩次勘災活動，分別調查中低層與高層建物之損壞情形，進而探討本次地震動特性與結構損壞之關係。針對本文分析對象之中低層街屋結構，選定米崙斷層兩側 6 個地震測站為中心，以距離測站最近之街區為單位，沿著街區外圍主要道路進行調查，以目視方式判定建築結構之損壞。調查紀錄沿用國家地震工程研究中心 921 地震勘災調查表[3]，重要紀錄項目包括地址、樓層數等。其中，地址在後續作業中，可用於查詢建造年代，確認其所採用耐震規範。調查時只以 RC 結構為對象，單棟、連棟、集合住宅在結構系統上若判定為一棟，則填寫在同一份調查表，在紀錄震損級別時，取柱梁或牆體最嚴重者。日本團隊於集集地震現地調查方式與花蓮相似，皆以測站附近的街廓進行損壞調查，主要差別在於集集地震的損壞率係針對大壞以上進行計算。

2-2 花蓮地震強地動特性

圖 1 為花蓮地震的 PGA 及 PGV 分佈，圖片中災損點位，是國震中心於地震後的災損調查，其中包含了街屋、校舍和大樓，且以大壞以上的建築物損害為主，部分街屋案例與本文災損調查結果重複。由圖 1 可知靠近斷層市區的 PGA 值大部分含蓋在 250~400gal 的範圍之內，PGA 的分佈與災損點位沒有明顯趨勢。PGV 在東西向的地面速度遞減的比較快，而在南北向的地面速度有持續擴散的現象，主要是因為斷層的破裂方向性效應所造成，最高地面速度集中在米崙段層的南側，且圖中災損案例多集中在 PGV 大於 90cm/s 的範圍之內。由圖可初步得知 PGV 與災損分佈的相關性較高，且有許多測站出現了近斷層地震的速度脈衝，其脈衝的週期 T_p 與分佈如圖 2[4]。

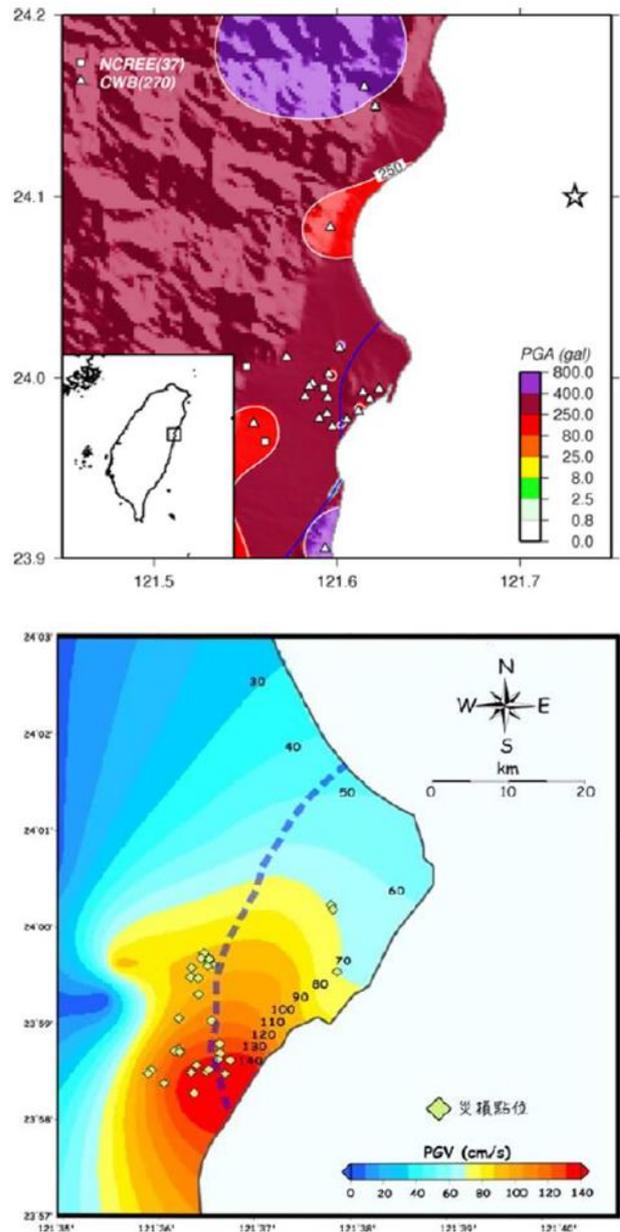


圖 1 花蓮地震 PGA(上)、PGV(下)分佈圖(取自郭俊翔,自土木水利期刊土木水利期刊 31 卷 5 期,2020)

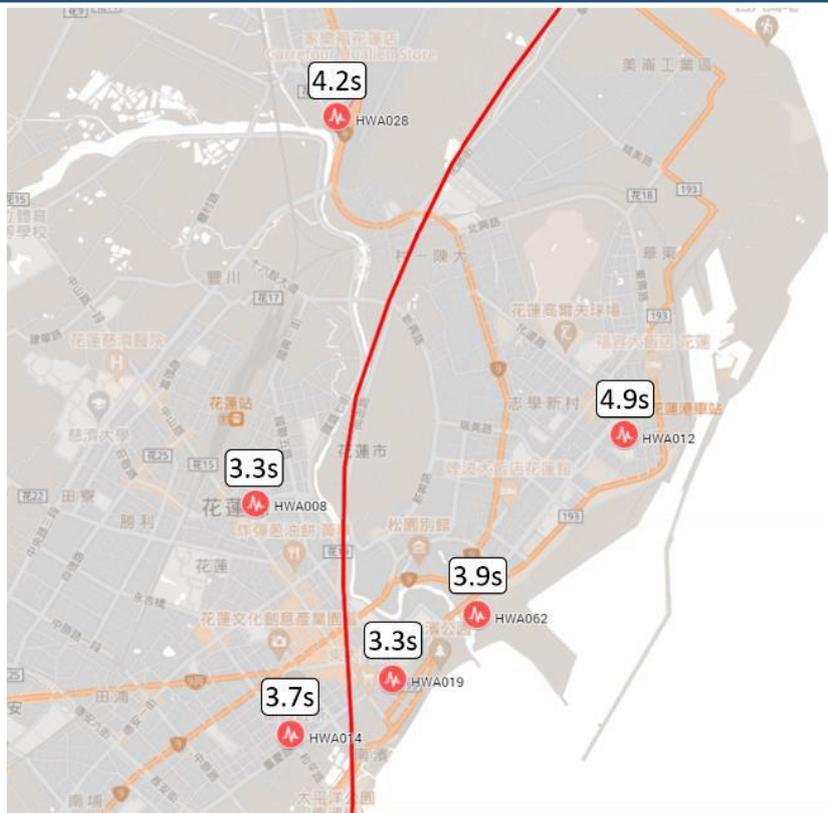


圖 2 震損調查之各測站速度脈衝週期 T_p

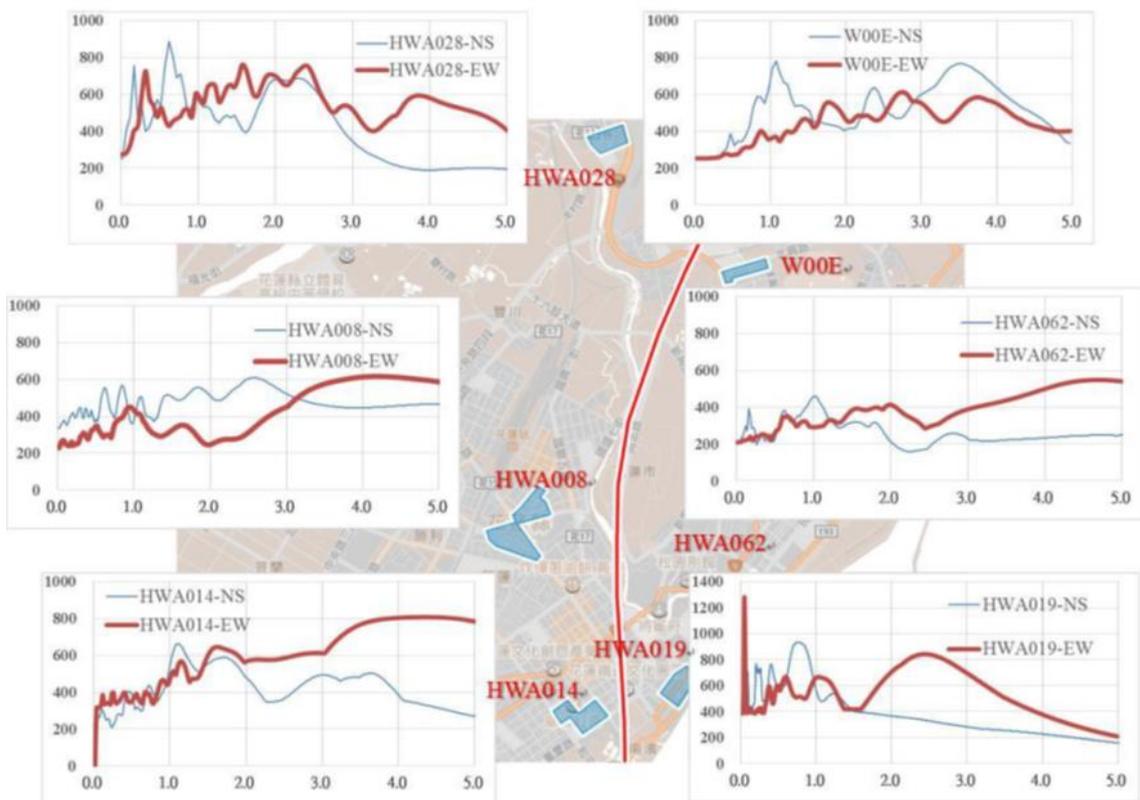


圖 3 低矮樓層建築街廓及測站反應譜

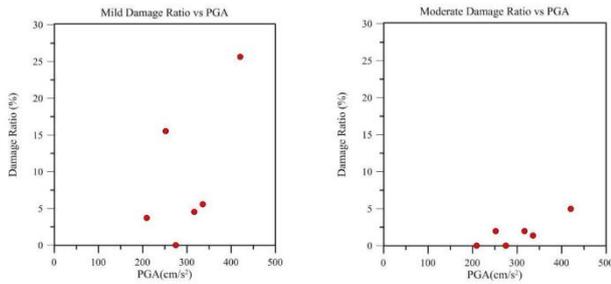


圖 4 街屋小壞(左)及中壞(右)損壞率與 PGA 之關係

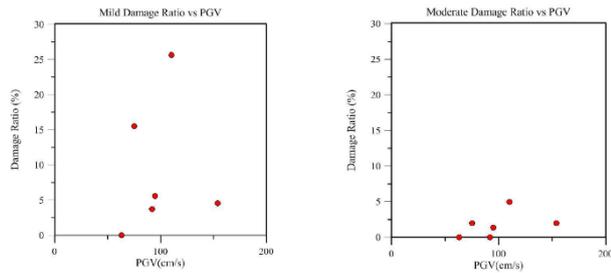


圖 5 街屋小壞 (左)及中壞(右)損壞率與 PGV 之關係

三、集集地震建物震損與分析

3-1 集集地震災損資料整理

民國 88 年 9 月 21 日發生芮氏規模 7.3 之強震，中央氣象局發表的地震報告，其最高震度高達七級，震央位於南投縣集集鎮，震源深度約為 8.0 公里。集集地震為車籠埔斷層引發的淺層地震，此次地震除了對台中和南投的建築物的影響嚴重外，甚至台北都出現大樓倒塌，沿車籠埔斷層旁的結構物均出現了嚴重損壞。本文關於街屋損害率數據資料整理自日本調查團隊的現場調查，調查對象同是以測站附近的 RC 街屋，與花蓮地震不同的是因集集地震的街屋災損情形嚴重，損害率以大壞以上進行統計。

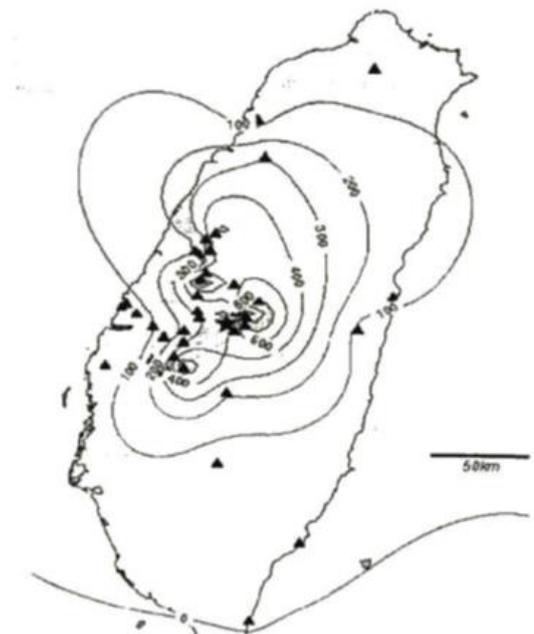
3-2 強地動特性

本次地震包含了許多珍貴的強地動記錄，在近斷層的作用之下會產生近斷層地震特有的速度脈衝波，圖 6 分別顯示了加速度和速度的 EW 分量(沿斷層方向)最大值的輪廓線 [5]，由於斷層破裂方向由南向北傳播，因此加速度和地震震度往北延伸。其中加速度分佈(圖 6a)最大在斷層上盤震央的兩側為 500-600 gal，北側 300-400 gal，斷層西側下方約

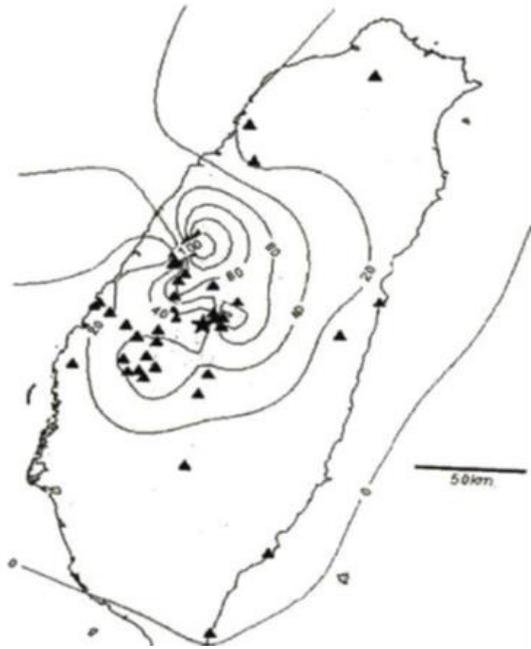
100-200 gal。另一方面，速度分佈(圖 6b)在震央附近和斷層附近的南方約為 40 至 50cm/s，但在北部斷層附近則迅速增加至 100 cm/s 或更高。主要是因為地震破裂的指向性所造成。

3-2 建物震損資料

本文根據 Miyakoshi 等人的日本團隊的文獻[2]集集地震現地調查的損壞數據，將測站分成三區如圖 7，分別為北側(上盤)南側(上盤)以及下盤。大壞損壞率使以 Pc+s 表示，指各測站周圍的建物嚴重以上之損害百分比，其中 c 為 Collapse (倒塌)，s 為 Severe Damage (嚴重損壞)，Pc+s 大於 20% 為 A 級，10%~20% 為 B 級，5%~10% 為 C 級，小於 5% 則為 D 級。其震損及強地動指標如表 1 所示，測站由北至南排列，可知上盤的建物損毀情形嚴重，下盤可見損壞程度相對較低，除了 TCU065 本身位於斷層上有非震動的破壞，其他皆為 D 級判定。圖 8~9 為 PGA、PGV 及損壞率的散佈圖，實心圓為有速度脈衝的測站，空心圓則是沒有速度脈衝的測站，從圖上可看見損壞率在 PGA 大於 400gal 之前沒有明顯的變化，而在 400gal 之後則有部分測站開始出現損壞。PGV 高或低皆有出現損壞，無趨勢，有速度脈衝測站會出現較大的 PGV，但與集集地震街屋損壞相關性差。



(a) 等加速度分佈圖



(b) 等速度分佈圖

圖 6 等加速度與速度分佈圖(取自日本建築學會”1999 年台灣。集集地震 第 I 編 災害調查報告” pp.5,1999.)



圖 7 測站分區圖 (取自日本建築學會”1999 年台灣。集集地震 第 I 編 災害調查報告” pp.5,1999.)

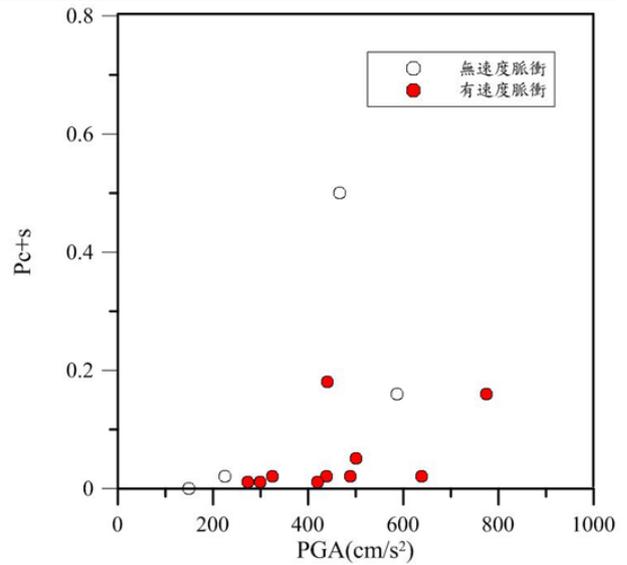


圖 8 大壞損壞率 Pc+s 與 PGA 之關係

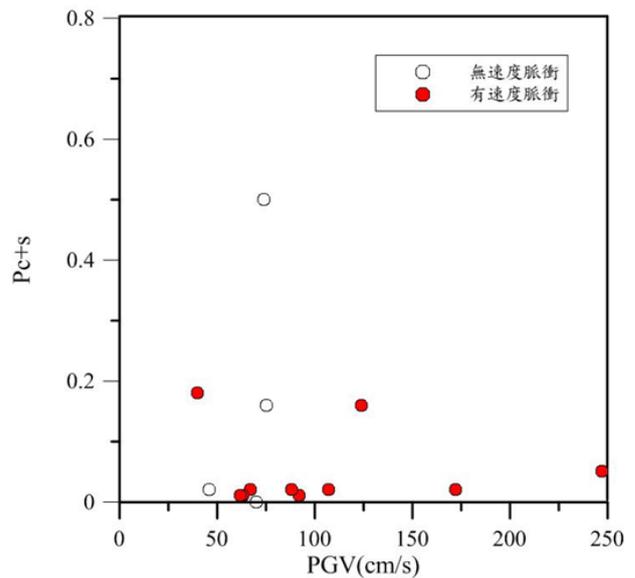


圖 9 大壞損壞率 Pc+s 與 PGV 之關係

四、街屋震動反應數值模擬

4-1 單質點模型建立

為了模擬每個測站紀錄造成的結構層間變位量，本節以 SAP2000 建構單質點模型。模型設定如圖 10 所示參數，其中 K_0 =初始勁度、 C_y =基底剪力係數、 H_e =等效高度、降伏變位 $R_y=1/200$ ，彈簧型式選擇 Takeda model 模擬 RC 結構受力後的遲滯迴圈，建立能反應花蓮和集集地震的建築結構模型。花蓮的結構自震週期經本團隊現地量測後得 $T=0.55N$ (N =樓層數)，而從 HAYASHI[6]於集集測得自震週期為 $T=0.1N$ ，一般 RC 結構基底剪力係數 C_y 約為 $2/N$ 、 $3/N$ 以及 $5/N$ ，本

文選用 $2/N$ 為街屋的 C_y 值。集集地震的結構模型由花蓮的模型 C_y 值折減得之，折減的係數以當時的耐震設計規範為依據，取自 63 年建築技術規則震區係數花蓮與南投相差 1.67 倍。

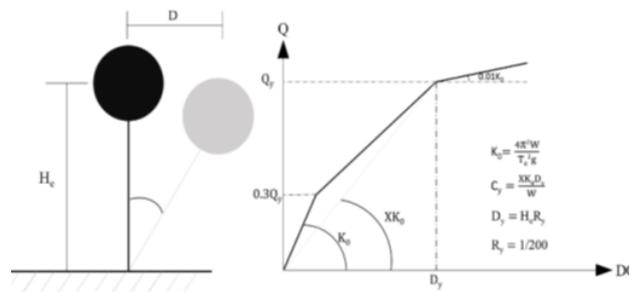


圖 10 RC 街屋單質點結構模型設定

表 1 集集地震震損分佈及強地動指標

	行政區	測站位置	編號	PGA(cm/s ²)	PGV(cm/s)	Pc+s	災損判定	備註	速度脈衝
北側	台中縣	石岡國小	TCU068	502	247	0.05	(C-D)	含非振動破壞	0
	台中市	光正國小	TCU052	439	172	0.02	(D)	含非振動破壞	0
	南投縣	國姓國小	TCU072	466	74	0.5	A		X
	南投縣	雙冬國小	TCU071	639	67	0.02	D		0
南側	南投縣	南光國小	TCU074	586	75	0.16	A-B		X
	南投縣	日月潭	TCU084	989	126	x	-		X
	南投縣	頭社國小	TCU079	580	73	x	-		X
	南投縣	水里國小	TCU078	440	40	0.18	(B)	地表位移	0
下盤	台中縣	內埔國小	TCU103	149	70	0.00	D		X
	台中縣	豐東國中	TCU102	299	92	0.01	D		0
	台中縣	豐南國中	TCU101	253	76	x	D		X
	台中市	張犁國小	TCU053	224	46	0.02	D		X
	台中市	僑笑國小	TCU049	274	63	0.01	D		0
	台中市	省三國小	TCU054	190	46	x	D		X
	台中市	忠孝國小	TCU055	256	49	x	D		X
	台中縣	健民國小	TCU067	489	88	0.02	(D)	含非振動破壞	0
	台中縣	霧峰國小	TCU065	775	124	0.16	(A)	土壤液化	0
	南投縣	草屯國小	TCU075	326	107	0.02	(D)	含非振動破壞	0
	彰化縣	員林國小	TCU110	187	57	x	D		X
	南投縣	南投國小	TCU076	420	62	0.01	D		0
	彰化縣	二水國小	TCU122	255	43	x	D		X

備註：Pc+s 打 x 者為無法判讀或沒有調查的測站點，非振動破壞包含邊坡滑動、土壤液化及地表位移。

4-2 花蓮地震分析結果

針對花蓮地震的分析結果如表 2，小壞的層間變位量門檻值 0.0003，大壞門檻值為降伏變位 $R_{y0.005}$ ，圖 11 顯示層間變位量與 PGA 的相關性良好，在 400gal 的時後層間變位量也只達到 0.0006，而 400gal 為舊版氣象局震度分級內的最嚴重(七級)分級，與花蓮的損壞情況相符，街屋雖有小壞情形出現，但沒有嚴重的災損情形。圖 12 有 4 個測站 PGV 超過 90m/s 最高達 150m/s，但層間變位量最高只到 0.0006，在花蓮地震中街屋反應與 PGV 的相關性較差。

4-3 集集分析結果

集集地震分析結果如表 3，小壞門檻值 0.0002，大壞門檻值同樣為 0.005，圖 13 PGA 與層間變位量散佈點趨勢呈一條斜直線往右上，TCU074 的 PGA 值約 600gal，層間變位達 0.008，落在前述的趨勢線上，配合其大壞以上損壞率 P_{c+s} 為 0.16，判斷為合理的分析結果；TCU068 的 PGA 約為 500gal，但反應值高達 0.1，可是大壞以上的損壞率 P_{c+s} 只有 0.05，測站還包含非振動損害，所以這個點位在此為異常點位排除分析。因 TCU052、TCU067 和 TCU076 的損壞率 P_{c+s} 非常低，和分析結果的層間變位量有較大的差異，這三測站的點位在趨勢線上排除損壞率單看層間變位量與 PGA 的關係是合理的，但與實際情況不符，所以這三個測站有模型代表性的問題(模型強度不足)，而 TCU072 則與三個測站相反(模型強度應過高)，TCU078 則因包含(非振動破壞)所致。

圖 14 PGV 和層間變位量一樣有良好的趨勢，除 TCU074 因為地面速度值較低導致點位落在趨勢線外，其它點位皆顯示出了良好的相關性，圖 17 在大壞的反應值以前點位的損壞率幾乎都趨近於 0，只有 TCU078 到達 0.2，但其中包含了非震動破壞，所以判斷仍為合理，超過大壞門檻值的 TCU052、TCU076 及 TCU067 損壞率沒有明顯的提升，可能是模型強度不足，與前段推論相呼應，TCU072 仍有模型強度過高的問題，現有的結構模型需要再修正才能反應其大壞損壞率達 50%。

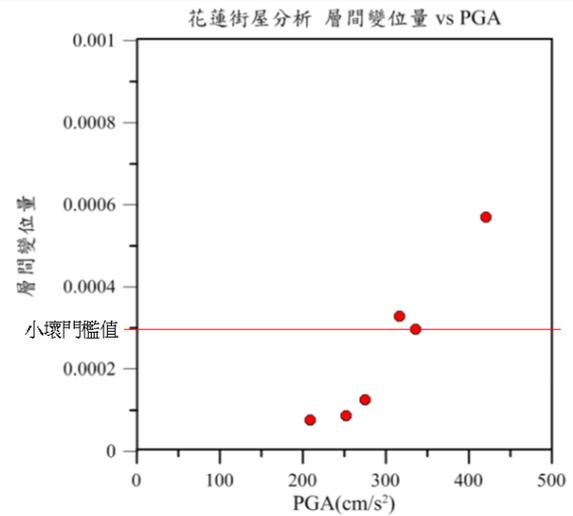


圖 11 花蓮地震街屋層間變位量與 PGA 之關係

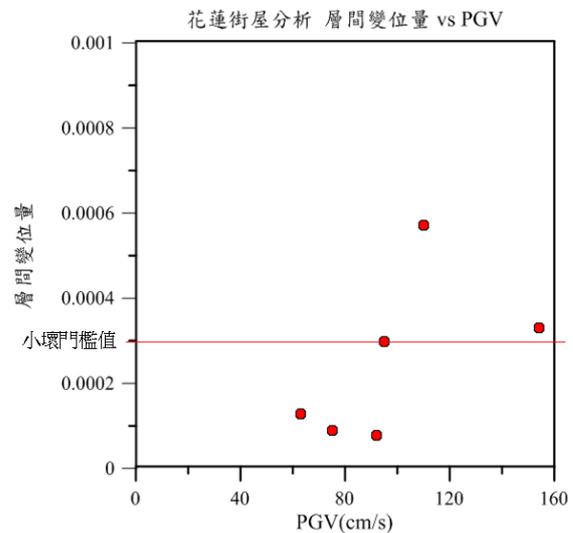


圖 12 花蓮地震街屋層間變位量與 PGA 之關係

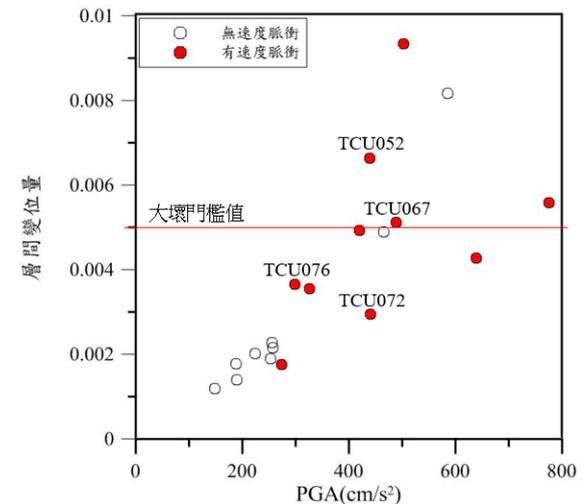


圖 13 集集地震街屋層間變位量與 PGA 之關係

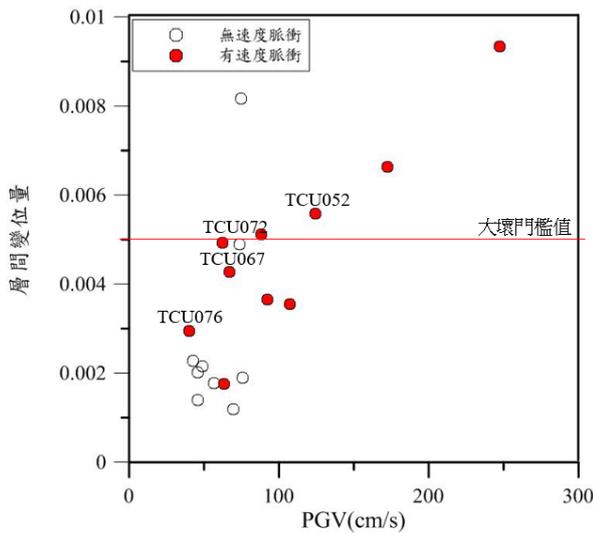


圖 14 集集地震街屋層間變位量與 PGV 之關係

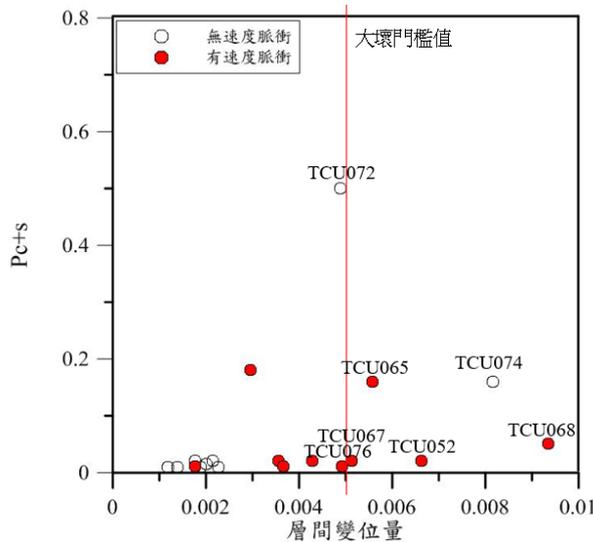


圖 15 集集地震街屋層間變位量與 Pc+s 之關係

表 2 層間變位量與強地動指標(花蓮)

測站	PGA(cm/s ²)	PGV(cm/s)	DR(小壞)%	層間變位量
HWA008	336	95	5.6	0.0003
HWA019	421	110	25.6	0.0006
HWA028	275	63	0.0	0.0001
HWA062	209	92	3.7	0.0001
W00E	252	75	15.5	0.0001
HWA014	317	154	4.5	0.0003

表 3 層間變位量與強地動指標(集集)

測站	PGA(cm/s ²)	PGV(cm/s)	Pc+s	層間變位量	備註
TCU068	502	247	0.05	0.0093	含非振動破壞
TCU052	439	172	0.02	0.0066	含非振動破壞
TCU072	466	74	0.5	0.0049	
TCU071	639	67	0.02	0.0043	
TCU074	586	75	0.16	0.0082	
TCU078	440	40	0.18	0.0030	地表位移
TCU103	149	70	0.00	0.0012	
TCU102	299	92	0.01	0.0037	
TCU101	253	76	x	0.0019	
TCU053	224	46	0.02	0.0020	
TCU049	274	63	0.01	0.0018	
TCU054	190	46	x	0.0014	
TCU055	256	49	x	0.0022	
TCU067	489	88	0.02	0.0051	含非振動破壞
TCU065	775	124	0.16	0.0056	土壤液化
TCU075	326	107	0.02	0.0036	含非振動破壞
TCU110	187	57	x	0.0018	
TCU076	420	62	0.01	0.0049	
TCU122	255	43	x	0.0023	

五、結論

本文以 0206 花蓮地震與 921 集集地震探討近斷層地震對結構的影響，集集地震因各測站的強地動指標本就超過花蓮測站，因此損害的程度也較嚴重，由單質點結構模型分析結果，可知花蓮地震街屋結構反應與 PGA 有良好的趨勢。集集地震街屋反應不論是 PGA 或是 PGV 與層間變位量的均明顯相關，從兩次地震的分析結果得知，PGA 在預測街屋損害時有一定的可靠性，但近斷層地震會造成較高的 PGV 及速度脈衝，此時應把 PGV 也一併使用，因為單方面使用 PGA 或 PGV 的災損評估效果較差。

參考文獻

1. 郭俊翔,「近斷層脈衝歷時資料庫簡介」, 中華民國地震工程研討會第五屆, PaperNo.116, pp4, 2020.
2. Jun'ichi Miyakoshi, Yasuhiro Hayashi "CORRELATION OF BUILDING DAMAGE WITH INDICES OF SEISMIC GROUND MOTION INTENSITY DURING THE 1999 CHI-CHI, TAIWAN EARTHQUAKE, pp5, 1999.
3. 蕭江碧(招集人), 921 集集大地震建築物震害調查初步報告, 國家地震工程研究中心, 台北, 1999。
4. 何承穎、林哲民、郭俊翔、饒瑞鈞、溫國

樑，「由兩起 0206 強震反思近斷層地動

研究在台灣的重要性與挑戰」，中國土木

水利工程期刊，三十一卷，第五期，2019

5. 日本建築學會” 1999 年台灣。集集地震
第 I 編災害調查報告” pp.5,1999.

6. Yasuhiro HAYASHI”,台灣集集地震の活
断層近傍における建物被害 BUILDING
DAMAGE NEAR ACTIVE FAULTS IN
TAIWAN, CHI-CHI
EARTHQUAKE” ,pp7,2000.

含凹槽和管線之區域受振後的訊號分析

葉居翰¹ 徐文信² 陳曉薇³ 張祐瑄³ 魏佑丞³ 董育庭³ 李婕綺³

¹屏東科技大學土木工程系研究所研究生

²屏東科技大學土木工程系副教授

³屏東科技大學土木工程系大學部

摘 要

隨著都市化的演進，為了發揮土地最大的利用價值，管線的地下化是必須的，但是地下管線的埋設與使用，可能會對土體及其周圍的地表建物產生直接或間接的影響。

許多研究結果顯示壕溝的建置可以有效阻隔特定頻段中的能量傳遞，若壕溝的下方有地下管線的埋設，會對壕溝的減震效應產生何種影響。本研究對於夯實土體以敲擊錘敲擊土體表面產生訊號，透過埋設在土體表面的兩個單軸加速規擷取的訊號，比對平坦地面、平坦地面下方埋製鐵管、地面設置壕溝與地面設置壕溝並於壕溝下方埋置鐵管四種狀況之時間域和頻率域的訊號，以此探究壕溝與圓形管線同時存在對振動波之傳遞造成的影響。

關鍵字：波傳、凹槽、管線、敲擊錘、土體試驗

Analysis of the Signals in the Region Including a Trench and a Pipeline due to Wave Propagation

Yeh Chu-Han¹ Shyu Wen-Shinn² Chen Xiao-Wei³ Chang You-Syuan³
Wei You-Cheng³ Dong Yu-Ting³ Lee Chieh-Chi³

^{1,2,3} Department of Civil Engineering, Pingtung University of Science and Technology

ABSTRACT

In a highly urbanization city, the pipeline beneath ground surface is a trend for saving the useful space. However, the existence of pipeline is affected to the soil and the buildings on the surface. Therefore, in this study, the behavior of a pipeline beneath a trench under the wave propagation is investigated by soil experiments with the impact of a hammer. It is well known a trench provided the effect of vibration isolation to reduce the displacement amplitude. Hence, four cases including a flat plane, an underground pipeline, a trench on the surface and a pipeline beneath a trench are studied in this paper. The signals of acceleration on the surface cross the pipeline (or the trench) are recorded in time domain and transfer into frequency domain for recognizing the effects due to a trench, a pipeline, or a trench with a pipeline. Combining the effect due to the buried pipeline with the effect of vibration isolation due to the trench, and discussing the site effect of this irregular topography is the main purpose of this paper.

Keywords: wave propagation, trench, pipeline, Hhammer, soil experiment

一、前言

隨著城市軌道交通的發展，交通設施引起的振動危害，逐漸引起了人們的重視，交通設施引起的振動危害除了會影響建築的正常使用與安全、不利於精密儀器的使用及貴重文物的保護，甚至會危害人類的健康和生活環境，許多研究對於交通設施引起的振動危害提出了減振、隔振的方法，壕溝的設置便是一種能夠有效阻隔振動波傳遞的辦法。地下管線的埋設與使用日益普遍，地下管線的存在會對壕溝之減振效應產生何種影響，與人民的生活品質以及居家安全息息相關。

本研究以粉土質砂土(SM)為試驗土體，模擬平坦地面、土體含寬 6cm 深 6cm 之壕溝、平坦土體下方 10cm 處有直徑 6cm 的鐵管與土體含寬 6cm 深 6cm 之壕溝且下方 4cm 處有直徑 6cm 的鐵管四種情形受到外力時產生或消去之振波，量測四種狀況之地表加速度，並分析其加速度時間域及頻率域之頻譜變化，探究壕溝與地下管線同時存在造成的干擾作用。

二、實驗架構

2-1 實驗規劃

本研究以敲擊錘(Hammer)敲擊土體表面產生訊號，分別對四種不同狀況進行敲擊試驗，如表 1 所示。Case1 為平坦土體並定義為對照組(如圖 1)所示；Case2 為平坦土體在兩個雙軸加速規中央設置一寬 6cm 深 6cm 之壕溝(如圖 2 所示)；Case3 為平坦土體表面下方 10cm 處埋設直徑 6cm 之鐵管(如圖 3 所示)；Case4 為平坦土體在兩個雙軸加速規中央設置一寬 6cm 深 6cm 之壕溝，並於壕溝下方 4cm 處埋設直徑 6cm 之鐵管(如圖 4 所示)。

表 1 實驗規劃類型與執行

試驗編號	類型	敲打次數
Case1	平坦土體	10
Case2	土體設置寬 6cm 深 6cm 之壕溝	10
Case3	平坦土體表面下方 10cm 有直徑 6cm 的鐵管	10
Case4	土體設置寬 6cm 深 6cm 之壕溝且下方 10cm 有直徑 6cm 的鐵管	10

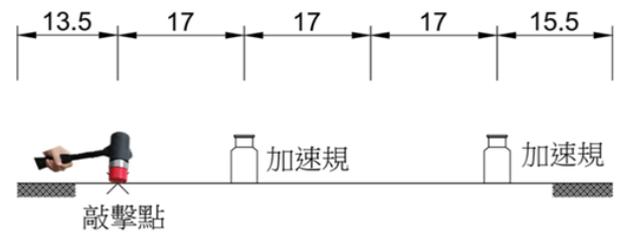


圖 1 平坦土體無壕溝無管(Case1)示意圖

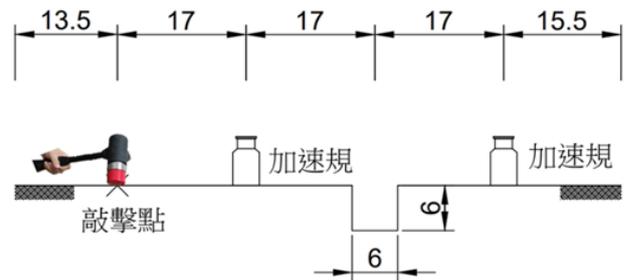


圖 2 土體含寬 6cm 深 6cm 之壕溝(Case2)示意圖

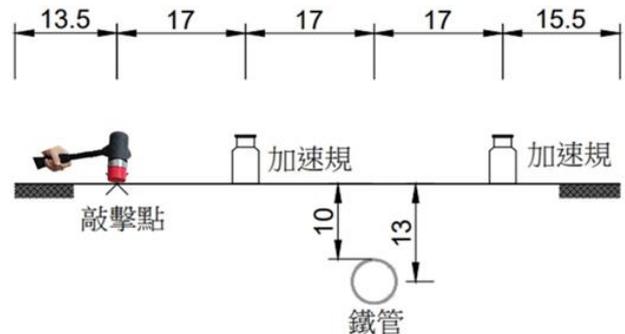


圖 3 平坦土體下方有直徑 6cm 的鐵管(Case3)示意圖

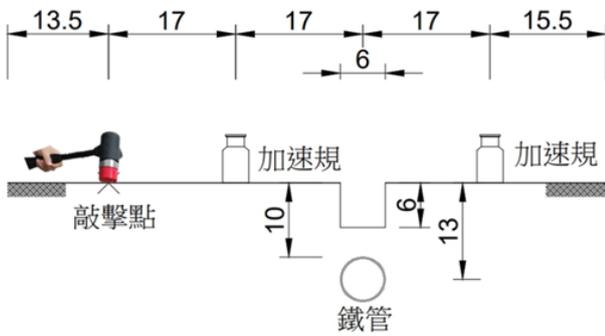


圖 4 土體含寬 6cm 深 6cm 之壕溝且下方有直徑 6cm 的鐵管(Case4)示意圖

2-2 實驗模型

本研究使用之鐵製模具，尺寸為長 80cm 寬 80cm 以及高 30cm，其中壕溝與管線埋設的位置在鐵箱中間偏右(如圖 5 所示)，管線使用外徑 6cm，厚度 0.25cm 之圓形鐵質管線，管線圓心離地表約為 13cm(如圖 3 所示)。

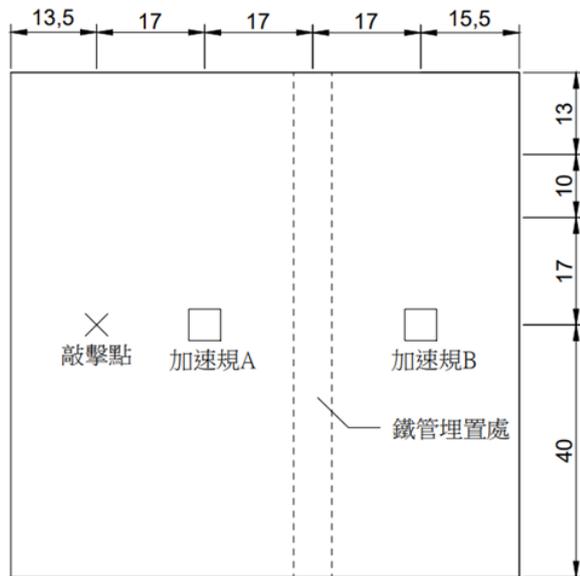


圖 5 鐵箱、加速規、敲擊點、鐵管配置圖

2-3 研究方法

組裝鐵箱後，於鐵箱內裝填阿公店水庫取回之淤泥，其過 4 號篩的粒徑分佈曲線(如圖 6 所示)，土樣的液性限度為 19，塑性限度為 17，在統一土壤分類中屬於 SM(粉土質砂土)。土樣烘乾後以 12% 的最佳含水量調配後分層放置於鐵箱內夯實，將加速規底座設置於土面；等待土體完全風乾；將兩個單軸加速規(型號為 393A03)安裝於底座上，使

用敲擊錘(型號為 o86D20) 在土體表面進行敲擊，透過 m+pAnalyzer 擷取敲擊錘和加速規的時間域訊號記錄進行後續的分析探討。

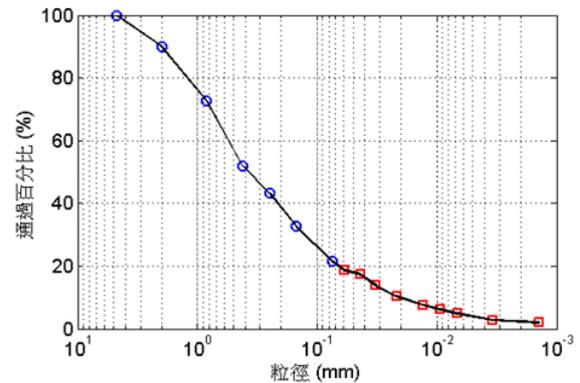


圖 6 粒徑分佈曲線

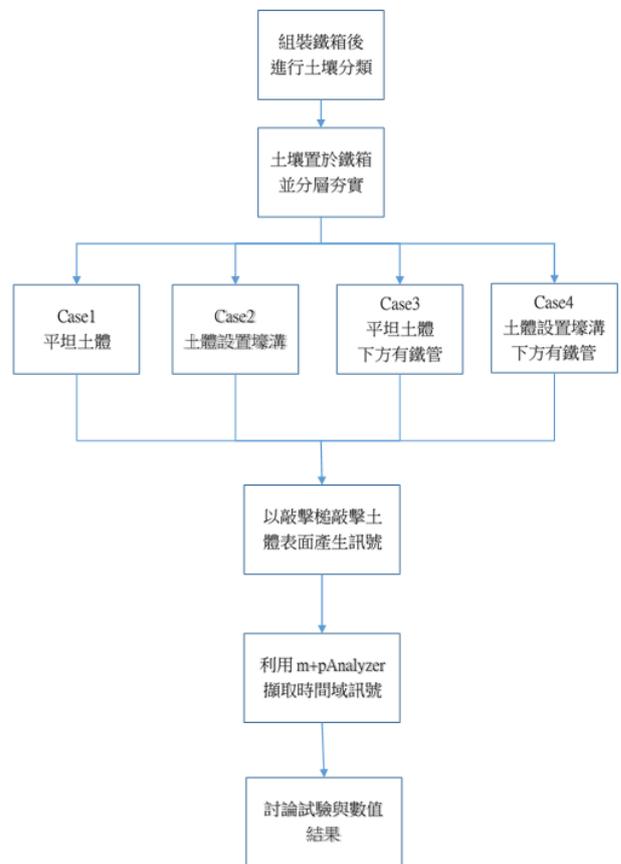


圖 7 實驗執行之流程及相關實施步驟圖

三、實驗結果與分析

3-1 時間域及頻率域訊號之分析

從時間域的訊號可以判斷的資訊較為有限，根據傅立葉轉換對(Fourier transform pair)的定義

$$\tilde{f}(\omega) = \mathcal{F}\{f(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

$$f(t) = \mathcal{F}^{-1}\{\tilde{f}(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (2)$$

可將時間域的訊號轉到頻率域，成為複數，而則表示在圓頻率(ω)對應下的能量，其中 f 為頻率，單位為 Hz。

但根據傅立葉轉換中的平移定理

$$\mathcal{F}\{f(t-t_0)\} = \tilde{f}(\omega)e^{-i\omega t_0} \quad (3)$$

時間域上訊號的平移不影響頻率域的結果，即

$$|\mathcal{F}\{f(t-t_0)\}| = |\tilde{f}(\omega)e^{-i\omega t_0}| = |\tilde{f}(\omega)| \quad (4)$$

因此在無法掌握真實的時間原點的情況下，仍可透過傅立葉轉換過後的頻率域訊號判讀。

本報告採用 Matlab 內建的指令將時間域的訊號透過傅立葉轉換至頻率域的訊號；根據計算，頻率間距為 0.625Hz，截止頻率(cut off frequency)為 1280Hz，由於敲擊錘產生的頻率範圍約在 600Hz 內，主要聚集在 400Hz 內，量測範圍取到頻率 600Hz。加速規 A 和 B 量測的時間域訊號轉至頻率域可顯示不同頻率的振波能量，因此透過頻率域訊號的解讀，可以了解在加速規 A 和加速規 B 的位置上，振波頻率的變化。

圖 8-12 所示分別為敲擊錘在 Case1 至 Case4 的結果，(a)為敲擊錘產生在時間域的力量函數 $F(t)$ ，(b)則為 $F(t)$ 轉換至頻率域的函數 $\tilde{F}(f)$ ，以其幅值 $|\tilde{F}(f)|$ 表示，(c)為加速規 A 和 B 所量測到的時間域加速度記錄，其中藍色實線代表加速度 A 所記錄的時域訊號 $R_A^\alpha(t)$ ，紅色虛線則為加速度 B 所記錄的時域訊號 $R_B^\alpha(t)$ ，其中上標 α 代表 1 到 4，分別表示 Case1 到 Case4，(d)為加速規 A 和 B 接收的時間域訊號轉換至頻率域後的訊號，以其幅值 $|\tilde{R}_A^\alpha(f)|$ (藍色實線)和 $|\tilde{R}_B^\alpha(f)|$ (紅色虛線)表示。

圖 8 為敲擊錘在平坦土體無壕溝無管

(Case1)敲擊之數據結果，其中圖 8(a)可觀察力量最大值為 1028N，發生於相對時間 0.1625 秒，圖 8(c)可觀察加速規 A 於相對時間 0.1641 秒收到的最大振幅大約 2.868g，而加速規 B 所接受到最大振幅是在 0.1695 秒時的 1.290g，兩加速規接收到的能量相差約 2.22 倍，時間上相差 0.0054 秒，由於敲擊位置距離加速規 A 較近，因此加速規 A 接收到的訊號較大於遠離敲擊位置的加速規 B；圖 8(b)中的頻率域訊號可以觀察到敲擊錘的頻率大約集中在 400Hz 以內，其中較主要的頻寬約在 200Hz 內，圖 8(d)中的頻率域訊號可以觀察到約在 78.14Hz 後的相對振幅於 B 處衰減之現象。

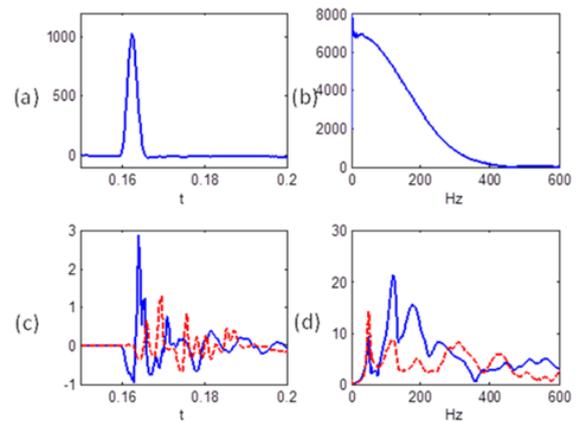


圖 8 平坦土體無壕溝無管(Case1)不同加速規擷取訊號之比對

圖 9 為敲擊錘在土體表面含寬 6cm 深 6cm 之壕溝(Case2)敲擊之數據，圖 9(a)可以觀察力量最大值為 1875N，發生於相對時間 0.1617 秒，圖 9(c)可觀察加速規 A 在時間軸上於相對時間 0.1637 秒收到的最大振幅大約 4.965g，而加速規 B 所接受到最大振幅是在相對時間 0.1652 秒時的 0.787g，兩個加速規接收到的能量相差約 6.31 倍，時間上相差 0.0015 秒，與平坦土體無壕溝無管(Case1)之結果比較可以觀察到壕溝對於能量傳遞影響；圖 9(b)中的頻率域訊號可以觀察到敲擊錘的頻率大約集中在 600Hz 以內，其中較主要的頻寬約在 200Hz 內，圖 8(d)中的頻率域訊號可以觀察到約在 78.14Hz 後的相對振幅於 B 處大幅衰減，尤其 223.8Hz、360.1Hz 和

451.4Hz 能量幾乎無法抵達 B 處。

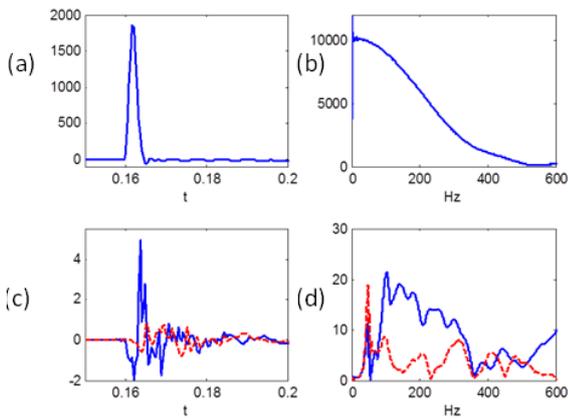


圖 9 土體含寬 6cm 深 6cm 之壕溝(Case2)不同加速規擷取訊號之比對

圖 10 所示為敲擊錘在平坦土體下方有直徑 6cm 的鐵管(Case3)敲擊之數據，圖 10(a)可以觀察力量最大值為 1880N，發生於相對時間 0.1617 秒，圖 10(c)加速規 A 在時間軸上於相對時間 0.1629 秒收到的最大振幅大約 3.942g，而加速規 B 所接受到最大振幅是在相對時間 0.1684 秒時的 1.034g，兩個加速規接收到的能量相差約 3.81 倍，時間上相差 0.0055 秒與平坦土體無壕溝無管(Case1)之結果比較可以觀察到鐵質管材對於振波的影響；圖 10(b)中的頻率域訊號可以觀察到敲擊錘的頻率大約集中在 600Hz 以內，其中較主要的頻寬約在 200Hz 內，圖 10(d)中的頻率域訊號可以觀察到約在 60.01Hz 後的相對振幅於 B 處大幅衰減，尤其 130Hz、199.4Hz 和 372.6Hz 能量幾乎無法抵達 B 處。

圖 11 所示為敲擊錘在土體含寬 6cm 深 6cm 之壕溝且下方有直徑 6cm 的鐵管(Case4)敲擊之數據，圖 11(a)可以觀察力量最大值為 2214N，發生於相對時間 0.1621 秒，圖 11(c)加速規 A 在時間軸上於相對時間 0.1641 秒收到的最大振幅大約 3.954g，而加速規 B 所接受到最大振幅是在相對時間 0.1699 秒時的 1.482g，兩個加速規接收到的能量相差約 2.67 倍，時間上相差 0.0058 秒與平坦土體無壕溝無管(Case1)之結果比較可以觀察到壕溝與鐵質管材同時存在對於振波的影響；圖 11(b)中的頻率域訊號可以觀察到敲擊錘的頻率大約

集中在 600Hz 以內，其中較主要的頻寬約在 200Hz 內，圖 11(d)中的頻率域訊號可以觀察到約在 68.77Hz 後的相對振幅於 B 處大幅衰減，尤其 163.8Hz~201.3Hz 和 493.9Hz 能量幾乎無法抵達 B 處。

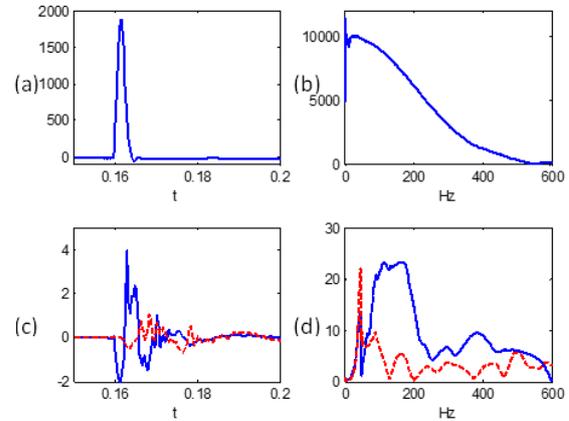


圖 10 平坦土體下方有直徑 6cm 的鐵管(Case3)不同加速規擷取訊號之比對

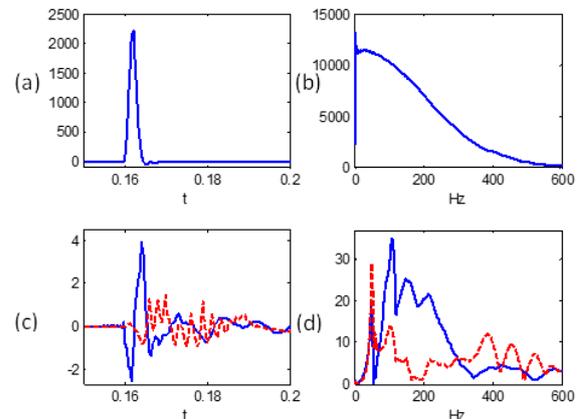


圖 11 土體含寬 6cm 深 6cm 之壕溝且下方有直徑 6cm 的鐵管(Case4)不同加速規擷取訊號之比對

3-2 加速度訊號配合力量之分析

由前述可以得知，力量函數的大小會對加速規擷取到的訊號造成影響，將不同時間或不同位置的敲擊訊號進行比對，我們將加速規擷取的幅值除以力量函數的極大值，以得到其頻率響應。

頻率域之訊號可表示為

$$\tilde{R}_{A(B)}^{\alpha}(f) = \tilde{H}_{A(B)}^{\alpha}(f) \tilde{F}(f), \quad \alpha = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

或

$$\tilde{H}_{A(B)}^{\alpha}(f) = \frac{\tilde{R}_{A(B)}^{\alpha}(f)}{\tilde{F}(f)} \quad (6)$$

其中， $\tilde{H}_A^{\alpha}(f)$ (或 $\tilde{H}_B^{\alpha}(f)$)為加速規 A(或加速規 B)的頻率響應函數， $\tilde{R}_A^{\alpha}(f)$ (或 $\tilde{R}_B^{\alpha}(f)$)為加速規 A(或加速規 B)的加速度頻譜， $\tilde{F}(f)$ 則為力量函數之頻譜。

因此在平坦土體無壕溝無管(Case1)中，其頻率響應可表示為

$$\tilde{H}_{A(B)}^1(f) = \frac{\tilde{R}_{A(B)}^1(f)}{\tilde{F}(f)} \quad (7)$$

同理，在土體含寬 6cm 深 6cm 之壕溝(Case2)中，其頻率響應可表示為

$$\tilde{H}_{A(B)}^2(f) = \frac{\tilde{R}_{A(B)}^2(f)}{\tilde{F}(f)} \quad (8)$$

但觀察 Case2 與 Case1 的邊界條件，可知於 Case1 中有鐵箱的影響(包括鐵箱四週及底部)，而 Case2 則較 Case1 多出壕溝的影響，故可推論 $\tilde{H}_A^2(f)$ (或 $\tilde{H}_B^2(f)$)較 $\tilde{H}_A^1(f)$ (或 $\tilde{H}_B^1(f)$)增加了壕溝造成之影響，應可表為

$$\tilde{H}_{A(B)}^2(f) = \tilde{H}_{A(B)}^1(f) \tilde{H}_{A(B)}^t(f) \quad (9)$$

其中公式(9)中上標 t 表示為壕溝(trench)造成的影響。

而 Case3 相較於 Case1 多出了圓形鐵管的影響，因此推論 $\tilde{H}_A^3(f)$ (或 $\tilde{H}_B^3(f)$)較 $\tilde{H}_A^1(f)$ (或 $\tilde{H}_B^1(f)$)增加了圓形鐵管造成之影響，故表為

$$\tilde{H}_{A(B)}^3(f) = \tilde{H}_{A(B)}^1(f) \tilde{H}_{A(B)}^p(f) \quad (10)$$

其中公式(10)中上標 p 表示為圓形鐵管(pipeline)造成的影響。

Case4 相較於 Case1 則多出壕溝和圓形鐵管同時存在造成的影響，推論 $\tilde{H}_A^4(f)$ (或 $\tilde{H}_B^4(f)$)較 $\tilde{H}_A^1(f)$ (或 $\tilde{H}_B^1(f)$)增加了壕溝和圓形鐵管同時存在造成之影響，故表為

$$\tilde{H}_{A(B)}^4(f) = \tilde{H}_{A(B)}^{tp}(f) \tilde{H}_{A(B)}^1(f) \quad (11)$$

公式(11)中上標 tp 表示為壕溝和圓形鐵管同時存在造成的影響。

推論壕溝和圓形鐵管同時存在造成的影響會和壕溝(trench)造成的影響乘以圓形鐵管(pipeline)造成的影響相等，因此將壕溝和圓形鐵管同時存在造成的影響表示為

$$\tilde{H}_{A(B)}^{tp}(f) = \tilde{H}_{A(B)}^t(f) \tilde{H}_{A(B)}^p(f) \quad (12)$$

圖 12-16 所示分別為 Case1 至 Case4 中不同加速規擷取訊號之頻率響應，藍色實線表示加速規 A、紅色虛線表示加速規 B。圖 12 所示為平坦土體無壕溝無管(Case1)之頻率響應曲線，可以觀察到約在 78.14Hz 後的響應於 B 處衰減之現象。圖 13 所示為土體含寬 6cm 深 6cm 之壕溝(Case2)之頻率響應曲線，可以觀察到約在 78.14Hz 後的響應於 B 處大幅衰減，尤其 223.8Hz、360.1Hz 和 451.4Hz 能量幾乎無法抵達 B 處。圖 14 平坦土體下方有直徑 6cm 的鐵管(Case3)之頻率響應曲線，可以觀察到約在 60.01Hz 後的響應於 B 處大幅衰減，尤其 130Hz、199.4Hz 和 372.6Hz 能量幾乎無法抵達 B 處。圖 15 所示為土體含寬 6cm 深 6cm 之壕溝且下方有直徑 6cm 的鐵管(Case4)之頻率響應曲線，可以觀察到約在 68.77Hz 後的響應於 B 處大幅衰減，尤其 163.8Hz~201.3Hz 和 493.9Hz 能量幾乎無法抵達 B 處。

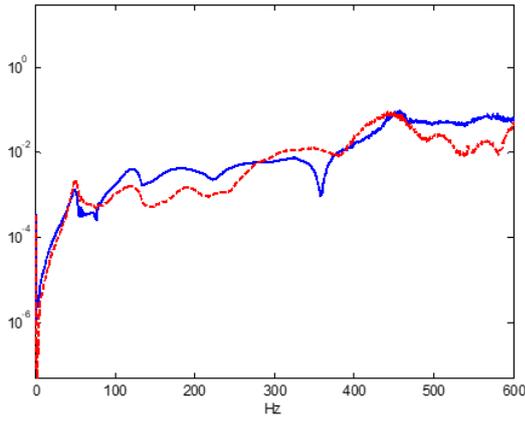


圖 12 平坦土體無壕溝無管(Case1)不同加速規擷取訊號之頻率響應

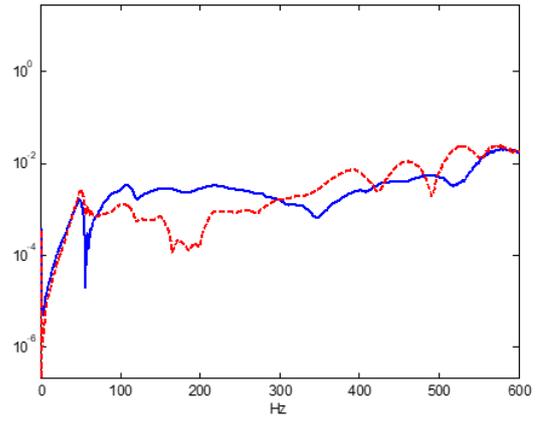


圖 15 土體含寬 6cm 深 6cm 之壕溝且下方有直徑 6cm 的鐵管(Case4)不同加速規擷取訊號之頻率響應

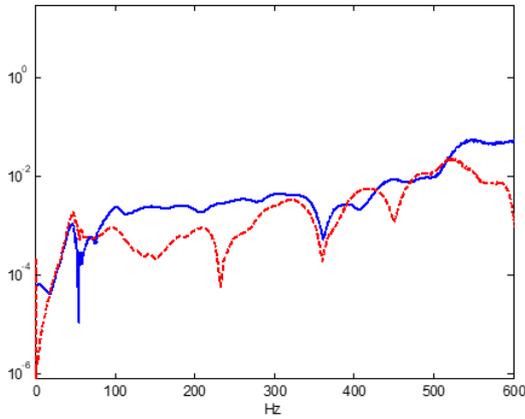


圖 13 土體含寬 6cm 深 6cm 之壕溝(Case2)不同加速規擷取訊號之頻率響應

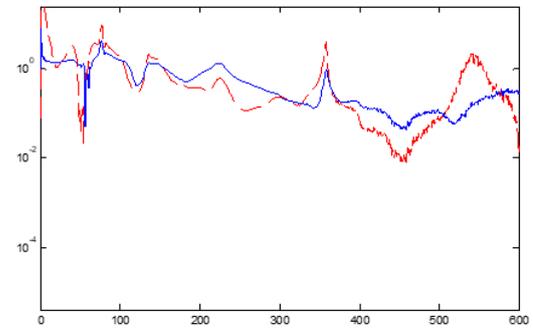


圖 16 壕溝和圓形鐵管同時存在(H_A^{tp})和壕溝(H_A^t)*圓形鐵管(H_A^p)於加速規 A 擷取訊號之頻率響應

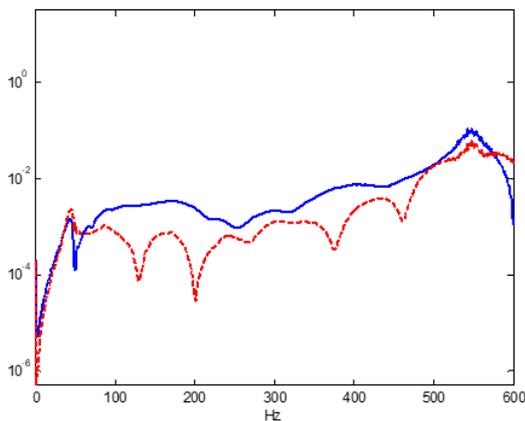


圖 14 平坦土體下方有直徑 6cm 的鐵管(Case3)不同加速規擷取訊號之頻率響應

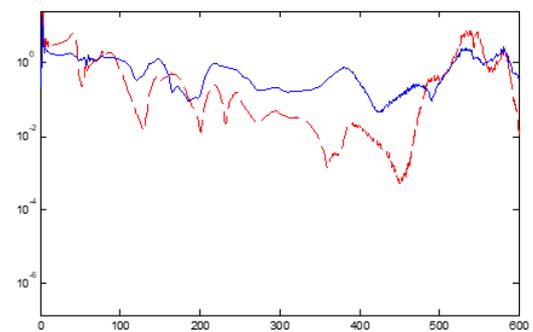


圖 17 壕溝和圓形鐵管同時存在(H_B^{tp})和壕溝(H_B^t)*圓形鐵管(H_B^p)於加速規 B 擷取訊號之頻率響應

如圖 16 所示為壕溝和圓形鐵管同時存在於加速規 A 造成的頻率響應($\tilde{H}_A^{tp}(f)$)和壕溝於加速規 A 造成的頻率響應($\tilde{H}_A^t(f)$)乘以圓形鐵管於加速規 A 造成的頻率響應($\tilde{H}_A^p(f)$)，藍色

實線表示 $(\tilde{H}_A^p(f))$ 、紅色虛線表示 $\tilde{H}_A^i(f)\tilde{H}_A^p(f)$ ，可以觀察到藍色實線與紅色虛線非常近似，這代表公式(12)於靠近敲擊位置處(加速規 A)是合理的。

如圖 17 所示為壕溝和圓形鐵管同時存在於加速規 B 造成的頻率響應 $(\tilde{H}_B^p(f))$ 和壕溝於加速規 B 造成的頻率響應 $(\tilde{H}_B^i(f))$ 乘以圓形鐵管於加速規 B 造成的頻率響應 $(\tilde{H}_B^p(f))$ ，藍色實線表示 $(\tilde{H}_B^p(f))$ 、紅色虛線表示 $\tilde{H}_B^i(f)\tilde{H}_B^p(f)$ ，可以觀察到藍色實線與紅色虛線之間有很大的差異，因此公式(12)於遠離敲擊位置處(加速規 B)是不成立的，推論這可能是由於振動波經過壕溝和圓形鐵管時，壕溝和圓形鐵管產生了耦合反應，使得壕溝於加速規 B 造成的頻率響應 $(\tilde{H}_B^i(f))$ 乘以圓形鐵管於加速規 B 造成的頻率響應 $(\tilde{H}_B^p(f))$ 無法用以判斷壕溝和圓形鐵管同時存在於加速規 B 造成的頻率響應 $(\tilde{H}_B^p(f))$ 。

四、結論與展望

4-1 結論

本研究以平坦地面、土體含寬 6cm 深 6cm 之壕溝、平坦土體下方有直徑 6cm 的鐵管與土體含寬 6cm 深 6cm 之壕溝且下方有直徑 6cm 的鐵管四種情形受到外力時產生或消去之振波，分析壕溝與地下管線同時存在對振波傳遞的影響。從時間域的訊號可觀察到通過壕溝、圓形鐵管和壕溝與圓形鐵管同時存在的訊號能量有下降的趨。而頻率域的訊號可以有效的呈現振波中不同頻率能量的幅值，透過訊號的分析可以判斷哪些頻率的能量被放大或抑制，本次研究中觀察到當振動波經過 6cm 深 6cm 之壕溝時，78.14Hz 後的能量衰減，在某些特定的頻段(223.8Hz、360.1Hz 和 451.4Hz)能量幾乎無法傳遞；當振動波經過土體下方有直徑 6cm 的鐵管時，60.01Hz 後的能量衰減，在某些特定的頻段(130Hz、199.4Hz 和 372.6Hz)能量幾乎無法傳遞；當振動波經過寬 6cm 深 6cm 之壕溝且下方有直徑 6cm 的鐵管時，68.77Hz 後的能量衰減，在某些特定的頻段(163.8Hz~201.3Hz 和 493.9Hz)能量幾乎無法傳遞。透過頻率響

應曲線的比較能夠觀察到在壕溝與圓形管線同時存在時，在靠近振動源端(尚未通過壕溝與管線)可以將壕溝與圓形管線同時存在造成的影響視為壕溝的影響乘以圓形鐵管的影響；但在遠離振動源端(通過壕溝與管線)壕溝與圓形管線同時存在造成的影響則與壕溝的影響乘以圓形鐵管的影響有較大之差異，這可能是因為壕溝和圓形鐵管產生了耦合反應，使得這項結果偏離預期的結果。

4-2 未來展望

本研究之敲擊位置與兩個單軸加速規設置位置為一直線，未來可以針對不同敲擊位置進行試驗，透過不同敲擊位置的試驗結果討論壕溝與圓形鐵管同時存在時對振動波之傳遞造成的影響。

未來的方向可以包含不同土壤的嘗試；不同的壕溝尺寸；不同的管線尺寸、材質或埋置的深度等，對於壕溝與圓形鐵管同時存在時對振動波之傳遞造成的影響進行更深入之探討。

五、致謝

本研究為科技部編號 MOST108-2221-E-002-016 之計畫，承蒙科技部經費補助，使本研究得以順利進行，特此致上感謝之意。

六、參考文獻

1. 周永川、何泰源、陳福勝，地下維生管線之地震防災對策，中華技術雜誌，第五十期，2001。
2. 鄧敏政、李中生、李維森，我國地下管線之安全管理現況介紹，2016 災害防救專輯－研判評估篇，土木水利第四十三卷，第三期，2016。
3. 徐文信、洪紹軒，地表含凹槽對沖擊荷載的阻隔效應，屏東科技大學暨北京科技大學第十二屆學術交流研討會，11月24日，國立屏東科技大學，台灣，2017。
4. 徐文信，壕溝下方埋置圓形管線之波傳行為探究，科技部計畫結案報告(編號：MOST108-2221-E-002-016)，2020。

太陽能電滲在浮木卵石地質改良工法之研究

沈茂松¹ 張志誠² 吳致穎³

¹ 國立高雄科技大學土木工程系教授

² 國立高雄科技大學土木工程系助理教授

³ 國立高雄科技大學土木工程所碩士生

摘要

垂直浮木卵石可在軟弱黏土中提供承载力；竹陣的中央圍束竹群上方基礎版受垂直力向下，使中央圍束竹群向下位移，帶動竹子周邊的圓卵石旋轉與下沉；旋轉的圓卵石表面積與粘稠的軟弱沉泥產生鍊結力；下沉的圓卵石顆粒下傳的接觸載重，受到竹子阻擋產生拱作用力；提供使中央圍束竹群上方基礎版的承载力，此即為軟弱黏性土壤垂直浮木卵石地質改良工法的原理。

本研究以太陽能電滲改良垂直浮木卵石之軟弱黏土，再以實際載重試驗驗證其承载力的變化。含水量 ω 大於液性限度(LL)的飽和軟弱沉泥(ML)，20cm×20cm 載重板只承 7kg 載重，經太陽能電滲 14 天，承载力為 85kg。飽和軟弱沉泥經插入垂直浮木卵石，受 2KW 太電滲 14 天承载力增加至 73kg。本研究得知軟弱土壤經過電誘滲透改良之後，十字片剪試驗之剪力強度 S_u 由原本平均 0~2kPa 提升至 70~90kPa 以上，表示土壤經過電滲壓密作用與土中水分子被引導至負極並經由抽水移除，可以增加承载力。本研究發現，同樣含水量插竹子卵石的土槽，20cm×20cm 的木板原可承受 88kg 的載重，但在插竹子卵石區外，插入電極板經太陽能電滲時，可能因竹子中空，電滲離子在土壤的傳遞路徑被延長，不像純土壤內，所以太陽能電的效能比較低，木板只承受 73kg。

依試驗得知，軟弱土壤經過電誘滲透，十字片剪強度增加約 35~45 倍，承载力也提升(7kg 增至 85kg)，但垂直浮木卵石在軟弱黏土之太陽能電滲電極棒的配置在竹陣外圍，提升的承载力不到預期效果(只為 73kg)，可能須配置在竹陣中再做測試。

關鍵字：太陽能、電誘滲透、淺基礎、平板載重試驗、壓密沉陷、承载力分析

Solar Energy Seepage in the Study of the Geological Improvement Method of Driftwood Pebbles

Shen Mao-Sung¹ Chang Chih-Cheng² Wu Chih-Ying³

¹Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

²Assistant professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

³Master student, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

In the face of extreme climate and environmental disasters caused by global environmental changes, the frequency and scale of floods, droughts, earthquakes and tsunamis have exceeded expectations, and civil and hydraulic construction projects are facing new challenges. The agenda of this seminar is mainly aimed at the development of new technologies in civil-related fields, the

integration of academic research results and professional technology, and promote the academic research and development and practice of civil engineering, water conservancy, environment, ecology, sustainability and disaster prevention in all walks of life, government, academia, and research. Exchange of experience, in order to jointly face the challenges of environmental changes, and at the same time promote the sustainable development of civil construction projects. Vertical driftwood pebbles can provide bearing capacity in soft clay; the upper base plate of the central encircling bamboo group of the bamboo array is subjected to vertical force downwards, The central encircling bamboo group is displaced downwards, driving the round pebbles around the bamboo to rotate and sink; the surface area of the rotating round pebbles and the viscous and weak sediment produce a linking force; the downward contact load of the sinking round pebbles particles, Blocked by the bamboo, the arching force is generated; it provides the bearing capacity of the base plate above the central encircling bamboo group. This is the principle of the soft clay soil vertical driftwood and pebble geological improvement method. In this study, the soft clay of vertical driftwood pebbles was improved by solar electroosmosis, and then the actual load test was used to verify the change of its bearing capacity. Saturated weak mud (ML) with water content ω greater than liquidity limit (LL), 20cm×20cm load-bearing board only bears 7kg load, 14 days after solar electroosmosis, bearing capacity is 85kg. The saturated soft sediment is inserted into the vertical driftwood pebbles, and the bearing capacity is increased to 73kg after 14 days of 2KW electroosmosis. This study knows that after the weak soil is improved by electro-induced osmosis, the shear strength S_u of the cross-sheet shear test has increased from the original average 0~2kPa to more than 70~90kPa, which means that the soil has undergone electro-osmotic compaction and the water molecules in the soil are guided To the negative electrode and remove by pumping water, the bearing capacity can be increased. This study found that a 20cm×20cm wooden board with the same moisture content in the soil tank with bamboo pebbles can withstand a load of 88kg. However, when the electrode plate is inserted outside the bamboo pebbles area, the electrode plate may be hollowed out due to electroosmosis. The transmission path of ions in the soil is prolonged, unlike pure soil, so the efficiency of solar power is relatively low, and the wooden board only bears 73kg. According to the test, after the weak soil is infiltrated by electric induction, the shear strength of the cross piece is increased by about 35 to 45 times, and the bearing capacity is also increased (7kg to 85kg), but the vertical driftwood pebbles are placed in the soft clay. At the periphery of the bamboo array, the increased bearing capacity is not as expected (only 73kg), and it may be necessary to configure it in the bamboo array for testing.

Keywords: solar energy, electric induced penetration, shallow foundation, flat load test, compaction subsidence, bearing capacity analys

一、緒論

1.1 研究動機

垂直浮木卵石可在軟弱黏土中提供承載力；軟弱黏土經過電誘滲透亦可增加承載力，將兩者結合，瞭解其承載力的，為本研究的動機。

1.2 研究目的

垂直浮木卵石可在軟弱黏土中提供承載力，軟弱黏土經過電誘滲透亦可增加承載力。但竹子中空導電性不佳，電極棒與卵石竹陣配置的位置，如何才能將兩種可提昇軟弱黏土的地質改良工法結合，使其能一加一大於二，或反而減弱承載力，為本研究主要目的。

圖一。

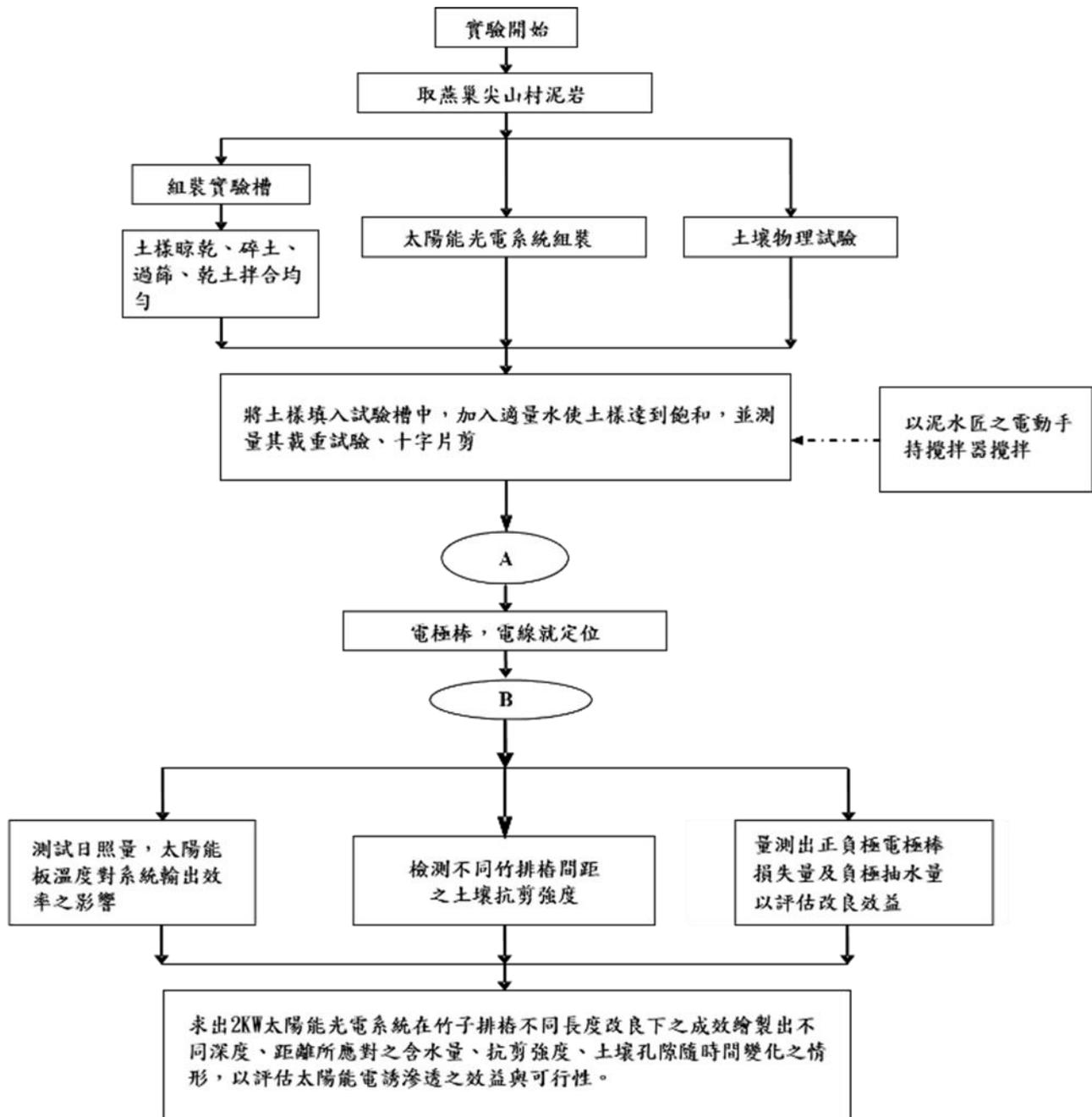


圖 1 試驗流程

二、文獻回顧

電誘滲透工法為使用金屬棒插入軟弱土層中，正負極通以直流電，利用電位梯度將水誘導至負極附近，再將之抽出的方法。陽離子通常會和水分子進行水合作用，當施加外電場於土層中，造成陽離子帶動流體往負極流動，使土層內產生電滲透現象，並藉由負極排水使土層壓密而獲得改良效果此為電誘壓密(electro-osmosis consolidation)，而正

極因離子氧化還原而釋出正電金屬離子，與黏土層之負電結合造成黏土鍵結力增加或電雙層吸力增大變硬，此為電滲化學硬化(electro-osmosis chemical hardening)(Mitchell, 1993)。而利用電流對基樁做陰極防腐蝕處理及電誘滲透所產生之硬化作用應用在改良地盤於基樁摩擦力上也已有學者提出並加以應用。

2.1 電滲滲透發展歷史

電力滲透現象是由 Reuss(1809)最早發現。而後有 Bjerrum(1967)【3】將電滲方法應用於改良非常靈敏性黏土、Fetzer(1967)【4】應用於軟弱黏土、Wade(1972)應用於靈敏性黏土。而 Wiedemann (1852)及 Quinck(1861)針對電力化學提出純理論的研究，因此電滲現象是有理論依據可以依循的；並且經由 Helmholtz (1879)、Gouy-Chapmann 以及 Stern (Van Olphen, 1977)等人致力於膠體化學基礎理論的發展，因而建立了雙重離子層(Double Layer)之概念，使電力滲透現象在理論方面獲得更進一步的解釋(整理自王翊光(2002)【16】、簡紹琦(2003)【6】)。

Schroeder(1974)【8】表示，電滲滲透工法可與排水系統設置搭配，通常僅針對於某些塑性範圍內的沉泥，於欲改良之地盤先設置一套點井系統，營造成水流流動的趨向，再通以直流電，利用點井輔助，電極插入兩點井的中央，造成電位梯度(electrical gradient)，使正離子向負極的點井移動再將水抽出。適當的配置方法，亦可改良開挖邊坡的穩定性。

2.2 電滲滲透化學機制

電滲滲透理論最早為 Helmholtz(1879)所建立，認為黏土表面帶負電荷，會吸附液體中之陽離子(Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 等)或極性分子(Dipole,如 H_2O)，使黏土表面與液體間產生電位差，此為雙層電位(Double Layer Potential)。從黏土表面至能中和該顆負電荷的正電荷最大距離，稱為擴散雙層(Diffuse Double Layer)又稱為電雙層(Double Layer)(引自李盈瑋，2004【19】)。

Shang(1997)【16】在其電滲儀器內設置排水帶，探討不同埋設間距對電滲反應速率造成之影響。Ozkan(1999)【30】等人自行設計一組類似化學電解槽之電滲儀器，以鈦金屬氧化物作為電極，針對高嶺土並導入磷酸和硫酸鋁進行電滲試驗，探討土壤性質和孔隙流體特性的變化。Dennes T.Bergado(2003)【18】等人針對泰國曼谷粘土進行電滲改良，使用銅與碳當電極，並結合

負極與垂直排水帶，得出負極與排水帶結合比僅使用排水帶能更快速達到壓密，且碳電極比銅電極能更快的到達壓密、有更多的沉陷量。Mohamedelhassan and Shang(2003)【31】使用鐵網電極對近海鈣質土進行純電滲試驗，分別灌入氯化鈣和硫酸鋁進行電滲化學試驗，發現灌入氯化鈣所得之電滲係數是最大的，在移動速率方面，鈣離子則是鋁離子的 6.3 倍。而其他更詳細的室內試驗。(引自謝博庭，2007)。

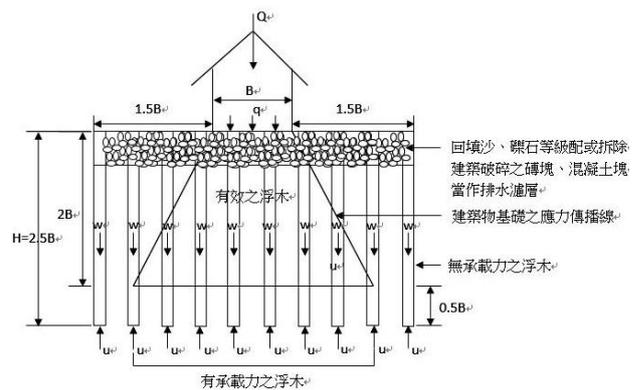


圖 2 軟弱黏土在建物應力傳播線內有效之浮木基礎

2.3 地盤改良原理

土壤改良可用許多方式來分類：按照應用程序的性質、按照所添加的材料，或按照所希望的結果等等。有機械穩定(mechanical stabilization)、化學穩定(chemical stabilization)、熱穩定(thermal stabilization)及電滲穩定(electrical stabilization)等數項方式。

2.4 太陽能電滲滲透地盤改良

針對地盤改良之技術，沈茂松、李俊穎(2007)【1】以 2KW 太陽能發電系統取代傳統蓄電池供電來源，進行太陽能電滲滲透改良軟弱土壤，研究以 1m 長正極為鐵棒負極為空心圓形鋁管加點井抽水，並通以直流電以不同改良距離研究太陽能電滲滲透最佳改良間距，並觀察日照度、發電量及負載情形以探討改良成效。

研究結果顯示改良 18 天後之土壤含水量平均減少 30~43%，且含水量低於液性限度，而抗剪強度提升約 3~17 倍，N 值由 0 提

升至 6~9，而在電極棒附近土壤強度提升較高，約提高 7~41 倍，並提出正負極改良間距為 40~50cm 對於太陽能電誘滲透改良效果最好，本研究所使用之 2KW 太陽能發電系統有以下幾種特色：

太陽能發電系統以太陽光電效應轉換，可作為獨立型發電系統，發電來源可仰賴太陽光。太陽能電為清潔能源，能穩定提供直流電力，配合充放蓄電池，可穩定供電。因可獨立發電，電力來源為太陽光，不使用大量蓄電池，環境上較無污染性。初期成本較高，但可不斷重複使用，往後成本幾乎不需要，清潔保養較為方便容易，更能節省電費及蓄電池與柴油發電機等費用。

一般電誘滲透以直流電蓄電池所提供 2KW 之電力須幾十個，而且直流電蓄電池容易損耗老化，電誘過程中費用所耗甚鉅，而利用太陽能發電系統進行輔助可給予電池蓄電亦可減少蓄電池損耗。

三、研究方法

本試驗是於訂製木槽中填入燕巢沉泥，實驗過程中分成三種不同狀況：純土、插入竹子、插入竹子並以圓卵石填入竹間縫隙，皆以太陽光電滲地質改良系統進行試驗，並於試驗槽表面綁設尼龍線分隔試驗區。圖 2。



圖 2 土竹子卵石實驗槽

3.1 試驗材料

(一) 竹子之物理性質

本研究使用日本茶竹作為浮木基腳，其

直徑約在 2 至 3.5 公分之間，長度為 18 公分，將其頭尾用中性矽利康進行密封使其具有浮力。

(二) 圓卵石之物理性質

圓卵石篩分析，將卵石使用 2"、1"、1/2" 號篩進行篩分析。

(三) 軟弱粘土之物理性質

含水量試驗、土粒比重(G_s)試驗，本實驗使用燕巢尖山村山坡地泥岩沉積的沉泥，將現地土壤利用太空包裝回實驗室做土壤物性試驗取得各項數據含水量試驗，取得自然含水量數據。土壤顆粒比重 G_s 為土壤的乾土單位重(γ_s)與與 4°C 水的單位重(γ_w)之比值，比重 G_s 2.61。

(四) 孔隙率、孔隙比試驗

孔隙率用於描述材料中孔隙所占的體積，孔隙比是土體中的孔隙體積與其固體體積之比值，取出合理之數據進行平均獲得孔隙率 $e = 0.3466$ 、孔隙比 $n = 0.2574$ 。

(五) 土壤粒徑分析

先取晾乾沉泥約 1kg 研開通過 #4 號篩進行篩分析試驗，黏性土壤取 50g 浸泡 20g 水玻璃，攪拌後進行比重計分析試驗，比重計試驗 24hr 後以 #200 號篩反洗篩，取 #200 號篩以上土壤做篩分析，再加篩分析曲線與比重計分析曲線結合，求得完整的粒徑分布曲線。

(六) 阿太堡限度試驗

取用 #40 篩以下土壤進行試驗，得知土壤含水量增加時，經歷過的固體、半固體、塑性、液性四種狀態，求出液性限度 $LL = 22.16\%$ 、塑性限度 $PL = 18.23\%$ 、 $PI = 3.93$ 、縮性限度 $SL = 16.34\%$ ，以及流性限度 $FL = 38.81\%$ 及最大流潰角 $\theta = 40^\circ$ 。USCS 統一土壤分類、AASHTO 分類將阿太堡限度試驗求得 $LL = 22.16$ 、 $PI = 3.93$ ，將此實驗使用土壤歸類為粉土 ML。將土壤利用 AASHTO 分類法，分類後本研究實驗土壤歸類為 A-6。

(七) 不排水剪力強度(s_u)

十字片剪試驗 (ASTM D2573, CNS12282)，透過十字片剪直接量測土壤的不排水剪力強

度，十字片剪高度 H 為兩倍直徑 D 。

3.2 浮木卵石軟弱粘土地質改良試驗槽

進行浮木卵石軟弱粘土地質改良試驗所使用長 60cm、寬 60cm、高 60cm、厚 0.5cm 之木板槽，在試驗槽與土接觸面鋪設不透水帆布進行阻隔，以免水滲出木板槽，並填入 54cm 高含水量為 30~40% 的燕巢泥岩進行試驗，試驗土壤體積約為 0.105m^3 、重量約為 190.3kg，濕土單位重(γ_m)為 $1.812\text{t}/\text{m}^3$ 。將 18cm 竹子以 5cm 間距由試驗槽中央部分向外進行鋪設，竹子入土深度為 13cm，上方留 5cm 凸出土面以放入圓卵石，讓竹子間距間鋪滿卵石，使其互相頂住形成拱作用，每次試驗拋入約 1200~1400 顆左右的卵石，重量約為 40 公斤重。

3-3 太陽能電滲地質改良系統之正負極設置

本研究所使用的太陽能光電系統係為一獨立型系統。本系統利用太陽能光電效應所轉換的電力進行發電、蓄存電力等功用。本系統包含了太陽能電池本體、系統底座、配電盤設施、蓄電池儲電系統、日照感知計、溫度量測計等一系列的完整規劃系統設施。詳細規劃設施茲於下面說明敘述之：

(一) 太陽能系統支撐架與 RC 灌注基座：

由於鋁合金材質具有自重較其他金屬材質輕穎、耐腐蝕性佳與抗氣候性能優秀、質地堅韌不易損壞、維修方便以及維護成本低廉等優點，因此選用鋁合金材料作為太陽能光電系統支撐架與 RC 灌注基座的外殼。

(二) 太陽能電池本體：

本研究的主要發電源為太陽能光電系統所使用的太陽能電池，係由單晶矽所製成。根據(Klaus,2006)表示，單晶矽所製成的太陽能電池發電效能較其他類型太陽能電池效能為佳，因此本試驗所使用的電池也選用此材料。本研究使用的太陽能電池本體是採用日本 MSK CO.所製作之太陽能電池，單片最大發電功率為 170W，並可以承受 $200\text{kg}/\text{m}^2$ 之風壓，合計有 12 片，以兩串聯六併聯的方式組合成 2KW 之太陽能光電系統。

(三) 系統漏電斷路器：

由於本試驗槽的外框框架是以金屬材質加以組裝而成，並且槽身四周放置了警告標語但其他的防護設施並不完善；為了避免在電滲試驗過程中發生漏電的意外，造成記錄人員觸電、受傷的情況發生，本系統配置了兩組 100 安培的漏電斷路器。當紀錄人員不慎發生觸電的意外時，斷路器立即感知並可以立即斷電，發揮保護人員的安全的功用。

(四) 日照感知計與溫度感測計：

溫度感測計裝設於每片太陽能板下方，並將資料傳送到配電盤之顯示器，用以研究溫度對於太陽能發電功率之影響程度。為了探討日照程度對太陽能發電功率之影響，並評估日照程度、溫度高低及負載大小對電滲滲透地質改良的程度大小影響；因此日照感知計以 23.5 度的規劃角度裝設於鋁合金支撐架上。

(五) 系統充電、放電控制器：

由於太陽日照程度瞬間變化差異極大，因此電壓也隨之改變，此舉會造成電滲改良效果不穩定，因此需要利用電池作為輔助的電力來源，並且藉由充放電控制器來控制何時必須替換改用輔助電力的應用時機。充放電控制器的主要功能有二項：1. 控制器可以控制電池充電與放電的運作機制，藉此保護電池，避免電池發生過度充電或過度放電之情形，導致鉛酸電池損壞、減低使用壽命。2. 穩定太陽能電池所發出的直流電，以便提供穩定的電流給予換流器或直流負載，使負載在穩定的電壓之下工作。就本試驗而言，此舉不但可以提高太陽能電池的輸出功率，相對也提高太陽能電滲滲透的成效。；並且從充放電控制器的警示燈中能得知電池是否充飽，亦或是尚處於放電狀態，太陽能光電系統是否能完全供應負載等；本研究所選購之 C40 型控制器，可控制電壓範圍從 12V 以下至 48V 以下，因此未來本試驗之後續研究若有相關需要，僅需將原本的線路重新配置並適當調整後設定控制器，即可以提高太陽能光電系統整體的輸出效能。

(六)電力儲存之鉛酸蓄電池系統：

鉛酸電池發展歷史悠久，製程及製作技術上都極為穩定、成熟，且單價較低廉，因此本研究使用鉛酸蓄電池作為太陽能光電系統的輔助電力來源。本試驗採用 24 小時連續不停止運轉的試驗方式，經過李俊穎(2007)【1】實際測試證實，假若天候狀況為晴天時，電池處於連續 24 小時運轉的狀態下並不會有過度放電的情形發生，並且能連續循環使用運轉；但是在遇到陰雨的狀況下，鉛酸蓄電池僅能維持 24 小時的效能，意即只要天氣若為晴天，本光電系統便可以於白天時僅依靠太陽能電池的作用轉換電能來維持運作；夜晚時使用鉛酸蓄電池用以轉換電能來維持 24 小時持續地運作，然而若遭遇連續陰雨時，則本系統之輔助電力只能維持一天的時間，隔天便無法補充電力，因此發生連續陰雨情況時，必須先行關閉系統，否則會發生過度放電的情形，影響電池的使用年限。

(七)電擊棒材料

正極電擊棒採用直徑 2.5cm 空心鋁管長度 50cm，如負極採用邊長 2.54 公分長度 50cm 空心鋁管。

由於太陽能電滲地質改良工法必須藉由抽水，將孔戲水排除，使土體產生壓密作用，進而增加土壤的剪力強度，為了使負極能達到所需的排水能力，因此在負極方型鋁管管身穿孔，穿孔是為了使孔隙水藉由電位差得作用流入負極，本試驗將開孔率 40%作為開孔，並於負極管底設置抽水盒，其內放置抽水馬達當作抽水設備來到達排水效果，另外為了避免土粒進入馬達導致故障，因此用不織布過濾細顆粒土壤。

3.4 試驗程序

本試驗經由上訴製作試體槽、不透水帆布、負極抽水設備、物性試驗及篩土拌土等動作後方能進行填土，填土時含水量控制在液性限度與流性限度之間，本實驗控制在 30%~40%之間，填完土於實驗槽上方綁設尼龍線區分試驗區域。

正極電擊棒採用直徑 2.5cm 空心鋁管長

度 50cm，負極採用邊長 2.54 公分長度 50cm 空心鋁管，開孔率 40%作為開孔，並於負極內部設置抽水馬達當作抽水設備來到達排水效果，本試驗擺放形式為兩支正極及兩支負極交替排列方式。

本試驗量測數據以每日早午晚為基準，以了解每日電滲土壤早晚之變化，量測發電量，以及抽水量。檢測儀器、十字片剪，本試驗所採用十字片剪是美國 GEONOR 公司所生產 H-60 十字片剪儀器，用來量測土體改良前後抗剪強度的變化，另外藉由量測區域的不同，也可以知道改良效益的作用範圍。

四、太陽能電滲在浮木卵石地質改良工法試驗

4.1 軟弱粘土未改良前之理論淺基礎承载力 (以 s_u 計算)

Terzaghi(1943)【12】之淺基礎極限承载力公式計算改良前承载力

$$q_{ult} = \alpha \cdot C \cdot N_c + \gamma \cdot D_f \cdot N_q + \beta \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$$

α 、 β 為基腳形狀因素。

C :土壤剪力強度參數，由單軸壓縮試驗 qu (短期承载力)或三軸試驗 SUU (短期承载力)、 CU (已有建物瞬間加載)、 CD (長期承载力)試驗求得，軟弱粘土以十字片剪試驗求得之不排水剪力強度 S_u 替代。

N_c 、 N_q 、 N_γ :土壤承载力因數。

ϕ 可由單軸壓縮試驗 qu (短期承载力)或三軸試驗 SUU (短期承载力)、 CU (已有建物瞬間加載)、 CD (長期承载力)試驗求得。

γ :土壤單位重，分析時需考慮地下水，為有效應力，由鑽探總表求得。

4.2 實驗結果

木箱飽和軟弱粘土($\omega > LL$)，試驗前十字片剪試驗得：

$$C = S_u = 0.000726 \frac{kg}{cm^2} = 0.00726 \frac{t}{m^2},$$

對應標準貫入試驗：

$$\text{由 } qu = \frac{N}{8} = 2C \rightarrow N_{SPR} = 16C = 16 \times 0.000726 = 0.0116 \text{ t/m}^2$$

但基礎屬局部剪力破壞或穿孔剪力破壞，本模型先以部剪力破壞分析。

$$C' = \frac{2}{3} S_u = 0.00484 \text{ t/m}^2$$

$$\text{基礎版長 } L_1 = 0.2\text{m}、\text{寬 } B_1 = 0.2\text{m}、\phi = 0^\circ$$

$$\text{木箱飽和軟弱粘土 } \gamma_m = 1.82 \text{ t/m}^3$$

$$\text{基礎版放在土壤表面， } D_f = 0、N_c = 5.3、N_q = 1、$$

$$q_{ult} = 1.3 \times 0.00484 \times 5.3 + 1.82 \times 0 \times 1 + 0.4 \times 1.82 \times 0.3 \times 0 = 0.0333 \text{ t/m}^2$$

$$Q_{ult} = q_{ult} \cdot B \cdot L = 0.0333 \text{ t/m}^2 \times 0.2\text{m} \times 0.2\text{m} = 0.001334\text{t} = 1.333\text{kg}$$

基礎版20cm × 20cm，竹子入土深度 $L_4 = 13$ ，竹子直徑 $d_s = 2.5 \sim 3\text{cm}$ 竹樁理論承載力模型。竹樁理論承載力計算：

$$s_u = 0.00484 \text{ t/m}^2, d_s = 2.5\text{cm}, L_4 = 13\text{cm}$$

$$Q_{u\text{竹}} = 0.45 \cdot s_u \cdot a_s \cdot L_4$$

$$\text{Case1. } L_4 = 13\text{cm}, Q_{u\text{竹}} = 9 \text{ 支}$$

$$9 \text{ 支} \times 0.45 \times 0.000726 \times \pi \times 2.5\text{cm} \times 13\text{cm} = 0.3\text{kg}$$

竹子入土深度13cm之理論承載力：

$$\text{模型 I: } 20\text{cm} \times 20\text{cm} \text{ 基礎版下方 } N = 3 \times 3 = 9 \text{ 支竹樁承 } Q_{u\text{石}} = N \times 0.45 \times s_u \cdot a_s \cdot L_4 = 9 \text{ 支} \times 0.45 \times 0.0364 \times \pi \times 2.5\text{cm} \times 13\text{cm} = 15.05\text{kg}$$

圓卵石在軟弱粘土地盤之理論承載力：
浮木卵石軟弱粘土基礎承載力

n_0 為已知數量，求出圓卵石 n_1 、 n_2 顆數量

$$n_1 = \frac{B \cdot L \cdot (D+l)}{B_o \cdot L_o \cdot (D+l)} \cdot n_o = \frac{B \cdot L}{B_o \cdot L_o} \cdot n_o$$

$$n_2 = \frac{B \cdot L \cdot D}{B \cdot L \cdot (D+l)} \cdot n_1$$

模型 I20cm × 20cm 基礎版，

- (1). 中央圍束竹群有 9 根竹子
- (2). $n_0 = B_o \cdot L_o \cdot (D+l)$ 區回填 745 顆圓卵石
- (3). $n_1 = B \cdot L \cdot (D+l)$ 回填 477 顆圓卵石提供承載力
- (4). $n_2 = B \cdot L \cdot D$ 區土內回填 179 顆圓卵石

圓卵石在軟弱粘土中之淨浮力(承載力):

$$\Delta U_w = (\gamma_m - \gamma_{d\text{石}}) \cdot V_{s\text{石}}$$

$$\text{平均卵石體積 } V_{s\text{石}} = 10.01 \text{ cm}^3 / \text{顆}, \gamma_m =$$

$$1.812 \text{ t/m}^3, \gamma_{d\text{石}} = 1.72 \text{ t/m}^3$$

模型 I: 20cm × 20cm 基礎版

$$B_o \cdot L_o = 745 \text{ 顆卵石}, B_1 \cdot L_1 = 477 \text{ 顆}, V_{s\text{石}} = 497 \times 10.01 = 0.00497\text{m}^3$$

$$\Delta U_w = (1.812 - 1.72) \times 0.0049797 = 0.4581\text{k}$$

計算軟弱粘土中竹陣回填圓卵石產生之向上拱力：

B、L 由實驗由加壓結束後捲尺直接進行量測，D 為卵石入土深度，l 為初始拋石高度 6.5cm，由卵石綁上棉繩進行。

拋石區長寬 $B = 40\text{cm}$ ， $L = 40\text{cm}$ ，卵石入土深度 $D = 3\text{cm}$ ，卵石出土高

$l = 5\text{cm}$ ，竹陣支數 $N = 38$ 支外圍，竹子表面積 $a_s = 2.5\pi$

$$, n = 0.379, \gamma_m = 1.812 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^2,$$

$$\gamma_{d\text{石}} = 1.72 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^2$$

Step1. 代入(3-22)式外圍圍束竹群內土內($B \times L \times D$)的圓卵石(n_2 個)排開軟弱粘土之浮力：

$$U_w = (B \cdot L \cdot D - N \cdot a_s \cdot D) \cdot \frac{V_{s\pi}}{V_o} \cdot \gamma_m$$

$$U_w = (40 \times 40 \times 3 - 38 \times 2.5\pi \times 3) \times 0.621 \times 1.812 \times 10^{-3} = 4.393kg$$

Step2. 代入(3-23)式計算外圍圍束竹群內圓卵石在土內($B \times L \times D$)的重量：

$$W = \gamma_{d\pi} \times [(B \cdot L \cdot (D + l) - N \cdot a_s \cdot (D + l))] \text{-----}(3-23)$$

$$W = 1.72 \times 10^{-3} \times (40 \times 40 \times (3 + 5) - 38 \times 2.5 \times \pi \times (3 + 5)) = 17.909kg$$

Step3. 代入(3-36)式計算竹子拱力 $F_o(b, d_b, d_s, D, l)$ ：

$$\text{竹子拱力 } F_o(b, d_b, d_s, D, l) = \gamma_{d\pi} \cdot [(B \cdot L \cdot (D + l) - N \cdot a_s \cdot (D + l)) - (B \cdot L \cdot D - N \cdot a_s \cdot D) \cdot (1 - n)] \cdot \gamma_m \text{-----}(3-36)$$

$$\text{竹子拱力 } F_o(b, d_b, d_s, D, l) = 1.72 \times 10^{-3} \times [(40 \times 40 \times (3 + 5) - 38 \times 2.5\pi \times (3 + 5)) - (40 \times 40 \times 3 - 38 \times 2.5\pi \times 3) \times (1 - 0.379)] \times 1.812 \times 10^{-3} = 13.515kg$$

軟弱黏土垂直浮木卵石與竹子之拱作用力、合力比較。

垂直浮木與卵石之理論附著力(鏈結力)竹陣中回填($D + l$)深的圓卵石，竹子產生的拱力 $F_o(b, d_b, d_s)$ 提供 $B_1 \times L_1$ 基礎 Q 的承载力，卻是靠竹子下沉引起周邊圓卵石的旋轉滾動與軟弱粘土產生的附著力。

中央圍束竹群(N 根)的承载力，為外圍圍束竹群內($B \times L \times D$)土下受圍束的圓卵石個數(n_2 個)產生旋轉時，土壤給于圓卵石球體表面的附著力，此即 $B_1 \times L_1$ 基礎 Q 理論的承载力，代入(3-37)式：

$$Q = N \cdot P + F_o = N \cdot P + f(b, d_b, d_s, D, l) \cdot n_2 \cdot C_a \cdot 4\pi \cdot \left(\frac{d_s}{2}\right)^2$$

模型 I：20cm × 20cm 基礎版，

$$F_o = 9.676kg, C_a = \frac{1}{2} s_u = \frac{1}{2} \times 3.64 \times$$

$$10^{-2} kg/cm^2, n_2 = 179 \text{顆}, d_s = 2.5cm$$

$$9.676 = f(b, d_b, d_s, D, l) \times 179 \times \frac{1}{2} \times 3.64 \times 10^{-2} \times 4\pi \times \left(\frac{2.5}{2}\right)^2$$

$$f(b, d_b, d_s, D, l) = 0.0015 kg/cm^2$$

20cm × 20cm × 1cm 基礎版在純土及竹子入土13cm深度加載沉陷量及穿孔剪力破壞評估，經由計算只放置基礎版加載沉陷量到達2cm以及插入竹子進行加載沉陷量大於2cm即為破壞。

在純土上經過太陽能電滲後加載重觀測沉陷量可以發現，載重增加至60kg時平均沉陷量大於2cm；加入竹子進行電滲並加載後可以發現雖然發電量效率變低，但承载力是有提高的；加入竹子與卵石進行電滲並加載後發現，發電效率與有無加卵石差不多，但抽水量較少，在進行平板載重試驗時需要較大的重量才可有初步的沉陷。圖4。

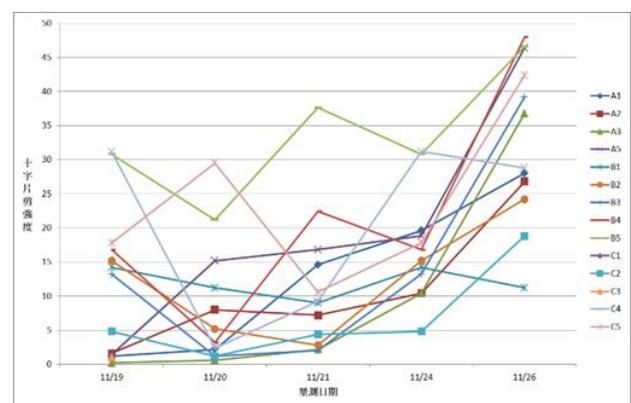


圖4 十字片剪強度

五、結論與建議

5.1 結論

竹子與太陽能電滲地質改良工法經載重試驗，理論竹樁承载力加卵石在土壤與竹子間理論的拱作用與實際載重相近。

含水量 ω 大於液性限度之飽和軟弱沉泥在 20cm×20cm×1cm 淺基礎穿孔剪力載重在未經過太陽能電滲的改良前 7kg 下沉陷超過 2cm，而經過太陽能電滲改良後提升達 85kg，沉陷方達 2cm。但飽和軟弱沉泥經插入垂直浮木卵石，受 2KW 太電滲 14 天承载力只增加至 73kg。

軟弱土壤經過電誘滲透改良之後，十字片剪試驗之剪力強度 S_u 由原本平均 0~2kPa 提升至 70~90kPa 以上，約增加 35~45 倍。表示土壤經過電滲固結作用與土中水分子被引導至負極並經由抽水移除，可以增加承载力。

本研究發現，同樣含水量插竹子卵石的土槽，20cm×20cm 的木板原可承受 88kg 的載重，但在插竹子卵石區外，插入電極經太陽能電滲時，可能因竹子中空，電滲離子在土壤的傳遞路徑被延長，不像純土壤內，所以太陽能電的效能比較低，木板只承受 73kg。

在電滲結束時，由於正負極會產生差異沉陷，且竹子與卵石並不是每個區域都一樣多，因此在施作平板載重時，要十分注意傾斜方向，載重不均時會有倒塌之風險。

垂直浮木卵石地質改良工法改良效果比太陽能電滲改良工法承载力好一點。

5.2 建議

依試驗得知，軟弱土壤經過電誘滲透，十字片剪強度增加約 35~45 倍，承载力也提升(7kg 增至 85kg)，但垂直浮木卵石在軟弱黏土之太陽能電滲電極棒的配置在竹陣外圍，提升的承载力不到預期效果(只為 73kg)，可能須配置在竹陣中再做測試。

參考文獻

1. 李俊穎、沈茂松，太陽能電誘滲透地盤改良之技術研發，國立高雄應用科技大學土木工程與防災科技研究所，碩士論文，第 3~23，63~124 頁，2007。
2. 葉向陽，「地下工程實務(二)」，現代營建雜誌，第 234~238 頁，1990。
3. Bjerrum, L., Moum, J. and Eide, O., "Application of electro osmosis on a foundation Problem in Norwegian quick clay," *Geotechnique*, 17, pp.214-235, 1967。
4. Fetzner, C.A., "Electro-osmotic stabilization of west branch dam," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.93, No. SM4, pp. 85-106, 1967。
5. Wade, M.H., "Slope stability by electro-osmosis," *Proceedings, 29th Canadian Geotechnical Conference*, Vancouver, Canada., Section X, pp. 44-66, 1976。
6. 簡紹琦、歐章煜，「電滲透化學灌漿地盤改良之研究」，國立台灣科技大學營建工程系，博士論文，台北，2003。
7. Bergado, D.T., Balasubramaniam, A.S., Patawaran, and Kwunpreuk, W. Electro-osmotic consolidation of soft Bangkok clay with prefabricated vertical drains *Ground Improvement*, 4 (4), pp. 153-163, 2000。
8. Schroeder W. L., "Soil in Construction" Chapter 10, pp.135-137, Wiley, 1974。
9. W. J. M. Rankine, "On The Stability of Loose Earth," *phil. Trans. Roy. Soc. London* 147, 1857。
10. Prandtl, L., "Über die Eindringungs festigkeit plastischer Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden," *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik*, Vol.1, No.1, pp.15-20, 1921。
11. G.G. Meyerhof, "The Ultimate Bearing Capacity of Foundations," *Geotechnical*, Vol.2, No.2, pp.301-332, 1951。
12. Terzaghi, *Theoretical Soil Mechanics*,

Wiley , New York , 1943 。

13. Das , B.M. , 1998 , Principles of Geotechnical Engineering , 4th edition , PWS Publishing Company 。
14. 邱清泉,「台灣地區推廣太陽能發電系統之研究」碩士論文,大葉大學電機工程學系,彰化,2003。
15. 劉安平,「建材一體形光伏電池應用的理想與現實」,中華民國第二屆應用科技研討會—能源、通訊、光電領域,國立高雄應用科技大學主辦,第 312~327 頁,2005。
16. 王翊光,「沉泥質黏土電滲透化學灌漿改良之研究」,國立台灣科技大學營建工程系,碩士論文,台北,2002。

山坡地條型基礎承载力探討

馬正明¹ 陳昱元² 莊承恩² 忻昊霖² 陳政錫² 吳政憲²

¹ 義守大學土木與生態工程學系教授

² 義守大學土木與生態工程學系大學部學生

摘要

為避免產生相關工程問題，興建高樓建築物更需注意基礎深開挖與變形量等問題。相關研究分析主要著重於沙土上之不同程度的變化，各項建設逐漸往往都市密集的發展，常可見許多深開挖的工法於都市密集區。但以往關於基礎開挖之研究大多針對淺基礎之開挖位於水平地表的研究較多，較少有針對山坡地載重以砂土進行比較及分析。

關鍵字：淺基礎、plaxis、基礎承载力、層狀土壤、 ϕ 角、C 值

Discussion on Bearing Capacity of Strip Foundation on Hillside

Chen-Min Ma¹ Yu-Yuan Chen² Chen-en Zhuang² Hao-Lin Hsin² Zheng-Xi Chen²
Cheng-Hsien Wu²

ABSTRACT

In order to avoid related engineering problems, it is necessary to pay more attention to issues such as deep foundation excavation and deformation in the construction of high-rise buildings. Related research and analysis mainly focus on varying degrees of changes on the sandy soil, and various constructions are gradually developing in dense urban areas, and many deep excavation methods can often be seen in urban dense areas. However, in the past, most of the research on foundation excavation focused on shallow foundation excavation located on the horizontal surface. There were less studies on hillside loading and sand soil comparison and analysis.

一、前言

近年來由於人口急速增加，加上地形之限制，坡地社區之開發成為趨勢，因此關於邊坡穩定與基礎承载力均是常見之問題。由於台灣山坡地面積約佔全島面積的四分之三，受到地形上之限制，平原地區之土地開發逐漸達到飽和，因此謀求山坡地之開發利用已成為趨勢。

然而綜觀目前台灣的社區發展型態，大都以別墅群社區為主，且其所需求的基礎配置大多以淺基礎為主，所以有關坡地建築之淺基礎設計，必須突破平地建築之設計理念，考慮邊坡開挖坡角及不同破壞機制對整體

邊坡穩定造成的影響。

如果欲分析之對象是由兩種以上之材料所組成，其材料之界面是否會在受外力作用下產生相對位移，而此相對位移之效應是否可忽略，且其接觸力如何傳遞等等，這些都是傳統有限元素法所無法解決的。因此本論文採用以有限元素分析並考慮多段式無厚度界面元素(multiple zero thickness interface elements)模擬分析，其界面力學行為遵循莫爾-庫倫破壞準則(Mohr - Coulomb failure criterion)，並配合極限分析理論，模擬土壤破壞滑動面力學行為與各種不同幾何之破壞機制，進而應用於凝聚性與 $c-\phi$ 土壤淺基礎和

邊坡淺基礎之極限承载力計算，以求得淺基礎與邊坡坡緣淺基礎極限承载力之最小上限值，並與理論值及數列解比較，即為本論文之主要研究目的。

二、Plaxis

2-1 Plaxis 有限元素

本研究採用的 PLAXIS 8 版，該軟體所內建的土壤應力-應變模式包括以下 8 種模式

- (1). 莫爾-庫倫模式：用來模擬土壤的應力-應變行為之模式。此模式包含 5 個重要的基本參數，分別為表示土壤彈性的彈性模數 E 和波松比 ν ，表示土壤塑性的摩擦角 ϕ 和凝聚力 c 以及剪脹角 ψ 。
- (2). 軟土模式：此模式為 Cam-Clay 類型模式的分析模式，適合用於模擬土壤主要壓密的行為。
- (3). 強化土模式：此模式亦包含了壓密導致之應變硬化行為，可用來模擬土體在主要壓密的條件下所發生的不可逆壓密行為。此高階土壤模式則可以用來模擬砂土、礫石、粘土和粉土等為軟弱類型土壤的性質。
- (4). HS small 模式：此模式與上一個模式一樣是用來模擬土壤之應變硬化行為，並且此模式將小應變也納入土壤硬化行為模擬的計算條件當中。
- (5). 修正的 Cam-Clay 模式：此模式為 Cam-Clay 類型模式的分析模式，主要用來模擬剪力強度較高的固結黏土。
- (6). 軟土蠕變模式：此模式為黏塑性力學之高階土壤模式，可用於模擬軟弱土壤與時間相依之潛變行為。
- (7). 節理岩變模式：此模式屬於彈塑性模式，可以用來模擬成層或節理的岩體行為。
- (8). 自訂模式：除上述的 7 種內建種模式外，PLAXIS 提供了一個可依使用者需求自建的模式。

本研究分析時採用之土壤模式為 PLAXIS 程式內建之莫爾-庫倫模式，彈塑性模型包括五個輸入參數，分別為表是土壤彈

性的彈性模數 E 和波松比 ν ，表示土體塑性的凝聚力 C 和摩擦角 ϕ ，以及剪脹角 ψ 。除了上述的五個模型參數，初始的土體條件在許多土體應力及應變問題中占有很重要的關鍵，通過適當的靜止土壓力係數 K_0 值，以便於模擬出初始狀態下的土壤應力。由於本研究主要分析砂土土壤必須用到分別代表土壤彈性的彈性模數 E 、波松比 ν ，和土壤塑性的摩擦角 ϕ 、凝聚力 C 、剪脹角 ψ 五個參數，所以使用內建的 Mohr-Coulomb 模式來模擬分析。

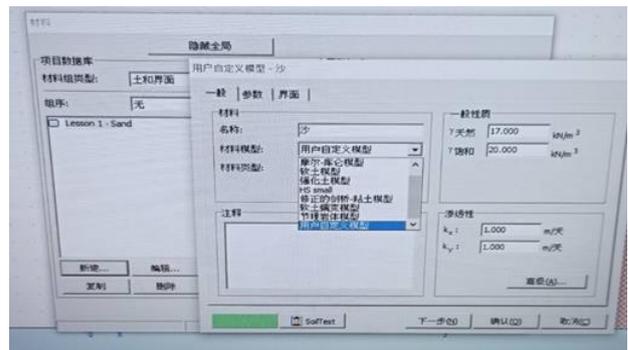


圖 2-1 軟體所內建的土壤應力-應變模式

2-2 Plaxis 設定參數

本研究分析採用一般數值分析的土壤模式，以 PLAXIS 程式內建之莫爾-庫倫模式為主，分別表示土壤彈性的彈性模數 E 、土和波松比 ν ，以及表示土體塑性的凝聚力 c 和內摩擦角 ϕ 以及剪脹角 ψ 。除了上述的五個模式參數外，初始的土體條件在許多土體變形的問題中占有很重要的設定，通過適當的靜止土壓力係數 K_0 值，以方便模擬出初始應力狀態下的側向土壤。由於本研究主要分析砂土土體，必須用到分別代表土壤彈性的彈性模數 E 、波松比 ν ，和土壤塑性的內摩擦角 ϕ 、凝聚力 c 、剪脹角 ψ 五個基本參數，所以使用內建的爾-庫倫模式來模擬做一般數值分析。

本研究以 PLAXIS 8.6 內建之莫爾-庫倫模式做為數值分析工具為主軸，與另外兩個程式做比較，摩爾-庫倫模型，它是屬於理想彈塑性模型。此模式總共需要一般輸入參數及五個基本參數。下面列出了這些參數和它們的單位，包括水位以上單位重 γ_{unsat} 、水位以下單位重 γ_{sat} 、土壓力參數 K_0 、彈性模數

E、柏松比 ν 、凝聚力 c 、內摩擦角 ϕ 及剪脹角 ψ 。

1. 楊氏模數 E (Young's modulus) :

本研究中砂土之 ϕ 角我們採用 $25^\circ \sim 40^\circ$ ，本研究採用公式 $\phi = 27^\circ + 0.3N$ 求得 N，再代入 $E = 1500(N + 15)$ 本研究砂土土壤之內摩擦角 ϕ 採用 $\phi = 25^\circ$ ，本研究查表(3-1)得楊氏模數

- $E = 1.250E+04 \text{ kN/m}^2$ $\phi = 30^\circ$ 、
- $E = 3.750E+04 \text{ kN/m}^2$ $\phi = 35^\circ$ 、
- $E = 6.250E+04 \text{ kN/m}^2$ $\phi = 40^\circ$ 、
- $E = 8.750E+04 \text{ kN/m}^2$

依據 $N = (\phi - 27) / 0.3$ ， $E = 1500(N + 15)$ ，求出 ES



圖 3-2 楊氏模數 E 25 度設定



圖 3-3 楊氏模數 E 30 度設定



圖 3-4 楊氏模數 E 35 度設定



圖 3-5 楊氏模數 E 40 度設定

2. 柏松比 ν (Poisson's ratio) :

當對於自重應力的問題採用線彈性模型或莫爾-庫倫模型時，柏松比的取值是簡單的。對於這種類型的加載，PLAXIS 給出了靜止側壓力係數 $K_0 = \sigma_h / \sigma_v$ ，摩爾-庫倫模型對一階壓縮給出 $\sigma_h / \sigma_v = \nu / (1 - \nu)$ ，因此很容易根據給定的 K_0 值來選擇柏松比，柏松比的取值必須與 K_0 一致。 $(K_0 = 1 - \sin\phi)$ ，在許多情況下，柏松比的取值範圍為 0.3 到 0.4。本研究柏松比取 0.35。

3. 凝聚力 c (Cohesion) :

PLAXIS 能夠處理無粘性土 ($c = 0$)，但是程序有些功能可能會出錯，因此建議不要取 0 值(一般取 $c > 0.2 \text{ kPa}$)。PLAXIS 為輸入的土層提供了一個特殊的選擇，可以模擬土壤的

凝聚力隨深度的增加而增加的特徵。本研究為砂土，故取值 0。

4. 內摩擦角 ϕ (Friction angle) :

摩擦角 ϕ 最主要之目的是作為控制土壤剪力強度降伏條件的作用，可經由現地試驗、試驗室剪力強度試驗及土壤的類型來決定。在 Mohr-Coulomb 模式中，以度的形式輸入。而計算所需要的時間大體上隨摩擦角呈指數增加。因此，在針對某個特定模擬項目之進行初始計算時，要盡量避免大摩擦角。李忠文(2014)論文中提到應力圓所表示的那樣，在摩擦角很大的程度上決定了抗剪強度。本研究內摩擦角取值為 25、30、35、40 度。

5. 剪脹角 ψ (Dilatancy angle) :

以剪脹角用度表示。除非是高度超固結土層，粘土根本無剪脹性(即 $\psi=0$)。砂土的剪脹性取決於密度和摩擦角。石英砂的剪脹角範圍為 $\psi = \phi - 30^\circ$ 。但是，在大多數情況下，因為 $\psi < 30^\circ$ ，剪脹角就等於零。只有極其疏鬆的鬆砂的 ψ 略低於零。本研究剪脹角取值為 0。

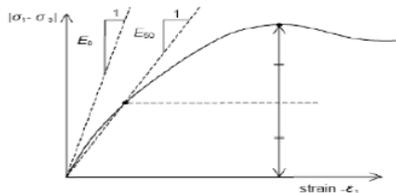


圖 3-6 E_0 和 E_{50} 的定義 (PLAXIS 說明手冊, 2012)

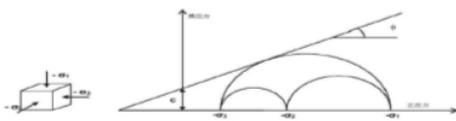


圖 3-7 應力圓(李忠文, 2014)

2-3 基礎模擬

在土壤加壓載重過程中，相對於鄰近土壤而言基礎材料屬於堅硬之材質，因此在加壓過程中，基礎會因為荷載加壓區的內、上部壓力不平衡導致變形，進而造成土壤與基礎間會產生相對位移。因此，在進行承载力分析時，可能需使用界面元素(Interface)，安置在基礎與土壤之間，來模擬土壤與結構間

的相對位移。在數值模擬過程中，可利用 Plaxis 內建的版元素(plate)來模擬基礎結構，而基礎結構所需的參數有基礎彈性模數 E 、基礎斷面積 A 及基礎慣性矩 I 。 A 值及 I 值以單位寬度來表示。而模擬基礎結構時必須輸入其 EA (軸向勁度)、 EI 值(彎曲勁度)以及 ν (擋土壁壁土混凝土之波松比)

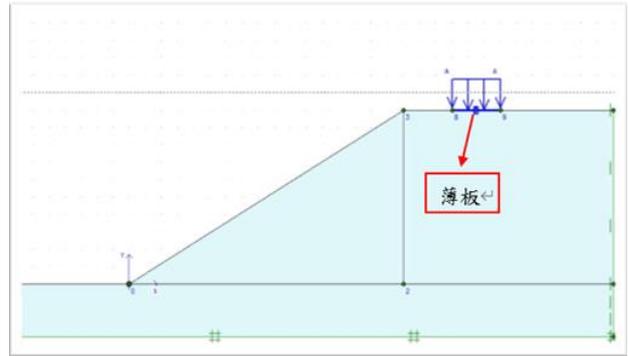


圖 3-8 基礎結構界面(Interface)元素示意圖

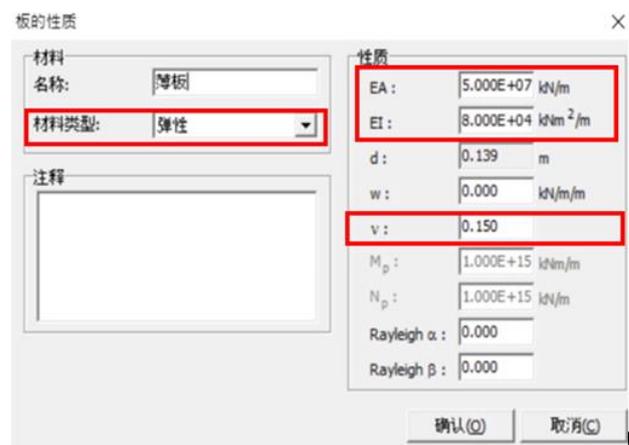


圖 3-9 基礎之數值輸入

三、數值分析結果與探討

由極限承载力公式與 plaxis 程式分析得到平地最大載重為 439ton，因此當我們改變(坡角、高度、土壤摩擦角)看距離多遠與平地 439 一樣，大於 439 則表示，後面可正常開挖跟平地差異不大，小於則表示有地層滑落下陷的危險。

距離我們用 $(0B \sim 6B)$ ，且 $B=3$ ，用意是距離會與基礎寬一樣都是 3M，以方便確認距離邊坡幾個基礎寬度。

表 3-1 砂土土壤對應的設定參數

砂土土壤				
內摩擦角 ϕ	25°	30°	35°	40°
凝聚力 c (kN/m ²)	0	0	0	0
柏松比 ν	0.35	0.35	0.35	0.35
E 楊氏模數 (kN/m ²)	12500	37500	62500	87500
剪脹角 (ψ)	0°	0°	0°	0°
KO 值	0.58	0.5	0.43	0.36

3-1 改變斜坡角 θ

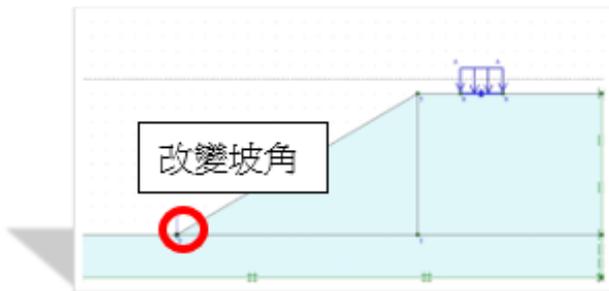


圖 3-1 改變斜坡角 θ

改變值:

斜坡角 θ	10 度	20 度	30 度
--------------	------	------	------

不變值: 斜坡高度 10M、土壤內摩擦角 30 度、薄板設定值

3-1-1 數據分析

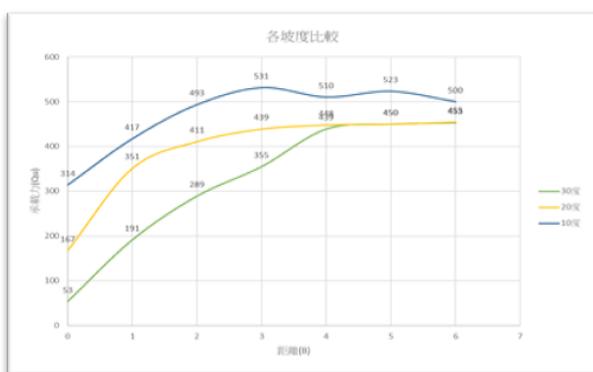


圖 3-2 改變斜坡角 θ 對距離與承載力影響

表 3-1 改變斜坡角 θ 對距離與承載力影響

坡角 10°							
距離	0B	1B	2B	3B	4B	5B	6B
最大載重 ton	53	191	289	335	439	450	453
坡角 20°							
距離	0B	1B	2B	3B	4B	5B	6B
最大載重 ton	167	351	411	439	448	450	455
坡角 30°							
距離	0B	1B	2B	3B	4B	5B	6B
最大載重 ton	314	417	493	531	510	523	500

3-2 改變高度 H

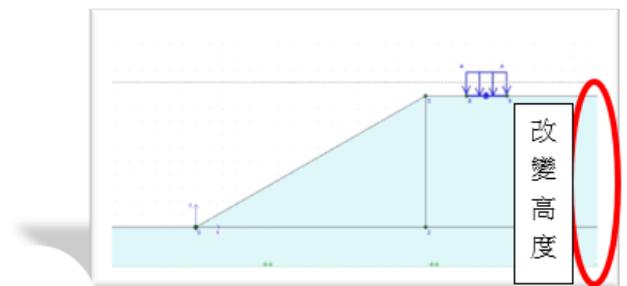


圖 3-3 改變高度 H

改變值:

高度	5m	10m	15m
----	----	-----	-----

不變值: 坡角 20 度、土壤內摩擦角 30 度、薄板設定值

3-2-1 數據分析

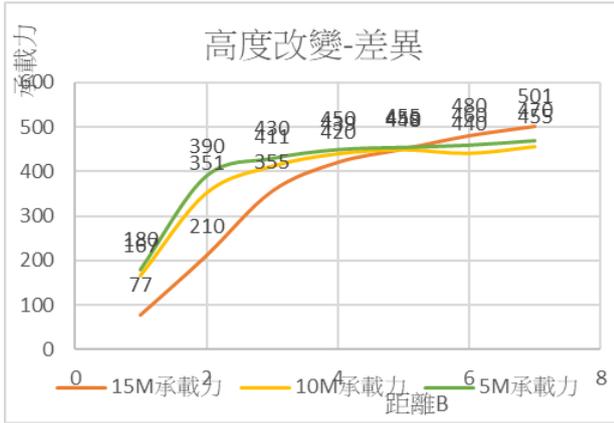


圖 3-4 改變高度 H 對距離與承載力影響

表 3-2 改變斜坡角 H 對距離與承載力影響

		高度 5M						
距離		0B	1B	2B	3B	4B	5B	6B
最大載重	ton	180	390	430	450	455	460	470

		高度 10M						
距離		0B	1B	2B	3B	4B	5B	6B
最大載重	ton	167	351	411	439	448	440	455

		高度 15M						
距離		0B	1B	2B	3B	4B	5B	6B
最大載重	ton	77	210	355	420	450	480	501

3-3 改變土壤內摩擦角 ϕ

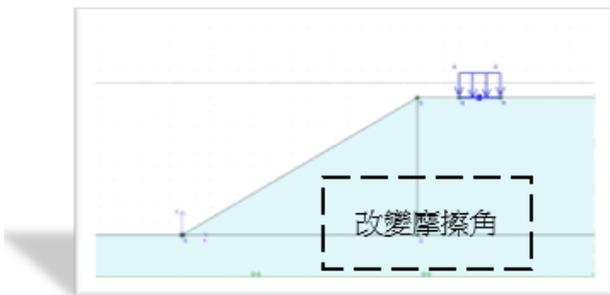


圖 3-5 改變土壤內摩擦角 ϕ

改變值:

改變土壤內摩擦角	25 度	30 度	35 度	40 度
----------	------	------	------	------

不變值: 坡角 20 度、高度 10M、薄板設定值

3-3-1 數據分析

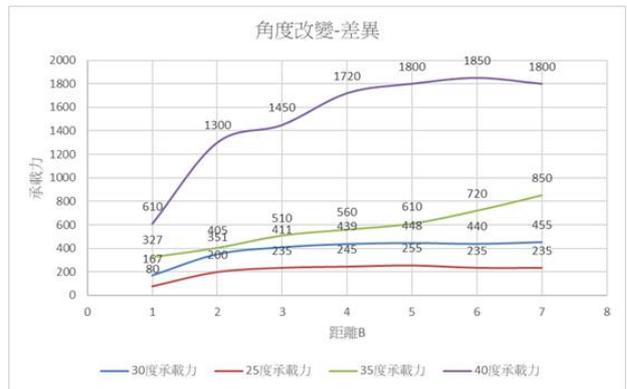


圖 3-6 改變土壤內摩擦角 ϕ 對距離與承載力影響

表 4-7 改變土壤內摩擦角 ϕ 對距離與承載力影響

		摩擦角 25 度						
距離		0B	1B	2B	3B	4B	5B	6B
最大載重	ton	80	200	235	245	255	235	235

		摩擦角 30 度						
距離		0B	1B	2B	3B	4B	5B	6B
最大載重	ton	167	351	411	439	448	440	455

		摩擦角 35 度						
距離		0B	1B	2B	3B	4B	5B	6B
最大載重	ton	327	405	510	560	610	720	850

		摩擦角 40 度						
距離		0B	1B	2B	3B	4B	5B	6B
最大載重	ton	610	1300	1450	1720	1800	1850	1800

四、總結

4-1 改變斜坡角 θ 對距離與承载力影響:

當坡角 30 度時,距離 4B 後跟平地相當。20 度則是 3B 後。10 度則是 1B,但當坡角變成 45 度時,卻無法承受壓力。因此當土質內摩擦角固定 30 度時,只改變斜坡 θ 角斜坡 θ 大時,斜坡所能承載重較小

只考慮斜坡角可得:

當 $\theta < \text{土質內摩擦角 } 30^\circ$  離邊坡一段距離可以安全開發
 當 $\theta > \text{土質內摩擦角 } 30^\circ$  不管距離多遠都會位移滑落

4-2 改變高度 H 對距離與承载力影響:

當高度 5M 時,距離 2B 後與平地差異不大,10M 與 15M 也是距離 2B,因此改變高度對原本的承載差異不大,且當距離 4B 時,三條線斜率慢慢變小開始收斂。

4-3 改變土壤內摩擦角 ϕ 對距離與承载力影響:

當改變土壤內的摩擦角,25 度時最大載重都在 250 上下,故研判此角度應該不適合開挖,有滑落下陷等危險。但摩擦角 30 度,距離 3B 後與平地差異不大,35 度則是 1B,40 度時上升斜率最大。

由此可知當改變土壤內的摩擦角,角度大,可承受的也大。

析 SMW 擋土壁特性與開挖變形之關係」,國立台灣科技大學,碩士論文。

6. 郭信東,2002,「淺基礎的破壞機制」,國立中興大學,碩士論文。
7. 鄭俊煙,98,「邊坡淺基礎承载力極限分析上限值之研究」,中華大學碩士論文
8. 施國欽(2004),“大地工程學(二)基礎工程篇”
9. 陳煌銘(1987),“深開挖引致地盤移動”,地工技術雜誌第 20 期
10. 林威廷,2016,「PLAXIS 2D 模擬深開挖變形行為之探討-以臺北盆地深開挖工程為例」,中國科技大學土木與防災設計系碩士論文

五、參考文獻

1. 曾浩淵,104,「層狀土壤極限承载力研究」,義守大學,土木與生態工程學系,碩士論文
2. 朱冠諺、楊順斌、關子謙、邵綠揚,108,「深開挖軟體模擬分析與比較」,義守大學,土木與生態工程學系,學士論文
3. 陳建宏,106,「相鄰淺基礎交互作用對極限承载力的影響」,義守大學,土木與生態工程學系,學士論文
4. 李哲豪,2014,「以 PLAXIS 分析深開挖對鄰近隧道的影響」,義守大學土木與生態工程學系,碩士論文
5. 鄭柏威,2008,「應用 PLAXIS 程式分

【B】環境與工程

未使用既有污水下水道幹管狀況調查與修繕-以臺東市幹管為例

謝啟萬¹ 馬志安²

¹國立屏東科技大學土木工程學系教授

²國立屏東科技大學土木工程學系碩士班研究生

摘要

臺東市污水下水道系統自民國 89 年至 93 年間建置管徑 300mm 至 1,200mm 鋼筋混凝土管(RCP)，長度約 4,667 公尺之幹管，因當年 BOT 招商未果，致建置完成之污水幹管遲未啟用，經修正計畫後，機關將啟用竣工近 20 年之幹管，為確認既有幹管狀況，採 CCTV 調查管線設施，發現破孔、接頭漏水、嚴重積水及障礙物等 4 類缺失，經考量功能、施工條件、施工成本後，以局部修補、局部翻修、新推管線及機械臂障礙切除等工法修繕，延長幹管使用壽命，該污水系統並於民國 109 年通水啟用。

本研究蒐集常見污水下水道修繕工法、人孔及管線巡視調查方法，並以臺東市未經使用之污水下水道幹管為例，進行探討啟用前狀況調查與修繕分析。

關鍵字：污水下水道、管線調查、管線修繕

Sewer Pipeline Assessment and Rehabilitation - Taitung City Main Sewer Pipelines Case Study

Hsieh, Chi-Wan¹ Ma, Chih-An²

¹ Department of Civil Engineering, National Pingtung University of Science and Technology

² Department of Civil Engineering, National Pingtung University of Science and Technology

ABSTRACT

Taitung City sewer system was built with 300mm to 1,200mm diameter Reinforced Concrete Pipe (RCP) from 2000 to 2004, with a length of about 4,667 meters of the main pipe. Because the BOT investment failed then, the completed sewage trunk pipe has never been used. After a revised plan is approved, the authorities will activate the trunk pipe after it was completed for nearly 20 years. In order to assess the condition of the existing pipe, a CCTV survey was used to investigate the pipeline facility. The survey found four types of issues, i.e., breakage, joint leakage, severe water accumulation and barriers within the pipe. After considering the function, construction conditions, and construction costs, it was decided to perform local repair, partial renovation, new pipeline construction and mechanical arm barrier removal to extend the service life of the pipe. The sewage system was put into service in 2020.

This study used common sewer repair methods, manhole and pipeline inspection methods to investigate the pre-commissioning condition and repair analysis using the unused sewer trunk pipe in Taitung City as an example.

Keywords: sewer pipeline, pipeline assessment, pipeline rehabilitation

一、前言

污水下水道系統為現代化國家之重要指標之一，生活環境品質的提昇與改善亦是民眾所關注之議題，環境衛生及河川水體水質污染問題日益受重視，完善的污水下水道系統正是解決都市污水排放、預防河川水體水質遭受污染進而提昇生活環境品質之重要基礎建設。然而，隨經濟發展所產生的污水問題日益嚴重，鑒於環境變遷及配合地方發展需求，污水下水道的建置從以前不被重視或是不願投資，逐漸變為各單位首長迫切爭相比較之重要公共建設。

由於大部分的污水下水道管線系統建置於看不見的地面下，經過長時間的使用之後，行駛車輛的重量、管線的腐蝕、人為的破壞或是地震影響等，往往會產生一些管線缺失，例如：材質上的耐久性、結構受到壓力損傷、地下水中化學物質腐蝕，可能造成斷裂或崩塌，進而造成重大災害。

臺東市污水下水道系統最早之污水下水道幹管約為民國 89 年至 93 年間建置，已設置約 20 年，由於當年招商不順，而尚未啟用，後至民國 101 年重新以政府興辦方式辦理，主管機關為確認既有幹管是否符合使用需求，爰辦理人孔及管線調查，以調查幹管狀況及研擬修繕工法，該主要幹管位於目前臺東市區熱門景點鐵花村周邊道路，對於既有幹管修繕施工所造成的交通衝擊，是一大挑戰。本研究期望就個案污水幹管的狀況調查，若發覺管線的缺失，並進行修繕工法探討，管線的修繕除了考量材質、技術、施工設備及施工成本外，也必須顧及對周遭居民、商家、交通之影響，採取適當之工法，以延長既有污水下水道管線之壽命。

二、管線設施常見缺陷及修繕工法

2-1 管線設施常見缺陷

近年管線造成的道路沉陷事故頻傳，不僅對於民眾生活所造成的風險威脅至大，也是相當不經濟，其危害性，可供各主管機關事先警惕，以防患於未然。

管線設施之缺陷可分為三項，結構缺陷、

供用缺陷、管理缺陷，其中以結構缺陷所造成的影響最大。管線破損、裂縫、地下水由連接處滲入、周邊土砂流入等因素皆可能導致道路陷落事故，而管線設施常見之結構缺陷原因及可能事故之影響如表 1。

表 1 管線設施常見之結構缺陷

缺陷內容	發生位置	原因	可能影響
破損	全部管線	◎交通車輛荷重 ◎地盤不均勻沉陷 ◎地震 ◎其他工程施工 ◎清掃器具及高壓水	◎道路沉陷 ◎土砂流入、減少管線斷面影響輸水功能 ◎浸入水、漏水
裂開	全部管線	◎交通車輛荷重 ◎地盤不均勻沉陷 ◎地震 ◎其他工程施工 ◎施工不良	◎道路沉陷 ◎土砂流入 ◎浸入水、漏水
腐蝕	混凝土結構	◎產生硫酸 ◎惡質污水流入 ◎劣化	◎破損
磨耗	全部管線	◎老朽化 ◎管內清洗	◎破損
變形	塑膠管	◎上載荷重	◎破損 ◎浸入水
脫落	全部管線	◎地盤不均勻沉陷	◎破損 ◎浸入水

2-2 管線修繕工法選用考量

考量管線設施的修繕工法因素，依據管渠、連接管、人孔各個區域的不同，適用的工法也有所差異。修繕工法係根據管線的埋設狀況、劣化或不良的問題、通水能力以及施工條件等因素來決定適用的方式。若要修繕已經通水的既設管線，將對周圍環境造成影響，故依據修繕情況之不同，可能需要額外新增龐大費用及延長施作工期。修繕後新的使用年限取決於功能的健全與否和機能之設置，可依表 2 各項內容進行分析與檢討，選用適當的工法將非常重要。

表 2 管線修繕工法考量表

項次	考量因素	分析與檢討
1	功能要求	確保必要的通水斷面、坡度、抗壓強度及耐久性等
2	釐清施工條件	施工中可否通水、道路和交通條件、周邊環境條件
3	選定工法	考量既設管線狀態，擬定採用適宜之工法
4	判斷通水能力	施工後的通水能力，選擇更生或更新工法
5	施工性、經濟性	各種限制條件的對策方案、施工性、經濟性、工期等因素

2-3 管線修繕工法種類

既設污水下水道管渠的修繕，依損壞程度，其修繕類別可分為整治及點補兩種不同的修繕規模。若依工法類別，可分為開挖工法與免開挖工法兩種，其中依修繕類別又可細分置換(線上置換)、翻修及補點等，表 3 彙整各類工法便於了解各類工法其適用管徑。

表 3 管線修繕工法與分類表

工法類別	修繕類別	項目	工法名稱	適用管徑	
開挖工法	重置或修補	1	明挖工法	Φ300 mm 以下	
		2	開挖擋土工法	Φ200 ~3400mm	
		3	開挖推進工法	Φ300 ~2000mm	
免開挖工法	重置	4	潛盾工法	Φ1350 ~2400mm	
		5	推進工法	Φ300 ~2000mm	
		6	破管工法	Φ100 ~1000mm	
		7	剖管工法	Φ300 mm	
		8	削磨管工法	Φ100 ~800mm	
		局部翻修	9	柔管內襯工法	Φ100 ~2500mm
			10	螺旋內襯工法	Φ250 ~2500mm
			11	套管內襯工法	Φ100 ~1000mm
	12		緊貼內襯工法	Φ100 ~1000mm	
	13		摺曲管工法	Φ100 ~1000mm	
	14		預鑄內襯工法	Φ100 ~1000mm	
	局部修補	15	鑲環工法	Φ200 ~3000mm	
		16	灌注工法	Φ800 mm 以下	
		17	機械臂工法	Φ200 ~800mm	

三、管線設施調查

3-1 現行規定

為適當維護管理管線設施，辦理檢查作為平時的維護管理業務，最重要的莫過於監控與掌握管線設施，現行國內下水道主管機關，內政部營建署頒行有最低標準之「公共污水下水道管渠維護管理要點」第 5、6 條規定如下：

第 5 條：直轄市、縣(市)政府對於公共污水下水道管渠定期人工檢視巡視檢查頻率如下。

(一) 例行檢查：

1. 道路段人孔外部設施每三個月巡檢一次以上。
2. 道路段人孔內部設施每年依計畫巡檢一次以上。
3. 易引起油脂堆積地方每三個月巡檢一次以上。
4. 倒虹吸管道每年檢測人孔兩端水位差至少一次，並依其流量判斷淤積情況。

(二) 專案檢查：

1. 污水處理廠第一次試運轉前。
2. 污水處理廠進流量水質異常時。
3. 主次幹管及分支管網管段路面龜裂、下陷、隆起及路基流失時。
4. 防汛期間及災害發生後加強各人孔設施巡視檢查。
5. 視需要不定期錯接管檢查。

第 6 條：直轄市、縣(市)政府對於使用中公共污水下水道管渠有下列之一者，應辦理管渠內部檢查清理作業。

- (一) 管渠管徑(600mm)以下內部至少每十年定期檢視及清理管渠淤積一次以上。
- (二) 管渠管徑(700mm)以上內部每二十年定期檢視或清理管渠淤積一次以上。
- (三) 倒虹吸管道內部每三年清理管渠淤積一次以上。

3-2 管線內部調查

調查的目的，主要為了解老舊污水管線的腐蝕、破損、斷裂、管體劣化狀況、滲漏狀況、管接頭鬆脫、接管突出、油脂結垢、管線

接合處突出、油脂或砂漿結垢、樹根入侵，以及其他可能阻礙水流之堆積物情況。管內調查依照管渠的構造、狀態可分為人員進入管內的目視調查及使用攝影設備(TV 調查)來進行，一般而言，適用範圍如表 4。

表 4 管內調查類別及適用範圍

類別	適用範圍
TV 調查	幹管內徑 200~1200mm
	支管內徑 150~200mm
人員目視調查	幹管內徑小於 1200mm (進入人孔目視)
	幹管內徑大於 1200mm (管渠內目視)

(一) 人員目視調查：人員由人孔進入管渠進行調查，調查時，應充分注意交通安全性，避免缺氧(氧氣 $>18\%$)或因誤吸硫化氫等有毒氣體(一氧化碳 $<35\text{ppm}$ 、硫化氫 $<10\text{ppm}$)而發生中毒意外或跌落。整體流程圖及示意圖如圖 1、2。



圖 1 人員進入管渠調查流程圖

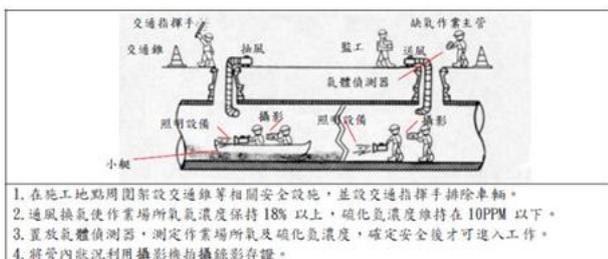


圖 2 人員進入管渠調查示意圖

(二) 管道閉路電視調查系統(Closed-circuit television, CCTV)：某些國家已將定期檢測主要污水管線列為常規，如此管線主管機關方可以將地下設施廣泛之資訊整合而擬定管線維護計畫。CCTV 系統亦可用於檢視以鑑定造成管線問題之原因。除應用於重力管線之檢測外，其應用於壓力管線之線上檢測亦逐漸受到偏好。攝影機具備有固定前視之攝影鏡頭或可以上下及左右轉動或旋轉之鏡頭以觀測管壁四周及側向連接管之狀況。調焦鏡頭亦可應用於大管徑管線檢測以取得較接近之影像。

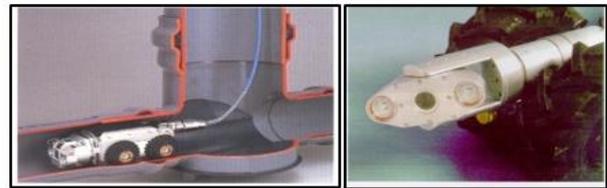


圖 3 CCTV 鏡頭

電視攝影機檢查管內情況之工作內容包含擋排水、繞流或抽排水、污水管線清洗、障礙物清除、閉路電視檢視、錄影、紀錄等，相關作業程序及示意圖如圖 4、5。



圖 4 CCTV 管渠調查流程圖

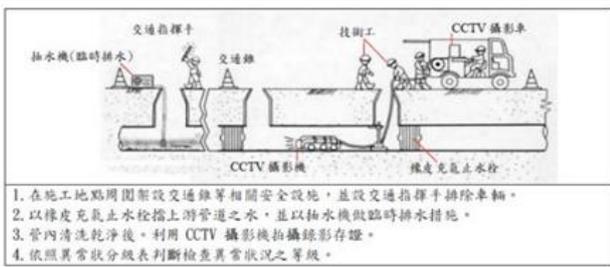


圖 5 CCTV 管渠調查示意圖

(三) 管線內部調查記錄：調查結果，應有系統做成紀錄，包含調查紀錄表、調查總表、調查統計表、照片及攝錄影像檔案等，各式調查紀錄相片如圖 6。

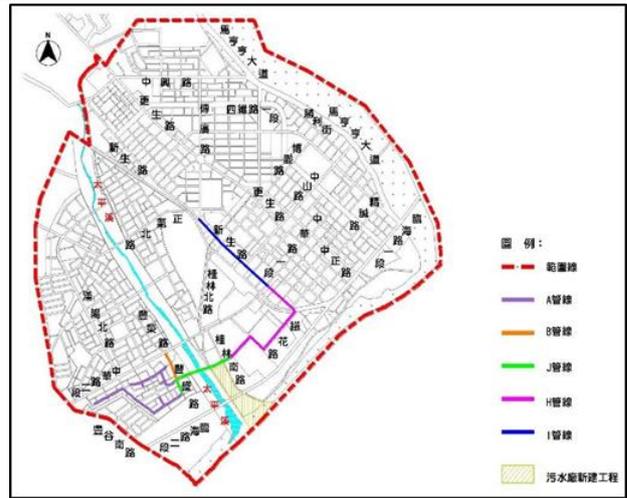


圖 7 工程計畫範圍圖

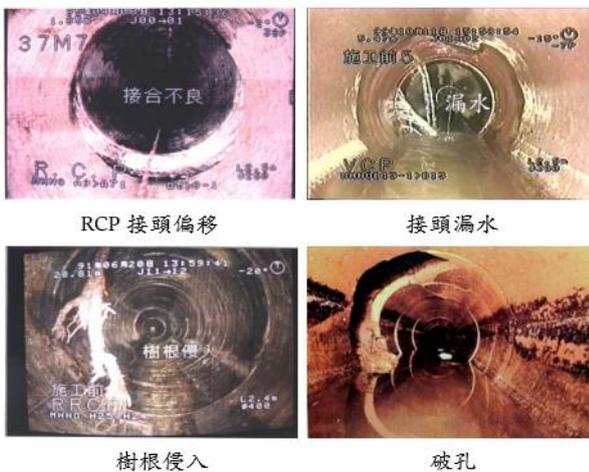


圖 6 各種管線缺失

四、臺東市污水幹管工程個案

該工程計畫範圍位於臺東市都市計畫區，其中約為民國 89 年至 93 年間建置有管徑 300mm 至 1,200mm 鋼筋混凝土管(RCP)，長度約 4,667 公尺之 A、B、H、I 及 J 幹管，計畫範圍及管線資料如圖 7 及表 5，計畫區內之相關管線設施，因當年採 BOT 模式招商未果，迄今仍未正式啟用，臺東縣政府為確認既有幹管狀況，爰辦理該計畫管線設施調查作業，以因應即將啟用之臺東市污水下水道系統。

在施工條件上，污水流往水資源回收中心主要幹線 I 系統既有管線所在新生路周邊，為臺東市近年來發展觀光文創產業最重要的地點，在施工方式的考量上，如何減少對交通的衝擊，是相當關鍵的因素。

表 5 計畫區既有管線統計表

管徑 (mm)	管 材	A 系統	B 系 統	H 系統	I 系統	J 系統	小計 (m)
300	RCP	999.94	-	-	-	-	999.94
400	RCP	766.42	-	-	-	-	766.42
500	RCP	-	-	-	-	144.63	144.63
700	RCP	-	252.40	-	-	-	252.40
1,000	RCP	-	-	-	735.41	459.80	1,195.21
1,200	RCP	-	-	1,308.14	-	-	1,308.14
合計		1,766.36	252.40	1,308.14	735.41	604.43	4,666.74



圖 8 I 系統所在周邊建設圖

4-1 管線調查結果

經 CCTV 調查，調查成果除 I 系統外，管線整體結構尚稱良好，部分損壞情形並非管身使用劣化，多屬外在因素所導致，有問題的管段包含 O 型環脫落、水垢結石、積水、破損等狀況為主，經整理分為四個部分，I 系統 I02→I01 管線、I 系統 I02→I03 管線、I 系統 I03→H59 管線及(A、B、J、H)系統管線，如圖 9 及表 6。



圖 9 管線調查結果圖

(一) I 系統 I02→I01 管線

發現 3 處出現大範圍破管及鋼筋裸露的狀況，如圖 10。



圖 10 I02→I01 管線 3 處破孔

(二) I 系統 I02→I03 管線

發現 9 處位置分散的接頭漏水，管線高程位於地下水層，持續漏水，如圖 11。

(三) I 系統 I03→H59 管線

歷經 2 次抽水作業，無法降低管內水位，初步研判管內已有破損處，連通管外地下水層，使得抽水機無法有效地抽降管內水，無法得知損壞狀況，可說是狀況不明，抽水作業，如圖 12。



圖 11 I02→I03 管線漏水 圖 12 I03 人孔抽水作業

(四) (A、B、J、H)系統管線

管線整體結構尚稱良好，部分損壞情形並非管身使用劣化，多屬外在因素所導致，有問題的管段包含 O 型環脫落、水垢結石、積水、破損等狀況為主，如圖 13。



圖 13 (A、B、J、H)管線管線缺失

4-2 修繕方案

經整理 4 個主要管段檢視成果，I 系統 I02→I01 管線、I 系統 I02→I03 管線、I 系統 I03→H59 管線及(A、B、J、H)系統管線，須優先處理問題整理如表 6。

表 6 管線檢視優先處理問題表

項次	管段位置	問題說明	備註
1	I 系統 I02→I01 管線	$\Phi 1000\text{ mm}$ 管疑遭鋼軌擊破 3 處	
2	I 系統 I02→I03 管線	$\Phi 1000\text{ mm}$ 管 9 處接頭漏水	283.50m
3	I 系統 I03→H59 管線	$\Phi 1000\text{ mm}$ 管管內嚴重積水，無法完成抽水，管內狀況不明	280.50m
4	(A、B、J、H)系統管線	管線障礙物 $300\text{mm} \leq \Phi < 500\text{mm}$, 13 處 $500\text{mm} \leq \Phi < 700\text{mm}$, 4 處	

(一) I 系統 I02→I01 管線修繕方案

(1) 方案研擬：

該管段全長 309.10m，在位於 109.74m、112.74m 及 115.73m 等三處出現大範圍破管及鋼筋裸露的狀況，考量檢視後管內狀況仍相當不錯，損毀處疑為遭鋼軌擊破造成，如以

局部翻修整段，費用約需要 1,150 萬，由於破損處較集中，以局部翻修較不符合效益，所以不納入考量，故針對其修繕方式，比較以下二種較符合現場及效益之處理方案：

表 7 I02→I01 管線修繕方案比較表

	方案一(採用)	方案二
方案說明	採管內襯破洞補強	採管線置換
特點	<ul style="list-style-type: none"> ◎無須進行路面開挖，交通影響範圍小 ◎施工階段須落實通風及安全措施 ◎施工費用較低 	<ul style="list-style-type: none"> ◎明挖施工，交通影響範圍較廣 ◎接頭止水處理困難 ◎施工費用高 ◎採用新管置換可徹底解決破管問題
經費(元)	1,038,306	2,050,279

方案一以人工進入管內進行修補作業，施工過程無須進行路面開挖，除了施工難度相對較低以外，施工費用較低，交通影響範圍也較小，惟施工階段須特別注意應落實通風及相關安全措施，以確保作業人員安全；方案二設置鋼襯板工作井並採用明挖施工置換管線，對交通影響層面較廣，另由於採用新管置換，雖施工費用提高，但可徹底解決破管問題。經評估後，考量施工費用、施工難易程度及影響層面，以方案一做為優先執行方案。

(2) 修繕執行：

既有污水管線破損，鋼筋外露，先以水泥砂漿填補管線破損處，再安裝不銹鋼套環，並用水泥砂漿覆蓋不銹鋼套環，加強修繕效果，修繕前後相片，如圖 14。



圖 14 破管修繕前後相片

(二) I 系統 I02→I03 管線修繕方案

(1) 方案研擬：

由於 I02→I03 損毀的狀況以接頭處漏水居多，所以需整建點位不像上游段 I01→I02

集中，容易於處理，其餘現階段未檢視出漏水接頭亦存在著漏水風險，以下評估以局部修補及局部翻修方式來整建。

表 8 I02→I03 管線修繕方案比較表

	方案一	方案二(採用)
方案說明	採管內局部修補	採局部翻修
特點	<ul style="list-style-type: none"> ◎施工費用較低 ◎施工階段須落實通風及安全措施 ◎使用年限較短，後續重置較頻繁，易增加社會成本，若以 3 年攤提，每年成本約 496,714 元/年 	<ul style="list-style-type: none"> ◎施工費用較高 ◎整管段內襯修復，完整性高 ◎攤提社會成本，若以 15 年計算，每年興建成本約 640,032 元/年，差異並不大
經費(元)	1,490,144	9,600,493

以上兩方案單純由整建費用考慮，為方案一局部修補方式最為經濟，但考量使用成本及社會效益，局部修補每處採 1m 補強，固著面積範圍小，使用年限可能僅達 3~5 年，被污水沖刷侵蝕後即須再次補強，局部翻修使用年限可達 15~20 年或者更甚，攤提整建成本再將社會成本納入，局部翻修未必不可納入考量，故可優先考量局部翻修整建 I02→I03 管段。

(2) 選用局部翻修工法：

常見局部翻修有現場固化內襯管(CIPP)、螺旋內襯工法、緊貼內襯工法等，以下依本案例就各工法比較分析，如表 9。

由於本管段位於地下水層處，接頭漏水至管內常有水流，且漏水處散布，擋水不易，該工區又位於觀光重要景點，交通繁忙，減少交通衝擊亦為重要考量因素，因此本管段經考量各項因素優先採用螺旋內襯工法，至於新管流量適量減少問題，由於本污水系統為建置初期，污水接管水量較低，在整體水量上，不會產生問題。

採用內襯 uPVC 板帶尺寸，寬度 80mm，高度 8mm，供應材料廠商，進口商為桃園市公司，製造商為新加坡廠商。

表 9 局部翻修工法比較表

工法	適用管徑 (mm)	最大施工長度 (m)	於本案條件之優缺點
現場固化內襯管 (CIPP)-翻轉	100~2700	900	<ul style="list-style-type: none"> ★新舊管線之間隙不大，不需灌漿 ★新管雖較舊管小，但其內徑光滑，流量未必減少 ★特殊之機械及施工技術性高 ★施工中現有水流需疏導至他處 ★樹脂之養護時間較長(需 5hr 以上) ★對小型工程而言，較不具競爭力
螺旋內襯工法 (連續式)	100~1600	300	<ul style="list-style-type: none"> ★施工快速，減少交通衝擊 ★水量不大時，可水中施工 ★可配合現有管線狀況施工 ★施工技術性高 ★新管線流量將適量減少
緊貼內襯工法 (牽引或滾壓)	62~600	320	<ul style="list-style-type: none"> ★不會明顯減少管線之流量 ★較適合於壓力管 ★通常使用於小管徑(600mm 以下)

(3) 修繕執行：

管內進行局部翻修佈場、施工及新舊管間灌漿完成情形，如圖 15。



圖 15 局部翻修修繕相片

(三) I 系統 I03→H59 管線修繕方案

(1) 方案研擬：

I03→H59 管段經調動大型抽水機具抽水後(106 年 1 月)，仍無法使管內地下水水位下降，初步研判管內已有破損處，連通管外地下水層，使得抽水機無法有效地抽降管內水，無法得知損壞狀況，若管內破損，致使鋼筋裸露或混凝土剝落，亦無法採局部翻修整建，所以本段以新設管段整建。

新設管線並於上游人孔 I03 及下游人孔 H59 處設置銜接段，將 I03 既設下游封牆，引流至新設管段，新設長度 295m，如圖 16，所需費用 19,644,857 元，既有不再使用管線

以混凝土封填。



圖 16 I03→H59 管線新設示意圖

(2) 修繕執行：

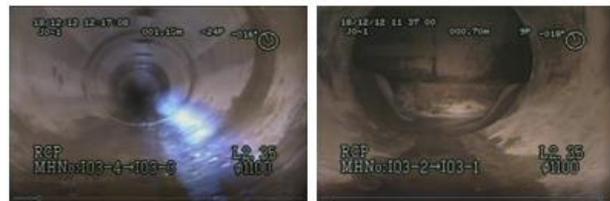
施工廠商於執行時，提出以 $\Phi 1100\text{mm}$ 管替代 $\Phi 1000\text{mm}$ 管之替代方案，不增加經費，經機關同意後執行，新設管線 295m 並於上游人孔 I03 及下游人孔 H59 處設置銜接段，既有不再使用管線以混凝土封填。



新設管線施工



既有廢棄管線填築



新設管線 CCTV 檢視

圖 17 I03→H59 管線處理情形

(四) (A、B、J、H)系統管線修繕方案

(1) 方案研擬：

管線整體結構尚稱良好，部分損壞情形並非管身使用劣化，多屬外在因素所導致，有問題的管段包含 O 型環脫落、水垢結石、積水、破損等狀況為主，以機械臂管線障礙物切除方式處理，本區域計須執行管線障礙物切除 17 處，所需費用 349,592 元。

(2) 修繕執行：

列舉不同項目修繕情形，如后。



圖 18 管內 PC 切除



圖 19 管內 O 型環脫落切除

4-3 執行成效

民國 89~93 年個案管線新設經費約 20,335 萬元，當時平均營建物價指數(總指數)為 68.42，經調查評估後，面對 4 種不同幹管缺失，採取管內襯破洞補強、局部翻修方式整建、新設管線及機械臂障礙物切除等工法，經費計約新臺幣 3,063 萬元，民國 107 年修繕時，營建物價指數(總指數)為 105.84，為原建設時之 1.55 倍，換算後，本案使用原建設經費約 10% 預算，順利完成幹管狀況調查與修繕工作，延長幹管使用壽命，該污水系統已於 109 年通水啟用。

表 10 本計畫幹管修繕方式表

項次	管段位置	問題說明	修繕方式	經費(元)
1	I 系統 I02→I0 1 管線	Φ1000 mm 管 疑遭鋼軌擊破 3 處	局部修補 (鋼環內襯)	1,038,306
2	I 系統 I02→I0 3 管線	Φ1000 mm 管 9 處接頭漏水	局部翻修 (螺旋內襯) 長度 283.5M	9,600,493
3	I 系統 I03→H 59 管線	Φ1000 mm 管 內嚴重積水， 無法完成抽水， 管內狀況 不明	新推管線 Φ1100 mm 長度 295M	19,644,857
4	(A、 B、J、 H)系統 管線	管線障礙物 300mm ≤ Φ < 500mm，13 處 500mm ≤ Φ < 700mm，4 處	機械臂障礙 物切除	349,592
合計(約)				30,630,000



圖 20 污水系統通水啟用

五、結論與建議

對於未使用既有污水下水道幹管狀況調查與修繕，本研究以臺東市幹管為例，綜上所述，結論如下：

- (一) 面對不同的管線缺失，本案例修繕工法係根據幹管的埋設狀況、劣化或不良的問題、功能要求、通水能力、施工條件及經濟性等因素擬定管內襯破洞補強、局部翻修方式整建、新設管線及機械臂障礙物切除等工法，順利完成幹管狀況評估與修繕工作，整體工期約 60 天，且未對周邊商圈產生重大影響，該污水系統已於 109 年通水啟用。

- (二) 污水下水道管線建設不易，經費龐大，在有既有幹管區域要重新埋設更新管線更是不容易，因此，妥善維修管理設施使其安全通水，並延長管線壽命，比建設更為重要。
- (三) 建置完整污水設施數位資料十分重要，上述 I 系統 Io2→Io1 管線破損疑為鋼軌樁所擊破，如能事先掌握管線資料，應可避免發生。
- (四) 管線設施大部分位於地底下，CCTV 的多功能運用可避免人員進入管線可能的風險，為最普遍應用於重力管線檢測之技術，而其應用於壓力管線之案例亦逐漸增加中。目前許多型式之 CCTV 檢測系統可適用於所有管徑與形狀之管線，其中亦包括精簡且易於攜帶之系統。
- 靖修，下水道管渠管理維護及修繕，詹氏書局，台北，2006。
5. 內政部營建署，雨、污水下水道管渠及設施維護管理制度，台北，2016。
 6. 謝啟萬，CCTV 應於估評下水道管線狀況評估之探討教材，2003。
 7. 中華民國地下管道技術協會，技術指南，2000。
 8. 臺東縣政府，「促進民間參與台東縣台東市污水下水道系統建設之興建、營運、移轉(BOT)計畫」先期計畫書(核定版)，2005。
 9. 謝啟萬、謝憲明、吳政翰，下水道管線免開挖工法，第九屆下水道研討會論文集，國立中央大學，桃園。

建議方面如下：

- (一) 建議運用 GIS 系統有計畫的安排巡檢及管內調查：污水管線設施大部分位於地底下，地面上可巡檢的項目不多，確保管線的通水安全重點還是需要透過管內調查，有系統有計畫的安排，近年來 GIS 資訊平台系統功能多元，將巡檢調查資料納入系統，相互搭配，維護更精準更有效率。
- (二) 建議中央多加輔導地方政府及廠商進行 CCTV 檢視操作：鑒於臺東並無廠商可進行 CCTV 調查工作，都須商請高雄的廠商處理，地方的危機處理時效不佳。
- (三) 建議維護幹管所需緊急排放的計畫應先行擬定，通水後的污水下水道系統，面臨要修繕時，就必須先有適當的地點或管線可能供排放或繞流。

參考文獻

1. 內政部營建署，污水下水道第五期建設計畫，台北，2014。
2. 內政部營建署，污水下水道第六期建設計畫，台北，2020。
3. 臺東縣政府，臺東縣臺東市污水下水道系統第一修正修正實施計畫，台東，2017。
4. 歐陽橋暉、江黎明、廖昭明、周良輝、黃

公共污水處理廠下水污泥減量處理及再利用現況

郭學文¹ 李國豪² 呂宛慈³ 許國恩⁴ 朱敬平⁵

¹內政部營建署下水道工程處課長

²內政部營建署下水道工程處幫工程司

³財團法人中興工程顧問社環境工程研究中心助理研究員

⁴財團法人中興工程顧問社環境工程研究中心環境檢測技術組組長

⁵財團法人中興工程顧問社環境工程研究中心副主任

摘 要

民國 109 年公共污水下水道「用戶接管普及率」及「整體污水處理率」已分別提升至 37.93 % 及 64.48%，而隨污水下水道普及率逐年增加，下水污泥產量將持續增加；為解決下水污泥去化與接軌循環經濟政策方向，內政部營建署於「污水下水道第五期建設計畫」積極推動污泥減量及再利用。在污泥減量部分，目前國內共計 20 座污水處理廠設置污泥乾燥設備，預期 110 年污泥減量效益可達 31 %，可降低污泥清運及掩埋場建設成本，減緩污泥去化壓力；另在污泥再利用部分，以朝燃料化、材料化及肥料化等多元資源化應用為推動目標，內政部營建署已於宜蘭縣及臺南市辦理下水污泥再利用示範驗證計畫，其中宜蘭縣宜蘭廠設計日處理量為 10 噸，產製炭化物，作為衍生燃料，而臺南市仁德廠設計日處理量為 30 噸，預計產至輕質粒料，提供景觀工程使用。另內政部營建署亦積極媒合再利用機構與污水處理廠共同提出個案再利用許可申請，如花蓮水資源回收中心將乾燥後下水污泥送至亞泥廠作為水泥窯原燃料，期能達到下水污泥資源化之永續目標。

關鍵字：污泥乾燥減量、污泥再利用

Current of Sewage Sludge Reduction and Reuse in Domestic Sewage Treatment Plants

KUO HSUEH-WEN¹ LI KUO-HAO¹ LU WAN-TZU² HSU KUO-EN² CHU CHING-PING²

¹Construction and Planning Agency, Ministry of the Interior

²Sinotech Engineering Consultants, Inc.

ABSTRACT

In 2020, the served rate of public sanitary sewer was 37.93 % and Percentage of Population Served by Waste Water Treatment Plants was 64.48 % in Taiwan. As the rate of increases year by year, it was expected that the sewage sludge would increase continually. To solve the problem of sludge removal and meet to circular economy, Construction and Planning Agency, Ministry of the Interior promoted the plan of sludge reduction and reuse. At present, there were twenty domestic sewage treatment plants equipped with sludge drying equipments. The sludge reduction rate could reach 31% in 2021, and reduce the pressure of sludge removal. Sludge reuse developed to diversified directions, included in fuel, material and fertilizer. In addition to the applications for sludge reuse by the sewage treatment plants and private factories such as Hualien and Asia

Cement Corporation using sludge as auxiliary fuel in manufacture of cement, the government conducted the sludge reuse demonstration projects in Yilan and Tainan. The reuse equipment in Yilan could deal with ten tons sludge per day to manufacture carbide as fuel. The reuse equipment in Tainan could deal with thirty tons sludge per day to manufacture lightweight aggregate for landscaping.

Keywords: sludge reduction, sludge reuse

一、前言

為提升國家競爭力，內政部加速推動全國污水下水道建設，截至民國 109 年底，公共污水下水道「用戶接管普及率」及「整體污水處理率」已分別提升至 37.93% 及 64.48%，而隨污水下水道普及率逐年增加，各縣市污水處理廠陸續完工運轉，預期進流污水有機成分濃度及污泥產率可漸趨於正常，民國 109 年我國公共污泥處理廠產率已增加至萬分之二，未來污泥量將持續隨之增加，污泥處理問題已受到各界重視。下水污泥具有含水率高、異味等特性，早期多採衛生掩埋處置方式，惟公民營掩埋場逐漸飽和且新址開發不易，造成處置成本持續上漲，且行政院環境保護署已於 103 年 1 月 29 日公告「公共下水道污水處理廠」納列為事業，並自 104 年 7 月 1 日起生效，公共污水處理廠產生之下水污泥係認定為事業廢棄物，需依廢棄物清理法辦理廢棄物清理計畫書申請與上網申報等作業，並委託公、民營機構清除處理或再利用事業廢棄物。內政部營建署為減緩污泥去化壓力，積極推動污泥減量及辦理污泥再利用示範驗證，期能以「減少廢棄物產量」和「資源有效利用」，解決日益嚴重之下水污泥處理問題。

二、污水處理廠污泥乾燥減量措施與成效

2-1 國內公共污水處理污泥乾燥設備設置現況

內政部營建署「污水下水道第五期建設計畫」(以下簡稱五期建設計畫)之污泥減量推動策略為補助污泥量穩定之污水處理廠設置污泥乾燥設備，優先考量地理區位及污水

量、污泥量已穩定之污水處理廠，於民國 104 至 109 年補助各縣市政府於所轄污水處理廠設置污泥乾燥設備，以將污泥含水率自 80% 降至 30% 為目標；設置污泥乾燥設備之廠區為新北市八里廠、新北市林口廠、桃園市龜山廠、新竹市客雅廠、臺中市福田廠、雲林縣斗六廠、花蓮縣花蓮廠、屏東縣六塊厝廠、金門縣榮湖廠及嘉義縣朴子廠等 10 處公共污水處理廠，乾燥設備規模介於 2 噸/日~60 噸/日，以斗六廠規模最小(2 噸/日)，八里廠規模最大(30 噸/日，設備兩座)，各污水處理廠乾燥設備已陸續完工，進入試運轉階段；另高雄市臨海廠建設時，已將污泥乾燥設備納入污泥處理程序，除前述五期建設計畫補助設置乾燥設備污水處理廠外，國內目前計有 9 座污水處理廠已設有污泥乾燥設施，包含臺北市迪化廠(臺北市自設)、宜蘭縣宜蘭廠(代操作廠商設置)、宜蘭縣羅東廠(BOT 廠商設置)、新北市淡水廠(BOT 廠商設置)、高雄市鳳山廠(BTO 廠商設置)高雄市楠梓廠(BOT 廠商設置)、苗栗縣竹南頭份廠(BOT 廠商設置)、新竹縣竹東廠(代操作廠商設置)及臺南市安平廠(前瞻計畫補助設置)，合計共 20 座污水處理廠已設置污泥乾燥設備，地理位置分佈如圖 1。

2-2 常見之污泥乾燥設備

目前已發展成熟之污泥乾燥技術包含熱風直接加熱式、熱風間接加熱式及除溼式乾燥，其分類以及技術特性比較如表 1 所示，五期建設補助之 10 座污水處理廠污泥乾燥設備型式主要有間接加熱及除溼式乾燥兩種，間接加熱式者熱源來自沼氣、天然氣或燃料油等，藉由加熱金屬壁與污泥接觸使水分揮發，採用此型式的污水處理廠有龜山廠、福

田廠、八里廠、六塊厝廠、榮湖廠等，其中八里廠、福田廠和六塊厝廠均規劃部分乾燥熱源由廠內污泥厭氧消化生成之沼氣提供。而採用除溼乾燥式者以電力作為乾燥能源，經由除溼機產生的乾燥空氣與污泥充分接觸，可將污泥中所含的水分趕出，採用此型式者有花蓮廠、林口廠、客雅廠、斗六廠、朴子廠等。

本研究分別以福田廠-間接加熱式(圖 2)及斗六廠-除溼乾燥式(圖 3)為代表，彙整操作相關資料如表 2。福田廠採間接加熱式，熱源操作溫度較高，乾燥污泥含水率為 9.5%，須留意出料後污泥含水率過低產生的粉塵問題；斗六廠採除溼乾燥式，操作溫度較福田廠低，乾燥污泥含水率為 28.2%，雖無粉塵問題，惟乾燥污泥出料裝袋後，污泥因餘溫會有發酵現象，導致異味產生，須等待乾燥污泥發酵完畢才可密封清運。

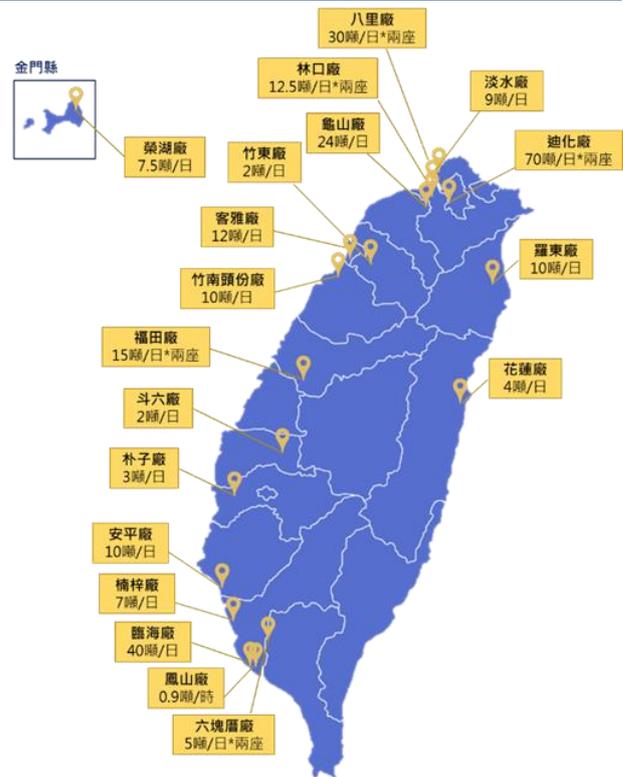


圖 1 公共污水處理廠污泥乾燥設施分布圖

表 1 污泥乾燥技術特性比較表

污泥乾燥形式		污泥適用性	有機質破壞情況	廢氣產生量	加熱源溫度(°C)	熱效率(%)	處理量	處理方式	設備佔地面積	設備價格
熱風直接加熱式	旋轉乾燥機	可	有	中	800	50~60	大	連續	中	中
	旋轉乾燥機(含攪拌機)	優	有	中	800	60~70	大	連續	小	中
	氣流乾燥機	可	有	高	500	60~70	中	連續	小	低
	流化床式乾燥機	可	有	中	400	60~70	大	連續	大	中
	噴霧乾燥機	可	有	高	400	60~70	中	連續	大	高
	輸送帶式乾燥機	優	有	中	400	50~60	中	連續	中	低
熱風間接加熱式	水蒸汽管式乾燥機	可	無	低	200	75~85	中	連續	大	高
	鑿式乾燥機	優	無	低	200	75~85	中	連續	小	中
除溼式乾燥	冷熱交循式乾燥機	可	無	無	無	-	低	批次	小	低
	工研院開發之除溼式系統	優	無	無	無	-	低	批次	小	低

資料來源：陳政澤、賴重光等

表 2 福田廠與斗六廠污泥乾燥設備操作參數

項目	福田廠	斗六廠
乾燥型式	間接加熱- 槳葉熱傳導式	除濕式乾燥- 熱泵冷凝式
設計處理量	15 噸/日*2 座	2 噸/日
進料含水率	78.2 %	86.9 %
出料含水率	9.5 %	28.2 %
熱源	天然氣(沼氣)	無
能耗	<770 kcal/kg	0.5 度電/kg 水
操作溫度	130°C	40~65°C



圖 2 福田廠污泥乾燥設備

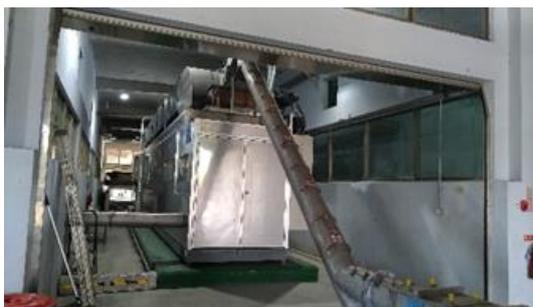


圖 3 斗六廠污泥乾燥設備

2-3 污水處理廠污泥乾燥效益分析

(一) 污泥減量效益

本研究彙整全國公共污水處理廠民國 106 年至 109 年脫水污泥及乾燥污泥產量，計算污泥乾燥減量效益(圖 4)，計算公式如下：

污泥減量效益=

$$\frac{\text{脫水污泥推估量(含水率均以 80\%計算)} - \text{實際污泥產量(脫水污泥及乾燥污泥)}}{\text{脫水污泥推估量(含水率均以 80\%計算)}}$$

民國 106 年產出乾燥污泥之污水處理廠僅臺北市迪化廠、新北市淡水廠、宜蘭縣宜蘭廠及宜蘭縣羅東廠等 4 座，平均每日產出約 6.6 噸乾燥污泥，污泥減量效益為 15 %；隨五期建設計畫補助之污水處理廠乾燥設備逐漸完工，民國 109 年平均每日產出約 13 噸乾燥污泥，污泥減量效益為 20 %；民國 110 年預估將新增桃園市龜山廠、新北市八里廠及金門縣榮湖廠產出乾燥污泥，平均每日產生 22.3 噸乾燥污泥，污泥減量效益將提升至 31 %。

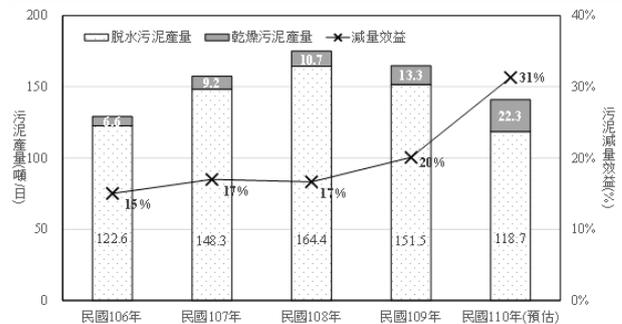


圖 4 全國公共污水處理廠污泥產量及污泥乾燥減量效益

考量部分污水處理廠污泥乾燥設備尚有餘裕量，未來可規劃收受鄰近地區污水處理廠脫水污泥，推動污泥減量最大化，在各廠污泥乾燥設備可全量運轉情況下，預估每日可處理約 406.4 噸脫水污泥，已超過民國 109 年全國污水處理廠推估脫水污泥產量約 206.3 噸(含水率 80 %計算)。

(二) 減少委外清運和掩埋場開發成本

下水污泥經減量與再利用後，可減少下水污泥委外清運成本，若每噸污泥成本以新臺幣 8,000 元估計，至民國 110 年每日污泥計減量 64.3 噸，估計每年減少的委外清運成本約新臺幣 1.88 億元。此外，另可延長掩埋場使用壽命，減少掩埋場開發，若每噸下水污泥減少的掩埋場開發成本以新臺幣 1,200 元計，合計下水污泥經乾燥減量後，每年減少的掩埋場開發成本約新臺幣 2,816 萬元。

2-4 乾燥污泥去化現況及挑戰

內政部營建署於五期建設計畫推動補助污水處理廠設置污泥乾燥設備時，希冀乾燥後下水污泥能進一步朝資源化應用，或作為都市垃圾焚化爐能之基載選項，惟因垃圾焚化爐餘裕量限制，或乾燥污泥經混燒試驗評估後無法進料等因素，目前各污水處理廠乾燥污泥送焚化廠之去化亦有所受限，各廠爰依下水污泥成分特性，同步積極規劃乾燥污泥作為燃料化、材料化與肥料化等資源化再利用，如花蓮廠乾燥污泥送至水泥廠作為輔助燃料與水泥原料(燃料化及材料化)；榮湖廠規劃與林務所合作進行污泥肥料化再利用；龜山廠預計與大園汽電共生合作推動污泥燃料化，評估後共同提出再利用試驗計畫。目前各污水處理廠已持續依據所在區位及乾燥污泥特性，評估適切之下水污泥多元化去化管道，期達資源有效再利用。

三、污泥再利用示範驗證及個案許可推動現況

3-1 再利用示範驗證推動背景

考量下水污泥富含有機物，屬具再生價值資源，為符合資源再利用之永續原則，針對污泥處置，除優先落實減量外，應同步研發污泥再利用之技術，一方面建立國內污泥再利用之本土技術，提供未來自行設置再利用設施之參考，另一方面也可帶動國內產官學界投入污泥再利用技術研發與推廣，創造污泥多元化再利用技術之發展空間，內政部營建署爰辦理「下水污泥處理再利用第一期計畫」，規劃於北區宜蘭縣以及南區臺南市執行污泥再利用示範驗證計畫，推動污泥去化再利用發展。

3-2 宜蘭縣再利用示範驗證計畫

宜蘭再利用示範驗證廠設置於宜蘭地區水資源回收中心，為每日處理量為 10 噸之下水污泥再利用設備，該廠已於民國 110 年 10 月竣工，刻正運轉中，設備照片如圖 5 與圖 6。



圖 5 宜蘭廠再利用設備-炭化爐



圖 6 宜蘭廠再利用設備-空污防治系統 RTO

(一) 污泥特性

宜蘭縣運轉中都市污水處理廠計有宜蘭和羅東 2 座，設計平均日污水量分別為 30,000 CMD(兩期)和 45,000 CMD(三期)，目前實際日污水量為 22,592 CMD 和 26,865 CMD，宜蘭縣每月脫水污泥產量約為 300.9 噸，2 座污水處理廠下水污泥含水率介於 75.0%~81.9%，灰分和可燃分比例分別介於 38.2%~52.0%(乾基)和 48.0%~61.8%(乾基)；下水污泥元素組成以碳為主，比例介於 21.6%~31.1%(乾基)，熱值約為 2,520~4,880 kcal/kg；下水污泥鎘、鉻、銅、鉛、鎳、鋅、砷和汞等八項重金屬含量檢測結果，以鋅濃度最高，介於 705~981 mg/kg，其次為銅，濃度介於 156~270 mg/kg。

(二) 再利用技術

宜蘭縣依據技術、經濟(操作成本、經濟效益等)、環境及法規等四項決策要素進行再利用技術可行性評估，並透過專家諮詢會議

研商，綜合考量模廠示範性、地域性及未來發展性等條件後，選擇炭化技術作為宜蘭下水污泥之再利用技術，所生成之產品規劃作為輔助燃料。前述炭化技術優勢說明如下

- (1) 下水污泥炭化處理為國外趨勢：鄰近日韓等國已持續新增下水污泥炭化處理實廠，主要係考量炭化物環境品質較佳(無臭味)，產品質輕，且應用較多元，運送方便等特性。
- (2) 炭化技術具示範性質：國內目前並無下水污泥炭化廠，因計畫具技術示範性質，可作為後續廠商之參考依據。
- (3) 炭化成品用途廣，通路選擇性高：下水污泥炭化後，產品可作為輔助燃劑、土壤改良劑、覆蓋土、除臭劑等用途。
- (4) 炭化產品性質單純，無臭味問題：炭化因已去除下水污泥所含揮發性有機物質，故無臭味問題，除進場貯存區需設臭味防治設備外，製程及產品貯存、運送及應用過程均無臭味等問題。
- (5) 炭化整體操作成本與乾燥差距不大：炭化建設成本高，但污染防治設備費用較低，能有效利用原水下水污泥中之有機質作為熱源，且產品單純無需後端分選，綜合評估炭化和間接乾燥之操作成本差異不大。
- (6) 炭化過程及產品應用溫室氣體排放量低：下水污泥所含之能源可視為生質碳，作為能量來源可不計算其碳排放量，採用炭化技術其外加能源少，排出高二氧化碳當量之 N_2O 幾乎為零。

(三) 再利用產品特性

本研究於宜蘭炭化廠不同運轉時段、相同生產條件下，採集炭化物產品進行特性檢測(如表 3 所示)，炭化物元素分析中以碳占最大比例，O/C 值為 0.6、0.53，碳含量約氧的兩倍，當 O/C 比例越低，具較佳熱釋放率。表 4 炭化物熱值(到達基)為 4,666、3,615 kcal/kg，介於火力發電常用之的褐煤(2,780~3,892 kcal/kg)與亞煙煤(4,800~5,700 kcal/kg)熱值間；另因下水污泥含大量有機質，揮發分比例高，另炭化物灰分比例高於台灣

電力公司主要煤炭燃料產生之灰分比例(2%~16%)，高灰分除會降低燃燒效率，並會產生粒狀空氣污染物，未來可與一般煤炭經適當比例混燒，以達到資源循環利用及空污排放之要求。炭化物灰熔點(如表 5 所示)介於台灣電力公司主要煤炭燃料灰熔點範圍(1,150~1,500°C)，一般而言灰熔點會受到灰分成分影響，其中三氧化二鋁、二氧化矽含量高，灰熔點越高。

表 3 宜蘭廠再利用炭化物產品元素分析

檢測項目	炭化物 1	炭化物 2	單位
C	36.1	32.7	%
H	4.8	4	%
O	21.7	17.3	%
N	5.4	4.8	%
S	1	0.8	%
Cl	0.13	0.12	%

表 4 宜蘭再利用炭化物產品近似分析

檢測項目	炭化物 1	炭化物 2	單位
總熱值(到達基)	4,666	3,615	kcal/kg
總水分	3.16	3.88	wt%
內含水分	3	3.05	wt%
灰分(乾基)	31.59	42.71	wt%
揮發份(乾基)	58.56	45.16	wt%
固定碳(乾基)	9.86	12.13	wt%

表 5 宜蘭再利用炭化物產品灰分分析

檢測項目	炭化物 1	炭化物 2	單位
灰融點-初變形溫度	1,219	1,313	°C
灰融點-軟化溫度	1,259	1,356	°C
灰融點-半球化溫度	1,358	1,447	°C
灰融點-熔流溫度	1,418	1,475	°C
氧化鈉	1.15	1.15	wt%
氧化鉀	2.06	2.1	wt%
氧化鎂	2.61	2.33	wt%
四氧化三錳	0.07	0.067	wt%
三氧化二鋁	13.38	13.96	wt%
二氧化矽	55.36	57.52	wt%
三氧化二鐵	7.22	7.12	wt%
氧化鈣	5.89	5.3	wt%

3-3 臺南市再利用示範驗證計畫

臺南仁德再利用示範驗證廠設置於仁德水資源回收中心，為每日處理量為 30 噸之下水污泥再利用處理設備。目前尚處於工程階段，預計將於民國 110 年 7 月竣工，設備照片如圖 7 與圖 8。



圖 7 臺南仁德廠再利用設備-旋轉窯



圖 8 臺南仁德廠再利用設備-破碎供料機

(一) 污泥量特性

臺南市轄下運轉中都市污水處理廠計有安平、虎尾寮、柳營、官田、仁德及安南等 6 座，設計平均日污水量分別為 160,000、12,000、6,000、2,500、15,500 及 13,500 CMD，目前實際平均日處理水量為 124,611、2,917、4,240、828、3,346 及 5,900 CMD，109 年度月平均脫水污泥產生量分別為 209.9 噸、2.5 噸、8.88 噸、0.16 噸、0.00 噸及 34.24 噸。其中污泥產生量最多的安平廠污泥灰分和可燃分比例分別介於 30.0%~69.9% (乾基) 和 30.1%~70.0% (乾基)；下水污泥元素組成以碳為主，比例介於 15.2%~31.5% (乾基)，熱值約為 1,250~3,450 kcal/kg。

(二) 再利用技術

臺南市依據工程技術、經濟面和環境及介面特色等綜合評析，遴選乾燥及燒結造粒作為下水污泥示範驗證廠燃料化技術，仁德廠以具污泥乾燥設備之安平廠為主要處理對象，收受乾燥污泥進入燒結造粒設備，其原理類似於坯體燒結成陶製品，先將粉狀原料作初步造粒成型，再經燒結以略低於該物質熔點的溫度加熱，使其堅硬製成粒料，國內外已有類似案例可供參考。臺南仁德廠下水污泥燒結後之輕質粒料規劃作為景觀用途。

3-4 花蓮廠與亞洲水泥之個案再利用

目前正式提出再利用申請者為花蓮廠與亞洲水泥，並已於民國 109 年 12 月取得再利用許可。

(一) 污泥量特性

花蓮縣僅 1 座運轉中都市污水處理廠花蓮地區水資源回收中心，設計平均日污水量 50,000 CMD，實際日污水量為 38,363 CMD，109 年度月平均乾燥污泥產量 19.91 噸/月，亞洲水泥因考量 109 年接管率為 35%，隨接管率提升，未來污泥會持續增加，因此申請再利用案時以 200 噸/月為申請量。花蓮廠污泥灰分比例約為 29.4%、揮發份為 58.21%、固定碳為 6.88%，熱值(乾基)為 3,798 kcal/kg。

(二) 再利用技術

花蓮亞洲水泥將下水污泥作為水泥燒成中的輔助燃料，取代部分煤炭的使用，污泥

投入旋窯系統(圖 9)後即於 $850\pm 100^{\circ}\text{C}$ 高溫環境充分燃燒，提供系統熱值，燃燒剩餘之灰分隨水泥原料進入旋窯內與生料(石灰石、矽鋁質原料、鐵砂)混合鍛燒成熟料。



圖 9 亞洲水泥花蓮廠預熱機/旋窯系統

1. -9413-42e7-8f57-b5e5d9aa8c61, 108 年。
2. 內政部營建署，下水污泥處理減量及再利用審查管理計畫委託專業服務案，108 年。
3. 內政部營建署，下水污泥處理減量及再利用審查管理計畫(第 3 年度)委託專業服務案，109 年。
4. 陳政澤、賴重光、李進成、陳毓生、黃財坤、陳政宗，石化業污泥乾燥減量處理應用實例探討。

四、結論

下水污泥經乾燥設備處理後可有效減少污泥體積，進而降低污泥清運及掩埋場建置成本，然為確實且妥善解決污泥去化問題，仍需開拓國內污泥多元再利用市場，污泥再利用發展除藉由內政部營建署推動污泥再利用示範驗證計畫，以及污水處理廠及再利用機構攜手合作，營造技術發展契機，促動再利用技術的提升，藉由成熟穩定的技術，確保再利用產品品質，提高市場對於下水污泥再利用產品的接受度。未來視下水污泥再利用產品普及性，落實下水污泥特定用途公告再利用，並可結合生質能源、固體再生燃料、再生綠建材等相關資源化產品認證，期以轉變下水污泥既定印象，達成下水污泥資源之永續利用。

參考文獻

1. 台灣電力公司，
<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=1437&cid=2649&cchk=4411e967>

公共污水處理廠擴建工程分包類型對成本超支之影響

秦嘉君¹ 王維志²

¹ 國立陽明交通大學工學院工程技術與管理學程碩士生

² 國立陽明交通大學土木系教授

摘要

臺灣積極發展成為高科技產業重鎮，同時產生之環境污染物日益增加，為了取得經濟發展與環境保護工作之間的平衡，推動公共污水處理廠(簡稱污水廠)之擴建工程是相當重要的環節，因此，污水廠是現代不可或缺的基礎建設。目前國內污水廠均達設計年限，伴隨環保法規逐年修正限值及標準，污水處理效率已無法符合其標準，相對地污水廠內處理設備也必須將其功能提昇，才更能符合國家永續發展方向。然而擴建工程投標廠商於爭取標案過程中，為了在價格上有競爭優勢，採取政策性低價搶標，致使契約金額低於施工廠商報價，故唯有改變分包類型，降低施工金額，進而影響後續工程執行之困難度。為此，本研究透過已完成之三件擴建工程案例，彙整影響成本超支的原因，根據其結果進行討論，進而建立影響工程成本超支之要因特性圖。本研究結果包括分包類型比較、擴建工程分包類型考量因素、分包類型影響成本超支原因。最後，本研究針對分包類型考量成本超支原因之影響，提出如何防範成本超支之改善對策。

關鍵字：擴建工程、分包類型、成本超支原因

Subcontracting Type Effect Cost Overruns on the Expansion Project of Public Sewage Treatment Plant

Chia-Chun Chin¹ Wei-Chih Wang²

¹ MS Student, Degree Program of Engineering Technology and Management, College of Engineering, National Yang Ming Chiao Tung University, Taiwan

² Professor, Department of Civil Engineering, National Yang Ming Chiao Tung University, Taiwan

ABSTRACT

Taiwan has been actively developing into a high-tech industry, while producing increasing environmental pollutants, in order to achieve a balance between economic development and environmental protection work, to promote the expansion of the sewage treatment plants (referred to as sewage plants) is an important link, therefore, sewage plants is an indispensable infrastructure for modern times. At present, the sewage plant has reached the design age, environmental protection regulations year by year to amend the limits and standards, sewage treatment efficiency has been unable to meet its standards, relatively sewage treatment equipment must also improve its function, in order to be more in line with the direction of sustainable development of the country. However, in the process of bidding for the expansion project, in order to have a competitive advantage in the price, take a policy low-cost bid, resulting in the contract amount is lower than the quotation, so only change the subcontracting type, reduce construction

costs, and thus affect the difficulty of the implementation of the follow-up project. Therefore, this study intends to summarize the causes of cost overruns through completed three expansion project cases, and establish a cause & effect analysis that affect project cost overruns. The results of this research include comparison of subcontracting types, consideration factors for expansion project subcontracting types, and factors affecting cost overruns by subcontracting types. At last, this research proposes how to prevent cost overruns in consideration of the impact of cost overruns in subcontracting type.

Keywords: expansion project, subcontracting types, cost overrun factor

一、前言

當臺灣積極發展高科技產業時，為避免產生的事業廢水污染河川(承受水體)，極需透過污水廠削減污染源符合放流水標準後放流，故公共污水處理廠(簡稱污水廠)是現代不可或缺的基礎建設。然而，污水廠工程標案與營建工程對比相較少，工程標案公開且透明化，使得競標更為激烈，致使投標廠商為了取得標案競爭優勢，採取政策性低價搶標，盼於工程執行階段期望以投標金額執行工程，一般唯有改變分包類型以降低施工廠商施工金額，致於增加後續工程執行的困難度。

隨著經濟發展及人口成長速率，環保法規因地制宜，推動經濟時，也降低污染源之去除率，得以提供優質水環境。污水廠主要係處理生活污水及事業廢水的公共設施場所，由於臺灣人口已達飽荷，生活污水量及水質已達穩定，而事業廢水水量及水質則會因為外在因素而變動，以致造成設計目標與施工結果之間的落差。

多年來，分包策略訂定準則是熱門議題，大多針對營造業新建工程分包規劃及分包商評選並以層級分析法的模式進行相關探討，對於既有結構物擴建工程的探討則鮮少著墨。全台公共污水廠興建案例經驗遠遠不及一般營建工程多，然而，工程分包類型在工程備標前後階段，因不同的擴建工程類型，經常仰賴以往投標經驗及曾經合作之施工廠商報價做為制定分包類型準則，導致最後工程成本超支，致使影響工程無法如實如質完成。若能將營建工程制定分包類型模式運用在污

水廠擴建工程上，將使投標時具有競爭優勢，更於決標後能如實如質完成工程。若分包類型決策能制定準則，對於施工管理及公司營運應有程度之幫助。

綜上所述，為因應總承攬商對於分包類型而建立影響工程成本超支之特性要因圖，盼藉以提升總承攬商分包類型客觀性及降低做出重複性失誤發生的機率。整體而言，本研究擬透過建立要因特性圖及其改善對策，以利未來總承攬商於施工階段能如實如質完成工程。本研究後續章節安排為(1)文獻回顧；(2)污水廠擴建工程分包類型；(3)分包類型決策影響成本超支原因；(4)結論與建議。

二、文獻回顧

本研究主要在探討有關公共污水處理廠擴建工程分包類型對成本超支之影響，彙整國內相關文獻後，發現多數以建築工程及高科技廠辦工程為主要探討對象，以污水廠工程為主之探討分析則很少見，而污水廠工程是維護環境工作重要環節，更是國家發展重要的一環，故本章節透過瞭解污水廠工程之發展歷程及環保法規之演進，彙整文獻資料，藉以提供日後分包類型之參考依據。

2-1 污水廠發展與環保法規演進

關於污水廠發展歷程及環保法規加嚴修訂係與國家經濟及產業蓬勃發展息息相關，政府為帶動地方繁榮、擴大內需，積極在各地區招商設立工廠，促進經濟發展；當訂單應接不暇時，地方人口增加，代表污水水量隨之增加，若要依賴河川的自淨能力消除污染物是需要長時間的，所以污水廠之興建與

營運是降低河川(承受水體)污染相當重要的環節，藉以提供優質水環境。

2-2 污水廠進流水類型

污水廠之進水水源來自於建築物污水處理設施(詳圖 1-情況 1)及事業排放廢水(詳圖 1-情況 2)，利用下水道系統管線接管至污水廠內處理，其處理後之水源需符合環保放流水標準，才得放流至各區域之河川(承受水體)，如圖 1 表示如下：

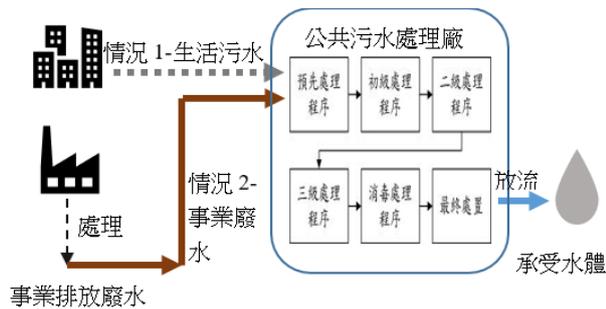


圖 1 污水廠進流水類型(資料來源：本研究整理)

駱尚廉與楊萬華(1999)針對影響生活污水量及事業廢水量有以下二點說明：(1)生活污水水量多寡係根據當地區域人口發展速度而改變，得以人口預測方法推估該區域之生活污水量。(2)影響事業廢水水量的因素包括產業園區內的工廠性質、工廠類型、產量效率、訂單多寡或各廠商在廠內預先處理效果決定。

綜上所述，生活污水量及水質相對穩定，在前期設計規劃階段設定的工程目標與後段施工階段的成果較能相互吻合。事業廢水水量及水質則會因為外在因素而變動，以致影響設計目標與施工結果的落差。

三、污水廠擴建工程分包類型

3-1 分包類型

有關發包行為是指政府機關(簡稱機關)或私人機構將工作交由其他廠商代為執行的行為。本研究討論的是公共工程，在此將發包與分包策略做定義分別，二者之行為會在同一工程契約履行過程中發生，其中機關(業主端)為完成工程目標，以尋求最適合廠商的

過程，稱之為發包策略；分包策略係為工程得標廠商(總承攬商)為使得工程如實如質完成，做適當分工選擇之過程，將部份工程項目交付協力商執行。

機關制訂發包策略後，施行政府採購發包程序，招標、開標、決標及訂約程序，而對於機關釋出的公共工程標案有意願的廠商，透過未來標案現場勘察、工程資料收集、針對招標文件內容分析檢核，包含合約工期、付款條件、完工條件及工程項目範圍，同時會將工程圖說及標單提供給曾有合作經驗的施工廠商報價，以上這是屬於廠商在投標前的分包策略，也是實務上常說的備標作業。

執行污水廠工程時主要係根據以工程目的及需求而採取不同的模式(自辦或分包)，自辦主要是適用於簡易的工程項目；而分包是適用於具有專業、複雜性工程，其主要原因在於承攬這類工程的總承攬商大部份係以管理技術為導向，大多以二家以上之綜合營造業類型的公司共同承攬，又或以綜合營造業的公司將土木工程與機電工程分開發包的方式執行工程。由於污水廠擴建工程標案少，考量經濟效益下，總承攬商不聘僱長期工班及購買專業機具(例如潛盾機、搖管機等)，因此在公司內部資源缺乏的情形下，大部份工作還是以分包為主要方式，向外尋求資源以完成整個專案。

總承攬商考量污水廠工程分包類型時，會將土木工程及機管電工程做第一層分包，原因是土木工程與機電工程的專業技術大相逕庭，工程師在培養技術的過程導致執行專案的思維邏輯也是不相同的，因此二大工程種類無法混合探討。

污水廠擴整工程採取分包模式執行專案，遴選適合之施工廠商進場施工，在實務上施工廠商分包類型可分為(1)勞務分包；(2)材料或設備分包；(3)連工帶料分包；(4)系統分包等四種類型，其主要分成下列幾種類型，如圖 2 所示。

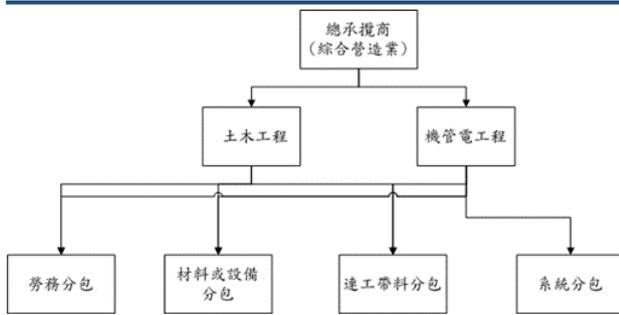


圖 2 污水廠工程分包類型(資料來源:本研究整理)

3-2 分包類型之比較

採用勞務分包及材料或設備分包這二種類型時，施工廠商較多，對於總承攬商現場工程師人力需求高，工作負擔重，本職學能也必須到位，才足以管理施工廠商及協調工

程介面問題，相對的對於現場專案工程師是高強度的現場經驗訓練，致使工程師競爭力或公司人員培訓績效是正面的幫助，在工程執行成本上可獲得較高投標競爭力。

另連工帶料分包或系統分包這二種類型，在施工品質及進度方面較能夠掌握，現場工程師人力需求低，施工廠商自行整合協調工程介面，因為上述情況，施工廠商之管理費較高，以致於總承攬商需支付較高的工程執行成本。

綜上所述，總承攬商核心能力與分包類型決策有顯著關係，而分包類型各有優缺點，善用其特性，進而如實如質完成工程目標，以達效益發揮最大化，表 1 彙整其優缺點及適用工程類型。

表 1 各分包類型之優缺點及其適用工程類型

分包類型	優點	缺點	適用工程類型
1.勞務分包	1.降低工程成本。 2.可分散風險。	1.分包多、分包作業繁雜，施工廠商管理不易。 2.不適用於大型工程，界面複雜，協調整合困難。	1.工程內容單純、沒有太多工程介面。 2.工程總承攬商有生產(代理)設備者。 3.低價承攬的工程
2.材料或設備分包			
3.連工帶料分包	1.工期與品質管理較佳，並且有利於成本控制。 2.協助契約履行成效高。 3.工程界面整合功效大，較容易管理。	1.施工廠商承攬金額高，當遇到資金週轉困難時，會嚴重影響專案工程執行。 2.施工廠商地緣關係影響大。	1.總承攬商團隊人力精簡時。 2.單一性質工程。 3.設備修繕工程
4.系統分包	4.減少總承攬商行政文書作業。 5.加強業主及廠商專業能力。 6.增加專業人才。		1.工程專案特性具有獨特性或技術性。 2.需要技師簽證之工程。

(資料來源：本研究整理)

四、分包類型影響成本超支之原因

總承攬商係以管理技術為導向的角色，向外尋求適合施廠商以完成整個專案。投標、分包採購階段均是由總承攬商先行支付費用，再依工程進度計價向機關請求支付工程款項，而工期掌握度及施工品質控管的良窳與成本控制有顯著性的關聯，故成本控制能力影響總承攬商損益，甚至影響公司營運。

4-1 因工程特性衍生之情況

污水廠工程無法像建築物完成後就可以

入住使用，軟硬體設施建置完成後，需經過系統調適(生物馴養及調整最適加藥量)達到及符合水質標準後，才會接受污水進廠處理。為此，本研究根據污水廠之工程特性衍生影響工程成本及工期的情況，彙整歸類為四個部分，分別是(1)完工條件受法規限制、(2)時間限制、(3)高程差限制、(4)各分項工程整合限制。

(一)完工條件受法規限制

污水廠選擇污水處理的方法係考量放流水標準、污水廠之規模、位置以及操作管理

等問題，評估後選擇最適當污水處理方式。因此，污水廠擴建工程完工條件除了按圖施工且如期完成工程標單外，還需要符合放流水質標準，以符合河川(承受水體)涵容能力。擴建工程中處理程序之池體及設備規格受到工程合約規範，直到試車階段後才發現污水水質不像設計單位原始設計值，其污染物數值太高(例如：鈣、鎂)，致使設備與管線材質無法負荷，造成管線滲漏、設備損壞等情況，因此，在完成保固責任前，上述之設備維修及管線補焊或更換等改善工作產生高額的保固維修費用，均由總承攬商負擔。

(二)時間限制

擴建工程在執行過程中會因為設計階段與施工階段時間落差以及施工階段施工時間限制，最終影響工程成本及工程，影響範圍分為二階段，其說明如下，

1.設計階段與施工階段之時間差

污水廠擴建工程於前期設計規劃階段到真正發包及施工階段，時間歷時許久，導致污水水質很難掌握，以致設計規劃設定之處理標準程序無法符合放流水標準，必須至試車階段，現場取進水水樣進行瓶杯試驗重新確認加藥量，利用系統程式配合機械性能調適，達到預期處理效果(設計單位預設結果)。

2.施工階段之施工時間落差

污水廠擴建工程執行專案期限和新建工程相同，不同之處為新建工程沒有進水處理的時間壓力，擴建工程之污水廠都已運轉達一定水量穩定的情況，無法因為廠內任何工程而暫停進水處理，因此擴建工程在執行上有因現實環境的時間限制。

台灣人口成長斜率愈來愈小，各區域的人口數趨於穩定，生活污水量變化相對已達到穩定成長的情況，污水水量幾乎不影響擴建工程之執行。當因池體程序拆除重建、設備更新或管線更新等遇到需要與既有系統銜接情況，可以利用進流水暫停進水、廠內仍有餘裕空間暫存於其他池體或污水管改道等方式進行，故對於擴建工程工期較無壓縮的可能。

因事業廢水水量多寡則是由工業及科學園區內的工廠產量效率、訂單多寡或事業單位預先處理效果決定。事業單位產生廢水的時段依事業單位工作時間而定，工業區產水尖峰時間是早上七點至下午五點；而科學園區則是連續運作排放不停歇地產生廢水，故事業廢水的產生水量不穩定。當需要施行系統銜接交換時，必須利用離峰時間執行，例如夜間施工、假日施作，或是壓縮施工時間。執行工程期間除了必須與既有系統銜接的情況採取不停水的操作模式，配套措施是暫存於其他池體、污水管改道或超載運行等方式進行。

當污水進流穩定性高，執行工程時間限制較低，相反地，執行工程時間限制較多時，對於施工人員調度機動性要求相對提高且假設性工作之重覆性也隨之增加，上述之情況，除了會影響工期，也會增加許多隱性的施工成本。

(三)高程差限制

下水道管線係以自然流下之重力流至最終處理廠為原則，處理流程站體設置位置係考量廠址地勢環境而設計。污水管線均設置在最下方，上面佈滿台電饋線、電信光纖、自來水管及瓦斯管等，因此在面臨施工受阻時，需要改變工法而開挖地面，為了避免影響維生管線運作及造成人員損傷，此時只能靠著封存已久的圖檔及施工謹慎的廠商，才得以執行相關工作，故施工廠商之技術能力及整合能力是相當重要之考量因素。

(四)各分項工程整合限制

污水廠擴建工程包括土木、機械、化工、環工、電氣、儀控及建築等專業領域之知識與技術，藉由池體創造生物菌種培養環境及系統程式控制污水停留時間，達到處理系統效能。

為了有效利用廠區空間，設計規劃大多選擇拆除及新建池體，因此擴建工程在前期需預先設置假設工程，各個池體間有程序管線或電氣儀控管線連接，所以拆除池體前，相關連接程序管線應加以盲封中斷，電氣及儀控系統部份也需要斷電，避免影響其他站

體。擴建工程需利用電氣儀控系統將機械設備整合聯接成完整之處理系統並與舊有的電氣儀控系統整併，進而完成功能試車，另功能試車分為單體試車及系統試車二階段，包含於設備安裝後進行單體性能測試，確保各個設備運作正常，完成後進行整體的整合性系統測試，設備連動系統正確及保護機制運作正常，藉以驗證系統符合工程契約目標，也是在機關進行工程驗收前，總承攬商提前自我驗收的環節。

4-2 擴建工程分包類型考量因素

目前總承攬商制定分包類型準則，仍仰賴以往投標經驗及曾經合作之施工廠商報價，缺乏考量外在環境因素、公司團隊核心能力優劣及施工廠商條件之客觀評價，僅注重於工程標案得標率，致使最後工程成本超支，進而影響工程無法如實如質完成，甚至公司周轉不靈倒閉，故污水廠擴建工程分包類型之考量因素可以分為三個方向探討，(1)外在環境、(2)總承攬商團隊核心能力、(3)施工廠商的條件。

(一) 外在環境因素

外在環境因素包含完工條件、市場特性及設計規劃階段不周全。

1. 完工條件會影響工期掌握度，因為無論是污水處理廠新建工程或擴建工程，結構體(管理大樓或池體)在建造階段均需要向主管機關申執相關執照(建造執照、使用執照等)，然而，機關審核文件程序冗長繁複且不可預期，在取得文件前，工程是無法繼續執行或辦理完工報核，致使常常衍生工期壓縮之情況。
2. 市場特性對成本的影響，由於公共工程案件成型係來自於機關政策計劃，而機關政策目標又分為短期、中期及長期計劃，以致於新建及擴建污水廠工程標案計畫成型不易達成；台灣各地區幾乎已完成至少一座污水廠建設，污水廠新建工程逐漸減少，目前污水廠工程多以擴建工程為主，藉由提昇污水處理效能，以因應機關政策執行。

現今公共工程標案公開且透明化，污水廠工程標案甚少，使得競標更為激烈，致使投標廠商為了取得標案競爭優勢，採取政策性低價搶標，增加工程執行之困難度。

3. 設計規劃階段不周全的影響分為二大階段，分別是設計規劃階段、施工階段。

(1) 在設計規劃階段，於污水廠營運期間，設計單位欲執行規劃擴建工程之設計工作時，會依機關預期工程目標分成二個部份進行其相關工作，第一是現況勘察及重新檢視評估廠內原設計允許收受水量、設備處理效能效率及能源耗損等相關能力，而相關資料及圖說因經過多次更換營運廠商後，圖說資料不易保全，造成無法確實釐清地下水物調查工作之情形。第二是採納營運單位操作需求，將其改善及精進項目規劃至工程目標內。

(2) 在工程執行過程中，常見之因設計規劃不周而發生影響工期、成本之情況，第一是地下管線調查不確實(管線路徑無法確定)，造成開挖預埋管線時，必須現況調整，無法如預設情況執行；第二是設計圖說矛盾及設計結果與營運單位需求上的落差，導致監造單位和營運單位共同驗收階段，營運單位會提出要求將其調整改善，造成施工單位及營運單位之爭端，進而影響工期延誤及成本增加。

(二) 總承攬商團隊核心能力

總承攬商團隊核心能力(包含團隊組織完整性及專業技術能力)與分包類型的關係是密不可分，總承攬商及施工廠商共同執行污水廠擴建工程，為此總承攬商擔負監督、管理施工廠商、整合工程界面及最後功能試車調適，並由總承攬商訂定遴選施工廠商準則，尋求適合施工廠商在專案工程現場執行施工，故總承攬商為最主要角色，影響工程執行成效，圖3彙整完成工程之考量因素。

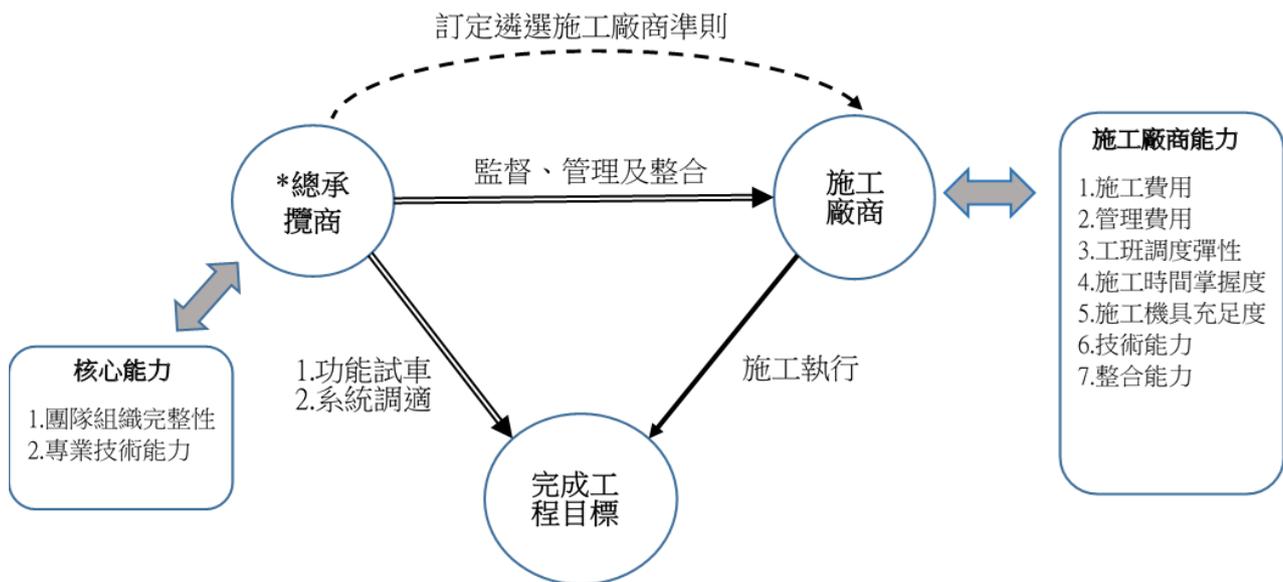


圖 3 完成工程目標之考量因素(資料來源：本研究整理)

當總承攬商因成本考量選擇勞務分包，致使工程分包太細，進場施工之廠商數量多，且工程介面重疊部份更需要現場釐清，因此總承攬商就必須增設人力管理；或分包類型缺乏整合能力，總承攬商就必須是整合能力強大的團隊，才足以管理及適時提出協助，以維持成本控制、工期掌握及施工品質控管之成效。

(三) 施工廠商的條件

施工廠商是真正進場施作的人員，當施工廠商的素質條件無法勝任擴建工程制定的工程成果，即便總承攬商核心能力再優秀，也只能要求中止合約，再另尋廠商，雖然這樣的結果是最不樂見的，除了工程爭議外，也會產生專案現場工期延宕及成本增加之影響，故施工廠商遴選的準則是相當重要的環節。施工廠商的條件包含施工費用、管理費用、工班調度彈性、施工時間掌握度、施工機具充足度、技術能力及整合能力等，為此，將其與成本控制、工期掌握度及品質管控之考量因素，彙整說明如下表 2。

4-3 影響成本超支原因

本研究透過已完成三件擴建工程個案彙整分析造成工程成本超支的原因，可將其因素歸類分為下列四點，

(一) 分包類型改變

分包類型乃由總承攬商的業務營運目標、遴選施工廠商的能力及施工廠商(分包商)本身的條件等因素考量制定，當無法正確衡量工程標案的準則時，任何大大小小的變數都能成為無法完成工程之原因。其中包含為了業務營運目的接案時，為了眼前的利益，樂觀地評估標案風險，卻忽略公司應該朝著永續經營的方向考量，最後衍生許多工程爭議，進而致使造成工程成本增加，工程品質和工期也受到影響。

(二) 總承攬商團隊能力及人力管理疏失

目前因隨著科技業蓬勃發展，營造業的薪資水平永遠無法和科技業比較，因此營造業人力資源短缺情況層出不窮，造成現場執行的工程師專案現場經驗不足，無法累積足夠的工程技術，也欠缺在工程介面整合上的能力。

(三) 工程界面協調困難度

工程介面協調困難度係因為在執行過程中，必須與操作單位之運作及需求互相協調配合，在新舊系統銜接時，操作單位需要配合停水，亦或是當操作單位有廠內參訪或評鑑時，也會要求停工，避免有人員安全的疑慮。

(四) 設計規劃不完整

設計規劃階段不完整不是本研究範圍，

因此僅臚列過往的工程經驗，其內容主要是設計完成後到工程執行完成是有時間落差，因為進流水水質會因事業之產品產線不同而隨之變化，若現況調查不明確，使得設計之

加藥程序或處理效能無法如產線更替般快速，最後只能執行工程變更設計程序，得以完成該專案工程目標。

表 2 分包類型與成本、工期及品質之考量因素彙整(資料來源：本研究整理)

分包類型		勞務分包	材料、設備分包	連工帶料分包	系統分包	
考量因素						
成本	1. 施工費用	低，點工型態	無施工費用，此部份費用是材料及設備價格。	與系統分包之施工費用差異不大，但會高於勞務分包類型的施工費用	與連工帶料分包之施工費用差異不大，但會高於勞務分包類型的施工費用	
	2. 管理費用	施工廠商	幾近為無管理費用	材料商無管理費用；設備商報價含管理費	中等，大多為小型公司或家族式公司	管理費用與前三項比較是最高的
		總承攬商	管理是由總承攬商為主導。	管理是由總承攬商為主導。	管理費用較少	管理費用較少
工期	1. 工班調度彈性	低，價高者得，哪個工地薪水高就會優先選擇	高，在執行前已提前下訂購單，並提供出貨時間	低，價高者得，哪個工地薪水高就會優先選擇	中，施工商規模小或家族企業型施工商工程規劃失誤，造成工作時程重疊。	
	2. 施工時間掌握度	低，施工人員技術不佳	高，材料及設備進場時間由總承攬商掌握	低，施工人員技術不佳	中，施工商規模小或家族企業型施工商工程規劃失誤，造成工作時程重疊。	
品質	1. 施工機具	少，僅提供常見手工具	少，僅提供下貨機具，除非另外要求提供吊車、堆高機等	少，僅提供常見手工具	充足，因為二者都是由專業工班組合而成。	
	2. 技術能力	低，基本單一施工技術	無差異，材料與設備仍需符合工程規範要求內容	中等，技術能力與系統分包差異不大。	系統分包類型廠商對於新穎材料、設備資訊敏感度較高，技術能力與連工帶料分包類型差異不大。	
	3. 整合能力	無，點工型態	無，僅負責提供設備及材料	有，總承攬商工程師負責與工頭交辦事務，並到場確認；工頭負責分工工作區域	有，總承攬商工程師負責追蹤系統商工期與專案目標	

有鑑於個案及因工程特性衍生之常見清況，為降低相關發生的可能性及決策過程中避免僅仰賴經驗法則。本研究建立影響工程成本超支之特性要因圖，藉以提供未來分包類型之參考，其內容可分為五大主要因素，分別是人為管控不當(人)、設備材料管控不當(材料)、機具使用及規劃不當(機具)、工程界面處理不當(方法)及環境因素限制(環境)。

(一)人為管控不當因素中，可分為三項次要因素，分別是總承攬商本身的問題、施工廠商本身的問題以及投標前分包類型運用不當。以總承攬商本身的問題為例，其常見的問題分為九種情況，分別是，

1. 財務不健全，致使低價搶標。
2. 工程師能力素質差，包括專業度不足、進度掌控不佳、施工順序不當、工作態度鬆

散、個人主義。

3. 缺乏溝通能力，包括與機關表達工程執行狀況及述明工程矛盾要求釋疑、與施工廠商釐清工程範圍及責任之權利義務。
4. 公司內部與現場專案在合約條款解讀上有認知落差，致使行政程序產生延誤或瑕疵之情況。
5. 向心力不足。
6. 現場環境調查不確實。
7. 工程標單數量未釐清(指標單數量為一式)，致使工程查驗無法完成，影響工進。
8. 巡檢機制不確實。
9. 物料管理。

(二)設備材料管控不當因素中，可分為三項次要因素，其中包括總承攬商本身的問題、施工廠商本身的問題、其他。以總承攬商本身的問題為例，有六種常見的問題，分別是

1. 交期太慢。
2. 物料波動劇烈。
3. 清圖不確實。
4. 採購選型錯誤。
5. 進場查驗之設備規格不符合規範，以致退回並重新採購訂定。
6. 物料管控不當，發生短缺或過多之情形。

(三)機具使用及規劃不當因素中，可分為二項次要因素，其中包括總承攬商本身的問題及施工廠商本身的問題。以總承攬商本身的問題為例，有三種常見的問題，分別是

1. 施工範圍防護設施不足，造成人員傷亡。
2. 各項施工計畫未落實於執行過程中。
3. 施工順序規劃不佳，同一個空間過多工種之施工人員聚集施作，影響施工動線及增加安全疑慮。

(四)工程界面處理不當可分為二項次要因素，其中包括總承攬商本身的問題與施工廠商本身的問題。以總承攬商本身的問題為例，有四種常見的問題，分別是

1. 採購時程延誤。
2. 分包太細，致使施工廠商太多，重疊介面難以釐清。
3. 新舊系統整合不確實。

4. 合約範圍未釐清。

(五)環境因素限制可分為二項次要因素，其中包括設計規劃階段不周全與其他。以設計規劃階段不周全為例，有六種常見的問題，分別是

1. 圖說不全。
2. 圖說矛盾。
3. 地下物調查不確實。
4. 設備停產，由於設計階段與施工階段有時間差，致使設備停產未即時更正設備規範內容。
5. 滿足機關預算編列，浮列或漏項材料管線數量。
6. 設計規劃與營運單位需求上的落差，後續調整處由總承攬商概括承受。

因環境因素限制無法完全避免，於是總承攬商在投標前必需將其風險容忍度納入考量，唯有於執行專案時，總承攬商及分包商利用其豐富工程經驗及技術將其損害降至最低。

綜上所述，成本超支原因包括主要因素(5項)、次要因素(12項)及次要因之小骨(63項)，將其計算平均權重後，故影響最大的是人為管控不當(佔 39%)，然而，以總承攬商本身的問題最為關鍵，其權重 21%，其次才是施工廠商的問題，其權重為 13%，其影響工程成本超支因素權重詳圖 4，故真正在專案現場施工的是施工廠商，施工廠商的遴選準則會影響工程執行的結果，而其準則是由總承攬商訂定，表示總承攬商團隊核心能力對整個工程執行有顯著性的關係。

4-4 成本超支之改善對策

工程特性衍生之情況(施工階段時間限制、高程差限制、各分項工程整合限制)、人為管控不當、設備材料管控不當、機具使用及規劃不當、工程界面處理不當、均為人為因素影響，這是可以防範及規避的風險，避免因未注意而造成因素產生之損失，故可針對總承攬商團隊工程師安排更深入的工程管理訓練並向經驗豐富之先進學習，盼藉以提高總承攬商團隊工程師工程認知、判斷力及專業技術強化，同時總承攬商應建立遴選施

工廠商準則，挑選適當之施工廠商，以達到防範之效益。而工程特性衍生之情況、環境因素限制包含設計規劃階段失誤及其他外在環境因素，此項因素是無法避免僅能降低其發生的機率及損失。

綜上所述，為因應防範規避成本超支發生的機率，故本研究彙整影響成本超支原因之改善對策(詳表 3)，對於施工執行應有相當程度之幫助。

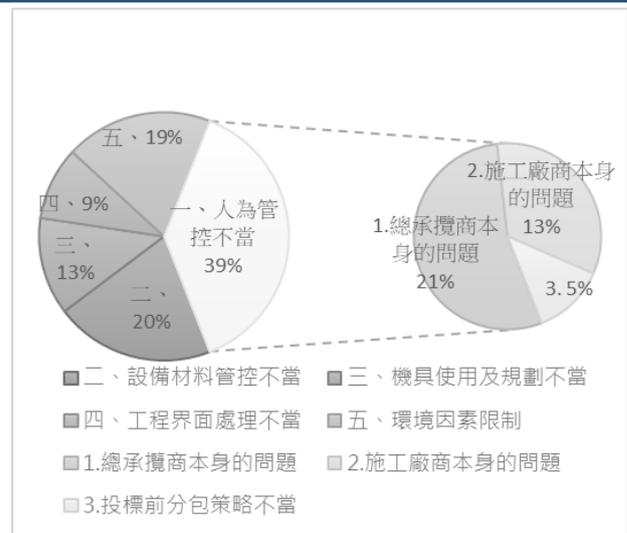


圖 4 影響工程成本超支因素權重(資料來源：本研究整理)

表 3 影響成本超支原因之改善對策

管理對象	影響原因	改善對策
1. 外在環境 (政府機關、設計單位、營運單位)	1. 工程特性衍生 2. 環境因素限制	1. 無法避免僅能降低其發生的機率及損失 2. 確切了解工程契約範圍 3. 現場勘查工作確實執行
2. 總承攬商	1. 施工階段時間限制	落實施工計畫
	2. 高程差限制	1. 現地勘查工作確實執行 2. 事先規劃及相關管線套繪檢討
	3. 各分項工程整合	1. 各分項工程定期檢討施工進度及協調事項 2. 設計圖及施工圖之清圖工作落實執行
	4. 人為管控不當	1. 建立遴選施工廠商準則 2. 排定工程管理訓練，建立工程認知及正確價值觀 3. 提供工程技術相關的課程，強化專業技術能力 4. 工程經驗傳承 5. 建立已完成之工程資料庫 6. 強化內部組織架構，招募各類人才及培訓
	5. 設備材料管控不當	1. 確實了解標單規格 2. 定期追蹤設備材料進場交期
	6. 機具使用及規劃不當	1. 落實職安相關防護工作 2. 確實執行施工計畫
	7. 工程界面處理不當	1. 選用適當分包類型 2. 確實釐清合約範圍及限制
3. 施工廠商	1. 人為管控不當 2. 設備材料管控不當 3. 機具使用及規劃不當 4. 工程界面處理不當	1. 訂定嚴實合約內容，分包商合約需客製化 2. 確實釐清工程範圍 3. 落實每日工作箱會議 4. 確實執行與廠商間權責分工 5. 確實要求提供施工計畫書並落實於施工

(資料來源：本研究整理)

四、結論與建議

當臺灣積極發展高科技產業且與環境保護工作並重時，亟需推動污水廠之擴建工程以達到環境保護之責，故污水廠是現代不可或缺之基礎建設。然而投標廠商於爭取工程標案過程中，為了在價格上有競爭優勢，故採取政策性低價搶標，致使分包策略改變，進而影響後續工程執行之困難度。

而制定分包類型準則是仰賴以往投標經驗及曾經合作之施工廠商報價，缺乏考量外在環境因素、公司目前核心能力優劣及施工廠商評價等客觀因素，僅注重於工程標案得標率，且透過已完成之個案發現，大部份總承攬商團隊組織人力較為薄弱，故不易管理及輔助過多的分包廠商。因此，若分包類型能制定準則，對於施工管理及公司營運應有相當程度之幫助。

為此，本研究擬透過已完成之三件擴建工程案例，彙整影響成本超支的原因，根據其結果進行討論，並針對因分包類型改變的原因及其影響，進而建立影響工程成本超支之要因特性圖，其研究結論共有四點以下說明。

第一，分包類型及其比較提供四種分包類型並將其優缺點及適用工程類型彙整，考量總承攬商團隊核心能力並善用分包類型的特性，進而如實如質完成工程目標，以達效益發揮最大化。

第二，擴建工程分包類型考量因素共歸納三大類別，包括：(1)外在環境(包含完工條件、市場特性及設計階段規劃不周全)，(2)總承攬商團隊核心能力(包含團隊組織完整性及專業技術能力)，(3)施工廠商條件(包含施工費用、管理費用、工班調度彈性、施工時間掌握度、施工機具充足度、技術能力及整合能力)。

第三，影響成本超支原因共歸納六大類別，包括：(1)因工程特性衍生之情況(包括完工條件受法規限制、時間限制、高程差限制、各分項工程整合限制)，(2)人為管控不當，(3)設備材料管控不當，(4)機具使用及規劃不當，(5)是工程界面處理不當及(6)環境因素限制。

第四，提供預防成本超支情況的改善對策，強化工程師專業技術能力、培養正確價值觀，以及建立施工廠商遴選準則，藉以防範規避成本超支發生的機率。

後續研究方向主要包括三點建議，(1)本研究利用個案分析及專家訪談進行影響成本超支原因之歸類彙整，後續可增加更多案例經驗建立更精準之準則，降低以主觀性(經驗法則)考量發生之情事；(2)後續可增加排除環境因素限制探討，以提升工程執行效益；(3)本研究目前所提之要因特性法仍為需透過討論及經驗彙整，後續可發展篩選系統，建立工程執行機制。

參考文獻

1. 駱尚廉、楊萬發，環境工程(二)-下水道工程，第二章 2-9 家庭污水量，第 55-57 頁，茂昌圖書有限公司，台北市
2. 駱尚廉、楊萬發，環境工程(二)-下水道工程，第二章 2-10 工業廢水量，第 57 頁，茂昌圖書有限公司，台北市，1999。
3. 范錦華，「營造業分包管理機制之探討」，碩士論文，國立台灣大學土木工程學研究所，台北市，2012。

不同二階床質對流體化床產氣之影響

傅榮晟¹ 陳昱霖² 林秋良³

¹ 國立高雄大學土木與環境工程學系碩士

² 國立高雄大學土木與環境工程學系大學部學生

³ 國立高雄大學土木與環境工程學系教授

摘要

本研究在探討二階段流體化床改變二階床質種類，對於氣化後氣體的產出量分佈影響。結果顯示，一、二階段床質皆為石英砂時，第一階段皆為 700°C 下，第二階段溫度越高，合成氣中 H₂ 的比例隨之提升，而 CO₂ 隨之減少；若將第二階段床質改為天然橄欖石時，當第二階段溫度越高，合成氣中 H₂ 的比例將會提升，且 CO₂ 比例下降；若將第二階段床質再改為鍛燒橄欖石，並操作在 800°C 下，隨著橄欖石的鍛燒溫度越高，合成氣中 CO 和 CH₄ 的比例隨之減少，而 CO₂ 隨之增加；因此在第一階段為 700°C，第二階段為 800°C 時，分別使用為石英砂、天然橄欖石和鍛燒橄欖石作為二階段床質時，以合成氣中 H₂ 的比例來說，鍛燒橄欖石較石英砂及天然橄欖石為佳。另由實驗結果得知，第二階段在溫度越高時，合成氣中 H₂ 比例有提高的趨勢，而床質選用鍛燒橄欖石，能夠進一步提高合成氣中 H₂ 比例。

關鍵字：流體化床、氫氣、合成氣

The Effects of Different Second-stage Bed Materials on the Gas Production in Two-stage Fluidized Bed

Rongsheng-F¹ Yulin-Chen² Chiou-Liang Lin³

¹Master, Dept. of Civil and Environmental Engineering, National University of Kaohsiung, Taiwan

²Bachelor Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, National University of Kaohsiung, Taiwan

³Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, National University of Kaohsiung, Taiwan

ABSTRACT

In this study, the effects of different second-stage bed materials on the gas production in two-stage fluidized bed gasification process were discussed. The results showed that when syngas of first-stage passed into the second-stage gasification, the H₂ ratio in syngas increased. Additionally, the H₂ ratio in syngas will increase when the operating temperature in second-stage increases. When the olivine was used as second-stage bed material, the H₂ ratio in syngas is more than that of silica sand and H₂ ratio increase with operating temperature increasing. Additionally, the different olivine of calcination temperatures were also applied as second-stage bed materials. As the calcination temperature increases, the CO and CH₄ ratios in syngas decrease, but CO₂ increase. Comparing silica sand, olivine and calcined olivine, the gas production of calcined olivine is better than silica sand and olivine.

Keywords: Fluidized bed, Hydrogen gas, Syngas

一、緣起

隨著世界快速發展，都市固體廢棄物逐年增加，國內處理廢棄物方式以焚化為主，而焚化可有效將廢棄物減容、安定化。有關焚化處理，國內外已有許多研究利用不同的操作參數(如溫度、床質粒徑、空氣量...等)，探討廢棄物進行焚化處理後，其廢氣組成、重金屬分佈與處理效益(Lin and Ma,2012;Xiao,2015)。

近年來隨著國內垃圾量提升，除了一般家戶垃圾處理量增加外，一般事業廢棄物也隨工業發展而增加，如何將增量後的廢棄物進行減量化與後續處置，為目前廢棄物處理中一項重要之議題，而除了將廢棄物妥善處理外，隨著全球氣候變遷以及相關資源的逐漸匱乏，廢棄物的能資源化也是目前大家所逐漸重視的方向。

而氣化技術為一種廢棄物熱轉換技術，優點在於廢棄物經適當操作條件氣化後產出之合成氣(包含 H_2 、 CH_4 與 CO 等)有多種方式可被再利用，但在氣化過程中也會產生焦油、焦碳等影響產氫效率之物質。當前氣化技術除了使用各種添加劑探討產氫效能之餘，也探討抑制焦油、焦碳的發生情形(Dascom et al., 2013; McKendry, 2002)。

氣化反應是使用生質物料與部份氧氣，於反應爐體內進行熱化學反應，當生質物進入氣化爐後，會其氣化反應的程序會經過四段反應區塊，其階段與功能如下：(1)乾燥段-去除水分、(2)裂解段-裂解生成焦油與煤炭、(3)還原段- CO_2 與水氣生成 H_2 和 CO 、(4)燃燒段-主要的氣化階段，產生 CO 與 CO_2 (Arnavavt et al., 2010; McKendry, 2002)。

而目前所使用的氣化爐多數可分為固定式爐床和流體化床式爐床，期中固定式操作容易、成本較低，但易產生結塊且焦油量多；而流體化床式熱傳導效益高、爐床溫度較均勻，且爐内生質物能和床質均勻混合，因此流體化床的應用有逐漸增加的趨勢。而二階段流體化床氣化爐則是將兩座反應爐連接成一個氣化系統，第一階段為氣化和熱裂解，生成氣體、焦油等產物，再進入第二階段進

行第二次的反應，藉以提高會產生合成氣體產量，根據研究二階段氣化可以增加總產氣率、減少焦油的生成避免堵塞氣體管道(Soni et al.,2012; Xu et al.,2014)。而本研究主要應用二階段流體化床作為氣化反應器，同時改變不同操作溫度以及第二階段床質的種類，探討不同條件下合成氣中的組成分佈，以及氫氣的組成影響。

二、實驗方法

本研究以實驗室規模之氣泡式流體化床氣化爐為實驗設備，設備構造如圖 1 所示。氣化爐分為兩個爐床，材質皆為不銹鋼(AISI-310)。爐床底部置有不銹鋼材質之分散板，孔洞均勻分佈，開孔面積為 15%。爐體內有加熱系統-電加熱管以及有三支熱電偶以監測並觀察爐內之溫度變化。燃燒室出口連接旋風集塵器進行飛灰之收集。實驗過程一階段使用的床質固定為為石英砂(SiO_2)，其粒徑為 0.775 mm；二階段使用的床質有石英砂、鎂鐵橄欖石及鍛燒後鎂鐵橄欖石，三種床質粒徑皆為 0.545 mm，鍛燒之溫度為 900 $^{\circ}C$ 、1000 $^{\circ}C$ 與 1100 $^{\circ}C$ ，鍛燒時間皆為 3 小時。

實驗過程的進料生質物模擬一般廢棄物組成，在聚乙烯(PE)密封袋(0.17 g)中加入木屑粉末(0.84 g)與聚丙烯(PP)塑膠顆粒(0.0756 g)，其成分比例如表 1 所示。操作過程將氣速固定為最小流體化速度 1.3 倍，並分別以一、二階操作溫度、床質成分、床質鍛燒與否作為控制變因，一階段操作溫度固定為為 700 $^{\circ}C$ ，二階段分別為 700 $^{\circ}C$ 、800 $^{\circ}C$ 與 900 $^{\circ}C$ 。實驗過程之進料速率以每 20 秒一包於進料口投料，持續 25 分鐘，並於煙道採樣口，間距 3 分鐘之速率進行合成氣之採樣。當實驗完成後，將採集之合成氣以氣相層析儀(GC-TCD)進行氣體分析，以計算各氣體之量及比例。

三、結果與討論

3-1 操作溫度對二階段氣化過程合成氣組成之影響

3-1-1 一、二階段爐床對合成氣組成之影響

圖 2 至圖 4 為控制第二階段爐床於不同溫度，對於合成氣體之影響，由結果顯示，不論第二階段的溫度為何，第一階段合成氣再經第二階段爐床反應後，合成氣中的 H₂ 比例有明顯的提高現象，但合成氣中的其他組成氣體的影響差異不大，因此第二階段爐床將有助於提高合成氣中 H₂ 比例，而提高 H₂ 比例同時有助於後端的分離及後續的應用。

另外比較圖 2 至圖 4，可發現當二階溫度越高時，H₂ 的比例明顯提高許多，CO 和 CH₄ 略為相同，而 CO₂ 的比例在二階段有些許下降。因此，由實驗可見二階段操作溫度越高時合成氣中 H₂ 比例能有所提升，CO₂ 比例能夠相對降低。據 Luo et al. (2009) 研究中指出當溫度提升時，會增加裂解與焦油重組反應，並提升 H₂ 與 CO 的產生量，且 CH₄ 也會隨溫度提升而進行再重組，提升產量。

3-1-2 應用天然橄欖石對合成氣組成之影響

圖 5 至圖 7 為第二階段床質改為天然橄欖石，同時改變第二階段操作溫度，對合成氣體組成之影響。由結果顯示，以天然橄欖石為床質時與石英砂有類似的結果，當第二階段操作溫度越高，合成氣中 H₂ 的比例有顯著提升，而 CO、CH₄ 和 CO₂ 皆有降低的趨勢。

根據 Alauddin et al. (2010) 研究指出溫度為操作過程中影響氣體組成最大因素，當溫度提高時總產氣量則相對提高。其可能原因是第二階段操作溫度提升，將增加甲烷-水氣反應進行並提升 H₂ 產生量，同時降低 CO、CH₄、CO₂ 產生量。

3-2 二階床質種類對合成氣組成之影響

圖 3、圖 6 和圖 8 為一階操作溫度固定 700 °C，床質為石英砂；二階操作溫度 800 °C，床質分別為石英砂、天然橄欖石、鍛燒橄欖石的合成氣組成情形，觀察改變二階段床質種類對合成氣組成之影響顯示，H₂、CH₄ 和 CO₂ 產量無明顯差異，CO 比例在床質為鍛燒橄欖石時有較高的趨勢，整體而言鍛燒橄欖石有較好的產氣效益。

3-3 鍛燒溫度對合成氣組成之影響

圖 8 至圖 10 為固定一、二階操作溫度，

且一階床質為石英砂，第二階床質則為改變不同鍛燒時間所製備之鍛燒橄欖石，鍛燒時間均為 3 小時，鍛燒溫度為控制變因，從圖中觀察二階段氣體組成比例，可得知 H₂ 產量略微相同，但 CO 和 CH₄ 在 900 °C 有最高產量，至於 CO₂ 有隨溫度上升有提升之趨勢。因此，鍛燒橄欖石的鍛燒溫度越高，並不一定有較高的效率。

四、結論

本研究在探討二階段流體化床改變二階床質種類，對於氣化後氣體的產出量分佈影響。應用二階對氣化程序，第二階段出口的合成氣中 H₂ 的比例將有明顯的提升，且第二階段溫度越高，合成氣中 H₂ 的比例隨之提升，而 CO₂ 隨之減少；若將第二階段床質改為天然橄欖石時，當第二階段溫度越高，合成氣中 H₂ 的比率將會提升；若將第二階床質再改為鍛燒橄欖石，隨著橄欖石的鍛燒溫度越高，合成氣中 CO 和 CH₄ 的比例隨之減少，而 CO₂ 隨之增加；因此在第二階段為 800 °C 時，分別使用為石英砂、天然橄欖石和鍛燒橄欖石作為二階段床質時，以合成氣中 H₂ 的比例來說，鍛燒橄欖石較石英砂及天然橄欖石為佳。另由實驗結果得知，第二階段在溫度越高時，合成氣中 H₂ 比例有提高的趨勢，而床質選用鍛燒橄欖石，能夠進一步提高合成氣中 H₂ 比例。

五、參考文獻

1. Alauddin, Z.A.B.Z., Lahijani, P., Mohammadi, M. and Mohame, A.R. (2010) Gasification of lignocellulosic biomass in fluidized beds for renewable energy development: A review. *Sust. Energy. Rev.* 14, 2852-2862.
2. Arnavat, M.P., Bruno, J.C. and Coronas, A. (2010) Review and analysis of biomass gasification models. *Renew. Sust. Engery Rev.* 14, 2841-2854.
3. Dascom, J., Krothapalli, A. and Fakhrai, R. (2013) Thermal conversion efficiency of

producing hydrogen enriched syngas from biomass steam Gasification. Int.J.Hydrogen Energy.38,11790-11789.

4. Lin, H. and Ma, X.Q. (2012) Simulation of co-incineration of sewage sludge with municipal solid waste in a grate furnace incinerator. Waste Manag.32(3),561-567.
5. Luo, S., Xiao, B., Hu, Z., Liu, S., Guo, X. and He, M. (2009) Hydrogen-rich gas from catalytic steam gasification of biomass in a fixed bed reactor: Influence of temperature and steam on gasification performance. Int. J. Hydrogen Energy. 34,2191-2194.
6. McKendry, P. (2002) Energy production from biomass (part 2) :conversion technologies. Bioresource Technol. 83,47-54.
7. Soni, C.G., Wang.Z.,Dalai. A.K., Pugsley, T., Fonstad, T. (2009) Hydrogen production via gasification of meat and bone meal in two-stage fixed bed reactor system. Fuel. 88,920-925.
8. Xiao, Z.H., Yuan, X.Z. and Jiang, L.B. (2015) Energy recovery and secondary pollutant emission from the combustion of co-pelletized fuel from municipal sewage sludge and wood sawdust. Energy, 91, 441-450.
9. Xu, S.,Ren, Y., Wang, B., Xu. Y., Chen, L., Wang, X. and Xiao, T. (2014) Development of a novel 2-stage entrained flow coal dry powder gasifier. Appl. Energy. 113, 318-323.

表 1 實驗材料之元素分析(wt.%)

元素組成	木屑	PP	PE
C	49.68	84.36	84.32
H	6.61	13.84	13.93
O	44.01	1.35	0.93
N	0.38	0.05	0.04

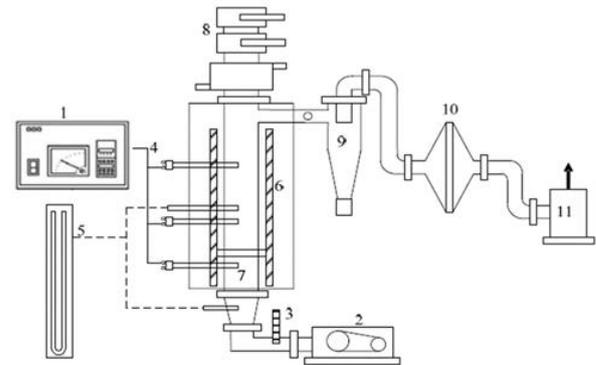


圖 1 流體化床焚化爐

- (1) PID 控制面板 (2)鼓風機 (3)浮子流量計 (4)熱電偶 (5)壓差計 (6)電加熱管 (7)砂床 (8)進料口 (9)旋風集塵器 (10)活性炭濾網 (11)抽風機

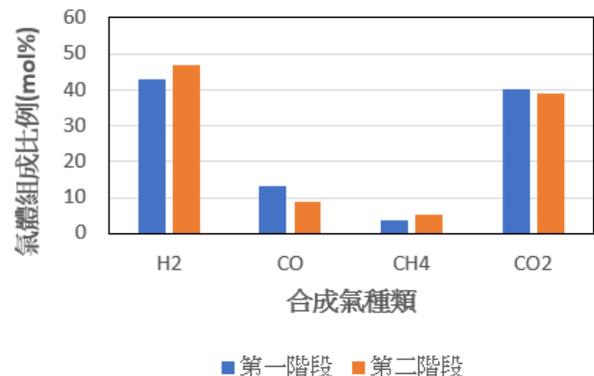


圖 2 二階段床質為石英砂，操作溫度 700°C 時對合成氣組成之影響

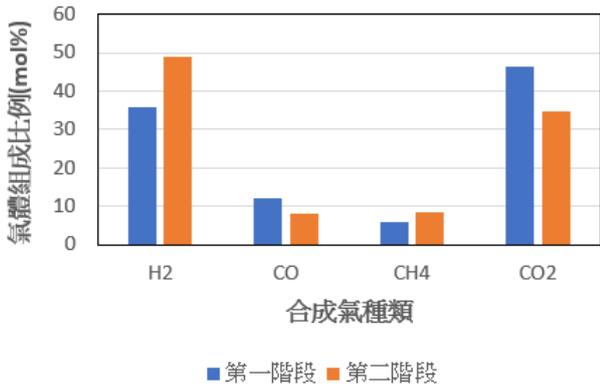


圖 3 二階段床質為石英砂，操作溫度 800°C 時對合成氣組成之影響

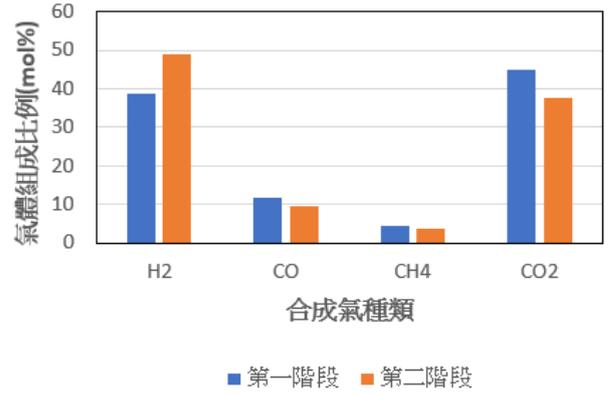


圖 6 二階段床質為天然橄欖石，操作溫度 800 °C 時對合成氣組成之影響

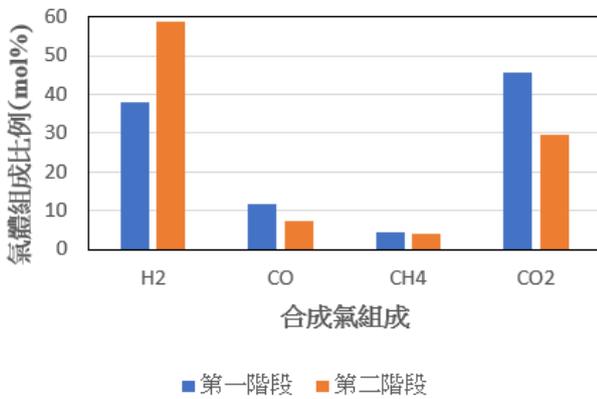


圖 4 二階段床質為石英砂，操作溫度 900°C 時對合成氣組成之影響

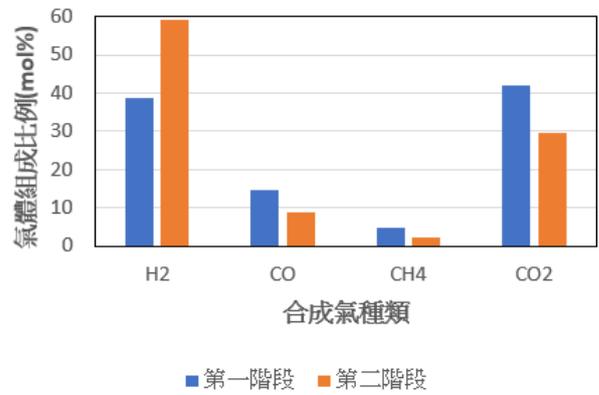


圖 7 二階段床質為天然橄欖石，操作溫度 900 °C 時對合成氣組成之影響

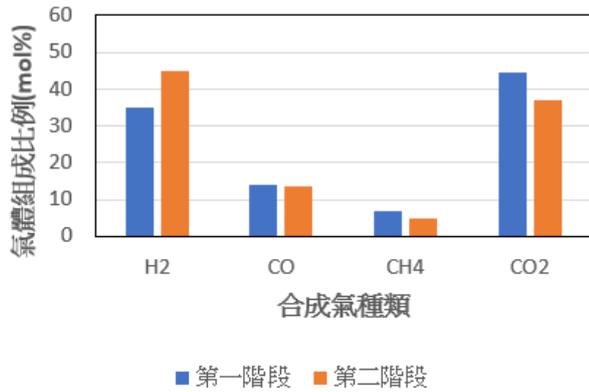


圖 5 二階段床質為天然橄欖石，操作溫度 700°C 時對合成氣組成之影響

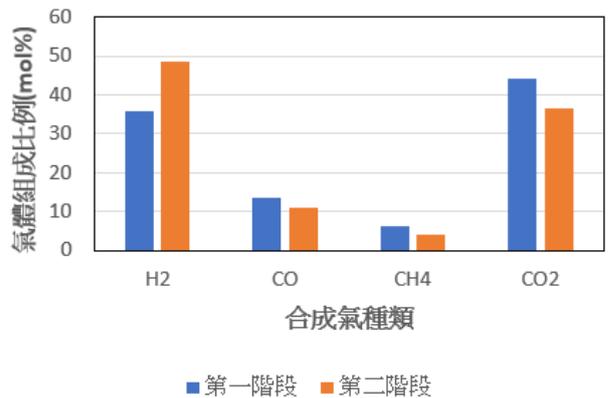


圖 8 鍛燒橄欖石(鍛燒溫度 900°C)對合成氣組成之影響

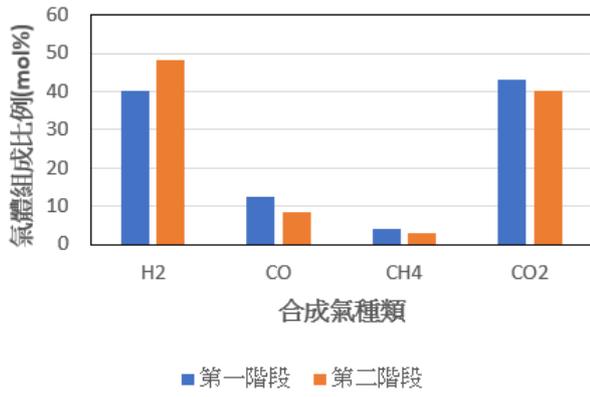


圖 9 二階鍛燒橄欖石(鍛燒溫度 1000°C)對合成氣組成之影響

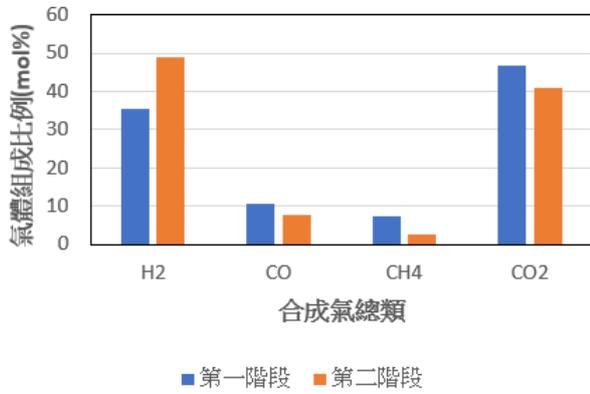


圖 10 二階鍛燒橄欖石(鍛燒溫度 1100°C)對合成氣組成之影響

運用光譜儀估計葉綠素 a 濃度

江介倫¹ 黃芯湄²

¹ 國立屏東科技大學水土保持系副教授

² 國立屏東科技大學水土保持系碩士生

摘要

因水中養分過多導致藻類大量繁殖形成水體優養化，而藻類多寡間接影響葉綠素 a(Chl-a)的濃度高低。然而計算 Chl-a 濃度需要帶回實驗室經過繁雜的程序後才能分析出，所以為了能快速的得出 Chl-a 的值，利用光譜儀建立出 Chl-a 濃度的迴歸式，進而可以迅速的得出 Chl-a 濃度。本研究將光譜值做標準化預處理後，用單一波長法和兩波長法對 Chl-a 濃度和光譜值做迴歸分析，本研究最後選擇紅波長比值(Red640.28/Red670、 $R^2=0.988$)來做 Chl-a 濃度的推估模型，可達誤差百分比僅 4%。

關鍵字：光譜、葉綠素 a

Use Spectrometer to Estimate the Concentration of Chlorophyll a

Jie-Lun Chiang¹ Hsin-Mei Huang²

¹Department of Soil and Water Conservation, Pingtung University of Science and Technology

²Department of Soil and Water Conservation, Pingtung University of Science and Technology

ABSTRACT

Excessive nutrients in aquatic ecosystems results in the exponential growth of algae. This condition leads to eutrophication in water. Chlorophyll-a (Chl-a) is a microscopic unit of algae, therefore, its concentration is directly proportional to the amount of algae in water. In this study we design single and multiple wavelength methods based on the spectrometer measurements to develop a regression model for estimation of Chl-a. The method used in this study included standardization and preprocessing of spectral values measured as wavelength intensity followed by developing a regression models based on single and double-wavelength method. In both models, wavelength intensity measured in different regions of the electromagnetic region (i.e. red, blue green and near infra-red (NIR)) was regressed against Chl-a concentration. The red wavelength ratio method (Red640.28/Red670) outperformed the other models, with the model yielding a coefficient of determination (R^2) of 0.988 and an error percentage of 4%. In conclusion, this study successfully demonstrates that a single wavelength method constructed using the red wavelength has got a higher prediction accuracy and can be applicable to the estimation of Chl-a.

Keyword: spectrum, Chl-a

一、緣起

因點源汙染及非點源汙染導致降雨後過

多的養份流入水中，造成藻類大量繁殖進而形成水體優養化，而優養化之後的水因藻類

過多使陽光沒辦法照射到底層水生植物，所以無法行光合作用導致溶解氧(DO)降低，這不但會使水中生物無法呼吸而死亡，也讓生物多樣性減少，倘若在水庫中發生有毒藻華現象甚至會影響人們飲用水的安全。

而台灣目前水庫是使用卡爾森營養狀態指數(CTSI)來判定水庫水質狀態，利用總磷(TP)、葉綠素 a (Chl-a)和透明度(SD)的平均來辨別水質狀態，而其中藻類多寡間接影響到 Chl-a 濃度高低，因此 Chl-a 常被作為優養化程度高低的指標。

且分析 Chl-a 濃度是需要帶回實驗室經過繁雜的程序後才能分析出，不但費時又費力。所以有前人利用衛星影像建立一套迴歸式來判定 Chl-a 濃度的多寡，但衛星影像有時間及空間上的缺點，像 LANDSAT 衛星雖然空間分辨率高但每 16 天才重複拍一次相同地方，而藻類變化快所以並無法準確的分析，而 Terra 衛星搭載 MODIS 成像儀，雖然每 2~3 天就拍攝一次，但他的空間分辨率低，無法準確了解地面情況。

所以為了能快速且簡易的得出 Chl-a 的值，本研究利用光譜儀建立出 Chl-a 濃度的迴歸式，進而可以迅速的計算出 Chl-a 濃度。

二、前人研究

李苗、臧淑英等(2011)和周超、高乃芸等(2012)以及曹櫻櫻(2015)，到水庫中採取水樣，想了解各水質與藻類的關係，研究表示藻類越多，葉綠素 a 濃度越大、ph 值、總磷、總氮也越高。Xu, et al.(2013)，採取每月水樣，並添加相同濃度的營養素(氮 N、磷 P 和氮磷 NP)加以培養，最後發現夏季和秋季是 N 影響大，而 P 影響較大在冬季和春季，表示隨著季節使藻類滋生的營養素也不同。Wataru, et al.(2016)，隨著水深採取 Secchi 深度與葉綠素 a 的值，分析後表示葉綠素 a 濃度會隨著水深越來越低，並在水深大於 20m 時兩者較相關，小於 10m 時則無。

楊國范等(2016)，利用 Landsat-8 衛星 OLI 在水庫拍的數據，使用線性迴歸與與最小二乘支持向量機模型 LS-SVM 進行葉綠素 a

濃度轉換。以 LS-SVM 模型與組合波段 $S6=B5/B4$ 相關性最高 ($R^2=0.966$)。劉宇(2017)，利用光譜儀校正 TM 衛星影像數據，來獲得精度較高的模型，最後以 $TM2+TM3$ ($TM2=520-600nm$; $TM3=760-900nm$) 模式最佳 ($R^2=0.89$)。Wang(2018) 使用 MODIS 數據換算成水色指數，也就是 Forel-Ule 指數 (FUI)，將 FUI 細分出 21 個色度，利用色度來判斷水質目前狀況。劉宇等(2019)也是利用 Landsat-8 衛星的波段 $B1\sim B7$ 做波段組合以及 7 種水體指數歸一化水體指數(NDWI)、改進歸一化水體指數(MNDWI)、新型水體指數(NWI)、NWE 型水體指數、增強型水體指數(EWI)、修訂歸一化水體指數(RNDWI)、 $AWEI_{nsh}$ 、 $AWEI_{sh}$ ，將 2 種波段做出 Chl-a 的反演模型。最後以 $(B3+B4)/B5$ 、 $B5/B3$ 以及 NDWI 這三種模式最適合做 Chl-a 反演模式。

范雅等(2011)，研究紫外線與葉綠素 a 的關係，表示紫外線越強，葉綠素含量會降低，在波長 230nm 左右會有吸收峰，且濃度越高吸收峰的位置越往右偏移。Yosef, et al.(2011)知道前人低濃度的葉綠素 a 的反演效果都不好，所以想測試低濃度範圍內 ($4-21 mg m^{-3}$) MERIS 和 MODIS 算法的適用性。結果以二波段 ($R665 * R708$) 模擬結果比三波段 ($(R665-R708) * R753$) 好。孫昊等(2019)在石佛寺水庫採取水樣帶回研究室分析葉綠素 a 濃度，並利用光譜儀量測光譜值，研究結果表示組合波段 $R702/R674$ 與 Chl-a 的相關性不錯。

三、研究方法

1-1 研究流程

先用 SMR35 葉綠素 a 分析儀量測 Chl-a 濃度，再用鹵素燈及光譜儀量測光譜值，經過線性迴歸找出判定係數 (R^2) 最佳的波段，最後將光源更換成該波段的 LED，再進行線性迴歸，建立推估模型，詳細研究流程，如圖 1。

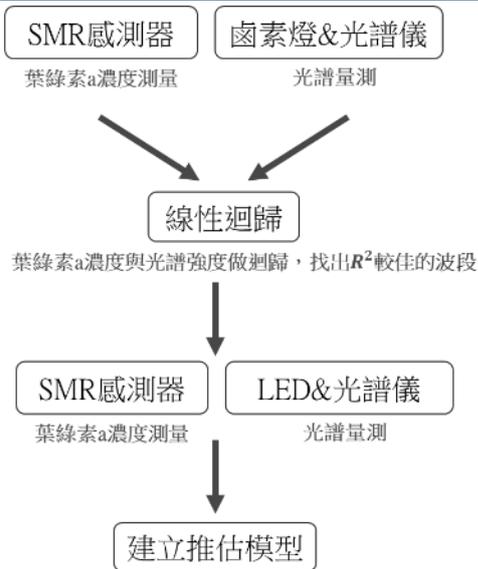


圖 1 研究流程圖

2-1 研究方法

2-1-1 養綠藻水

先準備一個培養缸，再用花寶四號做培養基加速藻類生長，而水與培養基比例約 10L:1g，並放置到可以讓陽光照射到的地方，靜待 5~10 日，等待藻類繁殖生長，如圖 2。



圖 2 綠藻水

2-1-2 量測葉綠素 a 濃度

使用 SMR35 葉綠素 a 分析儀，本儀器是利用螢光法採用 460nm 光源，量測範圍在 0~500 $\mu\text{g/L}$ ，研究設定是以 1 分鐘每秒量測一次 Chl-a 濃度，最後以平均 60 次的量測結果當作該次的 Chl-a 濃度，如圖 3。量測方式是將綠藻水倒入 2L 的不透光瓶中，再用葉綠素 a 分析儀來量測 Chl-a 濃度，如圖 4。量測

完後裝入比色皿中，接著用 100mL 的水稀釋綠藻水獲得不同的 Chl-a 濃度，如圖 5。

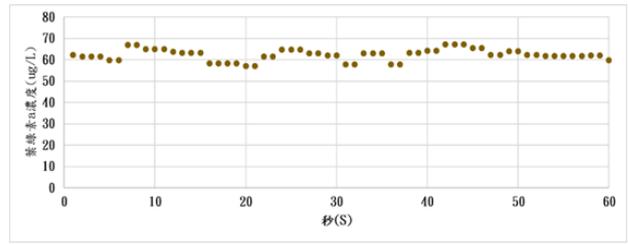


圖 3 Chl-a 平均濃度



圖 4 SMR35 葉綠素 a 分析儀

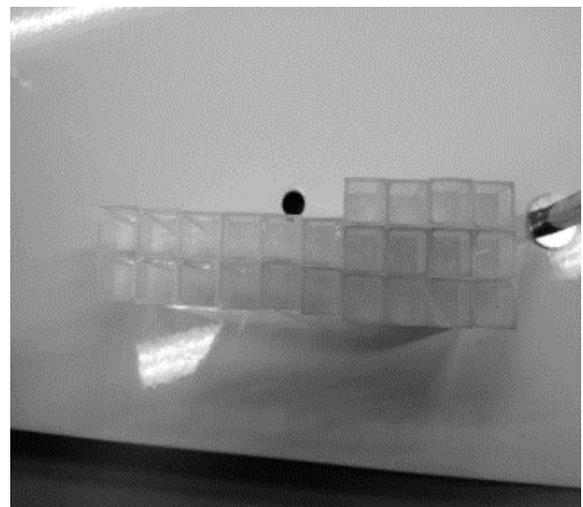


圖 5 裝有不同 Chl-a 濃度的比色皿

2-1-3 用光譜儀量測出各波長的光強度

本研究使用 OTO-SD1200 光譜儀，光譜接收範圍在 300-1000nm，狹縫寬度為 50um 並使用鹵素燈發射光源，連接 Y 型光纖將光源傳送到試管架中，在利用光譜儀接收光譜值，如圖 6。

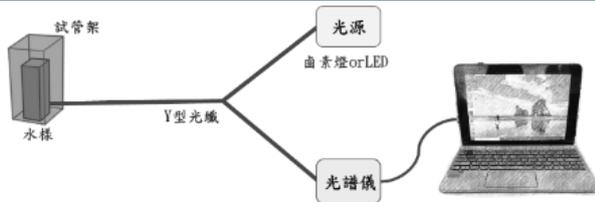


圖 6 光譜儀架設

2-1-4 線性迴歸

利用 SMR35 葉綠素 a 分析儀量測出不同的 Chl-a 濃度分別進行光譜儀量測，將 Chl-a 濃度以及光強度兩者進行迴歸分析，找出 R² 較高的波長範圍，如圖 7。

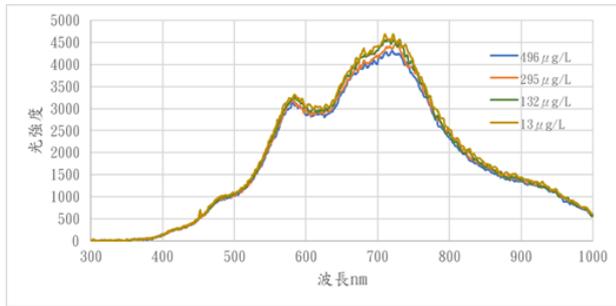


圖 7 葉綠素 a 濃度與光強度

2-1-5 燈源更換

將原本的鹵素燈光源更換為 R² 較高的波段範圍，這樣會使該波段更加敏感，並用 32 種不同的 Chl-a 濃度，進行光譜量測。

2-2 數據驗證

先將數值做標準化處理，降低每次量測周圍環境的影響。而本研究將 21 組數據做模式建立，用 11 組數據做模式驗證，如公式(1)。

(1) $Z = \frac{X - \bar{X}}{S}$ 其中 \bar{X} = 平均數；S = 標準偏差

2-2-1 單波長法

在波長 580-680nm 選用變化值最大的波長 658.71nm、R² 最高的波長 655.49nm、最大光強度值，這三種方法來做模式建立及驗證，如圖 8。

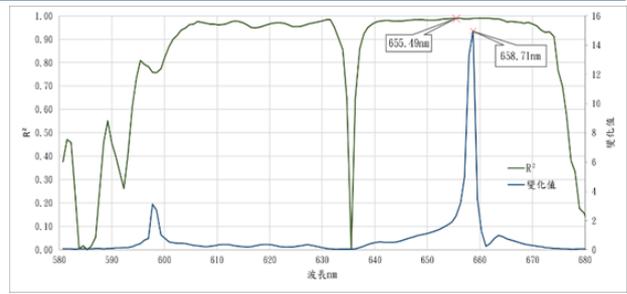


圖 8 600-660nm 各波長的判定係數(R²)

2-2-2 兩波長法

本研究模擬 MODIS、MERIS 衛星波段範圍以及紅波長比值，來做模式建立及驗證，所使用公式及波長，如表 1。

表 1 兩波長法所選用波長

	公式	選用波長
MODIS	MODIS(R ₁₃) × (R ₁₅) R ₁₃ =662-672nm R ₁₅ =743-753nm	R ₁₃ =662.73 R ₁₅ =744.98
MERIS	MERIS(R ₇) × (R ₉) R ₇ =660-670nm R ₉ =703-713nm	R ₇ =660.32 R ₉ =703.43
紅波長 比值	$\frac{Red1}{Red2}$ Red=620-720nm	Red1=640.28 Red2=670

2-3 誤差百分比

將推估出來的 Chl-a 濃度與實際量測出來的 Chl-a 濃度做誤差百分比計算。若結果為正值表示推估結果高估實際量測結果，若為負值表示推估結果低估實際量測結果，如公式(2)。

(2) 誤差百分比(%) = $\frac{預估值 - 實際值}{實際值} \times 100\%$

四、結果與討論

1. 葉綠素 a 濃度與光譜的關係

1-1 葉綠素 a 濃度高低與最大光強度

由下圖可以看出 Chl-a 濃度與最大光強度呈負相關，濃度越大光強度越低，因濃度越大被 Chl-a 吸收的光就越多，如圖 9。

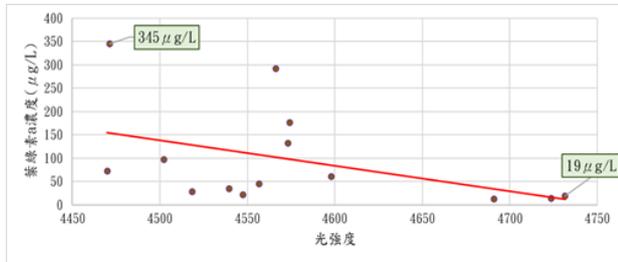


圖 9 葉綠素 a 濃度與最大光強度關係

1-2 葉綠素 a 濃度與最大光強度位置變化

由下圖可以看出 Chl-a 濃度與最大光強度位置，濃度越大位置越往右(長波)偏移，如圖 10。

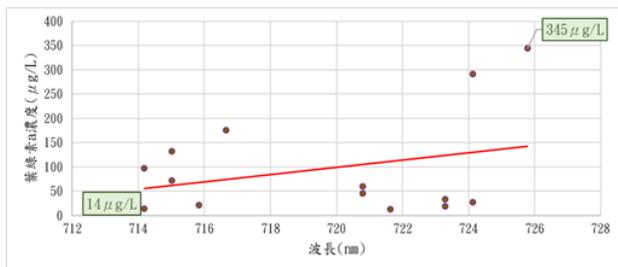


圖 10 Chl-a 濃度與最大光強度所在波長位置

2. 燈源更換

看下圖可以知道 R^2 最高約落在 884nm 左右，但 884nm 附近的迴歸結果也有較低的狀況出現，所以相對來說在波長 530-750nm 的範圍是相較於穩定(R^2 約在 0.3-0.75 之間)。且許多前人研究也表示紅光在 Chl-a 的推估效果上也比較好，如圖 11。

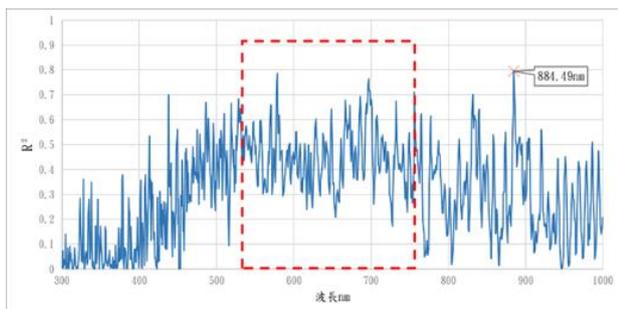


圖 11 300-1000nm 各波長之判定係數(R^2)

2-1 更換紅光 LED 燈

由下圖可以知道在將光源鹵素燈更換成紅光 LED 後，光譜接收範圍變成 580-680nm，如圖 12，而在 640-680nm 的波長 R^2 都大於 0.9，比之前用鹵素燈的結果相對變高了一點，如圖 13。

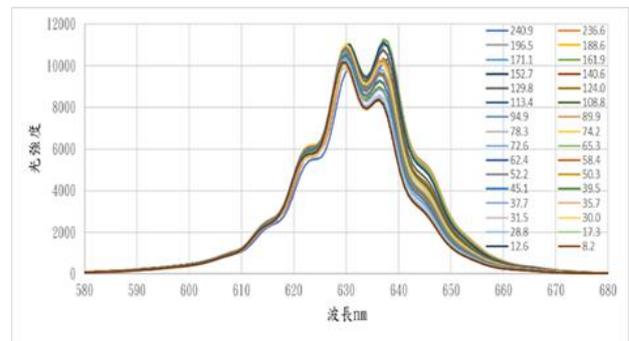


圖 12 更換成紅光 LED 燈後光譜接收範圍

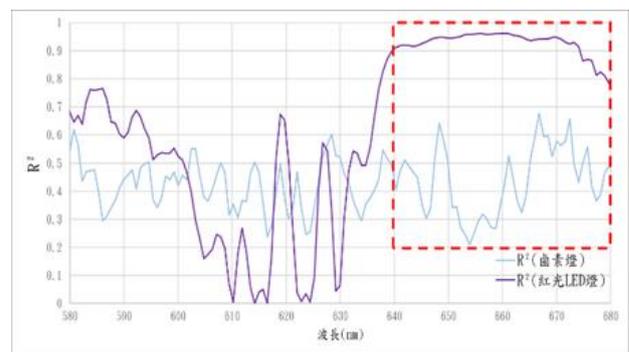


圖 13 更換光源後之判定係數(R^2)

3-1 光譜預處理

將光強度做標準化預處理後，對 Chl-a 濃度以及光強度做線性迴歸，由下圖可以看出原本 R^2 較差的波段 590-630nm 都提高許多，如圖 14。

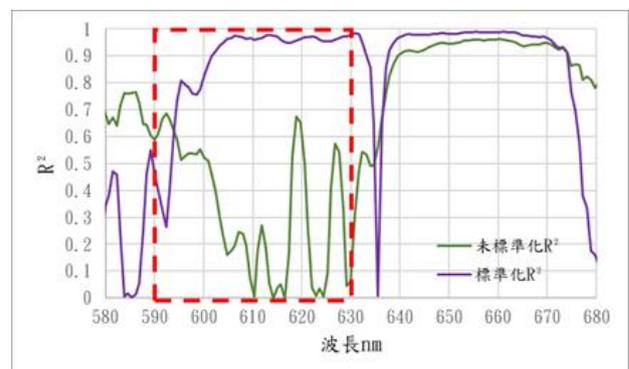


圖 14 標準化前後 R^2 關係圖

4-1 選擇推估公式

將 21 個數據用單波長法及兩波長法這兩種方法建模之後，在用 11 個數據推估 Chl-a 濃度，並計算平均誤差百分比，詳細結果如圖 15~20 及表 2~3。

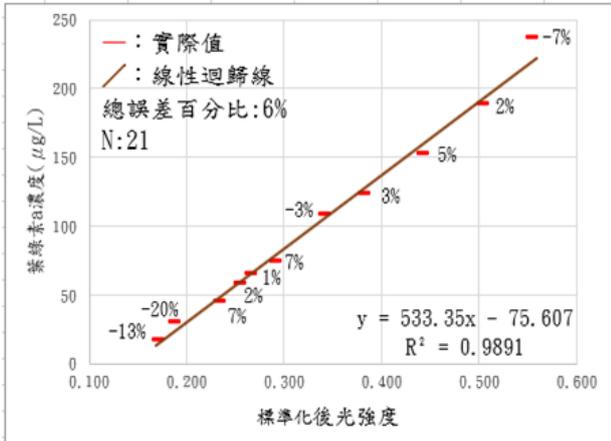


圖 15 單波長法- R^2 最高(655.49nm)

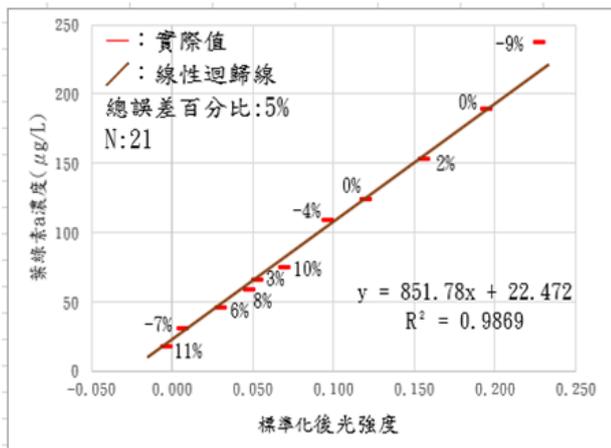


圖 16 單波長法-變化最大波長(658.71nm)

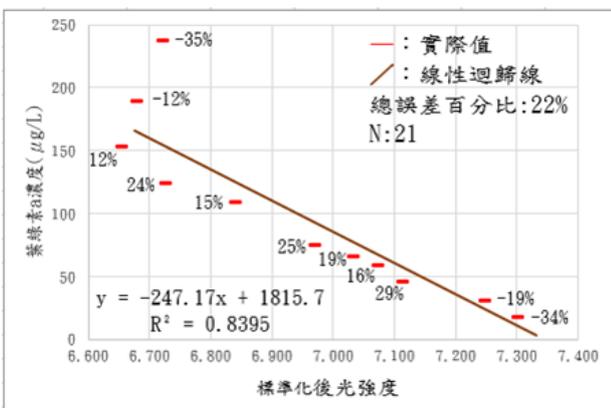


圖 17 單波長法-最大光強度值

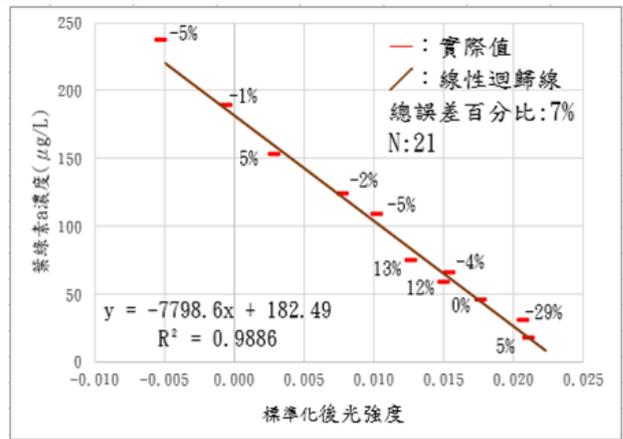


圖 18 兩波長法-MODIS

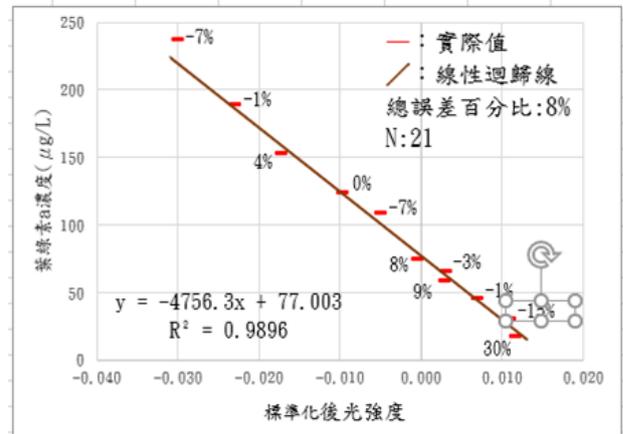


圖 19 兩波長法-MERIS

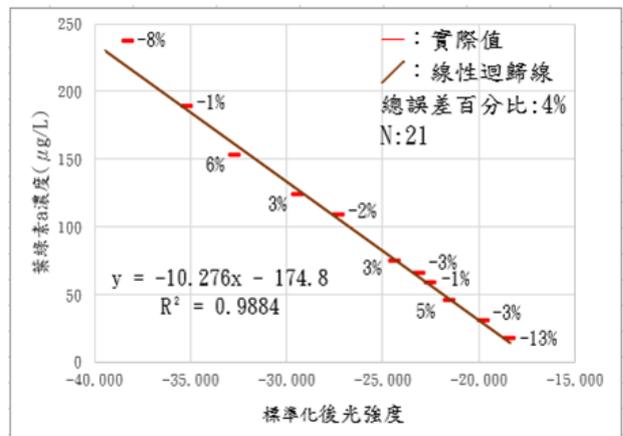


圖 20 兩波長法-紅波長比值

表 2 單波長法 R² 與誤差結果

		公式	x=波長(nm)	R ²	總誤差百分比
R ² 最高	未標準化	y=0.57x-129.3	660.32	0.95	9%
	標準化	y=533.35x-75.607	655.49	0.989	6%
變化最大	未標準化	y=-0.013x-130.638	669.19	0.939	19%
	標準化	y=851.78x+22.472	658.71	0.987	5%
最大光強度值	未標準化	y=0.097x-940.3	/	0.34	45%
	標準化	y=-247.17+1815.722	/	0.84	22%

表 3 兩波長法 R² 與誤差結果

		公式	x=波長(nm)	R ²	總誤差百分比
MODIS	未標準化	y=0.1427x-34.561	R ₁₃ =670.81 R ₁₅ =753.38	0.716	43%
	標準化	y=-7798.6x+182.49	R ₁₃ =662.73 R ₁₅ =744.98	0.989	7%
MERIS	未標準化	y=0.0285x-59.579	R ₇ =660.32 R ₉ =708.4	0.848	23%
	標準化	y=-4756.3x+77.003	R ₇ =660.32 R ₉ =703.43	0.99	8%
紅波長比值	未標準化	y=1666.8x-585.08	Red1=645.07 Red2=637.1	0.992	4%
	標準化	y=-10.276x-174.8	Red1=640.28 Red2=670	0.988	4%

五、結論

1. 葉綠素 a 濃度越大，最大光強度值越低，而最大光強度位置也會越往長波偏移(714nm→726nm)。
2. 更換紅色的 LED 燈(580-680nm)後比用鹵素燈量測(300-1000nm)的結果較好，R²從原本的 0.75 提高到 0.9。
3. 不管是單波長法還是兩波長法，經過標準化預處理後 R² 與誤差都有明顯變好及變小，單波長法以最大光強度值相差最

多，R²從原本 0.34 上升至 0.84、誤差百分比也從原本 45%變小至 22%，兩波長法則以 MODIS 差最多，R²從原本 0.72 上升至 0.99 誤差百分比從原本 43%變小至 7%

4. 在單波長法結果以 658.71 波長的變化最大的最好，誤差也最小為 5%，而葉綠素 a 與光強度的推估公式為 y=851.78x+22.472。在兩波長法以紅波長比值結果最好，誤差為 4%，而葉綠素 a 與光強度的推估公式為 y=-10.276x-174.8。所以本研究最終以紅波長比值作為葉綠素 a 的推估模型。

參考文獻

1. 李苗、臧淑英、那曉東、蘇旭坤，「克欽湖葉綠素 a 的高光譜定量模型研究」，中國農學通報，第 27 卷第 30 期，pp.313-317，2011。
2. 周超、高乃云、趙世嘏、楚文海，「上海青草沙水庫水質調查與評價」，同濟大學學報(自然科學版)，第 40 卷第 6 期，pp.894-899，2012。
3. 范雅、蔡紅星、李霜、王雪萍，「葉綠素的紫外吸收譜」，光散射學報，第 23 卷第 1 期，pp.80-82，2011。
4. 孫昊、周林飛，「石佛寺水庫葉綠素 a 濃度高光譜遙感反演」，節水灌溉，第 3 期，pp.67-70，2019。
5. 曹櫻櫻：「以葉綠素 a 含量與 ph、DO、氮磷濃度關係研究-以楊溪水庫為例」，現代商貿工業，第 17 期，pp.208-209，2015。
6. 楊國范、閻孟冬、殷飛，「清河水庫葉綠素口濃度反演模型研究」，遙感信息，第 31 卷第 5 期，pp.74-78，2016。
7. 劉宇，「基於遙感技術的克欽湖葉綠素反演研究」，長春大學學報，第 27 卷第 6 期，pp.20-24，2017。
8. 劉宇、李旭龍，「基于水體指數的鏡泊湖葉綠素 a 質量濃度反演研究」，湖南農業大學學報，第 45 卷第 2 期，pp.172-178，2019。

9. 培 養 綠 藻 水
(<https://lsman168.pixnet.net/blog/post/248986481>)
10. Xu, S., Huang, B., Wei, Z.B., Luo, J., Miao, A.J., Yang L.Y., “Seasonal variation of phytoplankton nutrient limitation in Lake Taihu, China: A monthly study from Year 2011 to 2012 ”, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Vol.94, pp.190-196, 2013.
11. Wataru, N., Akira U., Satoshi, S., Tetsuji, O., Satoshi, N., “Spatial and temporal distributions of Secchi depths and chlorophyll-a concentrations in the Suo Nada of the Seto Inland Sea, Japan, exposed to anthropogenic nutrient loading”, *Science of The Total Environment*, Vol.571, pp.543-550, 2016.
12. Wang, S., Li, J., Zhang, B., Evangelos, S., Andrew, N.T., Qian, S., Zhang, F.F., Tiit, K., Moritz K.L., Yanhong W.D.P., “Trophic state assessment of global inland waters using a MODIS-derived Forel-Ule index”, *Remote Sensing of Environment*, Vol.217, pp.444-460, 2018.
13. Yosef, Z.Y., Wesley, J.M., Semion, K., Benayahu, S., Bryan, C.L., Anatoly A.G., “NIR-red reflectance-based algorithms for chlorophyll-a estimation in mesotrophic inland and coastal waters: Lake Kinneret case study”, *Water Research*, Vol.45, pp.2428-2436, 2011.

衛生掩埋場整治方式之探討

王和源¹ 江曉私² 林志忠³

¹ 國立高雄科技大學土木工程系特聘教授

² 國立高雄科技大學土木工程系研究生

³ 高雄醫學大學總務處營繕組技佐

摘要

臺灣地狹人稠寸土寸金，蓋垃圾掩埋場已幾乎不可能，且隨著人民環保意識抬頭，民眾都不願意與掩埋場為鄰的前提下，環保署提出「垃圾掩埋場挖除活化」政策，掩埋場透過移除活化方式，將早期未分類回收就掩埋之生活垃圾挖除，藉由篩分機械設備包含：人工撿拾輸送機、單層圓篩機(滾筒篩)、懸吊式磁選機及鼓風機(風選機)等篩分程序，將廢棄物依照特性重新分類、回收、再利用，以達到掩埋場的土地空間活化再利用。廢棄物開挖分選後分為四類：焚化處理類、區內回填類、再利用處理類及有害廢棄物處理類；整治後掩埋場土石類重金屬超過管制標準時，大部分都採取與客土混拌稀釋或將較高濃度之土石類採固化處理，由於混拌稀釋方式無法將重金屬去除，如用固化處理，因土石類數量龐大，固化處理費用價格昂貴。

本研究將探討土石類重金屬污染利用水洗或酸洗方式之可行性，以期能作為日後掩埋場整治之參考；土石類清洗工法顯示：以水洗方式，分為五個粒徑級距，砂類(粗、中、細、極細)總和佔 46.89%，坩黏土佔 53.11%，各粒徑物料之重金屬濃度，無論砂類或坩黏土，均呈現高濃度的銅(Cu)及鉻(Cr)，其中銅(Cu)濃度 829~3,661 mg/kg，鉻(Cr)濃度 958~1,692 mg/kg，篩分出的粗顆粒或細顆粒物料，重金屬濃度皆偏高，無法分離出富集重金屬細顆粒，而達成洗淨粗顆粒的目的。土石類以酸洗方式，各級粒料中的標的污染物銅(Cu)及鉻(Cr)濃度仍多高達 1,000mg/kg 以上，銅(Cu)的去除率介於-85~27%，而鉻(Cr)的去除率介於 5~20%，去除率負值顯示顆粒中重金屬均質性不佳。以清洗工法(水洗及酸洗)皆無法達成任何洗淨或減量的目的。

關鍵字：掩埋場移除活化、掩埋場整治、廢棄物篩選分類、水洗、酸洗

Study on Removal and Activation of Sanitary Landfill

Wang Her-Yung¹ Chiang Hsiao-Hsien² Lin Zhi-Zhong³

¹ Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Sciences and Technology

² Master Student, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Sciences and Technology

³ Technician, Construction and Maintenance Division, Office of General Affairs, Kaohsiung Medical University

ABSTRACT

Taiwan's narrow people have a lot of money covering a landfill is almost impossible and with the rise of people's environmental awareness under the premise that the people are not willing to be neighbors to the burial site The Environmental Protection Department puts forward the policy of "Excavation and Activation of Landfill Sites" The landfill excavates the domestic waste that was

buried in the early unsorted recycling method by removing the activation method the screening machinery includes: Manual picking conveyor、Single layer round screen (trommel screen)、Suspended magnetic separator and Blower (Wind Separator) Screening procedure Reclassify, recycle, and reuse waste according to its characteristics, After remediation, when heavy metals in the soil and rock of the burial site exceed the control standards, Most of them are mixed with foreign soil to dilute or solidify the higher concentration of soil and rock. Because the mixing and dilution method cannot remove heavy metals, if curing is used, the cost of curing is expensive due to the huge amount of soil and stone. This study will explore the feasibility of using water washing or pickling for heavy metal pollution in soil and rock. It is hoped that it can be used as a reference for the remediation of the landfill site in the future; The soil and stone cleaning method shows: It is divided into five particle sizes by washing method, The sum of sand (coarse, medium, fine, and very fine) accounts for 46.89%, Clay clay accounts for 53.11%, The concentration of heavy metals in various particle size materials, no matter sand or clay, presents high concentrations of copper (Cu) and chromium (Cr), Among them, the concentration of copper (Cu) is 829~3,661 mg/kg, and the concentration of chromium (Cr) is 958~1,692 mg/kg, The sieved coarse particles or fine particles have a high concentration of heavy metals, which makes it impossible to separate and concentrate fine particles of heavy metals, so as to achieve the purpose of cleaning the coarse particles. The soil and stone are pickled, and the target pollutant copper (Cu) and chromium (Cr) concentrations in the aggregates of all levels are still as high as 1,000 mg/kg or more. The removal rate of copper (Cu) is between -85~27%, and the removal rate of chromium (Cr) is between 5~20%. Negative removal rate indicates poor homogeneity of heavy metals in the particles. The cleaning method (water washing and pickling) can not achieve any cleaning or weight reduction purposes.

Keywords: landfill removal activation, landfill remediation, waste screening and classification, water wash, pickling

一、前言

民國 73 年以前臺灣早期尚未有焚化爐時，垃圾處理多以掩埋進行，全臺垃圾掩埋場共計 385 處，其中扣除封閉復育 204 處、封閉 79 處、停用 32 處、蓋好因民眾抗議未使用 2 處，僅 68 處尚在營運，營運中垃圾掩埋場剩餘可埋容積為 390 萬 8 千立方公尺，容量平均僅剩 11.20%，其中有 13 處掩埋場已飽和而無剩餘容量，詳圖 1 所示[1]，國內許多掩埋場因掩埋空間容量不足，多數選擇封閉復育，而封閉復育之掩埋場會對環境有潛在的污染與危害。環保署於 105 年核定辦理「提升天然災害廢棄物應變處理能量設施計畫」，預計在 110 年以前活化 6 個掩埋場，釋出 60 萬立方公尺之掩埋空間，並營造 6 處

性別友善職場環境，到 109 年為止已活化 32.7 萬立方公尺[1]，以期能解決掩埋場空間不足的迫切危機。

掩埋場活化目的，主要作為廢棄物最終處置場所，包括遇到焚化廠歲修時，暫置待焚化之廢棄物、焚化爐焚化後所產生之灰渣、倘若天然災害如地震及颱風等狀況發生時，堆置大量災後待處理廢棄物等；109 年 7 月止臺灣垃圾焚化廠共興建 26 座，其中有 2 座（雲林及台東）尚未運轉，24 座營運中垃圾焚化廠有 18 座超過使用年限 20 年，多數焚化廠廠齡偏高，全年設計總處理容量可達約 899 萬 7000 公噸。而最近這幾年所有營運中的焚化廠實際焚化處理量僅約 600 萬公噸，處理容量不如預期，110 年半數焚化廠陸續進入整備期，焚化處理能量下降，無法焚燒處

理的垃圾堆置總量達 100 萬公噸[1]。垃圾經焚化處理後，會產出 3~5% 之有害飛灰及 10~15% 的底渣，若未再利用，則會送至掩埋場進行最終掩埋[1]，各焚化廠每年平均約 3,340~77,700 公噸灰渣運至掩埋處理，近 10 年總計約有 657 萬公噸灰渣採掩埋作為最終處置，詳圖 2 所示[2]。臺灣位於地震帶且屬於海島型氣候，地震及颱風頻繁，日後若遇到天然災害，必定造成環境衝擊，為有效迅速恢復市容及進行災區重建，大量廢棄物必須有臨時性集中暫置場所，再逐步分類消化、再利用及處置，根據環保署災害管理資訊系統統計數據，自 92 年至 103 年災後清除之污泥與廢棄物總量高達約 46 萬公噸，莫拉克颱風災後廢棄物數量更高達 22 萬公噸[2]。

各縣市政府經評估選定需活化之掩埋場予以重新開挖，並進行篩選分類；將可燃性廢棄物送至焚化廠處理，資源回收物(金屬物、非金屬資源物)交給回收商進行回收處理，分解之腐植土予以回填再利用，有害重金屬類予以固化，達成廢棄物妥善清理之目標；完成活化後之掩埋場，除了降低環境污染的危害，多出來的掩埋空間，解決各縣市掩埋場空間不足之問題。

二、廢棄物整治處理方式

2.1 整治計畫及流程

政府推動辦理垃圾掩埋場移除再生活化，需經多方考量，仔細評估確認後，進行掩埋場場址評估、環境調查、計畫擬定、成本效益分析、掩埋場地形測量、掩埋場鑽探採樣、廢棄物填埋數量推估、掩埋場開挖、篩分前處理、廢棄物分類、土壤重金屬污染整治及移除整治後效益評估等。

2.2 衛生掩埋場鑽探資料

鑽探位置採平均分配方式，主要瞭解廢棄物填埋深度及廢棄物種類；依據掩埋層鑽探柱狀資料，地質鑽探剖面圖得知 G01~G03 基地表層(0~1m)大概以級配與砂石組成，往下(1~12m)大致上都以坩土及塑膠袋等廢棄物居多，G03(3~5m)除了有坩土及塑膠袋外，還有電線及廢木材等廢棄物，詳圖 3 所示。

2.3 整治作業流程

掩埋場開挖後，先以卡車搬運至分篩堆置場暫存，待進行篩選分類；因開挖之廢棄物比較潮濕，石塊與腐植土容易黏結，導致篩分效果不確實，建議翻曬一段時間後，待廢棄物較乾燥時再行分篩，分篩出來的廢棄物分離效果比較顯著；本研究機械篩分設備包含：振動下料斗、人工檢拾輸送機、單層圓篩機(滾筒篩)、懸吊式磁選機及鼓風機(風選機)等，採用機械再搭配人力進行既有掩埋廢棄物篩選分類工作，可有效於要求期限內完成各階段所需達成的目標，詳圖 4 所示。

2.4 整治後廢棄物離場管制

掩埋場挖除之廢棄物經過篩分依照特性及樣態分類後，依據廢棄物清理法規定將廢棄物回收清運，清理作業確實遵照廢棄物清理法、水污染防治法、空氣污染防制法及其他相關施行細則，確實遵行清運作業之環境管理及污染防治，以防止污染物逸散，降低二次污染發生，維護作業環境及人員可能遭受污染物之暴露風險危害。

2.5 掩埋場重金屬檢測方式

(1) 手持式 X 射線螢光分析儀 (Handheld X-ray Fluorescence)

XRF 是一種便宜快速且能達到檢測重金屬濃度之儀器，尤其是在執行污染整治工程時，能快速獲得整治成效，不至於延宕工程進度(依據法規標準方法分析時間約 1~2 星期)，因此更能凸顯 XRF 之優點。

XRF 的原理是用高能量 X 射線或伽瑪射線撞擊材料時激發出的次級 X 射線，常用於檢測土壤和底泥中八大重金屬元素濃度及事業廢棄物毒性溶出程序(TCLP)快篩[3]，詳圖 5 所示。

(2) 毒性特性溶出程序 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure)

依據環保署規定需於事業廢棄物掩埋之前，進行毒性特性溶出程序(TCLP)，檢測後確認不會危害環境狀態才能夠掩埋；毒性特性溶出程序配合「有害事業廢棄物認定標準」；

若事業廢棄物經總量分析顯示，其中不含待測物之濃度低於溶出標準，則不須操作本溶出程序。

2.6 廢棄物處理技術

廢棄物處理係指應用物理、化學及生物等方式處理，將廢棄物在自然循環之環境中，以迅速、有效且無害的自行分解，以達到廢棄物資源化、減量化、無害化、安定化之目標，然而也必須符合法令要求，做必要的減廢、回收、再利用。廢棄物處理技術可分為前置處理、中間處理及最終處理等三大類[4]。

2.7 有害重金屬廢棄物中間處理

(1) 有害事業廢棄物固化及穩定化

固化(Solidification)係指將有害廢棄物包匣起來，使有毒污染物轉化成無毒型態，不但方便運輸且不因風雨而擴散，固化的原理藉由固化劑的特性，使有害廢棄物形成緊密性、具有低滲透性及高抗壓強度之固體，是一種廣泛被使用之方法。穩定化法(Stabilization)係指利用化學劑或熱能，將土壤或廢棄物中之有害成分轉換成無害成分或降低其有害性之處理方法，固化與穩定化通常會一起使用，才能阻礙有害物質暴露於人體或環境中[5]。

(2) 固化及穩定化處理標準

固化及穩定化處理技術可應用於焚化廠飛灰、熔煉廠爐渣、廢水處理廠所排放的重金屬污泥、污水塘污染物、掩埋場污染物、受污染土壤、廢棄或棄置污染物等；目前所使用之固化劑大多以水泥或石灰為主，使用固化及穩定化法所需整治時間，需視有害物質種類與數量、污染面積大小與深度、地質狀況與土壤類型等，需要數週甚至數個月之久。國外固化處理已有多年研究，其技術分類可分為水泥為基礎、石灰為基礎、爐灰為基礎、石膏為基礎、可溶性矽酸鹽類為基礎、熱塑固化物及有機聚合物固化物為基礎等，國內已有多項整治實績，並廣泛運用於我國有害事業廢棄物處理上，影響固化及穩定化法的因素包括：重金屬濃度、有機物濃度、土壤顆

粒大小、土壤特性、密度、含水量、硫酸鹽濃度、滲透性等，受污染之土壤大致可分為兩種處理方法：(a) 現場固化處理：經由挖掘設備移除污染土壤後，依一般固化程序處理。(b) 現地固化處理：不經挖掘程序，直接於現地進行固化[5]。

三、廢棄物篩分後樣態及處置

3.1 廢棄物篩分後樣態

掩埋場開挖後，小搬運至篩分堆置場堆置，隨後進行分選作業，廢棄物分類為焚化處理類、區內回填類、再利用處理類及有害廢棄物處理類等四類，並依法規規定委託合格廢棄物清除處理機構，執行廢棄物再利用處理焚化及有害廢棄物清除處理作業，詳圖 6 所示。

1. 焚化處理類

篩分過程中透過人工檢拾平台及鼓風機(風選機)作業，產生大量焚化處理類廢棄物，主要為塑膠袋、不織布類及紙類，因數量龐大，如遇焚化廠歲修或整改時，此類廢棄物無法處理，為了能解決焚化類堆置的問題，本研究後續利用打包方式處理，打包完成的可燃性廢棄物運至暫存區堆疊貯存詳圖 7 所示；廢木材類運至焚化爐焚燒轉至為燃料，也可以將廢木材用破碎機粉碎後，做為植栽有機肥料等，以達到垃圾減量及廢棄物再利用之成效，詳圖 8 所示。

2. 區內回填類

利用單層圓篩機(滾筒篩)篩分出來之腐植土分為 0.5 cm 以下及 0.5 cm~2 cm 二種尺寸，詳圖 9 所示，腐植土為本研究後續作為掩埋場內回填土使用。

3. 再利用處理類

利用人工檢拾平台揀選後，置放於廢輪胎堆置區暫存，後續請輪胎回收廠商回收處理，目前廢棄輪胎有三種處理方式，分別是破碎、磨粉處理及熱裂解處理等方式，我國處理方式與日本及美國相同，都是以物理機械破碎方式處理，破碎後產生膠片及膠粉，可提供造紙業、水泥製造業使用或作為輔助

燃料或膠由熱裂解廠製成裂解油，整體資源化比例高達 98% 以上，詳圖 10 所示。廢鐵及廢五金經由懸吊式磁選機篩選出來，外觀夾雜著泥土及塑膠類雜物，因為回收後還需將附著在五金上的廢土處理乾淨，才能作後續處理，費時又費工，回收價值不高。

4. 有害廢棄物處理類

整治後石頭及磚塊數量非常龐大，經 XRF 檢測後，八大重金屬鉻(Cr)及銅(Cu)濃度偏高，水洗及酸洗方式效果有限且成效不大；廢電瓶、電池、電容器長時間埋在地底下，導致鏽蝕、破裂，也容易造成土壤及地下水污染，間接影響民眾身體健康，此類廢棄物必須妥善處置；本研究建議採固化方式處理，需經核准營運之有害事業廢棄物處理機構處置，根據環保署公告之「事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準」第四十八條規定，作為固化體最終處置評估判斷之方式，固化體穩定後，再做後續處置。

3.2 篩分後土石類暫置處理

篩分堆完成後委由實驗室現場取樣，事業廢棄物毒性特性溶出程序(TCLP)，檢測步驟說明如下：

- (1) 將暫置於篩分區之土石類以挖土機及卡車進行小搬運分堆。
- (2) 依行政院環境保護署環境檢驗所公告之土壤檢驗方法，針對土壤進行檢測。
- (3) 將檢測合格之土石類依指示地點回填或堆置。
- (4) 不合格之土石類運至指定地點暫置，再行處置。

3.3 土石類水洗及酸洗試驗

針對土石類進行事業廢棄物毒性特性溶出程序(TCLP)，檢測值發現，土石類重金屬濃度偏高，國內重金屬污染之土壤大都採取與客土混拌稀釋或固化處理，因混拌稀釋之方法並無法將重金屬有效去除，而固化處理價格昂貴，本研究採水洗及酸洗方式，探討能否降低土石類重金屬污染偏高之問題。

3.3.1 土石類清洗可行性：

(1) 土壤清洗原理及適用性

土壤表面或孔隙常附著帶負電之有機質，而帶正電之重金屬離子吸附於土壤之有機質上，重金屬污染之土壤若以粒徑大小分離，則會產生不同污染濃度，小顆粒土壤重量較輕，表面積較大顆粒土壤大，因此小顆粒土壤污染濃度較高，反之，大顆粒污染濃度較低[6]。本工法的原理為，基於污染物質通常傾向附著於土壤中的細顆粒(如坩土及黏土)，而不易附著於土壤中的粗顆粒(如礫石及砂)，故若將土壤中之粗、細顆粒分離，可回收粗顆粒，達到污染減量的目的。

土壤清洗工法是否是適用於污染土壤，取決於標的污染土壤之三大特性：

- (a) 第一適用原則(土壤中污染物混合狀態)：如污染物吸附於有機質或鍵結於礦物粒料中不易溶出而難以去除。
- (b) 第二適用原則(土壤粒徑分布)：一般而言，細顆粒須<30%，方有整體效益。
- (c) 第三適用原則(土壤比重)：土壤中雜質(如紙、木料、塑膠、玻璃、礦渣、腐植土等)比重會影響清洗粒徑篩分成效。

(2) 分類後土石物料粒徑分佈及特性

現場篩分完成的土石類物料，在實驗室進行人工以清水淘洗方法，淘洗完成後各粒料之外觀描述、重量百分比及重金屬濃度詳表 1 及圖 11 所示。本土石類物料中含有大量雜質，如紙、玻璃、木材、棉布、爐渣、塑膠、鋁製品等，詳圖 12 所示，其中粗雜料(>10mm)佔全體重量 10.26%，細雜料(1~10mm)佔全體重量 21.40%，且皆含有高濃度的重金屬，綜合以上，雜質佔土石類物料 31.66%，數量龐大且比重不一，不符合清洗工法的第三適用原則。篩除雜質後之砂土物料，可稱之為實際土石物料，可分為五個粒徑級距，其中砂類(粗、中、細、極細)合計佔 32.07%，而坩黏土佔 36.27%，將此類物料總量為分母，重新計算各粒徑分佈之百分比，其結果如表 2 所示，亦即砂類(粗、中、細、極細總和)佔 46.89%，而坩黏土佔 53.11%，此處高百分比的坩黏土，不符合清洗工法的第二適用原則。

另檢視各粒徑物料之重金屬濃度，無論砂類或粉黏土，均呈現高濃度的銅(Cu)及鉻(Cr)，其中銅(Cu)濃度 829~3,661 mg/kg，鉻(Cr)濃度 958~1,692 mg/kg，與一般污染土壤中污染物多富集於細顆粒，污染物濃度動輒上萬 mg/kg 之現象不同。基於此，本實際土石物料應屬含重金屬礦渣類，不符合清洗工法的第一適用原則。

(3) 水洗可行性實驗

以清水掏洗土石類物料及過篩，可視為水洗可行性實驗，其污染物分離作用與水洗工法原理一致，所產生的效果亦能互為佐證，故此處不重複此可行性實驗。無論篩分出的粗顆粒或細顆粒物料，重金屬濃度皆偏高，無法分離出富集重金屬細顆粒，而達成洗淨粗顆粒的目的。以水洗做粒徑篩分，一般可做為酸洗的前處理，若粗顆粒在水洗時即被洗淨，則毋須再做酸洗洗淨。

(4) 酸洗可行性實驗

土石類物料經水洗篩分後的不同粒徑顆粒，因重金屬濃度仍高，在此做更進一步的酸洗，將實際土石物料(砂類及粉黏土)依不同粒徑分別施行酸洗，以評估酸洗工法的成效。參考蘇紹璋等人[7]探討國內外土壤清洗法及參考他案實廠經驗，酸洗實驗採用的參數如下：

- (a) 土液比=1：6
- (b) 酸洗液：檸檬酸($C_6H_8O_7$, Citric Acid)，為三質子酸(H_3A)，0.1M $pK_1=3.1$ ， $pK_2=4.8$ ， $pK_3=6.4$
- (c) 反應時間：60 分鐘

本實驗原始檢測數值詳列於表 3 至表 5 所示，表中數值顯示，土石中的粗顆粒較不均質，檢測時易出現超高重金屬濃度。基於此，各級物料重金屬濃度皆檢測 5 次，經剔除最高及最低的數值，後剩餘 3 個數值的平均值登錄為該物料的濃度。各物料酸洗前後的重金屬濃度及去除率詳見表 6 所示，相關數據顯示，酸洗對本案土石物料中重金屬去除效果有限，酸洗後，各級粒料中的標的污

染物銅(Cu)及鉻(Cr)濃度仍多高達 1,000 mg/kg 以上，銅(Cu)的去除率介於-85~27%，而鉻(Cr)的去除率介於 5~20%，去除率負值顯示顆粒中重金屬均質性不佳。酸洗原液中僅含微量重金屬，酸洗後廢液中的重金屬濃度普遍提升，但仍低於 5 mg/L，詳見表 7 所示。以酸洗廢液中的重金屬濃度作質量平衡查核，經計算而得本酸洗實驗對標的污染物銅(Cu)及鉻(Cr)的去除率低於 5%，與土石檢測重金屬而得的去除率相比對，此去除率可信度高，但如此表現遠遠不符本研究需求(銅 <400 mg/kg，鉻 <250mg/kg)。本案之土石類物料含有大量有機雜質、粉黏土含量高且重金屬為礦物鍵結，理論上無法符合任何土壤清洗工法的適用條件。今進行清洗實驗，經實驗證明，清洗工法(水洗+酸洗)去除土石中標的污染物銅(Cu)及鉻(Cr)濃度不及 5%，無法達到任何洗淨或減量的目的。

3.4 掩埋場整治後效益

「掩埋場移除再生活化」為垃圾掩埋場移除後土地再生活化，可作為掩埋(或暫存)以外之其他土地利用，由於作為土地利用型式相當多，且依掩埋場條件及各縣市發展考量之不同而不一致，故列舉提供七種可能選用土地利用型式：(a)休閒遊憩用地。(b)交通設施用地。(c)環保生態教育用地。(d)文化藝術用地。(e)非食用性農業用地。(f)建築用地。(g)環保生態園區用地[8]。

四、結論

1. 廢棄物經移除整治後樣態分為：焚化處理類-大部分為塑膠袋、不織布、紙屑及廢木材等，所佔比例約為 6%；區內回填類-主要為腐植土，所佔比例約為 47%，是所有廢棄物處置後所佔比例最多；再利用處理類-主要為廢輪胎及廢鐵、廢五金等物質，所佔比例約為 3%；有害廢棄物處理類-主要為石頭、磚塊及廢電瓶、廢電池、廢電容器等物質，所佔比例約為 44%，掩埋場整治後掩埋容量多出約 53%的使用空間。
2. 土石類物料含有為數不少之有害事業廢

- 棄物，經水洗及酸洗試驗結果，各級粒料中的標的污染物銅(Cu)及鉻(Cr)濃度仍高達 1,000 mg/kg 以上，銅(Cu)的去除率介於-85~27%，而鉻(Cr)的去除率介於 5~20%，去除率負值顯示顆粒中重金屬均質性不佳，以清洗工法不管水洗或酸洗皆無法達到任何洗淨或減量之目的。
3. 垃圾掩埋場移除後，土地再生活化作為掩埋(或暫存)以外之其他土地利用，由於作為土地利用型式相當多，且依掩埋場條件及各縣市發展考量之不同而不一致。各縣市政府可依需求而決定，並依據環境影響評估後，做為日後土地再生利用之參考。
 3. 劉泰銘，「攜帶式 X-射線螢光偵測器篩測受污染土壤之應用」，瑞昶科技股份有限公司。
 4. 網站：廢棄物處理及回收設備概述 <http://www.ecod.com.tw>。
 5. 李公哲、施堅仁、林永珍、陳俐婷等 5 人，「廢棄物低固化材料固化處理技術研究計畫」國立台灣大學環境工程學研究所，2001。
 6. 網站：土壤重金屬污染處理，台和工程顧問股份有限公司，<https://www.taihe.com.tw/service3.htm>。
 7. 陳尊賢、蘇紹璋。2008。土壤清洗法整治重金屬污染土壤國內外最新研究與整治案例之回顧。
 8. 行政院環境保護署，垃圾處理政策評估說明書【第 II 部分】垃圾掩埋場挖除再生活化，2012。

參考文獻

1. 行政院環境保護署，「行政院環境保護署及所屬 108 年度預算評估報告」，2019。
2. 行政院環境保護署，「提升天然災害廢棄

表 1 分類後土石類物料粒徑分佈及重金屬濃度¹⁾

名稱 ²⁾	粒徑 ³⁾ (mm)	網目	重量 (g)	重量 百分比 %	重金屬檢測值 (mg/kg) ⁴⁾							
					As ⁵⁾	Pb ⁵⁾	Cu ⁵⁾	Cd ⁵⁾	Zn ⁵⁾	Cr ⁵⁾	Hg ⁵⁾	Ni ⁵⁾
土壤污染管制標準： ⁶⁾					60 ⁵⁾	2,000 ⁵⁾	400 ⁵⁾	20 ⁵⁾	2,000 ⁵⁾	250 ⁵⁾	20 ⁵⁾	200 ⁵⁾
粗雜料(註 1) ⁷⁾	>10 ³⁾	... ⁸⁾	205.2 ⁹⁾	10.26 ⁹⁾	46 ⁵⁾	365 ⁵⁾	1,708 ⁵⁾	9 ⁵⁾	1,703 ⁵⁾	1,416 ⁵⁾	<3.4 ⁵⁾	235 ⁵⁾
細雜料(註 2) ⁷⁾	1.0~10 ³⁾	#18 ⁸⁾	427.9 ⁹⁾	21.40 ⁹⁾	27 ⁵⁾	216 ⁵⁾	3,063 ⁵⁾	<7 ⁵⁾	1,290 ⁵⁾	1,271 ⁵⁾	<2.8 ⁵⁾	174 ⁵⁾
粗砂(註 3) ⁷⁾	0.5~1.0 ³⁾	#35 ⁸⁾	128.9 ⁹⁾	6.45 ⁹⁾	23 ⁵⁾	453 ⁵⁾	1,548 ⁵⁾	<8 ⁵⁾	1,821 ⁵⁾	1,692 ⁵⁾	<3.5 ⁵⁾	199 ⁵⁾
中砂 ⁷⁾	0.25~0.5 ³⁾	#60 ⁸⁾	132.9 ⁹⁾	6.65 ⁹⁾	<10 ⁵⁾	405 ⁵⁾	3,661 ⁵⁾	<8 ⁵⁾	2,716 ⁵⁾	1,658 ⁵⁾	<3.8 ⁵⁾	193 ⁵⁾
細砂 ⁷⁾	0.125~0.25 ³⁾	#100 ⁸⁾	106.7 ⁹⁾	5.34 ⁹⁾	<9 ⁵⁾	382 ⁵⁾	1,983 ⁵⁾	<7 ⁵⁾	1,227 ⁵⁾	1,368 ⁵⁾	<3.4 ⁵⁾	177 ⁵⁾
極細砂 ⁷⁾	0.062~0.125 ³⁾	#230 ⁸⁾	272.5 ⁹⁾	13.63 ⁹⁾	<8 ⁵⁾	244 ⁵⁾	829 ⁵⁾	<8 ⁵⁾	998 ⁵⁾	958 ⁵⁾	<3.2 ⁵⁾	162 ⁵⁾
坩粘土 ⁷⁾	0.0007~0.062 ³⁾	0.7 μm 濾紙 ⁸⁾	725.9 ⁹⁾	36.27 ⁹⁾	18 ⁵⁾	336 ⁵⁾	943 ⁵⁾	<9 ⁵⁾	1,384 ⁵⁾	1,411 ⁵⁾	<3.5 ⁵⁾	207 ⁵⁾
... ⁷⁾	... ³⁾	總計： ⁸⁾	2,000.0 ⁹⁾	100.00 ⁹⁾	... ⁵⁾	... ⁵⁾	... ⁵⁾	... ⁵⁾	... ⁵⁾	... ⁵⁾	... ⁵⁾	... ⁵⁾

一、特性描述：¹⁾

註 1 粗雜料：內含玻璃、木材、塑膠袋、塑膠製品、包裝袋、綿布、石塊、磚塊、液晶面板、紙、鋁製品、爐石等。²⁾

註 2 細雜料：內含玻璃、木材、塑膠袋、塑膠繩、包裝袋、綿布、極粗砂、磚塊、液晶面板、貝類、紙、鋁製品、爐石等。³⁾

註 3 粗砂中：內含棉絮等。⁴⁾

二、說明：⁵⁾

1、烘乾後粗雜料有機物：28.8%，非有機物：61.2%。⁶⁾

2、烘乾後細雜料有機物：33.0%，非有機物：67.0%。⁷⁾

3、濕式篩分廢水水質：pH 8.0、導電度 2,780 μs/cm、As-ND、Pb<0.2、Cu 0.642、Cd<0.2、Zn 0.398、Cr<0.2、Hg-ND、Ni<0.2(重金屬單位 mg/L)。⁸⁾

4、每個樣品以 XRF 檢測五次，將最高及最低濃度刪除後，其餘三次取平均值。⁹⁾

5、陰影數值表示超過土壤污染管制標準。¹⁰⁾

三、檢測方法：參考攜帶式 X-射線螢光光譜儀分析法(XRF)，NIE4-S322.60C。¹¹⁾

表 2- 實際土石類物料粒徑分佈

名稱	粒徑 (mm)	網目	重量(g)	重量百分比%
粗砂	0.5~1.0	#35	128.9	9.43
中砂	0.25~0.5	#60	132.9	9.72
細砂	0.125~0.25	#100	106.7	7.81
極細砂	0.062~0.125	#230	272.5	19.93
粉黏土	0.0007~0.062	0.7 μ m 濾紙	725.9	53.11
總計			1,366.9	100.00

表 3- 實際土石類物料酸洗前後重金屬濃度檢測數值 (1/3)

名稱	粒徑 (mm)	網目	對照	次數	重金屬檢測值 (mg/kg)							
					As	Pb	Cu	Cd	Zn	Cr	Hg	Ni
土壤污染管制標準：					60	2,000	400	20	2,000	250	20	200
粗砂	0.5~1.0	#35	酸洗前	1	38	433	1,982	<8	1,355	2,774	<3.3	223
				2	15	347	7,457	<8	2,646	1,525	<3.6	262
				3	13	580	1,145	<8	1,267	1,695	<3.5	183
				4	39	729	1,035	<8	2,961	1,432	<3.8	163
				5	16	271	1,518	9	1,463	1,855	<3.5	191
				平均值	23	453	1,548	<8	1,821	1,692	<3.5	199
			酸洗後	1	<9	397	1,727	<8	1,163	1,287	<3.7	789
				2	17	513	1,623	<7	1,288	1,844	<3.5	186
				3	<9	409	3,068	9	1,761	581	<3.7	204
				4	19	639	3,808	<8	2,296	1,672	<4.0	183
				5	36	433	3,808	<8	3,647	1,975	<4.1	184
平均值	15	452	2,868	<8	1,782	1,601	<3.7	191				
中砂	0.25~0.5	#60	酸洗前	1	<10	405	3,695	<8	2,717	1,675	<3.8	191
				2	<10	402	3,647	<8	2,706	1,630	<3.8	186
				3	10	407	3,681	<8	2,754	1,639	<3.8	198
				4	<10	404	3,604	<8	2,725	1,679	<3.7	199
				5	13	405	3,655	<7	2,700	1,661	<3.9	189
				平均值	<10	405	3,661	<8	2,716	1,658	<3.8	193
			酸洗後	1	<12	632	1,784	<8	1,245	1,556	<4.3	215
				2	<11	533	2,978	<8	1,134	1,535	5.6	231
				3	<10	505	2,349	<8	2,330	1,544	<4.0	181
				4	<10	475	3,508	<8	1,270	1,571	<4.0	192
				5	<10	441	2,738	<7	1,313	1,535	<3.9	215
				平均值	<10	504	2,688	<8	1,276	1,545	<4.0	207

表 4 實際土石類物料酸洗前後重金屬濃度檢測數值-續(2/3)

名稱	粒徑 (mm)	網目	對照	次數	重金屬檢測值 (mg/kg)										
					As	Pb	Cu	Cd	Zn	Cr	Hg	Ni			
土壤污染管制標準：					60	2,000	400	20	2,000	250	20	200			
細砂	0.125~0.25	#100	酸洗前	1	<9	381	1,985	<7	1,228	1,381	<3.4	182			
				2	<9	381	1,963	<7	1,222	1,386	<3.4	182			
				3	<9	383	1,980	<7	1,234	1,329	<3.4	169			
				4	<9	383	1,990	<7	1,224	1,369	<3.4	175			
				5	<9	387	1,983	<7	1,230	1,353	<3.4	175			
				平均值	<9	382	1,983	<7	1,227	1,368	<3.4	177			
			酸洗後	1	<9	367	1,471	<7	1,255	1,415	<3.6	189			
				2	<9	399	1,621	<7	923	1,308	<3.1	171			
				3	<8	336	2,074	<7	773	1,118	<3.2	198			
				4	<9	384	1,883	<7	1,109	1,120	<3.2	183			
				5	<8	337	1,747	<7	979	1,224	<3.1	191			
				平均值	<9	363	1,750	<7	1,004	1,172	<3.2	188			
			極細砂	0.062~0.125	#230	酸洗前	1	8	240	888	<8	1,056	1,031	<3.2	152
							2	<8	251	843	<8	1,045	976	<3.3	176
3	<8	263					867	<8	961	866	<3.4	159			
4	<8	241					707	<8	974	887	<3.1	181			
5	<8	233					776	<8	974	1,010	<3.2	149			
平均值	<8	244					829	<8	998	958	<3.2	162			
酸洗後	1	<8				253	1,031	<8	689	758	<3.0	130			
	2	<9				304	809	<8	555	751	<3.0	127			
	3	<8				282	1,081	<8	631	804	<3.1	159			
	4	<8				331	983	<8	662	792	<3.0	139			
	5	<9				292	1,122	<8	701	692	<3.0	122			
	平均值	<8				293	1,032	<8	661	767	<3.0	132			

表 5 實際土石類物料酸洗前後重金屬濃度檢測數值-續(3/3)

名稱	粒徑 (mm)	網目	對照	次數	重金屬檢測值 (mg/kg)							
					As	Pb	Cu	Cd	Zn	Cr	Hg	Ni
土壤污染管制標準：					60	2,000	400	20	2,000	250	20	200
粉黏土	0.0007~0.062	0.7 μ m 濾紙	酸洗前	1	<10	333	955	10	1,368	1,425	<3.4	202
				2	22	346	1,016	<9	1,444	1,500	<3.6	210
				3	23	324	927	<9	1,365	1,382	<3.4	196
				4	20	328	934	<9	1,394	1,367	<3.5	209
				5	12	335	939	<9	1,390	1,426	<3.5	210
				平均值	18	336	943	<9	1,384	1,411	<3.5	207
			酸洗後	1	12	323	969	<9	919	1,420	<3.5	194
				2	15	336	992	<9	889	1,297	<3.3	192
				3	16	315	963	<9	877	1,297	<3.2	167
				4	16	324	941	<9	874	1,314	<3.3	173
				5	15	321	994	<9	895	1,373	<3.4	183
				平均值	15	323	975	<9	887	1,328	<3.3	183

說明：

- 一、每個樣品以 XRF 檢測五次，將最高及最低濃度刪除後，其餘三次取平均值。
- 二、陰影數值表示超過土壤污染管制標準。
- 三、檢測方法；參考攜帶式 X-射線螢光光譜儀分析法(XRF)，NIEA-S322.60C。

表 6 實際土石類物料酸洗前後重金屬濃度去除率

名稱	粒徑 (mm)	網目	對照	重金屬檢測值 (mg/kg)							
				As	Pb	Cu	Cd	Zn	Cr	Hg	Ni
土壤污染管制標準：				60	2,000	400	20	2,000	250	20	200
粗砂	0.5~1.0	#35	酸洗前	23	453	1,548	<8	1,821	1,692	<3.5	199
			酸洗後	15	452	2,868	<8	1,782	1,601	<3.7	191
			去除率	35%	0%	-85%	0%	2%	5%	0%	4%
中砂	0.25~0.5	#60	酸洗前	<10	405	3,661	<8	2,716	1,658	<3.8	193
			酸洗後	<10	504	2,688	<8	1,276	1,545	<4.0	207
			去除率	0%	-24%	27%	0%	53%	7%	0%	-7%
細砂	0.125~0.25	#100	酸洗前	<9	382	1,983	<7	1,227	1,368	<3.4	177
			酸洗後	<9	363	1,750	<7	1,004	1,172	<3.2	188
			去除率	0%	5%	12%	0%	18%	14%	0%	-6%
極細砂	0.062~0.125	#230	酸洗前	<8	244	829	<8	998	958	<3.2	162
			酸洗後	<8	293	1,032	<8	661	767	<3.0	132
			去除率	0%	-20%	-24%	0%	34%	20%	0%	19%
坩黏土	0.0007~0.062	0.7 μ m 濾紙	酸洗前	18	336	943	<9	1,384	1,411	<3.5	207
			酸洗後	15	323	975	<9	887	1,328	<3.3	183
			去除率	0%	4%	-3%	0%	36%	6%	0%	12%

說明：一、酸洗液為檸檬酸 0.1M。

二、砂土：酸洗液=1：6 (W/W)。

三、攪拌機以轉速 200rpm 攪拌 60min。

四、陰影數值表示超過土壤污染管制標準。

五、檢測方法；參考攜帶式 X-射線螢光光譜儀分析法(XRF)，NIEA-S322.60C。

表 7 實際土石類物料酸洗原液及廢液重金屬濃度變化

名稱	pH	導電度 μ s/cm	重金屬檢測值 (mg/L)							
			As	Pb	Cu	Cd	Zn	Cr	Hg	Ni
酸洗原液	2.2	2,690	ND	0.084	ND	ND	0.134	ND	ND	ND
粗砂酸洗廢液	4.2	4,340	ND	4.26	1.80	0.092	84.8	3.57	0.0010	1.94
中砂酸洗廢液	4.3	4,390	ND	3.42	2.27	0.116	98.0	4.50	0.0012	2.24
細砂酸洗廢液	3.9	4,340	ND	3.09	1.84	0.092	76.4	4.58	0.0011	1.84
極細砂酸洗廢液	3.3	4,080	ND	3.60	2.23	0.106	66.0	3.94	0.0009	1.85
坩黏土酸洗廢液	3.8	4,300	ND	3.52	0.256	0.166	86.4	6.14	0.0001	2.77
ND.=MDL			0.015	0.008	0.008	0.009	0.008	0.004	0.00008	0.003

說明：檢測方法如下：

一、水之氫離子濃度指數 (pH 值) 測定方法—電極法 NIEA-W424.53A。

二、水中導電度測定方法—導電度計法 NIEA-W203.51B。

三、水中金屬及微量元素檢測方法—感應耦合電漿原子發射光譜法 NIEA-W311.54C。

四、水中汞檢測方法—冷蒸氣原子吸收光譜法 NIEA-W330.52A。

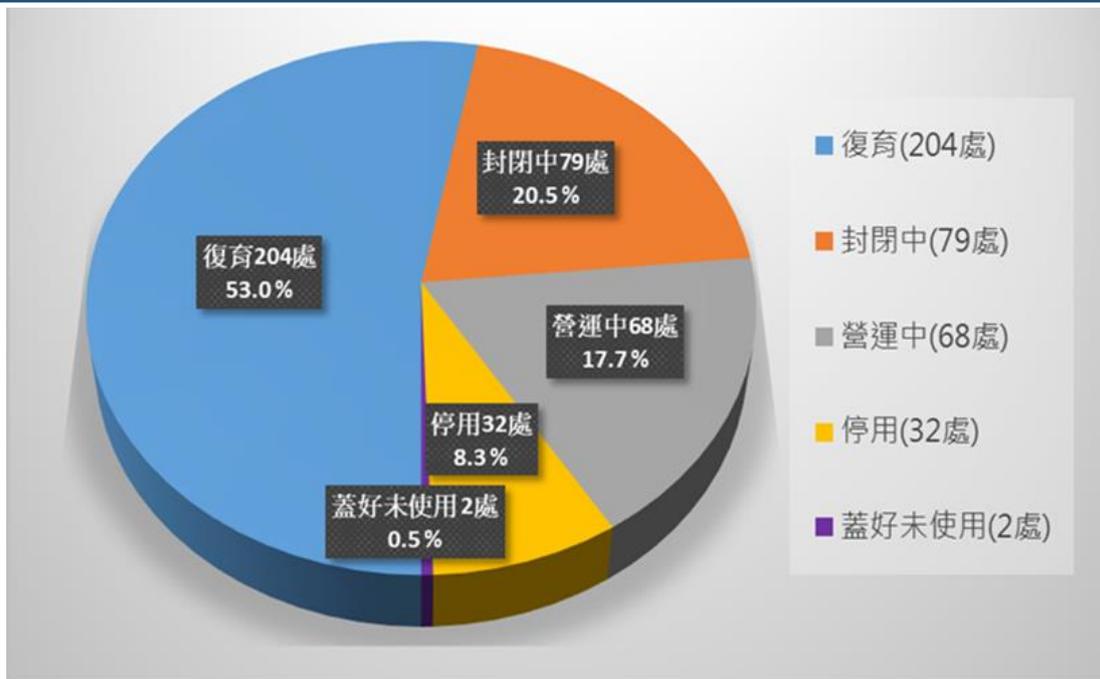


圖 1 109 年掩埋場現況統計圖 [1]

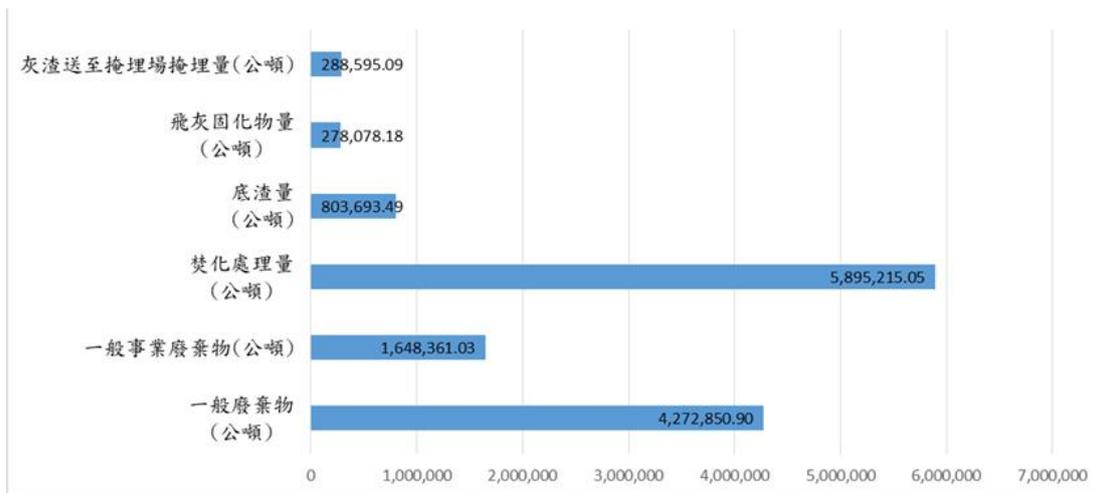


圖 2 109 年焚化廠營運年報 [2] 單位：公噸

鑽孔點編號	G01		G02		G03	
	組成	柱狀圖	組成	柱狀圖	組成	柱狀圖
取樣深度 (m)						
0-1	級配、砂石		級配、砂石		級配、砂石	
1-2	坩土		坩土、塑膠袋		坩土、塑膠袋	
2-3	坩土、塑膠袋		塑膠袋		坩土、塑膠袋	
3-4	坩土、塑膠袋		坩土、塑膠袋		坩土、塑膠袋、電線、木屑	
4-5	坩土、塑膠袋		坩土、塑膠袋		坩土、塑膠袋、電線、木屑	
5-6	坩土、塑膠袋		坩土、塑膠袋		坩土、塑膠袋	
6-7	坩土、塑膠袋		坩土、塑膠袋		坩土、塑膠袋	
7-8	坩土、塑膠袋		坩土、塑膠袋		坩土、塑膠袋	
8-9	坩土、塑膠袋		坩土、塑膠袋		坩土、塑膠袋	
9-10	坩土、塑膠袋		坩土、塑膠袋		坩土、塑膠袋	
10-11	坩土、塑膠袋		坩土、塑膠袋		坩土、塑膠袋	
11-12	坩土、塑膠袋		坩土、塑膠袋		坩土、塑膠袋	

圖例：
 廢棄物
 廢棄物與土壤混合物(含土量50%以上)

圖 3 掩埋層鑽探採樣廢棄物組成柱狀圖

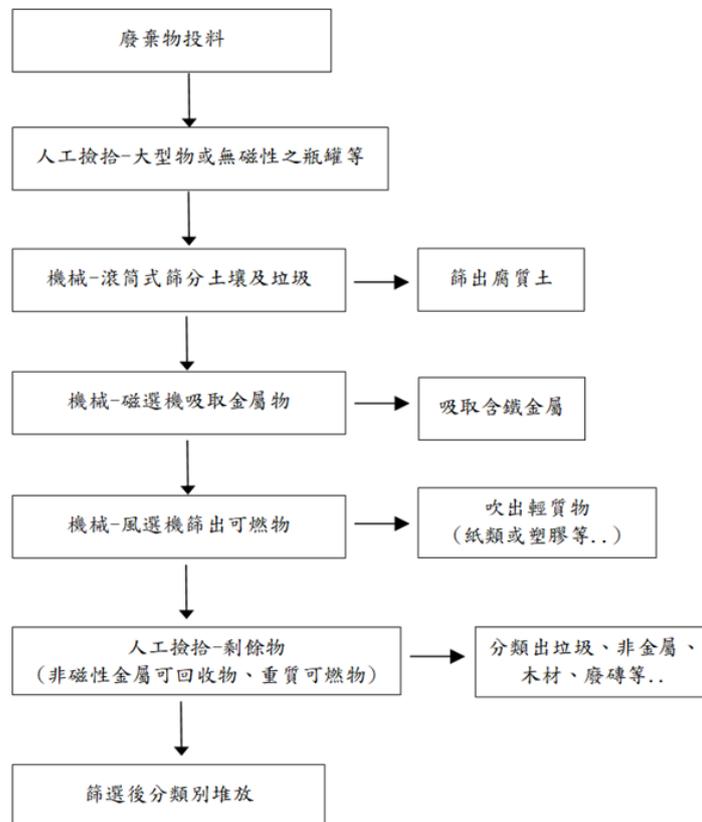


圖 4 篩分作業流程圖



圖 5 手持式 X 射線螢光分析儀(XRF) [3]

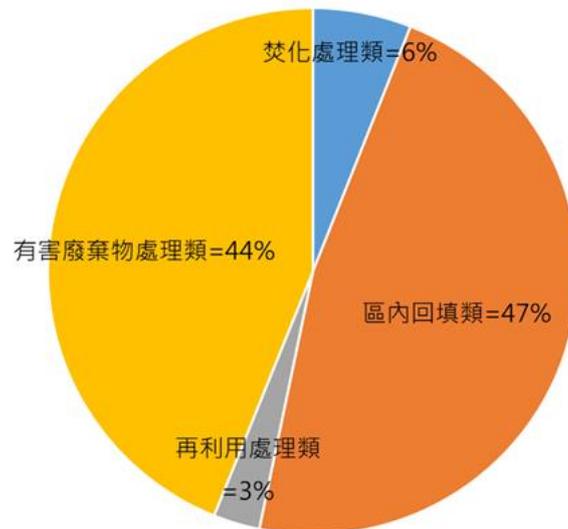


圖 6 廢棄物篩分後樣態分類統計圖

	
<p>焚化類 (一)</p>	<p>焚化類 (二)</p>
	
<p>廢棄物打包機</p>	<p>廢棄物打包</p>
	
<p>焚化類打包完成</p>	<p>打包完成離場</p>

圖 7 篩分後焚化類照片及焚化類打包後離場照片

	
<p>廢木材</p>	<p>絞碎後廢木材</p>

圖 8 篩分後廢木材照片

	
<p>腐植土(一) (< 0.5cm)</p>	<p>腐植土(一) (< 0.5cm)</p>
	
<p>腐植土(二) (0.5cm~2 cm)</p>	<p>腐植土(二) (0.5cm~2 cm)</p>

圖 9 篩分後腐植土照片

	
<p>廢輪胎</p>	<p>廢輪胎粉碎後膠粉</p>

圖 10 篩分後廢輪胎照片

	
粗砂 0.5~1.0mm (註 3)	中砂 0.25~0.5mm
	
細砂 0.125~0.25mm	極細砂 0.062~0.125mm
	
坩黏土 0.0007~0.062mm	...

圖 11 水洗後砂土類不同粒徑照片

	
粗雜料 >10mm (註 1)	細雜料 1.0~10mm (註 2)

圖 12 水洗後砂土類雜質照片

燃燒拜香特徵之研究

杜宜潔¹ 顏有利² 莊慶芳³ 彭祥瑞¹ 何昱達¹

¹ 國立聯合大學環境與安全衛生工程學系學生

² 國立聯合大學環境與安全衛生工程學系副教授

³ 國立聯合大學環境與安全衛生工程學系講師

摘要

燃燒拜香為台灣空氣污染的主要污染來源之一，特別在一些宗教民俗節慶的舉行期間及香火鼎盛的廟宇室內與周界環境，本實驗在密閉烘箱內燃燒拜香，採集產生之氣體以 GC/MS 分析其所含之揮發性有機物之感度及種類，並探討燃燒拜香排放之揮發性有機物(VOCs)的特性、及人體健康風險評估。

關鍵字：揮發性有機物、GC/MS

Characteristics of Incense Burning

Du, I-Chieh¹ Yan, Yeou-Lih² Juang, Chin-Fang³ Peng, Hsiang-Wei¹ He, Yu-Da¹

¹ Department of Safety Health and Environmental Engineering, National United University

² Department of Safety Health and Environmental Engineering, National United University

³ Department of Safety Health and Environmental Engineering, National United University

ABSTRACT

Burning incense is one of the main sources of air pollution in Taiwan, especially during the holding festivals and the indoor, perimeter environment of temples where incense is flourishing. In this experiment, incense was burned in a closed oven, then collected generated gas and use GC/MS to analysis the sensitivity and types of volatile organic compounds contained in it, and explores the characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted by burning incense and human health risk assessment.

Keywords: VOCs, GC/MS

壹、前言

台灣民間的宗教中，人數最多者為道教、佛教二教，為台灣地區最為普遍的民間信仰。根據內政部統計，全台約有 1.2 萬間宗教寺廟，平均每個村里約有 1.5 座寺廟，寺廟座落在都會地區，燃燒拜香的煙塵廢氣可能會對附近居民造成直接的影響。若無良好的通風、溫度及擴散不佳的條件下，燃燒拜香由於燃燒不完全，進而產生一氧化碳、懸浮微粒、臭

味、落塵、重金屬及致癌物質，對民眾的健康危害不容忽視，如今香支依照不同的文化和場合，香支的種類、尺寸、味道也有所不同，藉本實驗來分析香裡所含之揮發性有機化合物(VOCs)，是否符合工業局的標準、是否會影響人體的健康，又或是長期吸入的量會導致人體產生什麼影響，甚至是去思考如何改變成分來減少對人體的風險。

貳、實驗設備與方法

一、實驗流程

本研究流程分為五階段，第一階段先進行樣品前處理；第二階段，將烘箱擦拭乾淨及通風，降低背景干擾以減少誤差；第三階段燃燒樣品；第四階段採樣，將冷卻後的氣體經採樣箱進入採樣袋中，第五階段，將採集後的氣體經由雙管柱氣相層析質譜儀(GC-MS)來進行分析，了解拜香燃燒後的特徵污染物與其濃度。

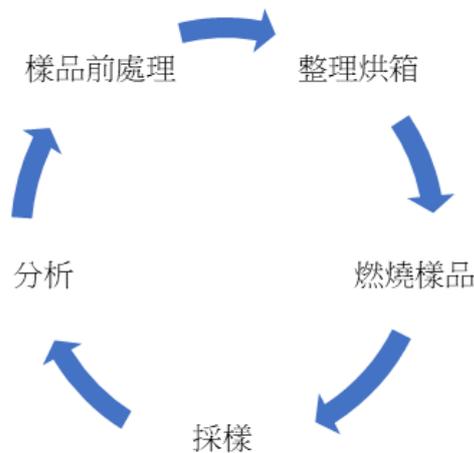


圖 1、流程圖

二、實驗設備及材料

1. 氣相層析/質譜儀 (Aglient GC6890/5973 Network MSD)
2. 前濃縮設備 (Entech 7100, 吉偉儀器股份有限公司代理)

3. 採樣袋清洗設備 (Entech 3100)
4. 烘箱 (長 0.6 m*寬 0.6 m*深 0.8 m)
5. 恆溫恆濕箱(長 0.6 m*寬 0.6 m*深 0.6 m)
6. 5 公升採樣袋 (SKC)
7. 分析篩(NO.10、50、70)
8. 沉檀香
9. 無灰濾紙 (70 mm)
10. 採樣箱
11. 溫溼度計
12. 天平(精準度 0.01 g)
13. 氮氣(純度 99.999%以上；儀器用氣體)
14. 液態氮(冷凍捕集劑)

三、樣品前處理

1. 將市售的香支磨成粉狀。
2. 香粉過篩取粒徑 0.2 mm~2 mm。
3. 恆溫恆濕 24 hr (濕度 65±2%、溫度 25±2 °C)。
4. 秤重 0.5 g、1 g、2 g。

四、實驗步驟

1. 通風、擦拭烘箱(擦兩次以上)和放入滑輪車(放置酒精燈)。
2. 將樣品放置架上放入烘箱以酒精燈燃燒。
3. 燃燒樣品 60 秒(0.5 g)、90 秒(1g)、130 秒(2 g)。
4. 待氣體均勻混和及冷卻(1 分鐘)。
5. 將採樣管伸入烘箱內採樣(至八分滿)。
6. 採樣後通風換氣(10 分鐘以上)。

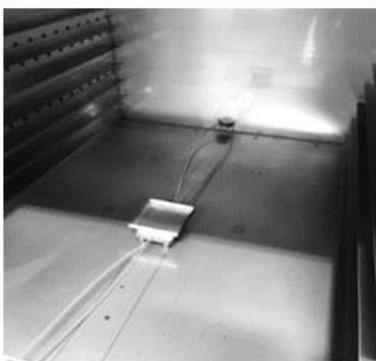


圖 2、放入滑輪車

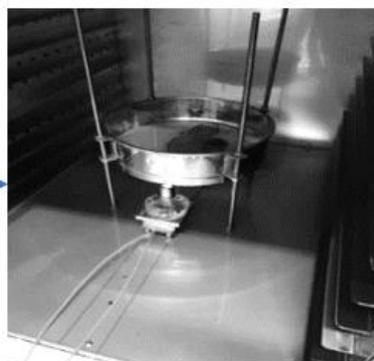


圖 3、放入酒精燈和樣品架

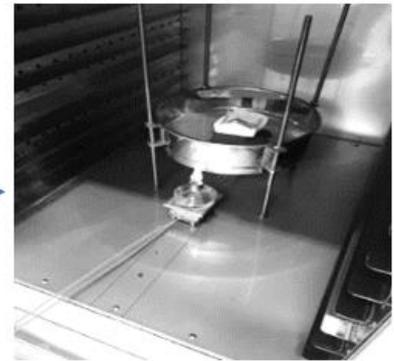


圖 4、放入樣品

五、樣品分析

cc)

1.以氣相層析/質譜儀分析所含 VOCs (採 100

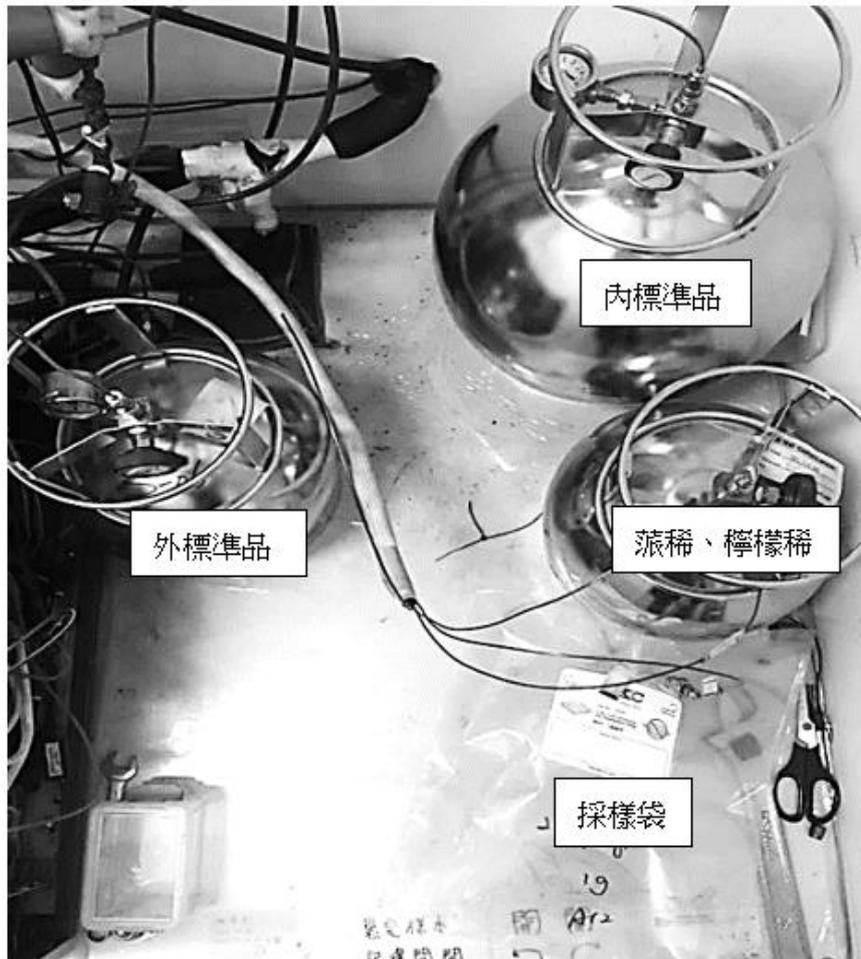


圖 5、樣品進入熱脫附冷卻裝置(Entech 7100A)

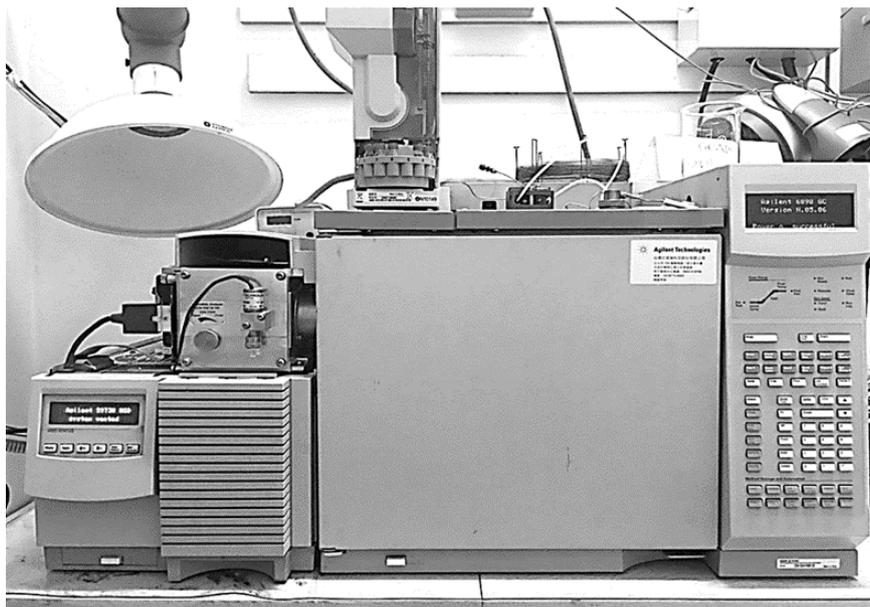


圖 6、樣品經 column(BD-624)進入 GC-MS

參、結果與討論

一、燃燒拜香產生之揮發性有機物與工業局訂定之標準比較

內外校正計算如下：

$$(1) \text{ 外部校正濃度} = \frac{\text{原始感度} \times \text{校正係數} \times 10}{\text{檢量線感度}},$$

$$(2) \text{ 校正係數} = \frac{\text{檢量線感度}}{\text{原始感度}},$$

$$(3) \text{ 感度比} = \frac{\text{內標感度}}{\text{內標檢量線感度}},$$

$$(4) \text{ 內校正係數} = \frac{\text{內插係數}}{\text{感度比}},$$

$$(5) \text{ 最終濃度} = \text{外部校正濃度} \times \text{內部校正係數}$$

表 1、校正後所得濃度(ppb)

物質	重量(克)					
	0.5	0.5	1.0	1.0	2.0	2.0
	第一次	第二次	第一次	第二次	第一次	第二次
Benzene	255.25	171.97	332.70	301.52	558.38	528.79
Toluene	107.73	104.66	200.63	172.69	267.11	224.46
(m,p)-Xylene	27.41	25.899	38.04	32.07	53.42	38.59
O-Xylene	20.45	20.37	25.54	20.33	33.11	24.77

表 2、CNS15047 所訂定之(*標準標準體積 1 m³ 香重量 3 g)

CNS15047 標準	物質	品質要求
	苯 (Benzene)	0.20 ppm 以下
	甲苯 (Toluene)	0.35 ppm 以下
	二甲苯 (Xylene)	1.00 ppm 以下
	二氯苯 (Dichlorobenzene)	0.20 ppm 以下

表 3、本實驗所使用之烘箱體積和重量

實驗	烘箱體積	0.288 m ³
	香重量	0.5 g
		1.0 g
		2.0 g

將校正後之濃度乘上本實驗之烘箱體積和依照不同香的克數換算成符合 CNS15047 所訂之標準。

例如：0.5 g 第一次的苯校正濃度為 255.25 ppb，烘箱體積為 0.288 m³、0.5 g 換算成 3 g 要乘上 6，255.25 ppb×6×0.288 m³=

441.08 ppb，0.5 g 第二次的苯校正濃度為 171.79 ppb，171.79 ppb×6×0.288 m³=297.16 ppb，兩次平均 (441.08+297.16)/2 = 369.12 ppb。

表 4、換算後平均所得濃度(ppb)

物質		重量(克)			平均濃度(ppb)
		0.5	1.0	2.0	
Benzene	65	369.12	273.98	234.83	292.64
Toluene	81	183.50	161.27	106.18	150.32
(m,p)-Xylene	92	46.05	30.28	19.87	32.07
O-Xylene	93	35.27	19.82	12.50	22.53

換算後平均所得濃度和 CNS15047 比較發現只有苯濃度大於規定之濃度。

假設在一大氣壓 25°C 密閉空間中，假設一般家中佛堂空間大約 37 m³，ppm × M/24.45 = mg/m³ (M:分子量)。本實驗香支重為 1.6 g，分為粉 1 g (62.5%)，其餘 0.6 g (37.5%)。以苯為例，假設一次燃燒 12 支香約為 12g 粉，依實驗結果知 3g 樣品苯平均濃度為 292.64 ppb，即 3 g 為 292.64 × 10⁻³ × 78/24.45 = 0.9335 mg/m³，而 12 g 為 0.9335 mg/m³ × 4 = 3.7343 mg/m³，假設空間為 37 m³，此空間有 138.1691 mg 苯，即 3.7343 × 24.45/78 = 1.17 ppm。而苯在 50~150 ppm 時會產生頭痛和疲倦、刺激鼻子和喉嚨，數據顯示在 37 m³ 空間內燃燒 12 支香對人體無顯著影響。

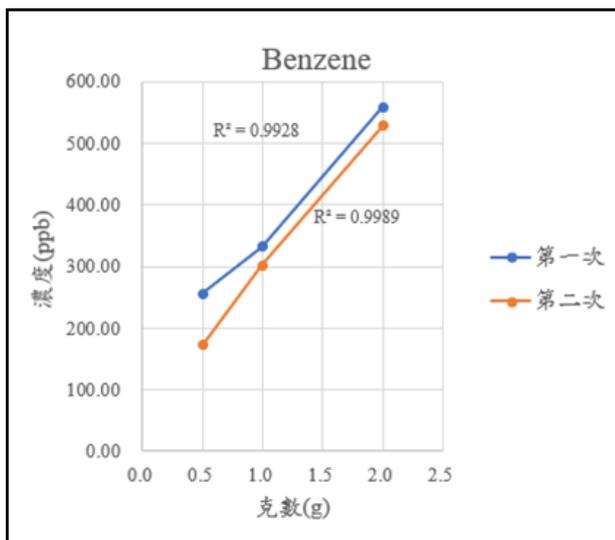


圖 7、苯各克重濃度之相關圖

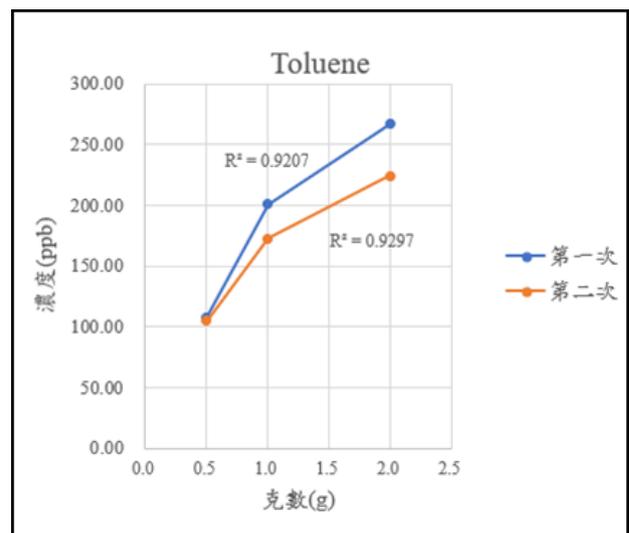


圖 8、甲苯各克重濃度之相關圖

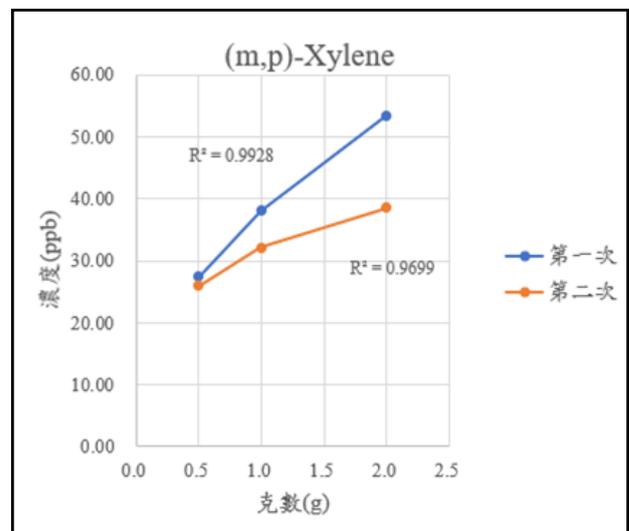


圖 9、(m,p)-xylene 各克重濃度之相關圖

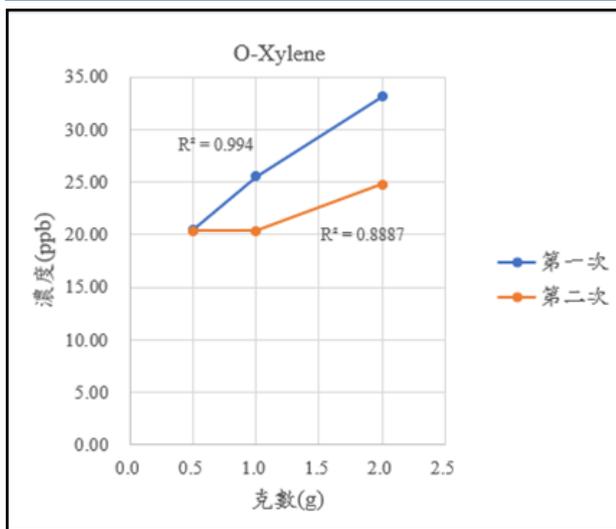


圖 10、o-xylene 各克重濃度之相關圖

二、燃燒拜香產生之精油對人體的風險

計算方法：以精油標準品之感度相當於 10 ppb 來換算

$$(6) \frac{\text{物質的感度}}{\text{標準品感度}} \times 10 \text{ ppb} = \text{物質的濃度(ppb)}$$

表 5、換算後所得濃度(ppb)

物質	克重					
	0.5 第一次	0.5 第二次	1.0 第一次	1.0 第二次	2.0 第一次	2.0 第二次
α-pinene	7.81	9.22	12.54	10.94	25.46	23.51
β-pinene	8.14	9.02	10.35	9.06	16.10	16.21
Camphene	170.41	208.94	398.74	395.99	951.23	885.04

發現這次實驗中的樣品所含的精油裡萜烯的濃度最高，但精油相關文獻過於稀少，無法分析其危害風險。

三、燃燒拜香產生之毒性物質對人體的風險

在分析本實驗之樣品時，發現其他工業局沒有管制的毒性物質，例如：呋喃、丙烯醛、巴豆醛、乙醛、氯甲烷等，本次計算以毒性較強的 2,3-二氫呋喃、2-甲基呋喃及丙

烯醛為例，但因沒有標準品，所以約略估計其濃度，結果僅供參考，如需準確濃度則建議購買相關標準品做進一步研究。計算方法：以同一樣品裡的苯的感度比物質之感度來換算濃度

$$(7) \frac{\text{物質的感度}}{\text{苯的感度}} \times \text{苯的濃度(ppb)} = \text{物質的濃度(ppb)}$$

表 6、換算後所得濃度(ppb)

物質	克重					
	0.5	0.5	1.0	1.0	2.0	2.0
物質	第一次	第二次	第一次	第二次	第一次	第二次
2,3-Dihydrofuran	16.14	17.43	45.83	37.36	75.78	58.73
2-Methylfuran	1.28	2.94	2.72	2.19	3.93	2.93
2-Methylpropenal	16.50	13.51	32.79	34.29	57.16	49.19

表 7、換算後平均濃度(ppb)

物質	克重		
	0.5	1.0	2.0
2,3-Dihydrofuran	16.78	41.60	67.25
2-Methylfuran	2.11	2.45	3.43
2-Methylpropenal	15.00	33.54	53.18

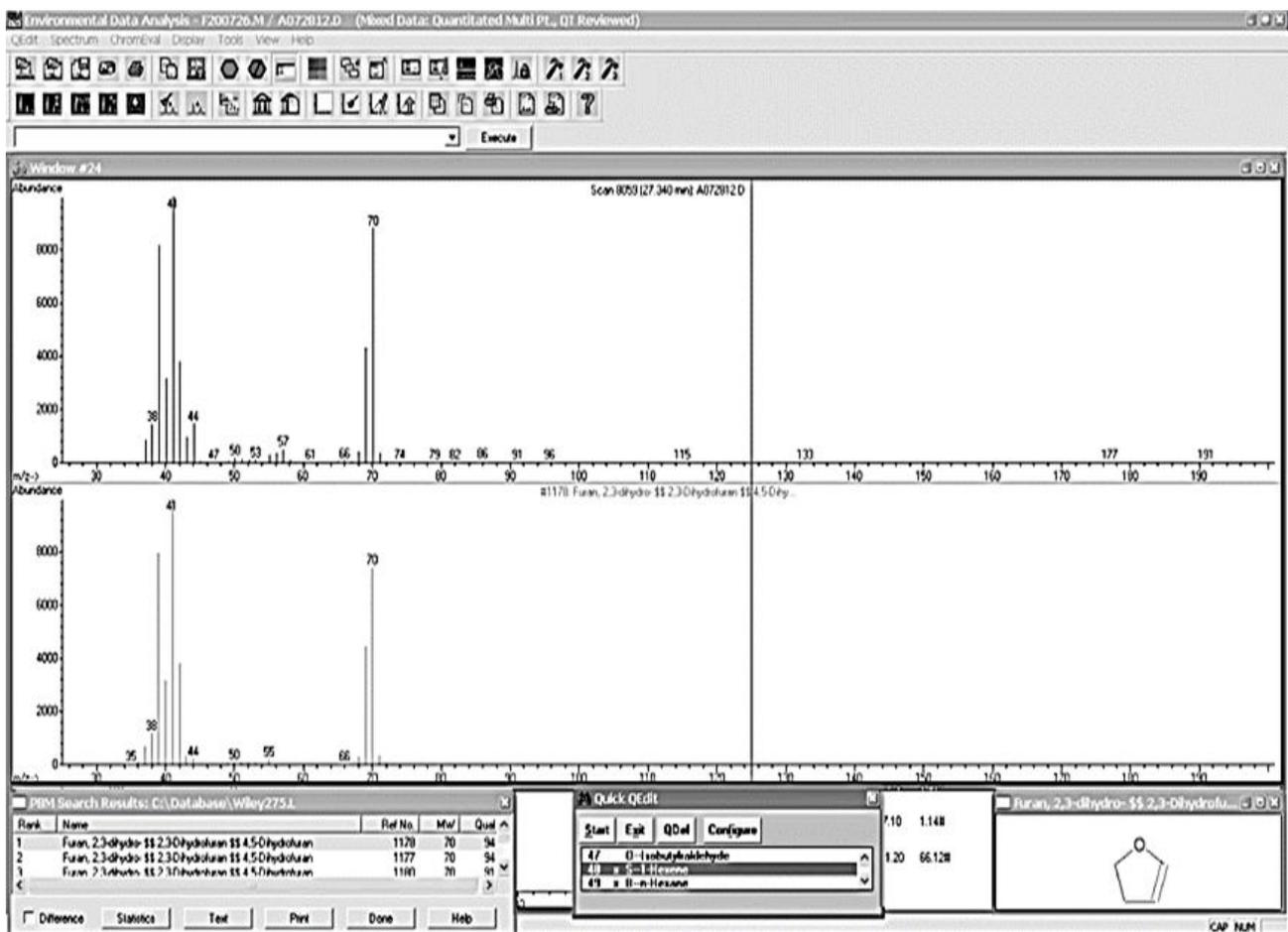


圖 11、2,3-Dihydrofuran 質譜圖

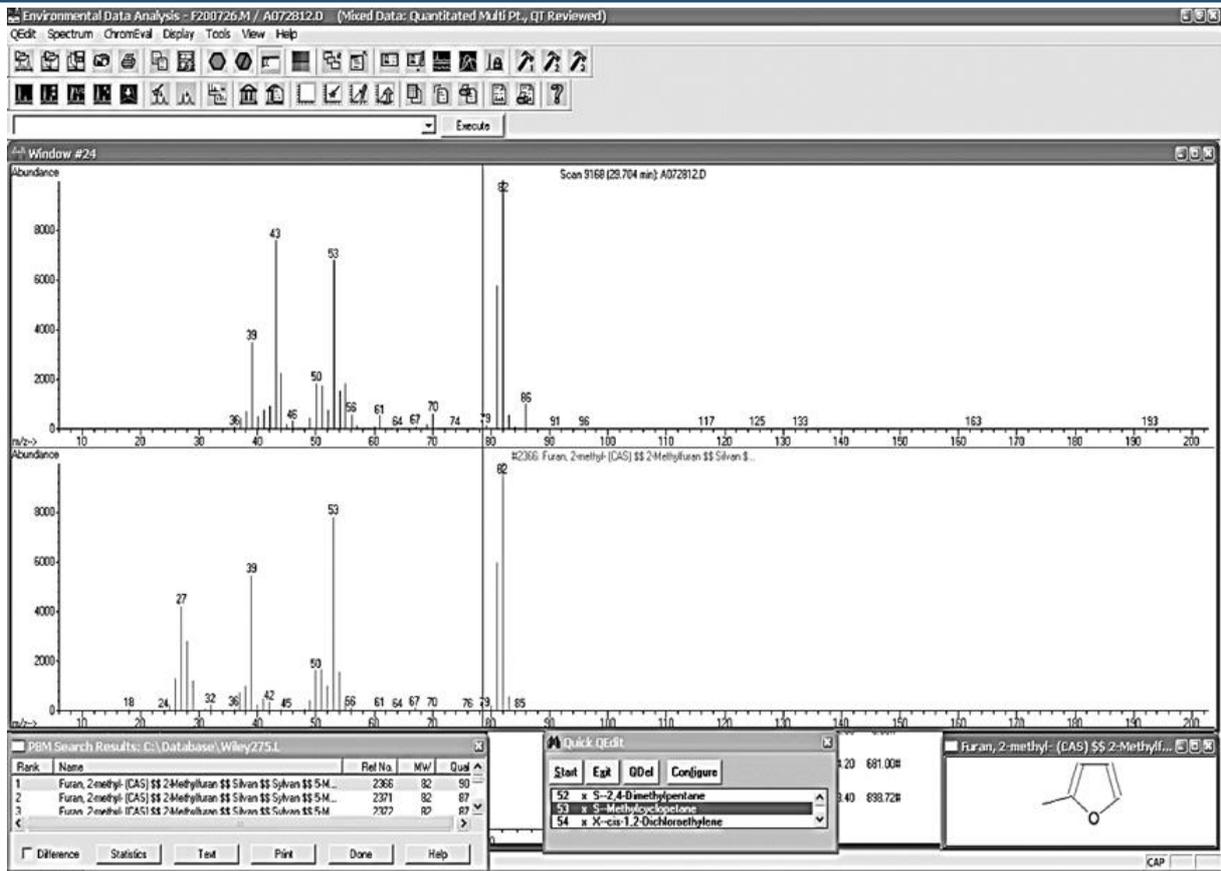


圖 12、2-Methylfuran 質譜圖

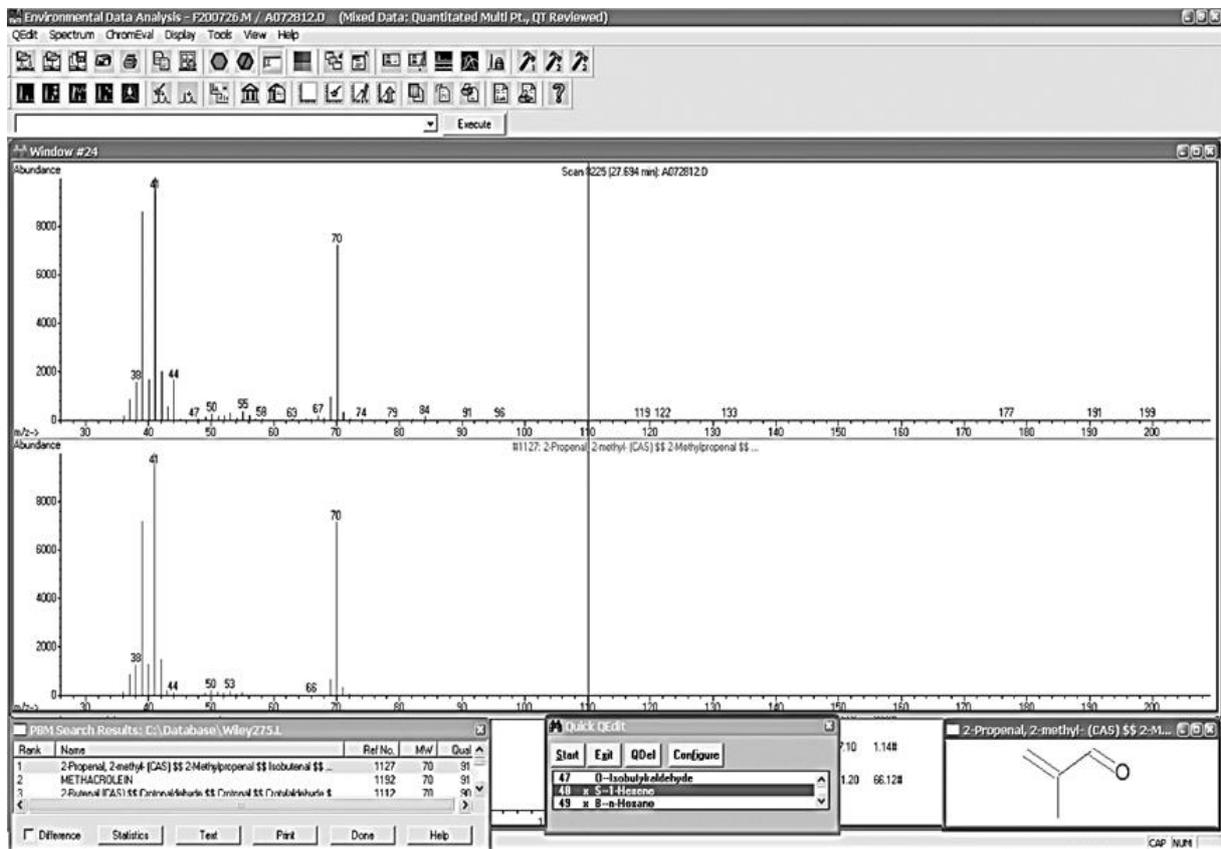


圖 13、2-Methylpropenal 質譜圖

苯的 target ion 是 78。

2,3-Dihydrofuran 的 target ion 是 41, reference ions 是 70、39。

2-Methylfuran 的 target ion 是 82, reference ions 是 53。

2-Methylpropenal 的 target ion 是 41, reference ions 是 70、39。

(一)、假設在一大氣壓 25°C 密閉空間中, 2-甲基呋喃之 LC₅₀ 為大鼠吸入蒸氣 1.7 mg/l; 4 h。假設大鼠 200 g, 人體 60 Kg, 計算方法:

$$\text{人體劑量} = \text{動物劑量} \div \left(\frac{\text{人體重}}{\text{大鼠重}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

即人體劑量 = 1.7 / (60,000 / 200)^{2/3} = 0.037 mg/l; 4 h, mg/l = 1,000 mg/m³, 即 0.037 mg/l; 4 h = 37 mg/m³。2-甲基呋喃分子量為 82, mg/m³ = ppm × M / 24.45, ppm = mg/m³ × 24.45 / 82。所以 37 mg/m³ 約為 124.09 ppm; 4 h。假設暴露本次實驗 4 hr, 各克重產生之 2-甲基呋喃濃度皆遠小於半致死劑量。

(二)、丙烯醛濃度之 LC₅₀ 為大鼠吸入蒸氣 1.300 mg / m³; 30 Month。假設大鼠 200 g, 人體 60 Kg, 即人體劑量 = 1.3 / (60,000 / 200)^{2/3} = 0.029 mg / m³; 30 Month。丙烯醛分子量為 56, mg/m³ = ppm × M / 24.45, ppm = mg/m³ × 24.45 / 56。所以 0.029 mg/m³ 約為 0.013 ppm; 30 Month。假設暴露本次實驗 30 M, 各克重產生之丙烯醛濃度皆遠大於半致死劑量。

在 5 倍嗅味閾值濃度時, 即可感受到不愉快的味道, 而當到達 5 至 10 倍嗅味閾值濃度時, 容易引起與臭味相關的抱怨, 嗅味閾值的定義為指可使 50% 聞嗅員感知臭味的最低濃度人們, 而丙烯醛的嗅味閾值則是 0.0036 (ppm, v/v), 並有著不悅的窒息味。

肆、結論與建議

1. 本實驗發現在樣品中除了含有工業局所規定之苯、甲苯等揮發性有機物, 還含有毒性較強的戴奧辛/呋喃及存在於天然森林的萜類 α-蒎烯、β-蒎烯、莡烯。

2. 本實驗結果與工業局 CNS15047 所規定之標準相比僅苯超出管制標準, 證明此次實驗所使用之香支不符合工業局所管制標準。

3. 以致癌風險(cancer risk)可接受範圍介於 10⁻⁶~10⁻⁴ 以最嚴格 10⁻⁶ 去規定管制濃度應為 0.020 ppm, 而工業局標準設定為 0.20 ppm, 但依照本實驗數據發現僅有苯稍微超過標準, 所以工業局所規定之標準是可行的, 但建議可以更嚴格。

伍、參考文獻

1. CNS15047 民國 95 年 11 月 20 日公布
2. CNS15127 民國 96 年 9 月 14 日公布
3. 苯安全資料表, 友和貿易股份有限公司提供
4. 甲苯安全資料表, 國喬石油化學股份有限公司提供
5. 鄰二甲苯安全資料表, Thermo Fisher 提供
6. 間二甲苯安全資料表, Merck 提供
7. 對二甲苯安全資料表, Merck 提供
8. 1,2 二氯苯安全資料表, 環保署列管編號:069-02 提供
9. 1,4 二氯苯安全資料表, Sigma-Aldrich 提供
10. 丙烯醛安全資料表, 環保署列管編號:100-01 提供
11. α-蒎烯安全資料表, Sigma-Aldrich 提供
12. β-蒎烯安全資料表, Sigma-Aldrich 提供
13. 莡烯安全資料表, Sigma-Aldrich 提供
14. 2-甲基呋喃安全資料表, Merck 提供
15. 李宜勳 高雄市餐飲業醛酮化合物排放特徵, 碩士論文, 國立中山大學環境工程研究所, 2014

再生能源躉購制度對電力結構之影響分析

黃靖翔¹ 甯蜀光²

¹ 國立高學大學土木與環境工程學系研究生

² 國立高學大學土木與環境工程學系教授

摘要

隨著全球暖化與氣候變遷的影響，已是現在及未來能源時代中，全人類所該面臨的議題，為減緩全球暖化及氣候變遷所造成之影響，各國致力於研發新興能源以取代傳統化石燃料，此外，各式利於再生能源發展之政策及制度也在國際間盛行，例如：再生能源躉購制度(Feed-in Tariff, FIT)、再生能源標準配比(Renewable Portfolio Standards, RPS)及再生能源憑證制度(Renewable Energy Certificates, RECs)等。本研究主要評估再生能源躉購制度的推動對國內電力結構之影響，研究中建立能源結構模型，考量能源成本之變動、能源需求變動、再生能源發展潛勢、新技術轉換期程等因素下，台灣電力結構之變化。

關鍵字：能源結構、躉購制度、再生能源、系統分析

Impact Analysis of Power Structure by Feed-in Tariff

Jing-Siang Huang¹ Shu-Kuang Ning²

¹ graduate student, Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Kaohsiung

² professor, Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Kaohsiung

ABSTRACT

The discussion on the greenhouse gases reduction, the clean energy development, the declaration of the carbon footprint and water footprint, etc., has continued to be concerned for many years. A number of renewable energy promotion and carbon trading systems have also been established these years. In Taiwan, The development of green energy and the reduction of greenhouse gases have been promoted for many years. Related systems such as Renewable Portfolio Standards (RPS), Feed-in Tariff (FIT), and Renewable energy certificate, REC) are gradually promoted. This study attempts to understand the impact of Feed-in Tariff promotion projects on the power structure. A mathematical programming model with the considerations of energy cost changes, energy demand growth, energy development potential and technology conversion period was established to realize the competition and cooperation mechanisms between institutions and also to find the integrated development strategy of multiple renewable energy development system.

Keywords: energy structure, feed-in tariff, renewable energy, system analysis

一、研究源起

2002 年聯合國永續發展世界高峰會議 (World Summit on Sustainable Development, WSSD, 2002) 於第九屆聯合國永續發展會 (the Ninth Session of the Commission for Sustainable Development, CSD-9) 中提出，未來能源所會面臨的重要議題，包括：能源普及與靈彈能源服務、能源效率、再生能源、先進化石燃料技術、以及能源運輸。在 WSSD 五大主題中，亦有在能源部分提出，再生能源 (包括太陽能、風力、水力、生質能、地熱及洋流等) 已是全球在未來追求永續發展的重要策略之一。

近年來極端氣候出現頻率逐年攀高，氣候變遷成為整體人類未來要所必須共同面對與解決的課題，更多的國家希望透過協商，或者是研發新能源科技，取代傳統化石燃料，無非是減緩氣候變遷所帶來的影響。因此，再生能源發展形成國際間的主流，為進一步鼓勵再生能源投入，設計了許多約束及鼓勵之政策或制度，進而發展出多種不同的政策與制度，諸多的政策皆是加速再生能源的發展，提升再生能源之比例。

台灣為滿足能源成長需求，並兼顧非核家園之目標 (行政院, 2017)，積極投入再生能源之開發，擴大設置再生能源，並 2025 年達成再生能源占總能源 20% 之目標 (經濟部, 2018)。為達成目標，我國也參考國際間再生能源發展策略，並於國內推動發展政策與制度。

二、文獻回顧

2-1 再生能源躉購制度 (Feed-in Tariff, FIT)

再生能源躉購制度係由政府或電力公司向再生能源發電業者，簽訂長期合約，並以一度電若干元的費率作為交易依據。合約期間，再生能源發電業者則向電網輸送電力，除了獲得原本電價外，同時還能獲得補貼，因此可以鼓勵更多再生能源業者投入再生能源之開發。

再生能源躉購制度並無強制性，參加與否在於個人或企業公司，因此能快速地推廣與實行，並且能短時間獲得較高的成效，因此，國際上許多國家推行再生能源制度會由此制度開始實施。制度之費率的設立則是由政府或電力公司執行，通常費率會逐年下降。

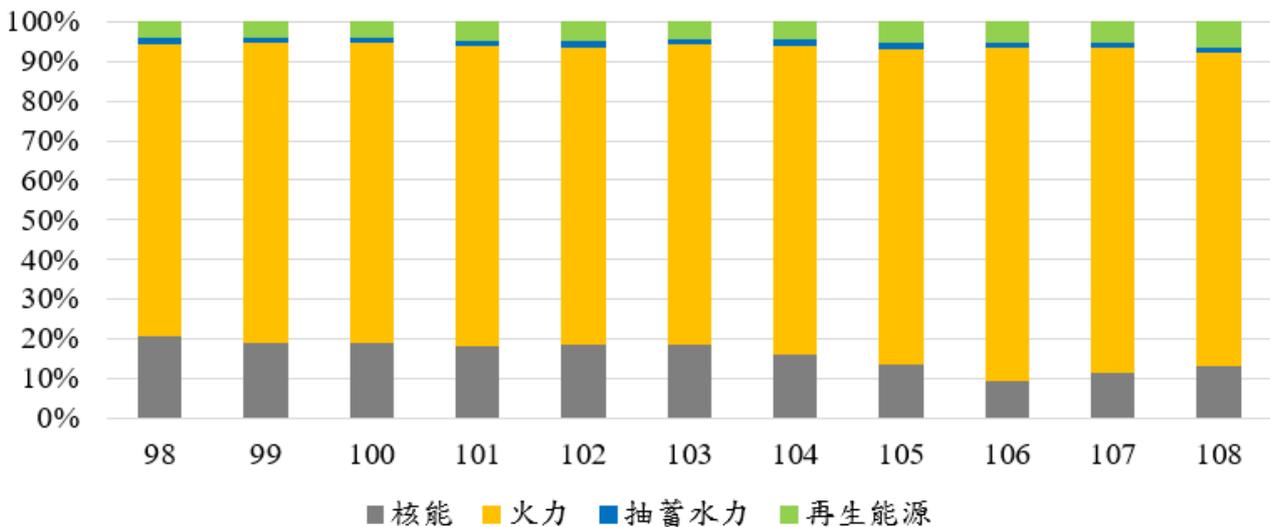


圖 2.1 台灣近十年之電力結構

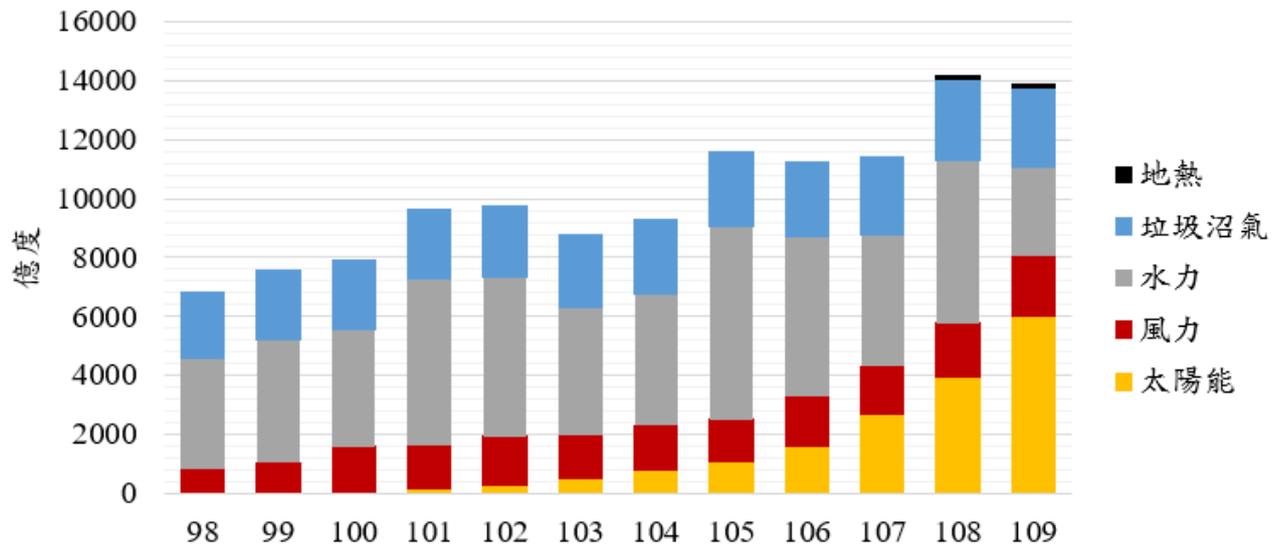


圖 2.2 台灣近十年再生能源之供電結構

躉購制度與其他推動策略常具有競爭性，Dong (2012)曾比較風力發電情況下的 FIT 與 RPS 制度，.研究中發現，不論再生能源發展技術、設備機組、發電量、綠電市場，FIT 都比 RPS 有更好的發展趨勢，若是以歐洲不同國家分別實施 FIT 或 RPS，結果顯示實施 FIT 制度之國家其發電潛力優於 RPS 制度之國家，甚至高於歐盟水平。Fagiani et al. (2013) 也曾藉由電力系統發展之模擬，在考量投資者避險之因素下，評估政府電力收購制度及憑證交易市場之效能，結果顯示：收購制度具有較高之效率，但效益較低且可能過度投資；而憑證之績效則來自較高之社會貼現率 (social discount rates)。Ciarreta et al. (2017) 比較政府電力收購制度及可交易的綠色憑證制度 (Tradable Green Certificates) 之優劣性，研究中建立兩者間的經濟模型，並以西班牙 2008-2013 年間電力系統資料率定模型，進而對未來之能源結構進行預測，結果顯示：可交易的綠色憑證制度可以較低之成本達成 2020 年國家之綠色能源目標。Zhang et al. (2018) 則針對政府電力收購制度，評估再生能源配比標準 (Renewable Portfolio Standards; RPS) 及再生能源憑證交易 (Renewable Energy Certificate; REC) 制度間之替代效益 (Substitution effect)，結果顯示：REC 可減輕政府在推動再生能源政策之支出，而 FIT、RPS 及 REC 制度將會降低電力部門之收益，但只

藉由 RPS 及 REC 可能不足以達成再生能源的設置目標，因此 FIT 制度之併行將是較佳的實施方案。

2-2 國內再生能源躉購制度推動現況

我國再生能源躉購制度由 99 年開始實行，政府為加速再生能源發展，陸陸續續通過利於再生能源發展之計畫，例如：「太陽光電 2 年推動計畫」、「風力發電 4 年推動計畫」等。

由圖 2.1 所示，在制度與計畫推行下，近十年再生能源成長幅度並無明顯增加，至 108 年時，再生能源占整體總能源 5.9%。但由圖 2.2 所示，在制度的推行下，近十年內太陽能增長幅度最為快速。

三、研究方法

本研究主要探討電力供應，並依照經濟部能源局之能源報告，選擇我國具有潛勢之能源類型，作為研究項目，分為三大類型，包括化石能源、新興能源、其他能源。模型中所使用之下標符號與子集合說明如表 3.1。

表 3.1 變數符號說明

i = 化石能源	j = 新興能源	k = 其他能源
i_a : 煤	j_a : 太陽能	k_a : 核能
	j_b : 風力	
i_b : 石油	j_c : 水力	
	j_d : 地熱	
i_c : 天然氣	j_e : 焚化發電	
	j_f : 沼氣發電	

本研究主要探討電力供應，並依照經濟部能源局之能源報告，選擇我國具有潛勢之能源類型，作為研究項目。依據能源類型現況分為基載及間載等兩種負荷之假設，假設比例分別為 60% 及 15% (台灣電力公司, 2017)

目標式： 能源成本最小化

Min

$$SC_t = \sum_i (C_{it} \times Q_{it}) + \sum_j (C_{jt} \times Q_{jt}) + \sum_k (C_{kt} \times Q_{kt}) \quad (1)$$

$$C_{jt} = RB_{jt} - RF_{jt}, \quad (2)$$

Q_{it} = 第 t 年第 i 種化石能源發電量 (度)

Q_{jt} = 第 t 年第 j 種新興能源發電量 (度)

Q_{kt} = 第 t 年第 k 種其他能源發電量 (度)

C_{it} = 第 t 年第 i 種化石能源發電之單位成本 (元/度)

C_{jt} = 第 t 年第 j 種新興能源發電之單位成本 (元/度)

C_{kt} = 第 t 年第 k 種其他能源發電之單位成本 (元/度)

RB_{jt} = 第 t 年第 j 種新興能源發電設置成本 (元/度)

RF_{jt} = 第 t 年第 j 種新興能源發電躉售費率 (元/度)

限制條件：

(一) 電力需求限制式

確保總電力需求獲得滿足

$$\sum_i Q_{it} + \sum_k Q_{kt} \geq ED_t \times B_1, \quad (3)$$

$$\forall t, i \in i_{a,c}, k \in k_a$$

$$\sum_i Q_{it} + \sum_j Q_{jt} \geq ED_t \times B_2, \quad (4)$$

$$\forall t, i \in i_b, j \in j_a$$

$$\sum_i Q_{it} + \sum_j Q_{jt} + \sum_k Q_{kt} \geq ED_t, \quad (5)$$

$$\forall t, i \in i_{a,b,c}, j \in j_{a,b,c,d,e,f}, \forall k$$

ED_t = 第 t 年總電力需求量

B_1 = 基載發電百分比

B_2 = 尖載發電百分比

(二) 化石能源供應量變動上限

確保化石能源供應量不會短時間產生劇烈變動

$$Q_{it} \geq C_1 \times Q_{i(t-1)}, \quad \forall t, \forall i \quad (6)$$

C_1 = 化石能源變動係數

(三) 能源供應潛力限制式

確保各類型能源使用總量不超過其可供應之最大值

$$Q_{jt} \leq PP_j, \quad \forall t, j \in j_{a,b,c,d,e,f} \quad (7)$$

$$Q_{kt} \leq PP_k, \quad \forall t, \forall k \quad (8)$$

PP_j = 第 j 種新興能源的供應潛勢

PP_k = 第 k 種其他能源的供應潛勢

(四) 新興能源轉換化石能源上限

確保各單項新興能源供應量不會在短時間內慘生劇烈變動

$$Q_{jt} \leq Q_{j(t-1)} \times D_1, \quad \forall t, j \in j_{a,b,c,d,e,f} \quad (9)$$

D_1 = 潔淨能源變動係數

(五) 非負限制式

$$Q_{it} \geq 0, \quad \forall t, \forall i \quad (10)$$

$$Q_{jt} \geq 0, \quad \forall t, \forall j \quad (11)$$

$$Q_{kt} \geq 0, \quad \forall t, \forall k \quad (12)$$

四、結果與討論

(一) 國內躉購費率與太陽能發電量之變化

本研究彙整近十年國內躉購費率與太陽能發電量資料，並進而分析裝置容量與報酬率間之關係；圖 4.1 顯示，再生能源費率雖然逐年下降，太陽能發電量卻無下降跡象，反而於 105 年、106 年及 107 年時，增加幅度最大，判斷其原因應是近年來太陽能相關技術日趨成熟，由於太陽能板之生產量增加而降低了設置成本，因此雖然躉購費率降低，但

實質的獲利卻有提升。

圖 4.2 所示，由報酬率方面，從 104 年開始，報酬率則逐年提升，從 104 年 3.2% 提

升至 108 年 6.5%，增加 3.3%。可見費率雖然是呈現下降的狀態，然而報酬率的增長，則是對於太陽能發電的提升產生最大助益。

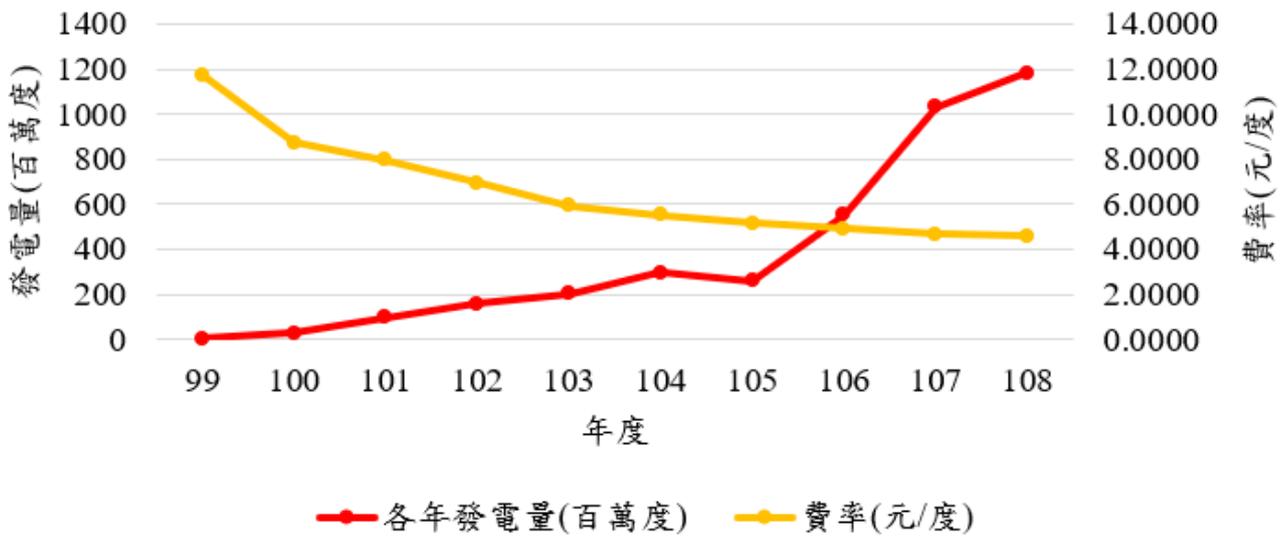


圖 4.1 太陽能發電量與躉購費率之關係

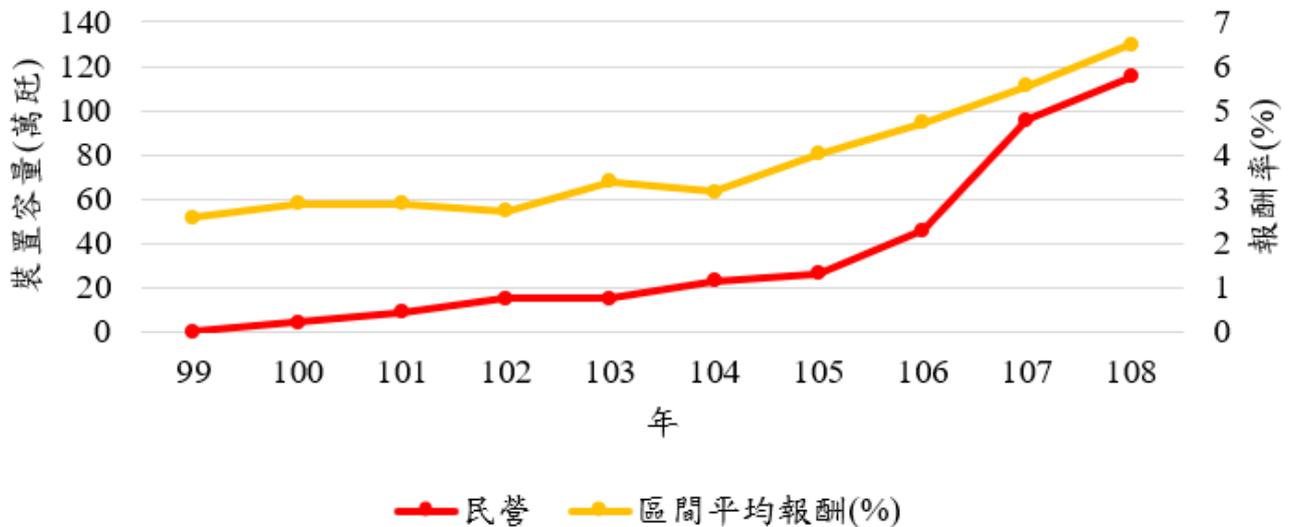


圖 4.2 太陽能發電裝置容量與報酬率之關係

(二) 電力結構變動分析

經前述建立之電力結構分析模型，本研究評估在躉售制度之誘因下從 2020 年至 2030 年，台灣電力結構之變動情形，獲得以下結果：圖 4.3 顯示各類型能源發電量之占比，在再生能源制度推動下，太陽能與焚化發電皆已達到該能源之潛力極限。2025 年雖然無法達成非核家園之目標，由於燃煤發電及再生能源的增長，替補核能供應及減少的部分，使得核能還是有逐年減少的趨勢。再生能源

占比在該年不僅能達到 20%，甚至還能超過，還達成國家能源自主之目標。然而在成本考量下，燃煤發電依舊是主要電力來源，其次則為燃氣發電與再生能源。

圖 4.4，再生能源在制度的推動下，再生能源有比例有明顯的增長，於 2027 年能達到總能源比例最高值 33.5%，與 2020 年相比，增加 27.6%。至 2030 年時，化石能源比例可降至 62.4%，與 2020 年 81% 相比，減少 17.6%。

圖 4.5，再生能源制度推動下，太陽能增長速度最為快速，於 2027 年可達到該能源之潛力極限，並占總潔淨能源 89%。其次則是

風力、水力及沼氣發電。地熱發電與焚化發電則因成本、技術及潛力極限等方面限制，因此兩項發電方式最為較低。

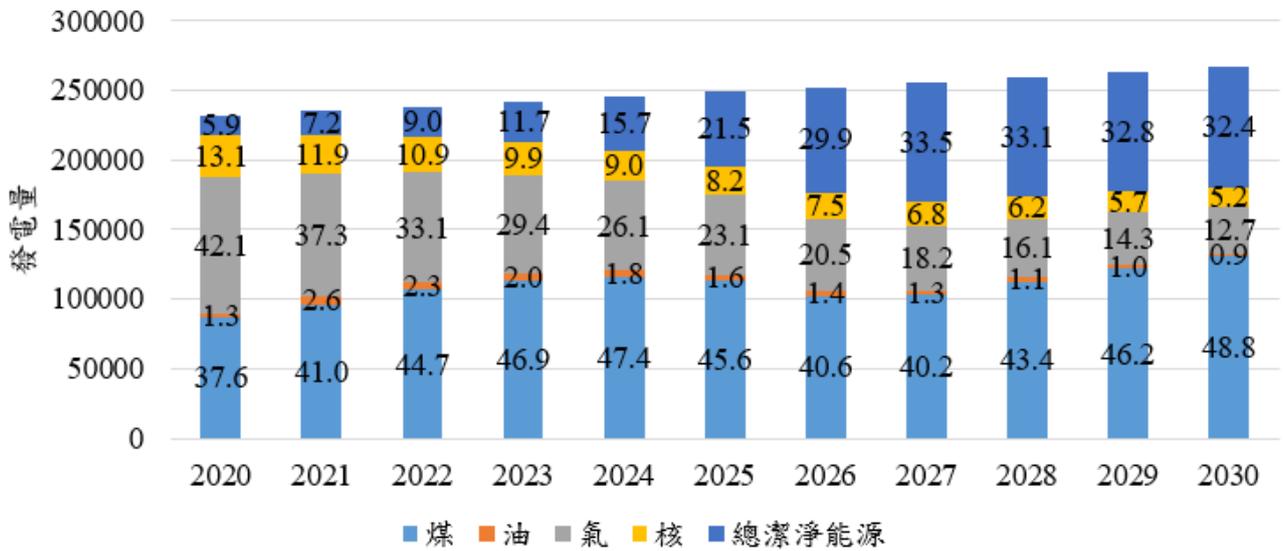


圖 4.3 模型預測之各類型能源發電量及比例

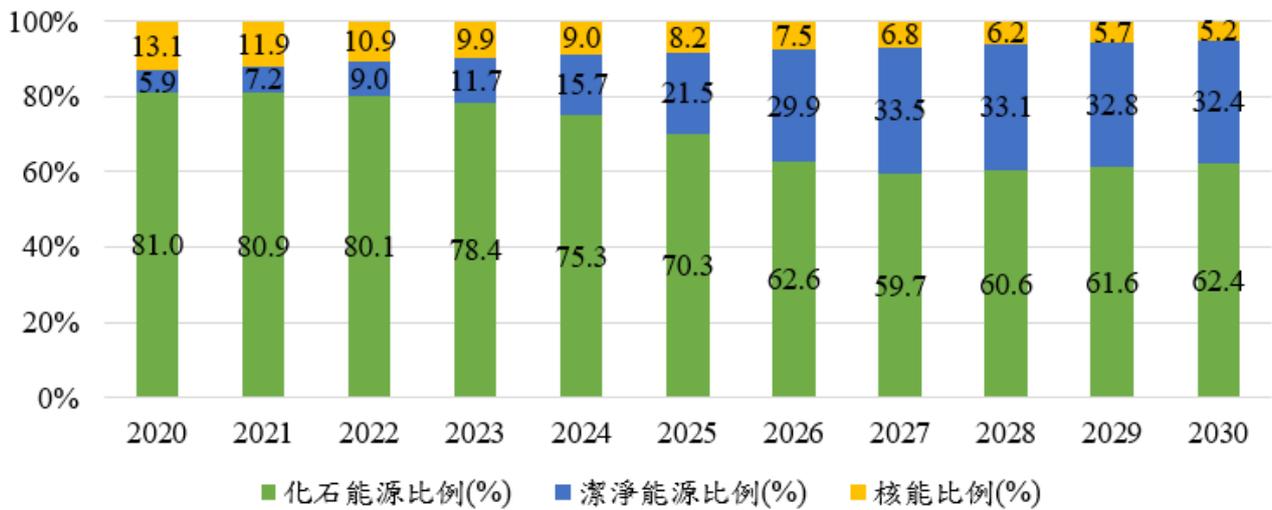


圖 4.4 各類型能源發電結構占比

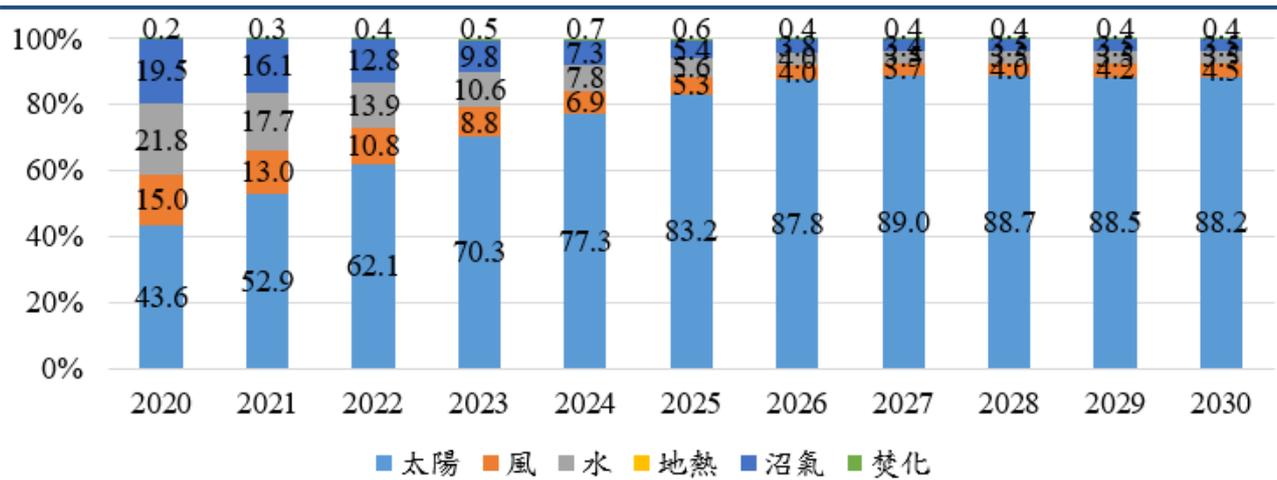


圖 4.5 潔淨能源發電結構占比

五、結論與建議

本研究以成本最小化做為規劃目標，討論再生能源制度的推動對於再生能源發展之影響，並分析該誘因對未來台灣電力結構變動之影響，初步獲得下列結論：

- (一) 再生能源制度的推動，對於再生能源發展有明顯的成效，再生能源比例也有大幅提升，且太陽能發電在規劃期間已達到該項能源之發展潛力。
- (二) 在躉售制度之推動下，於 2025 年時，再生能源可達總能源 20% 之目標，並且在 2027 年時，可達再生能源之最大占比 33.5%。
- (三) 在能源價格之市場機制下，規劃期間尚無法達到非核家園之目標，但有下降之趨勢，與 2020 年核能發電比例之 13.1% 相較，於 2025 年時降至 8.2%，至 2030 年則僅剩 5.2%。
- (四) 考量能源成本時，電力主要來源依舊為成本較低之燃煤發電，並做為基載電力主要能源類型，其次則是太陽能、風力等再生能源，而地熱與焚化發電則因成本及潛力之限制，成長幅度仍低。
- (五) 本研究尚未將發電對環境產生之衝擊納入評估，可做為未來評估之項目，以使規劃更趨完善。

六、參考文獻

1. 行政院，「能源發展綱領」，2017。
2. 經濟部，「能源轉型白皮書」，2018。
3. 洪銘謙，「台灣能源結構最佳化策略分析」，國立高雄大學土木與環境工程學系碩士論文，2011。
4. 楊雅涵，「環境、成本與社會因素對能源結構之影響分析」，國立高雄大學土木與環境工程學系碩士論文，2016。
5. 吳謙，「以生命週期觀點評估台灣電力結構之環境衝擊」，國立高雄大學土木與環境工程學系碩士論文，2019。
6. Ciarreta, M. A. Espinosa, C. Pizarro-Irizar, "Optimal regulation of renewable energy: A comparison of Feed-in Tariffs and Tradable Green Certificates in the Spanish electricity system," Energy Economics, 67, pp. 387-399, 2017.
7. C.G. Dong, "Feed-in tariff vs. renewable portfolio standard: An empirical test of their relative effectiveness in promoting wind capacity development," Energy Policy, 42, pp. 476-485, 2012.
8. P. Sun, P. Y. Nie, "A comparative study of feed-in tariff and renewable portfolio standard policy in renewable energy industry," Renewable Energy, 74, pp. 255-262, 2015.
9. Q. Zhang, G. Wang, Y. Li, H. Li, B. McLellan, S. Chen, "Substitution effect of renewable portfolio standards and renewable energy certificate trading for feed-in

tariff, "Applied Energy. 227, pp.426-435, 2018.

10. R. Fagiani, J Barquín, R. Hakvoort, "Risk-based assessment of the cost-efficiency and the effectivity of renewable energy support schemes: Certificate markets versus feed-in tariffs," Energy Policy, 55, 648-661, 2013.

【C】 工程材料

膨潤土飽和循環條件下的材料參數變化研究

張皓鈞¹ 鐘志忠² 陳憶婷³

¹ 中興工程顧問股份有限公司工程師

² 國立中央大學土木工程學系教授

³ 國立中央大學土木工程學系助理

摘要

低放射性廢棄物最終處置場的阻水層設施目前以膨潤土材料為主，由於處置場設計年限極長，處置場從施工階段至封閉後之處置期間，其近場環境的演化可能使膨潤土材料處於未飽和/飽和狀態，導致膨潤土材料的阻水性質發生變化，據此本研究藉由電滲加速試驗與乾溼循環試驗，掌握美國懷俄明州 MX-80 膨潤土與日本山梨縣 KV-1 膨潤土材料在處置場未飽和狀態、乾溼循環環境、以及飽和狀態下之阻水性質變化，供我國低放射性廢棄物最終處置場設計與安全評估之參考依據。

研究結果顯示，MX-80 與 KV-1 膨潤土經過電滲加速或乾溼循環試驗後，其於海水、高鹼性、高酸性環境中的最終回脹壓力皆較小於淡水環境，水力傳導度也皆大於淡水環境，由此可得知環境溶液中的離子種類與濃度將影響膨潤土的阻水功能，其中以海水環境的影響最為顯著，相較於未經電滲加速或乾溼循環試驗的膨潤土，其最終回脹壓力的減少幅度皆超過 50%，水力傳導度也皆約增加 3.3 倍以上。

關鍵字：膨潤土、未飽和/飽和處置環境、阻水性質

Study on the Alteration of Material Parameters in Bentonite under Saturated Cycling Conditions

Chang Hao-Chun¹ Chung Chih-Chung² Chen Yi-Ting²

¹ SINOTECH Engineering Consultants, LTD.

² Department of Civil Engineering, National Central University

ABSTRACT

The water-resistant layer in disposal of low-level radioactive wastes is made up of bentonite. As the disposal site is expected to serve a very long time, the hydraulic resistance of bentonite need to be evaluated under the potential unsaturated/saturated situations.

In this research, a migration technique and high-low relative humidity cycling test are applied to investigate the extended unsaturated situation, unsaturated/saturated evaluation and saturated situation. The buffer material is made using MX-80 bentonite from Wyoming and KV-1 bentonite from Yamagata.

According to the results, the swelling pressure is decreased and the hydraulic conductivity is increased when MX-80 and KV-1 bentonite are immersed in seawater, alkaline solution, acid solution after simulation tests. Among them, the impact of seawater is the most significant. When

bentonite is immersed in seawater solution, the swelling pressure is decreased 50% and the hydraulic conductivity is above 3.3 times that of immersed in freshwater without simulation tests.

Keywords: bentonite, unsaturated/saturated situations, hydraulic resistance

一、序論

1-1 研究背景

低放射性廢棄物最終處置場的概念設計源自於用過核子燃料或高放射性廢棄物最終處置時所採用之深層地質處置，將放射性廢棄物置放於地下數百公尺的穩定地層中，並利用廢棄物體、廢棄物包件、工程障壁及周圍岩層等「多重障壁」的設計，使其與人類生活圈完全隔離。

目前我國係規劃將處置設施設置於地表下 50 公尺至 100 公尺岩層中，在長期的處置期間內，處置場將面臨地下水入侵及再飽和，故採用具備遇水回脹自我封填功能的膨潤土作為阻水層材料，以遲滯地下水於處置場中的傳輸速率。

然而處置場從施工階段至封閉階段，近場環境的演化將會使膨潤土處於未飽和/飽和之狀態，導致其阻水性能發生變化。因此以下就處置場從施工階段至封閉階段分二部分進行探討：

(一) 處置場施工階段

此階段處置設施因排水系統發揮作用，並尚未進行回填作業，故係屬於初始未飽和且與大氣環境接觸的狀態，在此乾燥環境下，阻水層將產生收縮、開裂等變化，亦可能因遭遇乾燥與潮溼環境循環(wetting/drying cycles)，而使阻水層產生反覆的收縮與膨脹。

另外當處置設施施作完成後，未飽和阻水層與混凝土處置窖長時間的相互接觸也會使障壁材料間產生離子交換現象，導致膨潤土阻水層中的可交換鈉、鎂離子以陽離子交換的方式進入混凝土處置窖中，而混凝土處置窖中所含的鈣離子也會透過陽離子交換的方式釋出至阻水層中(SKB, 2001)，雖然離子交換現象在短期間內對阻水層所造成的影響並不顯著，但此反應是長時間且持續不斷的在進行，長時間尺度下，離子交換將會對膨

潤土的阻水性質造成影響。

(二) 處置場封閉階段

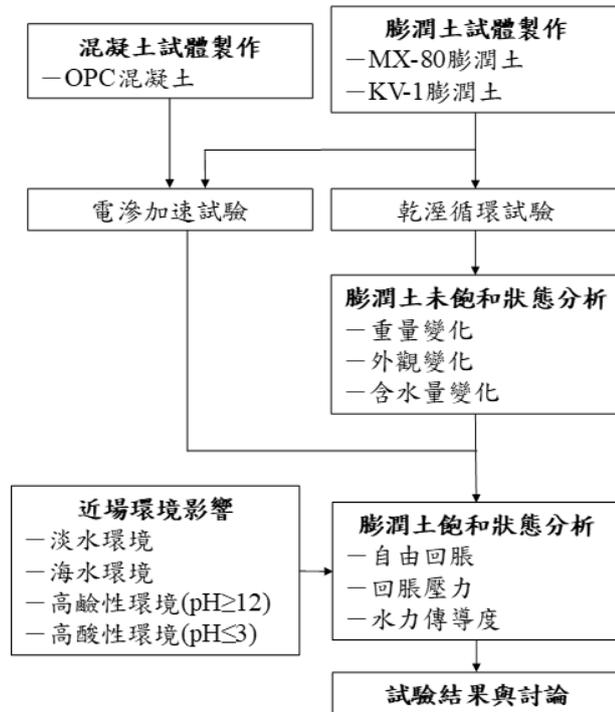
處置場封閉後地下水入侵至處置場時，處置設施將因地下水的影響而成為飽和狀態，入滲水會經過坑道襯砌、回填材並滲透至膨潤土阻水層後，再至混凝土處置窖中，混凝土材料受到入滲水的影響不但會產生溶出失鈣效應外，含有鈉離子、鈣離子、氫氧根離子的高鹼性溶液也會由混凝土釋出至膨潤土阻水層中，這些鹼性溶液將會與膨潤土中的蒙脫石反應，使膨潤土自我封填機能改變，影響原本應有的阻水功能。

以上未飽和/飽和的環境演變與交互作用相應的化學變化，將直接影響到最終處置場的障壁功能及成效，屬於低放射性廢棄物最終處置場安全評估的必須考量項目，因此本研究將建立適合國內之環境模擬與障壁材料功能參數的本土化研究，以取得相關材料參數供後續分析評估所使用。

1-2 研究規劃

本研究設計相關實驗裝置，用以模擬低放射性廢棄物最終處置場可能遭遇的近場環境，藉此掌握工程障壁材料於處置環境下的演變情形。圖 1 為本研究所規劃之試驗流程，先行依據目前我國低放射性廢棄物最終處置場的概念設計規劃試驗材料，並透過乾溼循環試驗與電滲加速試驗，分別模擬與分析未飽和狀態的膨潤土阻水層於乾溼循環環境下和長期與混凝土障壁交互作用情形下，其材料特性的變化狀況，接著針對乾溼循環試驗與電滲加速試驗完成之膨潤土試體，以淡水、海水、酸鹼性溶液進行自由回脹、回脹壓力與水力傳導度試驗，藉此模擬膨潤土阻水層經歷乾溼循環或長期與混凝土障壁交互作用後，淡水或海水入侵至處置場使阻水層成為飽和狀態的情形，同時也透過鹼性環境模擬混凝土溶出失鈣對膨潤土阻水層的影響，並

設計酸性環境進行對照，以瞭解膨潤土阻水層經環境演化、交互作用後的障壁功能變化。圖 1 膨潤土飽和循環條件下的材料參數變化研究流程圖



衝能力，以避免地下水的酸鹼性大幅變化而影響到其他工程元件的耐久性。

對於低放射性廢棄物最終處置場阻水層的設計功能，目前國際間尚無明確規定，多是參考瑞典高放射性廢棄物最終處置場緩衝材料之阻水性能要求：水力傳導度 $<10^{-12}$ m/s、回脹壓力 >1 MPa 進行設計(SKB, 2010)。

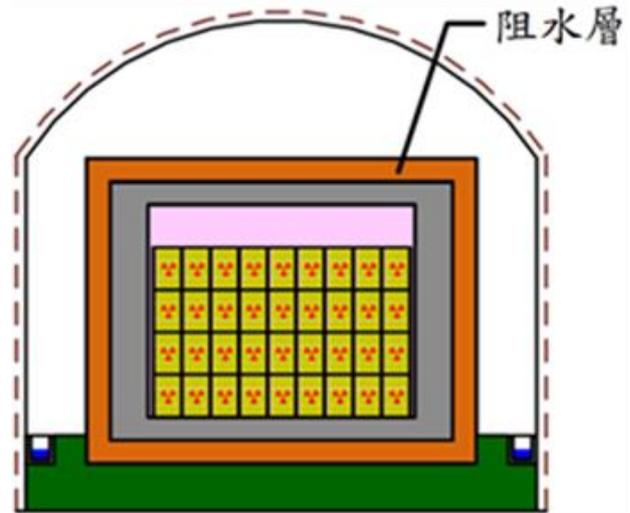


圖 2 阻水層位置示意圖

二、近場環境對膨潤土材料的影響

2-1 膨潤土阻水層的功能

依照台電公司現階段低放射性廢棄物最終處置場規劃，處置場未來將接收 A 類低放射性廢棄物與 B、C 類低放射性廢棄物，其中 B、C 類低放射性廢棄物含有較高濃度之長半化期核種，需要確保較長時間之安全功能，故於 B、C 類低放射性廢棄物處置窖外側設置阻水層，藉以降低地下水侵入機會，同時延長核種外釋時間(台電公司，2020)。

目前阻水層使用的材料以膨潤土為考量，其位置示意如圖 2 所示。主要係利用阻水層中膨潤土遇水回脹特性，抑止或延緩核種遷移的速度，並於處置期間維持密閉，故阻水層必須具備適當的回脹潛能、回脹壓力、低乾縮量及低水力傳導度等。

為長期維持上述設計功能，膨潤土阻水層的性質必須相當穩定，不易受到外界環境或與其他材料之間的交互作用影響，包含阻水層的物理性、化學性及礦物晶相都必須維持長期穩定，並且具備相對於環境的化學緩

2-2 未飽和環境對膨潤土材料的影響

(一)離子交換現象

未飽和環境下，膨潤土阻水層與混凝土處置窖長期間的相互接觸將會使障壁材料間產生離子交換現象，膨潤土阻水層中的可交換鎂離子會以陽離子交換方式將混凝土所含的水化矽酸鈣膠體(C-S-H 膠體)和氫氧化鈣中的鈣離子由鎂離子取代，形成強度較弱的水化矽酸鎂膠體(M-S-H 膠體)，導致混凝土抗壓強度下降，而被取代的鈣離子會入侵至阻水層中，使鈉型膨潤土轉變為鈣型膨潤土，影響膨潤土阻水層的工程性質(SKB, 2001)。

(二)乾溼循環

交通部中央氣象局(2020)紀錄顯示，台灣各地之月平均相對溼度變化幅度約為 20%，因此即使低放射性廢棄物最終處置場處於未飽和狀態，近場環境仍會遭遇較乾燥或較溼潤的環境循環，在此種乾溼循環的環境條件下，膨潤土阻水層的重量、含水量與外觀將會持續產生變化。

2-3 飽和環境對膨潤土材料的影響

當處置設施因地下水侵入而成為飽和狀態時，膨潤土阻水層將發揮其吸水回脹特性，以填塞縫隙阻隔核種外釋。膨潤土的回脹性能主要來自於蒙脫石，蒙脫石的結晶結構基本單元為二個矽氧四面體層(簡稱 T 層)包夾一個鋁氫氧八面體層(簡稱 O 層)所形成的(Tetrahedral Octahedral Tetrahedral, TOT)夾層，如圖 3 所示，當 TOT 夾層吸附水分子時，其表面之可交換陽離子將會發生水合作用而產生分散結構，導致膨潤土回脹(陳文泉，2004)。

然而膨潤土中的蒙脫石易受環境因素影響而產生劣化反應，例如地下水的入侵將使處置環境成為飽和狀態，環境溶液中所含的電解質、以及混凝土溶出失鈣所產生的鹼性溶液，皆會對蒙脫石造成劣化，進而影響膨潤土的阻水功能。

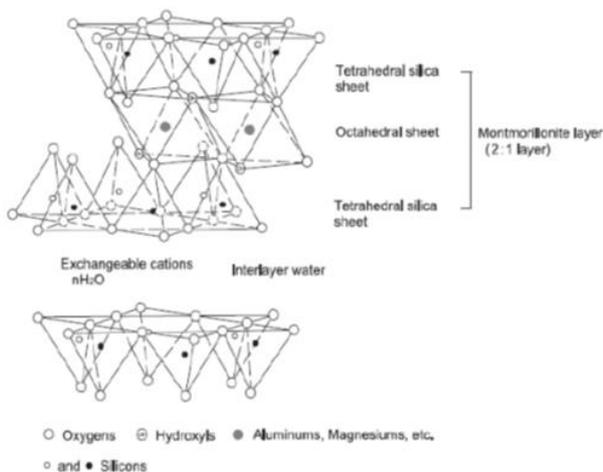


圖 3 蒙脫石之原子結構

三、膨潤土乾溼循環試驗規劃

本研究規劃相關試驗，掌握 MX-80 及 KV-1 二種膨潤土在處置場環境演變過程的材料參數變化。

3-1 實驗材料

(一) 混凝土

設計符合 ACI 349 核能安全相關用途混凝土規範，抗壓強度至少在 5,000 psi 以上之一般水泥混凝土(Ordinary Portland Cement, OPC)，表 1 為其配比，水灰比為 0.4，粗粒料最大粒徑為 2 cm，設計坍度為 18 cm，將混凝土於拆模後浸泡在飽和石灰水中養護 28

天，接著切割成直徑 7 cm、厚度 3 cm 的混凝土試體進行後續電滲加速試驗。

表 1 混凝土材料配比(kg/m³)

I 型水泥	水	粗粒料	細粒料	減水劑
450	180	937	798	3.4

(二) MX-80 膨潤土

本研究所使用的 MX-80 膨潤土材料為美國懷俄明州開採的膨潤土，其可交換陽離子以 Na⁺ 為主，屬於鈉型膨潤土，含水量為 13.3%。

(三) KV-1 膨潤土

本研究所使用的 KV-1 膨潤土為日本山形縣開採的膨潤土，其可交換陽離子以 Na⁺ 為主，屬於鈉型膨潤土，含水量為 10.0%。

3-2 未飽和狀態模擬試驗

本研究運用電滲加速試驗以及乾溼循環試驗，模擬膨潤土阻水層在未飽和狀態下與混凝土之間的交互作用，以及受環境乾溼循環演變的情形。

(一) 電滲加速試驗

電滲加速試驗裝置如圖 4 所示。陰極嵌入膨潤土試體中，而陽極則置入飽和鈣離子水溶液，裝置完成後通上 15 V 直流電流，促使離子由混凝土移向膨潤土材料(註 1：陽極使用鈣離子水溶液係用以避免混凝土鈣離子釋出現象發生於陽極端)。

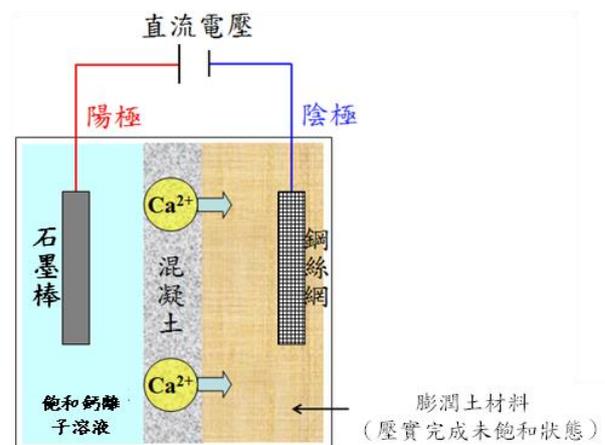


圖 4 電滲加速試驗配置圖

電滲加速試驗進行時將持續量測電流，待電流趨近於零後即停止電滲加速試驗，並

取交界面前 3 cm、約 140 g 的膨潤土試體進行後續飽和狀態模擬試驗。

(二) 乾溼循環試驗

本研究藉由圖 5 之水汽平衡法，並參考 Delage, et al. (1998) 不同溫度下鹽溶質之相對溼度數據，選擇適當的鹽溶質與環境溫度進行乾溼循環試驗。其中以 $Mg(NO_3)_2$ 鹽溶質於 $25^\circ C$ 下製備相對溼度 52.3% 的試驗環境，模擬處置場近場環境遭遇較乾燥的情形；另外以 KCl 鹽溶質於 $25^\circ C$ 下製備相對溼度 85.1% 的試驗環境，模擬處置場近場環境遭遇較溼潤的情形。

試驗過程中持續觀察膨潤土試體的重量、含水量以及外觀變化，當試體重量與含水量的變化量於 7 天內皆不超過 0.01%，同時外觀已無明顯改變時，即視試體與鹽溶質環境已達平衡，接著取出試體並將其改放置不同的飽和溶液玻璃容器內，重複進行乾溼循環試驗，當完成一輪乾溼環境循環後，最後取完成一輪乾溼環境循環的膨潤土試體進行後續飽和狀態模擬試驗。



圖 5 水汽平衡法試驗裝置

3-3 飽和狀態模擬試驗

本研究配置淡水、海水、高鹼性、高酸性溶液，並藉由自由回脹、定體積回脹與水力傳導度試驗，掌握 MX-80 與 KV-1 膨潤土於四種不同溶液環境中的阻水性質變化。

(一) 溶液配置

本研究配置不同溶液，以模擬處置場於淡水、海水、高鹼性、高酸性環境中的情形。

(1) 淡水環境：使用去離子水進行試驗。

(2) 海水環境：依據 ASTM D1141 規範製作 10 L 海水溶液。

(3) 高鹼性環境：將 8 g 的氫氧化鈉溶於 20 L 去離子水中，攪拌均勻後即可配置 $pH \geq 12$ 的高鹼性溶液，以模擬處置場因混凝土溶出失鈣效應而形成的高鹼性環境。

(4) 高酸性環境：將 0.73 g 的氯化氫溶於 20 L 去離子水中，攪拌均勻後即可配置 $pH \leq 3$ 的高酸性溶液，用以與其他溶液環境進行比較。

(二) 自由回脹試驗：參考 ASTM D4546 進行自由回脹試驗。

(三) 定體積回脹試驗：參考 ASTM D4546 利用氣-液轉換系統的方法，對膨潤土材料進行定體積回脹壓力試驗，藉此取得試體之最大回脹壓力，以及回脹壓力歷時曲線。

(四) 水力傳導度試驗：依據 ASTM D5856 滲透試驗，利用氣-液轉換系統的方法進行水力傳導度試驗。

四、電滲加速試驗結果與分析

4-1 電流量測

使用 MX-80 與 KV-1 膨潤土材料分別與 OPC 混凝土相互接觸，並以 15 V 定電壓進行電滲加速試驗，加速障壁材料之間的交互作用反應。在電滲加速試驗期間，每 24 小時量測一次電流變化，用以判斷交互作用的反應是否已趨近於完全。MX-80 與 KV-1 膨潤土材料的電滲加速試驗電流隨時間變化關係如圖 6 所示。

由圖 6 得知當電滲加速試驗經約 650 小時後，電流已無明顯變化，此為可交換離子交換完畢，使得系統阻抗提升所致，據此推測障壁材料之間的交互作用反應已經趨近於完全。

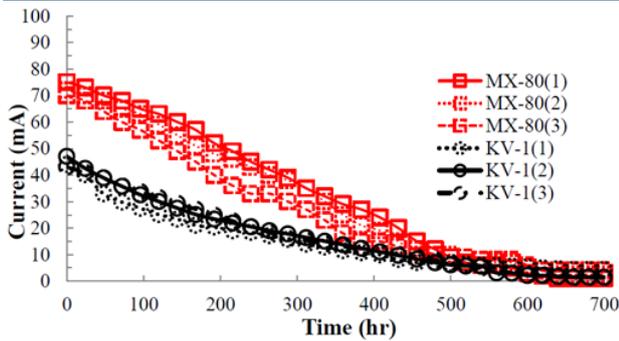


圖 6 電滲加速試驗電流與時間關係

4-2 電滲加速試驗後之飽和狀態模擬試驗

將電滲加速試驗完成後的 MX-80 與 KV-1 膨潤土試體浸泡於淡水、海水、高鹼性、高酸性四種不同溶液中，並長期量測其回脹率、定體積回脹壓力與水力傳導度，以掌握膨潤土先後經歷離子交換與飽和環境影響後，其阻水性質的變化情形。

(一) 電滲加速試驗後之自由回脹試驗

圖 7 為經電滲加速試驗後的 MX-80 與 KV-1 膨潤土試體，在淡水、海水、高鹼性及高酸性四種溶液環境下的自由回脹歷時曲線，同時也於圖中列出 MX-80 與 KV-1 膨潤土在未經電滲加速試驗的情況下，其於淡水環境中的自由回脹，以利後續分析比較。

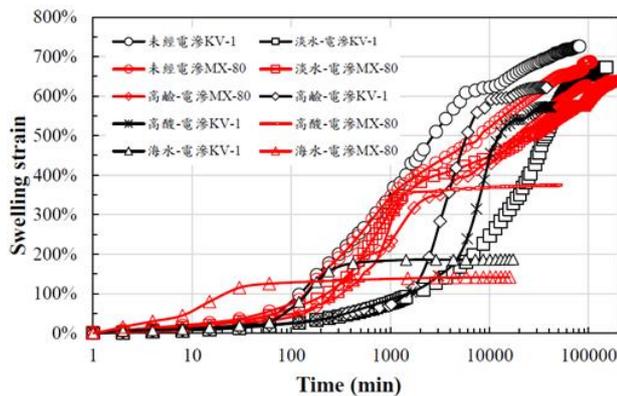


圖 7 電滲加速試驗後膨潤土自由回脹歷時曲線

由此試驗可發現，未經電滲加速試驗的膨潤土試體，其最大回脹率較經電滲加速試驗的膨潤土高。另外海水環境對 MX-80 與 KV-1 膨潤土的影響最為顯著，最大回脹率約降低 78.8% 及 74.2%；其次為高酸環境，約降低 46.1% 及 20.1%；而高鹼環境則是約降

低 10% 與 13.9%。

至於 MX-80 膨潤土的最大回脹率皆小於 KV-1 膨潤土之原因與膨潤土的塑性指數有關 (Nayka, et al., 1971)，阿太堡試驗結果顯示，MX-80 膨潤土的塑性指數為 341%，小於 KV-1 膨潤土的塑性指數 362%，使得其最大回脹率小於 KV-1 膨潤土。

(二) 電滲加速試驗後之定體積回脹試驗

MX-80 與 KV-1 膨潤土經電滲加速試驗後，於淡水、海水、高鹼性及高酸性四種溶液環境下的定體積回脹試驗結果如圖 8 所示，同時也於圖中列出 MX-80 與 KV-1 膨潤土在未經電滲加速試驗情況下，其於淡水環境中的定體積回脹壓力，以利後續分析比較。

圖 8 試驗結果顯示，MX-80 膨潤土的最終回脹壓力皆大於 KV-1 膨潤土，其原因與膨潤土中的蒙脫石含量有關 (陳文泉, 2004)，根據 IAEA(2007) 分析結果可得知，MX-80 膨潤土的蒙脫石含量為 80%，大於 KV-1 膨潤土的蒙脫石含量 57%，使得 MX-80 膨潤土的最終回脹壓力大於 KV-1 膨潤土。

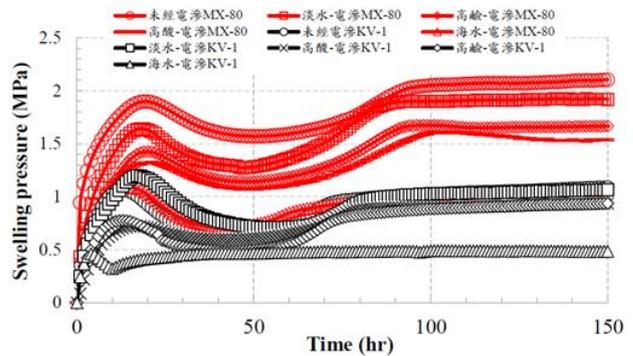


圖 8 電滲加速試驗後膨潤土定體積回脹壓力歷時曲線

同時由此試驗可發現，未經電滲加速試驗的膨潤土試體，其定體積回脹壓力較經電滲加速試驗的膨潤土高，另外海水環境對 MX-80 與 KV-1 膨潤土的影響最為顯著，最終的回脹壓力約降低 50.0% 及 56.9%，圖 8 中的歷時曲線也出現第二次回脹峰值被明顯壓縮的情形，且回脹壓力發展至最終穩定狀態的所需時間也較其他溶液環境短，此乃是由於海水環境中含有較高的離子強度所致。海水環境中與膨潤土電性相反的 Na⁺、K⁺ 等離

子會中和膨潤土表面的電荷，影響膨潤土 TOT 夾層可交換陽離子的水合作用，造成其分散結構的厚度減少，進而導致膨潤土的回脹壓力降低。

其次影響較為顯著的係高酸性環境，最終回脹壓力約降低 26.2% 及 14.7%；而高鹼性環境對電滲加速試驗後的膨潤土定體積回脹壓力影響則並不顯著。

(三) 電滲加速試驗後之水力傳導度試驗

MX-80 與 KV-1 膨潤土經電滲加速試驗後，於淡水、海水、高鹼性及高酸性四種溶液環境下的水力傳導度試驗結果如圖 9 所示，同時也於圖中列出 MX-80 與 KV-1 膨潤土在未經電滲加速試驗情況下，其於淡水環境中的水力傳導度，以利後續分析比較。

由此試驗可發現，未經電滲加速試驗的膨潤土試體，其水力傳導度較經電滲加速試驗的膨潤土低。四種不同溶液環境下，MX-80 膨潤土的水力傳導度皆較 KV-1 膨潤土低，另外經電滲後的 MX-80 膨潤土，在淡水、海水、高鹼性及高酸性環境下的水力傳導度都在同一個尺度上，其阻水性值相當；而在經電滲加速試驗後的 KV-1 膨潤土，在淡水、高鹼性及高酸性環境下的水力傳導度也在同一個尺度上，差異性不大，但在海水環境下的影響最為顯著，其水力傳導度約增加為其他環境的 10 倍。

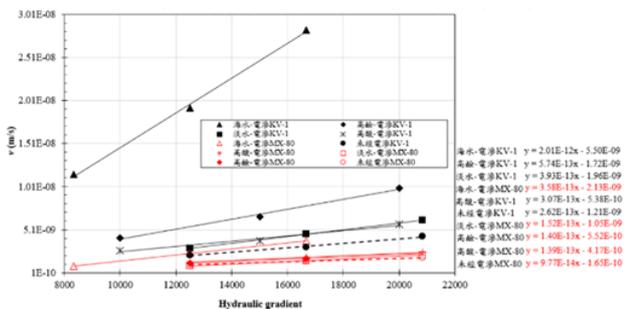


圖 9 電滲加速試驗後膨潤土水力傳導度變化趨勢

五、乾溼循環試驗結果與分析

5-1 外觀變化

壓製完成之膨潤土試體在未飽和條件下，若持續經歷相對溼度較低或較高之環境，則將引致體積的不穩定。圖 10 為 MX-80 膨潤土遭遇到乾—溼—乾環境後的外觀變化，其中圖 10(a) 為 MX-80 膨潤土試體壓製完成後，於大氣環境中的初始狀態，而當 MX-80 膨潤土第一次放置在相對溼度較低的環境中時 (RH=52.3%)，試體受到乾燥環境的影響並不顯著，試體外觀也無明顯的乾縮或剝落現象，如圖 10(b) 所示，接著將試體改放至相對溼度較高 (RH=85.1%) 的環境後，因膨潤土吸溼回脹，使得試體內有張應力生成並造成開裂現象，如圖 10(c) 所示，最後將試體放回相對溼度較低的環境中時 (RH=52.3%)，膨潤土乾縮現象將使試體開裂的部分崩落成大小不等之碎塊，如圖 10(d) 所示。

圖 11 為 KV-1 膨潤土遭遇到乾—溼—乾環境後的外觀變化，其中圖 11(a) 為 KV-1 膨潤土試體壓製完成後，於大氣環境中的初始狀態，而當 KV-1 膨潤土第一次放置在相對溼度較低的環境中時 (RH=52.3%)，雖然試體會因為乾縮而與試驗環間產生空隙，但外觀仍保持完整，並且沒有裂縫或剝落的現象發生，如圖 11(b) 所示，接著將試體改放至相對溼度較高 (RH=85.1%) 的環境後，因膨潤土吸溼回脹，使得試體與試驗環間的空隙消失，試體再次固定於試驗環中，然而空隙的消失導致試驗環側邊沒有多餘空間可以供試體回脹，造成試體角隅有突起的情形發生，如圖 11(c) 所示；最後將試體放回相對溼度較低的環境中時 (RH=52.3%)，原本角隅突起的部分將因乾縮而剝落，如圖 11(d)。

MX-80 膨潤土的外觀變化較 KV-1 膨潤土顯著的原因推測與蒙脫石含量有關，IAEA(2007) 顯示 MX-80 膨潤土中的蒙脫石含量為 80%，而 KV-1 膨潤土只有 57%，故 MX-80 膨潤土的吸溼回脹幅度較 KV-1 膨潤土大，進而造成乾溼循環的外觀變化較為顯著。另外當試體開裂後，膨潤土與環境水汽的接觸面積增加也會造成試體在外觀變化上更為顯

著。

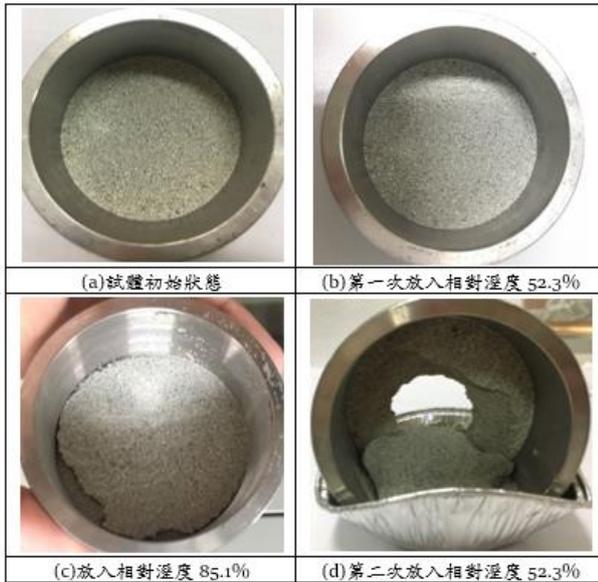


圖 10 MX-80 膨潤土外觀隨相對溼度變化的情形

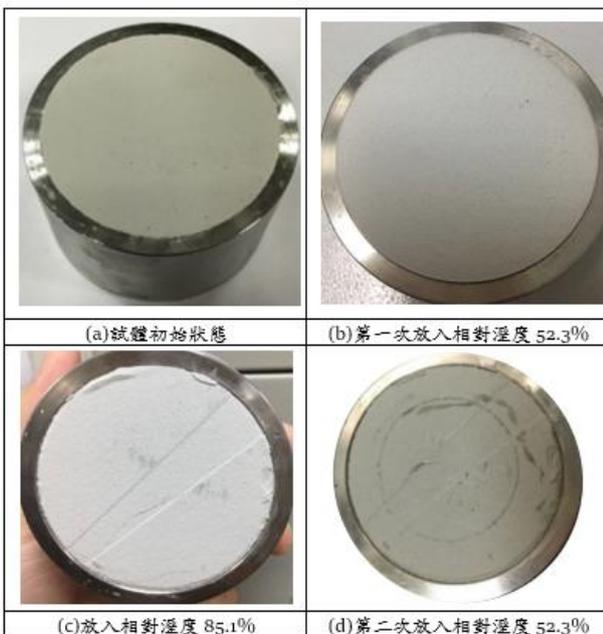


圖 11 KV-1 膨潤土外觀隨相對溼度變化的情形

5-2 重量變化

乾溼循環試驗中，MX-80 與 KV-1 膨潤土各階段的重量變化與時間相對關係如圖 12 所示，其中(AB)[→]為在大氣環境下將試體放置於相對溼度 52.3%後的重量變化曲線；(BC)[→]為試體在相對溼度 52.3%重量穩定後，改放至相對溼度 85.1%後的重量變化曲線，待試體重量平衡後，(CD)[→]為再將試體放回相對溼度 52.3%後的重量變化曲線。

由圖 12 可以發現，當膨潤土試體放置於乾燥環境中時(RH=52.3%)，其重量會因水分散失而遞減，而當膨潤土再次遭遇潮溼環境時(RH=85.1%)，其重量會因為試體吸收水分而遞增，據此可知 MX-80 與 KV-1 膨潤土具有良好的保水性能，能自我調節空氣與膨潤土中的水分以達吸力平衡。

MX-80 與 KV-1 膨潤土在第一次乾燥歷程中，二者達重量穩定的所需時間一致，皆為 85 天，且重量的變化量也皆未超過 1.5%。在潮溼歷程中，MX-80 膨潤土達重量穩定的所需時間較 KV-1 膨潤土少 8 天，重量的變化量也較 KV-1 膨潤土高約 1.8%，推測與膨潤土蒙脫石含量，以及試體開裂後增加膨潤土與環境中水汽接觸的面積有關。

雖然 MX-80 膨潤土於潮溼環境中吸收水分後的重量較 KV-1 膨潤土高，但在第二次乾燥歷程中，二者達重量穩定的所需時間卻相同，皆為 231 天，且 MX-80 膨潤土重量的變化量仍較 KV-1 膨潤土高約 2.5%，推測係因 MX-80 膨潤土試體開裂崩落所致，使得膨潤土充分曝露在乾燥環境中，不但增加重量的變化量，同時也縮短乾燥歷程的所需時間。

另外當二種膨潤土試體經歷一乾一溼循環後，若再將試體放至於乾燥環境時(RH=52.3%)，則試體重量穩定後，其重量損失將會大於第一次於乾燥環境中的重量損失。

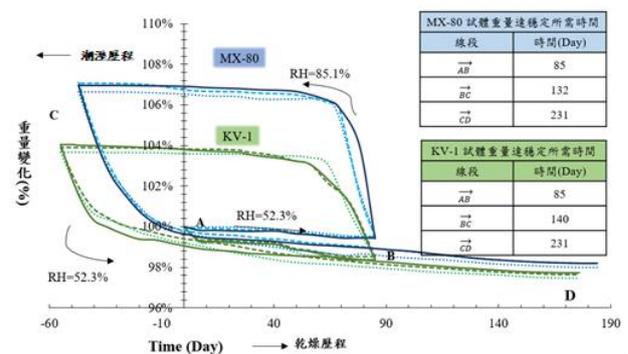


圖 12 乾溼循環試驗中膨潤土的重量變化與時間相對關係

5-3 含水量變化

乾溼循環試驗中，MX-80 與 KV-1 膨潤土各階段的含水量變化與時間相對關係如圖 13 所示。

相較於圖 12 可以發現 MX-80 與 KV-1 膨潤土的含水量變化範圍明顯大於其重量變化範圍，據此可判斷膨潤土受乾溼循環影響，使其重量產生變化之原因主要係由於膨潤土內部水分的吸收與釋出所致。另外藉由圖 13 也可以發現 MX-80 膨潤土含水量的變化量較 KV-1 膨潤土大，其原因推測為 MX-80 膨潤土的蒙脫石含量較 KV-1 膨潤土多，導致 MX-80 膨潤土吸收與釋出的水分較 KV-1 膨潤土多。

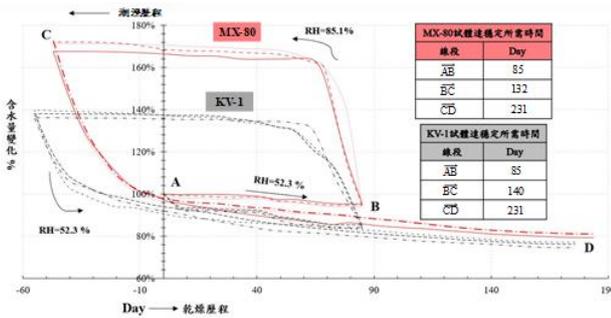


圖 13 乾溼循環試驗中膨潤土含水量變化與時間相對關係

5-4 乾溼循環試驗後之飽和狀態模擬試驗

將乾溼循環試驗完成後的 MX-80 與 KV-1 膨潤土試體浸泡於淡水、海水、高鹼性、高酸性 4 種不同溶液中，並長期量測其回脹率、定體積回脹壓力與水力傳導度，以掌握膨潤土先後經歷乾溼循環與飽和環境影響後，其阻水性質的變化情形。

(一) 乾溼循環試驗後之自由回脹試驗

圖 14 為經乾溼循環試驗後的 MX-80 與 KV-1 膨潤土試體，在淡水、海水、高鹼性及高酸性四種溶液環境下的自由回脹歷時曲線，同時也於圖中列出 MX-80 與 KV-1 膨潤土在未經驗乾溼循環試驗的情況下，其於淡水環境中的自由回脹，以利後續分析比較。

由此試驗可發現，未經乾溼循環試驗的膨潤土試體，其最大回脹率較乾溼循環試驗的膨潤土高。另外，海水環境對 MX-80 與 KV-1 膨潤土的影響最為顯著，最大回脹率約降低 77.4% 及 80.2%；其次為高酸環境，約降低 31.7% 及 12.5%；而高鹼環境則約降低 18.5% 與 13.3%。

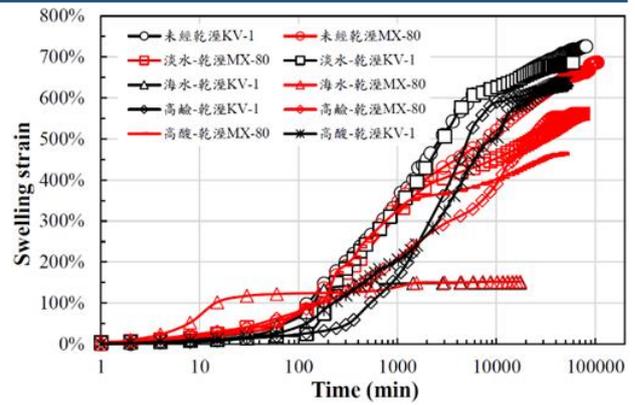


圖 14 乾溼循環試驗後膨潤土自由回脹歷時曲線

(二) 乾溼循環試驗後之定體積回脹試驗

MX-80 與 KV-1 膨潤土經乾溼循環試驗後，於淡水、海水、高鹼性及高酸性四種溶液環境下的定體積回脹試驗結果如圖 15 所示，同時也於圖中列出 MX-80 與 KV-1 膨潤土在未經驗乾溼循環試驗情況下，其於淡水環境中的定體積回脹壓力，以利後續分析比較。

由此試驗可發現，MX-80 與 KV-1 膨潤土經歷乾溼循環試驗後，其回脹壓力皆有所下降之趨勢，最終的回脹壓力分別約降低 31% 與 33%，在高鹼性環境下，最終回脹壓力約降低 34.3% 與 37.6%，高酸性環境下，最終回脹壓力約降低 31% 及 54%，而在海水環境下對 MX-80 與 KV-1 膨潤土的影響最為顯著，其最終回脹壓力約降低 66.2% 及 69.7%，同時藉由圖 15 歷時曲線可發現，KV-1 膨潤土的第 2 次回脹峰值被明顯壓縮，而 MX-80 膨潤土的第 2 次回脹峰值則幾乎消失，且回脹壓力的發展比其他溶液環境更快達到最終穩定狀態。

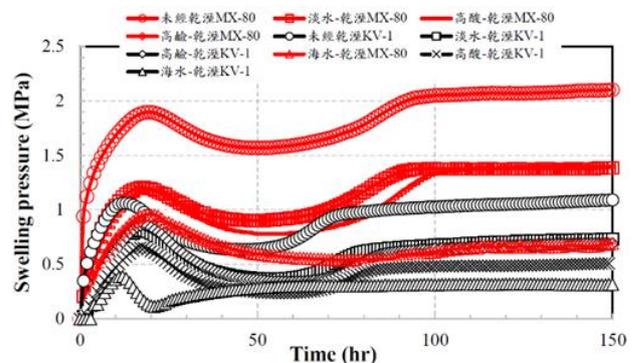


圖 15 乾溼循環試驗後膨潤土定體積回脹壓力歷時曲線

(三)乾溼循環試驗後之水力傳導度試驗

MX-80 與 KV-1 膨潤土經乾溼循環試驗後，於淡水、海水、高鹼性及高酸性四種溶液環境下的水力傳導度試驗結果如圖 16 所示，同時也於圖中列出 MX-80 與 KV-1 膨潤土在未乾溼加速試驗情況下，其於淡水環境中的水力傳導度，以利後續分析比較。

由此試驗可發現，未經乾溼循環試驗的膨潤土試體，其水力傳導度較經乾溼循環試驗的膨潤土低。四種不同溶液環境下，MX-80 膨潤土的水力傳導度皆較 KV-1 膨潤土低，另外經乾溼循環試驗後的 MX-80 膨潤土，在淡水、海水、高鹼性及高酸性環境下的水力傳導度都在同一個尺度上，其阻水性值相當；而在經乾溼循環試驗後的 KV-1 膨潤土，在淡水、高鹼性及高酸性環境下的水力傳導度也在同一個尺度上，差異性不大，但在海水環境下的影響最為顯著，其水力傳導度約增加為其他環境的 2 倍。

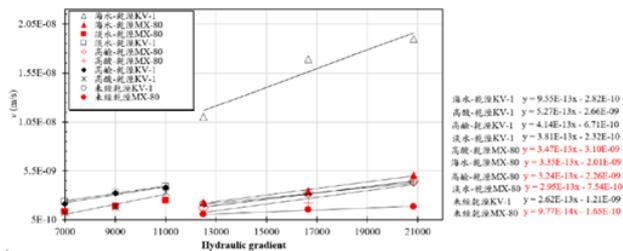


圖 16 乾溼循環試驗後膨潤土水力傳導度變化趨勢

六、結論與建議

本研究藉由電滲加速試驗與乾溼循環試驗，掌握 MX-80 與 KV-1 膨潤土材料在處置場未飽和狀態、乾溼循環環境、以及飽和狀態下之阻水性質變化，供我國低放射性廢棄物最終處置場設計與安全評估之參考依據。茲將上述試驗所得之結論與建議分項加以敘述，並將試驗結果彙整於表 2。

表 2 電滲加速與乾溼循環試驗對膨潤土特性的影響彙整

試驗項目		膨潤土材料		
		MX-80	KV-1	
電滲加速試驗	最大回脹率 (%)	未經電滲	686.9	726.2
		淡水	639.4	679.7
		海水	145.8	187.7
		高鹼性溶液	618.7	625.5
		高酸性溶液	369.9	579.9
	最終回脹壓力 (MPa)	未經電滲	2.10	1.09
		淡水	1.92	1.07
		海水	1.05	0.47
		高鹼性溶液	1.69	0.99
		高酸性溶液	1.55	0.93
	水力傳導度 (m/s)	未經電滲	9.77×10^{-14}	2.62×10^{-13}
		淡水	1.46×10^{-13}	3.93×10^{-13}
海水		3.56×10^{-13}	2.06×10^{-12}	
高鹼性溶液		1.33×10^{-13}	5.59×10^{-13}	
高酸性溶液		1.33×10^{-13}	3.12×10^{-13}	
乾溼循環試驗	最大回脹率 (%)	未經電滲	686.9	726.2
		淡水	558.3	675.7
		海水	155.3	143.8
		高鹼性溶液	559.6	629.4
		高酸性溶液	468.9	635.3
	最終回脹壓力 (MPa)	未經電滲	2.10	1.09
		淡水	1.44	0.73
		海水	0.71	0.33
		高鹼性溶液	1.38	0.68
		高酸性溶液	1.44	0.50
	水力傳導度	未經電滲	9.77×10^{-14}	2.62×10^{-13}
		淡水	3.14×10^{-13}	3.70×10^{-13}

	(m/s)	海水	3.43×10^{-13}	8.79×10^{-13}
		高鹼性 溶液	3.23×10^{-13}	4.17×10^{-13}
		高酸性 溶液	3.35×10^{-13}	5.20×10^{-13}

6-1 膨潤土阻水層材料的選擇

由於目前國際間尚未對低放射性廢棄物最終處置場阻水層的設計功能進行規定，故本研究將以瑞典高放射性廢棄物最終處置場緩衝材料的阻水性能要求：水力傳導度 $< 10^{-12}$ m/s、回脹壓力 > 1 MPa 作為依據進行評估 (SKB, 2010)。

由彙整表 2 可得知，MX-80 膨潤土僅有在乾溼循環試驗後，海水環境下的回脹壓力未達到要求，其餘的回脹壓力、水力傳導度數值皆符合 SKB 數值要求；而在 KV-1 膨潤土方面，其回脹壓力僅有經電滲加速試驗後，於淡水環境下符合要求，其餘的回脹壓力數值皆未達到 SKB 數值要求。

據此可知，MX-80 膨潤土受近場環境演化影響後，其各項阻水性能幾乎仍符合 SKB 要求，且回脹壓力皆大於 KV-1 膨潤土、水力傳導度也皆小於 KV-1 膨潤土，為求處置場阻水層的物理、化學性質長期穩定，以確保處置設施的功能年限滿足設計需求，故相對建議選用 MX-80 膨潤土作為處置場阻水層的材料。

6-2 近場環境演化對膨潤土阻水層的影響

近場環境演化將會使膨潤土處於未飽和/飽和之狀態，並進而使其阻水性能發生變化，本研究就未飽和/飽和環境對 MX-80 與 KV-1 膨潤土的阻水性能影響分項加以說明。

(一) 未飽和環境的影響

電滲加速試驗係模擬未飽和狀態下，混凝土障壁材料與膨潤土阻水層相互接觸時所產生的離子交換現象，此屬於處置場施工階段時不可避免之現象，並且當處置設施設置完畢時即開始產生反應。

SKB(2005)的模擬分析結果顯示，混凝土與膨潤土交互作用開始進行 500 年後，對於膨潤土鈣型化的影響範圍僅限於接觸面前約

0.2 m 的部分，至 10,000 年後的影響範圍才會約達到 0.5 m。考量目前我國低放射性廢棄物最終處置場概念設計係將膨潤土阻水層的厚度設定為 0.5 m，且 2 側皆與水泥材料相關之障壁元件相互接觸的情形下，也需經歷超過 500 年的交互作用，膨潤土阻水層才會完全鈣型化。而根據彙整表 2 可得知，MX-80 膨潤土鈣型化後，其在淡水環境下的回脹壓力減少幅度約為 8.6%，而水力傳導度則是未鈣型化膨潤土的 1.5 倍。

相較之下短時間內，大氣環境的相對溼度變化則較為顯著，交通部中央氣象局(2020)紀錄顯示，台灣平均每四個月就會出現一次相對溼度月平均相差 10% 以上的情形，另外彙整表 2 顯示，MX-80 與 KV-1 膨潤土經乾溼循環試驗後，其於淡水環境下的回脹壓力減少幅度達 30% 以上，MX-80 膨潤土的水力傳導度更增加為未經乾溼循環試驗的 3.2 倍。據此可說明膨潤土的阻水功能受乾溼循環的影響顯著，故應盡可能縮短處置設施的施工工期，盡早對處置場進行回填封閉，以減少處置設施與大氣環境接觸的時間，降低乾溼循環對阻水層的影響。若以處置場封閉後的長尺度安全評估分析而言，則建議仍需將交互作用對膨潤土鈣型化的影響納入考量。

(二) 飽和環境的影響

彙整表 2 顯示，MX-80 與 KV-1 膨潤土經過電滲加速或乾溼循環試驗後，其於海水、高鹼性、高酸性環境中的最終回脹壓力皆小於淡水環境，水力傳導度也皆大於淡水環境，由此可得知環境溶液中的離子種類與濃度將影響膨潤土的阻水功能，其中以海水環境的影響最為顯著，相較於未經電滲加速或乾溼循環試驗的膨潤土，其最終回脹壓力的減少幅度皆超過 50%，水力傳導度也皆約增加 3.3 倍以上。

因此當處置場封閉後，應針對海水入侵處置設施的可能性進行考量，以評估海水溶液對處置設施功能年限的影響。

參考文獻

1. 交通部中央氣象局網站，網頁資料：
<https://e-service.cwb.gov.tw/HistoryDataQuery/index.jsp>，2020。
2. 台電公司，「低放射性廢棄物最終處置建議候選場址處置設計與工程技術報告」，LLWD2-ED-2019-07-V05，pp.4-1~4-13，2020。
3. 陳文泉，「高放射性廢棄物深層地質處置緩衝材料之回脹行為研究」，博士論文，國立中央大學土木工程研究所，第 10~15 頁，2004。
4. Delage, P., Howat, M. D., Cui, Y. J., “The Relationship Between Suction and Swelling Properties in a Heavily Compacted Unsaturated Clay,” *Engineering Geology*, Vol.50, pp.31~48, 1998.
5. IAEA, “Characterization of Swelling Clays as Components of the Engineered Barrier System for Geological Repositories”, International Atomic Energy Agency, pp.77~83, 2007.
6. Nayak, N.V., and Christensen, R.W., “Swelling Characteristics of Compacted Expansive Soils,” *Clays and Clay Minerals*, Vol.19, pp.251~261, 1971.
7. SKB, “Modelling of Long-term Concrete Degradation Processes in the Swedish SFR Repository,” Svensk Kärnbränslehantering AB, R-01-08, pp.19~22, 2001.
8. SKB, “Modelling the Geochemical Evolution of the Multi-barrier System of the Silo of the SFR Repository,” Svensk Kärnbränslehantering AB, R-05-80, pp.29~33, 2005.
9. SKB, “Design, Production and Initial State of the Buffer,” Svensk Kärnbränslehantering AB, TR-10-15, pp.20~26, 2010.

熱浸鍍鋅鋼筋運用於高性能混凝土之探討

林志忠¹ 王和源² 林冠婷³

¹高雄醫學大學總務處營繕組技佐

²國立高雄科技大學土木工程與科技研究所特聘教授

³國立高雄科技大學土木工程與科技研究所碩士

摘要

在推展綠建築的目標下，台灣使用鋼鐵結構建築物越來越多；而地理位置上位處於海島型氣候區，高溫、高濕及高鹽附著易造成腐蝕環境。本研究探討使用熱浸鍍鋅鋼筋混凝土結構物之耐久性，在不同配比與齡期對於鍍鋅鋼筋及結構握裹強度勢必產生不同程度的影響。本研究以設計強度 280kgf/cm^2 ，水膠比 0.5，以爐石及飛灰等再生材料不同取代量高性能混凝土對鍍鋅鋼筋之影響，分別取代 0%、10%、20%、30%，製作 $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ 之混凝土圓柱試體，於齡期 7 天、14 天、28 天、56 天、91 天以及 120 天。經過室溫養護進行新拌性質試驗、工程性質試驗，並在製作試體時一併埋設鍍鋅鋼筋及一般鋼筋於混凝土試體內，比較鍍鋅鋼筋及一般鋼筋握裹力試驗。研究顯示隨爐石、飛灰取代量增加，坍度最高可達到 225 mm 以上具有良好之工作性。隨著爐石、飛灰的取代量逐漸增加時，單位體積重會逐漸降低，凝結時間也會因取代量的增加而提高至 1.2 倍，抗壓強度因爐石、飛灰的不同取代量隨著齡期的增加而增加，超音波波速提高約 1.07~1.1 倍以及電阻提升約 1.45~7.9 倍。高性能混凝土添加飛灰、爐石粉因卜作嵐反應有助於提高握裹強度，鍍鋅鋼筋最大握裹強度斜率較普通鋼筋高，故熱浸鍍鋅鋼筋使用於高性能混凝土石仍有較高的握裹強度。

關鍵字：高性能混凝土、鍍鋅鋼筋、工程性質、握裹強度

ABSTRACT

Under the goal of promoting green buildings, more and more steel structures are used in Taiwan; and the geographical position is in an island-type climate zone, where high temperature, high humidity and high salt adhesion can easily cause a corrosive environment. This study explores the durability of the use of hot-dip galvanized reinforced concrete structures. Different ratios and ages will inevitably have different degrees of influence on the galvanized steel bars and structural bond strength. In this study, the design strength is 280kgf/cm^2 , the water-binder ratio is 0.5, and the influence of different replacement amounts of recycled materials such as hearthstone and fly ash on the galvanized steel bar is replaced by 0%, 10%, 20%, and 30% of high-performance concrete. Make concrete cylindrical specimens of $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$, with ages of 7 days, 14 days, 28 days, 56 days, 91 days and 120 days. After curing at room temperature, the new mix property test and engineering property test were carried out, and the galvanized steel bars and general steel bars were embedded in the concrete test body at the same time when the specimens were made, and the bond strength test of galvanized steel bars and general steel bars were compared. Studies have shown that with the increase in the replacement of furnace stone and fly ash, the slump can reach a maximum of 225 mm and has good workability. As the replacement amount of furnace stone and fly ash gradually increases, the unit volume weight will

gradually decrease, and the setting time will increase to 1.2 times due to the increase in the amount of replacement. The compressive strength varies with the amount of replacement of furnace stone and fly ash. As the age increases, the ultrasonic wave speed increases by about 1.07 to 1.1 times and the resistance increases by about 1.45 to 7.9 times. The addition of fly ash and hearth powder to high-performance concrete can help to improve the bond strength. The maximum bond strength slope of galvanized steel bars is higher than that of ordinary steel bars. Therefore, hot-dip galvanized steel bars are still higher when used in high-performance concrete stones. Grip strength.

Keywords: high performance concrete, galvanized steel, engineering properties, bond strength

一、緒論

台灣為一海島,地處熱帶/亞熱帶,高溫、高濕與高鹽分的存在,造成金屬在大氣中容易腐蝕裂化。由於金屬材料的大氣腐蝕機制主要是受大氣中所含水分、氧氣和腐蝕物質(如雨中的雜質、灰塵、金屬表面沉積物等)聯合作用而產生的破壞【1】。鋼鐵材料為今日人類生活中不可或缺的重要資源,然而因其本身特性使然,使得"銹蝕"無日不時伴隨著我們,並無時無刻地損耗著我們的資源—鋼鐵,又因台灣受海洋性季風的惡劣環境下,"銹蝕"問題較其他國家來的更為嚴重【2】。混凝土除了承壓應力之外,還需藉接觸面,將拉應力傳遞至鋼筋,然而一旦鋼筋產生了鏽蝕導致握裹力降低,進而將對結構安全產生影響,為防範鋼筋的腐蝕,需考慮經濟及合理防蝕方法。鋼筋表面鍍鋅即有效的防蝕方法之一。因此針對飛灰及爐石粉使用在混凝土後對鍍鋅鋼筋之影響進一步探討。並對其相關性質之影響進行研究,包含新拌、硬固以及耐久性質等,本研究目的在添加各種再生材料於鍍鋅鋼筋高性能混凝土之最佳取代量、最佳配比及不同再生材料對鍍鋅鋼筋高性能混凝土握裹強度之影響性作探討。

二、文獻回顧

以熱浸鍍鋅(Hot dip galvanizing)最基本的製成就是將鋼材直接浸入熔融的鋅浴中,使表面鍍覆一層鋅層以達鋼材防蝕功效,其防蝕原理分為隔絕保護與陰極防蝕。隔絕保護是藉由鋼材表面的鍍鋅層將鋼板與腐蝕環

境隔離,此外鍍鋅薄膜氧化後生成的氧化鋅及氫氣化鋅為一致密的保護薄膜,可做為第二種阻擋層以保護底材,並使鏽蝕難以繼續侵入破壞鋼材。經過合金化處理的鍍鋅鋼板,表面可獲得一層較厚、致密又不易溶解於水的暗灰色非活性氧化膜,能阻止氧化進一步發生。而陰極防蝕作用是使用相對於鋼材活性較高較易氧化的金屬,例如鋁、鎂、鋅,利用兩者間電位差產生防蝕電流,以達防蝕效果。於鋅的電極電位比鐵的電極電位低(鋅為 $-0.762V$;鐵為 $-0.440V$),當鍍鋅層不完整或是有破裂時,周圍的鋅會形成陽離子來保護此處鋼材,並抑制鋼材的腐蝕,稱為犧牲陽極的作用,相對得鋼材就能得到陰極防蝕的保護,相較於使用塗裝的防蝕方法更有效果。若塗層處有裂縫產生,鏽蝕會迅速入侵致鋼材,引起鋼材膨脹及塗層剝落,同時會加速該處的腐蝕情況【3-6】。熱浸鍍鋅鋼筋其使用上的主要優點為抗腐蝕性佳,熱浸鍍鋅防時方法應用在鋼筋混凝土結構中能對腐蝕有效克制,經濟實用且耐久性佳,施工不需特別的設備或技術,鍍鋅效果可完全克服氣候,如海岸環境、都市景觀、施工條件及品質管理的問題,生命週期長,廣泛被使用在高腐蝕的鋼筋混凝土結構物中,預鑄構造或暴露於侵蝕環境的結構物以及易遭受侵蝕的內部結構【7】。所以另有研究結果提出添加一定比例的鋁於鋅浴以降低腐蝕速率,同時可增加塗層韌性便於加工【8】。熱浸鍍鋅是將鋼筋浸於熔融的鋅液中,以鍍上一層鋅。鋅層是由純鋅與鐵鋅合金組成的複合鋅層。此鍍鋅層的附著性及耐磨性均佳,能將鋼筋封住

而形成韌性的保護。同時，鋅對鐵而言係陽極能在鋅層破裂時以犧牲的方式來達到陰極保護的作用【7】。多年來，飛灰的摻入水泥混凝土中部分替代是一種常見的做法。飛灰的量來代替水泥的典型應用是由膠凝材料總量的質量限制在 15-20%，因飛灰已填滿孔隙，而阻止乾縮【9】。高爐石粉顆粒細微，添加於混凝土中可減少孔隙，增加混凝土緻密性，進而增加混凝土品質及耐久性【10】。卜作嵐材料目前被廣泛使用於混凝土，能有效改善工作度、增進混凝土晚期強度及增加耐久性，且具有環保經濟之特性，以工業副產品取代水泥，藉此將工業副產品作充分有效的資源利用。【11】。

三、試驗計畫

3-1 試驗材料

本研究所使用之試驗材料為水泥、爐石粉、飛灰、粗骨材、細骨材、自來水及化學摻料等，就其各別性質如下所述：

- (1) 拌和用水：符合 CNS 13961 混凝土拌合用水要求之規定。
- (2) 水泥：採用台灣品牌水泥公司所生產之卜特蘭第 I 型水泥，品質符合 CNS 61 規範要求，水泥購進以塑膠帶密封，確保不受潮，物化性質如表 1 所示。
- (3) 飛灰：採用台電興達火力發電廠所產製之 F 級飛灰，其性質符合 CNS 36 之要求規範，其物化性質如表 1 所示。
- (4) 爐石粉：使用符合 CNS12549 中聯爐石資源處理公司生產之水淬爐石，其物化性質如表 1 所示。
- (5) 天然砂石：採用之天然砂石，進行篩分析試驗後得之粒徑分佈曲線符合 ASTM C33 規範。
- (6) 人工海水素：人工海水是依據 ASTM D-1141 規範中之方法來配製。
- (7) 鋼筋：使用一般鋼筋及鍍鋅鋼筋，皆為 SD420W #6 鋼筋進行試驗，熱浸鍍鋅鋼筋製程係經過脫脂、酸洗、助鍍劑及熱浸鍍鋅。

3-2 試驗項目

本研究以 ACI 混凝土配比設計法計算設

計強度 280kgf/cm^2 ，固定水膠比($W/B=0.5$)，以爐石粉及飛灰等再生材料分別取代 0%、10%、20%、30% 製作混凝土試體，並探討 28 天鋼筋混凝土握裹力之影響，並進行新拌性質(如坍度、單位重、凝結時間、氯離子檢測)、硬固性質(如抗壓強度、握裹強度、超音波試驗)、耐久性質(如四極式電阻、硫酸鹽侵蝕)等試驗。另外製作 91 天鍍鋅鋼筋混凝土試體，養護於硫酸鹽溶液對鍍鋅鋼筋握裹力試驗之影響。

四、結果與討論

4-1 坍度

圖 1 所示，新拌混凝土之坍度由爐石粉、飛灰同時取代水泥及粗細骨材時，固定爐石粉取代量 0%，飛灰取代量為 0%、10%、20%、30% 時，坍度由 14mm 增加至 17mm，為控制組的 1.21 倍，當爐石粉取代量達 30%，隨著飛灰取代量提高坍度增加為 22.5mm，為控制組的 1.61 倍，其因爐石表面較水泥不吸附水分，使游離水增加，若在相同拌和下水，坍度略為增加，而飛灰表面為光滑之球形，會在混凝土材料間有滾球潤滑作用，所以使用飛灰可改善混凝土的黏聚性與可塑性而提升工作性。

4-2 單位重

圖 1 所示，爐石粉、飛灰同時取代 0% 時，控制組單位重為 2403kg/m^3 ，當飛灰取代量提高為 30% 時，單位重下降至 2367kg/m^3 ，當爐石粉取代量達 30% 時，單位重隨飛灰取代量的提高而逐漸下降至 2328kg/m^3 ，為控制組的 0.97 倍，由此可知，單位重隨著爐石粉及飛灰的取代量增加而降低；原因為飛灰之比重較細骨材來的小，因此取代量提升時，混凝土的單位重會逐漸降低。

4-3 凝結時間

圖 2 所示，凝結時間由爐石粉、飛灰同時取代水泥及粗細骨材時，固定爐石粉取代量 0%，飛灰取代量為 0%、10%、20%、30% 時，初凝時間分別為 201min、216min、205min、207min，終凝結時間分別為 314min、329min、311min、304min，爐石粉取代量為 20%，飛灰取代量為 30% 時，初凝時間 212min，終凝時間為 341min，初凝及終凝時間較控制組分

別增加 1.06 倍及 1.1 倍，當爐石粉取代量提高至 30%，隨著飛灰的取代量增加時，初凝及終凝結時間分別增加至 227min、378min，時間分別較控制組增加 1.13 倍及 1.2 倍，結果顯示隨著爐石粉、飛灰取代量的增加，初凝及終凝結時間會略為增加，其原因為飛灰的水化試在水泥水化後才發生，所以添加飛灰會延長混凝土的凝結時間減緩強度成長速率。

4-4 氯離子檢測

依據規範(CNS13465)規定新拌混凝土之氯離子含量檢測皆要小於 $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ ，當爐石粉與飛灰取代砂與細骨材時，氯離子含量範圍在 $0.035\sim 0.054\text{kg}/\text{m}^3$ 間，氯離子含量皆符合規範 $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ 以下。

4-5 抗壓強度

圖 3 所示，混凝土設計強度 $280\text{kgf}/\text{cm}^2$ 時，其抗壓強度隨著齡期增加而有提高的趨勢，7 天齡期之抗壓強度在 $205\sim 337\text{kgf}/\text{cm}^2$ 間，爐石粉及飛灰取代量為 30% 較控制組高 1.2 倍，由此顯示抗壓強度會隨著取代量的增加而提高；而 28 天齡期時，抗壓強度分別為 $370\sim 442\text{kgf}/\text{cm}^2$ 間，爐石粉及飛灰最大取代量取代量為 30% 時，較控制組高 1.1 倍；56 天齡期抗壓強度在 $380\sim 477\text{kgf}/\text{cm}^2$ 間，控制組與飛灰及爐石粉最大取代量相差 1.2 倍；91 天齡期時抗壓強度在 $421\sim 499\text{kgf}/\text{cm}^2$ 間，最大取代量強度高於控制組 1.1 倍；而達 120 天晚齡期時，抗壓強度介於 $425\sim 532\text{kgf}/\text{cm}^2$ 間，爐石粉及飛灰最大取代量為控制組 1 倍，晚齡期之抗壓強度成長趨勢趨於平緩。

4-6 握裹強度

圖 4~圖 7 所示，鋼筋混凝土界面在受到作用力之後產生滑移破壞，先是微裂縫產生，在作用力逐漸大於界面黏結握裹應力則有為小量的滑移，最後形成大裂縫進而滑脫破壞。試驗每組置入鋼筋分為未處理的普通鋼筋及熱浸鍍鋅鋼筋，在混凝土養護 28 天齡期後進行握裹強度試驗，爐石粉、飛灰取代水泥及細骨材之卜作嵐混凝土，在相同位移量下鍍鋅鋼筋最大握裹強度斜率相較於普通鋼筋高，可以由此數據判斷鍍鋅鋼筋握裹強度較佳；控制組之普通鋼筋混凝土及鍍鋅鋼筋混凝土

於位移量 3mm 時，握裹強度分別為 3250psi 及 4010psi，鍍鋅鋼筋混凝土握裹強度較普通鋼筋高 1.23 倍，當爐石粉取代量為 20%，飛灰取代量為 30% 時，普通鋼筋混凝土及鍍鋅鋼筋混凝土於位移量 3mm 時，握裹強度分別為 1870psi 及 4408psi，鍍鋅鋼筋混凝土握裹強度較普通鋼筋高 2.36 倍，而當爐石粉及飛灰取代量增加至 30% 時，普通鋼筋混凝土及鍍鋅鋼筋混凝土於位移量 3mm 時，握裹強度分別為 3426psi 及 4398psi，鍍鋅鋼筋混凝土握裹強度較普通鋼筋高 1.28 倍。

4-7 超音波波速

圖 8 一般養護下控制組於 7 天齡期時超音波波速介於 $4231\sim 4565\text{m}/\text{s}$ 之間；在 14 天齡期時，其超音波波速介於 $4438\sim 4679\text{m}/\text{s}$ 間；在 28 天齡期時，其超音波波速介於 $4582\sim 4796\text{m}/\text{s}$ 間；當 56 天齡期時超音波波速在 $4627\sim 4822\text{m}/\text{s}$ 間；而達 91 天晚齡期時，超音波波速介在 $4680\sim 4856\text{m}/\text{s}$ 間；在 120 天齡期時，其超音波波速介於 $4713\sim 4870\text{m}/\text{s}$ 間。

4-8 表面電阻

圖 9 為卜作嵐混凝土不同齡期表面電阻值之關係，隨著爐石粉及飛灰取代量的增加，表面電阻值逐漸增加，7 天早期齡期時表面電阻值介於 $8.3\sim 10.5\text{k}\Omega\text{-cm}$ 之間，最大取代量較控制組高 1.1 倍；而 14 天齡期之表面電阻值在 $8.6\sim 19\text{k}\Omega\text{-cm}$ 間，最大取代量較控制組高 2.2 倍，差距逐漸增加；在 28 天齡期時，其表面電阻值介於 $9.3\sim 36\text{k}\Omega\text{-cm}$ 間，最大 30% 取代量時較控制組高 3.2 倍；當 56 天齡期時表面電阻值在 $8.8\sim 68.1\text{k}\Omega\text{-cm}$ 間，最大取代量較控制組高 7.7 倍；91 天齡期時，表面電阻值介在 $11.9\sim 89.8\text{k}\Omega\text{-cm}$ 間，30% 取代量較控制組高 7.5 倍；達 120 天晚齡期時，表面電阻值介在 $12.8\sim 97.9\text{k}\Omega\text{-cm}$ 間，30% 取代量較控制組高 7.6 倍。

4-9 抗硫酸鹽侵蝕

硫酸鹽侵蝕主要成份為脫水硫酸鈉泡成水溶液將試體浸泡在裡面，來觀察其重量損失，混凝土試體製作完成後，待 28 天齡期時放入烘箱以 $100\pm 5^\circ\text{C}$ 烘乾 24 小時，再把試體浸泡在飽和硫酸鹽中，進行 5 個循環，以量

測其重量損失率。試驗結果如圖 10 顯示養護 28 天齡期時進行硫酸鹽浸泡記錄其損失重量，控制組為 4.84%、爐石粉及飛灰取代量 10% 時為 2.81%、爐石粉及飛灰取代量 20% 時為 2.11%、爐石粉及飛灰取代量 30% 時為 2.89%；後續侵入量較低，在試驗 5 循環後爐石粉及飛灰阻雖損失重量相差不多但表面完好，後續硫酸鹽容易入侵量較低，在本實驗中的反應階段因有添加較多的爐石及飛灰，故在硫酸鹽侵蝕方面停留在膨脹階段沒有崩解之現象，顯示耐久性能力的上升。

五、結論

- (1) 新拌性質混凝土坍度各配比皆有達到設計規範之坍度值，且飛灰、爐石粉等卜作嵐材料提高坍度，所以使用飛灰可改善混凝土的黏聚性與可塑性而提升工作性。
- (2) 單位重方面隨著爐石粉及飛灰取代量的增加，單位重有明顯之下降趨勢，因為飛灰之比重較細骨材來的小，因此取代量提升時，混凝土的單位重會逐漸降低。氯離子皆小於 $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ ，在此次試驗中符合設計要求。
- (3) 凝結時間因爐石粉及飛灰取代下大幅延長，而原因飛灰的水化是在水泥水化後才發生，所以添加飛灰會延長混凝土的凝結時間節減緩強度成長速率。
- (4) 抗壓強度皆隨齡期增加而增加，各配比皆符合設計強度要求，添加飛灰及爐石粉之混凝土配比，於晚齡期抗壓強度皆優於傳統混凝土。
- (5) 超音波速皆隨著齡期的增加而提高，於添加高性能混凝土相較於傳統混凝土有較高超音波波速成長趨勢。
- (6) 高性能混凝土添加飛灰、爐石粉因卜作嵐反應有助於提高握裹強度，28 天齡期鋼筋混凝土握裹強度為鍍鋅鋼筋表現較佳。
- (7) 隨著爐石粉及飛灰取代量的增加，表面電阻值逐漸增加，三組配比中在飛灰、爐石粉取代量較高，故隨高爐粉的增加表面電阻相對提高。
- (8) 添加飛灰及爐石粉在試體在 5 次循環下，於齡期 28 天硫酸鹽侵蝕試驗結果，在取代量 30% 不易受到硫酸鹽侵，能有效降

低硫酸鹽侵入混凝土內造成膨脹破壞。

參考文獻

1. 邱永芳、謝明志、陳桂清、羅建明、柯正龍，「台灣大氣腐蝕劣化因子調查研究資料年報簡介」，交通部運輸研究所港灣技術研究中心，102 年度防蝕工程年會暨論文摘要手冊，第 66 頁，2013。
2. 第 8 屆亞太熱浸鍍鋅國際會議熱浸鍍鋅工程影像競賽，熱浸鍍鋅雜誌，04 頁，2010。
3. Pistofidis, N., Vourlias, G., Konidaris, S., Pavlidou, E., Stergiou, A. and Stergioudis, G., "Microstructure of zinc hot-dip galvanized coatings used for corrosion protection," *Materials Letters* 60, PP.786-789, 2006.
4. Yu, J.S., Zhang, J.X., Wu, J.S., Liu, J.L. and Chen, J.G., "The overview of the coating performance of galvanized sheet applied in automobile," *PTCA (Part: A Phys. Test.)*, 41, PP.325-328, 2005.

表 1 材料物化性質(單位 kg/m^3)

Materials	Cement	Slag	Fly ash
Physical properties Specific gravity	3.15	2.91	2.26
Chemical contents(%)			
SiO ₂	20.22	33.47	48.27
Al ₂ O ₃	4.96	14.79	38.23
Fe ₂ O ₃	2.83	0.40	4.58
CaO	64.51	41.61	2.84
MgO	2.33	6.11	—
SO ₃	2.46	0.65	—
K ₂ O	—	—	1.16
Na ₂ O	—	—	0.20
TiO ₂	—	—	1.42
LOI	2.4	—	5.38



圖 1 高性能混凝土坍度及單位重

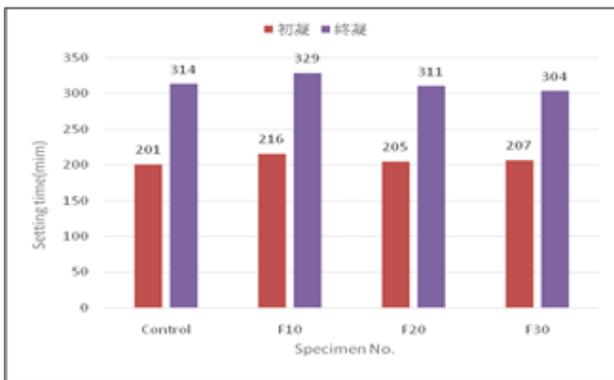


圖 2 高性能混凝土凝結時間

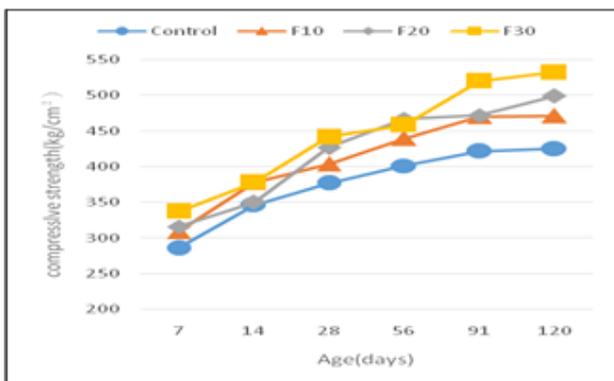


圖 3 高性能混凝土一般養護抗壓強度

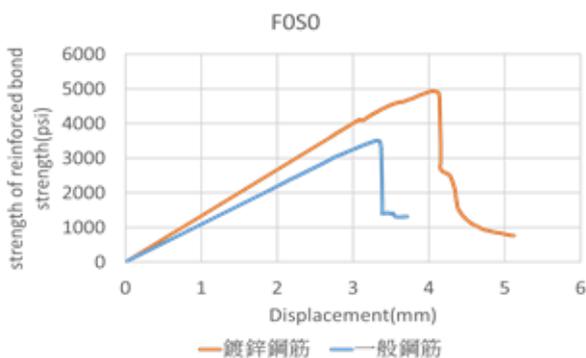


圖 4 高性能混凝土 28 天(F0S0)握裹—滑移量關係圖

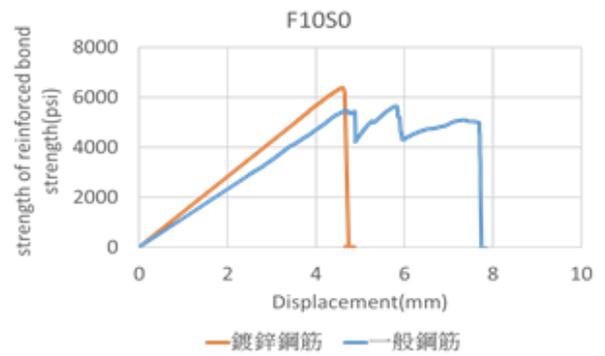


圖 5 高性能混凝土 28 天(F10S0)握裹—滑移量關係圖

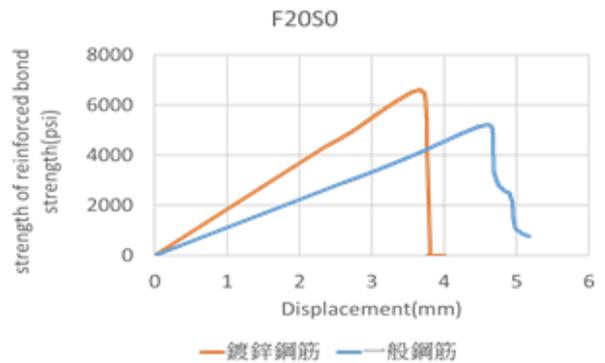


圖 6 高性能混凝土 28 天(F20S0)握裹—滑移量關係圖

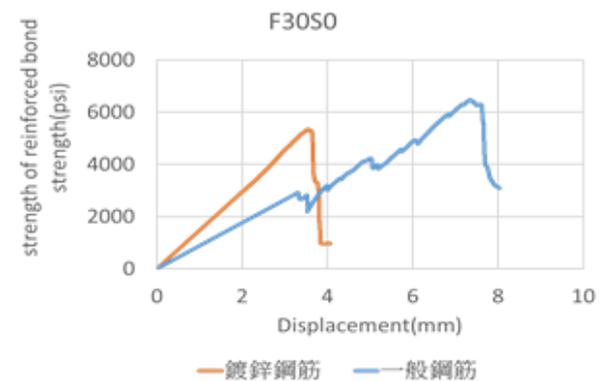


圖 7 高性能混凝土 28 天(F30S0)握裹—滑移量關係圖

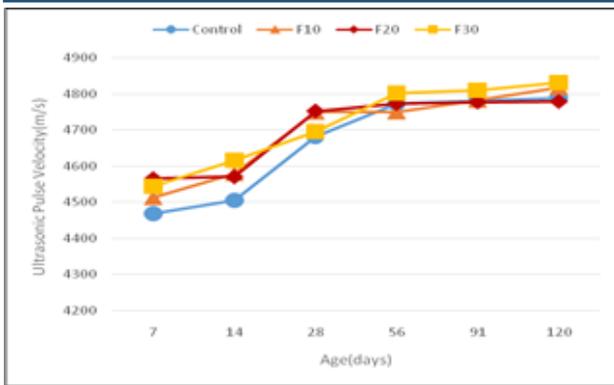


圖 8 高性能混凝土一般養護之超音波波速

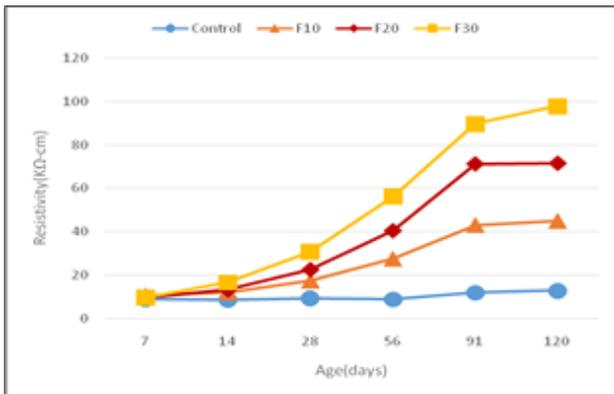


圖 9 高性能混凝土一般養護(S=0%)之表面電阻

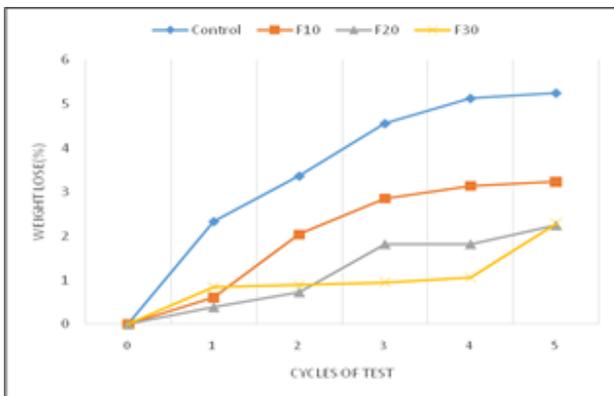


圖 10 高性能混凝土(S=0%)之硫酸鹽侵蝕

綠色混凝土在溫泉水養護環境之工程性質

張榮南¹ 林志忠² 王和源³ 陳敬鎰⁴

¹輔英科技大學休閒與遊憩事業管理系副教授

²高雄醫學大學總務處營繕組技佐

³國立高雄科技大學土木工程與科技研究所特聘教授

⁴國立高雄科技大學土木工程與科技研究所碩士

摘要

本研究將以再生綠建材包含爐石及飛灰在溫泉水環境養護之混凝土，探討對其新拌、硬固以及耐久性質之影響。在模擬溫泉水使用臺東(知本)及臺灣宜蘭(礁溪)等兩處碳酸氫鈉溫泉水，研究結果顯示，以溫泉水養護混凝土在添加爐石及飛灰等卜作嵐材料，當隨著取代量增加，其坍度增加，單位重隨著取代量增加而降低，而凝結時間也相對增加及氯離子含量符合規範；同時抗壓強度有明顯提升，且有優良之超音波波速及表面電阻值。另外硫酸鹽侵蝕顯示耐久性上升且皆有良好之工程性質。本研究結果預期可提供建立添加爐石粉、飛灰、於溫泉水環境中混凝土之最佳取代量及最佳配比的參考，可以提高廢棄物再生利用的價值，達到對於環境保護之最大效益。

關鍵字：綠色混凝土、溫泉水環境、抗壓強度、工程性質。

ABSTRACT

This research will use recycled green building materials including furnace stone and fly ash to cure concrete in a hot spring environment to explore the effects of its fresh mixing, hardening and durability. Two sodium bicarbonate hot spring waters, including Taitung (Zhiben) and Taiwan's Yilan (Jiaoxi), were used in the simulated hot springs. The research results show that the use of hot spring water curing concrete with the addition of furnace stone and fly ash and other materials should be replaced. As the amount increases, the slump increases, and the unit weight decreases with the increase in the amount of substitution. The setting time also increases and the chloride ion content meets the specification; at the same time, the compressive strength has been significantly improved, and it has excellent ultrasonic wave speed and surface resistance value. In addition, sulfate attack shows increased durability and both have good engineering properties. The results of this study are expected to provide a reference for establishing the optimal replacement amount and optimal ratio of furnace stone powder, fly ash, and concrete in the hot spring environment, which can increase the value of waste recycling and achieve the greatest benefit for environmental protection.

Keywords: green concrete, hot spring environment, compressive strength, engineering properties

一、緒論

由於環保意識抬頭，而事業廢棄物卻是現在社會中所不可避免的產物，有效減少廢

棄物是企業最優先的考量，任何廢棄物的處理，均會造成環境的二次污染。而混凝土以其廣泛的適用性和價格優勢及硬固耐久的性

質成為現代社會用量最大、最重要的建築結構材料，在一般的情況下在空氣和水中讓其水化過程完成。混凝土在世界上是使用最廣泛的人造建材，是由於具有多功能性和成本較低。而混凝土也成為首選在極端條件下建設的結構材料[1]。此外，可持續使用已成為混凝土基礎設施日益重要的特性，作為生產波特蘭水泥之過程中產生的二氧化碳排放量在全球有顯著之影響[2~3]。由於全世界倡導永續循環發展之下，將工業副產品再利用已被廣泛使用如爐石粉、飛灰、廢液晶玻璃砂等再生綠建材添加入混凝土，並模擬溫泉環境之建築結構。以臺灣臺東縣知本溫泉及宜蘭縣礁溪溫泉的溫泉環境為例，其高溫 $40\sim 65^{\circ}\text{C}$ 且為碳酸氫鈉泉附近多為變質岩地形，探討溫泉水中的碳酸根離子(HCO_3^-)、氯離子(Cl^-)和硫酸根離子(SO_4^{2-})等不同有害雜質進行探討。

本研究以爐石粉、飛灰的取代量及不同溫泉水去探討配比參數之變化對於溫泉環境中混凝土之工作性質、工程性質、耐久性質等影響，以便做為後續研究及工程應用上之設計參考。

二、文獻回顧

在營建產業中水泥為土木建築工程最常使用材料之一。但製造水泥亦產生 CO_2 ，而卜特蘭水泥是土木營建業最主要且最常使用之膠結材料，但傳統水泥燒結溫度需高達 $1300\sim 1400^{\circ}\text{C}$ ，全球水泥製造業二氧化碳總排放量佔全世界所有溫室氣體排放量約 $5\sim 7\%$ [4、5]。

多年來爐石粉是工業副產品，為煉鋼廠在製造生鐵的過程中，為了降低生產生鐵的溫度而額外添加石灰石當作讓氧化鐵還原的助熔劑，而高爐爐渣經由噴水使其快速冷卻，因為冷卻速度很快，使爐渣分裂變成顆粒狀態之水淬爐石，其具有潛在的膠結能力與水硬性，可以用來減少水泥用量，增加耐久性，提高混凝土的緻密性[6、7]。爐石在未經特殊處理裡被視為廢料，但在資源有限的情況下，如何將工業副產品有效回收再利用，也是未

來需要解決的議題[8]。在臺灣，火力發電廠在發電過程中燃燒煤粉會產生飛灰，而燃燒粉煤燃料時中含有顆粒較小的粘土雜質隨著熱空氣攜帶上昇，再使用靜電集塵器收集而得的工業副產品。而不同的火力發電廠所用的燃燒粉煤相對的也不同，所以飛灰的等級也有所不同，收集的飛灰可分為 F 級、C 級兩種，若為無煙煤或煙煤則可得含鈣質較低之 F 級飛灰，其化學成份中 CaO 含量小於 10% ；若為褐煤或次煙煤則可得含鈣質較高之 C 級飛灰，其化學成份中 CaO 含量大於 10% ，其除了具有卜作嵐性質外亦具有膠結性質[6、7]。

根據中華民國溫泉法中，溫泉的定義是符合溫泉基準之溫泉水及水蒸氣(含溶於溫泉水中之氣體)。溫泉水包括自然湧出或人為抽取之溫水、冷水及水蒸氣(含溶於溫泉水中之氣體)，在地表量測之溫度高於或等於 30°C 者；若溫度低於 30°C 之泉水，其水質符合溫泉水質成分標準者，亦視為溫泉[9]。臺灣之溫泉分佈廣闊，大部分分佈於北部中央山脈及其兩側山地，一部分位於周圍海上小島，整體而言，其分佈狀況頗為平均，全島僅雲林縣、彰化縣及澎湖縣三縣無溫泉資源[10、11]。

三、試驗計畫

3-1 試驗材料

本研究所使用的材料包括水、水泥、飛灰、爐石粉、粗骨材、細骨材、廢液晶玻璃砂等，其性質分述如下：

- (1) 拌合用水：應符合 CNS13961「混凝土拌合用水」之規定。
- (2) 水泥：採用的卜特蘭水泥係由臺灣品牌水泥公司生產的普通水泥，其性質符合 ASTM C150 及 CNS 61 R2001 規範要求的第 I 型波特蘭水泥，且為了顧及卜特蘭水泥之穩定品質，水泥購進時均以塑膠袋密封避免受潮，以確保性質，其物化性質如表 1 所示。
- (3) 飛灰：採用台電興達港火力發電之 F 級飛灰，符合 CNS 36 規範，其物化性質如

表 1 所示。

- (4) 爐石粉：爐石粉為中國鋼鐵公司所生產的水淬爐石，經中聯爐石處理公司研磨成細粉其性質符合 CNS12549 要求，比重為 2.89，細度為 $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ，其物化性質如表 1 所示。
- (5) 粗、細骨材：採用里港地區之粒料，符合 CNS1240 混凝土粒料之要求規定。
- (6) 溫泉水：試驗用溫泉水取自臺灣宜蘭礁溪溫泉及臺灣，臺東知本溫泉之溫泉水，礁溪及知本溫泉水皆屬於碳酸氫鈉泉其 PH 值為 7~9，含有碳酸根及硫酸根離子。

3-2 試驗項目

本研究中將爐石、飛灰這兩種卜作嵐材料應用於溫泉環境中混凝土進行探討其差異，以 ACI 混凝土配比設計法計算設計強度 $280 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ，採用固定水膠比 ($W/B=0.5$)，混凝土配比如表 2 所示，得其拌合實際用量後進一步研究最佳取代量的效益性。以新拌性質試驗如坍度、單位重、氯離子含量檢測及凝結時間等。並灌製試體以進行硬固性質試驗及耐久性質於 7、28、56、91 及 120 天齡期時進行試驗。硬固性質如抗壓強度、超音波波速等。耐久性質如四極式電阻、硫酸鹽侵蝕等。

四、結果與討論

4-1 坍度

坍度之所以不能完全代表混凝土之工作度，是因為影響工作性的因素有拌合水量、水泥特性、骨材性質及配比、摻料、溫度、時間。圖 1 所示，固定水膠比 0.5，其坍度值皆為 9cm。由此可發現爐石粉以重量取代水泥(0%、10%、20%)及飛灰以重量取代一般砂(0%、10%)，並不會使其坍度上升或坍損，其原因可能為爐石粉具有水化膠結作用，增加其新拌常重混凝土之黏滯性，導致工作性下降，而飛灰具有細小圓球體表面光滑，可助於分散水泥顆粒因而提升工作性。

4-2 單位體積重

溫泉環境中爐灰混凝土之單位重如圖 1

所示，爐灰混凝土之單位重在 $2348 \sim 2401 \text{ kg}/\text{m}^3$ 之間，隨著爐石及飛灰取代量增加而降低，其原因可能為爐石比重、飛灰比重皆較水泥及砂低，故隨爐石及飛灰取代量增加，混凝土新拌單位重降低。

4-3 凝結時間

凝結時間分別為初凝及終凝兩種，都會因不同因素有不同之影響，包括溫度、水泥特性、水膠比及養護環境等。用水量增加，凝結越慢；溫度越高，凝結越快；而濕度愈高，則凝結越慢。由圖 2 所示，為溫泉環境中爐灰混凝土之凝結時間，其初凝時間分別為 350、298 及 276min，終凝時間則分別為 476、433 及 455min，初凝後凝結時間隨著爐灰含量增加而增加，其凝結時間增加，其原因可能為爐灰所以導致初凝後導致凝結時間延長。

4-4 氯離子含量檢測

溫泉度假區的混凝土結構或地下有大量的管線，故須注意天然骨材的活性，是否導致混凝土脹裂，有害物質入侵，並進一步侵害管道中所使用的鋼管及鋼筋等，而大大縮短其耐久及實用性，故依據規範(CNS3090)規定新拌混凝土之氯離子含量檢測皆要小於 $0.3 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，溫泉環境中爐灰混凝土其氯離子含量各為 $0.014 \sim 0.021 \text{ (kg}/\text{m}^3)$ ，當混凝土添加卜作嵐材料(爐石、飛灰)時，氯離子含量雖然稍微增加，但是皆符合規範的要求。

4-5 抗壓強度

(一) 知本溫泉環境中爐灰混凝土

圖 3 所示，為知本溫泉環境中爐灰混凝土取代量與抗壓強度之關係，隨著爐灰取代量之增加，抗壓強度隨著上升之程度越趨明顯，三種不同配比 OPC、S10-F10、S20-F10，於齡期 7 天時各配比其抗壓強度為 40.7、45.8 及 48.3 MPa。各組混凝土於早齡期 7 天抗壓強度可達到 40MPa 以上；於齡期 28 天時，各配比其混凝土抗壓強度皆超過 45MPa，於晚齡期 120 天時，各組知本溫泉環境中爐灰混凝土其抗壓強度為 52.0、61.3 及 61.8MPa，皆可達到 50MPa 以上，混凝土

晚期抗壓強度上升來源，其原因可能為卜作嵐材料產生反應所提供。

(二) 礁溪溫泉環境中爐灰混凝土

圖 4 所示，為礁溪溫泉環境中爐灰混凝土取代量與抗壓強度之關係，隨著爐灰取代量之增加，抗壓強度隨著上升之程度越趨明顯，三種不同配比 OPC、S10-F10、S20-F10，於齡期 7 天時各配比其抗壓強度為 39.4、44.7 及 47.5 MPa。各組混凝土於早齡期 7 天抗壓強度可達到 35MPa 以上，其原因可能為恆溫 45°C 礁溪溫泉水加速水化反應，填充了混凝土的孔隙，漿體與骨材間的界面過渡區能緊密的結合，使得混凝土內部結構更加緻密。於齡期 28 天時，三組配比抗壓強度為 46.7、57 及 58.5 MPa，各配比其混凝土抗壓強度皆超過 45MPa，隨著齡期成長，水泥逐漸水化反應完全，則無法再繼續提供強度，於晚齡期 120 天時，各組知本溫泉環境中爐灰混凝土其抗壓強度為 50.7、60.8 及 61.3 MPa，皆可達到 50MPa 以上，混凝土晚期抗壓強度上升來源，其原因可能為卜作嵐材料產生反應所提供。

4-6 超音波波速

在非破壞檢測技術中以超音波波速檢測試驗為重要指標之一，通常來檢測混凝土的品質及探討裂縫的深度寬度。

(一) 知本溫泉環境中爐灰混凝土

圖 5 所示，為知本溫泉環境中爐灰混凝土取代量與超音波波速之關係，隨著爐灰取代量之增加，超音波波速隨著上升之程度越趨明顯，三種不同配比 OPC、S10-F10、S20-F10，以 28 天齡期為基準，於齡期 7~120 天其超音波波速範圍各是 4556~4662 m/sec(98.5 ~ 100.8%)、4662 ~ 4773 m/sec(100 ~ 102.4%)、4556 ~ 4702 m/sec(98.9~102.0%)，每組配比超音波波速成長成長趨勢略為接近，早齡期主要是水泥產生水化反應去填充孔隙，晚齡期是飛灰及爐石粉中的氧化矽及氧化鋁所析出矽、鋁離子持續與氫氧化鈣反應，所生成 C-S-H 膠體及

C-A-H 鹽類之水化產物逐漸增加，使得混凝土內部結構更加緻密。

(二) 礁溪溫泉環境中爐灰混凝土

圖 6 所示，為礁溪溫泉環境中爐灰混凝土取代量與超音波波速之關係，隨著爐灰取代量之增加，超音波波速隨著上升之程度越趨明顯，三種不同配比 OPC、S10-F10、S20-F10，以 28 天齡期為基準，於齡期 7~120 天其超音波波速範圍各是 4556~4717 m/sec(97.7 ~ 101.2%)、4662 ~ 4773 m/sec(98.8 ~ 101.2%) 及 4587 ~ 4717 m/sec(99.2~102.0%)，每組配比超音波波速成長成長趨勢略為接近，早齡期主要是水泥產生水化反應去填充孔隙，晚齡期是飛灰及爐石粉中的氧化矽及氧化鋁所析出矽、鋁離子持續與氫氧化鈣反應，所生成 C-S-H 膠體及 C-A-H 鹽類之水化產物逐漸增加，使得混凝土內部結構更加緻密。

4-7 表面電阻

使用四極式表面電阻儀測量混凝土電阻率，藉以評估混凝土內部孔隙結構的多重性質，因為混凝土電阻值即為探知混凝土的緻密程度及抵抗碳化能力的一個很好的評估指標。

(一) 知本溫泉環境中爐灰混凝土

圖 7 所示，為知本溫泉環境中爐灰混凝土取代量與表面電阻之關係，隨著爐灰取代量之增加，表面電阻隨著上升之程度越趨明顯，於固定水膠比 0.5，不同取代量的情況下，三種不同配比 OPC、S10-F10、S20-F10，以 28 天齡期為基準，於 7 天齡期表面電阻較為緩慢，各配比其表面電阻值分別為 8.4、22.3 及 23.1 kΩ-cm，而至 28 天齡期時，水泥水化大致完成，各配比其表面電阻值分別為 13、87.7 及 87.4 kΩ-cm，於晚齡期 56、91 及 120 天時，各配比其表面電阻值範圍分別為 14.0~20.1kΩ-cm(107.7~154.6%)、89.2 ~ 112.3kΩ-cm(101.7 ~ 128.0%) 及 91.8 ~ 125.1 kΩ-cm(105.0~143.2%)，因爐灰產生卜作嵐反應，混凝土表面電阻發展趨勢增加。

(二) 礁溪溫泉環境中爐灰混凝土

圖 8 所示，為礁溪溫泉環境中爐灰混凝土取代量與表面電阻之關係，隨著爐灰取代量之增加，表面電阻隨著上升之程度越趨明顯，於固定水膠比 0.5，不同取代量的情況下，三種不同配比 OPC、S10-F10、S20-F10，以 28 天齡期為基準，於 7 天齡期表面電阻較為緩慢，各配比其表面電阻值分別為 7.2、20.7 及 22.1 kΩ-cm，而至 28 天齡期時，水泥水化大致完成，各配比其表面電阻值分別為 13.3、82.3 及 87.0 kΩ-cm，於晚齡期 56、91 及 120 天時，各配比其表面電阻值範圍分別為 14.0 ~ 18.3kΩ-cm(105.7 ~ 138.1%)、91.8 ~ 118.7kΩ-cm(111.5 ~ 144.3%) 及 90.0 ~ 128.2kΩ-cm(103.4 ~ 147.3%)，因爐灰產生卜作嵐反應，混凝土表面電阻發展趨勢增加。

4-8 硫酸鹽侵蝕

臺灣位於亞熱帶及熱帶，以及大陸及海洋的交界處，是一個四面臨海之海島國家，在海域中含有豐富之氯鹽與硫酸鹽，所以氣候潮濕又多鹽分，而結構物長期暴露此環境中，易受侵蝕而影響結構物之耐久及安全性。

(一) 知本溫泉環境中爐灰混凝土

圖 9 所示，為知本溫泉環境中爐灰混凝土取代量與之硫酸鹽浸泡重量損失，隨著爐灰取代量之增加，抵抗硫酸鹽侵蝕的能力上升之程度越趨明顯，於固定水膠比 0.5，不同取代量的情況下，三種不同配比 OPC、S10-F10 及 S20-F10，顯示在進行第一循環至第五循環抵抗硫酸鹽侵蝕的能力上升之範圍，0.29 ~ 0.90%、0.27 ~ 2.56% 及 0.11 ~ 2.58%，爐灰混凝土損失重量差異不大且表面完好，故後續硫酸鹽侵蝕量較低，其原因可能是添加爐石、飛灰可抵抗硫酸鹽侵蝕，透過卜作嵐反應消耗 CH 數量，反應物為 C-S-H 膠體，可以有效的改善混凝土的孔隙結構，減少硫酸鹽侵蝕的機會，提升爐灰混凝土抵抗硫酸鹽侵蝕的性質。

(二) 礁溪溫泉環境中爐灰混凝土

圖 10 所示，為礁溪溫泉環境中爐灰混凝土取代量與之硫酸鹽浸泡重量損失，隨著爐

灰取代量之增加，抵抗硫酸鹽侵蝕的能力上升之程度越趨明顯，於固定水膠比 0.5，不同取代量的情況下，三種不同配比 OPC、S10-F10 及 S20-F10，顯示在進行第一循環至第五循環抵抗硫酸鹽侵蝕的能力上升之範圍，0.27 ~ 0.85%、0.22 ~ 2.55% 及 0.16 ~ 2.58%，爐灰混凝土損失重量差異不大且表面完好，故後續硫酸鹽侵蝕量較低，其原因可能是添加爐石、飛灰可抵抗硫酸鹽侵蝕，透過卜作嵐反應消耗 CH 數量，反應物為 C-S-H 膠體，可以有效的改善混凝土的孔隙結構，減少硫酸鹽侵蝕的機會，提升爐灰混凝土抵抗硫酸鹽侵蝕的性質。

五、結論

- (1) 添加爐石、飛灰於混凝土的新拌性質有明顯的影響。可提升混凝土坍度，有助其工作性。此外，單位重隨爐石及飛灰取代量增加，可降低單位重。
- (2) 在溫泉環境之混凝土添加爐石及飛灰會導致凝結時間延長比控制組增加。
- (3) 爐石及飛灰之添加於溫泉環境混凝土，其氯離子含量為 0.014~0.021(kg/m³)之間，氯離子含量雖然稍微增加，但是符合規範的要求。
- (4) 明顯提升溫泉環境之混凝土抗壓強度可以添加爐石、飛灰，將三種同時應用在混凝土取代時能達高環保並且不降低強度。在 45°C 溫泉養護下無發生 120 天晚期強度下降的趨勢，且達到 50MPa 以上，這遠超過按照 ACI 318 所需要一般混凝土的最低強度。
- (5) 超音波波速會隨著齡期及卜作嵐材料，達到優良範圍之超音波波速值 4556~4773 m/sec 之間，故在溫泉水環境中能以爐石、飛灰可提高耐久性。
- (6) 溫泉環境混凝土表面電阻隨著爐石、飛灰之添加而上升，甚至比控制組高。
- (7) 添加爐石、飛灰之混凝土在耐硫酸鹽浸泡中第一循環至第五循環後表面完好產生脫水硫酸鈉結晶，重量上升，故侵入量較低，故在硫酸鹽侵蝕方面停留在膨脹

階段沒有崩解之現象，顯示耐久性能力的上升。

參考文獻

1. Xianming Shi, Ning Xie, Keith Fortune and Jing Gong, 2012, "Durability of steel reinforced concrete in chloride environments An overview", *Journal of Construction and Building Materials*, 30, pp.125-138.
2. B. Lomborg, 2011, "The skeptical environmentalist: measuring the real state of the world", Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, pp. 512-40.
3. P.K. Mehta, 2001, "Reducing the environmental impact of concrete", *Concr Int*, 23 (10), pp. 61-66.
4. 羅名宏，爐石基鹼膠凝材料高溫殘餘工程性質之研究，國立高雄應用科技大學，土木工程與防災科技研究所，碩士論文，2014
5. 陳柏存、孫德和、王和源、周賢智、陳祿璿，2019，爐石鹼膠凝玻璃材料對硬固性質之影響，工程永續與土木防災研討會，高雄。
6. 陳惠珠，2011，添加卜作嵐材料與廢輪胎橡膠粉對水泥砂漿巨微觀影響之研究，國立高雄應用科技大學土木工程與防災研究所，碩士論文。
7. 羅永麟，2008，添加爐石及飛灰之混凝土微結構與性質研究，國立中興大學土木工程學系，碩士論文。
8. 王和源、陳昱文，2020，爐石粉與不鏽鋼還原渣取代水泥製成水泥砂漿新拌性質之研究，工程永續與土木防災研討會，高雄。
9. 「溫泉水」，中華民國九十二年七月二日華總一義字第 0 九二 00 一二一一九 0 號總統令公布。

10. 陳俊廷，2006，溫泉水養護對混凝土強度及耐久性之影響，國立中興大學土木工程學系，碩士論文。
11. 陳宗楷，2007，溫泉水養護對噴凝土強度與耐久性之影響，國立中興大學土木工程學系，碩士論文。

表 1 材料物化性質 (Unit: kg/m^3)

Materials	Cement	Slag	Fly ash	LCD glass
Physical properties	3.15	2.89	2.20	2.42
Specific gravity				
Chemical contents (%)				
SiO ₂	20.22	35.47	48.27	64.28
Al ₂ O ₃	4.96	13.71	38.23	16.67
Fe ₂ O ₃	2.83	0.33	4.58	9.41
CaO	64.51	41.00	2.84	2.70
MgO	2.33	6.60	—	—
SO ₂	2.46	—	—	—
K ₂ O	—	—	1.16	0.20
Na ₂ O	—	—	0.20	0.64
TiO ₂	—	—	1.42	0.01
P ₂ O ₅	—	—	—	0.01
LOI	2.4	—	5.38	—

表 2 溫泉環境中混凝土配比單位重 (Unit: kg/m^3)

Specimens	Cement	Fly ash	Slag	Fine aggrega	LCD glass	Coarse aggrega	Water
OPC	410	-	-	741	-	958	205
S10-F10	367	74	41	663	-	952	204
S20-F10	325	74	81	662	-	951	203

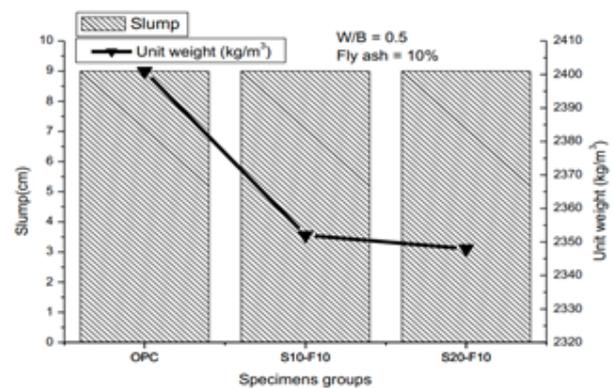


圖 1 溫泉環境中爐灰混凝土之坍度與單位體積重關係

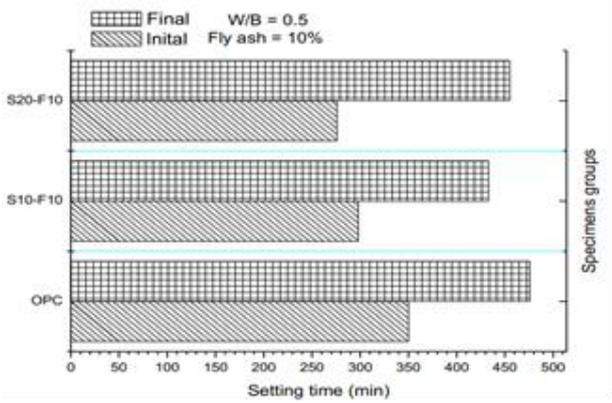


圖 2 溫泉環境中爐灰混凝土取代量與凝結時間之關係

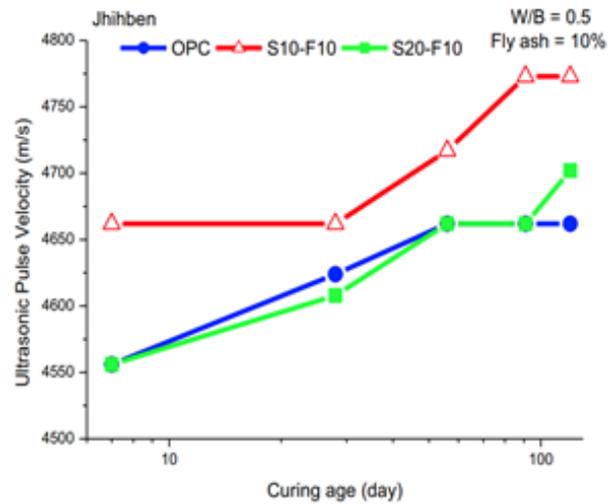


圖 5 知本溫泉環境中爐灰混凝土取代量與超音波波速之關係

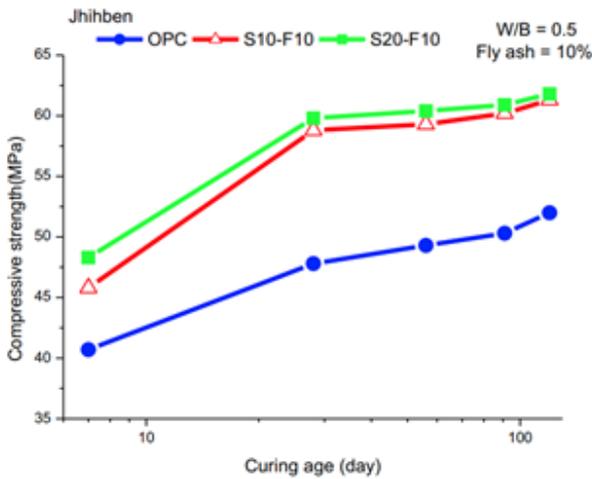


圖 3 知本溫泉環境中爐灰混凝土取代量與抗壓強度之關係

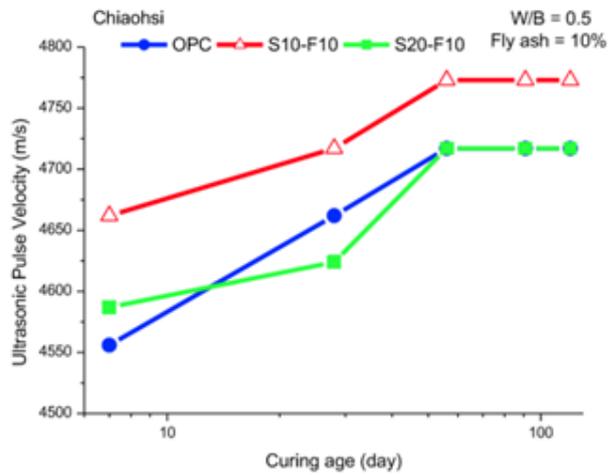


圖 6 礁溪溫泉環境中爐灰混凝土取代量與超音波波速之關係

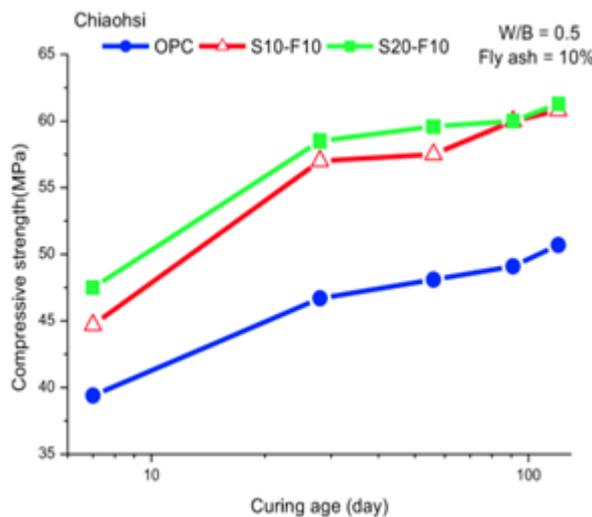


圖 4 礁溪溫泉環境中爐灰混凝土取代量與抗壓強度之關係

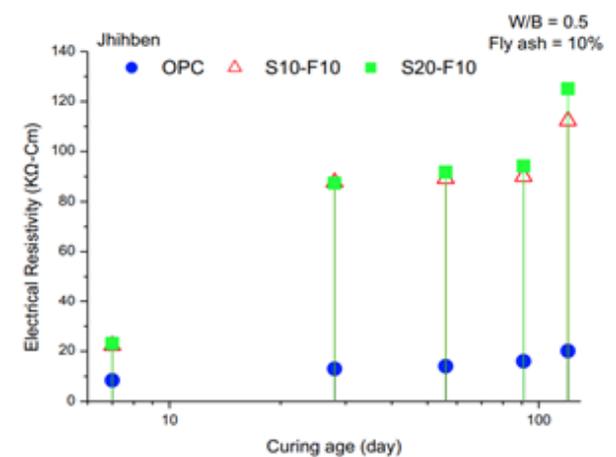


圖 7 知本溫泉環境中爐灰混凝土取代量與表面電阻之關係

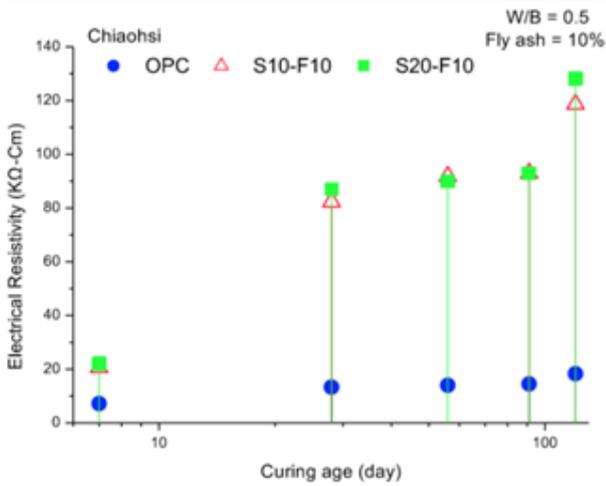


圖 8 礁溪溫泉環境中爐灰混凝土取代量與表面電阻之關係

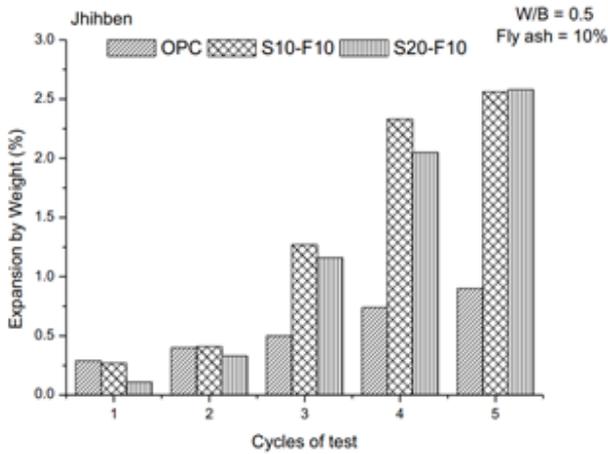


圖 9 知本溫泉環境中爐灰混凝土取代量之硫酸鹽浸泡重量損失

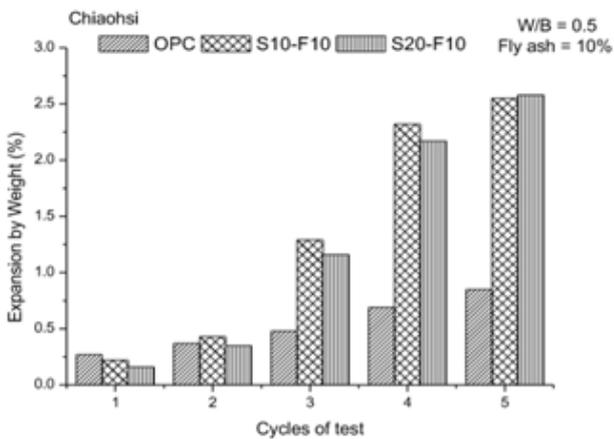


圖 10 礁溪溫泉環境中爐灰混凝土取代量之硫酸鹽浸泡重量損失

自來水管線淺層埋設初探

劉季宇¹ 楊炫智² 張哲瑜³ 周寶卿⁴

¹ 國家地震工程研究中心震災模擬組研究員

² 國家地震工程研究中心地球科學與大地工程組副研究員

³ 國家地震工程研究中心地球科學與大地工程組助理研究員

⁴ 國家地震工程研究中心震災模擬組專案助理研究員

摘要

都會區地下管線錯綜綿密，埋設成本極高且影響交通，埋管實務又常面臨第三方管線之衝突。國內目前已普遍採用可控制性低強度回填材料(CLSM)，作為管溝回填，較諸原土回填更具保護性。因此，若能採用較現行規定 120 公分更小之埋設深度，應有利降低施工成本及縮短施工時間，具多方效益。本研究收集國外之地下管線最小埋設深度規定，並針對埋設於道路下方之自來水延性鑄鐵管(DIP)，分析在內水壓與車輛荷載同時作用下，以 CLSM 回填管溝時，口徑 100mm 與 2600mm 管線於不同埋設深度下之受力行為，檢討管線安全性。

關鍵字：自來水管、淺層埋設、延性鑄鐵管、可控制性低強度回填材料

An Investigation on the Behavior of Water Pipes Buried with Small Depth of Cover

Liu Gee-Yu¹ Yang Hsuan-Chih¹ Chang Che-Yu¹ Chou Pao-Ching¹

¹ National Center for Research on Earthquake Engineering

ABSTRACT

Current regulation requires that the depth of cover of all buried pipes beneath traffic roads should be no less than 120cm. However, there will be numerous benefits if a smaller depth of cover is allowable. This is a preliminary investigation on the behavior of water pipes buried with various small depths of cover given a fixed internal pressure and a truck load on the pavement. In the finite element analyses, ductile cast iron pipes (DIP), the most popular water pipes, and controlled low-strength materials (CLSM), a standard backfill in Taiwan, were both considered.

Keywords: water pipes, depth of cover, Ductile Cast Iron Pipes (DIP), Controlled Low-Strength Materials (CLSM)

一、緣起

我國各路權機關針對埋設於道路下方之管線或箱涵結構物，其頂端距離路面之深度，通常訂有最小距離之限制，一般而言，其規定為：

(一) 在人行道者，不得少於 50 公分；

(二) 道路寬度在 6 公尺以下者，不得少於 70 公分；

(三) 道路寬度超過 6 公尺者，不得少於 120 公分；

(四) 快車道下，不得少於 120 公分；

(五) 慢車道下，不得少於 100 公分；

(六) 前項地下埋設物，如因情形特殊，經管理機關事先審查同意者，其埋設深度得不受前項限制。

有鑒於近年各路權單位均已規定道路挖掘埋設管線時，需以可控制性低強度回填材料(Controlled Low-Strength Materials, 以下簡稱 CLSM)回填路基，主要乃考量藉由該等回填材料具高流動、自充填、無須滾壓或搗實、低強度易於再開挖等多重優點及特性，可改善以往使用砂石級配料因回填滾壓不確實所造成道路下陷及不平整之諸多問題。為有效利用有限之道路地下空間，減少工程之施工費用及開挖規模，值得進一步藉由力學分析，瞭解 CLSM 回填管溝下，國內所普遍使用的自來水管材 延性鑄鐵管(Ductile Cast Iron Pipes, 以下簡稱 DIP)的淺層埋設，是否滿足安全要求，研究成果可作為後續向路權單位爭取自來水管線淺埋之依據。

二、文獻資料收集分析

2-1 淺層埋設地下管線之肇始

目前各國家基礎建設已漸趨成熟，主要工務陸續轉為設施維護及管線汰換更新，特別是後者在寸土寸金的密集都會區施作時，既有埋管方式所需施工費用及開挖規模，可能造成極大負擔。有鑑於此，日本政府著眼於財政因素、財務活用、公共事業效率化、公共工程限縮化之考量，是最早提出降低埋管成本，檢討管線淺埋可行性並真正落實施的國家。

日本建設省道路局 1999 年 3 月公告「關於地下電纜、自來水、瓦斯或下水管道之埋設深度」，更新(放寬)地下管線埋設深度之規定，自來水管線部份如圖 1 所示，更新如下：

- (一) 適用對象：口徑 300mm (含)以下之鋼管、DIP 及 PVC 管，以及 PE 管(拉伸降伏強度 204 kgf/cm² 以上、口徑 200mm 以下、外徑厚度比 11 者)。
- (二) 更新規定：(1)管頂至路面之距離，可為 0.3m 再加上道路的鋪面厚度，但合計不應小於 0.6m。(2)位於人行道下方之支管(如用戶外線)，管頂至路面之距離不

應小於 0.5m，惟地面下切致使距離小於 0.5m 者，應改用其他較高強度管材，或是施予保護措施。

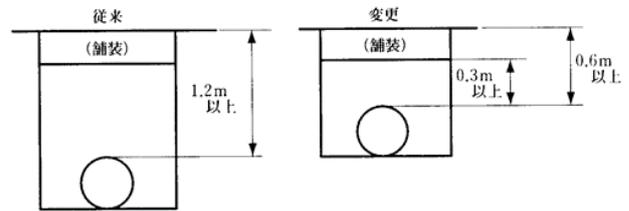


圖 1 日本自來水管之埋深規定(日本延性鐵管協會，2000)

日本水道協會 1999 年檢討報告書則指出，除口徑 75~300mm 管線外，口徑 50mm 與 350mm DIP 的淺埋管線，管體與接頭安全性亦無虞，淺埋規定可一體適用。

2-2 各國地下管線最小埋設深度規定

目前各主要國家對於不同地下管線的埋深規定，概略彙整如表 1 所列。

整體而言，美國自來水協會(American Water Works Association, AWWA)對於管線的最小埋深，不論是鋼管或 DIP 均無規定，美國延性鑄鐵管研究協會(Ductile Iron Pipe Research Association, DIPRA)建議 DIP 之埋深不應小於 75cm (DIPRA, 2017)。此外，美國石油學會(American Petroleum Institute, API)對於石油、天然氣管線，參採 ASME B31.4 規範，一般區域之最小埋深為 90cm。

日本按「道路法施行令(1952)」規定，地下管線最小埋深為 120cm，但自 1999 年起放寬小口徑管線進行最小埋深 60cm 之淺層埋設，為目前已知惟一政策推動地下管線淺層埋設的國家，且日本水道協會於同一年根據檢討報告書，進一步放寬其他不同小口徑管線之適用性，包含鋼管、DIP、PVC 管及 PE 管等。

英國之地下管線規範，係由 UK National Joint Utilities Group (NJUG)所訂定。對於不同地下管線，分別規定有不同的最小埋深，其中自來水管線的最小埋深規定為 75cm。

加拿大政體採聯邦型式，自來水管線之一般規定由地方自行決定。中央政府的 Canada

Water Security Agency，與美國相似亦無最小埋深之規定，僅要求埋深應深於各地區之凍線(depth of frost penetration，冬季時凍結表土與未凍結下層土壤間之分界線)。

表 1 各國對於不同地下管線最小埋設深度之規定

	自來水管線 最小埋深(mm)	其他管線 最小埋深(mm)	規範或單位
美國	750 [建議]	-	DIPRA (DIP)
美國	無規定	-	AWWA M41 (DIP)
美國	無規定	-	AWWA M11 (鋼管)
美國	-	石油、天然氣管線：900	ASME B31.4
日本	1200	1200	道路法施行令(1952)
日本	600 [限 300mm 以下 SP、PVC、DIP，及 200mm 以下 PEP]	天然氣管線：600 [限 300mm 以下 SP、DIP，以及 200mm 以下 PEP] 其他略	日本建設省(1999)，放寬小口徑管線進行淺層埋設
日本	600 [追加其他小口徑管線]	-	日本水道協會，追加其他小口徑管線適用淺層埋設，例如 50、350mm DIP
英國	750 (750)	高壓電纜：750-1200 (450-1200) 低壓電纜：600 (450) 天然氣管線：750 (600-750) 油管：900 (900) 電信線纜：450-600 (250-350)	UK National Joint Utilities Group (NJUG)，含車行道、步行道(括弧值)之規定，後者埋深一般較淺
加拿大	無規定	-	EPB 276 (Canada Water Security Agency)，僅要求埋深應深於各地區之凍線

2-3 可控制性低強度回填材料 CLSM 及其應用

CLSM 係 1980 年代開始發展，美國維吉尼亞州 1991 年最早公布相關規範，大量應用於管溝開挖及孔洞回填工程，以取代傳統回填材料並解決夯實問題。

簡單來說，CLSM 為一種具有自我充填、可取代夯實填方之膠結材料，硬固後具備抗壓、抗沉陷、低滲透及可再開挖等優點，又因可使用再生骨材而兼具環保作用。關於 CLSM 的定義、特性、應用以及材料細項規定，可參

閱美國混凝土學會的 ACI 229R-99 技術資料 (ACI, 1999)。

一般而言，埋設地下管線使用 CLSM 或一般混凝土作為管溝回填材料，主要有兩個不同的目的，一是避免活載重引致的路面過度沉降，例如重車行駛經過埋設大口徑鋼管的地方時會有路面過軟的感覺；二是作為地下管線的結構性支撐，避免土壤夯實不足或管底附近不易夯實，影響到管線的預期性能或壽命。

國內於 2001 年由台灣營建研究院與台北市政府合作，選擇三處管線工程以 CLSM 回填管溝，效果良好，之後陸續推廣使用(以上摘自湯輝雄簡報)。地下埋管之實務，目前已普遍採用 CLSM 作為管溝回填材料。

2-4 DIP 埋深重要考量

延性鑄鐵(ductile iron)因具有球狀石墨的微結構，故而機械性質優異，能承受衝擊力及塑性變形，加上高矽及高碳之化學成份，故亦具有抗腐蝕性及同鋼一樣的強度，成為自來水系統最普遍使用的管材。DIP 一般採可伸縮、撓轉之柔性接頭構造，目前國內主流採 K 型接頭，在地震作用下可隨地盤而運動，管體應力相對極小，地震動下此接頭具有相當之吸收變形能力，但缺乏抵抗拉脫之性能。

根據美國 McWane Ductile 公司官網學習中心的介紹，DIP 之設計與使用極為保守，管體強度高於各項可能荷載甚多，如正確使用，可確保基本安全無虞。DIP 之選用，決定於所需管徑與管壁厚度，前者由用水需求(流量)所控制，後者則取決於管溝型式、埋深(Depth of Cover)、路面載重(Wheel and Surface Loads)以及內水壓(Internal Pressure)的大小。

DIP 具有相對優異的強度與耐久性，因此相較於其他管材如鋼管、鑄鐵管、PVC 管或 PE 管等，可允許較薄之管壁厚度、較淺之埋深，抑或較低之管溝規格。

由於 DIP 設計與使用的保守性，理論上允許極淺之埋深，而無結構性的安全疑慮。淺埋條件下固然覆土重量小而管體土壓荷載亦小，相對有利，然而來自路面車載的力量較大，導致潛在致損風險相對增加。因此，

DIP 之埋深，建議不小於 75cm，以避免管體以及其上的鋪面的損害。

另根據美國 DIPRA 官網的常見問答設計篇，提到美國 ANSI/AWWA C150/A21.50 的“Thickness Design of Ductile-Iron Pipe”文件，所附檢核表之埋深均為 75cm 或以上，則埋深小於 75cm 是否允許？關於這個問題，DIPRA 持正面答覆，允許依相同模式計算並決定淺埋條件下 DIP 的管壁厚度，但提醒覆土厚度不足 75cm 時，必須留意：(1)採用較原訂更高的衝擊係數，以確實反映車載彈跳在淺埋條件下的影響；(2)縱然管體結構無虞，但鋪面進行養護或第三方挖掘不慎引致的管線損害疑慮，可能使得淺埋的效益喪失。

2-5 日本延性鐵管協會之淺埋技術資料

參考日本延性鐵管協會(2000)之範例，地下管線的載重，包括靜水壓、動水壓、靜載重(覆土重)、活載重(車輛荷載，以卡車輾壓為主)。日本的 T-25 規定乃 25 噸卡車之靜力作用，作用範圍為車輪下角度 45 度內之土層，土壓大小由埋深決定，並須另以衝擊因子放大(例如埋深 1.5m 以內時載重須增加 50%)，以反映路面不規則時車輪彈跳的動力效應，以此分析對於地下管線的作用。

日本延性鐵管協會(2000)，曾就口徑 50~350mm DIP 之安全性進行檢討。首先，考慮管體之一般安全性，係按「JWWA G113-114 水道用ダクティル鑄鉄管，鑄鉄異形管」(日本水道協會，2000)之計算式，以埋深 60cm 為條件，在設定靜水壓、動水壓、路面荷重、疲勞、耐震等受力下，試算 1 種管、3 種管、管件(異型管)的管體應力，皆小於延性鑄鐵之抗拉強度。其次，考慮實際承受車載之管體性能，以口徑 150mm、350mm 兩種管線各兩組不同淺埋深度及管溝型式，考慮管中無水以及管中施加 10 kgf/cm² (1 MPa) 水壓之兩種條件，分別實施車載受力試驗。

三、有限元素分析之模型設定

本研究採用有限元素法進行力學分析，分析模型之設定方式說明如下。

3-1 管體、管溝尺寸與埋設深度

- (一) 分析案例選擇較小口徑 100mm 與最大口徑 2600mm 之 DIP 為標的，大、小兩個極端管徑之管線進行分析，有助於研判不同淺埋深度之管線安全性趨勢。尺寸規格按 CNS 10808 G3219 標準(經濟部標準檢驗局，2019) 以其中 K 型 DIP 之 K3 型管(D3)為分析對象，外徑分別為 118mm 與 2684mm。
- (二) CNS 標準允許鑄造誤差，厚度方面口徑小於 700mm (含)者其厚度可誤差 1mm，大於 700mm 者可誤差 10% (經濟部標準檢驗局，2019)。本研究為求保守，口徑 100mm 與 2600mm 管線之厚度標準為 6mm 與 29.5mm，建模時厚度一律取最大負許可差，結果分別為 5mm 與 26.55mm。
- (三) 為求保守，建模時不計 DIP 內壁之砂漿內襯(厚度分別為 4mm 與 15mm；經濟部標準檢驗局，2019)。
- (四) DIP 為柔性接頭構造，接頭處既不傳遞軸力，也不傳遞彎矩，管軸方向分析長度，可取為單只 DIP 之長度，亦即 6m。
- (五) 管溝寬度，參考台水公司「自來水管理設施工說明書」(台灣自來水公司，2020) 規定，口徑 100mm 與 2600mm 標的管線之管溝寬度分別為 500mm 與 3600mm。
- (六) 分析模型共考慮 30cm、60cm、90cm 以及 120cm 等四種不同淺層埋設深度，該深度定義為管頂距離路面之距離。分析時不考慮厚度 10cm 的瀝青混凝土的影響，因此各埋設深度下，管頂所覆蓋 CLSM 厚度，實際上僅分別為 20cm、50cm、80cm 以及 110cm。

3-2 元素型式、土體尺寸與邊界條件

本研究以二維 4 節點薄殼元素模擬 DIP 管體，而回填之 CLSM 以及周圍土壤，則採三維 8 節點之六面體實體元素模擬，進行線彈性分析。

考量管溝回填 CLSM 後周圍仍有現地土壤作為支撐，故周圍土體仍須納入分析。關

於土體橫向的影響範圍，可參考樁基礎設計，基樁間距原則上應大於樁徑之 2.5 倍，若有可能則應大於 3 倍，以減小群樁效應。

至於土體深度的影響範圍，參考一般基礎支承力理論，極限狀態下土壤支承力破壞面之深度約在 1 至 1.5 倍基礎寬度之間，因此支承土層之厚度最小應達基礎寬度之 1.5 倍以上，而一般基礎垂直承載力的應力影響圈約為 2 倍基礎寬度的深度。

因此，本研究以管溝寬度為標準，管溝兩側以及底部之土體，均取管溝寬度 3 倍之範圍，納入分析。以口徑 100mm 管為例，管溝寬度為 50cm，則土體範圍即管溝左右向外延伸各 150cm，總計寬度 350cm，土體深度亦為管底向下延伸 150cm。以口徑 2600mm 管為例，管溝寬度為 360cm，則土體範圍即管溝左右向外延伸各 1080cm，總計寬度 2520cm，土體深度亦為管底向下延伸 1080cm，如圖 2 所示。

分析模型之邊界條件設定如下：

- (一) 前後兩面(XY 面)：Z 向位移束制，其餘未束制；
- (二) 兩側(YZ 面)：X 向與 Z 向位移束制，Y 向位移未束制；
- (三) 底部(XZ 面)：三向位移均束制；
- (四) 相異材料之介面：有限元素之節點採共點方式處理。

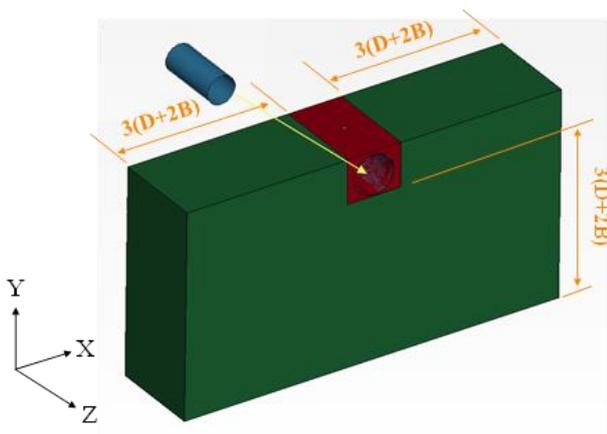


圖 2 口徑 2600mm DIP 淺埋分析模型

3-3 材料參數與加載條件

- (一) 分析模型之材料參數，如表 2 所列。

表 2 數值模擬材料參數

	比重 (tonne/mm ³)	彈性模數 (N/mm ²)	柏松比
延性鑄鐵	7.15e-9	1.6e5	0.28
CLSM	1.80e-9	8.7e2	0.25
土壤	1.80e-9	20.0	0.30

- (二) 管內水壓含靜水壓與動水壓二種，參考日本「ダクタイトルの浅層埋設について」(日本延性鐵管協會，2000)，對應之壓力值分別為 7.5 以及 5.5 kfg/cm²，總計 13 kfg/cm²，作用於直管之內壁，此內水壓荷載高於國內一般工作水壓，故分析結果可視為保守。
- (三) 有關車輛荷載之施加，參考美國 AASHTO HS-20 之車載定義，後輪(雙輪)之輾壓重量訂為 32,000 磅，相當於單輪 7.264 噸；其次，基於路面不平整因素所引致之車輛彈跳與車載變化，需另考慮衝擊因子，本研究之埋深均大於等於 30cm (1 英尺)，故衝擊因子可保守取 1.35，得到設計用最大單輪車載為 9.806 噸，取四捨五入為 10 噸，用於分析。
- (四) 考量輪胎與地表係以面接觸的方式進行力量傳遞，故車輪與地面接觸的面積為 20cm (車行方向) 30cm (輪寬)，10 噸之車載，以均布力方式作用於此一面積，此面積中心點位置，位於直管正中心點之上方，施加均布車載於 CLSM 表面。
- (五) 分析時三種材料自重之荷載均有考慮。

3-4 安全評估準則

參考 DIPRA 技術資料，DIP 受不同荷載之材料受力，內水壓之安全係數訂為 2.0，外部荷載(包含覆土重量與車輛荷載)之安全係數，環向應力強度至少為 1.5 和極限應力至少為 2.0 (DIPRA, 2016)。參考日本延性鐵管協會技術資料，則靜水壓之安全係數訂為 2.5，其餘動水壓、覆土重量與車輛荷載之安全係數一律為 2.0 (日本延性鐵管協會，2000)。本研究為求簡化，統一取 DIP 受力安全係數為 2.0。因此，管線淺埋分析的材料安全評估準則訂為：

- (一) 延性鑄鐵材料之抗拉強度為 420 MPa，經分析後之受拉或受壓應力超過 210 MPa，代表安全係數不足 2.0，未符安全要求。
- (二) CLSM 抗壓強度取 20 kgf/cm² (實務時 CLSM 強度範圍之下限值)，約相當於 2 MPa，參考一般混凝土之抗拉強度為抗壓強度之 1/10，故 CLSM 經分析後若受拉應力超過 0.2 MPa，代表已經開裂。

四、分析結果與討論

4-1 口徑 100mm 管線埋深 30cm 分析結果

在內水壓與車輛荷載同時施加下，此一最淺埋深案例之管體 von Mises 應力以及最大、最小主應力，分別如圖 3、圖 4 所列，CLSM 之主應力分布，如圖 5 所示。

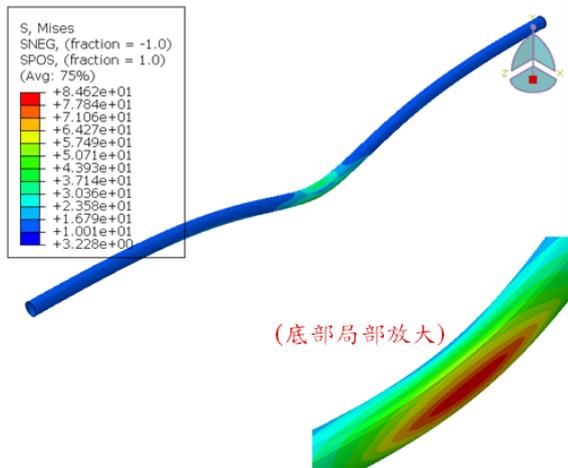


圖 3 100mm 管埋深 30cm 之管體 von Mises 應力分布

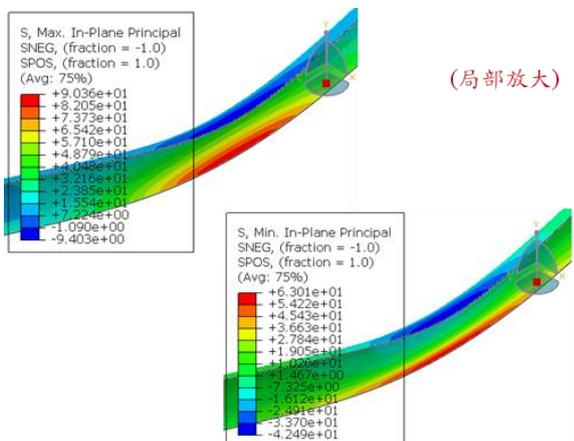


圖 4 100mm 管埋深 30cm 之管體最大、小主應力分布

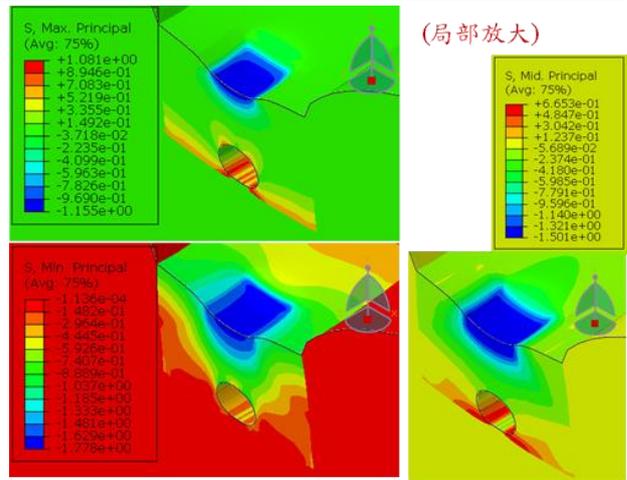


圖 5 100mm 管埋深 30cm 之 CLSM 主應力分布

4-2 口徑 2600mm 管線埋深 30cm 分析結果

在內水壓與車輛荷載同時施加下，此一最淺埋深案例之管體 von Mises 應力以及最大、最小主應力，分別如圖 6、圖 7 所列，CLSM 之主應力分布，如圖 8 所示。

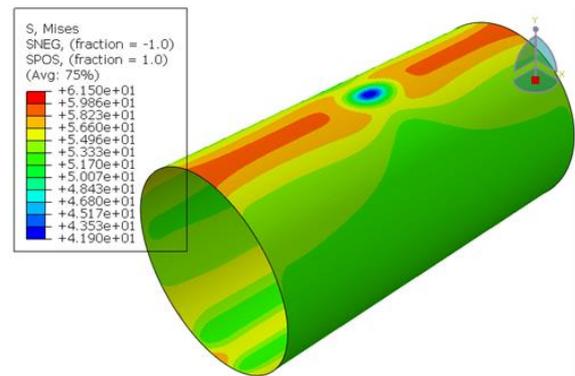


圖 6 2600mm 管埋深 30cm 之管體 von Mises 應力分布

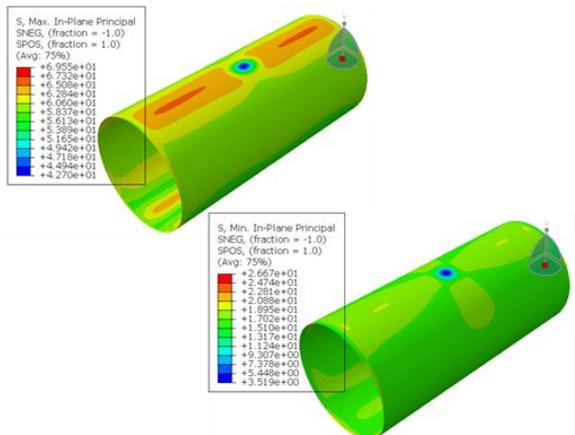


圖 7 2600mm 管埋深 30cm 之管體最大、小主應力分布

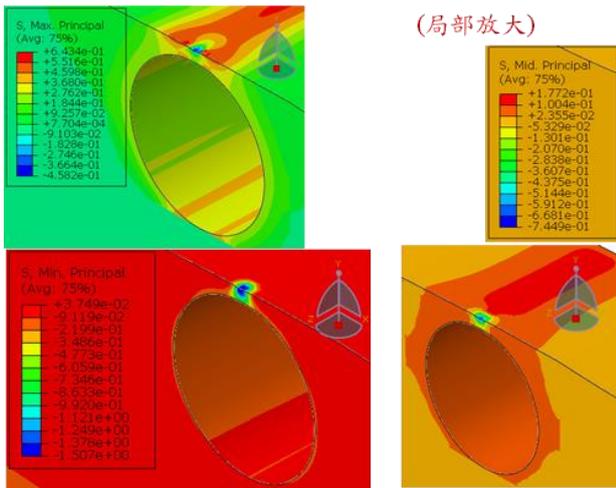


圖 8 2600mm 管埋深 30cm 之 CLSM 主應力分布

4-3 不同埋深之分析結果比較

考慮 30cm、60cm、90cm 以及 120cm 等四種不同淺層埋設深度(管頂 CLSM 厚度實際為 20cm、50cm、80cm 以及 110cm)，在施加車輛荷載之同時，比較管內有、無施加內水壓兩種情況，管體的最大 von Mises 應力分析結果，整理如圖 9 所示。

在內水壓與車輛荷載同時施加下，口徑 100mm 以及 2600mm 管線在四種埋設深度下，CLSM 之最大、最小主應力及其發生位置，分別整理如表 3、表 4 所列。

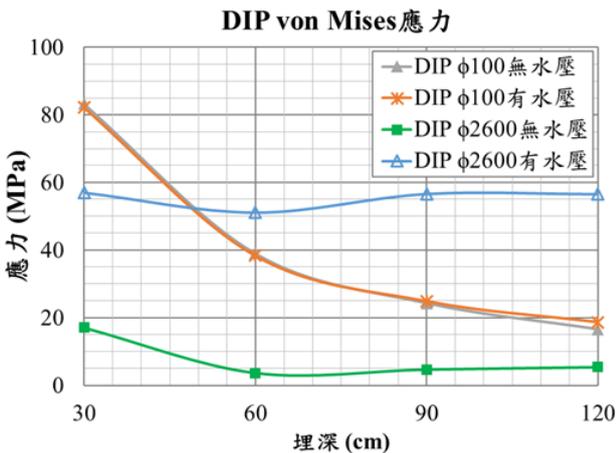


圖 9 四種埋深下管體之最大 von Mises 應力值

表 3 100mm 管四種埋深下 CLSM 之最大、小主應力值

埋深	CLSM 應力 (MPa)			
	Max. Principal		Min. Principal	
30	1.08 (管底兩側)	-1.16 (車載點)	-0.12 (管底兩側)	-1.78 (車載點)
60	0.31 (管底兩側)	-1.06 (車載點)	-0.04 (管底兩側)	-1.61 (車載點)
90	0.25 (近車載兩側)	-0.92 (車載點)	-0.04 (管底兩側)	-1.55 (車載點)
120	0.27 (近車載兩側)	-0.91 (車載點)	-0.04 (管底兩側)	-1.55 (車載點)

表 4 2600mm 管四種埋深下 CLSM 之最大、小主應力值

埋深	CLSM 應力 (MPa)			
	Max. Principal		Min. Principal	
30	0.64 (近車載兩側)	-0.46 (車載點)	0.04 (管頂)	-1.51 (車載點)
60	0.46 (管底兩側)	-0.36 (車載點)	0.0016 (CLSM 表面近土體交界)	-1.59 (車載點)
90	0.47 (管底兩側)	-0.49 (車載點)	0.0008 (CLSM 表面近土體交界)	-1.58 (車載點)
120	0.48 (管底兩側)	-0.55 (車載點)	-0.0003 (CLSM 表面近土體交界)	-1.59 (車載點)

4-4 綜合討論

本研究之有限元素分析，考慮管內有、無施加內水壓兩種情況，進行結果比較。直觀上會認為施加內水壓或有助於抵消車輛荷載下的管體受力，對管體安全會起保護作用。參考圖 9，口徑 100mm 管線在四種埋深下，有、無施加內水壓之管體最大 von Mises 應力值幾乎完全相同，其原因在於小口徑管線之徑厚比較小(厚壁)，內水壓對於管體應力之貢獻小，甚至可以忽略。反之，大口徑管線之徑厚比較大(薄壁)，內水壓對於管體應力之貢獻大，總應力會顯著提高。

其次，口徑 100mm 管線因斷面較小，埋設深度對於管體應力之影響顯著，應力隨埋深呈遞減之趨勢。口徑最大的 2600mm 管線則因斷面極大，管體應力對於埋設深度並不敏感，總應力係由內水壓所主導，亦可見 DIP 之安全性分析，內水壓不應忽略不計。

在內水壓與車輛荷載同時施加下，口徑 100mm 以及 2600mm 管線之管體 von Mises 應力，最大值均發生於最淺埋深，也就是 30cm 的案例，最大應力值分別為 82.2 MPa 以及 56.9 MPa，皆低於延性鑄鐵材料抗拉強度 420 MPa 之值甚多，亦即安全係數超出所

要求之 2.0 甚多，代表極淺埋深，並不足以造成 DIP 之力學性損害。

參考表 3 與表 4 之 CLSM 最大及最小主應力值，可知口徑 100mm 以及 2600mm 管線在四種埋設深度下，受拉應力均超過 0.2 MPa，代表均發生開裂。由於延性鑄鐵與 CLSM 材料的彈性模數及強度均差距極大，預期局部 CLSM 的開裂，對於 DIP 管體受力的影響不大，惟在長期車輛荷載作用下，CLSM 的開裂有可能對道路使用性造成疑慮，須注意之。

五、結語

本研究初步完成口徑 100mm 以及 2600mm DIP，四種不同埋深之有限元素分析，結果顯示在指定車輛荷載下，管體皆未達降伏，且安全係數超出所要求之 2.0 甚多，顯示極淺埋深，不足以造成 DIP 之力學性損害。分析結果亦顯示兩種口徑 DIP，不同埋深下均出現 CLSM 受拉應力過大，發生開裂，然而研判對於管體受力影響不大，但在長期車輛荷載作用下，有可能對道路使用性造成疑慮。

六、致謝

本研究為台灣自來水公司「自來水管線使用可控制性低強度回填材料(CLSM)回填管溝之淺埋技術可行性研究計畫」之初步成果，感謝台灣自來水公司提供委託研究計畫經費。本文內容任何缺失不足，概屬作者之責。

參考文獻

1. ACI (American Concrete Institute), 229R-99 Controlled Low-Strength Materials, Committee Report, 1999.
2. DIRPA (Ductile Iron Pipe Research Association), Design of Ductile Iron Pipe, 2016.
3. DIRPA (Ductile Iron Pipe Research Association), Truck Loads on Pipes Buried at Shallow Depths, 2017.
4. 日本水道協會，2000，「JWWA G113-114 水道用ダクタイル鑄鐵管・鑄鐵異形管」。

5. 日本延性鐵管協會，「ダクタイル管の浅層埋設について」，2000。
6. 台灣自來水公司，「自來水管理設施工說明書」，2020。
7. 湯輝雄，控制性低強度回填材料施工與品管。
8. 經濟部標準檢驗局，「CNS 10808 G3219 延性鑄鐵管」，2019。

蔗渣灰應用於水泥砂漿之硬固性質探討

沈永年¹ 簡于哲² 郭典昀²

¹國立高雄科技大學土木系工程系教授

²國立高雄科技大學土木工程系研究生

摘要

隨著環保意識的抬頭能源的匱乏，並依據減能減碳的的四大要件【減量】、【再利用】、【回收】、【廢棄物再生】，再生資源及廢棄物再利用成為大家積極研發的動力，則蔗渣灰及爐石粉具有膠結的功用，可做為卜作嵐材料取代水泥用量，本以研究蔗渣灰經由高溫燒製 700°C 並延燒一小時，蔗渣灰為固定取代量為 5%，水淬爐石粉則以 0%、10%、20%、30% 為取代水泥用量，水膠比:0.4、0.5 及 0.6，齡期為 7、14、28、56 天，探討蔗渣灰及水淬爐石粉取代水泥用量製成 水泥砂漿試體後新拌性質、硬固性質及經濟效益的可行性。

試驗結果顯示，在添加爐石粉後新拌性質會隨著取代量的上升而提高，硬固性質之抗壓強度在齡期 56 天時蔗渣灰 5% 爐石粉 10% 結果略超過控制組 5% 至 10%，此組在超音波波速上皆超過 4500 m/s，在齡期 28 天時卜作嵐指數皆超過 95% 有良好的卜作嵐反應，在耐久性質上因添加爐石粉 10% 後導致試體緻密性提高，顯示此組配比有良好的耐久性質，蔗渣灰為農業廢棄物爐石粉為工業生成的副產品，經由試驗結果後得知兩種物品可作為卜作嵐材料取代水泥，在蔗渣灰 5% 爐石粉 10% 取代部分水泥用量為最佳取代量，如此一來可以降低水泥用量，並達到將廢棄物再利用降低對環境的破壞，創造新的循環經濟。

關鍵字：蔗渣灰、爐石粉、水泥砂漿、工程性質

Engineering Properties of Mortar Containing Bagasses Ash and Slag

Chien Yu-Ger¹ Sheen Yeong-Nain¹

¹Institute of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

With the rise of energy shortage and environmental awareness, and in accordance with the four elements of energy and carbon reduction, the reduction, reuse, recycling, and waste regeneration, renewable resources and reuse of waste have become the driving force for active research and development. For example, bagasse ash and slag possess cementitious properties and can be used as pozzolanic materials to substitute for cement usage. In this study, bagasse ash was sintered at 700°C for one hour, and the replacement amount of bagasse ash was fixed at 5% plus 0%, 10%, 20%, and 30% water-extracted slag as cement replacement with water-to-cement ratios of 0.4, 0.5, and 0.6. The freshness, hardness, as well as the economic feasibility of the cement mortar specimens made by replacing a portion of the cement with bagasse ash and water-extracted slag were investigated at ages of 7, 14, 28, 56 days.

The results showed that the fresh properties improved after adding bagasse ash with increasing substitution amount. The hardening property test at 56 days of age showed that using

3% bagasse ash and 5% slag slightly exceeded the control group by 5% to 10% in terms of compressive, tensile, and flexural strengths. The ratio of 5% bagasse ash to 10% blast furnace slag resulted in an ultrasonic wave speed of more than 4500 m/s. The pozzolanic index at 28 days of age was more than 95% showing a good pozzolanic response. In terms of durability, the addition of 10% of blast furnace slag led to an increase in the denseness of the specimen, and this group exhibited good strength corresponding to the compressive strength. Our findings showed that bagasse ash, an agricultural waste, and slag, an industrial by-product, can be used as pozzolanic materials to replace cement. The best quality can be obtained using 5% bagasse ash and 10% slag to replace part of the cement usage. Both materials can be added to cement mortar to reduce the amount of cement and reuse the waste, creating a new circular economy.

Keywords: bagasse ash, slag, mortar, engineering properties

一、緒論

近年來因二氧化碳的排放量過多導致溫室效應的影響劇烈，地球暖化影響導致全球氣候異常 [1]，近年來我們的生活環境中也體會到大自然的反撲，大自然的反撲讓我們意識到節能減碳及資源再利用的重要，因此開始尋找新的材料來做為替代有效能源的替代品來延緩溫室效應的產生。

每製造 1 公噸的水泥，便會排放 0.85 公噸的二氧化碳，而水泥業的二氧化碳排放量佔全球 6% [2]。依據文獻得知在 2018 年全球水泥生產總量超過 41 億公噸 [3]，為了保護環境達及達成節能減碳的目標，水泥的減量勢必成為一項趨勢，依據減能減碳的四大要件【減量】、【再利用】、【回收】、【廢棄物再生】，應該去尋得其他的廢棄可再利用的資源，取代水泥的用量，使得在飛灰、爐石等工業廢棄物被廣泛加入混凝土中，這些工業廢棄物皆含有卜作嵐材料之特性，不僅能使混凝土強度提高，還可以取代部分水泥，進而減少水泥的使用，並且能處理工業廢棄物提升強度及達到永續發展。

台灣一年的農業廢棄物超過 471 萬公噸 [4]，隨著環保意識提升與科技發展，【永續發展】的議題一直是大家所關心的問題。研究再生材料、降低大環境污染源創造新的價值是大家所著重的問題，台灣農業為重的稻殼灰、蔗渣灰等當收成後的廢棄物是環境的大殺手之一，近年來大家一直往這方向去探討

農業廢棄物的基本性質，可替代為水泥、砂、石等天然資源或資源匱乏資源之替代品，製成環保建材，不僅降低成本，更可以減少碳排放量與廢棄物汙染，創造高價值循環經濟其中蔗渣亦為農業廢棄物，我國對於甘蔗渣的處理方式為將甘蔗渣作為火力發電的燃料使用，然而甘蔗渣燃燒後產生的蔗渣灰，是不可再利用的，為解決此問題，專家學者開始致力於將蔗渣灰取代水泥，並多方嘗試從改變基本性質或是作為輔助膠結材使用，皆有不錯的成效，除了解決一部分的農業廢棄物堆置問題，亦降低水泥的使用，朝著永續發展的目標邁進。

本研究是以農業廢棄物蔗渣灰及煉鋼後產剩餘的產物水淬爐石粉，添加入水泥砂漿中替代水泥用量，減少廢棄物的處理、降低環境汙染，探討改變性質後對水泥砂漿硬固性質影響之可行性，並可提升強度，去化農、工業之副產品製造循環再利用的價值。

主要研究目的如下；

1. 探討蔗渣灰與爐石粉取代水泥之新拌性質
2. 探討蔗渣灰與爐石粉取代水泥之硬固性質
3. 探討蔗渣灰與爐石粉取代水泥之經濟效益

二、文獻回顧

2-1 蔗渣灰

2-1-1 蔗渣灰的產生

甘蔗一直是台灣居民的民生經濟作物之一，甘蔗提煉完後產出的廢棄物甚多無法處

理掉，近年來環保意思崛起導致蔗渣無法處理，因此尋求新的出路替蔗渣灰發揮新生命。

世界超過 110 個國家以甘蔗為主要種植之農作物，總產量超過 15 億噸 [5]，台灣每年生產約為 780917 公噸的蔗糖，根據研究統計每生產出十噸的蔗糖，就會產生 2 至 3 噸的蔗渣 [5]，因此在台灣特用作物廢棄物中，甘蔗渣高仍居第一位。

生產製造過程可分為壓榨、清淨、蒸發、結晶、分蜜五個步驟，而製糖產生的副產品有蔗渣、糖蜜、濾泥及菸灰，國內為了提倡廢棄物再利用，也早已將這些副產品有效利用，其應用如下 [6]：

蔗渣：早期蔗渣用於鍋爐燃燒，產生蒸汽供作動力及熱源，後來製成蔗板用作天花板和隔音板。1930 年代更進一步用為紙漿的原料。

而蔗渣灰則是經由燃燒室，係利用熱空氣(320°C左右)使剩餘的水分蒸發完全後，將蔗渣加熱至 700°C~800°C使其燃燒，成為熱能及蒸氣，蒸氣推動壓榨機運轉以及使發電機發電最後剩下的黑色底渣，經過篩選後即可用於各項試驗。

2-1-2 蔗渣灰組成及特性

蔗渣灰是製糖過程中產生的一種農業廢物。很多學者認為，將蔗渣灰磨成細顆粒，即可發揮火山灰特性，有效改善於混凝土性能。從物理性上，蔗渣灰生成後是黑色的，多孔隙，低密度，且大多是不規則的形狀。再用於混泥土內會吸收水分，剛開始的蔗渣灰含水很高。蔗渣灰的礦物組成是由燃燒後所含二氧化矽細顆粒和未燃燒部的纖維狀的碳顆粒組成。蔗渣灰的火山灰活性取決於燃燒條件，與煅燒的溫度有實際的關係 [7]。

2-1-3 蔗渣灰的應用

蔗渣灰是製糖過程後產生的農業廢料，蔗渣灰的特性可以替代膠結材料，SBA(10%、20%及 30%)、水淬高溫爐石粉(0%、10%、20%和 30%) 替代水泥的膠結材料混合物進行實驗，混凝土進行了抗壓強度，吸水率的測試。測試結果顯示，將蔗渣灰加入爐石粉替換水泥膠結材會導致流動性降低。由 30%

蔗渣灰添加爐石粉試體的抗壓強度與控制組結果相當[7]。

蔗渣灰經由高溫燒結至不同溫度會改變其化學及物理性質，在固定水膠比的情況下，以水泥砂漿立方試體探討蔗渣灰在不同蔗渣灰取代量及不同溫度燒結下之工程性質探討，實驗結果顯示蔗渣灰在 600°C 和 700°C 燃燒中觀察到更多的纖維顆粒，在 800°C 燃燒中發現嚴重燃燒的纖維顆粒。在 800°C 和 900°C 的溫度下，發生非晶相向結晶相的轉變，並導致蔗渣灰的膠結性降低。在燒結溫度最佳為 700°C 時 [8]，水泥砂漿在硬固性質發展較其他燒結溫度優越，而蔗渣灰經由燒結後灌製水泥砂漿，其孔隙率降低，在 5% 取代量時，C-S-H 膠體能更有效填補孔隙，強度發展較其他取代量佳[9]。

2-2 一貫作業煉鋼爐渣

2-2-1 一貫作業煉鋼製程

從煉鐵過程中，會從高溫爐上部卸下一些氧化鐵的材料、熔化石及燃料，在經 1500°C 高溫燃燒下，會形成鐵水(融鐵)及礦渣[10]。自此可從爐底收集熔融鐵及浮在熔融鐵上面的高爐爐渣。高爐爐渣又依其冷卻方式之不同，分為氣冷高爐石及水淬高爐石[11]。

水淬爐石含高量玻璃質而本身具有潛在的膠結能力，而若加以適當的催化方法激發其水化活性，也會與氫氧化鈣進行「卜作蘭反應」形成類似水化產物 C-S-H 膠體。在爐渣自高爐排出時，採用噴水方式急速冷卻形成者，則稱之為水淬高爐石。

高溫爐石粉是在煉鋼過程中每煉 1 噸生鐵會自高爐排約 300 公斤之冷卻固體物，稱為高爐石(Blast Furnace slag, BF slag)由高溫狀態降至室溫分成兩種方式，依造冷卻方式的不同，可分為水淬爐石與氣冷爐石二種，早期氣冷高爐石被用於填路基，或用做混凝土骨材；水淬高爐石經由高壓水淬驟冷而形成的，在研磨後稱為高爐石粉。而自轉爐用鐵水淬煉 1 噸鋼時，大約產生 100-118 公斤之冷卻固體物，稱為轉爐石(Blast Oxygen Furnace slag, BOF) [12]。

2-2-2 爐石粉基本性質

添加爐石粉可以減少凝結時間，試驗結果顯示爐石粉取代水泥用量可以增加硬固性質，一開始沒甚麼卜作嵐反應當齡期時間越長爐石粉卜作嵐反應越明顯[13]。

2-3 卜特蘭水泥性質與材料

2-3-1 卜作嵐製程與基本性質

卜特蘭 I 型水泥又稱普通水泥，水泥原料主要是以石灰質材料與黏土材料為主，先將石灰石、黏土、矽砂與鐵質依固定配比研磨均和為生料後，生料在經過研磨、煅燒、急速冷卻等流程後形成熟料，再添加石膏研磨後變成為水泥，在高溫旋窯段燒階段會因溫度油滴慢慢變高而生成不同礦物熟料是一種粉末狀的硬性膠結材料，在與水混和後，會在空氣中應化成最堅硬的材料，通常應用在土木工程上[14]。

2-3-2 卜作嵐材料

卜作嵐材料一般的定義為含氧化矽(SiO_2)及氧化鋁(Al_2O_3)物質，且具有低或無膠結性質，在有水份存在環境下與水泥會產生氫氧化鈣，或鹼金屬的氫氧化物起化學反應而形成水泥的硬化性質，生成矽酸鈣水化膠體(Calcium silicate hydrates, C-S-H)及鋁酸鈣水化膠體(Calcium aluminate hydrates, C-A-H)，此過程稱為卜作嵐水化反應，類似水泥水化產物之膠結性反應的任何材料均屬之。卜作嵐材料的主要作用在轉換水泥水化的氫氧化鈣及鈉與鉀鹼類，成為穩定性佳的膠體，使水泥更佳穩定性。卜作嵐材料應用在固定水膠比的條件下，降低漿量因而減少水泥用量，除了卜作嵐材料為綠色建材之特色外，少用水泥對環境污染的影響及衝擊也會降低 [15]。

卜作嵐材料應用於混凝土中主要有以下優點 [16-18]：

1. 可做為替代水泥之材料，如飛灰、高爐石粉及矽灰。
2. 卜作嵐材料多為再生材料，可用以取代天然材料。
3. 透過減少一定量的天然材料用量，提高其使用壽命與耐久性。

4. 改善混凝土力學性質與耐久性。

由 M. Schneider 等人研究指出，水泥為建築材料中不可或缺的一部分，但隨著用量的增加，使得全球正面臨資源及二氧化碳排放等問題。為了解決此問題，全球開發替代材料的比率增加，並歸納出水泥替代材料必須擁有 CaO 、 SiO_2 以及 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 為主軸的替代成份[19]。在台灣比較常用的卜作嵐材料與膠結性材料有飛灰、爐石粉、矽灰等，其中飛灰及矽灰雖均稱為卜作嵐材料，但其特性均各自不相同，尤其混合不同卜作嵐與膠結性材料使用時，更有不同性能及功效[20]。

2-3-3 卜特蘭水泥反應

水泥礦物熟料組成占有的比例依序為式矽酸三鈣(50%)、矽酸二鈣(25%)、鋁酸三鈣、鋁鐵酸四鈣(8%) [21]，水泥在水化反應過程，可分為五個階段，第一階段為放熱高峰，為鋁酸鹽類與石膏於初期迅速溶解並反應。在第二階段為水化放熱速率急速降低並趨於穩定。水化反應會因受到阻礙而減緩。第三階段為放熱高峰的產生是由水泥中約佔 70~80%的矽酸鹽(C_3S 、 C_2S)水化放熱所致，此時將形成水化物 C-S-H 膠體及 CH 晶體。第四階段內有另一水化熱突出峰，是由水泥中另佔約 10%，在水化反應時會釋放出高水化熱約 1350J/g 的 C_3A 造成。第五階段呈現水化穩定狀態，此時水化物會緩慢形成 [22]。

三、試驗計畫

3-1 試驗內容

本研究主要探討將蔗渣灰以相同比例及爐石粉不同比例取代水泥灌製水泥砂漿，將蔗渣灰經由高溫爐加熱至 700°C 並依照不同水膠比(0.4、0.5、0.6)，蔗渣灰取代水泥用量(5%)，爐石粉取代水泥用量(0%、10%、20%、30%)製作水泥砂漿，針對添加爐石粉來有效去化蔗渣灰為配比之依據，進而探討其新拌性質、硬固性質。

3-1-1 試驗變數

實驗變數為依照不同水膠比(0.4、0.5、0.6)，將 700°C 高溫延燒一小時後之蔗渣灰降溫至常溫後，依照蔗渣灰固定取代量 5%，爐石粉不同取代量 0%、10%、20%、30% 等水泥之取代量製作水泥砂漿試體且依照 7 天、14 天、28 天、56 天不同齡期進行新拌性質、硬固性質。

3-1-2 試驗材料

1. 水泥(Cement)

本研究所使用之水泥為台灣水泥公司生產波特蘭第 I 型水泥，水泥性質符合 CNS61 之規範，其水泥比重為 3.15，細度則為 3480cm²/g。

2. 拌合用水(Water)

拌合用水採用自來水，符合 CNS 13961 混凝土拌合水要求規範。

3. 蔗渣灰(Bagasse Ash)

本研究使用來自台糖公司所提供的蔗渣灰，是甘蔗製糖後所遺留的甘蔗渣作為糖廠火力發電之燃料所產生的農業廢棄物，在試驗開始前將蔗渣灰高溫燒製 700°C 並經由 #100 號篩過篩，其比重為 2.325，細度為 4420 cm²/g。

4. 細骨材(Fine Aggregate)

本研究所使用之細骨材來源為里港溪之河砂，依據 CNS 487 規範檢測，其骨材性質比重為 2.64，吸水率為 2.3%，其細度模數為 2.89。

5. 水淬爐石粉(Slag)

本研究所使用之爐石粉為中國鋼鐵公司所生產之水淬爐石，經由中聯爐石資源處理公司研磨成粉狀，比重為 2.90，細度為 4000cm²/g。

I. 配比設計

本研究以蔗渣灰取代水泥(5%)及爐石粉取代水泥(10%、20%、30%)，再以不同水灰比製成水泥砂漿試體，水灰比方面分別為 0.4、0.5、0.6，此研究之配比是以體積法為主，使用體積法主要為了消除試體內材料因不同比重所產生之誤差。進行配比計算之前，先進

行各項材料之比重試驗測定其比重，將每樣材料之重量為單位之計算。

II. 試體拌合與製作

本研究製作立方形 5 × 5 × 5(cm) 試體進行抗壓強度試驗及超音波波速試驗，製作 4 × 4 × 16(cm) 之矩形試體進行抗彎強度試驗，其中方形試體以及矩形試體皆於拆模之後放置於飽和石灰水進行水中養護。

表 1 試驗材料

	
a. 卜特蘭 I 型水泥	b. 燒結過 700 度蔗渣灰
	
c. 水淬爐石粉	d. 細骨材

3-2 試驗項目及設備

3-2-1 新拌性質

1. 坍度

本試驗參考 ASTM C109 規範之規定進行試驗，利用迷你坍度錐進行試驗，用尺量測從坍度錐下至砂漿試體最高點的高度差值，反覆進行三次量測後取平均值，坍度試驗目的以坍度法測定新拌水泥砂漿之稠度，判斷砂漿之工作度影響為何。

2. 流度

本試驗是為測定水泥砂漿於標準流度值 100±5% 狀況下所含之水量，該試驗需進行四次，將四次測定之試樣底部直徑平均值與原流度模具底內徑差除以原流度模具底內徑所得的百分比，為該試樣之流度值。

3. 凝結時間

本試驗之凝結時間參照 CNS 786 規範所實行，目的是為了評估蔗渣灰再 700 °C 燒結溫度下及爐石粉不同取代量取代水泥量對凝結時間的影響。依照蔗渣灰固定取代量 5% 及

爐石粉 0%、10%、20%及 30 不同取代量取代水泥製作水泥試樣，倒入銅模中並用費開氏針進行第一次試驗後記錄時間，每經過 15 分中進行一次試驗直至初凝後每一個小時試驗一次直至試樣終凝並記錄初凝與終凝時間，作為凝結試驗的評估依據。

3-3-2 硬固性質

1. 抗壓強度

本試驗所依據之準則參考美國材料試驗學會 ASTM C109 規範規定。本試驗使用 30 噸自動化混凝土抗壓試驗機，如圖 3-4 所示，具有手動控制加壓與自動控制加壓系統及記錄數據，並可設定適合試體之加壓速率與範圍，作為試體力學強度參考依據。

2. 超音波波速

本試驗方法適用於評估混凝土的均勻性和相對質量，一般超音波頻率約在 20kHz 至 150kHz 之間為非破壞檢測使用之頻率，其中 50kHz 左右最為常用。此試驗主要是利用超音波再不同的介質會有不同的傳遞速率，透過波速傳遞的速率可作為強度品質之參考依據。

此試驗儀器使用攜帶式超音波波速檢測儀進行試驗，於試驗齡期後取出試體，在試體兩面抹上耦合劑，確保探頭兩端與試體表面能緊密接合，接收器測脈波在試體內部傳遞，將發射器音波傳入 5 × 5 × 5 (cm) 立方試體中，依路徑長短計算出超音波在試體中的脈波速度，依不同物質音波傳遞速度特性也會不同，由超音波波速量測試體內部緻密性。

四、水泥漿體結果與分析

本研究將蔗渣灰燒結至 700 度固定用量 5% 及爐石粉不同比例用量添加至水泥砂漿中取代水泥用量，透過試驗結果，探討新拌性質、硬固性質及經濟效益，分析試驗結果，來評估蔗渣灰及爐石粉取代水泥運用於水泥砂漿之工程性質。

4-1 新拌性質

在水泥砂漿新拌性質以坍度及流度作為工程性質上的依據，許多因素會影響水泥砂漿之新拌性質結果，因此 4-1 小節將分析爐石粉不同取代量及不同膠比兩種變數對於坍度及坍流度影響結果。

4-1-1 坍度

坍度試驗依據材料取代量及水泥砂漿配比，用以判斷水泥砂漿工作性質，坍度試驗結果如圖 1 所示，坍度的隨著不同取代量及水膠比而改變，當爐石粉取代量比例越高，坍度也會隨著提高，當水膠比 0.4 時控制組及爐石粉取代量 0%、10%、20% 及 30% 時，坍度值分別為 1.2cm、0.5cm、1.2cm、1.3cm 及 1.5cm；當水膠比 0.5 時控制組及爐石粉取代量 0%、10%、20% 及 30% 時，坍度值分別為 2.3cm、0.8cm、2.4cm、2.5cm 及 2.5cm；當水膠比 0.6 時控制組及爐石粉取代量 0%、10%、20% 及 30% 時，坍度值分別為 6.8cm、4cm、7cm、7.2cm 及 8.9cm，由上述結果顯示，在相同水膠比下爐石粉取代量越多坍度值會隨著增加，因爐石粉比重為 2.9 水泥比重為 3.15 略小於水泥，爐石粉以相等重量替代部分水泥時，膠結料總重量不變，但漿體實質佔有體積會增加，亦即漿體對骨材之體積比會因而提高，有助於混凝土之工作性。在水膠比提高導致時，用水量增加坍度值也隨著之提高。

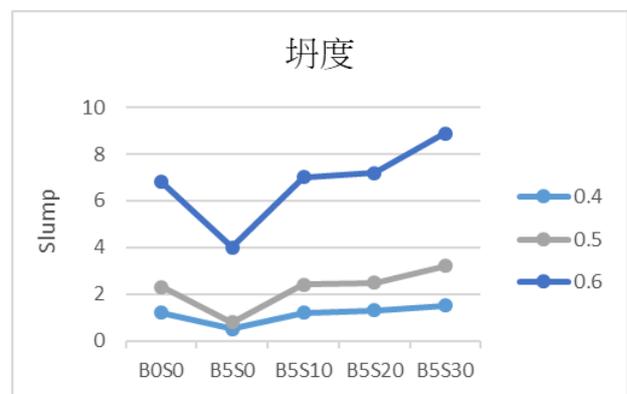


圖 1 含蔗渣灰水泥砂漿之坍度

4-1-2 坍流度

如圖 2 所示爐石粉添加量越多時，其坍流度值會隨添加量而提升，因此在爐石粉添加量為 10% 時趨近於控制組，當水膠比 0.4 時控制組及爐石粉取代量 0%、10%、20% 及 30% 時，坍流度值分別為 22.5cm、15.0cm、22.8cm、23.5cm 及 24cm；當水膠比 0.5 時控制組及爐石粉取代量 0%、10%、20% 及 30% 時，坍流度值分別 24.5cm、21.3cm、24.6cm、25.0cm 及 25.0cm；當水膠比 0.6 時控制組及爐石粉取代量 0%、10%、20% 及 30% 時，坍流度值分別 25cm、23.2cm、25cm、25cm 及 25cm，由上述結果顯示在水膠比提高時含蔗渣灰及爐石粉水泥砂漿坍流度值有上升趨勢，因為拌合水的增加，導致坍流度增加，可以增加工作性能。水膠比 0.4 時 B5S30 較 B5S0 坍流度提升趨近 50%；在水膠比 0.5 時 B5S30 較 5BS0 坍流度提升趨近 18%；在水膠比 0.6 時 B5S30 較 5BS0 坍流度提升趨近 8%，在相同水膠比下爐石粉不同比例用量，坍流度值提高，因爐石粉比重為 2.9 水泥比重為 3.15 略小於水泥，爐石粉以相等重量替代部分水泥時，膠結料總重量不變，但漿體實質佔有體積會增加，亦即漿體對骨材之體積比會因而提高，有助於混凝土之工作性。

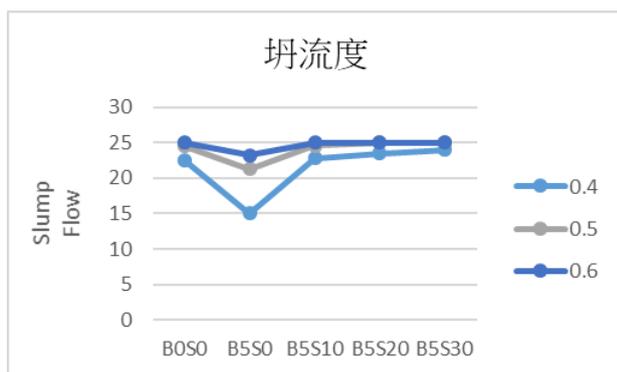


圖 2 含蔗渣灰水泥砂漿之坍流度

4-1-3 凝結時間

凝結時間試驗結果如圖 3、圖 4 及圖 5 所示，本次研究水膠比分別為 0.4、0.5 及 0.6 進行凝結時間試驗，由於不同的水膠比用水量不同及不同爐石粉取代量，導致水膠比越高用水量越多凝結時間有隨之延長狀態，當爐石粉取代量越高凝結時間也會隨之延後，

爐石比重為 2.9 水泥比重為 3.15 略小於水泥，爐石粉以相等重量替代部分水泥時，膠結料總重量不變，但漿體實質佔有體積會增加，亦即漿體對骨材之體積比會因而提高，因此凝結時間也有延的情形發生。在水膠比 0.4、0.5 及 0.6 控制組水泥砂漿凝結時間由 190 分鐘增加為 271 及 303 分鐘，終凝時間由 321 分鐘增加為 491 及 522 分鐘，顯示當水膠比越高用水量越多水泥砂漿凝結時間越長，因為用水量之增加而使泌水量增加。當爐石粉取代量 0%、10%、20% 及 30% 時，水膠比 0.4 時初凝時間為：175、242、270 及 287 分鐘，終凝時間為 302、334、351 及 371 分鐘；水膠比 0.5 時初凝時間為：255、325、391 及 413 分鐘，終凝時間為 452、503、523 及 561 分鐘；水膠比 0.6 時初凝時間為：273、389、415 及 461 分鐘，終凝時間為 512、590、624 及 634 分鐘，由上述顯示當蔗渣灰 5% 爐石粉 0%(B5S0) 因蔗渣灰為多孔隙及纖維狀等特點使吸附水量增加、導致凝結時間降低，使得塑性的時間來得快速。從爐石粉取代量 10% 開始凝結開始延長，因爐石粉本身因斥水效應所產生的游離水，導致浮水量增加使凝結時間延長，且因水泥量減少將使水化熱降低、水化速度減慢，因此會降低整體的活性，使凝結速率減慢而延長其凝結時間。



圖 3 含蔗渣灰水泥砂漿之凝結時間(水膠比 0.4)



圖 4 含蔗渣灰水泥砂漿之凝結時間(水膠比 0.5)



圖 5 含蔗渣灰水泥砂漿之凝結時間(水膠比 0.6)

4-2 硬固性質

本章節硬固性質主要探討不同水膠比及蔗渣灰固定取代量爐石粉不同取代量製成水泥砂漿之影響，探討試體在不同齡期下的硬固性質分析，本次硬固性質試驗分為破壞性試驗及非破壞性試驗兩大類，破壞性試驗為抗壓強度試驗及卜作嵐指數，非破壞性試驗為超音波波速檢測。

4-2-1 抗壓強度

抗壓強度試驗結果如圖 6、圖 7 及圖 8 所示。

1. 蔗渣灰固定取代量爐石粉不同取代量影響

如圖 6、7、8 所示，水膠比提高時抗壓強度會降低，控制組於水膠比 0.4 提高至 0.5 時及 0.5 提高至 0.6 時，抗壓強度分別降低 8.87MPa 及 10.16MPa，蔗渣灰固定取代量爐石粉不同取代量水膠比 0.4 提高至 0.5 時及 0.5 提高至 0.6 時，抗壓強度分別降低

2.14~6.7MPa 及 9.1~10.9MPa，於 14 天齡期時，水膠比提高時抗壓強度會降低，控制組於水膠比 0.4 提高至 0.5 時及 0.5 提高至 0.6 時，抗壓強度分別降低 6.66MPa 及 12.77MPa，蔗渣灰固定取代量爐石粉不同取代量水膠比 0.4 提高至 0.5 時及 0.5 提高至 0.6 時，抗壓強度分別降低 1.49~4.18MPa 及 11.45~11.84MPa，於 28 天齡期時，控制組於水膠比 0.4 提高至 0.5 時及 0.5 提高至 0.6 時，抗壓強度分別降低 5.70MPa 及 10.22MPa，蔗渣灰固定取代量爐石粉不同取代量水膠比 0.4 提高至 0.5 時及 0.5 提高至 0.6 時，抗壓強度分別降低 1.74~5.20MPa 及 10.10~10.26MPa，於 56 天齡期時，控制組於水膠比 0.4 提高至 0.5 時及 0.5 提高至 0.6 時，抗壓強度分別降低 4.88MPa 及 10.06MPa，蔗渣灰固定取代量爐石粉不同取代量水膠比 0.4 提高至 0.5 時及 0.5 提高至 0.6 時，抗壓強度分別降低 1.3~2.5MPa 及 8.38~15.47MPa，由上述結果顯至爐石粉過多取代量對整體抗壓強度並不會有太大的提升，表示添加過多的爐石粉無法有效進行卜作嵐反應，導致抗壓強度降低，蔗渣灰 5% 爐石粉 10% 取代量為最佳，因爐石粉以 CaO 與 SiO₂ 為主要成分，兼具膠結性與卜作嵐反應特性，能填充試體微孔隙而提高水密性及強度。水膠比由 0.4 提升至 0.6，會使試體孔隙增加造成抗壓強度降低，因提高水膠比雖使水泥顆粒易於水化，可以產生較多的 Ca(OH)₂ 來促進卜作嵐反應的進行，但會使得試體之充水空間增加而產生大量的孔隙；低水膠比時，則因卜作嵐反應生成的水化產物較為高密度堆積因而產生為緻密現象，抗壓強度也有所提升；抗壓強度隨齡期增加而增加，晚齡期隨著爐石粉產生卜作嵐反應，使抗壓強度較控制組有所提升。

2. 水膠比影響

如圖 6、圖 7 及圖 8 所示，添加水淬爐石粉比無添加水淬爐石粉在抗壓強度結果會有較好表現，隨著水膠比提高抗壓強度也會因為用水提高而降低。在水膠比 0.4 時，齡期 7 天至 14 天抗壓強度成長量為 4.12~5.67MPa，齡期 14 天至 28 天抗壓強度成長量為 3.51~4.30MPa，齡期 28 天至 56 天抗壓強度成長量為 3.51~4.29MPa，在水膠比 0.4 時，抗壓強度於控制組無明顯提升，但添加爐石粉後，抗壓強度成長幅度也隨之提升，因取代量增加工作性能也會越佳，表示整體水泥砂漿試體得均勻性能也隨之提高，使得水泥有更佳的水化反應，在不同爐石粉取代量的抗壓強度成長趨勢一致，表示添加越多爐石粉無法有效進行卜作嵐反應，在爐石粉取代量 10% 時整體成長幅度為最大，顯示 10% 爐石粉添加量為最佳取代量。在水膠比 0.5 時，齡期 7 天至 14 天抗壓強度成長量為 6.32~6.33MPa，齡期 14 天至 28 天抗壓強度成長量為 4.59~5.26MPa，齡期 28 天至 56 天抗壓強度成長量為 2.75~6.32MPa，在水膠比 0.5 時，整體試體的成長趨勢為最為明顯，也隨著拌合水的增加使水膠比 0.5 工作性能高於水膠比 0.4 時，在水膠比 0.6 時，齡期 7 天至 14 天抗壓強度成長量為 3.72~4.01MPa，齡期 14 天至 28 天抗壓強度成長量為 5.94~7.81MPa，齡期 28 天至 56 天抗壓強度成長量為 4.47~6.30MPa，在水膠比 0.6 時，整體抗壓強度皆低於水膠比 0.4 及 0.5 抗壓試體數據，因高水膠比提供良好水化環境，綜合上述結果水膠比 0.4 時抗壓結果皆高於水膠比 0.5 及 0.6，顯示 0.4 水膠比為佳水膠比，在蔗渣灰 0.5% 及爐石粉 10% 取代量時，齡期 28 天時抗壓數據顯示 B5S10 趨近於控制組強度，在齡期 56 天開始皆超過於控制組，顯示 B5S10 可有效取水泥，與水化作用所析出的矽酸鈣水化物鍵結反應不足，而導致水化產物減少造成抗壓強度發展有限。爐石粉之配比因水膠比提升，會使試體孔隙增加造成抗壓強度降低，因提高水膠比雖使水泥顆粒易於水化，可以產生較多的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 來促

進卜作嵐反應的進行，但會使得試體之充水空間增加而產生大量的孔隙；低水膠比時，則因卜作嵐反應生成的水化產物較為高密度堆積因而產生為緻密現象，抗壓強度也較高水膠比有所提升。



圖 6 含蔗渣灰水泥砂漿之抗壓強度(水膠比 0.4)

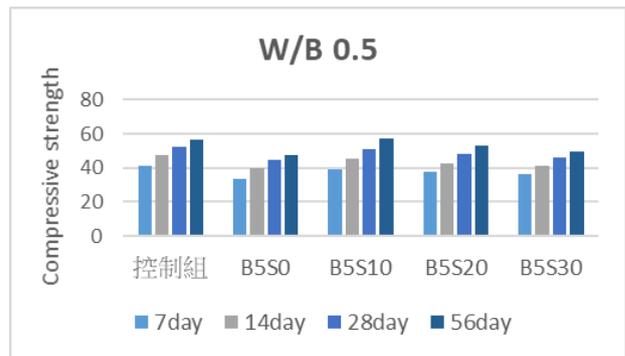


圖 7 含蔗渣灰水泥砂漿之抗壓強度(水膠比 0.5)

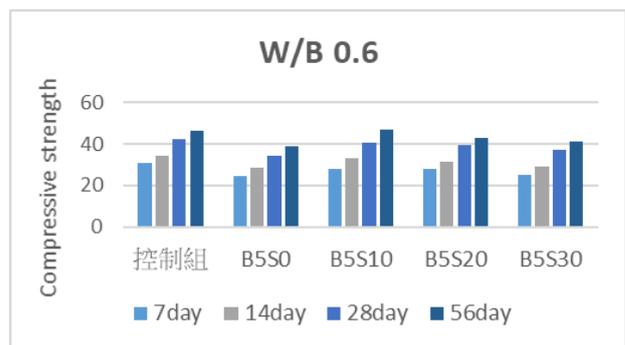


圖 8 含蔗渣灰水泥砂漿之抗壓強度(水膠比 0.6)

4-2-2 超音波波速變化

本研究以不同水膠比(0.4、0.5、0.6)，蔗渣灰固定取代量(5%)，爐石粉取代量(0%、10%、20%、30%)，於 3 天、7 天、28 天、

56 天，製成 5*5*5 公分水泥砂漿試體進行超音波波速試驗，超音波是一項非破壞試驗，試體內部孔隙越多，則檢測波速越小，水泥砂漿內部水化反應越完全孔隙越小，因此檢測到的波速則會呈現較高的趨勢，依據超音波波速高低，得知試體緻密程度，驗證其與抗壓強度之趨勢。結果如圖 9、10、11 所示

1. 蔗渣灰固定取代量爐石粉不同取代量

如圖 9、圖 10 及圖 11 所示，爐石粉取代量增加會使超音波波速降低趨勢。當齡期 28 天時，水膠比 0.4 時，控制組及加入蔗渣灰 5% 爐石粉 0%、10%、20% 及 30% 取代水泥之波速分別為 4810 m/s、4200 m/s、4700 m/s、4479 m/s 及 4453 m/s，顯示添加爐石粉比控制組略降低 2%~14%，超音波波速會因為有無添加爐石粉而有降低趨勢。因卜作嵐反應作用較緩慢，導致爐石粉之配比，早齡期之超音波波速較控制組低。在齡期 56 天時，水膠比 0.4 時，控制組及加入蔗渣灰 5% 爐石粉 0%、10%、20% 及 30% 取代水泥之波速分別為 5328 m/s、4436 m/s、5455 m/s、5100m/s 及 4700m/s，顯示添加爐石粉 10% (B5S10) 時超音波波略超過控制組 9%，因卜作嵐反應開始產生，導致爐石粉配比略超過控制組超音波波速，顯示石粉之配比在中齡期開始進行卜作嵐反應，產生 C-S-H 膠體填充試體內部孔隙，使試體有較佳緻密性。以 10% 爐石粉有較佳之超音波波速，取代量提升則超音波波速也隨之降低，由此可得知爐石粉不同取代量增加時抗壓強度會隨之降低，超音波波速於各取代量之趨勢與抗壓強度相符。

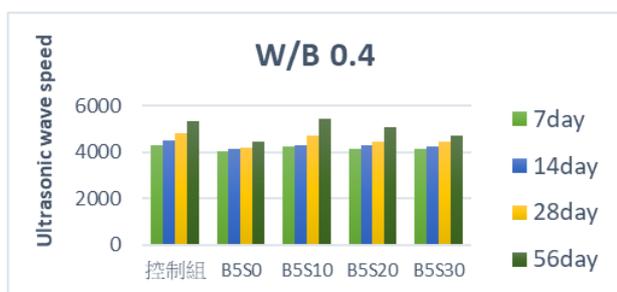


圖 9 含蔗渣灰水泥砂漿之超音波試驗(水膠比 0.4)

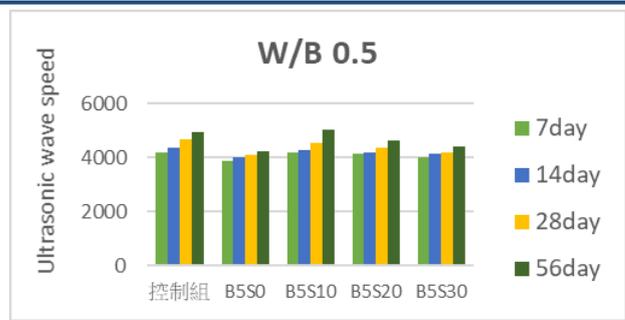


圖 10 含蔗渣灰水泥砂漿之超音波試驗(水膠比 0.5)

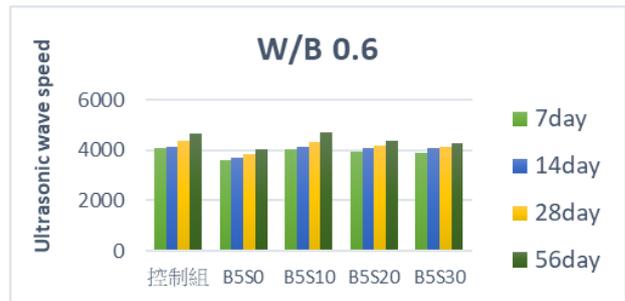


圖 11 含蔗渣灰水泥砂漿之超音波試驗(水膠比 0.6)

2. 水膠比之影響

針對不同水膠比下含蔗渣灰及爐石粉水泥砂漿對於超音波波速之影響，提高水膠比造成不同配比超音波波速降低，當齡期 28 天時，水膠比 0.4，超音波波速為 4200m/s~4810m/s；水膠比 0.5，波速為 4150m/s~4687m/s，波速降低約 2%~3%；水膠比 0.6，波速為 3840m/s~4360m/s，波速降低約 9%~11%；顯示控制組及爐石粉取代量隨水膠比提升，超音波波速有降低之趨勢，水化作用所析出的矽酸鈣水化物鍵結反應不足，而導致水化產物減少造成試體較不緻密。顯示隨水膠比提升，導致試體之充水空間增加而產生大量的孔隙，使得超音波波速有降低之趨勢，且因卜作嵐反應作用較緩慢，於齡期 28 天時，無法有效產生 C-S-H 膠體填充試體孔隙，導致隨爐石粉取代量提升，較控制組之超音波波速有略微降低之趨勢。

結果顯示水膠比 0.4，齡期 7 天到 56 天，波速成長幅度約 19%~32%。由圖 4-結果顯示，水膠比 0.5，齡期 7 天到 56 天，波速成長幅度落在 16%~27%。從圖 4-結果顯示，水膠比 0.6，齡期 7 天到 56 天，波速成長幅度 18%~21%。由以上結果分析顯示，水膠比越低於晚齡期成長幅度越趨緩，於各水膠比水化反應皆已完成，使固定蔗渣灰取代量爐石粉不同取代量可進行卜作嵐反應，在不同水膠比於晚齡期蔗渣灰皆進行卜作嵐反應，使晚齡期超音波波速提升。超音波波速於各取代量之趨勢與抗壓強度相符，在相同齡期下水膠比提高則超音波波速也隨之降低，由此可得知水膠提高會導致超音波波速降低時抗壓強度會隨之降低。

4-2-5 卜作嵐指數

卜作嵐指數指水泥砂漿之卜作嵐反應之優劣，將水泥砂漿試體(5cm*5cm*5cm)置放於養護水槽養護 28 天，將控制組試體與卜作嵐混凝土進行抗壓強度對照，在 0.4 水膠比時，蔗渣灰固定取代量爐石粉不同取代量之卜作嵐指數為 80.00%~96.53%，在 0.5 水膠比時，蔗渣灰固定取代量爐石粉不同取代量之卜作嵐指數為 84.47%~97.11%，在 0.6 水膠比時，蔗渣灰固定取代量爐石粉不同取代量之卜作嵐指數為 81.00%~96.31%，依據 CNS 卜作嵐指數最低為 75%，添加爐石粉後的卜作嵐指數皆超過無添加爐石粉之卜作嵐指數，原因為蔗渣灰無法幫助水泥膠結，導致抗壓強度降低幅度較大，在各水膠比時添加爐石粉 10% 都為最佳卜作嵐指數，在添加越多爐石粉卜作嵐指數呈現降低趨勢，表示添加過多的爐石粉無法有效的進行卜作嵐反應，導致抗壓強度略有降低幅；隨著水膠比的上升，高水膠比混凝土之卜作嵐指數降低程度較低水膠比混凝土卜作嵐指數少，原因為高水膠比混凝土含有較多水分，爐石粉提供較多水化產物，並使抗壓強度較低水膠比試體趨近於水泥砂漿試體，此卜作嵐指數結果與水泥砂漿抗壓強度有相同趨勢。

表二 蔗渣灰 5% 取代量爐石粉不同取代量之卜作嵐指數

試體名稱	卜作嵐指數(%)
W/B 0.4	
B5S0	80.00
B5S10	96.53
B5S20	87.98
B5S30	83.32
W/B 0.5	
B5S0	84.47
B5S10	97.11
B5S20	91.81
B5S30	87.97
W/B 0.6	
B5S0	81.00
B5S10	96.31
B5S20	92.96
B5S30	88.11

4-5 經濟效益

本研究以蔗渣灰及爐石粉取代水泥用量製成水泥砂漿試體，綜合上述結果分析，在設計配比中最佳爐石粉取量為 10% 水膠比最佳為 0.4，水膠比 0.4 蔗渣灰取代量 5% 爐石粉取代量 10% 此組別在新拌性質、硬固性質、耐久性質及微觀性質都有較好的表現。近年來因為營建業市場熱絡導致水泥用量提升迅速，每製造 1 公斤水泥的過程中會產生 0.89 公斤的 CO₂ 排放量，如果能用廢棄物作為卜作嵐取材料取代水泥，可以達到環保的減少使用、物盡其用、循環利用及替代使用，蔗渣灰及爐石粉符合環保 4R 的目的，蔗渣灰及爐石粉可以取代水泥減少水泥用量、廢棄物再利用及創造新的產值，本次研究最佳配比編號為 0.4B5S10 可以取代 15% 的水泥用量，對環境及經濟都可創造出良好的成效。

五、結論

1. 含蔗渣灰及爐石粉取代水泥之新拌性質可得知，當無添加爐石粉其流度及坍度會比

降低,添加爐石粉後整體工作性質會提升,其凝結時間也隨之上升,在水膠比提升時,因用水量增加而導致流度與坍度提高,因此在取代量提高及水膠比提高時會使坍度及流度提升。

2. 硬固性質由抗壓強度、超音波波速及卜作嵐指數顯示,隨著爐石粉的添加量增加強度會有降低趨勢,在蔗渣灰 5% 爐石粉 10% 取代水泥用量為最佳配比,此組配比在晚齡期時卜作嵐反應後,在抗壓強度超過控制組強度 5%~10%,其試體內部較緻密超音波波速皆超過 4500m/s 以上。
3. 在經濟效益上蔗渣灰為農業廢棄物爐石粉則為工業廢棄物,將兩者廢棄物取代水泥用量,不僅能夠降低水泥生產也能降低環境污染,並創造新的經濟效益。

綜合上述結果所示,蔗渣灰固定取代量(5%)及爐石粉不同取代量(0%、10%、20%、30%)製成水泥砂漿試體在水膠比 0.4、0.5 及 0.6 下,其蔗渣灰 5% 爐石粉 10% 為最佳取代量,在晚齡期時強度會有良好表現,達到良好的工作性與資源再利用。

參考文獻

1. <http://edresource.nmns.edu.tw/ShowObject.aspx?id=ob81aa7caaob81d9f9f8ob81aa8cedob81a2df75> 國立自然科學博物館 科博館 氣候變遷。
2. M. Kusic, C. Ferguson, C. Clarke, J. Smyth, 2018, "Building pressure", Carbon Disclosure Project.
3. USGS, 2019, "Mineral Commodity Summaries 2019"
4. 行政院主計總處, 2018, "綠色國民所得帳編制報告"。
5. P. O. Modania, M.R. Vyawahareb, 2013, "Utilization of Bagasse Ash as a Partial."
6. 翁鴻山, 2018, "循環經濟:製糖產業中資源與熱能的循環", 科技大觀園, 6/26 取自: <https://scitechvista.nat.gov.tw/c/sgGf.ht>
7. mH.X.Zhang, Huai wei, 2011, "An overview for the utilization of wastes from stainless steel industries. Resources", Conservation and Recycling 55(8), pp.745 - 754.
8. Duc-Hien Le, Yeong-Nain Sheen b, My Ngoc-Tra Lam, 2018, "Fresh and hardened properties of self-compacting concrete with sugarcane bagasse ash-slag blended cement", Construction and Building Materials 185 (2018) 138-147.
9. V. Jittin, S.N. Minnu, A. Bahurudeen, 2020, "Potential of sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material and comparison with currently used rice husk ash", Construction and Building Materials.
10. 潘毅倫, 2019, 含蔗渣灰之水泥砂漿工程性質研究, 國立高雄科技大學土木工程與防災科技研究所, 碩士論文。
11. 黃兆龍主編, 1999, 高性能混凝土設計與應用, 科技圖書股份有限公司。
12. 中國鋼鐵, 2003, 爐石利用推廣手冊。
13. 行政院公共工程委員會, 2017, 公共工程高爐石混凝土使用手冊。
14. Chin Mei Yun, Md Rezaur Rahman, Cherlene Yong Wee Phing, Anita Wong May Chie Muhammad Khusairy Bin Bakri, 2020, "The curing times effect on the strength of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) mortar", Construction and Building Materials.
15. 黃兆龍, 2006, 混凝土性質與行為, 詹氏書局。
16. 黃兆龍, 2007, 卜作嵐混凝土使用手冊, 財團法人中興工程顧問社, 台北。
17. Yunyao Wang, Zhonghe Shui, Xu Gao, Rui Yu, Yun Huang, Shukai Cheng, 2019, "Understanding the chloride binding and diffusion behaviors of marine concrete based on Portland limestone cement-alumina enriched"

- pozzolans ”,Construction and BuildingMaterials 198, pp.207-217.
17. AxelSchöler,BarbaraLothenbach,FrankWinnfeld,MaciejZajac,2015,“Hydration of quaternary Portland cement blends containing blast-furnace slag, siliceous fly ash and limestone powder ”, Cement and Concrete Composites 55,pp.374-382.
 18. VanToanPham,PhalkongMeng,PhuongTrinhBui,YukoOgawa,KenjiKawai,2020,“Effects of Shirasu natural pozzolan and limestone powder on the strength and aggressive chemical resistance of concrete”, Construction and Building Materials 239,117679.
 19. M. Schneider, M. Romer , M. Tschudin , H. Bolio , 2011 , ” Sustainable cement production — present and future ” , Cement and Concrete Research , vol.41 , pp.642 - 650.
 20. 陳柏榮 , ” 卜作嵐材料對混凝土影響之探討 ” , 2010 , 交通部台灣鐵路管理局。
 21. Sidney Mindess, J. Francis Young and David Darwin,2003,“Concrete”, second Edition.
 22. 顏聰 , 2006 , 土木材料 , 國家圖書館。

無機聚合廢液晶磚產製技術之研究

王金鐘¹ 羅晨晃² 游弘光³ 曹淑靚⁴ 袁維彤⁴ 李佳勳⁴ 陳蕙禎⁴

¹正修科技大學土木與空間資訊系教授

²正修科技大學土木與空間資訊系講師

³正修科技大學土木與空間資訊系研究生

⁴正修科技大學土木與空間資訊系大學生

摘要

本研究主要利用鹼活化處理技術，激發水淬爐石粉和電廠飛灰等膠結的能力，製作成膠結的無機聚合物，其次為無機聚合廢液晶磚的製作，其試拌配比为(1)鹼當量(AE)設定為6%、8%及10% (2)鹼模數比(MS)設定為1.5 (3)液膠比為0.8、1.0、1.5，(4)骨膠比為1.0、1.25及1.5等調配，其中水淬爐石粉/F級火力電廠飛灰比例分別為S40F60、S60F40、S80F20等調配，並澆置成5cm*5cm*5cm試體，拆模後並養治3天、7天及28天再進行一系列試驗，探討其抗壓強度、吸水率、乾縮率等之影響，目標為製作出能符合CNS-382普通磚之規範要求。

試驗結果顯示：(1)採用S40F60、S60F40膠結料混拌配比在鹼當量6%，液膠比為0.8、1.0及1.5，骨膠比為1.0、1.25、1.5，鹼模數比1.5能夠同時滿足CNS-382普通磚第3種磚之抗壓強度及吸水率要求。(2)採用S80F20膠結料混拌配比在鹼當量6%、8%、10%，液膠比為1.0及1.5，骨膠比為1.0、1.25、1.5，鹼模數比1.5能夠同時滿足CNS-382普通磚第3種磚之抗壓強度及吸水率要求。(3)就S40F60、S60F40、S80F20膠結料而言，在相同液膠比、鹼當量、骨膠比、養治齡期狀況下，S80F20膠結料提供的抗壓強度最高、吸水率最低、乾縮率最低，其次為S60F40膠結料。

關鍵字：廢液晶磚、無機聚合物、鹼當量、鹼模數比、液膠比、骨膠比、抗壓強度、乾縮率、吸水率

A Study of Production Technology of Geopolymer Bricks Made from Waste Liquid Crystal

Chin-Chung Wang¹ Chen-Hoang Lo² Hung-Kuang Yu³ Shu-Jing Cao⁴

Wei-Tong Yuan⁴ Jia-Xun Li⁴ I-Chen Chen⁴

¹Corresponding Author, Civil Engineering and Geomatics Department, Cheng Shiu University

^{2,3,4}Civil Engineering and Geomatics Department, Cheng Shiu University

ABSTRACT

This research mainly uses alkali activation treatment technology to stimulate the cementing ability of water quenched furnace powder and power plant fly ash, produce cemented geopolymers, Secondly production of waste liquid crystal geopolymer bricks, trial mix ratios(1)alkali equivalent(AE) was set to 6%, 8% and 10% ,(2)alkali modulus ratio (MS) was set to 1.5,(3) liquid binder ratio, such as the deployment of 0.8,1.0 and 1.5,(4) aggregate binder ratio was set to 1,1.25 and 1.5, Among them, the ratio of water-quenched furnace stone powder/F-grade

power plant fly ash is S40F60, S60F40, S80F20, etc., respectively. and pouring set to 5cm*5cm*5cm test specimens, and curing 3 days, 7 days and 28 days after executed a series of tests, base mechanics features of the brick through tests of compressive strength, water absorption, and shrinkage target for the production could meet the CNS 382 common brick specifications requirements.

From the experimental results show (1) The mixing ratio of S40F60 and S60F40 cement is 6% of alkali equivalent, the ratio of liquid binder is 0.8, 1.0 and 1.5, aggregate binder ratio is 1.0, 1.25, 1.5, and the alkali modulus ratio of 1.5 can simultaneously meet the requirements of CNS-382, compressive strength and water absorption requirements of the third type of brick. (2) The mixing ratio of S80F20 cement is 6%, 8%, 10% of alkali equivalent, the ratio of liquid binder is 1.0 and 1.5, aggregate binder ratio is 1.0, 1.25, 1.5 and the alkali modulus ratio of 1.5, can simultaneously meet the requirements of CNS-382, compressive strength and water absorption requirements of the third type of brick. (3) For S40F60, S60F40, and S80F20 cements material, under the same liquid binder ratio, alkali equivalent, aggregate binder ratio, and curing age, S80F20 cement provides the highest compressive strength, the lowest water absorption rate, and the lowest drying shrinkage rate, followed by S60F40 cementing material.

Keywords: waste liquid crystal bricks, geopolymer, alkali equivalent, alkali modulus ratio, liquid binder ratio, aggregate binder ratio, compressive strength, drying shrinkage rate, water absorption

一、前言

隨著經濟的蓬勃發展，事業廢棄物日益增加，在這環保意識高漲的時代，如何處理日益增多的事業廢棄物，乃是當務之急，刻不容緩。近年光電產業蓬勃發展，造成 TFT-LCD 製造業之事業廢棄物—廢玻璃年產量大增約為 15 萬噸。「電廠飛灰」國內火力發電廠主要係以燃煤發電為主，每年產能約為 200 萬公噸，以上這些事業廢棄物，產量如此龐大，而我國又地狹人稠，在可利用且有限土地的資源情形下，若不能大幅提升回收的比例，而盲目的固化中間處理及獨立掩埋最終處置，也只能治標。

其次為強化國人『永續發展、資源再利用』，若能以國內廢液晶為填充材，水淬爐石粉和 F 級火力電廠飛灰混拌製成的無機聚合物作為膠結材，製造出強度佳、環保優之無機聚合物—廢液晶磚，資源再利用，不但能解決無處堆置窘境，也不會造成國家資源的浪費，更能避免環境過度的開發及二度污染的問題產生，達到生態、節能、減廢、健康等

綠建築評估指標。

二、文獻回顧

隨著經濟的蓬勃發展，事業廢棄物日益增加，在這環保意識高漲的時代，如何處理日益增多的事業廢棄物，乃是當務之急，刻不容緩。光電產業為國家科學技術發展之八大重點科技及八項關鍵性技術之一，其中平面顯示器產業更為經濟部「兩兆雙星核心優勢產業」中之影像顯示產業的第一階段發展重點。

2-1 TFT-LCD 廢液晶玻璃

面板製程不良品、邊料亦蔚為可觀，大致上可分為廢素玻璃、廢黑玻璃及廢液晶面板，其中素玻璃被視為一般事業廢棄物可以直接掩埋或再利用；但在製程中鍍過銦錫氧化物(ITO)的面板目前多為委託處置，大多予以掩埋處理。若能將之回收再利用給予資源材料化，除了能符合環保法規外，再透過環境管理系統 ISO-14001 的追蹤管理，導入工業減廢與回收再利用的概念，讓製造廠商能

降低廢棄物清除處理成本，還能提升其企業環保形象。

2-2 TFT-LCD 廢玻璃回收及再生

由於 TFT-LCD 產業產品更新迅速，製程技術變化快速，再加上生產過程中使用多樣且特殊的原物料及化學品，使得產製過程產生的廢棄物種類及特性亦隨之變化。TFT-LCD 製造業第三大類之事業廢棄物為廢玻璃，包含廢素玻璃及廢液晶玻璃，產出量約占 TFT-LCD 製造業產出事業廢棄物總量之 14%。廢玻璃之再利用率約為 91%，主要來自液晶面板製造時產出之邊料、下腳料或是不良品，包含廢素玻璃及廢液晶玻璃，兩者之成分性質相同。其再利用方式為回收後經研磨可再利用作為玻璃原料、陶瓷原料或是紅磚原料，目前廢素玻璃已全數進行回收再利用；而廢液晶玻璃則需先經前處理消除注入之液晶的部分始得進行再利用。

2-3 電廠飛灰

「電廠飛灰」為燃煤火力發電廠發電所產生之副產物[1]，粉煤經鍋爐燃燒，約有 80% 的灰燼會隨著燃氣上升，當煙氣依照煙道流到靜電集塵器時，煙氣中全部的灰燼幾乎都被吸附下來，此部份的煤灰稱為「電廠飛灰」國內火力發電廠主要係以燃煤發電為主，每年產能約為 200 萬公噸，其成份中含大量 SiO₂、Al₂O₃ 及 Fe₂O₃ 等氧化物，環保署公告為可再生利用之材料。如何將電廠飛灰再利用率提高，解決高產量灰渣堆置問題，也是目前環境保護所必須面對的重要議題。

1. 飛灰

「飛灰」為燃煤火力發電廠發電所產生之副產物，粉煤經鍋爐燃燒，約有 80% 的灰燼會隨著燃氣上升，當煙氣依照煙道流到靜電集塵器時，煙氣中全部的灰燼幾乎都被吸附下來，此部份的煤灰稱為「飛灰」(fly ash)，而另外一部份的煤灰粒徑較粗，重量較大，直接掉到鍋爐底部則稱為「底灰」(bottom ash)。由集塵設備收集而得之飛灰，其品質須符合 CNS 3036 [卜特蘭水泥混凝土用飛灰及天然或煨燒卜作嵐攪和物]之影響甚鉅。

2. 飛灰之物理性質

了解飛灰化學成份之規定係提供火力電廠，對於煤成分、研磨、燃燒、收集等過程有所控制，及作為有關設備之維護或更新的參考資料，俾在生產飛灰時能控制其品質；而物理性質之有關限制，乃在確保混凝土使用飛灰時達到增進品質之目的。

(1) 細度

依 CNS 3036[2] 規定飛灰細度溼篩洗法，以 No.325 篩之停留百分率，最大值為 34%；停留率愈大，顯示飛灰愈粗，含碳量愈大。顆粒愈小，則飛灰的比表面積愈大，卜作嵐活性指數愈高。

(2) 卜作嵐活性指數

係指依據 CNS 3036 規定經養護 28 天之飛灰與卜特蘭水泥砂漿試體強度對控制組(純卜特蘭水泥砂漿試體)之比率稱為卜作嵐活性指數；CNS 規定其最小值為 75%；卜作嵐活性指數愈大表示飛灰與氫氧化鈣之反應能力愈佳，更能增進混凝土品質。

(3) 高壓蒸鍋膨脹率(健度)

CNS 3036 規定飛灰混凝土在高壓蒸鍋中之膨脹率最大值為 0.8%，以防混凝土之不正常膨脹或收縮。

(4) 燒失量(LOI)

當粉煤在燃燒過程中，其少量較粗碳顆粒未能完全燃燒而隨著飛灰向上飄浮而被捕集，這些碳顆粒在高溫下仍會燃燒而失去之重量，稱為燒失量。燒失量愈高顯示飛灰中的含碳量亦愈高；其混凝土需水量也較高，對化學摻料的使用效果可能有不利影響，依 CNS 3036 規定飛灰，F 及 C 類飛灰均不得高於 6%。

2-2 水淬高爐石粉

一貫作業煉鋼廠之高爐煉鐵過程須加入石灰石作為助熔劑，並加入焦炭作為還原劑，鐵礦石經還原反應後殘留之非鐵物質即為高爐石，高溫融熔液態高爐石經過高壓水冷卻方式產出「CNS12223 水淬高爐爐渣」[5]，經研磨成粉後主要應用於營建工程，替代水泥作為混凝土之膠結材，由中聯爐石處理資源化股份有限公司產出，細度 4000cm²/g，比

重 2.93。

2-3 鹼活化劑處理技術

無機聚合物是一項具有前瞻性之發展，鹼活化劑通過激發矽酸鋁材料，如粉煤灰、偏高嶺土、磨細高爐礦渣、高嶺粘土等，與鹼性溶液製成之應用，其中爐石粉亦含有 SiO_2 與 Al_2O_3 ，爐石具有潛在水硬性作用之材料，純爐石的顆粒結構穩定，可直接使用純爐石作為主要膠結材料，利用鹼性溶液溶解爐石顆粒表面玻璃質，溶出 Ca^{2+} 破壞矽鋁氧化物之鍵結，並與鹼性溶液所分離之陰離子經由聚合反應生成水化產物，因而組成矽凝膠體，具有高早強、工作性佳、較佳的抗化學侵蝕能力、抗凍融循環能力及具有較佳的黏結力，但是仍有速凝、高收縮量等缺點，而高濃度的活化劑卻可以增加結構強度與縮短凝結時間[3,4]。

2-4 CNS-382 普通磚規範 [6]

- (1) 適用範圍：本標準適用於以粘土為主要原料燒製而成，
- (2) 用於構築窯爐、土木、建築、造園等用途之普通磚（以下簡稱磚）。
- (3) 種類：依品質及形狀分類如下。
 - (一) 依品質區分：1 種磚、2 種磚、3 種磚。
 - (二) 依形狀區分：實心磚、開孔磚。
- (4) 外觀：不得有使用上有害之龜裂或損害。
- (5) 尺度及許可差：依表 1 之規定。
- (6) 品質：應符合表 2 之規定。

表 1 磚之尺度及許可差(單位: mm)

名稱	長	寬	厚
尺度	200	95	53
許可差	±6.0	±4.0	±2.7

表 2 磚之品質規定

名稱	1 種磚	2 種磚	3 種磚
吸水率(%)	10 以下	13 以下	15 以下
抗壓強度 MPa { kgf/cm ² }	>30.0{300}	>20.0{200}	>15.0{150}

三、試驗計畫

3-1 試驗變數

本研究為強化國人『永續發展、資源再利用』，若能以國內廢液晶為填充材，水淬爐石粉和 F 級火力電廠飛灰製作成無機聚合物作為膠結材，製造出強度佳、環保優之無機聚合物—廢液晶磚，資源再利用，不但能解決無處堆置窘境，也不會造成國家資源的浪費，更能避免環境過度的開發及二度污染的問題產生，達到生態、節能、減廢、健康等綠建築評估指標。

本研究所使用的鹼活化劑是由矽酸鈉溶液(號水玻璃)與氫氧化鈉混合配製而成，並嘗試探討無機聚合物抗壓強度、吸水率、乾縮量等關係，作為後續研究之用，表 1 為本研究之試驗變數表。

表 1 廢液晶磚產製技術之試驗變數表

材料 名稱	拌合配比				
	液膠比 (L/S)	鹼當量 (AE)	鹼模數 (Ms)	膠骨比 (B/A)	混拌 比例
廢液 晶磚	0.8	6%	1.5	1	S40F60
	1.0	8%		1.25	S60F40
	1.5	10%		1.5	S80F20

3-2 試驗材料

本研究所使用材料分項說明如下：

- (1) 第一階段水淬爐石粉和電廠飛灰混合無機聚合物製作
 - ①水淬爐石粉:細度 4000 cm^2/g ，中聯提供。
 - ②電廠飛灰:火力電廠飛灰取至興達火力電廠。
 - ③矽酸鈉(Na_2SiO_3):榮祥公司所生產之 3 號水玻璃。
 - ④氫氧化鈉(NaOH):工業級藥品。
- (2) 第二階段無機聚合物廢液晶磚製
 - ①TFT 廢液晶玻璃:南部 TFT 面板廠經前處理後研磨成粉末。

四、結果與分析

4-1 材料之物理化學特性

1. 水淬爐石粉

實驗中係採用中聯資源處理化公司所生產之水淬高爐爐石粉，經處理研磨成粉，性質符合 CNS 12549 規定，其細度為 $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ，將其作為無機聚合物使用，如圖 1 所示，由 X 光繞射分析(XRD)瞭解爐石粉各個相位的組成生成物，圖中顯示爐石粉為非結晶質化合物組成，再由 X 光螢光分析(XRF)探討爐石粉試樣中各元素含量，其中以 CaO 及 SiO_2 等元素含量最高，配合 XRD 分析所得的各種化合物，再以重量分析計算其化學成份計量，進而推算爐石粉各元素的氧化態含量百分比，如表 2 所示。再以掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察爐石粉晶相變化，得知爐石由多邊形片狀及角粒狀結構推疊而成，並存在許多大小不等的孔隙，如圖 2 所示。

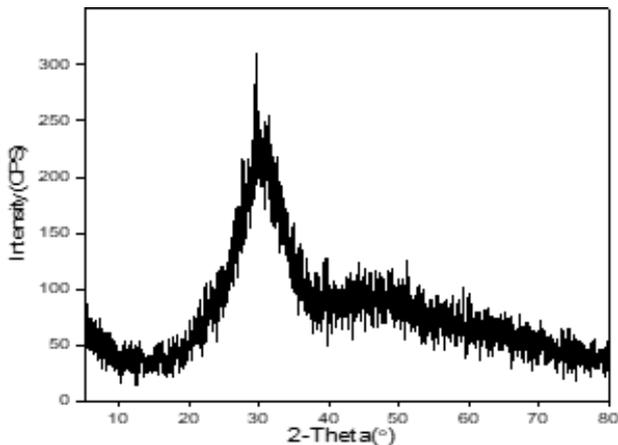


圖 1 水淬爐石粉之 X 光繞射分析圖

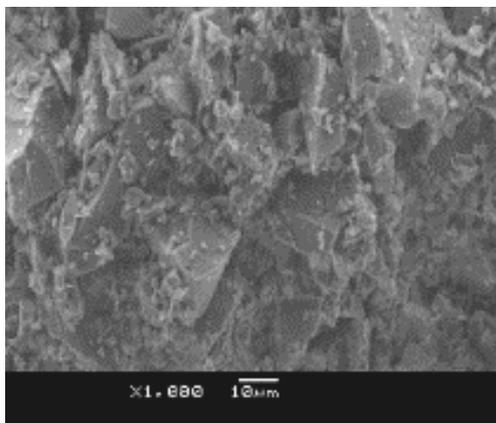


圖 2 水淬爐石粉晶相圖

2. 電廠飛灰

火力電廠飛灰取至興達火力電廠，由 X 光繞射分析(XRD)瞭解電廠飛灰各個相位的組成生成物如圖 3 所示，圖中顯示電廠飛灰主要結晶形化合物為 SiO_2 ，次要結晶形化合物為 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、CaO、MgO、 K_2O 、 Na_2O 等，再由 X 光螢光分析(XRF)探討電廠飛灰試樣中各元素含量，其中以 C、O、Si、Al、Fe、Ca、K、Mg、Na 等元素含量最高，配合 XRD 分析所得的各種化合物再以重量分析計算其化學成份計量，得知進而推算電廠飛灰各元素的氧化態含量百分比，如表 2 所示。再以掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察電廠飛灰晶相變化，得知電廠飛灰由粒徑大小不等中空球狀推疊而成，並存在許多大小不等的孔隙，如圖 4 所示。

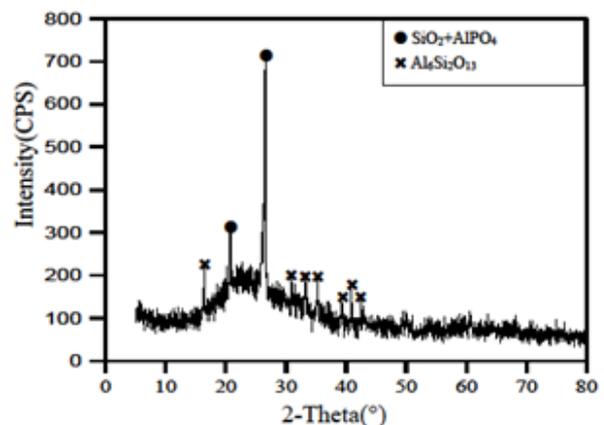


圖 3 電廠飛灰之 X 光繞射分析圖

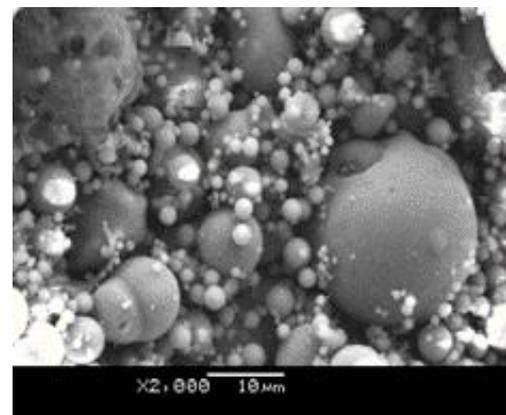


圖 4 電廠飛灰之晶相圖

3. TFT 廢液晶玻璃

南部 TFT 面板廠經前處理後研磨成粉末，TFT 廢液晶玻璃由 X 光繞射分析瞭解各個相

位的組成生成物如圖 5 所示，由 X 光繞射分析(XRD)瞭解廢液晶各個相位的組成生成物，圖中顯示廢液晶為非結晶質化合物組成，再配合 XRD 分析所得的各種化合物再以重量分析計算其化學成份計量，推算各元素的氧化態含量百分比，如表 2 所示。再以掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察廢玻璃晶相變化，得知廢玻璃由片狀結構推疊而成，並存在許多大小不等的孔隙，如圖 6 所示。

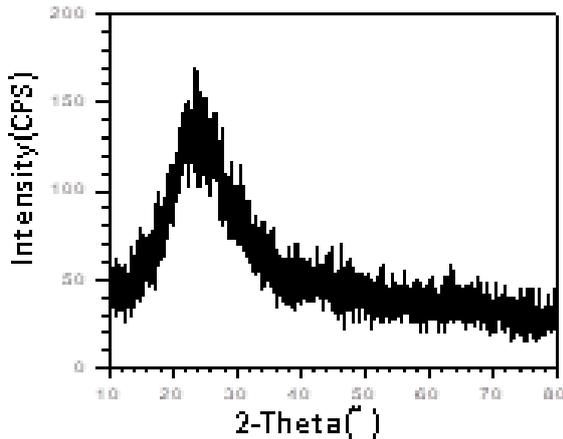


圖 5 TFT 廢液晶玻璃 X 光繞射分析圖

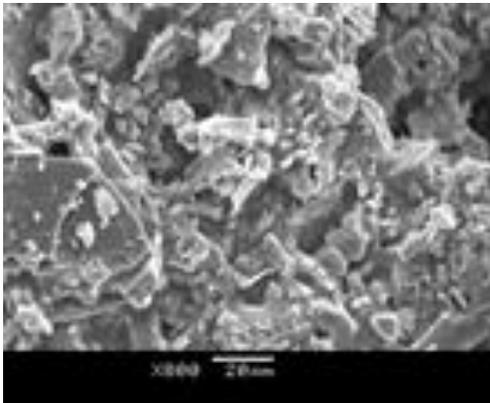


圖 6 TFT 廢液晶玻璃晶相圖

表 2 水淬爐石粉、電廠飛灰和廢液晶玻璃之化學性質

氧化物	化學組成成份(%)							
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	K ₂ O
水淬 爐石粉	33.6	40.8	15.0	6.1	1.8	0.2	0.3	0.3
火力電 廠飛灰	39.7	8.9	14.8	1.2	0.7	0.8	5.6	1.3
廢液晶 玻璃	77.4	8.0	4.4	1.4	-	0.8	5.6	1.3

4-2 抗壓強度

1. 鹼當量之影響：

為探討鹼當量對廢液晶無機聚合物試體之抗壓強度之影響，針對 6%、8% 及 10% 鹼當量範圍，並控制其鹼模數比為 1.5 及液膠比為 0.8、1.0 及 1.5 之條件下，就 S40F60 膠結料而言，當鹼當量 6% 改變至 10% 時之 3 天養護時間之抗壓強度範圍分別為 221.6~154.8 kgf/cm²、261.6.5~61.9kgf/cm²、172.5~32.1kgf/cm²，其 28 天養護齡期時則分別為 405.9~195.3kgf/cm²、153.8~29.3kgf/cm²、372.4~197.6 kgf/cm²；就 S60F40 膠結料而言，當鹼當量 6% 至 10% 時之 3 天養護時間之抗壓強度範圍分別為 305.2~111.6kgf/cm²、232.2~99.6kgf/cm²、226.9~54.4 kgf/cm²，其 28 天養護齡期時則分別為 450.7~145.2 kgf/cm²、315.1~88.2 kgf/cm²、452.6~115.2 kgf/cm²；就 S80F20 膠結料而言，當鹼當量 6% 至 10% 時之 3 天養護時間之抗壓強度範圍分別為 422.8~154.6kgf/cm²、255.6~66.9kgf/cm²、386.9~99.9 kgf/cm²，其 28 天養護齡期時則分別為 472.1~172.6kgf/cm²、440.9~116.8kgf/cm²、448.9~104.4kgf/cm²，如圖 7(a)(b)(c) 所示。由上述強度趨勢可看出抗壓強度隨養治時間增加而增加，隨著鹼當量的提高而有逐漸趨緩趨勢，其中以混拌配比在鹼當量 6%、8%、10%，液膠比為 1.0 及 1.5、鹼模數比 1.5 抗壓強度最高已經達到普通磚(第三種磚)抗壓強度之要求。其主要原因在於提高鹼當量亦使鹼激發劑濃度上升，其活化效果越佳，所含之氫氧根離子也較多，因而能迅速破壞爐石表面的玻璃質，並析出較多之鋁、矽元素，則水化產物 C-S-H 膠體亦隨之增加，進提升爐石無機聚合物之抗壓強度。

2. 液膠比之影響：

為探討液膠比對廢液晶無機聚合物試體之抗壓強度之影響，針對液膠比為 0.8、1.0 及 1.5，鹼當量為 6%、8% 及 10% 範圍，並控制其鹼模數比為 1.5 及之條件下，就 S40F60 膠結料而言，當液膠比由 0.8 改變至 1.5 時之 3 天養護時間之抗壓強度範圍分別為

186.6~122.1 kgf/cm²、134.6~61.9 kgf/cm²、143.6~32.1kgf/cm²，其 28 天養護齡期時則分別為 278.5~206.7kgf/cm²、176.4~29.3 kgf/cm²、284.1~160.4kgf/cm²；就 S60F40 膠結料而言，當液膠比由 0.8 改變至 1.5 時之 3 天養護時間之抗壓強度範圍分別為 217.9~123.2kgf/cm²、232.2~64.4 kgf/cm²、157.3~54.4kgf/cm²，其 28 天養護齡期時則分別為 383.6~258.8kgf/cm²、315.1~88.2 kgf/cm²、300.0~115.2kgf/cm²；就 S80F20 膠結料而言，當液膠比由 0.8 改變至 1.5 時之 3 天養護時間之抗壓強度範圍分別為 200.6~154.6kgf/cm²、212.8~66.9 kgf/cm²、178.44~76.0kgf/cm²，其 28 天養護齡期時則分別為 293.8~172.6kgf/cm²、330.5~116.8kgf/cm²、298.1~168.6kgf/cm²，如圖 8(a)(b)(c)所示。由上述強度趨勢可看出抗壓強度隨養治時間增加而增加，隨著液膠比的降低而降低，可能低液膠比，廢液晶粉末和膠結料混拌工作性不佳，混拌不均所造成，其中以混拌配比在鹼當量 6%，液膠比為 1.0、1.5，鹼模數比 1.5 抗壓強度最高已經達到普通磚(第三種磚)抗壓強度之要求。

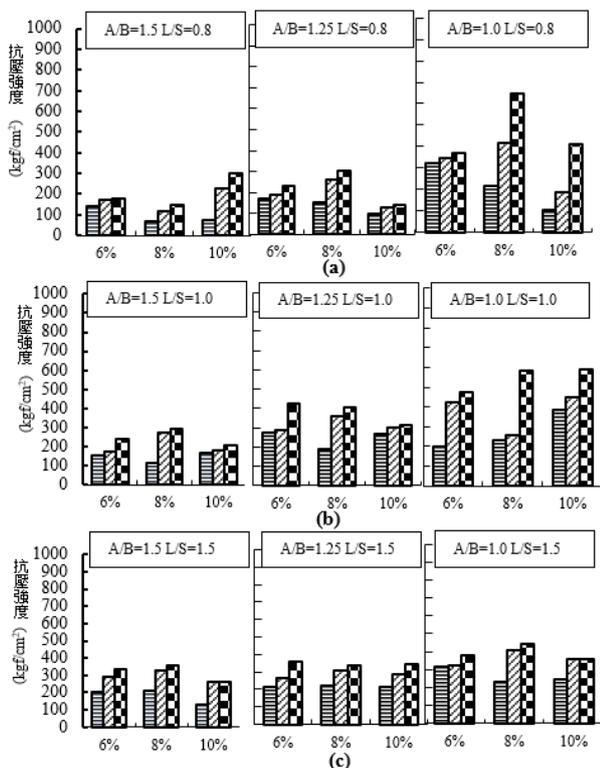


圖 7 (a)(b)(c)鹼當量對無機聚合廢液晶磚抗壓強度之影響

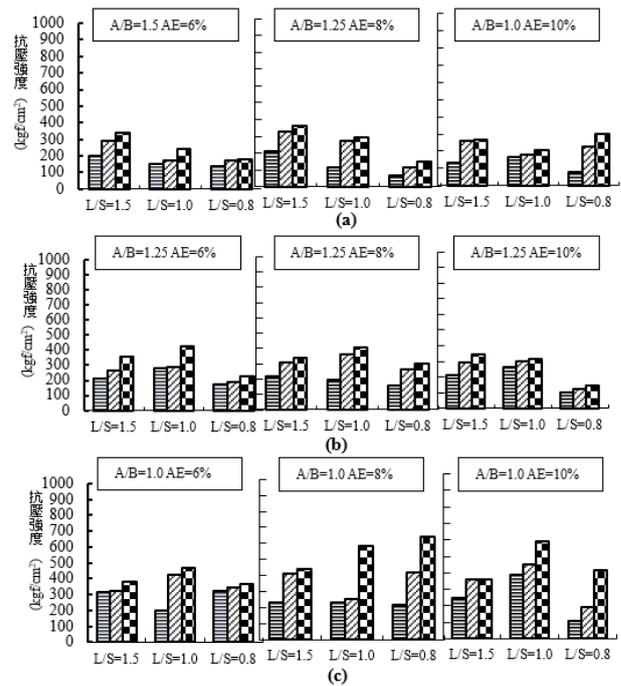


圖 8 (a)(b)(c)液膠比對無機聚合廢液晶磚抗壓強度之影響

3.骨膠比之影響：

就 S40F60 膠結料而言，在相同液膠比、相同鹼當量、鹼模數比狀況下，當骨膠比由 1.0 改變至 1.5 時之 3 天養護時間之抗壓強度範圍分別為 221.8~122.1kgf/cm²、261.6~61.9 kgf/cm²、172.5~32.1kgf/cm²，其 28 天養護齡期時則分別為 405.9~195.3kgf/cm²、158.9~29.3 kgf/cm²、372.4~197.6kgf/cm²；就 S60F40 膠結料而言，當骨膠比由 1.0 改變至 1.5 時之 3 天養護時間之抗壓強度範圍分別為 305.2~111.6kgf/cm²、232.2~64.4 kgf/cm²、226.9~54.4kgf/cm²，其 28 天養護齡期時則分別為 450.7~145.2kgf/cm²、315.1~88.2 kgf/cm²、452.6~115.2kgf/cm²；就 S80F20 膠結料而言，當骨膠比由 1.0 改變至 1.5 時之 3 天養護時間之抗壓強度範圍分別為 422.8~154.6kgf/cm²、255.6~66.9 kgf/cm²、386.9~76.0kgf/cm²，其 28 天養護齡期時則分別為 472.1~172.6kgf/cm²、440.9~116.8kgf/cm²、448.9~104.4kgf/cm²，如圖 9(a)(b)(c)所示。由上述可知，在相同液膠比、相同鹼當量、鹼模數比狀況下，其抗壓強度亦會隨著骨膠比增加而降低。其中以混拌配比在鹼當量 6%，液膠比為 1.0、1.5，骨膠

比為 1.0、1.25、1.5，驗模數比 1.5 等配比，其抗壓強度即可達到普通磚(第三種磚)抗壓強度之要求。就 S40F60、S60F40、S80F20 膠結料而言，在相同液膠比、驗當量、骨膠比、養治齡期狀況下，S80F20 膠結料提供的抗壓強度最高，其次為 S60F40 膠結料。

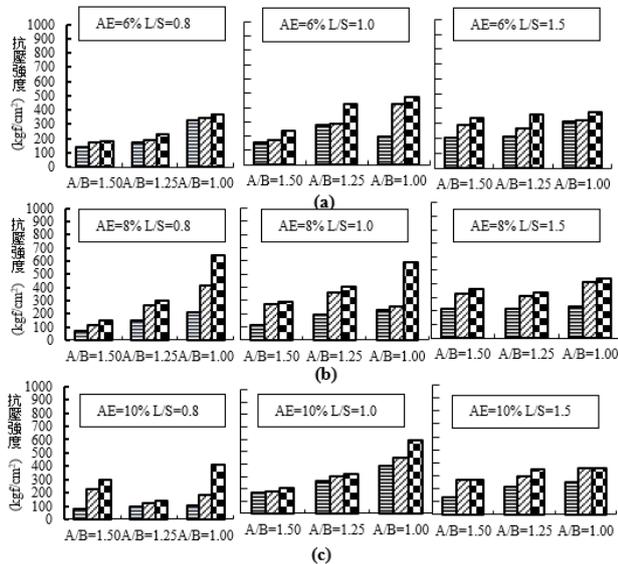


圖 9 (a)(b)(c)骨膠比對無機聚合廢液晶磚抗壓強度之影響

4-3 乾縮量

本研究主要使用乾縮試驗來瞭解無機聚合廢液晶磚之體積穩定性，因此利用數位式比較測長儀來量測無機聚合物脫水時所造成試體乾縮之長度變化量，因此其乾縮量越小越好，以下將針對無機聚合廢液晶磚驗當量、液膠比、骨膠比對於體積穩定性之影響作探討。

1. 驗當量之影響：

就 S40F60 膠結料而言，在相同骨膠比、相同液膠比狀況下，當驗當量 6% 改變至 10% 時之 3 天養護時間之乾縮率範圍分別為 0.080%~0.010%、0.072%~0.01%、0.092%~0.01%，其 28 天養護齡期時則分別為 -0.01%~0.062%、0.071%~0.012%、0.09%~0.013%；就 S60F40 膠結料而言，當驗當量 6% 改變至 10% 時之 3 天養護時間之乾縮率範圍分別為 -0.01%~0.084%、-0.012%~0.066%、0.087%~0.016%，其 28 天養護齡期時則分別為 -0.01%~0.072%、

0.01%~0.065%、0.083%~0.012%；就 S80F20 膠結料而言，當驗當量 6% 改變至 10% 時之 3 天養護時間之乾縮率範圍分別為 -0.01%~0.089%、-0.010%~0.064%、0.09%~0.010%，其 28 天養護齡期時則分別為 -0.01%~0.087%、-0.01%~0.067%、0.086%~0.01%；如圖 10(a)(b)(c)所示。由上述可知，乾縮量隨著驗當量的提高而增加，亦隨著養護齡期的增加而降低，由於高驗當量可有效激發廢液晶無機聚合物的活性，使結構內部因聚合作用及水化反應產生更多之 C-S-H 膠體填補材料中之孔隙，使其更為緻密；其中以驗當量 6%、8%、骨膠比為 1.0、1.25、1.5，液膠比 0.8、1.0 等配比乾縮量較低。

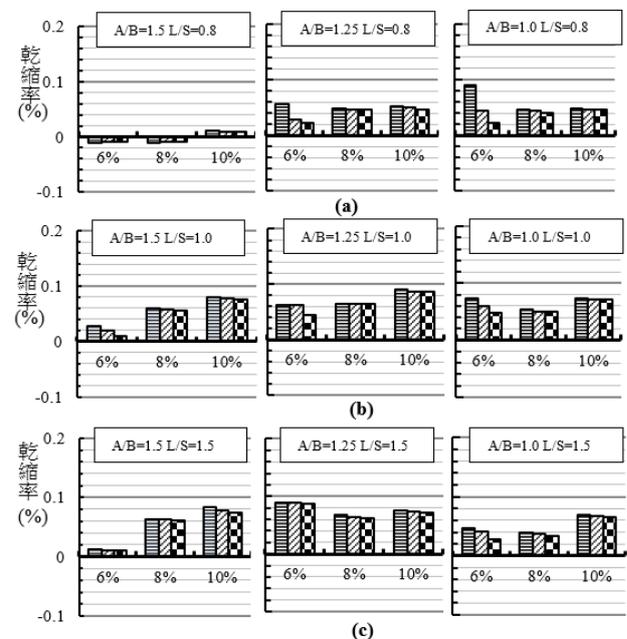


圖 10 (a)(b)(c)驗當量對無機聚合廢液晶磚乾縮量之影響

2. 液膠比之影響：

就 S40F60 膠結料而言，在相同驗當量、相同骨膠比液膠比狀況下，當液膠比(L/S)由 0.8 改變至 1.5 時之 3 天養護時間之乾縮率範圍分別為 0.01%~0.080%、0.012%~0.072%、0.01%~0.092%，其 28 天養護齡期時則分別為 -0.05%~0.062%、0.071%~0.012%、0.09%~0.013%；就 S60F40 膠結料而言，當液膠比(L/S)由 0.8 改變至 1.5 時之 3 天養護時間之乾縮率範圍分別為 -0.01%~0.084%、-

0.012%~0.066%、0.016%~0.087%，其28天養護齡期時則分別為-0.01%~0.072%、-0.01%~0.065%、0.012%~0.083%；就S80F20膠結料而言，當液膠比(L/S)由0.8改變至1.5時之3天養護時間之乾縮率範圍分別為-0.01%~0.089%、-0.01%~0.064%、0.01%~0.09%，其28天養護齡期時則分別為-0.01%~0.087%、-0.01%~0.067%、0.01%~0.086%，如圖11(a)(b)(c)所示。由上述可知，乾縮量隨著液膠比的增加而增加，但是隨著養護齡期的增加而降低，由於高液膠比、高鹼當量可有效激發無機聚合物的活性，使結構內部因聚合作用及水化反應產裂隙，造成更多乾縮量；其中以鹼當量6%、8%、骨膠比為1.0、1.25、1.5，液膠比0.8、1.0等配比，乾縮量較低。

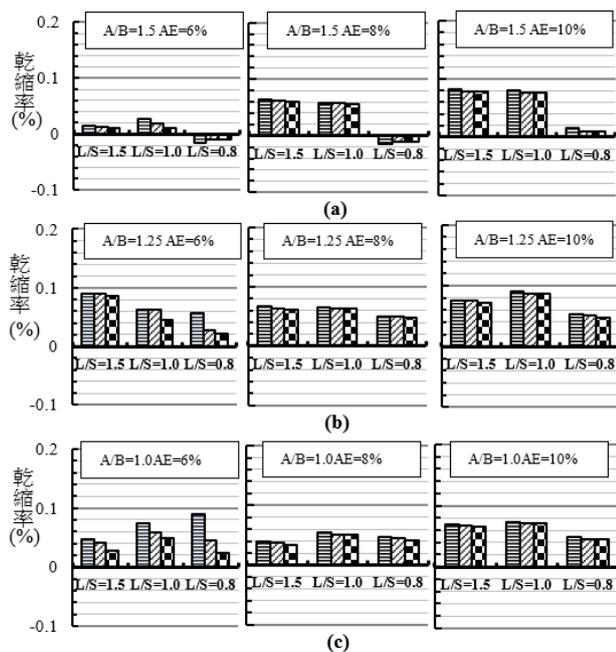


圖 11 (a)(b)(c)液膠比對無機聚合廢液晶磚乾縮率之影響

3.骨膠比之影響：

就S40F60膠結料而言，在相同液膠比、相同鹼當量、鹼模數比狀況下，當骨膠比由1.0改變至1.5時之3天養護時間之乾縮率範圍分別為0.01%~0.079%、0.012%~0.072%、0.01%~0.092%，其28天養護齡期時則分別為-0.01%~0.062%、0.012%~0.071%、0.013%~0.090%；就S60F40膠結料而言，

骨膠比由1.0改變至1.5時之3天養護時間之乾縮率範圍分別為-0.01%~0.084%、-0.012%~0.066%、0.016%~0.087%，其28天養護齡期時則分別為-0.01%~0.072%、-0.01%~0.065%、0.012%~0.083%；就S80F20膠結料而言，當骨膠比由1.0改變至1.5時之3天養護時間之乾縮率範圍分別為-0.01%~0.089%、-0.01%~0.064%、0.01%~0.09%，其28天養護齡期時則分別為-0.01%~0.087%、-0.01%~0.067%、0.01%~0.086%，如圖12(a)(b)(c)所示。由上述可知，乾縮量隨著骨膠比的增加而降低，但是隨著養護齡期的增加而降低，由於高液膠比、高鹼當量可有效激發無機聚合物的活性，使結構內部因聚合作用及水化反應產裂隙，造成更多乾縮量；其中以鹼當量6%、8%、10%，液膠比0.8、1.0、1.5等配比，骨膠比為1.0、1.25、1.5乾縮量較低。

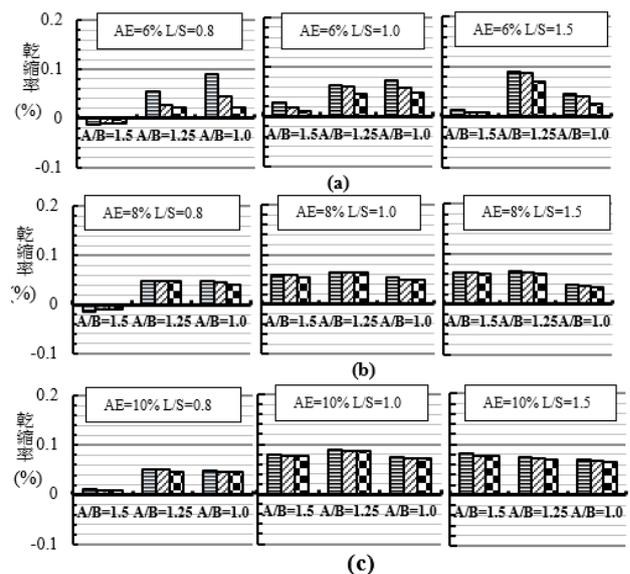


圖 12 (a)(b)(c)骨膠比對無機聚合廢液晶磚乾縮率之影響

4-4 吸水率

1.鹼當量之影響：

就S40F60膠結料而言，在相同骨膠比、相同液膠比狀況下，當鹼當量6%改變至10%時之3天養護時間之吸水率範圍分別為0.072~0.028、0.066~0.014、0.063~0.019，其28天養護齡期時則分別為0.006~0.0136、0.005~0.0443、0.004~0.0096；就S60F40膠

結料而言，當鹼當量 6% 改變至 10% 時之 3 天養護時間之吸水率範圍分別為 -0.018~0.077、0.018~0.071、0.023~0.058，其 28 天養護齡期時則分別為 0.004~0.0099、0.008~0.0144、0.004~0.0159；就 S80F20 膠結料而言，當鹼當量 6% 改變至 10% 時之 3 天養護時間之吸水率範圍分別為 -0.07~0.029、0.031~0.025、0.022~0.014，其 28 天養護齡期時則分別為 0.007~0.009、0.005~0.012、0.005~0.01；如圖 13(a)(b)(c) 所示。由上述可知，吸水率隨著鹼當量的提高而降低，亦隨著養護齡期的增加而降低，由於高鹼當量可有效激發廢液晶無機聚合物的活性，使結構內部因聚合作用及水化反應產生更多之 C-S-H 膠體填補材料中之孔隙，使其更為緻密；其中以鹼當量 6%、8%、骨膠比為 1.0、1.25、1.5，液膠比 0.8、1.0 等配比吸水率較低。

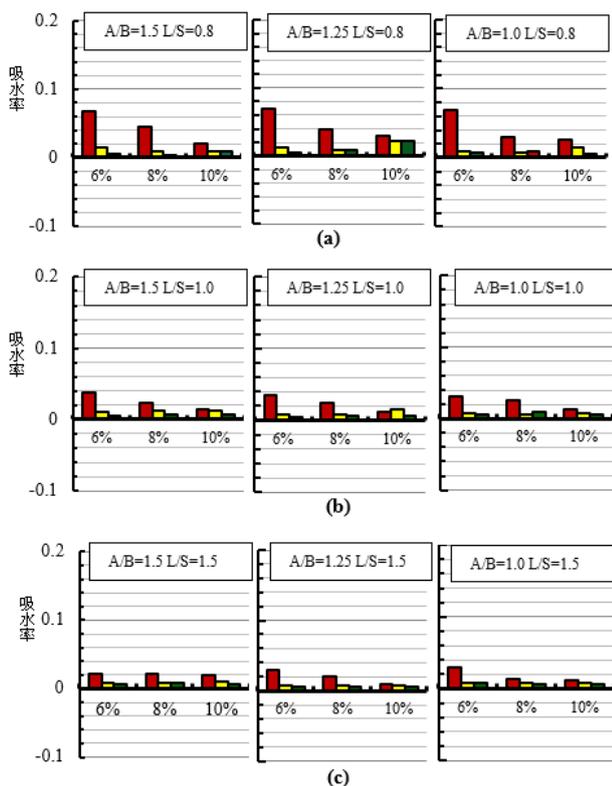


圖 13 (a)(b)(c) 鹼當量對無機聚合廢液晶磚吸水率之影響

2. 液膠比之影響：

就 S40F60 膠結料而言，在相同鹼當量、相同骨膠比液膠比狀況下，當液膠比(L/S)由 0.8 改變至 1.5 時之 3 天養護時間之吸水率範圍

分別為 0.027~0.072、0.014~0.066、0.019~0.063，其 28 天養護齡期時則分別為 0.004~0.0128、0.004~0.0443、0.004~0.0082；就 S60F40 膠結料而言，當液膠比(L/S)由 0.8 改變至 1.5 時之 3 天養護時間之吸水率範圍分別為 0.024%~0.077、0.018~0.071、0.002~0.0159，其 28 天養護齡期時則分別為 0.004~0.0099、0.004~0.0144、0.002~0.0159；就 S80F20 膠結料而言，當液膠比(L/S)由 0.8 改變至 1.5 時之 3 天養護時間之吸水率範圍分別為 -0.015~0.068、0.011~0.070、0.012~0.069，其 28 天養護齡期時則分別為 0.0027~0.0079、0.004~0.0074、0.0036~0.0092，如圖 14(a)(b)(c) 所示。由上述可知，吸水率隨著液膠比的增加而增加，但是隨著養護齡期的增加而降低，由於高液膠比、高鹼當量可有效激發無機聚合物的活性，使結構內部因聚合作用及水化反應產生裂隙，造成更多乾縮量；其中以鹼當量 6%、8%、骨膠比為 1.0、1.25、1.5，液膠比 0.8、1.0 等配比，吸水率較低。

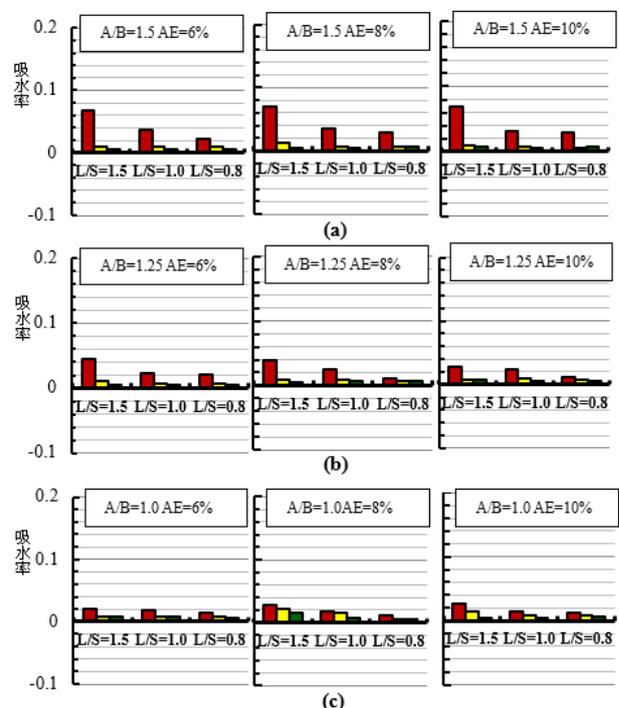


圖 14 (a)(b)(c) 液膠比對無機聚合廢液晶磚吸水率之影響

3. 骨膠比之影響：

就 S40F60 膠結料而言，在相同液膠比、相同鹼當量、鹼模數比狀況下，當骨膠比由

1.0 改變至 1.5 時之 3 天養護時間之吸水率範圍分別為 0.028~0.072、0.014~0.066、0.019~0.0443，其 28 天養護齡期時則分別為 0.004~0.0109、0.002~0.044、0.002~0.0094；就 S60F40 膠結料而言，骨膠比由 1.0 改變至 1.5 時之 3 天養護時間之吸水率範圍分別為 0.018~0.077、0.018~0.071、0.022~0.058，其 28 天養護齡期時則分別為 0.002~0.0134、0.0101~0.0087、0.002~0.0159；就 S80F20 膠結料而言，當骨膠比由 1.0 改變至 1.5 時之 3 天養護時間之吸水率範圍分別為 0.015~0.068、0.029~0.070、0.014~0.069，其 28 天養護齡期時則分別為 0.0025~0.0129、0.0020~0.0215、0.006~0.00960，如圖 14(a)(b)(c) 所示。由上述可知，吸水率隨著骨膠比的增加而降低，但是隨著養護齡期的增加而降低，由於高液膠比、高鹼當量可有效激發無機聚合物的活性，使結構內部因聚合作用及水化反應產裂隙，造成更多乾縮量；其中以鹼當量 6%、8%、10%，液膠比 0.8、1.0、1.5 等配比，骨膠比為 1.0、1.25、1.5 吸水率較低。

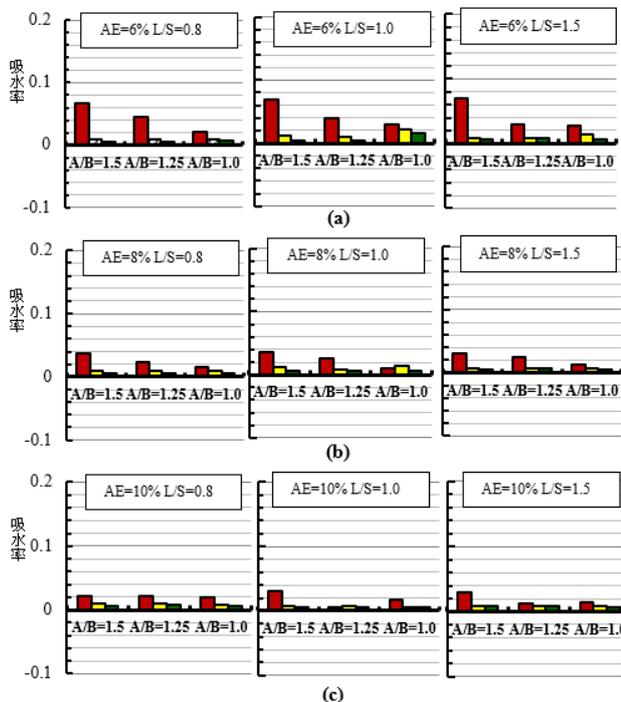


圖 15 (a)(b)(c) 骨膠比對無機聚合廢液晶磚吸水率之影響

本研究為探討廢液晶粒製作成無機聚合物工程性質之研究，經由試驗結果加以分析，

可歸納出以下幾點：

5-1 結論

1. 採用 S40F60、S60F40 膠結料混拌配比在鹼當量 6%，液膠比為 0.8、1.0 及 1.5，骨膠比為 1.0、1.25、1.5，鹼模數比 1.5 其抗壓強度已經達到普通磚(第三種磚)的要求。
2. 採用 S80F20 膠結料混拌配比在鹼當量 6%、8%、10%，液膠比為 1.0 及 1.5，骨膠比為 1.0、1.25、1.5，鹼模數比 1.5 其抗壓強度已經達到普通磚(第三種磚)的要求。
3. 就 S40F60、S60F40、S80F20 膠結料而言，在相同液膠比、鹼當量、骨膠比、養治齡期狀況下，S80F20 膠結料提供的抗壓強度最高，其次為 S60F40 膠結料。
4. 採用 S40F60、S60F40 膠結料混拌配比在鹼當量 6%，液膠比為 0.8、1.0，骨膠比為 1.0、1.25、1.5，鹼模數比 1.5 等配比其乾縮量較低。
5. 採用 S80F20 膠結料混拌配比在鹼當量 6%，液膠比為 1.0 及 1.5，骨膠比為 1.0、1.25、1.5，鹼模數比 1.5 等配比其乾縮量較低。
6. 就 S40F60、S60F40、S80F20 膠結料而言，在相同液膠比、鹼當量、骨膠比、養治齡期狀況下，S80F20 膠結料提供的乾縮率最低，其次為 S60F40 膠結料。
7. 採用 S40F60、S60F40、S80F20 等膠結料混拌配比在鹼當量 6%、8%、10%，液膠比為 0.8、1.0 及 1.5，骨膠比為 1.0、1.25、1.5，鹼模數比 1.5 其吸水率已經達到普通磚(第一種磚)的要求。

5-2 建議

1. 嘗試於前處理過程中，先將廢液晶粉末先預濕後再混拌，藉以降低施作落塵量，或許也會有較佳之工程性質。
2. 可以利用提升養治溫度的養護方式，藉以提升無機聚合廢液晶磚的工程性質。

參考文獻

1. 黃兆龍，卜作嵐混凝土使用手冊，臺北，科技圖書股份有限公司，民國 86 年。

2. 行政院公共工程委員會，公共工程飛灰混凝土使用手冊，臺北，民國 88 年。
3. 李元凱，「偏高嶺土聚合膠體工程性質之研究」，國立台灣科技大學營建工程系，碩士論文，2008。
4. 李宜桃，「鹼活化還原渣漿體之收縮及抑制方法研究」，國立中央大學土木工程研究所，碩士論文，2003。
5. 經濟部標準檢驗局，「CNS 12223-A2218 水淬高爐爐渣」，修正公布日期，2013。
6. 經濟部標準檢驗局，「CNS 382-R2002 普通磚」，修正公布日期，2007。
7. Davidovits, J., Mineral Polymers and method of making them, USA Paten, No.4, pp.349-386, 1982.
8. Yip C. K., Lukey G. C., and Van Deventer J. S. J., The coexistence of geopolymetric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation, Cement and Concrete Research, Vol.35, pp.1688-1697, 2005.

廢陶瓷粒製作成無機聚合物工程性質之研究

王金鐘¹ 羅晨晃² 黃啟鴻³ 蔡有豪⁴ 蔡育綸⁴ 王威⁴ 袁維彤⁴

¹正修科技大學土木與空間資訊系教授

²正修科技大學土木與空間資訊系講師

³正修科技大學土木與空間資訊系研究生

⁴正修科技大學土木與空間資訊系大學生

摘要

本研究主要為廢陶瓷磚無機聚合物的製作，其試拌配比為(1)鹼當量(AE)設定為 6%、8% 及 10% (2)鹼模數比(MS)設定為 2.0 (3)液膠比為 0.8、1.0、1.2，(4)骨膠比為 1, 2 及 3 等調配，並澆置成 5cm*5cm*5cm 試體，拆模後並養治 3 天、7 天及 28 天再進行一系列試驗，探討其凝結時間、抗壓強度、吸水率等之影響，目標為製作出能符合 CNS-382 普通磚之規範要求。試驗結果顯示：(1)爐石粉無機聚合物膠結材抗壓強度隨鹼當量增加而增加，隨著鹼模數比增加而增加，亦隨著液膠比下降而增加。(2)廢陶瓷磚無機聚合物抗壓強度隨鹼當量增加而增加，隨著液膠比增加而下降，隨骨膠比增加而降低；其中以鹼當量 6%、8%及 10%、液膠比 0.8、骨膠比 1 抗壓強度最高。(3)廢陶瓷磚吸水率隨含鹼當量增加、液膠比增加、骨膠比增加而下降；其中以鹼當量 6%、8%及 10%、液膠比 0.8、骨膠比 1 吸水率最低。(4)廢陶瓷磚最佳配比為鹼當量 6%、8%及 10%，鹼模數比 2.0，液膠比 0.8 及骨膠比為 1 之變數，能夠同時滿足 CNS-382 普通磚第 1 種磚之抗壓強度及吸水率要求。

關鍵字：廢陶瓷磚、水淬爐石無機聚合物、鹼當量、鹼模數比、液膠比、骨膠比、凝結時間、抗壓強度、吸水率

A Study of Engineering Properties of Geopolymers Made from Waste Ceramic Particles

Chin-Chung Wang¹ Chen-Hoang Lo² Qi-Hong Huang³ You-Hao Cai⁴
Yu-Lun Cai⁴ Wei Wang⁴ Wei-Tong Yuan⁴

¹Corresponding Author, Civil Engineering and Geomatics Department, Cheng Shiu University

^{2,3,4}Civil Engineering and Geomatics Department, Cheng Shiu University

ABSTRACT

This research is mainly geopolymers bricks made from waste ceramic particles, its trial mix ratios(1)alkali equivalent(AE) was set to 6%, 8% and 10% ,(2)alkali modulus ratio (MS) was set to 2.0,(3) liquid binder ratio, such as the deployment of 0.8,1.0 and 1.2,(4) aggregate binder ratio was set to 1,2 and 3,and pouring set to 5cm*5cm*5cm test specimens, and curing 3 days, 7 days and 28 days after executed a series of tests, base mechanics features of the brick through tests of setting time, compressive strength, and water absorption, target for the production could meet the CNS 382 common brick specifications requirements.

From the experimental results show (1)compressive strength of slag powder geopolymers

cementitious material increases with equivalent alkali and alkali modulus ratio increase, it decreases with liquid binder ratio increases, (2) compressive strength of waste ceramic particles geopolymer bricks increase with equivalent alkali increase, it decreases with liquid binder ratio and aggregate binder ratio increase, among them, the AE = 6%、8% and 10% ,L/S = 0.8, A / B = 1 compressive strength was highest , (3) water absorption of waste ceramic particles geopolymer brick increase with equivalent alkali and liquid binder increase, decreases with aggregate binder ratio increase, among them, AE = 6%、8% and 10% ,L/S = 0.8, A / B = 1 the water absorption was lowest, (4) The best ratio of waste ceramic particles geopolymer bricks were alkali equivalent(AE) was 6%, 8% and 10%, alkali modulus ratio (MS) was 2.0, liquid binder ratio was 0.8, aggregate binder ratio was 1, it can meet the compressive strength and water absorption requirement of CNS-382 common brick.

Keywords: waste ceramic particles geopolymer bricks, slag powder geopolymer, , alkali equivalent, alkali modulus ratio, liquid binder ratio, aggregate binder ratio, setting time, compressive strength, water absorption

一、前言

隨著經濟的蓬勃發展，事業廢棄物日益增加，在這環保意識高漲的時代，如何處理日益增多的事業廢棄物，乃是當務之急，刻不容緩。一般廢陶瓷材料主要源自於建築物拆除工程包含廢棄馬桶、浴缸、磚瓦等廢棄陶瓷及陶瓷工廠的不良品，年產量約 20 萬公噸。此事業廢棄物，產量如此龐大，而我國又地狹人稠，在可利用且有限土地的資源情形下，若不能大幅提升回收的比例，而盲目的固化中間處理及獨立掩埋最終處置，也只能治標。

本研究將以無機聚合方式將廢陶瓷粒製作成陶瓷磚並作為綠色建材使用，不但能解決二氧化碳排放造成空氣污染的窘境，亦可避免造成國家資源的浪費。

強化國人『永續發展、資源再利用』，若能以國內廢陶瓷粒作為填充材，水淬爐石粉製作成的無機聚合物膠結材，製造出強度佳、環保優之無機聚合物—廢陶瓷磚，資源再利用，不但能解決無處堆置窘境，也不會造成國家資源的浪費，更能避免環境過度的開發及二度污染的問題產生，達到生態、節能、減廢、健康等綠建築評估指標。

二、文獻回顧

一般廢陶瓷材料主要源自於建築物拆除工程包含廢棄馬桶、浴缸、磚瓦等廢棄陶瓷及陶瓷工廠的不良品，年產量約 20 萬公噸 [5,7]。其中陶瓷不良品包含不潔、針孔、脫釉、流釉、缺損、括痕、厚度不齊、接縫不齊、色斑、色調不齊、圖案不對稱等等，這些缺陷對於陶瓷本身的力學性質幾乎沒有影響，若能將廢陶瓷粒製作成陶瓷磚資源回收再利用，資源再利用，不但能解決無處堆置窘境，也不會造成國家資源的浪費。

2-1 廢陶瓷粒資源化利用

廢陶瓷為陶瓷製品、建物修繕拆除廢棄馬桶、浴缸、磚瓦等廢棄陶瓷及陶瓷工廠的不良品，年產量約 20 萬公噸。其處理方式仍停留在焚化燒毀居多，嚴重造成二氧化碳的排放量。我國正積極倡導節能減廢、資源再利用，目前國內外對廢陶瓷利用的方式再利用燒結成新陶瓷器皿再利用於道路級配 混凝土再生粒料瀝青混凝土細料等等 [7]。

2-2 水淬高爐石粉

一貫作業煉鋼廠之高爐煉鐵過程須加入石灰石作為助熔劑，並加入焦炭作為還原劑，鐵礦石經還原反應後殘留之非鐵物質即為高爐石，高溫融熔液態高爐石經過高壓水冷卻

方式產出「CNS12223 水淬高爐爐渣」[5]，經研磨成粉後主要應用於營建工程，替代水泥作為混凝土之膠結材，由中聯爐石處理資源化股份有限公司產出，細度 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ ，比重 2.93。

2-3 鹼活化劑處理技術

無機聚合物是一項具有前瞻性之發展，鹼活化劑通過激發矽酸鋁材料，如粉煤灰、偏高嶺土、磨細高爐礦渣、高嶺粘土等，與鹼性溶液製成之應用，其中爐石粉亦含有 SiO_2 與 Al_2O_3 ，爐石具有潛在水硬性作用之材料，純爐石的顆粒結構穩定，可直接使用純爐石作為主要膠結材料，利用鹼性溶液溶解爐石顆粒表面玻璃質，溶出 Ca^{2+} 破壞矽鋁氧化物之鍵結，並與鹼性溶液所分離之陰離子經由聚合反應生成水化產物，因而組成矽凝膠體，具有高早強、工作性佳、較佳的抗化學侵蝕能力、抗凍融循環能力及具有較佳的黏結力，但是仍有速凝、高收縮量等缺點，而高濃度的活化劑卻可以增加結構強度與縮短凝結時間[3,4]。

2-4 CNS-382 普通磚規範 [6]

- (1) 適用範圍：本標準適用於以粘土為主要原料燒製而成，用於構築窯爐、土木、建築、造園等用途之普通磚(以下簡稱磚)。
- (2) 種類：依品質及形狀分類如下。
 - (一) 依品質區分：1 種磚、2 種磚、3 種磚。
 - (二) 依形狀區分：實心磚、開孔磚。
- (3) 外觀：不得有使用上有害之龜裂或損害。
- (4) 尺度及許可差：依表 1 之規定。
- (5) 品質：應符合表 2 之規定。

表 1 磚之尺度及許可差(單位: mm)

名稱	長	寬	厚
尺度	200	95	53
許可差	± 6.0	± 4.0	± 2.7

表 2 磚之品質規定

名稱	1 種磚	2 種磚	3 種磚
吸水率(%)	10 以下	13 以下	15 以下
抗壓強度 MPa { kgf/cm ² }	> 30.0{300}	> 20.0{200}	> 15.0{150}

三、試驗計畫

3-1 試驗變數

本研究分為「爐石無機聚合物漿體調配」與「廢陶瓷磚無機聚合物製作」兩大部份，前者主要在探討鹼活化爐石無機聚合物漿體配比，而後者主要目的為廢陶瓷磚無機聚合物製作，將其鹼活化爐石漿體當作膠結材，並與廢陶瓷粒進行調配混拌製成。

表 3 爐石粉無機聚合物及無機聚合廢陶瓷磚之試驗變數

名稱	拌合配比			
	液膠比 (L/S)	鹼當量 (AE)	鹼模 數比 (Ms)	骨膠比 (A/B)
水淬爐石 粉無機聚 合物	1	6%	1.0	-
	1.25	8%	1.5	-
	1.67	10%	2.0	-
廢陶瓷磚	0.8	6%	2.0	1
	1.0	8%		2
	1.2	10%		3

3-2 試驗材料

本研究所使用材料分項說明如下：

- (1) 第一階段水淬爐石粉無機聚合物製作
 - ① 水淬爐石粉:細度 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ ，中聯提供。
 - ② 矽酸鈉(Na_2SiO_3):榮祥公司所生產之 3 號水玻璃。
 - ③ 氫氧化鈉(NaOH): 工業級藥品。
- (2) 第二階段廢陶瓷磚無機聚合物製作
 - ① 電廠飛灰:火力電廠飛灰取至興達火力電廠

四、結果與分析

4-1 材料之物理化學特性

本研究選用的水淬爐石粉細度為 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ ，將其作為無機聚合物使用，首先由 X 光繞射分析(XRD)瞭解爐石粉各個相位的組成生成物如圖 1 所示，圖中顯示爐石粉為非結晶質化合物組成，再由 X 光螢光分析(XRF) 探討爐石粉試樣中各元素含量，其中以 C、O、Si、Al、Fe、Ca、K、Mg、Na 等元素含量最高，配合 XRD 分析所得的各種化合

物，再以重量分析計算其化學成份計量，進而推算爐石粉各元素的氧化態含量百分比，如表 4 所示。再以掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察爐石粉晶相變化，得知爐石由多邊形片狀及角粒狀結構推疊而成，並存在許多大小不等的孔隙，如圖 2 所示。

表 4 水淬爐石粉及廢陶瓷粒化學組成成份

名稱	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
水淬 爐石 粉	33.6	40.8	15.0	6.1	1.8	0.2	0.3
廢陶 瓷粒	65.3	3.3	16.7	4.0	-	2.1	1.3

本研究所使用廢陶瓷粒取自桃園市新屋區某公司，經烘乾、研磨成粉末狀，其比重為 2.3，液性限度為 0，塑性指數為 0，屬於粉土質砂(SM)。由 X 光繞射分析顯示廢陶瓷主要結晶形化合物為 SiO₂，次要結晶形化合物為 Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、K₂O、Na₂O 等，如圖 3 所示。由 X 光螢光分析(XRF)探討廢陶瓷試樣中各元素含量，其中以 C、O、Si、Al、Fe、Ca、K、Mg、Na 等元素含量最高，配合 XRD 分析所得的各種化合物再以重量分析計算其化學成份計量，得知進而推算廢陶瓷各元素的氧化態含量百分比，如表 4 所示。再以掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察廢陶瓷晶相變化，得知廢陶瓷由片狀結構上下左右參差推疊而成，並存在許多大小不等的孔隙，如圖 4 所示。

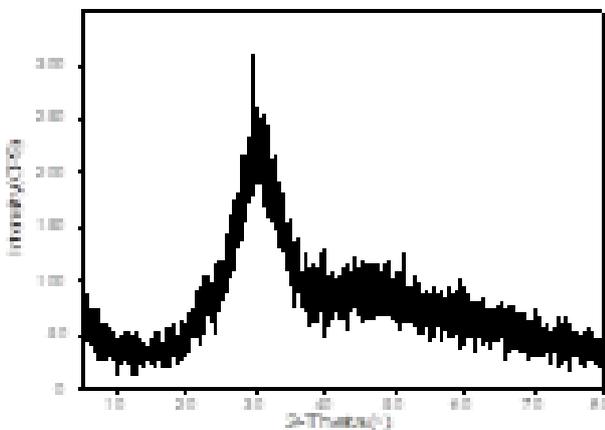


圖 1 水淬爐石粉 X 光繞射分析

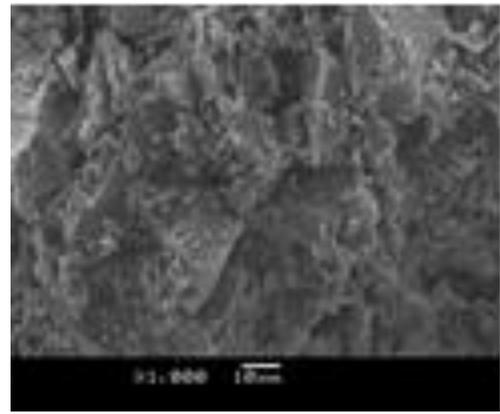


圖 2 水淬爐石粉養治 7 天後晶相

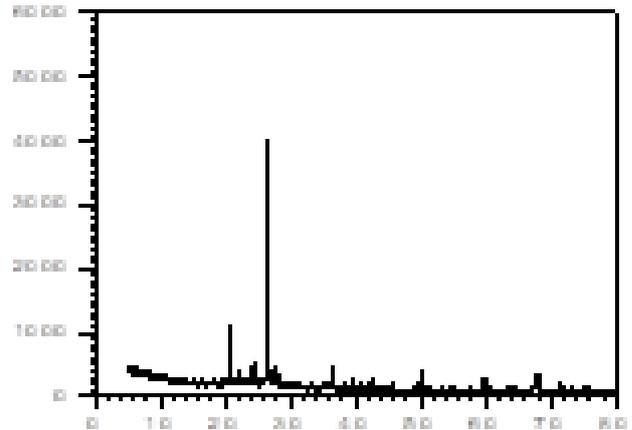


圖 3 廢陶瓷 X 光繞射分析圖

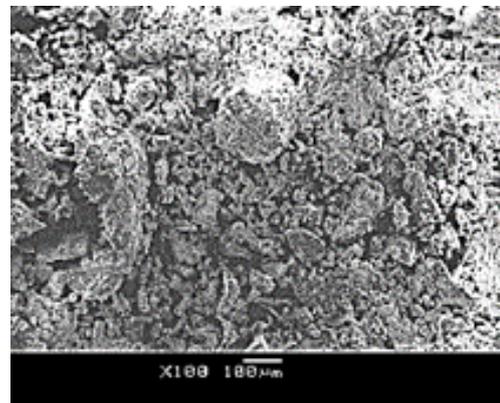


圖 4 廢陶瓷掃描式電子顯微鏡晶相

4-2 爐石粉無機聚合物之抗壓強度分析

4-2-1 凝結時間

1. 鹼當量之影響：

以鹼模數比 2.0，液膠比 1.25 為例，當鹼當量由 6% 提高至 8% 時，初凝時間會由 55 分鐘縮短至 45 分鐘，而終凝時間會由 80 分鐘縮短到 75 分鐘；當鹼當量由 8% 提高至 10% 時，初凝時間會由 45 分鐘縮短至 45 分

鐘，而終凝時間會由 75 分鐘縮短到 70 分鐘。因此鹼當量為 6% 之初凝時間與終凝時間較鹼當量 10% 總縮短了 10 分鐘，如圖 5 所示。結果表示鹼當量的增加導致凝結時間有縮短的趨勢，其主要原因是由於含鹼當量增加使鹼溶液濃度增加，而造成 OH^- 離子破壞膠結料結構，使 Si^{4+} 、 Al^{3+} 及 Ca^{2+} 溶出量增加，導致爐石無機聚合物有加速聚合反應之現象。

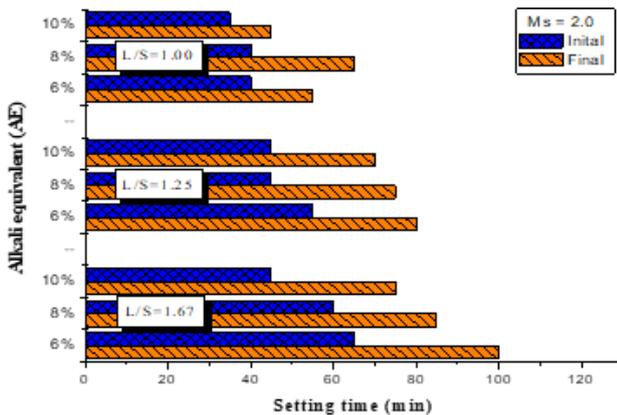


圖 5 鹼當量對爐石無機聚合物之凝結時間之影響

2. 鹼模數比之影響：

當液膠比固定為 1.67 及鹼當量為 6% 之情況下，隨著鹼模數比由 1.0 上升至 1.5 及 2.0 時，其初凝時間分別為 65、70 及 75 分鐘，而終凝時間則分別為 100、110 及 120 分鐘。當變化鹼當量為 8%、10%，其鹼模數比由 1.0 提高至 2.0 時，其初凝與終凝時間介於 60~105 分鐘、45~95 分鐘之間，如圖 6 所示。

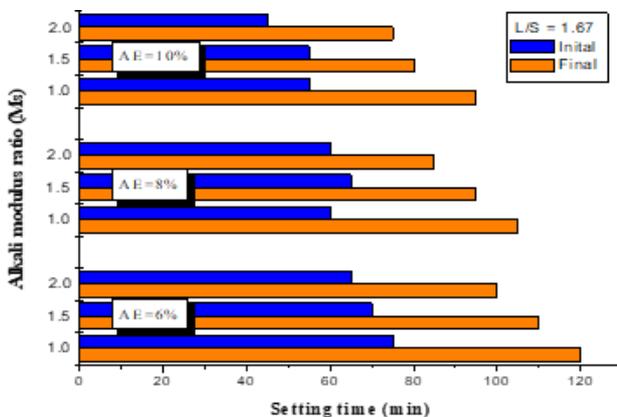


圖 6 鹼模數比對爐石無機聚合物之凝結時間之影響

由此可知，凝結時間會隨著鹼模數比增

加而縮短，主要是因為當鹼模數比增加時，使爐石無機聚合物之漿體中 Si^{4+} 含量增加， Si/Al 原子莫耳之比值產生改變，因而促使聚合反應加速而凝結時間呈現縮短之趨勢。

3. 液膠比之影響：

當固定鹼當量 6% 及鹼模數比為 1.0 之條件下，液膠比由 1.0 提升至 1.25 時，其初凝時間與終凝時間增加了 15 分鐘與 25 分鐘；當液膠比由 1.00 提升至 1.67 時，其初凝時間與終凝時間增加了 15 分鐘與 20 分鐘，如圖 7 所示。由驗結果得知，凝結時間將隨著液膠比的增加而增加，主要是由於固定鹼當量及鹼模數比，且增加其液膠比時，鹼當量的濃度被鹼金屬矽酸鈉溶液之水分所稀釋，而導致降低鹼當量及鹼模數比之濃度，增加漿體之凝結時間。

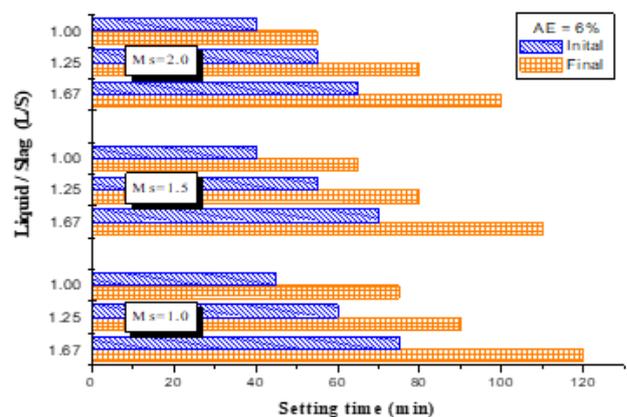


圖 7 液膠比對爐石無機聚合物之凝結時間之影響

4-2-2 抗壓強度

1. 鹼當量之影響：

為比較鹼當量對爐石無機聚合物試體之抗壓強度之影響，針對 6%、8% 及 10% 鹼當量範圍，並控制其鹼模數比為 2.0 及液膠比為 1.00、1.25 及 1.67 之條件下，改變鹼當量 6% 至 8% 時之 28 天養護齡期時則分別為 186.6~244.6 kgf/cm²、338~353.3 kgf/cm²、394~396.4 kgf/cm²；當改變鹼當量 8% 至 10% 時之 28 天養護齡期時則分別為 244.6~263.8 kgf/cm²、353.3~366.8 kgf/cm²、396.4~435.3 kgf/cm²，如圖 8 所示。由上述強度趨勢可看出鹼當量 6% 提升至 10% 時，其 28 天抗壓強

度最高成長了 41%，隨著鹼當量的提高則抗壓強度也相對的上升，其主要原因在於提高鹼當量亦使鹼激發劑濃度上升，其活化效果越佳，所含之氫氧根離子也較多，因而能迅速破壞爐石表面的玻璃質，並析出較多之鋁、矽元素，則水化產物 C-S-H 膠體亦隨之增加，進而提升爐石無機聚合物之抗壓強度。

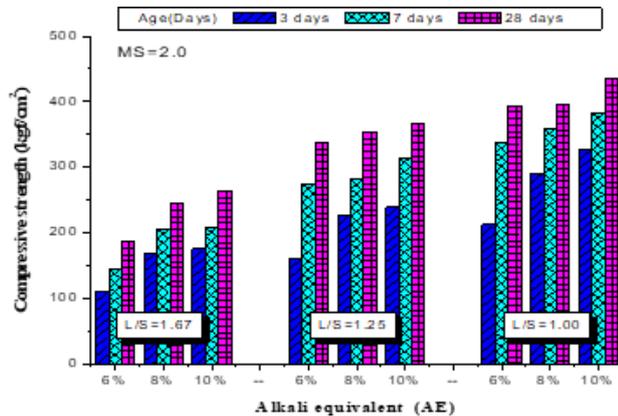


圖 8 鹼當量對爐石無機聚合物之抗壓強度之影響

2. 鹼模數比之影響：

當固定鹼當量為 10%，液膠比為 1.00，而鹼模數比分別為 1.0、1.5 及 2.0 時，其 3 天抗壓強度分別為 283.8 kgf/cm²、195.7 kgf/cm²、326.4 kgf/cm²，其 28 天時則為 356.6 kgf/cm²、408.5 kgf/cm²、435.3 kgf/cm²，如圖 9 所示。

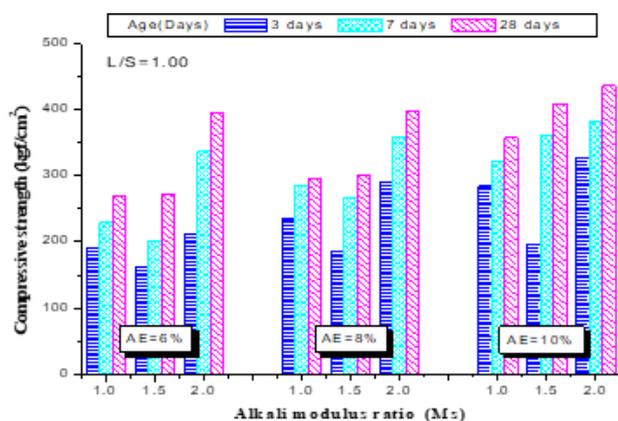


圖 9 鹼模數比對爐石無機聚合物之抗壓強度之影響

由試驗結果得知，隨著鹼模數比由 1.0 提升至 2.0 時，3 天之抗壓強度約可增加 15%，28 天則可增加約 22%，因此鹼模數比之增

加有益於強度的提升，原因在於鹼模數比之提高，可以提供充足之 SiO₂ 含量，使其形成更多之 C-S-H 膠體，而使漿體內部結構更為緻密。進而達到提升強度之效益，而鹼模數比 2.0 為三個變數中擁有最佳強度之配比。

3. 液膠比之影響：

當鹼當量 10%、鹼模數比 2.0 及液膠比為 1.67 時，其養護時間 3 天、7 天及 28 天之抗壓強度分別為 174.7 kgf/cm²、208.5 kgf/cm² 及 263.8 kgf/cm²，在相同鹼當量及相同的鹼模數比條件下，當液膠比由 1.67 下降至 1.25 時其抗壓強度由 238.3 kgf/cm²、314.8 kgf/cm² 及 366.8 kgf/cm²；當液膠比由 1.67 下降至 1.00 時其抗壓強度由 326.4 kgf/cm²、382.5 kgf/cm² 及 435.3 kgf/cm²，如圖 10 所示。而養護齡期 28 天時，當液膠比由 1.67 降低至 1.25 時，抗壓強度約可成長 39%；由 1.67 降低至 1.00 時，抗壓強度約可成長 65%，由試驗結果得知，液膠比之提升會使抗壓強度降低，其原因為液膠比之增加導致鹼激發劑之濃度被稀釋，而在無機聚合物之反應機制中，主要係以強鹼溶液破壞爐石表面之玻璃質進而產生化學水化反應，而化學水化反應中矽、鋁離子之析出量會影響其聚合作用之完整性，因此一旦降低鹼激發劑之濃度，鹼活化爐石之效益亦會降低，而導致抗壓強度降低之現象。

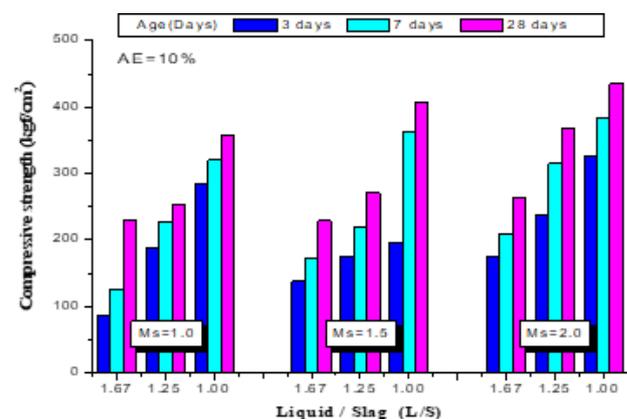


圖 10 液膠比對爐石無機聚合物之抗壓強度之影響

4-3 爐石粉無機聚合物對掃描電子顯微鏡晶相之影響

將水淬爐石粉製作成複合無機聚合物，澆置成 5cm×5cm×5cm 方形試體養護 7 天後取樣，其掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察水淬爐石粉無機聚合物晶相變化，如圖 12(a)(b)(c)(d)(e)(f)顯示，在相同水膠比 2.0 之條件下，皆可看到 C-S-H 膠體附著在熔融狀聚合反應生成產物結構上，但當鹼當量由 6% 提升至 10% 時，其 C-S-H 膠體逐之減少之現象，且隨著鹼模數比的提升，亦可看到其中出現了裂縫，Yip et al. [8]指出當鹼活化劑鹼度較低時，其 C-S-H 膠體以□形表示與 Si-O-Si 架狀結構以○形表示，兩者共同存在，而 C-S-H 膠體可填塞 Si-O-Si 架狀結構所產生孔隙。由此可知當低鹼度時，其強度來源主要以 C-S-H 膠體為主；然而鹼度較高時以 Si-O-Si 架狀結構為主。

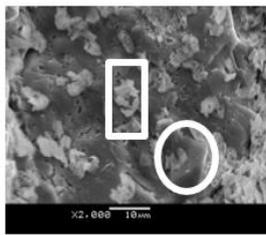


圖 12(a) AE=6% Ms=1.0 L/S=2 晶相圖

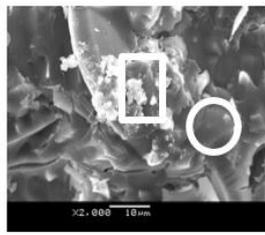


圖 12(b) AE=6% Ms=1.5 L/S=2 晶相圖

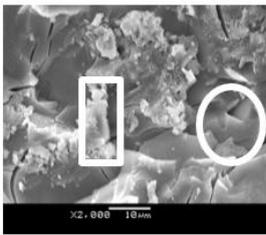


圖 12(c) AE=6% Ms=2.0 L/S=2 晶相圖

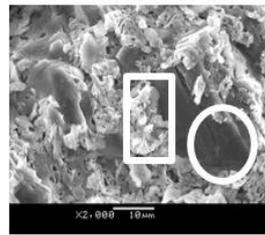


圖 12(d) AE=8% Ms=1.0 L/S=2 晶相圖

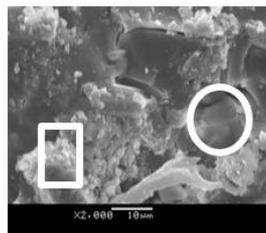


圖 12(e) AE=8% Ms=1.5 L/S=2 晶相圖

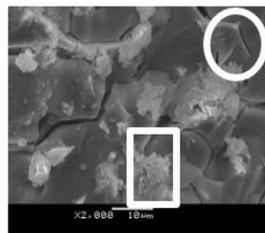


圖 12(f) AE=8% Ms=2.0 L/S=2 晶相圖

4-4 廢陶瓷磚無機聚合物

由前述得知爐石無機聚合物在鹼模數比 2.0 時為最佳強度之配比，由於鹼度提高使聚合反應更為激烈，相對高鹼度下鹼模數比越高使聚合反應效果影響較大，可使漿體變為黏稠，本研究特別選用廢陶瓷粒與膠結料重量比(骨膠比 A/B)以 1, 2 及 3 等三種，再澆置成 5cm×5cm×5cm 試體，並養護 3 天、7 天及 28 天進行一系列試驗，並探討抗壓強度、吸水率等關係。

4-4-1 抗壓強度

1. 鹼當量之影響：

當固定鹼當量 6%、液膠比 0.8 及骨膠比為 1 之條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之抗壓強度分別為 377.2 kgf/cm²、406.0 kgf/cm² 及 528.9 kgf/cm²，當鹼當量由 6% 提高至 8% 時其抗壓強度分別上升為 513.8 kgf/cm²、476.0 kgf/cm² 及 513.8 kgf/cm²；當鹼當量由 6% 提高至 10% 時之抗壓強度分別上升為 607.1 kgf/cm²、676.4 kgf/cm² 及 800.72 kgf/cm²，約可提升 60%，由圖 13(a) 所示。

當固定鹼當量 6%、液膠比 1.0 及骨膠比為 1 之條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之抗壓強度分別為 262.1 kgf/cm²、383.5 kgf/cm² 及 542.3 kgf/cm²，當鹼當量由 6% 提高至 8% 時其抗壓強度分別上升為 333.3 kgf/cm²、363.8 kgf/cm² 及 423.5 kgf/cm²；當鹼當量由 6% 提高至 10% 時之抗壓強度分別上升為 357.5 kgf/cm²、420.1 kgf/cm² 及 421.2 kgf/cm²，約可提升 8%，由圖 13(b) 所示。

當固定鹼當量 6%、液膠比 0.8 及骨膠比為 1 之條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之抗壓強度分別為 259.9 kgf/cm²、336.5 kgf/cm² 及 349.8 kgf/cm²，當鹼當量由 6% 提高至 8% 時其抗壓強度分別上升為 179.8 kgf/cm²、351.0 kgf/cm² 及 351.2 kgf/cm²；當鹼當量由 6% 提高至 10% 時之抗壓強度分別上升為 221.3 kgf/cm²、227.6 kgf/cm² 及 264.2 kgf/cm²，由圖 13(c) 所示。

由此可知，抗壓強度隨養護齡期增加而

上升，提高鹼當量亦可提升其強度性質，原因在於提高鹼當量時，鹼激發溶液之 pH 值亦較高，所含之氫氧根離子亦較多，具有較強的解離能力，能使爐石無機聚合物中之矽、鋁元素與鹼激發劑反應時，加速聚合反應，使其強度提升。就抗壓強度而言，以鹼當量 AE=6%、8% 及 10%，液膠比 0.8、1.0 及 1.2，骨膠比 1 之配比抗壓強度效果最佳，並且在養護 7 天及 28 天即可滿足 CNS-382 普通磚第 1 種磚抗壓強度要求。

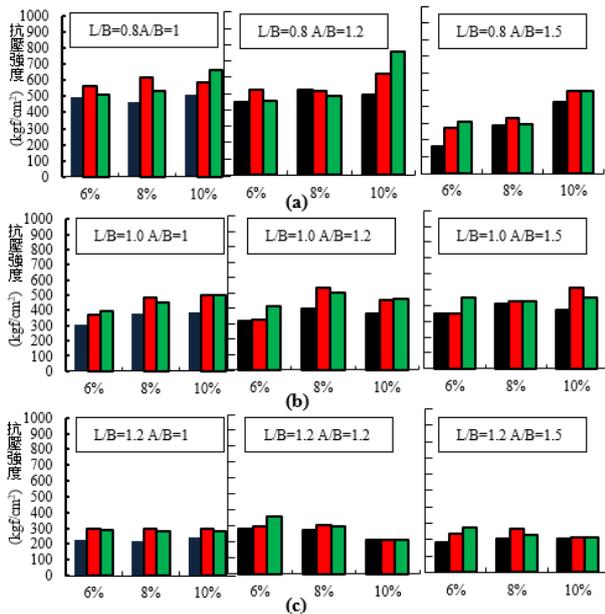


圖 13 (a)(b)(c)鹼當量對廢陶瓷磚無機聚合物抗壓強度之影響

2. 液膠比之影響：

當固定鹼當量 6%、骨膠比 1 及液膠比 0.8 之條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之抗壓強度分別為 377.2 kgf/cm²、406.0 kgf/cm² 及 528.9 kgf/cm²，當液膠比 0.8 提高至 1.0 時其抗壓強度分別為 262.1kgf/cm²、383.5 kgf/cm² 及 542.3kgf/cm²；當液膠比 0.8 提高至 1.2 時之抗壓強度分別為 259.9 kgf/cm²、336.5 kgf/cm² 及 349.8 kgf/cm²，約可降低 30% 左右，由圖 14(a) 所示。

當固定鹼當量 8%、骨膠比 1 及液膠比 0.8 之條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之抗壓強度分別為 333.7 kgf/cm²、476.0 kgf/cm² 及 513.8kgf/cm²，當液膠比 0.8 提高至 1.0 時其抗壓強度分別為 333.3kgf/cm²、

363.8kgf/cm² 及 423.5kgf/cm²；當液膠比 0.8 提高至 1.2 時之抗壓強度分別為 179.8 kgf/cm²、351.0kgf/cm² 及 351.3 kgf/cm²，約可降低 26% 左右，由圖 14(a) 所示。

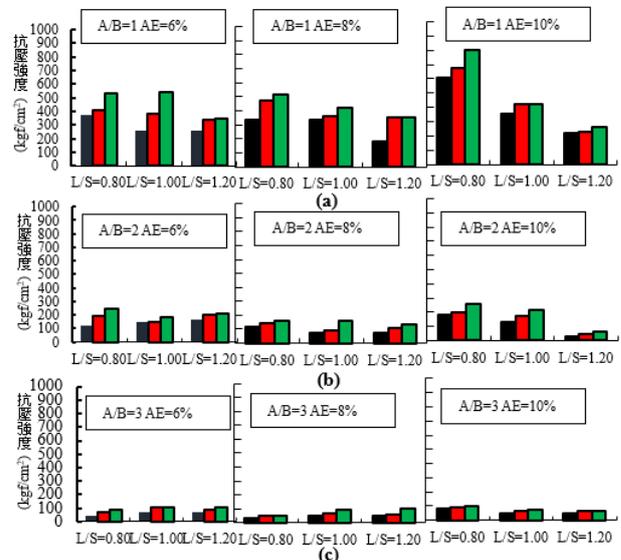


圖 14 (a)(b)(c)液膠比對廢陶瓷磚無機聚合物抗壓強度之影響

當固定鹼當量 10%、骨膠比 1 及液膠比 0.8 之條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之抗壓強度分別為 607.1 kgf/cm²、676.4kgf/cm² 及 800.7 kgf/cm²，當液膠比 0.8 提高至 1.0 時其抗壓強度分別為 357.5kgf/cm²、420.1kgf/cm² 及 421.2kgf/cm²；當液膠比 0.8 提高至 1.2 時之抗壓強度分別為 221.3kgf/cm²、227.6kgf/cm² 及 264.2 kgf/cm²，約可降低 60% 左右，由圖 14(a) 所示。

當固定鹼當量 6%、骨膠比 3 及液膠比 0.8 之條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之抗壓強度分別為 79.7 kgf/cm²、89.7 kgf/cm² 及 97.9 kgf/cm²，當液膠比 0.8 提高至 1.0 時其抗壓強度分別為 51.3kgf/cm²、62.8kgf/cm² 及 73.6 kgf/cm²；當液膠比 0.8 提高至 1.2 時之抗壓強度分別為 48.3kgf/cm²、68.3 kgf/cm² 及 69.3kgf/cm²，約可提升 29% 左右，由圖 14(c) 所示。

所以當液膠比增加時，抗壓強度會有降低的趨勢，主要是由於液膠比(L/S)提高使漿體內含水量增加相對工作性隨之增加，於聚合反應過程中並不與水產生反應，反之聚合

反應具有脫水效果，因此當漿體硬固後水分蒸發因而形成過多的孔隙，造成試體結構產生破壞面促使抗壓強度降低。就抗壓強度而言，以液膠比 0.8、1.0 及 1.2，骨膠比 1，鹼當量 AE=6%、8% 及 10%，之配比抗壓強度效果最佳，並且在養護 7 天及 28 天即可滿足 CNS-382 普通磚第 1 種磚抗壓強度要求。

3. 骨膠比之影響：

當固定骨膠比 1、鹼當量 6% 及液膠比 0.8 之條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之抗壓強度分別為 377.2 kgf/cm²、406.0 kgf/cm² 及 528.9 kgf/cm²，當骨膠比由 1.0 提高至 2.0 時其抗壓強度分別為 125kgf/cm²、195.6kgf/cm² 及 244.6kgf/cm²；當骨膠比 1 提高至 3 時之抗壓強度分別為 47.7 kgf/cm²、73.8kgf/cm² 及 76.7kgf/cm²，約可降低 80% 左右，由圖 15(a) 所示。

當固定骨膠比 1、鹼當量 8% 及液膠比 0.8 之條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之抗壓強度分別為 333.7 kgf/cm²、476.0 kgf/cm² 及 513.8kgf/cm²，當骨膠比由 1.0 提高至 2.0 時其抗壓強度分別為 119.3kgf/cm²、146.2kgf/cm² 及 159.2kgf/cm²；當骨膠比 1 提高至 3 時之抗壓強度分別為 37.76kgf/cm²、47.99kgf/cm² 及 54.11 kgf/cm²，約可降低 80% 左右，由圖 15(b) 所示。

當固定骨膠比 1、鹼當量 10% 及液膠比 0.8 之條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之抗壓強度分別為 607.1kgf/cm²、676.4 kgf/cm² 及 800.7kgf/cm²，當骨膠比由 1.0 提高至 2.0 時其抗壓強度分別為 184.2kgf/cm²、195.7kgf/cm² 及 260.9kgf/cm²；當骨膠比 1 提高至 3 時之抗壓強度分別為 79.7 kgf/cm²、89.7kgf/cm² 及 97.9kgf/cm²，約可降低 80% 左右，由圖 15(c) 所示。含有廢陶瓷之比例越高(A/B=1)之配比，雖然漿體填充料增加能有效提升其初、終凝結時間改善其工作性之情形。但是漿體變少，介面變多，試體結構產生界面使其抗壓強度降低。抗壓強度隨著養治時間增加而增加，抗壓強度亦會隨著骨膠比增加而降低，亦會隨著液膠比增加而降低。就抗壓強度而言，以鹼當量 AE=6%、8% 及

10%，水膠比 0.8，骨膠比 1 之配比抗壓強度效果最佳，並且在養護 3 天、7 天及 28 天皆可滿足 CNS-382 普通磚第 1 種磚抗壓強度要求。

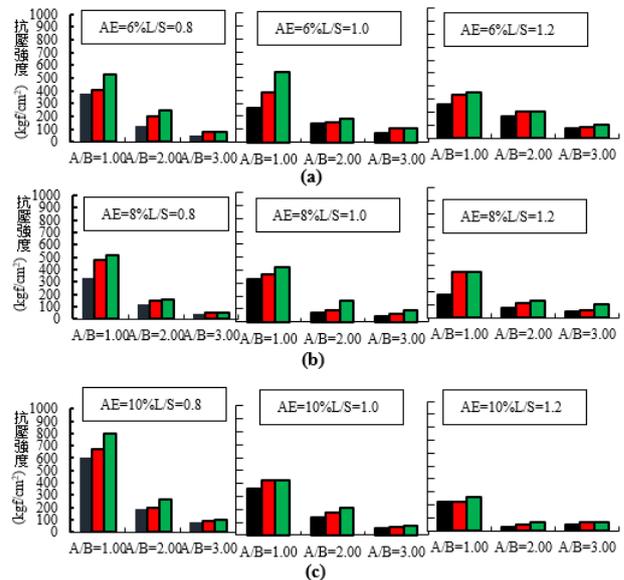


圖 15 (a)(b)(c)液膠比對廢陶瓷磚無機聚合物抗壓強度之影響

4-4-2 吸水率

1. 鹼當量之影響：

當固定鹼當量 6%、液膠比 0.8 及骨膠比為 3 之條件下，在養護 3 天、7 天及 28 天之吸水率分別為 3.09%、2.68%、2.37%，當鹼當量由 6% 提高至 8% 時其吸水率分別為 3.44%、3.05%、2.77%；當鹼當量由 8% 提高至 10% 時其吸水率分別為 4.12%、3.17%、3.11%，約可增加 15%，如圖 16(a) 所示。

當固定鹼當量 6%、液膠比 1.0 及骨膠比為 3 之條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之之吸水率分別為 2.99%、2.87%、2.47%，當鹼當量由 6% 提高至 8% 時其之吸水率分別為 4.13%、2.79%、2.22%；當鹼當量由 6% 提高至 10% 時之之吸水率分別為 3.46%、3.30%、2.62%，約可增加 15%，由圖 16(b) 所示。

當固定鹼當量 6%、液膠比 0.8 及骨膠比為 3 之條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之吸水率分別為 3.11%、2.53%、2.47%，當鹼當量由 6% 提高至 8% 時其之吸水率分別為 3.34%、3.24%、2.50%；當鹼當量由 6%

提高至 10% 時之之吸水率分別為 3.57%、2.82%、2.35%，約可增加 10%，如圖 16(c) 所示。

由上述可知，吸水率會隨著鹼當量增加而增加，亦隨著養護時間增加而降低，主要是因為高鹼當量可使其產生更多之 Si-O-Si 及 Al-O-Al 之架狀結構，內部結構雖然緻密，但是架狀結構呈現大小不等裂縫，因而造成吸水率亦呈現增加的趨勢。

就吸水率而言，以鹼當量 AE=6%、8% 及 10%，液膠比 0.8、1.0 及 1.2，骨膠比 1.0 吸水率最低。陶瓷磚混拌配比中，所有配比也就是鹼當量 AE=6%、8% 及 10%，液膠比 0.8、1.0 及 1.2，骨膠比 1、2 及 3 之配比，在養護 3 天、7 天及 28 天皆可滿足 CNS-382 普通磚第 1 種磚吸水率的要求。

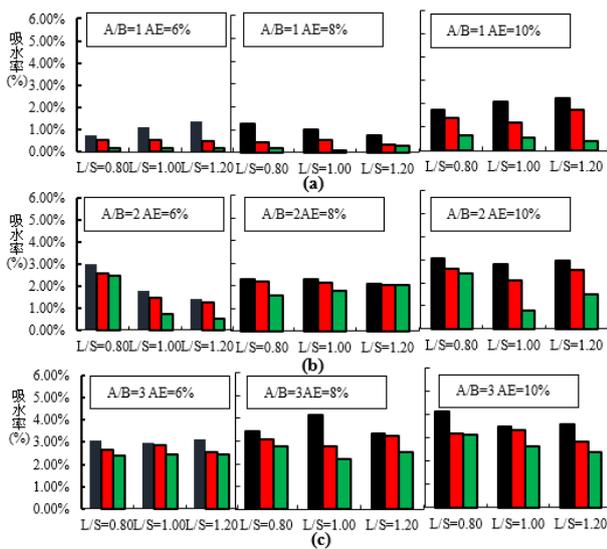


圖 16 (a)(b)(c) 鹼當量對廢陶瓷磚無機聚合物吸水率之影響

2. 液膠比之影響：

當固定鹼當量 6%、骨膠比為 1 及液膠比 0.8 之條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之之吸水率分別為 0.72%、0.56%、0.18%，當液膠比由 0.8 提高至 1.0 時其吸水率分別為 1.11%、0.55%、0.18%；當液膠比由 0.8 提高至 1.2 時其吸水率分別為 1.39%、0.46%、0.18%，由圖 17(a) 所示。

當固定鹼當量 6%、骨膠比為 2 及液膠比 0.8 之條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之之吸水率分別為 3.02%、2.58%、2.48%，

當液膠比由 0.8 提高至 1.0 時其吸水率分別為 1.77%、1.50%、0.74%；當液膠比由 0.8 提高至 1.2 時其吸水率分別為 1.42%、1.27%、0.5%，由圖 17(b) 所示。

當固定鹼當量 6%、骨膠比 3 及液膠比 0.8 之條件下，在養護 3 天、7 天及 28 天之吸水率分別為 3.09%、2.68%、2.37%，當液膠比由 0.8 提高至 1.0 時其吸水率分別為 2.99%、2.87%、2.47%；當液膠比由 0.8 提高至 1.2 時其吸水率分別為 3.11%、2.53%、2.47%，如圖 17(c) 所示。

由上述可知，吸水率隨著液膠比下降吸水率亦會降低，主要是因為低液膠比使試體內部之水分降低，使內部孔隙減少，吸水率因而降低。

就吸水率而言，以鹼當量 AE=6%、8% 及 10%，液膠比 0.8、1.0 及 1.2，骨膠比 1.0 吸水率最低。陶瓷磚混拌配比中，所有配比也就是鹼當量 AE=6%、8% 及 10%，液膠比 0.8、1.0 及 1.2，骨膠比 1、2 及 3 之配比，在養護 3 天、7 天及 28 天皆可滿足 CNS-382 普通磚第 1 種磚吸水率的要求。

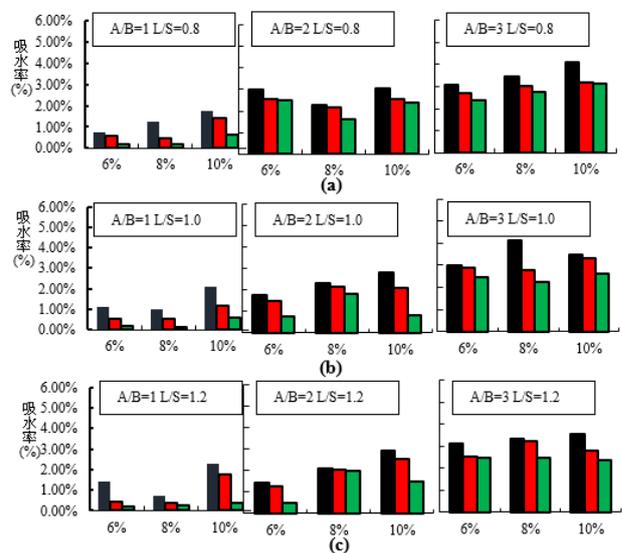


圖 17 (a)(b)(c) 液膠比對廢陶瓷磚無機聚合物吸水率之影響

3. 骨膠比之影響：

當固定鹼當量 6%、液膠比 0.8 及骨膠比為 1 之條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之之吸水率分別為 0.72%、0.56%、0.18%，當骨膠比由 1.0 提高至 2.0 時其吸水率分別

為 3.02%、2.58%、2.48%；當骨膠比由 1.0 提高至 3 時其吸水率分別為 3.09%、2.68%、2.37%，由圖 18(a)所示。

當固定鹼當量 8%、液膠比 0.8 及骨膠比為 1 之條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之之吸水率分別為 1.27%、0.46%、0.18%，當骨膠比由 1.0 提高至 2.0 時其吸水率分別為 2.30%、2.17%、1.59%；當骨膠比由 1.0 提高至 3 時其吸水率分別為 3.44%、3.05%、2.77%，由圖 18(b)所示。

當固定鹼當量 10%、液膠比 0.8 及骨膠比為 1 之條件下，在養護 3 天、7 天及 28 天之吸水率分別為 1.74%、1.41%、0.64%，當骨膠比由 1.0 提高至 2.0 時其吸水率分別為 3.06%、2.58%、2.40%；當骨膠比由 1.0 提高至 3 時其吸水率分別為 4.12%、3.17%、3.11%，如圖 18(c)所示。

就吸水率而言，以鹼當量 $AE=6\%$ 、 8% 及 10% ，液膠比 0.8、1.0 及 1.2，骨膠比 1.0 吸水率最低。陶瓷磚混拌配比中，所有配比也就是鹼當量 $AE=6\%$ 、 8% 及 10% ，液膠比 0.8、1.0 及 1.2，骨膠比 1、2 及 3 之配比，在養護 3 天、7 天及 28 天皆可滿足 CNS-382 普通磚第 1 種磚吸水率的要求。

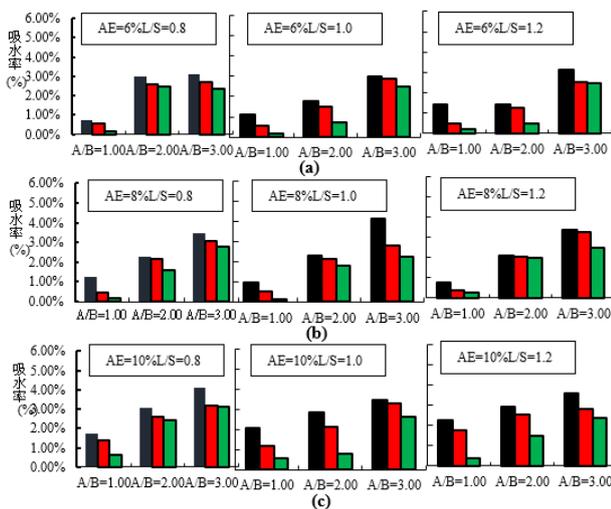


圖 18 (a)(b)(c)骨膠比對廢陶瓷磚無機聚合物吸水率之影響

本研究為探討廢陶瓷粒製作成陶瓷磚無機聚合物之研究，經由試驗結果加以分析，可歸納出以下幾點：

5-1 結論

1. 爐石粉無機聚合物膠結材，其凝結時間隨鹼當量增加而縮短；亦隨液膠比下降而縮短；其中以鹼當量 6%、鹼模數比 2.0、液膠比 1.00，凝結時間最短；而廢陶瓷磚無機聚合物凝結時間隨著鹼當量、液膠比、膠骨比增加而縮短。
2. 爐石粉無機聚合物膠結材抗壓強度隨鹼當量增加而增加，其 28 天抗壓強度最高成長了 41%；抗壓強度隨著鹼模數比增加而增加，其 28 天抗壓強度可增加約 22 %；抗壓強度隨著液膠比下降而增加，抗壓強度約可成長 39 %。
3. 廢陶瓷磚無機聚合物抗壓強度隨鹼當量增加而增加，隨著液膠比增加而下降，隨骨膠比增加而降低；其中以鹼當量 6%、8% 及 10%、液膠比 0.8、骨膠比 1 抗壓強度最高。
4. 廢陶瓷磚吸水率隨含鹼當量增加、液膠比增加、骨膠比增加而下降；其中以鹼當量 6%、8% 及 10%、液膠比 0.8、骨膠比 1 吸水率最低。
5. 廢陶瓷磚最佳配比为鹼當量 6%、8% 及 10%，鹼模數比 2.0，液膠比 0.8 及骨膠比為 1 之變數，能夠同時滿足 CNS-382 普通磚第 1 種磚之抗壓強度及吸水率要求。

5-2 建議

1. 嘗試於前處理過程中，先將廢陶瓷粒磁選、粉碎、過篩處理後，降低廢陶瓷粒中雜質後再作混拌，或許能夠提高其工程性質。
2. 可以利用其他卜作蘭材料結合無機聚合方式製作成無機聚合膠結料，作為提廢升陶瓷磚無機聚合物之工程性質。

參考文獻

1. 李元凱，“偏高嶺土聚合膠體工程性質之研究”，國立台灣科技大學營建工程系，碩士論文，2008。
2. 李宜桃，“鹼活化還原渣漿體之收縮及抑制方法研究”，國立中央大學土木工程研究所，碩士論文，2003。
3. 林瑋倫，“鹼激發爐石基膠體工程性質之研

- 究”，國立台灣科技大學營建工程系，碩士論文，2009。
4. 吳浩、管學茂，土聚水泥的研究現況及應用發展前景，水泥工程，第二期，河南，2004。
 5. 經濟部標準檢驗局，「CNS 12223-A2218 水淬高爐爐渣」，修正公布日期，2013。
 6. 經濟部標準檢驗局，「CNS 382-R2002 普通磚」，修正公布日期，2007。
 7. 王睿懋、林秉祁、林志棟，“廢陶瓷應用於瀝青混凝土之初步研究” 第二屆鋪面工程師生研究成果聯合發表會論文集，中央大學，第 32-41 頁，2001。
 8. 林樹豪、黃暉淇，“廢陶瓷砂於水泥混凝土之應用”，第六屆鋪面材料再生學術研討會論文集，正修科技大學，第 E1-1~E1-7 頁，2001。
 9. Yip C. K., Lukey G. C., and Van Deventer J. S. J., The coexistence of geopolymetric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation, *Cement and Concrete Research*, Vol.35, pp.1688-1697, 2005.

含爐石粉之再生瀝青水泥砂漿工程性質研究

陳世豪¹ 周俊佑²

¹ 國立高雄科技大學土木工程系教授

² 國立高雄科技大學土木工程系碩士生

摘要

天然砂和水泥在使用上具有高度緊密的相關性，全球每年對天然砂的消耗量僅次於水，並且在河流、湖泊和海岸線開採砂石，將對生態造成極大的影響；台灣道路工程所刨除後的瀝青混凝土廢料，容易造成環保與工程管理問題，若能以工業廢棄物循環再利用，透過工業廢棄物取代天然砂，不僅可有效去化工業廢棄物，更能避免廢棄物處置問題而造成的溫室氣體排放和環境汙染，並大幅減少天然砂使用量，以達到節能減碳、減緩天然砂資源的流失以及有效利用工業廢棄物，使之全面資源化的永續循環經濟目標。

本研究選用不同水膠比(W/B) 0.4、0.5、0.6，使用再生瀝青混凝土粒料以不同取代量(RM) 0%、50%及 100%；爐石粉以不同取代量(RM) 0%、10%及 20%，以再生瀝青混凝土粒料取代天然砂並添加爐石粉取代水泥製成水泥砂漿，探討其工程性質之影響，評估含爐石粉之再生瀝青水泥砂漿工程性質研究的可行性。

研究結果顯示，含爐石粉之再生瀝青水泥砂漿，能使坍度與流度有提升之趨勢，整體工作性就會越佳。硬固性質隨再生瀝青混凝土粒料取代量增加而有降低之趨勢；隨爐石粉取代量增加而提升，以爐石粉 20%具有較佳力學性質。

關鍵字：再生瀝青混凝土粒料、天然砂、爐石粉、水泥砂漿、工業副產品、工程性質

The Study on Engineering Properties of Recycled Asphalt Cement Mortars with Slag

Chen Shyh-Haur¹ Zhou Jun-You²

¹ Institute of Civil Engineering National Kaohsiung University of Science and Technology

² Institute of Civil Engineering National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

The use of natural sand and cement is highly closely related. The annual consumption of natural sand in the world is second only to water, and the mining of sand and gravel in rivers, lakes and coastlines will have a great impact on the ecology; Taiwan Road Engineering Institute The removed asphalt concrete waste can easily cause environmental protection and engineering management problems. If industrial waste can be recycled and reused, and natural sand can be replaced by industrial waste, it will not only effectively remove industrial waste, but also avoid waste disposal problems. Greenhouse gas emissions and environmental pollution are caused, and the amount of natural sand used is greatly reduced to achieve the goal of a sustainable circular economy of energy saving and carbon reduction, slowing the loss of natural sand resources, and effective use of industrial waste to make it fully resourced.

In this study, different water-binder ratios (W/B) 0.4, 0.5, 0.6 were used, and recycled asphalt pavement sand was used with different substitution amounts (RM) 0%, 50% and 100%; slag was used with different substitution amounts (RM) 0% , 10% and 20%, replace natural sand with recycled asphalt pavement sand and add furnace slag instead of cement to make cement mortar, explore the impact of its engineering properties, and evaluate the feasibility of engineering properties of recycled asphalt cement mortar containing furnace slag.

Research results show that the study on engineering properties of recycled asphalt cement mortars with slag can increase the slump and fluidity, and the overall workability will be better. The slag tend to decrease as the amount of recycled asphalt pavement flow increases; as the replacement amount of furnace slag increases, 20% of furnace slag has better mechanical properties.

Keywords: recycled asphalt pavement, natural sand, slag, cement mortar, industrial by-products, engineering nature

一、研究動機

全球每年對沙子消耗量僅次於水，對沙子的需求量大，它是世界上相當重要、但升值最少的商品之一，雖然不太可能很快消失，但是這種資源的確正逐漸流失中，現代社會的道路、橋梁等工業建設均與沙子息息相關，甚至用來製作電腦螢幕、智慧型手機的玻璃，乃至於矽晶圓的生產也會使用到沙 [註 1]。台灣道路柏油路刨除重鋪剩下的瀝青混凝土，易造成環保與工程管理問題，近年來，國內環保意識高漲，工程界又普遍存在砂石短缺、工程廢土棄置不易等困境，而舊瀝青路面回收料的使用，不但可使路面工程砂石需求降低，且可解決刨除料棄置等問題，故再生工法遂成為國內公路工程界迫切推動的工法 [註 2-註 3]。

「永續發展」的理念日漸重視，經濟發展需建立在保護地球自然生態體系與環境的基礎上，如何節能減碳及有效利用資源材料已成為各國努力的目標。全球水泥製造業的二氧化碳排放量，佔全世界所有溫室氣體排放量約 5~7%，對環境造成相當大的衝擊，生產 1 噸的水泥亦會產生 0.85 噸的二氧化碳，約有 60% 二氧化碳從石灰石煅燒階段排放 [4]。在資源有限的情況下，如何將工業副產品有效回收再利用，是未來需要解決的議題 [註 5-註 6]。

目前國內煉鋼爐渣中，中鋼公司以鐵礦一貫煉鋼所產生之高爐石(水淬爐石)，已達到資源化的目的，並產生相當之經濟價值，普遍應用於國內各大工程之水泥材料中。透過煉鋼產業所產出的工業副產品取代水泥，可降低廢棄物處置問題及減少溫室氣體排放，不僅可減少水泥使用量，以達到節能減碳、工業副產品全面資源化及永續的循環經濟目標 [註 7-註 8]。

隨著時代的進步，都市化的發展，土木工程的興建日漸逐增，其水泥砂漿所需之材料，水(含化學摻劑)、膠結料(含水泥與礦物摻料)、細骨材之所需用量也隨之拉升，因此，在近十年中，全球各大水泥行業越來越關注將卜作嵐材料以部份取代水泥的方式納入自己的產品中，除了減少成本、增加強度效益也更利於環境保護。

透過再生瀝青混凝土粒料取代天然砂，除了能減少天然砂的用量，以減緩天然砂資源耗損速度過快，更能降低道路工程經刨除後廢料的堆放，以便處理環保與工程管理的問題；且於水泥砂漿試體中，添加爐石粉取代水泥，其目的在於增強試體晚期強度，並減少水泥之用量，以降低二氧化碳的排放，使自然生態與環境的破壞影響降到最低，以利永續之發展。

二、試驗計畫

本研究使用再生瀝青混凝土粒料與取代天然砂並添加爐石粉取代水泥製成水泥砂漿進行研究與探討。

再生瀝青混凝土粒料使用道路刨除後之廢料經顎碎，以不同取代量 (RM) 0%、50% 及 100% 取代天然砂；爐石粉以不同取代量 (RM) 0%、10% 及 20% 取代天水泥，選用不同水膠比 (W/B) 0.4、0.5、0.6，進行水泥砂漿新拌性質試驗 (坍度及流度)，將其製作成試體，放置飽和石灰水養護，並於齡期 28 天進行硬固性質試驗 (抗壓強度)，探討以再生瀝青取代天然砂並添加爐石粉取代水泥之工程性質影響因素。

三、試驗材料與項目

3-1 試驗材料

(一) 再生瀝青:

- (1) 本研究所使用之再生瀝青混凝土粒料為路面刨除工程，刨除後之路面刨除料(reclaimed asphalt pavement, RAP)，經研磨後形成細粉狀之再生瀝青材料，細度模數為 2.95。
- (2) 其外觀如圖 3-1 所示。



圖 1 再生瀝青混凝土砂

(二) 水淬爐石粉:

- (1) 採用爐石粉為中國鋼鐵公司所生產的水淬爐石，經由中聯爐石資源處理公司研磨成細粉狀。比重為 2.90，細度為 4000cm²/g。

- (2) 其外觀如圖 3-2 所示。



圖 2 水淬爐石粉

(三) 水泥:

- (1) 採用卜特蘭第 I 型水泥，其性質符合 CNS 61 (ASTM C150)，比重為 3.15，細度為 3480cm²/g。
- (2) 其外觀如圖 3-3 所示。



圖 3 水泥

(四) 細骨材:

- (1) 採用細骨材取自里港溪之河砂，面乾內飽和比重依據 CNS 486 規範檢測。其符合 CNS 1240 混凝土粒料之要求規定，面乾內飽和比重為 2.68，吸水率為 2.0%。
- (2) 其外觀如圖 3-4 所示。



圖 4 細骨材

3-2 試驗項目

(一) 坍度試驗：

- (1) 本試驗參照 CNS C143 規範。
- (2) 利用迷你坍度錐(上徑 10cm、下徑 20cm、高度 30cm)進行試驗。
- (3) 將新拌混凝土分二層填入並搗實，完成後將坍度錐提起，量取錐模頂面至坍下試樣中心點之垂直距離。
- (4) 試驗設備如圖 3-5 所示。



圖 5 坍度試驗儀

(二) 流度試驗：

- (1) 參照 CNS C230 規範。
- (2) 將新拌混凝土分二層填入並搗實，完成後將坍度錐提起。
- (3) 混凝土坍度錐提起後，啟動水泥砂漿流度台。
- (4) 混凝土流動停止後，量測展開圓形之最大直徑及與最大直徑成直角方向之直徑。

(5) 試驗設備如圖 3-6 所示。



圖 6 流度試驗儀

(三) 抗壓試驗：

- (1) 參照 CNS C109 規範。
- (2) 將放置飽和石灰水養護之試體，於齡期 7、28 及 56 天取出。
- (3) 使用 30 噸自動化混凝土抗壓試驗機進行試驗。
- (4) 利用自動控制加壓系統及記錄數據，並設定試體之加壓速率與範圍。
- (5) 試驗設備如圖 3-7 所示。



圖 7 水泥砂漿抗壓試驗儀

(四) 超音波波速：

- (1) 參照 ASTM C597 規範。
- (2) 將放置飽和石灰水養護之試體，於齡期 7、28 及 56 天取出。
- (3) 使用超音波波速檢測儀進行試驗。
- (4) 量測超音波通過試體內部之時間，依據超音波在不同物質中傳遞速度

之特性，了解試體內部狀況。

(5) 試驗設備如圖 3-8 所示。



圖 8 超音波波速儀

四、結果與分析

4-1 坍度試驗

(一) 本研究以不同水膠比(0.4、0.5、0.6)、再生瀝青混凝土粒料取代量(0%、50%、100%)、爐石粉取代量(0%、10%、20%)，製成水泥砂漿進行坍度試驗，探討水泥砂漿之坍度，可分析漿體內部凝聚力與流動能力，進而了解其工作性。

(二) 不同水膠比(0.4、0.5、0.6)，添加不同比例再生瀝青混凝土粒料取代天然砂與不同比例爐石粉取代水泥之砂漿坍度試驗結果如表 1 顯示。

表 1 再生瀝青混凝土粒料水泥砂漿坍度值 (Unit: cm)

RAC(%)	G(%)	W/B		
		0.4	0.5	0.6
0	0	0.8	1.5	2.0
	10	1.0	2.0	2.8
	20	2.0	3.0	3.8
50	0	1.0	2.5	2.6
	10	1.2	2.9	3.7
	20	2.5	3.5	4.3
100	0	1.1	3.0	3.1
	10	1.3	3.3	4.2
	20	2.8	4.0	4.8

(三) 水膠比之影響:

(1) 水膠比提升，坍度值有大幅提升之趨勢，因用水量之增加而使漿體坍

度提高，提升整體水泥砂漿之工作性。

(2) 其數據如表 2。

表 2 水膠比對坍度之影響(Unit: cm)

RAC(%)	G(%)	W/B			變化量	
		0.4	0.5	0.6	0.4~0.5	0.4~0.6
0		0.8	1.5	2.0	+0.7	+1.2
50	0	1.0	2.5	2.6	+1.5	+1.6
100		1.1	3.0	3.1	+1.9	+2.0
0		1.0	2.0	2.8	+1.0	+1.8
50	10	1.2	2.9	3.7	+1.7	+2.5
100		1.3	3.3	4.2	+2.0	+2.9
0		2.0	3.0	3.8	+1.0	+1.8
50	20	2.5	3.5	4.3	+1.0	+1.8
100		2.8	4.0	4.8	+1.2	+2.0

(四) 再生瀝青混凝土粒料取代量:

(1) 再生瀝青混凝土粒料取代量增加，水泥砂漿之坍度也隨之增加，因再生瀝青之粒料外表包裹著少量的膠泥，使漿體內部摩擦力減少而導致坍度上升。

(2) 其數據如表 3。

表 3 再生瀝青混凝土粒料對坍度之影響

W/B	RAC(%)	G(%)	坍度 (cm)	變化量 (cm)
	0		0.8	0
0.4	50	0	1.0	+0.2
	100		1.1	+0.3
	0		1.5	0
0.5	50	0	2.5	+1.0
	100		3.0	+1.5
	0		2.0	0
0.6	50	0	2.6	+0.6
	100		3.1	+1.1

(五) 爐石粉取代量:

(1) 顯示隨爐石粉取代量增加，可以增加水泥砂漿坍度，因爐石粉比重略小於水泥，爐石粉以相等重量替代部分水泥時，膠結料總重量不變，但

漿體實質佔有體積會增加，亦即漿體對骨材之體積比會因而提高，有助於混凝土之工作性。

(2) 其數據如表 4。

表 4 爐石粉對坍度之影響

W/B	RAC(%)	G(%)	坍度 (cm)	變化量 (cm)
0.4	0	0	0.8	0
		10	1.0	+0.2
		20	2.0	+1.2
0.5	0	0	1.5	0
		10	2.0	+0.5
		20	3.0	+1.5
0.6	0	0	2.0	0
		10	2.8	+0.8
		20	3.8	+1.8

綜合以上變數影響之結果，水膠比提升時，會因為用水量之增加而使坍度提高；再生瀝青混凝土粒料與爐石粉取代量的增加，使坍度有提升之趨勢，整體工作性就會越佳，因此水膠比對坍度之影響性比取代量高。

4-2 流度試驗

(一) 本研究以不同水膠比(0.4、0.5、0.6)，再生瀝青混凝土粒料取代量(0%、50%、100%)，爐石粉取代量(0%、10%、20%)，製成水泥砂漿進行流度試驗，探討水泥砂漿之流度，可分析漿體內部凝聚力與流動能力，進而了解其工作性。

(二) 以不同水膠比(0.4、0.5、0.6)，添加不同比例再生瀝青混凝土粒料取代天然砂與不同比例爐石粉取代水泥之砂漿流度試驗結果由表 5 顯示。

表 5 再生瀝青混凝土粒料水泥砂漿流度值 (Unit: cm)

RAC(%)	G(%)	W/B		
		0.4	0.5	0.6
0	0	10.0	17.9	19.8
	10	11.0	19.1	23.0
	20	18.5	21.7	24.0
50	0	12.0	18.3	23.5
	10	17.5	19.6	25.0
	20	20.0	22.0	25.0
100	0	13.5	19.0	25.0
	10	18.0	19.8	25.0
	20	21.0	24.0	25.0

(三) 水膠比之影響:

(1) 水膠比提升，流度值有大幅提升之趨勢，因用水量之增加而使漿體流度提高，提升整體水泥砂漿之工作性。

(2) 其數據如表 6。

表 6 水膠比對流度之影響 (Unit: cm)

RAC(%)	G(%)	W/B			變化量	
		0.4	0.5	0.6	0.4~0.5	0.4~0.6
0	0	10.0	17.9	19.8	+7.9	+9.8
50		12.0	18.3	23.5	+6.3	+11.5
100		13.5	19.0	25.0	+5.5	+11.5
0	10	11.0	19.1	23.0	+8.1	+12.0
50		17.5	19.6	25.0	+2.1	+7.5
100		18.0	19.8	25.0	+1.8	+7.0
0	20	18.5	21.7	24.0	+3.2	+5.5
50		20.0	22.0	25.0	+2.0	+5.0
100		21.0	24.0	25.0	+3.0	+4.0

(四) 再生瀝青混凝土粒料取代量:

(1) 再生瀝青取代量增加，水泥砂漿之流度也隨之增加，因再生瀝青之粒料外表包裹著少量的膠泥，使漿體內部摩擦力減少而導致流度上升。

(2) 其數據如表 7。

表 7 再生瀝青混凝土粒料對流度之影響

W/B	RAC(%)	G(%)	坍度 (cm)	變化量 (cm)
0.4	0		10.0	0
	50	0	12.0	+2.0
	100		13.5	+3.5
0.5	0		17.9	0
	50	0	18.3	+0.4
	100		19.0	+1.1
0.6	0		19.8	0
	50	0	23.5	+3.7
	100		25.0	+5.2

(五) 爐石粉取代量:

- (1) 隨爐石粉取代量增加，可以增加水泥砂漿流度，因爐石粉比重略小於水泥，爐石粉以相等重量替代部分水泥時，膠結料總重量不變，但漿體實質佔有體積會增加，亦即漿體對骨材之體積比會因而提高，有助於混凝土之工作性。
- (2) 其數據如表 8。

表 8 爐石粉對流度之影響

W/B	RAC(%)	G(%)	坍度 (cm)	變化量 (cm)
0.4	0	0	10.0	0
		10	11.0	+1.0
		20	18.5	+0.8
0.5	0	0	17.9	0
		10	19.1	+1.2
		20	21.7	+3.8
0.6	0	0	19.8	0
		10	23.0	+3.2
		20	24.0	+4.2

綜合以上變數影響之結果，水膠比提升時，會因為用水量之增加而使漿體流度提高；再生瀝青混凝土粒料與爐石粉取代量增加，使流度有提升之趨勢，整體工作性就會越佳，因此水膠比對流度之影響性比取代量高。

4-3 抗壓試驗

(一) 本研究以不同水膠比(0.4、0.5、0.6)，再生瀝青混凝土粒料取代量(0%、50%、100%)，爐石粉取代量(0%、10%、20%)，製作 5cm × 5cm × 5cm 水泥砂漿試體，於 28 天進行抗壓強度試驗。

(二) 抗壓強度為評估材料使用之重要工程特性，以不同水膠比(0.4、0.5、0.6)，添加不同比例再生瀝青混凝土粒料取代天然砂與爐石粉取代水泥之砂漿抗壓強度試驗結果由表 9 顯示。

表 9 28 天之再生瀝青混凝土粒料水泥砂漿抗壓強度(Unit: MPa)

RAC(%)	G(%)	W/B		
		0.4	0.5	0.6
0	0	53.3	44.9	40.9
	10	60.4	48.5	40.6
	20	53.7	50.8	43.1
50	0	33.1	27.2	24.1
	10	36.5	29.2	22.7
	20	33.5	29.7	24.5
100	0	17.5	17.5	15.5
	10	17.2	18.7	14.7
	20	17.3	19.6	17.1

(三) 水膠比之影響:

- (1) 再生瀝青混凝土粒料取代量增加時，粒料外表所包裹著少量的瀝青膠泥，經水膠比提升後，使漿體內部摩擦力大幅減少而導致強度下降。
- (2) 添加爐石粉之配比，因水膠比提升，會使試體孔隙增加造成抗壓強度降低，雖然提高水膠比使水泥顆粒易於水化，可以產生較多的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 來促進卜作嵐反應的進行，但會使得試體之充水空間增加而產生大量的孔隙。
- (3) 水膠比的提升會使水泥活性降低，與水化作用所析出的矽酸鈣水化物(Calcium silicate hydrate)鍵結反應不足，而導致水化產物減少，造成抗壓強度發展有限；低水膠比時，則因卜作嵐反應生成的水化產物較為高密度堆積因而產生為緻密現象，抗

壓強度也較高水膠比有所提升。

(4) 其數據如表 10。

表 10 水膠比對抗壓強度之影響(Unit: MPa)

RAC(%)	G(%)	W/B			變化量	
		0.4	0.5	0.6	0.4~0.5	0.4~0.6
0		53.3	44.9	40.6	-8.4	-12.7
50	0	33.1	27.2	22.7	-5.9	-10.4
100		17.5	17.2	14.7	-0.3	-2.8
0		53.7	48.5	40.9	-5.2	-12.8
50	10	33.5	29.2	24.1	-4.3	-9.4
100		18.7	17.3	15.5	-1.4	-3.2
0		60.4	50.8	43.1	-9.6	-17.3
50	20	36.5	29.7	24.5	-6.8	-12.0
100		19.6	17.5	11.1	-2.1	-8.5

(四) 再生瀝青混凝土粒料代量:

(1) 因再生瀝青之粒料外表包裹著少量的膠泥，使漿體內部摩擦力減少而導致強度下降；再生瀝青混凝土粒料取代量越高，粒料表所包裹的膠泥含量越多，導致抗壓強度降低的幅度越大。

(2) 其數據如表 11。

表 11 再生瀝青混凝土粒料對抗壓強度之影響

W/B	Age(days)	RAC(%)	G(%)	強度 (MPa)	變化量 (MPa)
		0		48.3	0
	7	50	0	23.1	-25.2
		100		14.1	-34.2
		0		53.3	0
0.4	28	50	0	33.1	-20.2
		100		17.5	-35.8
		0		72.1	0
	56	50	0	40.3	-31.8
		100		25.5	-46.6

(五) 爐石粉取代量：

(1) 抗壓強度隨爐石粉取代量增加而提升，因爐石粉以 CaO 與 SiO₂ 為主要

成分，兼具膠結性與卜作嵐反應特性，能填充試體微孔隙而提高水密性及強度；爐石粉之水化作用較水泥為慢，添加爐石粉之配比於早齡期抗壓強度成長幅度較低。

(2) 同水膠比的爐石取代量越大者，其早齡期時的水化產物 C-S-H 膠體愈少，只有部分爐石進行卜作嵐反應，將使早齡期強度些微增長，且添加爐石粉在晚齡期持續進行卜作嵐反應，進而提高水泥砂漿強度發展。隨著爐石粉取代量提升，抗壓強度有顯著上升；且添加爐石粉有助於長期強度之發展，對晚期強度有很大的助益，隨著齡期增加卜作嵐反應將會不斷反覆進行，直到水化物氫氧化鈣(CH)完全被消耗為止。

(3) 其數據如表 12。

表 12 爐石粉對抗壓強度之影響

W/B	Age(days)	RAC(%)	G(%)	強度 (MPa)	變化量 (MPa)
		0		48.3	0
	7	0	10	48.7	+0.4
		20		52.4	+4.1
		0		53.3	0
0.4	28	0	10	53.7	+0.4
		20		60.4	+7.1
		0		72.1	0
	56	0	10	74.8	+2.7
		20		86.1	+14.0

(六) 齡期之影響:

(1) 同水膠比的再生瀝青混凝土粒料取代量越大者，將造成粒料表面所包裹著的膠泥量增加，使漿體內部的摩擦力下降，造成抗壓強度的下降，但當齡期上升時，漿體內部的水泥，經由水化反應所產生膠結作用黏結細粒料，使抗壓強度上升。

(2) 其數據如表 13。

表 13 齡期對抗壓強度之影響

W/B	Age(days)	RAC(%)	G(%)	強度 (MPa)	變化量 (MPa)
		0		48.3	0
7		50	0	23.1	0
		100		14.1	0
0.4	28	0		53.3	+5.0
		50	0	33.1	+10.0
		100		17.5	+3.4
56		0		72.1	+23.8
		50	0	40.3	+17.2
		100		25.5	+11.4

綜合以上變數影響之結果，水膠比由 0.4 提升至 0.6，會使試體孔隙增加造成抗壓強度降低，因提高水膠比雖使水泥顆粒易於水化，可以產生較多的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 來促進卜作嵐反應的進行，但會使得試體之充水空間增加而產生大量的孔隙，低水膠比時，則因卜作嵐反應生成的水化產物較為高密度堆積因而產生為緻密現象，抗壓強度也有所提升；再生瀝青混凝土粒料取代量增加，導致抗壓強度有降低之趨勢，係因再生瀝青之粒料外表包裹著少量的膠泥，使漿體內部摩擦力減少而導致強度下降；爐石粉取代量增加而提升，因爐石粉以 CaO 與 SiO_2 為主要成分，兼具膠結性與卜作嵐反應特性，能填充試體微孔隙而提高水密性及強度；抗壓強度隨齡期增加而增加，晚齡期隨著爐石粉產生卜作嵐反應，使抗壓強度較控制組有所提升。

4-4 超音波波速

(一) 本研究以同水膠比(0.4)，再生瀝青混凝土粒料取代量(0%、50%、100%)，爐石粉取代量(0%、10%、20%)，於 7 天、28 天及 56 天進行超音波波速試驗，超音波波速高低，藉此得知試體緻密程度，驗證其與抗壓強度之趨勢。

(二) 以同水膠比(0.4)，不同比例再生瀝青混凝土粒料取代天然砂與爐石粉取代水泥之水泥砂漿超音波波速試驗結果，如表 14 所示。

表 14 28 天之再生瀝青混凝土粒料水泥砂漿超音波波速(Unit: m/s)

W/B	RAC(%)	G(%)	Age(days)
			28
0.4	0		4532
		10	4587
		20	4676
	50		4202
		10	4202
		20	4202
100		3936	
	10	4000	
	20	4100	

(三) 再生瀝青混凝土粒料代量：

(1) 再生瀝青混凝土粒料取代天然砂製成水泥砂漿，因漿體內粒料包裹著瀝青膠泥，使內部摩擦力下降，導致黏滯性下降，與粒料經由顎碎後比表面積上升，使內部漿體內部產生孔隙，故此導致超音波波速降低。

(2) 其數據如表 15。

表 15 再生瀝青混凝土粒料對抗壓強度之影響

W/B	Age(days)	RAC(%)	G(%)	強度 (m/s)	變化量 (m/s)
7		0		4299	0
		50	0	3938	-361
		100		3789	-510
0.4	28	0		4532	0
		50	0	4202	-330
		100		3936	-596
56		0		4587	0
		50	0	4264	-323
		100		4192	-395

(四) 爐石粉取代量：

(1) 爐石粉取代量由 0% 增加 20%，波速有上升之趨勢，因爐石粉以 CaO 與 SiO_2 為主要成分，兼具膠結性與卜作嵐反應特性，能填充試體微孔隙而提

高水密性及強度。

- (2) 爐石粉之水化作用較水泥為慢，添加爐石粉之配比於早齡期抗壓強度成長幅度較低；且添加爐石粉之配比在晚齡期進行卜作嵐反應，產生 C-S-H 膠體填充試體內部孔隙，使試體有較佳緻密性。
- (3) 以添加 20% 爐石粉有較佳之超音波波速；添加 10% 爐石粉次之；0% 爐石粉最低。
- (4) 其數據如表 16。

表 16 爐石粉對抗壓強度之影響

W/B	Age(days)	RAC(%)	G(%)	強度 (m/s)	變化量 (m/s)
			0	4299	0
	7	0	10	4323	+24
			20	4479	+180
			0	4532	0
0.4	28	0	10	4587	+55
			20	4676	+144
			0	4587	0
	56	0	10	4616	+29
			20	4720	+133

(五) 齡期之影響：

- (1) 同水膠比時，超音波波速隨著齡期增加而增加；再生瀝青取代量上升後，雖因瀝青膠泥與比表面積的增加，導致超音波波速下降，但隨時間的增加，在水化過程中，水泥用量不變，將產生 C-S-H 膠體與 CH 晶體填充試體孔隙後，使試體緻密，導致超音波波速的上升。
- (2) 其數據如表 17。

綜合以上變數影響之結果，超音波波速的傳遞高低取決於試體結構的緻密性，當超音波波速提高，表示試體結構較為緻密；爐石粉取代量增加，隨卜作嵐反應作用，試體孔隙被填充後，使試體有較佳緻密性，晚期波速成長幅度較明顯；超音波波速與抗壓強度有相同之趨勢，添加 20% 爐石粉有較佳緻密性；添加 10% 爐石粉次之；0% 爐石粉最低。

表 17 齡期對抗壓強度之影響

W/B	Age(days)	RAC(%)	G(%)	強度 (m/s)	變化量 (m/s)
			0	4299	0
	7	50	0	3938	0
			100	3789	0
			0	4532	+233
0.4	28	50	0	4202	+264
			100	3936	+147
			0	4587	+288
	56	50	0	4264	+326
			100	4192	+403

五、結論

根據試驗結果，本研究以不同水膠比 (0.4、0.5、0.6)，再生瀝青混凝土粒料取代量 (0%、50%、100%) 取代天然砂，爐石粉取代量 (0%、10%、20%) 取代水泥，於 28 天齡期進行新拌性質及硬固性質之探討，並做出以下幾點結論：

(一) 坍度與流度

- (1) 水膠比由 0.4 提升至 0.6，會使試體孔隙增加造成抗壓強度降低，因提高水膠比雖使水泥顆粒易於水化，可以產生較多的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 來促進卜作嵐反應的進行，但會使得試體之充水空間增加而產生大量的孔隙。
- (2) 再生瀝青混凝土粒料取代量增加，工作性會逐漸上升，因取代量的多寡進而影響坍度及流度，其主要因素為包裹著再生瀝青的膠泥與粒料經顎碎後比表面積上升，導致水泥砂漿內膠體的摩擦力下降與吸水率提升。
- (3) 爐石粉取代量增加，可以增加水泥砂漿坍度，因爐石粉比重略小於水泥，爐石粉以相等重量替代部分水泥時，膠結料總重量不變，但漿體實質佔有體積會增加，亦即漿體對骨材之體積比會因而提高，有助於混凝土之工作性。

(二) 抗壓試驗

- (1) 水膠比的提升會使水泥活性降低，與水化作用所析出的矽酸鈣水化物(Calcium silicate hydrate)鍵結反應不足，而導致水化產物減少，造成抗壓強度發展有限；低水膠比時，則因卜作嵐反應生成的水化產物較為高密度堆積因而產生為緻密現象，抗壓強度也較高水膠比有所提升。
- (2) 再生瀝青混凝土粒料取代量增加而降低，因再生瀝青之粒料外表包裹著少量的膠泥，使漿體內部摩擦力減少而導致強度下降；再生瀝青取代量越高，粒料表所包裹的膠泥含量越多，導致抗壓強度降低的幅度越大。
- (3) 爐石粉取代量增加而提升，因爐石粉以 CaO 與 SiO₂ 為主要成分，兼具膠結性與卜作嵐反應特性，能填充試體微孔隙而提高水密性及強度。

(三) 超音波波速

- (1) 同水膠比時，超音波波速隨著齡期增加而增加；再生瀝青取代量上升後，雖因瀝青膠泥與比表面積的增加，導致超音波波速下降，但隨時間的增加，在水化過程中，水泥用量不變，將產生 C-S-H 膠體與 CH 晶體填充試體孔隙後，使試體緻密，導致超音波波速的上升。
- (2) 再生瀝青混凝土粒料取代天然砂製成水泥砂漿，因漿體內粒料包裹著瀝青膠泥，使內部摩擦力下降，導致黏滯性下降，與粒料經由顎碎後比表面積上升，使內部漿體內部產生孔隙，故此導致超音波波速降低。
- (3) 爐石粉取代量由 0% 增加 20%，波速有上升之趨勢，因爐石粉以 CaO 與 SiO₂ 為主要成分，兼具膠結性與卜作嵐反應特性，能填充試體微孔隙而提高水密性及強度；爐石粉之水化作用較水泥為慢，添加爐石粉之配比於早齡期抗壓強度成長幅度較低；且添加爐石粉之配比在晚齡

期進行卜作嵐反應，產生 C-S-H 膠體填充試體內部孔隙，使試體有較佳緻密性，以添加 20% 爐石粉有較佳之超音波波速；添加 10% 爐石粉次之；0% 爐石粉最低。

(四) 實驗結果顯示，再生瀝青混凝土粒料取代量提升使漿體坍度上升、流度上升、強度下降、超音波波速下降，顯示 RAP 有以下特性

- (1) RAP 因破碎、顎碎後產生裂縫，使 RAP 的比表面積增加導致吸水率上升。
- (2) RAP 表面殘留少量瀝青膠泥，使試體內部結構摩擦力減少，但因瀝青膠泥為絕緣體，且少量瀝青膠泥會使試體表面緻密性提高。

參考文獻

1. 自由時報，即時新聞／綜合報導，「消耗量僅次於水！科學家示警：地球正面臨另 1 種資源匱乏」。
2. 蘋果日報，即時新聞／生活報導，「解瀝青廢料環保問題 營建署推新工法」。
3. 鄭紹正，1999，熱拌再生瀝青混凝土配比設計之研究，中華大學大學土木工程學系，碩士論文。
4. 陳世晃、林志棟、徐聖博、簡啓倫，2019，瀝青刨除料去化-推動冷拌再生瀝青混凝土之應用，土木水利，第四十六卷，第五期，第 43-44 頁。
5. 廖文軒，2018，再生瀝青混凝土添加再生劑之成效分析，國立中央大學土木工程學系，碩士論文。
6. 遊景年，2017，冷拌再生瀝青混凝土應用於道路管線挖掘回填工程之現地驗證，國立中央大學土木工程學系，碩士論文。
7. 梁賢文，2019，熱拌瀝青混凝土工程 施作應注意事項，經濟部 108 年度工程施工查核檢討會，經濟部國營事業委員會，第 77 頁。
8. 王啟人，2011，溫拌再生瀝青混凝土工作性評估，淡江大學土木工程學系，碩士論文。

含飛灰粉之再生瀝青水泥砂漿工程性質研究

陳世豪¹ 陳聖仁²

¹ 國立高雄科技大學土木工程系教授

² 國立高雄科技大學土木工程系碩士生

摘要

隨著人類的發展，便利的科技伴隨著環境汙染及大量有害廢棄物的產生，例如火力發電所產生的飛灰、鋼鐵煉製所產生的爐石和道路刨除的廢瀝青料等等工業廢棄物，這些工業廢棄物既會對環境造成汙染，現今作法是找塊地來做掩埋，但是台灣地狹人稠，適合的地方難尋，即使找到適合掩埋的土地，也需要數年甚至數十年的分解，因此活化工業廢棄物，不但能減少掩埋的量，還可以讓環境更好。

本研究採用水膠比(W/B) 0.5，使用再生瀝青混凝土粒料以不同取代量(0%、50%及100%)；飛灰粉以不同取代量(0%、10%及20%)，以再生瀝青混凝土粒料取代天然砂與飛灰粉取代水泥製成水泥砂漿，探討其工程性質之影響，評估以再生瀝青混凝土粒料取代天然砂與飛灰粉取代水泥之可行性評估，尋找可用之處，讓工業副產品可以資源再利用。

根據結果顯示，以再生瀝青混凝土粒料取代天然砂並添加飛灰粉取代部分水泥，流度與坍度有提升之趨勢，可以增加工作性。硬固性質部分，抗壓強度隨再生瀝青混凝土粒料取代量增加而有降低之趨勢；隨飛灰粉取代量增加而降低。每個配比在超音波波速部分皆達到3500m/s以上，顯示添加飛灰粉能使試體有良好的緻密性與低滲透性，能使試體有較佳之耐久性。

關鍵字：再生瀝青混凝土粒料、天然砂、飛灰粉、水泥砂漿、工業副產品、工程性質

The Study on Engineering Properties of Recycled Asphalt Cement Mortars with Fly Ash

Chen Shyh-Haur¹ Chen Sheng-Ren²

¹ Institute of Civil Engineering National Kaohsiung University of Science and Technology

² Institute of Civil Engineering National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

With the development of mankind. Convenient technology is accompanied by environmental pollution and the generation of a large amount of hazardous waste. For example, industrial wastes such as fly ash from thermal power generation, furnace stone from steel refining, waste asphalt from road scraping, etc. These industrial waste not only causes environmental pollution. The current practice is to find a piece of land to bury, But Taiwan's densely populated, hard to find a suitable place. Even if you find land suitable for burying. Also take years or even decades of decomposition. Therefore, the activation of industrial waste. Not only can reduce the amount of burial, it can also make the environment better.

This study uses water-binder ratio (W/B) 0.5. Use recycled asphalt pavement with different

replacement amounts (0%, 50% and 100%) and fly ash powder is replaced by different amounts (0%, 10% and 20%). Use recycled asphalt concrete pellets instead of natural sand and fly ash powder to replace cement to make cement mortar, explore the impact of its engineering properties, evaluate the feasibility of using recycled asphalt concrete pellets to replace natural sand and fly ash powder to replace cement, and look for available Where, industrial by-products can be reused as resources.

According to the results, replacing natural sand with recycled asphalt concrete pellets and adding fly ash powder to replace part of the cement has a tendency to increase fluidity and slump, which can increase workability. For the hard part, the compressive strength tends to decrease with the increase of the replacement amount of recycled asphalt concrete pellets.

Keywords: recycled asphalt pavement natural sand, fly ash, cement mortar, industrial by-product, engineering nature

一、摘要

自從工業革命以來，科技日新月異的出現，高速發展也伴隨著高汙染，例如臭氧層破洞、二氧化碳的排放量快速上升和海平面上升等環境議題，近年來環保意識高漲，越來越多的人開始重視這類議題，力求「永續發展」，如何節能減碳和減少工業廢棄物產生將是全世界最大的課題。

根據統計全世界水泥業所製造的二氧化碳排放量，佔所有溫室氣體排放量的 5~7%，對環境有不小的影響，生產 1 噸的水泥將會產生 0.85 噸的二氧化碳，而全世界每年生產大約 38 億噸水泥 [1]，如何減少二氧化碳排放量及工業廢棄物的產量將是未來努力的方向。

全世界都在研究各種工業廢棄物添加在混凝土中，試圖找出改善混凝土的特性和品質，而台灣火力發電廠每年約產出 100 萬公噸的飛灰，這些飛灰拿來利用不但可以解決砂石料短缺的問題之外，還可降低成本，根據研究結果來看添加適當飛灰、爐石等工業副產品取代部分水泥或砂，在工程品質和經濟效益上都較傳統水泥優良 [2]。

除了全球暖化及工業廢棄物處理外，砂石也日益匱乏，跟水類似，看似隨手可得的東西，然而全球每年對沙子消耗量僅次於水，對沙子的需求量大，雖然不太可能很快消失，但是這種資源正逐漸流失，除了土木工程產

業需要外，在高科技產業中，也用來製造製作電腦螢幕、智慧型手機的玻璃和 IC 矽晶圓等 [3]。

台灣公路網四方八達，每年柏油路刨除重鋪所造成的瀝青廢料，容易造成環保與工程管理問題 [4]，隨著臺灣每年道路總長及面積逐年增加，瀝青混凝土使用量亦逐年增加成長，而熱拌再生瀝青混凝土在法規的限制下，瀝青刨除料添加上限為 40%，剩餘之刨除料只能堆置於廠內，導致多年來各縣市之廠商陸續貯存之刨除料已達飽和，進而衍伸出相關環保的問題，其如何去化與資源再利用也是目前產官學界積極尋解決的一個重大問題[5]，近年來國內環保意識高漲，使得地點更加難以尋找，除了地點外，工程界又普遍存在砂石短缺的問題，因此找尋舊瀝青路面回收料的用途，不但可使道路工程砂石需求量降低，並且可解決刨除料棄置堆放問題，故再生工法遂成為國內公路工程界迫切推動的工法 [6]。

本研究綜合上述內容，試圖將再生瀝青取代部分砂石，搭配工業廢棄物，以及不同取代量及水膠比，探討其工程性質，評估此研究之可用性，以提供瀝青及工業廢棄物的再利用。

二、試驗計畫

本研究使用再生瀝青混凝土粒料與取代天然砂與飛灰粉取代水泥所製成水泥砂漿進

行研究與探討。

再生瀝青混凝土粒料使用道路所刨除後之廢料，經過顎碎處理後，再生瀝青混凝土粒料以不同取代量 0%、50% 及 100% 取代天然砂；飛灰粉以不同取代量 0%、10% 及 20% 取代水泥，在水膠比 (W/B) 部分選用 0.5，將其製作做成砂漿試體，放置於飽和石灰水養護，針對其試驗過程中，進行水泥砂漿新拌性質試驗 (坍度及流度)，並於試體齡期 28 天進行硬固性質試驗 (抗壓強度及超音波速)，探討以再生瀝青取代天然砂與飛灰粉取代水泥之工程性質影響因素。

三、試驗材料與項目

3-1 試驗材料

(一) 水泥(Cement):採用卜特蘭第 I 型水泥，其性質符合 CNS 61 (ASTM C150)，比重為 3.15，細度為 3480cm²/g，其材料外觀如圖 1 所示。



圖 1.水泥

(二) 再生瀝青混凝土粒料(Reclaimed Asphalt Pavement):本研究所使用之再生瀝青為路面刨除工程，刨除後之路面刨除料，經研磨後形成細粉狀之再生瀝青材料，其材料外觀如圖 2 所示。

(三) 飛灰 (Fly ash): 本次所採用的飛灰為台灣電力興達火力發電廠生產的 F 級飛灰，品質符合 ASTM C618 及 CNS 3036 之規範，其材料外觀如圖 3 所示。

(四) 細骨材(Fine Aggregate):本次細骨材選自里港溪之河砂，根據 CNS 486 規範檢測，其

面乾內飽和比重符合 CNS 1240 混凝土粒料之要求規定，面乾內飽和比重為 2.68，吸水率為 2.0%，其材料外觀如圖 4 所示。



圖 2.再生瀝青混凝土



圖 3.再生瀝青混凝土



圖 4.天然砂

3-2 試驗項目

(一) 坍度試驗：本試驗參考 ASTM C109 規範之規定進行試驗，利用迷你坍度錐進行試

驗，目的以坍度法測定新拌水泥砂漿之稠度，判斷砂漿之工作度。

(二) 流度試驗：本試驗參考 ASTM C109 規範之規定進行試驗，利用迷你坍度錐進行試驗，目的以坍度法測定新拌水泥砂漿之稠度，判斷砂漿之工作度。

(三) 抗壓試驗：本試驗所依據之準則參考美國材料試驗學會 ASTM C109 規範規定。本試驗使用 30 噸自動化混凝土抗壓試驗機，具有手動控制加壓與自動控制加壓系統及記錄數據，並可設定適合試體之加壓速率與範圍，作為試體力學強度參考依據。

(四) 超音波波速：本試驗所採用之超音波檢測儀符合 ASTM C597 規範規定，用以量測超音波通過試體內部之時間，依據超音波在不同物質中傳遞速度之特性，了解試體內部狀況。

四、結果與分析

4-1 坍度試驗

(一) 結果由表 1 顯示。

表 1 W/B 0.5 不同取代量之坍度(Unit: cm)

RAC(%)	FLY (%)	W/B
		0.5
0	0	1.3
	10	1.9
	20	2.4
50	0	1.9
	10	2.5
	20	2.9
100	0	2.5
	10	3.2
	20	4.0

1. 再生瀝青混凝土粒料取代量：

如表 1 所示，在 W/B 0.5，再生瀝青取代量 0%、與飛灰粉取代量(0%、10%及 20%)之坍度分別為 1.3、1.9 及 2.4cm；再生瀝青混凝土粒料取代量 50%、與飛灰粉取代量(0%、10%及 20%)之坍度分別為 1.9、2.5 及 2.9cm；再生瀝青混凝土粒料取代量 100%、與飛灰粉取代量(0%、10%及 20%)之坍度分別為 2.5、3.2 及 4.0cm，根據上述當取代量 0%提升至

100%時，坍度分別增加 1.2、1.3 及 1.6cm，顯示坍度隨再生瀝青混凝土粒料取代量增加而增加。

2. 飛灰粉取代量：

如表 1 所示，在 W/B 0.5，飛灰粉取代量 0%、與飛灰粉取代量(0%、50%及 100%)之坍度分別為 1.3、1.9 及 2.5cm；飛灰粉取代量 10%、與飛灰粉取代量(0%、50%及 100%)之坍度分別為 1.9、2.5 及 3.2cm；飛灰粉取代量 20%、與飛灰粉取代量(0%、50%及 100%)之坍度分別為 2.4、2.9 及 4.0c，根據上述當取代量 0%提升至 20%時，坍度分別增加 0.9、1.0 及 1.5cm，顯示添加飛灰可以增加水泥砂漿坍度，有助於混凝土之工作性。

3. 小結：

綜合上述變數影響之結果，再生瀝青混凝土粒料與飛灰粉取代量增加，使坍度有提升之趨勢，連帶使得整體工作性變佳。

4-2 流度試驗

(一) 結果由表 2 顯示。

表 2 W/B 0.5 不同取代量之流度(Unit: cm)

RAC(%)	FLY(%)	W/B
		0.5
0	0	17.0
	10	17.3
	20	17.7
50	0	18.3
	10	18.7
	20	19.2
100	0	20.2
	10	22.1
	20	23.9

1. 再生瀝青混凝土粒料取代量：

如表 2 所示，在 W/B 0.5，再生瀝青混凝土粒料取代量 0%、與飛灰粉取代量(0%、10%及 20%)之流度度分別為 17.0、17.3 及 17.7cm；再生瀝青混凝土粒料取代量 50%、與飛灰粉取代量(0%、10%及 20%)之流度分別為 18.3、18.7 及 19.2cm；再生瀝青混凝土粒料取代量 100%、與飛灰粉取代量(0%、10%及 20%)之流度分別為 20.2、22.1 及 23.9cm，根據上述當取代量 0%提升至 100%

時，流度分別增加 3.2、4.8 及 5.2cm，顯示流度隨再生瀝青混凝土粒料取代量增加而增加。

2. 飛灰粉取代量：

如表 2 所示，在 W/B 0.5，飛灰粉取代量 0%、與飛灰粉取代量(0%、50%及 100%)之流度分別為 1.3、1.9 及 2.5cm；飛灰粉取代量 10%、與飛灰粉取代量(0%、50%及 100%)之流度分別為 1.9、2.5 及 3.2cm；飛灰粉取代量 20%、與飛灰粉取代量(0%、50%及 100%)之流度分別為 2.4、2.9 及 4.0 cm，根據上述當取代量 0%提升至 20%時，坍度分別增加 0.9、1.0 及 1.5cm，顯示添加飛灰可以增加水泥砂漿坍度，有助於混凝土之工作性。

3. 小結：

綜合上述變數影響之結果，再生瀝青混凝土粒料與飛灰粉取代量增加，使流度有提升之趨勢，連帶使得整體工作性變佳。

4-3 抗壓試驗

(一) 結果由表 3 顯示。

表 3 W/B 0.5 不同取代量在 28 天之抗壓強度 (Unit: MPa)

RAC(%)	FLY (%)	W/B
		0.5
0	0	50.2
	10	48.5
	20	43.5
50	0	28.8
	10	27.2
	20	26.2
100	0	19.4
	10	17.4
	20	15.6

1. 再生瀝青混凝土粒料取代量：

如表 3 所示，在 W/B 0.5，再生瀝青混凝土粒料取代量 0%與飛灰粉取代量(0%、10%及 20%)之抗壓強度分別為 50.2、48.5 及 43.5 MPa；再生瀝青混凝土粒料取代量 50%、與飛灰粉取代量(0%、10%及 20%)之抗壓強度分別為 28.8、27.2 及 26.2 MPa；再生瀝青混凝土粒料取代量 100%、與飛灰粉取代量(0%、10%及 20%)之抗壓強度分別為 19.4、17.4 及 15.6 MPa，根據上述當取代量 0%提升至

100%時，抗壓強度分別降低 30.8、31.1 及 27.9 MPa，顯示抗壓強度隨再生瀝青混凝土粒料取代量增加而降低，因為再生瀝青混凝土粒料外表所包裹著少量的瀝青膠泥，造成試體內部結構較不緊密而使抗壓強度降低。

2. 飛灰粉取代量：

如表 3 所示，在 W/B 0.5，飛灰粉取代量 0%、與再生瀝青混凝土粒料取代量(0%、50%及 100%)之抗壓強度分別為 50.2、28.8 及 19.4 MPa；飛灰粉取代量 10%、與再生瀝青混凝土粒料取代量(0%、50%及 100%)之抗壓強度分別為 48.5、27.2 及 17.4 MPa；飛灰粉取代量 20%、與再生瀝青混凝土粒料取代量(0%、50%及 100%)之抗壓強度分別為 43.5、26.2 及 15.6 MPa，根據上述當取代量 0%提升至 20%時，抗壓強度分別降低 6.7、2.6 及 3.8 MPa，添加飛灰粉之配比雖然能填充試體內部孔隙，使試體有較佳緻密性，但添加再生瀝青混凝土外表所包裹著少量的瀝青膠泥，使得飛灰的作用性降低，加上飛灰使用量增加，使得水泥用量減少，造成試體內部結構較純水泥用量差，而使抗壓強度降低。

3. 小結：

綜合以上變數影響之結果，最主要影響抗壓強度還是天然砂含量的多寡，隨著再生瀝青混凝土取代量的增加，對於抗壓強度有著致命性的影響；添加飛灰粉，雖然可以增加是體緻密性，因在早齡期中具有緩凝的效果，以至於強度成長較緩

4-4 超音波試驗

(一) 結果由表 4 顯示。

1. 再生瀝青混凝土粒料取代量：

如表 4 所示，在 W/B 0.5，再生瀝青混凝土粒料取代量 0%、與飛灰粉取代量(0%、10%及 20%)之超音波波速分別為 4520、4438 及 4325 m/s；再生瀝青混凝土粒料取代量 50%、與飛灰粉取代量(0%、10%及 20%)之坍度分別為 4325、4165 及 4045 m/s；再生瀝青混凝土粒料取代量 100%、與飛灰粉取代量(0%、10%及 20%)之坍度分別為 3948、

3906 及 3886 m/s，根據上述當取代量 0% 提升至 100% 時，坍度分別增加 4520、4438 及 4325 m/s，顯示超音波波速隨再生瀝青混凝土粒料取代量增加而降低，因為再生瀝青混凝土粒料外表所包裹著少量的瀝青膠泥，造成試體內部結構產生孔隙而使超音波波速降低。

表 4 W/B 0.5 不同取代量在 28 天之超音波波速(Unit: m/s)

RAC(%)	FLY (%)	W/B
		0.5
0	0	4520
	10	4438
	20	4325
50	0	4325
	10	4165
	20	4045
100	0	3948
	10	3906
	20	3886

2. 飛灰粉取代量:

如表 4 所示，在 W/B 0.5，飛灰粉取代量 0%、與再生瀝青混凝土粒料取代量(0%、50%及 100%)之超音波波速分別為 4520、4325 及 3948 m/s；飛灰粉取代量 10%、與再生瀝青混凝土粒料取代量(0%、50%及 100%)之超音波波速分別為 4438、4165 及 3906 m/s；飛灰粉取代量 20%、與再生瀝青混凝土粒料取代量(0%、50%及 100%)之超音波波速分別為 4325、4045 及 3886 m/s，根據上述當取代量 0% 提升至 20% 時，超音波波速分別降低 572、532 及 439 m/s，添加飛灰粉之配比雖然能填充試體內部孔隙，使試體有較佳緻密性，但添加再生瀝青混凝土粒料外表所包裹著少量的瀝青膠泥，使得飛灰的作用性降低，使得超音波波速有降低之趨勢。

3. 小結:

綜合以上變數影響之結果，超音波波速的高低取決於試體結構的緻密性，當超音波波速提高，表示試體結構較為緻密。再生瀝青混凝土粒料取代量提升，會造成試體產生孔隙，使超音波波速下降；飛灰粉取代量增加，能使試體孔隙被填充使試體有較佳緻密

性，但因再生瀝青混凝土的影響，以致沒有明顯的作用，這點超音波波速與抗壓強度有相同之趨勢。

五、結論

根據試驗結果，本研究以水膠比 0.5，再生瀝青混凝土粒料取代量(0%、50%、100%)取代天然砂，飛灰粉取代量(0%、10%、20%)取代水泥，於 28 天齡期進行新拌性質及硬固性質之探討，並做出以下幾點結論：

- (一) 再生瀝青含飛灰粉之水泥砂漿之新拌性質，隨著飛灰取代量增加，工作性會逐漸上升，但再生瀝青混凝土粒料取代量的多寡進而影響坍度及流度，其主要因素為包裹著再生瀝青的膠泥，使水泥砂漿內膠體的摩擦力下降。
- (二) 抗壓強度隨著再生瀝青混凝土粒料取代量增加而降低，因再生瀝青殘有膠泥，水泥及飛灰等粒料無法緊密結合，始試體結構緻密性低，造成強度下降。
- (三) 添加飛灰雖具有填滿試體內部孔隙的功用，因再生瀝青瀝青殘膠的影響，使得飛灰的作用效果不如以往。

參考文獻

1. Adina Bosoaga ,Ondrej Masek, John E.Oakey,2009,“CO2 Capture Technologies for Cement Industry”,Energy Procedia 1(1),pp.133-140.
2. 廖盈如，2013，不鏽鋼還原渣應用於預拌土壤材料之工程性質研究，國立高雄應用科技大學土木工程與防災科技研究所，碩士論文。
3. 自由時報，即時新聞／綜合報導，「消耗量僅次於水！科學家示警：地球正面臨另 1 種資源匱乏」。
4. 蘋果日報，即時新聞／生活報導，「解瀝青廢料環保問題 營建署推新工法」。
5. 中華民國內政部營建署-主題報導/專題報導/35196-為利瀝青剷除料去化-推動冷拌再生瀝青混凝土試辦
6. 鄭紹正，1999，熱拌再生瀝青混凝土配比設計之研究，中華大學大學土木工程學系，碩士論文。

鋼纖維運用在梁上線彈性行為探討

陳世豪¹ 游鎮瑞² 李瀚全³

¹ 國立高雄科技大學土木工程系教授

² 國立高雄科技大學土木工程系碩士生

³ 國立高雄應用科技大學土木工程系碩士生

摘要

在一般混凝土常見的試驗中通常主要考慮抗壓強度，但當混凝土用在結構物柱、樑、牆、板等則還需要考慮抗壓抗拉抗彎曲。當中又有較特別使用性的規定裂縫不能太大影響使用者感官。現代為了提高結構物強度常在混凝土中添加一些纖維摻料來改善混凝土強度、工作性等，其中添加鋼纖維不僅可以提高混凝土抗拉強度，也可以在混凝土受拉產生裂縫時提供拉力減少混凝土產生裂縫的大小，因此本篇想要利用鋼纖維混凝土 E 值推估混凝土在彈性階段鋼纖維含量增加對混凝土產生的影響，後續在於研究中利用實驗探求鋼纖維混凝土在微裂縫階段和破壞階段的強度及裂縫變化趨勢。

關鍵字：鋼纖維、分析模擬

Discussion on Linear Elastic Behavior of Steel Fiber Applied to Beam

Shyh-Haur Chen¹ Zhen-Ray Yu² Han-Cyuan Li³

¹Institute of Civil Engineering National Kaohsiung University of Science and Technolog

²Institute of Civil Engineering National Kaohsiung University of Science and Technolog

³Institute of Civil Engineering National Kaohsiung University of Science and Technolog

ABSTRACT

In the common tests of general concrete, compressive strength is usually mainly considered, but when concrete is used in structural columns, beams, walls, slabs, etc., it is also necessary to consider compressive, tensile and bending resistance. Among them, there is a more special specification that the cracks should not affect the user's senses too much. In order to improve the strength of the structure, some fiber admixtures are often added to the concrete to improve the strength and workability of the concrete. The addition of steel fiber can not only increase the tensile strength of the concrete, but also provide tensile force when the concrete is tensioned and cracks are generated to reduce the production of concrete. The size of the cracks, so this article intends to use the steel fiber concrete E value to estimate the impact of the increase in the steel fiber content of the concrete in the elastic stage on the concrete. The follow-up is to use experiments in the student master thesis to explore the micro-crack stage and the failure stage of the steel fiber concrete The strength and crack change trend.

Keywords: steel fiber, simulation

一、前言

混凝土為水、水泥、粗細粒料拌合而成之複合材料具有高抗壓強度、耐久性、耐火性等眾多優點。但混凝土有一個極大的缺點就是抗拉強度極低只有抗壓強度的 $1/8\sim 1/10$ [1]因此在結構物中常添加鋼筋來增加混凝土抗拉強度，近十年更衍生出添加摻料來提高混凝土的抗拉性質。本篇文章探討加入鋼纖維來提高混凝土抗拉強度，減少梁在載重下產生的撓度。

在 20 世紀初期時有許多學者開始研究纖維混凝土的應用，直到 1960 年代後纖維混凝土才開始普遍使用在工程上[2]。鋼纖維混凝土(Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC)即在混凝土中添加鋼纖維形成複合材料改善原本混凝土抗拉強度極低的問題。本篇文章主要探討鋼纖維含量不同時影響混凝土強度楊氏模數(Young's modulus)變化，在彈性階段中的纖維含量變化對混凝土樑的影響及增加強度的效益。並將鋼纖維假設應用在不同形式的梁，探討其纖維對各梁之影響。

二、試驗計畫

2-1 使用分析軟體

本篇文章主要使用 Abaqus 套裝軟體進行有限元素分析。Abaqus 為 SIMULIA 產品線下的結構分析軟體，可以分析動態、靜態下結構的應力與位移，也可以模擬熱學、聲學、土壤力學...等[3]。

Abaqus 在建立有限元素模型時有許多種狀況，分別對應的模型也不太相同，有時候選錯模型會造成分析結果有不可容忍之誤差，如表 2.1 所示。常見的有限元素模型有一階元素模型減積分 C3D8R、非協調式元素 C3D8I、二階元素 C3D20。造成表 2.1 之誤差可能為以下幾種[4]。

- (一) C3D8 不適用元素受到彎舉力之情況
- (二) C3D8R 厚度方向網格需大於 4 層否則必須使用沙漏控制
- (三) C3D8I 及 C3D20 皆有良好控制

此文章主要利用 Abaqus 靜態分析梁在載重下的應力行為且材料還在線彈性階段中。因繪製梁的模型厚度方向網格少於 4 格如圖 2.2 所示，因此依照軟體建議使用非協調形元素 C3C8I 進行模擬。主要對照組分成以下兩類：

- (一) 控制不同纖維含量：在不同纖維含量對照不同的鋼纖維混凝土之 E 值，探討 E 值對梁產生之撓度影響變化情形。
- (二) 控制梁之跨深比：梁在不同跨深比時使用相同的鋼纖維含量，探討其應力及撓度的影響變化情形。

表 2.1[4]

元素形式	網格尺寸(深*長)			
	1*4	2*4	4*4	8*16
C3D8	0.035	0.034	0.034	0.364
C3D8R	**	1.306	1.050	1.016
C3D8R*	0.985	0.985	0.985	1.000
C3D8I	0.985	0.985	0.985	1.000

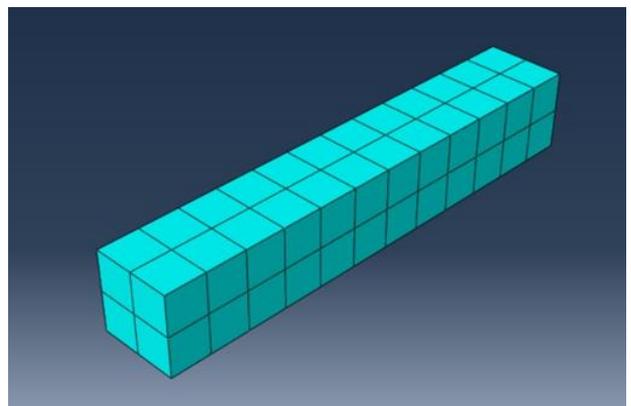


圖 2.2

2-2 根據設計方法

本篇文章主要根據 Rilem 設計，Rilem 是國際材料與結構研究實驗的委員會，提供材料與結構的相關知識[5]。鋼纖維混凝土抗壓強度標準試驗如下表 2.3、2.4，設計之原則根據 28 天的特徵強度，鋼纖維混凝土抗壓強度分類。利用表中 E 值及其特徵抗壓強度和特徵彎曲抗拉強度利用材料力學公式推求其混凝土柏松比。

表 2.3

SFRC 強度	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45
f_{fck}	20	25	30	35
f_{fctm}	3.7	4.3	4.8	5.3
f_{fctk}	2.6	3.0	3.4	3.7
E_{fcm}	29000	30500	32000	33500

單位(N/mm²)

表 2.4

SFRC 強度	C40/50	C45/55	C50/60
f_{fck}	40	45	50
f_{fctm}	5.8	6.3	6.8
f_{fctk}	4.1	4.4	4.8
E_{fcm}	35000	36000	37000

單位(N/mm²)

2-3 設計模型

本篇文章主要探討鋼纖維運用在梁上的效益，而結構梁主要承受力量為彎矩，因此在模擬分析時對照三點彎曲試驗在梁距離兩邊支承 1/3 處分別施加一向下集中力 50Mpa 的載重，且支承設置為簡支承，一端設置滾支承限制其 Y 方向變位，另一端設置為鉸支承限制其 X、Y、Z 方向變位如圖 2.5。

在第一種對照試驗中試驗變數為使用不同強度之鋼纖維，因此控制其梁模型為 40mm*40mm*240mm 並探討在不同強度纖維下的最大應力及變位情形。

第二種對照試驗中試驗變數為梁跨深比，因此分別設計跨深比為 4、5、6 並探討在各種不同尺寸下的最大應力及變位情形。

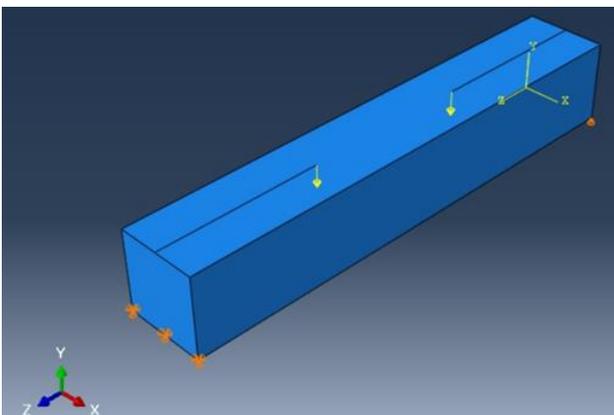


圖 2.5

三、結果分析與討論

3-1 控制使用不同強度纖維

- (一) 第一個模型使用 C20/25 的鋼纖維，E 值代 29000N/mm² 柏松比代入 0.13，分析結果如圖 3.1.1、3.1.2 可以看到最大應力值為 0.4Mpa 最大撓度為 0.0044mm。
- (二) 第二個模型使用 C30/37，E 值代 32000N/mm² 柏松比代入 0.11，分析結果如圖 3.2.1、3.2.2 可以看到最大應力為 0.4Mpa 最大撓度為 0.0039mm
- (三) 第三個模型使用 C45/55，E 值代 36000N/mm² 柏松比代入 0.098，分析結果如圖 3.3.1、3.3.2 可以看到最大應力值為 0.4Mpa 最大撓度為 0.0035mm

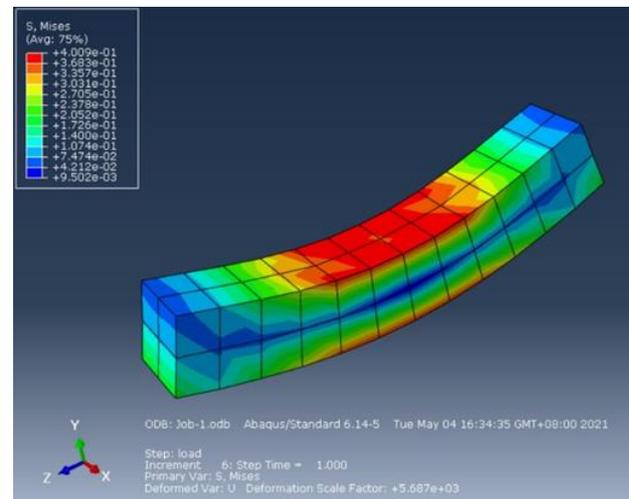


圖 3.1.1

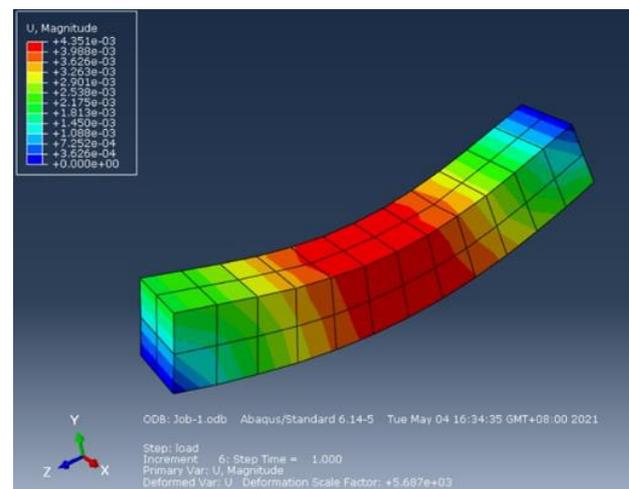


圖 3.1.2

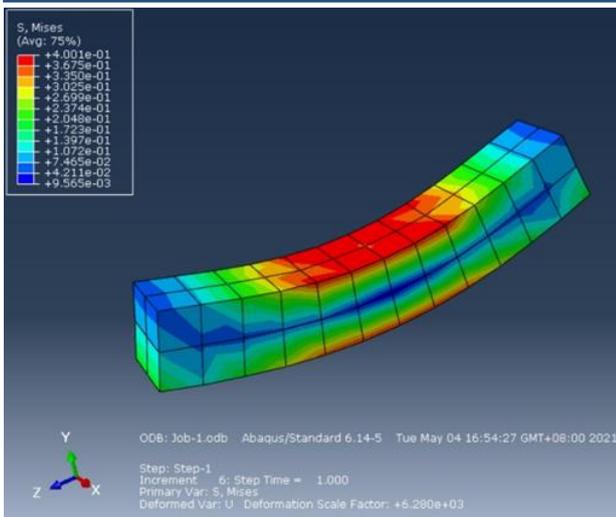


圖 3.2.1

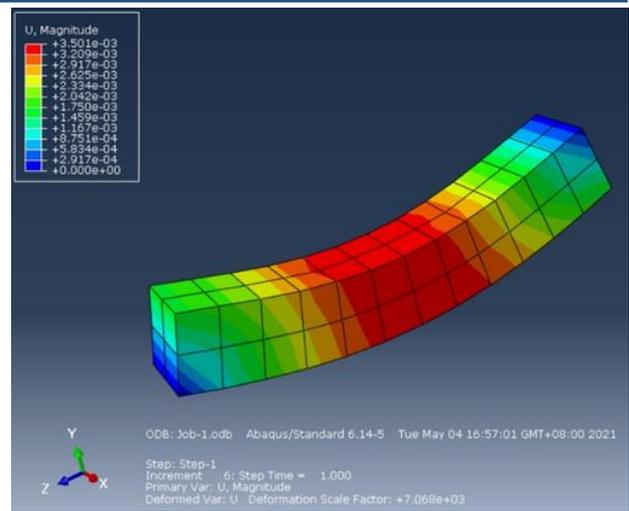


圖 3.2.2

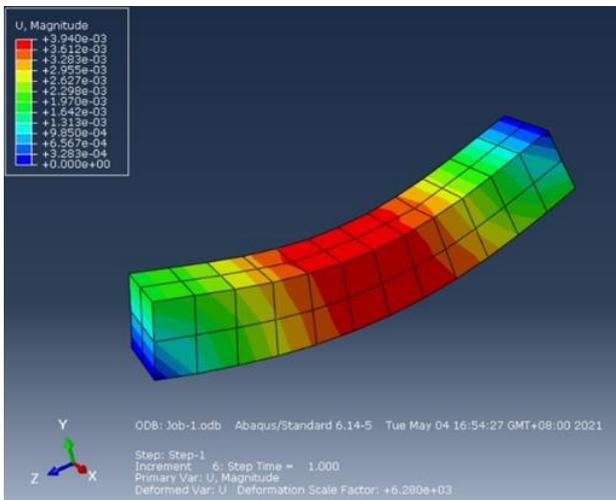


圖 3.2.2

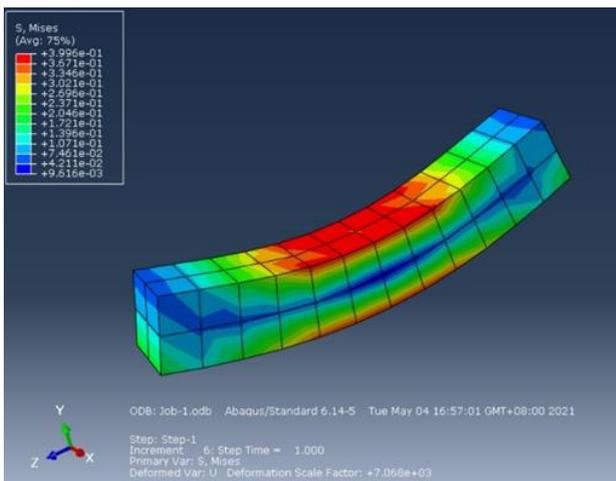


圖 3.3.1

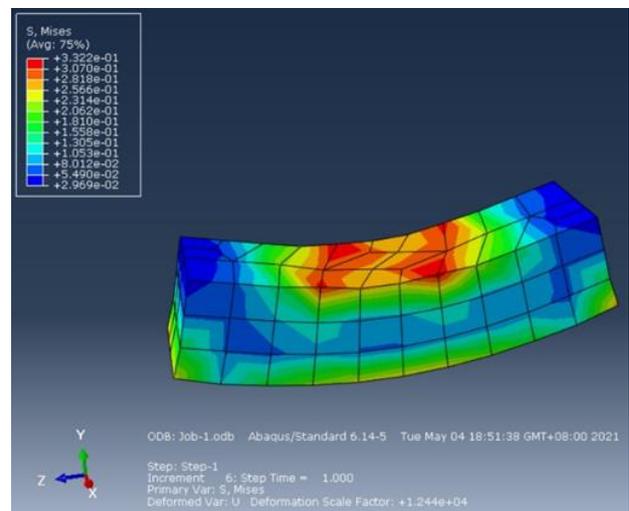


圖 3.4.1

3-2 控制梁之跨深比

模型使用 C30/37 的鋼纖維，E 值代 32000N/mm² 柏松比代入 0.11 且在不同跨深比下梁之最大應力及撓度 0.0014mm

(一) 第一個模型使用跨深比為 4 時模型為 40mm*40mm*160mm 時結果如圖 3.4.1、3.4.2 最大應力為 0.33Mpa 最大撓度為 0.0014mm。

(二) 第二個模型使用跨深比為 5 時模型為 40mm*40mm*200mm 時結果如圖 3.5.1、3.5.2 最大應力為 0.34Mpa 最大撓度為 0.0024mm。

(三) 第三個模型使用跨深比為 6 時模型為 40mm*40mm*240mm 時結果如圖 3.6.1、3.6.2 最大應力為 0.4Mpa 最大撓度為 0.0039mm。

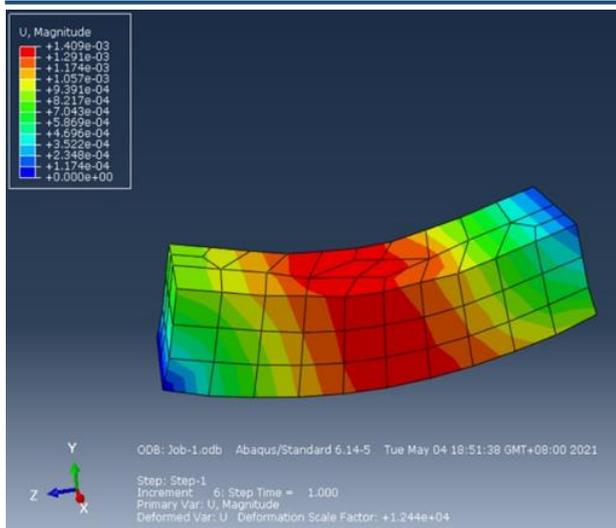


圖 3.4.2

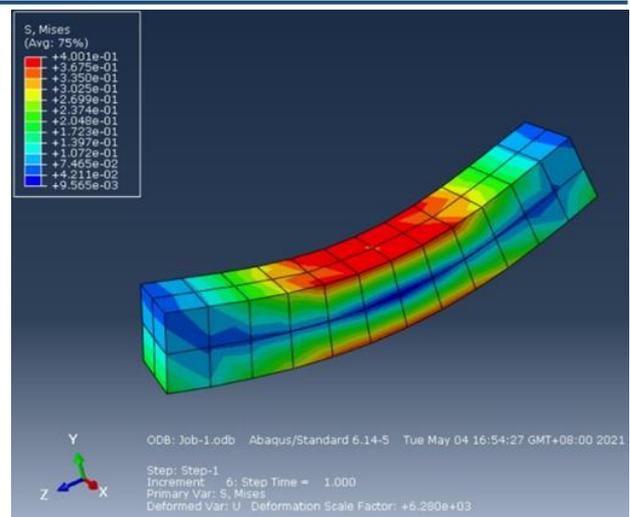


圖 3.6.1

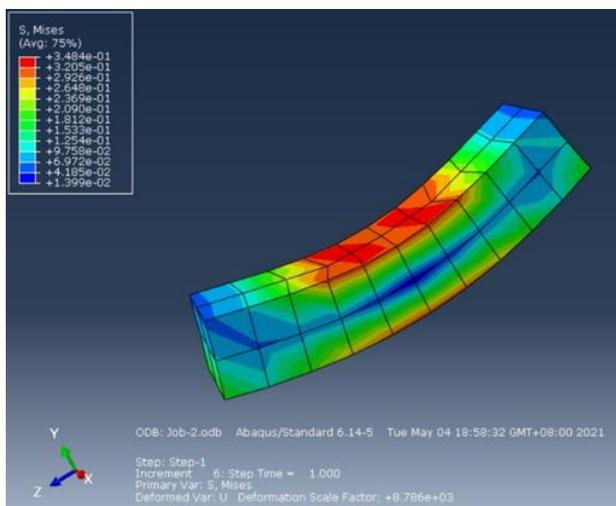


圖 3.5.1

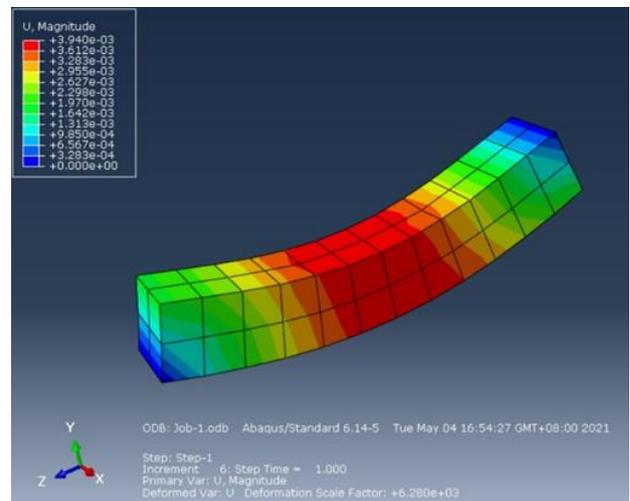


圖 3.6.2

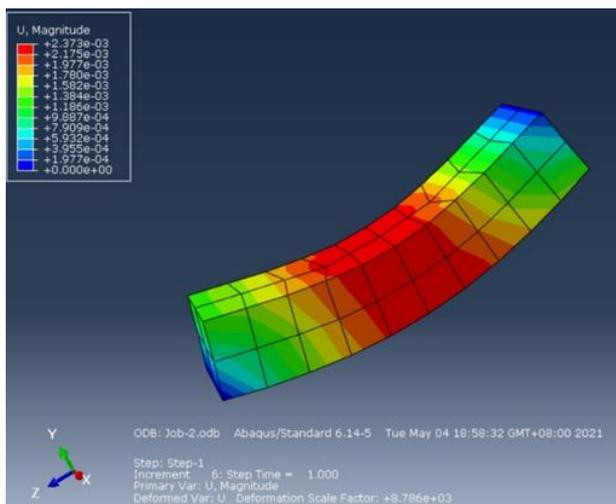


圖 3.5.2

四、結論

根據上述兩種變數可以得到以下結論:

- (一) 在使用 C20/25、C30/37、C45/55 三種不同鋼纖維混凝土配比材料時使用 E 值越低的鋼纖維混凝土雖然對應力不會造成巨大影響，但撓度相對明顯增加，因此使用強度較佳之鋼纖維混凝土可以減少混凝土梁在相同載重下產生之撓度。
- (二) 在使用相同型號之鋼纖維混凝土，梁的跨深比越大會產生較大的應力和撓度，因此在跨深比愈大的梁需要較強的鋼纖維混凝土來抵抗彎曲應力。

參考文獻

1. 維基百科. 混凝土. 2021; Available from: <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%B7%>

B7%E5%87%9D%E5%9C%9F.

2. 詹惠婷, 鋼纖維混凝土之影響與運用. 2021;
<https://sites.google.com/site/b9805118/qian-yan>
3. 士盟科技, Abaqus. 2021;
<https://simutech.com.tw/product-simulia-side-navo2.php?cid=1&kid=25>
4. 士盟瑞其 CAE 團隊, Abaqus Tips. 2021;
https://simutech.com.tw/uploads/ABQtip140502_057.pdf
5. 李瀚全, 鋼纖維混凝土預鑄環片在台灣之混凝土設計與分析初探. 2017. 碩士論文

鋼纖維混凝土梁之有限元素分析

王竣緯¹ 陳世豪² 熊彬成³

¹國立高雄科技大學土木工程系碩士班研究生

²國立高雄科技大學土木工程系副教授

³國立高雄科技大學土木工程系教授

摘要

混凝土是由水泥、骨材、水所拌合而成的材料，它具有較高的抗壓強度和較低的拉伸強度，同時也是脆性材料，如何增加抗拉強度與增加延性是研究混凝土一大課題。由於在混凝土材料中添加鋼纖維可以有效改善混凝土低延展性的缺點，近年來逐漸被各國所重視。本文透過 550mm*150mm*150mm 之鋼纖維混凝土缺口梁在三點彎曲試驗下的結果，利用 ABAQUS 軟體進行反算分析，探討鋼纖維混凝土的拉伸行為及相關的材料參數。

關鍵字：鋼纖維混凝土、有限元素、三點彎曲試驗

Finite Element Method of Steel Fiber Reinforced Concrete

Wang,Jun-Wei¹ Chen,Shyh-Haur² Hsiung,Bin-Cheng³

¹Graduate Student, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

²Associate Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

³Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

Concrete is a material composed of cement, aggregates, and water. It has high compressive strength and mixed tensile strength. It is also a brittle material. How to increase the tensile strength and increase the ductility of concrete is a lot of research. Study the response of a 550mm * 150mm * 150mm steel fiber concrete notched beam under a three-point bending test, and use ABAQUS software to simulate and study the tensile behavior of steel fiber concrete.

Keywords: steel fiber concrete, finite element, three-point bending test

一、概述

混凝土是由膠結材料、骨材、水及其他添加物按適當比例拌合，再經過一段時間硬化而成的材料，混凝土有著高硬度、高抗壓強度的優點且由於原料來源廣泛、成本低，是世界上最廣泛運用的土木建築材料，但是混凝土有著低抗拉強度、低抗彎強度且脆性的缺點。傳統上會利用鋼筋提供抗拉強度組成鋼筋混凝土彌補這些缺點。

所謂纖維混凝土是在混凝土中添加適量、離散之纖維的拌合而成的材料，改善了傳統混凝土低抗拉強度、低能量吸收、容易產生裂痕或發生瞬間斷裂的脆性反應等缺點，當混凝土承受之載重超過自身的極限強度時，會其位置產生裂縫，由於基材混凝土遭受破壞，而此時混凝土中的纖維會提供抗拉強度阻止裂縫進一步擴張而提升整體材料的極限應變。

與傳統上使用鋼筋混凝土的方式相比，纖維混凝土還有以下優點：

(一) 工時較短

由於鋼筋混凝土需要鋪設與綁紮鋼筋，而纖維混凝土可以減少部分鋼筋用量甚至完全不使用鋼筋，因此省下了鋼筋施工相關的時間及人力成本。

(二) 體積較小

在使用纖維混凝土的情況下由於沒有鋪設鋼筋，與鋼筋混凝土相比不需要外層約 5cm 的保護層，因此體積會相對減少且更加節省混凝土材料的用量。

影響了混凝土開裂後的機械性能的因素有基體強度，纖維類型，纖維取向，纖維強度，纖維的表面處理，纖維長徑比，纖維含量等。常使用的纖維有金屬纖維、玻璃纖維、聚合物纖維，本文以鋼纖維混凝土作為主要的研究對象。

二、鋼纖維混凝土材料特性

2-1 壓縮行為

由於在混凝土中添加纖維並不會對抗壓強度有明顯影響，在壓縮行為下的鋼纖維混凝土與普通混凝土具有相同的強度[1]。

2-2 拉伸行為

鋼纖維混凝土的拉伸行為分為以下三的階段[2]:

(一) 彈性階段

彈性階段是鋼纖維混凝土裂縫產生前的反應，此階段之特徵為應力值逐漸上升，此時的強度表現主要受混凝土影響。

(二) 微裂縫階段

在應力值超過混凝土的拉伸強度後開始形成裂縫，此階段之應力值開始下降，混凝土的承載開始轉移到鋼纖維上，與裂縫相交的鋼纖維透過橋接機制阻止裂縫進一步延伸。

(三) 宏觀裂縫階段

此階段為鋼纖維混凝土拉伸反應的最後階段，此時如果發生延性破壞反應則表示破壞是鋼纖維受到拉伸後失去與混凝土間的鏈結力造成拉拔破壞；如果發生脆性破壞反應則代表破壞主要是由於應力超過鋼纖維本身

之拉伸強度但小於鋼纖維與混凝土界面之剪力強度造成鋼纖維拉斷破壞。

三、實驗內容

由於單軸拉伸試驗需要特殊的設備與裝置來避免實驗誤差與錯誤，因此通常使用其他實驗間階獲取纖維混凝土的拉伸行為，例如：三點彎曲法、四點彎曲法取得載重-位移曲線(圖 1)後分析計算出 σ - w 曲線或是 σ - ε 曲線[1]。

$$f_{R,i} = \frac{3F_{L,i}L}{2bh_{sp}} \quad (1)$$

$f_{R,i}$: 殘餘抗彎強度

$F_{L,i}$: 相應裂縫寬度或撓度下之載重

L: 試驗支撐跨度

b: 試體寬度

h_{sp} : 梁頂至缺口尖端距離

本文根據 EN14651 進行三點彎曲法，其試體尺寸為長 550mm 寬 150mm 高 150mm 並於中央底部切開一槽口，其深度 25mm、寬度不超過 5mm，如圖 2、圖 3 所示。

四、有限元素分析與討論

4-1 參數計算與討論

本文以有限元素軟體 ABAQUS 軟體模擬鋼纖維混凝土在三點彎曲試驗下的力學行為如圖 4 所示，利用 Concrete damaged plasticity (CDP) 來定義鋼纖維混凝土的塑性行為，模擬所需基本參數如表 1 所示，彈性模數則以下列算式計算[2]。

$$E = 9500(f_{fcm})^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

f_{fcm} : 混凝土抗壓強度

ABAQUS 提供三種不同的模型來定義拉伸狀態下的塑性行為，分別是應變(圖 6)、裂縫寬度位移(圖 7)及斷裂能。由於應變模型有著較高的網格敏感度，容易導致模擬不收敛[1]，因此本文採用應力-裂縫寬度位移模型，如圖 8 所示。

σ_1 、 σ_2 、 σ_3 以下列算式計算， w_i 代表對應其應力之裂縫開口寬度，其中 $w_4 = 10\text{mm}$ [3]。

$$\sigma_1 = 0.7f_{fctm,fl}(1.6 - d) \quad (3)$$

$$\sigma_2 = 0.45f_{R1}K_h \quad (4)$$

$$\sigma_3 = 0.37f_{R4}K_h \quad (5)$$

$$K_h = 1 - 0.6 \frac{h-12.5}{47.5} \quad (6)$$

$f_{fctm,fl}$ ：混凝土彎曲特性拉伸平均強度

d ：有效深度，單位[m]

f_{R1} ：裂縫開口位移 0.5mm 之彎曲殘餘應力

f_{R4} ：裂縫開口位移 3.5mm 之彎曲殘餘應力

K_h ：尺寸因子

h ：梁的高度，單位[cm]

4-2 有限元素計算結果

(一)線彈性

其結果如圖 5 展示，彈性模數 E 以式(2)計算，普松比採 0.2。

(二)彈塑性分析

彈性模數及普松比同線彈性模型，彈塑性結果如圖 8 展示，圖 9 為梁中缺口中心之應力應變圖

五、結論與建議

- (一) 由於缺口梁其缺口會導致應力集中，所以從三點彎曲試驗可以更好的獲得鋼纖維混凝土的拉伸行為之反應。
- (二) 由式(3)可知混凝土初始開裂應力受鋼纖維混凝土抗拉強度影響。
- (三) 測試 σ - ε 與 σ - w 對混凝土彈塑性分析之間的差異。
- (四) 針對網格劃分測試最佳的網格尺寸及元素選擇做網格收斂分析以找出最佳的計算精度及效率。

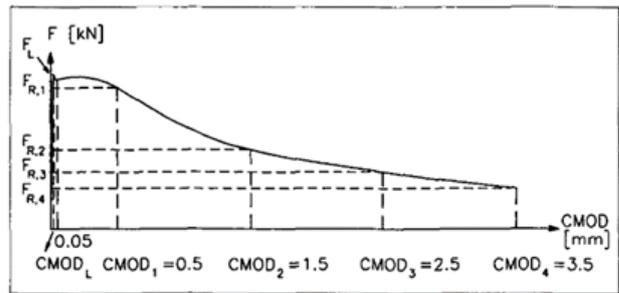


圖 1 載重-位移曲線[3]

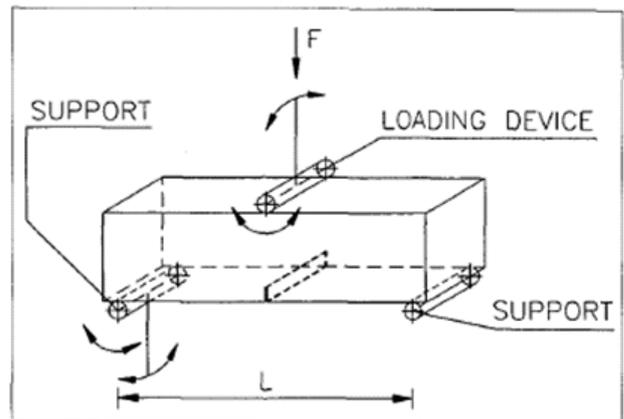


圖 2 缺口梁三點彎曲試驗示意圖[4]

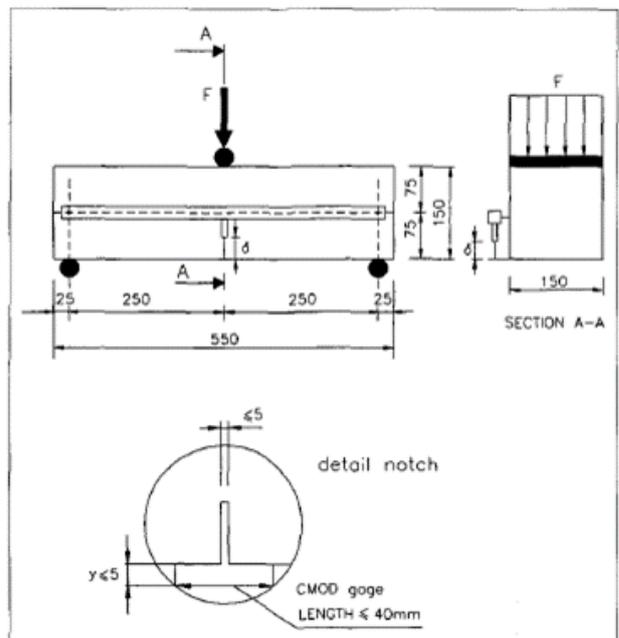


圖 3 缺口梁三點彎曲試驗試體尺寸[4]

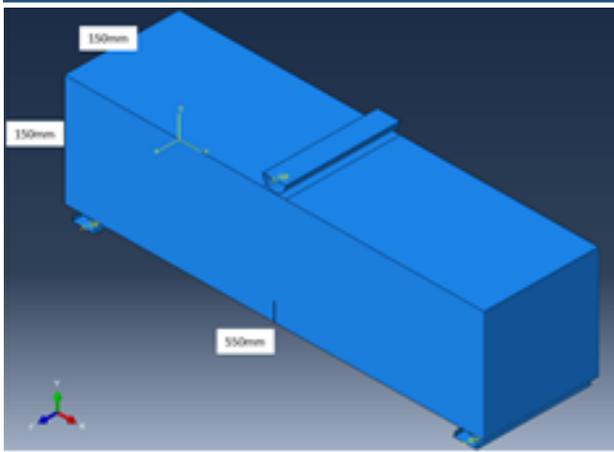


圖 4 ABAQUS 缺口梁三點彎曲試驗模型

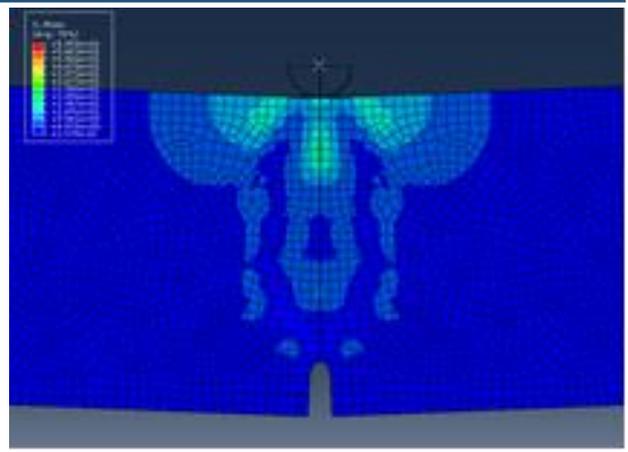


圖 8 彈塑性模型分析結果

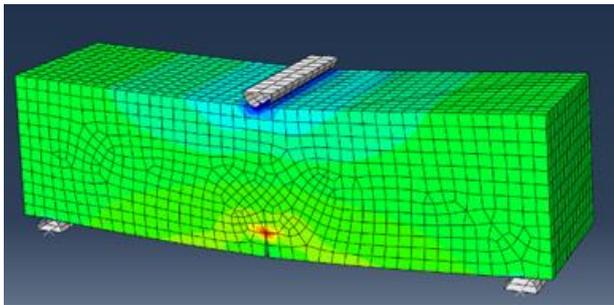


圖 5 三點彎曲試驗線彈性模型

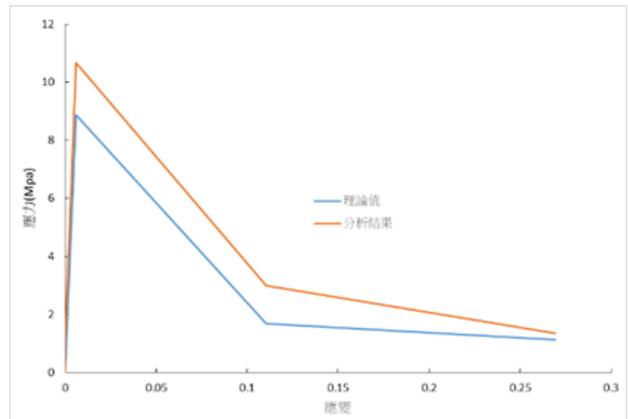


圖 9 梁之缺口拉伸應力應變曲線

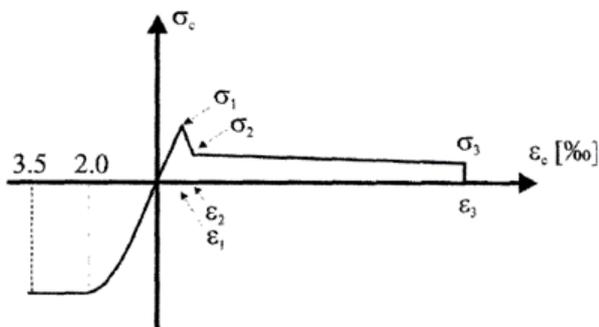


圖 6 鋼纖維混凝土 σ - ε 曲線[5][6]

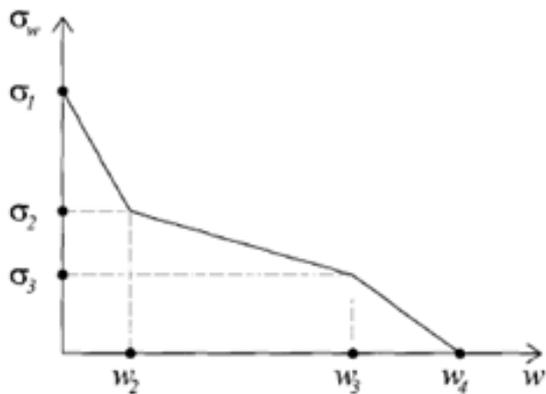


圖 7 σ -w 曲線圖[3]

參考文獻

1. Vandewalle, L. et al., Recommendations of RILEM TC162- TDF: 'Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete: bending test' (final recommendation), Mater. Struct, pp.579-582, 2002.
2. Zainal, S.M.I.S.; Hejazi, F.; Aziz, F.N.A.A.; Jaafar, M.S. Constitutive Modeling of New Synthetic Hybrid Fibers Reinforced Concrete from Experimental Testing in Uniaxial Compression and Tension. Crystals 2020, 10, 885.
3. RILEM Technical Committee, RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: σ - ε design method: Final Recommendation, Materials and Structures, pp.560-567, 2003.

4. Barros, J.A.O., Cunha, V.M.C.F., Ribeiro, A.F. et al. Post-cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete. *Mat. Struct.* 38, 47-56 (2005).
5. 李瀚全，鋼纖維混凝土預鑄環片在台灣之混凝土設計與分析初探。國立高雄應用科技大學土木工程與防災科技研究所碩士論文，高雄市，(2017)。
6. Abhaee, Sina, Investigation Of Fiber-Reinforced Concrete Crack Width Measurement By Finite Element Method,2017.

以雙向壓孔試驗探討鋼纖維含量對超高性能混凝土拉伸性質之影響

賴怡君¹ 李明輝² 戴毓修³

¹陸軍軍官學校土木工程系講師

²陸軍軍官學校土木工程系教授

³HiPer Fiber 工程師

摘要

超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)是一種新興的營建材料，除了具有高於 150 MPa 的超高抗壓強度，添加鋼纖維之後的拉伸力學行為也備受矚目。然而，這一特性是與所添加的纖維種類與體積含量密切相關。為了探討其對於 UHPC 拉伸行為的影響，本研究針對鋼纖維體積含量 1%、2%及 3%的 UHPC 試體進行試驗與分析。鑒於直接拉伸試驗(direct tensile test, DTT)在實驗的細節與架設有諸多的限制與操作不易，本研究採用雙向壓孔試驗(double punch test, DPT)進行 UHPC 的拉伸試驗。試驗結果顯示，隨著鋼纖維含量的增加，UHPC 的流動性將有降低的趨勢。儘管如此，對於較高鋼纖維體積分數的試體具有較顯著的初裂強度、極限拉伸強度與應變容量。此外，UHPC 的吸能性質與開裂後之破壞能也隨著鋼纖維含量而增加。相較於 1%體積含量的試體，當鋼纖維添加率為 3%時，能量吸收與破壞能將分別提升 418% 與 421%。

關鍵字：超高性能混凝土、鋼纖維、直接拉伸試驗、雙向壓孔試驗

Study on the Influence of Steel Fiber Content on the Tensile Properties of Ultra-high Performance Concrete by Double Punch Test

Lai Yi-CHun¹ Lee Ming-Hui¹ Tai Yuh-Shiou²

¹ Department of Civil Engineering, ROC Military Academy,

² HiPer Fiber LLC, Chief Technical Officer, Michigan

ABSTRACT

Ultra-high performance concrete (UHPC) is a rapidly emerging construction material with an exceptional compressive strength greater than 150 MPa. Its tensile behavior after adding steel fiber is also attracting attention. This characteristic, however, is closely related to the type and volume fraction of the added steel fibers. In order to explore its influence on the tensile properties of UHPC, this study investigated specimens with steel fiber volume content of 1%, 2%, and 3%, respectively. Given that there are many restrictions and challenging operations in the specifics and setup of the direct tensile test (DTT). In this study, a double punch test (DPT) was used to investigate the tensile behavior of UHPC. The test results show that as the content of steel fiber increases, the fluidity of UHPC would drop significantly. Despite this, the specimens with a higher volume fraction of steel fibers have more significant initial crack strength, ultimate tensile strength, and strain capacity. In addition, the energy absorption properties of UHPC and the

fracture energy after cracking also increase with the content of steel fiber. Compared with the specimen with a 1% volume fraction of steel fiber, when the steel fiber addition fraction is 3%, the energy absorption and fracture energy will be boosted by 418% and 421%, respectively.

Keywords: UHPC, steel fiber, direct tensile test, double punch test

一、前言

超高性能混凝土(UHPC)是一種超緻密水泥質複合材料，由不同粒徑的水泥、石英砂、石英粉、矽灰等混合堆積而成。由於極高的堆積密度，使得 UHPC 具有至少 150 MPa 的抗壓強度[1-3]。添加鋼纖維後，在拉伸試驗中除了呈現大於 8MPa 的拉伸強度之外，在初裂強度之後，材料將以多重極微小(< 10 μm)的裂紋逐漸開裂，呈現的應變硬化趨勢提供了高度的韌性與能量吸收特性。其它諸如高流度與良好的加工性、低滲透性，與極佳的耐久性[4-5]等，使得 UHPC 逐漸成為新一代建築材料。

為了探討 UHPC 的拉伸性質，許多的試驗方法已經被採用。例如直接拉伸試驗(Direct Tensile Test, DTT)是針對狗骨形狀的試體直接於兩端施加拉力，利用此一試驗方式可以直接獲得 UHPC 的拉伸強度、延性或是破壞能。然而，直接拉伸測試存在一些局限性和困難，包括難以確保軸向以外的自由度被完全拘束，較複雜的測試裝置，在標距長度內形成的局部裂紋，以及裂紋形成的不一致性，從而導致較高的變異性。間接拉伸試驗，如劈張試驗(Split Tensile Test, STT)或是雙向壓孔試驗(Double Punch Test, DPT)則相對是較容易且可靠的試驗方式[6]。然而，劈張試驗的主要缺點是試體的破壞將發生在給定的單一加載平面上。由於 UHPC 中的鋼纖維在試體內的取向和分佈是隨機的，纖維強化後所致的開裂面在劈張試驗中無法客觀的得到。此外，這一試驗方法亦無法獲得載重-變形曲線以用於比較不同類型的纖維和體積分數的後開裂(Post cracking)性能。

雙向壓孔試驗由 Chen [7]所提出，其主要是利用以小面積圓柱對試體上下平面施壓，在上下壓孔(Punches)正下方形成圓錐形的破

裂面，兩端面的破裂面隨載重施加相互靠近並徑向推動周圍的材料形成張力破壞。不同於劈張試驗在給定位至下的開裂，DPT 的裂紋將被形成在最弱的環向平面，而這也利於觀察纖維的橋接效應。同時，DPT 試驗亦更容易，成本較低，因此逐漸被用於纖維強化水泥質材料拉伸性質的測試[8-10]。

在 UHPC 的成分中，相較於其他的粉料及膠結料提供了基材硬固特性，鋼纖維的添加則將 UHPC 的脆性性質轉變成具有良好的延展性[11-12]。這主要來自於鋼纖維有效地橋接裂縫，限制裂縫擴展所致。此外，鋼纖維的形狀、尺寸與含量等亦是影響 UHPC 拉伸性質的重要因素。Will 等 [13] 研究了超高性能纖維混凝土(Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete, UHPFRC)在直接拉伸下的性能，纖維體積含量為 1.5%至 3.0%，其試驗結果顯示拉伸性質對纖維含量的強烈依賴性。

本篇研究利用雙向壓孔試驗探討不同鋼纖維含量對 UHPC 拉伸性質的影響，完成對應之拉伸應力-應變曲線，並於曲線中擷取鋼纖維含量對 UHPC 抗張效果之重要材料參數，包括初始開裂強度、極限拉伸強度其對應之應變量、材料受力過程中的吸收能量及破壞能量等。

二、實驗計畫

2-1 材料成分與配比

本研究使用的材料包含波特蘭一型水泥；矽灰，二氧化矽含量大於 95.01%；石英砂，粒徑介於 250 μm ~104 μm 之間。石英粉，顆粒粒徑介於 5-20 μm ，作用除了作為填充料以增加包裹密度之外，在高溫養護時所激發的活性將有利於早期強度的發展。由於 UHPC 的特徵是具有極低的水灰比，為了達到高流動性的特性，混合過程中添加聚羧酸型

(Polycarboxylate) 高效減水劑，其固含量為 0.55；此外，使用 Hiper Fiber 公司生產之鋼纖維，長度為 13.0 mm，直徑 0.2 mm，長徑比 (Aspect ratio) 為 65，如(圖 1)。實驗設計之強塑劑添加量為 6%，水灰比為 0.25。鋼纖維的體積分數為 1%、2% 及 3%，因添加鋼纖維的同時會對體積造成影響，故調整砂量與水泥的重量比值依序為 1.24、1.17 及 1.13，各材料摻合的比例如(表 1)。



(圖 1) 本實驗使用之鋼纖維

(表 1) UHPC 材料配比

編號	DPT1	DPT2	DPT3
水泥	1.00		
砂灰	0.25		
石英粉	0.25		
石英砂	1.24	1.17	1.13
水	0.22		
強塑劑	6%		
鋼纖維*	1%	2%	3%
水灰比	0.25		
砂灰比	1.24	1.17	1.13

* 鋼纖維體積含量

2-2 試體製作與養護

本研究在混合時是使用 Hobart 水泥砂漿混合機。混合的程序是先將水泥、砂灰、石英粉與石英砂等粉體材料置於混合容器中並使用低速攪拌至少 5 分鐘使粉料均勻後，將所需的強塑劑與水緩緩加入，並繼續以低速進

行混合，大約 10-15 分鐘後，將逐漸出現流動性。此時將混合機的轉速增加並持續攪拌 5 分鐘，直至漿體充分呈現糊狀，再依據鋼纖維的添加量逐漸放入鋼纖維。為了使纖維的分布更加均勻，攪拌時間約在 5 到 6 分鐘即完成混合。澆置前先針對 UHPC 之工作度進行流度試驗。試體澆置後利用保鮮膜覆蓋表面以避免水分迅速蒸發導致表面嚴重乾縮現象。放置室溫 48 小時後拆模，並將試體放入 90°C 熱水中養護 72 小時。完成後將試體取出並放置於室溫下，於 28 天後進行試驗。

2-3 雙向壓孔試驗

雙向壓孔試驗 (Double Punch Test, DPT)[7-10]之試體採用直徑 5 公分，高度為不超過 5 公分之圓柱試體(如(圖 2))，通過以小面積沖頭對圓柱試體上下平面施壓(架設方式如(圖 3))，在兩端沖頭(Punches)承壓處形成圓錐形的破裂面，受壓過程中兩個圓錐體相互靠近，在徑向平面上會產生均勻的拉伸應力，並且沿著這個徑向平面產生拉伸裂紋，受力行為如(圖 4)所示。這一試驗之原理最早是 Chen [7]根據塑性理論和裂紋破壞機理的假設計算所得出，其等效拉伸應力表示如下：

$$\frac{Q}{\pi a^2} = \frac{1 - \sin \varphi}{\sin \alpha \cos(\alpha + \varphi)} \frac{F_c}{2} + \tan(\alpha + \varphi) \left(\frac{bH}{a^2} - \cot \alpha \right) F_t \quad (1)$$

式中，Q 為施加之載重，F_t 為抗張強度，F_c 為抗壓強度，a 為沖頭之半徑，b 為試體之半徑，H 為試體之高度，α 為椎體(Cone)的角度，φ 為內摩擦角 (Internal friction angle)。若利用極限分析將混凝土理想化為彈性理想塑性材料 (elastic-perfectly plastic material)，並允許有較大的延展性時，可簡化得到材料張應力及橫向張應變公式如式(2)及式(3)：

$$\sigma_t \approx \frac{Q}{\pi(1.2bH - a^2)} \quad (2)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\delta}{2\pi b} \quad (3)$$

其中，σ_t 為橫向張應力，ε_t 為試體中心處環向拉伸應變，δ 為試體中心處環向伸長量。

本研究使用 MTS 萬能試驗機進行試驗，試驗配置如(圖 3)所示。加載速率為 0.004mm/s。加載過程中，對施加荷載是利用 MTS 之荷重規進行量測，訊號直接進入資料紀錄器中。變形的量測則是使用環向伸長計，將鏈條環繞於試體正中間後連接至伸長計並固定後開始進行，試驗過程中，荷載與變形歷程訊號同步傳回資料擷取器中，設定的取樣率是 2Hz。

2-4 UHPC 拉伸性質

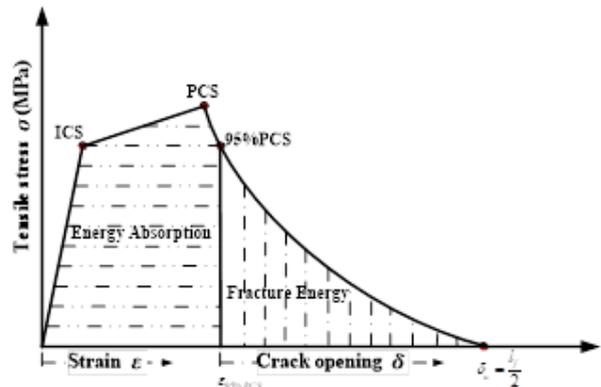
對於 UHPC 而言，典型的拉伸應力-應變曲線如圖 5 所示。在加載初期，應力將線性增加，直到 UHPC 基材出現裂縫。在此之前，鋼纖維並不提供作用，一旦基材出現裂縫後，可以觀察到勁度的折減，但是整體強度並未喪失。這歸因於 UHPC 中隨機分佈的鋼纖維的貢獻，由於初期裂紋的寬度微小足以允許纖維被拉拔，因此驅動了其橋接效應，限制裂縫擴展並呈現應變硬化的行為。隨著多重裂縫的逐漸局部化，在達到峰值拉伸應力之後，纖維橋接效應的逐漸減弱而變得不穩定，基材內部的裂紋加速擴展，因此，呈現逐漸的軟化趨勢，最終達到破壞。

為了比較鋼纖維摻量對拉伸力學行為的影響，本研究將試驗所獲得的應力-應變曲線進行分析並擷取其性能參數，包括初始開裂強度(Initial Cracking Strength, ICS)、峰值開裂強度(Peak Cracking Strength, PCS) 及對應之峰值應變量(Peak Strain, PS)。對於不同 UHPC 的韌性特性，透過吸能性質(Energy Absorption, EA.)進行比較，透過積分計算曲線所圍的面積，範圍從起始點計算至 PCS 95%所對應之應變值為分界，表示如下[14]。

$$E = \int_0^{\epsilon_f} \sigma d\epsilon \quad (4)$$

除此之外，不同的機制如骨材互鎖，纖維的拉拔以及裂縫的屏蔽等會影響混凝土在破壞後的行為。本研究透過對破壞能的計算，比較不同試體在斷裂過程中吸收的能量。其

定義為應力對裂縫寬度曲線下的面積。在此假設峰值應力之後的變形為裂紋擴展所致。故計算應力-環向變形量曲線積分 95%之極限強度後面積即可獲得[15]，如(圖 5)。



(圖 5) 張力應力-應變曲線中之材料特性

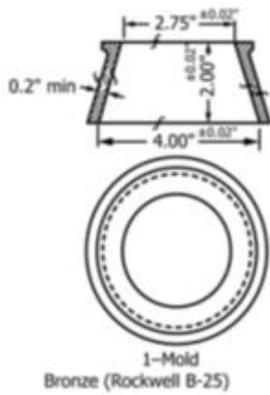
三、試驗結果分析與討論

3-1 流度試驗

為了確保所有 UHPC 混合物具有良好的的一致性與工作性能，混合後針對 UHPC 漿體進行了流度試驗。流度試驗的進行是參考 ASTM 1437[16]，使用錐形模具(如圖 6)，在模具中注入砂漿，由於 UHPC 具有良好的工作性，因此在填滿漿體的過程中不需要額外的搗實。錐形模拿起後容許漿體在靜止狀態下自由流動約兩分鐘，然後以尺量測並記錄漿體擴散的直徑。三種配比之流度試驗如(表 2)，可以觀察到，隨著鋼纖維含量增加，漿體的流度將會明顯的下降，尚未添加鋼纖維時，此配比之 UHPC 流度為 195mm，而 DPR1 添加鋼纖維後的流度為 185mm，隨著纖維增加到體積分數的 3%時，DPT3 的漿體流度只有約 110mm，下降 59.4%。雖然添加鋼纖維能增加 UHPC 的拉伸性能與破壞能，然而，工作性的損失是在進行設計時需要納入考慮的重要因素。

(表 2) UHPC 工作度

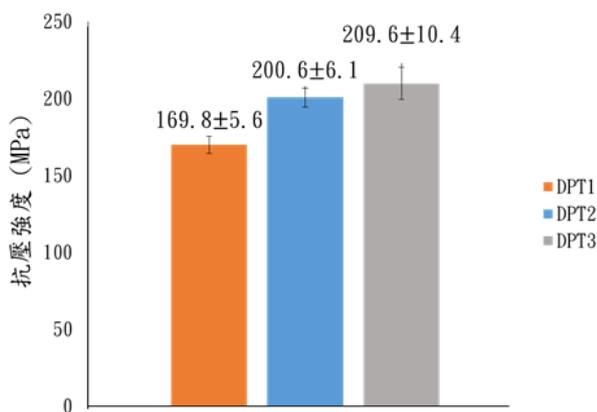
編號		DPT1	DPT2	DPT3
工作度 (mm)	漿體	195		
	添加鋼纖維	185	135	110



(圖 6) 流度測試與流度值量測

3-2 抗壓強度

為了瞭解不同配比對於 UHPC 強度的影響，混合時也同時製作 5X5X5cm 的立方型試體，在相同之養護條件下，在第 7 天實施抗壓試驗。每組試體至少進行 3 個測試並計算其平均強度。所測得之抗壓應力如(圖 7)所示。所有的配比抗壓強度都超過 150 MPa，符合 UHPC 之定義。對於 DPT1，DPT2 與 DPT3 的試體在 7 天時的平均抗壓強度分別為 169.8 MPa，200.6MPa 和 209.3 MPa，標準差分別為 5.6、6.1 及 10.4，鋼纖維添加量越多標準差有越大之趨勢。由結果顯示，隨著鋼纖維添加量的增加，抗壓強度有增強之趨勢，推測是由於鋼纖維在微裂縫形成時，纖維橋接所提供的圍束效應致使軸向承载力增加所致。

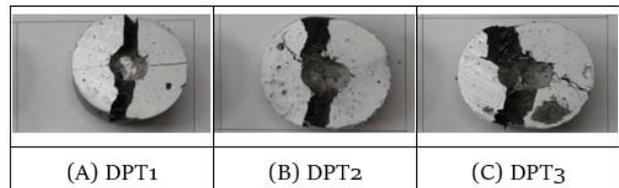


(圖 7) 不同纖維量對 UHPC 抗壓強度之影響

3-3 開裂裂紋模式

DPT 的試體的破壞模式如(圖 9)，軸向的垂直面表面產生多個裂紋，而非由單一裂縫決定。經觀察，添加鋼纖維量為 1% 時，試體

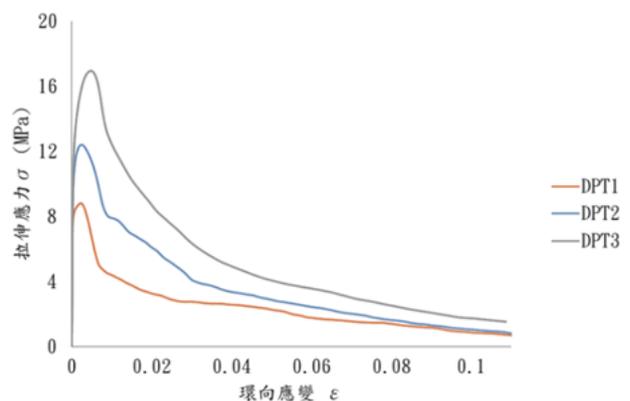
除了許多細微裂縫之外，出現 4 道局部化的明顯裂縫，裂縫間夾角約為 90° ；添加 2% 鋼纖維時試體局部化裂縫為三道，而裂縫間夾角約為 120° ；而添加鋼纖維體積率為 3% 時，僅剩下開裂為兩道較明顯的裂縫，且裂縫的路徑凌亂。由於纖維橋接效應吸收裂紋形成過程中累積的能量。從而減少裂縫的擴展並降低局部性的破壞。



(圖 9) DPT 試體破壞模式

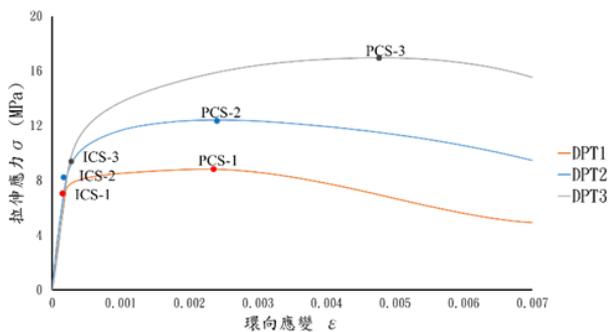
3-4 材料拉伸行為

利用安裝環向伸長計取得 DPT 過程中試體之變形量訊號，透過公式分析可得到試驗過程中之拉伸應力-應變曲線，每種材料以三組實驗取平均值，分析後獲得平均張應力-環向應變曲線，如(圖 10)所示。圖中可以觀察到，隨著鋼纖維的添加量增加，整體曲線都有增長且向右偏移的趨勢，除了初始開裂及峰值開裂強度隨著纖維添加量增加而增加，應力-應變曲線下面積(能量)也有明顯的差異，延展性及韌性也都受鋼纖維的影響。初始的斜率三者相近，但初始開裂強度已有明顯的區隔；從初始開裂強度到峰值開裂強度區間，可以觀察到明顯的應變硬化現象，而隨著鋼纖維含量的增加，應變硬化效果越加明顯；從峰值應力後開始下降時趨勢都相當陡峭，並分成兩段逐漸平緩，三者之間趨勢均相同。



(圖 10) 拉伸應力-環向應變關係曲線

從(圖 10)中擷取環向應變 0.007 前，放大之應力-應變曲線如(圖 11)，可獲得各材料之初始開裂強度(ICS)、極限抗張強度(PCS)及對應之應變量(PS)，並透過積分程式得到吸收能量(EA)以及開裂後之破壞能量(FE)，綜整如(表 3)，對於 DT1, DT2 與 DT3，其初始開裂強度分別是 7.3、7.9 及 8.9 MPa，雖然鋼纖維尚未開始作用，但是隨著添加量增加，水泥與鋼纖維兩種材料的複合效應導致提升 UHPC 的開裂強度；而極限強度分別是 8.8、12.3 及 17.0 MPa。而極限強度所對應之應變量分別為 2.25、2.27 及 4.56 μm ，材料受力過程中的吸收能量分別為 22、41 及 81 kJ/m^3 ，破壞能量為 18.52、26.98 及 37.45 kJ/m^2 ，都與鋼纖維含量呈正成長趨勢，因此可知，控制鋼纖維的含量能有效地調整材料抗張性質，以滿足設計強度。



(圖 11) 張應力-環向應變關係曲線局部放大

(表 3) UHPC 材料行為參數

	DPT1	DPT 2	DPT 3
ICS (MPa)	7.3	7.9	8.9
PCS (MPa)	8.8	12.3	17.0
95%PCS (MPa)	8.4	11.7	16.1
PS (mm/mm)	0.0023	0.0023	0.005
EA(吸收能量) (kJ/m^3)	22	41	81
FE(破壞能) (kJ/m^2)	18.5	27.0	37.5

四、結論

DPT 除了改善 DTT 架設不易的缺點外，也避免了張力實驗數據受單一主要裂紋支配的情況。而試驗試體上下兩端需磨平，並將沖頭與試體中心軸對齊，使施力時不會有所偏差而導致彎矩的產生。

- (一) 添加之鋼纖維含量越多，流度越差，鋼纖維添加量應有所拿捏，以免過度添加導致工作性不佳。
- (二) DPT 軸向的垂直面表面產生之裂紋，與鋼纖維添加量有關，添加鋼纖維量僅 1% 時，試體出現 4 道主要明顯裂痕，各裂縫間夾角約為 90° ；添加 2% 鋼纖維體積量時試體出現三道主要裂痕，裂痕之間夾角約為 120° ；而添加鋼纖維體積率為 3% 時，僅剩下開裂為兩道較明顯的裂縫。
- (三) 隨著鋼纖維的添加量增加，整體應力-應變曲線韌性都有增長且向右偏移的趨勢，曲線下面積(能量)也有明顯的差異，延展性及韌性也都受鋼纖維的影響；鋼纖維含量越多，應變硬化效果越加明顯。
- (四) 鋼纖維的含量越高，初始開裂強度、極限強度等參數都會提升；受力過程中所能吸收的能量也受鋼纖維含量影響，含量越高，能吸收的能量越大；此外，破壞能的大小受鋼纖維含量影響也不小，與鋼纖維的含量也有正比例的關係。同時也可觀察到，鋼纖維含量越高，韌性較佳，極限張力強度也有較高之狀況，反映出韌性越好，張力行為也會較佳之特性。
- (五) 綜整以上結論，控制鋼纖維的含量能有效地調整材料抗張性質，以滿足設計強度，唯設計時須考量工作度及可行性，以免流度過差無法使用。

參考文獻

1. Richard, P. and Cheyrezy, M, "Composition of reactive powder concretes." Cement and concrete research, Vol. 25, No.7, pp. 1501-1511, 1995.
2. K. Habel, M. Viviani, E. Denarié, E. Brühwiler, "Development of the mechanical properties of an ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPRC)." Cement and Concrete

- Research, Vol.36, No.7, pp.1362-1370, 2006.
3. M. Xu, and K. Wille, "Fracture energy of UHP-FRC under direct tensile loading applied at low strain rates." *Composites Part B: Engineering*, Vol.80, pp.116-125, 2015.
 4. Y.Y. Doo, J.P. Jung, S.W. Kim, and S.Y. Young, "Early age setting, shrinkage and tensile characteristics of ultra high performance fiber reinforced concrete." *Construction and Building Materials*, Vol.41, pp.427-438, 2013.
 5. Y.S. Tai, S.E. Tawil, F. ASCE, B. Meng, and W. Hansen, "Parameters Influencing Fluidity of UHPC and Their Effect on Mechanical and Durability Properties." *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.32, No.10, 04020298, 2020.
 6. A.H. Le, "Evaluation of the Splitting Tensile Strength of Ultra-High Performance Concrete." *RILEM-fib International Symposium on Fibre Reinforced Concrete*, Vol.30, pp. 1149-1160, 2020.
 7. W.F. Chen, "Double punch test for tensile strength of concrete," *J Am Concr Inst* 67.pp. 993-995 , 1970.
 8. W. F. Chen, "Double punch test for tensile strength of concrete," PB224770/AS (NTIS), Lehigh Preserve Institutional Repository, Vol.70, No.18, 1969.
 9. C. Aire, Sergio Carmona, Antonio Aguado, and Climent Molin, "Double-Punch Test of Fiber-Reinforced Concrete : Effect of Specimen Origin and Size," *American Concrete Institute Materials Journal*, vol.112, No.2, 2015
 10. S. Tuladhar, and S. Chao, "A Simple Tensile Testing Method for UHP-FRC Based on Double-Punch Test," *International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete*, issue 2, No.1, 2019.
 11. Z. Wu, C. Shi, W. He, and L. Wu, "Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete." *Construction and building materials* , Vol.103, No.30, pp. 8-14, 2016.
 12. M. Singh, A.H. Sheikh, M.S. Mohamed Ali, P. Visintin, and M.C. Griffith, "Experimental and numerical study of the flexural behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete beams." *Construction and Building Materials*, Vol.138, No.1, pp.12-25, 2017.
 13. K. Wille, S. El-Tawil, and A.E. Naaman, "Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading." *Cement and Concrete Composites*, Vol.48, pp.53-66, 2014.
 14. N.T. Tran, and D.J. Kim, "Synergistic response of blending fibers in ultra-high-performance concrete under high rate tensile loads," *Cement and Concrete Composites*, Vol.78, pp. 132-145, 2019
 15. Z.P. Bazant, "ANALYSIS OF WORK-OF-FRACTURE METHOD FOR MEASURING FRACTURE ENERGY OF CONCRETE," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.122, Issue 2, 1996.
 16. ASTM C1437-20, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.

混凝土用機械式緊固件歐盟 EOTA 與美洲 ACI 評估系統比較分析-以 新型植筋錨栓為例

謝啟萬¹ 葉進誠²

¹ 國立屏東科技大學土木工程系教授

² 國立屏東科技大學土木工程系研究生

摘要

本研究分別採用歐盟 EOTA EAD 330232 及美國 ACI 355.2 評估準則，針對我國新型專利植筋錨栓執行性能評估與比較分析，研究試件為標稱直徑與植入深度分別為 12 mm 與 150 mm 之植筋錨栓，混凝土試驗塊包括標稱設計低強度(210 kg/cm²)及高強度(560 kg/cm²)，研究範圍除評估錨栓包含鋼材破壞、拉出破壞、混凝土破壞及邊距檢測等項目比較分析，並建立開裂混凝土測試機制。研究結果顯示以拉出破壞為錨栓強度主要關鍵機制破壞模式，錨栓於結構物之錨固能力主要依據，經侷限抗張試驗及非侷限抗張試驗後得，20 MPa 試驗組顯示破壞模式為拉出破壞與混凝土破壞平均抗拉強度分別為 72 kN 與 85 kN；50 MPa 試驗組顯示破壞模式為熔接處破壞與鋼筋斷裂平均抗拉強度為 84 kN 與 88 kN；邊距檢測試驗顯示，最小邊距為 125 mm 且依據抗拉結果安裝之邊距距離越大抗張強度越高，混凝土影響面積也隨之增加。

關鍵字：緊固件、螺紋錨栓、混凝土、評估報告

EOTA and ACI Mechanical Fasteners for Concrete Use Assessment System Comparison Study – Rebar Screw Anchor Case

Hsieh Chiwan¹ Yeh Chin-Cheng²

¹ Department of Civil Engineering, Pingtung University of Science and Technology, professor

² Department of Civil Engineering, Pingtung University of Science and Technology, master

ABSTRACT

This study uses the EOTA EAD 330232 and the ACI 355.2 evaluation criteria respectively. Evaluation and comparative analysis of the implementation performance of my country's new patented anchor bolts. The research specimens are anchor bolts with a nominal diameter and implantation depth of 12 mm and 150 mm, respectively, concrete test blocks include nominal design low strength (210 kg/cm²) and high strength (560 kg/cm²). The scope of the research is to evaluate anchor bolts, including steel failure, pull-out failure, concrete cone failure, and edge testing, and establish a cracked concrete test mechanism. The research results show that pull-out failure is the main mechanism of anchor bolt strength failure mode, the main basis for the anchoring ability of anchor bolts to structures. After confined tensile test and non-confined tensile test. The 20 MPa test group shows that the pull-out failure and concrete cone failure mode the average tensile strength are 72 kN and 85 kN, respectively. The 50 MPa test group shows that the weld and steel failure the average tensile strength are 84 kN and 88 kN, respectively. Edge

detection test shows, the minimum margin is 125mm, The minimum edge is 125 mm, and according to the tensile results, the greater the edge distance of the installation, the tensile strength and the area affected by the concrete will increase.

Keywords: fastener, screw anchor, concrete, assessment report

一、前言

集集大地震後建築物之耐震係數上修，因此在需要加樑擴柱的補強工程中，緊固件為混凝土結構物聯結重要構件，目前歐洲 EOTA 與美洲 ACI 均有完整錨栓設計施工與評估準則與標準，我國螺紋錨栓應用已逐漸廣泛，但仍缺少完整制度，可於國內自主提供有效品質評估報告。

錨栓是將既有混凝土或鋼件等補強構件連結之重要營建材料，亦是混凝土補強工法中常用的緊固件之一。補強工法通常所使用的錨栓為後置式錨栓。後置式錨栓分別為化學植筋錨栓及機械式錨栓，其中，化學植筋錨栓係以錨件與黏著劑膠結於結構物上產生錨定力，其對於施工品質、環境、溫度等要求較高，且工期較長；而機械式錨栓利用其特殊的設計使錨栓與結構物產生摩擦或固鎖能力達到錨定的效果，相較化學錨栓施工條件少且不需二次施工有效縮短工期，亦機械錨栓須更完善的評估測試報告供設計單位參考。

近年來，台灣已研發出新型螺紋植筋錨栓(screw anchor)，係將鑽孔以螺牙錨栓的外牙使孔洞攻出內牙，使錨栓與混凝土產生互鎖力，操作簡易且不需要二次施工。而礙於 CNS 標準尚未針對新型螺紋植筋錨栓擬定屬於台灣之測試與評估機制。目前各設計單位均須參考歐盟 (EOTA) 或美洲 (ACI) 機構所核發之評估報告，以作為工程設計所使用。

錨栓試驗中已受力方式大致分為抗張及抗剪，其中抗張在評估報告中較為重要，其可顯示錨栓基本特性及與基材之間固鎖能力等；抗剪則呈現錨栓本身之鋼材抗剪力強度。

因此本論文將使用 #4 螺紋植筋錨栓進行實驗，透過試驗成果，進而比較分析歐盟 (EOTA) 與美洲 (ACI) 錨栓設計規範與評定報告之相似性與差異性，以供 CNS 後續建立時，

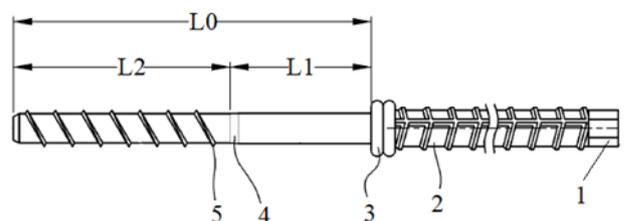
作為參考依據。並建立開裂混凝土測試機制，作為後續進行錨栓於裂紋混凝土及地震試驗測試使用。

二、研究範圍

本次研究包含 EOTA 及 ACI 評估報告中測試項目，參照規範詳細介紹錨栓評估細節並建立測試設備，分別進行錨栓鋼材強度、拉出破壞、混凝土破壞、邊距檢測，並依測試結果比較分析。

2.1 材料

本試驗用新型螺紋植筋錨栓係一種鋼筋與螺紋式植筋錨件結合，適用於植入混凝土結構物，並包含鎖固植筋錨栓於該鋼筋之前端的六角頭、形成於該鋼筋另一端的痕跡焊料(熔接觸)，及連接於該痕跡焊料的螺桿如圖 1。該螺桿的長度等於該預定埋入深度，並包括一桿體及螺旋環設於該桿體上的螺紋。該桿體具有連接於該痕跡焊料的無牙段，及形成有該螺紋的螺牙段。該無牙段的桿體直徑大於螺牙段的桿體直徑，該螺牙段植入預鑽孔時，該無牙段接續該螺牙段進入預鑽孔，直到痕跡焊料緊貼於該混凝土結構物，則該螺桿完成植入預鑽孔的底壁面。



1：六角頭、2：鋼筋、3：痕跡焊料(熔接觸)、4：桿體、5：螺紋、L0：螺桿、L1：無牙段、L2：有牙段

(圖 1) 新型螺紋植經錨栓

2.2 準則與標準

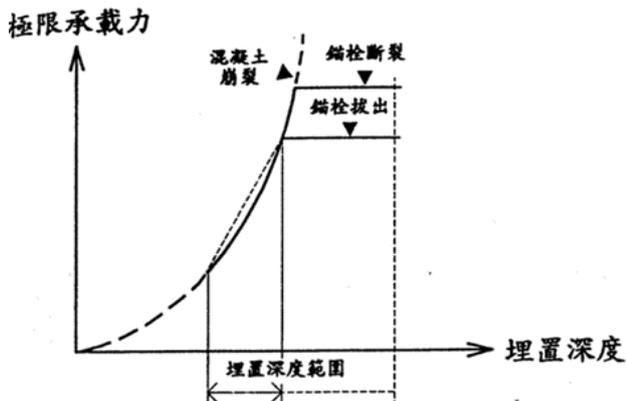
目前不論歐盟 (EOTA) 或美洲 (ACI) 規範, 均要求針對錨栓受力方向與破壞型式之極限承载力, 為考量錨栓之應用設計條件及安全性評估。然錨栓產品評估時, 須建立不同混凝土設計強度之抗張、抗剪特性外, 除此之外, 針對應用時可能產生邊距、間距、植入深度等特性評估。歐洲與美洲錨栓評估及試驗規範如表 1。

(表 1) 歐盟 (EOTA) 及美洲 (ACI) 機械式錨栓相關設計評估規範

	測試	評估	設計
歐盟	EOTA, ETAG/ EAD	EOTA, ETAG/ EAD, ETA	EN-1992-4 2017
美洲	ASTM E488 ACI 355.2	ACI 355.2 AC193	ACI 318

2.2.1 埋入深度

埋入深度 h_{nom} 計算自混凝土表面起算至錨栓最末端。圖 2 為錨栓承载力影響圖, 從圖可得知, 當錨栓埋設深度愈深時, 錨栓之極限承载力隨之提高。而當錨栓鋼筋埋設至斷裂破壞之臨界深度時, 即使再將埋設深度增加, 亦無法提升錨栓之極限承载力。

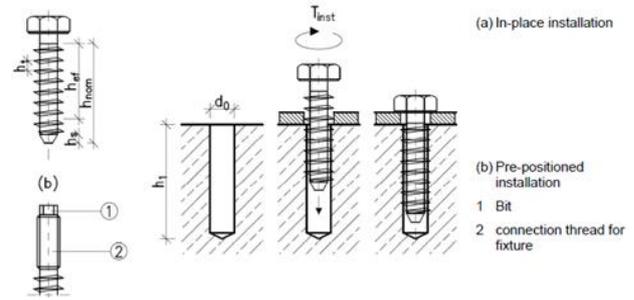


(圖 2) 埋設深度對於錨栓極限承载力之影響圖

2.2.2 有效埋入深度

在歐盟 (EOTA) 及美洲 (ACI) 規範中, 均有螺牙式錨栓有效埋入深度 h_{ef} 計算公式, 如式(1)所示。其中, 影響因子分別為受到埋入深度 h_{nom} 、螺牙之牙距 h_t 及末端無牙段 h_s , 如圖 3 所示。

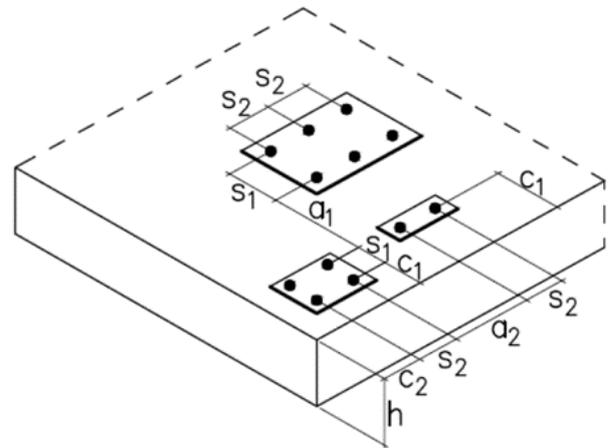
$$h_{ef} = 0.85(h_{nom} - 0.5h_t - h_s) \leq 8d_0 \dots \dots \dots (1)$$



(圖 3) 有效埋入深度定義

2.2.3 邊距與間距

錨栓中心至混凝土邊緣之最短距離稱之為邊距 C_{min} ; 而間距 S_{min} 為兩支錨件中心至中心距離。一個斷面於實務工程中常需植入多根錨栓, 才能滿足新舊混凝土或結構物應力傳導。因此錨定的位置相當重要, 需考量其最小邊距及間距, 使錨件應力不相互影響, 而混凝土基材錨固件間距與邊距之示意圖, 如圖 4 所示。



(圖 4) 混凝土基材錨固件間距與邊距之示意圖

2.2.4 混凝土強度

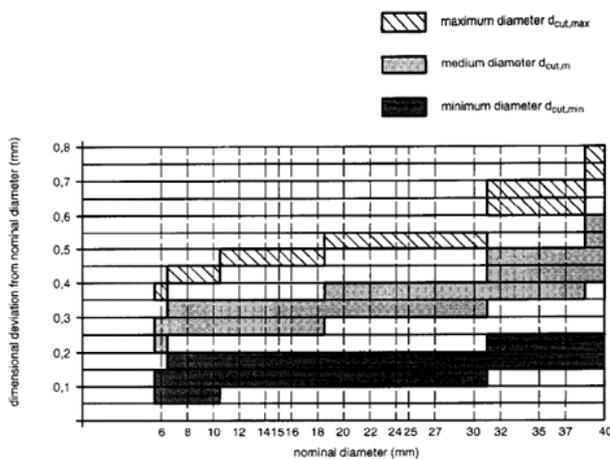
混凝土結構物於工程上最為常見, 在設計上常將混凝土抗壓強度與錨栓的極限承载力視為線性關係, 即代表混凝土強度愈高, 則錨栓的極限承载力愈大 [Fischer, 2010]。根據 EOTA EAD 330232-00-0601 之規範中, 以混凝土設計強度 C 20 / 25 為計算基準, 而錨栓承载力混凝土強度係數計算, 如公式(5)至(7)所示。

2.2.5 混凝土齡期

混凝土強度係來自於混凝土之水化反應，並搭配良好的養護，可使混凝土強度隨齡期增加進而成長。在 EOTA EAD 330232-00-0601 及 ACI 318 規範中，錨栓安裝之混凝土基材齡期規定至少為 21 天。

2.2.6 孔徑大小

孔徑大小 d_0 直徑大小是由水泥鑽尾決定，而在 EOTA、ASTM 和 ACI 等規範中，均有錨栓鑽頭直徑大小的規定範圍，鑽頭直徑範圍如圖 5 所示。因水泥鑽尾屬於耗材類產品，隨使用次數增加，鑽頭直徑亦會不斷縮小，因此對錨栓的承載力亦會產生影響。



(圖 5) 鑽頭的切割直徑規定範圍

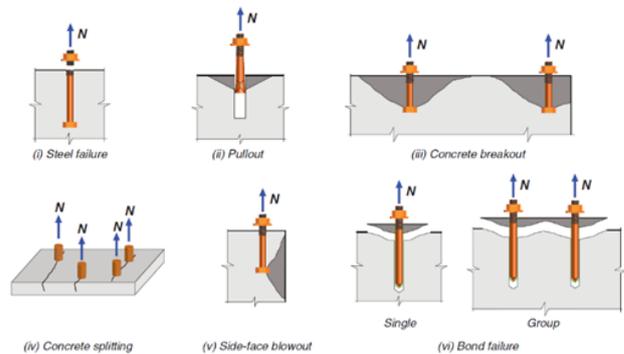
2.2.7 錨栓抗拉破壞型態

錨栓抗拉破壞型態分為錨栓破壞、錨栓拉出、混凝土錐狀破壞等，而混凝土破壞模式如圖 6 所示。

- i. 錨栓破壞：錨栓埋設深度愈深，代表握裹力越大。因此埋設深度使得混凝土強度大於錨栓鋼筋強度，當錨栓達極限強度時，基材未產生破壞，僅錨件本身斷裂。
- ii. 錨栓拔出：錨栓從基材中被拉出，混凝土未破壞或只有表面產生些許的破損，此現象較常出現於錨件之錨固能力不足。
- iii. 混凝土錐狀破壞：錨栓受到拉力時，混凝土因抗拉強度到達開裂破壞極限值，而混凝土沿錨栓周圍應力產生錐狀破裂；另外，邊距不足之混凝土錐狀破壞，

錨栓於混凝土邊緣距離不足，再受到拉力作用時，造成承載力降低。

- iv. 劈裂破壞：此現象較常發生於群錨之間距不足，導致劈裂現象的產生，或混凝土基材厚度不足，以致沿著錨栓發生劈裂。當錨栓離混凝土邊距過近亦容易造成劈裂現象。
- v. 混凝土側邊破壞：此現象較常發生在擴頭錨栓或膨脹錨栓等。
- vi. 群錨混凝土錐狀重疊：群錨在受到拉力時，相鄰錨栓因間距不足，導致混凝土錐狀破壞面重疊，造成承載力降低。



(圖 6) 錨栓抗拉破壞型態；(I) 錨栓破壞；(II) 錨栓拔出；(III) 混凝土錐狀破壞；(IV) 劈裂破壞；(V) 混凝土側邊破壞；(VI) 群錨混凝土錐狀重疊

2.3 試驗設備

錨栓以抗張為最主要評估之工程特性，其中又區分侷限、非侷限及邊距特性。美洲及歐盟錨栓試驗規範試驗設備示意圖如圖 7 至圖 10 所示。在此小節中介紹設備及錨栓安裝要求條件。

反力設施及量測輔助設備架設注意事項：

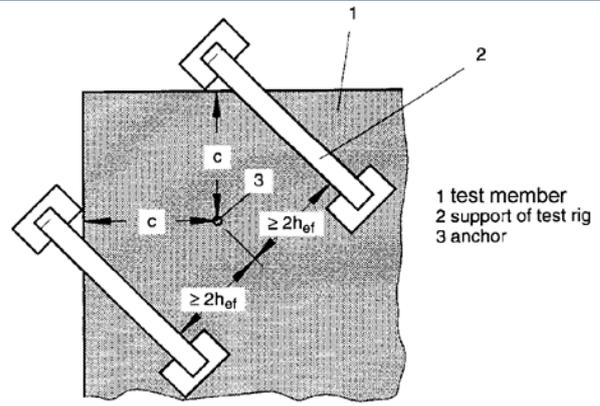
- (1) 非侷限抗張反力設備之支撐架內側，需距離錨栓中心 2 倍之錨栓有效埋入深度，如圖 7 所示。
- (2) 侷限抗張設備之侷限鋼板直徑為 $d_0+4\text{mm}$ 或 $1.5\sim 2d_0$ ，如圖 8 所示。
- (3) 邊距試驗除了滿足非侷限抗張設備外，錨栓亦需安裝於角落，且錨栓中心至混凝土邊距距離相等，如圖 9 所示。
- (4) 位移設備位置自錨栓延伸，自錨栓相對

不動點位置量取錨栓位移量。

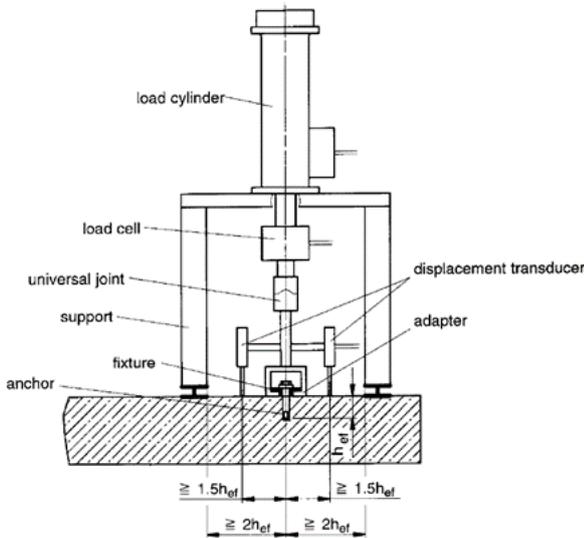
- (5) 確保錨栓承受軸向應力，或加裝萬向夾具。

錨栓安裝條件及要求：

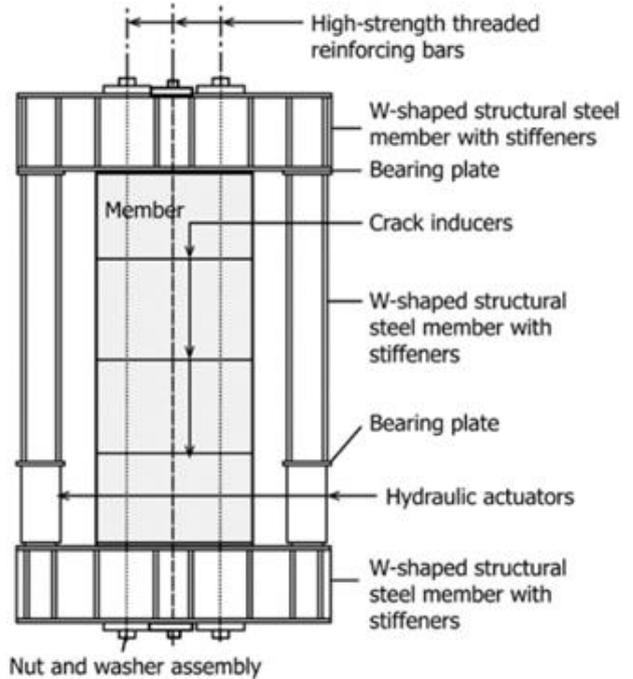
- (1) 鑽孔之鑽尾須滿足錨栓鑽頭直徑大小的規定，且經過鑽孔 10 次後，需檢查鑽尾直徑是否符合規定。
- (2) 混凝土齡期至少 21 天以上，且厚度需 $h \geq 1.5 \sim 2 h_{ef}$ 或不少於 100 mm。
- (3) 錨栓垂直度不得超過 $\pm 5^\circ$ 之偏差量。



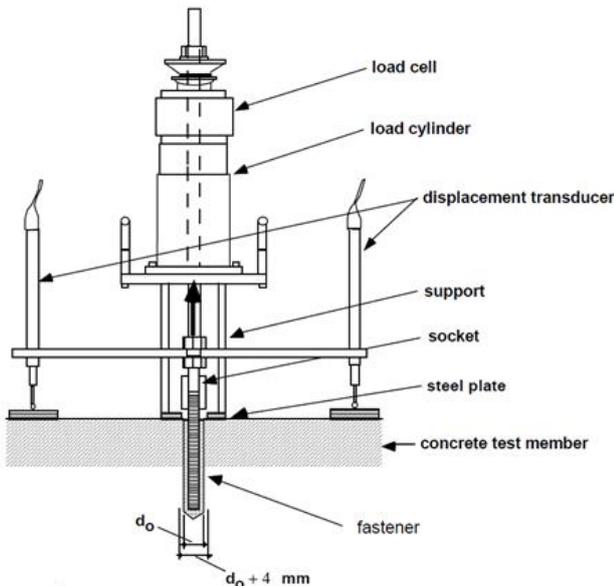
(圖 9) 邊距抗拉設備示意圖



(圖 7) 非侷限抗拉設備示意圖



(圖 10) 裂紋產生設備示意圖



(圖 8) 侷限抗拉設備示意圖

2.4 歐盟 EOTA 錨栓分析公式

2.4.1 錨栓破壞

$$N_{Rk,s} = A_s \cdot F_{u,s} \dots\dots\dots (2)$$

$$F_{u,s} = F_{u,t} \frac{f_u}{f_{u,t}} \dots\dots\dots (3)$$

2.4.2 拉出破壞

$$F_{u,c} = F_{u,t} \left(\frac{f_u}{f_{u,t}} \right)^n ; \text{ With } \frac{f_c}{f_{c,t}} \leq 1 \dots\dots (4)$$

$$\Psi_{c,50} = \min \left\{ \frac{N_{u,m,A2}}{N_{u,m,A1}} ; \frac{N_{u,m,A4}}{N_{u,m,A3}} \right\} \leq 1.55 \quad (5)$$

$$n = \log(\Psi_{c,50}) / \log(50/20) \dots\dots\dots (6)$$

$$\Psi_{c,XX} = \left(\frac{f_{ck,XX}}{f_{ck,20}} \right)^n \dots\dots\dots (7)$$

$$N_{5\%} = N_{Rk,p}(1 - Kv) \dots\dots\dots (8)$$

公式 (7) 中 v 為變異係數，K 如表 2。

2.4.3 混凝土破壞

$$F_{u,c} = F_{u,t} \left(\frac{f_c}{f_{c,t}} \right)^{0.5} ; \quad \text{With } \frac{f_c}{f_{c,t}} \leq 1 \quad (9)$$

2.5 美洲 ACI 錨栓分析公式

2.5.1 錨栓破壞

$$N_{sa} = A_{se,N} f_{uta} \dots\dots\dots (10)$$

$$A_{se,N} = \frac{\pi}{4} \left(d_a - \frac{0.9743}{n_t} \right)^2 \dots\dots\dots (11)$$

其中 $A_{se,N}$ 單位為 in^2 ; f_{uta} 不得超過 1.9 f_{ya} 或 125,000 psi。

2.5.2 侷限抗張(拉出破壞)

$$N_{pn} = \Psi_{c,p} \cdot N_p \dots\dots\dots (12)$$

其中 $\Psi_{c,p}$ ，在使用載重等級下經分析顯示不會產生開裂時，修正因子應可使用 $\Psi_{c,p} = 1.4$ ；在使用載重等級下經分析顯示會產生開裂， $\Psi_{c,p} = 1.0$ 。 N_p 為機械式錨栓評估準則試驗和評估為 5% 失敗率之結果。

$$N_{5\%} = N_m(1 - Kv) \dots\dots\dots (13)$$

公式 (12) 中 v 為變異係數，K 如表 2。

(表 2) K 值以 90% 信度評估特徵容量

測試件數量	K
4	3.957
5	3.400
6	3.091
7	2.894
8	2.755
9	3.649
10	2.568

2.5.3 非侷限抗張(混凝土破壞)

$$N_b = k_c \lambda_a \sqrt{f_c} h_{ef}^{1.5} \dots\dots\dots (14)$$

其中 k_c ，預埋式錨栓為 24；後置式錨栓為 17。因本次試驗使用一般型混凝土，非輕

質混凝土亦 λ_a 為 1。

三、試驗步驟與設備

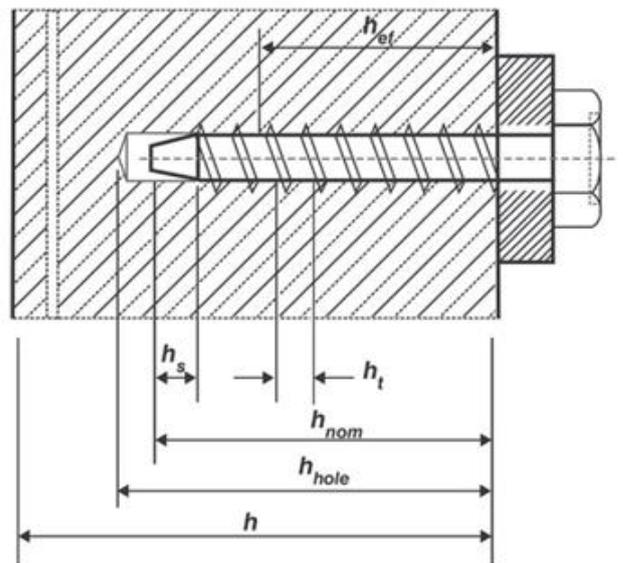
3.1 試驗材料

3.1.1 螺紋植筋錨栓

本研究係採用我國自行開發新型植筋螺紋錨栓如，圖 11 所示。此新型植筋螺紋錨栓適用於植入混凝土結構物，在結構物上之錨定位置進行鑽孔，欲鑽一 d_o 大小及大於 L_o 深度之孔洞，再利用六角頭將錨栓植入，達到錨固之效果。本研究採 #4 螺紋植筋錨栓為主，詳細之錨栓符號及尺寸如圖 12 及表 3 所示。



(圖 11) 新型植筋錨栓



(圖 12) 錨栓符號示意圖

(表 3) #4 螺紋植筋錨栓尺寸彙整表

NO.	Anchor length (L)	Thread pitch (h _t)	Anchor tip (h _a)	Thread diameter (D)	Shaft diameter (d)
1	153.22	10.03	3.25	15.57	12.54
2	152.88	10.04	3.27	15.54	12.57
3	153.23	9.99	3.34	15.60	12.49
4	152.23	10.02	3.31	15.52	12.50
5	152.53	10.10	3.28	15.54	12.57
6	152.75	10.07	3.30	15.55	12.57
7	153.19	9.99	3.29	15.54	12.58
8	153.31	9.96	3.32	15.54	12.60
9	153.12	10.00	3.28	15.53	12.54
10	152.78	9.96	3.26	15.58	12.54
Average	152.924	10.016	3.290	15.551	12.550
Standard deviation	0.354	0.046	0.028	0.025	0.035
Variation (%)	0.231	0.459	0.851	0.161	0.279

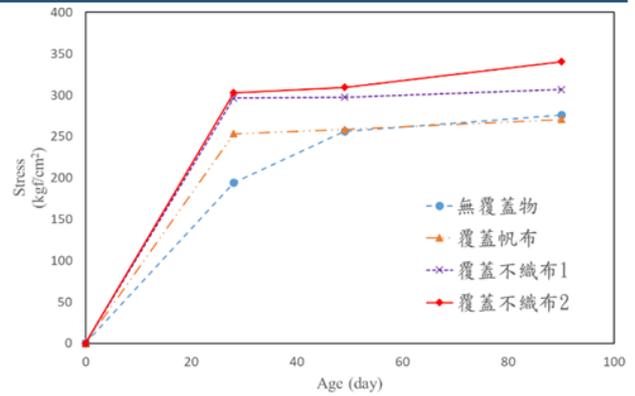
3.1.2 混凝土試驗塊

本試驗所使用之混凝土塊係由混凝土預拌廠進行預拌後，並運至屏東科技大學土木工程系之材料試驗場進行澆置。以灑水方式進行養護，以確保混凝土品質，如圖 13 所示。最後透過混凝土抗壓試驗，分別於 21、28、49、90 天進行圓柱試體抗壓試驗，並觀察抗壓強度變化，如圖 14 所示。

在 EOTA 及 ACI 規範中，混凝土強度於後制式錨栓混凝土不得超過 8,000psi (560kg/cm²)。因此，混凝土試驗塊採用標稱設計低強度 3,000psi (210kg/cm²) 以及高強度 8,000psi (560 kg/cm²)。



(圖 13) 混凝土現場澆置、養護



(圖 14) 混凝土養護方式及強度變化

3.2 試驗步驟

本研究為比較歐盟 EOTA 及美國 ACI 測試結果差異性，針對鋼材破壞、拉出破壞、混凝土破壞及最小邊距測定進行試驗，再各別進行評估與比較。

施工人員在安裝後置式錨栓時，確實施工非常重要。若無確實施工，可能會產生預鑽孔孔徑不正確、植入深度錯誤、植筋方向過斜等問題。因此，本研究之後置式錨栓抗張試驗安裝步驟與輔助設備如下說明：

3.2.1 鋼材破壞

本試驗依據 CNS 2111 金屬材料拉伸試驗法進行試驗，針對 #4 號螺紋錨栓鋼材強度試驗。為排除其他影響因子以獲得錨件本身最直接的鋼材強度。試驗中將錨件之鋼筋、痕跡焊料(熔接處)及螺牙去除，如圖 15。

機械式螺紋錨栓鋼材強度則透過萬能試驗機進行評估，如圖 16。萬能試驗機最大荷載能力為 100 噸。而結構設計分為螺桿調整柱及不鏽鋼固定柱 (如下以 A 與 B 柱簡稱之)、上下夾具，透過萬能試驗機台下方鍊條與齒輪將力量傳遞使平台向上頂升達試驗需求。上夾具為固定端、下夾具自由端，安裝待測試樣時，上夾具可藉由 A 柱調整所需高度，而待測試樣完成安裝執行試驗時，萬能試驗機平台向上頂升，整座機台循 B 柱共同往上達拉力效果。試驗步驟如下：

- (1) 將原螺紋植筋錨栓磨除螺牙，並於熔接處切斷取錨栓段，測試件如圖 15 所示。
- (2) 量取錨栓長度為 15 cm，並在每 5 cm 處使用修正液或油漆筆上做記號，固定於

萬能試驗機上下夾具。

- (3) 試驗時溫度應維持在 $10\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
- (4) 依照 CNS 2111 之相關規定設定萬能試驗機與電腦相關參數。如鋼筋降伏前以應力控制，超過降伏點後改以應變控制 50% ($20\sim 80\%$ / min 區間值)將鋼件拉斷。
- (5) 若試驗結果曲線有明顯之上、下降伏點時，則以上降伏點作為鋼筋降伏強度。



(圖 15) 錨件破壞測試件



(a) (b)

(圖 16) 萬能試驗機；(a) 萬能試驗機；(b) 上下夾具

3.2.2 侷限抗張試驗(拉出破壞)

螺紋式錨栓係利用前端切削方式，在預埋孔中將混凝土孔壁形成螺紋軌跡如圖 17，藉此與螺牙達成固鎖能力。

此試驗目的係驗證錨栓之螺牙之錨固能力，為排除混凝土破壞條件以獲得錨栓之錨固能力，試驗中將切除鋼筋段，如圖 18，並參照規範 EOTA TR 048 之相關規定建置錨栓侷限抗張試驗設備如圖 19，為排除混凝土破壞模式形成。

並經前人陳翊彰(2019)研究中針對機械式螺紋植筋錨栓之熔接處執行熔接處強度試驗，# 4 及 # 5 機械式螺紋植筋錨栓熔接處

強度皆大於鋼筋破壞強度，故可排除錨栓熔接處拉力破壞破壞。試驗步驟如下：

- (1) 於混凝土試驗塊使用符合規範尺寸水泥鑽尾如圖 5 與垂鑽輔助鑽孔、利用空壓機及噴槍延伸軟管清孔，並將螺紋植筋錨栓植入孔內。
- (2) 將已完成符合規範之侷限孔鋼板覆蓋於混凝土上。
- (3) 切除鋼筋段，並打磨熔接處，使其符合夾具尺寸，測試件如圖 18。
- (4) 依序將反力架、油壓千斤頂、荷重元、夾具、拉線式位移計、電腦伺服器連接。
- (5) 啟動伺服加壓系統，紀錄每一筆荷載與位移量，且試驗時間需在 $1\sim 3$ 分鐘內完成。



(圖 17) 混凝土螺牙軌跡



(圖 18) 拉出破壞測試件



(圖 19) 侷限抗拉設備示意圖

3.2.3 非侷限抗張試驗(混凝土破壞)

當混凝土之黏結力小於錨栓抗張能力時，即發生混凝土之錐狀破壞，也是實務上常見之破壞型態。

本試驗依據了 EOTA TR 048 之相關規定建置錨栓抗張試驗設備。圖 20 係將錨栓安裝在 3000 psi (210 kg/cm²)之混凝土進行非侷限抗張試驗。試驗步驟如下：

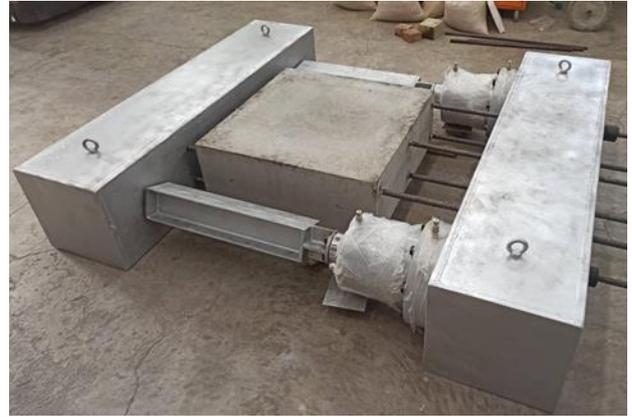
- (1) 於混凝土試驗塊使用符合規範尺寸水泥鑽尾圖 5 與垂鑽輔助鑽孔、利用空壓機搭配噴槍延伸軟管進行清孔，並將螺紋植筋錨栓植入孔內。
- (2) 依序將反力架、油壓千斤頂、荷重元、夾具、拉線式位移計、電腦伺服器連接，完成安裝設備，如圖 20。
- (3) 啟動伺服加壓系統，紀錄每一筆荷載與位移量，且試驗時間需在 1~3 分鐘內完成。



(圖 20) 非侷限抗拉設備示意圖

3.2.4 開裂混凝土

混凝土結構物經地震後即產生不同寬度之裂紋，對錨栓之固鎖能力產生一定程度折減，因此參照 ASTM E488 建立裂紋產生機制如圖 21，以利於後續進行錨栓於裂紋混凝土測試分析。



(圖 21) 混凝土裂紋產生示意圖

四、結果與討論

此章節將試驗之錨栓尺寸、混凝土抗壓強度及各試驗結果彙整，並設置對應之代號將錨栓與混凝土試驗塊強度、齡期結合以便查詢，代號表示方式如表 4。則試驗結果破壞模式如表 5。

(表 4) Test Condition Identity code

Sample	Item	Order
TC	Test Method	1
20	Concrete compress	2
A	Concrete number	3
I / II	Type of concrete	4
48	Concrete age	5
Y/C	Cylinder or core	6
1	Test number of core	7
-01~-10	Test number of anchor	8

EX : 20A I 48C1 ; TC20A II 40C2-01

(表 5) Failure Modal Abbreviation

F.M	Abbreviation
Put-Out Failure	PF
Concrete cone Failure	CF
Steel Failure	SF
Splitting Failure	SpF
Welding place Failure	WF

4.1 #4 試件埋入深度與有效埋入深度

本研究參考 EOTA TR048 及 ASTM E488 錨栓測試細節建置非侷限抗拉 Unconfine Tension (TU)、侷限抗拉設備 Confine Tension (TC) 及邊距檢測 Edge Tension (TE)，為符合測試機制錨栓之埋入深度及有效埋入深度將透過公式(1)計算，測試機制與對應之錨栓尺寸如表 6。

(表 6) 測試機制與對應之錨栓尺寸

Test Method	Nominal Embedment depth (h_{nom}) (mm)	Effective anchorage depth (h_{ef}) (mm)
Unconfine Tension (TU)	153	123
Confine Tension (TC)	108.49	85.17
Edge Tension (TE)	153	123

4.2 混凝土試驗塊

為符合規範混凝土試驗塊要求，分別澆製厚度為 250 mm 及 300 mm，以下簡稱為 type I 及 type II，試體編號方式為[混凝土強度-編號-型號-齡期-圓柱 Y 或鑽心 C 試體編號]，例如標稱強度 210、編號 A、第 I 型、49 天、編號 2 鑽心強度，其試體編號為 20A I 49C2，抗壓數據詳如表 7。

(表 7) 混凝土試驗塊抗壓結果

試驗塊	1	2	3	平均值
20A28Y	226.025	223.149	230.775	226.650
20A I 337C1	290.578	272.417	285.046	282.680
20B28Y	338.703	337.693	350.398	342.265
20B I 48C1	283.699	271.850	284.208	279.919
20B II 48C2	315.740	316.109	297.106	309.652
20B I 54C3	322.662	302.162	307.918	310.614
50A28Y	489.211	506.229	466.796	487.412
50A I 91C1	645.947	654.262	662.638	654.282
50A I 91C2	650.489	655.293	654.768	653.517

4.3 錨栓試驗結果

4.3.1 錨栓破壞

鋼材拉拔試驗進行時，係利用萬能試驗機之上下夾具將試件固定後進行之。然過程中夾具上倒鈎式齒紋會在待測件上形成齒痕，使拉拔試驗中緊抓測試件。

本研究所使用之螺紋錨栓，其前端為高

碳鋼，末端為不鏽鋼。然測試中發現，夾具在末端之不鏽鋼處，勉強能在表面形成齒痕，但已提供拉拔時所需要之固定能力。反之，如前端高碳鋼之硬度已超過夾具能力範圍，則無法在其表面產生齒痕來提供固定效果如圖 22，紅圈處為末端形成之齒痕。



(圖 22) 鋼材破壞測試件

4.3.2 侷限抗張試驗(拉出破壞)

試驗錨栓之埋入深度如表 6 所示。因扣除治具及侷限鋼板厚度，在埋入深度相較少於其他試驗。並分別植入設計強度 210 及 560 kg/cm² 混凝土試驗塊，試驗結果列於表 8 及表 9 所示。

(表 8) C20/25 侷限抗拉測試結果

Test Number	Ultimate strength (kN)	Failure Displacement (mm)	F.M
TC20B II 40C2-01	74.758	3.198	PF
TC20B II 40C2-02	69.974	2.925	
TC20B II 40C2-03	74.216	3.016	
TC20B II 40C2-04	73.376	2.529	
TC20B II 40C2-05	64.531	2.919	
TC20B II 43C2-06	74.178	3.107	
TC20B II 43C2-07	78.018	1.994	WF
TC20B II 43C2-08	80.745	1.983	
TC20B II 43C2-09	82.491	1.879	
TC20B I 43C2-10	75.171	2.663	PF
Average	72.314	2.908	PF
Stander deviation	4.205	0.261	
Variation	0.058	0.09	
K value	2.894		
N _{5%}	60.176		

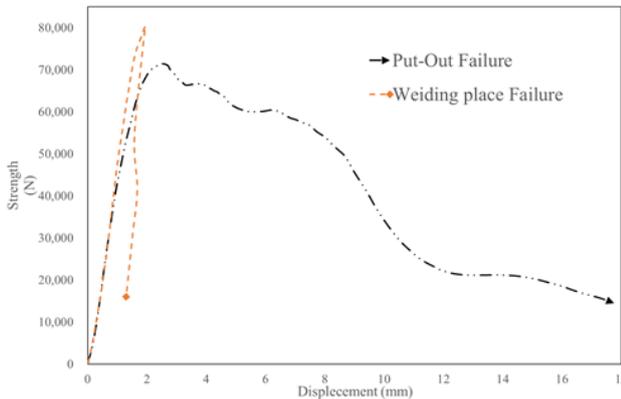
混凝土強度在 210 kg/cm² 之測試件中，編號 7~9 約在 80 kN 即發生熔接處剪斷破壞，而其他測試件則平均約在 72 kN 發生拉出破壞。而混凝土強度在 560 kg/cm² 中則都發生熔接處破壞，平均強度約 84 kN。

熔接處剪斷破壞之測試件可透過力量位

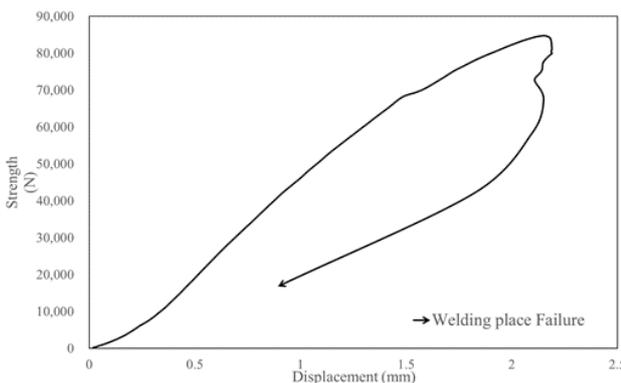
移曲線圖發現，相較於拉出破壞，力量值雖然較高，但錨栓位移非常少且未有拔出現象。由此可知，錨件本身之錨固能力依然存在，如圖 23 及圖 24 所示。

(表 9) C50/60 侷限抗拉測試結果

Test Number	Ultimate strength (kN)	Failure Displacement (mm)	F.M
TC50A I 86C2-01	84.527	1.707	WF
TC50A I 86C2-02	88.231	2.462	
TC50A I 86C2-03	80.780	2.768	
TC50A I 86C2-04	83.287	2.232	
TC50A I 86C2-05	87.265	1.721	
Average	84.818	2.18	WF
Stander deviation	3.015	0.46	
Variation	0.036	0.211	
K value	3.40		
N _{5%}	74.436		



(圖 23) C20/25 侷限抗拉測試結果



(圖 24) C50/60 侷限抗拉測試結果

4.1.3 非侷限抗張試驗(混凝土破壞)

試驗之錨栓埋入深度如表 6 所示。混凝土在設計強度 210 kg/cm² 時，大部分均發生混凝土破壞，其平均破壞強度約在 85 kN 左

右。而少數發生鋼筋破壞，其平均破壞強度約 88 kN。而混凝土在設計強度 560 kg/cm² 之試驗中，均發生鋼筋破壞，其平均破壞強度約在 88 kN 左右，試驗結果顯示如表 10 至表 12 所示。由此可知，#4 之螺紋錨栓使用在 210 kg/cm² 設計強度之混凝土是有足夠承載力。

(表 10) C20/25 非侷限抗拉測試結果

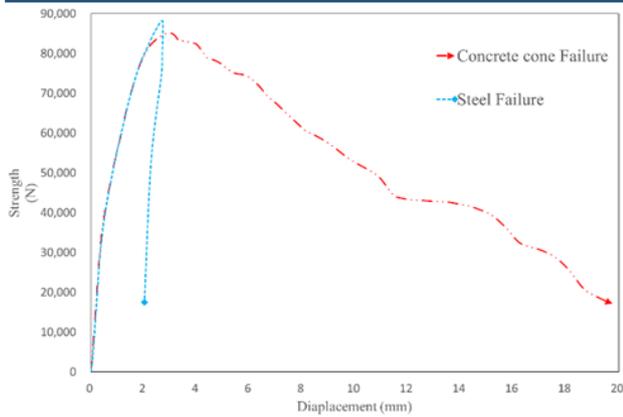
Test Number	Ultimate strength (kN)	Failure Displacement (mm)	F.M
TU20A I 286C1-01	79.487	3.087	CF
TU20A I 286C1-02	86.826	3.079	
TU20A I 286C1-03	88.385	2.636	SF
TU20A I 286C1-04	87.945	2.477	
TU20A I 286C1-05	89.153	2.403	CF
TU20B I 24C1-06	88.328	2.965	SF
TU20B I 24C1-07	86.884	3.178	CF
TU20B I 24C1-08	88.161	3.098	
TU20B I 24C1-09	80.702	3.646	
TU20B I 24C1-10	86.488	3.226	CF
Average	85.386	3.102	
Stander deviation	4.103	0.402	
Variation	0.048	0.13	
K value	2.894		
N _{5%}	73.525		

(表 11) C20/25 非侷限抗拉混凝土錐狀破壞

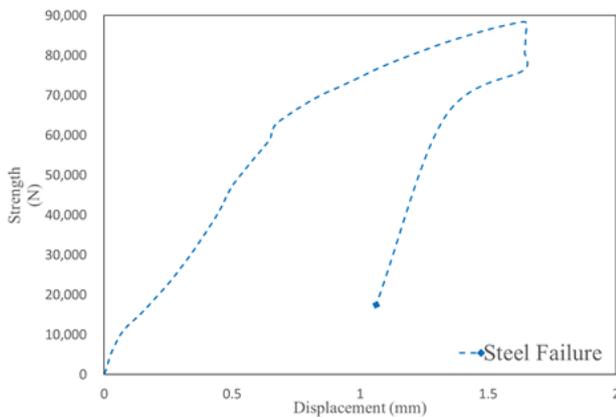
測試編號	長 [mm]	寬 [mm]	深 [mm]
TU20A I 286C1-01	325	200	42.2
TU20A I 286C1-02	225	140	37.4
TU20A I 286C1-05	110	110	31.86
TU20B I 24C1-07	345	290	57.26
TU20B I 24C1-08	317	180	43.42
TU20B I 24C1-09	237	230	40.72
TU20B I 24C1-10	211	144	38.66

(表 12) C50/60 非侷限抗拉測試結果

Test Number	Ultimate strength (kN)	Failure Displacement (mm)	F.M
TU50A I 44C2-01	88.314	1.389	SF
TU50A I 44C2-02	88.478	2.559	
TU50A I 44C2-03	88.928	1.973	
TU50A I 44C2-04	88.377	1.006	
TU50A I 44C2-05	87.859	1.158	
Average	88.391	1.617	SF
Stander deviation	0.382	0.574	
Variation	0.004	0.355	
K value	3.40		
N _{5%}	87.189		



(圖 25) C20/25 非侷限抗拉測試結果



(圖 26) C50/60 非侷限抗拉測試結果

4.1.4 邊距試驗

邊距試驗之錨栓埋入深度如表 6 所示。為達實驗目的，錨栓條件及抗張模式與非侷限抗張試驗相似，僅在混凝土角落邊距距離進行調整。

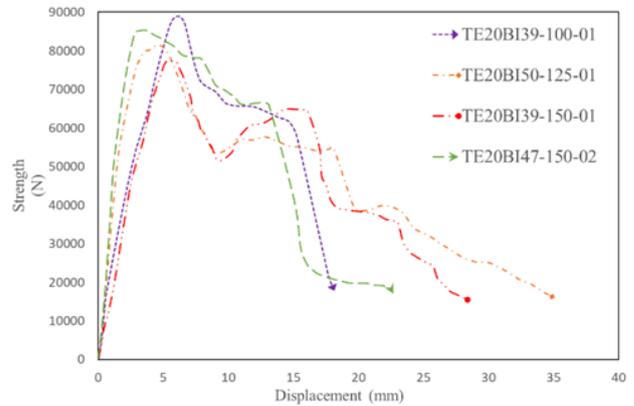
在邊距 100 mm 時強度可達 89 kN，但混凝土因邊距承载力不足而發生劈裂破壞。而 125 mm 之破壞模式產生混凝土錐狀破壞，150 mm 則發生了錐狀破壞及拉出破壞。從結果可得知，邊距 150 mm 承载力大於邊距 125 mm，且形成之混凝土錐狀破壞之面積約 2 倍，故邊距增加不僅可避免劈裂破壞之發生，混凝土承载影響面積亦隨之成長，而試驗結果顯示如表 13、表 14 及圖 27 所示。

(表 13) 邊距測試結果

Test Number	Ultimate strength (kN)	Failure Displacement (mm)	F.M
TE20B I 39C3-100-01	88.939	6.084	SpF
TE20B I 50C3-125-01	81.453	4.523	CF
TE20B I 39C3-150-01	77.511	5.417	PF
TE20B I 47C3-150-02	85.331	3.626	CF

(表 14) 邊距測試混凝土錐狀破壞

測試編號	長 [mm]	寬 [mm]	深 [mm]
TE20B I 50C3-125-01	106	96	26.89
TE20B I 39C3-150-01	180	121	35.99
TE20B I 47C3-150-02	247	180	43.59



(圖 27) 邊距測試結果

4.2 測試報告

本研究依據歐盟(EOTA)與美洲(ACI)測試規範，建立測試儀器設備，針對我國新型緊固件進行一系列相關錨栓測試，並依照兩種測試評估報告來呈現試驗結果。

五、結論與建議

本研究以#4 機械式螺紋植筋錨栓為主，並透過歐盟(EOTA)與美洲(ACI)兩種評估測試報告，進行鋼材破壞、拉出破壞、混凝土破壞及邊距影響試驗，根據試驗結果分析給予結論與建議如下：

5.1 結論

- (1) 本研究中設計強度 210 kg/cm² 混凝土試驗塊後期強度平均約 300 kg/cm²，成長 1.4~1.5 倍，設計強度 560 kg/cm² 混凝土試驗塊則約 650 kg/cm²，成長 1.1~1.2 倍，相較於前人之研究有穩定的趨勢，亦目前使用之混凝土養護及澆製方式是有效穩定生產混凝土試驗塊。
- (2) 混凝土破壞試驗中，在設計強度 210 kg/cm² 之混凝土約有 80% 以上機率，發生混凝土錐狀破壞，而設計強度 560 kg/cm² 之混凝土均發生鋼筋破壞，故可

判斷#4 機械式螺紋植筋錨栓較適用於 ACI 中定義之低強度混凝土 2,500~4,000psi (175~280 kg/cm²)。

- (3) 歐盟 EOTA 評估報告中，提供了不同混凝土設計強度之增加係數及開裂與非開裂混凝土條件係數，可透過公式計算估算出錨栓在該強度混凝土之承载力。
- (4) 兩份報告中針對螺紋錨栓之螺牙承載面積計算方式大不同。因此，在計算錨栓應力時需多加注意。

Pull-out failure			EOTA	ACI
Characteristic resistance in cracked and non-cracked concrete C20/25	$N_{Rk,p}$	[kN]	60.5	60.155
Increasing factors for $N_{Rk,p}$ in cracked or non-cracked concrete	Ψ_c	C30/37	1.073	--
		C40/50	1.128	--
		C50/60	1.173	--
Installation safety factor	γ_{inst}	--	1.0	1.0
Concrete cone failure				
Effective anchorage depth	h_{ef}	[mm]	123	123
Characteristic edge distance	$C_{cr,N}$	[mm]	200	200
Characteristic spacing	$S_{cr,N}$	[mm]	282.8	282.8
Installation safety factor	γ_{inst}	--	1.0	1.0
Factor for cracked concrete	k_{cr}	--	7.7	--
Factor for uncracked concrete	k_{cr}	--	11.0	--
Splitting failure				
Proof of splitting is required	--	--	是	是
Characteristic edge distance for splitting	$C_{cr,sp}$	[mm]	125	125
Characteristic splitting distance for splitting	$S_{cr,sp}$	[mm]	250	250
Installation safety factor	γ_{inst}	--	1.0	1.0
Factor for cracked concrete	k_{cr}	--	7.7	--
Factor for uncracked concrete	k_{cr}	--	11.0	--

5.2 建議

- (1) 拉出破壞試驗中，因夾具固定位置於螺紋植筋錨栓之熔接處，以至於在高強度混凝土試驗中無法獲得拔出破壞結果，亦可針對此種錨栓設計另一種夾具或拉拔模式。
- (2) 邊距試驗之試驗條件須在混凝土試驗塊角落，因此一次只能產出 4 筆資料，後續研究中可選定四種不同邊距距離在同一批混凝土執行試驗再彙整分析。
- (3) 未來可加入錨栓基本特性，如鋼材抗張強度、氫脆化影響或地震影響之抗張能力評估如循環測試、開裂混凝土，增加報告完整度。

六、參考文獻

1. ACI 355.2-19, "Qualification of Post-Installed Mechanical Anchors in Concrete and Commentary", American Concrete Institute, ACI Committee 355, 2019.
2. ACI 318-19, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary", American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2019.
3. ASTM E488, "Standard Test Methods for Strength of Anchors in Concrete and Masonry Elements", American Standard of Tests and Material, 2018.
4. EOTA EAD 330232-00-0601, "Mechanical Fasteners for Use in Concrete", European Organization for Technical Assessment, 2016.
5. EOTA TR 048, "Details of test for post-installed fasteners in concrete", European Organization for Technical Assessment, 2016.
6. 世鎧精密股份有限公司, 「Concrete Screw Anchors」電子型錄, 2016。
7. 陳翊彰, 「機械式螺紋植筋錨栓於非開裂混凝土之基本性能試驗」, 屏東, 2019
8. 喜得利 (股) 公司, 「安卡錨栓技術手冊」, 台北, 2000。
9. CNS 2111, 「金屬材料拉伸試驗法」, 中華民國國家標準, 1996。

離島混凝土材料及施工品質探討

王和源¹ 黃芬蘭² 林志忠³

¹ 國立高雄科技大學土木工程與科技研究所特聘教授

² 國立高雄科技大學土木工程與科技研究所研究生

³ 高雄醫學大學總務處營繕組技佐

摘要

離島建設在於實務上無論其材料取得、人員技術、施工機具的獲得、施工技術平台交流等，皆和台灣本島無法相提並論，更因諸多不便在於成本規劃上往往比台灣本島多出幾倍，甚至有能力的廠商毫無意願前往離島協助建設。而在工程建築及結構建設中，鋼筋混凝土是不可或缺的材料，規劃初期如何設計出符合、適應離島環境”之工程設計，及有效運用正確的工程材料，在施工中監督及落實材料檢驗、落實監督按圖施工，完工後建物及結構物能”安全無虞”的被使用，使用中透過適當的養護及工程材料維修，達到結構物預定的使用年限，整個工程的生命週期各環節充分達成使命，是本次探討的目的。

本研究先探討環境因素對離島地區混凝土可能影響，加上各種因素導致加速離島使用之混凝土造成各種缺失，包含設計疏失、施工欠佳引起裂縫，導致混凝土耐久性降低，以至於破壞結構，並提出提出混凝土耐久性之各種策略。做好有效規劃、確實檢驗工程材料，顧好材料品質，落實監督按圖施工，進而全面提升離島地區混凝土施工的品質水準。

關鍵字: 離島地區，混凝土材料，耐久性，施工品質

Discussion on Durability of Concrete Materials in Remote Islands

Wang He-Yuan¹ Huang Fin-Land²

¹ Professor, Institute of Civil Engineering and Disaster Prevention Technology, National Kaohsiung University of Science and Technology

² Graduate student, Institute of Civil Engineering and Disaster Prevention, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

The construction of outlying islands lies in the fact that no matter the material acquisition, personnel technology, construction equipment acquisition, construction technology platform exchanges, etc., they can not be compared with Taiwan's main island, and because of the many inconveniences, the cost planning is often several times higher than that of Taiwan's main island. Capable manufacturers have no intention to go to outlying islands to assist in construction. In engineering and structural construction, reinforced concrete is an indispensable material. How to design an engineering design that meets and adapt to the environment of an outlying island in the initial planning stage, and effectively use the correct engineering materials, and supervise and implement material inspections during construction. Implement supervision and construction according to the drawings. After completion, the buildings and structures can be used "safely". In

use, through proper maintenance and repair of engineering materials, the expected useful life of the structure is reached, and all links of the entire project life cycle are fully achieved. Mission is the purpose of this discussion.

This study first explores the possible impact of environmental factors on concrete in outlying islands. In addition, various factors have accelerated the use of concrete in outlying islands to cause various defects, including design negligence, poor construction and cracks, resulting in reduced concrete durability and damage to the structure, and proposed Put forward various strategies for concrete durability. Effective planning, actual inspection of engineering materials, good quality of materials, implementation of supervision and construction according to drawings, and overall improvement of the quality of concrete construction in outlying islands

Keywords: outlying islands, concrete materials, durability, construction quality

一、前言

離島工程工址四周環海，先天環境較為嚴峻，四周環海，使用水源取得不易，所有混凝土粒料皆須仰賴進口，混凝土材料及用水經常被摻雜海域附近未經處理之砂石料源及海水，混凝土中遭受鹽分、氯離子、空氣、溫溼度環境、腐蝕性液體或氣體等影響，造成混凝土品質劣化，構造物鋼材腐蝕影響結構安全。

整體工程施工完成交付使用單位後，新的工程建設未獲得使用單位或養護單位效維護及保養，且無考量損壞部份相等材質取得及更換，以至於無法有效達到預期工程使用年限，再者完工後亦無編制養護經費來源，因此，更需要於施工階段落實督促施工單位，對工程材料的審慎選用及檢驗，施工中各環節檢驗，施工後的養護等能確實的提升。

臨海地區建築或結構物的腐蝕問題，一直都是世界各國面臨的共通困擾問題。臨海氣候炎熱潮濕，建物結構在容易腐蝕嚴苛環境之下，結構物內之鋼筋混凝土容易受海水或海風中之氯離子的滲透侵入，對整體構造物之鋼筋發生銹蝕、斷裂、混凝土結構體膨脹，導致結構體混凝土劣化、混凝土剝落及損壞。整體而言鋼筋混凝土構造物經年累月暴露於高溫、高濕的環境下，混凝土的耐久性和強度對建築或結構物造成影響，隨環境侵蝕而降低使用年限，破壞整體構造，影響整體使用安全。如圖 1 所示。

二、混凝土材料及施工可能影響混凝土工程品質之缺失

1. 鋼筋混凝土構造物經年累月暴露於高溫、高濕的環境下，混凝土的耐久性和強度對建築或結構物造成影響，隨環境侵蝕而降低使用年限，破壞整體構造，影響整體使用安全。

混凝土材料的耐久性與性能表現，直接影響鋼筋混凝土的結構性能。常見混凝土損傷劣化主要有裂縫、剝離、剝落、蜂窩、鋼筋外露、鋼筋銹蝕、表面侵蝕等。混凝土一般劣化現象及瑕疵之原因大致有下列幾項：

- (1) 結構系統：結構體在於梁柱交接處、窗角斜向補強筋及鋼筋交會處等鋼筋綁紮較密的位置，或混凝土構材尺寸較小，受埋置物或鋼筋阻擋混凝土流動及搗實不易，容易導致混凝土澆置困難而產生蜂窩現象(如圖 2 所示)。
- (2) 混凝土配合材料配比不當：混凝土品質優良之配比設計應能滿足適當的工作性、凝固後可達到設計之強度與耐久性、合理之經濟性。配比設計不當為形成蜂窩現象的主要原因之一，很多人會認為蜂窩現象僅與混凝土現場澆置之操作不當有關。其實不然，有時候混凝土的配比設計對蜂窩現象的產生也是很重要的影響因素。混凝土料粒的尺寸也會影響蜂窩現象的形成，如果使用了太大或太多的粒料，可能有些空間會沒有足夠之水泥漿體充分填滿孔隙，容易形成蜂窩現象。

同樣，水及水泥含量不足，造成流動性不良，也會造成蜂窩現象。

- (3) 混凝土配比坍度太小，不易流動。預拌混凝土在使用摻料過多時易黏稠，施工時不容易流動影響工作度，特別是開口鋼筋補強的位置，很容易造成在拆模後有蜂窩現象發生。
- (4) 施工中搗實不足，震動棒未深入並且沒有確實搗實混凝土，導致混凝土中氣泡仍存於混凝土內部及表面，大量氣泡集結容易形成蜂窩(如圖 3 所示)。
- (5) 施工中混凝土保護層不足，鋼筋過於貼近模板，或模板縫隙未堵塞完全，或鋼筋較密，混凝土所使用的石子粒徑過大造成水泥漿流失。
- (6) 混凝土澆置施工過程中不正確的混凝土澆置方式，造成混凝土產稱析離現象，混凝土粒料與水泥砂漿分離，如卸料槽高度太高，導致混凝土硬化後出現內部空隙或表面的蜂窩現象(圖 4 所示)。

美國混凝土協會提到混凝土的析離時認為：混凝土不產生析離的最大卸料高度與混凝土的組成成分的特性有關，一般可以把卸料高度限設定在 90-120cm；在混凝土牆和柱的澆築施工時，讓混凝土自由下落的高度必須予以控制。高位卸料是最容易產生析離的，為了解決這個問題，可以在混凝土卸料過程中使用滑槽，並於滑槽末端使用擋板可避免析離。

- (7) 混凝土澆置後未達預定設計強度提早拆模(天數不足)，或使用不當的拆模方法，粒料隨模板脫落或造成表層剝落(如圖 5 所示)。
- (8) 模板施工支撐發生變形漏漿造成蜂窩現象，或模板表面粗糙或雜物未清理乾淨，鋼模板隔離劑未刷或未刷均勻，拆模時破壞混凝土表面。

2. 裂縫對混凝土耐久性的影響：

新澆置的混凝土種種因素而發生蜂窩、裂縫、麻面等可能損及結構強度及耐久性的瑕疵。老舊混凝土結構常因外力撞擊，空氣、

雨水中之化學物侵入導致劣化、受損，進行修補時需往往先將劣化、受損處加以打除，再進行修復以增加其耐久性；一般在進行混凝土瑕疵之修補時，我們希望修補結果能夠維持更長久的使用壽命，但對於因鋼筋鏽蝕而引起之裂縫所進行之修補工作，通常在修補完 1 至 3 年後，修補區域旁既會出現新的混凝土剝離現象。

鋼筋外露、鏽蝕與混凝土蜂窩現象相同，為結構構件最普遍之劣化類型，最常發生位置為橋梁主梁樑底處，主要原因大多為混凝土保護層不足、混凝土裂縫、蜂窩等因素，使鋼筋容易受到外在水氣與有害物質侵襲，造成鋼筋生鏽及腐蝕之情形；其次為最外側主樑、版樑兩側底面，以及鄰近排水孔洩水孔處，因雨水及路面排水滲入混凝土內部，以及迎風面等因素，容易造成混凝土產生白華、碳化及鋼筋鏽蝕等劣化現象。

當鋼筋混凝土受到外面環境的影響、以及施工不良、結構設計不當等因素，常造成混凝土發生各種的劣化現象，將導致混凝土在耐久性、強度的損失，加速了鋼筋的腐蝕，應而影響了建築物安全，減少建物使用的年限。結構物在於混凝土的耐久性造成損害有以下幾個要點：

- (1) 結構劣化對混凝土強度的影響：強度和耐久性是兩個不同層面，雖然它們對混凝土來說都是很重要的性能指標。模板後如果發現混凝土表面上有蜂窩時，無法判定蜂窩到底延伸混凝土內部有多深，但很顯然的混凝土的強度會在這個區域會降低強度，因為該處混凝土不密實，也就意味著該處的構材斷面積有一定程度的減少。構材斷面積減少就意味著構材抗剪、抗壓及抗彎等能力減小。混凝土蜂窩現象，直接影響混凝土強度，降低損害混凝土結構的耐久性。如果蜂窩大到一定程度，會導致構材的功能失效。
- (2) 氯離子侵蝕或碳化造成鋼筋腐蝕：混凝土中的鋼筋在同時滿足以下三個條件時容易發生鏽蝕。(A)在鋼筋表面存在電位差，不同電位的區段之間形成陽極和陰

極。(B)陽極區段的鋼筋表面處於活化狀態，能夠發生陽極反應 (C)存在水分和溶解氧，在陰極區段就會發生陰極反應。

由於混凝土的鹼度差異，鋼筋中的碳及其它合金元素的偏析，加工引起的鋼材內部應力差異等都會引起鋼筋表面各處產生電位差。鋼筋表面各處產生電位差這個條件總是容易存在，如果外部混凝土表面有孔隙存，則陽極區段的鋼筋表面處於活化狀態，能夠發生陽極反應又混凝土表面存在水分和溶解氧，在陰極區段就會發生陰極反應，鋼筋就會發生銹蝕反應；水中的鐵離子和氫氧根離子結合生成氫氧化亞鐵，氫氧化亞鐵與水中氧進一步作用可以生成氫氧化鐵，部分氫氧化鐵又可以繼續氧化生銹，混凝土結構就繼續鏽蝕剝落。

蜂窩現象本身就意味著鋼筋與空氣的直接接觸，雖然鋼筋曝露在空氣中的面積可能會很少，但只要它與空氣直接接觸，混凝土內部產生張應力，累積到一定程度時將導致混凝土產生裂縫、剝離及保護層剝落等損傷劣化情形，當損傷劣化情形更趨嚴重時，鋼筋與混凝土間握裹力便降低，鋼筋斷面也因膨脹碎裂而減少，使得構件強度降低而影響結構安全。

- (3) 有害離子滲透進入混凝土結構曾：蜂窩會導致鋼筋保護層厚度的減小，使硫酸鹽、酸類、海水和氯離子等直接與鋼筋接觸，空氣經由孔隙滲入到混凝土內，空氣中的二氧化碳會和混凝土中的氫氧化鈣發生反應而生成碳酸鈣，造成混凝土的碳化。碳化的後果就是會降低混凝土的鹼性，pH 值會從通常的 12.5 降到 10 或更低。如果混凝土保護層的碳化深度一直延伸到了鋼筋表面，鋼筋表面的鈍態膜就會被破壞，鋼筋就會很容易發生銹蝕現象。如地下水中硫酸鹽類(sulphate)侵襲劣化、鹼質-粒料反應 粒料反應。

3. 氯離子對混凝土產生破壞：
氯離子本身並不對混凝土產生破壞，但

它會破壞鋼筋表層的鈍態膜，從而導致鋼筋生銹。與混凝土的碳化現象類似，混凝土保護層越厚，則氯離子侵入的速度越慢，所以可以總結說，蜂窩現象可以通過幫助氯離子等有害元素的侵入而損害鋼筋混凝土結構的耐久性。

當二氧化碳(CO₂)經由混凝土孔隙進入混凝土內與水泥化產物氫氧鈣形成學反應，生成碳酸鈣(CaCO₃)，進而使混凝土內之孔隙水水的 pH 值下降。此時，鋼筋表面之鈍態保護膜(Fe₂O₃)可能被破壞，使鋼筋產生銹蝕及體積膨脹，導致混凝土產生裂縫，保護層剝落，將危害混凝土結構物安全。

海砂屋是指建築房屋時混凝土所用的砂，用的是來自海邊的海砂而非正常所用的河砂，海砂若沒有經過去氯離子處理，短期會使牆面滲出白色的痕漬，長期則會加速腐蝕鋼筋，鋼筋因銹蝕膨脹造成混凝土塊剝落，嚴重損害房屋的結構體，如圖 6 所示。

氯離子侵蝕是由於混凝土材料本身或外界入侵的氯離子穿透過混凝土，並且透過擴散過程滲入鋼筋與混凝土的交界面，而當氯離子與鈍態保護膜的氫氧根離子之比值(Cl-/OH-)，達到一臨界值時將會造成鋼筋表面之鈍態保護膜分解，進而產生鋼筋腐蝕。建築物鋼筋表面的混凝土品質因中性化或氯離子侵入將造成鋼筋腐蝕，當鋼筋腐蝕生成物的體積比鋼筋體積大至 3-7 倍時，會對混凝土產生張力，造成擠壓；累積到某一個程度時，混凝土表面會產生裂縫。而裂縫將導致愈多鋼筋生鏽，造成混凝土剝落，鋼筋外露，將影響建物結構(如圖 7 所示)。

混凝土表面瑕疵對結構體之耐久性有相當大的影響，在施工期間對新澆置混凝土之瑕疵妥善做好修補工作，將可有效延長結構的使用年限，並節省日後龐大的維修費用。混凝土施工過程應儘量避免蜂窩之發生，若拆模後混凝土表面有蜂窩，則需依程序來處理改善。鋼筋保護層厚度範圍之蜂窩，須先將表面凹凸或鬆動混凝土打除至堅實之結構面，並須將蜂窩外緣線打成接近直角之形狀，其深度至少有 2 至 3 公分，其邊應與表面成

直角，並用高壓清水沖洗，及周圍 150mm 範圍內用水充份溼潤 30 分鐘以上，將表面之鬆動碎渣、粉塵等清洗乾淨，再用相同強度之無收縮水泥砂漿填補，以使終凝後不會有收縮裂縫發生。當修補面積及深度較大者須用無收縮混凝土修補。

三、離島地區材料及施工問題之探討

1. 離島工程混凝土品質缺失探討

離島工程之材料、施工、技術、機具型式使用、交通運輸等逐項成本頗高，加上臨海氣候高溫、高鹽份等影響，各種限制問題導致混凝土品質相對之下缺點較為容易產生。民國 81 年金門地區解除戰地政務後，各項工程建設逐步推展，硬體設施雖有顯著進步，惟工程品質相較於台灣仍有落後與不足，離島建設除施工技術與人員素質有所差異外，影響金門本地工程品質，最嚴重者首推不良之混凝土材料與不當之混凝土施工，尤其金門地區沒有河砂可開採，早期混凝土皆使用海砂，對鋼筋混凝土結構影響甚大，後來工程品質雖有些防範措施，但是混凝土工程仍有瑕疵，這些皆反應出幾個問題：包括混凝土原料是否符合規範要求、混凝土工廠之生產流程是否嚴謹、混凝土施工過程是否標準、監工是否確實、混凝土養護是否正確，每一環節都影響工程的成敗。

離島等地區由於工程量體較少亦較小，預算編製作業無相關營建材料、機具甚至人力價格資訊可依循或參考，如無法編訂合理工程預算，廠商投標的意願便降低甚至造成流標，因此提供離島之價格資訊實足重要。

2. 離島地區混凝土施工規範探討：

公共工程在離島地區針對混凝土工程雖然有規範，但仍是屬於較一般之規定居多。針對離島地區代表性施工管理及規範探討如下：

(1) 以金門縣水頭港區旅客服務中心通關空間擴充工程為例[10]

a. 施工管理：工程對離島地區，境內無符

合「廠管理輔導法」之預拌混凝土，其處理方式包括預拌混凝土廠或「公共工程地型預拌混凝土設備」之品質控管方式，依工程會所訂「公共施綱要規範」第 03050 章「混凝土基本材料及施工一般要求」第 1.5.2 款「拌合廠規模、設備及品質控制等資料」辦理。

- b. 混凝土拌和廠規模、設備及品質控制等資料廠商應依據 CNS 3090 之規定提送有關混凝土組成材料來源及拌和計畫書，供工程司審核。
- c. 供應單一工程混凝土總量大於 [5000m³]之拌和廠，應檢附經政府機關、財團法人或學術機構等驗證單位依據 CNS 3090 驗證合格之證明文件，送交工程司審核通過後方得供料。
- d. 水泥：工程使用水泥材料時，若允許使用水硬性混合水泥，應於契約中特別註明，若未註明者，則以卜特嵐水泥為限。
- e. 混凝土粒料使用及粒料規格，參考彙整公共工程規範第 03050 章規格。

以上本工程混凝土施工規範之主要依工程會所訂「公共施綱要規範」第 03050 章「混凝土基本材料及施工一般要求」第 1.5.2 款「拌合廠規模、設備及品質控制等資料」及以 CNS 3090 之規定，然僅在水泥材料有提到，若允許使用水硬性混合水泥，應於契約中特別註明，若未註明者，則以卜特嵐水泥為限。其它施工等較無耐久性等規範。

(2) 以雄獅堡至下埔下海底管線管理站濱海自行車道新建工程為例[13]：

- a. 施工管理：廠商所使用之預拌混凝土，應為「領有工廠登記證」之預拌混凝土場供應。
- b. 混凝土施工規範第 03050 章第 1.5.4 混凝土配比設計應符合 ACI C211.1
- c. 提送配比設計時應一併提送所有相關資料，包括但不限於下列如表 1 所示：水泥及飛灰之種類及貨源。粒料來源，以及試驗結果。粗、細粒料之級配資料。粗、細

粒料混合後之級配資料；並提送粗、細粒料之混合比例資料。粒料與水泥之重量比。水與水泥之重量比。該配比設計所達成之工作性，以坍度表示。若使用化學摻料，應說明型式、數量、目的及應用與試驗規範。摻料除外之組成材料之氯化物含量。

- d. 供應單一鋼筋混凝土之契約數量大於 [500m³] 需做配比設計，預力混凝土無論數量多少，均需作配比設計。
- e. 水泥：一般構造物所使用之水泥為第 [I 型]，除契約中特別註明，若未註明者，則以卜特嵐水泥為限。
- f. ϕ 120 基樁工程預拌混凝土(280kg/cm²)及橋面板混凝土(210kg/cm²)水泥材料使用抗硫水泥，140kgf/cm² 預拌混凝土和 350kgf/cm² 水泥砂漿，採用一般第 I 型水泥。
- g. 混凝土粒料使用及粒料規格，參考彙整公共工程規範 第 03050 章規格表。

本工程工址因位於海岸線工程，工程混凝土之使用在於基樁工程及橋面板工程有特別提到使用水泥材料為「抗硫水泥」，但其它使用規格混凝土 140kgf/cm² 預拌混凝土和 350kgf/cm² 水泥砂漿則無特別規定，亦無提到耐久性材料的使用，所用水泥為一般第 I 型水泥。

(3) 以內政部營建署金門國家公園管理處金寧鄉古寧村(南山)第二期污水下水道及用戶接管工程為例[11]：

- a. 預拌廠規模、設備及品質控制等資料：廠商應依據 CNS 3090 A2042 之規定提送有關混凝土組成材料來源及拌和計畫書，供監造單位審核。該計畫應說明拌和廠之型式、位置及所採用之拌和設備與單位產量。
- b. 配比設計：為確保混凝土品質，各種強度混凝土均應進行配比設計。考量實務需求，混凝土配比設計執行原則適用如下：A. 當同一抗壓強度之混凝土其契約總量大於 1000m³ 時，須個案進行配比設。B. 當契約總量未滿 1000m³ 時，得依 A. 之個案方式處理；或採用

金門縣政府暨所屬各機關學校及公營事業機構核可一年內之混凝土配比，不另進行配比。

- c. 水泥：不同廠牌之水泥不得混合使用於同一構造物的同一單元之混凝土，除非經試驗證明此不同廠牌水泥所拌和成之混凝土彼此性質且色澤相當，而且須經監造單位事先同意。工程使用水泥材料時，若允許使用卜特嵐高爐水泥或卜特嵐飛灰水泥，應於契約中特別註明，若未註明者，則以卜特嵐水泥為限。水泥之物理性質及化學成分，均須照 CNS 61 R2001 卜特嵐水泥、CNS3654 R2078 卜特嵐高爐水泥、CNS 11270 R2181 卜特嵐飛灰水泥之規。工程使用卜特嵐高爐水泥、卜特嵐飛灰水泥時，應以配比設計方式為主，未經監造單位許可，不得混用卜作嵐摻和物。

本案為營建署發包之工程案例，其混凝土使用規定亦參考金門縣政府所屬公共工程規定，同一抗壓強度之混凝土其契約總量大於 1000m³ 時，須個案進行配比設；契約總量未滿 1000m³ 時，得依個案方式處理；或採用金門縣政府暨所屬各機關學校及公營事業機構核可一年內之混凝土配比，不另進行配比，所以採用的水泥無特別提到使用種類範圍。

(4) 以金門縣金湖鎮公所之金湖鎮菜市場及新湖里等環境改善工程為例[12]：

- a. 施工管理：廠商使用之預拌混凝土，應為「領有工廠登記證」之預拌混凝土廠供；本案預拌混凝土廠品質控管方式，依工程會所訂「公共工程施工綱要規範」第 03050 章「混凝土基本材料及施工一般要求」「拌合廠規模、設備及品質控制等資料」辦理。
- b. 結構用混凝土之材料拌和廠規模、設備及品質控制等資料：1. 混凝土組成成份之水泥、粒料與水及化學摻料與飛灰等之使用規定照第 03050 章之相關規定[12]。

根據以上摘錄契約規定及規範要求顯示，

金門地區公共工程在於混凝土水泥用料使用上無統一標準，例如工程使用 II 型水泥，有些則無特別要求水泥使用類別。

3. 離島地區混凝土使用量及價格分析

金門地區混凝土粒料全部皆須仰賴進口，依經濟部礦務局統計，自 104 年起至 109 年金門地區砂石進口數量如表 1 所示。離島混凝土取得有其困難之處，金門地區砂石進口數量統計表整體數據而言，混凝土骨材使用量已逐漸降低趨勢，其原因之一可能是建設量體已達到一定飽和程度，因工程量體需求影響，砂石之進口裝卸量下滑，另外原因可能營建建材選定已有其他合適材料取代替混凝土的使用(例如綠建材開發取代混凝土結構)。

以 109 年 6 月份同期比較，混凝土基本砂石粒料金門地區和台灣地區相較之下，以粗粒料而言 m^3 價格在北、中、南各地區相比其均價已高過於 3 倍。

另公共工程委員會亦在外島地區砂石之市場價格進行個別分析，由表 2 及表 3 顯示，金門、馬祖及澎湖地區之「產品，粒料，粗粒料，25~4.75mm，砂石廠交貨」及「產品，卜特嵐水泥，第 1 型水泥，散裝，工廠交貨」價格尚屬於平穩。另市場供給部分，金門粗砂、碎石之進口砂石裝卸量則由 109/03 之 37,990 公噸至 109/04 之 26,000 公噸，減少約 11,990 公噸，跌幅程度約 46.1%；顯示外島整體砂石的市場需求狀況，在進口砂石原料持續供應下，因工程量體需求影響，粗砂、碎石之進口砂石裝卸量有下滑趨勢，109 年第三季外島砂石及水泥價格會因市場供需狀況之變化適度調整，價格呈現應會因會進入平穩狀態。

離島地區(金門、馬祖、澎湖)單一工程材料項目-混凝土，成本價格均高於台灣之理由已明顯匯出，從價格剖析無論在於材料、水泥、人工都高出達 3 倍以上，再加上預拌混凝土廠商也有經營成本，工地交貨金額整體已超出台灣預算 30% 以上，因此混凝土價格之高也應該是台灣優良廠商不敢進駐離島各

地協助進行工程建設之一大原因。再者工程建設之同時也往往因聘請不到有經驗、有能力的施工人員而影響到整體工程進行，延宕工程建設，這些不便應是所有離島地區建設的最大阻礙。

4. 施工查核缺失比較分析

4.1「品質看得見，過程是關鍵」、「過程放心、品質放心」雖是提升公共工程施工品質之宣傳口號，但卻也凸顯工地現場施工管理的重要性，公共工程發現缺失要求改善最快速及有效的方式就是三級品管中的「品質查核」著手，自民國 82 年起國內公共工程的設計、監造、施工均遵循行政院公共工程委員會頒佈的「三級品管」制度運作，凡從事土木工程者人人朗朗上口視為當然毫無爭議，認為是唯一的、最佳的、甚至是世界性的品質管理做法，檢視工地施工人員落實品質管理作業程序及執行程度，以判定工地是否確實依品質制度及計畫進行自主品管。往常媒體報導公共工程品質與效率不佳，都是最低標所致，為避免投標廠商低價搶標，工程會已建立「廠商承攬公共工程履歷」，可供工程主辦機關查詢廠商過去 5 年內曾經參與公共工程的優劣紀錄，作為評選評分參考，而機關可搭配「評分及格最低標」，就廠商資格及規格以評分方式篩選後，再決標給履約能力較佳之廠商，進而提升公共工程施工品質[1]。所以未來參與公共建設之廠商，良好的品管組織運作及人力配置與培訓，敬業投入每次公共建設，建立良好實績，也是累計下次參與公共建設之競爭力。既然有了查核及客觀的檢視行為，即會有普遍之樣態缺失出現，工程會自九十八年起針對施工品質常見缺失，要求各主管機關查核時加重扣點罰款，並呼籲承攬廠商對於缺失發生率高之工程項目，先行檢討尋求改善，以確保施工及材料正確無誤。為此，縣府為強化各工程承辦人員及地區從業人員能充分了解施工及品管缺失，避免缺失一再發生，以提昇公共工程品質，並於日前舉辦鋼筋、模板及混凝土施工注意要點及對策實務講座，來提醒相關人員注意。

在查核小組查核之工程案件分析施工缺失，發現查核缺失項目一『混凝土澆置、搗實不合規範，有冷縫、蜂窩或孔洞產生』在累計 4 年的查核缺失項目缺失件數中被列入件數有 87 件，佔了缺失百分比 30.31% 最高。查核缺失項目二『施工縫及伸縮縫留設不當或施作不當或未設置』件數有 60 件，佔了缺失百分比有 20.91%。查核缺失項目三『混凝土表面殘留雜物(如鐵絲、鐵件、模板)』件數 57 件，缺失百分比佔了 19.86% 位居第三。

另外查核缺失項目『混凝土養護不合規範，塑性收縮造成裂縫』、查核缺失項目『混凝土完成面垂直及水平度不合規範或有大量修補痕跡』、查核缺失項目『無氯離子含量試驗紀錄或檢驗頻率不足，或內容不符規定』在各次的查核缺失中位居第四。

查核缺失項目一『混凝土澆置、搗實不合規範，有冷縫、蜂窩或孔洞產生』應於施工中工地現場指揮人員對於工作人員沒有確實要求踏實搗實，以至於拆模後發生冷縫及蜂窩現象，另外工程施工中實質的施工品質自主檢查，檢查人員亦沒有落實真正再三要求，由此得知金門地區，在於公共工程品質施工作業施工中缺失已有逐漸被重視。金門地區混凝土預拌廠大都設置於東半島，澆置過程中車輛運送銜接時而不濟，容易形成混凝土澆置銜接塑性收縮現象，金門的緯度與臺灣中部相近，不過由於金門是海面上所形成的陸島，因海陸性質等差異，四季的氣溫比臺灣低，且早晚溫差大，年平均溫大約攝氏 20.9 度。金門的 3-5 月多霧，4-6 月為雨季，夏季炎熱偶有颱風侵襲，冬季則是東北季風強勁，較為乾冷。混凝土澆置施工過程中，表面的水份常因溫度、溼度、風速以及混凝土本身之溫度，造成表面水份快速蒸發，澆置停頓過久或氣溫過高，混凝土蒸發速率大於混凝土表面泌水速率或外界補充之水份時，最易發生塑性收縮裂縫現象，新澆置的混凝土無法與前段已澆置完成混凝土結合成一體而形成之縫隙，這種現象在金門地區很容易發生。所以，在澆置混凝土前，應先擬定混凝土澆置作業計畫，詳細規劃車輛行駛路

線時間、運輸車輛數量安排、混凝土澆置人員、一個車次混凝土作業等時間等詳細規劃評估，避免於施工時發生或減少缺失，以上發生狀況在公共工程混凝土澆置作業施工自主檢查表中有詳細規定及要求，其中表列紀錄施工中檢驗項目：混凝土自拌合起致運送工地所需時間限制在 90 分鐘內完成為檢查要點；混凝土材料運送到工地卸貨前應先分析氯離子含量：應小於 $0.15\text{kg}/\text{m}^3$ ，及檢驗混凝土坍度，坍度太小容易造成蜂窩現象，一般坍度在 $15\text{cm}\pm 3.8\text{cm}$ 左右。

4.2 預防塑性收縮裂縫現象發生有下列改善策略：

1. 在材料方面預防：
 - A. 添加緩凝劑：使先澆置的混凝土不會過度硬化或凝結。
 - B. 增加黏結力：在先澆置之混凝土上澆置一層水灰比相同之水泥砂漿，再澆置新混凝土。
2. 施工方面預防：
 - A. 控制澆置計畫：避免混凝土之先後作業發生無法銜接之現象，計算車輛行駛路程時間，安排車輛運送車次及每車澆置作業時間。
 - B. 澆置混凝土之前，將地坪土壤或模板澆水均勻濕透。
 - C. 澆置混凝土後，覆蓋麻布袋或帆布或 PP 板保持混凝土終凝前表面濕潤。
 - D. 在混凝土澆置完成浮水消失後，在混凝土表面噴灑養護劑等。
 - E. 在混凝土澆置完成面水分快乾時，以噴霧灑水方式維持混凝土表面濕潤。
 - F. 在灌漿面邊緣及開口周圍用角材墊高，當每一區塊澆注整平後，灌水以蓄水方式進行養護。
 - G. 在混凝土澆置完成，浮水消失後，大約當人可踏上混凝土面無沉陷時，即可進行整體粉光。

『混凝土表面殘留雜物(如鐵絲、鐵件、模板)』在混凝土表面上殘留鐵絲、鐵件很容易在往後鐵件鏽蝕後或木材腐蝕後對結構體產生孔洞或混凝土剝落情形，施工的接續中容

易造成人員受傷，在建築工程中會因為殘留雜物影響泥作施工，如果是排水溝兩側牆，完工後農民要下排水溝渠取水，會因為混凝土表面殘留鐵絲、鐵件不小心而造成身體部份傷害。

四、提升離島地區對材料及施工之問題探討

4-1 混凝土耐久性設計

工程防鏽蝕評估其考量範圍如：工址環境條件、設計使用年限及工程經濟性，各國對於混凝土防蝕規範需求皆有相關規定，目前國內混凝土及橋梁設計大多參照美國相關規範辦理，所以防蝕需求亦參考美國 ACI 之規定 [32]。

混凝土結構防蝕包括下列對策[32]

1. 混凝土結構防蝕對策可考量採用 C_3A 含量低之抗硫酸水泥、規定混凝土最大水膠比、添加高爐石粉或飛灰等卜作嵐材料、加厚保護層、選用防蝕鋼筋及配合施工要求等，以下各項為混凝土構造物之可行防蝕對策，實際執行時則須考量工程特性及防蝕功能需求斟酌選用。
2. 設計結構物時，儘量採用通風流暢，鹽份粒子不易附著於表面之平順造型；於上部結構宜採用箱型梁而不宜採用 T 型梁或 I 型梁，因其梁下翼緣角隅位置易蓄積鹽害因子。
3. 鋼筋保護層適度加厚，增加結構體防蝕功能。
4. 採較嚴格之拉應力設計標準(如 0 張應力)，以避免裂縫的產生。
5. 避免與減少拉應力產生，設置適量防裂鋼筋以防患裂縫產生。
6. 降低混凝土水膠比、添加高爐石粉或飛灰等卜作嵐材料以減少混凝土孔隙，增進其緻密性及水密性，以提高混凝土抗腐蝕能力。
7. 宜採用具有抗硫酸鹽特性之 TYPE II 或 TYPE V 水泥。
8. 採用鍍鋅鋼筋或環氧樹脂鋼筋。
9. 陰極防蝕處理。

有關各項卜作嵐材料之添加量可參考國內

外相關規定。初步建議卜作嵐材料總量佔總膠結料重量之百分比為 45~50%，其中飛灰取代水泥量之上限為 10%。

4-2 混凝土規範及施工技術提升

依據建築技術規則建築構造編[38]：為設計結構混凝土構造時所必須遵守的最低基本要求。所稱結構混凝土係指具有結構功能之混凝土，包括鋼筋混凝土及純混凝土。設計原則：結構混凝土構造之設計，應能在使用環境下承受各種規定載重，並滿足安全性及適用性之需求。依據規範，金門地區為四面環海之島嶼區域，因環境、氣候、氣溫變化等環境因素的影響下，且位處於海域地帶，各類型土木、建物及設施常年受海洋惡劣環境下，鋼筋混凝土構造物長期曝露在海洋環境中，受到氯離子及硫酸鹽等有害因子之侵蝕，加上長期承受波浪、暴潮及海風侵襲的沖蝕作用，混凝土經常發生開裂、崩落等劣化現象及內部鋼筋快速腐蝕終致斷裂，要做好維護管理極為不易，因此，承受潛伏性與立即性損壞之威脅機率甚高。交通部運輸研究所研究資料顯示，臺灣缺乏完整的本土大氣腐蝕因子資料庫，有其急迫性與必要性。

公共工程技術資料為能提供離島地區工程採購，預算編列之價格參考，自 101 年 7 月起於公共工程價格資料庫之「大宗資材市場趨勢分析」中，提供離島地區大宗資材價格趨勢，以供預算編列參考。同時工程會亦於 101/07/10 以工程技字第 10100256200 號函請各單位提供所屬設計、施工等技術規範、規則或標準之相關網頁連結或電子檔依據該資料屬性分類並於技術資料庫網頁之「規範、標準查詢」專區建置相關連結網址，以供使用者查詢，編訂台灣區、離島地區規範要求。

4-3 混凝土之實際運用探討(以金門大橋為例)

金門大橋工程防蝕策略：金門大橋工程為國內首座大規模跨海大橋工程，是連接烈嶼鄉(小金門)與大金門的重要交通橋樑，路線全長約 5.414 公里，工程施工因受限於海象(海流流速、流向、潮位及海底地形)、氣象

(強風、大雨及濃霧)及離岸作業(海上施工運輸及資源供應)等不利因素影響,較陸上施工更加困難。依據目前金門大橋內容截取其中規範分析如下:

(一) 上部結構[33]:

金門大橋工程之橋梁工址位於海水中及近海岸,大橋工程因位於海水中,受海水飛沫之影響,屬極嚴重鹽害區,基於整體考量,契約規範混凝土使用 C3A 含量適度之 TYPE II 水泥及添加高爐石粉或飛灰等卜作嵐材料(飛灰、高爐石粉上限 45%)或 IS(MS)高爐中度抗硫水泥、IP(MS)卜作嵐中度抗硫水泥,最大水膠比為 0.40,工程混凝土強度採 $420\text{kgf}/\text{cm}^2$,可增加其水密性,有助於防蝕,配合混凝土抗氯離子穿透能力試驗,使用之配比均須符合 56 天齡期混凝土符合 CNS 14795 等級為”低”以下標準。在設計上採 0 張應力,以避免裂縫產生。

(二) 下部結構[33]:

金門大橋橋墩、橋台及基礎板係採用現場澆置施工,施工時配合控制水泥與混凝土品質及保護層厚度,以達到防蝕需求。墩柱及橋塔採用自充填混凝土(SCC),具有高度流動能力,澆置過程不需振動搗實,完全藉由自身流動性能填充至鋼筋間隙及模板之各角落,克服鋼筋密集及封閉性空間不易澆置構件之缺點,可提高混凝土施工品質,增進結構物耐久性。

(三) 橋墩基樁[33]:

圖 9 所示為金門大橋現場鋼筋施工照片;圖 10 所示為金門大橋基礎鋼筋綁紮施工。基樁因長期埋置於海水及地表面下,受土壤圍束及海水中低含氧量之構造物,其受侵蝕危害程度較外露於潮汐飛沫帶之構造物為低,金門大橋工程之基樁混凝土建議選用 C3A 含量適度之 TYPE II 水泥添加高爐石粉或飛灰等卜作嵐材料(飛灰、高爐石粉上限 45%),最大水膠比不

得大於 0.4 及 $315\text{kgf}/\text{cm}^2$ 混凝土(設計強度 $280\text{kgf}/\text{cm}^2$),樁體設計採 10 公分保護層,配合混凝土抗氯離子穿透能力試驗,要求使用之配比須符合 56 天齡期混凝土符合 CNS 14795 等級為”低”以下標準,可確保防蝕效能。

五、結論

離島工程工址因皆臨海,先天環境已非常嚴苛,四周環海,海砂、海水中含大量鹽份,如果再加上設計疏漏、施工低劣、監造督工不力、養護不佳均可能使混凝土出現裂縫結構工程混凝土更加速惡性循環的破壞甚至造成嚴重的崩解。

全面提升混凝土離島地區混凝土材料之耐久性,從材料、配比、產製、施工使用後均需落實執行包括混凝土施工過程中,採用合理的設計措施,正確選擇材料,採用科學的施工方法,嚴格施工管理,就能有效提高混凝土本身抗拉性能,減少混凝土裂縫的產生及鋼筋鏽蝕,保證工程品質,避免因出現裂縫,引起耐久性問題而影響工程的品質甚至導致結構垮塌的事件的發生,而作為離島地區混凝土設計與施工參考。

參考文獻

1. 行政院公共工程委員會/工程採購物價指數查詢網
2. <https://www.pcc.gov.tw/cp.aspx?n=7EBo1344450BC29A>
3. 經濟部礦務局”砂石價格參考網”
4. 金門縣政府、連江縣政府、澎湖縣政府“離島地區材料、人力與機具之價格調查”
5. 工程品質常見缺失案例,2007~2020
6. 金門縣政府工程施工查核缺失公告網,2007~2020
7. 公共工程品質管制作業要點
8. 陳正平混凝土結構表面缺陷對策探討,台北市土木技師公會-技師報 2017/4/3
9. 林正浚(2014),淺談混凝土蜂窩形成原因探討及改善對策,台北市土木技師公會電子報,第 538 期。

10. 住宅及都市發展局(1985), 施工手冊。
11. 金門縣水頭港區旅客服務中心通關空間擴充工程契約-金門縣政府, 2016
12. 金門國家公園管理處金寧鄉古寧村(南山)第二期污水下水道及用戶接管工程, 內政部營建署規範資料, 2018
13. 金湖鎮公所金湖鎮菜市場及新湖里等環境改善工程契約-金門縣金湖鎮公所, 2015
14. 金門縣政府,「雄獅堡至下埔下海底管線管理站濱海自行車道新建工程」, 規範第 03050 章混凝土基本材料及施工方法。
15. 張嘉峰、簡臣佑等, "基隆港西 2 至西 4 號碼頭結構檢測評估及維護管理系統建置之研究", 交通部運輸研究所港灣技術研究中心報告, 2008。
16. 陳桂清、柯正龍、羅建明、葉為忠、黃然, 「港灣與濱海地區構造物現況調查與維護之研究(1/4)」, 交通部運輸研究所, 2012。
17. 林志明「混凝土橋梁常見劣化樣態探討」, 財團法人中華顧問工程司, P13~16, 2017-01。
18. 張建智、葉為忠、張天銘、洪啟哲, 「中性化及鹽害環境下混凝土性質及腐蝕行為之研究研究成果報告」, 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告, 2010。
19. P.K. Mehta, "Durability of Concrete in Marine Environment-A Review", Performance of Concrete in Marine Environment ACI SP-65, 1980, pp. 1-19.
20. H.G. Wheat, and Z. Eliezer, Corrosion, 41 (1985) 640-645.
21. 柯賢文, 「腐蝕及其防治」, 全華科技圖書股份有限公司, 台北, (2003), p.127-132。
22. 林維明、黃兆龍、彭耀南、吳鶯榮, 「海砂屋調查及分析」, 腐蝕工程, 第十卷第二期, 100~106 頁, 1996。
23. Mehta, P.K.: Concrete Structures, Properties, and Materials, Pretice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., (1986)
24. Tuutti, k., "Corrosion of Steel in Concrete", Swedish Cement & Concrete Research Institute, S-100, Stockholm, (1982)
25. 巨子令, 工程任務眾包網, 「鋼筋混凝土橋樑裂縫成因及其防治的相關問題的探討」, 2018-03-15。
26. Shhorse, 「港口混凝土裂縫病害的治理措施」, 2017-04-20。
27. 黃兆龍, 「高性能混凝土理論與實務」, 詹氏書局, 2016。
28. 沈永年、王和源、林仁益、郭文田, 「混凝土技術」, 全華書局, 2018。
29. 黃紹翔, 「臨海養護環境對於高爐混凝土與一般混凝土性質影響研究」, 國立中興大學土木工程學系, 碩士論文, 2012。
30. 林正浚(2014), 淺談混凝土蜂窩形成原因探討及改善對策, 台北市土木技師公會電子報, 第 538 期。
31. 楊定良、王起平(2005), 台灣高鐵新建工程對新澆置混凝土瑕矯正/修補之相關品保/品管要求及承包商之作法, 現代營建, 第 311 期, 住宅及都市發展局, 施工手冊(1985)。
32. 王和源、黃芬蘭, 「離島地區混凝土材料耐久性之探討」, 工程永續與土木防災研討會, 2020。
33. 陳明谷, 金門大橋混凝土構造物防蝕策略及鍍鋅鋼筋使用之介紹。中華民國熱浸鍍鋅防蝕技術研究基金會, 第 68 期, 2020-01。
34. 「金門大橋工程設計報告」, 國道工程局, 2012 年 7 月。
35. 「金門大橋工程橋梁防蝕工法評估報告」, 國道工程局, 2012 年 7 月
36. CNS 1247 熱浸鍍鋅檢驗法
37. 陳國隆、羅財怡、黃炳勳、陳明谷「金門大橋混凝土構造物防蝕策略」, 混凝土科技, 第八卷, 第二期
38. 黃偉慶、張清土、陳鈺沛, 「混凝土障壁材料品質劣化速率模式研究」, 行政院原子能委員會委託研究計畫研究報告, 2010。

39. 全國法規資料庫
<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=D0070116>

40. 陳文輝,「淺談混凝土裂縫成因與預防」, 國產實業有限公司, 2021。

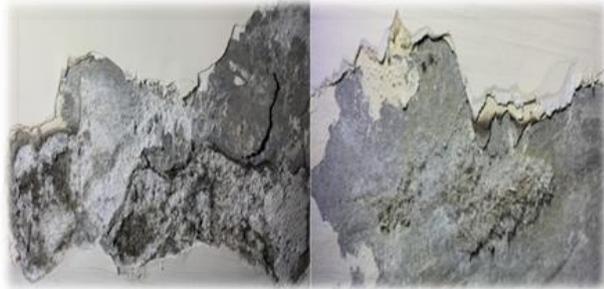


圖 1 因為剝落引起結構體損毀



圖 2 受埋置物或鋼筋阻擋混凝土流動及搗實困難產生蜂窩現象



圖 3 泡集結形成蜂窩現象



圖 4 不正確的混凝土澆置方式產生析離現象



圖 5 不當的拆模造成混凝土表面剝落



圖 6 鋼筋因銹蝕膨脹造成混凝土塊剝落



圖 7 裂縫對混凝土的影響

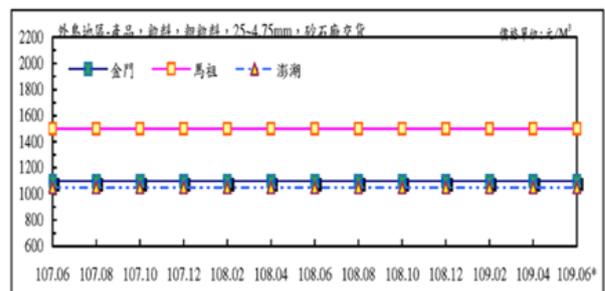


圖 8 離島地區砂石、水泥材料價格趨勢圖



圖 9 金門大橋基礎鋼筋綁紮施工

圖 10 金門大橋鋼筋施工

表 1 混凝土參考配比規格表

混凝土規格 28 天抗壓強度 (fc')	參考水泥用量 (kg/m ³)	一般澆置坍度 範圍 (cm)	最大淨用水量 (公升/50kg 水泥)	粗粒料尺寸 (mm)
140kgf/cm ²	215~235	10.0~20.0	31	4.75~50
175kgf/cm ²	250~275	5.0~15.0	31	4.75~50
210kgf/cm ²	300~325	5.0~12.5	24	4.75~37.5
245kgf/cm ²	375~400	5.0~12.5	24	4.75~37.5
	375~400	10.0~20.0	27	4.75~25
280kgf/cm ²	360~400	5.0~12.5	22	4.75~25
	400~425	10.0~20.0	27	4.75~25
315kgf/cm ²	430~440	5.0~12.5	21	4.75~25

備註：1.水泥用量依粗粒料尺寸、級配、減水劑用量而異。

2.若採用混凝土泵送機壓送時，粗粒料尺寸可降低，水泥量酌予增加，坍度可增加至 15cm。

表 2 金門地區砂石進口數量統計

年	金門地區進口砂石量 (公噸)	總量 (公噸)	推估混凝土使用量(m ³)
109	346,207	346,207	191,274
108	523,320	523,320	289,127
107	544,621	544,621	300,896
106	472,864	472,864	261,250
105	420,162	420,162	232,134
104	653,232	653,232	360,902

表 3 外島地區砂石及水泥漲價幅度彙整表

砂石材料	粒料、粗粒料 25~4.75mm，砂石場交貨				粒料、粗粒料 25~4.75mm，砂石場交貨			
	日期	109/01	109/6*	漲跌 漲跌幅	109/04	109/6*	漲跌 漲跌幅	
金門	1,100	1,100	0 0.0%	1,100	1,100	0 0.0%		
馬祖	1,500	1,500	0 0.0%	1,500	1,500	0 0.0%		
澎湖	1,050	1,050	0 0.0%	1,050	1,050	0 0.0%		
水泥材料	卜特蘭水泥，第 I 型水泥，散裝， 工廠交貨				卜特蘭水泥，第 I 型水泥，散裝， 工廠交貨			
	日期	109/01	109/6*	漲跌 漲跌幅	109/04	109/06*	漲跌 漲跌幅	
金門	3,000	3,000	0 0.0%	3,000	3,000	0 0.0%		
馬祖	3,300	3,300	0 0.0%	3,300	3,300	0 0.0%		
澎湖	2,800	2,800	0 0.0%	2,800	2,800	0 0.0%		

高水化熱巨積混凝土之價值分析

孫德和¹ 王和源² 蘇恆進³ 劉民開⁴

¹勞動部職業安全衛生署技正

²國立高雄科技大學土木工程系特聘教授

³國立高雄科技大學土木工程系碩士

⁴國立高雄科技大學土木工程系研究生

摘要

近年來政府對於文創產業發展不遺餘力，對多項文化重大工程投入相當大的心力與經費，本案以衛武營藝術文化中心主體結構工程混凝土工程為例進行高水熱巨積混凝土之價值分析，本案混凝土設計強度 280kgf/cm^2 ：約計有 127000 M^3 ，其中基礎板部分約 $78,000\text{ M}^3$ 原設計採用純水泥混凝土，為考量混凝土水化溫度過高可能生成微裂縫，擬對巨積混凝土與自填充混凝土材料配比部分經由 VE 分析凝聚共識，在確保工程品質以及期盼縮短工期為目標，並確保維持必要機能，以求取最大利益之替代方案。

研析過程中在創意階段，共提出了 6 種可替代原有機能的構想。經過判斷階段、發展階段及建議階段，研析案小組提出三項建議方案。其中最佳之建議方案為本研析標的之替代方案，預估約可節省工程混凝土材料經費壹仟捌百萬元，高達原設計混凝土材料(純水泥配比)造價之 13%。若以整體巨積混凝土工程來探討，約可讓承攬廠商節省高達伍仟貳百萬元，為原設計造價之 18%。

關鍵字：水化熱、巨積混凝土、主體構造、價值分析

高水化熱巨積混凝土之價值分析

Sun De-He¹ Wang Her-Yung² Su Heng-Jin³ Liu Min-Kai⁴

¹ Ph.D., Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

² Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Sciences and Technology

³ Master of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

⁴ Graduate student, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

In recent years, the government has spared no effort in the development of the creative industry, invested considerable efforts and funds in a number of major cultural projects, this case to Weiwu Camp Art and Cultural Center main structural engineering concrete project as an example for value analysis, this case mixed soil design strength 280kgf/cm^2 : about $127,000\text{ M}^3$, of which the basic plate part about $78,000\text{ M}^3$ original design using pure cement concrete, in order to consider the high hydration temperature of concrete may generate micro-cracks, it is proposed that the ratio of large concrete and self-filled concrete materials through VE analysis consensus, in order to ensure the quality of the project and look forward to shortening the duration of the goal, and ensure the maintenance of the necessary functions, in order to obtain

the best interests of the alternative.

In the creative stage, six alternative ideas of alternative organic energy were put forward in the process of this analysis. After the judging stage, the development stage and the recommendation stage, the ad hoc group put forward three proposals. One of the best proposed solutions for this research target alternative, estimated to save about 捌 million yuan in project concrete materials, for the original design of concrete materials (pure cement ratio) cost of 13%. If the whole huge concrete project is discussed, it will save the contractor up to \$1 million, or 18% of the original design cost.

Keywords: hydrothermal heat, accumulation and mixed soil subject structure, value analysis

一、緒論

價值工程(Value Engineering, VE)又稱為價值分析(Value Analysis)或價值管理(Valuemanagement)是一套簡單實用的管理技巧，應用於工程實務上目的為樽節工程成本提高工程價值，透過價值工程研析小組對研析標的利用價值工程的方法進行分析、研究、及評估，並同時對標的之成本、品質、必要性能、工期、等...作出合理的平衡考量最後提出降低成本或減少工期或提升機能的替代建議方案[1]，以提供規劃設計之參考使用。

由於衛武營藝術文化中心原工程之混凝土規劃採用純水泥混凝土，然而考量混凝土水化溫度過高與微裂縫生成問題，以價值工程方法將巨積混凝土與自充填混凝土材料配方調整以卜作嵐材料取代部分水泥使用[2]、[3]。

為提升混凝土穩定性與減少試拌驗證之耗時，亦建議將材料料源和型別一致化，以降低實際施工變異性；而透過教育訓練加強相關人員之品管認知與消除各方之疑慮，有利工程之進行與確保工程之品質。最後希望藉由此價值工程之研析技術，研擬較經濟可行之替代方案，完善設計變更的過程。

二、案例評估

2.1 研析標的

興建位置:研析標的位於原高雄縣鳳山市郊陸軍衛武營營區。原規劃工程:本主體設施工程計有戲劇院(2260席)、樂廳(2000席)、中劇場(1254席)、演奏廳(470席)、戶外劇場、

停車場及相關公共服務設施空間。建築物類型為鋼構造(SS造)；地上4層地下2層。

本計畫研究範圍為結構體混凝土工程 $280\text{kgf}/\text{cm}^2$ ：約計有 127000 M^3 ，其中基礎板部分約 $78,000\text{ M}^3$ 。

2.2 研析目標

衛武營藝術文化中心新建工程，原工程之混凝土規劃採用純水泥混凝土，然而考量純水泥配比有水化溫度過高與施工性及耐久性不佳等疑慮。為克服水化熱之因素，須從變更材料或工法著手考量並對混凝土材料特性，經介VE分析以降低各方之疑慮後凝聚共識，有利工程之進行與確保工程品質。維持必要機能，且以降低成本6%為目標，以求得最大效益之替代工法。

2.3 研析小組

進行價值工程研析首要之務乃成立研析小組進行價值工程相關作業為期三個月，並各司其職，本小組成員包括有領隊、成本工程師、協調人、專案工程人員、秘書、聯絡人等。

三、研析方法與流程

3-1 研析方法

利用價值工程研析方法，針對研析標的所需投入之人力、材料、金錢、時間、設備、方法等各項資源，透過資料的收集與整合，以合適的研析方法，求得能達成機能且降低成本的建議方案。本VE研析工作分成資料、創意、判斷、發展、建議等五個階段。

3.2 研析流程

研析流程圖如圖 1 所示。

(一) 資料階段

本次研析所需資料經小組成員搜集整理分析，並經討論交換意見後，各成員對研析方向及所需相關資料已有相當之瞭解及共識。所搜集相關資料如下包括現況照片、基地資料、基地位置圖、基地位置圖、基地平面圖、原擬工法、元交通維持方案、工程經費、天然環境資料……等。

(1) 成本分析

研析標的資料整理的方法包括成本分析，其做法就是將研析標的的成本資料整理成成本模式與成本條狀圖，根據成本分析的方法即可列出高成本的項目，做為研析可能的範圍。本案例以混凝土工程為研析標的，就該工程而言以水泥佔混凝土材料之成本比例最高，如圖 3 及圖 4 所示。

(2) 研析範圍

經成本模式分析後，混凝土工程之人工及材料所佔成本比例最大，而純就混凝土材料而言，則是水泥所佔成本比例最高，經小組決定後，決定以混凝土人工及材料為主要研析項目，其研析細項分別包括預拌混凝土材料費、混凝土工、混凝土泵浦及輸送管、混凝土振動器、混凝土養護、材料製作損耗、零星工料。

(二) 創意階段

(1) 機能分析

混凝土具有可塑性，硬固後能提供結構體所需強度，是被廣泛應用的建築材料。一般設計混凝土配比時，良好的工作性及硬固性質是被首先考量的要件。而新拌混凝土的性質主要在「使混凝土工程人員易施工，親和性與人性化，並保障完工後之安全性、耐久性、穩定、美觀」，而本混凝土工程又牽連到巨積混凝土水化熱考量，所以本工程新拌混凝土的性質不但需滿足強度佳、易施工、耐久性、品質穩定及美觀外，更需考量水化熱造成熱應力微裂縫，以致工程品質嚴重降

低的影響[4]。

(2) 創意構想

創意階段產生構想研析標的，執行的機能(要做什麼)這是價值研析的創意階段。當研析項目必須被執行時，會產生許多基本構想、程序或方法在此時引伸出來，(此階段切勿對任何構想加以評估)並依照機能分析的成果提出替代方案。工程項目：以混凝土工程為例創意思考構想，降低巨積混凝土水化熱之方式包括分層澆置、冷卻管降溫、降低水泥用量、加冰塊、用高爐石水泥、使用卜作嵐材料等方式。

(三) 判斷階段

由於本工程基礎版厚度介於 0.9~2.0 m 之間，機械房屋頂版厚度為 0.4 m，且設計強度為 280 kg/cm² 之純水泥配比設計水泥用量超過 360 kg/m³，故根據 ACI 301 委員會之建議：「對於混凝土斷面之最小尺寸達 75 cm 以上者，或單位水泥用量超過 360 kg/m³ 者，應依工程特性考慮水化熱問題」。因此，對於混凝土溫度控制與裂縫防制工作為本案應注意之重點。

經由以上各點分析針對各項建議方案，經小組成員就其可行性、是否滿足需求、成本降低情形及是否影響主要機能等反覆討論修正後，確定擬提出之建議替代方案並進行可行性評估表如表 1 所示。

當確定替代方案後首先找出方案評選的評估因子，並再利用成對比較法將評估因子經由兩兩比較，決定其相互之重要性，並依據其相對重要性以計算各評估因子之權重，詳細資料如表 2 所示。進而利用所得之評估因子權重做方案可行性評估，以得出使用者構想方案之滿意程度，以作為判斷建議時之參考，詳細評估矩陣分析如表 3 所示。最後再依原設計案及三個替代方案進行優缺點比較，如表 4 所示。(因方案 3、方案 6，研判類同，故選方案 1、方案 5 及方案 6 為優缺點比較)如下所列三項：

(1) 替代方案 1.(分層澆置)

因基礎版厚度介於 0.9~2.0 m 之間，以

斷面之最小尺寸 75 cm 規劃分層澆置，以控制水化熱影響。

(2) 替代方案 2.(使用高爐石水泥)

以用爐石水泥低水化熱的特性取代普通水泥，減少水泥水化產生的水化熱量。

(3) 替代方案 3.(使用卜作嵐材料)

以卜作嵐材料取代部份水泥，降低水泥用量，減少水泥水化產生的水化熱量。

(四) 發展階段

以三種替代方案之成本分析分別如表 5、表 6 及表 7 所示。

四、綜合分析

在研析過程中將經過創意階段所提出之各項替代方案利用權重評估表(表 2)與評估矩陣表(表 3)來作比較分析，茲分別說明如下：

(一) 分層澆置法

原設計基礎版厚度為 160cm，原純水泥混凝土配比可能有水化溫度過高與微裂縫生成等體積穩定性不佳問題。本工程基礎版屬於大容積且集中澆置的巨積混凝土 (Mass Concrete)，根據 ACI 301 委員會之建議：「對於混凝土斷面之最小尺寸達 75 cm 以上者，或單位水泥用量超過 360 kg/m³ 者，應依工程特性考慮水化熱問題」。因此，對於混凝土溫度控制與裂縫防制工作為本案應注意之重點。故如改變施工方式，以分層澆置方式避開混凝土斷面之最小尺寸達 75 cm 以上，或可降低水化熱過高帶來的缺失。唯此工法，於同一區域斷面會有 2 至 3 次灌漿，將造成工期加長，泵送機具、出工數增加，鋼筋污染需清洗、多次養護等問題

(二) 使用高爐石水泥

高爐石水泥一般為定製品，相對單價較普通水泥高，其優點是由水泥廠製作品質較穩定，但拌合廠需準備專用料倉存放，其高爐石添加比例仍應需作配比驗證，以確實符合工程需求。

(三) 使用卜作嵐材料(飛灰、爐石)

使用卜作嵐材料(爐石、飛灰)取代水泥水化熱，從研究文獻已可知，每減少水泥用量 10% 約可降低 5°C。

水泥強度效益 (Cement Strength Efficiency, CSE) 是指每一立方公尺的混凝土中，每公斤水泥所能發揮出來的抗壓強度。本計畫配比設計變更結果預估為傳統純水泥混凝土 CSE 之 1.7~2.2 倍，意即若配置相同強度之混凝土，只需使用傳統混凝土約一半之水泥量即已足夠，這不僅可降低成本，亦可避免因水泥使用太多造成混凝土的劣化(如析晶、白華、硫酸鹽侵蝕及風化裂解等)，更重要的是可減少水泥生產時所需消耗的能源與 CO₂ 排放量，兼具環保價值與符合綠建築指標。

最後在一配比成分進行成本比較如表 8 所示，本研析小組所提出之替代方案應已就其可行性、是否滿足需求、成本降低情形及是否影響主要機能等詳加評估及考量，使研析成果更具有可行性。

五、結論與建議

(一) 結論

- (1) 經由本小組研析後由 6 種創意構想中加以合併篩選出 3 種替代方案，並以評估矩陣加以評估後以替代方案三評分最高，與其他方案比較其優點也較高，將建議業主採用該方案施築本工程基礎版，預估約可節省工程材料經費壹仟捌百萬元，為該工程原定純水泥配比金額之 13%。
- (2) 本計畫混凝土材料佔所有混凝土工程造價之 45.67%，因此經討論混凝土採用純水泥配比修改為卜作嵐配比作為成本模式分析及研選替代方案之原始方案。
- (3) 依該工程原規範設定純水泥配比，則施工法僅能選擇分層澆置以控制水化熱，據此若將方案 1 與方案 3 比較，方案 1 不但材料費用較高且需多支付 1 倍的澆置人工、機具費用，評估約較方案 3 多伍仟貳百萬元，有 18% 差價金額。
- (4) 本工程基礎版面積約 38,600 平方米，配合分區開挖預估至少需分 15 次進行大底

澆置。若以方案 1-分層澆置，則每區塊至少增加 7 天工期耗費。以工期延誤罰款每日千分之一計算為 3 百萬，則需多支付 $300 \times 15 \times 7 = 31500$ (萬元)。據此若將方案 1 加上工期損失後與方案 3 比較後，評估約較方案 3 多參億陸仟陸百柒拾萬元，有 130% 差價金額。本分析幫助營造廠可以節省如此鉅大金額損失，更讓本公共工程建設案件得能順利推展。

(二)建議

- (1) 本次研究中，建議使用替代方案三從事大底巨積混凝土澆置使用，因涉及設計變更，應進行配比驗證。其中包含混凝土工程性質檢測、製程成本分析及實際現地效益檢測及驗證。
- (2) 若日後進行配比驗證合格後，可將卜作嵐混凝土的優點進一步使用到其它部位結構上，可得到更大的工程經濟價值。
- (3) 由於本次研究未針對其它強度配比提出替代方案，希望再取得業方認可後能將卜作嵐配比混凝土應用至本工程中的 SCC-350kgf/cm² 柱內灌漿工程上。
- (4) 建議業主編列預算從事驗證調查工作，以確認替代方案之可行性及對原工程之效益。

致謝

本研析的完成特別感謝小組成員包括張憲仁、董柏維、李美汶、林展全、康庭維等先進在研析過程中的辛勤付出努力如期達成研析成果，特在此表達由衷之謝忱。

參考文獻

1. 王和源，價值工程實務，國立高雄科技大學土木工程與防災科技研究所教材，2020。
2. 公共工程委員會(2017)。施工綱要規範網站 03，編號:03700V1.0-巨積混凝土。http://pcces.pcc.gov.tw/csi/Default.aspx?FunID=Fun_8&Sno=528. 2017.2.28.
3. ACI Committee 301-10 (2010), Specification for structure concrete, Chap.

8 MASS CONCRETE (ACI 301.1R-10), Farmington Hills. MI: American Concrete Institute.

4. 中興工程季刊，第 104 期，巨積混凝土基礎版專家系統簡介與應用，2009 年 7 月，PP103~110

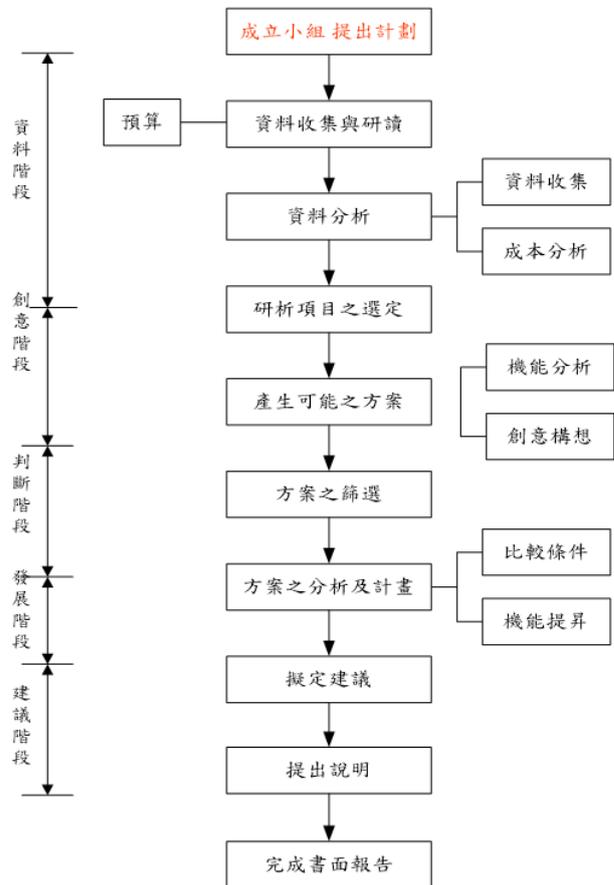


圖 1、研析流程圖

資料階段		成本額狀圖											
研析標的：混凝土工程													
項目：混凝土工程，280kgf/cm ²													
檢 查：對右列成本請分別單獨列表		建造成本		■									
		操作維修成本		□									
		替換成本		□									
		能源成本		□									
項目	成本	%	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
預拌混凝土材料費，280kgf/cm ²	222,950,760	45.67%	[Progress bar]										
混凝土工	238,857,635	48.93%	[Progress bar]										
混凝土泵浦及輸送管	9,544,125	1.96%	[Progress bar]										
混凝土振動器	1,018,040	0.21%	[Progress bar]										
混凝土澆置	1,018,040	0.21%	[Progress bar]										
材料製作損耗	12,470,990	2.55%	[Progress bar]										
零星工料及工具損耗，(約以上項目之1.0%)	2,309,678	0.47%	[Progress bar]										
合計	488,169,268		[Progress bar]										

圖 2、混凝土成本條狀圖

資料階段			成本條狀圖									
研析標的：混凝土工程												
項 目：混凝土材料，280kgf/cm ²												
檢 查：對右列成本請分別單獨列表												
			建造成本	■								
			操作維修成本	□								
			替換成本	□								
			能源成本	□								
項 目	成 本	%	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
水泥	68,757,000	50%	[Bar chart showing 50% completion]									
砂	20,627,100	15%	[Bar chart showing 15% completion]									
石	22,002,240	16%	[Bar chart showing 16% completion]									
用水量	0	0%	[Bar chart showing 0% completion]									
糖劑	4,125,420	3%	[Bar chart showing 3% completion]									
運輸管網費	22,002,240	16%	[Bar chart showing 16% completion]									
合計	137,514,000	100%	[Bar chart showing 100% completion]									

成本數額百分比

圖 3、混凝土材料成本條狀圖

表 1、可行性評估表

可行性評估表								
判斷階段		可行性評估						
研析標的：衛武營藝術文化中心主體結構新建工程								
項 目：混凝土工程		第 1 頁 共 1 頁						
表列在判斷階段中經與原設計比較後之構想每項評估標準以 0 至 5 分評分		A. 安 全 性	B. 經 濟 性	C. 生 態 性	D. 美 觀	E. 耐 久 性	F. 工 作 性	合計
1.分層澆置		4	3	3	3	3	3	19
2.冷卻管降溫		3	1	2	3	2	2	13
3.降低水泥用量		3	4	4	3	3	2	19
4.加冰塊		3	2	2	3	3	2	15
5.用爐石水泥		3	3	4	3	4	3	20
6.使用卜作嵐材料		3	5	5	4	4	5	26

表 2、權重評估分析表

判斷階段		權重評估	
研析標的：混凝土工程			
目標、期望標準		原始分數	指定權重
A.技術可行性(降低水化熱)		10	10
B.成本效益		10	10
C.施工性		10	10
D.耐久性		5	5
E.防水性		9	9
F.美觀(浮灰、泌水、粉化、龜裂、色澤均勻)		4	4
G.綠建築(節能減碳)		1	1

分數矩陣							
		B	C	D	E	F	G
A	B	A-3	A-1	A-1	A/E	A-1	A-3
	C	B-3	B-1	B/E	B-2	B-3	
	D	C-3	C-1	C-3	C-3		
E	D	D/E	D-2	D-2			
	E	E-3	E-3				
F	E	E-3	E-3				
	F	F-3					
G	F	F-3					
	G						

重要程度	高度 3	中度 2	低度 1
重要程度			
高度 3			
中度 2			
低度 1			

表 3、評估矩陣分析表

判斷階段		評估矩陣							
研析標的：衛武營藝術文化中心主體結構新建工程									
項 目：混凝土工程		第 1 頁 共 1 頁							
表列有潛力的構想	期望標準	A. 技 術 可 行 性	B. 成 本 效 益	C. 施 工 性	D. 耐 久 性	E. 防 水 性	F. 美 觀	G. 綠 建 築	滿意度
	原設計：純水泥混凝土	權重	10	10	10	5	9	4	
	評分	5	5	5	5	5	5	5	
		4	4	4	4	4	4	4	
		3	3	3	3	3	3	3	
		2	2	2	2	2	2	2	
	小計	10	30	20	10	18	12	3	
替代方案1	1.分層澆置	5	5	5	5	5	5	5	98
	評分	4	4	4	4	4	4	4	
		3	3	3	3	3	3	3	
		2	2	2	2	2	2	2	
		1	1	1	1	1	1	1	
	小計	30	20	10	10	18	8	2	
替代方案2	2.使用高爐石水泥	5	5	5	5	5	5	5	148
	評分	4	4	4	4	4	4	4	
		3	3	3	3	3	3	3	
		2	2	2	2	2	2	2	
		1	1	1	1	1	1	1	
	小計	40	20	30	15	27	12	4	
替代方案3	3.使用卜作嵐材料	5	5	5	5	5	5	5	205
	評分	4	4	4	4	4	4	4	
		3	3	3	3	3	3	3	
		2	2	2	2	2	2	2	
		1	1	1	1	1	1	1	
	小計	40	50	40	20	39	12	4	

表 4、優缺點比較表

判斷階段		構 想 比 較		
研析標的：衛武營藝術文化中心主體結構新建工程				
項 目：混凝土工程		第 1 頁 共 1 頁		
選擇最可行的構想或合併構想，表列於下，並將他們的優缺點分別記錄以便決定更進一步的工作。				
構 想	優 點	缺 點 (註記消除缺點的方法)	評等	
純水泥巨積混凝土(原案)	1. 符合原設計	1. 成本高 2. 水化熱高 3. 工作性較差 4. 耐久性差	中	
1.分層澆置	1. 工法簡易	1. 工期長 2. 界面多污損 3. 防水性差	差	
2.冷卻管降溫	1. 散熱性佳	1. 工期長 2. 成本高	中	
3.降低水泥用量	1. 成本降低	1. 強度品質不易 2. 不符規範最低水泥量要求	中	
4.加冰塊	1. 執行簡易	1. 製冰設備不足 2. 成本提高 3. 溫度量測控管	差	
5.用高爐石水泥	1. 使用方便	1. 材料需定製 2. 成本較高	中	
6.使用卜作嵐材料(爐石、飛灰)	1. 成本降低 2. 節能減碳 3. 水化熱溫控容易 4. 耐久性較佳	1. 易泌水、浮漿 2. 品管較繁複	佳	

表 5、替代方案一分層澆置法成本分析

發展階段		成本工作表格					
研析標的：衛武營藝術文化中心主體結構新建工程							
項 目：混凝土工程(分2層澆置)							
項 目	單位	原 設 計		建 議 方 案			
		數量	單價	數量	單價	合計	
1.預拌混凝土材料費，280kgf/cm ²	M3	78,000	1,763	137,514,000	78,000	1,763	137,514,000
2.混凝土工	工	78,000	1,877	146,406,000	78,000	2,250	175,500,000
3.混凝土泵浦及輸送管	式	78,000	75	5,850,000	78,000	120	9,360,000
4.混凝土振動器	式	78,000	8	624,000	78,000	10	780,000
5.混凝土養護	式	78,000	8	624,000	78,000	16	1,248,000
6.材料製作損耗	式	78,000	98	7,644,000	78,000	98	7,644,000
7.零星工料及工具損耗(約以上項目之1.0%)	式	78,000	18.15	1,415,700	78,000	22	1,716,000
合計				300,077,700			333,762,000

表 6、替代方案二高爐石水泥成本分析

發展階段		成本工作表格					
研析標的：衛武營藝術文化中心主體結構新建工程							
項目：混凝土工程(高爐石水泥)							
項目	單位	原設計			建議方案		
		數量	單價	合計	數量	單價	合計
1.預拌混凝土材料費· 280kgfcm ²	M3	78,000	1,763	137,514,000	78,000	1825	142,350,000
2.混凝土工	工	78,000	1,877	146,406,000	78,000	1,877	146,406,000
3.混凝土泵浦及輸送管	式	78,000	75	5,850,000	78,000	75	5,850,000
4.混凝土振動器	式	78,000	8	624,000	78,000	8	624,000
5.混凝土養護	式	78,000	8	624,000	78,000	8	624,000
6.材料製作損耗	式	78,000	98	7,644,000	78,000	98	7,644,000
7.零星工料及工具損耗 (約以上項目之1.0%)	式	78,000	18.15	1,415,700	78,000	18.15	1,415,700
合計				300,077,700			304,913,700

表 7、替代方案三使用卜作嵐材料成本分析

發展階段		成本工作表格					
研析標的：衛武營藝術文化中心主體結構新建工程							
項目：混凝土工程(使用卜作嵐材料)							
項目	單位	原設計			建議方案		
		數量	單價	合計	數量	單價	合計
1.預拌混凝土材料費· 280kgfcm ²	M3	78,000	1,763	137,514,000	78,000	1532	119,496,000
2.混凝土工	工	78,000	1,877	146,406,000	78,000	1,877	146,406,000
3.混凝土泵浦及輸送管	式	78,000	75	5,850,000	78,000	75	5,850,000
4.混凝土振動器	式	78,000	8	624,000	78,000	8	624,000
5.混凝土養護	式	78,000	8	624,000	78,000	8	624,000
6.材料製作損耗	式	78,000	98	7,644,000	78,000	98	7,644,000
7.零星工料及工具損耗 (約以上項目之1.0%)	式	78,000	18.15	1,415,700	78,000	18.15	1,415,700
合計				300,077,700			282,059,700

表 8、混凝土配比成本分析表

混凝土配比預估成本分析												
強度	材料	水泥	爐石粉	飛灰	砂	石	用水量	膠劑	總計	水膠比	運輸管 備量	售價
280 純水泥	用量(kg/m ³)	413	0	0	835	919	183	3.3	2,353	0.45		
	單價	2,350	1,700	0.800	0.300	0.300	0.000	20.0				
配比	小計	971	0	0	251	276	0	66	1,563		200	1,763
280 卜作嵐	用量(kg/m ³)	200	80	120	853	915	160	5.0	2,333	0.41		
	單價	2,350	1,700	0.800	0.300	0.300	0.000	20.0				
配比	小計	470	136	96	256	275	0	100	1,332		250	1,582
280 爐石水 泥配比	用量(kg/m ³)	413	0	0	835	919	183	3.3	2,353	0.45		
	單價	2,450	1,700	0.800	0.300	0.300	0.000	20.0				
配比	小計	1,012	0	0	251	276	0	66	1,604		200	1,804

機器學習應用於由混凝土相關影響因子抗壓強度迴歸與分類

郭忠勇¹ 黃立政²

¹國立高雄科技大學土木研究所碩專班碩士生

²國立高雄科技大學土木系教授

摘要

在現代大城市建築及土木建設中，混凝土材料廣泛使用於工程建設，而現今的非破壞檢測法是使用反彈錘檢測法來檢驗混凝土抗壓強度。從以往文獻得知相關混凝土強度，幾乎是以實驗室混凝土試體為主，若能建立實驗室試體與現地檢測都能通用之混凝土抗壓強度預測模型，則可提高工程便利度。而不同類型混凝土配比會隨著主要材料不同如粗骨材、水灰比、水膠比、細骨材中配比比例不同而影響最終混凝土強度，本研究目的是為建立一套混凝土抗壓強度準確率較高預測模型，本研究是使用一組台南某工地整理出實際數據，首先針對所蒐集的主要影響因子所測得之數據分類，做線性與非線性迴歸模型之預測，再以 k 鄰近(KNN)、支援向量機(SVM)以及隨機森林(Random Forests, RF)四種不同機器學習方法，結果發現二分類與三分類之結果比迴歸分析好。

關鍵字：非破壞檢測法、機器學習、抗壓強度、迴歸、分類

Machine Learning Techniques Applied to Regression and Classification of Compressive Strength of Concrete Based on Influencing Factors

Kuo Chung-Yung¹ Huang Li-Jeng²

¹ Master Student, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

² Corresponding Author, Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

In modern large city buildings and civil construction, concrete materials are widely used in engineering construction, and one of the most convenient non-destructive inspection methods today is to use the rebound hammer inspection method to test the compressive strength of concrete. The purpose of the research is to establish a set of concrete compressive strength prediction models with higher accuracy. This research uses a group of Tainan construction sites to sort out actual data. Linear regression model prediction, k nearest neighbors (kNN), support vector machine (SVM) and random forest (Random Forests, RF) different machine learning methods, and then use Python and other software to establish various types of strength regression and classification models. Results show that 2 and 3 classification models are better than the regression analysis.

Keywords: non-destructive testing method, machine learning, compressive strength, regression,

classification

一、緒論

1-1 研究動機

目前建築物在鑑定時都以混凝土抗壓強度為主要依據，常使用為非破壞性檢驗及破壞性檢驗，破壞性檢驗為混凝土澆置後鑽心試體後續進行抗壓強度，其方法會造成該混凝土結構部分破壞使部分應力集中之情況發生及中間層鋼筋切斷而使結構強度降低及須重新澆置補平產生表面二次接縫等問題。

非破壞性檢驗 NDT 有下列幾種方法(反彈錘法、超音波脈波波速法及彈性波檢測法等)而使用最便利攜帶、成本不高及最快速為反彈錘法。而近年來，使用人工智慧機器學習的方法已經被普遍的運用於各領域當中且皆得到不錯的結果，故本研究將嘗試建立不同類型之機器學習方式用於混凝土抗壓強度。

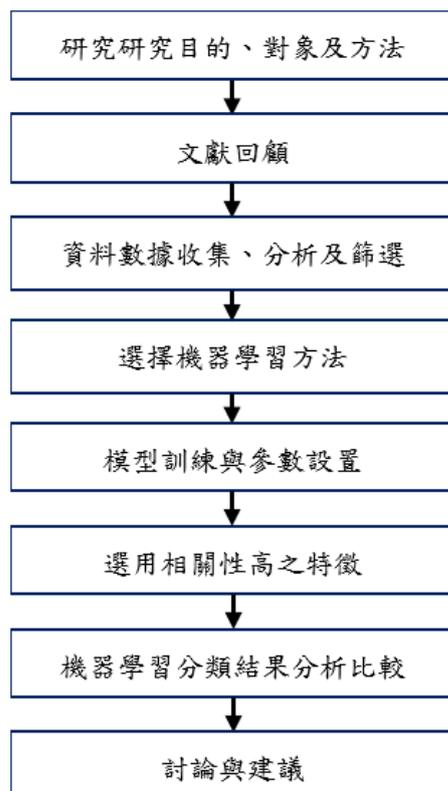


圖 1 研究流程圖

1-2 研究目的方法

本研究目的是建立一套準確率較高的預測模型，首先針對所蒐集的數據做線性迴歸模型之預測，再建構 K 鄰近(K Nearest

Neighbors)、支援向量機(Support Vector Machines)以及隨機森林(Random Forests, RF)不同機器學習方法之預測模型，皆以 7 種混凝土材料水泥、水、爐石粉、飛灰、粗骨材、水灰比、水膠比為 X 輸入、混凝土 28 天，抗壓強度為 Y 輸出項來建立混凝土強度預測迴歸與分類模型。

二、文獻回顧

2-1 混凝土抗壓試驗

陳正平 (2017) 內政部營建署於 91 年 6 月 27 日以台內營字第 0910084633 號令訂定，並自 92 年 1 月 1 日施行之「結構混凝土設計規範」(註：「結構混凝土設計規範」名稱已決定修正為「混凝土結構設計規範」)，第 1.7.2 節(混凝土規定強度)中規定：「結構混凝土之(規定抗壓強度) f_c' 不得小於 175kgf/cm^2 」；另於第 15.3.4.1 節(抵抗地震力構材之混凝土)中規定：「混凝土之規定抗壓強度 f_c' 不得小於 210kgf/cm^2 」72。財團法人台灣混凝土學會提出建議營建署修訂中之「混凝土結構設計規範」，將第 1.7.2 節(混凝土規定強度)中規定之最低結構混凝土規定抗壓強度由 175kgf/cm^2 修訂提高為 210kgf/cm^2 ；及第 15.3.4.1 節(抵抗地震力構材之混凝土)中規定之最低結構混凝土規定抗壓強度由 210kgf/cm^2 修訂提高為 245kgf/cm^2 ，提高結構物混凝土之抗壓強度，工程成本雖會微幅增加，卻可獲得減少混凝土用量，以及增加鋼筋混凝土構件的耐震性與耐久性等優點，進而提升結構物的安全性使用年限。影響混凝土強度等級的因素主要有水泥等級和水灰比、骨料、齡期、養護溫度和濕度等有關混凝土質量的，主要指標是抗壓強度，混凝土的抗壓強度是通過試驗得出的，混凝土抗壓強度與混凝土用水泥的強度成正比，按公式計算，當水灰比相等時，高標號水泥比低標號水泥配製出的混凝土抗壓强度高許多。一般來說，水灰比與混凝土強度成反比，水灰比不變時，用增加水泥用量來提高混凝土強度

是錯誤的，此時只能增大混凝土和變易性，增大混凝土的收縮和變形。所以說，影響混凝土抗壓強度的主要因素是水泥強度和水灰比，要控制好混凝土質量，最重要的是控制好水泥質量和混凝土的水灰比兩個主要環節。混凝土強度等級華人百科 [2]。

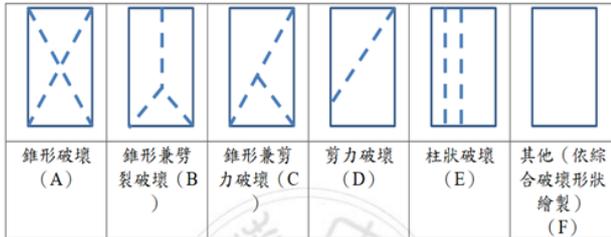


圖 2 破壞型態(資料來源:中國國家標準 CNS 1232 (2002), 混凝土圓柱試體抗壓強度檢驗法)。

2-2 非破壞性試驗測試

非破壞性試驗測試(Nondestructive Testing, NDT)，將超音波應用於混凝土的非破壞檢測的技術，約於 1940 年代由西方的學者提出，利用實驗儀器可有效測得縱向超音波在混凝土中的傳遞速度(Naik and Malhotra 1991)。超音波脈波波速法被廣泛地運用及最常被使用於現場測試檢驗。

2-3 反彈錘檢測法

Raffaele Pucinotti.(2015) 針對歷史博物館進行鑽心、反彈錘及超音波試驗，將試驗所得之數據建立非線性迴歸模型進行預測，探討碳化深度對混凝土強度的影響性。結果顯示混凝土強度與碳化深度之迴歸分析結果其相關係數低， R^2 值為 0.057，表示混凝土強度不受碳化深度影響，而使用超音波脈波波速法預測之結果，其 R^2 值為 0.82，結果非常接近實際混凝土抗壓強度。

2-4 超音波超音波波速測法

林嘉澤(2009) 研究的目的是為驗證超音波波速與強度關係曲線應用於現地混凝土之實務性。研究於實驗室選取三種配比分別灌製圓柱試體及板狀試體進行波速試驗之後，於現地選取六種配比灌製板狀試體並進行波速試驗後，套入波速-強度關係曲線，以抗壓強度進行驗證。研究結果顯示，圓柱試體及

鑽心試體於面乾內飽和狀態下以超音波法波速預估強度結果良好;以敲擊回音法波速因試驗方式及波到判讀準則之不同須先以 1.031 為修正係數修正波速後,之後預估強度結果良好。

2-5 機器學習方法(Machine Learning)

機器學習是一門 AI 人工智慧用法，該方法主要研究物件是人工智慧，主要是如何在由以往經驗學習中具體改善演算法的效能。機器學習是對能通過經驗自動改進的電腦演算法的研究。

葉怡成(1992)使用二種機器學習模式：倒傳遞類神經網路(back-propagation artificial neural network)，與 ID3 歸納決策樹(ID3 induction decision tree) 應用於結構破壞偵測，診斷預力混凝土基樁，有限元素法程式輸入資料偵錯，發現類神經網路模式在學習精度與抗雜訊能力方面較佳，歸納決策樹模式則在學習速度上較佳。

三、研究方法

3-1 機器學習工作流程

機器學習是一種利用計算機建立人工學習的演算法，經由演算法從一大群資料中去學習找出解決問題的方法。使用上需將大量的資料 Data 輸入電腦，機器學習的演算法將學習出一個特定的模型出來，而不是再透過傳統手動的方式給予規則，透過大群資料有標籤給答案，並從資料集學習與標記間的關聯，最後根據過往的資料進行訓練，從中學習進而生成模型。

機器學習主要可分為下列八個步驟：定義問題(Problem definition)、收集資料(Gathering data)、準備數據(Preparing that data)、模型選擇或創建(Model selection/construction)、訓練機器(Training)、評估分析(Evaluation)、調整參數(Hyperparameter tuning)及模型發佈運行(Model deployment)

3-2 研究架構及方法

近年來由於機器學習及人工智慧(Artificial Intelligence)發展迅速，多種各式機

器學習套件(Machine Learning Algorithms)也被研發提出,很多已被開發成套件,於網路平台上有許多可提供分析及使用如 Python, MATLAB 等程式語言,而機器學習主要是一種能讓電腦自主學習的方法,目前機器學習常用的程式語言有許多種,而 Python 是最廣泛使用的一種程式語言,本研究亦選用 Python 作為編輯機器學習分析模型之程式語言,Python 的創始人 Guido van Rossum,最初版在 1990 面世而正式發行於 1991 年第一次發佈,其特點在於它是一套開放式的程式語言,使用上每個人都可對 Python 的使用及創新擴充,讓 Python 能因此逐步擴充功能,並適用於更多領域(Python 維基百科,2021)。

本研究根據研究目的與方法擬定研究架構如(圖 4)所示。將所蒐集的數據建立迴歸模型再利用 k 鄰近(k Nearest Neighbors)、線性支援向量機(Linear Support Vector Machines)以及隨機森林(Random Forests, RF)等機器學習方法,來建立一個能夠得到混凝土抗壓強度更加準確的預測模型。

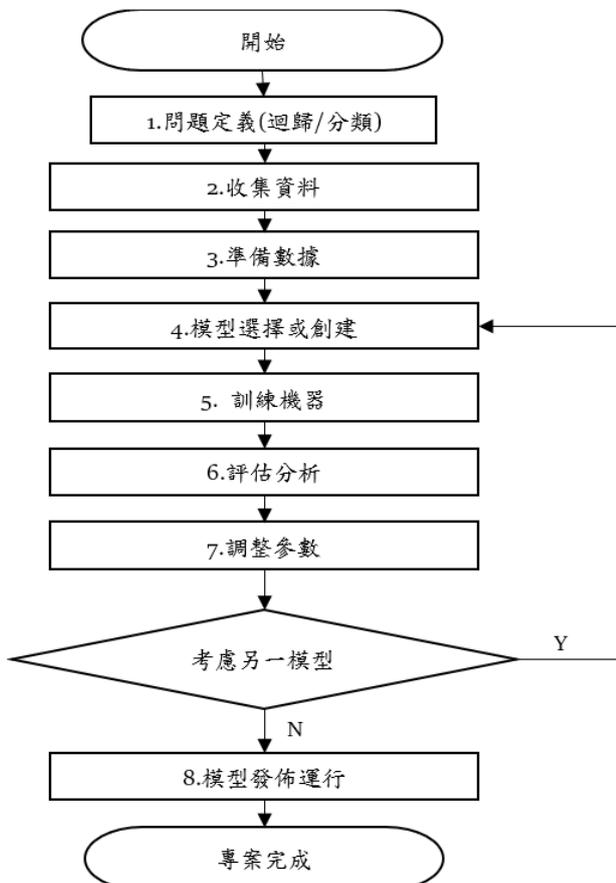


圖 3 機器學習之工作流程圖

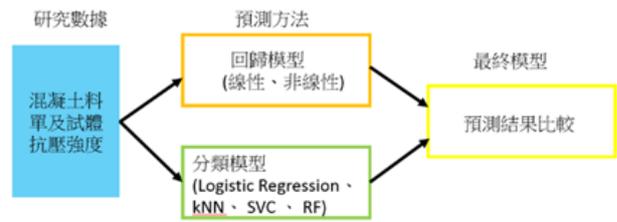


圖 4 研究架構

3-3 迴歸分析介紹

迴歸分析(Regression Analyses)是統計數學分析方法,是應用量測或使用調查之數據來反推出數學公式的一門科學,後續將公式代入假設之數據後,公式就可以推算出所需數值。依分析之性質可分為,線性與非線性、單變數與多變數,其基本在建立一個數學模型,再利用最小平方誤差(Method of Least Square)決定模型參數。

3-4 羅吉斯迴歸介紹(Logistic Regression)

邏輯斯迴歸(Logistic Regression)很多人看到名稱會誤以為是迴歸的模型,但其實它是一個分類的模型,羅吉斯迴歸是一種二元分類機器學習,主要計算目標會發生的機率方法是利用 Logit 函數對資料特徵進行轉換,結果以機率較高者作為分類選項,主要僅用於線性可分之二元問題。本研究在 Scikit-learn 之 linear_model 套件中,選用 LogisticRegression 作為羅吉斯迴歸之模型。

3.5 k 鄰近分析介紹

k 鄰近 (k-Nearest Neighbor)簡稱 kNN, kNN 是一種基於實例的算法,它使用方法根據不同特徵值之間的距離來進行分類,是一種簡單的機器學習方法, kNN 的訓練資料都是具有標籤的資料,即訓練的資料都有自己的類別,對於預測的新樣本數據(未有分類標籤),將其與訓練樣本一一進行比較,找到最為相似的 K 個訓練樣本,並以這 K 個訓練樣本中出現最多的分類標籤(類似投票規則)作為最終的預測標籤。本研究在 Scikit-learn 的 neighbors 套件中,選用 KNeighborsClassifier 作為 K 鄰近之模型,由於 K 鄰近沒有固定的分類依據,而是依據周圍有限的樣本進行分類,因此對於特徵交叉

或重疊程度較高的資料集，能有較好的分類準確度。

3-6 支援向量機分析介紹

支援向量機是一種分類機器學習模型，在訓練資料特徵空間中，於各目標資料集之間找出一道超平面(hyperplane)，並找出使這道超平面跟兩側資料集邊界的距離(margin)為最大值的平面函數，其優點在於能找出最適合訓練資料的分類邊界，避免因預測資料數據模糊導致分類錯誤。

3-7 隨機森林分析介紹分析介紹

隨機森林是一個包含多個決策樹的分類器，施用中從資料數據集中，隨機抽取數筆資料並建立多個子資料集，藉由多次隨機取樣產生子資料集並獨立分析，方法以群體決策之方式提高準確度，隨機森林能有效減少單一決策樹因資料模糊產生的影響，並以決策樹方法對每個子資料集進行訓練，最後統計各決策樹分類結果，以分類次數較多之標籤作為整體分類結果；本研究在 Scikit-learn 的 ensemble 套件中，選用 RandomForestClassifier 作為隨機森林之模型(Scikit-learn, 2021)。

表 1 本研究使用之 Scikit-learn 機器學習模型

機器學習方法	Scikit-learn 套件	Scikit-learn 模型
迴歸(Regression)		
線性迴歸	Linear_model	Linear Regression
K 鄰近	neighbors	KNeighborsRegressor ($k=3$)
線性支持向量機	svm	SVR (kernel=rbf) ($\gamma=1, C=1$)
隨機森林	ensemble	RandomForestRegressor
分類(Classification)		
羅吉斯迴歸	linear_model	LogisticRegression
K 鄰近	neighbors	KNeighborsClassifier ($k=5$)
線性支持向量機	svm	SVC (kernel=rbf) ($\gamma=1, C=1$)
隨機森林	ensemble	RandomForestClassifier

四、研究分析與討論

4-1 收集原始數據

本研究採用台南某一工地所蒐集的 77 筆超混凝土料單及凝土 28 天抗壓強度報告，整理數據將每一組試體分為有 7 個主要影響因子，如表 2 所示為代表性之前四筆。

表 2 台南某一工地所蒐集的 77 筆超混凝土料單及凝土 28 天抗壓強度原始數據

CEM	WATER	POW	ASH	AGR	CW	CB	STR28
2425	967	688	345	5952	0.398763	0.279641	45.374
2427	962	686	343	5950	0.396374	0.278356	42.189
2525	990	725	362	5304	0.392079	0.274086	47.432
2528	1229	723	364	5304	0.486155	0.339972	47.432

初步進行統計分析如表 3。

表 3 本研究使用混凝土數據

	最大值	最小值	平均值
水泥(Kg/m ³)	2616	645	2185.9
水(Kg/m ³)	2124	291	1235.9
爐石粉(Kg/m ³)	1656	228	821.6
飛灰(Kg/m ³)	444	111	328.1
粗骨材(Kg/m ³)	6033	1086	4316.6
水灰比(%)	0.811	0.301	0.58
水膠比(%)	0.461	0.226	0.37
抗壓強度(Map)	51.303	30.968	39.79

4-2 特徵選擇與因子目標

本研究將選用七種主要混凝土材料資料作為機器學習之特徵，包含：

X1: CEM: 水泥 (Cement)

X2: WATER: 水 (Water)

X3: POW: 爐石粉(Hearthstone powder)

X4: ASH: 飛灰 (Fly Ash)

X5: AGR: 粗骨材 (Coarse bones)

X6: CW: 水灰比 (Water-cement ratio)

X7: BW: 水膠比 (Water-binder ratio)

而分析之目標量(Target) 為：

Y: STR28: 28 天混凝土抗壓強度 (Compressive strength at 28th day)

4-3 數據探索

以 Pandas 及 seaborn 繪出 Pairplot 如

圖 5。

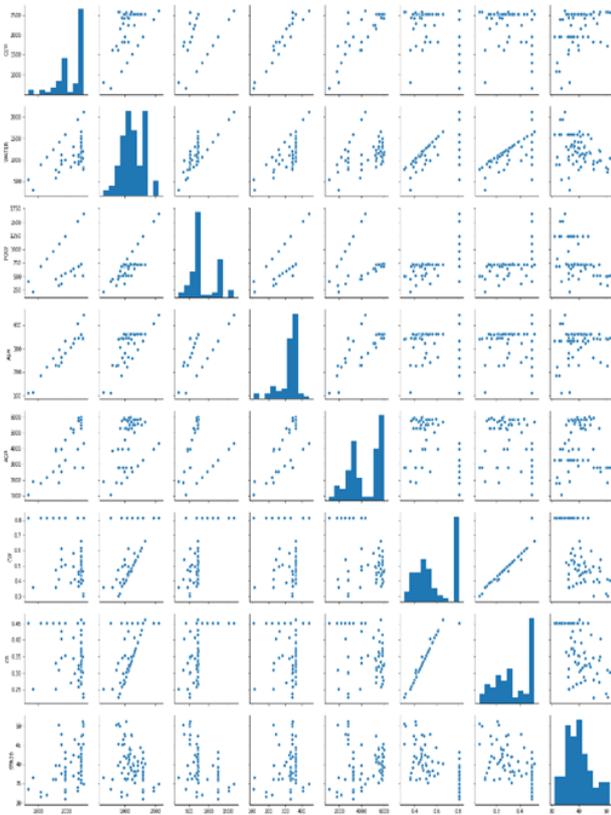


圖 5 混凝土強度與影響因子之 Pairplot

另外我們繪出因變數 STR28 與其他 7 個因子之關係圖，發現同一個 X 有許多不同 y 的現象。

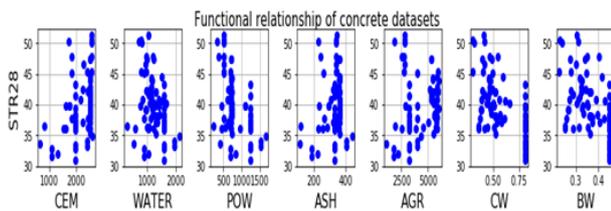


圖 6 迴歸用之 Pairplot

4-4 迴歸分析(Regression Analysis)

接著我們嘗試進行迴歸分析(Regression Analysis)。我們嘗試因變數為抗壓強度 $y = STR28$ ，自變數分別為 CEM, CW 及 ALL。採用 LR、kNN、SVR、RF 結果如圖 7 所示。顯示出 LR 迴歸最好 0.63，SVR 的效果並不很好為 0.3。

Regression Using CompareRegressors

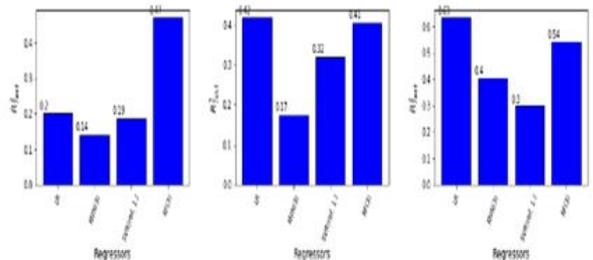
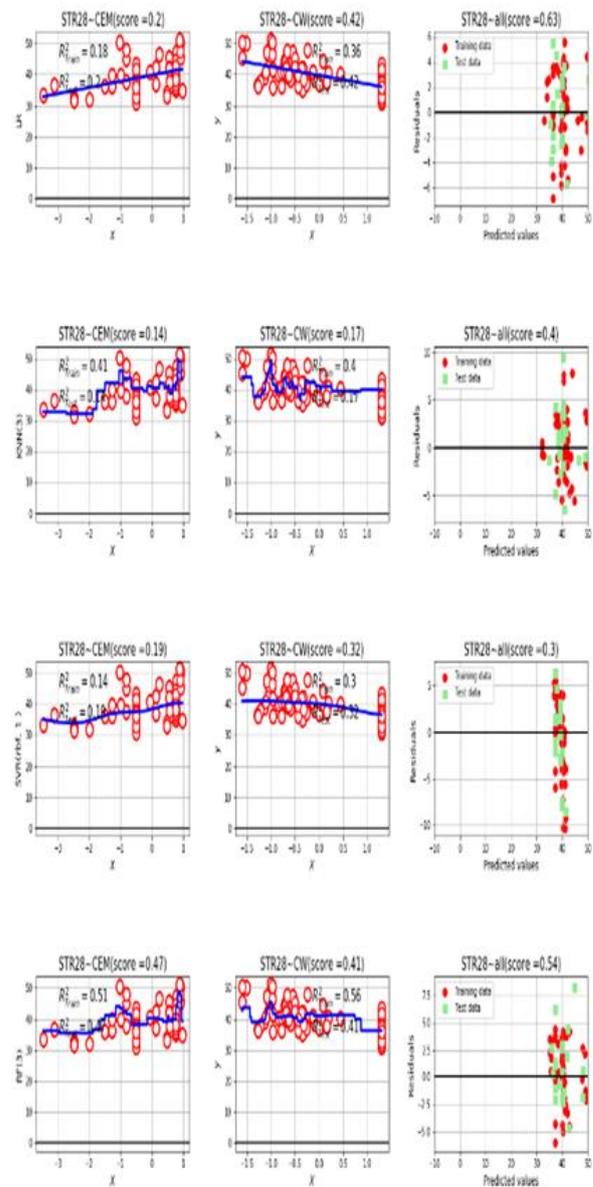


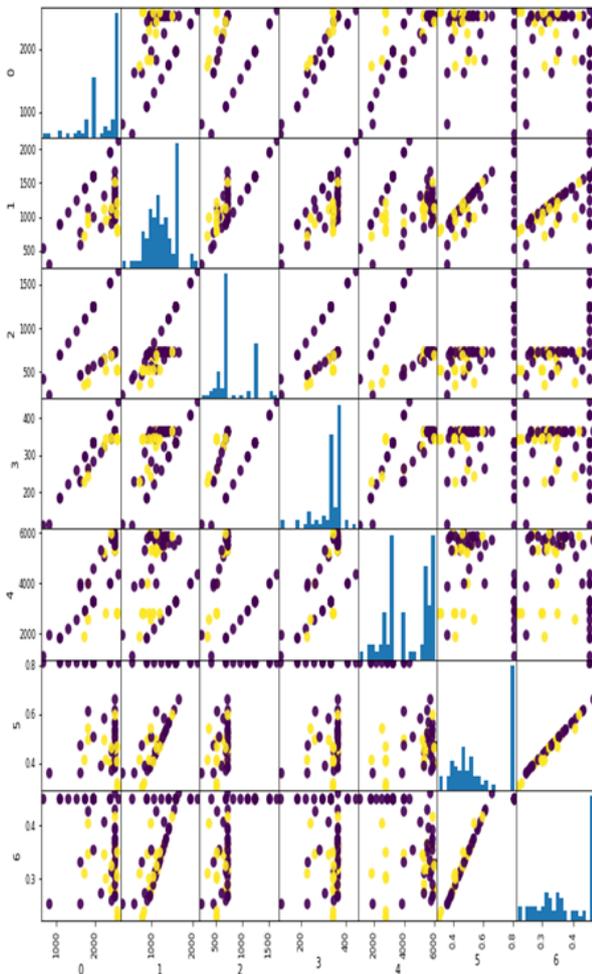
圖 7 迴歸分析之結果

4-5 分類分析(Classification Analysis)

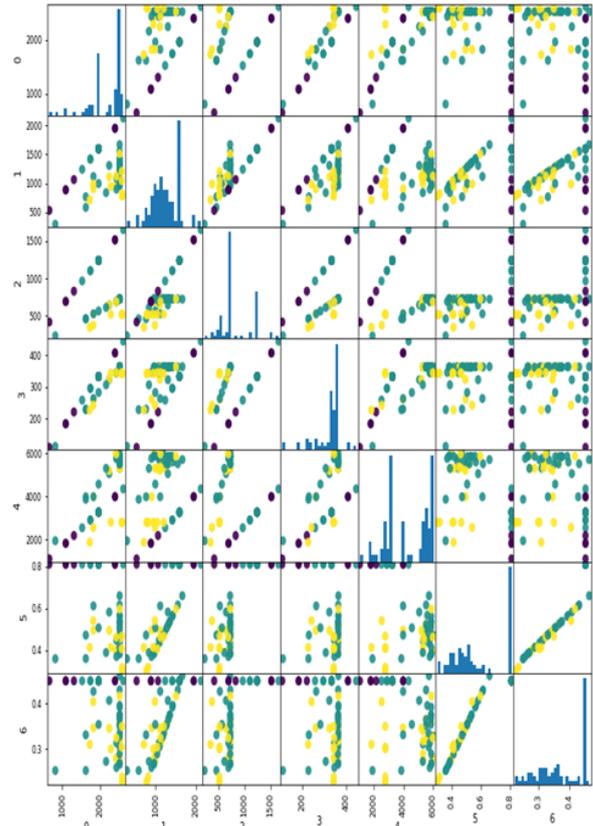
然後我們嘗試進行分類分析。影響因子仍然為七個(CEM、WATER、POW、ASH、AGR、CW、BW)，分類的類別標籤 y 分別為：

- (a) 分兩類：0 (STR28 為 1.15 ~1.5 倍) 與 1 (STR28 為大於 1.5 倍)。
- (b) 分三類：0 (STR28 為 1.15 ~1.25 倍) 與 1 (STR28 為 1.25~1.5 倍), 2 (STR28 為大於 1.5 倍)。

進行數據探索，二分類與三分類分別繪出 Pairplot 如圖 8 (a) 與 (b)。



(a) 分兩類



(b) 分三類

圖 8 分類用之 Pairplot

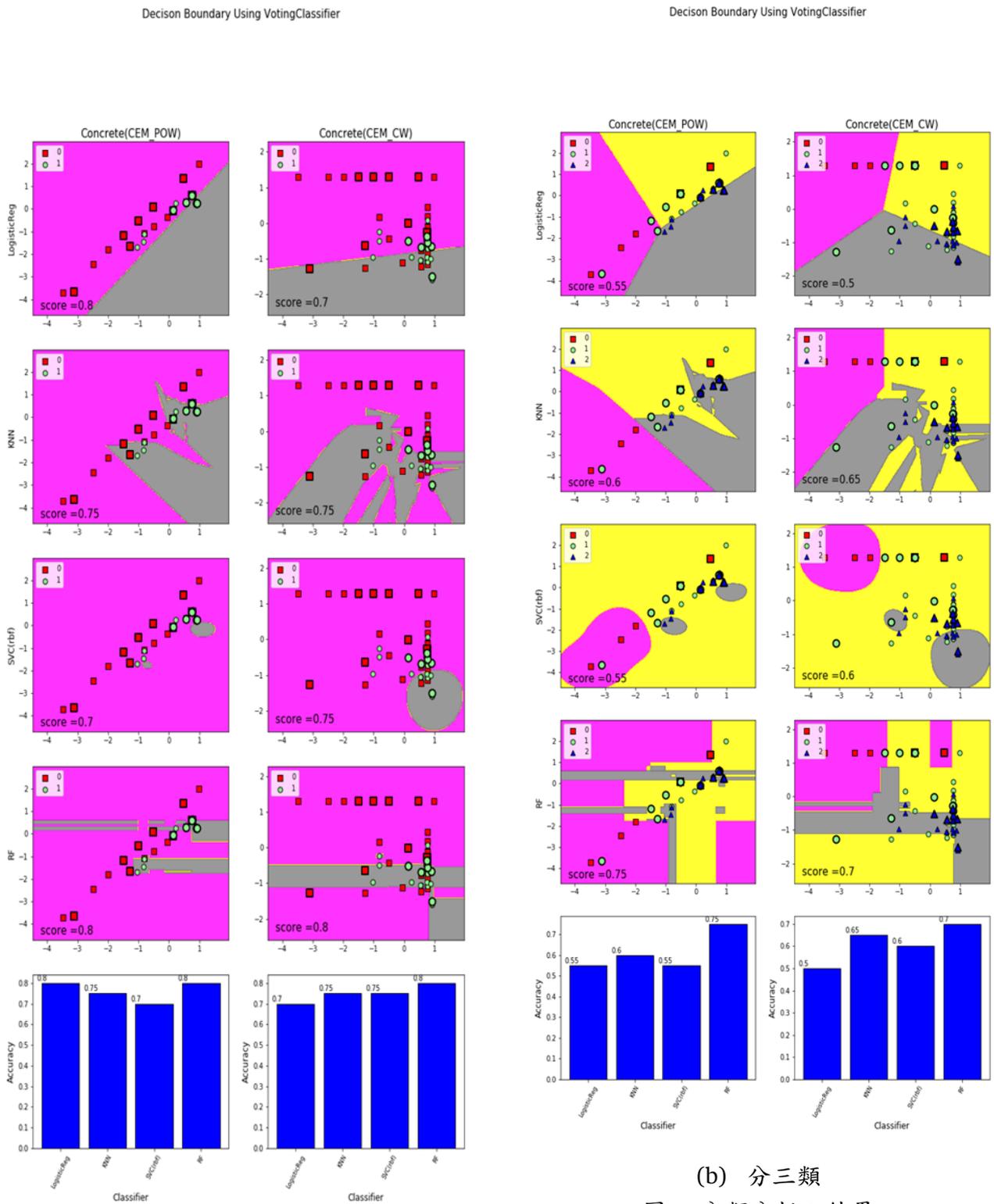
本研究使用特徵縮 normalization 的方式來進行，主要不讓資料有太多的改變及變化，並先通過歸一化將特徵數據縮小至 0 與 1 之間。Python 語法為：

```
X = StandardScaler().fit_transform(X)
```

再拆分訓練集(Training Set) 與驗證集(Test Set) 方面，我們選擇 75% 為訓練集，25% 為測試集，隨機選取；

```
X_train, X_test, y_train, y_test = \
train_test_split(X, y, test_size=0.25,
random_state=0)
```

在分類方面，我們選擇 $(X_0, X_2)=(\text{CEM}, \text{POW})$ 與 $(X_0, X_5)=(\text{CEM}, \text{CW})$ 兩組當作分類之因子，分別採用 Logistic Regression、kNN、SVC、RF 四種分類器，其結果參見圖 9(a)與(b)，顯示二分類之結果比三分類好。



(b) 分三類

圖 9 分類分析之結果

(a) 分兩類

五、結論與未來研究建議

本研究得到以下結論：

1. 用機器學習方法(Logistic Regression, kNN, SVC, RF)，以七個因子可以成功進行混凝土強度之二分類與三分類。二三分類的分數最高為 0.8 及 0.75，可見此模型不至於

發生過擬合(Over fitting)。

2. 用機器學習方法(Linear Regression、kNN、SVR、RF)，以七個因子進行混凝土強度之迴歸，顯示出 LR 迴歸最好 R² 值為 0.63，SVR 的效果並不很好 R² 值為 0.3。原因可能是數據量不足。

未來研究之建議:

1. 增加樣本數。
2. 採用更多之分類與迴歸方法進行探討。

參考文獻

1. 陳正平，「談結構混凝土規定抗壓強度之最低設計強度修訂」。技師報，2017。
2. 混凝土強度等級華人百科，上網日期：2021 年 2 月，檢自：<https://www.itsfun.com.tw/>，2021。
3. Raffaele Pucinotti, “Reinforced concrete structure: Non destructive in situ strength assessment of concrete ”, Construction and Building Materials, Vol. 75, pp. 331-341, 2015。
4. 吳的恭、林嘉澤，「非破壞性檢測應用於混凝土抗壓強度評估之驗證」，中興工程，第 103-108 頁，2009。
5. 葉怡成，機器學習在土木工程專家系統應用之研究。國立成功大學土木工程研究所博士論文，臺南，1992。
6. Python - 維基百科，上網日期：2021 年 3 月，檢自：自由的百科全書 (wikipedia.org)，2021。
7. Scikit-learn.org, 上網日期：2021 年 3 月，檢自：<https://scikit-learn.org/stable/index.html>，2021。

以聚氨酯發泡材料為輕質隔間牆之壁掛能力探討

張簡嘉賞¹ 余家蓉²

¹ 國立高雄科技大學營建工程系助理教授

² 國立高雄科技大學營建工程系研究生

摘要

聚氨酯之特性相當廣泛，傳統於建築運用上多應用於輕質隔間牆。常見發泡模式以採用現場高壓噴塗發泡完成，或於工廠發泡製成輕質板材，並於現地進行組合。因聚氨酯材料配比與發泡形式多樣化，故不同配比與發泡型式會造成截然不同的發泡強度。因傳統發泡材料強度不佳，故多應用其保溫隔熱特性。本研究進一步重新調配聚氨酯發泡配比，並採用維束力高之鋼板模型進行發泡，發展具高強度之新型發泡材料。並依據規範 CNS7408 硬質發泡塑膠-壓縮性能測定法進行聚氨酯發泡材料之抗壓強度測定。測試結果顯示，本研究所發展之高強度聚氨酯發泡材料可獲得較高之抗壓強度，可發展為具壁掛能力且不易破損之隔間牆。傳統隔間牆磚造或矽酸鈣板所製作而成。惟地震作用下，磚牆易發生倒塌傷及人員生命及造成財產損失。而由矽酸鈣板所組成之輕隔間因缺乏壁掛能力且易於撞擊時損壞，故於使用上有諸多限制。本研究發展之高強度聚氨酯發泡材因自身強度高且重量輕，故適合發展為具壁掛能力之輕質隔間牆。本研究進一步測試高強度聚氨酯發泡材可承受之荷重，進行一系列之壁掛能力測試，測試結果顯示，以單顆螺絲鎖固之高強度聚氨酯發泡材時，可達 6.5kgf 以上之掛載能力。另本研究進一步採用外層為矽酸鈣板，內層為聚氨酯發泡材料作為填充材，組成兼具防火性能之複合式隔間牆。進行壁掛測試並觀察其壁掛能力。測試結果顯示，此複合式隔間牆亦具有良好的壁掛能力。

關鍵字：聚氨酯、發泡材料、隔間牆、抗壓強度、壁掛、矽酸鈣板

Discussion on the Wall Hanging Capacity of Light Partition Wall with Polyurethane Foam Material

Chia-Shang Chang Chine¹ Jia-Rong Yu²

¹ Assistant Professor, Department of Construction Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology, Taiwan

² Master Student, Department of Construction Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology, Taiwan

ABSTRACT

Polyurethane has a wide range of properties, and is often used in lightweight partition walls in architectural applications. The common foaming mode is to use high-pressure spray foaming on site, or to make light board in the factory, and then to combine in situ. Due to the diversification of polyurethane material ratios and foaming forms, different ratios and foaming types will result in completely different foaming strengths. Because of the poor strength of traditional foaming materials, their thermal insulation properties are often used. In this study, the ratio of

polyurethane foam was further adjusted, and uses a high-strength steel plate model for foaming, and develops a new type of high-strength foaming material. The compressive strength of polyurethane foamed materials was determined according to the standard CNS7408 rigid foamed plastics - compression test method. The test results show that the high-strength polyurethane foam material developed in this research can obtain higher compressive strength, and can be developed into a partition wall with wall hanging ability and not easily damaged.

Traditional partition walls are made of bricks or calcium silicate boards. During an earthquake, brick walls are prone to collapse, injuring people's lives and causing property losses. However, the light compartment composed of calcium silicate board has many limitations due to its lack of wall hanging capacity and easy to be damaged during impact. The high-strength polyurethane foam material developed in this research has high strength and light weight, so it is suitable for development into a lightweight partition wall with wall hanging ability. This study further tests the affordable weight of high-strength polyurethane foams and conducts a series of wall hanging capacity tests, the results show that the weight of the wall hanging can reach more than 6.5kgf when the high-strength polyurethane foam material is locked with a single screw. In this study, calcium silicate board was used as the outer layer, and polyurethane foam was used as the inner layer to form a composite compartment wall with fire resistance, implementing a wall-hanging test and observe its wall-hanging ability. The test results show that this composite partition wall also has a good wall hanging ability.

Keywords: polyurethane, foam material, partition wall, compressive strength, wall hanging, calcium silicate board

一、緣起

近年來國內建築室內隔間系統，興起輕質隔間牆作為內部隔間趨勢，因輕質材料特點為質量輕、施工快速、耐燃、隔音等特質，提高民眾對於輕質隔間牆之接受度。

輕質隔間板材大部分使用防火板、水泥板、石膏板、矽酸鈣板[1]，其骨架常採用輕鋼架作為構架組合板材而成，板材與鋼架之間內部夾層填充材為影響主要隔音性能[2]。而輕質隔間板材承重能力差之特性，使得在壁掛方面須特別將釘材釘選於板材內部之輕鋼架或板材背面使用輔助鋼板。

因聚氨酯其組成結構多樣化，物理和化學特性非常豐富，它的用途廣泛，聚氨酯應用於紡織品、傢俱、汽車零件、膠著劑、建築保溫等等[3]，以各種形式出現於日常生活中，本研究針對輕質隔間牆研發高強度聚氨酯發泡材料配比，試驗其抗壓縮強度及壁掛試驗等性能。

作為隔間牆，防火性質是最重要考慮元素之一，則後續研究聚氨酯發泡材料與耐燃矽酸鈣板之接合可行性及其複合材之壁掛能力探討。

二、聚氨酯發泡材料

聚氨酯(Polyurethane,一般縮寫為 PU)係具有氨基甲酸酯結構的高分子聚合物材料。聚氨酯是透過每分子具有一個以上反應性異氰酸酯官能團(-NCO)的異氰酸酯與每分子具有兩個或多個反應性羥基(-OH)的多元醇。

圖 1 為二異氰酸酯與二醇之加成聚合反應[4]，由這兩大要素之間的反應形成的基團稱為「氨基甲酸酯鍵」，它是聚氨酯分子的重要組成部分，通常氨基甲酸酯結構會再與其他助劑下加成聚合反應而成。

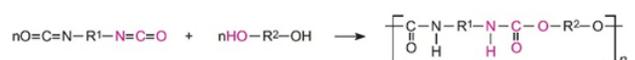


圖 1 二異氰酸酯與二醇之加成聚合反應

2-1 聚氨酯發泡材料性質

(一) 異氰酸酯：異氰酸酯是一種由異氰酸衍生出的酯類，通式為 $R-N=C=O$ ，依據分子中酯基個數的數量，進而分為單異氰酸酯、二異氰酸酯、多異氰酸酯等。其中二異氰酸酯為生產聚氨酯之重要元素之一，故本研究採用二苯基甲烷二異氰酸酯(圖 2)作為試驗材料。



圖 2 異氰酸酯

(二) 多元醇：為分子中含有兩個或兩個以上羥基的醇類。其多元醇分子量可取決柔性與硬性之特性[5]，柔性多元醇分子量一般在 2,000 至 10,000，硬性多元醇分子量則為在 250 至 700；其中分子量在 700 至 2,000 的多元醇用於調節基礎體系的軟硬度，同時增加低分子量的乙二醇在分子量的多元醇之間的溶解性。圖 3 為本研究採用分子量介於 405 至 445 之多元醇為發泡材料之一。



圖 3 多元醇

(三) 催化劑：聚氨酯發泡形成中，異氰酸酯的酯基與水和酯基與多元醇的羥基，這兩者為最主要反應，而圖 4 為催化劑在此兩大反應有很強的催化功能。前者酯基與水反應可迅速產生二氧化碳，使聚合物瞬間膨脹增大；後者酯基與羥基促

進聚合物分子鍊迅速增長、黏度增加，發泡強度提高[6]。

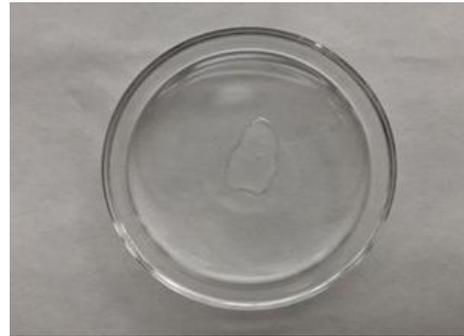


圖 4 催化劑

(四) 穩定劑：圖 5 為穩定劑是一種表面活性劑，促進發泡初期酯基與水反應之二氧化碳氣泡形成，調節氣泡結構[7]；提高材料流動與穩定性，使聚合物密度均勻分布。



圖 5 穩定劑

(五) 水：圖 6 為聚氨酯發泡反應之助劑。



圖 6 水

本研究規劃採用之高強度聚氨酯發泡材料其重量比例組成為二苯基甲烷二異氰酸酯(50~65%)、多元醇(35~45%)，其發泡助劑採用催化劑(0~1.5%)、穩定劑(0~2%)、水(1~2%)

進行發泡。

2-2 聚氨酯發泡步驟

本試驗聚氨酯發泡材料為異氰酸酯、多元醇、催化劑、穩定劑及水這五類成分組成。

先將脫模劑塗於模具中以利後續拆模。多元醇、催化劑、穩定劑與水混合為一液，高速攪拌一分鐘使其原料均勻混合(圖 7)，再加上異氰酸酯(圖 8)攪拌五至十秒後注入模具中，等待三十分鐘使其化學反應後形成固態材料(圖 9)，即可拆解模具取得發泡材料試體。



圖 7 多元醇、催化劑、穩定劑及水拌合



圖 8 聚氨酯發泡材料



圖 9 聚氨酯發泡板材與模具

2-3 聚氨酯發泡規格

聚氨酯發泡材料之試體形狀及尺寸皆可應材料需求設計模具，因實驗需求，須以發泡材料製作牆體模擬隔間牆。

作為板材型式，若板體過薄需再使用骨架支撐，為其簡化施工步驟，故增加其試體厚度至五公分，可直接以塊砌方式製作牆面。本試驗將試體製作規格為兩種，一種為(圖 10)磚型尺寸 20cm×8cm×5cm；另一種為(圖 11)板材尺寸 30cm×30cm×5cm。



圖 10 聚氨酯發泡板材



圖 11 聚氨酯發泡磚材

三、抗壓縮強度試驗

聚氨酯發泡材料塑形多樣化無侷限限制，作為隔間牆的形式有相當多方法，可直接製作一面板牆，亦可以組合磚方式堆砌而成。

本研究調製聚氨酯發泡材料配比，增加其材料強度，並依據規範 CNS7408 硬質發泡塑膠-壓縮性能測定法進行聚氨酯發泡材料之抗壓強度測定。

3-1 測試規範 CNS7408 硬質發泡塑膠-壓縮性能測定法

(一) 試驗試體製作：依據規範製片方式製作試體，待測試體底面面積為 25~230cm²，其厚度在 50±1mm。本試驗準備五個試體進行測試，採用聚氨酯發泡磚使用線鋸機進行裁切，待測試體如圖 12 所示，各試體之尺寸約為 50x50x50mm。

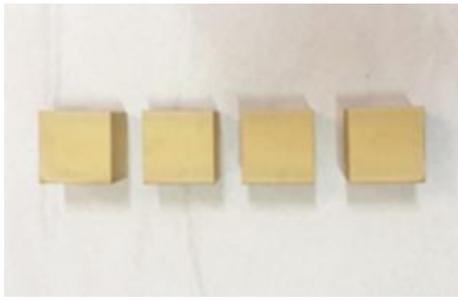


圖 12 測試壓縮試體

(二) 試驗原理：以萬能材料試驗機進行測試，儀器施加壓力以 5mm/min 速率對試體施加壓力。計算試體壓縮強度與相對變形量及在原始尺度 10% 相對變形量之壓縮應力，得以取得發泡材料之壓縮能力。然而聚氨酯發泡材料係由底面發泡至頂面，由下往上的發泡過程亦使材料產生異向性，故本試驗分為正向壓縮(圖 13)以及側向壓縮測試(圖 14)，以利判斷其方向對於強度之變化。

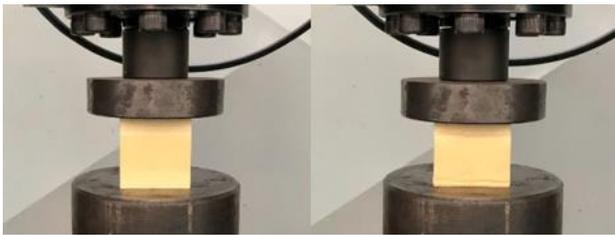


圖 13 正向壓縮測試前後

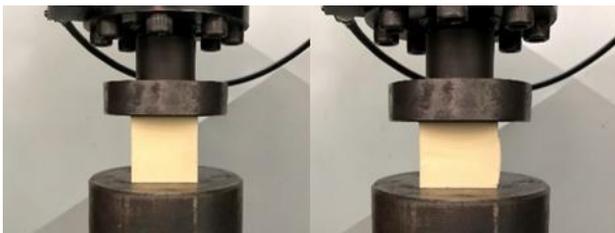


圖 14 側向壓縮測試前後

3-2 壓縮強度

抗壓縮強度為在試驗試體厚度 10% 變形量內之最大應力值，依圖 15 與表 1 其正向壓縮強度試驗結果平均為 2.27MPa，圖 16 與表 2 側向壓縮強度平均為 3.09MPa。

因試驗材料為發泡性質，其化學反應產生氣泡故而使試體膨脹，而最原初發泡部分結構較為緊緻。正向壓縮試體承受壓力部分為整個試體中最弱性部分，側向壓縮試體承

壓面含括整體結構，故側向壓縮強度明顯大於正向壓縮強度。

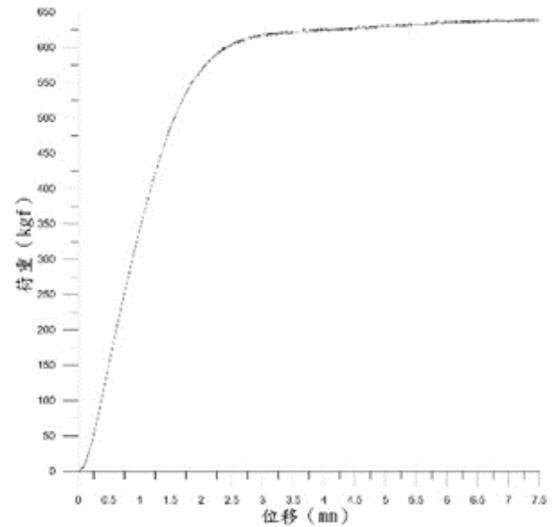


圖 15 正向壓縮試驗荷重 - 位移曲線圖

表 1 正向壓縮測試結果

編號	X_m (mm)	F_m (KN)	σ_m (MPa)
1	4.93	5.15	2.10
2	5.03	5.22	2.11
3	4.84	6.20	2.48
4	4.70	6.08	2.43
5	4.92	6.00	2.44
平均	4.85	5.62	2.27

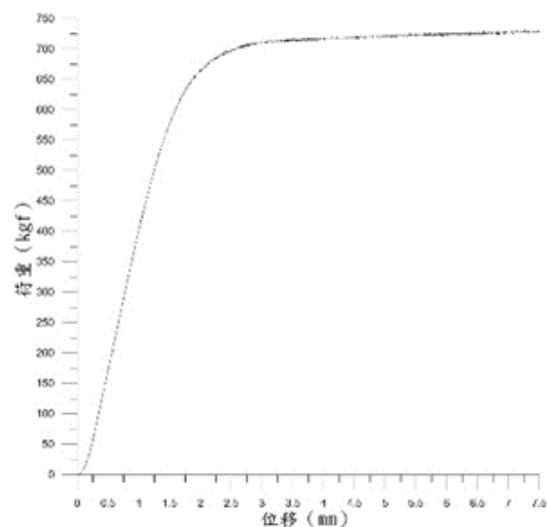


圖 16 側向壓縮試驗荷重 - 位移曲線圖

表 2 側向壓縮測試結果

編號	X _m (mm)	F _m (KN)	σ _m (MPa)
1	2.97	7.77	3.09
2	2.85	7.13	2.90
3	3.12	7.84	3.10
4	4.33	7.35	2.89
5	2.84	8.11	3.25
平均	3.53	7.75	3.09

可見聚氨酯發泡材料之異向性影響壓縮強度，故在發泡材料製作與使用上需考慮其壓縮力及方向性，作為設計強度與組裝方向之參考。

四、壁掛試驗

輕質板材在做為輕質隔間牆時，需先以輕鋼架作為結構骨架，前後表面封上石膏板、水泥板、矽酸鈣板等板材，內部填充混凝土或吸音棉等材質作為填充物，才可完成一道標準隔間牆體。矽酸鈣板在壁掛方面應承重不足，故需搭配輕鋼架輔助或在板材背後釘製鐵板作為補強。

聚氨酯發泡材料在製作上可進行調整厚度，可直接使用螺絲鑽釘於牆面進行壁掛，於工程應用上更便利。

試驗牆體以疊砌方式，使用免釘膠組合出一面聚氨酯發泡牆(如圖 17)，此牆尺寸為長度 120 公分、高度 100 公分、厚度為 5 公分，再使用批土整面(如圖 18)，塗刷兩道油漆以作為粉飾(如圖 19)。完成後將牆體置於一空構架之側面作為側向支撐整體牆面，則底部放置鋼條以使牆體固定直立狀態。

本壁掛試驗分為兩大種類牆體：第一項為單純聚氨酯發泡牆進行測試，其後續再將矽酸鈣板接合於聚氨酯發泡牆體上，探討其組合型態是否適用於壁掛狀態。



圖 17 聚氨酯發泡牆



圖 18 批土整面牆體



圖 19 油漆粉飾

4-1 聚氨酯發泡牆

分別採用 8#x1-1/2" (3.81 公分)及 8#x1-1/4" (3.17 公分)自攻螺絲將電視架釘於發泡牆面上，其鎖入深度約為牆體 4 公分與 3 公分。

使用八支自攻螺絲將電視架至於牆面後開始進行吊掛質量塊測試，為避免後續壁掛測試之質量塊因觸碰至牆面以分散重量傳遞，故在電視架上左右兩側各夾一隻 C 型夾後，再利用草繩與尼龍線輔助，使測試質量塊騰空狀態避開牆面，於每 72 小時疊加一塊質量塊直至牆體造成破壞(如圖 20 至圖 23)，期間觀測牆面與螺絲之間有無毀壞破損。

(一) 壁掛螺絲(鎖入壁體 4 公分)：電視架加上兩座 C 型夾具為 4.41 公斤，依表 3 所

示質量塊累加至第十塊時因其 C 型夾具承受不住荷重而滑脫墜落，故其壁掛重量僅算至九塊質量塊重量，包含夾具及電視架總重為 61.27 公斤，而拆解後觀察螺絲並無破壞變形(如圖 24)，且牆體與螺絲鑽孔無損害(如圖 25)，故鎖入壁體 4 公分之螺絲單支可承重 7.6kgf 之載重。

表 3 聚氨酯發泡牆壁掛試驗(螺絲鎖入壁體 4 公分)

	重量 (kg)	總重 (kg)	觀測結果
電視架加兩座 C 型夾	4.41	4.41	無變形破壞
一個質量塊	6.27	10.68	無變形破壞
二個質量塊	6.35	17.03	無變形破壞
三個質量塊	6.38	23.41	無變形破壞
四個質量塊	6.36	29.77	無變形破壞
五個質量塊	6.33	36.10	無變形破壞
六個質量塊	6.37	42.47	無變形破壞
七個質量塊	6.17	48.64	無變形破壞
八個質量塊	6.31	54.95	無變形破壞
九個質量塊	6.32	61.27	無變形破壞
十個質量塊	6.27	67.54	C 型夾滑脫墜落

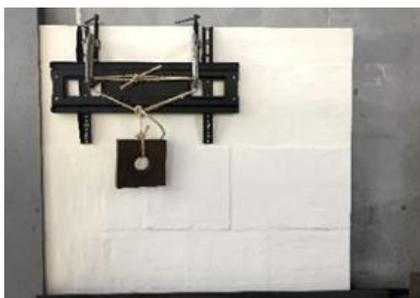


圖 20 第一塊質量塊

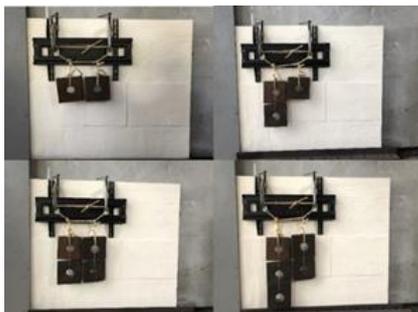


圖 21 第二塊至第五塊質量塊

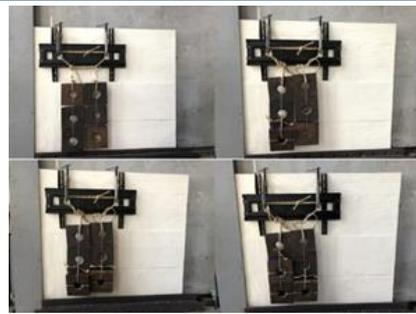


圖 22 第六塊至第九塊質量塊



圖 23 第十塊質量塊(夾具滑脫)



圖 24 試驗後之牆面(無損壞)



圖 25 試驗後之螺絲(無損壞)

- (二) 壁掛螺絲(鎖入壁體 3 公分)：壁掛至第九塊質量塊時 C 型夾承受不住重量而致破壞(圖 26 至圖 28)，壁掛結果如表 4 所示。試驗完成拆解電視架後觀察其

螺絲並無變形及鑽孔無擴大(圖 29 和圖 30)。故壁掛總重量算至八塊質量塊包含電視架及夾具為 54.96 公斤，其單一螺絲荷重為 6.87kgf。

表 4 聚氨酯發泡牆壁掛試驗(螺絲鎖入壁體 3 公分)

	重量 (kg)	總重 (kg)	觀測結果
電視架加兩座 C 型夾	4.41	4.41	無變形破壞
一個質量塊	6.36	10.77	無變形破壞
二個質量塊	6.38	17.15	無變形破壞
三個質量塊	6.35	23.50	無變形破壞
四個質量塊	6.33	29.83	無變形破壞
五個質量塊	6.27	36.10	無變形破壞
六個質量塊	6.37	42.47	無變形破壞
七個質量塊	6.17	48.64	無變形破壞
八個質量塊	6.32	54.96	無變形破壞
九個質量塊	6.31	61.27	C 型夾滑脫墜落

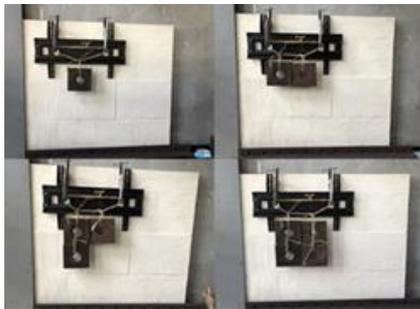


圖 26 第一塊至第四塊質量塊

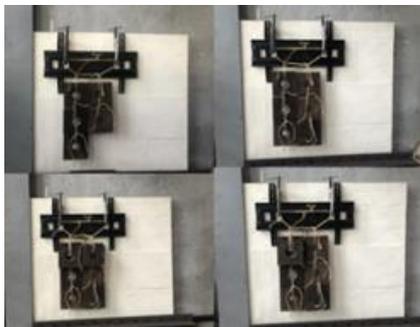


圖 27 第五塊至第八塊質量塊



圖 28 第九塊質量塊(夾具滑脫)



圖 29 試驗後之牆面(無損壞)



圖 30 試驗後之螺絲(無損壞)

4-2 聚氨酯發泡牆接合矽酸鈣板

本試驗如圖 31 至圖 33 所示，將矽酸鈣板釘於聚氨酯發泡牆上，將 PU 發泡材料做為輕質隔間牆之牆體內部填充物，使用 8#x1-1/2" 自攻螺絲將兩者材質釘合與壁掛電視架及吊掛質量塊，測試兩者之間壁掛能力。

測試壁掛重量結果因電視架在前兩次試驗有所磨損，測試結果如表 5 所示，其 C 型夾在第七塊質量塊滑落破壞，電視架與 C 型夾與六塊質量塊總重為 42.42 公斤，平均八支螺絲，單支至少可承重 5.30 公斤。

其試驗也顯示出聚氨酯發泡牆與矽酸鈣板可完整組合為輕質隔間牆，聚氨酯之特點

再加上矽酸鈣板防火耐燃之特性，使其作為隔間牆之安全性更加完善。

表 5 聚氨酯發泡牆接合矽酸鈣板壁掛試驗

	重量 (kgf)	總重 (kgf)	觀測結果
電視架加 兩座 C 型夾	4.41	4.41	無變形破壞
一個質量塊	6.35	10.76	無變形破壞
二個質量塊	6.27	17.03	無變形破壞
三個質量塊	6.38	23.41	無變形破壞
四個質量塊	6.33	29.74	無變形破壞
五個質量塊	6.36	36.10	無變形破壞
六個質量塊	6.32	42.42	無變形破壞
七個質量塊	6.31	48.73	C 型夾滑脫墜落

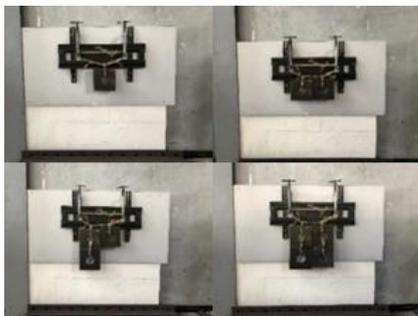


圖 31 第一至第四塊質量塊

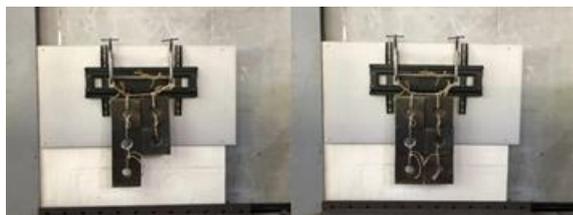


圖 32 第五與第六塊質量塊



圖 33 第七塊質量塊(夾具滑脫)

五、結論

(一) 聚氨酯發泡材料因發泡結構組成，其抗壓強度分為正向抗壓強度及側向抗壓

強度。正向壓縮強度試驗結果平均為 2.27MPa，側向壓縮強度平均為 3.09MPa，側向抗壓強度高於正向抗壓強度，其原因為本研究進行發泡時模具為單向發泡，故造成材料不同面向之強度發展不同。故後續本研究將調整材料配比與發展不同發泡形式來改善正向及側向壓縮強度之差距。

(二) 聚氨酯發泡牆單純以自攻螺絲即可進行壁掛，其最終係因 C 型夾承受不住荷重而滑脫墜落，而終止試驗。試驗結果顯示，鎖進壁體長度為 4cm 之單支螺絲具有 7.66kgf 之壁掛能力；鎖進壁體長度為 3cm 之單支螺絲亦具有 6.87kgf 之壁掛能力。

(三) 矽酸鈣板附合於聚氨酯發泡牆進行壁掛測試，因前兩次壁掛測試電視架有所磨損，故 C 型夾承載重量僅試驗至第六塊質量塊。故單一螺絲承重具有 5.30kgf 之壁掛能力。

參考文獻

1. 施文和，林信宏，林招焯「建築物輕質隔間牆隔音性能之研究」，內政部建築研究所，第 2 章，第 7 頁，2008。
2. 「防音輕隔間牆之防火性能驗證研究」，內政部建築研究所協同研究報告，第 2 章，第 2 頁，2019。
3. Anand B.Balaji, Harshini Pakalapati, Mohammad Khalid, Rashmi Walvekar, Humaira Siddiqui, Biodegradable and Biocompatible Polymer Composites,1.3.9, pp.3~32, Woodhead Publishing Series, Composites Science and Engineering, 2018.
4. John Lazonby, David Waddington, The Essential Chemical Industry (ECI) - Online, Polyurethanes, 2017,.
5. Sabu Thomas, Ajay Vasudeo Rane, Krishnan Kanny Abitha V, K, Martin George Thomas, Recycling of Polyurethane Foams, 2.4, pp.17~27, Plastics Design Library, 2018.
6. Yajing Shi, Xiaoming Ye, Qi Zhang, Chao

Zhang, Chao Qian, Xinzhi Chen, Synthesis of Tertiary Amine Catalysts for Polyurethane Foam, Hans Journal of Chemical Engineering and Technology, Vol.06, No.06,1.2, 2016.

7. 孫宇，「聚氨酯泡沫穩定劑發展現狀及建議」，聚氨酯工業，第 31 卷，第 1 期，第 1 頁，2016。

石墨烯應用於防水塗料之可行性探討

張簡嘉賞¹ 羅紫綾²

¹ 國立高雄科技大學 營建工程系 助理教授

² 國立高雄科技大學 營建工程系 研究生

摘要

於潮濕多雨的環境下，建築結構之防水更顯至關重要，然建築因施工品質及多雨環境等因素，漏水問題層出不窮，不僅有礙觀瞻，同時也大幅降低生活品質及危害建築結構安全。本研究係利用石墨烯具高熱傳導之特性，望發展防水兼具散熱之塗料。本文擬針對防水進行討論，以新型材料－石墨烯 PU 為主軸進行防水測試，並評估此防水材料未來發展之可行性。

本文將此防水測試分為兩部分進行探討，第一部分採用不同防水材料進行搭配組合測試，評估底漆之搭配是否影響防水效益，並根據 ASTM D3359 「膠帶量測膠結性之標準試驗方法(膠帶法)」之 B 方法，進一步探討塗料與混凝土界面膠結性之影響。測試結果顯示，不論是否有搭配底漆，本研究所發展之石墨烯 PU 塗層與混凝土界面具備良好之膠結性能。本研究完成膠結能力測試後，進一步設計一組可模擬 3m 高水壓之測試構架進行防水測試。測試結果顯示，本研究所發展之不同濃度之石墨烯 PU 皆具優異之防水效果。

關鍵字：防水測試、石墨烯 PU、防水塗料、膠結性

The Feasibility of Graphene Application to Waterproof Coatings

Chia-Shang Chang¹ Zih-Ling Lo²

¹ Assistant Professor, Department of Construction Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology, Taiwan

² Master Student, Department of Construction Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology, Taiwan

ABSTRACT

In the humid and rainy environment, the waterproof of building structure is more important. Although the factor of construction quality and rainy environment, water leakage problems emerge in endlessly. It not only offend the eye, but also greatly reduces the quality of life and endangers the safety of building structure. This research utilizes the high thermal conductivity of Graphene and hopes to develop coatings that are both waterproof and heat-dissipating. This article intends to discuss waterproofing, take the new material-Graphene PU as the main axis to conduct waterproofing tests, and evaluate the feasibility of the future development of this material. In this paper, the waterproof test is divided into two parts. In the first part, different waterproof materials are used for combination test. Evaluate whether the combination of primer affects the waterproof efficiency. According to the method B of ASTM D3359 "Standard Test Methods for Rating Adhesion by Tape Test (Tape Method)", the effect of coating on the interfacial adhesion between coating and concrete is further discussed. The test results show that the interface

between the Graphene PU coating and the concrete has a good bonding performance regardless of whether it is matched with a primer. After the cementation ability test, a set of test frame which can simulate 3m high water pressure is further designed for waterproof test. The test results show that the Graphene Pu with different concentrations has excellent waterproof effect.

Keywords: waterproof test, Graphene PU, waterproof coating, cementation

一、緣起

台灣位處高溫、潮溼及氣候多變之環境，夏季多有西南氣流，受西南氣流之影響常伴隨颱風引進，挾帶大量水氣致使雨量旺盛，其大量雨水易因防水工程品質不完善而滲入建築結構，導致建築物產生漏水現象，故建築物之防水性能更顯其重要性。

技術的研發及知識的拓展，於近十幾年自發現石墨烯以來，由於其優異之結構、電學、機械和光學性質，引起全球科學家極大的關注，為各產業所矚目之奈米材料。此材料適用於各種領域，包括醫療、能源、電子裝置、航太及未來材料等。本研究係利用石墨烯防鏽及防水等之優異性能，將之應用於建築塗料，探討其防水之可行性，可供日後工程界於建築塗料方面之選擇更多樣化。

二、文獻回顧

✧ 航空

飛機與直升機於空中飛行時，皆會遭遇一個棘手問題，即機翼之螺旋槳葉可能會發生結冰情況。因此 James Tour[1]教授與其研究人員開發一種原型除冰系統，意指將此系統未壓縮碳奈米管，即石墨烯奈米帶與環氧樹脂-石墨烯複合材料結合，於葉片前端披覆複合材料，將金屬保護層覆蓋塗層，並施加電壓；石墨烯製成之奈米帶僅占環氧-石墨烯複合材料之5%，然其石墨烯之高導電性卻足以以相對較小之電壓，傳遞足夠的熱量以融化結冰之螺旋槳葉。此技術之研發使得於寒冷天氣飛行時，更加安全。

✧ 防鏽漆

石墨烯具特殊片狀結構，對於水及空氣之擴散具優良屏蔽作用。經研究人員觀測，得石墨烯或氧化石墨烯為碳原子緊密堆積之

單層二維蜂窩狀晶格結構，具較小之尺寸效應，故可填充至防腐蝕之孔洞及缺陷，進而阻止和延緩小分子腐蝕金屬，提高塗層抗腐蝕能力[2]。此材料適用於鋼結構、橋梁及港口設施等。

✧ 防水膜

以石墨烯為核心材料，開發高機能性石墨烯透溼防水膜，可提供高耐水壓、高透濕性及高透氣性，散熱性亦表現相當優異。然機能透濕膜分為兩種，一為石墨烯親水膜 GM 系列，其以親水膜為基質，開發石墨烯機能透濕膜，並提供舒適性、耐磨性及導電性；二為石墨烯防水透氣膜，以 PU 為多孔隙膜製成，提升舒適性及強化耐磨性[3]。

✧ 石墨烯濾水

一根頭髮厚度的石墨烯膜材，可疊多達 20 萬片的石墨烯，因其孔隙相當微小，汗水經層層過濾，分離水中雜質效果優異[4]，亦能過濾有毒物質，望未來可變成淨水利器。於文獻回顧中，可得石墨烯具高導熱、耐腐蝕、防水及孔隙小等優異特性，故本研究採用其優點，應用於建築塗料中，並測試其效益。

三、膠結性能測試及評估

膠結性能為基底材與塗料間是否具適當結合之指標。本研究評估重點在於不同防水材料及石墨烯 PU 之搭配組合中，是否具備良好膠結及防水特性。

3-1 試體製作

本研究採用 100x100x15mm 之混凝土板試體進行初步防水測試。防水試體製作過程如圖 1 所示，使用壓克力模板，將混凝土灌入，待 24 小時乾燥後，拆模並將混凝土板至養護槽中進行養護，養護完成後取出風乾，

即可進行塗層之塗刷。圖 2 為養護完成之 14 組混凝土板試體。

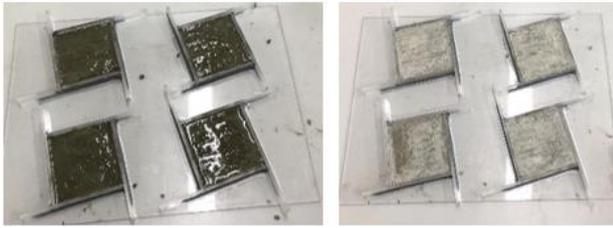


圖 1 試體製作過程

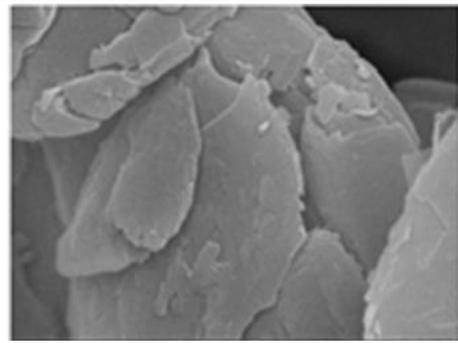


圖 3 SEM 下之石墨烯材料



圖 2 製作完成之混凝土板試體

3-2 塗料介紹

本章節將探討防水材料之特性，其本文實驗所運用之實驗材料分別如下所述。

(一) 石墨烯 (Graphene)

為本研究塗料設計之主軸，由圖 3 SEM 下，可觀察其石墨烯由片狀形態組成，特色為非常薄且長寬比大，此種獨特之形態，使石墨烯能提供有效之阻隔特性。

石墨烯為一六角形蜂巢晶格狀排列的碳原子(圖 4)，其厚度僅為一個碳原子層厚之二維材料，為碳之同素異形體。此材料為當今世上最薄且最堅硬之奈米材，具備高可撓性，可容許其彎曲及高度延展，導熱係數可高達 $5300\text{W/m}\cdot\text{K}$ [5]，具備優良之導熱性、機械性及彈性。



圖 4 石墨烯分子排列情況(圖片來源: Bio-nanocomposites of graphene with biopolymers; fabrication, properties, and applications)

(二) A 牌複合式防水材

此防水材之主劑(圖 5)為水性聚氨酯 (PU)，其顏色為乳白色，需搭配骨材拌合使用(圖 7)；骨材為灰色砂、粉之混合體(圖 6)。然此複合式防水材適用於建築物夾層之防水，表面須搭配其他裝修材。



圖 5 防水材主劑



圖 6 骨材



圖 7 複合式防水材

(三) 石墨烯 PU

本文係利用石墨烯(圖 8)之優異性能, 搭配水性聚氨酯(圖 5)具優良防水、耐久及耐候性等, 將石墨烯材料與水性聚氨酯拌合設計, 如圖 9 所示, 為其拌合而成之石墨烯 PU。



同圖 5 防水材主劑 圖 8 石墨烯材料



圖 9 石墨烯 PU

(四) 壓克力樹脂(底漆)

為一液型水性壓克力樹脂, 顏色為乳白色液體(圖 10), 此種型態之樹脂只需添加稀釋溶劑拌合均勻, 即可施塗。適用於混凝土表面之底塗, 改善塗料與混凝土之接著, 亦防止水氣上升。



圖 10 壓克力樹脂

3-3 塗料配置

本實驗共分成 14 組混凝土板試體, 於兩種不同防水材之搭配組合進行測試, 在相同情形下, 使用相同底漆進行試驗。

其塗料搭配組合如表 1 所示。編號 1~7 之試體皆搭配一層底漆, 另編號 8~14 之試體則無搭配底漆; 此 14 種搭配組合中, 編號 1 號之組合方式係為 A 牌複合式防水材標準傳統施作方式, 即一層底漆兩層面漆, 另 13 組

試體均依照 A 牌複合式防水材之施工方式, 一層塗刷完成乾燥後, 再進行第二層塗刷, 直至三層塗刷完成。圖 11 為各試體均完成三層塗刷工序後之試體照片。

表 1 防水測試 - 塗料組合

編號	組合	編號	組合
1	底漆 - A牌複合式防水漆	8	A牌複合式防水漆
2	底漆 - A牌防水材主劑+骨材1	9	A牌防水材主劑+骨材1
3	底漆 - A牌防水材主劑+骨材2	10	A牌防水材主劑+骨材2
4	底漆 - 石墨烯PU+A牌骨材	11	石墨烯PU+A牌骨材
5	底漆 - 石墨烯PU+骨材1	12	石墨烯PU+骨材1
6	底漆 - 石墨烯PU+骨材2	13	石墨烯PU+骨材2
7	底漆 - 石墨烯PU	14	石墨烯PU



圖 11 三層塗層施作完成之試體

3-4 膠結性評估

依防水材標準施作工序, 完成三層塗層之塗刷, 並待塗層乾燥後, 即根據 ASTM D3359 之試驗方法[6], 採用膠帶法進行其塗層膠結性之測試, 並比較各組塗層與混凝土板試體間之膠結性能。本研究之塗層厚度介於 2mil 至 5mil, 依據 ASTM D3359 試驗之條件, 故使用方法 B 進行測試。該法主要為利用刀具搭配鐵尺垂直刻劃 6 條線, 間距為 2mm (圖 12)。刻劃完成後, 使用膠帶黏貼至方格刻劃處並進行測試, 測試完成後(圖 13), 以圖 14 之膠結性分級判斷其成效。

由編號 1-3 之測試結果顯示, A 牌防水材主劑與骨材 1 及骨材 2 搭配之塗料, 其塗層與混凝土界面之膠結級別為 4B 及 3B; 另比較編號 8-10 之無搭配底漆試體, 其膠結級別亦為 4B 及 3B。整體而言, 即使未使用

底漆，A 牌複合式防水材與混凝土表面皆具良好之膠結性能；另比較編號 4-7 以及編號 11-14 之石墨稀 PU 搭配組合可得，編號 4-6 及 11-13 石墨烯 PU 添加骨材之搭配，其膠結級別為 3B 及 2B。而編號 7 與 14 之石墨烯 PU 之膠結級別為 4B，故不論是否具有底漆之塗層搭配，單純石墨烯 PU 仍具良好之膠結性能。

實驗結果分析，A 牌複合式防水材與骨材之搭配及單純石墨稀 PU 之塗層，其膠結性能佳，表面亦無乾縮或龜裂之現象，故防水性能測試將此結論納入設計之參考依據。

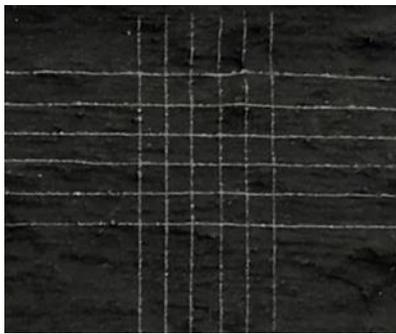


圖 12 刻劃完成之試體

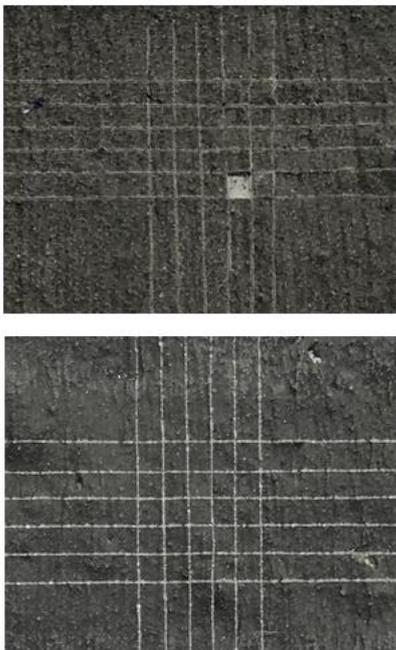


圖 13 測試完成之試體

CLASSIFICATION OF ADHESION TEST RESULTS		
classification	percent area removed	SURFACE OF CROSS-CUT AREA FROM WHICH FLAKING HAS OCCURRED FOR SIX PARALLEL CUTS AND ADHESION RANGE BY PERCENT
5B	0% None	
4B	Less than 5%	
3B	5 - 15%	
2B	15 - 35%	
1B	35 - 65%	
0B	Greater than 65%	

圖 14 方法 B 之膠結性分級 (圖片來源：ASTM D3359)

3-5 初步防水測試評估

依設計之塗層，經標準工序分別塗刷三層後，於 14 組混凝土試體板上以滴水靜置方式，進行初步測試其塗料防水特性。如圖 15 所示，含底漆之 A 牌複合式防水材主劑 PU 搭配之試體(編號 1~3)，以及含底漆之石墨烯 PU 試體(編號 7)，呈現良好的防水效果；如圖 16 所示，不含底漆之 A 牌複合式防水材主劑 PU 搭配之試體(編號 8~10)，及不含底漆之石墨烯 PU 試體(編號 14)，防水效果亦佳。綜觀而論，不論試體是否含有底漆之防水測試，其結果皆相同。然有含底漆之試體，於後續塗刷第二層及第三層塗料時，相較於無底漆之試體，因表面光滑故易於塗刷，此結果可供後續實驗作為參考。



圖 15 含底漆之防水測試

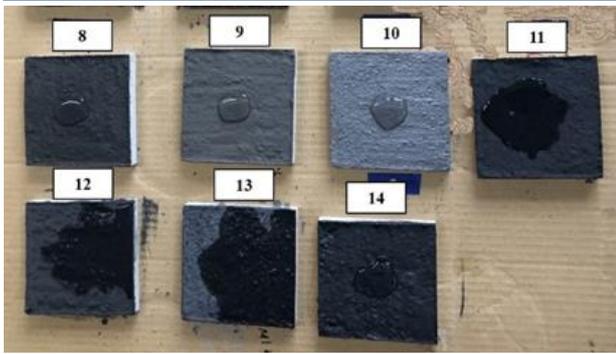


圖 16 不含底漆之防水測試



圖 17 混凝土分層灌漿至 PVC 管

四、石墨烯 PU 防水性能測試

臺灣四面環海且位處亞熱帶，氣候潮溼悶熱，亦夏季常伴隨颱風引進，然建築結構之防水為首要重視的範疇。本研究將以石墨烯 PU 為主軸，探討其是否具備防水功能，以評估未來於工程實務應用時，能否取代傳統之防水漆，發展多功能性之塗料。本研究係以不同濃度之石墨烯 PU 進行測試，並探討其防水效益。

4-1 試體製作

本試驗以南亞 4" PVC 管(內徑 100 mm)、高度為 170mm 之試體，用以模擬新建結構物之標準工序，共計 15 組試體。

依混凝土配比設計規範進行混凝土強度之配比設計，計算粗骨材、細骨材與水泥之用量，並進行混凝土之拌合，將拌合完成之混凝土填充至 4" PVC 管內，為預留石墨烯 PU 塗層、水泥砂漿層及填充水所需要之空間，於 4" PVC 管內底部置入厚度 1cm 之保麗龍板，並將其固定於 4" PVC 管底，避免灌漿及搗實時脫落造成水泥砂漿溢出。混凝土填充至管內時，分三層灌漿並適度搗實至混凝土高度為 15 公分，其施作過程如圖 17 所示。

如圖 18 所示，灌漿完成拆模後，將 15 組混凝土試體放入恆溫水槽中進行 28 天之養護(圖 19)，養護完成後，將試體取出並進行自然風乾(圖 20)，風乾完成即可進行塗層之塗刷。



圖 18 完成拆模之試體



圖 19 28 天恆溫槽之養護



圖 20 完成養護並自然風乾

4-2 塗料配置

本研究使用 15 組混凝土試體進行塗料組合搭配，完成塗料塗刷後，以水泥砂漿進行表面粉光。其塗料之組合如表 2 所示，編號 1、2 為比較 A 牌複合式防水材是否添加骨材之差異；編號 3、4 即比較於濃度 3% 石墨烯 PU 之塗層數是否影響測試結果；編號 5、6 探討濃度於 1.5% 石墨烯 PU 時，其塗層數是否影響測試結果；編號 7~10 則為於濃度 3% 時

之石墨烯水性漿料，比較不同塗層數及不同石墨烯片徑之時，其防水效果之差異；編號 11、12 則探討於濃度 1.5% 石墨烯 PU 時，其塗層數對防水測試結果之影響；編號 13、14 係利用不同濃度之石墨烯 PU 作為防水結果判斷之依據；編號 15 為無塗層之標準混凝土試體，如圖 21 為 15 組試體完成塗層塗刷照片，圖 22 為 15 組試體表面粉光，完成後即可封蓋進行防水測試。

表 2 防水測試 - 塗料組合

編號	塗層配置
1	底漆-三層A牌複合式防水材(含骨材)-水泥砂漿
2	底漆-三層三層A牌複合式防水材(不含骨材)-水泥砂漿
3	底漆-二層3%石墨烯PU-水泥砂漿
4	底漆-三層3%石墨烯PU-水泥砂漿
5	底漆-二層1.5%石墨烯PU-水泥砂漿
6	底漆-三層1.5%石墨烯PU-水泥砂漿
7	底漆-二層3%石墨烯水性漿料(片徑3 μ m)-水泥砂漿
8	底漆-三層3%石墨烯水性漿料(片徑3 μ m)-水泥砂漿
9	底漆-二層3%石墨烯水性漿料(片徑19.65 μ m)-水泥砂漿
10	底漆-三層3%石墨烯水性漿料(片徑19.65 μ m)-水泥砂漿
11	底漆-二層實驗拌合1.5%石墨烯PU-水泥砂漿
12	底漆-三層實驗拌合1.5%石墨烯PU-水泥砂漿
13	底漆-三層A牌複合式防水材(含骨材)-二層3%石墨烯PU-水泥砂漿
14	底漆-三層A牌複合式防水材(含骨材)-二層1.5%石墨烯PU-水泥砂漿
15	混凝土標準試體



圖 21 塗刷完成之試體



圖 22 試體表面粉光

4-3 防水試驗結果與討論

根據台灣建築技術規則規定[7]，女兒牆高度不得高於 1.5 公尺，故本實驗使用 2 倍之安全係數，並採用 3m 之水壓高度進行模擬測試。如圖 23 所示，為實驗防水測試構架，將 15 組試體安裝於試驗構架上之情形。測試結果顯示，試體編號 15 為無塗層之標準混凝土試體，如圖 24 所示，於第四天即有滲漏情形產生；試體編號 9 (圖 25) 於第七天開始產生滲漏現象。經 90 天之防水測試，其餘試體均未產生滲漏現象，可得以下結論：

- (1) 比較試體編號 1 及編號 2，可得 A 牌複合式防水材，其無論是否添加 A 牌骨材，均具有防水之功效，故其添加骨材之目的應為降低防水材主劑之用量。
- (2) 由試體編號 3 - 6 可得，濃度 1.5% 及 3% 之石墨烯 PU 皆具有防水性能，且不論塗刷二層或三層石墨烯 PU，亦可有良好之防水性能。
- (3) 由試體編號 13 及編號 14 之結果顯示，以 A 牌複合式防水材為基底，後搭配不同濃度石墨烯 PU，具相同防水之功效。
- (4) 試體編號 9，採用底漆搭配二層 3% 石墨烯水性漿料(片徑 19.65 μ m)之試體，於第七天開始滲漏；比較同片徑之編號 10，採用底漆搭配三層 3% 石墨烯水性漿料(片徑 19.65 μ m)，並未發生滲漏現象。可得知，若採用相同片徑 19.65 μ m 之石墨烯，建議至少需塗刷三層塗層，以避免發生滲漏之現象造成防水失敗。



圖 23 防水試驗架構

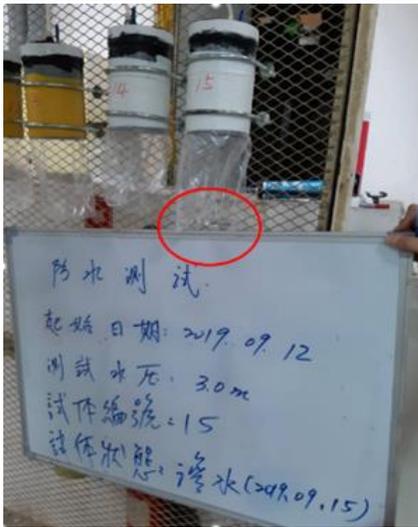


圖 24 編號 15 之滲水狀況

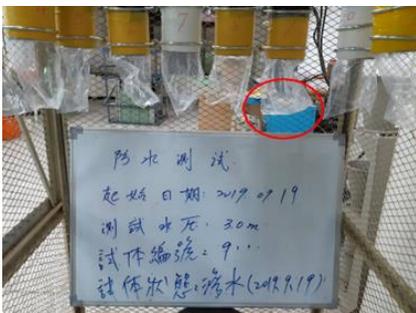


圖 25 編號 9 之滲水狀況

五、結論與建議

本研究利用石墨烯材料並搭配 PU 材，發展出石墨烯 PU，並試圖將石墨烯 PU 應用與發展為兼具防水與散熱之新型塗料，以期能為環保節能貢獻一分心力。本研究所發展之石墨烯 PU 經一系列之膠結能力測試與防水測試後，可得以下結論：

1. 新型石墨烯 PU 採用膠帶法測試其膠結性能，測試結果顯示，不論是否搭配底漆，A 牌複合式防水材及石墨烯 PU 之塗層，皆具良好之膠結性。
2. 防水性能測試中，經 90 天防水測試結果顯示，本研究所發展之石墨烯 PU 均無發生滲漏情形，表示石墨烯 PU 具備良好防水性能，具備發展成為兼具防水散熱塗料之潛力。

基於篇幅限制，本篇論文僅針對石墨烯 PU 之膠結能力與防水能力進行發表與說明，

後續亦已完成測試其耐候及耐腐蝕之特性，並利用其高熱傳導之優異性能，發展出防水兼具散熱之多功能材料。未來於建築防水散熱塗料中將有更多選擇，對於環保與能源節省上亦將多一種選擇。

參考文獻

1. J Wood, Chris (June 2, 2015). "Coating condensers with graphene could increase power plant efficiency". www.gizmag.com. Retrieved October 14, 2015.
2. 陳詠璞 (2017)。氧化石墨烯 / 環氧樹脂奈米複合材料之合成及其抗腐蝕特性研究。取自臺灣碩博士論文系統。
3. UC BACON Co. Ltd. (2018). Functional Membrane With Excellent Heat Convection And Anti-Abrasion. Retrieved from <http://ucbacon.com.tw/product/23>.
4. 湯雅雯 (2015 年 11 月 11 日)。可過濾鉛水石墨烯成淨水器【中時新聞網】。取自 <https://www.chinatimes.com/realtimenews/20151111005210-260405?chdtv>.
5. Maryam Azizi-Lalabadi , Seid Mahdi Jafarib.(2021). Bio-nanocomposites of graphene with biopolymers ; Fabrication , Properties , and Applications. *Advances in Colloid and Interface Science*,292(102416). doi: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102416>
6. ASTM INTERNATIONAL 。 Standard Test Methods for Rating Adhesion by Tape Test (D3359 - 17) 。 Retrieved from <https://compass.astm.org/download/D3359.696.pdf>.
7. 內政部 (民 99 年 08 月 23 日)。建築技術規則建築設計施工編 (台內營字第 0990806185 號)【法規查詢系統】。取自 <https://glrs.moi.gov.tw/LawContent.aspx?id=GL000127>.

添加無機色粉製成彩色水泥砂漿工程性質之研究

黃志明¹ 高典群² 楊文都³ 王和源⁴

¹ 國立高雄科技大學化學工程與材料工程系博士生

² 國立高雄科技大學土木工程系研究生

³ 國立高雄科技大學化學工程與材料工程系教授

⁴ 國立高雄科技大學土木工程系特聘教授

摘要

隨著時間推演，材料的多功能性漸漸被重視，本研究利用添加無機色粉 1.25、2.5 及 3.75% 及壓克力樹脂 20%，使水泥砂漿彩色化，探討水泥砂漿之新拌性質(坍流度)、硬固性質(抗壓強度、抗彎強度、抗拉強度及超音波波速)及耐久性質(四極式電阻及熱傳導係數)。結果顯示坍流度隨著無機色粉添加量增加而增加，坍流度皆大於控制組大於 20cm，表示添加無機色粉能有效增加水泥砂漿之工作性。隨著無機色粉增加，抗壓、抗彎及抗拉強度皆有所降低，添加 1.25% 無機色粉仍能保有一定之工程性質，而添加壓克力樹脂能改善水泥砂漿之抗拉強度，使其超越控制組。超音波波速則與抗壓強度有些微不同，但趨勢接近，且大於 3600m/s 以上。耐久性質皆隨添加無機色粉及壓克力樹脂增加而有所降低，表明無機色粉添加量影響較為顯著，7 天齡期之表面電阻已大於 20 kΩ-cm。研究顯示，添加不同含量之無機色粉及 20% 壓克力樹脂之彩色水泥砂漿對其工程性質仍有不同程度之影響。

關鍵字：無機色粉、水泥砂漿、工程性質

Study on Engineering Properties of Colored Mortar by Adding Inorganic Color Poeder

Jih-Ming Huang¹ Tien-Chun Kao² Wein-Duo Yang³ Her-Yung Wang²

¹ Department of Chiminal and Materials Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

² Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

³ Department of Chiminal and Materials Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

⁴ Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

As time deduced, the versatility of materials has gradually been valued. In this study, the addition of 1.25, 2.5 and 3.75% of inorganic toners and 20% of acrylic resin was used to color the cement mortar, and to explore the new mixing properties of cement mortar (slump). Fluidity), hard properties (compressive strength, bending strength, tensile strength and ultrasonic wave speed) and durability (quadrupole resistance and thermal conductivity). The results show that the slump fluidity increases with the addition of inorganic toner, and the slump fluidity is greater than 20 cm in the control group, indicating that the addition of inorganic toner can effectively increase the workability of the cement mortar. With the increase of inorganic toner, the compressive, flexural and tensile strengths are all reduced. Adding 1.25% inorganic toner can still maintain

certain engineering properties, and adding acrylic resin can improve the tensile strength of cement mortar. Make it beyond the control group. The ultrasonic wave speed is slightly different from the compressive strength, but the trend is close, and it is greater than 3600m/s. The durability properties decrease with the addition of inorganic toners and acrylic resins, indicating that the amount of inorganic toners added has a significant effect, and the surface resistance of the 7-day-old age is greater than 20 kΩ-cm. Studies have shown that the addition of different amounts of inorganic toner and 20% acrylic resin colored cement mortar still has varying degrees of impact on its engineering properties.

Keywords: inorganic color powder, mortar, engineering properties

一、前言

隨著時間推演，許多都市內房屋不符合現行之耐震度、管線老舊或消防法規等，為了達到安全標準及延長建築物使用年限，需將老舊建築物進行整建[1]，因此許多地方進行都市計畫更新，能增加都市機能、改善居住環境及增加公共利益等，並達到都市美觀及延長建築物使用年限[2]。營造業對於台灣經濟發展有深刻的關聯性，勞動力不足為國內長久以來一直無法徹底解決的困境，而營造業乃高度勞力密集之產業，對於缺工之衝擊造成產業重大傷害[3]，而改善外牆施作材料能同時增加建物美觀及減少施作步驟，進而使人力需求降低。

彩色水泥砂漿是添加無機色料及壓克力樹脂，色料成分可分無機顏料，有機顏料與合成顏料三種[4]。有機顏料因紫外線，高溫或雨水的影響而容易退色，不適合與水泥砂漿拌合；顏料中的氧化鐵顏料，其著色性能佳，市面上也相當常見，性質方面符合本研究要求，故本研究選擇使用氧化鐵顏料，替水泥砂漿增添色彩。氧化鐵顏料已被廣泛用於塗料、塑膠、橡膠、陶瓷、造紙、油墨、美術顏料、工業化學品、動物飼料、化妝品與磁性記錄材料等產品的生產。在塗料工業中用氧化鐵顏料來製造防銹底漆。橡膠工業中用作輪胎與三角帶等橡膠製品的著色劑；建築工業方面則與水泥混合製作人造大理石，地面水磨石，仿琉璃瓦以及馬賽克磚，此外，氧化鐵顏料也常用於石棉，人造皮革與皮革指光等著色劑和填充劑[1]；添加壓克力樹脂之水泥砂

漿，壓克力樹脂為一種白色乳液狀之水性材料，於反應後會形成一類膠質介面，能使水泥砂漿提升防水性及耐磨性等力學性質[5]，而此效應可使外牆粉刷層於操作時減少施工步驟進而降低人力需求。本研究添加無機色粉 5、10 及 15% 及 20% 壓克力樹脂，使水泥砂漿彩色化，期能求得較適當的配比，使工程能達到工作、耐久、安全、生態、經濟及兼併美觀之性能。

二、研究材料與方法

2.1 研究材料

- (1) 水泥：採用台灣水泥公司所生產之波特蘭第 I 型水泥，符合 CNS-61 波特蘭水泥規範規定，比重約為 3.15，如圖 1 所示。
- (2) 拌合水：採用符合 ASTM C1602 拌合水標準規範之拌合水。
- (3) 壓克力樹脂：由福仕寶材料科技有限公司提供，如圖 1 所示，基本性質如表 1 所示。
- (4) 細粒料：採自里港溪之天然河砂，比重 2.65，吸水率為 2.0%，如圖 1 所示。
- (5) 無機色粉：由福仕寶材料科技有限公司提供，如圖 2 所示，基本性質如表 2 所示。

2.2 試驗項目及方法：

本研究主要試驗項目分別為坍流度、抗壓強度、抗彎強度、抗拉強度、超音波波速、四極式電阻及熱傳導係數試驗，個實驗相關規範如下所示：

- (1) 坍流度：依據 ASTM C230 進行試驗，目的在測定水泥砂漿中於標準流度值，該試驗於跌落 25 次後須進行四次量測，將四次數據平均後為該試樣之坍流度值。
- (2) 抗壓強度：依據 ASTM C109 規範灌製 5cm×5cm×5cm 立方試體，共 342 顆。
- (3) 抗彎強度：依據 ASTM C348 規範灌製 4cm×4cm×16cm 長方體試體，以研判檢驗各種不同水泥砂漿抵抗彎取性質，共 342 顆。
- (4) 抗拉強度及依據 ASTM C190 規範灌製八字形試體，共 342 顆。
- (5) 超音波波速：依據 ASTM C597 規範，利用兩探頭與試體表面接觸予以量測，將發射器音波脈波傳入試體中，量測脈波傳遞時間，計算出超音波在試體中的脈波速度。
- (6) 四極式電阻依據 ASTM C876 規範，量測出的表面電阻值，可視為水泥砂漿內部孔隙多寡與聯通性的間接指標。當電阻值越大經過試體的表面電流越少，代表其試體越緻密，耐久性較佳。
- (7) 熱傳導係數依據 ASTM E1225 規範，藉由試體溫差及時間變化之相互關係，計算得出熱傳導係數，傳導係數越高表示試體中孔隙較少，有較佳之緻密性，但隔熱效果較弱。

2.3 試驗變數及配比：

本研究實驗變數如下列所示，配比表如表 3 所示。

- (1) 水灰比：0.5
- (2) 壓克力樹脂添加量：20%
- (3) 無機色粉添加量：1.25、2.5 及 3.75%
- (4) 齡期：3、7、28、56、91 及 120 天
- (5) 顏色變數：控制組、紅色、黃色、綠色、藍色、白色及黑色

三、結果與討論

(1) 坍流度

由圖 3 所示，添加量 1.25% 依顏色(紅色、黃色、綠色、藍色、白色、黑色)坍流度分別為 25.88、23.83、25.0、24.75、25.88 及 25.63cm；

添加量 2.5% 依顏色(紅色、黃色、綠色、藍色、白色、黑色)坍流度分別為 24.98、22.78、24.45、23.83、25.25 及 25.50cm；添加量 3.75% 依顏色(紅色、黃色、綠色、藍色、白色、黑色)坍流度分別為 24.73、21.13、24.08、23.25、25.0 及 22.50cm。坍流度結果顯示隨著添加量上升，坍流度值隨之降低，因無機色粉於水泥砂漿中會吸收部分拌合水，影響其漿體之流動性。

(2) 抗壓強度

如圖 4 所示，當齡期 3 天時，控制組抗壓強度為 42.33MPa；無機色粉添加量 1.25%，抗壓強度依顏色(紅、黃、綠、藍、白及黑)為 26.43、29.54、28.74、30.78、31.30 及 31.96MPa，無機色粉添加量 2.5%，抗壓強度依顏色(紅、黃、綠、藍、白及黑)為 26.17、29.05、27.54、27.90、30.17 及 29.89MPa，無機色粉添加量 3.75%，抗壓強度依顏色(紅、黃、綠、藍、白及黑)為 25.13、28.14、27.21、25.06、27.26 及 25.35MPa，當齡期 28 天時，控制組抗壓強度為 55.99MPa；無機色粉添加量 1.25%，抗壓強度依顏色(紅、黃、綠、藍、白及黑)為 33.31、36.40、36.53、33.17、33.54 及 36.84MPa，無機色粉添加量 2.5%，抗壓強度依顏色(紅、黃、綠、藍、白及黑)為 30.10、33.73、31.75、30.74、32.78 及 33.11MPa，無機色粉添加量 3.75%，抗壓強度依顏色(紅、黃、綠、藍、白及黑)為 29.27、33.39、30.39、30.29、31.11 及 29.87MPa，當齡期 120 天時，控制組抗壓強度為 67.77MPa；無機色粉添加量 1.25%，抗壓強度依顏色(紅、黃、綠、藍、白及黑)為 53.59、54.10、52.90、52.30、53.53 及 53.74MPa，無機色粉添加量 2.5%，抗壓強度依顏色(紅、黃、綠、藍、白及黑)為 52.51、52.54、49.47、47.60、52.36 及 50.11MPa，無機色粉添加量 3.75%，抗壓強度依顏色(紅、黃、綠、藍、白及黑)為 51.47、45.32、48.41、47.44、51.26 及 45.08MPa。顯示添加量增加，抗壓強度會隨之降低，添加量越高吸取拌合水越高影響水灰比越高，彩色水泥砂漿因添加壓克力樹脂，壓克力樹脂會包覆水泥砂漿，造成水泥水化之水分提供不足，造成抗壓強度相對控制組為低。

(3) 抗彎強度

如圖 5 所示，齡期 3 天時，控制組抗彎強度為 13.0MPa；齡期 28 天時，控制組抗彎強度為 16.5MPa；齡期 120 天時，控制組抗彎強度為 20.0MPa，顯示抗彎強度隨齡期增加而增加。齡期 3 天時，添加 1.25% 無機色粉之抗彎強度為 11.8~14.2MPa；齡期 28 天時，抗彎強度為 13.8~17.7MPa；齡期 120 天時，抗彎強度為 21.9~24.3MPa；齡期 3 天時，添加 2.5% 無機色粉之抗彎強度為 9.0~13.9MPa；齡期 28 天時，抗彎強度為 13.4~17.5MPa，齡期 120 天時，抗彎強度為 19.8~22.9MPa；齡期 3 天時，添加 3.75% 無機色粉之抗彎強度為 8.0~11.0MPa；齡期 28 天時，抗彎強度為 11.9~15.5MPa；齡期 120 天時，抗彎強度為 17.8~21.0MPa。在短齡期時彩色水泥砂漿抗彎強度遠低於控制組，因添加壓克力樹脂會於表面形成一薄膜，且於拌合時產生氣泡，造成試體內部孔隙增加，不利於水泥水化，於齡期 120 天時水泥水化趨於完全且壓克力樹脂齡期越久結構越趨於完全，能提供較佳之抗彎強度，因此彩色水泥砂漿之成長百分比於晚齡期皆大於控制組。

(4) 抗拉強度

如圖 6 所示，齡期 3 天時，控制組抗拉強度為 5.69MPa；齡期 28 天時，控制組抗拉強度為 8.69MPa；齡期 120 天時，控制組抗拉強度為 9.63MPa。齡期 3 天時，添加 1.25% 無機色粉之抗拉強度為 7.13~9.56MPa；齡期 28 天時，抗拉強度為 9.63~10.75MPa；齡期 120 天時，抗拉強度為 11.69~12.50MPa；齡期 3 天時，添加 2.5% 無機色粉之抗拉強度為 7.0~8.19MPa；齡期 28 天時，抗拉強度為 9.0~9.50MPa，齡期 120 天時，抗拉強度為 10.44~11.50MPa；齡期 3 天時，添加 3.75% 無機色粉之抗拉強度為 6.25~7.50MPa；齡期 28 天時，抗拉強度為 8.0~8.75MPa；齡期 120 天時，抗拉強度為 9.44~10.69MPa。結果顯示隨著添加量增加，抗拉強度隨之降低，無機色粉添加量越高吸取拌合水越高影響水灰比越高，而彩色水泥砂漿因添加壓克力樹脂，壓克力樹脂能慢慢硬化，形成具有強度之薄膜，

能改善水泥砂漿之抗拉強度，能使彩色水泥砂漿之抗拉強度有所提升。

(5) 超音波波速

如圖 7 所示，當齡期 3 天時，控制組超音波波速為 4348m/s；無機色粉添加量 1.25%，超音波波速依顏色(紅、黃、綠、藍、白及黑)為 3906、3954、3734、3731、3846 及 3789m/s，無機色粉添加量 2.5%，超音波波速依顏色(紅、黃、綠、藍、白及黑)為 3704、3846、3690、3704、3664 及 3597m/s，無機色粉添加量 3.75%，超音波波速依顏色(紅、黃、綠、藍、白及黑)為 3623、3806、3597、3624、3597 及 3571m/s，當齡期 28 天時，控制組超音波波速為 4545m/s；無機色粉添加量 1.25%，超音波波速依顏色(紅、黃、綠、藍、白及黑)為 4032、4167、4000、4117、4117 及 4117m/s，無機色粉添加量 2.5%，超音波波速依顏色(紅、黃、綠、藍、白及黑)為 3985、4032、3954、4004、4032 及 4032m/s，無機色粉添加量 3.75%，超音波波速依顏色(紅、黃、綠、藍、白及黑)為 3968、3881、3807、3846、3906 及 3954m/s，當齡期 120 天時，控制組超音波波速為 4657m/s；無機色粉添加量 1.25%，超音波波速依顏色(紅、黃、綠、藍、白及黑)為 4269、4258、4039、4202、4238 及 4202m/s，無機色粉添加量 2.5%，超音波波速依顏色(紅、黃、綠、藍、白及黑)為 4116、4220、4016、4117、4167 及 4082m/s，無機色粉添加量 3.75%，超音波波速依顏色(紅、黃、綠、藍、白及黑)為 4049、3985、3986、4032、4116 及 4000m/s。結果顯示隨著添加量增加，超音波波速隨之降低，無機色粉添加量越高吸取拌合水越高影響水灰比越高，而彩色水泥砂漿因添加壓克力樹脂，於拌合時會產生氣泡，造成試體內部產生許多孔隙，使超音波波速有所降低。

(6) 表面電阻

如圖 8 所示，當齡期 3 天時，控制組表面電阻值為 14kΩ-cm；無機色粉添加量 1.25%，表面電阻值為 17~27kΩ-cm，無機色粉添加量 2.5%，表面電阻值為 16~21kΩ-cm，無機色粉添加量 3.75%，表面電阻值為

14~19k Ω -cm，當齡期 28 天時，控制組表面電阻值為 22k Ω -cm；無機色粉添加量 1.25%，表面電阻值為 31~42k Ω -cm，無機色粉添加量 2.5%，表面電阻值為 28~36k Ω -cm，無機色粉添加量 3.75%，表面電阻值為 24~33k Ω -cm，當齡期 120 天時，控制組表面電阻值為 47k Ω -cm；無機色粉添加量 1.25%，表面電阻值為 40~62k Ω -cm，無機色粉添加量 2.5%，表面電阻值為 39~61k Ω -cm，無機色粉添加量 3.75%，表面電阻值為 36~56k Ω -cm。結果顯示無機色粉添加量增加表面電阻值隨之降低，因無機色粉會吸收拌合水使水泥漿體更為黏稠，同時彩色水泥砂漿中添加 20%之壓克力樹脂，於拌合時會產生氣泡，搗實時無法有效排出氣泡，於試體內部形成孔隙，造成表面電阻值有所降低。

(7) 熱傳導係數

如圖 9 所示，齡期 3 天時，控制組熱傳導係數為 1.8434W/m·K；齡期 28 天時，控制組熱傳導係數為 2.0016W/m·K；齡期 120 天時，控制組熱傳導係數為 2.6508W/m·K，顯示熱傳導係數隨齡期增加而減少。齡期 3 天時，添加 1.25%無機色粉之熱傳導係數為 2.0538~2.3936W/m·K；齡期 28 天時，熱傳導係數為 2.4531~2.7719W/m·K；齡期 120 天時，熱傳導係數為 2.8146~3.4502W/m·K；齡期 3 天時，添加 2.5%無機色粉之熱傳導係數為 1.4740~1.9104W/m·K；齡期 28 天時，熱傳導係數為 1.8545~2.1702W/m·K，齡期 120 天時，熱傳導係數為 2.2083~2.8303W/m·K；齡期 3 天時，添加 3.75%無機色粉之熱傳導係數為 1.3869~1.6371W/m·K；齡期 28 天時，熱傳導係數為 1.6475~1.8359W/m·K；齡期 120 天時，熱傳導係數為 2.0127~2.3723W/m·K。結果顯示隨齡期增加熱傳導係數有上升之趨勢，因早期水泥水化作用還不完全，試體充滿孔隙不夠緻密，導致各配比於早齡期熱傳導係數較小，於養護齡期 120 天試體之水化反應發展較為完全，試體孔隙減少使熱傳導係數提升。

四、結論

1. 無機色粉添加量增加會使坍度與坍流度有降低之趨勢，整體工作性變差。
2. 抗壓強度隨無機色粉添加量增加而降低，顯示無機色粉添加量越高會造成硬固性質的負面影響，而添加壓克力樹脂會使試體緻密性降低，硬固性質也隨之降低，在抗壓強度方面由白色無機色粉為最佳，彩色水泥砂漿之間，因壓克力樹脂會使試體內部孔隙增加，而無機色粉添加量會水泥漿體更加黏稠。
3. 抗彎強度及抗拉強度隨著無機色粉添加量增加有降低之趨勢，而於添加壓克力樹脂能改善水泥砂漿之抗彎及抗拉強度，不同養護環境於晚齡其抗彎抗拉強度皆有所上升，甚至超越控制組。
4. 超音波波速隨齡期增加波速也隨之增加，而無機色粉之彩色水泥砂漿超音波波速皆低於控制組，因添加壓克力樹脂使試體緻密性變差，飽和石灰水養護超音波波速皆低於 4300m/s，各顏色之間由黃色無機色粉添加量 1.25%為最佳，大氣養護超音波波速皆低於 4000m/s，超音波波速須達到 4500m/s 以上表示式體具有良好之緻密性，而無機色粉之彩色水泥砂漿之試體緻密性較差。
5. 無機色粉添加量提升，會使電阻降低之趨勢，於晚齡期電阻值超越控制組跟超音波波速之趨勢不符。熱傳導係數隨著無機色粉加量增加而性質有所降低，熱傳導係數因添加壓克力樹脂而使得試體內部有孔隙產生，造成熱傳導係數降低。

參考文獻

1. 胡竣傑，2011，彩色水泥砂漿工程性質之研究，國立屏東科技大學，碩士論文。
2. 江宗仁，2017，複壁工法應用於老舊建築物外牆整建之關鍵成功因素，中華科技大學，碩士論文。
3. 姜智元，2020，以現場施工人員角度探討營造業缺工問題與留任意願之研究，國立高雄科技大學，碩士論文。

4. 張芬東，2009，顏料在彩色混凝土中的應用，混凝土與水泥製品期刊，第 50-53 頁
5. 劉冠廷，2011，環氧樹脂及壓克力樹脂漿體用於修補裂縫適用性之研究，國立台灣海洋大學河海工程學系，碩士論文。
6. 黃兆龍，2003，高性能混凝土理論與實務，詹氏書局。

表 1 壓克力樹脂之物理及化學性質

Physical properties		Chemical contents(%)	
Solid content	50±1%	PolyAcrylic Emulsion	50±1
Viscosity	500cPc 以下	Water	50±1
pH	9.0-10.0	-	-

表 2 無機色粉之物理性質

Property \ Color	Red	Yellow	Green	Blue	White	Black
Composition	Fe ₂ O ₃	Fe(OH) ₃	Cr ₂ O ₃	Ultramarine	TiO ₂	Fe ₃ O ₄
pH	5-8	4-8	5-7	6-9	4-10	4-8
Melting point (°C)	>1000	>1000	2435	>1000	1830	1597
Density (g/cm ³)	5	0.3-1	5.2	2.35	3.7-4.2	4.6
Water soluble	none	none	none	none	none	none

表 3 W/C 0.5 添加無機色粉及壓克力樹脂於彩色水泥砂漿之配比表(Unit:kg/m³)

W/C	AM(%)	PolyAcrylic Emulsion	AM(%)	Color Powder	Cement	Sand	Water
0.5	0	0	0	0	624.26	1534.88	249.71
	20	124.85	1.25	7.80			
			2.5	15.61			
			3.75	23.41			



(a)水泥



(b)天然砂



(c)壓克力樹脂

圖 1 試驗材料



圖 2 試驗材料-無機色粉

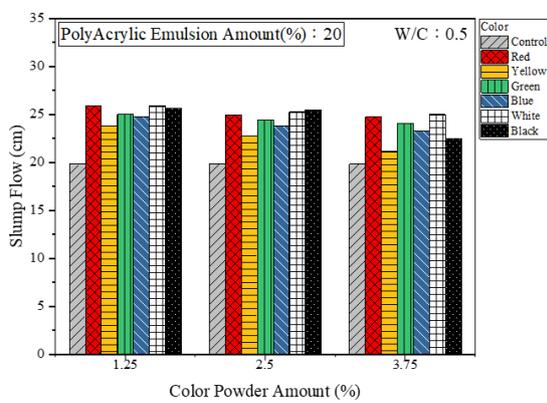


圖 3 無機色粉不同添加量於彩色水泥砂漿之坍流度

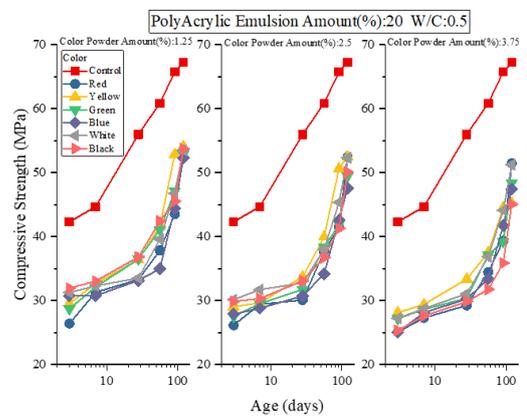


圖 4 W/C 0.4 不同無機色粉添加量於彩色水泥砂漿之抗壓強度

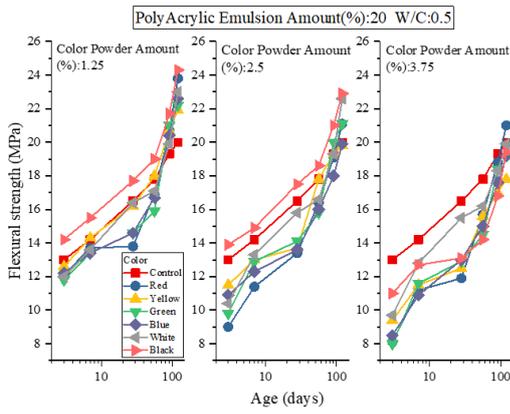


圖 5 不同無機色粉添加量於彩色水泥砂漿之抗彎強度

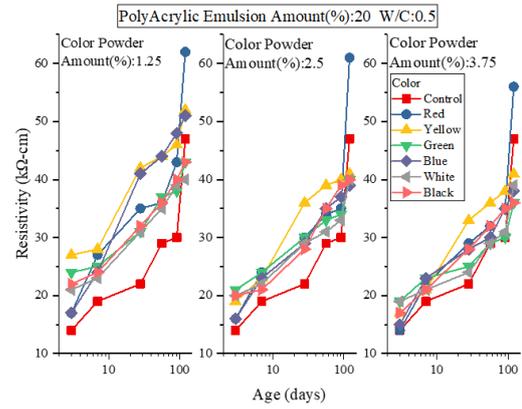


圖 8 W/C 0.4 不同無機色粉添加量於彩色水泥砂漿之表面電阻

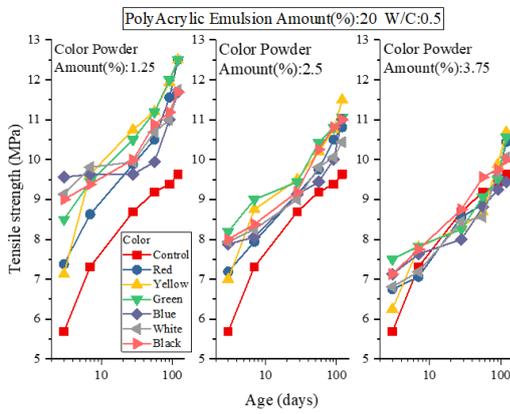


圖 6 不同無機色粉添加量於彩色水泥砂漿之抗拉強度

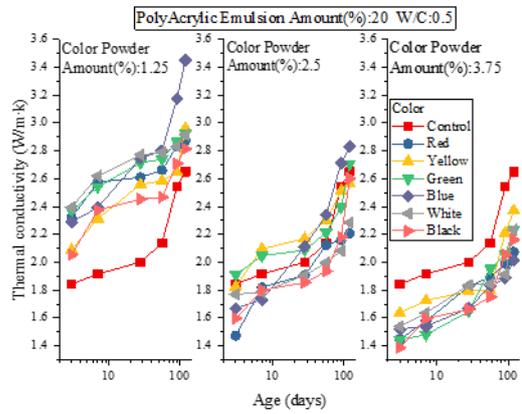


圖 9 W/C 0.4 不同無機色粉添加量於彩色水泥砂漿之熱傳導係數

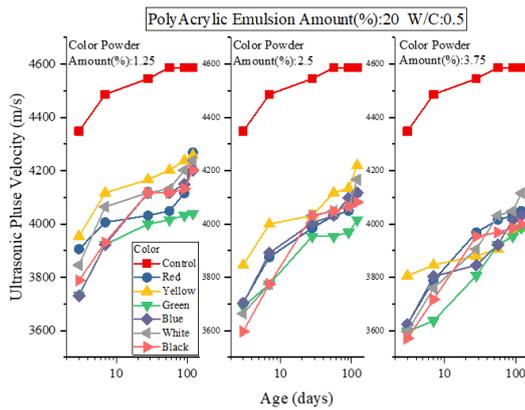


圖 7 不同無機色粉添加量於彩色水泥砂漿之超音波波速

添加卜作嵐材料及玻璃砂製成水泥砂漿之新拌及硬固性質之研究

王和源¹ 林堃豪²

¹ 國立高雄科技大學土木工程系特聘教授

² 國立高雄科技大學土木工程系研究生

摘要

本研究使用爐石粉、飛灰及不鏽鋼還原渣取代部分之水泥，再以廢液晶玻璃壓碎成廢玻璃砂取代砂，以固定水灰比 0.5，不鏽鋼還原渣取代量(RM)為 0%、5%及 10%；飛灰取代量(RM)為 10%；水淬爐石粉取代量(RM)為 20%取代水泥，廢玻璃砂取代量(RM)為 0%、10%、20%及 30%取代砂，拌合成水泥砂漿，探討其新拌性質試驗(坍度、流度)，並於養護齡期 3、7 及 28 天進行硬固性質試驗(抗壓強度、超音波波速)。

研究結果顯示，以玻璃砂取代 10%砂，能夠提升試體之抗壓強度及超音波波速。而以不鏽鋼還原渣、爐石粉及飛灰取代部分之水泥，能夠使水泥砂漿擁有良好之工作性，並且以添加 5%不鏽鋼還原渣及 10%玻璃砂有最佳之抗壓強度及超音波波速。

關鍵字：新拌性質、爐石粉、不鏽鋼還原渣、廢玻璃、卜作嵐材料

Study on the Fresh and Hardening Properties of Cement Mortar Adding Pozzolan Material and Waste Glass

Wang Hung Yu¹ Lin Kun Hao²

¹ Distinguished Professor, Dept. of Civil Engrg, National Kaohsiung University of Science and Technology, ROC

² Master Student, Dept. of Civil Engrg, National Kaohsiung University of Science and Technology, ROC

ABSTRACT

In this study, slag, fly ash and stainless steel reduced slag were used to replace part of the cement and use waste liquid crystal glass is crushed into waste glass sand instead of sand to make cement mortar. And the water-cement ratio (W/C) was 0.5, and the stainless steel reduced slag substitution (RM) was 0%, 5%, and 10%; The replacement amount (RM) of the fly ash is 10%; The replacement amount (RM) of the slag is 20% instead of cement; The replacement amount (RM) of the waste glass was 0%, 10%, 20%, 30% instead of sand to mix synthetic cement mortar. Discuss its fresh mixing property test (slump, flow), and conduct hardening property test (compressive strength, ultrasonic wave velocity) at 3, 7 and 28 days of curing age.

Research results show that replacing 10% of sand with glass sand can improve the compressive strength and ultrasonic wave speed of the specimen. The use of stainless steel reduced ballast, hearth powder and fly ash to replace part of the cement can make the cement mortar have good workability, and the addition of 5% stainless steel reduced ballast and 10% glass sand has the best compressive strength and ultrasonic wave speed.

Keywords: fresh properties, GGBFS, SSRS, waste glass, pozzolanic material

一、前言

近年來，隨著世界各國科技的進步及經濟發展，隨即也造成了巨大的能源消耗及嚴重的環境和生態問題，如何有效地利用材料及資源已成為各國朝向的目標[1]。在全球水泥製造業的二氧化碳排放量，約佔全世界所有溫室氣體排放量 5~7%，生產 1 噸水泥的過程中，會產生 0.85 噸的二氧化碳，因此水泥行業是 CO₂ 排放的主要來源[2,3]。目前國內煉鋼爐渣中，像是轉爐石及、脫硫渣及電弧爐渣等其他種類之爐渣，已進行多項實驗和研究，希望在工業副產品能達到回收再利用及重複使用[4,5]。然而在於混凝土的研究當中，回收的飛灰、高爐石粉及廢液晶玻璃粉(砂)都可用於取代部分水泥或骨材[6,7]，不論其經濟效益又或是工程性質，皆比單純添加水泥佳，適當的使用下，可以減少天然砂石級配的開採並且保育天然資源及資源永續利用[8]。

二、試驗計畫

2-1 試驗材料

1. 水泥(Cement):

為了確保水泥品質，採用台灣水泥股份有限公司所生產之卜特蘭第 I 型水泥，如圖 1(a)所示，其性質符合 ASTM C150，比重為 3.15，細度為 3450 cm² / g。

2. 不鏽鋼還原渣(Stainless Steel Reduced Slag, SSRS):

使用之不鏽鋼還原渣為製鋼廠冶煉廢鋼及廢鐵過程，經電弧爐熔煉還原期所產生的工業副產品，經研磨後形成細粉狀之不鏽鋼還原渣材料，比重為 3.10，細度(F)為 3000 cm²/g，其外觀如圖 1(b)所示。

3. 爐石粉 (Ground-Ganulated Bast-Frnace Slag, GGBFS):

取自中聯爐石資源處理公司，其性質符合 CNS12549 要求，比重為 2.9，細度為 4000 cm² / g，爐石粉外觀如圖 1(c)所示。

4. 飛灰(Fly Ash, FA)

本研究使用中聯資源股份有限公司所提供之 F 級飛灰作為本研究之使用，比重為 2.2，外觀如圖 1(d)所示。

5. 砂(Sand):

本試驗使用之細骨材取自里港溪的河砂，比重依據 CNS 487 規範檢測。比重為 2.65，吸水率為 1.48%，外觀如圖 1(e)所示。

6. 玻璃砂(Glass Sand, GS)

本試驗所使用之玻璃砂由奇美電子提供且壓碎機壓碎後，通過 4# 篩，達到近似天然細骨材之粒徑，比重為 2.64，吸水率為 0.09%，外觀如圖 1(f)所示。

2-2 試驗變數與配比

本研究以水灰比 0.5，不鏽鋼還原渣取代量(RM)為 0%、5%及 10%；飛灰取代量(RM)為 10%；水淬爐石粉取代量(RM)為 20%取代水泥，廢玻璃砂取代量(RM)為 0%、10%、20%及 30%取代砂，將其製作成 50mm×50mm×50mm 之立方試體，並且放置於飽和石灰水裡養護，先進行新拌性質試驗(坍度及流度)，並於養護齡期 3、7 及 28 天進行硬固性質試驗(抗壓強度、超音波波速)，其水泥砂漿配比表，如表 1 所示。

2-3 試驗項目

2-3-1 新拌性質

1. 坍度

本試驗依據 ASTM C109 規範之規定進行試驗，目的在於以坍度法測得新拌水泥砂漿之稠度，並藉此判斷沙漿之工作度。

2. 流度

本試驗依據 ASTM C230 規範之規定，目的在測定水泥砂漿中之標準流度值。

2-3-2 硬固性質

1. 抗壓強度

本試驗依據 ASTM C109 規範之規定之配合比例製成抗壓試體，以砂漿之抗壓試體依各齡期做抗壓試驗，以檢驗試體抵抗壓力之性質。

2. 超音波波速

本試驗採用之超音波檢測儀符合規範

ASTM C597 規範所規定，用以量測出超音波通過試體內部之所需時間，並藉此了解試體內部狀況。

三、結果與討論

3-1 坍度

如圖 2 所示，控制組(無添加還原矽)坍度為 2.5、2.4、2 及 1.9cm；添加 0%還原矽 10%飛灰 20%爐石粉，坍度分別為 3、2.9、2.8 及 2.7cm，顯示坍度隨著添加飛灰及爐石粉而增加；添加 5%還原矽 10%飛灰 20%爐石粉坍度分別為 3.7、3.5、3.3 及 3.2cm，顯示坍度值隨著不鏽鋼還原矽取代量增加而增加；添加 10%還原矽 10%飛灰 20%爐石粉坍度分別為 4.3、4.1、4 及 3.8cm，以上代表著坍度隨著還原矽的添加量增加而增加試體的工作性，而隨著玻璃砂取代量增加而降低。

3-2 流度

(一) 不鏽鋼還原矽之影響

如圖 3 所示，控制組流度分別為 19.2、19.1、18.7 及 18.5cm；添加 0%還原矽，流度分別為 20.1、20、19.8 及 19.4cm 顯示出隨著添加飛灰及爐石粉而使流度增加；添加 5%還原矽流度分別為 21.8、21.5、21.2 及 20.8cm 添加 10%還原矽流度分別為 22.5、22.4、22.1 及 22cm，顯示出流度隨著還原矽添加量而增加，代表還原矽隨著取代量增加，而提升水泥砂漿之工作性。

(二) 玻璃砂之影響

如圖 3 所示，玻璃砂取代量由 0%增加為 30%時，流度有降低之趨勢，顯示著試體隨著玻璃砂取代量增加而使流度降低，原因是玻璃砂阻隔了漿體之間水的流動，當拌合水泥水化的水減少時，漿體之濃度隨之減少，使得顆粒與顆粒之間互鎖力增加，而使得流動性減少。

3-3 抗壓強度

如圖四，抗壓強度隨著時間而增加；於三天齡期時，控制組強度為 40.68~32.82MPa；添加 0% 不鏽鋼還原矽強度為 32.38~26.9MPa，抗壓強度降低約 22~25%，

顯示出抗壓強度隨著玻璃砂取代量增加而遞減，原因是玻璃具有表面光滑之特性，導致與水泥漿體間無法有效達到膠結之作用。而添加 5% 不鏽鋼還原矽抗壓強度為 29.2~25.77MPa；添加 10%不鏽鋼還原矽抗壓強度為 28.64~23.78MPa，抗壓強度降低約 2~8%，顯示出在早期強度下，以添加 5%不鏽鋼還原矽有較佳之成效。在 28 天之齡期，以取代 5%不鏽鋼還原矽及取代 10%玻璃砂 58.21MPa 為最佳配比之抗壓強度，其強度成長為控制組之 14%，顯示出添加適當之卜作嵐材料對於試體之強度有所成長。

3-4 超音波波速

如圖五，超音波變化隨著養護齡期增加而提升；當玻璃砂取代量增加而使超音波降低；隨著不鏽鋼還原矽增加，超音波波速隨之降低。在 3 天及 7 天齡期，控制組超音波波速皆比添加 0%、5%及 10%不鏽鋼還原矽之配比较高，原因在於早期水泥水化作用未完全，而在於 3 至 28 天齡期，控制組超音波波速成長幅度約成長 15~18%；添加 0%還原矽 10%飛灰 20%爐石粉超音波波速成長幅度約成長 16~18%；添加 5%還原矽 10%飛灰 20%爐石粉超音波波速成長幅度約成長 17~19%；添加 10%還原矽 10%飛灰 20%爐石粉超音波波速成長幅度約成長 15~17%，顯示添加 5%還原矽 10%飛灰 20%爐石粉之配比有較佳之成長趨勢，係因卜作嵐反應而使試體內部孔隙有效被膠結體填充，讓試體有更好之緻密程度，此與抗壓強度結果為一致。而因玻璃砂比重較河砂比重小且體積較大，較小的玻璃砂能夠填充天然河砂的孔隙，能夠減少水泥砂漿內部之空隙產生，因此隨著玻璃砂取代量的增加，超音波波速會隨之遞增。

四、結論

本研究係以探討添加卜作嵐材料及玻璃砂製成水泥砂漿之新拌即硬固性質之研究，而有以下結論。

1. 隨著玻璃砂取代量增加，坍度隨之降低；而坍度隨還原矽取代量增加而增加，進而使工作性增加。

- 抗壓強度隨著齡期增加而增加，而在抗壓強度隨著玻璃砂取代量增加而遞減，係因玻璃具有表面光滑之特性導致與水泥漿體間無法有效達到膠結之作用，而使抗壓強度有降低之趨勢，在於 28 天之齡期，以取代 5% 不鏽鋼還原渣及取代 10% 玻璃砂為最佳配比之抗壓強度。
- 超音波變化隨著養護齡期增加而提升，當玻璃砂取代量增加時，超音波波速隨之提升，係因玻璃砂能夠填充天然河砂之孔隙，隨著不鏽鋼還原渣增加，而使超音波波速隨之降低。

參考文獻

- Adina Bosoaga ,Ondrej Masek, John E.Oakey,2009,“CO₂ Capture Technologies for Cement Industry”,Energy Procedia 1(1),pp.133-140.
- 曹哲豪，2018，不鏽鋼還原渣製成環保水泥砂漿膨脹行為之研究，國立高雄科技大學土木工程科技研究所，碩士論文。
- H. X. Zhang ,Huai wei,2011,“An overview for the utilization of wastes from stainless steel industries. Resources”,Conservation and Recycling 55(8), pp.745-754.
- 吳悅婷，2015，添加不銹鋼還原渣自充填混凝土工程性質預測模式之探討，國立高雄應用科技大學土木工程與防災科技研究所，碩士論文。
- D. S. G. Land, “The effect of synthesis conditions on the efficiency of C-S-H seeds to accelerate cement hydration,” Cement and Concrete Composites, pp. 73-78, 2018.
- VitorSousa, “Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production”,Journal of Cleaner Production
- 林柏彰，“還原爐渣取代水泥性質之研究，” 國立台北科技大學土木與防災研究所，碩士論文，2012.
- 艾和昌、王和源、黃忠發、林信輝，節能

減碳講習推廣計 第五章節能減碳材料在公共工程之應用，課程講義，高雄：100 年度公共建設相關專業人員永續公共工程，2011。

表 1 水泥砂漿配比表

W/C	F		GBFS		SSRS		Cement	GS		Sand	Water
	RM(%)	W(g)	RM(%)	W(g)	RM(%)	W(g)		RM(%)	W(g)		
0.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0	826.9	0	0.0	2316.3	447.8
								10	232.0	2084.7	444.6
								20	464.0	1853.1	441.3
								30	695.9	1621.4	438.1
								0	0.0	2316.3	447.8
								10	232.0	2084.7	444.6
	10	57.8	20	152.2	5	40.7	578.8	0	0.0	2316.3	447.8
								10	232.0	2084.7	444.6
								20	464.0	1853.1	441.3
								30	695.9	1621.4	438.1
								0	0.0	2316.3	447.8
								10	232.0	2084.7	444.6
10	57.8	20	152.2	10	81.4	496.1	0	0.0	2316.3	447.8	
							10	232.0	2084.7	444.6	
							20	464.0	1853.1	441.3	
							30	695.9	1621.4	438.1	
							0	0.0	2316.3	447.8	
							10	232.0	2084.7	444.6	

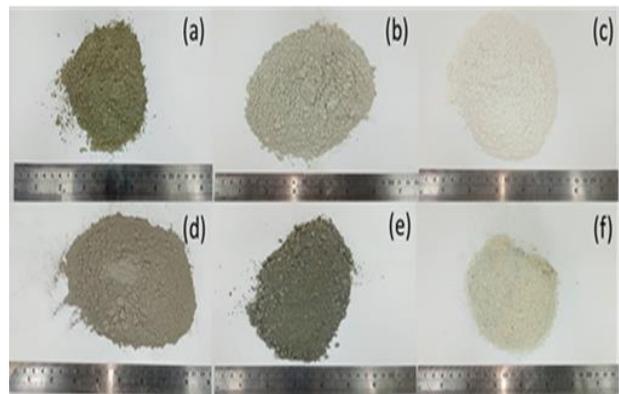


圖 1 試驗材料

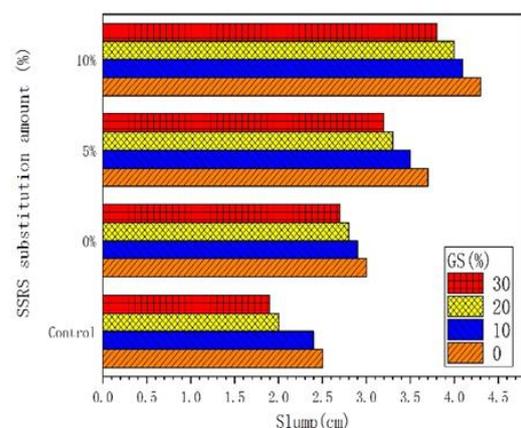


圖 2 玻璃砂與不鏽鋼還原渣水泥砂漿砂漿之坍度

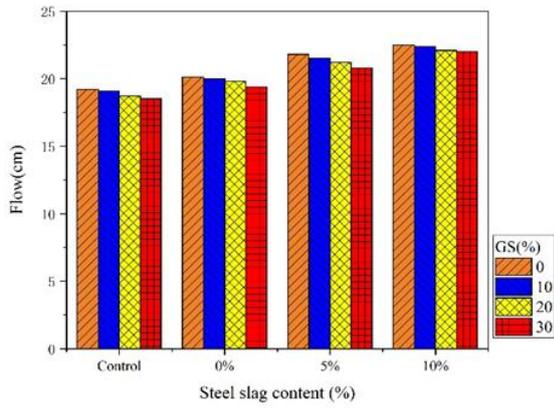


圖 3 玻璃砂與不鏽鋼還原渣水泥砂漿水泥砂漿之流度

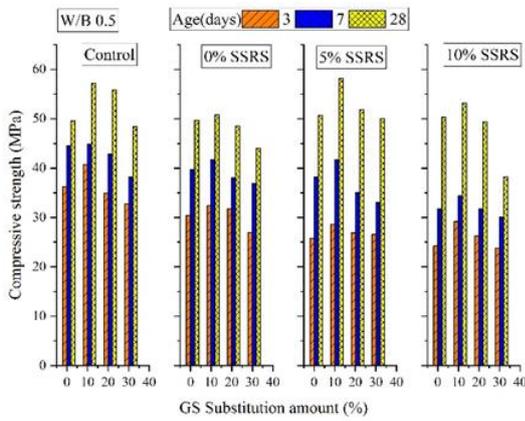


圖 4 玻璃砂與不鏽鋼還原渣水泥砂漿之抗壓強度

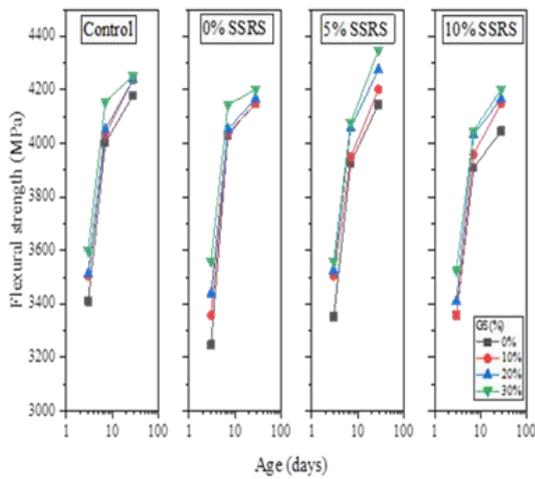


圖 5 玻璃砂與不鏽鋼還原渣水泥砂漿之超音波波速

含膜蛋殼粉應用於水泥砂漿之強度發展

沈永年¹ 魏冠宇²

¹ 國立高雄科技大學土木系教授

² 國立高雄科技大學土木系碩士生

摘要

隨著世界科技日新月異，環境保護及永續發展意識日漸受到重視，廢棄物及再生資源之利用已成為一項趨勢。雞蛋殼主要由碳酸鈣所組成，而碳酸鈣為同時作為水泥主要的成分之一，為此，利用蛋殼粉取代水泥是有可能性的，這樣不但能夠節約能源的使用，也能將廢棄物再利用，達到循環經濟的效果。

本研究主要探討將含膜蛋殼粉取代部分水泥之影響，將含膜蛋殼經由 0°C、650°C 高溫爐燒結後並延燒一小時，並依照固定水灰比 0.5 及固定水泥取代量 5% 製作含膜蛋殼粉之水泥砂漿試體，探討其燒結溫度對水泥砂漿新拌性質變化及 3 天、7 天、28 天硬固性質之強度發展。研究的結果顯示，含膜蛋殼粉隨著燒結溫度的上升水泥砂漿新拌性質隨之上升，而硬固性質之抗壓強度及超聲波波速，同樣隨含膜蛋殼粉燒結溫度上升而有上升的趨勢，而吸水率則隨之而來是有下降的趨勢，而燒結溫度 650°C 之含膜蛋殼粉於齡期 3 天及 7 天分別高於控制組抗壓強度 1.6% 和 1.4%，且於齡期 28 天僅僅低於控制組抗壓強度 1.8%，結果顯示添加顯示 650°C 之能在不減低太多強度下，並取代部分水泥達到減少二氧化碳排放之成效。

關鍵字：含膜蛋殼粉、水泥砂漿、強度發展

The Application of Egg Shell and Membrane Powder to Cement Mortar Strength Development

Yeong-Nian Sheen¹ Kuang-Yu Wei²

¹ Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

² Master Student, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

With the rapid development of world technology, the awareness of Environmental protection and sustainable development are rising, the utilization of waste and renewable resources has become a trend. The main of egg shells is calcium carbonate, and calcium carbonate is also one of the main components of cement. For this reason, it is possibility to use eggshell powder to replace cement, which not only can conserve resources, but also can recycle the waste and achieve the effect of the circular economy.

This study investigated the effects replace part of cement with egg shell & membrane powder. Sintering egg shell & membrane powder at 0°C, 650°C for one hour with a fixed water-cement ratio of 0.5 and a fixed eggshell powder substitution amounts 5% to making cement mortar. Discussion on influence of different sintering temperature on the freshness properties and the hardness properties and the strength development at ages 3, 7, 28 days.

The results show that the freshness properties increase with the increase of the sintering temperature of egg shell & membrane powder. The hardness properties of the compressive strength and ultrasonic test are also have rising trend with the increase of the sintering temperature, and the water absorption rate will then has a downward trend. Egg shell & membrane powder at 650°C is higher than the compressive strength of the control by 1.6% and 1.4% at the age of 3 days and 7 days, and is only lower than the compressive strength of the control by 1.8% at the age of 28 days. The results showed egg shell & membrane powder at 650°C can replace part of the cement to reduce carbon dioxide emissions without reducing the strength too much strength.

Keywords: egg shell & membrane powder, cement mortar, strength development

一、前言

混凝土為土木行業中最廣泛使用之建築材料，其成分由水泥、拌合水、砂、石以及其他摻料拌合而成，具高強度，耐久性，工作性佳之特點，使其成為眾多建材中最平凡使用之材料。儘管混凝土擁有許多優點，但它具有某些弊端使其不被視為可永續材料，主要原因為混凝土其中一種組成成分-水泥，全世界每年平均生產約 60 億噸常規混凝土[1]，1 噸混凝土產生之二氧化碳排放量約在 0.05-0.13 噸之間，而其中有 95% 二氧化碳由水泥產生。水泥生產過程中所產生之二氧化碳佔全球二氧化碳總排放量 6%[2]。根據統計，2016 年全球水泥生產總量約為 4174 噸，與 2010 年的總產量相比，增長了 24.96%[3,4]。

如今 2020 年，由於世界上人口迅速增加和工業快速發展，越來越多的環境問題已不可避免。蛋白質做為人類主要生存之一，人類對於蛋白質之需求主要來源即肉品及蛋品，雞蛋需求的增加導致 1990 年至 2017 年全球雞蛋生產量從 3740 萬噸增加到 8000 萬噸[5]，大多數食品工廠和糕點店都出現了廢棄蛋殼[6]。根據土耳其統計局於 2011 年 7 月的調查結果[7]，雞蛋平均一年生產的數量約為 10.5 億粒。隨雞蛋大小變化，平均蛋殼重量約為 8-9 克，每年產生廢棄蛋殼數量約接近 8.4 千噸。如此巨大的數量之後也隨之帶來著對自然環境破壞以及汙染，造成絕大部分廢棄蛋殼埋入了垃圾掩埋場。碳酸鈣為蛋殼中最主要之成分，通常稱之為方解石，同時也

作為水泥主要的成分之一[8]，因此，利用蛋殼粉用於取代水泥是具有可行性的，這樣不但能夠節約能源的使用，也能將廢棄物之再利用，達成循環經濟的效能。

本研究以含膜蛋殼粉含取代部分水泥添加於水泥砂漿中，探討含蛋殼灰之水泥砂漿之新拌性質、硬固性質、耐久性質、微觀性質等影響，研究目的為：

1. 探討不同溫度燒結下含膜蛋殼粉對於水泥砂漿之新拌性質。
2. 探討不同溫度燒結下含膜蛋殼粉對於水泥砂漿之硬固性質。

二、試驗計畫

2-1 試驗內容

本研究主要探討將含膜蛋殼粉(ES&MP)取代部分水泥製作水泥砂漿試體，將含膜蛋殼粉高溫爐加熱至 650°C 並依照水灰比 0.5 及水泥取代量 5% 製作含膜蛋殼粉之水泥砂漿試體，探討其燒結溫度對新拌性質及硬固性質之影響。

2-2 試驗變數

實驗項目分為兩部分，第一部分將含膜蛋殼粉(ES&MP)，依照 5% 水泥之取代量進行新拌試驗和製作 5x5x5 之水泥砂漿抗壓試體，並且依照 3 天、7 天、28 天不同齡期進行硬固性質。

第二部分將 650°C 高溫燒製後之含膜蛋殼粉降溫至常溫後，同樣依照 5% 水泥之取代量進行新拌試驗和製作 5x5x5 之水泥砂漿抗

壓試體，並且依照 3 天、7 天、28 天不同之齡期進行硬化性質。其試驗變數及試驗數量如表 1 及表 2 所示。

表 1 試驗變數表

材料	水泥、細骨材、水
取代水泥材料	含膜蛋殼粉
材料燒結溫度(°C)	0、650
取代水泥量(%)	0(Control)、5
水膠比(W/B)	0.5
齡期(Days)	3、7、28

表 2 試驗項目及試體尺寸與數量

試驗性質	試驗項目	齡期(天)	試體組數
新拌性質	坍度試驗	0	3
	流度試驗	0	3
硬化性質	抗壓試驗	3、7、28	7
	超音波試驗	3、7、28	7
	吸水率	3、7、28	7

2-3 試驗材料

本試驗研究所使用材料為水泥、拌合用水、含膜之蛋殼粉、細骨材，其材料性質於表 3 顯示，外觀如圖 1 所示。

1. 水泥:

本研究所採用之水泥為品牌水泥，水泥性質符合 CNS61 之規範，其水泥比重為 3.15，細度為 3150 cm^2/g 。

2. 拌合用水:

拌合用水採用自來水，符合 CNS 13961 混凝土拌合水要求規範。

3. 含膜蛋殼粉(Egg Shell & Membrane Powder, ES&MP):

蛋殼取自雞行之廢棄蛋殼，取回後賢行用自來水清洗蛋殼上之雜質，後使用 105° 的烤箱烘乾蛋殼乾 24 小時，蛋殼烘乾後放置至常溫，而後將蛋殼在裝有 11 個直徑為 47.62 mm 的鋼球的研磨機中進行乾粉碎 1 小時，而後將粉碎之蛋殼過篩至微米大小，本研究選擇使用 150 μm (#100)篩進行過篩，將含膜蛋殼粉完成過篩經 650°C 高溫燒結溫度燒結 1 小時並於高溫爐內自然冷卻。蛋殼其中成分

95% 為碳酸鈣其餘為碳酸鎂、磷酸鈣等無機鹽。比重為 2.36，細度為 1590 cm^2/g ；650°C 高溫燒結後之比重為 2.33，細度為 1890 cm^2/g 。

4. 細骨材:

本研究所使用之細骨材來源為里港溪，比重為 2.78。

表 3 研究材料基本性質

使用材料	比重	細度(cm^2/g)
水泥	3.15	3150
含膜蛋殼粉	2.36	1590
含膜蛋殼粉(650°C)	2.33	1890
細粒料	2.78	

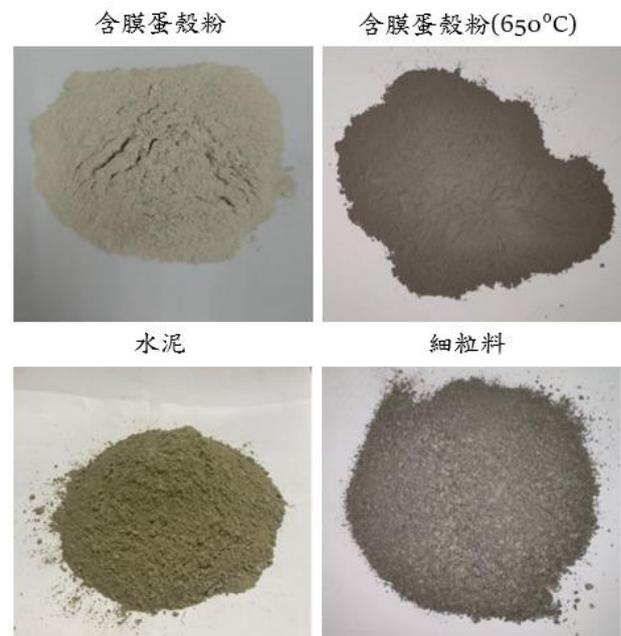


圖 1 試驗材料

2-4 試驗與儀器

2-4-1 材料性質

(一) 水泥比重試驗

本研究根據 CNS61 水泥比重試驗規範，本試驗所使用的之李氏比重瓶材質由硼矽酸玻璃製成，瓶內容量約為 250ml，適用於測定水泥等細微物質之比重。

試驗方法:

1. 用精密天平秤量 50g 試體，為 W。
2. 比重瓶洗淨後，加入煤油至 V 刻劃(0~1ml)。

3. 將試體緩慢的加入李式比重瓶內。
4. 試體全部到入比重瓶內後，以手持瓶，輕搖瓶底或迴轉將氣泡完全逐出。
5. 比重瓶置入恆溫水槽 30 分鐘，並紀錄水溫與液面刻劃為 $V_2(\text{ml})$ 。
6. 比重如式(1)所示。

$$\frac{50\text{g}}{V_2-V_1} \quad \text{式(1)}$$

(二) 細度試驗

本研究根據 CNS2924 水泥細度重試驗規範，所使用的布蘭氏氣透儀器為光信儀器出產，基座及背板全為鋼鐵材質，且 U 型玻璃管壓力計固定鋼背板上，孔板及柱塞均為不銹鋼材質，利用氣體通過壓實後流暢性判定材料細度為何。

試驗方法:

- (1) 將布蘭氏氣透儀擦拭乾淨，置入濾紙以細桿壓平。
- (2) 將 10g 之標準水泥放入瓶(120cc)內，震盪兩分鐘。
- (3) 取待測水泥 10(精度稱至 0.01g) 置入透氣槽內輕敲槽壁，使試樣面成一平面，再置濾紙於其上並加塞。
- (4) 氣透槽另端刷淨後，套於 U 形壓力計之頂端，栓處塗上凡士油，以防漏氣
- (5) 徐抽 U 形管一側之空氣至壓力計內液面升高至 B 刻劃上 4cm，即關閉活塞。
- (6) 當液面下降至 B 刻劃時，按碼錶計時，當液再降至 C 刻劃時(距 B 刻劃 5.5cm)，再按碼錶記錄時間，求出 T 與 T(sec)。
- (7) 細度 S 如式(2)所示。

$$S = S_s \left(\frac{\sqrt{T}}{\sqrt{T_s}} \right) \quad \text{式(2)}$$

式中

T: 試樣由 B 刻劃至 C 刻劃之時間

T_s : 標準水泥由 B 刻劃至 C 刻劃之時間 (64s)

S_s : 標準水泥細度(3310 cm^2/g)

2-4-2 新拌性質

(一) 流度試驗

本研究依據 CNS15992 之規範施作，所使用之流度檯為光信儀器出產。以及材料經由燒結後對水泥砂漿流動性的影響。主要目的為決定材料配比的最佳用水量以及評估在不同取代水泥之材料後的材料對於用水量的性質變化。

試驗方法:

- (1) 依照所需用量備置水泥與含膜蛋殼粉砂及水用量。
- (2) 以砂漿拌合機拌和，先以慢速拌和 30 秒水與水泥及含膜蛋殼粉加入砂後再拌 1.5 分鐘，刮入停留鍋邊之砂漿，再以中速拌和 1 分鐘。
- (3) 將拌和好之水泥砂漿於流度台上倒入流度模具中，搗實密實，並刮平表面。
- (4) 隨後緩慢將迷你坍度錐抽出，設流度台跌落次數 25 次，並啟動。
- (5) 用測尺量測跌落 25 伺候之水泥砂漿底部之內徑，以上步驟反覆量測四次後去平均值。
- (6) 底部直徑平均值與原流度模底面內徑差，除以流度模底面內側直徑百分比，為該試樣之流度值。
- (7) 水泥砂漿流度值如式(3)所示。

$$\frac{d'-d}{d} \times 100(\%) \quad \text{式(3)}$$

式中

d = 模具底面內徑(10cm)

d' = 跌落 25 伺候之水泥砂漿底部之內徑

(二) 坍度試驗

本試驗依據 ASTM C109 之規範施作，考慮水泥砂漿試體流動度過大導致試驗數據不準確，故以迷你坍度錐進行坍度試驗。目的為以坍度法測定不同取代水泥之材料之新拌水泥砂漿之坍度變化影響，以測定工作性質。

試驗方法:

- (1) 依照所需用量備置水泥與含膜蛋殼粉砂及水用量。
- (2) 以砂漿拌合機拌和，先以慢速拌和 30 秒

水與水泥及含膜蛋殼粉加入砂後再拌 1.5 分鐘，刮入停留鍋邊之砂漿，再以中速拌和 1 分鐘。

- (3) 拌和好之水泥砂漿分三層倒入迷你坍度中。搗實密實，並刮平表面。
- (4) 隨後緩慢將迷你坍度錐抽出
- (5) 用測尺量測自坍度錐坍落下後高度與原高度之距離差值，以上步驟反覆量測三次後去平均值。

2-4-3 硬化性質

(一) 水泥抗壓試驗:

本研究根據 ASTM C109 規範製作水泥砂漿抗壓試體，並將試體透過浸泡至齡期 3、7、28 天後取出進行水泥砂漿抗壓試驗，所使用拌合機為美國 KitchenAid 出產的水泥砂漿攪拌機，其攪拌鍋容量可達 5L，轉速為 50rpm 至 195rpm。所使用抗壓機為 30 噸自動化混凝土抗壓試驗機。

試驗方法:

- (1) 將試體模表面清潔並上油。
- (2) 依照所需用量備置水泥與含膜蛋殼粉砂及水用量。
- (3) 以砂漿拌合機拌和，先以慢速拌和 30 秒水與水泥及含膜蛋殼粉加入砂後再拌 1.5 分鐘，刮入停留鍋邊之砂漿，再以中速拌和 1 分鐘。
- (4) 拌和好之水泥砂漿分兩層填入模中。每層擊 4 遍，每遍 8 次，刮平表面。
- (5) 試體於 24 小時後拆模，置於 23±1°C 飽和石水中養護。
- (6) 定期取出試並拭乾表面，置於萬能抗壓試驗機承壓中央，加載壓力使試體破壞。
- (7) 記錄最大荷值 P(N)。
- (8) 抗壓強度如式(4)所示。

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{式(4)}$$

式中

σ = 抗壓強度(MPa)

P = 荷重(N)

A = 抗壓試體受壓面之面積(mm²)

(二) 超音波波速:

本研究按照 ASTM C597 規範進行超音波波速試驗，試驗將超音波脈波傳入水泥砂漿試體中，並通過超音波於試體中傳遞的時間判定超音波波速為何，試體採用 5×5×5 之水泥砂漿抗壓試體，試驗目的為利用非破壞檢測試體內部發展情形，藉此試驗評估水泥砂漿試體的強度發展。

超音波波速 V 如式(5)所示。

$$V = \frac{L}{T} \quad \text{式(5)}$$

V = 超音波波速(m/s)

L = 試體長度(m)

T = 傳遞時間(sec)

(三) 吸水率

本試驗參考 ASTM C1585 之規定，於齡期 3、7、28、，將試體透過浸泡試驗，完全浸沒在室溫下的水中 24 小時，用濕布擦去試樣表面上水分，然後測量質量為 WSSD (飽和面乾重量)。接下來，將所有試體在 105°C±5°C 的烘箱中保持 24 小時。將乾燥試體的質量記為 Wdry。在測量乾燥和飽和的質量後，通過公式計算吸水率，其計算公式如式(6)所示。

$$\text{Water absorption} = \frac{W_{SSD} - W_{dry}}{W_{dry}} \times 100\% \quad \text{式(6)}$$

式中：

W_{SSD} = 試體面乾內飽和重 (g)

W_{dry} = 試體烘乾重 (g)

三、結果與討論

3-1 新拌性質

3-1-1 燒結溫度對流度試驗影響

本試驗以固定水灰比為卜特蘭水泥使用水灰比 0.5，藉由不同燒結溫度來探討其對於水泥砂漿試體流動性之影響。流度試驗結果如表 4、圖 2 所示。

對於不同燒結溫度之含膜蛋殼粉水泥砂漿進行流動性的分析，由圖 2 中所示，燒結

溫度 0°C 流度值為 91 %；當燒結溫度提高至 650°C 時流度值為 105 %，流度值升高約 15.38 %；以上結果顯示燒結溫度自 0°C 上升至 650°C 會提升蛋殼粉的工作性，其原因是未經過高溫燒結的含膜蛋殼粉則保持原有材料性質，因為原材料的多孔性等特性，吸附較多中水分子，使流動拌合水較少；而含膜蛋殼粉經由高溫燒結後會改變含膜蛋殼粉材料性質，進而使流度值提高。

3-1-2 燒結溫度對坍度試驗影響

本試驗採用固定水灰比為卜特蘭水泥使用水灰比 0.5，藉由不同燒結溫度與不同材料添加量來探討其對於水泥砂漿試體工作性之影響。坍度試驗結果如表 4、圖 3 所示。

對於不同燒結溫度之含膜蛋殼粉水泥砂漿進行坍度的分析，由圖 3 中所示，燒結溫度 0°C 坍度為 1.2 cm；當燒結溫度提高至 650°C 時流度值為 1.4cm，坍度約上升約 16.67 %；以上結果顯示燒結溫度自 0°C 上升至 650°C 會增加蛋殼粉的坍度，這樣的結果與流度試驗的結果部分相符。說明含膜蛋殼粉原材料的多孔性，吸附較多中水分子，而含膜蛋殼粉經由高溫燒結後會改變含膜蛋殼粉材料性質，進而使坍度提高

3-2 硬固性質

3-2-1 燒結溫度對抗壓強度影響

本研究以不同含膜蛋殼粉之燒結溫度 (0°C 、 650°C)，固定含膜蛋殼粉取代量 (5%)，固定水膠比 (0.5)，製作 $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 水泥砂漿試體，於 3 天、7 天、28 天進行抗壓強度試驗。抗壓強度為評估材料使用之重要工程特性，以不同含膜蛋殼粉燒結溫度取代水泥之水泥砂漿抗壓強度試驗結果，如表 5 及圖 4 所示。

對於不同燒結溫度之含膜蛋殼粉水泥砂漿進行抗壓強度的分析，如圖 4 所示，於齡期 3 天時，燒結溫度 0°C 抗壓強度為 36.5 MPa；當燒結溫度提高至 650°C 時抗壓強度為 37.5 MPa，抗壓強度上升約 2.7%；於齡期 7 天時，燒結溫度 0°C 抗壓強度為 41.8MPa；當燒結溫度提高至 650°C 時抗壓強度為 43.3 MPa，抗

壓強度升高約 3.6%；於齡期 28 天時，燒結溫度 0°C 抗壓強度為 54.5 MPa；當燒結溫度提高至 650°C 時抗壓強度為 55.7 MPa，抗壓強度上升約 2.2%，以上結果顯示燒結溫度的上升會提升蛋殼粉的活性，使其產生水化作用進而幫助水泥砂漿試體抗壓強度的增長，且燒結溫度 650°C 之含膜蛋殼粉於齡期 3 天及 7 天分別高於控制組抗壓強度 1.6% 和 1.4%，以上結果顯示燒結溫度 650°C 之含膜蛋殼粉有提升強度之效果，能夠產生如此效果可能與含膜蛋殼粉中之蛋殼中成分的碳酸鈣相關，碳酸鈣能與水泥中 CH 產生卜作嵐反應產生 C-H-S 膠體，能提供水泥砂漿良好的緻密性，進而提高水泥砂漿之抗壓強度。

3-2-2 燒結溫度對超音波波速影響

超音波試驗是一種非破壞檢測，可檢測水泥砂漿試體內部緻密程度，水泥砂漿內部孔隙愈多，檢測結果波速愈低，相反的若是水泥砂漿內孔隙越少，檢測結果波速會愈高，透過波速高低，可以評估試體內部的緻密程度。本研究利用含膜蛋殼粉取代水泥製作水泥砂漿試體。本研究以不同含膜蛋殼粉之燒結溫度 (0°C 、 650°C)，固定含膜蛋殼粉取代量 (5%)，固定水膠比 (0.5)，水泥砂漿試體於 3 天、7 天、28 天進行超音波波速試驗，試驗結果如表 6 及圖 5 所示。

針對不同燒結溫度之蛋殼粉水泥砂漿進行超音波波速的分析，如圖 5 所示，齡期 3 天時，控制組超音波波速為 3686 m/s；當燒結溫度 0°C 時，超音波波速降低約 8.95%；當燒結溫度 650°C 時，超音波波速降低約 8.95%，與燒結溫度 0°C 時一致；於齡期 7 天時，控制組超音波波速為 3980 m/s；當燒結溫度 0°C 時，超音波波速降低約 9.6%；當燒結溫度 650°C 時，超音波波速降低約 13.29%；於齡期 28 天時，控制組超音波波速為 4145 m/s；當燒結溫度 0°C 時，超音波波速降低約 9.79%；當燒結溫度 650°C 時，超音波波速降低約 3.52%。由上述的結果可以得出，燒結溫度 650°C 皆高於燒結溫度 0°C ，且於齡期 28 天有展現出趨近控制組的趨勢，這樣的結果與抗壓強度的結果部分相符，顯示燒結溫度的

上升會幫助水泥砂漿試體品質增長。

3-2-3 燒結溫度對吸水率影響

試體孔隙對於吸水性有相對關係，用以評估外界水分子進入水泥砂漿試體之比率。本研究利用含膜蛋殼粉取代水泥製作水泥砂漿試體。本研究以不同含膜蛋殼粉之燒結溫度(0°C、650°C)，固定含膜蛋殼粉取代量(5%)，固定水膠比(0.5)，製作 5cm × 5cm × 5cm 水泥砂漿試體，3 天、7 天、28 天取出，擦拭試體表面水分，秤其試體 SSD 重，置於溫度 110 ±5°C 烘乾 24 小時，秤其試體 OD 重，計算試體吸水率。試驗結果如表 7 及圖 6 所示。

針對不同燒結溫度之蛋殼粉水泥砂漿進行吸水率的分析，如圖 6 所示，齡期 3 天時，控制組吸水率為 8.78%；當燒結溫度 0°C 時，吸水率上升約 0.79%；當燒結溫度 650°C 時，吸水率降低約 1.14%；齡期 7 天時，控制組吸水率為 7.6%；當燒結溫度 0°C 時，吸水率上升約 0.78%；當燒結溫度 650°C 時，吸水率降低約 0.65%；齡期 7 天時，控制組吸水率為 7.2%；當燒結溫度 0°C 時，吸水率上升約 1.24%；當燒結溫度 650°C 時，吸水率下降約 0.27%。結果顯示隨著溫度的上升，燒結溫度上升至 650°C 的確會提升蛋殼粉的活性，使其中成分之碳酸鈣經化學反應轉化成氧化鈣，添加入水泥砂漿中使其產生水化作用進而幫助水泥砂漿試體緻密性增加，此現象會造成水泥砂漿內部孔隙減少進而吸水率也會跟著降，並提升水泥砂漿之品質。

四、結論

本研究利用蛋殼粉經由不同燒結溫度(0°C、650°C)及固定水泥取代量(5%)，固定水灰比為(0.5)製作水泥砂漿試體，分別依不同的齡期(3 天、7 天、28 天)，進行新拌性質、硬固性質試驗，探討不同燒結溫度對於水泥砂漿之影響，由試驗結果分析，獲得下列結論：

1. 這項研究結果表明，在水泥砂漿中摻入部分代替水泥的含膜蛋殼粉可以增強水泥砂漿的質量性能並減少環境影響。不同燒結溫度的含膜蛋殼粉對新拌性質和

硬固性質有不同程度的影響。

2. 新拌性質：本研究之水泥砂漿之新拌性質，以坍度、流度作為水泥砂漿工作性評估之依據，結果顯示，含膜蛋殼粉隨著燒結溫度的上升水泥砂漿坍度及流度隨之上升，其原因說明含膜蛋殼粉未經過高溫燒結保持原有材料性質，因為其的多孔性等特性，吸附較多中水分子，使流動拌合水較少；而含膜蛋殼粉經由高溫燒結後會改變含膜蛋殼粉材料性質，進而使流度值提高。進而增加了工作性。
3. 硬固性質：
 - (一) 抗壓強度：含蛋殼粉水泥砂漿隨燒結溫度上升而有抗壓強度有上升的趨勢，且燒結溫度 650°C 之含膜蛋殼粉於齡期 3 天及 7 天皆高於純水泥砂漿之抗壓強度，結果顯示燒結溫度 650°C 之含膜蛋殼粉具有提升早期強度，產生如此效果可能與含膜蛋殼粉中之蛋殼中成分-碳酸鈣相關，碳酸鈣能轉化為氧化鈣與水泥中 CH 產生卜作嵐反應，從中產生 C-H-S 膠體，能給予水泥砂漿較佳的緻密性，進而提高水泥砂漿之抗壓強度。
 - (二) 超音波波速：燒結溫度 650°C 皆高於燒結溫度 0°C，且於齡期 28 天有展現出趨近控制組的趨勢，期結果與抗壓強度的結果部分相符，顯示燒結溫度的上升會幫助水泥砂漿試體品質增長。
 - (三) 吸水率：高溫燒結能夠有效的將其中含膜蛋殼粉蛋殼成分中之碳酸鈣轉換為氧化鈣，進而幫助水泥砂漿試體產生水化反應，能給水泥砂漿緻密性提升，使試體內部減少孔隙，提升水泥砂漿品質。

參考文獻

1. V. Mymrin, D.E. Pedroso, C. Pedroso, K. Alekseev, M.A. Avanci, E. Winter Jr., L. Cechin, P.H.B. Rolim, A. Iarozinski,

R.E. Catai, “Environmentally clean composites with hazardous aluminum anodizing sludge, concrete waste, and lime production waste” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 174, pp. 380-388, 2018.

2. Sarah Khan , Naveen Maheshwari, Gauri Aglave, Rishabh Arora, “Experimental design of green concrete and assessing its suitability as a sustainable building material” *Materials Today: Proceedings*, Vol.26, Part 2, pp.1126-1130, 2020.
3. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD),2016 “ GNR PROJECT Reporting CO2 ” 5/7 from:<https://www.wbcscement.org/GNR-2016/>
4. D.-Y. Oh, T. Noguchi, R. Kitagaki, W.-J. Park, “CO2 emission reduction by reuse of building material waste in the Japanese cement industry”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , Vol.38, pp.796-810, 2014.
5. Cedric Okinda, Yuwen Sun, Innocent Nyalala, Tchalla Korohou, Samwel Opiyo, Jintao Wang, Mingxia Shen, “Egg volume estimation based on image processing and computer vision” *Journal of Food Engineering*, Vol. 283, 110041, 2020.
6. Turkey , “Turkey statistical agency 2014” , 2014.
7. Hanifi Binici, Orhan Aksogan, Ahmet H.Sevinc, Erdi Cinpolat, “Mechanical and radioactivity shielding performances of mortars made with cement, sand and egg shells”, *Construction and Building Materials*, Vol.93, pp.1145-1150, 2015.
8. 黃兆龍,「混凝土材料品質控制」, 詹式書局, 1997。

表 4 含膜蛋殼粉水泥砂漿新拌性質試驗結果

Sample No.	W/B	Slump Flow (%)	Slump (cm)
Control	0.5	72	0.9
0°C 5%		91	1.2
650°C 5%		105	1.4

表 5 含膜蛋殼粉水泥砂漿抗壓強度(Unit : MPa)

Sample No.	W/B	Age (Days)		
		3	7	28
Control	0.5	36.9	42.7	56.7
0°C 5%		36.5	41.8	54.5
650°C 5%		37.5	43.3	55.7

表 6 含膜蛋殼粉水泥砂漿超音波波速(Unit : m/s)

Sample No.	W/B	Age (Days)		
		3	7	28
Control	0.5	3686	3980	4145
0°C 5%		3356	3597	3721
650°C 5%		3356	3600	3876

表 7 含膜蛋殼粉水泥砂漿吸水率(Unit : %)

Sample No.	W/B	Age (Days)		
		3	7	28
Control	0.5	8.78	7.62	7.24
0°C 5%		8.85	7.68	7.33
650°C 5%		8.68	7.57	7.26

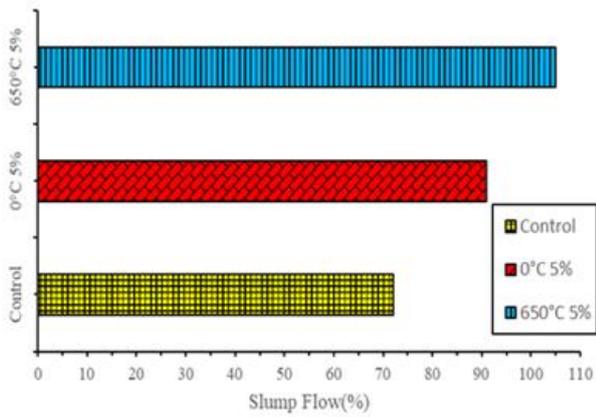


圖 2 含膜蛋殼粉水泥砂漿流度

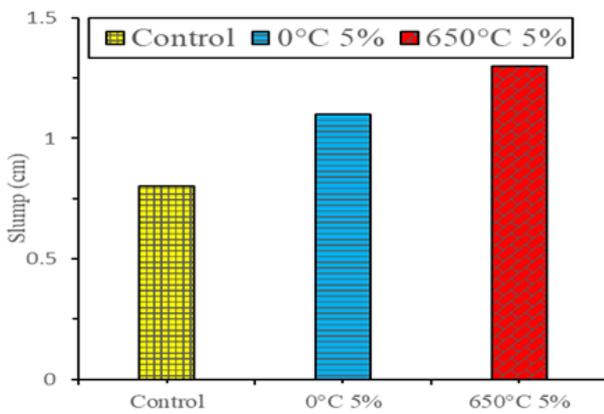


圖 3 含膜蛋殼粉水泥砂漿坍度

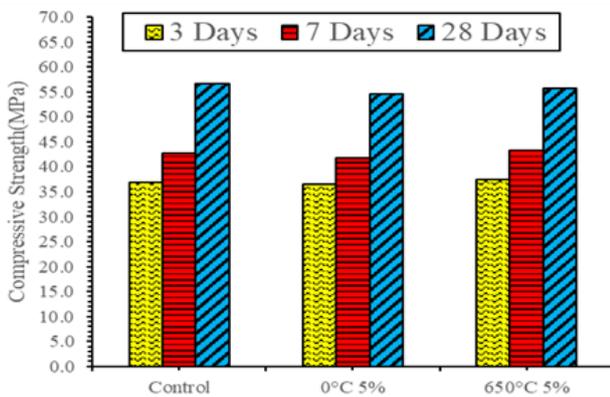


圖 4 含膜蛋殼粉水泥砂漿抗壓強度

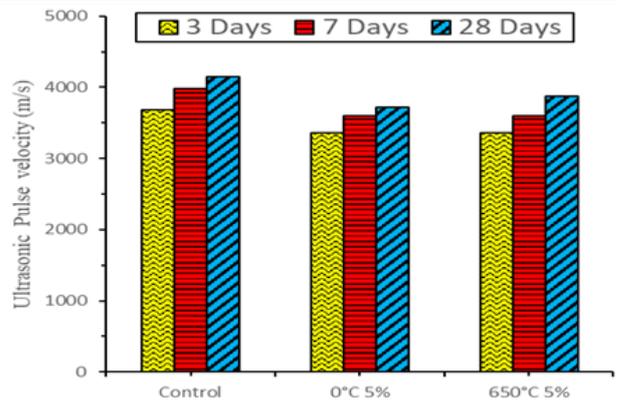


圖 5 含膜蛋殼粉水泥砂漿超音波波速

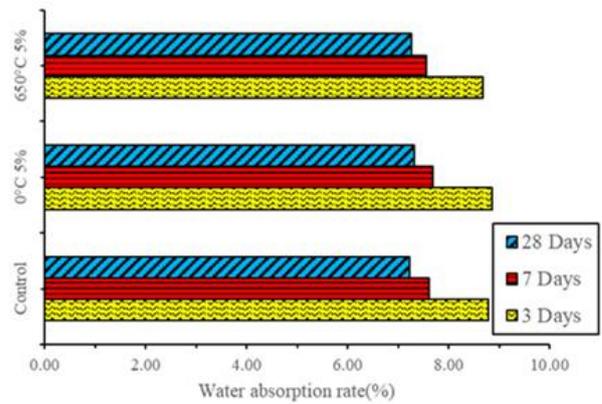


圖 6 含膜蛋殼粉水泥砂漿吸水率

價值工程於農舍住宅興建安之研析

曾耀德¹ 王和源² 王義忠³ 江文淵³ 陳子繡³

¹國立高雄科技大學土木工程系博士班研究生

²國立高雄科技大學土木工程系特聘教授

³國立高雄科技大學土木工程系學士

摘要

價值工程(Value Engineering, VE)為針對機能、成本、進度尋找適合的替代方案之管理技術，亦為協助決策者作判斷之實用工具。故針對原有流程、規劃、設計案，就機能、成本、工期進度等進行分析，提出符合機能與進度需求，且能降低生命週期成本之最佳化替代方案。本研究利用價值工程之創意分析方案評估出興建住宅農舍之最佳方案，擬由發展階段中的原木鋼骨構造其總工程成本價為4,260,800元，較原設計方案鋼筋混凝土總成本為4,658,940元，其以原木鋼骨構造可節省成本為398,140元。且其美觀、施工難易度、維護性、安全性及工期皆提高機能，顯示價值工程分析為最佳的替代方案。

關鍵字：價值工程、工程成本、農舍住宅

Research and Analysis of Value Engineering in Farmhouse Construction

Tseng, Yao-Te¹ Wang, Her-Yung² Wang, Yi-Zhong³ Jiang, Wen-Yuan³ Chen, Zi-Xiu³

¹Ph.D. Student, Dept. of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology, Taiwan

²Professor, Dept. of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology, Taiwan

³Bachelor, Dept. of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology, Taiwan

ABSTRACT

Value engineering is a management technique that finds suitable alternatives for function, cost, and schedule, and is also a practical tool to assist decision-makers in making judgments. Therefore, based on the original process, planning, and design, analyze the function, cost, schedule, etc., and propose an optimized alternative that meets the performance and schedule requirements and can reduce the life cycle cost. This research uses the creative analysis plan of value engineering to evaluate the best plan for constructing residential farmhouses. The total project cost of the construction of raw wood and steel frame in the development stage is NT\$ 4,260,800, which is NT\$4,658,940 compared with the total cost of reinforced concrete in the original design plan. The total differential cost is NT\$398,140. And its beauty, ease of construction, maintainability, safety and construction period all improve performance, showing that value engineering analysis is the best alternative.

Keywords: value engineering, engineering cost, farmhouse

一、前言

價值工程(Value Engineering, VE)是以系統化分析產品機能之技術方法，使用集合了團體的創意思考，用以尋求在最低的成本控制下、獲取所需要產品機能之替代方案外，另又能提高產品之價值性存在。美國奇異電子公司的勞倫斯·德洛斯·邁爾斯(Lawrence Delos Miles)於 1947 建立了基本的價值分析功能方法，同年開始發展價值方法理論(Miles, E. R., 1989)。價值方法論包含已知的價值分析、價值工程及價值管理。有時也涵蓋價值控制、價值改善或價值保證。

由於價值工程應用的業務範圍及本質的不同，其定義亦有許多不同的詮釋，其重要者如(1)價值工程能夠創造新觀念的方法。(2)價值工程是經過確定功能的步驟。(3)價值工程是應用組織方式，基於如何解決問題來測定及管制價值。(4)價值工程可降低總費用，同時達成各項主要功能及特性。(5)價值工程是應用已經過認可的技術，鑑定產品或服務的功能，並以最低費用提供可靠的必要功能。(6)價值工程是能創造新觀念、解決問題、增加管制價值之最大效益。

二、文獻回顧

價值工程的發展起源於戰時物資缺乏，許多的廠商被迫採用替代材料、製程或工法等變更來完成產品的生產，於研討期效卻又發現替代方案的性能，相較原先規劃時品質更佳，且成本降低(劉慶尚，2012)。美國於 1963 年率先引進於施工階段採用，實施價值工程變更建議制度(Value Engineering Change Proposal, VECP)，鼓勵營造廠商提出價值工程變更建議專案，若業主採納，可分享某種比例之節省金額。於 1970 年代初期，美國盛行營建管理(Construction Management, CM)，提倡設計階段即應用價值工程。此時期由於石油危機，造成營建費用高漲，發包價格高於預算的工程比比皆是，價值工程就在這種環境下，成為降低成本的利器之一。價值工程推行至今，歐美及日本等國家，早已公認價值工程為一種最佳降低生產或營運成本之

管理方法。

台灣最早由台北市政府捷運工程局，是首先運用價值工程於捷運工程上，節省經費等且效果顯著(史敬弘，2010)。陸續已有台北市政府、交通部及高雄市政府等政府機關導入應用之案例，因推行的成效卓著。政府各單位部門、營造廠及建築專案管理顧問等，便積極推動運用價值工程(盧協成，1997)。

2-1 價值工程

價值工程是一個有組織、有創意的的方法，以產品機能分析為核心，提高產品價值或機能為目的，力求以最低壽命週期成本實現產品或作業使用所要求的必要功能的一項有組織的創造性活動。價值工程涉及到價值、機能和成本等三個基本要素，其公式關係如下：

$$V = F / C$$

V：價值、F：機能、C：成本

價值工程研析後的結果，產品價值有五種主要提升方式，如表 1 分述(1)成本不變，功能提高。(2)功能不變，成本下降。(3)成本降低，功能提高。(4)成本略有增加，功能大幅度提高。(5)功能略有下降，成本大幅度下降。這五項狀況說明。

表 1 價值工程研析後結果

型態	機能	成本	評價	說明
1	提升 ↑	不變 →	佳	對成本無益，VE 較少採用。
2	不變 →	下降 ↓	佳	VE 研析基本模式。
3	提高 ↑	降低 ↓	最佳	最理想模式。
4	大幅提高 ↑	略增 ↑	不佳	對成本無益，VE 較少採用。
5	略降 ↓	大幅降低 ↓	可	容許機能縮減時適用。

在工程專案於設計規劃端時，工程的設計成果都可能有所謂不必要的成本隱含其中，設計工作就可以再加改善的空間存在。設計本質即已包含許多無法預知的變化因素，設計工程師又有如期交付成果的壓力，以至於有時候只能掌握要徑而不得不忽視了不必要

的成本支出。此時，運用價值工程研析的執行，正可彌補並改進此一窘狀。別於價值工程導入時機，若在設計前期，更能研析出可節省之費用，如圖 1 工程生命週期階段與成本降低可能性關係，由圖中曲線表示可於構想擬議初期，其對應節省費用居多(王和源主編，2021)。

一般價值工程會具備的特性，例如(1)各項工程如採用價值工程進行研析管控，則運用得愈早，其成效愈明顯。(2)工程設計時，必須考慮整個有效使用年限所需之總費用。而非斤斤計較於只降低某一單項費用。(3)價值工程主要是用以改善作業程序，觸發創造能力並依計畫嚴格執行各項精確步驟完成工作而著稱。(4)價值工程的工作計畫可以分為許多階段，而每一個階段中可能各有許多工作項目，有些項目是可以互相重疊、環環相扣的，藉以作最佳的聯接予以應用。(5)除非有明顯的錯誤，不可回溯追究以前的責任，否則價值工程的執行成效將大打折扣。(6)價值工程的成果係由業主或決策者來認定，因此，執行價值工程並不需要建立類似 ISO 的認證制度。(7)價值工程的獎勵條款，只有在工程發包後才能適用。(8)價值工程尤其有助於改善可靠度、品質、安全、易於施工、成效及控制進度等各方面之事務，因此，完整保存全部作業過程之記錄文件，亦有利於業務革新之推動。(9)執行價值工程計畫時，有賴於發揮協調合作的力量，否則任何階段的工作項目若有所遺漏，將會阻礙到目標值之達成率。(10)工程計畫保有彈性，不致僵化而窒礙難行(王和源主編，2021)。

工程生命週期階段與成本降低之可能性

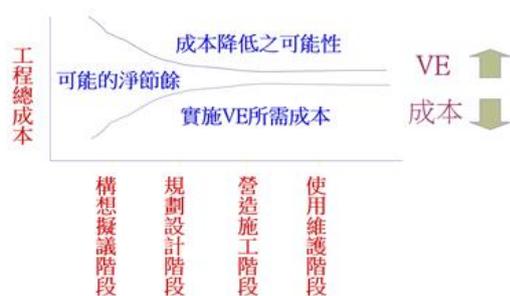


圖 1 工程生命週期階段與成本降低可能性關係圖(王和源主編，2021)

2-2 工程虧損因素

工程專案若不導入價值工程分析運用，則容易於設計過程中，發生損及工程成本的界面因素，其中最為常見可能發生的項目如(1)理念錯誤：設計者一直延用舊版設計規範，不理會新版更迭或新工法、新材料之使用。(2)習慣性作為：設計者的習慣性作為往往左右設計成本的多寡。(3)時間不足：若在緊迫時間內完成工作，往往無法詳細分析並比較各種可能的成本並獲致最佳化的設計成果，這將造成成本增加在所難免。(4)資料不足：新工法或新材料日新月異，如果缺乏資料之取得而錯失設計先機，也就錯失了提高價值、降低成本的契機。(5)構思欠週延：因設計者的個別差異，有時為獨立作業，使得在設計過程中，雖有很好的構思仍然欠缺週延性而產生不必要的成本支出。(6)主觀的心態：設計者對於本身的設計成果，往往會有自我辯護的心態，相對地會直接影響工程成本。(7)設計費不足：設計費不足可能使設計者刻意提高施工費用以利增加設計服務費，或明或暗反而增加工程總成本。(8)政治干擾：選舉文化造成政治干擾十分嚴重，每到選舉候選人都大談地方建設，往往為達時效而罔顧工程品質及預算來源，更遑論成本效益與價值工程之可靠度。(9)因應狀況的權宜之計：工程開工後，往往會因現場狀況與設計圖說的不符，而必須進行變更設計，此一作為卻經常造成開支增加或工期延宕，均增加有形與無形的成本。(10)經驗不足：資淺設計師往往只看到「點」與「線」，只能做出安全而保守的設計成果，卻忽略了經濟性與可行性(王和源主編，2021)。

2-3 價值分析運用領域

價值分析主要應用在以下這些領域上：(1)可被應用在任何需要改善成本與績效的地方，這些改善可用金錢或重要因素來衡量，如生產力、品質、時間、能源、環境衝擊與耐久性。價值方法論可有效益地被應用在所有的範圍。(2)價值方法論可被應用在硬體設備，如建築物或其他構造物，以及軟體部份如製造與建造製程、健康管理與環境服務、程式、

管理系統與組織結構。軟體專案之研析前置作業可利用標準的工業工程技術如流程圖、產出分析、及附加價值工作分析以搜集必要資料。(3)在土木、商業與軍事工程如建築物、公路、廠房及廢水處理場等單一性高之工程，價值方法論是以專案為基礎來應用。由於該等計畫為一次投資的方式，價值方法論必需愈早在設計階段應用，愈可能獲得最大利益。改變或修正設計可在不需大幅重新設計、大量執行成本與時程衝擊下完成。普通大型建造案的價值研析在基本設計階段執行一次，以及設計發展階段再做研析一次。價值研析也可在建造階段實施。(4)大型或單一產品或系統如軍用電子或特別設計之設備，價值方法論被應用在設計階段以確保目標的達成。通常一個正式的價值研析時機，在初期設計被核可，正式建造通知前實施。價值方法論也可被應用在建造期間以確保利用最新材料與技術。(5)價值方法論也可應用在規畫階段，運用指定的成本與執行參數，發展機能模式以執行專案管理。如果某些機能在控制範圍外，價值研析的執行可保證機能維持在控制範圍內。

三、研究方法

3-1 選定研析目標

由於物價持續攀升，同時土木建築工程施工技術與工程材料也日新月異的不斷更新；建造每一個工程專案的設計階段時，皆需考量到其工程成本之價值性，本研究希冀考量以較低的工程成本，達到興建一個安全、安靜、耐熱、通風及防颱的農舍住宅居住空間。除外部需有庭院、種菜空間與保有私密之外圍牆農舍為目標。研究中，主要在建設階段中，考慮如何降低工程成本造價、節省施工工期及維持原有良好機能為目標。價值工程主要是在研究如何在不影響計畫機能之原則下、研析出降低成本的替代方案。自行興建農舍除遠離都市繁華，並可降低興建成本，故本計畫原先設計鋼筋混凝土結構為考量，但因應近年整體營造物價指數提高，如何在最有效的工期中，達到更有安全性及美觀性

的需求，而進行價值工程分析。

本研究以一農舍坐落於旗山山區中，擁有靠山河流的好山好水景緻，且距離高雄市區也只有 25 分鐘汽車車程；擬興建自用住宅農舍，建蓋為一層樓結構之農舍建物，其擬研分析點為主要是以最安全性與施工工期最短為最佳考量。其基地條件如下述：

- (1) 基地面積為 750 坪。
- (2) 建築面積約 61 坪，建築設計如圖 2、圖 3 及圖 4。
- (3) 牆體估算總體積：約 52.9 m³。
- (4) 房屋總面積：約 312.91 m²。

本研究設計案原先計畫擬以鋼筋混凝土構造建蓋農舍，因考量鋼筋混凝土其外觀較不美觀，且日益飆漲的鋼筋成本價居高不下。故將利用創意思考方式將各類結構物應用價值工程之研析方式進行評估，期以不降低建築物原有設計動線機能、施工造價成本合理性，並在能確保工程與建築物材料強度美觀品質性的原則下，利用價值工程分析法，用以選擇最適合之方案進行工程的效益分析。為檢視其原始規劃設計之妥適性，選擇建築工程施工所需之構件為研析標的，希望藉由價值工程之研析技術，研擬較經濟可行之替代方案。通過採價值工程概念與研析方法，維持必要機能與進度，發現並刪減建設計畫中不必要工程成本最少有 8% 以上，用以顯著呈現價值工程導入本研究之效益。故本研究價值工程研析步驟圖，如圖 5 所示從資料蒐集審查到研析結論之步驟。

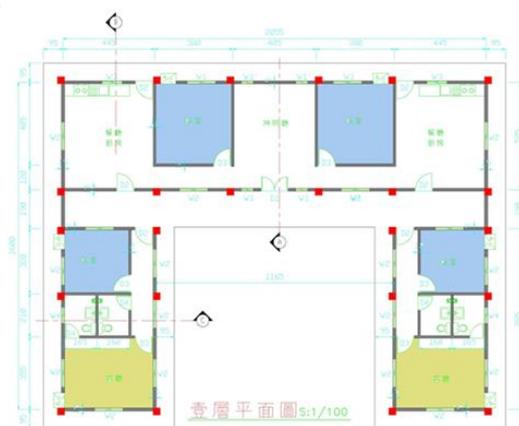


圖 2 建物一樓平面圖

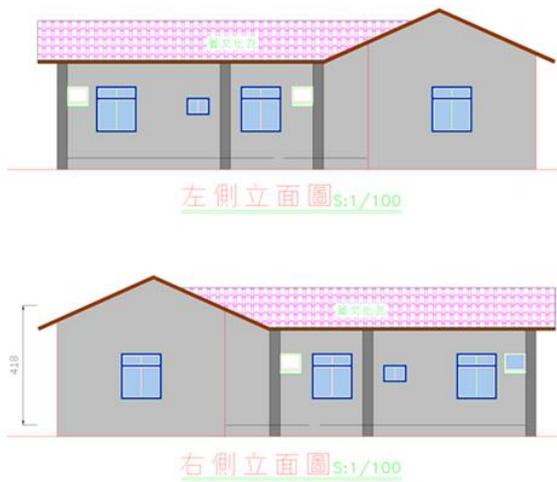


圖 3 建物兩側立面圖

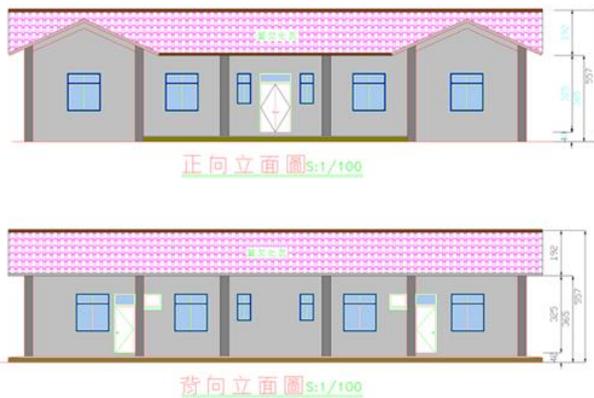


圖 4 建物前後立面圖

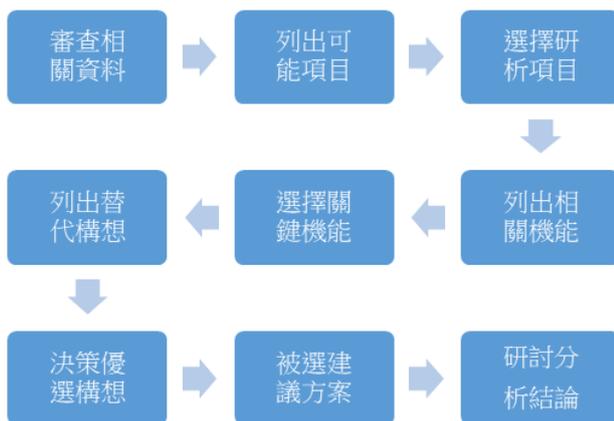


圖 5 價值工程研析步驟圖

3-2 研析流程

(一)前置與資料作業階段

前置作業主要與原規劃者進行討論，以增進對原規劃能充分瞭解，就相關資料詳細研讀並加以分析，其準備作業為取得之資料

包括本工程之規劃設計服務建議書、初步規劃報告書及相關簡報等資料。並參考各階段會議及審查意見變化始末及目前狀況，作為研析時之參考。

經由 VE 小組先行討論出基地位址及農舍面積，小組同仁開始案例收集、討論及研析相關農舍資料，並考量其農舍位置是否符合交通方便性、機能性，參與成員詳細閱相關資料及找詢網路及書刊資料作初步討論，以討論出功能需求之主要機能、次要機能及成本價格以利本案 VE 之研析。

(二)創意階段

以 VE 小組討論出研析範圍及機能分析為基礎後，提出六大方案進行初步比較如表 2 分別建議價值工程分析有方案一到方案六的方案創意提議。

(三)決策判斷階段

將運用到系統化評估方法，以達到價格合理、建物美觀，工期縮短、人力降低、增加使用空間、提高安全性、考量施工難易度及農舍日後維護方面，選擇一種較佳之建議方案，在考量六大方案之後經由各組組員討論後，篩選其中的四大評估分方案進利用權重評估表、分數矩陣表及方案構想評估矩陣表來進行評議如表 3 構想比較、表 4 評估矩陣及表 5 權重評估。本研究計畫案為了考量其美觀及安全性，故將較不符合其機能性的兩大方之混凝土構造及鐵皮屋方案刪除分析，僅以鋼筋混凝土、原木屋、鋼骨、原木鋼骨結構來進行判斷。

(四)發展階段

根據決策判斷階段評估後，小組依照本研究農舍案例的各種建造之方案比較後，在本階段中針對各建議方案分別計算其相關建造成本分析，試算所得何種方案成本價格最為經濟，最後將計算出成本整理如表 6 六大方案之成本比較表。從表中發現原先的設計方案為鋼筋混凝土，但經過權重評估表得知以方案四的鋼骨結構總分數為 134 及方案六的原木鋼骨結構分數為 144 分，其計算結果之價值工程效益，皆高於原設計方案的鋼筋

混凝土結構的 131 分。從此得知，原規劃方案一開始並不是最具有價值的最佳設計，方案四與方案六可優於原始設計的方案。

表 2 價值分析建議方案

方案一	混凝土結構 價錢低廉、取材容易但工期長、強度低及變化性差。
方案二	鋼筋混凝土結構 施工品質較易控制，但工期長、成本日益攀升且美觀較差。
方案三	原木屋結構 能擁有美觀，工期速度適中但價格偏高、安全性差且易生白蟻等。
方案四	鋼骨結構 結構較為堅固且防颱防火、工期速度適中但價格高。
方案五	鐵皮屋結構 施工快速、價格便宜，不需特定專人且維護簡易但因美觀不佳。
方案六	原木鋼骨結構 結合美觀、施工快速及堅固之結構，但工期適中且維護簡易。

(五)建議階段

本案最後依照各項權重評估及成本計算後，考量到目前物價持續漲幅，導致鋼筋原物量價格不斷提升，依據網路公告價格計算出各方案之總成本價。原先設計方案鋼筋混凝土構造總金額為 4,658,940 元，採用原木鋼骨結構，在總成本單價中為 4,260,800 元，原木鋼骨結構較其它比較方案其機能性較為適合；原木鋼骨於施工時間、美觀、安全性皆優於其它方案，故本設計案採用原木鋼骨結構做為最佳價值工程方案。

四、研究分析結果

本研究案例在達成業主及機能需求的價值工程分析原則下，將預算作較有價值之編列，達成成本控管目的；在公司、業主及同仁積極參與下，掌握各方需求的機能，努力尋求機能、成本、進度的替代方案，均為本案成功之主因；相較於鋼筋混凝土構造總金額為 4,658,940 元，依本工程價值研析後，建議案採用原木鋼骨結構總金額為 4,260,800 元，共節省新台幣 398,140 元，約為 8.5%，已達成初始的研析目標 8% 以上。

表 3 構想比較表

判斷階段		構想比較	
研析標的：興建農舍住宅		第一頁，共一頁。	
構想	優點	缺點	評等
鋼筋混凝土構造	1.施工機具少	1.結構自重重大	量體大，工期長。
	2.成本低	2.人員需求高	
	3.防火性佳	3.結構所佔體積大	
	4.不需特定施工人員	4.混凝土用量高	
	5.施工品質較易控制	5.工期長	
	6.防颱性佳		
原木屋構造	1.施工期短	1.價格高昂	施工快，成本高。
	2.結構自重輕	2.防火性差	
	3.結構美觀	3.需特殊人員	
	4.施工機具少	4.防颱性差	
	5.結構所佔體積少		
鋼骨結構	1.結構所佔體積少	1.鋼材耗用大	施工短，成本微提高。
	2.施工期短	2.施工機具較多	
	3.結構自重輕	3.需特殊人員	
	4.施工精度佳	4.美觀性較差	
	5.耐震性佳		
原木鋼骨結構	1.鋼材耗用降低	1.需特殊人員	工期短，成本微變低，但須專業施工法。
	2.防颱又耐震	2.防火性差	
	3.結構自重輕	3.施工品質不易控制	
	4.施工期短	4.施工介面不易掌控	
	5.施工精度佳		
	6.結構美觀		

五、結論

在一個工程專案的建築生命週期中，從一個專案計畫，從構想、規劃、設計、施工、完工到營運，通常長達數年，甚至更長，過去，能否順利執行，進度、成本通常成為計劃考量的順序，成本已然變成影響計畫能否執行之重要依據，如何適當預估可能的變數，將成本與控管工作做到最好，避免在執行過程一再追加預算。因此計畫成立之初應妥為考慮影響計畫規模之因子-包括：機能、使用期間、工程進度、外型與配置、設計參數(如結構系統、管線系統、電力系統等)，並參酌實際需求，妥為訂定。

表 4 評估矩陣

構想	估 矩 陣						權重
	價格	美觀	工期	使用空間	安全性	維護性	
鋼筋混凝土構造	5	5	5	5	5	5	5
	4	4	4	4	4	4	4
	3	3	3	3	3	3	3
	2	2	2	2	2	2	2
	1	1	1	1	1	1	1
小計	21	10	14	12	50	24	
原木屋構造	5	5	5	5	5	5	5
	4	4	4	4	4	4	4
	3	3	3	3	3	3	3
	2	2	2	2	2	2	2
	1	1	1	1	1	1	1
小計	7	20	28	18	20	8	
鋼骨結構	5	5	5	5	5	5	5
	4	4	4	4	4	4	4
	3	3	3	3	3	3	3
	2	2	2	2	2	2	2
	1	1	1	1	1	1	1
小計	14	10	28	18	40	24	
原木鋼骨結構	5	5	5	5	5	5	5
	4	4	4	4	4	4	4
	3	3	3	3	3	3	3
	2	2	2	2	2	2	2
	1	1	1	1	1	1	1
小計	21	20	24	18	40	24	

本研究案例的資料蒐集中得出原案例為鋼筋結構成本，與研析後改使用的原木鋼骨結構成本，其總成本降低到價值工程目標需求 8.5% 以上；但針對其工程的美觀、施工難易度、維護性、安全性、施工工期，皆大幅有效率提升原有的設計鋼筋混凝土設計方案效益。因此，價值工程理論已被工程界廣泛運用，並針對各種建設類型進行機能、成本、進度及相對產能研究，已尋求合宜替代方案與降低成本之特殊管理技巧，更能協助決策者作判斷的實用工具，對於原有之流程、規劃、設計案以分析機能、成本、進度等，提出最有利的機能與進度要求。故為未來工程於設計規劃端，價值工程方法勢必列入工程專案的重要考量指標之一。

表 5 權重評估表

判斷階段	權 重 評 估	
研析標的：興建住宅農		
目標、期望標準	原始分數	指定權重
A 價格	8	7
B 美觀	5	5
C 工期	6	7
D 人力	1	1
E 使用空間	7	6
F 安全性	11	10
G 施工難易度	1	1
H 維護性	8	8

分 數 矩 陣								
	B	C	D	E	F	G	H	
A	A1	A3	A2	E1	F2	A1	A/H	
B		C2	B1	B/F	F2	B2	H2	
C			C1	E1	C/F	C1	H2	
D				D	F2	D/G	H1	
E					E/F	E1	H1	
F						F1	F2	
G							H1	
H								H

重要程度
高度 3
中度 2
低度 1

表 6 六大方案之成本比較表

項次	結構種類	單價(元)	總價(元)	備註
方案一	混凝土	20500	1085320	280 kg/cm ² 4000 psi
方案二	鋼筋混凝土	88000	4658940	
方案三	鐵皮屋	125000	7689400	
方案四	木屋	200000	12303030	
方案五	鋼骨	99000	5241310	
方案六	原木鋼骨	80480	4260800	原木：鋼骨 3：7 = 80480(元)

參考文獻

1. Miles, E. R., "Lawrence Delos Miles' " Techniques of value analysis and engineering". Ekistics, Vol.56, pp.119~121, 1989.
2. 劉慶尚,「捷運工程機廠設備價值工程研

析」，價值管理，第 19 期，第 11~26 頁，2012。

3. 史敬弘，捷運車站站體精簡模式建構之研究，國立臺灣科技大學營建工程系，台北市，2010。
4. 盧協成，國內公共工程推動實施價值工程之研究，國立台灣工業技術學院營建工程技術研究所，台北市，1997。
5. 王和源主編，價值工程教案，國立高雄科技大學，高雄市，2021。

高強度熱浸鍍鋅鋼筋混凝土工程性質之研究

王和源¹ 蔡秉誠²

¹國立高雄科技大學土木系特聘教授

²國立高雄科技大學土木系研究生

摘要

本研究係選用混凝土預拌廠常使用之高強度混凝土配合設計強度($f_c' = 560 \text{ kgf/cm}^2$)，及使用鋼筋生產廠商目前例行生產之高強度鋼筋 (SD 490W 及 SD 550W)；以不同之鍍鋅含量，並於現地固定鋼筋及澆製高強度混凝土，於不同混凝土養護齡期 (7、28 及 91 天)，並探測高強度混凝土新拌性質、硬固及耐久性與工程性質。

結果顯示，養護齡期 28 天之混凝土抗壓強度皆可達到 63.4MPa 以上，劈裂強度為 5.28~5.62MPa，反彈錘 R 值為 44，參考對應混凝土抗壓強度約為 R 值 13.6 倍，顯示皆強度隨著齡期的增加而增強，且抗壓及劈裂強度間具有良好關係；超音波波速成長狀況為 4,660~4,706 m/s，顯示各取代量皆能達到較佳的緻密性，且與抗壓強度有相似的成長趨勢；量測之表面電阻為 23.3~24.3 $k\Omega\text{-cm}$ ，皆高於 20 $k\Omega\text{-cm}$ ，顯示該混凝土配比有著很好的緻密性；透過快速氣離子電滲試驗量測試體電滲質為 2177~2475 庫倫之間，顯示該混凝土有著良好的氣離子滲透性。28 天鍍鋅鋼筋拉拔試驗方面，其握裹力強度皆達到 20MPa，顯示隨著混凝土強度的提升鋼筋的握裹力也會隨之增長。

關鍵字:高強度混凝土、熱浸鍍鋅、工程性質、抗壓強度

Research on Engineering Properties of High-Strength Hot-dip Galvanized Reinforced Concrete

Her-Yung Wang¹ Tsai Bing Shian²

¹Institute of Civil Engineering National Kaohsiung University of Science and Technology

²Institute of Civil Engineering National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

In this study, the design strength of high-strength concrete ($f_c' = 560 \text{ kgf/cm}^2$) that is commonly used in concrete pre-mixing plants is selected, and the high-strength steel bars (SD 490W and SD 550W) currently routinely produced by steel bar manufacturers are used; The content of galvanized steel is fixed on site and high-strength concrete is poured. In different curing ages (7, 28 and 91 days), the high-strength concrete is modified and hardened by making cylindrical specimens. And the experiment of durability quality understand the engineering properties of high-strength concrete.

The results show that the compressive strength of concrete with a curing age of 28 days can reach more than 63.4MPa, the splitting strength is 5.28~5.62MPa, the rebound hammer R value is 44, and the reference corresponding concrete compressive strength is about 13.6 times the R value. The strength increases with the increase of age, and there is a good relationship between

compressive strength and splitting strength; the ultrasonic wave velocity growth status is 4,660 ~ 4,706 m/s, which shows that each amount of substitution can achieve better compactness, and It has a similar growth trend with compressive strength; the measured surface resistance is 23.3~24.3 kΩ-cm, which are all higher than 20 kΩ-cm, indicating that the concrete ratio has good compactness; through rapid chloride ion electroosmosis test The electroosmotic quality of the test body is between 2177 and 2475 coulombs, which shows that the concrete has good chloride ion permeability.

Keywords: high-strength concrete, hot-dip galvanized, engineering properties, compressive strength

一、前言

近年來許多都市的房屋不符合現行之耐震度、管線老舊或消防法規等，為了符合現代安全標準達到延長建築物使用年限、更安全及適用目前生活機能，需將老舊建築物進行整建，而鋼材腐蝕的防護及減緩是鋼材使用上必要的元素，適切的鋼材選擇可以節省日後修繕的花費，而鍍鋅鋼材的正面效益良多。

台灣做為熱帶/亞熱帶，因高濕、高溫與高鹽分的存在，造成金屬在大氣中容易腐蝕裂化。由於金屬材料的大氣腐蝕機制主要是受大氣中所含水分、氧氣和腐蝕物質(如雨中的雜質、灰塵、金屬表面沉積物等)聯合作用而產生的破壞【1】。

鋼鐵材料為今日人類生活中不可或缺的重要資源，然而因其本身特性使然，使得”銹蝕”無日不時伴隨著我們，並無時無刻地損耗著我們的資源—鋼鐵，又因台灣受海洋性季風的惡劣環境下，”銹蝕”問題較其他國家來的更為嚴重【2】。

近年來隨著經濟發展，高層建築需要高強度鋼筋及高強度混凝土也隨之增加而如需考量耐久性而增加鍍鋅時，鍍鋅含量是否會影響品質值得進一步探討。

隨著建築科技的飛速發展，高層建築結構不斷出現，對建築材料提出了越來越高的要求，其中最為重要的一項便是混凝土強度。由於在結構荷重不斷加大的同時，結構尺寸因受到眾多因素的影響而不能加大，因而要求混凝土具有較高的強度【3-7】。本研究針對

高強度鍍鋅鋼筋混凝土之工程性質作初步之探討。

二、試驗計畫

2.1 試驗材料

本研究採用之水泥為亞洲水泥股份有限公司所生產，並符合 CNS 61、ASTM C150 規格之波特蘭 I 型水泥。飛灰為林口火力發電廠所生產，並符合 CNS 3036、ASTM C618 規格的 F 類型燃煤飛灰。強塑劑為欣得實業公司所生產 PC 302 型，並符合 CNS 12283、ASTM C494 所規定之 G 型藥劑，拌合水為自來水廠所供應，並符合 CNS 13961 之規定。水泥及粗細粒料性值如表 1 所示。

2.2 試驗配比設計及項目

本研究係選用以設計強度 560kgf/cm² 高強度混凝土及使用之高強度鋼筋 (SD 490W 及 SD 550W)，再於現地釘製模板並固定鋼筋及澆製混凝土。於高強度混凝土養護齡期(7 天、14 天、28 天、56 天及 91 天)，進行混凝土相關性質試驗；且於高強度混凝土養護齡期 (7 天、28 天及 91 天)，進行高強度鋼筋混凝土之拉拔試驗。

2.3 試驗方法及項目

- (1) 抗壓強度，依據 ASTM C39 規範，於各齡期進行抗壓強度，探討不同齡期之混凝土強度變化。
- (2) 超音波波速，依據 ASTM C597 規範，進行不同齡期及取代量之超音波波速，量測試體內部之波速，探討試體緻密性。
- (3) 劈裂試驗，依據 ASTM C496 之規定，製

作試體尺寸為 10cm ϕ x 20 cm 之圓柱試體，於各齡期進行劈裂抗張強度，探討混凝土抗張強度。

- (4) 四極式電阻，依據 ASTM C876 規範，藉由儀器量測出之電阻值，可表示為試體表面之緻密性之間接指標，電阻值越高表示試體表面孔隙越少，較能抵抗氯離子侵蝕，有較佳的耐久性。
- (5) 氯離子電滲試驗，依據 ASTM C1202 規範進行試驗，運用電流通過混凝土的電荷量多寡來判斷氯離子對混凝土的滲透性，量測齡期為 28 天及 91 天，探討試體緻密性。
- (6) 反彈錘試驗，參考 ASTM C805 之規定進行試驗，進行不同齡期的量測，進行反彈錘 R 值量測，求得混凝土表面的硬度，推測其抗壓強度。
- (7) 鋼筋握裹試驗，本試驗參考 ASTM E488 規範，製作三塊大型混凝土並埋置鋼筋，進行鋼筋握裹拉拔試驗，於各齡期進行握裹強度。

三、結果與討論

3.1 抗壓試驗

本研究以 560 kgf/cm² 設計強度混凝土，製作 ϕ 12cm x 24cm 混凝土試體，於 7 天、28 天、56 天及 91 天養護齡期進行抗壓強度試驗，抗壓強度為強度時間變化使用之重要工程特性。

圖 1 及表 1 所示，混凝土設計強度 560kgf/cm² 時，其抗壓強度隨著齡期增加而有提高的趨勢，7 天齡期之抗壓強度在 49.86~51.68 MPa，28 天齡期抗壓強度 58.8~62.1 MPa；56 天齡期抗壓強度在 64.8~66.4 MPa；91 天齡期抗壓強度在 67.5~69.1 MPa，7 天及 28 天抗壓強度較為平緩。早齡期時的水化產物 C-S-H 膠體愈少，部分卜作嵐材料無法進行卜作嵐反應，將使早齡期強度越低。而其中取代水泥之卜作嵐材料中的爐石粉對晚期強度有很大助益，隨著齡期增加卜作嵐反應將會不斷反覆進行，直到水化物氫氧化鈣(CH)完全被消耗為止，

有助於長期強度之發展。

因早齡期混凝土中未起反應的卜作嵐材料顆粒介面越多，導致試體越不密實；而使抗壓強度降低，且水膠比的提升也會使試體孔隙增加造成抗壓強度降低，而於晚齡期隨著卜作嵐材料之卜作嵐反應持續作用，使抗壓強度提升。

3.2 劈裂試驗

圖 2 所示，混凝土設計強度 560kgf/cm² 時，其抗壓強度隨著齡期增加而有提高的趨勢，7 天齡期之抗壓強度在 34~38 MPa，28 天齡期抗壓強度 42.3~44.3 MPa；顯示 7 天至 28 天劈裂強度成長幅度 14.3%~19.8%，56 天齡期抗壓強度在 47.7~50.3 MPa；顯示 28 天至 56 天劈裂強度成長幅度 11.3%~12.1%，91 天齡期抗壓強度在 52.3~53.1 MPa，顯示 56 天至 91 天劈裂強度成長幅度 5.3%~8.7%。在混凝土配比設計中因添加了爐石粉導致早期強度較低晚期強度相對較高；而在齡期 7 天至 28 天漲幅較為明顯，在齡期 28 天至 91 天漲幅較為趨緩。

3.3 超音波波速

超音波波速試驗一般用於檢測混凝土品質之優劣，屬非破壞性試驗，主要是為在不破壞試體之條件下進行超音波波速量測，波速之快慢可顯示混凝土內部緻密性與均質性程度，但其容易受到齡期、水膠比變化、水泥、拌合用水量及骨材種類與特性等特性影響而波速有所變化，具有操作簡便、過程迅速及可在現地直接量測等優點，對於混凝土強度之變化也有類似的趨勢，故常用來監測強度變化及品質評估。

圖 3 所示，一般養護下於 7 天齡期時超音波波速介於 4,486~4,615 m/s 之間；在 14 天齡期時，其超音波波速介於 4,507~4,706m/s 間；在 28 天齡期時，其超音波波速介於 4,660~4,706 m/s 間；當 56 天齡期時超音波波速在 4,660~4,760 m/s 間；而達 91 天晚期齡期時，超音波波速介在 5,743~5,790m/s 間，顯示出混凝土於晚期時有較高的緻密性。超音波波速的傳遞快慢取

決於試體結構的緻密性，當超音波波速提高，表示試體結構較為緻密。因早期卜作嵐材料的反應較為緩慢，早期波速成長較緩慢，但隨卜作嵐反應作用，試體孔隙被填充使試體有較佳緻密性，晚期波速成長幅度較明顯。

3.4 表面電阻

評估混凝土耐久性是以四極式電阻量測儀對表面電阻率進行檢測，意味著混凝土之緻密程度與耐久性有相對的關係，電阻越大表示其緻密性越佳。圖 4 所示，7 天早期齡期時表面電阻值介於 9.7~10.4k Ω -cm 之間，顯示在水泥水化作用未完全反應，試體內部還充滿孔隙，導致早齡期各配比之電阻值均偏低。在 28 天齡期時，其表面電阻值介於 14.0~16.5k Ω -cm 間，電阻成長幅度約為 31.3%。

當 56 天齡期時表面電阻值在 23.3~24.3 k Ω -cm，期間電阻成長幅度約為 40.2%。；91 天期齡期時，表面電阻值介在 33.3~35.0 k Ω -cm 間，電阻成長幅度約為 30.3%。顯示當齡期 56 天至 91 天時卜作嵐反應逐漸趨緩，波速成長幅度降低，且晚齡期時因水化作用時間較長，反應較完全，其試體結構的緻密性以趨於穩定所以成長幅度較不明顯。

由以上結果，電阻高低取決於試體結構的緻密性，當電阻提高，表示試體結構較為緻密。因爐石粉的取代，早期電阻成長較緩慢，但隨卜作嵐反應作用，試體孔隙被填充使試體有較佳緻密性，晚期電阻成長幅度較趨緩。電阻與超音波速有相同之趨勢，能使試體有良好的緻密性與低滲透性，能有較佳之耐久性。

3.5 氯離子電滲

本試驗法方法主要以混凝土導電性質的方式係利用外加的 60V 直流電壓使得氯離子快速進入混凝土材料中，藉由量測得到的電流值計算 6 小時內總通過電量，用以評估混凝土抗氯離子滲透的能力。所有設計混凝土配比於試體到達養護材齡後依 ASTM C1202 標準進行試體前處理過程與 RCPT 過程。試驗結果顯示，於 56 天進行試驗時通過電荷為

2,155~2,475 庫倫，對應表 2 顯示混凝土有著中等的滲透性。

3.6 反彈錘

在測試物體的表面利用機械性敲擊產生暫態應力波動並導入物體內，該應力波動包含有壓力波(P-Wave)、剪力波(S-Wave)及表面波(R-Wave)，其中壓力波及剪力波在物體內部依球狀的波形方式向前傳動，而表面波則沿著物體表面遠離敲擊點的方式向外擴散出去。當壓力波及剪力波遇到物體內部的瑕疵(如裂縫及孔隙)或物體的邊界時，將會被反射回去，這些反射波回到了敲擊面時，則產生表面的位移，此等位移反應可利用訊號接收器監測到。

試驗結果如圖 5 所示，7 天早期齡期時反彈錘反彈數 R 介於 35.0~36.4 之間；在 28 天齡期時，其反彈錘反彈數 R 介於 44.3~44.8 間；當 56 天齡期時反彈錘反彈數 R 介於 46.3~49.7 間；91 天期齡期時，反彈錘反彈數 R 介於 50.7~52.3 間。結果顯示出 R 值為混凝土抗壓強度的 70%，如圖 6 所示，通過將混凝土抗壓強度與反彈錘 R 值繪製回歸曲線有著高度的相關性，表示混凝土強度與 R 值是有著正相關的關係。

3.7 鋼筋握裹強度

本研究使用 2 種方式執行現地鋼筋拉拔之試驗，其一為符合 ASTM E488 拉拔試驗，另一為模擬 ASTM E488 拉拔試驗。然依試驗法 ASTM E488 規定，兩方法最主要之差異點為，執行拉拔時施加反力之承載點其跨距須為鋼筋埋置深度之 2 倍以上及測試時需架設測微表藉以了解施力時鋼筋與混凝土之相對位移量。故目前工程常是使用模擬 ASTM E488 試驗法來執行現地鋼筋拉拔試驗，其主要是因測試現地之空間侷限，無法滿足試驗法之要求(反力跨距須為鋼筋埋置深度之 2 倍以上)；測試較為速度快速、便利；另為符合 ASTM E488 拉拔試驗因機台因素，目前能量只能執至 #8 號鋼筋。

1. 28 天齡期時強度比較

表 3 所示，無鍍鋅 #8 號鋼筋於 28 天齡

期握裹強度為 192.6 及 196.3 kgf/cm²；有鍍鋅鋼筋(薄) #8 號鋼筋 28 天齡期握裹強度為 201.62 及 207.3 kgf/cm²；有鍍鋅鋼筋(厚) #8 號鋼筋，28 天齡期握裹強度 203.3 及 213.8 kgf/cm²；通過試驗結果顯示出雖無鍍鋅鋼筋與鍍鋅量不同之鋼筋之握裹強度差異不大，但仍可觀察到有鍍鋅之鋼筋之握裹強度相較於無鍍鋅鋼筋有些微的提升。

2. 91 天齡期時強度比較

無鍍鋅 #8 號鋼筋於 28 天齡期握裹強度為 192.6 及 196.3 kgf/cm²；有鍍鋅鋼筋(薄) #8 號鋼筋 28 天齡期握裹強度為 201.62 及 207.3 kgf/cm²；有鍍鋅鋼筋(厚) #8 號鋼筋，28 天齡期握裹強度 203.3 及 213.8 kgf/cm²；通過試驗結果顯示出雖無鍍鋅鋼筋與鍍鋅量不同之鋼筋之握裹強度差異不大，但仍可觀察到有鍍鋅之鋼筋之握裹強度相較於無鍍鋅鋼筋有些微的提升。

圖 6 及表 3 所示，無鍍鋅 #8 號鋼筋於 28 天齡期握裹強度為 192.6 及 196.3 kgf/cm²，而 91 天齡期握裹強度為 230.1~242.3 kgf/cm²；有鍍鋅鋼筋(薄) #8 號鋼筋 28 天齡期握裹強度為 201.6、207.3 kgf/cm²，91 天齡期握裹強度為 232.4~245.4 kgf/cm²；有鍍鋅鋼筋(厚) #8 號鋼筋，28 天齡期握裹強度 203.3~213.8 kgf/cm²；91 天齡期握裹強度在 235.8~246.1 kgf/cm²；依試驗數據判斷，雖無鍍鋅鋼筋與鍍鋅量不同之鋼筋之握裹強度差異不大，但仍可觀察到有鍍鋅之鋼筋之握裹強度相較於無鍍鋅鋼筋有些微的提升。

四、結論

1. 於硬固性質中，抗壓強度皆隨齡期增加而增加，並且皆有達到設計強度要求，於晚齡期時抗壓強度有顯著的提升。
2. 超音波速皆隨著齡期的增加而增加，期波速均高於 4,500 m/s 顯示出有著良好的緻密性；表面電阻隨著齡期的增加也有明顯的提升，表現出於晚期時有著良好的抗侵蝕能力。
3. 超音波波速因添加卜作嵐材料能提供試體較佳緻密性，於晚齡期時因卜作嵐材

料提供卜作嵐反應，因此波速有較佳之發展。

4. 鋼筋握裹強度中，握裹強度隨著齡期增長而增加，但鋼筋鍍鋅量並未對試驗結果造成較大的差異，因此判斷鋼筋鍍鋅量與握裹強度並沒有一個良好的關聯性；並且透過回歸曲線顯示出鋼筋握裹強度與混凝土強度有著顯著的關聯性。
5. 鋼筋握裹拉拔試驗透過模擬 ASTM E488 進行結果均比符合 ASTM E488 之試驗結果強度高，其原因為前者於千斤頂施力時，其反力點與鋼筋距離過近，造成鋼筋與混凝土之握裹強度大於混凝土之抗張強度時，混凝土將開裂成倒三角形錐體，然又因反力施壓於混凝土，造成圍束力的因素所導致兩者拉拔強度有所差異。

參考文獻

1. 資源再生綠色產品促銷推廣暨成果發表會，經濟部工業局，2018。
2. 杜宗嶽，永續性再生資源骨材混凝土之研究，國立台灣科技大學博士論文，台北，2006。
3. 梁弘逸，「熱浸鍍鋅鋼材鐵鋁阻障層形成機構研究」，碩士論文，國立中山大學材料與光電科學學系研究所，2010。
4. 林清俊，「鋼筋表層防蝕處理對鋼筋混凝土握裹行為影響之研究」，碩士論文，國立海洋大學河海工程研究所，2001。
5. 蔡明達，「熱浸鍍鋅鋼結構在花卉博覽會之應用」，帷幕牆會刊，第 45~53 頁，2011。
6. 黃兆龍，卜作嵐混凝土使用手冊，財團法人中興工程顧問社，台北，2007。
7. 高強混凝土配制的研究[J]·黑龙江水利科技，2003，33(2)：84-85
8. 台灣檢驗科技股份有限公司，硬固混凝土品質檢測介紹，2020。

表 1 高強度混凝土養護之抗壓強度

Age day	Compressive Strength(MPa)	Compressive Strength average value(MPa)
7-1	45.62	45.53
7-2	46.23	
7-3	44.73	
14-1	55.3	55.20
14-2	55.0	
14-3	55.4	
28-1	58.6	58.28
28-2	57.5	
28-3	58.7	
56-1	58.5	59.18
56-2	58.8	
56-3	60.3	
91-1	67.5	68.33
91-2	69.1	
91-3	68.3	

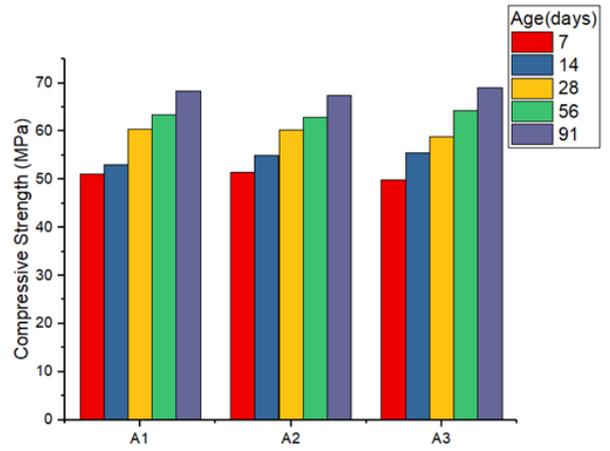


圖 1 高強度混凝土抗壓強度

表 2 ASTM C1202 電量與氯離子滲透性之關係【8】

Charge (coulombs)	Permeability of Cl-
>4000	High
2000~4000	Moderate
1000~2000	Low
100~1000	Very Low
<100	Negligible

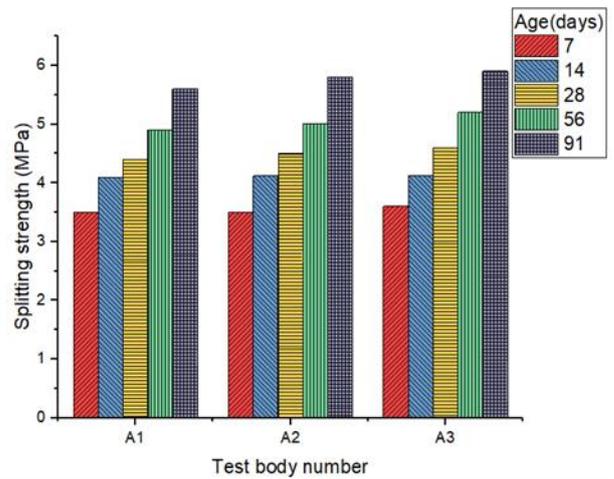


圖 2 高強度混凝土劈裂強度

表 3 養護齡期 28 天符合 ASTM E488 鋼筋握裹拉拔強度

Steel grade	Steel type	Galvanized amount(g/m ²)	Bond Strength (kgf)	Bond Strength (kgf/cm ²)
SD490W	#8	0	20054	166.4
SD490W	#8	1369	20777	175.9
SD490W	#8	2529	20907	171.2
SD550W	#8	0	21936	175.1
SD550W	#8	1369	21632	177.2
SD550W	#8	2529	23159	183.7

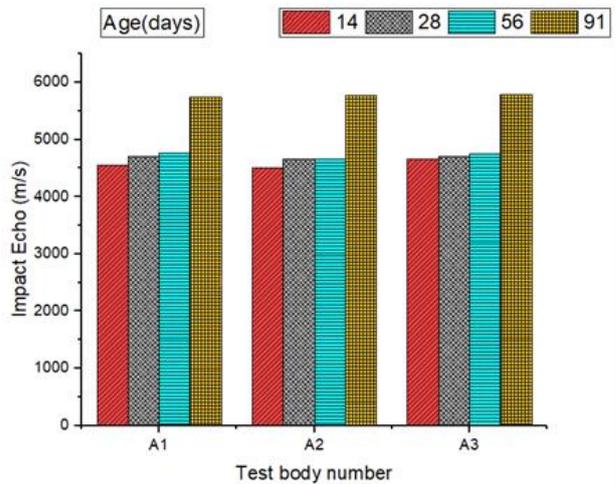


圖 3 高強度混凝土超音波波速

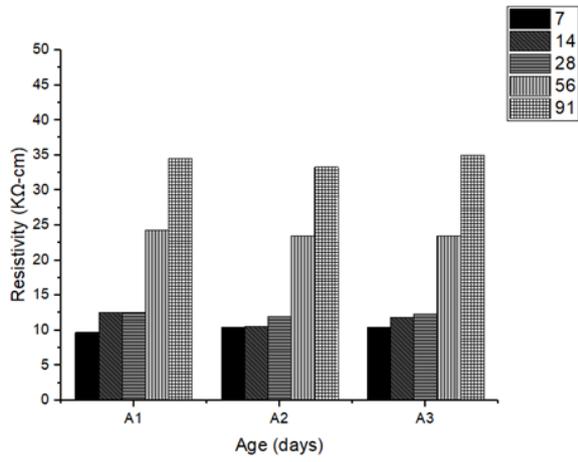


圖 4 高強度混凝土表面電阻試驗

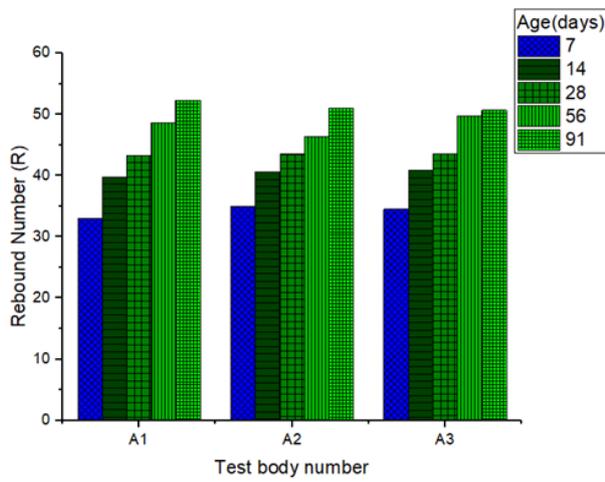


圖 5 高強度混凝土反彈錘試驗結果

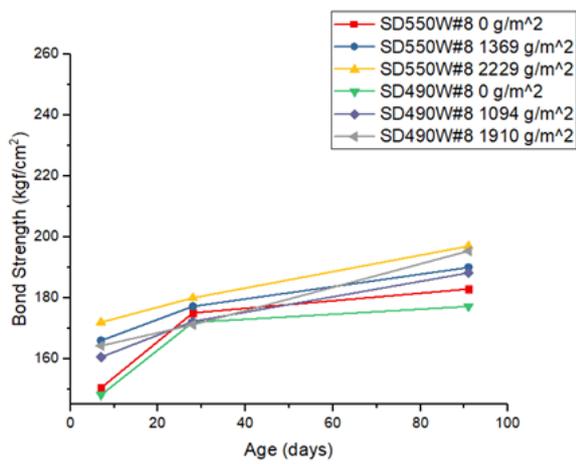


圖 6 高強度鍍鋅鋼筋混凝土之握裹強度

Experimental Comparative Study on the Behavior of Reclaimed Cement in Pavement Subgrade CBR Tests with Special Additives

Yo-Ta Chen¹ Navy Shih-Huei Chen² S. M. Keong³ H. S. Chang⁴ Joe W.S.⁵
A. Carey⁶

¹*Kuo Sen Enterprise Co., Ltd., Planning Dept.*

²*Consultant, Kuo Sen Enterprise Co., Ltd.*

³*Civil Engineering Consultant (Singapore)*

⁴*Singapore Air Force Base Facility Assistant (Former)*

⁵*Fellow, American Statistical Association (USA)*

⁶*B.S. Geography, New York State University (USA)*

ABSTRACT

The cost of treating industrial polluted water from a concrete batching plant in Singapore was found to consist 35% to 45% of its total cost of business operation. Preliminary investigation discovered that the solid content of the polluted water include rejected concrete or excessive wet concrete from washing of concrete trucks and batching plants. After extracting these solid contents of reclaimed cement waste from concrete batching plant through heating processes, the research team used these materials in the application of transportation engineering purposes. California Bearing Ratio Test was conducted to study the effect of using these reclaimed cement waste on improving the strength of soil. It can be applied to improve weak subgrade material underneath the pavement during road construction. According to ASTM D1883, the number of blows per layer shall be varied so as necessary to prepare the specimens having unit weight above and below the desired value. It is recommended in ASTM that if the CBR for soil at 95% of maximum dry unit is desired, specimens compacted at 55, 25, and 10 blows per layer is satisfactory. On the other hand, BS:1377:Part 4:1990 stated that 62 blows per layer is suitable for most types of soil. In order to consider both specifications, this research included 62, 55, and 25 blows per layer for American and British standards. After soil samples were collected and prepared, optimum moisture content for the soil was determined for each number of blows per layer.

For experiments of 25 blows per layer, CBR value at 30% replacement of soil particles achieved the highest average value of 32.231%, which is an increment of 16.5% compared to the control. For experiments of 55 blows per layer, CBR value at 10% replacement of soil particle achieved the maximum optimal value of 37.205%. The increment was 9.51% compared to the control experiment. As for experiments of 62 blows, the CBR values at 10% replacement of soil particles achieved an optimum average value of 60.041%, with an increase of 2.19% compared to the control experiment. Three prediction equations were obtained for prediction and engineering design purposes using (multiple) linear regression and quadratic equations. In order to further increase the strength of soil at subgrade of pavement, soil grouting material from Japan is introduced to increase the bearing capacity and friction of soil particles while keeping the water molecules for retaining soil properties. Soil liquefaction potential could also be reduced and grouting scope was controlled by the adjustment of setting time. Direct strengthening through

infiltration could also be achieved by Japan pavement grouting material and Kuo Sen epoxy materials.

Keywords: reclaimed cement, percent replacement, CBR, regression, Kuo Sen, Japan soil grouting material

1. Introduction and Paper Review

The design and construction of roads, highways and airport runways pavements can have an important impact on the environment and sustainability. The design and construction of road pavements could encourage recycling and optimization of the use of resources and minimize the production of waste (Ian D. Walsh et. al., 2011). Recently the recycling and reuse of construction materials are applied as means to achieve the circular economy, in which resource input and waste are minimized by narrowing material and energy loops in many developed countries (Geissdoerfer et. al., 2017). As researchers from Kuo Sen Enterprise Co., Ltd. studied the polluted water with rejected concrete or excessive wet concrete from washing of concrete trucks (Fig.1), batching plants, and precast factories (Fig.2.) in Singapore and Taiwan (Yo-Ta Chen, 2001, 2014), it was discovered that the main source of its high alkalinity came from a powder form of reclaimed cement. When applied into soil, the compacted mixture was found to achieve higher strength and therefore higher bearing capacity for pavement and foundations (Yo-Ta Chen, 2001, 2014).

The California Bearing Ratio Test was conducted in this research to study the effect of reclaimed cement on improving the strength of soil. The reclaimed cement can be applied to improve weak subgrade material underneath the pavement, and therefore contributing to a higher modulus of subgrade reaction, higher elastic modulus, a stronger pavement, and

potentially lower thickness of pavement slabs. Soil Grouting Material was introduced to improve the SPT-N values. This research seeks to convert these values into CBR values and compared it with factors such as compaction efforts and percentage of replacement using reclaimed cement.

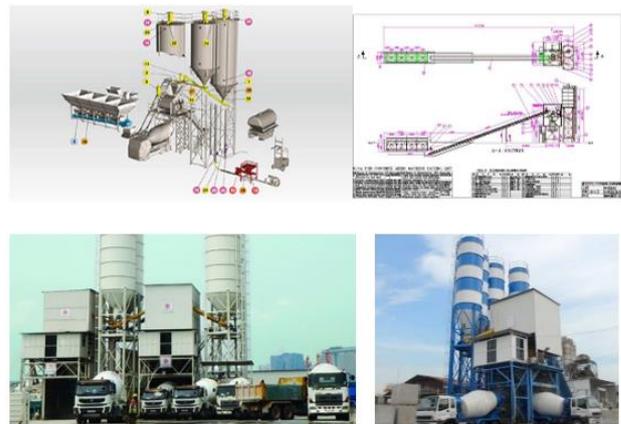


Figure 1. From left to right: isometric and plan view of batching plant, photographs showing batching plants and concrete trucks, where polluted water would result from washing facilities and concrete trucks.

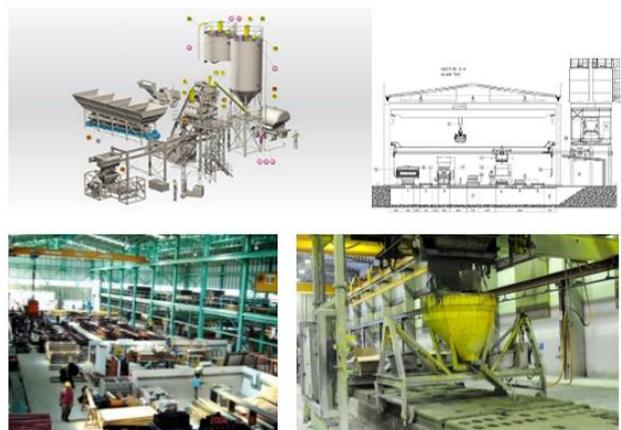


Figure 2. From left to right: isometric view of precast concrete factory, photographs of precast factory,

showing excessive concrete would be washed to water treatment plants.

2. Methodology

To determine if the reclaimed cement in this research could be used as part of the bonding material to improve the strength of weak subgrade material such as clay, the following experimental procedures were carried out. The soil sample was taken from the forest topsoil, through digging, transportation, and oven drying, in order to remove the excessive moisture content. The soil samples were then crushed, sieved and grinded to powder state. The moisture contents for 25 blows, 55 blows, and 62 blows were then determined.

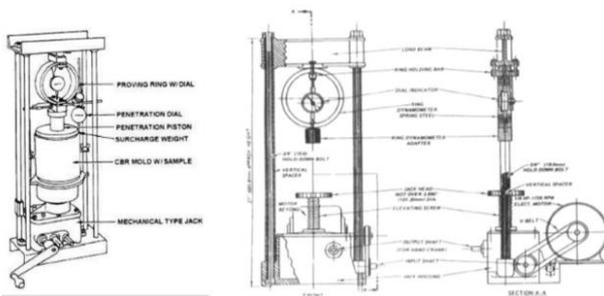


Figure 3. From left to right: isometric view, front view, and section view of CBR Test Equipment.

In ASTM D 1883, it is found that the number of blows shall be varied so as necessary to prepare the specimens having unit weight above and below the desired value. Typically, if the CBR values for soil at 95% of maximum dry unit weight is desired, specimens compacted at 55, 25, and 10 blows per layer is satisfactory. Due to time constrain in this research, the factor of 10 blows was omitted from the pre-determined number of blows. On the other hand, 62 blows per layer of soil was stated in BS: 1377: Part 4:1990 standard, which is known for its fit to almost all types of soils. Therefore, to determine the

effectiveness of the reclaimed cement on most types of soil, the researchers have decided to include 66 blows in this experiment. The CBR results of all three different numbers of blows per layer, in relation to the percentage of replacement by waste were studied and the effects examined.

The laboratory procedures also include cleaning the moulds (Fig.3) for CBR tests so it is free of debris. These moulds were then fixed rigidly onto the compaction machine and the programed mode for the number of blows was set. Optimum moisture content was found before each soil sample was mixed with water. This mixed soil sample would then be divided into 5 portions. Each layer of soil was then mixed with water and placed into the mould for compaction (Fig.4). After the compaction, the excessive soil was trimmed off and the surface leveled. Transfer the mould onto the CBR testing machine (Fig.3 and Fig. 4) and the test was started. Record the topside reading and repeat the test again for the bottom side readings, after backfilling the hole formed after testing the topside of the sample.



Figure 4. From left to right: CBR Test Machines with capacity (50 kN) fit for EN 13286-47, BS 1377:4, ASTM D1883, AASHTO T193, NF P94-078, UNI CNR 10009 standards; parts of moulds and gauges, ongoing tests, and compactor machine.

3. Experimental Results and data analysis

Table 1. The experimental design layout for CBR tests

Numbers of Blows	25 blows		55 blows		62 blows	
	CBR Values (%)		CBR Values (%)		CBR Values (%)	
Percentage of waste replacement (%)	1A	1B	2A	2B	3A	3B
0%	4A	4B	5A	5B	6A	6B
10%	7A	7B	8A	8B	9A	9B
20%	10A	10B	11A	11B	12A	12B
30%						

Each test is given a specimen code, indicated in the table above (Table 1), showing specimen 1A to 12B. Results of the CBR tests are as followed. Since there are 24 graphs and 24 tables for the CBR tests, we have picked specimen 1B, 4A, 7B, and 10A (all from the 25 blows range) of the experimental results shown in the table (Table 2, 3, 4, 5) below:

Table 2. CBR Test Results for Specimen 1B

Dial guage readings	Load (KN) top	Load (KN) bottom
0.00	0	0
0.25	0.2592	1.1427
0.50	0.4594	2.3678
0.75	0.6479	2.8390
1.00	0.8835	3.1217
1.50	1.3783	3.4515
2.00	1.8259	3.6047
3.00	2.4738	3.8426
4.00	3.7696	4.0288
5.00	4.5353	4.1937
6.00		4.2879
7.00		4.3704

Table 3. CBR Test Results for Specimen 4 A

Dial guage readings	Load (KN) top	Load (KN) bottom
0.00	0.000	0.000
0.25	0.236	0.377
0.50	0.306	0.801
0.75	0.401	1.154
1.00	0.471	1.555
1.25	0.554	2.038
1.50	0.648	2.568
1.75	0.754	3.028
2.00	0.860	3.416
2.25	0.990	3.664
2.50	1.107	3.879
2.75	1.225	4.111
3.00	1.367	4.335
3.25	1.473	4.571
3.50	1.649	4.783
3.75	1.779	4.983
4.00	1.944	5.124
4.25	2.085	5.254
4.50	2.250	5.384
4.75	2.415	5.466
5.00	2.603	5.572
5.25	2.757	5.690
5.50	2.910	5.843
5.75	3.098	5.973
6.00	3.251	6.055
6.25	3.416	6.161
6.50	3.581	6.255
6.75	3.746	6.361
7.00	3.899	6.455
7.25	4.029	6.538
7.50	4.147	6.620

Table 4. CBR Test Results for Specimen 7B

Dial guage readings	Load (kN) Top	Load (KN) Bottom
0.00	0	0
0.25	0.5890	0.0707
0.50	1.2487	0.1178
0.75	1.9908	0.1531
1.00	2.4267	0.2592
1.25	2.8154	0.3004
1.50	3.1453	0.3770
1.75	3.4633	0.4830
2.00	3.7107	0.5654
2.25	3.9227	0.6361
2.50	4.0641	0.6950
2.75	4.3822	0.7304
3.00	4.6884	0.8246
3.25	4.9476	0.9188
3.50	5.1243	1.0484
3.75	5.2774	1.2487
4.00	5.4306	1.3547
4.25	5.6191	1.4725
4.50	5.8075	1.6374
4.75	5.9842	1.7081
5.00	6.1439	1.8612
5.25	6.2434	1.9790
5.50	6.3494	2.0733
5.75	6.4319	2.2146
6.00	6.5615	2.2971
6.25	6.6321	2.4267
6.50	6.7617	2.5798
6.75	6.8442	2.6506
7.00	6.9384	2.8036
7.25	7.0091	2.9097
7.50	7.1151	2.9803

Table 5. CBR Test Results for Specimen 10A

Dial guage readings	Load (kN) Top	Load (KN) Bottom
0.00	0	0
0.25	0.2120	1.0484
0.50	0.4594	1.8377
0.75	0.8246	2.3560
1.00	1.0838	2.7330
1.25	-	3.0628
1.50	2.2382	3.3455
1.75	2.7094	3.6047
2.00	3.1217	3.8403
2.25	3.5340	4.0523
2.50	3.7696	4.2408
2.75	4.0994	4.4175
3.00	4.3468	4.5824
3.25	4.5942	4.7120
3.50	-	4.8416
3.75	-	4.9712
4.00	4.9476	5.1007
4.25	5.0772	5.2185
4.50	5.1950	5.3305
4.75	5.3246	5.4365
5.00	5.4541	5.5366
5.25	5.5366	5.6426
5.50	5.6544	5.7369
5.75	5.7722	5.8429
6.00	5.8664	5.9253
6.25	5.8900	6.0078
6.50	5.9960	6.1256
6.75	6.0785	6.2198
7.00	6.1845	6.3612
7.25	6.2670	6.4554
7.50	6.3612	6.5732

The above 4 tables are 1/6 of the total data collected from CBR testing results. The 24 tables and graphs from an additional of 648 data sets are not presented here due to space considerations. The final CBR data results were compiled in the table (Table 6) below.

Table 6. Compilation of Final CBR Test Results with different percentage of waste replacement

Numbers of Blows	25 blows		55 blows		62 blows	
Percentage of waste replacement (%)	CBR Values (%)		CBR Values (%)		CBR Values (%)	
0%	28.0 26	27.31 6	34.0 21	33.9 27	58.0 21	59.4 90
10%	29.3 01	28.9 17	37.4 86	36.9 24	59.61 2	60.4 69
20%	30.5 94	30.7 81	35.5 94	35.6 78	43.3 55	40.0 31
30%	32.0 30	32.4 31	23.5 26	22.4 31	17.97 8	15.27 4

In the table of between subject factors (Table 7) for CBR tests, where the input parameters are explained. The first independent variable of interest is the percentage of replacement having 4 levels. A value of 1 would represent 0% replacement using reclaimed cement, 2 represents 10% replacement, 3 means 20% replacement, and 4 represents 30% replacement with reclaimed cement. On the other hand, a value of 1 under the independent variable, number of blows, represents 25 blows. A value of 2 and 3 would represent 55 blows and 62 blows.

Table 7. Between Subject Factors for California Bearing Ratio Test

	Value Label	N
Numbers of Blows(compaction effort)	25 Blows	8
	55 Blows	8
	62 Blows	8
Percentage of Replacement of Cement by Waste	0% Replacement	
	10% Replacement	6
	20% Replacement	6
	30% Replacement	6
1		6
2		6
3		6
4		6

The test of between subject effects contains components of the CBR model that contribute to the variation in the dependent variable.

In the table of descriptive statistics (Table 8), N is the total sample size, being the number of test results. The average CBR is found to be 35.55054% while the average percentage of replacement is 2.50, representing 25% of replacement. Average number of blows is 2, representing 55 blows.

Table 8. Descriptive Statistics for California Bearing Ratio Test

	Mean	Std. Deviation	N
Value of California Bearing Ratio	35.55054	12.65441	24
Number of Blow (compaction effort)	2.00	0.83	24
Percentage of Replacement	2.50	1.14	24

The model summary (Table 9) indicates that the R is 0.467 and the adjusted R is 0.417. It can be concluded that the number of blows and the percentage replacement using reclaimed cement, explain about 41.7% to 46.7% of the variability of CBR values.

Table 9. Model Summary For California Bearing Ratio Test

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics					Durbin-Watson
					R Square Change	F Change	df	df	Sig. F Change	
1	0.684-a	0.467	0.417	9.66584	0.467	9.211	2	21	0.001	0.708

- a. Predictors: (Constant), Percentage of Replacement, Number of Blow (compaction effort)
- b. Dependent Variable: Value of California Bearing Ratio

From the ANOVA of CBR values (Table 10) below, we have the residual mean square value of 93.428. The square root of the residual mean square is the standard error of the estimate, which would be 9.6658, which measures the spread of the residuals about the fitted line. This value compares fairly.

Table 10. ANOVA for California Bearing Ratio Test

Model	Sum of Square	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	1721.089	2	860.544	8.211	0.001-a
Residual	1961.997	21	93.428		
Total	3683.085	23			

- a. Predictors: (Constant) Percentage of Replacement, Number of Blow (compaction effort)
- b. Dependent Variable: Value of California Bearing Ratio

In general, the equation for Multiple Linear Regression would be:

$$Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k + \epsilon$$

(equation 1)

Y is the dependent variable related to k independent variables and $\beta_0 \sim \beta_k$ are regression coefficients.

The least square function is given by:

$$L = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij})^2$$

(equation 2)

The least square estimates must satisfy:

$$\left(\frac{\partial L}{\partial \beta_0} \mid_{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij}) = 0 \right)$$

(equation 3)

and

$$\left(\frac{\partial L}{\partial \beta_j} \mid_{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij}) x_{ij} = 0 \right)$$

(equation 4)

j = 1, 2, ...k

The least square normal equations are:

$$n\beta_0 + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_{i1} + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_{i2} + \dots + \beta_k \sum_{i=1}^n x_{ik} = \sum_{i=1}^n y_i$$

$$\beta_0 \sum_{i=1}^n x_{i1} + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i2} + \dots + \beta_k \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{ik} = \sum_{i=1}^n x_{i1}y_i$$

$$\beta_0 \sum_{i=1}^n x_{ik} + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i1} + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i2} + \dots + \beta_k \sum_{i=1}^n x_{ik}^2 = \sum_{i=1}^n x_{ik}y_i$$

(equation 5)

The solution to the normal Equations are the least squares estimators of the regression coefficients.

For the coefficient of multiple determinations (R^2):

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_E}{SS_T}$$

(equation 6)

The adjusted R² is:

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SS_E/(n-p)}{SS_T/(n-1)}$$

(equation 7)

Table 11. Coefficients of California Bearing Ratio Test

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval			Correlations			Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound	Zero-order	Partial	Part	Tolerance	VIF	
(Constant)	34.866	6.835		5.101	0.000	20.652	49.080						
Number of Blow (compaction effort)	7.177	2.416	0.473	2.970	0.007	2.152	12.202	0.473	0.544	0.473	1.000	1.000	
Percentage of Replacement	5.468	1.765	-0.493	-3.098	0.005	-9.138	-1.798	-0.493	-0.560	-0.493	1.000	1.000	

a. Dependent Variable: Value of California Bearing Ratio

From the above table (Table 11) of coefficient for California Bearing Ratio tests with its residual statistics shown below (Table 12), it can be derived that:

$$\begin{aligned} \text{CBR values} \\ = 34.866 + 7.177 \text{ number of blow} \\ - 5.468 \text{ percentage of replacement} \end{aligned}$$

(equation 8)

Table 12. Residuals Statistics For California Bearing Ratio Test

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted	20.17169	50.92939	35.55054	8.65043	24
Residual	-19.2519	15.00743	2.96E-16	9.23603	24
Std. Predicted Value	-1.778	1.778	0.000	1.000	24
Std. Residual	-1.992	1.553	0.000	0.956	24

a. Dependent Variable: Value of California Bearing Ratio

This research continues to study the possibility of chemical grouting to improve and stabilize weak subgrades in order to mitigate soil liquefaction hazards. The soil grouting material from Japan was chosen for its function to improve weak soil profiles. For example, this grouting material was used for Seikan Tunnel (longest under-sea tunnel) soil improvement and water stop under more than 130 m of sea water level. In the 1970s it was imported to Taiwan for soil improvement at national project level. To study soil liquefaction potential of a construction site in Taiwan, the angle of friction (fi values) were measured before the soil is improved. Previous studies has shown an improved value of pi values, and this study would continue to convert this value into SPT-N, SPT, and CBR values, shown as below:

$$\log(\text{CBR}\%) = -5.15 + 6.55[\log(\text{SPT})]^{-0.26}$$

$$\log(\text{CBR}\%) = -5.15 + 6.55 \left[\log \left(\frac{304.8}{\text{SPT.N}} \right) \right]^{-0.26}$$

(equation 9)

For angular good gradation soil,

$$\phi = \sqrt{12\text{SPT.N}} + 25$$

$$\log(\text{CBR}\%) = -5.15 + 6.55 \left[\log \left(\frac{304.8}{\frac{(\phi-25)^2}{12}} \right) \right]^{-0.26}$$

(equation 10)

For circular good gradation or angular uniform gradation soil,

$$\phi = \sqrt{12\text{SPT.N}} + 20$$

$$\log(\text{CBR}\%) = -5.15 + 6.55 \left[\log \left(\frac{304.8}{\frac{(\phi-20)^2}{12}} \right) \right]^{-0.26}$$

(equation 11)

Table 13. The addition of soil improvement grouting material from Japan and the improved SPT-N and CBR values

	Fi (degree)	SPT-N ₂	SPT-N ₃	SPT ₂ (mm/blow)	SPT ₃ (mm/blow)	CBR ₂ (%)	CBR ₃ (%)
before	35.87	20.99	9.85	14.52	30.96	14.76	5.94
Soil grouting (1)	46.75	59.63	39.42	5.11	7.73	108.10	42.16
Soil grouting (2)	50.56	77.83	54.44	3.92	5.60	236.36	85.79

The above table (Table 13) compiles the effects of adding soil improvement grouting material from Japan to soil sample, with results from the previous conversion of Fi values to SPT-N and CBR values. From soil grouting formulation 1 to 2, CBR₃ values increase from 5.94% to 42.16% and 85.79%.

4. Discussion and conclusion

4.1. Results of Multiple Linear Regression for the California Bearing Ratio arrived at the equation below:

$$\begin{aligned} \text{CBR values} \\ = 34.866 + 7.177 \text{ number of blow} \\ - 5.468 \text{ percentage of replacement} \end{aligned}$$

(equation 8)

It is a relatively fair model to give a general description and possible prediction of CBR values in 25, 55, and 62 blows, with 10%, 20%, and 30% dosage of reclaimed cement.

4.2. Optimum dosage of reclaimed cement was found for models under 55 blows and 62 blows. Further data analysis was carried out, separating the models into two individual quadratic linear regressions (55 and 62 blows) and one linear regression model for 25 blows.

4.2.1. Quadratic linear regression for CBR values under 55 blows:

$$\text{CBR}\%_{55 \text{ blows}} = -397.21(p.r.)^2 + 84.608(p.r.) + 33.6$$

(equation 12)

To find maximum CBR% value and maximum percentage of replacement for specimen under 55 blows, we set the differentiation of CBR% to the percentage of replacement of reclaimed cement to be zero.

$$\frac{d(\text{CBR}\%_{55 \text{ blows}})}{d(p.r.)} = 0 = (2)(-397.21)(p.r._{max}) +$$

$$84.608$$

$$(p.r._{max}) = 10.65\%; \quad \text{CBR}\%_{55 \text{ blows max.}} = 38.165\%$$

4.2.2. Quadratic linear regression for CBR values under 62 blows:

$$\text{CBR}\%_{62 \text{ blows}} = -658.8(p.r.)^2 + 52.904(p.r.) + 59.401$$

(equation 13)

$$\frac{d(\text{CBR}\%_{62 \text{ blows}})}{d(p.r.)} = 0 = (2)(-658.8)(p.r._{max}) + 52.904$$

$$(p.r._{max}) = 4.015\%; \quad \text{CBR}\%_{62 \text{ blows max.}} = 60.966\%$$

4.2.3. Linear Regression for CBR values under 25 blows:

$$\text{CBR}\%_{25 \text{ blows}} = 15.257(p.r.) + 27.636$$

$$(equation 14) \quad (p.r._{max}) =$$

$$30\%; \quad \text{CBR}\%_{25 \text{ blows max.}} = 32.2131\%$$

Therefore from Figure 5, the optimum CBR value (60.966%) was achieved under compaction effort of 62 blows, with 4.015% replacement of reclaimed cement. For compaction effort of 55 blows, the highest CBR

value reached to 38.165% at 10.65% of replacment of reclaimed cement (Fig.5). The CBR values for compaction effort of 25 blows shows linear increase as percentage of replacement of reclaimed cement increases from 10% to 30%. The highest CBR value is 32.2131% at 30% replacement of reclaimed cement. These conclusions could be shown from the graph below (Fig. 5).

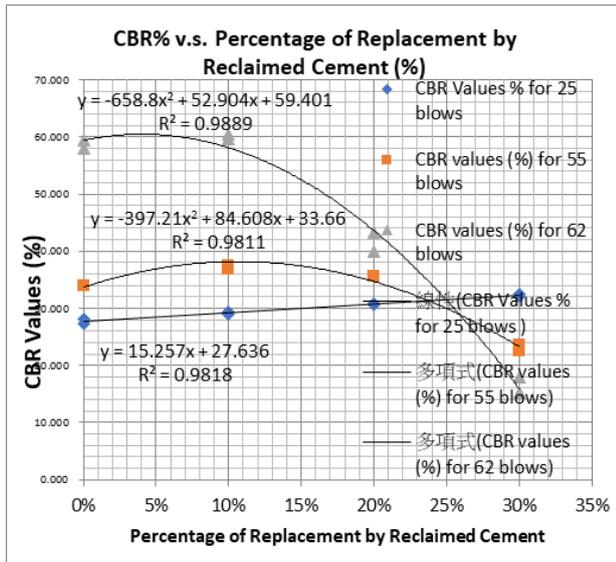


Figure 5. CBR values verses percentage of replacement by reclaimed cement under different levels of compaction efforts.

4.3. For soil grouting material from Japan using formulate 1 and 2, the SPT-N₃ increased from 9.85 to 39.42 and 54.44, resulting in the increase of CBR₃, from 5.94% to 42.16% and 85.79% respectively (Fig. 6). The results of CBR improvement using soil grouting material from Japan were plotted on the graph below, comparing to the CBR tests conducted in the experiment, with different levels of compactions and % of replacement by reclaimed cement.

4.4. The result shows that when soil grouting material from Japan is added, the CBR could be improved from 5.94% to 85.79%

for circular good gradation soil (Fig.6), without compaction efforts. In addition, the SPT-N value reached to 39-54, which could withstand earthquake up to 7.5 magnitudes with minimum liquefaction potential.

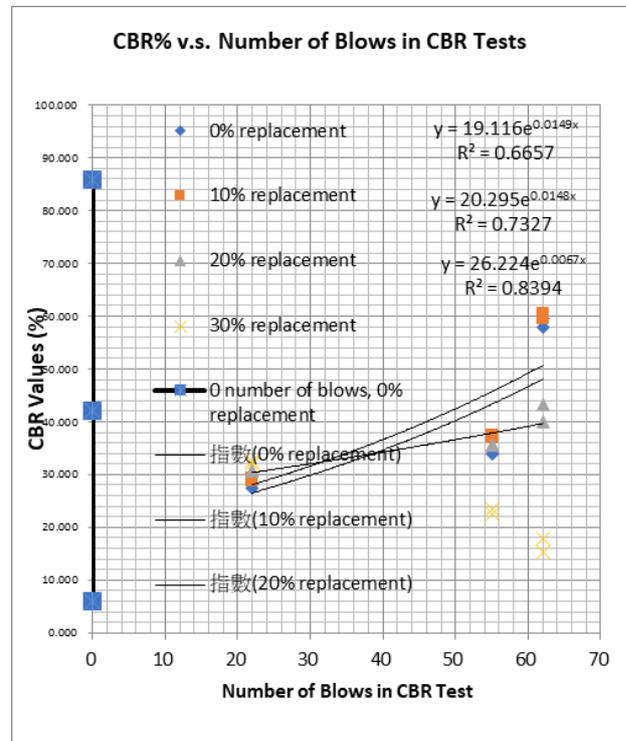


Figure 6. CBR values verses number of blows, with Soil Grouting Material improvement

4.5. Compaction effort would still be the second most influential factor for CBR values.

For 0%-20% replacement of reclaimed cement, the relationship of CBR v.s. Compaction effort (Fig.6) is:

$$(CBR)_{0\% \text{ replacement}} = 19.116e^{0.0149(\text{number of blows})} \quad R^2=0.6657 \quad (\text{equation 15})$$

$$(CBR)_{10\% \text{ replacement}} = 20.295e^{0.0148(\text{number of blows})} \quad R^2=0.7327 \quad (\text{equation 16})$$

$$(CBR)_{20\% \text{ replacement}} = 26.224e^{0.0067(\text{number of blows})} \quad R^2=0.8394$$

(equation 17)

It is noted that R^2 value increases when percentage of replacement (dosage) increases from 0% to 20%, indicating a better fit to the natural logarithm function.

Acknowledgement

We would like to thank Kuo Sen Enterprise, Denka (Japan), Denka Infrastructure Pte Ltd, Denka Construction Solutions, Singapore Polytechnics, National Nanyang Technological University (Singapore), National Chiao Tung University, National Taiwan University, New York State University, for their long-term support. We also want to thank individuals: Mr. Paul, Mr. Richard, Ms. Judy, Ms. Phenix, Ms. Vida for their support in the journey. Special thanks to Mr. Navy Shih-Huei Chen, consultant of Kuo Sen Enterprise, for guidance and innovative application of using soil grouting material. His 18-year support of soil and foundation research from Singapore to Taiwan is greatly appreciated. We also appreciate Ms. Fanny Shih for her long-term support of product features, marketing, and supply chain.. We would like to thank Mr. Keong in the assistance in the paper review, Mr. Yo-Lin Chen, for preparing part of the soil samples; Members of the Inner Mongolia Project Hope Program, and lastly but not the least, all the co-authors and Mr. Aaron and Mr. Michael from Kuo Sen Enterprise. Co., Ltd.

References

1. American Association of State Highway and Transportation Officials (1993) "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993".
2. Andrew Siegel, F., (1998) "Statistics and Data Analysis" Wiley.
3. Armando Orobio, John P. Zaniwski (2012) "Using the mechanistic-empirical pavement design guide for material selection" Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia.
4. ASTM D1557 Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Efforts.
5. ASTM D 2488 Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual - Manual Procedure).
6. BS 1377 Part 4:1990 Soils for Civil Engineering Purposes Part 4: Compaction related Tests.
7. BS 812: Part 2: 1995 Testing Aggregates Part 109: Methods for Determination of Moisture Content.
8. Brandt A. M. "Cement Based Composites Material: Mechanical Properties and Performance."
9. Clarke G.M. Statistics and Experimental Design
10. Chen, Yo-Ta (2001). "An experimental study on the behaviour of reclaimed cement waste." Civil Engineering Industrial Training Program, Singapore.
11. C.A. O'Flaherty (2002) "Highways: The location, design, construction & maintenance of pavements" Butterworth Heinemann, CRC Press.
12. Cooper, B.E., "Statistics for Experimentalists"
13. Chen, Yo-Ta (2005). "Materials for experimental soil mechanics laboratory study", State University of New York, USA.
14. Chen, Yo-Ta (2014). "Report on using soil grouting material from Japan to improve soil liquefaction of compacted soil."
15. Chen, Yo-Ta (2018). "Report on soil grouting material application in pavement subgrade"
16. Christina Siakati, Alexios P.Douvalis, Vincent Hallet, Arne Peys, Yiannis Pontikes (2021)"Influence of CaO/FeO ratio on the

- formation mechanism and properties of alkali-activated Fe-rich slags" *Cement and Concrete Research* Volume 146, August 2021, 106466.
17. David Croney and Paul Croney (1991) "The design and performance of road pavements" McGraw Hill Book Company.
 18. Dongshuai Hou, Qingrui Yang, Pan Wang, Zuquan Jin, Muhan Wang, Yue Zhang, Xinpeng Wang (2021) "Unraveling disadhesion mechanism of epoxy/CSH interface under aggressive conditions" *Cement and Concrete Research* Volume 146, August 2021, 106489.
 19. Fadi Althoey, Paul Stutzman, Michael Steiger, Yaghoob Farnamd (2021) "Thermo-chemo-mechanical understanding of damage development in porous cementitious materials exposed to sodium chloride under thermal cycling" *Cement and Concrete Research* Volume 147, September 2021, 106497.
 20. Geissdoerfer, Martin; Savaget, Paulo; Bocken, Nancy M. P.; Hultink, Erik Jan (2017). "The Circular Economy – A new sustainability paradigm?" *Journal of Cleaner Production*. 143: 757–768.
 21. Ian D. Walsh et al. (2011). "ICE manual of highway design and management" Institute of Civil Engineers" Institution of Civil Engineers.
 22. Maurice Villemagne, Yves Charonnat and Jean-Louis Nissoux.(1996), "Cement Concrete Pavements". Rotterdam ; Brookfield, Vt. . A.A. Balkema.
 23. M. Livneh and I. Ishai (1987). "The Relationship between SPT and InSitu CBR Values for Subgrades and Pavements in Arid Zones." Proc., 8th Asian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Kyoto.
 24. M. Mirsepahi, A. Nayeri, S. M. Mirhosseini & S. H. Lajevardi (2021) "Investigation of the Effects of Twin Tunneling on Ground Surface Settlement and Internal Forces of a Single Pile in 3D Analysis" *Soil Mechanics and Foundation Engineering* volume 58, pages63–70.
 25. Moshe Livneh (1989) "Validation of Correlations Between a Number of Penetration Tests and In Situ California Bearing Ratio Tests" *Transportation Research Record*.
 26. Keith Snook, Andy Turner, Ron Ridout, "Recycling Waste From the Construction Site."
 27. Yang, Nai C. (1972) "Design of Functional Pavements" McGraw Hill Book Company.
 28. Y. S. Kuo, I. C. Lee, G. G. Lin, J Lin, Benjamin Tsai, Navy Shih -Huei Chen (2015) "Preliminary Study of Strength and Mechanical Behavior of Quick Setting Cemented Sand" Taiwan Wind Power Conference.

【D】營建與交通

建築預鑄結構體吊裝過程施工現場危險因子與因子排除研究

張年成¹ 陳建元²

¹潤弘精密工程事業股份有限公司協理

²嘉義大學大學土木與水資源工程系教授

摘 要

預鑄工法於台灣建築業，已經普遍被接受且實施已久，且往往被認為盡管成本較高，但安全性亦更高。但是預鑄工法引入台灣已經數十年，為何施工意外仍然頻傳？什麼原因促使工地持續是為一高危險的場所？為理解此中之危險因子，本研究以建築吊裝現場之實務及其於工作現場之意外的發生、因應，以及安全之防範等做為研究標的，以訪談法及田野觀察法來獲得資料。研究結果得到三項結論：1.預鑄現場之意外肇因於經驗取勝與檢核未能落實，2.預鑄吊裝現場之意外與趕工關係密切，3.公共衛生與安全之集體性的輕忽致令公共意外頻傳。

關鍵字：預鑄工法、吊裝、意外、安全衛生、建築結構體、職業安全

A Study on Hazard Factors and Elimination Factors of the Construction Site - Take the Lifting Process of the Precast Structure of the Building as a Research Target

Chang Nian-Cheng¹ Chen Chien-Yuan²

¹Ruentex Engineering & Construction Co., Ltd.

²Corresponding Author, Department of Civil and Water Resources Engineering, National Chiayi University

ABSTRACT

In Taiwan, the precast construction method for building construction has been widely accepted and implemented for a decade. It is considered as a high cost and high safety building construction method in Taiwan. However, construction accidents during precast structure construction are still frequent. For the purpose of understanding the reasons causing high risk in the field during precast construction, this study focuses on the practices of building construction hoisting site and the occurrence of accidents in the workplace, as well as response and hazard prevention, as the research objects. The study methods include questionnaire of engineers and operators and field investigation for analysis. Results of the analysis show: (1) The accidents at the precast construction site depended on working experience of engineers and failure to carry out safety inspection. (2) The accidents at the precast hoisting site were closely related to rushing to work. (3) The collective negligence of public health and frequently safety causes public accidents.

Keywords: precast construction method, hoisting, accidents, health and safety, building structure, occupational safety

一、緣起

職業安全是為重要的勞動權，一則它會影響勞動的參與率；二則它的發生嚴重者可能影響到勞工無法再度回到職場，乃至一個家庭生計的維持。究諸產業，一旦職業災害不斷發生也勢必會影響及勞資關係的和諧，甚或對產業的發展亦會有所影響。

做為我國經濟發展的引擎，建築與營造業於台灣的產業經營始終長紅，但是其職業安全問題亦始終被人所注意，一提到營造業便直接聯想到職災意外與公安。加之 2020 年的新冠肺炎疫情盡管讓台商回流，啟動了建築產業。問題是缺工、缺料問題更加的嚴重。根據 2019 年度的職災年報，在製造業當中，主要災害類型為跌倒占 21.21%，被切、割、擦傷占 14.28%，被夾被捲占 13.25%，其他占 8.20%，不當動作占 6.17%，被撞占 6.04%，公路交通事故占 5.72%，與高溫、低溫之接觸占 5.14%。以營造業而言，主要之災害類型為墜落滾落、被夾被捲、跌倒、被切、割、擦傷、被撞、公路交通事故、物體飛落、物體倒塌崩塌、其他、與高溫低溫之接觸、衝撞、踩踏、感電、爆炸等(中華民國勞動部，2018)。而我國營建業職業災害數量，又位居各項產業之首(蘇南、卓冠瑜，2016)。而 2016 年來說，營造業死亡千人率為 0.096，製造業則為 0.030，營造業死亡千人率為製造業的 3.2 倍；常見職災為勞工在建築工程進行的時候，因為由高處墜落而受傷或死亡(李雅雯，2018)。

一般傳統鋼筋混凝土建築物，容易發生自重過大、跨度小、容易產生裂縫、施工期長，在高樓建築物上有鋼筋組立、混凝土澆置作業困難等問題(黃建勳，2005)。預鑄工法(Precast Concrete, PC)有效的克服了這些問題。它的施工，事先將柱、梁、版、牆等結構構件，在工廠模矩化生產，等待養護完成後運送至工地吊裝接合，免去現場模版支撐以及養護時間，並且不受天候影響，可大幅縮短工期及確保混凝土強度品質(尹衍樑，2002，尹衍樑等，2002，2005，2007)，且於施工現場而言，預鑄構件又有自重輕、斷面小、跨度大、

施工期短等優點(黃建勳，2005)。另外根據黃建勳(2005)之實證研究，以梁柱而言，傳統接頭的能量消散後，大部分由梁塑鉸到達塑性後來承受，而黃建勳之實驗利用預力及梁柱打開機制後，使得加入的消能板能夠充分消散能量，大部分變形由消能板來承受，使梁、柱沒有嚴重的破壞情況(黃建勳，2005)。這些在在顯示出預鑄工法於施工上並呈現於工程成果的優勢，因而被普遍運用，以致預鑄廠不斷設立，成為建築營造業的一環。預鑄工法之運用，如湛曉威(2019)之實證研究以台中某商場建物由常見的鋼筋混凝土構造施工建案改成以預鑄工法施工為例，藉由建築物的生命週期評估 LCA (Life Cycle Assessment)的架構，以企業到企業(B to B)範疇，從材料取得階段、生產製造階段、成品運輸階段等過程的碳排放盤查評估，結果發現不僅可提供建築規劃從業人員，在建築設計階段進行減碳作業，亦可估算預鑄工法建築物對地球環境之衝擊程度，進而將評估結果反饋至建築設計上，以提供設計者進行綠建築與低環境衝擊。這項實證研究顯示出預鑄工法之改良，亦符合綠色的普世價值。在環保當道的 21 世紀，係屬於一相對容易被接受的工法。

究諸缺工問題始終無法解決，加上施工工場之職安問題倍受重視，另且我國對建築物的要求已經由早期的工具化的結構強壯、堅固等，提升成為美學之講究並具產能時效性等高科技的廠房(尹衍樑等，2002，2004)。也因此預鑄工法委實給予建築施工的另一項於時間、施工都更加具有自主性的選擇。施工迅速、品質穩定，同時其防火性能及成本效益亦較鋼結構為佳，在吊裝高樓層結構時，也可同步進行低樓層之裝修工程，將原先垂直生產流程水平化。

根據戴興瑋(2016)對台灣知名預鑄廠商所進行之資料蒐集，過去 10 年的專案結構體構件生產資料，共達 772,212 筆巨量之生產資料，這些資料內容主要為中大型且為多元化建築專案，並擴及各個生產工序的時間紀錄與工項的特質。顯見即或預鑄工法之實施成

本相對來得高，但是建築結構體以預鑄來進行已經普遍被接受，唯以預鑄工法的進行來說，以勞動部職業災害統計資料所顯示的，在施工現場之結構體吊裝過程，有哪些因素最容易形成施工安全的問題？在施工現場會影響吊裝之品質之因素又有哪些？可以如何改善？以致令預鑄工法之進行能夠得到更高品質的施工品質？並落實預鑄工法較諸傳統施工更為安全一說，這些都是本研究進行的動機。

根據鄭慶武等(2018)之研究，於營造工地現場進行勞工作業行為觀察活動，透過BBS-APP（應用手持裝置應用程式開發(Application)，將行為安全(Behavior-Based Safety, BBS)觀念，於營造工地現場進行勞工作業行為觀察活動)導入累計大量觀察紀錄，發現可歸納出勞工不安全行為模式，及作業程序不安全狀況兩大類。而以此紀錄顯示出不安全模式是可以透過勞工的行為管理並作業程序之改善，而降低不安全行為的發生。本研究旨在探討建築預鑄結構體在吊裝上的施工品質與施工現場的安全，以下歸納為兩項研究目的：

1. 了解影響建築預鑄結構體於施工現場進行吊裝時容易產生職業災害的原因。
2. 歸納能夠降低建築預鑄結構體進行吊裝之職業災害之產生的因素與作為。

二、研究設計

本研究之設計，基於建築預鑄工法目前已經是我國建築業及土木工程的主流，且其有別於傳統工法，能夠減少施工意外，亦有頗多學界的研究成果在支撐。但是工作現場仍然不乏意外事件，特別是結構體吊裝更是最容易發生意外的過程。

基於這樣的研究目的與思考上，希望能著重於現場施工人員的深入觀察，這使得本研究無法使用工程界研究普遍的演算或量化，而以訪談法來攫取資料。也為了訪談資料的信效度的考量，因此在受訪者的選擇上，強調其經驗以及所對工程界並建築業界的投入，資料取得的來源亦即是本研究對受訪者條件

篩選的結果。

1 文獻分析法

文獻分析法(Document Analysis)，是以系統而客觀的界定、評鑒，並綜括證明的方法。研究者根據一定的研究目的或是課題，透過搜集有關資訊、調查報告乃至期刊論文等文獻資料，從而全面地、正確地掌握所要研究問題的一種方法，搜集內容儘量要求豐富及廣博；再將四處收集來的資料，經過分析後歸納統整，再分析事件淵源、原因、背景、影響及其意義等。研究者經由對現有學界與工程業的資料進行蒐集、檢驗與分析後，便可以從瞭解、重建過去所獲致的結論中，解釋社會現象的現況，甚至預測將來之發展(葉至誠，2008)。

本研究以預鑄工法之引進與產業使用現況做為文獻蒐集的核心；同時因著於施工現場的觀察，也對職業災害的發生極感到有研究的必要性，因此營造業的職業災害發生原因以及相關因應對策也是資料蒐集的重點。

2 訪談法

訪談屬於「研究行為」(research acts)，而非一般以社交或溝通目的進行的「對話」或溝通。訪談法的進行必須具有明確的目的且內容與歷程，過程安排必須經過有意識的安排與控制；在進行的過程中，由於「訪問者」向被訪談者汲取訊息，因此兩者之間的關係是不對等的，同時這種關係，是雙方均默認接受的(Kadushin, 1990)。

在進行的方法與類型上，訪談者詢問受訪者事先設計好的問題，以獲得與研究假設有關於的答案，其方式有三種。

- (1) 結構化排程訪談：對每個受訪者而言，問題的措辭、順序都是固定與相同的，以確保任何回答的差異，可歸因於受訪者之實際的差異，而非訪談的差異。
- (2) 半結構式訪談：依據訪談指導原則，所定與研究假設相關主題，給予受訪者相當程度的自由，來表達他們的觀點。
- (3) 非指導性訪談：最不結構化的，沒有採用任何事先指定的問題組合，訪談者有極

大的自由來探問各種領域，並且在訪談中提出特定的問題。

3 資料蒐集

本研究之資料取得來源，以資深的預鑄廠與施工現場之監工或實際操作工作人員為訪談對象(表 1)。考慮及其能夠提供的資料的豐富性與具有經驗值，本研究規範受訪者的條件有三：

- (一)語言表達流暢；
- (二)對預鑄結構體的吊裝現場有深入觀察者。
- (三)對營造業的職業災害問題感到興趣並且樂於協助提供經驗者。

研究先形成了受訪者的初步名單，並編定各受訪者代碼；接著除了受訪者的資歷豐厚以求得汲取其經驗之外，又希望受訪者的背景能夠普遍化，以涵括管理階層到現場施工之管理者盡皆都有。

表 1 研究受訪者相關背景與代碼一覽表

受訪者	代號	職稱	履歷	年齡	備註
莫惟瀚	M	總經理	台灣高鐵、廣輝、群創、台積電等廠房。	68 歲	30 年以上相關經歷(潤弘精密工程總經理)
徐坤榮	S	副總	奇美電子、群創光電、宜蘭眷改、台積電等。	58 歲	30 年以上相關經歷(曾經遭遇施工人員現場墜樓)
林國峰	L	副總	高速公路預鑄箱型樑、高鐵 C260 全跨預鑄箱型樑、台北聽奧體育場預鑄看台板、群創 T2 預鑄樑及柱、寶德能源預鑄樑及柱、懷來酒廠預鑄外牆板。	65 歲	30 年以上相關經歷。
吳浩仁	W	經理	奇美 6 廠、台北體育場、福聚太陽能廠、台大竹北產	40 歲	17 年左右相關經歷

			學大樓、宜蘭眷村國宅案、台中 IKEA 新建工程、礁溪旅館新建工程。		
游士賢	Y	副理	群創、美光、台積電、寶德等	41 歲	15 年左右相關經歷
林建宏	L2	襄理	竹北產學、群創光電、桃園 IKEA、台積電等。		11 年左右相關經歷 (剪力牆混凝土澆置作業，模板爆模導致施工架倒塌產生一名勞工受傷；樓版鋼承版鋪設，因混凝土澆置作業產生鋼承版掉落之虛驚事故；鋼構電鍍作業產生火災之虛驚事故)
鐘榮家	C	專案主任	鋼筋、模板、混凝土工程、泥作工程等。	42 歲	11 年左右相關經歷
林憲忠	L3	主任	100 年迄今：潤弘精密工程事業股份有限公司、寶德能源科彰濱土建工程、台中向上商場新建工程、富村冷凍台中廠、晟田建設土城案、台積電 F15P5、P6 FAB 預鑄工程、汶山溫泉飯店新建工程、台積電 F18P1、P2 FAB 預鑄工程、青昇段商場新建工程、台積電		6 年左右相關經歷

			F18P4 FAB 預鑄工程		
陳佑璋	C3	主任	寶德、IKEA、台積電等	36歲	6 年左右相關經歷(工地內台電外管線開挖擋土措施未依正確程序確實固定時，人員貪圖速度即開始作業，但天雨擋土措施崩塌，導致作業人員被擋土鐵板夾死)
黃郁仁	H	主任	場鑄、品管	37歲	9 年左右相關經歷

本研究之流程依序為確立研究動機目的、相關文獻回顧、田野資料蒐集、資料處理與探勘、工地現場觀察、結論彙整與解釋、依據本研究的實證結果提出結論與建議。

4 訪問題綱設計

受訪者確定後，於題綱設計分兩部份。首先是受訪者個別資料部份。分成姓名、代號、性別、年齡、職稱、施工現場相關經驗、歷經重大職業災害事件等，主要用來掌握受訪者於相關產業的個人經驗，也是用來過濾受訪者選擇的條件的。另一部份針對研究目的而設計訪談題目如表 2。

表 2 施工現場危險因子與因子排除研究訪談題綱設計

排序	向度	題目
1	成因	1.預鑄建築體吊裝過程，大抵如何操作？可以分為幾個步驟？
		2.請問您的觀察預鑄建築體吊裝過程最容易出現哪些災害或意外？為何會發生？您的經驗中大抵是哪些意外類型？
		3.按您的經驗預鑄建築體吊裝過程的意外或災害有比其他施工過程多嗎？原因在哪裡？
2	因應	1.意外發生時如何因應？
		2.您認為應如何因應預鑄建築體吊裝過程的意外或職業災害？

		3.您的經驗中的因應之道，想要落實並預防災害的困難的原因何在？
3	因子排除	1.依您的見解要克服哪些困難，這些有關預鑄建築體吊裝過程的職業災害才能降低？

三、國內預鑄工法與管理現況

3-1 預鑄工法與生產管理

預鑄建築工法是經由預先精密規劃與設計，將主體建築物分割成許多規格化的單元構件，如樑、柱、牆版等，其建築構件於工廠製造完成後，然後運送至工地進行吊裝與組裝作業(王維志等, 2004)。故預鑄工法可謂之為工廠化的建築。目前預鑄單元也由前期之預鑄帷幕牆，增加到柱、梁、樓版及陽台等多樣化的形式。預鑄生產廠主要的業務性質為生產規劃、構件製造及儲運作業等類型(戴興璋, 2016)，將各式結構體分別加以規格式製造，廠商可視建築物的需要訂製或選取。

工地現場只剩下構件組立、鋼筋續接，以及非常有限的混凝土澆置等工作項目，可說是將現場工作量降至最低，而在工廠中生產預鑄構件，則可大量使用機械、吊重設備，人力、時間都可大幅降低。而因著預鑄工法之使用而形成的生產模式，可概分為固定生產位置之全能工班(Comprehensive Method)生產模式與流程型(Flow Shop)移動生產線的專業工班(Specialized Method)生產型式。另又可因應所生產的結構體而劃分為標準品的長線生產(Long Line Production)與專案特殊規格的短線生產(Short Line Production)(Chan and Hu, 2001)。

如此於建築產業形成了一種上下游供應鏈的模式，預鑄廠成為建築業之上游供應商之一。而其所規格化生產之結構體則成為一種供選用訂製之產品。使得建築產業經由分階段的管控，品質可以被要求；且成本亦相對容易被掌握。

預鑄工法之實施之優勢並非管理層面之利潤提高，事實上是相對於傳統現場施工與成本並利潤為基準點來看，Chan and Hao (2002)則分析研究有關預鑄建築專案供應鏈管理實際情形，結果顯示有百分之九十五以

上的總承包商的專案經理認定，十件預鑄專案中有兩件以上因預鑄構件供應問題而造成工程延誤，另有預鑄構件生產品質不佳、構件損壞，或供應數量不正確、生產延宕等原因而影響施工進度的狀況也時常發生。以職業災害或意外之發生而言，毋寧它亦有著努力並改善的空間。根據沈育霖等人(2013)之研究，該研究針對橋梁工程預鑄預力節塊吊裝工法進行探討，發現 2011 年在橋梁工程 C910 標發生，該事故肇因於工作車推進時，發生節塊吊裝工作車支腿掉落情形，而設備維護與操作不當是為發生之主因。

3-2 預鑄結構體吊裝流程

預鑄工法因為工程種類不同所造成風險亦不同。預鑄工程類型茲有以下幾類。

(一)土木工程預鑄:例如預鑄節塊推進或是全跨預鑄工法，大多使用於橋樑工程，另外隧道工程預鑄環片，也是預鑄在土木工程中的運用。

(二)雜項工程預鑄:例如預鑄水溝、陰井、線槽蓋板、座椅等多運用在附屬工程。

(三)建築結構體預鑄:建築物之柱、牆、梁、版等，會先於工廠預鑄，到了建築現場方才進行組裝。視工程大小及進行之目的而有所差異，但預鑄工法之採取，基本上都是將建築結構體於預鑄廠事先預鑄之後，再載到施工現場來安裝。也因此就現場施工而言，未及於結構體之產出，而主要在於結構體之吊裝與施工以使得就定位，而於施工現場之職業災害的發生，即在於吊裝、施工以就定位這部份的工程。

預鑄結構體的吊裝流程，依建築結構以及工程內容而有所不同，以作者之工程實務，按柱與梁的吊裝如圖 1 所示。

3-3 柱與梁吊裝作業流程與工作重點

預鑄預力節塊吊裝施工時於節塊預鑄、臨時支撐塔架與支撐鋼樑桁架設置、節塊吊裝與前移，乃至於設備拆除過程皆可能因人員、設備與管理因素而發生人員受傷，首先預鑄預力節塊吊裝施工，包括許多高空作業，如於預鑄場作業、安置臨時支撐塔架、節塊

移動等，因此可能因施工失慎、安全措施不良等因素發生人員墜落，而致人員傷亡(勞動安全及安全衛生研究所，2014)。其次，預鑄預力節塊吊裝施工過程中，可能因施工不當、支撐失敗、預力破壞等因素而致系統模板、臨時支撐塔架與支撐鋼樑桁架倒塌，造成下方之人員之傷亡。第三，預鑄預力節塊吊裝施工過程中，可能因吊放節塊之鋼筋籠、臨時支撐塔架、支撐鋼樑桁架、混凝土節塊、與橋面作業等因施工失慎、安全措施不良或鋼纜強度不足等因素發生物體飛落，而導致下方之人員之傷亡(勞動安全及安全衛生研究所，2014)。在施工現場可看到嚴格的規範與施作細節的堅持，並依需要以專業工法進行。

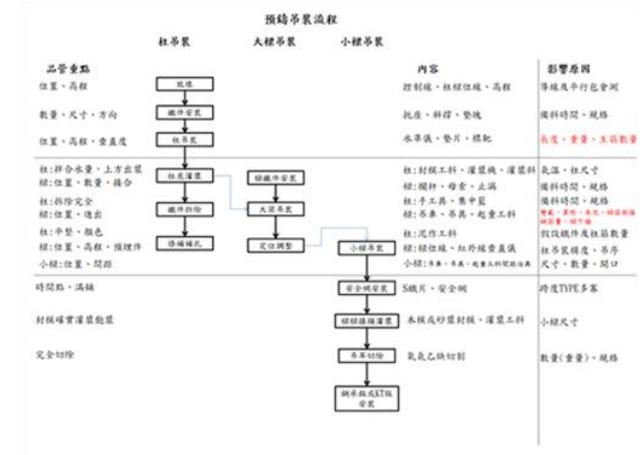


圖 1 預鑄吊裝流程圖

吊裝作業之進行的基本步驟是為：用吊車或天車吊至板車上，運送至工地，到工地後再以吊車下至地面，準備動作完成後，再以吊車起吊至建築物正確位置後，定位完成後再將鋼鎖解開，再吊另一預鑄構件(S)。也因此並不是一種連續的動作，而是經由工作的架接，而自動形成了分工的態勢。而按施工實務的流程，基本上有：1.柱主筋於基礎版預埋，2.基礎灌漿前柱筋定，3.基礎灌漿，4.灌漿後柱底高程檢測，5.柱底墊片設置，6.預鑄柱吊裝，7.柱斜撐組立，8.柱垂直度調整，9.柱底墊片填塞，10.吊裝完成脫鉤，11.柱底封膜，12.柱底無收縮灌漿(W)。

至於主要步驟依照結構體而有差異：

1. 柱吊裝(圖 2)→a.進料整備(零附件安裝)b.測量放樣，出筋修整 c.柱吊裝，斜撐固定

調整 d.柱垂直度調整查驗 e.柱底灌漿。

2. 大樑吊裝(圖 3)→a.進料整備 b.測量放樣 c.大樑吊裝 d.調整校正。小樑步驟同大樑。
3. 版吊裝→a.進料整備 b.放樣 c.版吊裝 d.支撐固定 e.調整(M)。



圖 2 柱預鑄吊裝



圖 3 樑預鑄吊裝

每個階段必須按專業進行，各個階段均有要留意的細則與實務，如資深土木工程師所提及的：

1. 建築結構在鋼筋綁紮前即需測量定位。
2. 版混凝土澆置後，需作柱位放樣、柱頭清理、及高程墊片調整高程。
3. 柱吊裝後要以斜撐固定及調整垂直。
4. 柱無收縮水泥灌漿。
5. 樑吊裝前，托架或支撐架要先架好，再進行樑吊裝，後續進行 DECK 鋪設、鋼筋綁紮、版混凝土澆置(L)。

另外亦有資深工程人員表示：

1. 基礎位置放樣：於 PC 面上放樣結構柱位

置、高程(Y)。

2. 預鑄柱基礎預埋：預埋柱基礎鋼筋、調整預埋鋼筋絕對位置、調整預埋鋼筋高程(Y)。
3. 結構體放樣：基礎版灌將完成後，放樣結構柱、梁位置，以供後續預鑄構件吊裝時校準用(Y)。
4. 預鑄結構體吊裝：依照預鑄柱、預鑄大梁吊裝、預柱小梁、預鑄版順序吊裝；預鑄柱吊裝時需校準位置與垂直度；預鑄大、小梁依照梁位線吊裝，如有預埋吊軌則亦需校準吊軌位置；預鑄版吊裝需跨入大小梁深度進行調整位置，如有預埋吊軌則亦需校準吊軌位置(Y)。

3-4 施工現場之意外與成因

以工地之形成的特性而言，基本上它是於營造業進行時，一個以工程之需要而形成的暫時過度性環境。正因為其暫時性的特色，以致於許多軟硬體都因應本特色而設立。以硬體而言，台灣之公共工程，大多開山闢嶺、搭橋鋪路，由於地處偏遠，往往因簡就陋，包括以簡便式的工寮提供工作人員居住，究諸其功能只能夠滿足基本的吃、睡等生活需求。大型營造工程之外，另有部份建築業是為從事建築業之營造、修繕及房屋設備安裝等。工作地點大多為民眾聚居之市區或者鄉鎮，人來人往的，施工現場更是盡可能的窄縮，能夠隨即拆卸為佳。其次是人員的組成，在經濟能量的推升之下，產業火紅，經常趕工；往往輪流由幾個工班輪替。以強調專業並施工之縝密的預鑄工法而言，每個工班之熟稔度又如何能一致？加上趕工，於實務進行，無疑是壓縮了個別工程與施工所分配到的時間。甚且人員亦對各式規範之防護措施因著沒時間而「嫌麻煩」，往往憑藉個別經驗而隨意處理。現場督工亦在趕工的狀況下，任由工班便宜行事。種種施工現場之複和性因子摻雜，使得建築業與營造工程同列於我國職業災害最多的行業之一。何況若事涉公共工程，由於連動著國家總體發展，更是備受社會大眾的矚目。一旦出現工安意外，對總體產業之社會觀瞻影響甚鉅。理解職業災害發

生之原因並加以規範，固然對員工之生命安全有著重要的關連，同時也能夠讓更多年輕人放心的投入。

以 2015 年台中捷運所發生的重大工安事故為例，該工程是於作業中吊掛鋼樑突然掉落地面，使得用路人及轎車因重力而壓扁，同時現場工人也 4 死 4 傷。經事發後檢討，發現是為現場指揮人員、吊裝作業人員所造成的疏失。

除了重大工程之外，接近私人性質的建築業，意外頻傳。但終究不過是社會新聞的一條，很快便消失。筆者以隨機取樣方式，由網路媒體選取發生之案件，來歸納意外發生的原因。以發生於 2020 年 9 月 14 日之台北市松山區光復北路的施工意外為例，主要是工人在外牆施工時，由八樓高樓墜落，該名男子雖然身上綁著安全繩，但疑似繩索斷裂、鬆脫導致墜落，而喪命。更前一個多月，2020 年 7 月 30 日時，則有位於高雄捷運文化中心的大樓整建工地，2 名工人在拆牆時遭崩落的樓牆壓傷。

大樓之外，由政府監造的大型建案亦同樣發生。2017 年 3 月 21 日，屬於台北市政府的一處位於木柵路二段的公營住宅，當頂樓起重機正在吊掛鋼筋時，鋼索突然斷裂，吊鉤及鋼筋整個掉下，砸中下方的貨車司機。至於 2016 年 5 月 4 日，台積電位於中科科園路的擴建廠房，發生一起工人從高處墜落的意外，發生主要因工人未按標準程序作業導致意外發生。

這些案例比對於勞動部分析 2018 年重大職災發生原因，以不安全動作與設備(佔 51%)居首；其次為不安全設備(19%)；第三原因為不安全動作(16%)；第四原因為不明。至於 2014 年勞動部勞工保險局針對台灣各縣市歷年重大職災進行統計，以工程施工常見的墜落而言，有三成以上的墜落案件起因於不足夠、不恰當，甚至是遭受任意移除的施工安全防墜措施。由這些統計數字與歸因，可知這些職業災害大多出於人為操作之不安全動作與設備，既曰不安全，則意味著可以使之安全，換句話說是可以經由人們的「動

作」或規範，來事先進行預防的。

四、結果與討論

4-1 吊裝過程職業災害發生類型

有關建築預鑄結構體於施工現場進行吊裝產生的職業災害，茲接受訪者之訪談內容分述如下：

1. 較易出現的災害與意外為：夾傷、撞傷、跌倒、墜落(Y)
2. 最易發生的意外為物體掉落，壓傷及推傷(W)。
3. 施工中最容易發生的意外為遭物體夾傷(Y)。
4. 吊掛物墜落、構件倒塌、鷹架倒塌(H)
5. 吊裝過程最容易出現墜落、倒塌、壓傷等災害或意外(L)。
6. 物體飛落，被撞，被夾、被捲(L3)。
7. 物體飛落:高處作業手工具未使用失手繩、零星五金未以適當容器放置
8. 被撞:機械碰撞(L3)
9. 被夾、被捲:預鑄構件放置徒手未配合適當工具造成夾傷(L3)。
10. 物體飛落、被夾、被捲(L3)。

4-2 吊裝過程職業災害產生的原因

至於其發生的原因，茲分述如下。

1. 物體掉落類

此是為進行吊裝之時產生的意外，對照學界所發表之文獻，首先預鑄預力節塊吊裝施工過程的意外事件，包括許多高空作業，如於預鑄場作業、安置臨時支撐塔架、節塊移動等，因此可能因施工失慎、安全措施不良等因素發生人員墜落，而致人員傷亡等(勞動安全及安全衛生研究所，2014):

- (1) 物體掉落的原因主要可能為鋼索斷裂，吊具損壞，吊點損壞，吊車故障，吊車傾倒，吊裝方式錯誤等等(W)。
- (2) 掉落→a.吊車能量不足 b.吊具承重不足 c.吊具損壞 d.吊具固定不良 e.碰撞(M)。
- (3) 墜落→a.不安全的環境 b.不安全的行為 c.未使用個人防護具(M)。
- (4) 倒塌→a.支撐架能量不足或損壞 b.碰撞 c.

地震 d.托架或配件損壞(M)。

- (5) 吊掛物墜落:吊鉤之防止脫落裝置防滑舌片未安裝、鋼索斷裂。

2.構件倒塌

此是發生於工地現場的相關硬體的問題。預鑄預力節塊吊裝施工過程中，也可能因吊放節塊之鋼筋籠、臨時支撐塔架、支撐鋼樑桁架、混凝土節塊、與橋面作業等因施工失慎、安全措施不良或鋼纜強度不足等因素發生物體飛落，而導致下方之人員之傷亡(勞動安全及安全衛生研究所，2014)。因此在施工現場可看到嚴格的規範與施作細節的堅持。並依需要以專業工法進行。構件倒塌包括：

- (1) 構件倒塌:重架或角拖支撐不足
- (2) 鷹架倒塌:吊掛作業中鋼索碰撞到鷹架
- (3) 其他意外:這是屬於操作過程的不慎引起。

3.感電事故:地上積水電線未架高

4.火災:氧乙炔熔接或電銲施工時易因火花飛濺引燃易燃物品如有機溶劑、泡棉、木材及電線等易燃物旁(H)

歸納上述發生的原因與現象，主要來自結構體吊裝而可能夾帶之物體掉落或者連帶使得周邊物品倒塌、遭到撞擊，以致於發生於短時間內無法防範的事故，進而影響到施工現場的安全與人員性命的傷害。再對應陳信睿[32]以柏拉圖分析針對近年來重大營造業職災資料，所進行的探究，發現所有災害類型裡墜落事件占了 657 件(63%)、物體倒崩塌 98 件(9%)、感電事件則有 51 件(8%)高於其他災害類型。接著，以此三種重大職災害類型之媒介物做單因子變異數分析，發現容易發生墜落之媒介物為開口部分、倒崩塌之媒介物為營建物、感電之媒介物為輸配電線路。這樣的研究成果亦與本研究之結果極為接近，最主要在於工地現場人為或者環境硬體之不夠牢固，而使得意外有了發生的機會。

4-3 吊裝過程職業災害之產生與原因歸類

以下茲以現場經驗的狀況來歸納這些意外災害之產生的原因。

1.施工現場人員導致因素

這些因素主要來自人為之操作。歸納受訪者的觀點如下：

- (1) 台灣現有營造生態層層分包，缺乏垂直整合，包商往往為了利潤及遷就既有工、料，沒有改善及提升的動力(M)。
- (2) 案場啟動前置時間不足，倉促上場，尤其近來缺工嚴重，從業人員訓練不足也是原因(M)。

在層層分包之下，往往到達工程人員之手時，已經工程延宕甚或必須於一定時間之內完成，按我國的工程趕工幾乎成為一種正常的現象。以致於往往如下所談到的：

- (1) 工進時程緊迫(C3)。
- (2) 工人缺乏安衛意識，工期太趕，無合理的工期(L)
- (3) 安全防護措施未落實(C3)。
- (4) 工人受傷：起吊時人員未做好正確的防護(S)
- (5) 施工時作業人員未專注於正在進行的作業項目(Y)
- (6) 吊裝時人員會有高架作業，防護不足，會有墜落風險(L)。
- (7) DECK 鋪設時，人員為高架作業，有墜落風險(L)。
- (8) 吊裝時因要調整構件到正確位置，人員太靠近構件，易發生壓傷風險(L)。
- (9) 施工人員墜落，安全防護具使用不當及吊掛指揮手和操作手配合狀態不佳(吊舉物旋轉速度控制不當)(L2)
- (10) 施工時作業人員未確實配戴個人防護具(Y)
- (11) 墜落，人員於高處協助預鑄柱及樑吊掛或脫鉤時，人員未確實使用個人防護用具(安全帶)(C3)。

上述之歸因主要是因為作業人員未配戴防護具以及安全意識未足所致。由上述之訪談顯示出對現場人員安全的危害，而未依標準作業程序進行施工(Y)，外加上未能穿戴個人的防護用具，以致於現場工作人員身體暴露在危險當中，加上又忽略了原先規範的防

護，使得危險產生的機率，格外加倍。以致於一旦發生碰撞即可能個人的安全受到威脅。而這樣導因於人為因子的出現，根據受訪者的觀察，與現場工作的習慣與因循有關。

作業人員貪圖一時方便(C3)，一時方便的思維主要是圖方便，而未認知是與自己的安全切身相關。也因著一時方便之感受與經驗，使得下次再遇到同樣的事件時，依然認定「方便」行事所獲得的便利與效率，而忽略了機率之存在，本身就存在著非必然性，但是意外出現的風險卻是無法評估卻也具體存在的。這特別是發生在具有一定現場經驗的工人身上。他們儘管受到監督、但是事實上卻有著自行處理的空間。以致於意外的發生，無法藉由現場監工或工程師的監督，來絕對的達到防範的目的。

- (1) 工人常會輕忽不安全行為，總認為以前沒事現在就沒事，人員遵守規定部份較容易被輕忽(S)
- (2) 施工人員有時存僥倖心態，未確實配待個人防護具，因此在意外發生時無法保護施工人員，或在施工流程中為圖方便，並未依照標準作業程序執行預鑄吊裝作業(Y)。

上述輕忽與僥倖心態形成了現場意外出現的人為因子。本段研究歸納可以對照沈育霖等人(2013)之研究，他們對橋梁工程預鑄預力節塊吊裝工法進行探討時，即發現 2011 年在橋梁工程 C910 標發生，該事故肇因於工作車推進時，發生節塊吊裝工作車支腿掉落情形，而設備維護與操作不當是為發生之主因。其中操作不當可說與人為脫離不了關係。至於設備維護不當則係屬於硬體設備方面的檢核的落實。

2. 施工現場硬體設備相關因素

有一些意外的出現，與硬體與設備有關。其成因首先在於老舊，未能及時更新。以致於出現意外，包括：

- (1) Wire 斷裂：用不合格 Wire 或老舊 Wire(S)。
- (2) 吊車傾倒：超載或吊車位置基礎強度不足(S)
- (3) 預鑄構件掉落：吊裝鐵件預埋不確實或吊

具規格不符(S)

- (4) a. 吊具損壞或是不正確的吊掛方式，吊掛手指揮不當造成碰撞掉落 b. 未穿著安全帶勾掛於穩固之物體(C)
- (5) 支撐架倒塌，應對支撐架進行結構計算外；於預鑄構件安裝前須確實檢查支撐架之支撐位置、支撐架是否歪斜、地面承载力及平整度是否無虞(L2)
- (6) 鋼筋倒塌，基礎版工作筋(馬椅)遭切除，以致上層版筋倒塌。基礎版鋼筋綁紮前細整地及 PC 高程需進行管控，以減少工作筋(馬椅)切除降高程之問題(L2)

硬體設備是否老舊？委實涉及相當多的因素，包括環境濕度、通風或者日常的保養等。但是定期觀察維修，卻是必要的舉措，以硬體相關設備之因子而導致意外的產生，基本上必須去回溯是否落實定時的檢核。其次則是導因於與預鑄結構工法的特殊性。特別是出現於結構體由預鑄廠運送到工地要進行吊裝的過程。首先是為與固定是否完備落實。

預鑄構件運輸過程，因固定不實，在車輛轉彎時，易發生構件掉落(L)。其次是發生於吊掛過程：

- (1) 預鑄吊裝時，因吊索斷裂，造成構件掉落意外(L)。
- (2) 吊裝過程如遇地震，組裝好之構件有倒塌風險(L)。
- (3) 預鑄工期每層工期短，安全措施若於設計未考慮完整，容易產生空窗期，安全措施吊裝後不易施工(S)
- (4) 物體飛落，吊舉物物料未確實細綁。主要發生於鋼筋或模版散料吊掛，須採取吊籠、太空包(符合強度需求)、保鮮膜包覆等(L2)
- (5) 物體飛落，預鑄構件未承做於有效之承面上；鋼索及吊具能量不足或以產生降伏狀態，需定期更換相關吊具以降低風險(L2)
- (6) 被撞，吊掛範圍未確實管制&吊掛過程未確實拉設牽引繩控制(C3)。
- (7) 物體飛落，吊掛物上方螺絲等零件類未確實移除及執行吊掛作業(C3)。

吊索斷裂以及吊掛物體飛落等，歸納共有

三項。還有負責吊掛的器具的問題，如：

- (1) 吊車:吊車站立處土壤承载力不足，造成吊裝過程，吊車歪斜(L)。
- (2) 起重機:起重機具翻覆，施工動線基底承载力不足。須有效鋪設鐵板增加起重機受力面積或提供硬鋪面供吊車承座(L2)。
- (3) 動線路寬問題。是否足以讓機械完美達成其效果。運輸車輛翻覆，施工動線路寬不足及路面摩擦力不足產生輪胎打滑(斜坡動線較常發生)(L2)。

3. 整體施工之安全意識問題

施工現場在規劃時是否納入安全管理，亦關係著意外發生的頻率：

- (1) 施工環境未確實規畫好動線或無條件全面提供平整路面(Y)
- (2) 施工的空間或動線不佳造成安全施工環境的空窗；施工人員貪圖方便做出不安全的行為(C)。
- (3) 無合理的安衛預算(L)
- (4) 現場工程師對安衛要求認知不足(L)

4-4 意外因應

於預鑄結構體吊裝過程，一旦施工發生意外，受訪者之因應策略於本小節加以歸納。

1 封鎖現場

保持現場完整，主要為後續了解意外發生原因並藉以檢討之用。也方便公權利介入調查。

- (1) 若為重大職災，則需保留現場狀況，不可破壞(L)。而保留現場之舉措在於透過封鎖，不使人進入。
- (2) 立即圈圍警示封鎖現場(W)。
- (3) 重大意外事故：停工並封鎖現場(C3)。

2 人員搶救為先

其次則在現場保持完整的情況下，對於受傷的工作人員全力救治。而此人員搶救包括了呼叫救護車等，讓專業醫療人力進入，參與救援。

- (1) 如有意外發生，因視意外狀況，以人員搶救為第一優先(L)。
- (2) 小事故或虛驚事故：暫時停工，受傷人員

緊急救護(C3)

- (3) 人的部份：人員受立即叫救護車，並疏散人員(S)
- (4) 立即停止作業並封鎖現場，若有人員受傷盡速送醫(C)。
- (5) 受傷人員緊急送醫(C3)。
- (6) 逐級通報、消防滅火、搶救送醫、人員疏散、尋求外部支援(H)

3 即時通報

- (1) 即時通報，人員受傷即時處理，除必要人員搶救外，不得任意破壞現場(L3)。
- (2) 現場勘查處理方式 B.調動資源 C.物料或構件調離整理，人員送醫並依法律規定通報(M)。
- (3) 並同步通報工安，且須依法規之規定通報中央主管機關執行後續調查等事宜(C3)。
- (4) 發生意外時，依照工地標準通報程序層層通報(Y)。
- (5) 真於施工時發生意外或職業災害，遵循工地發生意外時的標準處理成即可(Y)。

4 現場勘驗

依現場先行初步了解意外發生的原因。

- (1) 現場調查後，分析間接、直接及基本原因，制定矯正預防措施，災後復原(L3)。
- (2) 並通報工安之現場會同調查，研議相關改善方案後再行作業(C3)。
- (3) 檢查人員傷亡及機具損壞，回報工地主管及勞檢系統，檢查意外發生原因，檢查吊具或吊點損壞程度，檢查掉落物之損壞程度是否可再使用(W)
- (4) 機具部份：疏散人員，檢查環境後立即恢復，並檢查機具問題(S)
- (1) (5)A.現場勘查處理方式 B.調動資源 C.物料或構件調離整理，人員送醫並依法律規定通報(M)。
- (5) 損壞立即處理，並針對發生問題的原因，回溯未完成預鑄構件做全檢(S)
- (6) 經規劃檢討，優先使安全防護設施及人員上下設備先行(L3)。
- (7) 經驗回饋，避免相同錯誤不斷發生(L3)。

4-5 意外因子之事先排除

上述意外出現之預防，根據受訪者的觀察歸納如下。

1 必要之停止

這點主要基於客觀環境之判斷。但凡可以預見之負面因素，均必須適時停止。

- (1) 惡劣氣候應停止作業(C3)。
- (2) 避免作業人員過於疲憊(C3)。

勿讓工作人員於惡劣環境以及不佳的身心狀態之下施工。此對照趕工而頻仍的意外事件的發生，加上施工現場環境因素盡皆不佳，更加使得作業人員身心感到疲憊。

2 安全衛生先行

到底安全衛生應如何納入意外事件的防範？由意外發生之時間來看，主要是於現場吊裝作業進行之際，這使得建築意外之制止往往由現場作起，但是根據本研究受訪者之觀察，事實上公共衛生與安全理念，必須在案件規劃之初即納入。包括施工空間、施工器材乃至施工日期，必須有安全衛生之實施的作業時間。另外特別是納入相關成本當中，安全也是必要的支出。必須花費心力與經費來維護。例如受訪者所表示的：

- (1) 安全措施先行(S)
- (2) 所有安全相關的動作、設施、環境都要再開案初期就規劃好，例如；a.動作→各種類構件吊裝動作分解，人員如何安全到達吊裝位置，需要什麼器材(施工架、高空作業車)，工作位置空間，安全性是否合理、安全、穩固。b.設施→構件起吊前設施先行，周邊欄杆利用預埋insert起吊前安裝，中央區欄杆配合生產時套桶預埋，版面吊裝完成可立即設置使用，才不會有空窗期。c.環境→整齊、安全的環境，物料定時、定量、定點進場，不要有多餘物料，環境6S維持(M)。

但是以吊裝作業之進行必須特別留心於吊裝過程可能出現的危險。我國目前於預鑄產業當中，有許多決策經常仰賴專業工程師之經驗法則以及主觀判斷下進行，在面臨大

量訂單與多重專案同時進行的情況下，單憑個人或小組的經驗往往無法作出最佳的調度及決策，這使得預鑄工廠經常會面臨到超時工作以及人員配置不當導致生產力下降等問題，進而導致預鑄廠之人力成本大幅增加(鄭鈞耀，2019)。也因此如何能夠安全衛生落實，也是重要人力成本降低的因素。換句話說，不只是因為安全衛生方面向而已。吊裝安全落實重點如受訪者所表示：

- (1) 吊車作業範圍內淨空(S)
- (2) 吊裝操作時與預鑄構件維持安全距離最重要(S)
- (3) 吊車及吊掛用具之作業前檢點確實執行(C3)。
- (4) 預鑄結構體吊裝過程造成的意外不外乎夾傷、撞傷、跌倒、墜落，這些意外在施工過程中，只要依照標準作業程序與確實配戴個人防護具，將可有效的杜絕這些意外發生(Y)。
- (5) 施工前機具的確實檢查、具有證照合格的施工人員，吊掛時下方的管制，提供安全的施工環境與禁止人員不安全的行為(C)。

而上述的安全意識，亦可透過對作業人員的教育訓練不斷提醒。提升作業人員之安全衛生意識(C3)。

3 確實檢查

(1) 機器方面

為了防範因為機器硬體的損壞而產生不必要的意外事件，必須對機器硬體確實進行檢查。

受訪者對機具檢查表示：

- A. 預鑄建築體吊裝作業主要以機具為主，台灣吊裝機具普遍老舊，若能逐漸更新，機具部份所造成的職業災害一定降低(S)。
- B. 起重機具進廠前的再次保養與檢查(L2)

(2) 吊裝現場

對吊裝現場的機械設備，亦需要進行檢查。

- (a) 不同的吊舉物須配合其對應之吊具進行吊掛，且每日均須針對當日所使

用之吊具進行檢查(L2)。

- (b) 預鑄吊裝規劃的工序檢討，針對每項工序進行安全風險評估，進而做到事前的預防措施以減少風險(L2)
- (c) 預鑄施工規劃檢討、工序安排的細膩度(L2)

其次則是為參與吊裝之作業人員。必須切實作到維持一定距離的要求。

- (a) 要求作業人員確實使用高架作業防護具(如母索立柱先行、安全帶防墜器確實及正確使用、防墜網拉設)(C3)。
- (b) 吊掛中需吹哨警示；吊掛物下方不得有人；吊掛區域圍圍避免步相關人員進入；吊鉤之防止脫落裝置；吊掛人員需著背負式安全帶及雙掛鉤之安全掛繩；高度在 2 公尺以上之開口部份應設有適當強度之圍欄、握把、覆蓋或安全網等防護措施(H)

於預鑄吊裝現場最密切也最實際影響到意外事件的發生的，是為工班。在施工現場由於環境頗多負面因子，加上趕工趕進度等因素，使得工班在施工時擁有相對多的被允許的空間。也因此對工班而言，到底如何落實施工意外的防止？如何兼顧安全與進度？本研究之受訪者由對施工人員的保護切入。

施工人員確實配戴個人防護具，增加施工人員配待安全防護具的意願與主動性；使施工人員確實遵照標準作業程序，不可輕忽怠惰為求一時方便而省略動作(Y)。

也為了達到監視，勿使工作人員臨時便宜行事，因而以兩人以上共同工作為宜。

所有施工應避免單獨作業，每處施工應有 2 人以上夥同作業，已達自護、互護、監護等原則(L3)。透過彼此的勸誡，達到現場安全與個人防護的落實。對工班來說，可能更迫切的是一旦工程落後所產生的結果，他們要如何處理？誰來承擔？這些都必須透過溝通來凝結共識。如何將意外發生可能要承擔的後果告知工班，是本研究之受訪者基於職責所最常使用的方法。

須了解各工班的工作習性，找出工班的

潛在風險意識進而溝通分析其中風險之嚴重性(L2)甚或讓工班理解設若無法達到安全的要求，則可能喪失工作的機會。

需不厭其煩的與工班溝通，若該工班對安全意識仍持續無法提高及改善，則須適時給予處罰或解約(L2)。由 L2 之訪談結果顯示出，將安全意識與工作進行畫上等號。也顯示出工班必須在施工安全之講究與失去承接工程的機會之間二擇一。

也正因為對工班來說，設若無法達到進度則可能面臨賠款的壓力，甚或賠款的壓力並不下於工程解約，這也使得受訪者紛紛表示具有安全意識的工班，不只是難得，且亦有待培養。因而他們提出了以下建議：培養預鑄工班，減少現場施工學習曲線，使施工人員習慣施工防護措施(L3)。

4 安全評估

包括施工前、施工中以及施工後的評估。特別在施工前納入評估之後，才能真實將安全評估進行於施工現場。

- (1) 在施工前先將預鑄吊裝流程作分險分析評估(L)。
- (2) 對各項作業的風險，於施工前先作勤前教育(L)
- (3) 在預鑄設計規劃階段，即將安衛需求納入設計，以在工人施工時，即有良好的安全設施(L)。
- (4) 事先計畫及規劃缺乏整合安衛元素，全員安衛觀念並未落實，往往施工組人員做工法及施工的規劃，並無安衛意識或安衛相關人員加入參與規劃，甚至許多規劃和施作人員根本不同(M)。

一旦施工前能夠納入安衛意識，則將使得安衛意識容易於工程當中順利貫穿，而降低於實質施工面向，呈現斷裂的態勢。另外於施工當中，盡可能的降低作業人員於高空作業的時間，以避免高空墜落的機率。

經工序檢討，使人員於地面盡可能完成作業，減少人員高空作業時間。選擇有預鑄施工經驗人員，減少現場施工學習曲線，使施工人員習慣施工防護措施(L3)。

5 安全教育

安全教育屬於一種職能教育，被受訪者認為是屬於從事之員工所必須擁有的教育訓練的一種。必須於工程進行期間不斷的宣導。規劃教育訓練，不定時加強安全衛生意識(L3)。

其所指涉範圍及於各個工作角色，並其所承擔的職責，與工作方面所展現出的使命。包括了工程師、現場管理人員以及實際負責的現場工人。

- (2) 工程師對施工人員不安全的行為及現場不安全環境進行巡檢、告知、要求、修復(L2)
- (3) 對現場管理人員加強安衛教育(L)。
- (4) 加強工人的教育訓練(L)
- (5) 現場工程師需無時對安全意義有自我要求的能力，切勿自負而忽略(L2)
- (6) 工程師養成後，應想辦法避免人才流失(L3)。

而安全教育之目的則在於促使：「現場工程師、監工、施工人員等人員之心理素質及經驗的培養(L2)」。安全教育的進行是伴隨在整個施工前、中、後的，前期是將安全納入評估作業之中。且藉由合約的簽定讓它具體化、可落實化，並因而得到法律規範的保障。安衛設施量化，編列預算於合約中，依合約確實施行(L3)。

其次，前期也包括了：確實於規劃階段檢討設計相關，吊車能量及吊裝順序，並落實施工前之自主檢查及安衛宣導，依據標準作業流程進行施工操作，可有效降低意外風險(W)。

中期是以一種諄諄教誨的心情，提醒現場作業的勞工與監工。到了後期則就工程之進行所當強化的安全教育進行檢討。換句話說，施工現場的安全意識必須刻意被貫穿。訂定施工安全防護計畫，確實對工班宣導並嚴格執行(C)。針對檢討後的吊裝風險評估，對工班進行教育訓練及要求(L2)

此安全教育亦是透過工程的進行，來達到對參與員工的安全宣導，以致於每一位作業人員均成為建築結構體吊裝進行過程，對

現場安全極度講究且極力維護安全意識之提升的因子。包括如受訪者 L2 所提出的。施工動線須從規劃施工時便進行檢討、勘查及確認，避免動線空間不足以影響施工安全性(L2) 另外則不斷的將現場安全之維護納入相關檢討當中。將每次施工遇到之困難，提出檢討及改善方案，經驗回饋，避免相同錯誤發生(L3)。

經由檢討，免除現場安全與意外之防範，成為因應政府政權宣傳的口號。並成為工程進行之後成果展現的一部份。本章之訪談結果，以表格(如表 3)整理歸納後呈現於下。

表 3 預鑄結構體吊裝施工現場危險因子與排除研究結果歸納

吊裝意外發生類型與頻率	包括來自環境與人為操作	墜落(飛落)，7次	
		夾傷(被夾)，5次	
		撞傷，4次	
		倒塌，3次	
		被捲，3次	
		跌倒，2次	
		壓傷，2次	
意外發生之成因	物體掉落	鋼索斷裂，吊具損壞，吊點損壞，吊車故障，吊車傾倒，吊裝方式錯誤等等。	掉落→a.吊車能量不足 b.吊具承重不足 c.吊具損壞 d.吊具固定不良 e.碰撞。吊鉤之防止脫落裝置防滑舌片未安裝、鋼索斷裂
	墜落	不安全的環境、不安全的行為、未使用個人防護具	
	倒塌	支撐架能量不足或損壞 碰撞 c.地震 d.托架或配件損壞。	
	其他	操作過程的不慎引起感電事故、火災等。	感電事故:地上積水電線未架高 火災:氧乙炔熔接或電銲施工時易因火花飛濺引燃

			易燃物品如有機溶劑、泡棉、木材及電線等易燃物旁。				c.環境→整齊、安全的環境，物料定時、定量、定點進場，不要有多餘物料，環境 6S 維持。
意外因應	封鎖現場	保持現場完整				吊車作業範圍內淨空	
	人員搶救	逐級通報、消防滅火、搶救送醫、人員疏散、尋求外部支援				吊裝操作時與預鑄構件維持安全距離最重要。	
	即時通報	同步通報工安，且須依法規之規定通報中央主管機關執行後續調查等事宜。				依照標準作業程序	
	現場勘驗	檢查人員傷亡及機具損壞，回報工地主管及勞檢系統，檢查意外發生原因，檢查吊具或吊點損壞程度，檢查掉落物之損壞程度是否可再使用。			確實檢查	機具進廠前的再次保養與檢查	
意外因子事先排除	必要時施工停止	惡劣氣候應停止作業 避免作業人員過於疲憊				吊裝規劃的工序檢討	
	安全衛生先行	相關安全動作、設施、環境開案初期就規劃好	例如；a.動作→各種類構件吊裝動作分解，人員如何安全到達吊裝位置，需要什麼器材（施工架、高空作業車），工作位置空間，安全性是否合理、安全、穩固。 b.設施→構件起吊前設施先行，周邊欄杆利用預埋 insert 起吊前安裝，中央區欄杆配合生產時套桶預埋，版面吊裝完成可立即設置使用，才不會有空窗期。			每日均須針對當日所使用之吊具進行檢查	
						作業人員確實使用高架作業防護具	吊掛中需吹哨警示；吊掛物下方不得有人；吊掛區域圍圍避免步相關人員進入；吊鉤之防止脫落裝置；吊掛人員需著背負式安全帶及雙掛鉤之安全掛繩；高度在 2 公尺以上之開口部份應設有適當強度之圍欄、握把、覆蓋或安全網等防護措施
						每處施工應有 2 人以上夥同作業	所有施工應避免單獨作業，以達自護、互護、監護等原則。
						提升工班安全意識	需不厭其煩的與工班溝通，若該工班對安全意識仍持續無法提高及改善，則須適時給予處罰或解約。

		培養預鑄工班	減少現場施工學習曲線，使施工人員習慣施工防護措施。
安全評估		施工前、施工中以及施工後的評估	
安全教育		工程師、現場管理人員以及實際負責的現場工人。	

4-6 建築營造業之職業災害之因應與對策

營造業安全管理問題甚多，第一線勞工作業行為往往為求作業舒適、方便及效率，常見於民間工程出現飲用酒精性飲料，攀爬／跨越或於高處作業未勾掛安全帶情形。如何掌握第一線特定職種勞工作業危害行為模式成為關鍵。鄭慶武等(2018)之研究，發現樂觀偏差與矛盾心理及合理化作用、冒險心態，及選擇性投機心理等認知，普遍存在於營造業作業環境中。洪秀鳳(2016)透過勞動部職業災害事故案例，從教育訓練、安全認知及心智模式等三大構面，探討職業災害問題的本質。研究發現營造業職業災害問題的改善，必須改變工地管理者及勞工的「心智模式」，建立良好「教育訓練」制度，強化其對「安全認知」的重視。

以本研究指涉預鑄結構體吊裝，即與傳統施工的吊裝所產生的意外與危險，有所改善，按其施行而言，根據本研究訪談之資深現場人員的看法，如下：

1. 預鑄施工每次一層(鋼構每次三層)，安全性相對較高，施工中安全防護必需做先行，職業災害必能降低(S)
2. 預鑄工法已減少大部分的模版、施工架、鋼筋、灌漿作業(H)
3. 預鑄吊裝的安全性遠高於傳統施工方式。主要原因：預鑄為模組化施工，現場所需工人可大幅降低。且預鑄工法可大量減少高架作業，即使有高架作業，可透過規劃，讓安全設施先行，並利用高空作業車施工，因此，安全性高很多(L)。
4. 工安意外較其他工項少，因以同施工面

積下，預鑄工程施工人數較其他工種少，約為其他傳統工項的 1/5，現場管理上較其他如鋼筋、模板容易，又因最困難的模板施作與鋼筋綁紮已於預鑄工廠完成，現場施工反較傳統工法簡易且單純，可大幅降低發生意外的機率(Y)。

5. 預鑄若發生意外，都會比較嚴重，因此工人危險意識對較高，而且無論是個人防護或機具自檢均較嚴謹，再配合安全措施能夠先行，工人都能在安全的環境中工作(S)
6. 預鑄施工前，經規劃及模擬，可預知容易發生墜落、碰撞等危險施工環境、人員、機具需求及動線，施工前經規劃，改善工法，安衛設施先行，或以適當措施防護，達到本質安全上之要求(L3)。

五、結論與建議

5.1 結論

本研究以引進我國達半世紀之預鑄建築工法於吊裝現場之實務並及其於工作現場之意外的發生、因應以及安全之防範等做為研究標的，以訪談法及筆者之田野觀察法來獲得資料，經前章之歸納分析，提出研究成果，並提出研究建議，以供各界之參考。

本研究之成果發現預鑄結構體吊裝現場最容易出現之意外事件，依序為墜落(飛落)，7次；夾傷(被夾)，5次；撞傷，4次；倒塌，3次；被捲，3次；跌倒、2次；壓傷，2次。而這些成因大多導因於基本動作未能夠落實之故。總結國內預鑄吊裝現場致災原因包括：

1. 預鑄現場之意外肇因於經驗取勝與檢核未能落實，
2. 預鑄吊裝現場之意外與趕工關係密切，
3. 公共衛生與安全之集體性的輕忽致令公共意外頻傳。

5.2. 建議

有鑑於工程相關議題，大多傾向於工程問題的計算與量化進行，相對的極少從事屬於深入且具個案經驗之探究的質性研究。唯以筆者個人之實務卻深深感受到工程界委實需要更多個別經驗探索的研究進行，基於施

工實務，茲提出兩項研究建議。

1. 針對建築業者之建議

- (1) 於成本估算之時，將勞工安全防護納入成本之中。
- (2) 將勞工安全防護不足納入獎金與津貼之處理。

2. 針對學界研究之建議

目前學界對於預鑄建築體吊裝以及公共工程之施工投入了相當多的心血。但是大多以工程計算並量化之研究為主，相對的較少針對單一個案進行相對深入之研究。究諸施工現場之人為因素影響極大，但卻經常受到忽略。人力之調配、人力之投入，專業性之發揮等，盡皆與職安並現場意外事件之發生有一定的關連。事實上亦與所呈現之品質與施工進度之掌握，乃至施工成本之壓低有關，因此建議以個案進行研究。

參考文獻

1. 中華民國勞動部，107 年勞動檢查統一年報，
<https://www.osha.gov.tw/media/7185334/>，2018。
2. 王維志，林俊昌，汪俊男，「半預鑄工法運用於半導體廠房工程之效益分析」，營建管理季刊，夏季號，第 1~12 頁，2004。
3. 尹衍樑，「從工業化到複合化之建築生產」，中國近現代科學技術回顧與展望國際學術研討會論文集，第 678~679 頁，2002。
4. 尹衍樑、葉文凱、丘惠生，「台灣營建業轉型及發展方向」，第五屆海峽兩岸營建業合作交流活動營建學術研討會論文集，第 25~38 頁，西安，2002。
5. 尹衍樑、吳昌修、許利良、黃尚文，「高科技廠房之預鑄工法」，高科技廠房新工法與微震害防治研討會論文集，臺北，第 18~30 頁，2002。
6. 尹衍樑、賴士勳、郭正杰、王瑞禎，「高科技廠房建廠新紀元」，2004 年海峽兩岸土木工程研討會論文集，2004。
7. 尹衍樑、吳子良、王瑞禎，「預鑄工法創新研發與應用」，中國工程師學會，第 78 卷，第 3 期，第 64~80 頁，2005。
8. 尹衍樑、吳子良、王瑞禎，「預鑄工法創新研發與應用」，中國工程師學會，第 78 卷，第 3 期，第 64~80 頁，2005。
9. 尹衍樑、賴士勳，「台灣地區預鑄技術發展與應用」，技師月刊，第 46 期，第 44~51 頁，2007。
10. 李雅雯，重大職災死亡千人率營造業最高主因是墜落，自由時報，2018 年 7 月 18 日，2018。
11. 沈育霖、吳台一、黃然、徐輝明，節塊吊裝工作車作業安全研究，勞工安全衛生研究報告，行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，2013 年 4 月，2013。
12. 洪秀鳳，以組織學習概念探討營造業職業災害原因」，高雄第一科技大學營建工程研究所碩士論文，2016。
13. 黃建勳，預鑄梁與預鑄柱之預力接合研究，國立台灣科技大學營建工程系碩士學位論文，2005。
14. 勞動安全及安全衛生研究所，SDSP044To139—預鑄預力節塊吊裝工法，勞動部勞動安全及安全衛生研究所，<https://www.ilosh.gov.tw/menu/1188/1204/sdsp044to139>，2014 年 6 月 10 日，2014。
15. 湛曉威，預鑄混凝土構件之生命週期與二氧化碳排放評估-以大型購物商場新建案為例，國立中央大學土木工程學系研究所碩士學位論文，2019。
16. 葉至誠，社會科學概論，臺北，揚智出版社，2008。
17. 鄭鈞耀 (2019)，運用巨量資料與系統模擬建構預鑄產業人力彈性運用之決策評估模型，國立中央大學營造管理研究所碩士論文，2019。
18. 鄭雅文、鄭峰齊等，職業，病了嗎？，群學出版，2013。
19. 鄭慶武、鍾琳惠、林楨忠，「勞工行為認知於營造業安全管理之困境與突破」，勞動及職業安全衛生研究季刊，第 26 卷，

- 第 4 期，第 243~257 頁，2018。
20. 鄭慶武、林楨中、王紫盈，「BBS-APP 導入建築工程勞工行為改變之有效性探討」，*勞動及職業安全衛生研究季刊*，第 26 卷，第 1 期，第 9~20 頁，2018。
 21. 蘇南、卓冠瑜，「營建工地職業災害之鑑定與法律責任」，*技師期刊*，第 72 期，第 127~131 頁，2016。
 22. 戴興璋，*建築預鑄結構體生產難易度分級與分析之研究*，中央大學營建管理研究所博士論文，2016。
 23. Chan, W.T., Hu, H., "An application of genetic algorithms to precast production scheduling," *Computers and Structures*, Vol. 79, pp. 1605~1616, 2001.
 24. Chan, W.T., Hao, H., "Production scheduling for precast plants using a flow shop sequencing model," *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 165~174, 2002.
 25. Kadushin, A., *The Social Work Interview. A Guide for Human Service Professionals*, 3rd ed. New York: Columbia University Press, 1990.

台灣南部民眾購屋偏好之研究：基於層級分析法的調查與基於統計檢定的進階分析

陳益群¹ 陳柏任² 莊正昀^{3,*}

¹ 國立高雄科技大學土木工程系碩士生

² 國立高雄科技大學土木工程系學士生

^{3,*} 國立高雄科技大學土木工程系副教授

摘要

隨著時代的變遷國人的經濟水平大幅提升，生活與工作並重，每個在工作職場上奮鬥的人，努力工作的目標好像都是為了得到一間溫暖的房屋，且房屋是實體的具有保值的效果，可對抗未來可能發生之通貨膨脹及貨幣貶值等相關因時代變遷造成的問題，故購屋決策問題也在現今成為相當重要的議題。對於購屋決策問題本研究主要以層級分析法(AHP)建構問卷，在針對台灣南部民眾發放問卷，並以問卷所計算出之民眾對於各項購屋考量的權重值(CWV)進行分析並且排名。並且依據問卷基本資料將受訪者依照性別、年齡、收入、居住型態、同居人數進行五種不同的分類，利用 R 語言平台內進行 T 檢定，分析結果將顯示各個構面下族群間，對於購屋考量因素意見是否有顯著差異。而在購屋決策問題中本研究也對於建商、仲介及代銷業者提供具體之建議，對於消費者如何選擇房屋，也提供了相對應的建議，例如：研究中發現南部之消費者認為屋況為最重視之要素，這與北部消費者認知大相逕庭，故提出建商在台灣南部推出新建案時，在工程方面須多加注意工程之品質，以訂立嚴格之查核及檢驗標準，嚴防新成屋就有漏水或壁癌的現象，迎合台灣南部消費者之需求，有效提升消費者的購買慾望。

關鍵字：購屋決策、層級分析法、統計分析、T 檢定、數驅決策

Investigating the Preferences of Housing Purchase in Southern Taiwanese People's Mind: A Survey Using AHP and Advanced Analyses Using Statistical Tests

Chen, E-Chun¹ Chen, Po-Jen² Zhuang, Zheng-Yun^{3,*}

¹ Master Student, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

² Bachelor Degree, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

^{3,*} Associate Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

As time goes by, the economic level of the citizens has been greatly improved. As life and work are equally important, it seems that everyone who works hard for his/her job always seeks for a residential place with warm. This is perhaps because a house (or apartment, or any other equivalent) is a physical asset which holds its value, which can resist against inflation, currency devaluation and other possible problems in the future. Therefore, currently, the problem to make a housing decision has become a very important issue. In order to study this purchase decision-

making problem for housing, several questionnaires are designed using AHP (analytic hierarchy process). A survey is organized to poll the opinions from people in southern Taiwan using this set of questionnaires, and the CWVs (criteria weight vector), which represent the relative importance of the influencing factors on that decision, are calculated based on the questionnaires filled by each respondent using the CWV-determination process in AHP. These results are analyzed, and the factors are ranked. Furthermore, the entire sample are stratified according to gender, age, income, morphology and the number of co-residents, which are also polled using the 'respondent profile' questions block in the questionnaire. With these stratifications, by using the T-test function on the R platform, whether there is significant difference in the opinions of different groups of people or not pertaining to the absolute weight of each factor (that affects house purchase) is identified. The knowledge explored in this study not only provides some valuable insights for the builders and the intermediaries and agents, but also offers suggestions for the consumers when they are making relevant decisions about house purchase. The key insights include, but not limited to, the salient role of the 'housing condition' construct in southern Taiwan, which conflicts with the situation in northern Taiwan (i.e., compared to the 'location' construct that is usually deemed as the most important construct out there). Following this insight, it is recommended that when the builders is going to launch new projects in this area, they should pay more attention to the construction quality, establish stricter standards of inspections, and prevent the new house from 'water leakages' or 'wall cancers' at the beginning, so as to satisfy the needs in southern Taiwanese people's mind and stipulate their willingness to purchase. All this is to increase the consumer demands effectively for the market.

Keywords: housing behavior, analytical hierarchy process, statistical analysis, T-test, Data-driven Decision-making (DDDM)

一、前言

1-1 研究動機

現今國人經濟水平大幅提升，對於購屋不單單只是尋求一個遮風避雨的地方，對於房屋本身的要求也越加重視，而中國人自古以來「有土斯有財」的觀念，更加加深了購屋為人生重要目標的想法，而買房也可對抗未來可能發生之通貨膨脹及貨幣貶值等相關問題，故購屋決策問題也在現今成為相當重要的議題。

張春龍(2000)研究指出台南地區購屋決策問題上，當進行住宅選擇時，最先注意到的是房屋周邊條件中負面影響的部分，故第一優先的是嫌惡設施，這代表現今社會對住宅選擇因素之考量，會以負面考量部分作為首要決策問題。洪啟釗(2003)研究結果指出屏東縣市消費者購買住宅房屋考量因素時重

視程度是有差異的，其順序由高到低分別為購屋負擔能力、房屋特性、賣方特徵、其他因素及總體環境。林月萍(2003)研究結果顯示台中市地區，附近是否有臨避之嫌惡設施是專家認為消費者購屋時優先考量的要素。賀振宇(2009)研究結果顯示高雄市中產階級對於購屋決策問題最重視的決策因素是「住宅本身條件」。潘福田(2010)研究結果指出忙碌的新北市，在每個市人心目中，都希望能從家中迅速且準時的到達工作地點，下班後也一樣能快速便捷安全回家，縮短工作距離換取更多休息時間，新北市在重視「工作地點遠近」考量因素明顯有別於其他縣市。

而上述國內購屋決策問題的相關研究，大多是特定縣市利用 AHP 法建構問卷後，進行專家問卷訪談，進而針對一般民眾進行調查，但卻未針對廣泛區域(例如:南部或北部等等)之民眾利用族群間(例如:性別、年齡、收

入等等)在 R 語言平台內，進行獨立樣本 T 檢定，檢定出族群間意見取向是否有顯著差異。

1-2 研究背景

本研究問卷架構採取多目標決策之 AHP 法，做為影響購屋考量關鍵因素之分析工具，經由文獻回顧、資料蒐集、專家諮詢的方式，得出在價格、位置及屋況此三大構面上對於購屋考量決策影響因素，後再經由文獻回顧，針對價格、位置及屋況此三大構面上對於購屋考量選擇影響因素，對此三大構面經由文獻回顧，將認為之十五個準建構於構面之下。

1-3 研究目的

根據上述之研究背景及動機，利用 AHP 建構研究問卷進行後續分析，探討南部民眾購屋決策問題，在 R 語言平台內進行權重值計算，利用一致性指標及一致性比率篩選出有效問卷，並將其進行獨立樣本 T 檢定，可瞭解台灣南部民眾對於購屋上所重視的層面為何，希冀達成以下目的：

- (一) 探討利用 R 語言平台內進行權重值分析，將其南部購屋者對於問卷中十五項準則分析重視程度差異，後進行排名，了解街訪者對於各項準則之優先考量順序。
- (二) 探討利用 R 語言平台內進行獨立樣本 T 檢定，將街訪者依照族群分類(例如:性別、年齡、收入等等)，判斷出不同族群對於購屋各項準則之重視程度是否有顯著差異。
- (三) 分析出南部購屋族群對購屋考量上，哪些考量為民眾最注重的，在各個族群間對於各項考量有不同之意見傾向，最後研究結果可提供意見給房仲及建商推出相關行銷策略，及民眾購屋需注意及考量等意見。

二、文獻回顧

2.1 購屋決策因素探討

影響購屋決策的因素有很多，如價格方面、標的位置及房屋本身屬性等等，都對於購買決策有很大的影響。張金鶚(1996)認為

房地屋是由各種屬性所組成，這些屬性可由房地產屋單位內部的情形到房地產單位外部情形，皆是重要的影響。以下為近幾年來對於影響購屋決策因素的相關文獻。

張春龍(2000)：以台南市民在住宅選擇做研究，利用分析層級程序法(AHP)，分析出七大類評估項目，其依重視結果優先順序如下，「嫌惡設施」、「交通運輸」、「公共設施」、「經濟因素」、「自然條件」、「房屋屬性」、「土地使用管制」。洪啟釗(2003)研究結以屏東縣市消費者購買住宅房屋決策做研究，利用 AHP 分析出七大類評估項目，其依重視結果優先順序如下，「購屋負擔能力」、「房屋特性」、「賣方特徵」、「其他因素」及「總體環境」。林月萍(2003)：使用知識基礎的專家系統作為分析工具，並結合社會科學和決策理論，應用 AHP，以台中市地區住宅為例，提出房屋市場住宅產品之購屋消費期望偏好屬性共計五大構面，「消費者需求」、「土地使用管制」、「交通運輸」、「環境屬性」、「嫌惡設施」，及五大構面下個別的 21 項影響因素。賴慧蓉(2007)以台中市為例，運用分析層級程序法(AHP)，透過專家建議及文獻整理歸納出五大構面，「生活環境」、「建商信譽」、「住宅產品」、「屬性」、「價格」。賀振宇(2009)以高雄市為例，根據自用住宅屬性需求依序為：「住宅本身條件」、「交通設施」、「公共設施」、「嫌惡設施」、「整體經濟因素」、「政府政策」，共計六大類。潘福田(2011)研究顯示，新北市購屋者最重視的因素依序為，「交通運輸」、「嫌惡設施」、「房屋屬性」、「公共設施」、「經濟因素」、「土地使用管制」。

綜合上述學者的研究可了解到購屋者在做出購屋決策時，房屋價格、房屋位置、房屋屋況、房屋附近設施等等，以上考量為購屋者決策時會碰到之問題，而我們認為在建構價格構面下包含了房屋稅、地價稅、房屋單價及房屋貸款以上四項準則，位置構面下包含了交通位置、周遭商業區、鄰避設施、風水及住宅區以上五項準則，而屋況構面下包含建材品質、房屋格局、水電設備、外觀、屋齡及有無漏水以上六項準則。

2.2 層級分析法之探討

多準則決策分析是一種決策過程中幫助決策者同時考慮多個準則因素時的分析方法，目前多準則決策分析中有相當多不同的演算方式，常見的如層級分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP)、簡單多屬性評等技術 (Simple Multi Attribute Rating Technique, SMART) 等等，但各有不同思考邏輯與演算方法。AHP 為美國匹賓州茲堡大學教授 Thomas L. Saaty 於 1971 年替美國國防部從事應變計畫問題 (contingency planning problem) 研究所發展出一項決策方案，主要應用在不確定情況下包含多個評估準則之決策問題上即為「將複雜的問題簡單化」，近幾年來 Saaty (1980, 1990) 與其他學者努力及不斷的研究使得層級分析法逐漸成熟且廣為流行。

AHP 分析法是將複雜的問題簡化為簡明的要素層級系統。再彙集學者專家的意見及各階層決策者的意見，進行各要素間的成對比較 (pairwise comparisons)，予以量化後建立成對比較矩陣 (pairwise comparison matrix)，據以求出各矩陣之特徵向量 (eigenvector)。並依其特徵向量作為層級各要素間的優先順序，並求算出最大特徵值，用予以評定成對比較矩陣一致性指標的相對權重之強弱，以提供決策者做決策時的參考指標。其層級是由至少兩個以上的層級所組成，而 AHP 則將各個層級連結起來，計算出 AHP 層級之各因素間相對整個層級的優先順位、相對權重。接著，AHP 可建立連接所有成對比較矩陣之一致性指標 (Consistency Index, C.I.) 與一致性比率 (Consistency Ratio, C.R.)。依此程式最後評估出整個層級的一致性的程度 (鄧振源、曾國雄, 1989)。本研究 AHP 方法參考前期研究

綜合上述，層級分析法可將複雜之問題利用明列階層的方式，經由調查、訪問或腦力激盪，提出第一層之構面後細分出購面之下的準則，簡化問題的複雜性，經由計算出各項準則之權重值及一至性檢定，建立出具有相互影響關係的系統，有助於問題的分析。而在 AHP 分析法多年來已應用於購屋考量之

決策研究中，以系統化的方式解決問題。

2.3 T 檢定

T 檢定中所稱之 t 值即為 Student's t-distribution，為高斯特 (William Sealy Gosset) 於 1908 年所推導，並以其筆名 Student 來命名，而其適用時機為，對兩樣本平均數的檢定，目的在比較變異數相同的兩個母體之間的平均數差異，或比較來自同一母體之兩個樣本的平均數差異。而兩個獨立樣本 T 檢定 (independent-samples T test)，檢驗兩組資料之間的母體平均數是否存在著差異性，獨立樣本 T 檢定的統計量 t 值公式 (變異數同質時) 如下式所示：

$$\text{檢定統計量 } t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{S_p^2}{n_1} + \frac{S_p^2}{n_2}}}$$

$$\text{合併變異量 } S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{df}$$

獨立樣本 T 檢定的統計量 t 值公式 (變異數不同質時) 如式下式所示：

$$\text{檢定統計量 } t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$$

$$\text{樣本變異量 } s^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}$$

三、研究方法

3.1 研究設計

經由前述文獻分析，參考前期研究 (Zhuang et al., 2018; Zhuang et al., 2017; Chi et al., 2019; Chi et al., 2018; Zhuang et al., 2019) 建構 AHP 之方法，並依據研究架構進行本研究之設計，利用 AHP 以價格、位置及屋況做為構面，並在此構面下延伸出十五項準則。針對台灣南部民眾進行問卷街訪，收集其基本資料及其對各項構面及準則的重視程度傾向，以計算出在全部受訪者當中，各項準則

所受到的重視程度排序。再依照不同項目對受訪者進行族群分類，利用 t 檢定判斷不同族群在購屋決策時的傾向是否有顯著差異，研究架構圖如圖 1 所示。

本研究所之問卷架構採取多目標決策之 AHP 法，做為影響購屋考量關鍵因素之分析工具，經由資料蒐集、文獻回顧、專家諮詢的方式，得出在價格、位置及屋況此三大構面上對於購屋考量選擇影響因素。在構面下挑選各項重點影響因素，歸納出圖 2 所示之各構面下的關鍵影響因素，在此三大構面下列出共十五個影響購屋決策關鍵因素，做為購屋決策層級分析法之評估要素。

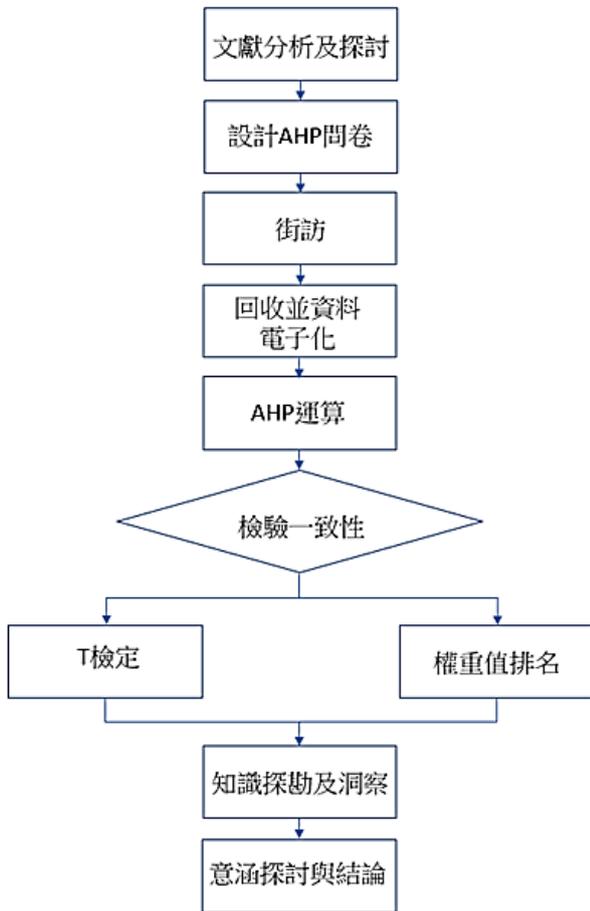


圖 1 研究架構圖

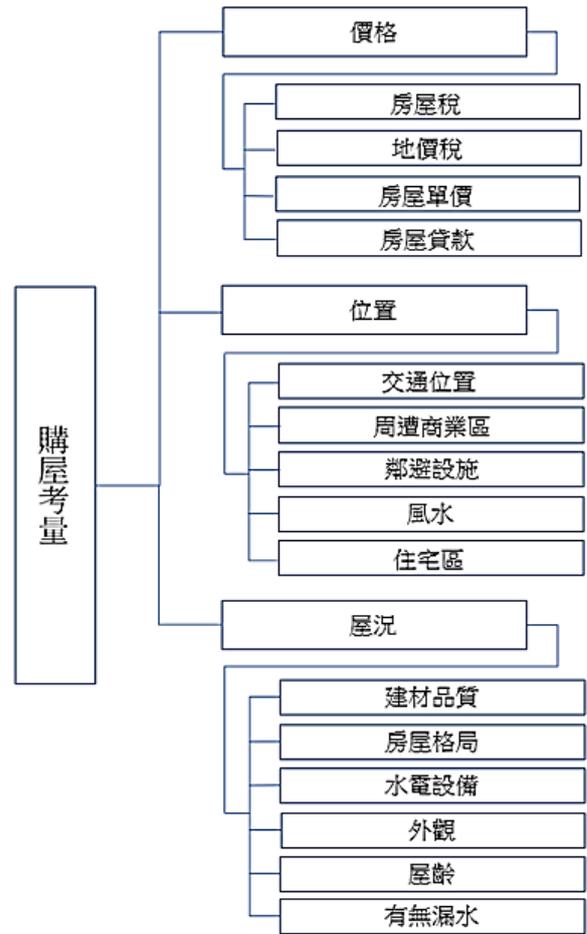


圖 2 購屋考量層次結構圖

3.2 問卷編制及訪問對象

本研究之研究問卷，為「購屋考量問卷」主要以台灣南部購屋者為對象，內容分為六個部分，第一個部分為「個人基本資料」，共分 9 個題項包含「性別」、「年齡」、「戶籍或成長的縣市」、「現在所居住的縣市」、「居住地方的型態」、「考慮購屋或再購屋會選擇哪類地區」、「家中經濟狀況」、「目前同居的人口數」、「購屋後預計同住人口數」，目的在於瞭解受訪者個人背景變項資料，如表 1 所示：

表 1 購屋考量問卷訪問者基本資料問卷題項表

背景變項	問卷題項
性別	男、女
年齡	數字或?o~?o
戶籍或成長的縣市	自填
現在所居住的縣市	高雄、台南、屏東、台東、嘉義(縣市)、雲林、外島、中部、北部、其他
居住地方的型態	市區、市郊、郊區、鄉鎮
購屋會選擇哪類地區	市區、市郊、郊區、鄉鎮
家中經濟狀況	40 萬以下至 200 萬以上(勾選)
目前同居的人口數	自填
購屋後預計同住人口數	自填

第二個部分至第五部分，為了得知構面下各個準則要素的相對重要性，必須要將要素兩兩配對比較，藉由 AHP 評估標度的基本劃分包括「同等重要」、「稍微重要」、「重要」、「非常重要」、「極端重要」等五項，分別賦予名目尺度 1、3、5、7、9 的衡量值，若有需要可加入四項介於五個基礎標度之間的衡量值 2、4、6、8 (Saaty, 2000)。依此設計成對比較問卷如表 2 所示：

表 2 AHP 成對比較問卷

X 指 標 項	重要程度									Y 指 標 項
	絕 強	極 強	強	稍 強	相 等	稍 弱	弱	極 弱	絕 弱	
	9:1	7:1	5:1	3:1	1:1	1:3	1:5	1:7	1:9	

3.3 資料處理及分析方法

問卷回收後，將數據輸入 R 語言進行 AHP 運算，研究過程範例，如表 3。此表格代表某訪問者在以不同的考量準則為影響要素時，所認為的兩兩不同準則的重要程度。

表 3 AHP 以構面為考量準則之成對比較示意圖

構面	價格	位置	屋況
價格	1	7	1
位置	1/7	1	3
屋況	1	1/3	1

求得成對矩陣後，所要進行的就是求出各要素間之相對權重，如表 4。運用數值分析特徵值(Eigen-value)解法，求得比較矩陣之最大特徵值 λ_{max} 與對應之特徵向量 (Eigen Vector) W_i 。特徵向量 W_i 公式如下式所示：

$$W_i = \frac{\left[\prod_{n=1}^n a_{ij} \right]^{\frac{1}{n}}}{\sum_{n=1}^n \left[\prod_{n=1}^n a_{ij} \right]^{\frac{1}{n}}}$$

n：評估要素之數

a_{ij} = 兩因素間的比值 (i, j = 1, 2, 3, 4, …, n)

表 4 標準化矩陣與相關權重示意圖

	價格	位置	屋況	相關權重 (CWV)
價格	0.466	0.84	0.2	0.502
位置	0.066	0.12	0.6	0.262
屋況	0.466	0.04	0.2	0.236

最大特徵值 λ_{max} 計算方式可利用向量平均值的常態化，首先將各行予以常態化後之各類元素加總，最後除以各列元素之各數。

權中加總矩陣計算：

$$0.502 \times \begin{bmatrix} 1 \\ 1/7 \\ 1 \end{bmatrix} + 0.262 \times \begin{bmatrix} 7 \\ 1 \\ 1/3 \end{bmatrix} + 0.236 \times \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.573 \\ 1.041 \\ 0.825 \end{bmatrix}$$

權重加總矩陣除以相關權重元素：

$$\frac{2.573}{0.502} = 5.123, \quad \frac{1.041}{0.262} = 3.969, \quad \frac{0.825}{0.236} = 3.503$$

取得這些值平均數來求得 λ_{max} ：

$$\lambda_{max} = \frac{(5.123 + 3.969 + 3.503)}{3} = 4.199$$

為了確認某位街訪者給予因素間重要性的一致程度是在有效範圍內，若給於因素與實際情況出現落差，將導致錯誤決策，故 Saaty (1980) 認為應採用一致性指標 (Consistency Index, C.I.) 及一致性比率 (Consistency Ratio, C.R.) 來檢測成對比較矩陣的一致性。使用 R 語言平台進行運算 CR 的計算方式為先求 CI，再除以一個與矩陣大小相對應之隨機一致性指標 (R.I.)，其 C.I. 與 C.R. 之計算方式如下：

$$CI = \frac{4.199 - 3}{3 - 1} = 0.599$$

$$CR = \frac{0.599}{0.58} = 1.033$$

本研究之問卷在 109 年 9 月於高雄市及台南市共回收 68 份紙本問卷，將回收之問卷

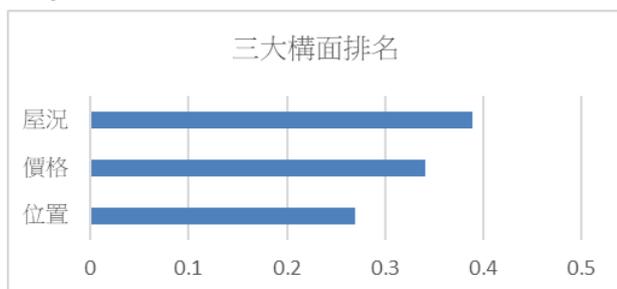
資料統整入 Excel，將 Excel 資料錄入 R 語言內進行權重值(CWV)計算，後透過 R 平台運算 CR 檢定過後以 CR 值 ≤ 0.2 作為可接受範圍(Schmidt et al., 2016; Zhuang et al., 2017; Liang et al., 2019)，剔除 CR 值 >0.2 之問卷，再以構面為基準下篩選出 36 份有效問卷。將通過 CR 鑑定的各個有效問卷中的各項準則的 CWV 值乘上其所屬購面的 CWV 值，以計算出各個準則在全部 15 個準則之中所佔的權重，計算之後將 36 份有效問卷的數值平均，以得出 15 個準則在所有受訪者之中的重視程度排名。將受訪者依照性別、年齡、收入、居住型態、同居人數進行五種不同的分類，之後除了原先依照購面數據進行 CR 鑑定篩選出的 36 份有效問卷之外，再以價格要素的數據、位置要素的數據、屋況要素的數據作為基準，利用 CR 檢定再分別篩選出 41、35、32 份有效問卷，利用 T 檢定依次判斷五種不同的族群分類中，各族群在購面、價格、位置、屋況四個領域中其對於各購面/準則的重視程度傾向是否有顯著差異。

四、研究結果與分析

4.1 相同樣本數下權重值計算及排名

為了更清楚的瞭解台灣南部民眾購屋時對於哪一部份考量較為看中，本研究將構面下三項準則價格、位置及屋況，進行 CWV 平均值的計算，結果顯示台灣南部民眾購屋考量的準則排名為「屋況」(平均值=0.389)為第一看重；「價格」(平均值=0.341)次之；「位置」(平均值=0.269)第三，如表 5 所示：

表 5 三大構面 CWV 平均值排名



綜合上述，研究發現雖然「屋況」於台灣南部民眾購屋考量中為最重要之考量，但在

三大構面之 CWV 平均值中，三者平均值皆無較強或較弱的趨勢，故可理解為三大構面皆為有效之構面，故三者民眾購屋考量時皆相同重視之。韓睿程(2016)研究結果認為，高雄市購屋者最重視的因素依序為：經濟因素、交通便利性、環境設施、房屋住宅屬性、建設公司、產品類型、嫌惡設施，而認為現代人於購買房屋時時間與金錢仍然是最重要且皆為優先考量之項目。本研究所提出之「屋況」考量雖為優先但與排在第二之「價格」考量，兩者 CWV 平均值相差不遠故也呼應其研究結果，在金錢的考量中，台灣南部民眾也相同重視之。

而本研究也為了瞭解三大構面其中包含的十五項評估要素裡哪一個評估因素較為重要，故也進行 CWV 平均值的計算，如表 6 所示。

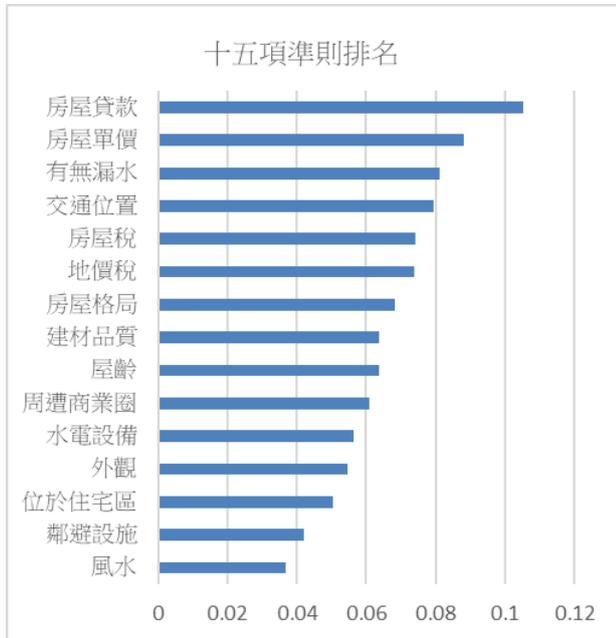
根據表 6，結果顯示台灣南部民眾購屋考量對於三大構面下十五項準則評估因素排名為「房屋貸款」(平均值=0.105)為第一看重；「房屋單價」(平均值=0.088)次之；「有無漏水」(平均值=0.081)為第三；「交通位置」(平均值=0.08)為第四；「房屋稅」(平均值=0.074)為第五；「地價稅」(平均值=0.074)為第六；「房屋格局」(平均值=0.068)為第七；「建材品質」(平均值=0.064)為第八；「屋齡」(平均值=0.0636)為第九；「周遭商業圈」(平均值=0.061)為第十；「水電設備」(平均值=0.056)為第十一；「外觀」(平均值=0.055)為第十二；「位於住宅區」(平均值=0.05)為第十三；「鄰避設施」(平均值=0.042)為第十四；「風水」(平均值=0.036)為第十五。

綜合上述，研究結果顯示台灣南部民眾購屋考在十五項準則中，「房屋貸款」在民眾心中為較多顧慮之購屋考量，也就是說南部民眾在購屋時將貸款利率及可貸款成數看的比重較重，選擇較能負擔之貸款方式。

而過去研究顯示，消費者購買住宅房屋時首要決策就是租買的選擇，當決定要購買房屋時，房價、所得、儲蓄、貸款的利率、資產的大小、稅賦便是影響購屋者購買住宅房屋時的重要考量因素(洪啟釗, 2003)。這與本

研究所發現之台灣南部民眾在購屋前，將最看重之考量為「房屋貸款」有著共通點，民眾會依房貸、房價、稅賦等因素進而思考購屋決策問題。

表 6 十五項準則 CWV 平均值排名



研究中也顯示在三大構面排名第一為「屋況」構面，但在十五項準則排名中卻是以「價格」構面裡的「房屋貸款」為第一形成對比，說明在構面考量時台灣南部民眾還是以房屋購買時房屋狀況為最看重之考量，但由細項中卻還是以實際面的貸款及房屋單價為首要考量。

過去研究顯示，新北市購屋者最重視的因素依序為：交通運輸、嫌惡設施、房屋屬性、公共設施、經濟因素、土地使用管制(潘福田，2011)。顯示出新北市在影響購屋決策時，交通運輸為最重視之考量因素，這與台灣南部購屋決策重視的考量因素，卻有著相當不同的地方，本研究顯示構面考量排序第一為「屋況」構面而不是有著交通運輸關係的「位置」構面，係因台灣南部都會區較為集中，且鄉鎮與都會區因購物方便性及人口集中程度有極大之落差，故與新北市購屋考量因素有著不一樣的地方。

4.2 不同樣本數權重值 T 檢定

上述 4.1 小節中所比較的是在相同的樣

本中，各個構面與準則所受到的重視程度差異，本研究將全部樣本依問卷基本資料中性別、年齡、收入、居住型態、同居人數等五種方式進行分類，透過相關係數與 t 檢定，了解不同族群在考慮購屋的各個構面時，其對不同構面的重視程度是否存在顯著差異，將以上述方式進行分類之後的各族群樣本在各構面中的 CWV 平均值輸入 R 語言平台進行 T 檢定後，若得出的 p-value 值在 0.2 以內，即代表比對的族群在該構面的看法存在顯著差異，如表 7、表 8、表 9、表 10、表 11、表 12、表 13、表 14、表 15、表 16、表 17、表 18、表 19、表 20、表 21 所示：

表 7 不同性別在價格構面的比對結果

性別	男	女
男		0.654233
		t = 8.1966e-05
		p=0.9999
		無顯著差異
女	0.654233	
	t = -8.1966e-05	
	p=0.9999	
	無顯著差異	

表 8 不同年齡在價格構面的比對結果

年齡	低	中	高
低		-0.9561881	-0.9924874
		t=0.62584	t=-0.29785
		p=0.5758	p=0.7853
		無顯著差異	無顯著差異
中	-0.9561881		0.9848209
	t=-0.62584		t=5.3096
	p=0.5758		p=0.01304
	無顯著差異		有顯著差異
高	-0.9924874	0.9848209	
	t=0.29785	t=-5.3096	
	p=0.7853	p=0.01304	
	無顯著差異	有顯著差異	

表 9 不同收入在價格構面的比對結果

收入	低	中	高
低		0.57513512	0.43103811
		t=1.0476	t=0.68496
		p=0.3718 無顯著差異	p=0.5425 無顯著差異
中		0.5751351	0.06494397
		t=-1.0476	t=0.29966
		p=0.3718 無顯著差異	p=0.784 無顯著差異
高		0.4310381	0.06494397
		t=-0.68496	t=-0.29966
		p=0.5425 無顯著差異	p=0.784 無顯著差異

表 10 不同同居人數在價格構面的比對結果

同居人數	低	中	高
低		0.4126399	0.4109693
		t=-1.0899	t=1.4424
		p=0.3555 無顯著差異	p=0.2449 無顯著差異
中		0.4126399	0.3287273
		t=-1.0899	t=-3.4525
		p=0.3555 無顯著差異	p=0.04086 有顯著差異
高		0.4109693	0.3287273
		t=-1.4424	t=3.4525
		p=0.2449 無顯著差異	p=0.04086 有顯著差異

表 11 不同居住型態在價格構面的比對結果

居住地區型態	市區	市郊	郊區	鄉鎮
市區		0.1532776	0.06994478	0.2244005
		t=0.1357	t=1.1139	t=2.3232
		p=0.9006	p=0.3465	p=0.1028
		無顯著差異	無顯著差異	無顯著差異
市郊		0.15327765	0.92523049	0.2782612
		t=-0.1357	t=1.8152	t=1.8115
		p=0.9006	p=0.1671	p=0.1677
		無顯著差異	無顯著差異	無顯著差異
郊區		0.06994478	0.9252305	0.5951228
		t=-1.1139	t=-1.8152	t=2.5177
		p=0.3465	p=0.1671	p=-0.08635
		無顯著差異	無顯著差異	有顯著差異
鄉鎮		0.22440053	0.2782612	0.59512275
		t=-2.3232	t=-1.8115	t=-2.5177
		p=0.1028	p=0.1677	p=0.08635
		無顯著差異	無顯著差異	有顯著差異

表 12 不同性別在位置構面的比對結果

性別	男	女
男		0.654233
		t = 8.1966e-05
		p=0.9999 無顯著差異
女		0.654233
		t = -8.1966e-05
		p=0.9999 無顯著差異

表 13 不同年齡在位置構面的比對結果

年齡	低	中	高
低		0.8263987	0.7242729
		t=2.2069	t=0.33121
		p=0.09194 無顯著差異	p=0.7571 無顯著差異
中		0.8263987	0.6275706
		t=-2.2069	t=1.3598
		p=0.09194 無顯著差異	p=0.2455 無顯著差異
高		0.7242729	0.6275706
		t=-0.33121	t=-1.3598
		p=0.7571 無顯著差異	p=0.2455 無顯著差異

表 14 不同收入在位置構面的比對結果

收入	低	中	高
低		0.8263987	0.9371659
		t=-0.27181	t=2.6258
		p=0.7992 無顯著差異	p=0.05844 有顯著差異
中		0.8263987	0.9407251
		t=0.27181	t=-4.9289
		p=0.7992 無顯著差異	p=0.007879 有顯著差異
高		0.9371659	0.9407251
		t=-2.6258	t=4.9289
		p=0.05844 有顯著差異	p=0.007879 有顯著差異

表 15 不同同居人數在位置構面的比對結果

同居人數	低	中	高
低		0.8944727	0.8412994
		t=1.0099	t=-1.1991
		p=0.3697 無顯著差異	p=0.2967 無顯著差異
中		0.8944727	0.586524
		t=-1.0099	t=2.449
		p=0.3697 無顯著差異	p=0.07052 有顯著差異
高		0.8412994	0.586524
		t=1.1991	t=-2.449
		p=0.2967 無顯著差異	p=0.07052 有顯著差異

表 16 不同居住型態在位置構面的比對結果

居住地區型態	市區	市郊	郊區	鄉鎮
市區		0.6838119	0.5013239	0.4907617
		t=-0.39358	t=-1.6104	t=1.3399
		p=0.714	p=0.1826	p=0.2513
市郊		無顯著差異	無顯著差異	無顯著差異
	0.6838119		0.2544128	0.7339546
	t=-0.39358		t=-1.5926	t=-1.3127
郊區				
	p=0.714		p=0.1865	p=0.2595
	無顯著差異		無顯著差異	無顯著差異
鄉鎮				
	0.5013239	0.2544128		-0.2647389
	t=1.6104	t=1.5926		t=-0.31376
市郊				
	p=0.1826	p=0.1865		p=0.7694
	無顯著差異	無顯著差異		無顯著差異
市郊				
	0.4907617	0.7339546	-0.2647389	
	t=-1.3399	t=1.3127	t=0.31376	
市郊				
	p=0.2513	p=0.2595	p=0.7694	
	無顯著差異	無顯著差異	無顯著差異	

表 17 不同性別在屋況構面的比對結果

性別	男	女
男		0.7705874
		t = -1.8822
		p=0.1185
		無顯著差異
女		0.7705874
		t = 1.8822
		p=0.1185
		無顯著差異

表 18 不同年齡在屋況構面的比對結果

年齡	低	中	高
低		0.9003091	0.7700657
		t=-0.048439	t=3.8427
		p=0.9632	p=0.01209
中		無顯著差異	有顯著差異
	0.9003091		0.7388138
	t=0.048439		t=-5.3375
高			
	p=0.9632		p=0.003095
	無顯著差異		有顯著差異
低		0.7700657	0.7388138
		t=-3.8427	t=5.3375
		p=0.01209	p=0.003095
中			
	0.7700657	0.7388138	
	t=-3.8427	t=5.3375	
高			
	p=0.01209	p=0.003095	
	有顯著差異	有顯著差異	

表 19 不同收入在屋況構面的比對結果

收入	低	中	高
低		0.6146101	0.9177793
		t=1.2539	t=-0.19622
		p=0.2653	p=0.8522
中		無顯著差異	無顯著差異
	0.6146101		0.3185489
	t=1.2539		t=1.0318
高			
	p=0.2653		p=0.3495
	無顯著差異		無顯著差異
低		0.9177793	0.3185489
		t=0.19622	t=-1.0318
		p=0.8522	p=0.3495
中			
	0.9177793	0.3185489	
	t=0.19622	t=-1.0318	
高			
	p=0.8522	p=0.3495	
	無顯著差異	無顯著差異	

表 20 不同同居人數在屋況構面的比對結果

同居人數	低	中	高
低		0.7455973	0.4777989
		t=-3.2508	t=0.39112
		p=0.02268	p=0.7118
中		有顯著差異	無顯著差異
	0.7455973		0.7476874
	t=3.2508		t=4.5907
高			
	p=0.02268		p=0.00589
	有顯著差異		有顯著差異
低		0.4777989	0.7476874
		t=-0.39112	t=-4.5907
		p=0.7118	p=0.00589
中			
	0.4777989	0.7476874	
	t=-0.39112	t=-4.5907	
高			
	p=0.7118	p=0.00589	
	無顯著差異	有顯著差異	

表 21 不同居住型態在屋況構面的比對結果

居住地區型態	市區	市郊	郊區	鄉鎮
市區		0.4419738	0.37446489	0.10841866
		t=0.83201	t=1.3384	t=0.86136
		p=0.4433	p=0.2384	p=0.4284
		無顯著差異	無顯著差異	無顯著差異
市郊		0.4419738	0.90966846	-0.28952241
		t=-0.83201	t=0.8952	t=-0.97417
		p=0.4433	p=0.4117	p=0.3747
		無顯著差異	無顯著差異	無顯著差異
郊區		0.3744649	0.9096685	0.07986068
		t=1.3384	t=-0.8952	t=-1.2291
		p=0.2384	p=0.4117	p=0.2737
		無顯著差異	無顯著差異	無顯著差異
鄉鎮		0.1084187	-0.2895224	0.07986068
		t=-0.86136	t=-0.97417	t=1.2291
		p=0.4284	p=0.3747	p=0.2737
		無顯著差異	無顯著差異	無顯著差異

由研究結果可以發現，在價格準則的重要性方面：(1)高年齡層 25 歲以上與中年齡層 15 至 24 歲的受訪者看法存在顯著差異(如表 8 所示)；(2) 3 人家庭與 4 人以上家庭受訪者看法也存在顯著差異(如表 10 所示)，(3)鄉鎮與郊區的受訪者之間亦存在顯著差異(如表 11 所示)。

以上顯示年齡層介於 15 歲以上及家庭人數在 3 人以上及原本住在鄉鎮郊區的南部民眾對於購屋決策中價格考量，有著較多不同之意見及看法。

研究顯示，在位置準則的重要性方面：(1)高收入族群與中等及低收入族群的受訪者亦存在顯著差異(如表 14 所示)，(2) 3 人家庭與 4 人以上家庭受訪者看法也存在顯著差異(如表 15 所示)。

以上顯示不管是高、中或低收族群都對

於購屋決策問題的位置準則中，有著較多不同之意見及看法。

而研究顯示在屋況準則的重要性方面：

(1)高年齡層與中及低年齡層的受訪者的看法皆存在顯著差異(如表 18 所示)，(2) 2 人以內家庭對比 3 人家庭及 4 人以上家庭的受訪者的看法亦存在顯著差異(如表 20 所示)。

以上顯示不管是高、中或低收族群都對於購屋決策問題的屋況準則中，有著較多不同之意見及看法。

五、結論與建議

本章將針對研究之分析結果進行統整與說明，並針對分析結果提出適當建議，期盼對於建商、仲介及購屋消費者可以藉此了解南部民眾對於購屋決策各項考量的重視程度，以提升從事建造或者買賣房屋之參考依據，而本研究也針對性別、年齡、收入、居住型態、同居人數進行五種不同的分類進行個別分析，讓建商及仲介有更多的參考依據。分析之結果，本研究針對「台灣南部購屋決策」提出以下建議：

- (一) 本研究建議建商在台灣南部推出新建案時，在工程方面須多注意工程之品質，以訂立嚴格之查核及檢驗標準，嚴防新成屋就有漏水的現象，迎合台灣南部消費者之需求，有效提升消費者的購買慾望。而本研究族群間之意見顯著差異分析，可提供建商在新建案時提供有效之參考依據，希冀達成能直接打入目標市場的方法。
- (二) 本研究對代銷及仲介則建議在銷售中古屋時，需先詳細了解其屋況及房屋之地理位置優勢，以利於在銷售時向客戶提出真實屋況情形，以及將房屋在地理位置上之優勢告知消費者，讓消費者在選擇購買時有正確的資訊能夠比較，以利做出最後正確的購買決定。而由本研究分析出之族群顯著差異分析，也可針對研究結果之族群進行推廣，利用此結果希冀能提升銷售率。
- (三) 本研究對消費者之建議，在進行購屋決

策時應先蒐集購屋標的的相關資訊，透過專人講解及網路上對於屋況的詳細介紹資訊，再依據自己對價格可接受性、建案位置的便利性及最重要的屋況了解程度，最後方能找到符合自己需求之住宅。

參考文獻

1. Chi, L. P., Fu, C. H., Chyng, J. P., Zhuang, Z. Y., Huang, J. H. "A Post-Training Study on the Budgeting Criteria Set and Priority for MALE UAS Design". *Sustainability*, 11(6), pp.1798, 2019.
2. Chi, L. P., Zhuang, Z. Y., Fu, C. H., Huang, J. H. "A Knowledge Discovery Education Framework Targeting the Effective Budget Use and Opinion Explorations in Designing Specific High Cost Product", *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 10(8), pp.2742, 2018.
3. Liang, S., Wu, I.C., Zhuang, Z.Y., Chen, C.W. "Analytic Hierarchy Process as a Tool to Explore the Success Factors of BIM Deployment in Construction Firms", 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 2019.
4. Satty, T. L. "The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation.", New York: Mc Graw-Hall, 1980.
5. Saaty, T. L. "The Analytic Hierarchy Process.", New York: Mc Graw-Hall, 1990.
6. Scott, J. "Social network analysis: critical concepts in sociology.", New York, Routledge, 2002.
7. Schmidt, K., Babac, A., Pauer, F., Damm, K. "Measuring patients' priorities using the Analytic Hierarchy Process (AHP) in comparison with Best-Worst-Scaling and rating cards: methodological aspects and ranking tasks". *Health Economics Review*, 6(1), 2016.

8. Zhuang Z.Y., Lin C.C., Chen C.Y., Su C.R. "Rank-Based Comparative Research Flow Benchmarking the Effectiveness of AHP-GTMA on Aiding Decisions of Shredder Selection by Reference to AHP-TOPSIS". *Applied Sciences*, 8(10), pp.1974, 2018.
9. Zhuang, Z. Y., Su, C. R., Chang, S. C. "The effectiveness of IF-MADM (intuitionistic-fuzzy multi-attribute decision-making) for group decisions: methods and an empirical assessment for the selection of a senior centre". *Technological and Economic Development of Economy*, 25(2), pp.322-364, 2019.
10. Zhuang Z.Y., Chiang I.J., Su C.R., Chen C.Y. "Modelling the decision of paper shredder selection using analytic hierarchy process and graph theory and matrix approach". *Advances in Mechanical Engineering*, 9(12), 2017.
11. 王可明,「影響企業導入豐田生產方式之個案研究—以 T 集團為例」, 國立高雄應用科技大學, 2012。
12. 林月萍,「成房屋市場住宅產品之顧客消費期望偏好知識型決策支援系統」, 朝陽科技大學, 2003。
13. 林昱伶,「以決策樹方法探討顧客消費行為之差異性分析-以連鎖醫美診所為例」, 東吳大學, 2015。
14. 洪啟釗,「影響消費者購買住宅房屋考量因素之研究—以屏東縣(市)為例」, 開南管理學院, 2003。
15. 陳柏翰,「建構驗屋項目與排序之研究」, 國立中央大學, 2020。
16. 張金鶚, 房地產投資與決策分析—理論與實務, 第 35~44 頁, 華泰書局, 1996。
17. 張春龍,「住宅選擇模型之研究—以台南市為例」, 長榮管理學院, 2000。
18. 賀振宇,「高雄市中產階級自用住宅屬性需求之研究」, 國立中山大學, 2009。
19. 鄧振源、曾國雄,「層級分析法(AHP)的內涵特性與應用」, 中國統計學報, 第 27 卷, 第 6 期, 第 6~22 頁, 1989。
20. 潘福田,「購屋者決策因素—以新北市為例」, 大同大學, 2010。
21. 賴慧蓉,「消費者購屋決策模式之建立—以台中市透天別墅為例」, 朝陽科技大學, 2007。
22. 韓睿程,「購屋者決策因素—以高雄市為例」, 國立高雄第一科技大學, 2016。

以公路交通系統模擬模式探討行向改變對出口匝道運轉績效之影響

張舜淵¹ 翟慰宗²

¹交通部運輸研究所(運輸計畫組、組長)

²交通部運輸研究所(運輸計畫組、研究員)

摘要

國道 1 號林口 A 交流道南下出口匝道雙車道出口，並漸變為 3 車道及 4 車道，其中，在接近文化一路口的車道配置為「左轉、左轉、左轉+直行、右轉」的 4 車道配置。由於文化一路於八德路至龜山一路間的距離僅約 140 公尺，二個號誌化路口間的儲車空間有限，導致南下出口匝道車輛左轉後，易有回堵現象；本文將以「公路交通系統模擬模式」評估中外車道行向「左轉+直行」的配置改為「直行」的對出口匝道運轉績效之影響，以提供相關業管單位參考。

關鍵字：行向改變、匝道運轉績效

Using the HTSS Mode to Explore the Impact of the Change of Direction on the Operation Performance of the Exit Ramp

Chang Shuen-Yuan¹ Tsai Wei-Tsung²

¹ Institute of Transportation, MOTC.

² Corresponding Author, Institute of Transportation, MOTC.

ABSTRACT

The double-lane exit of the south exit ramp of Linkou A Interchange on National Highway No. 1 will gradually become a 3-lane and 4-lane. Among them, the lanes close to Wenhua Road Intersection are configured as "turn left, turn left, turn left, straight, turn right" 4-lane configuration. Since the distance between Wenhua Road and Bade Road and Guishan Road is only about 140 meters, the storage space between the two Zhihua intersections is limited, which causes the vehicles on the south exit ramp to turn left and they are prone to back jams. This article will use the "Highway Traffic System Simulation Mode" to evaluate the impact of the "turn left + go straight" configuration of Chinese and foreign lanes to "go straight" on the performance of the exit ramp, so as to provide reference for relevant industry management units.

Keywords: change of direction, operation performance of the exit ramp

一、緣起

國道 1 號林口 A 交流道南下出口匝道雙車道出口，並漸變為 3 車道及 4 車道，其中，在接近文化一路口的車道配置為「左轉、左轉、左轉+直行、右轉」的 4 車道配置。由於

文化一路於八德路至龜山一路間的距離僅約 140 公尺，二個號誌化路口間的儲車空間有限，導致南下出口匝道車輛左轉後，易有回堵現象；本文將以「公路交通系統模擬模式」評估中外車道行向「左轉+直行」的配置改為

「直行」的對出口匝道運轉績效之影響，以提供相關業管單位參考。



圖 1 國道 1 號林口 A 交流道南出匝道車道漸變示意圖

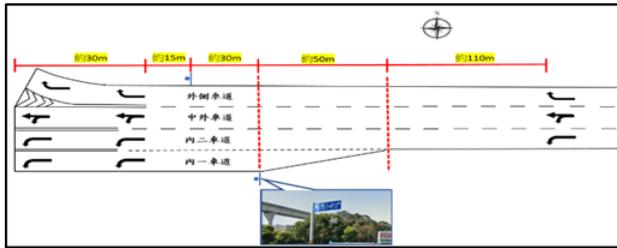


圖 2 國道 1 號林口 A 交流道南下出口匝道車道配置

二、交通特性分析

有關交通特性分析基礎資料，本文採用「國道 1 號林口 A 交流道南出匝道改善工程」可行性評估報告之調查成果，調查日期為 109 年 6 月 23 日，文化一路/八德路及文化一路/龜山一路等 2 處路口的轉向交通量如圖 3 及圖 4 所示，號誌時制計畫如圖 5 及圖 6 所示。路口的交通特性說明如下：

(一)文化一路/八德路口

1.林口 A 南出匝道(實際為往西方向)

平常日上午尖峰時段的交通量約 1,595 PCU/hr，其中，以左轉交通量最大，為 867 PCU/hr(約占 54%)；其次為右轉交通量，為 572 PCU/hr(約占 36%)；直行交通量最小，僅 156 PCU/hr(約占 10%)；左轉交通量約為直行交通量的 5.6 倍。

平常日下午尖峰時段的交通量約 2,129 PCU/hr，其中，以右轉交通量最大，為 1,176 PCU/hr(約占 55%)；其次為左轉交通量，為 625 PCU/hr(約占 29%)；直行交通量最小，為 328 PCU/hr(約占 15%)；左轉交通量約為直行交通量的 1.9 倍。

2.文化一路往南方向

平常日上午尖峰時段的交通量約 1,958 PCU/hr，其中，直行交通量為 1,641 PCU/hr(約占 84%)，右轉交通量為 317 PCU/hr(約占 16%)。

平常日下午尖峰時段的交通量約 1,500 PCU/hr，其中，直行交通量為 1,286 PCU/hr(約占 86%)，右轉交通量為 214 PCU/hr(約占 29%)。

3.文化一路往北方向

平常日上午尖峰時段的交通量約 1,519 PCU/hr，其中，直行交通量為 795 PCU/hr(約占 52%)，左轉交通量為 724 PCU/hr(約占 48%)。

平常日下午尖峰時段交通量約 2,428 PCU/hr，其中，直行交通量為 1,147 PCU/hr(約占 60%)，左轉交通量為 981 PCU/hr(約占 40%)。

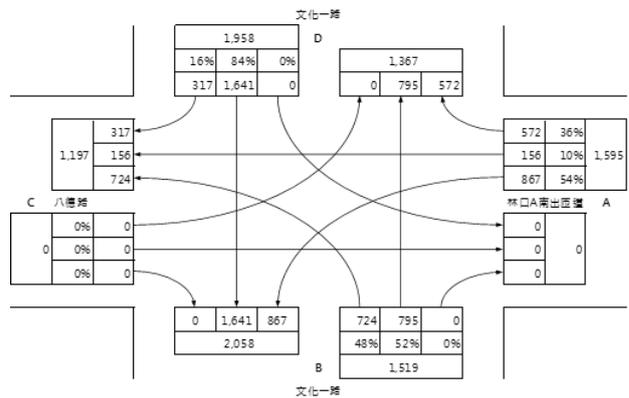


圖 3-1 文化一路/八德路路口轉向交通量(晨峰)

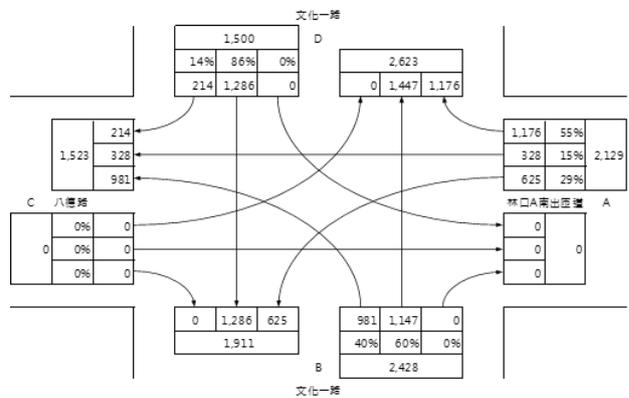


圖 3-2 文化一路/八德路路口轉向交通量(昏峰)

(二)文化一路/龜山一路口

1.林口 A 北出匝道

平常日上午尖峰時段的交通量約 1,791 PCU/hr，其中，以直行交通量最大，為 845 PCU/hr(約占 47%)；其次為右轉交通量，為 683PCU/hr(約占 38%)；左轉交通量最小，為 263 PCU/hr(約占 15%)。

平常日下午尖峰時段的交通量約 1,586 PCU/hr，其中，左轉、直行及右轉的交通量大致相同，分別為 518、566、502 PCU/hr。

2.文化一路往南方向

平常日上午尖峰時段的交通量約 2,559 PCU/hr，其中，直行交通量為 1,609 PCU/hr(約占 63%)，左轉交通量為 950PCU/hr(約占 37%)。

平常日下午尖峰時段的交通量約 1,912 PCU/hr，其中，直行交通量為 1,114 PCU/hr(約占 58%)，左轉交通量為 798PCU/hr(約占 42%)。

3.文化一路往北方向

平常日上午尖峰時段的交通量約 2,317 PCU/hr，其中，直行交通量為 1,187 PCU/hr(約占 51%)，右轉交通量為 1,130PCU/hr(約占 49%)。

平常日下午尖峰時段的交通量約 3,013 PCU/hr，其中，直行交通量為 1,881 PCU/hr(約占 62%)，右轉交通量為 1,132PCU/hr(約占 38%)。

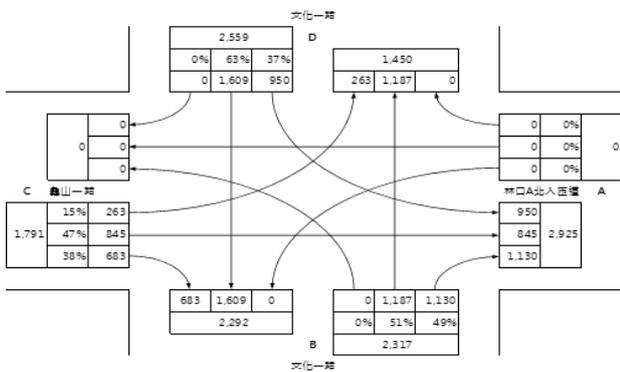


圖 4-1 文化一路/龜山一路路口轉向交通量 (晨峰)

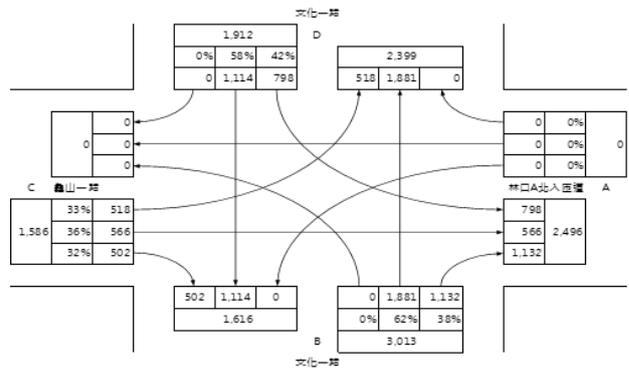


圖 4-2 文化一路/龜山一路路口轉向交通量 (昏峰)

(三)號誌時制計畫

1.文化一路/八德路路口於平常日上、下午尖峰時段的號誌週期均為 180 秒，共 3 時相如下：

- (1) 第 1 時相為文化一路南往北方向直行及左轉通行(允許文化一路南下右轉及南下出口匝道右轉)。
- (2) 第 2 時相為文化一路南向直行、右轉及北向直行(允許南下出口匝道右轉)。
- (3) 第 3 時相為南下出口匝道通行。

2.文化一路/龜山一路路口於平常日上、下午尖峰時段的號誌週期均為 180 秒，共 3 時相如下：

- (1) 第 1 時相為文化一路南向直行及北向直行、右轉 (允許龜山一路右轉)。
- (2) 第 2 時相為北往南方向直行及左轉通行 (允許文化一路北上方向右轉)。
- (3) 第 3 時相為龜山一路往東方向通行。

路口：文化一路/八德路	時相	平日晨峰時制(秒)			平日昏峰時制(秒)		
		綠燈	黃燈	紅燈	綠燈	黃燈	紅燈
南側：文化一路	D	62			70		
北側：八德路	C	58	3	2	55	3	2
東側：龜山一路	B	45			40		
西側：文化一路	A	-			-		

圖 5 文化一路/八德路號誌時制計畫示意圖

路口：文化一路/龜山一路	時相	平日晨峰時制(秒)			平日昏峰時制(秒)		
		綠燈	黃燈	紅燈	綠燈	黃燈	紅燈
南側：文化一路	D	50			65		
北側：龜山一路	C	60	3	2	50	3	2
東側：龜山一路	B	50			50		
西側：文化一路	A	-			-		

圖 6 文化一路/龜山一路號誌時制計畫示意圖

三、公路交通系統模擬模式

公路交通系統模擬模式(Highway Traffic Systems Simulation Model, 簡稱 HTSS)是為了模擬公路交通系統中獨立路口、幹道及路網而發展的一套微觀模擬模式。系統使用時機在於模擬市區、郊區之號誌化路口、幹道或路網，或對於無法採用分析性模式之有衝突車流，可採用本系統進行模擬，操作流程如圖 7 所示。

模擬模式中，「內部節點」以藍色實心圓表示之，為被模擬之主要交叉路口，最多可以設定 49 個；「邊界節點」以藍色空心圓表示之，是路網周邊產生車輛的節點，最多可以設定 51 個；在 HTSS 模式中，內部節點最多可設定 49 個、邊界節點最多設定 51 個、節線最多可設定 100 條。

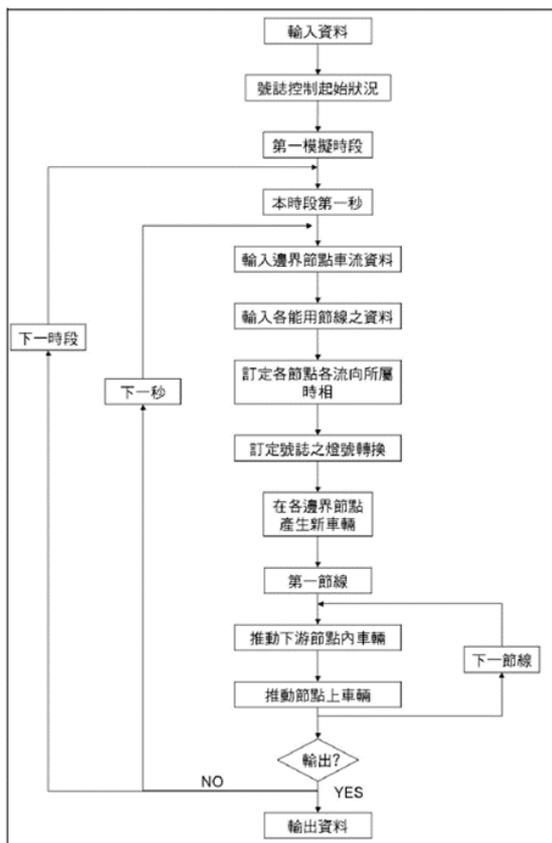


圖 7 HTSS 操作流程示意圖

(一)路網規劃

依上述欲分析路網及路口條件，設定 2 個內部節點及 6 個邊界節點，14 條節線詳如圖 8，其中，內部節點 1 為文化一路/八德路路口、節點 2 為文化一路/龜山一路路口，

So~S5 為為邊界節點。節線 1、2、11、12 為虛擬節線，節線 3 為南出匝道、節線 4 為八德路、節線 5、8、13 為文化一路(東向)，節線 6、7、14 為文化一路(西向)，節線 9 為龜山一路，節線 10 為北入匝道。

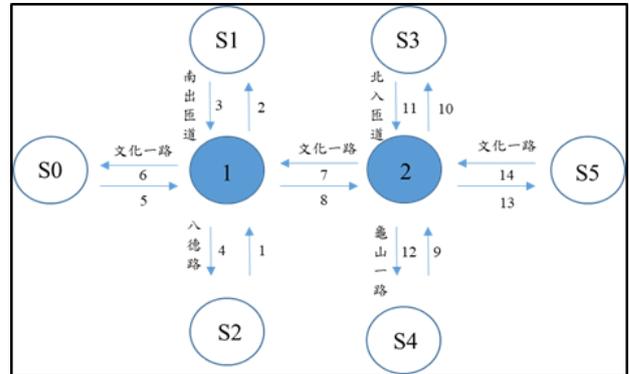


圖 8 路網規劃示意圖

(二)節線設定

HTSS 模擬模式中節線型式可設定「節線長度」、「左側非全車道長度」、「節線上下游車道數」及「節線是否具機車專用道」等相關模擬參數。本案節線形式設定如表 1，其中節線 3 內車道(南出匝道漸變岔出左轉專用車道)設定為具左側非全車道 125(公尺)，另節線 5、7、8(文化一路)具機車專用道，相關設定詳如表 1 及圖 9。

各節線車道行向依現況車道行向設定如表 2，其中節線 3(南出匝道)各車道行向由外而內為右轉，直行及左轉，左轉專用，左轉專用設定如圖 10。

表 1 節線形式設定

節線編號	節線長度 (公尺)	左側非全車道長度(公尺)	上游車道數	下游車道數	機車專用道
1	326	-	1	1	-
2	420	-	1	1	-
3	420	125	3	4	-
4	326	-	3	3	-
5	500	-	4	5	v
6	500	-	3	3	-
7	152	-	5	5	v
8	152	-	5	5	v
9	204	-	3	3	-
10	500	-	2	2	-
11	500	-	1	1	-
12	204	-	1	1	-
13	276	-	4	4	-
14	276	-	4	4	-



圖 9 節線 3(南出匝道漸變岔出左轉專用車道) 示意圖

表 2 節線行向設定

節線編號	車道轉向				
	車道1	車道2	車道3	車道4	車道5
3	右	直、左	左	左	-
5	機車	右	直	直	直
7	機車	直	直	直、左	左
8	機車	直	直	直、左	左
9	右	直	直、左	-	-
11	直	-	-	-	-
14	右	直	直	直	-



圖 10 節線 3 南出匝道車道行向示意圖

(三)大小車與機車轉向比例

節線設定中大小車與機車轉向比例依文化一路/八德路路口轉向交通量及文化一路/龜山一路路口轉向交通量設定如表 3，若節線下游為邊界節點，不需設定節線轉向比。

表 3 大小車與機車轉向比例

節線編號	上午尖峰			下午尖峰		
	大小車與機車轉向比例(%)	左轉	直行	右轉	左轉	直行
3	54	10	36	30	15	55
5	-	84	16	-	86	14
7	48	52	-	40	60	-
8	37	63	-	42	58	-
9	15	47	38	32	36	32
11	-	100	-	-	100	-
14	-	51	49	-	62	38

(四)流率設定

節線設定中流率依文化一路/八德路路口及文化一路/龜山一路路交通量設定如表 4，上午尖峰時段，節點 S0 為文化一路南向之流率設定為 1,958(PCU/ hr)，節點 S1 為南出匝道西向之流率設定為 1,595(PCU/ hr)，節點 S4 為龜山一路東向之流率設定為 1,791(PCU/ hr)，節點 S5 為文化一路北向之流率設定為 2,317(PCU/ hr)，熱機時段輸入流率設定為 100(PCU/ hr)。

表 4 節線流率設定

節點編號	時段	上午尖峰流率(PCU/hr)	下午尖峰流率(PCU/hr)
S0	時段1(熱機時間)	100	100
	時段2	1,958	1,500
S1	時段1(熱機時間)	100	100
	時段2	1,595	2,129
S2	時段1(熱機時間)	0	0
	時段2	0	0
S3	時段1(熱機時間)	0	0
	時段2	0	0
S4	時段1(熱機時間)	100	100
	時段2	1,791	1,586
S5	時段1(熱機時間)	100	100
	時段2	2,317	3,013

四、模擬評估分析成果

經上述模型設定，分析軟體執行後，以下就模擬評估分析成果做說明：

(一)車道配置調整對於路口整體運轉績效之影響

1.上午尖峰時段

上午尖峰時段二個車道配置方案對於路口運轉績效的模擬分析結果如表 5 所示，其中，文化一路/八德路路口 A 方向(南下出口匝道往八德路方向)平均延滯將由 44.5 秒/輛增為 92.0 秒/輛，該路口總平均延滯將由 111.5 秒/輛增為 126 秒/輛。另外，文化一路/龜山一路路口總平均延滯將由 102.7 秒/輛降為 101.3 秒/輛；二路口總平均延滯將由 106 秒/輛增為 112 秒/輛。

表 5 文化一路/八德路及/龜山一路路口運轉績效

(上午尖峰，單位：秒/輛)

路口名稱	方向	維持原車道配置		中外車道改為直行專用道	
		平均延滯	總平均延滯	平均延滯	總平均延滯
文化一路/八德路	A	44.5	111.5	92.0	126.0
	B	7.9		8.1	
	D	258.2		251.0	
文化一路/龜山一路	B	182.2	102.7	177.1	101.3
	C	122.3		121.4	
	D	15.0		13.4	
	二路口平均延滯			106	

2.下午尖峰時段

下午尖峰時段二個車道配置方案對於路口運轉績效的模擬分析結果如表 2 所示，其中，文化一路/八德路路口 A 向(南下出口匝道往八德路方向)平均延滯將由 70.9 秒/輛降為 45.5 秒/輛，該路口總平均延滯將由 44.6 秒/輛降為 36.7 秒/輛。另外，文化一路/龜山一路路口總平均延滯由 204.4 秒/輛降為 201.0 秒/輛，二路口平均延滯將由 126 秒/輛降為 120 秒/輛。

表 6 文化一路/八德路及/龜山一路路口運轉績效

(上午尖峰，單位：秒/輛)

路口名稱	方向	維持原車道配置		中外車道改為直行專用道	
		平均延滯	總平均延滯	平均延滯	總平均延滯
文化一路/八德路	A	70.9	44.6	45.5	36.7
	B	3.1		3.3	
	D	63.9		69.7	
文化一路/龜山一路	B	309.3	204.4	316.7	201.0
	C	262.1		237.5	
	D	20.0		19.4	
	二路口平均延滯			126	

由上述模擬評估分析結果可知南下出口匝道中外車道之配置若由「直行+左轉」改為「直行專用道」，上午尖峰時段二個路口之總平均延滯將由 106 秒/輛增為 112 秒/輛，亦即通過該二個路口的車輛平均延滯時間將增加

6 秒；下午尖峰時段該二路口平均延滯將由 126 秒/輛降為 120 秒/輛，亦即通過該二個路口的車輛平均延滯時間將減少 6 秒；整體而言，該項車道配置調整措施對二路口運轉績效之影響不大。

(二)車道配置調整對於南下出口匝道運轉績效之影響

二個車道配置方案對於南下出口匝道各個車道運轉績效之模擬評估分析結果如表 7 及表 8 所示，茲說明如下：

1.上午尖峰時段

- (1) 南下出口匝道 4 個車道之平均延滯時間均將增加，其中，內二車道將由 72.4 秒/輛增為 173.4 秒/輛，內一車道將由 50.3 秒/輛增為 115.7 秒/輛。
- (2) 匝道中外車道停等長度由 114.3 公尺減為 38 公尺，惟內二車道停等長度將由 104.6 公尺增加為 423 公尺，內一車道由 94.2 公尺增加為 120.3 公尺。
- (3) 匝道平均停等延滯將由 44.5 秒/輛，增加為 92.0 秒/輛，平均停等長度將由 80 公尺，增加為 146 公尺。

表 7 南下出口匝道各車道運轉績效(上午尖峰)

車道別	維持原車道配置		中外車道改為直行專用道	
	平均延滯時間(秒/輛)	停等長度(m)	平均延滯時間(秒/輛)	停等長度(m)
外側車道	0.5	2.8	29.3	4.9
中外車道	86.4	114.3	88.1	38
內二車道	72.4	104.6	173.4	423
內一車道	50.3	94.2	115.7	120.3
平均停等延滯(秒/輛)	44.5		92.0	
平均停等長度(m)	80		146	

2.下午尖峰時段

- (1) 匝道外側及中外車道延滯時間將減少，其中，中外車道將由 237 秒/輛減為 79.2 秒/輛；另外，內二車道及內一車道延滯時間將增加，其中，內二車道延滯時間將由 73.9 秒/輛增為 104.8 秒/輛。
- (2) 匝道中外車道停等長度 241 公尺減少為 105 公尺，惟內二車道停等長度將由 89.2 公尺增加為 150.1 公尺，內一車道由 82.1 公尺增加為 100.6 公尺。

- (3) 匝道平均停等延滯將由 70.9 秒/輛，減少為 45.5 秒/輛，平均停等長度將由 118 公尺，減少為 105 公尺。

表 8 南下出口匝道各車道運轉績效(下午尖峰)

車道別	維持原車道配置		中外車道改為直行專用道	
	平均延滯時間 (秒/輛)	停等長度(m)	平均延滯時間 (秒/輛)	停等長度 (m)
外側車道	19.4	61.6	16.7	64.4
中外車道	237	241	79.2	105
內二車道	73.9	89.2	104.8	150.1
內一車道	53.0	82.1	66.6	100.6
平均停等延滯 (秒/輛)	70.9		45.5	
平均停等長度 (m)	118		105	

由上述分析結果可知南下出口匝道中外車道之配置若由「直行+左轉」改為「直行專用道」，上午尖峰時段南下出口匝道中外車道停等長度可由 114.3 公尺降低為 38 公尺，惟約有 200 輛原行駛中外車道左轉車流改行駛內一及內二車道，致該二車道需求流率高於車道容量(443PCU/hr)，內二車道停等長度將由 104.6 公尺大幅增加為 423 公尺，同時因左轉車道車流往上游回堵延伸，將使部分左轉車流於匝道上游路段行駛外側車道，亦將影響外側車道之車流運轉及延滯。另外，下午尖峰時段中外車道停等長度可由 241 公尺降低為 105 公尺，惟內二車道停等長度將由 89.2 公尺增加為 150.1 公尺。內二車道停等長度的增加，可能會造成高速公路回堵主線的問題更為嚴重。

另南下出口匝道維持原車道配置，上午、下午尖峰時段停等長度為 80 公尺及 118 公尺，平均為 99 公尺；若將「直行+左轉」改為「直行專用道」上午、下午尖峰時段停等長度為 146 公尺及 105 公尺，平均將增為 126 公尺。

五、結語

1. 在上午尖峰時段，車道配置調整對於林口 A 交流道二個路口整體的運轉績效將有負面的影響，平均每輛車的延滯時間將由 106 秒/輛增加為 112 秒/輛；在下午尖峰時段，對於林口 A 交流道二個路口整體的運轉績效將有正面的影響，平均每輛車的延

滯時間將由 126 秒/輛減少為 120 秒/輛。

2. 在上午尖峰時段，車道配置調整對於南下出口匝道方向的運轉績效將有負面的影響，平均每輛車的延滯時間將由 44.5 秒/輛增加為 92.0 秒/輛，平均停等長度將由 80 公尺增加為 146 公尺，其中，內二車道的停等長度將由 104.6 公尺增加為 423 公尺；在下午尖峰時段，對於南下出口匝道方向運轉績效的影響，平均每輛車的延滯時間將由 70.9 秒/輛減少為 45.5 秒/輛，平均停等長度將由 118 公尺減少為 105 公尺，然而，內二車道的停等長度將由 89.2 公尺增加為 150.1 公尺。
3. 另南下出口匝道維持原車道配置，上午、下午尖峰時段停等長度為 80 公尺及 118 公尺，平均為 99 公尺；若將「直行+左轉」改為「直行專用道」上午、下午尖峰時段停等長度為 146 公尺及 105 公尺，平均將增為 126 公尺。
4. 南下出口匝道上上午尖峰時段左轉交通量(867 PCU/hr)為直行交通量(156 PCU/hr)的 5.6 倍，上午尖峰時段若將「直行+左轉」改為「直行專用道」，將浪費「直行專用道」的容量，導致左轉車輛的回堵；下午尖峰時段左轉交通量(625PCU/hr)約為直行交通量(328 PCU/hr)的 1.9 倍，且下午尖峰時段左轉交通量小於上午尖峰時段左轉交通量，因此，下午尖峰時段若「直行+左轉」改為「直行專用道」，將讓左轉與直行的車道數可符合下午尖峰時段轉向交通量的比例，並有助於路口績效的提升。然而，車道標線無法在不同時段採用不同的配置，且考量不論上午或下午尖峰時段，內二車道的停等長度均會大幅增加，尤其是上午尖峰時段，停等長度將由 104.6 公尺增加為 423 公尺。為避免造成南下出口匝道回堵主線的問題更為嚴重，並兼顧路口整體運轉績效，建議維持原方案。
5. 本文對於車道配置調整的模擬分析係以高速公路局 109 年 6 月 23 日之交通量調查資料進行分析，建議相關單位仍持續觀察車流變化情形，並適時重新調查交通量及

進行相關的模擬分析，以利提出符合交通運轉需要的交通改善措施。

參考文獻

1. 交通部高速公路局，國道 1 號林口 A 交流道南出匝道改善工程可行性評估報告，2021。
2. 交通部運輸研究所，臺灣公路容量分析軟體(THCS)2019 年版。

運輸規劃支援系統維運成果簡介

戴子純¹ 張碧琴² 劉士豪³ 韋懿軒⁴ 張舜淵⁵ 楊幼文⁶ 翟慰宗⁷

¹ 鼎漢國際工程顧問股份有限公司(國土及城際規劃中心副理)

² 鼎漢國際工程顧問股份有限公司(運輸與規劃部門資深專案經理)

³ 鼎漢國際工程顧問股份有限公司(大數據部門資訊技術總監)

⁴ 鼎漢國際工程顧問股份有限公司(國土及城際規劃中心規劃師)

⁵ 交通部運輸研究所(運輸計畫組組長)

⁶ 交通部運輸研究所(運輸計畫組副組長)

⁷ 交通部運輸研究所(運輸計畫組研究員)

摘要

近年為配合國家政策及國土發展方向，辦理整體運輸發展藍圖相關規劃作業，交通部運輸研究所建置「運輸規劃支援系統」與整合型資料庫，近年來並持續維護、推廣該決策支援系統，與各平台系統進行資源整合共享互惠，強化運輸規劃作業品質與速度。本文說明運輸規劃支援系統發展歷程、簡介系統功能，期提供運輸規劃相關從業人員快速查詢、下載規劃交通建設計畫所需之圖資、數據資料，以達節省資料處理，成果共享之效。

關鍵字：運輸規劃、系統功能

An Introduction to the Maintenance Results of the Transportation Planning Support System

Tai Tzu-Chun¹ Chang Pi-Chin² Liu Shi-Hao³ Wei Yi-Shiuan⁴
Chang Shuen-Yuan⁵ Yang Yu-Wen⁶ Tsai Wei-Tsung⁷

^{1,4} Urban & Transportation Planner Dept., THI Consultants Inc.

² Transportation Planning Dept., THI Consultants Inc.

³ Big Data Dept., THI Consultants Inc.

^{5,6} Institute of Transportation, MOTC.

⁷ Corresponding Author, Institute of Transportation, MOTC.

ABSTRACT

In recent years, in order to coordinate with national policies and the direction of national land development, to handle the planning work related to the overall transportation development blueprint, the Transportation Research Institute of the Ministry of Communications has established a "transportation planning support system" and an integrated database. Integrate resources and share reciprocity with various platform systems, and strengthen the quality and speed of transportation planning operation. This article explains the development history of the transportation planning support system and introduces the system functions. It is expected to provide transportation planning related practitioners with quick inquiries and downloads of maps and data required for planning and transportation construction design drawings, so as to save

data processing and share results.

Keywords: transportation planning, Ssystem functions

一、緣起

近年配合國家政策及國土發展方向，辦理整體運輸發展藍圖相關規劃作業，交通部運輸研究所建置「運輸規劃支援系統」與整合型資料庫，協助辦理北、中、南、東四區域之整體交通系統改善方案，近年來並持續維護、推廣該決策支援系統，與各平台系統進行資源整合共享互惠，強化支援決策品質與速度。本文說明運輸規劃支援系統發展歷程、簡介系統功能，期提供運輸規劃相關從業人員快速查詢、下載規劃交通建設計畫所需之圖資、數據資料，以達節省資料處理，成果共享之效。

二、系統發展歷程

本系統於民國 96 至 98 年間之「運輸部門中長程計畫審議決策支援系統與整合資料庫建置之研究」案完成系統基礎建置作業，而後於 100 至 102 年之「中長程計畫審議決策支援系統與整合資料庫之維護與效能提升計畫」，針對擴大資料庫範疇、提升系統運作效能和系統資安檢測機制等，進行 3 年期提升計畫；103 年迄今，以資料庫應用及持續更新為主軸，105 年導入文字探勘技術；106 年配合政策需求調整系統功能並強化支援系統應用；107 年進一步納入城際運輸需求模式(TDM2016)成果資料；108 年持續依據使用者回饋，優化系統平台使用者體驗、進行資料詮釋與呈現優化；109 年進行系統未來發展定位與功能檢討，整體歷程如圖 1 所示。

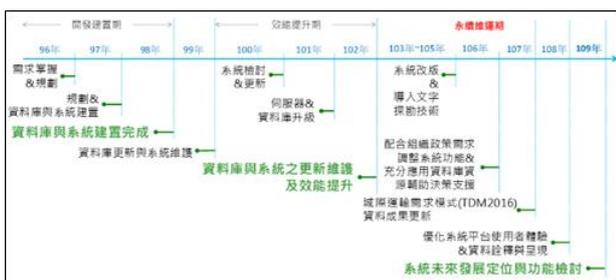


圖 1 系統與資料庫發展歷程

考量運輸規劃作業需求，本系統彙集運輸建設計畫資料、規劃資料、規劃工具、審議規範等於整合資料庫中，進行系統化分類管理，並依據不同使用需求，發展「運輸規劃圖展示及出圖作業系統(單機版)」和「運輸規劃支援系統(網路版)」，整體架構如圖 2 所示。



圖 2 整體系統架構

三、系統功能介紹

運輸規劃支援系統初始以線上 GIS 圖台和資料庫查詢為主軸，現已發展成縣市趨勢分析、計畫查詢、數據庫(圖形資料、社會經濟、運輸營運、運輸需求、資料詮釋)、知識庫(參考文件、工具軟體)、統計地圖、系統管理(帳號管理、使用紀錄、軌跡總覽、縣市分析、網站意見)等 6 大模組功能，各模組功能說明如下：

3-1 縣市趨勢分析

此模組在主畫面上提供全臺灣 22 個縣市之最新人口趨勢、二三級及業人口趨勢、觀光人口趨勢、地圖查詢、公共運輸使用率、公共運輸旅次目的的比例、汽機車持有數等資訊，模組介面如圖 3 所示，109 年度擴充縣市趨勢指標圖卡增加人口組成、個人經常性收入、戶數、戶量，優化連結縣市趨勢分析點選系統管理連結時自動帶出縣市相對應資料。



圖 3 縣市趨勢分析

3-2 計畫查詢

計畫查詢模組提供 GIS 圖台功能，供使用者以 GIS 介面查閱計畫資料、場站交通設施、觀光景點和各種底圖疊合功能。

1. 交通建設計畫基本資料查詢

提供鐵路交通建設計畫區位、線型，計畫內容(計畫緣起、計畫範圍/路線，計畫里程/車站數)，計畫效益，執行情形等基本資料查詢；109 年度完成 121 項交通建設計畫資料更新。

2. 計畫影響分析

提供查詢計畫周邊社經資料，包含人口數、二級及業人口數、三級及業人口數、人口密度、二級及業人口密度、三級及業人口密度，查詢範圍可選 300、500、1,000 和 5,000 公尺，如圖 2。

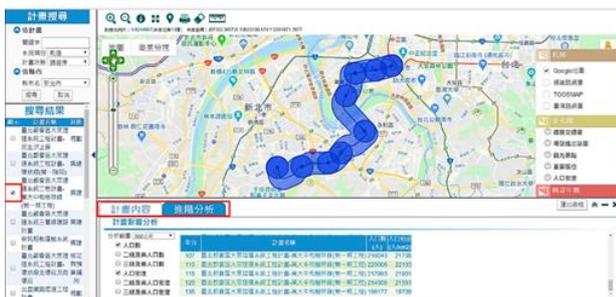


圖 4 計畫影響分析示意圖

3. 道路交通量查詢

提供計畫周邊道路交通量資料，包含國道及省道之日交通量及尖峰小時交通量，查詢範圍可選 300、500、1,000 和 5,000 公尺，如圖 5。

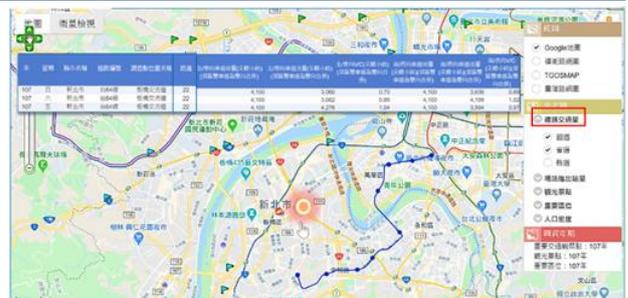


圖 5 道路交通量查詢示意圖

4. 場站進出量查詢

提供計畫周邊場站進出量資料，包含高鐵、臺鐵、及捷運場站歷年進出站旅客人數查詢，如圖 6。

5. 觀光遊憩據點遊客人數查詢

提供計畫周邊觀光局公告主要觀光遊憩據點歷年遊客人數查詢，如圖 7。

6. 重要區位查詢

提供計畫周邊工業區、科學園區、重大土地開發、都市計畫圖、第一級及第二級環境敏感地區等相關區位查詢，如圖 8 及圖 9。

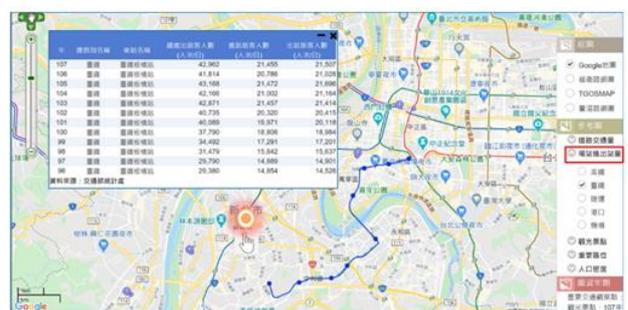


圖 6 場站進出量查詢

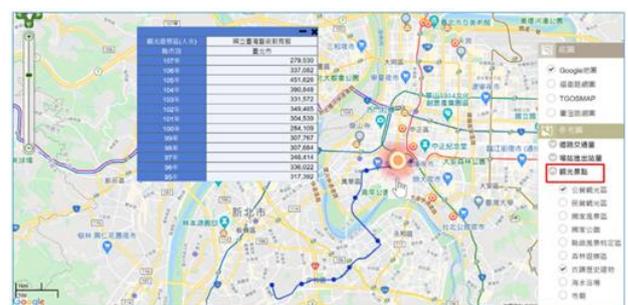


圖 7 觀光遊憩據點遊客人數查詢示意圖



圖 8 重要區位查詢示意圖



圖 9 重要區位查詢示意圖

3-3 數據庫

數據庫模組原提供圖形資料庫、社會經濟資料庫、運輸營運資料庫、運輸需求模式資料庫等 4 項之資料供使用者查詢下載，108 年新增「資料詮釋」，具體建置圖形、社會經濟、運輸營運、運輸需求資料庫之資料詮釋資料，以提供系統使用者相關資訊。

1. 圖形資料庫

圖形資料庫圖資檔案為*.shp 檔案格式，包含底圖、行政區、運輸系統路線、運輸場站/設施、重要區位、計畫區位和運輸需求模式路網等圖形資料，可提供使用者查詢、下載加值應用。

(1) 底圖：包含地形圖、都市計畫圖、環境敏感區、人口密度圖。



圖 10 底圖圖資示意圖

(2) 行政區：包含生活圈界、縣市界、鄉鎮界、村里界。

(3) 運輸系統路線：包含公路(國道、省道、市道、縣道、區道、鄉道、市區道路)、高鐵、臺鐵、捷運。



圖 11 運輸系統路線示意圖

(4) 運輸場站/設施：包含高鐵、臺鐵、捷運、機場、港口、隧道、橋梁。

(5) 重要區位：包含工業區、科學園區、新興計畫區、重要地標、國家公園、觀光景點。

(6) 計畫區位：主要為刻正辦理之鐵公路交通建設計畫。

(7) 運輸需求模式路網：包含城際運輸模式等路網。



圖 11 城際運輸模式路網圖資示意圖

2. 社會經濟資料庫

社會經濟資料依空間別分為各國、臺灣、縣市、鄉鎮 4 大分組，各提供 5 至 22 類社經統計資料，檔案為 Excel 工作表*.xlsx 檔案格式，可提供使用者查詢、下載加值應用。

(1) 各國：包含人口數、土地面積、人口密度、汽機車持有數、人均 GDP、經濟成長率等 8 項社會經濟資料。

(2) 臺灣：包含人口數、土地面積、平均家戶可支配所得、汽車持有數、機車持有數、及學人口(大專院校)、二級及業人口、三級及業人口、年觀光人次等 22 項社會經濟資料。

(3) 縣市：包含人口數、土地面積、人口密度、平均家戶可支配所得、汽機車持有數、及業人口、及學人口(大專院校)、年觀光人次等 18 項社會經濟資料。

(4) 鄉鎮：包含人口數、土地面積、人口密度、二級及業人口、三級及業人口等 5 項社會經濟資料。

3. 運輸營運資料庫

依資料類別分為 4 大類次資料庫，包含營運概況次資料庫、營運運量次資料庫、營運效果次資料庫和營運安全次資料庫，檔案

為 Excel 工作表*.xlsx 檔案格式，可提供使用者查詢、下載加值應用。

- (1) 營運概況次資料庫：包含縣市公共運輸使用率、縣市公路系統路線長度、全國運輸系統路線長度、軌道營運場站數。
- (2) 營運運量次資料庫：包含國道客運經營概況(行駛班次數、營業里程數、載客人數)、市區公車經營概況、公路平均交通量、軌道車站進出人數、軌道運輸營運概況(高鐵、臺鐵、及捷運營運總量)。
- (3) 營運效果次資料庫：國道需供比、臺鐵路線利用率、軌道客座利用率、軌道運輸準點率。
- (4) 營運安全次資料庫：運輸系統肇事概況。

序號	縣市	人口數 (A) 人	男性 (A) 人	女性 (A) 人	主辦機構 (B) 名	縣市人口總量 (A) 萬人	國道人口佔率 (%)	國道人口總量 (B) 人	國道人口佔率 (%)	戶數 (C) 戶	戶數 (C) 戶	資料主辦機構 (D) 名
125	新北市	3,902,428			2052.5667	3,901,2430	8.31	32,839	0.84	461,779	1,536,919	2.64
125	新北市	4,076,603			2052.5667	3,986,1001	10.22	59,79	25.98	1,641,512	2.48	
115	新北市	4,134,645			2052.5667	2,014,3779	11.82	47,56	20.64	1,647,269	2.51	
110	新北市	4,068,851			2052.5667	3,982,3234	12.26	71,29	16.45	1,581,980	2.57	
207	新北市	3,995,717	1,954,968	2,040,749	2052.5667	3,946,6929	12.26	74,23	13.51	1,562,037	2.56	5,943.68
106	新北市	3,986,489	1,953,397	2,033,292	2052.5667	3,942,2948	12.50	74,90	12.60	1,543,088	2.58	5,212.68
105	新北市	3,979,208	1,952,341	2,026,867	2052.5667	3,938,6498	12.75	75,54	11.71	1,526,812	2.61	5,262.51
204	新北市	3,970,644	1,951,355	2,019,289	2052.5667	3,934,8175	13.02	76,17	10.81	1,518,900	2.63	6,365.47

圖 12 社會經濟資料庫示意圖

4.運輸需求資料庫

依資料類別分為 3 大類次資料庫，包含城際次資料庫、都會區次資料庫和生活圈次資料庫，檔案為 Excel 工作表*.xlsx 檔案格式，可提供使用者查詢、下載加值應用。

- (1) 城際次資料庫：包含客運起迄矩陣(小汽車、國道客運、臺鐵、高鐵、航空等旅次量)，貨運起迄矩陣(小貨車、大貨車、聯結車、臺鐵、海運等旅次量)，客貨運路網評估(總延人公里、總延人小時)。
- (2) 都會區次資料庫：包含客運起迄矩陣(小汽車、機車、大眾運輸、遊覽車等旅次量)，貨運起迄矩陣(小貨車、大貨車、聯結車、臺鐵、海運等旅次量)。

3-4 工具軟體模組

依資料類別分為 8 大類，包含城際運輸、永續評估、空汙能耗、軌道容量、經效評估、公路容量分析、都會需求模式和生活圈模式。工具軟體模組提供規劃決策應用軟體下載功能，包含規劃工具軟體和系統技術操作手冊功能，目前已提供交通建設計畫經濟效益評

估軟體、臺灣地區公路容量分析軟體、臺北都會區運輸需求模式、生活圈運輸需求模式資料、城際運輸需求模式、永續評估模組、空汙能耗模式、都會捷運系統容量分析模式視窗軟體、臺鐵軌道容量分析模式資訊與手冊。

四、結語

本文說明運輸規劃支援系統發展歷程、簡介系統功能，期提供運輸規劃相關從業人員快速查詢、下載規劃交通建設計畫所需之圖資、數據資料，以達節省資料處理，成果共享之效。

參考文獻

1. 交通部運輸研究所，運輸部門決策支援系統維運技術服務(108年)，民國 109 年。
2. 交通部運輸研究所，運輸部門決策支援系統維運技術服務(107年)，民國 108 年。

Sketchup 軟體於實務設計施工界面整合之研究-以透天建築物為例

王和源¹ 陳偉嘉² 林志忠³

¹國立高雄科技大學土木工程與科技研究所特聘教授

²國立高雄科技大學土木工程與科技研究所研究生

³高雄醫學大學總務處營繕組技佐

摘要

營建工程規模日益龐大，專案管理參與者多介面的問題，在工作上的管理協調上較為困難，造成現場施作人員與建築師、設計師的認知不同，可能因此而導致專案進度的落後、成本的提高與浪費、品質與施工性不佳，進而影響到整體專案的績效。

本研究之目的即在於應用 Sketchup 軟體，建立工程專案作業協調、整合之模式，冀望能改善以往專案協調不易的問題，利用模型的建立，並以模型輔助溝通，達到正確的施作。由案例分析，使用 Sketchup 軟體在建築圖面跟結構圖面之界面檢核、工程步驟界面檢核水電圖面跟建築圖面界面檢核並於 3D 模擬上建立，使得能夠提高工作協調的密合度，並達到工程管理的正確性、方便性，精確性，提升整體建案的效益。

本研究以某建案工程展示建物為案例分析，經由 3D 使用於營建業施工階段之實際案例分析與比較，得出以下結論:Sketchup 軟體製圖模型可以快速入門，使業者更清楚了解最終的呈現結果，更可以運用 3D 快速修編的特性模擬繪製輔助繪製施工圖面協助施工單位克服施工階段問題並討論改進方案，可提升設計者、施工者、業主的溝通，進而檢視 2D 圖面的疏漏及避免資訊重複施工造成的資源浪費，透過繪製 3D 的過程中，施工單位可以更加的了解各介面的關係，規劃者更容易規劃並表示。

關鍵字：建築資訊模型(BIM)、Sketchup、2D(auto cad)、建築圖面、營建工程

Research on the Integration of Sketchup Software in the Interface of Practical Design and Construction-take Toutian Building as an Example

Wang Her-Yung¹ Chen Wei-Jia² Lin Zhi-Zhong³

¹ Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

² Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

³ Technician, Construction and Maintenance Division, Office of General Affairs, Kaohsiung Medical University

ABSTRACT

The scale of construction projects is increasing. The multi-interface problem of project management participants makes it difficult to manage and coordinate work. This results in different perceptions of on-site construction personnel from architects and designers, which may lead to project progress and costs. The improvement and waste, poor quality and construction, which affect the performance of the overall project.

The purpose of this research is to use Sketchup software to establish a coordination and

integration model for engineering projects, hoping to improve the problems that were not easy in project coordination in the past, use the establishment of models, and use models to assist communication to achieve correct implementation.

Based on the case analysis, the use of Sketchup software to check the interface between the architectural drawing and the structural drawing, the engineering step interface to check the hydropower drawing and the architectural drawing interface, and to establish it on the 3D simulation, which can improve the closeness of the work coordination. , And achieve the correctness, convenience and accuracy of project management, and improve the efficiency of the overall construction project.

This research takes a construction project as a case study, and through 3D actual case analysis and comparison used in the construction phase of the construction industry, the following conclusions are drawn:

1. 3D software drawing model is not only suitable for visualized competition drawings, but also enables the industry to understand the final presentation results more clearly. It can also use the characteristics of 3D rapid editing to simulate and draw the construction drawings to assist the construction unit to overcome the problems in the construction stage.
2. In the case of this research, it is found that the application of 3D software in the planning and construction phases can improve the communication between designers, builders, and owners, and then check the omissions in the 2D drawing and avoid the resources caused by repeated construction of information. Waste really helps the efficiency of communication between the builder and the owner.
3. Use the BIM model to integrate and communicate the interface relationship between various disciplines in a three-dimensional space.
4. Through the process of drawing 3D, the construction unit can better understand the relationship between the interfaces.
5. Through the BIM model, you can find out the conflicting points of the 2D drawing and discuss the improvement plan.
6. Through the production of BIM models, it is easier for planners to plan and express.

Keywords: Building Information Model (BIM), Sketchup, 2D (auto cad), architectural drawings, construction engineering

一、前言

營建工程所涵蓋的工種廣泛，其中包括了各個階段的施工順序、分工、銜接配合，隨著營建專案規模日益擴大，專案參與者相對增加，且施工項目內容多而複雜，其中的銜接，造成工作的協調性困難，造成專案工程的進度落後、相對的提高營建成本、施工品質不良，增加施作的危險性，進而影響到整體工程的績效。

工程圖檔技術也跟著進化，CAD

(Computer Aided Drawing)電腦繪圖軟體已不再是單純的繪圖工具，其功能由 2D 平面繪圖提升至 3D model 繪製；在演進成結合 3D model 與專案排程的 4D model；乃至於採用物件導向式設計概念的 BIM(Building Information Modeling)建物資訊建模技術【1】，在設計階段，詳細的分包商施工期間的協調。4D 因素也造成了 3D 組件連接到一個活動的時間表【2】。4D 模型不僅將 3D 模型利用發揮到最大，也促進了工作團隊間的互動【3】；在美國總務管理局(U.S. General Services

Administration) 主導下，透過其下 Public Buildings Service (PBS) Office of Chief Architect (OCA) 所建立之 National 3D-4D-BIM Program 計畫【4】，以專案生命週期的觀點，由規劃設計、施工及設施維護管理等階段，為 BIM 的標準與應用賤一一系列的準則。

視覺化建築模型：Sketchup 軟體之成果為三維模型，其中需要建築工程專案各種平面圖、3D 動畫或其他圖形，皆可以從 Sketchup 模型終生成，也因為所有圖層皆由一個模型製作生成，所以所有的工程圖說都為互相關聯的，在任何一个圖層做更改，可以立即在不同視圖反映出來，由於屬於 3D 模型，也容易讓不同專業工程人員了解工程項目與設計。

而 Sketchup 相較於以往 2D 圖檔及紙本圖文之優勢整理如下【5】：

1. 擁有更好更完善之的理解設計理念，提高對問題的共同理解。
2. 更加注重增值任務，可即時資訊、資料之增減與修改，迅速掌握各參與者所需，減少各階段產生的弊端。
3. 更加精確的估算成本和時間，以及更快速的建物生命週期時間循環，減少返工，材料，時間的浪費。
4. 資訊迅速的傳達，少了人工傳遞的多道手續，減少資訊傳遞錯誤和遺漏，損失也較少。

「建築資訊模型」具有以下這幾種特性【6】【7】：

視覺化建築模型：Sketchup 軟體之成果為三維模型，其中需要建築工程專案各種平面圖、3D 動畫或其他圖形，皆可以從 3D 模型終生成，也因為所有圖層皆由一個模型製作生成，所以所有的工程圖說都為互相關聯的，在任何一个圖層做更改，可以立即在不同視圖反映出來，由於屬於 3D 模型，也容易讓不同專業工程人員了解工程項目與設計。

BIM 在執行過程無法跳脫個專業間的設計本質。如建築、結構、機電、CSD 及 SEM

的干涉排除，都須經各專業工程師的分析與判斷。由於要發揮 BIM 的效益，需要以有豐富設計經驗的工程師配合 BIM 的新流程才能克盡其功；此類軟體的養成訓練時程很長，要成功導入至各事業體的最有效方式；事先找一個有 BIM 執行經驗的顧問團隊做整體流程的規劃，再輔以教育訓練，才能在最短的時間內達到成功的技術轉移【8、9】。

本研究以高雄市某 5 樓住宅新建工程，應用 Sketchup 軟體將 2D 圖面劃成 3D 後進行圖面的規畫，即可視化的溝通平台，能方便設計者、施工及使用單位三方面進行水平與垂直的溝通、協調及整合，提升設計效率和質量。在營建施工階段，能降低變更設計及施作後再拆除的狀況，提升工程建設績效、質量與安全性。

二、研究方法及設計

從 BIM 軟體的介紹、sketchup 軟體的功能與應用，Sketchup 模型建構與工程協調應用之相關性。

2.1 BIM 軟體簡介

目前市面上可稱為 BIM 的軟體相當的多。以往由於各家軟體於建築資訊產業不斷的競爭，並且不斷的推陳出新，市面上目前流通的軟體，Sketchup，Autodesk Revit、Autodesk Navisworks、Bentley Architecture、Graphisoft ArchiCAD、Innovaya，其他諸如能夠做估算、能夠為賦予 3D 模型詳盡的物件規格、屬性資料等，都為 BIM 的應用範圍，其皆可稱為 BIM 的相關軟體。

2.2 3D 模型案例之建立

BIM 模型的建構是利用 BIM 的相關軟體 Sketchup 將案例的建物模型建構完成，以利於後續工程協調之應用。先將各樓層建製完成，並進行討論樓層的界面點，開孔位置、大小，樓梯，廁所，動線……等。

建築 3D 模型的步驟：

1. 將建築圖各層的平面圖繪製成 3D 模型，並檢討內部界面點。
2. 建築圖各樓層完成後，2 樓疊加到 1 樓上

面，3 樓疊加到 1 樓上面，依序疊加到頂樓。

3. 疊加完成後檢討外觀是否有界面點。
4. 外觀裝修跟檢討銜接處是否有界面。
5. 建置 3D 模型完成後如圖 1 所示。

2.3 建築圖面、結構圖面及水電圖面整合

建築圖面及結構圖面整合完成後，利用圖面與水電、瓦斯、中華電信進行討論，且須更加得清楚，樑位、柱位、牆面何處需要加大加厚，或是單樓層進行討論，利用圖面的功能進行剖面或是細部放大，以便進行整體、剖面、細部、大樣 3D 圖的討論。如圖 2 所示。

2.4 圖面界面之分析與解決對策

由於現場工程師較擔心圖面不清楚，圖面畫製不夠詳細，工程師讀圖與設計部門的想法不一致，業主與設計認知不同，故將建築圖面建立及結構圖面的完成並與水電討論管路整合圖面的問題點。進而跟業主、建築師、結構技師、設計師、水電技師，進行圖面的反應，並將 3D 圖面顯現出來，將可能的處理方案呈現給各部門清楚了解，以便確認施工，工程人員也可以很清楚了解最後的定案。

三、Sketchup 於施工上之應用

使用 Sketchup 軟體於施工上，將應用於工程上，工程的施作上面除了 AUTO CAD 的 2D 的建築圖、結構圖、水電圖、細部大樣圖、施工步驟圖、磁磚分割圖…等等，這些相關的圖面都是為了要清楚的表達如何將圖面轉換成成品。但是 2D 圖面有時會表達不清楚或是認知上面的不同，所以常常造成施作完成後與業主的認知有不一樣的結果，再加上施作的工程界面問題，這些都會造成後續的補施作、修改、工期的延宕。為了避免這類問題，冀望更清楚的表達完成後的成果，將圖面繪製成 3D 的圖面，並依據施工經驗將 3D 圖面配合施工上面做一個討論並分析。

3.1 假設工程配置原則及相關位置確認

所謂假設工程即於施工時配合工程之進行而設置的臨時工程，而於完工時即行拆除，

如工務所、工寮、測量、整地、鷹架、臨時的動力照明設備、防護設備、臨時道路、圍籬、臨時水、臨時電、施工孔、吊料孔…等。依據現場的周邊環境及人員的出入、施工機具動線在施作前都必須先行規劃考慮，以避免在施作時造成相關的問題或造成風險提高。

3.2 鷹架施工評估

鷹架工程屬於最大的費用假設工程，以本案例來說明，鷹架大致可分為：80 公分及 50 公分。寬的內型框架鷹架，然鷹架在平面圖不易了解其相關配置及施作方式。若是將鷹架以 3D 的方式配置則更為清楚。若以 3D 配置如下。

如圖 3 鷹架相關位置所示，係將鷹架繪畫完成並製作成單元件，分別為 80 公分鷹架及 50 公分的鷹架做規劃配置圖圖所示。(白色的為 80 公分鷹架，黃色為 50 公分鷹架)，圖面製作完成後，並請鷹架廠商到工地討論圖面與現場是否可以施作。由於討論過程是用 3D 圖面顯示，所以鷹架廠商容易就很了解現場的需求。

3.3 基礎施工界面討論

本研究利用 3D 的建構發現問題，並找出問題點，加以討論並解決之。如圖 4 所示。

1. 由於側向部分跟鄰房銜接，所以基礎開挖後回填土方，基礎完成後如果基礎回填土方夯實不確實，則易造成隔壁的土方移動，鄰房傾斜、沉陷，以致於後續的維修費用可能很大，故建議地樑下的部分以混凝土澆置使其穩固。
2. 電梯的基礎則必須要先考慮電梯的 1 樓樓地板線到電梯底部深度是否足夠，經計算之後確認跟電梯大樣詳圖 1250mm 是足夠的，但是電梯的周圍並無圍束，如此易造成回填土方時土壤容易會流動到電梯機坑內部等缺失。
3. 化糞池的放置問題，由於本案是使用連續基礎，再加上化糞的深度尺寸，利用 3D 的技術計算開挖深度是否足夠。本研究發現開挖深度的不足，因此必須要將化糞池位置再加深開挖，才不至於造成化糞池的

頂蓋高於 1 樓樓地板線。

- 1 在樓地坪亦有銜接問題，當模板施作時，就要請模板師傅特別注意 1 樓樓地板的銜接，吊模的位置是否正確，不然又必須要進行打除工作。

3.4 廁所內部裝修工程

圖 5 可顯示磁磚貼室的方式，以及跟浴缸、門檻、面盆的相對關係。繪製時須先了解磁磚尺寸(壁磚使用 120*60 公分)、浴缸深度(50~60 公分)、面盆台度完成面(80~85 公分)、淋浴間位置施作樣式及尺寸(建議最小空間為 90*90 公分)…等等。本研究以 3D 繪製完後與施作人員溝通討論後，相關施作人員較易清楚的依照 3D 圖面來完成成品。

3.5 外部裝修工程界面點

本研究利用 3D 繪製完成如圖 6 所示，因此要清楚的看到外露樑跟格柵交疊，此會造成格柵無法安裝，若強行安裝後會造成位置不一樣。與建築師及結構技師充分討論，並反映給上級主管，最後的決定為外露樑退縮 10 公分給隔柵安裝。

如果按圖施作，待完成後則必須搭架並將外露樑打除 10 公分，方可安裝格柵，打除的過程又可能會造成其他的物件損傷，相對地就會造成工程進度延宕、費用增加及施工危險…等額外的風險及支出。

3.6 水電管路配置討論

圖 7 所示說明，一開始看到平面圖時的關聯性並不是很清楚，故在討論上都會有相對的困難。圖內有相對位置、剖面圖等，如圖 7 所示，可討論水電的相關配置，配置的部分：

- 1.提供抽水馬達的電源。(電源線路的路徑及開關位置)
- 2.水池排水的位置(方便日後清理需要將水排掉)。
- 3.水池的補充水源(給水的位置)
- 4.下大雨時造成水量過高所以需要(防溢孔)。
- 5.抽水馬達的位置及出水孔位置
- 6.維修孔的位置(日後需要維修的時候，應該要將石材面板拆除，所以施作的時候要考慮拆除的方便性……等等。

3.7 細部施工大樣討論與分析

一棟建築物皆有甚多工項，各個工項互相配合才可以完成。例如電梯入口的石材裝修，設計師將電梯牆面的設計圖繪製完成，工程師跟石材廠商討論圖面後，石材廠商會在出石材施工大樣圖，安裝師傅會依照施工大樣圖去安裝並施作完成，由於業主並不清楚圖面，又怕製作完成後並不是業主所想要的形式，若是將圖面繪製成 3D 圖面並將石材依圖面分割、噴上素材如圖 8，況且 3D 製作完成後將局部放大或是旋轉到任一個角度，如此在跟業主說明的時候會更加的清楚，日後石材廠商安裝施作完成後的型式，也會跟 3D 圖面一樣。

四、結論

各階段施工圖部分，均由設計施工單位，根據實際設備尺寸輸入數據(尺寸)標註於平面圖與立面圖上，若需在視覺或透視某個角度之切面，再切割另一切面的剖面圖，才可以表示出來。以 Sketchup 的模型圖內割出任何視覺角度之剖面圖，可以 360 度全面任意角度均可割出自己所需要的視覺剖面或平面圖，更能呈現出管線高程與樑下相對的距離，是否符合天花板高程的範圍。

本研究以某建案工程展示建物為案例分析，經由 3D 使用於營建業施工階段之實際案例分析與比較，得出以下結論：

1. 3D 軟體製圖模型不僅適用視覺化競圖，使業者更清楚了解最終的呈現結果，更可以運用 3D 快速修編的特性模擬繪製輔助繪製施工圖面協助施工單位克服施工階段問題。
2. 藉由 3D 軟體於規劃、施工階段之應用，可提升設計者、施工者、業主的溝通，進而檢視 2D 圖面的疏漏及避免資訊重複施工造成的資源浪費，實有助營造業者與業主之溝通效率。
3. 透過 BIM 模型以三度空間整合及溝通各專業間之介面關係。
4. 透過繪製 3D 的過程中，施工單位可以更加的了解各介面的關係。

5. 透過 BIM 模型可以找出 2D 圖面的衝突點，並討論改進方案。
6. 透過 BIM 模型的製作，使得規劃者更容易表現。

五、參考文獻

1. 陳怡兆 (2009)，專案資訊整合模型之建構與專案管理資訊系統之應用，國立成功大學土木工程研究所博士論文。
2. GSA (2009), GSA BIM Guide Series 04 - BIM Guide for 4D Phasing, GSA
3. Koo, B., and M. Fischer (2000), Feasibility Study of 4D CAD in Commercial Construction, Journal of Construction Engineering and Management. Vol.126 No.4, pp.251-260.
4. NBIMS (2007), Building Information Models.
5. NBIMS (2006), Building Information Models.
6. 唐清涓(2008)，建築資訊模型(BIM)於整合營建資訊技術之應用，國立宜蘭大學建築與永續規畫研究所，碩士論文。
7. 鄧挺發(2008)，建築專案設計圖整合系統之初步研究，國立台灣大學土木工程學系，碩士論文。
8. 陳志文(2010)，BIM 趨勢及在結構設計之應用，第十屆中華民國結構工程研討會。
9. 伍家儀(2001)，運用 3D 軟體於營建施工階段之案例分析，國立高雄應用科技大學土木工程與防災科技研究所，碩士論文。

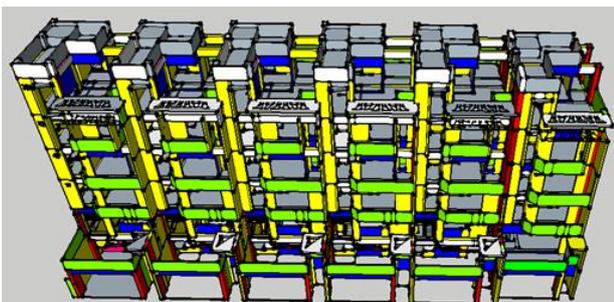
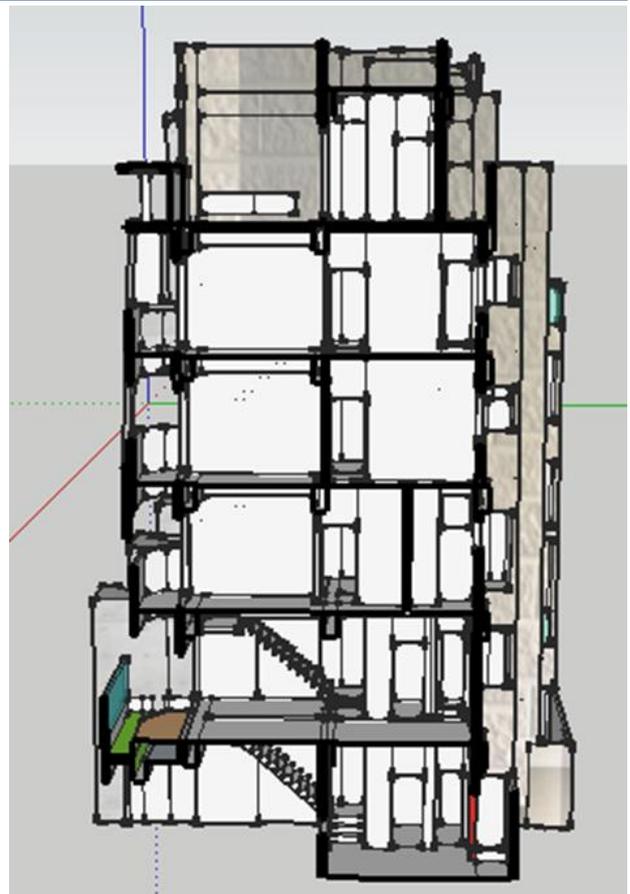
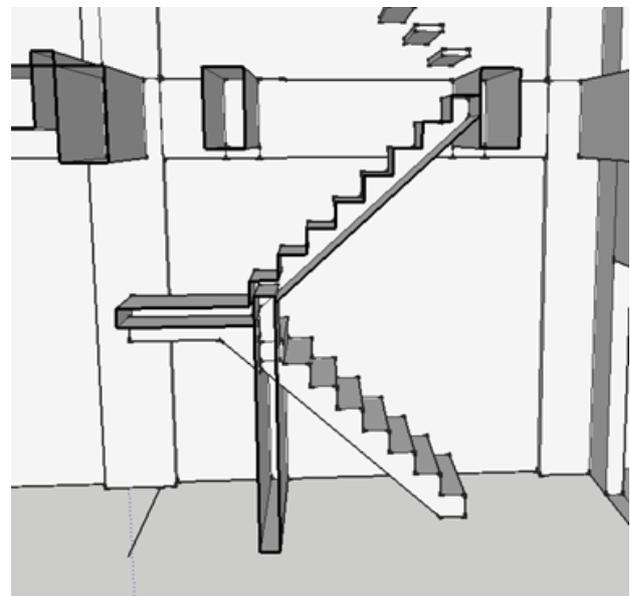


圖 1：建築模型繪製

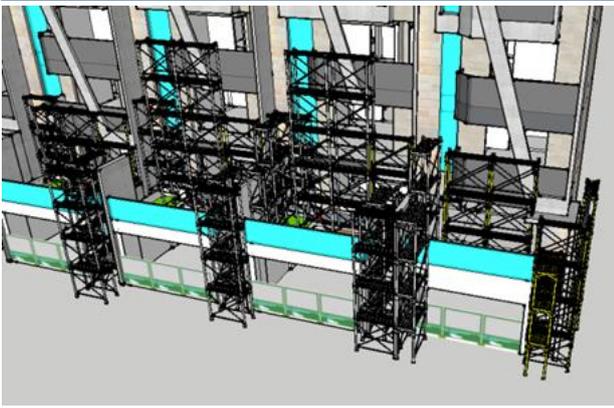


(1)：管線位置剖面

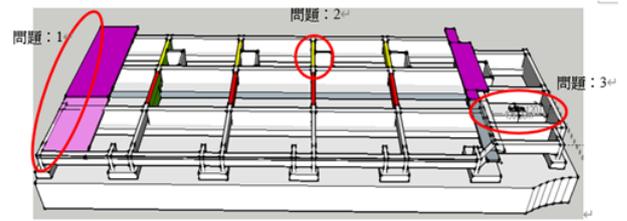


(2)：樓梯剖面

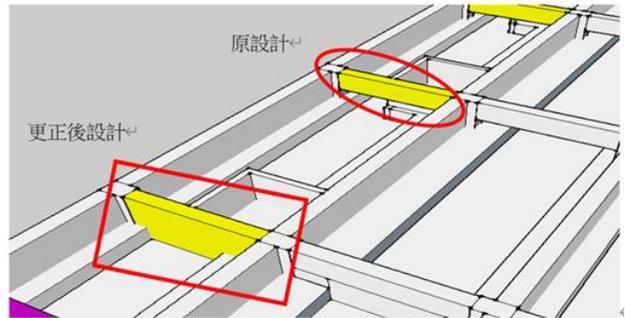
圖 2：管線及樓梯剖面



(1) : 3D 鷹架配置



(2) : 3D 側向圖面



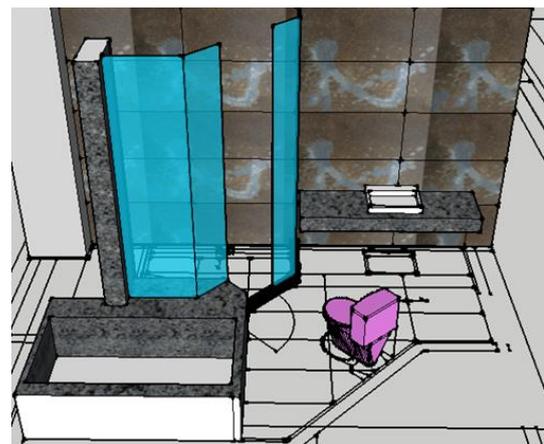
(3) : 電梯基礎問題討論圖面

圖 4 : 3D 基礎結構

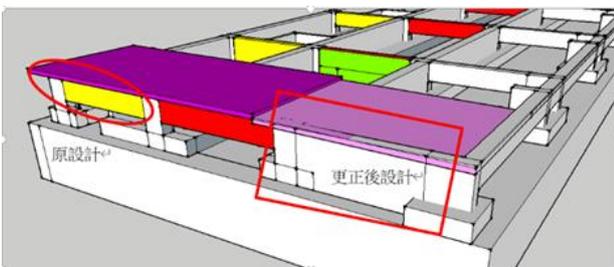


(2) : 實際現場施工照片

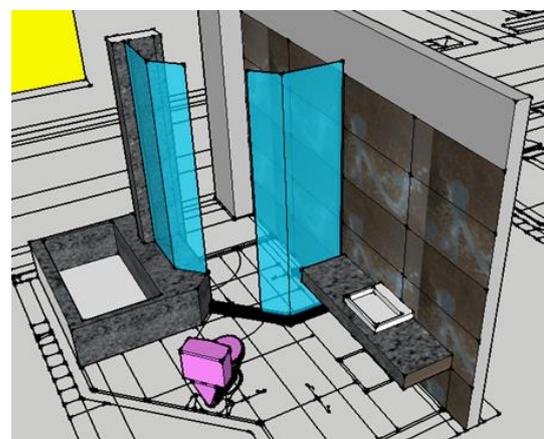
圖 3 : 3D 鷹架搭設圖面及現場施工照片



(1) : (角度 1) 廁所 3D 圖面

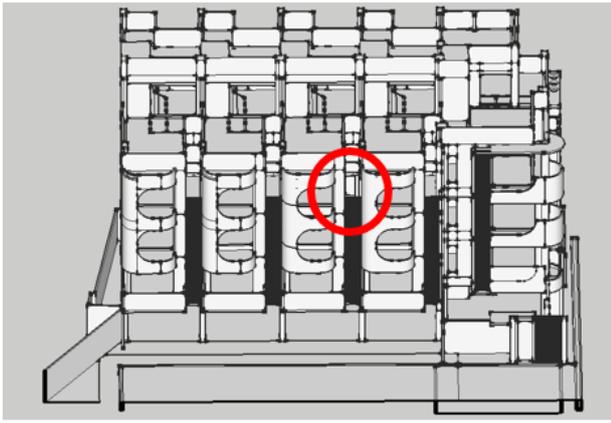


(1) : 3D 基礎結構

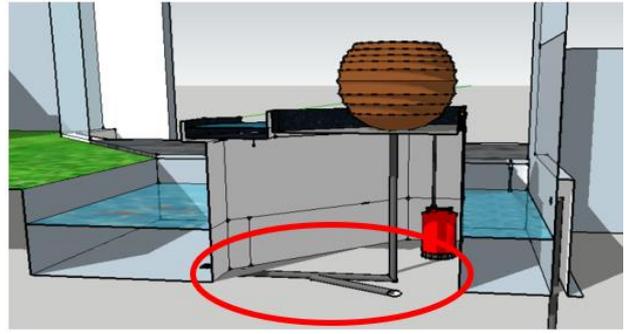


(2) : (角度 2) 廁所 3D 圖面

圖 5 : 廁所 3D 圖面

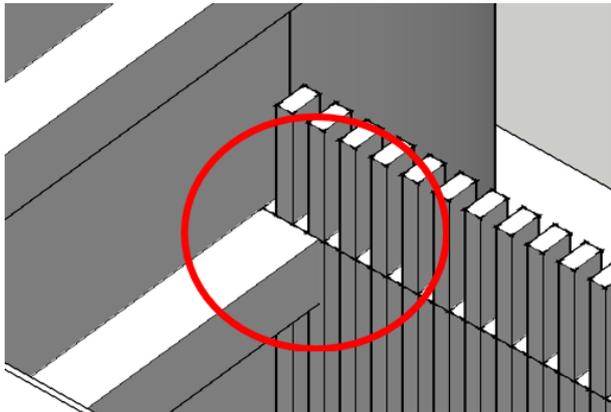


(1)：3D 整體外觀圖



(2)：3D 景觀水池剖面圖

圖 7：景觀水池水電管路配置 3D 圖面



(2)：外觀局部圖

圖 6：5 戶 3D 外觀裝修界面點之圖面

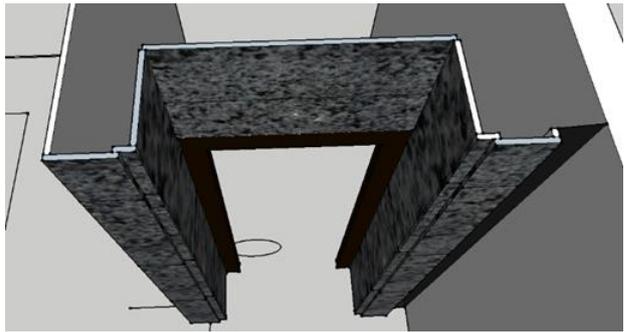
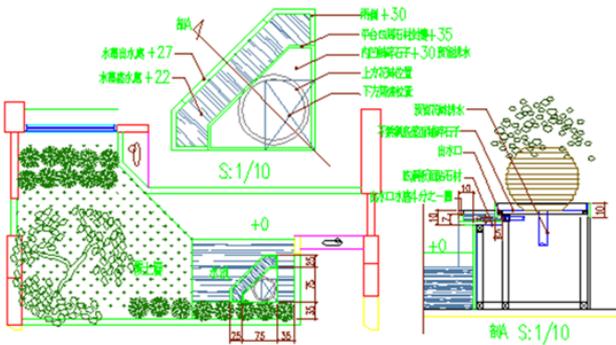


圖 8：電梯石材 3D 圖



(1)：景觀水池平面圖

水土保持工程數量計算指引與要領之探討

李明聰¹ 鄭皓中² 李昀澄³ 吳昱德⁴ 黃世慶⁵
周祖明⁶ 王志雄⁷ 高柏宗⁸ 王維志⁹

¹ 財團法人國家同步輻射研究中心助工程師

^{2,3,4} 國立陽明交通大學土木工程學系碩士生

^{5,6,7,8} 行政院農委會水土保持局工程員、科長、副組長、組長

⁹ 國立陽明交通大學土木工程學系教授

摘要

水土保持工程(簡稱水保工程)之興建與維護是水土保持工作中重要的環節，在當前因極端氣候變遷導致天然災害時有所聞的情形下，讓水保工程能如期如質完成，達到合理土地使用及永續發展之目的實為重要。要使一件水保工程能夠順利完成並保有相應的品質，其必要條件之一則是編列合理的預算。以一個工程之預算而言，主要組成可分為工作項目與其單價及數量，以往相關研究分析對於單價部分著墨較多，而數量計算部分則相對關注較少，然數量計算之正確性與否亦直接影響工程預算合理性與準確性。為此，本研究建立水保工程常見工作項目之數量計算指引，期以作為其數量計算上之一致性規則與作業參考；此外，本研究亦建立水保工程常用單元種類之數量計算要領，說明各類型工程單元之圖示案例、計算參數設定、計算方法與公式，並完成可供實際輸入計算之範本檔以為技術服務廠商實際使用，期提高預算編列的準確性。本研究共彙整 24 項水保工程工作項目之數量計算指引文件，並建立 18 種水保工程數量計算要領及其計算範本檔案。初步研究成果經部分技術服務廠商及工程主辦機關之檢視，顯示本研究所發展之數量計算指引與數量計算要領對於輔助工程數量計算應具有一定之成效。此外，由於目前所發展之模式仍是由人為輸入參數資料並由檔案內建公式進行計算，未來將可再結合 2D 圖形資料擷取減少人為操作及可能產生之誤差，或直接以 3D 模型建立並輸出資訊等方式，再進一步增加工程數量計算之準確性。

關鍵字：水土保持工程、數量計算指引、數量計算要領

Investigation of the Quantity Takeoff Guidelines and Essentials for Soil and Water Conservation Construction Projects

Ming-Tsung Lee¹ Hao-Chung Cheng² Yun-Cheng Li³ Yu-De Wu⁴ Shih-Ching Huang⁵
Tsu-Ming Chou⁶ Chih-Hsiung Wang⁷ Po-Tsung Kao⁸ Wei-Chih Wang⁹

¹ National Synchrotron Radiation Research Center

^{2,3,4} Department of Civil Engineering, National Yang Ming Chiao Tung University

^{5,6,7,8} Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan

⁹ Department of Civil Engineering, National Yang Ming Chiao Tung University

ABSTRACT

The construction and maintenance of soil-and-water-conservation (SWC) is a very important part of soil and water conservation when facing the situation of natural disasters caused by

extreme climate changes frequently. For reasonable land use and sustainable development, it is really critical to make sure that each soil and water conservation construction project could be completed as scheduled and expected. In order to implement such outcome, a construction project with reasonable budget is essential. In terms of a project budget, the main components can be divided into work items and its unit price and quantity. There are many studies which discussed subjects about unit price analyzing and its applications of work items. However, quantity takeoff which also affects the accuracy and reasonability of a construction project budget were fewer discussed. In order to facilitate the consistency of the quantity estimation of soil and water conservation construction in practical operations, this study intends to establish the quantity calculation instructions for common work items of soil and water conservation construction and the quantity calculation method guidelines for common unit types. We build the standard form which illustrates the case drawings, parameters setting, quantity calculate equation to make reference manuals for convenience follow-up to improve the accuracy of budgeting. The main outputs of this study are to accomplish quantity calculation instructions for 24 common work items and 18 types of quantity calculation method guideline of soil and water conservation construction. Moreover, these outputs were optimized it through literature discussion, data review, and discussion with experts to make it easier to understand and more suitable for applying. The result indicates that these instructions and guidelines are useful and helpful in soil and water conservation construction quantity takeoffs. Finally, we propose some future improvement applications about quantity information acquisition from 2D drawings or 3D models which could lower the possibility of quantity takeoff mistakes by human errors to increase the accuracy of budgeting in soil and water conservation.

Keywords: soil and water conservation construction, quantity takeoff guidelines, quantity takeoff essentials

一、前言

水土保持工作主要以保育水土資源、涵養水源、減免災害等作為，來促進合理土地使用與增加福祉，達到永續發展之目的(行政院農業委員會，1994)。而水土保持工程之興建與維護為執行水土保持之重要工作之一，其係融合土木工程、水利工程與植生工程，併包含野溪治理、山河整治以及崩塌地的調查與處理等工作(陳信雄，2004)，目前台灣各地每年有數以百件之水保工程進行，而其相關設計係委由技術服務廠商進行，然由於各家廠商作業與習慣使然，在圖資呈現與其數量計算之作法上不盡相同，進而對後續數量計算結果與最終之預算書產製造成影響。

一般工程預算之組成，主要可分為工程項目之單價與數量兩部份，而國內各單位長

期以來主要以單價為估算重點，然數量計算之正確性亦直接影響估算之準確度。目前國內並無統一的數量計算規則或指引作法，致使實務上可能因數量差異或漏項進而降低預算估算之準確性，甚至造成日後之履約爭議。

因此，本研究為使水土保持工程在數量計算之操作上可逐漸達一致性，將針對水土保持工程常見工作項目之數量計算指引與常見單元種類之數量計算要領進行探討，其中數量計算指引係說明進行工程數量計算時之相關規定與參考資料，數量計算要領則是透過圖示、公式等說明工程數量計算過程資訊。本研究並初步研擬可行之操握之範本，以作為技術服務廠商於估算水土保持工程項目數量之參考，並期可提高預算估算與編列之準確性。

二、文獻回顧

工程預算書之組成主要是由工程項目與其相對應之數量與單價計算所得，而其中數量與單價則直接影響工程預算估算之結果。然國內外相關研究討論多著重於項目的單價及其相關應用上，主要有單價差異與成本關係、契約標價或單價調整分析、單價與投標策略等(Tong and Lu, 1992; 姚乃嘉、楊智斌、郭文達, 2001; 王維志、李建中, 2001; 吳政曉, 2005; 蔡昇穎, 2008; 方冠今, 2008)，而較少對於有對於工程數量部分之探討(Gransberg and Reimer, 2009)。

實際上，工程數量計算結果對於預算估算之準確度有直接影響，然在國內目前並無公版統一之數量計算規則作法(陳新雅, 2018; 王維志、王世旭, 2019)，且因缺乏工程項目及其細項之數量計算指引，因此相關進行估算之人員並無一致性之法可以依循參考，進而生各式各樣不同之計算方法，倘若估算人員又缺乏經驗時，將導致漏項或估算錯誤之情事發生，進而造成預算或估驗之錯誤。

2-1 工程數量計算規定探討

前述的狀況在水土保持工程部分亦無法避免，且實際上由於不同設計單位或個人經常有不同的計算做法，會致使容易產生數量誤差或漏項並衍生預算估算不準確之情事(行政院農業委員會水土保持局, 2020)。有鑑於此，本研究就水土保持工程部分建立其適用之工程數量計算紙引，主要回顧國內外工程數量計算作法之規定，包含有(一)英國(Civil Engineering Standard Method of Measurement, fourth edition, CESMM4; ICE, 2012); (二)澳洲(Method of Measurement of Civil Engineering Works and Associated Building Works, MCEAB; CSAA, 1982); (三)香港(Standard Method of Measurement for Civil Engineering Works, SMMCEW; 香港特別行政區政府, 1992); (四)日本土木工事數量算出要領(案)(國土交通省, 2018); (五)台灣建築工程數量計算規則(財團法人臺灣營建研究院, 2017)。

(一)英國(CESMM4)

英國土木工程師學會(Institution of Civil Engineers, ICE)自 1976 年起逐步制訂土木工程數量計算標準(Civil Engineering Standard Method of Measurement, CESMM)，目前進階至第四版(CESMM4)，英國之 CESMM4 規定具有通用國家標準(national standard neutral)特性，因此依其規定進行契約估價時，須依照個別工程特性選擇適當之數量計算方法，並於數量計算表註明與數量計算有關之契約條款。

在適用範圍部分，英國之 CESMM4 主要應用於土木工程及其附屬之簡易建築構造物(Simple building Works incidental to civil engineering works)作業，主要共分為 26 類之工作項目，分別為(A)一般項目(general Items); (B)地工參數調查(ground Investigation); (C)大地工程及其他專業(geotechnical and other specialist processes); (D)拆除及清運(demolition and site clearance); (E)土方工程(earthworks); (F)場鑄混凝土(in situ concrete); (G)混凝土設備(concrete ancillaries); (H)預鑄混凝土(precast concrete); (I)管道工程(管道、下水道及接管)—僅輸送; (J)管道工程(管道、下水道及接管)—僅裝設; (K)管道工程(人孔、下水道及管道附屬設備); (L)管道工程(支撐及維護、鋪設及挖掘之輔助設備); (M)結構金屬(structural Metalwork); (N)雜項金屬(miscellaneous metalwork); (O)木製品(timber); (P)基樁(piles); (Q)打樁設備(piling ancillaries); (R)道路及鋪設(roads and pavings); (S)鐵軌(rail track); (T)隧道(tunnels); (U)磚造、砌石及磚石(brickwork, blockwork and masonry); (V)塗裝(painting); (W)防水(waterproofing); (X)雜項工作(miscellaneous work); (Y)下水道重新鋪設及相關工作(Sewer and water main renovation and ancillary works); (Z)土木工程附屬之簡易建築構造(simple building works incidental to civil engineering works)。而在呈現上，係以表格方式描述前述 26 種工程項目之計算細項分類與計算規則，主要分成兩部分，分

別為工作內容組成及規則內容。其中工作內容組成可再分成三個子階層(divisions)，分別說明單元類型與其兩種單元規格；而規則內容部分則為數量計算規則(measurement rules)、規則定義(definition rules)、規則涵蓋範圍(coverage rules)與規則補充說明(additional description rules)等所組成。

(二)澳洲(MCEAB)

澳洲土木工程數量計算標準(method of measurement of civil engineering works and associated building works)係由澳洲標準協會於1982年出版，參與標準編撰者共有科學、產業及政府組織等9個單位，而後有任何之標準更新者，並透過每月出版之澳洲標準期刊(Australian Standard)予以公布。澳洲之MCEAB雖已制訂土木與建築工程之數量計算單位及方法，然由於工程之型態與特性多樣化，無法一一針對個別工程類型制定標準化數量計算單位及方法。因此，澳洲土木工程數量計算標準在實際使用上，仍由使用單位考量各工程特性，決定個別專案工程所轄各類型工作與材料之最適當數量計算方式。

澳洲MCEAB計有23個類別，分別為(A)範圍及概述(Scope and General)；(B)準備(Preliminaries)；(C)現地調查(Site Investigation)；(D)整地及拆除(Site Clearance and Demolition)；(E)挖填方(Excavation and Filling)；(F)隧道和豎井(Tunnels and Shafts)；(G)疏浚(Dredging)；(H)打樁及沈箱(Piling and Caissons)；(I)道路及鋪面(Roads and Paving)；(J)鐵路軌道工程(Railway Track work)；(K)混凝土(Concrete)；(L)磚造及石造(Brickwork and Block work)；(M)鋼結構及金屬製品(Structural Steel and Metalwork)；(N)木工、木製品及五金(Carpentry, Joinery and Ironmongery)；(O)屋頂、屋頂管線及牆面處理(Roofing, Roof Plumbing and Wall Cladding)；(P)板金及衛生管線管道(Sheet metal Work and Sanitary Plumbing and Piped Services)；(Q)水管、污水及排水(Water Mains, Sewerage and Drainage)；(R)機電管線及管道(Electrical Conduits)；(S)技術服務(Engineering

Services)；(T)泥作(Plastering)；(U)路面、磁磚及磨石子(Paving, Tiling and Terrazzo Works)；(V)打光(Glazing)；(W)油漆(Painting)。

而在其數量計算說明架構部分，係以條列式方式呈現，主要分成7大部分，分別為(1)工作分類；(2)工作項目歸納：專案之工作項目(或數量計算項目)，每個工作項目所需之人力、機具及材料；(3)描述方式：說明數量計算項目包含之內容(非強調承包商應執行之工作)，若數量項目對應之工作有特殊要求與限制，應特別註明；(4)單價內含項目；(5)數量計算方法；(6)尺寸描述順序：除契約另有規定，尺寸應按長度、寬度及高度之順序描述；(7)數量計算單位。

(三)香港(SMMCEW)

香港特別行政區政府在1992年依據其土木工程契約之內容，公布新版土木工程數量計算標準(standard method of measurement for civil engineering works, SMMCEW)，其主要可分為26個種類，分別為(A)準備工作(Preliminaries)；(B)地質勘探(Ground Investigation)；(C)整地(Site Clearance)；(D)施工圍籬(Fencing)；(E)排水及管線(Drainage and Ducts)；(F)管道工程(Pipework)；(G)土方工程(Earthworks)；(H)道路及鋪面(Roads and Pavings)；(I)打樁工程(Piling Works)；(J)模板(Formwork)；(K)鋼筋(Steel Reinforcement)；(L)混凝土(Concrete)；(M)場鑄後拉式預力(In-situ Post-tensioned Prestressing)；(N)鋼結構(Steelwork)；(O)防水(Waterproofing)；(P)軸承及伸縮縫(Bearings and Movement Joints)；(Q)海事工程(Marine Works)；(R)隧道(Tunnelling)；(S)大地工程(Geotechnical Works)；(T)鐵路工程(Railway Works)；(U)固體廢物處置(Solid Waste Disposal)；(V)磚砌及圬工(Brickwork and Masonry)；(W)粉刷(Finishings)；(X)景觀及植栽(Landscape Soft works and Establishment Works)；(Y)檢測(Testing)；(Z)雜項(Miscellaneous)；其中並不包含單價分析項目。

在應用上，香港之SMMCEW主要目的係

以建立數量計算表為主，而呈現上以條列式方式進行，其數量計算作法之架構有(1)工作細項：說明工程項目進一步之細部分類；(2)特徵內容：說明工程項目之特徵、特性等相關內容；(3)單價包含項目；(4)數量計算方法；(5)不可計量項目；(6)數量計算單位等資訊。

(四)日本

日本國土交通省自 1983 年起陸續公布工程數量及機具費用之計算標準，然目前僅建築工程數量計算標準為正式公告執行，而土木工程數量計算標準則僅為草案，因此在此係參考「土木工事數量算出要領(案)」(日本國土交通省，2018)，整理其主要工作項目分為 4 大類別。

(1)共同篇：包含基本事項、土方工程、超輕質路堤用聚苯乙烯泡沫塑料、混凝土、護岸(法覆工)、擋土牆(擁壁工)、箱涵(函渠工)、地盤改良、基礎、結構物拆除與假設工程。

(2)河川、防砂篇：包含護岸基礎工、排水閘門及排水道、浚渫、河川整治、攔砂壩(砂防工)、護坡、消波塊及光纖工程。

(3)道路篇：包含鋪面工程、附屬設施、道路維持、鋼橋上部結構、混凝土橋上部結構、鋼橋橋墩、橋台與橋墩、橋樑補強、隧道及共同管道。

(4)公園篇：包含植栽。

而在數量計算作法規定部分，則列有(1)適用構造物；(2)數量計算項目；(3)分類依據；(4)數量計算方法：數量計算單位應符合一般計量原則，長度、面積及斷面積應根據幾何公式計算，並使用平均斷面積放大及計算數量；(5)結構物數量不扣除之項目：結構物內含之鋼筋、排水孔、體積或面積較小之預埋件，計算數量時不予扣除；(6)計算結構物數量不另計之項目；(7)數量計算單位及小數點位數；(8)其他應注意之規定等資訊。

(五)台灣

而在國內，目前雖尚無土木工程部分之專用規則內容，然財團法人台灣營建研究院在 2017 年就建築工程部分建立相關數量計算規則作法參考。考量土木工程與建築工程在

主要工料如鋼筋、模板、混凝土皆為通用之大宗物料，因此建築工程數量計算規則重點與內容，亦可作為建立水土保持工程數量計算指引之參考。

在工作項目分類上，主要係依國內建築工程之分工結構圖(Work Breakdown Structure 或 WBS)分為建築類別或機電類別，並再進一步細分為 12 項建築細項(土方與基礎工程、結構體工程、圬工及裝修工程、門窗工程、特殊外牆與屋面工程、防水隔熱工程、升降設備工程、景觀工程、裝潢工程、附屬設備工程、雜項工程、假設工程)與 5 項機電細項(給排水工程、電力系統、弱電系統、消防系統、空調工程)。其並針對開挖、填土、鋼筋、模板、混凝土、假設工程等以表格方式整理相關計算規定與說明，其內容包含有(1)工程項目名稱；(2)數量計算規則名稱：於此欄標示該工程細項之數量計算規則，如模板數量計算規則；(3)設計圖應提供資訊；(4)計量計價總則；(5)工作項目分類內容；主要記載此項項目內之細項工作；(6)形式；(7)規格；(8)單位；(9)工作範圍；(10)計量規則說明；(11)計價方式等資訊。

經比較英國、澳洲、香港、日本及國內之數量計算規定與作法可以發現，各國所發展之數量計算規則作法內容不盡相同，本研究後續乃以此將參考各國之優點與補充必要資訊，據以建立適用國內水土保持工程所用之數量計算指引。

2-2 工程數量計算要領探討

由於國內目前並無相關單位制訂與水保工程有關之數量計算要領，在此本研究回顧英國(CESMM4)及日本土木工事數量算出要領(案)之內容。在英國資料部分，參考其產製數量計算表之相關規定作法，其在數量計算要領上主要分為 4 個部分，分別為(1)拆解工作項目：將工程拆解成可為後續方便計算數量之工作項目(亦即為數量計算表中之各工作項目)；(2)各工作項目應具備相對應之資訊：如圖面尺寸資訊、使用材料、施作方式等；(3)確認各工作項目之計算單位：不同工作項目對應不同計算單位，以搭配單價進行複價計

算；(4)定義數量之計算方式與方法：定義各類型工作項目之計算模式，包含有計算參數、計算方式、例外情形等。

而在日本部分，其土木工事數量算出要領(案)則就「一般計算原則」、「數量計算要領」及「數量計算單位」等三個部分，在一般計算原則部分，主要有(1)規範數量單位應採用計量法計算，長度、面積、橫截面面積等的計算由數學公式、擴展、計測儀、平均面積(斷面)法等來執行；(2)利用 CAD 軟體等的計算結果，經確認後可適用。公式計算應按所述順序執行；(3)單位體積質量，除了可進行試驗確定外，還有使用各種指示、指標的數值。

在數量計算要領部分則有五點，分別為(1)長度應利用幾何公式計算，並可按比例放大(可利用 2 個以上量測值之平均為計算基準)；(2)面積應根據幾何公式、三角函數或測量儀器計算，若以測量儀器為面積計算工具，應量測 3 次以上，並以全部量測結果之平均值為數量計算依據；(3)非固定尺寸之斷面，量測面積時，以左右側斷面積之平均值(平均斷面)計算數量；(4)若確認 CAD 軟體計算結果較正確，則應採用 CAD 軟體之計算結果；(5)體積應以幾何公式計算，亦可利用平均斷面計算體積，若採用施工資訊模型(Construction Information Modeling, CIM)計算體積，應先確認 CIM 計算結果之正確性。

最後在數量計算單位部分，則規定應依據公式標註之順序執行乘法及除法運(要求之小數點位數執行四捨五入)以及如計算數量時採用之圓週率、長度、放大倍數、三角函數及弧度等參數，應四捨五入到小數點後第 3 位等兩點。

上述相關數量計算原則，本研究將作為後續建立水土保持工程數量計算要領之參考。

三、數量計算指引之架構組成與建立

先前已提及國內外數量計算上之工程分類、計算規則作法格式有所很大之差異，因此建立一套適合國內水土保持工程適用之數量計算指引以作為實際操作時之參考卻有其必要性與實用性。依照水土保持工程預算

書編製原則及工料分析手冊(2020)，水保局定義水保工程之工作分解結構(work breakdown structure, WBS)為工程類別(分為農路改善及養護與治山防災)、處理單元(如防砂壩、潛壩及固床工)、單元種類(如階梯式固床工、石樑固床工、踏步式固床工及複式斷面固床工等)及工作項目(對應水土保持施工規範及公共工程施工綱要編碼)等 4 個階層，其中單元種類為本研究之數量計算要領範疇，而工作項目則為發展數量計算指引的對象。

在數量計算指引格式部分，本研究參考英國 CESMM4、澳洲 MCEAB、香港 SMMCEW、日本及臺灣營建研究院數量計算規則作法，考量在架構、工作項目分類、闡述方式及與相應內容，應符合直覺式及國內常見方式呈現前提下，研擬其格式如圖 1，主要可分為工作範圍之內容組成與施工作業、工作範圍之配合工作、通用規則及各工作項目類型之計量特性等四個區塊。

(一)工作範圍之內容組成與施工作業：主要內容包括完成此一工作項目所需之人機料等資料，施工作業則摘要說明施工前、施工中、施工後等資訊。此部分內容可與預算書中單價分析表內容互相對應，以利於數量計算過程中，做為檢查是否有漏項之參考。

(二)配合工作：如材料檢試驗、施工完成檢試驗等各種配合試驗，主要作用為提醒是編列檢試驗費用之參考，以避免預算內檢試驗計價項目遺漏或不足。

工作項目名稱(施工綱要編碼)		通用規則			
一、施作範圍 依照設計圖說規定之...種類、強度及型式等進行施作。 二、內容組成 (一)材料： 1. 施工材料1... 2. 輔助材料1... (二)人工： 1. 一般工... (三)機具： 1. 機具1... 三、施工作業 (一)施工前... (二)施工中... (三)施工後...		一、計價範圍 二、計量 (一)依照不同類型之項目，以...計量。 (二)應扣除數量：... (三)數量計算時，取小數點位數... 三、容許誤差 (一)..... (二)..... 四、其他 ...			
四、配合工作 (一)試驗1：... (二)非破壞性試驗1：... (三)施工期間例行性試驗項目及頻率... (四)破壞性試驗：...					
第1階層 (類型)	第2階層 (特徵分類1)	第3階層 (特徵分類2)	計量 類型專用 單位	註明資訊	計價方式
4 工作名稱 (綱要編碼)					

圖 1 本研究發展之水土保持工程數量計算指引格式

(三)通用規則：參考國內外數量規則之應用，摘要擷取適合建立文字規則之內容，諸如「計價項目單價所包含之工作內容」（即計價範圍）、「計量單位」、「不可計量項目」、其他應注意項目等資訊。而在數量計算小數點後有效位數部分，相關單位有不同之作法，如日本就不同之工程項目設定有不同之有效位數，英國 CESMM4 則一般規定以不取小數點位數為原則，台灣建築工程數量計算規則則規定為小數點後二位數，其他如林金面(2001)之施工估價提及一般計算數量取二位小數點、第三位小數點四捨五入等。在本研究中則建議相關計量單位以國際單位制(SI)為基準，因此一般數量計算之小數點以下有效位數為 2 位，而以自然計量單位者則建議為整數。

(四)各工作項目類型之計量特性：主要說明工作項目包含之工作類型種類，並參考各國之數量計算作法，載明工作項目各類型之特性、計量單位、專用資訊(特定數量計算項目之專用規則或資訊)等內容，以及此類型之註明資訊(數量計算時應註明之資訊)與計價方式等。

進一步參考本研究所收集部分水土保持工程 48 件案例預算書之內容，擇定「出現次數較多」之工作項目作為建立數量計算指引之基礎。而在其內容部分，主要係以國內相關規定為基礎，包括工程會施工規範(行政院公共工程委員會，2020)、(行政院公共工程委員會，2020)、水土保持施工規範(行政院農業委員會水土保持局，2017)、公路工程施工規範(交通部，2020)、施工技術規範(交通部高速公路局，2020)、水利署施工規範(經濟部水利署，2020)、水土保持工程品質抽驗補充規定(行政院農業委員會水土保持局，2011)等資料。本研究所完成之 24 項數量計算指引整理如表 1，圖 2 則為摘錄拋石固床工[02383]之數量計算指引內容。

表 1 本研究建立數量計算指引項目

水土保持工程分類	綱要編碼	工作項目
路基及整地工程	02231	清除及掘除
	02300	土方工作
道路工程	02722	級配粒料基層
	02952	道路維護及復舊
土石流防治工程(河床穩定工程)	02383	拋石固床工
	02386	砌排石工
混凝土工程	03110	場鑄結構混凝土用模板
	03210	鋼筋
	03310	結構用混凝土
排水工程	02632	混凝土砌卵石溝
	0263A	混凝土拍漿溝
邊坡工程	02255	臨時擋土樁設施
	02342	土工織物
	02374	箱龍
	02838	加勁擋土牆-地工合成加勁材
植栽工程	02920	植草
	02921	噴植草
職安環境衛生措施	01556	交通維持
	01582	施工警告標示
	01583	工程告示牌及工地標示
	02631	進水井、沉砂井及人孔
其他	01510	臨時設施
	01725	施工測量

圖名: 拋石固床工[02383]	工作範圍	圖式: 13R-1(內)
<p>一、工程說明</p> <p>1. 工程名稱: 拋石固床工</p> <p>2. 工程地點: 河道</p> <p>3. 工程內容: 拋石固床工</p> <p>4. 工程數量: 1000 m³</p> <p>5. 工程圖式: 13R-1(內)</p> <p>6. 工程說明: 拋石固床工係指在河道中拋布石塊，以穩定河床，防止河床冲刷，並可保護河床免受冲刷之工程。</p> <p>7. 工程說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>8. 工程說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>9. 工程說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>10. 工程說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p>	<p>二、工程說明</p> <p>1. 工程說明: 拋石固床工係指在河道中拋布石塊，以穩定河床，防止河床冲刷，並可保護河床免受冲刷之工程。</p> <p>2. 工程說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>3. 工程說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>4. 工程說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>5. 工程說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>6. 工程說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>7. 工程說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>8. 工程說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>9. 工程說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>10. 工程說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p>	<p>三、工程說明</p> <p>1. 工程說明: 拋石固床工係指在河道中拋布石塊，以穩定河床，防止河床冲刷，並可保護河床免受冲刷之工程。</p> <p>2. 工程說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>3. 工程說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>4. 工程說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>5. 工程說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>6. 工程說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>7. 工程說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>8. 工程說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>9. 工程說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>10. 工程說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p>
<p>圖式說明</p> <p>1. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>2. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>3. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>4. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>5. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>6. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>7. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>8. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>9. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>10. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p>	<p>圖式說明</p> <p>1. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>2. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>3. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>4. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>5. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>6. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>7. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>8. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>9. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>10. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p>	<p>圖式說明</p> <p>1. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>2. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>3. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>4. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>5. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>6. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>7. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>8. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>9. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p> <p>10. 圖式說明: 拋石固床工之工程數量應按圖式 13R-1(內)之規定計算。</p>

圖 2 拋石固床工[02383]之數量指引資料

四、數量計算要領之建立

本研究的目的乃是建立水土保持工程之數量計算一致性原則與作法以增加工程數量計算之準確性。一般而論，工程數量係於完成圖說設計後，由計算人員依圖說資料進行各項目之量測與估算。然有研究認為因人為計算疏失是造成工程估價錯誤最大的主因(黃素嬌與蔣千里, 2007)，其中人為疏失、解讀方式與不同立場以及計算人員所忽略之設計誤差等則為其主要肇因(André Monteiro and João Poças Martins, 2013)，另有研究指出工程數量計算誤差之原因有漏項與數量短少兩種，其中漏項乃是源自對工程施工順序之不熟悉，而數量短少則可係因(1)計算範圍不明確、(2)單價分析表內之耗損定義不同，以及(3)甲方與乙方作法之差異等造成(王世旭等, 2017)。

有鑑於此，本研究先建立一致性之水土保持工程數量指引，將可減少認知落差部分衍生之工程計算誤差(王世旭, 2017)。而在人為造成之數量計算誤差部分，則透過減少人工作業(如輸入、手動計算機計算等)及借助電腦自動化將有助於降低誤差的發生，其中 Salman Azhar (2011)研究 32 件工程應用建築資訊模型技術 (Building Information Modeling)，其結果發現工程估價準確度誤差小於 3%。也就是說，應用自動化程序獲得工程數量資訊，並結合專業人員之經驗，應可降低人為誤差之發生，得到較合理工程數量資訊。

本研究研擬 18 種水土保持工程單元種類之數量計算要領，建立其一致性數量計算方式，以為相關單位進行水土保持工程相關數量時之參考與應用。此 18 項單元種類為非透過性壩(混凝土重力式壩)、透過性壩(鋼管壩)、鋼板樁、全套管基樁、階梯式固床工、複式斷面固床工、踏步式固床工、混凝土鋪石固床工階梯式固床工、混凝土護岸、乾砌石護岸、箱籠護岸、混凝土砌石護岸、預鑄護岸、重力式擋土牆、加勁擋土牆混凝土排水溝、砌石排水溝、跌水，其分屬防砂壩、樁、固床工、護岸、擋土牆、排水溝及跌水等 6 類

處理單元。

經審視所蒐集之水土保持工程 160 件案例之圖說資料，發現有「無標示參考圖源」、「缺少參數說明」及「計算公式缺漏」等狀況，其中缺少圖面對應及參數說明將無法得知數量計算究竟為在算哪部分、是否有重複計算，而無公式說明則無法對複雜計算進行檢核，其都將嚴重影響數量計算作業。且發現目前部分術服務廠商所提供之數量計算表，無法清楚呈現計算過程與先後邏輯，致使許多問題至施工階段才會顯現。為避免前述狀況之發生，本研究依循下列原則建構研擬相關數量計算要領。

- (一) 建立計算說明：包含文字說明、範例說明、計算參數設定以及數量計算應參考之圖說資訊(包含設計圖說之圖號及圖示編號)。
- (二) 建立標準圖示：包含可能所需之俯視、平面、立面、剖面等多種角度，以及相關應有之標示資料。
- (三) 計算參數建立原則：因水土保持工程多數須配合現地既有狀況進行施作，在構造尺寸上多有變化，故在參數設定上以非單一尺寸斷面(即變斷面)或標準構造(如矩形斷面、單一長度、單一形式等)為主。複雜構造物則考量進行拆解，以利相關量體計算。

依照本研究擬定之數量計算要領建立原則，並整理 160 件水土保持工程案例之圖面資料，彙整各單元種類之所有可能工作項目如表 2 所呈現，另重新繪製數量計算使用之標準圖示(以混凝土護岸為例如圖 3)。由圖 3 可以發現，將相關所需之參數標註於圖面上，可清楚了解相關構造物或擬計算數量之工作項目的相尺寸，並利建立數量計算要領說明及數量計算公式之用。在輸入參數與計算公式部分，以不涉及複雜計算為原則，並建議使用者應僅輸入數字即可由系統或檔案進行計算，本研究摘錄整理後之混凝土護岸之數量計算要領如表 3 所呈現。

表 2 水土保持工程 18 項單元種類之工作項目彙整

單元種類	可能工作項目
非透過性壩(混凝土重力式壩)	構造物開挖/回填、借土/棄土、鋼筋(鋼筋續接器)、軀體/造型模板、混凝土(打底、主壩、壩翼、護坦)、排水管、鋪排塊石(護坦)
透過性壩(鋼管壩)	構造物開挖/回填、借土/棄土、鋼筋(鋼筋續接器)、軀體/造型模板、混凝土(打底、主壩、壩翼、護坦)、排水管、鋪排塊石(護坦)、鋼管
鋼軌樁	鋼軌樁
全套管基樁	全套管基樁
階梯式固床工	構造物開挖/回填、借土/棄土、鋼筋(鋼筋續接器)、軀體/造型模板、混凝土(打底、固床工)、生態護坡(客土袋)、混凝土砌石
複式斷面固床工	構造物開挖/回填、借土/棄土、鋼筋(鋼筋續接器)、軀體/造型模板、混凝土(打底、固床工)
踏步式固床工	構造物開挖/回填、借土/棄土、軀體模板、混凝土(固床工)
混凝土鋪石固床工	構造物開挖/回填、借土/棄土、砌塊石
混凝土護岸	構造物開挖/回填、借土/棄土、鋼筋(鋼筋續接器)、軀體/造型模板、混凝土(打底、護岸)、生態護坡(客土袋)、排水管、排水器
乾砌石護岸	構造物開挖/回填、借土/棄土、砌塊石、生態護坡(客土袋)、生態護坡(稻草蓆)
箱籠護岸	構造物開挖/回填、借土/棄土、鋼筋(鋼筋續接器)、軀體/造型模板、混凝土(打底、護岸)、箱型石籠、排水管、排水器
混凝土(漿)砌石護岸	構造物開挖/回填、借土/棄土、鋼筋(鋼筋續接器)、軀體/造型模板、混凝土(打底、護岸)、生態護坡(客土袋)、生態護坡(稻草蓆)、混凝土砌石、排水管、排水器
預鑄護岸	構造物開挖/回填、借土/棄土、鋼筋(鋼筋續接器)、預鑄節塊、混凝土、生態護坡(客土袋)、回填 CLSM、不織布

單元種類	可能工作項目
重力式擋土牆	構造物開挖/回填、借土/棄土、鋼筋(鋼筋續接器)、軀體/造型模板、混凝土(打底、護岸)、生態護坡(客土袋)、排水管、排水器
加勁擋土牆	構造物開挖/回填、借土/棄土、加勁格網、生態護坡(客土袋)
混凝土排水溝	構造物開挖/回填、借土/棄土、鋼筋(鋼筋續接器)、軀體模板、混凝土(打底、溝體)、生態護坡(稻草蓆)
砌石溝	構造物開挖/回填、借土/棄土、鋼筋(鋼筋續接器)、軀體模板、混凝土、生態護坡(客土袋)、混凝土砌石
跌水	構造物開挖、構造物回填、借土、棄土、鋼筋(鋼筋續接器)、軀體模板、造型模板、混凝土(打底、主體、側翼、護坦)、排水管、鋪排塊石(護坦)

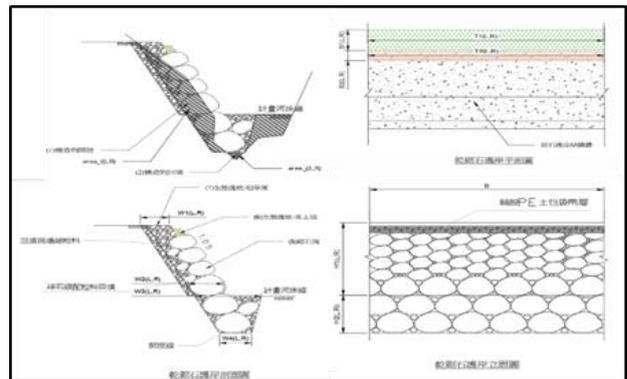


圖 3 重新繪製之標準圖示(混凝土護岸)

本研究所建立之 18 項常見水土保持工程之單元種類數量計算要領，不僅可作為設計時計算工程項目數量所用，亦可輔助工程主辦機關檢核預算書中之主要工作項目的數量。

五、討論

工程數量計算是一門相當專業之學問，其係由設計圖說及複雜計算所得，然其數據正確性與否，卻一直困擾著業主、估算者與投標廠商(黃玲鈴, 2006)。本研究擬建立之數量計算指引與計算要領，以為水土保持工程項目數量計算上之一致性規則與作業參考，

並可運用協助建立工程預算書與檢核其正確與否。

以完成工程預算書為最終目的，配合水土保持工程分工結構圖(WBS)之主要工作項目及預算書計價項目，並可考量數量計算要領(以工作項目為基礎)及數量計算指引(以計價項目為基礎)之整體應用整合架構如圖 4。其中，數量計算指引部分進一步會與完成工作之人機料資訊、單價分析相關，並可與工程會之施工規範與綱要編碼相對應；而數量計算要領部分，則為與工程標準圖、計算參數等相對應。未來再經進一步試用與調整，或將可為國內水土保持工程之數量之一致性

計算方法參考。

在完成 24 項數量計算指引與 18 種數量計算要領後，透過水土保持局的協助召開座談會，邀請工程主辦機關單位與技術服務單位進行討論並請相關單位試用，其回饋與反應顯示本研究所建立之數量計算指引與數量計算要領內容，在相關數量計算作業上有一定之助益，且可降低部分錯誤或遺漏之發生；工程主辦機關則說明這些文件與作法，對於其檢核預算書及工程數量有很大之幫助；此外，相關單位則致認為這些文件可作為相關教育訓練時使用。

表 3 混凝土護岸之數量計算要領

工作項目	計量單位	數量計算要領及參數說明	參考圖	計算參數及公式
構造物開挖	立方公尺	依照設計圖說標示構造物開挖處計算數量	縱斷面圖、橫斷面圖	$\Sigma[\text{area}_i(1)+\text{area}_i(2)]/2 \times W(\text{平均值})$
		構造物開挖數量= $\Sigma(\text{相鄰構造物設計斷面之開挖面積平均} \times \text{構造物設計縱向左右岸長度平均})$		
構造物回填	立方公尺	依照設計圖說標示構造物回填處計算數量	縱斷面圖、橫斷面圖	$\Sigma[\text{area}_j(1)+\text{area}_j(2)]/2 \times W(\text{平均值})$
		構造物開挖數量= $\Sigma(\text{相鄰構造物設計斷面之回填面積平均} \times \text{構造物設計縱向左右岸長度平均})$		
借土	立方公尺	依照設計開挖與回填數量相減計算	橫斷面圖	--
		若回填量>開挖量：回填量-開挖量		
棄土	立方公尺	依照設計開挖與回填數量相減計算	橫斷面圖	--
		若開挖量>回填量：開挖量-回填量		
		$\Sigma(\text{同座固床工相鄰兩階基礎橫向寬度平均} \times \text{同座固床工相鄰兩階基礎縱向長度平均}) \times \text{厚度}$		
砌塊石	平方公尺	依照設計圖說標示砌塊石斷面積計算數量	縱斷面圖、橫斷面圖、標準圖	$\Sigma[(H_1+H_2)/\cos\theta \times B]$
		砌塊石數量= $\Sigma(\text{不同設計之砌石縱向距離} \times \text{不同設計之砌石斷面橫向距離})$ 1.若有不規則之面積，依設計圖示標示。		
生態護坡(客土袋)	平方公尺	依照設計圖說計算客土袋堆疊之範圍	縱斷面圖、橫斷面圖、標準圖	$\Sigma(S_2 \times T_2)$
		Σ 左右岸各層堆疊面積		
生態護坡(稻草蓆)	平方公尺	依照設計圖說計算稻草蓆之範圍	縱斷面圖、橫斷面圖、標準圖	$\Sigma(S_1 \times T_1)$

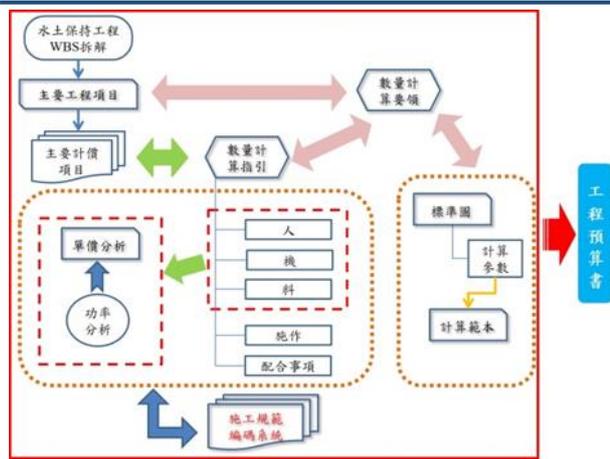


圖 4 水保工程數量計算指引與要領之整合應用

六、結論與建議

6-1 結論

本研究目的在建立水土保持工程常見工作項目之數量計算指引以及常用單元種類之數量計算要領，並研擬兩者間之應用整合架構。在數量計算指引部分，共整理有 24 種工作項目，其參考國內外相關作法建立其格式內容，包含有「內容組成與施工作業-彙整完成此一工作項目所需之人機料資料」、「配合工作-檢試驗項目資料」、「通用規則-數量計算之規則與應用內容」及「各類型作業方式-可能包含之工作類型種類、特徵、特性、專用規則等內容」，以使其符合國內情況並較易理解與應用，透過與工程會之施工綱要編碼相對應，以為後續編列預算書資料使用。

在數量計算要領部分，本研究針對常見之水土保持工程單元種類資料進行研析，由重新繪製數量計算所需之標準圖示(包含圖示與標註)為始，檢討各單元種類可能包含之工作項目，並建構計算工作項目數量之各種參數，以及發展數量計算模型與公式，最後完成 18 項單元種類之數量計算要領。前述相關計算要領之內容，除參數、公式及其應用說明外，亦初步建立計算範本檔案供實際測試與應用，經與工程主辦機關及技術顧問召開座談會及試用，其結果呈現數量計算指引與要領對於輔助水土保持工程之數量計算作業有一定之成效，並可作為教育訓練之用。

6-2 建議

本研究在研析建立水土保持工程數量計算指引與計算要領的過程，發現有幾項值得進一步發展、探討的課題，在此整理說明如後，以為後續相關研究之參考。

- (一) 目前水土保持工程圖面資訊與數量計算數值之抄寫、輸入、計算、審核等皆係由人工操作，然人為失誤是工程數量計算錯誤發生的主要原因之一，因此或可進一步發展自動檢核系統，以減少人為誤差衍生之問題。
- (二) 研擬發展由圖面檔案或模型(2D 或 3D 圖形資料)擷取數量資訊之功能，以減少人為輸入可能衍生之疏失，增加工程數量計算之準確度。
- (三) 持續建立水土保持工程常見工作項目之數量計算指引與單元種類之數量計算要領，並精進已建立之數量計算要領及相關計算參數，發展適合水土保持工程所用之一致性數量計算平台(可以為網頁或連線單機模式)，並透過相關上傳審核機制，逐步建構水保工程常用工程類型之數量計算資料庫，進一步並可建立水保工程常用標準單元資料，以提供全國各水土保持工程執行單位作為參考。
- (四) 將數量計算指引及要領與既有之公共工程 PCCES 系統進行一定程度整合，以利技術服務廠商可以更便捷、有效的獲得工程數量資訊並完成預算書之編擬。
- (五) 藉由本研究所整理之圖面數量資訊、數量計算參數以及實際水土保持工程案例資料(包含數量、預算等資訊)，可進一步進行統計與數據分析，釐清建立相關參數間之關連性，以逐步建立工程經費之概算模型。

七、致謝

感謝行政院農委會水土保持局(計畫編號：SWCB-110-071)提供本研究相關經費與資料，感謝水保局台北分局、台中分局、台南分局與南投分局提供主辦機關之經驗，並感謝

黎明工程顧問公司、世合工程技術顧問公司、豐得工程顧問公司、鋒璟工程顧問公司以及其他數家水保工程顧問公司所提供之寶貴經驗與資料。

參考文獻

1. 日本國土交通省，2018，土木工事數量算出要領(案)，2018。
2. 方冠今，為碳足跡計算編制施工預算工項之改善-以港灣工程為例，國立成功大學土木工程系碩士論文，2008。
3. 王世旭、官素仔、林依蓓、王維志、黃沁琪、楊亦東，「工程數量計算專業之重要性」，營建管理季刊，第 108 期，第 40-48 頁，2017。
4. 王維志、李建中，「電腦模擬與單價比對在工程採購招標之運用」，中國土木水利工程學會會刊，第 27 卷，第 4 期，第 3-12 頁，2001。
5. 王維志、王世旭，水土保持工程數量計算規則暨單價與工率分析及調整計畫，行政院農業委員會水土保持局委託研究報告(計畫編號：SWCB-108-122)，南投，2019。
6. 行政院農業委員會，水土保持法，1994。
7. 行政院農業委員會水土保持局，水土保持工程品質抽驗補充規定，南投，2011。
8. 行政院農業委員會水土保持局，水土保持施工規範，行政院農業委員會水土保持局，南投，2017。
9. 行政院農業委員會水土保持局，水土保持工程預算書編製原則及工料分析手冊，行政院農業委員會水土保持局，南投，2020。
10. 行政院公共工程委員會，施工綱要規範與工項編碼。檢自：https://pcces.pcc.gov.tw/csineu/Default.aspx?FunID=Fun_9_3&SearchType=B (Spetember 1, 2020)
11. 行政院公共工程委員會，工作項目細目碼編訂規則表。檢自：https://pcces.pcc.gov.tw/csineu/Default.aspx?FunID=Fun_9_2&SearchType=B (Spetember 1, 2020)
12. 交通部，公路工程施工規範。檢自：https://pcces.pcc.gov.tw/csineu/Default.aspx?FunID=Fun_4_1&SearchType=H (Spetember 1, 2020)
13. 交通部高速公路局，施工技術規範。檢自：https://pcces.pcc.gov.tw/csineu/Default.aspx?FunID=Fun_4_1&SearchType=H (Spetember 1, 2020)
14. 吳政曉，工程項目單價差異及降低成本案例之探討，國立交通大學土木工程系碩士論文，2005。
15. 林金面，施工估價，文笙書局股份有限公司，台北，2001。
16. 姚乃嘉、楊智斌、郭文達，「投標決策因素之分析與應用」，建築學報，36 期，第 21~37 頁，2001。
17. 香港特別行政區政府，Standard Method of Measurement for Civil Engineering Works (SMMCEW)，1992。
18. 陳信雄，水土保持工程學，科技圖書，台北，2004。
19. 陳新雅，建構整合預算及細項估算之建築資訊模型 - 以 NRM 1 及 NRM 2 為分析基礎，國立成功大學土木工程學系碩士論文，2018。
20. 財團法人臺灣營建研究院，建築工程數量計算規則，2017。
21. 黃玲鈴，以透天住宅案例推估工程數量及參數之研究，逢甲大學土木工程系碩士論文，2006。
22. 黃素嬌與蔣千里，「電腦在工程估算上之應用」，捷運技術半年刊，第 36 期，第 151~160 頁，2007。
23. 經濟部水利署，施工規範。檢自：https://pcces.pcc.gov.tw/csineu/Default.aspx?FunID=Fun_4_1&SearchType=H (Spetember 1, 2020)
24. 蔡昇穎，「工程採購標價審查與合約單價調整機制之研究」，國立中央大學營建管

理所碩士論文，2008。

25. André Monteiro and João Poças Martins, "A survey on modeling guidelines for quantity takeoff-oriented BIM-based design," *Automation in Construction*, Vol.35, pp.238-253, 2013.
26. CSAA, *Method of Measurement of Civil Engineering Works and Associated Building Works (MCEAB)*, 1982.
27. Gransberg, D.D. and C. Reimer, "Impact of Inaccurate Engineer's Estimated Quantities on Unit Price Contracts," *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 135, No.11, pp. 1138-1145, 2009.
28. ICE, *Civil Engineering Standard Method of Measurement*, fourth edition (CESMM4), 2012.
29. Salman Azhar, *Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry*, *Leadership and Management in Engineering*, Vol.11, No.3, pp.241-252, 2011.
30. Tong YiZhe and Lu YouJie, "Unbalanced bidding on contracts with variation trends in client-provided quantities," *Construction Management and Economics*, Vol.10, No. 1, pp.69-80, 1992

自動化 BIM 施工圖建置程式之研究-以機電施工圖為例

吳佳玲¹ 吳翌禎²

¹ 國立高雄科技大學土木工程系土木工程與防災科技碩專班研究生

² 國立高雄科技大學土木工程系副教授

摘要

建築資訊模型在國內的發展與多元的應用趨近成熟，以 BIM 模型具有單一模型整合豐富工程資訊控管容易、資料共享與同步性高，可依據使用者需求產生所需報表及明細數量表等等的特性，因此，若能基於 BIM 模型來製作符合現場施工需求的施工圖，相較於過去的傳統二維施工圖將更有效率，且資料的即時性與正確性比起以往傳統的二維模式更具有效力。本研究將透過視覺化程式設計軟體 Dynamo 從 BIM 模型中快速擷取傳統二維施工圖的圖面所必備的施工資訊標準如：管線尺寸標示、設備位置標註、圖例數量表等相關的圖資資訊，以達到施工圖建置自動化的目的。此程式可以協助建模人員處理繁複的製圖過程，減化人工處理圖面的步驟提升製圖的效益。

關鍵字：BIM、Dynamo、建築資訊模型、機電施工圖

Automation Program for BIM-Based Construction Drawings Generation - A Case Study of MEP Construction Drawings

Chia-Ling Wu¹ I-Chen Wu²

¹ Master Student, Graduate Institute of Civil Engineering and Disaster Prevention Technology, National Kaohsiung University of Science and Technology, Kaohsiung, Taiwan

² Associate Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology, Kaohsiung, Taiwan

ABSTRACT

The BIM development and diversified applications are approaching maturity. The Advantages of BIM models as described as following. One is "Information integration in the single model", it is easy to control and management. Another one is "Data sharing and synchronization is efficient", it can easily generate reports and schedules according to user needs. Therefore, generation construction drawings based on BIM model that meet the needs of on-site construction, which is more efficient and time saving then traditional construction drawings generation methods. Moreover, timeliness and accuracy of data are also more than traditional methods. This research use the visual programming software "Dynamo" to retrieve required data from BIM models, such like pipelines and equipment location, material quantity and so on, it is for achieving the purpose of generating the construction drawings automatically. This program can not only assist modelers deal with complex drawings, but also improve the efficiency of drawing generation procures.

Keywords: BIM, Dynamo, Building Information Modeling, MEP Construction Drawing

一、前言

近年來在政府與業界以及各方學者的推動下，建築資訊模型(Building Information Modeling, 以下簡稱 BIM)於公共工程的標案以及總造價較高的大型建案都有成功導入的案例，以 BIM 技術建置的 3D 模型不只可以應用在成本估算、碰撞檢核、空間檢討、時程控管甚至是綠能分析以及逃生動線的規劃等，都有相關的 BIM 技術可以運用，且參與的成員從業主、前端設計人員、到中間進行施工的施工團隊與後端負責營運維護與資產管理的人員，全部都可以涵蓋在 BIM 的建築生命週期中。透過 BIM 技術整合各專業領域的資訊和龐大的專案團隊人員，工程進度管控也更為流暢，利於業主處理專案問題的決策與提高專案管理的效率，因此國內營建工程導入 BIM 技術為現今銳不可擋的趨勢。

而 BIM 技術在機電方面的運用，像是透過三維視覺化的模擬讓建築與機電管線問題都可以呈現於模型中讓專案成員可以提前發現並處理，而參數化的功能更可以延伸多項資訊串聯服務，越是繁鎖複雜的工程其效益越是顯著。龔昭君(2016)就以實際案例分析 BIM 技術應用於機電建模在天花板高程、排水管線、風管配置等狀況的檢討優勢，並深入探討機電 BIM 建模於工程生命週期中建模規則及各專案角色立場，例如統一法規引用的標準、設備商的元件供應、主辦單位的立場、統包建模的優勢等相關建議。何冠勳(2015)也藉由建立 BIM 模型來進行衝突碰撞的檢查，並針對管線原物料的價格進行市場調查訪價後，計算取得修改後之成本損失，再探討導入 BIM 技術之成本與投資報酬率的成效。

在施工圖的製作方面，李炳宏(2015)就借助 BIM 技術軟體的應用讓施工套圖可以更加迅速準確，由 BIM 軟體所產出的施工圖也可以更加詳細描述施工步驟及現況，施工圖也更具視覺化的呈現。而且以 BIM 技術製作機電施工圖不但具有檔案同步性高以及可依據使用者需求製作明細數量表等各種優點，讓專案的管線、器具等數量資訊明確，使得呈

現在施工圖上的數據資料，其即時性與正確性也更具有效力。而羅元鴻(2015)則透過專家訪談來瞭解與探討從 BIM 導出施工圖說技術還無法完全取代 AutoCAD 技術的原因，提出國內缺少由 BIM 技術建置施工圖的標準流程以及相關配套軟體，造成目前使用 BIM 技術導出施工圖說的工作效率仍不及傳統 CAD 二維圖說。因此雖然 BIM 技術為工程界的一大趨勢，但若有相對應的製圖流程與輔助軟體來製作出相關的施工圖說，將可以讓 BIM 技術的運用更貼近施工實務、發揮更大的效益。過去徐雪芬(2012)就透過專家訪談瞭解 BIM 建築模型施工圖與實務二維施工圖的資訊落差，再規劃 BIM 軟體製作建築施工圖的建置流程，開發出運用於建築與結構模型上的 API 程式，分別為建築材料表建置輔助程式以及零件階段變更的輔助程式，透過輔助程式的應用其自動化的過程節省許多製圖時間。經由 BIM 模型產出的數量表，其器具、設備、管線、零件等數量資料，精確度也比起以往採用人工點料的方式精確且省時減力，減少誤差大幅提升施工圖的正確性。而在專案生命週期中，對於營造與機電等施工單位而言，在施工階段最重要的就是用正確的資訊與最快的速度，提供富含施工資訊的施工圖紙交予業主及監造單位進行圖面審查後，方可進行後續的施工作業。對於機電施工圖方面則有管線尺寸標註與器具數量計算等有別於建築施工圖的需求。且機電施工圖因為系統性質不同，必需區分為電氣系統、弱電系統、給水系統、排水系統、空調系統等五大管線系統，甚至系統分類會再因應專案工程的需求而再細分相關的子系統圖說，因此對於每場工程專案來說，其機電施工圖說的圖面數量相當龐大，在進行施工圖紙的製作的時候，若僅採用人工的方式逐一建立圖紙，再將施工資訊各別配置至圖紙內，過程將會耗費相當大的人力與時間，且處理的過程也會紊亂不一沒有準確的出圖模式與標準。而郭建宏(2017)運用 Revit 與 Dynamo 來探討目前建築專案設計流程與現有 CAD 的轉換，歸納出 BIM 模型產生建築所需的相關資料對比傳統

CAD 的應用，於圖說、資料應用、領域應用三方面進行比較，得出妥善運用 BIM 技術軟體將可以產生出合乎經濟效益的模型。

因此本研究將運用視覺化程式軟體 Dynamo 來作為開發工具，並參考過去的普通二維施工圖紙所呈現的相關施工資訊，依此需求開發出施工圖自動化建置程式。將已使用 BIM 技術建立的三維模型，再轉化為現場施工人員所習慣的二維平面施工圖識圖模式，且圖面資訊至少必需包含管線標籤、尺寸放樣、器具數量、圖例說明、施工位置等具體施工內容，最後再依據施工區域的需求適時補充相關 3D 及剖面視圖，讓施工人員可以更明確的接收到設計人員對於相關工區的設計原意。其自動化的運用，主要目的為替建模人員節省繁瑣複雜且重覆性高的製圖流程，降低時間成本提升建模成效，進一步讓製作施工圖的品質與效率提高。

二、研究方法

本研究的主要目的即是開發一 BIM 機電模型自動化建置施工圖程式，用以協助建模人員快速建置機電施工圖，透過 BIM 技術建置的模型來製作施工圖提高施工圖準確率、減化建模人員製圖過程，節省人力與時間的成本。本研究所開發的施工圖自動化建置程式可分為四大部份，分別為平面視圖批次更名、管線與設備自動化標註、批量創建施工圖紙、圖例數量表批量配置至圖紙，其系統流程，如圖 1 所示。本研究將採用 Dynamo 作為程式開發設計的主要工具，運用 BIM 模型參數化的功能連動模型參數修正其相關的工程資訊，再以程式連結外部檔案並同步擷取建築與結構模型的牆面資訊來進行管線自動化標註，最後程式將可以自動生成施工圖並將所需的圖例說明、明細數量表等資訊同步呈現於平面施工圖內完成施工圖的製作。而本研究將以一棟 10 層樓高的 RC 構造建築物為例，並依序建置好相關的機電模型，再將施工圖建置過程依序導入並進行流程探討，讓自動化建置施工圖程式更加符合實務要求。

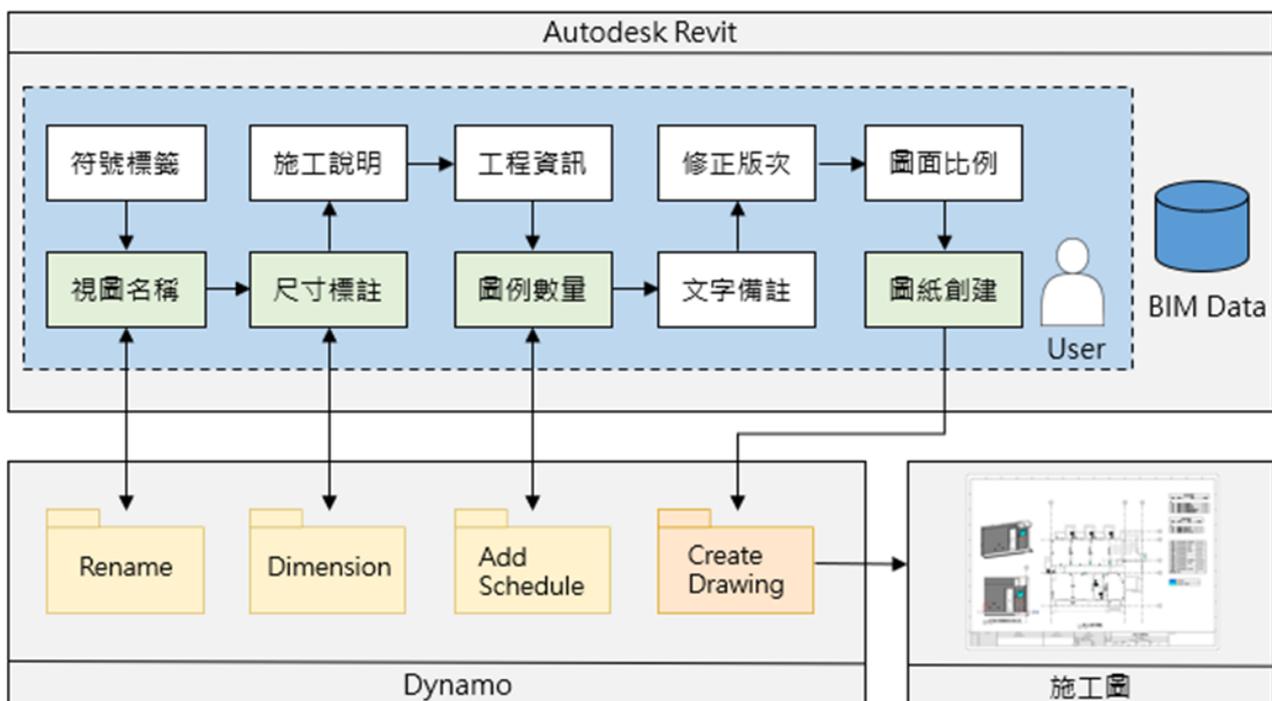


圖 1 BIM 機電模型施工圖自動化建置程式之系統流程圖

三、機電施工圖建置程式

一般建模人員在製作施工圖的過程都必需反覆的重覆相同的動作來製作數量龐大的圖紙，因此本研究運用 Dynamo 的自動化來處理：平面視圖更名、管線與設備標註、創建施工圖紙與快速貼覆圖例及數量表，讓製圖的整體過程更為輕鬆與流暢，其詳細說明如下。

3-1 平面視圖批次更名

如圖 2 所示，平面視圖批次更名要先透過節點取得專案內所有的視圖，再依據視圖的類型判斷出不相關的視圖後進行剔除的動作，接著在過濾後的視圖中取得關於視圖名稱的參數值再判斷要替換的內容，最後將參數內容變更成所需的名稱後再覆寫至模型內的視圖名稱。

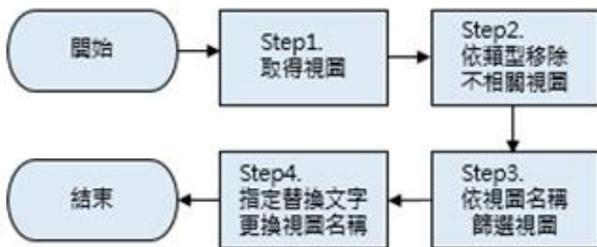


圖 2 平面視圖批次更名流程圖

3-2 管線與器具自動化標註

圖 3 為管線與器具自動化標註程式的流程，首先必需要在要生成標註的位置事先繪製一條模型線，以此設定要生成標註的位置，再來運用節點取得連結進來的建築模型的牆面的資訊，接著選取要進行標註的管線或器具，最後即完成在指定位置產生標註的動作。本次管線與器具自動化標註的輔助程式將會運用到 Dynamo 套件資料庫中的「GeniusLoci」與「Clockwork」兩種套件。

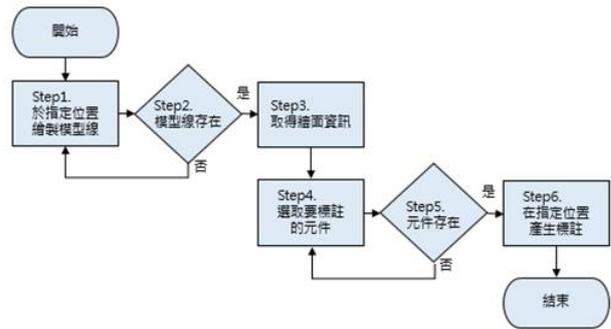


圖 3 管線與器具自動化標註流程圖

3-3 批量創建施工圖紙

批量創建施工圖紙的程式流程如圖 4 所示，首先是運用節點新增圖紙並將相對應的視圖置入於圖紙中，再來是透過節點運算將視圖置於指定位置，最後即可順利生成圖紙。本次批量創建施工圖紙將運用到 Dynamo 套件資料庫中的「GeniusLoci」、「Springs」與「Rhythm」三種套件。

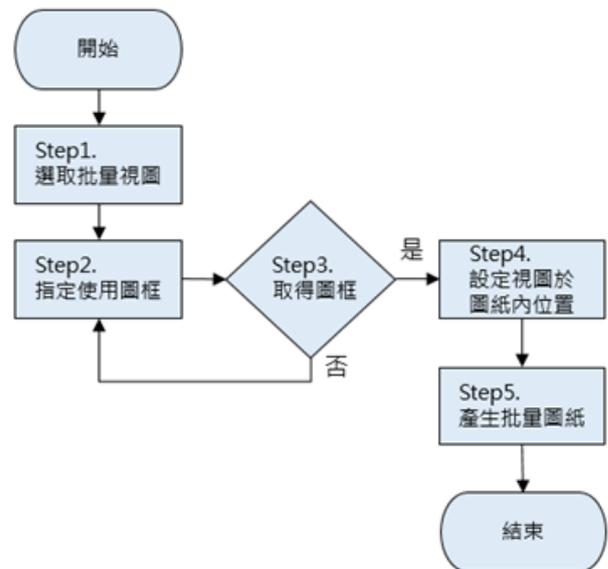


圖 4. 批量創建施工圖紙流程圖

3-4 圖例數量表批量配置至圖紙

圖例批量配置至圖紙的程式流程如圖 5 所示，首先用節點篩選出需要放置圖例的圖紙，再來用節點指定要拿來放置的圖例，最後即可將圖例放置於圖紙當中所需要配置的位置，本次圖例批量配置至圖紙將運用到 Dynamo 套件資料庫中的「Rhythm」套件。

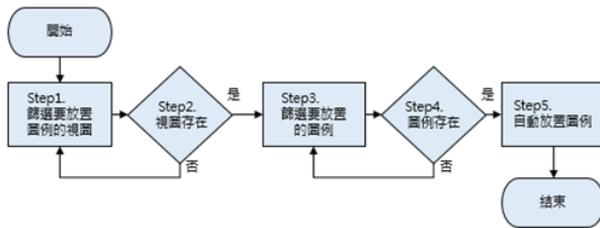
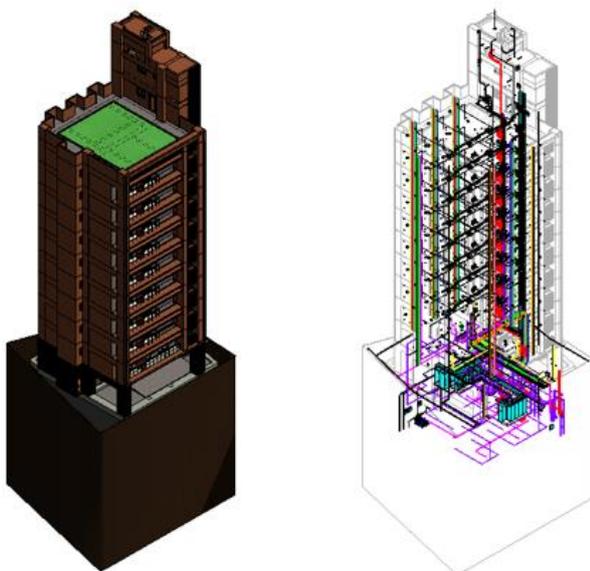


圖 5. 圖例批量配置至圖紙流程圖

四、案例分析

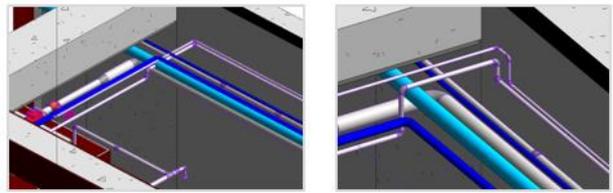
本案例選用台灣高雄市鳳山區民生路一棟 10 層樓高的新建 RC 構造建物為例，將此案機電管線等相關模型依各系統分開建置，一般機電模型會依照系統分開建模，最後專案建置完成全部的系統模型後，再進行彙整與衝突分析(圖 6 及圖 7)，待位置都需確認無誤，再進行後續的施工圖製作。

由於建模軟體具有參數連動的優點，在進入製作施工圖的流程時將視圖名稱修改為要出圖時所採用的圖紙名稱，後續製作出來的施工圖圖名即會是正確的圖紙名稱。在一開始機電系統模型依專案樓層資訊建置對應的樓層之後，可於樓板平面圖新增出對應的平面視圖，接著再運用本研究的「平面視圖批次更名」程式進行相關視圖更名，隨即迅速將視圖進行名稱修改為所需的視圖名稱，使用者可依據系統名稱自由的在 Dynamo 節點中輸入要使用的系統名稱，如圖 8、9 所示。



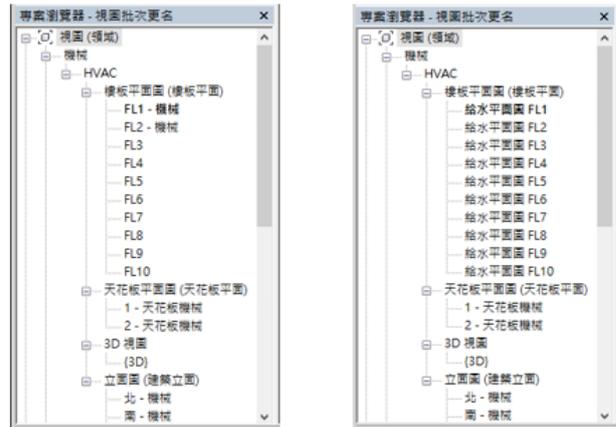
(a)專案建築模型 (b)專案機電模型

圖 6 專案模型



(a)管線衝突 (b)管線衝突排除

圖 7 衝突碰撞檢討



(a)給水視圖名稱修正前 (b)給水視圖名稱修正後

圖 8 給水平面視圖批次更名



(a)照明視圖名稱修正前 (b)照明視圖名稱修正後

圖 9 照明平面視圖批次更名

通常對於現場人員來說，施工圖的特性是提供給現場施工人員越詳實的施工尺寸進行施作才越能減少現場預期之外的施作狀況，也才能將設計師的原始設計如實呈現，因此為了提供給現場施工人員更明確的施工位置，施工圖都會進行管線與設備的尺寸標註，這部份會依據要施作的位置透過程式進行標註，因此在這裡使用者即可在需要標註的地方先繪製好模型線，再讓程式進行位置的判斷後來完成標註的動作，如圖 10、11 所示。

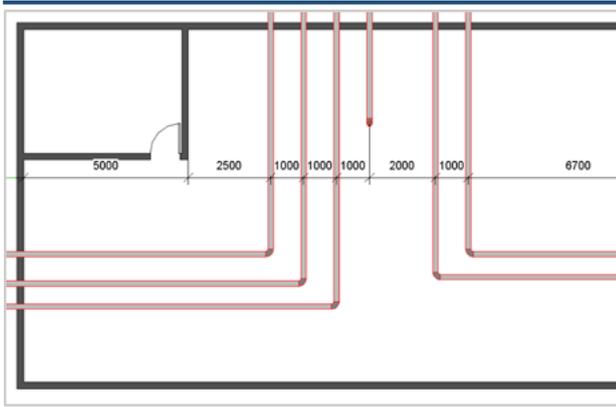


圖 10 管線自動化標註

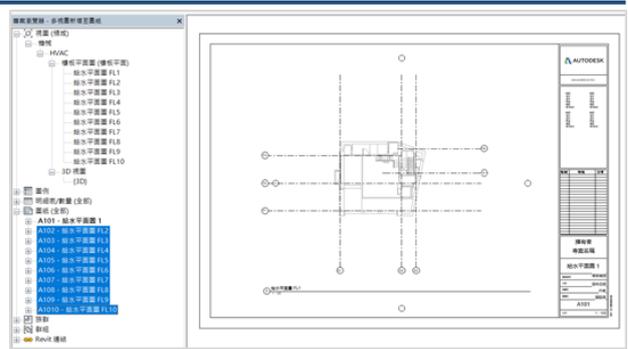


圖 13 給水平面圖生成圖紙

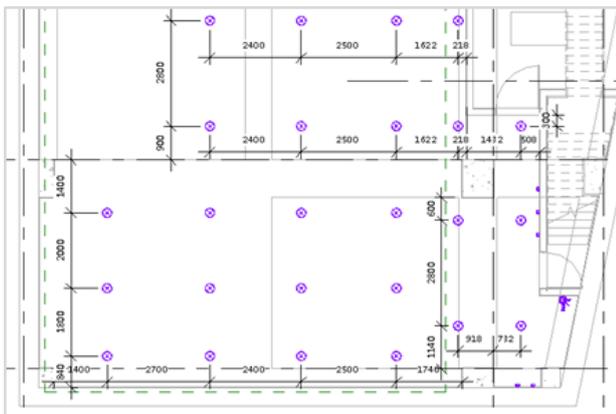


圖 11 設備自動化標註

Autodesk Revit 擁有創建圖紙的相關功能提供使用者製作施工圖紙資訊，在出圖前必需先將要使用的圖框依使用者需求與規格製作成元件，再載入至專案中來使用，一般製作圖紙的步驟將依新增圖紙的功能依續建立圖紙，但因為製作圖紙要單張逐一建立後再放置相對應的視圖，其處理過程較為耗時，此部份運用本研究的「批量創建施工圖紙」一次將圖紙創建完成，並且將視圖同步放置於圖紙中，如圖 12、13 所示。

最後為了讓施工圖資訊完整呈現，圖例說明為製作施工圖紙必要之需求，讓取得施工圖的施工人員可以一目了然平面圖上的顏色與每個符號所代表的設備為何，因此施工圖通常也必需包含圖例以及數量表，因此應用本研究的「圖例批量配置至圖紙」的功能，將圖例數量表快速且有次序的配置至圖紙中，而在運作程式前則必需事先製作好相關的圖例以及數量表如圖 14，再用程式將圖利數量數配置至各張施工圖紙內如圖 15。

待配置完所需的施工資訊後，再依需求配置相關的 3D 圖或剖面圖等圖面資訊輔助施工人員識圖，最後即可完成製作施工圖的步驟如圖 16。

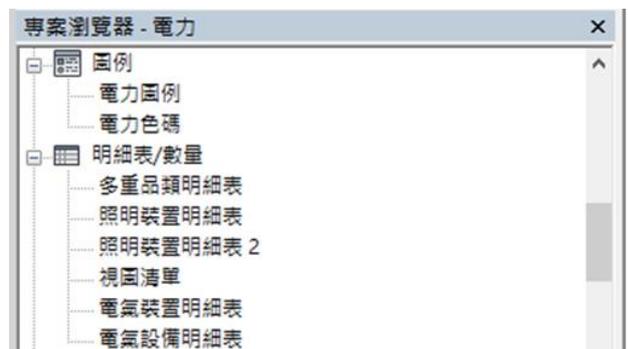


圖 14 圖例與數量表

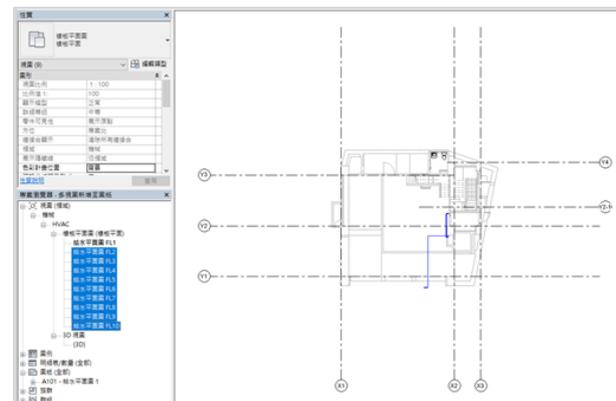


圖 12 給水平面圖

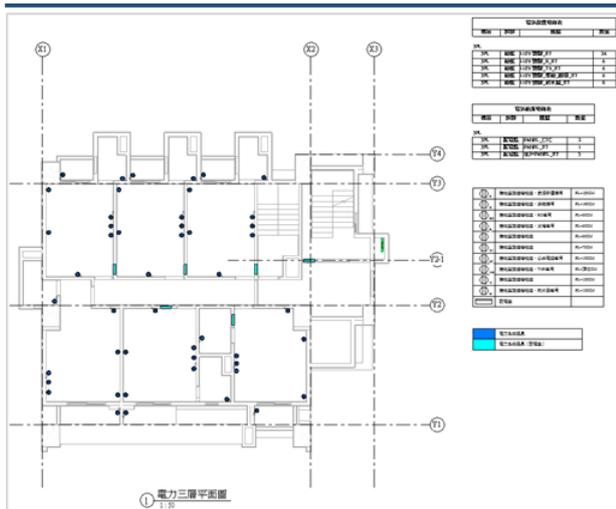


圖 15 圖例數量配置於圖紙

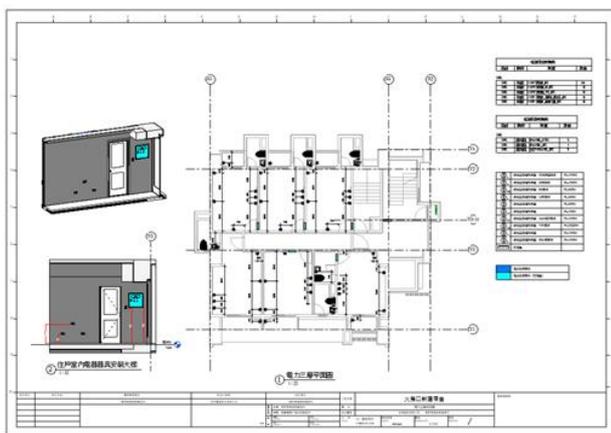


圖 16 插座平面施工圖

五、結論

在實際案例導入後，可以看到專案在導入前僅用 2D AutoCAD 與導入 BIM 技術之後兩者的差異，對於繪圖人員來說過去的傳統視圖方式只有二維的平面圖，圖面構成只能用點、線、弧、面來建構施工圖說，經常會因為識圖解讀不同而造成設計單位所製作施工圖之圖資內容與施工單位認知的落差；而運用 BIM 技術則可以先以各種物件建置出視覺化的模型，再製成相關的施工圖說，相對於傳統的 2D 圖面，3D 模型減少了設計端與施工端之間彼此對於圖面理解落差造成的誤會；而且對於後續的圖面修正來說，元件化的 3D 模型也因為具有雙向連動性，因此在圖面修正上較傳統 2D 方便許多，傳統的二維圖面在修正視圖的過程中往往必需各圖紙、各視圖逐一檢視再進行修改，而 BIM 技術的模型因

具有雙向連動的特點，因此只需要修改模型中的其中一處，即可連動至所有視圖內的相關元件、尺寸等資訊，並可減少漏改、部分修改錯誤等人為疏失；而過去二維圖面在數量計算方面一直沒有一套有效的計算方法，在數量計算方面仍然是以人工進行圖面清點的方式進行，因此常常會因為人為的因素而造成數量計算不一致的問題，然而導入 BIM 技術的模型數量都是可以直接由明細表產出，每一個元件在圖面內都有專屬的編號，每一個物件都有專屬的族群，皆可以依照使用者所需自訂出需要的明細數量表，改善了因人為造成的數量誤差；在檔案管理方面也是有相當大的改變，以往的二維圖紙通常都是以一般的電腦輔助繪圖軟體所製作，會依照設計師專長與習慣分成不同系統、不同樓層來製作圖面，因此往往會產生數百到數千張不等的二維圖檔，圖面管理無法集中容易有疏漏，而 BIM 技術的檔案管理都是在同一個專案底下，MEP 則是會再分成五大系統的模型，相較於二維圖說在圖面的管理上單純許多較容易掌握。綜合上述，因此導入 BIM 技術來製作施工圖，在現階段確實對於新建專案來說，是具有相當多優點的一項技術。

參考文獻

1. 何冠勳，「BIM 協同作業管理模式與實務應用之研究」，碩士論文，國立臺北科技大學，2015。
2. 李炳宏，「BIM 架構施工圖建置流程與方法之研究」，碩士論文，國立高雄應用科技大學，2015。
3. 徐雪芬，「建構 BIM_based 施工圖建置模式及自動化程式之研究」，碩士論文，國立臺北科技大學，2012。
4. 郭建宏，「操作 Autodesk Revit 及 Dynamo 建構 BIM 在建築領域應用研究」，碩士論文，國立臺灣科技大學，2017。
5. 羅元鴻，「探討 BIM 應用於施工圖說之研究」，碩士論文，國立中央大學，2015。
6. 龔昭君，「機電系統導入 BIM 於設計流程之問題檢討」，碩士論文，國立臺灣科技

大學。

7. 羅嘉祥、宋姍、田宏鈞，Autodesk Revit 煉金術-Dynamo 基礎實戰教程，第 4 章，第 99~103 頁，同濟大學出版社，中國，2017。

建築物生產履歷應用於以太坊智能合約之探討

李銘晉¹ 王裕仁²

¹ 國立高雄科技大學土木工程系碩士班研究生

² 國立高雄科技大學土木工程系副教授

摘要

為提高房屋之品質以及讓消費者買得能夠安心，許多業者開始導入可追溯性(traceability)的概念，房屋從建造到完工的過程給記錄起來，以便日後檢視或提供消費者參考，而高雄市政府也在 2015 年開發出一套建築物生產履歷系統供高雄市的建商或房屋業者使用，但對於資料存放於政府機關之伺服器一事，對於部分建商來說存有隱憂，而區塊鏈(Blockchain)擁有去中心化、可追蹤性、不可改變以及最終結果一致性等特性，適合於追溯、驗證及認證的應用，以太坊智能合約的特性為只要寫好程式並達成觸發條件便會自動執行交易，不受外界干擾，因此本研究應用以太坊智能合約建立之功能來執行或儲存建築物生產履歷之資料。

關鍵字：區塊鏈、以太坊、智能合約、生產履歷、Solidity

Discussion on the Application of Building Construction Traceability to Ethereum Smart Contract

Lee Ming-Jin¹ Wang Yu-Ren²

¹ Master Student, Dept. of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology, Taiwan

² Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology, Taiwan

ABSTRACT

In order to improve the quality of buildings and reassure consumers, many construction companies have begun to introduce the concept of traceability, which keeps track of the building process from construction to completion for future inspection or reference for consumers. In 2015, Kaohsiung City Government also developed a building traceability system for use by builders or housing companies in Kaohsiung City. However, there are hidden worries for some builders regarding the storage of data on the servers of government agencies, and the blockchain has the characteristics of decentralization, traceability, immutability, and consistency of the final result. It is suitable for the application of traceability, verification and authentication. By adopting Ethereum smart contract, as long as the program is written and when the trigger conditions are met, the transaction will be executed automatically without external interference. As a result, this research uses the functions established by the Ethereum smart contract to execute or store the data of the building's traceability.

Keywords: blockchain, ethereum, smart contracts, traceability, solidity

一、前言

居住為人類最根本需求之一，而房屋是絕大多數人一生中金額最高的一筆消費，房屋品質好壞攸關生命安全，而房屋大致分為成屋與預售屋在銷售，成屋情形對於民眾來說，對建造過程不得而知，建設公司也不會主動提供興建的詳細資料，而預售屋對於非相關產業之民眾也不盡然瞭解，一旦發生天災或是影響建築物安危之事件，可能因為缺乏相關紀錄而造成責任歸屬釐清上的盲點，因此，若能參考農產品之產銷履歷系統，針對建築物從開始到完工之過程詳細記錄下來，包含原物料之規格與檢驗，材料試驗報告以及施工查驗，以便日後可以溯源，此系統對整個建築產業會有相當大的助益。

2016 年高雄市政府與國立高雄科技大學合作發展建築物生產履歷線上平台及資料庫系統，以利建築業者於建設過程中，輸入相關的資訊，主要包括鋼筋、混凝土、模板、連續壁、管線、防水、磁磚工程等，透過高雄市政府建築物生產履歷網站，將資料上傳至雲端資料庫中，以達到溯源的目的，不僅業者能永久保存，未來也能提供給消費者作為購買房屋依據之參考。

然而建築業者在上傳生產履歷資料時，多少對於市府提供的資訊平台有疑慮，由於此紀錄是儲存於市府的伺服器中，擔心日後市府針對這些缺失來檢業者，亦或是伺服器出問題造成資料出錯或遺失，對此，本研究以區塊鏈技術為中心的建築物生產溯源系統，使用以太坊(Ethereum)做為開發背景，由於區塊鏈具有可追溯性、不可竄改等特性，因此讓每一個生產參與者(營造廠、材料供應商、施工廠商、檢驗單位等)都可以成為其中一個節點，將自家專屬格式的履歷資料，串接到這個統一的追蹤平台上。此一生產履歷結合區塊鏈的系統，因為不受市府資訊平台之局限，業者將保有較大之相容性，也解決履歷資料受第三方控制之疑慮。

二、文獻回顧

供應鏈涉及多個相互依存的運營商，在

物流管理中，可追溯性(traceability)是指沿著產銷供應鏈追蹤貨品位置、流通、販售狀況等資料的能力。產品追溯能力常見於汽車工業，對於零件有問題或是安全上之疑慮，車廠可依流水號將有問題的汽車召回。可追溯性在食品業中則用於控制食品安全。歐盟於 1997 年起推動食品來源的『可追溯性』(Traceability)，作為食品安全管理的重要手段；並於 2000 年要求所有食品產業實施危害重要分析管制點 HACCP (Hazardous Analysis and Critical Point) 安全管理制度，於 2008 年立法要求進入歐盟的食品需提供生產履歷供查詢。

鄭正義(2008)在相關文獻中指出，有關建築物生產履歷推行模式及其效益，考量建築物生產履歷是一種從建築物開工至建造完成之整個工程生命週期中都有留下可追蹤記錄，但建築物與農產品食品差異性極大，建築工期冗長並且不像食品般可量產，並且每棟建築物都具有獨特性，因此導入生產履歷將會需要花費更多的人事成本，隨著 BIM 受到建築、工程和營造(AEC)產業的重視，導入 BIM 的建商可以額外將整個建築生命週期中施工階段的查核記錄儲存於 BIM 模型中，形成以空間導向的建築物生產履歷，藉以增進 BIM 模型的利用率及使用價值。

區塊鏈(blockchain 或 block chain)是藉由密碼學串接並保護內容的串連交易紀錄(又稱區段)。每一個區段包含了前一個區段的加密雜湊(Cryptographic hash、相應時間戳記以及交易資料(通常用默克爾樹演算法計算的雜湊值表示 Merkle Hash Tree)，這樣的設計使得區段內容具有難以篡改的特性。用區塊鏈所串接的分散式帳本能讓兩方有效紀錄交易，且可永久查驗此交易(Luke 2016 and Narayanan et al. 2016)。從應用端來說，區塊鏈技術是以去中心化為基礎的對等網路，用開放原始碼軟體把密碼學原理、時序資料和共識機制相結合，來保障分散式資料庫中各節點的連貫和持續，使資訊能即時驗證、可追溯，但難以竄改和無法隱藏，進一步創造一套隱私、高效、安全的共用價值系統(吳壽鶴等，2018)。

三、研究方法

3-1 研究設定

使用以太坊做為開發背景，以太坊和比特幣一樣是基於 P2P 網路與密碼學建立起的區塊鏈機制，不同之處是，以太坊在每個運作的節點上都運行著一個以太坊虛擬機 (Ethereum Virtual Machine, EVM)，可以用來執行完整的程式。這些程式在以太坊中被稱為智能合約 (Smart Contract)。

3-2 研究步驟

應用區塊鏈以及智能合約的相關技術來建立建築物的生產履歷，藉以提升建築物生產履歷的可信度。每個建案都可以擁有一份屬於自己的智能合約，而這份智能合約就是建案的生產履歷紀錄。起初將政府單位設為合約發起者，建商將公司介紹以及建案資料導入合約中。而營造廠在施工階段時，添加施工自主檢查結果相關資訊到合約裡。材料供應商提供物料檢驗報告、材料出廠證明等相關資訊。表 1 為各角色與相關工作內容。

表 1 智能合約角色與工作圖

參與者	角色	主要工作
政府單位	合約發起者	設定其他參與者編輯合約的權限、建立建案的基本資料
建商	合約參與者	公司基本資料與建案介紹
營造廠	合約參與者	建案的施工自主檢查結果
材料供應商	合約參與者	出廠證明及檢驗報告等相關資訊

使用以太坊虛擬機 (Ethereum Virtual Machine, EVM) 來開發這次的合約，以 Solidity 作為主要程式語言去編寫智能合約內容，Solidity 為針對以太坊虛擬機所設計的四種語言之一，透過 Visual Studio Code 編譯器進行編譯，編譯完後會產生位元編碼 (bytecode) 與應用程式二位元介面 (Application Binary Interface, ABI)，再將位元編碼部署到以太坊中，即可在終端機介面與合約互動。

為建立本研究之建築生產履歷區塊鏈，共需要建構三個智能合約：生產履歷的主合約 (Building.sol)、基礎合約 (BuildingBase.sol)

以及字串函式庫 (StrLib.sol)。其中，主合約 (Building.sol) 提供操作生產履歷智能合約所需的功能，如提取 (Get)、設定 (Set) 以及刪除 (Remove) 等。基礎合約 (BuildingBase.sol) 中則定義狀態變數、列舉 (enum)、結構 (struct)、修改函式 (modifier)、事件 (event) 以及其他相關內部用函式等。最後，字串函式庫 (StrLib.sol) 則是將所有字串相關的函式都定義在其中。步驟說明如下：

步驟一：編譯基礎合約內容，設定角色權限以及資料輸入之格式。

步驟二：編譯主合約內容，包含智能合約所需之各項功能。

步驟三：編譯字串函式庫。

步驟四：使用 Ganache 來建立智能合約的測試網路及帳號。Ganache 是由 Truffle 開發團隊打造的區塊鏈測試環境，它可以自動產生 10 個以太坊虛擬帳戶，可以讓開發者迅速建立一個虛擬的區塊鏈環境，如下圖 1 所示。設定好對應帳戶位置以及 Ganache 所提供之 Server 資訊後即可部署合約。

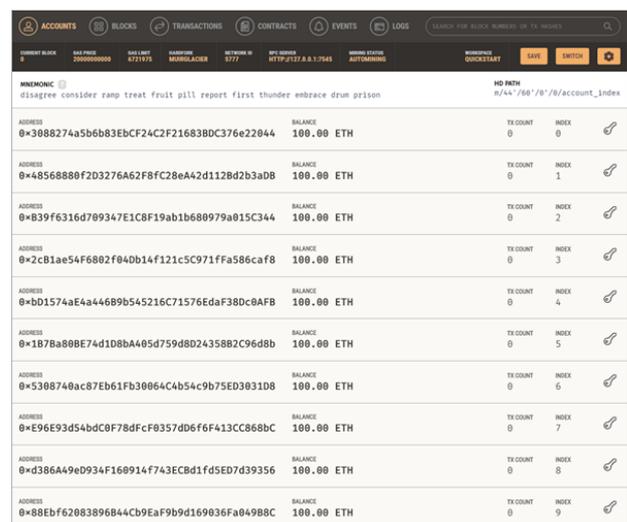


圖 1 Ganache 介面

步驟五：使用終端機輸入指令導入相關生產履歷資訊。

步驟六：查詢生產履歷資料，每筆交易都會產生一個新的區塊並記錄在 Ganache 裡供追溯。

本研究成功地使用 Ganache 來建置區塊鏈的模擬測試環境，並撰寫生產履歷相關智能合約 來建立建築物生產履歷溯源系統。合約撰寫完成後，利用 Truffle 於以太坊之進行部署與測試，得到相當好的結果。此計畫成果，讓建築物興建過程中的主要參與者，包含政府單位、營造廠、建商以及材料供應商，皆能將與其相關之建築物生產履歷資訊

上傳到區塊鏈上，並且提供查詢 的功能。資料一經上鏈，即無法修改，藉以增加上傳資訊的可信度。本次研究計畫成功地達成的原先設定的計畫目的，應用智能合約來建構以太坊的生產履歷區塊鏈。此研究結果，可以提供後續其他區塊鏈與生產履歷相關研究人員、業界以及政府單位的重要參考。

TX HASH	FROM ADDRESS	TO CONTRACT ADDRESS	GAS USED	VALUE
0x12adc8e443f5cbe64b3fef3eee9f2dafa75872834740d8382d6b4a8b74db4381	0xd89c392294e165643e5d3e882d8e2EBFb7997535	0x4778403f1b809aD35cd4b77Ce61767d47762D8E	55501	0
0xf566322203bc4e28b206a036619b346a1a90434da218f0b96aa92b2ee20e284d	0x8b0E093f6E81b85216c53b4d361E7381CA25bdfE	0x4778403f1b809aD35cd4b77Ce61767d47762D8E	23185	0
0x024975d0057ca144c14a6d6e361abe40b4f43bbb93a46969da6913f332261b34	0x8b0E093f6E81b85216c53b4d361E7381CA25bdfE	0x4778403f1b809aD35cd4b77Ce61767d47762D8E	23277	0
0x94f57c123104621b56823ac831b611e722898ca3c539c967eadcecd2f35ce93e	0x8b0E093f6E81b85216c53b4d361E7381CA25bdfE	0x4778403f1b809aD35cd4b77Ce61767d47762D8E	24365	0
0xb37cb518888c3f0456bf0de0ebe2dc360083c63b8c1f149fb416500ae0cbfa22	0x8b0E093f6E81b85216c53b4d361E7381CA25bdfE	0x4778403f1b809aD35cd4b77Ce61767d47762D8E	23277	0
0x19b9df3bc173ae4d6d617e702a530396a221154e42b66924471c636539267cac	0xd89c392294e165643e5d3e882d8e2EBFb7997535	0x4778403f1b809aD35cd4b77Ce61767d47762D8E	125901	0
0x0f51431db2d3e0e31486873f84c58f43fc956e7c51bdd1162145eadc12818587				

圖 5 Ganache 交易紀錄

GAS USED	GAS LIMIT	MINED ON	BLOCK HASH
55501	6721975	2021-05-07 07:06:52	0x09ce90b5f8fc6d615dd9a68ea0d9d0fd0d500684066ba1f1b5c7af728c077102

TX HASH	FROM ADDRESS	TO CONTRACT ADDRESS	GAS USED	VALUE
0x12adc8e443f5cbe64b3fef3eee9f2dafa75872834740d8382d6b4a8b74db4381	0xd89c392294e165643e5d3e882d8e2EBFb7997535	0x4778403f1b809aD35cd4b77Ce61767d47762D8E	55501	0

圖 6 Ganache 區塊資訊

參考文獻

1. Ethereum_white_paper
2. Kingma, D. P., & Ba, J. L. “Adam: a Method for Stochastic Optimization”, “International Conference on Learning Representations, 1-13”, 2015.
3. Chung H-W. and Law K. S, “Assessing fire damage of concrete by the ultrasonic pulse technique,” Cement, Concrete, and Aggregates, Vol. 7, pp. 84-88, 1985
4. Duchi, J., Hazan, E., & Singer, Y, “Adaptive Subgradient Methods for Online Learning and Stochastic Optimization.”, Journal of Machine Learning Research, 12, 2121-2159, 2011.
5. Goldberg, Yoav, “A Primer on Neural Network Models for Natural Language Processing,” Journal of Artificial Intelligence Research 57, 345-420, 2016
6. 呂紹明, “建構建築物全生命週期雲端履歷平台 —以施工階段為例,” 營建管理研究所, 中央大學, 桃園市, 2016.
7. 賴冠瑋, “改變建築新視界—江城建設推動建築物生產履歷的個案研究,” 房地產開發與管理研究所, 崑山科技大學, 台南市, 2014.
8. 鄭滌偉, “農產品產銷履歷食物與認知之研究,” 商學院企業管理系碩士在職專班, 東吳大學, 台北市, 2017.

委外設計監造對於工程公務人員專業與管理能力減損之初探

黃忠發¹ 韋竣傑² 吳明昌³

¹國立高雄科技大學土木工程系教授兼系主任

²國立高雄科技大學土木工程系土木工程與防災科技在職專班碩士生

³高雄銀行董事

摘要

隨公共工程複雜度及專業程度的提升，諸多工程專責機關幾乎將設計及監造工作委外，使得工程人員僅負責行政作業，長遠下來，將導致其專業能力逐漸弱化，此恐對公共工程之品質與執行效能造成負面影響。本文以文獻探討做為理論基礎，利用半結構式訪談法進行質性研究，挑選各級工程專責機關中曾有自辦經驗的高階主管做為訪談對象，企圖透過「設計監造委外的轉折點」、「自辦與委外的決策及優劣」、「工程人員核心能力」以及「對機關的影響」等四大面向擬定訪談大綱。

經個案分析訪談內容得知：業務特性將影響外包的決策、工程管理能力建構於專業能力及工程管理能力之提升有助於發揮組織效能；故工務機關若全面將設計監造工作外包，無異是切斷了承辦人員之專業能力培養、進而強化管理能力間之鏈結，致使工務機關專業能力欠缺至令人憂心。若全面外包已成長遠趨勢，本研究建議，工程專責機關應保有一定比例之自辦設計、監造工作並搭配相關的教育訓練政策及激勵因子，藉以增強工程人員專業及管理能力，進而提升機關效能。

關鍵字：資源基礎理論、核心能力、外包、公共工程

Case Studies on if Outsourcing of Design and Supervision would Reduce the Management Effectiveness for the Public Works Department

Huang, Chung-Fah¹ Wei, Chun-Chieh² Wu, Min-Chang³

¹Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

²Master Student, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

³Director, Bank of Kaohsiung Co., Ltd.

ABSTRACT

The purpose of this research is to discuss the general situation of design supervision and manufacturing implementation by specialized engineering agencies. With the increase in the complexity and professionalism of public projects, many engineering agencies now almost outsource design and manufacturing supervision, so that the project contractor is only responsible for administrative tasks. In the end, it will lead to a gradual weakening of its professional capabilities, and the impact of this argument on the engineering world will be addressed.

Using literature discussion as the theoretical basis, using the semi-structured interview method to conduct qualitative research, selecting senior executives from the engineering agency

with experience in self-management as interview subjects, in an attempt to pass the "turning point of outsourcing", "self-management and self-management" as interview subjects. The four major aspects of "outsourcing decision-making and its pros and cons", "engineering personnel's core competence", and "influence on the organization" were four major aspects to draft interview outlines. After analyzing the content of the interview, the following conclusions were drawn: The business characteristics will influence the decision-making of outsourcing and the construction of the project management ability in the professional ability and the improvement of the project management ability will help to exert the organizational effectiveness. This study also suggests that the engineering agency should maintain a certain proportion of self-designed and supervised work, combined with relevant education and training policies and incentives, so as to enhance the professional and management capabilities of project contractors, and thereby enhance the effectiveness of the agency.

Keywords : resource-based theory, core competencies, outsourcing, public constructions

一、前言

1-1 研究動機

以企業角度，「資源基礎模式」的理論架構建立在公司擁有異質性且不可移動性的資源。其資源是企業購買的實體、租賃、物件、供自己使用之生產之顧用來使企業更有效率運作的事物(Penrose,1959)。吳思華(1998)則將資源類分為資產與能力兩部份，其中能力則指的是企業建構及配置資源的能力，包括個人能力(含專業技術能力、管理能力及人際網絡等)與組織能力(含業務運作能力、技術創新與商品化能力及組織記憶與學習能力等)。故企業能有所掌握其資源而且能進行構建並執行策略，進而提升效率與效能(Barney,1991)。

就一般企業經營而言，核心的部分是不可以外包的，因為此會嚴重影響該企業經營之核心能力(Core Competence)，致組織競爭力下滑。然而工務單位之公務員之核心能力究竟是什麼？隨著公共工程複雜、大型化、特殊性以及專業分工等因素，諸多機關已逐漸將所有設計、監造工作皆外包給顧問公司或建築師事務所。長遠下來公務人員多忙於行政業務，令人擔心的是其專業能力可能因此弱化，是否有能力監督是一大值得深思的議題。在此種趨勢下，有自辦設計監造經驗的公務人員退休抑或是離職後，新生代是否能

夠一肩扛起辦理公共工程的責任？設計監造全面或大半委外對公務機關之利弊、對長遠之影響如何？實值得深入討論。

1-2 研究目的

根據上述的研究動機，本研究藉由深度訪談，並將訪談資料建立逐字稿，進行探討工程專責機關目前辦理公共工程委外設計監造之情況，在冀望達成以下之目的：

1. 透過深度訪談藉以了解目前機關設計監造案外包之現況與問題。
2. 分析設計監造全面委外後，工程人員專業能力及管理能力是否影響組織績效。
3. 對未來工務機關之作法提出相關建議。

二、文獻回顧

2-1 資源基礎理論觀點

「資源基礎理論」內涵著重在以公司內在的觀點探討公司競爭優勢的取得，且基礎理論建立於兩大基本假設之上，假設一：「在同一產業或策略群中，各公司掌控的資源有所不同，而且這些異質性資源將導致各公司彼此之差異」；假設二：「這些差異會因為異質性資源而不容易被其他公司模仿而延續」(吳佩勳, 2004)。「資源基礎理論」是指企業將資源做為決策的中心思考，並將其與企業的競爭優勢連結，所有企業都應利用有限資源建立其他競爭者無法模仿的核心能力(胡

浩軒, 2004)。亦即, 公司將資源及競爭優勢結合, 進一步整合及累積可替公司創造出久遠的競爭優勢 (尤雅娟, 2016)。

2-2 公務人員核心能力

李錫津(2005)認為公務人員主要的工作表現、知識及技能將受到核心能力的影響, 而此能力能透過訓練及發展而獲得改善, 可增加組織的價值並提升競爭優勢。林桐慶(2005)提及核心能力外顯於工作績效, 不同職務的核心能力也不完全相同。公部門導入核心能力的觀念, 能確保於公部門服務的員工擁有所應具備的能力, 對提升公務人力的素質有關鍵的影響 (謝久如, 2015)。

依據 105 年 1 月 13 日核定「行政院所屬機關及地方機關公務人員學習地圖」, 將公務人員核心能力分為共通、管理及專業等 3 類。「共通核心能力」系指機關人員不分職系、官等所具備之共通能力, 如論述表達能力; 「管理核心能力」系指針對不同官等公務人員所應具備之職能或技能, 越高職等對於國家施政方向及機關政策應有相對應的策略導向能力; 「專業核心能力」系指特定專業職務所必須具備的專業知識、技能及技術, 用以勝任工作, 產生績效。

行政院也於 103 年 9 月 29 日重新修訂該院所屬機關中; 高階主管職務管理核心能力項目, 其中, 中階主管應具備之管理核心能力: 問題分析、計畫管理、績效管理、資訊管理、溝通協調、團隊建立等 6 項; 高階主管應具備之管理核心能力: 環境洞察、願景型塑、變革領導、政策管理、跨域協調、公眾溝通、風險管理等 7 項, 並針對以上核心能力定義其意涵。

2-3 土木職系核心能力

依據行政院公共工程委員會 101 年 1 月 11 日修訂「公務人員土木工程類科職能分析—職務內涵」, 其中關鍵目的為描述土木工程類科人員之關鍵工作任務: 運用專業學識及依據法令辦理土木工程設計、審查、工程發包及管理及考核委外廠商技術服務。

2-4 政府外包的趨勢

追朔委託外包的理論起源, 受到公共選擇理論的影響, 主張減少政府職能, 由更有效率的市場來生產財貨及提供服務 (謝淑芳, 2008)。莫永榮(2004)指出政府推動服務委託外包的政策, 自身應扮演「促成者」的角色, 協助民間機構在組織及任務目標訂定及營運管理階段所面對之考驗, 藉由民間資源進一步創造公私雙贏的優勢。

三、研究方法

3-1 研究架構

依據文獻回顧及相關資料彙整與蒐集, 建立本研究架構如圖 1, 提出 4 個相關命題 (以下用 P 做為代號), 並藉由訪談個案驗證命題。依據工程專責機關業務特性不同, 選擇自辦監造方式是否採取外包方式辦理, 探討外包情形下對工程人員專業能力及管理能力之影響程度。

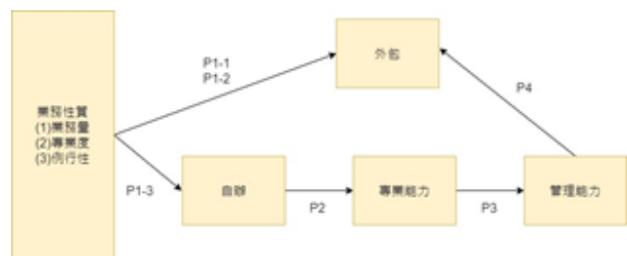


圖 1 研究架構

3-2 研究假設

根據研究動機、研究目的及文獻回顧, 整理後歸納以下研究假設, 藉以驗證各研究變項間之關係。

P1: 業務特性影響自辦或外包之決策

P1-1: 業務量超過機關人力所能負荷時, 傾向採外包

P1-2: 工程複雜度高傾向採用外包方式

P1-3: 機關辦理例行性單純業務, 傾向採取自辦方式辦理

P2: 工程人員自辦經驗愈多, 專業能力愈高

P3: 專業能力愈高, 工程管理能力越高

P4: 工程管理能力越高, 管理外包商之能力越高

3-3 質性研究

林金定等(2005)認為質性訪談是社會科學研究中最常被大家使用收集資料的方法之一，主要著重於受訪者個人的感受、生活與經驗的陳述，藉由對話方式，研究者得以獲取及解釋受訪者個人對社會事實的認知。訪談以研究過程區分可分為「結構式訪談」、「半結構式訪談」及「非結構式訪談」，其中半結構式訪談方式，利用訪談大綱做為輔助工具，其優點在於避免訪談時偏離主題且可視現場情況具彈性的調整內容。

本研究以半結構式訪談方式進行討論，並依據研究動機、目的及參考文獻擬定訪談大綱。訪談時間大約以一個小時至一個半小時之間，訪談對象皆提前以電話聯繫並提供訪談大綱供參，訪談時獲取受訪者同意錄音，訪談結束以逐字稿方式記錄錄音檔以利本研究後續分析。

3-4 研究對象及訪談個案彙整

本研究聚焦為國內工程專責機關中擔任主管職位且曾有自辦經驗之先進做為訪談對象，針對其過往辦理工程經驗進行探討，訪談對象資格需在本行業超過十年且擔任過主管、曾有自辦設計或監造經驗。總計訪談 10 名，這 10 位專家之看法相近，限於篇幅，採其中 5 名之意見，本文採用之訪談個案彙整如表 1。

表 1：訪談個案簡介

編碼	單位	訪談日期
A	高雄市政府工務局	110/3/9
B	內政部營建署	110/3/23
C	經濟部水利署第六河川局	110/3/29
D	高雄市政府水利局	110/3/29
E	交通部公路總局	110/4/26

3-5 訪談大綱

根據上開架構與主題，擬定之半開放式問題如下：

1. 以往公共工程之設計監造乃由具工務背景之公務員(以下簡稱工程人員)自辦，然目前國內工程專責機關之設計監造業務多轉變為委外之主流，請問您認為其中之轉變

過程主要原因為何？

2. 請問貴單位的工程案採用自辦設計、監造及委外設計、監造是否有明確的政策？目前自辦或委外之比例為何、採自辦或委外之決策準則為何？設計、監造是否有再區分？
3. 請問您認為諸多工務單位無法全數或部分採自辦設計、監造，最大困難點為何？
4. 根據您的觀察，自辦設計監造及委辦設計監造之優劣為何？若有實例請舉例說明，例如哪個案子曾因自辦或委外設計監造，有發生一些令人印象深刻的事情。
5. 您認為一位工程人員在工程專責機關應該具備哪些能力(各職位是否有明確的職務說明書或要求？若有請提供書面資料)？貴單位如何有計劃的培養或帶領(如師徒制)工程人員具備該有之工程素養？
6. 委外設計監造固然減少公務員業務量，然在全部委外設計監造之單位，工程人員是否具備應有之能力(未經自辦歷練的工程人員將如何有效管理廠商)？若能力不具備或欠缺，該如何強化其能力？
7. 請問您認為現今公務員是否過度將重心著重於辦理行政業務以及處理民怨，其公務員所需能力是否有轉變，轉變後其優劣？此趨勢長遠下來，對工程專責機關會有何影響？
8. 有何政策或配套措施可以鼓勵機關自辦設計或監造(例如，獎金或升遷管道之控管)？

四、研究發現

本研究以過去研究為基礎後，製作半結構式訪談問卷，經實地深度訪談 5 位工程專責機關現任或退休主管，經彙整後結果分析如下。以下斜體字代表訪談之專家論述，藉由專家訪談之佐證，依序驗證研究架構(圖 1)之推論。

4-1 訪談資料分析

一、業務特性影響到自辦或外包之決策

在人力之調配上亦由機關考量業務承受能力，而選擇自辦或委辦設計監造，具有彈

性之裁量機制，人力上較易於調整及控制。如因機關任務需求辦理大型專案亦或是超出原機關所能負荷之工程量，以致機關人力無法親自設計監造，傾向請委外顧問公司協助分擔。

…我們都是自辦設計還有自己去監造。如果說難度比較高的，就會委託給顧問公司來幫忙設計監造，有時候量體太大的話，量太多，…，可是我們平常的能量就已經不太夠了，後來我們那 2 件全部都委託給顧問公司幫我們設計監造…(C)

…當下所謂的業務量，就是說，可能有一些比較專案型的計畫可能好幾百億或是好幾十億，當下這些現有人力平常就在做養護工作，他也沒辦法說有多餘的人力，人力的部份去看這個委託監造，就勢必要把這塊再委給顧問公司幫忙做監造，主要是人力不足的問題…(E)

隨著公民意識的崛起，政府提供許多管道民眾反映市政及監督政府的作為，目的為促進政府為民服務效能，另外也能更有效率的處理民眾所遇到之問題，但另一方面也使工程專責機關無法專一的投入工程，經常需擔任民眾與政府之間的橋樑。

…所以人在量少、雜事多且行政業務越來越多的情況下，較無辦法像中央單位較能全心全意工程案裡面去投入，相對的他們較有機會自己來設計、自己來監造，這是我目前知道中央跟我們地方政府有一些生態上比較不一樣的地方…(A)

…現在目前其實真正的工程人員就只是要辦你的專業的上設計、監造，其實他還有百分之將近 70 到 80 的工作會是在去處理人民行政上的工作，包括就是國賠案子、包括就是那個去說明，因為損害到人民利益的部分，也不是只有光是用專業上技術是可以克服的…(D)

工程專則機關的機務來源不僅為工程案本身，隨著民眾積極參與公共工程且全民督工

的時代，公務人員也須扮演協調者的身份解決民眾訴求。

綜上，我們可得到以下的推論：

P1-1：業務量超過機關人力所能負荷時，傾向採外包方式

再者，假使工程案所含技術面過高超出機關工程人員專業能力，或是工程規模包含多種專業能力(有跨職系需求)，由於以上考量必需借助民間顧問公司專業團隊來完成機關被賦予之任務，此時機關需站在監督的角度，管理施工廠商及監造單位。

…從事那個比較簡易的或者是他的圖面、斷面比較單純的，他們也有在從事設計跟監造，那當然有些橋梁或者是他的斷面比較複雜，這個部分就會委託顧問公司來辦理…(D)

…原則上我們是這樣啦，自辦設計監造，然後能量沒辦法負荷的時候，或是太複雜的部份，我們想要借重顧問公司他們的人力，有時候顧問公司他們，他們公司裡面，有相關的人才很多，譬如說有電機、機械或是一些資訊的人員，向他們各個類別全部都有，還是環保，目前正在推動一些生態保育的這部分，我們土木水利的，對這個可能沒有這麼專業，所以我們會委託基於這個考量…(C)

綜上，我們可得到以下的推論：

P1-2：工程越複雜度或專業度機關人員無法掌握時，向採用外包

當機關辦理例行性維護標案亦或是經常性的維護修繕，此類工程較無重大改變，機關傾向由內部人員自行辦理設計及監造工作，由業主(機關)主導此工程案一方面可減少工程界面的紛爭，另一方面也能減少公文來往的時間，提高工程效率

…所以變成說我們幾乎大概例行性的、經常性的結構物或是比較小型的，我們都還是自己自辦設計跟監造，先講自辦設計，

我們大概自辦設計的能量可以到一半…那再來自辦監造的話幾乎差不多 9 成…(E)

…比較簡單的來自辦，比較複雜的部份會給顧問公司來幫忙…(C)

綜上，我們可得到以下的推論：

P1-3：機關辦理例行性且單純之業務，傾向採取自辦方式辦理

二、工程人員專業能力建構

工程專責機關曾有自辦經驗的應保留部分的工程自辦，避免全部外包，若工程人員能參與公共工程全生命週期，包括可行性評估、規劃、設計、招標、施工、驗收至接管及營運階段，可讓工程人員對工程有更多的參與，藉此培養能力。

…其實我們現在在講就是第二線人員要有第一線能力，我是覺得這是我們要的，你做第二線但結果對第一線不了解…(A)

…當然真的有時候就是因為量太大了，真的沒有辦法好好的去自辦設計，不過我覺得自辦設計的話才能夠對我們真正去做這個工程，才有專業的部分，知道「枚角」在哪裡…(C)

…自辦的優點就是，整個流程設計，就是新進同仁或是我們做工程的人員整個流程他都會涉獵到，不管是開始測量然後自己去設計或是自己去辦，編預算書或是監工的流程，就是對品質的管控還有去做結算，再來就是後面有的辦移交，這樣的話，整個流程每個新任同仁大概都有涉獵到的話，你大概辦個 3 件以上你大概就非常熟練了…(A)

機關內如未提供教育訓練或是由新進帶領，新進工程人員的核心能力將逐漸式微，將造成機關一大損失，也對機關產生負面影響。

…官派你在這個地方，你要看這個工程機關，那個機關的文化、背景是怎麼樣，如果像以前地方政府，你如果分發去那邊根本沒在教。最主要還是要自己自辦，你

如果沒有自辦，沒有受過那個訓練，跟讀書的東西不一樣…(B)

機關內部工程人員之素質，亦多經由嚴謹之國家考試錄取或相關之甄選機制所進用，故在專業知識上已具有相當的見解，透過親身待過工地，將可增加其實務經驗，提升其專業能力，也為機關提升效能。

…這就回歸「能」的問題，你越有才能或是越有能力或是越有經驗，對事情的判斷或事解決方式會比較多，法令一定是死的…(A)

…一方面自辦監造可以培養自己的同仁，一方面也不會讓自己的專業去流逝…(E)

綜上，我們可得到以下的推論：

P2：工程人員自辦經驗愈多，專業能力愈高

三、工程人員管理能力及機關效能

工程履約爭議及工程界面的協調，依靠著機關工程人員、施工廠商及監造單位的專業能力及溝通協調，在外包情況下工程人員退居第二線督導施工廠商及監造單位，假如機關人員對施工工法及程序不了解，該如何有效的管理廠商？

…這就是我說如果是自己工程師可以的話應該就是真的要自辦監造個 1、2 標完之後，你才知道，未來真的如果要委託監造的話，你才知道人家在搞什麼，你才知道說這個委託監造的顧問公司，我剛才說如果要去查證你的話，你有沒有去辦、這些有沒有去做這些，你總不能讓他領了這個錢什麼都不辦，然後發生事情再來追究他，這樣也不太好…(C)

…現在就是監造設計同一個人，他們就是監造出問題的時候，找設計的時候，主辦機關都替設計講話，我都說一句，因為在我認為設計也是委包，施工廠商也是外包商，一個比較大一個比較小，大的要先生出來才有小的，老大老二而已，你當

父母的主辦機關你要什麼，講公道話，不要一意偏心說設計，因為設計條文裡面，我說你很可能不承認設計疏失，因為設計疏失我罰很輕，但是實務面就是說不是設計疏失，但影響到可能就 100 萬，你這些東西就是，這是誰去認定這是設計疏失，主辦機關要有能力去認定，若無，就要請外面委員來講話，看是誰的錯…(B)

綜上，我們可得到以下的推論：

P3：專業能力愈高，工程管理能力越高

依據行政院公共工程委員會 107 年修訂「公共工程施工階段契約約定權責分工表」中，針對工程施工前、中、後對主辦機關、施工廠商及監造單位等訂定明確的分工，利用工程人員的專業能力更可明確執行該表所賦予的任務。

…但是我覺得這種專業人才的養成實在真的很重要，你如果，我們公務人員的這個專業上的一個養成，在設計端是非常重要的，我為什麼講這麼重要就是說，人家設計的東西到底對與錯你都不知道的話，這真的就是很危險，那當然你看起來是很危險，發包完之後就是辦變更而已也不會怎樣，但沒有必要，所以有很多東西的話在專業上，就像我說的雖然顧問公司在幫我們做設計，但是我們是牽著他在走，不是他牽著我們…(E)

在工程執行中常因施工界面、材料問題及設計、驗收等階段時常發生問題，因主辦機關無法於第一時間決策，恐增加履約爭議的發生，不僅使工期延宕，也造成多方面的困擾，更造成政府資源的耗費。

…其實委外的另外一個副作用，工程機制在互告，責任跟廉政在這邊。你委外顧問公司跟包商的關係，跟政府和廠商的關係，當然我政府和包商的關係，我會比較謹慎，我公務人員我有圖利嘛、不然就包庇之顧慮嘛…(B)

…委外監造跟施工廠商他一開始是會

對立，為什麼會是對立，因為他是代表公務人員在執行這個，但是在他身上而言，他沒有工期上的壓力，所以他回到剛才講的法令面跟一些要點的規定，那你機關那個時候就像是個和事佬，你偏誰都不對，那你怎麼把這 2 個搓合得很好，這就是溝通協調的問題…(E)

管理能力建構於工程人員之專業能力，如工程人員提升管理能力，也可為機關在執行工程上更有效率。

綜上，我們可得到以下的推論：

P4：工程管理能力越高，管理外包商之能力越高

五、結論與建議

5-1 結論

1. 本研究據初步探訪得知，目前還會堅持保有一定自辦單位之組織並不多，除了公路局、水利署下轄單位、營建署等維持此傳統，還有部分鄉鎮公所為節省工管費等考量自辦；其他機關，尤其是縣市政府，幾乎已經將設計與監造部分甚至全面委外。全面委外之機關，小至一段路面的刨鋪、排水溝之維護皆委外，長遠下來，工程人員忙於公務行政，加上機關內人員編制不足且缺乏傳承，已逐漸失去自辦能力。
2. 工程專責機關採自辦或外包方式之基本判斷依據為業務量、專業度以及是否為例行性的業務。當環境變遷或視政策需求機關被交付臨時性任務，導致機關能量無法負荷；抑或是該工程案規模橫跨多領域，機關專業部不足時，多傾向採用外包方式辦理。
3. 經過質化之研究與辯證，本研究認為，自辦設計監造有助於培養工程之專業能力，而具有專業能力之工程師會更有對專案之管理能力、對廠商進行有效之監管，才能發揮組織效能。然，全面委外設計、監造之結果，將會使工程人員弱化專業能力而難培養管理能力。如圖 1 所

示，全面外包切斷培養專業能力與管理能力間之鏈結，若全面外包已成長遠趨勢，缺乏能力之工程人員，若本身再不夠用心學習，恐被設計監造廠商、營造廠商玩弄於股掌之間，此恐非國家社會之福。

5-2 建議

本研究認為，身為工程專責機關之工程人員，應該具有一定程度專業能力與管理能力，而全面委外設計監造無疑將弱化這些應具備之能力。故建議工程專責機關應將恢復一定程度之自辦設計、監造工作，而先從自辦監造切入會比自辦設計容易。欲執行此事，除了公務主管需有決心將其納為政策，也要一些配套措施，例如給予一定之加班費、獎勵金等激勵，或將自辦與否列入公務人員升遷之參考標準。而充分之教育訓練與師徒制之帶領，也是促成能否維持工程人員自辦文化之重要節。

本研究目前僅探討工程專責機關，建議後續研究可擴大範圍至非工程專責機關，另外未來本研究團隊亦將持續進行相關量化分析，用數據佐證更多之論點。

參考文獻

1. Barney, J.B., "Firm, Resource and Sustained Competitive Advantage". *Journal of Management*, 17(1), pp.99-120, 1991.
2. Penrose, E.T., *The Theory of Growth of the Firm*, NY: John Wiley & Sons, 1959.
3. 尤雅娟，影響社會企業營運之因素探討：以資源基礎理論與管家理論觀點，國立高雄應用科技大學企業管理系碩士班，碩士論文，2015。
4. 行政院，行政院所屬機關及地方機關公務人員學習地圖，行政院，2016。
5. 行政院，所屬機關中、高階主管職務管理核心能力項目，行政院，2014。
6. 行政院公共工程委員會，公務人員土木工程類科職能分析—職務內涵，行政院，2012。
7. 林金定、嚴嘉楓、陳美花，「質性研究方法：訪談模式與實施步驟分析」，身心障礙研究季刊，第3期，第122~136頁，2005。
8. 林桐慶，工程人員核心能力之探討—以經濟部水利署為例，國立彰化師範大學行政管理研究所，碩士論文，2006。
9. 吳思華。《策略九說》。台北：臉譜文化，1998。
10. 吳佩勳、利尚仁、柳忠賢，「以資源基礎理論觀點分析通路品牌與競爭策略經營：突破八國聯軍的本土量販霸主—大潤發」，科技整合管理國際研討會，第615~638頁，2004。
11. 李錫津，公務人員核心能力研究報告，臺北市政府，2005。
12. 李粵強、許瑞翔、溫佩伶，「應用資源基礎理論探討台灣產業之優勢資源」，北台灣學報，第31期，第117~127頁，2008。
13. 陳膺，聯合採購發包機制之風險管控成效—以臺北市公立學校工程採購為例，國立臺北大學行政公共學系研究所，碩士論文 2020。
14. 胡浩軒，從資源基礎理論探討苗栗縣休閒農業之競爭優勢，育達商業技術學院企業管理研究所，碩士論文，2003。
15. 莫永榮，「政府服務委託外包的理論與實務：臺灣經驗」，行政暨政策學報，第39期，第75~104頁，2004。
16. 謝淑芳，從 Williamson 的交易成本觀點論政府事務委外管理，國立政治大學公共行政研究所，碩士論文，2008。
17. 謝久如，「建構公務人員學習地圖之研究—以公務人員管理核心能力為例」，人事月刊，第363期，第41到51頁，2015。

房屋修繕資料之變項關聯性分析及視覺化的實作

江長融¹ 鄭鈺晴¹ 莊正昀²

¹國立高雄科技大學土木工程系碩士生

²國立高雄科技大學土木工程系副教授

摘要

現今時代經濟發展越發成熟，人力資源也越發被重視，對於一個市場、一個企業、一個管理者而言，人力資源有效的調派及管理等知識及技能不僅是最基本的，而且也是最重要的工作領域。“在合適的時間，將合適的人員，安排在合適的職務上”是最佳的資本效益，如何讓此效益發揮最大功效也是各領域間的一大挑戰。在本文中，我們基於近幾年所取得的資料，針對現有派工的各個變項倆倆進行分析，並利用 R-Studio 軟件對資料的判別及分類，最後分別由三個方法進行分析比較及探討各者之間的關係，從中取得相關性來觀察現有的情況以及未來可改進之方向。此研究結果表明，各類變項間具有高相關性時兩者同時出現於同一事件中的機會越大。

關鍵字：人力資源調派、人力資源維修、R-Studio

房屋修繕資料之變項關聯性分析及視覺化的實作

Chang Rong Jiang¹ Yu Ching Jheng¹ Zheng Yun Zhuang²

¹Master Student, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

²Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

Nowadays, economic development is becoming more mature, so human resources are also being more valued. For a market, an enterprise, and a manager, knowledge and skills such as effective deployment and management of human resources are not only the most basic, but also the most important work area."At the right time, arranging the right people in the right positions" is the best capital benefit, and how to maximize this benefit is also a major challenge in various fields. In this article, based on the data obtained in recent years, we analyze the two variables of the existing dispatch, and use the R-Studio software to distinguish and classify the data. Finally, we analyze and compare the three methods respectively. Discuss the relationship between the various parties and obtain the correlation from it to observe the current situation and the direction for improvement in the future. The results of this study show that when there is a high correlation between various variables, the greater the chance that both of them will appear in the same event at the same time.

Keywords: human resource deployment, human resource maintenance, R studio

一、緣起

1-1 研究動機

由於全球經濟發展日益進步，人力資源是各行各業最重要，也是最不可或缺的一個領域。現代管理學之父 Peter Drucker 認為人力資源，是指一個組織所擁有用以製造產品或提供服務的人力；換句話說，一個組織的人力資源就是組織內具有各種不同知識、技能、以及能力的個人，他們從事各種工作以達成組織的目標。而人力資源最重要的目的是可以提高生產力以及降低成本，有效的利用人力資源來達成組織的最高績效是各領域中極其重要的一門課程。面對全球環境變遷造成的滯旱、地震及海嘯等，這些災害也會影響全球經濟，而這些災害也成為人力資源調派及管理的一大影響。本研究較偏向新穎科技發展的學術研究成果，而由於土木行業調派及管理也變得越發重要，所以我們利用現有的派工資料去進行分析，在本文最後，也將會展示成果並從中做比較，以及給予一些建議。

1-2 研究背景

本研究所使用原始資料為房屋修繕資料，用於模擬現今房屋進行修繕時所會記載的資料，以了解現今房屋修繕時所會產生的關聯性。

1-3 研究目的

本研究目的為分析現今房屋修繕所會產生的關聯性，來了解現今房屋修繕時可能會發生的情況，而主要目的為：

- (一) 利用 R studio 進行數值化分析，並讓類似的修繕資料能進行同樣的數值化分析。
- (二) 利用 R studio 製作熱度圖進行視覺化分析，了解現今房屋修繕時各種事物會產生的關聯性。

二、文獻回顧

關於人力管理及調派的研究有不少，但以土木相關領域去進行的研究幾乎是沒有，因此我們透過其他領域的相關文獻來進行探

究。以下是所找的一些關於人力資源維護及調派的參考文獻。

2-1 人力資源調派

Sun, Chang-Richards, Kleinsman, & Innes 提到基於 2010-2011 年地震所導致的資源損害的相關專業維修人員是否有動員至 2016 年地震的救災維護。(2021) 簡明智對於營建工程的工地管理人員調派以分枝界限法做規劃研究，並求得最低的人力成本以及最佳化的人力派遣模式。(2005) Adam 提到 COVID-19 大流行期間，藥房人力調派所需面對的七大問題：「危機管理」「內部溝通」「員工壓力」「工作空間的重組」「勞動力的重組」「遠程工作」和「日程管理」。(2021) Francesco Abbracciavento 利用建模和預測分析，顯示出提高與人力相關的績效的潛力，從而使公司在市場上更具有競爭力。(2020) Nouha Lahiani, Abderrahman El Mhamedi 提到利用 Pareto 多目標優化方法的離散事件仿真模型，並基於以能力和可用性去做最佳、最有效的人力資源分配過程。(2016) Zheng-Yun Zhuang 提到如何在有限的人力資源配置下生產高品質、低成本等多目標的產品，以 De Novo 規劃法進行研究。(2017) 使用模糊多目標規劃法進行比較，結果顯示此方法為有效且實用的。(2020) 王嘉男 提出對人力資源採取“水平式”的整合規劃，以有效的調派支援，彌補部份的人力不足，並減少人力的浪費及冗員的產生。(1993) 蘇鴻 利用線性規劃最佳化模式，求出對道路工程機具與人員資源等指派排程提供道路工程調派者作為調度的參考。(2010)

2-2 人力資源管理

Fan, Zhu, Huang, & Kumar 提出對現有的國際人力資源管理(IHRM)進行研究及評估，並根據《國際衛生條例(IHRM)》發表的 1924 篇文章進行分析，確定了 3 個主要方面：「外派人員管理」、「全球人力資本」、「國際人力資源政策和做法」。(2021) Oehlhorn, Maier, Laumer, & Weitzel 分析了 71 篇的學術文章，以評估人力資源管理在支持業務與 IT 之間的

戰略契合中的作用，並且確定了各個人力資源在戰略調整中的組織作用。(2020) Sayyadi Tooranloo, Azadi, & Sayyahpoor 以 FAHP 方法及 2 型模糊決策實驗室法進行分析，並基於現有理論基礎及專家意見，將影響實施的因素分為經濟、社會和環境三個方面。(2017) Takayuki Kataokaa 以考慮工作要素、技能、學習等多時期工人分配模型進行分析，其中顯示了所提出的模型使得人力資源策略的總處理時間更少且生產率更高。(2019) Cooke, Schuler, & Varma 提出了亞洲地區的人力資源管理(HRM)問題，並加以提出影響未來實踐的關鍵發展。(2020) Aurelia & Momin 提出 COVID-19 對各種人力資源管理的影響，並作全面性的分析，也得出 COVID-19 期間對於人力資源管理的發展情況。(2020) Barba-Aragón & Jiménez-Jiménez 使用來自 200 家西班牙中型工業公司的數據提出了戰略人力資源管理(SHRM)對徹底創新具有積極和直接的影響。(2020) Cooke, Wood, Wang, & Li 提出併購是企業增加競爭優勢的策略，也表明對於勞動力和人力資源管理有極大的影響，並提出了一系列的互補及一個研究框架，也指出了未來研究的方向。(2020)

2-3 機具維護

Xia, Shi, Si, Du, & Xi 透過在機床系統中集成能耗機制和聯合維護機會，提出了一種以能源為導向的機器維護和工具更換(EJMR)策略聯合優化方案，目的是要形成節能方案。(2021) Ruiz-Hernández, Pinar-Pérez, & Delgado-Gómez 解決了將維修工分配給諸多劣化機器的問題，將劣化機器問題建模成土匪問題，並提出了用於維護任務順序分配的索引策略。(2020) Yu & Han 以受半導體製造生產環境而產生的機器調度問題為研究，並針對單台機器和流水車間調度模型，考慮了此類的定期機器維護。(2021) Sharifi & Taghipour 提出了一種用於解多故障單機製造系統的集成生產計劃和維護計劃模型，並考慮了 3 個層面：「機器離散的多惡化狀態」、「2 個基於機器維護操作的狀態閾值」、「5 種不同類型的維護操作」。(2021) Wu, Yao, Dauz

ère-Pérès, & Yu 提出了動態決策模型，以協調容易出故障的並行機的調度和預防性維護決策，並且模擬了“與機器調度有關的退化”和“與機器健康有關的生產率”。(2020) Duffuaa, Kulus, Al-Turki, & El-Khalifa 開發了一種可以在一台機器上同時集成和優化生產、維護和過程控制決策的模型，並以一個例子證明了此模型的實用性。(2020) Sarker, Omar, Hasan, & Essam 提出一種用於解決作業調度問題(JSP)的混合進化算法(HyEA)，並分析了機器維護(預防性或故障性)對作業計劃的影響。(2013)

2-4 視覺化分析

Zheng-Yun Zhuang 使用視覺化分析高投資成本產品各個面向的優缺點，視覺化分析能清晰並直觀的了解到研究成果的情形，(2018)

三、研究方法

本章節共分五小節進行研究方法的探討和其建立的方式，第一節為研究的設計方法；第二節為前預處理方法；第三節為後預處理方法；第四節為數值分析；第五節為視覺化。

3-1 研究設計

本研究利用派工的原始數據進行前預處理和後預處理，以獲得可使用的數據資料，並利用其資料進行三種數值分析方法，之後將分析結果用對角線為 1 的對稱矩陣呈現，最後可使用製作而成的對稱矩陣通過 R studio 繪製成熱度圖。

3-2 前預處理方法

本小節為介紹進行前預處理時所需的步驟與方法。

3-2-1 原始資料的縱向、橫向增減

本步驟為對原始資料的縱向、橫向進行必要的欄位增加與不必要的欄位縮減，此步驟可使用手動方式或使用 R 程式語言的程式碼進行設定好的自動修正。

3-2-2 原始資料中共用欄位修正

原始資料因其為 Excel 檔，所以有些資料

會因方便紀錄而共用欄位。因此使用手動方式將資料以數值的方式貼到另一 Excel 檔案中進行整理並將同樣資料的位置進行補空。

3-2-3 原始資料中記錄“同上”修正

在原始資料中，有些資料記載時會因方便兩筆相同敘述的資料會以“同上”的方式進行紀錄，所以需要將其修正為原始應記載的完整資料。此步驟可使用手動拖拉或複製進行資料修正，或使用 R studio 編寫程式使其進行設定好的自動修正填補。

3-3 後預處理方法

本小節為介紹後預處理時所進行的步驟與方法，本小節分別對人、事、時、地四種類的變項進行連續(數值)、類別(種類)、因子等…資料格式的轉換，以及資料數據的判別。

3-3-1 [人]的預處理

本研究中[人]的預處理分為兩個部分進行，一為人數；二為出現的維修人員。

1. 人數:

人數在資料本身中為數值可以進行數量上的比較，因此在本研究中會將其轉換為數值資料儲存，以免後續分析時出現錯誤。

2. 維修人員:

維修人員因隱私問題不便公開其姓名，所以會以維修員 1~20 代稱。而因每次出現的人不固定，所以在本研究中會對各個事件拆分成各位維修員是否有出現記錄。本步驟中會進行判定各個維修員是否在本事件中出現，最後判定結果會以 TRUE、FALSE 的方式記載，為了方便觀看與記載，也能將其轉換成 0、1 的方式進行儲存。

3-3-2 [事]的預處理

本研究中[事]的預處理分為三個部分進行，一為事件數目；二為維修種類；三為篩選出的關鍵字對事件描述的判別。

1. 事件數:

事件數的原始資料是以數值的方式記載，為了防止爾後出錯，因此會將原始資料的數值再次轉換為數值資料的格式儲存，而因事

件本身有進行分類的記載，所以會分成兩筆資料儲存。其原始資料在事件數的儲存中會因種類的關係一筆有儲存數值，另一筆會以空白方式儲存，所以進入 R studio 中會以遺失值(NA)的形式呈現。因此我們會使用遺失值(NA)判定方法判別其位置，之後將其用 0 進行填補。

2. 維修種類:

事件的維修種類在原始資料中為固定種類進行記載，因此會將其轉換為因子的方式進行儲存，因子在程式中的儲存方式會變為對應各種類的編號儲存。

3. 關鍵字:

關鍵字的篩選方式為判斷其在事件描述中出現的頻率當作篩選基準。本步驟為對各個關鍵字分別進行判定是否在本事件中出現。最後的判定結果會以 TRUE、FALSE 的方式記載。為了方便觀看與記載，也可以轉換成 0、1 的方式儲存。

3-3-3 [時]的預處理

在本研究中[時]的預處理分為三部分進行，一為工時；二為由工時延伸出的工作天數；三為由工時和人數延伸出的人力小時。

1. 工時:

工時本身在原始資料中是以數值的方式進行記載，因此會將其轉換為數值資料儲存，以方便後續分析運行。

2. 工作天數:

工作天數本身是由每日 8 工時的方式進行計算來求得，其計算方式為將工時直接除以 8，最終結果會採取無條件進位，因此本身記載無小數點存在。

3. 人力小時:

人力小時是由工時乘上人數所取得的人力成本數值，因工時和人數本身已經轉換成數值方式儲存，所以本步驟中不需特別再進行處理。

3-3-4 [地]的預處理

在本研究中[地]的預處理只有地區這部

分。

因地區本身在原始資料中只有固定種類的區分，所以會將其轉換成因子的方式進行儲存，因子化後本數據會以各種類固定編號的形式儲存在 R studio 中。

3-4 數值分析

本小節會將前方小節處理完的資料在三種情況下使用三種方法進行分析。

3-4-1 連續對連續

連續為以數值方式儲存的資料，其進行相關係數的運算時會使用皮爾森積動差相關係數分析法進行分析。

其公式如下：

$$r(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

r 為皮爾森相關係數，皮爾森相關係數是用於測量兩個變數間線性相依程度。 x_i 表示 x 在變項中的第幾順位， \bar{x} 為 x 的平均值， y_i 表示 y 在變項中的第幾順位， \bar{y} 為 y 的平均值。

3-4-2 連續對類別

連續為以數值方式儲存的資料，而類別為以種類方式儲存的資料，其進行相關係數的運算時會使用斯皮爾曼等級相關係數分析法進行分析。

其公式如下：

$$\rho = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}}$$

ρ 為斯皮爾曼相關係數，斯皮爾曼相關係數是用於測量兩個變數依賴性的無母數指標。 x_i 表示 x 在變項中的第幾順位， \bar{x} 為 x 的平均值， y_i 表示 y 在變項中的第幾順位， \bar{y} 為 y 的平均值。

3-4-3 類別對類別

類別為以種類方式儲存的資料，其進行相關係數的運算時會使用肯德爾等級相關係數分析法進行分析。

其公式如下：

$$\tau - c = \frac{C - D}{\frac{1}{2} N^2 \frac{M - 1}{M}}$$

τ 為肯德爾相關係數，肯德爾相關係數是用於測量兩個隨機變量相關性的統計值。公式中 C 表示 XY 中擁有一致性的元素對數， D 表示 XY 中擁有一致性的元素對數， N 表示 C 的元素個數， M 表示 D 的元素個數。

3-4-4 相關係數矩陣

會將前面各個方法計算出的相關係數按位置擺放組成一對角線為 1 的對稱矩陣儲存。

3-5 視覺化

此步驟會將前面的對稱矩陣切成下三角矩陣後使用視覺化方法將其繪製成熱度成果圖，其內的數值會以顏色輔助區分，以方便後續分析觀察。

四、成果分析

本章節中的成果有使用三種分析法取得相關係數所組成的對角線為 1 對稱矩陣和由對稱矩陣之 R studio 製作而成的熱度成果圖。

4-1 相關係數分析

於 3-4 中使用的數值分析分別為皮爾森積動差相關係數分析法、斯皮爾曼等級相關係數分析法、肯德爾等級相關係數分析法三種分析法。

經過三種分析法分析完的成果資料會按特定位置進行排列，組成一對角線均為 1 的對稱矩陣。

最後結果的對稱矩陣因其數據過於龐大，不利於觀察分析，因此會於 4-2 中直接進行詳細分析。

4-2 視覺化成果之熱度圖分析

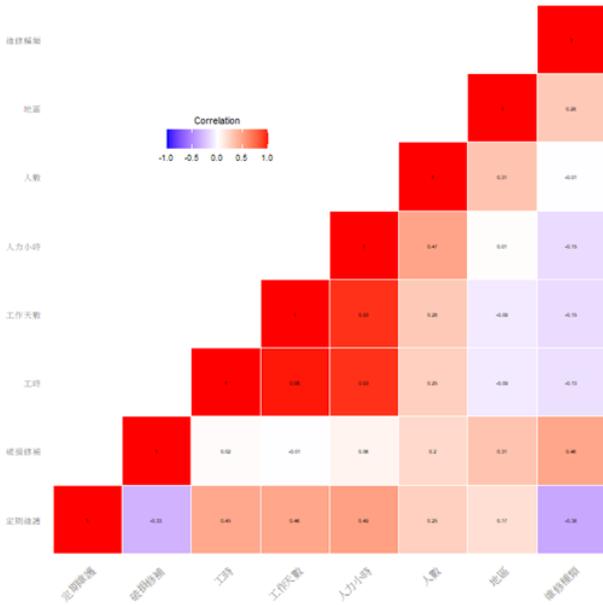


圖 1 成果熱度圖(基礎固定變項擷取)

圖 1 為成果熱度圖因其數據過於龐大不利觀察，因此只擷取前面基礎固定變項的相關熱度圖做為參考，後續的變項有維修員 1~20 與 17 個關鍵字。關鍵字分別為季、編號、房間、工具、維修、水泥、見、客戶、紀錄、單、使用、種類、時、破損、檢測、有、無法。

此小節會以自然科學的角度(相關係數大於 0.6 即為具有高相關性)來對圖 1 的成果熱度圖整體擷取符合具有高相關性的組合製作成表格進行分析。

表 1 成果擷取表(一)

	編號-關鍵字
破損修補	0.88

從圖 1 中擷取出的表 1 可以看出事件數中的破損修補與編號-關鍵字的相關係數為 0.88，大於自然科學標準的 0.6，因此可看出兩者有高相關性。而兩者的高相關性表示在破損修補的事件中記載的內容高機率會有“編號”這關鍵字。

表 2 成果擷取表(二)

	水泥-關鍵字
房間-關鍵字	0.65

從圖 1 中擷取出的表 2 可以看出水泥與房間這兩關鍵字的相關係數為 0.65，大於自然科學所需標準的 0.6，因此可看出這兩者間具有高相關性，而其高相關性表示在事件紀錄中水泥與房間這兩關鍵字高機率同時出現。

表 3 成果擷取表(三)

	見-關鍵字	客戶-關鍵字	紀錄-關鍵字
見-關鍵字	1	0.92	0.69
客戶-關鍵字	0.92	1	0.75
紀錄-關鍵字	0.69	0.75	1

從圖 1 中擷取出的表 3 可以看出“見與客戶”、“見與紀錄”、“客戶與紀錄”等關鍵字的相關係數分別為 0.92、0.69、0.75，都大於自然科學所需標準的 0.6，因此可看出各個兩者間具有高相關性，而其高相關性表示在事件紀錄中見、客戶、紀錄這三者兩兩間也高機率同時出現。

表 4 成果擷取表(四)

	工時	工作日	人力小時
工時	1	0.98	0.93
工作日	0.98	1	0.93
人力小時	0.93	0.93	1

從圖 1 中擷取出的表 4 可以看出工時對工作日的相關係數為 0.98、人力小時對工時和工作日的相關係數都為 0.93，這三種都大

於自然科學標準的 0.6，而其本身會有如此高的相關性是因為工作日和人力小時都是由工時延伸而出的變項，所以相關係數才會如此之高。

表 5 成果擷取表(五)

	地區
維修員 2	1
維修員 4	0.85
維修員 13	0.93
維修員 14	0.63
維修員 15	0.68
維修員 16	0.7

從圖 1 中擷取出的表 5 可以看出地區與維修員 2、4、13、14、15、16 的相關係數分別為 1、0.85、0.93、0.63、0.68、0.7，都大於自然科學所需標準的 0.6，因此可看出地區與這些維修員間具有高相關性，而其高相關性表示這些維修員有高機率在特定地區出現。

從圖 1 中擷取出的表 6 可以看出維修員 9、10、11、12、15、16、17、18、19、20 的相關係數分別為 0.63、0.63、0.63、0.63、0.61、0.74、0.84、0.89、1、0.97，都大於自然科學所標準的 0.6，因此可看出人數與這些維修員間具有高相關性，而其高相關性表示這些維修員在人數高時高機率出現。

從圖 1 中擷取出的表 7 可以看出維修員 9、10、11、12 兩兩間的相關係數都為 1，因此可看出這些維修員間具有高相關性，而其高相關性表示這些維修員間兩者高機率同時出現。

表 6 成果擷取表(六)

	人數
維修員 9	0.63
維修員 10	0.63
維修員 11	0.63
維修員 12	0.63
維修員 15	0.61
維修員 16	0.74
維修員 17	0.84
維修員 18	0.89
維修員 19	1
維修員 20	0.97

表 7 成果擷取表(七)

	維修員 9	維修員 10	維修員 11	維修員 12
維修員 9	1	1	1	1
維修員 10	1	1	1	1
維修員 11	1	1	1	1
維修員 12	1	1	1	1

表 8 成果擷取表(八)

	維修員 15	維修員 16
維修員 13	0.61	0.67
維修員 15	1	0.72

從圖 1 中擷取出的表 8 可以看出維修員 13 與維修員 15、16 和維修員 15 與維修員 16 分別為 0.61、0.67、0.72，因此可看出這些維修員間具有高相關性，而其高相關性表示這些維修員間兩者高機率同時出現。

表 9 成果擷取表(九)

	維修員 19
維修員 18	0.67

從圖 1 中擷取出的表 9 可以看出維修員 18 與維修員 19 的相關係數 0.67，都大於自然科學所標準的 0.6，因此可看出這兩位維修員間具有高相關性，而其高相關性表示這兩位維修員間高機率同時出現。

表 10 成果擷取表(十)

	時-關鍵字
維修員 6	0.75

從圖 1 中擷取出的表 10 可以看出維修員 6 與時-關鍵字的相關係數為 0.75，大於自然科學所標準的 0.6，因此可看出維修員 6 與時-關鍵字間具有高相關性，而其高相關性表示維修員 6 所處理的事件中記載時這關鍵字的機率較高。

五、結論與建議

5-1 結論

從第四章中可以看出經過分析與處理可以得到許多變項間的相互關係，由此能進行資源的分配與規劃，也能取得員工間或事物間的相互關係。並且本研究的步驟在原始資料改變為其他相近的修繕資料時，經過些微修正後也能進行分析。

而本研究成果也證實：基於派工維修這種本身為中度規模(本身無法是大規模)、但是具實證意義的資料，實施大數據分析方法的彈性及適切性。這進一步又證實了：所謂

大數據分析工作的成功與否，是端賴資料本身的品質與可產生知識的價值(原始數據的品質與所使用方法可產生的資訊價值)，而不是資料集本身的大小。

5-2 建議

本研究中關鍵字是由主觀判斷其出現頻率進行選取的，所以無法使其擁有客觀性，之後進行相似研究時可使用更客觀的方法選取關鍵字，使整體研究更具客觀性與說服性。

此外，在本研究中肯德爾相關係數分析所使用 R studio 的 polyserial 指令在變項兩者間判定有誤時，會使計算結果的相關係數超過 (-1) ~ (+1) 區間，而導致無法正常運算。在本研究只於一處遇到此類問題，超出邊界時會以最大值(+1)或最小值(-1)替代，此類問題的原因將供後續研究所探討。

六、參考文獻

1. Adam, J. P., Khazaka, M., Charikhi, F., Clervil, M., Huot, D. D., Jebailey, J., O, P., Morin, J., Langevin, M. C.. Management of human resources of a pharmacy department during the COVID-19 pandemic: Take-aways from the first wave, 2021.
2. Aurelia, S., & Momin, M. M. Global reverberation and prediction for HRM amid and after COVID-19: A technological viewpoint, 2020.
3. Barba-Aragón, M. I., & Jiménez-Jiménez, D. HRM and radical innovation: A dual approach with exploration as a mediator. 791-803, 2020.
4. Cooke, F. L., Schuler, R., & Varma, A. Human resource management research and practice in Asia: Past, present and future, 2020.
5. Cooke, F. L., Wood, G., Wang, M., & Li, A. S. Riding the tides of mergers and acquisitions by building a resilient workforce: A framework for studying the role of human resource

- management,2020.
6. Duffuaa, S., Kolus, A., Al-Turki, U., & El-Khalifa, A. (2020). An integrated model of production scheduling, maintenance and quality for a single machine.
 7. Fan, D., Zhu, C. J., Huang, X., & Kumar, V. Mapping the terrain of international human resource management research over the past fifty years: A bibliographic analysis,2020.
 8. Francesco Abbracciavento, S. F., Emanuela Gualandi, Rita Nanni, Andrea Paoli, Sergio M. Savaresi. Modeling and prediction for optimal Human Resources Management,2020.
 9. Nouha Lahiani. Abderrahman El Mhamedi, Y. H., Abdelfattah Triki. A novel improving method of industrial performance based on human resources management,2016.
 10. Oehlhorn, C. E., Maier, C., Laumer, S., & Weitzel, T. Human resource management and its impact on strategic business-IT alignment: A literature review and avenues for future research,2020.
 11. Ruiz-Hernández, D., Pinar-Pérez, J. M., & Delgado-Gómez, D. Multi-machine preventive maintenance scheduling with imperfect interventions: A restless bandit approach,2020.
 12. Sarker, R., Omar, M., Hasan, S. M. K., & Essam, D. Hybrid Evolutionary Algorithm for job scheduling under machine maintenance,2013.
 13. Sayyadi Tooranloo, H., Azadi, M. H., & Sayyahpoor, A. Analyzing factors affecting implementation success of sustainable human resource management (SHRM) using a hybrid approach of FAHP and Type-2 fuzzy DEMATEL,2017.
 14. Sharifi, M., & Taghipour, S. Optimal production and maintenance scheduling for a degrading multi-failure modes single-machine production environment,2021.
 15. Sun, X., Chang-Richards, A. Y., Kleinsman, T., & Innes, A. Improving human resource mobilisation for post-disaster recovery: A New Zealand case study,2021.
 16. Takayuki Kataokaa , K. M., Katsuhiko Takahashi. Strategic Human Resource Management Simulation Considering Work ELEMENTS,Skills,Learning and Forgetting,2019.
 17. Wu, C.-H., Yao, Y.-C., Dauzère-Pérès, S., & Yu, C.-J. Dynamic dispatching and preventive maintenance for parallel machines with dispatching-dependent deterioration,2020.
 18. Xia, T., Shi, G., Si, G., Du, S., & Xi, L. Energy-oriented joint optimization of machine maintenance and tool replacement in sustainable manufacturing,2021.
 19. Yu, T.-S., & Han, J.-H. Scheduling proportionate flow shops with preventive machine maintenance,2021.
 20. 王嘉男.多部門間的人力規劃系統之研究，1993。
 21. 劉建浩，李. 運用 De Novo 及多目標決策模式建構航空產業人力資源配置，2010。
 22. 簡明智.營建工程人力調派最佳化決策模式之研究，2005。
 23. 蘇鴻.道路工程機具與人力指派最佳決策模式之研究，2010。
 24. J. L. Rodgers and W. A. Nicewander. Thirteen ways to look at the correlation coefficient. The American Statistician,1988.
 25. Zheng-Yun Zhuang. Meta goal programming approach for solving multi-criteria de Novo programming problem,2017.

26. Zheng-Yun Zhuang. Weighted-additive fuzzy multi-choice goal programming (WA-FMCGP) for supporting renewable energy site selection decisions,2020.
27. Zheng-Yun Zhuang. A Knowledge Discovery Education Framework Targeting the Effective Budget Use and Opinion Explorations in Designing Specific High Cost Product,2018.
28. Myers, Jerome L.; Well, Arnold D., Research Design and Statistical Analysis 2nd, Lawrence Erlbaum: 508, 2003.
29. Kendall, M. Rank Correlation Methods, Charles Griffin & Company Limited,1948.
30. Zhuang, Z.-Y., Su, C.-R., & Chang, S.-C., The effectiveness of IF-MADM (intuitionistic-fuzzy multi-attribute decision-making) for group decisions: Methods and an empirical assessment for the selection of a senior centre. Technological and economic Development of Economy,2019.
31. Ni, L. M.-S, The coming of the age of big data. Universidade de Macau,2016.

營造業對待分包商公平性與長期合作關係之影響：以華人關係為調節變項

陳裕典¹ 許淑寬² 黃忠發³

¹ 國立高雄科技大學土木工程與防災科技研究所碩專班研究生

² 國立高雄科技大學人力資源發展系助理教授

³ 國立高雄科技大學土木工程系教授

摘要

華人關係是台灣社會企業經營的一個重要概念，它某種程度顯示出一個人，尤其是企業主，在他所能影響的範疇中的基本力量，關係之強弱可能影響雙方長期合作或是經營績效。本研究探討營造業與分包商長期合作關係，進而瞭解在營造廠對待分包商是否公平對於促成雙方長期合作關係之影響，且乃以華人關係作為調節變數，亦即分析雙方之關係強弱，是否影響其長期合作之意願。本研究採用「公平性量表」、「華人關係量表」、「長期合作量表」等為研究工具，以國內營造廠所屬專業分包商作為研究對象，總計回收 105 份問卷，有效樣本共計 84 份，以 SPSS 統計套裝軟體進行統計分析，研究結論如下：

公平性量表量表中，平均分數為 5.06 分，「我們雙方會公開且直接地溝通。」平均分數為 5.57 分最高，顯示良好的雙向溝通，建立起較佳公平性。長期合作量表中，平均分數為 5.57，以「下次我方會再次和甲營造廠合作這項服務。」此題平均分數為 5.87 分最高，結果顯示，分包商都希望與營造廠有再次合作的機會。關係量表分析中，平均分數為 5.26 分。以「我方和甲營造廠會維持和諧關係。」此題平均分數為 5.79 分最高，結果顯示，分包商都希望與營造廠維持和諧關係。

關鍵字：公平性、長期合作、華人關係

一、緒論

1-1 研究動機

在營建業中，營造廠是從事施工管理之角色，除某些特定專業營造業保有自己本身特殊工程技術、施工技術及技術人員以外，一般綜合營造業有超過八成以上的工作項目，是由專業包商來完成，而從事第一線工作者乃是這些鋼筋、模板、泥作等分包商。

在營造業選定分包商的過程中，因各自經營型態不同，若以降低交易成本方式進行選擇，常會選與本身有長期合作之分包商為優先考量，因交易摩擦減少、議價空間大且互動關係良好，故是否有優良、長期配合的分包廠商，也是營造廠能否經營的要素之一。然在分包架構下，營造業者為資方，分包商為勞方，二者之間除交易關係密不可分外，

對營造廠商而言，由於同樣的專業項目的合作廠商不只一家，故對待分包商間公平與否，也可能影響彼此之間的合作關係。

營造廠及分包商多屬中小企業，營造業者與分包商間之相處，人際間之互動相當密切，「關係」顯得非常重要，而華人社會中的關係相當特殊，故眾多國內外研究將其翻譯成 Guanxi，因與西方所稱之關係成分不同，故學術界為區分則稱之為華人關係(Guanxi)。台灣屬泛華人社會，關係也是台灣社會的一個重要概念，它顯示出一個人在他所能影響的範疇中的基本力量。有些營造業與分包商間互動關係造良好，常因所謂志同道合、攜手併肩、情投意合、患難之交等關係進行長期合作；亦有因不熟識或交情不佳等因素無法合作，故如何維持雙方間之合作關係，也是重要課題。

1-2 研究目的

根據以上所述研究動機，本研究針對營造業所屬專業分包商(鋼筋、模板、泥作、混凝土、水電等)為主要研究對象，從分包商之角度，探討其承攬業務之公平性、關係、長期合作情形之現況來達成以下目的：

1. 探討分包商體認到的營造業對其之公平性是否有差異。
2. 以分包商角度，探討其與營造廠是否、具何種長期合作關係。
3. 以華人關係為調節變項，探討雙方關係之親疏對於雙方合作績效之影響。

二、文獻回顧

2-1 華人關係定義

西方的管理者與學者發現，華人社會關係的展現方式及其結果，與西方的人際關係(interpersonal relationship)有很大的差異(Xin & Pearce, 1996)。關係雖然是中國社會特有的本土現象，但在英文中沒有一個與「關係」完全對應的辭彙(Cheng & Rosett, 1991; Yeung & Tung, 1996; Xin & Pearce, 1996)。因此，「Guanxi」已經成為一個經常出現在英文學術文獻和報刊中專有名詞(楊中芳、彭泗清 2001)。傳統上，華人社會中，重視人與人之間的「關係」，並不特別強調「合作」，而是強調「關係」的和諧性(錢穆，1989; 黃麗莉，1996; 賴志超，2004)。而且關係在華人的商業活動、企業管理、及組織行為中，扮演不可言喻的重要角色。因此，「關係」被視為瞭解華人社會行為與組織行為的核心概念之一。Guanxi 是華人組織經營管理中的重要概念，尤其它對組織成員的態度、行為、及彼此的互動具有不可忽視的影響，Guanxi 的發展可以作為一種克服競爭以及資源不足的策略機制，除此之外，Guanxi 也已經成為華人社會中個人關係以及商業行為的活力來源(Farh, Tsui, Xin & Cheng, 1998; Goodwall & Warner, 1997; Law, Wong, Wang & Wang, 2000; Luo, 1997; Park & Luo, 2001; Pearce & Robinson, 2000; Standfield & Marshall, 2000; Tsui & Farh, 1997; Warner, 1993; Xin & Pearce,

1996)。根據 Park & Luo(2001)的觀點，Guanxi 具三項特色，分別為：(1)Guanxi 在兩造間是可以轉移的(transferable)，也就是當 A 與 B 之間沒有任何關係時，可以透過 A 與 B 同時熟識的 C 來建立起雙方間的關係；(2)Guanxi 是互惠的(reciprocal)，在華人社會中，當一個人受了對方的恩惠時，必須要在適當的時機下回報，以建立人與人之間溝通的互惠默契與關係基礎，否則會失去他們能從 Guanxi 網絡中所獲得的一切社會資源，以及對所屬團體的歸屬感(Bian & Ang, 1997)；(3)Guanxi 具不可見性(intangible)，Guanxi 的建立與形成主要是靠成員間對組織或所屬團體的認同感(commitment)而來，彼此建立起 Guanxi 的成員被一股看不見也無法測量的力量所凝聚，共享著成員間互惠與平等的基礎(Park & Luo, 2001)。關係在企業的運作指的是某種通向特權的特殊管道(高承恕、陳介玄，1991; 陳介玄，1990)，就組織而言，組織成員中二個人之間的特殊連帶關係是一種人情、倫理、工具、利害結合的複雜溝通管道(Farh, Tsui, Xin, & Cheng, 1998)。

2-2 公平(Fairness)定義

公平是社會和法律制度道德運作方式的一個決定性方面(Rawls, 1971; Ring and Van de Ven, 1992)，Husted and Folger (2004)認為“經濟交易成功發生的原因是交易的動態方面並未受到忽視。因此，組織正義通過提供一種理解非正式交易和非正式交易的方式來補充交易成本文獻。形式上的製約因素影響著組織績效，從而改善了治理機制的設計和實施”。由於各方可能有不同且相互衝突的利益和觀點，因此當各方對目標和偏好的結果存在分歧時，解決方案將很困難。在這種情況下，當事各方管理衝突解決方案時，公平就變得至關重要。

公平是一種“決策，結果或程序既平衡又正確的觀念”(Husted and Folger, 2004; Sheppard, Lewicki, and Minton, 1992)。研究人員區分分配公平和程序公平。分配公平是指對與分配決定相關的結果進行評估，例如一方所獲得的報酬(Folger and Konovsky, 1989)。

根據其角色行為或地位得到報酬的當事方將感知結果的公平性(Luo, 2007)。程序公平解決瞭如何做出分配決策的過程(Konovsky, 2000)。這些看法會影響關係質量，因為不公平的對待信號會無視和邊緣化(Arino and Ring, 2010)，所以企業間交流的公平性很重要，特別是在建立信任和承諾方面。

2-3 假設推論與研究架構

對公平性的研究表明，如果評價人士認為流程和結果是公平的，他們對交換關係和參與分配決策的各方會更加滿意(Brockner and Siegel, 1996; Folger and Konovsky, 1989)。程序公正性的理解有助於當事方更容易地解決調整問題；各方可以降低適應成本並提高任務執行水平(Johnson et al., 2002a; Konovsky, 2000; Korsgaard, Schweiger, and Sapienza, 1995)。所以提供的合約在雙方的評價中都是公平的情況下，有助於提升雙方的合作意願。因此我們推論出假設一：

H1：公平性越高對長期合作有正向關係。

Yen et al.(2011)認為華人交易雙方關係是建立在感情、人情、信任的交互作用下所產生的連結網路。雙方關係更良好等方面來顧及雙方利益的組織間績效(黃識銘、方世榮, 2003)。在交易時，常常會因為交情的交互作用下，去選擇合作對象。因此我們可以推論出假設二：

H2：在華人關係的影響下有助於提升公平性對長期合作的影響。

本研究之架構如圖 1，「華人關係」作為公平性與長期合作關係間之調節變項，亦即探討營造廠與分包商之連結會受到雙方關係有何程度之影響。

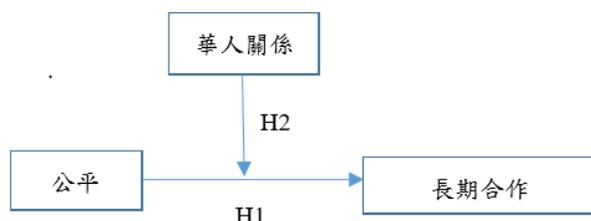


圖 1 研究架構

三、研究方法

依據文獻回顧及相關資料彙整與搜集，建立本研究架構如圖 1 所示。問卷題項包括：分包對應專案之基本資料、分包商公司基本資料及分包商與營造業間之互動狀況等。因分包商組織較為鬆散，沒有類似營造公會之組織形式，故僅能藉由個人以及同業之關係發放問卷，總共發出 200 份，回收 105 份，有效樣本共計 84 份，回收後以 SPSS 統計套裝軟體進行統計分析。在題目設計時，有提醒參與研究者：「請選擇一家貴公司有合作經驗的營造廠(在合作過程中重要、熟悉或有特別經驗者尤佳)為本研究的填答對象(以下，我們簡稱它為「甲營造廠」)，並選定該承包經驗來填答本問卷」。故一家營造廠可以針對超過一家之營造廠商填寫問卷。

四、研究成果

4-1 分包對應專案及營造廠之基本資料分析

分包對應專案及營造廠之基本資料之統計變數包含公司專業、工程專案屬性、工程專案出資方、負責之金額、與該營造廠合作時間、與該營造廠合作次數、分包商高層主管與該營造廠的熟識程度等原因。針對所蒐集之樣本資料進行分析，分析樣本結構及分佈情形，如表 1 所示。

此次參與研究之分包商所屬專業，以結構體工項為主，約佔 56%、水電佔 25%。調查之專案以土木工程、公共工程居多。分包商負責之金額，半數介於 500 萬到 1000 萬之間。分包商與該營造廠之合作時間半數在 5 年以上、合作次數有八成在兩次以上。分包商高層與營造廠間之熟識程度，多源自於商場上、業務上或社交圈認識。

4-2 分包商商基本資料

分包對應專案及營造廠之基本資料之樣本分佈情形，如表 2 所示。年度營業額以 1,000~5,000 萬間居多，約佔 40%。我國目前之分包商公司型態多屬工程公司或工程行，只有少數會去進行專業營造業之登記，目前營建業之工人多屬不固定雇主、領日薪，其勞保多自己掛在不同的工會而非掛在分包商

公司，公司之存在目的多只為方便開設發票。在缺工日益嚴峻之情況下，評斷一個分包商實力，除了其擁有之機具、設備外，就是其能長期掌握之工人，或稱之為其班底，在此次的調查中，僅有將近 10% 的分包商能掌握 20 位以上之勞工，多數掌握不到十人或十餘人。而超近半數的分包商有感受到缺工之壓力，僅有兩成覺得其人手算充足。此次問卷有特別強調要公司主管填寫，故填表人以上屬主管、其中負責人佔 41.7%。

表 1、分包對應專案及營造廠之基本資料

題項	選項	問卷數	百分比(%)
公司專業	鋼筋	15	17.9
	模板	15	17.9
	泥作(土水)	19	22.6
	混凝土工程	6	7.1
	水電	21	25
	其他	8	9.5
工程專案屬性	建築	31	31
	土木	47	47
	廠房	11	13.1
工程專案出資方	民間工程	41	48.8
	公共工程	43	51.2
負責之金額	<500 萬	25	29.8
	500 萬~<1000 萬	42	50
	1000 萬~<5000 萬	9	10.7
	5000 萬以上	8	9.5
與該營造廠合作時間	1 年(含)以下	14	16.7
	1-3 年(含)	27	32.1
	4-6 年(含)	30	35.7
	7-9 年(含)	8	9.5
	10 年(含)以上	5	6
與該營造廠合作次數	1 次	15	17.9
	2~5 次	39	46.4
	6~9 次	19	22.6
	10 次(含)以上	11	13.1
分包商高層主管與該營造廠的熟識程度(可複選)	家人/親戚	2	2.4
	同學/朋友	5	6
	業師/門生	0	0
	鄰居/同鄉	0	0
	有業務往來的朋友	35	41.7
	商場上認識的朋友	39	46.4
	社交圈認識的朋友	11	13.1
朋友介紹	11	13.1	
不熟識	4	4.8	

表 2、分包商公司基本資料

題項	選項	問卷數	百分比(%)
年度營業額	<500 萬	7	8.3
	500 萬~<1000 萬	25	29.8
	1000 萬~<5000 萬	32	38.1
	5000 萬~<1 億	15	17.9
	1 億以上	5	6
班底人數 (長期、以本公司為主之勞工)	<10 人	32	47.5
	10~20 人	34	42.8
	>20 人	14	9.7
填表人職位	負責人	35	41.7
	高階管理者	28	33.3
	中階管理者	4	4.8
	基層管理者	9	10.7
	一般職員	8	9.5
公司的缺工狀況	非常缺	16	19
	有點缺	28	33.3
	還好	21	25
	算充足	18	21.4
	非常充足	1	1.2

4-5 公平性表分析

本研究之公平性量表共計 14 題，其分析結果如表 3。構面平均分數為 5.06 分(標準差 0.859)。大半的題項都接近或超過 5 分(滿分為七尺度)，顯示分包商整體感受到營造廠對其對待是公平的。其中以「我們雙方會公開且直接地溝通。」平均分數最高為 5.57。而「我認為甲營造廠會依據我方的貢獻與付出，公平的獎酬我方」平均分數最低為 4.22 分，此點值得營造廠加以關注。

表 3、公平性量表分析

題目/題號	平均數	標準差
每次的雙方討論決議過程，對我方是公平的。	4.92	0.934
雙方的談判、協商之過程，對我方是公平的。	4.89	0.944
雙方在分包項目進行與變更設計之調整過程中，對我方是公平的。	4.82	1.06
雙方在分包項目進行與規劃管理的流程中，對我方是公平的。	4.86	0.984
在資源分配及相關分包項目資訊分享程序上，對我方是公平的。	5.04	0.95
在每次討論決議後的執行，都有清楚的定義與呈現。	5.43	1.18
在行政作業及流程管控，對雙方都是公平的。	5.14	1.13
我認為甲營造廠會依據我方的貢獻與付出，公平的獎酬我方。	4.22	1.18
我認為甲營造廠會為了未來能繼續與我方合作，公平的獎酬我方。	4.27	1.04
我認為甲營造廠會依據我方付出的責任與義務，公平的獎酬我方。	5.3	5.71
在每次雙方互動中，甲營造廠會誠信的處理我方事務。	5.5	0.912
在每次雙方互動中，甲營造廠重視我們彼此的關係維持。	5.52	0.942
我們雙方會公開且直接地溝通。	5.57	0.96
當我方有需求時，甲營造廠總是儘快的回應我。	5.35	1.1
構面之平均數 5.06、標準差 0.859		

4-4 長期合作量表分析

在長期合作量表分析如表 4 所示，平均分數為 5.57 分(標準差為 0.90)。其中以「下次我方會再次和甲營造廠合作這項服務。」此題平均分數最高為 5.87 分，整體而言，分包商都希望與營造廠有再次、長期合作的機會。

表 4、長期合作量表分析

題目/題號	平均數	標準差
下次我方會再次和甲營造廠合作這項服務。	5.87	0.941
未來我方這項分包項目外包不會更換甲營造廠。	5.02	1.62
我方會繼續和甲營造廠合作。	5.83	0.942
構面之平均數 5.57、標準差 0.90		

4-6 華人關係量表分析

本研究華人關係量表共五題，構面平均分數為 5.26 分(標準差為 0.729)，如表 5 所示。其中以「我方和甲營造廠會維持和諧關係」此題平均分數為 5.79 分最高。整體而言，分包商除與營造廠維持和諧關係外，私下之互動、聊天等來往也相當頻繁。

表 5、關係量表分析

題目/題號	平均數	標準差
我方和甲營造廠在合作分包項目外，工作之餘仍會有社交的互動往來。	5.23	1.26
我方和甲營造廠會像好友般的公開聊天。	5.49	1.1
我方和甲營造廠會在特殊節慶時互贈禮品。	4.38	1.33
我方和甲營造廠會維持和諧關係。	5.79	0.983
我方和甲營造廠會互惠彼此。	5.46	1.2
構面之平均數 5.26、標準差 0.729		

4-6 華人關係是否具調節效果

分包商本是不易調查之對象，本問卷目前仍在回收中。調查結果公平對長期合作意願有顯著效果，但華人關係之調和效果不顯著，其可能原因：華人關係本身就長期合作關係就有顯著效果，效果強到搶掉了調和效果的存在，此部分仍會持續調查。

五、結論與建議

本研究依據問卷調查結果統計分析與討論、文獻探討，發現營造業與分包商之間公平性與關係對長期合作之影響具有正項之影響力，可以推論，在營造業可藉由對待分包商的公平性提高，並維持良好的華人關係，對於營造業者培養堅實的分包團隊有極大的助力，故其營造業能本互信互利，公平對待分包商，並以華人關係為切入點，能獲得更具忠誠度之分包商，更能提升營造業者競爭力。

本研究所調查之對象為營造業所屬分包商。而由相關文獻得知國內關於營造業與分包商之探討，多為管理、經營策略為研究議題，關於此類以人文干涉之主題為研究仍為少數，故建議相關研究單位可多關注此類面層，探討是否以此調和類型方式有效提升各行業對其下游廠商忠誠度成效。後續研究者亦可針對非商業領域中上下為間輔以華人關係為研究，以增廣實務性之應用。

參考文獻

1. Ariño, A., & Ring, P. S. (2010). The role of fairness in alliance formation. *Strategic Management Journal*, 31(10), 1054-1087.
2. Bian, Y., & Ang, S. (1997). Guanxi networks and job mobility in China and Singapore. *Social forces*, 75(3), 981-1005.
3. Brockner, J. (1996). Understanding the interaction between procedural and distributive justice: The role of trust.
4. Cheng, L., & Rosett, A. (1991). Contract with a Chinese face: Socially embedded factors in the transformation from hierarchy to market, 1978-1989. *J. Chinese L.*, 5, 143.
5. Farh, J. L., Tsui, A. S., Xin, K., & Cheng, B. S. (1998). The influence of relational demography and guanxi: The Chinese case. *Organization science*, 9(4), 471-488.
6. Farh, J. L., Tsui, A. S., Xin, K., & Cheng, B. S. (1998). The influence of relational

- demography and guanxi: The Chinese case. *Organization science*, 9(4), 471-488.
7. Folger, R., & Konovsky, M. A. (1989). Effects of procedural and distributive justice on reactions to pay raise decisions. *Academy of Management journal*, 32(1), 115-130.
 8. Goodall, K., & Warner, M. (1997). Human resources in Sino-foreign joint ventures: selected case studies in Shanghai, compared with Beijing. *International Journal of Human Resource Management*, 8(5), 569-594.
 9. Husted, B. W., & Folger, R. (2004). Fairness and transaction costs: The contribution of organizational justice theory to an integrative model of economic organization. *Organization Science*, 15(6), 719-729.
 10. Johnson, J. P., Korsgaard, M. A., & Sapienza, H. J. (2002). Perceived fairness, decision control, and commitment in international joint venture management teams. *Strategic Management Journal*, 23(12), 1141-1160.
 11. Konovsky, M. A. (2000). Understanding procedural justice and its impact on business organizations. *Journal of management*, 26(3), 489-511.
 12. Konovsky, M. A. (2000). Understanding procedural justice and its impact on business organizations. *Journal of management*, 26(3), 489-511.
 13. Korsgaard, M. A., Schweiger, D. M., & Sapienza, H. J. (1995). Building commitment, attachment, and trust in strategic decision-making teams: The role of procedural justice. *Academy of Management journal*, 38(1), 60-84.
 14. Law, K. S., Wong, C. S., Wang, D., & Wang, L. (2000). Effect of supervisor-subordinate guanxi on supervisory decisions in China: An empirical investigation. *International Journal of Human Resource Management*, 11(4), 751-765.
 15. Luo, Y. (1997). Guanxi: Principles, philosophies, and implications. *Human systems management*, 16(1), 43-52.
 16. Luo, Y. (2007). The independent and interactive roles of procedural, distributive, and interactional justice in strategic alliances. *Academy of Management Journal*, 50(3), 644-664.
 17. Park, S. H., & Luo, Y. (2001). Guanxi and organizational dynamics: Organizational networking in Chinese firms. *Strategic management journal*, 22(5), 455-477.
 18. Park, S. H., & Luo, Y. (2001). Guanxi and organizational dynamics: Organizational networking in Chinese firms. *Strategic management journal*, 22(5), 455-477.
 19. Pearce II, J. A., & Robinson Jr, R. B. (2000). Cultivating guanxi as a foreign investor strategy. *Business Horizons*, 43(1), 31-31.
 20. Ring, P. S., & Van de Ven, A. H. (1992). Structuring cooperative relationships between organizations. *Strategic management journal*, 13(7), 483-498.
 21. Sheppard, B. H., Lewicki, R. J., & Minton, J. W. (1992). *Organizational justice: The search for fairness in the workplace*. New York: Lexington Books.
 22. Standifird, S. S., & Marshall, R. S. (2000). The transaction cost advantage of guanxi-based business practices. *Journal of world business*, 35(1), 21-42.
 23. Tsui, A. S., & Farh, J. L. L. (1997). Where guanxi matters: Relational demography and guanxi in the Chinese context. *Work and Occupations*, 24(1), 56-79.
 24. Warner, M. (1993). Human resource management 'with Chinese characteristics'. *International Journal of*

- Human Resource Management, 4(1), 45-65.
25. Xin, K. K., & Pearce, J. L. (1996). Guanxi: Connections as substitutes for formal institutional support. *Academy of management journal*, 39(6), 1641-1658.
 26. Yen, D. A., Barnes, B. R., & Wang, C. L. (2011). The measurement of guanxi: Introducing the GRX scale. *Industrial Marketing Management*, 40(1), 97-108.
 27. Yeung, I. Y., & Tung, R. L. (1996). Achieving business success in Confucian societies: The importance of guanxi (connections). *Organizational dynamics*, 25(2), 54-65.
 28. 彭泗清、楊中芳 (2001)。交往關係的影響因素與發展過程。載於楊中芳(主編)，中國人的人際關係、情感與信任。台北:遠流。
 29. 錢穆 (1989)。《民族與文化》。台北:東大書局。
 30. 黃麗莉 (1996)。《人際和諧與人際衝突》。臺北市:桂冠。
 31. 賴志超 (2004)。〈華人文化與組織認定〉。《應用心理研究》，21，10-13。
 32. 高承恕、陳介玄 (1991)，“台灣企業運作的社會秩序—人情關係與法律”，*東海學報*，32 卷，219-232。
 33. 陳介玄 (1990)，“關係法令：台灣企業運作的一個傳統面向”，*思與言*，28 (4)，47-64。
 34. 黃識銘，方世榮，2003，行銷通路成員之夥伴關係長期導向與組織間績效之研究，*管理評論*，22(2)，頁 55-85。

集合住宅大樓價值工程之探討

王和源¹ 向振國² 林哲偉³

¹國立高雄科技大學土木工程系特聘教授

²國立高雄科技大學土木工程系碩士

³國立高雄科技大學土木工程系研究生

摘要

本研究以價值工程方法是對於高雄市某集合住宅大樓新建工程做出探討，分別對於縮短工時與中間樁工法及止水方式的部分提出替代方案，以達到降低成本的目標。此分析提出了各種不同的替代方案，經過研析過程後各挑選出兩個替代方案進行最後比較，最終兩個部分皆得到最佳的替代方案，使此工程有效的降低成本。

關鍵字：價值工程、集合住宅大樓、縮短工時、中間樁工法、止水方式

Multi-residential Building of New Construction

Her-Yung Wang¹ Chen-Kuo Hsiang² Jhe-Wei Lin³

¹Professor, Dept. of Civil Engr., National Kaohsiung University of Sciences and Technology, R.O.C.

²Master, Dept. of Civil Engr., National Kaohsiung University of Sciences and Technology, R.O.C.

³Master Student, Dept. of Civil Engr., National Kaohsiung University of Sciences and Technology, R.O.C.

ABSTRACT

This research purpose use the Value Engineering to analysis multi-residential building of new construction (project) on Kaohsiung, propose alternative of shorten working hour, King post method and Water stop method to achieve reduce cost. This analysis provide the different alternative plan then pick up two proposal for final comparison and these two proposal all got best result so make the new construction reduce the cost.

Keywords: value engineering, multi-residential building, reduced hours, king post method, water stop method

一、前言

本研究針對集合住宅大樓新建工程以價值工程方法對縮短工時、中間樁工法及止水方式進行探討，期能以最佳替代方案達到不影響機能之情況，縮短工期，並減低成本。

價值工程(Value Engineering, 簡寫 VE)，也稱價值分析(Value Analysis, 簡寫 VA)，是指以產品或作業的功能分析為核心，以提高產品或作業的價值為目的，力求以最低壽命

周期成本實現產品或作業使用所要求的一項有組織的創造性活動。有些人也稱其為功能成本分析，價值工程涉及到價值、功能和壽命周期成本等三個基本要素。

價值工程的目標，須經由價值工程研析來完成。價值工程研析，是針對研析標的，投入人力、材料、金錢、設備等各項資源，透過資料的收集與整合，以合適的研析方法，求得能達成機能且降低成本的建議方案。

研析方法是組成研析計畫的重點，可依單位或研析標的特性分成各種不同的階段，故不論分成幾個階段，其技巧則大致相同，其可將研析工作分成資料、創意、判斷、發展、建議等五個階段。

二、研究目標及標的

2.1 價值工程及建案資訊

資料蒐集主要是彙整收集研析標的相關資訊，如圖說、規範、預算明細表、單價分析表、業主需求及現實情況等，提供研析小組了解研析標的，並以機能、成本、進度加以分析，選擇研析範圍，並確定其關鍵機能。工程建案之結構概況如表 1 所示。價值工程之研析流程如圖 1 所示。

2.2 研析目標

1. 增加或維持原有基本機能及必要次要機能需求。
2. 降低成本。
3. 增加使用年限。
4. 紀錄相關研析經驗，以供日後類似案例分析之參考。

2.3 位置現況及結構概要

基地坐落於高雄市左營區，基地東北側臨 17 米寬的道路，鄰近基地主要建築物為西側二樓到五樓透天厝，南側 2~4 樓透天厝，東側 2~4 透天厝。

結構台柱與中間柱共構，H-350*350*12*19 採預鑽埋入式，鑽孔直徑 0.8 米，深度至 GL-26.5 米。結構與施工法概要如表 2 所示。第一層支撐平面配置圖如圖 2 所示。支撐剖面圖如圖 3 所示。

三、研究方法及結果分析

3.1 研析方法

價值工程的目標，須經由價值工程研析來完成。價值工程研析，是針對研析標的，投入人力、材料、金錢、設備等各項資源，透過資料的收集與整合，以合適的研析方法，求得能達成機能且降低成本的建議方案。研析步驟、目的與方法技巧如表 3 所示。

3.1.1 創意分析(產生創意構想)

本案研析小組成員採用腦力激盪法，以他人的刺激為基礎而產生新構想，以解決問題，腦力激盪過程中禁止成員間批評討論、歡迎自由聯想、期望有大量的創意、追求結合與改進創意，在創意階段中，依研析項目產生許多構想，不論是過程或方法必需能滿足機能。創意階段產生構想如表 4 所示。

3.1.2 創意構想優缺點比較

由研析小組成員共同審查，就創意構想逐項加以了解其手段與方法，及其是否可以達成所要求的關鍵機能，本項審查的目的是使研析小組就初步的審視，在了解其內容後，可進一步條列其優缺點，經由優缺點的條列工作，可將一些優點較少且缺點較多的創意構想刪去。構想比較表如表 5 所示。

3.1.3 創意構想可行性評估

利用可行性評估構想加以排序篩選，表中評估因子可依所需達成的機能不同而作不同的設定，對每一項評估因子給予適當之評分，再將各創意構想的分數各別加總，即可比較各創意構想的得分高低，做為進一步評估的依據。可行性評估表如表 6 所示。

3.1.4 評估矩陣法評估構想

建立評估因子及其權重後，假設被評估的構想都是最少可以滿足被使用的最低要求，比較各構想之得分，並選出最高分之方案，即為以客觀方式選取之最佳方案。權重評估表如表 7 所示及評估矩陣如表 8 及表 9 所示。

3.2 機能分析

機能是研析對象能滿足某種需求的一種屬性，也是該產品或標的得以存在或銷售的主要理由；機能分析旨在找出研析標的物的機能，並確認可否提昇機能或刪除不必要機能。本案例採用構想優缺點比較、可行性評估、機能評估矩陣。

3.2.1 成本分析

本研究對集合住宅大樓進行研析，由於其工程建造過程中需使用大量的人力及防水材料，最符合價值工程中優先探討之對象，

因研究主要是比較原始花費與擬定替代方案後之差異。

中間樁工法及止水方式的部分原方案使用切斷方式為止水板加上皂土條替代為拔除方式灌漿，型鋼每公斤每米需要的成本約是新台幣 3600 元，此工程使用的場鑄樁每單位需要的成本約是新台幣 5000 元，後續止水所需的止水板及皂土條每單位需要的成本約是新台幣 2000 元，經本研析團隊進行價值工程研析後，如使用替代方案可使其成本降低，符合價值工程研析之目的，本研析小組提出替代方案之可行性與降低經費為最佳方法，並能在不影響計畫基本基能及品質下計算出最佳方案。成本分析表如表 10 所示。

四、結論

以價值工程研析結果經專業技師的工程安全評估下，選定成本較低工法，兼具安全及成本考量，透過風險管理及價值工程技術之結合，於所採納之替代方案將可同時維持機能與減緩風險。

另過去於風險管理評估過程中，並無減緩風險機制之經濟效益評估，可能導致花費鉅額的風險對策費用，但降低之損失費用卻過低，透過價值工程之技術，可評估方案之適切性及經濟效益。

對於原設計方案既有之調查工作如：地質調查、建物基礎調查、建物識別調查、地形調查、公共管線調查、交通量調查、拆除調查等，如於研判替代方案之可行性仍有遺漏或不足時，應建議業主編列預算從事補充調查工作，以確認替代方案之可行性及對原工程之效益。

致謝

本研析的完成特別感謝指導老師王和源教授在研究與課業上的教誨，使我受益良多，也感謝小組成員包括向振國、楊景然、魏芝庭及闕育晴等同學的努力付出。

參考文獻

1. 王和源，「價值分析專論」，國立高雄科技

大學土木工程與防災科技研究所教案，2020。

2. 沈茂松，「營建工程防災技術：基礎施工篇」，文笙出版社，2015。
3. 劉慶尚、沈文修「價值工程管理與實務(再版)」，超越企管，1998。
4. 陳宗男，「價值工程之認識」，營建管理季刊第 33 期，第 35~43 頁，1997。

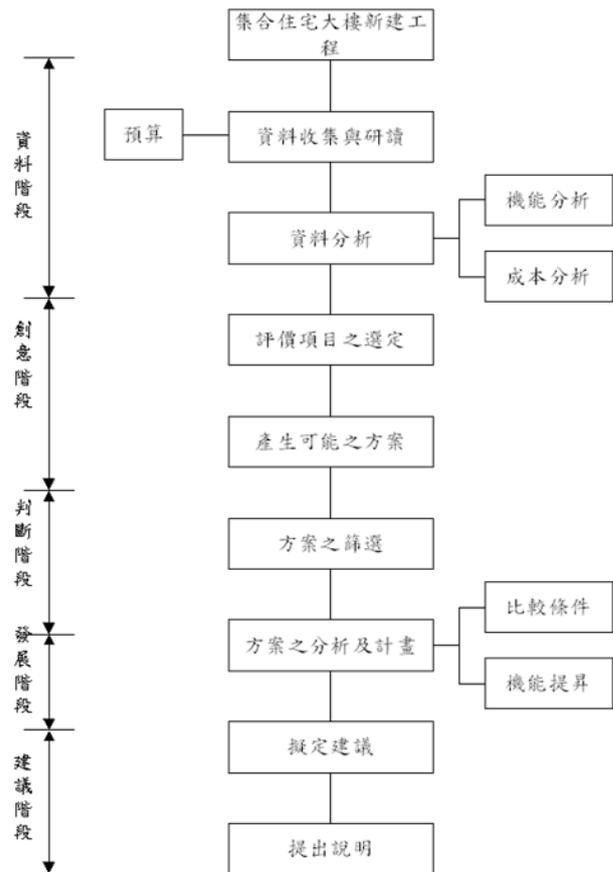


圖 1 研析流程圖

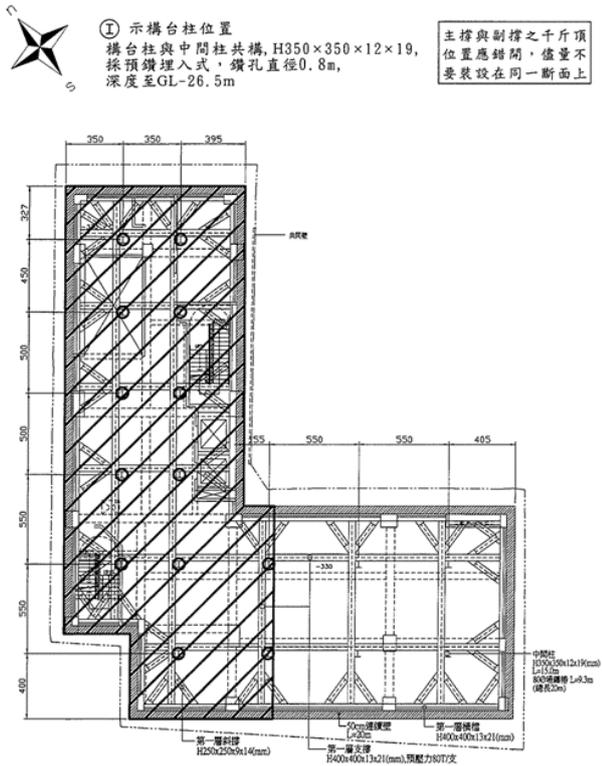


圖 2 第一層支撐平面配置圖

構台柱與中間柱共構, H350x350x12x19, 採預鑽埋入式, 鑽孔直徑0.8m, 深度至GL-26.5m

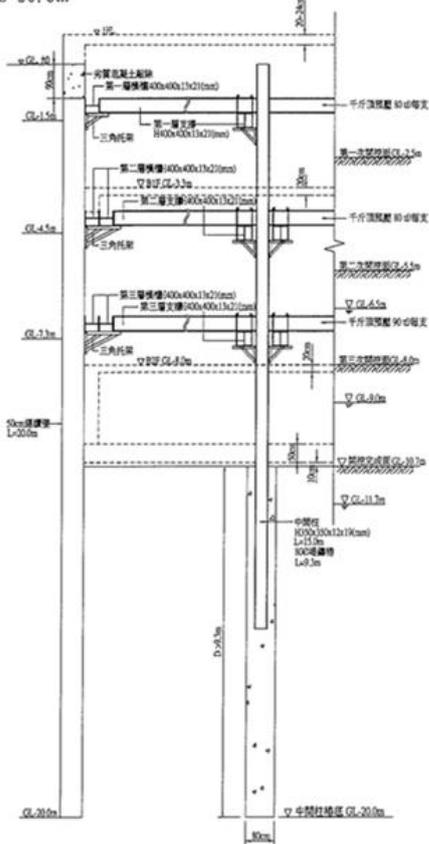


圖 3 支撐剖面圖

表 1 工程建案之基本資料

項 目	內 容
基地面積	661.00 平方公尺
總樓地板面積	地下室=1085.71 平方公尺 地上=2505.43 平方公尺 共 3591.14 平方公尺
層數	地下二層，地上十層
開挖深度	10.70 公尺
建築物高度	40.90 公尺

表 2 結構與施工法概要

項 目	說 明			
連續	寬度:50cm 深度:20.0m $f_c=280\text{kg/cm}^2$			
壁	SD420W(#6 以上), SD280W(#5 以下)			
中間	H-350*350*12*19, 採預鑽埋入, 鑽孔直徑 0.8m			
柱	深度至 GL-20.0m, H-型鋼埋入至 GL-15.0m			
構台	H-350*350*12*19, 構台柱與中間柱共構, 採預鑽埋入			
柱	鑽孔直徑 0.8m, 深度至 GL-26.5m, H 型鋼埋入至 GL-17.0m			
擋土	層別	圍令支數尺寸	支撐支數尺寸	支撐預壓值
	一層	H-400*400*13*21	H-400*400*13*21	80 t/支
	二層	2H-400*400*13*21	2H-400*400*13*21	80 t/支
	三層	2H-400*400*13*21	2H-400*400*13*21	90 t/支
建築	地下室: RC 構造			
物結	地面層: RC 構造			
構	採用筏基設計			
結構	6F 底板(含)以下, $f_c'=280\text{kg/cm}^2$			
體材	6F 柱(含)以上, $f_c'=245\text{kg/cm}^2$			
料強	鋼筋規格: SD420W, $f_y=4200\text{kg/cm}^2$ (#4(含)以上)			
度	SD280W, $f_y=2800\text{kg/cm}^2$ (#3)			

表 3 研析步驟、目的與方法技巧

步 驟	目 的	方 法 技 巧
1. 檢視相關資料	瞭解計畫內容	1.檢視相關文件 2.勘查工地 3.設計單位訪查 4.問題討論
2. 列出可能範圍	列出可能研析範圍	1.腦力激盪 2.條列方式 3.成本分析 4.價值分析/價值指數
3. 選擇研析範圍	列出有機會進行變更的研析部份	1.共同審查 2.排序/篩選 3.投票
4. 列出相關機能	將所需要的機能列出並明瞭共同關係	1.共同審查 2.腦力激盪 3.依組件單元列出機能

		4.系統化機能分析技術 5.成本化系統機能分析
5. 確定關鍵機能	選出影響成本最大的機能	1.共同審查 2.排序/篩選
6. 列出替代構想	列出達成關鍵機能的構想	1.強迫思考法 2.組合構想 3.簡化構想
7. 選擇優選構想	選出最符合機能的構想	1.共同審查 2.優缺點比較 3.排序/篩選 4.權重矩陣分析 5.成本矩陣分析
8. 準備建議方案	發展需要的建議方案並與原設計比較	1.成本估算 2.成本/效益分析 3.壽年成本分析 4.品質分析 5.可行性分析
9. 提出正式建議	準備簡報並提出書面報告	1.提出摘要報告 2.簡報說明建議案

表 4 產生構想

創意階段	產生構想
研析標的：集合住宅大樓新建工程	
項目：縮短工期	
執行的機能(要做什麼)	
這是價值研析的創意階段。當研析項目必須被執行時，許多基本構想、程序或方法在此時引伸出來。(此階段切勿對任何構想加以評估)	
構想加以評估)	
1.採用多數外籍勞工	
2.增加施工機具數量	
3.使用合適施工機具	
4.增加工人	
5.事前作業檢查	
6.確實落實自主檢查	
7.澆置及養護同一階段完成	
研析標的：集合住宅大樓新建工程	
項目：中間樁工法及止水方式	
1.拔除方式，灌漿工法填補	
2.切斷方式，止水鉸+皂土條	

表 5 構想比較表

判斷階段		構想比較	
研析標的：集合住宅大樓新建工程			
項目：縮短工期		第 1 頁共 2 頁	
選擇最可行的構想或合併構想，表列於下，並將他們的優缺點分別記錄以便決定更進一步的工作。			
構想	優點	缺點 (註記消除缺點的方法)	評等
採用多數外籍勞工	1.增加國際交流節省成本	1.溝通較困難 2.提供住宿 3.日常習慣差異性	
增加施工機具數量	1.工期短	1.成本提高 2.施工環境雜亂	
使用合適施工機具	1.加快施工速度	1.成本提高	
增加工人	1.加快作業速度	1.成本提高 2.管理較困難	
事前作業檢查、確實落實自主檢查	1.危險性降低	1.需增加管理人員	
澆置及養護同一階段完成	1.工期短	1.危險性提高	
判斷階段		構想比較	
研析標的：集合住宅大樓新建工程			
項目：中間樁工法及止水方式		第 2 頁共 2 頁	
構想	優點	缺點(註記消除缺點的方法)	評等
拔除方式，灌漿工法填補	1.不透水性佳 2.方便整理	1.材料取得彈性差 2.自重大 3.施工期變長	
切斷方式，止水鉸+皂土條	1.美觀 2.施工快速 3.色澤一致 4.便宜 5.配色便宜	1.施工品質不易 2.補修不易	

表 6 可行性評估表

判斷階段	可行性評估					
研析標的：集合住宅大樓新建工程						
項目：縮短工期						
表列在判斷階段中經與原設計比較後之構想每項評估標準以 0 至 5 分評分	A	B	C	D	E	合計
	安 全 性	人 事 費	維 護 費	施 工 性	可 行 性	
採用多數外籍勞工	3	3	2	3	1	12
增加施工機具數量	4	5	4	2	4	19
使用合適施工機具	5	4	4	3	5	21
澆置及養護同一階段完成	2	3	3	3	2	13
增加工人	4	2	2	3	3	14
事前作業檢查、確實落實自主檢查	4	1	1	0	4	10

註：灰色網底者將進入下一階段討論

判斷階段	可行性評估					
研析標的：集合住宅大樓新建工程						
項目：中間樁工法及止水方式						
表列在判斷階段中經與原設計比較後之構想每項評估標準以 0 至 5 分評分	A	B	C	D	E	合計
	安 全 性	人 事 費	維 護 費	施 工 性	可 行 性	
拔除方式，灌漿工法填補	3	5	3	2	5	18
切斷方式，止水鉸+皂土條	4	4	3	2	3	16

註：灰色網底者將進入下一階段討論

表 7 權重評估表

判斷階段	權重評估																															
研析標的：集合住宅大樓新建工程																																
目標、期望標準	原始分數	指定權重																														
A 安全性	5	10																														
B 人事費	1	2																														
C 維護費	1	2																														
D 施工性	1	2																														
E 可行性	3	6																														
分數矩陣																																
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td></td> <td>B</td> <td>C</td> <td>D</td> <td>E</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>A-2</td> <td>A-1</td> <td>A-1</td> <td>A-1</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>B-1</td> <td>D-1</td> <td>E-1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>C</td> <td></td> <td>C-1</td> <td>E-1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>D</td> <td></td> <td></td> <td>D</td> <td>E-1</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>E</td> </tr> </table>				B	C	D	E	A	A-2	A-1	A-1	A-1	B	B-1	D-1	E-1		C		C-1	E-1		D			D	E-1	E				E
	B	C	D	E																												
A	A-2	A-1	A-1	A-1																												
B	B-1	D-1	E-1																													
C		C-1	E-1																													
D			D	E-1																												
E				E																												
重要程度																																
高度 3																																
中度 2																																
低度 1																																

表 8 評估矩陣(縮短工期)

判斷階段							評 估 矩 陣
研析標的：集合住宅大樓新建工程							
項 目：縮短工期							第 1 頁 共 2 頁
表列有潛力的構想	期望標準	安全性	人事費	維護費	施工性	可行性	滿意度
	權重	10	2	2	2	2	
構想 1： 增加施工機具數量	評 分	5	5	5	5	5	86
		4	4	4	4	4	
		3	3	3	3	3	
		2	2	2	2	2	
		1	1	1	1	1	
小計	40	10	8	4	24		
構想 2： 使用合適施工機具	評 分	5	5	5	5	5	102
		4	4	4	4	4	
		3	3	3	3	3	
		2	2	2	2	2	
		1	1	1	1	1	
小計	50	8	8	6	30		

註：灰色網底者將進入下一階段討論

表 9 評估矩陣(中間樁工法及止水方式)

判斷階段							評 估 矩 陣
研析標的：集合住宅大樓新建工程							
項 目：中間樁工法及止水方式							第 2 頁 共 2 頁
表列有潛力的構想	期望標準	安全性	人事費	維護費	施工性	可行性	滿意度
	權重	10	2	2	2	2	
構想 1： 拔除方式， 灌漿工法填補	評 分	5	5	5	5	5	80
		4	4	4	4	4	
		3	3	3	3	3	
		2	2	2	2	2	
		1	1	1	1	1	
小計	30	10	6	4	30		
構想 2： 切斷方式， 止水鉸+皂土條	評 分	5	5	5	5	5	76
		4	4	4	4	4	
		3	3	3	3	3	
		2	2	2	2	2	
		1	1	1	1	1	
小計	40	8	6	4	18		

註：灰色網底者將進入下一階段討論

表 10 成本分析

構想	項目	數量	費用(元)
拔除方式	止水	17 支*20000	340,000
切斷方式	1.型鋼	17 支*5m	306,000
	2.止水鉸及皂土條	17 支*2000	34,000
	3.φ80cm 場鑄樁	{ 13*(10+6.5)+4*10 } *5000	1,272,500
合計	1+2+3		1612500

FWD 檢測探討不同回彈模數對鋪面反應之影響

劉明樓¹ 孫鳳吟²

¹義守大學土木與生態工程學系副教授

²高苑科技大學通識教育中心副教授

摘要

由於台灣公路建設都已達一定之規模，而其目前面臨之最大挑戰為如何對現有龐大之公路系統進行評估與維護。在鋪面之評估方法中又以非破壞性檢測中之落體側位儀 FWD (Falling Weight Deflectometer) 為目前最常用於鋪面之檢測。鋪面之反算分析是將 FWD 試驗所得各測點之撓度推估鋪面各層之材料性質，以作為鋪面績效與維護管理之依據。本研究首先取得國道 4 個不同路段的 FWD 試驗結果資料進行鋪面之反算分析，並求得鋪面之材料性質，最後利用所得的材料參數進行鋪面之結構與績效分析。本研究結果發現每個路段所得到的鋪面回彈模數性質將影響鋪面反應且其性質亦有有明顯的變異性，且此變異性也影響鋪面之結構與績效分析的結果。

關鍵字：鋪面反算、材料變異性、績效分析

一、緣起

開放通車之鋪面需定期對其進行評估，以了解其強度(或性質)作為維修之依據，此評估方法可利用非破壞撓度試驗 [1,2,3,4,5,6,7] 或應力波動之原理 [8,9,10,11,12,13] 反算求得其性質，以為鋪面結構強度之參考。目前鋪面反算分析法可分為撓度試驗法及應力波動法，因撓度法之理論及操作較為簡單，故也較常被用於鋪面反算之依據。鋪面反算分析之基本原理為對一組實測撓度值，找出鋪面結構各層之材料性質如鋪面各層之線性回彈模數或非線性之參數性質等，由於含有無限多組之材料性質可滿足此實測之撓度值，故如何使用適當的方法得到這些材料性質即非常重要。一般而言，反算之材料性質皆需由試誤法求得，即首先假設一組材料性質，再計算此組材料性質所得之撓度，並與實測值作比較，再由誤差之大小尋找另一組較佳的材料性質，此種方法亦稱為疊代法。故如何減少疊代法之次數一直是反算分析研究之重點。另外也有使用資料輔助回算之方法如美國德州農工大學 (Texas A&M University) 所發展之 Modulus 方

法 [14]，即預先利用鋪面分析理論計算各種路面材料性質之撓度值以組成一資料庫，再由實測之鋪面以比對及內插之方式反算得鋪面之材料性質。本研究將使用最佳化之理論 [15] 與有限元素程式結合發展反算分析程式，以求出鋪面之材料性質。

過去對於反算分析結果於鋪面工程之應用主要有路面成效評估、加鋪設計、車輛載重限制及鋪面管理等應用 [16]，而國內自民國 84 年首先引進第一部落錘式撓度儀 [17] 後，即開始進行此方面資料之分析及研究並有些成果 [18,19]，然而目前之反算大都仍在求得線性之鋪面性質，且將其結果用於鋪面結構及績效分析上之研究仍較少。台灣公路之建設已有相當之成果且道路也達一定之長度，政府每年投入於路面養護管理或加鋪之經費亦相當大，而目前公路單位已進行不少之非破壞性試驗結果，也累積相當多的資料，但此資料用於實際鋪面之績效分析仍有限，故深信本研究之成果必能對台灣之鋪面工程界於鋪面之維護管理或加鋪等方面之應用有一定之貢獻。

二、回彈模式與破壞模式

鋪面之非破壞性分析包含鋪面之反算與結構分析，其中反算分析是利用現地試驗結果來求得鋪面之材料性質，再利用此性質進行鋪面在受車輛荷重下之位移與應力反應。本研究首先使用線性模式於國道路段之分析。所使用之線性回彈模式如公式(1)或(2)所示：

$$E = (k_1 P_a) \quad (1)$$

$$E = (k_1 P_a) (I_1 / P_a)^{k_2} \quad (2)$$

上式中 k_1 與 k_2 是材料參數， P_a 是參考壓力而 I_1 是第一應力變變量。反算程式是模擬柔性鋪面在受 FWD 落錘作用下所產生之反應。圖 1 為 FWD 試驗與各層材料回彈模數之示意圖。鋪面承受落錘之荷重為 P ，其荷重半徑為 15 cm，反算分析流程如圖 2 所示。反算分析基本原理為當落錘側位儀之重錘打於鋪面時，於一側設置數個感應器並取量測其最大值位移 w_i^m ，其中下標 i 表示位置，而上標 m 代表量測值。接著假設鋪面之初始材料性質後計算於各感應器位置之位移反應 w_i^p ，其上標 p 表示預測值，再使用公式(3)計算誤差：

$$E_r = \sum_{i=1}^n [w_i^m(x) - w_i^p(x)]^2 \quad (3)$$

上式中誤差是觀測值與量測值差的平方，原理同最小二乘法使用誤差的平方以避免正負誤差相互抵消。使用公式(2)計算得誤差後，藉由圖形尋覓之最佳化方法修正材料參數，由疊代的過程中求得誤差為最小之目的函數 W 如公式(4)所示，當誤差為最小時，即得最佳的材料性質。

$$W = \text{Min}(E_r) \quad (4)$$

使用高公局落錘側位儀檢測國道高速公路不同路段之落錘側位儀試驗，至 102 年 4 月止共檢測 6,790 個落錘側位儀測點。本研究由其中選取個檢測路段如表 1 所示，取得不同荷重及位置之 FWD 值及路段鋪面結構的基本資料，並利用過去所發展的反算程式

進行反算分析以求得鋪面材料之性質如表 1-3 所示，因每個路段皆取 3 個 FWD 試驗結果進行反算分析，故亦求出每個路段之回彈模數之平均值及變異係數，並進行材料變異性的探討，且此結果將用於鋪面之績效分析。

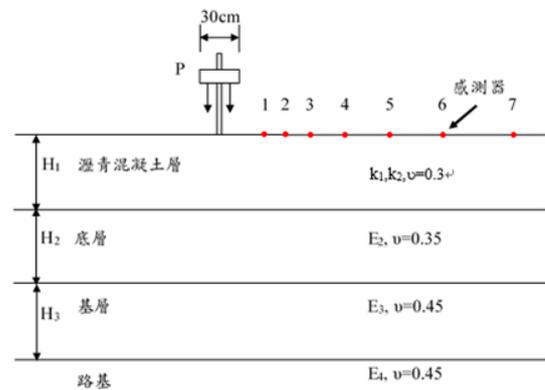


圖 1 FWD 試驗與各層材料回彈模數之示意圖

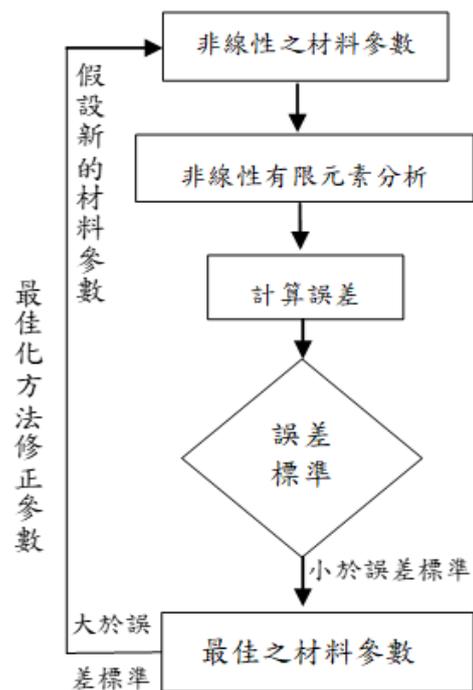


圖 2 材料參數反算程式流程

表 1 線性模式下材料性質統計參數

路段名稱	E ₁		E ₂		E ₃		E ₄	
	AVE	CV	AVE	CV	AVE	CV	AVE	CV
	(Mpa)	(%)	(Mpa)	(%)	(Mpa)	(%)	(Mpa)	(%)
國三南下屏東段	7896	47.5	929	31.7	581	33.7	130	43.7
國一南下斗南段	4347	31.7	1310	21.1	783	24.9	145	28.0
國三北上白河段	4479	25.5	1881	17.8	1111	18.8	98	27.5

表 2 非線性模式下材料性質統計參數(一)

路段名稱	k ₁		k ₂	
	AVE	CV	AVE	CV
	(Mpa)	(%)	(Mpa)	(%)
國三南下屏東段	41284	46.0	0.1697	10.0
國一南下斗南段	21053	33.5	0.0188	2.5
國三北上白河段	21328	24.4	0.2038	3.6

表 3 非線性模式下材料性質統計參數(二)

路段名稱	E ₂		E ₃		E ₄	
	AVE	CV	AVE	CV	AVE	CV
	(Mpa)	(%)	(Mpa)	(%)	(Mpa)	(%)
國三南下屏東段	940	33.0	593	40.3	131	45.9
國一南下斗南段	1272	23.6	785	24.1	146	28.0
國三北上白河段	1771	8.5	1039	7.5	98	27.3

績效分析是將結構分析所得之應力與路面破壞模式結合計算路面在車輪反覆作用下所產生之車轍與疲勞龜裂。所用之車轍模式係將二參數模式與塑性力學之理論結合計算每層路面材料在車輛反覆荷重下之永久應變量，再將其乘上該層之厚度即為該層之永久變形量，此模式可表示如公式(5)：

$$\log \varepsilon^P(N) = \log \mu + s \log N \quad (5)$$

上式中 ε_p 是荷重次數 N 之永久應變量， μ 和 s 是材料常數，其中 μ 是第一次荷重下之永應變量，而 s 為永久應變量與荷重次數於對數座標下之斜率。本研究視 μ 為應力之函數，其為在給定之應力下使用前節之塑性力學理論算得在垂直方向之永久應變。最後再將每一層永久變形量疊加即為該荷重次數之路面車轍，故路面車轍公式可表示如下：

$$\delta_j = \sum_{i=1}^j \sum_{k=1}^n \varepsilon_{j,k}^P h^k \quad (6)$$

其中

$\delta_j = j$ 期間之車轍累積量。

$\varepsilon_{j,k}^P = j$ 期間第 k 層所承受交通量之永久應變量。

$h^k =$ 路面結構第 k 層之厚度。

在疲勞龜裂分析中路面允許疲勞破壞次數為初始龜裂形成次數和龜裂傳播次數之和如下公式所示：

$$N_f = N_i + N_p \quad (7)$$

式(7)中 N_i 和 N_p 分別是初始龜裂形成和龜裂傳播所需之次數，而 N_f 為材料允許之荷重次數。 N_i 將由微觀破壞力學之理論求得，而 N_p 則直接由破壞力學中之 Paris' 定律求得其可表示如下：

$$N_p = \frac{1}{A} \int_{c_0}^h \frac{d_c}{\Delta K^n} \quad (8)$$

其中 c_0 是初始龜裂長度， h 是瀝青混凝土之厚度， ΔK 是應力強度因子之變化量，而 A 和 n 是材料性質。鋪面龜裂面積之計算則採用 Rauhut 所引用之觀念，將路面之結構及材料性質視為隨機變數，路面之龜裂破壞則由 Miner's 定律求得。

三、不同回彈模式對車轍與疲勞龜裂之影響

本研究將蒙地卡羅模擬法與有限元素法結合發展成具隨機性之鋪面結構分析程式。此程式之流程為輸入路段反算分析所得鋪面材料性質的統計參數，再利用蒙地卡羅取樣取得 N 組樣本值，即可帶入鋪面結構分析程式求得 N 組樣本下結構分析的反應結果(位移及應力)，再將此結果利用統計公式求得 N 組反應的平均值與變異係數，此程式進行材料變異性分析的流程圖如圖 3 所示。

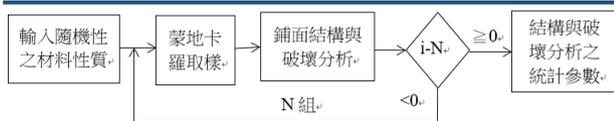


圖 3 隨機鋪面分析程式流程圖

首先進行應力分析，結果將用於鋪面車轍與疲勞龜裂之分析。本研究是利用結構分析所得之應力代入車轍模式與疲勞龜裂模式中，求得鋪面車轍的統計參數與疲勞龜裂面積與荷重次數關係之影響，並探討材料具有變異性與無變異性時荷重次數與車轍及疲勞龜裂面積的影響。因使用塑性力學之破壞分析需提供塑性力學車轍模式之參數，這些參數又必需經由實驗所獲得。因本研究並無材料之實驗，故將假設合理的參數進行路段分析，表 4 為三個分析路段其 AC 層塑性力學參數之假設值。

表 4 試驗路段 AC 層塑性力學參數之假設值

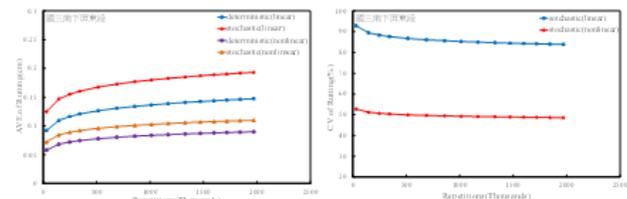
路段名稱	Rutting Parameter			
	α	ϕ_v (degree)	x(psi)	ϕ_{cv} (degree)
國三南下屏東段	7.37	35	442.6	25.74
國一南下斗南段	30	65	55.6	17.1
國三北上白河段	7.37	11.5	112.9	25.75

3-1 車轍分析

以下探討不同回彈模式與材料變異性對國道路段車轍分析之影響。圖 4 至 6 為各路段車轍與荷重次數關係之平均值與變異係數，由表 5 車轍最大值可知，在線性與非線性模式下，材料具有變異性時所得的車轍較材料無變異性時來的大，且隨著荷重次數的增加車轍逐漸增加。由表 5 可知，在線性模式下，材料具變異性與材料不具有變異性對車轍最大之差異量百分比為國三北上白河段，其差異量百分比為 47.02%，而車轍之最小差異量百分比發生在國三南下屏東段，其差異量百分比為 31.11%。在非線性模式下，材料具變異性與材料不具有變異性對車轍最大之差異量百分比為國三北上白河段，其差異量百分比為 24.82%，而車轍之最小差異量百分比發生在國一南下斗南段，其差異量百分比為 0.69%。

表 5 車轍最大值之比較

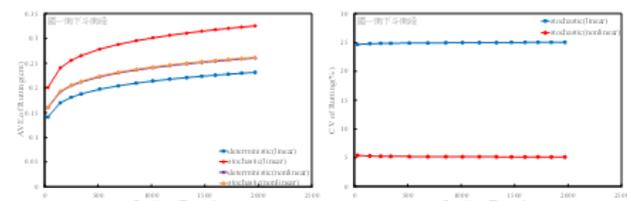
路段名稱	線性模式			非線性模式		
	無變異性 (cm)	有變異性 (cm)	差異百分比 (%)	無變異性 (cm)	有變異性 (cm)	差異百分比 (%)
國三南下屏東段	0.1473	0.1931	31.11	0.0898	0.1100	22.45
國一南下斗南段	0.2315	0.3254	40.57	0.2623	0.2621	0.69
國三北上白河段	0.1108	0.1628	47.02	0.1004	0.1253	24.82



(a) 車轍平均值

(b) 車轍變異係數

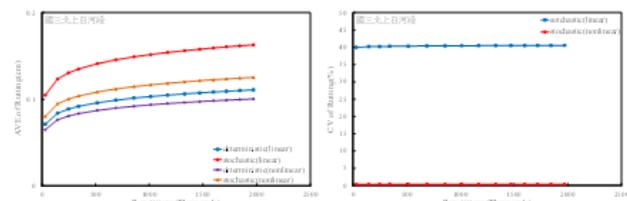
圖 4 國三南下屏東段材料變異性對車轍與荷重次數關係之影響



(a) 車轍平均值

(b) 車轍變異係數

圖 5 國一南下斗南段材料變異性對車轍與荷重次數關係之影響



(a) 車轍平均值

(b) 車轍變異係數

圖 6 國三北上白河段材料變異性對車轍與荷重次數關係之影響

3-2 疲勞龜裂分析

接著探討不同回彈模式與材料變異性對國道路段疲勞龜裂分析之影響。圖 7 為材料具變異對性疲勞龜裂面積與荷重次數關係。在線性與非線性模式下，材料具有變異性時所得疲勞龜裂面積平均值較材料無變異性時來的大。由表 8 疲勞龜裂面積最大值可知，在線性模式下，材料具變異性與材料不具有

變異性對疲勞龜裂最大之差異量百分比為國一南下斗南段，其差異量百分比為 75.37%，而疲勞龜裂之最小差異量百分比發生在國三南下屏東段，其差異量百分比為 0.80%。在非線性模式下，材料具變異性與材料不具有變異性對疲勞龜裂最大之差異量百分比為國一南下斗南段，其差異量百分比為 136.40%，而疲勞龜裂之最小差異量百分比發生在國三南下屏東段，其差異量百分比為 13.32%。

表 6 疲勞龜裂面積最大値之比較

路段名稱	線性模式			非線性模式		
	無變異性 (cm)	有變異性 (cm)	差異百分比 (%)	無變異性 (cm)	有變異性 (cm)	差異百分比 (%)
國三南下屏東段	53.0900	53.5156	0.80	27.3560	31.0000	13.32
國一南下斗南段	5.6140	9.8455	75.37	0.4907	1.1600	136.40
國三北上白河段	3.9687	5.2776	32.98	0.6829	0.9340	36.77

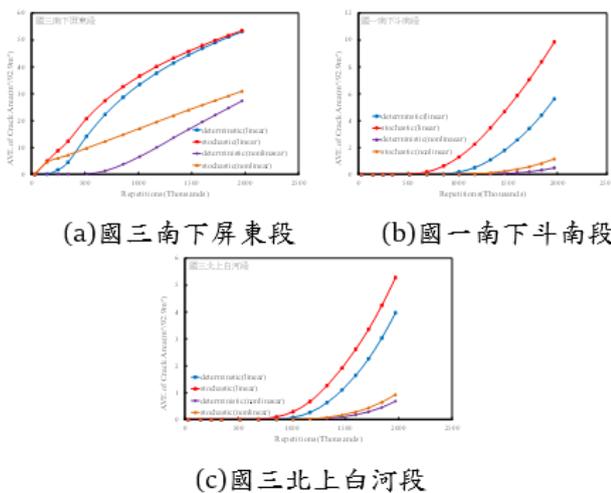


圖 7 材料變異性對疲勞龜裂與荷重次數關係之影響

四、不同回彈模式對績效分析之影響

鋪面在開放通車之後，其鋪面之維護與管理日漸重要。本研究所發展的程式可建立鋪面績效指標與維護方法及使用年限之相關性，以供鋪面管理單位之用。本研究將利用前節績效程式於試驗道路之分析結果計算績效指標。將鋪面績效分析所得之鋪面破壞參數(如車轍與疲勞龜裂)代入美國 AASHTO 所發展

之鋪面現況服務能力指標 (Present Serviceability Index, PSI)。此路面服務指標 PSI 採用下列公式：

$$PSI = 5.03 - 1.91 \log(1 + sv) - 1.38(\delta_a)^2 - 0.01\sqrt{c+p} \quad (9)$$

其中 sv 為 slope variance， δ_a 為車轍量，為疲勞龜裂之面積，而 p 為修補之面積。上式中之車轍與疲勞龜裂面積將由所發展之路面破壞程式產生，而 c 則是採用 Kenis 所提之公式計算而得，其可表示如下：

$$\overline{sv} = E(sv) = \frac{2B}{C^2} \text{var}[\delta_a] \quad (10)$$

其中 δ_a 為車轍量， B 及 C 是 roughness properties，而 $\text{var}[\delta_a]$ 是車轍之變方 (variance)。圖 8 為將上述三個道路其鋪面績效分析所得之車轍與疲勞龜裂帶入公式(9)所得 PSI 與車輛荷重次數之關係，由圖可知各路段之 PSI 值隨著車輛荷重次數的增加而降低。從線性模式下材料無變異性之 PSI，發現國一南下屏東段之 PSI 由 2.72 降至 2.22，是三個試驗路段中下降最多，而國一南下斗南段段之 PSI 由 4.2 降至 3.92，是全部路段中變化幅度最小。而在具有變異性時，國一南下屏東段之 PSI 由 2.40 降至 1.50，是三個試驗路段中下降最多，而國三北上白河段之 PSI 由 3.80 降至 3.50，是全部路段中變化幅度最小。

探討非線性模式下材料無變異性之 PSI，發現國三南下屏東段之 PSI 由 4.2 降至 3.9，是三個試驗路段中下降最多，而國三北上白河段之 PSI 由 5.02 降至 5.01，是全部路段中變化幅度最小。而在具有變異性時，國三南下屏東段之 PSI 由 3.90 降至 3.40，是三個試驗路段中下降最多，而國三北上白河段之 PSI 由 5.02 降至 4.98，是全部路段中變化幅度最小。

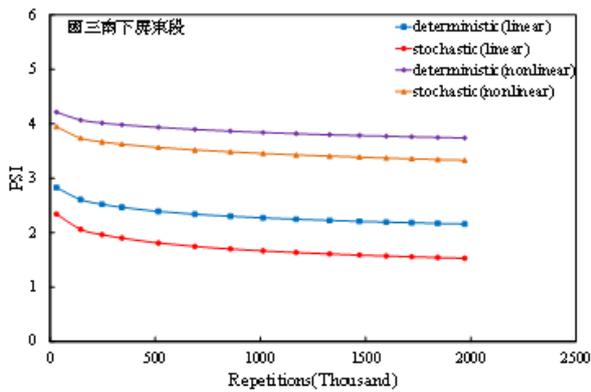


圖 8 國三南下屏東段材料變異性對 PSI 之影響

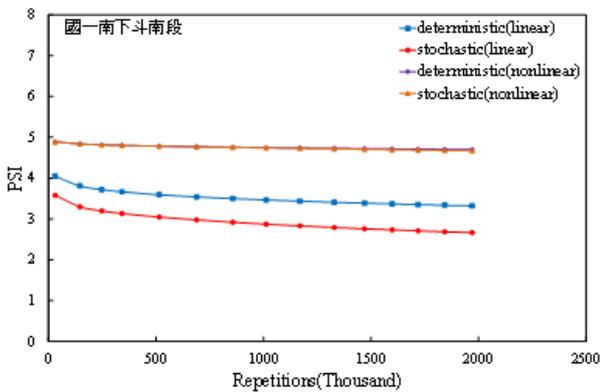


圖 9 國一南下斗南段材料變異性對 PSI 之影響

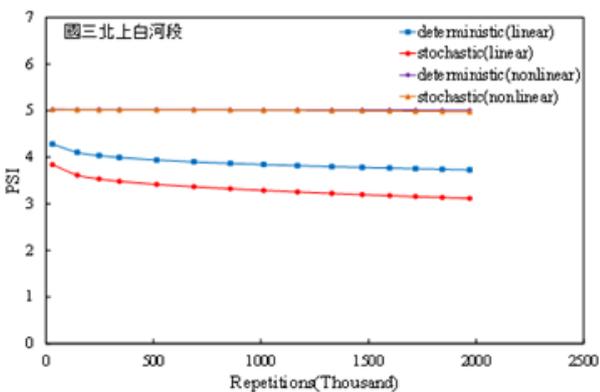


圖 10 國三北上白河段材料變異性對 PSI 之影響

隨機鋪面績效分析程式，探討材料變異性對鋪面分析的影響。本研究之重要結論敘述如下：

1. 在線性模式下，材料具變異性與材料不具有變異性對車轍最大之差異量百分比為國三北上白河段，其差異量百分比為 47.02%，而車轍之最小差異量百分比發生在國三南下屏東段，其差異量百分比為 31.11%。在非線性模式下，材料具變異性與材料不具有變異性對車轍最大之差異量百分比為國三北上白河段，其差異量百分比為 24.82%，而車轍之最小差異量百分比發生在國一南下斗南段，其差異量百分比為 0.69%。
2. 在線性模式下，材料具變異性與材料不具有變異性對疲勞龜裂最大之差異量百分比為國一南下斗南段，其差異量百分比為 75.37%，而疲勞龜裂之最小差異量百分比發生在國三南下屏東段，其差異量百分比為 0.80%。在非線性模式下，材料具變異性與材料不具有變異性對疲勞龜裂最大之差異量百分比為國一南下斗南段，其差異量百分比為 136.40%，而疲勞龜裂之最小差異量百分比發生在國三南下屏東段，其差異量百分比為 13.32%。
3. 各路段之 PSI 值隨著車輛荷重次數的增加而降低。從線性模式下材料無變異性之 PSI，發現國一南下屏東段之 PSI 由 2.72 降至 2.22，是三個試驗路段中下降最多，而國一南下斗南段段之 PSI 由 4.2 降至 3.92，是全部路段中變化幅度最小。
4. 非線性模式下材料無變異性之 PSI，國三南下屏東段之 PSI 由 4.2 降至 3.9，是三個試驗路段中下降最多，而國三北上白河段之 PSI 由 5.02 降至 5.01，是全部路段中變化幅度最小。

五、結論

本研究由交通部國道路面檢測資料平台選取三個路段之 FWD 試驗資料進行反算分析，由於鋪面材料強度與厚度可能因施工不良等因素，造成實際值與設計值不同的情況發生，故利用所得之線性與非線性之材料性質與變異係數以及鋪面厚度，帶入所發展之

參考文獻

1. 高翰成，鐘偉逞，林志棟，"柔性路面多層彈性模數評估之研究"，第十屆鋪面工程學術研討會，基隆，1999，第 709-719 頁
2. 林炳森，李泰明，吳元廷，鄒譽名，"路

- 面評審儀應用於剛性路面之回算法", 第八屆鋪面工程研討會, 中壢, 1995, 第 603-612 頁。
3. 黃偉慶, 汪立威, "柔性鋪面彈性模數回算個案分析", 第八屆鋪面工程研討會, 中壢, 1995, 第 623-632 頁。
 4. 白建華, 李朝聰, 李英豪, "剛性鋪面回算程式之建立-溫氏基礎模式", 第九屆鋪面工程學術研討會, 台中, 1997, 第 557-566 頁。
 5. 周家蓓, 陳又菁, "鋪面撓度值在養護整修策略上之應用", 第七屆鋪面工程學術研討會, 淡水, 1993, 第 181-191 頁。
 6. 黃偉慶, 汪立威, "鋪面彈性模數之回算及敏感度分析", 第七屆鋪面工程學術研討會, 淡水, 1993, 第 371-380 頁。
 7. 梁履坦, 林志棟, "回算法評估鋪面材料之回彈模數", 第七屆鋪面工程學術研討會, 淡水, 1993, 第 395-401 頁。
 8. 鄭丁興, "衝擊反應法在鋪面非破壞檢測上之應用", 第十屆鋪面工程學術研討會, 基隆, 1999, 第 699-708 頁。
 9. 張德文, 胡光復, 張嘉麟, "穩態撓度檢測法於台灣地區柔性鋪面之應用剖析", 第八屆鋪面工程研討會, 中壢, 1995, 第 593-602 頁。
 10. 張德文, 張鴻源, 黃喬炎, "穩態撓度試驗之回算研究", 第八屆鋪面工程研討會, 中壢, 1995, 第 613-622 頁。
 11. 胡光復, 周家蓓, 張德文, "穩態非破壞性檢測法於鋪面工程之應用", 第七屆鋪面工程學術研討會, 淡水, 1993, 第 361-370 頁。
 12. 康裕明, "鋪面結構的現場定量檢測技術之探討與展望", 第七屆鋪面工程學術研討會, 淡水, 1993, 第 381-390 頁。
 13. Uzan, J., "Resilient Characterization of Pavement Materials," International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 16, 1992, pp. 453-459.
 14. Lytton, R.L., "Backcalculation of Pavement Layer Properties," Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, ASTM STP 1026, A. J. Bush III and G.Y. Baladi, Eds., American Society for Testing and Material, Philadelphia, 1989, pp. 502-524.
 15. 劉明樓, 蘇珍立, 黃建維, "線性與非線性回彈模式對路面破壞之影響", 八十八年電子計算機於土木水利工程學術研討會, 台中, 2000, 第 529-537 頁。
 16. 張嘉麟, "動態反算於衝擊性撓度法之應用研究", 淡江大學土木工程研究所碩士論文。
 17. 鐘偉逞, "應用衝擊式撓度儀觀測路面結構強度之研究", 中央大學土木工程研究所, 中華民國八十九年六月。
 18. 洪境聰, "柔性鋪面現況服務力指標與預測模式建立之研究", 中央大學土木工程研究所, 中華民國八十九年六月。
 19. 姚志廷, "以國際糙度指標分析網級柔性鋪面養護最適化之研究", 中央大學土木工程研究所碩士論文, 中華民國九十年六月。
 20. Liu, M.L. "Numerical Prediction of Pavement Distress by Using the Geotechnical Constitutive Law," Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, College Station, Texas, 1993.
 21. Nakai, T. and Matsuoka H., "Deformation of Soil in Three-Dimension Stress", IUTAM conference on Deformation and Failure of Granular, Delft, Netherland, pp. 275-285, 1982.

以深度學習方法評估人行道受阻礙程度

林國良¹ 黃柏禎² 蔡子皓³

¹ 義守大學土木與生態工程系教授

² 義守大學土木與生態工程系研究生

³ 義守大學資訊工程學系學生

摘要

本研究針對市區人行道，建置基於無人飛行載具 UAV 的自動化之 AI 物件辨識系統，作為評估人行道受阻礙程度之基準。系統將利用深度學習的機器視覺方法，憑藉由無人飛行載具與行動裝置所擷取的人行道影像，以深度學習的物件辨識方法分離人行道與其上之物件，最後分析物件間之相互關係獲得的資訊得出合理的人行道受阻礙程度。

關鍵字: 人行道、物件辨識、深度學習、機器視覺、無人飛行載具、受阻礙程度

Determining Obstructive Level of Public Sidewalks with Object Recognition

Lin Kuo-Liang¹ Huang Po-Chen² Tsai Tzu-Hao³

¹ Professor, Department of Civil and Ecological Engineering, I-Shou University

² Master Student, Department of Civil and Ecological Engineering, I-Shou University

³ Student, Department of Information Engineering, I-Shou University

ABSTRACT

This research is intended to provide a systematic approach in determining the obstructive level of public sidewalks with deep learning based machine vision mechanism. Using digital images received by Unmanned Aerial Vehicle, sidewalk areas and objects are identified from the images with object recognition method. Illegal objectives on the sidewalks are then identified. Finally, obstructive level of public sidewalks can be calculated with the detection results and the calculated sidewalk areas..

Keywords: sidewalk, object detection, deep learning, machine vision, unmanned aerial vehicle, degree of hindrance

一、背景

台灣都市的步行環境常因人民公德與機關管理不善造成非法占用的情形，違規機車停放、商家佔用營業情況嚴重。對於人行道的違規佔用，地方政府一般而言並不主動取締，長期下來就讓許多人行道供大眾行走的功能逐漸降低，人們只能被迫走在馬路上。

當台灣逐漸邁入老齡化社會，不能開車、騎車而必須依賴步行的人口將越來越多，目前台灣各大都市所提供的整體步行環境顯然不及格。

為了協助主管機關改善人行道的管理，本研究以真實反映人行道暢行狀況為目標開發一套基於無人飛行載具 UAV 與行動裝置的

自動化人行道物件辨識系統，用於迅速計算人行道受阻礙程度。系統將利用基於深度學習的物件辨識視覺方法，憑藉由無人飛行載具所擷取的人行道影像，分離出人行道範圍與人行道上之各項物件，最後以演算法計算得出合理的人行道受阻礙程度。

二、研究方法

本研究的核心技術是深度學習的物件辨識。傳統上物件辨識由物件定位(Object Localization)、物件特徵擷取(Feature Extraction)與影像分類(Image Classification)這三個主要技術項目所構成，之前技術上的突破極為緩慢，尤其是在物件特徵擷取方面，人們需要利用多次前處理並判斷運用何種方法來擷取特徵點才有效率，不過在深度學習(Deep Learning)方法獲得突破後，影像辨識成功率與速度效能上都有了大幅改善。深度學習的崛起除了仰賴電腦 GPU 運算效能進化與海量網路訓練資料的供應外，也歸功於各種卷積式神經網路(CNN, Convolutional Neural Network)的進展。相較於傳統的演影像辨識演算法，CNN 不再由使用者對影像進行前處理或特徵點擷取，而是直接輸入資料利用多層次的卷積運算來萃取輸入資料的各種不同特徵，也就是對輸入資料進行多次的分類，CNN 的發明大大降低過去全連結式類神經網路需要訓練參數的數量，也讓特徵分類變得方便。當 Alexnet, GoogLeNet, VGG, Residual Network 等分類器陸續被發明且測試成功後，CNN 也不斷進化為 R-CNN、Fast R-CNN，乃至於 Faster R-CNN(ResNet)，分類錯誤機率已大幅降低。這些檢測方法在人工智慧物件辨識的各項競賽 PASCAL VOC、COCO 和 ILSVRC 上都獲得不錯的成績。

Faster R-CNN 的基本架構如圖 3 所示，主要包含四個部分：

1. Conv layers: 根基於 CNN 網路，Faster RCNN 首先使用一組基本的 conv+relu+pooling 層(13 個 conv 層+13

- 個 relu 層+4 個 pooling 層)來萃取影像的 feature maps，而此 feature maps 被後續的 RPN 層和全連接層共同分享使用。
2. Region Proposal Networks: RPN 網路用於生成 region proposals。該層通過 softmax 判斷 anchors 屬於 foreground 或者 background，再利用 bounding box regression 修正 anchors 獲得精確的 proposals。
3. Roi Pooling: 此層收集輸入的 feature maps 和 proposals，綜合這些資訊後提取 proposal feature maps，送入後續全連接層判定目標類別。
4. Classification: 此權連接層利用 proposal feature maps 計算 proposal 的類別，同時再次 bounding box regression 獲得檢測框最終的精確位置。

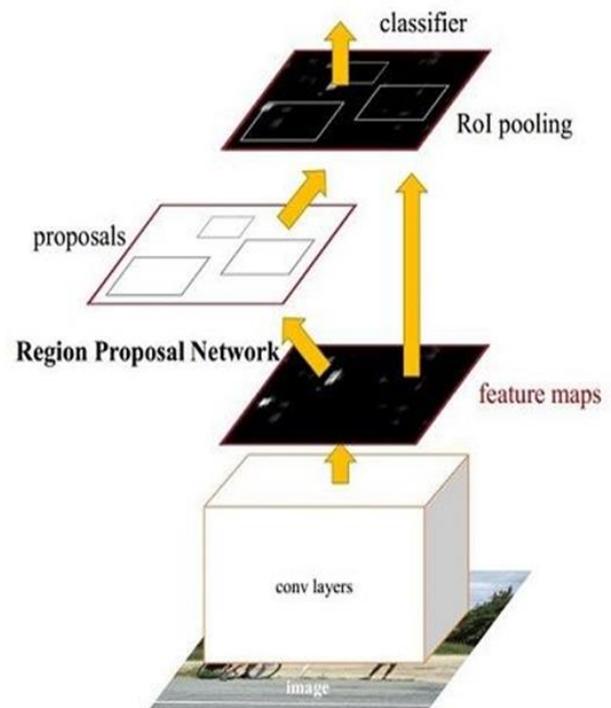


圖 3、Faster R-CNN 基本架構 (Ren et al, 2015)

Faster R-CNN 這一類的方法雖然準確率高，也比全連結式的神經網路快得多，但計算量仍然過大，即使運用等級極高的硬體設備，也不容易達到即時檢測的要求。

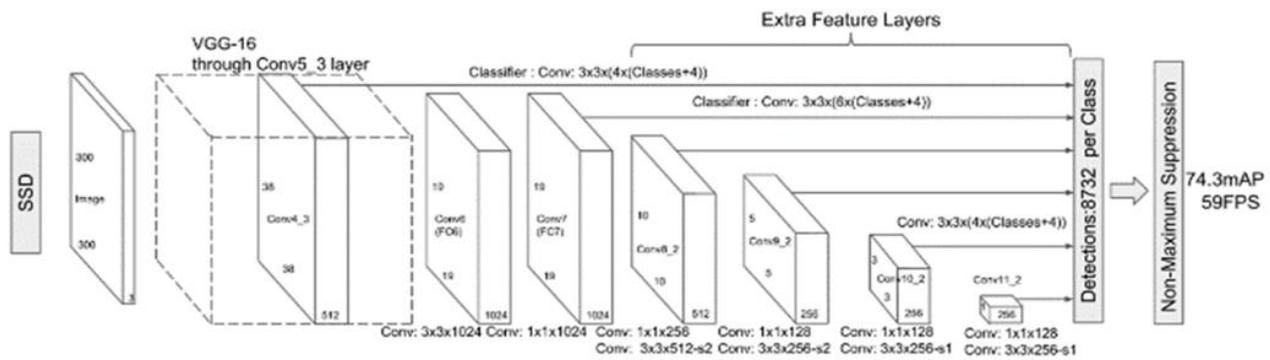


圖 4、SSD (Single Shot MultiBox Detector)演算法基本架構(王得懿，2018)

通常檢測速度是以每秒可處理的圖像數 (FPS, Frame per Second) 來表示，而 Faster R-CNN 最快大概可以達到每秒 7 個圖像的運作速度，如果想要增加處理速度到一般 Video 影像的 24 FPS 甚至於 60 FPS，往往只能犧牲檢測精度。

為了改善 Faster R-CNN 的處理速度，北卡羅來納大學的 Liu 等人發表了 SSD (Single Shot MultiBox Detector) 演算法 (Liu et al 2016)，SSD 的基本架構如圖 4 所示，SSD 網路的核心是使用小卷積濾波器來預測特徵圖上固定的一組預設邊界框的類別分數和位置偏移。為了實現高檢測精度，SSD 從不同尺度的特徵圖產生不同尺度的預測，並且通過寬高比來明確地分離預測。通過這些設計特性達到了簡單的端到端訓練，同時兼顧了處理速度與精度。

SSD 有以下幾個特點 (王得懿 2018):

1. 簡化的 VGG-16 網路: 特徵萃取網路的基礎架構是採用 VGG-16 (牛津大學在 2013 ImageNet 大賽獲勝的神經網路架構，達到 92.7% 正確率)，去除了 VGG-16 的全連結層 FC8，將 FC6、FC7 轉換為卷積層。Pool 5 不進行分辨率減小，在 FC6 上使用擴張卷積 (dilated convolution) 彌補損失的感受域 (Receptive Field)；並且增加了一些分辨率遞減的卷積層。
2. Anchor 機制: SSD 摒棄了 proposal 的生成階段，僅使
3. 用 anchor 機制，這裡的 anchor 就是位置和大小固定的 box，可以理解成事先設置好的固定的 proposal。

4. 不同深度的卷積層: SSD 使用不同深度的卷積層預測不同大小的目標，對於小目標使用分辨率較大的較低層，即在低層特徵圖上設置較小的 anchor，高層的特徵圖上設置較大 anchor。
5. 預測模塊: 使用 3x3 的卷積對每個 anchor 的類別和位置直接進行回歸。
6. 資料增強效果: SSD 使用的資料增強 (data augmentation) 對後續效果影響很大。

在 Liu 等人利用 PASCAL VOC 和 MS COCO 進行測試後證實 SSD 精度明顯優於 Faster R-CNN，而處理速度更快了 3 倍，因此 SSD 可能是目前深度學習運用於物件辨識最優異的神經網路演算法。

本研究初步利用 SSD_MobileNet，也就是利用 SSD 演算法加上 MobileNet 網路架構的分類器來進行人行道上的物件辨識。經以手持行動攝影裝置實際測試，當使用 TensorFlow CPU 版本時，物件辨識的速度約為 3~5 FPS，而在安裝 GPU 版本後但未進行優化的情況下，辨識速度已提升到 8~10 FPS。以下圖 5 到圖 6 是本研究在高雄市博愛路與裕誠路附近人行道進行實際測試的結果。後續將利用空拍機由上空進行影像擷取並持續優化神經網路架構以達到更快速的辨識速度。



圖 5、高雄市博愛路辨識圖

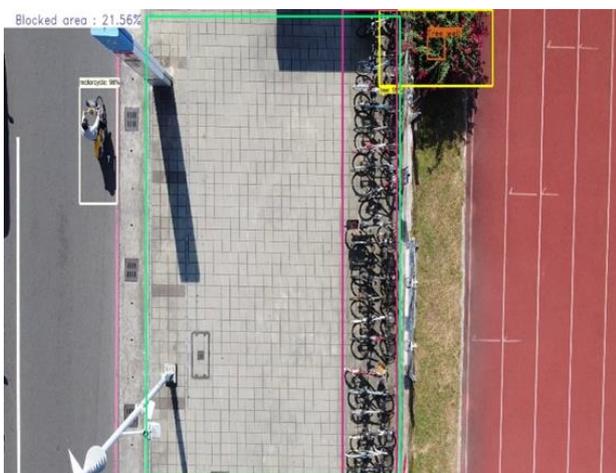


圖 6、高雄市博愛路辨識圖

三、研究步驟

為了能準確評估人行道受阻礙程度，系統將以 TensorFlow 的 GPU 環境作為建置平台，本研究擬採用機器視覺方法來辨識人行道區域、在以深度學習 SSD 網路辨識人行道上之物件，最後以自行開發之演算法得出人行道受阻礙程度。

本次我們選了兩個地點分別為測試地點與研究地點，測試地點為高雄市大大社區大社國中前的人行道，此區域離我們較近方便我們進行測試及驗證我們的假設想法，而研究地點為高雄市博愛路漢神巨蛋至三民家商這區間，這段剛好位於市區物件種類多樣化且人潮變化分明是個對於機器訓練有很大幫助的區域。

3-1 UAV 影像額取

在訓練神經網路模型前，需要準備具有

人行道物件的資料集，我們使用無人機去錄製人行道的俯瞰視角之影片，並透過 python 的 OpenCV 套件來切割出影片中的每一個影像畫格，我們挑選了 296 張圖片當作訓練模型使用的資料集，67 張圖片當作訓練模型使用的測試集。

3-2 Labeling 下標

收集好訓練用的圖片後，我們使用 Github{7}上所提供的程式碼來進行物件標記的動作，一共分為以下 sidewalk、tree、pole、motorcycle、car、people、bike、bicycle parking place、MRT，九種類別，我們將 sidewalk 和 people 以外的物件稱之為佔據人行道之物件。

3-3 類神經網路訓練

完成物件的標記後，我們一樣採用 Github{8}上所提供的原始碼 train.py 來訓練用於辨識人行道上物件的神經網路模型，並且使用 Object_detection_image.py 的程式碼進行模型的驗證，我們在原始碼 visualization_utils.py 中新增了可以計算出人行道受物件阻礙區域面積的演算法。

3-4 人行道受阻礙程度演算法

程式碼中先建立 SidewalkTable、CompareTable 的二維陣列與 ObjectTable 的三維陣列，並將三種 Table 中的所有索引值之數值設定為 0，以上 Table 的大小就是和圖片像素大小相同的陣列，而 SidewalkTable{圖 7}二維陣列用來存放 sidewalk 物件的資訊，ObjectTable{圖 8}的三維陣列用來存放佔據人行道之物件的資訊，CompareTable{圖 10}二維陣列則是用以存放前兩者比較後所佔據面積的資訊。

經過影像推論後，可以得到每一個物件框的座標點，我們將其座標點框取之範圍內的所有索引值之數值設定為 1，即是此物件佔據整張圖片的大小。然後將 SidewalkTable 與 ObjectTable 的資訊做程式判斷{圖 9}，如果兩個 Table 中對應的索引值之數值皆為 1，則 CompareTable 的此索引值就設定成 1，而計算後的 CompareTable{圖 10}即是人行道中受物件所佔據面積的資訊。



圖 11、穴處理的測試結果

四、成果展示



圖 12、件辨識並計算面積成果



圖 13、辨識並計算面積成果

五、結論

由圖 12 與圖 13 可發現目前的到的辨識精確度已經達到一定水準，能夠相當清楚的將物件標示出來並進行面積計算，而樹穴面積我們按照比例縮放計算後的結果也與我們實際去看過後非常接近，有些零星物件沒有被辨識出來，原因在於訓練資料還不夠多，這部份我們有持續再給資料，不過礙於法規的問題，我們只能進行白天的空拍，也意味著我們的訓練僅限於白天的狀況，之後若考取無人機執照後便可申請夜間飛行，進行夜間的狀況訓練，再經過一段時間的訓練及修正相信能有效的運用在現實生活中。

參考文獻

1. Shaoqing Ren, Kaiming He, Ross Girshick, and Jian Sun. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks, Extended tech report, Cornell University. arXiv:1506.01497 [cs.CV], 2015.
2. 王得懿， SSD: Single Shot MultiBox Detector 介紹, Medium, 2018
3. J.S. Seng, John & J. Norrie, Thomas. Sidewalk following using color histograms. Journal of Computing Sciences in Colleges. 23. 172-180, 2008.
4. Stevica Graovac, and Ahmed Goma. Detection of Road Image Borders Based on Texture Classification. International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 9, 242:2012.
5. Wei Liu, Dragomir Anguelov, Dumitru Erhan, Christian Szegedy, Scott Reed, Cheng-Yang Fu, Alexander C. Berg. SSD: Single Shot MultiBox Detector. Computer Vision – ECCV 2016. ECCV 2016. Lecture Notes in Computer Science, vol 9905. Springer, Cham.
6. Y. Wang, E. K. Teoh, and D. Shen. Lane detection and tracking using b-snake. Image and Vision Computing, pp. 269–

280, 2004.

7. LabelImg,
<https://github.com/tzutalin/labelImg>
8. TensorFlow-Object-Detection-API-Tutorial-Train-Multiple-Objects-Windows-10,
<https://github.com/EdjeElectronics/TensorFlow-Object-Detection-API-Tutorial-Train-Multiple-Objects-Windows-10>
9. 長河，跨界 | 土木工程也開始 AI 化了：
用卷積神經網路實現結構損傷視覺識別。
微信公眾號十千牛，2017 年。

【E】 防災與重建

國軍動員機制支援災害防救任務之研析-以 2018 年 823 水災為例

江政興¹ 陳建元²

¹陸軍部隊訓練南區聯合測考中心少校教官

²嘉義大學土木與水資源工程學系教授

摘要

本研究針對 2018 年 823 水災之災害防救經驗，探討國軍動員機制支援災害防救任務，分析現行國軍災防執行能力。本研究採用質性研究深度訪談法，分析國軍動員機制支援災害防救任務現況。本研究針對親歷 823 水災之救災任務的 27 歲至 47 歲，中士至上校等不同軍階的 8 位國軍進行訪談。藉由討論國軍動員機制支援災害防救任務之現況，檢討現行動員機制的缺失，前瞻未來可能面臨之問題。期以尋求完善國軍救災機制之道，達成提升國軍災害防救整備效能之目的。

目前國軍執行災害防救，是遵循「超前部署、預置兵力、隨時防救」之指導政策。國軍於 2018 年 8 月 23 日 14 時迄 8 月 31 日 18 時，累計派遣兵力 17,748 人次陸續投入救災工作中。依訪談可知，在平時依災防責任地區建立通聯機制，並整合各類型部隊可投入災害救援兵力及機具，藉由部隊有效訓練及裝備維修作為，於災害來臨時可有效投入重點地區執行災害防救任務。當災害發生時，國軍配合縣市政府應變中心開設等級，同步建立災害應變機制，並派駐連絡官整合縣市政府需求，依災防區權責完成兵力及機具支援。而國軍目前已完善災害救援機制，並循往例檢討潛勢地區可能面臨災害之類型，檢討編組部隊編制人力及機具完成兵力預置作為，期於災害來臨時能即時投入救災，保障民眾生命財產安全。最後提出改進國軍動員機制之建議，供後續參考。

關鍵字：國軍、災害防救、動員機制

A Study of the Military Mobilization Mechanism to Assist Disaster Prevention and Rescue – in Light of the 823 Flood Event in 2018

Chian Cheng-Hsing¹ Chen Chien-Yuan²

¹ Military Base of Army in Tainan

² Department of Civil and Water Resources Engineering, National Chiayi University

ABSTRACT

Based on the disaster prevention and rescue experience of the 823 flood event in 2018, the study explores the mobilization and assistance mechanism of the national army in supporting disaster prevention and rescue tasks, and analyzes the current military disaster prevention and rescue capabilities. The study uses qualitative research from in-depth interviews of army members aged 22 to 44 years old for the purpose of improving the effectiveness of military mobilization and disaster prevention and rescue missions.

The national army implements disaster prevention and rescue following the guiding policy

of "advanced deployment, advance troops, and anytime rescue", with standing troops as the priority and carrying out disaster prevention and rescue tasks. A total of 17,748 soldiers were involved in the disaster rescue mission during the 23-31 August 2018 flood event. According to interviews, we can establish a communication mechanism in areas with disaster prevention responsibility in peacetime, and integrate various types of troops to invest in disaster rescue forces and equipment. With effective training and equipment maintenance of troops, it can be effectively invested in key areas to implement disasters when disasters come. When a disaster occurs, the National Army cooperates with county and city government response centers to establish levels, simultaneously establish disaster response mechanisms, and dispatch liaison officers to integrate county and city government needs, and complete troop strength and machine support in accordance with the powers and responsibilities of disaster prevention areas. The National Army has now improved the disaster relief mechanism and reviewed the types of disasters that may be faced by potential areas, reviewed the formation of manpower and equipment for the formation of troops, and completed the force pre-positioning for property safety. The study suggestions to improve the national army's mobilization mechanism for disaster prevention and rescue.

Keywords: national army, disaster prevention, mobilization mechanism

一、緣起

依中央氣象局的統計資料顯示，2000 年至 2016 年之間，臺灣曾受到 104 次颱風侵襲，年均颱風侵襲次數高達 6.1 次(交通部中央氣象局，2017)。2001 年，台灣受到娜莉颱風的肆虐，當時的損失金額高達 57 億美金(張靜貞等，2007)。而 2004 年敏督利颱風(Chien et al., 2008)，使得臺灣中部與西南部地區發生劇烈降雨。2008 年卡玫基颱風，亦給臺灣造成嚴重災害(陳亮全等，2009)。2009 年的莫拉克颱風，則對台灣南部造成 643 人死亡、60 人失蹤、1555 人受傷的慘況，當時全部損毀的房屋數量為 722 間、半毀的為 44 間，造成的農業損失高達 164 億 6863 萬元(內政部消防署，2020)。時至 2018 年，台灣之天然災害次數較往年少，主要以 0823 豪雨帶來之積淹水災情較為嚴重，造成全台 7 人死亡、2 人失蹤、148 人受傷，而截至 8 月 30 日共累計疏散撤離民眾人數達 8492 人；並造成 70,034 戶停電，農業災損更超過 7.6 億元(中央災害應變中心，2020)。由於往年的災害防救，探討者眾多，若再次就以往案例進行探討，已無太大實際意義。而近年來因極端氣候影響，往往為瞬間暴雨，其災害型態有所

改變，而臺灣的相對因應方式亦有所差異。

台灣每年各種災害威脅不斷，保障國家、以及民眾的生命財產安全，是政府不可懈怠之責。在臺灣的「六大力量」中，以國軍投入資源、能量與經費最為龐大，但所獲得的民眾評價與成效，卻遠不如紅十字會、救難團體等為社會所認同。為健全臺灣災害防救體系及功能，強化整體災害防救效能，立法委員及行政院提出修訂災害防救法。而國軍肩負作戰與救災兩種重責大任，需經過歷史反覆的檢視及驗證，方能使體系更加完善(許博傑，2016)。必須於日常狀態下，有計劃的培養國軍災害防救之能力，以便於發生災變之時，其能夠積極投入執行災害防救工作(胡毓隆，2018)。

許多災害事件難以預料，後續處置作為的建置完善，有利於降低傷害(吳嘉銘，2017)。以災害防救法修訂前，國軍在整個救災體系中屬於支援救災的角色。依修訂前「災害防救法」及「申請國軍支援災害處理辦法」，只有在地方政府無法因應災害處理時才可以申請國軍支援，但不得「超過國軍支援能力範圍之外」，而且要以書面寫明災情資訊、所需救災人員、裝備及機具等事項(台灣新社會智庫，2009)。換言之，即當各級應變中心無法

因應災害處理時，才向國軍申請支援；而國軍總在災後接到任務才大舉出動(行政院研究發展考核委員會，2010)。不論是被動或主動執行災害防救工作，國軍的定位在於支援政府執行災害防救工作，其主要任務則以戰備演訓為主(蘇慶仁，2014)。

由此可見，防災觀念不僅僅侷限於統籌救災計畫的政府或是執行救援任務的國軍，其需深入每個國民心中方可確保，當災害來臨時具備機警且正確的應變態度，甚至動員全臺人力、物力，進行對於災區的救援以及重建。臺灣的兵役制度改為全募兵，部隊員額大幅縮減，軍隊的職能從傳統的戰備整備延伸至災害防救(蘇慶仁，2014)。而以現有人員編制，何以兼顧戰備任務及執行災害防救任務？未來因應之道必為秉持「納動員於施政，寓戰備於經建」之原則，當面臨重大災害的威脅時，整合政府、國軍以及社會各界的力量，才能將傷害減至最低。而動員則基於國家戰略構想與國防需求。一旦面臨重大災害的非常時期，各級的動員整備及災害防救工作，能夠配合國家戰略目標與實際需求，妥善規劃，在關鍵時刻發揮決定性之影響力(孫曉鳴，2015)。

823 水災由於降雨延時長、加上適逢大潮，以及降雨強度亦超出排水保護標準等因素，而西南部又多處地層下陷地區，進而導致中部與南部地區共有 8 個縣市，共計 1,544 處傳出淹水災情(中央應變中心，2018)。其中嘉義縣積合計 116 處積淹水，主要集中於河川中下游與沿海鄉鎮市(王安翔等，2018)。另根據農委會之統計，截至 2018 年 8 月 31 日止，全台以嘉義縣農業災損最為嚴重，其損失超過全台的半數，高達 4 億 6,281 萬元(行政院農業委員會，2020)。可見嘉義縣在此次水災中受災最重，最具探討意義。故本研究選擇以最近的 2018 年 823 水災為例，以嘉義縣作為此次調查之範圍進行此次探討。

二、國軍支援救災需求性

關於「災害」(Disaster)的定義，日本學者榑崎泰道、今井實、長穀川義明(1984)定義其為：由於自然或人為的原因，而導致人命亦或是社會遭受損傷，進而引發社會失去已構成的均衡現象。張豐書(2014)認為災害是會給人類以及人們賴以生存的環境，造成破壞性影響的事物總稱；且其具有局部性、擴張性、以及發展性。而在 2019 年 10 月 7 日頒佈的「國軍協助災害防救辦法」第三條中，將重大災害明確定義為：「依中央災害應變中心各類型災害一、二級之開設時機及災害狀況認定之」。簡言之，由於災難所導致的禍害即可謂為「災害」。

張豐書(2014)認為災害可以根據原因、發生部位、以及發生機理等因素，具體劃分為地質災害、海洋災害、天氣災害、環境災害、生化災害等。而據內政部消防署所列的災害種類，具體將其分為風災、震災與海嘯，火災與爆炸災害，水災，旱災，公用氣體與油料管線、輸電線路災害，寒害，土石流災害，空難，海難，陸上交通事故，毒性化學物質災害，礦災，森林火災等十四類(內政部消防署，2020)。另據「災害防救法」第二條之規定，將災害具體劃分為天然災害、人為災害兩大類。天然災害可區分為風災、水災、旱災、震災、寒害、土石流災害等；而人為災害則可區分為火災、森林火災、爆炸、礦災、空難、海難、公用氣體與油料管線、輸電線路災害、陸上交通事故、毒性化學物質災害等(梅元莉，2013)。

而台灣位處歐亞板塊與菲律賓海板塊的碰撞帶，活斷層密度極大，加上全球氣候變暖造成的極端降雨更為頻繁，種種因素導致的災害對台灣之威脅與日俱增。依世界銀行與哥倫比亞大學等研究機構共同發表之報告內容顯示，台灣是世界上最地震、水災、旱災交替發生頻率最為頻繁之區域，而且未來因極端氣候導致的巨型災害將成為一種「常態」(林美玲，2012)。近年來臺灣發生的災害頻發，諸如 1999 年的九二一大地震，造成超過三千人死亡。2003 年嚴重急性呼吸道症候群

(Severe acute respiratory syndrome, SARS) 疫情，對台灣航空、旅遊、酒店、餐飲、服務以及交通等各行各業造成的經濟損失高達 634 億元新台幣(湯惠芸，2003)。2009 年的「莫拉克」颱風，所引發的風災與水災造成臺灣水土流失，死亡以及失蹤者達七百餘人，人民生命及財產損失慘重(陳家鈞、賀志豪，2014)。

近年來學者們針對災害防救的應變分析，更驗證了地方政府無法處置大規模災情，可見國軍需提升相關防救資源、以及與各公部門機制協力與整合，方可發揮救災最大效能。然而，災防救助所直接產生或間接衍生的經費分擔、責任釐清及資源分配等問題，亦日趨嚴重，急待克服(梅元莉，2013)。

1999 年發生「921 大地震」，此地震造成 2 千餘人死亡，1 萬餘人受傷，10 萬餘間房屋全、半倒，估計損失新台幣 2,900 億餘元(張豐書，2014)。國軍秉持「救災視同作戰」之原則，立即投入裝備與人力，動員救災總兵力為 66 萬人次，陸軍部隊有 29 萬人(林美玲，2012)，快速進入各災區進行搶救與復原工作，並深得社會各界以及民眾的肯定，爾後更持續參與各項災害搶救行動。支援天數達 102 天協力救災，而執行救災相關項目以失蹤搜尋、人員搶救、毀壞房屋處理、民生救濟等為主要支援項目(張豐書，2014)。

但到 2009 年「莫拉克颱風」來臨，颱風所挾帶雨勢造成南部地區重創，死亡 643 人，失蹤 60 人，受傷 1 千餘人，房屋全、半毀 1 千餘間，農損估計約 165 億餘元(張豐書，2014)。國軍遵總統「將災害防救納入國軍中心任務之一」，國軍雖同樣投入裝備及人力，動員救災總兵力為 54 萬人次，陸軍部隊僅 10 萬人，救災兵力之調度捉襟見肘，遭新聞媒體批評延宕搶救時間(林美玲，2012)。支援天數達 54 天，而執行救災相關項目以人員撤離、山區搜索、搜尋罹難人員、災民收容照護、消毒防疫、災區服務、民生物資運補、搶灘運補、道路橋樑搶通、空中偵巡、接應外援物資、物資調度等為主要支援項目(張豐書，2014)。暴露出國軍現有兵力，已不足以應付

救災任務。國軍面對災害時所採取的同等搶救工作，但社會反應卻發生兩極分化(許鳳容，2012)。

2010 年 4 月 25 日的「國道三號 3.1 公里崩塌事件」，是三十年來最為嚴重的崩塌意外。造成四人罹難，倒塌下來的石堆約達十萬立方公尺，國道部分路段交通完全中斷，而清運砂石堆更是困難。國軍積極配合政府耗時近兩個月進行搶修，才最終恢復通車。2014 年 8 月 20 日臺灣遭受潭美與康芮兩個颱風的夾擊，農作物及民間設施損毀約為 1 億 8,732 萬元，國軍與五縣市政府互相配合，一同完成對於民眾的搶救、物資的運補、以及災後的復原等工作(洪宏嶽，2014)。

自「莫拉克」風災後，依據學者之相關研究提出，國軍若能夠先期預置救災兵力，並主動掌握災情、研判災情；並且確立其不待災區政府申請，即可及時投入進行救災之法制任務，能夠有效提升國軍即時投入救災之能力(梅元莉，2013)。面對災害頻發的臺灣，完善災害防救體制，使國軍能夠秉持總統、院長之指導，並配合行政院災害防救辦公室政策整合規劃，以全力執行災害防救工作。一方面有助於確保國人生命、財產安全，另一方面能夠進一步彰顯政府整體施政運作效能(許博傑，2016)。

近年來，政府提出增訂國軍主動救災等條文。期以使國軍能夠全力執行災害防救工作，確保國人生命、財產安全(蔡清操，2011)。對於國軍投入災害救援，修法建立新的模式，並配合進行國防法、兵役法修法。2010 年 7 月 13 日，災害防救法由立法院臨時會三讀通過，並於 8 月 4 日公佈實施。其中第三十四條第六項規定：「直轄市、縣(市)政府及中央災害防救業務主管機關，無法因應災害處理時，得申請國軍支援。但發生重大災害時，國軍部隊應主動協助災害防救。」賦予國軍主動救災的相應法律，即當發生新增重大災害時，國軍部隊應主動協助進行災害救援，並得運用應召的後備軍人，以支援災害防救(行政院研究發展考核委員會，2010)。具體包括：平時應派員參加各級政府召開之災害防救會

報，並指定專人負責協調聯絡；依救災責任分區，置重點於人員生命、財產安全之救援；當發生重大災害後，分區指揮部應主動瞭解狀況，即時通報災情；以及災後協助地方政府進行復原工作。換言之，即國軍救災從以往應援改為中心任務，需主動執行災區救援、人員運送、物資運補、交通搶通、以及災後復原重建等任務(蔡清操，2011)。而此一重大變革勢必對國軍日後的角色定位、功能以及戰力，皆具相當深遠的影響，因此國軍應如何執行災害防救任務，需要針對現階段國軍支援災害防救的相關作法進行探討，以重新思考與規劃適當的政策與機制，建構一套有效的反應機制有其必要性。

當前國軍從「精實案」、「精進案」至「精粹案」，部隊總員額由 1997 年的 42 萬 2,000 人，下降至 2008 年的 27 萬 5,000 人。其後，配合募兵制推行「精粹案」，2014 年更降至 21 萬 5,000 人。而國防部依據「精簡常備、廣儲後備」之原則，推行組織再造，軍種仍維持聯兵旅、艦隊及聯隊編組架構，並將資源充分集中在主戰部隊，以保障聯合防衛作戰任務順利執行(國防部陸軍司令部，2013)。無論如何轉變，皆將影響國軍救災能力。國軍仍以達成「及時動員、及時作戰」之首要目標。而在「平時養兵少，戰時用兵多」的戰略思維下，一旦國內有災害發生時，若其規模大到政府現有人力與物力已無法控制時，需動員民間力量才能控制災害擴大，將傷害降至最低。國軍採全募兵制後，依據「全民防衛動員準備法」將國防與全民相結合，使得動員目標除支援軍事作戰外，亦須協助災害防救(王得利，2011)。國軍秉持「超前部屬、預置兵力、隨時防救」的基本原則，來投入每次的災害防救工作(蘇慶仁，2014)。而動員力量有賴於中央、地方政府及民間力量才能達成之任務(孫曉鳴，2015)。人力精簡後救災之動員人力，在九二一地震國軍累計動員 26 萬人(軍管區司令部，2000)，而莫拉克風災時則累計動員人數大致達到 54 萬人(國防部，2010)。

由此可見，防災觀念不僅僅侷限於統籌救災計畫的政府或是執行救援任務的國軍，

其需深入每個國民心中方可確保，當災害來臨時具備機警且正確的應變態度，甚至動員全臺人力、物力，進行對於災區的救援以及重建。臺灣的兵役制度改為全募兵，部隊員額大幅縮減，軍隊的職能從傳統的戰備整備延伸至災害防救(蘇慶仁，2014)。而以現有人員編制，何以兼顧戰備任務及執行災害防救任務？未來因應之道必為秉持「納動員於施政，寓戰備於經建」之原則，當面臨重大災害的威脅時，整合政府、國軍以及社會各界的力量，才能將傷害減至最低。而動員則基於國家戰略構想與國防需求。一旦面臨重大災害的非常時期，各級的動員整備及災害防救工作，能夠配合國家戰略目標與實際需求，妥善規劃，在關鍵時刻發揮決定性之影響力(孫曉鳴，2015)。

三、研究目的與方法

3-1 研究目的

近年來，臺灣各種災害頻發，暴露出國軍現有兵力，已不足以應付救災任務。現有的防災過程的模式只能加強反應與復原動作，其防救思維途徑對於備災、減災的效果並不明顯；當現今重大災害的類型轉變成複合式狀態，而法制與體制的分門別類，使現有防救災體制常面臨無法應對的窘態、以及模擬兩可的情況，整體災害防救工作將面臨嚴苛挑戰(林美玲，2012)。

本研究針對 2018 年 823 水災之災害防救經驗，探討國軍動員機制支援災害防救任務，分析現行國軍災防執行能力。冀望透過國軍動員機制，研討支援災害防救任務現況，從而檢討現行動員機制的缺失，前瞻未來可能面臨之問題。本研究期以尋求完善國軍救災機制之道，達成提升國軍災害防救整備效能之目的。基此，本研究之目的如下：

1. 瞭解國軍動員機制的現狀。
2. 分析面對極端天氣災害，國軍投入支援的情形。
3. 提出地區及各縣市提升國軍動員機制因應與改進作為之建議。
4. 期以研究結果，提供地區及各縣市提升國

軍支援災害防救任務效能之參考。

3-2 研究方法

本研究之流程主要分為五個部分：首先，根據研究背景及動機，提出本研究之目的。再蒐集災害防救、國軍災害防救法源依據、國軍救災機制以及動員機制之相關理論及文獻，分析我國國軍動員機制支援災害防救任務之現況。之後，利用訪談分析法初步釐清相關問題。而後，針對相關人士進行深度訪談法，以歸納整合出國軍動員機制因應與改進對策。最後，得出國軍動員機制支援災害防救任務之結論，並提出後續研究建議。

1. 訪談大綱設計

本研究以台灣 2018 年 823 水災作為此次研究案例。藉由對支援過災害防救任務之國軍為調查對象，其中針對親歷 823 的救災任務之部分國軍進行訪談，共計 8 位受訪者進行此次調查。本研究於研究進行前，對受訪者進行研究目的及過程之解說，受訪者能充分瞭解並簽署參與研究同意書才正式收案，受訪者基本資料採匿名方式以保護受訪者的隱私。具體研究對象說明如表 1 所示：

表 1 訪談對象說明

訪談對象	參與支援狀況	訪談日期	訪談時長
A	指揮組	2020.08.05	1 小時
B	計畫、管制、 承辦	2020.08.05	1 小時
C	計畫、管制、 承辦	2020.08.05	1 小時
D	計畫、管制、 承辦	2020.08.10	45 分鐘
E	計畫、管制、 承辦	2020.08.10	45 分鐘
F	帶隊軍官	2020.08.12	45 分鐘
G	帶隊軍官	2020.08.12	1 小時
H	災後復原	2020.08.12	1 小時

期以擷取 8 位參與支援災害防救任務之國軍意見，探討分析國軍動員機制支援災害防救任務的狀況，並針對分析結果，提出結

論與建議。本研究訪談國軍動員機制支援災害防救任務之題目設計，參酌前期學者之相關研究，將訪談大綱設計如下：

(一) 基本資料

1. 參與訪談時間
2. 參與訪談時長
3. 受訪者參與 823 水災支援的哪個部分？

(二) 訪談題項

1. 就受訪者的瞭解，目前常見的災害類型有哪些？
2. 國軍支援災害防救部分，主要以何種災害類型為主？
3. 國軍在平時災害防救整備的工作有哪些？
4. 請問國軍在支援災害防救的機制為何？
5. 災害發生時，兵力支援方式為何？
6. 受訪者在本次救災擔任什麼樣的角色？主要執行工作有哪些？
7. 就本次救災經驗，與以往救災情形有無差異？
8. 就本次救災經驗，國軍在支援災害防救方面的建議為何？

2. 訪談分析法

通常對於實務性的研究，不易以量化數據進行衡量，而質性研究較具彈性及較可以進行深入性探討，因此多採用質性研究的方式進行。質性訪談是社會科學研究中，使用最廣泛的蒐集資料方式之一。深度訪談法是研究者為獲得與研究主題相關之更為深入的資料，透過預定的訪談題目規劃獲取必要資料，再藉由紀錄、整理、分析、比較，最終獲得研究結果。其能夠藉由訪談得到一些重要資訊，而這些並非單純藉由面對面普通訪談即可獲得結果(張春興等, 2000)。深度訪談有別於單純訪談，所花費時間較長；其目的在於藉由分析訪談真實涵意、衝擊影響、未來發展及解決之道等，以期取得的結果可以深入描述事物本質，做為研究者進一步分析的依據。

訪談類似一份口頭問卷，受訪者無需親自填寫答案，而是由研究者向受訪者面對面提出問題，重點在於受訪者對自身真實感受與經歷的陳述，透過彼此間的對話，研究者

從中瞭解受訪者對某一社會現象或事實的認知。深度訪談法能夠揭示與評鑑答案的真實性、對爭議性議題較易進行探討、適用於特殊對象、能夠控制環境、以及能夠掌握問題次序(蔡孟翰, 2009)。本研究資料來源以收集次級資料為輔, 以深度訪談為主, 應用二者相關資料進行分析, 透過訪談彙整歸納、整理分析後, 總結出國軍動員機制支援災害防救任務現況。

研究者在確定符合收案標準時, 與受訪者建立關係, 並說明本研究動機、目的後, 若其願意接受訪談, 會再與之約定訪談時間與地點。因收案地點需考量舒適性及隱私, 訪談時間與地點尊重受訪者的選擇。填寫訪談同意書後, 依約定的時間與地點, 開始進行一對一的深度訪談。

以研究者為研究工具, 將自己完全沉浸在研究現象中, 透過一對一之深度訪談的過程, 在自然的情況下與參與者互動, 收集語言及非語言資料(Dowling, 2007)。為取得資料一致性, 研究者將於訪談過中全程錄音存檔, 以便能反覆詳細聆聽訪談內容, 以還原參與者所陳述的本質。研究進行以參與者的權益為最優先考量, 於訪談前詳實向參與者解釋本研究目的、過程, 以及訪談過程需要全程錄音。告知參與者其資料會嚴加保密, 姓名等資料以代號表示, 僅供學術上之研究。訪談過程完全保密, 不會公開, 亦不作為其他用途。研究者會事先列出訪談大綱, 在訪談過程中, 依受訪者訪談內容行調整, 讓受訪者盡可能自由敘述其真實感受與經驗。每位受訪者會參與 1-2 次訪談, 訪談約為 1 小時左右。完成訪談後, 將錄音內容謄寫整理成逐字稿, 作為原始檔案資料。

仔細研讀訪談文字檔案資料, 找出受訪者者參與救援經驗中, 與本研究目的、文獻探討相呼應之相關語句。並對這些語句進行編碼, 避免受試者資料外洩之潛在危險。並將研究現象做一統合, 呈現出整體性描述。最後將研究所得的結果, 請受訪者進行檢視及確認, 以保障研究者所得結論能夠準確反應其真實想法與經驗。

四、國軍災害防救法源依據

在現今天然災害頻仍發生的狀況下, 全球對災害防救工作的重視程度與日遽增。災害防救體系主要是由法制體系以及規範、運作機制與資源整合等各個不同面向所共同構建而成。在複合式災害衝擊下, 現有的災害防救體系與運作機制, 在國家安全防衛、國土安全防護方面, 出現法制權責模糊、動員機制重疊、軍民資源整合缺失等種種問題(梅元莉, 2013)。

就國軍而言, 現今的戰爭威脅相對較低, 國軍兵力更多的運用於災害防救及危機處理。國軍已將「災害防救」列入中心任務之一, 在平時藉由戰備演訓以提升其執行非戰爭軍事行動能力; 並編製成為具即時反應、防災制變能力之部隊。同時, 並藉由災前規劃、整備裝備、救災訓練, 以適切強化防救之能力; 同時配合行政院、各級地方政府, 發揮災害防救、減災、以及防災等方面之效能, 減少災害對臺灣民眾人身及財產安全之威脅(張豐書, 2014)。國軍災害防救體系以國防部轄三軍司令部編成聯合作戰指揮中心, 指揮各作戰區(防衛部)執行災害防救任務; 作戰區並依各縣、市地境編成災防區及災防分區, 由災防區地境內陸軍部隊將級主官擔任指揮官, 配合縣、市政府指揮各軍種單位實施災害防救作業; 平時即建立協調、聯絡機制, 於災害發生時得立即投入救災工作, 如圖 1 所示。

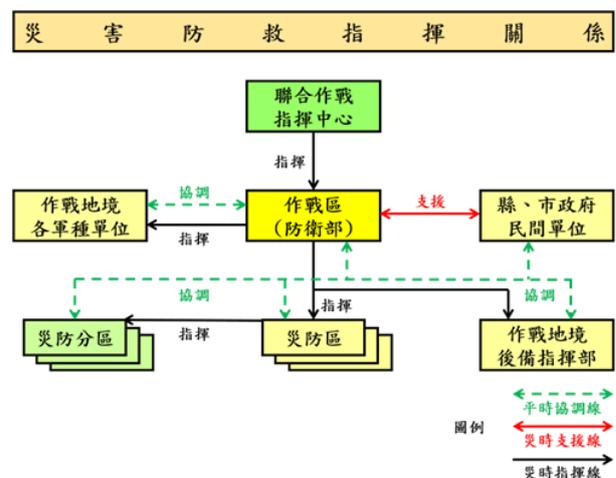


圖 1 災害防救指揮關係示意圖(資料來源:陸軍協助災害防救教範)

台灣關於國軍災害防救之法源依據是 1967 年 12 月 8 日發佈的「台灣地區天然災害申請國軍支援辦法」。其中第二條明訂國軍在救災中的支援角色，提出「申請國軍支援搶救天然災害，以地方政府能力所不及者為限」。而 2000 年 7 月 19 日通過的「災害防救法」，就中央至地方的防災體制，針對災前預防、災時應變、以及災後重建等不同事項進行全面性之規定。並於同年 11 月 29 日宣佈廢除「台灣地區天然災害申請國軍支援辦法」。2001 年 8 月 27 日依據「災害防救法」第 34 條，制訂出「申請國軍支援災害處理辦法」；30 日則發佈「災害防救法施行細則」。2008 年 11 月 14 日頒佈「民防團隊災害防救團體及災害防救志願組織編組訓練協助救災事項實施辦法」。「申請國軍支援災害處理辦法」沿用至 2010 年修訂災防法第 34 條，國軍重新制定「國軍協助災害防救辦法」（張豐書，2014）。2011 年 1 月 31 日發佈「結合民防及全民防衛動員準備體系執行災害整備及應變實施辦法」。2019 年 6 月 19 日則公佈出「全民防衛動員準備法」。由此可見，臺灣對於災害防救十分重視，長期以來不斷依世界局勢以及國情變化進行改變與調整。綜觀現今國軍參與救災相關法律如下(蔡清操，2011；陳家鈞、賀志豪，2014)：

1. 憲法

「憲法」在第 43 條中規定：總統為避免國家亦或是民眾遭遇緊急危難，或者需要應付財政經濟方面之重大變故，必須經過行政院會議的決議，進而發布派遣軍隊執行救災任務的緊急命令。「憲法」在第 137 條中規定：國防是以保衛國家的安全，以及維護世界和平作為最根本目的。而對於國防之組織，則透過法律以進行訂立。「憲法」在第 138 條中規定：臺灣的陸軍、海軍、以及空軍的核心任務是，必須超出個體、地域、以及黨派關係之外，對國家盡忠職守，同時亦需愛護人民；換言之，即從廣義方面闡明，災害防救是軍隊的重要任務之一。

2. 國防法

「國防法」於 2010 年 11 月 24 日總統華總一義字第 09900317051 號修正案中，在第 2、3、14 條中明確規定：災害救援是軍隊的重要任務。「國防法」在第 24 條中規定：總統為因應國防需求，依據「憲法」規定發布緊急命令，並具體規定實施動員事項，進行全國動員亦或是局部動員。

3. 全民防衛動員準備法

「全民防衛動員準備法」於 2001 年 11 月 14 日總統(90)華總一義字第 9000223460 號令公佈。在第 2 條中規定：全民防衛動員需要完成人力、物力、財力、以及科技、軍事等戰力之綜合準備，並且充分配合「災害防救法」中所規定的細則，進行災害防救支援。而動員可具體區分為動員準備階段、以及動員實施階段兩部分。所謂動員準備階段，即為日常實施動員的準備時期。所謂動員實施階段，即為戰事即將發生或發生時、亦或是在緊急危難時，總統可以依據「憲法」之規定發布緊急命令，進行全國動員或局部動員的實施時期。

「全民防衛動員準備法」在第 3 條中規定：動員的任務包括兩個方面，其一為動員準備階段，結合施政之實際作為，以達成人力、物力、財力、以及科技、軍事等戰力綜合準備，藉此積儲戰時所需之總體戰力，並且配合「災害防救法」之相關規定進行災害防救支援工作。其二為動員實施階段，集合並運用全民整體力量，以支援軍事作戰、亦或是緊急危難救援工作，並維持公務機關的緊急應變、以及保障民眾最基本的生活所需。

4. 災害防救法

「災害防救法」於 2010 年 8 月 4 日總統華總一義字第 09900192631 號修正案中，在第 3 條中規定：若發生重大災害時，國軍部隊應該主動進行災害防救的協助工作。而國防部可以根據災害防救之需求，運用應召的後備軍人以進行災害防救的支援工作。

「災害防救法」在第 34 條中規定：當下級政府不能因應災害處理的時候，上級政府

應該主動派出救援人員進行協助；或者依下級政府的請求，指派協調人員提供支援。而具體的支援協助項目以及程式，分別由各中央災害防救業務主管機關、亦或上級縣(市)政府依具體情況定之。當各級政府及中央主管機關無法因應處理時，得申請國軍支援。其中第四項規定，有關申請國軍支援、亦或是國軍主動協助救災的程式、兵力的預置以及派遣、指揮以及調度、協調以及聯絡、教育以及訓練、救災出勤時限以及其他相關事項的具體辦法，皆由國防部與內政部共同協調定之。

5. 國軍協助災害防救辦法

「國軍協助災害防救辦法」是國防部依據「災害防救法」第 34 條第 6 項規定制訂之。於 2010 年 10 月 15 日國防部國制研審字第 0990000659 號令及內政部台內消字第 0990186176 號令會銜訂定公佈全文 18 條中，在第 9 條中規定：軍隊支援救災的派駐時機是在災害預警發布時，作戰區以及縣(市)後備指揮部在接獲地方災害應變中心通知後，應該根據時限派遣連絡官進駐直轄市、縣(市)及鄉(鎮、市、區)災害應變中心，以支援災害防救、以及應變處理工作。其協助原則在於，當地方政府及中央災害防救業務主管機關，無法因應災害處理時，得申請國軍支援；但若發生重大災害時，國軍應該主動派遣兵力協助災害防救。而當國軍調派自身兵力進行災害防救的支援，其前題是不影響國軍的戰備、不破壞國軍之指揮體系、以及不超出國軍支援的能力範圍為限，國軍兵力支援地方政府災害處理作業流程如圖 2 所示。

6. 其他相關法令

國軍救災之母法及其相關子法眾多，諸如 2012 年 2 月 1 日的「中央災害應變中心作業要點」。2012 年 7 月 27 日的「生物病原災害防救業務計畫」。以及「兵役法」、「國防部災害應變中心作業規定」、「國軍戰備規定及突發狀況處置規定」、「國軍災害防救現行作業程式」等法規也律定國軍在不同災害的防救任務(衛生福利部疾病管制署，2013；行政

院原子能委員會，2013)。

國軍兵力支援地方政府災害處理作業流程

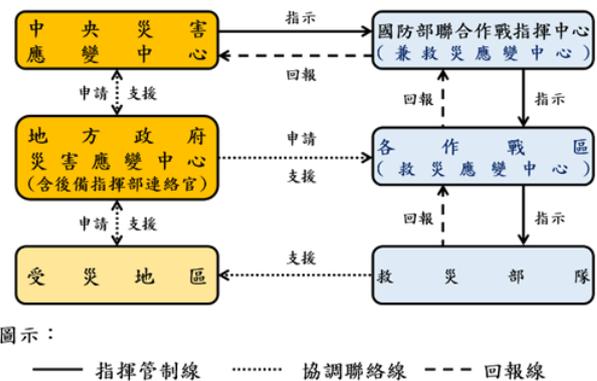


圖 2 災害處理作業流程圖(資料來源：國防部後備指揮部網頁)

而國軍在核子事故災害之防救法令，則包括 2003 年 12 月 24 日的「核子事故緊急應變法」。2009 年 5 月 27 日的「核子事故緊急應變基本計畫」(內政部消防署全球資訊網，2013)。

此外，有了「國防法」及「災害防救法」作為國軍支援災害救援的基礎後，國防部便開始訂立救災的相關子法，讓救災事務的推動更為順利(洪宏岳，2014)。依「災害防救法」第 15 條規定訂定的「結合全民防衛動員準備體系執行災害防救應變及召集實施辦法」；依「災害防救法」第 31 條第 3 項規定訂定的「民防團隊災害防救團體及災害防救志願組織編組訓練協助救災事項實施辦法」；依「災害防救法」第 34 條規定訂定的「國軍協助災害防救辦法」；依「災害防救法」第 49 條規定訂定的「災害應變徵調徵用徵購補償或計價辦法」；依「災害防救法」第 51 條規定訂定的「災害防救法施行細則」；依「全民防衛動員準備法」第 47 條規定訂定的「全民防衛動員準備法施行細則」；依「兵役法」第 51 條規定訂定的「兵役法施行法」等(洪宏岳，2014；陳家鈞、賀志豪，2014)。

五、國軍救災機制

國軍需要遵循「超前部署、預置兵力、隨時防救」、「防災重於救災、離災優於防災」及「救災即為作戰」等政策指導，做好災害防

救整備工作。且各部隊需主動與地方政府密切協調聯繫，並且需第一時間投入救災，以保障民眾的生命財產安全。依許鳳容(2012)之研究，將國軍救災機制區分為平時、重大災害發生時兩種不同的作業機制：

5-1 平時

依「國防法」第 3 條規定，中華民國的國防，包含政治、社會、經濟、心理、科技等各個方面之國防；同時是國防軍事、全民防衛、執行災害防救、以及與國防相關的全民國防；且能夠直接或者間接說明實現國防目的之事務。而據第 14 條規定：軍隊具有指揮權與管理權，具體包括：管理國軍的人事與勤務，蒐集軍事情報並進行研判，對作戰計畫的策定，軍隊的部署運用及訓練，動員整備與執行，軍事準則之制頒，作戰研究，分配人員、裝備與補給，資訊策劃，作戰執行，戰術督察，災害防救之執行，其他有關軍隊指揮事項。

1. 救災責任區域劃分

據「國軍協助災害防救辦法」第 7 條規定，國軍協助災害防救需以各作戰區為主，並充分結合實際行政區域，進行救災責任的編組劃分。而具體分區需依據該地區的特性、實際災害類別以及規模大小，透過作戰區作出統一規劃，合理運用地區三軍部隊。針對救災責任分區，極易發生土石流、水災等天然災害地區，應該預先劃分適當的位置，於前期完成預置兵力、整備機具，並在災害預警發布的時候，遵特軍令前推部署，一旦遇到突發狀況即時投入(蔡清操，2011)。

2. 建立日常聯絡管道

依據「災害防救法」、「申請國軍支援災害處理辦法」等規定，一旦國家發生重大災害時，接受國家整體災害防救體系的指導，即刻投入救災工作。當下「國軍聯合作戰指揮中心」在中央災害應變中心的指導下，藉由 24 小時專責值勤制，以配合各種災害應變機制運作，同步成立各級救災指揮中心，並且充分運用人力、物力以及其他各種資源，隨時因應各種災害發生的救援任務(謝政潔，

2012)。

3. 不影響正常戰備活動

據「申請國軍支援災害處理辦法」第 2 條以及「國軍協助災害防救辦法」第 8 條提出，國軍調派兵力支援災害防救，必須保證不影響國軍戰備、並且不破壞國軍指揮體系、以及不得逾越國軍的支援能力範圍等三個條件(蔡清操，2011)。

4. 完成災害救援應變編組

「國軍協助災害防救辦法」第 5 條提及，國軍應依災害地區特性及災害類別，結合各級政府機關災害防救相關單位的資訊，完成兵要調查、以及預判災情蒐報研析，于前期先行完成救災情報整備。在第 6 條中列明，重大災害作戰區及救災責任分區需指派作戰與專業參謀，整編成具備勘災能力的災情蒐報小組。並與各級政府密切聯繫，快速全面掌握災情，適時投入兵力，立即實行協助救災。共有中央、縣市、鄉鎮市三層級，每層級都會成立應變中心；每個編組單位都會成立緊急應變小組，如圖 3 所示。當作戰區收到各級政府國軍支援之緊急申請，應儘快作出核定，並透過電話先行回覆其兵力派遣情形，以及向國防部進行回報。此外，各級地方政府與中央災害應變中心指揮官，應該指揮、督導、以及協調國軍協助災害防救任務。若國軍常備部隊兵力不能滿足災害防救時，國防部需運用教育召集應召的後備軍人，編成救災部隊，納入作戰區指揮調度，以協助災害防救(蔡清操，2011)。

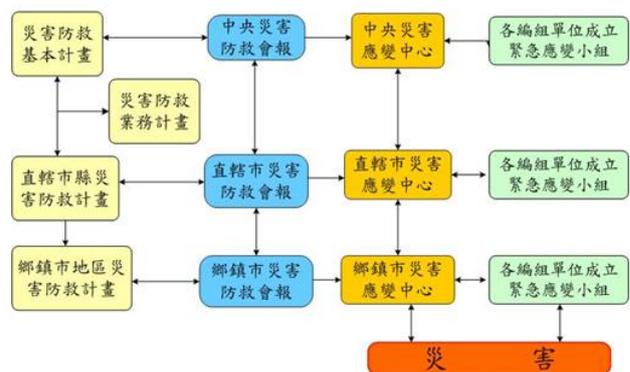


圖 3 災害防救體系運作流程圖(資料來源：國防部後備指揮部網頁)

5-2 重大災害時

「憲法」第 43 條規定，國家遇到天然災害、癘疫，亦或是財政方面的重大變故，須急速處分時，總統將於立法院休會期間藉由行政院會議決議，依據緊急命令法，發布緊急命令。但需要在發布命令後一個月內提交立法院追認。若立法院不同意，此緊急命令即時失效(張豐書，2014)。

1. 開設各級救災應變中心

在「災害防救法」第 34 條中提出，各級政府當無法因應災害處理時，該災害之中央災害防救業務主管機關應主動派員協助；亦或是依各級政府的請求，指派協調人員給予其支援與協助。此外，「核子事故緊急應變法」第 27 條規定，國防部接獲核子事故中央災害應變中心通知後，應立即構建核子事故支援中心，以協助救災相關事宜(張豐書，2014)。在「傳染病防治法」第 17 條則提出，中央主管機關認為有統籌各種資源、設備及人員的必要時，需報請行政院同意成立中央流行疫情指揮中心；並且指定指揮官，進行統一指揮、督導及協調政府機關、公營事業、後備軍人、民間團體等共同執行防疫工作。

2. 建立聯合運作機制

依據「災害防救法」第 31 條規定，各級政府成立災害應變中心。指揮官可以在災害應變範圍內，指揮、督導、協調救災工作；具體包括國軍、員警、消防、公共事業、相關政府機關、災害防救團體、民防團隊、以及災害防救志願組織等執行救災工作。此外，「水利法」第 75 條規定，在防汛期間主管機關可在必要的時候，協商調防所在片區內的軍警進行協同防護(張豐書，2014)。

3. 適時派遣支援

依「災害防救法」第 34 條第六項、以及「國軍協助災害防救辦法」第 9 條規定，當國家發生諸如海難、空難、天然災害、複合式災害、以及其他危及民眾生命財產安全之災害時，各級部隊不需等待命令，立即投入支援。而需依地方政府請求，並由國防部核派後，國軍始可進行支援的項目，具體包括：人

員疏散、鄉民安置、輸送維生物資、道路橋樑搶通、河道疏濬、消毒防疫執行、公共環境清理復原、校園清理、維護秩序、巨石爆破等等(蔡清操，2011)。

5-3 動員準備與機制

18 世紀 90 年代，在法國首次出現「動員」這一名詞。1793 年 8 月 23 日，法國國民公會頒佈「全國總動員令」，其中最早使用「動員」一詞(孫曉鳴，2015)。臺灣的「國軍軍語辭典」對動員進行定義，具體表述為：為適應國防軍事之所需、或應付緊急事變、亦或是處理重大災害，而將全國的人力、物力、財力、精力與科技力，由平時狀態快速轉變成戰時亦或非常時期狀態，進而使國力發揮最大效力，以獲得戰爭勝利、解決事變、或完成救援災害任務，最終達到維護社會安定、保障國家安全之目標(謝雲龍，2007)。1995 年 3 月，政府將「全民防衛動員」替代前期的「總動員」。動員體系是用以連結軍事與經濟、軍隊與社會、平時與戰時的一種紐帶。而所謂「動員機制」則為國家採取緊急措施、轉入戰時體制、統一調動的機制。具體而言，即作為一種轉化與控制的機制，其形成指的是因應國家的緊急狀況，以使國家潛力由潛在向現實轉化、國家體制由平時向戰時轉化、國家實力由經濟向軍事轉化，進而對國家所有力量進行統一的控制、調整以及分配等(孫曉鳴，2015)。

臺灣最早於 1942 年制定「國家總動員法」，賦予國家進行動員的法源依據。1997 年，國防部奉行行政院核頒「全民防衛動員準備實施辦法」，成立「全民防衛動員準備作業室」(中央全民防衛動員準備業務會報，2001)，所謂全民動員涵蓋人力、物力、財力、精神、經濟、衛生、交通等七項動員業務，並藉由中央相關機關作為負責機構(國防部，2014)。2001 年，「全民防衛動員準備法」的通過，並由行政院設「行政院全民防衛動員準備業務會報」以利指導相關機關，目的是依據國防戰略目標，以落實全民國防理念，並以此作為中央及地方政府推動動員之依據(立法院，2000)。

全民防衛動員準備體系的建立，用以為

平時支援災害防救作準備，而在戰時用以支援軍事作戰(蘇慶仁，2014)。如「災害防救法」第 15 條所提及，「各級災害防救會報應結合全民防衛動員準備體系執行災害防救」。

1. 行政動員準備

2008 年 4 月 11 日「全民防衛動員準備法施行細則」的第 5 條第一款提及，行政動員準備包括精神、人力、物力、財力、交通、衛生、科技等各方面之動員準備。而行政院依規定，藉由國防部綜合整理行政院動員會報秘書工作，並於平時依法調查、統計所掌握的人、物力動員資源，與災害防救體系相結合，負責國家動員業務的準備、規劃及籌辦。以落實全民國防理念，實施動員之準備；一旦戰事或緊急危難、災害發生時，能迅速實施全國或局部的動員(洪宏嶽，2014)。

「全民防衛動員準備法」第 8 條規定，為充分發揮動員之功能，由國防部接辦秘書任務，並建構全民戰力綜合協調組織。且由國防部負責協調全民戰力之行政機關、以及協調軍事相關事項，補足以災防機制較為欠缺之協調能力部份(洪宏嶽，2014)。

2. 軍事動員準備

「全民防衛動員準備法施行細則」第 5 條第二款提及，軍事動員準備，指軍隊及軍需動員準備。在「全民防衛動員準備法」第 15 條中規定「動員實施階段軍事人力統籌分配辦法」。而軍事機關、部隊運用的民間人力，可以分為四項，具體涵蓋軍隊徵召人力、軍事勤務人力、軍需生產人力、民防人力等(動員實施階段軍事人力統籌分配辦法，2019)。將軍隊的全部或一部分，由平時狀態轉變成戰時狀態，使特殊時期所需要人員、裝備、物資等能迅速獲得，並編成所需的軍隊以因應特殊時期之需求。具體涵蓋軍隊動員、軍需工業動員兩部分。軍隊動員是國家於特殊時期狀況下，將平時常設的軍隊，依預定計畫轉變成臨時編制，充實其人員裝備，以滿足特殊時期所需。軍需工業動員則是將平時國內公營及民營工業進行整備，特殊時期能夠依法將國內可充軍需的工廠、及附屬設備轉

換為生產軍需品，加以統整運用(朱富圓，2013)。

「動員實施階段軍事人力統籌分配辦法」第 5 條至第 7 條規定，軍隊徵召人力需優先運用軍官、士官、退伍軍人、以及結訓後 8 年內的後備軍人。但軍需生產機關若由於生產需求，需要運用退伍、結訓與通報列管後 8 年內之後備軍人及補充兵時，應列冊送戶籍地之直轄市、縣(市)後備指揮部報備，經其審查同意方可運用此部分人力。而軍需生產人力由於職務亦或是專長，需列為軍隊徵召或軍事勤務人力時，直轄市、縣(市)後備指揮部應該通知軍需生產機關(構)另行遴選(動員實施階段軍事人力統籌分配辦法，2019)。

3. 人力動員準備

「全民防衛動員準備法」第 15 條規定，分類計畫主管機關於動員準備階段，應對民間重要專門技術人員、義勇消防、民防、民間災害防救志願組織、社區災害防救團體等，實施調查、統計、以及編組。並針對學校青年進行動員服勤，針對戰時致傷殘、以及退除役軍人的安置等種種事宜作出規劃。此外，直轄市及縣(市)政府並應積極配合辦理，以保障動員實施階段能夠獲得所需之人力資源(動員實施階段軍事人力統籌分配辦法，2019)。

依據「兵役法」、「兵役施行法」、以及相關召集規則等動員作業規定與計畫，以營區為中心，動員周邊地區後備軍人充足該部隊。貫徹優先運用精壯後備軍人、要員固定編組、縮短動員時程、擴大地區選員範圍、提升資訊作業速度與精度等原則，依編實動員、擴編動員、戰耗補充、臨時編成等方式；實施戰時或非常時期動員召集，平時現役補缺、戰時人員補充的臨時召集、依軍事訓練需要於舉行訓教育召集、輔助戰時或擔任地方自衛防空的勤務召集、點閱召集等動員作業，以保持後備軍人的戰鬥技能，使其能夠適應戰備之所需(朱富圓，2013)。

4. 物力動員準備

「全民防衛動員準備法」第 9 條規定：

物資經濟動員準備由經濟部主管；財政部主管財力動員準備方案；交通部主管交通動員；行政院主管衛生動員、科技動員準備方案；國防部則針對軍事動員準備方案進行管理。藉由行政機關的運作，將全國各個階層以及全民防衛相關的活動以及資源，進行統籌運用，進而使全國的人力、物力、財力得以有效整合，發揮我國的總體戰力，以利於平時的協力災害救援，及戰時的支援軍事作戰(動員實施階段軍事人力統籌分配辦法，2019)。

物力動員可分為軍事運輸動員、軍需物資徵購徵用兩種。在全民防衛動員機制中，軍事運輸動員是運用潛存於民間的各式輸具與機、工具，以充實國軍部隊缺裝(洪仕貴，2011)。而軍需物資徵購徵用則指因應作戰或緊急任務需要，國軍徵用民間之重要物資與固定設施，以支援軍事作戰任務。所謂物力，具體涵蓋天然資源、土地、建物、機器生產設備、生產材料與成品、地上與地下設施等物質。配合各軍政機關就其主管分工合作，以綜合協調之方式，將物資積蓄、生產能與軍隊動員相銜接，達成動員民間物力支援作戰之目的(朱富圓，2013)。

六、國軍支援 823 水災任務與檢討

6-1 國軍支援 823 水災任務與檢討

國軍目前執行災害防救，是依據「兵力預置、超前部署」之指導政策，以常備部隊為優先進行救災。行政院曾有提議，配合教育召集執行災害搶救；而國防部亦有規劃過「以同心操演方式結合災害防救(勤務召集)」，但僅在救災演練時進行配合，於實際救災中則尚無實例。實際救災仍是常備部隊投入，並未曾有出動預備部隊的案例發生。

2018 年 8 月 23 日至 8 月 30 日期間，臺灣地區在熱帶性低氣壓與西南氣流雙重影響下，中南部地區共計八個縣市 1,544 處傳出淹水災情，其中嘉義縣積淹水災情嚴重，合計 116 處積淹水，且主要集中在河川中下游、以及沿海鄉鎮市。此次水災總計導致 7 人死亡、2 人失蹤、148 人受傷、8,492 人撤離，累計最高收容 2,042 人。同時全台農業災損總計

高達 8 億 7,199 萬元，其中以嘉義縣最為嚴重，損失占總體的 53%，達 4 億 6,281 萬元(中央災害應變中心，2018)。

水淹南臺灣的「823 水災」中，國軍在執行災害防救的行動中，發揮「聞聲救苦、立即馳援」的精神，全力投入防救災工作。國防部派遣大量中南部地區駐地的國軍部隊前往；並充分動員大量人力、物力挺進災區馳援嘉義，協處救災事宜。國軍奉命紛紛出動至水患各處現場，協助當地政府及民眾處理各項救災事宜(陳昆懋，2019)。國軍於水災發生初期即運用制式輸具(CM-32 雲豹八輪裝甲車、15 人橡皮艇)深入災區協助救災物資發放，如圖 4 所示；並於最短時間內完成抽水、禽畜清理、街道及學校清理等災後復原工作；充分展現國軍是一支能作戰、能達成任務的部隊。於 8 月 24 日，第四、五作戰區(南部、中部地區)已完成災害應變中心一級開設，國防部則完成二級開設。而第二、三、四及第五作戰區預劃派遣兵力，陸軍第八軍團、第十軍團亦陸續投入救災工作中。依國防部統計資料顯示，國軍於 8 月 23 日 14 時迄 8 月 31 日 18 時，累計派遣兵力 17,748 人次、甲車 115 輛次、輪車 841 輛次、膠舟 100 艘次、抽水機 323 部、消毒器 1,121 部；物資搬運 9.9 噸、協助撤離 820 位鄉民、堆置沙包 9,430 包、清理道路 257.17 公里、清理土石 160.91 噸、整理市容 4,237.39 噸、整理機關學校 78 處、清理禽畜 812,218 隻、消毒環境 329 萬 1,068 平方公尺、抽水 2 億 2,808.1 萬加侖(國防部，2018)。國軍除搶險救災外，最重要工作即包括協助禽畜清運，環境消毒、家園復原等工作；而救災部隊亦應給予官兵完善的防護裝備及充足的膳食、保障生活必須品的供給。後續還需做好官兵補假規劃與心理輔導等(陳昆懋，2019)。

6-2 嘉義災防區執行救災檢討與策進

嘉義地區因應「0823 熱帶低壓」帶來豪大雨影響，至 8 月 24 日 0630 時累積雨量達 801 毫米，造成嘉義縣 11 個鄉鎮淹水，影響五千餘戶居民，嘉義縣應變中心提升為一級開設，災防區即檢討投入兵力計 416 員，執

行鄉民撤離、沙包堆置與維生物資運送等工作；8月25日淹水地區計東石、水上、民雄、溪口、義竹鄉及布袋鎮等6處連續積水2日(水深80至100公分)，災防區即檢討於布袋國小開設前進指揮所，增派兵力至811員持續執行鄉民撤離、沙包堆置與維生物資運送等工作，並同步調派海軍水下作業大隊抽水機支援淹水排除任務。

8月26至27日淹水情形稍緩，除持續執行抽水工作外，災防區並派遣兵力計2,143員執行禽畜清運工作；8月28至29日依地方需求，彈性調度抽水設備支援淹水地區，並派遣兵力計2,831員執行市容、家園整理等災後復原工作；8月30至31日派遣兵力計1,902員執行環境整理及消毒等工作，8月30日並考量地區淹水情形已排除，布袋國小前進指揮所撤離，各單位恢復常態開設。



圖4 國軍救災現場圖1(南測中心提供)

本次災害防救雖即時啟動災害防救機制，自開設災害應變中心、成立災防區前進指揮所及指揮調度災防區部隊投入兵力、機具救援，執行災民撤離、物資運送、禽畜清運、家園環境整清理及消毒防疫等任務；惟執行期間仍有值得檢討事項，作為未來災防整備與應處機制精進之處(陸軍部隊訓練南區聯合測考中心，2018)。

1. 軍民溝通機制未健全

國軍平時雖與地方政府建立完成聯絡機制，惟災害發生時，派駐縣市政府及鄉鎮連絡官人員常因任務考量，檢討位階較低之軍、士官擔任，因對災防法規及運作流程不熟悉，

以致災情及資源共享落空，影響兵力派遣規劃。

派駐縣市政府連絡官，主要任務係為救災部隊與政府間之橋梁，未來可檢討主管階層人員派駐，以同步掌握地方災情資訊及可用資源，有利兵力派遣與資源分配。

2. 軍民可用資源未整合

國軍平時於每月定期調查轄區內可用災防資源，以利救災任務期間分配運用；惟縣市政府機具及物資未納入整合，以致災害發生時因國軍支援裝備不足，機具無法彈性調度運用。

國軍平時除定期調查救災資源外，與縣市政府建構聯絡機制期間，應主動將可用機具及物資納入掌握，以利災害發生時，配合連絡官協調機制，統一調度可用機具及資源，發揮救災成效。

3. 災害資訊網絡未善用

本次執行救災期間，僅運用內政部消防署應變管理資訊雲端服務(EMIC)系統，查詣有關氣象；雨量及未來氣候動態預劃等資訊，未輔以中央氣象局、國家災害防救科技中心等系統，迅速獲得各項情資，以提供應變中心指揮官運用或調整救災兵力等決策。

經檢討網路災防資訊，主要透過中央氣象局、EMIC及國家災害防救科技中心等來源提供；如未來可建構整合平台、建立災防資訊查詢捷徑，可有效且精準運用網絡資訊，提供災情蒐整、研判及兵力派遣之參考。

第二節 訪談資料整理歸類

本研究針對親歷823的救災任務之8位國軍進行訪談。研究對象之詳情，具體分述如表2所示：

表2 訪談對象基本資料表

受訪者	軍階	性別	年齡	支援時間	支援工作
A	上校	男	47	08.23-08.31	災害防救指揮中心，指揮組
B	少校	男	37	08.23-	計畫、管制、承辦

	校			08.31	
C	上尉	男	32	08.23-08.30	計畫、管制、承辦
D	少校	男	34	08.23-08.30	計畫、管制、承辦
E	上尉	男	33	08.23-08.30	計畫、管制、承辦
F	少校	男	36	08.23-08.31	時任連長，救災部隊帶隊軍官
G	少校	男	36	08.23-08.31	時任連長，救災部隊帶隊軍官
H	中士	男	27	08.23-08.31	帶隊幹部，災後復原、環境清潔

綜合上表所示，受訪者軍階最高為上校，最低為中士；其中包括上校 1 人、少校 4 人、上尉 2 人、中士 1 人。而受訪者年齡介於 27 歲-47 歲之間，其中以 30 歲以上者居多。參與 823 的救災任務的時間，大多參與 8 月 23 日至 8 月 31 日的整個災害防救過程；有 3 人則參與 8 月 23 日至 8 月 30 日的前期救災過程。在支援工作方面，包括帶隊軍官與幹部、指揮部成員，以及參與計畫、管制、承辦、搬運物資、災區整理、災後復原、環境清潔等工作。由此可見，參與此次訪談者範圍較廣，所瞭解到的實際狀況將可能較為全面。

6-3 官兵訪談災害救援機制認知

本研究針對 2018 年 823 水災之防救經驗，分析現行國軍災防執行能力。冀望透過國軍動員機制，研討支援災害防救任務現況，從而檢討現行動員機制的缺失。期以完善國軍救災機制，提升國軍災害防救整備效能，提供地區及各縣市提升國軍支援災害防救任務效能之參考。

1. 國軍官兵對災害救援認知

臺灣自 921 地震災害發生以來，國軍檢討發展災害救援機制，期間並經歷 72 水災、88 風災(土石流災害)、國道 3 號走山事件、0206 臺南大地震、花蓮大地震，乃至近年的 823 水災，災害類型並非單一種類，並因應法令制定公布，國軍整體災害救援機制已發展成熟，惟近年因極端氣候影響，臺灣各地區

常有強降雨天候，就受訪者普遍的認知，目前整體的災害救援對象，仍以風災及水災為重點。

2. 國軍支援災害救援機制

目前國軍已建立一套較完整的動員機制。在災害來臨時，國軍依災害等級情況、災害種類等進行狀況研判，依各地區需求指定所屬部隊編制完善兵力及機具，動員執行災害救援行動。以訪談紀錄分析，在國軍支援災害防救機制可明確區分指揮機構及部隊等兩個層級。指揮機構在平時針對所轄地區調查及紀錄災防資料及可用資源，並藉聯絡機制與地方政府完成資源共享，以利於災害發生時，即時掌握情資，運用適當兵力及資源投入重點地區，發揮救災成效。部隊方面，平時結合課程強化官兵災害防救認知，並妥善完成裝備整備，在災害發生時，得以發揮兵力及機具最大效用。

3. 823 水災救災經驗與建議

以本次救災經驗，部分受訪者表示不同往常，主要係造成災情原因為淹水無法消退，初期僅能少部分投入兵力及機具提供災民撤離及物資運送，至跨區徵調大量抽水設備應援後，始能大量投入兵力進行救援任務。在建議部分，分析受訪者提出建議事項較為廣泛，主要因為受訪者在本次救災擔任不同角色，負責之工作也有所差異，相對可瞭解到的實際狀況較為全面，主要建議面向摘要分析如下：

(1). 指揮機制方面

本次救災係深入災區開設前進指揮所，在先期整備階段因欠缺地方資訊，無法依據災害立即指定位置開設，造成與地方政府間之溝通協調機制無法立即建立，建議在平時可運用災防分區資訊的整合，尋找適切地點作為前進指揮所開設的預備位置，在面對大型災害時機可深入災區，立即掌握相關資訊。

(2). 資訊整合方面

國軍在資訊傳遞部分因保密機制而有所限制，在災害情資掌握多為透過媒體及中央

部門網站取得，目前民間資訊設備發展迅速，建議在災害防救階段，可用建構資訊化平台，並整合民用型通信設備，配合國軍派駐連絡官機制，同步資訊交流，有利於各級災害應變中心取得即時資訊，提供地方需求評估及國軍兵力派遣之主要參考依據。

(3).資源整合方面

以本次救災為例，抽水設備係為發揮救災成效之首功，然在災害發生初期確因資源整合缺乏造成調度不易，錯失先機；建議在平時完成災防責任區域內資源調查，並結地方政府建構整合平台，以利災害發生時即時查詢及調度運用。

(4).官兵輔導方面

本次因淹水造成大量牲畜死亡，官兵投入災害救援任務，多有接觸牲畜屍體狀況，如同 921 地震及 88 風災，官兵投入搜救行動接觸大體之行為，造成官兵心理影響，建議在災害應有健全的輔導作為，以維護官兵身心健康。

七、結論與建議

7-1 結論

本研究以 2018 年 823 水災之災害防救為例，探討國軍動員機制支援災害防救任務，分析現行國軍災防執行能力。國軍於 2018 年 8 月 23 日 14 時迄 8 月 31 日 18 時，累計派遣兵力 17,748 人次陸續投入救災工作中。藉由討論國軍動員機制支援災害防救任務之現況，檢討現行動員機制的缺失，前瞻未來可能面臨之問題。期以尋求完善國軍救災機制之道，達成提升國軍災害防救整備效能之目的。台灣每年各種災害威脅不斷，國軍在整個救災體系中屬於支援救災的角色。國軍現有兵力，已不足以應付救災任務。未來因應之道必為秉持「納動員於施政，寓戰備於經建」之原則。基由前述探討分析，本研究得出以下結論：

1. 國軍動員機制現狀

由於臺灣天災頻發，現已建立一套較完整的動員機制。現今的動員機制，基本依據

2001 年 11 月 14 日頒佈的「全民防衛動員準備法」；2008 年 4 月 11 日頒佈的「全民防衛動員準備法施行細則」2010 年 8 月 4 日頒佈的「災害防救法」；2010 年 10 月 15 日頒佈的「國軍協助災害防救辦法」等相關法律規定，依法進行全民動員及災害防救任務。國軍則依據「兵役法」、「兵役施行法」、以及相關召集規則等動員作業規定與計畫，動員營區周邊後備軍人充足本部隊。

目前國軍執行災害防救，是遵循「超前部署、預置兵力、隨時防救」之指導政策，以常備部隊為優先做好災害防救工作。國軍預劃派遣兵力，開設各級救災應變中心、建立聯合運作機制、適時派遣支援，於最短時間內完成人員疏散、鄉民安置、輸送物資、道路搶通、河道疏濬、禽畜清運、消毒防疫、清理復原等支援災害防救工作。

依訪談可知，在平時依災防責任地區建立通聯機制，並整合各類型部隊可投入災害救援兵力及機具，藉由部隊有效訓練及裝備維保作為，於災害來臨時可有效投入重點地區執行災害防救任務。

2. 國軍投入災害救援情形

本研究針對親歷 823 水災之救災任務的 27 歲至 47 歲，上校至中士等不同軍階的 8 位國軍進行訪談發現：當災害發生時，國軍配合縣市政府應變中心開設等級，同步建立災害應變機制，並派駐連絡官整合縣市政府需求，依災防區權責完成兵力及機具支援。而國軍目前已完善災害救援機制，並循往例檢討潛勢地區可能面臨災害之類型，檢討編組部隊編制人力及機具完成兵力預置作為，期於災害來臨時能即時投入救災，保障民眾生命財產安全。

7-2 建議

雖當前國軍支援災害防救的機制已趨近完善，但仍有所不足。依本研究分析之結果，建議具體可於指揮機制、資訊整合、資源整合等三個方面進行改善：

1. 指揮機制方面，提升派駐人員職能，達成溝通協調效果。

2. 資訊整合方面，建構統一平台，廣泛資訊交流。
3. 資源整合方面，軍民資源相互整合，提升資源運用彈性。

依本研究分析之結果，建議具體可於救災認知、協調工作、資訊建構及資源整合等四個方面進行改善：

1. 對國軍救災的認知方面，應充分認識到國軍是救災的預備隊，而非先鋒部隊；且災後應考慮軍隊的退場機制。軍隊投入災害救援考慮其公共性、緊急性、非替代性、以及補償性等原則。
2. 與國軍之間的協調方面，可考慮加強直轄市政府、縣(市)政府、內政部、行政院、與國防部之間，對於災害救援的協調工作，達成「主動聯繫、快速反應、積極救援」之目標。
3. 對於國內資訊技術發展迅速，民用型資訊設備於災害救援期間可協助軍事機關與資訊網絡平台進行整合，更能有效同步資訊，提升災害防救效能。
4. 地方政府可效仿國軍災防整備機制，定期清查地方可用資源，並與軍事機關交流整合，在災害發生時作為災區重點運用之主要參考依據。

參考文獻

1. 內政部消防署全球資訊網。 ，
<http://www.nfa.gov.tw/main/List.aspx?ID=&MenuID=522&ListID=3235> 檢索日期：2013年9月28日，2013。
2. 內政部消防署全球資訊網，<http://www.nfa.gov.tw/>，2020。
3. 中央全民防衛動員準備業務會報，動員幹部講習教材，臺北：編者印行，2001。
4. 中央災害應變中心災害情報站，<http://www.emic.gov.tw/14/index.php>，2020。
5. 中央災害應變中心，0823 熱帶低壓水災災害應變處置報告，2018。
6. 中央災害應變中心，0823 熱帶低壓水災災害應變處置報告(水災)，中央災害應變中心災害情報站全球資訊網，2018年11月1日，取自<http://www.emic.gov.tw/14/upload/attachment/002015d73d9201bf91bfd2670481fc33.pdf>，2018。
7. 王安翔、於宜強、李宗融，「2018年0823熱帶性低氣壓水災事件分析」，國家災害防救科技中心災害防救電子報，第158期，第1~11頁，2018。
8. 王得利，「全民防衛動員支援災害防救之研究」，後備動員軍事雜誌半年刊，第83期，第52~75頁，2011。
9. 立法院，立法院第四屆第四會期第二十四次會議議案關係文書，第89卷73期3132號上冊，2000年12月19日，<http://lis.ly.gov.tw/lgcgi/lglaw>，檢索日期：2014年1月3日，2000。
10. 交通部中央氣象局資訊網，<http://246.swcb.gov.tw/debrisClassInfo/disastersadmin/disastersadmin7.aspx>，2017。
11. 台灣新社會智庫，台灣應有軍隊救災條例，2009年08月21日，<http://www.taiwansig.tw/>，2009。
12. 朱富圓，募兵制實施對後備動員戰力影響之研究。國立中正大學戰略暨國際事務研究所碩士論文，嘉義，2013。
13. 行政院研究發展考核委員會，我國國軍投入災害救援之研究，行政院研究發展考核委員會編印，2010。
14. 行政院農業委員會，https://www.coa.gov.tw/theme_data.php?theme=news&sub_theme=agri&id=7451，2020。
15. 林美玲，動員後備軍人支援災害救援研究，國防大學管理學院資源管理及決策研究所碩士論文，臺北，2012。
16. 許博傑，「提升國軍災害防救應變作為之研究」，黃埔學報，第71期，第39~57頁，2016。
17. 胡毓隆，提升國軍作戰區災害防救整備效能之研究。嶺東科技大學企業管理系，

- 2018。
18. 吳嘉銘，以國軍災害防救現行作業程式探討災害防救整備之研究，國立臺東大學公共與文化事務學系，臺東，2017。
 19. 孟翰，分駐(派出)所工作特性對基層女警勤務適應及工作滿足感影響之研究(未出版之碩士論文)，中央警察大學，桃園，2009。
 20. 洪仕貴，全民防衛動員體系介紹，後備指揮部後備幹部訓練班教材，國防部，第 81~82 頁，2011。
 21. 洪宏嶽，後備動員在國軍救災任務中的角色與功能，國防大學政治作戰學院政治學系碩士論文，臺北，2014。
 22. 軍管區司令部，「九二一震災」救災及重建工作紀實，臺北市：軍管區司令部，第 137 期，2000。
 23. 陸軍部隊訓練南區聯合測考中心，嘉義災防區「0823 豪雨」災防檢討與策進簡報，陸軍部隊訓練南區聯合測考中心，2018。
 24. 國防部，風雨見真情—國軍八八風災救災實錄，臺北市，2010。
 25. 國防部陸軍司令部，陸軍協助災害防救教範(第二版)，2013 年 7 月 10 日，2013。
 26. 國防部，全民防衛動員準備實施辦法，參見 <http://law.moj.gov.tw/Law/LawSearchResult.aspx?p=A&t=A1A2E1F1&k1=%E5%85%A8%E6%B0%91%E9%98%B2%E8%A1%9B> 檢索日期：2014 年 1 月 11 日，2014。
 27. 國防部，國防部發布新聞稿：說明 8 月 23 日迄 31 日國軍協力救災執行成效，2018 年 8 月 31 日，2018。
 28. 動員實施階段軍事人力統籌分配辦法，國防部，<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=F0070016>，2019。
 29. 許鳳容，從國內救災機制探討國軍因應之作為：論我國災害防救之執行策略，國立中正大學戰略暨國際事務研究所碩士論文，嘉義，2012。
 30. 孫曉鳴，全民防衛動員體系與災害防救之研究，佛光大學公共事務學系碩士論文，宜蘭，2015。
 31. 湯惠芸，回顧今年台灣 SARS 疫情，大紀元，<http://www.epochtimes.com/b5/3/12/24/n435706.htm>，檢索日期：2013 年 9 月 28 日，2013。
 32. 梅元莉，國軍參與重大災害防救之角色功能與檢討策進，佛光大學公共事務學系碩士論文，宜蘭，2013。
 33. 陳亮全、葉克家、謝龍生、吳啟瑞、王俞婷、黃俊宏、翁進登、葉森海、張駿暉、柯明淳、林聖琪、陳素櫻、陳可慧、李洋寧、江申、張志新，卡玫基與鳳凰颱風災情綜合評估報告，國家災害防救科技中心技術報告，NCDR 97-To8，197，2009。
 34. 陳家鈞、賀志豪，精進國軍災害救援效能之研究，黃埔學報，66，209-228，2014。
 35. 陳昆懋，國軍救災傳播策略之研究—以 2018 年「花蓮 0206 震災」與「南臺灣 823 水災」為例，國防大學政治作戰學院新聞學系，2019。
 36. 張春興、楊國樞、文崇一，心理學，臺北：臺灣東華書局股份有限公司，2000。
 37. 張靜貞、蘇明道、糠瑞林、許文科、鄧慰先、周磊，「防洪工程之成本效益與風險評估—以基隆河流域整治計畫為例」，中央研究院經濟研究所臺灣經濟預測與政策，第 37 期，第 111~137 頁，2007。
 38. 張豐書，從後備部隊訓練運用在災害防救上之研究，國立中央大學土木工程學系碩士論文，桃園，2014。
 39. 蘇慶仁，全民防衛動員機制下國軍災害防救政策之研究，國防大學政治作戰學院政治學系碩士論文，臺北，2014。
 40. 蔡清操，國軍協助救災及支援申請作業說明，南區後備指揮部，100 年 3 月 28 日修正，2011。
 41. 劉慶祥，「新公共管理對國軍災害防救的啟示初探」，後備動員軍事雜誌半年刊，

第 87 期，第 26 卷，2013。

42. 謝政潔，國軍災害防救與救災機制之應變作為-以莫拉克風災為例，國立中正大學戰略暨國際事務研究所，2012。
43. 謝雲龍，我國全民防衛動員制度之研究，淡江大學碩士論文，新北，2007。
44. Chien, F.C., Y.C. Liu, C.S. Lee, "Heavy rainfall and southwesterly flow after the leaving of Typhoon Mindulle (2004) from Taiwan," *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 86, No. 1, pp. 17~41, 2008.
45. Dowling, M., "From husserl to van manen. A review of different phenomenological approaches," *International Journal of Nursing Studies*, Vol. 44, No. 1, pp.131~142, 2007.

新城活動斷層與桃園新竹地區地震危害潛勢分析

劉坤松¹ 黃湘淇²

¹高苑科技大學土木系暨防災研究中心教授

²淡江大學公共行政學系公共政策碩士在職專班

摘要

台灣桃園新竹地區及附近有中央地質調查列為第一類活動斷層的新城斷層以及第二類活動斷層的山腳斷層、湖口斷層和新竹斷層，因此地震災害潛勢不容忽視，需要我們對桃園新竹地區更進一步做微分區分析。本研究使用台灣地區自 1683 至 1899 年的 11 個災害性地震，1900 年至 2019 年震矩規模大於 5 的淺層地震，以及上述活動斷層來進行桃園新竹地區之地震危害潛勢的微分區。除了計算桃園新竹地區地震危害潛勢最高區域外，本研究也計算 10 年、30 年、50 年期間超過 CWB 震度階 5、6、7 級以及 MMI 震度階 VI、VII、VIII 級的地震震度機率。本研究成果可提供重要經濟建設之廠房設置耐震設計參考，將有助於減輕本區未來地震災害的損失。

關鍵字：新城活動斷層、桃園地區、新竹地區、地震危害潛勢、震度發生機率

Analysis of Seismic Hazard Potential in Taoyuan and Hsinchu Area Relative to Hsincheng Active Fault

Kun-Sung Liu¹ Hsiang-Chi Huang²

¹ Professor, Dept. of Civil Engng. and Hazard Mitigation Research Center, Kao Yuan Univ., Kaohsiung Taiwan

² Dept. of Public Administration, Tam Kang Univ., New Taipei City Taiwan

ABSTRACT

Microzonation of seismic hazard potential becomes necessary in Taoyuan and Hsinchu areas for the Central Geological Survey announced the Hsincheng active fault as Category I and the Sanchiao, Hukou and Hsinchu active faults as Category II since 2010. In this study, a catalog of more than 2000 shallow earthquakes occurred from 1900 to 2019 with Mw magnitudes ranging from 5.0 to 8.2, and 11 disastrous earthquakes occurred from 1683-1899, as well as above-mentioned four active faults in the vicinity are used to estimate the seismic hazard potential in Taoyuan and Hsinchu areas for seismic microzonation. Furthermore, these probabilities of seismic intensity exceeding CWB intensity 5, 6, 7 and MMI VI, VII, VIII in 10, 30, and 50-year periods in the above areas are also analyzed for the seismic microzonation. Results of this study will show which areas with higher earthquake hazard potential in Taoyuan and Hsinchu areas. They provide a valuable database for the seismic design of critical facilities. It will help mitigate Taoyuan and Hsinchu earthquake disaster loss in the future, as well as provide critical information for emergency response plans.

Keywords: Hsincheng active fault, Taoyuan Area, Hsinchu area, seismic hazard potential, seismic

intensity probabilities

一、前言

依據「災害防救法」第 20 條規定「直轄市、縣(市)災害防救會報執行單位應依災害防救基本計畫、相關災害防救業務計畫及地區災害潛勢特性，擬訂地區災害防救計畫」，爰此，桃園新竹地區之桃園市、新竹縣與新竹市政府皆須依上列規定訂定地區災害防救計畫。計畫的目的在健全地方災害防救體系，強化災前減災、整備、災時緊急應變及災後復原重建等災害防救工作，以期發揮整體救災效率及效能，有效執行各階段災害防救相關工作，以達迅速救災及減輕災害損失之目的。為使地區災害防救計畫內容趨於周詳，符合地方之特性與需求，計畫擬訂時應確實考量歷史災害因素，並應依災害潛勢的情境設定與災損評估等研擬災害防救對策。這也是本研究計畫-「桃園新竹地區地震危害潛勢微分區」所要探討或解決的問題，亦即進行災害潛勢的特性分析與災損評估，以供其研擬災害防救對策等。

本研究地區為桃園新竹地區，依據中央地質調查所公布之台灣地區活動斷層 2010 年版本中，桃園新竹地區及附近有中央地質調查列為第一類活動斷層的新城斷層以及第二類活動斷層的山腳斷層、湖口斷層和新竹斷層。其中山腳斷層為正移斷層，呈北北東走向，可以分為 2 段：南段自台北縣樹林向北延伸至台北市北投區，長約 13 公里；北段由北投向北延伸至台北縣金山，長約 21 公里(中央地質調查所，2019)。湖口斷層，為逆移斷層，呈東北東走向，由新竹縣湖口向東延伸至桃園縣平鎮，長約 21 公里。

新竹斷層，為逆移斷層，由新竹市西方向東延伸至頭前溪南岸，約呈東西走向，長約 9 公里。新竹斷層具有地形特徵，但缺乏出露地表的證據。由地質鑽探結果顯示，斷層截切更新世晚期的地層，並造成淺部岩層高角度傾斜，因此可能為盲斷層形式或斷層被新期沖積層所掩覆。微震觀測結果顯示，靠近新竹都會區下方沒有明顯微震活動；大

地測量結果顯示，斷層兩側的水平位移速度變化不顯著，但有右移趨勢。新竹斷層可能截切更新世晚期階地堆積層，暫列第二類活動斷層。(中央地質調查所，2019)新城斷層，為逆移斷層，依地質特性分為 2 段：北段呈東北東走向，由新竹縣芎林鄉頭前溪向東延伸至關西南方，長約 12 公里；南段呈東北走向，由新竹縣竹東鎮頭前溪附近向南延伸至苗栗縣頭份東北方，長約 16 公里。新城斷層截切時代約距今 270 年前的階地礫石層，為全新世仍活躍的一條逆移斷層，列為第一類活動斷層。(中央地質調查所，2019)

回顧過去桃園新竹地區的地震災害紀錄，雖然桃園市少有較大的地震災害記錄，但仍不可掉以輕心，較大之歷史地震災害記錄為 1815 年 10 月 13 日(清嘉慶 20 年 9 月 11 日)，宜蘭外海地震規模 7.6 地震，造成桃園地區百餘棟民房倒塌，約 85 人死亡，惟當時之房屋無耐震能力，故造成如此之災情。近年，2002 年 3 月 31 日地震，發生在東經 122.19，北緯 24.14，也就是宜蘭縣南澳地震站東偏南方 55.0 公里，震源深度 13.8 公里，芮氏規模 6.8。同年 5 月 15 日，蘇澳再度發生芮氏規模 6.2 強烈餘震，地震深度約 8 公里，造成宜蘭地區有 6 級震度，桃園三光地區最大震度 4 級。此次事件，造成桃園市大溪區大漢市場 43 號 3 樓建築龜裂，1 樓樓梯移位，該戶 1 人暫住親戚家。大溪鎮一德里活動中心開設避難收容場所，收容 7 人，6 件電梯受困事件(桃園市政府，2019)。

新竹縣西部地區人口稠密、工商建設發達，因此有大地震發生時易造成較嚴重的災情。截至目前該縣主要有 1935 年 4 月 21 日發生之新竹、台中大地震造成重大災情，且地震災害是無法預測的，唯有全面提升社會大眾之防災觀念，各防災編組單位做好災害應變之準備及對策，如此才能將災害減輕至最小程度。新竹縣內工業區林立，因工業生產所需之有毒化學物質可能於震後外洩，為不可忽視之地震災害潛在來源。另位於新竹

縣內之寶山水庫壩址距離新城斷層僅 5~6 公里，其可能因地震破壞而造成洪泛災害之可能性亦不可輕忽，另地震頻繁的宜蘭花蓮外海的隱沒型震源，雖然距離壩址較遠，但是產生的地震規模通常較大，仍可能具有造成大壩液化的風險(新竹縣政府，2018)。新竹市東區為一典型的商業都市，因人口快速成長、高樓林立如雨後春筍。香山區鄰近新竹斷層，易有地震災害之威脅。轄內有新竹及新城活動斷層通過，造成地震災害之隱憂，由於近年來都市發展快速，人口逐年上升，突發大規模地震災害所造成的後果非一般所能比擬。另外，新竹科學園區設有儲存毒性化學物質之廠商，有鑒於近年來園區內曾發生華邦、聯瑞、天下、世大及力晶等半導體(或積體電路)公司火警，雖未造成重大人員傷亡，若不幸發生爆炸或毒性化學物質外洩災害，恐造成大量人命傷亡損失(新竹市政府，2017)。

地震災害境況模擬的先置工作需要進行該區域的地震災害潛勢之分析。近年來震災潛勢似有升高趨勢，不僅直接關係到人民生命財產的安全，更影響到社會經濟建設的發展(葉錦勳, 2003)。第一類活動斷層的新城斷層以及第二類活動斷層的山腳斷層、湖口斷層和新竹斷層分布在桃園新竹及鄰近地區，加上近年來伴隨著都市的成長與發展，人口逐漸密集，且部分社區內老舊建築改建速度緩慢，一旦發生較大規模地震時極可能造成嚴重災情。有鑒於此，國內外學研單位均投入研發災害潛勢的評估方法，進行災害潛勢分析及危險度評估以及災害境況模擬，以作為劃分危險區之依據；並改進防救災工作之指引，這也是國家型科技計畫在永續發展防災方面的工作重點。綜上所述，本研究乃使用台灣地區自 1683 至 1899 年的 11 個災害性地震，以及 1900 年至 2019 年震矩規模大於 5 的地震活動資料，以及上述四條活動斷層來分析桃園新竹地區之地震危害潛勢，以進行強震地動值之估測，以及桃園市 13 個、新竹縣 13 和新竹市 3 個行政分區(如圖 1)之 10、30 和 50 年超過中央氣象局(CWB)震度階 5、6、7 級與修訂麥卡利(MMI)震度階 VI、VII、

VIII 級的地震震度機率分析；本研究結果可用於瞭解桃園新竹地區高地震危害潛勢地區的分布，提供重要經濟建設之廠房耐震設計之參考，以及研擬桃園市、新竹縣與新竹市地震防救災緊急應變計畫之依據。

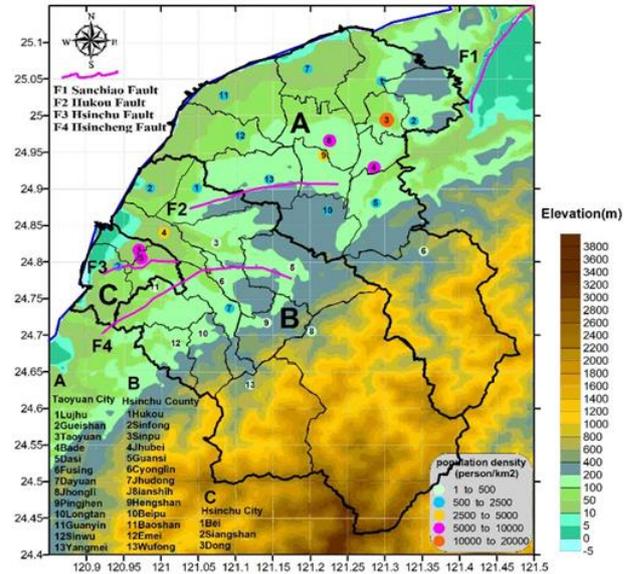


圖 1. 桃園新竹行政分區、地形與鄰近地區活動斷層分布圖

二、研究區域

本研究地區為桃園新竹地區，在地理位置方面，桃園市位於台灣西北部，西北濱臺灣海峽，海岸線略凸出而成弧狀；其餘 3 面皆為陸界，東北、東南、西南 3 面分別與新北市、宜蘭縣、新竹縣 3 縣市毗接，地形呈現西北向東南之狹長形，轄內有連綿不斷的丘陵台地，臨山面海，土地面積約 1,180 平方公里，共有 13 個行政區，其中最大的行政區為復興區，面積 330 平方公里，約佔本市面積的三分之一；最小的行政區為八德區，面積約 33 平方公里。市內擁有 7 條市管河川，分別為：南崁溪、老街溪、社子溪、富林溪、大崛溪、觀音溪、新屋溪，起源自石門水庫經大溪區東北處市境之大漢溪，將本市劃分為東南和西北兩大部分，東南部為標高 300 公尺以上之丘陵地、階地及山岳，本市地勢向東南逐漸升高，山勢峻峭，河谷窄狹；西北部地勢則較為平緩，台地、階地甚為發達，河流短而呈放射狀入海(桃園市政府，2019)。桃園市目前轄有 12 個區和 1 個直轄市山地原住民

區，包含桃園區、龜山區、八德區、大溪區、蘆竹區、大園區，中壢區、楊梅區、平鎮區、龍潭區、觀音區、新屋區，「原住民區」為復興區。依據該市府民政局截至 107 年 12 月底統計轄區現住總人口數達 222 萬餘人(桃園市政府，2019)。

新竹縣位於台灣西北部，北連桃園市、南銜苗栗縣、西為臺灣海峽、東鄰雪山山脈、大霸尖山。地理區東起尖石鄉，西至寶山鄉，南為五峰鄉，北為湖口鄉。竹縣位於北部都會圈及中部都會圈的承接軸線上，東南依山丘，西北臨臺灣海峽，北部為伯公岡、湖口台地，東北部以李嶼山及雪山諸山脈與桃園縣相鄰，東南以雪山山脈與宜蘭、台中相鄰，西南境隔著鹿場大山、獅頭山、八卦力山等山脈及新竹丘陵與苗栗縣相接。全縣土地總面積為 1,427.6 平方公里，其中平地鄉鎮面積 672.3 平方公里，佔全縣總面積 47.09%，山地鄉面積 755.3 平方公里，佔 52.91%。全縣地形除鳳山溪、頭前溪河口一帶為沖積平原外，大多為丘陵、台地及山地，從東南向西北逐次降低，至竹北附近僅 20—30 公尺。新竹縣共計有 13 個鄉鎮市，其中包括竹北市關西鎮、新埔鎮、竹東鎮等 3 個鎮，湖口鄉、新豐鄉、芎林鄉、寶山鄉、北埔鄉、峨眉鄉、橫山鄉、尖石鄉、五峰鄉等 9 個鄉。全縣總人口數為 555,074 人(統計至 107 年 7 月底)；人口密度約 388.8 人/平方公里，人口多集中在竹北市、竹東鎮、湖口鄉、新豐鄉。本縣近十年人口增加最多鄉鎮市為竹北市，遠大於本縣人口成長率，人口的聚集顯示其都市化的程度(新竹縣政府，2018)。

新竹市位於臺灣地區之西北部，屬台灣北部區域內，介於台北市與台中市之地理中心，西瀕臺灣海峽，東與新竹縣竹東鎮鄰接，南接苗栗縣之竹南鎮，東北以頭前溪與新竹縣之竹北市隔岸相望；市內有新竹平原，是新竹地區最富庶之地帶，本市極東為金山面，極西為南港，極南為南隘，極北為南寮。新竹市的地形大部份為平地，一般標高在 100 公尺以下，屬新竹平原，東南地區部份屬丘陵地帶，地形較為陡峻，地勢大致南向北逐漸

降低。新竹平原的東側為寬闊的頭前溪沖積河床，餘為低矮的丘陵地形，屬西部麓山帶的最西緣，北隔竹東斷層與竹東丘陵相接；最高點則位於五步哭山附近，標高海拔為 187 公尺。由於丘陵地區出露之地層以傾斜之砂頁岩互層為主，且高度較低與坡長較短，地形發展成特殊之魚骨狀山脊，為本區之重要地形特徵。新竹市範圍內包括三個地形分區，分別是新竹沖積平原、竹南沖積平原、竹東丘陵。分述如下：(一)新竹沖積平原：由鳳山溪與頭前溪之下游所搬運之泥沙及礫石等堆積而成，其北緣為湖口台地和飛鳳山丘陵，南緣為竹東丘陵。(二)竹南沖積平原：中港溪自斗煥坪以下及支流南港溪自造橋至河口沖積成一廣闊的平原為竹南沖積平原。(三)竹東丘陵：為頭前溪與中港溪間之切割台地，地勢由東向西逐漸降低，其西端以直線狀之陡崖臨海，樹枝狀水系組織甚密，向源侵蝕頗為盛行，許多河谷，河溝均由小侵蝕溝所形成，坡陡，平時乾涸，雨季或豪雨時聚水成流(新竹市政府，2017)。

新竹市劃分為東區、北區、香山等三區(新竹市政府，2017)。本市 106 年 5 月人口數為 438,524 人，若以本市各區現住人口分布觀察，以東區 210,861 人最多，佔全市人口數之 48.08%，其次為北區 150,135 人，佔 34.24%，而香山區 77,528 人最少，佔 17.68%。本市人口因受自然環境影響，大都集中在新竹平原，尤以舊市區人口密度更高，丘陵地大都為農業人口，密度較低。本市 106 年土地面積 104.72 平方公里，人口數 438,524 人，人口密度為每平方公里 4187.6 人，各區人口密度，以北區每平方公里 9544.5 人最為稠密，其次為東區每平方公里 6174.6 人，而香山區每平方公里 1413.5 人最為稀疏(新竹市政府，2017)。桃園市 13 個、新竹縣 13 個及新竹市 3 個行政區的人口數及人口密度如圖 2 所示。

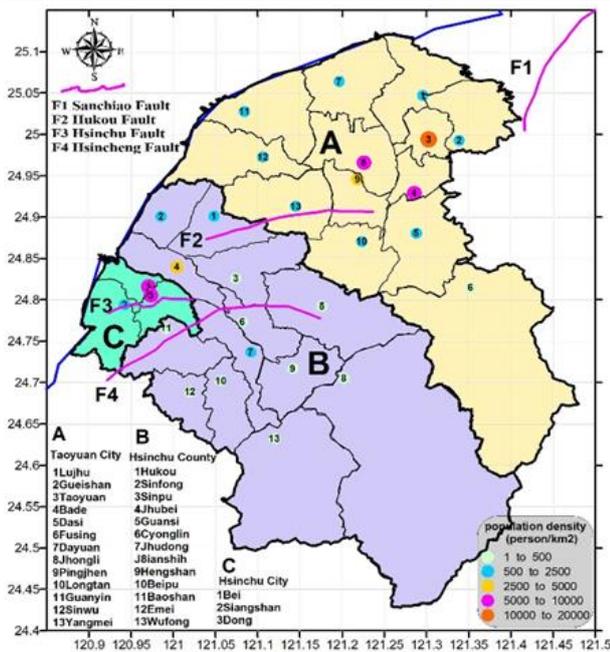


圖 2. 桃園市 13 個、新竹縣 13 個及新竹市 3 個行政區的人口密度分布圖

三、使用資料與分析方法

台灣地區地震活動的歷史記載可追溯至 1604 年，至今已逾 400 年。但有地震儀器的觀測，則是從 1897 年在台北設置地震儀開始。在本研究中，使用臺灣地區 1683 年以來的地震活動資料，來評估新北市地震危害潛勢。在 1897 年前的歷史地震記載主要來自政府檔案和個人日記。雖然整體記錄並不完整，但在災害性地震方面，仍提供了地震日期、人員死亡、房屋損壞和地面振動情況的資訊 (Tsai, 1985)。此外，有關地震之震矩規模，則採用美國地質調查局網站上之國家地震資料中心的資料庫。如果此資料庫有缺少的地震，我們則使用 Chen and Tsai (2008) 所提供之芮氏規模與震矩規模的換算公式來轉換。總體而言，本研究所使用的資料包括 1900 年至 2019 年共計 2000 多個規模 5.0 以上之淺源地震 (震源深度 ≤ 35 公里) 和 1683 年至 1899 年的 11 個災害性地震 (Tsai, 1985)。這些地震的震央分布如圖 3 所示。除了地震資料外，本研究也加入了山腳斷層、新城斷層、湖口斷層和新竹斷層，來計算桃園新竹地區最大地表加速度與速度。

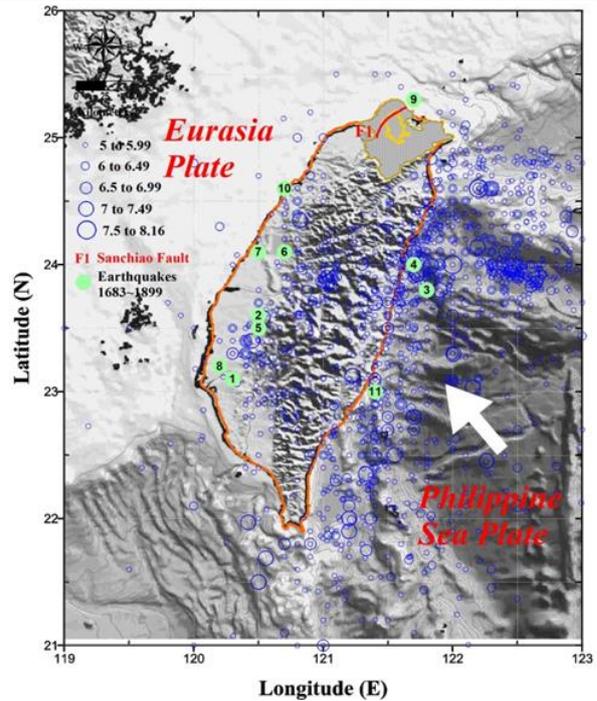


圖 3. 本研究所使用的地震之震央分布圖

以往地震危害潛勢的評估方法，大都以機率法 (PSHA) 進行地震危害度分析 (Loh et al., 1991)。此方法之基本理論及分析程序最早由 Cornell (1968) 於 1968 年提出，主要是假設地震發生符合卜桑過程 (Poisson process) 之統計模式；地震規模大小之分布符合 Gutenberg-Richter 關係；地震震源分布則為點震源常態分布。後來 Der Kiureghian and Ang (1977) 於 1977 年針對 Cornell 方法的點震源模式，提出斷層開裂模式 (fault rupture model)，以加強因點震源模式可能未充分反應地震破裂機制導致近斷層區域之 PSHA 結果過低的情形。Der Kiureghian and Ang 的斷層開裂模式直至今日為止常被工程界廣泛引用。本研究以實際發生過的地震活動記錄，不做震源分區，以每個使用地震的計算震度發生機率來估測台灣地區的地震危害潛勢，並將場址效應因子列入強震地動預估模式的考量，可得到更接近實際狀況的強震地動預估值，以便更精確的估測地震危害潛勢。除上述規模大於 5 之淺層地震外，本研究也加入山腳斷層、新城斷層、湖口斷層和新竹斷層來進行斷層破裂模式的計算，以避免因只使用點震源來計算低估了近斷層區域的地震危害度。

綜上所述，本研究震源區包括點震源及

4 條活動斷層，場址則是將桃園新竹地區以 0.01 度(約 1km)為邊長，取一格點，採用 Liu and Tsai(2015)的衰減公式來計算各格點的最大地表加速度以及最大地表速度，同時本研究亦考慮場址效應以便較精確的反應真實地動值。第一部分過程估算分為三個步驟，說明如下：

1. 首先計算由每個選取之淺層地震及上述 4 條活動斷層在桃園新竹地區每一格點中，所造成之最大地表加速度值及最大地表速度值。
2. 計算過程中併入每一格點的場址反應因子(Liu and Tsai, 2015)，包括最大地表加速度及最大地表速度，此部份採用 Liu and Tsai(2015)於建立台灣地區衰減模式時所得到的估測值。在此定義場址反應因子為地動的剩餘值(residual)RES，是地動觀測值的對數值減去地動計算值的對數值。將場址反應因子經指數計算後可得地動的放大值 AMP，即 $AMP = \exp(RES)$ 。
3. 在計算每一格點地動最大值所使用衰減公式的參數是採用震矩規模(M_w)，距離參數方面則依點震源(一般地震)採用震源距離，如無震源深度資料之歷史地震則以 10km 計算。另外活動斷層之距離參數則採用至斷層面之最短距離。

第二部分，我們分析每一格點的震度發生機率。震度發生機率提供了這格點在特定期間內可能超過一設定震度門檻值的發生機率。首先計算各格點超過一設定地動值之累計數，再除以所使用地震資料之時間區間，換算成超過設定地動值之平均年頻率值(Chiu & Kim, 2004)。所使用地震資料之時間區間主要是 1900 年至 2019 年震矩規模大於 5 的 2000 多個淺層地震資料，時間區間為 120 年。另為增加較大地震的次數，增加了 1683 至 1899 年的 11 個災害性地震(表 1)，時間區間為 337 年。在平均年頻率值的計算是分別計算再取兩時間區間中計算值較大者，來進一步計算一選定時間期間(分別為 10、30 和 50 年)之超越一特定震度(例如氣象局震度階 6 級為最大地表加速度 Peak Ground Acceleration (PGA)

250 gal)的發生機率，以免低估了該格點小震度的地震危害度。

接下來，再依 Poisson 指數機率模式(Seemann, et al., 2010)，去得到一選定時間期間之超越某一特定震度的發生機率，例如，計算 $PGA > 250$ gal(相對 CWB 震度階 6 級)的地震震度機率方程式如下：

$$P [PGA > 250 \text{ gal} | t] = 1 - e^{-\lambda t} \quad (1)$$

式中 λ 是超過設定地動值(PGA250 gal)之平均年頻率值， t 則是設定之特定期間(分別為 10、30 和 50 年)。

本研究使用場址震度來估計桃園新竹地區的地震危害潛勢，地震震度已是全世界用來量化振動程度和地震損壞程度的主要參數(Wald, et al., 1999b)。例如，在地震發生後，美國地震主管單位—美國地質調查所(United States Geological Survey, USGS)隨即發布地震地動震度圖(ShakeMap)來讓民眾知道各地震動的情形。它提供的資訊是不同於一地震之規模和震央，而是著重於地震發生後，在關注的場址所產生的地震動強度及破壞程度，而不是描述地震源的參數。中央氣象局(CWB)所發布的震度圖是以 PGA 來劃分的震度階，USGS 的 ShakeMap 則採用修訂麥卡利(MMI)震度階，同時考慮了 PGA 與 PGV 來劃分震度階(Wald, et al., 1999a)。

本文除計算桃園新竹地區 336 年地震動的最大值外，也估計桃園新竹地區在 10 年、30 年和 50 年期間發生超過中央氣象局震度階 5、6 和 7 級以及修訂麥卡利(MMI)震度階 VI、VII、VIII 級的地震震度機率。

四、結果與討論

本研究計畫分析桃園新竹地區地震危害潛勢，研究成果主要有(一)桃園新竹地區的最大地動值計算，以歷史地震以及新城斷層、山腳斷層、湖口斷層和新竹斷層等 4 條活動斷層引發不同地震規模來計算最大地動值，包括最大地表加速度值 PGA、最大地表速度值 PGV 及修訂麥卡利(MMI)最大震度階，(二)地震震度發生機率，包括桃園市、新竹縣與

新竹市在 10 年、30 年和 50 年期間超過 CWB 震度階 5、6、7 級的地震震度機率圖表以及桃園市、新竹縣與新竹市在 10 年、30 年和 50 年期間超過 MMI 震度階 VI、VII、VIII 級的地震震度機率圖表。

1. 最大地動值估測(PGA、PGV 和 MMI)

根據 Wells 與 Coppersmith (1994) 之斷層破裂長度與地震矩規模經驗公式，山腳斷層為已知正斷層，故使用正斷層經驗公式推估其震矩規模，代入斷層破裂長度 34km，得到 $M_w=6.88$ 。另新城斷層為已知逆斷層，使用逆斷層經驗公式推估其震矩規模，代入斷層破裂長度 28km，得到 $M_w=6.77$ 。湖口斷層為已知逆斷層，使用逆斷層經驗公式推估其震矩規模，代入斷層破裂長度 21km，得到 $M_w=6.61$ 。新竹斷層為已知逆斷層，使用逆斷層經驗公式推估其震矩規模，代入斷層破裂長度 9km，得到 $M_w=6.16$ 。上述斷層的長度乃依據中央地質調查所(2019)資料。

由上述分析方法，使用歷史地震資料，即從 1900 年至 2019 年，2159 個震矩規模大於 5，震源深度小於 35km 的淺層地震，加上 1683 年至 1899 年的 11 個災害性地震，再加上 4 條活動斷層所引發地震計算所得。得到桃園市 13 個行政區、新竹縣 13 個行政區及新竹市 3 個行政區 337 年的最大地表加速度值(PGA)及最大地表速度值(PGV)如圖 4 及圖 5 所示。由圖 4 之最大地表加速度等值圖顯示，PGA 大於 250gal(CWB 震度六級)的區域是在桃園市東北及西北部區域、新竹縣西部及北部區域以及新竹市全部，PGA 大於 400gal(CWB 震度七級)的區域是在(1)桃園市龍潭西南部。(2)新竹縣湖口西南部、新豐南部、新埔東南部、竹北北部及中部、關西北部、芎林中部、竹東中部、北埔西部、寶山南部以及峨眉。(3)新竹市北區東北部以及東區北部。另由圖 5 之最大地表速度等值圖顯示，PGV 大於 31 cm/s(MMI 震度階 VIII 級)的區域在(1)桃園市龍潭西南部。(2)新竹縣湖口西南部、新豐南部、新埔南部、竹北、關西北部、芎林北部、竹東西部及北部、北埔、寶山、峨眉以及五峰西部。(3)新竹市北區、東區以及

香山東部及中部。PGV 大於 40cm/s 區域是位於新竹縣竹北中部、北埔西部、寶山南部、峨眉以及新竹市東區北部及西部。對這些地方的中高樓層建築物地震反應要特別注意其耐震的補強。接下來，我們繪出由最大地表加速度值及最大地表速度值組合而成的修訂麥卡利(MMI)最大震度階(Wald et al., 1999a)如圖 6 所示。由圖中顯示 MMI 震度階 VIII 級的區域在桃園市平鎮龍潭楊梅交界區域以及新竹縣西部及中部區域。MMI 震度階 VIII 級，它對應的建築物損壞程度為建築材料差，工藝標準低，水平方向抗力弱類建築物毀壞嚴重損毀。MMI 震度階 IX 級的區域在苗栗縣竹南、頭份交界區域以及新北是新莊、樹林交界區域。MMI 震度階 IX 級，它對應的建築物損壞程度為設計上未考慮水平方向力類建築物嚴重破壞，有時倒塌。建築材料差，工藝標準低，水平方向抗力弱類建築物倒塌，建築物可能脫離地基。

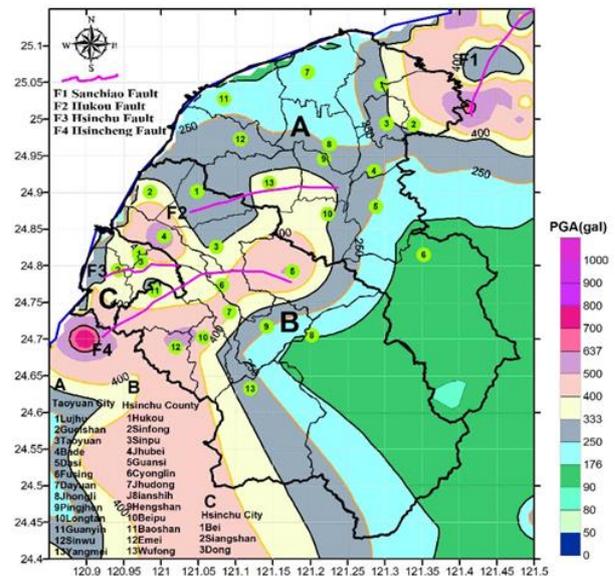


圖 4. 337 年(1683-2019 年)2170 個歷史地震及 4 條斷層引發地震所造成桃園新竹地區之最大地表加速度 PGA

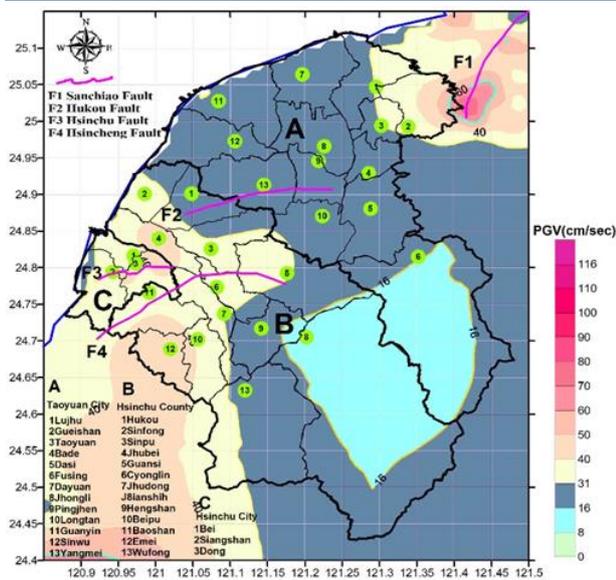


圖 5. 337 年(1683-2019 年)2170 個歷史地震及 4 條斷層引發地震所造成桃園新竹地區之最大地表速度值(PGV)

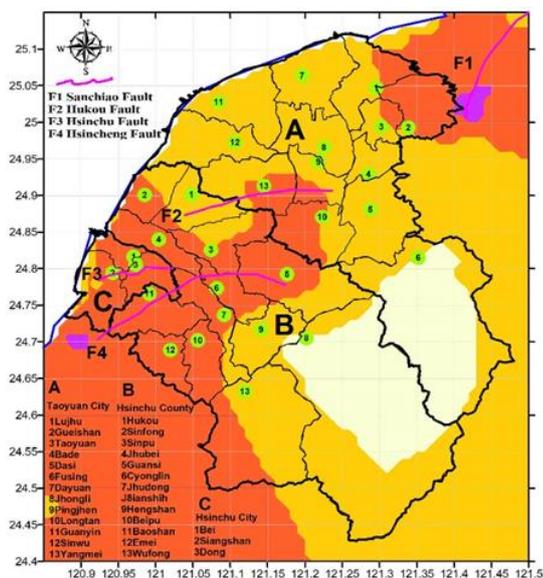


圖 6. 337 年(1683-2019 年)2170 個歷史地震及 4 條斷層引發地震所造成桃園新竹地區之修訂麥卡利(MMI)最大震度階

2. 地震震度機率估測

本研究第二部分將以上述資料進行桃園新竹地區地震震度機率推估，包括桃園市、新竹縣與新竹市在 10 年、30 年和 50 年期間超過 CWB 震度階 5、6、7 級的地震震度機率以及桃園市、新竹縣與新竹市在 10 年、30 年和 50 年期間超過 MMI 震度階 VI、VII、VIII 級的地震震度機率。結果說明如下：

我們以歷史地震資料以及 4 條活動斷層來計算 10 年、30 年和 50 年期間超過 CWB 震度階 5、6、7 級的地震震度機率。CWB 震度階 5、6、7 級分別對應建築物的損壞程度是輕微損壞、中等損壞和嚴重損壞。結果顯示桃園新竹地區地震危害潛勢最高的區域位於在下列區域：(1)桃園市龍潭、新竹縣關西、芎林所包圍的區域 (2)新竹縣竹東、北埔、寶山、峨眉、新竹市東區所包圍的區域(3)新竹縣湖口、新豐、竹北所包圍的區域，其 10 年、30 年和 50 年期間超過 CWB 震度階 7 級的地震震度機率分別是 0-10%、5-20% 與 10-30%。顯示出隨期間愈久地震震度機率愈高。此外，其 10 年期間超過 CWB 震度階 5 級的地震震度機率 35% 以上的地區是在下列區域：(1)龍潭與關西的邊界區域 (2)新竹縣竹東、北埔、寶山、峨眉、新竹市東區所包圍的區域(3)新竹縣湖口、新豐、竹北所包圍的區域。

另外，有的行政區的地震震度機率含蓋範圍較大，例如尖石 50 年內 $PGA > 80 \text{ gal}$ 的發生機率在 10% 至 85% 之間，關西 50 年內 $PGA > 80 \text{ gal}$ 的發生機率在 35% 至 90% 之間，探討其原因主要有三因素影響著地震震度機率，分別是歷史災害性地震的位置、與活動斷層的距離，以及場址的放大或衰減效應，而會造成一行政區的地震震度機率有較大範圍的差異，主要是場址效應以及與新城斷層的距離所造成。因此綜上結果桃園新竹地震危害潛勢微分區不以區為使用單位，應再細分至里較合理。

同樣地，我們以歷史地震資料以及 4 條活動斷層來計算桃園市 13 個行政區、新竹縣 13 個行政區及新竹市 3 個行政區在 10 年、30 年和 50 年期間超過 MMI 震度階 VI、VII、VIII 級的地震震度機率。MMI 震度階 VI、VII、VIII 級分別對應建築物的損壞程度是輕微損壞、中等損壞和嚴重損壞。結果顯示桃園新竹地區地震危害潛勢最高的區域位於：新竹縣北埔、寶山、峨眉所包圍的區域以及新竹縣湖口、新豐、竹北、新竹市北區、香山所包圍的區域，50 年期間超過 MMI 震度階 VIII 級的地震震度機率約為 35% 以上。另外，超過

MMI 震度階 VII 級的地震危害潛勢較高的區域是在新竹縣北埔、寶山、峨眉所包圍的區域、新竹縣湖口、新豐、竹北、新竹市北區、香山所包圍的區域以及桃園觀音、新屋所包圍的區域與龜山東部，10 年、30 年、50 年期間超過 MMI 震度階 VII 級的地震震度機率分別為 20% 以上、45% 以上、60% 以上。此外，高地震危害潛勢地區位於在下列區域：新竹縣北埔、寶山、峨眉所包圍的區域以及新竹縣湖口、新豐、竹北、新竹市北區、香山所包圍的區域，其 10 年、30 年和 50 年期間超過 MMI 震度階 VIII 級的地震震度機率分別是 10%、25% and 35%。上述估測桃園新竹地區強震震度機率之地震危害潛勢分析，研究結果可供中央政府及地方政府之地震防救災緊急應變計畫研擬的依據參考。

五、結論

地區災害防救計畫的目的在健全地方災害防救體系，強化災前減災、整備、災時緊急應變及災後復原重建等災害防救工作，以期發揮整體救災效率及效能，有效執行各階段災害防救相關工作，以達迅速救災及減輕災害損失之目的。計畫中之進行災害潛勢的特性分析與災損評估，以供其研擬災害防救對策等即是本研究所要探討或解決的問題。本研究使用歷史地震以及新城斷層、山腳斷層、湖口斷層和新竹斷層等 4 條活動斷層來進行桃園新竹地區之地震危害潛勢分析，預估最大強地動值、地震震度機率，得到以下結論：

1. 以歷史地震以及新城斷層、山腳斷層、湖口斷層和新竹斷層等 4 條活動斷層引發不同地震規模來計算桃園市 13 個行政區、新竹縣 13 個行政區及新竹市 3 個行政區 337 年的最大地動值估測顯示：最大地表加速度(PGA)大於 250gal(CWB 震度六級)的區域是在桃園市東北及西北部區域、新竹縣西部及北部區域以及新竹市全部，PGA 大於 400gal(CWB 震度七級)的區域是在(1)桃園市龍潭西南部。(2)新竹縣湖口西南部、新豐南部、新埔東南部、竹北北部及中部、關西北部、芎林中部、竹東

中部、北埔西部、寶山南部以及峨眉。(3)新竹市北區東北部以及東區北部。另最大地表速度(PGV)等值圖顯示，PGV 大於 31 cm/s(MMI 震度階 VIII 級)的區域在(1)桃園市龍潭西南部。(2)新竹縣湖口西南部、新豐南部、新埔南部、竹北、關西北部、芎林北部、竹東西部及北部、北埔、寶山、峨眉以及五峰西部。(3)新竹市北區、東區以及香山東部及中部。PGV 大於 40cm/s 區域是位於新竹縣竹北中部、北埔西部、寶山南部、峨眉以及新竹市東區北部及西部。對這些地方的中高樓層建築物地震反應要特別注意其耐震的補強。由修訂麥卡利(MMI)最大震度階顯示 VIII 級的區域在桃園市平鎮龍潭楊梅交界區域以及新竹縣西部及中部區域。MMI 震度階 VIII 級，它對應的建築物損壞程度為建築材料差，工藝標準低，水平方向抗力弱類建築物毀壞嚴重損毀。

2. 以歷史地震資料以及 4 條活動斷層來計算 10 年、30 年和 50 年期間超過 CWB 震度階 5、6、7 級的地震震度機率結果顯示桃園新竹地區地震危害潛勢最高的區域位於在下列區域：(1)桃園市龍潭、新竹縣關西、芎林所包圍的區域 (2)新竹縣竹東、北埔、寶山、峨眉、新竹市東區所包圍的區域(3)新竹縣湖口、新豐、竹北所包圍的區域，其 10 年、30 年和 50 年期間超過 CWB 震度階 7 級的地震震度機率分別是 0-10%、5-20% 與 10-30%。顯示出期間愈久地震震度機率愈高。此外，其 10 年期間超過 CWB 震度階 5 級的地震震度機率 35% 以上的地區是在下列區域：(1)龍潭與關西的邊界區域 (2) 新竹縣竹東、北埔、寶山、峨眉、新竹市東區所包圍的區域(3)新竹縣湖口、新豐、竹北所包圍的區域。
3. 同樣地，以歷史地震資料以及 4 條活動斷層來計算 10 年、30 年和 50 年期間超過 MMI 震度階 VI、VII、VIII 級的地震震度機率結果顯示：桃園新竹地區地震危害潛勢最高的區域位於新竹縣北埔、寶山、峨眉所包圍的區域以及新竹縣湖口、新豐、

竹北、新竹市北區、香山所包圍的區域，50 年期間超過 MMI 震度階 VIII 級的地震震度機率約為 35% 以上。另外，超過 MMI 震度階 VII 級的地震危害潛勢較高的區域是在新竹縣北埔、寶山、峨眉所包圍的區域、新竹縣湖口、新豐、竹北、新竹市北區、香山所包圍的區域以及桃園觀音、新屋所包圍的區域與龜山東部，10 年、30 年、50 年期間超過 MMI 震度階 VII 級的地震震度機率約分別為 20% 以上、45% 以上、60% 以上。此外，高地震危害潛勢地區位於在下列區域：新竹縣北埔、寶山、峨眉所包圍的區域以及新竹縣湖口、新豐、竹北、新竹市北區、香山所包圍的區域，其 10 年、30 年和 50 年期間超過 MMI 震度階 VIII 級的地震震度機率分別是 10%、25% 和 35%。上述估測桃園新竹地區強震震度機率之地震危害潛勢分析，研究結果可供中央政府及地方政府之地震防救災緊急應變計畫研擬的依據參考。

誌謝

1. 感謝中央氣象局提供地震資料，本研究經費由科技部贊助，計畫編號 MOST109-2116-M-244-001，特表謝忱。
2. 參考文獻
3. 中央地質調查所(2019)。台灣活動斷層。引用於 2019 年 12 月 11 日，取自 <http://fault.moeacgs.gov.tw/Gis/Home/pageMap?LFun=1>
4. 桃園市政府(2019)，桃園市地區災害防救計畫。引用於 2019 年 11 月 25 日，取自 <https://cdprc.ey.gov.tw/Page/C10B9C4A41D6D55F/bbe8abce-8f37-40af-8d76-b423384238d4>
5. 新竹市政府(2017)，新竹市地區災害防救計畫。引用於 2019 年 11 月 25 日，取自 <https://cdprc.ey.gov.tw/Page/C10B9C4A41D6D55F/df3426a1-7c45-48a0-b250-5c064b789e2e>
6. 新竹縣政府(2018)，新竹縣地區災害防救計畫。引用於 2019 年 11 月 25 日，取

自

- <https://cdprc.ey.gov.tw/Page/C10B9C4A41D6D55F/267ab24f-909f-4bc5-a93f-0be060e10330>
7. 葉錦勳(2003)，台灣地震損失評估系統—TELES，國家地震工程研究中心報告 NCREE-03-002。
 8. Chen K. P. and Y. B. Tsai (2008). A Catalog of Taiwan Earthquakes (1900-2006) with Homogenized Mw Magnitudes, *Bull. Seis. Soc. Am.* 98,483-489.
 9. Chiu, J. M., & Kim, S. G. (2004). Estimation of regional seismic hazard in the Korean Peninsula using historical earthquake data between A.D. 2 and 1995, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(1), 269-284.
 10. Cornell, C. A. (1968). Engineering Seismic Risk Analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5), 1583-1606.
 11. Der-Kiureghian, A. & Ang, A. H-S. (1977). A Fault-Rupture Model for Seismic Risk Analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67(4), 1173-1194.
 12. Liu, K. S., & Tsai, Y. B. (2015). A refined Vs30 map for Taiwan based on attenuation relationships of ground motion. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, Vol. 26, No. 6, 631-653.
 13. Loh, C. H., Yeh, Y. T., Jean, W. Y., & Yeh, Y. H. (1991). Seismic hazard analysis in Taiwan area using bounded fault-rupture model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 81(1), 265-272.
 14. Seemann, M., Onur, T., Goltz, J., & Fenton, J. (2010). Probabilities of significant earthquake shaking in San Francisco bay area communities. *Seismological Research Letters*, 81(6), 878-883.
 15. Tsai Y. B. (1985). A study of disastrous earthquake in Taiwan, 1683-1895; *Bull Inst Earth Sci, Acad Sinica* 5 1-44.
 16. Wald, D. J., V. Quitoriano, T. Heaton, H.

- Kanamori (1999a). Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity and Modified Mercalli Intensity in California. *Earthquake Spectra* 15, 557-564.
17. Wald, D. J., V. Quitoriano, T. Heaton, H. Kanamori, C. W. Scrivner, and C. B. Worden (1999b). TriNet “ShakeMaps”: rapid generation of instrumental ground motion and intensity maps for earthquakes in Southern California, *Earthquake Spectra* 15, 537-556.
 18. Wells D. L. and K. J. Coppersmith, 1994: New Empirical
 19. Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture
 20. Width, Rupture Area, and Surface Displacement, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 84, 974-1002.

高屏溪斜張橋頻率分析與監測

賴榮俊¹ 張勝緯² 鄭榮輝³ 鞠志琨⁴ 陳家乾⁵

¹交通部高速公路局南區養護工程分局(分局長)

²交通部高速公路局南區養護工程分局(副分局長)

³交通部高速公路局南區養護工程分局屏東工務段(段長)

⁴台灣整合防災工程技術顧問有限公司(總經理)

⁵台灣整合防災工程技術顧問有限公司(專案經理)

摘要

高屏溪斜張橋位於高雄市大樹區與屏東縣九如鄉交界處，不但是國內首座高速公路斜張橋，亦屬國家關鍵基礎建設，於 88 年底完工通車後，為確保橋梁安全，於 101 年建立二代監測系統，並於 102 年試運轉迄今。為瞭解橋梁基本特性，本文首先介紹陳振華老師於 98 年小波函數識別之結果，並同以小波函數識別近期橋體頻率是否仍有變化。此外為瞭解地震是否造成橋體結構影響，透過監測橋面板及橋塔速度反應，檢視橋梁結構是否安全，故本文除介紹高屏溪斜張橋之動力特性外，亦分享檢視橋梁基本特性之簡易方式，以利各界參考。

關鍵字：高屏溪斜張橋、小波函數、頻率識別

Frequency Analysis and Monitoring of Kaoping River Cable-stayed Bridge

Jung-Chun Lai¹ Sheng-Wei Zhang² Jung-Hui Cheng³ Chih-Kun Chu⁴
Jia-Chian Chen⁵

¹ Southern Region Branch Office, Freeway Bureau, MOTC (Chief of Precinct)

² Southern Region Branch Office, Freeway Bureau, MOTC. (Deputy Chief of Precinct)

³ Southern Region Branch Office, Freeway Bureau, MOTC. (Captain of Pingtung Branch)

⁴ E-TURN ENGINEERING CONSULTANTS CO., LTD. (President)

⁵ E-TURN ENGINEERING CONSULTANTS CO., LTD. (Project Manager)

ABSTRACT

Located at the junction of Dashu District in Kaohsiung City and Jiuru Township, Pingtung County, the kaoping river Cable-stayed Bridge is not only the first expressway cable-stayed bridge in Taiwan, but also a key national infrastructure. After it was completed and opened to traffic at the end of 1988, in order to ensure the safety of the bridge, The second-generation monitoring system was established in 2012 and has been commissioned in 2013 so far. In order to understand the basic characteristics of the bridge, this article first introduces the results of the wavelet function recognition by Mr. Chen C.H in 2009. We also use the wavelet function to identify whether the frequency of the bridge has changed last year. In addition, in order to understand whether the earthquakes cause the impact of the bridge structure, the safety of the bridge structure can be checked by monitoring the speed response of the bridge deck and the bridge

tower. Therefore, in addition to introducing the dynamic characteristics of the kaoping river cable-stayed bridge, this article also shares the basic characteristics of the bridge. A simple way for reference from all walks of life

Keywords: kaoping river cable-stayed bridge, wavelet function, frequency identification

一、緣起

高屏溪斜張橋又稱南二高斜張橋，位於高雄市大樹區與屏東縣九如鄉交界處，橋長 510 公尺，屬不對稱之單塔斜張橋，短跨(下稱邊跨)長約 180 公尺，長跨(下稱主跨)約 330 公尺，主跨與邊跨各使用 15 組(30 條)鋼纜懸吊主梁，整座橋梁之鋼纜共計 60 條，不但是國內首座高速公路斜張橋，亦為國道 3 號跨越高屏溪進入屏東境內之重要門戶地標，如圖 1 所示。



圖 1 高屏溪斜張橋照片(來源:高公局網站)

二、監測儀器

本橋梁之監測儀器，主要包含加速度計、速度計、位移計、傾斜計、拉力計及風速計等儀器，而本文主要關注及分析所用之儀器，為橋面板及橋塔之速度計，相關儀器數量如表 1 所示，佈設示意如圖 2 所示。

表 1 監測儀器數量

類次	名稱	代號	符號	單位	數量	備註
動態感應器						
1	埋入型加速度地震計(三軸)	ACC	●	組	1	ACC01
2	表面型加速度地震計(三軸)	ACC	●	組	5	ACC02-ACC18
3	表面型加速度地震計(單軸)	ACC	●	組	12	
4	速度型振動計(單軸)	VEL	■	組	22	VEL01-VEL22
5	動態位移計(單軸)	DSP	◆	組	6	DSP01-DPS06
6	動態傾斜計(雙軸)	TLT	⊕	組	1	TLT01
7	三維風速計	ANM	★	組	4	ANM01-ANM04
8	監視錄影系統	CTV	▽	組	4	CTV01-CTV04
動態儀器總計						
靜態感應器						
10	電磁拉力計	EMT	⊙	組	4	EMT01-EMT04
11	雨量計	RAN	○	組	2	RAN01-RAN02
靜態儀器總計						
組						
12	動態集錄系統	DRS	□	式	1	DRS
13	靜態集錄系統	SRS	※	式	1	SRS

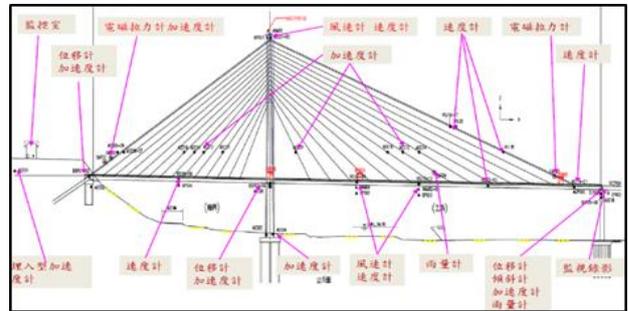


圖 2 儀器相對位置示意圖

三、98 年小波函數識別

高屏溪斜張橋通車迄今約有 20 年，為確認高屏斜張橋有無受外力作用至有無損傷，首先對橋梁於 98 年之分析結果介紹，藉以當作現況分析之參考依據。查 98 年「連續小波轉換於斜張橋之模態分析」(陳振華、黃炯憲，結構工程 24(1)，2009)，係透過小波函數識別橋梁自然頻率。該文章以 Meyer 小波函數為基底，進行衰減量測訊號之小波轉換，並以設定特定之小波尺度及調整位移方式，識別結構振態頻率，其中 Meyer 小波函數如圖 3 所示。

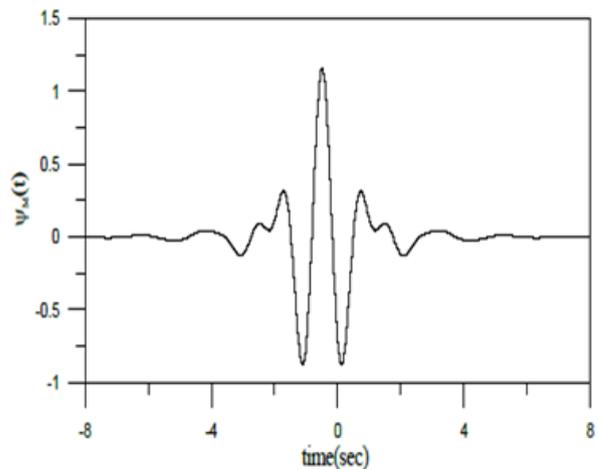


圖 3 Meyer 小波函數

經陳振華老師於 98 年識別高屏溪斜張橋之垂向及側向頻率如下表所示。

表 2 98 年識別高屏溪斜張橋之垂向及側向頻率

	垂向 mode1	側向 mode1
Frequency (Hz)	0.29	0.64

四、現況小波函數識別

為瞭解高屏斜張橋現況頻率，本文同以小波函數識別橋梁特性，識別原理同 98 年作法，惟採較簡易且直接觀察方式為之，本文小波函數以 molet 小波為基底，並選定分析頻率範圍，設定頻率增幅(頻率解析度)，首先以起始頻率計算小波函數(即先選定小波中心頻率)，再與時間訊號做捲積(小波轉換)，以瞭解特定時間下該頻率含量之多寡，隨後迭代中心頻率，即可完成時頻分析。

$$\hat{\psi}(\omega) = \begin{cases} (2\pi)^{\frac{1}{2}} e^{\frac{j\omega}{2}} \sin\left(\frac{\pi}{2} \nu \left(\frac{3}{2\pi} |\omega| - 1\right)\right) & \frac{2\pi}{3} \leq \omega \leq \frac{4\pi}{3} \\ (2\pi)^{\frac{1}{2}} e^{\frac{j\omega}{2}} \cos\left(\frac{\pi}{2} \nu \left(\frac{3}{2\pi} |\omega| - 1\right)\right) & \frac{4\pi}{3} \leq \omega \leq \frac{8\pi}{3} \\ 0 & |\omega| \notin \left[\frac{2\pi}{3}, \frac{8\pi}{3}\right] \end{cases}$$

以 109 年 6 月監測資料為分析對象，取橋面板主跨 1/2 處之垂向及側向速度計資料，並取 5 分鐘進行上開時頻分析，結果如下：

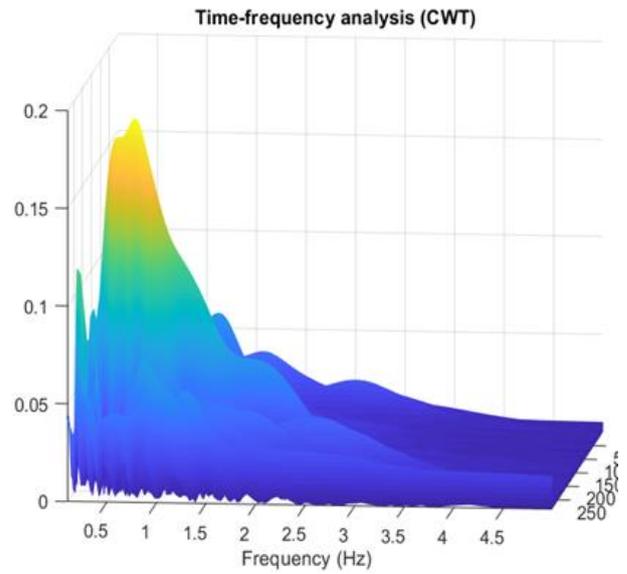
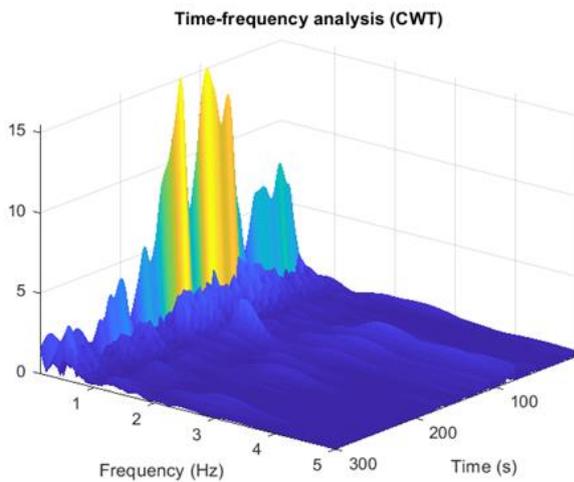
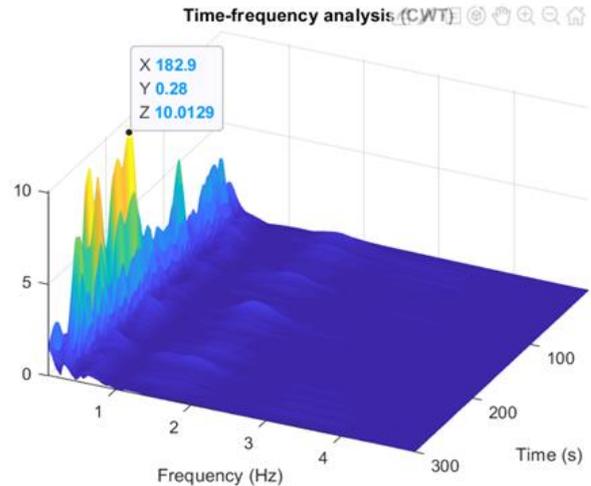


圖 4 橋面板主跨 1/2 處之垂向及側向之時頻振幅譜

另為瞭解橋塔行為，取同時間塔頂縱向(橋梁縱向)及側向速度計為分析對象，發現橋塔縱向頻率合理的與橋面板垂直向相同(0.28 Hz)，至側向反應之主要頻率，可由下一節結構模型分析瞭解到，以扭轉(0.73 Hz)成分為主，有關橋塔縱向及側向速度計反應時頻振幅譜如下所示。



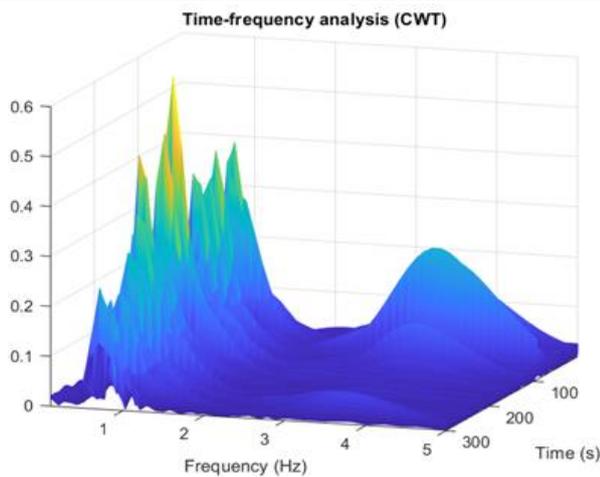


圖 5 橋面板主跨 1/2 處之垂向及側向之時頻振幅譜

有關 109 年識別高屏溪斜張橋之頻率如下表所示，結果顯示與 98 年分析相近，顯示橋梁結構尚無因外力(颱風或地震)至有太大影響，但局部是否有劣化情形，仍須仰賴定期橋檢及維護。

表 3 109 年識別高屏溪斜張橋之垂向及側向頻率

	垂向	側向	扭轉
Frequency (Hz)	0.28	0.64	0.73

五、有限元素識別

另一方面，可由有限元素模型之建置，分析橋梁主要頻率，本案透過 SAP2000 建立橋樑模型，有關模型基本參數如表 4 示，模型示意圖如圖 6 所示。

表 4 SAP2000 模型基本參數

	type 1	type 2
編號	B100~B110 B113、F100、 F101、F103~F110	B111, B112 B114, F102 F111~F114
斷面積 (m ²)	0.0273	0.0183
彈性模數 (kN/m ²)	2.1×10 ⁸	2.1×10 ⁸
單位長度質量 (kg/m)	214.305	143.655

	副跨	主跨
斷面積 (m ²)	21.6	1.79
彈性模數 (kN/m ²)	2.8×10 ⁷	2.04×10 ⁸
剪力模數 (kN/m ²)	1.2×10 ⁷	7.85×10 ⁷
單位長度質量 (kN/m)	675.52	241.78
彎矩慣性矩 (m ⁴)	I _y =1533 I _z =109	I _y =168 I _z =3.1
扭轉慣性矩 (m ⁴)	96.1	9.7475

	type 1	type 2	type 3	type 4
編號	A	B	C	D
斷面積 (m ²)	36.078	26.136	20.535	11.840
彈性模數 (kN/m ²)	2.8×10 ⁷	2.8×10 ⁷	2.8×10 ⁷	2.8×10 ⁷
剪力模數 (kN/m ²)	1.2×10 ⁷	1.2×10 ⁷	1.2×10 ⁷	1.2×10 ⁷
單位長度質量 (kN/m)	865.88	627.26	492.83	284.16
彎矩慣性矩 (m ⁴)	I _y =342.739 I _z =279.133	I _y =196.714 I _z =157.572	I _y =109.794 I _z =60.036	I _y =33.806 I _z =22.75
扭轉慣性矩 (m ⁴)	474.30	202.50	85.90	39.06

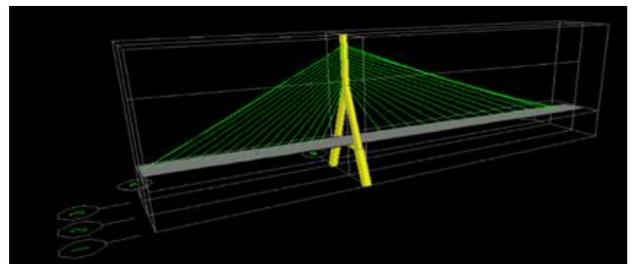


圖 6 SAP2000 結構模型

經分析高屏溪斜張橋 SAP2000 模型之頻率與小波識別結果比較，如下表所示，顯示結果接近。

表 5 橋梁模型分析頻率與小波識別結果比較

	垂向頻率	側向頻率	扭轉頻率
小波函數識別	0.28 Hz	0.64 Hz	0.73 Hz
有限元素識別	0.273Hz	0.63Hz	0.73Hz

六、地震力分析

另為瞭解特定地震對橋梁之影響程度，可藉由量測地表加速度，輸入模型得知鋼纜索力變化情形，並檢視地震發生時段之橋體頻率反應，確認該地震是否造成結構上破壞，本文以 109 年 5 月 30 日 8 時 58 分發生於高雄大樹區鄰近橋址之地震(規模 4)為分析案例，查氣象局地震報告資料如圖 7 所示，橋址量測地表水平加速度，最大為 3.5 gal，因深度較深所以地表反應不大，如圖 8 所示。



圖 7 109 年 5 月 30 日 8 時 58 分鄰近橋址之地震

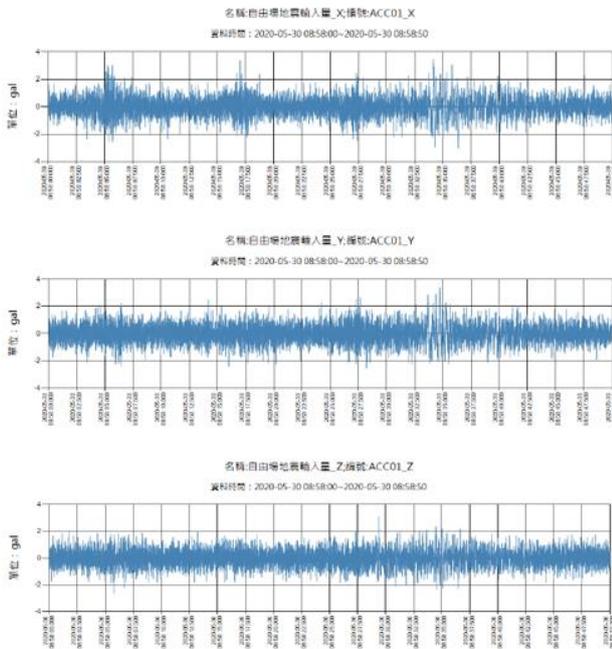


圖 8 109 年 5 月 30 日地震下量測地表加速度歷時

將上開地表加速度輸入有限元素模型可得到鋼纜之變化量如表 6 示，主跨變化範圍

於±30 kN 以內，邊跨變化範圍於±40 kN 以內，表示此地震對索力影響不大。

表 6 分析 109 年 5 月 30 日地震下之索力變化

	靜總載重	變化量(kN)			靜總載重	變化量(kN)	
F100	4946.922	3.042	-2.011	B100	6574.949	12.477	-10.507
F101	5081.615	5.457	-6.249	B101	7195.116	13.555	-11.347
F102	5357.198	10.397	-11.44	B102	6111.777	35.498	-32.285
F103	6904.904	22.957	-25.24	B103	7250.546	35.126	-31.98
F104	6930.855	22.928	-25.18	B104	7388.973	34.711	-31.637
F105	6596.49	22.954	-25.17	B105	6955.29	34.264	-31.267
F106	7763.305	23.087	-25.29	B106	9101.332	33.871	-30.948
F107	8494.644	23.303	-25.49	B107	9812.109	33.39	-30.551
F108	7096.506	23.576	-25.75	B108	6407.684	32.71	-29.972
F109	6080.866	23.958	-26.12	B109	7837.387	32.036	-29.399
F110	4698.192	24.402	-26.56	B110	6846.522	31.06	-28.547
F111	4873.567	11.227	-12.2	B111	5508.514	13.415	-12.347
F112	4099.565	11.258	-12.22	B112	5010.948	12.485	-11.507
F113	5995.474	10.912	-11.83	B113	7205.479	11.144	-10.283
F114	3476.921	9.457	-10.24	B114	5268.47	9.029	-8.338

針對橋塔部分，取地震發生後 5 分鐘之塔頂速度計資料，並透過傅立葉轉換得知頻率域反應，發現橋塔縱向(平行國道方向)速度計之振動頻率為 0.267 Hz，側向速度計反應出之橋體第 2(側向)振態(0.6 Hz)及第 3(扭轉)振態(0.73Hz)，有關橋塔縱向及側向頻譜分析結果分別如圖 9 及圖 10 示，接近小波識別及模型分析結果，表示橋塔於彈性範圍。

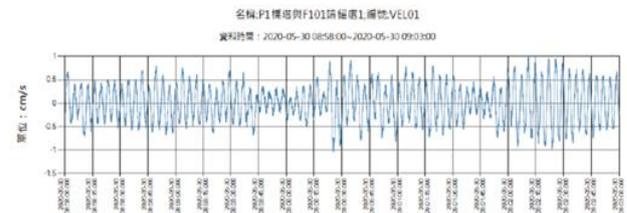


圖 9 地震作用下之橋塔縱向時間域及頻率域反應

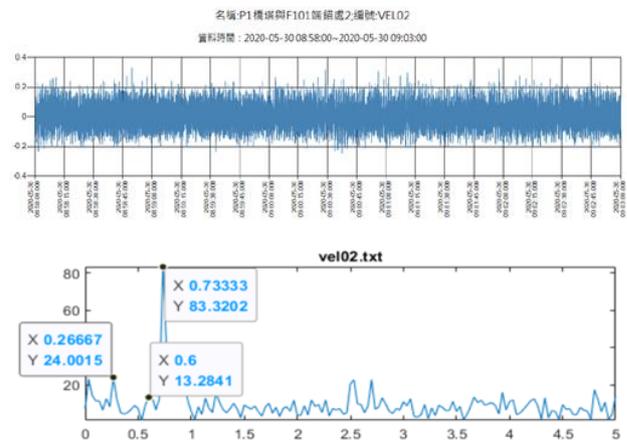


圖 10 地震作用下之橋塔側向時間域及頻率域反應

針對橋面板部分，由橋面板速度計，觀察橋面板於地震時之反應，故取主跨 1/2 處及邊跨 1/2 處之垂向速度資料，並透過傅立葉轉換分析其頻率反應，發現主跨及邊跨主要振動頻率垂向均為 0.267 Hz。表示橋塔亦於彈性範圍。有關主跨 1/2 處於地震發生時之時間域及頻率域反應如圖 11 所示，另邊跨 1/2 處部分如圖 12 所示。

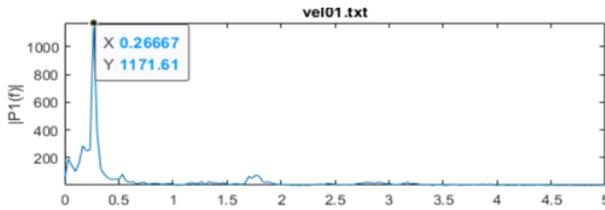


圖 11 地震作用下橋面板主跨時間域及頻率域反應

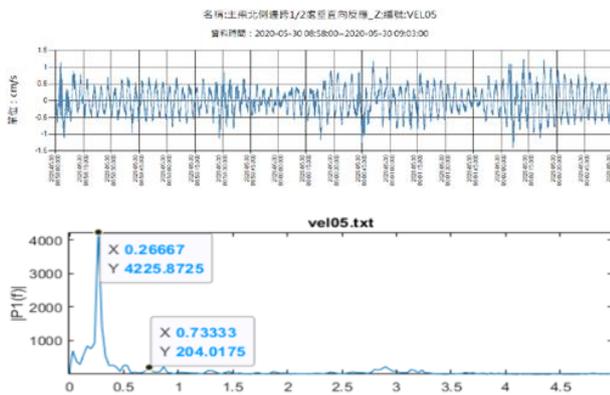


圖 12 地震作用下橋面板邊跨時間域及頻率域反應

七、結論與建議

1. 高屏溪斜張橋屬國家重要基礎建設，為確保行之安全，每季均進行橋體頻率分析，接近 98 年橋體頻率分析及有限元素模型分析結果。
2. 本文透過小波識別及地震力分析橋體反應，顯示橋體現況垂向振動約 0.27 Hz，側向振動約 0.64 Hz，扭轉振動約 0.73 Hz，提供後續持續監測觀察之參考。
3. 本文介紹以 Molet 小波轉換及傅立葉轉換來識別橋梁頻率之方式，結果相當接近，其原理上之差異，僅在於使用之轉換基底不同，但只要頻率解析度夠，基本上兩者分析結果無太大差別。
4. 高屏斜張橋雖持續執行監測作業，監測

整體結構是否安全，但對於局部劣化情形，仍須仰賴定期檢查與維護。

參考文獻

1. 陳振華;黃炯憲，(2009)「斜張橋鋼纜拉力量測與分析-以貓羅溪鋼拱塔斜張橋為例」，結構工程，台北，台灣，第二十四卷，第一期。
2. 陳振華、翁政佑，(2007)「斜張橋常時動態反應與警戒值統計關係之探討」，第十六屆南區統計研討會，高雄，高雄大學，June, 22-23, paper。
3. 陳振華、湯輝雄、歐陽蓁，(2005b)「斜張橋鋼纜拉力量測與分析-以貓羅溪鋼拱塔斜張橋為例」，結構工程，台北，台灣，第二十四卷，第三期。
4. 交通部台灣區國道新建工程局，(2002)「高屏溪橋」，台北，台灣。
5. 楊永斌、陳振華，(1995b)「鋼纜支撐橋梁理論發展的回顧之三：1880 年代至 1940 年代」，結構工程，台北，台灣，第十卷，第四期，65-88 頁。
6. 交通部台灣區國道新建工程局，(2002)「高屏溪橋」，台北，台灣。
7. 張益祥，(2001)「斜張橋之鋼纜預力監測技術」，國立成功大學土木工程研究所碩士論文，方一匡教授指導。

消防人員執行山域事故案件統計分析及工作壓力影響之研究-以高雄市政府消防局為例

王裕仁¹ 陳彤霖²

¹高雄科技大學土木工程系副教授

²高雄科技大學土木工程與防災科技在職碩士班研究生

摘要

鑒於近年山林開放政策實行，例如：國家公園生態保護區登山能力或經驗證明審查的取消、山地管制區、林務局管轄之林道開放，使國人能自由出入山林，降低原有對於登山客入山的難度限制，及 108 年國人因新冠肺炎無法出國或公共區域限制進入，致使國人趨於至山域活動如健行、登山、探洞、勘查、賞景等，而意外事故案件也可能隨著登山活動增加造成意外事件案件數量攀升，造成消防人員出動救援次數上升。本研究藉由統計 2011 年至 2020 年高雄市發生之山域事故，分析山域事故案件上升幅度、發生原因及發生地點，再統計分析高雄市政府消防局第六救災救護大隊執行案件出動人力，藉由統計數據向相關消防人員做深度訪談，了解山域事故造成之工作壓力之壓力源，期望藉由了解壓力源，進而研究消防人員執行山域事故工作壓力改善之辦法。

關鍵字：山域事故、統計分析、消防人員、工作壓力。

Statistical Analysis of Firefighters' Implementation of Mountain Accident Cases and Research on the Impact of Work Pressure - Take Kaohsiung City Government Fire Department as an Example

Yu-Ren Wang¹ Tung-Lin Chen²

¹Associate Professor, National Kaohsiung University of Science and Technology

²Master Student, M.A. program, Department of Science and Technology, National Kaohsiung University

ABSTRACT

In view of the implementation of the forest opening policy in recent years. For example: the cancellation of the review of mountaineering ability or experience certification in the national park ecological protection zone, the opening of the mountain control zone, and the forest road under the jurisdiction of the Forestry Bureau, which enables people to freely enter and exit the mountains and forests, reducing the original difficulty limit for climbers to enter the mountains. And in 108 years, Taiwanese people were unable to go abroad or restricted access to public areas due to the new crown pneumonia. As a result, Chinese people tend to go to the mountains for activities such as hiking, mountain climbing, cave exploration, surveying, and scenic viewing, etc. Accident cases may also increase with the increase in mountaineering activities, resulting in an increase in the number of accident cases and an increase in the number of rescue operations by firefighters. This study uses statistics on mountain accidents that occurred in Kaohsiung City from 2011 to 2020, and analyzes the increase in mountain accident cases, their causes, and locations.

Re-statistical analysis of Kaohsiung City Government Fire Department No. 6 Disaster Relief and Rescue Brigade dispatched manpower. Conduct in-depth interviews with relevant firefighters based on statistical data to understand the sources of work pressure caused by mountain accidents. It is hoped that by understanding the pressure sources, we can study how firefighters can improve work pressure in mountain accidents.

Keywords: mountain accident, statistical analysis, firefighters, work pressure

一、緣起

從事登山活動一直是國人熱愛的活動項目，但就登山健行活動之相關規定，政府首次是於 1972 年百岳訂立起計，並且是至 2019 年 10 月才正式向黑山告別。由此可知國人山域教育晚於他國許久，導致山域事故山域事故發生機率甚高。登山活動增加不僅造成政府支出增加，更造成消防人員頻繁出勤，容易造成消防人員累積龐大身體負擔及心理壓力。

二、山域事故案統計分析及消防人員出動統計分析

2-1 高雄市山域事故發生月份及案件數量

統計分析民國 100 年至 109 年高雄市山域事故發生案件數量，經統計發現事故較常發生於每年的 4、6、7、10、11 月份。而於 108 年 10 月時山林政策開放後，109 年案件攀升至 24 件，統計 100 年至 108 年案件平均值為 10 件如(表 1)所示，但自政策開放後，事故案件增加較平均值 2.4 倍，如(圖 1)所示。

表 1 高雄市山域事故案件統計分析表
(資料來源:高雄市政府消防局案件紀錄查詢系統)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	總計
100年	1	2				1	1				1	1	7
101年	2					2	1			1		2	8
102年	1	2				1	1		2			1	8
103年	1		1	2		1	1					2	8
104年			2				1		1				4
105年			1	1	1	1				3	1		8
106年		1	1		1				1	6	2		12
107年				2		2		1	1	1	2	1	10
108年		1	2	1		3	1	1		1	2	3	15
109年	1	1	2	5			4	3	1		5	2	24
合計	6	7	9	11	2	11	10	5	6	12	15	10	104

高雄山域事故每年發生件數分析：

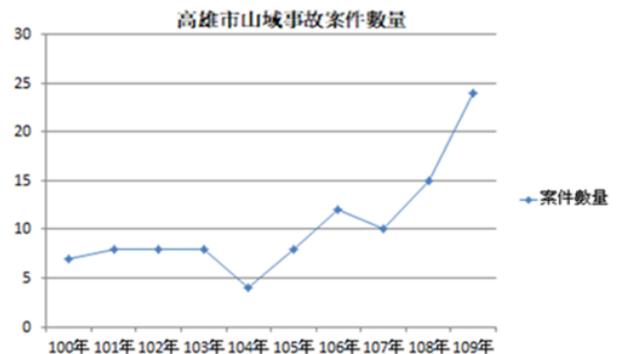


圖 1 高雄市山域事故案件統計分析折線圖

(資料來源:高雄市政府消防局案件紀錄查詢系統)

2-2 山域事故發生原因之分析

統計自高雄市政府消防局案件紀錄查詢系統中，案件求救原因主要可分類為四大項：迷途失聯、高山症發作、外傷、墜谷(崖)及其他因素，其中求救原因以迷途失聯共計 39 件佔總體案件 37.5% 為最多數，高山症計 20 件佔總體案件為 19.23%，外傷案件計 18 件佔 17.3%，墜谷(崖)計 15 件佔 14.42%，而其他因素為計 12 件佔 11.53%，如(表 2)及(圖 2)所示。

表 2 高雄市山域事故案件求救原因統計分析
(資料來源:高雄市政府消防局案件紀錄查詢系統)

年度	迷途失聯	高山症	外傷	墜谷(崖)	其他因素	總計數
100年	3	2	0	2	0	7
換算百分比	42.86%	28.57%	0.00%	28.57%	0.00%	
101年	5	1	1	0	1	8
換算百分比	62.50%	12.50%	12.50%	0.00%	12.50%	
102年	3	2	1	2	0	8
換算百分比	37.50%	25.00%	12.50%	25.00%	0.00%	
103年	4	2	2	0	0	8
換算百分比	50.00%	25.00%	25.00%	0.00%	0.00%	
104年	2	0	2	0	0	4
換算百分比	50.00%	0.00%	50.00%	0.00%	0.00%	
105年	4	2	0	0	2	8
換算百分比	50.00%	25.00%	0.00%	0.00%	25.00%	
106年	3	3	2	2	2	12
換算百分比	25.00%	25.00%	16.67%	16.67%	16.67%	
107年	4	2	1	2	1	10
換算百分比	40.00%	20.00%	10.00%	20.00%	10.00%	
108年	2	4	6	2	1	15
換算百分比	13.33%	26.67%	40.00%	13.33%	6.67%	
109年	9	2	3	5	5	24
換算百分比	37.5%	8.33%	12.5%	20.83%	20.83%	
總計	39	20	18	15	12	104
總百分比	37.5%	19.23%	17.3%	14.42%	11.53%	

而另外 100 至 109 年發生原因，其中南一段較常發生墜谷(崖)案件，南二段較常發生高山症案件，玉山群峰較常發生迷途失聯案件。

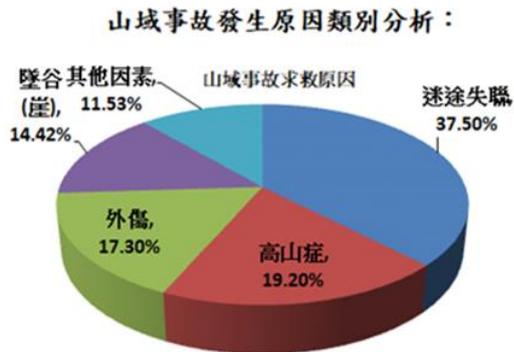


圖 2 高雄市山域事故案件求救原因圓形圖
(資料來源:高雄市政府消防局案件紀錄查詢系統)

2-3 山域事故發生區域之分析

統計 100 至 109 年發生於南一段 29 件、南二段 34 件、玉山群峰 21 件、其他區域 20 件，共計 104 件，其中南一段較常發生於石山林道，南二段較常發生於轆轤谷山屋，玉山群峰較常發生於圓峰山屋，如(圖 3)所示。

高雄市山域事故發生區域分析：

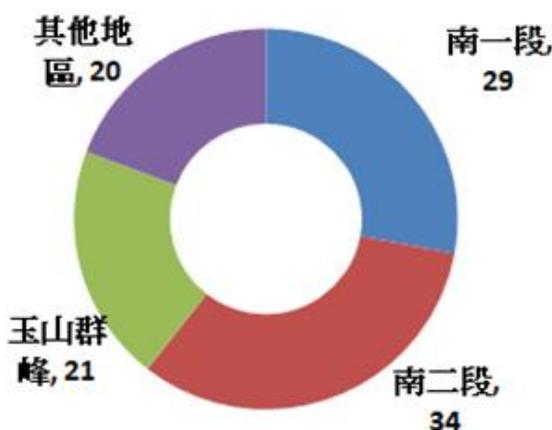


圖 3 高雄市山域事故發生區域統計圓形圖
(資料來源:高雄市政府消防局案件紀錄查詢系統)

2-4 消防人力出勤人次數量及比例

高雄市政府第六大隊統計執行轄內山域

事故搜救勤務出勤人次:100 年 411 人次、101 年 231 人次、102 年 140 人次、103 年 149 人次、104 年 279 人次、105 年 119 人次、106 年 277 人次、107 年 78 人次、108 年 265 人次、109 年(1 至 10 月)741 人次，共計 2690 人次。由統計數據百分比可看出自 109 年開始案件數量因驟升致使消防人員出勤人數大幅上升，佔總出勤人次百分比 27.5%，如(圖 4)所示。

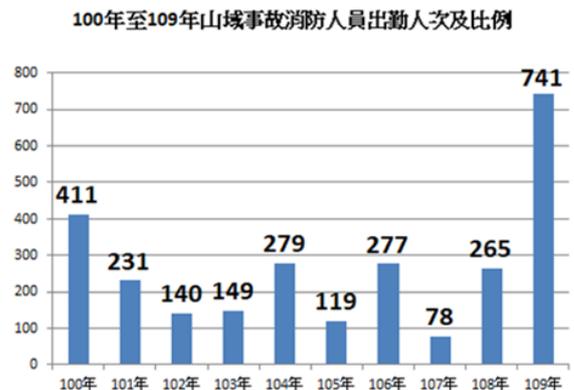


圖 4 高雄市山域事故消防人員出勤比例圖
(資料來源:高雄市政府消防局案件紀錄查詢系統)

出勤人次統計方式為根據高雄市政府消防局案件派遣系統上所統計出動消防人員總數，於山區已執行多日搜救行動之消防人員仍計為出動 1 人次，該統計次數僅計算總派遣消防人員數量。

三、山域事故對消防人員造成相關之影響

3-1 研究對象

本研究以出動之山域事故案件之高雄市政府消防局第六大隊消防隊為主要研究對象，第六大隊主要負責高雄市山域區域，東半部主要為玉山山脈、中央山脈之部分區域，其涵蓋轄區有高雄市美濃區、旗山區、內門區、杉林區、甲仙區、六龜區、茂林區、那瑪夏區及桃源區，如(圖 5)所示。

高雄市消防局各隊服務據點



圖 5 高雄市政府消防局各大隊服務區域
(資料來源:高雄市政府全球資訊網單位服務據點)

3-2 深度訪談法之問題設計

藉由統計分析山域事故案件發生之趨勢，設計深度訪談問題，向執行山域事故之消防人員做成訪談紀錄，研究問題如下：

在山域區域之消防單位，除了執行一般消防勤務，同時必須負責山域事故發生時之搜索救援，其所面臨之救援工作有那些特性？

這些工作特性及逐年攀升的山域事故搜救勤務案件數量造成搜救消防人員產生哪些工作壓力？

3-3 深度訪談資料結果

本次訪談對象共 4 名，分別是山域事故搜救成員裡的一名幹部及 3 名隊員如(表 3)所示，對於山域事故之特性及影響之訪談資料彙整結果如(表 4)至(表 10)所述。

表 3 本研究深度訪談研究

編號	職稱	工作職長	訪談日期
A	幹部	指揮山域搜救任務	110/03/19
B	隊員	執行山域搜救任務	110/03/21
C	隊員	執行山域搜救任務	110/03/23
D	隊員	執行山域搜救任務	110/03/24

壹、平時無登山習慣，擔心自身專業性不足。

受訪消防人員表示山域事故搜救是屬於另一種專業性作業，沒有相關訓練、高度體能負荷度或多年登山經驗的話，很容易在山上遭遇相關危險，以及自身專業或體能不佳可能會有走失或落隊的風險壓力，也可能因無法配合遭受排擠，如(表 4)所示。

表 4 訪談答覆彙整之一

編號	相關答覆
A	<u>早期畢業之消防人員未有受過山域證照相關訓練，這種搜救勤務對未經訓練的消防人員會有極大的殞命風險，故欲執行山域事故搜救務必要有經過專業訓練並取得合格證照才能執行勤務。</u>
C	<u>對我來說我的年齡都已經 45 歲了，體能對我來說是一大負擔，如果有突發事件我還怕自己會拖累隊伍。</u> <u>我剛開始對於這方面的專業技能感覺要學習的壓力滿大的，因為這是非常講求專業技術的救援並且需要耗損高體能。</u>

貳、公務單位供給救援者之自身裝備尚未充足。

救援者個人除了有充分的救援體能、充足的山域地區知識和資訊，還必須備妥必要生存的自身登山裝備及攜帶各式救援裝備。但礙於編制金費限制，部分消防救援人員會自行添購更加優良之裝備前往救援，求自身執行任務時能更安全及順遂，如(表 5)所示。

表 5 訪談答覆彙整之二

編號	相關答覆
A	<u>「工欲善其事，必先利其器」，有經驗之搜救人員若無適當之登山裝備，也是無法能順利執行任務，故在平時整備清點維護保養裝備也是重要任務，例如岩盔、禦寒衣物，充氣睡墊、露宿袋、睡袋、炊具、登山背包、雨具、登山鞋、照明器材、外帳、鈎環繩索、無線電、衛星電話及其他相關自我防護器材等。我都會要求同仁務必平時確實清點交接這些器材，因為這是各位同仁前進搜救的自我保命器材。</u>
B	<u>山域搜救工作使用之裝備器材，好的器材將能讓作業事半功倍，有些搜救夥伴還自行採購更加優良之作業工具或使其輕量化，金錢</u>

	<u>方面我必須謹慎使用，因為有房貸、育兒費用、長輩醫療費等，我無法再使用自身金費來採購更加優良的山域裝備。</u>
D	<u>公發裝備目前針對搜救事故來說只能是堪用程度，登山裝備基本就是要禦寒和輕量化，爬山在重量管理上很重要，當然一分錢一分貨，想要更好的裝備，只能要自己支出額外費用去添購。</u>

參、執行任務之帶隊官或指揮官執行山域事故決斷性正確與否，將會影響搜救隊伍士氣及任務成功率。

假如由經驗不足或未知相關風險之人員執行決斷，會導致救援人員身陷危害及任務執行難度上升，致使搜救人員於執行任務中產生壓力，如(表 6)所示。

表 6 訪談答覆彙整之三

編號	相關答覆
B	<u>帶隊官或上級之經驗及技術：某次案件，現場技術已超過我們能執行的層面，長官卻說明現場學習及立刻使用，我覺得這是非常危險的事情，要我冒這種風險我寧可現場抗命不執行。</u>
D	<u>早期會強制要求 EMTP 要參與山域搜救勤務，但其實現場患者狀況大多是已死亡、高山症發作(盡速帶往山下)或是沒有行走能力之人，說實在 EMTP 要求性沒有這麼高，早期該項制度導致擁有 EMTP 執照之人員不想留在山域搜救團體。</u> <u>當日搜救之帶隊官也是很大的因素，其實山域事故搜救案件帶隊官除了訂立目標找人外，要優先保護自己人，如果都還沒找到待救人員，自己人就掛彩，不但導致減少搜救人員，還要另外在編組搜救人員將自己的收傷人員帶下山，帶隊官如果風險判斷能力不佳，會將搜救難度及強度拉高，比如說：下雨天也要強制搜索，會增加自己人受傷的風險。</u>

肆、搜救路途遙遠及曠日耗時，無法有效工作輪替易導致身體疲憊及擔心失神受傷或喪命。

山域事故案件發生幾乎是在人煙罕至，無開發道路及無法容易接近的深山內處，因此救援光是先開車至登山口集結就要花上半

日以上，之後再重裝徒步進入山內搜索，且因搜索輪替要 6 日後之事情，對消防人員來說因輪替時間過長，導致容易身心俱疲致使分神受傷，如(表 7)所示。

表 7 訪談答覆彙整之四

編號	相關答覆
B	<u>搜救路途遙遠：通常發生救援的地點桃源鄉天池前往南一段或南二段處，該位置屬於在台東與高雄的交界處，而該處之唯一出入口卻是要從台東進入，所以每次發生事故時，都要從高雄集結奔馳到台東，從台東的登山入口近入，這樣就至少要花費半日，然後再走到救援地點大概又要一日以上，光是步行到救援地點就大概要三日。而撤退的路線又要三日，總共約需要花六日的時間。(B-2-1)</u>
C	<u>因山域救援通常曠日廢，少說至少也要 7 日以上，對我的困擾就是要露宿過夜，我本身感覺是容易緊張的人，而自己又是算淺眠的人，這種露宿野外的休息對我來說根本沒有休息到。曾經南二段搜索日數還超過 28 天。(C-2-2)</u>
D	<u>搜索作業時間一日也是 8 小時以上，並且非每條路好走，常常會碰到那種路非常狹隘，旁邊是懸崖，自己的確保卻是旁邊的小草，這種重裝行走對我說是很大的心理壓力。</u> <u>山搜時間單位是以 3-5 天起跳。我記得在民國 104 年 9 月時執行柯主任山域事故搜救勤務，當時搜救日數大約執行約 1 個月，最後與家屬說明搜救已盡力，此次的搜救時數遙遙無期，在山上的搜救日子著實是我們的工作壓力。</u>

伍、直升機搭乘之風險。

搜救人員最主要是考慮飛行安全疑慮，時常有報導飛行意外墜落的新聞，不管事救難人員或其家屬都很不願意見到電視上報導著自己熟識的人發生意外，如(表 8)所示。

表 8 訪談答覆彙整之五

編號	相關答覆
B	<u>搭乘直升機是有優缺點的啦，直升機可以增加救援速度，節省步行時間。但相對的因為從平地突然要拉升到海拔 3000 公尺以上很容易產生高山症，並且天氣因素也是會影響飛行安全問題，時常有報導飛行墜落的新聞，家裡人也很擔心我搭乘直升機的時候。不管如何搭乘直升機或步行都不是好的選擇。</u>

陸、高山症之致命性。

高山症是所有登山人員最怕遇到的疾病，高山症的成因，主要是因為高山空氣稀薄導致缺氧，進一步造成身體機能的惡化，特別是腦部與心臟。在海拔 1500 公尺以內的高度，氧氣分壓與海平面相差不大；然而，超過 2100 公尺以上，就開始有發生高山症的危險。高山症最主要的症狀是頭痛，並且常常合併噁心或嘔吐、全身無力、頭昏或頭重腳輕、失眠等問題。發生高山症的危險因子，主要和體質有關；年齡、性別、和個人的體能的關係較少。所以，如果過去曾有高山症的病史，就必須十分小心，如(表 9)所示。

表 9 訪談答覆彙整之六

編號	相關答覆
B	<u>山域事故發生大多是發生在 3000 公尺以上之高山，對於我們來說每次前往都有可能發生腦水腫及肺水腫的風險，所以我們對於自己的身體狀況要清楚及量力而為。</u>
D	<u>我自己其實也很怕遇到高山症，曾經有一次因為前一天的消防勤務比較繁忙，然後那陣子又身體狀況不佳，剛好就遇到山域事故搜救勤務，那次上山搜救沒多久，我就一直頭很暈，好險下撤時間不用很久，不然我可能是要增加成那次救援的負擔之一了。</u>

柒、搜救環境受天候影響，雨季或入夜致命風險性大增。

因為山域上潛藏各種天然地形危害，例如懸崖、落坑、野獸、落石及溪流，如果在能見度不佳、颱風天、雨季或是其他天候不佳的狀況時行走會增加受傷的風險，如(表 10)所示。

表 10 訪談答覆彙整之七

編號	相關答覆
B	<u>山上之溫度，在夏日也只有攝氏 5 度至 6 度，在冬天野外是直接結霜了。搜索必須注意自己有失溫的風險。</u> <u>因搜救日數都在數日以上，有時如果未能在日落前(大約是下午 4 點)紮營，晚間摸黑執行各種作業，能見度降低會增加作業危險性。</u>
C	<u>該勤務的執行順遂其實也很看天候狀況，假如是雨季或有濃霧會將難度提升很多，執行搜救危險風險很高，有一次在行走路途上還差一點被腳邊的蛇咬到，野獸攻擊也是一種風險。</u>

四、結論

- 一、綜觀 10 年山域事故案件，每年平均發生數量為 9.7 件，但自 108 年政院推出山林解禁後，民眾未做充足準備。案件數量明顯上升，109 年高雄共發生了 24 起山域事故，因山域事故發生不確定性及風險性仍高，加上山域事故案件發生呈現逐年增長趨勢，未來山域事故將可能成為頻頻發生之案件，假如案件數據仍持續逐年攀升，將對消防人員造成重大的負擔。
- 二、藉由深度訪談了解受訪地區消防人員壽山域事故影響主要之壓力原因有：
 1. 平時無登山習慣，擔心專業度不足。
 2. 公務單位供給救援者之自身裝備尚未充足。
 3. 執行任務之帶隊官或指揮官執行山域事故決斷性正確與否，將會影響搜救隊伍士氣及任務成功率。
 4. 家屬或民眾質疑性搜救執行能力，感受到家屬急迫的要求壓力。
 5. 搜救急迫性及搜救時間限制，未能於搜救中獲得妥善休息。
 6. 搜救路途遙遠及曠日耗時，無法有效工作輪替易導致身體疲憊及擔心失神受傷或喪命。
 7. 直升機搭乘之風險
 8. 高山症之致命性

9. 搜救環境受天候影響，雨季或入夜致命風險性大增。

參考文獻

1. 廖思博：「消防人員搶救工作壓力問題之探討-以台北車站特定區為例」，碩士論文，2015。
2. 萬文隆：「深度訪談在質性研究中的應用」，生活科技教育月刊，三十七卷，第四期，2004。
3. 100 年至 109 年高雄市政府消防局第六救災救護大隊山域事故統計分析，109 年 11 月製。
4. 高雄市政府消防局案件紀錄查詢系統。
5. 高雄市政府全球資訊網單位服務據點 (<https://fdkc.kcg.gov.tw/cp.aspx?n=4928082F113B77BE>)

可撓性水平救生母索之後裝式末端錨具抗拉強度研究

林琬茹¹ 林智強²

¹ 國立高雄科技大學土木工程防災所碩士生

² 國立高雄科技大學土木工程系助理教授

摘要

勞工於高處工作場所作業，若未能妥當設置合適且必要之安全防護設施，造成墜落職災風險將極高。本研究透過相關文獻蒐集與資料分析後得知大多數的職業災害類型多屬於墜落且亦是造成人員死亡的最主要原因。本實驗設計以後裝式錨具將最常見的四種單點錨定依力學結構設定四點式錨定基板埋入相同深度並以不同強度混凝土、吊環、施加力量進行抗拉強度試驗。依據實驗設計研究結果顯示：(1)錨具之錨定螺絲種類埋設於不同強度混凝土並不影響其抗拉強度。(2)尺寸大的吊環及厚度高之基板試驗皆呈現較好的抗拉可靠度。(3)後裝式錨具之錨定螺絲固定方式強度大小排列依序為：植筋式>膨脹式>內牙式>內迫式。

關鍵字：防墜設施、後裝式錨定、抗拉強度試驗。

A Study on Tensile Strength Property of the Flexible Horizontal Lifeline System among Post-installed End Anchor Connector

Lin, Wan-Ru¹ Lin, Chih-Chiang²

¹ Master student. Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

² Assistant Professor. Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

If workers work in high workplaces, aren't any appropriate and necessary safety protection facilities be properly installed, the risk of falling will be extremely high. This study found that most of the types of occupational disasters through the collection of relevant literature and data analysis are fall, which is the most important cause of death. In this experimental design, the four most common single-point anchors are embedded in the four-point anchor base plate according to the mechanical structure of the post-installation anchorage, and the tensile strength test is carried out with different strength concrete, lifting rings, and applied force. According to the research results: (1) The types of anchoring screws of anchors embedded in concrete with different strengths do not affect their tensile strength. (2) Tests of large-size rings and high-thickness substrates all show good tensile reliability. (3) The order of the strength of the anchor screw fixing method of the post-installed anchor is: bar-planting type>expansion type>internal thread type>internal forced type.

Keywords: anti-falling facilities, post-installed end anchor, tensile strength test

一、前言

1-1 研究背景與動機

職災不僅造成勞工個人傷亡及家庭破碎，社會更需付出沉重成本及經濟損失，勞動部歷年職業災害調查統計顯示，「墜落」一直居重大職災類型之首，營造業又居行業別發生率之首(約占 50%)，災害類型以墜落、滾落傷亡為最多(約占 60%)[1]。在營建工程中除了設置護欄、護蓋的安全設施外，使用安全帶及安全母索作為預防勞工墜落是重要防護設施之一，因此應推動整體防護措施將水平母索系統在設計階段即納入整體防護考量，才是落實現場安全管理工作的關鍵。職業安全衛生是評比先進國家的一項指標，更是保障勞工安全的基礎工程，具備有高可靠度系統的安全設施如圖 1 所示，需將各配件組合而成是缺一不可的，其中若有一項未能達安全要求將會事倍功半。

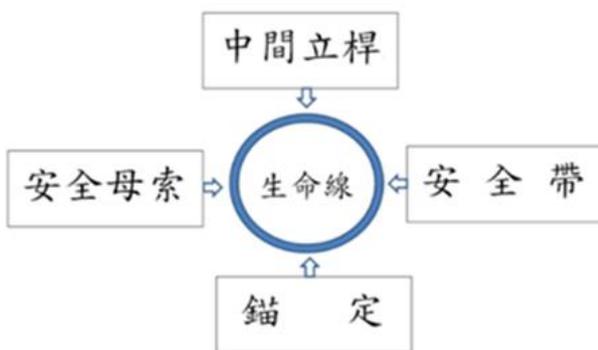


圖 1 安全衛生設施相互關係圖

資料來源：蔡一主論文[9]

1-2 研究目的

依營造安全衛生設施標準的 23 條要求，錨定須能承受 2300 kgf/人之要求。本研究將透過安全衛生設施之安全帶及安全母索系統之四點式錨定力學結構來探討其可靠度，經由試驗設計結果分析提出能達 100%可靠度之錨定設計。以目前業界普遍採用常見的防墜設施為主題，探討可撓性水平救生母索系統之末端錨具裝置強度，透過實驗的數據結果進行分析比較，本研究目的如下：

1. 探討不同樣式之後裝式錨定裝置，在不同混凝土試體中之拉拔試驗強度。

2. 探討於相同強度混凝土中，使用不同錨定裝置、不同厚度基板及不同吊環之高可靠度錨定。
3. 提供高處作業者於無護欄防護時，採具適當安裝安全防墜設施末端錨定裝置之建議參考。

1-3 研究流程

本研究針對不同樣本進行拉拔試驗，透過樣本差異性進行強度比較，本研究的流程如圖 2 所示。

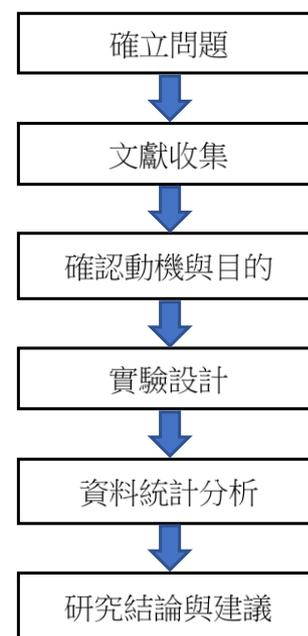


圖 2 研究流程圖

二、文獻探討

2-1 職業災害

透過相關文獻蒐集與資料分析統計，近 20 年來國內、外職業災害類型皆未曾改變，墜落類型仍居首。依據勞動部 108 年勞動檢查年報統計職災死亡人數，如圖 3 所示營造業死亡率總計 316 人中佔 168 人，與其他行業重大職災死亡人數比較，如圖 4 營造業死亡率達 53%最為嚴重，依勞動檢查統計年報災害類型比較，倒塌崩塌及墜落災害類型，如圖 5 兩者合計佔比高達 50%以上，明顯高於其他行業。綜合上述，我國每年所發生之重大職業災害有一半發生於營造業，而其中

又以倒塌崩塌及墜落居多[1]。

營造施工作業期間高處作業多，許多為營建作業所需構築設置的臨時構造物及相關安全設施，其本體的安全性常直接影響作業勞工的生命安全，職災案例分析中卻甚少提及墜落與水平母索的關連性，只論述作業移動時未正確使用安全帶及勾掛母索而導致失足墜落。對於水平母索各節點結構安全與使用甚少探討。



圖 3 勞動檢查統計年報[1]

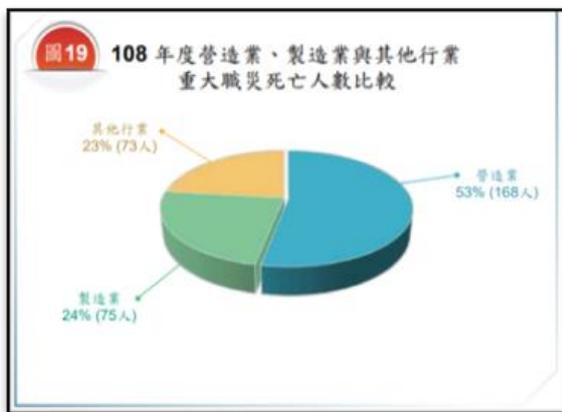


圖 4 勞動檢查統計年報[1]

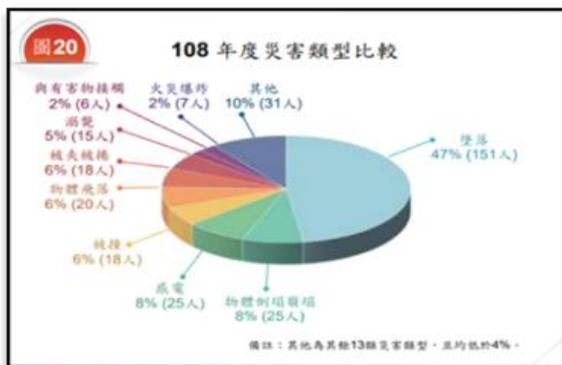


圖 5 勞動檢查統計年報[1]

2-2 錨栓設計規範

在一般情況下錨栓受力方式分為受拉力、受剪力或兩種力量混合，由於目前黏著錨栓之設計並無相關規範。後置混凝土錨栓品質試驗方法，國內亦未訂定，相關試驗方法只可參考美國混凝土學會 ACI 355.2 [3]之相關規定。

就「混凝土結構設計規範」，內政部營建署已於民國 100 年 7 月 1 日頒佈實施。除了修正全文，另增加錨栓設計「混凝土結構用錨栓」等其他規範。混凝土結構用錨栓如圖 6 區分為後置式錨栓與預埋式錨栓（法規設計方法於 ACI 318 code）[4]。後置混凝土錨栓品質試驗方法，國內未訂定相關試驗方法，則可參考美國混凝土學會 ACI 355.2 之相關規定。ACI 318-14 附篇 D 轉為正式章節第 17 章 ACI 318 委員會編訂結構混凝土建築規範 (ACI 318-14 Traditional Chinese) 結構混凝土建築規範解說 (ACI 318R-14 Traditional Chinese) [4]。

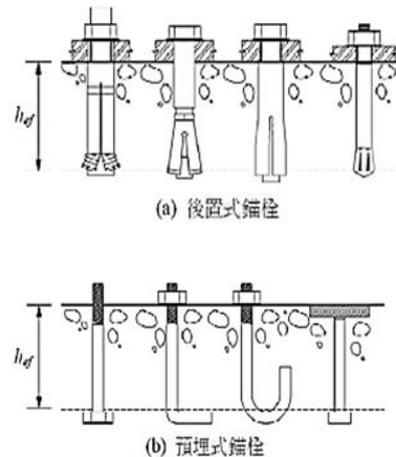


圖 6 後置式與預埋式錨栓

2-3 破壞試驗

錨栓設計相關文獻中，大部分研究錨栓受拉力行為。因此，在許多文獻中僅提供了力學理論所推導之理論公式或論述有限元素分析法所得到之結果相關的經驗公式。Cook, R. A.,(1993) [7]等人試驗了各式預埋式帶頭錨栓及黏著式、擴基式、灌漿式錨栓等共計 178 個試體分別於疲勞及衝擊載重力、承受靜力進行試驗，加以觀察各種錨栓系統破壞之型態。結果指出，在靜力的載重下，每一種型

式的錨栓皆會產生延性破壞導致錨栓本身斷裂，黏結破壞或錨栓被拉出脆性破壞而破壞則發生於黏著式、擴基式、灌漿式及膨脹式錨栓，至於在疲勞及衝擊載重下並不會有任何錨栓的破壞。而建議預埋式錨栓、膨脹式及擴基式錨栓之埋置深度可以依循 ACI 355 之預埋式錨栓埋置深度之規定[3]。Carrato (1996)[6] 等人做拉拔試驗以探討多種不同型式的預埋式或後置式錨栓受拉力作用力的破壞行為。各種錨栓之埋置深度介於 200 mm 至 480 mm 之間，在所進行的 44 個試驗當中，有 13 試體發生混凝土應力錐破壞，其中 7 個為擴基式錨栓，5 個為預埋式帶頭錨栓及 1 個預埋式鋼線嵌入錨定物，將這些發生混凝土應力錐破壞型式之錨栓的試驗值與 ACI 349 及 CCD (1995) 之設計公式作比較，發現試驗值均大於設計公式所計算之設計強度。埋置深度愈大，其極限拉力也就愈大。王起平、林毓芃、郭耀琳(2001)[8] 研究團隊對化學錨栓之拉力試驗與力學行為研究、埋設邊距不足對黏著錨栓拉力強度之影響、受拉力作用及在反覆荷重下之有限元素分析等一系列研究，皆以純混凝土小試體為主，試驗分析化學錨栓力學破壞行為。

三、試驗方法

本研究實驗，依據職業安全衛生法第六條：「雇主對下列事項應有符合規定之必要安全衛生設備、措施」及第五項：「防止有墜落、物體飛落或崩塌等之虞之作業場所引起之危害」及營造安全衛生設施標第 23 條：「雇主提供勞工使用之安全帶或安裝安全母索時，應依下列規定辦理第三項安全帶或安全母索繫固之錨定，至少應能承受每人 2,300 kg 之拉力」，CNS16123[2] 可撓性水平救生母索末端錨具及 CNS16122 錨定裝置內規定強度特性用途而設計。

3.1 試驗說明

3.1.1 實驗設計規劃

一般工程結構物最常使用混凝土之強度為 210 kgf/cm^2 。本實驗首先以繪圖軟體共設計規劃了三個試體區塊，於開挖完成後即進

行鋼筋鋪設及綁紮，在灌注預拌混凝土的過程中使用震動機確實將混凝土搗實，灌注完成後使用抹刀將混凝土表面確實抹平以利安裝試驗架及拉拔機。同時也灌注 30 個 $12 \text{ cm} \times 24 \text{ cm}$ 圓柱試體，將之浸在實驗室飽和石灰水池中養護 28 天，再由 TAF 核可之試驗所認證，待圓柱體抗壓試驗已到達預定強度才開始進行試驗。

於試體上畫記預定裝設各種組合之後裝式錨栓具的位置，並編定各種型式編號後依試驗步驟做抗拉測試實驗以利取得試驗數據。

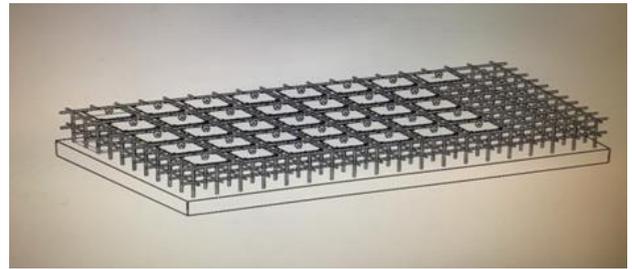


圖 7 試體設計規劃



圖 8 施做過程

3.1.2 試體及裝置材料說明

本試驗從開挖基地開始、鋼筋綁紮、灌注混凝土至圓柱試體抗壓試驗達到預定強度計耗時一個月；錨定開始拉拔試驗至完成計耗時二周。混凝土強度隨著時間、溫度而增強，本試驗為露天場所，在試驗期間天氣炎熱，不易控制混凝土強度不變而不影響試驗結果，故本試驗假設在試驗期間混凝土強度維持不變。為消弭材料不確定因素，故本試驗在鋼筋混凝土及各種後裝式錨具材料購買及備品準備上以完成一次性購足為原則，以確保本試驗假設所有製作之後裝式錨具，錨定及化學黏著劑品質一致。

表 1 混凝土及抗壓強度及養護

養護時間混凝土	14 天	21 天	28 天
3000 psi	(1)24.7	(1)31.1	(1)32.8
(210 kgf / cm ²)	(2)23.0	(2)28.6	(2)34.4
	(3)24.4	(3)31.2	(3)33.8
	平均	平均	平均
	245.3	309	343.3
4000 psi	(1)24.7	(1)32.2	(1)31.6
(280 kgf / cm ²)	(2)25.6	(2)32.1	(2)32.6
	(3)20.3	(3)30.1	(3)33.1
	平均	平均	平均
	240	320.6	330.7
5000 psi	(1)23.2	(1)35.0	(1)35.7
(350 kgf / cm ²)	(2)25.3	(2)34.8	(2)35.3
	(3)25.3	(3)33.0	(3)35.1
	平均	平均	平均
	251.0	349.3	360.7

3.2 整體設計規劃試驗基地

依樣本尺寸所需尺寸計算出其整地挖掘面積，依混凝土種類 3,000 psi (210 kg/cm²)、4,000 psi (280 kg/cm²)、5,000 psi (350 kg/cm²) 分為三區，依試體每區寬 220 cm x 長 380 cm x 深 30 cm 需求進行開挖，基礎開挖同時也量測深度，隨時告知土機怪手駕駛深度。確認地基開挖後先夯實(見圖 7)，與長寬及深度量測確認後加以整平(見圖 8)，開始進行基地#3 鋼筋進行鋼筋綁匝以寬 200 cm x 長 360 cm x 深 30 cm 做綁匝，長寬二端各加挖 10 cm(見圖 8)，進行地基鋼筋綁匝尺寸量測確認#3 鋼筋組配，密度間距縱向 20 cm x 橫向 20 cm 深度 15 cm ± 2 cm(見圖 7)，灌漿現場抽檢混凝土狀況，並用試體取樣送實驗室分析如圖 8。澆注混凝土及抗壓強度及養護(見表 1)，每個區域依不同強度混凝土，放置 1/4 吊環、3/8 吊環及 1/2 吊環與不同吊環，在試體為 20cmx20cm 設置不同變數之基座，螺栓固定方式有膨脹式、內迫式、內牙式及植筋式四種，植入螺絲深度約 10 cm±1cm，試體放樣及放置(見圖 9)，後置式錨定 3/8(外徑 9 mm)採用 4 種不同類型螺栓打入 10 cm±1 cm 深度之混凝土中，固定安裝於 3 種不同強度混凝土，

螺栓固定方式有膨脹式、內迫式、內牙式及植筋式。



圖 9 試體固定安裝

本研究之後裝式錨定採用 4 種不同類型螺栓打入 10 cm±1 cm 深度之混凝土中，固定安裝於 3 種不同強度混凝土，螺栓固定方式有：膨脹式 3/8"×4"【ψ7.6 mm×101.6 mm】、內迫式 3/8"×2"【ψ7.6 mm×50 mm】+【ψ7.6 mm×70 mm 螺桿】、內牙式 3/8"×2"【ψ7.6 mm×50 mm】+【ψ7.6 mm×70 mm 螺桿】及植筋式 3/8"×4"【ψ7.6 mm×101.6 mm】，以試驗不同螺栓固定方式與其抗拉強度及變形量之間變化，以尋找印證符合法令 2300 kgf/人及 CNS 與可靠度要求。並與 CNS16123 規範比較，要求 2000 kgf 本體在位移 1 mm 可靠度下，是否能配合不確定錨定因素使其本體能發揮百分之百效率及可靠度並確定錨定整組連結抗拉強度可在 20 kN 不能破斷之要求。

3.3. 拉拔強度試驗

本研究以 30 kN 之油壓機於不同條件下在裝置錨具裝設於 3 種混凝土上進行拉拔強度試驗，紀錄錨具裝置於不同混凝土抗拉強度之破壞模式，探討防墜設施設置的末端錨定固定方式及抗拉強度之可能危害並提供施工參考設置。研究參數採用不同類型之錨具

裝置，包括試體基材為 3 種混凝土抗壓強度【250 kgf/cm²、280 kgf/cm²、350 kgf/cm²】埋入深度【10 mm】，完成試驗樣本合計 108 筆。



圖 10 拉拔強度試驗

四、研究結果分析

4.1 拉拔試驗外觀之破壞模式

4.1.1 螺栓螺帽斷裂模式

當埋置深度 10cm 且混凝土強度達到 210 kgf/cm² ~ 350 kgf/cm² 以上時，後裝植筋式錨定材料於混凝土抗拉強度並未破壞而錨定將會先受到拉力強度破壞，破壞強度在 2,470-2,880 kgf 時會產生螺栓螺帽之斷裂模式破壞(圖 11)。

4.1.2 錨定被拔出模式

抗拉試驗發現，內迫式或內牙式於埋設深度不足時，或錨栓、黏著劑與混凝土之握裹長度不足，錨栓將因未能達到預定拉力強度即被拉出破壞。在施工過程中因鑽孔內泥塵未完全清乾淨，導致錨定膨脹與混凝土面握裹力不足，屬於人為施工不當(圖 11)。

4.1.3 錨具吊環斷裂破壞模式

抗拉試驗錨具構件之吊環，當埋置深度 10 cm 且混凝土強度達到 210 kgf/cm² ~ 350 kgf/cm² 以上時，錨具構件之吊環於混凝土抗拉強度，尚未破壞時及基板未變形前，錨具構件之吊環會於 1,710 kgf 達到拉力破壞強度，產生錨具構件之吊環斷裂模式破壞如(圖 11)。



圖 11 拉拔試驗外觀之破壞模式

研究中發現 3,000 psi 混凝土板厚 2 mm 且 1/4" 吊環中，四種樣式差異不大，但其吊環在拉力 1,500 kgf-2,000 kgf 左右即產生斷裂，足以證明 1/4" 吊環不能使用在安全設施上(圖 12)。

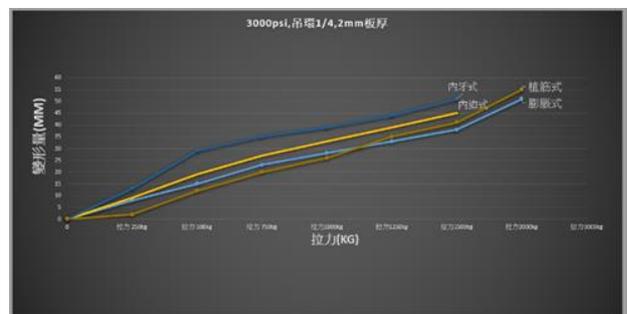


圖 12 3000 psi 混凝土板厚 2 mm.1/4" 吊環時拉拔強度比較

4.1.4 錨具基板厚度變形破壞

本實驗共採 2 mm、4 mm、6 mm 3 種板厚，抗拉試驗後錨具之基板厚度，當混凝土強度達到 210 kgf/cm² ~ 350 kgf/cm² 以上時，錨具構件之基板於混凝土抗拉強度尚未破壞時，2 mm 基板已變形，產生錨具構件之基板模式破壞。

4.2 混凝土強度對抗拉結果

探討各種樣式所產生之數據值之關連性。埋入深度 L=101.6 mm 時，後裝膨脹式、後

裝內迫式，後裝內牙式及後裝植筋式等四種錨定在 3,000 psi 時之各種錨定比較，結果顯示四種錨定埋入深度【10 cm】其抗拉強度不因其混凝土強度影響。

4.3 板厚對抗拉結果

根據實驗破壞模式，從實驗數據得知基板厚度，其抗拉強度 2 mm 基座變形大當數據達 3,000 kgf 時變形大，可靠度不佳，建議採用 4 mm 板厚，其抗拉強度於 3,000 kgf 時仍無變形情形。

4.4 吊環對抗拉結果

根據實驗破壞模式，從實驗數據得知吊環尺寸之選擇，其抗拉強度 1/4 吊環，其抗拉強度於 1,700 kg~2,000 kg 極可能發生破斷現象，未達法令規定，不可靠，3/8 之吊環於抗拉 3,000 以上仍無破斷情形，1/2 之吊環其抗拉強度達 3,000 kg 以上仍無變形狀況。

4.5 固定方式對抗拉結果

依實驗數據結果發現末端錨具在 5,000 psi 混凝土板厚 6 mm 且 1/2" 吊環中，內迫式呈現不穩定狀況，尤其在 750 kgf 拉力中，變形量已達 6 mm，且在 1,000 kgf 更是顯著其不穩定，反觀植筋式及膨脹式，呈現幾何曲線，且變形量遠低於其他樣式(圖 13)。

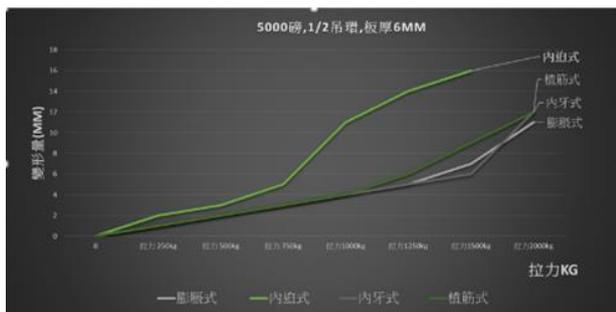


圖 13 5000 psi 混凝土板厚 6 mm.1/2" 吊環時拉拔強度比較

1、於後裝式四種固定錨定樣式中，錨定裝置強度可明顯被比較出，同條件下：膨脹式 > 植筋式 > 內牙式 > 內迫式。在業界工程中採用內迫式卻是佔有最大比例，若施工技術層面無法提升，防墜設施將是一大隱憂。

- 2、若以張力理論而言，內迫式錨定強度可達要求，但會有下述狀況而影響強度(1)表面打滑 (2)旋轉螺桿時，未張開而不知 (3)螺桿施力旋轉時易斷裂，造成可靠度大弧度降低，在本次研究中可信度最低；若使用在安全防墜系統仍有待商榷。
- 3、內牙式錨定孔會因乾淨與否和強度有直接因果關係，但以可靠度而言不及黏著式，但錨定打滑，或孔穴太深，或試體強度不足，或鑽孔為到達一定深度，強度則無法達到預期，影響其可靠度，此問題有待施工技術人員之技術提昇來克服。而降低抓著力，反而可靠度降低。
- 4、後裝植筋式孔內因為清潔乾淨與否和強度有直接因果關係且施工較費時，但可靠度較高，強度也比其他錨定方式為低，在陳宏亮老師專利中提到，為防止此盲點，結合植筋式和膨脹式優點，使其可靠度不因外在因素而降低強度。

後裝式錨具之錨定螺絲，其錨定螺絲固定方式其強度之大小排列為：植筋式 > 膨脹式 > 內牙式 > 內迫式，由各種錨具拉拔比較，顯示後裝式膨脹螺絲及植筋式膨脹螺絲其抗拉強度可達 3,000 kgf/人，遠高於其它錨具螺絲，防墜設施之錨具強度應可參考使用。後裝內迫式及後裝內牙式之拉拔強度明顯偏低，且穩定性不足，若使用於水平救生系統安全母索防墜措施之末端錨具固定螺絲，無法達到法令最低要求。

五、結論與建議

5.1 結論

由本實驗研究結果發現

1. 後裝式錨具之錨定螺絲種類，埋設於不同強度混凝土並不影響其抗拉強度。
2. 後裝式錨具之錨定螺絲其固定方式其強度之大小排列依序為：植筋式 > 膨脹式 > 內牙式 > 內迫式，建議使用植筋式或膨脹式。
3. 內迫式或內牙式錨具之拉拔強度無法達到安全母索錨具強度之要求，膨脹式及植筋式之拉拔遠高於其他錨具裝置。

4. 錨定埋入深度【10 cm】其抗拉強度不因其混凝土強度影響，但其吊環 1/4 的規格，抗拉強度無法達到法令之要求。
5. 水平救生系統中之錨具扣環結構不建議使用 1/4 尺寸之吊環，因其抗拉強度於 1700 kgf 時均為斷裂，致可靠度極低，若使用於安全設施，將是一大隱憂。
5. BSI(2012)，BSEN795，BSI.
6. Carrato, P.J., Krauss, K.W. and Kim, J.B., (1996). "Tension Tests of Heavy-Duty Anchors with Embedments of 8 to 19 Inches", ACI Structural Journal, 93 (3), 360-368.
7. Cook, R. A., (1993). "Behavior of Chemically Bonded Anchors", Journal of Structural Engineering, ASCE, 119 (9), 2744-2762.

5.2 未來研究方向與建議

目前國內對於墜落意外災害預防僅是以查核安全設施及設備為主，僅能減少意外墜落的傷亡並不能防止災害發生故成效有限。在選擇錨固點時大多數人僅以能否承受 5,000 磅(2,300 kg)的負載為標準，但在掛接時能承載 5,000 磅(2,300 kg)的錨固點有時在達到其荷載之前即已將牆壁或建築物撐裂，故其相對強度可能會在 5,000 磅(2,300 kg)之前即已失效。

本研究依試驗結果完成防墜設施性能分析，可提供施工單位在施工時選用錨具組合相關構件參考，以達到落實防墜設施之使用及預防墜落災害為目標。

建議後續研究者可針對後裝式末端錨具以更創新的材料來做設計實驗，提出更具堅固與強度的錨具以確保高處施工作業者有更足夠的安全。

參考文獻

1. 勞動部勞動及職業安全衛生研究所，營造工程水平母索安全實務宣導會，高雄，2020。
2. CNS 16123，中華民國國家標準(2019年)。防止由高處墜落之個人防護具-單點錨定裝置，中華民國經濟部。
3. ACI Committee 355, 《Qualification of Post-Installed Mechanical Anchors in Concrete and Commentary (ACI 355.2-07)》，American Concrete Institute, Detroit, 2007.
4. ACI Committee 318, 《Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318R-05)》，American Concrete Institute, Detroit, 2005.

消防主管人格特質、工作壓力與工作適應之研究

王和源¹ 黃凱翔² 何春玲³ 潘妍廷⁴

¹ 國立高雄科技大學土木工程與防災科技研究所特聘教授

² 國立高雄科技大學土木工程與防災科技研究所助理教授

³ 中國華僑大學土木工程學院工程管理系副教授

⁴ 國立高雄科技大學土木工程與防災科技研究所研究生

摘要

消防工作長時保持待命狀態以執行救災、救護勤務，造成消防員經常處於身心健康承受極大壓力，而過去公務部門僅在乎指標績效及業務層面問題，卻忽略個體所衍生出行為態度及對組織影響。以消防工作管理階層幹部而言，面對繁雜且多變的工作環境，工作壓力與工作適應表現將會直接衝擊到整個消防機關的運作情形。

本研究以高雄市政府消防局領有主管加給之人員為調查對象，以網路問卷方式進行施測，回收 172 份，有效樣本 150 份，有效問卷率為 87.2%。調查結果經由敘述性統計分析、獨立樣本 t 檢定、單因子變異數分析、皮爾森相關分析等統計方法，進行資料處理分析以考驗研究假設，以供政府機關首長於職務分配與訓用主管人員時，藉以將人才適得其所的運用於各層面或職務，並減少工作適應不佳之情況發生。

關鍵字：消防主管、人格特質、工作壓力、工作適應

The Study on Personality Traits, Work Pressure and Work Adaptation of Fire Supervisors

Wang He-Yuan¹ Huang Kai-Hsiang² Chun-Ling Ho³ Pan Yan-Tyng⁴

¹ Professor, Dept. of Civil Engineering, Kaohsiung University of Science and Technology

² Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Kaohsiung University of Science and Technology

³ Assistant Professor, College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen, China.

⁴ Master student, Dept. of Civil Engineering, Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

The rotation time of firefighting works is always on standby to perform disaster relief and ambulance duties. This has caused great pressure on the health of firefighters. In the past, the government ignored the behaviors and attitudes derived from individuals and the impact on the organization. The supervisors often face a complex and changeable of working environment, and work pressure and performance will directly impact the operation of the entire fire department.

The method of the study adopts questionnaire survey and the subject are the persons in charge of the Fire Department of Kaohsiung City Government. The survey was conducted by means of online questionnaires, and 172 copies were collected including 150 valid samples (the valid questionnaire rate was 87.2%). The results of the questionnaire were processed and analyzed to test the research hypothesis through statistical methods such as descriptive statistics,

independent sample t test, one-way analysis of variance and Pearson Correlation analysis.

Keywords: firefighting supervisors, personality traits, work pressure, work adaptation

一、前言

1-1 研究背景與動機

當有火災或其他災害發生之時，各縣市消防局救災救護勤務指揮中心在接獲民眾報案後立即派遣適當人員、車輛出動，而救災救護勤務指揮中心及轄區分隊長以上之各級消防指揮官即需將平時蒐集各單位之資料，例如：建築物基本資料、水源位置等相關消防力資料，迅速做出正確的研判分析與合宜指揮調度，包括消防力(消防車輛、滅火藥劑、救災裝備與器材)、消防人力之調度與配置等情形做妥善恰當處理。因此，第一線消防分隊長的火災專業判斷力與救災執行力，對於救災時機、搶救效果及能否完成任務有著絕對之影響，其擔任角色之重要性實為不可言喻。

在現代化追求高效率、高效能的社會氛圍下，職場所帶來的工作壓力已無可避免，107年勞動部頒布「工作相關心理壓力事件引起精神疾病認定參考指引」，認定工作壓力所造成的精神疾病傷害屬職業病種類其中之一。而消防工作每項任務均與民眾生命財產息息相關，消防人員所面臨之工作壓力可見之大。惟壓力並非僅產生負面影響，適度工作壓力更是造就進步的原動力，但過多的壓力除影響身心靈之健康外，甚至可能會發生無法挽回的憾事。而消防領導階層幹部為具有防火防災消防專業學識之人才，不僅須綜理各項勤業務並肩負團隊榮譽成敗責任，在火場上指揮調度車輛、裝備器材、人力亦為其職責所在，因此其須具備特殊人格特質及領導風格，方能凝聚組織向心力並激勵成員之潛力，進而影響組織效能。

1-2 研究目的

基於上述研究背景與動機，透過問卷調查方式進行本研究，試圖了解消防主管之人格特質、工作壓力與工作適應之現況與關聯，並進行探討，以期達成下列目的：

- 1、瞭解消防主管本身具備之人格特質之取向。
- 2、瞭解消防主管於執行各項勤、業務時所面臨之工作困境與壓力來源。
- 3、從生理、心理、家庭關係等層面來探討消防主管對於適應工作之狀況。
- 4、瞭解消防主管之人格特質對工作壓力及工作適應之差異程度，並衡量構面之關聯性，期由本研究結果，提出相關建議與改善措施，作為未來消防主管尋求壓力紓解及提升工作適應的有效對策。

二、文獻回顧

2-1 消防組織與工作特性

消防法第一條明定「預防火災、搶救災害及緊急救護」乃消防三大任務，目的是為維護公共安全、確保人民生命財產，為利消防任務之遂行，消防組織須執行許多不同勤務，而絕大多數執勤單位均由全國各地的消防分隊擔任。現今之消防勤務範疇涵蓋層面極廣，除火災搶救、緊急救護及水災、震災等各種災害需出勤搶救外，乃至於消防安全檢查、防災宣導等各種行政指導作為等等，均屬於目前消防勤務之範圍。

消防工作性質具高度危險性、全年無休24小時待命、強調團隊合作，與火災具有之成長性、不定性、偶發性等特性相似。消防任務之廣泛性與機動性極高，執勤內容項目與時間不易明確規範且不受限。近年來，更因社會經濟環境快速變遷使得消防人員須負擔工作範圍日趨增加。

2-2 人格特質之相關研究

人格特質是個體與他人、外在環境事物等因素相互影響作用下，表現於內在心理、外在行為各方面等特質，其理論內涵之所以被認為具行為預測力，主要係因其張顯出獨特性、穩定性與持久性。

有關人格特質相關理論存在多元觀點，

運用範圍亦相當廣泛，目前常運用於預測行為效力之之性格類型以 A/B 型性格、內外控人格特質、五大人格特質、組織行為人格特質等居多。

研究者/ 年份/ 理論類型	理論內容
Rotter (1966) 內外控 人格特質	<ol style="list-style-type: none"> 1. 內控人格(Believe in internal control)：認為個人可控制或預測事件結果，相信自我行為之成敗是因本身努力而得，故行為上較主動、具自信心。 2. 外控人格(Believe in external control)：認為運氣、機會、命運與複雜的外在環境等影響事件結果，非個人能力所能控制，故行為上較被動、缺乏自信。 3. 內外控人格特質僅相對程度的差異，非絕對二分法。
Friedman & Roseman (1974) A/B 型人 格	<ol style="list-style-type: none"> 1. A 型人格：屬積極進取型，具有高度競爭性、行動力，充滿企圖心，在職場上成就慾望較高，對時間敏感度強烈較缺乏耐性。 2. B 型人格：屬沉著溫和型，做事冷靜、不急不徐，穩定度較高，缺乏時間緊迫感。 3. A/B 型人格非完全對立面，即 A 型人格亦可能包含部分 B 型人格。

研究者/ 年份/ 理論類型	理論內容
Costa & McCrae (1992) 五大 人格特質	<p>NEO-PI-R 人格量表：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 外向性 (Extraversion)：人際互動數量與舒適度感受程度，喜好刺激冒險需求，指標數值偏高則表示其越外向。 2. 開放性 (Openness to Experience)：對陌生環境容忍力和好奇心，反映出主動探索程度及興趣多寡、深度。若興趣趨於廣泛，則其開放性越高。 3. 情緒 敏 感 性 (Neuroticism)：情緒穩定度和負面情感刺激的自我調節不良反應傾向。 4. 親和性 (Agreeableness)：反映在與他人合作關係和諧方面的人際導向。親和性程度高的人較善解人意，處事圓融。 5. 勤 勉 正 直 性 (Conscientiousness)：追求目標之專注程度，通常具有工作狂、完美主義者和強迫行為等傾向。

研究者/ 年份/ 理論類型	理論內容
Robbins (2017) 組織行為 人格特質	<p>在組織中影響員工的行為特質，共分為 5 項：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 成就取向 (Achievement orientation)：追求挑戰、克服困難及實現自我的程度。對事情懷抱完美主義的期望，故工作表現較佳。 2. 權威傾向 (Authoritarianism)：個人追求特殊職位及權勢之心態，易產生主觀論斷觀點，不易信任他人及抗拒變革。 3. 權術主義 (Machiavellianism)：存在「權謀」之涵義，認為為達目的，可以不擇手段。強調現實主義、重視勝利。 4. 風險取向 (Risk)：指決策者承擔或規避風險之意願，且對時間和情報資訊之知覺程度有所影響。 5. 內、外控取向 (Locus of control)：個人自認控制命運的程度，對工作投入程度、滿足感具影響性。

2-3 工作壓力之相關研究

近年來從消防人員工作壓力相關研究文獻發現：個人背景(如：性別、年齡、年資、學歷)、服務地區、擔任職務等為主要探討影響工作壓力的相關變項。其中因研究年代與研究對象的不同，而有不一樣的研究結果。而研究者大多認為消防人員工作壓力均呈現高度緊繃狀態，且影響層面相當廣泛，包含工作滿意度、情緒管理、安全績效、工作績效之影響、造成職場倦怠等；而造成壓力來源有工作因素、家庭因素、環境因素、個人因

素、組織因素等，其中工作本身之壓力的影響最大，主要的工作壓力來源為長時間待命服勤、面對工作危險環境。

2-4 工作適應之相關研究

工作適應為個人之能力及需求與工作環境進行適當之協調性。亦即就業者發自內心主動配合工作限制或要求，能主動學習或從中提升能力及培養興趣，以致克服工作上遭遇之困境，並獲得成就與滿足，進而自我實現。

目前常見應用的工作適應理論，以明尼蘇達工作適應理論(The Minnesota Theory Of Work Adjustment)及 Hershenson 職業發展過程模式 (Model Of Vocational Development Process) 居多。而影響工作適應之面向歸納為個人因素及環境因素等兩大類。

三、研究設計

3-1 研究架構與假設建立

本研究目的主要為探討消防主管之人格特質、工作壓力及工作適應等三者間之影響關係。爰此，根據前述文獻回顧探討與理論基礎，創建本研究架構如圖 1 所示。

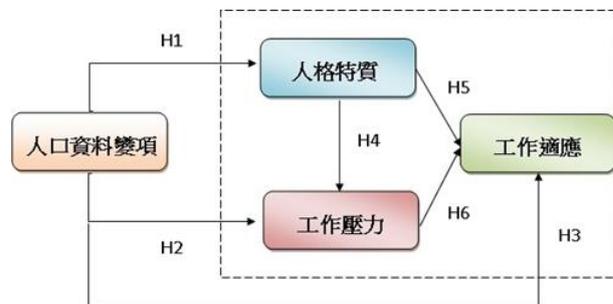


圖 1 研究架構

該架構內容包含「人格特質」、「工作壓力」、「工作適應」等三個構面及六項研究假設，以進行假設檢驗人口基本資料對各構面因素之差異性及關聯性之探討，如表 1 所示。

表 1 研究假設內容

假設	假設內容
H1	人口資料變項對於人格特質呈現顯著差異。
H2	人口資料變項對於工作壓力呈現顯著差異。
H3	人口資料變項對於工作適應呈現顯著差異。
H4	人格特質對於工作壓力呈現顯著相關性。
H5	人格特質對於工作適應呈現顯著相關性。
H6	工作壓力對於工作適應呈現顯著相關性。

3-2 研究問卷編製

依據本研究架構與假設之建立，此問卷調查內容分為二大部份，首先為個人背景資料、另一部份為人格特質量表、工作壓力量表、工作適應量表間之題目。

受測者之基本資料題目設計以名義尺度進行量測，其調查項目分別為：(1)性別：分為「男」、「女」；(2)年齡：分為「30歲以下」、「31-40歲」、「41-50歲」、「51歲以上」；(3)服務年資：分為「10年以下」、「11-20年」、「21-30年」、「31年以上」；(4)工作職務性質：分為「外勤主管職務」、「內勤主管職務」；(5)教育程度：分為「高中/職」、「專科」、「大學」、「研究所以以上」。

人格特質量表採用國外學者 Robbins 提出組織行為的五種人格特質定義為基礎，另考量消防工作的特性，以人民生命財產安全為首要任務，因此本研究在人格特質項目，僅取用成就取向、權威取向、風險取向、內外控取向等構面作為衡量的項目。

工作壓力量表透過文獻探究結果及考量研究對象之特性，綜合歸納整理消防人員壓力來源分為四個層面，分為工作負荷、家庭照顧、內在衝突、溝通協調。

依據影響工作適應之個人因素(如性別、服務年資、年齡、教育程度、人格特質)及環境因素(如：組織制度、人際關係、工作性質等因素)為主而展開工作適應構面之題項架構，將工作適應量表分為工作環境、工作能力、工作期待、人際關係等四個子構面。

本研究問卷採用李克特(Likert)五點尺度評量方式，請受測者認定該題目之認同程度，依其感受或最貼近自身實際情形進行勾選。每一道題目配分為「非常同意」給予5分、

「同意」給予4分、「普通」給予3分、「不同意」給予2分、「非常不同意」給予1分。

3-3 研究對象與抽樣方法

本研究所指「消防主管」，即依「警察人員人事條例」、「公務人員陞遷法」所稱，官等警正四階以上，佩階一線四星以上，且俸給領有主管加給之消防人員。主要針對高雄市政府消防局領有主管加給之消防員為調查對象，問卷內容以人格特質、工作壓力、工作適應量表為主，以探討各變項因素間之關係。

本研究之預試樣本以便利抽樣(convenience sampling)共抽取36名消防主管為預試樣本。為權衡各項條件並兼顧樣本代表性與有效性，以200份為樣本數，受測者的抽樣方式採用立意抽樣(purposive sampling)。

3-4 資料分析方法

依據研究所得調查數據資料，運用統計套裝軟體「SPSS」進行分析探討，茲將主要運用之統計方法與步驟分述如下：

- 1、敘述性統計分析主要為問卷中受測者之個人基本資料變項，包括性別、年齡、服務年資、工作職階、教育程度等資料，與人格特質、工作壓力、工作適應等三個構面，來進行樣本的次數分配分析，以瞭解樣本資料變項之結構分佈情形。
- 2、信度為測量的可靠性，係指測量結果的一致性或穩定性，亦可視為測驗結果受測量誤差影響之程度。
- 3、效度是指衡量是否能正確地測出所需衡量之特質或功能程度，即測驗之題目內容是否周延、具代表性、適切性、並確實包含所欲測量主題的內涵。
- 4、獨立樣本t檢定主要探討「性別」與「工作職務性質」在三個構面「人格特質」、「工作壓力」、「工作適應」之顯著影響性。
- 5、單因子變異數分析主要探討「年齡」、「服務年資」、「教育程度」在三個構面「人格特質」、「工作壓力」、「工作適應」之差異情形。
- 6、皮爾森相關分析為探討消防主管之「人

格特質」、「工作壓力」、「工作適應」等三個構面間之相關性。

基本資料	項目	樣本數	百分比
	研究所以上	53	35.3

四、樣本資料分析

4-1 問卷發放與回收

本研究共回收 172 份問卷，扣除無效問卷共 22 份，主要是因填答時間過短或整份問卷僅填寫單一答案者，判斷該等問卷品質可虞，而逕予刪除，冀從此問卷所調查之數據，能呈現最真實之現況。最後，有效問卷共計 150 份，有效問卷比率為 87.2%。針對受測者基本資料進行敘述性統計分析，彙整如表 2。

受測者人口便項統計上，以男性共 142 人 (94.7%) 居多，顯示兩性在擔任消防主管職務上比例差異懸殊。在年齡方面，以 31-40 歲共 65 人 (43.3%) 所佔比例最高，顯示消防主管年齡多以 40 歲以下之青壯年族群為多數。在服務年資方面，以 11-20 年以下年共 58 人 (38.7%) 所佔比例最高，顯示服務年資多寡非為影響升遷主管職務之單一因素。在工作職務性質方面，以外勤主管職務共 130 人 (佔 86.7%) 所佔比例最高，顯示消防單位外勤幹部仍為多數，並以災害搶救、緊急救護為首要任務，可顯現消防工作非同一般公務單位組織編制。在教育程度方面，以大學畢業共 68 人 (45.3%) 所佔比例最高。

表 2 受測者個人基本資料分析

基本資料	項目	樣本數	百分比
性別	男	142	94.7
	女	8	5.3
年齡	30 歲以下	42	28.0
	31-40 歲	65	43.3
	41-50 歲	30	20.0
	51 歲以上	13	8.7
服務年資	10 年以下	57	38.0
	11-20 年	58	38.7
	21-30 年	27	18.0
	31 年以上	8	5.3
工作職務性質	外勤主管職務	130	86.7
	內勤主管職務	20	13.3
教育程度	高中/職(含以下)	4	2.7
	專科	25	16.7
	大學	68	45.3

4-2 信度與效度分析

- (一) 本研究各量表主要採用之信度分析方法為 Cronbach' s α 值分析法。人格特質量表之構面平均 Cronbach' s α 值為 0.718，工作壓力量表之構面平均 Cronbach' s α 值為 0.841，工作適應量表之構面平均 Cronbach' s α 值為 0.852。可顯見量表構面平均 Cronbach' s α 值均大於 0.70，具高度可靠性與穩定度。
- (二) 專家效度方面邀請 5 位曾任不同層級且具內、外勤豐富經驗之消防幹部及專家學者針對問卷題型表中之內容、表達意思邏輯、題型是否適合等進行審查後給予建議修正，以建立本問卷之專家效度，經彙整專家學者之建議，刪除不適合之內容題型及調整題序，經專家效度程序後完成問卷題項共 42 題。

4-3 各構面敘述性統計分析

由表 3 顯示在人格特質表現以「成就取向」構面平均數為 3.8778 為最高，說明受測者認為於消防工作中表現與貢獻，能獲得自我實現心裡滿足感；而「風險取向」構面平均數為 3.0067 為最低，顯示因大部分消防搶救工作攸關人命，故受測者於採取風險考量上較為保守。

表 3 人格特質構面之敘述性統計分析

子構面	構面平均數
成就取向	3.8778
權威傾向	3.4133
風險取向	3.0067
內控取向	3.0444

由表 4 顯示在工作壓力表現以「家庭照顧」構面平均數為 3.6178 為最高，說明受測者之傾向認為分配在家庭與工作時間上有比例失衡之情形；而「內在衝突」構面平均數為 3.1311 為最低，顯示受測者實際執行工作情況與訂定之理想目標差別不大。

表 4 工作壓力構面之敘述性統計分析

子構面	構面平均數
工作負荷	3.3578
家庭照顧	3.6178
內在衝突	3.1311
溝通協調	3.3289

由表 5 顯示在工作適應表現以「人際關係」構面平均數為 4.0822 為最高，說明受測者之傾向認為當團隊遭遇困境時，帶領團隊度過低潮尤為重要，且向團隊成員請益亦是方法；而「工作環境」構面平均數為 2.8689 為最低，顯示受測者對於目前內部工作升遷體制與外部工作實際環境較為無法適應及認同。

表 5 工作適應構面之敘述性統計分析

子構面	構面平均數
工作環境	2.8689
工作能力	3.6800
工作期待	3.4911
人際關係	4.0822

4-4 人口變項對人格特質之差異分析

為探討不同人口背景變項與人格特質構面之間差異性分析，利用獨立樣本 t 檢定與單因子變異數分析進行檢測，若差異達顯著水準，則採用 Scheffé 檢定進行事後比較以瞭解差異情形。檢定結果如表 6、表 7、表 8、表 9、表 10 所示。

人口變項之「性別」、「年齡」、「工作職務性質」對「人格特質」構面之顯著性無差異。人口變項之「服務年資」對「人格特質」構面呈現有顯著差異，服務年資為「11-20 年」的消防主管在風險取向之正向性得分顯著高於服務年資為「21-30 年」的消防主管；推論原因為較資淺之消防主管，因工作經驗較為不足，對於消防工作勤、業務較不熟稔以及在人際關係上尚未建立基礎關係，在規劃策略方面較易參考自我經驗值判斷決定，因此有所差異。

人口變項之「教育程度」對「人格特質」構面呈現有顯著差異，教育程度為「研究所以上」的消防主管在成就取向、內控取向之得分顯著高於教育程度為「大學」的消防主

管；推論原因為受繼續教育學習過程其中最為重要為表達能力及邏輯性的培養，亦為展現個人自覺性高低程度，較易相信自我控制環境及行為結果，願意花時間主動學習，過程中也對工作較易產生熱情動力。因此在工作當中較易保持不斷學習的能力與探索未知領域，並在擅長領域中一展專業長才，因此其在成就取向、內控取向等子構面上較教育程度為「大學」者較為高昂。

表 6 不同性別在人格特質上差異分析表

子構面	性別	人數	t 值	顯著性
成就取向	男	142	.494	.622
	女	8		
權威取向	男	142	1.075	.284
	女	8		
風險取向	男	142	.037	.970
	女	8		
內控取向	男	142	1.160	.248
	女	8		

表 7 不同年齡在人格特質上差異分析表

子構面	年齡	人數	F 值	顯著性	事後比較
成就取向	①30 歲以下	42	.288	.834	—
	②31-40 歲	65			
	③41-50 歲	30			
	④51 歲以上	13			
權威取向	①30 歲以下	42	.501	.683	—
	②31-40 歲	65			
	③41-50 歲	30			
	④51 歲以上	13			
風險取向	①30 歲以下	42	1.487	.221	—
	②31-40 歲	65			
	③41-50 歲	30			
	④51 歲以上	13			
內控取向	①30 歲以下	42	1.124	.342	—
	②31-40 歲	65			
	③41-50 歲	30			
	④51 歲以上	13			

表 8 不同服務年資在人格特質上差異分析表

子構面	服務年資	人數	F 值	顯著性	事後比較
成就取向	①10 年以下	57	.040	.989	—
	②11-20 年	58			
	③21-30 年	27			
	④31 年以上	8			
權威取向	①10 年以下	57	.467	.706	—
	②11-20 年	58			

子構面	服務年資	人數	F 值	顯著性	事後比較
風險取向	③21-30 年	27	2.896	.037*	②>③
	④31 年以上	8			
	①10 年以下	57			
	②11-20 年	58			
內外取向	③21-30 年	27	1.863	.138	—
	④31 年以上	8			
	①10 年以下	57			
	②11-20 年	58			

表 9 不同工作職務性質在人格特質上差異分析表

子構面	工作職務性質	人數	t 值	顯著性
成就取向	外勤主管職務	130	.497	.620
	內勤主管職務	20		
權威取向	外勤主管職務	130	1.177	.241
	內勤主管職務	20		
風險取向	外勤主管職務	130	.682	.497
	內勤主管職務	20		
內控取向	外勤主管職務	130	-.168	.867
	內勤主管職務	20		

表 10 不同教育程度在人格特質上差異分析表

子構面	教育程度	人數	F 值	顯著性	事後比較
成就取向	①高中/職(含以下)	4	3.051	.031*	④>③
	②專科	25			
	③大學	68			
	④研究所以上	53			
權威取向	①高中/職(含以下)	4	1.174	.322	—
	②專科	25			
	③大學	68			
	④研究所以上	53			
風險取向	①高中/職(含以下)	4	1.644	.182	—
	②專科	25			
	③大學	68			
	④研究所以上	53			
內控取向	①高中/職(含以下)	4	3.033	.031*	④>③
	②專科	25			
	③大學	68			
	④研究所以上	53			

4-4 人口變項對工作壓力之差異分析

為探討不同人口背景變項與工作壓力構面之間差異性分析，利用獨立樣本 t 檢定與單因子變異數分析進行檢測，若差異達顯著水準，則採用 Scheffé 檢定進行事後比較以瞭解差異情形。檢定結果如表 11、表 12、表 13、表 14、表 15 所示。

人口變項之「性別」、「年齡」、「工作職務性質」對「工作壓力」構面之顯著性無差異。人口變項之「年齡」對「工作壓力」構面呈現有顯著差異，其中年齡為「31-40 歲」及「41-50 歲」的消防主管在家庭照顧之得分顯著高於年齡為「30 歲以下」的消防主管；推論原因為現代中壯年常被喻為『上有父母，下有孩子』的三明治世代，大多育有仍需倚賴父母生活年紀的小孩，或需要適當關注與照顧身體狀況的雙親，又因消防工作輪值時間較長，致使常無法兼顧婚姻家庭中與配偶的相處、家庭照顧責任、子女的教養問題等，而感受到無比沈重的壓力。

人口變項之「服務年資」對「工作壓力」構面呈現有顯著差異，其中服務年資為「10 年以下」的消防主管在工作負荷之得分顯著高於服務年資為「21-30 年」的消防主管；推論原因為年資較少者因工作經驗不足，對於消防工作勤、業務較不熟稔以及人際方面尚未建立良好關係，而感受到較強烈的工作壓力。

人口變項之「教育程度」對「工作壓力」構面呈現有顯著差異，其中教育程度為「專科」的消防主管在溝通協調之得分顯著高於教育程度為「研究所以上」的消防主管；教育程度為「專科」的消防主管在溝通協調之得分顯著高於教育程度為「研究所以上」的消防主管；推論原因為受教育程度較高者其理解能力及邏輯性較佳，故能夠在工作上能產生最佳的工作效率，藉此節省工作時間及避免耗費精力。

表 11 不同性別在工作壓力上差異分析表

子構面	性別	人數	t 值	顯著性
工作負荷	男	142	.101	.919
	女	8		
家庭照顧	男	142	1.305	.194
	女	8		
內在衝突	男	142	-1.818	.071
	女	8		
溝通協調	男	142	-1.173	.243
	女	8		

表 12 不同年齡在工作壓力上差異分析表

子構面	年齡	人數	F 值	顯著性	事後比較
工作負荷	①30 歲以下	42	.609	.610	—
	②31-40 歲	65			
	③41-50 歲	30			
	④51 歲以上	13			
家庭照顧	①30 歲以下	42	2.134	.038*	②>① ③>①
	②31-40 歲	65			
	③41-50 歲	30			
	④51 歲以上	13			
內在衝突	①30 歲以下	42	.267	.849	—
	②31-40 歲	65			
	③41-50 歲	30			
	④51 歲以上	13			
溝通協調	①30 歲以下	42	.549	.650	—
	②31-40 歲	65			
	③41-50 歲	30			
	④51 歲以上	13			

表 13 不同服務年資在工作壓力上差異分析表

子構面	服務年資	人數	F 值	顯著性	事後比較
工作負荷	①10 年以下	57	2.679	.049*	①>③
	②11-20 年	58			
	③21-30 年	27			
	④31 年以上	8			
家庭照顧	①10 年以下	57	1.561	.201	—
	②11-20 年	58			
	③21-30 年	27			
	④31 年以上	8			
內在衝突	①10 年以下	57	.463	.709	—
	②11-20 年	58			
	③21-30 年	27			
	④31 年以上	8			

子構面	服務年資	人數	F 值	顯著性	事後比較
溝通協調	①10 年以下	57	.217	.884	—
	②11-20 年	58			
	③21-30 年	27			
	④31 年以上	8			

表 14 不同工作職務性質在工作壓力上差異分析表

子構面	工作職務性質	人數	t 值	顯著性
工作負荷	外勤主管職務	130	.740	.460
	內勤主管職務	20		
家庭照顧	外勤主管職務	130	1.442	.151
	內勤主管職務	20		
內在衝突	外勤主管職務	130	.864	.389
	內勤主管職務	20		
溝通協調	外勤主管職務	130	1.281	.202
	內勤主管職務	20		

表 15 不同教育程度在工作壓力上差異分析表

子構面	教育程度	人數	F 值	顯著性	事後比較
工作負荷	①高中/職(含以下)	4	.561	.642	—
	②專科	25			
	③大學	68			
	④研究所以上	53			
家庭照顧	①高中/職(含以下)	4	.633	.595	—
	②專科	25			
	③大學	68			
	④研究所以上	53			
內在衝突	①高中/職(含以下)	4	.587	.624	—
	②專科	25			
	③大學	68			
	④研究所以上	53			
溝通協調	①高中/職(含以下)	4	2.515	.041*	②>④
	②專科	25			
	③大學	68			
	④研究所以上	53			

4-6 人口變項對工作適應之差異分析

為探討不同人口背景變項與工作適應構面之間差異性分析，利用獨立樣本 t 檢定與單因子變異數分析進行檢測，若差異達顯著

水準，則採用 Scheffé 檢定進行事後比較以瞭解差異情形。檢定結果如表 16、表 17、表 18、表 19、表 20 所示。

人口變項之「性別」、「年齡」、「工作職務性質」對「工作適應」構面之顯著性無差異。人口變項之「年齡」對「工作適應」構面呈現有顯著差異，其中年齡為「51 歲以上」的消防主管在工作環境適應上得分顯著高於年齡為「31-40 歲」的消防主管；推論原因為年齡較長者因受服務年資影響，對於消防團體單位運作情形及生活作息，乃至於與長官、同事間溝通協調的進對應退皆比年輕族群更為熟悉。

人口變項之「服務年資」對「工作適應」構面呈現有顯著差異，其中服務年資為「21-30 年」的消防主管在工作能力得分顯著高於服務年資為「10 年以下」之消防主管；推論原因為年資較高者在思考方面較為成熟圓融，工作經驗值更為豐富，對於棘手問題，其處理問題的能力較強，故在心理或工作執行層面皆相比於服務年資較資淺者，工作適應程度較為良好。

人口變項之「教育程度」對「工作適應」構面呈現有顯著差異，其中教育程度為「研究所以以上」的消防主管在工作能力之適應上得分顯著高於教育程度為「專科」及「大學」的消防主管；而在工作期待上得分顯著高於教育程度為「大學」的消防主管；推論原因為教育程度較高者，其理解能力和學習能力更好，領導能力或人際網絡資源更為豐富，因此在工作中越能夠發揮其所長才，並勇於迎接挑戰，更易適應社會變遷與需求。因此在工作能力上能展現其正向價值，在工作期待而獲得成就感，進而提升自我內在價值，因此工作能力與工作期待以教育程度為「研究所以以上」的消防主管為佳。

表 16 不同性別在工作適應上差異分析表

子構面	性別	人數	t 值	顯著性
工作環境	男	142	.912	.363
	女	8		
工作能力	男	142	.435	.664
	女	8		
工作期待	男	142	1.495	.137
	女	8		
人際關係	男	142	.598	.551
	女	8		

表 17 不同年齡在工作適應上差異分析表

子構面	年齡	人數	F 值	顯著性	事後比較
工作環境	①30 歲以下	42	3.260	.034*	④>②
	②31-40 歲	65			
	③41-50 歲	30			
	④51 歲以上	13			
工作能力	①30 歲以下	42	.513	.674	—
	②31-40 歲	65			
	③41-50 歲	30			
	④51 歲以上	13			
工作期待	①30 歲以下	42	.791	.501	—
	②31-40 歲	65			
	③41-50 歲	30			
	④51 歲以上	13			
人際關係	①30 歲以下	42	.249	.862	—
	②31-40 歲	65			
	③41-50 歲	30			
	④51 歲以上	13			

表 18 不同服務年資在工作適應上差異分析表

子構面	服務年資	人數	F 值	顯著性	事後比較
工作環境	①10 年以下	57	1.350	.261	—
	②11-20 年	58			
	③21-30 年	27			
	④31 年以上	8			
工作能力	①10 年以下	57	5.27	.012*	③>①
	②11-20 年	58			
	③21-30 年	27			
	④31 年以上	8			
工作期待	①10 年以下	57	.069	.976	—
	②11-20 年	58			
	③21-30 年	27			
	④31 年以上	8			
人際關係	①10 年以下	57	.351	.789	—
	②11-20 年	58			
	③21-30 年	27			
	④31 年以上	8			

表 19 不同工作職務性質在工作適應上差異分析表

子構面	工作職務性質	人數	t 值	顯著性
工作環境	外勤主管職務	130	-.089	.929
	內勤主管職務	20		
工作能力	外勤主管職務	130	.223	.824
	內勤主管職務	20		
工作期待	外勤主管職務	130	.611	.542
	內勤主管職務	20		
人際關係	外勤主管職務	130	.257	.798
	內勤主管職務	20		

表 20 不同教育程度管在工作適應上差異分析表

子構面	教育程度	人數	F 值	顯著性	事後比較
工作環境	① 高中/職(含以下)	4	.135	.939	—
	② 專科	25			
	③ 大學	68			
	④ 研究所以上	53			
工作能力	① 高中/職(含以下)	4	7.698	.000*	④>② ④>③
	② 專科	25			
	③ 大學	68			
	④ 研究所以上	53			
工作期待	① 高中/職(含以下)	4	3.603	.015*	④>③
	② 專科	25			
	③ 大學	68			
	④ 研究所以上	53			
人際關係	① 高中/職(含以下)	4	1.517	.213	—
	② 專科	25			
	③ 大學	68			
	④ 研究所以上	53			

4-7 人格特質、工作壓力、工作適應構面間相關分析

本節依據研究目的，使用皮爾森相關分析以檢測理論模型中「人格特質」、「工作壓力」及「工作適應」研究構面間之相關程度，其分析結果如表 21 所示。

1. 「人格特質」與「工作壓力」($r=-0.126$, $p>0.01$)未達顯著相關，顯示消防主管之人格特質對於工作壓力未有顯著相關，即本研究假設 H1 不成立。推論其消防工

作常面臨不可預測的危害環境，且工時冗長，造成生理與心理長期處於高度工作壓力下。

2. 「人格特質」與「工作適應」($r=0.496$, $p<0.01$)有顯著正相關，且達中度正相關，即消防主管之「人格特質」正向性愈高，其「工作適應」愈強。
3. 「工作壓力」與「工作適應」($r=-0.382$, $p<0.01$)有顯著負相關，且達中度負相關，即消防主管之「工作壓力」愈高，其「工作適應」愈低。

表 21 各構面間皮爾森相關分析

	構面	人格特質	工作壓力	工作適應
人格特質	皮爾森相關	1	-.126	.496**
	顯著性(雙尾)		.123	.000
工作壓力	皮爾森相關	-.126	1	-.382**
	顯著性(雙尾)	.123		.000
工作適應	皮爾森相關	.496**	-.382**	1
	顯著性(雙尾)	.000	.000	

註：**.在顯著水準為 0.01 時(雙尾)，顯著相關。

4-8 研究假設驗證

本研究為探討人口變項對於各構面間之顯著性差異及「人格特質」、「工作壓力」、「工作適應」等構面變項間之相關分析；並以獨立樣本 t 檢定、單因子變異數分析及 Pearson 相關分析等研究方法來驗證研究假設是否成立，其結果如表 22 所示。

表 22 研究假設驗證結果表

假設	假設內容	顯著性	驗證結果
H1	人口資料變項對於人格特質呈現顯著差異。	在服務年資、教育程度具有顯著差異。	部分成立
H2	人口資料變項對於工作壓力呈現顯著差異。	在年齡、服務年資、教育程度具有顯著差異。	部分成立
H3	人口資料變項對於工作適應呈現顯著差異。	在年齡、服務年資、教育程度具有顯著差異。	部分成立
H4	人格特質對於工作壓力呈現顯著相關性。	無相關。	不成立

假設	假設內容	顯著性	驗證結果
H5	人格特質對於工作適應呈現顯著相關性。	中度正相關。	成立
H6	工作壓力對於工作適應呈現顯著相關性。	中度負相關。	成立

五、結論與建議

5-1 結論

- 研究結果發現，消防主管在整體人格特質方面，以「成就取向」呈現顯著性。經探討消防主管之人口背景變項對人格特質之差異性，發現服務年資為「11-20年」的消防主管在風險取向之正向性顯著高於服務年資為「21-30年」的消防主管；而教育程度為「研究所以以上」的消防主管在成就取向、內控取向之正向性顯著高於教育程度為「大學」的消防主管。
- 研究結果發現，消防主管在整體工作壓力方面，感受到中等程度之壓力，而主要的工作壓力來源是工作負荷與家庭照顧。經探討消防主管之人口背景變項對工作壓力之差異性，發現年齡為「31-40歲」及「41-50歲」的消防主管在家庭照顧之壓力顯著高於年齡為「30歲以下」的消防主管；而服務年資為「10年以下」的消防主管在工作負荷之壓力顯著高於服務年資為「21-30年」的消防主管；教育程度為「專科」的消防主管在溝通協調之壓力顯著高於教育程度為「研究所以以上」的消防主管。
- 研究結果發現，消防主管在整體工作適應方面，感受為中等程度之適應，除了工作環境呈現偏低於中點分數外，其餘工作能力、工作期待及人際關係均偏高於中點分數，這表示消防主管對組織升遷結構及工作瞬息萬變性之適應力較為低弱。經探討消防主管之人口背景變項對工作適應之差異性，發現年齡為「51歲以上」的消防主管在工作環境適應上得分顯著高於年齡為「31-40歲」的消防主管；而服務年資為「21-30年」的消防主管在工作能力上得分顯著高於服務年資

為「10年以下」之消防主管；而教育程度為「研究所以以上」的消防主管在工作能力之適應上得分顯著高於教育程度為「專科」及「大學」的消防主管；而在工作期待上得分顯著高於教育程度為「大學」的消防主管。

- 經由 Pearson 相關分析探討構面間之正負關係與相關性強弱後，發現「人格特質」與「工作適應」具有中度正相關、「工作壓力」與「工作適應」之間具有中度負相關，而「人格特質」與「工作壓力」未有顯著相關。說明工作壓力對工作適應間具有一定之關聯性及顯示消防主管感受整體工作壓力愈大時，對於整體工作適應力愈低。

5-2 建議

- 建議機關首長於職務分配與訓用主管人員時，可先行從人格特質、性向、價值觀、抗壓性等相關測驗之篩選，藉以將人才適得其所的運用於各層面或職務，並減少工作適應不佳之情況發生。
- 建議新進或晉升為各單位之主管人員，對內、外勤工作之適應程度與心態應有相應之調整，避免工作認知與實際狀況產生落差，宜提早瞭解所屬單位之工作內容，提高對所職掌業務工作之認知，並考量自身條件(如個性、專長、家庭因素等)以減少工作環境改變所帶來之衝擊與壓力。

參考文獻

- 林宜君(2002)，台灣消防人力系統中消防分隊長代謝現象，國立交通大學，經營管理研究所，博士論文。
- 勞動部職業安全衛生署(2018)，工作相關心理壓力事件引起精神疾病認定參考指引。
- 內政部消防署網站。
- 李宗彥(2019)，高雄市政府消防局外勤消防人員工作壓力與調適策略之關係研究-以高雄市政府消防局第二大隊為例，高苑科技大學，經營管理研究所，碩士

論文。

5. 邱永祥 (2001)，影響高職特教班畢業生職業適應相關因素之研究，國立彰化師範大學，工業教育研究所，碩士論文。
6. 龔祖銘 (2002)，基層員警工作困擾、組織投注感與工作適應關係研究，國立中正大學，犯罪防治研究所，碩士論文。
7. Robbins, S. P. (1998) *Organizational behavior: concepts, controversies, and application* (8th ed.). Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall.
8. 吳錦隆 (2001)，影響國中訓導主任工作壓力與工作適應相關因素之研究，國立彰化師範大學，工業教育學系，碩士論文。

違章建築嚴重性之問卷設計

張雅婷¹ 王裕仁²

¹ 國立高雄科技大學土木工程系碩士班研究生

² 國立高雄科技大學土木工程系副教授

摘要

建築物對城市之影響，就如人們穿著之衣飾般，除外觀顏色調合、大小適中外，並須具有保暖之功能。若為能符合使用需求而任意違建，就如同衣服補綴既有礙觀瞻甚而影響至公共安全。

違章建築不論在都會區或鄉村，隨處可見，而各縣市主管機關取締寬嚴不一，致使台灣各地區違建到處蔓延。就集合式住宅而言，有搭蓋違建之現象約為百分之七十左右。就公共環境面而言，除破壞居住環境品質、水土保持、市容觀瞻、公共交通、公共衛生、公共安全等外，對於建築物本身也可能會危及結構安全，甚而損及自身生命及財產。

有鑑於此，最理想的方式是根據建築物的危害公共權益的嚴重程度，建立一套違章建築危險程度的初步評估之評分表。本研究根據文獻以及專家、學者們之經驗，將違章建築分為四種主因層及十三個因子層，主因層有：不特定人員出入之場所違建、影響公共環境或衛生、影響公共交通及有結構之虞的自宅違建，希望未來能夠邀請業界先進一同填寫，再運用層級分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)作危險性權重分析，期望透過該研究之結論與建議，有助於探討目前法律規範與問卷結果之差異。

關鍵字：違章建築、層級分析法

Questionnaire Design for the Severity of Illegal Buildings

Chang, Ya-Ting¹ Wang, Yu-Ren²

¹ Master Student, Dept. of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology, Taiwan

² Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology, Taiwan

ABSTRACT

The impact of buildings on the city, just like the clothes people wear, in addition to the appearance of color adjustment, size appropriate, and must have the function of keeping warm. Any violation of construction to meet the needs of use is like clothing filling is both an obstacle to vision and even an impact on public safety.

Illegal buildings can be found everywhere, whether in metropolitan areas or villages, and the county and city authorities have banned leniency, causing the spread of illegal construction in Taiwan. As far as collective housing is concerned, the phenomenon of construction violations is about 70 percent. As far as the public environment is concerned, in addition to destroying the quality of the living environment, soil and water conservation, the appearance of the city, public transport, public health, public safety, etc., the building itself may also endanger structural safety, and even damage their own lives and property.

In view of this, the ideal approach would be to establish a score scale for a preliminary assessment of the risk level of illegal construction based on the severity of the damage to public interests of the building. Based on the literature and the experience of experts and scholars, this study divides illegal buildings into four main cause layers and thirteen factor layers, the main factor layers are: non-specific personnel access to places illegal construction, affect public environment or health, affect public transport and structural risk of self-building violations, hope that in the future can invite the experts and scholars to fill in the advanced together, and then use Analytic Hierarchy Process (AHP) for risk weight analysis, hope to through the conclusions and recommendations of the study. It helps to explore the differences between current legal norms and questionnaire results.

Keywords: illegal construction, AHP

一、前言

任何的建築物都有可能受到時間及其他外在因素的影響而改變，然違章建築卻能存在於台灣任何的空間與時間，違建生命力的旺盛，遂成為台灣在地的建築特色與文化。違章建築會造成環境破壞、妨礙市容觀瞻、產生公共安全、公共衛生及公共交通等諸多問題。

有鑑於此，本研究的目的乃透過層級分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)及相關文獻整理，建構出問卷，希望能作為政府主管機關執行違章建築查處業務之參考。

二、文獻回顧

2.1 違章建築之源起

在台灣，違章建築不論在都會、城鄉亦或邊遠鄉間隨處可見，可說是一種嚴重之「公共問題」(public problem)。都市地區較常見的有陽台外推、露台加蓋、天井違章建築以及法定空地違章建築等，非都市地區則有佔用防火巷、公有地，以及坐落於農地的違法工廠等。不僅形成市容凌亂，部份違章建築更產生公共安全及環境汙染等問題。由全國違章建築產生數量與取締執行率觀之，2020年度直轄市、縣(市)政府統計，至12月底應拆除件數為695530件，已拆除件數為33223件，拆除率僅為4.8%，透過此數據可得知違建管理單位之經費與人力編制不足以致於取締執行困難，造成違章建築之情形一再發生，

因此，實有必要對現行違章建築之查報、認定及拆除等處理機制重新探討及規劃，以維護公共安全、公共交通、公共衛生及增進市容觀瞻，並健全建築管理。

2.2 違章建築分類

違章建築依其條件性質可分成「程序違建」與「實質違建」，其區分係以「建築法」第86條規定。

程序違建係指需透過補辦相關執照後，即可轉變為「合法建築物」。就內政部於64年10月17日函示，建築基地及建築物之高度、結構、實質及建蔽率等，在均不違反當地都市計畫及建築法令下，且獲土地使用權，僅有程序疏失，即未領得建築執照就興建者，係屬「程序違建」。而程序違建欲透過補照程序而成為「合法建築物」，必須是加蓋後整幢建築物之樓地板面積及樓層高度需在建築法規所規定之容積範圍及高度限制內。

「建築法」第28條規定：『建築執照分為四種：

- 一、建造執照：建築物之新建、增建、改建及修建，應請領建造執照。
- 二、雜項執照：雜項工作物之建築，應請領雜項執照。
- 三、使用執照：建築物建造完成後之使用或變更使用，應請領使用執照。
- 四、拆除執照：建築物之拆除，應請領拆除執照。』而「程序違章」又可分為『得補照』及『應拆除』兩類。

2.3 層級分析法

層級分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)為 1971 年匹茲堡大學教授 Thomas L. Saaty 提出之方法，主要應用在不確定情況下及具有多個評估準則的決策問題上，以一個邏輯性及層級性的結構，整合相關資料，並以直覺判斷來進評估。由鄧振源與曾國雄的研究得知，AHP 方法分為以下九項特性(鄧振源、曾國雄，1989)：

- (1) 一個系統可被分解成許多種類別(Class)或構件(Component)，並形成有向網路的層級結構。
- (2) 層級結構中，每一層級的構件均假設具獨立性(Independence)。
- (3) 每一層級內的構件，可以用上一層級內某些或所有構件作為評估標準，進行評估。
- (4) 進行比較評估時，可將絕對數值尺度轉換成比例尺度(Ratio Scale)。
- (5) 成對比較後，可使用正倒值矩陣(Positive Reciprocal Matrix)處理。
- (6) 偏好關係滿足遞移性(Transitivity)。不僅優劣關係滿足遞移性(如：A 優於 B 且 B 優於 C 則 A 優於 C)，同時強度關係也滿足遞移性(如：A 優於 B 二倍且 B 優於 C 三倍則 A 優於 C 六倍)。
- (7) 完全具遞移性不容易，因此容許不具遞移性的存在，但需測試其一致性(Consistency)的程度。
- (8) 構件的優勢程度，經由加權法則(Weighting Principle)而求得。
- (9) 任何構件只要出現在階層結構中，不論其優勢程度是如何小，均被認為與整個評估結構有關，而並非檢核階層結構的獨立性。

三、研究規劃

3-1 AHP

層級分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)，由 Thomas L. Saaty 於 1971 提出。主要係處理不確定之情況下及同時有多個評估項目或方案的問題。

層級分析法之主要特色為利用階層式架構的方式，將複雜關係的準則建立階層架構，可使問題簡化，透過評估尺度的量化讓問題能夠更容易評比相對重要性，使評估者能有效的作出決策。

3-1-1 AHP 架構

層級分析法的發展目的，係將複雜的問題予以系統化，藉由劃分不同層級的方式將目標問題分解，並透過量化的判斷，有效減少決策錯誤的風險性。

層級分析法的特性，包括下列各項：

1. 一個系統可以被分析成許多種類或成分，並形成如網路一般的層級架構。
2. 層級架構中每一層級之要素均具有獨立性。
3. 每一層級要素皆可以上一層級某些或所有要素作為評估標準。
4. 比較評估時，可將絕對數值尺度轉換成比例尺度。
5. 各級要素進行成對比較後可使用正倒值矩陣處理。
6. 偏好關係滿足遞移性，不僅優劣關係滿足，同時強度也滿足。
7. 完全具遞移性不容易，因此容許不具遞移性存在，但需測試一致性程度。
8. 經由加權法則而求得要素的優勢程度。

3-1-2 層級架構化之要點

層級架構為系統結構的骨架，透過層級方式表現，可以較清楚的表示階層中各因子間的關係，其關係如圖 3.1 所示：

層級的主要目的，係為了建立系統分解後的架構，所建立的層級架構有兩種：第一種為完整層級，另一種為不完整層級。

1. 完整層級如圖 3.1 所示，顯示了每一層內的因子均有關連。
2. 不完整層級如圖 3.2 所示，顯示了每一層內的因子並非皆有關連。

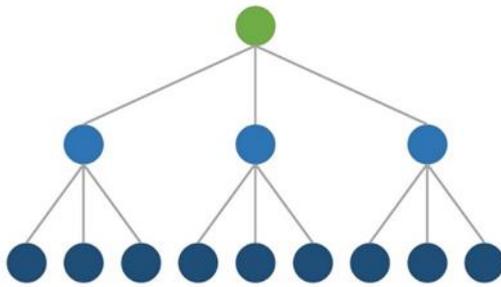


圖 3.1

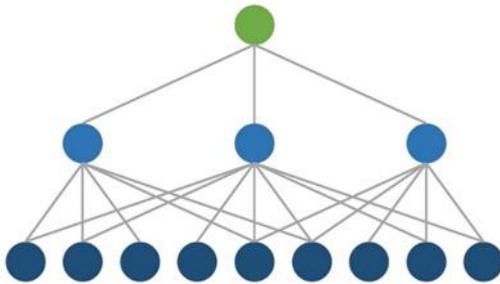


圖 3.2

3-1-3 AHP 層級分析法之流程

在使用層級分析法分析問題時，主要分為 9 個步驟進行，以下為 AHP 層級分析法標準之流程，如下圖 3.3，本研究進行至制訂準則設計問卷：

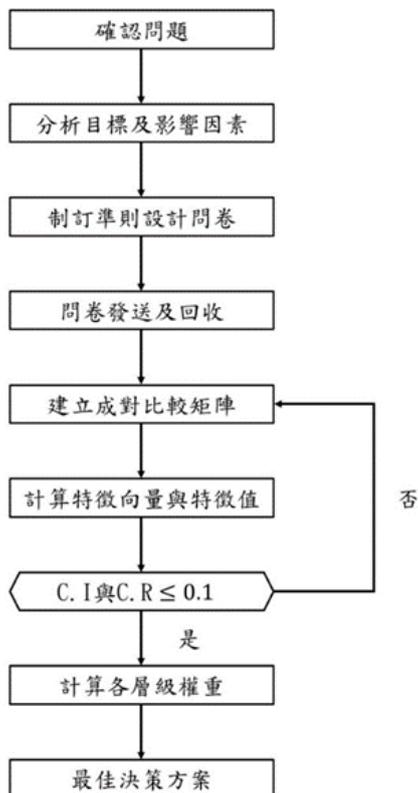


圖 3.3

3-1-4 AHP 層級分析法評估尺度

評估尺度(Ratio Scale)一般劃分為五項，即同等重要、稍重要、頗重要、極重要及絕對重要，並賦予 1、3、5、7、9 的衡量值；並在兩個尺度中間賦予 2、4、6、8 的折衷值。層級分析法(AHP)之評估尺度，說明如下表 3.1:

表 3.1

評估尺度	定義	說明
1	同等重要	兩方比較方案貢獻程度具同等重要性，等強。
3	稍微重要	經驗與判斷稍微傾向喜好某一方案，稍強。
5	頗重要	經驗與判斷稍微傾向喜好某一方案，頗強。
7	極重要	實際顯示非常強烈傾向喜好某一方案，極強。
9	絕對重要	有足夠證據肯定絕對喜好某一方案，絕強。
2、4、6、8	相鄰尺度之中間值	需要折衷值時。

四、問卷設計及結果

問卷問題之設計有四個重點(Newman Lynn M, 1995)：

- (1) 觀念：受訪者對主題的熟悉度與認知。
- (2) 理念：受訪者對此問題存在什麼理念與對的事情與假的事情的判定標準為何。
- (3) 行為：受訪者的職業。
- (4) 特性：受訪者的數據資料，如性別、年齡、民族、收入或受教育程度。

正常情況下編撰問卷時，需考慮以下三點：

- (1) 所需的資訊類型：必須了解，其需求及目的。
- (2) 提問結構：所提問的方式為何種。如：電話、郵件、面談等。
- (3) 題目寫法：問卷要採取何種方式。如：開放式問卷、封閉式問卷…等。

在設計問卷題目時，研究人員需知什麼該做，什麼不該做：

- (1) 問卷題目中，避免縮寫、俚語、或生僻字，以免造成受訪者的不理解。
- (2) 題目描述需具體表現，用含糊的問題提問，可能產生含糊的答案。

- (3) 確保問卷題目讓人淺顯易懂，問題不要使用過多假設，來推斷出一個人的行為、知識、態度。
- (4) 檢查所設計之題目是否有發生偏差，一個有偏差的問題，可能使受訪者不能做出真正的立場反應，其題目可能會有暗示受訪者應該有何種行為。

4-1 違章建築之評估要項建立

本研究根據 AHP 法的文獻以及專家、學者們之經驗，歸納出四個主因層和十三個因子層。

(一) 建構層及分析架構，本研究共分三層：

- (1) 第一層為執行目標層
- (2) 第二層為主因層
- (3) 第三層為因子層

(二) 執行目標層：

為本研究最終目標，違章建築嚴重性判定

(三) 主因層：

- (1) 不特定人員出入之場所違建
- (2) 影響公共環境或衛生
- (3) 影響公共交通
- (4) 有結構之虞的自宅違建

(四) 因子層：

- (1) 不特定人員出入之場所違建：
 - (a) 文教類場所之違建
 - (b) 衛生及社福類場所之違建
 - (c) 商業及服務類場所之違建
 - (d) 旅遊住宿類場所之違建
- (2) 影響公共環境或衛生
 - (a) 農地違章工廠
 - (b) 鴿舍
 - (c) 影響山坡地水土保持之違建
- (3) 影響公共交通
 - (a) 違章棚架
 - (b) 占用防火巷或防火間隔
 - (c) 占用騎樓
- (4) 有結構之虞的自宅違建
 - (a) 屋頂之鐵皮圍封違建
 - (b) 既有女兒牆增建壁體之違建
 - (c) 陽臺或露臺之違建

完整層級架構圖詳表 4.1，完整問卷詳表 4.2-6。

表 4.1 層級架構圖

執行目標層	主因層	因子層
違章建築嚴重性判定	不特定人員出入之場所違建	文教類場所之違建
		衛生及社福類場所之違建
		商業及服務類場所之違建
		旅遊住宿類場所之違建
	影響公共環境或衛生	農地違章工廠
		鴿舍
		影響山坡地水土保持之違建
	影響公共交通	違章棚架
		占用防火巷或防火間隔
		占用騎樓
	有結構之虞的自宅違建	屋頂之鐵皮圍封違建
		既有女兒牆增建壁體之違建
		陽臺或露臺之違建

表 4.2 違章建築嚴重性之權重因子分

A	B	A 或 B 何者重要		相對有幾倍重要									
		相同	A	B	1	2	3	4	5	6	7	8	9
不特定人員出入之場所違建	影響公共環境或衛生				1	2	3	4	5	6	7	8	9
不特定人員出入之場所違建	影響公共交通				1	2	3	4	5	6	7	8	9
不特定人員出入之場所違建	有結構之虞的自宅違建				1	2	3	4	5	6	7	8	9
影響公共環境或衛生	影響公共交通				1	2	3	4	5	6	7	8	9
影響公共環境或衛生	有結構之虞的自宅違建				1	2	3	4	5	6	7	8	9
影響公共交通	有結構之虞的自宅違建				1	2	3	4	5	6	7	8	9
說明	第二項比較，A 與 B 均選「相同」的標，請選擇「1」等強。 相對之相對重要係數說明： 1：相同，3：稍強，5：強，7：極強，9：絕強。 2：介於 1 和 3，4：介於 3 和 5，6：介於 5 和 7，8：介於 7 和 9。												

表 4.3 不特定人員出入之場所違建

相比項目		A 或 B 何者重要			相對有幾倍重要								
A	B	相同	A	B	1	2	3	4	5	6	7	8	9
					等強	介於 1-3	稍強	介於 3-5	強	介於 5-7	極強	介於 7-9	極強
文教類場所之違建	衛生及社福類場所之違建												
文教類場所之違建	商業及服務類場所之違建												
文教類場所之違建	旅遊住宿類場所之違建												
衛生及社福類場所之違建	商業及服務類場所之違建												
衛生及社福類場所之違建	旅遊住宿類場所之違建												
商業及服務類場所之違建	旅遊住宿類場所之違建												
說明		若二項比較，A 與 B 互選「相同」的話，請選擇「1」：等強。 A 與 B 之相對重要倍數說明： 1：相同；3：稍強；5：強；7：極強；9：極強。 2：介於 1 和 3；4：介於 3 和 5；6：介於 5 和 7；8：介於 7 和 9。											

表 4.4 影響公共環境或衛生

相比項目		A 或 B 何者重要			相對有幾倍重要								
A	B	相同	A	B	1	2	3	4	5	6	7	8	9
					等強	介於 1-3	稍強	介於 3-5	強	介於 5-7	極強	介於 7-9	極強
農地違章工廠	碼舍												
農地違章工廠	影響山坡地水土保持之違建												
碼舍	影響山坡地水土保持之違建												
說明		若二項比較，A 與 B 互選「相同」的話，請選擇「1」：等強。 A 與 B 之相對重要倍數說明： 1：相同；3：稍強；5：強；7：極強；9：極強。 2：介於 1 和 3；4：介於 3 和 5；6：介於 5 和 7；8：介於 7 和 9。											

表 4.5 影響公共交通

相比項目		A 或 B 何者重要			相對有幾倍重要								
A	B	相同	A	B	1	2	3	4	5	6	7	8	9
					等強	介於 1-3	稍強	介於 3-5	強	介於 5-7	極強	介於 7-9	極強
違章棚架	占用防火巷或防火間隔												
違章棚架	占用騎樓												
占用防火巷或防火間隔	占用騎樓												
說明		若二項比較，A 與 B 互選「相同」的話，請選擇「1」：等強。 A 與 B 之相對重要倍數說明： 1：相同；3：稍強；5：強；7：極強；9：極強。 2：介於 1 和 3；4：介於 3 和 5；6：介於 5 和 7；8：介於 7 和 9。											

表 4.6 有結構之虞的自宅違建

相比項目		A 或 B 何者重要			相對有幾倍重要								
A	B	相同	A	B	1	2	3	4	5	6	7	8	9
					等強	介於 1-3	稍強	介於 3-5	強	介於 5-7	極強	介於 7-9	極強
屋頂之鐵皮圍封違建	既有女兒牆 增建壁體之違建												
屋頂之鐵皮圍封違建	陽臺或露臺之違建												
既有女兒牆增建壁體之違建	陽臺或露臺之違建												
說明		若二項比較，A 與 B 互選「相同」的話，請選擇「1」：等強。 A 與 B 之相對重要倍數說明： 1：相同；3：稍強；5：強；7：極強；9：極強。 2：介於 1 和 3；4：介於 3 和 5；6：介於 5 和 7；8：介於 7 和 9。											

五、結論

有鑑於近年關於違章建築的危害已不僅限於單純的結構安全問題，還有因違章建築阻擋消防車通行的案例又或是廠商為節省工廠建地成本，選擇在農地為違建工廠導致農作物遭受工業汙染。

因此本研究主要是針對違章建築對於人民的危險性分析，為了調查專業人士對於現今較具危險性的各項違章建築而擬定此問卷，希望未來能夠邀請業界先進一同填寫，完成整個 AHP 的分析，期望透過該研究之結論與建議，改善台灣社會中違建所存在的問題，

使人民生活與居住環境得到改善及增進市容，也希望能作為政府主管機關執行違章建築查處業務之參考。

參考文獻

1. 洪琦勛，國立高雄科技大學土木工程系土木工程與防災科技碩士班，應用 AHP 探討結構物耐震檢查之相關因子權重分析(2019)。
2. 邱宏哲，中華大學建築與都市計畫研究所碩士論文，台灣住宅違章建築演變與發展之研究(2001)。
3. 馮兆麟，國立台北科技大學土木與防災研究所碩士學位論文，建築物二次施工問題之研究-以新北市為例(2012)。
4. 李宗霖，國立中山大學社會科學院高階公共政策碩士學程碩士在職專班碩士論文，高雄市違章建築管理之研究(2008)。
5. 謝崑滄，國立中山大學中山學術研究所碩士論文，都市違章建築之問題探討-以高雄市為例(2006)。
6. 洪翠芳，正修科技大學營建工程研究所碩士論文，違章建築拆除管理之研究-以高雄市住宅型態為例(2014)。
7. 褚志鵬，Analytic Hierarchy Process Theory 層級分析法(AHP)理論與實作(2009)。
8. 廖佳銘，國立台灣科技大學營建工程系碩士論文，違章建築拆除工程人力配置最佳化模式之研究(2020)。
9. 葉冠杰，國立台北科技大學土木工程系土木與防災碩士班，地方政府違章建築認定及拆除之探討-以臺北市為例(2019)。
10. 蔡政哲，正修科技大學營建工程研究所碩士論文，都市違章建築處理對策之研究(2013)。
11. 林穎延，國防大學管理學院資訊管理學系碩士班碩士論文，企業架構方法為基礎之問卷設計-以企業架構師需求調查為例(2014)。
12. 吳宏哲，中華大學建築與都市計畫學系碩士班，台灣住宅違章建築演變與發展

之研究(2001)。

13. 中華民國內政部營建署，違章建築案件統計。
14. Thomas L. Saaty(1980),The Analytic Hierarchy Process,McGrawHill.

以社區居民為本位探討韌性社區推動成效

謝忠穎¹ 邵俊豪²

¹中央警察大學防災研究所研究生

²中央警察大學防災研究所副教授

摘要

近十年來我國政府致力於防救災工作的推動，然而社區的防災工作推行仍存在些許難題必須克服，以致社區的防救災能力普遍不足。為了有效因應災害的衝擊以及強化復原重建的工作，政府遂於災害防救深耕第 3 期計畫中推行韌性社區，希望藉此提升社區民眾防災意識並促進社區各利益關係人共同參與，以強化社區自主防災能力。

而社區防災工作的推動過程中，居民扮演著關鍵性角色，唯有促進居民主動、積極參與，才有利於營造由下而上的自發性推動模式，也才能進一步從社區與學校、NGO、公部門等組織的互動關係探討如何助益社區防災持續運作。為此，本研究藉由回顧韌性社區、防災社區以及推動成效相關文獻，進行韌性社區與防災社區之比較，探討韌性社區所做出的創新與努力。同時亦以社區居民為本位進行評估面向之發展，歸納出社區防災意識、社區民眾參與、社區防災教育與訓練、社區運作機制、社區脆弱度掌握、社區防災資源掌握共六個推動成效評估面向，以了解韌性社區的推動成效。

關鍵字：災害防救深耕第 3 期計畫、自發性推動模式、持續運作、防災意識

A Resident-based Study on Promotion Effectiveness of Resilient Community

Chung-Ying Hsieh¹ Chun-Hao Shao²

¹Graduate Student, Graduate School of Disaster Management, Central Police University, Taiwan

²Associate Professor, Graduate School of Disaster Management, Central Police University, Taiwan

ABSTRACT

Over the past ten years, the government has devoted itself to disaster prevention and relief efforts. However, there are still some difficulties that must be overcome in the promotion of disaster prevention work in community. Because these difficulties have made the community generally inadequate in disaster prevention and relief. In order to cope effectively with the impact of disaster and to strengthen the recovery and reconstruction, the government has implemented "Resilient Community" in the "Disaster Prevention and Protection 3rd Project". It is hoped that this will raise the public awareness of disaster prevention and promote the participation of all stakeholders in the community, so as to strengthen independent disaster prevention capabilities of community.

Residents play a key role in the promotion of community disaster prevention work, and only by promoting the community residents to participate actively can they develop a spontaneous promotion model. Only then can the interaction between communities and organizations such as

schools, NGO and IGOs be further discussed in terms of how to benefit continuity of communities. Therefore, this study examines the innovations and efforts of Resilient Community by reviewing relevant literature on the Resilience Community, Disaster Prevention Community and promotion effectiveness. At the same time, the resident-based assessment has been conducted to summarize six promotion effectiveness assessment area to understand the promotion effectiveness of the Resilient Community, including community awareness of disaster prevention, community participation, community disaster prevention education and training, community operational mechanism, community vulnerability control, and community disaster prevention resource management.

Keywords: disaster prevention and protection 3rd project, spontaneous promotion model, continuity, awareness of disaster prevention

一、前言

從 1999 年九二一大地震以及 2009 年莫拉克颱風災害以來，我國中央與地方政府陸續推動防災社區相關計畫，由於過往災例與計畫推動之背景下，有助於民眾提升防災意識。然而，內政部消防署(2017)於災害防救深耕第 3 期計畫中指出我國社區防災工作的推行仍存有部分困境與難題，導致社區之防災能力普遍不足以因應災害衝擊。為此，政府於計畫中提出執行策略與措施，希望能消弭前述困境並持續強化地方韌性，而其中包含了韌性社區的推行。

提升地方災害韌性至關重要，其中社區居民扮演著關鍵角色，不管是在災前的防範作為、災時初期的應變與救援，甚至災後的復原重建工作，皆必須仰賴社區居民的全心協助與參與。如此才能有效推動社區防災工作，得以營造出由下而上的自發性推動模式，使其永續經營。反之，如缺乏主動、積極參與的社區居民，將不利於社區防災工作推動，更遑論建立社區與學校、NGO、公部門等組織間的良好互動。因此，社區居民為社區防災持續推動之根本。

二、研究背景與目的

2-1 研究背景

由於臺灣地理位置特殊，不僅位於環太平洋地震帶，亦處於季風氣候帶及颱風行經路徑上，因此飽受震災、洪患與颱風等災害

威脅。再加上人口過度集中、土地密集開發等社會經濟發展現象，使得災害來臨時，往往增幅災害衝擊，因而造成人民生命與財產的重大損失。世界銀行(2005)亦指出臺灣高達 73%的土地面積與人口同時暴露於三項以上天然災害威脅之中；其中 99%的土地面積與人口更同時暴露於兩項以上天然災害威脅中。由此可知，臺灣著實面臨著多重災害的嚴峻挑戰。

2-2 研究目的與問題

面對著未來愈趨頻繁的多重災害，災害的預防與應變已很難僅僅依靠公部門的力量，而必須仰賴所有國民共同投入，因此，如何深化居民的防災意識並促進全民防災實屬刻不容緩的課題。為了提升推行效率，在推動韌性社區等社區防災工作的同時，不僅應了解韌性社區與過往的防災社區有何差異之外，更要了解韌性社區之推行狀況與成效，因此，我們必須要建立起韌性社區推動成效之探討面向。而考量到身為關鍵角色之社區居民直接攸關於推行成效之良窳，故本研究希望以社區居民為本位來了解韌性社區推動成效。

基於本研究目的，提出以下研究發問：

- (一) 韌性社區與防災社區之推動模式有何不同？
- (二) 如何以社區居民為本位探討韌性社區推動成效？

三、文獻探討

3-1 韌性與防災探討

(一) 何謂韌性

韌性(Resilience)一詞在許多領域中被廣泛討論與應用。Holling 於 1973 年將韌性觀念引進生態學領域，他認為生態系為動態複雜的系統，韌性為吸收擾動、維持運作並回復至另一穩定態的能力，稱為「生態韌性」；這與傳統視生態系僅存在單一穩定態的「工程韌性」觀點有了區別，而此觀點的代表學者為 1984 年提出的 Pimm。1981 年，Timmerman 為首位討論氣候變遷下社會韌性的學者，其認為韌性為社會基礎設施承受經濟、環境等擾動並回復至受擾動前之能力。Adger 則在 2000 年重新詮釋社會韌性，指出韌性為人類社區由公共設施承受衝擊、擾動並從中回復、重建之能力，且特別強調韌性為永續發展的重要目標(黃泰霖，2012)。

近十年來韌性觀念更在防災領域中蓬勃發展，1999 年，Tobin 認為必須先了解社區的人口、種族、文化及政治等面向才能發展災害管理領域的韌性。Bruneau 等人於 2003 年提出韌性為社會單元減災、控制災害影響即完成復原重建之能力。Folke(2006)認為在韌性思維中，衝擊與擾動可視為改變、革新的契機，使社會得以不斷地適應、學習並發展。Mayunga 於 2007 年指出具有韌性的社區，能連結個人行為與社區能力，使社區能吸收衝擊、維持運作並重建，尤其強調社區具備預測、準備、反應及從災害中學習的能力。Cutter 等人(2008)認為韌性是社區系統從災害中適應、學習與回復的能力(潘穆嫻、林貝珊、林元祥，2016；柯昭男，2018)。

在氣候變遷議題與災害事件頻傳的背景下，國內外各組織皆致力於倡導與強化國家與社區防災能量。在國際方面，聯合國於 2005 年提出 2005-2015 兵庫行動綱領，將建構國家與社區的韌性訂為世界減災之目標，希望發展、強化各層級組織的制度與防災能力，尤其必須有系統地提升社區層級災害韌性(UNISDR，2005)；聯合國更於 2015 年提出

2015-2030 仙台減災綱領，承接上者的成果與挑戰，尤其強調減災工作與永續發展，並訂定了四大優先推動項目以利持續提升災害韌性(UNISDR，2015)。在國內方面，中央政府則將深化基層災害防救與社區自主防災能力列為國家發展重點(內政部消防署，2017)。

國內外組織皆如此重視國家與社區的韌性，在於災害具有不確定性，我們無法精準預測災害的發生時間與帶來的衝擊。因此，我們必須正視災害等突發事件，將其視為常態，並思考如何在社會與災害共存的情況下，建構出能有效應對突發事件的機制，以維持社會穩健的發展。也唯有如此方能提升社會的災害韌性，不僅可以減少建築物毀損、生活機能停頓之風險，更能降低人民的生命財產損失，故韌性對於社區至關重要，因為韌性正是社會與社區得以永續發展的重要目標。

(二) 國內防災社區發展過程之探討

回顧我國防災社區的發展歷程，可發現 1999 年九二一大地震與 2009 年莫拉克颱風為重要的轉捩點，兩次慘重的罹災經驗喚醒了中央與地方政府、民間組織對於社區防救災能量的重視，而紛紛開始推動防災社區相關計畫。我國防災社區的推動並無統一的程序或模式，而國家災害防救科技中心(簡稱 NCDR)自九二一大地震後，及致力於發展合適的防災社區推動模式與操作方法，藉由多年的防災研究成果與實際經驗累積，建立了防災社區推動模式，有效降低防災社區的推動門檻。

消防署自 2010 年 10 月 19 日開始辦理防災社區計畫，每期防災社區執行期程為 2 年，截至 2015 年已有 36 個社區參與。計畫透過每年補助經費之方式，讓地方政府與協力團隊輔導社區居民認識居住環境之災害風險、培養緊急應變技能以及建立防救災編組。目標為希望能提升居民防災意識與能力，以建立一個具備自主防救災能力的社區，以利社區能於災時進行初期應變。

(三) 韌性社區之探討

內政部消防署(2017)認為韌性社區為具

備災害容受力，且在災害來臨時能迅速應變與回復的社區，除了災前的預防措施與災時承受衝擊外，更加強調反應與復原的過程。換句話說，韌性社區的特性為「低脆弱度」與「高回復力」，並與無法完全避免的災害風險共存，藉由韌性社區的推動，得以降低災害衝擊並迅速從中恢復。以下為成為韌性社區的三項要素：

1. 執行社區防災基礎工作

進行環境踏勘、建立社區防救災資料、討論防救災議題以及實際演練等工作。

2. 平時建立復原重建共識

於災前與社區居民及專業技術人員(如水電工、重機具操作人員、保險人員或法律顧問等)討論、訂定復原重建機制，取得共識並簽定合作備忘錄。

3. 維持運作機制

社區藉由事先規劃、工作期程安排、分組及檢討機制建置，使韌性社區得以在較完善的系統下執行防救災工作。

韌性社區的另一個特點即是防災士，此制度首見於日本。其緣起於 1995 年阪神大地震時，公部門資源無法因應大規模受災情形並進入災區協助救援，因此當時多數居民皆由鄰居協助就出，公部門與居民皆意識到受災時無法完全依賴政府的救援，故防災士制度即在此背景下孕育而生。除了防災士，日本亦有防災介助士，平時藉由模擬體驗使其更了解高齡者、身障者等弱勢族群面臨災害的真實情況，主要任務為協助弱勢族群有關防災知識之學習、訓練以及災時的初期應變。上述兩者皆為經過訓練且認證合格之人員，具備足夠防災意識與防災技能的他們，秉持著「自助、共助、群體合作」之精神於日本社會各地從事防救災工作。

我國韌性社區的防災士制度為擷取日本防災士與防災介助士之特點建立而成的。消防署期望藉由每個韌性社區推派至少 2 名居民完成防災士培訓，在未來能協助推動韌性社區，並領導更多社區居民共同參與、從事

防救災工作，更能於災時協助引導外部資源進入社區協助復原重建。

呼應到消防署於計畫中提及我國社區居民防災意識普遍不足、社區意見領袖不諳防救災工作之窘境，可了解到我國政府正試圖提出防災士制度來因應此狀況。藉由此制度的執行，當更多社區居民經過培訓成為了防災士，具備一定水平防災意識與技能的他們，不僅能實際參與、推動社區防救災工作，更能影響並領導親友的觀點，進而促進其共同參與，此對於營造社區由下而上的自發性推動模式是大有助益的。

3-2 推動成效評估探討

由於韌性社區與防災社區皆為強化社區防災能力之計畫，雖然兩者特色不一且各有其重視與強調之面向，但其態念與目標相似，故並非毫無關係。為此，研究者將藉由回顧防災社區的成效指標、推動構面之相關文獻，作為發展本研究韌性社區推動成效探討面向之參考。有關各文獻彙整如表 1。

表 1 社區防災成效評估相關指標

文獻作者/年分	指標項目	研究內容與指標項目
何謹余 (2005)	「基本資料掌握」、「危險區域調查」、「社群防救組織」、「通報系統」、「避難設施及設備」、「增強居民防災及應變能力」	以坡地社區為研究對象，旨在建立社區防災管理能力評估因子架構。
吳杰穎、康良宇 (2007)	「防災社區運作」(推動概念、組織運作、資源網絡、民眾參與)、「專業組織協力」(推動認知、協助向度)、「政府軟硬體援助」(資源協助、施政理念、法令體制)	針對 10 個曾參與社區防救災總體營造計畫之社區為研究對象，藉由三個指標議題探討社區防災推動成效。
郭俊欽、莊翰華、謝琦強 (2010)	「社區基本系統」、「社區防災學習系統」、「社區永續系統」	以社區學習角度進行探討，認為社區經由教育、學習並調整，有助於提升社區適應能力，並促進永續經營

		及發展理念，且結果顯示社區防災的落實必須建立在提高居民防災學習的意願。
李龍潭 (2010)	「訓練」、「設施設備」、「經費」、「制度」	針對原桃園縣 36 個曾參與防災社區之社區為研究對象，調查鄉鎮市公所首長、業務承辦人員、消防單位、社區民眾對於社區防災推動之意見，整理出防災社區推動之構面因素。
黃建文 (2013)	「災害認知與防災概念」、「防災社區活動與訓練」、「防災社區制度運作」、「居民參與社區防災」	以屏東縣 5 個曾參與內政部災害防救示範社區的社區為研究對象，調查鄉鎮市公所首長、業務承辦人員、消防單位、社區民眾對於社區防災推動之意見。
周瑞生、 吳家輝 (2014)	「政策框架與制度安排」、「政府補助經費挹注」、「界定各利益相關者之權責」、「專業團隊輔助」、「社區學習機制」、「社區領袖之領導力」及「民眾防災意識」	歸納出社區防災的成功運作必須建立於政府的政策推動、專業團隊協助及社區居民參與三者之上。
柯昭男 (2018)	「風險認知」(社區資源掌握、環境災害認知、防災自主建立、行動計畫研擬)、「培力與應變」(網絡組織運行、內部運作協調、資源調配更新、社區環境建置、社區參與共識)、「復原重建」(重建計畫研擬、地方產業發展)	以新北市 24 個曾參與防災社區的社區為研究對象，針對其實際全程參與防災社區計畫的社區里幹事、社區領導人(里長)或社區組織代表實施問卷調查，其防災成效區分為三個面向。

資料來源：本研究整理

回顧上述文獻，可發現吳杰穎等人、郭俊欽等人、周瑞生等人與柯昭男皆於研究中

提及社區永續經營之理念，其指標項目包含有防災意識或社區參與之相關內容。由於研究者認為社區防災永續經營之主角為社區居民，其防災意識與參與意願將深刻影響著社區防災工作之推動情形，故上述學者點出了社區防災永續經營過程中的關鍵因素。

(四) 韌性社區與防災社區之差異探討

經由韌性社區與防災社區之比較，可發現韌性社區格外重視復原重建功能與持續經營議題。

1. 復原重建：

韌性社區除了執行社區防災基礎工作外，也藉由災前與社區居民、專業技術人員建立復原重建共識，並簽定合作備忘錄，大幅提升了未來復原重建工作之執行效率。

2. 持續經營：

首先為社區居民參與模式，防災社區的推動主體多為公部門與協力團隊，社區居民普遍缺乏經驗或防災知識，往往成為此互動關係中之單向接受者，這現象並不利於營造由下而上的社區防災推動模式；相對地，韌性社區加入了培訓社區居民成為防災士之要素，使其成為韌性社區的推動者之一，不僅能協助推動各項防災工作，更能影響且領導著社區居民共同參與，有助於提升社區整體防災意識與參與意願。

在評鑑方面，防災社區計畫並未提及，目前亦僅有新北市政府自行推動之防災社區認證，由公部門、專家學者及協力團隊共同審查社區資料；韌性社區則建立了三階段的認證機制，當社區每持續推動防災工作 2 年後即可申請爭取下一階段之認證標章。而認證過程中，會由消防署邀集專家學者成立訪視小組前往社區實地訪查，以了解韌性社區推動狀況與進度，並給予建議及回饋。

在計畫結束之後續運作支援部分，防災社區往往在公部門與協力團隊之資源退出社區後，難以持續運作；韌性社區則規定地方政府必須在 2 年計畫的推動期程結束後，編列至少 2 年經費給韌性社區，以維持其持續推動防救災工作。

經由韌性社區與防災社區之比較後，可發現前者計畫承接了後者推動過程中的成果與挑戰。在既有的防災推動基礎概念上特別強調了復原重建功能面向，並加入防災士、完善認證與後續運作支援機制，希望能逐漸消弭社區居民防災意識不足、社區領導者不諳防災觀念與社區缺乏資源導致停擺等推動困境。雖然短時間內效果難以顯現，但研究者認為上述機制與作為會是促進全民防災不可或缺之養分。

表 2 韌性社區與防災社區之比較

	韌性社區	防災社區
期程	2 年	2 年
推動主體	公部門、協力團隊、防災士	公部門、協力團隊
推行方式	村里或社區組成推動小組、公所組成跨單位小組	防災工作坊
經費來源	消防署	消防署
評鑑	韌性社區韌性（實地訪查）	無；認證標章（僅新北市政府）
後續運作機制	計畫結束後，由地方政府編列至少 2 年經費以利運作。	無

資料來源：本研究整理

五、以社區居民為本位之推動成效面向探討

第三部分回顧了有關防災社區成效指標、推動構面之相關文獻，經整理歸納後，將以社區居民為本位之推動成效面向區分為社區防災意識、社區民眾參與、社區防災教育與訓練、社區運作機制、社區脆弱度掌握、社區防災資源掌握共 6 個面向。

- (一) 社區防災意識：了解社區居民對於災害的認知與感受程度，以及對於預防或應變作為之重視程度。
- (二) 社區民眾參與：了解社區居民對於社區防災活動之認同程度與參與意願。
- (三) 社區防災教育與訓練：了解社區居民於社區防災教育與訓練課程中之學習狀況。
- (四) 社區運作機制：了解社區居民對於社區

防災編組與防災作為之熟悉程度。

- (五) 社區脆弱度掌握：了解社區居民對於自身社區脆弱度之掌握程度。
- (六) 社區防災資源掌握：了解社區居民對於自身社區防救災人才與物資、民生物資補給據點以及公部門單位之熟悉程度。

藉由上述六項評估面向，可了解到社區居民於社區防災工作的實際參與和推動狀況，進而據以探討韌性社區推動成效與推動狀況。

六、結論與建議

本研究藉由文獻回顧，進行韌性社區與防災社區之比較分析，以了解當前韌性社區之運作模式與重點，以及其相較於防災社區有何差異之處。同時彙整有關社區防災推動成效相關文獻，歸納出以社區居民為本位之推動成效評估面向，以期能深入了解社區居民在社區防災工作之參與和推動情形。本文之結論與建議合述如下。

- (一) 由上述文獻與計畫之探討可得知，韌性社區與防災社區之推動模式差異，在於前者多了災前復原重建作為、培訓居民成為社區推動者的防災士制度以及有助於社區持續經營之後續經費支援、認證機制，後者在此三面向並未提及。而目前社區防災持續運作之較大困境在於社區居民，顯現社區居民為社區防災工作推動之根本，當缺乏社區居民的付出與參與，社區防災工作將無法順遂推動。韌性社區有別於防災社區，亦針對社區居民面向之推動困境審慎思量，為了消弭居民防災意識不足、領導者缺乏防災知識等現象而加入防災士要素。研究者認為防災士制度之建立是促進全民防災理念中良好的開始，由每期韌性社區推派 2 位居民為開端，隨著更多居民培訓成為防災士並分布於全國各地從事防救災工作，意味著有更多具備基礎防災知識之領導者協助推動社區防災工作，其對於整體民眾防災意識之提升亦有更大的影響力。因此，建議公部門重視防災士等促進社區居民防災意

識之培訓機制，應持續提倡、實施並擴大此培訓機制，同時可尋求專家學者、企業等組織之合作。

- (二) 為了以社區居民為本位來探討韌性社區推動成效，可針對回顧文獻所歸納出的六大面向，從中擬定各面向的調查題目，採用李克特五點量表之答題方式，五個選項分別有其代表分數，同時可賦予選項實際意義，如此更能真實呈現居民的參與和推動情形。後續計算出研究對象之六大面向總分數相對於滿分之比例，並將推動成效分為三個不同程度之評價(良好、尚可、不好)，其對應比例分別為 80%以上、60~79%、59%以下，以了解研究對象韌性社區之推動成效。而韌性社區的推動目標在於提升社區災害韌性，當居民在社區防災工作參與、掌握程度越高，意味著災時社區居民越能因應災害衝擊，進而降低災害損失。因此，推動成效之良窳應從社區居民本身去檢視才更具意義，但研究者並非指經費資源、法令體制、利益關係者互動關係等面向不重要，而是上述面向在一個缺乏社區居民參與之社區中顯得毫無探討之必要。舉凡當居民對於社區防災工作不熟悉，甚至未學習到防災知識，即便經費來源無虞或防災活動場次皆符合規定，對於提升社區防災能力卻十分有限。因此，建議公部門與專家學者可延續本研究歸納之六大評估面向與研究操作方法，從中發展可深入了解居民於社區防災工作參與情形之評估細項相關題目，方有利於了解社區防災推動之真實狀況，進而得以評估社區防災推動成效。

參考文獻

2. 內政部消防署(2017),「災害防救深耕第3期計畫(核定本)」,取自於 [https://www.nfa.gov.tw/cht/index.php?act=download&ids=5333&path=../upload/cht/attachment/2f48f69de1e82e3c19ea37](https://www.nfa.gov.tw/cht/index.php?act=download&ids=5333&path=../upload/cht/attachment/2f48f69de1e82e3c19ea372e4b51acfa.pdf)
3. 何謹余,「坡地社區防災管理能力評估指標之研究」,成功大學水利及海洋工程學系碩士論文,2005。
4. 吳杰穎、康良宇,「社區防災推動之探討—以『社區防救災總體營造計畫』為例」,社區發展季刊,第116期,第213~231頁,2007。
5. 李龍潭,「地方政府推動社區災害防救之研究—以桃園縣防災社區為例」,國立中央大學土木工程學系碩士論文,2010。
6. 周瑞生、吳家輝,「臺北市都會社區防災管理實務推動」,物業管理學報,第5卷第2期,第35~52頁。
7. 柯昭男,「社區防災成效之評估:以社區韌性建構為考量」,中央警察大學防災研究所碩士論文,2018。
8. 郭俊欽、莊翰華、謝琦強,「社區防災學習指標之建構」,華岡地理學報,第25期,第1~19頁,2010。
9. 黃泰霖,「系統韌性概念回顧與災防策略之省思」,2012,取自於 <http://www.ncdr.nat.gov.tw/upload/epaper/o88.pdf> (2020年12月13日取得)
10. 黃建文,「地方政府推動防災社區之研究—以屏東縣為例」,國立高雄應用科技大學土木工程系暨土木工程科技研究所碩士論文,2013。
11. 潘穆嫻、林貝珊、林元祥,「韌性研究之回顧與展望」,防災科學,第1期,第53~78頁,2016。
12. UNISDR “Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the resilience of nations and communities to disasters,” Geneva, Switzerland: UNISDR, 2005.
13. UN “Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030,” UN World Conference on Disaster Risk Reduction, Sendai, Japan, 2015.
14. World Bank “Natural Disaster Hotspots: a global risk analysis,” Washington, D.C.: The World Bank, 2005.

運用無人飛行載具與影像辨識定位磁磚剝落位置

王芷涵¹ 黃凱翔²

¹國立高雄科技大學土木工程所碩士生

²國立高雄科技大學土木工程系助理教授

摘要

氣候極端天氣天數逐年上升，建築外牆材質也因氣候影響導致變質，而危害用路生命財產安全。政府因公寓大樓外牆磁磚剝落事件頻傳，也訂定了相關防範措施，針對屋齡超過 15 年公寓大樓需定期檢測外牆磁磚，但目前檢測方法準確度不佳也耗費大量時間與人力資源。為使檢測建築外牆快速且減少人力資源的浪費，並解決當前檢測方法準確度不佳等問題，本研究提出無人飛行載具結合影像辨識方法，快速辨識磁磚剝落與定位剝落位置，提供給修繕者或管理者明確改善位置，以利後續維修工作與成本估算。在研究案例上，以國立高雄科技大學建工校區作為實驗案例，該結果證實，無人飛行載具結合影像辨識確實可行且準確率高達 90% 以上，而磁磚剝落位置，可透過無人飛行載具定位系統找出座標，進而改善建築外牆檢測方法。

關鍵字：影像辨識、無人飛行載具、磁磚、定位

Use Unmanned Aerial Vehicle and Pattern Recognition to Locate the Peeling Position of Tiles

Chih-Han Wang¹ Kai-Hsiang Huang²

¹ Master student, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

² Assistant professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

The number of weather extreme weather days has been increasing year by year, and the material of building exterior walls has also deteriorated due to climate influences, which endangers the safety of life and property on roads. Due to the frequent occurrence of peeling off tiles on the exterior walls of apartment buildings, the government has also formulated relevant preventive measures. For apartment buildings over 15 years old, the exterior tiles need to be tested regularly. However, the current detection methods are not accurate and consume a lot of time and manpower. Resources. In order to detect the exterior walls of buildings quickly, reduce the waste of human resources, and solve the problems of poor accuracy of current detection methods, this research proposes an unmanned aerial vehicle combined with pattern recognition methods to quickly identify and locate the peeling tiles. The repairer or manager clearly defines the location for improvement to facilitate subsequent repair work and cost estimation. In the research case, the National Kaohsiung University of Science and Technology Jiangong Campus was used as an experimental case. The results confirmed that the unmanned aerial vehicle combined with pattern recognition is indeed feasible and the accuracy rate is as high as 90%. The position of the tile

peeling can be carried by the unmanned aerial vehicle. A positioning system is used to find out the coordinates, thereby improving the detection method of building exterior walls.

Keywords: pattern recognition, unmanned aerial vehicle, tiles, positioning

一、前言

台灣高樓受於高溫高濕環境與長期日照影響，牆面材料容易產生變質導致脫落或龜裂，除了牆面材料改良之外，營運維護的整修困擾著施工與管理者，尤其高樓層要辨別材料脫落位置更是不易，因此，克服此問題是本研究所專注的目標。

1-1 背景

磁磚剝落亦會危害人生命財產等問題，尤其使用年限已達 15 年房屋更是危險族群，「台北市建築管理自治條例第 31 條之 1」更在 2020 年 1 月修正了法案，並推出「外牆安全診斷檢查及申報制度」，保障用路人安全。此制度主要規定屋齡達 30 年 11 層樓以上建築物，每 3 年申報 1 次、屋齡超過 15 年未達 30 年 11 層樓以上建築物，如無外牆剝落紀錄，每 6 年申報 1 次、如外牆曾有剝落紀錄，每 3 年申報 1 次（臺北市建築管理工程處，2019）。

外牆修繕在台灣各大縣市已有相關的補助條款，如台中都市更新整建屋齡 20 年以上且留層樓以上補助金額最高可達總經費 25%，但不超過新台幣 1000 萬元、公寓大廈共用部分或約定共用部分維護，領滿使用執照 7 年每一公寓大廈外牆修繕費用為總金額 50%，不超過 22 萬元為準，在目前有相關此補助條例除台中與台北外，高雄與其他直轄市也逐漸重視高樓層住宅外牆磁磚老化改善，減少意外發生與保障住戶與附近居民生命安全。

在檢測外牆上，黃世孟 et al. (2010) 透過目視檢測準則結合專家問卷，並利用層級分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 找出建築外牆公共安全檢查因子與權重，建構出一套評估方法快速檢測建築外牆、梁智信 and 林谷陶 (2016) 紅外線熱像檢測可清楚了解磁磚表面溫度分布，磁磚脫落處與未異常區域溫度比較通常溫度較低，但此法受到

氣候與溫差不夠大影響導致檢測失真，建議檢測者在夜間進行檢測 (天野 et al., 2009)、超音波檢測採集牆面與磁磚分離率搭配紅外線熱像儀增加檢測精準度 (陳柏穎 et al., 2014)。

然而，近年來無人飛行載具 (Unmanned aerial vehicle, UAV) 的興起，應用廣泛如農業 (Yang et al., 2017)、邊坡 (Yeh et al., 2018)、沿海 (Yang et al., 2018)。UAV 在搭載攝影機鏡頭應用上多為影像辨識 (Pattern recognition) 與重建三維模型 (Nesbit & Hugenholtz, 2019)，此法可定期監測植被生長面積 (Théau et al., 2021) 或邊坡滑動，提供人觀測之位置與座標 (Sheu et al., 2019)，利於未來研究人員前往現地探勘。

影像辨識是目前運用最為廣泛的深度學習，透過多層卷積神經網路 (Convolutional Neural Network, CNN) 找出目標特徵當作往後辨識依據。現今辨識模型眾多，如 R-CNN (Girshick et al., 2014)、Fast R-CNN (Girshick, 2015)、Region Proposal Network (RPN)、Faster R-CNN (Ren et al., 2015)、You Only Live Once (YOLO v1) (Redmon et al., 2016)、SSD (Liu et al., 2016)、Feature Pyramid Network (FPN) (Lin et al., 2017)、Mask R-CNN (He et al., 2017)，這些模型專注於物件檢測 (object detection)，可透過開放資源資料進行預測或利用個人資料進行訓練後預測。

1-2 動機

過去磁磚剝落檢測方法易受環境、溫度等影響，導致檢測效果不佳，尤其熱像儀受到位置與方向因素，高樓處無法做更準確的判斷，因此，本研究結合 UAV 與影像辨識的方法，改善人無法到達的位置，並利用 UAV 上的攝影機，記錄 UAV 航線的影像，最終透過影像辨識找出磁磚剝落位置，並依據 UAV 所提供的三維座標匯出磁磚剝落中心位置，

給未來修繕人員了解高樓層建築外牆磁磚剝落之正確位置，使人員後續修繕準備更為完善。

二、Mask R-CNN

Mask R-CNN 在 2017 年被發表出來，整體架構改善於 Faster R-CNN 並利用 FPN 進行預測，其中在原本的 ROI (Region of Interest) Pooling 也更改為 ROI Align，圖 1，相較於 Faster R-CNN，除了方法簡單有效以外，在多目標偵測的情況下也有更好的結果，而兩者差別於最終輸出 Mask R-CNN 增加一個目標形狀 (Mask)。然而，ROI Align 改良了 ROI Pooling 的取整數的誤差，這改善了 Mask 和物件的錯位，可更完整的 Mask 出物件之形狀。

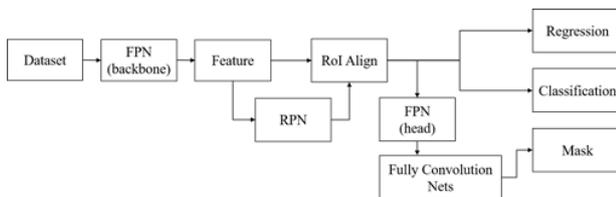


圖 1 Mask R-CNN 架構圖

Mask R-CNN 損失函數 (loss function) 為：

$$L = L_{cls} + L_{box} + L_{mask} \quad (1)$$

L_{cls} 與 L_{box} 的部分和 Faster R-CNN 相同，至於 Mask 輸出為 $m \times m \times K$ ， $m \times m$ 是解析度， K 則為類別數量，最後與 Faster R-CNN 不同處為激活函數 (Activation Function) 與損失函數分別為 sigmoid 與 average binary cross entropy。兩者匯出結果差異最大地方為語意分割 (semantic segmentation) 與實例分割 (instance segmentation)，一個僅可對類別做區分，另一可做同一類別區分，如圖 2 (COCO 資料訓練模型)，雖然 Mask R-CNN 可做更詳細的同類別分類，卻導致了訓練與預測時間較長，在運用上，不像其他模型的廣泛，但在時間許可下，此方法是當今 R-CNN 裡準確率最高的模型。



圖 2 Faster R-CNN (a) 與 Mask R-CNN (b) 匯出

三、研究方法

本次研究架構主要分為七大步驟，從規劃飛行路線、UAV 指定位置飛行、飛行期間錄影、資料訓練、資料預測、找尋預測物件中心點與換算座標，圖 3。以下為各步驟介紹：

步驟一 規劃飛行路線：飛行路線規畫可分為現場與預先規劃路徑，以確保完整拍攝整棟大樓外牆，也可減少人力資源的浪費，如公寓大廈區域範圍廣，可藉由多台 UAV 分配不同路線，規畫出完整拍攝公寓外牆且不重複拍攝路徑。

步驟二 UAV 指定位置飛行：到指定位置開啟 UAV 與定位系統即可飛行。

步驟三 飛行期間錄影：目前多數 UAV 發展轉為模組化發展，可藉由不同的感測器使 UAV 飛行更為安全，但此研究 UAV 上需搭配攝影機且依規畫路徑範圍進行拍攝。

步驟四 資料訓練：在收集完公寓大廈外牆錄影後，尚未有外牆磁磚剝落模型須先行進行資料訓練，反之，有磁磚剝落模型可直接跳過此步驟，直接進行下一步驟進行資料預測。

步驟五 資料預測：把 UAV 影片檔輸入後，辨識有磁磚剝落位置並匯出圖片檔進行資料儲存，即可快速找尋磁磚剝落位置，不須人工逐一檢視影片記錄磁磚剝落。

步驟六 找尋預測物件中心點：為了避免磁磚脫落位置相似，匯出磁磚剝落位置提供給修繕者，使未來修繕可快速找尋外牆磁磚剝落，提高工作效率且可

透過座標間的位置訊息，安排最佳修繕路徑。

步驟七 換算座標：由於 UAV 座標為當下拍攝時的座標，並非磁磚剝落位置座標，

然而，照片中心與 UAV 座標相互呼應，因此，需計算磁磚剝落位置與 UAV 位置之相對座標，圖 4 與附錄一。

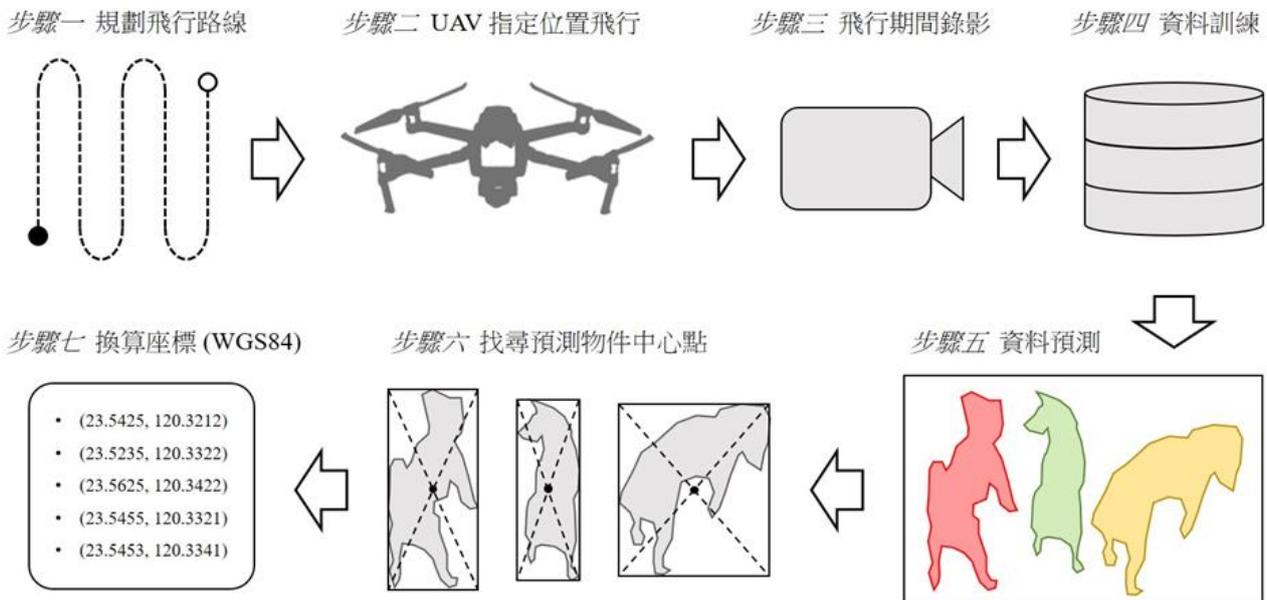


圖 3 辨識外牆磁磚剝落架構圖

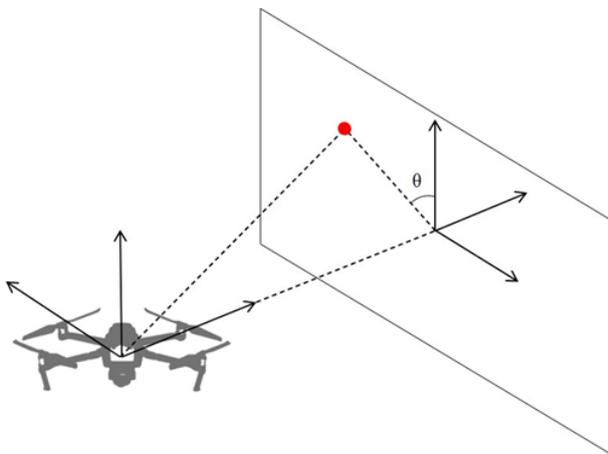


圖 4 UAV 與磁磚剝落中心座標換算

四、實驗結果

主要分為兩節，第一節介紹實驗場所與範圍，第二節針對實驗方法的結果進行分析。

4-1 實驗場所介紹

本次實驗場所為國立高雄科技大學 建工校區，圖 5，主要以紅色框內作為本次實驗磁磚剝落檢測範圍，分別對每棟大樓進行 UAV 路線規劃與辨識磁磚脫落。



圖 5 實驗場所

4-2 實驗結果分析

本實驗結果，透過 UAV 與影像辨識結合，確實可以解決目前外牆磁磚剝落偵測問題，不僅節省了檢測時間，更可以降低檢測者風險。在影像辨識訓練上，我們透過校內不同大樓與非校區內的公寓大廈進行磁磚剝落模型的訓練，最終我們得到 90% 以上的準確率，圖 6 (1) (2)，實驗基地內的房屋外牆磁磚剝落位置與座標，最終計算出磁磚剝落位置座標與高度。



圖 6 (1) 實驗基地外牆磁磚剝落位置與座標

五、結論與建議

本實驗方法確實可行，且比起過往檢測上更加安全與方便。透過無人飛行載具錄影可更快速且不需人工方式辨識磁磚剝落位置與座標，而此方法最終可針對不同座標系統做轉換，因應不同地區或國家做使用。

在未來可使用各點座標做最佳化的排程與人力分配，使維修效率提高，畢竟台灣高樓眾多，以台北市來說，當前屋齡超過 15 年的高樓有 2970 棟，在目前耗時又耗人力的外牆檢測方式，跟不上磁磚脫落的速度。在設備改善上，把攝影機換成紅外線熱像儀並加上影像辨識，可增強磁磚剝落辨識的問題，尤其本研究僅專注在磁磚脫落，未脫落磁磚在未來也有潛在的不安因素，提早發現減少憾事發生。

參考文獻

1. Girshick, R. (2015). Fast r-cnn. Paper presented at the Proceedings of the IEEE international conference on computer vision.
2. Girshick, R., Donahue, J., Darrell, T., & Malik, J. (2014). Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. Paper presented at the Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition.
3. He, K., Gkioxari, G., Dollár, P., & Girshick, R. (2017). Mask r-cnn. Paper presented at the Proceedings of the IEEE international conference on computer vision.
4. Lin, T.-Y., Dollár, P., Girshick, R., He, K., Hariharan, B., & Belongie, S. (2017). Feature pyramid networks for object detection. Paper presented at the Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition.
5. Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C.-Y., & Berg, A. C. (2016). Ssd: Single shot multibox detector. Paper presented at the European conference on

- computer vision.
6. Nesbit, P. R., & Hugenholtz, C. H. (2019). Enhancing UAV-SfM 3D Model Accuracy in High-Relief Landscapes by Incorporating Oblique Images. *Remote Sensing*, 11(3), 239.
 7. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. Paper presented at the Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition.
 8. Ren, S., He, K., Girshick, R., & Sun, J. J. a. p. a. (2015). Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks.
 9. Sheu, B.-H., Chiu, C.-C., Lu, W.-T., Huang, C.-I., & Chen, W.-P. (2019). Development of UAV Tracing and Coordinate Detection Method Using a Dual-Axis Rotary Platform for an Anti-UAV System. *Applied Sciences*, 9(13). doi:10.3390/app9132583
 10. Théau, J., Lauzier-Hudon, É., Aubé, L., & Devillers, N. (2021). Estimation of forage biomass and vegetation cover in grasslands using UAV imagery. *Plos one*, 16(1), e0245784.
 11. Yang, M.-D., Huang, K.-S., Kuo, Y.-H., Tsai, H. P., & Lin, L.-M. (2017). Spatial and Spectral Hybrid Image Classification for Rice Lodging Assessment through UAV Imagery. *Remote Sensing*, 9(6). doi:10.3390/rs9060583
 12. Yang, M.-D., Huang, K.-S., Wan, J., Tsai, H. P., & Lin, L.-M. (2018). Timely and quantitative damage assessment of oyster racks using UAV images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations Remote Sensing*, 11(8), 2862-2868.
 13. Yeh, F.-H., Huang, C.-J., Han, J.-Y., & Ge, L. (2018). Modeling slope topography using unmanned aerial vehicle image technique. Paper presented at the MATEC web of conferences.
 14. 天野, 勲., 山川, 和., & 伊藤, 秀. (2009). 特殊建築物の外壁診断における赤外線調査ガイドライン. *建設の施工企画* (708), 70-76.
 15. 梁智信, & 林谷陶. (2016). 外牆磁磚系統檢測技術探討. (130), 63-73.
 16. 陳柏穎, 李德河, 吳建宏, 許家豪, & 賴新龍. (2014). 以非破壞性檢測法檢測大樓壁磚分離率. [Using Nondestructive Test to Inspect the Building Wall Tiles Separation Rate]. 26(1), 23-36. doi:10.6652/JoCICHE.201403_26(1).0003
 17. 黃世孟, 江立偉, & 陳振華. (2010). 建築物外牆公共安全目視診斷評估方法之研究. [Study on A Method by Visual Inspection of the Building Siding Public Security]. 1(1), 35-44. doi:10.29467/jpm.201003.0004
 18. 臺北市建築管理工程處. (2019). 全國首創! 北市府推動外牆診斷申報制度!. Retrieved from https://dba.gov.taipei/News_Content.aspx?n=D633BAA019C40BE8&sms=72544237BBE4C5F6&s=0290714C3BC98CF5.

	
<p>緯度: 22.650266944444443 (UAV 座標) 經度: 120.32820861111111 (UAV 座標) 高度: 21 m (UAV 座標)</p>	<p>緯度: 22.650238666666667 (UAV 座標) 經度: 120.32821708333333 (UAV 座標) 高度: 22 m (UAV 座標)</p>
<p>磁磚剝落中心座標: (22.650272943020074, 120.32820681389542) 高度: 22.0 m</p>	
	
<p>緯度: 22.650263222222222 (UAV 座標) 經度: 120.329324555555556 (UAV 座標) 高度: 27 m (UAV 座標)</p>	<p>緯度: 22.6502504166666665 (UAV 座標) 經度: 120.329325472222222 (UAV 座標) 高度: 28 m (UAV 座標)</p>
<p>磁磚剝落中心座標: (22.65025457551102, 120.32932517451754) 高度: 27.0 m</p>	
	
<p>緯度: 22.649341972222222 (UAV 座標) 經度: 120.328266444444444 (UAV 座標) 高度: 25 m (UAV 座標)</p>	<p>緯度: 22.649295805555553 (UAV 座標) 經度: 120.32824936111111 (UAV 座標) 高度: 26 m (UAV 座標)</p>
<p>磁磚剝落中心座標: (22.649325603557266, 120.32826042075072) 高度: 24.5 m</p>	

圖 6 (2) 實驗基地外牆磁磚剝落位置與座標

附錄一

```

def getangle(x1, y1,x2, y2):
    angle = math.degrees (math.atan((x2-x1)/(y2-y1)))
    if x2 > x1 and y2 < y1:
        angle = -angle
    elif x2 > x1 and y2 > y1:
        angle = 180 - angle
    elif x2 < x1 and y2 > y1:
        angle = 180 - angle
    elif x2 < x1 and y2 < y1:
        angle = 360 - angle
    return angle

def getdistance(x1,y1,x2,y2):
    distance = (((x2-x1)**2) + ((y2-y1)**2)**(0.5))
    return distance

C = []
if len(centerpoint) > 1:
    z = realgps[o][2]
    #angle C
    aziCA = getangle(detected_center[o][o],
detected_center[o][1], centerpoint[o][o],
centerpoint[o][1])
    aziCB = getangle(detected_center[1][o],
detected_center[1][1], centerpoint[1][o],
centerpoint[1][1])
    if aziCA > aziCB + 180:
        angleC = (360 - aziCA) + aziCB
    else:
        angleC = aziCA - aziCB
        (360 - aziCA) + aziCB = aziCA
    print('angleC = ' + str(anglec))
    #angle A
    if aziCA > aziCB:
        aziAB = 90
    elif aziCA > aziCB and aziCA <90 and aziCB<90:
        aziAB = 270
    elif aziCA > aziCB and aziCA >270 and aziCB>270:
        aziAB = 270
    else:
        aziAB = 270

```

```

aziAC = getangle(centerpoint[o][o],
centerpoint[o][1], detected_center[o][o],
detected_center[o][1])
    if aziAC < aziAB:
        angleA = aziAB - aziAC
    elif aziAC > aziAB + 180:
        angleA = 360 -aziAC + aziAB
    elif aziAC > aziAB and aziAC < aziAB +180:
        angleA = aziAC - aziAB
    print('anglea = ' + str(angleA))
    #angle B
    angles = 180 - angleA- angleC
    print('angleB = + str(angleB))

AB_Lx = realgps[1][o] - realgps[o][o]
AB_Ly = realgps[i][1] - realgps[e][1]

AB = (((AB_Lx * 111 *1000)**2)**(1/2))
AC = (AB * math.sin(math.radians (angleB))) /
math.sin(math.radians(angleC))
    print('AB= ' + str(AB) + ' AC= ' + str(AC)+ ' BC= ' +
str(BC))

    if aziCA <90:
        distance_z = AC * math.cos(math.radians
(aziCA))
        distance_x = AC * math.sin(math.radians
(aziCA))
        zc_x = z - distance_z
    elif aziCA >90 and aziCA <180:
        distance_z = AC * math.cos(math.radians (180 -
aziCA))
        distance_x = AC * math.sin(math.radians (180 -
aziCA))
        zc_x = z + distance_z
    elif aziCA >180 and aziCA <270:
        distance_z = AC * math.cos(math.radians (270 -
aziCA))
        distance_x = AC * math.sin(math.radians (270 -
aziCA))
        zc_x = z + distance_z
    elif aziCA >270:

```

```

distance_z = AC * math.cos (math.radians(360 -
aziCA))
distance_x = AC * math.sin(math.radians (360 -
aziCA))
zc_X = z - distance_z
zc_x = math.ceil(zc_x)
distance_x = distance_x / 111 / 1000
if AB_Lx < 1:
    if aziCA < 180:
        xc = realgps[o][o] + distance_x
    else: xc = realgps[o][o] - distance_x
else:
    if aziCA < 180:
        xc = realgps[o][e] - distance_x
    else: xc = realgps[o][o] + distance_x
AB1 = (((AB_Ly / 111 * 1000)**2)**(1/2))
AC1 = (AB1 * math.sin(math.radians (angleB))) /
math.sin (math.radians(anglec))
BC1 = (AB1 * math.sin(math.radians (angleA))) /
math.sin (math.radians(anglec))
print('ABy= ' + str(AB) + ' ACy= ' + str(AC) + ' BCy= ' +
str(BC))

if aziCA < 90:
    distance_zy = AC1 * math.cos (math.radians
(aziCA))
    distance_y = AC1 * math.sin (math.radians
(aziCA))
    zc_y = z - distance_zy
elif aziCA > 90 and aziCA < 180:
    distance_zy = AC1 * math.cos (math.radians(180 -
aziCA))
    distance_y = AC1 * math.sin(math.radians(180 -
aziCA))
    zc_y = z + distance_zy
elif aziCA > 180 and aziCA < 270:
    distance_zy = AC1 * math.cos (math.radians (270
- aziCA))
    distance_y = AC1 * math.sin (math.radians(270 -
aziCA))
    zc_y = z + distance_zy
elif aziCA > 270:

```

```

distance_zy = AC1 * math.cos (math.radians(360
- aziCA))
distance_y = AC1 * math.sin (math.radians(360 -
aziCA))
zc_y = z - distance_zy
zc_y = math.ceil(zc_y)
distance_y = distance_y / 111 / 1000
if AB_Ly < 0:
    if aziCA < 180:
        yc = realgps[o][1] + distance_y
    else:
        yc = realgps[o][1] - distance_y
else:
    if aziCA < 180:
        yc = realgps[o][1] - distance_y
    else:
        yc = realgps[o][1] + distance_y
zc = (zc_x+zc_y)/2
print('gps= (' + str(xc)+', '+str(yc)+', '+str(zc)+')')

```

安全母索不同材質差異性之研究

鄭淑惠¹ 林智強²

¹國立高雄科技大學土木工程系碩士生

²國立高雄科技大學土木工程系助理教授

摘要

國內目前普遍使用之安全母索提供給現場勞工朋友勾掛使用，但工安意外仍然不斷發生，其中又以墜落是最為常見，顯示安全母索的安全性是需要再值得探討，其中安全繩索的材質是安全母索強度的關鍵，現場使用之安全母索材質普遍規格尺寸不齊，即使防墜計畫相當完整，但也因為繩索材質不堪完善，而導致憾事一再發生。本研究探討 5 種不同材質，分別為聚乙烯、聚丙烯、聚酯、聚醯胺及棉，其中以棉使用較為頻繁，主要是因為平價、取得容易、操作方便、延展性較佳及施工簡易…等優點，由於現場施工區域範圍有些地方可能較無法依照法令規範之施工工法來施作，那麼安全繩在現場則是扮演較簡易型的安全防護措施。針對繩索的材質不同及繩索粗細，將影響現場使用的風險，以聚醯胺和棉來作為參考值，聚醯胺在現場也會列入使用考慮，但相較之下，棉質的繩索於現場使用上的延展性效果來的更佳，在遇到緊急狀況人員墜落之虞，不會因為重力加速度，使墜落的人員造成因繩索的反彈所產生的二次傷害，本研究透過實驗的方式進行比較，探討不同材質其強度差異。

關鍵字：安全母索、抗拉強度、繩索材質、繩索尺寸

Study on the Difference of Different Materials of Lifeline

Cheng, Shu-Hui¹ Lin, Chih-Chiang²

¹ Master student. Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

² Assistant Professor. Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

At present, the safety mother rope commonly used in Taiwan is provided for workers on site to hook and use, but industrial safety accidents continue to occur, among which falling is the most common. It shows that the safety of the safety mother rope needs to be further discussed. The material of the safety rope is the key to the strength of the safety mother rope, and the material specifications and sizes of the safety mother rope used on site are generally uneven, even though the fall prevention plan is quite complete, the rope material is not perfect, which leads to repeated regrets. In this study, five different materials are discussed, including polyethylene, polypropylene, polyester, polyamide, and cotton. Among them, cotton is used more frequently, mainly because of the advantages of low price, easy access, convenient operation, better ductility, and simple construction, then the safety rope is a simple safety protection measure on site. Given the different materials and thickness of ropes, which will affect the risk of on-site use, polyamide and cotton will be taken as reference values, and polyamide will also be considered in site use. However, in contrast, cotton ropes have better ductility in on-site use. In case of emergency, people will not

fall because of gravity acceleration. In this study, we compared the secondary injuries caused by the rebound of the rope, and discussed the strength differences of different materials.

Keywords: lifeline, tensile strength, rope material, rope size

一、前言

繩索所編結的安全網是由交叉編結而成，繩結則是一段或多段的一股可以曲繞材料，經過纏繞及編織而形成，這種編織是應用在安全的結構上的考量，而此繩股之交叉則是稱為繩結。繩索、鋼索、扁帶、線等都可以用來作為繩股得的材料，實際上也因為環境的不同所選擇適合的材質。

安全繩索、安全網其實最常為使用在高處作業場所，如依據勞動部勞動及職業安全衛生研究所宣導會，說明下面幾張圖，針對營造業所做之職災千人率分佈圖如圖 1、營造業重大職災災害類型分佈之建築工程佔比如圖 2、營造業重大職災災害類型分佈之整體墜落死亡佔比如圖 3、營造業鋼構作業災害類型分佈如圖 4 由職災死亡千人率統計看來，其所有工程發生災害以建築工程發生率最為居高，其佔了 46%之高比例如圖 2，其中又以墜落死亡災害佔了 60%其餘危害類型則是佔了約 40%如圖 3 所示，用來預防不小心墜落時還可以能保有保住性命的機會，一般會發生墜落危害的作業及場所，依據勞動部勞動及職業安全衛生研究所宣導會，報告中整合出在屋頂作業而造成的死亡人數，並對應其死亡的原因如圖 6，從圖中可看出因墜落、滾落而造成的死亡式最高的比例，佔了有 94%，而剩餘的 6%則是其他行為所造成，一般有可能發生墜落之場所：如地面開口、施工架上、工作台、管道間、樓板開口、電梯管道開口、牆面開放邊緣、二公尺以上合梯(A 字梯)、高空工作車操作、移動梯，單梯等，易發生墜落之作業型態：如高架作業、設施配管、線槽配設、鋼構組配、電纜鋪設、油漆施工、大樓外牆清洗等。

因此可知繩索對於勞工的安全性是直接相關的，故本研究將針對常見的五種繩索材質進行比較，然而在採購繩索時又會有不同

粗細大小的尺寸差異，尺寸差異除了影響價格外，對於現場使用上也會有不同安全程度的考量，所以會將五種材質再搭配上常見的五種尺寸，進行抗拉強度試驗，透過實驗的數據結果進行分析比較。

依據勞動部勞動及職業安全衛生研究所宣導會，說明下面幾張圖，針對營造業所做之職災千人率分佈圖如圖 1、營造業重大職災災害類型分佈之建築工程佔比如圖 2、營造業重大職災災害類型分佈之整體墜落死亡佔比如圖 3、營造業鋼構作業災害類型分佈如圖 4、營造業鋼構作業災害類型人數佔比如圖 5、營造業屋頂作業災害類型分佈如圖 6、營造業屋頂作業災害類型人數佔比如圖 7、營造業施工架作業災害類型佔比如圖 8、營造業施工架作業人數災害佔比圖 9，來做為說明墜落危害的嚴重性。

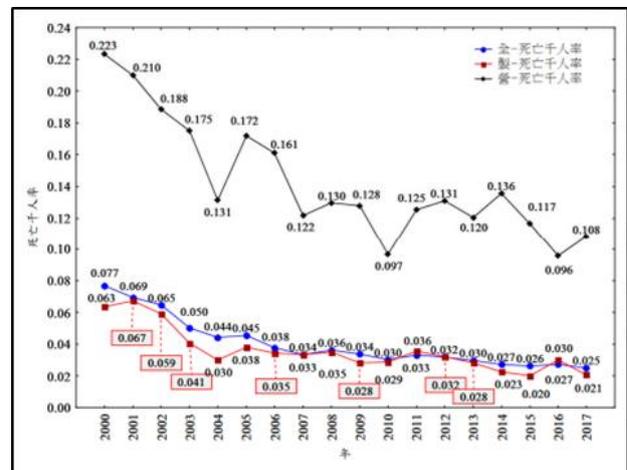


圖 1 營造業職災千人率分佈(2000 - 2017 年)

由於圖 1 只說明到 2017 年，查詢候補上依照職安法適用行業工作場所重大職災死亡千人率，在 2018 年其營造業之死亡千人率 0.1469，而實際死亡人數為 124 人，在 2019 年其營造業之死亡千人率 0.198 而實際死亡人數為 168 人。

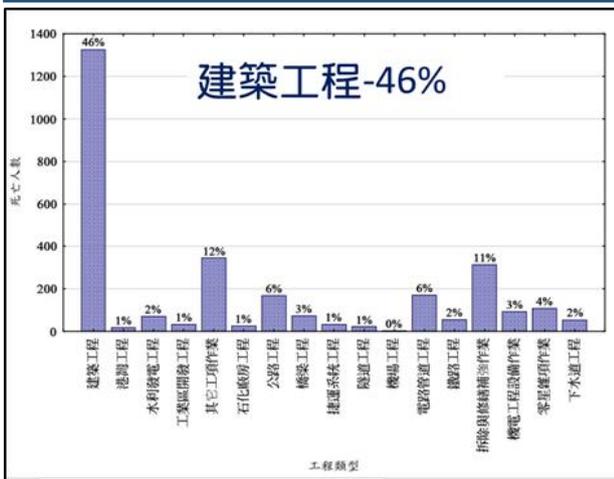


圖 2 營造業重大職災災害類型分佈(2000 - 2017 年, N=3234)

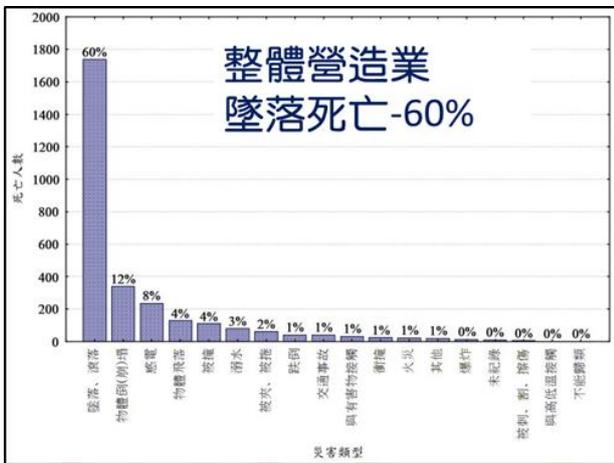


圖 3 營造業重大職災災害類型分佈(2000 - 2017 年)

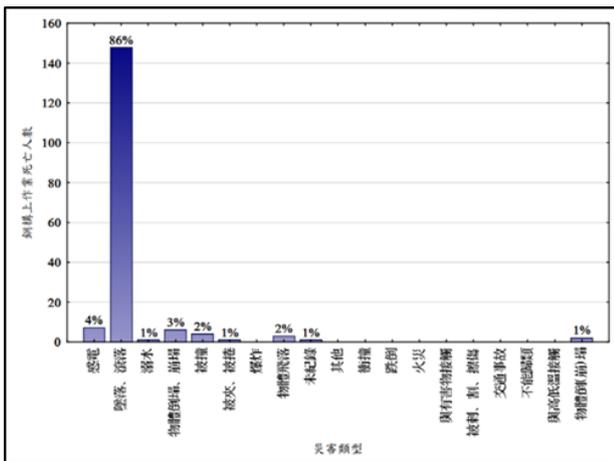


圖 4 營造業鋼構作業災害類型分佈

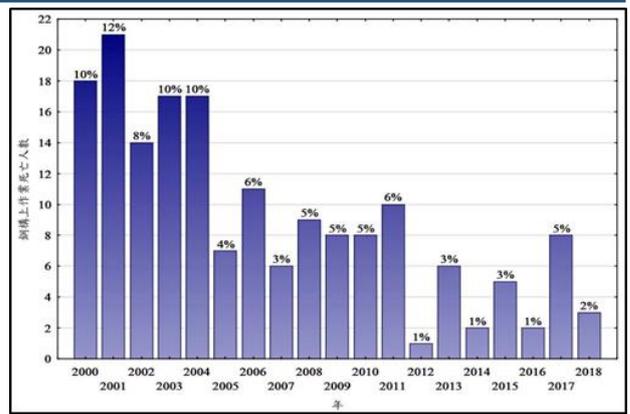


圖 5 營造業鋼構作業災害人數佔比

由於圖 4 可知，鋼構作業的意外中，墜落占 86%、感電占 4%、被撞占 2%、物體飛落占 2%、物體倒崩塌占 3%，可知墜落是其中占比最高的。

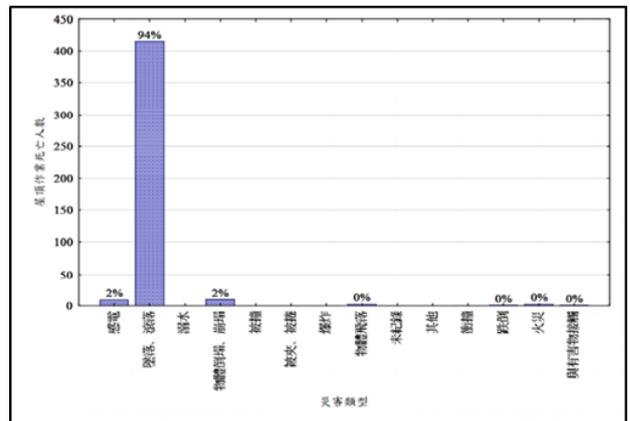


圖 6 營造業屋頂作業災害類型分佈

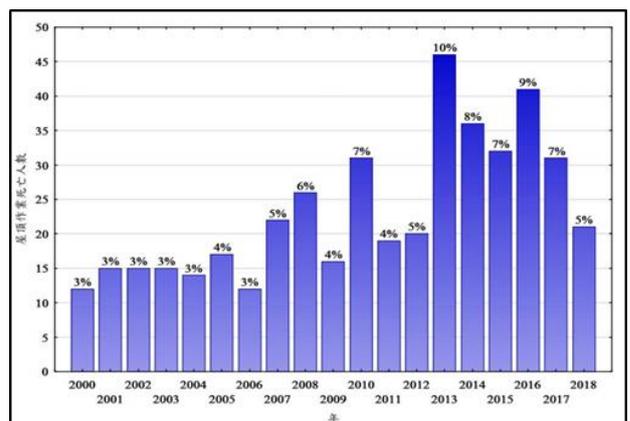


圖 7 營造業屋頂作業災害類型人數佔比

由於圖 6 可知，鋼構作業的意外中，墜落占 94%、零星雜項作業占 13%、感電占 2%、物體倒崩塌占 2%，可知墜落是其中占比最高的。

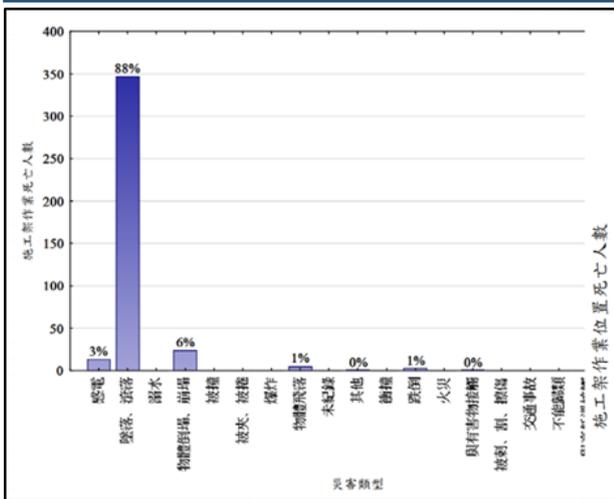


圖 8 營造業施工架作業災害類型佔比

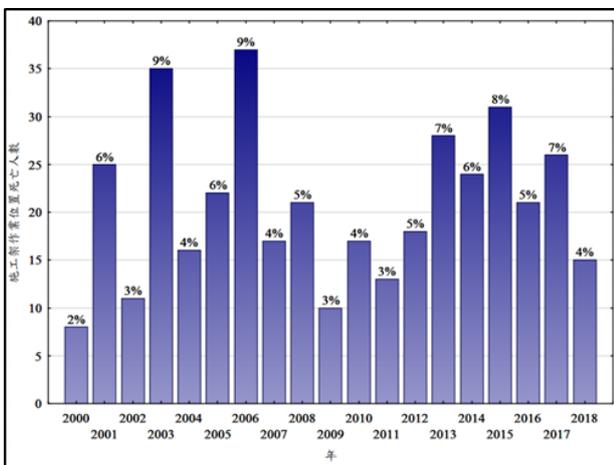


圖 9 營造業施工架作業人數災害佔比

由於圖 8 可知，鋼構作業的意外中，墜落占 88%、拆除與修繕補強作業占 7%、物體倒塌占 6%、感電占 3%、物體飛落占 1%，可知墜落是其中占比最高的。

二、繩索基本樣品與設置說明

2-1 繩索材質與尺寸說明

本研究所使用之神所材質分別為聚乙烯、聚丙烯、聚酯、聚醯胺及棉，以下針對各材質的性質加以描述。

聚酯特性：屬於人造纖維，表面光滑無孔隙，本身具有強度大、不易破裂、強力伸縮、快乾等特性。

聚乙烯特性：在大氣陽光和氧的作用下，易產生老化、脆化、龜裂或是粉化等作用，即尚失本身繩索力學性能。

聚丙烯特性：通常為半透明無色固體，

無臭味無毒性，分子的結構與聚乙烯相似，由於結構規整而高度結晶化，故熔點可高達 167°C，其特色優點為耐熱產品，可使用於蒸汽消毒，且耐腐蝕，抗張強度 30MPa，強度、剛性和透明性都比聚乙烯好，且密度 0.90g/cm³，是最輕的通用塑料。

聚醯胺特性：高耐磨性，高熱穩定性，極佳之強度與硬度。

棉特性：布紋質感天然涼且柔軟、吸水力強，適合手工天然染色耐熱度夠。

本研究之繩索，除了依照不同的材質外，對於其繩索的尺寸，也做差異性分析，而本研究針對前節所描述的各材質，均做 5 種尺寸，分別為 8 mm、10 mm、12 mm、14 mm 和 16 mm。

營造業常見之繩索如圖 10 所示，經過編結後如圖 11 所示，而實驗所用之拉力測試繩索如圖 12 所示。



圖 10 營造業用之繩索



圖 11 營造業交叉編結



圖 12 拉力測試繩索

2-2 現場設置狀況

一般常見錨錠端母索捆綁方式以打結或鋼索夾固定，常見有以或 ϕ 8mm 或 ϕ 9mm 鋼索，也有以棉繩或特多龍繩為水平母索設置，一般 PP(聚酯繩索) ϕ 14mm 以上，尼龍繩 ϕ 13mm 以上及特多龍繩 ϕ 12mm 以上，其強度方可達 2300kg。

實驗針對每一種繩索軍紀錄其長度，並對繩索樣本進行編號與拍照記錄如圖 13 所示。

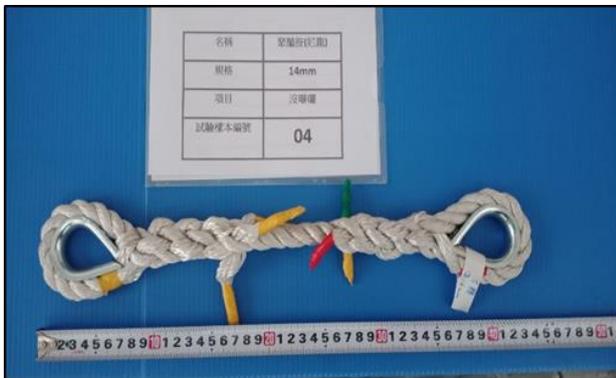


圖 13 實驗用繩索紀錄

三、實驗規劃分析

3-1 實驗規劃步驟

此項研究是採用現場普遍使用之繩索樣本來做測試，針對樣本收集了五種材質、五種粗細大小之繩索，先取長度差不多之繩索，使用交叉編結加強拉力測試的準確度，因繩索兩頭均已編織繩結固定，使得這些樣本在做拉拔測試時，可以達到更準確的承載重量。實驗執行步驟如下：

- (一) 針對繩索材質對勞工的重要性做篩選
- (二) 選定研究之繩索種類及大小尺寸
- (三) 剪裁測試之繩索樣本
- (四) 蒐集法規訂定之標準
- (五) 準備拉拔測試機
- (六) 數據分析

四、實驗結果比較

針對我們所選擇之安全母索材質作為拉拔實驗測試，將分為聚酯、聚乙烯、聚丙烯、聚醯胺及棉等五大種類，再將這五種繩索分別取不同大小的尺寸規格，進行拉拔測試，所得到之抗拉強度數值與中華民國國家標準 CNS 法規規定值，作為比較參考，其數值比較如表 1 至表 5。

表 1 聚酯

尺寸	實際拉力(kN)	CNS(kN)
8mm	8.93	5.98
10mm	13.93	10.2
12mm	21.78	14.6
14mm	29.04	19.5
16mm	41.50	25.0

表 2 聚醯胺(尼龍)

尺寸	實際拉力(kN)	CNS(kN)
8mm	8.34	11.9
10mm	17.17	18.1
12mm	23.64	27.5
14mm	33.45	36.6
16mm	51.70	46.9

表 3 聚乙烯

尺寸	實際拉力(kN)	CNS(kN)
8mm	4.61	5.2
10mm	13.34	7.94
12mm	16.68	11
14mm	24.33	14.6
16mm	17.36	18.7

表 4 聚丙烯

尺寸	實際拉力(kN)	CNS(kN)
8mm	10.20	6.37
10mm	14.03	9.71
12mm	18.54	14.1
14mm	24.23	18.8
16mm	28.55	24.2

表 5 棉

尺寸	實際拉力(kN)	CNS(kN)
8mm	5.00	3.2
10mm	7.65	5.2
12mm	9.81	7.3
14mm	14.13	9.8
16mm	22.66	13.1

由以上數據將其轉化為圖表進行比較，分別如圖 14 至圖 18，且由圖可知聚酯、聚丙烯和棉的所有尺寸實驗結果均大於軌範所規定，而聚醯胺(尼龍)和聚乙烯則是在部分尺寸下的實驗結果不符合規定，由此可知這兩種材質需要特別注意其強度。從圖中亦可看出，強度最大的是聚醯胺(尼龍)其尺寸為 16 mm，其拉力值達 52.7 kN，若是與規範相比，則是棉尺寸為 16 mm 的實驗結果，約為規範值之 1.76 倍。

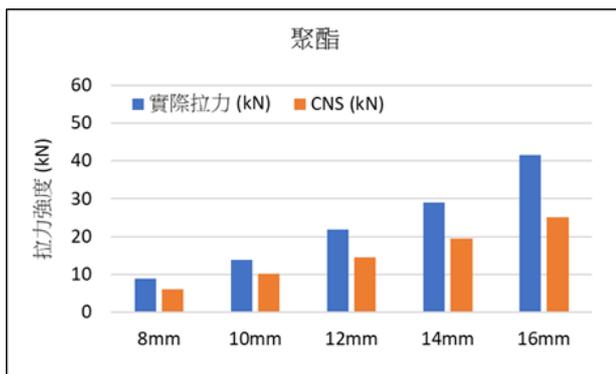


圖 14 聚酯實驗與規範比較

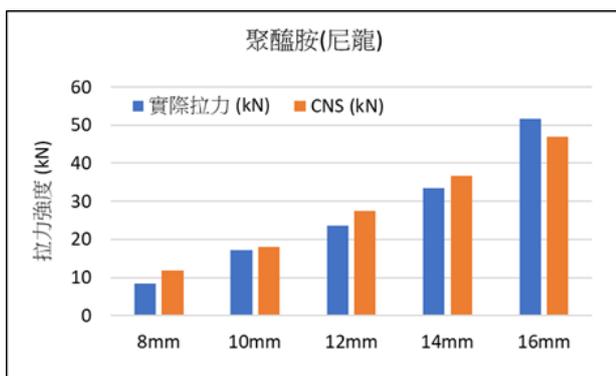


圖 15 聚醯胺(尼龍)實驗與規範比較

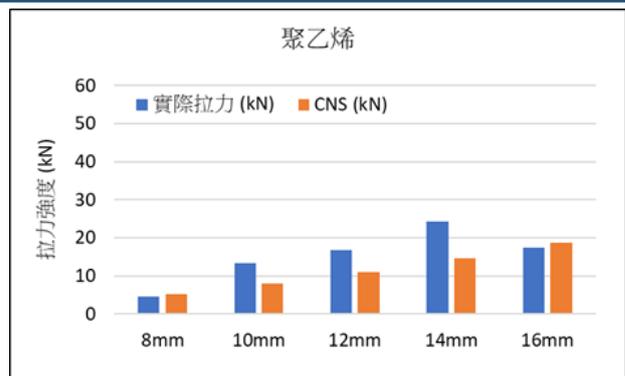


圖 16 聚乙烯實驗與規範比較

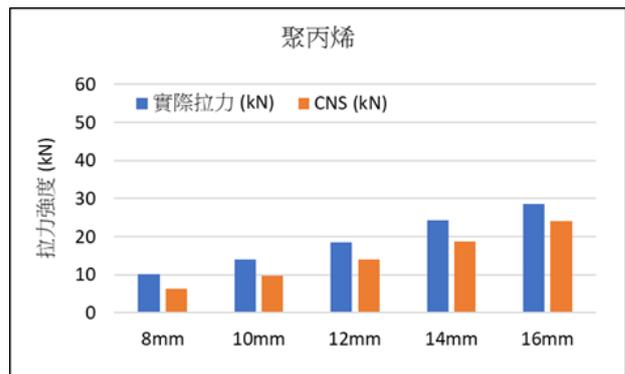


圖 17 聚丙烯實驗與規範比較

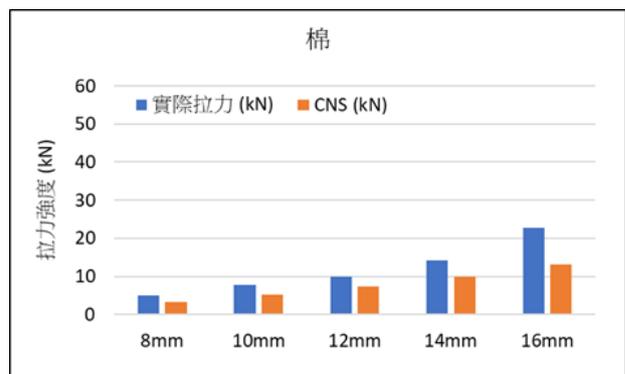


圖 18 棉實驗與規範比較

五、結論

本研究之實驗結論結果，針對墜落災害部分，希望可以提供給業界在對於施工現場，有高處作業、開口作業、有墜落危害之虞之場所，所需要使到繩索材質的部分，可提供參考選擇，以較佳的實驗後之拉力破斷數據，來參考選擇使用之安全性能，進而期待降低現場災害的罹災比例，使整個風險控制大大提升，達到整個大環境的職災比例，結論如下幾點：

1. 整體而言實驗可反應平時現場所使用繩

索之情況。

2. 對於材料而言，聚酯、聚丙烯和棉的所有尺寸實驗結果均大於軌範所規定，而聚醯胺(尼龍)和聚乙烯則是在部分尺寸下的實驗結果不符合規定。

強度最大的是聚醯胺(尼龍)其尺寸為 16 mm，其拉力值達 52.7 kN，若是與規範相比，則是棉尺寸為 16 mm 的實驗結果，約為規範值之 1.76 倍。

參考文獻

1. 勞動部勞動及職業安全衛生研究所，營造工程水平母索安全實務宣導會 2020/11/27。
2. 林禎中，安全網安全性能之探討，行政院勞工委員會勞工安全衛生簡訊，第 24 期，台北，1997。
3. 安全網，CNS 總號 14252，中華民國國家標準，1998。
4. 張智超，安全母索抗拉強度特性之研究，嘉南藥理科技大學產業安全衛生與防災研究所，碩士論文
1. ，2009。
5. 行政院勞工委員會(2010)，營造安全衛生設施標準(2010)，行政院勞工委員會。
6. 吳世雄，曹常成，營造業墜落安全問題之分析研究，行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，研究報告，台北，1996。
7. 潘惟潮，淺談營造業職業災害殺手-墜落-的防範，地 193 期，7-16 頁，2005。
8. 吳欣芷，水平安全母索抗拉強度之影響因子研究，嘉南藥理科技大學產業安全衛生與防災研究所，碩士論文，2010。

鋼纜(鋼索)應用研究

邱士銘¹ 林智強²

¹國立高雄科技大學土木工程防災所碩士在職專班

²國立高雄科技大學土木工程系助理教授

摘要

鋼纜(鋼索)的重要性：

長久以來營造業施工意外一直高居世界各國產業職災及重大職災比例之首，依據勞動部勞動及職業安全衛生研究所報告中，「墜落」是我國全產業勞工重大職業災害之主要原因，其中以「營造業」及「製造業」為發生墜落災害之大宗。

對於勞工生命及產業生產力造成重大的威脅，主要原因是營造工程作業場所具有開放場所與高危險之特性，但受限於人力及專業技術的不足，監督檢查之效果及效率並不理想，導致工安意外仍一再發生，顯示鋼纜(鋼索)的抗拉強度被忽略，即使防墜計劃完善，也因為鋼纜(鋼索)強度不足而造成憾事發生。

本研究目的以安全母索鋼纜(鋼索)為主軸，來探討鋼纜(鋼索)持續靜荷重之下，其抗拉強度的安全性是否可行。

材質說明：

本研究材質探討為：鍍鋅鋼纜實驗過程。

依據鋼纜(鋼索)不同規格尺寸進行各種條件下的試驗，依不同的功能及用途來選擇適合的鋼纜(鋼索)，並可運用在吊掛物品、捆綁物品、懸掛作業、水平安全母索、垂直安全母索、救生索等等。

另外一組鋼纜(鋼索)樣品進行浸泡塩水和曝曬後的抗拉強度測試，透過不同條件之下進行試驗，確認鋼纜(鋼索)可承受的拉力強度和性能，是否達到施工安全和品質。

差異性：

針對新品鋼纜(鋼索)與使用持續靜荷重 30 天抗拉強度的比較，短期塩水浸泡及曝曬下之鍍鋅鋼索強度 < 新品。

A Study on the Applications of Steel Wire Rope and Safety Devices

CHIU SHIH MING¹ Lin,Zhi-Qiang²

¹ Master student Dept. of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology, ROC

² Associate Professor. Dept. of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology, ROC

ABSTRACT

Construction site accidents have long topped the list of industrial disasters and occupational accidents around the world. According to a report released by the Institute of Labor, Occupational Safety and Health under the Ministry of Labor, “fall accidents” are the major cause of occupational accidents among all industries, particularly in the “construction” and “manufacturing” industries.

Fall accidents pose a material threat to the lives of laborers and production capacity of the construction industry because there are open spaces at a construction site and they are highly dangerous. However, lack of workforce and professional techniques leads to inefficient supervision and ineffective inspection. As a result, workplace accidents continue to occur. This phenomenon also indicates that the tensile strength of steel wire ropes has been ignored. With a comprehensive fall-prevention plan, accidents can still occur due to insufficient tensile strength of steel wire ropes.

This study focuses on steel wire rope, exploring whether its tensile strength makes it safe to use it when it is subject to static load.

Material:

Regarding material, this study discusses the process of conducting experiments on galvanized steel wire ropes.

Experiments under various conditions were conducted according to specifications and size of steel wire ropes. Suitable steel wire ropes were chosen based on their functions and purposes; they were used to lift and bind goods, for suspension work, or along with horizontal safety lanyard, vertical safety lanyard, and lifeline.

Experiments on the tensile strength of the other steel wire rope sample were conducted under various conditions after it was soaked in salt water and dried in the sun to verify if the tensile strength and performance of the steel wire rope met the standards for construction safety and quality.

Steel wire ropes are the most commonly used material on the market. They are cheaper than alloy steel and stainless steel. Their strengths are as follows: excellent toughness, high tensile strength, high permeability, low degree of deformation, resistance to breakage, and ready availability.

Difference:

A comparison between the tensile strength of a new steel wire rope and that of a steel wire rope subject to static load that has been used for 30 days shows the following: the tensile strength of the galvanized steel wire rope after it was soaked in salt water for a short period of time and dried in the sun is weaker than that of a new steel wire rope.

一、前言

1-1 研究動機

近年來安全衛生意識的抬頭，工安意外頻繁，顯示雇主對於環境安全的改善略有不足，守護作業人員生命安全的觀念須加強和輔導。施工作業常伴隨著人員和物品的墜落、鋼纜使用材質須定期實施檢查，必要時檢測鋼纜抗拉強度，並加強人員專業素質，致力預防墜落災害的發生，降低危害發生率，以達到保障勞工作業安全的目標。

鋼纜(鋼索)應用:

- (1)橋樑工程懸吊用。
- (2)起重機或升降機，吊升荷重用。
- (3)鋼構組配穩定性用。
- (4)安全支撐，穩定性用。
- (5)結構物補助強度用。
- (6)貨物網綁用。
- (7)延長支點作為固定物品用。

1-2 研究目的

鋼纜亦稱「鋼絲索」或「鋼索」，工地現場習慣稱為「鋼索」。鋼索是由數條至數十條

鋼線(絲)或稱素線，纏繞組織成為一股，再由數股纏繞組織成一條鋼索。例如：6(股)×24(絲)，24條鋼絲組成1股，6股組成1條鋼纜，依 CNS941 G3011 標準(104.07.15 修訂公布)，有鍍鋅 1 級、2 級及不銹鋼等之分類，以撚向分 S 撚及 Z 撚，依特性又分有油蕊及無油蕊，各依其特性選擇不同尺寸規格[1]。

(一) 鋼纜(鋼索)特性：

- (1) 支持結構或建築物之穩定。
- (2) 人身安全防護設施上之垂直安全母索(CNS14253-4)、水平安全母索(CNS16123)、個人錨定裝置(CNS16122)及自動回繞救生索(CNS14253-3)。
- (3) 鋼纜(鋼索)運用在水平安全母索上：於建築工程上的地下支撐、施工架、鋼構/小型鋼構、屋頂作業、及土木工程上的地下支撐被廣泛使用[4]。
- (4) 鋼纜(鋼索)運用在垂直安全母索上：於管道間配管、線槽、使用吊籠大樓外牆清洗、大型煙囪管、電梯管道開口、牆面開放邊緣、道路邊坡作業等。
- (5) 鋼纜(鋼索)運用在支持結構或建築物上：於吊橋、橋樑懸吊系統、動力機械吊運物料等。

二、文獻探討

2-1 國內水平母索設置概況

勞工於高處作業(>2m)或於高架作業(>5m)時，常因防護措施不足或被拆除，加上勞工個人作業行為輕忽而造成職災意外事故發生。國內營造業於高處與高架作業的防護措施規定，於職業安全衛生設施規則及營造安全衛生設施標準等，都有詳細規範。

依據工程實務訪查結果發現，因作業工序需求，勞工對於現場安全防護設施的衝突或干擾時，往往基作業方便與效率，而將安全防護設施拆除，如：施工架交叉拉桿或鄰近構造開口超過 20cm 長條網等拆除，造成勞工於外牆作業時因踩空造成墜落等職災事故。

因考量各職種勞工作業工序的施工效率及安全性，於各作業平台或通道處設置安全母索提供勞工行走中或作業時鉤掛之用。而實務觀察結果，一般鋼構件組裝人員於鋼構件組立期間正確穿戴與使用全身背負式安全帶，且作業中利用水平母索進行安全帶鉤掛等使用狀況較常見外；其他，如：鷹架工、泥作工/磁磚工/石材工等，往往因作業上的干擾影響作業效率而不習慣鉤掛安全帶於水平母索上。

常見安全母索設施配件有：(1)垂直安全母索、(2)水平安全母索、(3)自動回縮救生索、(4)雙掛鉤安全帶、(5)延長線應用、(6)母索擒墜器等[2]。



圖 1 水平母索固定端形式[2]

如圖 1 所示，材質強度不足、繫結形式與固定方式錯誤等，其安全性堪憂。

2-2 國內水平母索使用材質強度特性

整理國內水平母索使用材質強度特性，及其作業現場施工與設置重點，條例說明如下：

(一) 依據國內 CNS 16123:2019 Z2167-為參考 BS EN 795:2012 英國標準規範所訂定[3]：

- (1) 鋼索：無油蕊 $\psi 8\text{mm}$ 以上，抗拉強度 4000 kgf 以上。
- (2) 鋼索：有油蕊 $\psi 9\text{mm}$ 以上，抗拉強度 4000 kgf 以上。
- (3) 尼龍： $14\text{mm}\psi$ 抗拉強度 4000kgf 以上，且具有 2 條不同顏色的觀察線。
- (4) 鋼索則需能量吸收裝置(吸震)或減震裝置；尼龍編織繩須調整裝置或減震裝置。

- (5) 端點須為大掛鉤抗拉強度 22 kN 以上，考量勞工作業效率，端點以鋁合金輕量型為佳。

以上因設計受力不同及使用高度、耐候性不同、安全係數、使用人數、現場條件、固定點結構等個別多種變化。整體來說，水平母索抗拉強度 2300kgf 以上，且位移在 30mm 以內。

- (6) 系統不允許使用鋼索夾作為錨固定應用；壓縮結(壓鑄結)、交叉結、馬踢結、束結或可靠度達 95% 以上。
- (7) 系統應由設計單位依設計重量再加 1.5 倍為最低要求標準，每增加一人使用系統應再加 100kgf，最多容許 4 人同時作業，但應依設計單位為主。
- (8) 應有標示牌警告其荷重及使用條件。
- (9) 系統應預留 1M~3M 做為日後自動檢查及檢測用。

三、試驗方法

3-1 實驗規劃設計

(一) 鋼纜材質、尺寸說明

(1) 材質選用：

市面上較為廣泛使用的鍍鋅鋼纜。
 特性：大眾化、方便性、用途廣。
 優點：抗拉強度高、伸長量低、韌性好、價格低、使用壽命長、耐熱性佳等。

(2) 研究尺寸：以目前營造業常用規格為依據。

4mm×20 組
 6mm×20 組
 8mm×20 組
 10mm×20 組

3.1.2 現場設置狀況：

一般常見錨定端鋼纜捆綁方式依法令規定有壓鑄結固定，撚接頭(Splice)、套圈(Ferrule)、型鐵(Swage)。若以勞動部安全母索指引，做為水平安全母索使用應在鋼纜公稱直徑為 8mm，或有油蕊的鋼纜公稱直徑為 9mm，抗拉強度為 3400kgf 左右，均大於法

令規定鋼索備用強度值 2300kgf [5]。

3-2 實驗規劃步驟：

(一) 以下為分組說明和實驗條件設計

(1) 分組說明

第一組：2 天靜荷重+拉力測試+數值結果。

第二組：30 天靜荷重+拉力測試+數值結果。

第三組：2 天靜荷重+鹽水 30 天+曝曬 180 天+拉力測試+數值結果。

第四組：2 天靜荷重+鹽水 90 天+曝曬 90 天+拉力測試+數值結果。

(2) 實驗條件設計

(a) 荷重重量：用 10 個水泥抗壓重量試體(每個大約 10 kg)+支撐木架(每座大約 8 kg)，合計約為 110 kg ± 10 kg (如圖 3)。

(b) 鹽水浸泡比例：依據維基百科所述，水 1000 g + 鹽 35 g 為比例上的調和，其濃度與海水相似(如圖 4)。

(c) 靜荷重試驗場地：為高科大土木館一館地下室的材料試驗場所，室內溫度約為 28°C，相對濕度為 65%(如圖 3)。

(d) 曝曬鋼纜場地：地址位於高雄市小港區台機路 12 號(工作場所)。

(e) 鋼纜曝曬時間：每日至少連續 4 小時以上，曝曬算 1 日；2 小時以上未滿 4 小時算半日，全日雨天或陰天算半日(如表 1)。

(f) 進行抗拉強度試驗場所：為世侑安全衛生有限公司，地址位於台南市永康區大橋三街 194 號。

(g) 安裝試驗鋼架及拉拔機，進行抗拉強度試驗取得強度數據，並記錄其試驗數據(如圖 5、圖 6)。

3-3 實驗流程：

(一) 剪裁訂制實驗用鋼纜(圖 2)。

- (二) 鋼纜吊掛靜荷重(圖3)。
- (三) 鋼纜浸泡塩水(比例，水1000g：塩35g)(圖4)。
- (四) 鋼纜曝曬。
- (五) 準備拉拔測試機。
- (六) 進行強度拉拔測試(圖5)。
- (七) 抗拉強度數據(圖6)。
- (八) 拉力破壞後試驗樣本(圖7)。



圖 2 鋼纜試驗前總樣本

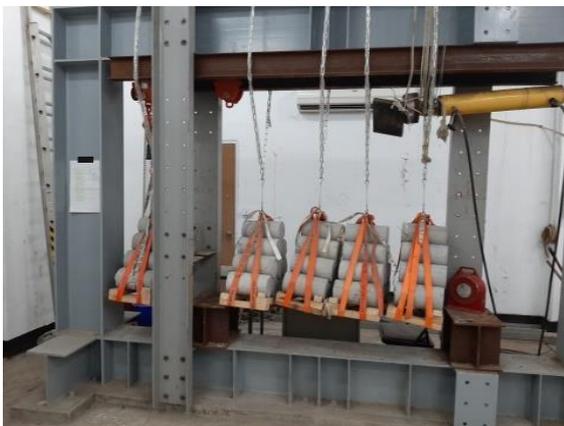


圖 3 靜荷重實驗



圖 4 浸泡塩水



圖 5 拉拔強度測試



圖 6 抗拉強度數據



圖 7 拉力破壞後試驗樣本

表 1 曝曬時間表

曝曬時間	計算日數
日曝 4 小時以上	1 日
日曝 2 小時以上，未達 4 小時	半日
全日雨天、陰天	半日

四、研究結果分析

4-1 研究結果數據

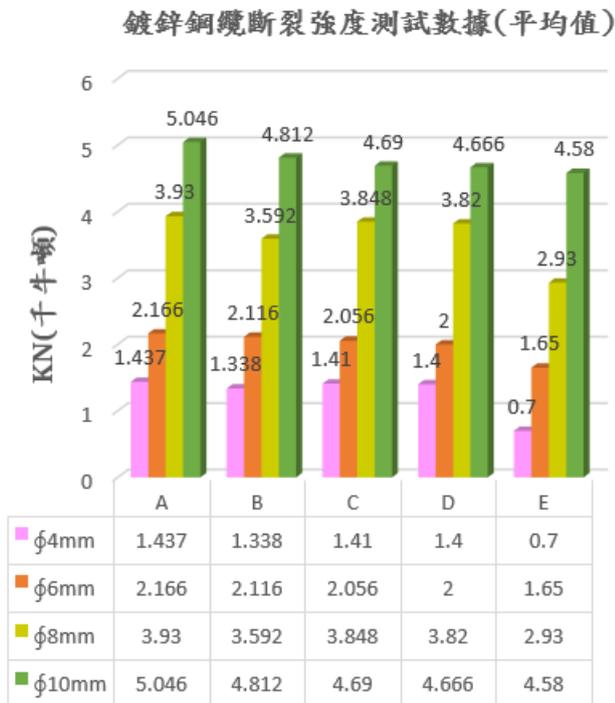


圖 8 鍍鋅鋼纜拉力強度測試數據圖表

4-2 研究結果分析

根據實驗數據結果顯示(如圖 8)：

- (一) 新品強度 > 靜荷重 2 天 > 靜荷重 30 天。
- (二) 新品強度 > 浸泡 + 曝曬 > 靜荷重 30 天。
- (三) 以 8mm 為例，靜荷重 2 天(平均強度為 3.93KN)；靜荷重 2 天 + 浸泡 + 曝曬(平均強度為 1.40KN)，靜荷重 30 天(平均強度為 3.59KN)均大於 CNS 941 G3011 法令規定的強度 2.93 KN。
- (四) 其強度順序為：靜荷重 2 天 > (靜荷重 + 浸泡 + 曝曬)平均強度 > 靜荷重 30 天平均強度。

五、結論與建議

5-1 結論

本實驗結果發現：

- (一) 鋼纜 φ 4mm 及 φ 6mm 壓鑄結在抗拉強度試驗中大部分會先破壞或鬆脫，其抗拉強度符合 CNS 法令規範的標準。
- (二) 鋼纜 φ 4mm、φ 6mm、φ 8mm、φ 10mm、鋼纜在抗拉強度試驗中，每一種規格尺

寸的抗拉強度成正比，且抗拉強度之「差異性」低、相對的其穩定度較佳。

(三) 鋼纜 φ 4mm 在抗拉強度試驗過程中，拉拔強度增加，其中 1 條鋼纜自轉一圈後造成強度降低至 0.62KN，低於試驗的平均值 1.437KN，甚至低於法令規定值 0.7KN，為其特例，其他數據均符合法令規範。

(四) 由此實驗推論：在高鹽分和高濕度環境中，鋼纜(鋼索)持續在靜荷重之下，容易疲勞並且鏽蝕，使其抗拉強度降低，時間越久強度降低幅度越大。

5-2 建議

勞工作業環境中對於鋼纜防墜設施使用要求，及相關法令規範的瞭解有限，大多無法實施有效率的防墜系統，甚至很多是在無任何防護的形況下施工作業，且防墜設施長時間曝露於外在環境(如：靠海附近、高濕度氣候、昆蟲、鳥類棲息處等)，防墜安全設施和錨錠組件容易產生鏽蝕或毀壞，對其施作和性能都會有影響，潛在風險徒增加，易造成墜落危害，若因錨錠強度鬆脫或不足，則會產生倒塌，導致勞工傷亡等意外災害，這是我們不樂見的。

因此施工現場防墜設施應定期檢點及保養、加強施作環境所有負責人、主管、勞工等相關人員的職安意識，而非侷限於法令規範的最低要求標準 2300kgf，或短期性工程，持續地教育訓練和宣導是有其必要性，當每個人的危害意識、保護自己也保護他人的思考模式提升，相對地職災事故發生率亦會降低，而達到施工安全、施工零災害的目標。

參考文獻

1. 鋼索 CNS 總號 941 G3011 類號，中華民國國家標準修訂公布日期 104/07/15。
2. 明志科技大學，勞動部勞動及職業安全衛生研究所，水平母索安全實務指引編撰及宣導活動辦理，案號 1090006，第二章，第 4 頁、第 11 頁，2020。
3. 中華民國國家標準 CNS 16123:2019 Z2167 參考英國標準 BS EN795:2012。

4. 鄭慶武 蔡一主 勞動部勞動及職業安全衛生研究所，水平母索安全實務指引編撰及宣導活動辦理，第一章，第 9 頁，(2020)。
5. 行政院勞動部勞工委員會，營造安全衛生設施標準，第一章 總則，第 23 條(2021 修正)。
6. 蔡一主 總經理技術指導，世侑安全衛生有限公司。

使用無人飛行器檢測及基於卷積神經網路辨識建築物外牆裂縫之研究

黃凱翔¹ 莊凌雲²

¹ 國立高雄科技大學土木工程系土木工程與防災科技研究所助理教授

² 國立高雄科技大學土木工程系土木工程與防災科技研究所研究生

摘要

建築物外牆具有隱私、保全、禦寒、保溫、防風、擋雨、造型、美觀等的效果，在興建完成初期大致均能發揮其應有的功能，但在經年累月自然摧殘下(氣候、地震)，物料天生的衰變(氧化、風化、乾縮)及人為因素(設計疏失、施工不當、打鑿、裝潢、改裝)的破壞下，外牆常會出現縫紋進而擴大成裂縫。如今高層建築發展快速，因此如何檢測高層建築外牆裂縫的方法實有討論的空間，研究使用無人飛行載具(UAV)掛載可見光及熱顯像儀，並配合深度學習類神經網路(Mask-R-CNN)及邊緣線偵測演算法(Canny)，試圖以自動化方式判讀高層建築物外牆裂縫的狀況，以利隨後工程維修工作之進行，除可提高效率外並可保障檢測者之安全，研究成果顯示，利用可見光進行影像判釋及邊緣線偵測可有效偵測出牆面裂縫及磁磚脫落，研究成果亦顯示利用熱顯像儀進行磁磚脫落監測效果不佳。

關鍵字：裂縫偵測、無人飛行載具(UAV)、熱顯像儀、卷積神經網路、邊緣線偵測

Research on Using Unmanned Aerial Vehicle to Detect and Identify Cracks in Building Exterior Walls Based on Convolutional Neural Network

Kai Hsiang-Huang¹ Ling Yun-Chuang²

¹Asst.Professor, Institute of Civil Engineering and Disaster Prevention, National Kaohsiung University of Science and Technology, Taiwan

²Graduate Student, Institute of Civil Engineering and Disaster Prevention, National Kaohsiung University of Science and Technology, Taiwan

ABSTRACT

The exterior wall of the building has the effects of privacy, preservation, protection from the cold, heat preservation, wind, rain, shape, beauty, etc. It can perform its due functions in the initial stage of completion, but under the natural devastation (climate, earthquake) over the years Under the damage of natural decay of materials (oxidation, weathering, drying shrinkage) and human factors (design negligence, improper construction, chiseling, decoration, modification), external walls often appear cracks and expand into cracks. Nowadays, high-rise buildings are developing rapidly. Therefore, there is room for discussion on how to detect cracks in the external walls of high-rise buildings. Research on the use of unmanned aerial vehicles (UAV) to mount visible and thermal imaging cameras, and cooperate with deep learning through the neuron network classification (Mask -R-CNN) and edge detection algorithm (Canny), trying to interpret the cracks in the external walls of high-rise buildings in an automated manner to facilitate the subsequent

engineering maintenance work, in addition to improving efficiency and protecting the inspectors Safety. Research results show that the use of visible light for image interpretation and edge line detection can effectively detect wall cracks and tile falling off. Results also show that using thermal imaging cameras to monitor tile falling off is not effective.

Keywords: crack, unmanned aerial vehicle (UAV), convolutional neural network (CNN)

一、緣起

裂縫(crack)會直接導致混凝土結構體的損壞，這是工程界眾所皆知的議題，因此裂縫檢測是一項至關重要的責任，也是一項長久的負擔，若是不能準確檢測出混凝土其中的裂縫，將對人身及財產造成安全上的問題。惟現代建築物雖朝高空發展，但是仍舊以傳統模板為主的方式製作外牆，加上氣候變遷、大小地震、人為因素等原因，造成混凝土龜裂，引發滲漏水鏽蝕鋼筋，鋼筋氧化生鏽體積膨脹，進而爆裂混凝土損壞結構；另因建築高度或土木工程大面積不利人工檢測的執行，故使用無人飛行器(UAV)協助調查收集資訊之應用為本研究之主軸，並以影像判釋邊緣線偵測演算法 Canny 及人工智慧深度學習的卷積神經網路加強辨識能力縮短判讀時間，提高工作效率。

二、文獻回顧

Ç,F, Özgenel ., et al.(2018) [1] 曾提出以 AI 卷積神經網路(CNN)解決現代混凝土裂縫判讀的方式，另因高層建築高度不利人工檢測的執行，故李良輝，謝嘉聲，2018 [2] 等研究者，亦有以無人飛行器協助調查收集土木大面積及多樓層建築等資訊之應用，但是如何整併應用兩種不同型態的軟硬體，則是本論文探討研究的目的。

2.1 混凝土產生裂縫成因

經由工程界多年來經驗的累積，混凝土裂縫的成因可以就:設計端、施工端、材料端、環境端及管理端來討論 [3]。

就設計端而言:於設計初始在對案件的需求，釐訂各項材料符合法規強度之範圍，而混凝土考量強度等級高低，收縮硬化程度及變形量大小，尤其是考量水電配管粗細、

位置及機械電機重裝設備重量及震動等，對混凝土裂縫均產生深遠影響。

就施工端而言:澆置時間間隔控制不良，震動棒震動、插入時間長短控制不佳，模板支撐架組合缺失，澆置後養護不用心，拆模時間順序，均對混凝土裂縫產生深遠影響。

就材料端而言:混凝土成分配比計算，骨料粗細大小，添加劑的選用，拌合方式良窳，拌合廠至工地距離時間的掌握，亦對混凝土裂縫均產生影響。

就環境端而言:溫度及溼度對混凝土強度有絕對的影響，以台灣目前的環境，澆置時空氣溫度(320C~130C)濕度(80%)是較理想的情況，養護時混凝土乾縮的速度較好控制，對混凝土裂縫產生影響。

就管理端而言:混凝土澆置的期程與時間管控，是否確實監督控制施工縫或冷縫的產生，養護方式及養護材料選用的合理性，均對混凝土裂縫均產生影響。

2.2 卷積神經網路(CNN)

卷積神經網路(Convolutional Neural Network)的起始，來自 1958 年兩位神經生理學家 David Hunter Hubel 和 Torsten N. Wiesel，他們的研究啟發了日後人工智慧(AI)去識別物體特徵和不同尺度的辨別能力，及現代電腦影像判讀及遙測資料收集技術的研究領域。

卷積神經網路基本構造可分為:卷積層、池化層、全連接層 [4]。

卷積神經網路(以下簡稱 CNN)的理論是將大量視訊資料經由輸入端傳入卷積層作特徵分類，再轉入池化層作多層的過濾，再轉入全連接層作分辨，最後輸出成影像判讀結果。事實上 CNN 是一種機器數據計算的分類方法，而在 CNN 的世界裡如今已衍伸出好幾種計算方式，其中的區域卷積神經網路(R-

CNN)可說是目前影響層面較大的計算法。

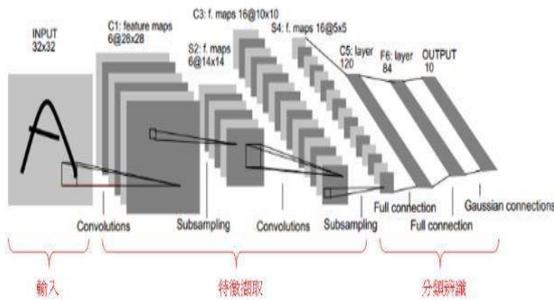


圖 1 Hubel & Wiesel

(Harvard University HARVARD BRAIN TOUR)



圖 2 CNN 概念圖(Yann LeCun,1998)

2.2.1 區域-卷積神經網路(R-CNN)

區域卷積神經網路(Region-CNN)簡稱 R-CNN，是將區域提名(Region Proposal)加入 CNN 目標檢測的計算中，基本作法是在視訊資料中以區域的方式預選圖像出現的位置，利用圖像中各種特徵，在作選取計算時，可大量減少圖像數值，最後輸出得到需要的結果。

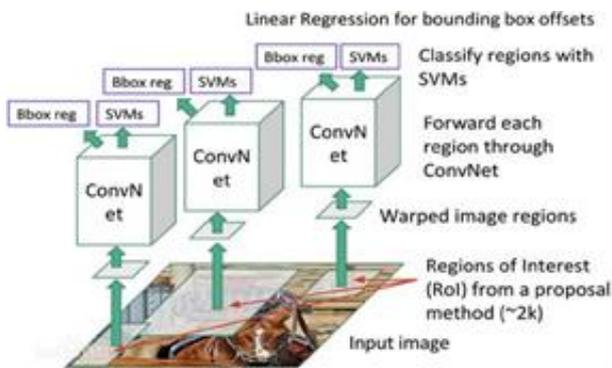


圖 3 R-CNN 結構(軟體定義世界(SDX))

2.2.2 快速區域-卷積神經網路(Fast R-CNN)

但 R-CNN 卻有計算過程繁雜的問題，這問題足以影響判讀速度，因此隨後發展出快速區域-卷積神經網路(Fast R-CNN)，它的方法是將 R-CNN 原本每次預選圖像都要單獨經過 CNN 處理，簡化成將整個圖像一次提出特徵，在 CNN 捲積層中得到總數特徵，再到池化層過濾，最後分類後輸出，這樣的處理速度會比傳統 R-CNN 快數十倍以上〔5〕如表 1。

2.2.3 高速區域-卷積神經網路(Faster R-CNN)

Fast R-CNN 速度雖然已經加快，但仍有弱點出現，這是因為要找到整張圖所有的特徵，也是一項耗時費工的程序，如果把尋找特徵的工作先交給『邊緣檢測』的網路(Region Proposal Network)處理，這就成了高速區域卷積神經網路(Faster R-CNN)。

表 1 CNN 速度比對表

名稱 數據	R-CNN	Fast R-CNN	Faster R-CNN
圖像檢取時間 Test time per image (with proposals)	50 秒	2 秒	0.2 秒
加速值 Speedup	1X	25X	250X
檢取指標 mAP (VOC 2007)	66.0	66.9	66.9

(軟體定義世界(SDX))

2.2.4 遮罩區域-卷積神經網路(Mask R-CNN)

由表 2 可知 CNN 已在 AI 界廣泛的使用，並展現其強大的視覺辨識功能，而表中 2015 年何凱明(Kaiming He)也是 Faster R-CNN 及遮罩區域-卷積神經網路(Mask R-CNN) 的開發者。

表 2 CNN 發展史

1958 年	Hubel&Wiesel	以貓與猴子視覺為研究對象，提出腦中兩種基本型態之視覺細胞。
1980 年	福島邦彥	依據 Hubel&Wiesel 研究提出 Neocognitron(神經認知機制)並提出初代 CNN 雛型架構。
1987 年	Alex Waibel & Geoffrey Hinton	發表 TDNN(時間延遲神經網路)作為最初之 CNN 神經網路訓練用途。
1998 年	Yunn LeCun	發表之論文 (Generalization and Network Design Strategies)奠定 CNN 機器自我學習及圖像辨識的架構。
2006 年	Kumar Chellapilla	利用 GPU(圖形處理器)進行 CNN 訓練。
2006 年	李飛飛	為 CNN 建立視覺資料庫(ImageNet)。
2012 年	Alex Krizhevsky	所設計 AlexNet 架構正式開啟 CNN 時代。
2014 年	Oxford University	以 19 層 CNN 將 error rate 降低至 6.7%，已接近人類 5.1%的境界。
2015 年	何凱明	發表的 ResNet 再將 CNN error rate 降低至 3.57%，正式超過人類視覺 5.1%準確性。

根據 Kaiming He 的理論，Mask R-CNN 是從 Faster R-CNN 為基礎架構，當 Faster R-CNN 先以 RPN 網路(Region proposal network)生成目標框架，經過計算對比及分類確定目標，Mask R-CNN 再接手結合 FCN(Fully Convolutional Networks)，做圖像語意分割(Semantic Segmentation)，併同 Faster R-CNN 的目標檢測結果，達成實例分割(Instance Segmentation)。

Mask R-CNN 的出現除在 2017 年在 ICCV(IEEE International Conference on Computer Vision，國際計算機視覺大會)得到論文獎外，更在 COCO 挑戰賽中的目標檢測(object detection)、目標分割(instance segmentation)及關鍵點檢測(key point detection)等項目取得佳績，因此本研究將以遮罩卷積神經網路 Mask R-CNN 作為辨識檢測軟體骨幹。

2.3 無人飛行器(Unmanned Aerial Vehicle-UAV)

無人飛行器(簡稱 UAV，又稱:無人機 drone)自第一次世界大戰在英國出現，至今

已有百年歷史，簡單定義這是一種無人駕駛而代以預設程式、儀器導航或遠端遙控飛行的載具〔6〕。UAV 的使用除在軍事上特種用途外，在民間商業使用更是蓬勃發展，現行的 UAV 已可配置微型中央處理器(CPU)，加上全球定位系統(GPS)及慣性測量模組(IMU)，由地面無線電通信協定導航進行飛行任務〔7〕。



圖 4 軍用無人飛行器
(USAF <https://www.af.mil/>)

從『齊柏林看見台灣』的空中攝影集中，利用直升機自空中觀察地貌、地理及生態環境，其所展現出來效果與實際性是令人震撼，但卻付出大量的時間、精神與金錢甚至是生命，而 UAV 的應用及電腦計算軟硬體表現，卻有著小兵立大功的表現，尤其在農漁業、環境及坡地災害的監測，配合電腦辨識軟體的幫助，在防災救災上提供極為卓越的成果。

UAV 的構造大概分定翼型及旋翼型：定翼型發動機與機翼為分別結構，機翼固定在機身上，機身尺寸可以放大，酬載量(含燃料)較大，飛行時間也較長，其發動機以內燃機為主，動力較大，起降需有跑道。旋翼型則是發動機與機翼同一結構，旋翼決定機翼大小，機體大小受限制，故酬載量較少，其發動機以電動馬達為主，電池容量決定滯空時間，不須跑道起降。兩者各有優缺點，經比較如表 3:

表 3 UAV 優缺點比較表

UAV 種類	優點	缺點	代表機型
定翼型	1.大面積區域巡航 2.遠距、高空 3.滯空時間長 4.發動機使用噴射引擎速度較快 5.儀器設備酬載量較大	1.起降需平坦的跑道 2.機身體積較大 3.內燃機引擎空污及噪音問題 4.後勤維護份量大	RQ-4(全球之鷹) 
旋翼型	1.垂直起降不須跑道 2.機動性強 3.使用電動馬達噪音小 4.無機翼機體可縮小 5.可定點滯空 6.可使用多軸發動機	1.續航力較短 2.飛行速度較慢 3.酬載量較小 4.抗風能力較差 5.巡航區域較小	DJI phantom 系列 

2.4 小結

今日 UAV 的發展及應用已成為全球各業界的共識，除軍事用途，舉凡營建業、農漁業、礦產業、新聞業、服務業(檢測)及娛樂業.....等，經由 UAV 裝載之儀器設備進行目標範圍內的影像情資收集，達到大量節省作業成本及人力奔波，但對大量數據資訊的辨識判讀，仍須有對應的電腦軟硬體輔助處理，如美國太空總署(NASA)的某些計畫，經由無人探測器傳回大量的資訊照片，也使用到卷積神經網路(CNN)來處理判讀〔8〕；同理，本研究利用 UAV 針對高層建築物表面裂縫作遠端資訊的收集，並使用可自我學習的新形態卷積神經網路(MASK R-CNN)的辨識，達到節省人、事、物力，快速達成任務，以利後續計畫或維護工作的進行。

三、研究設備

無人飛行載具為 DJI 研發之 Matrice 300 RTK，以偵測種植區域中作物之生長與健康狀況，其飛行器之重量為 3.6 公克，對稱電機軸距 895mm，最大上升與下降速度分別為 6 米/秒與 5 米/秒，P-GPS 垂直與水平懸停精度分別為 +/-0.5 米與 +/-1.5 米，在無風環境下之最大水平飛行速度為 23 公尺/秒，而最大

起飛海拔高度為 7000 米，適用於 -20°C 至 50°C 的作業環境，最大飛行時間約 55 分鐘，詳細飛行器規格如表 4。

表 4 飛行器規格

型號	Matrice 300 RTK
設備外觀	
重量	淨機重量 (不含電池): 3.6 kg 淨機重量 (含雙電池): 6.3 kg
對稱電機軸距	895 mm
最大上升速度	S 模式: 6 m/s P 模式: 5 m/s
最大下降速度	S 模式: 5 m/s P 模式: 4 m/s
P-GPS 懸停精度	垂直: ±0.1 m (視覺定位正常工作時) ±0.5 m (GPS 正常工作時) ±0.1 m (RTK 定位正常工作時) 水平: ±0.3 m (視覺定位正常工作時) ±1.5 m (GPS 正常工作時) ±0.1 m (RTK 定位正常工作時)
RTK 位置精準度	RTK FIX 時: 1 cm+1 ppm (水平) 1.5 cm + 1 ppm (垂直)
最大水平飛行速度	S 模式: 23 m/s P 模式: 17 m/s
最大起飛海拔高度	5000 m (2110 槳葉, 起飛重量 ≤ 7 kg) 7000 m (2195 高原靜音槳葉, 起飛重量 ≤ 7 kg)
作業環境溫度	-20°C 至 50°C
最大飛行時間	55 分鐘

其可見光感測器之規格為 13 英寸 CMOS，有效像素 2000 萬，具有對焦點 1 公尺至無窮遠且帶自動對焦的鏡頭，其 ISO 範圍為 100-12800，電子快門範圍為 8 秒到 1/8000 秒，影像最大解析度為 5472*3648，適用於 0°C 至 40°C 的作業環境，其產出的影像格式包括 JPEG 與 DNG，詳細感測器規格如表 5。

表 5 可見光感測器規格

項目	近紅外光相機	廣角相機	紅外線相機
影像感測器	6 個 1/2.9 英寸 CMOS，包括 1 個用於可見光成像的彩色傳感器和 5 個用於多光譜成像的單色傳感器	1/2.3" 英寸 CMOS 有效像素 1200 萬	非製冷氧化釩微測熱輻射計
鏡頭	FOV：62.7°； 焦距：5.74 mm (35 mm 格式等效：40 mm)； 無窮遠固定焦距； 光圈：f/2.2	DFOV：82.9°； 焦距：4.5mm； 等效焦距：24mm； 光圈：f/1.0； 對焦距離：5m 至無窮遠	DFOV：40.6°； 焦距：13.5mm； 等效焦距：58mm； 光圈：f/1.0； 對焦距離：5m 至無窮遠
ISO 範圍	影片：100 - 25600 相片：100 - 25600		
電子快門	1 ~ 1/8000 s		
影像最大解析度	3840x2160@30fps， 1920x1080@30fps		
拍攝模式	單張拍攝 多張連拍 (BURST): 3/5 張 自動包圍曝光(AEB): 3/5 張 @0.7EV 步長 定時拍攝		
影像格式	MP4(影片)，JPEG(相片)		
作業環境溫度	0°C 至 40°C		

四、研究方法

4.1 研究流程圖(以建築物磁磚為例)

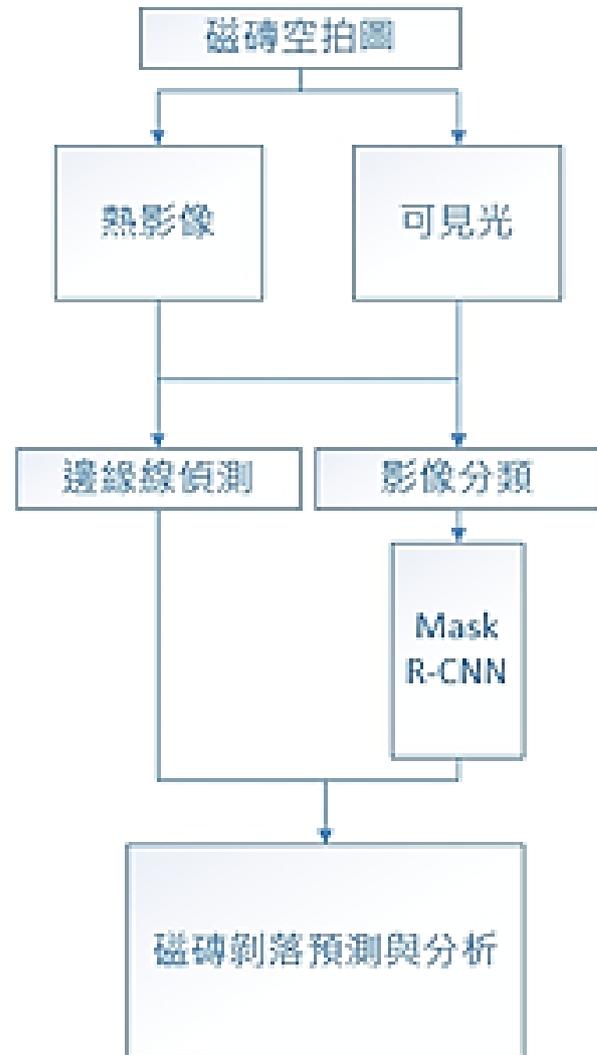


圖 5 研究流程圖

4.2 Mask R-CNN 辨識方法

Mask R-CNN (Mask Regions with Convolutional Neural Network Features)是基於 Faster R-CNN 框架延伸的新方法，基於 CNN 演化的演算法之一，演算法當中增加目標分割的功能，並把 Faster R-CNN 中的 RoI Polling 更改成 RoI Align，並在最後的特徵層採用 FPN(Feature Pyramid Network)進行特徵提取。Mask R-CNN 主要有四大功能，分類、物件偵測、語義分割和實例分割，相較於其他方法，除了方法簡單有效以外，運算速度也更快，而且在多目標偵測的情況下也有更好的結果。Mask R-CNN 神經網路主要結構為

三部分，Faster R-CNN，ROIALign 跟 FCN (Fully Convolution Network)。其中 Faster R-CNN 有兩個元素，Region Proposal Network(RPN)和 ROI Pooling，前者用作提取目標物之邊框，後者則在每個邊框中提取特徵，並同時進行分類與邊框迴歸。而 ROIALign 與前者 ROI Pooling 的最大差別在於 ROIALign 沒有採用量化的操作，而是使用了雙線性插值算法。最後 FCN 會先對影像進行卷積跟池化，使特徵圖不斷縮小，再反卷積，進行插值，從而進行準確的分割。Mask R-CNN 可分四個結構主幹結構(Backbone)、區域建議網路(RPN)、興趣區域分類器(ROI)與邊框迴歸器(Classifier and bounding box regression)、分割掩碼(Mask)生成網路。區域提取網路(Region Proposal Network, RPN)是種區域提取的方法，RPN 主要用於提取特徵的主要區塊，藉由 RPN 的預測，就能選出所要尋找的目標區域，而提取出的目標特徵 anchor 稱為感興趣區域(Region of Interest, ROI)，後續將 ROI 進行分類再與邊框迴歸。這個階段要將 RPN 所提取出的 ROI 細分每個區塊的特徵點加以類別，透過 ROI Pooling 重新調整成固定尺寸，把提取的特徵跟輸入資訊正確對齊，並使用最大值或平均值來總結結果。

4.3 Canny 辨識方法

圖像之邊緣代表影像亮度變化顯著的部分，指灰度值在很小的緩衝區域內急劇變化到另一個灰度相差較大的灰度值。而影像邊緣的提取同時也是分割所依賴的重要特徵，而邊緣檢測主要是圖象的灰度變化的度量、檢測和定位，而當代邊緣偵測應用中，常用的偵測法為 Canny 邊緣偵測。一個優良的邊緣檢測法需要有好的檢測、好的定位和最小邊緣響應點，希望檢測出圖像中的實際邊緣，且有好的定位能與實際影像的距離接近，圖像中的邊緣只能標識一次，並且可能存在的圖像雜訊不應標識為邊緣。而 Canny 皆滿足這三大項。Canny 此演算法處理影像為灰階圖，若取得影像為彩色，需先做灰階處理，原理就是根據影象各個通道的取樣值進行加權平均。灰階化的發法有：

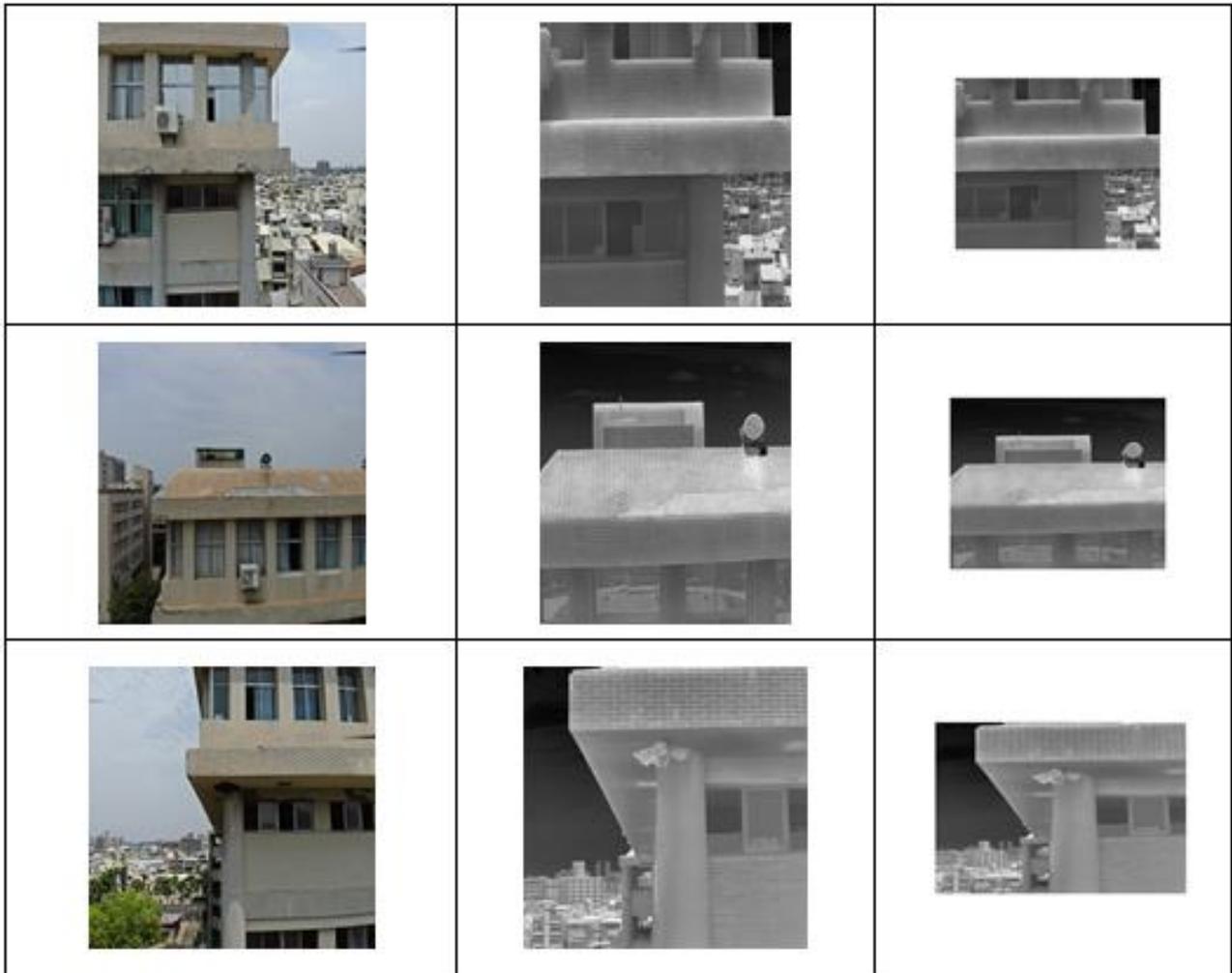
方法 1：Gray=(R G B)/3;

方法 2：Gray=0.299R 0.587G 0.114B

若影像為灰階圖以後，Canny 邊緣偵測法第一步驟，須使一個二維高斯函數做影像平滑化，藉此消除影像中所出現的低類雜訊，接著計算梯度大小與角度，若計算出影像之梯度大小後，要做非最大值抑制，會發現有些局部位置的區塊包含不同大小的梯度，而非最大值抑制的工作即是針對這些梯度，根據其梯度方向，找出在梯度方向上的梯度值最大的地方，並將此點歸納為實際邊緣的位置。完成非極大值抑制後，會得到一個二值影象，非邊緣的點灰度值均為 0，可能為邊緣的區域性灰度極大值點可設定其灰度為 128。Canny 演算法中減少假邊緣數量的方法是採用雙閾值法。根據高閾值得到一個邊緣影象，這樣一個影象含有很少的假邊緣，但是由於閾值較高，產生的影象邊緣可能不閉合，未解決這樣一個問題採用了另外一個低閾值。在高閾值影象中把邊緣連結成輪廓，當到達輪廓的端點時，該演算法會在斷點的 8 鄰域點中尋找滿足低閾值的點，再根據此點收集新的邊緣，直到整個影象邊緣閉合。

五、研究成果

5.1 Mask R-CNN 辨識成果



5.2 Canny 邊緣線辨識成果



5.3 研究成果分析

上述為本次研究成果，利用無人飛行器裝載儀器拍攝，所用影像有可見光與紅外線影像，而環境採用 Mask R-CNN 來辨識，採分開訓練和驗證，分為可見光與紅外線影像，訓練樣本為 50 張及驗證樣本 20 張，從可見光影像成果可得知，所得影像有較明顯的光譜值，使辨識成果較為明顯且 Mask R-CNN 皆有判斷出磁磚剝落的地方，而紅外線影像，則於拍攝時間的不適，溫差較不明顯，從熱

影像來看，磁磚掉落處與建物的差異不大，導致 Mask R-CNN 辨識無法辨識出掉落位置。

六、結論與建議

6.1 結論

從辨識結果來看(以紅外線影像)，基於拍攝時間的錯誤，因所得到建物之影像溫度大致相同，導致辨識成果不理想，無法辨識出掉落的磁磚。基本上以 DJI Matrice 300 RTK 無人飛行器操作拍攝影像並無特殊的問

題，但癥結在於轉換人工智慧 **Mask R-CNN** 後會因所得資訊因日照緣故，造成程式在演算上判斷不出實際情況。

6.2 建議

雖然本項研究結果不盡如意，但卻讓研究人員體會到一項計劃的進行，因時制「地」的重要性，對於時程上的掌控及現場自然環境的了解，尤其拍攝主體的光照時間的拿捏，成為本項研究成敗的關鍵。因此**建議**取景時應考慮日照時間與成相後是否能呈現明顯的對比，以利人工智慧 **Mask R-CNN** 的辨識與判讀，而 **Mask R-CNN** 亦應加強自我訓練以提高其靈敏度，尤其卷積神經網路現今已多方展現在各行業上的成就，相信日後重新檢討對日照時間的掌控，定能發揮 **Mask R-CNN** 的辨識功能與效果。

參考文獻

- 1、Ç,F, Özgenela ., et al.(2018). “Performance Comparison of Pretrained Convolutional Neural Networks on Crack Detection in Buildings.” 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction,(ISARC 2018).
- 2、李良輝，謝嘉聲，(2018)，”UAV 三維建模”，工程永續與土木防災研討會。
- 3、劉素芝，(2017)，”混凝土裂縫的成因與控制”，建築發展，1 卷，3 期，頁 312-317，3 月。
- 4、王水龍，(2020)，卷積神經網路應用於室內三維點雲重建之研究，國立高雄科技大學，碩士論文。
- 5、CNN 卷積神經網路從 RCNN 到 FasterRCNN 的理解，2019.11.01，程式前沿論壇。
- 6、Paul, Gerin, Eahlstrom., et al. (2012), Introduction to UAV Systems, fourth edition, John Wiley & Sons Ltd, West Sussex.
- 7、楊明德，蔡惠萍，(2018)，無人飛行載具發展現況與未來趨勢，土木水利會刊，45 卷，3 期，頁 23-29。
- 8、Alan, S.Li., et al. (2020), NASA NeMO-Net’s Convolutional Neural Network, Publisher IEEE Journal.
- 9、江智鵬，黃科瑋，(2019)，一個改良式卷積神經網路於醫學影像之辨識。
- 10、吳侑霖，林柏江，(2018)，以深度學習結合影像分類實現自動駕駛系統。
- 11、傅汝鴻，康立威，(2018)，基於深度學習之天候影像分類。
- 12、12.D.E.Barrick, M.W.Evans and B.L. Weber (1977) “Ocean Surface Currents Mapped by Radar” In: American Association for the Advancement of Science.
- 13、Hanyu Peng, Shifeng Chen (2019) “BDNN: Binary convolution neural networks for fast object detection”. In: Pattern Recognition Letters 125 (2019) 91-97.
- 14、Joseph Redmon, Santosh Divvala, Ross Girshick, Ali Farhadi (2016) “You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection”. In: 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.

應用構件預鑄化降低營造業職災風險之探討

蔡宜珊¹ 潘煌鏗²

¹臺北市政府工務局新建工程處臨僱技術師

²國立高雄科技大學土木工程系教授

摘要

勞工為國家經濟發展的貢獻者，營造產業則扮演帶動國家經濟發展重要角色，故營造業勞工更是國家經濟建設的骨幹。每位勞工都是家庭的經濟來源，惟營造業因工程類別多、施工項目內容複雜、工作環境開放且不變導致工作場所之潛在危害極高，又加上施工進度控管要求等因素，造成勞力密集及勞工高流動性，亦使營造業的職業災害發生率總是高居各業之冠。

勞力人口的老年化趨勢，青壯年族群不願進入營造業，導致現今工人短缺與技術水平控管及傳承不易問題。本研究爰以預鑄構件單元模組建造施工，以降低施工危害因子、加快工程執行速度的可能性並強化並提升職業安全衛生管理及績效，以保障勞工安全與健康，以提高青壯年勞動意願。構件預鑄化透過嚴格的品管環保製程和縮短工期，可以生產各類形狀之預鑄單元並克服天候及地形因素；又預鑄構件可於室內進行預鑄作業，精準有效率地快速大量生產，並運送至工地現場進行快速吊裝、組立，使用較少人力配合機械施工，使工期至少縮短，若符合施工現場腹地廣大之也可於現場進行預鑄以減少搬運受損情形。

本研究將依水土保持工程施工項目進行文獻蒐集與職災分析，以構件預鑄化之施工圖說、檢查重點、預算編列及標準作業程序等以職業安全衛生管理機制進行案例探討、危害辨識與風險評估，找出重大潛在危害並擬定危害對策，藉此推廣職安四化(設計標準化、構件預鑄化、施工機械化及人員專業化)，期加強職業安全衛生之落實。

關鍵字：營造業四化、職安四化、構件預鑄化、風險評估

一、研究動機與目的

臺灣地形地貌為一個多山的島嶼，目前共計列管 116 條獨立水系，而於地圖上繪出河道且標示名稱但未列管，或者是被歸類為排水體系的河川，更多於此數。至於地圖上未標示名稱或未繪出者，則更難以估計。而我國河道特色在於流路短促，河床比降大，上游多超過 1/100，下游則介於 1/200~1/500 間，又降雨量往往集中於每年 5 月至 11 月汛期，導致在梅雨季及颱風季節山坡地及河道遭受大量雨水沖蝕氾濫成災，故於災後水土保持工程是為重要，惟河道及山坡地通常位於海拔高又偏鄉的山區地帶，工程施工通常不易，物料及機具進出山區困難，且規模小又工期短，加上山區乖舛多變的天氣令人

捉摸不定，造成施工困難度的增加，又常因安全防護不足造成「墜落、滾落」、「物體飛落」、「倒塌、崩塌」等職業災害，有時施工機具或車輛也因地形或地質因素未謹慎操作發生翻覆及滑動等災害事故，故本研究經由分析及調查探討水土保持工程構件預鑄化施工時所可能引起之災害類型，提供因應之改善對策，以有效防止職業災害發生，其主要研究目的可歸類下列幾點：

- (一) 作為水土保持工程預鑄化施工期間降災策略之參考。
- (二) 提供各檢查單位之檢查人員重點檢查指引。
- (三) 增進現場作業人員及勞工對危害辨識之能力。
- (四) 探討水土保持工程預鑄化施工作業過

程之施工危害，進行災害要因分析，以強化相關施工安全管理。

- (五) 探討水土保持工程預鑄化相關作業可能產生之危害類型，提出邊坡作業施工安全與改善措施。

二、研究方法與流程

本研究蒐集勞動部職業安全衛生署網站上所提供之 102 年至 108 年間與水土保持工程相關之職業災害案例加以分析及彙整，以現行職業安全衛生之相關法令為基礎，利用特性要因圖來探討及分析水土保持工程施工階段中所可能引起之危害，並提供改善對策及因應方針，以使營造廠商及專業下包商於施工期間能加以注意，並預先防範及確保施工安全，降低職業災害之發生。

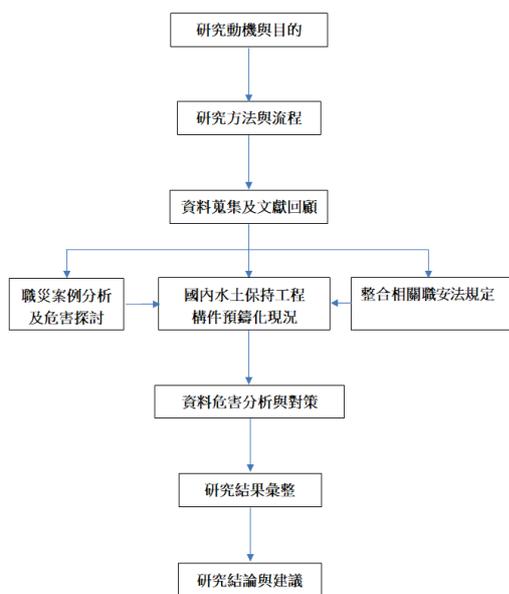


圖 1. 研究流程圖

2-1 特性要因圖定義及圖形結構

一個問題的特性(現象)，肯定是受到一些要因(主要因素)之影響，經過耙梳歸納這些要因，整理成具有層次且相互關聯的圖形，稱之為特性要因圖。圖形是以箭頭連結特性和要因之間，或是特性和對策之間的關係。在 1952 年由日本品管大師石川馨教授(Kaoru Ishikawa)所發展出來的，故又名石川圖，又其完整圖形外型類似魚骨，因此一般俗稱為魚骨圖。圖形結構由大小箭頭組合而

成，魚頭向右者為探討原因型，而魚頭向左者為擬定對策型。以探討原因型之特性要因圖為例，魚頭右側代表問題之特性(現象)，魚骨側代表造成該特性(現象)之重要原因，包括背骨(脊椎骨)、大骨、中骨、小骨...，分別代表製程、大要因、中要因、小要因...，而成為完整之魚骨圖。

本研究爰以水土保持工程之野溪整治構件預鑄化施工過程中欲分析的危害類型劃分，並於特性要因圖之背骨右方箭頭末端填入問題點，做為特性要因圖追求之標的。

2-2 野溪整治構件預鑄化施工之作業階段分類

有了明確危害問題點後，就可依該問題點針對施工過程中，可能引起危害之相關缺失及問題加以探討及分析，但因危害的來源可以小至微觀一個作業中，如模板切割作業，大則可擴及工程的整個作業階段，如果以微觀來進行分析，則危害來源將可以分至很細的每個階段及勞工所從事之各種細微之動作，危害分析切割過細，將使危害分析過於累贅，但若取整個作業階段來分析又無法深入分析危害來源，故為簡化分析並且又能兼顧各施工層面，因此將野溪整治構件預鑄化施工之主要作業階段如圖 2 所示，以利危害來源之分析：



圖 2. 野溪整治構件預鑄化工法施工流程圖

三、文獻回顧

3-1 重大職業災害統計

而依據勞動部職業安全衛生署歷年工作場所重大職災死亡人數，我國營造業全產業重大職業災害死亡人數(勞動部職業安全衛生署，2021)，由 103 年的 346 人，降至 107 年的 285 人，但自 108 年起死亡人數又由 107 年最低點 285 人上升至 316 人(圖 3)，與 108 年度營造業、製造業與其他行業重大職災死亡人數比較，營造業之死亡人數居全行業之冠佔當年度 53%(圖 4)，可見在降低職業災害的努力上仍需努力。

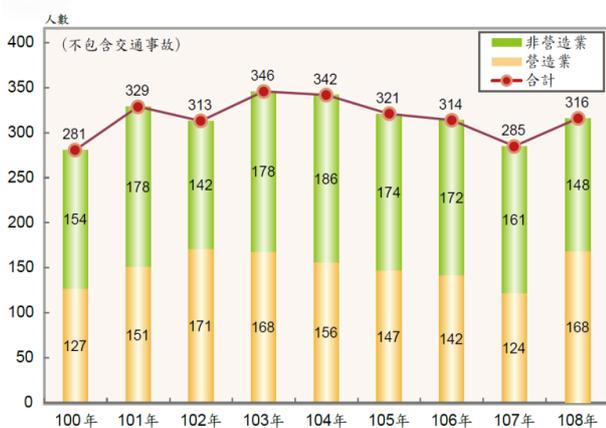


圖 3. 歷年工作場所重大職災死亡人數

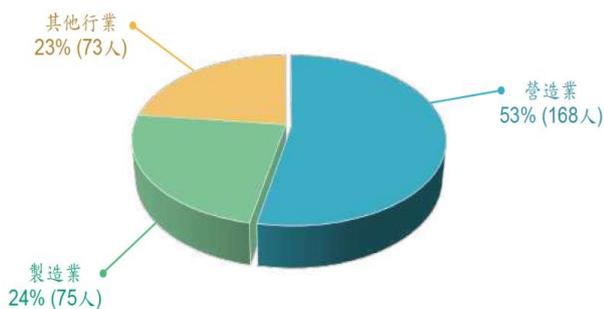


圖 4. 營造業、製造業與其他行業重大職災死亡人數比較

3-2 水土保持工程災害案例分析與探討

經彙整勞動部職業安全衛生署網站上所提供之 102 年至 108 年間營造業重大職災實例摘要與水土保持工程相關之職業災害案例加以分析，水土保持工程首要危害因子為物體倒(崩)塌、其次為墜落、滾落、再者為溺斃。

水土保持工程主要工程範圍為河道及山

坡地，其施工位置通常位於海拔高之偏鄉山區地帶，且物料及機具進出山區費時費力，加上山區乖舛多變的天氣令人捉摸不定，造成施工困難度的增加。從國內外的案例及文獻分析中發現使用預鑄混凝土之工法施工效率佳、進度容易掌握，預鑄製品在製作時可免去場鑄模板支撐及養護時間，若工程採結合場鑄及預鑄工法並行，更可節省等待時間，且預鑄品製作時可不受氣候影響於室內施作，可維持一定工進，其尺寸規格較正確，品質較穩定。在運輸及儲存方面也較容易管控。由於預鑄工法採規格化、標準化、模組化方式，使得工程設計者於設計施工圖時能較快速方便，施工者可遵循 SOP 標準施作程序以降低職業災害發生。

預鑄工法與傳統工法的施工作業雖有不同，但所面臨的危害後果卻是相同類型，例如牆身鋼筋綁紮、牆身模板組立、混凝土澆置...等作業會面臨物體飛落、倒塌、墜落滾落...等危害類型，傳統工法對於此種危害類型其風險等級都是需要加以管理控制並進行為降低風險所採取之措施應對，如表 1 所示。由於預鑄工法主要的作業流程皆是利用吊車進行預鑄塊組立，並由吊掛的專業人員進行預鑄塊輔助放置，遇到同樣的危害類型時較無重大風險的可能，如表 2 所示。由上述兩表進行比較可發現傳統工法的風險等級皆在等級 3 以上，擋土牆於場鑄施工階段，鋼筋及模板施工高度較高易產生倒塌；預鑄塊高度固定，鋼筋及模板作業較無倒塌危害產生。傳統工法施工階段需長時間於高處作業，有可能導致施工人員不甚掉落；預鑄塊施工，因施工人員可直接站立於預鑄塊上進行組立，降低高處作業產生墜落危害之風險。傳統工法長時間於易發生溺水環境下作業；預鑄塊則可選擇於安全環境下進行施工，再運送至工區進行組立排放作業，降低於溺水環境下作業時間。但針對物體飛落之危害風險提高是因預鑄塊於地組完成後，運送至工區進行組立排放作業階段，需長時間使用移動式起重機進行吊掛作業，易有物體飛落危害產生，因此須針對此工項進行較為嚴格的施工順序

及管理才能有效降低危害風險的發生機率。

表 1.傳統工法的風險評估表

作業名稱	危害辨識度及後果		現有防護措施	評估風險		
	作業內容	危害類型 危害可能造成後果之情境描述		管理控制	嚴重度	可能性
傳統工法 鑄身鋼筋綁紮鑄身模框組立混泥土澆置模框拆除	被刺、割、擦傷	鋼筋綁紮過程中人員受傷	作業前檢查個人防護具	S2	P3	3
	物體飛落	物料吊放時，鎖勾脫落導致物體飛落危害	作業前對設備作檢查定期保養及更新鋼索吊放物綁紮牢固	S3	P2	3
	感電	鋼筋加工作業時，電焊機漏電造成人員感電	電焊機設自動電擊防止裝置供電設備設漏電斷路器制定標準作業程序及教育訓練	S4	P3	4
	倒塌	勞工綁紮鋼筋時，綁紮作業草率，使得鋼筋倒塌、人員受傷	現場人員監督安衛人員確實督導作業	S4	P4	5
	墜落滾落	人員高處作業為有足夠防護措施，導致作業人員墜落、滾落	標準作業程序及教育訓練於作業場所入口顯而易見處所公告應注意之事項等	S4	P4	5
	溺水	爆與或溪水暴漲導致工區淹水	增設抽水設施雨量過大時暫時停工	S3	P3	4

表 2.預鑄工法的風險評估表

作業名稱	危害辨識度及後果		現有防護措施	評估風險		
	作業內容	危害類型 危害可能造成後果之情境描述		管理控制	嚴重度	可能性
預鑄工法 預鑄塊組立及排放	被刺、割、擦傷	鋼筋綁紮過程中人員受傷	作業前檢查個人防護具	S2	P3	3
	物體飛落	物料吊放時，鎖勾脫落導致物體飛落危害	作業前對設備作檢查定期保養及更新鋼索吊放物綁紮牢固	S3	P3	4
	感電	鋼筋加工作業時，電焊機漏電造成人員感電	電焊機設自動電擊防止裝置供電設備設漏電斷路器制定標準作業程序及教育訓練	S4	P3	4
	倒塌	勞工綁紮鋼筋時，綁紮作業草率，使得鋼筋倒塌、人員受傷	現場人員監督安衛人員確實督導作業	S4	P1	4
	墜落滾落	人員高處作業為有足夠防護措施，導致作業人員墜落、滾落	標準作業程序及教育訓練於作業場所入口顯而易見處所公告應注意之事項等	S4	P2	4
	溺水	爆與或溪水暴漲導致工區淹水	增設抽水設施雨量過大時暫時停工	S3	P2	3

框式排列，並以鋼索進行單元連結。基礎及邊坡回填現場疏河床粒料後，外層再利用現場大塊石施作乾砌塊石護岸共計施作 T180 型單元 769 個、T60 型單元 268 個，2002 年 10 月 16 日開工至 12 月 15 日完工總施工期 61 日，工程費 4,328,000 元。



圖 5.T 型單元護岸排列情形

3-3 我國野溪整治之構件預鑄化施工現況

(一) 美佐呂溪整治一期工程

(1) 治理概要：

為疏通台東縣美佐呂溪橋上游淤塞河段(0k+000~0k+080)，設置複式斷面固床工調整洩水坡降以利排洪，進行土石淤河段之疏濬處理(0k+180~0k+280)，以 T 型預鑄組合式單元配合乾砌現場大塊石修復社區河段護岸(0k+080~0k+280)，並配合設置蓄砂區提供汛期災害風險管理,施工完成情形如圖 5.~11.所示。

(2) 預鑄工法運用：

本工程利用場鑄固床工施作時間進行預鑄單元開模作業後，於工區內高灘地進行單元澆置工作；0k+080~0k+180 河段採用 T180 型單元進行階梯狀排列，並逐層以鋼索進行單元連結，外層再利用現場大塊石施作乾砌塊石護岸；0k+180~0k+280 河段採用 180 型單元排列基礎，邊坡則以 T60 型單元進行格



圖 6.T 型單元護岸回填土方



圖 7.T 型單元水制工排列



圖 8.T 型單元水制工拋石



圖 11.美佐呂溪植生復舊照片(完工八個月)



圖 9.美佐呂溪整流段完工照片



圖 10.美佐呂溪蓄砂段完工照片

(二) 知名橋整治二期工程

(1) 治理概要：

主要疏通台東縣知名三號橋上，下游淤塞河段(0k+000~0k+470)，於整治段設置固床工調整流心流向，以 C 型預鑄組合式單元進行兩側護岸排列(0k+000~0k+320)，並配合 T 型預鑄組合式單元進行蓄砂區護岸排列(0k+020~0k+240)，提供汛期災害風險管理，施工完成情形詳如圖 12~16。

(2) 預鑄工法運用：

本工程同樣利用場鑄固床工施工時間進行預鑄單元開模作業，並於工區內高灘地進行單元澆鑄工作；0k+000~0k+020 及 0k+240~0k+320 河段採用 C150 型透水單元進行階梯狀排列，並以鋼索進行相鄰單元連結，再利用現場河床粒料回填護岸邊坡；0k+020~0k+240 河段採用 C100 型單元進行階梯狀排列，並以鋼索進行相鄰單元連結，再利用現場河床粒料回填護岸邊坡；並於蓄砂區段以 T120 型透水單元排列成箱型挑水工，以鋼索連結單元後拋填現場卵塊石，現場大塊石則排列於護岸坡腳處。共計施作 C150 型單元 264 個、C100 型單元 730 個、T120 型單元 252 個，2003 年 4 月 1 日開工至 6 月 18 日完工，總施工期 79 日，工程費 4,789,000 元。



圖 12.C 型單元護岸排列情形



圖 15.知名橋整治二期工程完工照片



圖 13.知名橋野溪蓄砂段完工情形



圖 16.知名橋整治二期工程完工 8 個月照片

四、構件預鑄化製作及吊放危害評估

表 3.預鑄工法的風險評估表

第一階 作業	第二階 作業	作業內容	危害 類型	風險辨識 (來源、起因、事件、 可能後果等)	風險對策 (即避免風險或改善機會 之措施)
製作	製作場地 整備	挖土機 配合人工作業	缺割	工作人員精神不濟、車 速力不足導致缺割	
	鋼架 組立	起重機 配合人工作業	物體 飛落 破片	1. 鋼架吊運過程不慎掉落 2. 組立過程手腳破片	
	鋼架 搬運	人工作業	破片	組立過程手腳破片	
	泥漿土 澆置	攪拌車配合 人工澆置接管	墜落	作業過程人員不慎墜落	設置適當之工作架。
	拆模	人工作業	破片	作業過程不慎破片	
堆置	起重機配合 人工作業	物體 飛落	起重機吊掛作業不慎 脫落	1. 作業範圍圍管管制。 2. 確實檢查起重機、吊掛具。	
		倒塌	堆置之形塊滑落	1. 堆置地面整平夯實。 2. 設置適當之墊板。	
		破片	作業過程手腳破片	確認與起重機操作手閘之聯絡 信號。	
運送	裝車	起重機、平板 車配合人工吊 掛及固定作業	物體 飛落 破片	起重機吊掛作業不慎脫落 作業過程手腳破片	1. 作業範圍圍管管制。 2. 確實檢查起重機、吊掛具。 確認與起重機操作手閘之聯絡 信號。
	運送	平板車運送	碰撞	行駛過程撞擊人員	1. 車輛進出場應由交通引導 員指揮運送。 2. 平板車駕駛行車視野輔助 系統、倒車及轉向警報系 統。
吊放	吊放	起重機配合 人工吊掛作業	物體 飛落	起重機吊掛作業不慎脫落	1. 作業範圍圍管管制。 2. 確實檢查起重機、吊掛具。 確認與起重機操作手閘之聯絡 信號。
			破片	作業過程手腳破片	
			溺水	人員不慎自吊機滑落水域	1. 鄰近水域作業人員確實穿戴 救生衣。 2. 鄰近區域確實設置救生圈、 救生繩、拋繩器水上救生 設備，並每日檢查以維持其 性能。



圖 14.C 型護岸回填土方

五、結論及建議

在構件預鑄化作業的危害分析，我們可以發現物體飛落是為主要原因，因此在從事預鑄節塊吊掛施工時，更應加強危害防止及訓練，本研究所提供之分析內容及改善對策可以提供營造廠商及檢查單位作為教育訓練之內容，並透過職災案例的解析彙整及分析構件預鑄化作業於施工中所可能發生原因及改善對策後，可以提供工程廠商以下之策略擬定建議：

- 一、善用職災案例
- 二、施工前召開危害評估會議
- 三、擬定危害改善計畫
- 四、定期召開安全衛生設施界面協調會議
- 五、選擇優良廠商

參考文獻

1. 勞動部，職業安全衛生法，民國 108 年 05 月 15 日。
2. 勞動部，職業安全衛生法施行細則，民國 109 年 02 月 27 日。
3. 勞動部，職業安全衛生管理辦法，民國 109 年 09 月 24 日。
4. 勞動部，職業安全衛生教育訓練規則，民國 105 年 09 月 22 日。
5. 勞動部，營造安全衛生設施標準，民國 110 年 01 月 06 日。
6. 勞動部，職業安全衛生設施規則，民國 109 年 03 月 02 日。
7. 勞動部，危險性工作場所審查及檢查辦法，民國 109 年 07 月 17 日。
8. 勞動部，加強公共工程職業安全衛生管理作業要點，民國 103 年 12 月 30 日。
9. 勞動部，起重升降機具安全規則，民國 109 年 08 月 20 日。
10. 勞動部職業安全衛生署，風險評估技術指引，民國 104 年 12 月 04 日。
11. 勞動部職業安全衛生署，營造工程施工風險評估技術指引解說手冊，民國 110 年 02 月。
12. 勞動部職業安全衛生署，108 勞動檢查統計年報，109 年 07 月。

13. 王志輝、莊裕斌、鍾庫比亞、黃勝頂，結合新技術導入預鑄組合式工法設計之風險評估研究，2019。
14. 莊裕斌，預鑄組合式單元應用在野溪工程整治之效果，2003。

由懸臂式擋土牆之傾倒探討土壤剪力強度參數之適用性

沈茂松¹ 陳德富²

¹ 國立高雄科技大學土木工程系教授

² 國立高雄科技大學土木工程系碩士研究生

摘要

本研究利用護岸工程開挖深度 9m 以懸臂式擋土實例倒塌之 FSP-III 鋼版樁與 ϕ 60cm 排樁穩定樁的側向位移，再以應力反推方式，比較護岸擋土壁之土壤設計剪力強度參數，砂土、黏土皆以短期強度 S_u ，比原設計黏土用 S_u 、 $\phi=0$ 、砂土用長期強度 $c'=0$ 、 $\phi'\neq 0$ ；如同物理 c 、 ϕ 中(黏土 C_u 、 $\phi=0$ ；砂土 $c'=0$ 、 $\phi'\neq 0$)進行分析。

在研究中 13m FSP-III 鋼版樁開挖深度 9m，在使用土壤物理剪力參數或短期強度，皆是入土深度不足之不穩定狀況，但比對排樁牆之實測變位，使用土壤短期強度之側向變位誤差為 8.08%，而使用物理參數誤差為 18%。比對鋼版樁之實測變位，使用土壤短期強度之側向變位誤差為 14.0%，而使用物理參數誤差為 15.6%。

因鑑於鋼版樁打樁定位歪斜，對側向變位分析影響較大，而設計重疊攪拌以切削樁施作的預壘排樁定位較佳，依此研判，設計護岸之懸臂式擋土牆仍以土壤短期強度參數為宜。

關鍵字：短期強度、長期強度、物理 c 、 ϕ

一、緒論

1-1 研究動機

本研究利用護岸工程開挖深度 9m 以懸臂式擋土實例倒塌之 FSP-III 鋼版樁與 ϕ 60cm 排樁穩定樁的側向位移，再以應力反推方式，比較護岸擋土壁之土壤設計剪力強度參數，砂土、黏土皆以短期強度 S_u ，比原設計黏土用 S_u 、 $\phi=0$ 、砂土用長期強度 $c'=0$ 、 $\phi'\neq 0$ ；如同物理 c 、 ϕ 中(黏土 C_u 、 $\phi=0$ ；砂土 $c'=0$ 、 $\phi'\neq 0$)進行分析。

在研究中 13m FSP-III 鋼版樁開挖深度 9m，在使用土壤物理剪力參數或短期強度，皆是入土深度不足之不穩定狀況，但比對排樁牆之實測變位，使用土壤短期強度之側向變位誤差為 8.08%，而使用物理參數誤差為 18%。比對鋼版樁之實測變位，使用土壤短期強度之側向變位誤差為 14.0%，而使用物理參數誤差為 15.6%。

因鑑於鋼版樁打樁定位歪斜，對側向變位分析影響較大，而設計重疊攪拌以切削樁施作的預壘排樁定位較佳，依此研判，設計

護岸之懸臂式擋土牆仍以土壤短期強度參數為宜。

1-2 研究目的

本研究在追查實際在施工中傾倒的懸臂式護岸擋土壁體，由擋土壁實測側向位移，來印證設計與探尋合適的土壤剪力強度參數。研究對象為懸臂式擋土壁體，因其沒有內支撐，不會受內支撐起始設定壓力的大小，影響擋土壁體的側向位移；亦不是背拉支撐系統，不會受地錨的背拉力大小，或錨碇樁的前後距離、與錨深不足的影響。

1-3 研究流程

本研究以實際之 13m 長 FSP III 懸臂式鋼版樁當護岸擋土壁體，其旁 1m~4m 再加一排 18m 深、直徑 60cm、重疊 5~10cm 緊密排列的預壘排樁當穩定樁之護岸擋土牆，在南部某河川整治工程，施工傾倒之實測鋼版樁與預壘排樁的側向位移，利用土壤短期強度與物理參數(粘性土壤用 $C_u(S_u)$ 、 $\phi=0$ ，砂性土壤 $C'=0$ 、 $\phi'\neq 0$)，重新分析懸臂式擋土牆開挖 9m 之主、被動土壓力入土深度穩定分析、預

壘排樁牆當穩定樁能否穩定鋼版樁側向變位後的土楔應力，鋼版樁牆與預壘排樁牆受主、被動土壓力後產生的側向變位，最後以實測鋼版樁與預壘排樁的側向位移，去印證懸臂式擋土牆之最佳設計的土壤剪力強度參數，研究流程，如圖 1 所示。

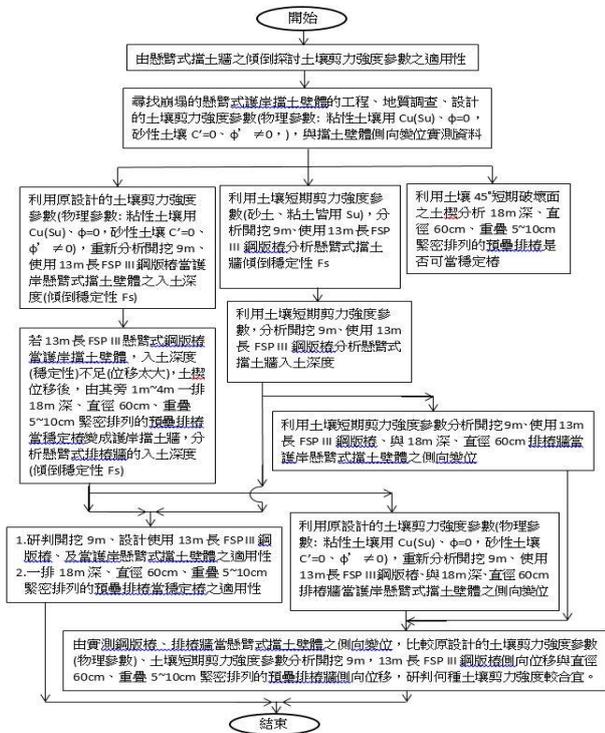


圖 1 由懸臂式擋土牆之傾倒探討土壤剪力強度參數之適用性研究流程

二、文獻回顧

2-1 懸臂式擋土牆穩定分析

施國欽(1996)[1]指出懸臂式鋼版樁兩側水壓力互相抵銷，因此側向主、被動土壓力需考慮有效應力，分析時必須滿足主、被動土壓力彎矩，對版樁底端 B 點取力矩 $\sum MB=0$ ，由此可求出版樁貫入深度 D，如圖 2 所示。

實務上應再增加 20%~30%之長度。有些分析直接將被動土壓力折減，即是 Kp/FS ，其中 $FS=1.5\sim 2.0$ ，依上述方式求得貫入深度 D，依此法計算不需再增長。最後，依結構力學求出剪力為零之位置，該點為彎矩最大之處，依斷面模數 $S=M_{max}/\sigma_a$ 可選出版樁之斷面尺寸。

2-2 預壘排樁之等值矩形樁分析

沈茂松(2015)[5]指出連續的預壘排樁牆為圓形基樁，當擋土壁體承受彎矩時，常轉換為等值矩形樁分析。

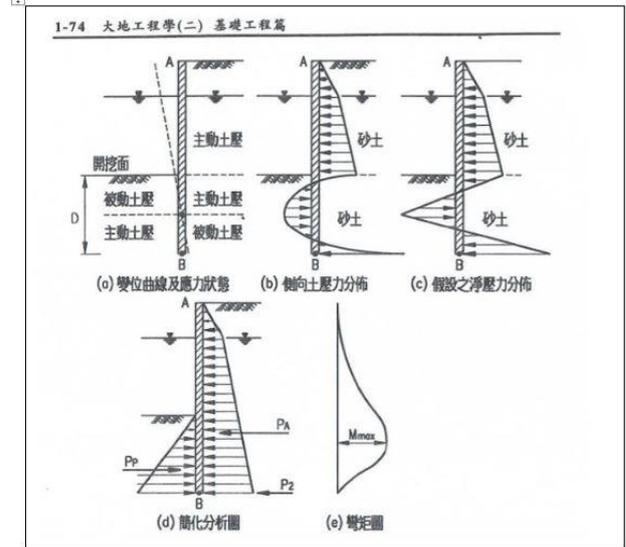


圖 2 懸臂式鋼板樁入土深度分析(摘自施國欽, 1996, [1])

圓形基樁轉換為等面積的矩形樁，但圓形基樁的配筋，可考慮減少一支，如圖 3 所示。若是排樁有重疊，則鋼筋可以不減少。

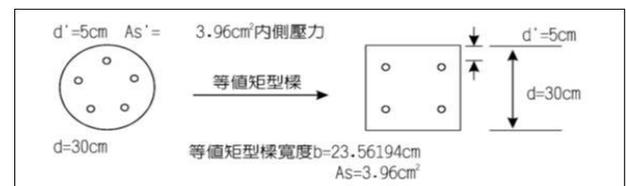


圖 3 連續的預壘排樁牆為圓形基樁，當擋土壁體承受彎矩時，常轉換為等值矩形樁分析(摘自沈茂松,2015,[5])

三、懸臂式擋土牆護岸工程

3-1 懸臂式擋土牆護岸工程描述

本研究護岸工程為三爺溪中下游某段整治工程。懸臂式擋土牆發生較嚴重的位置為 9K+300，其擋土牆設計剖面圖，如圖 4 所示。

護岸工程懸臂式擋土牆採用 13m 長 FSPIII，開挖 9m 深，為防損及鄰房，在鋼版樁與鄰房間設置一排緊密排列長 18m 直徑 $\phi 60cm$ 的預壘排樁(重疊 5~10cm)，當做穩定樁，如圖 4 所示。

長 18m 直徑 $\phi 60cm$ 的預壘排樁的水泥

砂漿 $f_c' = 210 \text{ kg/cm}^2$ ，每支排樁配 9 支 $\phi 25\text{mm}$ 鋼筋，如圖 5 所示。設計土壤參數，如表 1 所示。

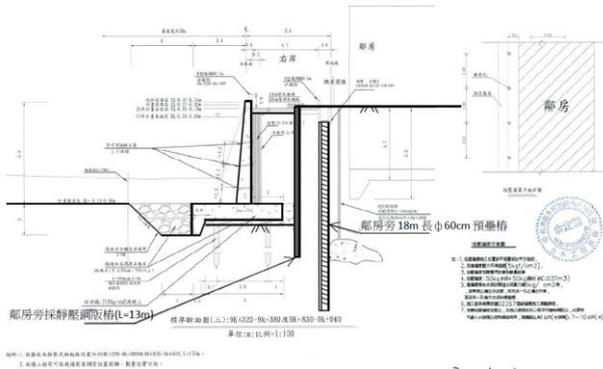


圖 4 懸臂式鋼版樁與排樁傾倒最嚴重的 9K+300 擋土牆設計斷面

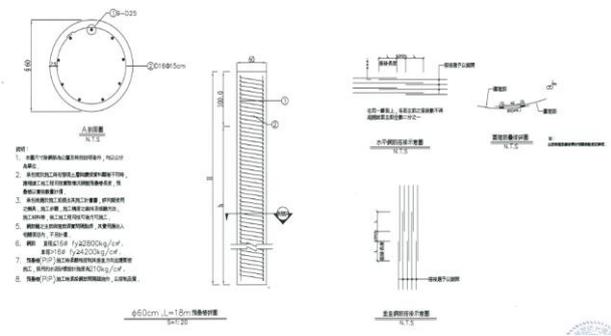


圖 5 長 18m 直徑 $\phi 60\text{cm}$ 預壘排樁設計圖，預壘排樁的水泥砂漿 $c' = 210 \text{ kg/cm}^2$ ，每支排樁配 9 支 $\phi 25\text{mm}$ 鋼筋

表 1 原設計土壤參數

層次	參數	平均位置深度 m	γ (t/m^3)	W(%)	N	Cu (t/m^2)	ϕ (u°)	C' (t/m^2)	ϕ' ($^\circ$)	Su (t/m^2)	Cc	備註
(1) 回填層(SF)		0.00~3.30	2.00	-	10	-	-	0.0*	30.0*	-	-	取保守值
(2) 結實粉土層(ML)		-3.30~-4.70	1.99	24.3	7	4.20*	-	-	-	4.20*	0.266	
(3) 粉質細砂層(SM)		-4.70~-6.60	1.83	23.8	20	-	-	0.0*	33.0*	-	-	
(4) 粉質黏土層(CL)		-6.60~-8.30	1.88	37.4	3	1.80*	-	-	-	1.80*	0.347	
(5) 粉質細砂層(SM)		-8.30~-9.80	1.94	21.0	14	-	-	0.0*	31.2*	-	-	9k+473 鑽孔
(6) 粉質黏土層(CL)		-9.80~-11.20	1.87	36.7	4	2.40*	-	-	-	2.40*	0.317	
(7) 粉質細砂層(SM)		-11.20~-12.70	1.97	24.5	20	-	-	0.0*	33.0*	-	-	
(8) 粉質黏土層(CL)		-12.70~-16.80	1.97	26.8	6	3.60*	-	-	-	3.60*	0.284	
(9) 粉質細砂層(SM)		-16.80~-20.45	1.98	22.6	35	-	-	0.0*	35.6*	-	-	
(1) 砂質粉土層(ML)		0.00~-1.80	1.96	20.8	4	-	-	0.0*	28.8*	-	-	9k+950 鑽孔
(2) 粉質黏土層(CL)		-1.80~-3.10	1.90	-	2	1.20*	-	-	-	1.20*	-	
(3) 粉質細砂層(SM)		-3.10~-5.20	1.87	27.5	10	-	-	0.3**	29.5**	-	-	
(4) 粉質黏土層(CL)		-5.20~-17.40	2.01	25.6	5	2.80**	9.1**	-	-	3.00*	0.263**	
(5) 粉質細砂層(SM)		-17.40~-20.45	2.02	20.6	32	-	-	0.0*	35.3*	-	-	

3-2 護岸擋土牆倒塌的情形與變位量測

護岸擋土牆施工里程 9k+300 處，於 13m 鋼板樁及預壘樁擋土措施設置完成達設計強度後，進行基礎開挖作業，開挖初始皆為穩定狀態，當開挖深度快達到 6m 深度時即發

現邊側路堤地面有些許龜裂現象，經暫停開挖並進行相關檢測，停滯開挖監測並無擴大裂縫產生後，接續依據設計深度進行開挖，開挖深度將達 7m 時，13m 鋼板樁發生傾斜變位，邊側地面出現較大裂縫並有土方下陷且拉斷管線發生滲水現象。

護岸擋土牆倒塌情形：(如圖 6a~6h)



圖 6a 護岸擋土牆基礎(9k+300) 開挖深度 6m 處即發生 13m 鋼板樁倒塌變位



圖 6b 鋼板樁傾斜側向變位，土方下陷



圖 6c 鋼板樁變位處，預壘樁變位，間隔土方下陷嚴重



圖 6d 鋼板樁及預壘樁處，側向變位持續增加，土方下陷過大



圖 6e 鋼板樁變位量測(變位大於 30 公分)



圖 6f 地面龜裂下陷面積持續增加，並產生階梯狀態下陷情形



圖 6g 鋼板樁變位量測(大於 1 公尺)



圖 6h 鋼板樁變位量測(大於 1 公尺)

3-3 護岸擋土牆倒塌應推求的因素

13m 長懸臂式鋼版樁開挖 9m、及長 18m 直徑 $\phi 60\text{cm}$ 預壘排樁當穩定樁，在開挖施工倒塌，由現勘引起許多應探討的因素，說明如下：

1. 比較 13m 長懸臂式 FSP-III 鋼版樁擋土牆在砂土、黏土皆以短期強度 S_u ，與原設計黏土用 S_u 、 $\psi=0$ 、砂土用長期強度 $c'=0$ 、 $\psi'\neq 0$ (物理 c 、 ψ)之主、被動土壓力的入土穩定性分析。
2. 分析 13m 長懸臂式 FSP-III 鋼版樁擋土牆在砂土、黏土皆以短期強度 S_u 之入土深度。
3. 比較 13m 長懸臂式 FSP-III 鋼版樁擋土牆在砂土、黏土皆以短期強度 S_u ，與原設計黏土用 S_u 、 $\psi=0$ 、砂土用長期強度 $c'=0$ 、 $\psi'\neq 0$ (物理 c 、 ψ)之主、被動土壓力的側向位移。
4. 比較 18m 長 $\psi 60\text{cm}$ 重疊 5~10cm 之預壘排樁在 13m 懸臂式 FSP-III 鋼版樁擋土牆側潰、變成擋土牆後，在砂土、黏土皆以短期強度 S_u ，與原設計黏土用 S_u 、 $\psi=0$ 、砂土用長期強度 $c'=0$ 、 $\psi'\neq 0$ (物理 c 、 ψ)之主、被動土壓力的側向位移。
5. 分析 18m 長 $\psi 60\text{cm}$ 重疊 5~10cm 之預壘排樁，能否當 13m 長懸臂式 FSP-III 鋼版樁擋土牆之穩定樁。

以上五大因素為本研究所須深入分析探討的主題，最主要的目的在追尋，擋土壁體在施工時應採用的土壤設計參數，是短期強度或為物理參數(黏土用 S_u 、 $\psi=0$ 、砂土用長

期強度 $c'=0$ 、 $\phi' \neq 0$)

四、懸臂式擋土牆之傾倒探討土壤剪力強度參數

懸臂式擋土牆在施作完成後進行開挖，由傾倒之實測位移來探討土壤剪力強度參數，本章以護岸工程開挖 9m，採用 13m 長懸臂式 FSP-III 鋼版樁擋土牆與 18m 長 $\phi 60\text{cm}$ 重疊 5~10cm 之預壘排樁當穩定樁，分析項目如下：

1. 比較 13m 長懸臂式 FSP-III 鋼版樁擋土牆在砂土、黏土皆以短期強度 S_u ，與原設計黏土用 S_u 、 $\psi=0$ 、砂土用長期強度 $c'=0$ 、 $\psi' \neq 0$ (物理 c 、 ψ) 之主、被動土壓力的入土穩定性分析。
2. 分析 13m 長懸臂式 FSP-III 鋼版樁擋土牆在砂土、黏土皆以短期強度 S_u 之入土深度。
3. 比較 13m 長懸臂式 FSP-III 鋼版樁擋土牆在砂土、黏土皆以短期強度 S_u ，與原設計黏土用 S_u 、 $\psi=0$ 、砂土用長期強度 $c'=0$ 、 $\psi' \neq 0$ (物理 c 、 ψ) 之主、被動土壓力的側向位移。
4. 比較 18m 長 $\phi 60\text{cm}$ 重疊 5~10cm 之預壘排樁在 13m 懸臂式 FSP-III 鋼版樁擋土牆側潰、變成擋土牆後，在砂土、黏土皆以短期強度 S_u ，與原設計黏土用 S_u 、 $\psi=0$ 、砂土用長期強度 $c'=0$ 、 $\psi' \neq 0$ (物理 c 、 ψ) 之主、被動土壓力的側向位移。
5. 分析 18m 長 $\phi 60\text{cm}$ 重疊 5~10cm 之預壘排樁，能否當 13m 長懸臂式 FSP-III 鋼版樁擋土牆之穩定樁。

再經由以上分析所得結果，進行整理與總結。

分析流程如下：

4-1 使用原土壤設計參數分析開挖 9m，採用懸臂式擋土壁 13m 鋼版樁

護岸設計分析圖，如圖 7 所示。

各層土壤的主被、動土壓係數，如表 2 所示。

整理懸臂式擋土牆各點主、被動土壓力應力圖，如圖 8、表 3 所示。

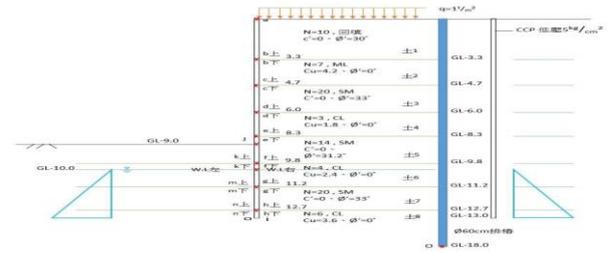


圖 7 原土壤設計參數黏土 C_u 砂土 $c'=0$ 、 $\phi' \neq 0$ 之護岸設計分析圖

表 2 原土壤設計參數各土層土壤的主被、動土壓係數

	USCS	N	C' (Cu)	ϕ'	γ (kN/m ³)	$K_a = \tan^2(45-\phi'/2)$	$K_p = \tan^2(45+\phi'/2)$	$K_a^{0.5} = \tan(45-\phi'/2)$	$K_p^{0.5} = \tan(45+\phi'/2)$
土-1	回填	10	0	30	2	0.333		0.5773	3
土-2	ML	7	4.2	0	2	1		1	1
土-3	SM	20	0	33	1.8	0.2948		0.53	3.392
土-4	CL	3	3.8	0	1.9	1		1	1
土-5	SM	3.4	0	31.2	1.9	0.317		0.563	3.149
土-6	CL	4	2.4	0	1.9	1		1	1
土-7	SM	20	0	33	2	0.2948		0.2948	3.392
土-8	CL	6	3.6	0	2	1		1	1

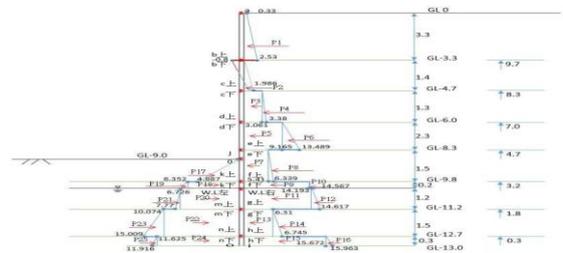


圖 8 原土壤設計參數之各點主動土壓力、被動土壓力應力圖

表 3 採用原土壤物理剪力參數，懸臂式擋土牆對樁底 i 點之主動土壓彎矩 $\sum Ma$ 、 $\sum Mp$ 應力表

被動土壓力		力臂 X_a	M_p
P17=	$1/2 \times 4.887 \times 9.9 \times 1.9548$	$3.2 \times 9.9 \times 9.9 \times 0.466$	6.7766
P18=	$6.352 \times 10.9 \times 1.2704$	$3 \times 2.0 \times 3.1$	3.938
P19=	$1/2 \times 6.726 \times 6.332 \times 10.9 \times 0.0374$	$3 \times 2.0 \times 3.066$	8.1146
P20=	$6.726 \times 1.2 \times 10 \times 0.0712$	$1.8 \times 1.42 \times 2.5$	20.178
P21=	$1/2 \times 7.77 \times 6.726 \times 11.2 \times 0.0364$	$1.8 \times 1.42 \times 2.066$	1.419
P22=	$0.074 \times 12.7 \times 11.2 \times 0.165$	$0.3 \times 1.52 \times 1.65$	13.8005
P23=	$1/2 \times 15.0009 \times 10.074 \times 12.7 \times 1.2 \times 0.0325$	$3.4 \times 1.52 \times 0.8$	2.961
P24=	$11.625 \times 11.2 \times 7 \times 0.4975$	0.32×0.15	0.523
P25=	$1/2 \times 11.625 \times 11.825 \times 13.2 \times 0.0485$	0.32×0.1	0.04485
$\sum P_p = 34.297 \text{ kN}$		$\sum M_p = 61.7748 \text{ kN}$	

主動土壓力		力臂 X_a	M_a
P1=	$1/2 \times 2.533 \times 3 \times 1.745$	$0.7 \times 3.3 \times 10.8$	45.0846
P2=	$1/2 \times 1.9864 \times 7.3 \times 1.3902$	$0.3 \times 1.42 \times 6.766$	12.186
P3=	$3.061 \times 6.4 \times 7 \times 0.9793$	$7 \times 1.32 \times 2.65$	30.44
P4=	$1/2 \times 3.26 \times 3.061 \times 6.4 \times 7 \times 0.207$	$7 \times 1.32 \times 2.43$	1.5495
P5=	$0.0548 \times 6.2 \times 15.5865$	$4.7 \times 2.32 \times 0.85$	91.145
P6=	$1/2 \times 11.886 \times 6.65 \times 6.2 \times 0.4975$	$4.7 \times 2.32 \times 0.46$	22.115
P7=	$5.459 \times 6.6 \times 3 \times 0.1$	$3.2 \times 1.52 \times 0.95$	31.995
P8=	$1/2 \times 339.5 \times 4.9 \times 6.6 \times 3 \times 0.2045$	$3.2 \times 1.52 \times 0.70$	2.489
P9=	$14.193 \times 10.9 \times 9.9 \times 0.8386$	$3 \times 2.0 \times 3.1$	8.7999
P10=	$1/2 \times 14.567 \times 14.193 \times 10.9 \times 0.0374$	$3 \times 2.0 \times 3.067$	0.1147
P11=	$14.567 \times 11.2 \times 20 \times 0.7488$	$1.8 \times 1.42 \times 2.5$	43.71
P12=	$1/2 \times 14.617 \times 14.567 \times 11.2 \times 0.03$	$1.8 \times 1.42 \times 2.13$	0.0639
P13=	$6.31 \times 12.7 \times 11.2 \times 0.81$	$0.3 \times 1.52 \times 1.65$	5.0505
P14=	$1/2 \times 6.745 \times 6.31 \times 12.7 \times 1.2 \times 0.32025$	$0.3 \times 1.52 \times 0.8$	0.261
P15=	$15.692 \times 13.12 \times 7 \times 0.7016$	0.32×0.15	0.705
P16=	$1/2 \times 15.692 \times 15.672 \times 13.2 \times 0.0485$	0.32×0.1	0.04485
$\sum P_a = 69.381 \text{ kN}$		$\sum M_a = 301.7326 \text{ kN}$	

計算各點主動土、被動土壓力及彎矩平衡，如下所示。

1. 側向主、被動土壓力平衡

$FS = \Sigma Pp / \Sigma Pa = 34.297 / 69.380 = 0.49 \leq 1$ (NG)

2. 側向主、被動土壓力彎矩平衡(傾倒力矩)

$FS = \Sigma Mp / \Sigma Ma = 51.775 / 300.739 = 0.172 \leq 1$ (NG)

懸臂式擋土牆在土壤採用物理參數分析，傾倒之安全係數不足。

小結：懸臂式鋼版樁依原土壤物理剪力參數分析為不穩定，其主、被動土壓平衡之 $FS=0.49$ ，主、被動土壓彎矩平衡 $FS=0.172$ ，代表鋼版樁入土深度不足。

4-2 利用土壤短期強度 $C=Cu=Su$ 分析 13m 鋼版樁懸臂式擋土牆，土壤短期強度利用 Terzaghi&Peck (1967)之半經驗公式 [1]

$C = Su = \frac{10N}{16} (t/m^2) \quad \psi = 0^\circ$ (2-3)

由表 1 原地質簡化表經式(2-3)得土壤短期剪力強度，如表 4 所示。護岸設計分析圖，如圖 9 所示。

表 4 本護岸工程之土壤短期剪力強度

層號	土質	N	CL	$S_u = 10N/16 (t/m^2)$	$\psi = 0^\circ$	修正土質
土1	砂壤土	10	3.3	6.25	2	砂壤土
土2	ML	7	4.7	4.375	1.99	砂壤土
土3	SM	20	6	12.5	1.92	砂壤土
土4	CL	3	8.3	1.875	1.88	砂壤土
土5	SM	14	9.8	8.75	1.94	砂壤土
土6	CL	4	11.2	2.5	1.97	砂壤土
土7	SM	20	13.7	12.5	1.97	砂壤土
土8	CL	6	15.8	3.75	1.97	砂壤土
土9	SM	35		21.875	1.98	砂壤土

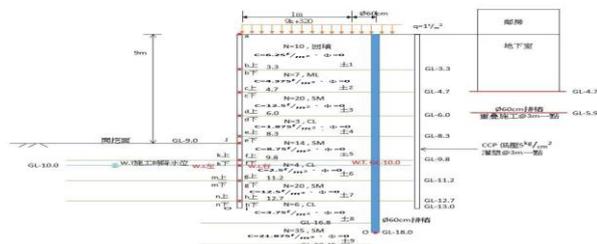


圖 9 本護岸工程之土壤短期剪力強度分析圖

擋土牆各點主動土壓力及被動土壓應力圖，如圖 10、圖 11 中的虛線及表 5 所示。

計算各點主動土、被動土壓力及彎矩平衡，如圖 12 所示。

1. 側向主、被動土壓力平衡

$FS = \Sigma Pp / \Sigma Pa = 80.036 / 105.6356 = 0.735 \leq 1$ (NG)

2. 對 i 點(樁底) 側向主、被動土壓彎矩平衡(傾倒力矩)

$FS = \Sigma Mp / \Sigma Ma = 140.159 / 394.197 = 0.348 \leq 1$ (NG)

懸臂式擋土牆在土壤採用短期強度分析，傾倒之安全係數不足。

小結：懸臂式鋼版樁依短期土壤強度分析為不穩定，其主、被動土壓平衡之 $FS=0.735$ ，主、被動土壓彎矩平衡 $FS=0.348$ ，代表鋼版樁入土深度不足。

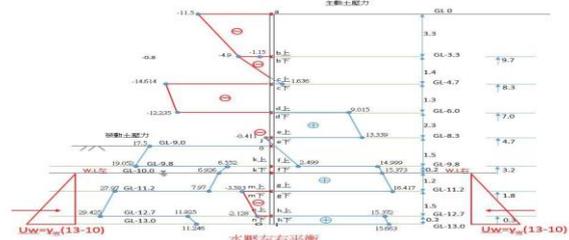


圖 10 採用土壤短期強度之懸臂式擋土牆各點主、被動土壓力應力圖

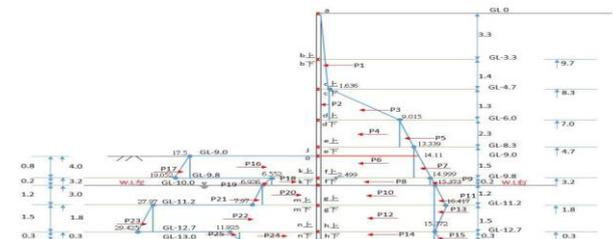


圖 11 採用土壤短期強度及土壤抗張力很小，張力會消失，懸臂式擋土牆各點主、被動土壓力應力圖

表 5 採用土壤短期強度分析，懸臂式擋土牆對樁底 i 點之主動土壓彎矩 ΣMa 、 ΣMp 應力表

被動土壓力	力臂 X_p	M_p
$P16 = 17.5 \times 0.8 = 14$	$3.2 + 0.8/2 = 3.6$	50.4
$P17 = 1/2 \times (19.66 - 17.5) \times 0.8 = 0.62$	$3.2 + 0.8/3 = 3.467$	2.149
$P18 = 6.552 \times 0.2 = 1.31$	$2 + 0.2/2 = 1.1$	1.442
$P19 = 1/2 \times (6.926 - 6.552) \times 0.2 = 0.0374$	$3 + 0.2/3 = 3.066$	0.1145
$P20 = 6.926 \times 1.2 = 8.3112$	$1.8 + 1.2/2 = 2.4$	19.946
$P21 = 1/2 \times (7.97 - 6.926) \times 1.2 = 0.624$	$1.8 + 1.2/3 = 2.2$	1.378
$P22 = 27.97 \times 1.8 = 50.346$	$0.3 + 1.8/2 = 1.2$	60.4152
$P23 = 1/2 \times (29.425 - 27.97) \times 1.8 = 1.3095$	$0.3 + 1.8/3 = 0.9$	1.1785
$P24 = 11.246 \times 0.3 = 3.3738$	$0.3/2 = 0.15$	0.506
$P25 = 1/2 \times (11.925 - 11.246) \times 0.3 = 0.1018$	$0.3/2 = 0.1$	0.01
$\Sigma P = 80.361 \text{ kN}$		$\Sigma M_p = 140.593 \text{ kN}\cdot\text{m}$

主動土壓力	力臂 X_a	M_a
$F1 = 1/2 \times 1.68 \times 3.3 = 2.772$	$0.3 + 3.3/2 = 1.8$	4.990
$F2 = 1.68 \times 3.3 = 5.544$	$3.3 + 0.3/2 = 3.45$	19.22
$F3 = 1/2 \times (1.5 - 1.68) \times 3.3 = 0.315$	$3.3 + 0.3/3 = 3.4$	1.075
$F4 = 0.315 \times 3.3 = 1.0395$	$4.7 + 0.3/2 = 5.05$	5.25
$F5 = 1/2 \times (1.33 - 1.5) \times 3.3 = 0.9225$	$4.7 + 0.3/2 = 5.05$	4.66
$F6 = 1.33 \times 3.3 = 4.389$	$3.3 + 0.3/2 = 3.45$	15.13
$F7 = 1/2 \times (1.16 - 1.33) \times 3.3 = 0.5265$	$3.3 + 0.3/3 = 3.4$	1.81
$F8 = 1.16 \times 3.3 = 3.828$	$3.3 + 0.3/2 = 3.45$	13.2
$F9 = 1/2 \times (1.01 - 1.16) \times 3.3 = 0.2475$	$3.3 + 0.3/3 = 3.4$	0.84
$F10 = 1.01 \times 3.3 = 3.333$	$3.3 + 0.3/2 = 3.45$	11.5
$F11 = 1/2 \times (0.84 - 1.01) \times 3.3 = 0.2925$	$3.3 + 0.3/3 = 3.4$	1.0
$F12 = 0.84 \times 3.3 = 2.772$	$0.3 + 3.3/2 = 1.8$	4.990
$F13 = 1/2 \times (0.67 - 0.84) \times 3.3 = 0.2925$	$0.3 + 3.3/3 = 1.2$	0.35
$F14 = 0.67 \times 3.3 = 2.211$	$0.3/2 = 0.15$	0.327
$F15 = 1/2 \times (0.5 - 0.67) \times 3.3 = 0.2925$	$0.3/2 = 0.15$	0.0438
$\Sigma F = 133.853$		$\Sigma M_a = 105.6356$

小結：

1. 依上分析，懸式鋼版樁入土 GL-13m、開挖 9m，在土壤短期強度實際應設到 GL-23.0m。
2. 懸式鋼版樁傾倒後，換 18m 長 $\phi 60\text{cm}$ 的排樁當擋土壁，但排樁深 GL-18m 在土壤短期強度穩定深度應到 GL-23.0m，亦是不穩定。

4-4 以短期土壓力參數分析 13m 長 FSP III 鋼版樁與 18m 長 $\phi 60\text{cm}$ 的排樁之側向變位

1. 擋土壁體之假設支點 $l=0.1\sim 0.3H$ (無支撐之開挖深度 H)，取 0.1H。本案懸臂式擋土壁體到 $GL-(9+0.9)=GL-9.9\text{m}$
2. 鋼版樁慣性矩，FSP III 鋼版樁， $I=16800\text{cm}^4/m$ ，若其為舊品，打樁疲勞、焊接回火，故日本建築工學會建議取 0.5I 分析：

$$I=8.4*10^{-5}\text{cm}^4/m$$

本研究將以 I 與 0.5I 做分析比較。

3. 鋼版樁彈性係數

$$E_s=2.1*10^6\text{kg/cm}^2, E_s=2.1*10^7\text{t/m}^2$$

4-4-1 鋼版樁之側向變位

原鋼版樁之側向變位，圖 17 所示。因原應力塊太複雜，故以同面積大小之三角形應力計算鋼版樁的側向變位，如圖 18 所示。

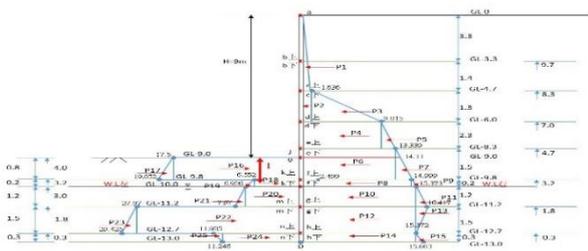


圖 17 採用土壤短期強度及土壤抗張力很小，張力會消失，懸臂式擋土牆各點主、被動土壓力應力圖

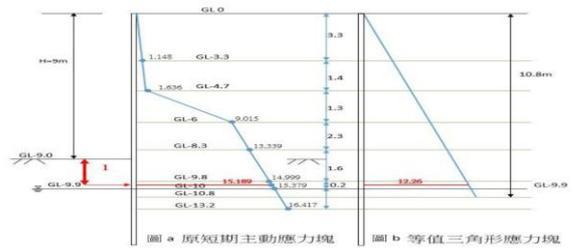


圖 18 因原應力塊近似三角形，故以同面積大小之三角形應力計算鋼版樁的側向變位

鋼版樁側向變位分析

$$\sigma=14.999+\frac{15.379-14.999}{0.2}*0.1=15.189\text{ t/m}^2$$

1. 原 $GL_0\sim GL-9.9\text{m}$ 之應力塊

$$P_1=60.6933\text{ t/m}$$

$$P_2 = \frac{1}{2} * 9.9W = P_1 = 60.6933\text{ t/m},$$

$$W= 12.26\text{ t/m}$$

懸臂梁三角形應力塊計算懸臂鋼版樁之側向位移

2. 考慮為舊品，慣性矩 I 折減 0.5 (舊品)

$$\delta_{\max} = \frac{Wl^4}{30EI} = 2.308\text{m}$$

3. 鋼版樁為新品，I 不折減

$$\delta_{\max} = \frac{Wl^4}{30EI} = 1.1127\text{m}$$

現場最大變位約 1.5m，可能為新舊交雜使用，但若初始打設歪斜，則雖側潰，其比較不一定客觀。

4-4-2 使用土壤短期強度分析分析 $\phi 60\text{cm}$ 排樁牆在鋼版樁傾倒後之側向變位

Step1 排樁之等值矩型梁分析如圖 4.9 所示，排樁牆換算為 $51.03\text{cm} * 105\text{cm}$ 之等值矩型樑，如圖 19~圖 20 所示。

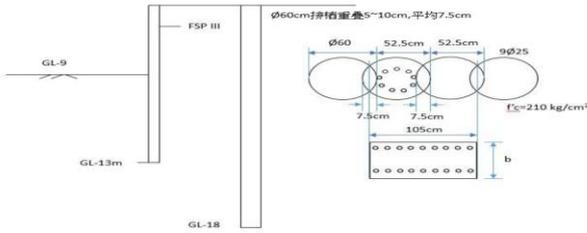


圖 19 排樁 ϕ 60cm 重疊 5~10cm(取平均重疊 7.5cm)之等值矩型梁分析圖

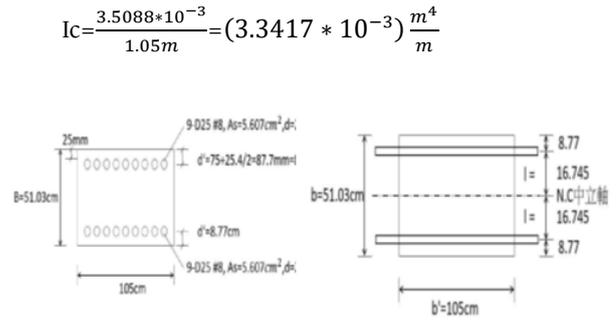


圖 21 排樁 ϕ 60cm 重疊 5~10cm(取平均重疊 7.5cm)之等值矩型梁混凝土與鋼筋換算彈性比後之斷面，壓力鋼筋 $n \cdot A_s = 9.384 \cdot 9 \text{ 支} \cdot 5.07 \text{ cm}^2 = 428.23 \text{ cm}^2$ 、張力鋼筋 $n \cdot A_s' = 9.384 \cdot 9 \text{ 支} \cdot 5.07 \text{ cm}^2 = 428.23 \text{ cm}^2$

Step2 計算不穩定傾斜後，轉由排樁牆受主動土壓力之側向變位

由圖 19 所示，鋼版樁傾倒後，排樁牆受主動土壓力，如圖 22 所示。

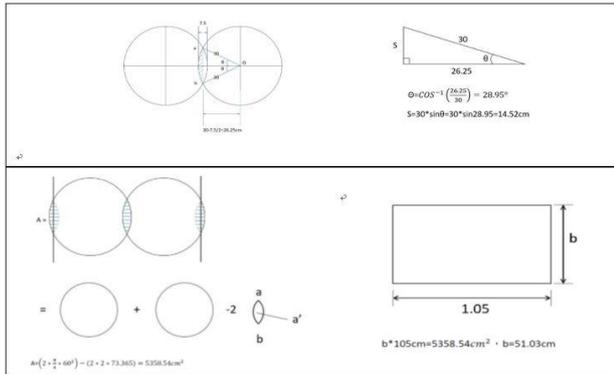


圖 20 排樁 ϕ 60cm 重疊 5~10cm(取平均重疊 7.5cm)之等值矩型梁分析圖

1. 等值矩形梁慣性

$$n = E_s / E_c = \frac{2.04 \cdot 10^6}{217370.65} = 9.384$$

2. 2 支排樁各配 9 支 ψ 25 鋼筋，分別為等值矩形樑的壓力鋼筋與張力鋼筋，換算為混凝土之面積為：

壓力鋼筋

$$n \cdot A_s = 9.384 \cdot 9 \text{ 支} \cdot 5.07 \text{ cm}^2 = 428.23 \text{ cm}^2$$

張力鋼筋

$$n \cdot A_s' = 9.384 \cdot 9 \text{ 支} \cdot 5.07 \text{ cm}^2 = 428.23 \text{ cm}^2$$

如圖 21 所示。

3. 計算等值矩形樑(1.05m \times 51.03cm)慣性矩

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} + n \cdot A_s \cdot l^2 + n \cdot A_s' \cdot l^2 =$$

3.5088 $\cdot m^4$ 轉換成 1m 間距之等值矩形樑 (1.0m \times 51.03cm)

1. 樑的彎矩、剪力與變位應力

$$\delta_{max} = \frac{W \cdot l^4}{30 E_c I_c} = 0.5404 \text{ m} \approx 54.04 \text{ cm}$$

現場排樁側位移約 50cm

小結：

此實際排樁側變位及排樁換算為等值矩形梁之慣性矩，分析現場排樁側變位為 8.08%。故黏土、砂土以土壤短期強度計算擋土壁之主被動土壓力，與現場擋土壁側向變位比對，尚屬合理。

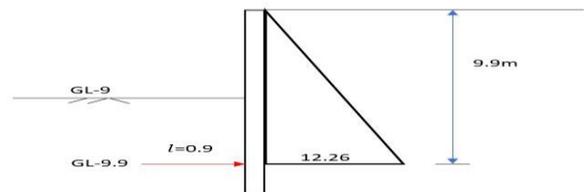


圖 22 在鋼版樁傾倒後，轉至排樁牆受短期主動土壓力

4-5 以原設計黏土 C_u ，砂土 $c' = 0$ 、 $\phi' = 0$ 強度參數分析 13m 長 FSP III 鋼版樁與 18m 長 ϕ 60cm 的排樁之側向變位

4-5-1 以原設計之各點主、被動土壓力應力及轉為等值三角形應力塊圖分析鋼版樁之側向變位

Step1. 總應力面積不變，轉為三角形應力塊作分析

1. 原 GL-9.9m 之

$$\sigma = 14.193 + \frac{14.567 - 14.193}{0.2} * 0.1 = 14.38 \frac{t}{m}$$

2. 原 GL0~GL-9.9m 之應力塊

$$P_1 = 46.036 \frac{t}{m}, P_2 = \frac{1}{2} W * 9.9m = \frac{46.036t}{m}, W = 9.3 \frac{t}{m}$$

原設計之各點主、被動土壓力應力及轉換為等值主動土壓力三角形應力塊圖，如圖 23、圖 24 所示。

Step2. 應力圖懸臂梁三角形應力塊

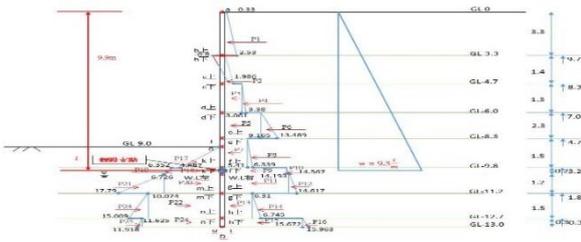


圖 23 原土壤設計參數之各點主動土壓力、被動土壓力應力及等值主動土壓力三角形應力塊圖

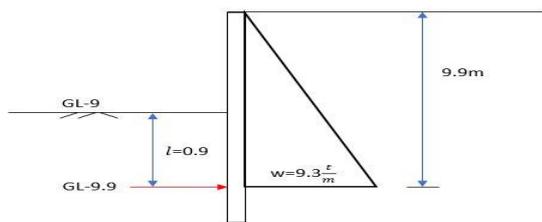


圖 24 在鋼版樁傾倒後，轉至排樁牆受原土壤設計參數之各點主動土壓力之等值三角形應力塊圖

4-5-2 以原設計黏土 C_u ，砂土 $c' = 0$ 、 $\phi' = 0$ 強度參數 18m 長 $\phi 60cm$ 的排樁之側向變位

Step1 排樁牆等值矩形梁

$$I_c = 4.8115 * 10^{-3} \frac{m^4}{m}$$

$$E_c = 217370.65 \text{ kg/cm}^2 = 2173706.5 \text{ t/m}^2$$

1、由應力圖

$$\delta_{max} = \frac{W * l^4}{30 E_c I_c} = 0.4099m \approx 41cm$$

現場排樁牆側位移約 50cm

$$\text{誤差} \frac{0.5 - 0.4}{0.5m} = 0.18 = 18\%$$

以實際排樁側變位及排樁換為等值矩形梁之慣性矩佔 82%，分析現場而排樁側變位誤差為 18%，呈現不合理狀況。故黏土以 C_u 、砂土以 C' 、 ϕ' 強度參數計算擋土壁之主被動土壓力，與現場擋土壁側變位比對較不合理。

2、以等值三角應力塊比較，則短期強度

$$W_1 = 12.26 \frac{t}{m^2}, \text{ 及黏土 } C_u, \text{ 砂土 } C' = 0, \phi' \neq 0 \text{ 之物理參數應力塊 } W_2 = 9.3 \frac{t}{m^2},$$

$$\text{兩者相差} \frac{W_1}{W_2} = \frac{12.26}{9.3} = \frac{1.318}{1} \text{ 或 } \frac{9.3}{12.26} = 0.758$$

4-6 排樁當鋼版樁變位後之穩定樁分析

如圖 22 與圖 24 所示，以土壤短期強度分析排樁牆之穩定性。

FSP III 鋼版樁側向變形後土楔受力，如圖 25 所示。

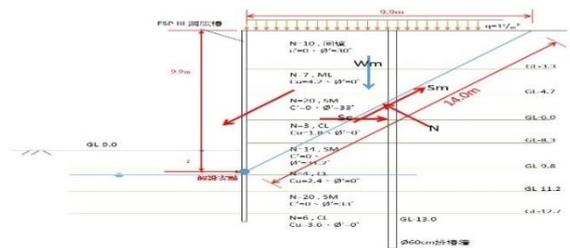


圖 25 在鋼版樁位移後，排樁牆牆受短期土壤剪力之穩定分析

Step1 土壤短期 45° 主動破壞面

1. GL0m~GL-9.9m 上方土楔平均單位重， $\gamma_m = 1.913 \frac{t}{m^3}$
2. GL0m~GL-9.9m 上方土楔平均 N 值， $N = 9.667$

Step2 土楔受力

1. 土楔重， $W_m = 93.746 \frac{t}{m} \downarrow$

2. 地表超載， $Q=9.9 \cdot q = 9.9 \frac{t}{m} \downarrow$
3. 鋼版樁太柔性，其抗剪力不計
4. 排樁抗剪強度分析，排樁斷面與配筋，如圖 26 所示。

(1) 混凝土剪應力 $V_c = 0.53 \sqrt{f_c'} = \frac{7.68 kg}{cm^2}$

$$V_c = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot V_c = \frac{\pi}{4} 60^2 \cdot 7.68 = \frac{21.704 t}{支}$$

(2) 鋼筋 9- $\psi 25$ ， $A_s = 5.07 cm^2$

$$f_v = 0.4 F_y = 0.4 \cdot 4200 \frac{kg}{cm^2} = 1680 \frac{kg}{cm^2}$$

$$V_s = 9 \cdot 5.07 cm^2 \cdot 1680 \frac{kg}{cm^2} = 76658.4 kg = 76.65 \frac{t}{支}$$

(3) 排樁抗剪力

$$V = V_c + V_s = 21.704 + 76.65 = 98.36 \frac{t}{支}$$

(4) 一支排樁有效間距 0.525m，如圖 26 所示。排樁牆 1m 長抗剪力

$$V_0 = \frac{V}{0.525} = 187.356 \frac{t}{m} \rightarrow$$

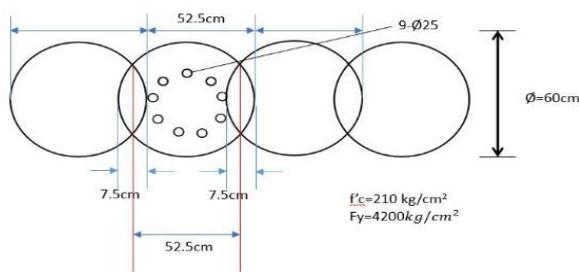


圖 26 排樁斷面與配筋

Step3 力多邊形，力比例尺，令 1cm=20 $\frac{t}{m}$ ， $W_m = 4.687 cm \downarrow$ ， $Q = 0.495 cm \downarrow$ ， $V_0 = 9.365 cm \rightarrow$

排樁牆當穩定樁的力系平衡之力多邊形，如圖 27 所示。

得土楔正向力， $N = 20.7 t/m$ ，土楔破壞面的機動剪力， $S_m = -46 t/m$

Step4 機動剪力為負代表土楔沒有位移。排樁在鋼版樁位移後，本可當穩定樁，但本工程因鋼版樁入土深度不足，發生側潰引起排樁側位移 50cm。

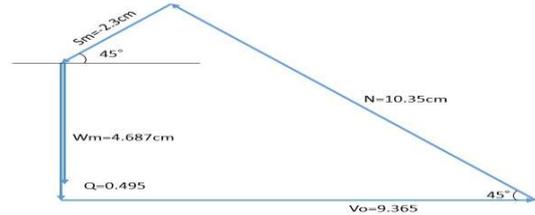


圖 27 排樁牆當穩定樁的力系平衡

4-7 小結

綜合結論本鋼版樁採懸臂式設計入土 13m 之發生災損原因：

1. 依原設計參數，得到

(1) 主被動土壓側力平衡

$$FS = \frac{\Sigma Pp}{\Sigma Pa} = 0.49 < 1 (NG)$$

(2) 主被動土壓彎矩之傾倒平衡

$$FS = \frac{\Sigma Mp}{\Sigma Ma} = 0.1721 < 1 (NG)$$

代表鋼版樁入土深度不足。

2、以土壤短期強度，砂土、黏土、沉泥皆用 S_u 分析

(1) 主被動土壓側力平衡

$$FS = \frac{\Sigma Pp}{\Sigma Pa} = 0.735 < 1 (NG)$$

(2) 主被動土壓彎矩之傾倒平衡

$$FS = \frac{\Sigma Mp}{\Sigma Ma} = 0.348 < 1 (NG)$$

代表鋼版樁入土深度不足。

3、依短期強度分析，FSP III 懸臂式鋼版樁入土

(1) 在土壓側力平衡下，鋼板樁入土至少到 GL-18.0m (FS=1)

(2) 在土壓彎矩傾倒平衡下，鋼版樁入土

至少到 GL-23.0m (FS=1)

- 4、13m 深鋼版樁之穩定樁，土楔機動剪力為負，代表土楔沒有位移，可阻擋土楔側變位。但塌陷原因在入土深度不足發生不穩定傾倒後，原為穩定樁的排樁牆變為懸臂式擋土牆，其深度在土壤短期強度分析下，抗主被動土壓彎矩傾倒至少需到 GL-23m，故排樁牆亦發生傾倒。
- 5、經短期主動土壓力分析開挖 9m 深入土 13m 鋼版樁及入土 18m 排樁，側向變位分析得：
- (1)鋼版樁側向變位
- $$\delta_{\max} = 1.11m(I \text{ 不折減})$$
- $$\sim 2.3m(I \text{ 舊品折減 } 0.5)$$
- 變位約為 1.5m，反算鋼版樁慣性矩為 0.7I。
- (2)排樁之側向變位 $\delta_{\max} = 0.5404m$ ，現場排樁側位約誤差為 8.08%，小於 10% 為可接受。
- (3)以原設計反推鋼版樁側向變位
- $$\delta_{\max} = 0.8445m(I \text{ 不折減})$$
- $$\sim 1.688m(\text{舊品 } I \text{ 折減 } 0.5)$$
- 現場變位約為 1.5m(反算鋼版樁為 0.844I)
- (4)分析排樁之側向變位
- $$\sigma_{\max} = 0.4099m$$
- 現場排樁側位約為 0.5m，誤差為 18%，則顯得不合理。
- 6、經懸臂式擋土牆主動土壓力等值三角應力塊比較，原設計之應力塊 $W_2 = 9.3 \frac{t}{m}$ ，比上土壤(砂土、黏土)皆用短期強度 S_u 之應力塊 $W_1 = 12.26 \frac{t}{m}$ ，兩者比值為 0.758，即低估土壤之主動土壓力約 24.2%。

五、結論與建議

5-1 結論

一般懸臂式擋土牆的護岸工程，黏土常用 $C_u(S_u)$ 、 $\phi = 0$ ，砂土用 $c' = 0$ 、 $\phi' \neq 0$ ，去設計懸臂式鋼版樁擋土牆，雖然有緊密排列的預壘排樁當穩定樁，但常因鋼版樁之側向變位過大，致使護岸在開挖時發生塌陷。本研究以台灣某護岸工程整治發生入土 13m

FSP-III 鋼版樁其旁 1-4m 有 $\phi 60cm$ 入土 18m 之緊密排列之預壘排樁當穩定樁，在開挖 9m 過程中發生 FSP-III 鋼版樁側向位移約 1.5m 及排樁側向位移約 0.5m，引起地表塌陷約長 30m*寬 30m*深 1m 之案例探討土壤短期強度及原設計強度對本護岸工程可採用 FSP-III 鋼版樁入土 13m 之設計分析，得到以下結論。

1. 以砂土與土壤短期強度 S_u 分析本護岸工程開挖 9M 深懸臂式擋土壁在主被動土壓平衡下，擋土壁需深 GL-17.775m，在主被動彎矩傾倒平衡下，擋土壁體需深至 GL-22.925m。
2. 以原參數分析其擋土壁之主被動土壓平衡之下 FS 只有 0.49，傾倒之 FS 只有 0.1721，皆不足。
3. 以土壤短期強度分析 FSP-III 鋼版樁入土 13m 開挖 9m 之傾向位移比對現場實測側向變位，其誤差約為 14.0%，而採用物理剪力參數分析排樁側向變位，其誤差約為 15.6%。因鋼版樁現場施工定位有歪斜，而設計重疊攪拌以切削樁施作的預壘排樁定位較佳，依此研判，以土壤短期剪力強度分析懸臂式擋土牆較為適宜。
4. 鋼版樁傾倒後， $\psi 60cm$ 入土 18m 之預壘排樁，以等值矩形梁採用土壤短期強度分析其側向變位其誤差約為 8.08%、小於 10%，而採用物理剪力參數分析之誤差約為 18%。
5. 原設計 $\psi 60cm$ 入土 18m 之預壘排樁當穩定樁，在鋼版樁開挖之穩定效果經土楔受應力分析是合宜的。但因鋼版樁入土深度不足，故引發護岸工程在開挖過程中塌陷。
6. 以土壤物理 c 、 ψ 中(黏土用 C_u 、 $\psi = 0$ ；砂土 $c' = 0$ 、 $\psi' \neq 0$)與土壤短期強度 S_u (砂土、黏土)對懸臂擋土牆，兩者主動土壓力比為 0.758:1，低估主動土壓力 24.2%。

5-2 建議

1. 一般擋土牆的設計會考慮短期與長期強度的穩定分析，但要獲得施工中崩塌的案例不多，台灣常見的護岸工程擋土開

挖設計，黏土常用 $Cu(Su)$ 、 $\psi=0$ ，砂土用 $c'=0$ 、 $\psi'\neq 0$ ，去設計擋土牆，本案例研判驗證短期強度比較適合，但需要更多施工中崩塌的案例來印證。

六、參考文獻

1. 施國欽，大地工程學(二) 基礎工程篇，第1章，第73~74頁，1996
2. 沈茂松，實用土壤力學試驗(增訂第九版)，試驗二：標準貫入試驗與分裂式取樣器與岩心取樣，第50頁，2010
3. 房性中，標準貫入試驗 N 值應用的比較與探討(第二版)，第六章，N 值在訂定土壤參數時之應用，第6-6頁，1998
4. 林耀煌，高層建築基礎開挖施工法與設計實例(增訂版)，1983
5. 沈茂松，營建工程防災技術—基礎施工篇(第五版)，附錄 I，第38~39頁，2015

協助郊山山區人命搜救作業程序最適化探討(以高雄市鼓山區為例)

林宗曾¹ 曾柏喻²

¹國立高雄科技大學土木工程系教授

²國立高雄科技大學土木工程與防災科技在職碩士班研究生

摘要

近年來政府開放休閒活動盛行，政府開放山林鼓勵民眾上山遊憩接近大自然，遊客登山休閒比例攀升，除百岳以外，適合初學者高度不到海拔 1500 公尺的郊山登山更是受到普羅大眾歡迎，比起百岳登山，民眾對於郊山活動，往往抱持著簡單、健行理念，忽略它依然具有一般車輛、醫療資源難以接近，需要基礎體力、可能走失等風險，造成山難事件頻傳，救災單位為提升人命搜救成效，添購不少野外山林裝備、並辦理常規訓練強化搜索能力，但是山難救援充滿許多變數，每一種變數都影響搜救人員的準備與任務編組，經常因被救者家屬的期盼與救災者本身的自我要求為快速完成人命搜救過程中慌忙混亂。本研究探討指揮派遣搜救的模式，擬對郊山山區人命搜救作業搜救進行比較分析，期望探討成效，於未來各搜救單位可運用本模式促進救災效率，研判郊山山區人命搜救作業程序是否可利於執行，縮短山難者的待救時間。

關鍵字：郊山山區、山難、搜救作業

Discussion on Optimizing the Assistance in Search and Rescue Operation of Mountain Lifesaving - Take Gushan District, Kaohsiung City as an Example.

Lin Tzong-Tzeng¹ Tseng Bor-Yuh²

¹National Kaohsiung University of Science and Technology of Science and Technology

²National Kaohsiung University of Science and Technology of Science and Technology

ABSTRACT

In recent years, the government has opened up leisure activities to prevail. As the government opens up the forests and encourages people to go up to the mountains for recreation and get close to nature, The proportion of tourists climbing and leisure is rising,.Except Taiwan Centuple Mountains, Suburban mountains the height lower of 1500 meters witch is suitable for beginners much more welcomed by the general public. People always take the easy attitude to mountain hiking, ignore it still has Inaccessible of hard traffic and medical services. High risk of lost with basic physical fitness in need cause frequent mountain accident. To improve life support efficiency, government of rescue team purchased a lot of outdoor mountain forest equipment and apply for regular training. Mountain accident rescue is full of many variables, every variable affects the preparation and task organization of search and rescue personnel. Pressure of family members' expectations and Self-demand cause busy and chaos. The research is about the model of command and dispatch search and rescue. It is proposed to compare and analyze the search and rescue

operation of human life in the Suburban mountains. Expect to discuss the effectiveness. In the future, search and rescue units can use this model to promote accident relief efficiency. Study and judge whether the human life search and rescue operation procedures in the Suburban mountains area can be carried out easily and shorten the waiting time of the people in mountain accident.

Keywords: suburban mountains area hiking, mountain accident, search and rescue operations

一、緣起

高雄市柴山、壽山地區，於日治時期即開發為壽山公園，近年來政府成立壽山國家公園管理處，柴山又稱壽山，古時候又稱打狗山或打鼓山，位於高雄西濱海岸線，南北綿延五公里，東西寬約 2.5 公里，總面積約有一千二百公頃，保留著相當完整豐富的熱帶珊瑚礁森林生態，以及特殊的石灰岩地形景觀，最高海拔雖然僅有 356 公尺，卻是高雄天然的屏障。目的為保育生態與觀光發展取得平衡，且軍事管制內多為未開發道路與原始林，仍屬於危險山域。本研究藉由文獻回顧、事故現場指揮、管理系統...等理論套用於案例分析研討，討論在救災經驗在不同的條件下，對於山難搜救出勤的人力分配與編組之影響，該經驗與理論是否可用於山域事故，討論救難人員於執行各項山難事件的救援型態分析是否可行有無矛盾之處，找出在理論、實務、法規...等尚待磨合之處，提出各種執行面上會遇到的問題與可能造成的缺失，給予山難搜救任務編組與分配之策進作為。

二、高雄市鼓山區「郊山」山難救介紹

2-1 高雄市鼓山區郊山山區範圍

高雄市鼓山區郊山山區範圍以「壽山自然國家公園」為主，以往古稱打狗山、打鼓山、俗稱柴山，內除了國家公園管理處等相關單位以外，部分為軍事管制地區「南部地區後備指揮部」(如圖 2)、靠海岸部分則由海巡署部分所管轄，權責眾多難分；以外形成原因主要為地形隆起海平面下降，以珊瑚礁石灰岩地質、天然鐘乳石洞著名，至高點高度為海拔 356 公尺，日據時代開始規劃為軍事管制區，國民政府時期逐漸開放，1989 年，柴山部分地區解除軍事管制，政府將柴山規

劃為一處「自然公園」，特別規劃了許多綜橫交錯的步道，提供高雄市民及遊客健行及遊憩空間，目前是高雄市最熱門的登山健行步道，不論清晨或傍晚，來此登山健行的遊客絡繹不絕並於 2011 年成立自然國家公園，供民眾探索自然遊憩休閒去處，與台灣百岳相比，壽山地區海拔高度只能算是郊山等級，大部分遊客可能未具完整登山經驗，或準備不足，常有受傷、迷路，甚至喪生等情事發生，且珊瑚礁地形多變，搜救人員往往背著器材疲於奔命，筆者認為可整合周邊資源建立完整體系，本研究選定實際山搜地點為壽山地區。

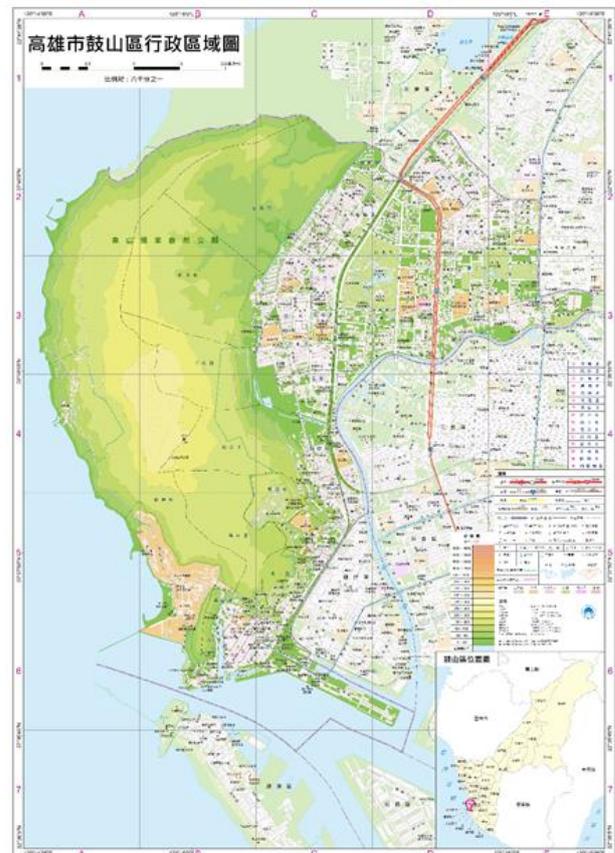


圖 1 高雄市鼓山區行政範圍
(資料來源:高雄市政府民政局網站)



圖 2 壽山軍事管制區地圖

(資料來源:國家自然公園管理處地圖網站)

2-2 「郊山」釋義

台灣的行政單位並未對「山域」給予明確定義，民國 92 年行政院體育委員會為推廣山林活動，鼓勵民眾走出戶外，挑選 100 座郊山作為小百岳供民眾參考，是以登山界普遍給予「郊山」定義為海拔 1500 公尺以下、多數路徑明顯，個人體消耗小，可當日往返。

2-3 山難的涵意

台灣法規並未明確定義山難的意涵，就廣義而言多指山區發生災難事件，中華民國山難救助協會對於山難事故的定義為；從事山野活動，發生形成激化外的狀況，迷途、無法脫困、身體方面的傷害，非經外界救助或救援無法保安的狀況(中華民國山難救助協會 2005)；不同單位亦有其不同看法或定義：消防單位的認定為人員於山區活動遭受危難，接獲通報啟動救援機制的案件；媒體對山難看法為然源於山區發生危難不論有無啟動救援，如採香菇受困、獵人迷路由國家公園派人強制帶領下山皆認為山難。(鄭安晞，2005)

2-4 張博歲山難事件

2011 年 2 月底中山醫學大學學生張博歲於獨自攀爬南投白姑大山時迷途，當地消防局耗費多人次、路線經歷 51 天後搜尋無結果，由山友於 2 日後意外尋獲，2012 年 9 月經由家屬提起國家賠償訴訟，2015 年 5 月 27 日經台北地方法院民事法庭多年審理終於宣判，南投縣消防局敗訴，審判原因為，法官認為消防局未依「消防機關與協助救災機關處理山難事故支援聯繫作業要點」第 4 點規定發揮指揮中心應具備之指揮統合功能，認為南投縣消防局負有指揮疏失責任，主要對於路線救援之規劃及救援人力分配佈置，明顯無法有效妥善掌控，導致救援範圍混亂、救援人力未完整分配，不均導致救援時機拖延，判決須賠償近 267 元，為國內因山難搜救產生國賠的首例(國家賠償，2015)。

2-5 台灣山難搜救組織

台灣執行山難救援的組織主要可分為政府機關與民間組織兩大類，其中政府機關又可以分成主要權責機關與協同處理機關，依據消防署災害防救法及各縣市自治條例多為轄區管理機關擔任主要權責主導機關，其餘則為協同機關，但因山難多為未知情況，多以預設人命救助為最主要情況，所以山難發生時主要處理機關多為各直轄市、縣(市)政府消防局，協同處理機關則為警察機關、國家公園管理機關、林業管理機關、國軍等符合條件時進一步申請內政部消防署特種搜救隊、內政部空中勤務總隊及行政院國家搜救指揮中心支援；另外民間團體分成民間救難組織及登山團體，多為協同處理團體(直轄市及縣(市)政府消防機關處理山域事故人命救助作業要點，2015)。但在實務上除警察消防等機關具有 24 小時備勤人力可立即快速組織救援以外，其他協同團體多需要時間整合組織，所以大多低一時間還是由各縣市消防局為第一主導機關負責，部分消防機關有成立山難搜救專責分隊但仍須擔負消防隊原有之消防勤務，如救災、救護、查察及捕蜂、抓蛇等勤務，因此工作內容頗為繁重。

三、協助郊山地區搜救作業方式原則

3-1 郊山地區搜救應變作業派遣

- (一) 依據 104 年 4 月 23 日中央災害防救委員會第 25 次會議已決議山域事故發生時，以山域主管機關處長擔任行政綜合協調總指揮官，第一時間動員轄內人物進行搶救，俟消防人員抵達事故現場後擔任人命救助指揮官。
- (二) 直轄市及縣(市)政府消防機關處理山域事故人命救助作業要點加強與協同處理機關團體協調聯繫，並相互支援；協同機關主要指警察機關、國家公園管理機關、林區管理機關等；所稱協同處理團體，指民間救難組織、登山團體等。
- (三) 山域事故發生時，由當地消防機關指派是當幹部擔任人命救助指揮官，發生地轄區及協同處理機關英第一時間負責人例、裝備器材之聯繫協調。

3-2 影響郊山地區搜救作業應變之各種不同救援環境

各種不同影響救援因素眾多，救援時的編組與任務分配皆牽涉到了救援的執行效率，伴隨任務推展，編組可能需要轉換模式(例如日、夜、長時間任務)，如無法馬上適應新任務編組

- (一) 氣候：台灣多盛行午後雷陣雨，閃電與突如其來的雨量造成地面濕滑，人員不慎可能有雷擊危險。
- (二) 日夜時間：不同日夜時間關係搜救人員生理時鐘的調節以外，日夜能見度不同，對周遭掌握度不同，夜間可能伴隨著較高走失、失溫等風險。
- (三) 被救者現況：不同被救者裝備意味著不同任務目標，被救者健康可行走，可定位為引導任務，昏迷或受傷需搬運等狀態，就有著生命流失的急迫性。

3-3 事故現場指揮體系 Incident Management System (ICS)

事故現場指揮體現源自於 1970 年美國南加州一場森林大火，此大火延燒了十三天造成 16 罹難、885 棟住家燒毀、燃燒面積達

600,000 英畝，事後檢討認為當時候缺乏一套各平行單位間共同的聯合指揮管理制度，造成許多參與單位的極大混亂，美國消防單位即開始研究開發並發展出 ICS 題。

- (一) 主要建構於五項管理工作上，即為指揮、作業、計劃、後勤、財務/行政。
- (二) ICS 組織大小隨著處理事故的狀況不同而有所變異，每個組以其任務特性進行模組化編組可因需要而分割成更小的的單位，可隨時擴充或變化。
- (三) 各項作業指揮官有權決定是否要將其權力下放給幕僚或作業組，若其權力沒有下放，則要負責所有工作。

四、協助郊山山區搜救作業程序案例流程分析

本研究為協助郊山山區搜救作業搜救作業，綜合整理 2015 至 2019 年高雄市政府消防局鼓山分隊協助郊山山區人命搜救之山難案件資料，並選定一件大型救災案例進行分析，進而探討其成效。

4-1 高雄市鼓山區郊山山難案例分析:鼓山消防分隊實施緊急救護之山難勤務的現場消防局指揮派遣情形

- (一) 日期時間：109 年 09 月
- (二) 事件情形：如表 1

時間	通報派遣或作為
1851	報案人電話通報，男性 53 歲(小坪頂右邊叉路往柴山方向，在往新軍區迷路)
1856	通報壽山國家自然公園籌備處
1900	通報 110 警察局
1910	以簡訊傳送報案者提供定位回傳目標
1922	警察局提供座標 22.664215、120.260198 觀海巖
1945	鼓山分隊代理小隊長回報:目前到壽山國家自然公園管理處與巡山員會合，進行收集資料擬定計畫中
2000	人員致電回報陪同有壽管處警察 2 名、壽管處巡山員 2 名及鼓山分隊警消 5 名，由軍事管制區登山口步行登山預計 20 分鐘到達"雅座"，再步行約 1 小時前往已知定位點。

2051	搜尋人員回報已發現迷路之民眾,但其他資訊因電話訊號不好無法清楚回報,等搜尋人員來到訊號良好處再行回報
2124	鼓山 2 號回報:被救者為 50 歲男性、意識清楚,頭部有撕裂傷,拒絕送醫,前往登山口中,預計使用越野車準備載往壽管處
2137	鼓山 2 號回報:與患者目前在壽管處,清理傷口中.
2359	所有人完成返隊,任務完成



圖 3 隊伍集結後預計步行約 1 小時前往已知定位點(來源筆者自攝)



圖 4 本次移動距離為 6.8 公里(筆者來源自行紀錄)

救護人員簡易包紮測量生命徵象後確認可以行走,帶領受救者依循原路走回地面後安置返隊,本次任務約歷時 5 小時,共出動 4 車 9 人。

4-2 協助郊山地區搜救作業分析

- (一) 案件受理: 案件受理後盡快確認被救者現況、位置,手機是否有足夠電量,判斷案件是否啟動救援,立即通報相關單位同步通知轄區單位壽山自然公園管理處與保安警察第七總隊第七大隊壽山分隊,並確認研擬集結地點,依據個案情況進行派遣。
- (二) 權責或協力機關:無法定位的情況,只能由報案人口中得知該難者前往海洋美景等位於壽山國家公園內景點後迷路,研判主要範圍可能為獸山國家公園內、亦有可能誤闖軍事管理區,因軍事管理區周遭多有哨兵崗哨,權責機關依據轄區應為國家公園管理處。
- (三) 確立指揮官:由轄區主管機關主導資源分配調度,本案關係人命救助由消防機關指定幹部擔任人命救助指揮官指派適合人選擔任,依據官階、專長、經驗並指定協同單位相關工作事項,建立事故指揮所主持計畫會議並確認事故執行計畫,若有未指定工作事項,則應由指揮官自行完成或另指定工作群組。
- (四) 設立計畫部門:應由專人收集、紀錄本案件可用資料,協助規劃本案件救援計畫,依據各項資訊資源積極就氣象、位置、作持續更新作為指揮官現場指揮與判斷參考,如訊息量龐大,可指定 2-3 人擔任該要務。
- (五) 設立前進指揮站:主要為人員亦於整備出發與返回休息可以快速提供支援之處,通常成立於山區登山口、上風處、視野清楚、通訊設備訊號可及處,任務如需進行展延編組持續擴大,前進指揮站亦具備容納多工作群組與資源準備,指定一名次級指揮官,可包含計劃部門隨時待命紀錄情報、快速反應小組隨時提供第一線支援。

(六) 後勤部門:通常任務時間一拉長,救援工作人員的生理需求問題就會逐一浮現,包含體能分配、食物供應,休息區的設立,這都需要後勤部門來進行維持,減輕工作人員負擔,後勤人員主要工作事項如下;後勤醫療、物資供應與設備管理、準備工作人員必要飲食,維持整體任務工作群組人員運作平衡。

(七) 前往搜索:要執行搜索時可依據已知情報制定搜索計畫,並分配搜索組、救護組、快速反應組,各組別分工執行不同任務,除個人防護裝備以外,依據任務所使用裝備亦不同出發前由安全官與組長再次確認器材攜帶是否齊全,路線選擇是否合理,考量團隊體能,若計畫路線搜尋未果,應依據原計畫折返或計畫路線轉下一個子任務,且不可忽略團隊體能負荷與分配避免體力不支,團隊出現迷航等情事,搜索途中如遇危險導致人員受傷,應立即放棄任務回報前進指揮站後原途返回,務必群體行動,不可留傷者於原地待援其餘人繼續任務,如有傷者受困或無法行走須搬運事宜,派遣快速反應小組出動支援。

(八) 返回路面途中:發現被救者以後,確認被救者位置後立即回報,如被救者未有受困情況則由救護組人員接觸評估生命徵象,這時小組長應依據被救者情況選擇最適返回路線,如被救者健康可走動,或許可以原路線返回,被救者受傷或體能不支,小組長需判斷是否需要進行搬運,或是請求外援協助,此時主要任務轉為維持被救者生命徵象,並請求其他任務編組協助(如快速反應小組、第二搜索組...等)

(九) 到達地面:到達地面後,優先安置被救者,並依序清點人員數量、器材,向指揮官回報完整任務過程後才算任務完成。

(十) 返隊待命:由計劃部門人員進行資料收集完整記錄,相關照片、報案紀錄、事發經過,由新聞官發布新聞媒體,供內部人員隨時可調閱分析,做為案例教育參

考資料,必要時針對本次值勤不足處,可進行討論改進,為下一次任務做更完善準備。

五、結論

本研究探討現行山難作業程序與消防署推動的事故現場指揮體系基本運作模式來做分析,針對兩者的救援編組結合現場實務經驗作探討。本研究對不同的救援環境比較結果證實如下說明:

(一) 山難搜索人員自身置於與被救者相同的危險環境,救援狀況多變,須依據救援通報當時情況進行必要性的任務編組,並做應變變化準備。

(二) 我國山難救援協同組織眾多,如何編組分工合作,任務分配,使任務組織具備延展性、變形性。

因此,在現今科技發達的環境下,不論事故現場位於何處,事故現場指揮系統如能結合各直轄市縣市機關山難標準作業程序,可縮短人命救助時效,降低因各種環境因素所導致生命時效性拖延,確保救難人員在安全環境中作業。

參考文獻

1. 中華國內政部消防署全球資訊網,官方網站(<https://www.nfa.gov.tw/>)。
2. 直轄市及縣(市)政府消防機關處理山域事故人命救助作業要點
3. 104年4月23日中央災害防救委員會第25次會議決議內容。
4. 維基百科。
5. 曾益宏,不同救援條件對溺水事件出勤任務編組與分配之影響-以高雄市旗津海岸為例,2020。
6. 藍晉豪,從「風險知覺」觀點論山難搜救人員之面山價值觀,2019。
7. 林忠杉,太魯閣國家公園協力關係之研究-以山難救助事件為例,2006。
8. 蘇裕銘,我國消防機關推動事故現場指揮體系(ICS)關鍵成功因素之研究,2004。

應用價值工程技術評估工程設計方案可行性-以達德安橋上下游整治工程為例

王和源¹ 張志仲² 關仕偉³

¹國立高雄科技大學土木工程系副院長

²國立高雄科技大學土木工程系系友

³國立高雄科技大學土木工程系研究生

摘要

推動臺灣價值工程的重要里程碑，主要是 1981 年行政院經濟建設委員會引進價值工程技術及 1998 年行政院公共工程委員會採購法列入替代方案。而價值工程為替代方案其中的一種產生途徑，經由價值工程工作計畫程序產生的替代方案，其產生過程歷經(一)資料蒐集階段、(二)創新推想階段、(三)分析判斷階段、(四)發展階段、(五)提出階段、(六)執行階段及(七)考核階段等循序過程，依此模式產生的替代方案，經集思廣義後往往能跳脫既定成俗的格局，降低成本，在成本、性能、可靠性間尋得最佳平衡點與減少變更設計等優點。

透過價值工程作為最佳方案評估，在機能、成本及工期等多方考量之下，因本案例原規劃方案，工程經費超出預算過多，經多方溝通協調後，甲方同意增加經費，設計單位藉減少部分需求提出替代方案二，透過與地方居民溝通協調，匯集專家學者建議，最後變更第二方案。

本研究係透過價值工程的技術與運用，研析工程原設計方案(方案一)、實際執行方案(方案二)及透過價值工程方法，腦力激盪、創意思考新提出之第三方案(方案三)，就其成本，機能、工期、等評估因子進行比較分析，以客觀、評估量化的方式擇出最適宜之方案，同時求證應用價值工程所能產生之功能、效益及問題。

關鍵字：價值工程，河川整治，工程設計

Apply Value Engineering Technology to Evaluate the Feasibility of Engineering Design Scheme - Take the Upstream and Downstream Renovation Project of Da De'an Bridge as an Example

Her-Yung Wang¹ Zhang Zhizhong² Shi-Wei Que³

¹Associate dean., National Kaohsiung University of Sciences and Technology., ROC.

²Alumnus, National Kaohsiung University of Sciences and Technology., ROC.

³Master Student, Dept. of Civil, National Kaohsiung University of Sciences and Technology., ROC.,

ABSTRACT

Important milestones in promoting value engineering in Taiwan are mainly the introduction of value engineering technology by the Economic Construction Committee of the Executive Yuan in 1981 and the inclusion of alternative plans in the Procurement Law of the Public Works Committee of the Executive Yuan in 1998. The value engineering is one of the alternatives. The alternatives generated through the value engineering work plan process go through (1) the data

collection stage, (2) the creative speculation stage, (3) the analysis and judgment stage, (Four) development stage, (5) proposal stage, (6) implementation stage, and (7) assessment stage. Alternatives based on this model can often break away from the established and customary pattern after brainstorming and generalization. Cost, find the best flat point between cost, performance, and reliability, and reduce design changes.

Through the evaluation of value engineering as the best plan, under the consideration of function, cost, and construction period, the project cost exceeded the budget due to the original plan of this case. After communication and coordination with multiple parties, Party A agreed to increase the cost, and the design unit borrowed to reduce it. Part of the demand proposes an alternative second plan. Through communication and coordination with local residents, the suggestions of experts and scholars are gathered, and the second plan is finally changed.

This research is based on the technology and application of value engineering to study and analyze the original design plan of the project (plan 1), the actual implementation plan (plan 2) and the third plan (plan 3) proposed by value engineering methods, brainstorming and creative thinking. , To compare and analyze its cost, function, construction period, and other evaluation factors, select the most suitable plan in an objective and quantitative manner, and at the same time verify the functions, benefits and problems that can be produced by the application of value engineering.

Keywords: value engineering, river improvement, engineering design

一、前言

曾文溪上游集水區位於嘉義縣阿里山境內，面積約 1,176 平方公里。本區雖曾於 96 年完成整體治理調查規劃，惟因 98 年 8 月 8 日「莫拉克」颱風暴雨造成阿里山地區雨量高達 2,800mm 以上，致溪水暴漲，嚴重沖刷上游河道及坡地。造成大量土砂淹埋部分民宅以及造成集水區內溪床土砂嚴重淤積，並掏空路基、致多處護岸設施與橋樑損害，對外道路中斷，影響居民安全與交通。

為即減輕人民生命財產威脅，降低洪水及土砂災害，期以「曾文溪上游集水區莫拉克風災整體復建規劃」進行集水區整體治理復建規劃，針對計畫區內災害問題提出分析治理對策，並透過分年分期治理計畫，以抑止泥沙生產、下移與減低災害之發生，打造安全之環境，帶動地方發展，促使本規劃區能達到保育水土資源、土地合理利用、降低水土災害及涵養水源等目的。

本研究以達德安橋上下游整治工程為例，該工程係基於前述整治計畫提出之項目，行

政院農委會水土保持局南投分局核列工程經費約 4,000 萬元整，計畫範圍主要工程包含：整治工程、護坡工程、橋梁工程、道路工程等，總工期約十一個月。

擬藉由系統性之價值工程研析探討替代方案之可行性，提出節省工程經費、縮減工期，並符合上位計劃攔阻土砂之主要目的及居民使用需求之更加方案。

二、研析計畫

2.1 計畫範圍

達德安橋位於嘉義縣阿里山鄉達邦村，嘉 169 線 37K 處右側農路進入，因 98 年 8 月莫拉克風災造成大面積崩塌及裸露情形發生，坡面崩塌嚴重，崩落土砂堆積河道造成溪床淤積嚴重，且舊有達德安橋遭土砂撞擊而損毀，故編列本期整治計畫；將配合於達德安橋上下游一併設計防砂壩整治以達穩定溪床、防止土砂下移以及保護橋樑之功效；待溪床及邊坡穩定後，再針對整治區下游進行道路修復工程，以恢復當地居民對外連絡交通。

2.2 工區各項問題概述

依據歷年災害、相關影像、相關計畫及實地勘查後，針對工區內崩塌地、溪流、土石流潛勢溪流以及道路(農路)水土保持等各項，整理並歸納出其問題所在，其各類型問題為：

1. 溪流問題主要有下列幾點：
 - (1) 坡面崩塌造成泥砂來源豐富，溪床土砂堆積，造成流心擺盪不穩。
 - (2) 溪流沖刷邊坡基腳造成崩塌。
 - (3) 既有整治工程遭土砂掩埋、沖擊損毀，或是防砂、防洪功能減低。
2. 崩塌地問題
 - (1) 因坡度較陡，加上河岸侵蝕造成側岸崩塌，因此崩塌地多分佈於河岸邊，並呈現較大面積崩落。
 - (2) 分佈於工區邊緣之狹長形崩塌地則為蝕溝加深及加大所引起。
 - (3) 崩塌地皆屬淺層崩塌，主要崩塌的材料來自表層土壤及部分風化岩盤。
3. 土石流潛勢溪流問題
 - (1) 邊坡崩塌造成溪床淤積、跨河構造物因土砂堵塞而導致通洪斷面不足。
 - (2) 兩岸沖刷導致道路基腳崩塌流失。
4. 道路及農路水土保持問題
 - (1) 道路上邊坡崩塌導致路面損毀。
 - (2) 道路下邊坡崩塌，導致基腳崩塌流失。
 - (3) 溪流交匯處因土砂堵塞既有箱涵、管涵，導致土砂溢流，造成道路損毀中斷。
5. 本案例致災原因研判
 - (1) 主流土石撞擊橋台及橋面造成橋梁損壞
 - (2) 橋梁下游坡度陡峻，加上凹岸之沖刷，致使道路下邊坡之懸臂式擋土牆基礎淘空而倒塌
 - (3) 溪流兩岸大多為順向坡，大量土石滑落，影響排洪斷面，加快流速，增強土石撞擊力量，造成災害

2.3 治理對策方針研擬

由於工區範圍內於莫拉克風災後所遭受之災害以土砂災害為主，加上規模及影響範圍甚大，故其治理對策應以短期、臨時性治理工程為優先且為必要之考量，亦較能符合土砂沖淤狀況；考量到部落遷村之影響層面及當地居民之社會觀感，故現階段以保障居民安全、維持道路暢通、緊急通洪斷面清疏來作為本計畫之最重要課題；其溪流整治、崩塌地保育、土石流潛勢溪流防治以及道路及農路水土保持治理等各項工程對策簡述如下：

1. 溪流整治:初步係以防止或減輕溪流沖蝕、淘刷與溪岸崩塌，並有效控制土砂生產與移動，達成穩定流心，減少洪水、泥砂與土石流等災害之臨時性整治工程為優先考量；待後續溪床呈現較穩定狀況後，再行永久性之整體整治考量。
2. 崩塌地保育:以減少坡面裸露、減少土砂下移、減低工區內土砂生產量為優先治理規劃考量。
3. 土石流潛勢溪流防治:以工程設施來有效降低土石流撞擊、淤埋、堵塞..等有害行為，並以維護居民生命、財產、維持道路通暢以及通洪斷面足夠為優先。
4. 道路及農路水土保持治理:以減少邊坡裸露、崩塌、滑動及沖蝕，增加道路及邊坡安全排水，穩固道路基腳為優先治理規劃考量。
5. 土砂清疏:以維持通洪能力為優先規劃治理原則，緊急清疏之通洪斷面以 Q2 為原則，中長期清疏則分別以 Q50、Q100 為原則。
6. 本案例治理對策:
 - (1) 於橋梁上游設置潛壩固床工攔阻土石減緩撞擊。
 - (2) 重建之橋梁加大通洪斷面，避免阻塞並減低水流流速。
 - (3) 橋梁下游設置固床工及護岸，保護橋梁基礎，並避免凹岸淘刷。
 - (4) 於下游適當位置設置攔砂壩，攔阻土石，並保護固床工和橋梁。

2.4 工程內容及案例評估

本研究報告將透過價值工程的技術與運用，研析工程原設計方案(方案一)、實際執行方案(方案二)及透過價值工程方法，腦力激盪、創意思考新提出之第三方案(方案三)，就其成本、機能、工期、等評估因子進行比較分析，以客觀、評估量化的方式擇出最適宜之方案，同時求證應用價值工程所能產生之功能、效益及問題。

1. 研討成員及期程:研析小組成員計有 5 人(包括組長、協調工程師、成本工程師、專業人員及秘書等)，成員各有工作，僅利用假日課業學習之空檔討論，交流意見並進行價值工程之研析過程。研析期間自 102 年 4 月至 6 月，討論過程如表 1。

2. 研討目標:本案工程原設計經費包含管理、保險、稅捐等總計捌仟伍佰餘萬元，整治範圍包含達德安橋上下游，主要工程內容有土石流溪流整治工程、道路工程、橋梁工程及其他雜項工程等，直接工程費柒仟捌佰餘萬元。經小組討論後確定研析目標如下：

- (1) 直接工程經費需減少。
- (2) 依據上位計劃，攔阻砂石為最重要需求。
- (3) 工期縮短，須於隔年汛期前完工。
- (4) 符合相關規範規定。
- (5) 需考量民眾接受度。
- (6) 節能省碳的可能性。

3. 研討流程:依據價值工程之標準研析流程進行資料之蒐集、機能分析、成本模式、創意構想、判斷建議等之過程。

(1) 資料蒐集:本案例蒐集上位計畫『曾文溪上游集水區莫拉克風災整體復建規劃』報告書，原設計簡報、預算書、圖及相關法規、規範等資料。供參與小組成員詳細閱讀相關資料及圖說，並做初步之討論及分析，以利爾後 VE 研析之進行。

(2) VE 項目選定:

方案二:設計公司提出。就治理重

點觀之，工程經費來源為「99 年度曾文南化烏山頭水庫集水區保育計畫」，依專款專用原則，工程內容應以溪流整治，攔阻砂石輸出至水庫為主；就整體治理觀之，溪床穩定是最根本，溪床穩定後邊坡自然無崩塌滑動之虞，邊坡穩定後興建道路、橋梁等工程，方能確保安全。固本方案鎖定減少子需求，藉以降低工程費用，並提出分年分期興設計畫，溝通居民及甲方取得設計共識。

方案三:研析小組提出。分析原方案預算書，發現直接工程費 71,687,693 元，其中混凝土總量 18,677 立方公尺，材料費 38,622,907 元，為直接工程費之 54%；混凝土佔工程中數量、經費比重最重，故選定混凝土材料，從構造形式、替代材料等尋找符合需求之更加方案，以達降低工程經費，縮減工期之目標。

(3) 創意構想:

創意發想階段依據研析項目，經來自各不同領域的組員多次討論及腦力激盪，產生許多基本構想；針對研討目標及相關機能需求，小組提出第三替代方案之可能構想；及各種創意構想如表 2 所示：

1. 利用其他材料取代混凝土，例如現場塊石、鋼軌、鋼管、竹子等等。
2. 其他構造形式取代主、副壩，以減少混凝土用量，例如陣列式柱列、梳子壩、鋼管壩等。
3. 減少砂石來源，如崩塌地源頭坡面處理、剷除砂石等。

(4) 判斷階段:

本階段主要目的係將創意階段所有提出之混凝土替代材料、改變構造減少混凝土及減少砂石來源等改善創意構想，依據相關規範及工程可行性等等因素加以適當的篩選，選擇較具可行性與發展潛力之構想，作為建議案之發展指標。本計畫研析工作中以

優缺點比較及成本效益、可行性等評估各個發展構想，提供判斷處理發展為可行方案。

(5) 發展階段:

本階段之目標將判斷階段所篩選出之優選構想，發展成符合機能需求的建議方案，在此階段分析各構想之優缺點是否可以有效提升整體效益，將替代方案的投資成本及效益成本加以分析，作為決策者變更之依據。

三、綜合分析

3.1 可行性分析

綜合原設計方案(方案一)及創意階段所提出之各項價值工程改善方案(方案二及方案三)，利用權重評估表與評估矩陣表來做判斷，藉價值工程分析方法將三個方案做量化之分析，探討最佳方案之可行性，茲分別說明如下:

工程先決條件為河川治理，而治理目標就是要穩定溪床、攔阻砂石進入下游河道，避免砂石輸出至曾文水庫，簡短水庫壽命；預期效益為攔阻土沙進入曾文溪保護曾文溪水庫之壽命，並保護下游部落居民之安全。工程需求即有損壞橋樑修復道路修復並達到地方要求。

方案一(如表 3 所示):能有效地達成河川治理之目的，並且以回復當地原貌為前提，故所需經費超過甲方核定的經費約 213%，再者需有許多單位配合施工較為煩雜對於施工安全風險亦也相對提高，此方案設計對於當地居民的反對聲音可以降低許多，整體治理成果也較完整。

方案二(如表 4 所示):以攔沙保護曾文水庫為先決目標，經多方協調將路工部份刪除於本期計畫中，改列下期計畫或協調其他單位規劃設計，本方案設計工程內容包含主、副壩體及兩支壩體保護工，另為避免過大岩石威脅下游及壩體安全，須包含孤石打除作業，這亦是一筆經費負擔且工期影響甚鉅，但相對於方案一大幅縮減預算且為較節省工期，並且施工安全風險降低，提升工作品質。

方案三(如表 5 所示):系列壩之目的在調整溪床坡降，保護坡腳，達到溪床穩定之目的，主壩體才是攔阻砂石並承受上游砂石打擊之構造，固本方案不改變主壩體，副壩及兩支保護工之目的是要保護主壩，避免主壩坡腳淘刷而傾倒，固本方案考量改變副壩等之構造方式為箱籠或蛇籠，除能達成其使命外，亦能充分利用現場打除之砂石，減少混凝土用量達 64%，並達到政府推動節能省碳之環境保護目標，本方案改善施工方法且不失其功能性、節省成本及經費並在施工性、工期方面都有不錯成效。

3.2 可行性評估評估因子

經小組會議討論，在有限時間下，僅就蒐集之資料分析探討，共同提出可行性評估之評估因子，分述如下:

1. 工程成本：機關核列經費為四千萬元整，包含直接及間接工程費，經協調甲方同意增加經費，但能以不超列預算百分之二十為原則，此為本案探討極為重要之因子之一。
2. 工期：溪流整治之特性是汛期期間施工困難，且遭遇之困難是不可預期的，並且在保護下游安全的前提下，下次颱風豪雨來臨前完工，是相當重要之因素。
3. 工程需求：工程設計除滿足河溪整流、穩定河床、攔阻砂石之基本需求外，亦應考量恢復舊貌如交通、祭祀廣場、景觀綠美化、生態保育等子需求；整體規劃設計及一次施工能減少許多重複的工項，整體性、完整性、景觀等均較佳。
4. 結構安全性：結構須符合規範強度外，溪床現況有巨大岩石殘留，顯示上游還有巨石輸出之可能性，故主壩體之強度需特別注意，且構造物間有密切之穩定關係，一支保護一支直到溪床坡度之平衡點，故不容許其中一個有結構安全之疑慮。
5. 使用年限：溪流整治工程涉及下游聚落生命財產安全問題，需考量構造物耐久性及耐候性等，以符合經濟性原則。
6. 環境影響：整治工程盡可能減少河道與河岸干擾範圍，並保留原有之孔穴、亂石堆，

避免干擾動物棲息地；設計近自然河岸、溪畔、深潭、淺灘、急流、岸邊緩流及高灘地綠美化等等，減少工程破壞自然環境。

7. 民眾接受度：整治溪流原為小坑溝，兩旁有許多私有土地及原住民保留地等，現因災害把河道變大了，整治工程需要取得私有土地之使用同意，故工程適當的滿足民眾需求，能減低土地使用同意書取得之難度，有利工程之進行。
8. 施工安全性：工程依據工程內容、構造物形式、材料、施工方法等等的異同，應考量施工安全設施、方法等均不同，且施工過程方法需符合國家安全衛生相關法規。

經小組討論、腦力激盪的結果，提出還有更多的評估因子，經初步評估篩選去除不適當或權重為零之因子後，以成對比較法客觀比較個評估因子的重要性，評估結果整理如表 6 分數矩陣表、表 7 權重評估表、表 8 標準分數表及表 9 矩陣評估表。

在判斷階段中另有三個主要分析程序：分別是構想、比較權重評估與矩陣評估模式，後兩項為同一評估系統的前後步驟，此階段再透過系統化評估方法支應用，比較篩選出所有的創意，並決定優選方案本案。經矩陣評估結果，三案其實在各項評估因子內其強度差異並不大，以工程成本、工期、結構安全性為方案三較為理想化。雖方案三分數未超過方案二很多，顯見兩案適切性其實不相上下，各有其優劣點。總而言之方案三已具備效益性及可行性。

四、結論

本工程案經透過價值工程的技術，評量化出方案三為最適宜之方案，其就應用後之效益與機能進行檢視如下：

成本效益上，與原設計案(方案一)相較，能節省工程預算經費新台幣 4,865 萬(57%)，與執行案(方案二)相較，可節省工程預算經費新台幣 721 萬(16%)，符合價值工程擷節成本之效果。

生態效益上，副壩與固床工之石籠工法就地使用堵塞在溪床之石塊，直接利用現地

資源，以生態工程之方式施作，減少混凝土用量及其對環境之衝擊，在工程與生態上取其和諧之發展。

工程機能上，滿足攔阻土砂之主要目的、清疏堆積溪床上的土石、工程在汛期前完成及恢復當地聯外交通等。

綜理上述，本案依系統性之方法研析，循價值管理研析步驟將不必要之之本刪除，保證工程品質與機能下，得證價值工程合乎機能及品質又可降低成本的特點。經本案後，本組有信心未來該理論與手法廣大推展並落實在營建業時，必能彰顯與享受價值工程之成效。

致謝

本研析的完成首先感謝小組成員張志仲、王耀輝、林孟儒、許玉銘及林子軒等五同學共同努力付出，才能順利完成。

特別感謝導師王和源教授，幫我們過程中不斷地修正才能完成最終的定稿，傾注了王老師大量的心血。在我攻讀碩士研究生期間，深深受益於老師的關心、愛護和諄諄教導。能師從王老師，我為自己感到榮耀，在此謹向老師表示我最誠摯的敬意和感謝。

參考文獻

- (1) 王和源教授，「價值工程實務」，國立高雄應用科技大學價值工程教案，2013。
- (2) 「曾文溪上游集水區莫拉克風災整體復建規劃報告書」，行政院農委會水土保持局南投分局，2009。
- (3) 「達德安橋上下游整治工程預算書」，行政院農委會水土保持局南投分局，2009。

表 1 價值工程研析小組活動記錄表

項次	時間	出席率	活動摘要	備註
1	2013.04.28(日)	80%	作業編組及題目概要	初期瞭解
2	2013.05.04(六)	93%	資料蒐集及研討	資料蒐集
3	2013.05.05(日)	100%	資料蒐集及研討	資料蒐集
4	2013.05.11(六)	80%	機能概估及分析	審查階段
5	2013.05.12(日)	93%	機能分析及創意階段	審查與評估階段
6	2013.05.18(六)	93%	機能分析及創意階段	審查與評估階段
7	2013.05.19(日)	80%	判斷及發展階段	審查與評估階段
8	2013.05.25(六)	100%	可行性分析	建議及討論
9	2013.05.26(日)	100%	建議階段	報告及討論
10	2013.06.01(六)	100%	建議階段	報告及修改
11	2013.06.02(日)	100%	建議階段與校稿	報告及建議
12	2013.06.01(六)	100%	校稿及修改	報告及建議
13	2013.06.08(日)	100%	期末報告	

表 2 創意構想-攔沙壩材質

主壩副壩固床工	石頭	篩子
主壩蛇籠攔砂	消波塊	濾網
竹子	網子	水草

表 3 方案一構想檢討表

方案描述	原設計方案，滿足所有需求，構造物強度最佳，但混凝土用量大不符節能省碳原則，亦缺乏生態景觀設計。
所需資源	現地就有構造物均已毀損，所有需求資源須由外輸入。
成本/效益分析	總工程經費 85,734,000 元整
機具	吊車、PC200 或 PC300、承運車等
材料	鋼筋、模版、混凝土
效益分析	構造物均為 RC 結構物，攔阻砂石效果、抵抗土石沖刷及使用、保固時間上效益較大。
工期估算	工期約 320 日曆天。
成果預期	構造物完工後預期可攔阻土石量約 27,000 m ³ 進入曾文溪，延長曾文水庫壽命；並保護下游部落之生命財產安全；復核工程修復毀損之道路，恢復原住民祭祀及生活之品質

表 4 方案二構想檢討表

方案描述	除溪流整治工程外，餘皆維持作，列下期施作項目。
所需資源	現地就有構造物均已毀損，所有需求資源須由外輸入。
成本/效益分析	總工程經費 44,297,972 元整
機具	吊車、PC200 或 PC300、承運車等
材料	鋼筋、模版、混凝土
人員	總人員約 10-15 員
效益分析	工程經費較方案一節省 48%；混凝土減量 31%；固床工為 RC 結構物，使用及保固時間上效益會比較大。
工期估算	工期約 200 日曆天，約為原方案之 60% 左右之工期。
成果預期	施工後建成溪床穩定，攔阻砂石之最主要目標，且大大縮短施工時間；並以成本來分析也大大降低工程經費，惟恢復交通及邊坡穩定等工程，應於下期工程繼續編列，已達整體治理之目標。

表 5 方案三構想檢討表

方案描述	原副壩、#1 保護工及 #2 保護工部份更改為石籠或蛇籠攔阻量。
所需資源	現地原有石塊可利用於石籠之使用材料，所需額外資源即為石籠之鋼線及另須打石機具。
成本/效益分析	總工程經費 37,084,806 元整
機具	PC200 或 PC300
材料	鋼線、現場塊石
人員	總人員約 5-10 員
效益分析	工程經費較方案一節省 57%；混凝土減量 64%；石籠或蛇籠雖無法與 RC 結構相提並論，但成本相對減少很多。
工期估算	工期約 200 日曆天，約為原方案之 60-70% 左右之工期。
成果預期	石籠或蛇籠使用年限雖與 RC 結構相差甚大，但卻可大大縮短施工時間，可以有有效的在短時間達到設計原意所需之要求；並以成本來分析也大大降低工程經費。

表 6 分數矩陣表

	B	C	D	E	F	G	H
A	A/B	C-1	D-2	A-1	A-2	A/B	A/H
	E	B/C	D-1	B-1	B-2	B-2	B/H
		C	C/D	C-1	C-1	C/G	H-1
			D	D-2	D-1	D-1	D/H
				E	E/F	G-1	H-1
					F	F/G	H-1
重要程度						G	H-1
高度 3							H
中度 2							
低度 1							

表 7 權重評估表

判斷階段		權重評估	
研究標的:溪道整治設計方案			
項目		第一頁共一頁	
目標期望		原始分數	指定權重
A	工程成本	6	6
B	工期	8	9
C	工程需求	6	6
D	結構安全性	9	10
E	使用年限	1	1
F	環境影響	2	2
G	民眾接受度	3	3
H	施工安全性	7	8

表 8 標準分數表

標準	優	佳	好	可	差
分數	5	4	3	2	1

表 9 矩陣評估

表列有潜力的構想	期望標準	A	B	C	D	E	F	G	H	合計	
		工程成本	工期	工程需求	結構安全性	使用年限	環境影響	民眾接受度	施工安全性		
構想	計畫	6	9	6	10	1	2	3	8	112 分	
	5										
	4										
	3										
	2										
原設計方案一	1									112 分	
	小計	6	27	18	30	4	2	9	16		
	5										135 分
	4										
	3										
2											
1											
建議方案二	小計	24	36	6	30	3	6	6	24		
	5									142 分	
	4										
	3										
	2										
1											
建議方案三	小計	30	36	6	30	2	8	6	24		



圖 1 計畫位置圖

台南市永康液化區案例探討

吳啓綸¹ 許少凡¹ 古志生²

¹義守大學土木與生態工程學系研究生

²義守大學土木與生態工程學系教授

摘要

2016年二月六日美濃地震造成了台南地區多處發生液化現象，其中，永康區發現液化噴砂現象。本研究利用圓錐貫入試驗(Cone Penetration Test, CPT)、標準貫入試驗(Standard Penetration Test, SPT)以及剪力波速(Shear-Wave Velocity, Vs)現地試驗調查台南市永康液化區土壤性質，並利用現地試驗數據進行液化潛勢評估，液化潛勢分析採用三種 CPT 液化評估法、三種 SPT 液化評估法及一種 Vs 液化評估法。利用各種分析法計算液化潛能指數(Liquefaction Potential Index, LPI)，進行此液化區之案例探討，並根據設計地震條件進行未來之液化災害風險評估。分析結果顯示此液化區在兩地震條件下所得出之 LPI 值均在中、高級液化災害風險。

關鍵字：液化、液化潛能指數、圓錐貫入試驗、標準貫入試驗、剪力波速

A Case Study of Yongkang Liquefied Site

Chi-Lun Wu¹ Shao-Fan Xu¹ Chih-Sheng Ku²

¹Master Student, Department of Civil and Ecological Engineering, I-Shou University

²Professor, Department of Civil and Ecological Engineering, I-Shou University

ABSTRACT

The Meinong Earthquake on February 6 caused liquefaction in many places in Tainan. In this study, several in-situ tests were conducted to explore the ground condition in Yongkang liquefied site. Those in-situ test included the Cone Penetration Test (CPT), Standard Penetration Test (SPT) and Shear-Wave Velocity (Vs). Three CPT-based methods, three SPT-based methods and one Vs-based method were used to evaluate the liquefaction potential in this liquefied site. Liquefaction potential index (LPI) were conducted by the different assessing methods under Meinong seismic condition and designed seismic condition. The results showed that this site was middle to high disaster risk under two earthquake conditions.

Keywords: liquefaction, liquefaction potential index, cone penetration test, standard penetration test, shear wave velocity

一、前言

位於環太平洋地震帶的台灣，地殼活動可以說是相當的活躍，頻繁的地震也併發出多起土壤液化現象。2016年2月6日的美濃地震，震央位於高雄市美濃，芮氏規模6.6，

深度16.7公里，造成南臺灣部分地區發生震災。其中台南市區也發生多起的液化災害，使得土壤液化再度受到重視。

判別液化評估的主要方法為液化潛能指數，國內外學者自1970年代紛紛提出各種現地試驗之液化評估法，目前常用的現地試驗

有圓錐貫入試驗、標準貫入試驗、剪力波速等。

圓錐貫入試驗是公認較為可靠之現地試驗法，試驗簡單、快速，可以取得較準確之連續數據(包括錐尖阻抗 q_c 、袖套摩擦 f_s 、孔隙水壓力 u_2 等等)，適合用於軟弱地層，調查結果也已廣泛應用在液化評估工作。

標準貫入試驗為最早發展之現地試驗，試驗方式為鑽桿上連接有吸附鐵砧之滑桿，距地表 76cm 將 63.5kgf 之重錘自由落下打擊 SPT 劈管取樣器，實際貫入深度為 45cm，每貫入 15cm 紀錄其打擊次數，分三段紀錄，最後兩段打擊次數之和為 SPT-N 值，而 N 值越大表示土壤強度越高。在各國有不同的落錘釋放方式，其預估打擊能量會有所不同，(Seed et al.,1985)文中有整理出不同國家使用之 SPT 的能量比，其中，本文所使用之試驗方式為自由落體式，其預估打擊能量為 60%。

剪力波速試驗屬於大範圍、非破壞性之調查方法，利用下孔式震測、跨孔式震測及表面波譜法測得剪力波速及初始剪力模數，本研究使用剪力波速以 SCPT 之下孔式震測，除了能取得剪力波速外，也能同時取得 CPT 等常用參數。

雖然 SPT 為目前常用之調查方法，但仍在可靠性及數據不連續性造成忽視掉部分液化土層等問題。而 CPT 則因為無法直接判斷土壤種類，也對液化評估的部分帶來不便。

日本學者 Iwasaki 等人(1984)提出液化潛能指數，(LPI)以量化鑽孔 20 公尺內的液化潛勢加權平均以估計土壤液化引發災害之嚴重程度，液化災害風險評估常採用 Iwasaki et al.(1984)，是依據日本 6 次地震 64 個液化及 23 個無液化案例資料分析結果，以 5 與 15 作為低、高液化風險之初步判斷界線。

二、液化潛能評估法

液化分析簡易法最早由 Seed and Idriss(1971)所提出之反覆剪應力比如公式 1，並在 1985 年將地震規模影響納入考量，利用地震規模係數修正反覆剪應力比至震矩規模 7.5 時，如公式 2、3(Seed et al.,1985)，而根

據 2001 年 Youd et al. 彙整出地震時剪應力沿地震深度方向之折減係數如公式 4a、4b (Youd et al. 2001)。

$$CSR = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) \gamma_d \quad (1)$$

$$CSR_{7.5} = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) \gamma_d \cdot MSF \quad (2)$$

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}} \quad (3)$$

$$z \leq 9.15m, \gamma_d = 1.0 - 0.00765z \quad (4a)$$

$$9.15 < z \leq 23m, \gamma_d = 1.1740.0267z \quad (4b)$$

其中， g 為重力加速度； a_{max} 為最大水平地表加速度； σ_v 及 σ'_v 為總和有效覆土應力； γ_d 為應力深度折減係數；MSF 為地震規模修正係數； M_w 為震矩規模； z 為距地表深度。

2-1 圓錐貫入法之液化潛能評估

圓錐貫入試驗於 1932 年荷蘭引用後不斷研究發展至今，試驗快速、簡單且可以獲取較準確之連續試驗數據，適合用於軟弱地層，調查結果也已廣泛應用在液化評估相關工作。使用圓錐貫入試驗時，基本上為每 0.05 米獲取一個數據(包括錐尖阻抗 q_c 、袖套摩擦 f_s 、孔隙水壓力 u_2 等等)，而利用這些原始數據再次應用在 CPT 液化評估法，進行判別各地區液化程度。目前常用的圓錐貫入法之液化潛能評估有 Robertson and Wride (1990)、Ku and Juang (2012)、Boulanger and Idriss (2016)以下將簡述這三種分析法之反覆阻抗計算過程。

Robertson and Wride (1990)簡稱 RW 法其反覆阻抗比 CRR 以土壤行為分類指數(I_c)作為界線分類出以下三種部份：

1. 土壤行為分類指數(I_c)小於或等於 2.6 時砂性土壤如公式 5、6。

when $I_{C,RW} \leq 2.6$

$$\text{if } 50 > Q_{tn,cs}, CRR_{7.5} = 0.833 \left(\frac{Q_{tn,cs}}{1000} \right) + 0.05 \quad (5)$$

$$\text{if } 50 \leq Q_{tn,cs} < 160, CRR_{7.5} = 93 \left(\frac{Q_{tn,cs}}{1000} \right)^3 + 0.08 \quad (6)$$

2. 土壤行為分類指數(IC)大於 2.7 時黏性土壤如公式 7。

when $I_{C,RW} \geq 2.7$

$$CRR_{7.5} = 0.053 Q_{tn,cs} \cdot k_{\alpha} \quad (6)$$

3. 土壤行為分類指數(IC)介於 2.6 至 2.7 時如公式 5、6。Ku and Juang(2012)簡稱 KJ 法其反覆阻抗比如式 8。

$$CRR = 0.05 + Exp \left[A + B \times \left(\frac{Q_{tn}}{100} \right)^C \right] \quad (7)$$

$$A = I_{C,BJ} \cdot \left(\frac{Q_{tn}}{100} \right) - 14.7 \quad (8)$$

$$B = 0.909 I_{C,BJ}^3 - 7.47 I_{C,BJ} + 19.28 \quad (8a)$$

$$C = 0.059 + 0.015 I_{C,BJ}^2 \quad (8b)$$

Boulanger and Idriss(2016)簡稱 BI CPT 法其反覆阻抗比相較前兩種評估法多了細料含量的考慮參數，如式 9-12。

$$qc1n = Cn \cdot \frac{qc}{Pa} \quad (9)$$

$$\Delta qc1n = \left(11.9 + \frac{qc1n}{14.6} \right) \exp \left[1.63 - \frac{9.7}{FC+2} - \left(\frac{15.7}{FC+2} \right)^2 \right] \quad (10)$$

$$Q_{c1ncs} = qc1n + \Delta qc1n \quad (11)$$

$$CRR = \exp \left[\left(\frac{Q_{c1ncs}}{113} \right) + \left(\frac{Q_{c1ncs}}{1000} \right)^2 - \left(\frac{Q_{c1ncs}}{140} \right)^3 + \right.$$

$$\left. \left(\frac{Q_{c1ncs}}{137} \right)^4 - 2.8 \right] \quad (12)$$

2-2 標準貫入法之液化潛能評估

目前常用的標準貫入法之液化潛能評估有 NCEER 之 Youd et al. (2001)、雙曲線函數(黃俊鴻等 2012)、Boulanger and Idriss(2012)。NCEER 之 Youd et al. (2001)簡稱修正 Seed 法，此分析法係 1998 年國際液化專家工作坊的共識會議結論。此評估分析法主要考慮地表

以下 20 公尺以內、地下水位以下之飽和土壤，及細料含量小於 50% 之土層。其土壤阻抗比如公式 13-18。

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60cs}} + \frac{(N_1)_{60cs}}{135} + \frac{50}{[10((N_1)_{60cs}) + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (13)$$

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad (14)$$

$$\text{if } FC \leq 5\%, \alpha = 0, \beta = 1.0 \quad (15)$$

$$\text{if } 5\% < FC \leq 35\%, \alpha = \exp \left(1.76 - \frac{190}{FC^2} \right), \beta = 0.99 + \frac{FC^{1.5}}{1000} \quad (16)$$

$$\text{if } FC > 35\%, \alpha = 5.0, \beta = 1.2 \quad (17)$$

$$(N_1)_{60} = N_{60} Cn \quad (18)$$

雙曲線函數(黃俊宏，2012)簡稱 HBF 法主要延伸 Seed et al.之簡易評估法基本架構，使用現地土壤液化與非液化案例資料，來界定土壤之抗液化強度，除了使用世界各國之案例外，更增加使用國內集集地震之案例資料，採用雙曲線函數進行迴歸分析，用以表示土壤之抗液化強度。此評估分析法主要考慮地表以下 20 公尺以內、地下水位以下之飽和土壤，及塑性指數(Ip)小於 7 之土層。其土壤阻抗比如公式 19-22。

$$CRR_{7.5} = 0.08 + \frac{0.0035 \times (N_1)_{60cs}}{1 - \frac{(N_1)_{60cs}}{39}} \quad (19)$$

$$(N_1)_{60cs} = k_s (N_1)_{60} \quad (20)$$

$$\text{if } FC \leq 10\%, k_s = 1.0 \quad (21a)$$

$$\text{if } FC > 10\%, k_s = 1 + 0.07 \cdot \sqrt{FC - 10} \quad (21a)$$

$$(N_1)_{60} = N_{60} Cn \quad (22)$$

Boulanger and Idriss (2012)簡稱 BI 法，更新了 SPT 之液化評估法，部分參數以 Youd et al.(2001)為基準，此評估分析法主要考慮地表以下 20 公尺以內、地下水位以下之飽和土壤，及塑性指數(Ip)小於 7 之土層。其土壤阻抗比如公式 23-26。

三、區域地質及研究方法

3-1 研究區概況

美濃地震後永康區大灣東路城隍宮對面農田發現大面積液化噴砂，但周圍鄰近建築物無發現明顯損壞(古志生, 2016)，本研究即針對此區進行調查研究。研究區現地調查位置及鄰近測站位置如圖 1 所示，圖 2 為研究區調查孔位與液化噴砂區示意圖。2016 年 2 月永康區平均地下水位監測結果，大約是距地面 1.96 公尺。兩個鄰近測站在美濃地震之紀錄如圖 3 及圖 4 所示，詳細位置及最大地表加速度資料詳見表 1。

表 1 美濃地震研究區鄰近地震測站資料(中央氣象局)

	距震央(km)	經度	緯度	最大 PGA
口碑國小	22.7	120.3495	23.02585	416.92
永仁高中	32.8	120.2416	23.00297	136.94



圖 1 研究場址附近測站及調查孔位



圖 2 研究場址調查點位及液化噴砂示意圖

$$CRR_{7.5} = \exp \left\{ \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} \right) + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126} \right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6} \right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4} \right)^4 - 2.8 \right\} \quad (23)$$

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (24)$$

$$(N_1)_{60} = C_n \times N \frac{Em}{60} \quad (25)$$

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp \left\{ 1.63 + \left(\frac{9.7}{FC+0.01} \right) - \left(\frac{15.7}{FC+0.01} \right)^2 \right\} \quad (26)$$

2-3 剪力波速之液化潛能評估

(Andrus et al. 2000)提出較完整之剪力波速液化評估法，使用大量現地資料進而回歸出液化與非液化曲線，並根據緊密砂土不易發生剪縮之理論，認為其正規化之剪力波速 V_{S1} 液化發生之上限值 V_{S1}^* ，而分析觀察後發現剪力波速 (V_S) 之值越大越不容易發生液化。其阻抗比如式 27。

$$CRR = 0.022 \left(\frac{K_c V_{S1}}{100} \right)^2 + 2.8 \left[\frac{1}{(V_{S1}^* - K_c V_{S1})} - \frac{1}{V_{S1}^*} \right] \quad (27)$$

Bwambale et al.(2019) 將 Juang et al.(2001)之正規化剪力波速針對於細料含量修正係數 K_{CS} 納入考量，如式 28 細料含量與修正係數之關係如式 29、30。其土壤阻抗比如式 31。

$$V_{S1cs} = k_c V_{S1}, \leq 210 \quad (28)$$

$$\text{if } FC \leq 5\% , k_c = 1 \quad (29a)$$

$$\text{if } 5\% < FC < 35\% , k_c = 1 + (FC - 5)T \quad (29b)$$

$$\text{if } FC \geq 35\% , k_c = 1 + 30T \quad (29c)$$

$$T = 0.009 - 0.0109 \left(\frac{V_{S1}}{100} \right) + 0.0038 \left(\frac{V_{S1}}{100} \right)^2 \quad (30)$$

$$CRR = 0.022 \left(\frac{V_{S1cs}}{100} \right)^2 + 2.8 \left[\frac{1}{(215 - V_{S1cs})} - \frac{1}{215} \right] \quad (31)$$

其中， V_{S1cs} 為乾淨砂之剪力波速， k_c 為細料含量修正係數， V_{S1} 為正規化剪力波速。

震央距	震度	最大 PGA	最大加速度 (GAL = CM/S < SUP > 2)		
			垂直	南北	東西
23	7	416.92	163.26	238.64	416.92

口埤國小

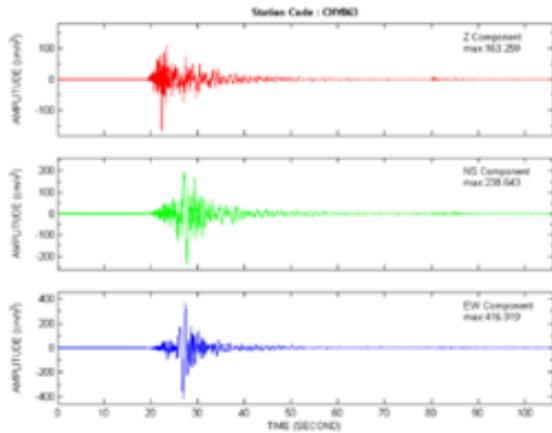


圖 3 美濃地震口埤國小測站資料

震央距	震度	最大 PGA	最大加速度 (GAL = CM/S < SUP > 2)		
			垂直	南北	東西
32.25	5	136.94	86.64	112.72	136.94

永仁高中

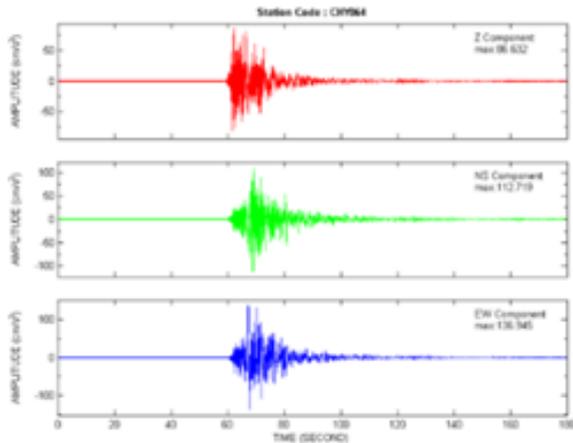


圖 4 美濃地震永仁高中測站資料

3-2 研究方法

本研究共蒐集四個調查點資料，分別為永大路 YK074、大灣東路 YK077、民族路 YK080 及南興路 YK084，各個調查點的剖面資料如圖 5 至圖 8。各調查點均進行 SCPT 及平行鑽探，SCPT 調查點與鑽探點之距離約在 1.5 至 3 公尺之間。

研究區附近有兩個地震測站，利用測站與調查點位置之震央距離進行內插，估算研究區域之美濃地震最大加速度，研究區域距

離震央為 29.52km 對應之最大地表加速度 PGA=228gal。

將美濃地震條件及現地鑽探數據進行液化評估，採用 CPT、SPT 及 Vs 之分析法進行案例分析。根據各分析法所訂定之條件進行分析後可獲得土壤反覆阻抗比(CRR)及反覆應力比(CSR)，兩者相除後可得到安全係數(FS)，並帶入 Iwasali et al.(1982)所提出之液化潛能災害風險分級，檢視研究區域內液化危害程度。此外，採用設計地震條件及近三年平均月地下水位進行液化災害潛勢分析以評估此區之土壤液化災害風險。

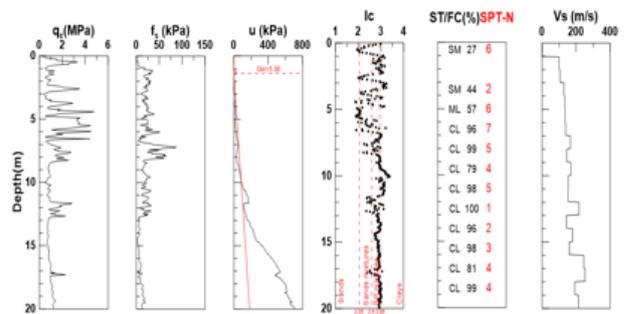


圖 5 YK074 永大路土層剖面圖

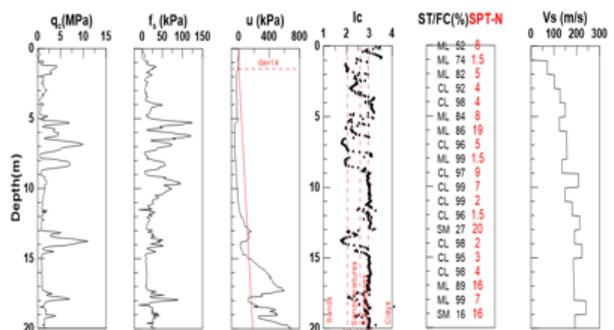


圖 6 YK077 大灣東路土層剖面圖

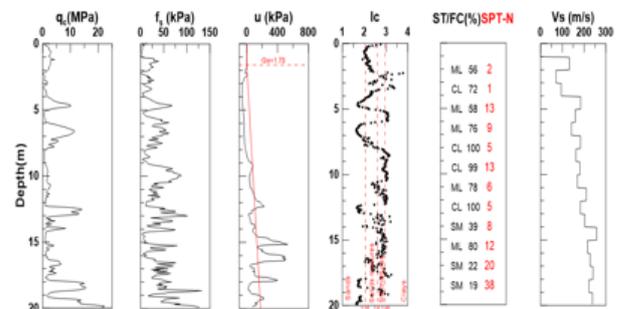


圖 7 YK080 民族路土層剖面圖

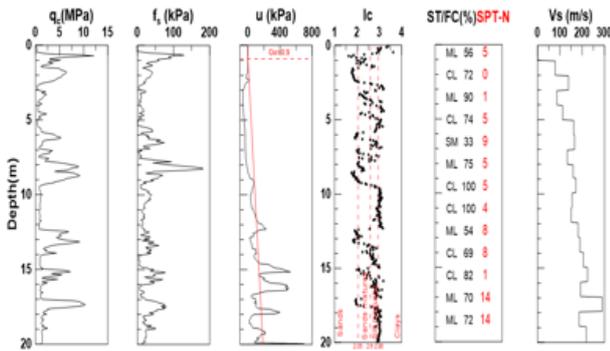


圖 8 YKo84 南興路土層剖面圖

四、液化評估分析

4-1 研究區土層性質與液化調查結果

由各調查點的剖面資料可以發現地表下 20 公尺內土層以細粒土層(CL、ML)為主。地震後現場液化調查顯示，大灣東路 YKo74 旁邊三至五公尺內有發現液化噴砂現象，在 YKo84 南興路周遭數十公尺內有發現液化噴砂現象，其餘兩處無發現液化現象。研究區域內有發現液化噴砂現象，但發現液化噴砂附近建築物沒有明顯受損情形，因此研判本研究區發生之地盤液化災害屬於中度(輕微噴砂)至高度液化災害(大面積噴砂)。

4-2 美濃地震條件之案例探討

美濃地震震矩規模(Mw)為 6.6，根據內插分析得本研究區之最大地表加速度約為 228gal，各調查孔之地下水位介於 0.9 公尺至 1.7 公尺。表 2 為各調查孔分析所得之液化潛能指數，其中，南興路 YKo84 之液化潛能指數最高，特別針對此處深入探討。圖 9 及圖 10 分別為 SPT 法及 SCPT 液化評估分析所得結果，圖中紅色虛線為 Iwasaki 建議之 LPI 指數分級界線 5、15。SPT 的分析的 LPI 值均低於 SCPT 的分析結果，分析結果與現地調查之比較如表 3，分析結果大致上符合現地情形。SPT 結果相較於 CPT 較為保守，原因是此區土層多為黏土類土壤，特別是 Seed 法只考慮細料含量 50% 以下土層的液化情形，對於細料含量較高的細粒土壤需考慮其他評估方式。此外，HBF 及 BI-SPT 法只分析塑性指數 7 以下之土壤的液化潛能，塑性指數高於 7 的類黏性土壤(Clay-like soils)需另外考慮其液化

評估方式。

表 2 美濃地震條件下研究區之液化潛能指數

美濃地震	YKo74	YKo77	YKo80	YKo84
RW	10.0	11.0	9.7	14.4
KJ	28.0	27.7	24.8	33.8
BI-CPT	39.5	32.4	28.1	35.6
Andrus	26.9	24.2	17.3	28.7
Seed	8.9	0	0	0
HBF	9.8	6.7	6.8	11.4
BI-SPT	7.0	3.5	4.5	8.4

表 3 分析結果與現地情形

南興路 YKo84	LPI	是否符合現地情形
RW 法	14.4(中等)	符合
KJ 法	33.8(高等)	符合
BI-CPT	35.6(高等)	符合
Andrus	28.7(高等)	符合
修正 Seed	0(無)	低估
HBF	11.4(中等)	符合
BI-SPT	8.4(中等)	符合

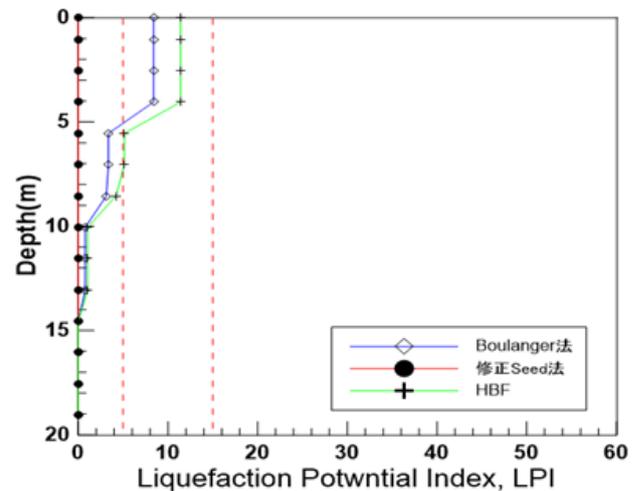


圖 9 SPT 法之液化潛能指數分析結果

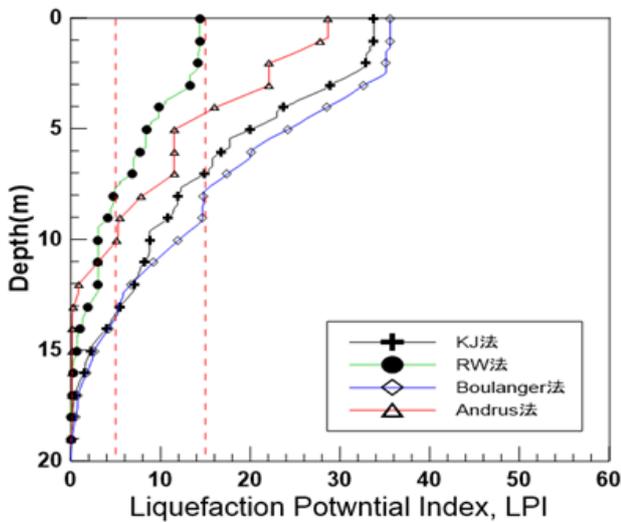


圖 10 CPT、Vs 之液化潛能指數分析結果

表 4 中的分析結果突顯出 SCPT 分析結果較為保守，其中一個重要因素係 SCPT 法考慮所有種類土壤的液化分析結果，KJ 法分析過程中同時考慮黏土層的超額孔隙水壓，因此此種評估法所計算出之 LPI 值均高於其他分析法之結果。

4-3 設計地震條件下之液化潛勢評估

根據「建築物耐震設計規範」，永康區之設計地震規模為 6.7、最大加速度為 0.314g，地下水位以經濟部水利署水文資訊網所查詢到近三年永康測站平均月地下水位加上一個標準差之 1.62 為設定地下水位(圖 11)。各種分析法計算所得之液化潛能指數結果如表 4 所示，表中數值均高於美濃地震之分析結果，主要原因應該是採用的設計地震最大地表加速度高於美濃地震之最大地表加速度。分析結果顯示除了 Seed 法之外其餘各種分析法所評估此區域應歸類為中高潛勢液化區。

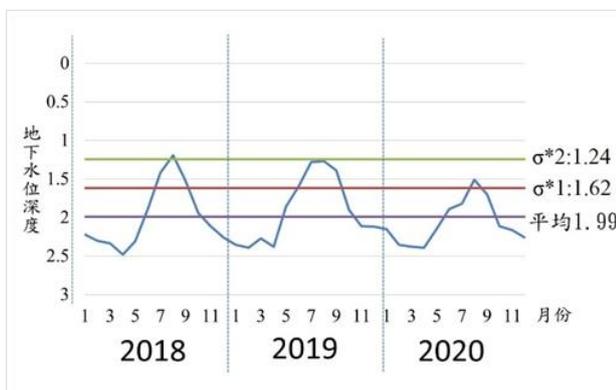


圖 11 三年內地下水位深度

表 4 設計地震條件下研究區之液化潛能指數

設計地震	YK074	YK084	YK080	YK084
RW	13.6	18.4	17.4	18.4
KJ	35.4	39.0	35.0	39.0
BI-CPT	49.2	41.8	39.8	41.8
Andrus	40.1	33.9	24.6	33.9
Seed	12.2	1.6	1.1	1.6
HBF	14.5	16.7	14.8	16.7
BI-SPT	12.1	14.3	13.4	14.3

五、結論與建議

根據以上的分析探討整理成以下幾點結論：

1. 根據鑽探數據結果顯示，研究區地下水位分布於 0.9m~1.7m，此區土層以黏性土壤為主。
2. 分析結果顯示，修正 Seed 法成效較為不明顯，因此此分析法不適用於黏性類土壤進行土壤液化災害風險評估。
3. KJ 法及 BI-CPT 法在黏性類土壤中可能存在液化災害風險過於高估的問題。
4. 美濃地震之地震規模 6.6 最大加速度 0.233g 條件下，研究區之液化潛勢評估歸類為中高等液化災害風險，地震後研究區內僅有液化噴砂無建築物損害，分析結果與現地狀況相符。
5. 目前雖無較嚴重液化災害，根據內政部建築物耐震設計規範中，設計地震規模 6.7 最大加速度 0.314g 條件下，將此研究區歸類為中高液化災害風險，未來土地使用規劃仍須注意液化災害。

參考文獻

1. 中華民國內政部營建署(2011)，「建築物耐震設計規範及解說」。
2. 中央氣象局(2016)，「0206 美濃地震規模報告」，地震測報中心。
3. 中央氣象局(2016)，「實際觀測最大加速度 PGA 分布圖」，地震測報中心。
4. 經濟部水利署(2016)，「歷史地下水位查

- 詢”，水文資訊網整合服務系統。
5. 謝昀凌(2020)， “三類液化分析法之案例應用研究”，義守大學，土木與生態工程學系，碩士論文。
 6. Andrus, R.D., and Stokoe, K.H. II (2000).“Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 126, pp. 1015-1025.
 7. Bwambale, B., and Andrus, R. D. (2019).“State of the art in the assessment of aging effects on soil liquefaction”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol.125, pp.105658-1-13.
 8. Iwasaki, T., Arakawa, T., and Tokida K. (1984). “Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 3, pp. 49-58.
 9. Juang, C.H., Chen, C.H., and Mayne, P.W. (2008). “CPTU simplified stress-based model for evaluation soil liquefaction potential”, *Soils and Foundations*. vol. 48, No. 6, pp. 755-770.
 10. Ku, C.S., and Juang, C. H. (2012). “Liquefaction and cyclic softening potential of soils -a unified piezocone penetration testing-based approach”, *Geotechnique*, vol.62, pp.457-461.
 11. Robertson, P. K. (1990).“Soil classification using the cone penetration test”, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 27(1), pp. 151-158.
 12. Robertson, P. K., Woeller, D. J., and Finn, W. D. (1992). “Seismic cone penetration test for evaluating liquefaction potential under cyclic loading” , *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 29, 1992, pp. 686-695.
 13. Robertson, P. K., and Wride, C. E. (1998).“Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test”, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 35, No. 3, pp. 442-459.
 14. Seed, H. B., and Idriss, I.M. (1971). “Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential,” *Journal of Geotechnical Engineering* , Vol. 97, No. 9, pp. 1249-1273.
 15. Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., and Chung, R.M. (1985). “The Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluation”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 111, No. 12, pp. 1425-1445.
 16. Youd, T. L., et al. (2001). “Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 127, 2001, pp. 817-833.

都會區內建築物災害曝險量體推估-以台北市土壤液化潛勢圖為例

曹雅筑¹ 楊承道² 林祐萱¹ 林祺皓²

¹國家地震工程研究中心專案助理研究員

²國家地震工程研究中心副研究員

摘要

本研究介紹如何利用房屋稅籍資料與門牌地址定位資料所建立的建築物數值資料庫，對研究區域內建物於想定災害情境下的曝險量體進行估算。災害曝險量體的推估為政府進行災害管理與相關政策的重要依據。本研究以台北市於房屋稅籍上登載之所有建築物為保全標的，配合中央地質調查所近期公布之土壤液化潛勢圖，對台北市轄區內座落於高土壤液化潛勢區的建築物量體與其特性進行統計與估算。中央地調所的土壤液化潛勢調查旨在掌握平原都會區可能發生土壤液化災害之範圍，以作為都市防災整備規劃之參考，減少天然災害引致的人命傷亡與財經損失。一般土壤液化災害雖不致於造成人員傷亡，但往往造成地基承载力下降，建物抑或傾斜、抑或倒塌。所以對轄區內曝險保全標的量體之估算，對於地方政府於防災整備與政策擬定為一重要之參考依據。

關鍵字：土壤液化潛勢圖、房屋稅籍資料、門牌地址地位、建築物曝險量體推估

Building Exposure Estimation in the Metropolitan Area: Using Soil Liquefaction Potential Map in Taipei City as an Example

Ya-Chu TSAO¹ Cheng-Tao YANG² You-Xuan LIN¹ Chi-Hao LIN²

¹Research Assistant, National Center for Research on Earthquake Engineering

²Associate Researcher, National Center for Research on Earthquake Engineering

ABSTRACT

This study introduces how to build a digital database of buildings that can be exploited to estimate exposure of buildings under a seismic scenario based on house tax data and the geospatial database. Exposure is critical information by which the government formulates disaster management strategies and relevant policies. In this study, we identify buildings in house tax data that are located in the metropolitan area of plain subjected to soil liquefaction, as indicated by the soil liquefaction hazard survey to obtain statistics about the volume and attributes of those buildings. The soil liquefaction hazard survey conducted by Central Geological Survey aims at figuring out the area of a metropolis of plain subjected to soil liquefaction and providing insights for disaster prevention planning and preparedness to reduce the casualty and the economic loss which may be induced by natural disasters. While soil liquefaction is not a direct threat to human lives, it usually damages the bearing capacity of a foundation, leading to building inclination or collapse. Therefore, the knowledge of building exposure to soil liquefaction is a key for local government to prepare for disasters and policy establishment.

Keywords: soil liquefaction potential map, house tax data, address matching, building exposure

estimation

一、緣起

台灣地區活動斷層遍佈全島[1]，面對無明顯發生前兆的斷層錯動地震事件，最有效的應變方法即為事前的防災整備。因地表震動而誘發的土壤液化、海嘯、工程構造物損壞、人員受困等災變，皆為防災整備關注之焦點。

相較於地勢起伏多變的山區，人類較易於平原活動，亦因都市化之影響，人口多稠密地聚集於平坦都會區，相應的土木建設也越發蓬勃。人們與土木建設之關係日益密不可分，面對地震災變，建築物的穩固性與人身安全顯然呈高相關性。建築物之穩固性，除建物建造年代、構造類別、樓層等自身條件外，其座落環境之相關要素如地質條件、座落位置等，同為評估項目，故如何評估建物穩固性及識別位於高災害潛勢之保全標的，以降低建築物對人身安全之直接影響，為防災之重要議題。

鑑於此，本研究擬以台北市為例，利用建築物數值資料庫，比對台北市土壤液化潛勢圖[2]，估算高土壤液化潛勢區中曝險建物量體與特性。本研究採用的方法與分析結果，可以作為地方政府與防災協力單位進行防災整備之參考。

本文中將介紹基礎研究資料，包含房屋稅籍資料、全國門牌地址定位資料[3]、最小統計區人口資料[4]、地調所土壤液化潛勢圖等之特性外，也將簡要說明如何整合眾多來源不同之資料，並透過交叉勾稽比對完成建築物位於高土壤液化潛勢區之量體推估與屬性整理。

二、建築物空間屬性資料庫

本研究彙整房屋稅籍資料與內政部門牌地址定位資料，進而取得建物相關屬性資料與空間位置，故下列將分項簡述兩種資料之背景，並說明建物資料庫如何建立。

1. 房屋稅籍資料

為保護納稅義務人之權利，財政部針對

房屋建造年分、結構、樓地板面積、用途等等進行記錄與建檔，以確保房屋稅課徵之正確性。

2. 門牌地址資料

於民國 87 年起，內政部陸續輔導各地方政府建置該縣市之門牌位置資料庫暨查詢系統，更建置「全國門牌地址定位服務」，提供民政、警政、工務及消防等相關業務資訊，亦可作都市計劃、稅捐業務使用。

本研究以房屋稅籍資料為基礎，適度除去敏感私密資料後，運用地震工程的專業知識與歷年來修正的耐震設計規範與震區劃分，提取當中便於後續應用之資料欄位，建立以棟號為單元的建築物數值資料庫，包含構造類別、樓地板面積、建造年份、樓層數、適用耐震設計規範、模型建物等屬性資料；再經清理內政部的全國門牌地址定位資料後，提取兩資料庫之共有資訊——地址字串，進行兩資料庫之字串比對處理，確立建築物所在的空間位置，建置建築物空間屬性資料庫，如圖一所示。

如此，本建築物數值資料庫便能針對所關注的防災工作掌握特定關鍵標的，如透過建物建造年代的整理，了解台北市建物建造年代空間分布，發現其中多數人口密集區域之建物多興建於西元 1970 到 1980 年代間，甚至更早，代表臺北市既有房屋老化趨勢相當明顯，亦或如圖三之大台北都會地區建築物容積分布，分析建物樓地板面積與土地面積之關係，以土地開發密度推估中高樓層危險建築物狀況，以上是防災規劃考量上須納入觀察之要素。

三、土壤液化潛勢與空間統計單元

本研究所關注的災害為土壤液化，本章將了解土壤液化之發生地點，以便於後續結合前章所建置之建物資料庫，掌握及識別位於高災害潛勢之保全標的。

土壤液化多發生於砂質土壤結合高地下水位之區域，該區經一定震度搖晃，使得似砂質顆粒浮在水中，該現象易使砂質土壤失

去承載地表構造物的能力，導致位於該地之構造物下陷或傾斜。台北市境內有河川流經，淡水河、基隆河及新店溪包圍人口稠密之台北盆地，如圖四所示，從中央地質調查所土壤液化潛勢查詢系統可獲取台北市之土壤液化潛勢圖資，共分為三級，目前取用地方政府補充調查而產製之大比例尺圖資作為研究分析基礎。設以台北市境內想定地震為例，若山腳斷層錯動發生，台北地區之場址效應與高土壤液化潛勢將讓市內地震災害損失風險增加。

為便於災害曝險標的分析，本研究所使用之空間統計單位為街廓，街廓是以都市街道為界而形成之地區，且不為穿越性交通所分割者，因街廓為都市中較易辨別和分割的地理單元，故常作為保存記錄及收集統計資料的基本單位。除掌握建物資料與建物所在之地質環境外，人流分布亦為災害防救討論要素之一，故本研究於社會經濟資料服務平台[4]取得縣市相關屬性資料，如透過圖五了解都會區街廓內人口分布狀況，整併至以街廓為空間記錄單元的資料庫中，進行研究統計與關聯分析。

四、土壤液化曝險量體推估

經掌握建築物空間分布與結構屬性後，針對建築物座落之地質環境進行分析，可估算座落於高土壤液化潛勢區的建築物量體。現階段液化風險評估對象多著重於一般建築物與災害應變重要設施，依據都更條例等法令的定義，屋齡三十年以上之建物將視為老舊建築物，然九二一地震事件後，建物耐震規範提高，若遵循該規，超過二十年之房屋應歸類於不耐震的老舊建物，且五層樓以下之建築物多未進行土壤改良作業，抗土壤液化能力較低，故現研究將以五層樓以下、無地下室或未經下挖地基且位於高土壤液化潛勢災害區內之一般低矮建築物為首要關注對象。

經統計後，現台北市內五層樓以下、無地下室或未經下挖地基且位於高土壤液化潛勢災害區內之高關注一般建築物約為 192321 棟，其中位於高潛勢區之建物棟數約為 2044

棟，高關注建物數量於各街廓之空間分布如圖六所示，棟數量普遍不高，數量多於 20 棟以內，然建物棟數大小易受街廓面積皆影響，街廓越大，所涵蓋的建物棟數相對較高，故松山區與中山區附近較大之街廓所涵蓋的高關注棟數確實較大。

為避免因街廓面積而影響分析指標，故本研究第二個分析指標擬由建物樓地板面積為分析來源，以高關注建物之總樓地板面積除以該街廓內所有建物之總樓地板面積，考量樓地板可承載的生命與財產，作為高風險建物量體分析方向之一。現針對高關注建物之總樓地板面積較高比例之街廓進行量體匡列，如圖七，目前該比例 75% 以上與 50% 以上的標的街廓多分布於台北市人口密度高之老舊市區內，如大同區、中山區、萬華區、松山區等，在施行防災準備或救援行動時，人口較多之區塊多為關注焦點，相較於以棟數為考量單位，以此為指標，較能有效評估建物實際容納空間與其對應之人群或財產容量，故本指標確有其參考與應用意義。

五、結論

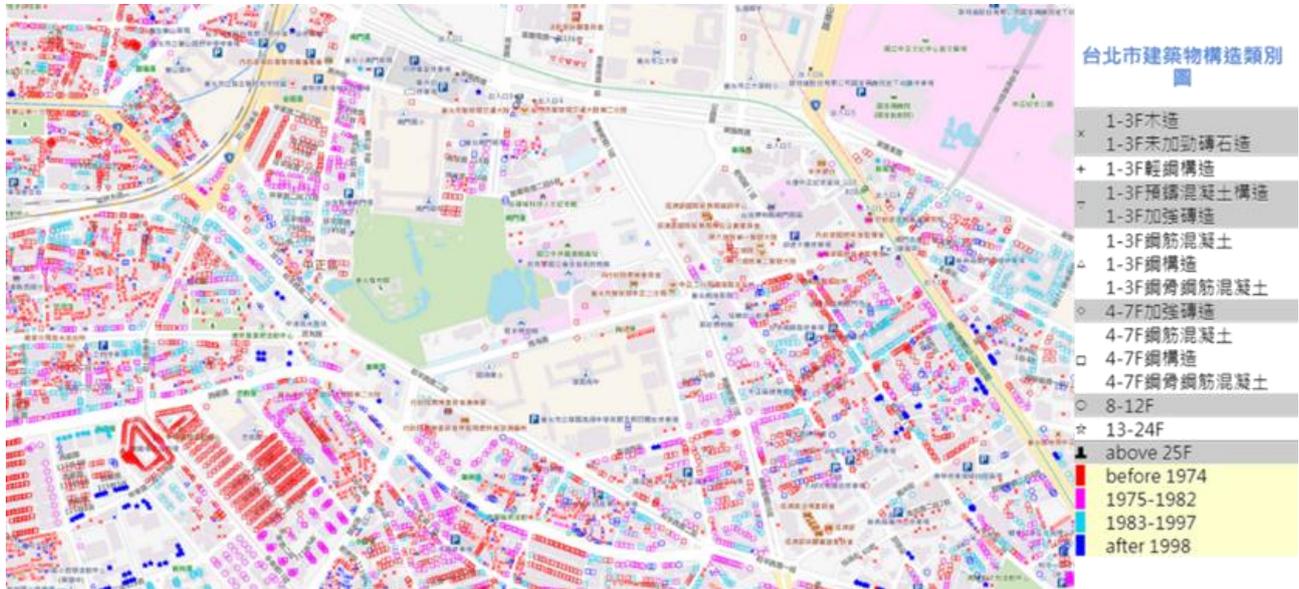
本研究介紹房屋稅籍資料、全國門牌地址定位資料所建立的建築物數值資料庫，並以台北市為例，說明如何利用建築物數值資料庫，搭配最小統計區與土壤液化潛勢圖，進行台北市都會區內建築物災害曝險量體推估。一般土壤液化災害雖不致於造成人員傷亡，但往往造成地基承载力下降，建物抑或傾斜、抑或倒塌。對轄區內曝險建築物的量體之掌握，可作為地方政府於防災整備與政策擬定為一重要之參考依據。

參考文獻

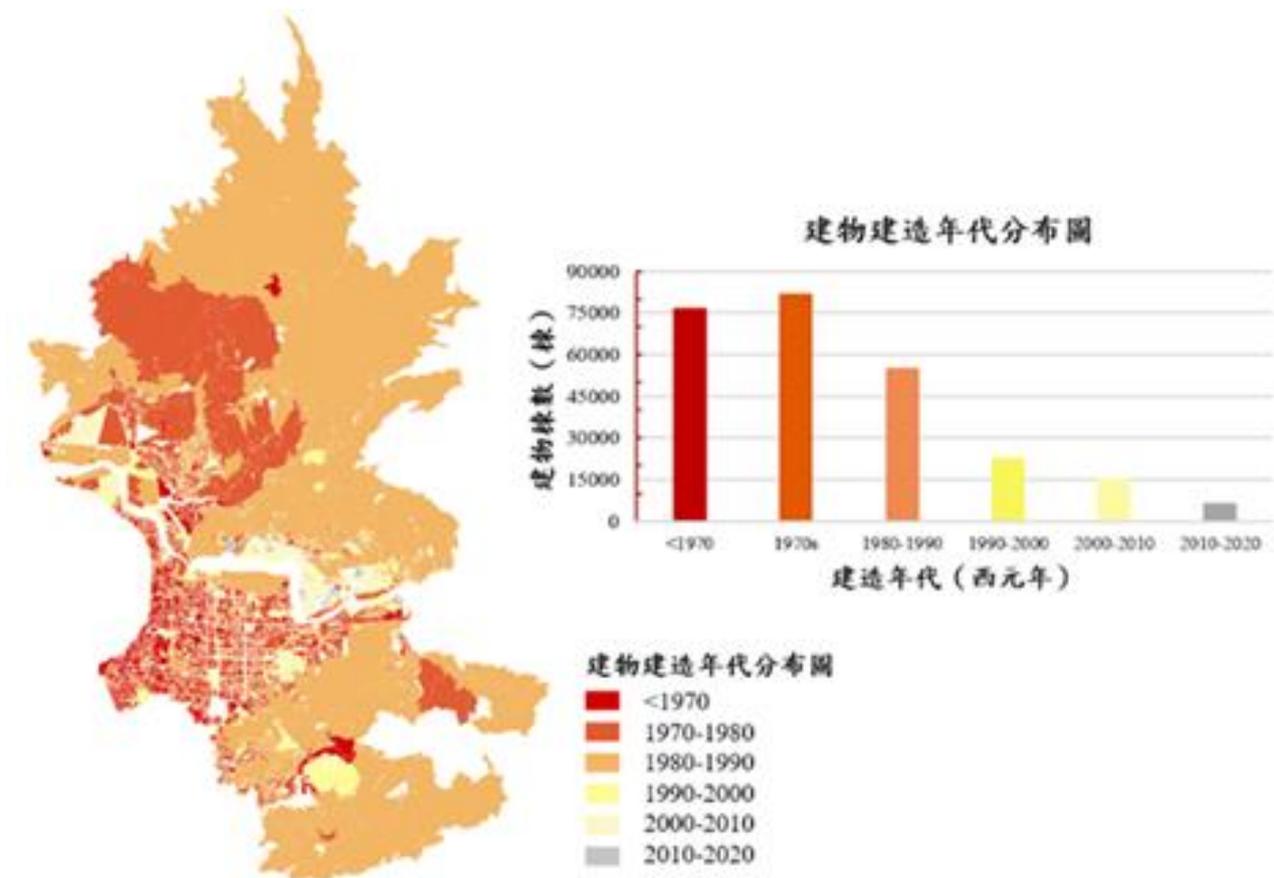
1. 經濟部中央地質調查所，2021，「經濟部中央地質調查所土壤液化潛勢查詢系統」，<https://www.liquid.net.tw/cgs/Web/Map.aspx>
2. 台北市政府，2021，「台北市土壤液化潛勢查詢系統」，<https://soil.taipei/Taipei2019/Web/Map.aspx>

3. 內政部資訊中心，2021，「全國門牌地址定位服務」，
https://www.tgos.tw/tgos/Web/Address/TGOS_Address.aspx

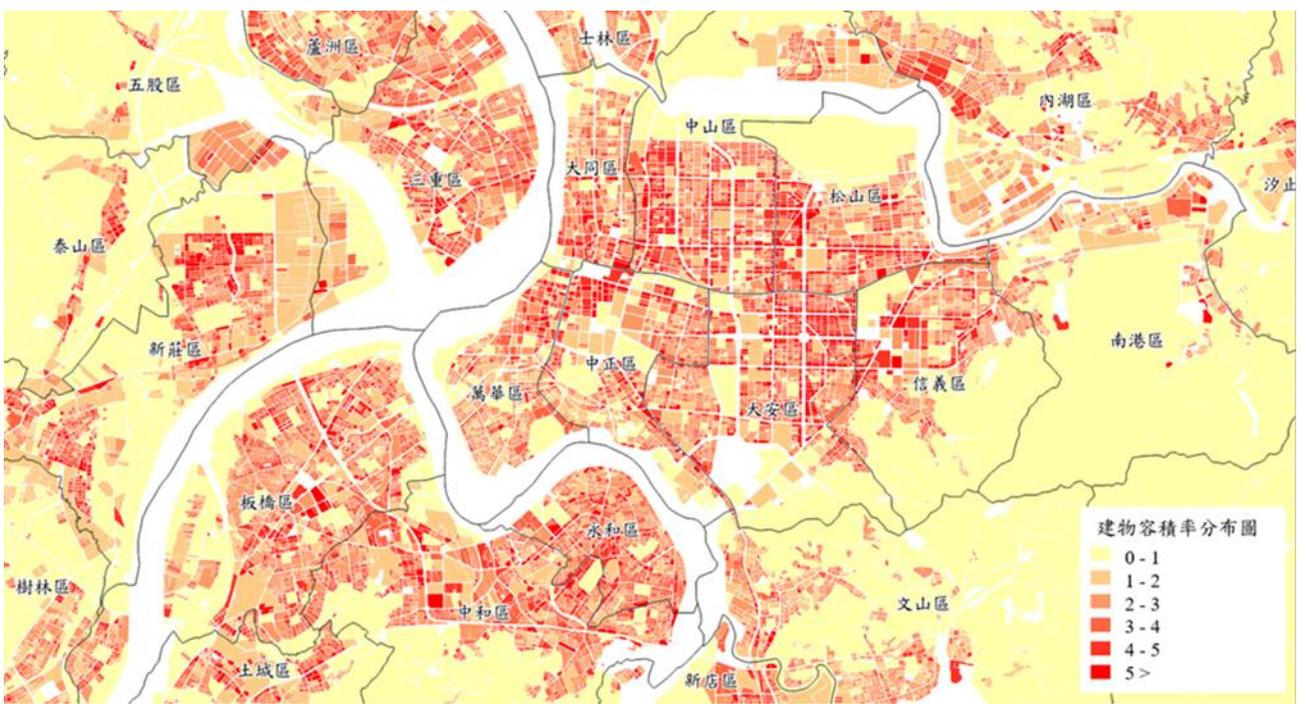
4. 內政部統計處，2021，「社會經濟資料服務平台」，
https://segis.moi.gov.tw/STAT/Web/Portal/STAT_PortalHome.aspx



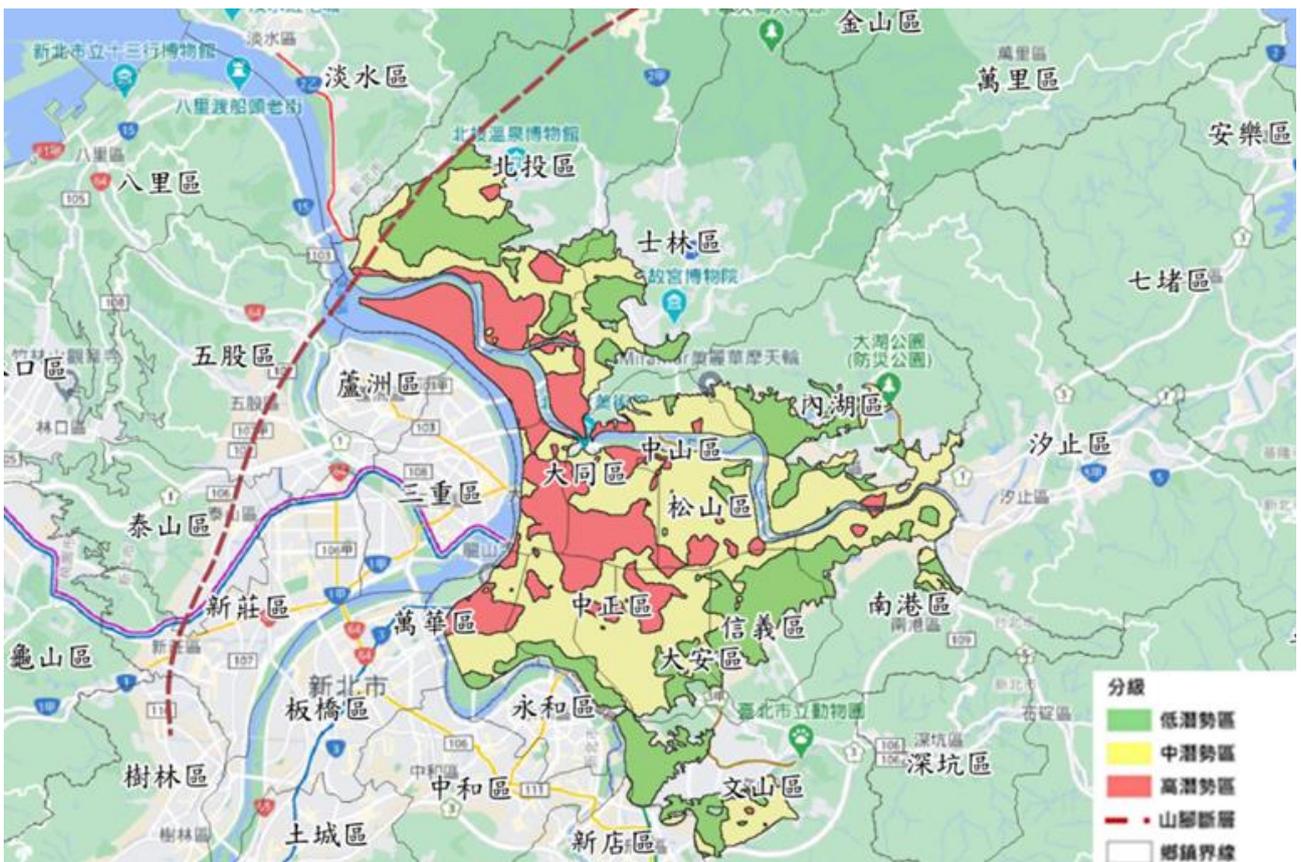
圖一 建築物屬性與地址定位資料庫



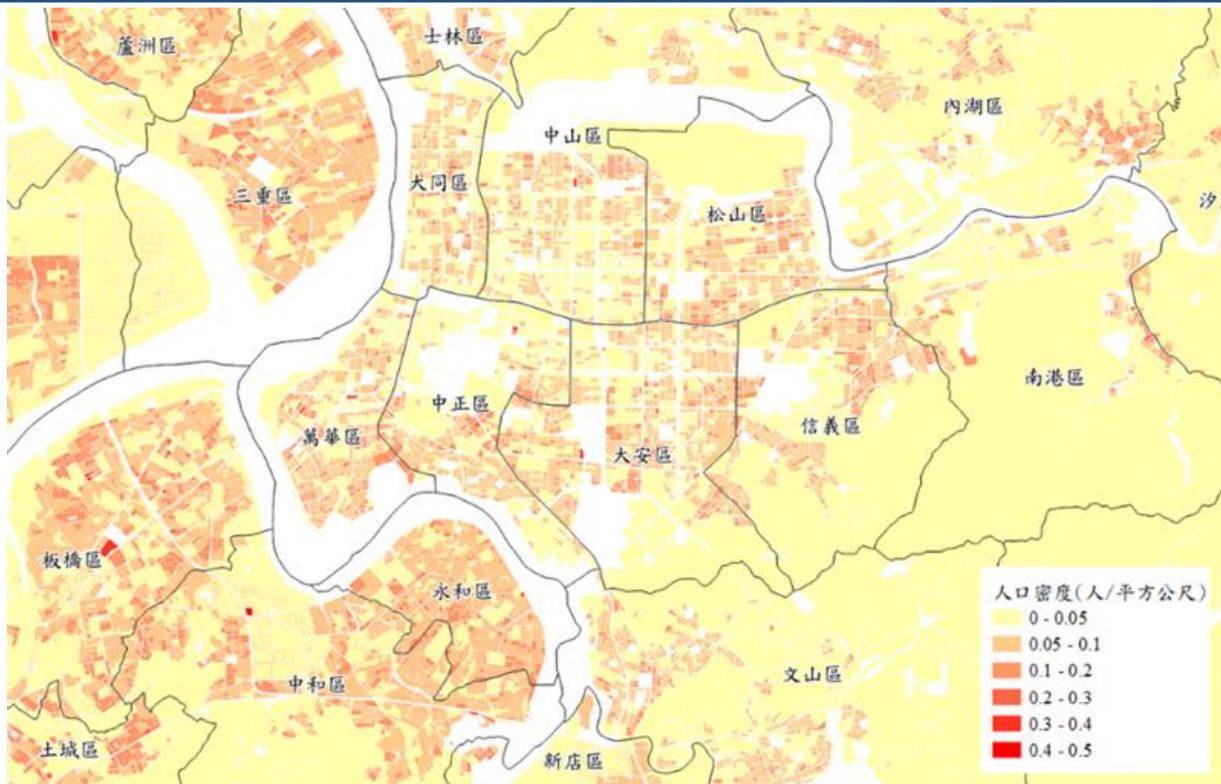
圖二 臺北市建築物建造年代分布圖



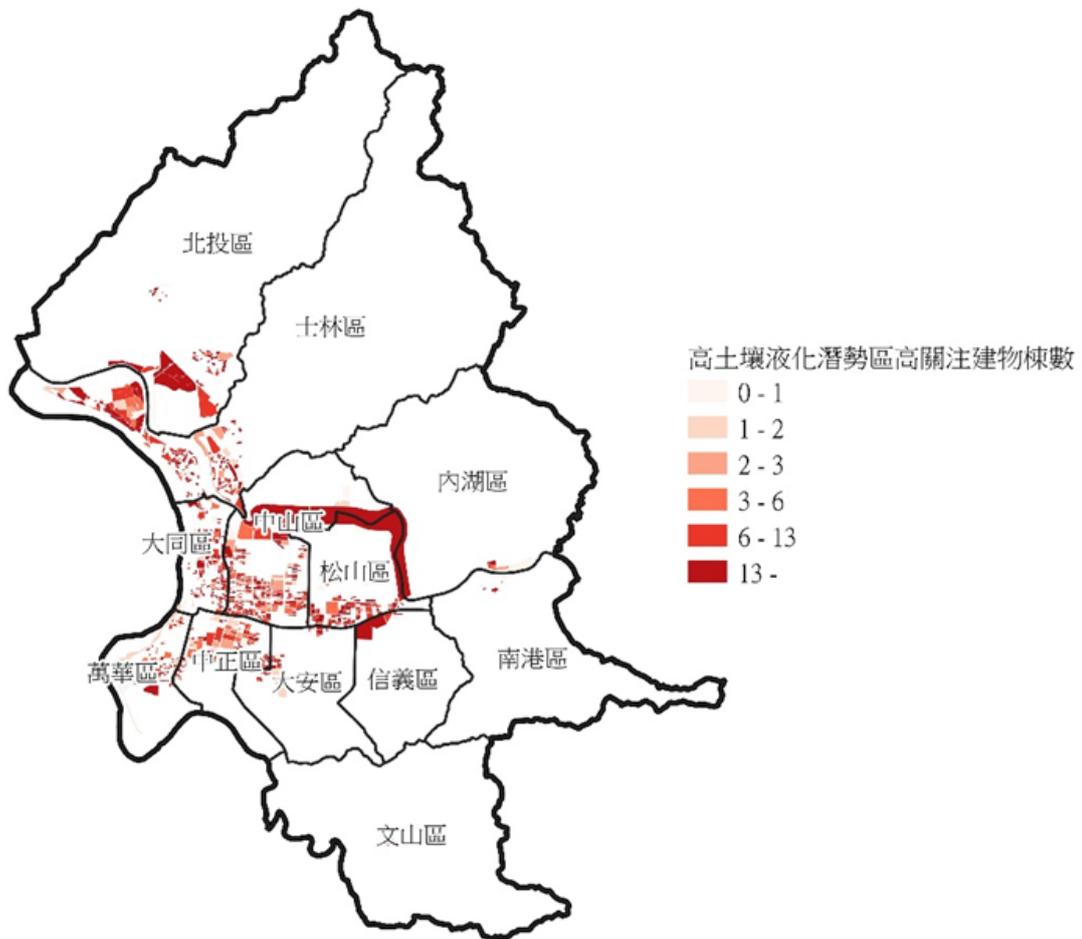
圖三 大台北都會區建築物容積率分布圖



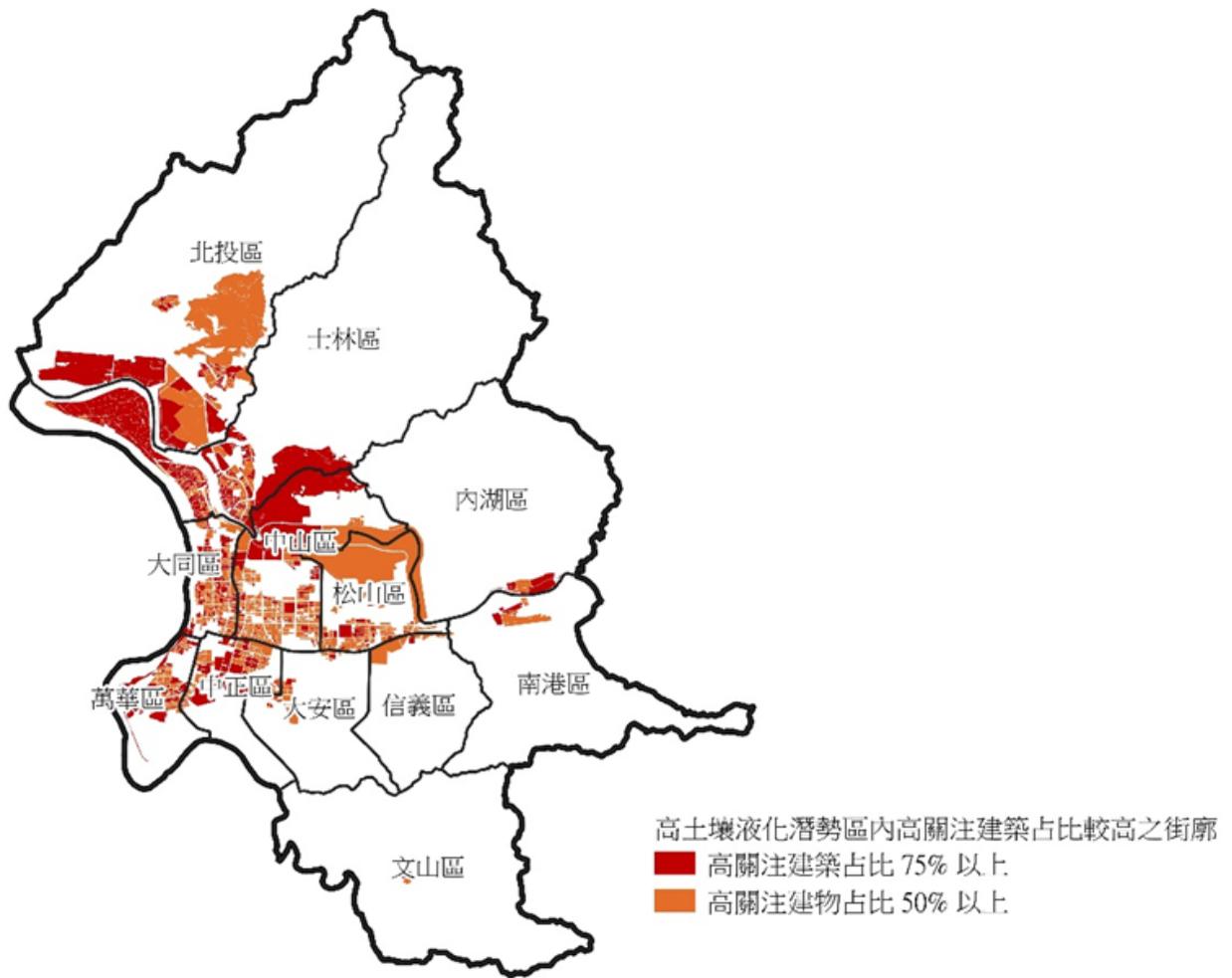
圖四 山腳斷層位置與台北市土壤液化潛勢圖



圖五 大台北都會區人口密度圖



圖六 台北市高土壤液化潛勢區內高關注建築物棟數



圖七 台北市高土壤液化潛勢區內高關注建築物比例之街廓

高科技廠房消防搶救分析

王和源¹ 何春玲² 林志忠³ 陳翰昌⁴

¹國立高雄科技大學土木工程與防災科技研究所特聘教授

²中國華僑大學土木工程學院工程管理系副教授

³高雄醫學大學總務處營繕組技佐

⁴國立高雄科技大學土木工程與防災科技研究所研究生

摘要

台灣科技產業蓬勃發展，高科技廠房建築物日益增加，其建築物與一般工廠有相當大的差異，火災發生時對消防人員而言是一大危機。加上內部開口較少，無法順利排煙，除了在搶救過程當中發生傷害之外，更有可能導致消防人員受困火場。

本文係針對高科技廠房建築結構型態加以分析，根據文獻回顧與案例研判，探討高科技廠房客體客體分析、消防資訊權、火災概況、派遣與搶救指揮作業及消防人員執行火災搶救作業面臨危害的概念內涵與理論，據以建立研究架構與問卷編製。研究採用運卷調查方式，問卷調查對象以高雄市政府消防局服務於高雄科學園區、加工出口區、工業區內有高科技廠房周圍分隊人員，以網路問卷方式進行施測，最後回收有效樣本 174 份。問卷結果經由敘述性統計分析、獨立樣本 t 檢定、單因子變異數分析、皮爾森相關分析等統計方法，進行資料處理分析以考驗研究假設。

關鍵字：高科技廠房、火災、搶救分析

Research on Fire Rescue Analysis of High-tech Factory

Wang He-yuan¹ Chun-Ling Ho² Lin Zhi-Zhong³ Chen Han-Chang⁴

¹Professor, Dept. of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

²Assistant Professor, College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen, China.

³Technician, Construction and Maintenance Division, Office of General Affairs, Kaohsiung Medical University

⁴Master student, Dept. of Civil Engineering, Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

Taiwan's technology industry is booming, and high-tech factory buildings are increasing day by day. The buildings are quite different from ordinary factories. When a fire occurs, it is a big crisis for firefighters. In addition, there are fewer internal openings and the smoke cannot be exhausted smoothly. In addition to injuries during the rescue process, it is more likely to cause firefighters to be trapped in the fire scene.

This article discusses the object analysis of high-tech factory buildings, fire protection information rights, fire occurrence, pre-dispatch and rescue command operations, and firefighters performing fire rescue operations facing hazards. and establish a research framework and questionnaires. The survey was conducted by means of online questionnaires. The subjects of the questionnaire survey were personnel from the fire department of the Kaohsiung City Government.

Finally, 174 valid samples were collected. The results of the questionnaire were analyzed to the research hypothesis through statistical methods such as descriptive statistics analysis, independent-sample t-test, one-way anova, and analysis of correlation.

Keywords: high-tech factory, fire, rescue analysis

一、前言

1-1 研究背景與動機

台灣工業發展快速，各縣有許多產業園區，包括由中華民國經濟部主管的工業區(工業局轄)及加工出口區(加工出口區管處轄)、科技部主管的科學工業園區、行政院農業委員會主管的農業生物科技園區、行政院環境保護署主管的環保科技園區以及由縣市政府或民間組織設立的工業園區或工業區【1】。根據經濟部統計處統計全台灣約有 8 萬 8 仟餘家工廠【2】，各家工廠因生產需求不同，工廠空間及規模日益擴大，尤其在於高科技產業中工廠內常存放各種化學物品，在火災發生時，對於消防人員搶救上無疑是一大挑戰。

消防人員面對著各式不同的災害現場，進行各項的火災搶救，也擔心隨時突發的危急狀況，輕者導致人員皮肉損傷，重者更有可能會導致嚴重危害到自身安全。工廠火災搶救時消防人員傷亡殉職屢見不鮮，殉職人數不斷攀升，近七年來，已有 18 名消防人員於搶救工廠火警時殉職 11 人因此受傷。這幾次消防人員殉職的慘痛教訓，終於促使消防法於 108 年 11 月修法通過，針對消防員救災的「退避權」、「資訊權」及「調查權」等生命 3 權入法，維護消防人員救災安全。

分析近幾年受傷殉職的案件，其中資訊不對等是造成消防人員傷亡的一大主因，包含工廠內部結構、化學物品存放數量位置、有無人員受困位置等資訊不明確，使消防人員對火場內部不甚瞭解的狀況下而進入工廠內救災，容易使消防人員陷入危險的救災環境中。

1-2 研究目的

高科技公司工廠火警常常因為所存放原物料的不同常常造成火災不易處理，也可能進一步造成火災搶救人員的危險。曾發生過

多起高科技廠房火災案例，不但造成業者金錢損失，廠房內化學物質燃燒更會對環境造成汙染，而消防搶救人員更發生多起因搶救高科技廠房火災而受傷甚至殉職的案例。高科技廠房但發生火災，所危及的生命財產損失將無法估計。救災人員若能被早期告知可能之化學物質，更可強化自我保護之。因此，本研究除了討論事件之根本原因外，更希望喚醒相關業者及消防機關對高科技廠房工廠火警的防護意識及救災安全【3】。

本研究以「高科技廠房火災搶救分析」為目標，將在火警發生時，現場可能面臨之各項危害加以分類，並針對現職人員進行分析調查，預計達成下列之目標：基於上述研究背景與動機，透過問卷調查方式進行本研究，試圖了解消防主管之人格特質、工作壓力與工作適應之現況與關聯，並進行探討，以期達成下列目的：

- 1、加強場所自衛消防編組演練。
- 2、落實災害現場指揮體系。
- 3、火災搶救危害研判與預防。
- 4、救災車輛部署及優勢人力派遣。
- 5、落實高科技廠房消防資訊權取得。

二、文獻回顧

2-1 高科技廠房建築特性分析

高科技產業是使用尖端技術生產高技術產品的產業群。研究開發投入成本高，研究開發人員比重大的產業，為了研發高科技的產品，建造的廠房設計結構當然就不是一般的水準，唯有在建造出能夠符合產業需求的高科技半導體廠房，才能做為高科技產業往前發展的後盾，消防人員為了火災發生時可以順利完成任務，也必須了解高科技廠房建築特性，進而預防救災時可能造成的危害。而高科技廠房建築的與一般傳統工廠特別差異之處可分為下列九點【4】：

- 1、面積及量體大。
- 2、施工工期短。
- 3、空間高度高。
- 4、施工規劃複雜。
- 5、空間最大利用。
- 6、無塵室空間規劃。
- 7、複雜的安全法規需求。
- 8、存放危險化學物品種類複雜。
- 9、耐震與抗微振。

2-2 高科技廠房火災特性

高科技廠房因製程要求極精密，因此空間構造用途較一般建築物不同，空間廣大且隔間複雜，一旦災害發生，也往往造成作業人員避難逃生及外部進入內部搶救方面的困難，因此高科技廠房發生災害時潛藏著下列幾項危害特性：

- 1、密閉空間及回風系統，搶救困難。
- 2、內部結構複雜機具充斥，逃生不易搶救時易空迷失方向。
- 3、大量空氣循環，化學品洩漏擴散迅速。
- 4、氣流流動，助長火勢延燒。
- 5、化學物質繁多，人員暴露危害。
- 6、存放可燃性易體，火勢燃燒猛烈。

2-3 桃園敬鵬公司火災搶救案例探討

探討高科技廠房就必須提到桃園市平鎮區敬鵬公司 107 年發生的火警，共造成消防人員 6 人死亡、6 人輕重傷的慘劇，而這場科技廠房救災也衍伸出許多議題值得探討，更引起後續政府對消防資訊權的重視，而這場火警在內政部通盤檢討後，於 108 年公告「桃園市敬鵬工廠火災全方位檢討策進專案報告」【5】中明確指下列必須探討課題：

- 1、持續提升消防人員救災安全。
- 2、化學品資訊仍不足因應救災需要。
- 3、違章建築及防火區劃的破壞導致火災蔓延。
- 4、火勢沿製程排氣風管快速延燒。
- 5、工廠初期應變能力不足。

而報告中針對整體火災搶救過程進行調查研析，提出完整報告陳報行政院，針對這

這次火災各項安全隱憂及救災檢討提出未來策進作為，包含增訂救災安全規定，即消防法中資訊權與退避權規定，並修正「毒性化學物質管理法」及「工廠危險物品申報辦法」，訂定「使用化學品工廠或倉儲應提供廠區化學品種類及數量配置圖行政指導綱領」，使化學品資訊揭露更加完整，使救災資訊更加落實。另對防火區劃及自衛消防編組亦更加強化，提升自主救災能力。

2-4 消防搶救資訊權相關法令

消防資訊權於敬鵬火災發生前，大多消防單位不論在平時管理或是救災當下均落於被動狀態，許多廠商以商業機密為由不願圖資及化學品種類，乃至於消防單位無法及時掌握正確資訊，於火災發生時無正確圖資可供消防人員進入火場救災，現場也無熟悉廠區狀況的廠方人員到場協助提供資訊，導致高科技廠房救災時多次發生消防人員受傷殉職事件，而於敬鵬火災發生後消防署痛定思痛，針對多項消防資訊權修法，保障消防人員資訊取得，降低火災發生時救災危害，以下為有關消防資訊取得相關法令：

- 1、消防法第 21-1 條：
 - (1) 消防指揮人員搶救工廠火災時，工廠之管理權人應依下列規定辦理：
 - (2) 提供廠區化學品種類、數量、位置平面配置圖及搶救必要資訊。
 - (3) 指派專人至現場協助救災。
- 2、毒性及關注化學物質管理法第 71 條：

直轄市、縣(市)主管機關於運作人申請毒性化學物質及關注化學物質運作許可、登記或核可時，應依防制污染環境或危害人體健康之必要，要求運作人申報運作場所全廠(場)及內部配置圖；其運作經審核通過者，並應將運作場所全廠(場)及內部配置圖副知消防機關。
- 3、使用化學品工廠或倉儲應提供廠區化學品種類及數量配置圖行政指導綱領。

三、研究設計

3-1 研究架構與假設建立

本研究目的的主要為探討高科技廠房之

「客體分析」、「消防資訊權」、「火災發生」、「派遣與搶救指揮作業」、「火場搶救危害」之影響關係。爰此，根據前述文獻回顧探討與理論基礎，創建本研究架構如圖 1 所示。

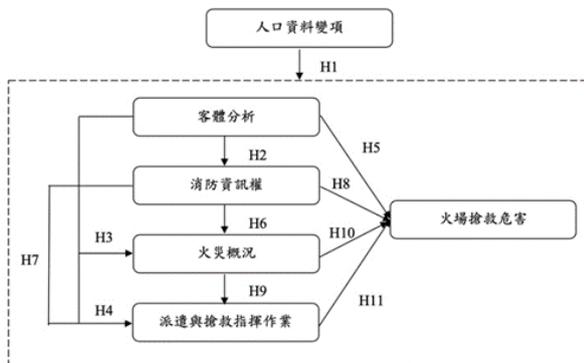


圖 1 研究架構

該架構內容包含「客體分析」、「消防資訊權」、「火災發生」、「派遣與搶救指揮作業」、「高科技廠房火場搶救危害」等五個構面及十一項研究假設，以進行假設檢驗人口基本資料對各構面因素之差異性及關聯性之探討，如表 1 所示。

表 1 研究假設內容

假設	假設內容
H1	人口基本資料對「客體分析」、「消防資訊權」、「火災發生」、「派遣與搶救指揮作業」、「火場搶救危害」呈現顯著差異。
H1-1	年齡對「五個構面」呈現顯著差異。
H1-2	服務年資對「五個構面」呈現顯著差異。
H1-3	教育程度對「五個構面」呈現顯著差異。
H1-4	職務類別對「五個構面」呈現顯著差異。
H2	客體分析與消防資訊權有顯著相關。
H3	客體分析與火災發生有顯著相關。
H4	客體分析與派遣與搶救指揮作業有顯著相關。
H5	客體分析與火場搶救危害有顯著相關。
H6	消防資訊權與火災發生有顯著相關。
H7	消防資訊權與派遣與搶救指揮作業有顯著相關。
H8	消防資訊權與火場搶救危害有顯著相關。
H9	火災發生與派遣與搶救指揮作業有顯著相關。
H10	火災發生與火場搶救危害有顯著相關。
H11	派遣與搶救指揮作業與火場搶救危害有顯著相關。

3-2 研究問卷編製

依據本研究架構與假設之建立，此問卷調查內容分為二大部份，首先為個人背景資

料，受測者之基本資料題目設計以名義尺度進行量測，其調查項目分別為：(1)年齡：分為「30 歲以下」、「31-40 歲」、「41-50 歲」、「51 歲以上」；(2)服務年資：分為「10 年以下」、「11-20 年」、「21-30 年」、「31 年以上」；(3)教育程度：分為「高中/職」、「專科」、「大學」、「研究所以以上」；(4)職務別：分為「外勤主管職務」、「內勤主管職務」。

另一部份為高科技廠房之「客體分析」、「消防資訊權」、「火災發生」、「派遣與搶救指揮作業」、「火場搶救危害」之題目，問卷採用李克特 (Likert) 五點尺度評量方式，請受測者認定該題目之認同程度，依其感受或最貼近自身實際情形進行勾選。每一道題目配分為「非常同意」給予 5 分、「同意」給予 4 分、「普通」給予 3 分、「不同意」給予 2 分、「非常不同意」給予 1 分。

3-3 研究對象與抽樣方法

為考量研究執行期程與資料收集之便利性，問卷調查範圍以高雄市政府消防局為主，而問卷發放對象以高雄市政府消防局分隊長以上分隊長以上指揮官、小隊長、隊員為主。

本研究採用分層抽樣(stratified sampling)方式進行樣本之選取及量表施測，預計發放問卷樣本數共計 200 份。由研究人員以郵寄問卷發放方式，填寫完可採用回郵或寄發 E-mail 等方式回收。

3-4 資料分析方法

依據研究所得調查數據資料，運用統計套裝軟體「SPSS」進行分析探討，茲將主要運用之統計方法與步驟分述如下：

- 敘述性統計分析主要以問卷中人口變項資料與「客體分析」、「消防資訊權」、「火災發生」、「派遣與搶救指揮作業」、「火場搶救危害」等五個構面，進行樣本次數分配分析，以瞭解樣本資料變項之分布情形。
- 信度為測量的可靠性，係指測量結果的一致性或穩定性，亦可視為測驗結果受測量誤差影響之程度。
- 效度是指衡量是否能正確地測出所需衡

量之特質或功能程度，即測驗之題目內容是否周延、具代表性、適切性、並確實包含所欲測量主題的內涵。

- 單因子變異數分析主要探討「年齡」、「服務年資」、「教育程度」、「職務別」在五個構面「客體分析」、「消防資訊權」、「火災發生」、「派遣與搶救指揮作業」、「火場搶救危害」之差異情形。
- 皮爾森相關分析為探討高科技廠房之「客體分析」、「消防資訊權」、「火災發生」、「派遣與搶救指揮作業」、「火場搶救危害」等五個構面間之相關性。

四、樣本資料分析

4-1 問卷發放與回收

本研究共回收 198 份問卷，扣除無效問卷共 24 份，主要是因填答時間過短或整份問卷僅填寫單一答案者，判斷該等問卷品質可虞，而逕予刪除，冀從此問卷所調查之數據，能呈現最真實之現況。最後，有效問卷共計 174 份，有效問卷比率為 87.9%。針對受測者基本資料進行敘述性統計分析，彙整如表 2。

受測者人口變項統計上，年齡以 31 歲~40 歲(38.5%)最多；服務年資以 10 年以下(40.8%)最多；教育程度以大學(46%)居多；職務類別以隊員(59.2%)居多。

表 2 受測者個人基本資料分析

基本資料	項目	樣本數	百分比
年齡	30 歲以下	45	25.9
	31-40 歲	67	38.5
	41-50 歲	42	24.1
	51 歲以上	20	11.5
服務年資	10 年以下	71	40.8
	11-20 年	57	32.8
	21-30 年	42	24.1
	31 年以上	4	2.3
教育程度	高中/職(含以下)	8	4.6
	專科	48	27.6
	大學	80	46.0
	研究所以上	38	21.8
職務別	隊員	103	59.2
	小隊長	28	16.1
	分隊長以上指揮官	43	24.7

由表 3 顯示高科技廠房客體分析中以「防火區劃制度」平均數分為 3.58，顯示認同程度最低，說明高科技廠房防火區劃落實程度應再加強。

表 3 客體分析因素敘述性統計分析

構面因素	平均數
內部存放化學物品狀況	4.44
使用面積狀況	4.48
內部建築型態	4.33
防火區劃制度	3.58

由表 4 顯示高科技廠房客體分析中以各項因素平均數均 3.09~3.55 之間，說明消防資訊權內五項因素均應持續加強。

表 4 消防資訊權因素敘述性統計分析

構面因素	平均數
各消防分隊針對轄內科技廠房消防圖資定期更新程度	3.48
業者能否及時派員到場協助提供救災資訊	3.05
業者派員到場後是否能提供消防救災有效資訊	3.22
廠方提供消防救災有關資訊圖資落實程度	3.55
高科技廠房現有消防圖資內容與救災行動需求符合程度	3.09

由表 5 顯示高科技廠房火災概況以「高科技廠房使用者防火防災意識」平均數分為 2.79，顯示認同程度最低，說明消防單位人員普遍認為高科技廠房使用者防火意識不足，應加強業者防火觀念。

表 5 火災概況因素敘述性統計分析

構面因素	平均數
高科技廠房使用者防火防災意識	2.79
高科技廠房內部員工對於自身消防安全設備瞭解程度	3.21
消防人員對高科技廠房發生火災猛烈程度	4.09
高科技廠房發生火災後，結構物坍塌情形	3.18
高科技廠房火災發生時，火勢擴大燃燒與蔓延情形	3.82
高科技廠房發生火災後，廠商自衛消防編組作業情形	3.34

由表 6 顯示派遣與搶救指揮作業以「消防救災工作現場無線電功能發揮情形」平均數分為 2.99，顯示認同程度最低，說明火災現場應加強現場無線電通訊以利指令下達及人員位置回報。

表 6 派遣與搶救指揮作業因素敘述性統計分析

構面因素	平均數
消防救災救護指揮中心案件派遣時，是否能準確告知為高科技廠房	3.60
消防人員對於高科技廠房火災第一時間搶救是否派出大量人力進行救災	4.01
消防人員對指揮官調度與指揮能力評估	4.29
消防救災指揮官隊救災現場水源調度狀況	3.90
消防救災指揮官對於高科技廠房救災資訊掌握及人力派遣落實程度	3.87
消防救災指揮官調派照明設備協助救災工作落實程度	4.24
消防救災工作分區指揮官作業功能發揮程度	4.22
消防救災工作現場無線電功能發揮情形	2.99
瞭解消防救災救護指揮中心案件派遣時，是否能準確告知為高科技廠房	3.60

由表 7 顯示火場搶救危害各項因素均平均數均達 4 分以上，其中以「高科技廠房入內搶救時，遭內部危險物品危害情形」平均數為 4.48 為最高，說明受測者認為高科廠房搶救時內部危險物品係重要危害因素認同程度最高。

表 7 火場搶救危害因素敘述性統計分析

構面因素	平均數
高科技廠房破門進入遭受火勢竄出危害情形	4.05
高科技廠房破門進入遭觸電危害情形	4.25
高科技廠房破門進入遭結構坍塌及掉落物危害情形	4.14
高科技廠房破門進入遭高溫影響導致無法搶救情形	4.28
高科技廠房入內搶救遭高溫危害情形	4.35
高科技廠房入內搶救時，遭內部危險物品危害情形	4.48
高科技廠房入內搶救時，現場水量不足導致危害情形	4.01
高科技廠房入內搶救時，遭掉落物危害情形	4.26
高科技廠房入內搶救時，因結構破壞坍塌造成危害情形	4.09
高科技廠房入內搶救時，因內部空間隔間複雜、機台阻礙而迷失方向造成危害情形	4.39
高科技廠房進入無塵室搶救時，因架高地板燒毀導致墜落危害情形	4.18

4-2 信度與效度分析

本研究各量表主要採用之信度分析方法為 Cronbach's α 值分析法，如表 8 所示，可顯見量表構面平均 Cronbach's α 值均大於 0.70，具高度可靠性與穩定度。

表 8 問卷構面整體信度分析

構面名稱	Cronbach's α 值
客體分析	0.792
消防資訊權	0.828
火災發生	0.811
派遣與搶救指揮作業	0.868
火場搶救危害	0.888

專家效度方面邀請 5 位曾任不同層級且具內、外勤豐富經驗之消防幹部及專家學者針對問卷題型表中之內容、表達意思邏輯、題型是否適合等進行審查後給予建議修正，以建立本問卷之專家效度，經彙整專家學者之建議，刪除不適合之內容題型及調整題序，經專家效度程序後完成問卷題項共 34 題。

4-3 人口變項對各構面之差異分析

為探討不同人口背景變項與高科技廠房之「客體分析」、「消防資訊權」、「火災發生」、「派遣與搶救指揮作業」、「火場搶救危害」構面間差異性分析，利用單因子變異數分析進行檢測，若差異達顯著水準，則採用 Scheffé 檢定進行事後比較以瞭解差異情形。檢定結果如表 9、表 10、表 11、表 12 所示。

人口變項之「年齡」對「派遣與搶救指揮作業」、「火場搶救危害」構面呈現顯著差異。在「派遣與搶救指揮作業」方面，「51 歲以上」優於「30 歲以下」、「31~40 歲」、「41~50 歲」；在「火場搶救危害」方面，「31~40 歲」優於「30 歲以下」；「41~50 歲」優於「30 歲以下」；「51 歲以上」優於「30 歲以下」、「31~40 歲」、「41~50 歲」。推論原因為消防工作經驗隨著年齡增長，在高科技廠房救災經驗與指揮決策經驗能力較其他年齡之消防人員高，對科技廠房救災危害之認知較多，因而有所差異。

表 9 不同年齡在各構面之差異分析表

構面	年齡	F 值	顯著性	事後比較
客體分析	①30 歲以下	2.380	.071	-
	②31-40 歲			
	③41-50 歲			
	④51 歲以上			
消防資訊權	①30 歲以下	2.624	.052	-
	②31-40 歲			
	③41-50 歲			
	④51 歲以上			
火災發生	①30 歲以下	2.274	.082	-
	②31-40 歲			
	③41-50 歲			
	④51 歲以上			
派遣與搶救指揮作業	①30 歲以下	6.766	.000	④>① ④>② ④>③
	②31-40 歲			
	③41-50 歲			
	④51 歲以上			
火場搶救危害	①30 歲以下	10.953	.000	②>① ③>① ④>① ④>② ④>③
	②31-40 歲			
	③41-50 歲			
	④51 歲以上			

表 10 不同服務年資在各構面之差異分析表

構面	服務年資	F 值	顯著性	事後比較
客體分析	①10 年以下	2.738	.055	-
	②11-20 年			
	③21-30 年			
	④31 年以上			
消防資訊權	①10 年以下	.478	.698	-
	②11-20 年			
	③21-30 年			
	④31 年以上			
火災發生	①10 年以下	.673	.569	-
	②11-20 年			
	③21-30 年			
	④31 年以上			
派遣與搶救指揮作業	①10 年以下	5.316	.002	③>①
	②11-20 年			
	③21-30 年			
	④31 年以上			
火場搶救危害	①10 年以下	4.484	.005	③>①
	②11-20 年			
	③21-30 年			
	④31 年以上			

人口變項之「服務年資」對「派遣與搶救指揮作業」、「火場搶救危害」構面呈現顯著差異。在「派遣與搶救指揮作業」方面及「火場搶救危害」方面，均呈現「21~30 年」優於「10 年以下」。推論原因為救災消防之工作特性，屬較為危險且每一任務皆為專案相似度不高，派遣與指揮作業決策及火場搶救危害

認知與救災經驗息息相關，需花費相當之時間累積，因此服務年資較多之消防人員派遣與搶救指揮作業決策及火場搶救危害認知，較服務年資較少者佳。

人口變項之「教育程度」對「客體分析」、「派遣與搶救指揮作業」及「火場搶救危害」構面呈現有顯著差異。在「客體分析」方面，「研究所(含以上)」優於「高中職(含以下)」、「專科」、「大學」。在「派遣與搶救指揮作業」方面，「研究所(含以上)」優於「專科」。在「火場搶救危害」方面，「大學」優於「專科」；「研究所(含以上)」優於「專科」。推論原因為教育程度為研究所以以上之消防人員其理解能力和學習能力更好，掌握的專業知識越高，在高科技廠房火災搶救客體認知較高，因此高科技廠房火災搶救客體分析、派遣與搶救指揮作業決策、火場搶救危害認知以教育程度為「研究所以以上」之消防人員為佳。

表 11 不同教育程度在各構面之差異分析表

構面	教育程度	F 值	顯著性	事後比較
客體分析	①高中/職(含以下)	8.284	.000	④>① ④>② ④>③
	②專科			
	③大學			
	④研究所以以上			
消防資訊權	①高中/職(含以下)	1.973	.120	-
	②專科			
	③大學			
	④研究所以以上			
火災發生	①高中/職(含以下)	.789	.502	-
	②專科			
	③大學			
	④研究所以以上			
派遣與搶救指揮作業	①高中/職(含以下)	4.524	.004	④>②
	②專科			
	③大學			
	④研究所以以上			
火場搶救危害	①高中/職(含以下)	8.775	.000	③>② ④>②
	②專科			
	③大學			
	④研究所以以上			

人口變項之「職務別」對所有構面均呈現顯著差異。且五個構面均呈現「小隊長」優於「隊員」、「分隊長以上指揮官」。其原因可能係職務別為小隊長之受測者乃係管理階層人員，且多半於科技廠房轄區年資較深，具有一定之救災經驗與工作經歷，不論對於科

技廠房救災的認知及火場派遣調度指揮抑或是火場危害皆有豐富的經驗，而職務別為隊員及分隊長以上指揮官，可能調動較為頻繁救災經歷稍嫌不足，故在高科技廠房火災搶救上小隊長較隊員及分隊長以上指揮官高。

表 12 不同職務別在各構面之差異分析表

構面	職務別	F 值	顯著性	事後比較
客體分析	①隊員	10.532	.000	②>① ②>③
	②小隊長			
	③分隊長以上指揮官			
消防資訊權	①隊員	4.097	.018	②>① ②>③
	②小隊長			
	③分隊長以上指揮官			
火災發生	①隊員	6.646	.002	②>① ②>③
	②小隊長			
	③分隊長以上指揮官			
派遣與搶救指揮作業	①隊員	12.822	.000	②>① ②>③
	②小隊長			
	③分隊長以上指揮官			
火場搶救危害	①隊員	18.585	.000	②>① ②>③
	②小隊長			
	③分隊長以上指揮官			

4-4 各構面間相關分析

本節依據研究目的，使用皮爾森相關分析以檢測理論模型中「客體分析」、「消防資訊權」、「火災發生」、「派遣與搶救指揮作業」、「火場搶救危害」構面間之相關程度，其分析結果如表 13 所示。

(一)「客體分析」與其他構面之相關性：

1. 「客體分析」與「消防資訊權」之 $r = .227$, $P = .002$ ，顯示兩者之間具有低度正相關，即高科技廠房火災搶救之「客體分析」愈高，則其「消防資訊權」愈高。
2. 「客體分析」與「火災發生」之 $r = .207$, $P = .006$ ，顯示兩者之間具有低度正相關，即高科技廠房火災搶救之「客體分析」愈高，則其「火災發生」愈高。
3. 「客體分析」與「派遣與搶救指揮作業」之 $r = .578$, $P = .000$ ，顯示兩者之間具有中度正相關，即高科技廠房火災搶救之「客體分析」愈高，則其「派遣與搶救指揮作業」愈高。
4. 「客體分析」與「高科技廠房火場搶救危害」之 $r = .538$, $P = .000$ ，顯

示兩者之間具有中度正相關，即高科技廠房火災搶救之「客體分析」愈高，則其「高科技廠房火場搶救危害」愈高。

(二)「消防資訊權」與其他構面之相關性：

1. 「消防資訊權」與「火災發生」之 $r = .496$, $P = .000$ ，顯示兩者之間具有中度正相關，即高科技廠房火災搶救之「消防資訊權」愈高，則其「火災發生」愈高。
2. 「消防資訊權」與「派遣與搶救指揮作業」之 $r = .451$, $P = .000$ ，顯示兩者之間具有中度正相關，即高科技廠房火災搶救之「消防資訊權」愈高，則其「派遣與搶救指揮作業」愈高。
3. 「消防資訊權」與「高科技廠房火場搶救危害」之 $r = .219$, $P = .004$ ，顯示兩者之間具有低度正相關，即高科技廠房火災搶救之「消防資訊權」愈高，則其「高科技廠房火場搶救危害」愈高。

(三)「火災發生」與其他構面之相關性：

1. 「火災發生」與「派遣與搶救指揮作業」之 $r = .408$, $P = .000$ ，顯示兩者之間具有中度正相關，即高科技廠房火災搶救之「火災發生」愈高，則其「派遣與搶救指揮作業」愈高。
2. 「火災發生」與「高科技廠房火場搶救危害」之 $r = .342$, $P = .000$ ，顯示兩者之間具有中度正相關，即高科技廠房火災搶救之「火災發生」愈高，則其「高科技廠房火場搶救危害」愈高。

(四)「派遣與搶救指揮作業」與其他構面之相關性：

1. 「派遣與搶救指揮作業」與高科技廠房火場搶救危害」之 $r = .625$, $P = .000$ ，顯示兩者之間具有中度正相關，即高科技廠房火災搶救之「派遣與搶救指揮作業」愈高，則其高科技廠房火場搶救危害」愈高。

表 13 各構面間皮爾森相關分析

		客體分析	消防資訊權	火災發生	派遣與搶救指揮作業	火場搶救危害
客體分析	皮爾森相關	1	.229**	.207**	.578**	.538**
	顯著性		.002	.006	.000	.000
消防資訊權	皮爾森相關	.229**	1	.496**	.451**	.219**
	顯著性	.002		.000	.000	.004
火災發生	皮爾森相關	.207**	.496**	1	.408**	.342**
	顯著性	.006	.000		.000	.000
派遣與搶救指揮作業	皮爾森相關	.578**	.451**	.408**	1	.625**
	顯著性	.000	.000	.000		.000
火場搶救危害	皮爾森相關	.538**	.219**	.342**	.625**	1
	顯著性	.000	.004	.000	.000	

**：相關性在 0.01 層上顯著（雙尾）。

4-5 研究假設驗證

本研究為探討人口變項對於各構面間之顯著性差異及「客體分析」、「消防資訊權」、「火災發生」、「派遣與搶救指揮作業」、「火場搶救危害」等構面變項間之相關分析；並以單因子變異數分析及 Pearson 相關分析等研究方法來驗證研究假設是否成立，其結果如表 14 所示。

表 14 研究假設驗證結果表

五、結論與建議

5-1 結論

1. 消防人員之「年齡」對於高科技廠房「派遣與搶救指揮作業」、「火場搶救危害」呈現有顯著差異具有顯著差異存在。
2. 消防人員之「服務年資」對於高科技廠房「派遣與搶救指揮作業」、「火場搶救危害」呈現有顯著差異具有顯著差異存在。
3. 消防人員之「教育程度」對於高科技廠房「客體分析」、「派遣與搶救指揮作業」、「火場搶救危害」呈現有顯著差異具有顯著差異存在。
4. 消防人員之「職務別」對於高科技廠房「客體分析」、「消防資訊權」、「火災概況」、「派遣與搶救指揮作業」、「火場搶救危害」呈現有顯著差異具有顯著差異存在。
5. 高科技廠房火災搶救五項構面均有正相關

性。

假設	假設內容	顯著性	驗證結果
H1	人口基本資料對「客體分析」、「消防資訊權」、「火災發生」、「派遣與搶救指揮作業」、「火場搶救危害」呈現顯著差異。	如下所示	部分成立
H1-1	年齡對「五個構面」呈現顯著差異。	「派遣與搶救指揮作業」、「火場搶救危害」有顯著差異	部分成立
H1-2	服務年資對「五個構面」呈現顯著差異。	「派遣與搶救指揮作業」及「火場搶救危害」有顯著差異	部分成立
H1-3	教育程度對「五個構面」呈現顯著差異。	「客體分析」、「派遣與搶救指揮作業」、「火場搶救危害」有顯著差異	部分成立
H1-4	職務類別對「五個構面」呈現顯著差異。	五個構面均有顯著性差異	成立
H2	客體分析與消防資訊權有顯著相關。	低度正相關	成立
H3	客體分析與火災發生有顯著相關。	低度正相關	成立
H4	客體分析與派遣與搶救指揮作業有顯著相關。	中度正相關	成立
H5	客體分析與火場搶救危害有顯著相關。	中度正相關	成立
H6	消防資訊權與火災發生有顯著相關。	中度正相關	成立
H7	消防資訊權與派遣與搶救指揮作業有顯著相關。	中度正相關	成立
H8	消防資訊權與火場搶救危害有顯著相關。	低度正相關	成立
H9	火災發生與派遣與搶救指揮作業有顯著相關。	中度正相關	成立
H10	火災發生與火場搶救危害有顯著相關。	中度正相關	成立
H11	派遣與搶救指揮作業與火場搶救危害有顯著相關。	中度正相關	成立

5-2 建議

1. 建議消防機關於高科技廠房火災搶救，應加強現場無線電通訊，使救災指揮體系充分發揮；並善用職務、年資等差異，賦予有效的適合的任務能使得火災搶救更佳安全且順利；而救災救護指揮中心接獲報案後，若在第一時間派遣出優勢人力及裝備，加上現場消防搶救資訊落實取得，消防搶救人力更能夠執行正確的救災任務。
2. 建議轄區內有高科技廠房場所之消防分隊，平時應加強對於高科技廠房場所的瞭解程度，及資訊權的落實且定時更新，能夠使得火災發生時的指揮派遣能夠更加順利並

有效降低火場危害。且指揮官在災害現場扮演著相當重大的角色，當指揮官在下達各項救災戰略，派遣救災人員進入火場進行各項搶救工作時，更需必須更加考量高科技廠房火災搶救當下環境威脅，來做出正確之判斷。

參考文獻

1. 經濟部工業局台灣工業用地供給與服務資訊網站 105 年度工業區開發管理年報。
2. 經濟部統計處網站 107 年統計資料。
3. 陳祐康、邱志湧、林宏鋅、哈多吉、何憲欽(2012)，以根本原因分析解析高科技廠房火災事件。
4. 李宗軒(2019)，高科技半導體廠之地上工程，土木水利 46 卷 6 期，中國土木水利工程學會。
5. 桃園市敬鵬工廠火災全方位檢討策進專案報告(2019)，內政部。

高雄市桃園區某國民小學校舍興建工程價值工程之探討

溫富霖¹ 陳嘉凱² 王和源³

¹ 國立高雄科技大學土木工程系碩士研究生

² 國立高雄科技大學土木工程系學士

³ 國立高雄科技大學土木工程系特聘教授

摘要

臺灣的工程日益更新，對於工程要求也越佳重視，不僅要顧及施工品質外，也要針對工程之機能、進度和成本進行最佳之規劃，因此工程價值的運用在工程中也變得相對重要，除了要能有效提升機能外也要降低建物成本，以達到工程之最佳化。本研究是利用高雄市桃園區建山國民小學校舍之興建工程來做案例，運用價值工程分析法(Value Engineering, VE)探討鋼筋混凝土結構與鋼骨鋼筋混凝土結構的適用性，其中也包括耐震評估、自重問題、環保問題、實用空間、外觀設計、成本造價等，並透過分數矩陣和權重評估來做相互比較分析，以探討本案之工程機能價值改善，日後也可運用在相關之建築工程上，提升工程機能價值。

關鍵字：價值工程、校舍興建、機能評估

Discussion on the Application of Value Engineering to Primary School Building on Taoyuan Kaohsiung City

Fu-Lin Wen¹ Jia-Kai Chen² Hez-Yung Wang³

¹Institute of Civil Engineering and Disaster Prevention, National Kaohsiung University of Science and Technology

²Institute of Civil Engineering and Disaster Prevention, National Kaohsiung University of Science and Technology

³Institute of Civil Engineering and Disaster Prevention, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

In addition to the construction quality, it is also necessary to make the best planning for the function, progress, and cost of the project. Therefore, the use of engineering value has become relatively important in the project, not only to effectively improve the function but also to reduce the cost of the building in order to achieve the optimization of the project. This study uses the construction project of Jianshan Elementary School in the Taoyuan District of Kaohsiung City as a case study, and uses Value Engineering (VE) to investigate the applicability of reinforced concrete and steel reinforced concrete structures, including seismic evaluation, self-weight, environmental protection, usable space, exterior design, and cost, etc., and compares them with each other through fractional matrix and weight evaluation. We also compare and analyze each other through fractional matrix and weight evaluation to explore the improvement of engineering function value in this case, which can be applied to related construction projects in the future to enhance the engineering function value.

Keywords: value engineering, campus construction, function evaluation

一、前言

價值工程主要是為了探討工程之機能、進度和成本，並在不影響工程之情況下，讓工程能達到最高價值之管理技術，並且在工程中應用的越早效果也會越佳顯著，是協助決策者做規劃之最佳工具。透過了解價值工程研析的架構如圖 1 所示，讓工程能在短時間內提升機能，這也是價值工程的核心。本案例中建山國民小學屬於高雄市偏遠山區小學，莫拉克颱風後，校舍遭受大風雨侵襲，建築物及設備多處受損，影響學生學習與安全至遠，因此急需迫切改善，原先工程是以鋼筋混凝土構建造校舍，但因考量鋼筋混凝土其安全性，且工期長、維護不易，故將利用價值工程分析法選擇最適合之方案進行效益分析。

二、研析標的說明

由於全球物價持續攀升，其施工技術也不斷更新，在建造每一個設計方案時，都先需考量到其成本價值，本研究以機能為主，興建安全、安靜耐熱通風防颱的居住空間為目標，並主要在建設期內考量如何降低成本、節省工期及維持良好機能為目標，通過價值工程之分析，進行本案設施機能之評估和比較，最後提出結論。

三、研究方法與流程

透過價值工程研析步驟分成六階段包含，準備作業、資料蒐集、創意階段、判斷階段、發展階段和建議階段等過程。

(一) 準備作業：

準備作業主要與原規劃者進行討論，以增進對原規劃能充分了解，就相關資料詳細研讀並加以分析，包括本工程之規劃設計服務建議書、初步規劃報告書及相關簡報等資料，並參考各階段會議及審查意見變化始末及目前狀況，作為研析之參考。

(二) 資料蒐集

經由小組先行討論出基地位置及校舍面積，小組同仁開始收集、討論及

延析相關資料，並考量其校舍是否符合安全性、機能性，參與成員詳細閱讀相關資料及找尋網路及書刊資料作初步討論，以討論出功能之主要機能、次要機能及成本價格以利本案進行研析。

(三) 創意階段

以小組討論出研析範圍及機能分析為基礎後，提出四大方案進行初步比較 1.鋼筋混凝土結構 2.鋼骨鋼筋混凝土結構 3.鋼骨結構 4.加強磚造結構。

(四) 判斷階段

本階段針對工程結構之安全性、工期、使用性、施工難易度、維護性等來進行評分，並透過權重評估表、分數矩陣表和方案構想評估矩陣來求得最後之總分。

(五) 發展階段

本階段根據判斷階段評估後，依照校舍建造之方案比較，在本階段中針對各建議方案分別計算其相關機能。

(六) 建議階段

本階段探討針對最優之方案來進行最後之分析，並提出為何為最佳之方案，能對工程造成何種改善，提升何種工程機能，最後提出建議構想。

四、研究內容與討論

(一) 個案研析過程

本階段對「建山國民小學校舍興建工程」個案蒐集基地位置、校舍面積、工程圖、工程規範等，供小組充分了解基本工程資料，從而有利後續進行討論分析。

(二) 個案資料階段

建山國民小學位於高雄市偏遠山區，圖 2 所示，學校班級數為國小部 6 班，國幼班 1 班，全校學生均屬布農族原住民孩子，學校目前僅有 14 間教室，學校教學及相關空間數量嚴重不足。莫拉克颱風後，校舍遭受大風雨侵襲，建築物及設備多處受損，影響學生學習與安全至遠，因此急需迫切改善，以提

供全體師生一處安全無虞的校園教學環境，本工程於 102 年 3 月 13 日開工(契約工期為 240 工作天)，因山區天候影響及辦理建築執照變更設計之故，本工程於 103 年 4 月底全部工項施作完畢，並於 103 年 6 月 13 日完竣。

(三) 個案創意階段

本階段透過小組討論，將蒐集到的資料進行研析，並對提出之四個方案進行細部分析其優劣。

方案一:鋼筋混凝土結構-施工品質較易控制，但工期長、人工成本日益攀升且自重、美觀較差、不易維護。

方案二:鋼骨鋼筋混凝土結構-施工品質較易控制，工期短、使用空間大、安全性佳、易維護、價格高。

方案三:鋼骨結構-結構較為堅固且耐震性佳、耐火性不佳、隔音差、工期短。

方案四:加強磚造結構-價錢低廉、取材容易但工期短、空間小、強度低及變化性差。

(四) 個案判斷段

本階段將運用到系統評估，以達到價格合理、建築美觀，工期縮短、人力降低、增加使用空間、提高安全性、考量施工難易度及校舍日後維護方面，選擇一種較佳之建議方案，在考量六大方案之後經由各組組員討論後，篩選其中的四大評估，方案利用權重評估表，如表 1 所示，分數矩陣表，如表 2 所示，方案構想，如表 3 所示，及評估矩陣表，如表 4 所示，來評議，本計劃案為考量其安全性、工期、使用性、維護性，故將較不符合其機能性的鋼筋混凝土構造之方案刪除分析，僅以鋼骨鋼筋混凝土來進行判斷。

(五) 個案發展階段

根據判斷階段評估後，依照校舍建造之方案比較後，在本階段中針對各建議方案分別計算其相關機能，計算所得之何種方案成本價格最為經濟，原本設計計畫為鋼筋混凝土，經過權重評估表得知以鋼骨鋼筋混凝土結構總分數為 144，如表 4。

(六) 個案建議階段

本案最後依照各項權重評估及成本計算後，依據高雄市建造執照工程造價公告價格計算出各方案之總成本價。原先設計方案鋼筋混凝土構造總金額為 5214000 元，採鋼骨鋼筋混凝土結構，在總成本單價為 5422988 元，鋼骨鋼筋混凝土結構較其他比較方案其機能性較為適合:鋼骨鋼筋混凝土結構其安全性、施工時間、使用空間、維護性皆優於其他方案，故本設計採鋼骨鋼筋混凝土結構為最佳價值工程方案。

五、結論

1. 本案例運用價值工程分析，經過資料收集、創意、判斷等階段，綜合考量整體工程需求後，經各項項目互相比對後，確認鋼骨鋼筋混凝土結構為可行性方案。
2. 經過價值分析評估後，得鋼骨鋼筋混凝土權重評估較優於原方案，雖價格比混凝土構造高一點但機能上較佳，固選定鋼骨鋼筋混凝土結構為最佳方案。
3. 原案為鋼筋結構成本總金額 5,214,000 元，鋼骨鋼筋混凝土結構成本總金額為 5,422,388 元，其總成本差異為 208,388 元，但其安全性、工期、施工難易度、維護性、皆大幅提高原設計鋼筋混凝土設計方案。

參考文獻

1. Jing Tao,Suiran Yu “Product Life Cycle Design for Sustainable Value Creation:Methods of Sustainable Product Development in the Context of High Value Engineering ” Procedia CIRP,Vol69,Pages25-30,2018.
2. StefanBock,MarkusPutz“Implementing ValueEngineering based on a multidimensional quality-oriented control calculus within a Target Costing and Target Pricing approach ”International Journal of Production

Economics, Vol183, PartA, Pages146-158, January 2017.

3. 吳義川、張柏毅，「價值工程與專案成本作業」，中鼎月刊，第 26~33 頁，2002。
4. 辛其亮，「如何應用價值工程成本分析方法於工程計畫成本管控」，土木水利半月集，第 12 集，第 22~35 頁，2001。
5. 劉慶尚，「價值工程參考手冊」，台北市捷運工程局，第 13~18 頁，1992。
6. 沈文修，「價值工程及其在捷運工程之運用」，捷運技術，第 45~74 頁，2000。
7. 王和源，「價值分析專論」，國立高雄科技大學土木工程系教案，第 102~114 頁，2020。

致謝

感謝價工團隊全體組員針對國小興建案進行專業的分析，透過價工的分析，了解到一件工程案中能節省或提升多少機能，在日後的工程中，價工是不可或缺的角色，也是工程中最實用的工具。

表 1 權重評估表

判斷階段	權重評估	
	原始分數	指定權重
研析標的：興建山國小校舍		
目標、期望標準		
A 價格	7	6
B 美觀	4	3
C 工期	10	8
D 人力	2	2
E 使用空間	4	3
F 安全性	12	10
G 施工難易度	3	3
H 維護性	6	5

表 2 分數矩陣

		分數矩陣							
		B	C	D	E	F	G	H	
A	A2	C3	A2	A1	F3	A1	A/H		
	B	C2	D1	B/F	F2	B2	B/H		
		C	C2	C1	C/F	C/G	H2		
			D	E2	F2	D/G	H1		
				E	F1	E1	E/H		
					F	F1	F1		
						G	G1		
								H	

重要程度
高度 3
中度 2
低度 1

表 3 構想比較圖

構想	優點	缺點
鋼骨結構	1.結構所佔體積少	1.鋼材耗用大
	2.施工期短	2.易生鏽
	3.結構自重輕	3.需特殊人員
	4.施工精度佳	4.美觀性較差
	5.耐震性佳	5.隔音差
	6.空間跨距大	6.搖晃位移大
加強磚造結構	1.鋼材耗用降低	1.需特殊人員
	2.造價低廉	2.防火性差
	3.結構自重輕	3.施工品質不易控制
	4.施工期短	4.施工介面不易控制
	5.施工精度佳	5.空間小
	6.結構美觀	6.耐震性差
鋼筋混凝土構造	1.剛性大	1.結構自重大
	2.隔音性佳	2.人員及機具需求高
	3.防火性佳	3.結構所佔體積大
	4.抗壓強度大	4.混凝土用量高
	5.施工品質較易控制	5.工期長
	6.防黴性佳	6.維修不易
鋼骨鋼筋混凝土構造	1.施工期短	1.價格高昂
	2.結構自重輕	2.防火性差
	3.結構美觀	3.需特殊人員
	4.施工機具少	
	5.結構所佔體積少	
	6.耐震性好	

表 4 評估矩陣

評估矩陣							
構想	價格	美觀	工期	使用空間	安全性	維護性	
權重	6	3	8	3	10	5	
鋼筋混凝土構造	5	5	5	5	5	5	81
	4	4	4	4	4	4	
	3	3	3	3	3	3	
	2	2	2	2	2	2	
	1	1	1	1	1	1	
	小計	18	6	16	6	30	
權重	6	3	8	3	10	5	
鋼骨結構	5	5	5	5	5	5	123
	4	4	4	4	4	4	
	3	3	3	3	3	3	
	2	2	2	2	2	2	
	1	1	1	1	1	1	
	小計	18	6	32	12	40	
權重	6	3	8	3	10	5	
加強磚造結構	5	5	5	5	5	5	74
	4	4	4	4	4	4	
	3	3	3	3	3	3	
	2	2	2	2	2	2	
	1	1	1	1	1	1	
	小計	24	9	24	6	20	
權重	6	3	8	3	10	5	
鋼骨鋼筋混凝土構造	5	5	5	5	5	5	144
	4	4	4	4	4	4	
	3	3	3	3	3	3	
	2	2	2	2	2	2	
	1	1	1	1	1	1	
	小計	18	9	32	15	50	

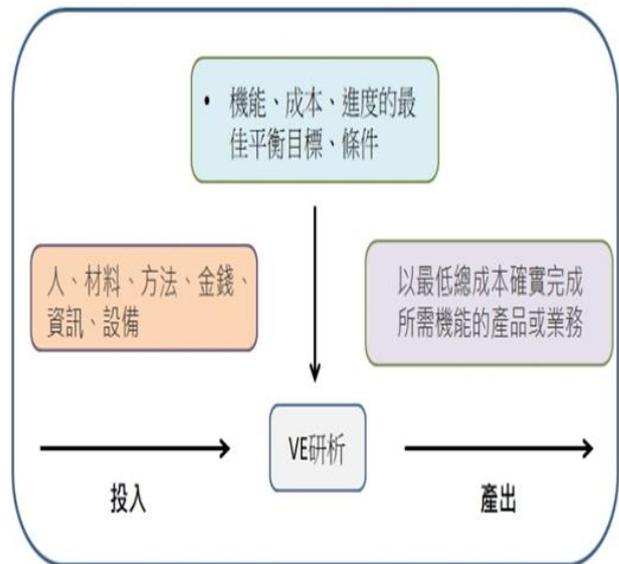


圖 1 研析方法(價值工程研析的架構)



圖 2 工程位置:高雄市桃源區建山國民小學

紅外線熱顯像儀於消防救災應用之探討

蔡宗憲¹ 陳建元²

¹臺南市政府消防局副中隊長

²國立嘉義大學土木與水資源工程學系教授

摘要

各種災害發生時第一線的處理及應變人員就是消防人員，而在各種災害中最常見的就是火災。在一個火災現場狀況瞬息萬變，火場中高溫及濃煙產生的閃燃及爆燃常常造成救災人員的傷亡。近年來臺灣各地有不少的消防人員在火場受傷甚至死亡，很多的原因是對於火場環境不熟悉、視線不良而受困火場。然而在能見度幾乎為零的高溫濃煙中搜索，就是一件非常大的挑戰，如何安全的進入火場，並且安全的離開火場變成非常的重要。紅外線熱顯像儀可以增進救災效率與保護消防人員安全，消防人員如何在最短時間內遂行有效率與安全的搶救任務，端賴高科技的搶救器材輔助，在能見度幾乎為零的高溫濃煙中搜索，紅外線熱顯像儀為其救災重要選項之一。本研究設定了 9 個救災模擬場所來進行三種搜索方式的比較，並分析其搜索救災之結果，並希望將研究成果與建議做為消防搶救人員運用紅外線熱顯像儀進行消防任務和相關單位之參考。

關鍵字：紅外線熱顯像、消防救災、人命搜索

Study of Thermal Imaging Camera for Fire Events Search and Rescue

Tsai Tsung-Hsien¹ Chen Chien-Yuan²

¹Tainan City Government Fire Bureau

²Corresponding Author, Department of Civil and Water Resources Engineering, National Chiayi University

ABSTRACT

Many types of hazards, including exposure to fire and smoke, are common disasters facing Firefighters' daily lives. Quite a few firefighters get hurt or die in a fire rescue event because they face a big challenge – searching the heat and smoke in areas in which they are unfamiliar. Although the fire floor is unpredictable, there is no time for firefighters to wait because it is their mission to save people's lives and property. However, firefighters are just normal humans with equipment; they cannot resist the thick smoke, flashover, or dark and toxic gases. Therefore, how to avoid firefighter deaths and injuries becomes a main issue. The infrared thermal imaging camera can improve the searching and rescue efficiency, and protect the safety of firefighters. How firefighters can carry out safe rescue missions in the shortest time efficiently depends on high-tech rescue equipment to assist them in high-temperature smoke without visibility. The infrared thermal imaging camera is one of the important options for disaster relief. In this study, 9 disaster relief simulation sites were set up to compare the three designed search methods, and the results of the search and disaster relief were analyzed. It is hoped that the research findings and

recommendations will be adopted by fire rescue personnel and related units to perform infrared thermal imaging efficiently.

Keywords: infrared thermography, firefighting, search and rescue

一、緣起

舉凡各種災害發生時，首要第一線的處理及應變人員就是消防人員。在各種災害中最常見的就是火災，在一個火災現場狀況瞬息萬變，火場中高溫及濃煙產生的閃燃及爆燃常常造成救災人員的傷亡。近年來臺灣各地有不少的消防人員在火場受傷甚至死亡，很多的原因是對於火場環境不熟悉、視線不良而受困火場。如 2018 年桃園敬鵬工業惡火 5 死 5 傷 2 命危、2015 年桃園新屋保齡球館惡火 6 名勇消殉職、2014 年 6 月 27 日新北市中和區華夏之星社區地下停車場火警造成 1 名勇消因公殉職等。然而在能見度幾乎為零的高溫濃煙中搜索，就是一件非常大的挑戰，如火場中的不確定性太多，高溫、濃煙、視線不良、掉落物、坍塌等，消防人員為能在第一時間找到起火點，甚至救出受困民眾，都必須深入危險的環境中，與這些不確定的危害對抗，以減少人名的生計及財產損失。因此，如何安全的進入火場，並且安全的離開火場變成非常的重要。

尤其臺灣大型公共建設紛紛完工營運，而且電子業、半導體與高科技業蓬勃發展，大型廠房林立於各科學工業園區，零售百貨業、大型量販店於生活圈中逐一興建營運，建築高樓隨國內經濟成長逐一興建完成，這些高樓、地下建築與複雜空間環境，火災或地震時產生的大火、高溫、濃煙、低能見度與有害化學品，可能延宕搶救時機與危及消防人員安全，這也是消防人員必須面臨的嚴峻挑戰。此外，關於鐵皮屋火場中因開口部面積比例少，存放的物質複雜且難以預料，濃煙與熱氣易充滿內部空間，燃燒產生的大量煙霧和熱量不易散發。高溫煙氣會在極短的時間內到達屋內頂部，然後沿屋頂向四周和向下擴散，造成整個空間大量熱煙，能見度迅速下降，不利於救災人員進入與搜救等火

災人命問題。面對鐵皮結構火警不確定性因素太多，高溫、濃煙、視線不良、掉落物、坍塌等，消防人員為能在第一時間找到起火點，甚至救出受困民眾，都必須深入危險的環境中，與這些不確定的危害對抗，以減少人民的生計及財產損失。

然而限於消防人員救災面臨的問題如背負式空氣呼吸器之空氣容量限制、濃煙阻礙視野與行動、高溫建築的倒塌風險、消防人員的體力限制等因素。依據美國 NIST (National Institute of Standards and Technology, 標準及技術聯邦組織) 於 2008 年 1499 號技術公告，結果證明紅外線熱顯像儀可以增進救災效率與保護消防人員安全。Giesbrecht et al. (2007) 將『紅外線熱顯像儀』列入優先改進的裝備技術，並且要求消防隊員、隊長及指揮官等必須要接受合格的相關訓練。因此，消防人員如何在最短時間內遂行有效率與安全的搶救任務，端賴高科技的搶救器材輔助，在能見度幾乎為零的高溫濃煙中搜索，就是一件非常大的挑戰，紅外線熱顯像儀為其救災重要選項之一。運用熱顯像儀設備如何安全的進入火場，並且安全的離開火場便非常重要。

二、研究目的與方法

在能見度幾乎為零的高溫濃煙中搜索，是一件非常大的挑戰，如火場中的不確定性太多，高溫、濃煙、視線不良、掉落物、坍塌等，消防人員為了能在第一時間找到起火點，甚至救出受困民眾，都必須深入危險的環境中，與這些不確定的危害對抗，以減少人員的生計及財產損失。於是在能見度幾乎為零的高溫濃煙中搜索，就是一件非常大的挑戰，如何安全進入火場，並安全離開火場，變成非常重要。因此，根據上述研究背景與動機，本研究之研究目的如下：

1. 瞭解紅外線熱顯像儀於消防救災之現況與困境。
2. 探討紅外線熱顯像儀於消防救災之應用情形。
3. 根據研究結果，提出具體建議，以做為消防搶救人員運用紅外線熱顯像儀進行消防任務和相關單位之參考。

本研究首先決定研究主題，並針對其背景與動機，經由蒐集相關資料及期刊文獻來加以探討，並按照研究目的，研究方法與流程，探討文獻回顧與搜救所遇困難度。再依照搜索方式、人員訓練和實證研究，以獲取研究所需的資料，並根據分析結果提出結論，最後針對研究結果提出相關的建議。

要訓練一名消防人員可以因應各式災害，需要一段時間及經費，但可能一場災害就能毀掉一名優秀的消防人員。因此，如何有效的運用現代高科技器材尋找起火點及避免消防人員在火場中傷亡，減少更多遺憾發生，乃成為非常重要的課題。本研究並希望將研究成果與建議做為消防搶救人員運用紅外線熱顯像儀進行消防任務和相關單位之參考。

三、紅外線熱顯像儀偵測原理

3-1 紅外線熱顯像儀種類

熱顯像儀的應用很廣泛，依照工程、醫學軍事與消防等，都有不同的軟硬體設計。就軟體方面，工程使用的熱顯像儀為求量測溫度的準確性，會將放射率於 0.1 至 1 的區間做調整，而消防與軍事用的熱顯像儀則大都將放射率固定在 0.95。另外在視角、變焦功能、影像處理等技術也依功能需求而有不同設計，例如消防使用的熱顯像儀，為了可以觀測大型目標物，所以視角較寬(設定在 50 度以上)(郭來盛，2011)。

由於消防、軍事用的熱顯像儀必須經常使用在惡劣的環境中，例如大量髒污、塵土及水的環境，所以其防水防塵等級必須較其他職業使用還高，一般需達到 IP67 的防水防塵等級(工業用熱顯像儀等級要求僅需達 IP54)。所謂防水防塵等級是指各種電器設備和包裝的防塵、防水程度，來對電器產品進

行分類，而這種分類方法得到大多數國家的認可，保護等級以 IP(防水防塵等級，或稱異物防護等級 Ingress Protection Rating 或稱國際防護等級 International Protection Rating)編碼，其中數字表示防護程度高低。然而供消防單位使用的熱顯像儀除了須具備 IP67(第一個數字 7 為防塵等級、第 2 個數字 6 為防水等級)的等級(表示完全防塵、侵入 1 公尺水中無影響)。因火場是一個高溫的場所，所以在設計上設備的耐高溫條件必須較其他用途的熱顯像儀來的高，一般熱顯像儀在出廠前皆需要經過高溫爐高溫測試(溫度設定在攝氏 260°C)，至少 5 分鐘以上。

此外，供軍事或消防使用的熱顯像儀其防撞防摔規範亦是被要求，由於作業環境的關係，必須要能承受高度 1.5 公尺至 2 公尺的撞擊測試。因此，要能夠在火場惡劣環境中使用的熱顯像儀，它的防水、防塵、耐高溫及防摔等級，都必須優於其他環境使用的熱顯像儀(郭來盛，2011)。

3-2 紅外線熱顯像儀偵測原理

所有物體之所以能被人類所看見，是因為物體所發射的可見光能被人類肉眼所看見，且能在視網膜內成像。但有些光卻無法被人類所看見，稱為不可見光，例如紅外線、X 光、輻射線等等。而所有的物體，理論上只要超過絕對零度(-273.15°C)，就會發射出紅外線，光譜範圍在 0.8 μm 至 1000 μm 之間，為人類肉眼無法看見的不可見光 0.38 μm 至 0.76 μm ，紅外線依照光譜範圍，可分為近紅外線(near infrared, IRA, 波長 0.8 μm 至 1.4 μm)、中紅外線(middle infrared, IRB 波長 1.4 μm 至 3 μm)、遠紅外線(far infrared, IRC, 波長 3 μm 至 1000 μm)。火焰的紅外線光譜範圍大約在 8 μm 至 14 μm 之間，所以專為消防單位所設計的紅外線熱顯像儀就以偵測這個範圍內的紅外線。

紅外線熱顯像儀的鏡頭為鍍元件，當物體所發射的紅外線穿透鏡頭之後，經過感測元件，再經過放大器及信號處理器後，轉換成肉眼可辨識的影像顯示在螢幕中，如圖 1。

然而紅外線熱顯像儀器技術是使人類可

跨越視覺障礙，將物體表面溫度分佈情形轉變為看得到之影像，其係運用光電技術，以偵測物體熱輻射之特定紅外線波長訊號，再將該訊號轉換為可供視覺辨視之影像圖示，且同步計算出溫度值。紅外線是指電磁波譜中介於可見光與微波間之波段，由於其波長較紅色光長，故稱為紅外線。

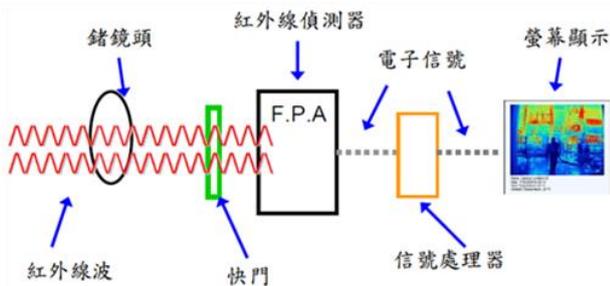


圖 1 紅外線熱顯像儀成像方式(苗沛元, 1998)

3-3 紅外線熱顯像儀影像攝溫原理

所有物體理論上超過絕對零度(-273.15°C)就會放射紅外線，紅外線為一種電磁波為不可見光，光譜範圍由 $0.75\mu\text{m}$ 至 $1000\mu\text{m}$ ，又分為近紅外線 $0.75\mu\text{m}$ 至 $3\mu\text{m}$ ，中紅外線 $3\mu\text{m}$ 至 $6\mu\text{m}$ 及遠紅外線 $6\mu\text{m}$ 至 $1000\mu\text{m}$ ，實體火的紅外線光譜範圍一般分佈在 $8\mu\text{m}$ 至 $14\mu\text{m}$ 之間，所以消防用的紅外線熱顯像儀就以偵測此範圍內的紅外線為主。紅外線的來源分為直接、主動及被動，直接的紅外線如火、高溫放射的紅外線，主動紅外線如人及動物放射的紅外線，被動的紅外線如傢俱等被動吸收熱源再放射。紅外線為不可見光，紅外線無法穿透水及玻璃，所以紅外線熱顯像儀的鏡頭一定為鍍元件，當紅外線穿透鏡頭之後經過感測元件，再經過放大器及信號處理器後轉換成肉眼可辨識的影像，如圖 3(苗沛元, 1998)。原始的紅外線信號並不是非常清晰，必須經過增益/補償校正及壞軸處理之後才能清晰影像。

紅外線熱顯像量測溫度資訊時，測得的即是受測物體的表面溫度。而受測物的表面溫度變化主要受下列三因素影響(Weil, 1991)，茲說明如下：

(1) 材料表面條件：各種材料的輻射係數與表面的粗糙度有關，粗糙表面物體的輻射係數較光滑面大。

- (2) 材料內部結構組織：傳導係數隨材料內部結構組織情形而異。就混凝土結構而言，混凝土的孔隙率越大，導熱力越差。
- (3) 為影響測溫準確性的因素。

3-4 紅外線熱顯像儀在濃煙環境下偵測辨識原理

紅外線在空氣中傳導被空氣中的粉塵、周圍的物件所吸收、反射，所以紅外線的輻射會因為吸收及散射作用而減弱，散射為紅外線被空氣中的懸浮粒子吸收及再輻射所造成，會導致紅外線強度變弱。煙層中的較大懸浮粒子與紅外線的散射無關，如果粉層粒子的大小與紅外線相近，則會產生瑞利散射(Rayleigh Scattering)現象，當紅外線波長如果超過 $2\mu\text{m}$ ，則與空氣分子的散射無關，煙層粒子與霧靄的大小比紅外線的波長小(金台寶的近紅外線應用網, 2010)。因此，紅外線比可見光更能穿透煙層粒子及霧靄。

紅外線熱顯像儀大部分採用偵測 8 至 $14\mu\text{m}$ 的紅外線波長之偵測元件，是因為與 3 至 $5\mu\text{m}$ 的偵測元件比較，其對於大氣中物體溫度的敏感度較靈敏及容易穿透煙霧粉層粒子及霧靄，在較遠的距離就可以偵測到物體溫度，3 至 $5\mu\text{m}$ 的紅外線則要比較貼近物體才可以偵測出溫度；8 至 $14\mu\text{m}$ 的紅外線的偵測元件所需的光圈較小，是可以得到良好的影像解析度(Holborn et al., 1992)。

紅外線在空氣中傳導被空氣中的粉塵、周圍的物件所吸收、反射，所以紅外線的輻射會因為吸收及散射作用而減弱，散射為紅外線被空氣中的懸浮粒子吸收及再輻射所造成，會導致紅外線強度變弱。煙層中的較大懸浮粒子與紅外線的散射無關，如果粉層粒子的大小與紅外線相近，則會產生瑞利散射(Rayleigh Scattering)現象，當紅外線波長如果超過 $2\mu\text{m}$ ，則與空氣分子的散射無關，煙層粒子與霧靄的大小比紅外線的波長小(金台寶的近紅外線應用網, 2010)。因此，紅外線比可見光更能穿透煙層粒子及霧靄。

紅外線熱顯像儀大部分採用偵測 8 至 $14\mu\text{m}$ 的紅外線波長之偵測元件，是因為與 3 至 $5\mu\text{m}$ 的偵測元件比較，其對於大氣中物體

溫度的敏感度較靈敏及容易穿透煙霧粉層粒子及霧靄，在較遠的距離就可以偵測到物體溫度，3 至 5 μm 的紅外線則要比較貼近物體才可以偵測出溫度；8 至 14 μm 的紅外線的偵測元件所需的光圈較小，是可以得到良好的影像解析度(Bishop et al., 1993)。

目前的紅外線熱顯像儀的偵測器大都為 Uncooled Microbolometer (非冷卻式微幅射熱測定計)，感測元件為 Asi (非結晶矽) 或 VOX (氧化釩)，共同的特點都是不利於高溫作業環境。工業用的紅外線熱顯像儀要求輕巧所以外型較為緊實，散熱效果較不理想，所以無法在高溫環境中作業；消防用紅外線熱顯像儀的設計為了適應作業環境的高溫要求，外型的設計則要可考慮散熱的效果，所以外型會較大，也會設計散熱系統。

對於紅外線熱顯像儀的高溫測試，並無統一與可依循的國際標準與規範，因此消防用紅外線熱顯像儀的製造廠，為了能提供相關耐高溫數據給使用者參考，大都將紅外線熱顯像儀開機後放置於高溫爐中，將高溫爐的最高溫度設定在 500 °F (260 °C)，觀察紅外線熱顯像儀能夠持續呈現影像的時間，依據各廠牌的相關數據此耐高溫的時間都在 5 分鐘以上，而工業用紅外線熱顯像儀的操作環境溫度大都建議不可以超過 50°C，二者有明顯的差異性。

此外，於操作紅外線熱顯像儀時，也必須考慮其可能掉落造成撞擊的影響在內，但是其相關測試方式與高溫測試有相同的狀況，目前並無統一與可依循的國際標準與規範。消防、軍事用的紅外線熱顯像儀製造廠一般將紅外線熱顯像儀由某個高度以自由落體方式掉落於水泥地面，採四方體有六個面，每個面掉落一次的方式進行測試，測試後開機觀察紅外線熱顯像儀是否能正常呈現影像，一般此用途的紅外線熱顯像儀可以承受高度 1.8 公尺或 2 公尺的撞擊測試。工程用的紅外線熱顯像儀一般而言屬於精密儀器設備，原廠並無此撞擊測試資料可參考，因此不適於使用於可能掉落或撞擊的工作環境及條件。

綜上所述，消防搶救的環境充滿高溫、濃

煙與大量的水，掉落撞擊也無法避免，更必須要有廣角鏡頭能快速搜尋大範圍的目標物與辨識危害性環境，而量測溫度的精確度、觀察遠距離目標物等要求相對上述環境條件就不是那麼急迫與優先，因此實驗以選擇消防用紅外線熱顯像儀為主。茲將各用途紅外線熱顯像儀比較，如表 1 所示。

表 1 常見各用途紅外線熱顯像儀比較表

用途	消防用	工程用	軍用
感測器	微幅射熱測定計	微幅射熱測定計	微幅射熱測定計
光譜反應範圍	8-14 μm	5-8 μm 或 8-14 μm	8-14 μm
耐溫度	260 °C 五分鐘	50 °C	50 °C
耐濕等級	IP67	IP54	IP67 或 IP54
耐撞擊	2 公尺掉落	無	無 (監視用)
視角	50 度	24 度	24 度
變焦功能	2 倍或 4 倍	無	10 倍以上 (監視用)
放設率設定	固定式 0.95	可調式 0.1 至 1	固定式 0.95

在火災現場中，空氣中充滿黑色的碳粒子，造成能見度降低，消防人員仍必須深入火場找尋受困的民眾，因此，前方就充滿了許多不確定性。而熱顯像儀的特色，是將物體所發出的紅外線轉換為肉眼可見的影像，而空氣中的碳粒子或粉塵會吸收物體所發出的紅外線，甚至會反射，讓物體本身所放射的紅外線到達熱顯像儀的鏡頭量減少，影響感應強度，但仍會影像於螢幕上。濃煙中的粒子大小相較於紅外線的波長來的小，所以紅外線更能穿透煙層的粒子，使得熱顯像儀能在能見度低的火場中使用。而火場中的遮光率，亦可以方程式計算。

在一個實驗室的全黑箱子中，當光源直射照在照度計上時，其標準的光通量為 I_0 ，若將煙霧導入黑色箱子中，這時照度計所測得的光通量為 I ， I_0 減去 I 則為被煙霧阻擋後的光通量，再除以無煙霧阻擋的邊準光通量 I_0 ，則為遮光率。

然而濃煙粒子對熱顯像儀判讀的影響，使得在火場中使用熱顯像儀時，會受到距離及遮光率的影響。熱顯像儀在透光率為 100%

時，實際溫度 600°C 時，距離 0.9 公尺處熱顯像儀測得 500°C，而 10 公尺處測得 300°C，20 公尺處測得 127°C(郭來盛，2011)。在使用熱顯像儀時，量測的溫度數值會隨著距離而遞減，且其溫度的誤差值增大。而透光率不同時(或煙粒子濃度不同時)，在同樣距離所測得的溫度亦不同，例如在同樣 4 公尺處，實際溫度 600°C，在透光率 80% 時熱顯像儀測得的溫度為 368°C，透光率 40% 時測得 328°C，透光率 20% 時測得 312°C，在不同透光率的條件下使用熱顯像儀，所得到的溫度數值會隨著透光率減少而使得誤差值增大，亦即空間內的煙粒子濃度越濃，透光率越低，熱顯像儀的誤差值也越大。

綜上所述，熱顯像儀受到距離及煙粒子濃度的影響，數值會有很大的差異，對消防人員於火場中使用時，熱顯像儀雖然是一件高科技的輔助產品，但在實際應用時，所偵測出的溫度數值，僅能當作參考值，不能代表物體的實際溫度。例如熱顯像儀測得的溫度約 300 度 C，但物體實際溫度可能到達近千度。但雖然無法得知實際溫度，但仍然能從熱顯像儀中，看得出四周環境的格局及物體的大小、前方是否有落差等等。若要得知火場中火勢的成長情形，還必須多方面的觀察，例如指揮官從外觀火舌是否竄出、煙的濃度及煙色、煙流的速度等，若發現煙的濃度加深、煙流速度加快並且伴隨著火舌，就表示可能有「閃燃」發生的可能，下一步就必須要撤出內部所有搶救的消防人員，以減少人員的傷亡。

3-5 紅外線熱顯像儀使用限制

紅外線熱顯像儀在火場中使用時，由於物體所發出的紅外線能夠穿透煙層粒子，而成像在熱顯像儀的螢幕中，但由於紅外線無法穿透物體，因此在火場中使用時，無法偵測牆後或物體後方情形。另外，因為紅外線無法穿透玻璃及水，消防人員在火場中搶救時，若前方為一灘水池，這時若又專注在熱顯像儀的螢幕裡，可能就會失足掉落水池中而造成危險。如圖 2 為一碗熱水放在玻璃門內及外側，以熱顯像儀偵測溫度情形，可明

顯看出熱顯像儀無法偵測玻璃後方的熱源溫度。



圖 2 熱顯像儀無法穿透玻璃偵測溫度 (2017.6.26.拍攝)

四、紅外線熱顯像儀搜索救災分析

4-1 紅外線熱顯像儀配備概況分析

各縣市消防局利用消防預算購買紅外線熱顯像儀情形(自由時報，2015)如表 2 所示，可看出雲林縣消防局消防預算僅其他六都 1/3 至 1/2，卻能夠以僅有預算購買共 11 具消防救災用的紅外線熱顯像儀，亦表示雲林縣消防局對於消防人員生命安全的重視。另外，新北市政府消防局在民國 103 年底共配置 23 具熱顯像儀，不過僅其中 15 具為消防局預算購買(雪山分隊的 3 具已不堪用待報廢)，其餘 6 具為民眾及宮廟捐贈。新北市政府消防局也在民國 104 年及 105 年的預算中增購 7 具，以使得每個行政區至少要 1 具以上。投稿著作所有列名作者皆同意其投稿之文章經本研討會刊登後，即授權本刊收錄於其他資料庫中，並得為重製、公開傳輸、授權用戶下載、列印等行為。為符合資料庫之需求，並得進行格式之變更。

表 2 六都及雲林縣總預算與消防預算表(自由時報, 2015)

縣市	總預算 (億)	消防預算 (億)	熱顯像儀數 量
台北市	1585.44	28.65	6
新北市	1633.96	30.72	23
桃園縣	703	17	3
台中市	1135	21.15	9
台南市	765	15	5
高雄市	1234	20.69	5
雲林縣	270	6.5	11

4-2 紅外線熱顯像儀搜索救災情形

有別於一般搜索救災方式，非徒手亦不使用繩索器材來進行搜索，帶隊官在進入火場前可先利用熱顯像儀觀察火場外觀狀況，例如現場為鐵皮建築物，在帶隊官進行搜索前，以熱顯像儀快速檢視建築物溫度，在確認無高溫危險時再進入火場，在搜索時也同時使用熱顯像儀尋找熱源及起火點，如圖 3 所示。帶隊官攜帶熱顯像儀隨時檢視火場內的溫度。熱顯像儀除可以用來尋找熱源及起火點，也能用來搜尋受困的民眾，因為民眾的體溫與四周物體的溫度不同，在熱顯像儀中就會有一人形出現，而讓搜救的消防人員立刻判斷出是否為受困民眾。

然而在火場中搜救時，若搭配熱顯像儀使用，應為 3 至 4 人為一小組進入火場，可由帶隊官(或小組內較資深同仁)攜帶熱顯像儀進行輔助，隨時監看四周溫度，如有發現溫度過高，無法立即以水將溫度降下來時，應立即進行撤退，避免人員傷亡。熱顯像儀雖然是一件高科技的產品，在火場中看似萬能，但仍有它的盲點，例如它無法穿透牆壁、玻璃、水面等。由於紅外線無法穿透物體，因此在火場中使用時，無法偵測牆後或物體後方情形，而且因為紅外線無法穿透玻璃及水，消防人員在火場中搶救時，若前方為一灘水池，此時如又專注在熱顯像儀的螢幕裡，可

能就會失足掉落水池中而造成危險。



圖 3 紅外線熱顯像儀搜索情形
(新北市政府消防局提供 106.6.26.)

4-3 紅外線熱顯像儀搜索救災演練

固定每月時間由大隊選定特定場所來進行演練，一方面可以訓練消防人員搜救的能力，另一方面則可以讓消防人員瞭解這些場所的環境，再由測驗官模擬不同的狀況，來考驗消防人員的靈機應變能力，例如受困火場、消防車沒水等。例如民國 106 年 5 月選定新店區天主教耕莘醫院作為救災演練場所，假定醫院後方的鍋爐室起火，有一名員工受困，樓上又有加護病房等，考驗著現場消防人員要如何分配任務，和如何進行破壞、排煙、疏散、搜索及救援，如圖 4 所示。



圖 4 耕莘醫院後方演練情形
(新北市政府消防局提供 106.6.26.)

尤其是鍋爐室，裡面有重油、柴油等燃料，非常有可能發生閃燃及爆燃的危險，消防人員到達現場時，就必須跟關係人，包括場所負責人或員工等以了解室內有哪些危險性，例如有無危險物品及可燃性氣體，是否可以用水來滅火，因禁水性物質遇水會產生

劇烈反應，以及有無人員受困。

本研究於民國 106 年 6 月觀摩新北市政府消防局新店分隊訓練，該分隊選定新店區車子路的紙箱工廠做為演練場所，訓練消防人員到達一個不熟悉的環境，如何進行任務分配及搜索，圖 5 中可以看出，消防人員攜帶水線進入火場滅火及搜救時，在不到 2 公尺處有一名民眾在門邊，但因為火場內視線不良，以膠帶封住呼吸器面罩模擬漆黑的火場，因而無法立即發現。雖然這次訓練是以膠帶封住呼吸面罩來模擬漆黑火場，但試想如果在這樣黑暗的環境下執行搜救工作，若有紅外線熱顯像儀的搭配使用，應可更為快速就找到受困者，而且所需要的時間、人力也會大為減少許多。



圖 5 以水線進入滅火及搜救初期未發現受困民眾 (106.6.26 拍攝)

4-4 在濃煙條件下搜索救災方式比較分析

為能夠瞭解徒手搜索、繩索搜索等傳統搜救方式和紅外線熱顯像儀搜索救災方式之差異與優劣。因此，選定共 9 個救災模擬場所來進行以上三種搜索方式的比較，並分析其搜索救災之結果。以下針對已設定之 9 個不同模擬場所，每個場所都為模擬黑暗沒有光源的情況下，在每個場所設置有 2 名待救患者 (P1、P2)、2 處危險 (H1、H2)，以三種搜索方式進行內部搜索時，除測量總共搜索所花費的時間外，亦會了解是否能避開危險地點。茲分別說明如下：

- (1) 場所一：為一約 25 坪大的健身房，室內環境有數台健身器材，坪數雖小，但因環境複雜搜索時容易因物品阻擋而迷失方向，困難程度約 2 顆星。

- (2) 場所二：為一約 95 坪大型會議室，雖然看似無太多阻礙物，但因坪數過大，容易迷失方向，因而增加搜救的困難度，困難程度約 4 顆星。
- (3) 場所三：為一約 20 坪教室，室內環境多桌子及椅子形成阻礙，因而增加搜救難度，困難程度約 3 顆星。
- (4) 場所四：為一約 45 坪地下停車場，停車場內停放多輛汽車，造成許多縫隙，可能有患者躺臥在其中，容易影響搜救人員判斷，因而增加搜救難度，困難程度約 5 顆星。
- (5) 場所五：為一約 60 坪里民聯誼廳，室內環境雜物不多，但搜索範圍大，困難程度約 3 顆星，如下圖 14 所示。
- (6) 場所六：為一約 25 坪小型會議室，室內空間雜物少坪數不大，搜救難度不高，困難程度約 2 顆星。
- (7) 場所七：為一約 30 坪餐廳，室內空間雜物多易造成阻礙，且實務上此類場所易有多重火源，因而增加搜救困難，困難程度約 3 顆星。
- (8) 場所八：為一約 75 坪活動中心，室內坪數較大，容易在搜索時迷失方向，使得困難度增加，困難程度約 4 顆星。
- (9) 場所九：為一約 45 坪地下室，室內雜物多且隔間多，因而造成搜救困難，困難程度約 5 顆星。

每個場所設定待救患者及危險物各 2 組，待救患者分別設定在不同的區域躺臥，而危險物則設定為電梯井等易造成人員傷亡的地點。

此外，以瓦斯噴燈作為當次搜救行動中的起火點。搜救人員進入搜救若發現起火點，可以口述方式告知發現起火點，並以消防水線將其撲滅。本次搜索實驗仍以找尋待救患者為主。

4-5 搜索救災結果分析與討論

每個場所經過 3 種搜索救災方式搜索後，得到以下不同結果，如圖 6 所示。從表 3 中可看出徒手搜索方式在沒有繩索的輔助下不

但容易走失，亦可能造成人員受傷，耗費時間也相對最多，而且非常沒有效率。然而在第 3 種搜索救災方式中，透過紅外線熱顯像儀進行搜索救災，不但能減少繩索等器材使用，而且可避免搜索救災範圍的侷限，亦即能夠很快地針對火場危害做出搜索判斷。例如在表 3 內使用紅外線熱顯像儀進行搜索時，其中★符號呈現較多，表示使用紅外線熱顯像儀較能避開危險地點，並且以最快時間搜索到患者，如此可避免深陷救災危險之中，因而增加搜索救災效率。此外，在一個不熟悉的環境中，亦能夠透過紅外線熱顯像儀快速地辨識空間大小及距離，不至於在火場中迷失方向。

綜上所述，經由表 3 可明顯地看出此 3 種不同的搜索救災方式所耗費的時間差異。然而在使用紅外線熱顯像儀輔助下進行搜救所消耗的時間是快於其他搜救方式。例如：紅外線熱顯像搜索方式較繩索搜索節省約 3.1 倍時間、較徒手搜索節省約 3.2 倍時間。

表 3 各種搜索救災方式時間

場 次	時 間	徒手搜索				繩索搜索				熱顯像儀			
		P1	P2	H1	H2	P1	P2	H1	H2	P1	P2	H1	H2
一	25	03:01	08:35	★	☆	04:26	05:12	★	☆	01:01	02:15	★	★
二	95	01:22	04:14	☆	◎	18:02	21:24	◎	★	05:00	07:23	★	◎
三	20	02:28	07:01	★	☆	01:53	06:01	★	★	00:52	01:58	★	★
四	45	14:09	23:31	☆	◎	13:14	17:17	☆	☆	02:14	02:18	★	★
五	60	21:04	25:45	◎	☆	15:10	19:23	☆	◎	06:47	07:15	★	★
六	25	09:31	14:03	☆	◎	09:31	12:12	★	★	01:33	03:27	★	★
七	30	08:35	12:02	★	☆	04:26	08:32	◎	☆	01:29	02:30	★	★
八	75	11:23	15:45	☆	★	13:41	15:29	☆	★	06:54	08:18	★	◎
九	45	15:14	18:47	◎	★	15:12	17:16	★	◎	02:41	03:37	◎	★
十	32.2	9:52	13:37	★:3	★:2	9:50	12:58	★:4	★:4	03:10	04:20	★:9	★:8
均				☆:5	☆:3			☆:4	☆:3			☆:9	☆:8
				◎:2	◎:3			◎:2	◎:3			◎:1	◎:2

※附註：P1:找到患者 1 的時間；P2:找到患者 2 的時間；H1:危險物 1；H2:危險物 2；★:遭遇危險物且安全避開；☆:遭遇危險物且誤觸身陷危險；◎:未發現危險物。

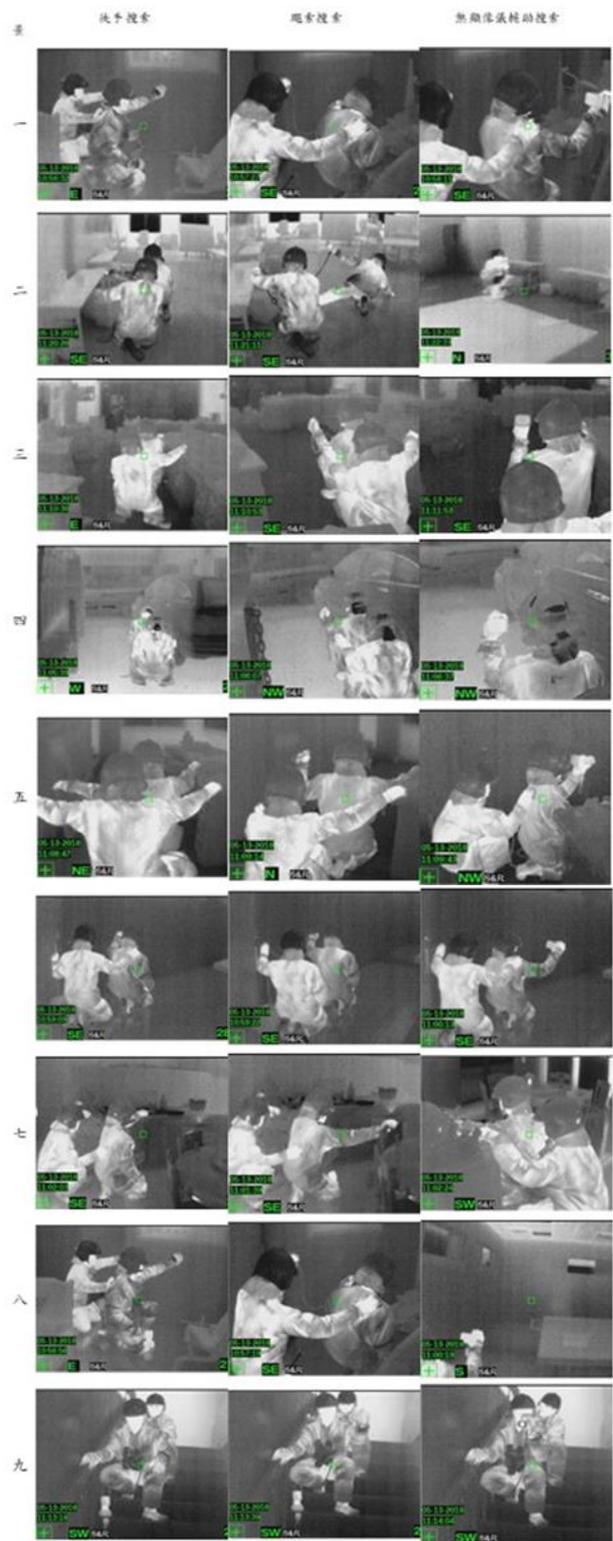


圖 6 各搜索方式實際照片

五、結論與建議

5-1 結論

在多次消防救災人員傷亡的案例中，可發現指揮官對於火災危險的判斷能力不足、安全管理不確實以及設備問題，乃是造成傷

亡的原因。唯有強化指揮官判斷能力、提高火場安全管理以及採購熱顯像儀，才能減少消防救災人員在火場中傷亡的發生。因此，熱顯像儀不但能夠協助消防人員在濃煙中迅速找到患者，亦能夠幫助消防人員提前了解及判斷火場狀況，以減少人員傷亡的憾事發生。

本研究利用 9 個假設搜救場所(沒有光源、模擬黑暗的情況下)在每個場所設置有 2 名待救患者及 2 處危險，同時應用 3 種搜救方式，分別為徒手搜索、繩索搜索與熱顯像儀搜索，除測量總共搜索所花費的時間外，亦可以了解是否能夠避開危險地點。從實驗結果顯示，熱顯像搜索方式較繩索搜索法節省約 3.6 倍時間、較徒手搜索節省約 4.7 倍時間，此結論說明熱顯像儀搜索不但可快速搜尋到患者，相對亦能夠有效地減少空氣瓶內空氣量使用而避免消防人員在火場內受困的可能發生。

另外，熱顯像儀雖然能夠更有效地避開危險區域，並且更確實地尋找到火源，但我們也可以了解，熱顯像儀仍然有距離及透光率的限制，距離越遠，其偵測出來的溫度誤差值越大，所以，熱顯像儀在火場中並非萬能。不過扣除掉這些誤差及其限制(例如無法穿透物體、玻璃及水面)，它還是能夠穿透濃煙，在螢幕中顯現出火場內構造及格間、熱源的大小及範圍，提供給消防人員作為參考。大部分的人對於熱顯像儀的第一印象就是能夠快速以及安全的尋找人員，如此便有機會拯救更多的生命。也許問很多人，他們都會告訴你使用熱顯像儀可以更快速的搜尋，然而許多的火場有可能讓使用者落入陷阱中。

戰術上最常用的就是利用熱顯像儀來尋找火點，如果消防人員可以更快速的找到火點，則人員使用的效率就可以最大化。快速的找到火點也可以縮小搜索的範圍以及最後的成災後果，同時也可能可以將原本需要多輛消防車的場景縮小成為只需要一台車便可以控制火勢。熱顯像儀的優點為可以重新看到因為濃煙而失去的視野，這讓消防隊員在火場中可以看到四周圍的場景，這也代表了以前可以讓消防隊員安全的離開火場基礎的

技能便不再需要。消防隊員仰賴熱顯像儀可以更快且更深入地進到危險環境中。一旦熱顯像儀失靈，使用者有可能會迷失方向，並且沒有辦法沿著進來的路線安全的撤退。

熱顯像儀可以讓消防隊員看見建築物的結構來決定這個結構的安全與否。問題在於，使用熱顯像儀的人必須接受過訓練以便正確的解讀影像，舉例來說：一個在地板上的洞可能會顯示熱或冷，但是實際上，這個影像所顯示的是有可能火是在洞的底下。如果使用者知道他看的影像代表甚麼意思，那麼就很有可以提前避開坍塌的危險，讓所有的隊員都能夠安全。

現行各單位雖有配發熱顯像儀，但最大的問題就是熱顯像儀的訓練始終無法與現在的科技與時俱進。許多的分隊所接受的熱顯像儀訓練只是熱顯像儀業務人員所提供的教育訓練。訓練不足會導致無法正確地使用熱顯像儀，同時也會因為知識的不足而增加使用者的危險。很多的分隊都認為使用熱顯像儀是一件非常簡單的事情，但是實際上它是很複雜的。

5-2 建議

對消防救災人員來說，最重要的就是身上的消防裝備，不過國內消防員的裝備卻嚴重不足，以紅外線熱顯像儀來說，這個儀器能穿透濃煙，幫助消防員在火場內快速掌握狀況，消防救災人員透過觀察分析煙流走向、區劃空間通風控制燃燒情況及溫度分布情形，使消防人員運用熱顯像儀時面對火災搶救除了快速搜尋受困民及尋找起火點外，配合適當消防戰術的運用更能避免救災時的潛在危害。因此，運用熱顯像儀能使消防救災人員預防火場潛在因子發生及快速撲滅火點和人命搜救，因此熱顯像儀已成為消防機關不可或缺消防搶救設備。

另外，熱顯像儀應該要普及到每個消防單位，並將熱顯像儀的使用納入常規的搜索及搶救流程，由於因為目前的火場搜索流程中，尚未訂有熱顯像儀設備的使用，例如一組 3 至 4 名搜救人員，該由哪位來攜帶，他的任務是什麼?這些也都是需要去構思及訂

定的，才能讓消防人員傷亡的憾事不要再發生。

參考文獻

1. 自由時報，消防救命利器-北市總預算1585 億 熱顯像儀僅 6 具，<https://news.ltn.com.tw/news/focus/paper/849576>，2015。
2. 苗沛元，夜視新境界—新一代紅外線熱像儀簡介，軍品科技新知，第 105 期，第 73~84 頁，1998。
3. 金台寶的近紅外線應用網，線上檢索日期：2010 年 9 月 6 日，網址：<http://www.avitone.com.tw/GinTaBo/IR>。
4. 郭來盛，紅外線熱顯像儀在濃煙環境下量測鋼材溫度之研究與探討，長榮大學職業安全與衛生研究所，2011。
5. Bishop, S.R., Holborn, P.G., Beard, A.N., and Drysdale, D.D., “Dynamic modelling of building fires,” *Appl. Math. Modelling*, Vol. 17, pp.170~183, 1993.
6. Giesbrecht, G.G., Jamieson, C., and Cahill, F., “Cooling Hyperthermic Firefighters by Immersing Forearms and Hands in 10°C and 20°C Water,” *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, Vol. 78, No. 6, pp.561~567, 2007.
7. NIST, Federal Building and Fire Safety Investigation of The World trade center Disaster, Final Report on the Collapse of the World Trade Center Towers, 2005.
8. Weil, F.D., Structural determinants of political tolerance in Germany, *Research in Political Sociology*, Vol. 5, pp. 299~322, 1991.

【F】 永續與生態工程

梅山鄉圳南村大樹腳崩塌案例調查分析

陳建元¹ 楊沛漳²

¹國立嘉義大學土木與水資源工程學系教授

²國立嘉義大學土木與水資源工程學系碩士

摘要

大樹腳崩塌地特定水土保持區位於嘉義縣梅山鄉圳南村，本區於 1998 年受芮氏規模 6.2 的瑞里地震影響，造成圳南村大樹腳聚落的華興溪源頭區，於震後及後續颱風豪雨期間造成大量崩落土石堵塞溪床、掩埋鄰近道路，並於 2004 年劃定本區為大樹腳崩塌地特定水土保持區實施長期水土保持工程整治。暨 2010 年實施第一次長期水土保持計畫五年通盤檢討，於 2019 年進行第二次五年通盤檢討期程。本區因有濃密樹木遮蔭，此次(第二次)通盤檢討除現地勘查外並利用無人載具(UAV)協助現場調查。此區頭崙山層之火炎山礫石層形成之峭壁，雖僅於瑞里地震時發生崩塌事件，但複雜地質構造與陡坡持續造成土石崩落於下邊坡，且礫石層之崩落造成邊坡之後退亦危及坡頂村落道路。調查結果顯示上游野溪源頭區仍有土石崩落情形，並有持續向源侵蝕現象，形成數處小型沖蝕溝，溪床堆積礫石並有間歇流動現象。由於大雨易造成現地陡峭黃壤土崩解形成沖蝕溝，進而造成礫石層崩落，隨地表水匯流形成小規模土石流動情形。

關鍵字：崩塌、特定水土保持區、無人載具、土石流

Hillslope Collapse Investigation and Analysis - A Case Study at Dashujiao Area, Meshan Village

Chen Chien-Yuan¹ Yang Pei-Zhang²

¹ Corresponding Author, Department of Civil and Water Resources Engineering, National Chiayi University

² Department of Civil and Water Resources Engineering, National Chiayi University

ABSTRACT

The Dashujiao landslide soil and water conservation area is located in Meshan Village, Chiayi County. The area was affected by the ML 6.2 Ruili Earthquake in 1998, which caused seismic landslides. Subsequent rainfall induced debris flows have blocked the river upstream and endangered Dashujiao residents downstream. The area was designed as a soil and water conservation area for long term engineering measures to mitigate and prevent landslides in 2004. This study carried out the second five-year overall review of the soil and water conservation planning in 2019, following the first review in 2010. An unmanned aerial vehicle (UAV) was used to aid field investigation due to the dense vegetation cover in the area. Results of the investigation and analysis show that the cliff is in Toukoshan formation stage with a gravel/yellow soil layer that is prone to slope collapse during seismic events and intense rainfall. The complex geologic conditions with a fault and progressive erosion of the steep cliff in the area endanger residents.

The investigation found debris deposited upstream with erosion gullies at the source area. The yellow soil is prone to disintegrate during intense rainfall. As a result, erosion gullies have formed and gravel has fallen into the streambed with a small magnitude of debris flow.

Keywords: landslide, soil and water conservation area, UAV, debris flow

一、緣起

1998 年 7 月 17 日 12 時 51 分 15 秒，在嘉義縣梅山鄉與竹崎鄉境內發生芮氏規模 (ML) 為 6.2 的顯著地震，震央位置在阿里山氣象站西方約十五公里處，因靠近梅山鄉瑞里村，中央氣象局遂將此地震命名為瑞里地震。根據內政部消防署的地震災情統計資料顯示，本地震總計造成 5 人死亡、27 人受傷、房屋全倒者計有 6 戶、半倒者有 45 戶，附近山區並發生山崩、落石等現象。

圳南村大樹腳崩塌地位於華興溪源頭區，礫石層形成之峭壁，於瑞里震後及後續颱風豪雨期間崩塌嚴重，其大量崩落土石常堵塞溪床、掩埋產業道路，而礫石層之崩塌造成邊坡之後退亦危及坡頂村落與道路，對區內公共設施以及部落民眾生命財產安全造成嚴重威脅，依據『水土保持法』第 16 條第 1 項第 6 款之規定，以及『特定水土保持區劃定與廢止準則』第 3 條第 1 項第 6 款之劃定，將該區劃定為崩塌地特定水土保持區。

此處崩塌地特定水土保持區長期水土保持計畫於 2004 年 10 月 28 日經農委會核定實施，依水土保持法第 18 條第 2 項規定，嘉義縣政府於 2010 年實施第一次長期水土保持計畫五年通盤檢討迄今，2010 年實施第一次長於 2019 年已屆第二次五年通盤檢討期程。本研究依水土保持法等相關法規進行長期水土保持計畫執行成效進行通盤檢討。

二、研究區域與方法

2-1 研究區域

本研究區域位於嘉義縣梅山鄉圳南村，地理位置瑞里崩塌地特定水土保持區位於梅山鄉與竹崎鄉之交界處，粗紙坑溪上游 166 道路(原 122 道路)、瑞水公路上瑞里一號橋與瑞里二號橋之間山脊，公告面積為 90.2 公頃，

區內土地主要為林務局所轄林班地，部分地區為私有地，分屬阿里山事業區 196 及 202 林班地，使用分區為森林區，用地編訂分為林業與國土保安用地；大樹腳崩塌地特定水土保持區位於虎尾溪支流華興溪之上游，西北距梅山市區約 2.3km。本區有縣 118 道路通過，可聯絡梅山、太和等地，公告面積為 31.8 公頃，其中非國有地佔 1.18 公頃，公有地除道路屬嘉義縣梅山鄉公所外，均屬中華民國國有財產署，面積共 30.62 公頃。

本區行政區域隸屬於嘉義縣梅山鄉圳南村，位於虎尾溪支流華興溪之上游，西北距梅山市區約 2.3 km。本區有縣 118 道路通過，可聯絡梅山、太和等地，地理位置如圖 1 所示。

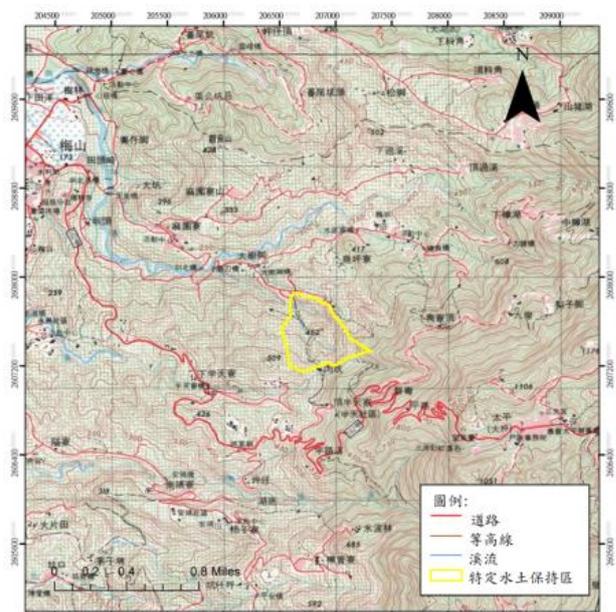


圖 1 大樹腳崩塌地特定水土保持區位置圖

大樹腳崩塌地特定水土保持區範圍包含其支流磨刀溪和無名溪之集水區，標高在 300~600 公尺。區內水系發達，蝕溝縱橫，故地貌極為複雜、零碎；此乃礫石層分布區

之地形特徵。其中以磨刀溪集水區之崩塌地分布最廣，包括其源頭區和溪谷兩岸；無名溪則以溪床和谷壁之崩塌較為嚴重，其他地區則為 40% 左右斜坡，主要為果園區，區內高程主要集中在 300-500 公尺間。

境內坡向在劃定區西側主要為東北向，在劃定區東側主要為西北向。平均坡度約 28.4 度東北及西南側有近乎垂直 90 的山壁，該區因有裸露岩盤，地勢甚為陡峻，全區坡度以三級坡占最多。

距離大樹腳崩塌地特定水土保持區最近之雨量站為離本區西南方 7.3km，距離較近且高程相當之水利署竹崎沙坑站 (N2,603,610m，E200,275m)，高程 80m。根據水利署竹崎沙坑站 2008 年至 2018 年之降雨量資料，近 10 年來之平均年降雨量為 2,370.6mm，較第一次五年通盤檢討期間 2008 年至 2018 年之平均年降雨量為 2,377.6mm 低，但較水利署統計的 1953 年至 2000 年間的平均年降雨量 2,047mm 高。

2-2 研究方法

本計畫之研究流程如圖 2 所示，研究目標針對圳南村大樹腳崩塌地特定水土保持區實施長期水土保持計畫執行成效與變異情形進行通盤檢討。崩塌地現況調查除至現地進行拍照定位與現況調查，調查使用工具包括數位相機、雷射測距儀、衛星導航與行車紀錄器、GPS、數位攝影機、無線對講機、皮尺及鋼捲尺等，並依崩塌地特定水土保持區通盤檢討手冊(水土保持局，2016)建議之調查表分別進行土地利用變異調查、崩塌地(含裸露地)變異調查、坡面蝕溝變異調查、橋樑及道路現況調查、野溪調查、工程構造物現況檢視、近年災害處理情形及特定水土保持區保全對象調查。

本計畫除蒐集近年衛星影像以判釋崩塌裸露地(如圖 3)，並利用無人飛行載具進行現地空拍影像，協助現地調查，並製作現地地形圖，以利環境變異判釋，UAS 空拍作業流程如圖 4 所示。

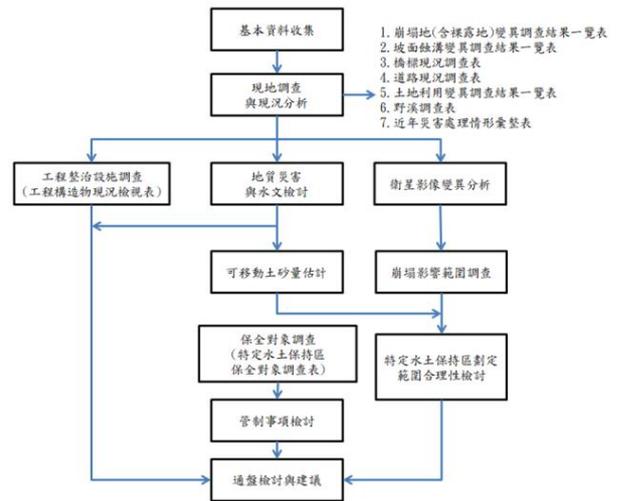


圖 2 研究執行流程圖

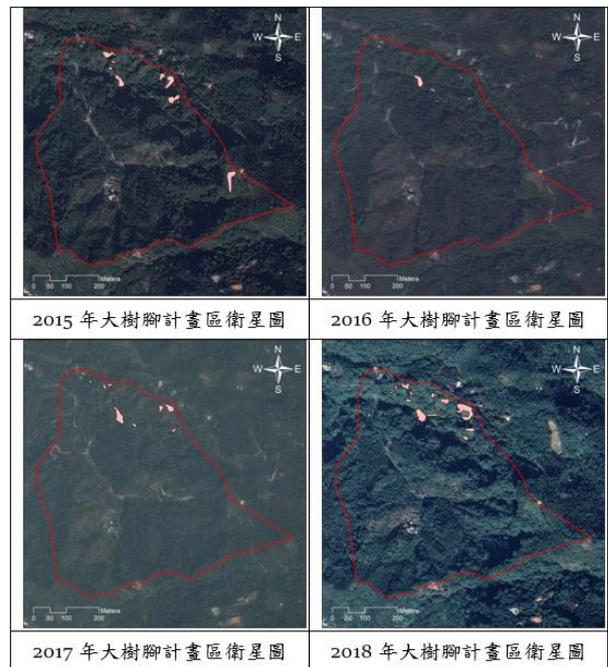


圖 3 研究區近年衛星影像判釋崩塌範圍圖

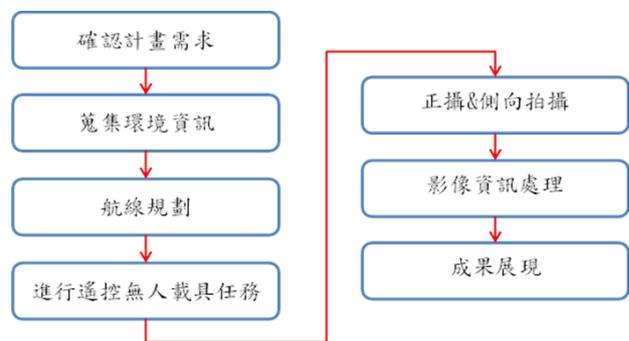


圖 4 UAS 無人載具拍攝作業流程

三、水文與地文環境調查成果

3-1 環境水系

大樹腳崩塌地特定水土保持區地勢大致由東南向西北傾斜，水系屬北港溪水系上游三疊溪的支流華興溪，並依河流發育共可分為三大集水區，分屬為華興溪支流磨刀溪上游三個不同集水區，集水區位置與溪流如圖 5。本區之集水 I 區，面積約 8.32 公頃，集水 II 區，面積約 20.25 公頃，集水 III 區，面積約 3.23 公頃，地形皆東南高西北低。

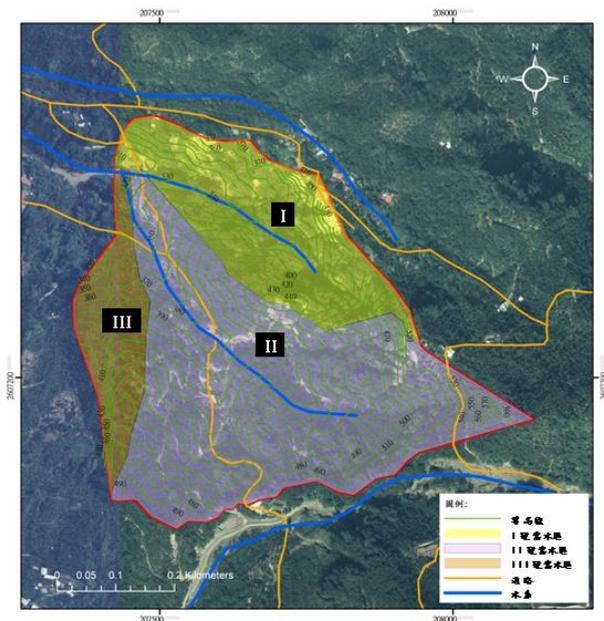


圖 5 研究區水系與集水分區

3-2 地質

出露於大樹腳崩塌地特定水土保持區之岩層為更新世之頭嵙山層和中新世之南莊層。兩者係以大尖山斷層接觸。南莊層以砂岩為主夾頁岩，分布於嶺頭區。頭嵙山層之火炎山礫石層分布於本區上游，香山相的砂岩夾礫岩則分布本區下游。其中以火炎山礫石層之崩塌最為嚴重，香山相者次之。

大樹腳崩塌地特定水土保持區之岩層走向為東北偏東，向西南傾斜約 30° 。本山坡以西北向為主，故大多屬逆向坡。大尖山斷層通過山脊處，其走向與岩層略為一致。大尖山斷層位於嘉義觸口至大尖山間，呈北西至北東走向，全長約 25 公里，可能為一逆斷層；斷層東側為昇側，出露中新世地層，西側為頭嵙山層及部份為現代非紅土階地堆積層。

本斷層鄰近岩層破碎，使其易於崩塌(圖 6)。

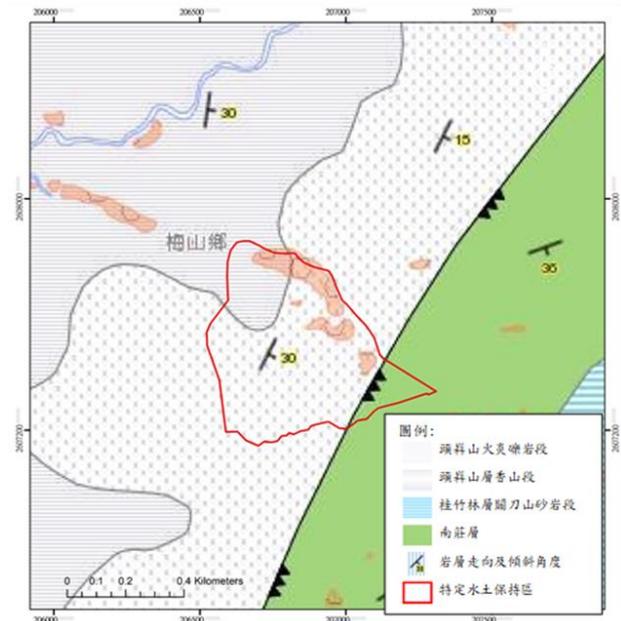


圖 6 研究區環境地質圖(1/5,000)(中央地質調查所)

3-3 土壤

大樹腳崩塌地特定水土保持區之土壤資料根據水土保持局 1995 年完成之二萬五千分之一的土壤圖，全區主要為新舊崩塌地所形成之崩積土，局部河谷地區屬黃壤，土壤性質分述如下：

1. 崩積土

本區之崩積土係由地質岩層中所含之礫、砂、泥、頁岩的風化物及石塊藉滾落、滑落或崩塌等位移作用堆積而成。土層深淺不一，隨成土所在地而異，深度約在 30~70 公分，土壤成弱酸性，pH 值介於 4.0~5.6 之間，有機含量在 2.4~3.8%，土壤鈉與交換性鉀含量頗高，土壤類型為砂頁岩淡色崩積土，無發育跡象，故土壤貧瘠，含石量佔 1/4 至 1/2 強，底土顏色主要呈棕色或黃棕色。

2. 黃壤

黃壤的主要特徵乃在黃色的心土，其成土作用最重要者為溫暖濕潤的氣候，氧化鐵的水化程度較高，呈各級的黃色。黃壤的剖面形態發育完整者，通常具有淺薄的暗灰色表層，下接淡黃色的溶提層，澱積層多為黃色或棕黃色，時而雜有灰色及紅色的斑紋，

其剖面內的矽鋁率顯灰壤式的變動，所以黃壤實際上可視為紅壤與灰化土壤之間的一種過渡形式。現地黃壤遇長期大雨則崩解造成礫石層崩落(圖 7)。



圖 7 現地浸水崩解黃壤

3-4 野溪

本區溪流屬華興溪支流磨力溪上游三個不同集水區(參考圖 5)，I 號集水區，溪床平均坡度 19.6%，主流長度約為 460m，區內溪床土石量多。依現地採樣孔粒徑調查分析方法，河床質以卵石約佔 31.7%，礫石佔 43.1%，其餘砂土佔 25.2%，最大粒徑約為 0.5m。採樣孔粒徑調查分析方法係依第一次五年通盤檢討依技術規範第三十七條河床質粒徑分析-採樣孔粒徑調查分析，河床上以往構築之固床工大多已淤滿。本區之 II 號集水區，溪床平均坡度 21.7%，主流長度約為 530m，於 2001 年桃芝、納莉颱風期間崩塌地下方土石曾淤積至坑溝內，於 2002~2003 年間已完成坑溝整治與固床工程。近年颱風豪雨頻繁，目前於坑溝內仍可見少量土石，固床工設施穩定。圖 8 為大樹腳崩塌特定水土保持區境內溪流前後期現況對照圖。境內頭崙山層受經年地震豪雨影響，河岸崩塌土石多堆積於溪床。

四、環境變異檢討分析

環境變異檢討係針對特定水土保持區在短時間內可能會受自然或人為因素影響而有部分或顯著變化之相關因子所作的現地調查，包括土地利用、坡面蝕溝沖蝕、崩塌地及裸露

地、野溪、道路(橋涵)水土保持、保全對象位置及規模、近年災害及處理情形、水土保持處理措施現況調查等。



圖 8 研究區內野溪(磨力溪支流)前後期現況對照圖

4-1 土地利用變異

本區之土地利用型態以果園(種植蓮霧與芭樂)及檳榔園為主(圖 9a)，面積共 17.41 公頃，佔全區總面積 54.7%，其次為混淆林為主，面積 13.15 公頃，佔全區總面積 41.6%；第二次調查結果(圖 9c)與第一次調查結果差異不大，檳榔園面積為 13.21 公頃，佔全區總面積 44.55%，果園面積則有明顯下降，面積為 1.54 公頃，較上次面積減少近 6.3%，統計結果詳表 1。

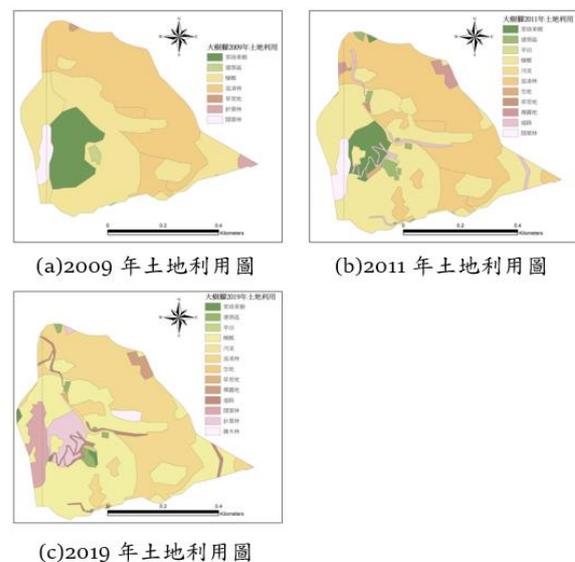


圖 9 土地利用圖(1/5,000)(資料來源:水土保持局)

表 1 大樹腳崩塌地特定水土保持區土地利用變遷統計表

土地利用類型	2009		2014		2019	
	面積 (ha)	百分比 (%)	面積 (ha)	百分比 (%)	面積 (ha)	百分比 (%)
建築區	0.19	0.60	0.48	1.51	0.39	1.23
混淆林	13.16	41.38	13.21	41.54	12.92	40.63
草荒地及其他	0.26	0.82	0.04	0.13	0.04	0.13
檳榔	13.66	42.96	14.16	44.53	13.30	41.82
闊葉林	0.79	2.48	0.84	2.64	1.50	4.72
常綠果樹	3.56	11.19	1.55	4.87	0.15	0.47
針葉林	0.18	0.57	-	-	1.68	5.28
旱田	-	-	0.06	0.19	0.06	0.19
河流	-	-	0.18	0.57	0.19	0.60
空地	-	-	0.09	0.28	0.01	0.03
道路	-	-	0.71	2.23	0.86	2.70
裸露地	-	-	0.48	1.51	0.39	1.23
雜木林	-	-	-	-	0.31	0.97
合計	31.8	100.00	31.8	100.00	31.8	100.00

4-2 崩塌及裸露地

本區頭崙山層之火災山礫石層形成之峭壁，於瑞里地震時崩塌嚴重，其大量崩落土石於後續豪雨堵塞溪床、掩埋鄰近道路，而礫石層之崩塌造成邊坡之後退亦危及坡頂村落與道路。本區崩塌地分布於溪溝兩岸及陡峭谷壁區，並有向源侵蝕現象，而影響區內溪流及坡頂之村落和道路。

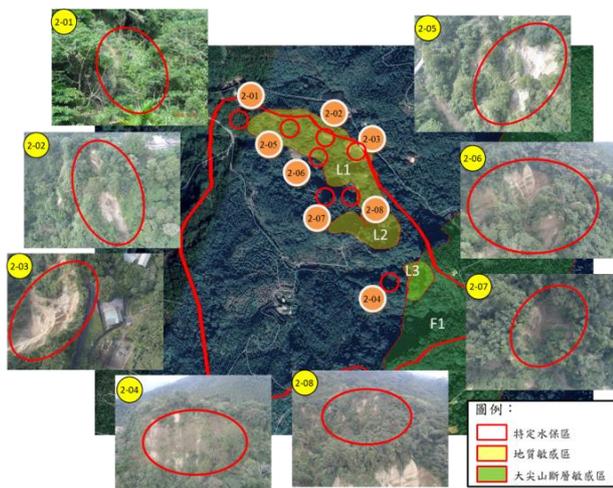


圖 10 第二次通盤檢討調查崩塌地位置圖(底圖為 2018 年衛星影像)(含 UAV 空拍影像)

本計畫調查利用無人飛行載具飛行空拍崩塌區域的現況，第一次通盤檢討所列崩塌地採自然復育方式，原有崩塌面積有擴大及

新增崩塌區域情形相關位置如圖 10，而前次崩塌地編號 1-01，崩塌時間經比對衛星影像應為 2016 年 9 月尼伯特颱風、莫蘭蒂颱風及馬勒卡颱風帶來後續豪雨事件期間造成。

2-2-3 水文分析

水文分析檢討係應用最新的降雨資料，推算特定水土保持區各重現期距之設計降雨強度及洪峰流量。根據水土保持技術規範第 17 條，本特定水土保持區水文分析係採用合理化公式計算。本計畫區並利用衛星空拍資料監測計畫區現況，判釋近年崩塌地有無擴大情形。

計畫區洪峰流量推算結果如表 2 所示。所使用設計年平均降雨量與計畫實施前(原長期水土保持計畫)相近，故推估之特定水土保持區之洪峰流量值與原長期水土保持計畫計算值相近。區內之德安橋主要匯集子集水區 I 之流量，其洪峰流量檢討如表 3。計畫實施後第一次通盤檢討德安橋之洪峰流量為 2.98cms，略高於第二次通盤檢討德安橋之洪峰流量為 2.95cms，但與實施前的 2.96cms 相近。

水理分析採現況調查資料為主，主要分析項目為溪流瓶頸段、橋梁及束縮段之通洪能力。大樹腳崩塌地特定水土保持區瓶頸段主要為德安橋，以下針對該橋通洪能力進行檢討分析。利用曼寧粗糙係數礫石底兩岸混凝土之平均值 0.02 去計算分析，結果顯示(表 4)在 50 年重現期距之洪峰流量下，德安橋岸坡高度足夠，橋下涵洞通容檢核通過。

表 2 大樹腳崩塌地特定水土保持區洪峰流量估算表

子集水區	面積 (ha)	集流時間 (min)	逕流係數 C	降雨強度 I ²⁵	降雨強度 I ⁵⁰	逕流量 Q ₂₅ (cms)	逕流量 Q ₅₀ (cms)
I	8.3	3.85	0.8	146.00	160.00	2.69	2.95
II	19.8	4.11	0.8	146.00	160.00	6.42	7.04
III	3.7	3.48	0.8	146.00	160.00	1.20	1.32

表 3 大樹腳崩塌地特定水土保持區水文分析檢討表

控制點名稱	德安橋		計畫實施前* (1993~2002)	第一次通盤檢討 (2001~2010)	第二次通盤檢討 (2008~2017)
	E(X)	206,653m			
TWD97 坐標	N(Y)	2,607,769m			
清水流流量(cms)			2.96	2.98	2.95
集水面積(ha)			8.3	8.3	8.3
河溪(橋涵)寬度W(m)			6	6	6
河岸(橋涵)高度H(m)			7	7	7
溪床坡度S(%)			22	55/250=22%	55/250=22%
曼寧粗糙係數n			-	礫石底 0.02	礫石底 0.02
流速(m/s)			-	5.0	4.9
流深(m)			-	0.29(臨界流況)	0.29(臨界流況)
通水流量(cms)			-	2.98	2.95
岸坡高度是否足夠			-	7m>1.2X0.29=0.35m	7m>1.2X0.29=0.35m
通洪能力是否足夠			-	7m>1.2X0.29=0.35m	7m>1.2X0.29=0.35m

*計畫洪峰流量為考量洪水挾帶泥砂、漂流木等因素，而加大百分之五十之洪峰流量。

表 4 德安橋通洪能力演算檢討表

控制點名稱	德安橋		計畫實施前* (1993~2002)	第一次通盤檢討 (2001~2010)	第二次通盤檢討 (2008~2017)
	X	206,653m			
控制點 GPS 座標	Y	2,607,769m			
年平均降雨量(mm)			2,478.8	2,600.0	2,500.0
集水面積(ha)			8.3	8.3	8.3
逕流係數			0.8	0.8	0.8
流入時間(min)			3.33	3.33	3.33
流下時間(min)			0.52	0.52	0.15
集流時間(min)			3.85	3.85	3.85
重現期跟 50 年之設計降雨強度(mm/hr)			159.88	160.71	160.00
洪峰流量 Q_p (cms)			2.96	2.98	2.95
計畫洪峰流量 Q_p (cms)			4.44	4.47	4.43

※當河岸高度>1.2 流深，則岸坡高度檢核通過

※當橋涵高度>1.2 橋涵流深，則涵洞通容檢核通過

五、結論與建議

大樹腳長期水土保持計畫規劃原則係以保全對象(民宅)為首要考量，德安橋與農路為次要考量。本區之整體治理規劃以加強野溪治理，以防止土石下移為原則。計畫分別為崩塌地治理、野溪治理與道路水土保持等三大項。已完成工程設施包括防砂壩工程、連續性潛壩工程、固床工程、及德安橋橋面加高 7m(原約 3.5m)工程，以利橋下淨空間增大與土石的無害通過。邊坡冠部處並設置截水溝攔截地表水，為保護道路之安全，於內坑農路跨越河溝處構築箱涵，使排水路暢通。

經第二次通盤檢討後，在土地利用變遷方面，宜農牧地無變化，僅不屬查定範圍之

建地及道路面積略增加；保全對象土地利用現況檢討分析顯示保全對象無變異，無超限利用及違規使用紀錄。土壤沖蝕量在長期水土保持計畫實施後皆明顯降低，且近年無致災事件紀錄。由歷年衛星影像判釋，本區崩塌裸露面積並未有明顯擴大情形。溪流現況檢討分析顯示原長期水土保持計畫規劃之防砂壩、潛壩、跌水、固床工，截、排水工程皆明顯發揮功效。道路與橋樑現況檢討後顯示，農路路面完整，德安橋增高後，橋下淨空間增大可讓土石無害通過。

上述檢討結果顯示本區經長期水土保持計畫實施後目前已具成效。除長期水土保持計畫規劃之工程外，主管機關嘉義縣政府亦投入大量經費進行源頭區治理工程，本區內並有水土保持局南投分局、梅山鄉公所等單位，先後完成水土保持相關工程設施，發揮治山防災之功效。經實施長期水土保持計畫迄今，本區目前無亟需水土保持治理之需求，建議朝廢止特定水土保持區方向辦理，期間若有災害發生，縣府將依相關規定辦理緊急搶修工程，並依現有規劃避難路線進行疏散，回歸正常水土保持管理與維護措施。

參考文獻

1. 水土保持局，嘉義縣梅山鄉圳南村大樹腳崩塌地特定水土保持區長期水土保持計畫(核定本)，2005。
2. 水土保持區局，土地利用圖，2009。
3. 水土保持區局，土地利用圖，2011。
4. 水土保持區局，土地利用圖，2019。
5. 水土保持局，崩塌地特定水土保持區長期水土保持計畫通盤檢討工作手冊，2016。
6. 水土保持法，中華民國 105 年 11 月 30 日總統華總一義字第 10500146991 號令修正公布第 32 條條文，2016。
7. 嘉義縣政府，嘉義縣竹崎鄉緞繻村(嘉-A020)土石流特定水土保持區長期水土保持計畫第一次五年通盤檢討報告，國立嘉義大學土木與水資源工程學系，2012。

我國製造業推動 ISO 50001 能源管理系統成效分析

沈佩玲¹ 廖婷雱² 廖弓普³

¹財團法人台灣綠色生產力基金會工程師

²財團法人台灣綠色生產力基金會副工程師

³財團法人台灣綠色生產力基金會協理

摘要

本研究追蹤統計經濟部工業局「製造業能源管理示範輔導計畫」示範工廠節能成效，分析工廠建置能源管理系統之節能量、節電率以及節能投資情形。亦透過能源查核申報資料，針對能源大用戶之節能情形進行分析，並了解我國能源大用戶導入 ISO 50001 之情況以及建置效益。由研究發現製造業建置 ISO 50001 能源管理系統可協助廠商建立完善之能源管理制度，促進企業製程改善有效落實企業節能減碳，在數位化、大數據時間，智慧化能源管理已是未來趨勢，建置能源管理系統更是做為邁向智慧化能源管理之重要工具。

關鍵字：能源管理系統、ISO 50001、節能減碳、持續改善、減少溫室氣體排放、節能投資

The Analysis of Energy Conservation Performance of Implementing ISO 50001 in Manufacturing Industry in Taiwan

Pei Ling-Sheng¹ Ting Yu-Liao² Gong Pu-Liao³

¹Taiwan Green Productivity Foundation Engineer

²Taiwan Green Productivity Foundation Associate Engineer

³Taiwan Green Productivity Foundation Deputy Director

ABSTRACT

The purpose of this study is to track the performance of energy conservation of demonstrated factories who participated in the project “Energy Management Demonstration Counselling for Manufacturing” provided by Industrial Development Bureau. Moreover, the study also evaluates the amount of energy saving, energy-saving rate and investment condition regarding ISO 50001 implementation.

This study also analyzes the data with regard to the energy saving performed by large electricity consumers (LEC) in accord with the reference called “Energy Conservation Audit Technology.” In this study, we further discuss LEC’s condition and benefits from implementing ISO 50001.

Manufacturing factories establish integrated system with support from applying ISO 50001. The system stimulates the factories to improve the manufacturing processes which leads to energy conservation and carbon reduction. With the tool of Energy Management, factories further pursue the modern trend of intellectualized energy management in this digitized and big data era. In conclusion, ISO 50001 is a significantly essential basic technique for intellectualized energy management.

Keywords: energy management system, ISO 50001, energy conservation and carbon reduction, continuous improvement, energy conservation investment

一、緣起

行政院 106 年核定「能源發展綱領」確立邁向 114 年非核家園的能源轉型架構，針對能源安全部分：擴大能源查核與導入能源管理系統，推動替代化石能源之技術發展與應用，以降低對化石能源的依賴(能源發展綱領，2017)。以及 107 年核定「溫室氣體減量推動方案」推動策略：推動智慧化能源管理，協助產業建置能源管理系統(溫室氣體減量推動方案，2018)。

面臨全球暖化與氣候變遷衝擊，降低能源耗用與強化溫室氣體排放管理已成為當前企業追求永續發展的必要策略；國際企業大廠亦已陸續制訂各種綠色採購標準，要求供應鏈體系符合綠色市場需求。台灣廠商主要以外銷貿易為主，勢必面臨被要求節能減碳的壓力。國際標準化組織(ISO)順應此趨勢，於 2011 年 6 月公告一套具系統化管理模式能源管理系統 ISO 50001，並於 2018 年 8 月公告新版標準，國際間諸多先進企業已藉 ISO 50001 能源管理系統實施獲得利益及節省能源成本。工業部門亟需應用這項標準強化企業能源管理體質，提升整體能源使用效率，落實國家節能減碳政策。

經濟部工業局自 102 年透過能源局經費支持，推動「製造業能源管理示範輔導計畫」，目標為落實製造業進行實質減量，依據能源管理系統 ISO 50001 國際標準協助製造業進行能源管理，並結合節能診斷技術服務，期透過內部管理系統之建置，協助企業獲得節能效益並建立持續改善之機制。本研究統計歷年參與計畫之示範工廠節能成效，並分析廠商建置能源管理系統之節能量、節電率以及節能投資情形。亦透過能源查核申報資料，針對能源大用戶之節能情形進行分析，並了解我國能源大用戶導入 ISO 50001 之情況以及建置效益，以利未來政府單位研擬推動策略。並期盼我國工業部門透過能源管理系統提供的標準化與資訊化的概念，落實節能減

碳之永續目標，持續改善節能績效。

二、能源管理系統輔導架構

能源管理系統旨在協助組織建立能源基線及能源績效指標，並透過高層宣示及系統 P-D-C-A 循環機制持續改善(ISO Energy Management Systems, 2018)，達成系統化能源管理之目標。

依據 ISO 50001 能源管理系統的各項要求，工廠將能源管理系統導入整體企業體制，組織發展並實行政策，由最高管理階層身體力行，實施工廠各項耗能設備審查，鑑別工廠重大耗能設備，找出重大的能源消耗領域，針對該重大耗能設備建立能源績效指標、能源基線，並研擬節能改善的行動計畫以及員工教育訓練，使節能的相關知識以及精神內化到員工身上，執行流程如圖 1 所示。

能源管理系統各階段的輔導工作說明如下：

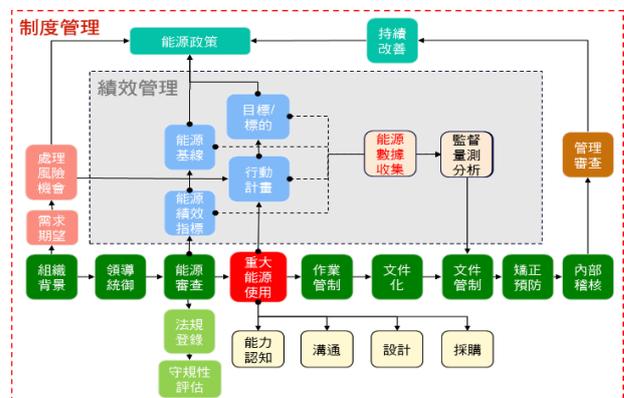


圖 1. ISO 50001 能源管理系統流程架構

2-1 先期成立推行組織

協助廠商成立適當的推行委員會，說明能源管理系統觀念與內部權責分工建議，並透過起始會議展現高階主管推動能源管理系統的決心能源管理系統推行組織架構。建立能源管理推行組織後，應決定直接或間接影響組織達成能源管理系統或改善能源績效之內外部議題，並鑑別利害相關者之需求及期望，評估其風險與機會，找出重大性議題後，針對重大性議題擬定行動計畫，提出因應風

險之預防措施採取行動，並在管理審查階段進行計畫有效性之評估。

2-2 執行能源規劃

本階段為確認能源管理組織架構及現場作業流程，主要重點為發掘內部重大能源使用及確認符合能源管理法規狀態，並透過辦理教育訓練方式，讓工廠內各單位人員參與鑑別內部重大能源使用，並據以作為後續改善規劃的基礎。

2-3 推行能源管理計畫

本階段工作基於工廠實施能源審查結果建立能源基線資料，並據以擬訂能源管理績效指標，以作為後續監測與管理能源績效的依據，並依重大能源使用評估結果，討論後續改善方案與作業管制之需求，依實施能源管理系統的需求，擬訂符合組織營運型態的能源政策。經鑑別重大能源使用設備，透過能源管理團隊討論並結合能源診斷方式找出可改善空間，提出節能方案，著手規劃適當的能源管理目標、標的及行動計畫。為有效控制能源管理成效，開始討論文件化的作業管制架構，編訂符合現場需求的作業管制文件。

2-4 建立和實施能源管理制度

本階段工作依據 ISO 50001 標準建立符合能源管理需求的制度與程序文件並適初與公司既有制度進行整合，包括：建立能源管理手冊，制定能源管理系統程序文件（含作業指導書、操作規範、檢驗標準及紀錄表單）。並依工廠辨識重大能源管理議題之結果，能源管理團隊應討論後續行動計畫與作業管制之需求，再找出節能改善空間，工廠應針對特定作業擬訂管制程序，編訂符合現場需求的作業管制文件。

2-5 實施監督、量測、分析及評估

本階段將針對重大能源使用找出相關變數及靜態因子，決定需要監測、量測及分析能源績效之關鍵特性，並訂定長期監督量測計畫，使得能源績效指標得以有效管理，並與能源基線對應比較，呈現落實節能改善方

案後之節能效益，促使邁向工廠設定之能源管理政策和目標。

2-6 系統內部稽核、教育訓練及管理審查

本階段工作透過實施教育訓練過程，協助人員熟悉內部稽核的執行方式，並藉由改善稽核缺失的過程，修改文件管制內容與加強相關能源管制措施。當所有稽核缺失獲得改善後，召開能源管理審查會議，邀請高階主管主持會議，擬訂後續改善行動。

2-7 外部驗證

本階段工作為配合第三者驗證工作之實施，協助企業負責人員向國際驗證單位提出驗證申請。

三、能源管理系統示範輔導成效

3-1 歷年示範輔導廠商成效

分析 102-108 年度示範廠商建置能源管理系統之節能績效如表 1，由表顯示節電量以電機電子業最高，其次為化工業；總節能量以化工業最高，造紙業次之。其中廠商多針對電力此種能源作節能改善之提案，其原因為《能源用戶訂定節約能源目標及執行計畫規定》(2019)中，規定能源用戶於中華民國一百零四年至一百一十三年平均年節電率應達百分之一以上，因此廠商紛紛研提節電之措施。未來可進一步分析廠商在節省其他能源種類研提節能措施之趨勢，並鼓勵廠商研提多元能源類別改善措施，除針對電力、天然氣，亦鼓勵廠商針對燃料油、燃料煤進行節能活動。

統計 102-108 年共計 228 家示範廠商累計節電率，如圖 2，示範廠商建置能源管理系統首年之平均節電率約 2.2%，以 105 年之示範輔導廠商為例，其累計至 108 年度之節電率為 9.2%。統計 7 年受輔導廠商之平均節電率為 1.9%。證實工廠導入能源管理系統之後，可改善及強化工廠能源管理體質，工廠依 ISO 50001 標準要求，每年訂定節能目標與標的，並提出相對應的節能改善行動計畫，以達成當年度所訂定的節能目標，因此工廠只要推動 ISO 50001，皆可因能源管理系統 PDCA 機

制之運作下，持續落實節能減碳。

表 1. 102 至 108 年度示範廠商節能績效

行業類別	節電 (度)	總節能量 (kLOE)	減碳量 (tonCO ₂ eq)
電機電子業	205,301,158	21,662	114,433
化工業	130,323,665	31,076	122,853
金屬基本工業	94,826,285	13,618	59,882
非金屬礦業	82,845,493	20,292	81,223
紡織業	55,859,325	7,874	37,216
造紙業	92,249,008	23,215	92,204
食品業	9,141,521	1,062	5,416
其他製造業	12,930,101	2,512	9,553
合計	683,476,556	121,311	522,780

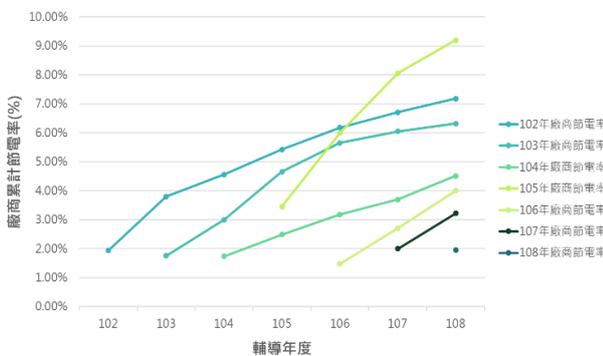


圖 2. 102-108 年度示範廠商累積節電率

分析 102-108 年度示範廠商節能設備類別提案件數、投資經費與節能量之關係，如圖 3，其中 X 軸為設備類別改善提案件數，Y 軸為投資經費，泡泡大小為節能量，由圖可看到空調、空壓機、照明及馬達系統等公用設備之提案件數比熱能系統(鍋爐、蒸汽)提案件數更多，顯示多數廠商研提節能改善提案，多以公用設備為首要選擇。在工廠導入 ISO 50001 能源管理制度後，透過能源規劃與審查，將進而往製程系統研提節能改善提案，由圖 3 顯示製程之總節能量為所有設備節能量之最大宗，故廠商建置 ISO 50001 可引領產業推動製程升級。

進一步分析節能量最大宗之製程設備節能改善方法之節能量，廠商針對製程設備所執行之節能改善手法如圖 4，其中泡泡大小為節能量，由圖 4 可以得知，能源管理之節能手法最為製程設備廣泛使用，提案數量共 328 件，其次為設備改善，提案數量為 253 件，

第三為汰舊換新，提案數量為 120 件。在眾多改善手法中，節能量最大之改善手法為設備改善，共節省 18,524 kLOE，平均節省 1kLOE 之投資經費為 46,163 元。節能量第二大為能源管理，共節省 18,098 kLOE，平均節省 1kLOE 之投資經費為 19,920 元，因此對於製程設備而言，執行能源管理系統，確實能為製程系統帶來多元之改善手法，讓製程系統改善升級更具經濟效益。

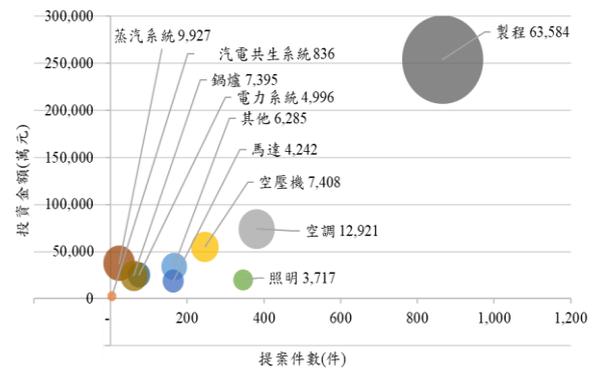


圖 3. 102-108 年度示範廠商節能設備之提案件數與投資金額、節能量之關係

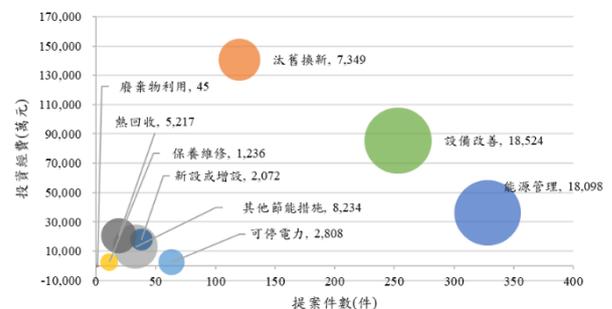


圖 4. 製程設備之節能改善方法提案件數與投資金額、節能量之關係

3-2 能源查核申報資料分析

為探討示範廠商建置 ISO 50001 對於節能減碳是否有較好之效益，本研究以 106 年「生產性質能源查核申報資料」(經濟部能源局, 2017)分析建置 ISO 50001 與否之廠商其節能量、節電量、節電率、投資金額、節省能源成本之節能效益，如表 2。由表 2 可得知已建置 ISO 50001 廠商之節能量、節電量、減碳量較未建置之廠商高，整體的節能成效較佳。已建置 ISO 50001 廠商平均節能投資金額與平均節省能源成本亦較未建置廠商高，原因

應為廠商建置 ISO 50001 取得高階主管支持，提供足夠資源支持，故有較充足經費與人力投入，能源管理行動計畫落實度較未建置之廠商高。

表 2. 已/未建置 ISO 50001 之節能效益分析比較

節能效益	已建置 ISO 50001 廠商 (296 家)	未建置 ISO 50001 廠商 (3,030 家)
平均節能量(kLOE/家)	251	50
平均節電量(kWh/家)	1,979,241	451,141
平均節能投資金額(元/kLOE)	316,873	145,897
平均節省能源成本(千元/家)	34,795	7,988
平均減少碳排放量 (tonCO ₂ eq/家)	1,100,122	733,021

106 年度能源查核申報資料顯示，前 300 大耗電用戶導入 ISO 50001 之家數共 87 家，占前 300 大耗電用戶家數 29%，但用電量占所有能源大用戶 70%，此 87 家耗電用戶之行業類別包含金屬基本工業、化工業、電機電子業、非金屬礦業、造紙業、紡織業，分析各行業類別之節電量，可發現建置能源管理系統對於金屬基本工業、電機電子業、化工業、非金屬礦業之節電情形，皆有良好之成效，如圖 5。

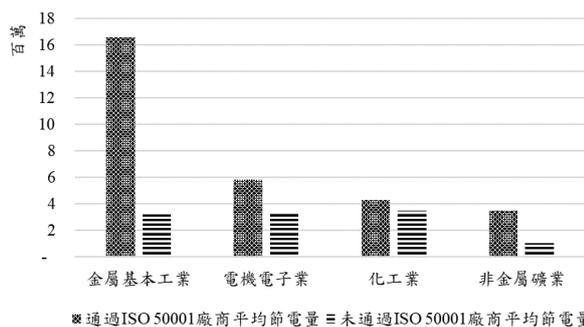


圖 5. 各行業別已/未建置 ISO 50001 平均節電量

四、結論

本研究分析歷年能源管理系統示範廠商節能改善方案，製程改善提案數量最多、投資金額最高且有最高節能改善成效。因此，推動能源管理制度，確實可以有效引導廠商

發掘更多製程改善技術並落實製程改善，促進產業的升級，期望協助製造業工廠做得對之外，更要做得好，成為產業製程改善的助力與推手。

「智慧化能源管理」是許多製造業廠商的目標，企業導入能源管理系統是邁向智慧化能源管理的第一步，能源管理已成為企業內部推動能源績效持續改善的動力。利用能源管理系統能源績效指標與能源基線的建立，培訓工廠人員數據蒐集分析與評估管理的能力，瞭解智慧化生產及管理的實際應用作法，透過能源數據蒐集計畫規劃，可建立能源資訊分析系統基礎架構；依循能源管理系統建立監督、量測及分析機制，對於有意導入大數據分析管理能源使用之企業，更是刻不容緩。

參考文獻

1. International Standard Organization (Ed.). (2018). ISO 50001 Energy Management Systems, Switzerland.
2. 生產性質能源查核申報資料(2017 年版)【資料檔】。台北市:經濟部能源局。
3. 行政院經濟部,「能源發展綱領」,第 4 章,第 2 頁,行政院核定,台北,2017。
4. 行政院環境保護署,「溫室氣體減量推動方案」,第 4 章,第 8 頁,行政院核定,台北,2018。
5. 能源用戶訂定節約能源目標及執行計畫規定(2019 年,12 月 25 日)。

沖刷後泥岩製作成無機聚合物之工程性質研究

王金鐘¹ 晨晃² 何芊葳³ 蔡有豪⁴ 蔡育綸⁴ 王威⁴

¹正修科技大學土木與空間資訊系教授

²正修科技大學土木與空間資訊系講師

³正修科技大學土木與空間資訊系研究生

⁴正修科技大學土木與空間資訊系大學生

摘要

我國泥岩涵蓋面積約 1400 餘平方公里，若以中度沖蝕每年平均 2~4mm/m² 計算，平均每年沖蝕量約為 420 萬立方公尺，沖刷量如此龐大，是目前環境保護所必須面對的重要議題。本研究利用鹼活化技術激發水淬爐石粉之膠結能力，第一階段無機聚合物膠結料製作，其試拌配比(1)鹼當量(AE)設定為 6%、8%及 10% (2)鹼模數比(MS)設定為 1.0、1.5 及 2.0 (3)液膠比為 1.67、1.25、1 等調配，再進行一系列試驗，並選出較佳配比製作成無機聚合物膠結料。第二階段為泥岩磚無機聚合物的製作，以最佳配比作為膠結料，再以沖刷後泥岩粉當成填充料，其試拌配比为(1)鹼當量(AE)設定為 6%、8%及 10% (2)鹼模數比(MS)設定為 1.5 (3)液膠比為 0.8、1.0、1.2，(4)骨膠比為 3、4 及 5，並澆置成 5cm*5cm*5cm 試體，並養治 3 天、7 天及 28 天再進行一系列試驗並探討其工程性質。試驗結果顯示：(1)水淬爐石粉無機聚合物膠結材其凝結時間隨鹼當量增加而縮短，亦隨液膠比下降而縮短；(2)水淬爐石粉無機聚合物膠結材抗壓強度隨鹼當量增加而增加，亦隨著液膠比下降而增加；(3)泥岩磚無機聚合抗壓強度、吸水率隨鹼當量增加而增加，亦隨骨膠比增加而增加。(4)泥岩磚無機聚合物當鹼當量 6%、8%及 10%，鹼模數比 1.5，液膠比 1.00 及骨膠比為 5 為最佳配比。

關鍵字：泥岩磚、水淬爐石粉、鹼當量、鹼模數比、液膠比、骨膠比、凝結時間、抗壓強度

A Study of Engineering Properties of Geopolymers Made from Eroding Mudstone

Chin-Chung Wang¹ Chen-Hoang Lo² Chian-Wei Ho³
You-Hao Cai⁴ Yu-Lun Cai⁴ Wei Wang⁴

^{2,3,4}Civil Engineering and Geomatics Department, Cheng Shiu University

¹Corresponding Author, Civil Engineering and Geomatics Department, Cheng Shiu University

ABSTRACT

Our country's mudstone covers an area of about 1,400 square kilometers, if calculated by annual average of 2~4mm/m² of erosion, the average annual erosion is about 4.2 million cubic meters, such a large amount of erosion, it is an important issue that must be faced by environmental protection at present, this study uses alkali activation technology to stimulate the cementing ability of water quenched furnace stone powder, the first stage of production of geopolymer cement, its trial mixing ratios: (1)alkali equivalent(AE) was set to 6%, 8% and 10% ,(2)alkali modulus ratio (MS) was set to 1.0,1.5 and 2.0,(3) liquid binder ratio, such as the

deployment of 1.67, 1.25 and 1, executed a series of tests, and choose the best ratio to make geopolymer cement, the second stage is the production of mudstone geopolymer bricks and choose the best ratio to make geopolymer cement, the second stage is the production of mudstone geopolymer bricks, use the best ratio as the geopolymer cement material, and then use the washed mudstone powder as a filling material, its trial mixing ratios: (1) alkali equivalent (AE) was set to 6%, 8% and 10%, (2) alkali modulus ratio (Ms) was set to 1.5, (3) liquid binder ratio (L/B), such as the deployment of 0.8, 1.0 and 1.2, (4) aggregate binder ratio (A/B) was set to 3, 4 and 5, and poured set to 5cm*5cm*5cm test specimens, to curing 3 days, 7 days and 28 days after executed a series of tests, then carry out a series of experiments and investigate its engineering properties, test results show (1) the setting time of water-quenched furnace stone powder geopolymer cementing material decreases with the increase of alkali equivalent, also shortened as the liquid binder ratio decreases. (2) the compressive strength of water-quenched furnace stone powder geopolymer cementing material increases with the increase of alkali equivalent, and also increases with the decrease of liquid binder ratio ratio (3) the compressive strength and water absorption rate of mudstone geopolymer bricks increase with the increase of alkali equivalent, and also increase with the increase of aggregate binder ratio, (4) the best ratio of mudstone geopolymer bricks is 6%, 8% and 10% alkali equivalent, alkali modulus ratio 1.5, liquid binder ratio is 1.00 and aggregate binder ratio is 5.

Keywords: mudstone geopolymer bricks, water quenched furnace stone powder, alkali equivalent, alkali modulus ratio, liquid binder ratio, aggregate binder ratio, setting time, compressive strength

一、前言

我國泥岩涵蓋面積約 1400 餘平方公里，若以中度沖蝕每年平均 2~4mm/m² 計算，平均每年沖蝕量約為 420 萬立方公尺，沖刷量如此龐大，而我國又地狹人稠，在可利用且有限土地的資源情形下，如何將沖刷後泥岩再利用，解決沖刷泥岩堆置問題，也是目前環境保護所必須面對的重要議題。近年來隨著全球科技不斷的進步，所造成的環境污染日益嚴重，但是隨著全球環保意識高漲，民眾對於環境品質的要求也與日俱增，如何處理日益增多的事業廢棄物，乃是當務之急，刻不容緩。

為強化國人『永續發展、資源再利用』，將沖刷泥岩粉為填充材，製造具強度良好且兼具環保之無機聚合泥岩磚，並進行各項試驗，以作為日後工程界設計參考，達到生態、節能、減廢、健康等綠建築評估指標。

二、文獻回顧

泥岩本身顆粒細小，且膠結性十分疏鬆，透水性又低，因此遇雨水就變得十分軟滑，順坡向下流動，坡面因而形成雨溝和蝕溝；植生相當困難，到處童山濯濯。泥岩裸露，稜脊和溝谷密佈是泥岩惡地形的一種特有景觀。

2-1 泥岩特性

泥岩組成礦物主要為伊萊石、綠泥石、石英、長石、雲母等。其粒度分佈範圍為粘土粒 (<4μm) 佔 27~31%，粉砂粒 (4~60μm) 42~49%，及砂粒 (60μm~4mm) 20~31%，pH 值高達 8~9.2，液限為 40%，塑性指數為 9%，屬於低塑性黏土 (CL)。

2-2 水淬高爐石粉

一貫作業煉鋼廠之高爐煉鐵過程須加入石灰石作為助熔劑，並加入焦炭作為還原劑，鐵礦石經還原反應後殘留之非鐵物質即為高爐石，高溫融熔液態高爐石經過高壓水冷卻

方式產出「CNS12223 水淬高爐爐渣」[4]，經研磨成粉後主要應用於營建工程，替代水泥作為混凝土之膠結材，由中聯爐石處理資源化股份有限公司產出，細度 4000cm²/g，比重 2.93。

2-3 鹼活化劑處理技術

無機聚合物是一項具有前瞻性之發展，鹼活化劑通過激發矽酸鋁材料，如粉煤灰、偏高嶺土、磨細高爐礦渣、高嶺粘土等，與鹼性溶液製成之應用，其中爐石粉亦含有 SiO₂ 與 Al₂O₃，爐石具有潛在水硬性作用之材料，純爐石的顆粒結構穩定，可直接使用純爐石作為主要膠結材料，利用鹼性溶液溶解爐石顆粒表面玻璃質，溶出 Ca²⁺破壞矽鋁氧化物之鍵結，並與鹼性溶液所分離之陰離子經由聚合反應生成水化產物，因而組成矽凝膠體，具有高早強、工作性佳、較佳的抗化學侵蝕能力、抗凍融循環能力及具有較佳的黏結力，但是仍有速凝、高收縮量等缺點，而高濃度的活化劑卻可以增加結構強度與縮短凝結時間[1,2,3,6,7]。

2-4 CNS-382 普通磚規範 [5]

- (1) 適用範圍：本標準適用於以粘土為主要原料燒製而成，用於構築窯爐、土木、建築、造園等用途之普通磚(以下簡稱磚)。
- (2) 種類：依品質及形狀分類如下。
 - (一)依品質區分：1種磚、2種磚、3種磚。
 - (二)依形狀區分：實心磚、開孔磚。
- (3) 外觀：不得有使用上有害之龜裂或損害。
- (4) 尺度及許可差：依表 1 之規定。
- (5) 品質：應符合表 2 之規定。

表 1 磚之尺度及許可差 (單位: mm)

名稱	長	寬	厚
尺度	200	95	53
許可差	±6.0	±4.0	±2.7

表 2 磚之品質規定

名稱	1種磚	2種磚	3種磚
吸水率(%)	10 以下	13 以下	15 以下
抗壓強度 MPa { kgf/cm ² }	>30.0{300}	>20.0{200}	>15.0{150}

三、試驗計畫

3-1 試驗變數

本研究為強化國人『永續發展、資源再利用』，若能以沖刷後泥岩作為填充材，以水淬爐石粉製作成無機聚合物作為膠結材，製造出強度佳、環保優之無機聚合物—泥岩磚，資源再利用，不但能解決無處堆置窘境，也不會造成國家資源的浪費，更能避免環境過度的開發及二度污染的問題產生，達到生態、節能、減廢、健康等綠建築評估指標。

本研究產製技術分二個階段，第一階段水淬爐石粉無機聚合膠結材製作，本研究主要採用鹼當量(AE) 6%、8%及 10%，鹼模數比(Ms)1.0、1.5、2.0 與液膠比(L/S)1.67、1.25 及 1.0 等配比，並製作 5 cm×5 cm×5 cm 之立方體試體，經養護 3 天、7 天及 28 天，探討其抗壓強度和凝結時間等關係，其試驗變數如表 3 所示。

表 3 水淬爐石粉無機聚合膠結材產製之試驗變數

材料名稱	拌合配比		
	液膠比 (L/S)	鹼當量 (AE)	鹼模數 (Ms)
水淬 爐石粉	1	6%	1.0
	1.25	8%	1.5
	1.67	10%	2.0

第二階段無機聚合泥岩磚製作，其配比採用(1)鹼當量(AE)設定為 6%、8%及 10% (2) 鹼模數比(MS)設定為 1.5 (3)液膠比為 0.8、1.0、1.2，(4)骨膠比為 3、4 及 5 等調配壓坯成 5cm*5cm*5cm 試體，養治 3 天、7 天及 28 天進行一系列試驗，如表 4 所示。

表 4 無機聚合泥岩磚產製之試驗變數

材料名稱	拌合配比			
	液膠比 (L/S)	鹼當量 (AE)	鹼模數 (Ms)	骨膠比 (A/B)
泥岩磚	0.8	6%	1.5	3
	1.0	8%		4
	1.2	10%		5

3-2 試驗材料

本研究所使用材料分項說明如下：

- (1) 第一階段水淬爐石粉無機聚合物製作
 - ① 水淬爐石粉: 細度 4000 cm²/g，中聯提供。
 - ② 矽酸鈉(Na₂SiO₃): 榮祥公司所生產之 3 號水玻璃。
 - ③ 氫氧化鈉(NaOH): 工業級藥品。
- (2) 第二階段無機聚合泥岩磚製作
 - ① 泥岩取至高雄縣阿蓮鄉清和宮旁

四、試驗結果與分析

4-1 泥岩、水淬爐石粉等材料物理與化學特性

本研究所使用泥岩取至高雄縣阿蓮鄉清和宮旁，經烘乾、研磨成粉末狀，其 pH 值為 9，液限為 40%，塑性指數為 9%，屬於低塑性黏土(CL)。再由 X 光繞射分析(XRD)瞭解泥岩各個相位的組成生成物如圖 1 所示，圖中顯示泥岩主要結晶形化合物為 SiO₂，次要結晶形化合物為 Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、K₂O、Na₂O 等，再由 X 光螢光分析(XRF)探討泥岩試樣中各元素含量，其中以 C、O、Si、Al、Fe、Ca、K、Mg、Na 等元素含量最高，配合 XRD 分析所得的各種化合物，再以重量分析計算其化學成份計量，進而推算泥岩各元素的氧化態含量百分比，如表 5 所示。再以掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察泥岩晶相變化得知泥岩由片狀黏土礦物推疊而成，並存在許多大小不等的孔隙如圖 2 所示。

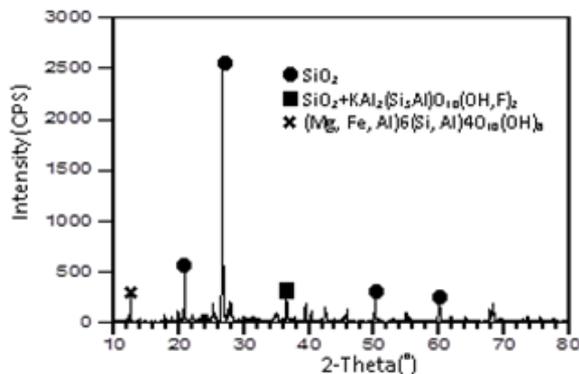


圖 1 泥岩 X 光繞射分析圖

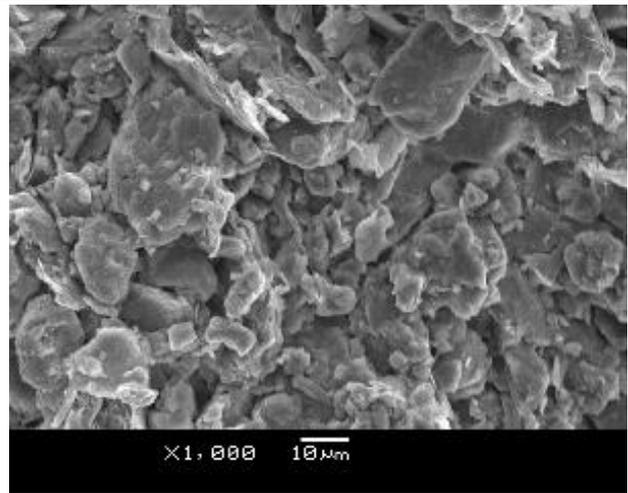


圖 2 泥岩電子顯微鏡晶相圖

本研究選用的水淬爐石粉取至中聯資源其細度為 4000cm²/g，首先由 X 光繞射分析(XRD)瞭解爐石粉各個相位的組成生成物如圖 3 所示，圖中顯示爐石粉為非結晶質化合物組成，再由 X 光螢光分析(XRF)探討水淬爐石粉試樣中各元素含量，其中以 C、O、Si、Al、Fe、Ca、K、Mg、Na 等元素含量最高，配合 XRD 分析所得的各種化合物，再以重量分析計算其化學成份計量，進而推算水淬爐石粉各元素的氧化態含量百分比，如表 5 所示。再以掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察爐石粉晶相變化，得知爐石粉由多邊形片狀及角粒狀結構推疊而成，並存在許多大小不等的孔隙，如圖 4 所示。

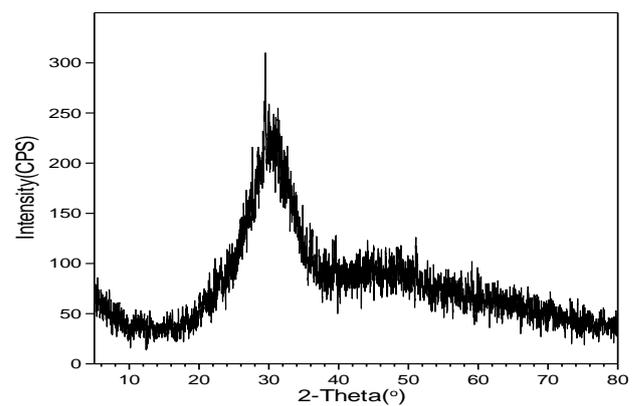


圖 3 爐石粉 X 光繞射分析圖

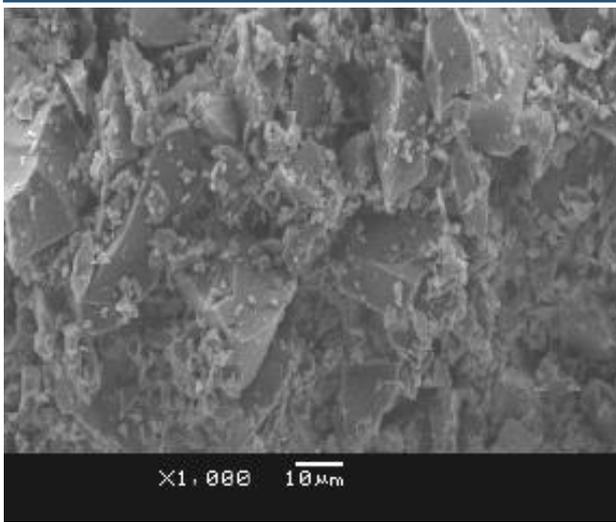


圖 4 爐石粉微鏡晶相圖

表 5 泥岩、水淬爐石粉化學組成成份

名稱	CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	SO ₃ (%)
泥岩	10.45	52.41	12.53	5.58	1.82	2.17	9.99
水淬 爐石粉	46.49	36.74	15.80	0.30	-	0.65	-

4-2 第一階段水淬爐石粉無機聚合膠結材製作

4-2-1 凝結時間

1. 鹼當量之影響：

以鹼模數比 2.0，液膠比 1.25 為例，當鹼當量由 6% 提高至 8% 時，初凝時間會由 55 分鐘縮短至 45 分鐘，而終凝時間會由 80 分鐘縮短到 75 分鐘；當鹼當量由 8% 提高至 10% 時，初凝時間會由 45 分鐘縮短至 45 分鐘，而終凝時間會由 75 分鐘縮短到 70 分鐘。因此鹼當量為 6% 之初凝時間與終凝時間較鹼當量 10% 總縮短了 10 分鐘，如圖 5 所示。結果表示鹼當量的增加導致凝結時間有縮短的趨勢，其主要原因是由於含鹼當量增加使鹼溶液濃度增加，而造成 OH⁻ 離子破壞膠結料結構，使 Si⁴⁺、Al³⁺ 及 Ca²⁺ 溶出量增加，導致爐石無機聚合物有加速聚合反應之現象。

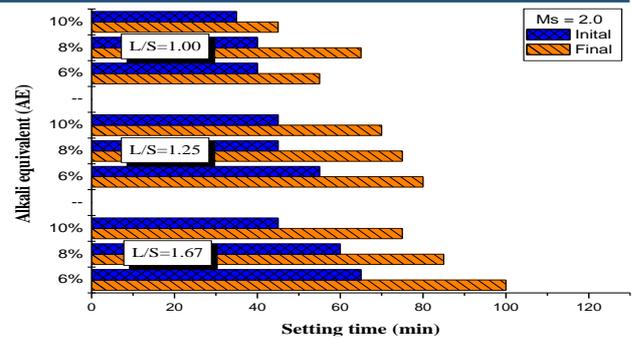


圖 5 鹼當量對爐石無機聚合物之凝結時間之影響

2. 鹼模數比之影響：

當液膠比固定為 1.25 及鹼當量為 6% 之情況下，隨著鹼模數比由 1.0 上升至 1.5 及 2.0 時，其初凝時間分別為 60、55 及 45 分鐘，而終凝時間則分別為 100、80 及 80 分鐘。當變化鹼當量為 8%、10%，其鹼模數比由 1.0 提高至 2.0 時，其初凝與終凝時間介於 45~60 分鐘、80~100 分鐘之間，如圖 6 所示。由此可知，凝結時間會隨著鹼模數比增加而縮短，主要是因為當鹼模數比增加時，使爐石無機聚合物之漿體中 Si⁴⁺ 含量增加，Si/Al 原子莫耳之比值產生改變，因而促使聚合反應加速而凝結時間呈現縮短之趨勢。

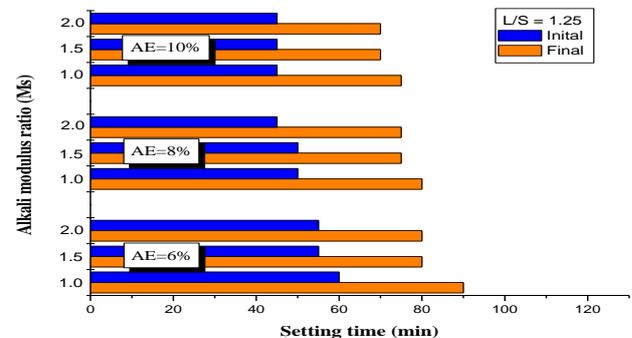


圖 6 鹼模數比對爐石無機聚合物之凝結時間之影響

3. 液膠比之影響：

當固定鹼當量 6% 及鹼模數比為 1.0 之條件下，液膠比由 1.0 提升至 1.25 時，其初凝時間與終凝時間增加了 15 分鐘與 25 分鐘；當液膠比由 1.00 提升至 1.67 時，其初凝時間與終凝時間增加了 15 分鐘與 20 分鐘，如圖 7 所示。由試驗結果得知，凝結時間將隨著液膠比的增加而增加，主要是由於固定鹼當量

及鹼模數比，且增加其液膠比時，鹼當量的濃度被鹼金屬矽酸鈉溶液之水分所稀釋，而導致降低鹼當量及鹼模數比之濃度，增加漿體之凝結時間。

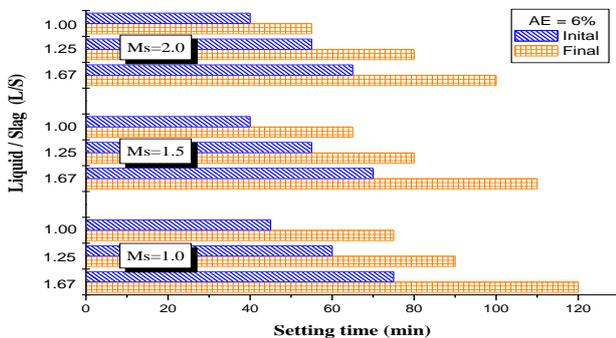


圖 7 液膠比對爐石無機聚合物之凝結時間之影響

4-2-2 抗壓強度

1. 鹼當量之影響：

針對 6%、8% 及 10% 鹼當量範圍，並控制其鹼模數比為 2.0 及液膠比為 1.00、1.25 及 1.67 之條件下，改變鹼當量 6% 至 8% 時之 28 天養護齡期時抗壓強度範圍分別為 186.6~244.6 kgf/cm²、338~353.3 kgf/cm²、394~396.4 kgf/cm²；當改變鹼當量 8% 至 10% 時之 28 天養護齡期時則分別為 244.6~263.8 kgf/cm²、353.3~366.8 kgf/cm²、396.4~435.3 kgf/cm²，由上述強度趨勢可看出鹼當量 6% 提升至 10% 時，其 28 天抗壓強度最高成長了 41%，隨著鹼當量的提高則抗壓強度也相對的上升，如圖 8 所示，其中以鹼當量 AE=10%、鹼模數比 Ms=2.0、液膠比 L/S=1.0 抗壓強度最高效果最佳。

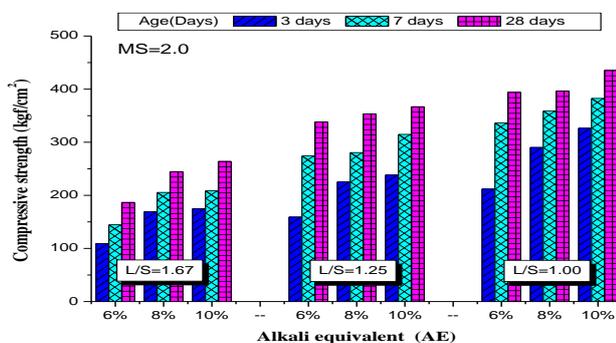


圖 8 鹼當量對爐石無機聚合物之抗壓強度之影響

2. 鹼模數比之影響：

當固定鹼當量為 10%，液膠比為 1.00，而鹼模數比分別為 1.0、1.5 及 2.0 時，其 3 天抗壓強度分別為 283.8 kgf/cm²、195.7 kgf/cm²、326.4 kgf/cm²，其 28 天時則為 356.6 kgf/cm²、408.5 kgf/cm²、435.3 kgf/cm²，如圖 9 所示。由試驗結果得知，隨著鹼模數比由 1.0 提升至 2.0 時，3 天之抗壓強度約可增加 15%，28 天則可增加約 22%，因此鹼模數比之增加有益於強度的提升，原因在於鹼模數比之提高，可以提供充足之 SiO₂ 含量，使其形成更多之 C-S-H 膠體，而使漿體內部結構更為緻密。

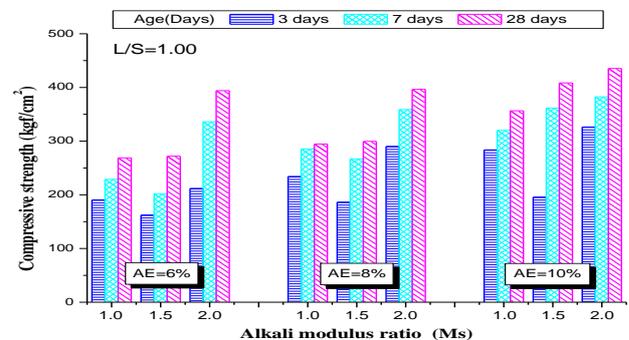


圖 9 鹼模數比對爐石無機聚合物之抗壓強度之影響

3. 液膠比之影響：

當鹼當量 10%、鹼模數比 2.0 及液膠比為 1.67 時，其養護時間 3 天、7 天及 28 天之抗壓強度分別為 174.7 kgf/cm²、208.5 kgf/cm² 及 263.8 kgf/cm²，在相同鹼當量及相同的鹼模數比條件下，當液膠比由 1.67 下降至 1.00 時其抗壓強度由 326.4 kgf/cm²、382.5 kgf/cm² 及 435.3 kgf/cm²，如圖 10 所示。而養護齡期 28 天時，當液膠比由 1.67 降低至 1.00 時，抗壓強度約可成長 65%，由試驗結果得知，液膠比之提升會使抗壓強度降低，其原因為液膠比之增加降低鹼激發劑之濃度，而導致抗壓強度降低之現象。

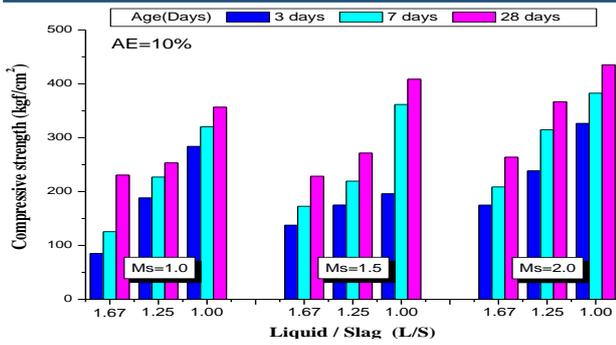


圖 10 液膠比對爐石無機聚合物之抗壓強度之影響

4-3 爐石粉無機聚合物對掃描電子顯微鏡晶相之影響

電子顯微鏡(SEM)觀察水淬爐石粉無機聚合物晶相變化，如圖 11 至 12 所示，在相同液膠比 1.0 之條件下，皆可看到 C-S-H 膠體附著在熔融狀聚合反應生成產物結構上，但當鹼當量由 6% 提升至 10% 時，其 C-S-H 膠體逐之減少之現象，且隨著鹼模數比的提升，亦可看到其中出現了裂縫，Yip et al. [8] 指出當鹼活化劑鹼度較低時，其 C-S-H 膠體以 □ 形表示與 Si-O-Si 架狀結構以 ○ 形表示，兩者共同存在，而 C-S-H 膠體可填塞 Si-O-Si 架狀結構所產生孔隙。由此可知當低鹼度時，其強度來源主要以 C-S-H 膠體為主；然而鹼度較高時以 Si-O-Si 架狀結構為主。

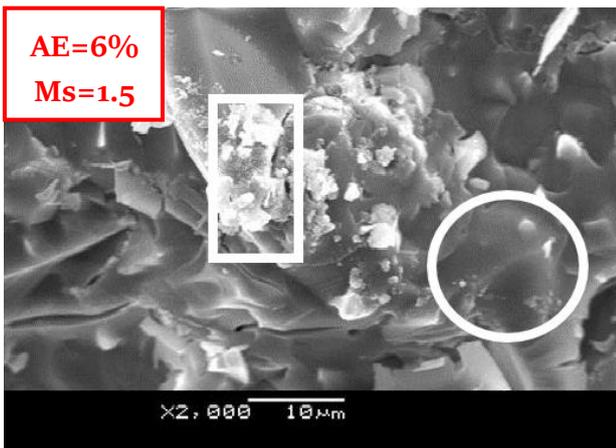


圖 11 爐石無機聚合物掃描式電子顯微鏡晶相圖

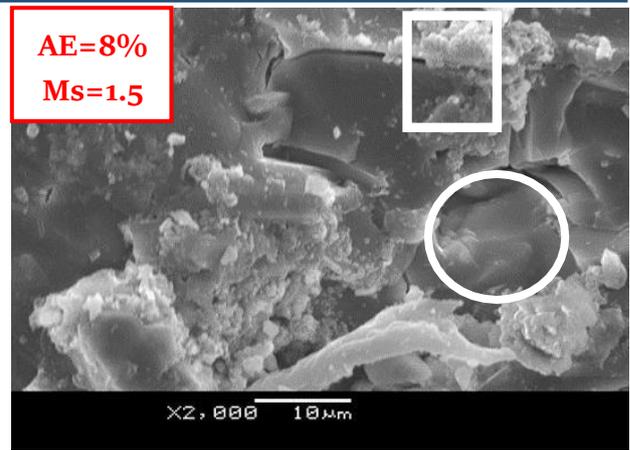


圖 12 爐石無機聚合物掃描式電子顯微鏡晶相圖

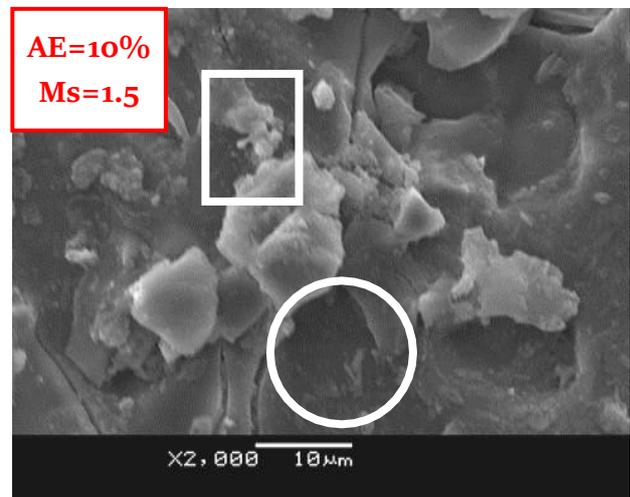


圖 13 爐石無機聚合物掃描式電子顯微鏡晶相圖

4-4 第二階段無機聚合泥岩磚製作

由於鹼模數比提高促使聚合反應更激烈，更易產生乾縮裂縫，本研究特別選用鹼模數比 1.5，液膠比為 0.8、1.0、1.2，骨膠比為 3、4 及 5 等調配，並探討一系列相互關係。

(1) 凝結時間

1. 鹼當量之影響

當鹼當量為 6%、液膠比為 0.8 及骨膠比為 5 之情況下，其初凝時間與終凝時間分別為 31 分鐘與 44 分鐘。當鹼當量提升至 10% 時，初凝與終凝時間則縮短至 28 分鐘與 41 分鐘，由圖 14 所示。由上述結果表示其初終凝時間皆隨著鹼當量之增加而縮短，由於含鹼當量提高則聚合反應較為激烈且快速造成

泥岩磚漿體拌合過程中快速達初凝時間。

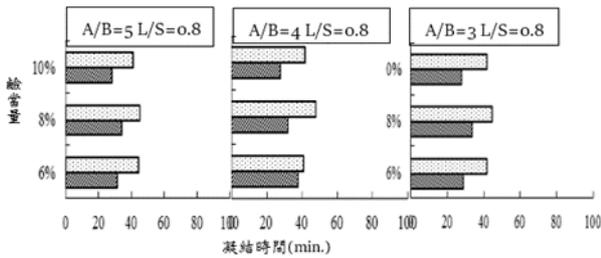


圖 14 鹼當量對無機聚合泥岩磚凝結時間之影響

2. 液膠比之影響

當固定鹼當量 6% 及骨膠比為 5 時，其液膠比由 0.8 提升至 1.2 時，終凝時間則由 44 分鐘提高至 54 分鐘；當液膠比由 1.0 提升至 1.2 時，終凝時間則由 54 分鐘提高至 75 分鐘，延長了 70%，由圖 15 所示。因此凝結時間會隨著液膠比的提高而延長，主要是液膠比上升使鹼當量的濃度被鹼金屬矽酸鈉溶液之水分所稀釋，進而增加凝結時間。

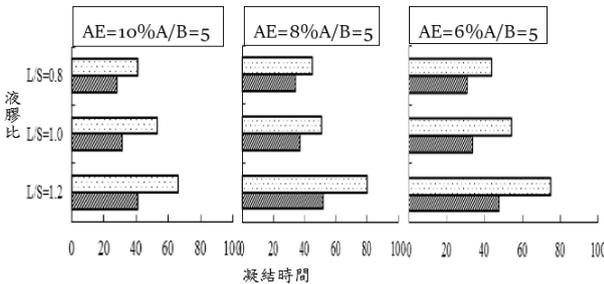


圖 15 液膠比對無機聚合泥岩磚凝結時間之影響

3. 骨膠比之影響

當鹼當量為 6% 及液膠比為 1.2 之條件下，骨膠比 A/B=3 之初凝時間與終凝時間分別為 46 及 68 分鐘，當骨膠比由 A/B=4 提升至 A/B=5 時，其初凝與終凝時間分別為 48 及 75 分鐘，換言之增加了 14% 及 4%，由圖 16 示。試驗結果明顯表示凝結時間會隨著骨膠比的提高亦表示泥岩磚中膠體減少了，因此其聚合反應速度減緩，使其凝結時間有增長之趨勢。

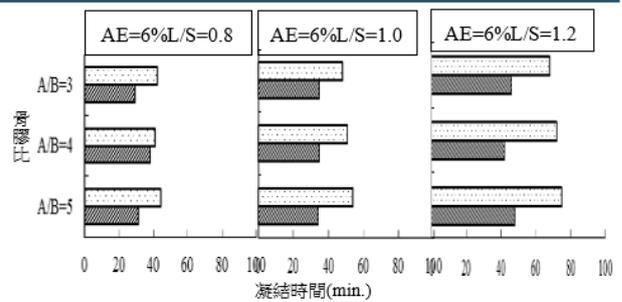


圖 16 骨膠比對無機聚合泥岩磚凝結時間之影響

(2) 抗壓強度

1. 鹼當量之影響

當固定鹼當量 6%、液膠比 0.8 及骨膠比為 5 之條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之抗壓強度分別為 415kgf/cm²、530kgf/cm² 及 570kgf/cm²，當鹼當量由 6% 提高至 10% 時之抗壓強度分別為 240kgf/cm²、263kgf/cm² 及 296，約可降低 40%，由圖 17 所示。由此可知，抗壓強度隨養護齡期增加而上升，提高鹼當量反而降低其抗壓強度，原因在於提高鹼當量時，鹼激發溶液之 pH 值亦較高，所含之氫氧根離子亦較多，具有較強的解離能力，加速聚合反應試體內部分佈著更多的乾縮裂縫，因此使其強度降低。

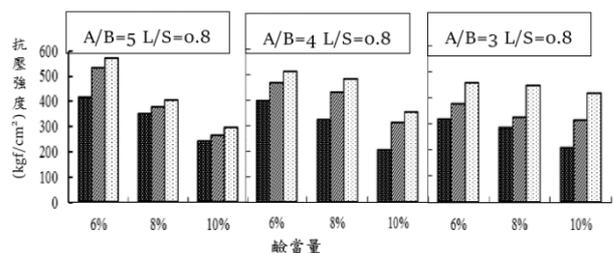


圖 17 鹼當量對無機聚合泥岩磚抗壓強度之影響

2. 液膠比之影響

當固定鹼當量為 6% 及骨膠比為 5 之條件下，變化液膠比分別為 0.8、1.0 及 1.2 時，其 28 天時則為 570kgf/cm²、248kgf/cm²、119kgf/cm²，由圖 18 所示。

由上述結果得知，隨著液膠比之增加由 0.8 上升至 1.2 時，28 天則約下降 95%，所以當液膠比下降時抗壓強度會有上升的趨勢，主要是由於液膠比(L/S)提高使漿體內含水量增加，況且聚合反應具有脫水效果，因此當漿體硬化後水分蒸發因而形成過多的孔隙，造成試體結構產生破壞面促使抗壓強度降低。

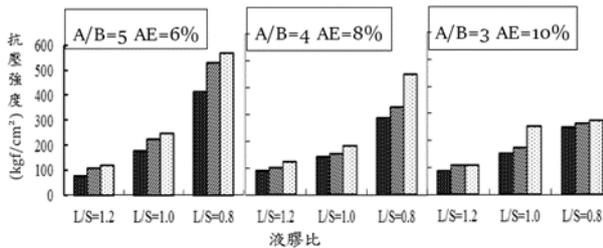


圖 18 液膠比對無機聚合泥岩磚抗壓強度之影響

3. 骨膠比之影響

在不同齡當量以及液膠比於不同齡期 3、7、28 天時，骨膠比為 3 之泥岩護坡材料其抗壓強度最低，當齡當量 6%、及液膠比為 0.8 時，骨膠比 5 之泥岩護坡材料 28 天養護齡期抗壓強度為 570 kgf/cm²，當骨膠比由 5 下降至 3 時，其 28 天養護齡期之抗壓強度降低至 460kgf/cm²，相當於降低了 19%，由圖 19 所示。由上述可知，骨膠比在 3 至 5 範圍內，其抗壓強度亦會隨著骨膠比增加而增加，試體結構更趨緊密，使其抗壓強度增加。就抗壓強度而言，以齡當量 AE=6%、8%及 10%，水膠比 0.8，骨膠比 4 和 5 之配比抗壓強度效果最佳。

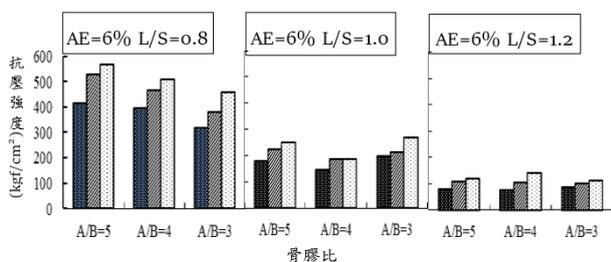


圖 19 骨膠比對無機聚合泥岩磚抗壓強度之影響

(3) 吸水率

1. 齡當量之影響

當固定齡當量 AE=6%，骨膠比 A/B=5 及液膠比 L/S=0.8 的條件下，在養護 3 天、7 天及 28 天之吸水率分別為 0.2%、0.82%、0.98%，當齡當量由 6%提高至 10% 時其吸水率下降為 0.41%、0.61%、0.98%。因此，以 28 天吸水率為例，當齡當量由 6%提高至 10%時，其吸水率下降了 19%，如圖 20 所示。由上述可知，吸水率會隨著齡當量提高而下降，亦隨著養護時間增加而降低，主要是因為高齡當量可使其產生更多之 Si-O-Si 及 Al-O-Al 之架狀結構，內部結構更為緻密，吸水率亦呈現下降之趨勢。

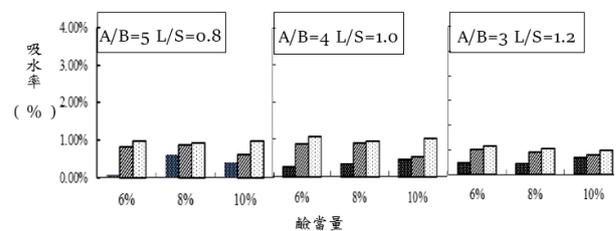


圖 20 齡當量對無機聚合泥岩磚吸水率之影響

2. 液膠比之影響

當骨膠比固定 A/B=5，AE=6%，變化其液膠比為 1.2、1.0、0.8 時，其養治 28 天吸水率則介於 0.2~2.4%、0.2~1.8%、0.2~0.98% 之間，如圖 21 所示。整體來說，當液膠比由 0.8 提升至 1.2 時，以養治 28 天養護齡期為例其吸水率上升約 54%。由上述可知，隨著液膠比下降吸水率亦會降低，主要是因為低液膠比使試體內部之水分降低，吸水率因而降低。

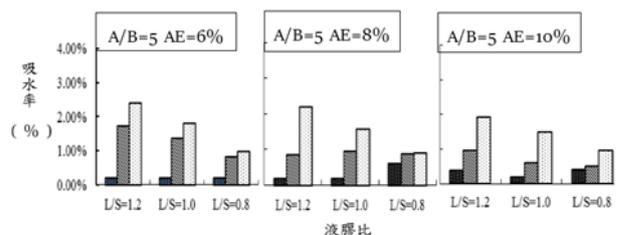


圖 21 液膠比對無機聚合泥岩磚吸水率之影響

3. 骨膠比之影響

當固定鹼當量 6%、液膠比為 1.2、骨膠比 $A/B=5$ 之條件下，其養護時間 3 天、7 天及 28 天之吸水率分別為 0.2%、1.73% 及 2.4%，當骨膠比 $A/B=5$ 下降至 $A/B=3$ 時，其吸水率分別為 0.2%、1.4%、2.53%，整體約增加了約 6%，如圖 22 所示。因此，吸水率會隨著骨膠比的下降，內部架狀結構更趨疏鬆，因此吸水率有增加的趨勢。

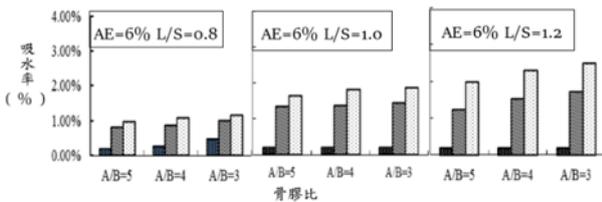


圖 22 骨膠比對無機聚合泥岩磚吸水率之影響

綜合上述，各配比之吸水率均遠低於 10%，均滿足 CNS-382 普通磚第 1 種磚吸水率的要求。其中鹼當量分別為 $AE=10\%$ ，液膠比 $L/S=0.8$ 及骨膠比 $A/B=5$ 之配比之吸水率為最低。

五、結論

本研究為探討沖刷後泥岩製作成無機聚合物之工程性質研究，經由試驗結果加以分析，可歸納出以下幾點：

- (1) 爐石粉無機聚合物膠結材，其凝結時間隨鹼當量增加而縮短；亦隨液膠比下降而縮短；其中以鹼當量 6%、鹼模數比 2.0、液膠比 1.00，凝結時間最短；而泥岩磚無機聚合物凝結時間隨著鹼當量、液膠比增加而縮短。
- (2) 爐石粉無機聚合物膠結材抗壓強度隨鹼當量增加而增加，其 28 天抗壓強度最高成長了 41%；抗壓強度隨著鹼模數比增加而增加，其 28 天抗壓強度可增加約 22%；抗壓強度隨著液膠比下降而增加，抗壓強度約可成長 39%。
- (3) 泥岩磚抗壓強度隨鹼當量增加而增加約下降 12%；隨著液膠比增加而降低，約降低 40%；抗壓強度在骨膠比 3 至 5 範圍內隨骨膠比增加而增加，其 28 天抗壓強度相對增加

約 12%。

(4) 泥岩磚吸水率隨液膠比增加而上升，在骨膠比 3 至 5 範圍內，隨骨膠比增加而降低，其中以鹼當量 6%、液膠比 0.8、骨膠比 5 吸水率最低。

(5) 泥岩磚最佳配比為鹼當量 6%、8%，鹼模數比 1.5，液膠比 0.8 和 1.0，骨膠比為 4 和 5，能夠同時滿足 CNS-382 普通磚第 1 種磚之抗壓強度及吸水率要求。

參考文獻

1. 李宜桃，“鹼活化還原矽漿體之收縮及抑制方法研究”，國立中央大學土木工程研究所，碩士論文，2003。
2. 林瑋倫，「鹼激發爐石基膠體工程性質之研究」，國立台灣科技大學營建工程系，碩士論文，2009。
3. 鄭大偉，「無機聚合技術的發展應用及回顧」，礦冶第 54 卷，第 1 期，第 141-157 頁，2010。
4. 經濟部標準檢驗局，「CNS 12223-A2218 水淬高爐爐渣」，修正公布日期，2013。
5. 經濟部標準檢驗局，「CNS 382-R2002 普通磚」，修正公布日期，2007。
6. Davidovits, J., Mineral Polymers and method of making them, USA Paten, No.4, pp.349-386, 1982.
7. Xu, H., Van Deventer, J. S. J., “The geopolymerisation of alumina-silicate minerals, International Journal of Mineral Processing”, Vol.59, pp.247-266,2000.
8. Yip C. K., Lukey G. C., and Van Deventer J. S. J., The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation, Cement and Concrete Research, Vol.35, pp.1688-1697, 2005.

從使用者觀點探討綠建築產品-以高雄市為例

卓巧雯¹ 王裕仁²

¹ 國立高雄科技大學土木工程系土木工程與防災科技在職專班碩士生

² 國立高雄科技大學土木工程系副教授兼副系主任

摘要

因應高雄市環境課題，為有效規劃建立高雄永續居住環境改造，高雄市政府自 2014 年訂定《高雄厝設計及鼓勵回饋辦法》，政府以獎勵措施鼓勵民間興建更適切地方特質的永續建築。本研究將探討使用者對於此政策申請意願及看法、實際使用之狀況、其中之利弊及長遠影響為如何。本研究採用深度訪談法方式，針對使用者包含建商、建築師、住戶三方的角度進行分析，歸納產業界實際操作現況。透過本研究給予《高雄厝設計及鼓勵回饋辦法》之條文內容修訂建議，使政策更臻完善，既符合政府永續經營目標亦貼近使用者需求。

關鍵字：高雄厝、綠建築、深度訪談

Discussing Green Building from the User's Perspective - Take Kaohsiung City as an Example

Cho Chiao-Wen¹ Wang Yu-Ren²

¹ Master Student, M.A. program, Department of Science and Technology, National Kaohsiung University

² Associate Professor, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

In response to Kaohsiung's environmental issues, in order to effectively plan and renovate the Kaohsiung sustainable living environment, Kaohsiung City has created a response to the Kaohsiung LOHAS Building Plan since 2014 that government encourages private construction through incentives to building sustainable with appropriate local characteristics, this research will discuss the users' opinions of this policy, the actual use of it, the pros and cons, and what are the long-term impact. this research adopts in-depth interview method, Analyze from the perspective of users including builders, architect and resident, Summarize the actual operation status of the industry. Through this research give to Kaohsiung LOHAS Building Plan proposal to amend the law ' according to the government's sustainable business goals and meet user needs, the policy will be more complete.

Keywords: nature of article, requirements on submitted articles

一、前言

1.1 研究動機

高雄市政府自 101 年推動「高雄厝」政策，

針對環境面、社會面、法規面、經濟面，制定 3 大核心、4 大指標、12 項政策工具，透過強制及鼓勵性的方式，目標減緩或改善環境課題所帶來之居住環境負面影響，然而，法令

推動至今 9 年，針對使用者及業界實際操作卻未曾探討，在自由市場的機制下，如何使政策永續經營，並藉由該政策帶來的社會效益，打造高雄宜居生活環境。

1.2 研究目的

根據上述之研究背景、動機及相關資料彙整與蒐集，探討高雄厝使用者對於此政策申請意願及看法、歸納產業界實際操作現況，再針對住戶方了解實際居住上情形，透過本研究給予《高雄厝設計及鼓勵回饋辦法》之條文內容修訂建議，使政策更臻完善，既符合政府永續經營目標亦貼近使用者需求。

二、文獻回顧

2-1 高雄厝政策緣起

為落實「生態、經濟、宜居、創意、國際」的大高雄五項施政核心價值，以動人的在地建築文化、前瞻的綠建築技術、由下而上的社區營造參與，找到屬於在地建築之認同性、識別性、自明性與未來性，兼具國際觀視野亦有本土化的堅持。爰規劃推動高雄厝執行計畫，初期並以推廣宣導「高雄厝」計畫、制定興建高雄厝設計準則、高雄厝指標及認證機制及辦理媒合工作等方式推廣執行，及成立單一窗口協助辦理推廣事宜，藉以打造高雄特色建築，喚起全國對於高雄風土及人文的關注，並帶動建築與觀光相關產業，促進產業升級，創造土地與建築的價值，樹立熱帶氣候地區永續環境與建築的新典範。(推動高雄厝資訊網，2020)

2-2 三大核心、四大指標、十大設計準則

表 1 高雄厝十大設計準則

項次	設計準則	內容
1	會呼吸的透水基盤	透過草坪與透水性的設計，讓建築物與土地連結與觸動。
2	有效的深遮陽	經由挑簷或遮陽或陽台等設計，對應出四個區域不同的方位與特性，能帶來涼爽的庇蔭，使其凸顯出高雄市氣候環境的性格。
3	綠能屋頂的設計	將目前高雄地區屋頂層的現況，重新整合為具有自然生態風貌的特色，並搭配間接減低直達熱負荷，

		與塑造出開放性的逃生平台。
4	在地材料與技術的導入	高雄市的歷史與地域特色，最直接的敘事方式，便是經由材料與技術手法，來呈現設計元素上，讓使用者更貼近建築物。
5	融入場域的形象設計	不同地理場域，可產生不同的對話，而要傳遞出獨有的關係與地域性味道，需由基地內外的調和，來展現出意象的環境自明性。
6	埕空間的創造	多元的族群文化建構了高雄市不同的聚落風貌，而河洛、客家、原住民族等所共通的集會場所氛圍，更是在地文化中不可或缺的象徵，故由天井、露臺、陽台等小空間來重新詮釋。
7	人性化的空間通用設計	經由通用設計的觀念，可讓每個空間環境的使用性，提升至無論年齡、身心機能等差異，皆能享有舒適自在的使用。
8	合宜的使用空間機能	由使用者的空間機能為出發點，尋找合宜的空間使用量，不僅可免除不必要的空間，更可創造更多舒適環境與生活多樣和諧與互動性。
9	環保健康建材的應用	一般民眾在室內空間的時間約佔每天的 90% 以上，因此居「住」空間的健康生活是必要性，故納入環保健康的觀念，來提升優質的環境。
10	創造有效通風的開口	經由開口部之設計，使空氣自然對流，達成室內自然通風之均勻性，降低室內二氧化碳，並改善室內空氣溫溼度。

高雄厝設計原則朝向三大核心理念，環境永續、反映在地自明性及居住健康，訂定指標性設計原則及地區性設計原則，經由操作設計手法來訂定 10 項設計準則，此外，劃定四大指標領域於設計準則中，包含環境負荷、社會文化、服務品質以及室內環境品質指標。整合以上 2.3.7 點可以由外觀明顯辨別該案是否為高雄厝，相較於一般建案，高雄厝的建案擁有較深的陽台，加上複層式的綠化，可以有效阻擋陽光直射，並淨化空氣。



圖 1 高雄厝景觀陽台

綠能屋頂的設計指在屋頂上設置綠化或太陽光電，可避免陽光直射造成居室內高溫並避免屋頂漏水，並利用太陽光電產生能源，達到永續發展；人性化的空間通用設計以通用設計為概念，無論年齡、身心機能等差異，皆能舒適自在使用。



圖 2 高雄厝綠能屋頂

2-3 實施方式

高雄厝的申請戶主要分為建商與自主戶，而自主戶申請上細分為新建案申請及舊屋修造申請。

(一) 建商提出新建案申請

建商在設計新建案時須依照《高雄市高雄厝設計及鼓勵回饋辦法》的法令限制及規定，規劃設計後，送至高雄市政府工務局建築管理處申請建照執照，建照執照核准、核發後，該建案始可開工。

自主戶申請的部分：

1. 自主戶提出新建案申請

自主戶需委託專業技師，就目前基地規範之建蔽、容積率等相關資訊去換算該房屋可建築面積並依照《高雄市高雄厝設計及鼓勵回饋辦法》的法令限制及規定，規劃設計後，送至高雄市政府工務局建築管理處申請建照執照，建照執照核准、核發後，該建案始可開工。

2. 由自主戶委託專業技師

針對目前原有房屋之基地建蔽、容積率等相關資訊去換算該房屋可擴增面積，再依照《高雄市高雄厝設計及鼓勵回饋辦法》的法令限制及規定，規劃設計後，送至高雄市

政府工務局建築管理處辦理增建，申請核准後始得開工。

2-4 自由市場機制

自由市場是經濟學術語，指金錢、貨物的流動完全是根據市場自然的狀況而進行的，政府不介入控制。自由市場經濟就是以「市場主導」作為經濟體系運作的原則。自由市場的原則是希望小政府大市場，但政府儘量不介入或儘可能避免干預經濟發展，在市場需求擴張時期會造成經濟過熱，容易產生經濟泡沫，在經濟萎縮時期，沒有政府主導的提振措施，會令經濟長期衰退，所以現實各地政府仍會對經濟有不同程度的參與。

自由市場機制是由市場上的參與者可共同參與市場決策的機制，如同高雄厝政策並非強制性的規定，建商可選擇蓋或不蓋，消費者同樣可選擇買或不買，在銷售資訊公開透明下，想獲得更好居住環境的民眾來說，高雄厝產品是更理想的選擇。

三、研究方法

3-1 研究架構

本研究首先確立和研究主題相關之相關內容，接著進行多方面的文獻探討，包含：高雄厝的政策內容與實施方法、自由市場機制等，並結合收集到的眾多文獻資訊，設計出一份研究問卷，再發放施測的同時進行相關人士的深度訪談，最終分析彙整問卷以及訪談的調查結果，提出本研究之結論與建議。

3-2 深度訪談法之問題設計

藉由高雄厝政策相關資料及彙整，設計深度訪談問題，針對高雄厝使用者作成訪談紀錄，研究問題如下：

針對高雄厝法令部分，就操作實務上面臨過哪些問題？

所面臨之狀況，就現有法令有哪些建議修正意見？

3-3 深度訪談法資料結果

本次訪談對象共 9 名，分別為實務操作過高雄厝綠建築政策之建商、建築師及目前

居住高雄厝建案之住戶 3 種類組各 3 位，對於使用者觀點探討高雄厝綠建築法令可精進之處，其資料彙整結果如下所述：

編號	類組	職稱	訪談日期
A-1	建商	董事長	110/04/04
A-2	建商	經理	110/04/04
A-3	建商	經理	110/04/05
B-1	建築師	建築師	110/04/17
B-2	建築師	建築師	110/04/18
B-3	建築師	建築師	110/04/18
C-1	住戶	屋主	110/04/22
C-2	住戶	屋主	110/04/22
C-3	住戶	屋主	110/04/22

(一) 景觀陽台需有 1/3 面積以上綠化，是否能減少綠化設置比例，發揮有效使用空間。

法規規範設置 3 米深景觀陽台需用覆土方式設置植栽，同時綠化設置面積須達 1/3 以上，在實際完工案例會發現到，陽台扣除綠化部分僅剩一個走道，對於住戶來說可以休憩、使用的空間有限，使用效益不高，進而影響購屋意願。

編號	相關答覆
A-2	景觀陽台要以覆土方式設置 1/3 的綠化，就外觀來說可以看到花花綠綠，民眾看到會被吸引進而來案場了解，但是進到室內會覺得種花草的地方綠化比例很大，走出去的空間很狹小，不能拿椅子坐在外面看風景休息，覺得很浪費空間，是不是可以縮小比例，可能是 1/4 或是 1/5 的綠化比例，才能有效利用陽台空間，進而民眾才會願意購買。
B-1	陽台及綠化面積的尺寸，在施工上有詢問同行的經驗及設計，所以在覆土方面注意建材厚度，讓植栽面跟使用平台沒有高低差，我們是建議看未來能不能修法，如果植栽數量有增加取代設置一般草皮，綠化面積可以縮小範圍，可以增加住

	戶有效的使用空間
C-1	目前是住在 107 年度完工的案子，當時是被景觀陽台吸引，想說陽台可以種一些花草或是菜，當休閒娛樂，陽台是很大沒錯，但是綠化太多了，有時候要整理最外圍的植物很難整理，建商設的自動灑水系統也噴不到，自己在整理也覺得太大了，維護上面要花很多心思，沒有想像中的簡單。

(二) 放寬景觀陽台北向日照之限制。

法規規範景觀陽台規劃時，設置方位需為冬至日日照達一小時以上之範圍內，通常為北向設置無法達成此需求，此規範主要考量綠化部分若無足夠日照，植物恐無法存活，惟使用者反應可種植耐陰植物，亦或透過建築設計讓陽光折射等方法解套，希望此規範可鬆綁。

編號	相關答覆
A-3	景觀陽台規劃時有法規規範要設置面冬至日日照達一小時以上之範圍內，所以導致北向的地方不能設置因為冬至日照短，不過北向日照在夏天也是一樣很強，是不是可以放寬法令限制，讓在北向日照的住戶可以享受到景觀陽台遮陰的效果。
B-2	高雄厝的建築特色就是可以從外觀很明顯看到綠化，搭配建築設計就是一個美麗的作品，有時候臨路面有部份，可能是北向就不能做景觀陽台就很可惜。
B-3	法令有一條是規範景觀陽台的日照範圍，可能是考量植物沒照到陽光活不了，不過這可以透過建築手法讓陽光折射進去，所以這方面的限制感覺沒必要去約束。

(三) 景觀陽台是否能規範最小深度，非規範深度為 3 米。

針對景觀陽台規範深度至少3m深，若室內以大坪數規劃，其附屬空間比例較低，與景觀陽台所占坪數比例較適中；若室內以小坪數規劃，因為深度限制，其附屬空間比例較高，會有室內部分空間與景觀陽台坪數接近之情形。

編號	相關答覆
A-3	景觀陽台不論室內坪數大小規範相同(深度超過3米不得計入面積，且總陽台面積總和不得超過該層樓地板面積1/8)，若以相同的價錢而言，小坪數(30坪以下)的高雄厝陽台佔總坪數較多，就空間比例上來講，民眾會覺得陽台太大室內太小，會降低他們購買的意願，如果可以去規範說我們最小深度是2.5米，對於小坪數來講會覺得比較合理。
C-2	目前是買40坪的高雄厝，扣掉公設比大概實際27坪左右，當初是喜歡種植花草才選擇高雄厝產品，當初空屋感覺起來還好，實際上家具進駐室內空間變小以後發現，景觀陽台好像跟我們客房差不多大，有點後悔購買，詢問過建商才知道景觀陽台有限制面積一定要做到這麼大，反而吃掉室內空間，有點可惜。

(四) 回饋金係數過高。

高雄厝透過獎勵方式給予建蔽容積率，前提是申請人須繳交回饋金，透過使用者反應，設置高雄厝設施因為工法繁瑣以致施工人力、原料、成本增加，同時還需繳交回饋金，對於建商負擔較大，希望可以適時調降回饋金繳納係數，提高建商設置意願，讓市府美意達到雙贏。

編號	相關答覆
A-1	高雄厝造價成本比起一般產品更高，3m深的景觀陽台，深度較深還要預留覆土深度，所以綁紮的鋼筋數會增加，還要種植植物、留設排水跟澆灌系統，成本約比一般產品高1~2成，還要繳交設施回饋金，實是一大負擔，但藉由景觀植栽創造的垂直綠化、錯層外觀造型等，都能讓城市變得更環保也更美

觀。若不是支持這項政策，不然真的是會打退堂鼓。之前105年回饋金就有調降過一次，是不是還有機會再調降，想必會提高更多建商的申請意願。

B-1	其實很多民眾都對高雄厝很有興趣，但是一聽到要繳回饋金其實都很反彈，我已經花那麼多錢蓋房子了，為什麼還要再繳錢給政府，但是經過宣導市府的美意，其實也還是會乖乖繳錢，換個方向想就是花錢多買建蔽、容積率，當然也是有聽到要繳錢就不申請的，如果可以適度調降回饋金係數，讓民眾繳的錢變少，或許可以減輕他們的負擔。
-----	--

四、結論

- 一、綜觀以上，高雄厝政策為鼓勵性政策，建商、建築師可透過，在民眾亦可在購屋時自由選擇是否購買高雄厝綠建築產品，在自由市場的機制下，政府永續政策的美意，是否能達到使用者需求，同時達到政策永續經營目標，若能適時傾聽產業界之需求，在不違反立法宗旨下進行法令修正，想必能創造永續、宜居的居住環境。
- 二、藉由深度訪談了解使用者針對高雄厝綠建築法令，實務操作、使用上主要遇到問題有以下幾點：
 1. 景觀陽台需有1/3面積以上綠化，是否能減少綠化設置比例，發揮有效使用空間。
 2. 放寬景觀陽台北向日照之限制。
 3. 景觀陽台是否為規範最小深度，非規範深度為3米。
 4. 回饋金係數過高、以致高雄厝建案售價提高。

五、著作權授權條款

投稿著作所有列名作者皆同意其投稿之文章經本研討會刊登後，即授權本刊收錄於其他資料庫中，並得為重製、公開傳輸、授權用戶下載、列印等行為。為符合資料庫之需求，並得進行格式之變更。

六、投稿手續

向本研討會主辦單位索取或上網 (<https://ce.npust.edu.tw/2021%E5%B7%A5%E7%A8%8B%E6%B0%B8%E7%BA%8C%E8%88%87%E5%9C%9F%E6%9C%A8%E9%98%B2%E7%81%BD%E7%A0%94%E8%A8%E6%9C%83/>) 下載著作權授權書，填妥後將著作權授權書、論文原稿(一份)，標明「2021 工程永續與土木防災研討會稿件」上傳至本研討會網站。所有稿件歡迎以電子檔案上傳，檔案須為 word 檔，以利電腦排版修改。

七、受稿及連絡處

807 高雄市三民區建工路 415 號
國立高雄科技大學土木工程系
TEL：(07)3814526 轉 15202 FAX：(07)3831371
Email：J108241128@nkust.edu.tw

參考文獻

1. 推動高雄曆資訊網。
2. 蘇志勳，2020 高雄曆 3.0 健康建築活化計畫成果宣導專輯，第 2 章，第 12~21 頁，高雄市政府工務局，高雄，2020。
3. 林憲德，亞洲觀點的綠色建築，詹式書局，台北，2011。
4. 蔡厚男，綠屋頂技術手冊，詹式書局，台北，2013。

重載交通量路段之不銹鋼氧化渣瀝青混凝土成效

林登峰¹ 黃隆昇² 王偉筑³ 劉昆祐⁴

¹義守大學土木工程學系特聘教授

²樹德科技大學室內設計系及建築與室內設計研究所教授

³義守大學土木工程學系碩士

⁴義守大學土木工程學系專題生

摘要

隨著環保意識高漲，人們常將資源再利用及減少天然資源開採聯想一起，並針對此觀念著手進行一連串相關試驗，以證實可行性，政府也隨之訂定相關規範，確保資源再利用之安全性。本研究將不銹鋼氧化渣碎石砂以 40% 之取代量，取代天然粒料碎石砂應用於瀝青混凝土中，藉由基本性質試驗、膨脹試驗、SEM 試驗、EDS 試驗、TCLP 試驗、馬歇爾試驗、平坦度試驗、抗滑試驗及車轍試驗，探討其物理及工作性質，並推廣氧化渣再利用途徑。經研究發現本次使用之氧化渣碎石砂比重高於天然碎石砂，且其粒徑較天然碎石砂細，更適合應用於瀝青混凝土中；參照 CNS 15311 針對不銹鋼氧化渣碎石砂進行膨脹試驗得知，其膨脹量遠小於規範值，且透過 EDS 試驗得知內部含有大量 Ca 元素，Ca 與 O 結合形成 CaO 而使不銹鋼氧化渣具有親油性質，使粒料容易被瀝青完全包裹。從追蹤評估不銹鋼氧化渣瀝青混凝土之試驗道路，得知開放通車後 12 個月之平坦度標準差分別為 3.2mm 與 2.5mm，皆小於規範值 3.4mm，而抗滑係數與車轍深度符合規範，顯示試驗道路狀況良好，表示將不銹鋼氧化渣瀝青混凝土作為道路面層材料有利於提升道路耐久性。

關鍵字：不銹鋼氧化渣瀝青混凝土、TCLP、試驗道路成效

一、前言

鋼爐渣是鋼鐵工業之副產品，其特徵為含有高含量的鈣質、矽質和鐵質。鋼爐渣可分為轉爐石(BOF)、氧化渣(EAF)和還原渣(LFS)。人們將其應用於許多領域，例如道路建設，瀝青混凝土，農業肥料和土壤改良(Yi Jiang, Tung-Chai Ling, Caijun Shi, and Shu-Yuan Pan, 2018)。但鋼爐渣因經常被不肖業者違法堆棄，堆積場中的鋼爐渣量總計達數百萬噸/年，導致現今鋼爐渣資源再利用多被冠上許多嚴厲的規範以限制其使用，如同日本與歐洲各國，皆針對鋼爐渣再利用制定一套標準化規範，同時也努力研發鋼爐渣再利用之新領域。隨著科技快速發展，近年廢棄物再利用的觀念逐漸升溫，由於氧化渣具有優良的強度與低成本的特性，可將其列為永續建築的材料選擇之一，以取代部分天然粒料

(江呈文，2020、Yousef R. Alharbi, Aref A. Abadel, Nourhan Elsayed, Ola Mayhoub, and Mohamed Kohail, 2020]。但氧化渣含有毒金屬，因此若可浸出量過高可能會影響生態系統，但 S.K.Singh 等人透過，浸出測試與 TCLP 等相關試驗驗證，在任何 pH 下，有毒金屬皆不會超過浸出允許之規範。因此，氧化渣可以在不破壞環境之狀況原則下，適當的應用於工程材料(S.K.Singh, Prabhat Vashistha, Ramesh Chandra, and Anand K. Rai, 2021)。由(邱鳳嬌，2018)指出，氧化渣具有表面粗糙且多稜角、低磨損率、低健性、高硬度及高內摩擦角等優點，若經破碎、磁選及篩分等處理後，可作為鋪面基底層級配及面層材料使用。交通工程之基礎建設持續發展的兩個主要條件為減少能源消耗與保護自然資源，但由於瀝青混凝土的生產過程將消耗大量能量及不可再生的自然資源(Seyed Ali Ziaee, and

Kambiz Behnia,2020)，若使用氧化矽取代天然粒料，可減少部分天然資源的消耗，而氧化矽在經過適當安定化處理後應用於瀝青混凝土中，可改善瀝青混凝土之力學性質及其耐久性(Marta Skaf, Juan M. Manso, Ángel Aragón, José A. Fuente-Alonso, and Vanesa Ortega-López, 2017)，因此將氧化矽使用於瀝青混凝土中之比例可逐漸提升。根據相關研究顯示[8]，氧化矽應用於瀝青混凝土中，其穩定值、回彈模數及剪切模數，將會隨著取代量增加而提升，且相較使用天然粒料之瀝青混凝土，應用氧化矽之瀝青混凝土將獲得更好的性能。(Morteza Jalili Qazizadeh, Hamid Farhad, Amir Kavussi, and Aliasghar Sadeghi, 2018)等人認為，在瀝青混合料中添加氧化矽比起添加轉爐石矽可獲得較高的疲勞壽命，且疲勞壽命將隨添加量增加而提升。(S.M. Motevalizadeh, and H. Rooholamini, 2021)也提出，隨著氧化矽取代量提升，可有效增加瀝青混凝土之抗張力強度，而氧化矽細粒料提升之效果優於氧化矽粗粒料。由於氧化矽經過多項試驗及研究皆指出適用於瀝青混凝土中，且隨著環保意識與再利用之觀念日漸提升，氧化矽之再利用勢在必行，而氧化矽更能細分為碳鋼與不銹鋼氧化矽兩種，本研究則使用不銹鋼氧化矽作為

二、不銹鋼氧化矽瀝青混凝土配合設計

2.1 試驗材料性質分析

本研究所使用之粗粒料皆為天然粒料，而細粒料分為天然粒料碎石砂及氧化矽碎石砂。由表 1 顯示，天然粒料碎石砂比重為 2.73，而氧化矽碎石砂比重為 3.35，由於氧化矽為煉鋼副產物，因此內部金屬化合物將導致其比重高於天然粒料，由於比重差異 0.2 以上，為了避免瀝青混合料體積不足與級配降格等問題，因此配比設計時需以體積法施作；含砂當量結果顯示，兩種碎石砂皆符合規範，且氧化矽碎石砂之潔淨程度較天然粒料碎石砂優秀，更適合應用於瀝青混凝土。

表 1 試驗材料基本試驗

	天然粒料 碎石砂	氧化矽 碎石砂	規範值
比重	2.73	3.35	-
含砂當量 (%)	86.43	90.88	≥50

圖 1 為天然及氧化矽粒料之篩粒徑曲線，由圖可知本研究所使用之氧化矽碎石砂較天然碎石砂細，並將篩分析結果計算後得知，天然粒料碎石砂之細度模數為 3.19，氧化矽碎石砂之細度模數則為 2.48，而一般瀝青混凝土粒料之細粒料，最佳應用之細度模數為 2.3~3.1 之間，相較之下天然粒料碎石砂稍微大於適用範圍，顯示本研究之氧化矽碎石砂較天然粒料碎石砂更適合應用於瀝青混凝土。

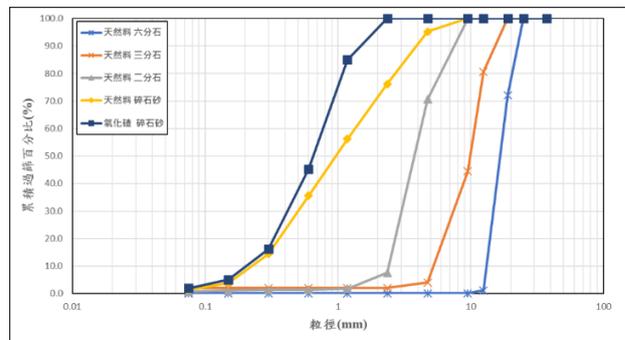


圖 1 試驗材料篩分析試驗

本研究依照 CNS 15311 針對氧化矽碎石砂進行試驗，以得知氧化矽碎石砂經過水合作用之潛在膨脹，而粒料膨脹原因為水分侵入，水分破壞粒料內部結構，改變化學成分，進而產生膨脹現象。試驗結果顯示，氧化矽碎石砂於齡期 7 天之膨脹量為 0.09%，遠小於膨脹料規範值 0.5%，且將氧化矽碎石砂應用於瀝青混凝土，可利用瀝青膠泥將粒料完全包裹，大幅降低水侵害的現象，因此判斷氧化矽碎石砂並無膨脹疑慮。

本研究依據 NIEA R201.15C 規範進行檢測，了解氧化矽之重金屬溶出狀況，以探討氧化矽有害物質之量值有無超出法規規定值。試驗結果顯示，氧化矽中鉛、鎘、銅、汞之最大含量皆為 N.D；最大總鉻為 0.03(mg/L)；最大六價鉻為 <0.05(mg/L)、最大總錳為 0.055(mg/L)、最大總砷為 <0.05(mg/L)、最大

總銀為 0.618(mg/L)，試驗項目皆符合規範值，由此得知氧化矽之重金屬溶出情況符合經濟部事業廢棄物再利用管理辦法之規定。

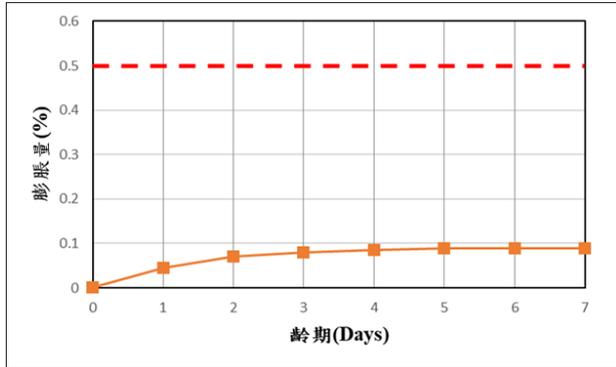


圖 2 氧化矽膨脹試驗

表 2 氧化矽 TCLP 試驗

	Pb	Cd	Cr	Cr ⁶⁺	Cu	Hg	Se	As	Ba
TCLP (mg/L)	N.D	N.D	0.03	<0.05	N.D	N.D	0.055	<0.05	0.618
標準值	4.0	0.8	4.0	0.2	12.0	0.016	0.8	0.4	10.0

圖 3 為氧化矽之 SEM 成像圖，由圖得知氧化矽結構表面粗糙且表面之粒形成方正狀，圖中白色結晶物為 CaO，其使氧化鈣具有親油性質。表 3 為氧化矽 EDS 試驗，藉由軟體協助解讀峰值並數值化之成分分析圖，由此可初步看出氧化矽之主要成分為何，得知主要成分為 C、O、Mg、Si、Ca，而其中以 O 與 Ca 元素含量最多。

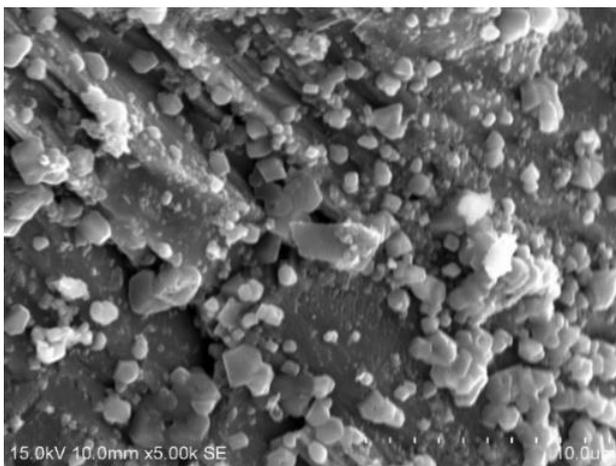


圖 3 氧化矽 SEM 成像圖

表 3 氧化矽成分分析

	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Cr	Mn
Weight%	7.82	38.56	3.75	2.36	13.47	25.59	6.33	2.13
Atomic%	14.22	52.61	3.36	1.91	10.47	13.94	2.66	0.85

2.2 馬歇爾配比設計

本研究利用馬歇爾配比設計方法進行氧化矽瀝青混凝土性質探討，並採用密級配 19.0mm 規範標準，透過分析氧化矽瀝青混凝土之穩定值、流度值、單位重、孔隙率、VMA、VFA，來決定最佳含油量及粒料級配使用比例。以瀝青含油量 3.5~5.5 進行設計並進行馬歇爾試驗，圖 4 為氧化矽取代量 40% 之配比曲線。由圖 5 可知單位重數值隨含油量增加而上升，其原因瀝青膠泥進入粒料孔隙內，因此提高整體瀝青混凝土之單位重；空隙率數值則隨含油量增加，而逐漸下降，符合規範之含油量區域為 4.5%~5.5%；VMA 值 13.33%~14.86%，符合規範之含油量區域為 3.5%~5.5%；VFA 隨含油量增加由 48.27% 提高至 76.57%，符合規範含油量區域為 4.5%~5.4%；穩定值介於 1372kgf~1528kgf 之間，故含油量 3.5%~5.5% 皆符合規範；流度值隨著含油量增加而提升，且各含油量皆符合規範。統整上訴試驗結果顯示，含油量 4.5%~5.4% 可符合馬歇爾六項性質之規範，本研究將選用 4.6% 為最佳含油量。

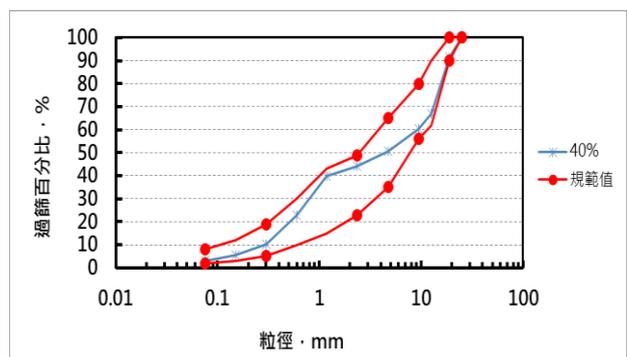


圖 4 氧化矽取代量 40% 配比曲線

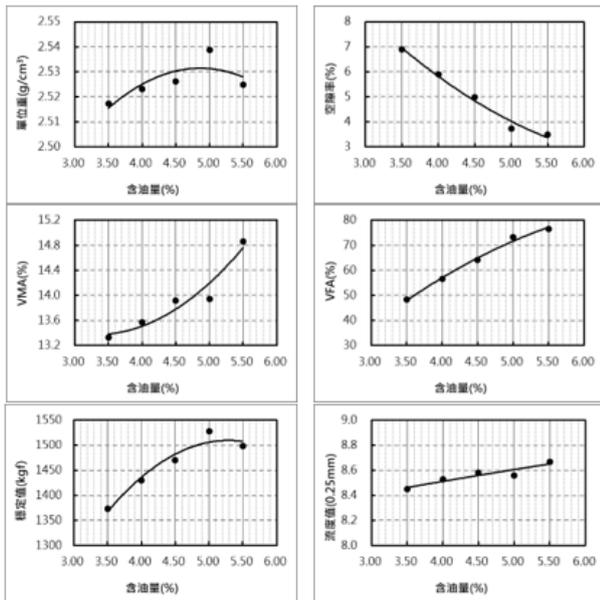


圖 5 氧化矽取代量 40%馬歇爾試驗結果

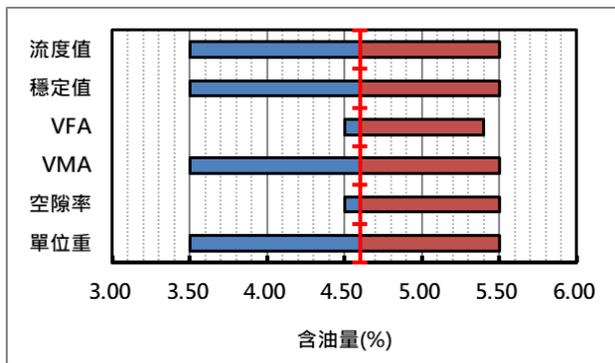


圖 6 氧化矽取代量 40%含油量區間

三、道路成效追蹤

3-1 道路現況

本計畫之目的為使用氧化矽取代天然粒料，應用於瀝青混凝土之成效，氧化矽則為唐榮鐵工廠股份有限公司將氧化矽經再利用加工程序後所提供，並選擇於臨海工業區內的中林路進行鋪設，鋪設範圍為中林路 0K+390~0K+869，氧化矽碎石砂之取代量為瀝青混凝土之總粒料 40%，氧化矽瀝青混凝土鋪設厚度為 10cm。

3-2 平坦度試驗

本計畫以高低平坦儀進行檢測並藉由分析程式計算後得知平坦標準差。試驗結果顯示，本試驗道路東向與西向車道之平坦度標準差符合規範值，開放通車 6 個月後，試驗道路東向車道平坦度標準差為 2.6mm，西向

車道為 2.1mm；持續追蹤開放通車 12 個月後之成效，東向車道平坦度標準差為 3.2mm，而西向車道之平坦度標準差則為 2.5mm，由此可知，將氧化矽瀝青混凝土應用於重交通量之道路，歷時 12 個月之平坦度標準差雖因開放通車時間增加而上升，但仍小於 3.4mm，皆符合規範值。

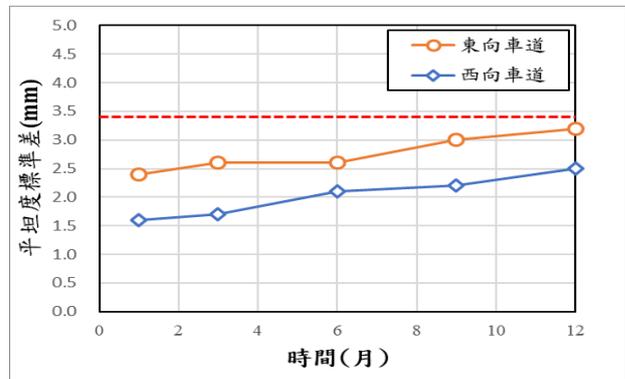


圖 7 平坦度試驗

3.3 抗滑試驗

本試驗針對試驗道路車輛輪跡處進行抗滑試驗，使用英式擺錘進行試驗並量測現場溫度經修正後求得抗滑係數。由試驗結果得知氧化矽瀝青混凝土之抗滑係數皆符合規範值 45，且隨開放通車時間增加抗滑係數逐漸提高，其原因為受到通行車輛輾壓，瀝青混凝土表面粒料容易被帶離，造成粗粒料外漏，導致鋪面粗糙程度提高。

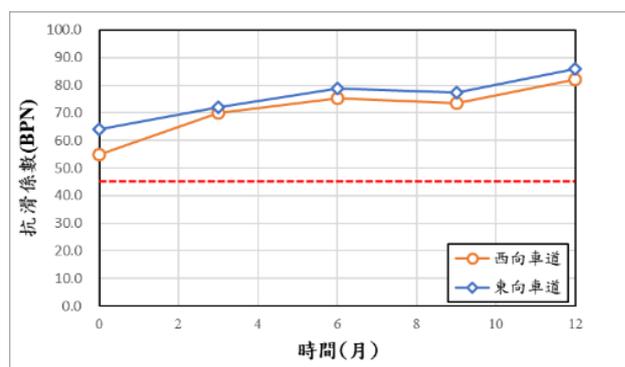


圖 8 抗滑試驗

3.4 車轍試驗

隨開放通車時間增加，鋪面經過車輪反覆輾壓下將產生凹陷，稱為車轍，為了瞭解鋪面長期受到交通荷重影響所產生的應變狀況，需針對試驗道路進行鋪面車轍檢測，通常以三米直規進行，並將首次車轍值做為長期追蹤之基準值，以利日後求的真實車轍值。圖 9、10 為車轍試驗追蹤之結果，由次得知現到開放通車 6 個月東向車道之車轍深度為 5.92mm，西向車道為 2.935mm，明顯看出東向車道與西向車道之車轍深度有所差異，但皆小於輕級車轍規範 12.5mm，顯示目前道路狀況良好。

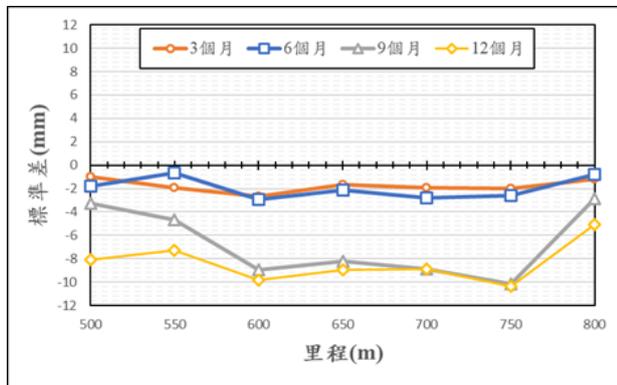


圖 9 西向車道車轍試驗

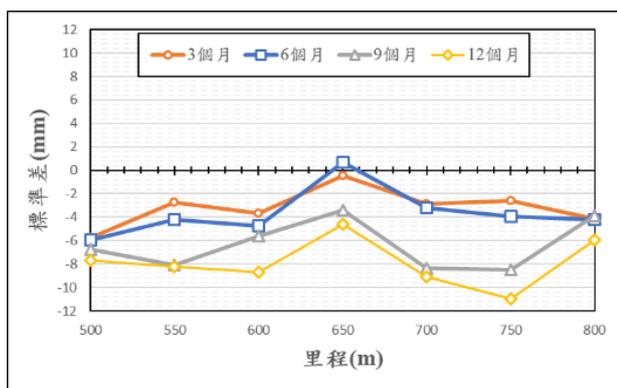


圖 10 東向車道車轍試驗

3.5 鑽心試驗

本研究以鑽心試驗觀察氧化矽瀝青混凝土長期受到交通荷重後之性質變化，將氧化矽瀝青混凝土開放通車一年後之鑽心試體，切割成適當大小並進行相關試驗。圖 11 為單位重分析結果，由圖可得知因長期交通荷重持續將瀝青混凝土持續進行壓實，導致單位

重隨開放通車時間增加而上升；圖 12 為開放通車一年後穩定值之變化，隨時間增加穩定值逐漸下降，加上鑽心試驗將對試體造成擾動，導致其強度相對下降；圖 13 為流度值分析結果，由圖得知流度值隨開放通車時間增加而漸少，其原因為瀝青混凝土長期曝於戶外會造成瀝青膠泥老化，進而導致流度值下降。分析鑽心試驗結果，隨開放通車時間增加穩定值及流度值有明顯下降，但仍符合規範值。

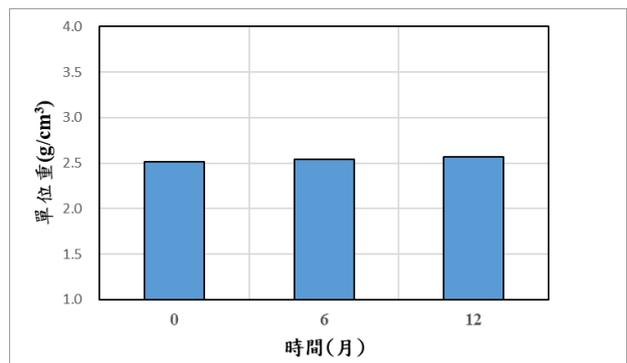


圖 11 鑽心試驗-單位重

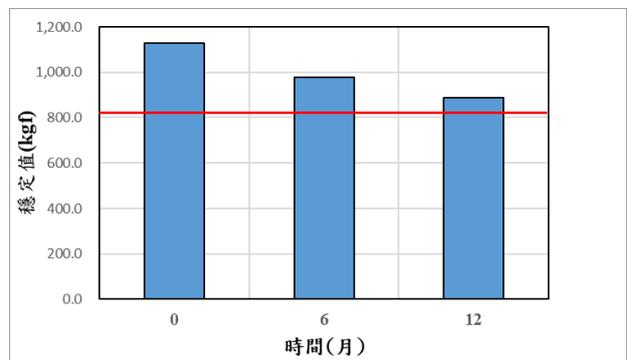


圖 12 鑽心試驗-穩定值

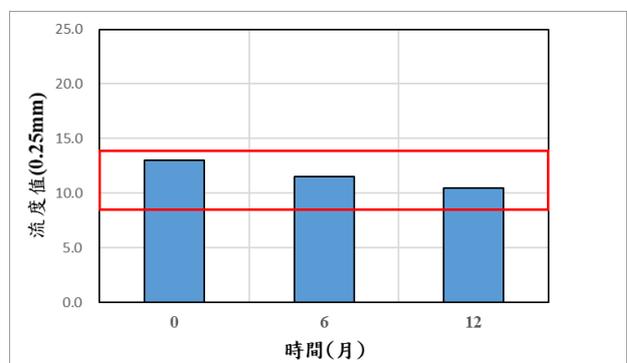


圖 13 鑽心試驗-流度值

四、結論

1. 由基本試驗結果得知，本研究使用之氧化矽碎石砂比重較天然碎石砂重，而氧化矽膨脹量遠小於規範值 0.5%。氧化矽之毒性溶出情況亦符合經濟部之再利用規定。
2. 由於氧化矽具有親油性質，使瀝青混凝土之瀝青需求量降低，瀝青黏結力亦能提升，不易受到水侵害。
3. 由平坦度試驗結果得知，將氧化矽瀝青混凝土應用於重交通量之道路，歷時 12 個月之平坦度標準差仍符合規範值，且隨通車時間增加而上升。
4. 由車轍試驗得知，開放通車 12 個月東向車道與西向車道之車轍深度雖有差異，但仍皆小於輕級車轍 12.5mm，說明目前試驗道路狀況良好。
5. 將氧化矽碎石砂應用於瀝青混凝土中，具有優良的成效，且適用於重載交通量路段。

五、參考文獻

1. Yi Jiang, Tung-Chai Ling, Caijun Shi, and Shu-Yuan Pan, "Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review " Resources, Conservation and Recycling, Volume 136, pp 187-197, 2018.
2. 江呈文，「電弧爐氧化矽安定化可行性研究」，國立台北科技大學，資源工程研究所碩士論文，2020。
3. Yousef R. Alharbi, Aref A. Abadel, Nourhan Elsayed, Ola Mayhoub, and Mohamed Kohail, "Mechanical properties of EAFS concrete after subjected to elevated temperature " Ain Shams Engineering Journal, 2020.
4. S.K.Singh, Prabhat Vashistha, Ramesh Chandra, and Anand K. Rai "Study on leaching of electric arc furnace (EAF) slag for its sustainable applications as construction material " Process Safety and Environmental Protection, Volume 148, pp 1315-1326, 2021.
5. 邱鳳嬌，「廠拌電弧爐氧化矽瀝青混凝土品質控制技術之研究」，高苑科技大學，土木工程研究所碩士論文，2018。
6. Seyed Ali Ziaee, and Kambiz Behnia "Evaluating the effect of electric arc furnace steel slag on dynamic and static mechanical behavior of warm mix asphalt mixtures " Journal of Cleaner Production, Volume 274, 2020.
7. Marta Skaf, Juan M. Manso, Ángel Aragón, José A. Fuente-Alonso, and Vanesa Ortega-López "EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use " Resources, Conservation and Recycling, Volume 120, pp 176-185, 2017.
8. Mohamed Shiha, Sherif El-Badawy, and Alaa Gabr "Modeling and performance evaluation of asphalt mixtures and aggregate bases containing steel slag " Construction and Building Materials, Volume 248, 2020.
9. Morteza Jalili Qazizadeh, Hamid Farhad, Amir Kavussi, and Aliasghar Sadeghi "Evaluating the fatigue behavior of asphalt mixtures containing electric arc furnace and basic oxygen furnace slags using surface free energy estimation " Journal of Cleaner Production, Volume 188, pp 355-361, 2018.
10. S.M. Motevalizadeh, and H. Rooholamini "Cohesive zone modeling of EAF slag-included asphalt mixtures in fracture modes I and II " Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Volume 112, 2021 .

焚化底渣取代部分黏土產製普通磚之技術初探

林登峰¹ 林國良² 陳佳玟³ 田佳恩⁴

¹義守大學土木工程學系特聘教授

²義守大學土木工程學系教授兼工學院院長

³義守大學土木工程學系碩士

⁴義守大學土木工程學系專題生

摘要

焚化底渣為人類生活廢棄物經焚化後產生之副產物，過往焚化底渣大多以掩埋作為末端處置，我國掩埋容積有限，且土地資源珍貴，應規劃永續資源循環之再利用途徑。但目前焚化底渣再利用速度遠不及焚化後之焚化底渣產量，因此本研究將焚化底渣應用於普通磚，本研究將焚化底渣取代部分黏土，取代量分別為 0%、5%、10%、15%、20%，窯燒溫度分別為 850°C、900°C、950°C，並藉由基本性質試驗、收縮率、燒失率、吸水率、單位重、抗壓強度及 SEM 試驗探討焚化底渣對於普通磚之性質影響。經研究結果得知，黏土比重為 2.73，焚化底渣比重為 2.18；黏土主要由 O、Al、Si、Fe 及 Na、Mg、K、Ca、Ti、Cu 等微量元素組成，焚化底渣所含元素為 O、Al、Si、Ca 組成，由 TCLP 試驗可知焚化底渣之重金屬溶出皆小於所規定之規範值，符合一般事業廢棄物之要求；焚化底渣應用於陶瓷磚時用水量呈現先上升後下降，因焚化底渣本身具有疏水性質；焚化底渣於收縮率、燒失率以及吸水率時，皆隨著取代量增加而上升；因焚化底渣內含 CaCO₃，在溫度逐漸提高後會產出 CO₂，導致燒結體孔隙率增加，使抗壓強度隨著取代量增加也隨之下降，因結構體內部產生孔隙導致抗壓過程中應力無法均勻配置。由 SEM 去對微觀結構進行分析，可以得知焚化底渣不同的取代量以及不同窯燒溫度應用於陶瓷磚之孔隙以及緻密化程度。

關鍵字：焚化底渣、TCLP、SEM

一、緣起

隨著社會發展迅速，人們之生活廢棄物亦隨之增加，此現象將對環境造成污染及生態破壞。早期垃圾處理多以「掩埋、堆置」作為處理方式，但人們開始重視環保議題後改以「焚化」處理。依據環保局統計，垃圾焚化廠每年平均垃圾焚化總量約為 630~650 萬公噸，相對可產出約為 100 萬公噸的焚化底渣。然而臺灣地區天然資源缺乏，焚化底渣再生材料若能多元化應用，不僅可以彌補天然材料的不足，也可以解決尋址建闢掩埋場的問題[1]。焚化底渣屬於多孔性輕質聚集物，其吸水率約為 10%，與天然砂石有很大的差異，故應用上必須考量吸水率問題[2]。焚化底渣之主要成分為 SiO₂ 及 CaO，與天然砂石成分

相近，因此可作為許多工程應用材料之替代原料[3]。由巫宗威等人研究指出底渣再生粒料作為天然粒料之替代材料，其底渣性質的處理流程到工程應用，統計資料顯示 98 年至今底渣回收率已達百分之 70，若加強底渣應用於回填材料之中將可取代以往垃圾掩埋場不堪負荷的問題[4]。添加焚化底渣製成陶瓷磚研究得知導致坯體破壞強度降低，但將燒結溫度適當升高，有利於降低吸水率，增加破壞強度[5]。由 Zhikun Zhang 研究指出，使用 50%焚化底渣及 50%粉煤灰製成之陶瓷在窯燒溫度 1000°C 可以被有效利用，且具有良好的耐腐蝕性[6]。由 R.V.Silva 等人研究得知，對於環境評估去做評估，焚化底渣經適當處理可以被視為自然資源的替代材料[7]。Francesco Baino and Monica Ferraris 之研究

指出使用焚化爐底渣作為瓷磚原料，並以無機鹽作為發泡劑生產多孔陶瓷，其抗壓強度約為 2 MPa、導熱係數約為 0.13W/mK，顯示該材料作為隔熱材料之潛力[8]。Fernanda Andreola 等人研究得知，焚化底渣主要由 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 和少量重金屬，使用毒性分析測試確定燒結後轉化為惰性陶瓷的可行性[9]。本研究探討焚化底渣取代黏土製成普通磚之性質影響，藉由收縮率、燒失率、吸水率、單位重、抗壓強度及 SEM 試驗探討焚化底渣對於普通磚之性質影響。

二、試驗材料分析

2-1 試驗材料基本性質

本研究使用之試驗材料為焚化底渣，表 1 為試驗粒料之基本性質，焚化底渣本身為多孔隙材料，則孔隙率較黏土大。根據數據顯示，焚化爐底渣相對於黏土，比重較低。圖 1 為各試驗材料之粒徑曲線，由圖可知本研究所使用之焚化底渣主要粒徑介於 0.03~0.3mm 之間，焚化底渣粒徑較黏土粗，進而得知黏土之比表面積大於焚化底渣。

表 1 試驗材料基本性質

	黏土	焚化底渣
比重	2.73	2.18
單位重(kg/m^3)	1226.67	1053
孔隙率(%)	61.35	64.46
比表面積(cm^2/g)	2600.32	1320.17

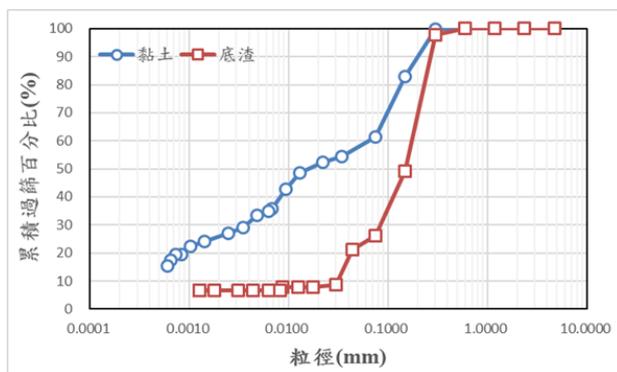
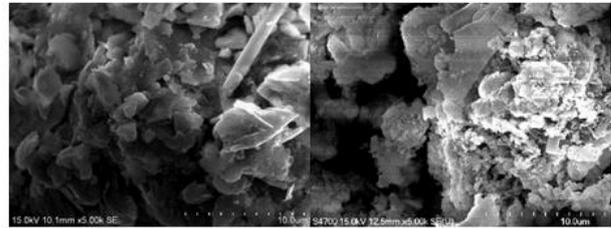


圖 1 試驗材料粒徑曲線

2-2 SEM 試驗

圖 2 為黏土、焚化底渣與污泥灰放大 5000 倍率之 SEM 試驗成像圖，由各試驗材料之 SEM 成像圖可知，圖 2(a)黏土由 EDS 試

驗可以得知圖中長條狀結晶含有大量之 Ti 元素，其餘片狀多為 Si 元素之氧化物；圖 2(b)由 EDS 試驗可得知焚化底渣內含大量 Ca 元素，故圖中結晶大部分為 Ca 元素之氧化物。



(a)黏土

(b)焚化底渣

圖 2 SEM 成像圖

2-3 EDS 試驗

本研究藉由 EDS 試驗可得知燒結體中所包含的元素，表 2 為試驗材料 EDS 試驗結果，黏土主要元素分別為 O、Al、Si、Fe 及 Na、Mg、K、Ca、Ti、Cu 等微量元素組成，其中以 O、Si 元素含量較多；焚化底渣所含元素為 O、Al、Si、Ca，其中以 O、Si、Ca 元素含量較多。

表 2 試驗材料 EDS 試驗結果

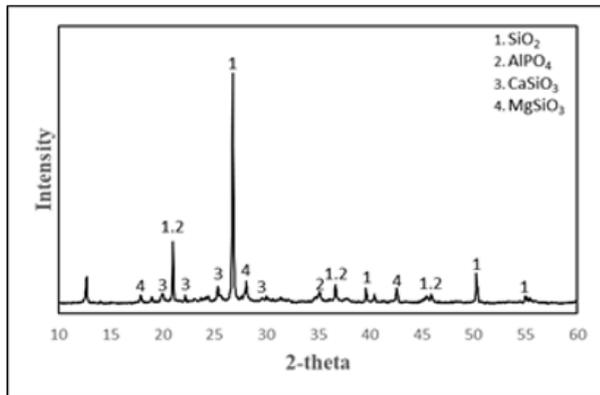
	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	Cu
黏土 (%)	53.6	0.6	1.1	9.2	24.8	2.4	0.5	1.5	5.1	1.3
底渣 (%)	53.7	-	-	4.8	15.1	-	26.3	-	-	-

2-4 XRD 試驗

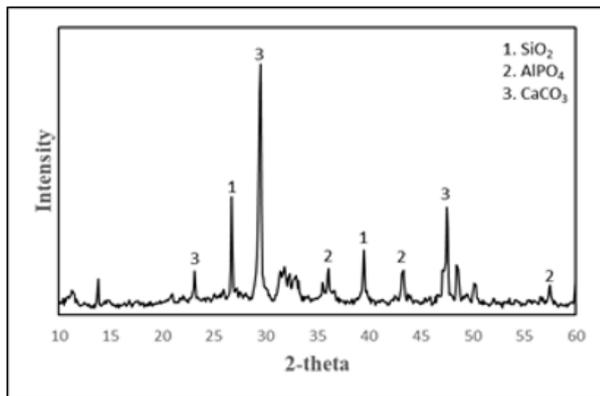
X-射線繞射分析(X-Ray Diffractometer，簡稱 XRD)是一種將 X 射線照射在材料表面上，產生晶體特徵繞射譜線。表 3 為黏土與焚化底渣 XRD 試驗結果，黏土本身因含有大量 O 及 Si 元素，故由大量之 SiO_2 以及少量之 CaSiO_3 、 MgSiO_3 、 AlPO_4 組成，焚化底渣本身含有大量之 O、Si、Ca 元素，故由大量的 CaCO_3 及少量的 SiO_2 組成；圖 3 為黏土與焚化底渣 XRD 峰值圖，由表 3 的數據可得知黏土之峰值圖中最高的峰值，對應為 SiO_2 化合物，焚化底渣之峰值圖中峰值最高的峰值對應為 CaCO_3 。

表 3 試驗材料 XRD 試驗結果

	SiO ₂	CaCO ₃	CaSiO ₃	MgSiO ₃	AlPO ₄
黏土	83.8	-	6.4	8.5	1.2
底渣	27.5	70.5	-	-	2.1



(a) 黏土



(b) 焚化底渣

圖 3 試驗材料 XRD 峰值圖

2-5 TCLP 試驗

表 4 為本研究試驗材料之 TCLP 試驗結果，TCLP 之目的為瞭解底渣的重金屬溶出情況，去探討其內部所含之有害物質的含量有無超出法規規定值。由表可以得知焚化底渣之重金屬總量以 Cu 最多(1.83 mg/L)，其次為 Ba 有 0.662 mg/L，最少則為 Cd < 0.1 mg/L。由此可知焚化底渣之重金屬溶出皆小於所規定之規範值，符合一般事業廢棄物之要求，故可進行資源化再利用。

表 4 焚化底渣 TCLP 試驗結果

項目 (mg/L)	As	Pb	Cu	Cd	Cr	Hg	Cr ⁶⁺	Se	Ba
底渣	ND	ND	1.83	<0.100	ND	ND	ND	ND	0.662
規範值	≤0.4	≤4.0	≤12.0	≤4.0	≤0.8	≤0.016	≤0.2	≤0.8	≤10.0

三、結果與分析

3-1 阿太堡試驗

製作試體前須先得知焚化爐底渣各取代量之用水量，本研究以阿太堡之塑性限度試驗求出混合料之塑性限度，塑性限度係指是土壤保持塑性行為之含水量下限。由圖 4 可知，隨著焚化底渣取代量的增加，其塑性限度會上升，但當取代量為 10% 會開始下降。其原因為焚化底渣本身孔隙率較大，故塑性限度會隨著取代量增加而上升，但由於焚化底渣經過處理後會產生疏水性質，添加至 10% 時塑性限度開始下降。

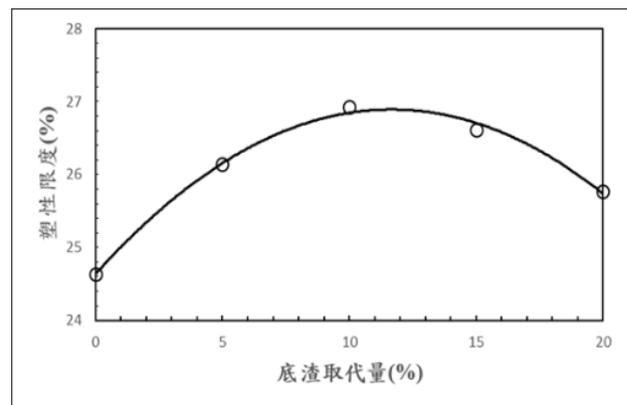


圖 4 阿太堡試驗

3-2 收縮率試驗

圖 5 為焚化底渣應用於紅磚之收縮率，從圖中得知，隨著焚化底渣取代量增加，其收縮率也隨之上升；窯燒溫度分別為 850°C、900°C、950°C，當窯燒溫度提升，其收縮率也隨之上升，其原因為進行高溫燒結時，燒結體內部顆粒間因動能大而相互連結，使孔隙率降低並且產生緻密化之現象。

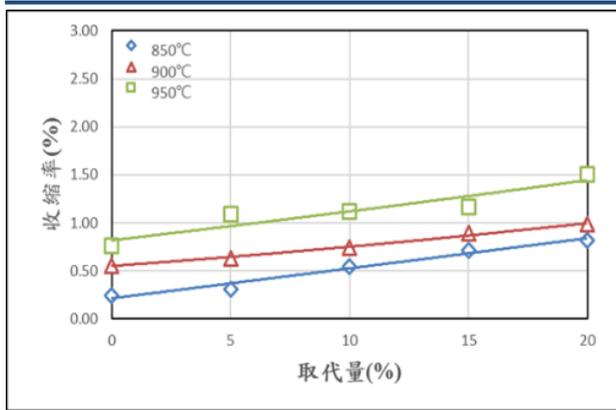


圖 5 收縮率試驗

3-3 燒失率試驗

圖 6 為焚化底渣應用於紅磚之燒失率，由圖顯示隨著焚化底渣取代量增加而燒失率上升；窯燒溫度分別為 850°C、900°C、950°C，當窯燒溫度增加時，其燒失率則會上升，因焚化底渣內含有重金屬、有機物、無機鹽類，高溫使水分蒸發、有機物氧化及無機鹽類分解。從圖中可得知窯燒溫度為 900°C 及 950°C 時差異不大，但與窯燒溫度 850°C 時有較大差異。

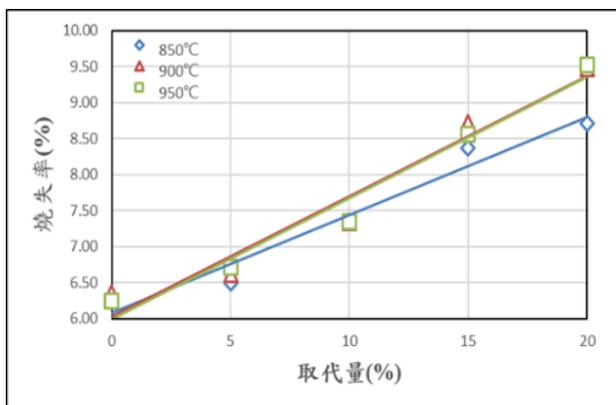


圖 6 燒失率試驗

3-4 吸水率試驗

圖 7 為焚化底渣應用於紅磚之吸水率，吸水率多寡對紅磚性質有著重要影響，因水之熱傳導率較空氣高，若紅磚內含之水分提升將使紅磚導熱效果提升並降低紅磚之隔熱性質。由圖 7 可得知，隨著焚化底渣取代量增加，其吸水率隨之增加，其原因為焚化底渣內含 CaCO₃，在溫度逐漸提高後會產出 CO₂，導致燒結體孔隙率增加，使其緻密化現象下降，因此吸水率隨焚化底渣取代量增加而上

升。

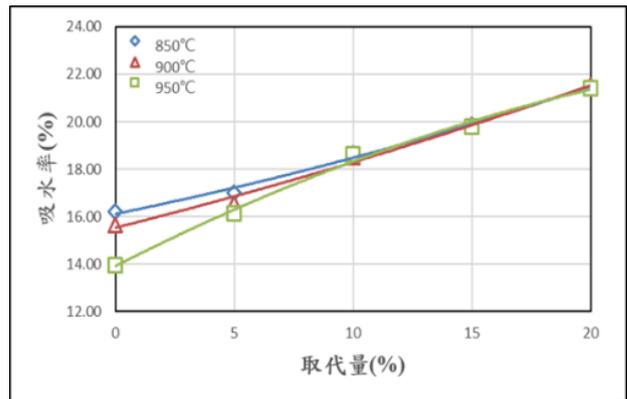


圖 7 吸水率試驗

3-5 單位重試驗

圖 8 為焚化底渣應用於紅磚之單位重，由圖 8 可看出單位重隨著窯燒溫度增加而增加，因高溫可使結構體緻密化進而減少孔隙，但當取代量大於 10% 時，單位重的變化差異不大；焚化底渣取代量上升，單位重會跟著下降，因焚化底渣內含有較複雜的物質，其中含有 CaCO₃ 化合物，會使結構體內部產生孔隙導致緻密化現象下降。

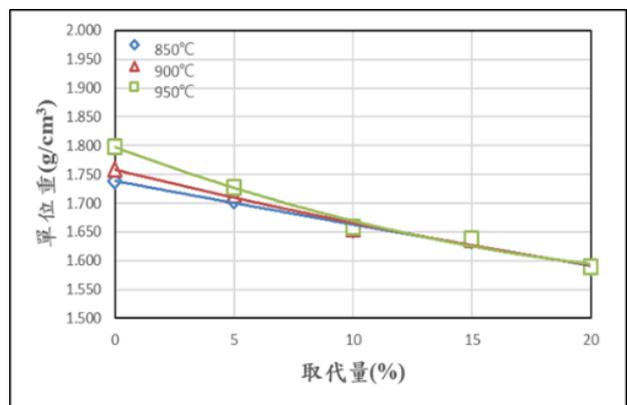


圖 8 單位重試驗

3-6 抗壓強度試驗

圖 9 為焚化底渣應用於紅磚之抗壓強度，由試驗結果可以得知隨著窯燒溫度增加其抗壓強度也隨之上升，因高溫提升會使顆粒間產生緊密連結，提升緻密化現象；因焚化底渣內含有大量 CaCO₃，在高溫燒結後會分解形成 CO₂，結構體內部產生孔隙，導致抗壓過程中應力無法均勻配置，故抗壓強度隨著焚化底渣取代量增加而下降。

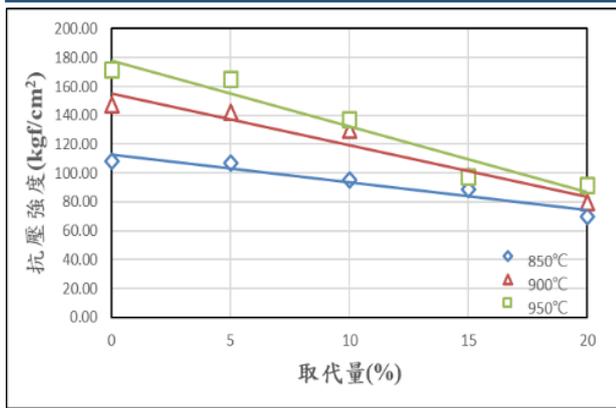


圖 9 抗壓強度試驗

3-7 SEM 試驗

圖 10 為焚化底渣取代量 0%~20% 之紅磚在不同窯燒溫度下的 SEM 成像圖，本研究利用 SEM 放大 5000 倍進而去觀察不同取代量之紅磚的內部結構。由圖可得知當窯燒溫度增加時，950°C 的孔隙較 850°C 的孔隙較少，即越高溫其結構體越緻密；從焚化底渣取代量可得知取代量提高則孔隙也隨著增加，促使吸水率隨之上升且抗壓強度隨之下降。

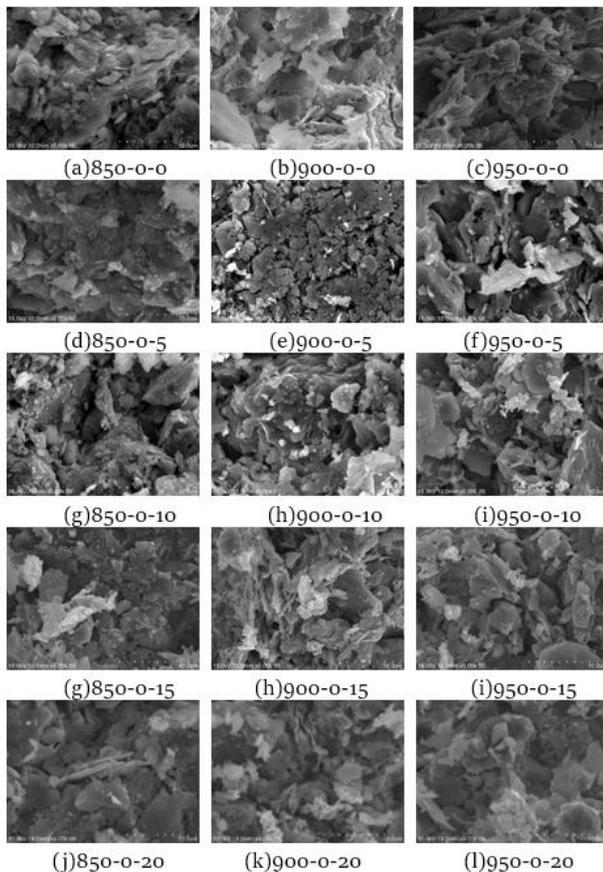


圖 10 SEM 試驗

四、結論

1. 塑性限度隨著焚化底渣取代量的增加而上升，但由於焚化底渣經過處理後會產生疏水性質，添加至 10% 時塑性限度開始下降。
2. 隨著焚化底渣取代量增加，其收縮率也隨之上升，因進行高溫燒結時，燒結體內部顆粒間因動能大而相互連結，使孔隙率降低並且產生緻密化之現象。
3. 因焚化底渣內含有重金屬、有機物、無機鹽類，高溫使水分蒸發、有機物氧化及無機鹽類分解，故燒失率隨著焚化底渣取代量增加而上升。
4. 隨著焚化底渣取代量增加，其吸水率隨之增加，因焚化底渣內含 CaCO_3 ，在溫度逐漸提高後會產出 CO_2 ，導致燒結體孔隙率增加，使其緻密化現象下降。
5. 由抗壓強度試驗得知，隨著窯燒溫度增加其抗壓強度也隨之上升，因結構體內部產生孔隙導致抗壓過程中應力無法均勻配置。

參考文獻

1. 蔡得時，垃圾焚化爐底渣混凝土工程性能之研究，中國科技大學，碩士論文，2017 年
2. 巫宗威，垃圾焚化爐底渣混凝土工程性能之研究，中國科技大學，碩士論文，2017 年
3. 羅函傑，焚化底渣再利用製成不同工程建材之最佳條件及其材料特性與環境影響分析，逢甲大學，碩士論文，2020 年
4. 巫宗威、戴俊地、蔡得時，垃圾焚化爐底渣再生粒料應用之研究，2015 中華民國營建工程學會第十三屆營產業永續發展研討會，1-17 頁，2015 年
5. 伍浩然、劉倩妮、劉燕、雷雨、張婭、何擁、楊為中，「生活垃圾焚燒底渣資源化製備陶瓷磚」，陶瓷，第 2 期，p23-28，2017 年
6. Zhikun Zhang、Jing Wang、Lina Liu、Jiao Ma、Boxiong Shen，Preparation of additive-free glass-ceramics from MSW incineration bottom ash and coal fly ash，Construction and Building Materials，

Volume 254 ' 2020.

7. R.V.Silva 、J.de Brito 、C.J.Lynn 、R.K.Dhir ' Environmental impacts of the use of bottom ashes from municipal solid waste incineration: A review ' Resources, Conservation and Recycling ' Volume 140 ' 2019 ' Pages 23-35.
8. Francesco Baino 、 Monica Ferraris ' Production and characterization of ceramic foams derived from vitrified bottom ashes ' Volume 236 ' 2019 ' Pages 281-284.
9. Fernanda Andreola 、 Luisa Barbieri 、 Bárbara Queiroz Soares 、 Alexander Karamanov 、 Luciana M.Schabbach 、 Adriano M.Bernardin 、 Claus T.Piche ' Toxicological analysis of ceramic building materials - Tiles and glasses - Obtained from post-treated bottom ashes ' Waste Management ' Volume 98 ' 2019 ' Pages 50-57.

枯水期水資源最佳化分配-以內門區五里為例

程緯清¹ 龔柏勳² 黃凱翔³

¹國立高雄科技大學土木工程系碩士生

²國立高雄科技大學土木工程系碩士生

³國立高雄科技大學土木工程系助理教授

摘要

全球氣候環境變遷造成水資源短缺與糧食危機，如何節約用水和增加糧食產量已成了全球關注的焦點，引起了國際間的重視，而為了有效利用水資源，農田水利會開始積極的將各個農業種植地納入灌區，以改善糧食生產及灌溉水資源供應，而本研究以高雄市内門區為例進行研究，針對該地區的埤塘、水系及農田水利會所設置的 12 個水利小組進行評估分析，將埤塘可供水量平均分配給該地區水量不足之月份，希望幫助該地區的農民能夠不用因缺水而無法種植作物而煩惱，並達到水資源最佳化的目的。

關鍵字：水資源、地理資訊系統、最佳化

The Research of Optimizing the Water Resources During the Dry Season Based on the Case of 5 Villages in Kaohsiung Neimen District

Cheng, Wei-Ching¹ Gong, Bo-Xun² Huang, Kai-Hsiang³

¹Master Student, Department of Civil Engineering, Kaohsiung University of Sciences and Technology

²Master Student, Department of Civil Engineering, Kaohsiung University of Sciences and Technology

³Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Kaohsiung University of Sciences and Technology

ABSTRACT

Global climate and environmental changes have caused water shortages and food crises. The problems of saving water and increasing food production have attracted the international attention a lot. To improve the problems of food producing and irrigation water supply, the Farmland Water Conservancy Association has begun to expand the irrigation area by adding different agricultural areas into the management of the Farmland Water Conservancy Association. According to the issue above, this article took the Kaohsiung's Neimen District as the case and conduct the evaluation and analysis based on the ponds, water systems and the 12 hydraulic groups set by the Farmland Water Conservancy Association. Due to the evaluation and analysis above, we tried to solve the problem of not being able to grow crops caused by water shortage and we suggested to optimize the water resources by assign the water supply of ponds to the area where are lack of water in months with insufficient rainfall.

Keywords: water resources, GIS, optimization

一、緒論

隨著全球氣候變遷日益嚴重，糧食與水資源的匱乏也慢慢地受到國際的重視，在台灣，每年 5-6 月的梅雨季與 7-9 月的颱風季是台灣水資源重要的來源，但今年面臨無颱風入境的紀錄，而產生了大量缺水的窘境，糧食的生產也受到了極大的影響，根據水利署的統計，農業用水就佔了大約台灣總水量七成的水資源，實為過多。為了改善水資源分配不均的現象，本研究以高雄市內門區為例進行水資源分配。2019 年高雄市農田水利會計畫將內門區納入水利會的灌區(羅翊庭，2020)，並規劃出了 12 個水利小組優先納入灌區，而該地區的水資源來源是由溝坪溪及二仁溪提供，看似無須擔心水資源問題，但是在每年的 12、1、2、3 月時會面臨枯水期，屆時許多作物將無法順利種植，因此為了解決缺水的問題，將會針對該地區的水資源進行最佳化使用評估，珍惜得來不易的水資源。

為了使內門區能夠有更加穩定的水資源可運用，也為使農作物可穩定生產，本文利用衛星影像、數值高程模型(DEM)及探測球等資料進行研究試驗。並採用地理資訊系統整合資料、進行圖層套疊分析，並計算該地區的埤塘能夠容納多少水量，可為內門地區增添多少可用之水資源，為了使研究能夠更加精確，本研究以內門區溝坪溪流域的 5 里(金竹里、永興里、永吉里、永富里、溝坪里)進行測試，分析如何將有限的水資源進行有效的利用，以達到最佳化的目的。

二、文獻回顧

水是人類以及所有動、植物的重要資源，如何妥善的使用這份資源為全人類所需思考的一項課題，在民國 97 年時，南投水利會曾對南投的大坪頂地區進行管路灌溉的可行性評估，針對該地區的地形、土壤及水文等進行一番調查後，發現該地區地形特殊，且因居民自行鑿井灌溉而造成地下水位下降，為解決灌溉及地下水資源問題成立大坪頂地區旱作灌溉營運站，負責辦理大坪頂地區農地供水計畫，使高大圳的水資源剩餘用水能夠

有效的加以利用。民國 108 年為將內門區納入農田水利會之評估計畫，因缺乏穩定的水資源供應，因此進行該地區的水源及可用水量調查，但發現未納入埤塘的水源及可用水量調查，為此，地理資訊系統是完成本研究不可或缺一套軟體。

2-1 地理資訊系統

地理資訊系統(Arcgis)是一套蘊含各種資料庫且可多方面呈現的一套軟體，結合了空間及屬性資料。起源於 1960 年代，最初用於土地管理及國土規劃(李宗信，2016)，隨著電腦軟體及資訊的普及，帶來的便利性更可以說是更全面，配合網際網路的應用，地理資訊系統將會成為未來資訊生活中不可或缺的一部份(黃怡婷，2009)。而地理資訊系統內建的 ArcToolbox 處理工具箱可進行空間切割及分析，如環域分析、地圖裁切、地籍合併等多功能，以下簡單介紹幾個。

1. 環域分析:為 GIS 常用的空間分析進階功能，系為方便識別某一項地理空間實體物對周遭環境、物品等的影響度，可將一個點或線的資料，使其擴展一定範圍的功能，會於該物周圍呈現一個環帶區域範圍的面圖層。
2. 裁切:在 GIS 裡面算是非常常會用到的功能，將一個圖層裡面的資料，擷取所需範圍內的圖徵，從而輸出為一個新圖層。
3. 合併:將兩個或以上的獨立圖層進行合併，合併後圖層內所有資料將會保留。

2-2 衛星影像

在傳統影像判釋上，常常用以單一基礎像元分類之演算法進行判釋，而其正確率卻無法滿足實務上的應用。然而利用遙測影像進行土地類別自動化判釋，是依照光譜的反射資訊，透過特殊的統計方法進行分析與歸類，賦予每個影像每個像元一個特定值，此特定值為地表覆蓋的特定類別，但此方法未考慮像元與鄰近像元間光譜反應的關係，僅可依據各像元間的光譜反射值來判釋土地覆蓋類別，而無法精準的判釋土地利用類別(李瑞陽，2016)。而本研究所使用的衛星影像係

由福衛五號拍攝的衛星影像，其光學遙測搭載之感測器具有全色態與多光譜態兩種，其規格如表 1 所示，所拍攝出來的衛星影像如圖 1 所示。

表 1 福衛五號規格表

項目	規格與說明
地面解析度	全色光-2 米；藍光、綠光、紅光、近紅外光-4 米
波段	全色、藍、綠、紅、近紅外光
灰階	12 位元
影像儲存量	≥ 80G位元
對比傳遞函數(CTF)	≥ 0.1(全色光) ≥ 0.2(藍光、綠光、紅光) ≥ 0.16(近紅外光)
信噪比(SNR)	全色光: ≥ 283 B1(紅光): ≥ 295 B2(綠光) ≥ 295 B3(藍光) ≥ 2100 B4(近紅外光) ≥ 2100



圖 1 2017.11.17 之衛星影像

2-3 探測球

為一種利用聲納系統進行傳導的裝置，聲納(SONAR)是一種利用聲波傳播回波用來測定距離的技術，可分為主動式與被動式兩種，兩種差異在於會不會主動發出聲波，主動式為主動發出聲波，並在接觸物體後回波並計算與該物體之距離，被動式為不發出任何訊號，只會接受來自於附近周遭的各物體的音訊來判斷或辨識。而探測球屬於主動式的聲波系統，藉由聲波傳播回波的方式，傳回來之影像如圖 2 所示，圖為實際探訪研究區域之埤塘所測得之埤塘深度照片，由圖可知該埤塘深度為 0.7m，埤塘內溫度為 29°C，也偵測到該埤塘內有魚活動，而在魚下方的綠橘色沉澱物則為埤塘內的土壤。



圖 2 探測球測得影像

而聲波需要經由介質來進行傳導，會受到各種因素的影響，如溫度、壓力或鹽度等，如表所示，影響最大的為溫度，再來是鹽度，最小的是壓力(Wagner, 1999)。

表 2 聲波在各介質中的傳遞速率

介質	聲波速率
水中	2.25*10 ⁸ m/s
空氣中	2.99*10 ⁸ m/s
溫度	-0.007 °C ⁻¹
壓力	0.001 ⁻¹
鹽度	0.013%

(資料來源:Wagner, 1999)

三、研究方法

3-1 研究區域

內門區位於高雄市的西北方，右鄰杉林鄉與旗山鎮，左鄰台南市，為高雄市的中央偏北地帶，其地理位置詳如圖 3 所示。內門區整體地勢高，高程都多大於 110 公尺，因此地形起伏甚大，且內門區有座縱貫南北的內烏山山脈，將該地區分成東邊的溝坪盆地以及西邊的內門盆地，這兩個盆地分別有各自的流域，溝坪盆地的是旗山溪流域；內門盆地則是二仁溪流域，溝坪盆地所在之溝坪溪屬旗山溪支流上游段，因此集水區範圍較大；而內門盆地所在之二仁溪因由眾多野溪組合而成，集水區範圍較小，流量較不穩定，因此本研究選擇水量充足且較穩定的溝坪盆地進行研究，如圖 4 所示。



圖 3 內門區地理位置



圖 4 研究區域

3-2 研究步驟

由於此研究區域的灌溉用水長期屬於不穩定的狀態，除了天然形成的埤塘外，當地農民也為了解決缺水問題而自行挖掘埤塘，因此透過該地區的衛星影像進行埤塘的判釋，但一般的影像並無法直接選定埤塘的位置，所以本研究使用機器學習進行埤塘的判釋，標示出該地區所有的埤塘位置，並至現地投放探測球以測得水池深度，將經判釋過後的埤塘配合地理資訊系統求出面積，即可算出該埤塘之體積與可蓄水之容量。研究步驟如下敘述並如圖 5 所示。

1. 載入衛星影像:收集該地區不同時期的衛星影像圖進行整合。
2. 進行機器學習辨識埤塘:利用深度學習演算法以及機器學習之程式進行埤塘水體的辨識。
3. 現地投放探測球:實際走訪內門區隨機挑選埤塘投放探測球，利用聲納系統求得該埤塘的水深。
4. 地理資訊系統面積計算:將內門區埤塘的

地圖圖資匯入至地理資訊系統內，根據埤塘的大小給予相對應的水深，並使用 ArcToolbox 工具箱內的 Calculate Areas 面積計算功能計算面積。

5. 求得體積與蓄水量:計算出面積與水深後，即可計算出體積以即可容量之水量。

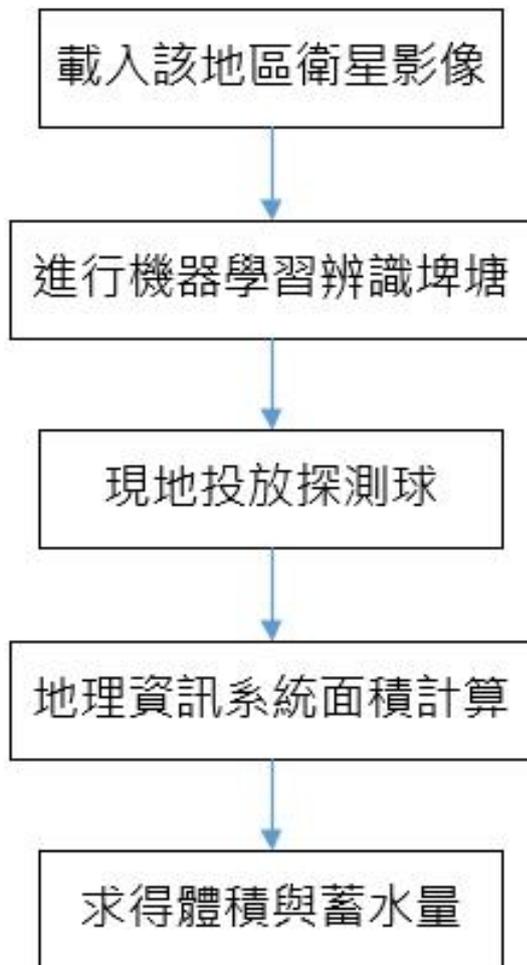


圖 5 研究流程

四、研究結果

針對利用機器學習判別出來的埤塘所在位置進行計算及水文分析，如圖 6 所示，底圖是數值高程模型(DEM)，而底圖上的每一個點都是該地區的埤塘位置。

該地區的埤塘共有 176 個，將所有資料從地理資訊系統匯出，匯出成文字檔，由 Excel 進行總體積及總水量計算，計算結果由表 3 所示。

表 3 顯示水量總和為 123343200 公升約等於 12334.32 萬噸的水，而換算成 CMD(日

平均流量)為 85655，根據高雄市內門區農田水利會事業區域可行性評估計畫工作報告書中提到溝坪溪的各月份可用流量，詳如表 4 所示。



圖 6 埤塘位置

表 3 埤塘體積及水量計算表

數量	體積	水量(L)
1	25.2	25200
2	25.2	25200
3	50.4	50400
⋮	⋮	⋮
175	75.6	75600
176	50.4	50400
總和	123343	123343200

表 4 溝坪溪推估可用流量表

100-107 年	推估可用流量(CMD)
1 月	25,546
2 月	22,321
3 月	25,008
4 月	60,352
5 月	191,766
6 月	424,536
7 月	285,815
8 月	400,998
9 月	251,496
10 月	96,605
11 月	42,898
12 月	24,656

藉由表 4 可發現明顯水量不足的月份為 12、1、2、3 共 4 個月份，若將埤塘的水平均分配給這些月份，則每月份可得 21413.75 的水量，新的月份水量表如表 5 所示。

表 5 埤塘分配水量表

月份	舊水量 (CMD)	新水量 (CMD)
12	24,656	46069.75
1	25,546	46959.75
2	22,321	43734.75
3	25,008	46421.75

根據內門區納入農田水利會計劃，該地區總共規畫了 12 個水利小組，各水利小組分布如圖 7 所示。

水利小組之總面積約為 900 公頃，若同時耕種農作物，根據地理資訊系統計算，將會耗費 281525.76CMD 的水量。

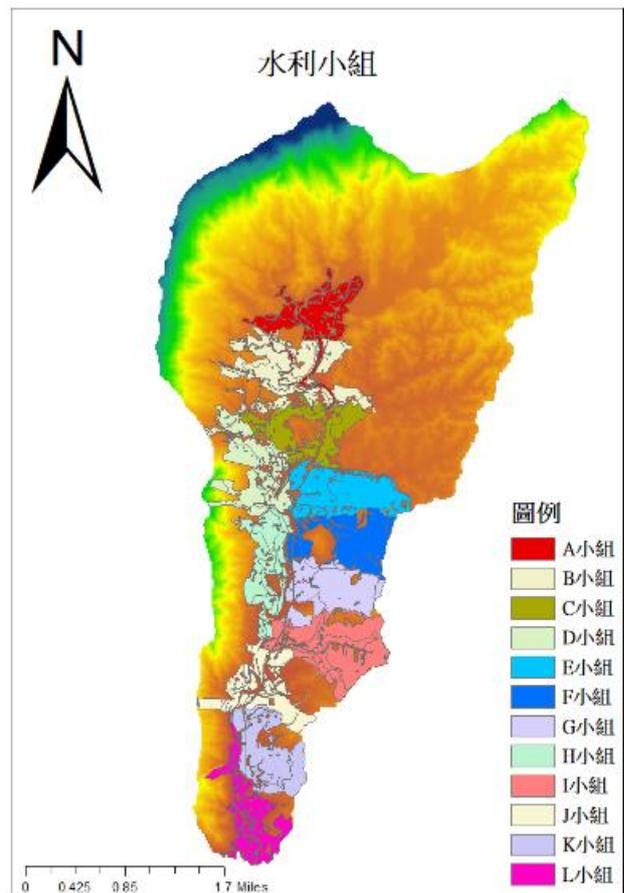


圖 7 研究區域水利小組

五、結論

由於內門區的地形變化甚大，高低起伏明顯，有些地區無法種植農作物，實為可惜。根據試驗結果，得出以下結論：

1. 根據顯示埤塘能夠供給 12334.32 萬噸的水，但因這是以衛星影像進行判釋，且是以全滿狀態的體積下去計算水量，因此水位滿載時才能有 12334.32 萬噸的水可供其他月份使用，建議日後進行灌溉時須再審慎評估。
2. 表顯示水量較為短缺的為 4 個月份，並不能完全供應水資源，而研究成果水利小組總需水量約為 281525.76CMD，根據流量表推估顯示只有 6、7、8 月才可達到完全供應，因此建議應選擇適合的農作物並適當的實施休耕或輪流耕種等方式來達到水資源運用之最佳化。

參考文獻

1. Wagner, D. J., (1999) The Speed of Light

and the Index of Refraction

2. 羅翊庭(2020)，農田水利會非灌區納入灌區水資源最佳化，國立高雄科技大學，碩士論文。
3. 李宗信(2016)，二十年來台灣歷史地理資訊系統的發展。
4. 李瑞陽、莊佳文(2016)，”運用影像分塊方法於高解析衛星影像土地利用判是經度之研究”，航測及遙測學刊，第十一卷，第四期，第 403-415 頁。
5. 黃怡婷(2009)，應用 GIS 於海岸颱風災害資訊系統建置之研究，國立台灣海洋大學，碩士論文。

剛性鋪面沉陷及唧水破壞之維護措施探討-以中鋼 CBP 造粒積剛性鋪面破壞為例

鄭敬勳¹ 林智強²

¹高雄科技大學土木工程系碩士班研究生

²高雄科技大學土木工程系助理教授

摘要

剛性鋪面於國內主要用於機場及高速公路，則國內多半鋪面皆為使用柔性鋪面，故導致剛性鋪面維護技術、經驗及從業人員等，較不如柔性鋪面之水準及規模，經調查多半國營事業之土木維護單位，如：中鋼、中油及台電等，因傳統產業有生產之壓力，急需使用道路等迫切性，且普遍進行剛性鋪面之維護及整修，皆需封閉車道及耗時，故在短期間內需進行剛性鋪面之設計及選擇適合之維修材料來進行鋪面整修，而目前國內維護相關單位於剛性鋪面維護之規劃及設計，多半仰賴工程師之工程經驗或採納維護廠商之建議，來進行後續維修等作業，往往導致維護品質及成效大大降低，雖國內有針對鋪面工法及材料之相關研究可供參考，但對於在重車交通量大等傳統產業內之鋪面道路上，需在短時間內完成鋪面維護施工，往往無法有效改善原有鋪面破壞之問題點，本次針對中鋼廠區 CBP 造粒積剛性鋪面沉陷及唧水破壞之維護措施案例來進行探討與分享，期盼透過本次案例研究與分析，可供業界及相關維護團隊，未來對於剛性鋪面沉陷及唧水破壞之維護措施(工法)參考。

關鍵字：剛性鋪面、剛性破壞、維護技術、托底支撐基座工法

Discussion on the Maintenance Measures of Rigid Pavement Subsidence and Water Damage - Taking Sinosteel CBP Granulation Rigid Pavement Damage as an Example

Zheng Jing-Xun¹ Lin Chih-Chiang²

¹Master Student, Dept. of Civil Engrg., Nat' l Kaohsiung Univ. of A. Sci. & Tech., ROC

²Assistant Professor, Dept. of Civil Engrg., Nat' l Kaohsiung Univ. of A. Sci. & Tech., ROC

ABSTRACT

The rigid pavement is mainly used in domestic airports and highways, but most of the floors in China are used for flexible pavements, therefore, the rigid pavement maintenance technology, experience and practitioners are worse than the level and scale of flexible pavement, civil maintenance units such as medium-sized steel, PetroChina and Taiwan Power, which are investigated, are urgently needed due to the pressure of traditional industries to use roads, and the maintenance and renovation of rigid pavements are generally required to seal lanes and run time. Therefore, in a short period of time, it is necessary to carry out the design of rigid pavements and select suitable maintenance materials for surface renovation, at present, domestic maintenance units rely on the engineering experience of engineers or suggestions from

maintenance manufacturers to carry out follow-up maintenance and other operations, it often leads to a significant reduction in maintenance quality and effectiveness, although there are relevant researches on pavement engineering and materials in China, it is often impossible to effectively improve the problems of the destruction of the original pavement in traditional industries such as heavy vehicle traffic, this paper discusses and shares the maintenance measures of CBP granulation rigid pavement sinking and chirp water damage in China steel plant, it is hoped that through this case study and sharing, it can be used as a reference for future maintenance measures (work law) for rigid pavement sinking and water damage in the industry.

Keywords: rigid pavement, rigid failure, maintenance technology, bottom support base construction method

一、前言

國內道路鋪面主要分為兩大類，係為剛性鋪面及柔性鋪面，本次主要研究為剛性鋪面破壞之維護措施，柔性鋪面不多作介紹，剛性鋪面可承受彎(撓)曲應力，具有高穩定性、不易變形、可承受重載壓、使用壽命長等優點，但剛性鋪面於施工品質上較難控制，若進行維護、整修時較耗時及養護期長，而普遍國內養護單位對於剛性鋪面之維護措施，往往礙於時間之急迫性，無法有效對症下藥，多半僅針對鋪面表面破壞或接縫進行維護、修繕，而對於較嚴重之鋪面破壞種類，如：鋪面沉陷及唧水等現象，並無太多防範措施，只能經常性大型翻修或底層灌注等維護措施，本文以中鋼廠區 CBP 造粒積剛性鋪面沉陷及唧水破壞之維護措施案例來進行探討與分享，期盼可供相關維護單位之維護技術參考。

1.1 研究動機

因應我國經濟發展需求，設立諸多大型重工業區，如：中鋼、中油、台中火力發電廠等傳統工廠，由於各廠區生產需求，時常有大型重車頻繁出入，鋪面因常受大型重車輾壓，加上台灣屬海島型氣候、特殊環境之原因經常性下雨及配合環保政策需進行路面清洗作業等，導致瀝青混凝土鋪面經常性破壞，雖瀝青混凝土於維修時較為快速，但相較於剛性路面之承载力低，且沉陷量遠遠大於剛性路面，為解決上述諸如原因，考量剛性鋪面承载力優於瀝青混凝土鋪面、有效改善經常性維修之頻率及維護工作，亦可減少維護

成本支出，最終選擇剛性鋪面取代瀝青混凝土鋪面，然而剛性鋪面雖有較高承载力及不易變形等優點，若剛性鋪面造成破壞，工事浩大又耗時，目前剛性鋪面維護作業，多半僅針對鋪面之表面及接縫進行維修，而對於傳統產業重車高交通量之場內剛性鋪面，根本無法解決鋪面易破壞之事實，尤其是沉陷及唧水等破壞類型，為防範以上兩項嚴重之剛性破壞等發生，後續針對維護工法之深入研究及探討。

1.2 研究目的

綜合前面本次研究之主要目的：

- (一) 探討剛性鋪面之破壞情形。
- (二) 使用鋼筋混凝土作為剛性鋪面維修材料之效果。
- (三) 藉由托底支撐座工法(維護技術)於剛性鋪面之應用案例，並加以探討與討論，未來可供相關業界參考。
- (四) 未來將朝向透過電腦軟體應力分析與實際現地應力數據量測之相互驗證及比對，可得相關修正參數及數據，提供日後剛性鋪面設計之參考。

1.3 研究步驟

- (一) 確立研究動機、目的及流程。
- (二) 研擬研究架構及內容。
- (三) 蒐集國內、外之相關文獻資料。
- (四) 剛性鋪面種類及特性
- (五) 透過現地試驗之案例實施
- (六) 資料整理、建立及分析
- (七) 結論與建議。

(八) 撰寫報告。

二、剛性鋪面特性及種類

2.1 剛性鋪面介紹

剛性鋪面面層材料為波特蘭混凝土組成，又稱為水泥混凝土鋪面，由於波特蘭水泥具有高剛性及高彈性模數(楊氏係數)，可將所承載之外力荷重傳遞於寬廣面積之路基土壤上，由面層之混凝土版結構強度承載鋪面荷重，原則上路基承載強度變化小，對鋪面結構強度不致有太大影響。由於剛性鋪面具有高承載力、高剛性、抗剪力破壞能力佳、高穩定性、經濟性、使用壽命長等優點，對於高交通流量及高載重之交通路段上，剛性鋪面應為最佳之鋪築方案。

2.2 剛性鋪面分類

一般而言，剛性鋪面主要可分為接縫式無筋混凝土鋪面(JPCP)、接縫式鋼筋混凝土鋪面(JRCP)、連續式鋼筋混凝土鋪面(CRCP)、與預力混凝土鋪面(Prestressed Concrete Pavement)等四種。

(一) 接縫式無筋混凝土鋪面(JPCP)

混凝土鋪面中未埋設鋼筋、鋼絲網、纖維網等，且難控制混凝土因溫差變化、乾縮而產生不規則裂縫，須於固定間格設置橫向縮縫(伸縮縫)，一般間格距離為 4 公尺至 6 公尺設置一橫向縮縫。縮縫內有分無綴縫筋(無筋伸縮縫)及綴縫筋(有筋伸縮縫)型式。

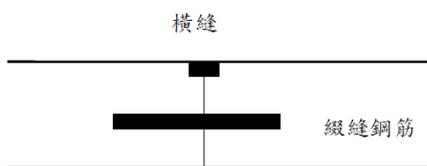


圖 2-1 接縫式混凝土鋪面【4】



圖 2-2 接縫式混凝土鋪面(綴縫筋)【4】

(二) 接縫式鋼筋混凝土鋪面(JRCP)

為混凝土埋設鋼筋、鋼絲網、纖維網等，可有效避免因溫差變化過大及乾縮產生不規則裂縫，因鋼筋具有抗拉能力且能將裂縫拉近密合之功用，因此設置橫向縮縫(伸縮縫)可間距拉大，但應視鋼筋使用數量而定，最長可間隔 30 公尺設置一橫向縮縫。此種鋪面須注意鋼筋不能貫穿橫向縮縫。



圖 2-3 接縫式混凝土鋪面(綴縫筋)

(三) 連續式鋼筋混凝土鋪面(CRCP)

混凝土中加入連續鋼筋、鋼絲網、纖維網等，鋼筋可提供抗拉、張應力，避免鋪面因溫差及乾縮等因素，產生不規則裂縫。連續式鋼筋混凝土鋪面不需設置橫向縮縫、工作縫等，有其施工方便性及降低養護頻率之特性、優點。事實上連續式鋼筋混凝土鋪面還是會因乾縮產生裂縫。

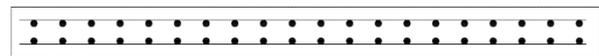


圖 2-4 連續式鋼筋混凝土鋪面(CRCP)

(四) 預力混凝土鋪面(PCP)

採用預力工法(先拉法、後拉法)之施工方式，增加鋪面抗拉及抗彎矩力，但因成本費用極高及屬特殊施工技術，較少被採用。

1. 先拉法:

先拉工法乃預先使鋼腱受拉力，並將其固定於兩端之固定臺，然後灌注混凝土，通常均以蒸氣養護，待混凝土達到預定之強度後切斷鋼線，於是由鋼腱與混凝土間之握裹力將預力傳達於混凝土鋪面。

2. 後拉法:

依設計配置預力套管、鋼腱及鋼筋，澆置混凝土，待混凝土養護及達到預

定強度後拆模，針對套管中之鋼鍵施拉預力，然後再錨定、澆置水泥砂漿於套管中，最後將鋼鍵固定於混凝土鋪面兩端之錨錠。

三、剛性鋪面損壞型態與原因

3.1 剛性鋪面損壞型態

混凝土鋪面損壞型態大致可分為表面損壞、裂縫、接縫破壞等類型。

(一) 表面損壞

如不規則型裂縫、粒料磨光、脫落、剝落，係因混凝土養護使粒料鬆動或不正確修飾，並且粒料品質不良及不正確拌合等原因致表面損壞。

(二) 裂縫

如縱向裂縫、橫向裂縫、角隅斷裂及耐久性裂縫，係因鋪面收縮及翹取引起應力，且加上車輛超載、路基喪失之成立、不足或不良鋸縫等因素致鋪面裂縫。

(三) 接縫破壞

如接縫填縫料破壞、橫向接縫破裂及縱向接縫破裂，係因混凝土養護使混凝土破裂或不正確修飾，並且填縫料脫落及老化等原因致接縫破裂。

(四) 其他

如高差、擠破、車道與路肩高差、車道與路肩分離、修補損壞及積水。

主要影響剛性鋪面版破壞之關鍵如下：

(一) 交通載重

反覆承受重車載重下，隨機具重量、輪軸載重組合、胎壓及行駛速率等因素變化下，會造成剛性鋪面破壞速率皆不同。

(二) 環境因素

因台灣一年四季氣溫不盡相同，而溫度高低將會造成剛性鋪面版塊上拱或下凹等情形發生，使得鋪面版塊變形，加上自重或頻繁交通載重下易產生破壞，且溫度高低也會對鋪面之接縫、裂縫造成不同程度之影響。根據國外研究報告指出，剛性鋪面版在溫度及乾縮聯合作用下產生的應力，可達到混凝土拉

力強度之 70~80%，因環境因素所產生之應力，更勝於車輪荷重之應力。原則上濕度變化的部分較不影響剛性鋪面版。

(三) 基底級配層之影響

基底層之支承狀態(沉陷、膨脹及壓密等)對版中應力造成極大之影響，若鋪築基底層時未依照規範確實做好路基之壓實等作業，恐會造成路基產生膨脹性和可壓縮性，間接使路面版因支承力不足造成破壞。而路基及基底層之材料性質不同，且路面結構變化過大，造成剛性鋪面版等破壞形式有很大差異。

(四) 材料選用不當或施工問題

若使用不當級配材料，如：粒料級配配比不當、使用不良材料，或未依規範、步驟進行施工，如：混凝土澆置間隔過久(形成冷縫、施工縫等)、未依造規定使用適合之施工設備、機具、或鋸縫時間過晚、接縫寬度不足等因素，將會嚴重影響鋪面結構。

3.2 剛性鋪面各損壞型態之原因

(一) 不規則裂縫

產生之原因：

1. 鋪面版之保護層不足，混凝土品質不佳。
2. 載重過重、支承力不足或路基不均勻沉陷等。
3. 鋪面版表面整飾過度。
4. 溫度效應(應力)導致鋪面版內部壓、拉應力過大，造成翹曲或收縮。
5. 接縫切割方法不當。

(二) 粒料磨光

產生之原因：

1. 施工不良、混凝土搗實不足。
2. 車輪之磨光作用。
3. 使用軟質之粒料。

(三) 剝落

產生之原因：

1. 施工不良、混凝土之骨材及配不當。
2. 版表面產生龜裂而導致剝落(連鎖效應)。

3. 混凝土品質不良。
4. 凍融作用。

(四) 縱向裂縫

產生之原因:

1. 鋪面板之溫度、濕度應力及水分(濕度)變化,導致鋪面板之翹曲或收縮。
2. 伸縮縫設置位置不當。
3. 施工人員施工不良,如鋸縫過晚設置、接縫深度不足。
4. 施工時,因養護不良、天氣乾燥、強風、酷熱等因素。
5. 反覆重載壓交通負荷作用及路基承载力、支承力不足。
6. 鋪面厚度設計不足,路基不均勻沉陷或混凝土品質不良所造成。

(五) 橫向裂縫

產生之原因:

1. 鋪面厚度設計不足,路基不均勻沉陷或混凝土品質不良所造成。
2. 鋪面板之溫度、濕度應力及水分(濕度)變化,導致鋪面板之翹曲或收縮,又加上外部荷重作用導致版塊移動之原因。
3. 橫向接縫施工品質不良,或鋸縫施工不良,若裂縫位置發生於橫向接縫之 0.6m 內,屬鋸縫縫槽深度不足或是鋸縫過晚設置之原因。
4. 反覆重載壓交通負荷作用及路基承载力不足,若裂縫位置發生於橫向接縫之 2~3m 內,屬路基支承力不足之原因。
5. 施工時,因養護不良、天氣乾燥、強風、酷熱等因素。

(六) 角隅斷裂

產生之原因:

1. 反覆重載壓交通負荷作用及接縫處路基承载力不足或版塊下方基底層掏空。
2. 鋪面板之溫度應力,導致鋪面板之翹曲或收縮。
3. 施工時,因養護不良、天氣乾燥、強風、酷熱等因素。

4. 接縫結構不完整,且鋪面板厚度不足。
5. 橫向接縫施工品質不良,或鋸縫施工不良,若裂縫位置發生於橫向接縫之 0.6m 內,屬鋸縫縫槽深度不足或是鋸縫過晚設置之原因。

(七) 接縫碎裂

產生之原因:

1. 版與版接縫間距過長,容易導致接縫因外在負重行為形成破裂。
2. 因接縫與裂縫間填塞較無壓縮性之材料(如:石子等),會造成版塊伸縮時產生超額內應力,並且結合外部車輛載重作用下,形成版邊緣接縫破碎。
3. 伸縮縫填縫材品質不良,導致水易滲透及版塊接縫間無伸縮效果,造成接縫之破碎。
4. 混凝土配比設計不良及混凝土養護不當,造成接縫之破碎。
5. 於澆置混凝土階段,為增加工作度,導致降低混凝土強度,並結合外部負重作用下,造成接縫之破碎。

(八) 接縫填縫料破壞

產生之原因:

1. 接縫老化,導致填縫料脫落。
2. 車輛行駛造成之影響。
3. 因溫度變化,導致版熱漲冷縮,致使接縫伸縮,而將填縫料擠出。
4. 即使使用良好之填縫材,若施工不良或形狀不良之填縫槽,將導致接縫填縫之缺陷。
5. 因填縫材品質不良(如:材料硬化、老化),易造成黏著力及內聚力喪失。

(九) 接縫高差

產生之原因:

1. 路基、基底層之不均勻沉陷,或接縫不良。
2. 底層受水而膨脹,或基底層承载力不足。
3. 路基或基底層夯實度(壓實度)不足。
4. 唧水作用,造成鋪面板底部細料被水帶走。

(十) 擠破

產生之原因:

1. 路基不均勻沉陷及承载力不足之原因。
2. 接縫因石子或土讓(屬不可壓縮之物質)填塞,導致鋪面版無法有效伸縮、伸展,鋪面版內部因而產生內應力,造成翹曲現象,經常發生在裂縫或接縫周遭。

(十一) 車道-路肩分離

產生之原因:

1. 於施工階段,未針對基礎進行量測或路基壓實度不足。
2. 路基、基底層等含水量過高及排水不良。
3. 車道與路肩之基礎產生差異沉陷。

(十二) 唧水或噴泥現象

產生之原因:

1. 接縫材料品質不良及排水不良。
2. 基底層之基底層膨脹及細粒料流失。
3. 接縫或裂縫已損壞,容易使水滲入基底層,導致基底層含水量過高,而降低基底層承載能力。



圖 3-1 鋪面唧水現象

四、國內現行剛性鋪面之維護措施

目前國內現行之鋼性鋪面維護方法,共分為三大類包括緊急養護、一般養護及大型養護,以下個別介紹:

4.1 緊急養護

若鋪面版出現較為嚴重或可能危及行車

安全時,應確實檢查並通報後盡速進行養護,通常水泥混凝土鋪面版皆需耗費長時間之進行養護施工,故未暫時應急補救措施,可採用瀝青混凝土填補工法,可暫時維持行車品質及雨水等繼續滲入而以致鋪面版之結構急速破壞。建議若遇緊急情況下,因瀝青熱拌料不易獲得,故可採用冷拌料替代之,而待事後正常養護時,則需將全部填補之瀝青混凝土重新翻修更新。

(一) 施工方法

1. 熱拌混合料填補法:

- (1) 材料:使用最大粒徑 13 公厘以下之熱拌密級配瀝青混凝土較為適合。

(2) 施工方法:

- (a).先使用切割機將損壞之範圍進行切割,後進行挖除,而開挖面應垂直。
- (b).將周圍及底部之鬆散粒料及雜物清除乾淨。
- (c).周圍及底部噴灑黏結層(採用乳化瀝青)。
- (d).倒入熱拌混合料並耙平,且熱拌混合料填補高度需高出原鋪面 2~3 公厘以上。
- (e).使用壓路機進行夯壓。
- (f).經必要之養護,才可開放通車。

2. 常溫混合料填補法:

若連續下雨,造成鋪面出現大坑洞,因坑洞潮濕情況下,建議可採用常溫混合料填補法作為緊急修護措施,但穩定性較不確定。

- (1) 材料:為瀝青系常溫型冷拌混合料,市面上已袋裝商品供應,養護單位平時需備妥,以備不時之需。

(2) 施工方法:

- (a).將坑洞內之雜物、碎料及積水排除。
- (b).倒入冷拌混合料,敲擊鬆散,且需高出於原鋪面之 2~3 公厘以上。

(c).使用夯實機進行夯壓。

(二) 注意事項

1. 需將損壞之鋪面上，異物或鬆散粒料清除乾淨，並噴灑黏結層確保修補材料與原鋪面之黏結。
2. 若損壞鋪面與鄰近鋪面有明顯高差，需先修正其高差後再進行修補。
3. 若養護環境、經費及時間條件允許下，優先對於沉陷及坑洞進行效果較佳之永久性修補。對於坑洞損壞之養護，先將坑洞之雜物及鬆散粒料清除乾淨，依上述熱拌混合料填補法進行養護；若對於沉陷之養護，則先需使用刨除機刨除方式修正鋪面高差，再依上述熱拌混合料填補法進行養護。

4.2 一般養護

剛性鋪面主要之一般養護方法包刮有裂縫填封、表面處理、底緣排水、部分厚度修補、底層灌注、全厚度修補及局部打除重作等七種方法，以下針對各項維護措施之施工說明。

4.2.1 填封

由於鋪面表面產生裂縫、鋪面接縫填縫料脫落及縱向分離等破壞，但在未進一步完全破壞前，利用填縫料填塞之改善工法。主要目的：1.防止不可壓縮之物體滲入接縫，引致鋪面版端緣破裂；2.防止鋪面水經接縫滲入基底層產生唧水，造成鋪面版破壞等情形。

(一) 施工方法：

1. 將原有接縫清除。
2. 以鑽石鋸片進行鋸割深 3 公分、寬 1 公分之 U 型新接縫。
3. 以高壓空氣將新接縫之內部吹除乾淨。
4. 設置成型填縫條。
5. 最後灌注填縫料，如：瀝青等。

4.2.2 表面處理

利用機械以研磨機或刮槽機，將剛性鋪面表面刮除一薄層或刮成溝槽，用來改善剛性鋪面之表面缺陷之工法。表面處理之方法有兩項：

(一) 薄層：

以特殊砂漿材料，如樹脂瀝青膠泥砂漿或瀝青混凝土等材料，鋪設於剛性鋪面版表面上，通常鋪設厚度為 1.5 公分厚以下之薄層，用以改善鋪面版表面之平整度及抗滑性。

(二) 鋪面研磨及刮槽：

利用研磨機或刮槽機於剛性鋪面版表面進行刮除薄層或溝槽，為增加剛性鋪面版之抗滑性能，另為消除鋪面表面產生段差損壞情形，需進行處理使之平整。

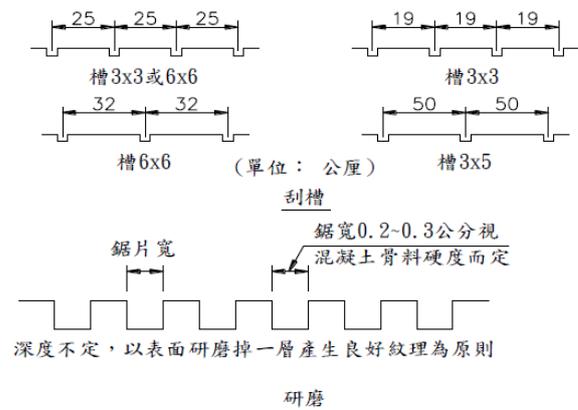


圖 4-1 鋪面研磨及刮槽之表面處理示意圖

4.2.3 底緣排水

於車道或車道外側路肩之鋪面版底下設置縱向或橫向之排水暗溝，可將經裂縫及接縫滲入至鋪面版下之水快速排除，避免後續鋪面版產生唧水、錯離或折斷之破壞情形發生。

(一) 施工方法

1. 鋸割暗溝範圍，寬度大於 15 公分以上，深度視基底層材料而定。若基底層材料為不透水層，排水暗管(透水管)頂面需低於鋪面版底深 5 公分；若基底層材料為透水層，則排水暗管頂面需平於或低於基底層底面。
2. 進行暗溝開挖，縱向暗溝每隔 10~15 公尺，需加設一橫向暗溝，並連接路邊之排水系統，將水排除且坡度需達 5% 以上。
3. 鋪設透水性工程不織布。
4. 埋設排水暗管(透水管)於暗溝內。透

水管直徑為 5 公分，同一斷面需有三個開孔，相鄰開孔所對應之圓心角需為 120 度，開孔孔徑為 0.13 公分，每 30 公分長度開口面積應大於 13 平方公分以上。

5. 回填透水性級配材料。
6. 鋪設面層。

4.2.4 部分厚度修補

剛性鋪面表面產生坑洞、接縫脫落及表面剝落等破壞，破壞深度未達鋪面版厚度之半，可採用部分厚度修補工法，修補材料可選擇樹脂系與水泥系兩種，而依使用粒料尺寸可分為水泥混凝土及砂漿等。

(一) 環氧樹脂材料修補:

養護時間較水泥系列之材料短、強度高，但成本費用較高。

1. 材料:多元酯及環氧樹脂砂漿等多種，多半使用環氧樹脂砂漿較多，製作拌合方法為使用主劑和硬化劑，依照相關比例混合，再加入適當之級配粒料或乾燥砂砂混合而成，一般樹脂配合比:粒料 1:40~1:10 之間。而硬化時間因氣候溫度變化而異，待拌合完成後需在 10~30 分鐘內施工，並養護時間約為 2~8 小時。若在氣溫低時材料硬化反應會較慢，故在 5°C 以下不適合施工，若氣溫太高會發生硬化現象過快，故建議選在氣溫較低之上午施工。

2. 施工方法:

- (1) 將剛性鋪面之劣質及損壞混凝土部分打除，並以空氣壓縮機吹除塵土及清理乾淨。
- (2) 均勻塗刷黏層(接著劑)，其用量為 0.3~0.5kg/cm² 或經工程司認可之使用劑量。
- (3) 待黏層未乾前，均勻塗佈環氧樹脂砂漿，並充分搗實。
- (4) 養護期間嚴防雨淋，盡量減少承受應力部分。

(二) 水泥系材料修補:

較容易作業，且可獲所需強度之優點，

但養護時間較長。

1. 材料:依照現地交通條件選用適當水泥系材料，如早強水泥、超早強水泥及普通水泥等。若修補厚度過薄，建議粗礫料最大尺寸不可超過施工厚度之 1/3。需使用坍度較小之水泥系材料。

2. 施工方法:

- (1) 將剛性鋪面之劣質及損壞混凝土部分打除，接合面需良好無損之水泥混凝土面，打除時不可切斷鋼筋網及鋼筋，若有斷損需搭接或和接回原本狀態。
- (2) 接合面塗刷環氧樹脂，澆置水泥混凝土或已拌合好支水泥砂漿。
- (3) 澆置完成後需確實搗實，以及鏟平修飾。
- (4) 水泥砂漿或水泥混凝土未完全塑型中，利用軟掃帚依順向掃成紋痕。
- (5) 視澆置水泥種類節定養護時間及開放通車時間。

(三) 一般注意事項:

1. 修補厚度不宜過薄，原則上以 10 公分為上限，亦不可超過原鋪面版版厚之半。
2. 鋪面版打除面，需為不規則狀，以傾斜者為最佳。
3. 打除後需將塵土、雜物及鬆動部分，清除乾淨。
4. 塗佈環氧樹脂黏接層應均勻塗抹，並有適當厚度。
5. 澆置完水泥混凝土需鋪設均勻及確實搗實，防止過度震動使粒料析離。
6. 修補作業應為連貫作業，由損壞部分之切割、打除，至噴灑養治劑為止。

4.2.5 底層灌注

於剛性鋪面版底與基底層之間隙進行灌注，使得沉陷之版塊抬起，其恢復原狀，以達到鋪面版穩定或已受到滲水影響之鋪面結構獲得改善。目前灌注材料有瀝青及水泥兩系列，近來也陸續研發多種灌注材料中。

(一) 瀝青材料灌注法:

灌注直徑約為 5~6 公分，其灌注孔之排列方式將影響整體效果，灌注材料採用針入度 10~40 的吹製地瀝青，施工順序如下:

1. 於鋪面版進行鑽孔，如圖 2-18 為灌注孔之鑽孔排列。孔之排列應考量以下因素:

- (1) 水泥混凝土鋪面版之裂縫、大小、沉陷量之情況。
- (2) 灌注壓力、機械及所用之瀝青材料。

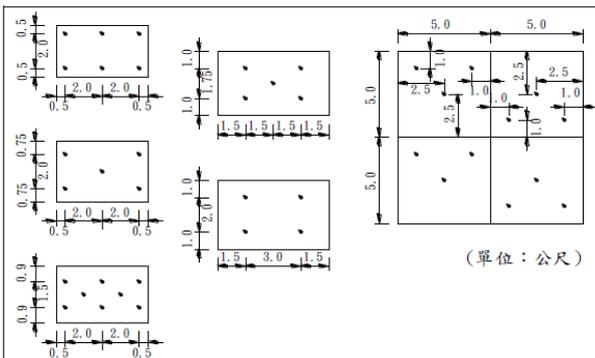


圖 4-2 灌注孔之位置示意圖

2. 鑽孔後利用小孔徑之空氣壓縮機清除塵土及雜物，再將灌注管嘴泵送空氣至版底，使清除水分及砂土。若進行灌注瀝青材料時，建議於鋪面版上塗刷一層石粉水，以利瀝青材料溢出或滴落而污染鋪面版表面時，易於清除。

3. 瀝青材料需加熱至 210°C 以上，以 $2\sim 4\text{ kg/cm}^2$ 壓力用噴嘴灌注，如圖 2-19。灌注量依鋪面版及基底層之間隙情況而定，約 $2\sim 6\text{ kg/cm}^2$ 之間。此作業為高壓下進行，應注意防火及灼傷外，並應注意以下各項:

- (1) 進行灌注時須配戴口罩及手套。
- (2) 應避免孔內有水分，恐產生蒸氣壓力，使瀝青噴出。
- (3) 抽出灌注嘴時，防止瀝青倒流。
- (4) 進行灌注時，瀝青將從其他孔洞、接縫、裂縫及路肩等處噴出，應小心注意。

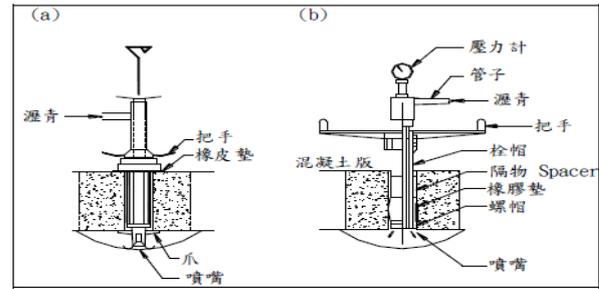


圖 4-3 瀝青灌注用噴嘴

4. 灌注完成後，需等待 30 秒，再將灌注嘴管抽出，立即將木塞埋入孔口。
5. 待瀝青材料之溫度降低及凝固後，將木塞拔出，並以水泥砂漿或瀝青砂漿灌入孔內填平灌注孔。灌注後約 30 分鐘~1 小時，即可開放通車。

(二) 水泥灌注法:

透過填充鋪面版與基底層之空隙及使沉陷之鋪面版抬平兩種。此法養護時間需較長，若無養護直接開放通車，可能會產生唧水作用，引致鋪面版破壞。通常養護時間至少需達三天以上，灌注材料以水泥砂漿為主，可加入矽砂、細砂、飛灰及石膏等細骨材，混合漿之配比需以稠度為基準來調配，一般採用稠度錐來測試 10~16 秒內流完為度。則施工順序跟(一)瀝青材料灌注法大致相同。抬平鋪面版時期鑽孔之位置，如圖 2-9。

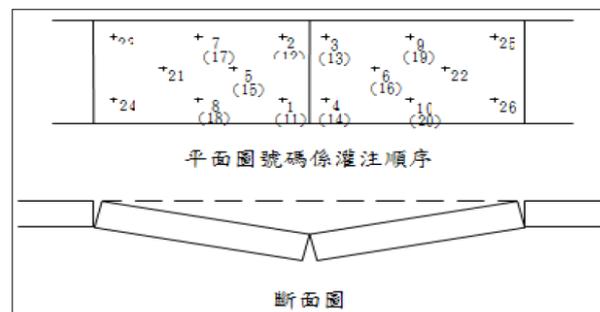


圖 4-4 抬平鋪面版之鑽孔位置及順序圖

4.2.6 全厚度修補

係為鋪面版有嚴重裂縫、斷裂或有大面積之破壞，期破壞深度已達 10 公分以上，或鋪面版版厚之一半以上時之鋪面版維修工法。

(一) 施工步驟:

1. 確認損壞範圍，原則上修補範圍為橫

向之全鋪面版寬，而縱向長度至少應有 1.8 公尺以上，剩餘之原有鋪面版之縱向則不可小於 1.8 公尺。

2. 鋸割及清除鋪面版之損壞部分。鋸割需平行於橫向接縫，而損壞之鋪面版，建議盡量採取吊除方式處理，避免擾動之版底基底層。
3. 修補範圍之版底基底層，須確實整平、夯實。
4. 於鋪面版橫向垂直面之中央鑽設綴縫筋，最外側之綴縫筋孔需距離版緣 20 公分，而綴縫筋孔需間隔 30 公分(鋪面版厚達 15~32 公分)鑽設一處，或間隔 38 公分(鋪面版厚達 33~42 公分)鑽設一處。
5. 綴縫筋(相關尺寸規定，請詳圖 2-10)固定端以環氧樹脂充分固結，活動端則是利用塑袋包紮並塗刷油脂，其兩端點須與水平面及垂直面之最大偏差不可大於 1 公分。若兩側為新築水泥混凝土面時，綴縫筋應固定於一體之金屬支架上，該支架需固定於路基上，且澆置水泥混凝土時不可發生傾斜或位移等。

鋪面版厚度 (公分)	鋼筋直徑 (公厘)	鋼筋長度 (公分)	鋼筋間距 (公分)
15-20	20	46	31
21-32	25	46	31
33-42	30	51	38

圖 4-5 綴縫筋尺寸及間距與鋪面版厚度之規定

6. 澆置完水泥混凝土後，須確實搗實及整平，於水泥混凝土具塑性、且有足夠硬度時進行掃紋作業，掃紋透過金屬梳沿橫向拖曳，而金屬梳由 2.4 公厘寬、12~15 公分長，約 1.27 公分間距之金屬薄片組成。
7. 掃紋作業完後，需噴灑養治劑進行養護。
8. 鋸縫:
 - (1) 原有接縫鋸縫:原接縫寬度不足 1 公分者，需重新鋸縫，標準新縫尺寸為:寬 1 公分、深 3 公分。

(2) 新設之接縫鋸縫:

A. 第一次鋸縫:

- (a).均須依照設計圖之規範，來進行施工。
- (b).橫向接縫應為綴縫筋組合之中心線進行切割，中心線之位置，需於為澆置混凝土前，先標記清楚、預留記號，以利後續進行鋸縫切割施工。
- (c).應在水泥混凝土硬化，又不至於在鋸切時產生大量剝落時進行施工，通常為澆置完水泥混凝土之 4~24 小時間進行鋸切，若在天氣炎熱或日夜溫差大時，則須於 4~8 小時間進行鋸縫。
- (d).鋸縫施工不應受天氣等狀況來停止作業。
- (e).若進行鋸縫作業時發生大量角隅剝落，且寬度達 0.5 公分以上時，需予以延緩作業；若僅是輕微剝落屬正常現象，若鋸縫頂部邊緣完整且無剝落現象，則代表作業時機已晚，可能已產生不規則裂縫。
- (f).第一次鋸縫寬度應為 3.2 公厘；第一次鋸縫深度應為鋪面版厚之 1/4。
- (g).澆置水泥混凝土前，應先確認檢查切割機是否可正常運作，同時切割機及鋸片需有備品，以免因延誤切割而產生裂縫，若切割機組件故障時，不可澆置水泥混凝土。
- (h).若進行鋸縫切割時，發現產生裂縫時，應立即採取跳躍切割施工方式，可降低不規則裂縫之產生。
- (i).切割完成後需使用高壓水柱進行沖刷，可有效防止歲雜物嵌入鋸縫口，使車輛經過時要成鋸縫之破壞。

B. 第二次鋸縫:

(a). 第二道鋸縫之寬度及深度，應依照設計圖之相關規範，進行施工，鋸縫完成後需使用高壓水柱沖洗接縫，清洗鋸縫凹槽中之碎屑。

(b). 第二道鋸縫之施工時機，應為水泥混凝土之抗壓強度到達 240kg/cm² 以上時，進行作業。

(二) 一般注意事項:

1. 為避免擾動鋪面版底之基底層，建議採用全厚度鋸割吊除方式進行作業。
2. 縱向修補長度至少為 1.8 公尺。
3. 基底層應確實整平及夯實。
4. 原接縫應確實保留。
5. 復原後之接縫需填封完全。
6. 若原有鋪面版無設置綴縫筋，則維修時應全面設置綴縫筋。
7. 鋪面版吊除後，應盡速回復鋪面版，避免造成基底層易受氣候影響。
8. 鋪設之水泥混凝土，建議避免使用高水泥含量及高水灰比之水泥混凝土，減少發生乾縮裂縫之機率。
9. 應確實養治後，才可開放交通。

4.2.7 局部打除重作:

若鋪面版之裂縫破壞已達重級破壞以上，需採用部分鋪面版局部打除重作工法。本公司將部分鋪面版拆除，並於現場回復予以更新。施工順序如下:

- (一) 於鋪面版和路肩之接縫或鋪面版之橫向接縫及縱向接縫，進行鋸割。
- (二) 打除並清除原有損壞之鋪面版及不良之基底層材料。
- (三) 確實夯實基底層，必要時需增加鋪面版厚度。
- (四) 一律設置綴縫筋、澆置水泥混凝土、掃紋、鋸縫及填封等作業。

4.3 大型養護

若路段中損壞較為嚴重、損壞範圍過大時，且考量經濟效益、施工成效性及對用路

人之影響性，經審慎評估後，採取大型養護方法，並於單次養護作業中修護多數損壞。大型養護屬於計劃型養護工作，因涉及範圍較大及施工耗時，若決定採取大型養護作業時，需針對該路段再型確認鋪面損壞狀況，並評估後依據結果擬定對策及養護方法，並對未來鋪面結構之需求進行規劃及設計。

4.3.1 翻修(全面鋪面版更新):

若剛性鋪面版損壞嚴重，且進行緊急養護和一般養護後，皆無法使鋪面維持正常機能時，應立即翻修。翻修方法應考量交通量、路基、基底層及面積等因素，決定採取瀝青混凝土面層或是水泥混凝土面層。

(一) 翻修之厚度設計，請參考相關鋪面厚度設計法，如:AASHTO 美國州際公路運輸協會厚度設計法、PCA 波特蘭水泥協會厚度設計法、FFA 厚度設計法等。

(二) 施工注意事項:

1. 進行鋪面版塊打除時，原則上以一整塊版塊為最小單位。
2. 若進行基底層級配開挖時，應注意不可擾動鄰近土層，如使用機械開挖時，距開挖線處應由人工進行開挖。
3. 基底層應確實夯實及整平，而邊緣處或角隅應以夯實機或搗固機等夯壓。
4. 若進行水泥混凝土鋪面版翻修時，其接縫相關間隔規定設計，僅只是翻修另一側車道時，接縫位置及結構應與原有水泥混凝土鋪面版之設計進行施工。與原有鋪面版之縱向接縫處可埋設綴縫筋。
5. 進行翻修水泥混凝土鋪面版時，需與鄰近原有路邊結構物之縱向縫隙間埋設接縫版及灌注瀝青，如圖 2-11。
6. 水泥混凝土品質，需依照相關之施工規範進行施工。

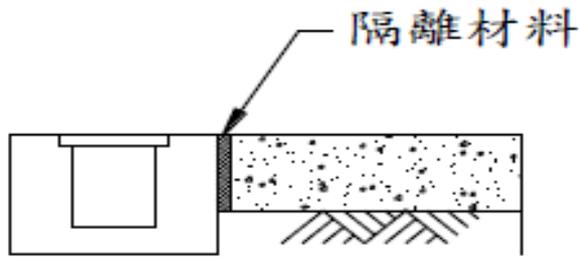


圖 4-6 水泥混凝土鋪面版與原有結構物間設置隔離材料

五、剛性鋪面破壞之維護措施實際案例

目前國內對於剛性鋪面之維修及補強，多半仰賴工程師之現場工程經驗或經由維護廠商之建議採用適合之工法進行維護，雖目前有針對國內外鋪面的維護工法、施工步驟及維修材料等進行研究，但礙於現地需求條件及維護單位需在有限時間內完成維修作業，導致皆未能有效針對鋪面之破壞主因進行充分調查與分析，僅能於短時間內進行規劃、發包及施工，然而因鋪面之破壞原因都不盡相同，無法針對鋪面工程特性訂定技術規範，故在沒有可參考的標準情形下，未能掌握維修成效與品質，易容易重複性發生同樣地鋪面破壞之情形，經查閱諸方文獻回顧及探討剛性鋪面之破壞種類中，發現剛性鋪面沉陷及唧水破壞情形之維護技術相當稀少，本研究將針對國內剛性鋪面沉陷相關維護方法探討外，透過不同維護技術及工法，實際運用於中鋼 CBP 造粒積剛性鋪面沉陷及唧水等破壞之案例，最後針對此維護技術之分析及深入探討。

5.1 中鋼 CBP 造粒積剛性鋪面之沉陷及唧水破壞維護措施案例

5.1.1 工程概述:

中鋼 CBP 造粒積廣場道路位於高雄市小港區中鋼路之小港廠區內，主要為載滿礦泥料卡車運至礦泥堆置料場之行經主要道路，係因中鋼廠區內道路，為配合相關環保政策，需減少道路色差，故增設自動灑水器並頻繁進行路面灑水清潔，此剛性鋪面長期受大型車輛重載壓負重，且鋪面之接縫內填縫材早已損壞，鋪面水經由已破壞之接縫滲入基底

層，造成基底層泡水、濕軟，導致基底層之承载力嚴重降低，進而漸漸形成版塊高低差和唧水情形，版塊內部與基底層間形成空洞，使剛性鋪面使用壽命大大降低、頻繁破壞，為提升剛性鋪面之使用壽命及防止版塊沉陷和唧水等破壞，本次案例使用 RC 托底支撐基座工法來增加版底支撐強度、減少接縫破壞及減少水流入基底層，造成基層濕軟、降低承载力。

5.1.2 現況把握:

- (一) 剛性鋪面版塊形成高低沉陷。
- (二) 重車載壓時，版塊形成唧水(基底層之細粒料，經由接縫噴射至版塊表面)。
- (三) 接縫內明顯積水
- (四) 用路人及車輛行駛之安全性及舒適感降低。
- (五) 易發生機車騎士交通事故(摔車)。



圖 5-1 鋪面沉陷(高低差)及唧水現象

5.1.3 試驗方法

本次案例路段經探討評估後，採用 RC 托底支撐座工法進行剛性鋪面之維護，於版塊之縱、橫向接縫處下方設置一支撐基座，除了可以有效延長水路及降低水滲入至基底層，且考量接縫處通常為鋪面版塊主要破壞位置，因此支撐基座亦可提供另一側鋪面版塊有效支撐力與托底等優點，進而防止版塊產生沉陷及唧水等破壞，以下為 RC 托底支撐基座之工法詳細介紹:

(一) Rc 托底支撐基座之工法:

此工法指藉設置替代基礎、加強既有基底層喪失支承力等因應措施，提升結構

物之結構安全及機能，以確保其鋪面因基底層承载力不足，而導致沉陷。

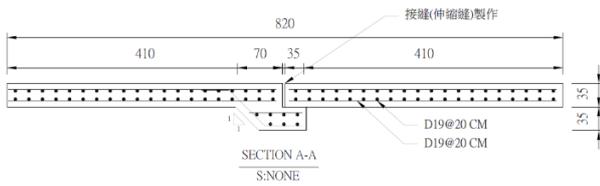


圖 5-2 Rc 托底支撐座-剖面圖

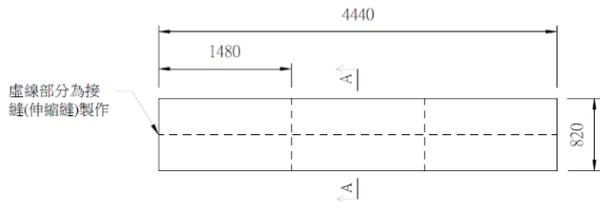


圖 5-3 本次試驗鋪面-平面圖

設計條件:

1. 剛性鋪面單元尺寸:4400cmX820cmX35cm;托底支撐基座單元尺寸:(縱向:4400cm、橫向:820)X(上底:105cm 下底::70cm)X35cm。
2. 鋼筋配置:D19 鋼筋@20cm，雙向雙層。
3. 預拌混凝土($f_c = 280\text{kg/cm}^2$)。
4. 無筋接縫(伸縮縫):橫向接縫間距約 15m 設置一處;縱向接縫為鋪面中心線設置一處。
5. 剛性鋪面受力:40t/車。

(二) 施工步驟:

1. 既有剛性鋪面進行打除(含鋼筋切除)。
2. 基底層進行開挖支撐基座坑(預計設置支撐基座處)。
3. 現有基底層性質改善及處理，如:泡水土層，進行日曬處理、劣質基底層級配進行汰換更新。
4. 基底層整平及夯實。
5. 支撐基座及鋪面鋼筋組立。
6. 模板組立。
7. 混凝土泵送澆置。
8. 剛性鋪面整體表面粉光、修飾。

9. 無筋接縫(伸縮縫)設置(約 15m 間距設置橫向接縫)。

(三) 施工流程圖:

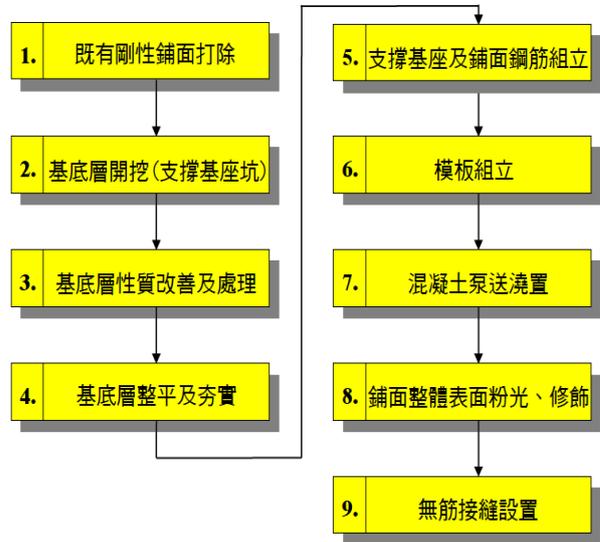


圖 5-4 施工流程圖

(四) 施工過程紀實:



圖 5-5 施工前紀實-剛性鋪面損壞情形



圖 5-6 施工中紀實-1.既有剛性鋪面打除(北側)



圖 5-7 施工中紀實-基底層長年泡水、積水(北側)



圖 5-11 施工中紀實-基底層整平及夯實(北側)



圖 5-8 施工中紀實-另一側鋪面版塊嚴重沉陷、高低差(南側)



圖 5-12 施工中紀實-支撐基座及鋪面鋼筋組立(北側)



圖 5-9 施工中紀實-基底層性質改善及處理作為(北側)



圖 5-13 施工中紀實-支撐基座及鋪面鋼筋組立(北側)



圖 5-10 施工中紀實-基底層開挖支撐基座坑(北側)



圖 5-14 施工中紀實-支撐基座及鋪面鋼筋組立(北側)



圖 5-15 施工中紀實-模板組立(北側)



圖 5-19 施工中紀實-托底支撐基座完成照



圖 5-16 施工中紀實-280kg/cm² 混凝土泵送澆置(北側)

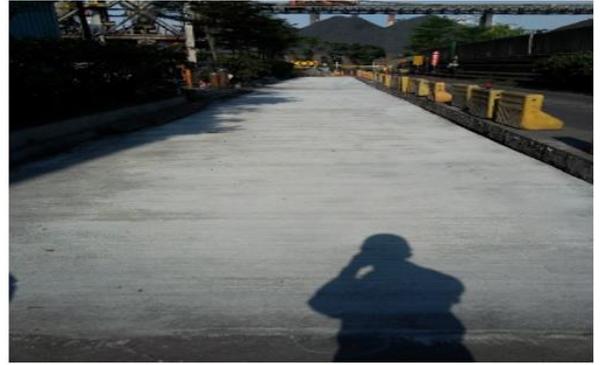


圖 5-20 施工中紀實-北側剛性鋪面完工

補充: 南側剛性鋪面施工方法及步驟, 與北側相同。



圖 5-17 施工中紀實-鋪面整體表面粉光、修飾(北側)



圖 5-21 施工中紀實-本次試驗路段之剛性鋪面完工

六、案例試驗討論

6.1 剛性鋪面設計厚度之探討

本次試驗之剛性鋪面厚度設計為 35 公分厚, 主要參考文獻【FAA】FAA 規範中剛性鋪面厚度最小面層值不可少於 15 公分之相關規定, 且遵循此鋪面之原設計鋪面厚度(35 公分)之規定, 最終決定於本次試驗鋪面厚度設計為 35 公分, 鋪面厚度應屬合理。



圖 5-18 施工中紀實-無筋接縫(伸縮縫)設置(北側)

6.2 剛性鋪面鋼筋設計用量之探討

本次試驗之剛性鋪面配筋用量，係依據蔡攀鰲教授所著作公路工程學中提出，一般剛性鋪面版之鋼筋比 ρ (鋼筋用量/混凝土橫斷面面積)為 0.3%~1.82%左右。本次試驗剛性鋪面版之鋼筋比

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{(41 \times 2.865)}{(820 \times 25.15)} \times 100\% = 0.57\%$$

依據蔡教授之公路工程學之鋼筋比規範，本次試驗鋪面版之鋼筋用量應屬合理。

6.3 剛性鋪面維護後之效果確認

(一) 本次案例試驗之剛性鋪面，採用托底支撐座工法進行維護，完工至今皆有不定時，依人工現地觀察及調查，目前評估此剛性鋪面狀態相當良好，並無出現版塊沉陷及唧水等破壞情形，請詳如圖 6-1、圖 6-2，而現場轄區單位來文反應此路段使用滿意，且大大增加機車騎士及大型車輛行車之舒適感及安全。



圖 6-1 試驗鋪面之 106 年 03 月現況照



圖 6-2 試驗鋪面之 110 年 03 月現況照

(二) 本次案例試驗之剛性鋪面托底維護工法，在國內鋪面維護相關工法中，還未曾出現過，筆者想透過本次案例試驗，來深入探討若於鋪面版接縫下方增設 RC 托底支撐基座，是否能防止剛性鋪面版塊沉陷等問題，且可增加接縫之使用壽命，依維護完成至今目前效果顯卓，尚未發現有沉陷或唧水等情形發生，未來持續追蹤。本次剛性鋪面維護工法研究及分享，期盼能提供業界對於鋪面維護技術及工法之參考。

七、結論與建議

7.1 結論

- (一) 參考 FAA 規範中之剛性鋪面厚度最小面層值不可少於 15 公分之規定，本次試驗之剛性鋪面厚度設計為 35 公分厚，採放大厚度規定標準，且與原設計鋪面厚度(35 公分)鋪面厚度相同，應屬合理。
- (二) 本次案例試驗之剛性鋪面沉陷及唧水維護措施之 RC 托底支撐座工法，於國內鋪面維護技術工法中從未出現，礙於工程時效性關係，規劃設計及施工階段缺少軟體結構應力分析及非破壞性現場量測應變及應力值，並深入探討與分析整體鋪面結構之力學行為，後續透過計算及分析比較，能得出更貼近現地之力學與破壞行為，未來會朝著這方面努力與研究，可供業界參考。
- (三) 經調閱過往維護紀錄中，發現此試驗路段平均約 2.5 年其剛性鋪面發生破壞，本次試驗已於 106 年 11 月中完工，至今 110 年 5 月已過 4.5 年之久，目前鋪面狀態良好，現場單位反應此路段使用滿意，大大增加機車騎士及大型車輛行車之舒適感及安全。
- (四) 後續皆有持續性，以人工目視來觀察及判斷，本次試驗路段之施工成效性，是否有效改善原鋪面沉陷及唧水等破壞狀態，經長期觀察，依目視可明顯發現，此剛性鋪面不再產生沉陷及唧水等破壞情形，效果良好，後續將持續追蹤。

7.2 建議

- (一) 建議未來可將本次案例試驗之鋪面維護 RC 托底支撐座工法，制定一套標準化施工流程，若業界有遇到類似相同之鋪面破壞等情形，可供參考。
- (二) 由於此試驗之維護工法，屬大型養護中翻修方法的一種，相對著維護成本之費用較高，建議可針對剛性鋪面之全生命週期進行分析及建立鋪面破壞指數之標準，以利業界在進行鋪面破壞之判斷，能精準分析出對鋪面成本之影響。

參考文獻

1. 周義華，運殊工程，鼎漢國際工程顧問股份有限公司，第二版，1993
2. 夏桂華、李 釗，「機場剛性鋪面維修技術手冊研析」，碩士論文國立中央大學，2000。
3. 李英豪、李 釗、陳世晃，「剛性鋪面維護及補強技術之研究(1/2)」，交通部，第 14~26 頁、第 45~54 頁，2009。
4. 陳金泉，「以現地量測驗證混凝土鋪面靜力分析-雲林斗六工業區取德公司地坪案例」，碩士論文國立成功大學，第 5~6 頁，2009。
5. 「北二高剛性路面建造講習」，國道新建工程局，第 24~28 頁，1980。
6. 李英豪、李 釗、陳世晃，「剛性鋪面維護及補強技術之研究(2/2)」，交通部，第 16~29 頁，2010。
7. 中華民國交通部台灣區國道新建工程局 (<http://gip.taneeb.gov.tw/ct.asp?xItem=11984&ctNode=2808>)
8. Federal Aviation Administration, "Airport Pavement Design and Evaluation," FAA Advisory Circular AC 150/5320-6C, 1978.

廢石英磚拋光粉製作成無機聚合物工程性質之研究

王金鐘¹ 羅晨晃² 曹淑靚³ 李佳勳³ 陳蕙楨³

¹正修科技大學土木與空間資訊系教授

²正修科技大學土木與空間資訊系講師

³正修科技大學土木與空間資訊系大學生

摘要

本研究主要利用鹼活化處理技術，激發水淬爐石粉膠結的能力，製作成膠結的無機聚合物，其次為廢石英磚拋光粉無機聚合物的製作，其試拌配比為(1)鹼當量(AE)設定為 6%、8% 及 10% (2)鹼模數比(MS)設定為 1.5 (3)液膠比為 0.8、0.9、1.0，(4)骨膠比為 0.4、0.6 及 0.8 等調配，並澆置成 5cm*5cm*5cm 試體，拆模後並養治 3 天、7 天及 28 天再進行一系列試驗，探討其抗壓強度、吸水率、乾縮率等之影響，目標為製作出能符合 CNS-382 普通磚之規範要求。

試驗結果顯示：(1)採用鹼當量 6%、8% 和 10%，液膠比為 0.8、0.9 及 1.0，骨膠比為 0.4、0.6、0.8，鹼模數比 1.5 就能滿足 CNS-382 普通磚第 1 種磚之抗壓強度要求。(2)就抗壓強度而言，所有配比中以水膠比 0.8、骨膠比 0.8、鹼當量 10% 之配比抗壓強度效果最佳。(3)採用鹼當量 6%、8%、10%，液膠比為 1.0 及 1.5，骨膠比為 0.4、0.6、0.8，鹼模數比 1.5 就能滿足 CN382 普通磚第 1 種磚吸水率的要求。(4)就吸水率而言，所有配比中以液膠比 0.9，骨膠比 0.4，鹼當量 10% 的配比吸水率最低。(5)就乾縮率而言所有配比中以鹼當量 8%、骨膠比為 0.6，液膠比 0.9 配比，乾縮率較低。

關鍵字：廢石英磚拋光粉、水淬爐石粉、鹼當量、鹼模數比、液膠比、骨膠比、凝結時間、抗壓強度、吸水率

A Study of Engineering Properties of Geopolymers Made from Waste Quartz Tiles Polishing Powder

Chin-Chung Wang¹ Chen-Hoang Lo² Shu-Jing Cao³
Jia-Xun Li³ I-Chen Chen³

^{2,3}Civil Engineering and Geomatics Department, Cheng Shiu University

¹Corresponding Author, Civil Engineering and Geomatics Department, Cheng Shiu University

ABSTRACT

This research mainly uses alkali activation treatment technology to stimulate the cementing ability of water quenched furnace powder, produce cemented geopolymers, Secondly production of waste quartz tiles polishing powder geopolymer bricks, trial mix ratios (1) alkali equivalent (AE) was set to 6%, 8% and 10%, (2) alkali modulus ratio (MS) was set to 1.5, (3) liquid binder ratio, such as the deployment of 0.8, 1.0 and 1.5, (4) aggregate binder ratio was set to 1, 1.25 and 1.5, respectively. and pouring set to 5cm*5cm*5cm test specimens, and curing 3 days, 7 days and 28 days after executed a series of tests, base mechanics features of the brick through tests of

compressive strength, water absorption, and shrinkage target for the production could meet the CNS 382 common brick specifications requirements.

From the experimental results show (1) use alkali equivalent 6%, 8% and 10%, the ratio of liquid binder is 0.8, 0.9 and 1.0, aggregate binder ratio is 0.4, 0.6 and 0.8, and the alkali modulus ratio of 1.5 can simultaneously meet the requirements of CNS-382, compressive strength requirements of the first type of brick. (2) In terms of compressive strength, among all the ratios, the liquid binder ratio of 0.8, aggregate binder ratio of 0.8, and alkali equivalent of 10% has the best compressive strength effect. (3) use alkali equivalent 6%, 8% and 10%, the ratio of liquid binder is 0.8, 0.9 and 1.0, aggregate binder ratio is 0.4, 0.6 and 0.8, and the alkali modulus ratio of 1.5 can simultaneously meet the requirements of CNS-382, water absorption requirements of the first type of brick. (4) In terms of water absorption, among all the ratios, the ratio of liquid binder is 0.9, aggregate binder ratio is 0.4, and alkali equivalent is 10% the water absorption ratio is low. (5) In terms of dry shrinkage ratio, the ratio of alkali equivalent is 8%, aggregate binder ratio is 0.6, liquid binder is 0.9, and the dry shrinkage ratio is low.

Keywords: waste quartz tiles polishing powder, slag powder geopolymer, , alkali equivalent, alkali modulus ratio, liquid binder ratio, aggregate binder ratio, setting time, compressive strength, water absorption

一、前言

隨著經濟的蓬勃發展，事業廢棄物日益增加，在這環保意識高漲的時代，如何處理日益增多的事業廢棄物，乃是當務之急，刻不容緩。一般廢石英磚拋光粉材料主要源自於石英磚拋光及陶瓷工廠的石英磚不良品，年產量約 1 萬公噸左右，其中石英磚不良品包含不潔、針孔、括痕、厚度不齊、接縫不齊、色斑、色調不齊等等(林樹豪、黃暉淇，2001)，若能將廢石英磚拋光粉製作成廢石英磚無機聚合物，資源再利用，不但能解決無處堆置窘境，也不會造成國家資源的浪費。

強化國人『永續發展、資源再利用』，若能以國內廢石英拋光粉作為填充材，水淬爐石粉製作成的無機聚合物膠結材，製造出強度佳、環保優之無機聚合物—廢石英拋光磚，資源再利用，不但能解決無處堆置窘境，也不會造成國家資源的浪費，更能避免環境過度的開發及二度污染的問題產生，達到生態、節能、減廢、健康等綠建築評估指標。

二、文獻回顧

一般廢石英磚拋光粉材料主要源自於石

英磚拋光包含石英磚拋光及陶瓷工廠的石英磚不良品，年產量約 1 萬公噸。

2-1 廢石英磚拋光粉資源化利用

磁磚在材質依吸水率來區分石英磚(吸水率 1%以下)、半瓷化磚(吸水率 1-3%)、石質化磚(吸水率 3-6%)、陶質磚(吸水率 6-13%)，石英磚又分為拋光石英磚、半拋石英磚、霧面石英磚，所謂拋光石英磚是以粘土和石材的粉末經壓機壓制，再以高溫燒製而成後，再經由機器研磨拋光，表面平整光亮，石英磚表面或背面整塊磚的顏色都相同。

隨著技術的進步，業者將製成的石英磚再次上釉，再燒成，再拋光，改善傳統石英磚易吃色的缺點，石英磚依製程大致分成滲透拋光石英磚、多管拋光石英磚、微粉拋光石英磚與聚晶微粉拋光石英磚，拋光石英磚製作過程的手續繁複程度決定價格的高低。

廢石英磚拋光粉為石英磚拋光和石英磚製作的不良品，年產量約 1 萬公噸。其處理方式仍停留摻配於粘土再混拌壓製成磁磚磚胚再利用。我國正積極倡導節能減廢、資源再利用，目前國內外對廢石英磚拋光粉再利用的方式①再利用燒結成新陶瓷磚②再利用

於混凝土摻料等等。

2-2 水淬高爐石粉

一貫作業煉鋼廠之高爐煉鐵過程須加入石灰石作為助熔劑，並加入焦炭作為還原劑，鐵礦石經還原反應後殘留之非鐵物質即為高爐石，高溫融熔液態高爐石經過高壓水冷卻方式產出「CNS12223 水淬高爐爐渣」(經濟部標準檢驗局，2013)，經研磨成粉後主要應用於營建工程，替代水泥作為混凝土之膠結材，由中聯爐石處理資源化股份有限公司產出，細度 $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ，比重 2.93。

2-3 鹼活化劑處理技術

無機聚合物是一項具有前瞻性之發展(鄭大偉(2010)、Yip, et al(2005))，鹼活化劑通過激發矽酸鋁材料，如粉煤灰、偏高嶺土、磨細高爐礦渣、高嶺粘土等，與鹼性溶液製成之應用，其中爐石粉亦含有 SiO_2 與 Al_2O_3 ，爐石具有潛在水硬性作用之材料，純爐石的顆粒結構穩定，可直接使用純爐石作為主要膠結材料，利用鹼性溶液溶解爐石顆粒表面玻璃質，溶出 Ca^{2+} 破壞矽鋁氧化物之鍵結，並與鹼性溶液所分離之陰離子經由聚合反應生成水化產物，因而組成矽凝膠體，具有高早強、工作性佳、較佳的抗化學侵蝕能力、抗凍融循環能力及具有較佳的黏結力，但是仍有速凝、高收縮量等缺點，而高濃度的活化劑卻可以增加結構強度與縮短凝結時間，(林瑋倫(2009)、(吳浩、管學茂，2004))

2-4 CNS-382 普通磚規範

- (1) 適用範圍：本標準適用於以粘土為主要原料燒製而成，用於構築窯爐、土木、建築、造園等用途之普通磚(以下簡稱磚)(經濟部標準檢驗局，2007)。
- (2) 種類：依品質及形狀分類如下。
 - (一)依品質區分：1種磚、2種磚、3種磚。
 - (二)依形狀區分：實心磚、開孔磚。
- (3) 外觀：不得有使用上有害之龜裂或損害。
- (4) 尺度及許可差：依表 1 之規定。
- (5) 品質：應符合表 2 之規定。

表 1 磚之尺度及許可差 單位: mm

名稱	長	寬	厚
尺度	200	95	53
許可差	± 6.0	± 4.0	± 2.7

表 2 磚之品質規定

名稱	1種磚	2種磚	3種磚
吸水率(%)	10 以下	13 以下	15 以下
抗壓強度 MPa	$> 30.0\{300\}$	$> 20.0\{200\}$	$> 15.0\{150\}$

三、試驗計畫

3-1 試驗變數

本研究所使用的鹼活化劑是由矽酸鈉溶液(3號水玻璃)與氫氧化鈉混合配製而成，並嘗試探討無機聚合物抗壓強度、吸水率、乾縮量等關係，作為後續研究之用，表 3 為本研究之試驗變數表。

表 3 廢石英拋光磚無機聚合物產製技術之試驗變數

名稱	SiO_2 (%)	CaO (%)	Al_2O_3 (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	Na_2O (%)	Fe_2O_3 (%)
水淬爐石粉	33.6	40.8	15.0	6.1	1.8	0.2	0.3
廢石英磚拋光粉	72.9	1.3	12.1	2.0	-	2.7	0.56

3-2 試驗材料

本研究所使用材料分項說明如下：

- (1) 第一階段水淬爐石粉無機聚合物製作
 - ①水淬爐石粉:細度 $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ，中聯提供。
 - ②矽酸鈉(Na_2SiO_3):榮祥公司所生產之 3 號水玻璃。
 - ③氫氧化鈉(NaOH):工業級藥品。
- (2) 第二階段廢石英磚拋光粉無機聚合物磚製作
 - ①廢石英拋光粉:新北市鶯歌區某廠取得。

四、結果與分析

4-1 材料之物理化學特性

1. 水淬爐石粉

實驗中係採用中聯資源處理化公司所生產之水淬高爐爐石粉，經處理研磨成粉，性質符合 CNS 12549 規定，其細度為 $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ，

將其作為無機聚合物使用，如圖 1 所示，由 X 光繞射分析(XRD)瞭解爐石粉各個相位的組成生成物，圖中顯示爐石粉為非結晶質化合物組成，再由 X 光螢光分析(XRF) 探討爐石粉試樣中各元素含量，其中以 CaO 及 SiO₂ 等元素含量最高，配合 XRD 分析所得的各種化合物，再以重量分析計算其化學成份計量，進而推算爐石粉各元素的氧化態含量百分比，如表 2 所示。再以掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察爐石粉晶相變化，得知爐石由多邊形片狀及角粒狀結構推疊而成，並存在許多大小不等的孔隙，如圖 2 所示。

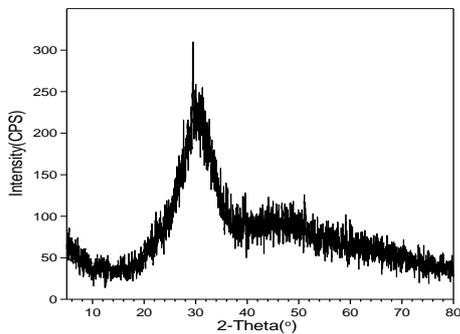


圖 1 水淬爐石粉之 X 光繞射分析圖

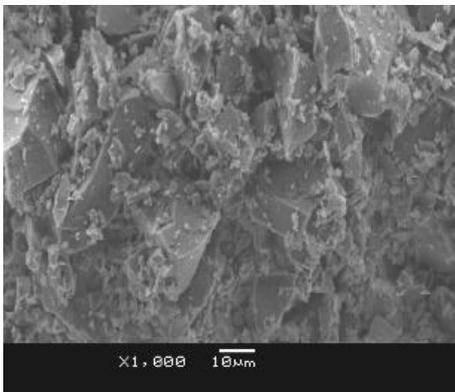


圖 2 水淬爐石粉晶相圖

2. 廢石英磚拋光粉

新北市鶯歌區某廠經前處理後研磨成粉末，經由 X 光繞射分析顯示廢石英磚拋光粉主要結晶形化合物為 SiO₂，次要結晶形化合物為 K₂O、Na₂O 等，如圖 3 所示，再由 X 光螢光分析(XRF)探討廢石英磚拋光粉試樣中各元素含量，其中以 C、O、Si、Al、Mg、Fe、Ca、K、Na 等元素含量最高，配合 XRD 分析所得的各種化合物再以重量分析計算其化學成份計量，得知進而推算廢石英磚拋光粉各

元素的氧化態含量百分比，如表 4 所示。再以掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察廢石英磚拋光粉晶相變化，得知廢石英拋光粉由片狀結構上下左右前後參差推疊而成，並存在許多大小不等的孔隙，如圖 4 所示。

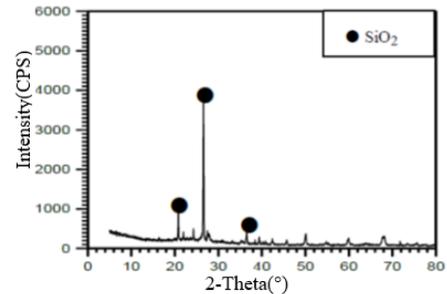


圖 3 廢石英磚拋光粉 X 光繞射分析圖

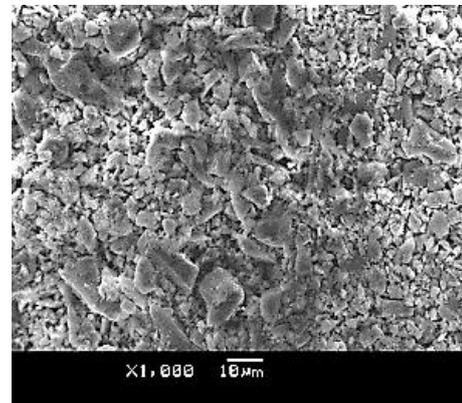


圖 4 廢石英磚拋光粉晶相圖

表 4 水淬爐石粉及廢石英磚拋光粉化學組成

材料名稱	拌合配比			
	液膠比 (L/B)	鹼當量 (AE)	鹼模數 (Ms)	骨膠比 (A/B)
廢石英拋光磚 無機聚合物	0.8	6%	1.5	0.4
	0.9	8%		0.6
	1.0	10%		0.8

4-2 抗壓強度

1. 鹼當量之影響：

為探討鹼當量對廢石英磚拋光磚無機聚合物試體之抗壓強度之影響，針對 6%、8% 及 10% 鹼當量範圍，並控制其鹼模數比為 1.5 及液膠比為 0.8、0.9 及 1.0 之條件下，當固定骨膠比 0.8、液膠比 0.8、鹼當量 6% 的條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之抗壓強度分別為 633.7 kgf/cm²~874.3 kgf/cm²；當鹼當量由 6% 提高至 8% 時其抗壓強度分別

上升為 $593.5 \text{ kgf/cm}^2 \sim 696.5 \text{ kgf/cm}^2$ ；當鹼當量由 6% 提高至 10% 時之抗壓強度分別上升為 $674.4 \text{ kgf/cm}^2 \sim 790 \text{ kgf/cm}^2$ 約提升 8%，由圖 5(a) 所示。

當固定骨膠比 0.8、液膠比 0.9、鹼當量 6% 的條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之抗壓強度分別為 $547.8 \text{ kgf/cm}^2 \sim 756.4 \text{ kgf/cm}^2$ ；當鹼當量由 6% 提高至 8% 時其抗壓強度分別上升為 $455.4 \text{ kgf/cm}^2 \sim 473.4 \text{ kgf/cm}^2$ ；當鹼當量由 6% 提高至 10% 時之抗壓強度分別上升為 $527.2 \text{ kgf/cm}^2 \sim 603.6 \text{ kgf/cm}^2$ 約提升 20%，由圖 5(b) 所示。

當固定骨膠比 0.8、液膠比 1.0、鹼當量 6% 的條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之抗壓強度分別為 $482.7 \text{ kgf/cm}^2 \sim 667.3 \text{ kgf/cm}^2$ ；當鹼當量由 6% 提高至 8% 時其抗壓強度分別上升為 $371.8 \text{ kgf/cm}^2 \sim 406 \text{ kgf/cm}^2$ ；當鹼當量由 6% 提高至 10% 時之抗壓強度分別上升為 $416.9 \text{ kgf/cm}^2 \sim 464.3 \text{ kgf/cm}^2$ 約提升 14%，由圖 5(c) 所示。

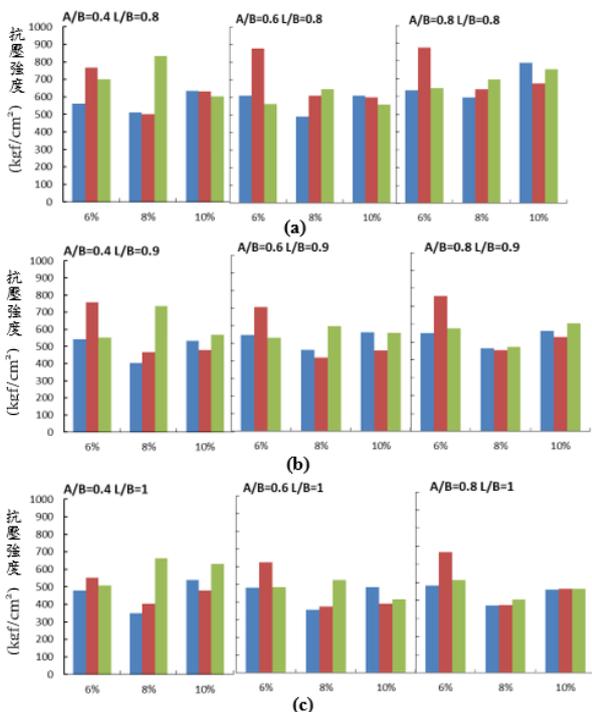


圖 5 (a)(b)(c) 鹼當量對廢石英拋光磚無機聚合物抗壓強度影響

由上述強度趨勢可看出抗壓強度隨養治時間增加而增加，隨著鹼當量的提高而有逐漸趨緩趨勢，其中以混拌配比在鹼當量 6%、

8%、10%，液膠比為 0.8、0.9 及 1.0、等所有配比在養護 3 天、7 天及 28 天後其抗壓強度均能滿足 CNS-382 普通磚第 1 種磚抗壓強度要求。其主要原因在於提高鹼當量亦使鹼激發劑濃度上升，其活化效果越佳，所含之氫氧根離子也較多，因而能迅速破壞爐石表面的玻璃質，並析出較多之鋁、矽元素，則水化產物 C-S-H 膠體亦隨之增加，進而提升爐石無機聚合物之抗壓強度。

2. 液膠比之影響：

針對 6%、8% 及 10% 鹼當量範圍，並控制其鹼模數比為 1.5 及液膠比為 0.8、0.9 及 1.0 之條件下，當固定骨膠比 0.4、鹼當量 10%、液膠比為 0.8 的條件下，當液膠比為 0.8 於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之抗壓強度分別為 $602.3 \text{ kgf/cm}^2 \sim 634.4 \text{ kgf/cm}^2$ ；當液膠比由 0.8 提高至 0.9 時其抗壓強度分別下降為 $480.2 \text{ kgf/cm}^2 \sim 568.4 \text{ kgf/cm}^2$ ；當液膠比由 0.8 提高至 1.0 時之抗壓強度分別下降為 $478.2 \text{ kgf/cm}^2 \sim 632.5 \text{ kgf/cm}^2$ 約下降 10%，由圖 6(a) 所示。

當固定骨膠比 0.6、鹼當量 10%、液膠比為 0.8 的條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之抗壓強度分別為 $599.3 \text{ kgf/cm}^2 \sim 783.8 \text{ kgf/cm}^2$ ；當液膠比由 0.8 提高至 0.9 時其抗壓強度分別下降為 $458.2 \text{ kgf/cm}^2 \sim 603.0 \text{ kgf/cm}^2$ ；當液膠比由 0.8 提高至 1.0 時之抗壓強度分別下降為 $390.6 \text{ kgf/cm}^2 \sim 483.2 \text{ kgf/cm}^2$ 約下降 30%，由圖 6(b) 所示。

當固定骨膠比 0.8、鹼當量 10%、液膠比為 0.8 的條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之抗壓強度分別為 $674.4 \text{ kgf/cm}^2 \sim 790.0 \text{ kgf/cm}^2$ ；當液膠比由 0.8 提高至 0.9 時其抗壓強度分別下降為 $527.2 \text{ kgf/cm}^2 \sim 603.6 \text{ kgf/cm}^2$ ；當液膠比由 0.8 提高至 1.0 時之抗壓強度分別下降為 $461.9 \text{ kgf/cm}^2 \sim 464.08 \text{ kgf/cm}^2$ 約下降 30%，由圖 6(c) 所示。

所以當液膠比增加時，抗壓強度會有降低的趨勢，主要是由於液膠比(L/B)提高使漿體內含水量增加相對工作性隨之增加，於聚合反應過程中並不與水產生反應，反之聚合反應具有脫水效果，因此當漿體硬固後水分

蒸發因而形成過多的孔隙，造成試體結構產生破壞面促使抗壓強度降低。就抗壓強度而言，以液膠比 0.8、0.9 及 1.0，骨膠比 0.4、0.6 及 0.8，鹼當量 AE=6%、8% 及 10% 等所有配比在養護 3 天、7 天及 28 天後其抗壓強度均能滿足 CNS-382 普通磚第 1 種磚抗壓強度要求。

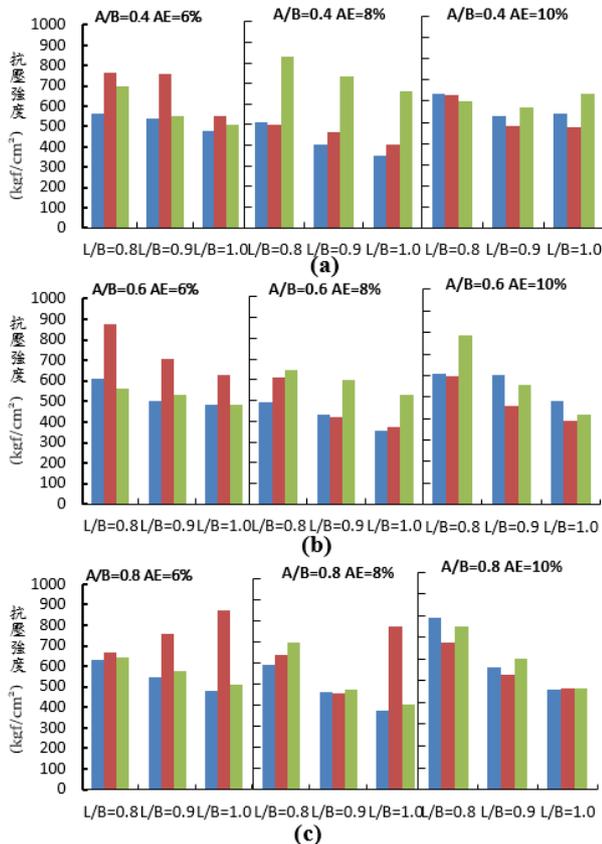


圖 6 (a)(b)(c)液膠比對廢石英拋光磚無機聚合物抗壓強度影響

3. 骨膠比之影響：

針對液膠比為 0.8，鹼當量為 10%，骨膠比為 0.4、0.6 及 0.8 範圍的條件下，當骨膠比為 0.4 時於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之抗壓強度分別為 $602.3\text{kgf/cm}^2 \sim 634.4\text{kgf/cm}^2$ ；當骨膠比由 0.4 提高至 0.6 時其抗壓強度分別上升為 $599.3\text{ kgf/cm}^2 \sim 783.8\text{kgf/cm}^2$ ；當骨膠比由 0.6 提高至 0.8 時之抗壓強度分別上升為 $674.4\text{kgf/cm}^2 \sim 788.2\text{kgf/cm}^2$ ，由圖 7(a)所示。

針對液膠比為 0.9，鹼當量為 10%，骨膠比為 0.4、0.6 及 0.8 範圍的條件下養護齡期 3 天、7 天及 28 天之抗壓強度分別為

$480.2\text{kgf/cm}^2 \sim 568.4\text{kgf/cm}^2$ ；當骨膠比由 0.4 提高至 0.6 時其抗壓強度分別上升為 $458.2\text{ kgf/cm}^2 \sim 603.0\text{kgf/cm}^2$ ；當骨膠比由 0.6 提高至 0.8 時之抗壓強度分別上升為 $527.2\text{kgf/cm}^2 \sim 603.6\text{kgf/cm}^2$ ，由圖 7(b)所示。

針對液膠比為 1.0，鹼當量為 10%，骨膠比為 0.4、0.6 及 0.8 範圍的條件下養護齡期 3 天、7 天及 28 天之抗壓強度分別為 $464.3\text{kgf/cm}^2 \sim 632.5\text{kgf/cm}^2$ ；當骨膠比由 0.4 提高至 0.6 時其抗壓強度分別上升為 $390.6\text{ kgf/cm}^2 \sim 415.9\text{kgf/cm}^2$ ；當骨膠比由 0.6 提高至 0.8 時之抗壓強度分別上升為 $461.9\text{kgf/cm}^2 \sim 464.3\text{kgf/cm}^2$ ，由圖 7(c)所示。

試體抗壓強度隨著養治時間增加而增加，抗壓強度亦會隨著骨膠比增加而趨緩，亦會隨著液膠比增加而降低。就抗壓強度而言，以液膠比 0.8、0.9 及 1.0，骨膠比 0.4、0.6 及 0.8，鹼當量 AE=6%、8% 及 10% 等所有配比在養護 3 天、7 天及 28 天後其抗壓強度均能滿足 CNS-382 普通磚第 1 種磚抗壓強度要求。其中以水膠比 0.8、骨膠比 0.8、鹼當量 10% 之配比抗壓強度效果最佳。

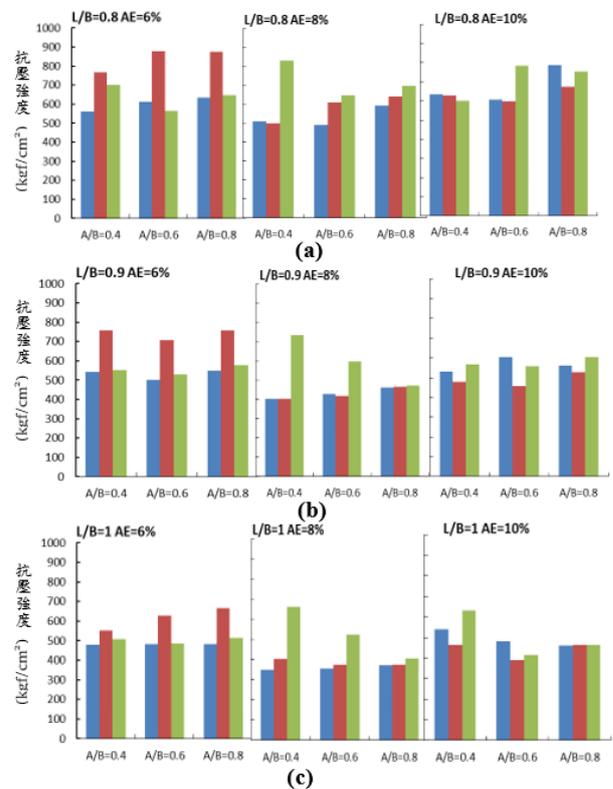


圖 7 (a)(b)(c)骨膠比對廢石英拋光磚無機聚合物抗壓強度影響

4-3 吸水率

1. 鹼當量之影響：

為探討鹼當量對廢石英磚拋光磚無機聚合物試體之吸水率之影響，針對鹼當量 6%、8% 及 10%，液膠比為 0.8、0.9 及 1.0，骨膠比 0.8、0.9 及 1.0 之條件下，當固定骨膠比 0.4、液膠比 1.0、鹼當量 6% 的條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之吸水率分別為 0.23%~1.79%；當鹼當量由 6% 提高至 8% 時其吸水率分別為 0.91%~4.19%；當鹼當量由 6% 提高至 10% 時之抗壓強度分別為 0.42%~1.35%，由圖 8(a) 所示。

當固定骨膠比 0.6、液膠比 1.0、鹼當量 6% 的條件下，當鹼當量 6% 於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之吸水率分別為 0.22%~1.38%；當鹼當量由 6% 提高至 8% 時其吸水率分別為 0.45%~1.33%；當鹼當量由 6% 提高至 10% 時之吸水率分別為 1.06%~1.55%，由圖 8(b) 所示。

當固定骨膠比 0.8、液膠比 1.0、鹼當量 6% 的條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之吸水率分別為 0.42%~1.71%；當鹼當量由 6% 提高至 8% 時其吸水率分別為 0.42%~1.53%；當鹼當量由 6% 提高至 10% 時之吸水率分別下降為 0.89%~1.78%，由圖 8(c) 所示。

由上述可知，吸水率會隨著鹼當量增加而增加，亦隨著養護時間增加而降低，主要是因為高鹼當量可使其產生更多之 Si-O-Si 及 Al-O-Al 之架狀結構，內部結構雖然緻密，但是架狀結構呈現大小不等裂縫，因而造成吸水率亦呈現增加的趨勢。

就吸水率而言，以鹼當量 AE=6%、8% 及 10%，液膠比 0.8、0.9 及 1.0，骨膠比 0.4、0.6 及 0.8，等所有配比在養護 3 天、7 天及 28 天後其吸水率均能滿足 CNS-382 普通磚第 1 種磚吸水率的要求。

2. 液膠比之影響：

針對鹼當量 6%、8% 及 10%，骨膠比 0.4、0.6 及 0.8，液膠比為 0.8、0.9 及 1.0，之條件下，當固定骨膠比 0.4、鹼當量 10%、液膠比 0.8、0.9 及 1.0 的條件下，當液膠比 0.8 於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之吸水率分別為

0.22%~1.32%；當液膠比 0.8 提高至 0.9 時其吸水率分別為 0.65%~1.09%；當鹼當量由 6% 提高至 10% 時之吸水率分別為 0.42%~1.35%，由圖 9(a) 所示。

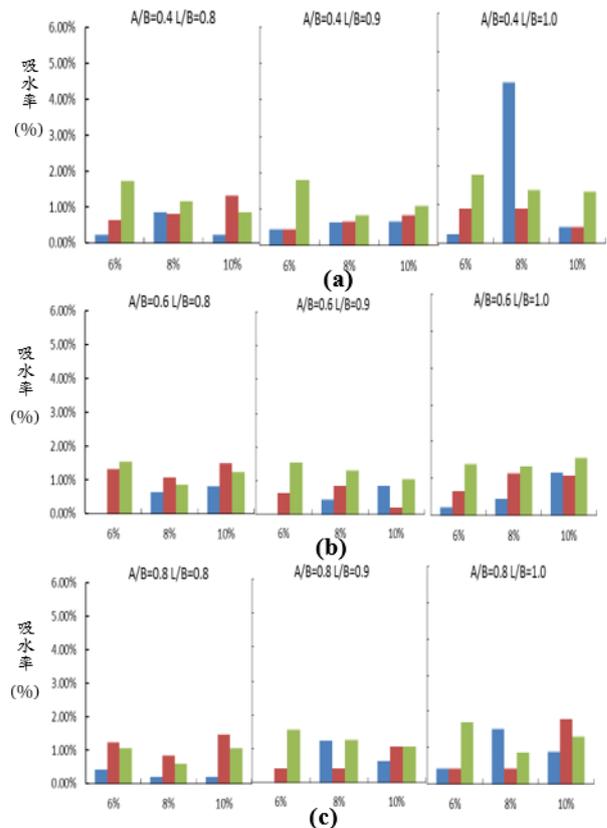


圖 8 (a)(b)(c) 鹼當量對廢石英拋光磚無機聚合物吸水率影響

當固定骨膠比 0.6、鹼當量 10%、液膠比 0.8、0.9 及 1.0 的條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之吸水率分別為 0.82%~1.49%；當液膠比 0.8 提高至 0.9 時其吸水率分別為 0.21%~1.04%；當鹼當量由 6% 提高至 10% 時之吸水率分別為 1.06%~1.55%，由圖 9(b) 所示。

當固定骨膠比 0.8、鹼當量 10%、液膠比 0.8、0.9 及 1.0 的條件下，於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之吸水率分別為 0.21%~1.46%；當液膠比 0.8 提高至 0.9 時其吸水率分別為 0.63%~1.06%；當鹼當量由 6% 提高至 10% 時之吸水率分別為 0.89%~1.78%，由圖 9(c) 所示。

就吸水率而言，以液膠比 0.8、0.9 及 1.0，鹼當量 AE=6%、8% 及 10%，骨膠比 0.4、0.6

及 0.8，等所有配比在養護 3 天、7 天及 28 天後其吸水率均能滿足 CNS-382 普通磚第 1 種磚吸水率要求。

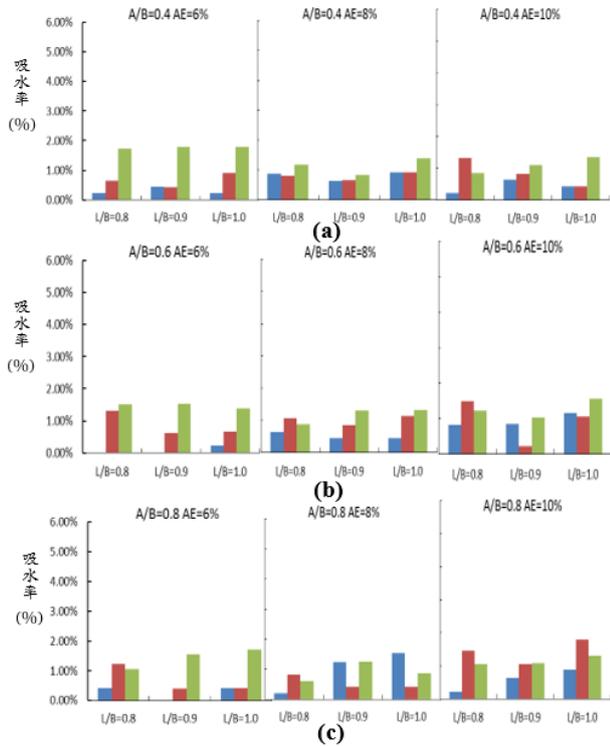


圖 9 (a)(b)(c)液膠比對廢石英拋光磚無機聚合物吸水率影響

3. 骨膠比之影響：

針對鹼當量 6%、8% 及 10%，骨膠比 0.4、0.6 及 0.8，液膠比為 0.8、0.9 及 1.0，之條件下，當固定液膠比 0.8、鹼當量 10%，骨膠比 0.4、0.6 及 0.8 的條件下，當骨膠比 0.4 於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之吸水率分別為 0.22%~1.32%；當骨膠比 0.4 提高至 0.6 時其吸水率分別為 0.82%~1.49%；當骨膠比 0.4 提高至 0.8 時之吸水率分別為 0.21%~1.46%，由圖 10(a)所示。

當固定液膠比 0.9、鹼當量 10%，骨膠比 0.4、0.6 及 0.8 的條件下，當骨膠比 0.4 於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之吸水率分別為 0.65%~1.09%；當骨膠比 0.4 提高至 0.6 時其吸水率分別為 0.21%~1.04%；當骨膠比 0.4 提高至 0.8 時之吸水率分別為 0.63%~1.06%，由圖 10(b)所示。

當固定液膠比 1.0、鹼當量 10%，骨膠比 0.4、0.6 及 0.8 的條件下，當骨膠比 0.4 於養

護齡期 3 天、7 天及 28 天之吸水率分別為 0.42%~1.35%；當骨膠比 0.4 提高至 0.6 時其吸水率分別為 1.06%~1.55%；當骨膠比 0.4 提高至 0.8 時之吸水率分別為 0.89%~1.31%，由圖 10(c)所示。

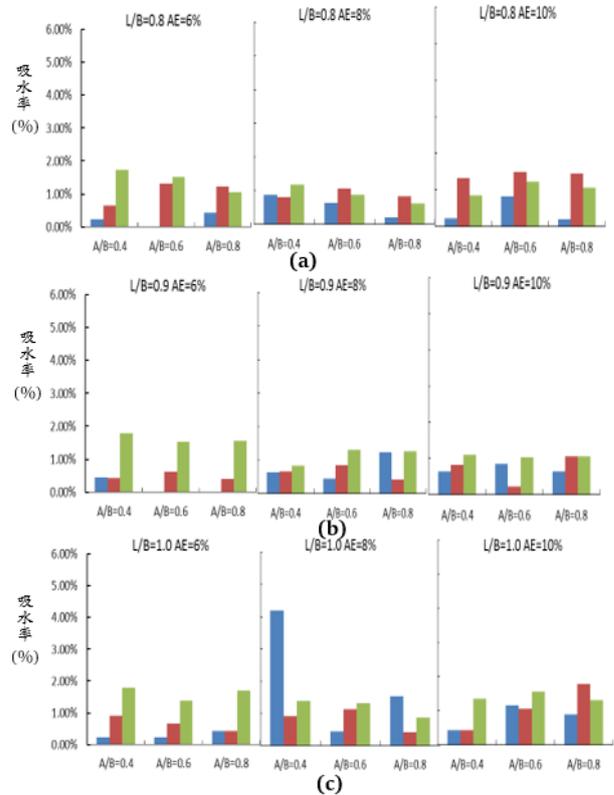


圖 10 (a)(b)(c)骨膠比對廢石英拋光磚無機聚合物吸水率影響

就吸水率而言，以鹼當量 AE=10%，液膠比 0.9，骨膠比 0.4 吸水率最低。在鹼當量 AE=6%、8% 及 10%，液膠比 0.8、0.9 及 1.0，骨膠比 0.4、0.6 及 0.8 之配比，在養護 3 天、7 天及 28 天皆可滿足 CNS-382 普通磚第 1 種磚吸水率的要求。就吸水率而言，以液膠比 0.9，骨膠比 0.4，鹼當量 10% 的配比吸水率效果最佳。

4-4 乾縮量

本研究主要使用乾縮試驗來瞭解無機聚合廢液晶磚之體積穩定性，因此利用數位式比較測長儀來量測無機聚合物脫水時所造成試體乾縮之長度變化量，因此其乾縮量越小越好，以下將針對無機聚合廢液晶磚鹼當量、液膠比、骨膠比對於體積穩定性之影響作探討。

1. 鹼當量之影響：

為探討鹼當量對廢石英拋光磚無機聚合物試體之吸水率之影響，針對液膠比為 0.8、0.9 及 1.0，鹼當量 6%、8% 及 10%，骨膠比 0.8 之條件下，當固定骨膠比 0.4、液膠比為 1.0，鹼當量 6%、8% 及 10% 的條件下，當鹼當量 6% 於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之乾縮率分別為 0.21%~0.29%；當鹼當量由 6% 提高至 8% 時其乾縮率分別為 0.07%~0.47%；當鹼當量由 6% 提高至 10% 時之乾縮率分別為 0.06%~0.31%，由圖 11(a) 所示。

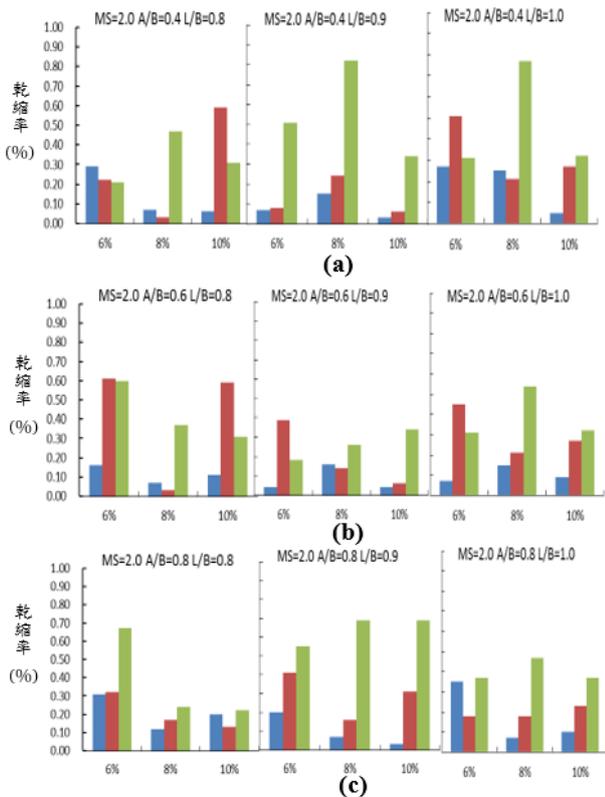


圖 11 (a)(b)(c) 鹼當量對廢石英拋光磚無機聚合物乾縮率影響

當固定骨膠比 0.6、液膠比為 1.0，鹼當量 6%、8% 及 10% 的條件下，當鹼當量 6% 於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之乾縮率分別為 0.07%~0.45%；當鹼當量由 6% 提高至 8% 時其乾縮率分別為 0.15%~0.54%；當鹼當量由 6% 提高至 10% 時之乾縮率分別為 0.09%~0.32%，由圖 11(b) 所示。

當固定骨膠比 0.8、液膠比為 1.0，鹼當量 6%、8% 及 10% 的條件下，當鹼當量 6% 於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之乾縮率分別

為 0.18%~0.37%；當鹼當量由 6% 提高至 8% 時其乾縮率分別為 0.07%~0.47%；當鹼當量由 6% 提高至 10% 時之乾縮率分別為 0.10%~0.37%，由圖 11(c) 所示。

2. 液膠比之影響：

針對鹼當量 6%、8% 及 10%，骨膠比 0.4、0.6 及 0.8，液膠比為 0.8、0.9 及 1.0，之條件下，當固定骨膠比 0.4、鹼當量 10%、液膠比 0.8、0.9 及 1.0 的條件下，當液膠比 0.8 於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之乾縮率分別為 0.06%~0.35%；當液膠比 0.8 提高至 0.9 時其乾縮率分別為 0.03%~0.41%；當鹼當量由 6% 提高至 10% 時之乾縮率分別為 0.05%~0.43%，由圖 12(a) 所示。

當固定骨膠比 0.6、鹼當量 10%、液膠比 0.8、0.9 及 1.0 的條件下，當液膠比 0.8 於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之乾縮率分別為 0.11%~0.59%；當液膠比 0.8 提高至 0.9 時其乾縮率分別為 0.04%~0.34%；當液膠比由 0.8 提高至 1.0 時之乾縮率分別為 0.09%~0.32%，由圖 12(b) 所示。

當固定骨膠比 0.8、鹼當量 10%、液膠比 0.8、0.9 及 1.0 的條件下，當液膠比 0.8 於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之乾縮率分別為 0.13%~0.22%；當液膠比 0.8 提高至 0.9 時其乾縮率分別為 0.03%~0.69%；當液膠比由 0.8 提高至 1.0 時之乾縮率分別為 0.10%~0.37%，由圖 12(c) 所示。就乾縮率而言，以液膠比 0.8、0.9 及 1.0，鹼當量 AE=6%、8% 及 10%，骨膠比 0.4、0.6 及 0.8，等所有配比在養護 3 天、7 天及 28 天後其乾縮率均相當小。

由上述可知，乾縮率隨著液膠比的增加而增加，由於高液膠比、高鹼當量可有效激發無機聚合物的活性，使結構內部因聚合作用及水化反應產裂隙，造成更多乾縮量；其中以鹼當量 10%、骨膠比為 0.6，液膠比 0.9 配比，乾縮率較低。

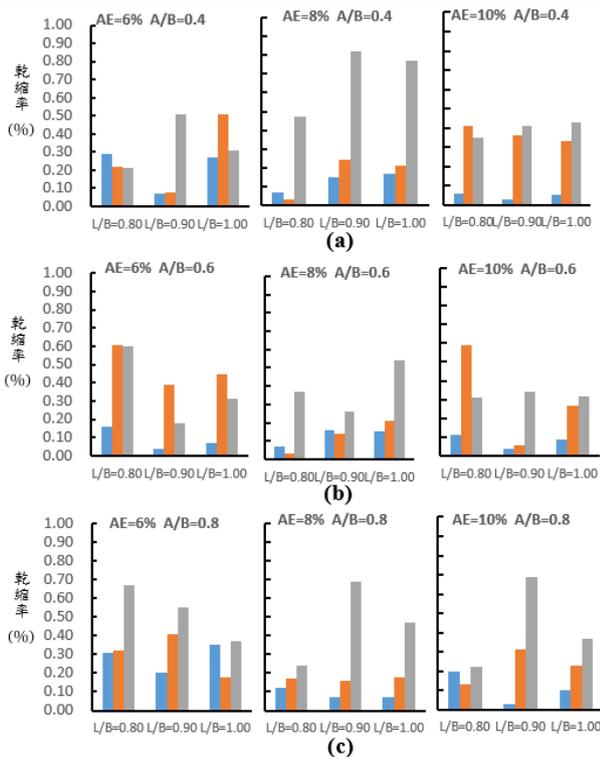


圖 12 (a)(b)(c)液膠比對廢石英拋光磚無機聚合物乾縮率影響

3. 骨膠比之影響：

針對鹼當量 6%、8% 及 10%，液膠比為 0.8、0.9 及 1.0，骨膠比 0.4、0.6 及 0.8，之條件下，當固定液膠比 0.8、鹼當量 10%，骨膠比 0.4、0.6 及 0.8 的條件下，當骨膠比 0.4 於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之乾縮率分別為 0.13%~0.22%；當骨膠比 0.4 提高至 0.6 時其乾縮率分別為 0.11%~0.59%；當骨膠比 0.4 提高至 0.8 時之乾縮率分別為 0.06%~0.41%，由圖 13(a)所示。

當固定液膠比 0.9、鹼當量 10%，骨膠比 0.4、0.6 及 0.8 的條件下，當骨膠比 0.4 於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之乾縮率分別為 0.03%~0.69%；當骨膠比 0.4 提高至 0.6 時其乾縮率分別為 0.04%~0.34%；當骨膠比 0.4 提高至 0.8 時之乾縮率分別為 0.03%~0.41%，由圖 13(b)所示。

當固定液膠比 1.0、鹼當量 10%，骨膠比 0.4、0.6 及 0.8 的條件下，當骨膠比 0.4 於養護齡期 3 天、7 天及 28 天之乾縮率分別為 0.06%~0.41%；當骨膠比 0.4 提高至 0.6 時其乾縮率分別為 0.03%~0.36%；當骨膠比 0.4 提高至 0.8 時之乾縮率

分別為 0.05%~0.43%，由圖 13(c)所示。由上述可知，乾縮率隨著液膠比的增加而增加，由於高液膠比、高鹼當量可有效激發無機聚合物的活性，使結構內部因聚合作用及水化反應產裂隙，造成更多乾縮量；其中以鹼當量 8%、骨膠比為 0.6，液膠比 0.9 配比，乾縮率較低。

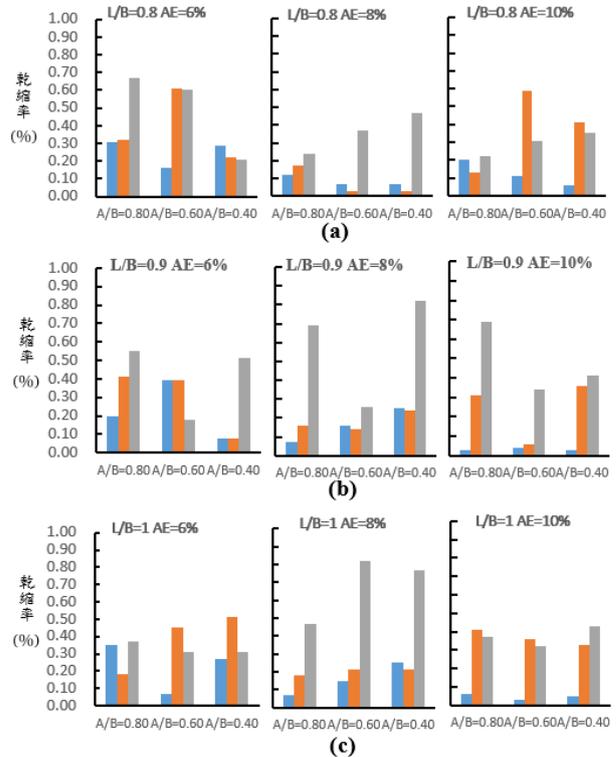


圖 13 (a)(b)(c)骨膠比對廢石英拋光磚無機聚合物乾縮率影響

五、結論

本研究廢石英磚拋光粉製作成無機聚合物工程性質之研究，經由試驗結果加以分析，可歸納出以下幾點：

5-1 結論

1. 採用鹼當量 6%、8% 和 10%，液膠比為 0.8、0.9 及 1.0，骨膠比為 0.4、0.6、0.8，鹼模數比 1.5 就能滿足 CN
2. S-382 普通磚第 1 種磚之抗壓強度要求。
3. 就抗壓強度而言，所有配比中以水膠比 0.8、骨膠比 0.8、鹼當量 10% 之配比抗壓強度效果最佳。
4. 採用鹼當量 6%、8%、10%，液膠比為 1.0 及 1.5，骨膠比為 0.4、0.6、0.8，鹼模數

比 1.5 就能滿足 CN382 普通專第 1 種磚吸水率的要求。

5. 就吸水率而言，所有配比中以液膠比 0.9，骨膠比 0.4，鹼當量 10% 的配比吸水率效果最佳。
6. 就乾縮率而言所有配比中以鹼當量 8%、骨膠比為 0.6，液膠比 0.9 配比，乾縮率較低。

5-2 建議

1. 可以利用提升養治溫度的養護方式，藉以提升無機聚合廢液晶磚的工程性質。

參考文獻

1. 林樹豪、黃暉淇，「廢陶瓷砂於水泥混凝土之應用」，第六屆鋪面材料再生學術研討會論文集，正修科技大學，第 E1-1~E1-7 頁，2001。
2. 林瑋倫，「鹼激發爐石基膠體工程性質之研究」，國立台灣科技大學營建工程系，碩士論文，2009。
3. 李宜桃，「鹼活化還原渣漿體之收縮及抑制方法研究」，國立中央大學土木工程研究所，碩士論文，2003。
4. 吳浩、管學茂，「土聚水泥的研究現況及應用發展前景」，水泥工程，第二期，河南，2004。
5. 鄭大偉，「無機聚合技術的發展應用及回顧」，礦冶第 54 卷，第 1 期，第 141-157 頁，2010。
6. 經濟部標準檢驗局，「CNS 12223-A2218 水淬高爐爐渣」，修正公布日期，2013。
7. 經濟部標準檢驗局，「CNS 382-R2002 普通磚」，修正公布日期，2007。
8. Yip C. K., Lukey G. C., and Van Deventer J. S. J., The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation, *Cement and Concrete Research*, Vol.35, pp.1688-1697, 2005.

鹼活化脫硫渣磚之產品碳足跡

林宗曾¹ 黃郁芹²

¹高雄科技大學土木工程系教授

²高雄科技大學土木工程研究所碩士班研究生

摘要

鋼鐵業為工業發展之基礎，自工業革命以來，全球工業蓬勃發展，同時導致環境造成巨大的負擔，二氧化碳等溫室氣體的大量排放以及濃度也快速成長，現今氣候變化超越警戒線，全球暖化已經變成人類為當前全球所共同關注的議題，實施教育溫室氣體盤查與減少排放更是不可忽視的趨勢，為此本研究探討鹼活化脫硫渣磚從原料階段至運輸階段至製程階段，即搖籃到大門之碳足跡，使產品之各個階段碳排量細節化，嚴實產品製程質量，以達到減少產品碳排放量的綠色效益。研究結果顯示鹼活化程序磚的原料階段之碳排放量大約為 13.12 kg kg CO₂ eq；運輸階段之碳排放量大約為 23 kg kg CO₂ eq；製造階段之碳排放量大約為 18.05 kg kg CO₂ eq，因此，製造一塊鹼活化脫硫渣磚碳排放大約 54.17 kg kg CO₂ eq。而未來土木建築材料之水泥減量不僅能達到節能減碳的目標，還能有效發揮脫硫渣資源化廣泛利用，符合環保與永續發展之目的，提升資源化之高價值並大幅降低溫室氣體對環境的衝擊，朝著永續綠色建築材料邁進。

關鍵字：碳足跡、生命週期、脫硫渣、環境衝擊。

Carbon Footprint of Alkali Activated Desulfurization Slag Brick

Tzong-Tzeng Lin¹ Yu Qin Huang²

¹Professor, National Kaohsiung University of Science and Technology

²Master Student, M.A. program, Department of Science and Technology, National Kaohsiung University

ABSTRACT

The iron and steel industry is the foundation of industrial development. Since the industrial revolution, global industries have developed vigorously, which has caused a huge burden on the environment. The emission and concentration of carbon dioxide and other greenhouse gases have also grown rapidly. Nowadays, climate change has exceeded the warning line, and global warming has become a topic of common concern for human beings around the world, and the implementation of educational greenhouse gas inventory and reduction of emissions is a trend that cannot be ignored. For this reason, this study explores the alkali-activated desulfurization slag brick from the raw material stage to the transportation stage to the process stage, that is The carbon footprint of the gate makes the carbon emissions of each stage of the product detailed and strictly enforces the quality of the product process to achieve the green benefit of reducing product carbon emissions. The research results show that the carbon emissions in the raw material stage of the alkaline activation process bricks are about 13.12kg CO₂ eq; the carbon emissions in the transportation stage are about 23 kg CO₂ eq; the carbon emissions in the manufacturing stage are

about 18.05 kg CO₂ Therefore, the carbon emissions from making an alkali-activated desulfurization slag brick are about 54.17 kg CO₂ In the future, the cement reduction of civil construction materials can not only achieve the goal of energy saving and carbon reduction, but also effectively utilize the extensive utilization of desulfurization slag, which is in line with the purpose of environmental protection and sustainable development, enhances the high value of resource utilization and greatly reduces the impact of greenhouse gases. The impact of the environment is moving towards sustainable green building materials.

Keywords: carbon footprint, life cycle, desulfurization slag, environmental impact

一、緣起

鋼鐵業為工業發展之基礎，自工業革命以來，全球工業蓬勃發展，同時導致環境造成巨大的負擔，二氧化碳等溫室氣體的大量排放以及濃度也快速成長，現今氣候變化超越警戒線，全球暖化已經變成人類正於面臨之最迫切的課題，溫室氣體盤查與減少排放更是不可忽視的趨勢。

以二氧化碳的源頭來分析，CO₂ 的產生最主要為工廠排放的大量燃燒礦物。舉凡水泥之生產，水泥產業的碳排放主要來源於水泥熟料的生產過程。根據資料顯示生產 1 噸熟料需要大約 0.161~0.296 噸煤礦，然而煤礦經由燃燒會產生大約 0.383~0.704 噸二氧化碳，以及生成熟料時 CaCO₃ 分解產生的二氧化碳，資料統計每生產 1 噸水泥熟料就會排放大約 1 噸的二氧化碳。從 1970~2018 年，全球的水泥從 5 億噸產量漲到了近 50 億噸產量，據某研究顯示水泥的製造雖滿足了土木營建材料之所需，但所排放的二氧化碳卻占了全球二氧化碳排放量的 7%。

溫室氣體之大量排放造成全球氣候變遷問題，為當前全球所共同關注的議題，實有必要將其他資源再利用的產物取代水泥，本研究將探討活化脫硫渣磚從原料階段至運輸階段至製程階段之碳排放量，而水泥減量不僅能達到節能減碳的目標，還能有效拓展脫硫渣資源化用途，符合環保與永續發展之目標，提高其資源化價值並降低環境衝擊，朝向永續綠建材邁進。

二、文獻回顧

2-1 脫硫渣之產出

脫硫渣其產自一貫作業煉鋼廠，經由脫硫劑自高爐鐵水脫硫所產生之固體廢棄物，脫硫渣生產過程為高爐煉鐵所產出之生鐵水，含有矽、磷、硫以及碳等元素，含硫元素之比例過高易使鋼材延展性降低，為提高鋼材之品質，因此當鐵水排至魚雷車後，以脫硫劑將其中的硫排除，最後所得的渣體排出魚雷車冷卻後即稱之為脫硫渣，(吳怡葦, 2018)脫硫渣製作流程如(圖 1)所示。

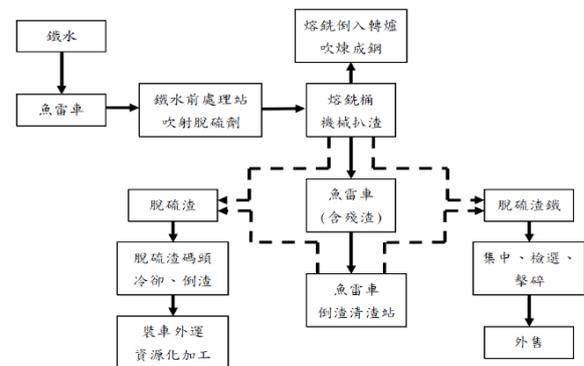


圖 1 脫硫渣製作流程

依據中鋼公司提供之爐石利用推廣手冊研究結果顯示，脫硫渣係由氧化鈣、鐵氧化物、氧化矽、矽酸鈣類及少量的石墨、硫化物之鹼性物質所組成。

2-2 脫硫渣之再利用現況

近年來脫硫渣因更改製程，已無膨脹問題，但大部分人仍認其有膨脹之疑慮，而使脫硫渣無法被多數再利用。另因脫硫渣具有含量高的鐵，經磁選後僅剩小粒徑的細粉料，僅能運用於土方回填、土壤改良及部份取代

石灰石用於燒製水泥熟料外，其於仍無法完全消耗，因此極需尋求其他再利用之方法，以解決目前脫硫渣資源化程度不高之問題(吳哲宇, 2017)，本研究探討其從原料階段至製程階段所產出對環境衝擊之碳排量，增加製品之價值性，以求更多元的資源化發展。脫硫渣屬於一般事業廢棄物，依據行政院環境保護署公告「可利用廢棄物」，目前國內對其處理及再利用方式有(土木技師公會, 1996)：

脫硫渣再利用方式	
1	將中鋼煉鋼脫硫渣內約 25~30%之金屬鐵成分以磁選方式回收，作為煉鐵原料。
2	藉由其高 pH 值(約 12.4)及具鈣鎂鋁矽酸鹽特性，可作為農業土壤改良劑及肥料，並增進土壤中磷鈣鎂鋅之有效性，消除鋁及錳的毒害。
3	無重金屬溶出之虞，可作為土木工程土方回填材料。
4	部份取代石灰石用於燒製水泥熟料，可減少 CO ₂ 之排放量。

2-3 生命週期評估

一個完整的生命週期碳足跡評估是從一個產品從原料採用階段，中間有原料加工階段、產製階段、包裝階段、輸送階段，最後藉由消費者的使用階段、維修階段，然後進入到了回收階段、廢棄物處理階段，即為從搖籃到墳墓(Cradle to Grave)期間。生命週期評估即是對這整個階段進行資源和環境影響分析與評估，然而每個國家對於生命週期評估的定義及闡釋各有不同(林韋志, 2020)。

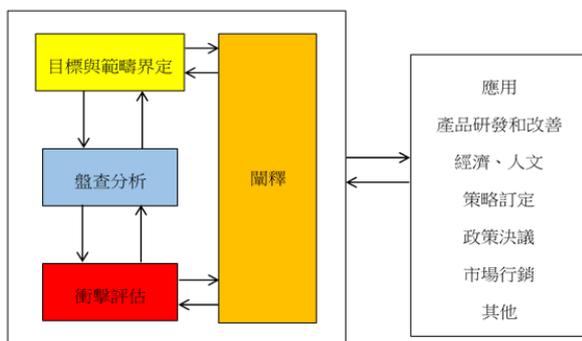


圖 2 生命週期架構圖

一個產品的生命週期，從原料開採，經過加工、產品製造包裝、運輸，然後由消費者使用、維修，最後回收再利用或作為廢棄物

處理和處置，一般可分為 3 種：搖籃到大門、搖籃到墳墓及搖籃到搖籃。而從搖籃到搖籃之範疇為從開始到開始，意思就是說產品在生產之後，最終被回收再利用，或者是再造為其他的產品，生命週期架構如(圖 2)所示。

2-4 碳足跡

「碳足跡」此名詞來自於 Wackernagel 學者在 1996 所提出之「生態足跡」，其概念是將人類所消耗的各種重要物質，在生產過程中所伴隨而來的各類型環境衝擊，轉換成面積單位，藉此與環境可承載量進行比較。這幾年來碳足跡相關定義之文獻如(表 1)所示。

表 1 碳足跡定義

作者	定義
Galli et al.(2011)	碳足跡計算生命週期內所有溫室氣體排放，可以應用在個人、團體、政府、企業、組織、工業等，不管應用在哪種案例上，都必須考慮其直接及間接的排放。
MCI (2008)	二氧化碳與其他溫室氣體的總量於產品或服務整個生命週期中的排放量。
ETAP (2007)	碳足跡用於衡量人類活動所產生的溫室氣體對環境的衝擊，以公噸二氧化碳為單位。
Carbon Trust(2007)	估算產品溫室氣體排放量的一種方法，以二氧化碳當量為單位，包含從原料生產、製造到產品處置整個生命週期。(不包含使用階段的排放)。此技術用於確認及測量的個體溫室氣體排放量，其中包含供應鏈階段與產品生產相關的所有系統中的每項活動。

三、研究方法

本研究之碳足跡的計算由生命週期軟體 SimaPro 8 中，對鹼活化脫硫渣製造出來的磚，透過生命週期搖籃到大門的系統邊界，即原料取得階段、運輸階段及製造階段，依照全

球暖化潛勢值 IPCC 2013 GWP 的計算模式中，計算出產品在製成後會產出多少的碳排放量。本研究碳足跡系統邊界範疇如(圖 3)所示。

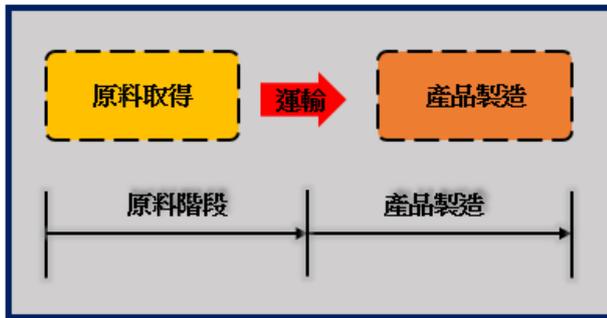


圖 3 碳足跡系統邊界

另，生命週期須要了解產品的製程，找到原料或能源投入的數量及管道，接著詳細的紀錄過程中的各種假設及現象。研究中設定的範疇，去進行盤查及資料彙整，範圍包括原料階段及製造階段；數據來自於業界公司、具代表性的企業環境報告書、國內外學術論文及環保署報告書等，以及生命週期軟體 SimaPro 8 的數據資料庫。

3-1 碳排放量探討項目

本研究之碳足跡排放量分為原料階段、運輸階段及製造階段，原料階段範疇為生產實驗中所需的數量所產生的碳足跡，包含脫硫渣、爐石粉、標準砂、水、氫氧化鈉、矽酸鈉、篩分析電力以及烘箱電力等；運輸階段則以環保署碳排放係數中做假設探討 6 噸營業用大貨車探排量；製造階段的碳排放則透過 SimaPro 軟體來建置，探討項目為脫硫渣、爐石粉、標準砂、氫氧化鈉、矽酸鈉以及拌合所需耗電碳排放。

四、研究結果

本研究之碳足跡的運算由生命週期軟體對鹼活化脫硫渣磚，透過搖籃到大門之系統邊界，即原料取得階段、運輸階段及製造階段，依照全球暖化潛勢值 IPCC 2013 GWP 的計算模式中，計算出產品在此範疇之碳排放量，結果如(表 2)、(表 3)、(表 4)所示。

表 2 原料階段探討項目

	探討項目	碳排放量(kg CO ₂ eq)
原料階段	脫硫渣	0.036 kg CO ₂ eq
	水淬高爐石粉	1.28 kg CO ₂ eq
	標準砂	0.77 kg CO ₂ eq
	水	0.0011 kg CO ₂ eq
	NaOH	0.010 kg CO ₂ eq
	Na ₂ SiO ₃	0.34 kg CO ₂ eq
	電力(篩分析)	0.58 kg CO ₂ eq
	電力(烘箱)	10.1 kg CO ₂ eq

表 3 運輸階段探討項目

	探討項目	碳排放量(kg CO ₂ eq)
運輸階段	6 噸營業用大貨車 (柴油)	23.33 kg CO ₂ eq

表 4 製造階段探討項目

	探討項目	碳排放量(kg CO ₂ eq)
製造階段	脫硫渣	3.29 kg CO ₂ eq
	水淬高爐石粉	2.95 CO ₂ eq
	標準砂	0.80 CO ₂ eq
	水	0.0011 kg CO ₂ eq
	NaOH	2.85 CO ₂ eq
	Na ₂ SiO ₃	7.90 CO ₂ eq
	電力(拌合)	0.26 CO ₂ eq

五、結論

近年來許多先進國家為保護環境，逐漸以其他替代品取代天然礦石及資源，不僅有效降低全球碳排的污染，更突顯其高價值之利用與經濟效益，本研究數據顯示鹼活化程序磚的原料階段之碳排放量大約為 13.12 kg CO₂ eq；運輸階段之碳排放量大約為 23 kg CO₂ eq；製造階段之碳排放量大約為 18.05 kg CO₂ eq，因此，製造 1 米平方之鹼活化脫硫渣磚碳排放大約 54.17 kg CO₂ eq，故未來若脫硫渣拓展其再利用多元用途，對環境亦有相當的減碳效果。

參考文獻

1. 吳怡葶、林宗曾：「鹼活化脫硫渣產製發泡砂漿板之性能與環境特性」，碩士論文，2018。
2. 中國鋼鐵公司，2003，爐石利用推廣手冊。
3. 張祖恩：「煉鋼爐石資源化利用與展望」，台灣能礦展望與挑戰專題研討會，2017。
4. 張又升：「台灣自來水節約式生命週期二氧化碳排放之評估」，建築學報，2012。
5. 張一成：「用碳足跡計算對世新大學學生餐廳一個餐盒作碳排放量的分析研究」，通識教育與多元文化學報 第四期，2014。
6. 吳哲宇、林宗曾：「鹼活化水泥砂漿添加脫硫渣礦物細料之工程性質與環境特性分析」，碩士論文，2017。
7. 社團法人台灣省土木技師公會：「爐渣問題面面觀」，技師報，2011。

底泥添加轉爐石之物理性質探討

林宗曾¹ 江傳祥²

¹高雄科技大學土木工程系教授

²高雄科技大學土木工程防災科技研究所碩士研究生

摘要

廢棄物的成分性質且著科技及產業發展不斷進化改變，建議處理廠在財務可許方面，可與相關研究學術機構合作，進行相關的研究，進而了解廢棄物的特性及貯存及處理過程中的完善性及安全性，也應該對於廢棄物制定一連串相關的標準制度，訂定一套標準化的作業系統來妥善處理廢棄物，做好各項因應檢測的措施及試驗，友善對待環境，避免環境遭受二次污染。

廢棄物的妥善處理，一直是各國操心的議題，以目前台灣每年約生產 2310 萬噸左右的鋼，大約會產生 230~270 萬噸的轉爐石(Basic Oxygen Furnace slag,BOF slag)，如果能夠將廢棄物與工業副產品循環再利用，透過廢棄物與工業副產品能夠有效回填在結構物、非結構物上，不僅能夠避免廢棄物處置問題造成環境污染還能減少溫室氣體的排放，並且大幅減少處置費用，節省這些處置的繁瑣步驟，能夠有效達到節能減碳及利用廢棄物資源化的永續循環經濟目標。

本研究使用底泥添加轉爐石，以底泥與轉爐石 90:10、70:30、60:40 之配比下製成漿體，探討底泥與轉爐石間的基本物理性質。

關鍵字：底泥、轉爐石、廢棄物、物理性質

Discussion on the Physical Properties of Basic-oxygen-furnace Slag Added to Bottom Mud

Tzong-Tzeng Lin¹ Chuan-Xiang Jiang²

¹Professor, National Kaohsiung University of Science and Technology

²Master Student, M.A. program, Department of Science and Technology, National Kaohsiung University

ABSTRACT

The compositional nature of waste is constantly evolving and changing with the development of technology and industry. It is recommended that the treatment plant cooperate with relevant research and academic institutions in terms of financial licensing to conduct related research to understand the characteristics of waste and the process of storage and treatment. For the completeness and safety of the waste, we should also formulate a series of related standards and systems for waste, formulate a set of standardized operating systems to properly handle waste, and do all kinds of testing measures and tests, and treat the environment friendly and avoid the environment suffers secondary pollution

The proper disposal of waste has always been a topic of concern to all countries. If waste and industrial by-products can be recycled and reused, at present, Taiwan produces about 23.1 million

tons of steel each year, and about 2.3 to 2.7 million tons of converter stone (Basic Oxygen Furnace slag, BOF slag) will be produced. re-structured and non-structured objects can be effectively backfilled through waste and industrial by-products, which can not only avoid waste disposal problems Environmental pollution can also reduce greenhouse gas emissions, and significantly reduce disposal costs. Saving these tedious steps in disposal can effectively achieve the goal of a sustainable circular economy of energy saving, carbon reduction and waste recycling. In this study, the bottom mud was added with BOF slag, and the bottom mud and BOF slag were made into a slurry at a ratio of 90:10, 70:30, and 60:40 to discuss the basic physical properties between the bottom mud and the BOF slag.

Keywords: bottom mud, BOF slag, waste, physical properties

一、前言

現今在每個國家都有廢棄物的產生，傳統的經濟學觀點認為廢棄物的產生是生產活動所引起，對環境排放的汙染行為具有外部不經濟性，英國致力於開發基於循環經濟的發展，台灣也致力於廢棄物的處置，分別訂定相關的廢棄物處理法規，我們根據環保署對於廢棄物處理的定義，廢棄物處理(Waste disposal)是指將棄用或是無用處的物質用較為妥善的方式棄置。分為一般廢棄物 (general waste) 與事業廢棄物 (industrial waste) 兩類(林士凱, 2019)。一般廢棄物是指由家戶或其他非事業所產生之垃圾、糞尿、動物屍體等，足以污染環境衛生之固體或液體廢棄物。事業廢棄物又分為兩種：

一般廢棄物:由事業所產生有害事業廢棄物以外之廢棄物。

事業廢棄物:由事業所產生具有毒性、危險性，其濃度或數量足以影響人體健康或污染環境之廢棄物。

在過去，廢棄物多以掩埋、焚燒的方式將其處置，但因現今科技日益先進發達、發展迅速，也間接導致廢棄物大量生產，且許多廢棄物的組成成分相當複雜，如若使用傳統廢棄物處置方式將會對環境造成極大的汙染。因此政府明訂對於各類廢棄物的相關規定法則、處理的辦法，並在政策上進行垃圾分類、垃圾減量、工業廢水排放規定、資源回收等等，各項處置來減少廢棄物的產生及將環境的污染性降至最低。

為減少廢棄物的數量，廢棄物已廣泛大量運用在結構物或非結構性的回填，因為可有效提高工作性，並且增加強度及耐久性，並且對於環境的衝擊也能有效減少降低，增加整體的經濟性，探討應用在回填路基之工程性質，本研究利用底泥混拌轉爐石探討其基本物理性質。

二、底泥與轉爐石介紹

2-1 底泥

2-1-1 底泥定義

底泥指因重力而沉積於地面水體底層之物質由砂粒、黏土或其它固體物質混合並沉降在水體底層混合物。來自受侵蝕的岩石及土壤礦物、動植物碎屑等天然有機物或人為污染物，藉由風、水及冰雪等自然力帶到溪流、河川、湖泊水庫等水體底部沉積如圖 1(行政院環保署，2021)。

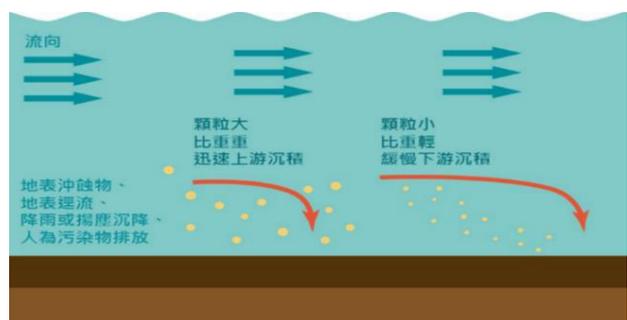


圖 1 底泥形成示意圖(行政院環境保護署，2021)

2-2 轉爐石

2-2-1 出產及特性

爐石是目前中鋼公司在一貫作業煉鋼廠流程中,如圖 2(中聯資源股份有限公司,2021)所示,在煉製鋼液時,將鐵水及副原料投入轉爐石後,經過吹煉而產出鋼液及轉爐石,以目前台灣每年約生產 2310 萬噸左右的鋼,大約會產生 230~270 萬噸的轉爐石(Basic Oxygen Furnace slag,BOF slag)。

轉爐石是屬於煉鋼爐石之一,具耐磨、高硬度及高抗滑的特性,非常適合應用在鋪面工程上;但未經安定化的轉爐石含有大量游離石灰(f-CaO),遇水後易產生體積轉膨脹,使得資源再利用上受到質疑,最終多以土木工程填方、填海造陸及圍堤背填等方式處理(中聯資源股份有限公司,2021)。

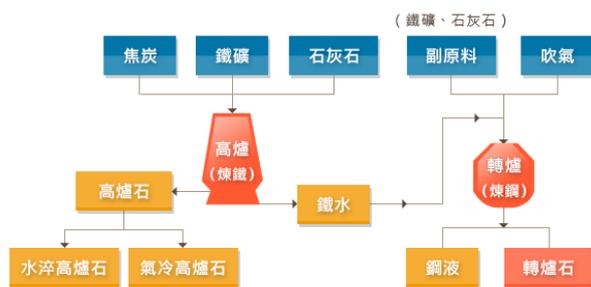


圖 2 一貫作業煉鋼流程(中聯資源股份有限公司,2021)

表 6 中鋼公司煉鋼製程副產品種類及產量(中聯資源股份有限公司,2021)

種類	產出特性	年產量 (萬公噸)	百分比 (%)
高爐石	高爐將原料熔煉成鐵水產出之爐石	278.9	49.7
轉爐石	鐵水經轉爐精煉成鋼液時產出之爐石	114	20.3
脫硫渣	鐵水經過脫硫處理後之副產物	32	5.7
集塵灰	製程除塵系統收集的粉塵(包括煤灰)	34.1	6.1
礫泥	含有礫物粉塵的廢水經過處理、濃縮脫水後之產物	38.3	6.8
鏽皮	生產過程中鋼鐵表面除鏽產生之氧化鐵副產物	30.5	5.4
廢耐火材	高溫設施汰換下來的殘餘耐火材	8.1	1.4
營建廢土	營建工程產出的土方	7.3	1.3
石灰石泥餅	石灰經水洗及脫水產出的塊狀物	1	0.2
其他	包括爐石鋼、冷凝鐵、脫硫渣鐵、煤灰、橡膠墊子、廢油脂、廢包裝料、冷軋廢油、廢油桶、鋅渣、含鋅礫泥、轉爐鐵砂、一般垃圾、雜項金屬、混合五金、廢電線電纜等	17.5	3.1
合計		561.6	100

2-2-2 轉爐石與天然粒料之成份組成

表 2 各種爐石之成份比較表(中聯資源股份有限公司,2021)

項目	氣冷高爐石	水淬高爐石	轉爐石	電弧爐氧化矽 A(碳鋼)	電弧爐還原矽 A(碳鋼)	電弧爐氧化矽 B(不鏽鋼)	電弧爐還原矽 B(不鏽鋼)
SiO ₂	33.92	33.46	11.45	19.91	20.22	33.32	30.34
Al ₂ O ₃	14.68	13.70	4.48	12.05	10.28	4.66	2.01
Fe ₂ O ₃	0.51	0.42	21.60	14.90	9.79	2.47	2.21
CaO	40.72	42.69	39.37	36.16	41.16	38.37	50.49
MgO	6.27	6.21	6.39	3.32	10.32	17.49	10.60
K ₂ O	0.47	0.35	-	-	-	-	-
SO ₃	1.40	1.48	-	-	-	-	-
TiO ₂	0.51	0.46	0.49	0.74	0.38	1.48	0.15
P ₂ O ₅	0.04	0.04	1.97	0.90	0.60	0.54	0.54
MnO	0.55	0.39	4.01	7.61	1.78	1.21	0.10
LOI	0.33	0.27	3.94	0.98	1.24	0.21	0.56
Total	99.40	99.46	93.70	96.57	95.77	99.75	97.00

2-2-3 轉爐石之物理性質

爐石是由多種礦物組成的固溶體,隨化學成分之變化而有所不同,性質跟隨其化學成分有著相當密切的關係,轉爐石物理性質如表 3 所示。轉爐石具有下列材料之特性(沈得縣,2011):

1. 耐磨性(durability):轉爐石有堅硬表面及較佳抗磨損能力,抗風化及抗侵蝕能力佳,非常適合用於瀝青混凝土鋪面
2. 摩擦性(friction properties):轉爐石外表粗糙凹凸富有稜角,可提高瀝青混凝土之抗磨擦能力(wear resistance),特別是在行車速率較高之鋪面,使用轉爐石可有助於提高鋪面之摩擦力。
3. 儲熱能力(heat retention):轉爐石儲熱之功能較天然粒料佳,可延長瀝青混凝土施工時間。
4. 比重(specific gravity):轉爐石含鐵成分高,比重介於 3.2~3.6 之間,轉爐石瀝青混凝土單位重大於傳統瀝青混凝土約 15%~25%,但會依配合設計而異。

表 3 轉爐石之物理性質(沈得縣,2011)

物理性質	參考值*
比重	3.2~3.6
單位重(kg/m ³)	1600~1920
吸水率(%)	≤ 3
洛杉磯磨損率(%)	≤ 25
健性試驗(%)	< 12
加州承載比(CBR)	> 300

2-2-4 轉爐石膨脹性

轉爐石膨脹影響因素，可能造成轉爐石膨脹的因素我們綜觀文章敘述可以歸納為養治溫度、養治方法、養治時間、游離氧化鈣之活性以及轉爐石粒徑大小等，將上述歸納部分茲詳述如下(沈得縣，2011)：

- a. 養治溫度：轉爐石之浸水膨脹率，根據 JIS A5015 解說中證實其養治水溫愈高膨脹率愈大，尤其是養治溫度在 60°C 以上就認定有促進膨脹之效果。
- b. 養治方法：根據 JIS A5015 解說養治方法可分為；
 - (a) 間歇養治：試體浸置於 80±3°C 熱水中持續養治六個小時，並在裝置內冷卻，次日再反覆此操作，總共 10 次循環；
 - (b) 連續養治：將試體持續養治於 80±3°C 熱水中，養治 4 日。研究結果顯示；在養治初期係以連續養治之膨脹率較大，但就長期之膨脹率而言，兩種養治方法之差異性質不大。
- c. 游離氧化鈣(f-CaO)：f-CaO 活性愈高轉爐石之膨脹性愈大，且新鮮轉爐石比安定後轉爐石活性大。鹽基度(CaO/SiO₂)愈高，活性愈大。
- d. 轉爐石粒徑大小：粒徑較小之轉爐石比表面積大，與水接觸之面積增函，而增函其化學反應之進行，因此膨脹量較大；反觀尺寸較大之轉爐石，因反應接觸面積減少，膨脹量反而較小。

三、實驗計畫

若能將廢棄物與工業副產品循環再利用，透過廢棄物與工業副產品能夠有效利用在回填於結構物或者非結構物上，不僅能夠避免廢棄物處置問題造成環境汙染還能減少溫室氣體的排放，並且大幅減少處置費用，本研究利用底泥混拌轉爐石以 90:10、70:30、60:40 三種配比下製成底泥漿體，進行標準基本試驗並探討其物理性質。

3-1 試驗配比

本研究以底泥混拌轉爐石，以 90:10、

70:30、60:40 之配比，製作 25mm×25mm×25mm 之立方試體，放置烘箱以溫度 100°C±5°C 烘乾至 24 小時進行含水率與吸水率之試驗；將試體放置烘箱以溫度 50°C 烘乾至 24 小時進行抗壓強度試驗。

3-2 驗物項目與方法

3-2-1 含水率

在實驗過程中將不同之配比混拌後放置量杯中，並測量其重量且記錄，在放置烘箱溫度 100°C 烘至 24 小時，使其完全乾燥後，將底泥取出，量測其含水率

$$\text{含水量} = \frac{\text{空皿} + \text{樣品重} - \text{空皿} + \text{樣品重(烘乾)}}{\text{空皿} + \text{樣品重(烘乾)} - \text{空皿} + \text{樣品重}} \times 100\%$$

3-2-2 吸水率

實驗過程中將不同配比之混拌後的試體放置烘箱溫度 100°C±5°C 烘至 24 小時後取出，將試體放入鋼杯中，沿著鋼杯內緣，使用注水器緩緩加入鋼杯中，直至水超過試體表面即可，在將試體取出，將表面擦拭乾淨，使其達到面乾內飽和狀態，在量測其重量。

3-2-3 抗壓強度

實驗過程中，將不同配比之混拌後的試體放置烘箱溫度 50°C 烘乾至 24 小時後拿出，並將試體置於拉伸試驗機承作中央，並且加壓至 80 至 180 秒間達到最大之荷重。

四、實驗結果

綜觀前一章實驗實驗計畫敘述，施作相關實驗項目後，得到以下實驗結果並說明敘述之。

4-1 含水率

根據圖 3 顯示含水率在轉爐石添加 10% 的時候為 56.9% 此時含水率是最高的，添加 30% 的轉爐石為 49.04% 為次之，添加 40% 的轉爐石含水率為 46.82% 則較低，其原因可能是因為在取樣時底泥的水分含量就高於轉爐石，因此少量的添加轉爐石對含水率沒有太大的影響。

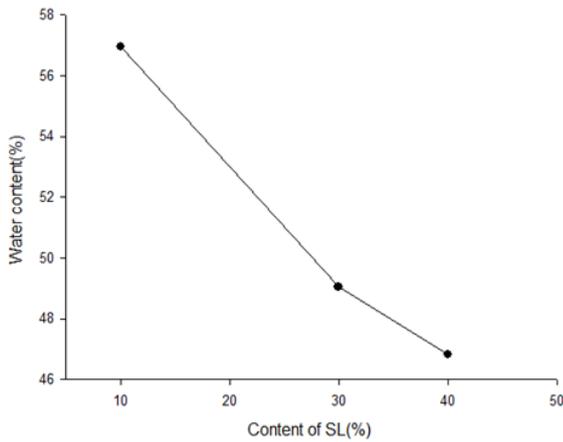


圖 3 添加轉爐石不同比例之含水率

4-2 吸水率

根據圖 4 顯示，吸水率在添加轉爐石 10% 時為 39% 此時吸水率是最高的，添加轉爐石 30% 時為 21% 為次佳，添加轉爐石 40% 時為 19% 為最低，結果可以發現到底泥烘乾時體積會收縮，因此轉爐石在添加 10% 時，因為轉爐石含量較少，吸水率相對來說就會增加，添加轉爐石 40% 時，因為轉爐石添加量較多，吸水後轉爐石會膨脹，因此就會降低其吸水率。

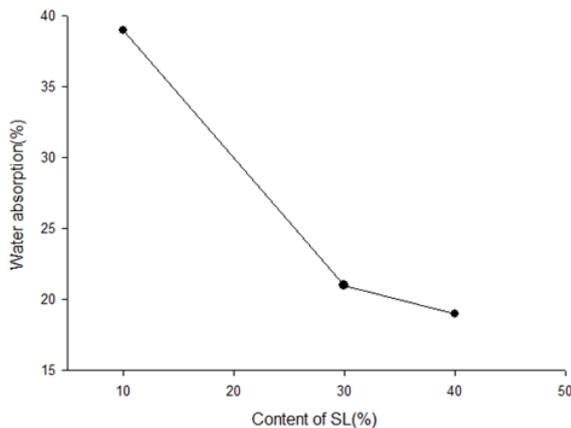


圖 4 添加轉爐石不同比例之吸水率

4-3 抗壓強度

由圖 5 可以得知，抗壓強度在添加 10% 的轉爐石時為 5.03kg/cm^2 為最高強度，添加 30% 的轉爐石抗壓強度為 3.90kg/cm^2 則為次佳，添加 40% 的轉爐石抗壓強度為 3.59kg/cm^2 則為最低，添加 10% 轉爐石強度會比較高，原因有可能因為轉爐石吸水後，

氧化鈣會水化成游離氧化鈣，氫氧化鎂會水化成氫氧化鎂，會使試體膨脹龜裂，造成添加越多的轉爐石強度驟降的原因之一。

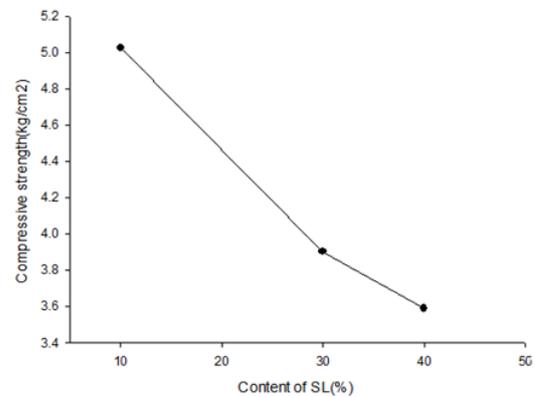


圖 5 添加轉爐石不同比例之抗壓強度

五、結論

本研究探討以底泥添加轉爐石製成漿體，探討其物理性質，獲以下結果：

1. 依據實驗數據所得添加轉爐石 10% 時含水率為最高，添加 40% 時含水率為最低，說明轉爐石的添加量越多含水率能有夠有效的下降。
2. 依實驗數據顯示，轉爐石在添加 10% 時能有較高的吸水率，則添加 40% 的轉爐石則其吸水率較低。
3. 抗壓強度在添加轉爐石 10% 時強度為最高 5.03kg/cm^2 ，原因有可能因為轉爐石吸水後，氧化鈣會水化成游離氧化鈣，氫氧化鎂會水化成氫氧化鎂，會使試體膨脹龜裂，造成添加越多的轉爐石強度驟降的原因之一。

參考文獻

1. 林士凱，浚港底泥添加轉爐石燒結骨材特性之研究，國立高雄科技大學海洋環境工程系暨研究所碩士論文，2019
2. 行政院環境保護署，底泥品質檢測資訊公開網，https://sed.epa.gov.tw/Sediments_Public/discoverA_what，2021
3. 中聯資源股份有限公司，<https://www.chc.com.tw/source.html>，

2021

4. 沈得縣、李承劭，轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面使用手冊及注意事項，轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面研討會，2011

【G】其他議題

工程安全衛生協議組織會議教育宣導成效與教學滿意度之研究

廖福中¹ 徐啟銘² 謝文英³

¹國立雲林科技大學技術及職業教育研究所博士生

²國立雲林科技大學環境與安全衛生工程系教授

³國立雲林科技大學技術及職業教育研究所教授

摘要

協議組織會議對石化業事故預防、工安、施工品質等扮演關鍵角色，故有必要對其承攬商開工前進行教育宣導，以確保施工品質與效益。本研究旨在探討對承攬商進行協議組織會議教育宣導成效，以及其對教學滿意度之情形。本研究以自編之「協議組織會議教育宣導成效訓練評量及教學滿意度問卷」對三類承攬商人員(工地負責人、職業安全衛生管理人員及工作人員)，進行協議組織會議教育宣導成效評量及教學滿意度調查。所得資料以描述性統計及相依樣本 t 檢定，進行分析。結果顯示，協議組織會議宣導成效能有效提升承攬商三類人員之行為安全；且該三類人員對協議組織會議宣導成效，達高度滿意。本研究所得提供施工事故預防、工安及施工品質等安全知能之實徵支持，對施工效益有諸多助益。

關鍵字：標準作業程序書、行為安全、事故分析、教學滿意度

A Study on the Educational Propaganda Effect and Course Satisfaction of the Construction Safety and Health Coordination Organization Meeting

Fu-Chung Liao¹ Chi-Min Shu² Wen-Ying Hsieh³

¹Doctoral students, Technological and Vocational Education, National Yunlin University of Science and Technology Graduate School

²Professor, Department of Environment and Safety and Health Engineering, National Yunlin University of Science and Technology Graduate School

³Professor, Technological and Vocational Education, National Yunlin University of Science and Technology Graduate School

ABSTRACT

A construction safety and health coordination organization meeting plays an important role on the matters of accident prevention, industrial safety and construction quality in the petrochemical industry. Therefore, it is required to perform educational propaganda before a contractor starts its work to ensure the construction quality and effectiveness in the petrochemical industry. The purpose of this study is to explore the effect of convening a construction safety and health coordination organization meeting for educational propaganda for a contractor in the petrochemical industry. Additionally, it is the interest of this study to find out whether a contractor is satisfied with the course provided. This study has prepared an "Assessment on the Educational Propaganda Effect of the Construction Safety and Health Coordination Organization Meeting and

a Survey on Course Satisfaction”. Targeting three groups of personnel from a contractor (site manager, occupational safety and health manager and worker), an assessment on the educational propaganda effect of the construction safety and health coordination organization meeting was performed and a survey on course satisfaction was given. A descriptive statistics and dependent sample t test were given for the analysis of the acquired data. The result showed that a construction safety and health coordination organization meeting could effectively improve the behavior-based safety for the three groups of personnel from a contractor. Moreover, the three groups of personnel felt highly satisfied with the propaganda effect of a construction safety and health coordination organization meeting. This study serves as a concrete support for the behavior-based safety knowledge in the construction accident prevention, industrial safety and construction quality fields in petrochemical industry. Additionally, this study provides lots of help and benefits for the effectiveness of construction in petrochemical industry.

Keywords: standard operating procedure, behavior-based safety, accident analysis, course satisfaction

一、緒論

事故預防和設備改善是石化業施工安全的兩大支柱，設備改善與施工安全的關聯性不可言喻，很明顯的設備改善受到施工安全的強烈影響(Ma, Zhao,& Xi, 2016)。在這個框架中，化學製程和安全防護裝置有效防止化學品的洩漏與危害。未來需要有更多新的化工操作技術及設備緊急應變的安全措施，有助於石化工廠操作有更高的安全水平。否則設備的失效和人為的疏忽，可能導致嚴重的重大事故(Bruno, Vianello, Reverberi, Lunghi, & Maschio, 2017)？

筆者服務於石化廠近 30 年，統計該廠近兩年的承攬商違規工安罰單，106 年度違規件數計 438 件，罰款金額 546,000 元。107 年度違規件數計 812 件，罰款金額 1,491,000 元。比較得知 107 年度承攬商違規件數及罰款金額均為 106 年度的兩倍。經 108 年訂定協議組織會議宣導成效後，108 年度承攬商工安違規罰單為 182 件，罰款金額 487,000 元。再與 107 年度相較，108 年度之違規件數與罰金大大降低，因之有必要探討之。

本研究透過協議組織會議宣導成效，及其教學滿意度強化行為安全效益的影響，藉由文獻探討落實協議組織會議宣導成效及教學滿意度分析。故本研究的具體目的如下：

- 一、探討協議組織會議宣導之成效。
- 二、瞭解協議組織會議滿意度。

二、文獻探討

標準作業程序書、行為安全、事故分析、勤前教育(工具箱會議)及工作安全分析等為本研究之焦點，茲析述於后。

2-1 標準作業程序書(SOP)

Casey (2001) SOP 對於品質標準的重要性早已認證，SOP 的內容規範(Manghani, 2011)。換言之，SOP 以書面形式來說明，誰要做什麼？以及何時要做？SOP 建立了一套有系統的作業方式，確保工作完成以及被要求完成同樣任務的人始終如一。SOP 必須寫得好，提供有效的控制並防止錯誤的發生，以及避免人為的疏失和不正當的行為方式(Manghani, 2011)。SOP 對於工作規章確保「有效性、合法性及準確性」。文件規範可靠性是在維持所必需的工作(Slay, Lin, Turnbull, & Beckett, 2009)。SOP 管理規範可以支持減少程序的錯誤(Bulbul, Yavuzcan, & Ozel, 2013; SWGDE, 2012)。在定義 SOP 時，存在彈性的權衡和必要的細節規範就企業而言的確有非常大的用處(Slay, Lin, Turnbull, & Beckett, 2009; Wilsdon & Slay, 2005)，鑑於文件的多樣性及標準化，進而實現具體的標

準流程及規範細節有利於制定標準程序，採取知識轉移和規範指導以提供企業制定標準 (Graeme, Benjamin & Tim, 2019)。SOP 的定義，其中包含內容深度以及覆蓋範圍。在這種情況下，SOP 不太可能涵蓋每一種可能性，都是核心方法的基礎適用於直接限制之外的目的 (Horswell, 2004)。但是，SOP 不是為了設計關於特定類型的深入規範，而是操作或程序指導的形式，以確保規範的一致性。SOP 應被視為執行特定任務的最低可接受範圍。SOP 提供指導及結合明智的調查和批判性思維，可做出合理的程序性進步 (Horswell, 2004)。SOP 為這項工作提供最低可接受的標準信息收集 (Graeme, Benjamin, & Tim, 2019)。

小結：由上述可知，標準作業程序書是企業內部規範標準作業，有別於法律嚴苛的要求標準，企業在此標準作業規範下一體適用，要求企業內部員工及承攬商應遵守的規範，在此規範下，進而達到企業基本要求的能力。

2-2 行為安全

Geert, Genserik, Karolien, & Koen (2018) 從歷史的角度來看，技術本位是首要用於改善工業安全和實施安全政策。這可追溯到 18 世紀末工業革命的開始，它是工業安全的起源。人們意識逐漸增強對工業安全和職業災害不是上帝可以同意且避免的工作“行為” (Loimer & Guarnieri, 1996)。從 20 世紀開始，「工業安全」一詞又有不同的相關見解，「國家安全理事會」於 1912 年在美國成立。該理事會成立於鋼鐵電氣工程師協會安全大會由安全專業人員，管理階層領導，公眾組成官員和保險人員。他們將工業安全轉化為三個 E 的口號：工程、教育和執法 (National Safety Council, 1974; Swuste, Van & Zwaard, 2010)。

「工程維護」這個名詞出現於 19 世紀末、20 世紀初，詳見於工業安全專書。企業專業維修技術能夠有效的事故預防，因此工業安全著重於機械安全裝置的設計預防。包括機器設備的外殼零件以及減壓裝置，以作為防止過度破裂的保障，對於鍋爐、壓力容

器、安全開關作為防呆安全裝置 (Calder, 1899; DeBlois, 1926; National Safety Council, 1974; Westerouen, 1893)。事故的影響因素，例如溫度、壓力、噪音和通風以及個人防護設備的使用也成為不可或缺的要件 (Swuste, Van & Zwaard, 2010)，同時被歸類為工業安全設備及維修技術。工程科學技術不斷朝著這個方向發展有著更好的安全裝置，使用新材料和新知識應用於越來越複雜的製程安全防護措施。除工程維修專業技術外，還有法令規章以及主管機關檢查也有助於避免事故發生 (Jørgensen, 2016; National Safety Council, 1974)。美國 1970 年制定第一部國家安全法，稱為“職業安全與健康法案” (OSHA)。在 20 世紀 90 年代初，一個新的里程碑可以觀察到“執法”方面。1987 年 Piper Alpha 災難的報導除其他外，提到“安全管理警示系統”，大大提升工業區安全規範。該系統由重大事故報告直接提出相關建議，藉由歐洲制定塞維索法規，並成為歐洲化學公司的強制性要求 (Vierendeels, Reniers, & Ale, 2011)。

除工程和執法以外，還有第三個面向，即教育。它被視為增進員工了解安全規範最好的方式。安全宣導與訓練是在工作崗位或課堂上完成的。安全規範加深工作人員對於工作危害和安全實踐。安全教育內容包含勞檢員、雇主及工安人員等，熟悉工程安全技術及法令規範等要求。根據發病率和死亡率每週報告 (CDC, 1999)，有效性 1980 - 1996 年期間的安全教育已被翻譯成更廣泛的工作場所中更安全的工作場所。透過教育心理學層面以及教育方式的多元化，讓安全教育更加有效並且說明使用模擬器等安全技術工具 (Rasmussen, 1997)。

三個 E 的口號 (即工程，執法和教育) 三個安全文化模式 (The Egg Aggregated Model (TEAM) of safety culture) 如圖 1 所示。工程和執法是兩者都歸類為單獨的一組。教育被歸類為工會，因為教育可以將工程作為執法。這個第一個安全模型，用於說明改善職業安全的三個重要方面。

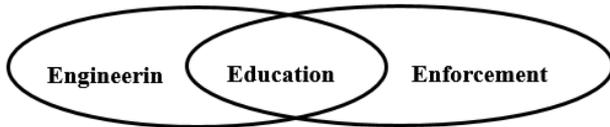


Fig. 1. The three E's model by the National Safety Council (1974).

資料來源：Geert, Genserik, Karolien, & Koen(2018)：An integrative conceptual framework for safety culture: The Egg Aggregated Model (TEAM) of safety culture. 103, 323-339

小結：行為安全是企業內部規範施工作業最基本的能力要求，配合政府的法律規範，企業對於行為安全的基本能力與素養，達到企業內部員工及承攬商應遵守的工安規範，在此規範下，進而達到施工作業防護基本要求的的能力。

2-3 事故分析

Li, Zhang, 與 Wei (2017)事故因果分析是追蹤工業事故原因並最終防範的好方法類似的事再次發生。事故原因分類不僅可以提供對事故的全面了解，還可以對事故原因進行統計。既使有許多事故模型或分類法，但有些模型是特定領域的，而其他模型則是對於實際應用而言過於籠統或複雜。為了解決事故分析的問題提出了一個新的模型。由系統安全角度及控制理論角度來探討。首先，從系統安全因素的角度來看，複雜系統可以分解為六個組件，即機器、人、管理、信、資源和環境。從控制理論的角度看，執行器，傳感器，控制器，和通信被定義為系統因素的抽象功能。系統的組合因子和控制函數構成事故因果分析和分類的矩陣模型，命名的事事故因果分析和分類(ACAT)模型。然後與現有原因進行比較制定了分類方案，BP 德克薩斯煉油廠事故的案例用於說明其原因能力。

Bruce, Ladewski, 及 Ahmed (2019)美國勞工統計局報告稱，2016 年有 290 萬非致命性工傷和 5190 例致命傷。2016 年嚴重傷害的年度直接和間接費用估計為 1511 億美元。OSHA 方法遵循通過工作場所檢查監控工作場所的一般方法和員工危害識別。工作場所

檢查通過審查年度報告或通過由 OSHA 官員進行的現場檢查，旨在使勞工更加了解工作場所所有關安全規範和員工安全權利的法規工作場所，工作場所安全的檢查和教育方法都側重於滿足 OSHA 法規。

Md, Faisal, 及 Paul (2019)大多數化學品在本質上是危險的。製程安全包括危害識別與危害分析，事故模型以及後果分析等許多領域。危害識別是篩選“什麼可以在一個過程中出錯”。風險是安全的另一種表達方式。它可以表示為兩個問題的產物：“事故的頻率是多少？”和“有多少事故會對生產過程和生態系統而造成影響？雖然每個區域都很重要，但危險識別和風險分析是其中的關鍵步驟過程安全分析。

Sergey, Kudryavtsev, Yemelin, 及 Yemelina(2018)制定防止突發事件的安全措施，減少事故風險，改善工作安全以及工作條件的需求，進而從管理階層對工作安全的能力。有必要使用一個完善的系統對於組織和處理信息以進行分析和工業風險管理，監測工業安全進而迅速應對可能影響的變化因素，危險性工作場所的保護與實施，旨在預防事故，以及發生傷亡的必要防護措施以及有效管理，落實危險性工作場所的作業安全。

小結：職業災害發生的原因大致可分為直接原因、間接原因及基本原因，直接原因一般是指能量釋出及有害物暴露，間接原因包括不安全狀態(占 10%)及不安全行為(佔 88%)，基本原因是指雇主管理缺失所引起，由此可知職業災害發生的原因在間接原因(不安全的狀態及不安全行為)就占 98%。

2-4 勤前教育(工具箱會議)

Jeschke, et. al. (2017)作業前勤前教育最好的溝通方式是工具箱會議(工具箱會談，尾門會議等)，這是許多國家建築工程(和其他行業)最常使用的流行工具。工地負責人和工作人員經常利用工具箱會議做出許多重要職業安全與衛生決議，以及工地負責人和他們之間的日常溝通，像工作人員，同事，管理階層，客戶和其他建築專業主要涉及生產問題和施工期間。雖然工具箱會議是建築安全聯

繫的重要形式，但用於評估當前危害場所的研究是比較少見。施工安全會議由管理階層交辦的，很少有工人參與。因此，需要進一步有效安全溝通以及建築業致力於開發和評估一個丹麥的“工具箱培訓”計劃，重點是改進建築工頭的能力，以加強有效的規劃和現場安全實踐，並改善日常安全溝通。工具箱培訓計劃超越實際的工具箱會議，並關注工頭在整個工作日的規劃，安全溝通和安全工作現場，不僅在固定的會議時間，而且在每日特別會議和討論。該計劃重點突出增加工人的積極參與和改善雙向溝通。

Ryan, Alexandra, Annie, Jamie, Illa, 及 Erika (2016)安全溝通的質量和頻率工作場所，特別是主管和下屬之間，與組織安全實踐和員工相關聯對安全優先事項或安全氣氛的共同認識。應用實驗提供主管安全通信積極影響的其他令人信服的證據。工具箱會談是一種傳統且具有潛在影響力的形式施工監督員安全溝通。工具箱說話材料是需求的，由著名的建築研究組織提供。這種需求很可能是由兩者所驅動的格式和政府法規的實用性。例如，俄勒岡州職業安全與健康管理局要求建築業雇主定期舉行安全會議或經營安全委員會。如果雇主選擇安全會議，所有可用的員工必須參加，並且必須舉行會議至少每月一次和/或在任何工作開始時持續更多一周以上。會議必須包括對“行為安全和操作安全”的問題討論和事故調查。

Tappura, Nenonen, 及 Kivistö (2017)會議組織和安全程序應該提高管理階層且關注工作場所安全防護能力，因為工作安全議題通常設定在組織位階。許多安全問題都是屬於管理階層必須授意，沒管理階層的支持，現場操作主管無法解決這些問題。所以，需要實施的訊息和實施安全防護措施，以提高管理階層的意識安全問題及其對安全相關活動的承諾。

小結:勤前教育是指作業人員在作業前，集中在一起，由作業負責人或技術人員對工作進行交底，與作業人員溝通工作中風險及安全措施的短暫、非正式的會議。因一般情況下都是在作業人員拿好工具箱準備作業，或坐在工具箱上開的會，所以就稱之為工具箱會議。

2-5 工作安全分析(JSA)

Eirik, Ingvild, 及 Eva (2019)JSA 是一種在施工階段用於評估風險的方法。JSA 也稱為安全工作分析(SJA)，工作危害分析(JHA)和任務危害分析(THA)，是一種定性風險評估方法(在某些情況下僅限於危險識別)用於尖端操作，系統地和漸進地考慮所有相關風險到特定的工作任務。工作安全分析已經在全球範圍內發展並成為一種流行的方法在許多行業建立危害控制，包括石油、建設、自動化、採礦和造船廠。

工作安全分析(JSA)的目的是識別和評估與任務相關的所有風險要素，以便採取措施消除和/或控制任務可以實施危害。挪威石油和天然氣工業協會發布的工作安全分析指南將工作安全分析流程劃分為五個主要步驟。

2-5-1 確定工作安全分析的需求

建立標準來訂定工作安全分析的必要性，在執行的步驟有：

- (一) 存在危害但未通過現有工作程序或障礙充分控制的活動。
- (二) 需要偏離程序規定的工作的活動或慣例。
- (三) 不了解的工作內容。
- (四) 不熟悉的相關業務。
- (五) 從未使用的新設備。
- (六) 條件變化的因素(例如天氣狀況，新的時間表，子活動的順序改變，新的交互並行操作)。

2-5-2 準備和計畫

工作需要工作安全分析，由負責工作安全分析的人員來訂定程序。工作安全分析管理階層建立了一個工作安全分析團隊。通常由工安經理及其相關人員代表組成，分為工

作管理人員和執行人員兩個部分。工安經理和相關工作人員收集相關數據和其他訊息作為分析。

2-5-3 執行工作安全分析

工作安全分析通過以下步驟執行：

- (一) 分解工作：按順序列出步驟。
- (二) 危害識別：潛在的危害因子。
- (三) 評估潛在的危害事故。
- (四) 評估發生事故的頻率。
- (五) 危害風險評估評，進而評估與風險矩陣有關。
- (六) 具有不可容忍的風險，提供了決定是否存在風險的理由以適當的方式完成工作是可以接受的。

2-5-4 風險評估

實施措施和執行工作在按照工作安全分析進行工作之前，確實如此檢查是否滿足作業的先決條件以及是否滿足建議的措施已經實施。如果不可預見的因素或工作出現實質性變化，工作安全分析必須重新評估。

2-5-5 風險控制

工作安全分析的執行與評估由工安經理推動。這種評估很重要，做為下次工作安全分析時的改善與修正，並有助於技術能力的轉移。

結論：工作安全分析是指事先或定期對某項工作進行安全分析，識別危害因素，評價風險，並根據評價結果制定和實施相應的控制措施，達到最大限度消除或控制風險的方法。

小結：工作安全分析係指主管人員(領班)藉觀察屬下工作步驟，分析作業實況，以發掘作業場所潛在的危險及可能危害，經觀察、討論、修正而建立安全的工作方法。

三、研究方法與設計

以下就研究架構，研究對象及研究設計進行說明：

本研究為參加協議組織會議人員，計有工地負責人 25 人，職業安全衛生管理人員 35 人，工作人員 160 人，每週再教育訓練 4 小

時，進行二個月 8 週，計 32 個小時，共 220 人，評量日期自 108 年 10 月至 11 月 21 共 8 次，進行說明。

3-1 研究架構

本研究以承攬商參加協議組織會議人員為對象，以承攬商「工地負責人、職業安全衛生人員及工作人員」三者進行實證研究。訓練課程施以同一評量為前、後測量依據，分析實證前後再個人安全防護具、機動車輛注意事項、各項作業安全防護措施、用電安全措施及違規罰款等五個構面之資料，其研究架構如圖 2 所示。

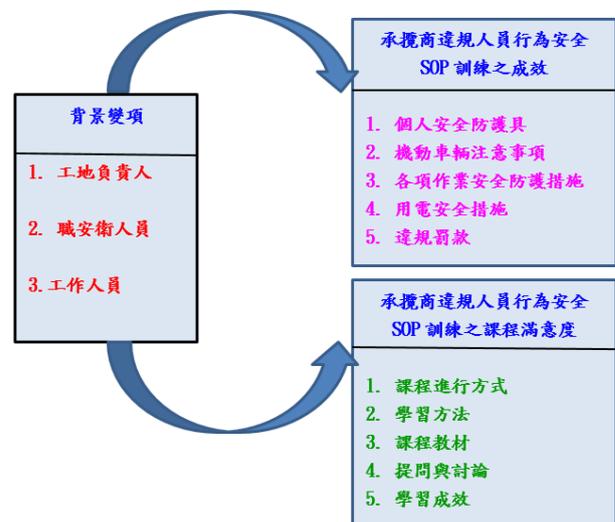


圖 2 研究架構(資料來源：本研究設計)

3-2 研究設計及工具

單從承攬商參加協議組織會議人員訓練、對話及溝通等指標，無從了解承攬商對參加協議組織會議人員及教學滿意度強化行為安全的效益。基於承攬商承攬工作臨時約僱工地負責人、職業安全衛生人員及工作人員對事業單位規定無從深入了解。因之實給予參加協議組織會議人員進行學習測量(見附件一)所示，以得知參加協議組織會議人員對所規範的措施及罰則的內容(包含保命規定、個人安全防護具、機動車輛注意事項、各項作業防護措施及違規罰款記點)，如表 1 所示。再利用萊克特式量表設計課程滿意度問卷(見附件二)所示，由非常同意到非常不同意五個級距，讓參加協議組織會議訓練承攬商人員

填答，其內容如表 2。

許多動態測試都有一個測試前訓練及學習後測試，允許對學習者的學習進度進行效度量測(Elliott, Resing, & Beckmann, 2018)，我們的研究問題集中在對於學習者的獨特教學需求。早期學者研究，發現了教學功能顯著預測學習者的需求(Stad, Wiedl, Vogelaar, Bakker, & Resing, 2018)。

萊克特量表是一個封閉式的強制選擇量表，用於問卷調查，提供從一個極端到另一個極端的一系列答案。萊克特量表廣泛用於心理學和其他社會科學研究。

萊克特量表創建一組線性的響應，增加或減少測試者的心理認知。這些回復類別對

受訪者的解釋開放。因此，例如，一個受訪者可能會選擇「同意」來回應一個陳述，而另一個受訪者則採用相同的方式，但選擇「非常同意」。無論如何，受訪者和他們數據的研究人員都明白「非常同意」被認為是比「同意」更積極的選擇。

研究工具有兩個主要目標。第一，該研究尋求進一步研究動態測試在教學的認知和教學需求方面的實用性能力的學習者。第二，隱性的行為態度，推理的動態測量和教學檢查需求，調查是否存在這種學習者的不同特性(Bart, Wilma, Femke, & Sophie, 2019)。

表 1 研究設計內容

週期	參加人員	宣導方式	標準作業程序書	評量方式
第一週	工地負責人	教育訓練	保命規定、	課後評量
~	職業安全衛生人員		個人安全防護具、	
第八週	工作人員		機動車輛注意事項、	
			各項作業防護措施、	
			違規罰款記點。	

表 2 問卷設計內容

問卷內容		非常同意 ← → 非常不同意				
題	目	5	4	3	2	1
1.	協議組織會議課程進行方式感到滿意。	<input type="checkbox"/>				
2.	協議組織會議課程學習方法感到滿意。	<input type="checkbox"/>				
3.	協議組織會議教材對我學習有所幫助。	<input type="checkbox"/>				
4.	協議組織會議課程提問討論感到滿意。	<input type="checkbox"/>				
5.	與傳統教學相較，更能提高學習成效。	<input type="checkbox"/>				

3-3 資料處理

本研究資料收集及分析如下說明：

3-3-1 資料收集

本研究收集承攬商前後評量成績分數及課程滿意度問卷(工地負責人 25 人、職業安全衛生人員 35 人及工作人員 120 人)三類共 220 人。

3-3-2 資料分析

本研究問卷所得各項資料以 SPSS 10.0 版統計套裝軟體處理並加以分析，所使用之統計方法包括：

- (1) 描述性統計本研究利用次數分配及百分比來瞭解樣本資料結構之情形，平均數及標準差來瞭解課程滿意度情形。
- (2) 以相依樣本 t 檢定來考驗參加協議組織會議前後評量的差異情形，判定課程前後是否有顯著差異。
- (3) 本研究各項假設考驗之顯著水準為 $\alpha = 0.05$ 。

四、結果與討論

4-1 結果:

4-1-1 承攬商參加協議組織會議人員宣導成效之差異分析

本研究藉由承攬商宣導成效訓練評量前後測分析，透過樣本 t 檢定，來檢定參加協

議組織會議人員對強化行為安全效益的差異性。

(1) 承攬商工地負責人參加協議組織會議後之差異

為了解承攬商參加協議組織會議前後，對強化行為安全效益是否產生差異，故對前後評量進行相依樣本 t 檢定進行考驗，如表 3 所示， t 值=-24.821*， $p=.000<.05$ ，結果顯示達顯著水準，表示承攬商參加協議組織會議人員強化行為安全效益有顯著差異。

(2) 承攬商職業安全衛生人員參加協議組織會議後之差異

為了解承攬商參加協議組織會議前後，對於強化行為安全效益是否產生差異，故對前後進行評量相依樣本 t 檢定進行考驗，如表 4 所示， t 值=-17.197*， $p=.000<.05$ ，結果顯示達顯著水準，表示承攬商參加協議組織會議強化行為安全效益有顯著差異。

(3) 承攬商工作人員參加工程安全衛生協議組織會議後之差異

為了解承攬商參加協議組織會議前後，對於強化行為安全效益是否產生差異，故對前後評量相依樣本 t 檢定進行考驗，如表 5 所示， t 值=-43.477*， $p=.000<.05$ ，結果顯示達顯著水準，表示參加協議組織會議強化行為安全效益有顯著差異。

表 3 承攬商工地負責人參加協議組織會議前後成績 t 檢定摘要表

N=25

組別		M or \bar{X}	SD	t 值	p 值
前測	承攬商工地負責人	41.36	9.14185	- 24.821*	.000
後測	承攬商工地負責人	71.60	7.89515		

表 4 承攬商職業安全衛生人員參加協議組織會議前後成績 t 檢定摘要表 N=35

組別		M or \bar{X}	SD	t 值	p 值
前測	職業安全衛生人員	47	8.09316	-17.197*	.000
後側	職業安全衛生人員	73	7.67535		

表 5 承攬商工作人員參加協議組織會議前後成績 t 檢定摘要表 N=160

組別		M or \bar{X}	SD	t 值	p 值
前測	工作人員	44.76	8.52336	-43.477*	.000
後側	工作人員	72.80	7.73524		

4-1-2 石化業承攬商參加協議組織會議教學滿意度分析

表 6 承攬商參加協議組織會議對於教學滿意度問卷摘要表 N=220

題 目	平均數	標準差	排序
1. 協議組織會議進行方式感到滿意	4.236	4.24±1.24	4
2. 協議組織會議學習方法感到滿意	4.253	4.30±1.10	3
3. 協議組織會議教材對我學習有所幫助	4.318	4.30±1.10	1
4. 協議組織會議提問討論感到滿意	4.281	4.30±1.00	2
5. 與傳統教學相較，更能提高學習成效	4.168	4.20±1.20	5

表 7 承攬商參加協議組織會議整體訓練滿意度問卷摘要表 N=220

承攬商參加協議組織會議人員	總數(N)	滿意度	排序
1. 承攬商工地負責人	25	3.75	3
2. 承攬商職業安全衛生人員	35	3.91	1
3. 承攬商工作人員	160	3.8	2

由上述表 6 課程滿意度問卷摘要表得到以下結論

- (1) 承攬商參加協議組織會議人員對於課程滿意度五項內容(課程進行方式、課程學習方法、課程教材、事故分析提問與討論及學習成效)皆有高度滿意。
- (2) 承攬商參加協議組織會議人員對於課程滿意度五項內容(課程進行方式、課程學習方法、課程教材、事故分析提問與討論及學習成效)以課程教材最為滿意，其次為事故分析提問與討論，再者為課程學習方法。
- (3) 承攬商參加協議組織會議人員對於課程滿意度五項內容(課程進行方式、課程學習方法、課程教材、事故分析提問與討論及學習成效)與傳統教學相較更能提高學習成效滿意度最差。

由上述表 7 承攬商參加協議組織會議訓練滿意度問卷摘要表得到以下結論:

- (1) 承攬商工地負責人對於協議組織會議整體滿意度為最差，歸因為工地負責人因為有多個工地再進行，他必須瞭解整個工程進度，故停留工作場所時間最短，對於協議組織會議最無感。
- (2) 承攬商職業安全衛生人員對於協議組織會議整體滿意度為最佳，歸因為職業安全衛生人員於施工期間須全程在場，要是違規也要連坐處罰，所以，必須掌控安全衛生管理業務，故停留工作場所時間最長，對於協議組織會議最有感。
- (3) 承攬商工作人員對於協議組織會議整體滿意度為其次，歸因為工作人員一旦違規，除了罰款還要記點，勢必影響其工作權益及薪資收入，故停留工作場所時間最長，對於協議組織會議其次有感。

4-2-1 本研究結果與文獻比較之異同原因之探討分析如下說明:

(1)相同原因分析：

背景變項-工地負責人、職業安全衛生人員及工作人員標準作業程序書、行為安全、事故分析、勤前教育及工作安全分析等文獻

分析對於承攬商工地負責人參加協議組織會議宣導成效課程內容(個人安全防護具、機動車輛注意事項、各項作業安全防護措施、用電安全措施及違規罰規)及程滿意度(課程進行方式、學習方法、課程教材、事故案例提問與討論及學習成效)具有高度正相關意涵。

(2)相異原因分析：

背景變項-工地負責人、職業安全衛生人員及工作人員標準作業程序書、行為安全、事故分析、勤前教育及工作安全分析等文獻分析對於承攬商工地負責人參加協議組織會議宣導成效的課程內容(個人安全防護具、機動車輛注意事項、各項作業安全防護措施、用電安全措施及違規罰規)及程滿意度(課程進行方式、學習方法、課程教材、事故案例提問與討論及學習成效)皆因每一種身分的位階不同而有所取捨，故在協議組織會議前後評量分數及課程滿意度排序上的認知皆有不同的選擇方式，而有所不同認知指標。

4-2-2 承攬商參加協議組織會議有效提升行為安全及教學滿意度及其原因分析

- (1) 工作情境使然，易於融入授課內容及參與授課情境。
- (2) 生活背景使然，易於融入事故案例分析形成共鳴。
- (3) 生活圈的使然，易於融入彼此的生活習慣與模式。
- (4) 語言使用使然，易於融入工作及教學溝通的橋樑。
- (5) 制度規範使然，易於融入程序書遵守之共同規範。

五、結論與建議

在國營企業中，事業單位與承攬商乃相輔相成，承攬商的能力必需符合事業單位的需求才能有效提升組織績效，因此不論是新進承攬商或資深承攬商都需要不斷的充實與訓練自我；相對的，國營企業為了不斷成長、追求永續發展與擴大版圖，並且因應快速變遷的外在環境、產業外移與日趨激烈的國際競爭，提供一個能讓承攬商配合事業單位需求來提升專業能力、知識與態度之制度與環

境，為此，本公司所採用的最佳方式就是提供承攬商施工期間有良好且完整的教育訓練。透過教育訓練，加強承攬商專業與知能，亦可藉由再教育訓練改變承攬商之工作態度、增強其工作動機，進而增加組織之績效、達成事業單位之目標與策略。

筆者就本文研究內容提出以下研究結論：

5-1 結論

5-1-1 參加協議組織會議對強化承攬商(工地負責人、職業安全衛生人員及工作人員)之行為安全效益有顯著提升。

5-1-2 參加協議組織會議進行方式有 78.6% 感到滿意、課程學習方法有 81.8% 感到滿意、課程教材對我學習有所幫助有 83.6% 感到滿意、事故案例分析提問與討論有 80.9% 感到滿意、傳統教學相較更能提高學習成效有 84% 感到滿意。參加協議組織會議教學滿意度對於承攬商與事業單位具有相當重大的意義。教學滿意度可以讓事業單位依據承攬商的教學滿意度，規劃出符合承攬商學習的課程，並增進承攬商的學習利益。在這資訊爆炸的時代，滿足承攬商的學習興趣，將是吸引承攬商自主學習的一大利器。再者，講師也可以依據承攬商的教學滿意度的情形，檢視承攬商的學習成效，來確保自己的教學品質。如發現有不適宜的教學方式時，也可以適時的改進自己的教學方式，以更貼近承攬商的方式來進行教學，相信這對於講師是具有相當大的助益。筆者就上述內容提出以下研究建議與限制：

5-2 建議：

5-2-1 石化業承攬商參加協議組織會議宣導成效之差異分析可藉由其他統計方法例如單因子變數分析或多元回歸分析來呈現不同的樣貌。

5-2-2 進行不同背景變項之課程教學滿意度分析，例如不同性別對課程教學滿意度分析或不同工種對課程教學滿意度分析

5-3 本文研究現象背後潛藏的意涵：

煉油石化業在本質上為高風險之產業，稍一不慎極易產生火災爆炸事故，對企業本身及社會大眾造成重大影響。因而煉油石化產業非常重視安全衛生，先進國家推行的安全管理機制均具備事故調查的要求，本研究參考外國學者的專業論述，作為重要的工安先期指標，作為改善承攬商管理及安全操作的有效方法。

近期研究顯示大部份事故情境及原因相似且重複，顯見業界並未善用事故經驗學習到教訓，導致事故重複發生。對於發生頻率低但後果嚴重之煉油石化業事故特性，事故資料分析將更形重要。國內現有勞動部「職業災害統計月報表」係依職業災害事故之特性編列，不敷製程產業如煉油石化業之需求。導致相關事故致災關鍵資訊未能深入探討並儲存於事故資料庫中，不僅無法累積失敗學習經驗，並錯失與同業間寶貴之經驗傳承及分享機會。

本研究參考國外文獻近 60 位學者及專家的實務經驗，分析事故情境及剖析事故導因，藉由行為安全訓練，以承攬商施工關鍵人物「工地負責人、職業安全衛生人員及工作人員」進行統計分析。本研究發現，設備因素為製程安全事故優先應重視之事故導因，包括現場人員設備操作、檢查及維修等直接執行層面，操作期間預知保養等間接管理層面，及技術設計和建構等基本源頭管控層面等，具有顯著之事故發生頻率及重要性，與歐盟 MARS 石化事故資料庫具有相同事故導因趨勢，值得事業單位借鏡及作為防範對策之參考。

參考文獻

1. Albrechtsen, E., Solberg, I., & Svensli, E. (2019). The application and benefits of job safety analysis. *Safety Science*, 113, 425-437.
2. Amin, M., Khan, F., & Amyotte, P. (2019, April 19). A bibliometric review of process safety and risk analysis. Retrieved October

- 13, 2020, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582019302563>
3. Amponsah-Tawiah, K. (2013). Occupational Health and Safety and Sustainable Development in Ghana. *International Journal of Business Administration*, 4(2), 74-78
 4. Bulbul, H. I., Yavuzcan, H. G., & Ozel, M. (2013). Digital forensics: An Analytical Crime Scene Procedure Model (ACSPM). *Forensic Science International*, 233(1-3), 244-256.
 5. Calder, J. (1994). *The prevention of factory accidents: Being an account of manufacturing industry and accident and a practical guide to the law on safe-guarding, safe-working, and safe-construction of factory machinery, plant and premises With 20 tables and 124 illustrations by John Calder.* London: Longmans, Green, and 39 Paternoster Row, London New York and Bombay.
 6. Casey, E. (2001). *Handbook of computer crime investigation: Forensic tools and technology.* Elsevier.
 7. Centers for Disease Control and Prevention[CDC] (1999). *Achievements in Public Health, 1900-1999: Improvements in Workplace Safety -- United States, 1900-1999.* *Morb. Mortal.Wkly Rep.* 48 (22), pp. 461-484.
 8. DeBlois, L. (1926). *Industrial Safety Organisation for Executives and Safety Engineer.* New York: McGraw-Hill Book Company.
 9. Elliott, J. G., Resing, W. C., & Beckmann, J. F. (2018). Dynamic assessment: A case of unfulfilled potential? *Educational Review*, 70(1), 7-17. doi:10.1080/00131911.2018.1396806
 10. Fabiano, B., Vianello, C., Reverberi, A., Lunghi, E., & Maschio, G. (2017). A perspective on Seveso accident based on cause-consequences analysis by three different methods. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 49, 18-35.
 11. Geller, E.S. (1994). Ten principles for achieving a Total Safety Culture. *Profession. Safety Science*, (9), 18-24.
 12. Grill, M. (2018). *Safety leadership in the construction industry: Managing safety at Swedish and Danish construction sites (Doctoral Thesis, Doctor of Medicine).* Gothenburg: Gothenburg University.
 13. Grill, M., & Nielsen, K. (2019). Promoting and impeding safety – A qualitative study into direct and indirect safety leadership practices of constructions site managers. *Safety Science*, 114, 148-159.
 14. Grill, M., Grytnes, R., & Törner, M. (2015). *Approaching safety in the Swedish and Danish construction industry: Professionals' perspectives of safety culture differences.* *Monit*, 19(2), 1-19.
 15. Hassard, J., Flintrop, T., Clausen, K., & Muylaert. (2012). *Motivation for employees to participate in workplace health promotion, A Report prepared for the European Agency for Safety and Health at Work.* Luxembourg, pp. 1-29.
 16. Horsman, G., Findlay, B., & James, T. (2019). Developing a 'router examination at scene' standard operating procedure for crime scene investigators in the United Kingdom. *Digital Investigation*, 28, 152-162.
 17. Horswell, J. (Ed.)(2004). *The Practice of Crime Scene Investigation.* CRC Press International Labour Organisation, ILO Standards on Occupational Safety and Health: Promoting a safe and healthy working environment. In *International*

- Labour Conference, 98th Session., Geneva.
18. Hughes, P., & Ferrett, E. (2008). Introduction to Health and Safety in Construction (pp. 2-5). USA: Butterworth-Heinemann, Imprint of Elsevier.
 19. Jeschke, K. C., Kines, P., Rasmussen, L., Andersen, L. P., Dyreborg, J., Ajslev, J., Andersen, L. L. (2017). Process evaluation of a Toolbox-training program for construction foremen in Denmark. *Safety Science*, 94, 152-160.
 20. Joint ILO/WHO Committee. (n.d.). Definition of Occupational and Safety, 12th Session of Joint ILO/WHO Committee on Occupational Health. Retrieved from www.ilo.org/safe-work, 1995.
 21. Jørgensen, K. (2016). Prevention of “simple accidents at work” with major consequences. *Safety Science*, 81, 46-58.
 22. Kudryavtsev, S. S., Yemelin, P. V., & Yemelina, N. K. (2018). The Development of a Risk Management System in the Field of Industrial Safety in the Republic of Kazakhstan. *Safety and Health at Work*, 9(1), 30-41.
 23. Ladewski, B. J., & Al-Bayati, A. J. (2019). Quality and safety management practices: The theory of quality management approach. *Journal of Safety Research*, 69, 193-200.
 24. Li, W., Zhang, L., & Liang, W. (2017). An Accident Causation Analysis and Taxonomy (ACAT) model of complex industrial system from both system safety and control theory perspectives. *Safety Science*, 92, 94-103.
 25. Loimer, H., & Guarnieri, M. (1996). Accidents and acts of God: A history of the terms. *American Journal of Public Health*, 86(1), 101-107.
 26. Ma, Y., Zhao, Q., & Xi, M. (2016). Decision-makings in safety investment: An opportunity cost perspective. *Safety Science*, 83, 31-39.
 27. Manghani, K. (2011). Quality assurance: Importance of systems and standard operating procedures. *Perspectives in Clinical Research*, 2(1), 34.
 28. National Safety Council. (1974). Accident prevention manual for industrial operations (Rep.). Chicago, IL.
 29. Olson, R., Varga, A., Cannon, A., Jones, J., Gilbert-Jones, I., & Zoller, E. (2016). Toolbox talks to prevent construction fatalities: Empirical development and evaluation. *Safety Science*, 86, 122-131.
 30. Ph.d., M. C. (2000). Towards a model of safety culture. *Safety Science*, 36(2), 111-136.
 31. Rasmussen, J. (1997). Risk management in a dynamic society: A modelling problem. *Safety Science*, 27(2), 183-213.
 32. Reason, J. (1997). Achieving a safe culture: Theory and practice. *Work & Stress*, 12(3), 293-306.
 33. Reniers, G. L., Cremer, K., & Buytaert, J. (2011). Continuously and simultaneously optimizing an organization’s safety and security culture and climate: The Improvement Diamond for Excellence Achievement and Leadership in Safety & Security (IDEAL S&S) model. *Journal of Cleaner Production*, 19(11), 1239-1249.
 34. Safety and health at work: A vision for sustainable prevention: XX World Congress on Safety and Health at Work 2014: Global Forum for Prevention, 24-27. (2009). Geneva: ILO.
 35. Slay, J., Lin, Y., Turnbull, B., Beckett, J., & Lin, P. (2009). Towards a Formalization of Digital Forensics. *Advances in Digital Forensics V IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 37-47.
 36. Stad, F. E., Wiedl, K. H., Vogelaar, B.,

- Bakker, M., & Resing, W. C. (2018). The role of cognitive flexibility in young children's potential for learning under dynamic testing conditions. *European Journal of Psychology of Education*, 34(1), 123-146. doi:10.1007/s10212-018-0379-8
37. SWGDE. (2012). SWGDE Model Standard Operation Procedures for Computer Forensics. Retrieved April 13, 2018, from <https://www.swgde.org/documents/CURRENT%20Documents/SWGDE%20QAM%20and%20SOP%20Manuals/SWGDE%20Model%20SOP%20of%20Computer%20Forensics>
38. Swuste, P., Gulijk, C. V., & Zwaard, W. (2010). Safety metaphors and theories, a review of the occupational safety literature of the US, UK and The Netherlands, till the first part of the 20th century. *Safety Science*, 48(8), 1000-1018.
39. Tappura, S., Nenonen, N., & Kivistö-Rahnasto, J. (2017). Managers' viewpoint on factors influencing their commitment to safety: An empirical investigation in five Finnish industrial organisations. *Safety Science*, 96, 52-61.
40. Tappura, S., Nenonen, N., & Kivistö-Rahnasto, J. (2017). Managers' viewpoint on factors influencing their commitment to safety: An empirical investigation in five Finnish industrial organisations. *Safety Science*, 96, 52-61.
41. Vierendeels, G., Reniers, G., & Ale, B. (2011). Modeling the major accident prevention legislation change process within Europe. *Safety Science*, 49(3), 513-521.
42. Vierendeels, G., Reniers, G., Nunen, K. V., & Ponnet, K. (2018). An integrative conceptual framework for safety culture: The Egg Aggregated Model (TEAM) of safety culture. *Safety Science*, 103, 323-339.
43. Vogelaar, B., Resing, W. C., Stad, F. E., & Sweijen, S. W. (2019). Is planning related to dynamic testing outcomes? Investigating the potential for learning of gifted and average-ability children. *Acta Psychologica*, 196, 87-95.
44. Weick, K. E., Sutcliffe, K. M., & Obstfeld, D. (1999). Organizing for high reliability: Processes of collective mindfulness (Vol. 21, pp. 81-123). Stamford: JAI Press.
45. Westerouen van Meeteren, F.W. (1893). *Handboek voor de Nijverheidshygiëne, deel I en II (Reference Book on Industrial Hygiene, Parts I and II)*. Amsterdam: Elsevier.
46. WHO. (1995). *Global strategy on occupational health for all: The way to health at work* Geneva, Switzerland: World Health Organizations, Office of Occupational Health.
47. Wilsdon, T., & Slay, J. (2005). *Digital Forensics: Exploring Validation, Verification and Certification*. First International Workshop on Systematic Approaches to Digital Forensic Engineering (SADFE'05), 48-55.
48. Wu, C., Li, N., & Fang, D. (2017). Leadership improvement and its impact on workplace safety in construction projects: A conceptual model and action research. *International Journal of Project Management*, 35(8), 1495-1511.

附件一

承攬商召開協議組織會議教育訓練宣導評量

承攬商工地負責人：_____ 承攬商職業安全衛生人員：_____

承攬商工作人員：_____

※選擇題 50 題，每題 2 分，作答時間 10 分，答錯不扣分

- ()01. 進入工作場所未戴安全帽，罰款多少? 1. 1000 元 2. 2000 元 3. 3000 元 4. 4000 元。
- ()02. 於禁止停車處，停放工程車輛，罰款多少? 1. 1000 元 2. 2000 元 3. 3000 元 4. 4000 元。
- ()03. 工程車於工場區直線行駛限速多少? 1. 20KM/HR 2. 40KM/HR 3. 60KM/HR 4. 80KM/HR。
- ()04. 工作許可證經開立後，承攬商於工作前未實施作業環境測定者，罰款多少? 1. 1000~5000 元 2. 5000~10000 元 3. 10000~15000 元 4. 15000~20000 元。
- ()05. 作業環境測定儀器未經校正機構校正合格者，罰款多少? 1. 1000 元 2. 2000 元 3. 3000 元 4. 4000 元。
- ()06. 承攬商工地負責人未進廠執行職務者，罰款多少? 1. 20000 元 2. 40000 元 3. 60000 元 4. 80000 元。
- ()07. 承攬商職業安全衛生人員於施工中未全程在場者，罰款多少? 1. 10000 元 2. 20000 元 3. 30000 元 4. 40000 元。
- ()08. 承攬商工程車輛進廠未裝置滅焰器且經檢查合格者，罰款多少? 1. 10000 元 2. 20000 元 3. 30000 元 4. 40000 元。
- ()09. 施工架組配作業未依規定設置施工架組配作業主管者，罰款多少? 1. 1000 元 2. 3000 元 3. 5000 元 4. 7000 元。
- ()10. 承攬商職業安全衛生人員未依規定穿著紅色背心者，罰款多少? 1. 1000 元 2. 2000 元 3. 3000 元 4. 4000 元。
- ()11. 承攬商局限空間作業，未依規定設置缺氧作業主管者，罰款多少? 1. 3000 元 2. 5000 元 3. 7000 元 4. 9000 元。
- ()12. 承攬商動火作業未依規定置備滅火器者，罰款多少? 1. 1000 元 2. 3000 元 3. 5000 元 4. 7000 元。
- ()13. 承攬商於工作場所高處作業時，未依規定穿著安全帶且掛勾者，罰款多少? 1. 5000 元 2. 10000 元 3. 15000 元 4. 20000 元。
- ()14. 承攬商於工作場所操作堆高機，未依規定取得堆高機證照者，罰款多少? 1. 1000 元 2. 3000 元 3. 5000 元 4. 7000 元。

- ()15. 承攬商於工作場所操作移動式起重機起重吊掛作業，未依規定設置吊掛指揮人員者，罰款多少?1. 1000 元 2. 3000 元 3. 5000 元 4. 7000 元。
- ()16. 承攬商局限空間作業，未依規定設置人孔監視者，罰款多少?1. 3000 元 2. 5000 元 3. 7000 元 4. 9000 元。
- ()17. 承攬商攜帶香菸、火柴、打火機進本廠二道門者，依規定罰款多少?1. 10000 元 2. 20000 元 3. 30000 元 4. 40000 元。
- ()18. 承攬商於工作場所操作起重吊掛作業，吊勾無設置防滑舌片者，罰款多少?1. 1000 元 2. 2000 元 3. 3000 元 4. 4000 元。
- ()19. 承攬商人員入事業部，如冒用他人證件或無證件入廠，依規定罰款多少?1. 10000 元 2. 20000 元 3. 30000 元 4. 40000 元。
- ()20. 承攬商於工作場所從事危害性工作未依規定配戴適當安全防護器具者，依規定罰款多少?1. 10000 元 2. 20000 元 3. 30000 元 4. 40000 元。
- ()21. 承攬商如違反進入煉儲區二道門內手機管制規定，依規定罰款多少?1. 10000 元 2. 20000 元 3. 30000 元 4. 40000 元。
- ()22. 承攬商於工作場所使用交流電焊機本體未按規定接地者，罰款多少?1. 1000~5000 元 2. 5000~10000 元 3. 10000~15000 元 4. 15000~20000 元。
- ()23. 承攬商於工作場所臨時電源線路上未裝置漏電斷路器或每天收工後承攬商責任區電源未切斷者，罰款多少?1. 1000~5000 元 2. 5000~10000 元 3. 10000~15000 元 4. 15000~20000 元。
- ()24. 承攬商於工作場所堆高機未裝置前後照燈及警報裝置者，罰款多少?1. 1000 元 2. 2000 元 3. 3000 元 4. 4000 元。
- ()25. 承攬商安全帽未標示公司名稱者，罰款多少?1. 1000 元 2. 2000 元 3. 3000 元 4. 4000 元。
- ()26. 承攬商於工作場所使用不合格施工架者，罰款多少?1. 2000 元 2. 4000 元 3. 6000 元 4. 5000 元。
- ()27. 承攬商如未替其勞工投保勞工保險，而從事本事業部相關工作時，依規定罰款多少?1. 10000 元 2. 20000 元 3. 30000 元 4. 40000 元。
- ()28. 發包工程開工前未向本事業部工安部門提出「職業安全衛生管理單位（人員）設置報備書」完成申報手續者，依規定罰款多少?1. 10000 元 2. 20000 元 3. 30000 元 4. 40000 元。
- ()29. 承攬商人員請勿餵食野狗，以免野狗繁衍流竄，傷害員工，罰款多少?1. 1000 元 2. 2000 元 3. 3000 元 4. 4000 元。

- ()30. 承攬商於工作場所從事高危險性 (A 級) 工作未依規定配戴適當安全衛生防護器具者，依規定罰款多少?1. 3000 元 2. 5000 元 3. 7000 元 4. 10000 元。
- ()31. 承攬商於工作場所從事露天開挖作業未設擋土支撐或採取替代方法以防止地面之崩塌者，罰款多少?1. 10000~20000 元 2. 20000~30000 元 3. 30000~40000 元 4. 40000~50000 元。
- ()32. 承攬商於工作場所提供未通過安全認可之中央主管機關指定之機械、設備或器具供勞工使用，罰款多少?1. 3000 元 2. 5000 元 3. 7000 元 4. 9000 元。
- ()33. 承攬商於工作場所工程作業期間廢棄物任意丟棄，妨害環境衛生者，罰款多少?1. 1000 元 2. 2000 元 3. 3000 元 4. 4000 元。
- ()34. 承攬商於工作場所堆高機無乘客座而搭載人員行駛於本事業部道路者或作為施工架者，罰款多少?1. 1000 元 2. 3000 元 3. 5000 元 4. 7000 元。
- ()35. 承攬商於工作場所未經許可擅自啟用消防栓、高壓噴槍等消防水者，罰款多少?1. 5000 元 2. 10000 元 3. 15000 元 4. 20000 元。
- ()36. 承攬商於工作場所施工架組配人員及作業主管未受本公司之施工架作業講習合格者，罰款多少?1. 10000 元 2. 20000 元 3. 30000 元 4. 40000 元。
- ()37. 承攬商於工作場所交流電焊機本體未按規定接地者，罰款多少?1. 1000~5000 元 2. 5000~10000 元 3. 10000~15000 元 4. 15000~20000 元。
- ()38. 承攬商於工作場所交流電焊機未依規定裝設自動電擊防止裝置或設定在手動而無自動電擊防止功能者者，罰款多少?1. 10000~20000 元 2. 20000~30000 元 3. 30000~40000 元 4. 40000~50000 元。
- ()39. 承攬商於工作場所乙炔高壓氣瓶其外接軟管未加裝逆火防止裝置者，罰款多少?1. 1000 元 2. 3000 元 3. 5000 元 4. 7000 元。
- ()40. 承攬商於工作場所安全帽未標示公司名稱者，罰款多少?1. 1000 元 2. 2000 元 3. 3000 元 4. 4000 元。
- ()41. 承攬商攜帶含酒精成分飲料進入煉儲地區，罰款多少?1. 1000 元 2. 2000 元 3. 3000 元 4. 4000 元。
- ()42. 承攬商取得工作許可證，未依規定將該證置於施工場所之明顯處或下班前未回簽者，罰款多少?1. 1000 元 2. 2000 元 3. 3000 元 4. 4000 元。
- ()43. 承攬商規避本公司相關人員安全查核者，罰款多少?1. 1000 元 2. 3000 元 3. 5000 元 4. 7000 元。
- ()44. 承攬商施工場所，未設置相關安全警示設施標識，罰款多少?1. 1000 元 2. 3000 元 3. 5000 元。

元 4.7000 元。

- () 45. 承攬商於工作場所未穿安全鞋者，罰款多少？1. 1000 元 2. 2000 元 3. 3000 元 4. 4000 元。
- () 46. 承攬商於作業現場發生事故或災害時，相關人員未依本事業部監造或轄區部門人員指示或未經同意擅自離開者，罰款多少？1. 10000 元 2. 20000 元 3. 30000 元 4. 40000 元。
- () 47. 承攬商進入廠區不得攜帶檳榔，不得於工作中嚼食檳榔，或於工作區域內任意吐檳榔汁、丟檳榔袋之行為，罰款多少？1. 1000 元 2. 2000 元 3. 3000 元 4. 4000 元。
- () 48. 承攬商於進行關鍵線上維修作業未實施錄影監視，罰款多少？1. 10000~30000 元 2. 30000~60000 元 3. 60000~90000 元 4. 90000~120000 元。
- () 49. 承攬商職安人員、工地負責人及檢點者，在工作許可證的施工簽章欄未簽認或勾選不確實，罰款多少？1. 1000 元 2. 2000 元 3. 3000 元 4. 4000 元。
- () 50. 承攬商提供未通過安全認可之中央主管機關指定之機械、設備或器具供勞工使用，罰款多少？1. 1000 元 2. 3000 元 3. 5000 元 4. 7000 元。

附件二

承攬商參加協議組織會議課程滿意度問卷

親愛的承攬商，您好：

感謝您參加本廠協議組織會議，為了解本教育訓練課程對承攬商學習情況之影響，請您就本次協議組織會議教育訓練課程提供寶貴建議。此份調查不影響承攬商考試成績，敬請放心填寫，感謝您！

基本資料

承攬商名稱：

職稱： 工地負責人 職業安全衛生人員 工作人員

性別： 男性 女性

問卷內容

題 號	題 目	非常同意←→非常不同意				
		5	4	3	2	1
1	協議組織會議進行方式感到滿意。	<input type="checkbox"/>				
2	協議組織會議學習方法感到滿意	<input type="checkbox"/>				
3	協議組織會議教材對我學習有所幫助。	<input type="checkbox"/>				
4	協議組織會議提問討論感到滿意。	<input type="checkbox"/>				
5	與傳統教學相較，更能提高學習成效。	<input type="checkbox"/>				

一、您認為此門課程的教學創新部份與傳統教學方式有何不同？

二、我有話要說(請撰寫心得、建議或看法)

附件三

承攬商參加協議組織會議整體滿意度問卷

親愛的承攬商，您好：

感謝您參加本廠協議組織會議，為了解本教育訓練課程對承攬商學習情況之影響，請您就本次協議組織會議提供寶貴建議。此份調查不影響承攬商考試成績，敬請放心填寫，感謝您！

基本資料

承攬商名稱：

職稱： 工地負責人 職業安全衛生人員 工作人員

性別： 男性 女性

問卷內容

題 號	題 目	非常同意←→非常不同意				
		5	4	3	2	1
1	您對於協議組織會議整體滿意度評比。	<input type="checkbox"/>				

台灣營造業男性從業人力斷層及薪資低下之因應對策

陳冠彰¹ 潘煌鏗²

¹國立高雄科技大學土木工程系土木與防災科技研究生

²國立高雄科技大學土木工程系教授

摘要

探討有效提升男性在營造產業的就業率並減少營造業人力斷層及薪資調整增進從業意願，本研究以台灣北部、中部、南部營造工地男性施工人員做為研究之對象，選擇目前工地中志願擔任目前職務為營造男性施工人員為研究對象，設計問卷內容，由網路問卷及紙本問卷調查，蒐集統計結果。本研究目的在於瞭解營造工地男性施工人員從業之真實現況，歸納結果後獲得在增進就業保護(修訂法令)百分之 33.4%認為需要，在薪資改善方面有 66.3%認為需要薪資調整。

關鍵字：人力斷層、營造業、男性施工人員

Countermeasures for the Disruption of Male Employment in Taiwan's Creative Industry and Low Salary

Chen Guanzhang¹ Pan Huangyun²

¹Graduate student, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

²Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

To discuss effectively increasing the employment rate of men in the construction industry and reduce the manpower gap in the construction industry and salary adjustments to increase the willingness to work. This study takes male construction workers on construction sites in northern, central and southern Taiwan as the research object, and chooses to volunteer in the current construction site. The job is to create male construction workers as the research object, design the content of the questionnaire, and collect the statistical results from the online questionnaire and paper questionnaire. The purpose of this research is to understand the real situation of male construction workers' employment on construction sites. After summarizing the results, 33.4% of them believe that it is necessary to increase employment protection (revision of the law), and 66.3% believe that salary adjustment is necessary for salary improvement.

一、緣起

根據行政院主計總處人力資源調查 108 年就業人數平均為 1150 萬人，較 107 年增加 6 萬 6 千人或 0.58%。失業率自 98 年 5.85% 高峰下降後，108 年為 3.73%，較 107 年上升

0.02 個百分點。108 年勞動力參與率平均為 59.17%，較 107 年上升 0.18 個百分點。近年來受高等教育普及影響，108 年大專及以上勞動力占全體勞動力比率增為 51.83%，較 98 年上升 9.77 個百分點；依年齡結構分，雖然勞動力主力與 10 年前相同皆為壯年族群

25~44 歲這之間，惟整體人口結構轉變，中高齡勞動力 45~64 歲所占比例由 32.70% 增加至 37.15%，上升 4.45 個百分點。圖 1. 勞動力年齡結構。

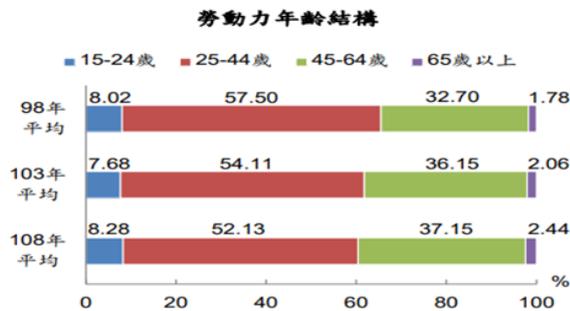


圖 1 勞動力年齡結構

二、研究動機與目的

研究目的在瞭解現今營造業工地男性施工人員從業之真實現況，透過現況的數據掌握更進一步探討如何有效提升男性在營造產業的就業率，減少營造產業人力的流失，希望藉由本研究日後能提供給產業或學界一個統計改善指標，並從分析結果的各項數據，提供改善之建議，以提升未來營造產業之從業率。

綜合上述研究動機，本研究目的分述如下：

- 一、瞭解營造業工地男性施工人員從業之真實現況，包含(年齡、學歷、婚姻與家庭狀況、職務狀況、經濟狀況、就業狀況、增進男性勞工就業率之方法)等各向度調查。
- 二、探討如何有效提升男性在營造產業的就業率。
- 三、透過研究結論與建議提供給立法者做為相關勞動法令及政策推動之參考依據。
- 四、提供產業界、各企業為改善職場管理，降低離職率之參考。
- 五、建議改善營造就業薪資之參考指標。

三、文獻回顧

傳統營造業施工，隨著時代的發展，有許多創新的工法及大型機械輔助，但營造業

工地現場仍具有高度的複雜性及危險性，除基本的作業人力之外，更需要專業之技術人力來執行，大量的施工介面交錯、施工工序、基礎人力、施工機械等問題，以致施工過程中仍需仰賴高度的人力，但由於營造業特性，常伴隨著高噪音、環境惡劣、粉塵作業，普遍職災率及死亡率的發生又高於其他產業，因此多數年輕人就業意願並不高，仍必須仰賴現有的中年勞工，106 年工業及服務業男性每人每月薪資為 54,066 元，工時為 171.5 小時，平均時薪為 315 元。女性薪資為 45,333 元，工時為 167.2 小時，平均時薪為 271 元，是男性平均時薪之 86.0%，兩性薪資差距為 14.0%。依行業別觀察，106 年醫療保健服務業兩性時薪差距最大為 44.6%，其次為藝術、娛樂及休閒服務業之 34.3%，製造業為 26.2% 居第三；而在支援服務業、用水供應及污染整治業、不動產業之女性平均時薪高於男性。以民間工程及公共工程比較：

1. 民間工程：北部平均日薪較高約 2,800 元，其次為中部平均日薪約為 2,500 元，南部平均日薪約為 2,200 元。
2. 公共工程：北部平均日薪約 2,600 元最高，中部平均日薪 2,300，南部平均日薪 2100 元，其平均日薪均較民間工程低。另薪資調查中以電焊工薪資最高(平均日薪約為 4,800 元)，其次為鋼筋工(平均日薪約 2,600 元)及模板工(平均日薪 2,500 元)，薪資最低為勞力工(平均日薪約 1,700 元)。依內政部營建署「國內營造業缺工現況及未來處理情形」指出，國內營造業勞工之來源主要來自本國勞工及外籍勞工，而在臺移工目前人數約 70 萬人，其中僅 4,802 人為營造業移工(與本國營造業就業人數比率約為 0.48%)；又勞動部為保障本國勞工就業機會，目前政策採限制性及補充性引進移工，自 90 年底至 108 年 12 月底止，外籍營造工人數由 3 萬 3,367 人減少至 4,416 人。另依本部營建署近幾年「營造業經濟概況調查」資料顯示，近幾年營造業反應所遭遇的困難以「勞力工短缺」的比例最多，而需

要政府優先協助的項目是「解決勞工短缺問題」，且營造業勞工人力管道來源大多為「自行招募」，每百家有 74.4 家最高。復參考行政院主計總處 108 年 8 月底「事業人力僱用狀況調查」公布之「營建工程業」受僱員工人數為 472,547 人、空缺員工人數 12,701 人（其中專業人員 1,049 人、技術員及助理專業人員 3,052 人、技藝有關工作人員、機械設備操作及組裝人員 6,767 人及基層技術工及勞力工 1,179 人）；再參考本部營建署今(109)年度所辦理「營造業經濟概況調查」推估結果，營造業勞工人力缺工總人數計 48,809 人（其中專任工程人員 1,331 人、工地主任 2,015 人、技術士 7,296 人、公司內部管理人員 994 人及基層勞工 37,173 人），詳表 1-1。

表 1-1 營造業缺工種類

總人數	基層勞工	技術士	工地主任	專任工程人員	公司內部管理人員
48 809	37 173	7 296	2 015	1 331	994

3-1 國內就業狀況

根據勞動部資料顯示 108 年 7 月份土木工程受僱人數約為 81100 人，主要人力集中在技術、機械設備操作及安裝人員佔 51.45%，其中以管道裝設人員佔 8.52%，其次為基層技術工及勞力工佔 23.40%，其中以勞力工為最多佔 20.45%。

3-2 缺工原因分析

1. 營造業工作環境相對危險且辛苦，年輕人從事意願低落，加以國內勞工老年化，老年人口數呈現上升趨勢且青壯年人口數呈現下滑，顯示人口老化嚴重及生育率下降，人力有嚴重的斷層，未來將減少勞動人口量能。
2. 109 年 01~08 月建築物開工件數比 108 年 01~08 月增加 478 件，而 109 年 01~08 月營建工程業就業人數雖比 108 年 01~08 月增加 5,784 人，惟仍無法滿足現階段開工需求。

3. 市場需求持續擴大，如臺商回流效益及前瞻基礎建設效益持續發酵、危老重建計畫核准案件數為 1,051 件及都市更新案件尚未動工為 270 件(可視為待消化案件)等，建商積極推案，隨著各工地的開工，人力需求日益殷切。
4. 臺商回流及外商進駐，科技廠同步招募工人蓋廠房，讓原本人力吃緊的營造業，更為雪上加霜。

表 1-3 營造業缺工種類

土木工程受僱人數—按主要職業別分		
108 年 7 月		
職業別	人數	百分比
總計	81,100	100.00
主管及監督人員	3,736	4.61
監督人員(含現場及辦公室主任、科/股長)	2,476	3.05
專業人員	3,950	4.87
土木及水利工程師	2,060	2.54
環境工程師	130	0.16
建築工程師(含建築師)	236	0.29
測量師及製圖師	143	0.18
勞安及衛生管理人員(含工業安全管理師)	544	0.67
技術員及助理專業人員	7,786	9.60
營建工程技術員	4,982	6.14
製圖員	256	0.32
環境工程技術員	531	0.65
勞安及衛生技術員	653	0.81
事務支援人員	4,849	5.98
一般辦公室事務人員(含文書)	2,480	3.06
會計助理、簿記、出納	1,452	1.79
服務及銷售工作人員	74	0.09
技藝、機械設備操作及組裝人員	41,729	51.45
鋼筋綁紮人員	2,736	3.37
模板人員	4,079	5.03
混凝土鋪設人員	3,676	4.53
營建木作人員	1,167	1.44
其他營建構造人員(含鷹架工)	4,569	5.63
地面、牆面鋪設及磁磚鋪貼人員	2,447	3.02
泥作工作人員	4,126	5.09
管道裝設人員(含檢修)	6,912	8.52
焊接及切割人員(含電焊工、氬焊工)	343	0.42
車輛維修人員	60	0.07
建築物電力系統裝設人員(含水電工)	46	0.06
電力機械裝設人員	1,232	1.52
電力線路裝設人員	5,049	6.23
小客、貨車駕駛人員	222	0.27
大客、貨車駕駛人員	588	0.73
搬土、吊車、起重機等移運設備操作人員	3,434	4.23
基層技術工及勞力工	18,976	23.40
清潔及家事工作人員(含建築清潔工)	2,393	2.95
勞力工	16,583	20.45

資料來源：勞動部「職類別薪資調查報告」。
附註：僅列示主要職業，故有相加總與總計不符現象。

3-3 缺工原因調查

經營建署於今(109)年 10 月 28 日邀集各營造業公會召開缺工調查研商會議完竣，並請公會於二周確認所屬會員缺工之調查數據彙整後送營建署。第一階段調查資料中除基隆市等部分縣市尚未完成調查外，就現行公會彙整之調查資料中，計總缺工數(基層技術工)9,821 人，其中民間私人工程 3,094 人，公共工程 6,727 人；另以工種類型來看，在公共工程中以模板工缺最多(1,719 人)，其次為鋼

勞力工(1461 人)、筋工(1,416 人)及泥水工(776 人)。

1. 民間私人工程：總約缺 3,094 人，以中南部縣市嘉義縣(約缺工 645 人)、臺中市(約缺工 663 人)、臺南市(約缺工 640 人)缺工需求較大，其次是臺北市(約缺工 307 人)、新竹市(約缺工 153 人)、高雄市(約缺 105 人)、苗栗縣(約缺工 105 人)、新北市(約缺工 100 人)、新竹縣(約缺工 100 人)、雲林縣(約缺工 97 人)、屏東縣(約缺工 94 人)、彰化縣(約缺工 61 人)，詳表 3-1。另以工種類型來看，模板工缺最多(約缺 1,056 人)，其次為鋼筋工(694 人)及泥水工(436 人)
2. 公共工程：總計約缺工 6,727 人，以直轄縣市如新北市(約缺 1,741 人)、桃園市(約缺工 1,307 人)缺工最多，其次為臺北市(約缺工 1,204)、高雄市(約缺工 805 人)、臺南市(約缺工 681 人)、臺中市(約缺工 409 人)較嚴重，依序為澎湖縣(約缺工 150 人)、臺東縣(約缺工 70 人)、嘉義市(約缺工 67 人)、南投縣(約缺工 51 人)、屏東縣(約缺工 20 人)、金門縣(約缺工 15 人)、嘉義縣(約缺工 10 人)，詳表 3-3。另以工種類型來看，模板工缺最多(約缺 1,719 人)，其次為勞力工(1,461 人)、鋼筋工(1,446 人)及泥水工(776 人)。

3-4 營造業職災型態

營造工地常為室外環境作業，受天氣因素的影響，其施工品質及工程進度受天候影響相當大，例如：夏季高溫高熱加上高度勞動的狀態下，易造成勞工熱中暑、熱衰竭，致造成作業中職災意外頻傳；另外，颱風大雨會致使工程停擺，停工後相關安全的「檢查」是否落實？及停工後的趕工追工惡習，往往造成勞工職災風險提高，因此勞工之施工安全管理是預防事故、災害發生的重要關鍵，透過有效的安全管理，能徹底預防危害事故。然而營造業外包工作廣泛，性質不同，加上工作人員流動性高，且常出現為了配合工作進度，增加臨時性工人來趕工情形(吳世雄、洪維隆;2004)。因此，在現場工作的勞工對於工作

危險性認知不足，加上承攬商若對工地安全管理稍有疏忽情況下，就易造成意外事故發生。

3-5 穩定就業方案

2020-6-11 經濟日報指出受到新冠肺炎疫情影响，就業市場面臨嚴重衝擊，隨著畢業生踏出校門，勞動部協助新鮮人就業方案，即日起陸續上路。其中只要 29 歲以下應屆畢業生，年底前在同一家公司穩定就業滿三個月，發 2 萬元獎勵金，就業滿半年再加發 1 萬元，最多 3 萬元，下周一(15 日)上路，也就是新鮮人至少要在今年 9 月 30 日前就業，就有機會領到獎勵金。至於投入特定行業(3K 製造業、照顧服務業及營造業)獎勵方案，則是工作穩定就業達 18 個月，最高可領到 13 萬 8 千元獎勵，即日起已經上路。

3-6 外籍勞工規範修正

勞動部日前修正「專案核定民間機構投資重大經建工程及政府機關或公營事業機構發包興建之重要建設工程聘僱外籍營造工作業規範」，新修正的規範刪除百億門檻降為 10 億元，另配合配合行政院順利推動重大公共工程，針對確實具有擴大外籍營造工人數必要且特殊個案，經中央目的主管機關報行政院同意後，核配外籍營造工比例不受相關核配比例之限制。勞動部 109 年 3 月 31 日公告修正「專案核定民間機構投資重大經建工程及政府機關或公營事業機構發包興建之重要建設工程聘僱外籍營造工作業規範」，並自即日起生效。

根據統計，截至 2 月底，政府重大公共工程有 4,294 名外籍移工、重大投資營造業則有 215 名外籍移工。

四、研究方法

依設計之執行架構，研究內容對應至兩部分之執行架構概述如下：

4-1 文獻蒐集與回顧

蒐集國內相關男性營造業就業人數、就業意願、薪資差異文獻，做為本研究調查的作業基礎，進行瞭解男性營造業真實情況和

造成人力斷層的原因。文獻蒐集與回顧的工作範圍有 4 項如下圖 1.:

- (1) 蒐集國內男性營造業就業相關研究文獻，並進行文獻回顧。
- (2) 蒐集男性就業意願與需求因素之相關研究文獻。
- (3) 蒐集人力斷層之相關研究文獻。
- (4) 探討國內男性營造業真實情況和造成人力斷層的原因之相關差異成因。

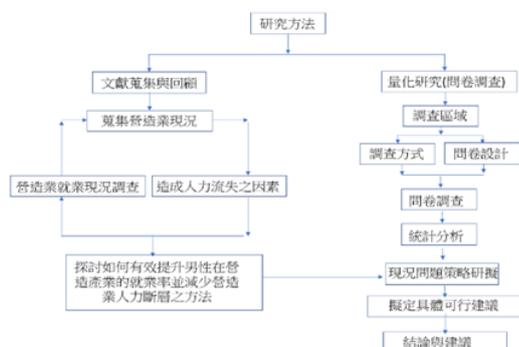
4-2 問卷調查

探討影響男性勞工在營造業真實情況和造成人力斷層之原因，除了過往的文獻資料調查外，還需要進行現況調查，以瞭解男性勞工之真實從業情況和造成人力斷層之原因，及影響男性投入營造業就業市場之意願低落原因。

為了讓現況調查有代表性，調查方式為問卷調查。

五、結論

完善的薪資結構，不僅對工作者有著正向激勵作用，讓工作者體認到付出與收入成正比，讓勞工對企業具有向心力。自民國 109 年 9 月 7 日政府發布，自 110 年 1 月 1 日起實施，每月基本工資調整為 24,000 元，每小時基本工資調整為 160 元，但對於需長期付出高度勞力及日曬雨淋的勞工，其實仍薪資過低。



1. 營造工地男性施工人員從業之現況:

(一) 在本次研究結果中發現，台灣地區為本國籍男性勞工為主軸，從業年齡分佈則在 41 至 65 歲，年齡層明顯偏高，

學歷狀況以大學程度佔為多數，婚姻狀況調查為已婚居多，工作地點以南部地區為多數，以全職員工佔多數，在工作同行夥伴間則無影響，以個人勞動居多，投保狀況為勞工保險，擔任職務以職業安全衛生人員為居多，現場工程師次之，在工作環境方面主要為外業室外工作環境，從事營造產業就業主要因素為土木相關科系，養家餬口則為次之，工作職能為現場管理居多。

2. 有效提升男性在營造產業就業率方式:

(一) 從統計結果中有百分之 36.3% 的人認為營建施工採取現代自動化設備或營建模組化技術亦會增進從業意願，有百分之 36.3% 的人認為企業應培養固定施工團隊(正職員工培訓)，在導入製造業、科技業之系統管理制度有百分之 53.7% 認為營造業需符合勞動法令需求，在增進就業保護(修訂法令)百分之 33.4% 認為需要，在薪資改善方面有 66.3% 認為需要薪資調整。

參考文獻

1. 技師報社論-第 1244 期 社論-正式缺工之國安危機。
2. 內政部營建署-國內營造業缺工現況及未來處理情形。
3. 職業安全衛生法。
4. 勞動基準法。
5. 勞工安全衛生展示館-感電-職場中的無形殺手，慎防機械設備電擊危害。
6. 勞動部職業安全衛生署-中小企業常見潛在危害系列-物體倒塌、崩塌危害預防。
7. 勞動統計專網-行業職業就業指南-行業指南目錄-營造業
8. 台北市勞動檢查處-常見問答-職業災害勞工保護法的特色為何?
9. 楊玉如、王韻婷，(民 107)，勞動統計通報，勞動部統計處。
10. 紀廷亞，(民 108)，以精實理念為基礎探討職場於兩性平權之議題。摘要。修平科技大學。

分析門神畫作武將甲冑紋理特徵之研究

蘇東青¹ 溫名閔² 王丞偉³

¹ 國立金門大學土木與工程管理學系教授

^{2,3} 國立金門大學土木與工程管理學系學士生

摘要

目前畫作修復研究已提出多樣性影像遙測技術進行相關畫作缺失偵測或檢測，考量歷史悠久畫作之原作匠師大多已不復在，如何準確判釋原作匠師畫風，依據原始畫風精神進行修補或重製，實為畫作文物保存工作之必要課題。尤其中國文化之門神畫作，相較於壁畫而言，以電腦視覺為基礎對門神畫作進行非破壞檢測與評估之應用，仍十分闕如。本研究目的在於考量武將門神甲冑具有多樣且特殊之紋理特性，不同匠師具有不同紋理畫風，即便相同紋路，不同匠師對於紋理間距表現必定不同，故本研究認為值得發展電腦視覺方法，依據甲冑紋理特徵識別匠師畫風。研究成果對於未知匠師之門神畫作，可提供一項潛在匠師畫風之建議，以便後續畫作修補或重製。目前本研究利用小波多層次解析配合共生矩陣計算，已完成全台部分匠師所繪武將門神甲冑吉祥圖案之紋理分析，並利用 t-test 以顯著水準 0.05 進行紋路間紋理特徵差異檢定。研究結果指出，t-test 結果可有效指出不同吉祥圖案於水平 0 度、雙對角 45 度與 135 度、以及垂直 90 度方向之紋理特徵差異性，以作為後續利用電腦視覺自動化識別不同甲冑吉祥圖案之基礎。

關鍵字：門神畫作、武將甲冑、吉祥圖案、紋理特徵、小波多層次解析、共生矩陣、t-test

A Study of Analyzing Texture Features of Warriors' Armors in Door God Paintings

Su Tung-Ching¹ Wun Ming-Hung² Wang Cheng-Wei³

^{1,2,3}Department of Civil Engineering and Engineering Management, National Quemoy University

ABSTRACT

Many literatures had presented many remote sensing techniques in defect detection as well as inspection of paintings. However, it is usually difficult to acquire the useful information for restoring a defect painting, so how to precisely confirm the style and painting skill of the defect painting is important. Compared with mural paintings, the related literatures discussing about applying the nondestructive testing methods to door god paintings are extremely rare. Due to not only door gods' armors with peculiar textural features but also multiple styles as well as painting skills among artists, it is worth to introduce computer vision methods into textural feature interpretation of armors in door god paintings. The achievement of this research could offer restorers a reference to confirm original or potential artists. At present, this research had applied a multi-resolution wavelet coupled with co-occurrence matrix calculation to the texture analyses of several patterns of door gods' armors painted by some artists, and had performed a t-test with a significant level of 0.05 to see the significances of the texture differences among the surveyed

patterns. This paper indicates that the t-test result not only can effectively show the significances of the differences among the texture features at the directions of 0° , 45° , 90° , and 135° but also can be the base for the automated interpretation of auspicious patterns of warriors' armors in door god paintings.

Keywords: door god paintings, warriors' armors, auspicious patterns, texture features, multi-resolution wavelet, co-occurrence matrix, t-test

一、前言

門神起源於遠古時期先民對萬物有靈之崇拜，有許多不同組合或由不同神祇擔任，職責主要在於防衛家門、驅趕邪魔(楊濤，2009)。門神一詞最早見於《禮記·喪服大記》，可見門神最早可以追溯到先秦時期(王曉戈，2011；洪旭紳，2013)。神荼及鬱壘為最早出現的門神，有左神荼，右鬱壘之二門神稱號，盛行於漢代(王曉戈，2011)。武將門神除了神荼、鬱壘外，尚有秦叔寶與尉遲恭(見圖 1)、韋馱與伽藍、哼哈二將、四大天王、四大元帥、三十六官將、三十六天罡七十二地煞星；文官門神有文臣、衙役、宮娥；其他門神有童男、童女、二十四節氣、天聾地啞、龍、鳳、…等(洪旭紳，2013)。其中，武將門神和文官門神服飾方面最大不同在於有無甲冑之別，在甲冑上披擗和靠腿，部分有出現相同紋飾現象，可能因為彩繪匠師對門神甲冑的裝飾有不同設計的因素在裡面，且描繪甲冑的方式也因匠師慣用和傳承的技藝而有些許不同，皆可以看見各種類似圖案的出現(李怡瑩，2009)。甲冑上吉祥圖案有各類紋理，如：鎖紋、古錢套、龜背紋、繡球紋、水波紋、魚鱗紋、環紋、回紋與萬字紋，各類紋樣因不同匠師思維而有所不同，但大致紋樣仍有機可循，因此甲冑上之紋理會因匠師不同而有特殊處理手法與方式(李怡瑩，2009)。

金門縣文化局於 2018 年已指定「蔡氏家廟門神」和「新倉上二房十一世宗祠門神」為金門縣古物，「蔡氏家廟門神」為神荼、鬱壘，「新倉上二房十一世宗祠門神」為左進祿，右加官。由於兩對門神歷史悠久，因此所用顏料如鉛丹、硃銅綠、錳白等大多已退色，且線條紋理不明顯；其中神荼、鬱壘已於 2017

年由蔡氏子孫執行「辭神」儀式後請下，委託國立台南藝術大學進行為期一年彩繪補修。門神彩繪補修除了修復原有色彩外，亦必須保有原來墨線走勢及線條美感，以維持匠師風格。然而依據李奕興(2013)調查文獻記載，離島地區門神畫作原始匠師大多已不可考，在匠師未知情況下進行門神畫作修復，很可能發生不當全色痕跡或者使修復後的畫作喪失其原始匠師繪畫風格。



圖 1 一對門神畫作，左為尉遲恭，右為秦叔寶(圖片來源:吳盈君，2016)

由於甲冑上吉祥圖案各有其特殊紋理，因此本研究收集全台北、中、南各地廟宇已知匠師之門神畫作影像，欲分析武將門神甲冑上紋理特徵，以了解不同吉祥圖案紋理特

徵差異，以及匠師之間對某一吉祥圖案呈現之紋理特徵差異。研究結果將可提供識別不同吉祥圖案之有效紋理特徵，同時提供類神經網路進行繪畫風格識別，判定未知匠師畫作風格應與何位匠師畫風接近，以作為後續門神畫作修復基準之參考。

二、背景

2-1 台灣門神畫匠師

大約從 1960 年代開始，一些著名匠師為台灣傳統民居或寺廟創作了門神畫，然而大多數著名匠師已故，因此目前他們創作的門神畫大部分由其學徒修復。學徒中有些屬於著名匠師家庭成員，例如兩位著名匠師陳玉峰(1900~1964)和潘春源(1891~1972)，都是來自中國福建泉州，他們大部分的門神畫散佈在台灣南部廟宇。之後，著名匠師陳壽彝(1934~2012，陳玉峰之長子)和堂兄蔡草如(1919~2007)均為陳玉峰學徒。在陳玉峰、陳壽彝和蔡草如的門神畫中，有一種屬於他們家庭流派的特殊繪畫風格。同樣，潘春源、潘麗水(1914~1995，潘春源之子)和潘岳雄(1943年至今，潘麗水之長子)亦創作了許多屬於他們家庭流派特殊繪畫風格的門神畫。根據以上所述，可以建立有關台灣南部門神畫創作的師徒家譜。至於台灣其他地方匠師洪旭紳(2013)建立了台灣新竹一位著名匠師師徒家譜，並編輯了有關該匠師及其學徒所創作的門神畫圖鑑。

過去，台灣曾有幾宗門神畫修復案例。在 1968 年，陳壽彝與另外兩位匠師合作，在新北市的清水祖師廟中翻修了陳舊的門神畫(李奕興，2009)。另一位匠師許連成(1919~2002)於 1975 年為台灣北部一座歷史悠久的寺廟創作了門神畫，而許連成的門神畫於 1989 年由劉家正進行了翻新。實際上，劉家正翻新了許多許連成的門神畫，但是劉家正的繪畫風格屬於潘氏家族，因此在修復方法上存在一些爭議。

2-2 畫作紋理特徵分析

一張顯示色調變化頻率的影像，例如斑馬線和衣物編織等，可以看作是具有紋理特

徵的影像(Lillesand et al., 2008)。同樣，吉祥圖案影像也具有色調變化頻率特性，因此藉由紋理特徵分析將有助於門神畫作風格識別。部分文獻討論了紋理特徵分析在(1)繪畫修復中的應用(Cai & Siegel, 2002)；(2)按藝術流派對繪畫進行分類(Zujovic et al., 2009；Keshvari & Chalechale, 2016；Lee & Cha, 2016)；以及(3)繪畫風格識別(Gultepe et al., 2018；Narag & Soriano, 2019)等。Cai & Siegel (2002)探索了兩種紋理特徵，即能量(或稱同質性，Homogeneity)和熵(Entropy)，基於灰度共生矩陣(Gray Level Co-occurrence Matrix, GLCM)計算，已顯示能量和熵對畫作清漆效果敏感，尤其由熵之紋理特徵顯示清漆會增加畫作對比度。由於 GLCM 是一種常用的統計計算方法，亦被應用於提取中國傳統繪畫紋理特徵以進行畫風分類(Lu et al., 2008)。

基於小波分析(wavelet analysis)之多尺度和多方位的影像分解，已應用於繪畫掃描影像進行畫作特徵描述(Lyu et al., 2004)。Cetinic & Grgic (2013)根據 GLCM 提取的紋理特徵和離散小波變換(Discrete Wavelet Transform, DWT)進行自動化畫風識別分類。毫無疑問，小波係數統計特性已證明可有效進行繪畫風格分析(Johnson Jr. et al., 2008；Jafarpour et al., 2009)。根據相關研究工作(Ji et al., 2019；Ghahfarrokhi et al., 2020)，紋理特徵提取的過程首先是使用 DWT 進行影像分解以獲得多尺度和多方向的子帶影像(sub-band image)，其次從子帶影像生成 GLCM，最後從 GLCM 導出紋理描述子，例如能量，熵，對比度，相關性等。

三、研究資料收集

據李奕興(2013)和康銘錫(2012)對台灣門神畫的調查，本研究選擇了他們調查過的一些寺廟和台灣其他寺廟作為研究地點，並使用 ASUS_Zo1HDA 或 Sony_J9110 的智能手機獲取吉祥圖案影像。本研究共訪問了 52 座寺廟，獲得 453 幅吉祥圖案影像詳列如表 1 所示，可以看出四種吉祥圖案影像總共涉及 31 位匠師，其中鎖鍊和魚鱗是門神繪畫中常

用的吉祥圖案，因此獲取的影像數量要比其他圖案多出許多。圖 2 為四種吉祥圖案範例影像。



圖 2 武將門神甲冑吉祥圖案範例影像，左上：魚鱗紋，右上：鎖鏈紋，左下：龜背紋，右下：回紋

為了避免門神畫取像模糊，必須使用三腳架代替手持方式支撐智能手機進行取像。考慮到門神畫作尺寸不盡相同，於取像過程中必須通過反復試驗確定適當的鏡頭高度和物距。由現場反覆測試得知，合適的鏡頭高度和物距分別約為 1.5 m 和 1~2 m。由於門神畫多數位於半室外環境中，因此有時取像過程會受到寺廟結構、日照方位角或天氣的影響，而無法獲得具有適當照明的影像以至於影像對比度和亮度降低。ASUS_Zo1HDA 和 Sony_J9110 的光圈值(光圈)分別為 $f/1.7$ 和 $f/1.6$ (f : 鏡頭焦距)。因此，採用鏡頭焦距的自動調節來獲取具有適當對比度和亮度的吉祥圖案影像。

表 1 本研究所調查匠師及收集之武將甲冑影像數

匠師	吉祥圖案				總數
	魚鱗紋	鎖鏈紋	龜背紋	回紋	
李漢卿	6	-	-	-	6
王錫河 &洪純宋	5	-	-	-	5
林中信	8	3	-	-	11
張劍光	5	2	-	-	7
游景賢	3	3	-	-	6
劉家正	14	16	-	-	30
潘岳雄	12	3	-	-	15
梅月杉	4	2	-	-	6
許明義	6	5	-	-	11
蔡孟學	4	1	-	-	5
蔡海永 &蔡文傑	3	4	-	-	7
顏文伯	4	2	-	-	6
蘇天福	8	10	-	-	18
鐘銀樹	4	1	-	-	5
卓福田	2	-	-	-	2
陳秋山	5	1	-	-	6
王錫河	6	5	1	-	12
朱銀鸞	5	4	1	-	10
呂石旺	4	3	2	-	9
郭佛賜	12	7	4	-	23
陳陽春	11	11	4	-	26
潘麗水 莊武男	67	35	2	3	107
王瑞瑜	5	11	1	-	17
鹿港 小龍	2	4	-	2	8
張火爐	1	4	-	1	6
黃名樹	2	3	-	3	8
蔡龍進	1	2	-	1	4
許連成	15	5	-	-	20
陳壽彝	8	-	1	5	14
總數	13	20	6	4	43
總數	245	167	22	19	453

四、研究方法

4-1 二階二維離散小波轉換(2 level 2D DWT)

小波轉換(Wavelet Transform, WT)是從傅立葉變換發展而來的線性變換，其中基函數是正弦波，但小波函數會改變頻率並限制持續時間，以便在頻率範圍內提供更好的分辨率(Lu et al., 2008; Yang et al., 2011)。最初，WT的發展是用於信號處理，而不是影像處理，直到 Daubechies 和 Mallat 提供了 WT 的離散化，並分別建立了 WT 和多分辨率理論之間的聯繫。在本文中，吉祥圖案影像可以看作是離散信號沿 2D 尺度的變化。2D DWT 可以將吉祥圖案影像分解為從最粗到最細的多

個比例(Beura et al., 2015; Sudarshan et al., 2015; Yang & Wu, 2016)。通過二維 DWT 分解(通過一維卷積通過連續的低通(L)和高通(H)濾波實現),可將吉祥圖案影像 $I(m, n)$ 劃分為子帶影像,包括一個近似影像(LL)和三個水平(HL)、垂直(LH)和對角線(HH)方向的細節影像(Yang et al., 2011)。參數 m 和 n 分別表示影像在行和列方向上的像素數目。可以在下一階進一步分解近似影像(LL),以獲得尺寸為 $(m/2, n/2)$ 的 LL、HL、LH 和 HH 等子帶影像。對於每個級別的分解,均使用 2 的下採樣對列或行方向上的近似影像和低通或高通濾波器的可選卷積進行運算。

4-2 灰階共生矩陣(GLCM)計算

GLCM 是一維方陣,其中在行(i)和列(j)方向上的每個元素都記錄一對具有相同元素值且沿一個方向(θ)相隔一定像素距離(D)的像素的相對出現頻率(M_{ij})(Yang et al., 2011; Ji et al., 2019)。圖 3 顯示了方陣中感興趣像素在不同方向和像素距離下 GLCM 生成的圖示,以及在 90° (垂直方向)和一個像素距離下 M_{ij} 的統計範例。圖 3(b)顯示了範例細節影像的 GLCM,其中影像尺寸為 7×7 (但不限於正方形),灰度級數為 8。在 GLCM 中,元素位置 $(3,0)$ 記錄值 1,因為範例細節影像中只有像素位置 $(2,1)$ 灰度值為 3 和像素位置 $(1,1)$ 灰度值為 0 具垂直相鄰一個像素距離條件。除了 0° 、 45° 、 90° 和 135° 的四個必要方向外,多項研究表明,不同的像素距離(D)對基於 GLCM 進行紋理描述的準確性有很大影響,並證明了一個像素距離($D=1$)可以提高特徵提取的準確性(Arebey et al., 2012; Ji et al., 2019)。在本文中,在 GLCM 的計算中引入了以像素為邊界而不是跨越像素的相鄰距離。

4-3 共生紋理特徵計算

從水平和垂直方向的細節影像計算出的 GLCM 分別進一步計算了 0° 和 90° 的共生紋理特徵。此外,從對角方向的細節影像中計算出 45° 和 135° 中的兩個 GLCM,以進一步計算在雙對角線方向上的共生紋理特徵。本研究考慮以下 7 種描述子以描述吉祥圖案之

共生紋理特徵。

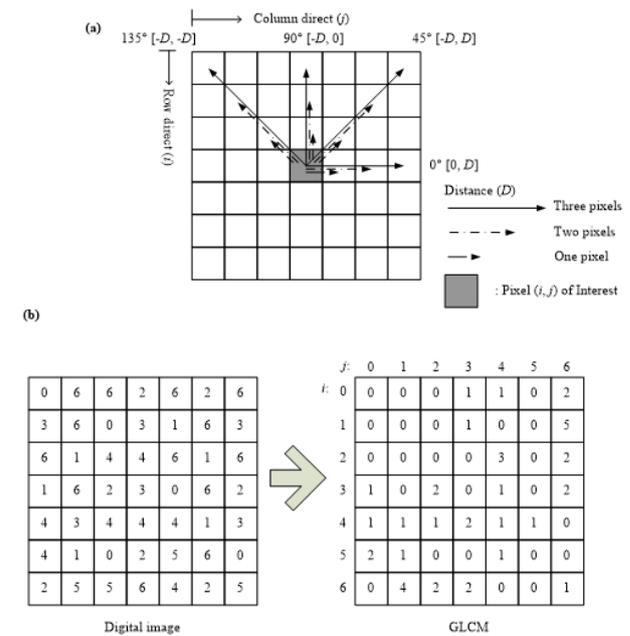


圖 3 GLCM 生成圖例, (a)具有相同元素值的一對像素在四個方向上被不同的像素距離分隔開, (b)使用 $D = 1$ 和 $\theta = 90^\circ$ 的 GLCM 記錄數位影像灰度相對出現頻率

- 角二次矩(Angular Second Moment, ASM): 可以表示吉祥圖案影像中灰度分佈的均勻性(O'Byrne et al., 2012)。ASM 的紋理描述子表示為

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij}^2 \quad (1)$$

ASM 的值範圍介於 $1/n^2$ 到 1 之間,數值 1 表示該影像為恆定。 P_{ij} 計算為 $M_{ij} / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{ij}$ 。

- 熵(Entropy, ENT): 隨機性的統計量度決定了吉祥圖案影像中的紋理干擾(O'Byrne et al., 2012; Ghahfarrokhi & Khodadadi, 2020)。ENT 的紋理描述子獲得為

$$-\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij} \cdot \log_{10}^{P_{ij}} \quad (2)$$

ENT 值越大,吉祥圖案的紋理複雜性越高。因此,ASM 和 ENT 之間應該存在高度負相關。

- 對比度(Contrast, CON): 可通過此描述子測量吉祥圖案影像中的局部偏差,該描述

子的計算公式如下：

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (i-j)^2 \cdot P_{ij} \quad (3)$$

CON 值越高，影像對比度越高。因此，CON 值若為 0 表示影像為恆定。

- 均質性(Homogeneity, HOM):HOM 也可以稱為逆微分矩，它衡量 GLCM 中元素分佈與對角 GLCM 之間的相似性 (Ghahfarrokhi & Khodadadi, 2020)。紋理描述子定義為

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{P_{ij}}{1+(i-j)^2} \quad (4)$$

HOM 對於紋理描述恰與 CON 相反，HOM 值越高，影像對比度越低(或稱影像均勻性越高)。

- 不相似度(Dissimilarity, DIS):測量吉祥圖案影像中灰度的不相似度。DIS 對影像空間中灰度值或色調的排列非常敏感，並表示為

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |i-j| P_{ij} \quad (5)$$

DIS 值越高，意味著影像中灰階相異性越大。

- 相關性(Correlation, COR):可以定義影像像素之間的空間相關性(Ghahfarrokhi & Khodadadi, 2020)，以通過該紋理描述子表示吉祥圖案的紋理方向(傅桂霖等人，2004)，其計算方法如下

$$\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (i \cdot j) P_{ij} - \mu_x \mu_y}{\sigma_x \sigma_y} \quad (6)$$

換句話說，COR 是 GLCM 的相關係數。COR 值越高，在特定方向上影像灰階值的空間依賴性程度越大。

- 群聚傾向(Cluster tendency, CLU):測量吉祥圖案影像中紋理群聚程度，並可以通過以下方式獲得：

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (i - \mu_x + j - \mu_y)^2 \cdot P_{ij} \quad (7)$$

上述 μ_x 、 μ_y 、 σ_x 、以及 σ_y 計算如下

$$\begin{cases} \mu_x = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n i \cdot P_{ij} \\ \mu_y = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n j \cdot P_{ij} \\ \sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (i - \mu_x)^2 \cdot P_{ij}} \\ \sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (j - \mu_y)^2 \cdot P_{ij}} \end{cases} \quad (8)$$

五、結果與討論

5-1 吉祥圖案紋理特徵

根據表 1 所列獲取的吉祥圖案影像數量，對四個吉祥圖案計算共生紋理特徵值整理如圖 4。對每個吉祥圖案，圖 4 所標記的共生紋理特徵值乃個別吉祥圖案總採集影像所計算的平均值。從圖 4 可看出，任何吉祥圖案在雙對角線方向上的共生紋理特徵值大約相同。該結果證明，所有被調查的吉祥圖案在雙對角線方向上都具有紋理對稱性。基於所計算的共生紋理特徵值，本研究對於吉祥圖案的紋理特性描述如下。

在 ASM 中，魚鱗和龜背模式分別獲得最高和最低的共生紋理特徵值。該結果表明，魚鱗圖案的影像比其他三個圖案的影像更恆定。對於任何吉祥圖案，水平方向上的灰階值分佈都比其他三個方向上的灰階分佈更均勻。

在 CON 中，從圖 4(b)可看出在雙對角線方向上的吉祥圖案影像對比度高於在水平或垂直方向。除回紋外，垂直方向上的共生紋理特徵值低於其他方向，在其他方向上，龜背紋的共生紋理特徵值最高，因此與其他圖案相比，龜背紋通常具有最高的影像對比度。由圖 4(b)和 4(c)可以看出，在 HOM 中獲得的曲線凹形與在 CON 中的凸形恰好相反。由於魚鱗圖案的 HOM 值較高，HOM 的紋理描述子證明魚鱗圖案的對比度低於其他圖案。

除了 CON 和 HOM 外，獲得的 ENT 和 ASM 之間曲線的形狀也正好相反。顯然垂直方向上回紋的 ENT 值比不同方向上其他圖案的 ENT 值大得多。該結果指出，與其他圖案相比，垂直方向上的回紋圖案具有最高的紋理複雜性。除垂直方向外，龜背圖案在其他方向具有最高紋理複雜性，且圖 4 顯示 CLU 和 COR 兩項紋理描述子獲得具有相似形狀的

曲線。在 COR 中，水平或垂直方向的特徵值遠高於雙對角線方向的值。此外，在四種吉祥圖案間，回紋在水平或垂直方向與雙對角線方向上的 COR 值存在極大差異，因此本文證明了吉祥圖案影像中灰階空間依賴性程度越大，CLU 值則越高，即紋理聚類程度越高。

在 DIS 中，圖 4(e)顯示吉祥圖案影像在雙對角線方向上的灰階與水平或垂直方向上的灰階相異度更高。值得注意的是，圖 4 所獲得的 CON 和 DIS 之間的曲線形狀是相似的。因此，本文證明對所調查的吉祥圖案，CON 和 DIS 之間存在相互關係，吉祥圖案影像對比度越高，則影像中灰階不相似程度越高。

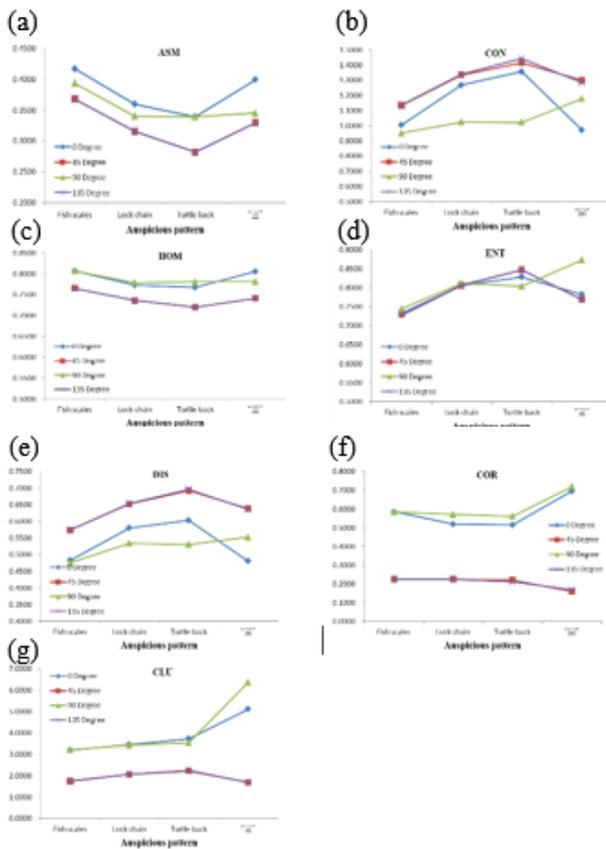


圖 4 所調查吉祥圖案在不同方向之紋理特徵值; (a)ASM; (b)CON; (c)HOM; (d)ENT; (e)DIS; (f)COR; (g)CLU

5-2 兩兩吉祥圖案間紋理相似性

對計算出的共生紋理特徵值進行了兩尾 t 檢定(顯著水準 $\alpha : 0.05$)，以查看四種吉祥圖案中的任意兩種間的相似性，因此必須執行 6 種檢定組合。這 6 種組合的檢定結果如表 2

所示。檢定結果驗證了魚鱗紋和鎖鏈紋圖案間之紋理差異最大，但鎖鏈紋和龜背紋圖案間之紋理相似度最大。該結果表明，容易將魚鱗與鎖鏈圖案區分，但難以區分鎖鏈紋與龜背紋圖案。儘管如此，在某些方向上採用某些紋理描述子時，例如:以 CON 描述子在垂直方向上描述魚鱗和鎖鏈圖案，兩者之間的紋理有時會混淆。

表 2 亦指出在水平和垂直方向上的魚鱗和龜背圖案幾乎具有明顯的紋理相似性，然而將 ASM、HOM、ENT 和 DIS 的紋理描述子以雙對角線方向應用於紋理特徵提取時，可以接受魚鱗和龜背圖案之間存在顯著差異。換句話說，在對角線雙方向上的上述四個紋理描述子有助於識別魚鱗和龜背圖案。最後，除非採用 COR 的紋理描述子，否則任何方向上的大多數紋理描述子都不足以將回紋與其他圖案區分開。

表 2 任何兩個吉祥圖案間紋理相似度檢驗結果

圖案	方向	共生紋理特徵						
		A	C ⁽¹⁾	H	E	D	C ⁽²⁾	C ⁽³⁾
魚鱗 vs. 鎖鏈	0°	H ₁	H ₁	H ₁	H ₁	H ₁	H ₁	H ₀
	45°	H ₁	H ₁	H ₁	H ₁	H ₁	H ₀	H ₁
	90°	H ₁	H ₀	H ₁	H ₁	H ₀	H ₀	H ₀
	135°	H ₁	H ₁	H ₁	H ₁	H ₁	H ₀	H ₁
魚鱗 vs. 龜背	0°	H ₁	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀
	45°	H ₁	H ₀	H ₁	H ₁	H ₁	H ₀	H ₀
	90°	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀
	135°	H ₁	H ₀	H ₁	H ₁	H ₁	H ₀	H ₀
魚鱗 vs. 回紋	0°	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₁	H ₁
	45°	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₁	H ₀
	90°	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₁	H ₁
	135°	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₁	H ₀
鎖鏈 vs. 龜背	0°	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀
	45°	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀
	90°	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀
	135°	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀
鎖鏈 vs. 回紋	0°	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₁	H ₀
	45°	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₁	H ₀
	90°	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₁	H ₁
	135°	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₁	H ₀
龜背 vs. 回紋	0°	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₁	H ₀
	45°	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₁	H ₀
	90°	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₁	H ₁
	135°	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀	H ₀

備註: A: Angular Second Moment (ASM); C⁽¹⁾: Contrast (CON); H: Homogeneity (HOM); E: Entropy (ENT); D: Dissimilarity (DIS); C⁽²⁾: Correlation (COR); C⁽³⁾: Cluster tendency (CLU)
 H₀: 接受兩個吉祥圖案間紋理特徵相同的假設
 H₁: 接受兩個吉祥圖案間紋理特徵互不相同的假設

六、結論與建議

本研究拜訪全台北、中、南各地共 52 座寺廟，獲得 453 幅武將門神影像，門神畫作涉及 31 位匠師作品，武將門神甲冑吉祥圖案包括：魚鱗紋、鎖鍊紋、龜背紋、以及回紋。所取得的吉祥圖案影像透過二階二維小波轉換、共生矩陣計算，最終透過紋理描述子對吉祥圖案分析水平、垂直、以及雙對角線方向共生紋理特徵值。所獲得的共生紋理特徵值有效指出不同吉祥圖案在各方向之紋理特徵差異，尤其在雙對角線方向證明上述四種吉祥圖案均具有紋理對稱性。此外，本研究考慮角二次矩、熵、...等七種紋理描述子，各項紋裡描述子本身具有相互影響關係，於本研究中，各項紋裡描述子相互影響關係亦獲得驗證。

透過雙尾 t 檢定(顯著水準 $\alpha:0.05$)檢定四種吉祥圖案間兩兩紋理相似度，發現依據紋裡描述子很容易將魚鱗紋與鎖鍊紋圖案進行區分，但難以區分鎖鍊紋與龜背紋圖案區分開。然而，若以垂直方向之 CON 描述子描述魚鱗和鎖鍊紋，則兩者間之紋理有時易混淆。大多數紋理描述子在雙對角線方向可有效區分魚鱗紋和龜背紋，然而除非採用 COR 紋理描述子，否則任何方向大多數紋理描述子都不足以將回紋與其他圖案區分開。

後續研究將進行不同匠師對於吉祥圖案呈現手法之相似度檢定，以了解所調查匠師畫作風格關係，以驗證匠師間之師徒關係。此外，依據本研究所分析出有助於區分不同吉祥圖案之紋裡描述子，將紋理特徵值代入人工智慧類神經或深度學習網路進行訓練及測試，以電腦視覺方式進行武將甲冑紋路自動識別。

參考文獻

1. 王曉戈，「漳州武將門神年画图式探析」，集美大学学报(哲学社会科学版)，第 14 卷，第 3 期，第 16~22 頁，2011。
2. 李怡瑩，「寺廟中彩繪門神與其甲冑欣賞」，藝術欣賞，第 5 卷，第 3 期，第 15~20 頁，2009。
3. 李奕興，門上好神：臺灣早期門神彩繪.1821-1970，文化部文化資產局，台中，2013。
4. 吳盈君，嘉義縣一般古物配天宮蔡草如門神彩繪維護計畫成果報告，國立臺南藝術大學，台南，2016。
5. 洪旭紳，「新竹畫師李金泉及其派下堵頭彩繪研究」，藝術論文集刊，第 20&21 期，第 21~47 頁，2013。
6. 康銘錫，台灣門神圖錄，貓頭鷹出版社，台北，2012。
7. 傅桂霖、陳聰慶、陳素珠，「衛星影像紋理分析再山坡地變異點偵測之應用」，水土保持學報，第 36 卷，第 3 期，第 201~214 頁，2004。
8. 楊濤，「浅析門神画装饰中的寓、形、色」，蘇州大學學報(工科版)，第 29 卷，第 5 期，第 26~28 頁，2009。
9. Arebey, M., Hannan, M.A., Begum, R.A. and H. Basri, "Solid Waste Bin Level Detection Using Gray Level Co-occurrence Matrix Feature Extraction Approach", Journal of Environmental Management, Vol. 104, pp.9~18, 2012.
10. Beura, S., Majhi, B. and R. Dash, "Mammogram Classification Using Two Dimensional Discrete Wavelet Transform and Gray-level Co-occurrence Matrix for Detection of Breast Cancer", Neurocomputing, Vol. 154, pp.1~14, 2015.
11. Cai, Y. and M. Siegel, "Texture Characterization of the Visual Appearance of Paintings", in: Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Vol. 1, pp.39 ~ 42, 2002.
12. Cetinic, E. and S. Grgic, "Automated Painter Recognition Based on Image Feature Extraction", in: Proceedings of International Symposium on Electronics in Marine (ELMAR-2013), pp. 19~22, 2013.
13. Ghahfarrokhi, S.S. and H. Khodadadi,

- “Human Brain Tumor Diagnosis Using the Combination of the Complexity Measures and Texture Features Through Magnetic Resonance Image”, *Biomedical Signal Processing and Control*, Vol. 61, 102025, 2020.
14. Gultepe, E., Conturo, T.E. and M. Makrehchi, “Predicting and Grouping Digitized Paintings By Style Using Unsupervised Feature Learning”, *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 31, pp.13~23, 2018.
 15. Jafarpour, S., Polatkan, G., Brevdo, E., Hughes, S., Brasoveanu, A. and I. Daubechies, “Stylistic Analysis of Paintings Using Wavelets and Machine Learning”, in: *Proceedings of the European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, pp.1220 ~1224, 2009.
 16. Ji, Y., Sun, L., Li, Y. and D. Ye, “Detection of Bruised Potatoes Using Hyperspectral Imaging Technique Based on Discrete Wavelet Transform”, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 103, 103054, 2019.
 17. Johnson Jr., C.R., Hendriks, E., Bereznoy, I.J., Brevdo, E., Hughes, S.M., Daubechies, I., Li, J., Postma, E. and J.Z. Wang, “Processing for Artist Identification: Computerized Analysis of Vincent Van Gogh’s Painting Brushstrokes”, *IEEE Signal Processing Magazine (Special Section Signal Processing in Visual Cultural Heritage)*, Vol. 25, pp.37~48, 2008.
 18. Keshvari, S. and A. Chalechale, “Classification of Iranian Paintings Using Texture Analysis”, in: *Proceedings of 2016 6th International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE)*, pp.136~140, 2016.
 19. Lee, S.-G. and E.-Y. Cha, “Style Classification and Visualization of Art Painting’s Genre Using Self-Organizing Maps”, *Human-centric Computing and Information Sciences*, Vol. 6, Article no.7, 2016.
 20. Lillesand, T.M., Kiefer, R.W. and J.W. Chipman, *Remote Sensing and Image Interpretation*, 6th ed., John Wiley & Sons, Inc., NJ, USA, 2008.
 21. Lu, G., Gao, Z., Qin, D., Zhao, X. and M. Liu, “Content-based Identifying and Classifying Traditional Chinese Painting Images”, in: *Proceedings of 2008 Congress on Image and Signal Processing*, pp.570~574, 2008.
 22. Lu, W., Gao, X., Tao, D. and X. Li, “A Wavelet-based Image Quality Assessment Method”, *International Journal of Wavelets Multiresolution and Information Processing*, Vol. 6, No. 4, pp.541~551, 2008.
 23. Lyu, S., Rockmore, D. and H. Farid, “A Digital Technique for Art Authentication”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 101, No. 49, pp.17006~17010, 2004.
 24. Narag, M.J.G. and M.N. Soriano, “Identifying the Painter Using Texture Features and Machine Learning Algorithms”, in: *Proceedings of the 3rd International Conference on Cryptography, Security and Privacy*, pp.201~205, 2019.
 25. O’Byrne, M., Ghosh, B., Pakrashi, V. and F. Schoefs, “Texture Analysis Based Detection and Classification of Surface Features on Ageing Infrastructure Elements”, in: *Proceedings of Bridge and Concrete Research in Ireland Conference*, pp.223~228, 2012.
 26. Sudarshan, V.K., Ng, E.Y.K., Acharya, U.R., Chou, S.M., Tan, R.S. and D.N. Ghista, “Computer-aided Diagnosis of Myocardial

- Infarction Using Ultrasound Images with DWT, GLCM and HOS Methods: A Comparative Study”, *Computers in Biology and Medicine*, Vol. 62, pp.86~93, 2015.
27. Yang, M.-D., Su, T.-C., Pan, N.-F. and P. Liu, “Feature Extraction of Sewer Pipe Defects Using Wavelet Transform and Co-occurrence Matrix”, *International Journal of Wavelets Multiresolution and Information Processing*, Vol. 9, No. 2, pp.211~225, 2011.
28. Yang, D.-W. and H. Wu, “Three-dimensional Temperature Uniformity Assessment Based on Gray Level Co-occurrence Matrix”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 108, pp.689~696, 2016.
29. Zujovic, J., Gandy, L., Friedman, S., Pardo, B. and T.N. Pappas, “Classifying Paintings By Artistic Genre: An Analysis of Features & Classifiers”, in: *Proceedings of IEEE International Workshop on Multimedia Signal Processing*, pp.1~5, 2009.

萃思理論應用於軍事觀光景點開發方案規劃-以金門九宮坑道為例

高志瀚¹ 廖程達² 許忠信³

¹國立金門大學土木與工程管理學系副教授

²中建海峽建設發展有限公司預算員

³金門國家公園管理處烈嶼區管理站主任

摘要

現行觀光園區規劃作業常基於規劃人員主觀性進行發想，當進行多目標需求之觀光園區開發規劃作業流程時，需要基於客觀且系統性方法論發展構想方案，方能促進方案可行性。故本文作者以系統性創意思考作業程序，應用於須達成多目標之軍事觀光園區開發規劃作業流程。本文以 TRIZ 等方法，重新審視軍事遺址再利用的基本功能，以金門九宮坑道為案例，對九宮坑道園區規劃提出課題與對策。獲得轉換空間屬性、整合周邊資源，區域規劃、增強互動性的旅遊方式、強調休憩空間重要性、增加餐飲區的機能與體驗觀光等規劃內容。並以 LIDAR 掃描隧道空間與盤點既有觀光資源，取得形成具體執行方案所需資料，以擬定園區分五個功能定位分區方案及其設計重點。藉此規劃模式，開發金門軍事觀光業新型態，延伸金門軍事觀光資源再利用的實質意義，形成軍事園區開發規劃階段之最適規劃策略。

關鍵字：萃思理論、衝突矩陣、開發規劃、軍事園區、金門九宮坑道

Applied TRIZ for Development Planning of Military Park Project

Kao Chih-Han¹ Liao Cheng-Da² Hsu Chung-Hsin³

¹Associate Professor, Department of Civil Engineering and Engineering Management, National Quemoy University

²Cost Engineer, CSCEC Strait Construction and Development Company

³Director, Lieyu Visitor Center of Kinmen National Park

ABSTRACT

The all objectives of planning landscape development program need to be satisfied simultaneously. However, the planning process of landscape development is subjective, which requires an objective brainstorming methodology to propose program in a systematic process. The teoriya resheniya izobreatatelskikh zadatch (TRIZ) theory had been widely applied for brainstorm in many professional fields which need to improve the utility. The study utilizes the TRIZ to extract rule of development planning that has enhanced the performance of planning process.

To demonstrate the new systemic planning process of landscape, this study has utilized the development case of the Jiugong tunnel. The existing military landscape, it has to be preserve its historical significance, spatial text and cultural sightseeing. Moreover, the regional economic must be enhance through the rebuild the value of the landscape too. This study has utilized contradiction matrix to seize the strategy of development planning for the Jiugong tunnel project. Additionally, those strategies can be referred to extra the content of development programs. This study has utilized literature review and case analysis, field investigation and the TRIZ theory. There are five

strategies has been made in this project and whole field divide to five functional areas.

For example, the strategy of development planning has applied to transfer the space attribute, integrate the surrounding relating resources, regional planning. More interactive way of brainstorm work, that has increased importance of the rest space, the planning content conforms to modern life function and leisure sightseeing.

The Quemoy battlefield cultural tourism development planning will be more efficient accord those specific outlines formed that has been extra by TRIZ.

Keywords: military landscape, planning guideline, tourism strategy, TRIZ theory

一、研究背景與目的

現行園區開發規劃構想之作業流程，常由設計師基於業主之基本需求，以召開說明工作會、問卷調查等方法所發展草案，經開會審議後定案。其基本規劃內容依規劃者個人創意構想草案，因未對方案資訊進行系統性分析評估，規劃方案內容常局限於個人認知。(廖程達，2019)

現行以腦力激盪作業流程分為兩個階段：

- (一)、環境調查與分析；
- (二)、發展課題對策構想，發展設計與定位。

於第二個階段發展課題對策與構想時，以召開專家審查會議，檢視規劃草案並提出對策，而所得之修正方案仍依賴審查者專業背景，補足規劃者其專業領域限制，因此同樣限於審查參與者之既有相關專業知識範圍。如以客觀系統性腦力激盪方法，輔助發展與評估前述園區開發規劃草案之設計構想，將使規劃工作能更具創意與執行可行性。

基於現行規劃作業流程需要系統性工具協助對規劃草案進行評估與調整，曾引用 SWOT 分析法(袁牧，2007)，AHP 層級分析法(許娟，2011)做為景觀園區規畫構想的研究方法。另 Vinodh, Kamala and Jayakrishna(2014)亦曾以品質展開與 AHP 結合 TAIZ 進行產品創新開發。

萃思理論 (Teoriya Resheniya Izobreatatelskikh Zadatch, TRIZ)將一般創意思考問題內容，轉換為 TRIZ 格式陳述，將問題已標準格式表達，搭配矛盾矩陣工具，能找出研究標的問題，尋求創新與改善的方法(陳棟燦、張柏毅，2013)。

其中 G.S.Altshuller 將 39 個通用工程參數，與 40 條發明原理建立對應關係，整理成 39×39 之矛盾矩陣表。使用者依系統中產生矛盾的兩個通用工程參數，從矩陣表中獲得化解矛盾對應之發明原理，應用該原理來解決問題。該理論已應用於工程規劃設計與工業工程等領域，(陳棟燦、何佩舉，2015)、(Ó Catháin and Mann, 2009)。

本文將運用 TRIZ 系統創新工具中的矛盾矩陣與 40 發明原則，應用於發展與評估園區開發規畫方案，期能得到最適化開發規畫方案。

本文以金門軍事觀光園區開發規劃為案例，利用 TRIZ 理論對金門九宮坑道園區開發，訂定規劃之基本要綱，獲得創新研究課題與對策，以供未來相關單位進行類似案例的發展開發方案作業之參考

二、研究範圍及步驟

本文基於前述研究目的，針對九宮坑道軍事園區開發規劃為主要研究對象，要想整合周遭資源，打造創新性的旅遊方式，增強遊客其旅遊體驗性、互動性與滯留性。

作者調查九宮坑道軍事園區周遭資源，並將其若干規劃議題依 TRIZ 理論的發明原則，創意化為規劃策略，以作為重塑九宮坑道軍事園區創新發明規劃，印證 TRIZ 理論可為戰地空間規劃設計進行指引與評估。

2-1 案例簡介

九宮坑道位於金門國家公園之烈嶼，原為介於九宮與羅厝漁港之間花崗岬角礁岩。於民國五十二年，由海軍選定開鑿坑道放置登陸

小艇。以人工開鑿花崗岩「雙丁」字型建構，計有四處出海口，五個副坑道作為聯絡碼頭（副坑道長約 190 公尺），總長度為 790 公尺，高約 7 公尺，最寬處 15 公尺，可容納 52 艘小艇停泊，是金門最大的小艇地下坑道。共可容納 52 艘登陸小艇的停泊，具備有航道出海口、迴船池、地下運補碼頭、聯外出口的副坑道、停車場、銜接道路網等，是戰時重要的地下運補碼頭。（高志瀚、劉華嶽，2018）



圖 3 九宮坑道主坑道出海口（高志瀚,劉華嶽, 2018)



圖 1 九宮坑道俯瞰圖(高志瀚,劉華嶽, 2018)



圖 2 九宮坑道金三碼頭段（高志瀚,劉華嶽, 2018)

2-2 研究步驟

本文進行研究步驟如下所述：

(一) 法規檢討與案例分析

收集金門地區軍事園區開發相關政策與法規，以及國內外軍事營區活化再利用的成功案例。基於此衍生軍事坑道規劃所面臨潛在的挑戰與機遇，整理出對坑道規劃設計之相關議題。

(二) 以 TRIZ 衝突矩陣發展規劃策略

本文首先將前述議題轉化成 TRIZ 標準陳述句型，進而將改善點檢視衝突矩陣獲得對應之發明原則。

(三) 田野調查法

針對研究範圍進行實地調查，調查九宮坑道範圍週邊環境意象、交通系統、人文與自然環境、與空間使用現況等，加以整理記錄。並以光學雷達(LIDAR)掃描隧道結合衛星攝影圖資取得未知空間精確資料。本階段蒐集資料，將基於發明原則，投入發展明確規劃方案。

(四) 發展與評估規畫方案

本文以前述萃取而得之發明原則，與規劃者逐項對議題提示發明原則，檢視田野調查資料，發展更明確規劃方案，如空間區分、動線規劃與服務設施等。並將規劃方案再以萃取所得策略及發明原則進行檢視其是否有衝突點。

三、研究內容

3-1 法規檢討與案例分析

作者為歸納九宮坑道開發規劃，蒐集金門地區軍事園區開發相關政策與法規。如國家公園法、金門國家公園保護利用管制原則，與金門國家公園第二次通盤檢討計畫書、國家公園事業計畫、金門地區軍事設施活化利用暨經營管理總體先期計畫(江柏煒, 2012)等。以瞭解本開發案有關土地利用與環境保護相關限制，及九宮坑道於全金門縣之軍事觀光資源整體規劃定位。

另有國內外軍事營區活化再利用的成功案例，如紐約無畏號博物館、水牛城海軍公園、登陸艇博物館、南斯拉夫潛艇坑道(二戰德國興建)、克羅埃西亞潛艇坑道(二戰德國興建)、二戰德國地下坑道、蘇聯潛艇坑道(光影秀)，與台南安平德陽艦博物館等。基於此衍生軍事坑道規劃所面臨潛在的挑戰與機遇，整理出對坑道規劃設計之相關議題。

針對開發規劃範圍進行實地調查，調查九宮坑道範圍週邊環境意象、交通系統(停車與自行車旅遊交通系統)、人文(人口、經濟概況、週邊觀光資源)，與自然環境(潮位調查、落石觀察、地質地形、氣候、生態)與空間使用現況等，加以整理記錄。本階段蒐集資料，將基於前述經 TRIZ 萃取而得之發明原則，投入發展明確規劃方案。

3-2 TRIZ 發展規劃與策略

本文以下列格式將實際問題轉化為 TRIZ 問題的模式進行論述。

IF _____, THEN _____, BUT _____。
如果我們採用某種手段(M)，則參數(A)可以改善，但是參數(B)會惡化。

表 1 TRIZ 問題模式

IF	某種手段M
THEN	可改善參數A
BUT	會惡化參數B

議題一

議題：如何使戰地觀光空間文化更好的保存，不破壞原軍事環境前提下提升遊憩水準，更好的推廣戰地觀光文化。

轉化為 TRIZ 問題：如戰地空間能得到科技的規劃；則能更好的推廣戰地文化；但如沒有科技的規劃，會破壞戰地空間的環境，影響戰地空間的文化價值。

參照矛盾矩陣，可得到改善參數為(27)可靠度，惡化參數為(30)外部對物體的傷害。

表 2 議題一衝突矩陣

	惡化參數為(30)外部對物體的傷害
改善參數為(27)可靠度	27 35 2 40

40 發明原則分別對應

表 3 議題一對應發明原則

27	可拋棄的
35	參數改變/屬性轉換
2	分離，抽出
40	複合材料

經檢視 40 個發明原理與實例，採用原則(35)參數改變/屬性轉換；與(2)分離，抽出。而原則(27)可拋棄的；(40)複合材料因屬工業製造原理參數，無法納入本議題策略分析原則。進而尋得發明原理應用到議題，得策略一。

策略一：科技的空間規劃有利於戰地空間從原本單一的功能抽出，轉化為觀光空間，遊玩空間，空間屬性的轉換能更好的提升原有空間的活用。

議題二

議題：觀光景點以單一的形式進行運行行銷，沒有其他觀光機能，使得服務功能單一。

轉化為 TRIZ 問題格式：如果整合觀光景點周邊資源為一體；則形成一個多樣性觀光旅遊區，增加當地的經濟發展；但會影響在地居民原有生活型態。

參照矛盾矩陣，可得到改善參數為(39)生產力，惡化參數為(13)物體穩定性。

表 4 議題二衝突矩陣

惡化參數	(13) 物體穩定性
改善參數為(39)生產力	35, 3, 22, 39

40 發明原則分別對應

表 5 議題二對應發明原則

35	參數改變/屬性轉換
3	區域性質/局部品質
22	將有害變成有益
39	惰性的環境

檢視 40 個發明原理與實例，採用原則(35)參數改變/屬性轉換；與(3)區域性質/局部品質。因原則(22)將有害轉變成有益；(39)惰性的環境屬工業製造原理參數，故不考慮納入策略分析原則。應用到議題上，得到策略二

策略二：改變觀光景點個別行銷模式，結合周遭資源形成一個區域性、綜合性的觀光景區，能提供多元觀光旅遊需求，滿足不同年齡層的遊客需求。

議題三

議題：九宮規劃區目前以九宮坑道為主，如開發尚未開發之次坑道金山碼頭坑道區位，如何提升現有空間利用價值。

轉化為 TRIZ 問題格式：如果增加互動性強的觀光方式；則遊客觀光停留時間變長，觀光選擇性增多；但是危險性會增加。

參照矛盾矩陣表，可得到改善參數為(15)移動物體的耐久度，惡化參數為(27)可靠度。

表 6 議題三衝突矩陣

	惡化參數為(27)可靠度
改善參數為(15)移動物體的耐久度	11, 2, 13

40 發明原則分別對應

表 7 議題三對應發明原則

11	事先的預防
2	分離，抽出
13	反向操作

檢視 40 個發明原理與實例，採用原則(2)分離，抽出；(11)預先補強/預防。至於原則(13)反向操作屬於工業製造原理參數，故不考慮納入策略分析原則。將尋得發明原理應用到實際的問題上，探討每個原理的應用與實施得到策略三

策略三：觀光方式設計，做預防措施如增設工作人員保護，遊玩項目安全措施，不再開發設計與主體結構有直接接觸的觀光遊玩方式，多設計互動性多的觀光遊玩方式，增加遊客的停留時間。

議題四

議題：四維五營區與四維七營區為閒置的軍事區域，兩個景區均具備充分空間和景色，如何將閒置空間再活化，提升閒置空間的使用率。

轉化為 TRIZ 問題：如兩個營區活化為不同的觀光商業功能；則會延長遊客停留時間，促進地區的消費；但是冬季季節氣候影響，將有季節性的效益差異。

參照矛盾矩陣表，可得到改善參數為(15)移動物體的耐久度，惡化參數為(25)時間的浪費

表 8 議題四衝突矩陣

惡化參數	(25) 時間的浪費
改善參數為 (15) 移動物體的耐久度	20, 10, 28, 18

40 發明原則分別對應

表 9 議題四對應發明原則

20	連續的有用功能
10	預先作用
28	取代機械功能/使用另外感知
18	機械振動

檢視 40 個發明原理與實例獲得發明原理的詳解，採用原則(20)連續的有用功能；(10)預先作用；(28)取代機械功能/使用另外感知。原則(18)機械振動屬於工業製作原理參數，不納入策略分析原則。應用到實際的問題，得到策略四。

策略四：提升兩個區域商業服務重要性，活化後商業功能可分夏季與冬季模式安排活動，夏季增加營業時間與活動內容，冬季可做預訂形式的經營方式。變換模式的經營理念。

議題五

議題：羅厝碼頭作為一個漁用碼頭，如何利用臨近九宮坑道的優勢，創造出經濟的發展。

轉化為 TRIZ 問題：如果羅厝碼頭形成飲食區；則解決遊客飲食問題，也為羅厝村帶來經濟發展；但是遊客的湧入會影響羅厝村原有生活型態。

參照矛盾矩陣表，可得到改善參數為(33)操作使用上的方便性，惡化參數為(23)物質損失

表 10 議題五衝突矩陣

	惡化的參數 (23) 物質的損失
改善的參數 (33) 操作使用上的方便性	28 32 2 24

40 發明原則分別對應

表 11 議題五對應發明原則

28	取代機械功能/使用另外感知
32	改變顏色
2	分離/抽出
24	中間介質

檢視 40 個發明原理與實例，採用原則(28)取代機械功能/使用另外感知；(2)分離/抽出。原則(24)中間介質屬於工業製作參數，不納入策略分析原則。應用到實際問題得到策略五。

策略五：羅厝碼頭可將碼頭功能轉變為以餐飲為主功能的碼頭設施，或者將碼頭功能與餐飲功能分離，在兩個不同的區域發揮不同的服務功能。

3-3 田野調查

本文因九宮坑道年代久遠，又新建之初屬軍事機密工程，無法取得相關空間圖說，又因交通動線受海水阻隔，工作團隊為取得本規劃案發展相關空間資訊，先以 LIDAR 掃描隧道，結合衛星攝影圖資，基於以現地明顯地物為基準點，製作隧道未知空間精確資料。規畫者使用雷達掃描圖初步研判，主次坑道交接處相對位置，作為實地探勘調查之準備。進一步將此資料如 3-4 節所述，應用於 3-2 節產出之規畫策略，擬定 5 各分區之設計重點。



圖 4 九宮坑道坑道雷達掃描平面圖(高志瀚, 劉華嶽, 2018)

進而基於九宮坑道開發範圍為基礎，進行自然資源、人文資源、交通資源調查，以作為後續發展規劃方案所需基本資料。

3-4 發展規劃方案

基於本文前述章節之調查與分析評估與 TRIZ 創新發明原則所提出的問題二、三和策略二、三，對九宮坑道金三碼頭景點開發開發初步規劃：

- (1) 金三碼頭次坑道其內部之空間應強調民國 50 年代海軍碼頭之風格定調，與金門地區已開放之陸軍營區作市場區隔。採實用堅固、造型簡潔粗獷之設計原則。
- (2) 應與九宮主坑道展示強調自然景觀為主題作差異，擬以充實展示內容策略發展。將當時之軍事活動與歷史氛圍作為表達重點，如搭乘登陸艇遠離家鄉的年輕軍人為達成使命，在陌生的一片荒蕪岩礁土地奉獻血汗甚至生命之歷程；在一切保密，與世隔絕氛圍中積極備戰時對於將來未知。可將參與當時坑道構工之當事人訪談以影音圖片、坑道構工鑽炸或船艦運動之聲影等方式納入展示內容，以增加故事性吸引遊客駐足體會。
- (3) 除了修建金三碼頭坑道內的步道及增加聲光設備媒體外，在碼頭開設露天步道，並讓整條坑內步道能連結至其它主次坑道其他出口，和四維 5 營、7 營區，不僅能欣賞天然岩石海景，也可造訪陸軍軍事觀光區。經由交錯互通之動線，使遊客可根據其時間安排與體力限制作彈性選擇，其讓觀光動線更加多元化。
- (4) 在遊玩方式上，可增加海上遊玩項目(摩托艇，橡皮艇等)，增加金三碼頭的遊玩性和觀光多樣性。也可吸引年輕人到此觀光，讓九宮坑道規劃區吸引不同年齡層和不同目的性的觀光者。

1. 休憩空間開發區

九宮坑道園區目前位於遊客中心出口側及四維七營區已設置商店空間，目前金門國家公園管理處以出租委外經營方式。基於本文提出的議題四和策略四，對休憩空間開發

區開發初步規劃：

- (1) 開發區域兩個賣店共同功能主要為販售園區主題文創商品或觀海景觀餐飲內容，增加觀光營運收入。建議於不同賣店間可以不同主題區隔，如遊客中心側賣店因接近坑道區可採海軍與岩石坑道相關商品規劃。四維七營區因其海景遼闊又接近自行車路線，賣店採自行車旅遊與海洋相關商品。
- (2) 因賣店於園區整體串聯長距離動線上，增加提供遊客休憩空間、安全解說與協助資訊功能，營造友善旅遊環境，可增加旅客在此停留的時間和人數。
- (3) 規劃區設置民宿，四維七營區將可於夜晚經營夜景餐飲，將與民宿相輔相成。對羅厝漁港當地居民而言，也能將羅厝漁港餐廳定位為外送四維七營區賣店之中央廚房，於不造成園區內污染，及增加餐飲服務間取得兼顧策略，能吸引更多商店來此經營，使規劃觀光區域人潮更加熱絡。

4. 民宿開發區域

基於本研究前述章節之調查與分析評估與 TRIZ 創新發明原則所提出的問題四和策略四，對民宿開發區域開發初步規劃：

當所有觀光系統建置及整合完工後，為使遊客停留烈嶼，以增加民宿開發區域，民宿住宿區建議以四維五營區或現管理站辦公室處規劃，讓旅客能有更長的遊玩時間，並且也能增加夜間旅遊的行程與方式。工作團隊建議，基於夜間旅遊考量，可參考鼓浪嶼步行夜遊模式，於九宮碼頭至四維七營區間海濱步道與四維五營區至管理站間步道，加強夜間光雕營造，使投宿遊客可於前述空間以步行或自行車型態選項，具更多自主性規劃夜間活動，體會海島寧靜之美。在冬季可使用預定的方式，減少冬季的成本投入。

羅厝碼頭開發區

基於本文前述章節之調查與分析評估與 TRIZ 創新發明原則所提出的問題五和策略五，對羅厝碼頭開發區開發初步規劃：

- (1) 羅厝碼頭開發區應以飲食為主，商業為輔的開發模式開發，如開放民宿開發，用於解決旅客的餐飲問題。可參考墾丁後壁湖碼頭開發，以海鮮為主餐飲商店聚集於一個區域內，形成餐飲商圈。
- (2) 羅厝碼頭保留原本的碼頭功能，可提供海釣、出海觀光、浮潛的動態旅遊方式，增加碼頭的多樣性功能，帶動羅厝商業發展。

本文以「TRIZ 矛盾矩陣」創新發明，解析參考軍事空間資源再利用發展案例，與盤整九宮坑道之軍事觀光資源後，進而園區開發規劃研究，達成軍事資源再利用的效能提升，與帶動金門地區觀光轉型目的。本文通過以重新規劃九宮坑道園區為操作標的，且本案例規畫方案經過國家公園召開專家審查會議，審議通過該方案為可行，且預期可達規劃的目標。本文經前述研究工作具體成果如下：

利用 TRIZ 理論可有效的解決規劃時所得課題，為提出對策提供了有利的依據。可證明 TRIZ 理論不僅應用於產品的創新與研發，亦可運用於規劃與設計。

四、結論

本文以九宮坑道及周邊環境資源為例，形成系統性腦力激盪規劃程序，規劃軍事資源觀光園區，包涵多元化觀光資源，既兼顧歷史文化，經濟效益與資源環保等目標，有效的使用周遭資源，是產業整體發展，在原有的觀光基礎上提供動靜結合的觀光模式，為軍事觀光資源提供可行性規範方案。

九宮坑道園區以萃思理論，為規劃工作提供科學系統性的發展基礎。應用案例後獲得九宮坑道園區的整體的規劃方案，將九宮坑道園區分割成場域佈置區、金山碼頭景點開發區、休憩空間開發區、民宿開發區、羅厝碼頭開發區，這五個區域形成服務功能完整園區，提升該金門旅遊服務品質與經濟功能。

表 12 以 TRIZ 發展之開發規劃策略與效益

	使用策略	方案	效益
全區規劃	策略一	將整個區域依功能區分為五個區域，整合九宮坑道的周遭資源，提升整區服務能力。	擴充整合九宮坑道及周遭資源觀光機能
主坑道場域佈置區	策略三	開放水上觀光遊覽模式，並增加 AR、VR 等現代新數位聲光科技，展現新創遊覽體驗方式。	引進新科技提升旅遊服務品質與保存活化歷史場域。
金三碼頭景點開發區	策略二、三	利用濱海優勢，設計水上活動，以海景步道串聯觀光資源。	連接九宮坑道，利運用海景特點，串接海與九宮坑道。有異於傳統觀光模式，開發不同年齡層遊客來源。
休憩空間開發區	策略四	提升遊客中心與既有賣店等休憩空間服務能量，以休憩為主，銷售商品為輔之形式，並擴增夜間服務時段。	滿足遊客購物需求，增加遊客的滯留時間，周邊商品販賣亦造成經濟效益。
民宿開發區域	策略四	設民宿，並建置燈光造景，在夏季和冬季採不同經營模式，冬季以預約開放模式減少成本投入。	民宿將增加滯留九宮坑道旅遊時數，也擴增整個區域服務機能。
羅厝碼頭開發區	策略五	將羅厝碼頭由在地利用模式，轉型設置旅客餐飲區。	餐飲區設立提供遊客飲食服務，改變經營方式，也發展當地經濟。

參考文獻

1. Catháin, C. Ó. and Mann, D., "Construction Innovation Using TRIZ", Global Innovation in Construction Conference, pp.296~306, 2009.
2. Kamala, S. V. and Jayakrishna, K.,

- “Integration of ECQFD, TRIZ, and AHP for innovative and sustainable product development”, Applied Mathematical Modelling, Vol. 38, Issues 11-12, pp. 2758-2770, 2014.
3. 江柏煒, 金門軍事主題園區計畫先期規劃。金門國家公園管理處, 金門, 2012。
 4. 袁牧、張曉光、楊明, SWOT 分析在城市戰略規劃中的應用和創新, 城市規劃, Issue 04, 第 53~58 頁, 2007。
 5. 高志瀚、劉華嶽, 金三碼頭規劃開發可行性評估案期末報告書, 金門國家公園管理處, 金門, 2018 年。
 6. 許娟、賀鵬飛, 層次分析法在城市街道景觀設計中的應用, 規劃師, 2011。
 7. 張月華, 整合 QFD 與 TRIZ 於監工配備包創新設計, 中華大學營建管理學系碩士論文, 2013 年。
 8. 陳棟燦、張柏毅, 運用 VE 及 TRIZ 方法論在交通工程專案之研究, 價值管理, 第十七期, 第 1~15 頁。2011。
 9. 陳棟燦、何佩舉, 結合價值工程與 TRIZ 於浮動碼頭之研究第, 第 45~54 頁, 2015。
 10. 曾協淳, 應用創新構思問題解決法 (TRIZ) 降低五階段 QFD 管理之衝突矛盾—以筆記型電腦主機板開發為例。臺北科技大學管理學院工業工程與管理 EMBA 專班學位論文。2009。
 11. 廖承達, 運用 TRIZ 理論規劃軍事觀光資源之研究, 國立金門大學土木與工程管理學系碩士論文, 2019 年。
 12. 鄭景鴻, 應用創新構思問題解決法 (TRIZ) 降低研發專案管理之衝突矛盾—以智慧型手機研發專案為例, 臺北科技大學管理學院工業工程與管理 EMBA 專班碩士論文, 2008 年。

施工架繫牆桿(壁連座)之拉伸試驗研究

陳業燊¹ 王裕仁²

¹國立高雄科技大學土木工程系土木工程與防災科技在職專班碩士生

²國立高雄科技大學土木工程系副教授兼副系主任

摘要

營造工地構築過程中在，假設工程必須使用到「施工架」作為施工人員之作業平台之一；因此施工架除了結構各部件強度需符合法令規範安全強度要求外，亦須確保維持施工架整體的穩定性作為工作者施工作業最大的強力後盾。要維持施工架本體直立性穩定而不傾倒崩塌，須以制式(標準式)之繫牆桿(壁連座)與建築物繫結固定以維持施工架穩定。

但，常因國內相關工程施工介面未強制整合要求或建築物造型較特殊及老舊建築修繕，造成制式(標準式)之繫牆桿(壁連座)設置施作預埋上無法有效落實或是設置困難，致使施工單位實務現況上常以三號鋼筋、四號鋼筋或其他型式之繫牆桿(壁連座)桿件取代制式繫牆桿(壁連座)，因此當繫牆桿(壁連座)設置一旦失效，施工架即可能發生傾倒之意外事故。

因此，為能有效掌握施工架與結構物間繫牆桿(壁連座)強度之性能。本研究針對繫牆桿(壁連座)，採用試體分別為預埋式及後裝式，預埋式拉拔試體有：#3 與 #4 竹節鋼筋(埋入方式分別為直埋式及彎折式；纏繞方式分別為纏繞 1 圈、纏繞 1 圈後凹彎且繫固及纏繞 2 圈)及制式(標準式)設置危害，藉由本研究模擬現場拉拔試驗數據分析，判斷繫牆桿(壁連座)之實際測試結果在不同條件下承载力之分佈，並量測拉拔前變形量與拉拔後變形量之距離，探討拉拔強度與變形量之關聯性。來進行分析後提供施工單位在施作使用非制式(標準式)之繫牆桿(壁連座)桿件設置時參考，並有效評估施工架之安全性以及可發揮最大性能之設置方式，省思其承载力數值與需符合相關法令規範的實際差距。

關鍵字：施工架、繫牆桿(壁連座)、拉拔試驗

Tensile Test Research on Construction Frame Tie Wall Rod (Wall Connecting Seat)

Chen Ye-Shan¹ Wang Yu-Ren²

¹ Master Student, M.A. program, Department of Science and Technology, National Kaohsiung University

² Associate Professor, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

During the construction of the construction site, it is assumed that the "construction frame" must be used as one of the construction personnel's work platforms; therefore, the construction frame must not only meet the strength requirements of laws and regulations, but also ensure that the overall construction frame is maintained. Stability is the strongest backing for workers' construction work. To maintain the erection and stability of the construction frame body without tipping and collapsing, the standard tie wall rod (wall connecting seat) must be tied to the building to maintain the stability of the construction frame.

However, often due to the lack of mandatory integration requirements for the construction interface of relevant domestic projects, or the special shape of the building and the renovation of the old building, the installation of the standard (standard) tie wall rod (wall connecting seat) cannot be effectively implemented or The installation is difficult, so that the construction units often use No. 3 steel bars, No. 4 steel bars or other types of wall tie rods (wall tie seat) to replace the standard wall tie rods (wall tie seat) in the actual situation, so it is used as a wall tie rod (wall tie seat) Once the setting fails, accidents of dumping of the construction frame may occur.

Therefore, in order to be able to effectively grasp the performance of the strength of the wall rod (wall connecting seat) between the construction frame and the structure. This research is aimed at tie wall poles (wall connecting seats), and the test bodies are pre-embedded and post-installed. The pre-embedded drawing specimens are: #3 and #4 bamboo joint steel bars (the embedding methods are direct-buried and post-installed, respectively). Bending type; winding methods are 1 winding, 1 winding and then concave bending and securing and winding 2 windings) and standard (standard) setting hazards. Based on the analysis of the simulation field pull test data in this study, determine the tie wall rod The actual test results of (wall connecting seat) distribution of bearing capacity under different conditions, and measure the distance between the amount of deformation before drawing and the amount of deformation after drawing, and explore the relationship between the drawing strength and the amount of deformation. After analyzing, provide the construction unit with reference when installing non-standard (standard) tie wall rods (wall connecting seat) rods, and effectively evaluate the safety of the construction frame and the setting method that can exert the maximum performance, and think about it. The actual gap between its carrying capacity value and the need to comply with relevant laws and regulations.

一、前言

營造業在古往今來的歷史過程中皆屬於較高風險之作業，在以往人們居住建築物只在乎其穩固且能遮風擋雨即可，一路進步至今已不再滿足現在人們只在乎其柱樑牆這樣的基本單調配置，而開始講究其外觀美感大廳挑高等多樣性的變化；台灣本屬地稀人稠，人們居住的土地本就稀少，在土地無法增加的情況下只能往上發展。依據勞動部職業安全衛生屬重大職災統計中(勞動部職業安全衛生署，2020)，營造業職災排行榜一直在全產業名列前茅，這也就持續造就營造業職災仍舊比一般行業來的高的主要原因在其細分職災發生類型又以墜落發生比例最為大宗，其中施工架占職災媒介物最重要的原因之一(勞動部職業安全衛生署，2020)。實際上，國內施工架的相關要求法規以「營造安全衛生設施標準」，就有明確的規定(勞動部職業安全衛生署，2021)但，於現況中主要仍會發生

職業災害的情事上，在於事業單位在施工程期間施工架組配或拆除的執行工序及管理的能力未能依據相關步驟而造成職業災害發生頻率仍無法下降。歷年來施工架倒崩塌案例及力學分析的調查結果，造成施工架倒崩塌主要因素，大致可歸咎於下列幾項：

1. 施工架組配作業區地面土質表層軟弱，未適時鋪設或補強足夠強度之墊板。
2. 未使用可調基腳座板，造成整體施工架載重傳達不均。
3. 使用非施工架構件之材料或強度不足。
4. 施工架各構件未確實搭設及穩固。
5. 施工架未確實與建築物妥實的繫結固定。
6. 施工架搭設未確實由專任工程人員或相關執業技師依結構力學原理妥為設計致使強度不足。(依民國 110 年 01 月 07 號公布新的營造安全衛生設施標準要求高度在 7 公尺以上，須由專任工程人員或相關執業技師依結構力學原理妥為設計

致使強度不足。)(勞動部職業安全衛生署，2021)

二、研究方法

由於繫牆桿(壁連座)是使施工架穩定的重要組成部分，在國內發生施工架的倒塌事故中，多起都是因繫牆桿(壁連座)(含三、四號鋼筋)設置的不足，或其被拆除後未做及時的補強所引起(林楨中，2016)。因此，為能有效掌握施工架與結構物間繫牆桿(壁連座)強度之性能，本研究針對繫牆桿(壁連座)(含三、四號鋼筋)設置危害，並針對施工現場模擬情境及所用之施工架相關連結裝置實際進行性能評估及測試，透過實驗的評估測試，確認其強度及功能需求，以其有效提昇整體施工架使用上之安全性及品質。

並藉由本研究模擬現場拉拔試驗數據分析，判斷繫牆桿(壁連座)(含三、四號鋼筋)之實際測試結果在不同條件下承载力之分佈，可提供施工單位在施作使用非制式標準之繫牆桿(壁連座)物件時設置時參考，並有效評估施工架之安全性以及可發揮最大性能之設置方式，省思其承载力數值與需符合相關法令規範的實際差距。

三、文獻回顧

依據勞動部勞動及職業安全衛生研究所，針對目前國內施工架繫結繫牆桿(壁連座)穩定性之缺失響彙如下：

1. 制式繫牆桿(壁連座)設置不當。
2. 未使用制式繫牆桿(壁連座)。
3. 採用竹節鋼筋繫結不確實。
4. 竹節鋼筋纏繞圈數不足。

由於繫牆桿(壁連座)是使施工架穩定的重要組成部分之一，在國內發生施工架的倒塌事故中，多起都是因繫牆桿(壁連座)(含三號、四號鋼筋)的設置不足所致，或其被拆除後未做及時的復原及補強所引起。因此，為能有效掌握施工架與結構物間繫牆桿(壁連座)強度之性能研究，本研究針對繫牆桿(壁連座)(含三號、四號鋼筋)進行實際性能評估及測試(張智奇 2013)，並另外針對拉拔試驗

後所得試體之變形良探討與拉拔強度關聯性。

本研究針對現場施工現場較常使用三號及四號鋼筋、內牙式及制式繫牆桿(壁連座)等物件，並規畫不同強度之混凝土、材質、纏繞圈數及埋入方式之實際拉拔試驗結果，且，本研究拉拔試驗進行量測試體變形量來探討與破壞強度之關聯性，所得數值用以提供施工單位在施作設置時參考，並有效評估施工架之安全性以及可發揮最大性能之設置方式，除可提供業者參考外，亦可提高作業勞工的自我安全意識。

四、研究結果分析與討論

(一) 本研究經拉拔試驗結果可分成鋼筋混凝土與繫牆桿(壁連座)鋼材兩類型破壞態樣，其破壞型態如下列所示

1. 鋼筋混凝土：

- 1.1 第一種可能為混凝土本身結構強度不足，這種情況在於澆置混凝土過程中骨材分配不均或養護不善所致。
- 1.2 第二種可能為拉拔試體在安裝過程中距離鋼筋籠太近。
- 1.3 第三種可能為鋼筋混凝土受力後混凝土表面產生裂縫而造成破壞。

2. 竹節鋼筋：

- 2.1 混凝土抗拉強度大於鋼材降伏強度，本研究預拌混凝土不論 210kgf/cm² (3000PSI)、280kgf/cm² (4000PSI)及 350kgf/cm² (5000PSI)強度下皆有這類破壞形式。
- 2.2 混凝土強度未達預定強度即被拉拔破壞，這種破壞態樣符合 ACI 349 規範說明。

(二) 本研究所設置之試體類型分別為：

1. 預埋式：

- 1.1 #3 竹節鋼筋採取纏繞 1 圈、2 圈及 1 圈後進行凹灣繫固 3 種類型，埋入方式分為直埋式與彎折 90 度(彎折式)兩種。
- 1.2 #4 竹節鋼筋採取纏繞 1 圈、2 圈及 1 圈後進行凹灣繫固 3 種類型，埋入

方式分為直埋式與彎折 90 度(彎折式)兩種。

2. 後裝式：

- 1.1 #3 內牙不銹鋼材質。
- 1.2 #3 內牙碳鋼材質。
- 1.3 #4 內牙不銹鋼材質。
- 1.4 #4 內牙碳鋼材質。

3. 制式(標準式)繫牆桿(壁連座)：為市售碳鋼材質。

本研究所拉拔測試之試體，都採用相同埋入方式、彎折圈數及材質之條件下，每組試驗設計皆製作 3 個同樣試體進行拉拔及變形量測試，最後取其平均值。經現場拉拔試驗結果數值如下列：

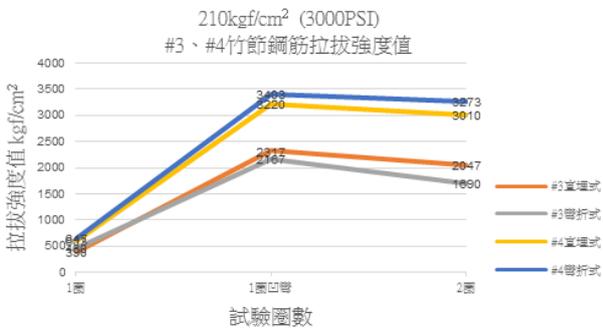


圖 1 混凝土強度 210kgf/cm² (3000PSI)拉拔強度曲線圖

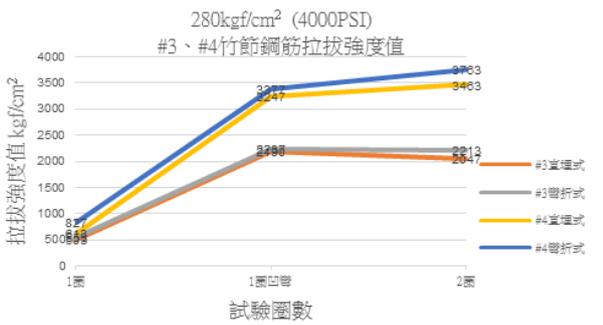


圖 2 混凝土強度 280kgf/cm² (4000PSI)拉拔強度曲線圖

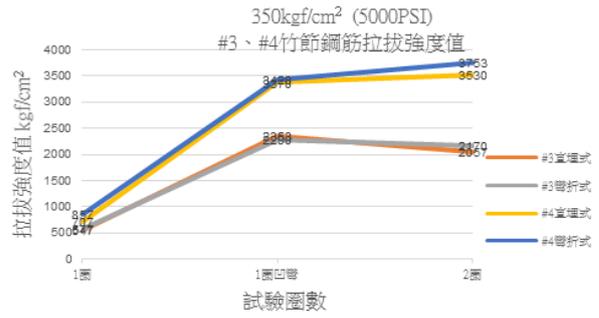


圖 3 混凝土強度 350kgf/cm² (5000PSI)拉拔強度曲線圖

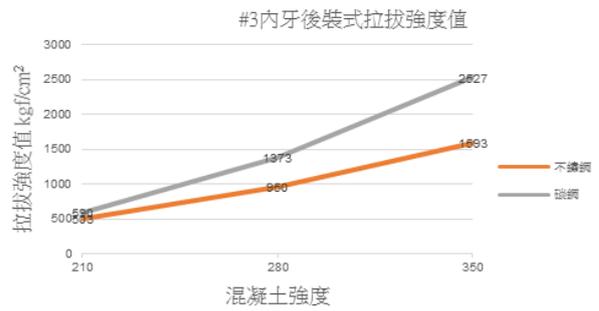


圖 4 #3 內牙後裝式拉拔強度曲線圖

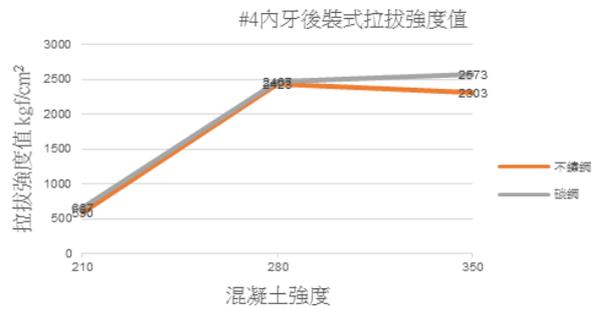


圖 5 #4 內牙後裝式拉拔強度曲線圖

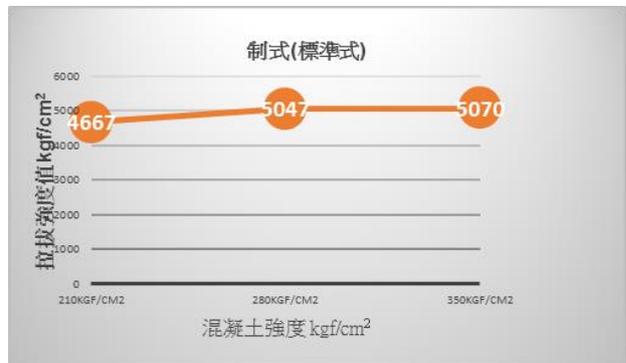


圖 6 制式(標準式)拉拔強度曲線圖

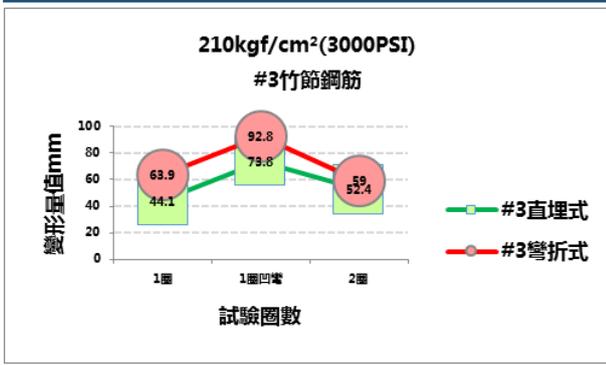


圖 7 混凝土 210kgf/cm² (3000PSI) #3 竹節變形量曲線圖

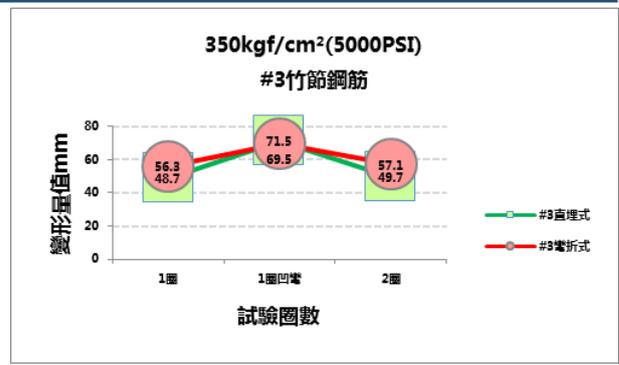


圖 11 混凝土 350kgf/cm² (5000PSI) #3 竹節變形量曲線圖

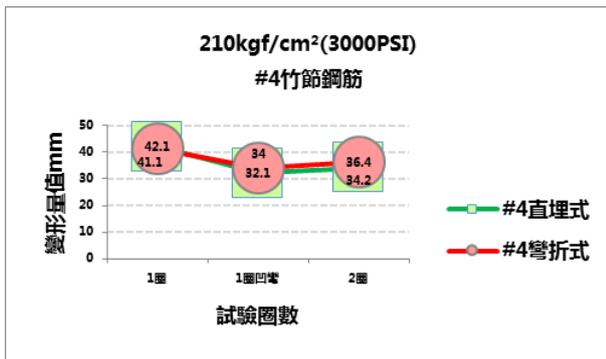


圖 8 混凝土 210kgf/cm² (3000PSI) #4 鋼筋變形量曲線圖

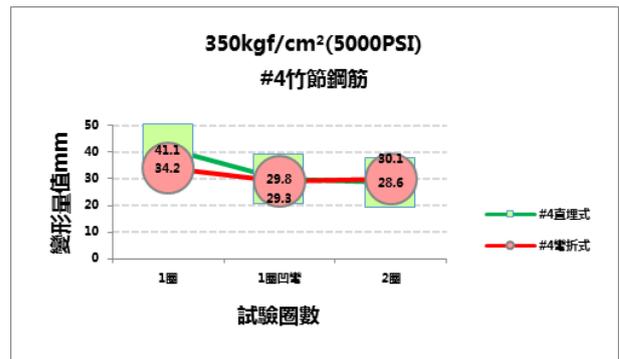


圖 12 混凝土 350kgf/cm² (5000PSI) #4 竹節變形量曲線圖

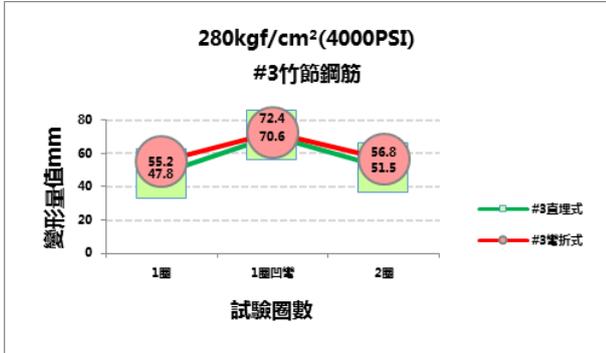


圖 9 混凝土 280kgf/cm² (4000PSI) #3 竹節變形量曲線圖

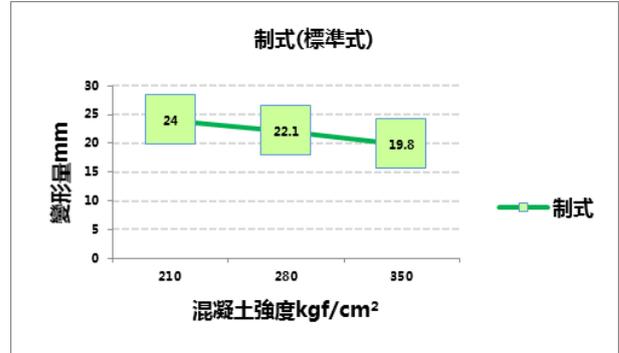


圖 13 制式(標準式)變形量曲線圖

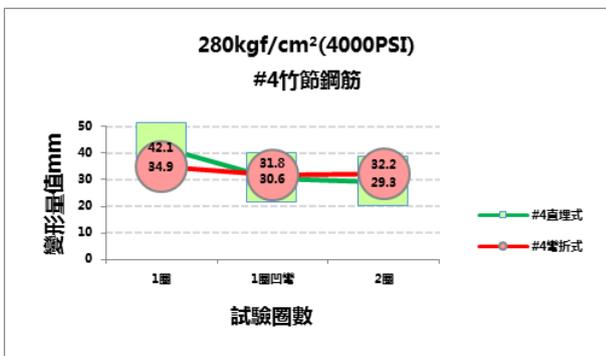


圖 10 混凝土 280kgf/cm² (4000PSI) #4 竹節變形量曲線圖

(三) 本研究經現場拉拔試驗試體所得數值，經整理得到下來論點：

1. 現場拉拔試驗結果，纏繞 1 圈試體 #3 或 #4 竹節鋼筋不論在任何強度混凝土皆不足，在纏繞 2 圈及纏繞 1 圈且有進行凹彎繫固處理拉拔強度有勉強達到指引(張智奇，2013)要求強度，如圖 1、圖 2、圖 3 所示。
2. 在混凝土強度 210kgf/cm² (3000PSI) 拉拔強度試驗下，#3 或 #4 內牙後裝式不論是不銹鋼材質或是碳鋼材質強度完全不足，未達國家標準規定值 1000kgf 強度。

3. 在混凝土強度 280kgf/cm^2 (4000PSI) 拉拔強度試驗下，#3 內牙後裝式不銹鋼材質強度未達規定值，但在碳鋼材質則達到最低強度 1000kgf ，在試驗過程中可能在槌入試體時之力量有關係，故強度仍持保留，但在#4 內牙後裝式不論材質為不銹鋼或是碳鋼皆超過法規規定值，但可靠度有待討論。
4. 在混凝土強度 350kgf/cm^2 (5000PSI) 拉拔強度試驗下，#3 或#4 內牙後裝式不論是不銹鋼材質或是碳鋼材質強度完全達到法規規定值，故此方式可採用內牙後裝式方式，但須考慮其可靠度。
5. 在變形量的試驗數值中，纏繞 1 圈不論是#3 或#4 竹節鋼筋皆被拉伸平均 40mm 以上，明顯有問題。
6. 在#3 竹節鋼筋纏繞 1 圈後進行凹彎繫固其變形量最大，但平均強度也越強，較可能已達混凝土強度但未達到鋼筋降伏強度，故，在持續被拉伸其可靠度大幅降低。

五、結論

1. 以竹節鋼筋進行施工架纏繞時，只纏繞 1 圈強度完全不足最不可靠，但現場最為普遍，職災發生率最高。
2. 在比對制式(標準式)與#3 或#4 竹節鋼筋及#3 或#4 內牙後裝式不銹鋼與碳鋼材質中可明顯發現，制式(標準式)當成營造工地現場施工架繫牆桿(壁連座)其可靠度是最高的。
3. 在變形量的試驗數值中，#3 竹節鋼筋在纏繞 1 圈採直埋式不論是何種強度下的混凝土其變形量被拉長平均約 40mm 即接近纏繞 1 圈有一半會被拉伸，故，不建議採取此方式。
4. 由上述試驗印證，制式(標準式) 210kgf/cm^2 (3000PSI) 時，其抗拉強度可達 4667kgf ，但變形量也隨之達 24mm ，其變形量乃因鋼筋混凝土保護層所致。位移達到 24mm 時即不在變形，而是完全由埋入深度之錨栓卡在鋼筋籠上。
5. 在 350kgf/cm^2 (5000PSI) 時穩定性及變形

量最小，足以可見混凝土強度會影響抗拉強度及變形量。

參考文獻

1. 張智奇、黃奕叡，2013，壁連座或繫牆桿設置指引，技術叢書 IOSH102-T-128，行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所。
2. 林楨中、顏聰，2016，施工架安全性能影響因子及安全設計重點之研究，技術叢書 IOSH104-S310，勞動部勞動及職業安全衛生研究所。
3. 勞動部職業安全衛生署，2020，108 勞動檢查統計年報，勞動部職業安全衛生署。
4. 勞動部職業安全衛生署，2021，營造安全衛生設施標準，修正日期民國 110 年 01 月 06 日。

半導體超純水設備維護工程之成本估價模式

楊涵¹ 王維志²

¹國立陽明交通大學工學院工程技術與管理學程碩士生

²國立陽明交通大學土木系教授

摘要

半導體廠因應產能計畫，各廠皆可能需要擴充設備、擴充廠區或變動機台位置以滿足產能增加需求，而超純水設備皆為其必要擴充之項目，但不同廠區皆有不同施工環境與施工限制的差異，又或工程突發狀況無相應解決對策及相關資料紀錄，以及業主未依據建議更換年限更換耗材而產生額外維護工程等，諸多因素皆會影響超純水耗材設備更換工程之成本，導致施工成本低估或工程延宕之損失。本研究提出半導體超純水設備維護耗材更換工程之估算模式，該模式分為兩大部分，第一部分提出在案前分列出影響工程之幾項重要因子，包括由國際變動指數預測其原物料漲幅、在未知且不允許現場勘查情形下探察其實際施工環境以建立施工機具之單位設備法與施工人力問券篩選法確認臨時施工人員素質。第二部分為概算成本，導入施工機具單位設備法估算工程使用之機具成本及蒐集實際工程案例並應用多因素迴歸模型法，去深究該客戶因未依據建議更換年限更換耗材而影響施工人力次數之對應關係。最後，本研究以 15 件實際案例來測試所提之估價模式，測試結果與傳統估價模式相較，成本誤差率由 5%-17% 降低至 2%-14%，顯示本研究所提模式之可行性。

關鍵字：設備維護、核定經費、成本估算、多因素迴歸模型

Cost Estimation Model of Maintenance Projects for Ultra-pure Water Systems in Semiconductor Facilities

Yang, Hang¹ Wang, Wei-Chih²

¹MS student Degree Program of Engineering Technology and Management

National Yang Ming Chiao Tung University.

²Professor Department of Civil Engineering, National Yang Ming Chiao Tung University.

ABSTRACT

Due to the capacity plan of the semiconductor factory, each factory may need to expand equipment, expand the factory area or change the location of the machine to meet the demand for increased production capacity. Ultra-pure water equipment is the project that needs to be expanded, but different factories have different construction environments and differences in construction restrictions, or there are no corresponding countermeasures and related data records for emergencies in the project, and the owner does not replace the consumables according to the recommended life limit and additional maintenance works. This study proposes the best estimation model for the above-related issues. The model is divided into two parts. The first part proposes to list several important factors affecting the project before the case, including the forecast of the increase in raw materials by the international change index and the unknown And

it is not allowed to explore the actual construction environment in the case of on-site investigation to establish the unit equipment method of construction equipment and the construction manpower questioning and screening method to confirm the quality of temporary construction personnel. The second part is the cost estimate. Collect actual engineering cases and apply the multi-factor regression model method to investigate the number of construction manpower effect to replace consumables according to the recommended times. Finally, this research uses 15 actual cases to test the proposed valuation model. Compared with the traditional valuation model, the test result reduces the cost error rate from 5%-17% to 2%-14% to verify the application of this model to super the feasibility of the replacement of pure water equipment consumables.

Keywords: equipment maintenance, cost estimate, multivariate regression model

一、前言

半導體企業在台灣也劃分成晶圓廠、封裝測試廠、零件組裝廠及面板廠，各企業為使產品提高競爭優勢、降低產品交貨期限、以達優良品質及高利潤之目標，更是需要各部門互相協調與配合，在早期大量建廠下，規劃之生產及相關設備需花費高度成本，良好的設備維護及運轉管理更是各企業在競爭激烈環境下生存之重要關鍵。

各半導體企業每年都投入大量花費及心力於製程領域中，創造自有優良率提升產品價值，製程主要劃分為蝕刻、黃光、薄膜及擴散，在這些百道甚至千道製程中，最不可或缺的元素是超純水，每道製程完成後須使用超純水清洗後，再由旋風機風乾再繼續下道製程，超純水在規劃建廠中屬廠務設備，廠務設備分為化學氣體、化學品及超純水與廢水，故維護相關設備及維持良好運轉攸關企業營運。

儘管這些維護相關費用，半導體企業知悉需每年維護，但現況仍須仰賴往前歷史資料或經驗，無一套正確估價模式，對於提供設備相關資料不足或估價人員經驗不足，經常造成成本估算不足而影響後續工程進度，又或在擴建和新建工廠時無一評定標準來擬訂後續維修耗材費用，現有方式多為過往成交價格來編製後續維修預算，故以半導體超純水維護工程之成本估價模式為研究主題，希望透過本研究可提供半導體超純水維護工程之成本估價參考。

本研究為解決現有半導體廠區超純水設備維護耗材更換工程估價不準確的困境，探討現有估價模式不準確造成實際執行施工落差之原因，因此研究目的為：(1)經由蒐集資料與文獻，探詢現況估價不準確之原因；(2)歸納及建議超純水設備耗材更換工程對應問題與解決方式表；以及(3)以案例探討傳統估價方法與本研究成本模式估價方法之差異。

二、回顧成本估價方法

估價之目的，即預估工程各項相關工料數量，以達成工程成本控制與管理之目標。在討論估價方法前先界定專案之生命週期。工程專案之生命週期：在半導體廠中，耗材更換工程常有制式原物料件，但要縮短施工日期、減少施工變更等原因將設計與施工由同家廠商統包承攬其業務範圍，故研究案例以設計與施工統包為研究範圍。

- (一) 迴歸分析法：迴歸分析 (Regression Analysis) 是一種統計學上分析數據的方法，目的在於了解兩個或多個變數間是否相關、相關方向與強度，並建立數學模型以便觀察特定變數來預測研究者感興趣的變數。迴歸分析 (Regression Analysis) 可分為簡單迴歸 (Simple Regression) 和多元迴歸 (Multiple Regression)，簡單迴歸是用來探討 1 個依變數和 1 個自變數的關係，複迴歸 (多元迴歸) 是用來探討 1 個依變數和多個自變數的關係。(蕭文龍，2009)
- (二) 最佳迴歸模式：選擇變數進入的方式為

獲得最佳迴歸模式，在進行迴歸分析時，大部份的情形是有多個自變數可以選擇使用在迴歸方程式中，欲找到的是能夠以較少的自變數就足以解釋整個迴歸模式最大量，但其存在問題是應該選取多少個自變數，又如何選擇其自變數，故整理選擇自變數進入迴歸模式的方式如圖 1(蕭文龍，2009):

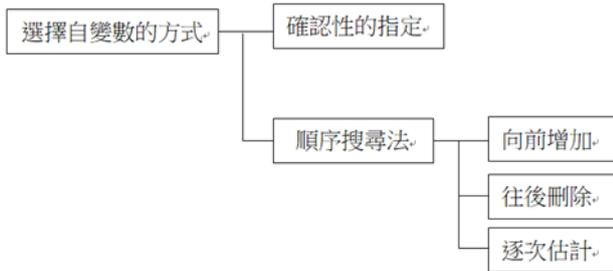


圖 1 迴歸模式方式流程圖

三、半導體產業製程用水

對於晶圓廠、封測廠及光電產業等相關半導體業而言，良率的提升，除靠追求相關製造技術的精益求精外，其製程上為去除附著於晶片上或玻璃上之殘餘酸鹼、有機物及其他外來雜質或微粒子，每道製程皆須仰賴超純水來洗淨處理，故週邊相關配合系統技術及供應品質之良好與否亦佔有相當重要之地位，而超純水處理即是其中之一。

3-1 超純水功能

在高科技產業上，超純水用於製成階段的濕製程(Wet Process)上，由於在濕製程處理過程中所使用之水質，關係著產品之品質，其利用超純水去除雜質及防止晶片或玻璃上形成氧化膜，故如果水質不良，非但不能去除不必要之雜質，且會造成產品之污染而影響品質(顏登通，2017)。

超純水概括在高科技產業功能如下：(1) 去除沉積物、(2)防止金屬離子污染、(3)防止有機物質污染、(4)防止氧化物之污染、(5)增加產品表面之整齊、(6)增加產品表面之平滑、(7)去除產品表面的微塵粒子及附著物

3-2 何謂超純水

Ultra-pure 水(超純水)又稱高純水，是指

將水中的導電介質幾乎完全去除，又將水中不離解的膠體物質、氣體及有機物均去除至很低程度的水。電阻率大於 $18\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ ，或接近 $18.3\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ 極限值。超純水的含鹽量在 0.1mg/L 以下電導率小於 $0.1\mu\text{s/cm}$ 。

最初是美國科技界為了研製超純材料(半導體原件材料、納米精細陶瓷材料等)應用蒸餾、去離子化、反滲透技術或其它適當的超臨界精細技術生產出來的水，如今超純水已在生物、醫藥、汽車等領域廣泛應用。

這種水中除了水分子(H_2O)外，幾乎無雜質，更沒有細菌、病毒等有機物也沒有人體所需的礦物質微量元素，超純水無硬度，口感較甜，又常稱為軟水。

超純水與純水差別為電導率不同，純水電導率在 $2\sim 10\mu\text{s/cm}$ 之間，超純水的電導率為 $0.056\mu\text{s/cm}$ (資料來源:顏登通，2017。)

3-3 超純水製造流程

超純水大致流程如圖 2 所示，各半導體廠因應不同出水水質標準而增減設備。

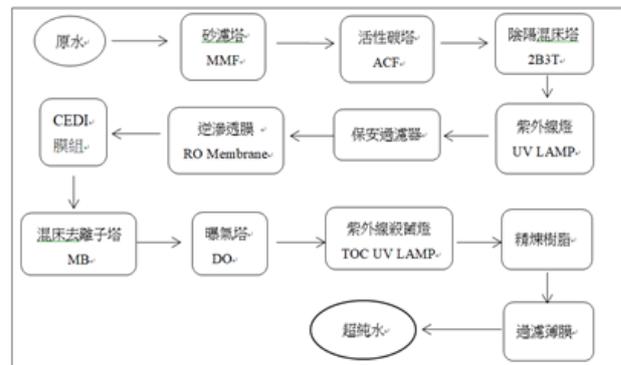


圖 2 超純水製造流程圖

3-4 半導體超純水系統耗材更換定期維護需求

在超純水系統中，影響水質的關鍵在於原水入水水質與各廠區製程用水需求量，台灣半導體廠使用之原水大多仰賴水庫中自來水，自來水會隨雨水、颱風水量或空氣中各氣體濃度影響水中之 PH 值濃度等，或製程端遇需大量使用超純水，皆致設備提早更換耗材，反之若無天災等因素，設備維持正常運轉，業主確實完成每天基本工作如定時抄表、巡視設備使用情形，而各單元使用年限

不一，更換頻率需看該廠區實際使用用水量情形，故各廠無固定超純水耗材更換時程。

超純水系統耗材更換工程流含括規劃階段、施工階段及試車與驗收階段，超純水系統耗材更換工程，各階段說明如下：

- (一) 規劃階段：依據業主耗材更換需求，初步規劃分為總耗材需求量、拆裝工程評估、總經費、總施工工期、試車驗收標準等來擬訂專案執行計畫表。專案執行表包括耗材需求表、施工進度表及竣工文件。一般須在耗材須更換年限前半年提出需求，再根據實際發生需求來規劃耗材更換工程之相關物件，包括作業流程制定、進度時程規劃、預算成本規劃與設備機台正常啟用。
- (二) 施工階段：得標新標案後，須購買標案所需耗材及其備品，施工前須將耗材項目做檢測以確保施工現場所需之耗材符合標單規格，確認無誤後，現場施工時，因耗材更換工程須讓該環節停機停水，故施工時間短縮緊湊，根據專案執行表內容來指派專案負責人及發包廠商。耗材更換工程中，每個流程環環相扣，採用專業廠商負責該專業範圍，採分開發包方式來施作，故專案負責人須監控及掌握其施工流程並確保步驟正確方能施作下一步。
- (三) 試車與驗收：耗材在指定時間內更換完畢後，將重啟讓該環節正常產水，正常情況下產水一週後執行水質檢測，來達到業主產水需求標準，反之，若設備產生漏水、漏砂、停機等故障，須將故障排除且將其設備正常產水一週，方能執行水質檢測直至業主標準。

四、成本估價現況與案例分析

超純水系統耗材更換之現行成本估價情況、案例分析及影響耗材更換工程成本之因素，本研究以半導體廠之超純水系統設備耗材更換工程常用於初步設計及發包階段之估價方法，以 A 公司為例，以下各成本以新台幣為單位計算皆經過修改但不影響本研究成

果。

4-1 初步設計及發包階段之估價

實際半導體廠之裝機配管工程只做概念計劃或設計後，承攬商得標後才做細步設計。依據初步的超純水設備機台的耗材更換清單表、施工標準及 QA/QC 測試驗收標準等做成本單價分析，若遇非初期建置半導體廠，因無細步設計資料，故更換人工及相關零組件以過去施工經驗評估，製成工程預算，這些屬概估，而發包廠商以實際運作成本計算。

例某廠經由規劃清單需求表供需施作 300 支 RO 膜，當時建廠費用約為 2 億元，推估其廠每年預計更換耗材費用 4 仟萬元，而 RO 膜為其一單位，推估此更換案件成本約為 500 萬元。

4-2 現有估價流程

廠商依據各半導體廠區業主標單內容進行估價作業，以利順利得標後進行超純水耗材更換工程，現有估價總流程時間圖，如圖 3 所示。

超純水耗材更換工程現有估價流程為：

- (一) 業主檢視現有系統運轉情形：超純水系統因每設備單元預定及耗材可耐受度不同，故需固定更換時間亦不同，業主為使超純水系統穩定持續運轉，除每天定時派人抄錶紀錄運轉情形外，約每年第三季統一檢測該廠整年度運轉情形，以此為記錄訂定下一年度預計更換耗材品項。
- (二) 業主審核下一年度更換耗材品項及預算：根據上述第一點，確認下一年度更換耗材品項後，依照往年度耗材更換工程得標施做費用編製預算。
- (三) 業主提出預算及需求：業主為使超純水系統穩定持續運轉，約每年第三季編制下年度超純水系統耗材更換工程預算，以確保系統能正常供水提供製程單位使用。
- (四) 業主邀標：業主視實際現場系統使用情形，比對抄表及運轉紀錄，決定更換品項及更換數量。

(五) 廠商評估業主需求及驗收標準：

1. 視業主提出需求規範，評估如下：
 - (1) 國際物價指數及國際匯率變動以評估原物料成本
 - (2) 預計施工人員是否符合業主要求之合格證照
 - (3) 預計完工日期是否符合業主需求
 - (4) 業主提出之耗材更換數量是否足夠供應現場製程用水水量需求
2. 視業主提出驗收標準，評估如下：
 - (1) 驗收標準對應之耗材內容是否符合，如 RO 膜應驗證 TOC 及 Particle 項目而非驗證餘氯數量
 - (2) 評估驗收文件製作所需時間
3. 廠商視現場施工作業條件，如：
 - (1) 參考往前案例成本及評估現場施工出入動線
 - (2) 現場施工高度是否需使用堆高機、天梯和拖板車等及評估施工寬度可同時容納幾位施工人員
 - (3) 確認現場施工電壓是否為 110V、220 V 或 440 V
 - (4) 確認現場是否提供水源及排水渠道

(六) 廠商報價：廠商視第三項(廠商評估業主

需求及驗收標準)及第四項(廠商估算施工成本)粗估工程成本，再將其彙整成業主指定報價格式後報價。

(七) 業主議價：廠商報價若符合業主預算內，業主將在各家議價後採最低標方式決定得標廠商；廠商報價若不符合業主預算，會提出超支預算之工程品項，與業主商榷預算擬定以利後續作業，業主視實際情形提出新預算後再請廠商重新投標如上述第四項(業主邀標)流程依序執行。

(八) 決標：決標由業主通知得標廠商，廠商再依指定時間內至現場施工。

4-3 超純水耗材更換工程之案例成本預估

以 A 公司為例，案例成本費用結構有修改但不影響整體研究。圖 4 所示，超純水設備維護耗材更換工程成本分為直接成本與間接成本，直接成本大致分為原物料、機具設備、相關人工、相關設備管路、廢棄物丟棄及五金費用，本研究只探討廠商直

本研究案例來自 A 公司，預估發生成本及施工平面示意圖皆修改過但不影響本研究成果。每一個案例成本，只探討直接成本，不探討管理及設計費用，本研究列舉 2 個案例說明。

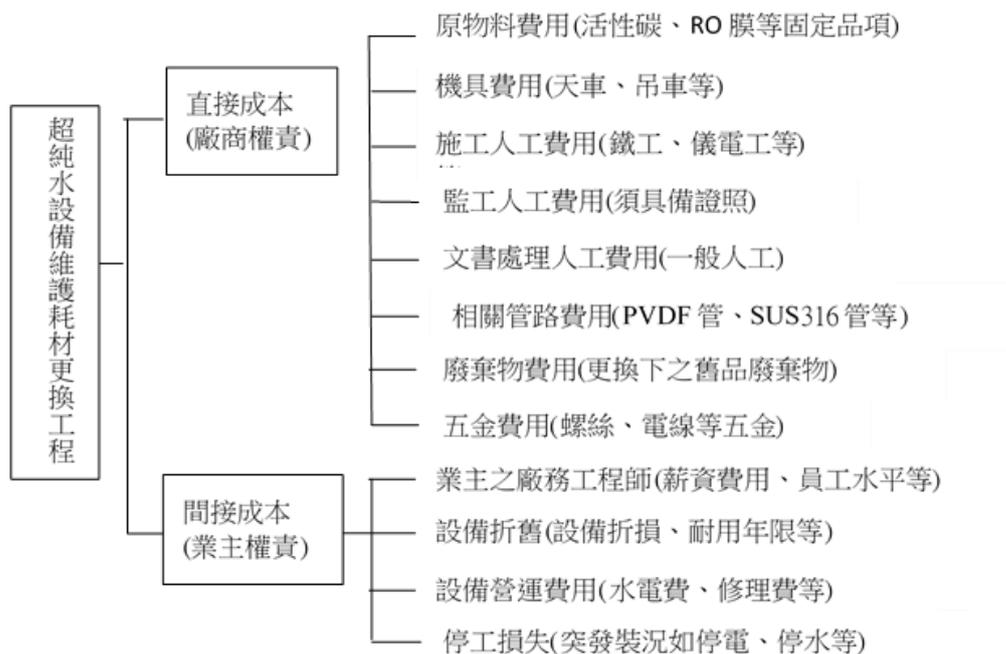


圖 4 案例成本費用結構圖

4-3-1 (以更換 RO 膜為例)

某 A 封測廠欲更換純水系統 RO 膜管共計 60 支，RO 膜管殼外觀示意圖如圖 5 所示 (資料來源: LENNTECH 官網, 2021)，此施工需同時更換全數 RO 膜管之 Adapter 與 O-ring 等耗材，預計分兩天施作。RO 膜單元相關施作面積示意圖(如圖 6)及預估施工成本依序說明為：

- (一) 此區共有 20 套壓力管殼，每個壓力管殼裝有 3 支 6 吋 RO 膜，共計 60 支 RO 膜。
- (二) 此區為約長 3.5 公尺，寬 3 公尺，高 3.2 公尺，每層有五套 RO 膜壓力管殼，高約 80 公分，共四層，施工平面示意圖如 4-7 所示。
- (三) 6 吋 RO 膜每支長約一公尺，重約 8 公斤
- (四) 施工走道在此區為兩條，第一條約 16 平方公尺，第二條約 20 平方公尺
- (五) 此案例無使用施工機具，搬運及安裝為人工搬運
- (六) 更換之舊品 RO 膜及相關因本更換工程所產生之 Adapter 與 O-ring 等耗材皆需廢棄，預計共分二天施作。
- (七) 此案例預估成本計算方式，如表 1 所示。
 1. 新品 RO 膜為 13,800 元/支，但須從日本原裝進口，成本以美金 425/支計價(成本估算當日匯率約 32.35)
 2. RO 膜單位更換人工成本 18,000 元/式，預估 RO 膜更換所需人工為 2 人/天，工時最長為 8 小時，合計一天最多可拆裝 30 支 6 吋 RO 膜
 3. 監工人員 5,000 元/天、文書處理人員 5,000 元/天
 4. RO 膜丟棄費用 500 元/支
 5. 五金另料 5,000 元/式
- (八) 驗收標準：RO 膜更換完成設備無漏水，且出水水質需達 $\text{TOC} < 1\text{X ppb}$



圖 5 RO 膜管殼外觀示意圖

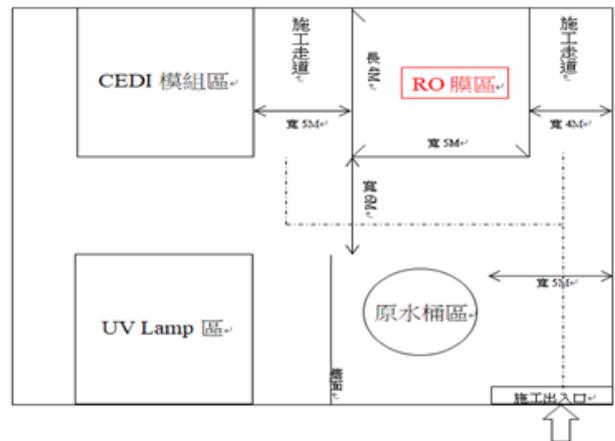


圖 6 A 廠施作面積示意圖

表 1 A 廠 RO 膜更換施工預估成本表

項目	品項敘述	數量	單位	單位成本	小計成本
1	RO 膜新品含 O-ring 接頭	60	支	13,749	824,920
2	RO 膜更換工資	2	式	20,000	40,000
3	監工人工	2	式	5,000	10,000
4	文書處理人工	2	式	5,000	10,000
5	舊品 RO 膜棄置費用	60	式	500	30,000
6	五金另料(備用)	1	式	5,000	5,000
總計					919,900

4-3-2 (以更換 MMF 塔為例)

某 T 廠欲更換純水系統兩座 MMF 塔，預計分四天施作。施工面積示意圖(如圖 7)及預估施工成本說明依序為：

- (一) 設備位置位在廠區一樓，無貨梯
- (二) 每塔容量為 8,000/L，共兩塔，每次更

換一塔，一塔施工預計兩天，水質驗收無誤後方施作第二塔。

- (三) 一桶槽內大石、中石、小石及細沙總計約重為 1.2 噸
- (四) 更換出入人孔蓋為，上人孔蓋為 20 孔，下人孔蓋為 32 孔。
- (五) 施工走道主要為一條約 72 平方公尺。
- (六) 更換之舊品砂石及相關小型五金皆須廢棄。
- (七) 更換所需機具為：

1. 吊車：將原物料砂石由貨車吊至平面，及將更換下之活性炭廢棄物由平面吊至貨車，裝填新品砂石須將其吊至桶槽上方，由人工輔助其裝填至桶槽。平面拖運則由人工使用拖板車搬運。
2. 抽取泵浦：更換砂濾塔時需開啟上人孔蓋，使用泵浦將舊品砂石抽出。
3. 氣體檢測儀(五合一)：因泵浦裝填新品砂石須經由人工操作及確保大石、中石、小石及細沙填平，故下人孔蓋開啟後，施工人員進入桶槽內施工。桶槽內施作屬密閉空間，此機具隨時充填桶槽內氧氣及檢測桶槽內含氧量，以確保施工人員安全。

- (八) 此案例預估成本計算方式，以下成本列表如 4-6 所示：

1. 大石、中石、小石、細沙 5/L
2. 吊車 9,000/式、氣體檢測儀 3,000/式
3. 施工人工 45,000/式，預估 MMF 塔更換所需人力為 4 人/天，工時最長為 8 小時，合計一天最多可拆裝 8,000L/塔之砂濾塔。
4. 監工人工 5,000/式、文書處理人工 5,000/式
5. 舊品砂石棄置費用 3/L、五金另料 10,000/式

- (九) 驗收標準：大石等砂石安裝完成設備無漏水，且進水與出水壓差須達 $<1X \text{ kg/cm}^2$ 。

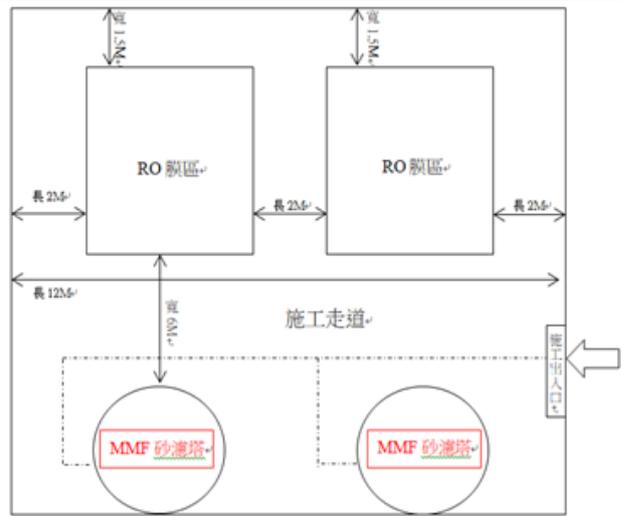


圖 7 T 廠施作面積示意圖

表 2 T 廠砂濾塔更換施工預估成本表

項目	敘述	數量	單位	單位成本	小計成本
1	大石	6,000	L	5	30,000
2	中石	4,000	L	5	20,000
3	小石	4,000	L	5	20,000
4	細沙	2,000	L	5	10,000
5	氣體檢測儀	4	式	3,000	12,000
6	吊車費用	4	式	9,000	36,000
7	砂濾塔更換人工	4	式	40,000	160,000
8	監工人工	4	式	5,000	20,000
9	文書處理人工	2	式	5,000	10,000
10	舊品砂石棄置	16,000	L	3	48,000
11	五金另料(備用)	1	式	10,000	10,000
總計					376,000

4-4 超純水耗材更換工程之案例成本差異分析

超純水耗材更換工程實際案例發生成本與預估工程成本差異，除現場施工突發狀況、施工人員對環境不熟悉等因素外，列舉 1 個實際案例說明。

案例一，以更換 RO 膜為例：

某 H 廠 RO 膜耗材更換工程實際執行成本，因用水量淡旺季別，平均每天用水量約 200 噸，施工拆裝時發現離上次更換時間為五年，A 公司非原先建造純水系統廠商，某 H 廠施工問題示意圖(資料來源：康淳科技股份有限公司官網，2021)與某 H 廠 RO 膜施工平

面示意圖，如圖 8 及 9 所示，預估總成本與實際施工發生成本如下表 3 所示，誤差率為 6.89%，實際施工發生以下問題除致使成本增加，且造成施工工期緊縮，需加派人力完成，方能符合業主預期兩天內施工完成，註解如下(資料來源:楊涵，2021)：

- (一) 本廠區高處有多管路穿插天花板，不得使用天車或堆高機搬運 RO 膜，擔憂造成現場系統管路破損。
- (二) 設備老舊，業主未依照正確時間更換 RO 膜及相關 O-ring 與 Adapter，造成進水及出水管路內牙損壞嚴重，拆裝時多處發生漏水，故須整組重新更換。
- (三) 非原先建置該廠超純水系統廠商，監工人員對該廠區作業環境不熟悉，需耗費時間判斷正確施工工法與第二點所述之突發狀況排除，工期造成延宕。
- (四) 主施工步行走道寬為 2 公尺，施工區域狹窄，施工人員使用拖板車托運 RO 膜寬度受限，需以人工徒手搬運。
- (五) 此廠區 RO 膜設備，最高為 1.8 公尺，皆須人工攀爬天梯、雙人以空手抬運，施工高度危險，且 8 吋 RO 膜管單支重達 15 公斤，人工搬運不易。
- (六) 如第五點所示，此 RO 膜設備裝卸走道為寬 1.5 尺，施工人員不論是卸下架上舊品 RO 膜或拆除新品 RO 膜保護裝置，皆因廠區施工面積狹窄，工期時間延長。

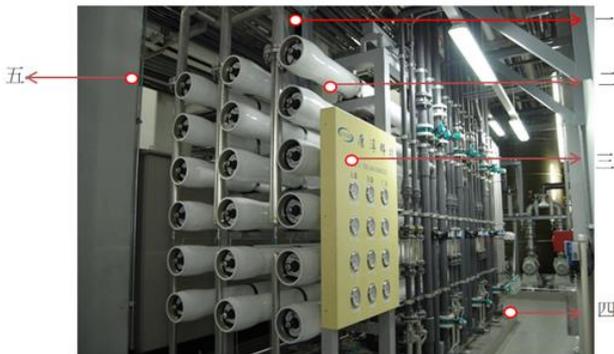


圖 7 RO 膜施工問題示意圖面示意圖

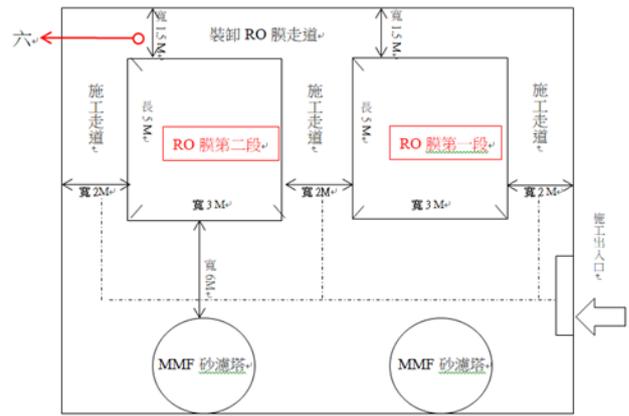


圖 8 H 廠 RO 膜施工平面圖

表 3 H 廠 RO 膜耗材更換工成實際成本表

項目	品項敘述	數量	單位	預計總成本	數量	單位	實際總成本
1	RO 膜新品含 O-ring 接頭	120	支	1,656,000	120	支	1,656,000
2	RO 膜更換人工	2	式	36,000	4	式	72,000
3	監工人工	2	式	10,000	4	式	20,000
4	文書處理人工	2	式	10,000	3	式	15,000
5	RO 出水管路安裝	120	支	42,000	140	支	46,200
6	1" PVC SCH 管	6	M	1,800	6	M	1,800
7	廢棄物丟棄費用	120	式	36,000	120	式	36,000
8	五金另料(備用)	1	式	5,000	1	式	3,000
				1,796,800			1,847,000

4-5 超純水耗材更換工程影響因素-歸納與建議

上述列舉之案例並加上其他 15 件實際案例，進行案例分析與檢討，影響工程成本之因素眾多，如人力成本增加、約定事項改變等，集結各種影響因素彙總成總表，以利下次工程預防及避免，如表 4 所示。

表 4 超純水更換工程成本影響因素之歸納與建議表

影響主因	影響子因	事件描述	建議解決方案
需求不明確	現場系統需求不明確	<ol style="list-style-type: none"> 1. 耗材更換完成後，原水水質受天候不佳影響，後續驗收須加派人力 2. 前單元出水水質之化學藥劑劑量添加錯誤，造成更換設備之驗收標準不符，需加派人力處理 3. 業主變動現場廠區機台位置或增加機台擺設未事先告知，即使曾施工該廠區，但其經驗仍因現場機台位置不同而難評估施工程序 4. 需人力搬運機具時，低估所需施工人力，造成工期延宕，須加派人力完成 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 監工人員應於施工前確認施工人員精神及體力是否適合進行工程，以確保施工人員人身安全 2. 監工人員施工前應請求業主提供現有廠區平面圖，事先規劃施工路徑 3. 監工人員應事先擬定該日整體施工安排，確認排程是否可符業主規範 4. 監工人員應落實施工日誌撰寫，除記錄該廠區實際施工情形外，亦可檢討該日施工情形是否可改善之處，以達類似錯誤降低發生機率
	施工人力	<ol style="list-style-type: none"> 1. 施工人員對施工環境不熟悉 2. 施工人員需調派，會更換不同原施工員施工，造成施工天數增加 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 事先到施工地點廠勘，若無法事先到廠，可與其業主做電話訪問初步調查該廠情形。 2. 監工人員預期潛在風險對施工人員進行簡易教育訓練
非約定事項	需求臨時改變	<ol style="list-style-type: none"> 1. 需求不精確，施工時發現所需耗材數量增加或型號錯誤 2. 未確實告知往前更換耗材時間 3. 驗收條件改變，需委外檢測水質 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 標單報價前，至業主廠區確認實際廠區現有運轉情形 2. 請求業主提供廠區現有抄錶紀錄，確認系統運轉現況是否符合業主所述在報價範圍內，將五金費用成本提高，以應變其他需求費用
施工時間	現場作業環境改變	<ol style="list-style-type: none"> 1. 業主要求施工天數需增加 2. 施工環境老舊，天車、吊車等無法使用 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 若施工動線足夠，可使用堆高機以節省人力 2. 若施工動線不足，可使用鐵鍊、鐵夾及保護泡棉，以拉取方式運送耗材以節省人力
	施工經驗判斷錯誤	<ol style="list-style-type: none"> 1. 預定施工天數增加，使用機具成本亦增加 2. 相關機具零件毀損需另購置 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 立即更換資歷較久之監工人員至現場查修該設備情形，該設備平時運轉維護時與先前固定步驟有何不同，確認後續緊急措施處理 2. 若往前有更換過同廠區案例，依據上次施工日誌模擬該日可能狀況，以避免發生同樣施工錯誤
緊急事件	突發狀況發生	<ol style="list-style-type: none"> 1. 現場原有設備漏水 2. 安裝完成驗收後，設備因人為操作不當漏水 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 立即更換資歷較久之監工人員至現場查修該設備立情形 2. 與業主討論，該設備平時運轉維護時與先前固定步驟有何不同，以確認後續緊急措施處理

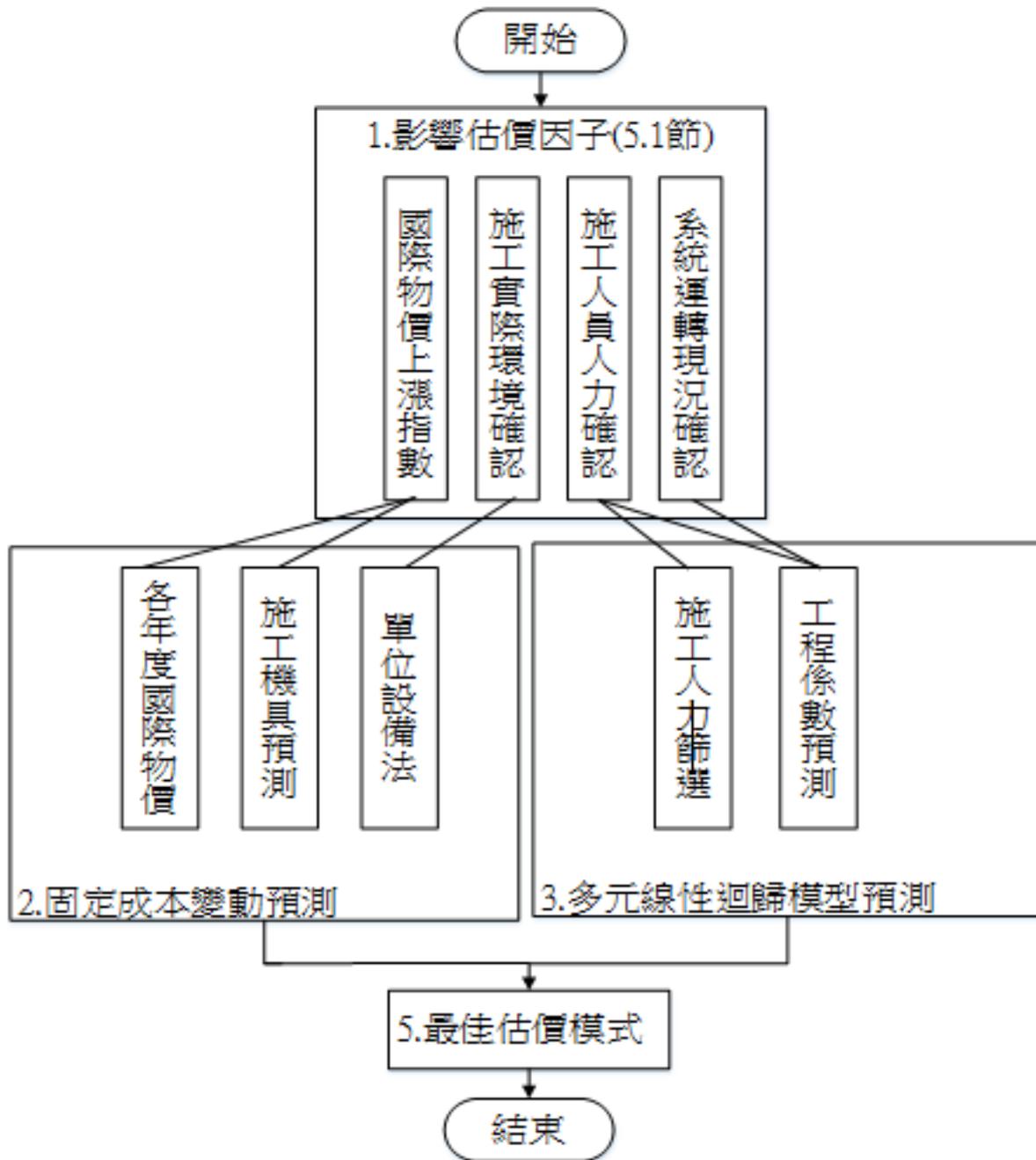


圖 9 估價模式建置流程圖

五、估價模式建置

影響超純水設備維護耗材更換工程之成本因子諸多，本研究透過案例分析揭露主要超純水設備維護耗材更換工程之重要影響因素，並分析、測試其影響因子對超純水設備維護耗材更換工程之影響程度，進而判斷其項目承受風險能力，以建置估價模式，如圖 9 所示。

5-1 影響估價因子確定

影響超純水設備維護耗材更換工程之因素，本研究共劃分四部分，如表 5 所示。

5-2 估價模式建置

上述列舉案例中，每案背景皆不相同，除廠區可施工面積及機具不同外，也因各廠要求水質不同，無一確定更換年限標準，除須視該廠用水量情形評估更換時間及現場廠區使用現況，亦要評定是否可在業主規範施

工天數內完成更換工程。

- (一) 導入單位設備法於施工機具:半導體超純水設備維護耗材更換工程所需機具費用估算,問券訪查或現場勘查,以設備占地總面積乘以工程使用機具數量,求其工程使用總機具費用,設備占地面積示意圖如圖 10。

表 5 影響估價因子表

序列	影響估價因素	估價方法
一	國際物價 上漲指數	國際通貨膨脹率+ 近六個國際美金匯率平均值
二	系統運轉- 現況確認	探訪該系統是否依 建議年限更換其單元耗材
三	單位設備法- 施工環境確認	依據施工環境訪談表確認 使用機具及施工工法順序
四	施工人員 人力確認	問券篩選施工人力

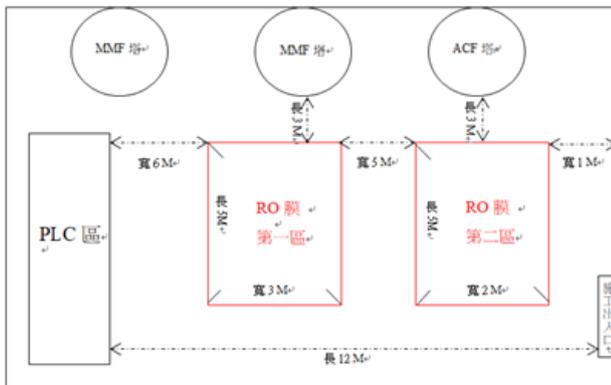


圖 10 單元施工面積示意圖

- (二) 導入多元線性迴歸分析模型於系統年限:

1. 多元回歸模型建置:以更換超純水設備單元 50 件案例為樣本基礎,在一般每天運轉及用水量 100 噸/天之半導體廠,RO 膜更換年限建議為三年一次,如離上次更換年限五年,樣本基礎以 2 表示,其他單元案例並以此類推得如表 6 多元迴歸模型表:
2. 最優迴歸方程式(工程係數)建置:藉由多因素迴歸分析模型推導出施工人力次數與更換年限之工程係數為

離上次建議更換年限每增加 1 年,預期施工次數將增加 1.3 倍(工程係數為 1.3);離上次建議更換年限每增加 1 年,實際施工次數將增加 0.5 倍(工程係數為 0.5)。以 RO 膜更換單元為例,若該廠無固定更換年限,則需以基礎成本乘上工程調整係數;反之若有固定更換耗材則不需乘工程係數:

每支 RO 膜更換工程成本= RO 膜基礎更換工程成本×工程係數

計算公式: $C = [(R \times I) + M + Mf + D + H] \times Ea$

(註 1: C: 預估 RO 膜工程費用

R: RO 膜設備費用

I: 國際物價上漲指數

M: 人力更換費用

Mf: 監工費用

D: 文書費用

H: 五金雜費

Ea: 工程調整係數)

5-2 案例測試:

本研究蒐集 15 件實際案例作為其測試結果,探詢其施工廠區實際系統更換離上次更換持間,透過多元迴歸模型建置工程係數,其預估與實際成本發生表,誤差率由原 5%-17%降低至 2%-14%,平均成本誤差率減少 3%,如下圖 11 所示:

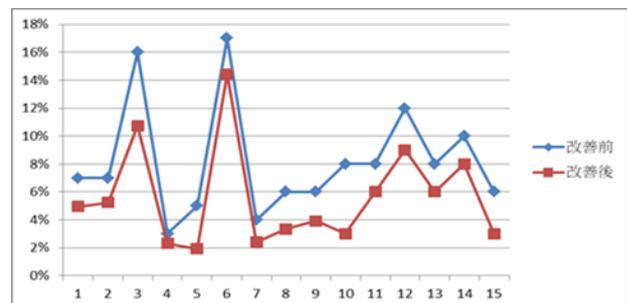


圖 11 案例更換實際更換之成本誤差比較圖

此 15 件案例中,因科學園區施工人員須具備其廠區要求之相關證照又或該半導體廠有其差異要求證照,依據人力資源篩選表篩選施工人力,除讓監工人員可篩選臨時施工人員外,亦可讓監工人員判別其對應工作內

容，如原換 RO 膜 30 支原從施工時間 5.8-10 小時不等到能穩定工時控制在 6-7 小時內完工，其穩定的人力施工時間除使工期能如期完成並讓後續工程可評斷預計施工時間，亦能更有效評估施工人力成本，結果如下圖 12 所示：

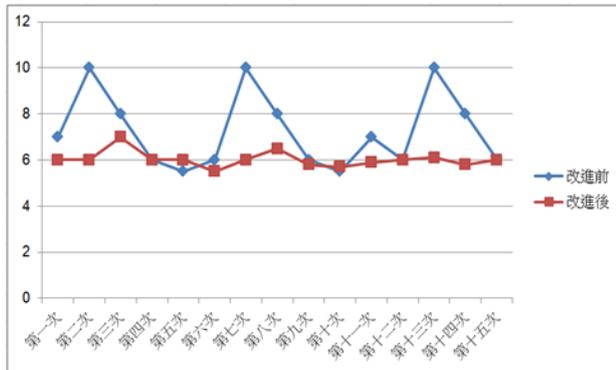


圖 12 施工人力工時改進圖

六、結論與建議

6-1 結論

本研究以 15 件實際案例，探討施工階段執行作業方式之成本估算差異處，亦列出超純水耗材更換工程之工程特性與建議，其結論共有以下幾點說明。

(一) 建立超純水耗材更換工程估價模式：

1. 建立超純水系統更換耗材頻率與施工時間安裝模式：本研究探討出該廠區是否有固定更換超純水系統該單元耗材頻率對其施工時間與次數之關聯，相較於傳統估價模式須仰賴該單元更換工程歷史成本之不準確估價模式，超純水系統更換耗材頻率與施工時間安裝模式透過與業主確認該系統離上次更換時間，並利用相關訪談方式確認該廠施工環境，解決了現有估價模式不準確問題。
2. 導入工程係數超純水耗材更換工程之工程成本估價：本研究整合多元迴歸分析模型與單位面積施工法，建立一套適合半導體超純水耗材因不同年限系統有其工程係數之成本估算模式。此模式透過超純水系統現行運轉視角探討其工程突發情形潛在性，

亦藉由專家訪談驗證其工程問題，並導入國際物價指數，解決國際原物料單價浮動議題，最後經多元迴歸分析模型預測其系統耗材單元更換調整係數，處理施工人員不熟悉該系統作業環境以產生之現場突發情形、施工工法準確度等影響成本因素，此預測模式可提供相關產業概算成本模式。

(二) 施工人員篩檢模式之可行性：

本研究以 37 位臨時施工人員，讓監工人員能初步判斷其是否適合半導體廠區作業環境之施工人員，測試結果篩選 13 位不合適人員，其他 24 人於施工中之施工工法、情緒穩定，並讓更換耗材數量能符預期時間，較優於傳統以第一印象篩檢臨時人員或不篩選臨時人員之情形，驗證此模式可應用於半導體耗材更換工程之可行性，以避免造成估算成本提高。

6-2 後續研究與建議

- (一) 經常性工程若持續施工：同一廠區及其超純水耗材更換品項頻率高且固定，業主可自行組織領導團隊自行施作工程，將達較佳之成本控制模式。
- (二) 天然降雨對超純水系統運轉影響性：全台分兩次專家訪談，各隸屬台灣北區及南區廠區，對天氣自然降雨於廠區原水入水皆有影響，間接影響該廠超純水系統運轉實際情形，本研究透過平均降雨模式估算工程成本，後續建議研究可細分自然降雨因應不同季節之原水涵括那些菌種，更精確計算出超純水更換工程之成本。
- (三) 超純水耗材工程之總工期概算：本研究透過多元迴歸性模型建置工程成本，使監工人員能預期不熟識廠區之施工過程，以降低突發狀況可能性。建議後續研究能透過整理各處原水與廠區超純水系統運轉對應之耗材更換工期之關聯性，亦透過多元迴歸分析或類神經網路訓練預測施工時間。

參考文獻

1. 林秉毅，「工程專案生命週期成本估價方法之探討」，碩士論文，國立交通大學，新竹市，第 3~15 頁，2004。
2. 溫兆寶，「半導體裝機配管工程成本估價模式之探討」，碩士論文，國立交通大學，新竹市，第 3~50 頁，2010。
3. 廖淑珍，「運用資料探勘於半導體機台維修管理之知識支援」，碩士論文，國立交通大學，新竹市第 1~30 頁，2002。
4. 蕭文龍，「多變量分析最佳入門實用書」，碁峰資訊，一版，台北市，第 50~80 頁，2009。
5. 顏登通，「高科技廠務」，第 30~50 頁，全華圖書，四版，台北市，第 40~80 頁，2017。

提升管線業者參與市地重劃工程共同管道建置意願之研究

郭文田¹ 賴義國² 張厚起³ 劉志堅⁴

¹ 國立高雄科技大學土木工程系教授

² 國立高雄科技大學土木工程系碩專班研究生

³ 亞新工程顧問股份有限公司經理

⁴ 亞新工程顧問股份有限公司工程師

摘要

民國 89 年臺灣訂定共同管道法，第 11 條明文規定，新市鎮開發理區段徵收、市地重劃、都市更新地區重大工程應優先施作共同管道，但目前除了 6 個高鐵特定區及台北捷運系統有規劃共同管道，以及少數縣市政府市地重劃有規劃外，建置狀況不盡理想。本研究透過相關文獻整理與專家訪談後，先列出影響管線業者納入共同管道意願之因子，再利用 google 表單進行問卷調查，篩選合格表單後，以層級分析法評估各因子之權重。結果顯示，影響管線業者參與共同管道建置前 3 項因素，權重由大至小之因素分別為：(1)需一次性繳交建置費用金額太高，34%、(2)建置經費較自行埋管之施工費用高，17%、及(3)共同管道建置可能不符合管線單位的需求，11%。並提出三種策略：策略一：提供管線單位工程款分期攤還辦法、策略二：成立共同管道基金及建立運用辦法、策略三：成立專責部門負責共同管道。分析顯示，策略一與策略三配合或策略二與策略三配合均可解決 96% 的影響因素。

關鍵字：共同管道、市地重劃、層級分析法

Research on the Willingness of Pipeline Dealer to Participate in the Construction of Utility Tunnel in the Urban Land Consolidation

Wen-Ten Kuo¹ Yi-Kuo Lai² Hou-Chi Chang³ Chih-Chien Liu⁴

¹Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

²Graduate student, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

³Manager, Southern Taiwan Office, MOH AND ASSOCIATES, INC.

⁴Engineer, Southern Taiwan Office, MOH AND ASSOCIATES, INC.

ABSTRACT

In 2000, Taiwan enacted the Utility Tunnel Law. Article 11 stipulates that utility tunnel should be given priority for major projects in new town development zones, urban rezoning, and urban renewal areas. However, except for the six designated high-speed rail areas and the Taipei MRT system, and the rezoning of a few counties and cities have planning utility tunnel, the construction status is not satisfactory. After collating relevant literature and interviews with experts, this research first lists the factors that affect the pipeline dealer's willingness to participate the utility tunnel, and then uses the Google form to conduct a questionnaire survey. After screening the qualified forms, the weight of each factor is evaluated by a hierarchical analysis method. The results show that the top three factors that affect pipeline dealers' participation in the construction

of a utility tunnel, the weighting factors from large to small are: (1) the one-time payment of the construction cost is too high, 34%, (2) the construction cost is higher than that of self-buried pipes, 17%, and (3) the utility tunnel construction may not meet the needs of the pipeline dealer, 11%. Proposed three strategies: Strategy 1: Provide pipeline dealer with amortization method of project funds. Strategy 2: Establish a utility tunnel fund and establish application methods. Strategy 3: Set up a dedicated department to be responsible for utility tunnels. Analysis shows that the combination of strategy 1 and strategy 3 or strategy 2 and strategy 3 can solve 96% of the influencing factors.

Keywords: utility tunnel, urban land consolidation, analytic hierarchy process

一、緣起

共同管道被許多先進國家視為基礎建設，把公共設施管線收納於此，可獲得管線易於維護、道路減少挖掘、人手孔數量縮減、瀝青道面使用年限延長、保護用路人車安全等直接效益，間接可節省維護費用及減少碳排放。民國 78 年起陸續學習到日本共同管道構想，民國 89 年臺灣訂定共同管道法，同年高雄市完成全臺第一條共同管道。雖然共同管道法第 11 條訂有「新市鎮開發、新社區開發、農村社區更新重劃、辦理區段徵收、市地重劃、都市更新地區、大眾捷運系統、鐵路地下化及其他重大工程應優先施作共同管道」之條文，但執行至今可以發現，雖然市地重劃工程開發為設置共同管道之最佳時機，但往往管線單位參與建設之意願並不高，因此，本研究擬探討影響管線單位參與市地重劃共同管道建置之因素，再提出可行之建議方案供政府機關參考。

二、文獻回顧

2.1 共同管道類型

共同管道依使用類型分為幹管及供給管兩大類，供給管又可再區分為支管、電纜溝及纜線管路等三種型式(1)，目前實務上也將寬頻納入纜線管路一併建置。

- (一) 幹管：係指傳輸運送區域性之公共管線，通常設置於車道下方。而幹管共同管道收納之管線，以同一管道收容同一種管線為原則，利於管理和防災。
- (二) 供給管：指容納供給用戶所需維生管線

為主之共同管道，可直接引至用戶，又可分為支管、電纜溝及纜線管路等三種型式。簡單而言就是在道路地底下挖掘一條放置各類管線的大管道，把原本凌亂未規劃的管線有組織有系統分門別類的收納在管道結構內，如此也有利於後續之維管。

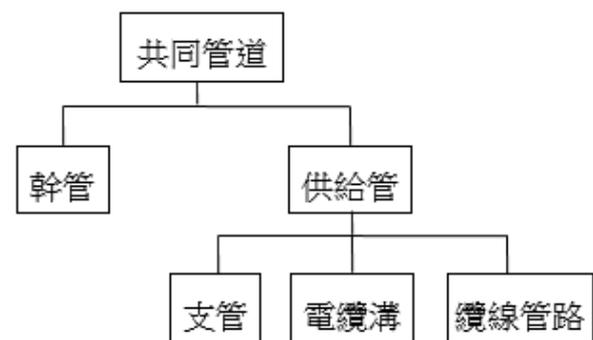


圖 1 共同管道分類圖

2-2 市地重劃工程

內政部地政司定義市地重劃(2)：是依照都市計畫規劃內容，將一定區域內，畸零細碎不整之土地，加以重新整理、交換分合，並興建公共設施，使成為大小適宜、形狀方整，各宗土地均直接臨路且立即可供建築使用，然後按原有位次分配予原土地所有權人。而重劃範圍內之道路、溝渠、兒童遊樂場、鄰里公園等公共設施及工程費用，則由參加重劃土地所有權人按其土地受益比例共同負擔，故是一種有效促進土地經濟使用與健全都市發展的綜合性土地改良事業。

林宗瑤(2012)研究提出以桃園高速鐵路特定區開發案為例，透過政府主管機關大力

支持，在特定區開發的同時規劃共同管道，可以減少管線維護及有效管理，證明共同管道為先進的指標性建設之一，所以共同管道可透過土地開發一併建置，以降低未來地下管線管理問題。

王聰賢(2008)研究發現，都會區或新建集合住宅或工業區科學園區等將共同管道納入興建，已越來越受重視。一般工程當地下管線與公共工程有衝突時，施工前的管線遷移作業及交通壅塞問題，均造成施工的一大挑戰，若能建立共同管道系統，對市區防災體系與災後搶救、民生管線毀損修護問題，均能獲得有效改善。

Valdenebro 等人(2018)提出城市使用公用設施管道(urban utility tunnels, UUT)系統對歷史中心進行升級，和可持續再造的好處，透過考慮歷史中心的景觀公用事業的質量決定了城市的生活質量。城市演變或進步是城市生活便利的指標，城市服務的能力則建構在公用事業管道上。

2-3 運用 AHP 於施作共同管道工程因子之相關研究

陳逸家(2012)在其研究中探討鐵路改建地下化工程結合共同管道施作要項之權重，評估鐵路改建工程結合共同管道所需各權重因子，經由文獻回顧、專家訪談找出各個構面之評估因子，應用層級分析法(AHP)來做為找出共同管道主、次權重因子的方法，提升共同管道施作意願，作為參考依據，最終提昇都市整體的發展。

三、研究規劃

3-1 研究方法

本研究透過文獻回顧與訪談學界、業界及政府機關等相關專家，整理出影響管線單位納入共同管道意願因素後，再採用 google 問卷調查，有效之問卷再以層級分析法分析，得到各評估因子的權重，再針對各因子研提方案，研究流程如圖 2 所示。

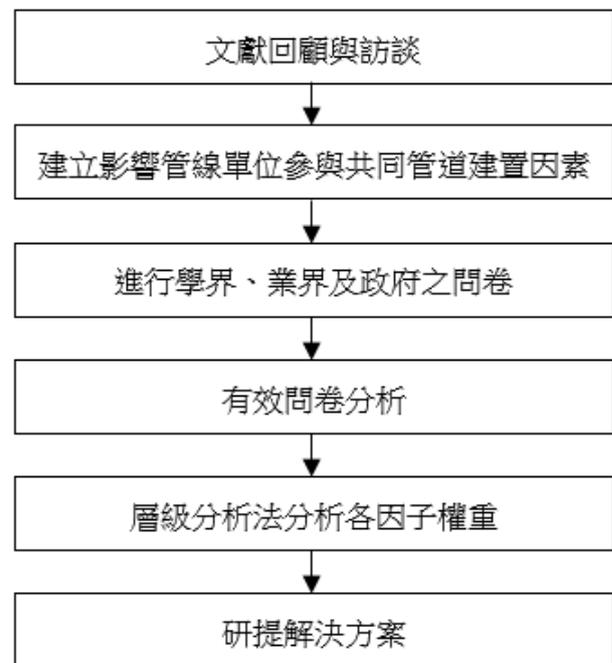


圖 2 研究流程圖

3-2 影響管線單位參與共同管道建置因素彙整

透過共同管道相關研究文獻蒐集，先整理出可能影響管線單位參與共同管道建置因素，列出 18 項可能影響因素，如表 1 所示。再實際訪談台南市政府公部門主管、設計單位共同管道專案工程師、營造公司主管及學術界教育人士，整理出納入問卷之因素項目 10 項，包括：

- A. 需一次性繳交建置費用金額太高
- B. 建置經費較自行埋管之施工費用高
- C. 共同管道建置可能不符合管線單位的需求
- D. 可能會受其它種類管線共管影響
- E. 增加後續維管作業之複雜性
- F. 客戶群及其需求具不確定性
- G. 共同管道在接戶運用時缺乏彈性
- H. 各單位建置經費分攤較不均
- I. 預留空間大小，不易分配規劃使用
- J. 管線單位投入成本，回收無法確定

表 1 影響管線單位參與建置因素

編號	因素	編號	因素
1	工程興建工期拉長	10	交維時間過長，易引起民怨
2	興建所需經費龐大，增加業者成本	11	政府首長推動意願
3	各單位租賃分攤比較難分配	12	中央政府無強制規定
4	管線單位眾多協調困難	13	公家機關意願低
5	維護共同管道，需有經常性人力配合	14	管線單位投入成本回收無法確定
6	維護共同管道結構費用	15	地下水水位過高不易興建
7	預留空間大小，分配規劃不易	16	引上管預留位置不符合現況
8	需增加安全監控設備	17	交維時間過長，易引起民怨
9	設備需定期維修更換	18	地質土壤不良地區

3-3 影響管線單位參與共同管道建置因素彙整

決定使用電子問卷平台，考量因素：第一為便利性，表單的設計是否容易，設計的內容是否讓受訪對象可以方便作答。第二為瀏覽的便利性，電子表單可在任何行動裝置上瀏覽及作答。第三為門檻低。最後決定選用 GOOGLE 表單平台做為設計電子問卷，因為最符前述三項考量，且只需有一個 GOOGLE 帳號即可使用，不需額外費用，可讓每一個受訪對象在簡單明瞭的格式下，以便利的方式及不增加負擔的條件下作答。

3-4 層級分析法分析步驟

層級分析法 (Analytic Hierarchy process；簡稱 AHP) (7) 為 1971 年美國匹茲堡大學教授 Thomas L.Saaty 為美國國防部從事應變計劃問題所發展出來的方法，該方法主要應用在不確定情況下及具有多數個評估準則的決策問題上，理論簡單，同時又具實用性，評估各準則之間的複雜關係，使其有系統的聯結，並藉由計算後獲得判斷值，來決定各項因子重要程度。層級分析法步驟如下：

1. 步驟一：目標問題的評估

蒐集有關共同管道之文獻做為評估準則，同時將層級分析法應用在問題中，理解目標問題的特點，以確定問題的評估方向。

2. 步驟二：建立各層因子

透過上述因素彙整，找出影響管線業者

參與共同管道建置意願之重要因子，進一步透過文獻整理與專家訪談後的結果，建立目標問題，主準則、次準則將其納入架構，本研究為要獲得管線單位參與市地重劃工程意願的評估準則權重。

3. 步驟三：建立比較矩陣

完成建立層級結構後，根據回收的有效問卷建立比較矩陣，兩兩相比結果，經過計算後，得到相對權重值。Saaty 建議尺度於 1 至 9 尺度進行設計，區分為同等重要、稍重要、頗為重要、極重要、絕對重要則分別給序 1、3、5、7、9 之衡量值。

4. 步驟四：計算特徵值與特徵向量

計算特徵值與特徵向量，將取得成對之矩陣是否符合一致性，採用特徵向量的理論基礎，運用特徵值與特徵向量求得各層級要素之相對權重。

5. 步驟五：一致性檢測

一致性指標 (Consistence Index；C.I.) 各領域專家填寫問卷整理出成對比較矩陣，直到最終評估之結果通過一致性檢測，才能顯現填寫者的判斷前後一致性，在不同的階數之下，所形成的一致性指標稱為隨機性指標 (Random Index；R.I.)。在一樣階數的矩陣之下 C.I. 值與 R.I. 值的比率，則稱為一致性比率 C.R. (Consistency Ratio)。

四、結果與討論

4-1 問卷回收數量及受訪者分析

受訪專家領域分佈圖如圖 3 所示，問卷發放及回收統計表如表 2 所示，問卷邀請數 129 份，回收 80 份，回收率 62.0%。因問卷的設計係請受訪者提供因素項目之排序，若未依此方式回覆者，視為無效，有效問卷共計 50 份，佔回收數 62.5%。

表 2 問卷發放及回收統計表

問卷對象	問卷邀請數	問卷回收數	回收率(%)	有效問卷數	無效問卷數	有效問卷佔比(%)	無效問卷佔比(%)
政府機關	30	19	63.3	12	7	63.2	36.8
業界	90	56	62.2	35	21	62.5	37.5
學界	9	5	55.6	3	2	60.0	40.0
總計	129	80	62.0	50	30	62.5	37.5

4-2 問卷調查依序位法分析

彙整合計各因素項目之序位，以序位合計值最低因素項目為第 1 重要，依此類推。得到以下排序：

1. 需一次性繳交建置費用金額太高
2. 建置經費較自行埋管之施工費用高
3. 共同管道建置可能不符合管線單位的需求
4. 可能會受其它種類管線共管影響
5. 共同管道在接戶運用時缺乏彈性
6. 增加後續維管作業之複雜性
7. 客戶群及其需求具不確定性
8. 管線單位投入成本，回收無法確定
9. 預留空間大小不易分配規劃使用
10. 各單位建置經費分攤較不均

本研究之問卷對象以業者所占比例約 70% 最多，因此，若以全部問卷象之調查結果進行分析，與業者之結果並無差異。前三個因素項目，無論是政府機關、業界或學界，均認為是影響管線業者參與共同管道建置意願的排名前三個重要因素。

雖然序位法對重要性提出了排序，但是並未提供各因素項目佔整體問題重要性之比例，擬以層級分析法計算各項目的重要性占比，以利於進行決策分析。

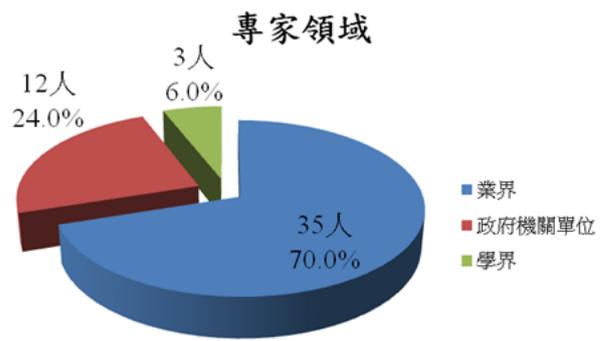


圖 3 受訪專家領域分佈圖

4-3 問卷調查依層級分析法分析

要進行層級分析時，要先建立成對比較矩陣，需要將本研究 n 個因素項目(本研究之 n=10)的衡量結果，置於成對比較矩陣 A 的上三角形中；其主對角線之元素 a₁₁-a_{nn} 為要素自身的比較，其值為 1。下三角形中的數值係為上三角形部分相對位置數值的倒數，即 a_{ij}=1/a_{ji}。成對比較矩陣的元素，如式(1)所示：

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

表 3 比較矩陣建立方式一覽表

	A. 需一次 性繳交 建置費 用金額 太高	B. 建置 經費較 自行埋 管之施 工費用 高	C. 共同 管道建 置可能 不符合 管線單 位的需求	D. 可能 會受其 他種類 管線共 管影響	E. 增加 後續維 管作業 之複雜 性	F. 客戶 群及其 需求具 不確定 性	G. 共同 管道在 接戶運 用時缺 乏彈性	H. 各單 位建置 經費分 攤不均	I. 預留 空間大 小不易 分配規 劃使用	J. 管線 單位投 入成本， 回收無 法確定
A. 需一次 性繳交建 置費用金 額太高	1	B/A	C/A	D/A	E/A	F/A	G/A	H/A	I/A	J/A
B. 建置經 費較自行 埋管之施 工費用高		1	C/B	D/B	E/B	F/B	G/B	H/B	I/B	J/B
C. 共同管 道建置可 能不符合 管線單位 的需求			1	D/C	E/C	F/C	G/C	H/C	I/C	J/C
D. 可能會 受其他種 類管線共 管影響				1	E/D	F/D	G/D	H/D	I/D	J/D
E. 增加後 續維管作 業之複雜 性					1	F/E	G/E	H/E	I/E	J/E
F. 客戶群 及其需求 具不確定 性						1	G/F	H/F	I/F	J/F
G. 共同管 道在接戶 運用時缺 乏彈性							1	H/G	I/G	J/G
H. 各單位 建置經費 分攤不均								1	I/H	J/H
I. 預留空 間大小不 易分配規 劃使用									1	J/I
J. 管線單 位投入成 本，回收 無法確定										1

透過 Excel 計算政府機關、業界、學界等得到下表矩陣相對權重表。

表 4 相對權重計算結果一覽表

因素項目	政府機關	業界	學界	全部
A.需一次性繳交建置費用金額太高	0.11	0.34	0.33	0.34
B.建置經費較自行埋管之施工費用高	0.17	0.17	0.17	0.17
C.共同管道建置可能不符合管線單位的需求	0.34	0.11	0.11	0.11
D.可能會受其它種類管線共管影響	0.05	0.08	0.06	0.08
E.增加後續維管作業之複雜性	0.08	0.06	0.08	0.06
F.客戶群及其需求具不確定性	0.06	0.05	0.05	0.05
G.共同管道在接戶運用時缺乏彈性	0.08	0.07	0.04	0.08
H.各單位建置經費分攤較不均	0.03	0.03	0.08	0.03
I.預留空間大小不易分配規劃使用	0.04	0.04	0.03	0.04
J.管線單位投入成本，回收無法確定	0.04	0.05	0.04	0.04

4-4 影響市地重劃工程參建共同管道因素分析

依據表 2 及表 4 顯示，「A.需一次性繳交建置費用金額太高」、「B.建置經費較自行埋管之施工費用高」、「C.共同管道建置可能不符合管線單位的需求」等三項因素，無論是政府機關、業界或學界，均認為是影響管線業者參與共同管道建置意願的排名前三項重要因素。

4-5 影響因素之類型分析

由層級分析法的評估結果顯示，受訪者認為前三項影響因素佔全部十項因素中的權重占比約 62%，影響性第一的因素為「A.需一次性繳交建置費用金額太高」，權重占比為 34%，目前除了台灣電力公司外，其它的管線單位可以配合一次性繳交建置費用的意願及能力均受到影響，例如：中華電信公司現在處於市場競爭及需為股東權益負責的經營狀態；而對於小型的電信、電纜公司，則可能無足夠的現金流，是影響參建共同管道意願的主要原因，而工程主辦機關也瞭解上述狀況

因而往往未積極溝通協調，所以為當前共同管道建置難以順利推動的主要原因，應進一步思考解決方案以能突破目前困境。

影響性第二的因素為「B.建置經費較自行埋管之施工費用高」，權重占比為 17%，此因素與「H.各單位建置經費分攤較不均」有關，可一併討論，例如：以自來水管線為例，其空間佔比很大，但其單位空間之產值相較於電信或電纜，因自來水單價較低且輸送水的管材較粗，所以對自來水而言，其單位空間之產值較電信或電纜會低很多，若僅依管線空間佔比作為分攤費用之依據，勢將對自來水公司並不公平。再如：對於電信或電纜公司，其收納管線之管徑其實不大，若設置於共同管道內也要分擔共同管道較大斷面設計所需增加的費用，所以電信或電纜公司也會有共同管道建置較自行埋管之施工費用高的問題。

影響性第三的因素為「C.共同管道建置可能不符合管線單位的需求」，此與工程主辦單位及設計單位於需求調查及工程設計等階段，未能充分邀集管線單位參與及管線單位受邀與會但並未積極提供需求等因素有關，若能在規劃及設計階段，工程主辦、設計單位及維護管理主管機關可以與管線單位充分溝通協調，應可一併解決「I.預留空間大小不易分配規劃使用」之問題。至於因素「F.客戶群及其需求具不確定性」，若管線單位於規劃及設計階段有積極參與，則市地重劃之開發，管線單位可就其專業，依土地使用分區加以研判未來需求。

影響因素「D.可能會受其它種類管線共管影響」及「E.增加後續維管作業之複雜性」，此同樣與工程主辦單位及設計單位於需求調查及工程設計等階段，未能充分邀集管線單位參與及管線單位受邀與會但並未積極提供需求等因素有關，若能在規劃及設計階段，工程主辦、設計單位及維護管理主管機關可以與管線單位充分溝通協調，應可一併解決此等問題。

至於「J.管線單位投入成本，回收無法確定」之因素，係屬各管線單位經營層面之問

題，將不納入後續解決方案之研擬範圍。

綜合上述討論，將影響因素區分為 5 種類型，如表 5，區分：(1) 一次性繳交建置費用金額太高、(2) 參建共管成本高於自行埋設、(3) 設計不符需求、(4) 易受其它管線影響且增加維管複雜性、(5) 成本回收不確定。上述 5 種類型，其影響因素之權重總和分別為 34%、20%、28%、14%及 4%，如圖 4 所示。

表 5 影響管線單位參建共同管道因素類型區分

影響因素類型	影響因素										影響因素之權重總和
	A.	B.	C.	D.	E.	F.	G.	H.	I.	J.	
權重	0.34	0.17	0.11	0.08	0.06	0.05	0.08	0.03	0.04	0.04	
(a) 一次性繳交建置費用金額太高	◎										0.34
(b) 參建共管成本高於自行埋設		◎						◎			0.20
(c) 設計不符需求			◎			◎	◎		◎		0.28
(d) 易受其它管線影響且增加維管複雜性				◎	◎						0.14
(e) 成本回收不確定										◎	0.04

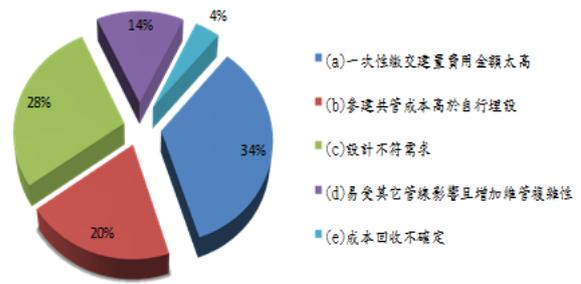


圖 4 影響參建因素之類型及權重分佈圖

4-6 增加管線單位參建共同管道之策略探討

4-6.1 法規面分析及應用

因目前管線單位參與共同管道建置之成效並不理想，所以擬藉現有的法規整理，提出可增加管線單位參建意願的條文，提供工程主辦機關鼓勵或促使管線單位參建共同管道的有利法源，增加管線單位參建共同管道的意願。

(1) 已有明確政府及管線單位經費負擔比例

依據 90 年 12 月 19 日發布之「共同管道建設及管理經費分攤辦法」，第二條：「共同管道工程建設經費分攤為工程主辦機關負擔三分之一，管線事業機關（構）按其參與之共同管道類別負擔三分之二。」，據此，已先律定管線事業機關（構）負擔三分之二。

(2) 共同管道建置之政策支持

「共同管道法」已提供市地重劃工程應優先施作共同管道之條文，工程主辦機關可據以推動。「促進民間參與公共建設法」也有對參建單位所得稅之優惠措施，惟此點可能一般的管線單位

(a) 市地重劃工程優先施作共同管道

「共同管道法」第 11 條：「新市鎮開發、新社區開發、農村社區更新重劃、辦理區段徵收、市地重劃、都市更新地區、大眾捷運系統、鐵路地下化及其他重大工程應優先施作共同管道；其實施區域位於共同管道系統者，各該主管機關應協調工程主辦機關及有關管線事業機關（構），將共同管道系統實施計畫列入該重大工程計畫一併執行之。」

(b) 對參建單位提供稅賦優惠

「促進民間參與公共建設法」，有關之條文包括：第 3 條、第 36 條及第 37 條。對民間機構參與重大公共建設開始營運後，有營

利事業所得稅之優惠措施。惟現有管線單位可能並無此經驗而未善加利用，可請管線單位依此法案提出所得稅之減繳申請，以提升參建誘因。

(c) 配合道路禁挖促使管線單位參建

「共同管道法」第 13 條：共同管道系統整體規劃於完成後，各級主管機關依據共同管道系統所規劃之結果，著手進行實施計畫。主管機關訂定共同管道實施計畫時，應同時劃定禁止挖掘道路範圍並公告之。

4-6.2 法規修改

現階段依據「共同管道建設及管理經費分攤辦法」，第二條：「共同管道工程建設經費分攤為工程主辦機關負擔三分之一，管線事業機關（構）按其參與之共同管道類別負擔三分之二。」問卷分析之結果，影響管線參建共同管道之最大因素，即是「需一次性繳交建置費用金額太高」，故建議可修法可由公務預算先行支應，並提供分期攤還，而共同管道主管機關得視管線事業單位規模和還款能力，分 20 或 30 年之長期攤還方式，減少負擔，以增加管線單位參與意願。

4-6.3 成立共同管道基金及建立運用辦法

成立共同管道基金先行支應，工程竣工時一次性繳交，目前只有臺北市成立共同管道基金，因此，臺北市可用於推動如捷運之重大建設同時施作共同管道。「臺北市共同管道基金收支保管及運用自治條例」特設置臺北市共同管道基金，制定本自治條例。共同管道建設即先由基金支出，於工程完工時管線單位再繳交應付的 2/3 工程經費。

4-6.4 調降管線單位共同管道建設分攤比例

共同管道第 21 條授權訂定之「共同管道建設及管理經費分攤辦法」規定，共同管道工程建設經費分攤為工程主辦機關負擔 1/3，管線事業機關按其參與之共同管道類別負擔 2/3。檢討現行經費分攤辦法調整分攤比例，以提高廠商配合意願。

4-6.5 修改現行各管線單位間分擔比例計算公式

現階段共同管道空間計價方式為用斷面積比例分攤經費，這對自來水管線極不利，需提出新的計價方式。例如：依使用戶數數量為計價方式、使用數量為計價方式等，並透過管線單位之共同協商取得共識，以提高管線事業單位參建共同管道之意願。

4-6.6 成立專責部門負責共同管道

各縣(市)政府宜設置共同管道科或成立相關單位部門指派專責人員協助辦理，負責共同管道業務擬定及督導推動。目前僅臺北市及高雄市有專責部門，其它縣市基本上多由工務局以專人方式進行管理。

4-7 針對不同影響因素類型之解決策略分析

影響因素之類型分析結果，發現影響管線單位參建共同管道因素可以分為 5 種類型，包括：

- (1) 一次性繳交建置費用金額太高，權重占 34%；
- (2) 參建共管成本高於自行埋設，權重占 20%；
- (3) 設計不符需求，權重占 28%；
- (4) 易受其它管線影響且增加維管複雜性，權重占 14%；
- (5) 成本回收不確定，權重占 4%。

綜合上述討論結果，增加管線單位參建共同管道之策略探討，應在不改變既有的政府與管線單位分別負擔 1/3 與 2/3 比例基礎下提出可行策略，包括：(1) 策略一：提供管線單位工程款分期攤還辦法、(2) 策略二：成立共同管道基金及建立運用辦法、(3) 策略三：成立專責部門負責共同管道。

表 6 影響管線單位參建共同管道因素類型區分

影響因素類型	策略一： 提供管線單位工程款分期攤還辦法	策略二： 成立共同管道基金及建立運用辦法	策略三： 成立專責部門負責共同管道
(a) 一次性繳交建置費用金額太高，權重 34%	◎	◎	
(b) 參建共管成本高於自行埋設，權重 20%	◎	◎	
(c) 設計不符需求，權重 28%			◎
(d) 易受其它管線影響且增加雜管複雜性，權重 14%			◎
(e) 成本回收不確定，權重 4%			
各策略可解決影響因素之權重計算	54%	54%	42%

可以解決影響管線單位參建共同管道因素類型，列於表 6，其中策略一與策略二屬同類性質，可以解決 54% 的影響因素；策略三可以解決不同 42% 因素。

所以可以採取策略一與策略三配合，則可以解決 96% 的影響因素；或採取策略二與策略三配合，同樣可以解決 96% 的影響因素。

五、結論

本研究旨在探討管線業者參與市地重劃工程建置共同管道之窒礙因素及解決方法，經層級分析法計算窒礙因素之權重，再研提解決策略。獲得以下結論：

1. 影響管線業者參與共同管道建置前 3 項因素，權重由大至小之因素分別為：(1) 需一次性繳交建置費用金額太高，34%、(2) 建置經費較自行埋管之施工費用高，17%、及(3) 共同管道建置可能不符合管線單位的需求，11%。
2. 影響管線單位參建共同管道因素可以分為五類型：
 - (1) 類型 1：一次性繳交建置費用金額太高，權重占 34%。
 - (2) 類型 2：參建共管成本高於自行埋設，權重占 20%。

(3) 類型 3：設計不符需求，權重占 28%。

(4) 類型 4：易受其它管線影響且增加雜管複雜性，權重占 14%。

(5) 類型 5：成本回收不確定，權重占 4%。

3. 增加管線單位參建共同管道之可行策略，包括：
 - (1) 策略一：提供管線單位工程款分期攤還辦法。
 - (2) 策略二：成立共同管道基金及建立運用辦法。
 - (3) 策略三：成立專責部門負責共同管道。
4. 策略一與策略三配合或策略二與策略三配合均可解決 96% 的影響因素。

參考文獻

1. 內政部營建署共同管道資料庫網站。
2. 內政部地政司網站。
3. 林宗瑤，「高鐵桃園車站特定區共同管道建設之案例研究」，朝陽科技大學營建工程系，碩士論文，2012。
4. 王聰賢，「共同管道在都會區公共工程之運用研究」。國立臺北科技大學土木與防災研究所，碩士論文，2008。
5. José-Vicente Valdenebro, and Faustino N. Gimena, "Urban utility tunnels as a long-term solution for the sustainable revitalization of historic centres: The case study of Pamplona-Spain," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.81, pp. 228-236, 2018.
6. 陳逸家，「鐵路地下化工程共同管道施作因子之評估」，國立高雄應用科技大學土木工程與防災科技研究所，碩士論文，2012。
7. 王興國，「科學工業園區開發工程分標原則之研究」，國立交通大學工學院碩士在職專班營建技術與管理學程，碩士論文，2006。

監造單位以編碼表單在模板工程安全衛生查核的執行探討

林筱凡¹ 潘煌鏗²

¹國立高雄科技大學土木工程與防災科技碩專班研究生

²國立高雄科技大學土木工程系教授

摘要

營造工程作業環境隨著工程進度會有不同危害，為建立多重督導管理機制，強化勞工作業安全預防及減少勞工的施工中災害，工程安全衛生查核事項已列入監造廠商工作項目並納入監造契約之中，透過契約的強制性來落實及強化監督職業安全衛生查核工作。這裡以模板工程為例，提出一種以編碼型式表單的查核方式，來探討監造廠商執行安全衛生查核成效。結果指出，監造單位採用編碼型式表單於模板分項工程施工作業時，監造人員在進行不定期查核執行時，無須每次確認查核標準，能夠清楚的依據高風險危害項目立即著手查核，可節省監造廠商安全查核時效。

關鍵字：監造廠商、工程安全衛生查核計畫、職業安全衛生、風險評估

Encoding Style Sheet Applied to Safety and Health Inspection of Formwork Construction by the Engineering Supervision Unit

Hsiao-Fan Lin¹ Huang Hsing Pan²

¹Graduate Student, Graduate Institute of Civil Engineering and Disaster Prevention Technology, National Kaohsiung University of Science and Technology

²Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

The construction of a construction environment will have different hazards as the construction progresses. In order to establish a multiple supervision and management mechanism, strengthen labor safety prevention and reduce labor disasters during construction, The project safety and health inspection items have been included in the work items of the manufacturing supervision manufacturer and included in the manufacturing supervision contract, and the supervision of the occupational safety and health inspection work is implemented and strengthened through the mandatory contract. Here, taking template project as an example, we propose a check method based on a coded form to discuss the effectiveness of safety and health checks performed by manufacturers. The results point out that when the manufacturing supervision unit uses the coded form in the template sub-project construction operation, the supervision personnel do not need to confirm the inspection standards every time when performing irregular inspections. They can clearly start the inspection based on the high-risk hazard projects. Save the timeliness of safety inspections for manufacturers.

Keywords: supervision manufacturer, engineering safety and health inspection plan, occupational safety and health, risk assessment

一、前言

為有效降低營造工程職業災害，強化營造工程施工安全自主管理、改善營造工程安全設施與強化營造工地現場防災等作為，政府已陸續修正和增訂「職業安全衛生法」[1]、「營造安全衛生設施標準」[2]、「職業安全衛生管理辦法」[3]等相關法規。另外，針對建立多重督導管理機制，已將安全衛生查核事項列入監造廠商的工作項目並納入監造契約之中，冀望透過契約的強制性來落實及強化監督查驗之工作，並擬定明確的損害罰則以改善查驗不實狀況來落實監造管理，以完備營造安全管理制度。在營建產業相關安全防災之落實執行面，目前仍是有待持續努力的重點，如何事前降低施工危害風險及減少勞工於施工中災害是現階段職業安全衛生管理重要課題。

根據行政院勞動部之勞動檢查統計年報資料[4]所示，近三年(2017~2019 年)之營造業勞工死亡千人率平均約為 0.167，比全部產業勞工死亡千人率平均 0.0274(如表 1)高出約 6 倍，顯示營建產業之風險遠高於其他行業。

表 1 重大職業災害死亡千人率

年 別	全部產業			營造業		
	僱工人數 (千人)	死亡 人數	死亡 千人率	僱工人數 (千人)	死亡 人數	死亡 千人率
106 年	11,352	314	0.0277	901	142	0.1576
107 年	10,988	285	0.0259	844	124	0.1469
108 年	11,052	316	0.0286	847	168	0.1983
平均值	11,131	305	0.0274	864	145	0.1676

近年政府於公共工程標案中指導相關部門研討推動「加強公共工程職業安全衛生管理作業要點」[5]、修正「職業安全衛生管理辦法」[3]、「營造安全衛生設施標準」[2]、「職業安全衛生法施行細則」[6]部份條文等作為，努力降低營造工程職災，欲將公共工程做為民間表率，加強公共工程各項職場安全及衛生工作，以公共工程施工災害之減少，進而帶動民間營造業安全及衛生工作提昇，減少生命財產損失，以營造安全之工作環境，

確保勞工生命安全與健康。

因此本次研究目的，即探討監造單位以編碼表單在模板工程安全衛生查核執行時，冀望能依據高風險危害項目立即著手查核，以提升監造單位不定期查核時效性。

二、研究方法

依據加強公共工程職業安全衛生管理作業要點[5]第十二條第四項「勞動檢查法第二十八條所定勞工有立即發生危險之虞認定標準」情事，應列為查核重點，就模板工程而言，常見危害(1)墜落、滾落(2)物體倒(崩)塌(3)物體飛落(4)感電(5)跌倒，前四項皆為勞動檢查法第二十八條所認之情事，故本次提出模板分項工程做為研究，參考設計階段模板工程施工風險評估內容，訂定相關表單及查核安全作業流程圖，研究方法流程圖(如圖 1)。

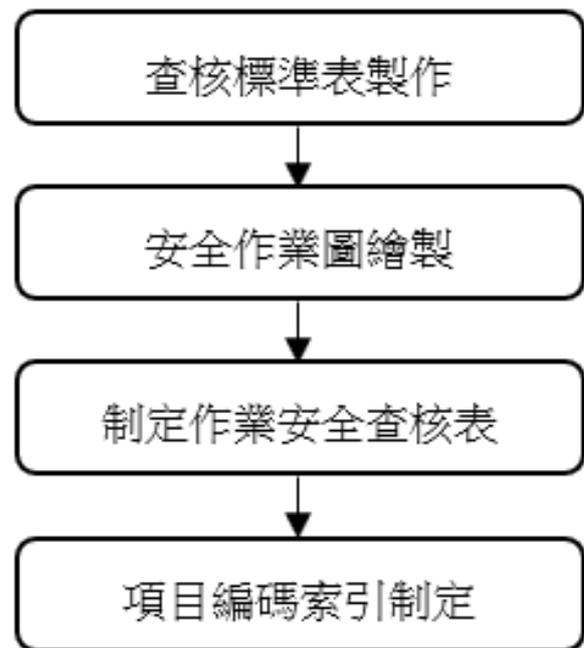


圖 1 研究流程圖

2-1 查核標準表製作

依設計階段模板工程施工風險評估，擷取第二階段作業做為查核標準表之主標題，將其評估作業拆解內容、風險對策做為查核項目及查標準參考依據；後將風險對策及風險等級各別參照至查核標準及風險等級(如圖 2)，後續依據查核時機各別訂定查核項目、

方法、頻率、不合格處理及管理紀錄；並於高風險項目列為檢驗停留點及不定期查核要點。

標準表與風險評估可參照對應

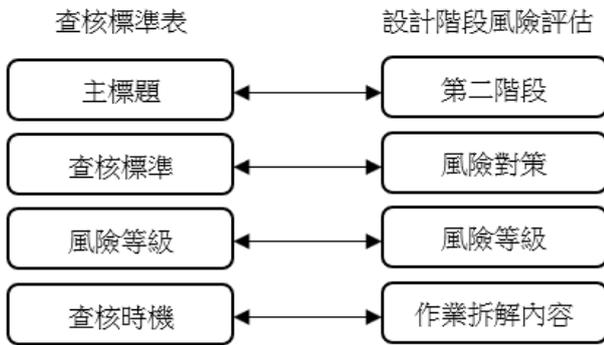


圖 2 標準表與風險評估可參照對應圖

2-2 安全作業圖繪製

參照查核標準表內查核項目及查核標準訂定作業流程圖及檢驗停留點(如圖 3)。

安全作業圖與查核標準表可參照對應

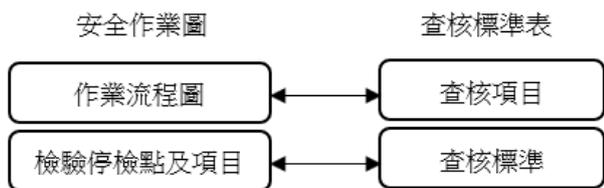


圖 3 安全作業圖與查核標準表可參照對應圖

2-3 制定作業安全查核表

查核表單內容參照查核標準表內容之查核項目、標準、風險等級內容撰寫，災害類型依設計階段模板工程施工風險評估之潛在危害制定(如圖 4)。

標準表與風險評估可參照對應

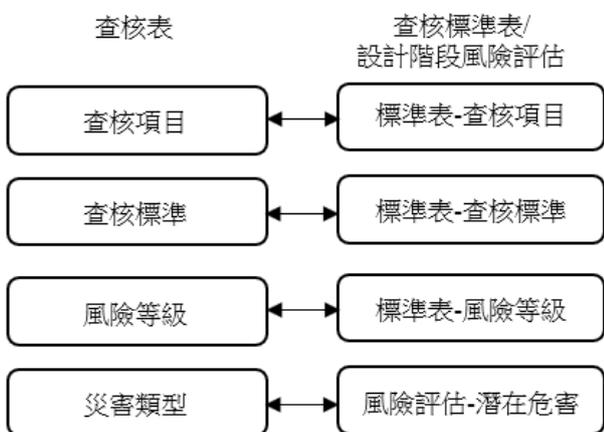


圖 4 標準表與風險評估可參照對應圖

2-4 項目編碼索引制定

2.4.1 索引項目制定採用該項英文縮寫或口語羅馬拼音為編碼代碼索引碼，編碼管理系統如下：

□ - □ - □□

(A) (B) (C)

其中(A、B)總類代碼+細類代碼

(C)為流水號

2.4.2 制作編碼前先行確認編碼項目別，各項目編碼如下：

(一) 查核標準表編碼項目：風險等級、查核時機、方法、頻率、不合格處置及管理紀錄。

(二) 安全作業流程圖編碼項目：檢驗停留點及項目。

(三) 作業安全查核表編碼項目：風險等級、危害類型。

編碼索引如表 2 所示

三、研究結果

依據編碼索引清單，將查核標準表單、安全作業流程圖及作業安全查核表單簡化後格式如下：

(一)查核標準表單

表單內容包含查核項目、標準、風險等級、查核時機、方法、頻率、不合格處置方式及管理紀錄，除查核項目及查核標準外，其餘項目填列編碼(如表 3)。

(二)安全作業流程圖

作業流程圖包含作業流程、檢驗停留點及項目，查核標準及檢驗停留點(如圖 4)。

(三)作業安全查核表單

依據查核標準項目擬定查核表，表單內容包含查驗時機、查核項目、查核標準、風險等級、災害類型、實際查核情形及查核結果欄位，於風險等級及災害類型填列編碼(如表 4)。

表 2 編碼索引《僅列部份項目》

項目	總類	總類代碼	細類	細類代碼	總碼
1	CS查核標準 Check standard	CS	模板	M	-
			作業主管資格	01	CS-M01
			強度計算書核備	02	CS-M02
2	R風險等級 Risk level	R	高度	H	R-H
			中度	M	R-M
			低度	L	R-L
3	CT查核時機 Check the timing	CT	進場前	01	CT-01
			吊運前	02	CT-02
4	CM查核方法 Check method	CM	作業主管證照	01	CM-01
			計算書	02	CM-02
5	CF查核頻率 Check frequency	CF	第一次進場前	01	CF-01
			作業期間每週至少一次	02	CF-02
6	D不合格處置方式 Disqualification method	D	重新提送	01	D-01
			立即召開	02	D-02
7	M管理紀錄 Management records	MR	進場進場	01	MR-01
			會議紀錄	02	MR-02
			查核表	03	MR-03
8	H危害類型 Hazard type	H	墜落	01	H-01
			物體飛落	02	H-02
			物體倒塌	03	H-03
			火災爆炸	04	H-04
			感電	05	H-05

表 3 模板工程查核標準表單《僅列部份項目》

查核項目	查核標準	風險等級 R	查核時機 CT	查核方法 CM	查核頻率 CF	不合格處置方式 D	管理紀錄 MR
作業前危害檢討	作業主管資格	-	CT-01	CM-01	CF-01	D-01	MR-01
	進場前商告知會議	-	CT-01	CM-03	CF-01	D-02	MR-02

檢驗停留點及項目

查核流程

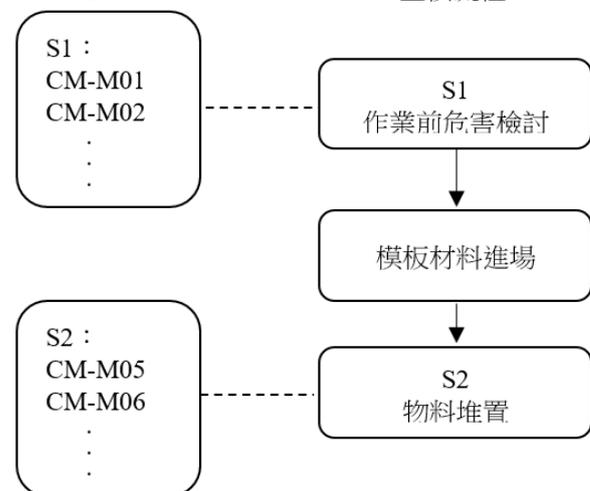


圖 4 安全作業流程圖《僅列部份項目》

四、結論

本次提出編碼型式表單的查核方式，探討監造廠商執行安全衛生查核成效，透過研究結果顯示：

- (一) 本次模板工程簡化表單與設計階段風險評估因非同一人評估撰寫及製作，著力點有所不同，因此簡化表單所花費時程並無減少，倘若風險評估及簡化表單人員皆屬有工程經驗人員或是同一批人員所評估製表，將可節省表單製作 50% 以上時間。
- (二) 編碼表單應用於工程上，以「模板進場查核表單」來說，未簡化查核標準表單項目共 12 項（項目未明列高風險項目），

採用簡化編碼表單雖有 13 項查核項目，但表單直接載明高風險危害項目共 5 項，在不定期查核時直接填列於表單上，自 110/04/20 起共計已填寫 3 次，於不定期安全查核執行時減化 1/2 填表時間。

(三) 依據公共工程施工品質管理作業要點第十條[7]，每一標案人員派任現場人員應專職，不得跨越其他標案，並依工程規模金額設置監造人員，常因人員設置總採最低人員限額配置，導致監造廠商因人力不足，無法完整執行施工品質及工地安全查核職務；倘若監造單位可採用編碼型式表單於模板工程安全查核時，因無須每次確認查核標準，只須依據高風險危害項目立即著手查核，可確實減少監造廠商安全查核時效。

4. 行政院勞動部，勞動檢查統計年報資料，2017~2019。
5. 行政院勞動部，加強公共工程勞工安全衛生管理作業要點，103 年 12 月 30 日修正。
6. 行政院勞動部，職業安全衛生法施行細則，109 年 02 月 27 日修正。
7. 行政院公共工程委員會，公共工程施工品質管理作業要點，108 年 4 月 30 日修正。

表 4 分項工程作業安全查核表《僅列高風險項目》

查核項目	查核標準	風險等級 R	災害類型 H	實際查核情形	查核結果
吊掛前機具檢查	機具使用前檢點、載重檢測及一機三證檢查	R-H	H02 / H03	-	-
吊掛中安全檢查	鋼索、扣環穿繞過吊而上於平均二點吊掛	R-H	H02 / H03	-	-

參考文獻

1. 行政院勞動部，職業安全衛生法，108 年 05 月 15 日修正。
2. 行政院勞動部，營造安全衛生設施標準，110 年 01 月 06 日修正。
3. 行政院勞動部，職業安全衛生管理辦法，109 年 09 月 24 日修正。

共同管道-幹管型式規劃探討

李尚欣¹ 王裕仁²

¹國立高雄科技大學土木工程與防災科技研究所研究生

²國立高雄科技大學土木工程與防災科技研究所教授

摘要

在高密度城市地區，一般的關鍵基礎設施管道主要位於地下，以確保城市的安全和景觀。但是，沒有整體性的規劃下，任由各個管線部門挖掘及埋設管線的結果，將導致地面下管線埋設物有如蜘蛛網般交錯綜橫。並且各單位挖掘路面維修管線的頻率將提高，也會加劇交通部門管理上的困擾及社會成本的浪費。現階段推動共同管道，主要在重劃區內的工程、開闢新的道路工程及捷運工程等重大建設。本研究將針對開發區內重大路口，利用已設置的管線數量及申請道路挖掘之頻率間的關係，探討設置共同管道之對策，讓共同管道的效益發揮最大。

關鍵字：共同管道、幹管

Discussion on Type Planning of Common Duct in Main Pipe

Lee Shang-Shin¹ Wang Hung-Yu²

¹National Kaohsiung University of Science and Technology

²National Kaohsiung University of Science and Technology.

ABSTRACT

In high-density urban areas, the general critical infrastructure pipelines are mainly underground to ensure the safety and landscape of the city. However, any pipeline department to excavate and lay pipes under the road without comprehensive planning will result in the ground being staggered like a spider web. In addition, the frequency of digging road maintenance pipelines by the pipeline department will increase, which will also aggravate the management troubles of the transportation department and the waste of social costs. At this stage, the common pipeline was promoted, mainly in major Civil engineering projects such as land rezoning, new road, and MRT constructions. In the study, we will use the relationship between the number of lay pipelines and the frequency of road excavation to explore the countermeasures for setting up common ducts in the developed urban major intersections, so that the benefits of common duct can be maximized.

Keywords: common duct, main pipe

一、緣起

工作因緣際會下，辦理某市共同管道通盤檢討業務及推動，接觸了相關的議題及法令、規定。在政府的大力推動下，其建設規模及成果上有所落差，進而想了解探討其原因，

以做為後續推動的建議方向。

二、研究動機與目的

2-1 動機

隨者農業種植技術的進步，單位面積所

能生產的糧食增加，使人口的持續的穩定成長，也隨科技的進步，人類生活由原本只是滿足基本的生命需求，演變為多元性需求。

而工業革命後人口產生集中化現象，都市化較工業革命前更加的明顯，人民要求更高的生活品質，原本密布於天際的電線線路慢慢的往地下埋設，讓路面下除原本的供水系統、下水系統更為多樣化。

就今日都市常見的地下管線約略有自來水、台電管線、電信、固網、有線電視、軍方訊號線、警方監視系統、瓦斯、雨水下水道、污水下水道、路燈線路、交通號誌等常見管線路，及輸油和特定工業用管線。

傳統埋設於路面下方的各種公共管線及特定管線，常需要維修、擴充及用戶接管的各種因素，有不斷挖補之現象，會縮短道路使用壽命、浪費資源、破壞道路平整性，影響交通及造成用路民眾的生命危險，使社會大眾詬病。

但是公共管路是現代都市進步發展的基石，更是都市防護救災體系重要的一環，如何確保維生管線在災害發生時，仍快速恢復運轉或降低災害的擴大，為政府施政重要的一環。

2-2 目的

共同管道的設置可以將不同的管線收納於其中，透過立體性的設計及內部的空間設計，提供後續管線的各項作業需求，但自民國 89 年立法後，共同管道在幹管的建設推動上並無明顯的增加，期能透過問題的了解提供日後政策推動上小小的建議。

三、文獻回顧

3-1 共同管道

泛指設於地面上下，用於容納二種以上公共設施管線之構造物，以及設置於其中的排水、通風、照明、通訊、電力或有關安全監視(測)系統等之各種設施。(共同管道法，2000)

法國是共同管道最早起源，其初是為了解決巴黎市區因污水排放系統建置不完善，1832-1833 年間霍亂流行造成全市 2 萬多人

的死亡、也引發了法國大革命，市政府決定在城市道路下方大規模進行衛生下水道管網建設，由於較大的下水道斷面積，其他公用管線(如電力、電話、給水、壓縮空氣等)可同時可收容於其中。(技師期刊，78)

3-2 共同管道分類

幹管指容納傳輸區域性之公共設施管線，無法直接引至用戶之管道，如圖 3-1。(共同管道工程設計標準，2013)

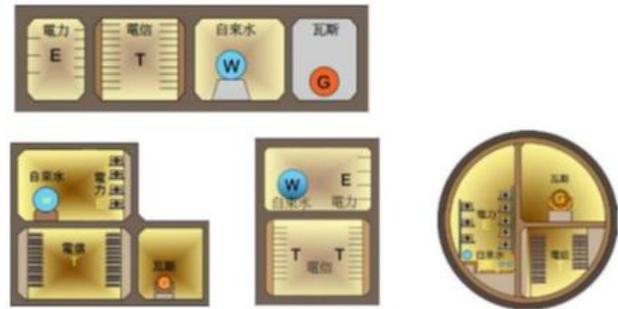


圖 3-1 幹管示意圖

供給管用以連接幹管，容納直接供給用戶管線之管道，其可再細分為支管、電纜溝及纜線管路等，如圖 3-2。(共同管道工程設計標準，2013)

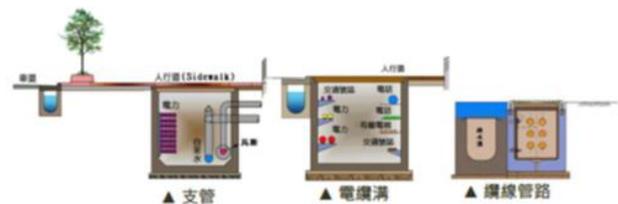


圖 3-2 供給管示意圖

幹管常見設在道路車道下方，屬各單位所專用通過性或大口徑管線，就都市發展區而言，各管線單位的幹管線路多已完成下地埋設，如在這些區域設置共同管道幹管，既有管線需辦理臨時遷移及永久遷移等 2 次作業，經費及期程龐大，就民生所造成的影響巨大。(桃園市共同管道系統整體規劃，2018)

支管大都設置在慢車道或人行道下方，需考量工作人員之作業空間其相關設施與幹管相似。(內政部，2017)

電纜溝亦設於人行道下方，有開放式及封閉式，開放式人員以打開人行道上蓋板即

可進行作業，封閉式人員由傳統人孔進入函體進行相關工作。(內政部, 2017)

纜線管路以人手孔及 PVC 管路組成，收納以電、光等建傳遞物質之管線(內政部, 2017)。

共同管道除主要管道外，尚需其他附屬設施，通風、排水、配電、插座、照明、接地、廣播、對講機、監視、標誌、發電機、空調、監控及安全警報、電話通訊等共 15 種系統，用以輔助整體功能運作。(林宗瑤, 2012)

3-3 收納管線概述

公共設施管線泛指電力、電信(含警、軍特定單位使用電信)、自來水、下水道、瓦斯、輸油、有線電信、路燈、交通號、廢棄物或經主管機關會商目的事業主管機關認定供民眾使用的管線(共同管道法, 2000)。

電力系統主要透過發電、輸電、配電等架構，如圖 3-3，將能源傳送給用戶使用，傳統輸、配電線路多為架空存在，隨著民眾生活的水平提昇，對城市景觀的要求及防災因素，都市發展區多數線路已完成地下化作業，其地下化輸、配電線路即是共同管道收納的對象。

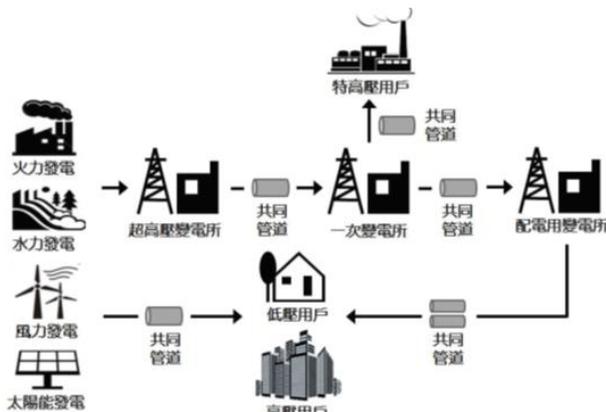


圖 3-3 電力系統架構圖

電信電纜提供一般通訊的傳輸，包括用戶電纜及中繼電纜。市內電纜可分為電信提供者不同機房間之幹線管線及機房至用戶間之配線管線，如圖 3-4。隨著無線通訊的普及，用戶的電信需求雖隨之下降，其因網路需求的增加其機方和用戶間的配線仍有存在必要性，和電力系同相同，早期電信亦為立桿型

式，現在電信桿亦隨時間演變而減少。

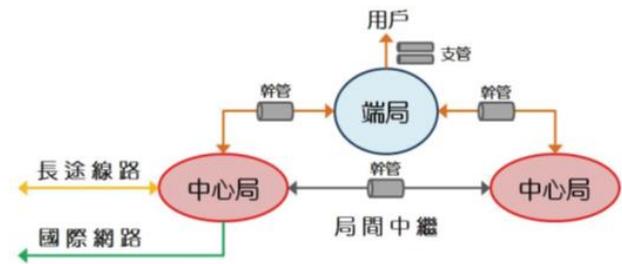


圖 3-4 電信系統架構圖

自來水，其系統流程略述為取水、導水、淨水、配(送)水四個階段，如圖 3-5。因為民生需求中最為基本的，故其管線配置密度高，其輸送方式可分為重力流及壓力管兩種，除原水輸水系統或部分山區管線採重力輸送外，多屬壓力傳送。隨著意識高漲的消費，用戶對高質量的自來水要求更甚以往，產業型態亦由需高穩定供水之科技產業取代可容偶發性缺水之傳統產業。

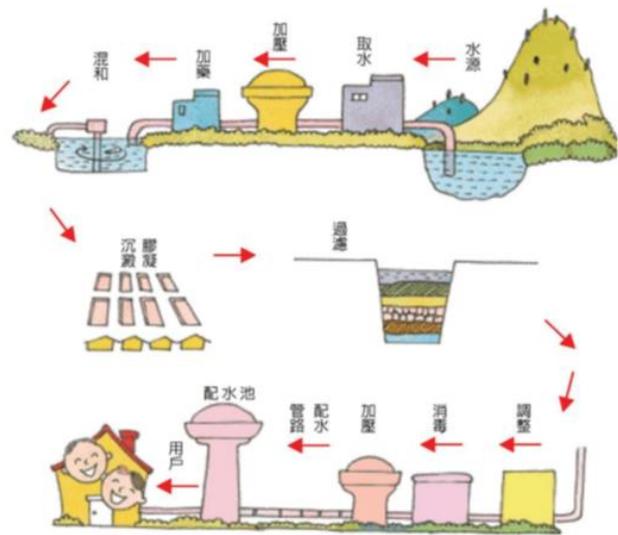


圖 3-5 自來水系統架構圖

瓦斯為民眾一般對於氣體燃料的通稱，市面上瓦斯可分為兩種，瓶裝瓦斯稱「液化石油氣」；而透過瓦斯管線傳輸的一般稱為「天然氣」。隨著天然氣軟硬體設施的進步及政策大力推動下，市佔率逐步的趕上液化石油氣，其管線的布設亦增加地下管線的密度。

有線電視發展起源於解決山區收視不良的社區共同天線，至民國 99 年全台灣合法收視戶已達 508 萬，佔全國家家戶數的 64%，依業者估計包含非法私接戶應可達到 80%。

下水道系統是都市基本公共建設，用以提升人民居住環境品質、保障衛生與健康、保護生命財產安全、維護水資源及水再利用不可或缺，如圖 3-6。系統依收集的水來源區分為雨水和污水下水道，雨水下水道收集降落於地面之水透過雨水管收集後就近排放至河、海等；污水下水道收集家庭及事業廢水，透過污水管收集至污水處理廠處理後放流。

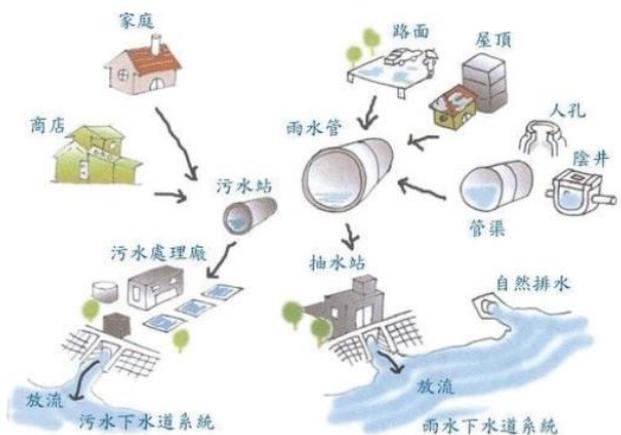


圖 3-6 下水道系統架構圖

3-4 收納於幹管條件分析

一般雨水下水道，系統設計時係考量整體區域地勢，以避免降雨積水成災，使雨水可藉由重力排出，並滿足最低自清流速，避免泥沙淤積，其埋深無法隨共同管道任意變化，且其挖掘頻率甚低，一般較少納入共同管道內。

而台灣污水下水道的設計亦採用重力流方式，如同雨水下水道不能隨意變化埋深，另須考量污水中可能含有之污染物化學特性及恐產生具有揮發性及毒性之氣體，例如氨及甲烷等，原則上於共同管道規劃時，亦不建議納入考量。

而天然氣管若為供應民生所需之用途，屬於維生管線，氣體雖具窒息性及可燃性，但若做好安全之監控管理，則亦可考慮納入共同管道中。

自來水管線及天然氣管線等壓力流管線，因無須考慮縱坡變化之因素，故亦可收容於幹管內。

其他電力及電信電纜於管道內可變形，

設置彈性較高且較不受空間變化之限制，所以常納入幹管共同管道之內。

3-5 共同管道建設經費及分攤

採用明挖覆蓋工法建置幹管，其工程經費與淨斷面積成正相關(含主體工程建造費、附屬設施工程費及既有管線遷移保護費等三項)，可由式 3-1 估算約 3.0 億/公里；支管共同管道(2m×2.2m) 1.2 億/公里；電纜溝(1m×1.52 m) 0.2 億/公里。幹管的建造費用約是電纜溝的 15 倍，就成本上是相當的有差距，再者其經費分攤由工程主辦機關負擔 1/3，其他參與負擔 2/3，如由民生管線單位中有需求者自行辦理，其負更是沉重，因此現行共同管道的推行仍多由政府機關辦理。

$$M = -0.0018A^{22} + 0.1987A + 1.5491 \quad (\text{式 3-1})$$

四、研究結果

透過某高雄市政府的道路挖掘管理系統資料，如圖 4-1，分析其自 2016 年至 2020 年近 5 年期間的道路挖掘相關資料及就申請單位及數量做相關分析，以做為了解管線單位線挖掘的需求的量化指標。

項目	申請單位年度統計 (案件類別分類)							
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月
數量	77	54	55	71	96	50	45	
機修	94	108	98	74	92	100	101	
零星	597	718	516	692	718	794	849	
駁艇	120	277	344	270	376	292	369	
總計	893	1157	1413	1209	1222	1236	1364	
挖掘長度(m)	28,977.79	47,266.24	43,597.08	40,389.27	49,525.90	41,828.44	45,045.86	40.1
挖掘面積(m²)	25,166.43	39,102.54	34,026.55	34,507.30	43,574.61	34,661.72	39,075.04	31.5
新建機用戶	22.6	50.3	54.6	57	317	327	390	

圖 4-1 高雄市政府系統查詢畫面

就資料而言，每年申請挖掘案約為 10,000 件(不含展期案件)，並無隨年增加，且因為管線臨時損壞需進行搶修約為 1,000 件，所佔比率約為 10%，反而是因建築用戶需求而申挖掘自 2,000 多件逐年增加至將近 4000 件，其佔比由原 20.42% 增加至 37.29%，如圖 4-2。足以顯示近 5 年來因臨時維修的需求

是固定的，民生增加常是道路挖掘的來源。這也反應出地下管線或許存在管損問題，但不會因為使用時間長短而增加管損的機會。另根據不用的管線單位挖掘申請進行分析，民生五大管線自來水、台電、電信(含有線電視及固網業者)、下水道、瓦斯的申挖次數並無明顯的變化，但其申量為總挖掘數的絕大多數，如圖 4-3。

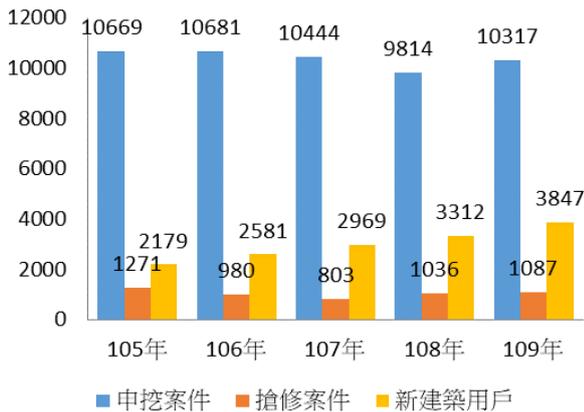


圖 4-2 年度申挖案件分析資料



圖 4-3 五大管線申請統計資料

另外屬於管線單位計畫型挖掘係由管線單位年度排定作業，多為管線單位的汰換工程或新設工程，雖然每年的計畫型挖掘案件所佔比例相對為少數，介於 430 件到 680 件之間，但是由統計資料比對和搶修案件數量，有部分相關連，當計畫型案件數量增加時，有減少搶修案件數量的趨勢，如圖 4-4。

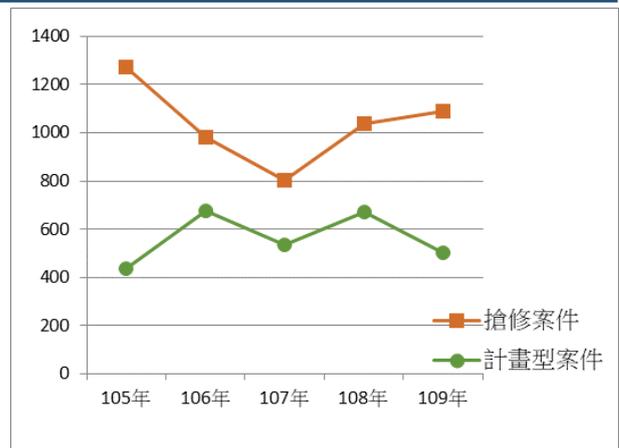


圖 4-4 計畫型案件與搶修案件統計資料

另透過高雄市的道路挖掘管理系統，可以發現在高雄市內的道路的地下密佈著各式各樣的民生管線，但各管線在道路的直線路段上，大多可以各自獨立的，如圖 4-5，但是在於十字路口處，因各管線的轉向需求，會有大量的管線交錯問題出現，如圖 4-6。依高雄市道路挖管理自治條例第 20 條只統一規定各管線管頂距路面深度，並未對各管線有不同差異條件，易造成各管線單位於路口處造成交錯會合現象。

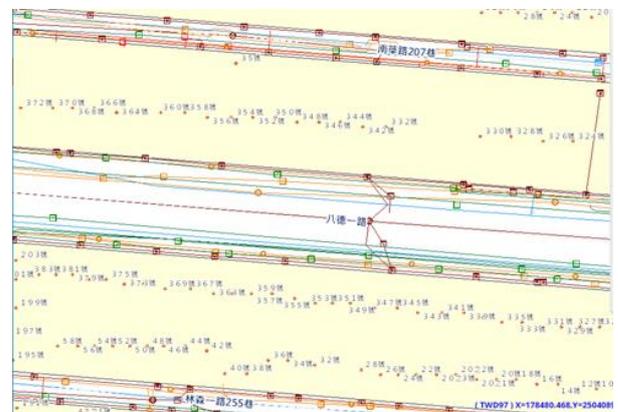


圖 4-5 各管線單位道路直線段分布圖



圖 4-6 各管線單位道路路口段分布圖

五、結論與建議

經由高雄市政府挖掘資料分析，在現有開發道路上，管線單位每年有萬件的挖掘需求，每年的挖掘長度在約在於 500 公里，即代表著地下管道的維護、新建有很大的需求，如能利用共同管道收納民生管線的立意將能更有效的利用道路空間，但是因雨、污下水道的特性，在多數的規劃報告中多不納入共同管道收納，其餘主要民生管線只餘自來水連結區域性主幹管需較大收納空間，電力、電信、有線電業者及自來水給水管多為小型管路，而幹管型式的共同管道所需經費又是纜線管路的 15 倍之多，那大量建立幹管型式的必要性則有再檢討，如能利用纜線管路即可收納大部分的民生用管路。

但在十字路口處，因多數管線轉向需求，將會造成相互的影響，如能以立體化使用道路下方空間，將可於日後管路擴充、維護上有所助益，在路口處進行幹管型式的共同管道建設將有助日後降低開挖。雖然路口處建設幹管型式共同管道短期內會對交通造成衝擊，但以長期效益而言，因日後無需在路口處進行開挖將大大的降低交通社會成本。

參考文獻

1. 內政部營建署，「共同管道法」，2000。
2. 內政部營建署，「共同管道法施行細則」，2001。
3. 內政部營建署，「共同管道工程設計標準」，2003。
4. 吳峰凱，「桃園市共同管道建設與管理策略之研究」，2020。
5. 高雄市政府，「高雄市道路挖掘管理自治條例」，2019。
6. 臺灣世曦工程顧問股份有限公司，「桃園市共同管道系統整體規劃總規劃報告」，2018。
7. 楊昭卿，台灣自來水公司管線配制問題之研究，2020。
8. 陳駿歲，產品競爭模式之研究-以台灣液化石油氣與液化天然氣銷售為例，2012。
9. 陳美芝，有線電視發展家庭保全初探研

究~以新視波有線電視為例，2011。

10. 許聖富、王寶泉，海峽兩岸推動共同管道作法之異同探討，技師期刊，第 78 期，2017。
11. 亞新工程顧問股份有限公司，高雄市共同管道系統第二次通盤檢討規劃報告，2020。
12. 高雄市政府工務局，道路挖掘管理中心，<https://pipegis.kcg.gov.tw/Homepage/index.aspx>。

自我效能、學習投入與專業能力成長關係之研究-以高中職生參與抗震競賽為例

陳祿璿¹ 林紀亘² 黃忠發³

¹ 國立高雄科技大學土木工程系土木工程與防災科技在職專班碩士生

² 國立高雄科技大學土木工程系土木工程與防災科技碩士生

³ 國立高雄科技大學土木工程系教授兼系主任

摘要

本研究目的主要以自我效能及學習投入為主要影響面向，探討專業能力之現況、相關與預測情形，協助學界及產業界，瞭解在學生之自我效能及學習投入，對於專業能力提升影響，進而透過產學合作發掘有潛在就業意願的畢業生投入產業成為生力軍。本研究為調查研究，採用「自我效能量表」、「學習投入量表」、「專業能力量表」、「活動效益量表」及「基本資料問卷題項」為研究工具，本研究以國內高中職土木營建相關科系在學學生作為研究對象，總計發放 254 份問卷，有效樣本共計 144 份，並使用 SPSS 統計套裝軟體進行資料統計分析。本研究以平均數、標準差、單因子變異數分析以及徑路分析等統計方法進行資料分析，並根據研究結果提出結論與建議。

茲將研究結論敘述如下：

- 一、透過相關分析發現高中職學生之自我效能與學習投入對專業能力有顯著相關，證實三者間有一定程度之關係。
- 二、由徑路分析中得知高中職學生之自我效能透過學習投入對專業能力具有顯著影響，且發現分析結果完全符合驗證中介之條件，即使高中職學生之自我效能並無直接對專業能力提升產生效益，而是透過學習投入之增進而間接影響專業能力，故高中職學生之自我效能對學習投入與專業能力具有完全中介之效果。

關鍵字：自我效能、學習投入、專業能力成長

The Relationship between Self-efficacy, Learning Input and Professional Ability Growth - Taking the Seismic Competition as an Example

Chen Lu-Hsuan¹ Lin Ji-Xuan² Huang Chung-Fah³

¹ Master Student, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

² Master Student, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

³ Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

The purpose of this research is to focus on self-efficacy and learning input as the main impact aspect, to explore the current status, correlation and prediction of professional capabilities, to assist academia and industry to understand the impact of students' self-efficacy and learning input on the improvement of professional abilities, and then through Industry-university cooperation

seeks out graduates with potential employment willingness to join the industry as a new force. This research is a survey research, using the "self-efficacy scale", "learning input scale", "professional ability scale", "activity benefit scale" and "basic information questionnaire items" as research tools. High school vocational civil construction related students as the research objects, a total of 254 questionnaires were distributed, with a total of 144 valid samples, and SPSS statistical package software was used for statistical analysis of data. In this study, statistical methods such as mean, standard deviation, single-factor variance analysis, and path analysis were used to analyze data, and conclusions and recommendations were made based on the research results.

The research conclusions are described as follows:

1. Through correlation analysis, it is found that the self-efficacy and learning input of high school vocational students are significantly related to professional ability, which confirms that the three have a certain degree of relationship.
2. From the path analysis, it is learned that the self-efficacy of high school vocational students has a significant impact on professional ability through learning input, and it is found that the analysis result fully meets the conditions of the verification agency, even if the self-efficacy of high school vocational students does not directly improve professional ability. It produces benefits, but indirectly affects professional ability through the increase of learning investment. Therefore, the self-efficacy of high school vocational students has a completely intermediary effect on learning investment and professional ability.

Keywords: self-efficacy, learning investment, professional ability growth

一、緒論

1.1 研究動機

隨著大環境改變以及資訊科技的快速發展，全球知識經濟時代來臨，各國對於教育改革無不積極，以期培育優秀人才與強化國際競爭力【Bray, 2007; Koljatic et al., 2013】。人才乃國家進步重要因素之一，教育則不僅僅是人才培育的搖籃，更是國家永續發展的基礎，故如何提升其學習成效，儼然成為當前首要課題【教育部，2013】。

台灣從 1990 年始，為了打倒升學主義，實行人人有書讀，政府也推動了一系列的教育改革方式，廣泛設置大學，其密度成為全球之甚，大學入學門檻也大幅降低，錄取率更大於 90%，使得大學畢業生滿街跑現象；依據內政部統計處(2016)所公布 105 年第 11 週內政統計通報本國 15 歲以上人口教育程度統計，大學生畢業生人數已超過 500 萬人【葉建宏，2016】。擁有大學以上文憑的人口相較於過去，數倍暴增，形成經濟學家所稱的文

憑通膨現象。

在文憑通膨現象下，企業主現今在意的已不是以往的學歷，而是專業能力【蘇珍慧，2014】，企業愈趨往重視實務上與專業能力，且在學歷偏好層面，漸漸回到人才本身之素養，不再只參考學校光環及排名【1111 通訊社記者，2013；戰寶華，2014】，然而專業能力的提升，則需先透過以往學習，學習投入則會影響專業能力之成長。投入學習時間越長及頻率越高，對於學習表現就越好【Kuh, Kinzie, Schuh, & Whitt, 2005; Greene, Marti, & McClenney, 2008】，顯示目前專業能力為職場中競爭差異性重要因素，故持續學習投入，來提升專業能力為現今社會必須重視之課題，亦是企業所重視的重要議題。

我國目前教育方式仍多為課堂講授，甚少機會讓學生共同討論與思考，其學習態度與主動性，亦受外來誘惑影響(如：3C 產品)不如以往，故如何增加學生對求知的渴望，明白學習的意義與價值，更是迫在眉睫【陳雯玲，2017；Dyson, 2001；Johnson and

Johnson, 1993】。

而此精神與抗震競賽活動之主軸核心不謀而合，本活動採小組方式進行，主要藉由此競賽活動，讓高中職學生經由團隊合作方式進行學習，並發現問題與解決問題之過程互相激盪與鼓勵，且增加對活動內容之學習興趣，進而建立革命情感共同達成目標。

而近年來目前鮮少有研究聚焦於自我效能與成就動機，同時從參與抗震競賽活動之角度，專注於個人心理因素去探討對學習投入的影響；Linnenbrink 與 Pintrich 於 2003 年，提出自我效能是影響學習投入的重要關鍵因素，亦能帶來更多學習投入；而吳宗立(1993)認為成就動機是誘發學習意願，參與學習活動，並且願意為學習目標而奮鬥之內在動力，在學習過程中是一項中介過程，唯一直接影響學習追求及努力；故本研究擬將深入探討與研究自我效能、學習投入與專業能力成長之關係。

1.2 研究目的

根據上述之研究動機，針對目前國內高中職學生土木營建相關科系之在學生，探討其自我效能、學習投入與專業能力成長之現況、相關與預測情形並以背景變項，如學校類別、在學年級、科別、學校區域、參與活動類型、準備活動時間、團伍中擔任角色、參與活動次數、未來參與意願，探討高中職土木營建相關科系之在學生專業能力成長關係之差異情形，希冀達成以下目的：

1. 探討不同背景變項在學生，其自我效能差異情形。
2. 探討不同背景變項在學生，其學習投入差異情形。
3. 探討不同背景變項在學生，其專業能力關係差異情形。
4. 探討在學生之自我效能、學習投入對專業能力關係影響，是否具有預測性。

二、文獻回顧

2.1 抗震盃之介紹

抗震盃主要針對全國高中職學生，活動競賽項目有下列三項：

1. 抗震大作戰：由參賽隊伍需事先製作紙建築模型，放置於活動專用之六軸震動台上，進行水平及垂直方向的搖動以模擬地震波對於建築結構的破壞，藉此提升學生對於耐震設計的瞭解。
2. 橋梁變變變：主要運用現場食材作為構件來搭設橋梁，誘發學生發揮創意設計及組裝出結構穩定的橋梁，藉此提升學生對於橋梁設計的瞭解。
3. 點燃拍攝魂：配合專業媒體的幫助，製作結構物抗震以及設計專業工程教育影片，並於網頁上以及第四台的公共頻道(CH3)上反覆播放，希藉由微電影競賽，增加趣味性，並由網路工具，將製作過程擴散到各界、發揮科普計畫之擴散、普及精神。

期藉由競賽活動方式，讓高中職學生能夠透過對於結構理論的理解、創新的設計、實際動手製作之過程，向下強化並深根於建築耐震設計以及工程教育，以提升國民教育與結構耐震之間的關係。

2.2 自我效能

自我效能(self-efficacy)之概念，係由知名的心理學專家 Bandura (1977)中所提出，是指學習者對於自身針對特定學習目標，相信自身具備完成學習任務的能力之信念，亦是能夠有效預測學習者未來學習成就的重要因素【Henderson, Huang, Grant, & Henderson, 2009; Shank & Cotton, 2014】。

Hackett & Betz (1981)自我效能是致使所有個人行動之力量，尤其是在個人遭遇阻礙時能夠展現克服之行為，Schunk (1985)自我效能係指個人依據經驗，對自我完成某一事物或工作之信念，它影響個體對活動之選擇、努力與動機的堅持度以及熟習之水平。

Carter、Breen 與 Beilby(2019)指自我效能被認為是一種普遍的個人因素，反應個體對其有能力成功執行行動與獲得期望結果的內部信念。

孫志麟(1991)經由分析 Bandura 對於自我效能之定義，認為自我效能有三方面之意涵。一、特殊情境：自我效能係一種特殊之社

會行為。二、能力的信念：自我效能係指個人對自身能力上之認知及想法。三、動態的作用：自我效能牽涉個人如何成功地完成某種行動之臆斷；所以自我效能具備有驅策行為之效用，是行為之動力泉源；而 Linncnbrink 與 Pintrich (2003) 則指出，自我效能是個人對於自己能不能夠做某些行動的判斷，是一種特殊性的與情境性的能力判斷。

2.3 學習投入

Newmann、Wehlage 與 Lamborn (1992) 定義為學生心理的投資和努力於學習、理解知識及增加技能等，而就個人而言是有意圖提升學業工作上之能力；Glanville 與 Wildhagen (2007) 研究中指學生在學校課程中的行為及心理投入，而投入之程度可以使它成為一個瞭解學生學習成效之提升概念。

許多研究證實，在學生的學習過程中扮演著相當重要的成分。Mosenthal (1999) 指出，學習投入為學習者認知及情感系統的基礎，Astin (1993)、Pascarella 與 Terenzini (2005) 研究中顯示學生投入教育活動的體力與時間，為提升學習成效及發展最好的觀測值。

張景媛(1997)指可以檢視學生個人表現行為與精神上投入程度的高低，並反映出學習用心程度與持久性。學習投入時間及專注度等越高者亦會有正向的提升學習成效之表現。

2.5 專業能力

Alsina 與 Mulà (2019) 針對 30 名數學教師的課程進行分析，分析出五種專業實踐要素能提升教師將先前知識、經驗與系統信念轉化為專業能力。

Ardiawan (2017) 國小教師的專業能力與學生自然科學學科成績的關聯性，研究結果顯示，教師專業能力與學生自然科學學習成績之間有顯著相關。

Bilal、Guraya 與 Chen (2019)，探討技能發展計畫 (faculty development program, FDP) 對醫療專業人員的專業發展之影響，研究結果技能發展計畫對於提升專業人員的專業知

識與專業能力，有非常顯著的效果。

三、研究方法

3.1 研究架構

依據文獻回顧及相關資料彙整與搜集，建立本研究架構，如圖 1 所示。主要探討自我效能、學習投入與專業能力成長三者間影響程度之關係。故本研究除探討自我效能與學習投入構面下各因素變數對專業能力成長影響的程度之外，並且實證高中職學生之自我效能與學習投入二構面是否具有提升其專業能力成長之效果，以及瞭解自我效能、學習投入與專業能力成長三構面間之是否有關聯性。

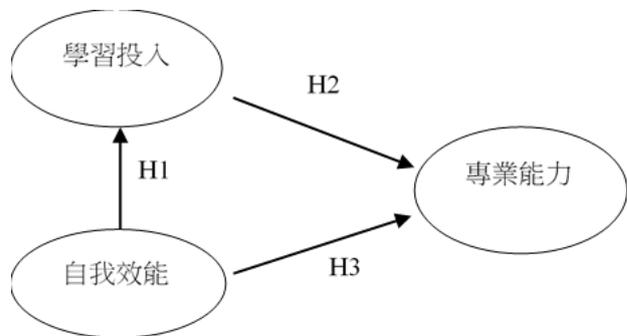


圖 1 研究架構圖

3.2 研究假設

依據相關文獻理論做基礎，本研究將架構模型分為兩大部份進行分析，第一部份為探討自我效能與學習投入二構面與專業能力成長之關係，第二部份為自我效能與學習投入二者之間的互動關係；最後透過徑路分析檢驗各研究構面間因果之關聯性。由上述研究模型推演出本研究之假設如下：

- H1：高中職學生之自我效能對學習投入具有正向直接影響效果。
- H2：高中職學生之自我效能對專業能力成長具有正向直接影響效果。
- H3：高中職學生之學習投入對專業能力具有正向直接影響效果。
- H4：高中職學生之自我效能於學習投入及專業能力間具有中介效果存在。

3.3 研究對象及抽樣方法

本研究為調查研究，以文獻探討為理論

基礎，採用「自我效能量表」、「學習投入量表」、「專業能力量表」及「活動效益量表」為研究工具，本研究主要為國內高中職學生，針對參與本次抗震活動之學生進行抽樣，並以個人作為研究樣本單位，探討各個變項因素之間的關係加以論述。作為研究對象進行問卷調查，有效樣本為 189 份。第一、二、三及四部分，依序為「自我效能量表」、「學習投入量表」、「專業能力量表」及「活動效益量表」，係採用李克特(Likert)六點尺度評量的方式，請受測者加以衡量，選項分別為「完全不同意」、「不同意」、「有點不同意」或「有點同意」、「同意」、「非常同意」依序給予 1~6 分。第五部份為填答者之基本資料，主要針對學校類型、就讀年級、就讀科別、在學地區、活動參與準備天數、準備時數、隊伍擔任的角色、參與本活動次數、日後參與活動意願等項目進行詢問。

四、研究結果與分析

4.1 研究量表信度檢驗

在此採用 Cronbach's α 值分析法對各量測量表分別做信度分析，其判斷信度之準則，即 $\alpha < 0.35$ 代表低信度； $0.35 < \alpha < 0.70$ 代表中信度； $\alpha > 0.70$ 代表高信度【周文賢，2004】。本研究依照上述之條件進行問項信度分析，得知本研究量表整體與各構面之信度皆高於 0.70，屬於高信度水準。自我效能量表之整體信度值 0.913；學習投入量表之整體信度值 0.918；專業能力量表之整體信度值 0.913 以及活動效益量表之整體信度值 0.899，說明本研究量表所得之結果具有高度一致性與穩定性。

綜合上述之信度分析之 Cronbach's α 皆符合理論範圍內，故可接受自我效能、學習投入、專業能力與活動效益之量表。

1. 自我效能量表

自我效能整體構面之 Cronbach's α 值為 0.913，茲將整理如表 1 所示，經由分析後，8 個衡量題目的項總相關值中，皆大於 0.7 達到標準。

表 1 自我效能信度分析

題目	刪除該題後之 Cronbach's α 值	Cronbach's α 值
我很樂意面對具有挑戰性的學習	0.911	0.913
在學習上我是個能自立學習的學習者	0.903	
第一次不成功時，我會一直嘗試到成功為止	0.893	
我相信只要努力就能獲得良好的學習成效	0.907	
我能夠達成自己所設立的學習目標	0.897	
我訂出一個學習計畫後就能將它付諸實行	0.901	
改變學習方式後，我會注意是否有進步的情況	0.900	
遇到學習瓶頸時，我會找尋新的學習方式來改善舊有學習方式	0.899	

2. 學習投入量表

學習投入整體構面之 Cronbach's α 值為 0.918，將其整理如表 2 所示，經由分析後，15 個衡量題目的項目總相關值中皆大於 0.7，達到高信度之標準。

表 2 學習投入信度分析

題目	刪除該題後之 Cronbach's α 值	Cronbach's α 值
我會遵守製作此次競賽作品中課堂上的規定	0.915	0.918
學習過程中，我會表現出認真學習的樣子	0.911	
學習過程中，我能夠維持專注力上課	0.912	
我能準時完成交辦作業	0.912	
我喜歡參與此上課	0.913	
我對上課內容覺得容易	0.913	
課堂中指派的作業讓我覺得興奮	0.910	
當我在上課時，我感到很快樂	0.910	
我覺得上課很有趣	0.909	
我嘗試尋找其他與課程相關的資源，例如電視、期刊文章與報章雜誌等	0.913	
當我閱讀課程教材時，我會問自己問題，來確保是否理解它	0.911	
我會閱讀補充教材，以學習更多課堂上的知識	0.913	
如果我不懂課程所學的概念，我會想辦法去理解它	0.915	
如果我不懂課堂所學的東西，我會回頭再看一次	0.915	
即使沒有考試，在家我還是照樣讀書	0.915	

3. 專業能力量表

專業能力整體構面之 Cronbach' s α 值為 0.913，將其整理如表 3 所示，經由分析後，8 個衡量題目的項目總相關值中皆大於 0.7，達到高信度之標準。

表 3 專業能力信度分析

題目	刪除該題後之 Cronbach's α 值	Cronbach's α 值
在活動過程中，增進我對已學力學/結構等課業之理解程度	0.899	0.913
在活動過程中，我廣泛涉獵力學/結構等相關知識	0.899	
在活動過程中，我更深入力學/結構等相關知識	0.901	
在活動過程中，我將課堂上所學的知識整合於作品中	0.906	
在活動過程中，我提出改善流程並清楚佈署導入步驟	0.899	
在活動過程中，我思考分析問題原因，並找到更適當的解決方案	0.904	
在活動過程中，我提出改善流程並清楚佈署導入步驟	0.899	
在活動過程中，應用最有效率的方法徹底執行我的任務	0.908	

4. 活動效益量表

表 4 活動效益信度分析

題目	刪除該題後之 Cronbach's α 值	Cronbach's α 值
在活動過程中，增進我對已學力學/結構等課業之理解程度	0.899	0.899
在活動過程中，我廣泛涉獵力學/結構等相關知識	0.899	
在活動過程中，我更深入力學/結構等相關知識	0.901	
在活動過程中，我將課堂上所學的知識整合於作品中	0.906	
在活動過程中，我提出改善流程並清楚佈署導入步驟	0.899	

活動效益整體構面之 Cronbach' s α 值

為 0.899，將其整理如表 4 所示，經由分析後，5 個衡量題目的項目總相關值中皆大於 0.7，達到高信度之標準。

4.2 填答者基本資料分析

基本資料之統計變數包含填答者學校類型、就讀年級、就讀科別、在學地區、活動參與準備天數、準備時數、隊伍擔任的角色、參與本活動次數、日後參與活動意願等項目。針對所蒐集之樣本資料進行整理分析，分析樣本結構及分佈情形，分述如下。

本研究發放問卷共計 254 份，其中有效樣本 144 份。在各屬性方面，學校方面以技術型高中(高職)居多佔 82.4%，綜合高中則僅佔 3.6%；其在學年級部份，以二年級為最多佔 58.8%，其次為一年級佔 36.0%；科別方面則是建築科為多數佔 76.5%；受測者之學校位置部份，以北、中部佔 64.7%，為南部佔 35.3%；本次參與之活動以抗震盃居多佔 89.7%，橋梁變變變為次之佔 10.3%，可知受測者大多參與抗震活動；活動前準備平均時間為 17.86 天(標準差=16.17)，其中以 10 天以下者居多佔 43.2%，次之 30 天以上者則為 26.1%；總共準備平均小時為 38.8 小時(標準差=39.82)；另外，在隊伍職務擔任部份，多以組員為主佔 79.5%；而其中大多第一次參與本抗震活動佔 74.2%，二次以上則佔 14.1%；另於本次調查顯示，有八成以上之受測者願意再次參加本活動。

4.3 各構面量表分析

從表 5 中可以發現依據有效樣本受試者之填答情況量表分析中，「自我效能」構面平均分數為 4.65 分，標準差為 0.818，在受測樣本中，自我效能偏向同意；「學習投入」構面平均分數為 4.70 分，標準差為 0.697，在受測樣本中，學習投入偏向同意；「專業能力」構面平均分數為 4.74 分，標準差為 0.694，在受測樣本中，專業能力偏向同意；「活動效益」構面平均分數為 5.03 分，標準差為 0.718，在受測樣本中，活動效益偏向非常同意。

表 5 各構面量表分析

構面	自我效能	學習投入	專業能力	活動效益
自我效能	1			
學習投入	0.659**	1		
專業能力	0.408**	0.622**	1	
活動效益	0.431**	0.557**	0.575**	1

4.4 相關分析

本章節主要以 Pearson 相關分析檢測研究模型中各構面之相關程度。結果如表 6 所示，以自我效能構面與學習投入構面($r=0.659$, $p<0.01$)之相關程度最高，說明自我效能較高之填答者，其學習投入亦越高。而自我效能構面與專業能力構面($r=0.408$, $p<0.01$)及活動效益構面($r=0.431$, $p<0.01$)亦具有相當程度之相關，說明填答者傾向認為自我效能與此二構面有著息息相關，亦可解釋為高中職學生自我效能將有助於學習投入與專業能力提升進而影響活動的效益。

另由分析結果發現，學習投入與專業能力($r=0.622$, $p<0.01$)與活動效益($r=0.557$, $p<0.01$)具中度正向相關，可解釋受測者若學習投入越高，有助宜提升專業能力及活動效益。

另由分析結果發現，專業能力與活動效益($r=0.575$, $p<0.01$)具中度正向相關，可解釋受測者若專業能力提升，有助活動效益。

由上述分析結果得知，自我效能與學習投入以及學專業能力有達顯著正向相關，而學習投入亦與專業能力達顯著正向相關，而專業能力亦與活動成效亦達顯著正向相關，說明彼此構面間有一定程度之關聯。

表 6 研究構面之相關分析

構面	平均數	標準差
自我效能	4.65	0.818
學習投入	4.70	0.697
專業能力	4.74	0.694
活動效益	5.03	0.718

4.5 徑路分析

本研究瞭解學生自我效能構面、學習投入構面與專業能力構面三構面彼此間因果之關聯性。透過中介驗證後得知，自我效能對學習投入及專業能力間具有中介效果，本研究在此亦再利用徑路分析(Path Analysis)統計方法呈現其間之影響係數，將可再次驗證中介結果是否存在，以確認研究構面間之因果關係，並更嚴謹確定研究本研究理論模型與假設是否成立，如圖 2 所示。

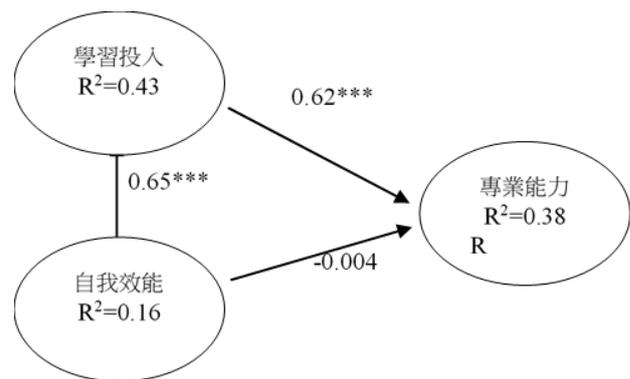


圖 2 徑路分析圖

透過徑路分析之結果得知第一部份自我效能與學習投入之互動情形，以自變數為學習投入，依變數為自我效能構面。依據分析結果顯示，學習投入對自我效能($\beta=0.65$, $p<0.001$)模式之判定係數(R^2)為 0.43，表示自我效能對於學習投入具有直接顯著影響效果，亦證明高中職生之自我效能與學習投入具有直接的因果關係。

第二部份學習投入對專業能力，依變數為專業能力，自變數為學習投入。此模式的判定係數(R^2)為 0.38，學習投入($\beta=0.62$, $p<0.01$)對專業能力之路徑達到顯著水準，表示學習投入對於專業能力具有直接顯著影響效果，亦證明高中職生之學習投入與專業能力具有直接的因果關係。

除各研究變數間之直接影響因果關係外，其中亦發現自我效能對於專業能力雖無顯著影響效果，但卻可透過自我效能間接影響專業能力。由此可知自我效能透過學習投入構面之間接影響效果為自我效能對於專業能力($\beta=0.65$, $p<0.01$)之徑路數值乘上學習投入對於專業能力($\beta=0.62$, $p<0.01$)之徑路數值，

故自我效能對專業能力之總效果為 0.40。

經由上述分析本研究理論模型自我效能、學習投入與專業能力關係，以驗證本研究理論模型之假設確立結果，H1：「高中職學生之自我效能對學習投入具有正向直接影響效果」達顯著水準：成立。H2：「高中職學生之自我效能對專業能力成長具有正向直接影響效果」未達顯著水準：不成立。H3：「高中職學生之學習投入對專業能力具有正向直接影響效果」達顯著水準：成立。H4：「高中職學生之自我效能於學習投入及專業能力間具有中介效果存在」：成立。本研究模型之分析結果顯示，高中職學生之學習投入具直接影響專業能力之效果，且自我效能可透過學習投入對專業能力之表現具有正面提升的效益。

綜上所述，本研究發現高中職學生之自我效能可藉由其學習投入之高低進而影響專業能力成長之程度，故高中職學生之學習投入亦成為學生對於專業能力提升與否之重要因素。學生因受大環境的影響，學習投入較不如以往認真，致使學生之專業能力降低，對於專業能力培養提升多來自父母親友或師長之期待，多非出自本身意願付出努力，故如何重拾學生對學習的投入，儼然已成為學習項目成效之關鍵。

五、結論與建議

本研究根據文獻探討、問卷調查結果統計分析與討論，透過相關分析發現高中職學生之自我效能與學習投入對專業能力有顯著相關，證實三者間有一定程度之關係。由徑路分析中得知高中職學生之自我效能透過學習投入對專業能力具有顯著影響，且發現分析結果完全符合驗證中介之條件，即使高中職學生之自我效能並無直接對專業能力提升產生效益，而是透過學習投入之增進而間接影響專業能力，以協助增強其動機，獲得專業能力之提升。

本研究之對象主要為參與本次抗震活動之高中職學生，於瞭解高中職學生參與本次抗震活動之思維與學習情況。而由相關文獻得知國內關於研究多以不同教學方式或教材

的創新等作為研究議題，關於此類主題之研究仍為少數，故建議相關研究單位可多關注此類面層，探討是否有其他方式可有效提升學生之自我效能及學習投入程度，亦可由個別瞭解並依其特性進行小組測驗等方面著手。此外後續研究者亦可嘗試針對不同地區或年齡層之學生進行比較，以供教學相關單位作實務性之應用。

參考文獻

1. Alsina, Á., & Mulà, I. (2019). Advancing towards professional competence model through a reflective transformational learning and sustainability: The case of mathematics teacher education. *Sustainability*, 11(15), 4039.
2. Ardiawan, I. K. N. (2017). The correlation between teacher professional competence and natural science learning achievement in elementary school. *Journal of Educational Science and Technology (EST)*, 3(3), 173-177.
3. Astin, A. W. (1993). What matters in college? Four critical years revisited. San Francisco, CA: Jossey-Bass
4. Bandura, A. (1977). Self-efficacy: Toward a unifying theory of behavioral change. *Psychological Review*, 84(2), 191-215.
5. Henderson, M., Huang, H., Grant, S., & Henderson, L. (2009). Language acquisition in Second Life: Improving self-efficacy beliefs. Same places, different spaces. *Proceedings ascilite Auckland*, 11, 464-474.
6. Shank, D., & Cotten, S. (2014). Does technology empower urban youth? The relationship of technology use to self-efficacy. *Computers & Education*, 70, pp.184-193.
7. Bilal, Guraya, S. Y., & Chen, S. (2019). The impact and effectiveness of faculty development program in fostering the faculty's knowledge, skills, and

- professional competence: A systematic review and meta-analysis. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(4), pp.688-697.
6. Bray, M. (2007). *The shadow education system: Private tutoring and its implications for planners*. Paris: UNESCO, International Institute for Educational Planning.
 7. Dyson, B. (2001). "Cooperative learning in an elementary physical education program." *Journal of Teaching in Physical Education*, 20, pp.264-281.
 8. Glanville, J. L., & Wildhagen, T. (2007). The measurement of school engagement: Assessing dimensionality and measurement invariance across race and ethnicity. *Educational and Psychological Measurement*, 67(6), pp.1019-1041.
 9. Johnson, D.W. and Johnson, R.T. (2009). "An educational psychology success story: Social interdependence theory and cooperative learning." *Educational researcher*, 38(5), pp.365-379.
 10. Koljatic, M., Silva, M. and Cofré, R. (2013). "Achievement versus aptitude in college admissions: A cautionary note based on evidence from Chile." *International Journal of Educational Development*, 33(1), pp.106-115.
 11. Linnenbrink, E. A., & Pintrich, P. R. (2003). The role of self-efficacy beliefs in student engagement and learning in the classroom. *Reading & Writing Quarterly*, 19(2), pp.119-137.
 12. Newmann, F. M., Wehlage, G. G., & Lamborn, S. D. (1992). The significance and sources of student engagement. In F. M. Newmann (Ed.), *Student engagement and achievement in American secondary school*, pp. 11-39.
 13. Schunk, D. H. (1985). Self-efficacy and classroom learning. *Psychology in the Schools*, 22(2), 208-223.
 14. Carter, A. K., Breen, L. J., & Beilby, J. M. (2019). Self-efficacy beliefs: Experiences of adults who stutter. *Journal of Fluency Disorders*, 60, pp.11-25.
 15. 吳宗立 (1993)。成就動機理論及其相關研究分析。國教園地，44，67-73。
 16. 孫志麟 (1991)，自我效能的基本概念及其在教育上的應用。教育研究，22(12)，47-54。
 17. 張景媛 (1997)，國中生之正負向情緒與其後設認知、學習動機關係之研究。教育心理學報，29，51-75
 18. 陳雯玲 (2017)，運用合作學習提升國中三年級學生地理科學習成效之行動研究，國立臺中教育大學教育學系，碩士論文，台中。
 19. 葉建宏 (2016)，高等教育學歷貶值問題之探討。臺灣教育評論月刊，5(6)，158-161。
 20. 蘇珍慧 (2014)，學歷通膨年代-離開學校後才是關鍵。臺灣教育評論月刊，3(12)，92-99。

土木科系在學生學習動機、學習投入與學習成效之分析

蔡秉霖¹ 許昊宸² 黃忠發³

¹國立高雄科技大學土木工程系土木工程與防災科技在職專班碩士生

²國立高雄科技大學土木工程系土木工程與防災科技碩士生

³國立高雄科技大學土木工程系教授兼系主任

摘要

本研究目的主要以學習動機、學習投入及學習成效作為主要影響面向，探討與就業意願之現況、相關與預測情形，協助學界及產業界，瞭解在學生之學習動機及學習投入，對於學習成效影響，進而透過產學合作發掘有潛在就業意願的畢業生投入產業成為生力軍。本研究為調查研究，採用「學習動機量表」、「學習投入量表」、「學習成效量表」、「基本資料問卷題項」及「就業意願問卷題項」為研究工具，本研究以國內普通大學及科技大學土木營建相關科系二年級與三年級學生作為研究對象，總計發放 221 份問卷，有效樣本共計 189 份，並使用 SPSS 統計套裝軟體進行資料統計分析。本研究以平均數、標準差、獨立樣本 t 檢定、單因子變異數分析以及徑路分析等統計方法進行資料分析，並根據研究結果提出下列結論與建議。土木科系之學習動機及學習投入對於學習成效正向直接影響效果顯示，高中職學生之學習動機具直接影響學習成效之效果，且學習投入可透過學習動機對學習成效之表現具有正面提升的效益。

關鍵字：學習動機、學習投入、就業意願

An Analysis of Students' Learning Motivation, Learning Engagement and Learning Effectiveness in the Department of Civil Engineering

Tsai, Bing-Lin¹ Hsu, Hao-Chen² Huang, Chung-Fah³

¹Master Student, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

²Master Student, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

³Professor, Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

This research is a survey research, using the "Learning Motivation Scale", "Learning engagement Scale", "Learning Effectiveness Scale", "Basic Information Questionnaire Items" and "Employment Willingness Questionnaire Items" as research tools. The second-year and third-year students of civil construction related departments in domestic ordinary universities and universities of science and technology were used as the research objects. A total of 221 questionnaires were distributed, with a total of 189 valid samples, and SPSS statistical package software was used for statistical analysis of data. In this study, statistical methods such as mean, standard deviation, independent sample t-test, single-factor analysis of variance, and path analysis were used to analyze data, and conclusions and recommendations were put forward

based on the research results.

This study finds out that the learning motivation and learning engagement of the civil engineering department have a direct effect on learning effectiveness. The results show that the learning motivation of high school vocational students has the effect of directly affecting the learning effectiveness, and learning investment can positively improve the performance of learning effectiveness through learning motivation. The benefits.

Keywords: learning motivation, learning engagement, employment willingness

一、緣起

1.1 研究動機

營造業素有火車頭工業之稱，舉凡民生相關之硬體建設如交通、水力、電力、石化、農業等經濟建設，皆需倚靠營造產業去建設完成，營造產業所附加價值甚高，倘繁榮發展不僅可提升國家各項基礎建設，並有效增加公共投資與執行，更可以帶動周邊產業的蓬勃發展。中華經濟研究院分析師林柏君(2017)在「我國營造業之發展現況與趨勢」中提到營造業面臨之問題，其中項目人力之運用，營造相關業者表示，現在年輕人大多不願意投入營造業工地作業，連畢業於營建、土木、建築工程等相關科系之學生，於畢業後也不願踏入本行從事作業，人力缺乏的問題相當嚴重。

以目前國內大專院校營建、土木、建築工程科系的學生，畢業後就業的走向不外乎就是投入公職產業、營建產業或非相關產業，公職產業包括如高普考、特考等公務員，營建產業包含顧問公司、建築師事務所、營造廠或自行創業，林進南(2018)提出，根據勞動部的人力調查資料顯示，106年以來營造業產業對於人力需求是呈現淨增加的態勢，且淨增加已逾10%之多，其主要理由為因應退離人力補充、需求擴大及長期缺工等因素考量。依據主計處108年人力調查統計資料，在營造廠人力調查空缺員工人數顯示，「主管及監督人員」394人，「專業人員」1,049人，「技術員及助理專業人員」3,052人，「事務支援人員」260人，合計為4,755人，107年上述空缺人員合計為4,557人，108年較107年空缺人數多了198人，表示營建產業人力逐年

需求量增加。

林進南(2018)另觀察技術人力近年來求供倍數之變化，我國在技術員及助理專業人員之求供倍數水位明顯較高，顯示勞動市場對於相關具備技術專才的人力需求較多，若以供給面來解釋，此數據之高亦可謂人力供給量相對較少。此一現象正可印證營造廠商對於技術人力之求才若渴，卻苦無對策，其問題在於營造業技術人力的嚴重斷層現象，工法與經驗傳承相當不易，已然是長期結構的問題。因為大環境的因素，使得原本營建產業人力需求面大於供給面，倘若無法在營建相關科系畢業生中吸收充足之生力軍加入，仍使得原本就不足的人力資源更為迅速惡化，嚴重衝擊勞力需求密集的營建產業，更將影響公共投資的有效執行及基礎建設的工程品質。

另依據內政部統計處所公布105年第11週內政統計通報以本國15歲以上人口教育程度統計中，本國大學生畢業生人數已超過500萬人次(葉建宏，2016)。我國擁有大學以上文憑的人口相較於過去，暴增數倍，形成經濟學家所稱的文憑通膨現象；而提升專業能力，則必需要先透過學習，學習投入會影響專業能力的成長。投入學習活動之頻率越高和投入的時間越長，學習表現就越好(Kuh, Kinzie, Schuh, & Whitt, 2005; Greene, Marti, & McClenney, 2008)。基於以上敘述，顯示專業能力是職場中差異化競爭的重要因素，因此持續學習投入，以提升專業能力已是現今社會必須重視的重要課題。

1.2 研究目的

根據上述之研究動機，針對目前國內普

通大學及科技大學土木營建相關科系之在學生，探討其學習動機、學習投入與學習成效之現況、相關與預測情形並以背景變項，如性別、在學成績、在學學習時數、工讀經驗、家中是否有人從事與營建業相關、工讀經驗、家人是否從事營造業、選擇科系原因、畢業後職涯計畫、畢業後第一份工作類型、工作退休類別、工作地點及可接受國外的的工作，探討大專校院土木營建相關科系之畢業學生就業意願之差異情形，希冀達成以下目的：

1. 探討不同背景變項在學生，其就業意願之差異情形。
2. 探討不同背景變項在學生，其學習動機之差異情形。
3. 探討不同背景變項在學生與其學習投入差異情形。
4. 探討在學生之學習動機、學習投入對其學習成效之影響，是否具有預測性。

二、文獻回顧

2.1 學習動機

Stipek (1995) 認為學習動機是學生在學習方面的成就動機，為追求成功的一種心理需求，也是影響學業成效主要之原因。張春興(2000)認為指引起學生學習活動，維持學習活動，並導使該學習活動趨向教師所設定目標的內在心理歷程。林崇德(1995)指推動進行學習活動之內部原因或內在動力。朱敬先(2000)認為是追求成功的一種心理需求，亦學習者發現其意義與價值，而嘗試驅策自己追求成長之傾向。陳品華(2006)認為學生參與及致力於學習工作的意願或慾望，顯現於學生對特定學習活動之選擇以及學習投入該活動的時間。鄭采玉(2008)認為學習過程中，持續學習活動的內在動力；並自發性的投入心力、朝向所預定的學習目標之過程。吳鴻松(2009)認為學習動機是追求預訂目標的需求，是驅策個體持續學習、引發行為的一種心理歷程。陳啓明、邱政鋒(2009)認為學習動機是朝向其學習目標的心路歷程、是學習行為的內在因素。

2.2 學習投入

Newmann、Wehlage 與 Lamborn (1992) 定義為學生心理的投資和努力於學習、理解知識及增加技能等，而就個人而言是有意圖提升學業工作上之能力；Glanville 與 Wildhagen (2007) 研究中指學生在學校課程中的行為及心理投入，而投入之程度可以使它成為一個瞭解學生學習成效之提升概念。

許多研究證實，在學生的學習過程中扮演著相當重要的成分。Mosenthal (1999) 指出，學習投入為學習者認知及情感系統的基礎，Astin (1993)、Pascarella 與 Terenzini (2005) 研究中顯示學生投入教育活動的體力與時間，為提升學習成效及發展最好的觀測值

(張景媛, 1997)指可以檢視學生個人表現行為與精神上投入程度的高低，並反映出學習用心程度與持久性。學習投入時間及專注度等越高者亦會有正向的提升學習成效之表現。

2.3 學習成效

學生學習後所產生之效果，國際間仍有不同之詮釋，聯合國教科文組織於 2007 年出版的「品質保證與認證：基本詞彙與定義錄」(Quality Assurance and Accreditation: A Glossary of Basic Terms and Definitions, [QAA])，初次對於學生學習成效提出相關定義，係指學習成效乃學習者歷經一段學習，且完成某時數、課程或學程後，所被期許應明白、瞭解、且能表現出來的成效與技術(黃淑玲, 2011a; Light & Cox, 2001; Sanerivi, 2012)。

Guay, Ratelle, & Chanal, (2008) 學習成效是判斷學生學習成果的指標，衡量成效的目的在使學生瞭解其自身學習狀況，並做為教師改進教學和學生改善學習的依據。學習成效評量學生參與學習活動後，在某種指標的表現或某種行為的改變(Guay et al., 2008; Pike, Smart, & Ethington, 2012)。

2.4 就業意願

Holland (1985) 認為就業意願選擇是在尋

找一個可以滿足個人適應傾向的狀態：即個人的職業滿足、穩定、成就等，都與個人特性及工作環境的調和有關。就業意願是指個人依照自己的興趣、能力對工作價值及未來前途的認識，進行職業選擇的行動，是個人達到其未來就業目標的一種慾望傾向(李宏才，常雅珍，林冠良，2012)。陳信宏(2004)認為就業意願選擇之所以會有差異和變動的原因，主要是源自於個人特質、家庭背景因素、社會互動機會、工作價值觀等因素交互影響而產生的。

三、研究方法

3.1 研究架構

依據文獻回顧及相關資料彙整與搜集，建立本研究架構，如圖 1 所示。其中以在學生學習動機、學習投入為自變數，探討對於國內普通大學及科技大學在學生學習成效影響之程度。

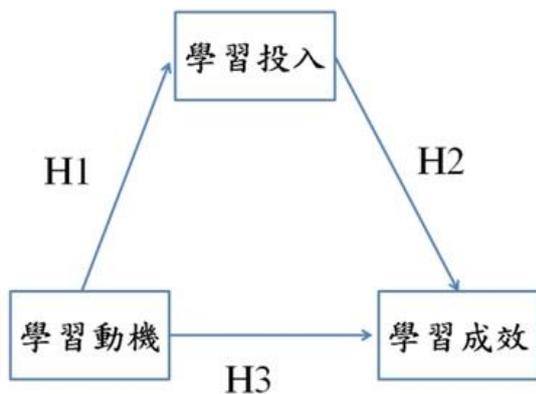


圖 1 研究架構圖

3.2 研究假設

本研究根據研究目的、文獻探討、以及研究架構，整理歸納如下之研究假設，藉以驗證各研究變項間之關係。

- H1：土木營建科系在學生之學習動機與學習投入有顯著相關。
- H2：土木營建科系在學生之學習動機與其學習成效有顯著相關。
- H3：土木營建科系在學生之學習投入與其學習成效有顯著相關。

3.3 研究對象及抽樣方法

本研究為調查研究，以文獻探討為理論基礎，採用「學習動機量表」、「學習投入量表」及「學習成效量表」為研究工具，受限於時間及人力的關係，無法就全國性的土木營建科系畢業生進行全面性的探討，僅先選取國內南部地區普通大學及科技大學土木營建相關科系二年級與三年級學生作為研究對象進行問卷調查，有效樣本為 189 份。第一部份為填答者之基本資料，主要針對性別、在學成績、在學學習時數、工讀經驗、家中是否有人從事與營建業相關、工讀經驗、家人是否從事營造業、選擇科系原因、畢業後職涯計畫、畢業後第一份工作類型、工作退休類別、工作地點及可接受國外的的工作等項目進行詢問。第二、三、四部分，依序為「學習動機量表」、「學習投入量表」、「學習成效量表」，係採用李克特(Likert)六點尺度評量的方式，請受測者加以衡量，選項分別為「非常不符合」、「不符合」、「有點不符合」或「有點符合」、「符合」、「非常符合」依序給予 1~6 分。

四、研究結果與分析

4.1 填答者基本資料分析

基本資料之統計變數包含填答者性別、在學成績、在學學習時數、工讀經驗、家中是否有人從事與營建業相關、工讀經驗、家人是否從事營造業、選擇科系原因等原因；另有畢業後升學與否、第一份工作之種類、月薪、工作地點以及期望退休時的工作等原因。針對所蒐集之樣本資料進行整理分析，分析樣本結構及分佈情形，分述如下。

樣本資料顯示，本次填答者大三與大二在學生約各佔一半，大三生為 95 份，佔 50.3%，大二生為 94 份，佔 49.7%；因土木營建相關科系屬工程學系，一般而言男性較多於女性，填答對象男性 138 份，佔 71.9%，女性 54 份，佔 28.1%；在校班級排名成績以前 25% 共 67 份，佔 34.9%；下課後花在課業上時間以不到 1 小時為居多共 98 份，佔 51.1%，其次為 1 小時至 2 小時以下為 72 份，佔 37.5%，顯示將近九成目前在學生於課後僅願意花在功

課上時間為 2 小時以下；有工讀經驗的人居多共 127 份，佔 66.1%，無工讀經驗的人共 41 人，佔 31.8%，其中工讀經驗與營建產業相關的人共 41 份，僅佔 31.8%，顯示多數學生在工讀的過程並未選擇與所學相關之營建產業工作；就讀科系原因以「自己的興趣」居多共 79 份，佔 41.8%，並未超過半數，代表就讀原因還是會受到考試分發及親友建議的影響；家人從事與營建業相關工作共 126 份，佔 65.6%。

詢問學生畢業及兵役退伍後升學或就業情形(如表 1 所示)，以就業取向居多，佔 50.0%，其中在未來有進修意願的人，佔 20.3%，顯示學生大部分想先進入職場，未來有機會再考慮是否繼續進修或是準備國考；畢業後最想投入的第一份工作以營造廠居多，佔 28.1%，顧問公司/建築師事務所次之，佔 18.2%，仍有 20.8%對於未來想投入工作尚未有想法(如表 1 所示)。

表 1 受測者基本資料

題項	選項	問卷數	百分比 (%)
畢業(服完兵役)後計畫升學或就業	先升學	39	20.3
	先就業，不考慮升學	57	29.7
	先就業，有機會再升學	39	20.3
	先準備技師、高普考等考試	57	29.7
畢業後最想投入的第一份工作	營造廠	54	28.1
	顧問公司/建築師事務所	35	18.2
	建設公司	17	8.9
	專業分包商或材料供應商	2	1.0
	公務員	27	14.1
	國營事業	7	3.6
	轉行到非營建相關產業	4	2.1
	自行創業當老闆	6	3.1
尚未有想法	40	20.8	

對於未來從何工作退休尚未有想法佔 27.1%，推論因該次為受測者為在學生，對於退休仍需許久時間，其次想自己在創業當老闆時退休，佔 25.0%(如表 2 所示)；期望工作地點以只要有發展不計較遠近居多，佔 66.7%(如表 2 所示)，顯示學生在選擇工作上認為未來只要有發展性，工作地點的遠近並不影響其選擇；畢業後是否接受在國外的工作中以可考慮居多，佔 56.3%(如表 2 所示)，

顯示學生相關語言能力已有提升趨勢，亦較有國際觀，但也對於國內工作存有隱憂，在未能獲取較高薪資，仍較多的畢業生未來會考慮離鄉背景，且接受長期旅居國外工作。

表 2 受測者基本資料(續)

題項	選項	問卷數	百分比 (%)
退休時，是在哪個工作退休	營造廠	12	6.3
	顧問公司/建築師事務所	22	11.5
	建設公司	13	6.8
	專業分包商或材料供應商	0	0
	公務員	27	14.1
	國營事業	10	5.2
	非營建相關產業	8	4.2
	自行創業當老闆	48	25.0
畢業後希望的工作地點	尚未有想法	52	27.1
	離家一小時內	64	33.3
畢業後可以接受國外的 工作嗎	只要有發展，不計較遠近	128	66.7
	不願意	36	18.8
	可考慮	108	56.3
	願意	48	25.0

4.2 學習動機量表分析

從表 3 中可以發現土木營建相關科系在學生在學習動機量表分析中，平均分數為 4.01 分，標準差為 0.67，在受測樣本中，學習動機偏向符合。以「我選讀土木/營建系是為了學習一技之長。」此題平均分數為 4.91 分最高，其次為「我選讀土木/營建系是為了將來工作需要」此題平均分數為 4.80 分，結果顯示，大部分選讀土木營建科系在學生認為學習一技之長對於未來畢業後之工作是有所需要的，最低為「我選讀土木/營建系是因為受到同學影響」此題平均分數為 2.74 分，顯示並不會因為同儕間影響選讀的相關科系。

4.3 學習投入量表分析

從表 4 中可以發現土木營建相關科系在學生在學習投入量表分析中，平均分數為 3.89 分，標準差為 0.82，在受測樣本中，學習投入偏向有點符合。以「我通常會在預期的時間內完成課業。」此題平均分數為 4.60 分最高，其次為「我每天會盡力完成自己的課業」此題平均分數為 4.47 分，最低為「上課前我通常會花十分鐘以上預習該課程」此

題平均分數為 2.64 分結果顯示，大部分就讀土木營建科系在學生會預期的時間內並盡力於每日完成相關課業，但普遍在學生並未於上課前提早預習及複習該課程。

表 3 學習動機量表分析

題目、題號	平均數	標準差
1.我選讀土木/營建系是為了自我充實	3.95	1.147
2.我選讀土木/營建系是為了獲得成就感	3.93	1.126
3.我選讀土木/營建系是為了學習一技之長	4.91	1.014
4.我選讀土木/營建系是為了將來工作需要	4.80	.977
5.我選讀土木/營建系是為了取得學士學位	4.30	1.241
6.我選讀土木/營建系是因為對此領域有興趣	4.24	1.173
7.我選讀土木/營建系是因為升學率高	3.77	1.141
8.我選讀土木/營建系是因為想考取專業證照或國家考試	4.46	1.219
9.我選讀土木/營建系是因為家長期待	3.54	1.298
10.我選讀土木/營建系是因為受到同學影響	2.74	1.258
11.我選讀本校土木/營建系是因為學校校譽佳	3.73	1.210
12.我選讀本校土木/營建系是因為學校師資優良	3.84	1.193
構面之平均數 4.01、標準差 0.67		

表 4 學習投入量表分析

題目、題號	平均數	標準差
1.我每天會準時上課	4.44	1.209
2.我每天會盡力完成自己的課業	4.47	1.063
3.我通常會在預期的時間內完成課業	4.60	1.073
4.我從來不缺課	3.85	1.483
5.上課時我會專心聽課，不滑手機或聊天	3.29	1.206
6.上課時我會將老師補充之部分動作筆記	4.14	1.016
7.下課後，我會自行整理該科目之筆記	3.70	1.089
8.對於上課不懂之環節，我會請教老師、助教或自己找到答案	3.89	1.223
9.上課前我通常會花十分鐘以上預習該課程	2.64	1.107
構面之平均數 3.89、標準差 0.82		

4.4 學習成效量表分析

從表 5 中可以發現土木營建相關科系在學生在學習成效量表分析中，平均分數為 4.29 分，標準差為 0.82，在受測樣本中，學習成效偏向符合。以「就讀本系這幾年後，我對土木/營建專業知識有更進一步的瞭解。」

此題平均分數為 4.57 分最高，其次為「就讀後，我更清楚自己的能力」及「就讀後，我更清楚自己的優缺點」此 2 題平均分數為 4.47 分，最低為「就讀後，我對未來升學更具信心」此題平均分數為 3.86 分，結果顯示，大部分就讀土木營建科系在學生因就讀該學系後對於土木營建專業知識的瞭解提升，且更清楚自己的專業能力與優缺點，但普遍對於未來的升學都較無信心。

表 5 學習成效量表分析

題目、題號	平均數	標準差
1.就讀本系這幾年後，我對土木/營建專業知識有更進一步的瞭解	4.57	.946
2.就讀後，我對就業市場有更進一步的瞭解	4.38	.958
3.就讀後，我的工作能力有所提升	4.16	1.105
4.就讀後，我將會有更好的工作機會	4.35	1.022
5.就讀後，我更清楚自己的興趣	4.30	1.088
6.就讀後，我更清楚自己的能力	4.47	.943
7.就讀後，我更清楚自己的優缺點	4.47	.981
8.就讀後，我更清楚自己未來的表現會更好	4.24	1.138
9.就讀後，我對未來升學更具信心	3.86	1.200
10.就讀後，我對未來就業更具信心	4.12	1.093
構面之平均數 4.29、標準差 0.82		

4.5 未來就業意願量表分析

在就業意願量表分析中，平均分數為 4.40 分，標準差為 1.18，在受測樣本中，就業意願偏向同意。以「若本行業(土木、營建相關)有適合的職缺，我會前去應徵。」此題平均分數為 4.73 分最高，結果顯示，大部分土木營建科系大學生畢業後，願意投入營建產業工作，如表 6 所示。

4.6 徑路分析

本研究瞭解學生學習動機構面、學習投入構面與學習成效構面三構面彼此間因果之關聯性。透過中介驗證後得知，學習動機對學習投入及學習成效間具有中介效果，本研究在此亦再利用徑路分析(Path Analysis)統計方法呈現其間之影響係數，將可再次驗證中介結果是否存在，以確認研究構面間之因果

關係，並更嚴謹確定本研究理論模型與假設是否成立，如圖 2 所示。

表 6 就業意量表分析

題目、題號	平均數	標準差
1.未來就業時，我想從事土木/營建相關(含土木職業公務員)工作	4.73	2.523
2.未來就業時，我對於土木/營建相關產業有很大的期許	4.21	1.250
3.既然就讀土木系，我想嘗試投入土木/營建相關產業	4.66	1.133
4.即使有其他的職場選擇，我也會選擇土木/營建相關產業	4.13	1.290
5.畢業後我最想投入的土木/營建相關產業	4.28	1.323
構面之平均數 4.40、標準差 1.18		

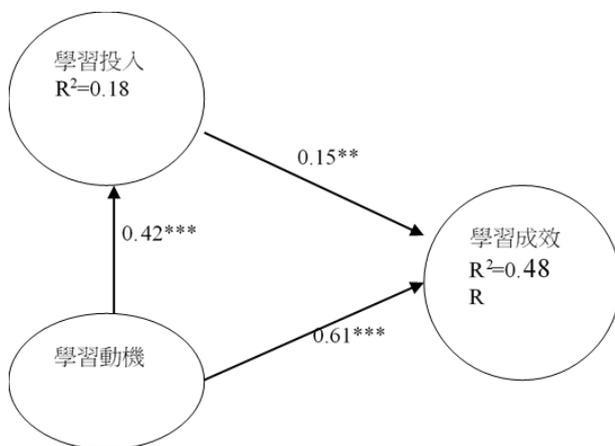


圖 2 徑路分析圖

透過徑路分析之結果得知第一部份學習動機間與學習投入之互動情形，以自變數為學習投入，依變數為學習動機構面。依據分析結果顯示，學習投入對學習動機($\beta=0.42$, $p<0.001$)模式之判定係數(R^2)為 0.18，即代表土木系在學生之學習投入對學習動機具有直接顯著影響效果。

第二部份學習動機與學習投入對學習成效，依變數為學習成效，自變數為學習動機與學習投入。此模式的判定係數(R^2)為 0.48，學習動機($\beta=0.61$, $p<0.001$)，學習投入($\beta=0.15$, $p<0.01$)對學習成效之路徑達到顯著水準，表示學習動機及學習投入對於學習成效具有直接顯著影響效果，亦證明土木系在學生之學習動機及學習投入與學習成效具有直接的因果關係。

上述分析本研究理論模型學習動機、學習投入與學習成效關係，以驗證本研究理論模型之假設確立結果， $H1$ ：「土木科系在學生之學習動機對於學習投入呈現正向直接影響效果」達顯著水準：成立。第二部份經過本研究理論模型之假設驗證。 $H2$ ：「土木科系之學習動機對於學習成效呈現正向直接影響效果」達顯著水準：成立。 $H3$ ：「土木科系之學習投入對於學習成效呈現正向直接影響效果」達顯著水準：成立。本研究模型之分析結果顯示，高中職學生之學習動機具直接影響學習成效之效果，且學習投入可透過學習動機對學習成效之表現具有正面提升的效益。

五、結論與建議

本研究根據文獻探討、問卷調查結果統計分析與討論，發現土木科系在學生之學習動機與學習投入以及學習成效彼此間之關聯，學習動機對學習投入具正向直接影響效果；學習動機對學習成效具正向直接影響效果，亦可推論土木系在學學生可藉由學習動機之參與，改變其學習投入與學習成效之情況，故其教學相關單位可善用銜接未來工作需要做為教學領域方向，以協助增強其動機，獲得良好之學習成效。

本研究所調查之對象為在學大二及大三學生，主要在於瞭解土木科系在學生之學習情況。而由相關文獻得知國內關於學習成效研究多以不同教學方式或教材的創新等作為研究議題，關於此類主題之研究仍為少數，故建議相關研究單位可多關注此類面層，探討是否有其他方式可有效提升學生之學習投入與成效。此外後續研究者亦可嘗試針對不同地區或年齡層之學生進行比較，以供教學相關單位作實務性之應用。

參考文獻

- Astin, A. W.(1993).What matters in college? Four critical years revisited.San Francisco, CA:Jossey-Bass. Pascarella, E. T., & Terenzini, P. T. (2005). How college affects students. San Francisco:Jossey-Bass.

2. Glanville, J. L., & Wildhagen, T. (2007). The measurement of school engagement: Assessing dimensionality and measurement invariance across race and ethnicity. *Educational and Psychological Measurement*, 67(6), 1019-1041. doi:10.1177/0013164406299126
3. Goodman, R.E., *Rock Mechanics*, 2nd Edition, Chapter 3, pp.55~99, John Wiley and Sons, New York, 1989.
4. Greene, T. G., Marti, C. N., & McClenney, K. (2008). The effort-outcome gap: differences for African American and Hispanic community college students in student engagement and academic achievement. *The Journal of Higher Education*, 79(5), 513-539.
5. Holland, J. L. (1985). *Making Vocational Choice : A Theory of Vocational*
6. Juang, C.H., D.H. Lee, and C. Sheu, "Mapping Slope Failure Potential Using Fuzzy Sets, " *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.118, No.3, pp.475~494, 1992.
7. Kuh, G. D., Kinzie, J., Schuh, J. H., & Whitt, E. J. (2005). *Assessing conditions to enhance educational effectiveness: The inventory for student engagement and success*. San Francisco: Jossey-Bass.
8. Light, G., & Cox, R. (2001). *Learning & teaching in higher education: The reflective professional*. London, UK: Paul Chapman.
9. Mosenthal, P. B., & Kirsch, I. S. (1990). Understanding graphs and charts, Part I. *Journal of Reading*, 33, 371-373.
10. Newmann, F. M., Wehlage, G. G., & Lamborn, S. D. (1992). The significance and sources of student engagement. In F. M. Newmann (Ed.), *Student engagement and achievement in American secondary school* (pp. 11-39). New York: Teachers College Press.
11. Sanerivi, L. L. (2012). Achieving learning outcomes through internal quality assurance [Asia-Pacific Quality Network 4th online forum: Learning outcomes and accountability – the role of EQA and IQA, the third session].
12. Stipek, D.(1995). Effects of different instructional approaches on young children's achievement and motivation. *Child Development*, 66 (1), 209-223.
13. 內政部統計處 (2016)。105 年第 11 週內政統計通報 (我國 15 歲以上人口教育程度統計) , http://www.moi.gov.tw/stat/news_content.aspx?sn=10392。
14. 朱敬先 (2000)。教育心理學。臺北：五南。
15. 吳鴻松 (2008)。科技大學成人學生學習動機與學習滿意度關係之研究—以南部某科技大學為例。高學師範大學，高雄市。
16. 李宏才、常雅珍、林冠良(2012)，「北區技職院校幼保系應屆畢業生工作價值觀與就業意願之研究」，長庚科技學刊，第十六期，第 93 頁至 124 頁。
17. 林柏君(2017)，「我國營造業之發展現況與趨勢」，經濟前瞻，第 174 期，第 43~48 頁。
18. 林崇德 (主編)(1995)。高中生心理學。臺北：五南。
19. 林進南(2018)，「我國營造業景氣之現況與展望」，台灣經濟研究院，刊登於今日合庫，第 520 期。
20. 洪如江，初等工程地質學大綱，第 3 章，第 141~200 頁，財團法人地工技術研究發展基金會，台北，1991。
21. 張春興 (2000)。教育心理學：三化取向的理論與實踐。臺北市：臺灣東華書局。
22. 張景媛 (1997)。國中生之正負向情緒與其後設認知、學習動機關係之研究。教育心理學報，29，51-75。
23. 教育心理與輔導學系教育心理學報，38

- (1), 37-50。
24. 陳信宏(2004), 餐飲科系大學生工作價值觀對就業意願選擇之研究, 輔仁大學餐旅管理學系碩士班, 碩士論文。
 25. 陳品華(2006)。技職大學生自我調整學習的動機困境與調整策略之研究。國立臺灣師範大學。
 26. 陳啓明、邱政鋒(2009)。成人參與高等回流教育學習動機之量表建構與現況之研究。國立虎尾科技大學學報, 28(3), 93-109。
 27. 黃淑玲(2011a)。教學典範的轉移與評量大學生學習成效之建議。教育研究月刊, 207, 61-74。
 28. 黃淑玲(2011a)。教學典範的轉移與評量大學生學習成效之建議。教育研究月刊, 207, 61-74。
 29. 潘國樑, 「新中橫公路受賀伯風災之遙測技術」, 地工技術, 第 57 期, 第 45~54 頁, 1996。
 30. 鄭采玉(2008)。國小學生社會領域學習動機與學習滿意度關係之研究, 國立屏東教育大學, 屏東縣。

UAV 影像應用在掩埋場之容積監測

林宗曾¹ 吳妍潔²

¹高雄科技大學土木工程系教授

²高雄科技大學土木工程系研究所碩士二年級

摘要

近年來利用無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)地面拍攝，並透過多視立體視覺三維重建技術，及真正射影像製作方法，可提供三維高程或平面位移變化之空間資訊。視覺監測系統是一種以視覺定位技術，再結合資料獲取與資料處理，並應用於特定監測的一項技術。傳統的資料獲取及資料處理方法，都是藉由人工進行操作，因此，提高了監測方法的使用門檻。

實驗選定在高雄岡山之掩埋場進行多次 UAV 拍攝，對同一區域不同時間影像，進行掩埋場監測，本研究藉由影像之點雲差異分析，得到最好效能和效率之點雲密度，並使用三維重建技術得到容積之結果，並獲得每期呈現出的總容積量，便可推估每期的掩埋量，發現平均掩埋量約為 5818.51(m³)，進而達到監測掩埋場之容積變化和使用。

關鍵字：無人飛行載具、監測、點雲密度、多視立體視覺

The Point Cloud Density of UAV Images is Applied to Buried Field Monitoring

Tzong-Tzeng Lin¹ Yan-Jie Wu²

¹Professor, National Kaohsiung University of Science and Technology

²Master Student, M.A. program, Department of Science and Technology, National Kaohsiung University

ABSTRACT

In recent years, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) ground shooting, multi-view stereo vision 3D reconstruction technology, and real radio image production method can provide spatial information of 3D elevation or plane displacement changes. The visual monitoring system is a technology that uses visual positioning technology, combined with data acquisition and data processing, and is applied to specific monitoring. The traditional data acquisition and data processing methods are all manually operated, thus raising the threshold for the use of monitoring methods.

The experiment selected multiple UAV shootings at the burial site in Gangshan, Kaohsiung, and monitored the burial site with images of the same area at different times. In this study, the point cloud difference analysis of the images was used to obtain the point cloud density with the best performance and efficiency. Three-dimensional reconstruction technology obtains the volume result, and obtains the total volume presented in each phase, and then estimates the buried volume of each phase. It is found that the average buried volume is about 5118.51 (m³), which can then be used to monitor the volume change of the landfill and use.

Keywords: unmanned aerial vehicle, monitoring, point cloud density, multi-view stereo vision

一、研究動機目的

近年來無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)蓬勃發展、日益興起，可以提供地面拍攝，將拍攝的相片變成可用之資料，所拍攝之影像為高解析影像，但是必須透過相關處理，優點在於便利性、機動性、即時性以及低成本性。另外視覺監測系統是一種以視覺定位技術，再結合資料獲取與資料處理，並應用於特定監測的一項技術。

本研究選定高雄岡山區之掩埋場進行研究，透過 UAV 拍攝之相片，套入 UAV 三維重建之相關軟體，選擇適當的點雲密度分析，能快速完成監測該區域容積變化為本研究之目的。

二、UAV 監測

2-1 UAV 介紹

UAV 的發展日新月異，相較於有人飛機與衛星，具有低成本、操作容易、高空間解析度、飛行高度低較不受氣候之影響等優點，主要用於小區域環境或土地監測與測繪，也漸漸廣泛應用於各領域。

本研究所使用之 UAV 為大疆創新科技有限公司所製作，型號為 Phantom4 Pro V2.0，UAV 規格如表 2-1 所示。

表 2-1 UAV 規格(來源:大疆官網)

型號	Phantom4 Pro V2.0	
總重量	1375g	
動力電池	15.2V 5870mAh LiPo 4S 電池	
螺旋槳	9.4 × 5.5 英寸	
機身材質	高密度 EPS	
飛行時間	30 分鐘	
相機影像	2000 萬畫素	

2-2 監測技術

監測的重要核心在於如何獲取高精度三維定位資訊，並經由分析這些三維定位資訊來獲取相關的應用。以計算監測點的三維座標，並分析這些監測點來評估是否發生位移。

此研究利用攝影測量技術，應用於掩埋場監測使用，並採用三維重建成果，以點雲密度進行整體容積之結果，其成果可用於分析整體容積變化或使用。

三、實驗方法

本研究透過 UAV 拍攝序列影像，利用基於多視立體視覺重建三維訊息，所製作三維點雲稠密性高，所以可以直接對不同時期點雲進行直接相減，得到一距離變化量。選擇岡山之掩埋場作為研究區域，進行拍攝，應用在掩埋場監測使用。

3-1 UAV 拍攝

由於考量到以三維重建軟體進行研究需要製作稠密點雲，故選擇高重疊度進行拍攝如圖 3-1 所示，採用航線正面 80%重疊度以及側面 70%重疊度，進行飛行拍攝作業。

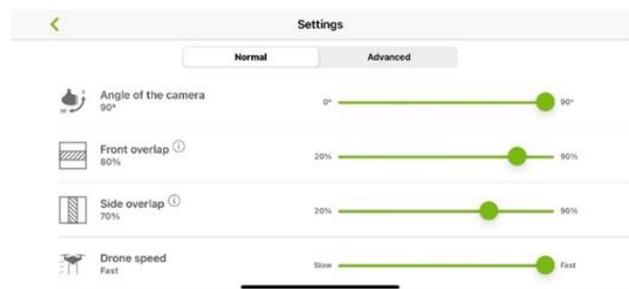


圖 3-1 航線重疊度設定

利用 UAV 對實驗區進行拍攝，平均拍攝高度為 60 公尺，拍攝影像平均為 400 張，實驗共計拍攝 12 次，航線規劃如圖 3-2 所示。



圖 3-2 航線規劃

3-2 多視立體視覺

近年來三維重建技術之發展，由傳統攝影測量至現代攝影測量學，主要變化在於影像自動匹配技術之發展，可在寬基線、攝影基線旋轉大之情況之下依然可以匹配成功，再加上多視立體視覺三維重建技術之發展，奠定了新一代攝影測量技術之崛起。現代攝影測量是主要沿至以從運動到結構 (Structure from Motion, SfM) 演算法重建場景，起初 SfM 是以攝影測量衍生出來之方法，透過記錄相機行進路線，並求得相機姿態參數，接著運用三角測量進一步重建三維場景。

3-2-1 核線幾何

核線之定義為針對同一場景所拍攝之影像，不管是一張、三張甚至更多張的影像，影像中所對應之特徵有一定的約束關係，而此約束關係與相機率定、場景重建有密切的關連。核線幾何為兩張影像之間的攝影幾何，依賴於相機的內方位參數及相機位置與姿態 (外方位參數)。

核線基礎為通過兩拍攝站基線之平面，與影像共軛點之交線為核線。不同影像點形成不同共軛面及核線 ($em, e'm'$)。左右影像之核線分別與攝影基線 CC' 交於一點，該點稱為核點即，如圖 3-3 所示。

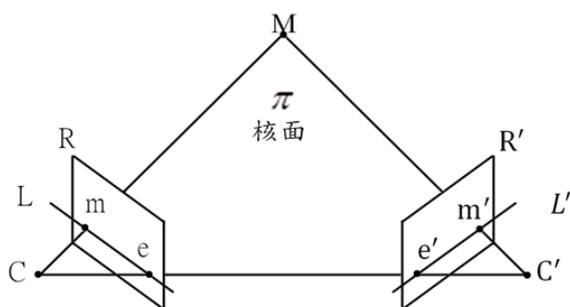


圖 3-3 核線幾何關係(來源：邱翰廷)

3-2-2 從運動恢復結構 (Structure From Motion, SfM)

由相機拍攝一序列影像，透過影像匹配技術取得影像共軛點，由求取基礎矩陣進行相機率定，進而求取影像內、外方位參數，最後由求取之參數進行多視三維重建匹配完成三維重建。

SfM 演算法重建流程，以重建相機的位置與場景為三維重建之關鍵。以多視角所拍攝序列影像，進行影像配準，再經由配準後所得之影像特徵點，以核線幾何 (Epipolar Geometry) 關係進行場景重建，求取相機相對應位置，並探討與基礎矩陣 (Fundamental Matrix) 之關係，以及基礎矩陣解算方法。

1. 三角定位 (Triangulation)

三角定位的目標是從影像匹配中透過投影關係恢復出這些匹配點對應的三維場景中的點，以及重建影像的相機參數，如圖 3-4 所示。

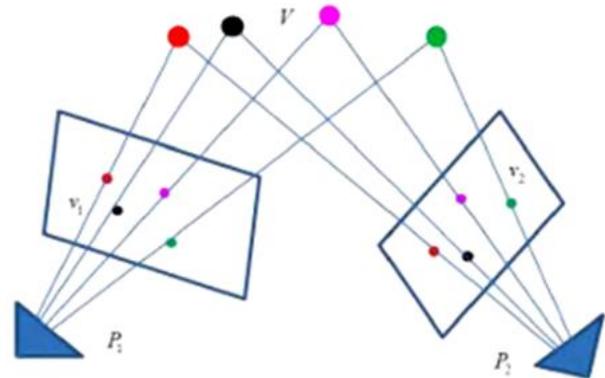


圖 3-4 三角定位相間與物間示意圖

SfM 是一個迭代計算的過程。我們由兩幅影像的特徵點匹配可以得到基礎矩陣 F ，在已知照相機內方位參數的情況下，很容易由基礎矩陣 F 得到本質矩陣 E 。並可透過分解本質矩陣 E 可以得到相對位置資訊 (旋轉矩陣 R 和平移矩陣 T)。當從第一個影像對中計算出初始的方位和結構後，在其餘的配對中延續 SfM 計算過程。從第三幅影像開始，每次加入一副影像，進行迭代計算，再用三角測量的方法恢復場景的結構。

2. 集束法調整 (Bundle Adjustment)

上述步驟已取得特徵點的三維資訊及每個相機的姿態資訊，接續透過集束法調整，進行最後的參數優化計算。集束調整為優化重建結果以提供整體最優的三維結構和相機參數。所謂最優意指最終的參數估計，使某一函數取得最小值；整體則意味著無論對三維結構還是相機參數而言，它的解都是最佳

推定；集束指的是所有透過三維特徵點的光線束會彙集到每個相機的中心。這種方法實際上是調整所有的光束與照相機的位置，使得總誤差最小。

3-3 稠密點雲重建

SfM 已建立真實場景與影像之間關係並取得稀疏點雲，但稀疏點雲無法有效地描述場景或表面資訊，所以必須以稀疏點雲作為基礎，將其擴展為稠密點雲。

利用多視立體視覺(Multi-View Stereo, MVS)技術將稀疏特徵點周圍區域進行恢復三維資訊，現今常用 MVS 有四種：基於深度圖(Multiple Depth Maps Based)之方法、基於變形網格(Deformable Polygonal Meshes Based)之方法、基於體素(Voxel Based)之方法、基於面片(Patched-Based)之方法。本研究則採用基於面片的多視立體視覺之方法進行三維重建。

面片重建：

1. 初始特徵匹配

透過 Harris 和 DoG (Difference-of-Gaussians)特徵點，將這些特徵點在多幅影像之間進行匹配，重建出稀疏面片，之後重複以下兩個步驟，執行 n 次。(本研究 $n=3$)，如圖 3-5 所示。

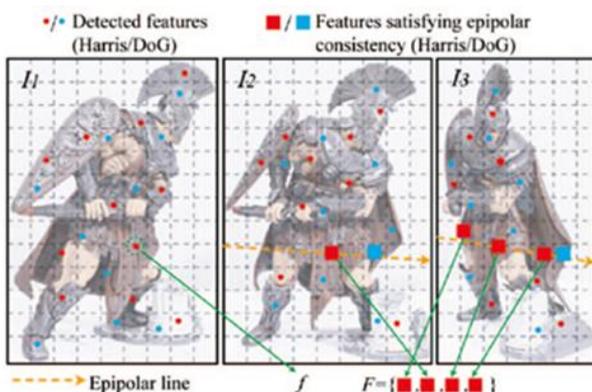


圖 3-5 特徵點匹配(來源：徐峻翔)

2. 面片擴散

擴展上一個步驟到鄰近像素，進一步得到更密集的面片。

3. 面片過濾

因同一網格中的面片的 NCC 係數差異大，即擴散重建中所造成的錯誤，所以要對擴散

後的錯誤結果進行過濾。將灰度一致性、幾何一致性較弱面片除去，即網格中與深度最小面片距離大、法向量夾角大的面片。

3-4 三角網格之構建

為了提高重建模型的真實感，使得視覺效果更為逼真，我們透過紋理映射來達到目的。紋理映射的目的就是將二維的影像照片“貼”到網格化之後的物體表面模型上，從而以較低的代價實現複雜的視覺效果，使得重建之後的物體模型更具備細節性和真實性，如圖 3-6 所示。

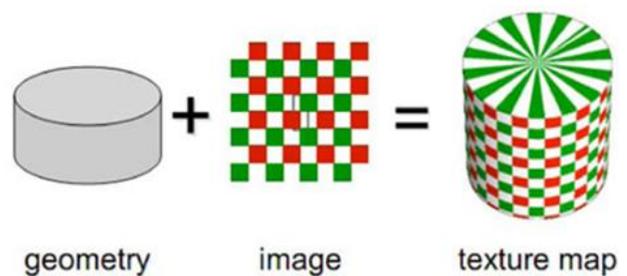


圖 3-6 紋理映射示意圖

四、結果與討論

4-1 稠密點雲密度尺寸比例

本研究採用網格尺寸之比例去比較點雲密度之差異，適當的網格尺寸能獲得良好的三維重建成果。若點雲資料因作業目的之不同或現地拍攝間距設定的不一致，所獲得的點雲資料「密度」也有所不同，因此網格尺寸也應該相對性的調整。

一、低密度點雲

點雲比例設定於 1/4 影像尺寸，速度最快，但成效有限。

二、中密度點雲

點雲比例設定於 1/2 影像尺寸，速度中，成效好。

三、高密度點雲

點雲比例設定於 1:1 原始影像尺寸，亦是 UAV 原始拍攝之距離，速度慢，為密度成效之標準。

在本研究中低密度點雲之重建密度明顯比高、中密度點雲低，然而在研究中發現中密度點雲與高密度點雲相近，且解析度相近。



圖 4-1 低密度點雲比例



圖 4-2 中密度點雲比例



圖 4-3 高密度點雲比例

4-2 稠密點雲密度比較

本研究以 1:1 之比例為點雲密度標準值，但在時間上要花費較多，因此效率不高，由表 4-1 可發現以 1/2 之比例在時間與成效上都是可接受的範圍，因此本研究以中密度點雲進行後續的三維建模之分析。

表 4-1 點雲密度比較

點雲密度	影像比例	時間	時間差距	效果
高	1:1	3 小時 39 分	1 小時 34 分	優
中	1/2	2 小時 05 分		佳
低	1/4	1 小時 31 分	34 分	差

故研究採用中密度點雲進行三維重建之分析。點雲密度比例可參閱圖 4-1、4-2、4-3。

4-3 容積變化量

本文以 6 個月份的資料呈現容積變化，進而獲得每期的總容積量。每一期之總剩餘容積量如表 4-2 所示，在圖 4-4 我們可以發現 3-4 月的掩埋量最高，4-5 月份的掩埋量最少，然而每一期掩埋量之平均約為 5818.51(m³)。

表 4-2 總剩餘容積量

月份	總剩餘容積量(m ³)	每期掩埋量(m ³)	平均掩埋量(m ³)
3 月份	283455.46	第一期 (0)	5818.51
4 月份	273890.21	9565.25	
5 月份	269966.56	3923.65	
6 月份	264023.36	5943.2	
8 月份	246375.22	8824.07	
9 月份	239720.34	6654.88	

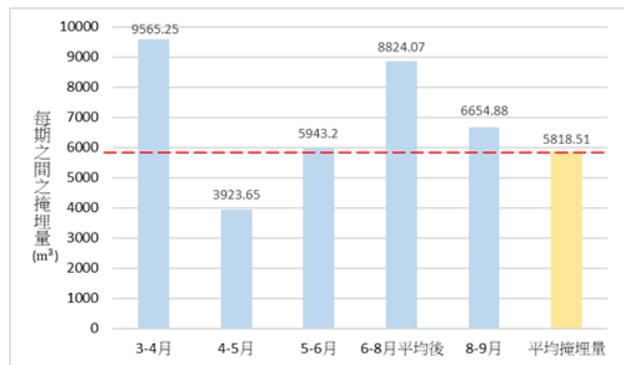


圖 4-4 每期之間之掩埋量

五、結論

本研究以 UAV 進行外業動作，在以外業拍攝之相片套入相關軟體進行三維模型進而計算該期容積量，前述成果可結論成下列幾點：

1. 本研究以 UAV 作業，方法簡單、高效率以及成本低廉，且對監測大面積之掩埋場來說是最適用的。
2. 研究中以影像之稠密點雲密度差異，比較出最適合本研究分析之點雲密度為中密度點雲，在影像呈現上不輸高密度點雲，在操作時間上也比高密度點雲快上 1 倍。
3. 容積變化以 6 個月份的資料呈現，獲得每期呈現出的總容積量，便可推估每期的掩埋量。

埋量，故本研究之平均掩埋量約為 5818.51(m³)。

參考文獻

1. 張庭榮：「整合視覺攝影測量於物聯網架構之自動監測系統」，博士論文，2018。
2. 徐竣翔：「UAV 影像在都市三維變遷偵測之應用」，碩士論文，2015。
3. 邱翰廷：「UAV 影像在河床裸露地之三維變遷偵測-以高屏溪為例」，碩士論文，2016。
4. 李怡蓁：「基於多視立體視覺的三維重建與真正射影像製作」，碩士論文，2014。
5. 李彥玲：「單幅遙測影像除霧處理之研究」，碩士論文，2011。
6. 陳建璋：「卑南溪 UAV 航測影像之裸露地砂石辨識與加值應用」，碩士論文，2014。
7. 吳芳、劉榮、田為春、曾政祥，遙測變化檢測技術及其應用綜述，地理空間信息，第 5 章，第 57~59 頁，2007。
8. Haekyung Park, Dongkun Lee “Comparison between point cloud and mesh models using images from an unmanned aerial vehicle” Measurement, Vol.138, pp.461~466, 2019.
9. Birute Ruzgiene, Tautvydas Berteska and Silvija Gecyte, “The surface modelling based on UAV Photogrammetry and qualitative estimation” Measurement, Vol.73, pp.619~627, 2015.
10. 內政部國土測繪中心-無人飛行載具系統專區
<https://www2.nlsc.gov.tw/UAS/index.html>

建築外掛石材飾面中插銷類型及石材種類組合之安全性探討

翁佳樑¹ 薛懷德²

¹ 國立高雄科技大學營建工程系副教授

² 國立高雄科技大學營建工程系碩士生

摘要

近年我國將天然石材作為建築外牆裝飾材料之使用率越來越普及，由於石材具有許多優點，且表面自然紋理彰顯建築非凡獨特，身受建築師喜愛。常用的外牆石材工法為插銷式工法，由於我國目前尚未有完整外牆石材施工規範，因此出現南北部石材使用厚度不同的狀況發生，北部以使用板厚 3cm 為主，南部則較常使用板厚 2cm 進行施工。為了因應厚度較薄石材，從原本開孔加工衍伸出開槽加工之獨特工法，但目前尚未有插銷類型與對應錨定強度之相關研究資料，需要進一步進行探討。本研究針對石材種類、石材厚度、插銷類型(石材加工方式)設計出 12 種實驗組合，依照美國 ASTM C1354 錨定強度試驗規範進行實驗。結果顯示不同石材種類與紋路方向均會影響錨定強度，其中表面具有紋理之石材有強弱方向特性，使用時需特別注意。實驗發現石材厚度對錨定強度影響差異高達 32%~62%，結果亦證實板厚 2cm 石材僅能適用開槽加工及片狀插銷，且其強度普遍不佳。

關鍵字：外牆石材工法、插銷類型、石材厚度、錨定強度

ABSTRACT

In recent years, utilization of natural stone as a decorative material for building exterior walls has become more and more popular in Taiwan. Because of the advantages of stones and the natural texture of the surface shows the extraordinary and uniqueness of the building, it gains high popularity from architects. Common external wall stone construction method is the dowel pin method. Since Taiwan does not have a complete external wall stone construction specification, There appears different thicknesses of stone in the north and south. North side mainly uses 3cm thickness of stones, and south side more commonly use 2cm thick for construction. In order to cope with the thinner stone, the unique method of kerf is derived from the original hole processing. However, there is no research data related to the type of dowel pin and the corresponding anchoring strength, further discussion of the method is needed. In this study, 12 kinds of experimental combinations were designed according to the type of stone, the thickness of the stone, and the type of dowel pin (stone processing method), and the experiment was carried out in accordance with the ASTM C1354 anchorage strength test specification of the United States. The results show that different stone types and grain directions will affect the anchorage strength. Stones with texture on the surface have the characteristics of strength and weakness, so attention should be paid when using them. Experiments have found that the impact of stone thickness on the anchorage strength varies as much as 32% to 62%. The results also confirm that the stone with a thickness of 2cm can only be used for kerf and flake dowel pin, and it's generally poor of strength.

Keywords: exterior wall stone construction method, dowel pin type, stone thickness, anchorage

strength

一、緣起

天然石材為歷史最悠久的建材之一，古代將石材疊砌成壁體與外界隔絕，現代將石材剖成薄板並使用鐵件固定於建築外牆上，成為外牆裝飾材料，由於石材具有抗壓、耐磨、耐燃等優良性能，從古至今都有將天然石材運用於建築工程上。近年我國新建大樓將石材作為外牆飾面材料之使用率逐年提高，天然石材具有許多種類與不同樣貌，石材的莊榮典雅能夠襯托出建築物外型，表面自然紋理能突顯建築線條，身受建築師喜愛。

我國外牆石材使用率最高施工方式為乾式工法中插銷式工法，此工法為使用鐵製繫件將石材端部與結構壁體相互接合。由於外牆石材屬於高空作業，完工為封閉狀態，無法檢核內部施工確實性，完工查驗存在一定的困難度。目前尚未有完整的外牆石材評估方式與檢核機制，如設計不當加上施工不確實，可能會使高掛於建築外牆之石材發生掉落傷人意外，危及用路人生命安全，成為街道上的不定時炸彈(圖 1)。

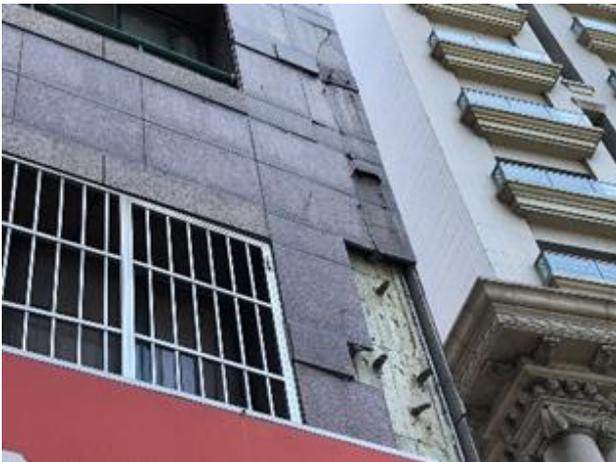


圖 1 外牆石材破裂脫落

二、研究目的

目前我國尚無外牆石材相關施工規範，僅有三篇由行政院公共工程委員會所制定的施工綱要規範，此規範侷限使用於公共工程，民間工程不受到規範約束，對比其他國家均有完整施工規範，所有工程須由依循規範進

行施工。在專家訪談與現地調查時，發現我國南北部外牆石材使用之石材厚度有別，北部以使用板厚 3cm 為主，南部則較常使用板厚 2cm 進行施工，會出現此現象原因為我國尚未有規範規定石材厚度要求，建商為了節省營建成本，進而縮小石材厚度，在這 1cm 之板厚差異是否會對外牆石材安全性帶來影響，需透過實驗釐清。

由於我國南部大多使用板厚 2cm 進行施工，為了增加施工性，從原本的開孔插銷工法進而延伸出南部獨有的開槽插片工法，綜觀各國工法中並未找到同於開槽插片之施工方式，可謂我國南部特殊工法。由於工法獨特因此尚無錨定強度方面檢核相關研究，有必要藉由實驗進一步檢討。

外牆石材規劃通常是由建築師與業主選定石材品種，再根據預算決定使用施工方式，接著發包至石材工程公司進行施工。從設計到施工過程中並未針對選定石材品種進行檢討，僅依據石材工程公司與石材供應商之相關工程經驗判斷業主選定石材與工法是否適用於施工處。由於石材為天然材料，不同種類石材之材料性能具有極大差異，相同品種中不同批次同樣也存在差異，且建築師特別喜愛選擇具有特殊紋理之石材品種彰顯建築設計獨特性，因此必要在外牆石材設計規劃階段透過相關試驗了解選定石材之材料性能。本研究主要目的探討石材種類、石材厚度、插銷類型(石材加工方式)與對錨定強度影響程度。

三、文獻回顧

3-1 外牆石材乾式工法介紹

常用之外牆石材插銷式工法為使用鐵製繫件將石材逐塊錨固於結構壁體上，繫件系統中由外而內可分為三大部分(圖 2)，分別為定扣件、承拖件與錨固件，定扣件為繫件與石材端部孔槽接合處，主要承受建築外牆所受側向應力，如地震力與風壓力；承拖件主要承受石材本身自重，再將所受荷重往內傳

遞；錨固件為接收所有構件傳遞之荷重，並將其轉移至結構壁體上。插銷式工法需在石材端部加工出孔槽，以置入定扣件與繫件系統相互搭接，主要分為開孔插銷與開槽插片兩種加工方式，開孔插銷為使用震動槌鑽於石材端鑽出孔洞(圖 3)，使用之定扣件為圓棒狀插銷(圖 4)；開槽加工為使用砂輪機於石材端部切出槽孔(圖 5)，使用定扣件為扁片狀插片(圖 6)。插銷式工法繫件系統中如受到超出負載之外力時，會有系統中弱面處破壞，石材之材料性能遠低於不銹鋼製繫件，因此石材與定扣件接合處為系統中弱面，因此需特別注意此處之錨定強度是否足以承受外力。

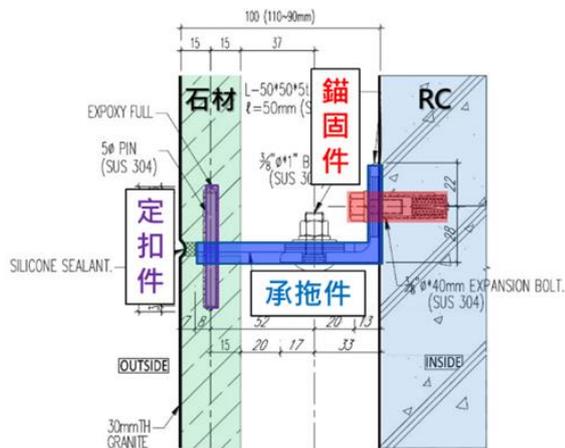


圖 2 插銷式工法繫件系統



圖 3 開孔加工



圖 4 插銷



圖 5 開槽加工



圖 6 插片

3-2 插銷式工法相關研究

「Slate flexural and anchorage strength considerations in cladding design」透過實驗得知板岩表面處理為磨光面之錨定強度大於機切面，原因為表面磨光處理會使板岩表面更均勻且減少缺陷，因此其錨定強度將高於未經表面處理之機切面，(Vera Pires, 2011)。

「Practice and testing of stone cladding in Hong Kong」依照 ASTM C1354 錨定強度試驗規範測試不同尺寸繫件，並使用傳統設計公式計算錨定強度與實驗結果強度進行相互比較。結果顯示實驗強度與計算強度最大差異高達 86.6%，可證傳統設計公式其計算結果與實際實驗結果無直接關係，無法透過公式計算代表石材繫件之錨定強度 (J. Y. H. Yu, 2006)

四、研究方法

4-1 實驗設計

本實驗依照現地常用工法組合歸類出三種實驗因子分別為石材種類、石材厚度、插

銷類型，並選擇不同實驗水準，共設計出 12 種實驗組合(表 1)，以下分別介紹。

表 1 實驗參數

實驗因子	石材種類	石材厚度	插銷類型
實驗水準	藍寶鑽石	2cm	開孔插銷
	浪花白橫紋	3cm	開槽插片
	浪花白直紋		

(一) 石材種類

近年各國開採出許多新石種，雖然石材表面紋理華麗美觀，並不一定適用於建築物外牆上，因此勢必要對石材之材料性能有所了解，方能判斷石材適用範圍。表面具有明顯紋理石材能轉換紋路方向進行外牆設計，使建築物具有不同視覺感，可分為橫紋設計與直紋設計。橫紋意指石材紋理同於建築物橫軸，與建築樓層方向平行；直紋意指石材紋理同於為建築物縱軸，與建築物高度方向平行。插銷式工法中繫件安裝位置位於石材重力線方向，目的為支撐石材自重並使用定扣件連結上下相鄰兩端石板，因此外牆為橫紋設計中，石材端部定扣件與紋路方向為垂直；而直紋設計時，石材端部定扣件與紋路方向為平行。

本研究探討石材種類與紋路方向對錨定強度產生影響，選用藍寶鑽石與浪花白兩種石材為實驗樣本，藍寶鑽石外觀為暗色系帶藍點，屬於粒狀紋理，使用此石材代表粒狀結構之石材種類(圖 7)；浪花白外觀黑白交錯，屬於條紋狀紋理，具有明顯各異向性特徵，因此不同方向所產生之物理性質有所差異，使用此石材代表條紋狀結構之石材種類(圖 8)。以上兩種均屬於火成岩，質地堅硬耐候性佳，許多建案使用於建築外牆、樓梯、地坪等，為常見外牆石材種類。



圖 7 藍寶鑽石

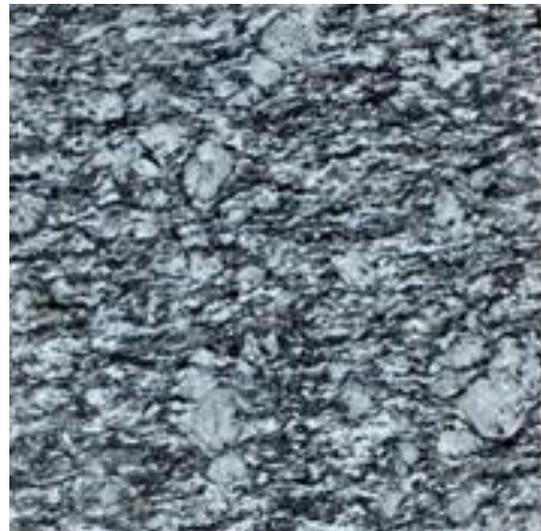


圖 8 浪花白

(二) 石材厚度

經由調查得知我國南北部使用外牆石材厚度有別，在北部大多使用厚度 3cm 石材；但南部較常使用 2cm 石材，由於在南部許多外牆石材僅施作於建築物基座部分，原先以厚度 3cm 石材為主，業主為了降低營建成本而逐漸改用厚度 2cm 石材進行施工，長久下來將外牆石材使用厚度 2cm 習以為常，加上國內尚無相關施工規範約束石材厚度，因此南部開始大量使用 2cm 石材於建築外牆。本研究比較板厚 2cm 與 3cm 石材之錨定強度差異。

(三) 插銷類型(石材加工方式)

我國常用插銷式工法其加工方式原先僅

有開孔插銷，出現開槽插片主要原因為南部從民國 80 年逐漸使用厚度 2cm 石材於建築外牆，傳統開孔插銷使用手持電動鎚鑽進行加工，鑽頭直徑為 5mm，由於厚度 2cm 石材較薄，加工過程中容易因鑽孔歪斜或石材硬度較低關係，使得鑽孔處加工崩角破裂，耗損許多材料。因此發展出於石材端部使用砂輪機切出溝槽，並將圓柱狀插銷改成扁片狀，俗稱插片、香菇片、扁 pin，其安裝方式同於插銷均為將定扣件置入加工處接合並往上搭接。目前國內尚無相關施工規範可循，現地常用加工方式及鐵件尺寸都是依靠經驗法則流傳下來，觀察已完工數年外牆石材中無發現任何異狀，進而推斷此施工方式為可行，並繼續使用相同工法進行施工，未經過相關實驗認證的工法是無法保證數十年後不會發生任何問題。本研究比較開孔插銷工法與開槽插片工法對錨定強度所產生之差異。

4-2 實驗方式

本研究選擇美國規範 ASTM C1354 單位石材錨定強度標準試驗方法進行實驗，此規範使用率高且規定清楚明瞭，內容記載多種石材乾式工法錨定強度試驗，包含背擴式工法、背栓式工法、插銷式工法與分裂扣式工法，本研究主要參考插銷式工法錨定強度試驗部分(圖 9)，依照規範中實驗治具相關規定設計製作出實驗治具(圖 10)。

試驗方式為使用萬能試驗機對石材表面進行施壓直到石材與扣件接合錨固端失效為止，試驗機加載刀頭模擬實際石材外牆所受側向應力，觀察錨固端承受之最大錨定強度。規範內容提到樣本尺寸為 30cm×30cm，每組樣本施作五次，為了觀察石材樣本在最弱狀態下之錨定強度，需將樣本置於恆溫水池養護 48hr，水溫保持 $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，養護結束後將表面擦乾至面乾內飽和狀態立即測試。安裝方式為將石材平放於治具支撐端上固定住扣件部分，加載刀頭位置調整至等於加工孔槽底部一倍石材厚度距離。實驗結束後得到錨固端破壞荷重值，將破壞荷重帶入規範中公式計算出錨定強度，此值代表石材與扣件處所承受側向應力之承載能力。

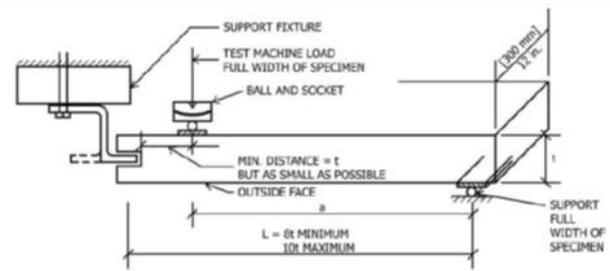


圖 9 ASTM C1354 治具規定



圖 10 本實驗治具

五、實驗結果分析

5-1 石材種類

比較各工法組合在不同石材種類產生之錨定強度差異，開槽工法中不同石材種類之差異為 13%~17%(表 2)；開孔工法中不同石材種類之差異為 12%~22%(表 3)。板厚 2cm 石材中，開孔工法之不同石材種類之錨定強度差異量(22%)大於開槽工法強度差異量(17%)；板厚 3cm 石材中，兩種工法之不同石材種類初降強度差異相似(12%~13%)，證明任何石材種類在板厚 3cm 中所產生之錨定強度相對穩定。三種石材在相同厚度工法之錨定強度排名趨勢為藍寶鑽石>浪花白直紋>浪花白橫紋，結果顯示不論板厚與工法下，具有粒狀結構之藍寶鑽石均大於條紋狀結構之浪花白，浪花白兩紋路方向強度趨勢為直紋大於橫紋，意旨定扣件平行於紋路方向之錨定強度大於垂直於紋路方向，差異量介於 3%~10%，可證條紋狀結構石材具有強弱方向特性，使用時需特別注意。

表 2 開槽工法不同石種強度差異比較

實驗組合	藍寶鑽石 2cm 開槽	浪白橫紋 2cm 開槽	浪白直紋 2cm 開槽	強度 差異
錨定強度(kgf)	123.60	109.14	102.37	17%
實驗組合	藍寶鑽石 3cm 開槽	浪白橫紋 3cm 開槽	浪白直紋 3cm 開槽	強度 差異
錨定強度(kgf)	188.92	165.23	184.18	13%
強度差異計算公式=(MAX-MIN)/ MAX				

表 4 藍寶鑽石不同板厚強度差異

實驗組合	藍寶鑽石 2cm 開槽	藍寶鑽石 3cm 開槽	強度 差異
錨定強度(kgf)	123.60	209.52	41%
實驗組合	藍寶鑽石 2cm 開孔	藍寶鑽石 3cm 開孔	強度 差異
錨定強度(kgf)	85.09	192.84	56%
強度差異計算公式=(MAX-MIN)/ MAX			

表 3 開孔工法不同石種強度差異比較

實驗組合	藍寶鑽石 2cm 開孔	浪白橫紋 2cm 開孔	浪白直紋 2cm 開孔	強度 差異
錨定強度(kgf)	85.09	66.78	69.13	22%
實驗組合	藍寶鑽石 3cm 開孔	浪白橫紋 3cm 開孔	浪白直紋 3cm 開孔	強度 差異
錨定強度(kgf)	192.84	170.62	180.92	12%
強度差異計算公式=(MAX-MIN)/ MAX				

表 5 浪花白橫紋不同板厚強度差異

實驗組合	浪花白橫紋 2cm 開槽	浪花白橫紋 3cm 開槽	強度 差異
錨定強度(kgf)	109.14	160.90	32%
實驗組合	浪花白橫紋 2cm 開孔	浪花白橫紋 3cm 開孔	強度 差異
錨定強度(kgf)	66.78	170.62	61%
強度差異計算公式=(MAX-MIN)/ MAX			

5-2 石材厚度

比較各石材種類在板厚 2cm 與 3cm 產生之錨定強度差異，藍寶鑽石不同板厚之強度差異為 41%~56%(表 4)；浪花白橫紋不同板厚之強度差異為 32%~61%(表 5)；浪花白直紋不同板厚之強度差異為 41%~62%(表 6)。結果顯示板厚 3cm 錨定強度均高於 2cm，強度差異介於 32%~62%，雖然兩者厚度僅差 1cm，其所對應之錨定強度差異高達一半之多，特別在在開孔工法中不同板厚之強度差異高達 56%~62%，相較於開槽工法差異為 32%~41%，因此使用開孔工法需慎選板厚，且應避免使用 2cm 石材於建築外牆。

表 6 浪花白直紋不同板厚強度差異

實驗組合	浪花白直紋 2cm 開槽	浪花白直紋 3cm 開槽	強度 差異
錨定強度(kgf)	102.37	173.67	41%
實驗組合	浪花白直紋 2cm 開孔	浪花白直紋 3cm 開孔	強度 差異
錨定強度(kgf)	69.13	180.92	62%
強度差異計算公式=(MAX-MIN)/ MAX			

5-3 插銷種類(石材加工方式)

比較各石材種類在不同加工方式產生之錨定強度差異，藍寶鑽石中不同工法組合之強度差異為 2%~31%(表 7)；花白橫紋中不同加工方式之強度差異為 3%~39%(表 8)；浪花白直紋中不同加工方式之強度差異為 2%~32%(表 9)。結果顯示板厚 2cm 石材中不同插銷種類(石材加工方式)之強度差異(31%~39%)大於板厚 3cm 石材(2%~3%)，證

明板厚 3cm 石材使用不同工法進行加工，所產生之錨定強度差異不大。藍寶鑽石與浪花白橫紋中板厚 2cm 使用開槽工法之強度大於開孔工法，板厚 3cm 則相反；浪花白直紋中板厚 2cm 使用開槽工法之強度會大於開孔工法，板厚 3cm 亦相同；實驗證實板厚 2cm 石材中錨定強度均為開槽工法大於開孔工法，板厚 3cm 中則不一定，其兩種工法之強度差異不大(2%~3%)，可證板厚 2cm 石材適用工法為開槽加工。

表 7 藍寶鑽石不同工法強度差異比較

實驗組合	藍寶鑽石 2cm 開槽	藍寶鑽石 2cm 開孔	強度差異
錨定強度 (kgf)	123.60	85.09	31%
實驗組合	藍寶鑽石 3cm 開槽	藍寶鑽石 3cm 開孔	強度差異
錨定強度 (kgf)	188.92	192.84	2%
強度差異計算公式=(MAX-MIN)/ MAX			

表 8 浪花白橫紋不同工法強度差異比較

實驗組合	浪花白橫紋 2cm 開槽	浪花白橫紋 2cm 開孔	強度差異
錨定強度 (kgf)	109.14	66.78	39%
實驗組合	浪花白橫紋 3cm 開槽	浪花白橫紋 3cm 開孔	強度差異
錨定強度 (kgf)	165.23	170.62	3%
強度差異計算公式=(MAX-MIN)/ MAX			

表 9 浪花白直紋不同工法強度差異比較

實驗組合	浪花白直紋 2cm 開槽	浪花白直紋 2cm 開孔	強度差異
錨定強度 (kgf)	102.37	69.13	32%
實驗組合	浪花白直紋 3cm 開槽	浪花白直紋 3cm 開孔	強度差異
錨定強度 (kgf)	184.18	180.92	2%
強度差異計算公式=(MAX-MIN)/ MAX			

六、結論

一、 石材種類與紋路方向均有差異

相同厚度工法中三種石材之錨定強度排名趨勢為藍寶鑽石>浪花白直紋>浪花白橫紋，結果顯示具有粒狀結構之藍寶鑽石均大於條紋狀結構之浪花白，且浪花直紋大於橫紋，差異量介於 3%~10%，可證條紋狀結構石材具有強弱方向之分，使用時需特別注意。

二、 石材厚度對錨定強度影響極大

實驗結果顯示板厚 3cm 石材之錨定強度均大於板厚 2cm，差異介於 32%~62%，兩者厚度差 1cm 而錨定強度差異量高達一半之多。開孔工法中錨定強度差異(56%~62%)高於開槽工法(32%~41%)，因此使用開孔工法需慎選石材厚度，外牆石材應盡可能避免使用板厚 2cm 進行施工。

三、 厚度 2cm 石材適用開槽工法

實驗結果顯示板厚 2cm 錨定強度均為開槽工法大於開孔工法，板厚 3cm 則不一定，兩種工法差異僅為 2%~3%，可證板厚 2cm 石材適用工法為開槽加工。

六、建議

一、 施工前需針對外牆石材選定組合進行評估

在新建大樓外牆石材設計規劃階段應對選定石材與工法組合進行相關試驗以了解材料性能，並根據建案條件檢討適用性與檢核安全性。

二、 研擬我國外牆石材施工規範

建議我國主管機關應針對我國施工現狀擬定外牆石材施工規範，內容須包含施工前適用性評估與施工中抽驗準則，以及完工後查驗標準，以提升我國外牆石材安全性。

參考文獻

1. 吳烜婷，「乾式石材外牆吊掛繫件之應用研究」，成功大學碩士論文，2004。

2. Vera Pires, P.M. Amaral, L.G. Rosa, R.S. Camposinhos, “Slate flexural and anchorage strength considerations in cladding design” *Construction and Building Materials*, Vol.25, p3966~3971, 2011.
3. J. Y. H. Yu, S. L. Chan, “Practice and testing of stone cladding in Hong Kong” *Advanced Facade Engineering and Technology Symposium*, Lecture 7, Hong Kong, 21st April, 2006.
4. ASTM C1354 Standard Test Method for Strength of Individual Stone Anchorages in Dimension Stone. Pennsylvania, America: International Association for Testing.

未設置雨量觀測站地點之雨量資料推估-以 0828 寶業里滯洪池為例

林宗曾¹ 陳青宏²

¹國立高雄科技大學土木工程與防災科技研究所教授

²國立高雄科技大學土木工程與防災科技研究所研究生

摘要

一般使用雨量資料，可由中央氣象局等相關單位網站查詢取得，但一般氣象觀測站設置設置地點相較於人類土地利用範圍而言實屬有限，於是只有在有設立測站的地方，方可得到直接之雨量資料，如該地區未設立氣象測站，即無法得知該地點實際之降雨情形。本研究以 2018 年 0828 豪雨積淹水事件之高雄市三民區寶業里滯洪池為例，使用目前現有設置使用中之鄰近氣象局觀測站之即時雨量資料推算分析地點之實際雨量，並比對滯洪池水位上升資料，進行兩者關連性之研究，以期獲得即時雨量資料之直接運用模式。

關鍵字：降雨量、氣象觀測站

Rainfall Data Estimation at Locations without Rainfall Observing Stations - Taking 0828 Baoyeli Detention Pond as an Example

Tzong-Tzeng Lin¹ Ching-Hung Chen²

¹Professor, National Kaohsiung University of Science and Technology

²Master Student, M.A. program, Department of Science and Technology, National Kaohsiung University

ABSTRACT

Generally used rainfall data can be obtained from the website of the Central Meteorological Bureau and other relevant units. However, the location of general meteorological observation stations is limited compared with the scope of land use. Therefore, the direct data can only be obtained in places where there are observation stations. If there is no meteorological station in the area, it is impossible to know the actual rainfall situation at that location. In this study, the detention pond in Baoyeli, Sanmin District, Kaohsiung City, which was the case of the 0828 heavy rain machine flooding event in 2018, was used as an example. The actual rainfall at the analysis site was calculated and compared using the current rainfall data from the neighboring meteorological bureau observation stations currently in use. Research on the correlation between the water level of the detention basin and the correlation between the two in order to obtain the direct application model of the real-time rainfall data.

Keywords: Rainfall, Meteorological Observatory

一、前言

全球陸地的年降雨量平均值約 900 毫米，臺灣地區年平均降雨量達 2,500 毫米左右，

約為全球平均的 2.8 倍，是單位面積降雨量相對較多的國家，再加上本島地形變化大的影響，降雨量的多寡以及降雨的形勢，對民

眾的日常生活而言，有著密不可分的緊密關係。面對全球環境變遷造成的極端氣候與環境災害，如何因應處置以保全人民生命財產安全，氣象資料的運用在日常生活中是不可或缺的一部分，不管是一般工程的工期影響抑或是一般防災應變時之判斷等，皆有其使用之必要性。

為了觀測天氣的變化情形，官方跟民間設置了許的氣象觀測站，以目前現有設置使用中之氣象局觀測站而言，往往並非以地域範圍平均布設，考量目標地點實際雨量資料無法透過實際設置氣象觀測站方式取得，除了耗費大量財力、物力增設氣象測站外，應可利用既設之氣象觀測站觀測所得之即時雨量資料進行分析推算，藉以得到目標地點之推算雨量，並達到使用預警及防災需求。為此，本文將探討如何利用氣象觀測站觀測所得之即時雨量資料得到分析地點之推斷雨量，並達到使用預警及防災需求。

觀測站之雨量資料與個案地點間之關係為距離越短，關聯性越高，反之，兩者距離越長，則影響程度則隨著距離拉長而驟減，爰此，本研究使用反距離權重法 (Inverse Distance Weighted, IDW) 進行目標地點之雨量推估，並將推算所得之目標地點雨量與現地實際滯洪池之觀測水位資料進行比對驗證。

二、研析標的說明

2-1 案例地點說明

本研究以高雄市三民區寶業里滯洪池作為研究地點，三民區位於臺灣高雄市西南部，周邊與鼓山區、鹽埕區、新興區、前金區、苓雅區、左營區、鳳山區、鳥松區、仁武區等行政區相鄰，依內政部統計資料，至 109 年 10 月底，三民區人口數約 33.7 萬人，是高雄市人口第二大區，僅次於鳳山區，也是全國人口第八多的鄉鎮市區。

原高雄市區除萬壽山、半屏山的珊瑚礁石灰岩塊及東南端鳳山丘陵外，絕大部分的地區在十公尺以下的平原，位於嘉南平原、屏東平原之交會處。三民區主屬平原，因在半屏山、萬壽山以南之區，所以地勢略向南、

向西傾斜，溪流匯入愛河，也因此區內降雨情形受地形影響較低。

2-2 案例概要

寶業里滯洪池使用寶業里 41 期自辦市地重劃區內公園學校預定地做為開闢基地，西臨澄清路，北臨褒揚東街，東臨文安南街，南側緊臨鳳山市建國路；其中文小用地約 2.69 公頃，公園用地約 1.77 公頃，總使用面積為 4.46 公頃，土地用途為學校預定地(文小)與公園用地(公一)，北側緊鄰停車場用地，東側為第三種住宅區，西側為澄清路，基地位處於平原地區，平均地表高程約為 10.0m~12.0m，澄清路側約為 EL.+10.4m，東南側臨文安南街與建國路側地勢較高約 EL.+11.34m，整體地形起伏由西向東南漸昇。基地範圍周邊皆有雨水箱涵幹道，文小用地臨文安南街，與基地中央道路，有 B 幹線既有雨水箱涵幹線通過，公園用地東北角下方有雨水箱涵穿越。

根據寶業里滯洪池基本設計報告書(2010)內容，滯洪池細分為北側滯洪池(下稱北池)及南側滯洪池(下稱南池)兩個系統，最高水位 EL.+11.5m，南北兩池合計最大容量滿足 10 萬噸。南、北兩滯洪池之間以箱涵聯通並設置閘門管控，低強度降雨下僅需使用北池滯洪，當北側滯洪池水位超過 EL.+9.5m 時，再開啟閘門讓北池及南池聯通操作，以應付強度較高且延時較長之降雨，配置圖如(圖 1)所示。



圖 1 寶業里滯洪池配置圖

寶業里滯洪池之鄰近氣象觀測站為三民站(CoV700)、鳳山站(CoV440)、苓雅站(CoV710)、大寮站(CoV730)等 4 站，相對位置如(圖 2)所示，地形無較大起伏，故所得雨量資料受地形影響程度較低，與兩者距離遠近程度成反比。



圖 2 寶業里滯洪池與鄰近雨量站相對位置

三、案例研析

3-1 研析目標

常見區域雨量分析方法大致有下列幾種：

1. 算術平均法，直接將各雨量站之紀錄取平均值作為分析依據，此法計算簡易，但準確性不足。
2. 徐昇多邊形法，將各雨量站連線成三角形，在將各三角形外心連接後包住一雨量站，該連接面積既為該雨量站之影響面積，再以面積加權方式求取平均雨量，本法較平均法精確，但針對單一特定地點之雨量仍無法精確取得，且未考量地形影響。
3. 高度平衡多邊形法，在徐昇法的基礎下，納入地形標高因子，所得結果精確，但計算繁瑣。

為討論未設置氣象觀測站地點處之實際降雨情形，可採用空間內插法進行分析，常見方法有下列三種：

1. 反距離權重法 (Inverse Distance Weighted, IDW) (Inverse Distance Weighted, IDW)，針對每一個未知的數值推估，距離反比權重法是利用它鄰近的已知點之數值來進行加權運算，所給的權重依照距離遠近來計算。
2. 克利金法(Kriging)是用來做空間內插的地

理統計學方法，克利金法假設說屬性的空間變異不是完全的隨機性(stochastic)或是完全的決定性(deterministic)。

3. 平滑曲線法(Spline)是一個應用在選擇樣點後，利用多項式方程式進行內插，產生平滑曲面的內插法。

本研究採用反距離權重法，結合案例地點周邊氣象觀測站之觀測雨量資料，並計算各觀測站與目標地點之實際距離，依實際距離影響以反距離權重法進行計算後，推算出案例地點之雨量以及降雨情形，再與實際積淹水事件進行驗證分析，藉以取得兩者間之關係，以利後續實際應用及防災應變之參考。反距離權重法所給的權重依照距離遠近來計算，其概念是一個未知值的點，它被周圍已知點的值的影響程度與距離成反比，距離越遠影響程度越小。

3-2 研析流程

研析流程如(圖 3)所示。



圖 3 研析流程圖

四、研究結果

4-1 鄰近雨量站與目標地點距離推算

因既有氣象觀測站之資料僅提供經緯度資料，並無與目標地點之距離資料，為得到相對距離，必須先將觀測站與目標地點之經緯度座標進行座標轉換後，再進行相對距離計算，所得之相對距離資料如(表 1)。

表 1 寶業里滯洪池與三民站、苓雅站、鳳山站及大寮站之距離計算

標的名稱	座標 N	座標 E
寶業里滯洪池	22.639122	120.345824
鳳山站 C0V440	22.646653	120.356122
三民站 C0V700	22.645017	120.311233
苓雅站 C0V710	22.622742	120.330669
大寮站 C0V730	22.605614	120.395717

續表 1

標的名稱	TWD97 二度分帶座標 Y	TWD97 二度分帶座標 X	與寶業里 滯洪池距離 S(m)
寶業里滯洪池	2504470.70990381	182760.94341679	
鳳山站 C0V440	2505300.02397921	183823.05656655	1347.53
三民站 C0V700	2505139.52474269	179208.43267154	3614.92
苓雅站 C0V710	2502663.82641550	181195.04315528	2391.00
大寮站 C0V730	2500738.62010632	187874.25023019	6330.43

4-2 依據反距離權重法進行目標地點雨量推算

本研究針對 2018 年 0828 豪雨事件寶業里滯洪池周邊 4 座氣象觀測站之雨量資料進行分析，並將分析範圍往前及往後各延展一天，以利觀察累積雨量變化情形。以(表 2~表 4)日累積雨量而言，2018 年 8 月 27 日至 29 日等 3 日之每日累積雨量皆達到大雨標準，其中 8 月 28 日之日累積雨量更達到豪雨標準。

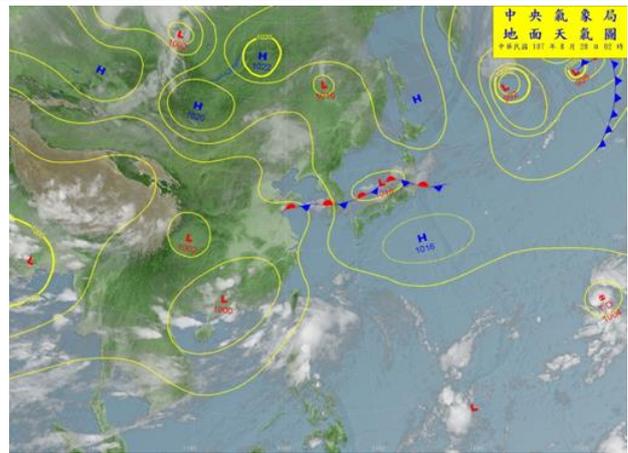


圖 4 0828 事件期間地面天氣圖

表 2 日累積雨量(2018/08/27)

日累積雨量(2018/08/27)				
測站	三民	苓雅	鳳山	大寮
日雨量(P)	179	157	158.5	168
平均時雨量(P/24hr)	7.46	6.54	6.60	7.00

表 3 日累積雨量(2018/08/28)

日累積雨量(2018/08/28)				
測站	三民	苓雅	鳳山	大寮
日雨量(P)	304	314.5	349	281.5
平均時雨量(P/24hr)	12.67	13.10	14.54	11.73

表 4 日累積雨量(2018/08/29)

日累積雨量(2018/08/29)				
測站	三民	苓雅	鳳山	大寮
日雨量(P)	162.5	156	143	137
平均時雨量(P/24hr)	6.77	6.50	5.96	5.71

使用反距離權重法，將鄰近雨量站已知之觀測資料進行加權運算，藉此求取區域內之未知點數值進行推估，所給的權重依據距離遠近來計算；本方法主要建構於兩點間的距離越接近，則兩者性質關聯性則越高；反之，離的越遠則相似性越小。

公式：

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i P_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

\bar{P} ：平均雨量，mm

n：鄰近雨量站數量

w_i ：鄰近雨量站第 i 站量測雨量之權重

P_i ：鄰近雨量站第 i 站指定時段之量測雨量，
mm， $i=1, 2, 3, 4$

計算後所得目標地點推算雨量如(圖 5)、(圖 6)、(圖 7)，再與寶業里滯洪池水位變化比對，如(圖 8)，0828 降雨大約在 0827 深夜 23:00 左右，滯洪池約在 0828 凌晨 0:00 起開始滯洪，降雨於 1:00 左右雨量暫歇，降雨量約達 52.53mm/hr，尚未達 5 年重現期降水量，於 0828 0500 時開始另一波較大之降雨，在 0600 時達到高峰，降雨量約達 71.34mm/hr，皆已達氣象局之大雨標準，也可看出在兩波降雨期間，滯洪池水位持續上升並無下降情形，此一情形表示兩波降雨間隔期間並不長，降雨稍歇時，上游仍有集水區降水流入滯洪池之狀況發生，依據相關水情回報，滯洪池周邊已有積淹水狀況。

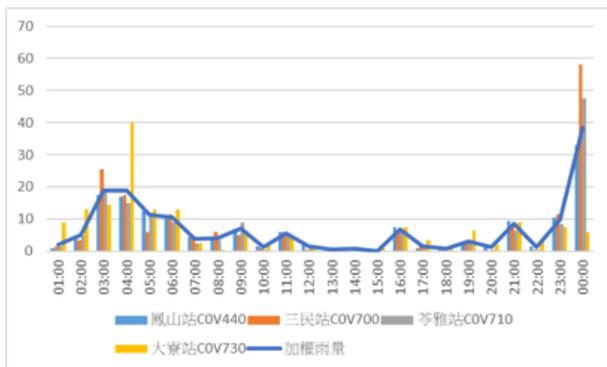


圖 5 2018 年 8 月 27 日之寶業里滯洪池推算雨量

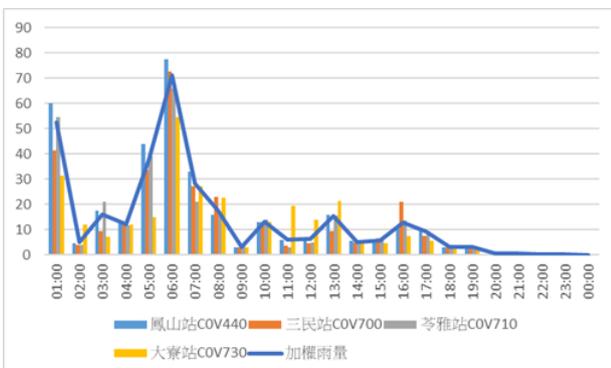


圖 6 2018 年 8 月 28 日之寶業里滯洪池推算雨量

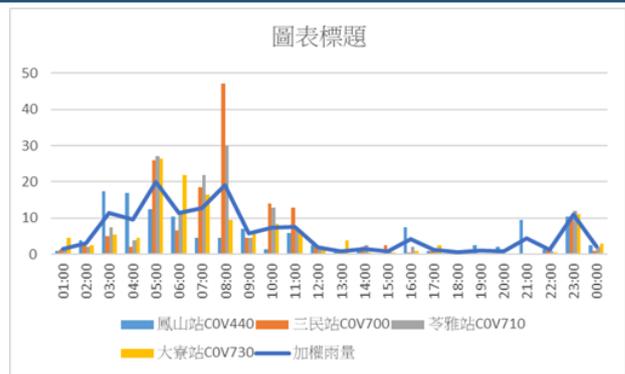


圖 7 2018 年 8 月 29 日之寶業里滯洪池推算雨量

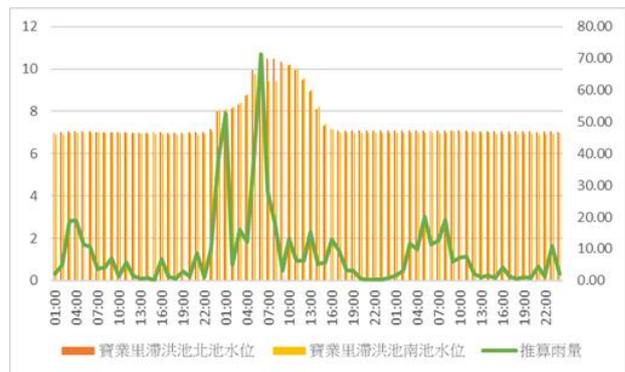


圖 8 20180828 豪雨推算雨量與滯洪池水位關係

五、結論與建議

5-1 結論

雨量數據於空間及時間分布具高度隨機性，因此，本研究以空間分析理論為基礎，利用反距離權重法，進行雨量資料空間分析，分析所得之寶業里滯洪池之實際雨量推估值，經比對滯洪池水位上升資料，透過反距離權重法獲取目標地點之逐時雨量資料，不論是降雨趨勢及降雨量，均與滯洪池水位上升資料十分吻合。

由驗證結果可知，此方法適用於此區域，應可作為未設置氣象觀測站地點之雨量值推估方式，並應用於雨型分析以及及時降雨資料與防災通報使用。

5-2 建議

(一) 鄰近雨量觀測站之數量多寡將對推算地點之雨量歸算值之精確性造成影響，在經濟性及用地取得可行之前提下，適度增設氣象觀測站之數量，並考量觀測站

選址之相對位置，將可提升雨量資料利用之精確性。

- (二) 進行雨量站資料分析，倘若有雨量站資料因故無法提供完整的逐時雨量時，建議先以空間差值計算法，如：反距離權重法，或是其他適合研究區域的空間分析法，先進行雨量資料補遺後，再進行雨量分析，較完整的雨量資料將有助於預估雨量計算。
- (三) 一般工程實際執行中如遇大量降水之情形而有影響現地施工，從而須辦理申請不計或是展延工期時，可參照本研究方法，依現地鄰近雨量站之降雨情形推算工程地點之降雨狀況，作為工期計算之佐證資料。

參考文獻

1. 大氣水文研究資料庫網站，氣象數據資料，取自 <https://dbar.pccu.edu.tw/>。
2. 徐苡琪，氣象雷達與觀測站之雨量關聯性分析-以高雄市為例，國立高雄應用科技大學，土木工程與防災科技研究所，碩士論文。
3. 陳志謀，雨量站分群與區域淹水指標評估，國立屏東科技大學，土木工程系，博士論文。
4. 丁祖光，不同重現期暴雨特性對臺北市排水容量之研究，國立臺灣海洋大學，河海工程學系，碩士論文。
5. 陳新法，降雨量分析於軍事工程及防災應用之研究，國防大學理工學院，環境資訊及工程學系，碩士論文。

彈性黏著劑應用於台灣磁磚外牆系統之應變行為探討-以不同日射能量結合降溫試驗做比較

翁佳樑¹ 顏澤維²

¹ 國立高雄科技大學營建工程系副教授

² 國立高雄科技大學營建工程系碩士班研究生

摘要

磁磚是多數台灣建築會選用的建築外牆材料，但近年來仍然頻繁傳出如寒流時磁磚掉落傷及人事物的案件，從而需要重視並著手預防磁磚的掉落問題。目前在台灣，多使用益膠泥作為磁磚的黏著材料，而一樣為磁磚掉落問題困擾的日本，除了制定相關法規外，亦著眼於改進磁磚的黏著材料，開發出了彈性黏著劑作為黏著材料。本研究建置一座以台灣施工條件建造的試驗牆體，於該牆體上分別以台灣製益膠泥及日本製彈性黏著劑黏貼磁磚，並以紅外線加熱燈模擬台灣的日射能量，並結合水管灑水降溫進行加熱及降溫試驗，紀錄其溫度與應變變化，以了解日射、降溫下益膠泥與彈性黏著劑的溫度、應變表現。結果發現，彈性黏著劑的溫度下降趨勢與益膠泥不同，而突發性降溫會使牆體溫度及應變短時間內驟變，短時內的大量膨脹及收縮會不利於牆體健康，使得彈性黏著劑能夠適應較大應變變化這點優於益膠泥之表現。

關鍵字：磁磚外牆、彈性黏著劑、日射模擬、降溫、應變

Discussion on the Strain Behavior of Elastic Adhesive Applied to the External Wall System in Taiwan - Compare with Different Insolation Energy Combined with Cooling Test

Chia-Liang Weng¹ Ze-Wei Yan²

¹ Associate Professor, Department of Construction Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

² Graduate Student, Department of Construction Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

ABSTRACT

Tiles are the most used exterior wall materials by Taiwanese buildings. However, in recent years, there have been frequent cases of damage to people and things caused by the falling of tiles during the cold current. Therefore, it is necessary to pay attention to and prevent the problem of tiles falling. At present, in Taiwan, high polymer mortar is mostly used as the adhesive material for tiles, and Japan, which is also troubled by the problem of falling tiles, has not only formulated relevant laws and regulations, but also focused on improving the adhesive materials of tiles and developed elastic adhesives as a new adhesive material.

In this study, a test wall was built under the construction conditions of Taiwan. Tiles were glued on the wall with Taiwan-made high polymer mortar adhesive and Japanese-made elastic adhesive, and infrared heating lamps were used to simulate solar energy in Taiwan, combined with water pipes. Sprinkle water to cool down to conduct heating and cooling tests, record the

temperature and strain changes, to understand the temperature and strain performance of the high polymer mortar adhesive and the elastic adhesive under solar radiation and cooling.

The results showed that the temperature decrease trend of the elastic adhesive is different from that of the high polymer mortar adhesive. The sudden temperature drop will cause the wall temperature and strain to change rapidly in a short period of time. The large amount of expansion and contraction in a short period of time will be harmful to the health of the wall, making the adhesive can adapt to large strain changes, which is better than the performance of high polymer mortar adhesive.

Keywords: external tile wall, elastic adhesive, solar radiation simulation, cooling, strain

一、緣起

磁磚的使用在台灣已行之有年，磁磚種類也相當繁多，但每每如寒流來襲時，磁磚外牆常常發生掉落情形，而掉落程度輕則小塊磁磚，重則連同打底甚至結構層一同掉落，會造成的傷害風險無可忽略，而使用防護網、事後修補等方式又治標不治本，故了解磁磚掉落的原因從而預防發生是很重要的。

與台灣有著相同困擾的日本，在磁磚掉落預防對策上，除了制定相關法規外，也開發出了稱為彈性黏著劑的新型磁磚黏著材料，彈性黏著劑相比起傳統的水泥砂漿、海菜粉等黏著材料，有著不需調配即可使用、更高的耐久度等好處，因此在日本使用率逐年提高。

相比日本，台灣的磁磚黏著材料目前多採用益膠泥，儘管彈性黏著劑有著易於施作、防止開裂蔓延等好處，但其推行地區是在日本，台灣與日本兩地間的施工手法、日射、氣溫等皆有所不同，因此於台灣的眾條件下，直接使用彈性黏著劑作為黏著材料是否優於益膠泥仍需探討。

本研究建置實驗牆體，進行模擬加熱試驗以比較益膠泥與彈性黏著劑兩者，在不同季節、日射方向下的溫度、應變變化，並將其紀錄、分析，以供業界後續參考。

二、實驗目的與流程

2-1 實驗目的

磁磚飾面的剝離是由磁磚與底層混凝土間的應變差易所引起的(起橋孝德，河野政典，

柘田佳寬，2011)，本研究以紅外線加熱燈進行模擬日射試驗並結合降溫測試，欲了解使用兩種黏著劑的牆面在不同季節、方位下的日射能量、突發性降溫下，各層溫度、應變上的表現差異。

2-2 實驗流程

本研究先於室內建置一座高 1.6 米、長 1.8 米的試驗牆體，於牆體上施作打底層後，分別以益膠泥與彈性黏著劑黏貼磁磚，各層介面設有熱電偶與應變歸以記錄溫度以及應變數值，實際照片如圖 1，牆體配置圖如圖 2，牆體概要如表 1。

實驗牆體設置完成後，以紅外線加熱燈對實驗牆體進行加熱，以不同季節及不同方向之日射能量作為加熱標準，加熱標準參考如表 2(詹肇裕，2002)。

每次實驗進行 24 小時，於此段時間內收集各層的溫度以及應變數值，統整後以 10 分鐘作為時間間隔，將 24 小時共 144 個紀錄點製成圖表並進行比較。

另外，為了解突發性的降溫(如寒流、午後雷陣雨等現象)對牆體造成的影響，於牆上掛置鑽孔水管，固定於下午兩點以水替牆體進行降溫，降溫過程約持續 2 分鐘，其後回歸正常日射照射，並同樣記錄溫度以及應變的數值統整分析。



圖 1 實驗牆體實際照片

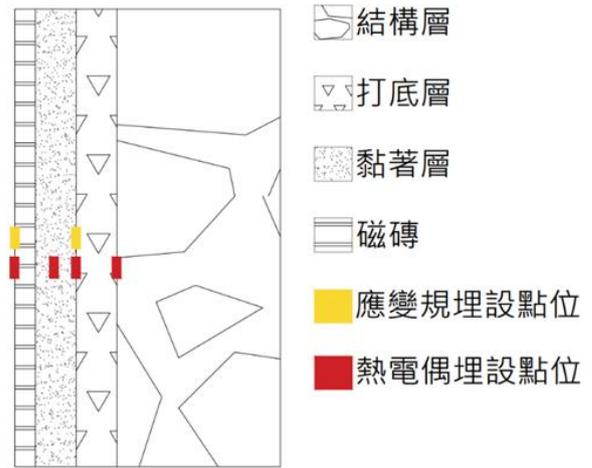


圖 2 實驗牆體配置圖

表 1 實驗牆體分層概要表

實驗牆體分層名稱		該層概要
結構層		使用設計強度 210kgf/cm ² 混凝土 厚度約 15cm
打底層		以水泥砂漿構成 以修飾結構層表面 厚度約 1cm
黏著層	益膠泥	主要成分含 水泥、防水劑、樹脂等 厚度約 1cm
	彈性黏著劑	主要成分含 改性有機矽樹脂 厚度約 1cm
磁磚層		屬陶瓷材質 背面含背溝 無切割尺寸為 22.6x15cm

表 2 日射量值參考標準表(詹肇裕, 2002)

季節與方位	夏季西向	夏季東向	冬季西向
時刻	日射量值 單位: kJ/m ² .day		
06:00	21.3	104.7	3
07:00	91.8	758.9	2.4
08:00	136.3	1163.6	40.8
09:00	515.1	1420.9	75.6
10:00	757.7	1214.4	112.6
11:00	895.1	885.5	162.1
12:00	967.5	531.8	211.4
13:00	990.7	326.8	356.8
14:00	861.3	309.6	558.8
15:00	628.3	241.9	602.7
16:00	360.8	167.8	471.5
17:00	118.5	117.5	194.3
18:00	5	68.6	5.4

三、實驗結果

3-1 溫度部分實驗結果

溫度部分實驗結果如圖 3、4、5、6，由圖表可知，使用不同季節或方位的日射能量組合，會對牆體溫度差的高峰時間點以及差異大小產生影響。

以同季不同向(圖 4、5)進行比對，牆面達到最高溫的時間點會有所不同，夏季西向約下午 6 點，夏季東向則約上午 11 點可達到當日最高溫。

若以同向不同季(圖 5、6)進行比對，牆面達到最高溫的時間差異不大，夏季西向約下午 6 點，冬季西向約下午 5 點而因為季節日射強弱的不同造成了牆面整體的溫度差異，夏季西向的牆面在最高溫時磁磚面與環境溫度有約 10 度的溫差，而冬季西向只有約 6 度。

儘管普遍認知冬季的日射較弱，但在實驗結果中仍然確認到了冬季日射下的牆面依然與環境溫度存在著一定的溫度差異。

降溫測試的實驗結果如圖 3，於圖表中可看出即使是短時間的降溫，亦可以使牆體整面的溫度發生顯著的下降，但由於降溫時間短暫，致使牆體各層降溫幅度較小。由於設備以及研究時間限制致使無法模擬強力寒流來襲時的氣溫、強風、日射減少等條件，推估若是強力寒流等帶來的降溫條件，為牆體帶來的降溫幅度以及持續時間會較本研究來的巨大。

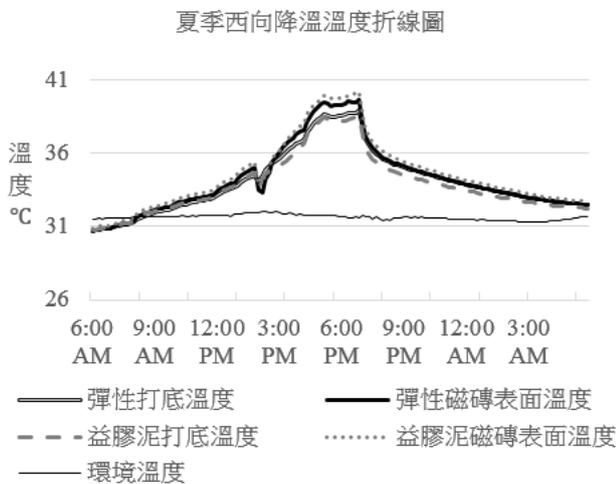


圖 3 夏季西向降溫溫度折線圖

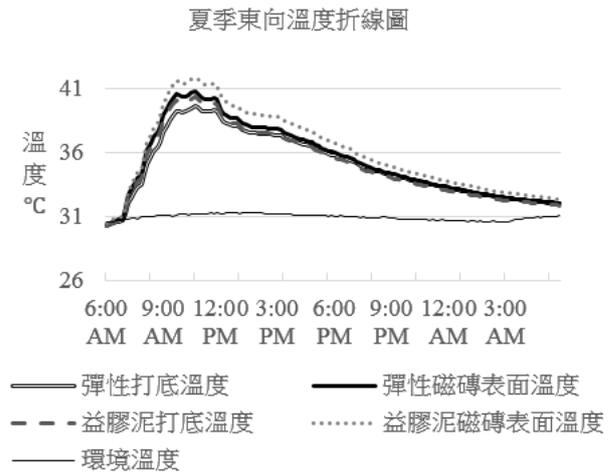


圖 4 夏季東向溫度折線圖

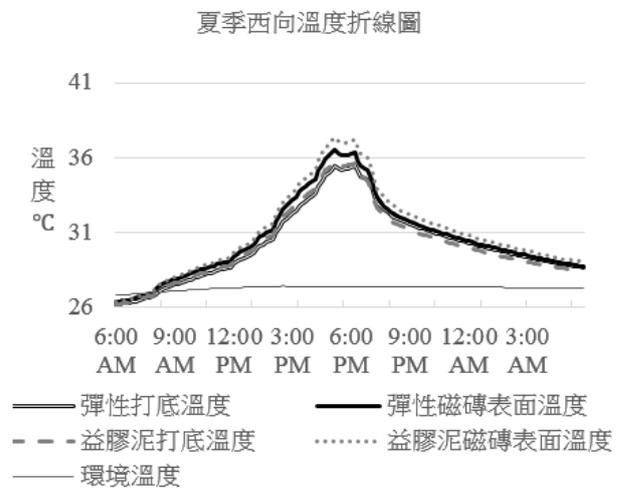


圖 5 夏季西向溫度折線圖

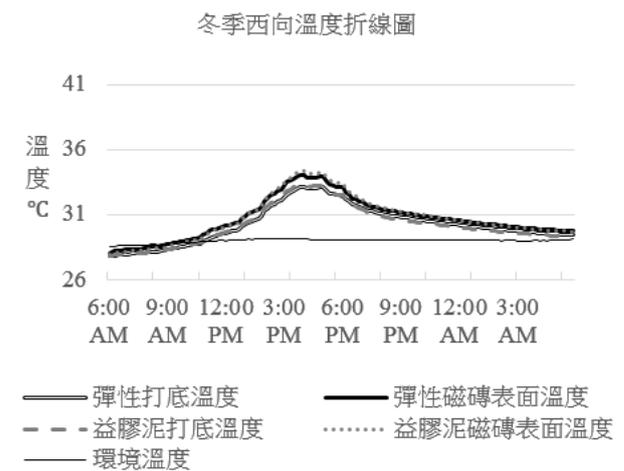


圖 6 冬季西向溫度折線圖

3-2 牆體溫度差分析

牆體溫度差圖如圖 7、8、9、10，本研究為了解各層溫度變化之差異，以磁磚面溫度減去該層溫度後製成溫度差折線圖，如益膠泥 RC 溫度差曲線，即表示以益膠泥磁磚面的溫度減去 RC 層的溫度所畫出的曲線，若圖中一點數值為 0，代表該點與磁磚面溫度相同，若途中一點數值為 2，代表該點磁磚面溫度高出 2 度。

由觀察圖 7、8 可知，若以不同黏著劑的牆體溫度差進行比對，在牆體降溫時，使用彈性黏著劑的牆體，其打底層的溫度差曲線會類似於 RC 溫度差線，下降的較快，而使用益膠泥的牆面，其打底層溫度曲線會較類似於黏著層曲線，較緩和的下降，雖然各組模擬的日射量不同，但於其他日射量實驗組上皆有觀察到這些情形。

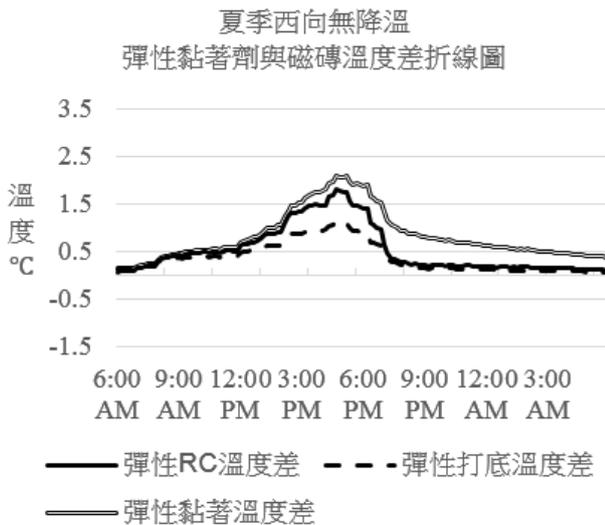


圖 7 夏季西向無降溫 彈性黏著劑與磁磚溫度差折線圖

降溫測試的溫差實驗結果如圖 9、10，可以觀察到降溫時段使牆面的各層溫度與磁磚面急速拉近，使用彈性黏著劑的牆面，其黏著層曲線可到達負數，也就是黏著層溫度高於磁磚面，其後在日射結束，正常降溫時，牆面表現會與沒有降溫測試時相同，使用彈性黏著劑的牆體，其打底層的溫度差曲線會較快下降，而使用益膠泥的牆面，其打底層溫度差曲線皆會較緩和的下降。

此處代表了在溫度下降時，使用彈性黏

著劑的牆面，其打底層、RC 層與磁磚面的溫度差較小，只有黏著層的溫度差異較高。而使用益膠泥的牆面，只有 RC 層與磁磚面的溫度差較小，打底層、黏著層的溫度差則較大，形成了由裡而外的各層溫度表現不一致的情形。

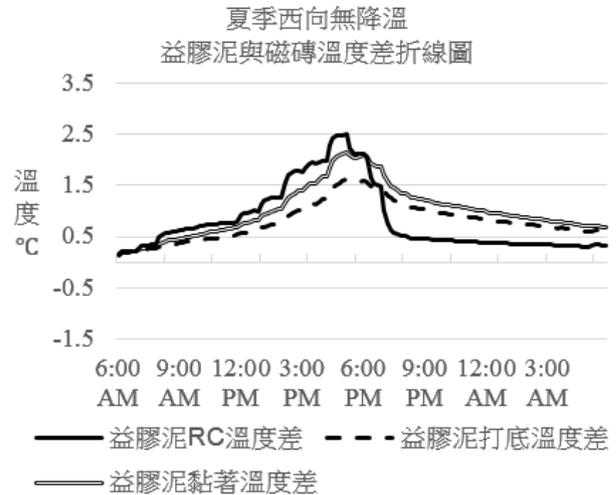


圖 8 夏季西向無降溫 益膠泥與磁磚溫度差折線圖

使用彈性黏著劑的牆面雖然黏著層與各層有著溫度差異，但其材料本身較具彈性，可以適應變形，而使用益膠泥的牆面不只黏著層，打底層也與 RC 層、磁磚面有著溫度差異，溫度差異產生的變形不一致情形下，益膠泥本身適應變形的能力也不如彈性黏著劑，若是發生更劇烈的降溫時，產生更大的溫度差異情況下，使用益膠泥的牆面會因其打底層的溫度差異和黏著劑耐變形能力會對牆體產生不良影響。

3-3 應變分析

本研究除以熱電偶量測各層溫度外，亦有埋設應變規以量測應變變化，圖中，應變點以第一個紀錄點作為原點，應變值大於 0 代表該層膨脹，應變值小於 0 代表該層收縮。

無降溫應變圖如圖 11、12，由應變圖可以得知，使用不同的黏著劑牆面，同一層面的應變在溫度上升時並沒有太大的區別，而兩種黏著劑間的不同會在應變開始下降後開始出現差異。

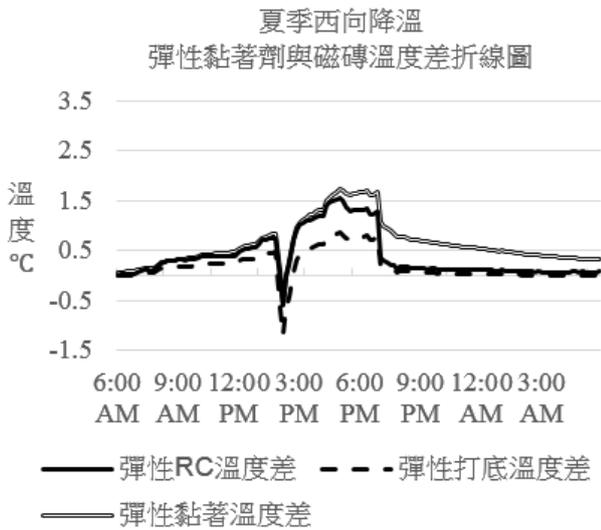


圖 9 夏季西向降溫 彈性黏著劑與磁磚溫度差折線圖

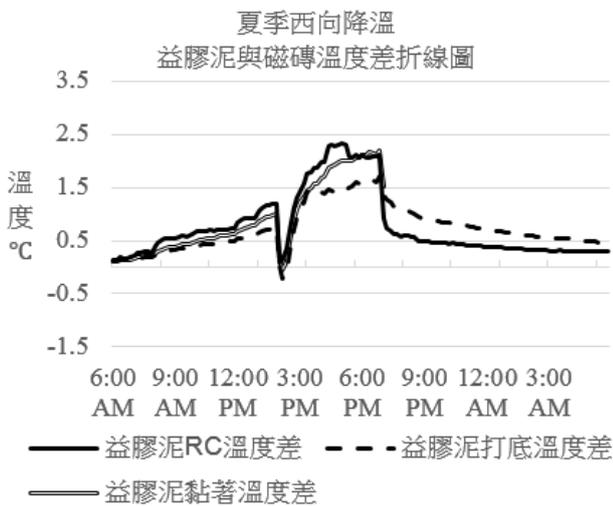


圖 10 夏季西向降溫 益膠泥與磁磚溫度差折線圖

使用彈性黏著劑的牆面由於彈性黏著劑的彈性，使得磁磚面應變可以在降至零後保持穩定、打底層則收縮一段時間後再回復，使用益膠泥的牆面則因益膠泥彈性較差，磁磚面應變降至零後仍受到打底層拉扯繼續下降，打底層則因磁磚面拉扯，可收縮時間及幅度皆不如使用彈性黏著劑的牆面打底層，使得牆面磁磚和打底層在降溫時互相束縛。

降溫試驗應變圖表如圖 13、14，降溫時給牆體帶來的溫度下降影響益反映在應變上，從圖上可看出應變曲線皆在降溫時產生明顯下墜，唯使用益膠泥的打底層有所不同，本研究推估該層應變實際上應與其他曲線相同

產生下墜，但因應變規黏於兩種材料間，於降溫時發生劇烈擠壓應變規的情形，故產生此種曲線，故此處僅能確認使用益膠泥的打底層在突發性降溫時會產生劇烈的應變變動。

若觀察降溫對於整體牆面的影響，可以發現由於牆體在降溫後重新受到加熱，應變在降溫的下墜後會很快的重新攀升，對比無降溫的圖 11、12 可以注意到圖 13、14 中的應變曲線會在降溫後的短時間內變化非常大，而短時間內劇烈的變化則不利於牆體的耐久性。

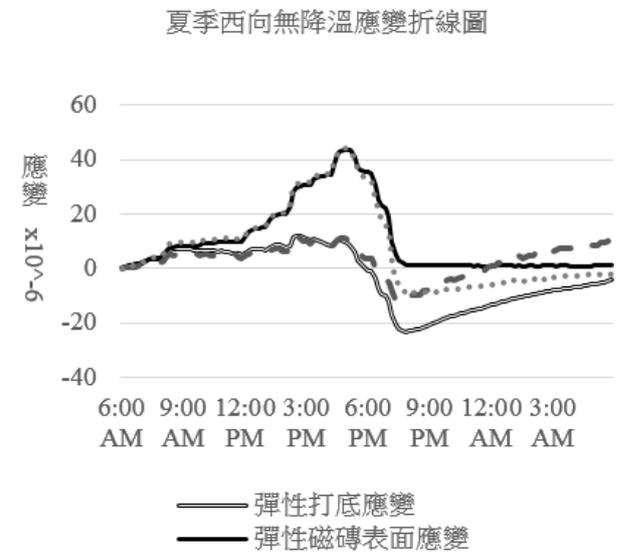


圖 11 夏季西向無降溫應變折線圖

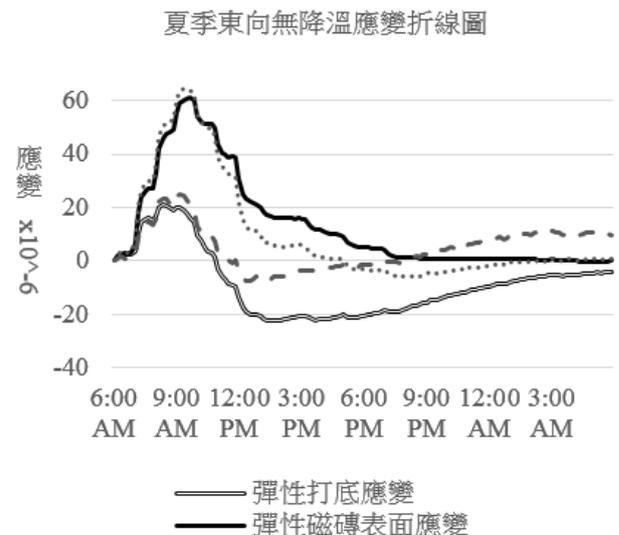


圖 12 夏季東向無降溫應變折線圖

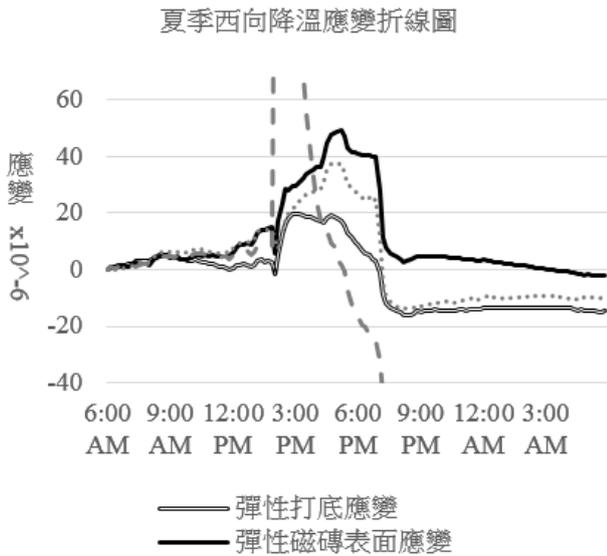


圖 13 夏季西向降溫應變折線圖

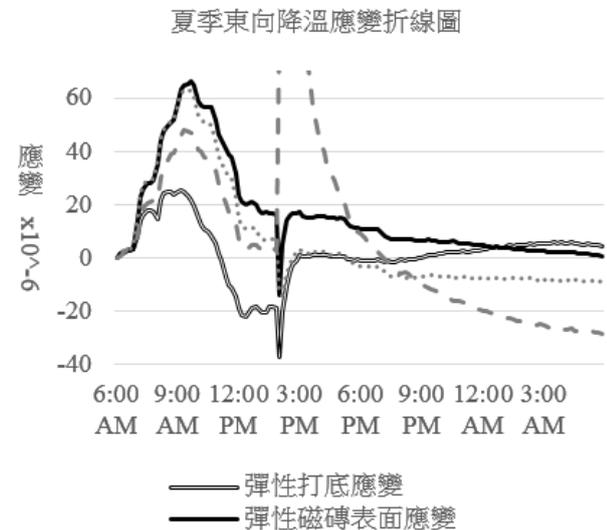


圖 14 夏季東向降溫應變折線圖

3-4 應變差分析

本研究所採計之應變數據，除直接製作唯應變折線圖外，為觀察居於打底層及磁磚間的黏著劑，作為兩者間的中間人對應變的影響為何，以磁磚面的應變減去打底層的應變，將此值稱為應變差並製作應變差折線圖以供參閱，圖中，應變差值大於 0 代表磁磚面應變大於打底層應變，應變差值小於 0 則代表磁磚面應變小於打底層應變。

無降溫應變差圖如圖 15、16，由於升溫時牆體同一層面的應變曲線不會有太大差別，因此應變差在上升階段兩種黏著劑還沒有明顯差異，但在應變差下降後，可以觀察到益膠泥牆面的應變差曲線下降快速，這代表了

使用益膠泥的牆體，比起使用彈性黏著劑的牆體，打底層和磁磚面的應變會以更快的速度去尋找兩者應變的穩定點，而造成這一點的原因就在於益膠泥的彈性較差，而使用彈性黏著劑的牆體應變差則因彈性黏著劑可適應兩者間的應變，可以穩定的下降。

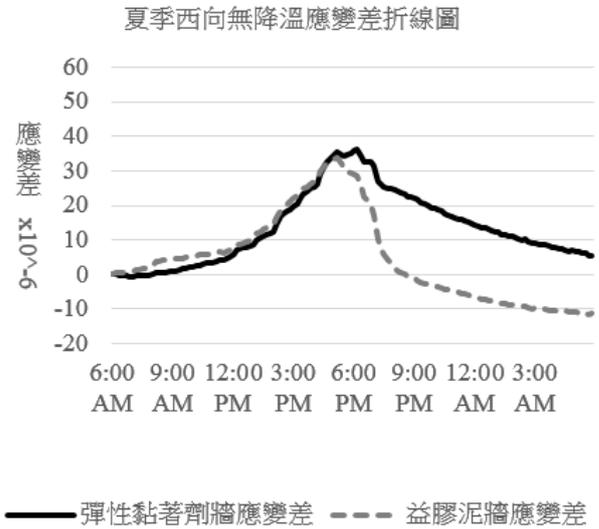


圖 15 夏季西向無降溫應變差折線圖

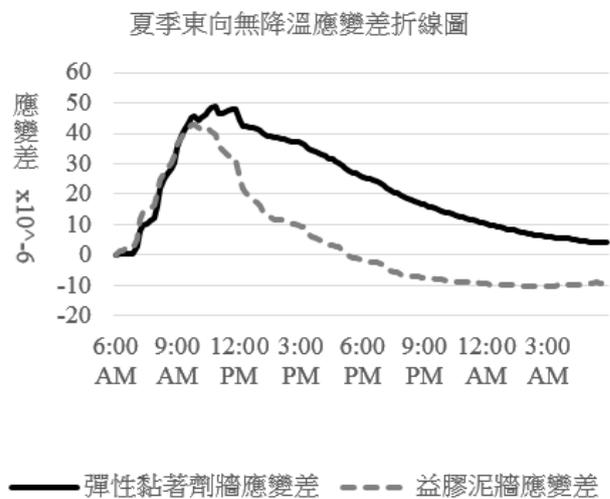


圖 16 夏季東向無降溫應變差折線圖

降溫試驗的應變差圖如圖 17、18，使用益膠泥的牆面由於降溫時應變規可能遭到劇烈擠壓，產生的曲線過於極端，較難與無降溫試驗進行比較。而觀察彈性黏著劑牆面的應變差，可以發現在降溫發生時，應變差曲線有產生明顯的下墜，對比無降溫試驗組，曲線明顯有所不同，應變差在日射結束開始下降時，下墜的幅度較無降溫試驗組來的較

快，而應變差快速的下降代表了牆體應變短時間內發生劇烈的變化，而劇烈的變化則不利於牆體的耐久性，由此可知，即使只有短時間的溫度下降，急遽的溫度下降會使牆體快速收縮，長遠來看對牆體造成不良影響。

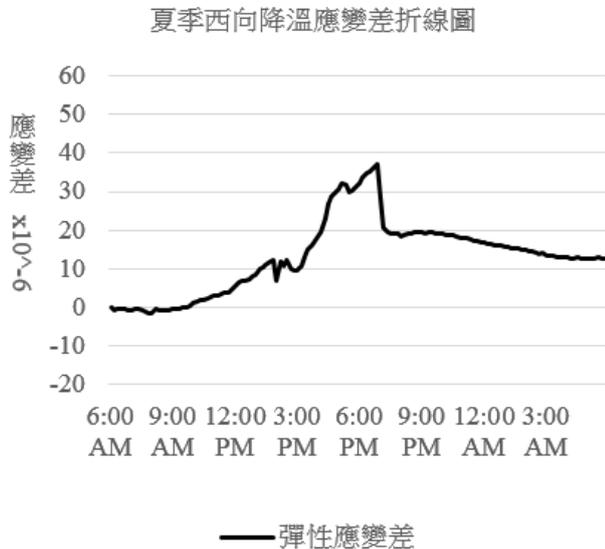


圖 17 夏季西向降溫應變差折線圖

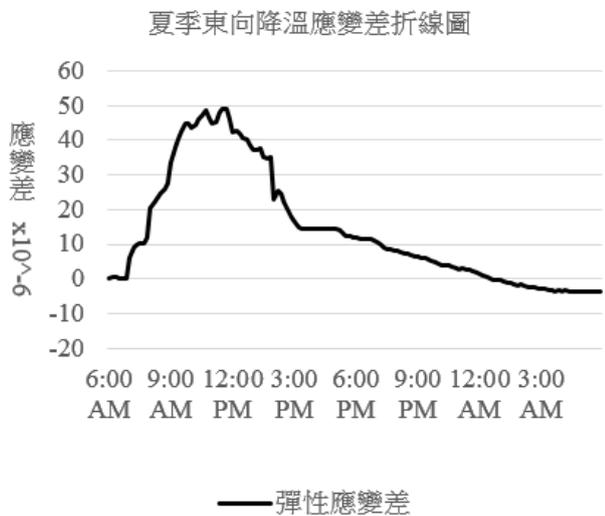


圖 18 夏季東向降溫應變差折線圖

四、結論與後續建議

4-1 結論

本研究進行了以紅外線燈模擬日射能量，收集溫度以及應變數據，並結合以水進行對牆面突發降溫的測試，其結論整理如下：

1. 儘管普遍認知上認為冬季的日射較弱，但實驗中仍可觀察到冬季日射下，牆體的溫度與環境有所差異，有著一定的降

溫空間。

2. 根據觀察牆體溫度差折線圖可發現，使用不同黏著劑的牆體，打底層溫度曲線在降溫時的傾向會有所差異，使用益膠泥的牆面在降溫時溫度曲線會更趨近於磁磚面，使得兩者的應變也快速逼近彼此的中和點。
3. 觀察應變折線圖可以發現，無降溫組中，相較於使用彈性黏著劑的旗面，使用益膠泥的牆面在溫度下降時，打底層和磁磚面應變會快速逼近，短時間內產生大量應變變化，而降溫組中，使用益膠泥的牆面打底層也會產生劇烈的應變變動。
4. 觀察應變差折線圖可發現，無降溫組中，益膠泥牆面的應變差下降得比彈性黏著劑牆面更快，代表其短時間內發生較大的應變變化，而降溫組中也顯示了降溫會對應變差曲線產生落差。

總結而言，突發性降溫對於牆面的溫度、應變等，相較無降溫的曲線皆會產生下墜，而下墜後持續的日射又會使剛失去的溫度及應變產生回升，使得牆體短時間內反覆的收縮又膨脹，這種劇烈的應變變化會不利於牆體的健康。此時，彈性黏著劑相較於益膠泥更好的彈性及應變吸收效果便可發揮，將如寒流、午後雷陣雨等突發性降溫對牆體的損害降低，進而確保磁磚飾面的整體強度。

4-2 後續建議

1. 由於實驗設備與時間限制，本研究無法模擬如同真實寒流等自然現象真實發生時的情形，建議若有相關設備可朝此方向研究。
2. 本研究設計上以水替牆面降溫，但並無考慮水分替牆面帶來的影響，建議之後可以水之外的方式降溫並比較差異。
3. 本研究雖討論了降溫對於牆面的影響，但因時間因素沒有設計與牆體老化的相關試驗，建議可以朝反覆降溫促使牆面快速老化的方向進行研究。

五、參考文獻

1. 起橋孝徳，河野政典，榊田佳寛，「タイル張り仕上壁の屋外暴露試験および熱冷繰返し試験における挙動」(磁磚飾面牆在室外暴露試驗和冷熱循環試驗下的行為)，日本建築學會構造系論文集，第 76 卷，第 661 號，第 465~470 頁，2011。
2. 添田智美，富田泰宇，佐佐木仁，三上貴正，「日間の温度変化が外装タイルの挙動に与える影響」(毎日温度變化對外牆磁磚行為影響)，日本建築學會構造系論文集，第 78 卷，第 694 號，第 2057~2064 頁，2013。
3. 馮冠凱，「應用紅外線熱顯像法探討外牆磁磚缺陷類型於不同日射能量下檢出程度之研究」，國立高雄科技大學營建工程系碩士論文，2019。
4. 詹肇裕，「斜線逐時日射量實測與統計」，行政院國家科學委員會專題研究成果報告(編號: NSC90-2626-E-146-001-), 2002。
5. 稻葉洋平，佐佐木正治，閑田徹志，「タイルの剥離評価に関する研究-ひずみ追従性試験および剥離モデルの提案」(磁磚剝落評估方式研究-試驗方法和剝落模型)，日本建築學會構造系論文集，第 76 卷，第 667 號，第 1577~1582 頁，2011。

謝誌

本研究由日商思敏打硬股份有限公司(セメダイン株式会社 / CEMEDINE CO., LTD.)提供部分研究經費，使研究能順利完成，特此致謝。

以稜鏡折射為基礎之三維數位影像量測技術開發之研究

蔡楷耘¹ 童士恆² 施明祥³ 張桂瑛¹ 邱鈺清¹ 張耕嫻¹

¹ 國立高雄大學土木與環境工程學系大學部學生

² 國立高雄大學土木與環境工程學系教授

³ 國立暨南國際大學土木工程學系教授

摘要

隨著科技發展日益進步，影像量測技術也逐漸應用於不同領域中，相較於傳統的二維影像量測技術，三維影像量測技術增加了深度資訊，可使得量測所能應用之範圍更為廣闊，然現行三維影像量測中複數相機之影像量測技術存在同步性、空間限制、姿態要求等問題，若能克服此些問題，將有助於影像量測技術應用於微觀靜態及動態量測。

本研究為克服三維影像量測之問題，採取光學稜鏡輔以單一相機方式進行三維影像量測，透過光學稜鏡之折射並成像於相機，以數位影像相關係數法(DIC)進行影像匹配，進行三維數位影像相關係數法之量測。研究結果顯示，稜鏡三維數位影像相關係數法於長:19 mm、寬:19 mm、高:6 mm 之區域量測精度可達約 0.0155 mm，單一方向最大誤差量為 X 方向為 0.0244 mm；Y 方向為 0.0136 mm；Z 方向為 0.0264 mm，於率定方面採取最低 27 點空間位置進行率定即可達 0.0173 mm 之量測誤差，可見稜鏡三維數位影像相關係數法於微觀量測方面具有良好的量測效果。

關鍵字：稜鏡、三維測量、微觀測量、數位影像相關係數法、數位影像量測技術

Research on the Development of 3D Digital Image Measurement Technology Based on the Refraction of Prism

Kai-Yun Tsai¹ Shih-Heng Tung² Ming-Hsiang Shih³ Kuei-Ying Chang¹
Yu-Cing Chiu¹ Geng-Man Chang¹

^{1,2} Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Kaohsiung

³ Department of Civil Engineering, National Chi Nan University

ABSTRACT

With the advancement of science and technology, image measurement technology has gradually been applied in different fields. Unlike the traditional 2D image measurement technology, 3D image measurement technology has increased the depth of information. It can make the scope of application of measurement wider. However, the current image measurement technology of multiple cameras in 3D image measurement has problems of synchronization, space limitation, attitude, etc. If these problems can be overcome, it will help the image measurement technology to be applied to microscopic measurement.

In order to overcome the problem of 3D image measurement, this research adopts the isosceles triangle prism to supplement the single camera method for 3D image measurement. Through the refraction of the isosceles triangle prism, the image is imaged on the camera and

matched by the digital image correlation coefficient method. The research results show that the measurement accuracy of the 3D digital image correlation coefficient method in the area of length: 19 mm; width: 19 mm; height: 6 mm can reach about 0.0155 mm, and the maximum error amount in a single direction is X-direction is 0.0244 mm; Y-direction is 0.0136 mm; Z-direction is 0.0264 mm. In the aspect of calibration, the lowest numbers of spatial position used for calibration is 27 point, and the measurement error of 0.0173 mm can be achieved. 3D digital image correlation coefficient method has a good measurement effect in microscopic measurement.

Keywords: prism, three-dimensional measurement, microscopic measurement, digital image correlation method, digital image measurement technology

一、前言

1-1 緣起

隨著科技發展與技術日益進步，影像量測技術這近二十年間逐漸受到重視並應用於各領域中，相較於傳統的二維影像量測技術，三維影像量測技術增加了深度資訊，可使得量測所能應用之範圍更為廣闊。為進行三維數位影像量測，部分技術採取複數相機於不同角度同步拍攝之方式進行量測，如：Chen 等人 (2013) 嘗試以複數相機對準量測物進行拍攝，利用量測區域為多台相機所覆蓋，藉由任意兩台相機配對進行三角量測，找出觀測點殘差最小之相機組合，以探討其在靜態與動態之潛力。Li 等人於 2017 年提出以雙相機架設於待測物之前後進行三維全場變形之量測，可以百微米之精度量測物體之深度與厚度。三維影像量測亦可用於動態量測，Lee 等人於 2016 年採用兩台相機並結合數位影像相關係數法與最小平方法，來進行懸臂樑之動態量測，其量測誤差為 0.1 至 0.2 mm。

然使用複數相機之影像量測技術雖可進行三維影像量測，但仍有以下幾大問題有待克服：(1) 採取多機進行同步拍攝，不同相機間可能產生拍攝訊號延遲問題，此誤差將不利於進行動態量測；(2) 當以複數相機影進行微觀量測時，設備所能占用之空間有限，如何於有限空間下架設複數台相機作為量測使用，將成為一困難點；(3) 三維影像量測技術需考量相機之架設穩定性，對於各項機間之姿態確定需透過複雜的率定程序。若能克服以上問題，將有助於影像量測技術於動態

量測及微觀量測上之應用。

鑑於傳統複數相機之技術在相機方位校正、同步性有待克服，部分學者提出採用單一相機進行三維影像量測之技術，其中 Tung 等人於 2011 採取以單一相機透過將試體平移之方式，使物體於不同位置之影像回饋至單一相機進行拍攝，藉由分析平移之影像進行三維影像量測。除平移之方法外，亦有採取光學方式之單機三維量測技術，Dan 等人於 2019 年提出以十字分色稜鏡(cross dichroic prism)配合兩平面鏡與單一彩色數位相機進行三維數位影像相關係數法之量測技術，利用鏡面反射配合主要量測之相機達成如同三個相機於不同位置進行拍攝之效果，為使其影像能有效佔據所有畫面，採用十字分色稜鏡將反射鏡之影像進行合併以達到單機拍攝量測之效果，其精度可達 0.005mm，然由於採用平面鏡進行反射，故對於平面鏡之架設準確性無法確定，且因其極度仰賴稜鏡對於光學路徑之影響，故只能於相對穩定之環境下進行。而 Chen 等人則採取三面反射鏡透過偏振分光鏡將影像區分，藉由偏振光以達到如同複數相機台虛擬相機拍攝之效果，然其校正上會有其技術困難，偏振分光鏡之透射與反射製作之穩定性為此技術須考量之問題。

為解決三維量測技術於複數相機之困難點，並考量部分採用反射鏡之單相機量測方式，本研究採以單一相機配合光學稜鏡以數位影像相關係數法(DIC)進行稜鏡三維影像量測，以克服現行多機三維影像量測技術之同步性、空間限制、姿態確認等問題，以利影像量測技術應用於微觀量測。

1-2 研究目的

由於現行三維影像量測技術中採用多相機同步拍攝方式進行，對於設備同步性、姿態、佔用空間問題有待解決，而單機影像量測技術亦有輔助鏡面架設準確性問題，為此本研究透過使用單一相機配合光學稜鏡進行稜鏡三維影像量測以克服現行三維量測技術之技術困難點。

為使量測技術之精度提升，本研究採取以等腰三角稜鏡進行光學折射，藉由稜鏡之折射方式，可將量測目標於三角稜鏡之左右兩斜面各自呈現一完整的像，透過數位影像相關係數法(DIC)之高精度影像匹配分析試體兩成像，模擬如同兩台相機於不同位置、角度同步拍攝物體，以進行三維影像量測之技術實現。本研究之目的在於驗證此稜鏡三維數位影像相關係數法(DIC)之率定作業，透過採取不同位置、不同率定方式進行驗證，以確立稜鏡三維數位影像相關係數法之最有效率定結果。

二、研究方法

2-1 研究之理論概述

本研究之稜鏡三維數位影像量測技術其原理與人眼辨識物體位置與距離之方法相似，需藉由兩張於不同位置所擷取之影像，以判斷物體在空間中之座標位置，而本研究之方法乃利用光學稜鏡，透過光線折射使待測物於相機影像中呈現兩個成像，藉由數位影像相關係數法(DIC)分析左右影像成像，以達到如同雙相機於不同角度拍攝物體之效果。如圖 1 所示，其方法須將相機-稜鏡-受測物件依序成一線排列，由待測物表面 P 點發射光束，所發射出之光束可分為、兩道光束，通過稜鏡底面並達到稜鏡左、右兩股面後，此二道光束會再度匯聚並通過鏡頭中心 C 點，於感光元件上呈現出兩個像，透過數位影像相關係數法分析左右影像以計算出同一點在兩影像的位置，藉由單張影像中左右兩側試體之成像位置差異，即可得出待測物於三維空間中座標位置。

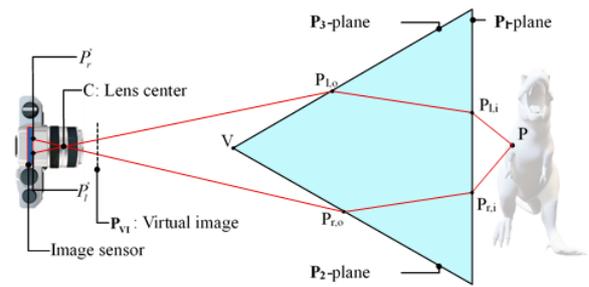


圖 1 稜鏡三維數位影像相關係數法示意圖

2-2 研究方法

本研究所採用之量測技術為稜鏡三維數位影像相關係數法，其方法為透過光學稜鏡之折射將試體分為兩影像並成像於一相機上，將拍攝所得之影像以數位影像相關係數法(DIC)分析單一影像左右兩側之試體成像，藉由分析試體於相機之左右成像位置，計算試體實際之三維影像座標位置，為進行量測試驗，本研究之研究方法將分為以下部分進行：

✓ 研究設備架設：

為進行稜鏡三維數位影像相關係數法之量測作業，本研究採用數位相機配合一底角 45 度之光學稜鏡(圖 2 所示)進行，為能準確進行率定作業，使用一移動平台，透過移動平台將試體移動至特定位置，以進行三維量測之率定作業。其架設方式須將相機固定於稜鏡上方，並使相機中心之位置對準稜鏡中心，於相機-稜鏡架設完成後，將試驗用之試體架設於移動平台上並設置於稜鏡底面下方，使試體-稜鏡-相機之中心呈現一垂直線，如圖 3 所示，藉由此種架設方式以減小率定所造成之誤差情況。考慮本研究乃透過稜鏡之影像進行量測拍攝，於試體標記可能有光線不足之情況，為避免影像之標記不明顯導致無法分析，故於試體上方採取電源供應器穩定電壓供電之二排六燈 LED 燈源，於試驗過程中朝向試體進行照射。

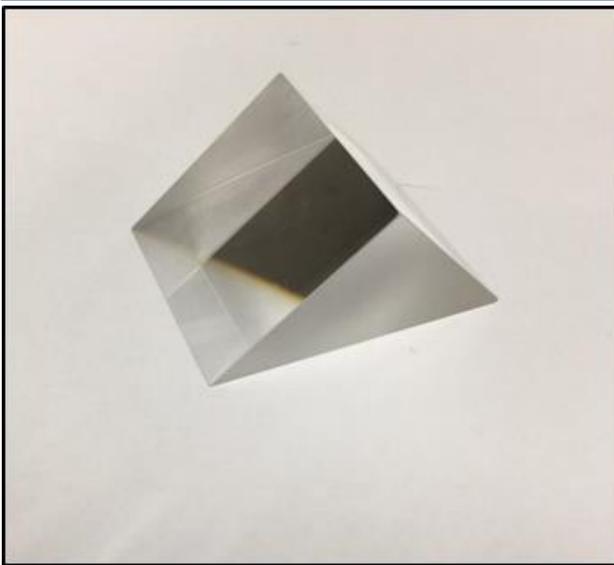


圖 2 底角 45 度之光學稜鏡

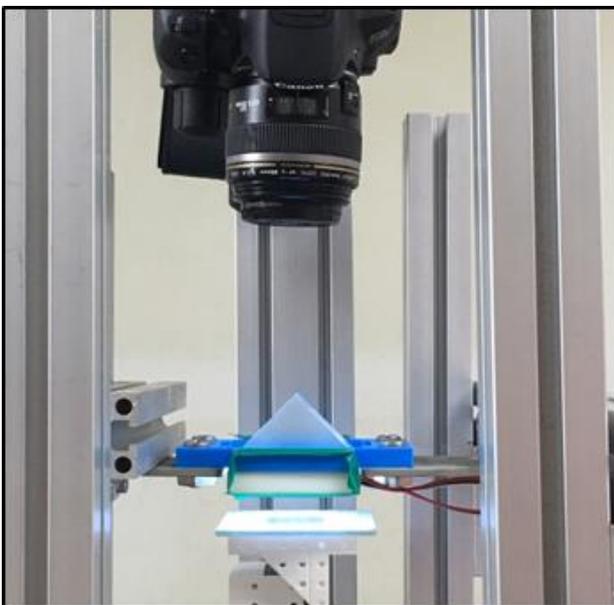


圖 3 稜鏡三維數位影像相關係數法設備架設方式

✓ 影像擷取方式:

透過光學稜鏡折射，待測物之影像可於相機感光元件上呈現兩個完整的影像，為能進行精確量測作業，故稜鏡三維數位影像相關係數法需先行進行設備率定，由於率定作業需考慮試體與相機間之姿態問題，故本研究採取以移動平台移動試體並拍攝之方式進行影像擷取，透過將試體於 $18\text{ mm} \times 18\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 之區域中以水平方向間隔 3 mm 、垂直方向間隔 1 mm 進行試體的移動，則可取得共 343 張已知座標位置的影響，並以數位影像相關係數法

(DIC)分析特定觀測點於各已知位置之影像座標。由於本研究採用的試體深度方向與鏡頭方向相同，為考慮相機可能因試體高程不同時，對焦情況影響率定之效果，故本率定拍攝方式須先將相機對準試體於率定區域中心時之位置進行對焦(如圖 4 所示)，再進行區域內之試體移動拍攝。

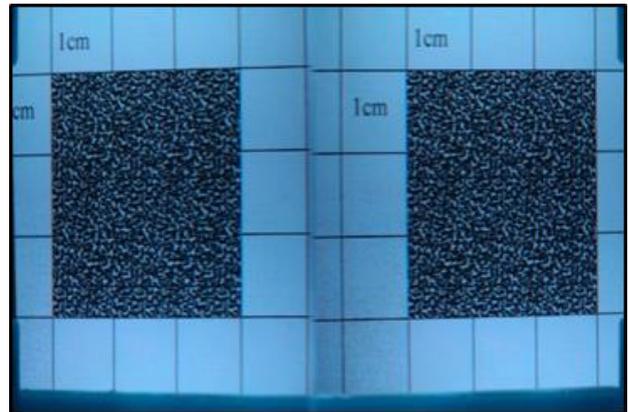


圖 4 率定影像之對焦拍攝結果

✓ 設備之率定方法:

本研究所探討之目的主要為藉由不同位置影像進行稜鏡三維數位影像相關係數法之率定，從中找尋最佳之率定方式。量測所採取之方式為使用數位影像相關係數法(DIC)分析單一觀測點於影像左右側之影像座標，以進行如同兩台相機同步拍攝之效果，故稜鏡三維數位影像相關係數法之率定作業可分為以下兩個部分。

1. 數位影像相關係數法 (Digital Image Correlation method):

為進行稜鏡三維數位影像相關係數法之量測，於獲取率定之影像後，需先行對率定影像之左右成像進行數位影像相關係數法之分析，透過以數位影像相關係數法分析物體表面之灰階影像，以匹配試體成像之位置。數位影像相關係數法之原理乃藉由分析試體表面之灰階分布，透過灰階分布之特徵，對兩影像進行比對，以獲得兩影像之位置關係。透過將影像分割成數個次級影像，利用數位影像相關係數法對每個次級影像進行分析，找尋兩影像之對應關係，以得出每個影像於變形前所對應之變形後位置。假設變形前影

像為 A，變形後影像為 B，數位影像相關係數之定義(Tung 等人，2011)如下：

$$\text{COF} = \frac{\sum g_{ij} \tilde{g}_{ij}}{\sqrt{\sum g_{ij}^2 \cdot \sum \tilde{g}_{ij}^2}}$$

其中 g_{ij} 及 \tilde{g}_{ij} 分別為影像 A 於 (i, j) 座標及影像 B 於 (\tilde{i}, \tilde{j}) 座標上之灰階值。

2. 參數率定

藉由數位影像相關係數法(DIC)分析匹配後，可得 343 組試體於各空間位置時之影像座標，由於稜鏡三維量測之率定作業需使用較多影像進行率定，為探討時間與率定效果之問題，故本研究於參數之率定方法中，分別採取空間位置中 9 點(區域四角點與中心點)、27 點(每軸取三點)、64 點(每軸取四點)、125 點(每軸取五點)及 343 點(使用所有點)控制點進行參數率定最佳化，並探討於固定空間內之最佳率定效果，以減輕進行稜鏡三維量測前之率定作業。為比較各率定結果的優劣，分別使用控制點標定座標與利用率定結果反算得到的控制點座標差值及所有 343 點檢核點的空間座標與反算所得之座標差值進行精度探討。

三、試驗結果與討論

3-1 區域內率定分析結果：

本研究採取對一空間區域內拍攝試體於各已知位置之影像，透過數位影像相關係數法(DIC)進行試體之左右成像匹配，以進行率定作業，並探討其率定後的反算結果與以知空間座標之差距，判斷稜鏡三維數位影像相關係數法之量測精度。

由 18 mm*18 mm*6 mm 之區域中，以水平方向間隔 3 mm、垂直方向間隔 1 mm 所採取之控制點位置，經稜鏡三維數位影像相關係數法量測後，其均方根誤差(RMS)可達 0.0155 mm，單一方向最大誤差量為 X 方向為 0.0244 mm；Y 方向為 0.0136 mm；Z 方向為 0.0264 mm，由圖 5 可發現，透過稜鏡三維影像相關係數法進行三維量測，其上方邊界誤差較中心位置大，而其他區域之誤差分布較不規則，故推斷誤差產生之情況應為隨

機之情況。

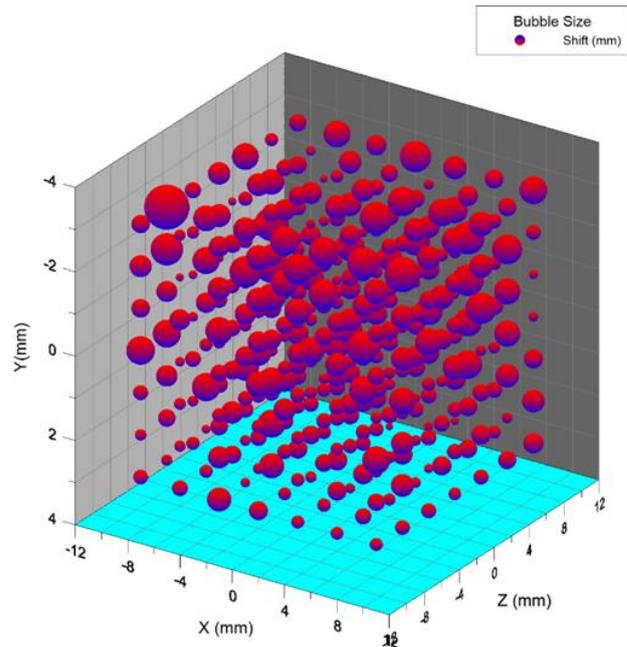


圖 5 空間中率定點為之誤差量(三軸總誤差量)

由於本試驗所採取之對焦方式，乃利用試體於區域中心位置時之影像進行對焦，故於 Y 座標為 0 之一面內區域，其高程誤差均小於整體區域之均方根誤差(RMS) 0.0155 mm，而從單層平面進行探討，如圖 6 所示，可發現該層平面於左右兩側邊界位置高程變化較為明顯，而於中央區域則變化較小，由其變化呈現對稱分布，故可能與相機之鏡頭扭曲有關。

稜鏡三維數位影像相關係數法之量測方式，須先進行參數之率定作業，由於率定作業需使用試體於不同空間座標下之影像進行率定，率定所使用之控制點數量影響率定之效果，為考量最有效之率定效果，如前所述本研究採用 9 點、27 點、64 點、125 點及 343 點控制點進行率定最佳化，透過比對使用不同數量之控制點率定結果，以訂定出量測精度高且較不耗費時間之率定方式。圖 7 為採取五種不同控制點數量進行之率定最佳化與量測結果均方根誤差(RMS)關係圖，結果顯示當採用 27 點以上時，量測之精度變化已趨於平緩，且使用所有 343 點時，其率定效果僅比使用 125 點時低 0.0012 mm，然若僅採取 9 點進行率定時，雖然控制點的誤差可達到

0.0073 mm，然全部 343 點的量測精度卻達 0.0276 mm，顯見使用 9 點進行參數率定的結果無法達到其他點數的同等級的率定結果。

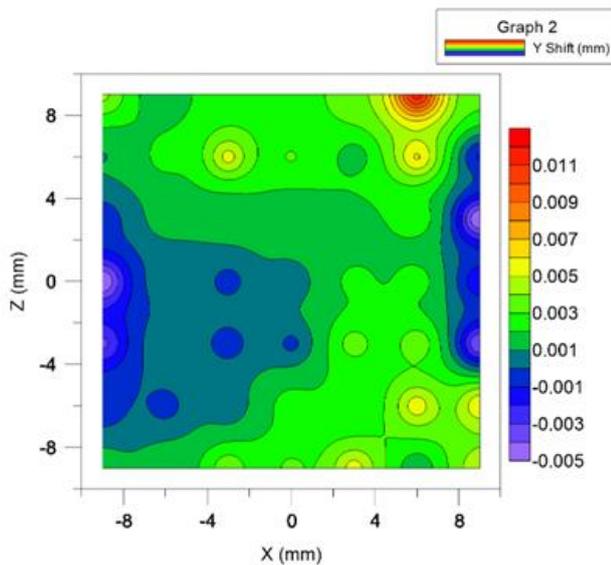


圖 6 Y=0 平面內之量測高程誤差

3-2 討論

本研究主要針對稜鏡三維數位影像相關係數法之精度、率定方式進行研究，由研究結果可發現，稜鏡三維數位影像相關係數法之量測可於 18 mm*18 mm*6 mm 之區域內達到 0.0155 mm 的高量測精度，然從圖 5 之結果顯示，於不同位置之量測誤差有相當的變異性，且於率定區域之邊界位置誤差更是有略為變大趨勢，集中於 Y 為 -3 mm 之區域，此部分之誤差可能與相機之對焦清晰度與深度量測之影響有關，由於本研究採取之方式為以區域中心之對焦為主，故於當試體較靠近或較遠離鏡頭時，其模糊程度可能影響數位影像相關係數法(DIC)之計算結果。

而由不同控制點數的率定試驗結果中，可發現當採取以 27 點進行試驗時，其率定結果即具有一定效果，顯示本研究之量測方式雖需針對參數進行率定，然率定最佳化所採用之標準位置並不需要繁瑣之率定過程，即可達到高精度之三維量測。

四、結論

三維影像量測技術相較於傳統二維影像量測技術多了深度資訊，能使影像量測之應

用更為廣闊，透過本研究所使用之稜鏡三維數位影像相關係數法進行高精度之數位量測，可避免以往採取之多機同步拍攝之量測問題，且透過稜鏡進行單機影像量測相較於現行單機量測技術能有較低成本、較少可能性誤差產生之優點。由試驗結果顯示，此技術之量測精度可達 0.0155 mm，且亦不需要進行過於繁瑣之率定作業，然影像透過稜鏡之影像量測技術對於試體所需照度的要求較高，若光線較為不足可能影響相機所擷取之影像品質，進而影響數位影像相關係數法(DIC)之分析精度。

由率定試驗結果中顯示，當採取率定用之控制點數量為 27 點時，其所呈現之量測精度與使用所有 343 點控制點進行率定之差異不大，即稜鏡三維數位影像相關係數法之率定可採用 27 個控制點進行即可，如此可大幅降低率定的程序。

參考文獻

1. F.-X., Chen, X., Chen, X., Xie, X., Feng and L.-X., Yang, "Full-field 3D measurement using multi-camera digital image correlation system.", *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 51, No. 9, pp. 1044-1052., 2013.
2. H. Lee, H. Rhee, J.H. Oh, and J.H. Park, "Measurement of 3-D Vibrational Motion by Dynamic Photogrammetry Using Least-Square Image Matching for Sub-Pixel Targeting to Improve Accuracy", *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 16, No. 3, 359, 2016.
3. J.-R. Li, X. Xie, G.-B. Yang, B.-Y. Zhang, T. Siebert and L.-X. Yang, "Whole-field thickness strain measurement using multiple camera digital image correlation system", *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 90, pp. 19-25, 2017.
4. S.-H., Tung, M.-H., Shih, "Precision verification of a simplified three-dimensional DIC method", *Optics and*

- Lasers in Engineering”, vol. 49, No. 7, pp. 937-945, 2011.
5. D. Solav, K. M. Moerman, A. M. Jaeger, K. Genovese and H. M. Herr, “MultiDIC : An Open-Source Toolbox for Multi-View 3D Digital Image Correlation” ,IEEE Access, vol. 6, pp. 30520-30535, 2018.
 6. B. Chen, L. Ji, and B. Pan, “ High-temperature stereo-digital image correlation using a single polarization camera”, Applied Optics, vol. 59, No. 13, pp. 4008-4015,2020.
 7. X. Dan, J. Li, Q. Zhao, F. Sun, Y. Wang and L. Yang, “A Cross-Dichroic-Prism-Based Multi-Perspective Digital Image Correlation System”, Appl. Sci, vol. 9, No. 4, 673, 2019.

共同主辦：國立高雄科技大學土木工程系
國立高雄科技大學營建工程系
義守大學土木與生態工程學系
國立高雄大學土木與環境工程學系
國立高雄大學土木與水資源工程學系

協辦單位：國立金門大學土木與工程管理學系
正修科技大學土木與空間資訊系
高苑科技大學土木工程系

研討會網站

