

誠信·創新·品質·服務

中興工程 155

SINOTECH ENGINEERING

1983年10月創刊 | 2022年04月出刊 | ISSN 0257-554X



我國推動化學品租賃模式的機會與挑戰

張嘉真 黃欣棚 沈怡彤 陳艾琳

台電離岸風電第一期計畫·下部結構安裝經驗分享

吳祥煜 徐榮福 黃崇哲 陳世仰

新型複合式連接梁研發與對角線鋼筋混凝土連接梁
強度與變形量評估

詹文宗 邱水金 鄭敏元



財團法人中興工程顧問社
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.



環境工程研究中心

重要實績

事業廢水特性調查及管理評估
公共污水處理廠評鑑與永續營運管理
污染土地再利用政策與制度架構建立
廢家電回收管理與影像辨識技術開發
海洋污染防治法規及品質標準研修
微量新興污染物方法開發與應用
溫室氣體盤查及量測分析

提供高品質的研究服務和發展先進的環保技術，針對廢污水處理及再生、污染土地活化、廢棄物減量與循環經濟、淨零碳排等領域進行研究；所屬環境實驗室為環保署認可實驗室，取得水質水量、地下水、土壤及底泥等兩百餘項認證

聯絡資訊

11494 臺北市內湖區新湖二路 280 號 6 樓

電話：02-8791-9198 傳真：02-2791-8858

Email: eerc-ctr@sinotech.org.tw

<https://www.sinotech.org.tw/eerc-ctr>

誠信 創新 品質 服務



財團法人 中興工程顧問社
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.



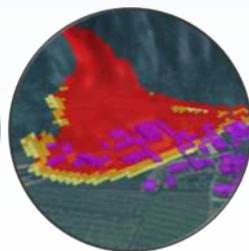


防災科技研究中心 專業服務

重要實績

- ✓ **水保局** 土砂收支物聯網及大數據分析技術
- ✓ **科技部** 地震數值模擬及地震危害分析
- ✓ **地調所** 廣域山崩潛勢與警戒雨量評估
- ✓ **新加坡** AI於天災風險之廣域資料分析

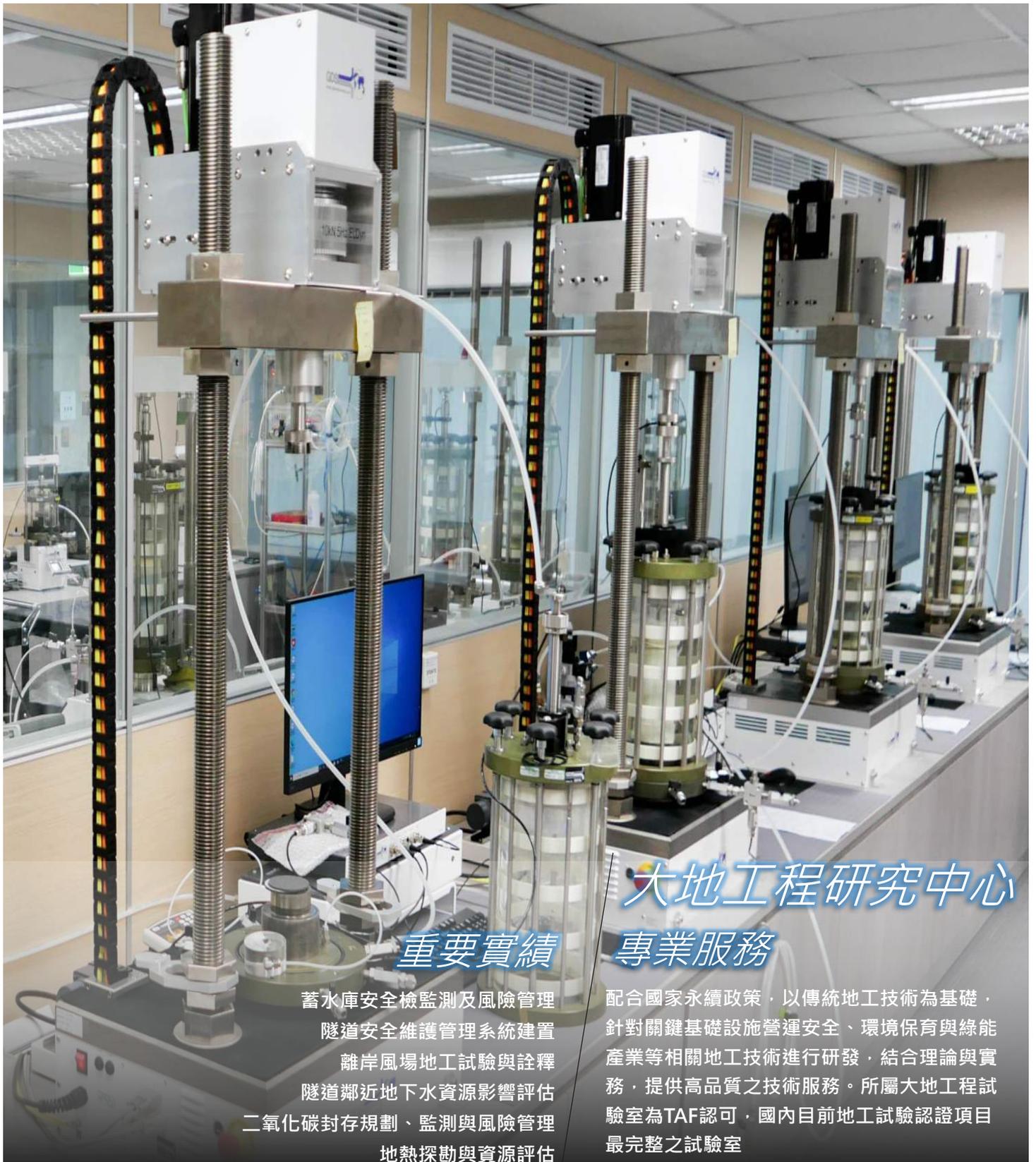
針對各項天然災害之防災技術，進行研究發展、技術服務、諮詢業務，跨領域整合地質、土工、地震、水保、水利、地球物理、地理資訊、遙測資訊等專業技術，提供全方位具體之國土保育與防災規劃，以確保公共工程之永續經營。



聯絡資訊

114065臺北市內湖區新湖二路280號
電話：(02)8791-9198 傳真：(02)8791-1536
E-mail：dptrc-ctr@sinotech.org.tw
<https://dptrc.sinotech.org.tw>





大地工程研究中心 專業服務

重要實績

蓄水庫安全檢監測及風險管理
隧道安全維護管理系統建置
離岸風場地工試驗與詮釋
隧道鄰近地下水資源影響評估
二氧化碳封存規劃、監測與風險管理
地熱探勘與資源評估

配合國家永續政策，以傳統地工技術為基礎，針對關鍵基礎設施營運安全、環境保育與綠能產業等相關地工技術進行研發，結合理論與實務，提供高品質之技術服務。所屬大地工程試驗室為TAF認可，國內目前地工試驗認證項目最完整之試驗室



聯絡資訊

114065台北市內湖區新湖二路280號
電話：(02)8791-9198 傳真：(02)8791-1536
E-mail：gerc-ctr@sinotech.org.tw
<https://www.sinotech.org.tw>

誠信 創新 品質 服務
 財團法人 中興工程顧問社
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.





部門重要實績

鐵道系統營運規劃、營運機構安全管理系統導入
臺鐵第四代票務系統開發、台灣高鐵營運規劃決策輔助系統
鐵公路業者班表及票務分析

長庚醫療財團法人建物耐震評估檢查申報
明志科技大學結構安全監測系統建立
南科管理局振動干擾分析改善

地理資訊系統於國內外之土木、水利、環保、
道路、城市設施維護、風力發電、工業區等領域之應用

土木水利及 軌道運輸研究中心

鐵道系統之運轉及安全管理整合技術服務擊劃
公共運輸營運數據整合分析
耐震評估補強、結構安全監測、振動分析防治、耐久性評估
地表水（河川、水庫、河口等）水理、污染質及泥砂傳輸
模擬分析
工程專業領域電子政務、地理資訊、手持式巡查等資訊系統
之研發與開發

聯絡資訊

地 址：臺北市內湖區新湖二路280號
電 話：(02) 8791-9198
E-mail：chrc-ctr@sinotech.org.tw



- 創刊日期 / 中華民國 72 年 10 月
 - 行政院新聞局登記局版臺誌字第 03793 號
 - 中華郵政登記執照北臺字第 1023 號
 - 發行人 / 曾參寶
 - 編審小組
 - 委員 / 張國揚 黃崇仁 蔡文豪
 - 孫世勤 周頌安 冀樹勇
 - 鍾志成
 - 召集人 / 游麗慧
 - ISSN / 0257-554X
 - 出版者 / 財團法人中興工程顧問社
 - 社址 / 114065 臺北市內湖區新湖二路 280 號
 - 電話 / (02) 8791-9198
 - 傳真 / (02) 8791-2198
 - 電子信箱 / adm-dpt@sinotech.org.tw
 - 網址 / www.sinotech.org.tw
 - 印刷 / 鴻友印前數位整合股份有限公司
- ※ 本刊圖文未經同意不得轉載 ※

徵稿簡則

- 一、本刊歡迎有關水利、電力、地工、環工、都市計畫、生態工法及其他土木工程之論著、譯述、專題研究、新技、新知及報導等學術性文稿，有關介紹工程之遊記、工程界人物軼事等亦一律歡迎；報導性文稿之文體應力求輕鬆活潑。「工程技術」及「案例／計畫報導」專欄，僅接受本社及本社轉投資之公司或其子公司之同仁投稿，來稿併請加註中、英文篇名、摘要及關鍵字。
 - 二、來稿時請附「中興工程季刊投稿人暨稿件資料表」（請從本社網站 www.sinotech.org.tw 直接下載列印，或洽本社行政處提供）。
 - 三、來稿請用稿紙繕寫清晰，或 A4 白紙打字亦可，如有插圖請用白紙墨繪、照片請附底片或檔案；文稿請附以 MS WORD 軟體撰打之光碟片，或 E-mail 至 adm-dpt@sinotech.org.tw。文稿格式範本請至本社網站 www.sinotech.org.tw 下載。
 - 四、來稿如係工程報導、遊記及工程人物軼事等，以五千字為限；「工程技術」及「案例／計畫報導」文稿以排印後 8 頁（約 8,500 字）為限。稿酬從優。
 - 五、本刊所有度量單位請採用 SI 國際單位。
 - 六、來稿如引用他人著述，應明示其出處；撰寫時請參考「文稿格式範本」、「英文摘要範本」，並儘可能依序將原作者姓名、出版年份（加小括弧）、引用文獻名稱、書刊名稱、卷號、期別、頁次等在文後之參考文獻中註明。所附圖表或照片等需為作者自行創作，或均已取得原創者授權刊登使用。
 - 七、來稿文責由作者自負，請勿侵害他人智慧財產權或違反其他法律規定。
 - 八、來稿經刊載後，其著作財產權即為本社所有；本刊對來稿有增刪權。不用稿件，恕不退還。
 - 九、本刊每年刊印四期，逢一、四、七、十月出版，如蒙來稿請於出版前六個月送交本社行政處本刊編審小組。
 - 十、本刊係屬本社與本社轉投資之公司或其子公司同仁之共同園地，懇請踴躍投稿。惟外界人士有關上述相關之文稿亦一律歡迎。
- 註：本刊經行政院公共工程委員會名稱為水利工程、土木工程、結構工程、大地工程、測量、環境工程、都市計畫、機械工程、冷凍空調工程、電機工程、電子工程、資訊、工業工程、水土保持、應用地質、交通工程等科技師執業執照換發辦法內之「國內外專業期刊」，歡迎踴躍投稿，兼可取得換發執業執照所需積分。作者只需於申請技師訓練積分審查時附上「中興工程」季刊目錄及文稿（前開工程類相關文稿）影印本作為證明，經該會審核確認後，每篇文稿即可獲得六十分，作者兩人以上者，平均分配得分。

中興工程第155期目錄

工程技術

我國推動化學品租賃模式的機會與挑戰

.....張嘉真·黃欣栩·沈怡彤·陳艾琳..... 3

運用數值模擬探討建築物對土石流之影響－以高雄瑪雅野溪為例.....

.....許志豪·黃全謐·簡榮興·曹鼎志·鐘啟榮·黃效禹..... 13

南迴鐵路電氣化之工程挑戰.....高贈智·李怡德·李民政·彭家德·謝立德..... 23

工程碳管理於基樁工程排碳評析及減碳策略應用.....

.....許珮蓓·王寧沂·鄭維祐·周武雄..... 35

三維多平面邊坡穩定分析技術與應用實例－以霧鹿場址為例.....

.....黃淳銘·鍾明劍·陳建新·譚志豪·康耿豪·戴東霖..... 45

應用空載光達於公共工程規劃之大面積樹木調查.....郭鎮維·徐廣達·蘇美婷..... 57

水庫集水區土砂調節效益分析.....

.....林晉守·林伯勳·陳俊愷·何幸娟·張哲益·蔡明發..... 69

國內外鐵路營運服務評鑑機制回顧.....徐任宏·孫千山·鍾志成·胡守任..... 79

案例／計畫報導

台電離岸風電第一期計畫一下部結構安裝經驗分享.....

.....吳祥煜·徐榮福·黃崇哲·陳世仰..... 89

桃園鐵路地下化北段標設計初步構想.....朱書賢·簡敦頤·黃士銘·史春華·郭林堯..... 97

佛光山新寶橋新建工程案例研討.....

.....黃政源·阮仲如·蘇哲雋·吳育茜·黃乾祐·黃模立·蔡雪華..... 107

研發成果介紹

新型複合式連接梁研發與對角線鋼筋混凝土連接梁強度與變形量評估.....

.....詹文宗·邱水金·鄭敏元..... 115

我國推動化學品租賃模式的 機會與挑戰

張嘉真* 黃欣栩** 沈怡彤*** 陳艾琳***

摘 要

傳統商業模式以產品消費驅動經濟發展，隨著全球工業化發展日益蓬勃，助長大量化學品之使用並產出廢棄物，然部分企業無力完善處理產生之廢棄物，導致資源耗竭及環境問題。為達成永續發展及化學品的健全管理，聯合國工業發展組織於2004年起於發展中國家推動實踐化學品租賃模式，化學品租賃是以服務為導向的商業模式，重點為供應商所銷售的是化學品所具有的功能，從增加化學品銷售量轉型為價值提升。國際上，化學品租賃模式已成功應用於保養、清潔、塗佈、著色和脫脂等生產製程單元，計費方式則採用生產計數單位，如產品產量、使用面積、服務時數等，與化學品銷售量脫鉤，聯合國工業發展組織並提供化學品租賃推動作業指引，包含潛力評估、制定及實施，以及評估與監控成果等步驟。本文參考化學品租賃推動作業指引，評估我國推行化學品租賃之機會與挑戰，推動項目方面分析我國化學品衍生廢棄物產源及產生情形，以D-1504非有害有機廢液或廢溶劑、R-2501廢酸性蝕刻液及R-2503二甲基甲醯胺粗液之產生量大且易溯源，具採行化學品租賃模式潛力；法規方面建議遵循現行廢棄物管理架構並兼容創新，如依經濟部事業廢棄物再利用管理辦法之規定辦理再利用，包含廠(場)內再利用、附表再利用、許可再利用等，建議於附表評估增列具租賃服務潛勢之化學品品項，並針對適用對象、目的、成分等進行限制管理，以符實需。

關鍵字：化學品租賃、聯合國工業發展組織、商業模型、事業廢棄物

一、前 言

用於工業生產製程的化學品，在經濟發展中扮演重要的角色，但是在製造、使用和處理處置過程中，會對環境和人類產生不利影響。工業生產過程是有害廢棄物的主要貢獻者，且隨著全球發展工業化的地區日益擴張，化學品的使用數量亦大幅增加。1970年代全球化學品產業的年產值

約為1,710億美元，至2013年，年產值已超過4兆美元，化學工業占全球收入7%以上，占9%國際交易量。

儘管人們越來越關注環境問題，但傳統以產品消費驅動經濟發展的商業模式正在助長不必要的化學品消費和有害廢棄物的產生。聯合國工業發展組織（以下簡稱工發組織）在2013年提出預測，5年內發展中國家將占全球化學品生產的

* 中興工程顧問社環境工程研究中心副研究員

** 中興工程顧問社環境工程研究中心資源循環利用組組長

*** 中興工程顧問社環境工程研究中心助理研究員

31%，約占全球消費量 33%，然多數企業沒有能力以無害環境的方式管理其產出之廢棄物。因此在推動製造產業循環經濟化上，須強化化學品在整個生命週期內的健全和有效管理，亦即除了上游中游端的生產流程，須朝向最佳可行技術（Best Available Control Technology, BACT）發展，促進源頭減量外，下游關聯產業的合理消費與有效使用，也為推動資源循環利用之重要關鍵。

為持續推動聯合國 2030 年永續發展議程、歐盟循環經濟戰略、國際化學品管理戰略方案，工發組織在奧地利和德國政府的支持下，自 2004 年以來一直在發展中國家和轉型經濟體推動化學品租賃（Chemical Leasing），化學品租賃是以服務為導向的商業模式，透過銷售或補償化學品的服務與功能而非化學品的販售，將經濟成長與原物料消耗量脫勾，以兼顧化學品供應端與需求端的利益。化學品租賃在供需雙方之間形成策略合作夥伴關係，共同的目標為減少化學品的消耗，將重點由增加化學品銷售量，轉變為價值提升，因此提高產能，並有效處理化學品及管理廢棄物，達到滿足經濟發展和環境效益雙贏目標。

二、化學品租賃模式

化學品租賃商業模式為供應商銷售化學品所具有的功能，如部分化學品的功能可能為金屬零件的清滌、脫脂或表面塗層保護，此時如金屬零件製造商需要清潔劑清洗金屬零件時，不需要付費購買清潔劑，可由化學品供應商直接提供清洗零件的相關服務，清潔的件數或表面塗佈的面積即可為其收費之依據，為了提升利潤，供應商可對客戶的員工進行教育訓練，以優化清潔劑的使用效率，並減少清潔劑的消耗量。

在化學品租賃模式下，供應商可以是化學品製造商或經銷商，供應商應對所銷售的化學品以

及如何最有效、最安全地使用它們有深入的經驗和知識，由供應商提供建議和服務，以改善客戶使用化學品的方式。

化學品租賃推行初期，供應商應啟動程序檢查所供應的化學品，並擇定具有發展化學品租賃模式潛力的客戶，與客戶協商過程中，若客戶表達合作推動的興趣，可參考下述永續性標準及工發組織所提出的化學品租賃推動作業指引步驟與客戶研商合作推動模式，並作適時適度調整：

（一）永續性標準

成功的化學品租賃商業模式關鍵要素包含採用高品質與永續性標準，以及參與公司間相互信任並公平透明的分享利益，成功的模式應符合以下永續性標準（圖 1）：



資料來源：<https://www.chemicalleasing.org/concept/sustainability-criteria>

圖 1 化學品租賃永續性標準

1. 減少化學品及其應用和生產製造過程對環境、健康、能源和資源消耗的不利影響。
2. 改善化學品的處理和儲存，以防止或降低風險。

3. 不使用風險較高的替代化學品。
4. 雙方契約應包含持續改善的目標，並應能公平、透明的分享合作公司間的利益，以產生經濟社會效益。
5. 需要對相關措施進行監測與確認。

數量與價格，建議以非核心生產流程為主。

表 1 彙整工發組織之成功案例所採用的化學品。

(二) 化學品租賃推動作業指引 (圖 2)

1. 準備階段：評估公司執行化學品租賃模式的潛力

- 任務 1. 界定具潛力的化學品與製程：收集不同生產製程所使用的化學品，包括種類、



圖 2 化學品租賃推動作業指引

表 1 聯合國工業發展組織化學品租賃模式成功案例綜整

化學品種類	製程	可能的付費基礎	應用領域
黏著劑	包裝	黏著件數或黏著的面積	食品與飲料製造業、建築營造、鞋類製造、木製品製造
	標籤	包裝瓶數、黏著的標籤面積	食品與飲料製造業
清潔劑、消毒劑	清潔 / 清洗	使用房間數	飯店、醫療保健院所
溶劑 / 清潔劑	清潔 / 清洗	清潔 / 消毒瓶數	食品與飲料製造業
清潔劑、消毒劑	洗衣	洗衣重量	飯店、醫療保健院所
油、潤滑脂	潤滑	工時	採礦業、採石業
其他類型潤滑劑	包裝輸送機潤滑	包裝品輸送機運轉時數	食品與飲料製造業
粉末塗料、溶劑、水性塗料、磷化處理化學品	表面保護	處理面積、預處理 / 塗佈件數	金屬製品製造、汽車及機械設備製造、木製品製造、電子設備製造、橡膠及塑膠製品製造業
油墨	印刷	印刷品數	出版和印刷
混凝劑、膠凝劑、消泡劑	廢水處理	處理水量	各產業
鑽孔用化學品 (如溴化鈣、溴化鋅、甲酸銻)	石油井、天然氣井	每日費用	石化業
觸媒	化學反應	合成產品產量	化學材料及化學品製造

資料來源：聯合國工業發展組織，<https://chemicalleasing.org/publications>

- 任務 2. 預先評估化學品與程序：將可能採用的化學品依永續性標準作預先評估，考量參數應包括消耗量、成本和有害性。消耗量越

大、化學品的購置費用越高，表示化學品租賃模式的適用度越高，而化學品的危害性越高，越有必要優化化學品的使用，或者使用

- 危害性較低 / 風險較小的替代化學品。
- **任務 3.** 定義付費方式：自以數量為基礎的付費方式，轉向以獲得利益為基礎的付費方式，如表 1 所列。因計費基準有別於傳統售出货量，因此供應商及客戶間需取得共識，設置必要的計數設備並作定期校核。
2. 發展與執行階段：與化學品供應商和其他潛在合作夥伴一起制定和實施化學品租賃業務模式
- **任務 4.** 建立工作小組：建立一個內部工作小組，開發和實施化學品租賃模式。
 - **任務 5.** 建立核心團隊：整合化學品供應商、客戶，以及其他可能的合作單位，劃分權責、擬定任務與推動時程。
 - **任務 6.** 收集數據並建立基線：任務包括收集實施化學品租賃之前的所有相關數據，據以描述擇定生產線之現況，並建立基線，以評估一段時間內，施行化學品租賃的成本與收益。
 - **任務 7.** 確定程序中化學品使用優化的措施：優化措施包括減少化學品的消耗量、採用危害較小或風險較低的替代品、程序的優化與替代等，根據預期的優點與缺點評估優化措施，篩選較具潛力者，並進行詳細的成本效益分析。
 - **任務 8.** 測試已擇定的項目：透過測試取得成本或效益等量化資訊，以及驗證產品品質，確認化學品租賃模式的適用性。
 - **任務 9.** 建立化學品租賃契約：議定化學品租賃模式的適用範圍、品質要求、付費機制、供應商與客戶間的責任義務、契約期限以及爭議處理等。
3. 評估與監控執行成果：持續評估管理化學品租賃實施成果，並作必要之修正與優化
- **任務 10.** 監測、紀錄與評估結果：監測化學品租賃模式的施行，記錄與評估效益，並呈現結果的連續過程，客戶可根據監測的成果，評估是否將施行的範圍擴展到其他的生產線和業務領域。
- 透過將付費基礎與化學品的消費分離，化學品租賃模式可協調相關的鼓勵措施，為化學品供應商和客戶以及環境帶來雙贏局面。化學品租賃模式對供應商的潛在好處包括：
- (一) 為客戶帶來了額外的價值和利益，故對供應商形成更好的競爭力和市場差異化。
 - (二) 更高的利潤（如與客戶分享經濟利益）。
 - (三) 擴大市場範疇（通過提供這種創新的業務方法，供應商將吸引更多客戶，成為使用此生產流程的公司的主要供應商）。
 - (四) 更好地遵守「歐盟關於化學品註冊、評估、許可和限制的法規（Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals, REACH）」等國際法規。
 - (五) 改善環境狀況。
- 化學品租賃模式對於在生產製造過程中使用化學品的客戶，潛在好處包括：
- (一) 降低營運成本。
 - (二) 當化學品的使用不屬於產業核心業務時，客戶可專注於其核心業務，同時受惠於供應商提供的服務與專有技術。
 - (三) 通過最佳化學品與其他資源的使用方法，提高資源使用效率。
 - (四) 改善化學品的處理和儲存，促進人體健康和安全。
 - (五) 以具潛力的化學品替代，用危害較小的產品替代更危險的產品。
 - (六) 降低對環境的影響（例如減少廢棄物產生，減少空氣和水污染）。
 - (七) 減少化學品管理的責任。
 - (八) 持續改進並遵守國際法規。
 - (九) 可精確計算與生產活動相關的成本。

(十) 減少停機時間，並降低維護成本。

三、國際發展情形與案例介紹

2005年工發組織在埃及、墨西哥和俄羅斯發起試點計畫，其後拓展到斯里蘭卡，塞爾維亞和哥倫比亞等發展中國家和轉型經濟體，迄今已有超過20個國家，約91件成功案例，分布如圖3所示，在推行化學租賃模式超過10年之後，已經證明化學品租賃模式可提高化學品的有效利用。2016年11月21日在聯合國工業發展組織成立50週年之際，工發組織推動簽署與奧地利、德國與瑞士間的全球與多方化學品租賃倡議聯合宣言，此宣言雖不具有法律約束力，其目的在提高政治層面對化學品租賃的認識，並加強在全球推廣活動中的合作。各國相關作為綜整如下：

2. 公私部門相互合作建立指導委員會，並遵循REACH管理規範。
3. 整合化學產業永續發展與化學品租賃概念，並推動德國資源效率計畫（ProgRess）。
4. 對國內願意採用化學品租賃的企業提供財務補助。

化學品租賃倡議聯合宣言開放其他合作夥伴參與，薩爾多瓦、塞爾維亞及斯里蘭卡等3個國家於2018年加入簽署，祕魯則於2020年加入。



資料來源：聯合國工業發展組織，<https://www.unido.org/our-focus-safeguarding-environment-resource-efficient-and-low-carbon-industrial-production/chemical-leasing>

圖3 實施化學品租賃模式國家分布

(一) 奧地利

1. 在聯邦環境部官方網站上分享有關化學品租賃的信息。
2. 發起啟動、支持和諮詢化學品租賃項目（Pero-Dow, Initiative “Chemical Leasing goes Agro”）等服務。
3. 對國內願意採用化學品租賃的企業提供財務補助。
4. 發送邀請、贊助、參與和推廣兩年一度的化學品租賃獎相關資訊。
5. 贊助、推廣，並組成專家小組，討論與辦理化學品租賃相關研討會和會議論文的發表。
6. 贊助化學品租賃的研究和科學出版物。

(二) 德國

1. 由德國環境部和聯邦環境局以及合作夥伴共同合作施行化學品租賃計畫，以協助推廣並提高對此商業模式的認識。

工發組織於2009年創立全球化學品租賃獎（Global Chemical Leasing Award），表彰並分享全球化學品租賃成功案例，以下列舉數項知名案例。

(一) 潤滑油租賃

2009年塞爾維亞最大的礦泉水和飲料生產商KnjazMiloš及其化學品供應商Ecolab合作，執行化學品租賃計畫。KnjazMiloš生產線的輸送帶必須進行潤滑以確保包裝瓶平穩移動，原使用的濕式潤滑劑含有有害成分，同時易噴濺於地板，衍生工安疑慮，經雙方評估協商，改以無害的乾式潤滑劑取代原使用之濕式潤滑劑，並安裝自動配

料系統和噴嘴等新設備。在化學品租賃模式下，KnjazMiloš 並非支付潤滑劑的購買費，而是依據輸送帶的工作時間付費予 Ecolab，且由於化學品供應商的利潤與潤滑劑的使用量直接相關，可促使化學品供應商有效使用潤滑劑。

對於 KnjazMiloš 而言，每年包裝生產線原需使用 6,000 公斤的濕式潤滑劑和 1,500 公噸的水，改用乾式潤滑劑後，可減少 50% 的化學品消耗量並節約用水，且不再需要支出廢水處理費用，每年節省的直接成本約為 5,700 歐元，同時由於工作環境中職災風險降低，改善了職業健康和安全；對於 Ecolab 來說，雖然潤滑油銷售量減少，但因加計服務成本，實際利潤增加約 10%。

（二）粉末塗料租賃

靜電粉末塗料常使用於金屬製品製造業的生產製程，以避免金屬表面劣化。埃及電子產品製造商 ABB ARAB，發現生產製程中的噴漆作業，會大量浪費靜電粉末塗料，致使成本居高不下，且由於漆料品質不佳，增加設備維護負擔與產生大量廢棄物。為了解決前述問題，與粉末塗料供應商 Akzo Nobel Powder Coatings S.A.E. 協商，簽訂化學品租賃契約，契約內容包括以塗佈面積取代漆料購買數量作為計價基礎，優化噴漆作業包括改良粉末塗佈技術，使塗佈厚度降至最佳，並回收粉末廢料，以更有效地利用化學品和資源，同時對員工進行培訓，從而提高產品的品質。

實施化學租賃模式之前，ABB ARAB 生產製程噴漆作業採用 160 °C、2.9 bar 的壓力操作，能源成本高，每平方公尺塗層需消耗 0.2 公斤的粉末塗料，總計每年約使用 140 公噸粉末塗料，其中約有 12% 的粉末塗料變成廢棄物，且重工率或產品退貨率達 2%，造成高設備維護負擔；實施之後，噴漆作業操作條件改為 130 °C、2 bar，有效降低 30% 的能耗，且粉末塗料及其廢料密閉循

環利用，每平方公尺面積粉末塗料使用量為 0.16 公斤（約減少 20%），廢棄粉末塗料產生量減少 4~5%，每年可節省直接支出費用約 68,000 美元，此外，亦營造安全工作環境，獲得分享知識、提升員工專業能力等其他間接效益。

（三）清洗溶劑租賃

塞爾維亞 FKL 為生產汽車軸承和傳動軸等金屬零件之製造商，為了使生產過程中的金屬清潔技術更加高效能與安全，在經過測試驗證後，與當地化學品批發商 Ravago Chemicals 簽訂一份為期 5 年的化學品租賃契約，除付費機制改以每月機器工時計價外，契約內容尚包括以金屬清潔等級之四氯乙烯產品取代乾洗等級藥劑，並導入溶劑參數的標準監測程序，以有效地調整四氯乙烯的酸度，另外，安裝可於現場回收廢棄溶劑的蒸餾裝置，在整個清潔和回收過程中，溶劑儲存和運輸皆使用符合 ResponsibleCare® 原則的密閉容器，將四氯乙烯更安全地且密封供給機器使用。

改善前，金屬零件清洗程序每年約消耗 30 噸溶劑，清洗作業時溶劑易逸散至作業環境中，而溶劑酸化除造成清洗機金屬零件嚴重腐蝕，增加維護負擔外，每週需更換設備內溶劑，每年約產生 25 噸有害廢棄物，其中 95% 為溶劑，委託清運成本約 70,000 歐元；改善後，四氯乙烯使用量減少為每年 5 噸，有害廢棄物產生量減少為每年 1.5 噸，廢棄物中溶劑含量降至 5% 以下，透過監測系統，可維持溶劑品質並顯著降低維護成本，縮減清潔週期，提升生產率，直接節省成本約每年 100,000 歐元。

四、我國推動的機會與挑戰

現行化學品供應模式，係由供應商販售予客戶，經使用後產生之化學品廢液，屬於廢棄物

清理工法（以下簡稱廢清法）第 2 條第 1 項之廢棄物定義第 2 款「減失原效用」及第 3 款「於營建、製造、加工、修理、販賣、使用過程所產生目的以外之產物」之範疇，故客戶使用後之化學品須依廢清法第 28 條，交由廢棄物清除處理機構清除、處理。若屬於具有經濟價值之副產品或溶劑，可透過再回收、純化之技術處理，重新回到製程者，因現行廢清法暫無相關法源依據，建議持續導入租賃或逆向回收之概念。

為因應資源循環趨勢，以及產業、環保主管機關審查之實務需求，環保署蒐研及彙整多元化的資源循環利用方式，於民國 109 年 4 月 7 日公告事業廢棄物清理計畫書審查作業參考指引（第 3 次修訂版），將 3 種廠內資源循環模式及 4 種廠外資源循環模式，納入廢棄物清理計畫書（以下簡稱廢清書）填報與審核範例，摘錄如表 2 所示，所列循環模式可符合國際上化學品供應模式常見的用途及案例。

表 2 廢清書審查作業參考指引之循環模式及法規依據

種類	循環模式名稱	法源依據
廠內	1. 物料製程內未排出，逕自循環使用	· 從事業廢棄物廠（場）內自行再利用及自行處理認定原則第 1 條第 1 項
	2. 廢棄物於製程排出後，廠內回原製程作原料使用	
	3. 廢棄物於製程排出後，經廠內其他難製程或設備處理、加工，可製成再生料、其他產品、原物料，再提供廠內製程使用	· 從事業廢棄物廠（場）內自行再利用及自行處理認定原則第 2 條 · 廢清法第 28 條第 2 項 · 事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準第 2 條
廠外	1. 委託不同法人處理及再利用，做出資源化原料、材料、產品	· 廢清法第 28 條第 1 項 · 第 1 至第 3 款
	2. 送至同一法人不同廠區處理及再利用	· 廢清法第 2 條 · 事業自行清除處理事業廢棄物許可管理辦法第 3 條第 4 項 · 核釋應檢具事業廢棄物清理計畫書之事業，其製程產出物之認定辦理原則（100 年 5 月 9 日） · 事業廢棄物清理計畫書審查管理辦法第 14 條
	3. 物料送回原供應商調整成分與濃度，且再返回原廠原製程循環使用（跨廠區）	· 廢清法第 2 條 · 液體廢棄物填報於事業廢棄物清理計畫書及上網申報清流向原則 · 環署廢字第 0910055887 號函釋
	4. 原料購入使用後，送至其他公司純化（再製）、調整成分與濃度，再返回原廠原製程循環使用	· 廢清法第 2 條 · 核釋應檢具事業廢棄物清理計畫書之事業，其製程產出物之認定辦理原則（100 年 5 月 9 日） · 事業廢棄物清理計畫書審查管理辦法第 14 條

資料來源：行政院環境保護署，事業廢棄物清理計畫書審查作業參考指引（摘錄），2021.04.07。

依循前述循環模式提送廢清書，在法源方面需依廢清法第 2 條廢棄物定義各項要件逐一檢視是否屬於廢棄物，裁量範圍較廣，建議環保主管機關可思考將具採行化學品租賃模式潛力之廢棄物，依循廢清法第 39 條授權中央目的事業主管機關會商中央主管機關、再利用目的事業主管機關，於再利用管理辦法訂定合理的適用範圍、物化性質等，俾利推動化學品租賃模式。

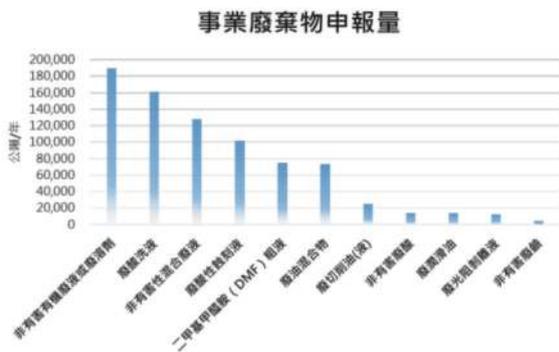
以經濟部訂定發布「經濟部事業廢棄物再利用管理辦法」為例，第 3 條規定再利用途徑包括：「廠（場）內自行再利用」、「公告（附表）再利用」及「許可再利用」，其中現行公告（附表）再利用之廢棄物共計 52 項（民國 109 年 7 月 15 日修正發布），事業可逕依附表所列之種類及管理方式進行再利用。化學品租賃模式推動初期，建議依同辦法第 4 條規定由事業或再利用機構所屬產業公會，提出可行評估後送經濟部評估公告，於附表增列具租賃服務潛勢之化學品品項，並針對適用對象、目的、成分等進行限制管理，協助廠商推動化學品租賃制度。前述法規完備後，化學品供應商（即化學品供應端）應預先申請為再利用機構，欲申請化學品租賃之廢棄物產出者（即化學品需求端）應辦理事業廢棄物清理計畫書之新申請或變更，將化學品使用及再利用流向妥善

記載，經直轄市、縣（市）主管機關或中央主管機關委託之機關審查核准後，據以辦理。

本研究參考國外推行案例，調查我國溶劑、清潔劑、塗料、油脂及酸鹼液廢棄物產出情形，據以篩選具化學品租賃推動潛力之項目，依近年單年度申報量高低排序化學品類型廢棄物依序為（1）非有害有機廢液或廢溶劑、（2）廢酸洗液、（3）非有害性混合廢液、（4）廢酸性蝕刻液、（5）二甲基甲醯胺粗液及（6）廢油混合物等，如圖 4 所示。

為篩選具潛力之化學品租賃對象，本研究綜合考量廢棄物產生量、廢棄物於產出事業集中性比例、屬於非混合性廢棄物等條件（圖 5），提出具採行租賃模式潛力之化學品衍生廢棄物，包括（1）D-1504 非有害有機廢液或廢溶劑、（2）R-2501 廢酸性蝕刻液及（3）R-2503 二甲基甲醯胺（DMF）粗液，此三類廢棄物使用量大且易溯源原料，對於化學品需求端更具誘因，建議可優先輔導推動及管理，媒合化學品需求端及化學品供應端。

根據事業廢棄物申報管理系統聯單統計，前述具採行模式潛力之化學品衍生廢棄物，以非有害有機廢液或廢溶劑為例，其化學品需求端之業別包括積體電路製造業、液晶面板及其組件製造



資料來源：事業廢棄物申報管理系統，本研究繪製。

圖 4 我國事業廢棄物申報量統計



圖 5 化學品租賃優先推動對象篩選建議

業、其他光電材料及元件製造業、塑膠原料製造業、化學原材料製造業等，廢棄物再利用率約為83%，其中包含化學原材料製造業採行廠內再利用約占56%、積體電路製造業採行再利用（回收）約占27%及委託清除處理約占15%。從化學品供應端來看，有機溶劑原料供應商逾500家、種類達數百種，產品至少包含180237¹對苯二甲酸（PTA）、180198 混合二甲苯、180197 乙苯、182199 其他芳香烴、180184 乙烯、180185 丙烯、180268 乙二醇（EG）等，由於非有害有機廢液或廢溶劑所含成分性質不一，應避免不同來源之廢液或廢溶劑混合，以利推行化學品租賃。

廢酸性蝕刻液的化學品需求端為印刷電路板製造業、金屬表面處理業、積體電路製造業等，其廢棄物再利用率約為99%，其中包含印刷電路板製造業採行再利用（回收）約占99%及廠內貯存約占1%。化學品需求端向供應端購買蝕刻液類型至少包含190188 酸性蝕刻劑、192899 其他或特殊蝕刻劑。

二甲基甲醯胺粗液的化學品需求端為塑膠皮、板及管材製造業、其他塑膠製品製造業、皮革及毛皮整製業等，其廢棄物再利用率約為97%，其中採行再利用（回收）約占98%及廠內貯存約占2%。

前述具採行化學品租賃模式潛力者屬事業廢棄物，現階段依規定採行廠內再利用、再利用（回收）、廠內貯存或委託清運處理等作法，檢視現行經濟部事業廢棄物再利用管理辦法，附表已納入廢酸性蝕刻液、廢酸洗液、二甲基甲醯胺粗液、混合廢溶劑、廢光阻剝離液、廢潤滑油等化學品類型廢棄物的再利用。未來推行化學品租賃仍應回歸我國廢棄物管理機制，不致成為事業廢棄物管理漏洞，爰建議中央目的事業主管機關（即經

濟部）將特定化學品類別公告為再利用之事業廢棄物，新增或補強再利用用途、運作模式等相關規定，以增加業界投入意願，順利推行化學品租賃模式。

五、結語

傳統商業模式為銷售越多，賺得越多，然而，在化學品租賃模式下，供應商銷售的是化學品所提供的功能，並將化學品之消費與使用量付費分離（如清洗數量、塗覆面積等），可更有效且經濟的使用化學品，其成功要件在於商業模式創新，即透過租賃服務所帶來之額外收益，促使業界轉型，由於我國目前尚未有典型案例可供參考，建議未來可進一步探究化學品租賃服務契約、計價方式及逆向回收模式，並進行實廠商業模式評估，應可提升業界共同參與之意願。

本研究根據近年事業廢棄物申報統計，針對我國溶劑、清潔劑、塗料、油脂及酸鹼液等廢棄物，依其產生量、產出事業集中性、屬非混合性物等條件，篩選化學品租賃優先推動項目，分別為D-1504 非有害有機廢液或廢溶劑、R-2501 廢酸性蝕刻液及 R-2503 二甲基甲醯胺（DMF）粗液，並溯源至化學品供應端所販售之產品大項。

檢視化學品租賃模式對於國內廢棄物清理、再利用等現行法令框架之適法性，現行事業廢棄物清理計畫書審查作業參考指引已將7種資源循環模式納入廢清書填報範例，並可適用於化學品租賃模式。故針對化學品租賃之法規政策方面之強化，建議未來可持續評估並增列具租賃服務潛勢之化學品，如遵循廢清法第39條公告之再利用管理辦法進行公告（附表）再利用，現行經濟部事業廢棄物再利用管理辦法，針對附表已納入化學品類型之廢棄物，增訂化學品租賃適用之適用對象、目的、成分、再利用用途、運作模式等進

¹ 事業廢棄物清理計畫書及申報填報之原物料代碼表。

行限制管理。事業申請方面，化學品供應端具備再利用機構資格，化學品需求端申請或變更事業廢棄物清理計畫書，將化學品使用及再利用流向妥善記載，以兼容現行廢棄物管理架構及創新的化學品租賃模式。

參考文獻

行政院環境保護署，廢棄物清理法，2017.06.14。
 行政院環境保護署，共通性事業廢棄物再利用管理辦法，2021.01.07。
 行政院環境保護署，事業廢棄物清理計畫書審查作業參考指引，2021.04.07。
 經濟部，經濟部事業廢棄物再利用管理辦法，2021.06.24。
 經濟部工業局，產業綠色成長推動計畫專案計畫期末執行成果報告，2018。
 聯合國工業發展組織（UNIDO）化學品租賃網站，<https://chemicalleasing.org/>。

聯合國永續發展知識平臺網站，<https://sustainabledevelopment.un.org/>。
 Global promotion and implementation of chemical leasing business models in industry, United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), 2016.
 Joint Declaration of Intent on Chemical Leasing signed between UNIDO, Austria, Germany and Switzerland, 2016.
 Chemical leasing manual, Resource Efficient and Cleaner Production (RECP, UNIDO), 2017.
 Economic features of Chemical Leasing, Environment Directorate Organization for Economic Co-operation and Development, Health and Safety Publications, series on Risk Management, No.37, 2017.
 Chemical leasing function to impact, United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), 2020.

叢書訊息

- (一) 高岩覆對隧道設計與施工影響研究(二)
 脆性破壞特性評估與因應對策
 蕭富元、林金成、蔡明欣等 編著
 2017年10月初版
- (二) 流體注儲行為之力學機制研究與工程應用
 俞旗文、譚志豪、雷世璋等 編著
 2016年10月初版
- (三) 應用雷達影像評估坡地災害
 林柏勳、蕭震洋、鄭錦桐、
 陳俊愷、李易叡等 編著
 2016年10月初版

運用數值模擬探討建築物對土石流之影響－以高雄瑪雅野溪為例

許志豪* 黃全謐** 簡榮興*** 曹鼎志****
鐘啟榮***** 黃效禹*****

摘 要

土石流事件發生時，鄰近溪流之建築物可能攔阻下移之土石，使土石流動能降低甚至改變流向，本研究以高雄市那瑪夏區瑪雅里野溪為例，採用 RAMMS 土石流模組進行模擬，透過數值地形編修以探討有、無建築物時土石流流動及堆積行為之變化。模擬結果顯示，當地形上納入建築物時，流動土石受到建築物攔阻，使得堆積土石往上游側壅高、流出長度縮短，並使土石流災害範圍發生變化。

關鍵字：土石流、RAMMS、數值模擬、建築物

一、前 言

根據水土保持手冊（2017），土石流對鄰近區域環境之危害方式，可以區分為淤積、沖刷、撞擊及磨蝕等四種主要形式，可能為單一形式，但多數是多種形式綜合作用結果而造成災害，其中，淤積作用主要出現於溪流坡度驟減、溪幅展寬或兩者兼具的地形條件，尤其在溪流下游流出谷口後的寬平地所形成之扇狀地，是土石流主要的淤積區域。

然而，隨著人為開發及人工建築物的影響，於山區河谷或土石流堆積扇上，常可見人口稠密之聚落範圍，若發生土石流溢流時，可能因大量

建築物造成地形改變，進而影響土石流之流動及堆積行為（Nakatani et al., 2013），使得受影響範圍產生明顯差異。爰此，本研究透過編修數值地形，建立有、無考慮建築物之數值地形後，以假設之情境進行數值模擬，瞭解受影響範圍之差異，藉以對未來土石流防災提出改善建議。

二、文獻回顧

土石流是一種飽含泥、砂、礫及巨石等物質與水之混合物，以重力作用為主，水流作用為輔的一種高濃度且流動快速的兩相流（水土保持局，2017）。於過去之土石流災害事件中，常可發現

* 中興工程顧問社防災科技研究中心正研究員
** 中興工程顧問社防災科技研究中心副研究員
*** 中興工程顧問社防災科技研究中心助理工程師
**** 中興工程顧問社防災科技研究中心副主任
***** 行政院農業委員會水土保持局土石流防災中心主任
***** 行政院農業委員會水土保持局土石流防災中心科長

非典型軸對稱之土石流堆積扇，經調查結果推估應為鄰近溪流之結構物（整治工程、建築物）攔阻下移之土石材料，而使得土石流動能降低，甚至改變流向。

以整治工程為例，Cuomo et al. (2019) 提出不同整治工程下之土石流行為。在天然溝渠之下，土石堆積深度較低、流出長度較長（圖 1a、1d）；於設置整治工程後，若下移土石量體未超過整治工程貯砂空間，則土石堆積深度增加、無溢出（圖 1b、1e）；於設置整治工程後，若下移土石量體超過整治工程貯砂空間，則土石堆積深度增加、流出長度縮短（圖 1c、1f）。此外，Bernard et al. (2019) 透過數值模擬比較有無整治工程之差異。當設置梳子壩後，土石流遭壩體攔阻，壩後堆積深度明顯上升、壩前堆積深度明顯降低（圖 2a、2b），顯示整治工程對於土石流行為具明顯影響。

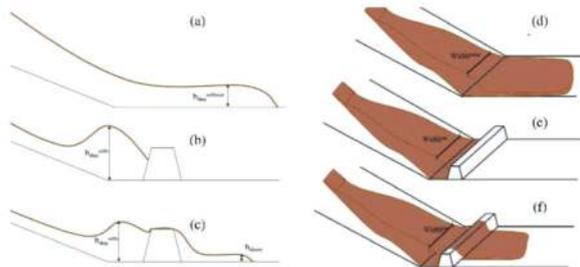


圖 1 整治工程對土石流動之影響示意圖
(Cuomo et al., 2019)

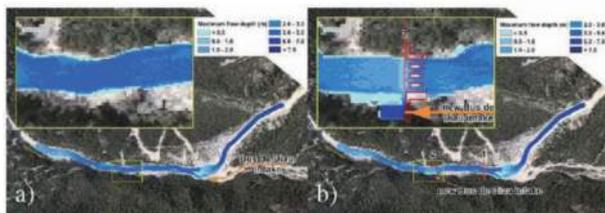


圖 2 土石流數值模擬梳子壩設置前、後之差異
(Bernard et al., 2019)

以建築物為例，日本學者 Takebayashi and Fujita (2020) 針對 2014 年 8 月日本廣島縣朝南市之土石流事件（圖 3）進行案例分析時，將建築物納入數值模擬中，可見模擬結果與現地影像紀錄較為相符。因鋼筋混凝土建築物位於野溪出谷口處，改變土石流之流向，使土石流之堆積範圍受建築物侷限，故土石往兩側擴散現象較不明顯，而是呈現較為狹長形狀（圖 4）。

中谷加奈等人 (2015) 研究亦指出，於建築物及圍籬設置前、後，以及不同地形與流量之排列組合下，土石流通過相同扇狀地造成之堆積範圍具明顯差異（圖 5）。在均勻土砂、流量為每秒 2 公升時，建築物及圍籬未因土石流撞擊而毀壞時，相較無建築物及圍籬下，大多數的土石流堆積會往上游方向壅高，且流出長度較為縮短（Case 1~3）；在均勻土砂、流量為每秒 6 公升時，建築物及圍籬未因土石流撞擊而毀壞時，堆積行為與前者相似（Case 4, 5, 7），建築物及圍籬若遭土石流撞擊毀壞後，土石流則依然朝下游直進方向移動（Case 4~6）。此外，若將材料改為礫石及均勻土砂時，亦可發現相似之堆積特性（Case 8~13）。

於國外之災害案例、假設整治工程與建築物的模擬研究中，可見鄰近溪流之結構物對土石流行為之影響。本研究聚焦在有、無建築物之差異探討，若能瞭解建築物與土石流行為之相互關係，將有助於未來土石流風險管理之應用，減少土石流發生時可能造成之損害，達到防災、減災之成效（許志豪等人，2018），故本研究採實際發生過土石流災害之高雄市那瑪夏區瑪雅里野溪進行模擬及探討，研究區域之說明如后。



圖 3 建築物侷限土石流流動示意圖
(Takebayashi and Fujita, 2020)

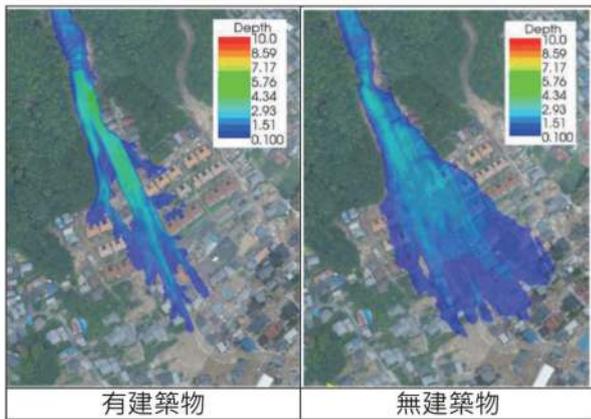


圖 4 日本廣島縣朝南市土石流數值模擬結果
(Takebayashi and Fujita, 2020)

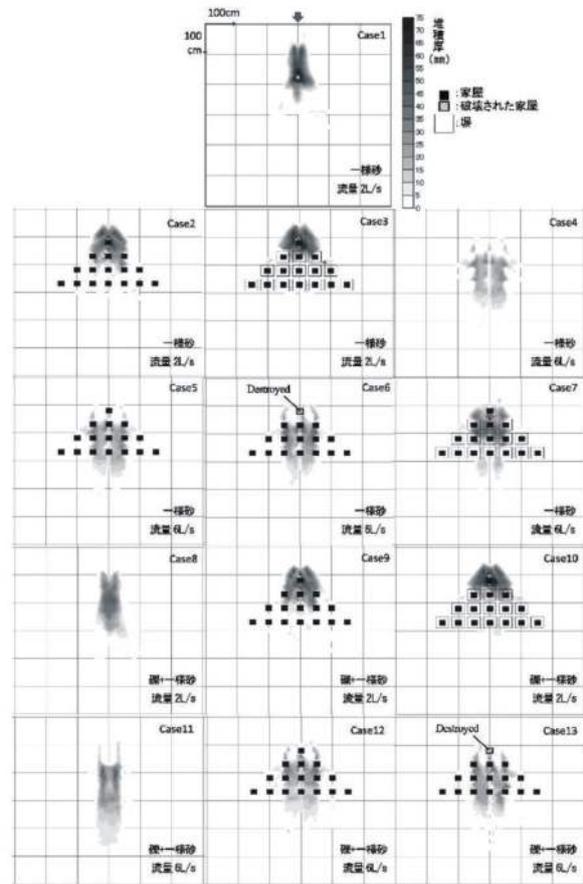


圖 5 土石流於不同建築物、圍籬及流量下之行為
(中谷加奈等人, 2015)

三、研究區域介紹

本研究之野溪位於那瑪夏國民中學旁，其行政區屬於高雄市那瑪夏區瑪雅里（圖 6a），根據水土保持局土石流防災資訊網資料顯示，於 2009 年莫拉克颱風豪雨造成集水區上游崩塌地擴大（圖 6b），土石隨溪水下移衝擊及淤埋下方房舍，估計約 40,000 立方公尺之土石侵入瑪雅里和平巷民宅及那瑪夏國民中學教室，並造成省道台 21 線（於 2014 年，此路段改編為台 29 線）受阻中斷、上方甲仙農場林道損毀，總計約 15 至 20 棟民宅受損、500 公尺道路損毀（圖 7）。

為瞭解土石流堆積區之大量建築物對於土石

流流動及堆積行為之影響，本研究以莫拉克颱風災害之 40,000 立方公尺土石量作為土石流模擬情境之災害規模，進行後續之模擬與分析。

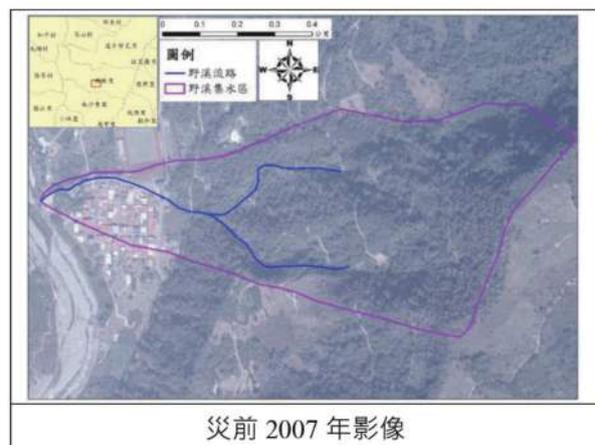


圖 6a 那瑪夏國民中學旁野溪位置圖

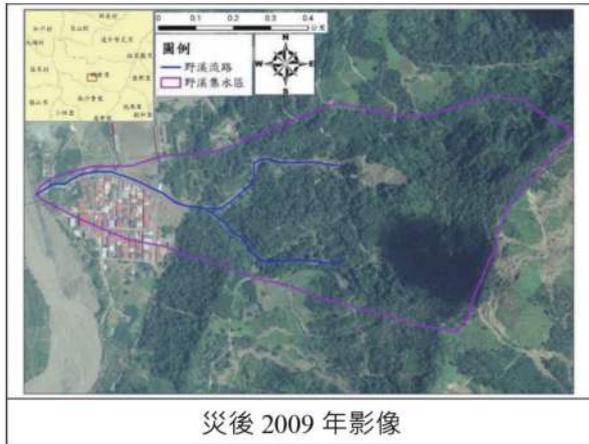


圖 6b 那瑪夏國民中學旁野溪位置圖



圖 7 那瑪夏國民中學旁野溪之土石流災害照片
 (整理自水土保持局歷史影像平台)

四、土石流模擬情境及結果

(一) RAMMS 土石流模組

RAMMS (Rapid Mass Movement Simulation) (以下簡稱 RAMMS) 為瑞士聯邦森林、雪與景觀研究所 (WSL, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research) 所開發，其前身為 1998-2000 年所發展之 Aval-1D 與 Aval-2D 模式，並於 2005 年整合各模組成為 RAMMS 數值模擬軟體。目前已開發出崩塌 (AVALANCHE MODULE)、落石 (ROCKFALL MODULE) 以及本研究所採用

之土石流 (DEBRIS FLOW MODULE) 模組。

RAMMS 土石流模組採用 Voellmy-Salm 連續體模式作為理論基礎 (Salm, 1993; Voellmy, 1955)，模式之總體摩擦阻力 (Total Basal Friction Coefficient) 可分為與速度無關之乾燥庫倫摩擦係數 (μ , Dry-Coulomb Friction Coefficient) 與速度相依之紊流流動係數 (ξ , Viscous-Turbulent Friction Coefficient)。前者主控土體之流出長度 (Runout Distance)，後者則影響流出歷程時間。RAMMS 土石流模組可針對特定位置之歷史土石流流量紀錄建立集水區之水文特性關係，其模擬區域亦可從地形所圈繪之邊界，合理調整計算範圍以加速模擬運算時程。

於國際上，RAMMS 土石流模組曾應用於瑞士、法國及奧地利之土石流數值模擬 (Hussin et al., 2012; Frank et al., 2015; Schraml et al., 2015)。在臺灣，亦已陸續應用於省道台 9 線 (蘇花公路) 115.9K 大坑橋 (李璟芳等人, 2015)、桃園市復興區合流部落 (李璟芳等人, 2016; 黃全謚等人, 2018; Tsao et al., 2019)、南投縣信義鄉豐丘一號野溪 (吳俊毅、謝欣穎, 2018)、屏東縣滿州鄉老佛野溪 (曹鼎志等人, 2020) 等土石流災害案例，且模擬結果與實際災害範圍相似，足以顯示於採用適切的材料參數情況下，透過 RAMMS 土石流模組進行數值模擬，可重現土石流之產狀，用於掌握可能之流動與堆積行為。

(二) 土石流模擬參數率定

於進行土石流模擬前，需先進行土石流材料參數及 RAMMS 模擬參數之選用。有關土石流材料參數，根據 Takahashi (1980) 研究之公式，本研究野溪之土石流平衡體積濃度為 52.5%，而土石流單位重則可透過乾燥之泥砂及礫石材料單位重 $2,650 \text{ kg/m}^3$ 及土石流平衡體積濃度進行換算，得到 $1,866 \text{ kg/m}^3$ ，尚符合一般移動中之土石流單

位重介於 1,450 至 2,240 kg/m³ 之間（詹錢登，2000）。

有關 RAMMS 模擬參數之選用，因無法取得災害發生當時之實際流動深度及速度做驗證，故本研究採用逆推法進行參數率定，並以莫拉克颱風後正射航照所圈繪之土石實際影響範圍作為對照比，求得最適切之土石流模擬參數。首先，乾燥庫倫摩擦係數 μ 及紊流流動係數 ξ 取 RAMMS 手冊建議範圍之中值 0.22、600 m/s² 作為起始值代入模擬情境，共反覆進行 14 種情境組合之模擬（圖 8）。

於完成模擬後，依照 Carranza and Castro (2006) 建立之模式驗證準則與分類（詳圖 9），將模擬成果之土石流流經最大範圍與災後影像圈繪之土石實際影響範圍（視為實際觀測值）予

以套疊，以式（1）及式（2）計算 α 、 β 及 γ 等三項無因次面積參數，並求得覆蓋指數（coverage index, Ω ）：

$$\Omega = \alpha - \beta - \gamma \quad (1)$$

$$\alpha = A_x / A_{obs}, \beta = A_y / A_{obs}, \gamma = A_z / A_{obs} \quad (2)$$

A_x 為數值模擬影響範圍與實際影響範圍重疊區面積； A_y 為數值模擬影響範圍落在實際影響範圍外之面積（ $A_{y1}+A_{y2}$ ）； A_z 為數值模擬未能反應之實際影響範圍面積（ $A_{z1}+A_{z2}+A_{z3}$ ）； A_{obs} 為由災後影像圈繪之實際影響範圍（ $A_x+A_{z1}+A_{z2}+A_{z3}$ ）。當 Ω 值愈接近 1，表示數值模擬影響範圍與實際影響範圍愈近似，模擬準確度愈佳。經比較後選用覆蓋指數最高（約為 0.88）之模擬參數（ μ 為 0.05、 ξ 為 1,000）進行後續案例模擬。

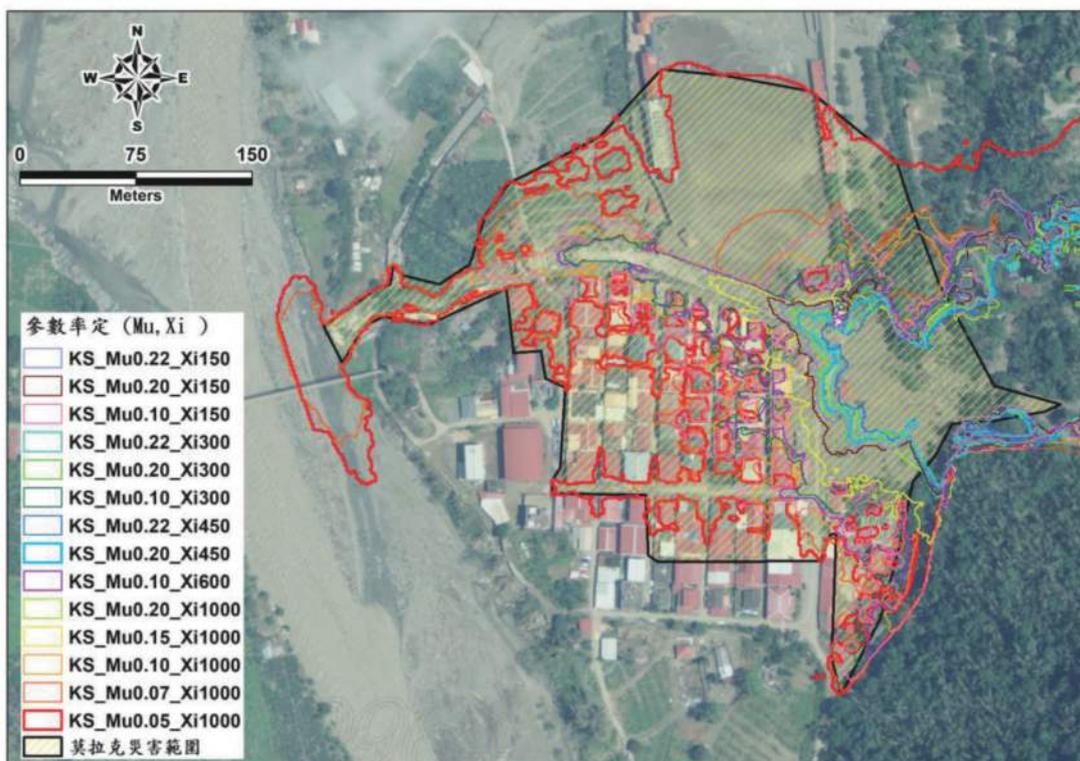


圖 8 RAMMS 參數率定之 14 種情境組合模擬

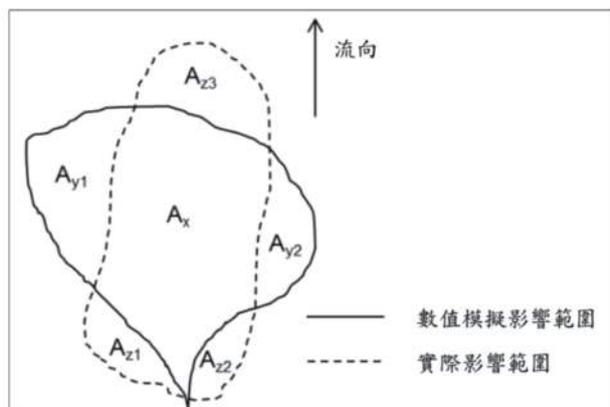


圖 9 模擬與實際影響範圍疊合分類示意圖
 (修改自 Carranza and Castro, 2006)

(三) 土石流模擬案例及結果

本研究依據前述參數計算與率定之成果，於固定參數下，進行 2 種不同地形（有、無建築物）之土石流數值模擬，探討建築物對土石流的攔阻情形，比較有、無建築物對於土石流流出長度、擴散範圍及堆積面積等之影響，本研究之參數設定如表 1、模擬結果如圖 10 所示，比較有、無建築物之模擬結果如下：

1. 於野溪河道深槽內之流出長度並無明顯變化，皆往下匯入楠梓仙溪，且堆積深度亦無明顯差異。
2. 整體堆積範圍受到建築物影響，縮小至無建築物時之 81%，然而於總量體不變之情況下，即代表可能存在堆積區位轉移及局部堆積深度增加之情形。
3. 於有建築物時（圖 10 案例（B）），因受與流向垂直之第一排建築物攔阻土砂影響，故聚落最東側之堆積深度明顯增加（紅圈處）。
4. 於有建築物時（圖 10 案例（B）），因受與流向垂直之第一排建築物（紅圈處）攔阻土砂及改變土石流流向，故土石流於撞擊南側之建築物後，部分土石流之流向偏往北邊，因此，於考量建築物時，北側擴散範圍略增、南側擴散

範圍略減（黃圈處）。

5. 土石流於南側聚落內流動時（圖 10 案例（B）），最西側聚落受到土石流危害之程度明顯較小（綠圈處），顯見建築物確實可使得流動動能消散速度更快，故聚落內之流出長度略有縮短。
6. 由圖 10 案例（A）可見，由於該野溪之南側聚落曾受人為整地影響，無建築物之區域上亦有類似階地之地形，於進行模擬時，土石流堆積情形亦反映出地形特徵，故可見階地交接之高低落差處具有較高之堆積深度（紫圈處），然而，於有建築物時（圖 10 案例（B）），此堆積特徵明顯消失，僅可於聚落中心位置發現局部較高之堆積深度（藍圈處），研判因為受建築物攔阻所致。
7. 於圖 11 可見於最上游建築物處（C 點：野溪河道深槽 A-A' 剖面與道路 B-B' 剖面之交會處），A-A' 剖面之最大流動速度略為上升 10% 至 35%，而 B-B' 剖面之最大流動速度則略為降低。
8. 於圖 11 可見於最上游建築物處（C 點），河道兩岸亦因建築物攔阻土石，兩岸建築物之上游側（B-B' 剖面）整體有增加情形，最大流動深度增加約 1.5 至 2.7 公尺。

表 1 土石流數值模擬參數設定表

項次	選用參數	案例 (A)	案例 (B)
1	地形條件	1m DEM (無建築物)	1m DEM (有建築物)
2	土石流平衡體積 濃度 (%)	52.5	
3	輸入總土石量體 V (m ³)	40,000 (2009 年莫拉克颱風災害事件)	
4	土石流單位重 ρ (kg/m ³)	1,866	
5	乾燥庫倫摩擦係 數 μ (無因次)	0.05	
6	紊流流動係數 ξ (m/s ²)	1,000	

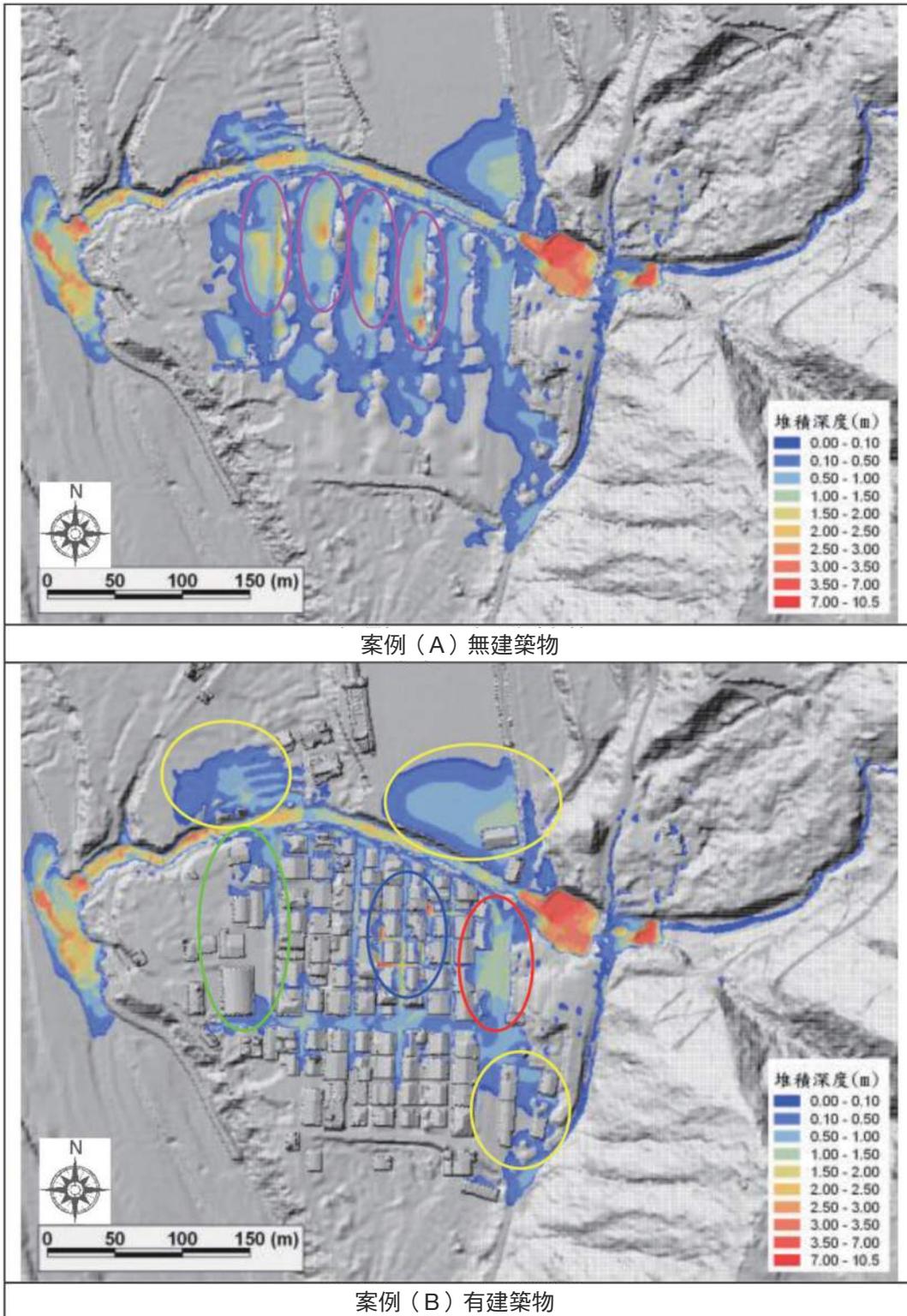


圖 10 那瑪夏國民中學旁野溪之土石流模擬結果

五、結論與建議

本研究以莫拉克颱風之土石流歷史災害事件，透過 RAMMS 土石流模組進行模擬，以探討有、無建築物之不同數值地形下土石流之流動及堆積行為，根據模擬結果顯示土石流流動與堆積行為確實受建築物影響，土石受建物攔阻後，可發現往上游側壅高、流出長度縮短、局部堆積深度增加、土石擴散範圍發生變化等現象。

在下移總土石量體不變之情況下，雖然土石之堆積範圍受到建築物影響，縮小至無建築物時之 81%，然而堆積範圍之外圍輪廓仍大致相符，僅存在局部堆積範圍、深度、流速之變化，故於土石流疏散避難時，仍應採取較全面之風險考量，不宜因建築物具備攔阻土石之功效，而縮小疏散避難之範圍。倘若可透過工程治理，攔阻下移之土石流量體，減少影響堆積區聚落之土石流量體，方可進行疏散避難範圍之探討，惟土石流事件之災害規模（量體）同樣仍存在不確定性，有待未來進一步之研究。

本研究採用 RAMMS 土石流模組進行模擬時，假設建築物為不受土石流撞毀之剛體，然而實際上建築物可能因土石流衝擊（深度、速度）而造成損壞（Hsu and Tsao, 2014；許志豪、曹鼎志，2017），尤其木造、磚造建築物之強度明顯低於加強磚造及鋼筋混凝土造建築物，故承受土石流衝擊力之能力亦較低，可能受土石流衝擊而全毀，因而再次改變土石流流動與堆積行為，未來建議可進行建築物受土石流衝擊之微觀研究，透過擷取時間序列下各模擬網格資料（深度、速度），計算土石流施加於建築物之最大衝擊力，並與建築物之承受力相比，以更進一步瞭解土石流與建築物之互制關係，且相關研究成果亦可回饋至工程治理規劃，以達到工程效益最大化，使得土石流災害之防災、減災作為更臻完善。

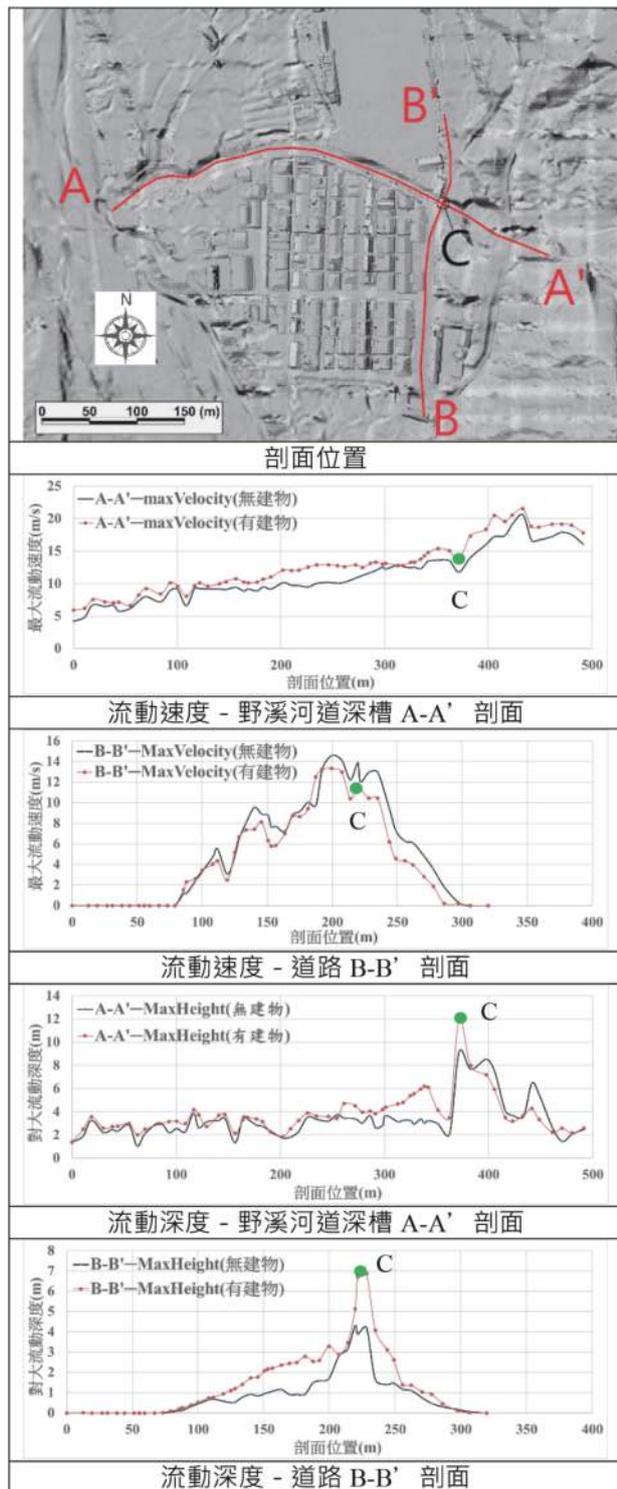


圖 11 那瑪夏國民中學旁野溪之土石流模擬結果一剖面差異

謝誌

本研究資料乃由行政院農業委員會水土保持局提供，謹此謝誌。

參考文獻

- 中谷加奈、小杉惠、長谷川祐治、里深好文、水山高久 (2015) 家屋が存在する扇状地における土石流の挙動に関する実験的検討，砂防学会誌，第 67 卷，第 6 期，第 22-32 頁。
- 行政院農業委員會水土保持局，土石流防災資訊網，網址：
<https://246.swcb.gov.tw/>。
- 行政院農業委員會水土保持局，歷史影像平台，網址：
<https://photo.swcb.gov.tw/Repository/Database>。
- 行政院農業委員會水土保持局 (2017) 水土保持手冊。
- 李璟芳、黃韋凱、曹鼎志、張玉璠、冀樹勇 (2015) 微地形判釋應用於土石流災害之三維數值模擬，中華水土保持學報，第 46 卷，第 2 期，第 96-105 頁。
- 李璟芳、周憲德、曹鼎志、許志豪、黃鄧軒、廖緯璿 (2016) 羅浮合流部落土石流之致災機制分析與數值模擬，中華水土保持學報，第 47 卷，第 4 期，第 171-184 頁。
- 吳俊毅、謝欣穎 (2018) 應用 RAMMS 軟體預測土石流之影響範圍—以豐田野溪為例，水土保持學報，第 50 卷，第 2 期，第 2447-2460 頁。
- 許志豪、曹鼎志 (2017) 土石流流速對磚造結構物之易損性影響，中華水土保持學報，第 48 卷，第 3 期，第 137-144 頁。
- 許志豪、曹鼎志、黃全謐、尹孝元 (2018) 風險治理及土石流非工程手段之空間分布探討—以高雄市為例，土木防災與環境永續研討會論文集，第 315-320 頁，高雄。
- 曹鼎志、黃全謐、鐘啟榮、黃效禹、鄭耕秉 (2020) 以數值模擬探討防砂壩之土石流減災成效 - 以屏東老佛為例，第 18 屆大地工程學術研討會，屏東。
- 黃全謐、許志豪、曹鼎志 (2018) 以不同數值模式進行土石流情境模擬之分析與比較，中興工程，第 141 期，第 45-55 頁。
- 詹錢登 (2000) 土石流概論，科技圖書，台北。
- Bernard, M., Boreggio, M., Degetto, M., and Gregoretti, C. (2019) Model-based Approach for Design and Performance Evaluation of Works Controlling Stony Debris Flows with an Application to a case Study at Rovina di Cancia (Venetian Dolomites, Northeast Italy), Science of The Total Environment, 688, pp. 1373-1388.
- Carranza, E. J. M., and Castro, O. T. (2006) Predicting Lahar-Inundation Zones: Case Study in West Mount Pinatubo, Philippines, Natural Hazards, 37, pp. 331-372.
- Cuomo, S., Moretti, S., and Aversa, S. (2019) Effects of Artificial Barriers on the Propagation of Debris Avalanches, Landslides, 16, pp. 1077-1087.
- Frank, F., McArdell, B. W., Huggel, C., and Vieli, A. (2015) The Importance of Entrainment and Bulking on Debris Flow Runout Modeling: Examples from the Swiss Alps, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 15, pp. 2569-2583.
- Hsu, C. H., and Tsao, T. C. (2014) The Influence of Velocity on Vulnerability of Building Structure to Debris Flow, Second International Conference on Vulnerability and Risk Analysis and Management (ICVRAM) and the Sixth International Symposium on Uncertainty, Modeling, and Analysis (ISUMA), Liverpool, UK, pp. 1095-1104.
- Hussin, H. Y., Quan Luna, B., van Westen, C. J., Christen, M., Malet, J. P., and van Asch, Th. W. J. (2012) Parameterization of a Numerical 2-D Debris Flow Model with Entrainment: a Case Study of the Faucon Catchment, Southern French Alps, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, pp. 3075-3090.
- Nakatani, K., Okuyama, Y., Hasegawa, Y., Satofuka, Y., and Mizuyama, T. (2013) Influence of Housing and Urban Development on Debris Flow Flooding and Deposition, Journal of Mountain Science, Vol. 10, Issue 2, pp. 273-280.
- RAMMS User Manual v1.7.0 : Debris Flow.
- Salm, B. (1993) Flow, Flow Transition and Runout Distances of Flowing Avalanches, Ann. Glaciol., 18, pp. 221-226.
- Schraml, K., Thomschitz, B., McArdell, B. W., Graf, C., and Kaitna, R. (2015) Modeling Debris-Flow Runout Patterns on Two Alpine Fans with Different Dynamic Simulation Models, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 15, pp. 1483-1492.
- Takahashi, T. (1980) Debris Flow on Prismatic Open Channel, J. Hydraulics Div. ASCE, 106, No.HY3, pp. 381-396.
- Takebayashi, H., and Fujita, M. (2020) Numerical Simulation of a Debris Flow on the Basis of A Two-Dimensional Continuum Body Model, Geosciences, 10, 45, pp. 45-64.
- Tsao, T. C., Hsu, C. H., Yin, H. Y., and Cheng, K. P. (2019) Debris-Flow Building Damage Level and Vulnerability Curve - A Case Study of a 2015 Typhoon Event in Northern Taiwan, In: J.W. Kean et al. (eds.) : Debris-flow hazards mitigation: mechanics, monitoring, modeling, and assessment; Proceedings of the Seventh International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, Golden, Colorado, USA, pp. 887-894.
- Voellmy, A. (1995) On the Destructive Force of Avalanches, SLF, Davos, Switzerland.



* 花東線鐵路月美段高架橋
縱橫四界的願景擘劃者

花東線鐵路電氣化關山~月美間高架橋座落於台9線旁的花東縱谷，由簡潔樞梁結構與綿延秀麗山脈及自然田園風光，打造出令人印象深刻的田園鐵道景觀，已於2014年6月正式營運通車。

鐵道建設工程

中興團隊專業服務

水利、大地、電力、結構、建築、軌道、交通、系統
機械、環境、海岸及港灣、都市設計、工業城鄉開發
園區規劃等之規劃、設計與施工監造管理

聯絡資訊

10570 臺北市松山區南京東路五段171號
電話: (02) 2769-8388 傳真: (02) 2763-4555
E-mail: sinotech@sinotech.com.tw
<https://www.sinotech.com.tw>



正派經營，品質保證，追求卓越，創新突破

 中興工程顧問股份有限公司
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, LTD.



南迴鐵路電氣化之工程挑戰

高贈智 * 李怡德 ** 李民政 *** 彭家德 **** 謝立德 *****

摘要

臺灣鐵路電氣化建設始於民國 60 年行政院十大建設，民國 68 年 6 月完成西部縱貫線鐵路電氣化工程，率先提供民眾城際間的快捷電化交通。其後，政府陸續完成各路線之電氣化工程，而南迴鐵路枋寮至臺東（南迴線）為臺灣環島鐵路電氣網之最後一哩路。

南迴線自民國 80 年通車以來，沿線橋梁、隧道、邊坡保護設施多有劣化，為提昇路線防災性，南迴計畫先針對沿線結構設施進行安全評估及分級，並依分級結果規劃補強順序，之後於原線進行電氣化作業。在此期間，亦同時改善南迴線沿線車站、平交道及機電設備等相關設施，並針對無法原線電氣化之區間，例如臺東多良路段及利嘉溪橋則進行局部改線，以符合電氣化需求。本文主要針對南迴鐵路電氣化面臨之工程挑戰及精進作為進行說明。

關鍵字：南迴鐵路、鐵路電氣化、原線電氣化、橋梁補強、隧道補強、邊坡補強

一、前言

臺灣鐵路電氣化建設始於民國 60 年 10 月行政院核定列入國家十大建設，民國 68 年 6 月完成西部縱貫線鐵路電氣化工程，其後陸續完成高雄至屏東（民國 85 年）、八堵至羅東（民國 89 年）、羅東至花蓮（民國 92、93 年）、花蓮至臺東（民國 103 年）、屏東至潮州（民國 104 年）、潮州至枋寮（民國 108 年）之電氣化工程（詳圖 1）。緣此，南迴鐵路枋寮至臺東（南迴線）為臺灣環島鐵路電氣網之最後一哩路，對臺灣鐵路之發展極具特殊意義。

南迴鐵路屬臺灣十二項重大建設工程，於民國 66 年宣布興建，民國 69 年 7 月成立南迴鐵路工程處後正式開工，後於民國 73 年 9 月納入十四項重要建設續辦。南迴鐵路推行期間歷經諸多困

難，在全體人員辛勤努力下，於民國 80 年 12 月 16 日全線通車，民國 81 年 10 月移交臺灣鐵路管理局正式營運。



圖 1 臺灣鐵路電氣化歷程

* 中興工程顧問公司大地工程部工程師
 ** 中興工程顧問公司大地工程部技術經理
 *** 中興工程顧問公司大地工程部資深協理
 **** 交通部鐵道局副總工程司
 ***** 交通部鐵道局工程管理組組長

而為進一步達成南迴鐵路電化通車之目標，行政院於民國 102 年 6 月成立「臺鐵南迴鐵路臺東潮州段電氣化工程建設計畫（簡稱南迴計畫）」，並交由交通部鐵道局執行。南迴計畫路線總長約 123.4 公里，包括潮州至枋寮段（長約 25.2 公里）及枋寮至臺東段（長約 98.2 公里），全線已於民國 109 年 12 月完成電氣化通車，總經費為新臺幣 276.13 億元。中興工程顧問公司（簡稱中興公司）承接枋寮至臺東段之橋涵、隧道及邊坡安全評估及補強設計。

本文主要探討南迴鐵路枋寮至臺東段之電氣化工程（簡稱本工程），該路段除中央號誌站至古莊站間 16.8 公里為既有雙軌外，其餘為單軌路段（詳圖 2）。

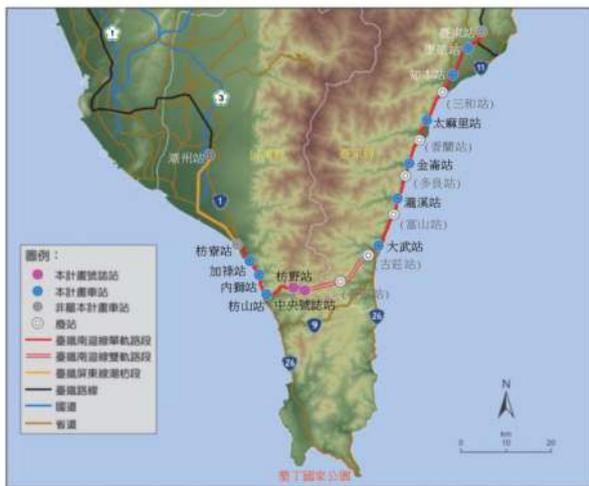


圖 2 南迴線鐵路電氣化工程路線示意圖

本工程除配合電氣化需求，針對沿線各車站月棚、月台與平交道等處進行改善並增設一般機電設備外，並就臺東機務分段增設系統機電與基地設備工程。另為提昇路線抗災性，亦一併改善南迴線沿線軌道、橋涵、隧道、路基與邊坡擋土等既有構造設施。

南迴計畫完成後，可串起臺鐵環島鐵路電氣

化路網，縮短南迴鐵路行車時間，提供快捷交通服務，促進東部觀光。而所採電化列車除可改善沿線及車內空氣品質，更可減少碳排放量，具節能減碳效益。此外，列車動力一元化後之車種將可予以簡化，並提昇列車調度靈活性（詳圖 3）。



圖 3 南迴計畫目標

二、橋梁、隧道及邊坡擋土設施之安全檢測、評估與補強

本工程總長約 98.2 公里，鐵路依山傍海而行，沿線設置多座隧道及橋梁，包含橋涵 170 座（總長 9.1 公里）、隧道 42 座（總長 40.8 公里）及邊坡 164 處（總長 48.3 公里）。

考量南迴線自民國 80 年通車至今已逾 20 餘年，沿線橋梁、隧道、邊坡擋土設施多有劣化，故計畫執行之初即先針對沿線既有結構設施進行安全評估並予以分級，據此規劃補強順序，俾確保原線電氣化之營運安全。

（一）橋梁安全評估與補強措施

依橋梁檢測結果顯示，南迴線沿線橋涵設施普遍有混凝土剝落、裂縫、鋼筋外露銹蝕、欄杆損壞及基礎裸露等問題（詳圖 4）。



圖 4 加津林橋橋墩混凝土剝落及鋼筋銹蝕情形

為確保南迴線橋涵功能符合鐵路電氣化需求，茲配合目視評估與各項檢測結果，並依據下列基準進行橋涵承載能力、耐震能力及耐洪能力分析，擬定合適之維修補強對策（詳表 1）。

1. 承載能力：以 93 年版鐵路橋梁設計規範為基準，確保橋涵上部結構能承受 KS-18 列車載重。
2. 耐震能力：以 95 年版鐵路橋梁耐震設計規範為基準，使橋涵結構可承受 5 級地震。
3. 耐洪能力：以河川計畫治理洪水位為基準，依橋基沖刷深度進行補強，以提升橋梁耐洪及基礎耐沖刷能力。

表 1 橋梁維修補強對策

橋梁異狀	可選用對策
一般性異狀	混凝土剝落、蜂窩、裂縫修復、欄杆更新
承載能力不足	梁構件鋼板 / 碳纖維貼片補強、箱涵版 / 牆構件補強
橋墩（台）耐震能力不足	橋墩（台）混凝土 / 鋼板包覆補強
基礎耐震或耐洪能力不足	拋石保護、擴展基礎加大、沉箱基礎補樁
支承剪力及防落長度不足	增設混凝土 / 鋼板止震塊 / 增設防落長度裝置
近海橋涵鹽害	距海岸 300m 內之橋梁，進行混凝土表面塗料保護

針對利嘉溪橋，因既有沉箱基礎裸露嚴重（詳圖 5），施工風險較高，復以未來該橋存在雙軌化需求，故改於既有橋梁之上游側新建一雙軌橋梁，進行局部改線（詳后說明）。



圖 5 利嘉溪橋沉箱基礎裸露情形

（二）隧道安全評估與補強措施

依隧道檢測結果顯示，南迴線沿線隧道多有滲漏水、混凝土剝落、裂縫、鋼筋外露銹蝕等問題（詳圖 6），需進行必要之補強。

為確保電氣化之路線營運安全，本工程所設定之隧道補強目標，係將原本評定為 A、B 級（須立即 / 或儘早採取處理對策）之隧道區段，全面提升至 C 級（須定期檢視並擇期實施處理對策）以上，另針對可能影響電化營運之區段進行重點補強。



圖 6 金崙隧道內滲漏水情形

本工程之隧道安全評估作業，係汲取日本鐵路隧道維護管理作法，並融合國內最新之隧道異狀肇因診斷概念進行之。首先，利用襯砌影像掃描建立全線隧道襯砌表面影像（詳圖 7），再交由隧道工程師進行：1. 異狀判釋；2. 異狀展開圖繪製；及 3. 各項安全檢測項目施作位置之規劃。

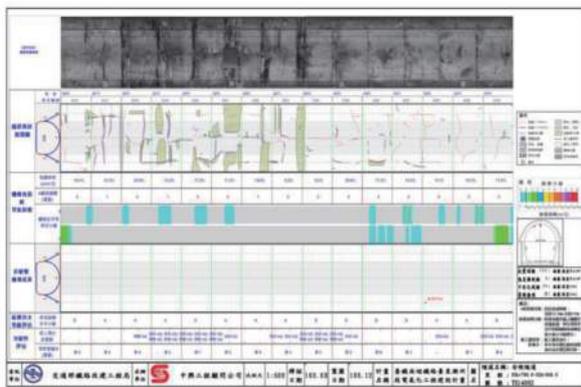


圖 7 安朔隧道襯砌異狀判釋評估成果展開圖

其次，由工程師攜帶異狀展開圖至現場進行目視查核比對，同時進行襯砌剝落判定與各項安全檢測（如史密特錘試驗與鑽心抗壓試驗等），據以進行外力肇因診斷與隧道安全等級評估，並提出隧道監測與維修補強對策（詳表 2）。

表 2 隧道維修補強對策

隧道異狀		可選用對策
功能相關	淨空不足	降道及調整線形；改線
	滲漏水	襯砌裂縫灌漿、止水灌漿 導排水措施、電力設備保護板
結構相關	剝落	局部剝落填補、碳纖維貼片補強
	裂縫	襯砌裂縫補強灌漿、岩栓補強
	其他	回填灌漿、襯砌鋼筋外露處理、 底板補強處理

依本工程之隧道安全評估結果顯示，屬 A、B 級之隧道區段總長約 15.4 公里（佔比約 38%），其餘則屬 C、D 級隧道（佔比約 62%）。其中，多良一號隧道之圍岩自營運通車以來逐年弱化，致使隧道襯砌承受過大岩壓而開裂剪壞，現場雖加設岩栓及鋼支保等補強措施予以加固（詳圖 8），然襯砌異狀仍持續惡化，此顯示隧道圍岩仍持續緩慢弱化，為後續隧道營運之潛在威脅。另經量測，加固後之多良一號隧道淨空縮減，已無法滿足電化空間需求。緣此，在不影響既有鐵路營運，並確保未來電化通車營運安全之考量下，改於既有隧道之海側辦理局部改線（詳后說明）。



圖 8 多良一號隧道鋼肋補強及淨空不足情形

（三）邊坡安全評估與補強措施

依邊坡檢測結果顯示，南迴線部分邊坡及隧道洞口有蝕溝土砂入侵軌道疑慮（詳圖 9），擋土設施則有擋土牆開裂、鋼筋外露銹蝕等問題，而地錨邊坡亦有地錨設施損害及預力損失情況（詳圖 10），需進行必要之補強。

本工程所設定之邊坡補強目標，係將原本評定為 A、B 級（有不穩定徵兆，需加強監測及巡查並進行穩定狀態評估及採取必要之修復或補強措施）之邊坡區段，全面提升至 C 級（須定期巡查或視需要進行監測或修復措施）以上，俾確保

邊坡穩定性。

依據目視檢測評估與各項非破壞性檢測結果顯示，本工程屬 A、B 級之邊坡區段共 64 處（佔比約 39%），其餘 C、D 級邊坡佔比約 61%。



圖 9 大武二號隧道北口蝕溝保護設施



圖 10 南迴線地錨邊坡異狀

經檢視，南迴線沿線 47 處地錨邊坡共設置 7,403 支地錨，本工程針對 736 支地錨進行鑿開檢視（含內視鏡檢視），並選定其中 570 支地錨進行揚起試驗，相關檢測及試驗結果係繪製於地錨展開圖（詳圖 11），並據此進行地錨邊坡之評級。

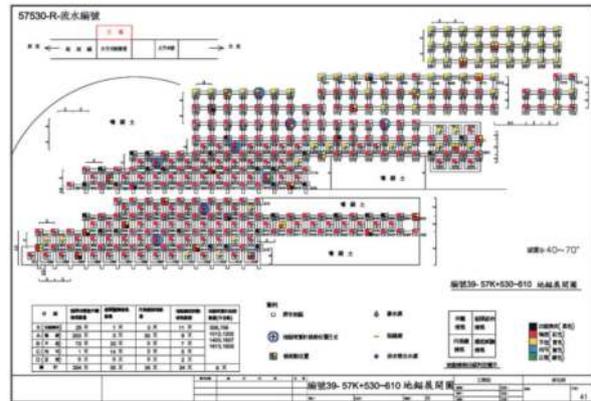


圖 11 南迴線 K57+530~610 邊坡地錨展開圖

本工程依據現場邊坡檢測及試驗結果進行評估，並據以擬定維修補強對策（詳表 3）。其中，富山站（廢站）邊坡為本工程重點補強區段，其擋土設施於營運通車後即持續產生開裂等異狀，地錨預力亦持續損失，故增設系統性地錨以確保邊坡穩定；補強後之情形請參閱圖 12。

表 3 邊坡維修補強對策工法

邊坡異狀	可選用對策工法
隧道洞口落石	攔石柵、防坍架
土砂入侵鐵軌	攔石柵、防坍架
地錨護坡劣化	增設地錨、地錨防蝕處理、RC 面 / 裂縫修補、孔洞回填夯實
蝕溝土石入侵	排水設施、導流設施
枋山溪沖刷	基樁式擋土牆
邊坡其他異狀	擋土牆、地錨、岩栓、土釘、格梁護坡、橫向排水管



圖 12 富山邊坡補強後情形

三、多良路段局部改線

本工程多良一號隧道位於多良站（廢站）南側，隧道長 1,641 公尺，所處地層之主要岩性為板岩及硬頁岩（詳圖 13）。該隧道所處區位受板塊擠壓之強大應力影響，形成以褶皺為主，並伴隨斷層與剪裂帶之複雜特徵構造。經調查，該隧道位於一大複背斜構造的東翼，此背斜構造的軸部和中央山脈嶺線位置一致，褶皺面向東傾斜。

多良一號隧道為一單軌馬蹄形斷面之鐵路隧道（詳圖 14），路基以上內空高度為 6.01 公尺，軌面上淨高 5.5 公尺，起拱線淨寬 4.96 公尺，襯砌厚度 50 公分，採傳統鋼支保支撐工法施築。

多良一號隧道於營運通車後，其混凝土襯砌持續發生異狀，甚至錯動開裂，臺鐵局曾於民國 95 年針對襯砌進行鋼板補強，後於民國 98 年增設鋼支保與鋼襯板（詳圖 15），並進行固結灌漿補強。

然於民國 103 年進行檢測時發現，當初所增設之鋼支保有許多處挫曲變形（詳圖 15），顯示襯砌持續惡化。經檢討，多良一號隧道圍岩弱面發達致岩體破碎，其強度隨時間增長而持續弱化，致增加作用於隧道襯砌上之力量。加以該隧道係沿東海岸之邊坡設置，形狀屬馬蹄形斷面，其對於側向應力之抵抗能力較弱，故當外力過大時，隧道襯砌易產生縱向水平裂縫，造成隧道持續變形。



圖 13 多良改線段位置及區域地質圖



圖 15 多良一號隧道鋼支保挫曲變形情形

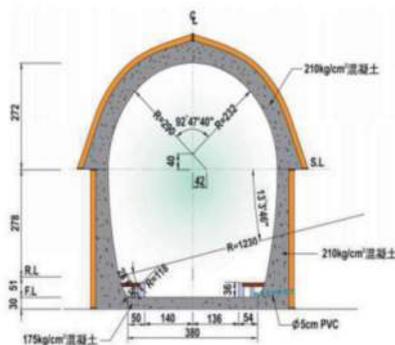


圖 14 多良一號隧道標準斷面

經整體評估，多良一號襯砌異狀屬 A、B 級之區段約佔 45%，加以受隧道襯砌加固工程影響，隧道淨空嚴重不足，無法滿足電氣化需求，故經多次討論，於既有隧道之海側辦理局部改線（以下簡稱多良改線段）。

多良改線段之路線總長約 2.9 公里，主要結構設施為兩座橋梁（總長 2.2 公里，詳圖 16），以及一座短隧道（長 152 公尺，詳圖 17）。其中橋梁結構採三跨連續梁（跨度以 33、35 公尺為主）以降低梁深，避免開挖山壁，基礎部份則採用井式基礎配合竹削工法進行施工，藉以避免大規模開挖並兼做擋土結構（詳圖 18）。至於橋梁及隧道段之軌道型式，則採用彈性基版無道碴軌道（詳圖 17），以利後續營管作業。

多良改線段已於民國 109 年 5 月 28 日切換通

車，本路段緊鄰台9線南迴公路，乘客向外望去即為浩瀚的太平洋，加以鐵路與公路像巨龍般穿梭在山海之間，景色優美，故自通車以來，榮獲全臺風景最漂亮鐵道之美譽（詳圖 19）。



圖 16 多良改線段橋梁工程



圖 19 多良改線段切換通車情形

四、新建雙軌利嘉溪橋

臺鐵利嘉溪橋位於臺東縣臺東市，橋梁總長 418 公尺，於知本站與康樂站間跨越利嘉溪（共 20 跨、跨距 19.8 公尺）。利嘉溪為臺東縣管之沖刷型河川，致使原橋梁基礎裸露，嚴重處甚至逾 10 公尺，臺鐵局業以床工保護，惟難顯長期保護成效（詳圖 5 及圖 20）。



圖 17 新多良一號隧道及無道碴軌道



圖 20 利嘉溪橋基礎裸露及下游貨櫃固床工



圖 18 多良改線段井式基礎竹削擋土結構

經中興公司橋梁安全檢測及評估結果，利嘉溪橋沉箱基礎需以補樁方式進行補強，以符規範安全要求。惟考量補強經費甚鉅，加以未來花東雙軌需求，故為避免重複投資，於民國 105 年 11 月決議局部改線，另建雙軌橋梁。

本改線路段總長約 1.5 公里（加計前後路堤段），其中新建利嘉溪橋長 455 公尺，以 40.5 公尺跨距（共 10 跨）跨越利嘉溪（詳圖 21）。

因受兩側堤防高度及鄰近平交道限制，該橋採下路式 U 型梁橋型（詳圖 22）。另考量利嘉溪屬沖刷型河川，故基礎型式採樁基礎。至於軌道

型式，則採用較易維管之彈性基鈹無道碴軌道，並採用加勁軌作為界面緩衝處理（詳圖 23），俾防止鐵路道床之垂向勁度劇烈變化，確保乘客舒適度及行車安全。新建利嘉溪橋已於民國 110 年 3 月 25 日切換通車（詳圖 24）；目前通行單軌，並預留未來雙軌運行空間。

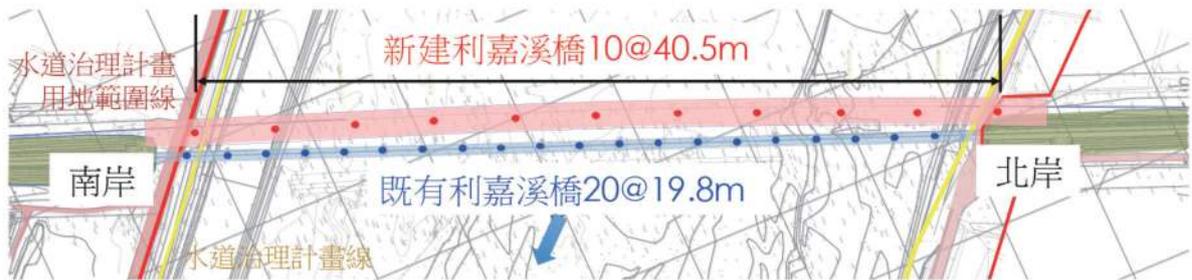


圖 21 新建利嘉溪雙軌橋平面配置圖

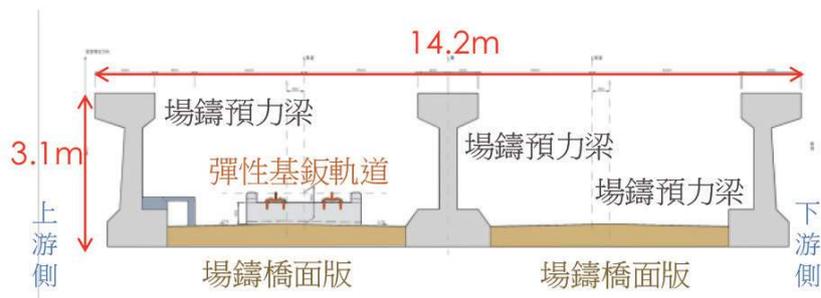


圖 22 新建利嘉溪雙軌橋 U 型梁



圖 23 道碴軌道與無道碴軌道間採用加勁軌



圖 24 新建利嘉溪雙軌橋通車情形

五、工程挑戰及創新精進作為

(一) 南迴線主線標

南迴線自枋寮站至臺東站長達 98.2 公里，幅員遼闊，故基於工程特性、區域性、工程規模、工程界面整合等考量，茲以金崙站及菩安站為介，將主線標工程（含一般機電）分成三標執行（詳圖 25），主要工程內容詳表 4，其他相關重要資訊詳表 5。



圖 25 南迴線主線標分標圖

表 4 南迴線主線標主要工程內容

標名	C711標枋寮菩安段工程	C712A標菩安金崙段工程	C712B標金崙臺東段工程
項目	枋寮(不含)-菩安	菩安-金崙	金崙-臺東(不含)
軌道工程	◆隧道降道 枋山站新增副軌	◆隧道降道 多良改線段無道碴軌道 瀧溪站調整副軌	◆隧道降道 利嘉溪橋無道碴軌道 康樂站調整副軌
隧道工程	◆襯砌補強、導排水	◆襯砌補強、導排水	◆襯砌補強、導排水
邊坡工程	◆增設地錨(第一階地錨) 排水管、防坍架、岩栓格 梁護坡、攔石柵、基樁式 擋土牆等	◆增設地錨(第一階地錨) 排水管、防坍架、岩栓格 梁護坡、攔石柵等	◆增設地錨、排水管 防坍架岩栓格梁護坡 攔石柵等
橋梁工程	◆增設防落設施 上、下部結構及基礎改善 保護塗漆	◆增設防落設施 上、下部結構及基礎改善 保護塗漆	◆增設防落設施 上、下部結構及基礎改善 保護塗漆
建築工程	◆月台改(新)建 雨棚新建及改建 月台端末斜坡設施改善 枋寮電力分駐所新建 ◆系統機電機房新建	◆月台改建 雨棚新建及改建 月台端末斜坡設施改善 ◆大武電力分駐所新建 ◆系統機電機房新建	◆月台改建 雨棚新建及改建 月台端末斜坡設施改善 ◆系統機電機房新建
其他工程	◆附屬一般機電工程 ◆站房及月台電梯 ◆系統機電配合工程	◆多良路設局部改線工程 ◆附屬一般機電工程 ◆站房及月台電梯 ◆系統機電配合工程	◆新建利嘉溪橋工程 ◆附屬一般機電工程 ◆站房及月台電梯 ◆系統機電配合工程

表 5 主線標相關重要資訊

	C711 標	C712A 標	C712B 標
決標金額	24.10 億	51.57 億	17.39 億
開工日期	民國 106.08.21	民國 106.05.16	民國 107.01.26
執行單位	鐵道局 南工處	鐵道局 東工處	鐵道局 東工處
設計單位	中興工程 顧問公司	中興工程 顧問公司	中興工程 顧問公司
監造單位	美商同棧 顧問公司	美商同棧 顧問公司	美商同棧 顧問公司
承攬廠商	利德工程	根基營造	榮金營造

(二) 工程挑戰及創新精進作為

本工程為國內首次於既有鐵路營運路線上進行大規模加固補強之工程，加以路線超過 80% 為單軌路段，大幅提升工程困難度。故確保鐵路營運安全，並順利達成電氣化任務，本工程採取下列創新精進作為：

1. 廠商座談、廣徵意見：有鑑於南迴線工區位處偏遠，招商不易，遂舉辦多場廠商說明會及座談會，廣徵廠商意見（詳圖 26），並據此調整工程內容，終順利完成發包作業。



圖 26 廠商座談會現場照片

2. 鄰軌作業、夜間施工：針對隧道補強、隧道降道、第一階邊坡地錨補強及防坍架設施等高風險鄰軌作業（詳圖 27），限定於夜間封鎖時段施工，並於翌日通車前恢復原狀。



(a)第一階地錨 (b)隧道補強

圖 27 南迴線夜間施工作業

3. 減班接駁、增加工時：為增加夜間工時，提升施工安全，鐵道局積極與臺鐵局、地方政府及公車業者協商，終能減少夜間列車班次，改採公路替運接駁（詳圖 28）。



圖 28 臺鐵減班暨公路替運接駁宣傳摺頁

4. 鐵路運輸、減少衝擊：為減少施工道路之開闢，減輕環境衝擊，鐵道局特增購 7 輛工程維修車，並增派司機員及指揮員協助載運施工所需機具及材料（詳圖 29），另協調臺鐵局將南迴線各車站作為人機料集散場地，並針對偏遠山區增設通訊設備以利人員通訊。



圖 29 鐵道局添購之工程維修車

5. 友善環境、生態永續：在工程施工之同時，本工程亦兼顧環境生態保護，包括規劃設置鋼便橋（詳圖 30）以運輸大型施工機具（無法以鐵路運輸），避免開挖邊坡，而完工後亦可回收再利用。此外，本工程於水泥中添加高爐石粉與飛灰以降低水泥用量，並採用可重複使用之模組化模板支撐系統新建橋梁，而枋寮及大武電力分駐所亦獲綠建築標章肯定。



圖 30 枋山溪施工鋼棧橋

6. 即時監控、強化管理：考量本工程大部分路段位處偏遠且公路無法到達之處，故為提升施工安全管理之效能，係規劃建置工地即時監控（詳圖 31），管理單位可經由手機 APP 即時掌握現況，強化預警功能。



圖 31 即時監控系統影像

7. 雨棚造型、融合觀光：為提供旅客不同視覺及使用體驗，本工程依照旅運人次及觀光需求等因素，選定太麻里站、大武站及金崙站等三車站之月台雨棚，加入金針花、山岳、海浪等環境意象建置膜構造雨棚，其餘車站則採用原住民文化意象樣式，建置斜屋頂木構造雨棚（詳圖 32）。



圖 32 南迴線車站雨棚造型

針對本工程所採用之創新精進作為，獲得各界好評，其中主線標（C711、C712A、C712B）皆獲交通部公共工程優良工程獎（詳下圖，中興公司為設計單位），並榮獲中華民國大地工程學會 110 年度傑出工程獎。



圖 33 交通部公共工程優良工程獎

六、結語

南迴鐵路枋寮至臺東段為環島鐵路電氣網之最後一哩路，南迴計畫於民國 102 年開始推行，為國內首次大規模於既有鐵路營運路線上進行結構加固補強之原線電氣化工程，且超過 80% 為單軌路段，致使多項鄰軌工程須於鐵路夜間封鎖時段施工，大幅提升工程困難度。

為確保原線電氣化後之鐵路營運安全，中興公司於民國 103 年度起針對南迴線沿線 98.2 公里橋梁、隧道及邊坡擋土設施，除蒐集臺鐵局提供之高風險路段資訊，並進一步進行安全檢測、分析及評估工作，據以辦理補強設計工作。經評估，南迴線除多良一號隧道及利嘉溪橋兩路段進行局部改線外，其餘路段採原線加固補強方式進行。

針對南迴計畫之施工規劃，中興公司於設計階段即進行風險評估作業，掌握高風險工項，並在鐵道局之帶領下，與臺鐵局運、工、機、電等相關單位、地方政府及公車業者進行多次協商，終能增購工程維修車、增派司機員及指揮員、減少夜間列車班次、實施客運替運接駁，促成以鐵路運輸大宗物料、增加夜間施工時間等重大配套措施，大幅減輕環境衝擊，並減少施工風險。

南迴線鐵路電氣化工程自開工以來，無重大工安意外發生、施工進度較預定超前、經費管控得宜（無須辦理建設計畫修正），在大型公共建設中實屬難得。在各單位的努力之下，於民國 109 年 12 月 20 日假臺東車站舉行南迴鐵路電氣化通車典禮（詳圖 34、圖 35），完成環島鐵路電氣化最後一哩路，為臺灣鐵路工程建立一個新的里程碑。



圖 34 南迴鐵路電氣化工程通車典禮 (1/2)



圖 35 南迴鐵路電氣化工程通車典禮 (2/2)

料與技術指導，並協助各執行界面之協調，使本工程得以順利完成，特此謝誌。

參考文獻

- 臺灣省政府交通處南迴鐵路工程處 (1992) 國家十四項重要建設－南迴鐵路工程工程輯要
- 交通部鐵路改建工程局 (2013) 臺鐵南迴鐵路臺東潮州段電氣化工程建設計畫
- 交通部鐵路改建工程局 (2013) 臺鐵南迴鐵路臺東潮州段電氣化工程－南迴線鐵路電氣化綜合規劃報告書
- 謝立德、許志豪、曹鼎志、黃春銘、李璟芳、李怡德 (2015) 應用遙測及地質災害資訊劃設南迴線鐵路邊坡易致災路段之初探，第十六屆大地工程學術研討會 (Geotech2015)
- 謝立德、王元度、張博翔、李怡德 (2015) 南迴線鐵路隧道之安全檢測與補強，第十四屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會
- 交通部鐵路改建工程局 (2016) 臺鐵南迴鐵路臺東潮州段電氣化工程－公共工程計畫經費審議報告書
- 李怡德、李民政、高贈智 (2017) 南迴鐵路電氣化工程之推動與特色，中興工程季刊第 137 期
- Yuan-Tu Wang, Po-Hsiang Chang, Yi-Te Lee, and Min-Chen Lee (2019) Safety inspection and reinforcement of South-link line railway tunnels, Asian Region Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- 交通部鐵道局 (2020) 臺鐵南迴鐵路臺東潮州段電氣化工程建設計畫－南迴線土建及一般機電工程設計暨配合工作技術服務工程設計報告
- 交通部鐵道局網頁及臉書粉絲頁

謝誌

南迴鐵路自民國 80 年通車以來，相關竣工圖說多有遺漏，當年執行人員多已休退，計畫執行初期更顯困難。惟承蒙鐵道局、東工處、南工處及臺鐵局等單位之指導，及協助提供工程參考資

新書推介

(一) 廢污水生物急毒性檢測與應用評析

許國恩、林宜璇、吳佳娟、
烏春梅、林淑滿等 編著

2020年11月初版

(二) 台灣地區巨積混凝土配比與熱學特性之研究

詹穎雯、陳育聖、邱暉仁、
何季軒等 編著

2020年7月初版

工程碳管理於基樁工程排碳評析及減碳策略應用

許珮蒨* 王寧沂** 鄭維祐*** 周武雄****

摘要

近年來氣候變遷議題已成為全球關注焦點，我國自 2012 年起推動公共工程碳管理工作，多項工程已陸續完工並由實際盤查產出排碳資訊，本文以完成整體工程或基樁工程之蘇花改、西濱南、國 4 及國 5 工程標案為例，並以橋梁樁基礎之全套管基樁工程為主題進行排碳量分析及減碳評估。依據分析結果，基樁單位長度排碳量隨直徑增加而上升，為 0.55~1.65 tCO₂e/m，而單位體積排碳量則隨直徑增加而減少，為 0.44~0.70 tCO₂e/m³；排碳源以工程材料為主要來源，各工程之混凝土與鋼筋之排碳占比合計約 90%，另機具排碳占比介於 3%~10%，各工程之差異與地質條件及機具操作有關，又以岩體地質之機具能耗明顯高於粉砂土地質。

基樁工程應以工程材料為首要減碳重點，其中以飛灰及爐石粉替代水泥材料之減碳效益最大，減碳比例約 21%~42%；而鋼筋箍筋工法及工區場電之減碳比例較低，但實為工區可掌握之排碳源，仍可於工程施作時推動。建議相關工程可參採歐盟綠色採購準則，由整體生命週期之角度，自規劃設計階段開始，延續至施工、維護及營運管理階段，考量混凝土配比、鋼筋工法與配置、供應商選用等方式，以落實工程減碳策略與因應未來國家減碳目標。

關鍵字：碳管理、全套管基樁工程、生命週期、節能減碳

一、前言

我國公共工程委員會（以下簡稱工程會）自 2012 年起推動公共工程碳管理工作，於 2013 年邀集各部會提出 20 件試辦工程，規劃執行各項工程設計階段之碳排放估算，與施工階段之碳盤查作業，其中交通部提出 3 件道路工程，包含台 9 線蘇花公路改善工程（以下簡稱蘇花改工程）、國道 5 號頭城交流道增設上下匝道改善工程（以

下簡稱國 5 工程）及國道 4 號臺中環線豐原潭子段工程（以下簡稱國 4 工程）。同時公路總局亦推動多項工程碳管理案例，執行施工期間碳盤查作業，包含西濱快速公路八棟寮至九塊厝新建工程（以下簡稱西濱南工程）、淡江大橋工程、台 9 線南迴公路安朔草埔段與金崙大鳥段等工程。

隨著前述各項工程陸續完工，工程碳盤查累積成果豐碩，除了解工程整體排碳量之外，亦產出多項工程主要構件的排碳資訊可供參考。其

* 中興工程顧問公司環境工程部計畫主任

** 環興科技公司水務工程部工程師

*** 前環興科技公司水務工程部工程師

**** 環興科技公司水務工程部技術經理

中，道路工程常見以全套管基樁作為橋梁下部結構或擋土支撐，目前國際上如瑞典 EPD® (The International EPD® System) 中僅有鋼樁及預鑄混凝土基樁成果，場鑄混凝土基樁之排碳資訊較為缺乏。

因此本文即以場鑄混凝土基樁為主體，以蘇花改、西濱南、國4及國5工程為案例，說明各工程案例之碳盤查範疇、橋梁樁基礎之全套管基樁工程（以下簡稱基樁工程或基樁）規格與數量，以及基樁工程資料蒐集成果、碳排放量、排碳特性及單位排碳量結果，最後彙整相關減碳措施與

效益，並提出減碳執行建議。

二、工程案例簡介及碳盤查範疇

蘇花改、西濱南、國4及國5工程之主要工程內容、規模、型式及工法等如表1所示，其中與基樁工程相關之工項主要為橋梁工程下部結構之樁基礎；另蘇花改與國4工程因規模較大，尚包含隧道工程、路堤路塹段以及排樁工程。本文係以橋梁工程樁基礎之全套管基樁工程為標的進行分析。

表1 工程案例簡介

工程案例	主要工程內容	長度 (km)	工程型式	工法
蘇花改 ^a	蘇澳東澳段 (A段)	橋梁 (5座)	4.4 下構：直接基礎 / 樁基礎 / 井基 上構：箱型梁 / 波鋼箱型梁	支撐先進 / 場鑄逐跨 / 場鑄懸臂
		隧道 (3座)	3.8 眼鏡型短隧道 / 長隧道	鑽炸及機械開挖
	南澳和平段 (B段)	橋梁 (6座)	4.0 下構：直接基礎 / 樁基礎 / 井基 上構：箱型梁 / 鋼箱梁 / 波鋼箱型梁	吊裝 / 場鑄逐跨 / 場鑄懸臂
		隧道 (3座)	13.1 長隧道	鑽炸及機械開挖
	和中大清水段 (C段)	橋梁 (2座)	0.2 下構：直接基礎 / 樁基礎 / 井基 上構：I型梁 / 鋼箱梁	吊裝 / 場鑄逐跨 / 場鑄懸臂
		隧道 (2座)	7.7 長隧道	鑽炸及機械開挖
西濱南 ^b	主線高架橋梁	7.397	下構：樁基礎 上構：箱型梁	場鑄逐跨 / 場鑄懸臂
	七股溪橋段	0.44	下構：樁基礎 上構：拱橋	場鑄懸吊
國4 ^c	橋梁 (6座)	5.1	下構：直接基礎 / 樁基礎 / 井基 上構：箱型梁 / 鋼箱梁 / 波鋼箱型梁	吊裝 / 場鑄逐跨 / 場鑄懸臂
	隧道 (3座)	3.8	長隧道	鑽炸及機械開挖
	路堤 / 路塹 (4處)	2	-	-
國5 ^d	穿越橋 (L1)	0.07	下構：樁基礎	場鑄逐跨
	穿越橋 (L2)	0.04	上構：箱型梁	

^a 台9線蘇花公路改善工程；

^b 西濱快速公路八棟寮至九塊厝新建工程；

^c 國道4號臺中環線豐原潭子段工程；

^d 國道5號頭城交流道增設上下匝道改善工程。

前述工程於施工期間執行全工程或特定標別之碳盤查工作，其碳盤查範疇如圖 1 所示，涵蓋工區及非工區，工區包含工程材料使用、運輸、能資源使用、碳匯變化及廢棄物處理，非工區則為施工管理單位之辦公室。



圖 1 工程碳盤查施工期間盤查範疇

三、基樁工程排碳量計算方法

(一) 系統邊界

本文就蘇花改、西濱南、國 4 及國 5 工程中，依已執行碳盤查標案之樁基礎全套管基樁工程為範疇，彙整各工程案例之盤查標別與基樁規模如表 2 所示，基樁直徑尺寸大多為 1.5 及 2.0m，僅西濱南工程之部分基樁尺寸為 1.0m，各盤查案例之基樁長度介於 7~55m。

表 2 工程案例盤查之基樁工程規模

工程	標別	基樁規模			位置
		直徑 (m)	長度 (m)	支數	
蘇花改	A1	2.0	20、25、	379	主線
	A3		30	179	
	C1A	1.5	22~35	54	
西濱南	A	1.0	20、27	30	橋台
		1.5	41~53	468	
	B	1.5	24~55	915	主線
C	21~47		706		
國 4	C713	2.0	7~12	85	主線
	C714		20~36	336	
國 5	E14	1.5	45	24	主線

備註：基樁型式皆為全套管基樁；不包含排樁；國 5 工程不含擋土牆基樁。

參考歐盟營建產品之產品類別規則 (Product Category Rules, PCR) EN15804 工程生命週期階段，分別為產品 (A1-A3)、建造 (A4-A5)、使用 (B1-B5 與結構物相關及 B6-B7 與操作相關) 及壽命終了 (C1-C4) 四階段。本文依此設定基樁工程系統邊界如圖 2 所示，包含產品及建造兩階段，即工程材料 (A1-A3)、材料運輸 (A4) 及機具能資源 (A5)。由實際盤查內容，工程材料使用項目包含混凝土、鋼筋、基樁測管、間隔器，另基樁施工過程使用之鋼套管及特密管由於可重複利用，屬於資本財而不納入系統邊界；材料運輸則包含前述工程材料之運輸；機具能資源使用為施工過程機具消耗之汽、柴油。

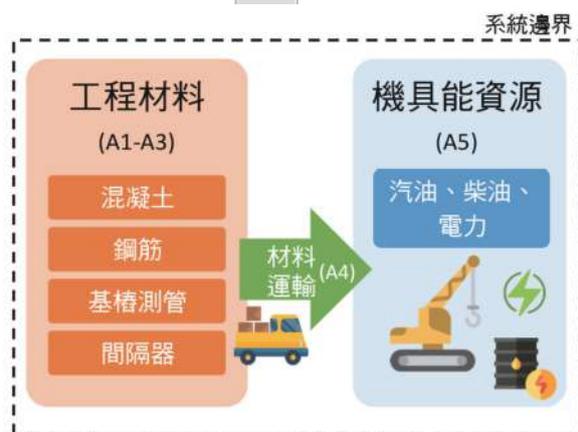


圖 2 基樁工程系統邊界

(二) 計算方法與排放係數

排碳量計算方法為排放係數法，即「排碳量 = 活動數據 × 排放係數」，活動數據項目同前節說明，排放係數來源如表 3 所示。

各工程皆有執行混凝土及鋼筋供應商盤查，產出本土化混凝土及鋼筋碳足跡排放係數，此兩項材料皆採用供應商盤查係數；PVC 測管及間隔器 (材質為 PVC) 則是參考商用軟體 Gabi 之 Gabi-PE 係數資料庫選用適當係數；材料運輸部

分之混凝土運輸係採用供應商盤查、調查成果或環保署係數平台之排放係數，其餘材料運輸則選用環保署係數平台或商用係數資料庫 Gabi-PE 之排放係數；機具能耗使用之汽、柴油及電力則是採用環保署係數平台所公布的最新係數進行計算。

表 3 排放係數來源

項目	排放係數來源
混凝土	各工程供應商盤查結果
鋼筋	各工程供應商盤查結果
PVC 測管	商用軟體係數資料庫 Gabi-PE
間隔器	商用軟體係數資料庫 Gabi-PE
材料運輸	各工程供應商盤查或調查結果、環保署係數平台、商用軟體係數資料庫 Gabi-PE
機具能資源	環保署係數平台

- 5 工程則使用 315 kgf/cm² 水中混凝土。
2. 竹節鋼筋：各標工程皆以施工圖設計量作為活動量計算之依據，該數量包含 5%~10% 損耗。
3. PVC 測管：各標工程依據基樁長度計算 PVC 測管使用數量，為活動量計算之依據。
4. 間隔器：僅蘇花改 C1A 標與國 4 工程依據使用量作為活動量計算之依據。
5. 材料運輸：依上述各項材料活動量配合盤查成果（預拌混凝土運輸）或運輸距離及運具規格，計算工程材料運輸排碳量。
6. 機具能耗：各工程皆有收集基樁工程施作期間之機具能耗量（機具種類包含搖管機、挖土機、吊車、電焊機及發電機，不含劣質混凝土打除能耗），再以基樁體積作為個別基樁機具能耗之分配依據。

（二）活動數據彙整

基樁工程之材料使用量彙整如表 4 所示，各項材料使用量與各工程之基樁規模有關，整體以西濱南工程使用之基樁材料量最大。另由於西濱南、蘇花改 A1 與 A3 標，以及國 5 工程，皆未包含基樁間隔器之材料使用資料，然經分析此部分排碳量占比低（未達 0.1%），不影響整體基樁工程之排碳量。

施工期間基樁工程之機具單位能耗與各工程施工廠商及主要地質條件如表 5。單位能耗以各工程施工機具總用油量（柴油）及理論基樁體積換算，各基樁工程單位體積能耗介於 4.9~17.2 L/m³。

由盤查結果顯示，基樁施作之機具能耗應與工程所在地的地質條件有關，西濱南與國 5 工程主要地質為粉土、細砂與黏土等，基樁單位體積能耗較低，介於 4.9~6.0 L/m³；蘇花改與國 4 工程皆為岩體地質，基樁單位體積能耗相對較高且差異性較大，介於 9.0~17.2 L/m³。

（三）功能單位

參考瑞典預鑄混凝土基樁環境宣告（Environmental Product Declarations, EPD）及營建產品與服務 PCR，設定基樁工程之功能單位為 1 m，包含產品與建造（含材料運輸及施工機具）階段。

此外，本文各工程之基樁直徑包含 1.0、1.5 及 2.0 m，為進行不同直徑尺寸之排碳量分析，亦同時以功能單位為 1 m³ 作為比較基礎。

四、基樁工程排碳量分析

（一）活動數據蒐集內容與方式

蘇花改、西濱南、國 4 及國 5 基樁工程之各項活動數據蒐集內容與方式，說明如下：

1. 混凝土：各工程皆以混凝土實際投入量（料單數量）作為活動量計算之依據，蘇花改與西濱南工程使用 210 kgf/cm² 水中混凝土，國 4 及國

表 4 基樁工程材料使用量

工程	鋼筋 (ton)	混凝土 (m ³)	PVC 測管 (m)	間隔器 (只)
蘇花改	5,909	52,572	61,092	3,792*
西濱南	24,608	180,446	386,750	-
國 4	4,046	35,009	35,800	18,487
國 5	252	2,149	4,320	-

* 僅包含蘇花改 C1A 標之使用量。

表 5 基樁工程機具單位能耗與地質

工程	標別	施工廠商	單位能耗 (L/m ³)	地質條件
蘇花改	A1	甲	17.2	板岩、粉砂質板岩與硬頁岩
	A3	甲	13.2	礫石、砂、泥、板岩與硬頁岩
	C1A	乙	9.8	崩積塊石與片麻岩
西濱南	A	甲	4.9	粉土、細砂與粘土
	B	甲	6.0	
	C	丙	5.2	
國 4	C713	甲	14.2	砂岩、泥岩與砂頁岩互層
	C714	丁	9.0	礫石、砂岩、泥岩與頁岩
國 5	E14	戊	5.9	細砂、沉泥質細砂與黏土

(三) 排碳量分析

依據前述各項活動數量及排放係數來源計算各基樁工程之排碳量，說明如後：

1. 單位長度排碳量 (表 6)

僅西濱南工程有直徑 1.0 m 之基樁，其單位排碳量最低為 0.55 tCO₂e/m；直徑 1.5 m 基樁部分，蘇花改、西濱南與國 5 之單位排碳量差異不大，介於 0.94~1.00 tCO₂e/m；而直徑 2.0 m 基樁單位長度排碳量最高，蘇花改為 1.37 及 1.48 tCO₂e/m，國 4 則較高為 1.50 及 1.65 tCO₂e/m。整體而言，基樁單位長度排碳量隨基樁直徑尺寸增加而上升。

2. 單位體積排碳量 (表 6)

基樁單位體積排碳量以西濱南直徑 1.0 m 最高為 0.70 tCO₂e/m³；其次為直徑 1.5 m 基樁，蘇花改與西濱南皆為 0.53 tCO₂e/m³，國 5 則略高為 0.56 tCO₂e/m³；最低為直徑 2.0 m 基樁，蘇花改為 0.44 與 0.47 tCO₂e/m³，國 4 亦較高為 0.48 與 0.53 tCO₂e/m³。整體與基樁單位長度排碳量趨勢不同，單位體積排碳量隨基樁直徑尺寸增加而下降。

表 6 基樁工程單位排碳量分析

工程	標別	直徑 (m)	長度* (m)	支數 (支)	排碳量 (tCO ₂ e)						單位排碳量		
					混凝土	鋼筋	PVC 測管	間隔器	機具	運輸	總計	tCO ₂ e/m**	tCO ₂ e/m ³
蘇花改	A1	2.0	20、25、	379	8,163	3,068	96	-	1,714	255	13,296	1.48	0.47
	A3	2.0	30	179	4,582	1,527	62	-	328	35	6,533	1.37	0.44
	C1A	1.5	22~35	54	899	391	23	0.30	90	6	1,409	0.94	0.53
西濱南	A	1.0	20、27	30	244	152	7	-	12	7	422	0.55	0.70
		1.5	41~53	468	14,341	4,478	196	-	672	389	20,076	0.96	0.54
	B	1.5	24~55	915	26,555	9,923	413	-	1,550	780	39,221	0.94	0.53
	C	1.5	21~47	706	19,231	6,998	347	-	966	870	28,412	0.94	0.53
國 4	C713	2.0	7~12	85	948	347	15	0.05	152	49	1,512	1.65	0.53
	C714	2.0	20~36	336	9,211	3,134	59	1.96	890	107	13,403	1.50	0.48
國 5	E14	1.5	20、45	12	735	242	16	-	43	43	1,078	1.00	0.56

備註：* 表列長度 (m) 為基樁規格，不含樁頭長度。** 單位長度排碳量為基樁長度。

3. 排碳源分析 (圖 3 及圖 4)

各項基樁排碳源之分析結果如圖 3 所示，以混凝土排碳量占比最高約 58%~69%，其次為鋼筋 22%~36% 及機具 3%~10%，PVC 測管、間隔器及運輸占比較低，皆不及 5%。

由前述結果可知，混凝土及鋼筋為基樁主要排碳來源（合計占比約 90%），比較不同直徑尺寸之單位混凝土及鋼筋排碳量，如圖 4 所示。混凝土部分，直徑 1.0 m 基樁之單位排碳量最高為 0.40 tCO₂e/m³，次之為直徑 1.5 m 基樁 0.34~0.39 tCO₂e/m³，最低為直徑 2.0 m 基樁 0.30~0.33 tCO₂e/m³；鋼筋部份仍以直徑 1.0 m 基樁之單位排碳量最高為 0.25 tCO₂e/m³，次之為直徑 1.5 m 基樁 0.13~0.15 tCO₂e/m³，最低為 2.0 m 基樁 0.11 tCO₂e/m³。顯示直徑規格愈大之基樁，單位混凝土與鋼筋之排碳量愈低，亦即單位體積之材料用量隨基樁直徑增加而減少。

機具之排碳源占比僅次於混凝土與鋼筋，主要受到各工程機具用油量影響，其中以蘇花改直徑 2.0 m 基樁機具排碳量占比 10% 最高，次之為國 4 直徑 2.0 m 機具排碳量占比 7%。

另相同直徑之基樁，於不同工程之排碳量亦具有差異。直徑 1.5 m 基樁部分，國 5 與西濱南工程基樁之混凝土單位排碳量較高，為 0.37 及 0.39 tCO₂e/m³，主要係受混凝土配比影響（如表 7 所示）。西濱南與國 5 使用之混凝土其飛灰及爐石粉替代率為 20~31%，明顯低於蘇花改 45% 之替代率，導致國 5 與西濱南之基樁混凝土排碳量較高；另直徑 2.0 m 基樁部分，則係因國 4 工程使用 315 I kgf/cm² 水中混凝土，混凝土強度高於蘇花改使用之 210 II kgf/cm² 水中混凝土，另部分基樁之飛灰及爐石粉替代率僅 40%，使得國 4 混凝土排碳量較高。

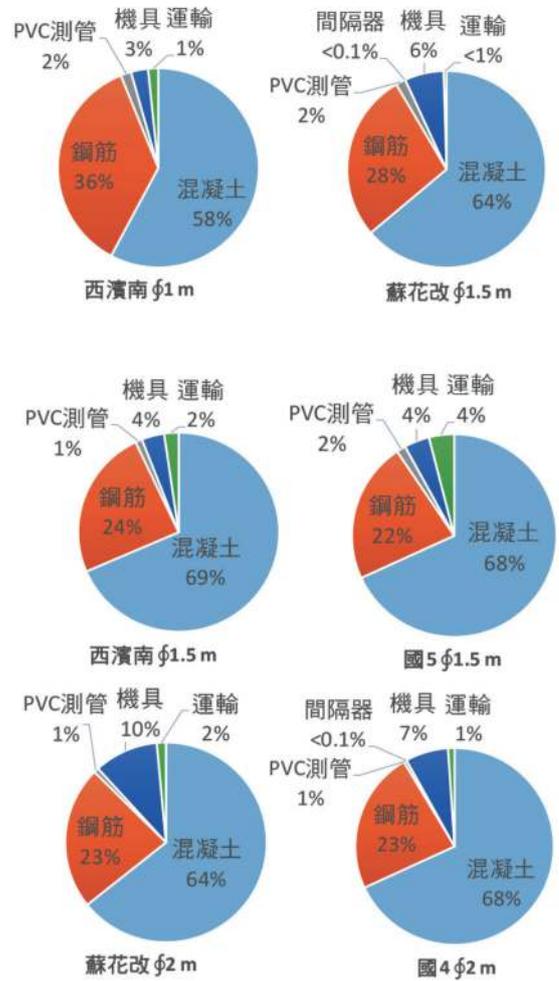


圖 3 各規格基樁之排碳量占比

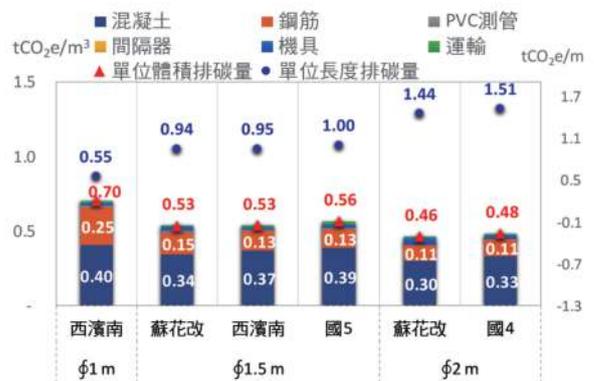


圖 4 基樁之平均單位排碳量與排碳源

表 7 基樁工程混凝土規格與飛灰及爐石粉替代率

項目	蘇花改	西濱南	國 4	國 5
樁徑 (m)	1.5、2.0	1.0、1.5	2.0	1.5
水中混凝土規格 (kgf/cm ²)	210 II	210 II	315 I	315 I
飛灰及爐石粉替代率	45%	20~31%	40、45%	30%
混凝土排放係數 (kgCO ₂ e/m ³)	237~253	320~359	282~291	338

* 飛灰及爐石粉替代率 = (飛灰 + 爐石粉) / (飛灰 + 爐石粉 + 水泥)

表 8 基樁工程水泥替代材料之減碳效益

工程	盤查標別	飛灰及爐石粉替代率	減碳量 (tCO ₂ e)		減碳比例
			減碳量	減碳比例	
蘇花改	A1	45%	5,305	40%	40%
	A3		2,737	42%	
	C1A		440	31%	
西濱南	A	20%	3,117	15%	21%
	B	31%	9,098	23%	
	C	30%	6,674	23%	
國 4	C713	40%	543	36%	42%
	C714	45%	5,685	42%	
國 5	E14	30%	222	21%	21%

五、基樁工程減碳措施與效益

依據基樁工程排碳量分析結果，混凝土及鋼筋為最主要的排碳來源，合計占比約 90%，以下分別計算混凝土替代材料及鋼筋箍筋工法之減碳量，另評估各工程若以工區場電替代燃油發電機之減碳量，及混凝土使用量控管之影響進行說明。

(一) 水泥替代材料

各基樁工程使用之水中混凝土配比皆包含飛灰或爐石粉，用以替代混凝土中部分之水泥用量，分析基樁工程水泥替代材料之減碳效益如表 8。

整體來看，減碳量與飛灰及爐石粉替代率、水中混凝土用量與各標別之水泥排放係數有關，其中以飛灰及爐石粉替代率影響最甚，減碳量隨替代率增加而提升，主因為飛灰及爐石粉之排放係數較水泥低（飛灰排碳係數為 0.004 kgCO₂e/kg，爐石粉為 0.0522 kgCO₂e/kg，水泥為 0.883~1.035 kgCO₂e/kg）；國 4 及蘇花改工程之減碳比例最高，分別為 42% 及 40%，西濱南與國 5 工程則約 21%。

(二) 鋼筋箍筋工法

蘇花改 A1 標基樁圍東區鋼筋如以原設計之彎鉤型式施作橫箍筋，此部分竹節鋼筋總排碳量約為 74.37 tCO₂e，現場係以焊接方式施作，排碳量為 26.97 tCO₂e，減碳量約 47.40 tCO₂e，減碳比例為 63%。

(三) 工區場電替代燃油發電機

蘇花改工程之基樁施作期間，鋼筋加工係以工區場電作為電力來源，然此工區場電尚包含其他工項施作用途，無法區別基樁工程之用电量。另西濱南工程 B 標之基樁施作期間，因業主要求，大多數的鋼筋加工係以工區場電為電力來源；其餘案例工程則使用燃油發電機進行鋼筋加工，由盤查結果顯示，兩種能源加工方式之排碳量具有差異。西濱南工程 B 標工區場電較燃油發電機方式約有 11.37 kgCO₂e/t 鋼筋減碳量，再輔以該標之基樁鋼筋加工數量，換算得 B 標工區場電加工方式可減碳約 97.29 tCO₂e。

此外，假設各工程若皆以工區場電作為鋼筋加工之電力來源，依據各工程之基樁鋼筋數量及前述單位鋼筋減碳量 11.37 kgCO₂e/t，推估各工程減碳量如表 9，約有 2.87~278.11 tCO₂e 之減碳量。

表 9 基樁工程以工區場電替代燃油發電機之減碳量估算

工程	單位場電鋼筋加工減碳量 (kgCO ₂ e/t)	推估減碳量 (tCO ₂ e)	基樁工程排碳量 (tCO ₂ e)	減碳比例
蘇花改 *	11.37**	67.19	21,238	0.32%
西濱南 *		278.11	88,131	0.32%
國 4		46.00	14,915	0.31%
國 5		2.87	1,078	0.27%

* 蘇花改工程及西濱南 B 標已採此減碳措施

** 西濱南工程碳管理工作正式成果報告表 5.2.2-3

(四) 混凝土設計量與實際量差異

彙整各工程基樁混凝土實際使用量與設計理論量差異如表 10，結果顯示各工程具有 6.07~10.43% 之差異。基樁實際混凝土使用量明顯高於設計理論量，推測可能與現場地質條件、施作人員技術或工程管理有關。由於混凝土為基樁工程主要排碳來源，若於施工期間確實管控混凝土用量，整體排放量之減量潛勢將有 2.27~6.70%。

表 10 基樁工程之混凝土實際盤查與設計理論量差異分析

工程	混凝土數量 (m ³)			基樁工程實際量與設計量排碳量差異 (D)
	實際量 (A)	設計量 (B)	實際量與設計量差異 (C)	
蘇花改	52,572	47,607	10.43%	6.70%
西濱南	180,446	170,115	6.07%	4.16%
國 4	35,009	32,286	8.43%	5.74%
國 5	2,149	1,951	10.13%	2.27%

$C = (A - B) / B$; $D = (A \text{ 情境} - B \text{ 情境}) / B \text{ 情境}$;
A 情境及 B 情境皆為基樁工程整體排碳量。

六、結論

本文彙整蘇花改、西濱南、國 4 與國 5 之基樁工程盤查資料，進行排碳量與減碳效益分析，相關結論與建議說明如後：

(一) 基樁單位排碳量

基樁單位長度排碳量隨直徑尺寸增加而上升，基樁直徑 1.0 m、1.5 m 及 2.0 m 分別為 0.55、0.94~1.00 及 1.37~1.65 tCO₂e/m；而單位體積排碳量則是隨基樁直徑尺寸增加而下降，基樁直徑 1.0 m、1.5 m 及 2.0 m 分別為 0.7、0.53~0.55 及 0.44~0.53 tCO₂e/m³；相關成果可供後續工程設計案進行排碳量推估時參考。

(二) 材料為基樁主要排碳來源

混凝土為基樁最主要的排碳來源，占比高達 58~69%，各工程占比差異來自混凝土配比組成，主要為混凝土強度及飛灰及爐石粉替代率不同所造成；鋼筋排碳占比介於 22~36%，以基樁直徑 1 m 之鋼筋占比最大，其餘尺寸無明顯差異。

(三) 減碳策略與建議

1. 影響施工機具能耗因素包含施工機具、地質條件及操作技術等，雖無法直接量化其效益，但建議進行基樁施作時可盡量選用能耗較佳之機具。
2. 各案例基樁工程混凝土之實際使用量與設計理論量差異達 6.07~10.43%，若工程施作期間確實管控混凝土使用量，整體基樁工程將有 2.27~6.70% 之減碳潛勢。
3. 以飛灰及爐石粉替代水泥為基樁工程重要減碳來源，減碳比例約 21~42%，影響因子為各工程之混凝土強度、配比與替代率等。

4. 蘇花改工程 A1 標選用焊接替代原彎鉤型式之鋼筋箍筋工法，其鋼筋減碳比例約占該項作業排碳量 63%；另西濱南 B 標以場電作為鋼筋加工之電力來源替代燃油發電機，確實具減碳成效，由此估算各工程若皆以工區場電替代燃油發電機，減碳量約 2.87~278.11 tCO₂e，雖然兩者之減碳比例較整體基樁工程不顯著，但為工程確實可掌握的排碳來源。
5. 基樁工程主要排碳來源為工程材料，建議應由基樁規格設計最佳化著手，特別是就混凝土及鋼筋進行減碳設計或執行減碳策略；混凝土部分，建議未來在不影響設計條件之下，選用水泥替代材料較高之混凝土配比、積極尋求其他混凝土減量方式或是選用產品碳足跡較低之供應商；鋼筋部分除前述選用較減碳之箍筋工法之外，建議可進行鋼筋配置減量或選用碳足跡較低之供應商等方式。
6. 各項減碳措施不僅可減少基樁工程排碳量，其中以飛灰及爐石替代水泥之再利用方式影響最顯著，同時可達到循環經濟之附加效益；選用產品碳足跡較低之供應商產品亦可落實整體供應鏈減碳之效果；另建議可參採歐盟綠色採購「公路設計、建造及維護」準則，以全生命週期角度，從工程規劃設計開始，直至施工、營運及維護管理階段，依據各項準則，由主管機關整合各方能力，落實工程全生命週期之減量作為。

謝誌

感謝公路總局蘇花公路改善工程處、公路總局西部濱海公路南區臨時工程處、高速公路局（原為國工局，自 2018 年與高公局整併）第二新建工程處及高速公路局第一新建工程處之各項計畫之執行成果內容與經費。

參考文獻

- 交通部公路總局蘇花公路改善工程處（2021）台 9 線蘇花公路山區路段改善計畫施工期間工程碳管理委託服務工作—成果報告書
- 交通部公路總局西部濱海公路南區臨時工程處（2018）西濱快速公路八棟寮至九塊厝新建工程委託工程碳管理暨碳足跡盤查輔導及查證服務工作—正式成果報告書
- 交通部高速公路局第二新建工程處（2021）國道 4 號臺中環線豐原潭子段工程委託監造及專業技術顧問服務—工程碳盤查 109 年度進度報告
- 交通部高速公路局第一新建工程處（2019）國道 5 號頭城交流道增設上下匝道改善工程（第 E14 標）碳足跡盤查輔導與查證服務—服務成果報告
- 行政院環境保護署（2019）基礎建設—橋梁（Infrastructure-Bridge）碳足跡產品類別規則，取自：<https://cfpcalculate.tw/cfpc/Carbon/WebPage/FLPCRDoneList.aspx>
- BRE Global Ltd（2018）Product Category Rules for Type III Environmental Product Declaration of Construction Products to EN 15804. Available: https://www.greenbooklive.com/filelibrary/EN_15804/PN514-BRE-EN-15804-PCR.pdf
- Peab Grundläggning AB（2019）Environmental Product Declaration - EPD, PRECAST CONCRETE FOUNDATION PILES. Available: <https://www.environdec.com/library/?Epd=16880>
- European Commission（2016）Commission Staff Working Document, EU Green Public Procurement Criteria for Road Design, Construction and Maintenance. Available: https://ec.europa.eu/environment/gpp/eu_gpp_criteria_en.htm

誠信 創新 品質 服務

防震制振技術研究中心

防震設備產品

中興社自主研發「國產液流黏滯阻尼器」及各種防震設備，
 以提供優質臺灣製造之產品選擇及技術服務！
 從零件加工至組裝品管測試皆採用臺灣在地化生產，
 並通過認證合格實驗室的多項性能試驗，以確保產品品質與消費者權益。

 液流黏滯阻尼器(FVD) FLUID VISCOUS DAMPER	 位移型消能斜撐(SDB) STEEL DAMPING BRACE
 地震力分散裝置(STU) SHOCK TRANSMISSION UNIT	 效能監測系統(EMS) EFFICIENCY MONITORING SYSTEM
 鋼板制震壁(SDW) STEEL DAMPING WALL	 防震力學試驗室(SML) LABORATORY FOR VIBRATION

專業服務

防震設備研製 新型消能元件研發 設備隔震技術研發 各類消能元件性能試驗	國防減振研製 高科技減振機械研發客製 國防減振測試方法開發
監測系統技服 工程智慧監測系統 防震效能監測系統 智慧綠電儲能微電網系統	振控設計技服 防震系統規劃設計 高樓防震/減振工程 設施隔震設計規劃

聯絡資訊

A 114065 臺北市內湖區新湖二路280號
W www.sinotech.org.tw
T (02)8791-9198#171 **F** (02)8792-3070
E ast-proj@sinotech.org.tw

誠信·創新·品質·服務



財團法人 **中興工程顧問社**
 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.



三維多平面邊坡穩定分析技術 與應用實例－以霧鹿場址為例

黃淳銘* 鍾明劍** 陳建新*** 譚志豪****
康耿豪***** 戴東霖*****

摘 要

本文採用 Bentley 公司之 PLAXIS 3D LE 軟體，利用其 Slope Stability 模組中的 3D MPA 分析方法，進行臺東縣霧鹿場址之三維邊坡穩定性分析。分析時以情境模擬方式探討常時、高水位、地震情境下邊坡安全係數於空間上的分布情況，藉以瞭解邊坡在不同情境下的崩塌熱區區位，以利災防相關單位作為參考。文中常時及高水位情境分析所得之崩塌熱區皆位於近河道處之階地堆積層，前者分析之安全係數為 1.240，若發生崩塌可能阻斷南橫公路，後者當地下水水位抬升 15m 時，部分南橫公路上邊坡區域趨近於破壞，且鄰近公路之下邊坡區域安全係數降至 1.0 以下，若發生崩塌可能造成南橫公路阻斷；地震情境分析所得崩塌熱區與常時情境相似，但安全係數大幅降至 0.967，若發生崩塌將造成下邊坡之南橫公路阻斷。透過上述案例研究可知，3D MPA 分析方法適用於大區域三維邊坡穩定性評估並找出崩塌熱區，此崩塌熱區可進一步應用於崩後影響範圍評估，藉此評估崩塌熱區對保全對象之影響。

關鍵字：三維多平面分析、霧鹿場址、邊坡穩定、情境模擬、崩塌熱區

一、前 言

臺灣因位處於歐亞板塊與菲律賓海板塊交界，板塊造山運動與隱沒作用，致使地震頻繁發生與地質條件較為破碎（何春蓀，1986），加上每年颱風、梅雨帶來的大量降雨（陳怡良，2013），使邊坡時常發生崩塌。崩塌常受降雨及地震的影響而產生，具有高度破壞性及發生快速

特性，且發生時常伴隨著大量經濟損失與危及人民生命安全。1999 年發生芮氏規模 7.3 的集集地震，致使鄰近震央的九份二山產生大規模順向坡滑動，崩塌深度達 30 公尺以上，並造成 39 人死亡，形成兩處堰塞湖（農委會水土保持局，2003）。2009 年莫拉克颱風帶來大量降雨，席捲臺灣中南部，帶來單日超過一千毫米的降雨量，造成獻肚山發生崩塌面積 70 公頃以上的大規模崩

* 中興工程顧問社大地工程研究中心助理研究員
** 合昱工程顧問有限公司大地及水保技師
*** 中興工程顧問社大地工程研究中心正研究員
**** 中興工程顧問社大地工程研究中心再生能源組組長
***** 國立陽明交通大學土木工程學系博士候選人
***** 經濟部中央地質調查所環境與工程地質組技士

塌事件，並使小林村遭到土石掩埋，估計死亡人數達 400 人以上（唐昭榮等人，2009）。有鑑於此，崩塌發生前若能進行先期評估以瞭解該區域之危害性分布，或許能及早防範或規畫因應措施，以降低災害損失。

本文採三維邊坡穩定分析軟體，評估研究區域內安全係數分布情況，並以情境模擬方式，分析該區域在地下水位上升或地震影響下邊坡穩定性及安全係數變化趨勢，掌握其崩塌熱區及崩塌量體，以利相關主管單位研擬災害防救措施。

二、文獻回顧

對於邊坡的穩定性與否、可能發生崩塌的區域，一直是邊坡災害防救上相當重要的課題。降雨及地震為引發崩塌發生的兩大主因，前者入滲至地下後，易造成地下水位抬升、地質材料孔隙水壓增加、有效應力下降、材料強度降低、內部摩擦力降低等影響，而使邊坡穩定性下降並趨於破壞（Tsai and Yang, 2006; Wang and Sassa, 2003）。著名案例如梅姬颱風造成的蘇花公路 115.9k 崩塌、莫拉克颱風引致的布唐布那斯溪崩塌及包盛社崩塌等（Lo et al., 2014; Lin and Lin, 2015; 黃淳銘，2019），後者因地震力作用產生的劇烈震動，易使岩土材料鬆動與破壞，進而發生崩塌（林慶偉等人，2002），過去因地震造成崩塌案例如集集地震誘發的草嶺崩塌、日本熊本地震引致的阿蘇大橋崩塌等（Tang et al., 2009; Hung et al., 2019）。

前人研究常利用影像判釋及地質地物探查等方式推論可能發生的崩塌區塊，並以二維剖面通過該潛在崩塌塊體進行穩定性評估，計算其安全係數大小（Wu et al., 2017）。但分析區域內穩定性最差的滑動塊體，有時難以被精確的判斷出來，也成為二維分析中的盲點。過去利用二維極限平

衡法進行邊坡穩定分析，其假設之滑動面形貌時常與現實不符，且欲將二維分析結果之滑動塊體向三維方向延伸時，常為主觀式猜測其三維塊體範圍與形貌，較難客觀進行分析（Fredlund et al., 2017a）。

本文採用 Bentley 公司之 PLAXIS 3D LE 軟體，利用其 Slope Stability 模組中的三維多平面邊坡穩定分析（3D Multi-Plane Analysis, 簡稱 3D MPA），將傳統二維分析及具侷限性的滑動面及安全係數，進階至三維分析並得到安全係數的空間分布。PLAXIS 3D LE 原為 SoilVision System 公司開發之軟體，2020 年納入 Bentley 公司後重新命名。此軟體早期常用於探討地下水位面高低及材料強度對於邊坡穩定性的影響，如 Leong and Rahardjo（2012）用於新加坡 Bukit Batok 邊坡分析，成功分析出因降雨造成地下水位抬升，而引致邊坡發生破壞的結果，其後續採用水平排水措施降低地下水位，使邊坡穩定性大幅上升。近年該模組開發 3D MPA 功能後，已應用於市政、道路及鐵路規劃、礦場安全評估等方面（Fredlund et al., 2017b），其特色為可快速進行大區域的三維邊坡穩定分析，獲得分析區域內的安全係數分布，進而評估高危害潛勢區域的範圍。

三、分析方法

本文使用之 PLAXIS 3D LE 軟體內建 4 個分析模組，分別為 Slope Stability、Consolidation、Groundwater、Dynamics，可依解決問題需求選取適合模組進行分析。本文欲瞭解研究區域內之三維邊坡穩定性分布情況，故採用 Slope Stability 模組，茲摘錄其原理及搜尋方式如后。

（一）3D MPA 介紹與分析原理

3D MPA 為 Slope Stability 模組內的一種三維

邊坡穩定性分析方式，其分析程序係先將研究區域劃分出多條分析剖面，每條分析剖面再以滑動面搜尋法尋找三維潛在滑動塊體，並配合極限平衡法計算各潛在滑動塊體之安全係數。經大量搜尋與計算後，可以套疊分析區域內所有計算過潛在滑動塊體之安全係數分布圖，據此可找出安全係數最低之潛在滑動塊體，並獲得其位置、體積大小、及滑動方向等資訊。

(二) 邊坡穩定性分析—極限平衡法

3D MPA 係藉由極限平衡法進行邊坡穩定性分析，透過切片法將分析塊體沿滑動面垂直切成數塊，由塊體之力與力矩平衡關係求取安全係數。極限平衡法具有以下三項假設：(1) 材料遵守 Mohr-Coulomb 破壞準則；(2) 全部切片塊體安全係數皆相同；(3) 凝聚力分量和摩擦角分量所使用之安全係數相同。對於飽和材料應力狀態、剪力強度與安全係數關係，如式 (1) 所示。

$$\tau = \beta / F_s [c' + (\sigma_n - u_w) \tan \phi'] \quad (1)$$

式 (1) 中 τ 為剪力強度、 β 為切片底邊長度、 F_s 為安全係數、 c' 為有效凝聚力、 ϕ' 為有效內摩擦角、 σ_n 為正向總應力、 u_w 為孔隙水壓力。於未飽和材料則須考慮基質吸力影響，式 (1) 則可改寫為式 (2)。

$$\tau = \beta / F_s [c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b] \quad (2)$$

式 (2) 中 u_a 為孔隙氣壓力、 $u_a - u_w$ 為基質吸力、 ϕ^b 為因基質吸力產生而增加的內摩擦角。

(三) 滑動面搜尋法—Slope Search Method

3D MPA 使用的滑動面搜尋法為 Slope Search Method，為適用於搜尋分析範圍內安全係數最低

之圓弧形破壞滑動面的方法。此法首先於分析剖面上選取任意兩點（如圖 1 所示之 A、B），以此兩點連線之垂直平分線上作為危險圓圓心可能的位置，並將 A、B 兩點連線與過 B 點鉛直線間的夾角 D，平均進行分割。每條分割線表示為危險圓通過 B 點時的切線，其控制著危險圓大小與圓心位置，進而決定出多數個危險圓作分析。由危險圓於邊坡上畫切的二維塊體，即為該危險圓所對應之二維潛在滑動面。

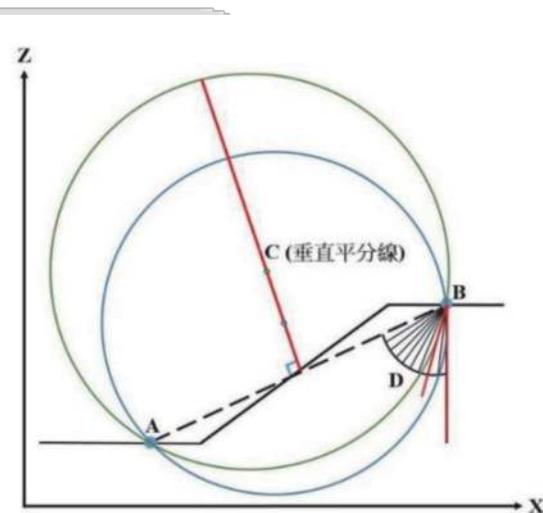


圖 1 滑動面搜尋方法

(四) 三維橢球體分析

接續前節搜尋結果，於二維潛在滑動面的第三個維度上，依所設定欲搜尋之橢球體長短軸比範圍內進行三維橢球體劃設（如圖 2 所示，圖 2 (a) 即為三維橢球體（藍紫色碗狀）與模型相切情況示意圖，圖 2 (b) 為橢球體於模型上所切之塊體形貌示意圖），再以三維橢球體與模型相切之塊體透過極限平衡法計算其安全係數。

四、霧鹿場址案例研究

本文以臺東縣海端鄉（圖 3）的霧鹿場址為例，此場址位於利稻溪與新武呂溪交會處西側，具潛在大規模崩塌之特徵，保全對象包含位於河階地位置的霧鹿聚落及通過下邊坡的南橫公路（圖 4）。

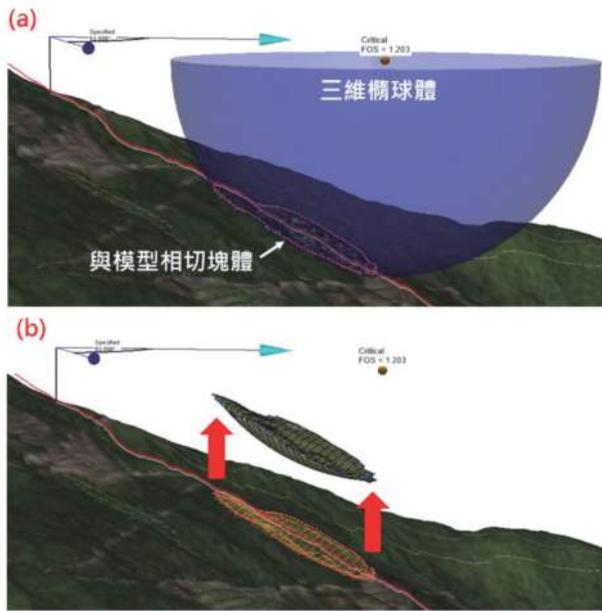


圖 2 三維橢球體劃切示意圖



圖 3 霧鹿場址地理位置及全景圖

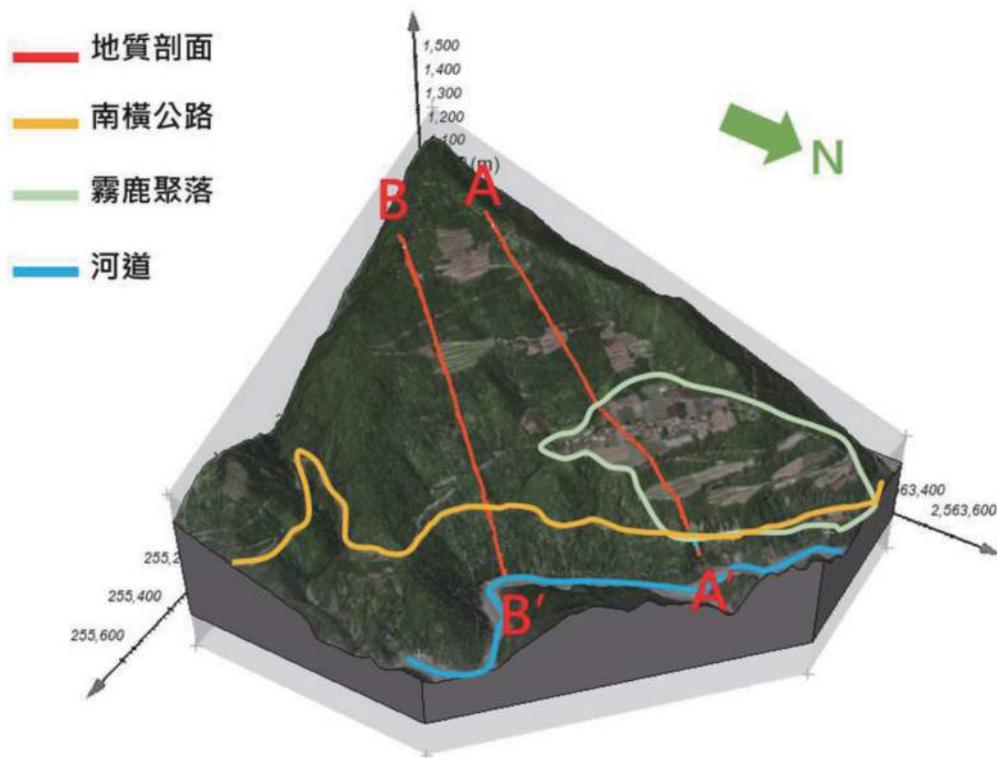


圖 4 霧鹿場址三維模型範圍
 （底圖套疊 2019 年之 Google Earth 影像）

(一) 地形與地質條件

圖 5 為霧鹿場址之地表地質圖，由圖可知霧鹿場址地形上存在大規模崩塌特徵，如上邊坡處崩崖明顯，且存在多重山脊。霧鹿場址大致可分為二個區塊，東側（B 區）崩場地形明顯，且近年亦有崩塌造成人工構造物破壞，趾部為新武呂溪之攻擊側，新武呂溪在本區匯集了利稻溪及馬里蘭溪的溪水；西側（A 區）上邊坡側則多為厚層崩積層覆蓋，下邊坡為階地堆積層。

霧鹿場址下邊坡側均可見階地堆積層，其中圖 5 (a) 為東側出露的階地堆積層，目前已噴漿整治，圖 5 (b) 為北側下邊坡出露的階地堆積層，研判圖 5 (d) 處因蝕溝沖蝕或崩塌以致未見階地堆積層。新武呂溪溪床兩岸出露為黑色片岩，且本場址下邊坡側的片岩葉理可分為 S1、S2 及 S3（圖 5 (c)）；近期邊坡破壞以致擋土牆受剪破壞及道路下陷（圖 5 (d)），場址上邊坡側仍為崩積層覆蓋（圖 5 (e)），上邊坡道路部分路面可見張裂隙（圖 5 (f)）。

依現地調查結果繪製圖 5 中 AA' 及 BB' 之地質剖面如圖 6 及圖 7 所示。本區地層大致可區分為三層，分別為崩積層（col）、河階堆積層（t）及黑色片岩（BS），茲摘錄各層說明如后。

崩積層（col）：本層以淺層崩塌材料為主，遍布場址上邊坡，其中可再由地形及鑽孔資料將土壤層區分出來。

河階堆積層（t）：本層主要分布於場址北側臨新武呂溪，階地面向上游大致可對應至利稻，向下游可對應至下馬。

黑色片岩（BS）：本層為本區主要岩性，主要葉理面走向約呈北偏東 30 度朝西北側傾 30 度左右，褶皺軸呈低角度朝北傾沒，其中可再由鑽孔資料將剪裂帶區分出來。

(二) 三維模型分層

本文採用之數值地形（Digital Elevation Model, DEM）係由經濟部中央地質調查所產製「高解析度數值地形資料」轉換而成之 6 公尺精度 DEM。地質分層為利用研究區域內五孔鑽探（109-WL-1W、109-WL-2TC、109-WL-3W、109-WL-4T 及 109-WL-5W）資料，配合地表地質調查、地球物理探勘等，細分五個地層，分別為：（1）土壤層、（2）崩積層、（3）階地堆積層、（4）剪裂帶、（5）黑色片岩。

透過 ArcGIS 軟體將地表地質圖（圖 5）、AA' 地質剖面（圖 6）及 BB' 地質剖面（圖 7）等地質分層資料，以克利金法（Kriging）內插方式建置出各分層的三維界面，再匯入至 PLAXIS 3D LE 中，依照各分層上下界面自動建出各分層塊體，如圖 8 所示。地下水水位面的設定，為透過水位觀測井量測出的地下水位作率定，進行三維流場分析後得到。

(三) 3D MPA 多平面剖面劃設

3D MPA 繪製分析剖面分為 3 種方式，分別為 From Elevation Contour、From Polyline、Create planes manually。From Elevation Contour 為於設定之高程水平面與地表面相切之線段上以等間距方式劃切 3D MPA 分析線段；From Polyline 為於手動繪製於地表面之線段上以等間距方式劃切 3D MPA 分析線段；Create planes manually 為使用端可於地表面上任意劃切或依任兩點座標之連線繪製 3D MPA 分析線段。

本文關注邊坡對保全對象之影響，故採用 From Polyline 之指定線段與間距方式，沿南橫公路上邊坡繪製一條線段，並由程式自動以等間距生成其他不同方位角之分析剖面。另為能探討 3D MPA 與特定剖面之差異，另透過 Create planes manually 將 AA' 及 BB' 剖面依序輸入，故霧鹿場址 3D MPA 多平面剖面劃設結果如圖 9 所示。

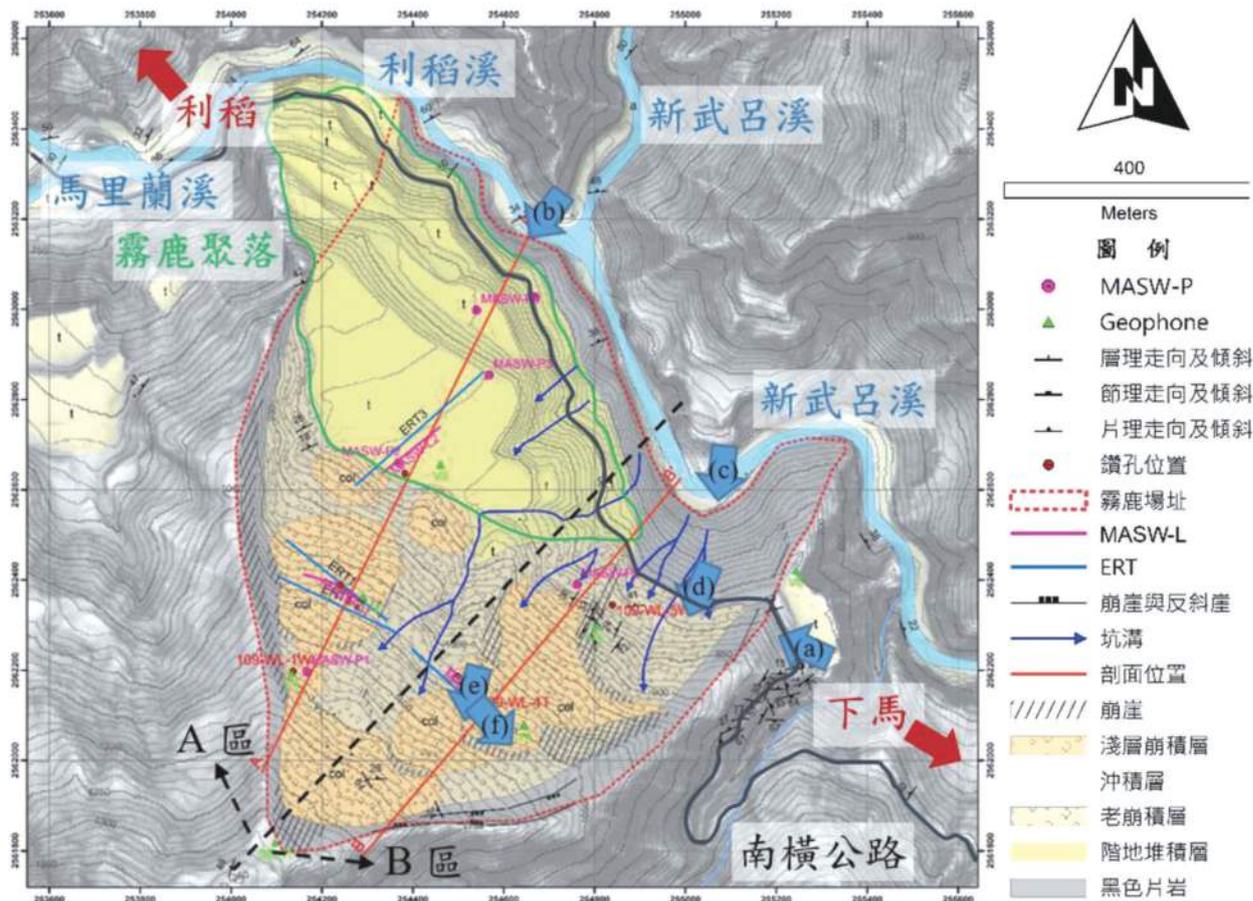


圖 5 霧鹿場址地表地質圖及現地調查照片

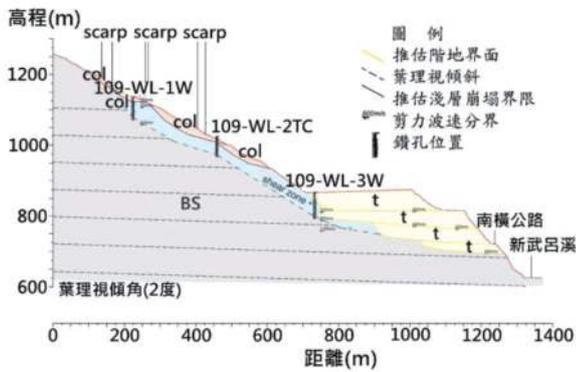


圖 6 AA' 地質剖面圖

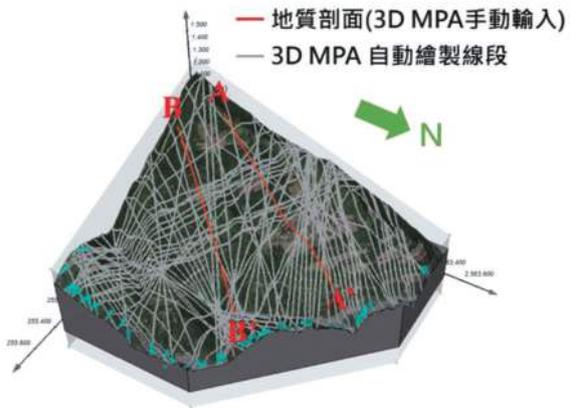


圖 9 霧鹿場址 3D MPA 多平面剖面劃設

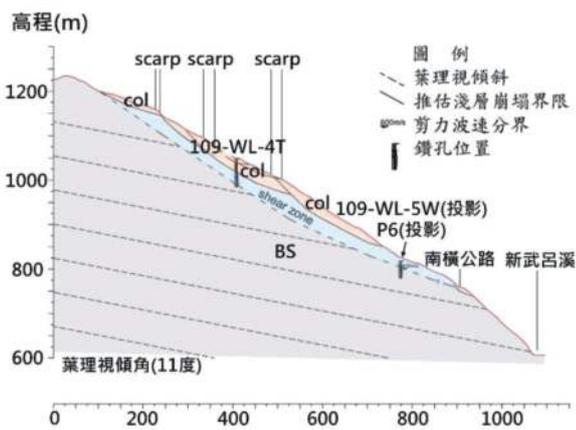


圖 7 BB' 地質剖面圖

本研究挑選鑽探所得岩芯進行室內試驗，如透過土壤一般物理性質試驗及直接剪力試驗，獲取土壤層之單位重及強度參數。另由岩石一般物理性質試驗及單軸壓縮試驗，透過 RocLab 軟體依 Hoek & Brown (2019) 經驗公式進行強度折減，設定崩積層、剪裂帶及黑色片岩之單位重及強度參數；階地堆積層材料則係參考表面波震測所得剪力波波速 (600 m/s)，配合式 (3) 先轉換為 SPT-N 值後 (陳逸龍、林志平, 2003)，再分別利用式 (4) 及式 (5) 將 SPT-N 值轉換為內摩擦角及凝聚力 (日本道路協會, 1968; Kamimura and Truong, 2013)。綜上所述，霧鹿場址的簡化地層參數彙整如表 1 所示。

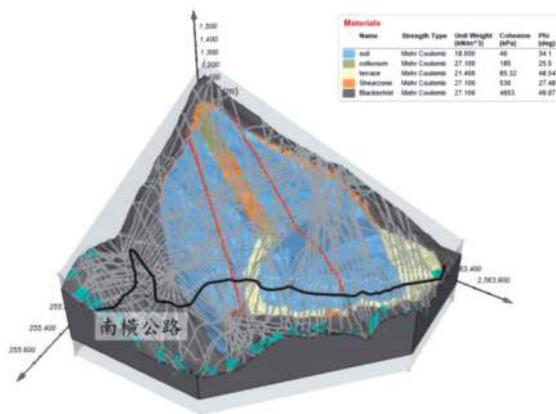


圖 8 霧鹿場址三維模型建置成果

$$V_s = 22.864 \times (N)^{0.757} \quad (3)$$

$$\phi = (15 \times N)^{0.5} + 15 \quad (4)$$

$$c = (0.014 \times N) - 0.18 \quad (5)$$

式 (3) 至式 (5) 中 V_s 為剪力波波速、 N 為 SPT-N 值、 ϕ 為內摩擦角、 c 為凝聚力。

表 1 霧鹿場址簡化地層參數表

模型分層	單位重 (kN/m ³)	凝聚力 (kPa)	內摩擦角 (deg.)
土壤層	18.0	46.00	34.10
崩積層	27.1	185.00	25.50
階地堆積層	21.4	85.32	48.54
剪裂帶	27.1	530.00	27.48
黑色片岩	27.1	4653.00	49.07

(四) 情境模擬成果與討論

本文情境模擬包含常時、高水位及地震等三種情境，透過 3D MPA 計算霧鹿場址於不同情境下之安全係數分布圖，進而評估研究範圍內之崩塌熱區。此外，以 AA'、BB' 剖面上 3D MPA 分析成果與 GeoStudio 2D 分析結果進行比對，以驗證 3D MPA 分析成果之可靠性。茲分述如后。

1. 常時情境

常時情境參考經濟部中央地質調查所 (2020) 於民國 108 年 6 月至 109 年 11 月間觀測水位之平均值，採率定後所繪製的地下水水位面設定為常時情境地下水水位，透過 3D MPA 分析所得安全係數等值圖如圖 10。由圖 10 可知霧鹿場址於常時情境之穩定性甚佳，安全係數最低的崩塌熱區位於霧鹿聚落下邊坡近河道處之階地堆積層，如圖 10 中圈選框所示，其安全係數為 1.240。南橫公路剛好通過此崩塌熱區，若此區域發生崩塌將造成南橫公路交通阻斷及危害公路上之人車安全。

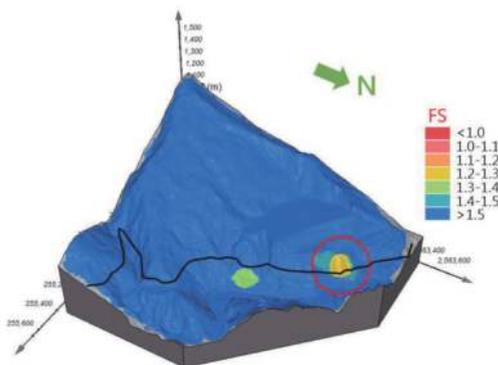


圖 10 常時情境安全係數等值圖

2. 高水位情境

高水位情境之地下水水位設定，採用常時水位情境之地下水水位面依序向上抬升 5m、10m、15m、20m，但不超過地表，探討地下水水位變化對於邊坡穩定性的影響，分析成果如圖 11 所示。地下水位的抬升主要影響近河道處之階地堆積層穩定性，圖 11 中 i 區涵蓋安全係數最低的區域，其受地下水水位抬升影響造成安全係數顯著下降。當地下水水位抬升 15m 時，i 區之安全係數降至 1.0 以下，具有高度破壞可能性，而 ii 區部分塊體安全係數介於 1.0-1.1 之間，瀕臨破壞邊緣；當地下水水位抬升 20m 時，i 區之不穩定塊體及 ii 區瀕臨破壞塊體範圍皆有擴大的跡象，若 i 區塊體破壞，雖然其塊體位在南橫公路下方，但因距離公路近，仍需提防後退式破壞造成公路阻斷，而 ii 區之不穩定塊體位於南橫公路上方，若發生崩塌將造成南橫公路交通阻斷及危害公路上之人車安全。

3. 地震情境

地震情境係採常時水位並考量設計地震 (回歸期 475 年之地震，50 年超越機率約為 10%)，設計地震係參考「建築物耐震設計規範及解說」(內政部營建署，2011) 之規定，水平加速度係數 Z 取 $Z=0.4S_{Ds}$ 進行分析，計畫範圍所在分區為臺東縣海端鄉 $S_{Ds}=0.8$ ，用途係數 $I=1.0$ ，故研究區域之最大水平加速度為 0.32 g。再依據「建築物基礎構造設計規範」(內政部營建署，2001) 規定，原則上水平向地震係數 k_h 可取基地地表水平向尖峰加速度值之半估計，故分析時採用 $k_h=0.16$ ， k_v 採 $1/2 k_h=0.08$ ，分析結果如圖 12 所示。

由圖 12 可知，霧鹿場址在地震情境下整體的安全係數於常時及高水位情境降低許多，安全係數較低的崩塌熱區位於近河道處之階地堆積層，且其潛在滑動塊體之安全係數低於水土保持技術

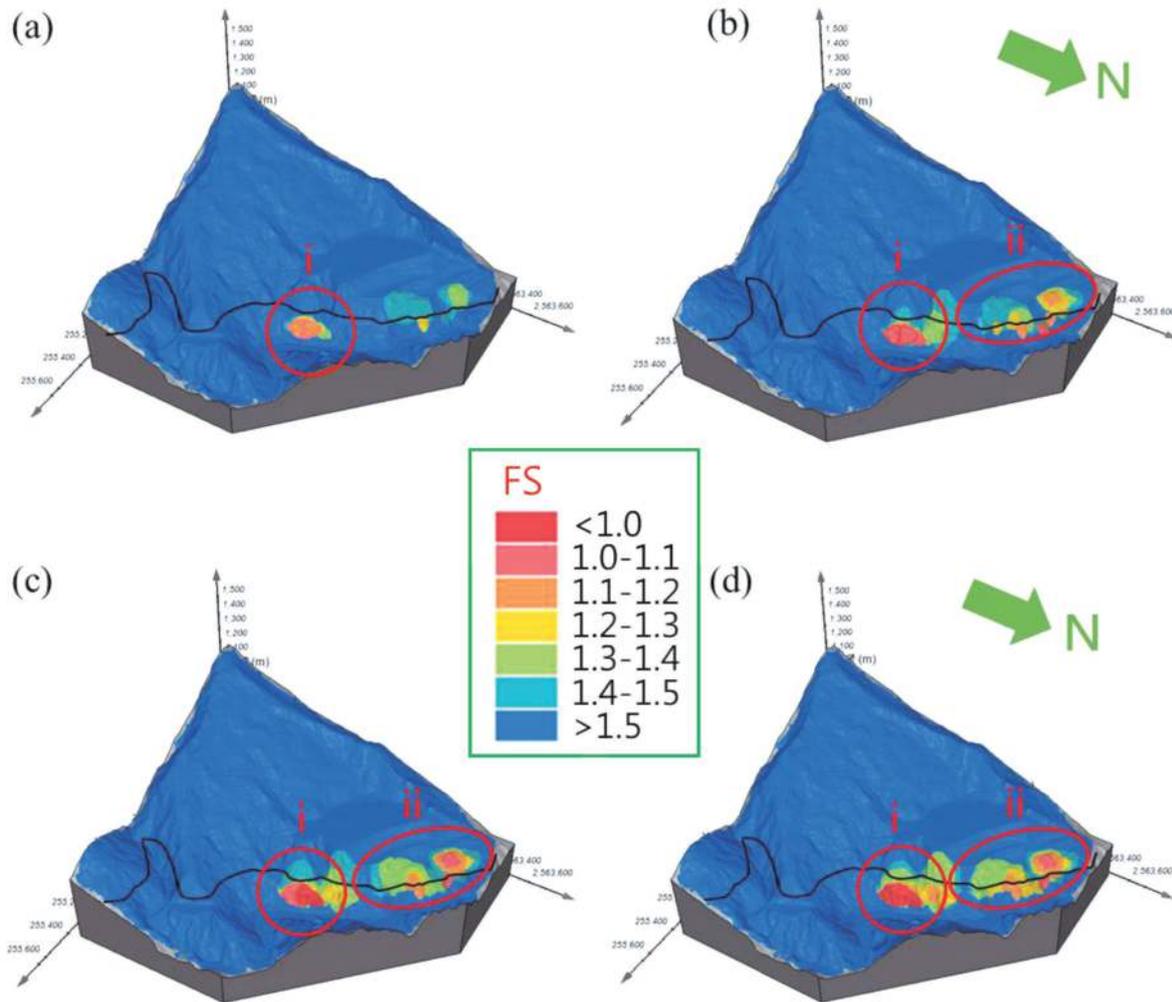


圖 11 高水位情境安全係數等值圖 (a) 地下水位抬升 5m；(b) 地下水位抬升 10m；
(c) 地下水位抬升 15m；(d) 地下水位抬升 20m

規範（農委會水土保持局，2020）之規定（地震情境安全係數須大於 1.1），如圖 12 之箭頭所指之區位。

霧鹿場址內安全係數值最低的區域位於霧鹿聚落下邊坡近河道處之階地堆積層，其安全係數為 0.967，已低於臨界狀態之安全係數（1.0），故此區域在地震情境下將產生滑動，並將造成南橫公路阻斷及危害公路上之人車安全。

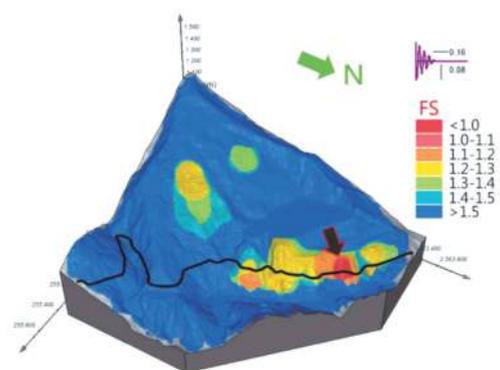


圖 12 地震情境安全係數等值圖

整體而言，常時、高水位及地震情境分析結果皆顯示安全係數最低的區域位於霧鹿聚落下方邊坡近河道處（圖 12 中箭頭所指區位），且於地震情境時整體邊坡之安全係數均有明顯地降低。安全係數較低的區域將從階地堆積層近河道處之邊坡向霧鹿聚落延伸。若此區域發生崩塌，將造成下邊坡處南橫公路阻斷並危害公路上之人車安全，而其對於霧鹿聚落的影響，則有待另行評估。

4. 3D MPA 分析結果驗證

經濟部中央地質調查所（2021）曾採用 GeoStudio 軟體並依照與本文相同之材料參數設定及情境分析假設進行霧鹿場址 AA' 及 BB' 剖面的二維邊坡穩定分析，分析成果分別如圖 13（a）

及（c）所示。為立於相同比較基準，本文挑選出 AA' 及 BB' 剖面上 3D MPA 的分析成果展示如圖 13（b）及（d）所示。比對結果顯示：（1）於 AA' 剖面，GeoStudio 2D 及 3D MPA 分析所得安全係數最低的滑動弧分別如圖 13（a）及（b）中紅色實線圓圈標示處，兩者所得安全係數、塊體長度及平均厚度均相近；（2）於 BB' 剖面，GeoStudio 2D 及 3D MPA 分析所得安全係數最低的滑動弧分別如圖 13（c）及（d）中藍色虛線圓圈標示處，兩者所得安全係數、塊體長度及平均厚度均相近。整體而言，透過圖 13 的比對可知 3D MPA 與 GeoStudio 2D 於 AA' 及 BB' 剖面之分析成果相當接近，驗證 3D MPA 分析成果確實具有足夠可靠性。

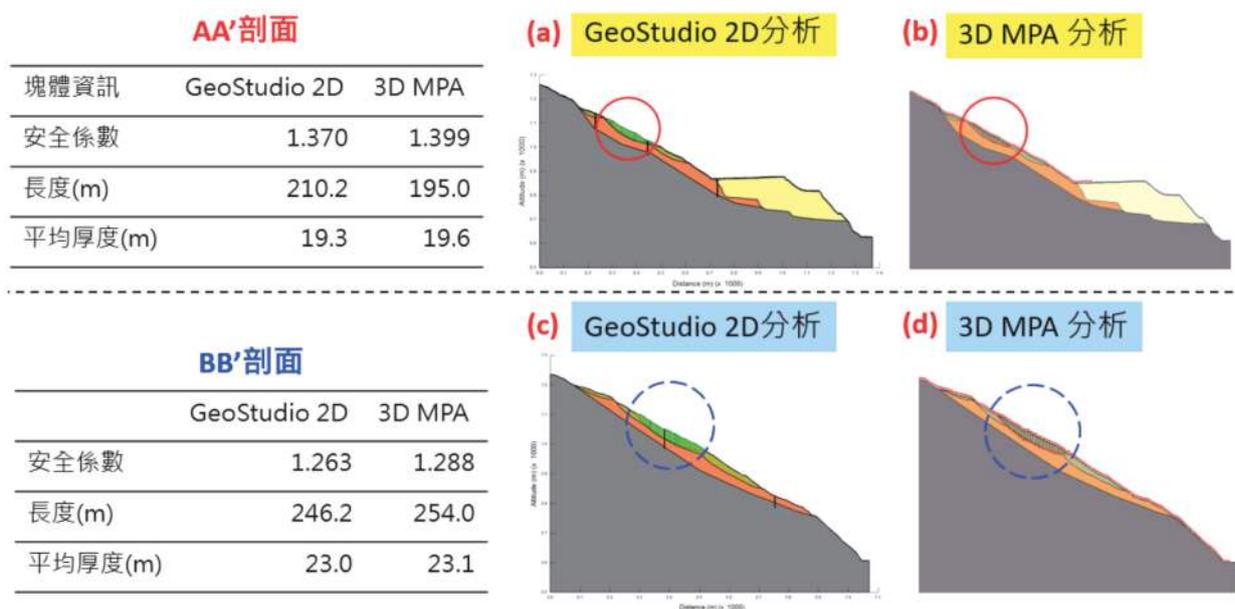


圖 13 3D MPA 與 GeoStudio 2D 模擬成果比對

5. 3D MPA 分析優勢

經濟部中央地質調查所（2020）以人為主觀方式劃切二維分析剖面進行邊坡穩定分析，找出剖面上安全係數最低的滑動弧後，再透過山崩微

地形判釋方法，將此二維塊體依地形圈繪成三維塊體。然而，人為劃切之二維分析剖面不一定能剛好通過場址內安全係數最低的區域，且山崩微地形判釋方法於圈繪潛在崩塌塊體上較為主觀，

故此方法常難以分析出場址內最易破壞的區域。

本研究以地震情境為例，局部放大圖 12 下邊坡區域後可得圖 14，由圖 14 可知霧鹿場址內安全係數最低的區域位於 AA' 剖面西側的河道攻擊坡，然 AA' 剖面並未通過此區域，故無法透過二維剖面分析搜尋得到。然而透過 3D MPA 分析方式，得以於大範圍區域執行多平面自動搜尋分析，求得研究區域內安全係數於三維空間上的分布狀況，並搜尋出最易產生破壞的崩塌熱區及塊體資訊。

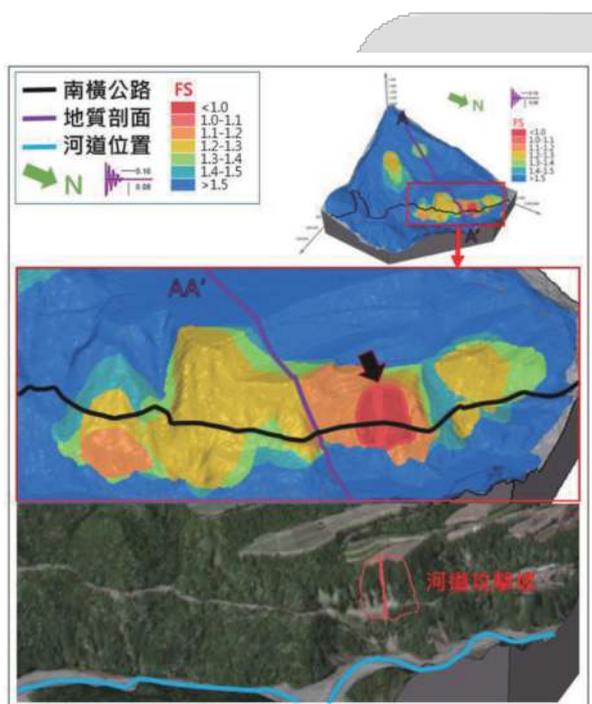


圖 14 二維分析剖面與崩塌熱區比對圖

五、結論與建議

根據前述研究成果可歸納以下結論與建議。

- (一) 利用 3D MPA 分析可以進行大範圍三維邊坡穩定性評估，用以獲得研究區域內安全係數分布情況。若配合情境模擬方式，可進一步分析該區域在地下水位上升或地震影響下邊坡穩定性及安全係數變化趨勢，

掌握其崩塌熱區及崩塌量體，以利相關主管單位研擬災害防救措施。

- (二) 透過與 GeoStudio 2D 分析成果比對可知，不論在 AA' 或 BB' 剖面，3D MPA 分析所得安全係數最低的滑動弧、安全係數、塊體長度及平均厚度均與 GeoStudio 2D 分析成果相近，驗證 3D MPA 分析成果確實具有足夠可靠性。
- (三) 透過 3D MPA 進行霧鹿場址分析可知，常時及高水位情境分析所得崩塌熱區位於近河道處之階地堆積層，前者安全係數為 1.240，若發生崩塌可能阻斷南橫公路，後者當地下水位抬升 15 m 時，部分南橫公路上邊坡區域趨近於破壞，且鄰近公路之下邊坡區域安全係數降至 1.0 以下，若發生崩塌可能造成南橫公路阻斷；地震情境分析所得崩塌熱區與常時情境相似，但安全係數大幅降至 0.967，若發生崩塌將造成下邊坡之南橫公路阻斷。
- (四) 3D MPA 分析所得之崩塌熱區可作為崩後影響範圍評估時之崩塌量體，用以評估崩塌發生後對於保全對象的影響。

謝誌

感謝經濟部中央地質調查所提供計畫經費及技術協助得使本文順利完成，特此謝誌。對於工作期間提供協助的相關單位及財團法人中興工程顧問社的工作同仁，亦一併感謝諸位對此研究之付出與努力。

參考文獻

- 內政部營建署 (2001)，建築物基礎構造設計規範
- 內政部營建署 (2011)，建築物耐震設計規範及解說
- 日本道路協會 (1968)，道路橋下部構造設計指針·直接基礎の設計篇

- 何春蓀 (1986), 臺灣地質概論, 經濟部中央地質調查所出版, 第 11-135 頁
- 林慶偉、謝正倫、王文能 (2002), 集集地震對中部災區崩塌與土石流之影響, 臺灣之活動斷層與地震災害研討會, 第 124-134 頁
- 唐昭榮、胡植慶、羅佳明、林銘郎 (2009), 邊變式山崩之 PFC3D 模擬初探—以草嶺與小林村為例, 地工技術, 第 122 期, 第 143-152 頁
- 陳怡良 (2013), 民國 98 年颱風調查報告—第 8 號莫拉克 (Morakot) 颱風 (0908), 民國 98 年颱風調查報告, 第 17-43 頁
- 陳逸龍、林志平 (2003), 多頻道表面波試驗程序標準化之研究, 國立交通大學碩士論文, 第 1-118 頁
- 黃淳銘 (2019), 結合地質模型進行三維離散元之崩塌運移數值模擬 - 以太麻里溪、四川新磨村、棧仔寮為例, 國立成功大學碩士論文, 第 1-93 頁
- 經濟部中央地質調查所 (2020), 坡地場址調查觀測及變形機制分析 (4/5), 正式報告書
- 經濟部中央地質調查所 (2021), 坡地場址調查觀測及變形機制分析 (5/5), 正式報告書
- 農委會水土保持局 (2003), 九份二山崩塌地變動觀測, 九十二年度土石流防災暨監測科技計畫成果彙編
- 農委會水土保持局 (2020), 水土保持技術規範
- Fredlund, M. D., Fredlund, D. G., Ivkovic, Z., and Lu, H. (2017a). Extending slope stability analysis to multi-plane 2D and 3D limit equilibrium approaches. Paper presented at the GeoOttawa 2017 Conferenc, Ottawa Canada
- Fredlund, M. D., Lu, H., Ivkovic, Z., and Gitirana, G. (2017b). Multi-plane spacial analysis based on 2D & 3D limit equilibrium analysis. Paper presented at the American Board of Medical Specialties Conferenc, Chicago, IL
- Hoek, E. and Brown, E. T. (2019). The Hoek–Brown failure criterion and GSI–2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11 (3), pp. 445-463
- Hung, C., Liu, C. H., Lin, G. W., and Leshchinsky, B. (2019). The Aso-Bridge coseismic landslide: a numerical investigation of failure and runout behavior using finite and discrete element methods. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78 (4), pp. 2459-2472
- Kamimura, M. and Truong, T. K. (2013). Relationships between N value and parameters of ground strength in the South of Vietnam. *Geotechnics for sustainable development*, Publisher of Construction, Hanoi, 1-7
- Leong, E. C. and Rahardjo, H. (2012). Two and three-dimensional slope stability reanalyses of Bukit Batok slope. *Computers and Geotechnics*, 42, pp. 81-88
- Lin, C. H. and Lin, M. L. (2015). Evolution of the large landslide induced by Typhoon Morakot: a case study in the Butangbunasi River, southern Taiwan using the discrete element method. *Engineering Geology*, 197, pp. 172-187
- Lo, C. M., Lee, C. F., Ter Chou, H., and Lin, M. L. (2014). Landslide at Su-Hua Highway 115.9k triggered by Typhoon Megi in Taiwan. *Landslides*, 11 (2), pp. 293-304
- Tang, C. L., Hu, J. C., Lin, M. L., Angelier, J., Lu, C. Y., Chan, Y. C., and Chu, H. T. (2009). The Tsaoiling landslide triggered by the Chi-Chi earthquake, Taiwan: insights from a discrete element simulation. *Engineering Geology*, 106 (1-2), pp. 1-19
- Tsai, T. L. and Yang, J. C. (2006). Modeling of rainfall triggered shallow landslide. *Environmental Geology*, 50 (4), pp. 525-534
- Wang, G and Sassa K. (2003). Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: Effects of grain size and fine-particle content. *Engineering Geology*, 69, pp. 109-125
- Wu, G., Cunningham, D., Yuan, R. M., Zhou, Q., Zeng, X., and Yang, X. P. (2017). Mass-wasting effects induced by the 2015 Gorkha (Nepal) M w 7.8 earthquake within a large paleo-landslide site adjacent to the Tatopani Border Station, Nepal: implications for future development along the critical Bhote Koshi River valley transport corridor between Nepal and China. *Landslides*, 14 (3), pp. 1147-1160

應用空載光達於公共工程規劃之 大面積樹木調查

郭鎮維* 徐廣達** 蘇美婷***

摘要

公共工程開發前之規劃階段，需要對施工地區內的樹木進行調查。傳統的樹木調查需透過專業人員進行地面普查工作，常耗費大量時間與人力成本。近年來光達（LiDAR, Light Detection and Ranging）與資料分析軟體不斷進步，已被應用於林業資源與樹木調查。本研究嘗試將光達應用至公共工程的大面積樹木調查，並透過地面調查的資料檢核與操作修正，實際應用於桃園航空城規劃案的一般樹木調查及數量規格估算。地面檢核成果顯示，LiDAR 可獲取準確的樹木座標與樹高，另使用樹高一胸徑的指數模型，可獲得良好的胸徑推估值。部分樹木的測量值差距較大，主要出現在樹種較複雜，以及生長較密集的地區。使用光達資料進行桃園航空城樹木調查的總面積約為 2,376 公頃，判釋成果總計樹木數量為 37,029 株，其調查成果可用以評估既有樹木處理的方式，如保留、移植、移除等，以及相對應的工程處理費用估算。未來的樹木調查可靈活運用不同載具（空載、UAV、車載及手持式）的光達系統，結合不同來源的點雲資料的優勢，獲取全方位的樹木資訊。

關鍵字：空載光達（Airborne LiDAR）、樹木調查、桃園航空城

一、前言

公共工程開發前之規劃階段，需要對施工地區內的樹木進行調查，以利完成後續的植栽規劃與移植計畫，以及移植經費的估算。傳統的一般樹木調查需透過專業人員進行地面普查工作，記錄其樹木編號、名稱、樹高、座標、胸高直徑、樹冠幅等資訊。地面普查工作需耗費大量時間與人力成本，對於中小型之調查範圍尚可接受；然而，若計畫範圍廣達上百甚至上千公頃，則必須

有更先進更有效率之調查方法，進行樹木定位與數量估計。

近年來光學雷達技術（Light Detection and Ranging, LiDAR）與資料分析軟體不斷進步，從最初的工程測距應用，到大面積高精度的地形監測（蕭震洋等，2009；林伯勳等，2012），近年來更被應用於林業與樹木調查（van Leeuwen and Nieuwenhuis, 2010；魏浚紘等，2010；林莉萍等，2014；Camarretta et al., 2019）。光達係指以雷射光對目標物進行高密度的掃描，獲取目標物三維

* 中興工程顧問公司建築工程部工程美學中心工程師

** 中興工程顧問公司建築工程部工程美學中心規劃師

*** 中興工程顧問公司建築工程部工程美學中心主任

形貌的遙測技術。其雷射光具有穿透樹葉縫隙的特性，能快速偵測得森林林分結構的三維空間資訊（林莉萍等，2014）。光達系統已被證實適用於林木資源、生物量、冠層立體空間繪製，並且能產出單木層級的資料，包括立木位置與樹高等（彭炳勳，2007）。

光達依照載具與空間尺度的不同，可分為衛載（Spaceborne）、空載（Airborne）以及地面（Terrestrial）等系統。衛星搭載的光達其優勢在於高時間頻度與大面積範圍，但相對地資料解析度較低；而地面光達通常針對小區域的目標物進行掃描，可獲取公分甚至公厘等級的資料解析度。至於搭載於飛機上的空載光達，可掃描數十公里的地面範圍，且其點雲密度（point cloud density）亦足夠獲取樹木的空間資訊，因此適用於大面積林業資源的調查。

有別於航空照片與衛星影像等被動式光學遙測系統，空載光達為一主動式偵測系統，自1970年代開始發展，配合後續全球衛星定位系統（Global Positioning System, GPS）及慣性導航系統（Inertial Navigation System, INS）的精進，能精確定位出掃描點座標，以快速獲取目標物的三維點雲資訊。傳統地面調查於樹高測量時，受限於不同樹種的冠幅形狀及林木密生的影響，樹高測定不僅費時且不容易正確（彭炳勳，2007），而空載光達可透過樹冠頂與地面點的高程測定，獲得精確的樹高資訊，正確率可達90%以上（Means et al., 2000）。對於不易抵達的山區，空載光達亦能獲得精確的樹高與位置資訊，如國內林業試驗所與成功大學團隊合作執行的「巨木地圖」計畫，即應用空載光達資料，探測臺灣山區的巨木所在（林試所，2020）。近年來隨著演算法的精進，更可將點雲資料分割為單木點雲，進而取得樹冠幅、樹冠面積等資訊。

空載光達於國內的林業資源調查已有許多的

學術研究與實際應用，本研究嘗試將此技術應用至公共工程的大面積樹木調查，並透過地面調查的資料檢核與操作修正，實際應用於桃園航空城規劃案的一般樹木調查。文末並討論不同載體之光達資料的樹木調查應用策略。

二、光達判釋樹木之方法與流程建立

（一）空載光達判釋樹木之原理

光達判釋植生之原理，乃利用雷射光的可穿透性及多重反射特性，可同時測得地面與樹冠層頂端之點位。原始點雲資料可依據距離與反射強度進行分類，若使用植生表層之點雲，可建立數值地表模型（Digital Surface Model, DSM），而使用地面點之點雲，可建立數值地形模型（Digital Terrain Model, DTM），將 DSM 減去 DTM，即可獲得樹冠高程模型（Canopy Height Model, CHM）（圖1）。兩者相減的同時也消除了地形起伏的影響，可獲得樹高資訊，同時定位出樹木的座標位置。

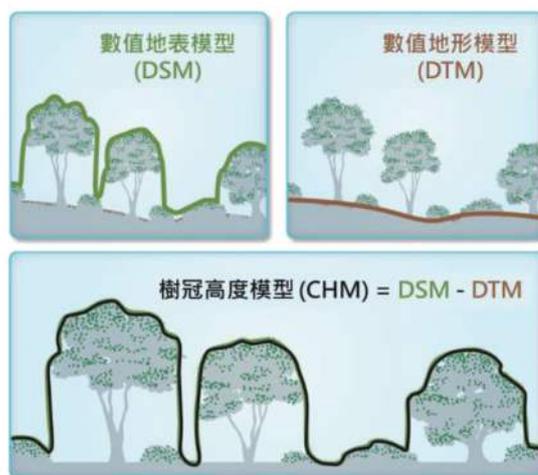


圖1 樹冠高度模型建立之概念
 （修改自 neonscience.org/）

(二) 分析工具與材料

因應光達於各領域應用的需求，近年來發展出多款點雲分析軟體，以處理巨量資料，提供點雲分類、3D 建模等功能。本研究使用 LiDAR360 (version 4.0) 作為分析工具，該軟體除了基本的點雲分類與高程建模功能外，其主要特色在於具備林木計測模組，支援空載及地面光達兩種資料來源，透過內建的演算法，可自動萃取單木的座標、樹高、冠幅等資訊。

本研究以桃園航空城區段徵收工程範圍為分析目標（範圍說明與分析成果見第四節），使用桃園市政府工務局提供之空載光達點雲資料（民國 106 年測製地形用），點雲密度約為 3.3~4.2 pt/m²，足夠提供後續的樹木分析使用。另搭配民國 109 年正射影像（解析度 1×1 m），作為空間資訊的比對。

(三) 應用空載光達於樹木調查流程

本研究使用上述分析工具與材料，建立樹木調查流程（圖 2），各步驟說明如下：

1. 模型建立

首先匯入點雲資料並去除雜訊（remove outliers），程式可將點雲自動分類為地面與非地面點，接著使用點雲建立數值地表模型（DSM）與數值地形模型（DTM），並藉由 DSM 與 DTM 建立樹冠高程模型（CHM）。本研究設定各模型的空間解析度為 1×1 m。

2. 單木分割與計測

使用 CHM 執行單木分割（CHM segmentation），程式會萃取出局部最高點作為單木所在位置，並計算樹高與框出樹冠範圍。此步驟須設定偵測的最小樹高，本研究的分析目標是計畫範圍內的喬木，故設定最小樹高為 2 m，並假定 2 m 以下為

灌木叢。樹高 > 2 m 的灌木，可透過人工檢核剔除（說明如後）。

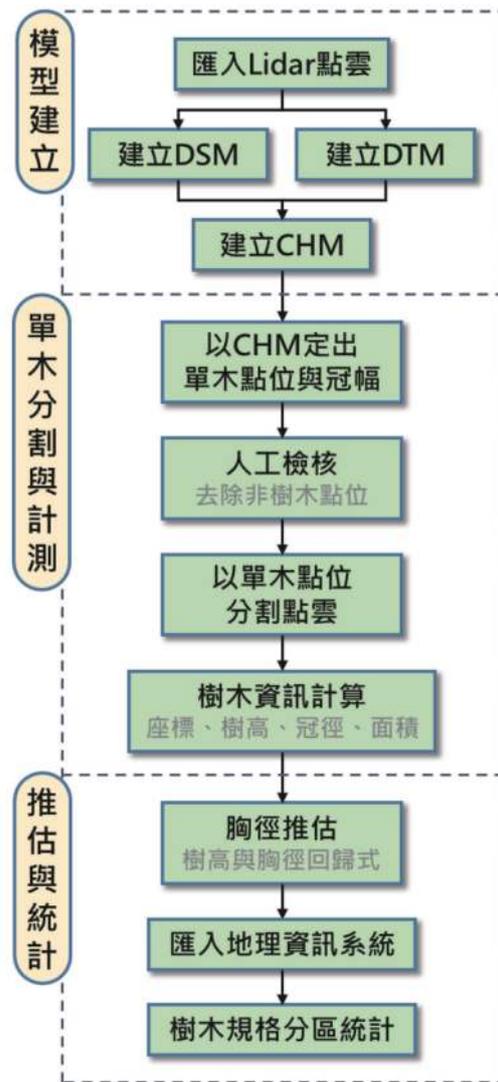


圖 2 以空載光達進行樹木調查流程

若點雲分類時僅分類為地面點與非地面點，則程式會自動將所有地表突起物視為可能的樹木，包含建物、電桿等，這時需進行人工檢核，將此類地物剔除。首先將點雲以高程分色，並疊合正射影像做平面檢視，將明顯屬於建物的點位剔除，另電桿通常分布於道路兩側，且判釋出的「樹冠」僅 1 m²，有別於樹木特徵。若平面檢視

不易判釋，可選取局部小範圍檢視立體點雲，依地物的形態特徵判釋，例如建物一般具有平整屋頂與垂直牆壁，而電桿則為細長型。檢視時可搭配 Google 街景，以實景協助確認。

事實上 LiDAR360 有自動分出建物點雲的功能，亦可使用其機器學習 (Machine Learning) 的工具，以人工圈選出多組建物點雲提供程式辨識，以便於最初分類時就將建物分出，減少人工剔除建物的時間。但需注意評估辨識的正確性，避免過多的樹木在辨識的過程中被濾除。

除了建物與電桿外，人工檢核尚須剔除非喬木的植生，如竹林、香蕉、灌木等，本研究使用的正射影像解析度對於判釋這類地物略顯不足，點雲型態也不易辨別，此時 Google 街景便成為良好的輔助工具，提高人工檢核的正確性。另可搭配民國 109 年全國國土利用調查 (國土規劃地理資訊圖台 <http://nsp.tcd.gov.tw/ngis/>)，協助確認闊葉林與竹林的空間分布，作為判釋的輔助。

人工檢核完畢之後，使用剩餘被視為樹木的點位，將點雲分割為一株株的單木 (point cloud segmentation)，即單木以一組點雲呈現，程式便會自動重新計算每木的座標、樹高、樹冠幅與面積，將這些樹木資訊輸出為 .csv 檔，可匯入 excel 進行後續的編輯與統計。

3. 胸徑推估與數量統計

空載光達可獲取精確的樹木座標與樹高資訊，然而，因掃描方向為俯視角度，樹幹通常被樹冠遮擋，因此難以量測樹木胸高直徑 (Diameter at breast height, DBH)。然而研究指出，樹高與樹冠幅兩者與胸徑關係最為密切，因此以樹高或樹冠幅作為參數來推估胸徑應屬可行 (魏浚紘等，2010)。若為單一樹種，均可獲致顯著的「樹高一

直徑」方程式 (林文亮等，2001)。

本研究使用桃園航空城鄰近的草漯重劃區 (面積約 312 公頃) 於 2017 年 2 月完成的樹木調查資料 (總計 18,817 株)，主要樹種包含苦楝 (Melia azedarach)、朴樹 (Celtis sinensis)、烏臼 (Triadica sebifera)、相思樹 (Acacia confuse)、木麻黃 (Casuarina equisetifolia) 等，與航空城樹種組成相似且具地緣關係，以之建立胸徑對應樹高與冠徑的關係式，使用線性、多項式、指數、乘冪等迴歸方式，其中指數模型的相關係數最高，其胸徑與樹高的相關係數為 0.54，胸徑與冠徑的相關係數為 0.64。由於模型含括所有的樹種，故僅為中度相關，但以大面積調查的尺度來說，仍可做出合理的推估。

雖然胸徑與冠徑的相關係數高於其與樹高的係數，但以 LiDAR 資料分析所得的樹高資訊，其可信度較冠徑高。因為在檢核過程中，發現若相鄰數株闊葉樹的樹高相似，容易因其樹冠相連而導致被判別為同一株，造成單一樹冠面積判釋過大，此現象在密林區特別明顯。相較之下，樹高資訊較不受樹木生長分布所影響。故本研究使用胸徑—樹高的指數模型來推估研究範圍的樹木胸徑，如下式：

$$DBH = 10.077e^{Ht}$$

其中 DBH 為樹胸徑，Ht 為樹高。

將推估的胸徑結合前述的樹木座標、樹高等資訊，建立樹木資料庫，並依座標位置匯入地理資訊系統 (Geographic Information System, GIS) 後，即可視分區的需求，進行樹木規格的數量統計。規格統計時以胸徑區間範圍表示，本計畫採公共工程及苗木市場慣用的 10 公分為胸徑分級區間 (如 10~20、20~30 cm)，以配合達成規劃及基本設計階段工程經費估算的目的。

三、地面調查檢核

透過上述方法與流程所獲取之樹木資訊，本研究選取幾處的樣區進行地面檢核，藉此評估分析方法的正確性，並探討造成差距的可能原因，以作為後續的修正與精進。

(一) 檢核方法與流程

1. 選擇樣區

樹木的排列方式與生長密度可能會影響 LiDAR 擷取樹木資訊的正確性，故本研究於計畫範圍內選擇線狀與面狀分布的樣區各 2 處執行現地檢核，其位置分布如圖 3，各樣區之範圍與檢核株數如表 1 所列。



圖 3 檢核樣區位置分布

表 1 檢核樣區基本資料

樣區	範圍	檢核株數	位置概述
線狀 1	170 m	23	八股路 (224~229 巷口)
線狀 2	210 m	18	菓林埤塘北側道路
面狀 1	65×50 m ²	41	海軍基地西北側
面狀 2	80×80 m ²	44	海軍基地西南側

選定樣區後，可將該區之樹木點位資訊匯出為 .kml 檔，並上傳至 Google Earth 雲端，即可由手機或平板等行動裝置開啟，方便於現地確認檢核的目標物。

2. 現地測量與檢核

本研究於 2020/11/4 進行現勘，以行動裝置比對並確認目標物後，使用手持式 GPS 量測樹木座標，並以手持式雷射測距儀 (Leica D510) 的測高功能測量樹高，若反射訊號不佳則以身長比例法估算。使用皮尺量測胸高樹圍 (以地面算起 1.3 m 處)，並假設樹幹為正圓以換算樹胸徑；少數單木生長具有分支，則分別測量各分支之樹圍，紀錄合併胸徑。按照樣區與樹木編號分別記錄測量值。

3. 誤差統計分析

本研究使用盒鬚圖 (Box and Whisker Plots) 來檢驗 LiDAR 分析值和現地測量值的差異。盒鬚圖用於檢視一組數據或比較不同組數據的分散程度，其圖形意義如圖 4 所示。

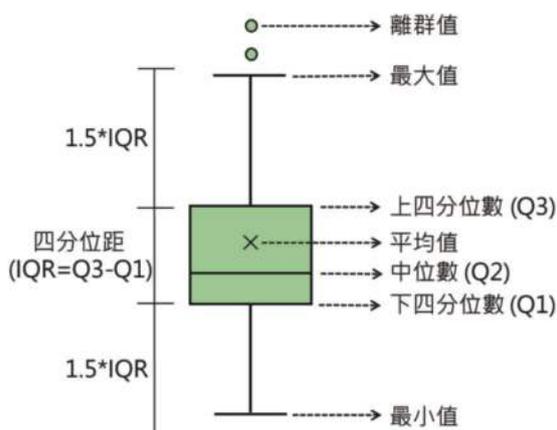


圖 4 盒鬚圖之圖形與數值意義

(二) 檢核成果

1. 點位座標差距

各樣區的樹木點位座標差距如圖 5 (A) 所示，不論線狀或是面狀樣區，其平均值與中位數均 < 5 m，在近距可視範圍內，顯示 LiDAR 樹木定位準確度高。部分離群值差距 > 8 m，乃因冠幅較大之樹木，其樹冠頂點 (LiDAR 判釋) 與樹幹位置 (現場量測) 有所偏差，加上手持 GPS 於林下定位的誤差較大，但於現地都能尋找到目標物。

2. 樹高差距

各樣區的樹高差距如圖 5 (B) 所示，其中位數均 < 1 m，顯示樹木高度資訊準確。其中線狀 1 樣區的差距僅 0.6 m 為最低，該樣區樹木均為行道樹 (水黃皮 *Millettia pinnata*)，且各株之間間隔 > 4 m，LiDAR 可準確地判別與測高。另面狀 1 樣區部分離群值差距 > 5 m，推測因為樹木生長較密，大樹的樹冠會覆蓋鄰近的小樹，導致 LiDAR 擷取樹高與現地不相符。另 LiDAR 資料與現地時間存在時間差異，可能因樹冠或樹型的改變，或是樹木發生折斷，使得樹高資料有較大的差距。

3. 胸徑差距

各樣區的樹高差距如圖 5 (C) 所示，線狀樣區的胸徑差距，其平均值與中位數均小於 10 cm，胸徑推估相當準確。其中樹種單一的線狀 1 樣區，平均值差距僅 2.2 cm。面狀樣區的差距較線性樣區略大，中位數差距約為 10 cm，平均數受到少數極端值影響，差距在 20 cm 上下。面狀樣區的樹種較為複雜，其中面狀 1 樣區包含了針葉樹與闊葉樹，導致胸徑差距存在較大的變化。另某些樹種 (如印度橡膠樹 *Ficus elastica*) 於胸高位置有多條粗壯分支，測量時的合併胸徑

會明顯高於推估值。

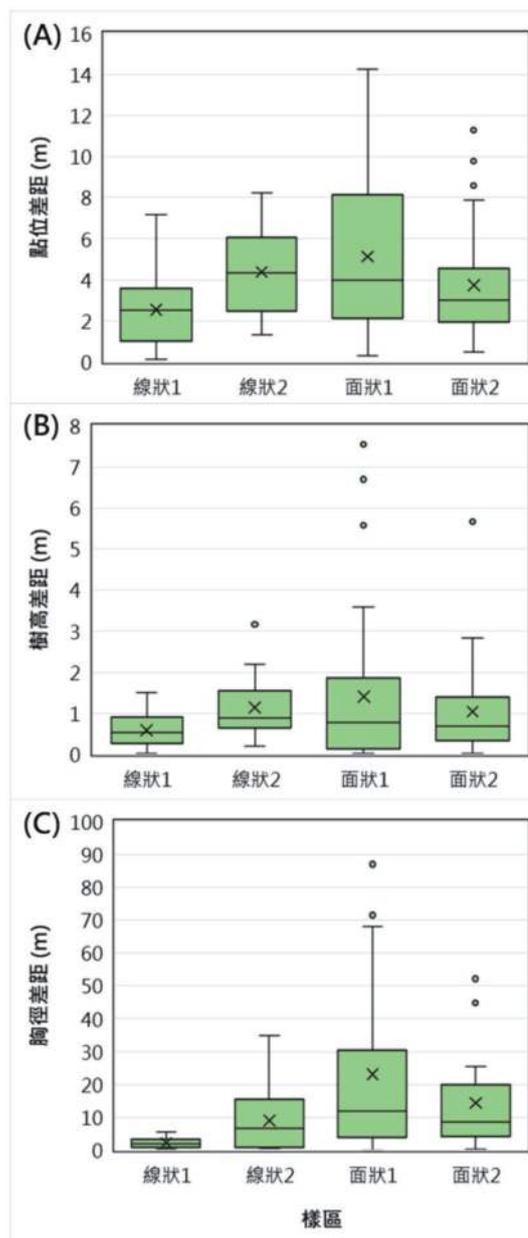


圖 5 各樣區之 (A) 點位差距、(B) 樹高差距、(C) 胸徑差距之盒鬚圖

(三) 檢核成果之歸納與應用修正

上述的檢核成果，顯示 LiDAR 分析法可獲取準確的位置與樹高，在胸徑方面亦能獲得良好的推估值。至於部分樹木的測量值差距較大，主要

出現在樹種較複雜，以及生長較密集的地區。

理論上若能依照樹種採用不同的樹高一胸徑關係式，便可提升推估的準確性。然而在大面積樹木調查的實務中，一來無法單從 LiDAR 資料判定樹種，二來建立此資料庫相當耗費成本，故採用單一關係式仍是較具效率的實用方式。

樹木生長較密集的地區，會因樹冠層的相連而影響 LiDAR 分割單木的成果，特別是闊葉林（彭雅莉，2016）。有時可能會將一顆具有多個樹冠的單木判釋為多棵樹，亦有可能將多棵高度相近且樹冠相連的多棵樹判釋為一棵單木。所幸上述情形在 LiDAR 分析軟體中，可以做人工修正。使用者可以在已做完單木分割的點雲中，自行增加或減少樹冠點位，透過點雲的三維分布特徵，搭配 Google 街景的確認，即可刪除多判的樹木，並增加漏判的樹木，此人工修正的程序可與前述人工檢核非樹木點位的程序（圖 2）同時進行。修正完成後再以更新後的點位重新做自動化點雲單木分割（如圖 6）與數據測量，獲致更為正確的樹木數量與位置、樹高、冠徑等資訊。

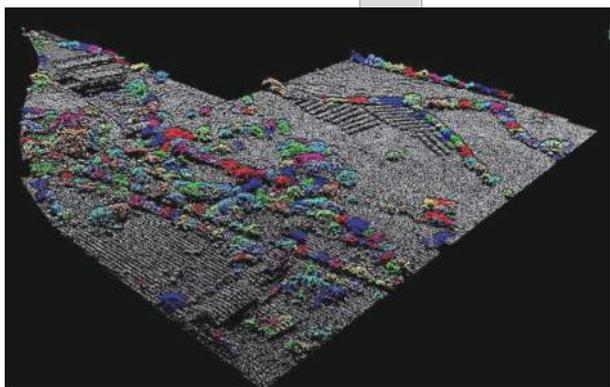


圖 6 人工檢核後之點雲單木分割（優先開發區 E）

四、應用光達於桃園航空城樹木調查

（一）調查範圍簡介

桃園航空城位於桃園市北側（圖 7），其範圍

主要包括「擬定桃園國際機場園區及附近地區特定區計畫」（範圍 4,564.32 公頃）及其他周邊地區。桃園航空城開發方式為區段徵收，區段徵收面積 3,148.17 公頃、其中交通部辦理區段徵收面積 1,412.81 公頃；桃園市政府辦理區段徵收面積 1,735.36 公頃（桃園航空城公司，2021），為臺灣有史以來最大的開發及都市計畫。

規劃階段依工程需要進行計畫範圍內的一般樹木數量及規格調查，本研究使用前述建立的 LiDAR 樹木調查方法與流程（第二節），並依現地檢核成果進行技術修正（第三節），執行區段徵收範圍內的一般樹木調查。依計畫期程，先後可分為優先開發區（計 14 處）、第一期開發範圍 A1~D3（計 10 個標別），以及第二期開發範圍（圖 7），總計面積約為 2,376 公頃。

（二）一般樹木之數量規格統計

本研究所建立之 LiDAR 樹木調查流程可獲致精確之樹木位置與樹高資訊，並推估合理之胸徑區間，然而受保護樹木認定時所需之樹種及生長狀況等資訊，仍須由專業人員於地面調查判定，故 LiDAR 分析僅用於調查範圍內一般樹木之數量規格，因此數量計算時須扣除由地面調查時所認定之受保護樹木與特定樹木。

依照「桃園市樹木保護自治條例」第 3 條，受保護樹木指「森林以外之樹木普查方法及受保護樹木認定標準」第二條所定之樹木；而特定樹木之胸徑認定為「闊葉樹之樹幹胸高直徑達零點八公尺以上」。計畫範圍內之受保護樹木及特定樹木，其數量分別為優先開發區 248 株、第一期 2,312 株、第二期 484 株。依照上述特定樹木之胸徑認定標準，LiDAR 分析成果在數量規格統計時，胸徑 80 cm 以上之樹木將不列入。

將 LiDAR 樹木調查的分析成果，依座標點位匯入 GIS 圖層，並套疊受保護樹木與特定樹木之點位（如圖 7），若點位重複則予以濾除，避免重複計算。接著依胸徑規格進行各分區 / 標的一般樹木數量統計（表 2 與表 3），其中優先開發

區總計有 6,412 株，第一期開發範圍（不含優開區）計有 21,518 株，第二期開發範圍（不含優開區）計有 9,099 株，總計畫範圍內共有 37,029 株一般樹木。

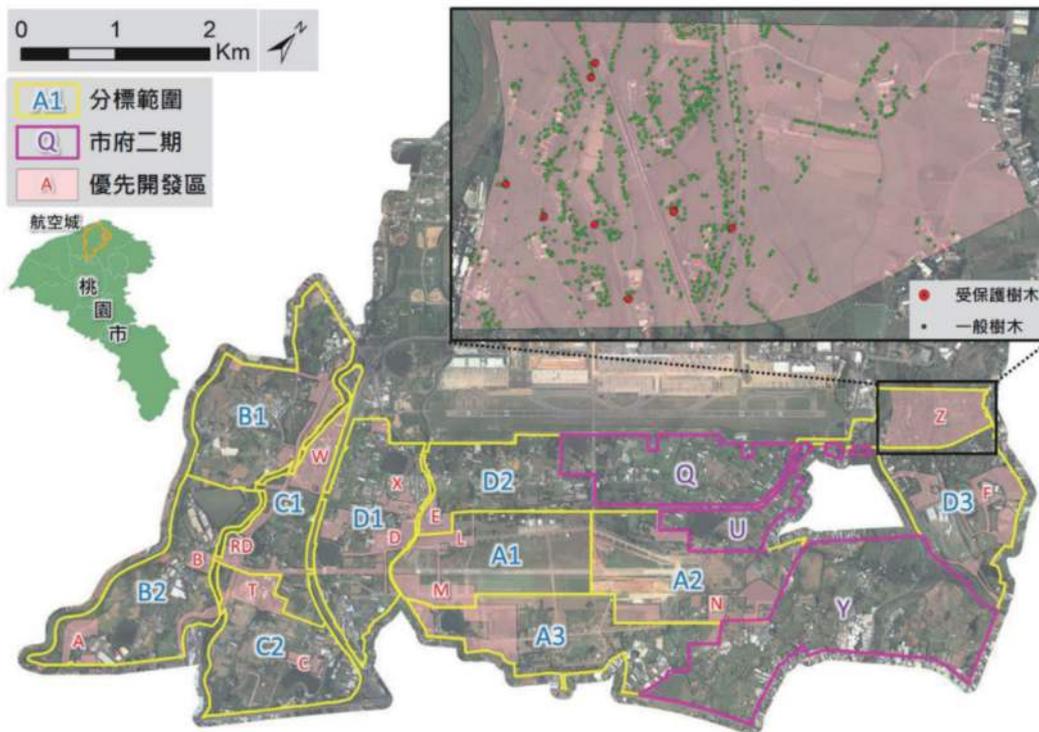


圖 7 桃園航空城優先開發區與分標範圍分布。
 右上圖框為 LiDAR 樹木定位之局部範例（優開區 Z）

表 2 優先開發區一般樹木數量規格統計

優開區 胸徑 (cm)	A	B	C	D	E	F	L	M	N	RD	T	W	X	Z	總計
10~20	92	67	25	140	195	258	72	306	187	397	127	403	65	486	2,820
20~30	50	85	4	93	162	235	144	265	234	534	89	281	22	436	2,634
30~40	34	8	1	30	19	76	15	76	90	217	48	59	1	75	749
40~50	1	0	0	10	6	15	2	31	16	36	11	14	0	12	154
50~60	0	1	0	0	0	5	0	10	5	6	7	1	0	6	41
60~70	0	1	0	1	0	2	1	3	0	0	3	0	0	1	12
70~80	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2
總計	177	162	30	274	382	591	234	691	533	1,190	286	758	88	1,016	6,412

表 3 第一期與第二期一般樹木數量規格統計

胸徑 (cm)	第一期											第二期			
	A1	A2	A3	B1	B2	C1	C2	D1	D2	D3	總計	Q	U	Y	總計
10~20	178	499	1,118	899	1,201	626	730	936	1,644	573	8,404	1,383	467	2,536	4,386
20~30	364	493	1,005	1,158	1,308	538	762	623	1,728	674	8,653	918	387	2,050	3,355
30~40	248	158	304	343	587	241	420	255	571	157	3,284	361	146	568	1,075
40~50	69	29	103	66	188	42	136	65	101	30	829	100	30	67	197
50~60	27	7	24	23	49	17	25	21	37	10	240	24	11	18	53
60~70	12	3	12	5	3	7	9	10	14	3	78	8	9	4	21
70~80	3	0	9	0	2	5	4	3	4	0	30	1	4	7	12
總計	901	1,189	2,575	2,494	3,338	1,476	2,086	1,913	4,099	1,447	21,518	2,795	1,054	5,250	9,099

(三) 資料應用

以 LiDAR 分析所得之樹木數量規格統計成果，可於工程規劃之基本設計階段，作為既有樹木處置之工程費用估算的依據。此外，每株單木可依其分區予以流水編號，結合座標的空間資訊及樹高、冠徑、胸徑區間等屬性資訊，建立樹木資料庫，以 GIS 進行樹木智慧化管理。

上述之樹木空間資料庫，可轉為 .kml 檔，便於雲端共享與行動裝置使用。後續於分包階段進行樹木普查時，執行廠商可據此迅速獲知調查目標的空間位置與數量分布狀況，提升調查效率，進行現場調查，測量胸徑，判別樹種，完成樹木資訊的完整登錄。

大樹，提供潛在受保護樹木之明確點位，提升地面調查之效率。

以光達系統萃取樹木資訊乃是透過點雲的演算與分割，因此若能提高點雲密度，將可提升樹木判釋能力與分析成果的準確性，並讓樹木測量資訊從點（座標）、線（冠徑）、面（樹冠面積），到體（樹冠層體積），完整地紀錄。空載光達雖然無法獲得樹種資訊，然而若點雲密度夠高，足以呈現樹木的型態特徵，至少可以分辨出針葉樹與闊葉樹。Krzystek *et al.* (2020) 使用高密度光達點雲 (~55 pt/m²)，不僅成功分辨出針葉樹與闊葉樹，甚至可以篩選出枯立木，正確率可超過 90%。若能區分出針葉樹與落葉樹，將可應用個別的樹高一胸徑關係式，進而提升胸徑推估的準確性。

五、討論與結論

相較於傳統的地面樹木調查，空載光達的優勢在於可快速進行地毯式調查，獲取大面積之樹木概況，大幅減少人力與時間成本；且對於地面調查不易進入之地區（如密林、私宅、管制區等），亦可獲取所需的樹木資訊。此外，依據光達調查的初步成果，可快速篩選出計畫範圍內的

空載光達無法直接測量胸徑乃是因為掃描視角的限制，而車載或地面光達能以側向視角掃描，可精確測量胸徑。近年來車載光達技術的提升，可針對行道樹進行數位化移動測繪（陳建璋等，2017；Herrero-Huerta *et al.*, 2018；Heo *et al.*, 2019），可獲致相當細緻的掃描成果。結合環景影像的紀錄，可提供專業人員進行樹種辨識，大

幅縮短調查時間，並增加人員安全性。

無人飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 亦可搭載光達系統，相較於一般的空載光達，UAV 可採用較低的航高以獲致更為密集的点雲。此外，UAV 亦可由空拍影像生成點雲，結合地面光達系統，完整測繪自地面至樹冠層的立木資訊 (Tian *et al.*, 2019)。至於地面光達，掃描時需架設於一固定點，再透過不同方位的多點掃描，獲取一定範圍內之樹木資訊。近年來更研發出手持式光達，調查人員持光達掃描儀於森林中漫步走動，即可獲取精準的點位與胸徑資訊，大幅提升樹木調查機動性。

綜上所述，各類光達技術應用於樹木調查已漸趨成熟，調查者可依照調查範圍的空間尺度以及主要目的，來決定使用的載具。若為上千公頃的大面積調查，目的為估算數量規格，則空載光達最具效率；中小範圍的調查使用 UAV 較具機動性；若欲調查道路兩側的行道樹，車載光達是不二選擇；若欲取得密林區的林下資訊，則手持式光達可以有良好的發揮。上述不同的光達系統亦可相互搭配組合應用，結合不同來源的點雲資料的優勢，獲取全方位的樹木資訊。光達與其他工具如 UAV 影像的融合應用是可以期待的 (van Leeuwen and Nieuwenhuis, 2010)，結合其他光學遙測技術，可進一步用於監測植生的生長與復育狀況 (Camarretta *et al.*, 2019)。

本研究建立空載光達的樹木調查分析流程，並透過地面檢核作為修正，應用於桃園航空城規劃階段的一般樹木數量規格估算，其調查成果可用以評估既有樹木處理的方式 (如保留、移植、移除等)，以及相對應的工程處理費用估算。所獲取的樹木位置、樹高、胸徑等資訊，結合 GIS 以建立樹木的空間資料庫，可提升後續樹木普查的執行效率，並可作為樹籍管理的基礎資料。未來的樹木調查可靈活運用不同載具 (空載、

UAV、車載及手持式) 的光達系統，結合不同來源的點雲資料的優勢，獲取全方位的樹木資訊。期待光達於公共工程規劃能有更廣泛的應用。

謝誌

感謝桃園市政府工務局及航空城工程處積極推動導入本項技術，並感謝桃園市政府工務局賴宇亭局長及陳聖義副局長多次主持會議深入指導。另感謝工程美學中心同仁林嘉莉、李恆欣小姐協助樹木調查地面檢核工作。與此一併謝誌。

參考文獻

- 行政院農業委員會林業試驗所 (2020) 臺灣的群眾，一起尋找臺灣的巨木，檢自 https://www.tfri.gov.tw/main/news_in.aspx?siteid=&ver=&usid=&mode=&mnuid=5425&modid=529&nid=37870&noframe=。
- 林文亮、王兆桓、陳家玉 (2001) 臺灣地區人工林樹高方程式之建立，國立臺灣大學農學院實驗林研究報告，15 (1) : 25-32。
- 林伯勳、蕭震洋、許振崑、冀樹勇 (2012) 空載光達高精度掃描技術評估石門水庫集水區整治成效，中興工程，114: 23-33。
- 林莉萍、王正楷、曾義星、朱宏杰 (2014) 應用空載光達資料估計森林樹冠高度模型及葉面積指數，航測及遙測學刊，19 (2) : 107-123。
- 桃園航空城公司 (2021) 計畫位置與範圍，<https://taoyuan-aerotropolis.com/cht/index.php>。
- 彭炳勳 (2007) 應用空載光達資料推測林木樹高與葉面積指數，國立屏東科技大學森林系碩士論文。
- 彭雅莉 (2016) 利用影像分割法描繪離散型空載光達不同林型組成立木樹冠之研究，國立嘉義大學森林暨自然資源研究所碩士論文。
- 魏浚紘、吳守從、彭炳勳、陳朝圳 (2010) 應用空載光達建立阿里山地區柳杉人工林之林分材積式，地理學報，59: 67-80。
- 陳建璋、魏浚紘、謝依達、陳朝圳 (2017) 行道樹、受保護樹木調查及系統資料建立與應用，中華林學季刊，50 (1) : 33-56。
- 蕭震洋、林伯勳、鄭錦桐、辜炳寰、徐偉城、冀樹勇 (2009) 應用光達技術進行集水區土砂運移監測及攔阻率評估，中興工程，105: 17-25。
- Camarretta, N., Harrison, P.A., Bailey, T., Potts, B., Lucieer,

- A., Davidson, M. and Hunt M. (2019) Monitoring forest structure to guide adaptive management of forest restoration: a review of remote sensing approaches. *New Forests*, 51: 573–596.
- Chen, W., Hu, X., Chen, W., Hong, Y. and Yang M. (2018) Airborne LiDAR remote sensing for individual tree forest inventory using trunk detection-aided mean shift clustering techniques, *Remote Sensing*, 10(7) : 1078.
- Heo, H.K., Lee, D.K., Park, J.H. and Thorne, J.H. (2019) Estimating the heights and diameters at breast height of trees in an urban park and along a street using mobile LiDAR. *Landscape and Ecological Engineering*, 15: 253-263.
- Herrero-Huerta M., Lindenbergh R. and Rodríguez-Gonzálvez, P. (2018) Automatic tree parameter extraction by a Mobile LiDAR System in an urban context. *PLoS ONE* 13(4) : e0196004.
- Krzystek, P., Serebryanyk, A., Schnörr, C., Červenka, J. and Heurich, M. (2020) Large-scale mapping of tree species and dead trees in Šumava National Park and Bavarian Forest National Park using LiDAR and multispectral imagery. *Remote Sensing*, 12(4) : 661.
- Means, J.E., Acker, S.A., Fitt, B.J. Renslow, M., Emerson, L. and Hendrix, C.J. (2000) Predicting forest stand characteristics with airborne scanning Lidar. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 66(11) : 1367-1371.
- Suárez, J.C., Ontiveros, C., Smith, S. and Snape, S. (2005) Use of airborne LiDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry, *Computers & Geosciences*, 31(2) : 253-262.
- Tian, J.; Dai, T.; Li, H.; Liao, C.; Teng, W.; Hu, Q.; Ma, W.; Xu, Y. (2019) A Novel Tree Height Extraction Approach for Individual Trees by Combining TLS and UAV Image-Based Point Cloud Integration. *Forests*, 10, 537.
- van Leeuwen M, Nieuwenhuis M. (2010) Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing. *European Journal of Forest Research*. 129(4) : 749-70.

應用程式

公開發售

結合 ETABS 之位移法耐震性能設計及評析程式

售價：新臺幣 9,190 元/套(含報告)

訂購電話：(02)8791-9198 轉 467 陳小姐

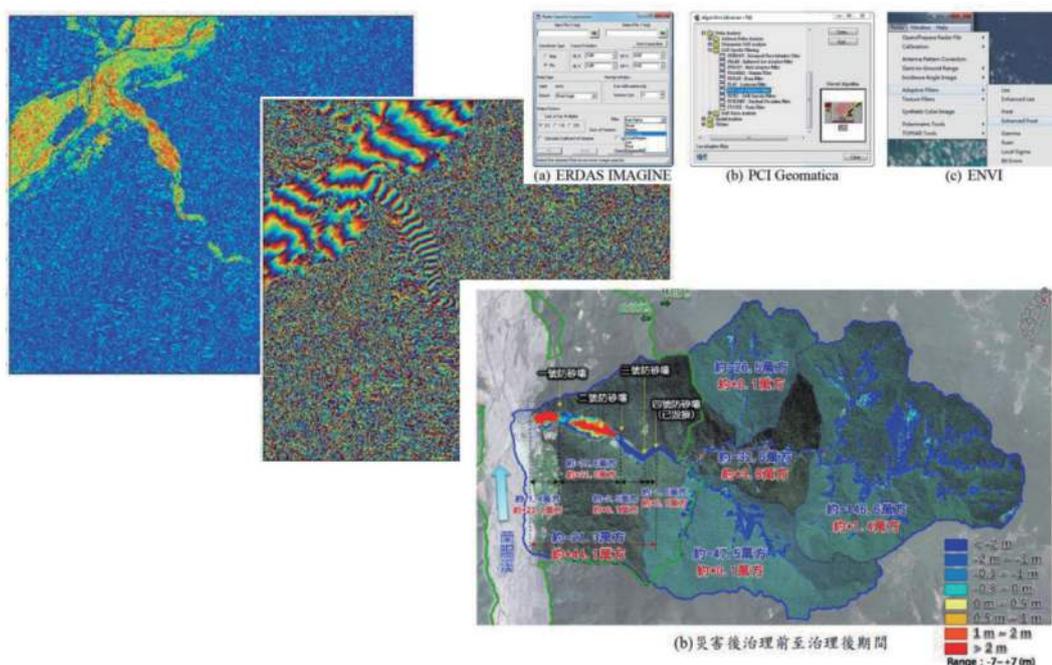
傳 真：(02)8791-2198

E-MAIL：louis@sinotech.org.tw

應用雷達影像評估坡地災害

本書彙整雷達影像技術之影像取得、資料處理、標準化產品、影像判釋及應用案例等相關研究報告與期刊文獻，建立「衛星雷達影像前處理」、「衛星雷達影像於坡地災害變異點偵測技術」及「衛星雷達觀測坡地災害高程變異技術」等三項雷達衛星影像處理技術，成功應用於實例。茲將重點條列如下：

1. 衛星雷達影像前處理技術：針對前後期重複觀測的雷達影像，以自動化方式於雷達影像上尋找大量、空間分布均勻且可靠度高之共軛點，進行自動化匹配套合程序；同時，亦針對臺灣地形環境建立適用之雷達前處理作業程序，以產製具有良好精度之正射影像與數值地形模型資料，提供環境變異偵測作業利用，提昇整體效率。
2. 衛星雷達影像於坡地災害變異點偵測技術：應用經輻射校正、正射糾正及濾波處理後的正射雷達影像，搭配自動化影像判釋技術，建立災害變異點偵測技術，可量化評估災害變異之面積。
3. 衛星雷達觀測坡地災害高程變異技術：建立相位差比較法及數值地形相減法等兩種衛星雷達觀測坡地災害高程變異技術，得以產製數值地形模型與崩塌量體、高程變動量及沖淤變動等相關結果，取得災後量化資訊。



相關資訊請洽 財團法人中興工程顧問社 防災科技研究中心
林伯勳博士（02-87919198 分機 309）、李璟芳博士（分機 344）
臺北市內湖區新湖二路 280 號

水庫集水區土砂調節效益分析

林晉守* 林伯勳** 陳俊愷*** 何幸娟***
張哲益**** 蔡明發*****

摘 要

水庫集水區上游之土砂調節及控制，一直係為水庫蓄水及供水操作、庫容維持最重要課題之一。若遭遇颱風豪雨事件大量土砂流出時，防砂壩可儲存土砂達至滿砂後，將增大溪床寬度使得水流流速變慢，被輸送土砂受重力作用產生堆積，以減輕並調節於下游的輸送土砂量，即為土砂調節效益。本文以石門水庫集水區之蘇樂溪集水區為例，彙整歷年調查成果與遙測圖資、及民國 109 年前汛期間 3 次 UAV 航拍數值地形，進行數值高程分析，成果顯示蘇樂地區自民國 95 年至今，共計設置 18 座河道橫向構造物，總儲砂量推估為 38.5 萬方，其總調砂量為 13.5 萬方；土砂調節效益比為 35.06%，且土砂調節效益比自民國 107 年後則皆趨於定值，顯示單一防砂設施之土砂調節效益具有極限，相關成果除可作為水土保持治理成效說明外，另可回饋至水庫上游集水區土砂流出管理策略規劃之依據。

關鍵字：水庫集水區、數值地形、土砂調節效益

一、前 言

防砂設施一般係指為攔蓄河道泥砂、調節泥砂輸送、穩定河床及兩岸崩塌、防止侵蝕、沖蝕、抑止土石流所構築高度五公尺以上之橫向構造物，此外，當防砂壩可貯存土砂至淤砂坡度時，若遭遇大洪水事件時，亦可將一次性的土砂生產量調節為多次分批流出，以降低對集水區下游河道、水庫或其他保全對象等威脅，稱為調砂效益。每當颱風豪雨事件後，上游來砂受洪水挾帶通過防砂壩時，防砂壩上游將堆積新的淤砂坡度，其重回到動態平衡期間所分配之過程，如圖 1 所示。當洪水挾砂進入防砂壩上游淤砂範圍時，因坡度

突然變得平緩，水流中部分土砂料源順應坡度的改變而發生落淤，進而調整河段坡度。洪水期間調砂作用造成壩體上游溪床再度抬升，其河床位置約在紅色虛線處，形成一楔形淤積量體，此則係調砂量。而直到洪水消退時，水流中之挾砂量降低，因而由落淤轉變沖刷，此時，原先堆積在緩坡河段之細顆粒泥砂容易受沖刷，隨著水流逐漸往下游運移，溪床深槽位置下降，逐漸恢復颱風前之淤砂坡度，會恢復部分調砂空間，此即防砂壩對上游入流土砂在時間上的重新分配過程。就日本調查經驗上，透過不同時間點所量測淤砂坡度配合數學幾何公式計算調砂量及儲砂量，發現調砂量約為儲砂量 10 至 15%，其兩者比值關

* 中興工程顧問社防災科技研究中心助理研究員
** 中興工程顧問社防災科技研究中心土砂監測模擬組組長
*** 中興工程顧問社防災科技研究中心高級研究員
**** 行政院農業委員會水土保持局保育治理組水庫保育科工程員
***** 行政院農業委員會水土保持局保育治理組水庫保育科科長

係稱為調砂比（調砂量 / 儲砂量）（陳信雄等人，1989）；若於設計階段，則先計算儲砂量後，再利用調砂比演算其調砂量。

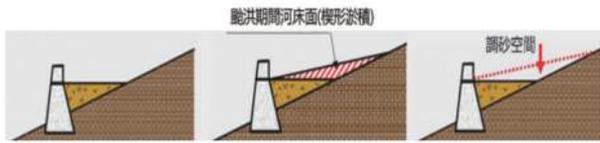


圖 1 防砂壩調節土砂沖淤過程示意圖
 （摘自日本國土交通省，2007）

目前國內調砂量計算方法，係以集水區保育治理前後之泥砂輸出之動態平衡關係，作為數值模式分析基礎。惟選用模式須具代表性，進一步討論影響因子包含：壩高、壩體上游淤砂長度、有效淤砂高度、淤砂坡度等參數，需透過工程圖資搭配現地調查進行率定驗證，耗時且人力成本高。鑑此，本文以石門水庫集水區蘇樂地區為案例，分別於汛期前、汛期後，利用 UAV 航拍方式進行航拍並產製數值地形，再結合公部門歷史遙測數值地形圖資計算河道高程變動量，進行歷年土砂調節效益評估，說明透過設置河道構造物對上游集水區土砂控制及調節之效益。

二、研究方法

（一）研究樣區選定

本文以 UAV 航拍方式產製野溪集水區數值地形並進行高程變動分析，不但機動性高，且最為經濟，是目前國內廣泛應用於水土保持相關研究方式之一。為有效探討河道土砂調節效益，需考量「基礎資料豐富度」、「土砂料源供應情形」、「野溪溪床開闊度與遮蔽率」等條件，分述如后：

1. 基礎資料豐富度

土砂調節效益分析目的為探討河道治理前、治理後其河道構造物對河床防砂及調砂功能改善情形，因此，除地文、水文等環境基礎資料外、航遙測圖資、歷年治理工程圖資等相關資料，實為此項分析成果之關鍵（尤以數值地形資料為甚）。

2. 土砂料源供應情形

野溪集水區上游是否仍有坡面崩塌、野溪溪床堆積等可運移堆積之土砂材料，皆為影響河道土砂調節效益之重點因子。若該野溪集水區已投入多期保育治理工程、且坡面崩塌已復育、或野溪暫無大量土砂料源可往下游運移、保育治理成效顯著者，則遭遇颱風豪雨事件後，其應無顯著地形貌變異，無法實質評估土砂調節量體及成效。因此，本文以上游仍有坡面崩塌、野溪溪床堆積等土砂料源等區域，作為研究樣區選定條件之一。

3. 野溪溪床開闊度與遮蔽率

若野溪溪床幅寬較小，則表示該樣區位處集水區上游，其上游土砂料源粒徑較大、野溪溪床較陡、土砂調節長度較短，所評估之土砂調節量有限；同時，若較上游之保育治理工程投入後，野溪溪床常有植被完整覆蓋，不易量測實際野溪溪床地形貌，以及無法有效估算土砂調節效益。反之，若野溪溪床幅寬較寬（如 30 至 50 公尺以上），則表示該樣區位處集水區中上游，其上游土砂料源來源較多、野溪溪床較緩、土砂調節長度較長，且野溪溪床較無植被完整覆蓋，較易於 UAV 航拍量測實際野溪溪床地形貌，估算土砂調節效益。

鑑此，本文以前述條件進行評估，以石門水庫集水區之蘇樂溪，作為土砂調節效益評估之研究樣區。

蘇樂溪屬於石門水庫集水區之野溪支流，位於蘇樂溪子集水區內，該子集水面積 596 公頃，佔石門水庫集水區總面積約 0.78%，下游匯流至大漢溪並流入庫區。其行政區位於桃園市復興區高義里，上方蘇樂橋係為連接桃園與宜蘭地區間之台 7 線山區交通要道，如圖 2 所示。

蘇樂溪子集水區上游坡度陡、裸露面多，其境內最大一次土砂災害為民國 93 年 8 月艾利颱風，崩塌地面積劇烈上升至 23.3 公頃，爾後於民國 94 年 9 月泰利颱風後，崩塌地面積增加至 27.1 公頃，相關歷程變化如圖 3 所示。為避免土砂災害進一步擴大，相關公部門隨即於民國 95 年起依「石門水庫及其集水區整治特別條例」進行蘇樂地區土砂災害治理，其中河道治理部分，自民國 93 年起至民國 107 年期間，水保局已陸續辦理共計 12 件整治工程，除上游崩場地整治及兩側設置護岸外，河道中亦陸續設置固床工、梳子壩、及防砂壩等橫向構造物，如圖 4 所示。參考水保局（2020）調查成果顯示，前述橫向構造物可提供約 38.5 萬方之儲砂空間，如表 1 所示。

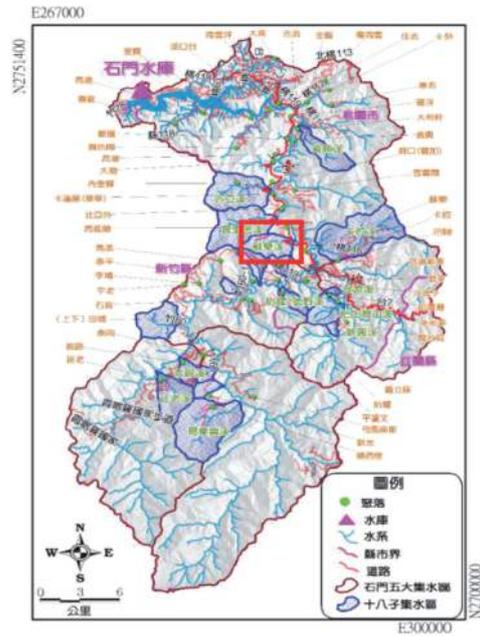


圖 2 石門水庫集水區空間分布圖

表 1 蘇樂溪河道橫向構造物儲砂量彙整表

類型 (數量)	儲砂量 (萬方)
防砂壩 (11)	37.1
梳子壩 (2)	8.4
固床工 (5)	1.4
總計 (18)	38.5

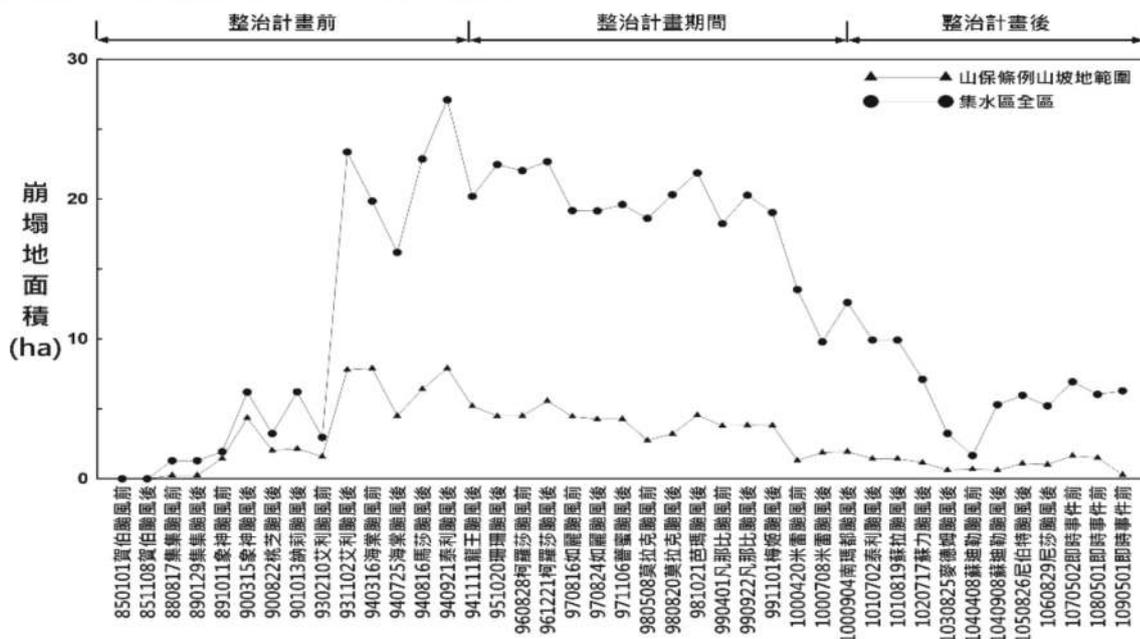


圖 3 蘇樂溪子集水區內崩塌歷程圖

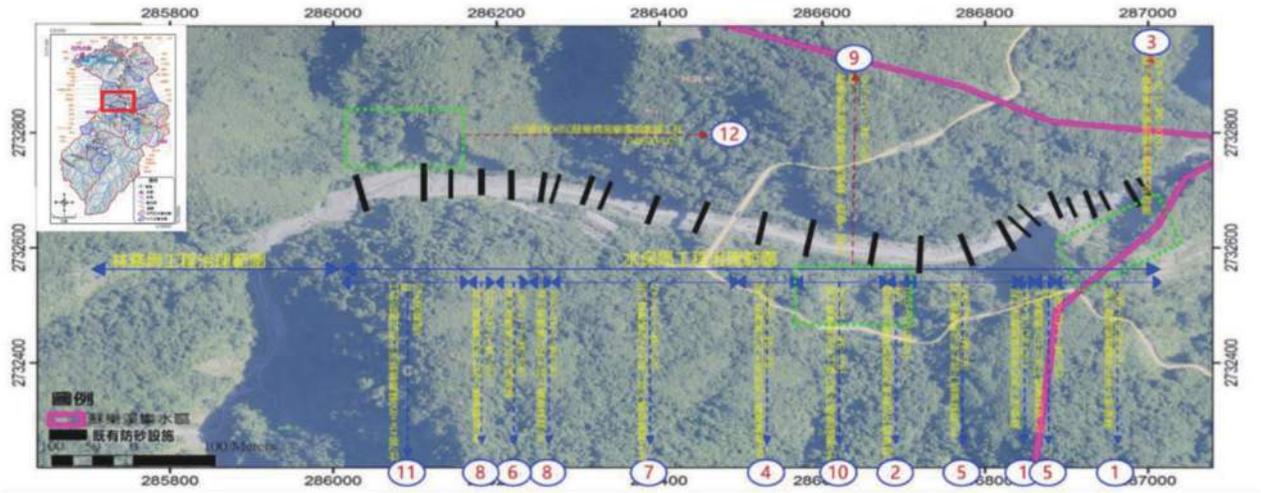


圖 4 蘇樂溪河道保育治理工程空間分布圖

透過多年期的治理，蘇樂溪河道兩岸坡腳受到保護、河床土砂環境逐漸穩定、崩塌地面積逐年下降，截至民國 109 年 5 月已復育至僅存 6.9 公頃。

(二) 高程差異分析

正射影像能分析前後期之地貌變化區位及其對應面積變化量，而搭配地形高程差異分析技術則可進一步估算體積變化量。水保局 (2017a) 曾利用歷史數值高程模型及正射影像追蹤分析曾文水庫重要治理區之土砂環境變遷，除可觀察蝕溝發育、溪床側淘及坡面崩塌增減外，更可以明確得知其土砂變動量體；陳樹群、邱渝方 (2019) 亦以 UAV 空拍產製數值地形比對方式，分析惠蓀林場蘭島溪防砂壩降低中間兩支墩柱，促使上游淤砂自然外移，逐漸演變成自然河道之量化變動，如圖 5 所示，其方法為以後期高精度數值地形減去前期高精度數值地形，若所得網格內數值為負值即為崩塌或下刷之土砂流失，反之，正值即為土砂堆積，如圖 6 所示。

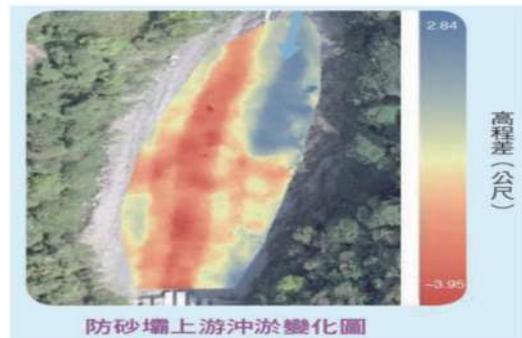


圖 5 數值地形及航照成果比對示意圖
 (摘自 陳樹群、邱渝方，2019)

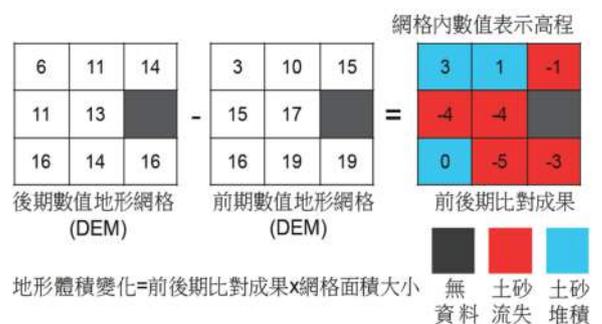


圖 6 前後期地形變化計算示意圖
 (摘自 蕭震洋等人，2009)

以航測所得數值地形分析，目前較不適用於進行「土壤沖蝕」僅於厘米等級變化之微量體分析（蕭震洋等人，2009），而本文亦針對野溪河道之土砂調節效益進行探討，因此分析範圍僅限於該研究樣區之野溪河道，暫不考慮坡面崩塌等土砂變動現象。

此外，所使用數值地形雖皆已經過精度檢核，但各期數值地形資料間，可能還尚有系統性的差量，導致其產製之數值地形會有些微差異；且任何差異比對，皆應於相同基準下比較同性質資料才具意義。故應先將各期數值地形正規化，再進行前後兩期間之土砂流失及堆積等地形高程變化量分析；若河道為常流水，則建議配合河道斷面測量等其他調查方式，輔助說明河道地形變化。圖 7 為本文歷史資料比對方式及分析步驟，依序說明如后。

1. 基礎數值地形與航照比對：任何差異比對，皆應對不變動範圍進行統一校正，將其置於相同基準下比較同性質資料，方具參考意義；亦即以一個基礎標準資料進行不動範圍選定，其他資料依此基礎標準進行校正或校準。本文以歷年施測涵蓋範圍最廣之民國 99 年 11 月施測成果資料為基礎標準；首先將其數值地形製作等高線圖展繪於同步航拍照片，接以比對溪床結構物及道路等不動且有明顯邊界區域；最後，將此明顯邊界區域作為比對之基礎標準區域，進行各期資料校對。
2. 各期航照自動配準：本文應用 ERDAS IMAGINE® 軟體之圖像自動配準功能（AutoSync）將各期航照對準。
3. 影像判釋及分類：本文以裸露地為地形高程變動計算區域，應用物件導向自動化判釋軟體 Definiens Developer，搭配人工輔助各期航照之裸露地及無水溪床判釋圈繪。
4. 數值地形校準：本文將各期數值地形依步驟 1 判釋出之不動地區高程值，作為基礎標準檔案，依次將各期數值地形校準。
5. 前後期數值地形相減：經校準後，再將後期數值地形減去前期數值地形，即可獲得兩期之地形高程變化量。
6. 異常點濾除：新設之溪床防砂結構物、護岸及坡面之橫向截水、縱向排水邊界等區域，數值地形在前、後期皆應相同，但因前述區域之坡度變化較大，易因不同施測時期之測量點位置不同或 GPS 定位些微偏差，導致高程呈現明顯高度差異，故應參考該期同步施測航照及等高線加以濾除區域周緣之異常值。
7. 集水區土砂變動量分析：以步驟 5 求得之地形高程變化量，計算其量體變化情形。
8. 土砂調節效益比計算：土砂調節效益之定義為「通過河道防砂設施調節土砂生產量，將一次

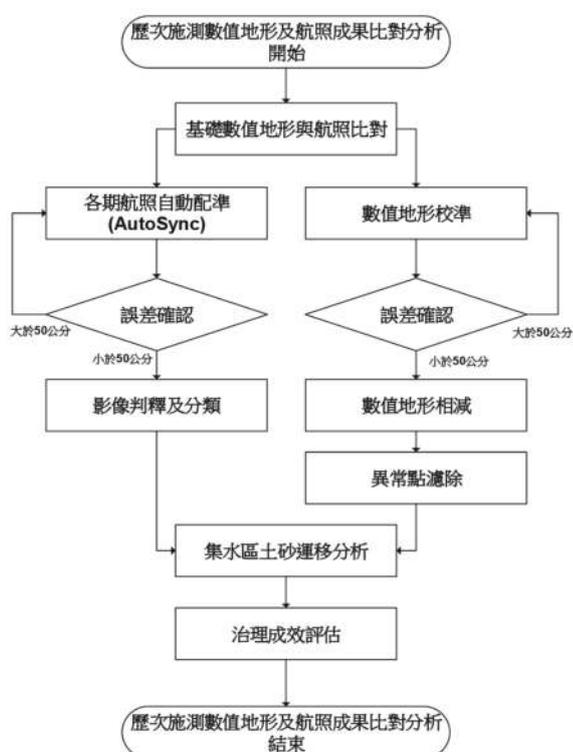


圖 7 數值地形及航照成果比對分析流程圖

性的土砂生產量調節為多次分批流出，以降低對集水區下游河道、水庫或其他保全對象等威脅」(連惠邦, 2017)，而其與防砂設施儲砂量之比值即為土砂調節效益比，公式如下所示。

$$\text{土砂調節效益比} = \frac{\text{土砂調節量}}{\text{防砂設施儲砂量}} \quad (1)$$

本文採用防砂設施儲砂量，如表 1 所示；土砂調節量則以步驟 7 求得土砂變動量進行計算。其中，由於河道防砂設施為分段、分年完工，故土砂調節效益應依各防砂設施所控制範圍分段計算。

三、研究成果

本文首先針對石門水庫集水區之蘇樂溪蒐集公部門歷史數值地形資料共計 10 幅，如表 2 所示，並分別於民國 109 年 5 月至 109 年 9 月期間進行 3 次 UAV 航拍(空間解析度(GSD) < 25 公分)，產製正射影像及地面解析度 1m*1m 之數值地形作為分析所需圖資，相關成果如表 3 所示，再依前述分析流程進行「集水區土砂變動量分析」、及「土砂調節效益比評估」，分述如后。

(一) 集水區土砂變動量分析

彙整民國 95 年至 109 年第三期施測成果之土砂變動情形，如圖 8。觀察結果如下：

1. 民國 95-97 年期間，河道治理工程多集中投入於蘇樂溪上游及下游處，故圖 8 (a) 可間接說明，因治理工程投入後，民國 95-97 年期間土砂多堆積於蘇樂溪上游、及下游處，且中游河段因土砂供應不足而有淘刷現象發生。
2. 民國 97-99 年期間，河道治理多以蘇樂溪中游為主，故參考圖 8 (b)、(c) 分析成果，顯示民國 97-99 年期間中游河段土砂運移轉為堆積為主，另上下游因達坡度平衡故無明顯變動趨勢。

表 2 蘇樂溪集水區歷史數值地形產製時間彙整表

產製時間(民國)	95年6月	97年8月	97年11月	98年10月	99年11月	100年9月	101年10月	104年7月	107年5月	107年10月
來源	內政部	水保局	水保局	水保局	水保局	水保局	水保局	水保局	水保局	水保局

表 3 蘇樂溪集水區 UAV 拍攝成果彙整表

拍攝日期	拍攝面積	正射影像	數值地形
民國 109 年 5 月	2.16 (km ²)		
民國 109 年 7 月	1.99 (km ²)		
民國 109 年 9 月	6.15 (km ²)		

3. 民國 101-104 年期間，分別經歷蘇拉、蘇力、麥德姆、及蘇迪勒颱風，故由圖 8 (f) 可知，上游集水區產砂後大量堆置於河道，此現象亦顯示透過河道治理可有效減緩土砂下移。
4. 民國 104-107 年期間，亦經歷尼伯特、尼莎颱風，河道持續堆積土方，如圖 8 (g) 所示。
5. 民國 107-109 年期間，集水區較無經歷大型颱風事件，上游土砂供應量減少，故原堆積於河道土砂逐漸下移，產生淘刷趨勢，如圖 8 (h) 所示。
6. 民國 109 年 5 月至 9 月期間，因無颱風侵襲臺灣，故整體溪床無顯著變動，僅為沖淤互見現象，無明顯趨勢，如圖 8 (i)、(j) 所示。

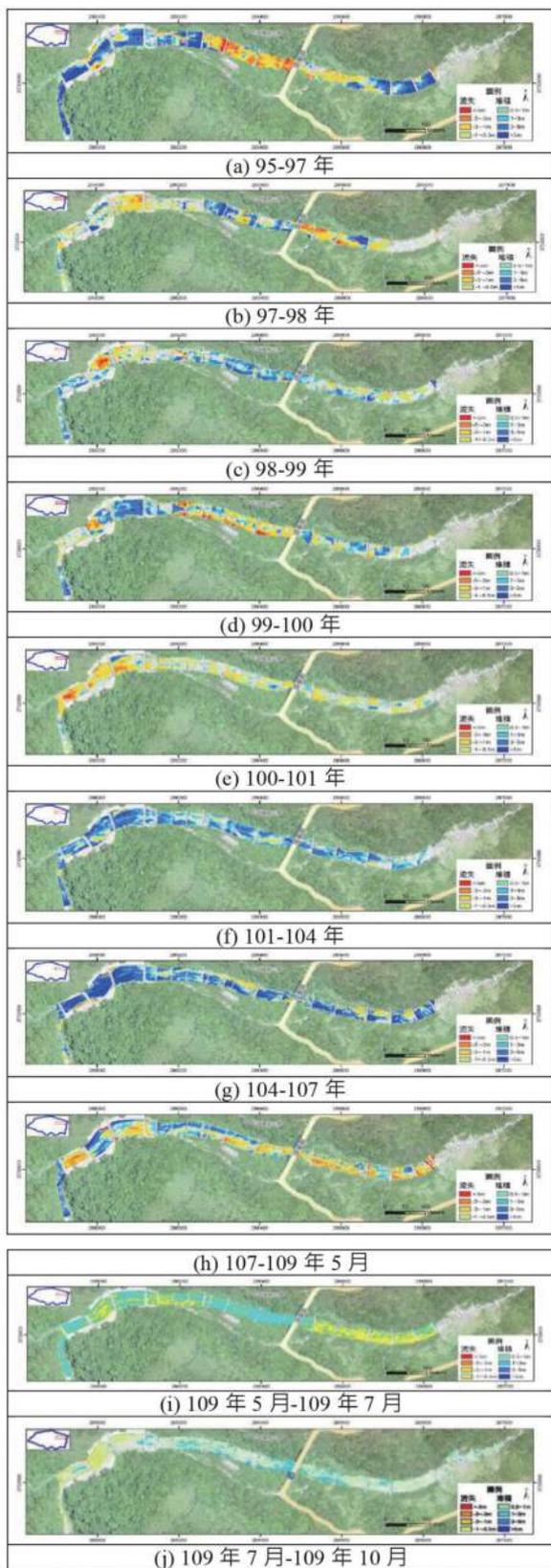


圖 8 蘇樂溪河道高程變化圖

(二) 土砂調節效益比評估

參考水保局歷年石門水庫集水區規劃與調查成果，顯示蘇樂溪河道防砂設施於完工一年內皆為淤滿狀態，故本文假設前述集水區土砂變動量計算結果，視為淤滿防砂設施頂部暫留土砂量，即為土砂調節量，並利用航照將治理河道範圍，依實際防砂設施後方控制面積予以分段，如圖 9 所示。再個別計算各河道單元之淨土砂調節量，並以熱區圖方式呈現，如圖 10 所示。



圖 9 蘇樂溪河道單元切割示意圖

分析成果顯示，在民國 101 年至 107 年期間，集水區經歷了蘇拉等颱風事件後，造成大量土砂堆積於河道河道，其中上游處（河道單元 17、18）土砂調節量劇烈上升（如圖 10 藍色虛線框處），尤其以民國 104 年至 107 年期間調節量 9647.2 立方公尺、及 8323.6 立方公尺為最高，間接證實其土砂供應多來自於上游崩塌而非河道兩側坡面，且防砂設施確實於第一線發揮攔砂與調砂成效；此外，大部分土砂多堆積於下游處（河道單元 2 至 8 之間）。另針對本文於 109 年度進行三次 UAV 拍攝之成果進行評析，惟其拍攝間隔較為密集，且期間並無較經歷大型颱洪事件，因此整體蘇樂溪河道較無顯著土砂堆積行為。

透過前述土砂調節量計算成果，得知蘇樂溪自民國 95 年起之總調節土砂量約為 11.6 萬方，本文另以河道防砂設施之儲砂量進行評析，如表 4 所示，由表可知，防砂壩總調砂量為 12.3 萬方，調砂比約為 33.15%；固床工總調砂量為 1.2 萬方，

調砂比約為 84.3%，推測因固床工之設計坡度較緩，因此在未經歷大型颱風降雨事件下，其上方可堆置較多土方量體，以致於其調節效益計算結果較防砂設施高約 2.5 倍。

此外，本文以各時間點為基礎，針對各河道單元進行土砂調節效益比分析，計算方式為將各河道單元之歷年調節土砂量逐年累加，並除以其儲砂量，作為各河道單元之土砂調節效益比，如圖 11 所示。圖中顯示，土砂調節效益比範圍多介於 0.13~1.14 之間，另以空間分布而言，以河道單元 15 所提供之土砂調節效益比 114% 最高；若從時間角度進行評析，蘇樂溪各河道單元在竣工後約 7 至 10 年之間，其土砂調節效益比將趨於定值（如圖 11 紅色方框處），顯示防砂設施調節效益有其極限。

表 4 蘇樂溪河道土砂調節效益彙整表

類型 (數量)	調砂量 (萬方) (A)	儲砂量 (萬方) (B)	土砂調節效益比 (C=A/B*100%)
防砂壩 (13)	12.3	37.1	33.15%
固床工 (5)	1.2	1.4	84.3%
總計 (18)	13.5	38.5	35.06%



圖 10 蘇樂溪土砂調節量體分布熱區圖

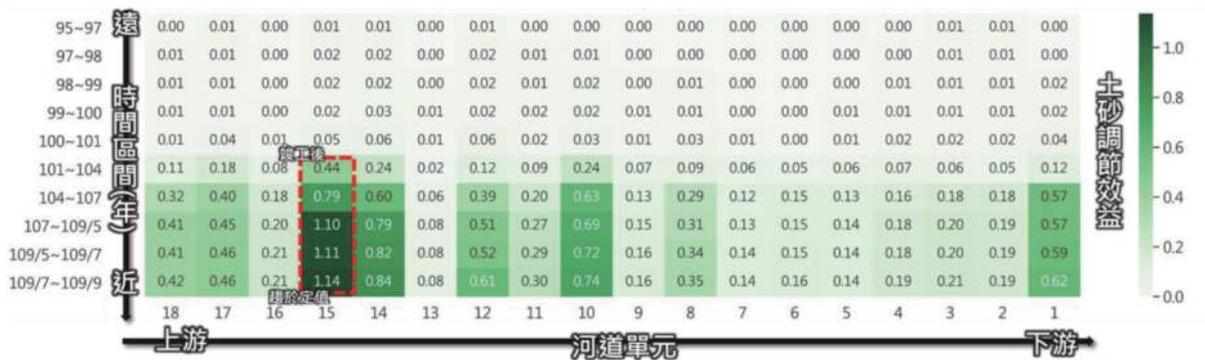


圖 11 蘇樂溪土砂調節效益分布熱區圖

五、結論與建議

本文以石門水庫集水區蘇樂溪為樣區，並透過 UAV 航拍方式產製數值地形與歷史遙測數值地形圖資，計算自民國 95 年至 109 年 9 月之間，蘇樂溪河道高程變動情形，以及評析因保育治理工程投入所設置之河道橫向構造物，所發揮土砂調節效益，歸納本文重要結論與建議，如下：

- (一) 蘇樂溪河段自民國 95 年至今，共計設置 18 座河道橫向構造物，其總調砂量為 13.5 萬方；總儲砂量推估為 38.5 萬方，土砂調節效益比為 35.06%，更優於日本調砂比經驗值（10 至 15%）。
- (二) 分析成果顯示，由於民國 101 年至 107 年期間經歷多場颱風事件，因此蘇樂溪河道中游至上游河段之土砂調節量體大幅上升，而土砂調節效益比自民國 107 後則皆趨於定值，顯示單一防砂設施之土砂調節效益具有極限，後續建議可透過本文評析手段，篩選出河道土砂淤積熱區，作為野

溪清疏點位之參考。

- (三) 未來可針對其他重點治理區進行土砂調節效益分析，相關成果除可作為水土保持治理成效說明外，另可回饋至水庫上游集水區土砂流出管理策略規劃之依據。

參考文獻

- 陳信雄、陳明杰、李錦育（1989），「防砂工程學」，臺灣大學森林學系。
- 日本國土交通省（2007），「土木設計施工手冊（防砂篇）」。
- 蕭震洋、林伯勳、鄭錦桐、辜炳寰、徐偉城、冀樹勇（2009），「應用光達技術進行集水區土砂運移監測及攔阻率評估」，中興工程季刊，第 105 期，第 17~25 頁。
- 連惠邦（2017），「土砂災害與防治」。
- 陳樹群、邱渝方（2019），「會呼吸的防砂壩」，科學發展月刊，560 2019.08 [民 108.08]，頁 56-62
- 水保局（2020），「109 年 13 座重要水庫集水區庫容有效維持保育減砂量目標追蹤暨治理成效評析」。
- 日本國土交通省（2007），「土木設計施工手冊（防砂篇）」。
- 松村和樹、中筋章人、井上功夫（1998），「土砂災害調查」。

叢書訊息

- (一) 高岩覆對隧道設計與施工影響研究(二)
脆性破壞特性評估與因應對策
蕭富元、林金成、蔡明欣等 編著
2017年10月初版
- (二) 流體注儲行為之力學機制研究與工程應用
俞旗文、譚志豪、雷世璋等 編著
2016年10月初版
- (三) 應用雷達影像評估坡地災害
林柏勳、蕭震洋、鄭錦桐、
陳俊愷、李易叡等 編著
2016年10月初版



* 高速鐵路桃園段

縱橫四界的願景擘劃者

溝通兩地的交通，聯繫著家人的情感，促發著經濟的繁盛
中興工程顧問公司以全方位的服務，串起臺灣交通建設網絡
在縱橫阡陌的路網與城鄉之中，構築出臺灣的發展動脈
也為每個角落延伸無限出廣闊願景

鐵道建設工程

中興團隊專業服務

水利、大地、電力、結構、建築、軌道、交通、系統
機械、環境、海岸及港灣、都市設計、工業城鄉開發
園區規劃等之規劃、設計與施工監造管理

聯絡資訊

10570 臺北市松山區南京東路五段171號
電話: (02) 2769-8388 傳真: (02) 2763-4555
E-mail: sinotech@sinotech.com.tw
https://www.sinotech.com.tw



正派經營 · 品質保證 · 追求卓越 · 創新突破

中興工程顧問股份有限公司
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, LTD.



國內外鐵路營運服務評鑑機制回顧

徐任宏 * 孫千山 ** 鍾志成 *** 胡守任 ****

摘 要

鐵路運輸為我國當前重要之陸路公共運輸系統，時值鐵路監理制度逐漸成型之際，著眼於前瞻軌道建設各項計畫之大力推展，實應儘速建立完善而合理的鐵路運輸營運與服務評鑑機制來提升服務品質與營運績效。本文藉由國內外鐵道（鐵路、捷運）相關評鑑或績效評比制度之回顧，來釐清鐵路營運與服務評鑑的機制及重點項目，並對未來國內如何執行評鑑提出建議。

關鍵字：鐵路系統、營運與服務評鑑

一、前 言

依《發展大眾運輸條例》第7條規定，主管機關對大眾運輸之營運及服務應定期辦理評鑑。其子法—《大眾運輸營運與服務評鑑辦法》第2條更進一步闡明鐵路運輸業為評鑑範圍之一。惟過去交通部考量鐵路運輸業特性（多為公營事業、具獨佔性質、各業者之間無法彼此比較等）與其他業別不同，評鑑結果難以作為虧損補貼或獎勵之依據，故遲至2021年才訂頒《鐵路運輸業營運與服務評鑑執行要點》，而正式評鑑最快可能在翌年辦理。

綜觀國內外鐵道系統（含鐵路、捷運）情況，我國捷運系統已建立評鑑機制，並與監理定期檢查整合，據以執行「績效導向的監理」；歐盟各國鐵路、美國大眾運輸、國際主要地鐵系統等亦訂有相關評鑑或績效評比制度，除了作為延續經營權契約及給予獎勵的參據外，也是營運機構自我提升服務品質或營運績效的重要依循準則。

隨著我國鐵路監理制度的逐漸精進、前瞻基

礎建設計畫的推動及鐵道觀光旅遊之大力推展，建立鐵路營運與服務評鑑機制已刻不容緩。爰此，本文回顧國內外鐵路或捷運系統相關評鑑 / 評比機制，並依前段所述區分為「監理機關外部評鑑」、「營運機構自我評比」等兩大部分說明，以作為精進鐵路運輸業營運與服務評鑑指標與其機制之依據。

二、監理機關外部評鑑

各國監理機關擬定評鑑指標的目的，主要係提供監理依循，其指標訂定目標會因監理強度而有所不同，例如：

1. 供定期檢查參考或逕行查核使用：典型的案例為我國鐵路系統營運績效資料、捷運系統的定期檢查 / 評鑑指標。
2. 供經營權契約的評估、獎勵等使用：典型的案例為歐盟大眾運輸服務品質認證標準（EN 13816）。

* 中興工程顧問社土木水利及軌道運輸研究中心副研究員

** 中興工程顧問社土木水利及軌道運輸研究中心軌道運輸組組長

*** 中興工程顧問社土木水利及軌道運輸研究中心主任

**** 國立陽明交通大學運輸與物流管理學系教授

監理評鑑指標詳細內容說明如後。

(一) 鐵路監理機關要求之營運績效資料

《鐵路法》第4條闡明地方營、民營及專用鐵路機構(台灣高鐵、林鐵、糖鐵等)由交通部監督。《地方營、民營及專用鐵路監督實施辦法》第40條進一步規定此類鐵路機構須按月、按季、年度統計營運績效資料，並提報交通部備查，以作為監理的重要參考依據。以月報為例，相關績效資料如表1所示，且國營鐵路(臺鐵)亦存在類似作法。

除表1內容之外，臺鐵亦定期公告其營運月報、年報，內容涵蓋營運、工務、機務、電務、財務、附屬事業業務等資訊，如表2所示。

表1 我國鐵路營運績效指標

項目	細項
客貨運輸情形	旅客人數及延人公里數、車站進出旅客人數、貨運噸數及延噸公里等
運輸能量	列車開行次數、列車公里數、座位公里數
列車服務水準	平均乘載率、準點情形、發車率、事故事件(種類、件數、旅客傷亡情形)
其他經指定之項目	-

表2 臺鐵統計指標

類型	項目
營運	行車事故件數及傷亡人數、各站客貨運起訖量、列車行駛次數及行駛公里、列車準點率、列車客座公里、列車車輛公里、客座利用率、車種別客運量、線別客運量、貨品別貨運量、線別貨運量
工務	(各項設施設備數量統計)
機務	機車或車輛數量、車輛經用年數及修理情形、動力車平均每日運用概況、動力車行駛公里、動力車車輛噸公里
電務	(號誌、電力、電訊之各項設施設備數量統計)

資料來源：臺鐵統計資訊

(二) 我國捷運系統定期檢查 / 評鑑

我國地方政府依據《大眾捷運系統經營維護與安全監督實施辦法》第17條，對大眾捷運系統營運機構(即各捷運公司)辦理定期檢查。為利於檢查作業執行，捷運公司須於地方政府檢查前填妥檢查基準表。前述過程中，相關指標與數值亦一併彙整作為該捷運系統之營運與服務評鑑成果(符合《大眾運輸營運與服務評鑑辦法》)。各項定期檢查項目與指標摘要如表3所示。

(三) 歐盟大眾運輸系統服務品質認證標準

EN13816為歐盟對大眾運輸服務產業的服務品質認證標準，可作為政府評估營運團隊服務並決議是否延續經營權契約及給予獎勵等之依據，並藉以維持大眾運輸的服務水準(歐洲標準委員會，2002)。

該標準為評估營運團隊所提供的產品與服務是否能符合客戶需求，除了「旅客滿意度調查」、「量測績效指標」外，更結合了「秘密客訪查」機制，例如：至路線上查核車站清潔、設備管理、指引標誌、站務員服務態度、週邊管理、廁所清潔及其設備管理等品質管理，以取得全面性的服務水準評量。

EN13816第一層的八大準則以及各層級的建議指標如表4所示，在認證時通常不會評估所有類型的指標，而是依據各國不同系統、地點與運具擬定合適的指標，並定期審視認證的相關指標與方法。

表 3 我國捷運系統定期檢查指標

項目	指標	說明
組織狀況	編制員額管制	員額人數
	人力結構管制	營運部門人力占總人力比例
	人員訓練	訓練班期數
	行車人員技能及體格檢查	現職行車人員辦理次數
營運管理狀況及 營運水準	平均每日載客數	-
	班距	含尖峰、離峰
	速率	起始站至終點站平均速度
	準點率	至終點站的實際到達時間與時刻表預定到達時間差距在三分鐘以內的列車比例
	延滯時間	至終點站的實際到達時間與時刻表預定到達時間的差距
	平均承載率	站立旅客數 / 車廂內站立面積
	加減速變化率	-
	旅客滿意度	非常滿意與滿意之問卷數 / 有效問卷數 (非常滿意、滿意、普通、不滿意、非常不滿意)
	旅客申訴比例	-
	車票失效率	單程票故障車票更換次數 / 使用總次數
	車廂溫度	-
	車站溫度	-
	噪音	-
	車站照度	-
財務狀況	營收成長	營業收入
	成本控制	營業成本
	資金運用情形	財務收入 - 總預算金額
	盈虧執行狀況	綜合損益
	財務績效	自有資金比例
車輛維護保養	電聯車維護與保養執行情形	列車可用率 (滿足運行計畫的比例)、列車妥善率 (可用列車比例)、正線列車平均故障間距 (車廂公里)、預檢執行率
	維修車輛維護與保養執行情形	預檢執行率
	維修機具維護與保養執行情形	預檢執行率
路線維護保養	路線維護與保養執行情形	號誌可用度、通訊可用度、轉轍器可用度、第三軌可用度、供電系統可用度、行控系統造成五分鐘以上延誤次數、軌道造成五分鐘以上延誤次數、軌道預檢執行率、土木結構預檢執行率、整體預檢執行率
	場站維護與保養執行情形	自動售票機可用度、自動閘門可用度、無障礙自動閘門可用度、電梯可用度、電扶梯可用度、月台門可用度、水電可用度、環控可用度、整體預檢執行率
行車安全及保安 措施	職業安全衛生事項	失能傷害頻率 (次數與損失日數)、教育訓練時數
	事故率	百萬車公里行車事故件數 (重大及一般)、百萬人次非行車事故件數 (重大及一般)
	傷亡率	百萬人旅次死亡及重傷、輕傷
	犯罪率	百萬延人公里件數
	災害防救演練	年度辦理次數
	消防演練、民防團隊訓練及消防系統可用度、消防相關設備檢查	消防演練次數、民防團體訓練次數、消防系統可用度 (整體、子系統)、消防相關設備預檢執行率
	車站保安執行情形	站巡執行率
其他有關事項	車站、車廂及路線標示	應限期改善缺失改善率
	車站廁所環境清潔情形	站巡執行率
	年度事業計畫研 (修) 訂	年度辦理次數
	維護計畫研 (修) 訂	年度辦理次數
	附屬事業執行情形	附屬事業收入、附屬事業成本、應限期改善缺失改善率

資料來源：交通部

表 4 歐盟 EN13816 內涵一覽表

層級 1	層級 2	層級 3
1. 可用性 Availability	1.1 運具 (運具舒適度) 1.2 路網 (可隨時到達隨地) 1.3 營運 (班次頻率) 1.4 適用 (無障礙) 1.5 可靠性 (班表是否恰當)	1.2.1 點與點距離 1.2.2 轉乘需求 1.2.3 覆蓋度 1.3.1 營運時間 1.3.2 頻率 1.3.3 乘載率
2. 可及性 Accessibility (即便利性)	2.1 外部介面 2.2 內部介面 2.3 票務	2.1.1 行人 2.1.2 自行車 2.1.3 計程車 2.1.4 私人車輛 2.2.1 出入口 2.2.2 內部移動 2.2.3 轉乘其他大眾運輸 2.3.1 線上購票 2.3.2 外部購票 2.3.3 確證 (票的正確性)
3. 資訊 Information	3.1 一般資訊 3.2 一般狀況旅行資訊 3.3 異常狀況旅行資訊	(略)
4. 時間性 Time	4.1 旅次長度 4.2 與班表的匹配度 (準點)	(略)
5. 顧客關懷 Customer Care	5.1 承諾 5.2 顧客關係 5.3 人員 5.4 援助 5.5 購票	(略)
6. 舒適性 Comfort	6.1 系統功能 (車站功能) 6.2 旅客座位與空間 6.3 旅程中的舒適度 6.4 環境條件 6.5 其他設施 6.6 人體工學	(略)
7. 安全與保安 Security	7.1 侵犯防護 7.2 事故預防 7.3 緊急應變	(略)
8. 環境衝擊 Environmental Impact	8.1 污染 8.2 天然資源 8.3 基礎設施	(略)

資料來源：歐洲標準委員會 (2002)

三、營運機構自我評比

各國營運機構擬定評比指標的目的，不外乎就是自我改進的依據，但仍可依其比較對象分不同分為以下兩類：

1. 自我追蹤使用：典型案例為我國交通部統計處施政措施滿意度調查 (臺鐵部分)、鐵路旅客問卷調查、鐵路營運績效指標 (監理機關要求以外之指標)、捷運系統服務指標、美國大眾運輸系統容量及服務品質手冊 (TCQSM) 等。

2. 與國際上相似系統比較使用：典型案例為國際地鐵聯盟（CoMET）及軌道運輸標竿聯盟（Nova）所制定的標竿評比指標。

營運機構評比指標詳細內容說明如後。

（一）交通部統計處施政措施滿意度調查

《鐵路法》第4條闡明我國國營鐵路由交通部管理，故交通部成立交通部臺灣鐵路管理局（即臺鐵）負責國營鐵路營運事宜。交通部統計處每年會辦理所屬各機關（構）之滿意度調查，作為考評服務績效及研訂相關政策之重要參據，其中調查對象就包含臺鐵，其問卷問項如表5。

表5 交通部統計處施政措施滿意度調查問項

問項	
1.	使用電子票證搭乘臺鐵的便利性
2.	四大超商或郵局取票的措施
3.	車廂清潔程度
4.	服務人員服務態度
5.	臺鐵 e 訂通 APP
6.	車站窗口售票服務
7.	車站內環境整潔
8.	車站內列車資訊顯示器內容即時性
9.	車上廁所清潔
10.	聯外公共運輸的便利性
11.	車站內引導指標或動線安排
12.	車站內廁所清潔程度
13.	網路訂票服務
14.	列車準點情形
15.	列車時刻安排
16.	民眾等候空間設計
17.	上下班（學）時間提供之短程運輸服務品質

資料來源：交通部統計處（2019）

我國各鐵路機構會透過問卷方式詢問旅客搭乘感受，例如臺鐵每年度即透過問卷方式辦理旅客意向調查，以作為施政重要參據，表6即為2019年意向調查項目之內容摘錄。

表6 民國108年臺鐵旅客意向調查問卷問項

問答	
1.	購票及取票方式
2.	訂購車票時訂不到首選車次的頻率
3.	訂不到首選車次時的替代方案
4.	是否考慮預訂早鳥優惠票
5.	若考慮預訂早鳥優惠票，則會於乘車日幾天前提早預訂
6.	「一般車票」幾週前開放網路預訂較合適
7.	網路預訂「一般車票」每人每乘車日上限幾張較合適
8.	「團體車票」幾個月前開放網路預訂較合適
9.	是否對「臺鐵夢工場」實體店鋪及網路商店的紀念商品有購買意願
10.	若對「臺鐵夢工場」有購買意願，請問您最喜歡的商品類型
11.	若對「臺鐵夢工場」有購買意願，請問您可接受的價位
12.	是否知道臺鐵郵輪式列車
13.	知道臺鐵郵輪式列車的資訊來源為何
14.	最近一年是否有搭乘過臺鐵郵輪式列車
15.	若臺鐵局規劃推動鐵道旅遊行程，最喜歡的行程
16.	若臺鐵局規劃推動鐵道旅遊行程，最有意願參與的行程天數
17.	若臺鐵局規劃推動鐵道旅遊行程，可接受的價位
滿意度調查	
18.	臺鐵車站聯外公共運輸工具（含計程車）之便利程度
19.	臺鐵「新票務系統」
20.	臺鐵「列車平穩程度」
21.	臺鐵「列車準點情形」
22.	臺鐵「列車時刻安排」
23.	臺鐵「列車車廂設備」
24.	臺鐵「列車車上廁所」
25.	臺鐵「車站引導指標」
26.	臺鐵「車站站內空間設備」
27.	臺鐵「車站站內環境清潔」
28.	臺鐵「車站廁所」
29.	「臺鐵人員」
30.	「臺鐵便當」
31.	「臺鐵商品」
其他	
32.	上述滿意度調查所列服務項目，哪些項目較具重要性
33.	臺鐵局整體服務之滿意度給予評分（0～100分）
34.	建議事項

資料來源：交通部臺灣鐵路管理局（2019）

(二) 我國鐵路營運績效指標

除了第二章所述的鐵路監理機關要求之營運績效資料以外，各營運機構亦會另訂績效指標自我追蹤，例如台灣高鐵訂有營運績效指標及品質績效指標（如表 7 及表 8 所示，兩者間內容有重疊，亦涵蓋部分監理機關要求），據以持續改善各項作業，並透過每季追蹤執行情形，確實檢討、改進未達目標之相關作業。

表 7 台灣高鐵營運績效指標

營運績效指標	單位	民國 108 年績效值
發車班次數	班次數	53,727
旅客量	千人次	67,411
列車準點率（5 分鐘，不含天災）	□	99.90
列車發車率（不含天災）	□	100
列車抵達終點站平均延誤時間	分鐘	0.069

資料來源：台灣高速鐵路股份有限公司（2020）

表 8 台灣高鐵品質績效指標

面向	項目	公式	目標值
安全	旅客重傷與死亡率	旅客受傷人數（重傷與死亡）／每百萬旅次	0 人
	輕傷且就醫率	旅客受傷人數（輕傷且就醫）／每百萬旅次	常屬旅客主觀認定故取消
	輕傷率	旅客受傷人數（輕傷）／每百萬旅次	≤ 0.10
可靠	5 分鐘準點率	延誤小於 5 分鐘之班次數／載客營運班次	> 99.5%
	自動收費系統（AFCS）車站設備妥善率	[（每季主要設備運轉的總時數-每季主要設備停擺的時數）／每季主要設備運轉的總時數] × 100%	已合併納入資訊系統維修故取消
效率	顧客意見回覆達成率	7 工作天內完成回覆之案件／總案件量	≥ 99%
顧客滿意	整體服務滿意度	滿意度回答 5 分 & 4 分／全部受訪人數	≥ 95%

資料來源：台灣高速鐵路股份有限公司（2020）

(三) 我國捷運系統服務指標

我國各捷運公司依據《大眾捷運系統經營維護與安全監督實施辦法》第 3 條規定，訂有安全、快速、舒適等各項服務指標（包含其目標值）並提報備查，據以評估捷運系統服務水準，作為經營管理與發展改善之參考，以臺北捷運為例，其指標如表 9 所示。

表 9 臺北捷運系統服務指標與其目標值

構面	指標	目標
行車	一般	低於 4 件 / 每百萬車公里
	重大	0 件 / 每百萬車公里
非行車	一般	低於 0.04 件 / 每百萬車公里
	重大	0 件 / 每百萬車公里
安全	死亡及重傷率	0 件 / 每百萬人旅次
	輕傷率	低於 1.5 件 / 每百萬人旅次
	犯罪率	低於 0.1 件 / 每百萬延人公里
快速	速率	高於 26 kph（環狀線）、30 kph（其他）
	主線班距	線別、時間各異
	延滯時間	平均低於 5 sec
舒適	準點率	平均高於 95%
	承載率	尖峰小時平均低於 6 人 / m ²
	加減速變化率	均高於 95%
服務	通風度	平均高於 0.32 m ³ /min/ 人
	噪音	隧道平均低於 85 dB(A)、高架平均低於 80 dB(A)、平面平均低於 78 dB(A)
	旅客申訴事件	低於 3 件 / 每百萬人旅次
	單程票失效率	低於 20 ppm

資料來源：臺北大眾捷運股份有限公司（2020）

(四) 美國大眾運輸系統容量及服務品質評估指標

為評估運輸系統服務品質、系統及設施容量，美國訂有大眾運輸系統容量及服務品質手冊（Transit Capacity and Quality of Service Manual, TCQSM），可提供最新的容量與服務品質評估方

式供從業人員使用，但並不涉及政府相關政策的擬定。

該手冊針對鐵路運輸等固定路線運輸系統（Fixed-route Transit）的服務品質評估方式，提出了可用性（Availability）和舒適便利性（Comfort and Convenience）兩大類的服務品質指標，可用

性指標係基於空間和時間來衡量運輸系統能夠被旅客使用的程度，包含服務頻率、服務時段、服務範圍等三項評鑑項目；舒適便利性則用來反映旅客搭乘運輸系統時的感受，包含乘載率、可靠度、旅行時間等三項評鑑項目。其評估指標與服務水準門檻彙整如表 10 所示。

表 10 美國 TCQSM 評估指標

項目	評估指標	服務水準						
		旅客感受 營運業者成本				優 ← → 劣 高 ← → 低		
服務頻率	平均時隔 (分鐘)	≤ 15	5-10	11-15	16-30	31-59	60	>60
服務時段	累積營運時間 (小時)	>18	15-18	12-14	7-11	4-6	<4	
服務範圍	運輸支援區域 被涵蓋比率 (%)	>90%服務涵蓋區人口	>90	75-90	50-74	<50		
乘載率	乘載因子 (人/座位)	<0.5	0.5-0.8	0.8-1.0	1.0-1.25	1.25-1.5	>1.5	
	旅客立位面積 (平方米/人)	>1	0.5-1	0.4-0.49	0.3-0.39	0.2-0.29	<0.2	
可靠度	準點率 (%)	95-100	90-94	80-89	70-79	<70		
	班距變異係數	0-0.21	0.22-0.3	0.31-0.39	0.4-0.52	0.53-0.74	≥ 0.75	
旅行時間	與汽車旅行時間 之比值	≤ 1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	>2	

資料來源：美國運輸研究委員會（2013）

（五）國際捷運評比指標

國際地鐵聯盟與軌道運輸標竿聯盟為達成分享實務作法、量測經營績效、支援營運策略目標、支援決策等目的，訂有各項標竿評比指標，可綜合評比各捷運公司在不同面向的經營狀況。構面與指標羅列如表 11 所示。舉例來說，臺北捷運連續數年之系統營運可靠度世界第一，即為表中的 P2a 指標與各國重要捷運系統的比較結果。

四、綜合討論

從前述鐵道營運與服務評鑑機制的回顧，可以獲致以下幾點結論：

（一）監理機關外部評鑑指標部分

主管機關基於監理與政策需要，需掌握關鍵統計資料及績效指標，會要建立較為複雜的指標。說明如下：

表 11 CoMET & Nova 評比指標

構面		指標
成長、學習與創新		G1a/b 路網規模、旅次變化 G2a/b 營運容量公里及車廂公里變化 G3 員工每千工時之訓練時數 G4a/b 業外收入 / 票箱收入、業外收入 / 旅次數
財務		F1 總收入 / 營運成本 F2 每車廂公里營運成本 / 收入 F2a 每車廂公里服務營運成本 F2b 每車廂公里維修成本 F2c 每車廂公里行政成本 F3 每車廂公里投資成本 F4a/b 營運成本 / 旅次數、營運成本 / 旅客延人公里 F5a/b 票箱收入 / 旅次數、票箱收入 / 旅客延人公里
顧客	容量與利用	C1 容量公里 / 路線公里 C2 旅客延人公里 / 容量公里
	服務品質	C3 旅客延滯時數 / 旅次數 C4 旅次準點數 / 旅次數 C5a/b 列車準點 / 總列車數 (計畫與實際開行) C6 列車延誤時數 / 列車行車時數
	可及性	C7 無階化車站比例
內部流程	可靠度及可用度	P1a/b 車廂可用度、尖峰使用數 P2a/b 兩事件間車廂公里 / 小時
	效率	P3 旅次數 / (員工 + 承包商) 工時 P4a/b 容量公里或車廂公里 / (員工 + 承包商) 工時 P5 列車行車時數 / 駕駛時數 P6 員工缺勤比例 P7 每車廂公里牽引能源消耗 P8a/b 總能源消耗 / 旅次數、總能源消耗 / 旅客延人公里
安全與保安		S1 總死亡 / 旅次數 S1a 自殺死亡 / 旅次數 S1b 事故死亡 / 旅次數 S1c 非法活動死亡 / 旅次數 S2 犯罪事件 / 旅次數 S3a/b 員工因事故損失時間 / 員工工時
環境		E1 每延人公里 CO ₂ 排放

資料來源：國際地鐵聯盟、軌道運輸標竿聯盟 (2016)

1. 供定期檢查使用者，指標必須與監理重點（組織狀況、營運管理狀況及營運水準、財務狀況、車輛維護保養、路線維護保養、行車安全及保安措施等）互相對應，並有目標值可據以提出應行改進事項、建議事項等。此類指標亦會涉及較多與旅客無直接關係的組織經營面課題。
2. 供經營權契約的評估、獎勵等使用者，指標必需盡量公允，並能夠就旅客服務面向作全面的檢視，但不見得會涉及財務等方面（屬招標、議約議價等契約考量範疇）。例如 EN13816 涵蓋可用性、可及性等八大準則，面向相當廣泛，但並未包含財務課題。

(二) 營運機構自我評比指標部分

營運機構為自我提升服務品質或營運績效，須透過各種方式掌握關鍵績效並據以改善，說明如下：

1. 供營運機構自我追蹤使用者，相關指標是在法規的提報備查要求外另外制定，或者是以研究的角度，透過問卷調查等方式檢討旅客服務水準。前者通常與監理機關外部評鑑指標較類似，涵蓋許多監理相關重點以及常見的營運績效指標（與目標）；後者是透過廣泛的問卷發放、秘密客使用，從旅客滿意度檢視可改善之處，且一般不存在所謂的合格標準。
2. 供國際上相似系統比較者，相關指標需要考量各系統的差異性，並使其具備可比較性。以國際地鐵聯盟及軌道運輸標竿聯盟為例，因其會員為自動化程度較高的捷運系統，才能夠就系統可靠度、無階化月台比例、能源消耗率等指標進行比較，並學習彼此之良好實務作為。

五、建議

我國已於 2021 年 6 月 30 日訂頒《鐵路運輸

業營運與服務評鑑執行要點》，考量鐵路營運與服務評鑑機制及指標評估方式仍會持續滾動檢討，且其成果同時要能發揮「監理機關外部評鑑」及「營運機構自我評比」之功能，茲將具體建議說明如下，期望於機制精進的過程中達到正向循環、促使鐵路運輸業維持良好之營運績效及服務水準。

(一) 適度回饋至「監理機關外部評鑑」

1. 定期檢查強調營運機構財務、營運績效、法規符合度等之檢視。
2. 營運評鑑需透過問卷或秘密客等科學方式執行，強調旅客感受（服務的有效性），並輔以實地或書面資料查核，據以檢視旅客感受到的服務品質。
3. 定期檢查與評鑑可相輔相成，舉例來說：當評鑑結果發現旅客普遍覺得特定車種行駛不平穩時，可將該列車檢修狀況、購車規範等回饋納入定期或不定期監理檢查重點，確保營運安全無虞。
4. 若未來評鑑機制運作得宜，則可考量將其中非屬法規或定期檢查要求的部分（如車站整潔、人員服務等），給予適當獎勵以鼓勵營運機構持續精進，例如給予補助款、授予獎章等。

(二) 「營運機構自我評比」建議

1. 可整合業者既有之旅客滿意度調查、品質績效指標等，比較導入某項設施設備或程序、內外部環境因素的前後變化。
2. 可透過前述差異分析，察覺內部存在之問題，據以強化改進。

(三) 評鑑指標擬定調查方式建議

1. 書面資料查核：擬定通用之績效指標，具體項目可參考鐵路績效指標、捷運系統服務指

標、美國 TCQSM 評估指標等。

2. 納入實地查核：以類似定期檢查的方式，查核特定服務項目的滿足程度。
3. 問卷調查：透過四或五量尺滿意度調查詢問旅客感受，其項目可參考交通部統計處、臺鐵等作法。
4. 納入秘密客調查：參酌 CSIM、Qualicert PSMA 等服務稽核方式，客觀檢視乘車流程各項作業的滿意度；不同秘密客針對各營運機構的調查方式、流程可有所不同，但給分標準需一致，且必須產出稽核報告加以說明調查狀況與給分原因。

參考文獻

- 歐洲標準委員會 (2002), EN 13816:2002 Transportation - Logistics and services - Public Passenger Transport - Service Quality Definition, Targeting and Measurement.
- Transportation Research Board (2013), Transit Capacity and Quality of Service Manual (3rd Edition). Retrieved from <http://www.trb.org/Main/Blurbs/169437.aspx>
- Alex Barron, Richard Anderson, and Judith Cohen (2016), World Class Metro Systems: What Can Be Learned From the Global Metro Community. Retrieved from <https://planitmetro.com/wp-content/uploads/2016/06/World-Class-Metro-Systems-Benchmarking-and-define-world-class.pdf>
- 交通部統計處 (2019), 107 年「交通部施政措施滿意度調查」摘要分析。檢自 <https://www.motc.gov.tw/uploaddowndoc?file=survey/201904011555190.pdf&filedisplay=201904011555190.pdf&flag=doc>
- 交通部臺灣鐵路管理局 (2019), 108 年臺鐵旅客意向調查 - 車站旅客。檢自 https://service.railway.gov.tw/tw/survey_Questionnaire.aspx?TSN=573
- 台灣高速鐵路股份有限公司 (2020), 台灣高鐵企業社會責任報告書 2019。檢自 <https://corp.thsrc.com.tw/Corp/47d838f6-dc86-4860-94d8-3e2d663ff82c/assets/53f6ee4b-cfc6-4e46-a074-3eabc0d357df.pdf>
- 臺北大眾捷運股份有限公司 (2020), 我們的系統服務目標, 為民服務白皮書。檢自 <https://www.metro.taipei/cp.aspx?n=CADABD681149D7CB>

SINOTECH



*離岸風力發電業務
承風展翼·綠色家園

綠色新能源“風能”可提供乾淨新能源
中興工程顧問公司是全方位的工程技術單位
具有高專業技術，將持續推動綠色新能源之發展
並為人們打造節能減碳及永續發展環境持續前進



電力開發工程

中興團隊專業服務

水利、大地、電力、結構、建築、軌道、交通、系統
機械、環境、海岸及港灣、都市設計、工業城鄉開發
園區規劃等之規劃、設計與施工監造管理

聯絡資訊

10570 臺北市松山區南京東路五段171號
電話: (02) 2769-8388 傳真: (02) 2763-4555
E-mail: sinotech@sinotech.com.tw
<https://www.sinotech.com.tw>

正派經營·品質保證·追求卓越·創新突破

 中興工程顧問股份有限公司
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, LTD.



台電離岸風電第一期計畫 — 下部結構安裝經驗分享

吳祥煜 * 徐榮福 * 黃崇哲 ** 陳世仰 ***

摘要

台電離岸風電第一期計畫規劃共 21 組離岸風機，總裝置容量為 109.2MW，下部結構安裝部分，執行 84 支基樁之打樁作業、21 座套筒桁架吊裝及接合灌漿作業，全計畫下部結構施工工期約為 4 個月。

下部結構安裝分為三個階段：基樁打設作業、套筒桁架安裝作業及接合灌漿作業，每個作業施工前都須經由海事擔保員確認後並簽署鑑定證明。(1) 基樁打設作業前先放置打樁導架以確保基樁的位置、傾角及高程符合預期，打樁期間配合啟動氣泡幕以減低噪音，每支基樁包含最終的測量作業約需要 2.5 小時作業時間；(2) 套筒桁架安裝前須先進行基樁內部清潔動作，套筒桁架放置於基樁上方後，利用抱樁器針對位置、傾角及高程進行微調，每座套筒桁架的安裝時間約為 2 小時；(3) 結束前階段作業後即可開始基樁與套筒桁架接合灌漿作業，灌漿作業時搭配使用水下無人載具以觀察灌漿溢流情形，每支基腳平均約需 2 小時的灌漿時間。

基樁打設作業過程中，承攬廠商藉由現場實際打樁情況所蒐集之參數，事後再輔以分析報告，針對基樁承載力進行雙重確認，日後其他離岸風電開發商，可借鏡台電離岸風電一期計畫執行方式，增加工程可靠度。

本計畫為第一階段示範風場，雖經歷 Covid-19 事件短暫影響施工進度，但在業主台灣電力公司、承攬商比利時商楊德諾公司 Jan De Nul，與日商日立公司 Hitachi，及專業顧問團隊中興工程顧問公司和丹麥 NIRAS 公司之共同合作密切溝通協調下，工程最終順利完成，也藉由與國外廠商合作的機會增進自身經驗，對國內工程顧問公司相關專業技術人員來說，實屬寶貴的一堂課。

關鍵字：台電一期離岸風電、下部結構安裝、套筒桁架

一、前言

由於臺灣缺乏自有能源，能源價格的波動影響社會經濟層面甚鉅。例如，油價的提高會導致產業對其他能源（煤與天然氣）的需求激增，連帶使得原物料價格飆漲，增加生產成本，其中亦

包括增加供電之成本，在發電成本價格高漲情況下，傳統能源的優勢漸失，因此再生能源在價格上逐漸具備競爭力，後續發展可期。

面對國際二氧化碳減量的協議與環保的趨勢，歐美等先進國家已陸續提出再生能源政策，而我國政府亦於民國 98 年 7 月 8 日頒布再生能源

* 前中興工程顧問公司中部工程中心工程師

** 中興工程顧問公司中部工程中心技術經理

*** 中興工程顧問公司中部工程中心協理

發展條例，對於開發再生能源採取優惠躉購制度，形成一個有利發展環境。

根據國際工程顧問公司 4C Offshore 針對全球平均風速觀測之研究，全球最理想之 20 處離岸風場，臺灣海峽佔據了 16 處之多，顯示臺灣周圍海域具有發展離岸風力發電之條件。

我國自 2001 年起積極推展風力發電以來，迄 2019 年底止累積裝置容量已逾 845.2MW，成果相當輝煌。能源局規劃 2025 年，完成再生能源占比 20%（包括太陽光電 20GW、離岸風電 5.7GW），另外也針對離岸風電規劃 2026 年到 2035 年，10 年 15GW（每年 1.5GW）的區塊開發政策，由此可預見風力將是未來 20 年內再生能源開發之主力之一，值得我們重視。台灣電力股份有限公司（以下簡稱台電）配合政府「再生能源極大化」之政策，極力開發風力發電等相關再生能源，以因應未來電力需求。

「台電離岸風電第一期計畫」為台電於彰化芳苑外海，離岸約 8 公里處興建總裝置容量 109.2MW 之離岸風場，此風場水深介於 18-28 公尺，預計興建 21 組 5.2MW 之離岸風機，因離岸

邊距離僅 8 公里，故無海上變電站之規劃，海纜直接由芳苑永興海堤上岸，沿著台 17 線接入台電既有的大城變電所。2018 年 2 月計畫決標，承攬商由比利時商楊德諾公司 Jan De Nul（以下簡稱 JDN）及日商日立公司 Hitachi（以下簡稱日立）共同承攬，專業顧問團隊由中興工程顧問公司及丹麥 NIRAS 公司共同合作組成。

本文針對台電離岸風電第一期計畫「離岸風機下部結構安裝工程」安裝過程之經驗進行分享。

二、施工過程

下部結構基礎安裝作業主要可分為三個安裝施工工項：「基樁打設作業」、「套筒桁架安裝作業」、「接合灌漿作業」，安裝流程如圖 1 所示。每個工項或重點安裝作業時，都會由海事擔保員（Marine Warranty Surveyor, MWS）確認施工過程是否符合規定並簽署鑑定證明書（Certificate of Approval, CoA）確保工程如品質要求施作，日後若有狀況發生時也可作為保證依據。



圖 1 安裝流程圖

本計畫下部結構基礎安裝作業船隊主要由 AEGIR（重型吊桿船）、POSH DARING（氣泡幕船）、MMA VIGILANT（清樁船）、GRAND CANYON（灌漿作業船）及其他輔助船隻如鯨豚觀察船、警戒船、駁船（Barge）、拖船、人員運輸船（CTV）所組成，本章就三個施工工項分別進行介紹。

（一）基樁打設作業

本計畫所使用之基樁長度因應安裝現地水深以及離岸風機組設計高程，長度介於 63-82 公尺間，樁外徑約 3.1 公尺，每座離岸風機組下部結構設計為 4 支基樁搭配 1 座套筒桁架，此計畫共製造 84 支鋼管樁及 4 支預備用鋼管樁。

基樁打設作業前，首先利用水下無人載具（Remotely Operated Vehicle, ROV）進行海床掃描，確認無明顯障礙物後即放置打樁導架（Template）於海床上，打樁導架之功能可確保每支基樁在貫入土層中時，傾斜度保持在容許範圍內，也可確保 4 支基樁貫入土層且達到目標深度時，4 支基樁之相對位置及絕對位置符合工程設計所預期，因此打樁導架的定位須格外謹慎，放置過程中必須注意海流方向、速度大小及吊掛作業時的風速、風向，打樁導架設計有可調整之腳座，可在導架放置於海床後進行調整，並在基樁放置前調整至適合的角度及高度，以符合海床高程及設計安裝精度，打樁導架如圖 2 所示，安裝船上之測量人員可藉由控制線及訊號線得知打樁導架安裝於海床後的相關定位資訊。

打樁導架放置完成後，即開始進行基樁吊裝及打樁作業，4 支基樁依序吊裝放置於打樁導架的 4 個套管中，基樁自身重量會使其貫入於土層中，在此階段會先確認基樁之自重貫入深度是否符合預期，基樁的高程及貫入深度可藉由基樁吊裝工具、樁錘上之測量系統進行量測。



圖 2 打樁導架



圖 3 打樁期間啟動氣泡幕

打樁作業開始前，將通知氣泡幕船啟動氣泡幕（如圖 3），以降低打樁作業時所產生的噪音，一旦確認氣泡幕確實執行以及鯨豚觀察員確認過去 30 分鐘內無海洋哺乳動物出現於作業範圍內時，即可開始進行打樁作業，打樁初期會針對樁錘能量進行控制，藉由緩啟動，樁錘能量由小至大慢慢增加，避免打樁初期因過大能量使基樁短時間發生長距離貫入的現象。

打樁作業因應重型吊桿船之起重機臂展高度及打樁導架套管高度，作業分為 2 個階段執行。初始打樁作業因基樁自重貫入並放置引樁及樁錘後，受制於起重機臂展高度的限制，使用短引樁；打樁作業後期，基樁深入打樁導架套管，為避免

樁錘與打樁導架距離過於接近，因此採用長引樁執行後續打樁作業。

基樁打設作業流程圖如圖4，詳細流程如下：

1. 目視檢查鋼管樁概況
2. 取得 MWS 認可並簽屬 CoA
3. 啟動氣泡幕
4. 起吊短引樁並放置於基樁上方
5. 起吊樁錘並放置於短引樁上方
6. 基樁打設至第一階段目標深度
7. 起吊短引樁回甲板並繫固
8. 起吊長引樁並放置於基樁上方
9. 起吊樁錘並放置於長引樁上方
10. 基樁打設至最終目標深度
11. 起吊樁錘、長引樁回甲板並繫固
12. 通知氣泡幕船關閉氣泡幕
13. 起吊打樁導架回甲板

重複四次

重複四次

14. 離開安裝地點

基樁打設的作業時間會因為樁錘能量、天氣條件等因素有所差異，本計畫平均每支基樁包含最終的測量高程階段，約需要 2.5 小時作業時間。

(二) 套筒桁架安裝作業

本計畫所使用之套筒桁架因應安裝現地之水深，共設計三種不同尺寸，高度分別為 55.38m、58.42m、61.88m，平均露出海平面高度約 27-30m。套筒桁架的每支基腳與基樁連接處有一抱樁器 (Gripper) 如圖 5，目的為調整套筒桁架之水平傾角 (Inclination)、高程 (Elevation) 及平面位置 (Position)，抱樁器上有液壓管線連接至套筒桁架平台，以使操作人員可在套筒桁架安裝於基樁上方後，搭配在平台上的控制設備，執行套筒桁架調整作業。



圖 4 基樁打設作業流程圖



圖 5 套筒桁架抱樁器

套筒桁架安裝作業開始前，清樁船會預先執行清樁作業，確認基樁內部清潔完成後，即可準備吊裝套筒桁架，套筒桁架吊樁工具與套筒桁架連接後，會解除套筒桁架固定於動力式駁船之海上繫固設備（Seafastening），起吊並航行至預定安裝地點，並藉由重型吊桿船之定位系統搭配水下無人載具協助，將套筒桁架放置於基樁上，圖6為重型吊桿船起吊套筒桁架航行至安裝地點之過程。



圖 6 吊裝套筒桁架過程

確認套筒桁架四支基腳皆安裝於基樁內後，抱樁器操作人員、測量人員及相關設備需轉移至套筒桁架上執行調整作業，抱樁器操作人員將操作液壓設備並與測量人員搭配，以調整套筒桁架之準確度。

套筒桁架安裝作業流程圖如圖 7，詳細流程如下：

1. 確認清樁作業已執行
2. 目視檢查套筒桁架概況
3. 目視檢查套筒抱樁器液壓管及抱樁器
4. 目視檢查海上繫固設備
5. 取得 MWS 認可並簽屬 CoA
6. 吊裝套筒桁架
7. 放置套筒桁架於基樁上（搭配 ROV 輔助）
8. 操作人員轉移至套筒桁架平台
9. 調整及測量套筒桁架
10. 確認套筒桁架安裝資訊
11. 操作人員及設備轉移回重型吊桿船
12. 離開安裝地點

因為本計畫是將套筒桁架自動力式駁船起吊並航行至安裝地點安裝，因此在不考慮航行時間的情形（每段航程時間不一致），僅考慮套筒桁架至安裝地點之作業時間，放置套筒桁架至基樁上的安裝時間取決於當時風速、浪高、流速等相關因素影響，平均約為 40 分鐘，後續高程調整作業時間約為 1.5 小時，平均每一座套筒桁架的安裝時間約為 2 小時。

（三）接合灌漿作業

含剪力樺之基樁與套筒桁架透過接合灌漿作業固結後，產生載重力量傳遞。

本計畫所使用之灌漿材料為超高強度無收縮水泥灌漿料，搭配事先安裝於灌漿船之相關灌漿設備如：實驗室貨櫃、工具貨櫃、灌漿軟管、送料設備機組、淡水冷卻設備執行灌漿作業。

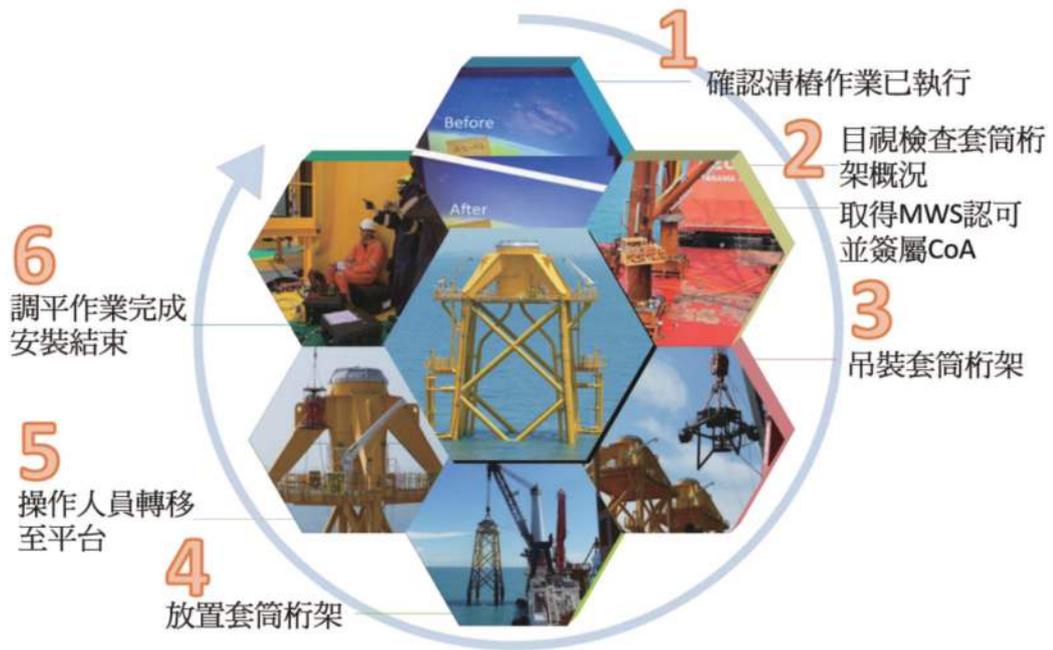


圖 7 套筒桁架安裝作業流程圖

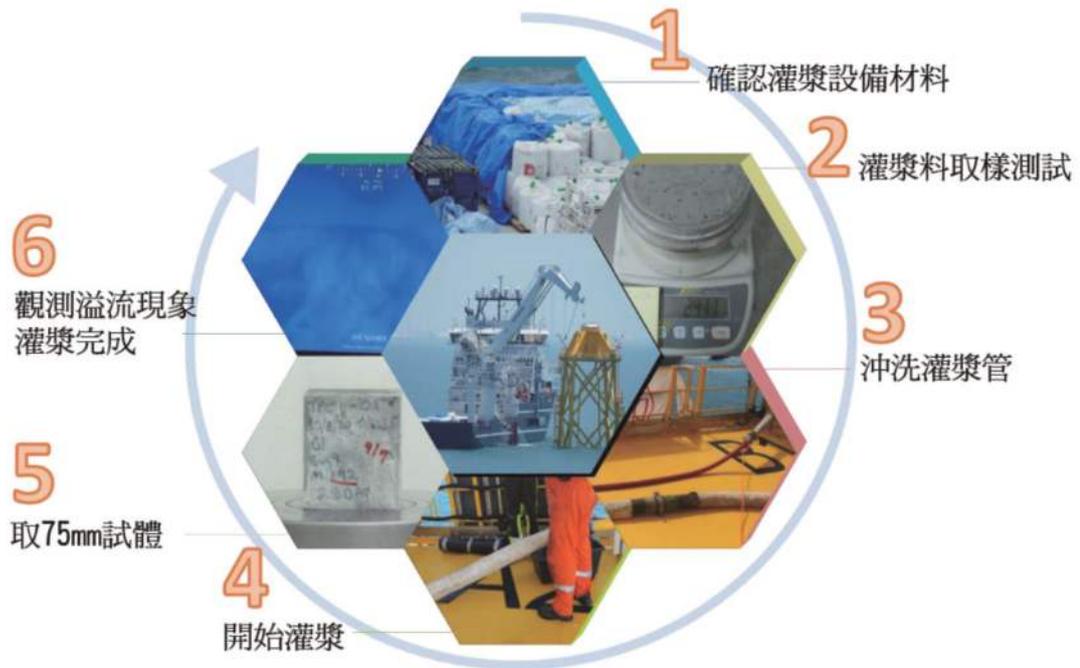


圖 8 接合灌漿作業流程圖

接合灌漿作業開始前，先針對套筒桁架之水平傾角進行測量，並藉由事先已知清樁深度、套筒桁架抱樁器調整高度，可計算出理論灌漿量，理論灌漿量再加上 10% 的備用灌漿量即為該支基腳的預期灌漿量，作業開始前先使用淡水沖洗灌漿軟管及套筒桁架上之灌漿管，同時進行取樣作業，1 天、3 天、7 天材齡的試體壓驗於灌漿船上進行，28 天材齡的試體另送第三方實驗室進行壓驗試驗，取樣作業完成後即開始灌漿作業，作業過程中配合 ROV 在海面下觀測，一旦觀測到灌漿發生溢流現象且灌漿量符合或超出預期表示灌漿作業完成；若已發生溢流現象，但仍未到達預期灌漿量時，將持續灌漿直至理論灌漿量為止，本計畫每支基腳平均約需 2 小時的灌漿時間。

接合灌漿作業流程圖如圖 8，詳細流程如下：

1. 準備灌漿設備並確認
2. 取得 MWS 認可並簽屬 CoA
3. 灌漿料取樣並測試密度
4. 連接沖洗管沖洗灌漿管
5. 連接灌漿軟管至套筒桁架之灌漿管
6. 攪拌灌漿料並開始送漿
7. 取試體 (75mm 立方體)
8. 觀測到溢流現象且達到預期灌漿量
9. 灌漿作業完成
10. 離開作業地點

(因有 4 隻基腳，故需重複流程 3~8 作業 4 次)

本計畫所選用之灌漿材料其強度發展於海溫 20 度時，最初 24 小時固化強度即發展到 28 天固化強度之 40%；7 天之固化強度即發展到 90% 以上。

接合灌漿作業結束後一週內，需利用 CTV 運送人員至套筒桁架，針對套筒桁架抱樁器進行洩壓及拆除抱樁器液壓管，並進行接合灌漿作業後水平測量，確認無異狀即完成該位置之下部結構安裝作業，安裝作業結束成果如圖 9 所示。



圖 9 安裝作業結束成果

三、經驗分享

承攬廠商可根據地質報告，預期打樁作業的自重灌入深度，施工過程以此預期深度作為實際打樁作業之參考資訊。

承攬廠商於基樁於打樁前擬定打樁流程，藉由「打樁緩啟動」，緩慢增加能量的方式並觀察基樁下陷程度，並於打樁完成後提供每支基樁之承載力分析報告，此分析報告與工程施工前所評估的打樁分析報告差別在於增加 2 個打樁分析參數：「打樁期間最後 1.25 公尺之平均錘擊能量 [KJ]」及「平均錘擊次數 [blows/m]」，最終分析報告顯示，21 個位置共 84 支基樁之現地承載力，皆大於設計安全承載力。

承攬廠商藉由現場實際打樁情況所蒐集之參數，事後再輔以分析報告，針對基樁承載力進行雙重確認，日後其他離岸風電開發商，可借鏡台電離岸風電一期計畫執行方式，增加工程可靠性。

四、結語

台電離岸風電第一期計畫規劃 21 組離岸風機，總裝置容量為 109.2MW，下部結構安裝部分，將執行 84 支基樁之打樁作業、21 組套筒桁架吊

裝及灌漿作業，整個下部結構施工工期為 2020 年 6 至 9 月，約為 4 個月。

本計畫所使用之基樁長度介於 63-82 公尺間，樁外徑約 3.1 公尺。基樁打設作業前，會使用水下無人載具進行海床掃描並將打樁導架放置於海床上，打樁導架之功能可確保每支基樁在貫入土層中時，傾斜度保持在容許範圍內，也可確保 4 支基樁之相對位置及絕對位置符合預期。打樁導架放置完成後，即開始進行基樁吊裝及打樁作業，打樁作業開始前會啟動氣泡幕，以降低打樁作業時所產生的噪音。打樁初期會針對樁錘能量進行控制，藉由緩啟動，控制初期的打樁能量避免產生過大的自重灌入深度，基樁的最終高程及貫入深度可藉由樁錘吊裝工具上之測量系統進行量測，每支基樁包含最終的測量高程約需要 2.5 小時作業時間。

基樁打設作業過程中，施工商蒐集打樁作業過程實際數據並重新評估基樁承载力，驗證承载力符合預期，藉由雙重確認增加工程可靠性。

套筒桁架因應安裝現地之水深，共有三種不同尺寸，高度分別為 55.38 m、58.42 m、61.88 m，平均露出海平面高度約 27-30 m。套筒桁架的每支基腳與基樁連接處有一抱樁器用以調整套筒桁架之水平傾角、高程及平面位置，並設置有液壓管線連接至平台，以使操作人員可在平台上執行套筒桁架調整作業。安裝作業開始前，先執行清樁作業，確認基樁內部清潔完成後即開始吊裝套筒桁架，確認套筒桁架基腳皆安裝於基樁內即開始進行調整作業，每座套筒桁架的安裝時間約為 2 小時。

套筒桁架安裝作業結束後即可進行基樁與套筒桁架接合灌漿作業，作業開始前會先針對套筒桁架之進行測量，並使用淡水沖洗灌漿軟管及套筒桁架上之灌漿管，同時間進行取樣作業，作業完成後即開始灌漿作業，ROV 同時間配合在海面

下方觀測溢流現象以確認灌漿完成，本計畫每支基腳平均約需 2 小時的灌漿時間。

為達成 2025 年再生能源占比 20% 之政策目標，創造離岸風電友善發展環境，經濟部以行穩致遠原則、採「先淺海、後深海」開發模式，以「先示範、次潛力、後區塊」3 階段策略有效推動離岸風電發展。

本計畫為第一階段示範風場，雖經歷 Covid-19 事件短暫影響施工進度，但在業主台灣電力公司、承攬商比利時商楊德諾公司 Jan De Nul 與日商日立公司 Hitachi 及專業顧問團隊中興工程顧問股份有限公司與丹麥 NIRAS 公司之共同合作密切溝通協調下，工程最終順利完成，也藉由與國外廠商合作的機會增進自身經驗，對國內工程顧問公司相關專業技術人員來說，實屬寶貴的一堂課。

參考文獻

- 4C Offshore. (2021, April) Global Offshore Wind Speeds Rankings. Available: <https://www.4coffshore.com/windfarms/windspeeds.aspx>
- TPC CHANGHUA DEMONSTRATION. (2020, December) 「DETAILED BACK-ANALYSIS PILE CAPACITY.」經濟部能源局，2021 年 05 月 11 日，取自：https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/news/News.aspx?kind=1&menu_id=41&news_id=19823
- 台灣電力股份有限公司 (2020)，「離岸風力發電第一期計畫—示範風場新建工程 打樁作業分項施工 / 分項品質計畫」
- 台灣電力股份有限公司 (2020)，「離岸風力發電第一期計畫—示範風場新建工程 套筒桁架吊裝作業分項施工 / 分項品質計畫」
- 台灣電力股份有限公司 (2020)，「離岸風力發電第一期計畫—示範風場新建工程 超高強度無收縮灌漿料分項施工 / 分項品質計畫」
- 台灣電力股份有限公司 (2020)，「離岸風力發電第一期計畫—示範風場新建工程 打樁分析」

桃園鐵路地下化北段標設計 初步構想

朱書賢* 簡敦頤** 黃士銘*** 史春華**** 郭林堯*****

摘要

桃園鐵路地下化計畫於民國 109 年 9 月 2 日經行政院核定，為前瞻基礎建設計畫－軌道建設項下之重大建設計畫，而桃園地區因路廊寬度不足，且鐵路沿線居住人口密集，為避免增加工程需地範圍及房屋拆遷，故工程規劃原則以綜合規劃階段路權範圍為限，考量施工可行及安全性等條件下，進行檢討，特別在鳳鳴－桃園路段以桃高階段之用地範圍為限，兩側皆為龜山工業區廠方，施工空間侷限，且需大量鋪設軌道支承版，並於支承版下方開挖施工永久軌隧道。

基本設計階段，在前述原則下，檢討軌道配置與路線容量檢核、定線方案、施工可行性與需求及工程需用地等，並先行就定線及路權設計成果提送審查，使能作為後續細設階段發展之基礎架構，另外車站配置及開發規模方案檢討，亦為基設階段檢討及與外部單位協商之重點工作，特別在桃園車站，另與桃園捷運綠線 G07 站共構轉乘，相關捷運線出入口旅客動線及轉乘需求之整合，以及臺鐵局於站區另有開發之構想，包含現為桃園臨時站之範圍地下部分及共同開發大樓等，皆非原桃地計畫核定之工程範圍及規模，需由臺鐵局自行開發，綜合以上，需整合之議題繁多，故於基設階段已起動相關議題之研商，並獲初步共識。

關鍵字：工程需地檢討、路廊寬度受限路段設計考量、軌道支承版設計、車站建築構想

一、前言

桃園鐵路地下化計畫（以下簡稱桃地計畫）為國家前瞻基礎建設計畫－軌道建設項下之重大建設計畫，中興工程顧問公司承攬該計畫北段委託細部設計及施工監造暨配合工作技術服務（DJ01 標，以下簡稱本標）。本標於民國 109 年 12 月 10 日開始工作（NTP），目前為基本設計

階段，並於民國 110 年 6 月下旬提送基本設計成果初稿。基設階段主要工作重點，係針對設計方案進行評估分析，期能於此階段確認設計方案，作為細部設計執行之依據。主要檢討之方向包含配置、定線方案、需地範圍檢討及車站量體與配置等。因鐵路改建工程之界面複雜，且北段工程範圍跨新北市及桃園市，關聯單位眾多，諸多重大議題尚未定案，仍待各方協商確認，故以下僅

* 中興工程顧問公司軌道工程一部計畫經理
** 交通部鐵道局北部工程處副工程師
*** 交通部鐵道局北部工程處土建軌道科科長
**** 交通部鐵道局北部工程處副處長
***** 交通部鐵道局北部工程處處長

就中興工程顧問公司於備標及基本設計階段，對前述議題之初部設計構想進行說明。

二、計畫緣起

桃地計畫原於民國 98 年 2 月 27 日經行政院核定，同意辦理「臺鐵都會區捷運化桃園段高架化建設計畫」，後因桃園市政府鑒於桃園段鐵路路廊寬度不足，高架化後對於桃園、中壢都會區之景觀、噪音衝擊過大，而鐵路沿線居住人口密集，桃園站與中壢站的運量僅次於臺北車站，為全臺最繁忙的交通運輸樞，考量兼具宏觀與永續發展與因應地方民眾訴求，經行政院民國 109 年 9 月 2 日核定，同意辦理「臺鐵都會區捷運化桃園段地下化建設計畫」。

三、計畫概述

本標工程範圍為自工程起點（UK53+255）至內壢站北端（UK62+300），總長度 9045m，路段包括鳳鳴、桃園、中路、桃園醫院等 4 個車站（如圖 1）。主要工作內容包括：土建工程、一般機電工程、電梯電扶梯工程、臨時及永久軌道工程、臨時軌電車線工程及臨時軌電信工程之設計及監造工作。沿線預計消除 8 處平交道、地下道 3 處，陸橋改善另案辦理，並於桃園站與捷運綠線共構同時預留捷運棕線轉乘銜接。

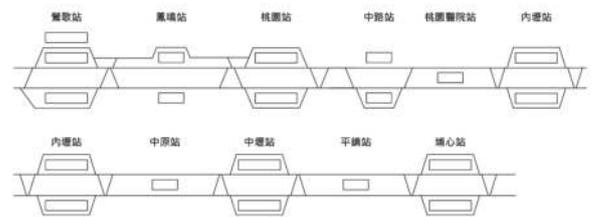


圖 1 DJ01 標計畫路線示意圖

四、軌道配置與路線容量檢討

為了滿足目標年的運輸需求，綜合規劃報告建議鶯歌至埔心間的軌道配置如圖 2 所示，其中鶯歌－桃園間為三軌，桃園－埔心間則維持兩軌。至於車站軌道與月臺配置方面，桃園站為兩島式月臺四股道車站，鳳鳴與中路站採用一島式月臺一岸壁式月臺三股道車站，而桃園醫院則是一島式月臺兩股道車站。

中興工程顧問公司於備標及基設初期，曾就桃園以北之軌道配置提出建議方案，惟因桃地計畫之都市計畫變更作業已近公告階段，相關變更恐造成都市計畫變更，以及關聯計畫之界面期程不定等因素，未獲同意。故基設成果軌道配置大致維持綜合規劃的建議，但考量到鶯歌站實際上並未接出第三軌，因此在鳳鳴站北端建議增設一橫渡線，將第三軌接回正線以發揮其運輸功能，如圖 3 所示。此外，經前述調整重新分析路線容量結果如表 1 所示，在整體表現上，下行方向之路線容量為每小時 9 列車，上行方向為每小時 10 列車，雙向合計每小時 19 列，顯示本案的軌道配置可滿足目標年尖峰小時雙向 14 列的運輸需求。



資料來源：「臺鐵都會區捷運化桃園段地下化建設計畫」綜合規劃

圖 2 綜合規劃建議之軌道配置

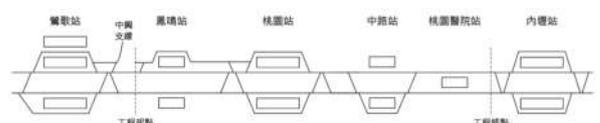


圖 3 本計畫建議之軌道配置

表 1 路線容量分析結果

區間	路線容量 (列車 / 小時)		
	下行	上行	雙向合計
鶯歌－鳳鳴	15	10	25
鳳鳴－桃園	16	10	26
桃園－中路	9	14	23
中路－桃園醫院	9	10	19
桃園醫院－內壢	9	10	19
整體容量表現	9	10	19

五、工程需地檢討

桃地計畫工程所需用地，於綜合規劃階段自計畫起點至桃園車站間，沿用桃園鐵路高架計畫設定之路權範圍，並盡量利用臺鐵既有路權範圍（鐵路廊帶或場站用地）及公有土地。基設階段工程需地檢討原則，仍遵循綜合規劃階段設定之條件，主要考量下列因素：

- (一) 新北段「變更鶯歌（鳳鳴地區）都市計畫（配合臺鐵捷運化桃園段高架化建設計畫）」案及「變更鶯歌（鳳鳴地區）細部計畫（配合臺鐵捷運化桃園段高架化建設計畫）」，已於民國 104 年 3 月 6 日配合高架化計畫發佈實施。
- (二) 專案管理顧問就前述民國 104 年 3 月 6 日發布實施之案是否因中央建設計畫名稱由高架化改為地下化須重新辦理都市計畫變更，洽新北市政府澄清，經新北市政府 110 年 2 月 1 日新北府都字第 1100205756 號函澄清：無需重新辦理都市計畫變更。
- (三) 而桃園段都市計畫變更案辦理情形如下：
 1. 第一階段都市計畫變更（涉及所需工程用地範圍及鐵路地下化沿線兩側公共設施用地之變更內容）業經 110 年 3 月 23 日內政部都市計畫委員會第 987 次會議審定，細部計畫土地使用分區管制要點則於 110 年

6 月 23 日發布實施。

2. 第二階段於民國 109 年 9 月 22 日、民國 110 年 3 月 5 日及 4 月 13 日已召開三次專案小組會議，待依會議記錄修改內容後再次提會討論。

(四) 綜上，為免影響已發布實施（新北段及桃園段第一階段）之都市計畫，及辦理中之都市計畫變更作業期程，進而影響到桃地計畫整體期程。故本標工程需地範圍原則依都市計畫範圍繪製（如圖 4 所示）：

1. 永久軌隧道結構空間需求：兩軌道中心間距採用 4.0m，軌道中心至側牆距離維持 3.025m，故桃園車站以北三軌正線範圍區間，隧道內淨寬為 14.05m，而桃園車站以南，二軌正線範圍區間，隧道內淨寬為 10.05m。
2. 臨時軌空間需求：臨時軌兩軌中心間距採用 3.8m，臨時軌距連續壁之施工安全淨空採用 3m，臨時軌淨寬（含設施需求）約 10.8m。

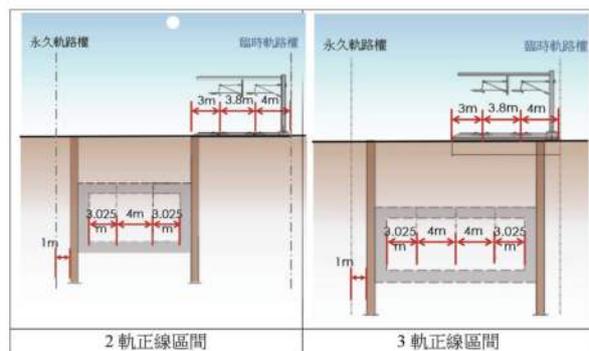


圖 4 工程需地範圍示意圖

本標範圍之工程需地範圍圖，依前述原則進行檢討，共有下列項目範圍，與公告都市計畫（綜合規劃階段）路權範圍不同：

- (一) 茄苳溪、皮寮溪過河段線型檢討：
 - CJ13 標過皮寮溪與茄苳溪段，現況有一座

雙軌舊鐵路橋，及一座單軌鐵路橋（桃高計畫興建），目前既有軌係利用靠海側之2軌營運，永久軌隧道則配置於山側，鐵路地下化施工期間仍以既有海側2軌維持營運。

因國道2號高架橋於皮寮溪及茄苳溪間跨越臺鐵，鐵路兩側橋墩垂直軌道方向之淨距僅28.9m，依綜合規劃方案永久軌隧道與既有雙軌舊鐵路橋部分重疊，於永久軌隧道施作時，舊雙軌鐵路橋需局部敲除（惟經洽臺鐵局並無該橋之竣工圖），但仍需維持單軌營運。且本段山側永久軌隧道之連續壁與大湳高架橋橋墩基礎（編號P46W）干涉（如圖5）：

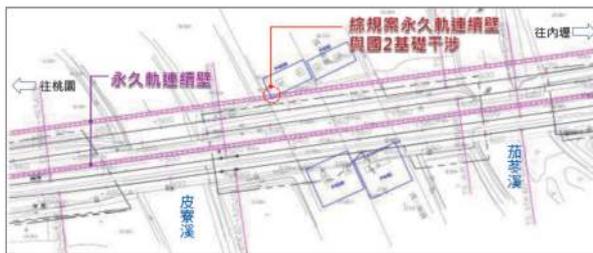


圖5 綜規永久軌隧道與國2基礎干涉示意圖

本案鐵道局北部工程處於民國110年5月14日邀高速公路局北區養護工程分局召開「『臺鐵都會區捷運化桃園段地下化建設計畫』路線穿越國道2號大湳高架橋下方可能與橋梁基礎干涉事宜會勘」，會中高速公路局不同意原綜合規劃方案，建議本計畫採用路線往北側移以避開國2高架橋基礎。且後續設計顧問需提報相關圖說及橋梁基礎安全影響評估等資料，轉高速公路局審查。

綜上，依照高公局之建議，本案永久軌線形需避開與國2高架橋基礎干涉，且同時考量降低施工中鐵路營運維持之風險，避免雙軌舊鐵路橋部分敲除，又仍需維持單軌營運之情形，故建議另於海側新增一股臨時軌（作為臨時之西正線），繞行於國道2號高架海側橋墩之外側，另一股則

利用既有西正線作為臨時之東正線，如此可騰空舊雙軌鐵路橋，於施作永久軌隧道時可全面拆除。建議方案之永久軌線形調整後與原綜規案線形比較示意圖，如圖6所示。

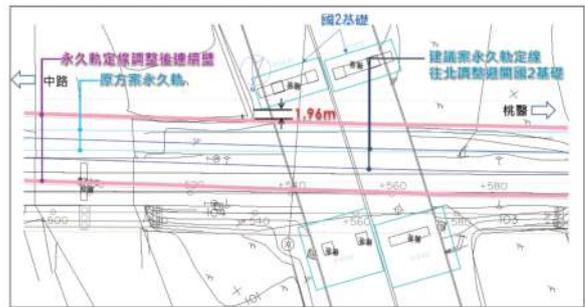


圖6 建議案永久軌與永久隧道示意圖

本案對工程需地範圍之影響，說明如下：

1. 臨時軌需地範圍影響：建議案需於海側新增一股臨時西正線，需增加臨時軌用地需求面積約3100m²，詳細成果請參見基本設計圖說－臨時軌需地範圍圖。

2. 另建議案永久軌隧道往海側（往北）調整後，需地範圍往海側偏移，需地面積大致與原綜規階段相同，因原海側即為既有軌範圍，故增加之用地多為交通部臺灣鐵路管理局管有。

（二）配合永久軌定線方案檢討調整：（此部分仍需待定線成果經臺鐵局同意後方能定案）

針對原綜規定線方案，配合施工條件進行檢討。初步釐清有下列路段定線方案進行調整，相對衍生需地範圍之調整。

1. 56K + 720 ~ 57K + 160（林森路地下道至紹興街路段）

綜規路線於桃園車站以北，第一階段臨時軌偏海側配置，而第二階段臨時軌則偏山側配置。因於桃園車站東側（林森路~桃鶯陸橋間）第1、2階段臨時軌皆與山側連續壁位置重點，影響山側連續壁之施工。另此路段往北，第1階段臨時

軌雖偏海側配置，與山側連續壁間施作空間不足8m，範圍約有200m，如圖7所示。

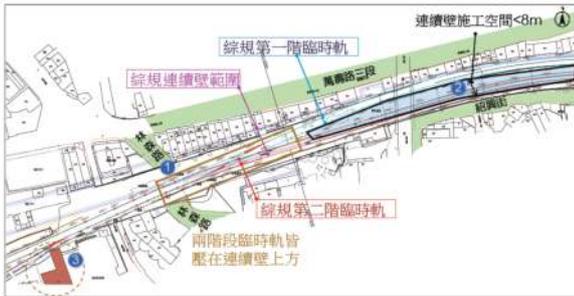


圖7 紹興街 - 桃園陸橋間定線檢討示意圖

為解決前述2項問題，定線方案調整，永久軌及臨時軌需地範圍變動說明如下：

- (1) 永久軌於紹興街至林森路地下道與綜規永久軌用地差異處，如下圖8黃框所示，經檢核與綜規用地範圍差異處，皆屬臺鐵用地範圍內，現況為道路。

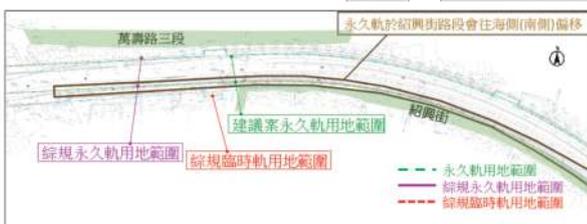


圖8 林森路至紹興街路段需地差異示意圖

- (2) 臨時軌於此路段與綜規臨時軌用地差異處，大致如圖9所示3個區段，臨時軌增加需地的部分主要在山側，用地權屬則為私有地或公私共有地，其中紹興路段用地現況為道路，施工中租用用地範圍，以仍能滿足紹興街緊急救災及居民進出動線需求為前提。



圖9 林森路至紹興街臨時軌需地差異示意圖

2. K57 + 680 ~ K57 + 980 (民族陸橋~三民陸橋間)

綜規階段桃園車站西側僅一階段臨時軌，此臨時軌位於連續壁上方，影響該段連續壁施作，需增加一階段臨時軌。如圖10所示。因前述線形調整，臨時軌需地於此路段增加用地範圍，皆屬臺鐵路管有土地。

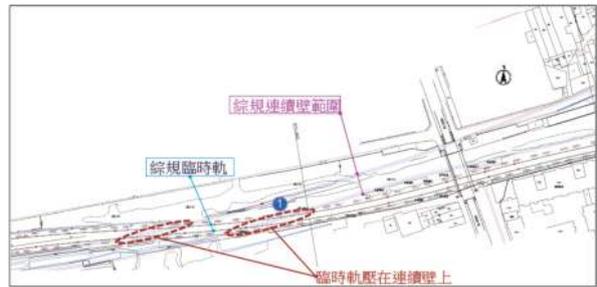


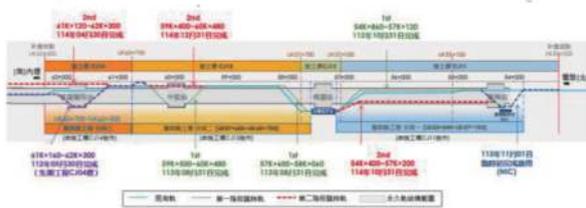
圖10 民族陸橋~三民陸橋間定線檢討示意圖

- (三) 除前述兩項外，配合系統機電標需求，調整隧道壁龕及突出物等（俟系統機電標需求確認後，再行調整）。

六、路廊寬度受限路段設計方案

本標沿線路廊寬度不足，特別在CJ11標鳳鳴 - 桃園段間，永久軌配置3軌隧道，隧道總寬度為18.05m，臨時軌營運需求空間約11m寬，故永久軌及臨時軌路廊需地寬度約為29m，而此路段之路權寬度僅為21~26m，且此路段行經龜山工

業區，兩側緊臨廠房建物，為免多徵收用地及拆遷，造成 CJ12 標第二階段靠山側之臨時軌（里程 54K+640~56K+980）有長達 2.3km 臨時軌將直接位於地下永久軌隧道之上方而需設置軌道支承版供臨時軌列車運轉使用，總計本標（北段分標簡圖如下所示）全線更約有 4km 之軌道支承版。



（一）軌道支承版設計

1. 結構系統

軌道支承版系統會依據不同情況配置，並依照臨時軌與開挖範圍關係，可分兩種狀況，如圖 11，兩種狀況結構配置皆考慮施工開挖順序及施工動線，並配合開挖支撐系統；且軌道支承版系統結構鋼柱與開挖支撐中間樁共用。

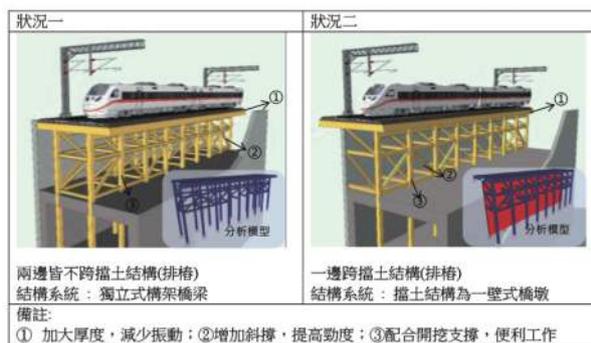


圖 11 軌道支承版系統結構配置

2. 材料強度與載重

結構設計所採用之材料強度及載重組合，依據鐵路橋梁設計規範及耐震設計規範之規定，以

強度設計法設計並考慮對各構件造成最不利影響之載重組合，相關應考量之載重如下所示：

- (1) 靜載重，包含結構自重、電車線及電纜等附加靜載重
- (2) 活載重，包含鐵路活載重、衝擊力
- (3) 鋼軌縱向力
- (4) 風力，包含結構物所受之風力、活載重引致之結構物風力、傾覆風力
- (5) 地震力
- (6) 離心力
- (7) 其他載重，包含溫度力（含梯度效應）、差異沉陷、起動及煞車力、車輪側向力及橫壓力等

3. 分析方法

為評估軌道支承版之結構及考量結構物存在質量、勁度及幾何不規則等因素，將採三維有限元素法，分析模式包含部分既有橋梁結構及新增之墩柱與托底梁結構構成之立體構架，其中地震力分析採依鐵路橋梁耐震設計規範之反應譜動力分析法，以達成具備等同永久結構物之耐震性能；考量普悠瑪列車最高時速 130km/hr 行駛不降速的狀況，檢核相關橋梁轉角及振動加速度小於高鐵規範容許值（垂直振動加速度容許值為 0.35g；梁端動態轉角值和之容許值為 $8 \times 10^{-3}/h$ (rad)，h 為軌頂至支承中心高度），以確保乘客舒適度；以上述條件進行結構分析，決定臨時軌道版結構梁、柱、及斜撐等構件設計。

4. 分析程式

結構分析及設計將採用下列輔助程式：

CSI SAP2000 NONLINEAR V11.0.8 版

5. 設計成果

設計成果以 TYPE A 為例，結構型式為軌道支承版搭配鋼構架系統，RC 結構尺寸初步估算厚度為 0.75 公尺，鋼結構尺寸初步估算鋼柱外尺寸為 BOX600x600mm、結構鋼梁尺寸初步估算沿

軌道方向之主梁為 H700x300mm、縱向及橫向支撐鋼梁尺寸初步估算為 H400x400mm、鋼斜撐尺寸初步估算為 H300x300mm。

(二) 施工空間檢討

如上所述，在 CJ11 標鳳鳴 - 桃園段間，路廊寬度不足，且兩側緊臨民宅，如圖 12 所示，連續壁施作時需於用地範圍內緊鄰臨時軌施作，施工空間僅約 8m，而一般連續壁施作空間約需 12m，雖參考過往案例，如高雄鐵路地下化計畫 CL311 標及北捷頂溪站等，分別有 6m 及 9m 之施工空間限制下之案例，惟前述案例施工空間受限區域範圍小，如 CL311 標案例，受限區域長度約 45m，而本標 CJ11 標所遭遇狀況，如圖 12 所述之情形為直線路段，長達約 2km 範圍皆僅有 8m 之施作空間，且兩側工業區範圍內，缺乏橫交連外道路，前後兩端之橫交道路分別在鳳鳴里平交道及建國東路平交道，兩者間相距約 1.8km。故經檢討，此區域範圍內，應考量施工機具之施工、避車空間，及鋼筋加工廠、土方及材料堆置等需求，如圖 13，並依桃地計畫通車時程，檢討 CJ12 標期程，在符合標案完工期程之條件下，考量合理工率及工作面（機組數），檢討本路段廠商施工所需之路外施工空間需求，後續細部設計階段，將前述成本合理編列於預算中。

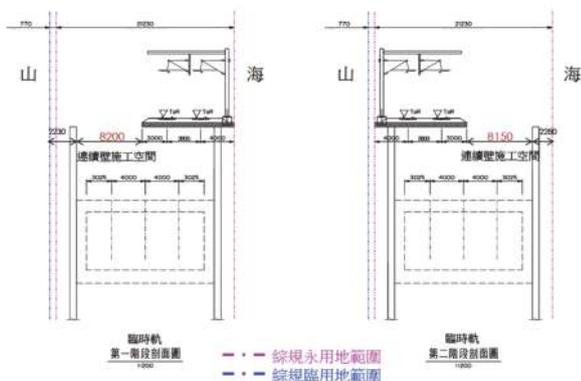


圖 12 鳳鳴 ~ 桃園間路廊寬度示意圖

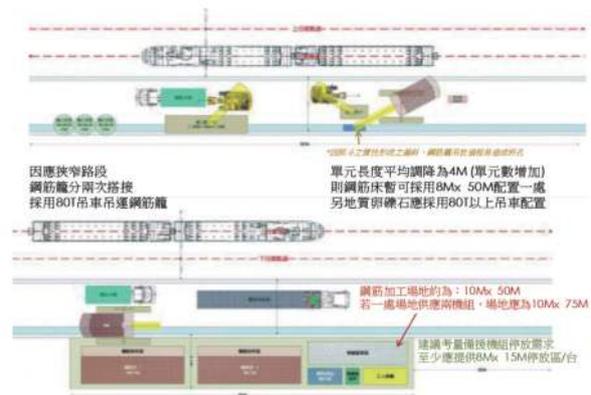


圖 13 鳳鳴 ~ 桃園間施工空間檢討示意圖

(三) 鄰軌施工安全監控

因本標路段全線皆臨營運中軌道旁施工，甚至有長達 4km 範圍需於軌道支承版（上方支承營運中路線）下方開挖（如圖 14），營運中列車需於支承版上方以營運速度通過，且多數地方兩側緊鄰民房，為確保鐵路地下化施工期間的安全，除將於施工標契約中明定需依相關鄰軌施工安全規定辦理外，相關預算需覈實編列，且將規劃下列監測系統：

1. 開挖支撐監測系統。
2. 軌道支承版即時監測系統（軌面監測）。
3. 異物入侵系統（CCTV 監測或圍籬光纖感應式監測系統）。
4. 施工區沿線設置緊急按鈕。

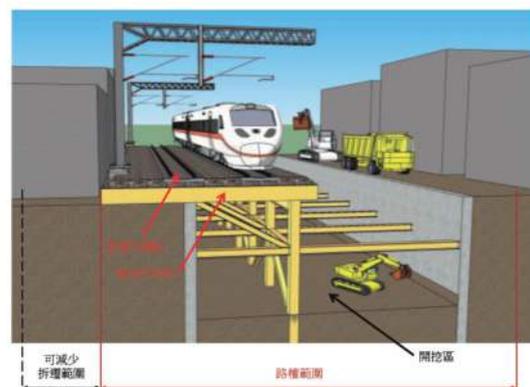


圖 14 鄰軌施工示意圖

七、車站建築構想

本標範圍內包含既有桃園車站地下化及新增鳳鳴、中路及桃園醫院等3個通勤車站，而各車站設計，需與臺鐵局就使用及站區開發需求等進行溝通，並依照地方政府就都市設計之要求，特別是桃園車站為桃園市之門戶車站，且與桃園捷運綠線共構，及站區範圍內有文化遺址等因素，故有關桃園車站之設計需遵循綜合規劃核定之基礎外，尚需與臺鐵局、桃園市政府都發局、捷運局、交通局及文化局等單位協商。基本設計階段，已啟動相關協商程序，並獲致初步共識，惟各單位間仍有不同意見，在車站設計未定案前，相關成果仍有變動可能，以下謹就本計畫對車站設計之構想進行概要說明。

桃園市因早期大量栽植桃樹，繽紛馥郁，有桃花林之稱，將桃園站營造為象徵桃花源之門戶綠廊亮點，後續整體都會發展將與「智慧航空城」結合，以「桃花源記」為主軸，取其「逸趣」意象，利用鐵業園及綠園道廊帶空間，及周邊整體退縮開放廣場，將周邊水圳、埤塘及溪流地景以意象呈現或實景營造方式，串連站區沿街及廣場景觀綠帶，創造安全連續、鬧中取靜、以慢行悠活為主之綠色低碳人本空間廊帶。

本標由新北市鳳鳴站往西續行至桃園市桃醫院站，沿途行經非都及都市重劃區、觀光廠房、鄰里住宅、都市政經商圈、工業區、醫院及多所大專中小院校，彰顯各站區環境風貌、土地使用型態及強度迥異，以與桃捷綠線共構設計之桃園站譜出之「浮丘」、「逸趣」的桃花源協奏曲，展現桃園站區獨特壯麗魅力，沿途三站新設通勤站則分別以「風」、「川」、「森」為主題，譜出與桃花源和諧交融、展現北桃新舊融合之活力美與藝文樂等觀光氣息。

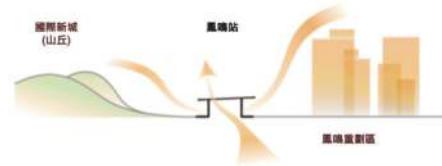
車站建築則強調以人為本，優化旅客動線與

服務機能，並結合在地多元文化與永續發展的精神，反映到車站的實質設計上。藉由發展各站的特色主題與共同設計語彙，將鐵路、桃園、自然生態的重要設計脈絡延續，提出三者兼顧的各站設計提案。



(一) 鳳鳴車站

設計主題為「沐風之丘」沐風之鳳鳴站位於鳳鳴重劃區（新社區）及國際新城（舊山城）之銜接位置，月台改採開放式自然通風，結合社區環境特色以「呼吸、綠意、新生活」，作為車站規劃的設計定位。



(二) 桃園車站

為打造國門之都桃園市之城市門戶意象，本標在車站建築設計部分，特別與國際著名之荷蘭麥肯諾建築師事務所（Mecanoo）合作。桃園車站以「新創桃花源」的意象作為主軸展開：桃園身為國門之都，擁有全臺第一大國際機場，並規劃智慧航空城之願景，這幾年積極強化城市基礎建設，藉此孕育各項產業、活動多元發展，期望打造優質生活的智慧化城市。桃園未來的願景和過去清朝時期桃澗堡的歷史印象相結合，造就新創桃花源的嶄新概念。

地下化的桃園車站，地面層腹地狹長，交通繁雜交錯，缺少綠帶和開放空間，故建築設計以折板屋頂為主體，除設置服務旅客之站務和商業空間外，亦提供大面積遮蔭廣場，搭配周圍景觀

引入舊時遍植桃花，繽紛馥郁的桃仔園印象。車站將成為桃園未來經濟核心，同時也是乘載青年夢與城市樂的綠花園，展現科技與生態永續的新姿態。



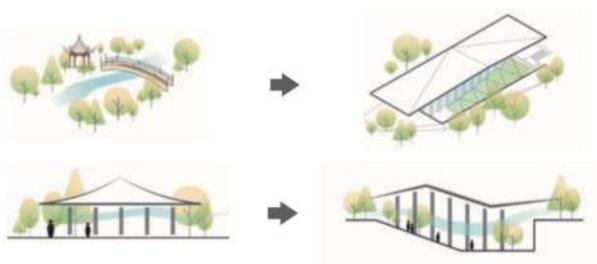
(三) 中路站

中路站之建築設計，則與所在建築師事務所合作。「賦水之行」為中路站之設計主題，中路站連接騰空綠廊的開放空間，採整體公園化、活潑化設計，多功能廣場舉辦各類活動，藉以融入周邊社區生活。各出入口設置大面積挑空，引進自然光，形塑空間的自明性，另將引入「智慧、人性、便捷」的智能設計。



(四) 桃園醫院站

桃園醫院車站體半隱於下沉式花園，美麗的園林景觀與穿堂層車站大廳結合，達成「庭屋一如」室內外通透的建築空間。建築結構與景觀樹木相互輝映，宛如漫步於森林之中，讓旅客忘卻塵囂，達到靜心療癒的作用。



八、結論與建議

桃園鐵路地下化計畫，沿線路廊寬度狹窄，為免增加多餘之拆遷，大量使用軌道支承版以減少工程需地面積，為本路段工程特性，本標於基本設計階段，主要就下列議題進行檢討：

- (一) 盡可能在綜規路權範圍內，考量施工可行性及維持施工中臺鐵營運安全之前提下，檢討定線方案及工程需地範圍，以減少拆遷及用地取得。
- (二) 因大量使用軌道支承版，且使用之路段位於臺鐵營運中正線，列車需以高速通過該區段，故對軌道支承版之設計，除考量施工過程中開挖等各種條件外，包含地震力、列車載重（含剎車力及啟動力等）因素，並且檢核前述載重對軌道支承版造成之轉角及振動加速度值，以確保施工安全及乘客舒適度。
- (三) 就用地限寬路段依現地條件檢討施工空間成本，並合理反應於預算中。
- (四) 就各車站之配置及建築設計，除依循都市計畫土管規則外，並與臺鐵局及地方政府各關聯單位進行協商，以確認車站規模與造型方案。

參考文獻

- 「臺鐵都會區捷運化桃園段地下化建設計畫」綜合規劃（109年9月）
- 「臺鐵都會區捷運化桃園段地下化建設計畫」DJ01 標北段鐵路工程設計及監造工作委託技術服務基本設計報告（A版），2021年6月



* 宜蘭礁溪 佛光大學體育館暨活動中心

宏觀的視野觀察及環境的特色 創造人與生活的連結

以作為佛光師生的共同成長記憶空間為目標
從教育理念、教學情誼、校園永續經營來出發
並延伸整合成三項規劃特色：> 開放式教育的空間使用
> 作為校園實質性與象徵性的核心 > 實踐永續綠校園的理想



土木&建築事業

中興團隊專業服務

水利、大地、電力、結構、建築、軌道、交通、系統
機械、環境、海岸及港灣、都市設計、工業城鄉開發
園區規劃等之規劃、設計與施工監造管理

聯絡資訊

10570 臺北市松山區南京東路五段171號
電話：(02) 2769-8388 傳真：(02) 2763-4555
E-mail：sinotech@sinotech.com.tw
https：//www.sinotech.com.tw

正派經營 · 品質保證 · 追求卓越 · 創新突破

 中興工程顧問股份有限公司
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, LTD.



佛光山新寶橋新建工程案例研討

黃政源 * 阮仲如 ** 蘇哲雋 * 吳育茜 *
黃乾祐 *** 黃模立 **** 蔡雪華 *

摘要

佛光山「新寶橋」座落於大雄寶殿與大悲殿之間，為連接兩殿之便捷橋梁，以便利年紀漸長信眾至大悲殿禮拜。新寶橋長度 75 公尺、寬 5 公尺，為人車兩用屋頂式橋梁，上部結構採 Vierendeel 型式構架、屋頂採用鈦鋅鈹屋瓦，下部結構為井式基礎混凝土橋墩，完成後之橋梁與佛光山寺景觀融合，並於 2020 年春天正式啟用。

本工程施工主要挑戰為：1. 工區聯外道路狹小導致施工機具尺寸限制；2. 周遭既有建物及大殿迴廊須避免破壞；3. 工區位於山谷處周遭並無施工平台及空間；4. 下方生態池地質軟爛承載能力不佳，綜合上述挑戰由設計方案及施工技術同時考量並執行工程設計。本案例由規劃、設計、施工協助一系列服務業主，分享設計規劃、施工建議作為後續案例的參考。

關鍵字：橋梁設計、井式基礎、邊坡穩定、施工構台、BIM 施工協助

一、前言

大悲殿位於佛光山西山為宮殿式建築，於民國 60 年完成佛光山內第一座殿堂。寶橋為當年大師從修道區往返信眾區，說法開示溝通必經之地，許多弘揚佛法之想法都是在寶橋上靈光乍現所產生的，因此寶橋具有相當之歷史意義。參訪路線需通過寶橋攀登邊坡階梯方可抵達大悲殿，且階梯落差甚大對於行動不便之信徒造成極大困擾。因此評估前往大悲殿的路線上規劃一條無障礙路線。

新寶橋（後續稱新橋）選定路線為大雄寶殿迴廊西南隅至大悲殿迴廊東北隅（圖 1）為新橋路線，工區為山谷地且聯外道路為 6m 寬之斜坡，

因此施工方式極具挑戰。設計考量建築物歷史意義及水土保持，參考周遭建物避免新橋突兀，並利用兩側橋墩增加山坡之穩定性；施工則採用破壞少及安全性高之方式進行，因此利用架設施工構台於山谷中生態池上方增加施工腹地。



圖 1 新橋工程位置說明

* 中興工程顧問公司南部工程中心工程師
** 中興工程顧問公司核能後端專案計畫副理
*** 中興工程顧問公司南部工程中心技術經理
**** 中興工程顧問公司南部工程中心資深協理

二、橋樑結構規劃及設計

新橋規劃需求：1. 新橋與山谷環境、寺廟建築有協調性；2. 新橋考量輕量化設計；3. 新橋具備視覺通透性；4. 維持山谷地之生態環境；5. 考量車輛行駛新橋之車輛荷載。設計團隊由環境調合及生態保護角度出發，由以下議題說明本工程：

(一) 橋梁造型

為營造整體景觀，周遭環境條件須一併改善。考量園區協調性，橋梁外觀須與四周建物相互融合，讓使用者感覺橋梁為迴廊之延伸，減少建築物突兀感。因此規劃階段利用大量透視圖與寺方進行意見交換（圖2、3）。



橋梁建築外觀

橋梁內部配置

圖2 橋梁外觀設計透視圖



圖3 橋梁完工模擬圖

(二) 橋梁配置

橋梁採用三跨（17.4m+40m+17.5m）方式跨越山谷，可有效減少邊坡承重減少邊坡滑動、避免破壞生態池及山谷原貌、橋墩落於樹叢處減少破壞山谷原貌及生態池、兩側橋台坐落於大殿迴

廊旁小平台處，詳圖4。橋台及橋墩開挖整地面積未滿1000m²，且其挖方與填方之加計總和未滿2000m³，故得以簡易水土保持申報書代替。

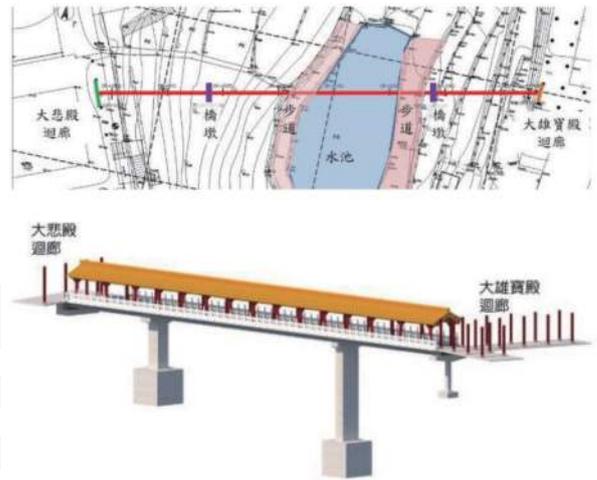


圖4 橋梁平面配置及透視圖

(三) 橋梁結構形式

新橋為景觀橋梁，須營造輕盈及透視感，故結構系統不宜採用深梁及垂直斜撐阻礙視覺感受。因此採用鈦鋅瓦作為屋瓦減輕自重，及Vierendeel型式（圖5）為橋梁結構系統避免垂直斜撐設置。



圖5 橋梁分析模型（SAP 2000）

(四) BIM 模型應用

本工程從設計階段即採用 BIM 支援（圖 6~8），於基設圖、細設圖、數量估算、建築整合、施工規劃…等過程，皆利用 BIM 支援說明，有效澄清寺方、設計、監造及施工單位的各方疑義。

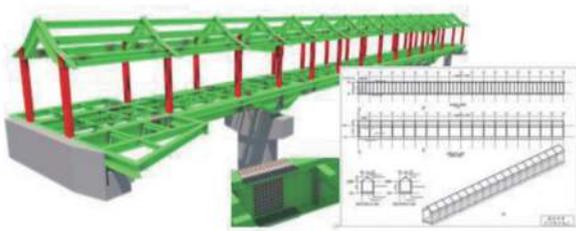


圖 6 BIM 細部設計模型與圖說產生 (TEKLA)

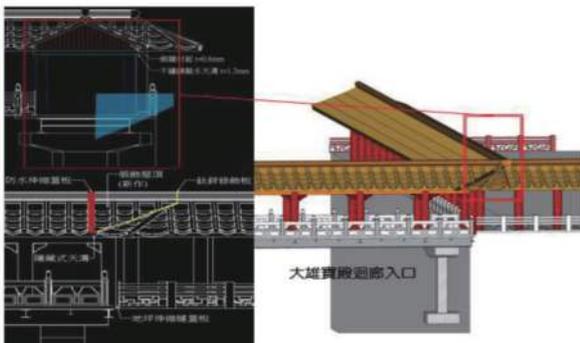


圖 7 新橋屋簷與迴廊銜接 BIM 介面整合



圖 8 BIM 施工協調會議

三、井式基礎及邊坡穩定

考量維持山谷地既有生態環境景觀，及新橋之整體規劃，以橋墩座落於山谷兩側邊坡上，避免於生態池內落墩，並依此原則，進行新橋之基礎設計工作。

(一) 井式基礎

工址主要地層分布狀況：大悲殿側地下 2m~6.1m 為粉質黏土或砂質粉土，SPT-N 值多介於 6~22 之間，地下 6.1m~25.3m 則為 SPT-N 值 ≥ 50 的堅實黏土層，其下方尚有 SPT-N 值 ≥ 50 的緊密砂土層；而大雄寶殿側地下 0m~0.7m 為表土層，地下 0.7m~6.5m 為砂質粉土，且 SPT-N 值多介於 19~25 之間，地下 6.5m~26m 為 SPT-N 值 ≥ 50 的堅實黏土層，下方則同樣為 SPT-N 值 ≥ 50 的緊密砂土層。

為確保橋墩基礎可坐落於承载力足夠且相對堅實的地層，初步考量以「深基礎」穿過軟弱的細砂層及粉土層，使基礎與上部結構載重直接承載於泥岩或緊密之砂土層。然而，由於現場地形陡峭且既有建物林立，聯外道路與施工空間皆有受限，傳統用於施作深基礎（如全套管基樁、反循環樁等）的大型機具無法進場，換言之，傳統的樁基礎恐因不具施工性而無法採用。井式基礎因具有可因地制宜採用小型機具施工、基礎面積小、開挖工法可順應地形等特點，故最終選定井式基礎作為新橋工程的基礎型式。

參考交通部臺灣區國道新建工程局之「公路橋梁井式基礎設計準則及解說」，並根據地層特性及橋梁上構之荷重，大悲殿側之基礎 P1 採直徑 6m、深度 15m 之井式基礎；大雄寶殿側之基礎 P2 則採直徑 4.5m、深度 10m 之井式基礎，P1 及 P2 井式基礎與邊坡相對位置如圖 9 所示。

井式基礎在初期進行井口開挖時，為避免井

口邊坡土壤坍塌，規劃以土釘與噴凝土穩定坡面，如圖 10 (a) 所示，開挖至井式基礎預定頂面高程後，再以 H 型鋼（或桁架式支保）與掛網噴凝土構築而成的臨時開挖支撐，逐輪向下開挖至井式基礎預定底面高程，如圖 10 (b) 所示。待開挖作業完成後，再由下往上逐步進行鋼筋綁紮與混凝土澆置作業，完成井式基礎施作。如圖 10 (c) 與圖 10 (d) 所示。

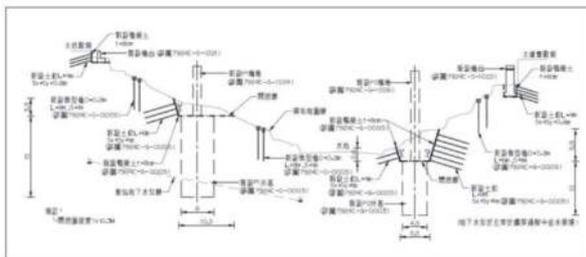


圖 9 井式基礎與邊坡穩定設施剖面圖



圖 10 井式基礎施工照片

(二) 邊坡穩定

本案邊坡穩定分為永久性與臨時性兩部分考量，臨時性邊坡著重於初期進行井口開挖時，井口坡面土壤穩定，分析時以臨時性邊坡之平時狀況為主要分析情境；永久性邊坡穩定則係針對工

址兩側的既有邊坡進行補強考量，分析情境包括永久性邊坡之平時、暴雨及設計地震等情境；各情境之安全係數標準，參照水土保持技術手冊相關規定，臨時性邊坡平時之安全係數大於 1.2，而永久性邊坡平時之安全係數大於 1.5、地震時之安全係數大於 1.2 以及暴雨時之安全係數大於 1.1。本案邊坡穩定分析採用極限平衡法之 Slide 軟體，最終在考量施工可行性與滿足各情境的安全係數標準下，臨時性邊坡以土釘與噴凝土作為穩定坡面的設施，而永久性邊坡則選定微型樁作為穩定邊坡之補強工法，於兩側邊坡分別佈設數排微型樁，微型樁配置如圖 11 所示，各情境分析成果如圖 12 所示。

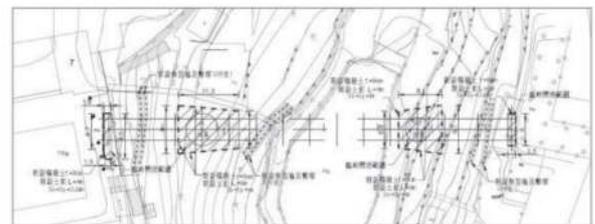


圖 11 井式基礎與邊坡穩定設施平面配置圖

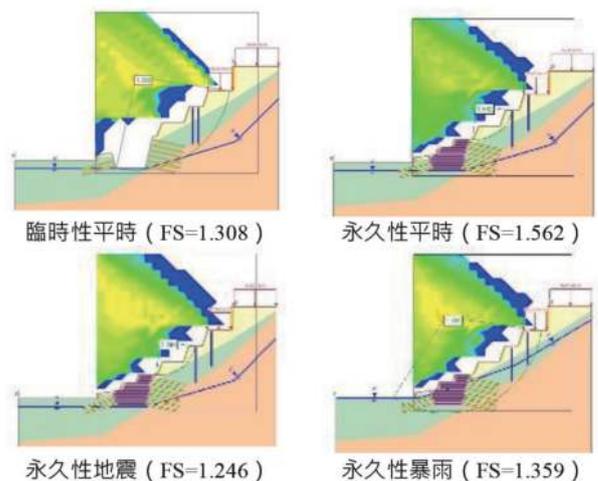


圖 12 邊坡穩定分析成果（以大雄寶殿側為例）

此外，由於新橋工址坐落於山坡地，工程內容包含邊坡開挖與回填行為，依法須於施工前擬具水土保持計畫，送請主管機關核定後，方得施工；然而，因本案開挖整地面積未滿 1000m²，且其挖方與填方之加計總和未滿 2000m³，故得以簡易水土保持申報書代替。

(三) 復舊

邊坡的復舊工作，則考量舊有漿砌卵石擋土設施高程與新舊建物外觀一致性，先以地工格網與填土進行夯實回填，再視現況環境以土袋包或漿砌擋土牆銜接兩側既有邊坡，如圖 13 所示。



P1 (大雄寶殿側)

P2 (大悲殿側)

圖 13 復舊完成照片

四、行車路線規劃

本案最大特色為業主有車輛行駛需求，須考量車輛在既有迴廊進出路線，依民國 104 年市區道路及附屬工程設計規範，車輛型式（小客車：車長 5.5m，車寬 2.1m，迴轉半徑 R=7.5m）使用設計軟體進行車輛最小轉向軌跡模擬（詳圖 14），原研擬之方案皆與既有建築物衝突無法採用，故將新設車輛迴轉平台提供額外迴轉空間。

橋梁西端之大悲殿迴廊淨寬不足及既有迴廊柱需保存情況下，車輛行駛路線無轉彎空間。因此須新設車輛迴轉平台，並配合周邊迴廊柱間距，調整新橋柱間距。車輛迴轉平台平面詳圖 15，經分析檢核，此方案能提供足夠空間讓車輛迴轉進出，詳圖 16。

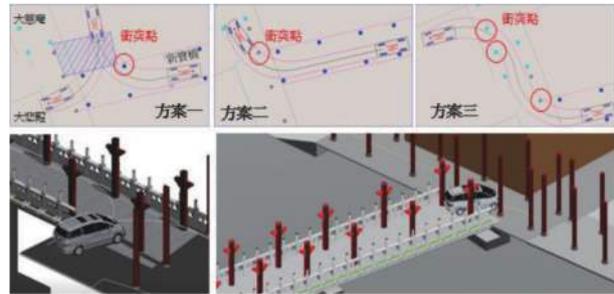


圖 14 路徑研擬及車輛最小轉向軌跡模擬

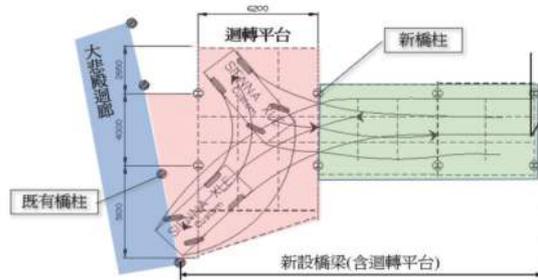


圖 15 迴轉平台最小轉向軌跡模擬

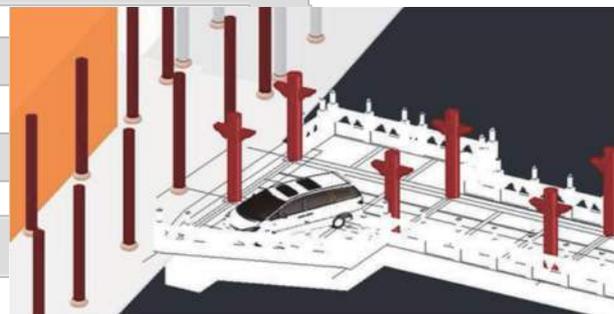


圖 16 迴轉平台行車路線動態模擬

為確認前述分析結果，進行實車測試模擬，使用粉筆與三角錐模擬迴轉平台與新橋平面位置，並用實際車輛進行實測，並採用無人機錄影記錄。結果顯示車輛與結構邊緣較接近位置共三處，分別為：1. 實車往南側平台轉向，車頭貼近欄杆邊緣；2. 實車倒車至北側平台邊緣，車尾貼近欄杆邊緣；3. 實車轉出迴轉平台，車外殼貼近橋柱邊緣。均無影響車輛迴轉路線，測試結果與分析一致，詳圖 17。



圖 17 無人機記錄現場實車測試

五、施工構台及吊裝規劃

鋼構吊裝，橋面距離地面約 20m~25m 高且正下方為生態池，吊裝機具之吊臂無法由聯外道路達到所需高度。新橋兩端皆為迴廊地坪，該處無法承受重型機具架設，且機具操作空間大於迴廊柱間距。故鋼構吊裝須採用施工構台，規劃重點為機具出入動線、機具能量、施工構台架設方式、施工構台挖填量須控制在簡易水保規定內、及維持山谷地既有生態環境景觀。

(一) 施工構台

設計階段，工區地勢陡峭導致鑽探作業空間不足，僅在橋墩處進行地質調查作業。故無法得知生態池底下方土層資料及水池底部狀態，故進行生態池抽乾作業及水中生物先安置它處，使工作面呈現無水狀態。抽水可避免構台柱打設階段池水影響，同時檢視池底完整性，並保持原通水斷面使其雨季時保有功能。

施工構台位於生態池範圍內，架設方式可採用以下方式執行：1.H 型鋼打入土層作為構台支撐系統、2. 覆工鈹下方澆置低強度混凝土作為構台柱下方基礎，如圖 18。

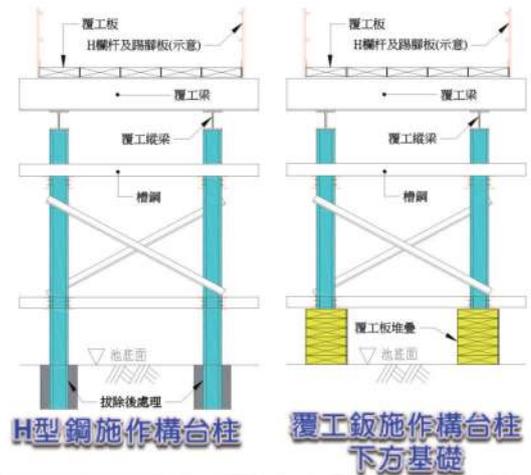


圖 18 施工構台柱基礎型式

本案施工構台高度高、上方荷重需求高，採用覆工鈹作為構台基礎恐承载力不足，經評估後，採用安全性高之 H 型鋼作為施工構台支撐系統。

構台結構分析後單柱最大荷重需求約 75t，並參考土壤條件，構台柱須貫入深度達地表下 12m 處，方可提供足夠之承载力。構台尺寸依照山谷環境及既有駁坎規劃，避免落柱破壞駁坎，故規劃施工平台平面 12m×40m、引道 10m×30m（如圖 19），間距 4m 打設構台柱與既有設施衝突須閃避，共計施打 61 之構台柱。

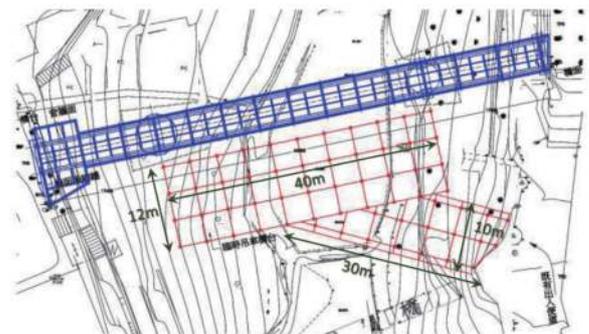


圖 19 施工構台及引道之構台柱佈設平面圖

（二）吊裝機具規劃

吊裝須考量吊臂最長距離、吊升荷重及作業半徑、機具架設位置、施工動線等條件，工區聯外道路蜿蜒且最小路寬僅4.5m、坡度達15~20度。且施工動線與建物及設施衝突導致機無法通過，為確保施工安全性及可行性，與寺方及施工單位溝通，拆除影響之建物及設施，待施工後復舊，動線如圖20。

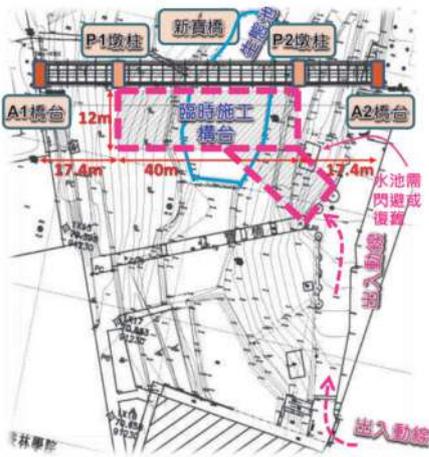


圖20 施工動線及施工構台示意圖

考量吊裝機具須承受最大荷重約6.5t、吊臂由構台至兩端橋台，機具採用KA-1200低噪音之輪式油壓吊車，其吊臂可提供12~47m長度。本案進行吊掛作業，最遠吊臂距離為 $17.4m+12m \approx 30m$ 尚可吊運約11t之型鋼，施工模擬如圖21。

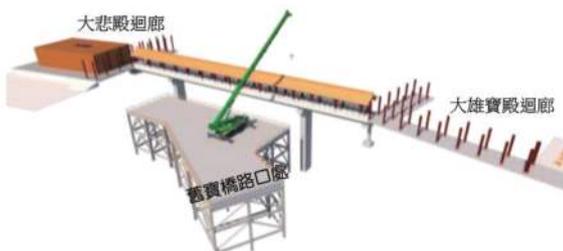


圖21 施工構台及吊裝機具模擬圖

六、結論

本案在宗教園區內執行景觀橋梁設計，在規劃設計上需要考量人文、宗教、生態環境及寺方需求。設計階段大量採用BIM整合技術及建築透視之軟體應用，迅速出透視圖及模擬圖讓寺方直觀、明確理解工程規劃及配置，甚至後續施工皆可展示說明。BIM模型在設計初期費工耗時，但介面溝通協調、配置調整及成果展示卻大幅縮短溝通時間，以專案執行是正面效益。後續相關景觀工程案可考量規劃初期採用模擬圖讓業主先構想完工狀況，完工照片（圖22）與劃模擬圖（圖3）近乎相同，完美展現規劃、設計與施工品質之管控。



圖22 新橋完工照片

本案重點為如何在有限施工動線內提供足夠之施工空間，為解決此問題，在設計階段納入施工、監造單位一起討論。由規劃設計後及施工、管理經驗建議，彙整出幾種執行方案提供寺方評選。此執行方式有以下優點，1. 避免設計單位提供無法執行之工程設計；2. 施工單位明確掌控工程風險；3. 監造單位清楚設計構想及施工方式，因此本案由施工執行到完工僅10個月即完工。

工程規劃過程須讓業主表達想法和參與討論，利用各式軟體展示出規劃成果，並模擬業主

所期望之完工狀態。由工程規劃進入工程設計，需要設計、監造、施工三方單位提供相關工程經驗，不斷討論及方案修正後提出最佳施工方式。因此，過程中設計單位扮演溝通介面協調之角色，利用工程專業知識及 BIM 整合技術有效突顯工程疑義並給出建議，提供整個專案最佳品質管控。

參考文獻

- 內政部，「混凝土結構設計規範」（106 年版）。
- 內政部，「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範」，鋼結構容許應力設計法規範及解說（99 年版）。
- 國工局，「公路橋梁井式基礎設計準則及解說」（105 年版）。
- 內政部，「建築物基礎構造設計規範」（90 年版）。
- 水土保持局，「水土保持技術手冊」（106 年版）。
- 內政部，「市區道路及附屬工程設計規範」（104 年版）。



財團法人中興工程顧問社歷年之研發成果，已開發下列程式，若有需要，歡迎洽購。

聯絡電話：(02) 8791-9198 轉 467 陳小姐

E-MAIL：louis@sinotech.org.tw

網址：http://www.sinotech.org.tw

序號	程式名稱	版次
1	泛用型非線性靜動態平面結構分析程式	V1.0
2	深開挖土層參數回饋分析 (DEXC-OPT) 深開挖土層參數回饋分析 (RUIP)	V1.0
3	進出港操船模擬分析程式	V1.0
4	預力混凝土中空矩形斷面橋墩重力應變關係分析程式	V1.0
5	單目標多座水庫系統運轉程式 (ORES)	V1.0
6	區域流量延時曲線分析程式	V1.0
7	台灣地區水庫資訊系統	V1.0
8	台灣電子地圖網站	V1.0
9	岩盤隧道施工資料自動化處理	V1.0
10	預力預鑄混凝土橋柱分析	V1.0
11	非線性混凝土結構分析系統	V1.0
12	加長型單肋板補強梁柱接頭設計輔助程式	V1.0
13	區域水資源系統即時操作模式建立	V1.0
14	結合 ETABS 之位移法耐震性能設計及評析程式	V2.0
15	混凝土非破壞檢測儀 (Sino-NDT-IE) 之改良	V1.0
16	SinoPad 中興現地調查系統	V1.0
17	隧道支撐設計整合系統	V1.0
18★	二維泛用地表水分析軟體 (註)	V2.5
19	柔性加勁擋土牆之設計參數與數值分析方法研究	V1.0
20	台灣地區大眾捷運安全管理系統之建立 (一)	V1.0
21	RFID 設施巡檢系統、RFID 設備盤點系統、RFID 主動式監測系統	V1.0
22	隧道 (1) 輸進資料、(2) 地質 資料、(3) 監測資料等處理系統及 (4) 隧道施工資料查詢系統	V2.0
23	沖刷監測預警裝置開發	V1.0

(註)：序號 18★之程式現階段僅開放政府機關申購。

新型複合式連接梁研發與對角線鋼筋混凝土連接梁強度與變形量評估

詹文宗* 邱水金** 鄭敏元***

摘要

欲維持鋼筋混凝土耦合剪力牆系統的耐震機制，剪力連接梁需要在大變形量下維持其設計強度，過去研究發現當梁跨深比（梁淨跨除以梁高之比值）偏低，必須使用對角線鋼筋來滿足此需求，但對角線鋼筋施工困難，在實務施作上造成很大的困擾，不少學者開始研究其他方法來解決此問題，但提出的方法大部分無法兼顧施工與經濟，本研究提出新型複合式鋼筋混凝土連接梁的構想，並藉由實驗驗證其可行性。

本研究總共測試六組試體，主要測試變數包含 1) 試體跨深比、2) 配筋與細部設計、以及 3) 試體設計剪應力需求，其中兩組試體以新構想設計，使用傳統梁方式配筋（縱向主筋搭配橫向箍筋），並使用鋼板以低面壓方式提供梁試體主動圍束；另外四組試體則是根據設計規範使用對角線鋼筋。所有試體使用相同斷面，並以相同的實驗配置與流程完成測試，實驗結果顯示所有試體強度均可由標稱撓曲強度合理評估；就使用對角線鋼筋試體而言，試體最大變形量似乎隨著跨深比增加而增加，設計剪應力需求對於試體變形量影響並不顯著。在相同跨深比下，兩組新型複合式連接梁試體其最大變形能力大於使用對角線鋼筋試體達 40% 以上，顯示新型複合式連接梁可以達到使用對角線鋼筋連接梁相同設計強度、且維持其設計強度至更大位移量。同時，試體破壞過程也顯示新型複合式連接梁在很多細部設計上有簡化的空間，惟本研究試體數量有限，需要未來研究來進一步探討。

關鍵字：耦合剪力牆系統、剪力連接梁、複合式連接梁、對角線鋼筋、跨深比

一、前言

鋼筋混凝土建築物主要使用抗彎矩構架或結構牆（或剪力牆）作為主要側向力支撐系統，針對中、低樓層建築物而言，過去有學者指出，使用結構牆通常比抗彎矩構架更有效率且經濟（Moehle et al., 2011），針對高樓而言，其實結

構牆的使用也相當普遍，如目前全球最高建築物位於杜拜的哈理發塔。過去的地震勘災經驗也發現，建築物使用沒有細部配筋之結構牆仍具有良好的耐震能力（Wood et al., 1987; Fintel, 1991; Wood, 1991; Wallace, 2011; Lagos et al., 2012），因此結構牆的使用在很多國家相當普遍。

因為建築或實際需求，在設計上常常需要在

* 中興工程顧問公司結構工程部資深協理

** 中興工程顧問公司結構工程部工程師

*** 國立臺灣科技大學營建工程系教授

結構牆面上作規則的開孔，造成原先單面剪力牆變成多面剪力牆，並以沿著樓高的梁作連接，此系統稱為耦合剪力牆系統，而連接剪力牆的梁即稱為剪力連接梁或連接梁，過去文獻證實使用對角線鋼筋可以提升連接梁之剪力強度與變形能力 (Paulay and Binney, 1974; Barney et al., 1976; Tegos and Penelis, 1988; Tassios et al., 1996; Galano and Vignoli, 2000)，ACI 318-14 規範 (ACI Committee 318, 2014) 要求若連接梁剪應力需求大於 $0.33 \sqrt{f'_c}$ (MPa) 且跨深比 (l_n/h) 小於 2.0 時必須使用對角線鋼筋，其剪力強度可根據式一評估，其中 A_{vd} 是一組對角線鋼筋標稱總面積、 f_y 是對角線鋼筋標稱降伏強度、 α 則是對角線鋼筋與連接梁軸向方向夾角。

$$V_n = 2A_{vd}f_y \sin \alpha$$

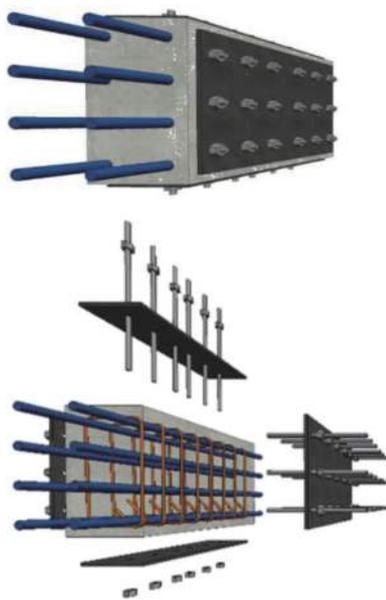


圖 1 新型複合型連接梁

但對角線鋼筋施工困難，且過去文獻 (Hindi and Hassa, 2007; Lequesne, 2011) 指出規範剪力評估公式一嚴重低估連接梁之強度，以上問題須要進一步釐清。本研究以梁柱接頭圍束概念提出

以鋼板主動圍束連接梁的構想 (圖 1)，以往復載重實驗結果來評估其可行性，期望改善現行鋼筋混凝土連接梁設計。

二、試體設計

本研究共測試了六組試體，其中四組試體為根據現行規範 ACI 318-14 以對角線鋼筋設計，另外兩組試體使用傳統梁配筋搭配鋼板圍束，所有試體均以直立方式施作與測試，而每組試體直立時由上到下分別為頂部混凝土塊、梁試體、與底部混凝土塊，頂部混凝土塊主要用來施加往復水平位移，底部混凝土塊主要用來提供試體固接邊界條件。試體測試參數包含：(1) 試體跨深比 (l_n/h)、本研究選用 1.5 或 2.5；(2) 根據式一所得試體剪應力大小、設計目標 $0.48 \sqrt{f'_c}$ 或 $0.96 \sqrt{f'_c}$ MPa；與 (3) 試體配筋與圍束型式，六組試體設計參數請詳見表 1，試體設計細部請參考圖 2。現行規範剪應力上限值為 $0.83 \sqrt{f'_c}$ MPa，本研究試體設計剪應力採用 $0.96 \sqrt{f'_c}$ MPa，原因為廠商提供研究所需混凝土強度常高於設計值。所有試體斷面寬度 (b) 280mm、深度 (h) 480mm，標稱混凝土強度 28MPa，縱向鋼筋與對角線鋼筋標稱降伏強度 420MPa，橫向鋼筋標稱降伏強度 785MPa。鋼板圍束試體 (試體 C1.5_HP、C2.5_HP) 以數支規則排列、直徑 19mm 螺桿將厚度 13mm 之鋼板包覆於試體每一個面，螺桿鎖合力道以扭力扳手控制以達到試體各面上軸力約 $0.05A_g f'_c$ 為目標，其中 A_g 表示試體該面的面積、 f'_c 為試體當天混凝土圓柱試體抗壓強度。

表 1 試體設計參數

試體	D1.5_L	D1.5_H	C1.5_HP	D2.5_L	D2.5_H	C2.5_HP
跨深比	1.5	1.5	1.5	2.5	2.5	2.5
$\frac{V_n}{b_v h \sqrt{f'_c}} (\text{MPa})$	0.48	0.96	-	0.48	0.99	-

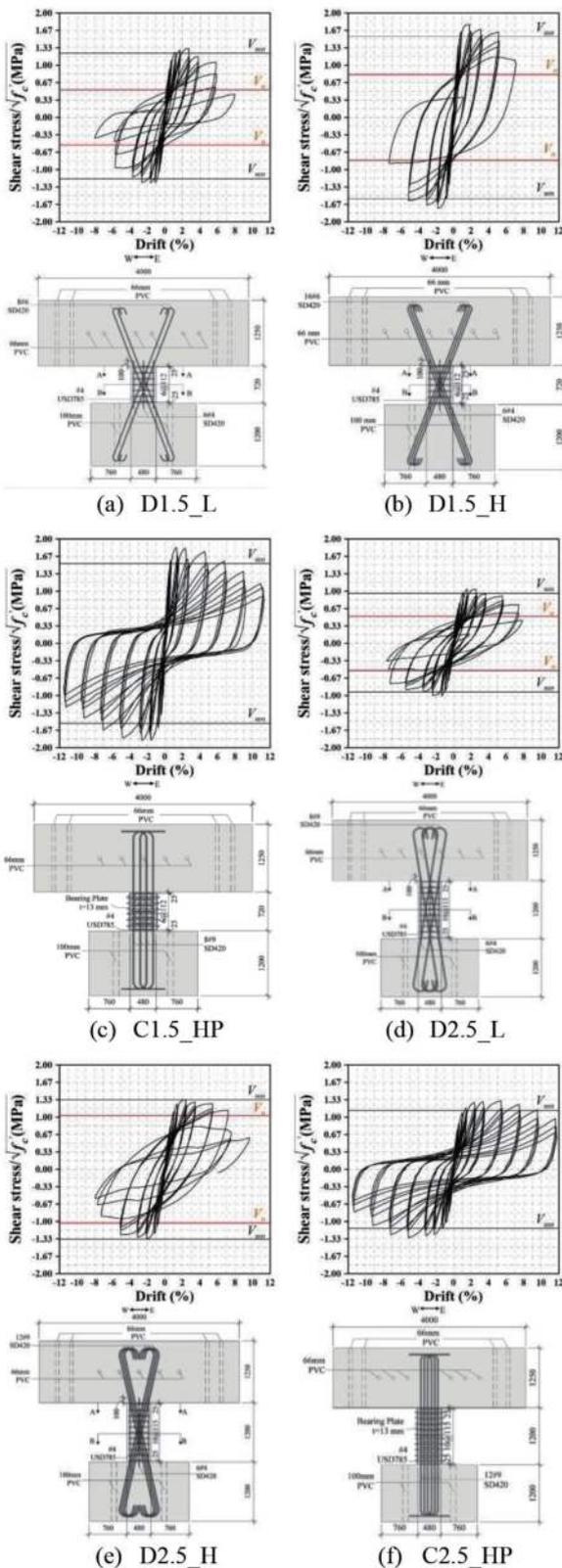


圖 2 試體設計與測試結果 (單位: mm)

三、實驗配置

試驗佈置示意圖詳圖 3，該配置以提供試體雙曲率變形之往復載重為主要目的，測試所需夾具包含兩組傳力鋼梁（夾住試體頂部混凝土塊之兩側）、轉接鋼梁、以及兩支軸向束制桿件。本案使用三支 100 tonf 千斤頂，其加載歷時曲線如圖 4 所示，其中縱座標表示層間變位角 (Drift)，由側向位移量除以連接梁淨跨距 (l_n) 而得，且載重方向定義試體往東方向移動為正向。

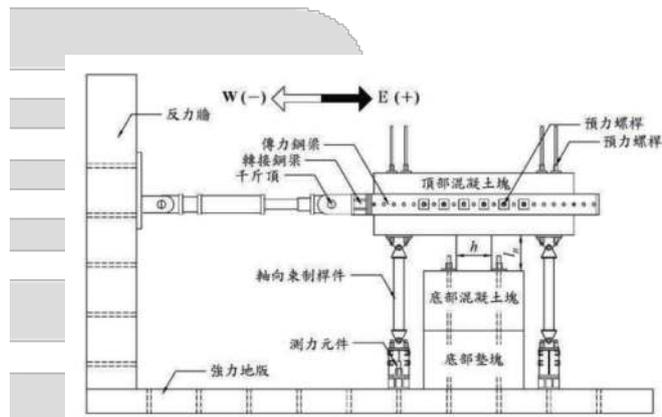


圖 3 實驗配置

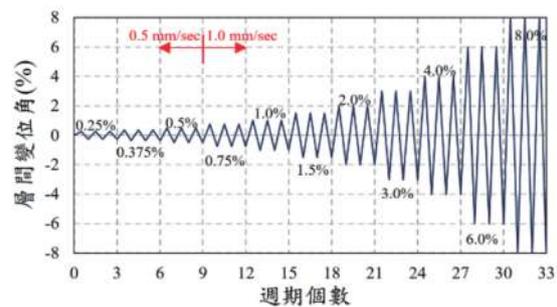


圖 4 加載歷時

四、測試結果

試體正規化剪力與層間位移角測試曲線如圖 2 所示，重要測試數據紀錄於表 2 中。

強度評估公式 V_{mn} 為根據連接梁在端部發展標稱撓曲強度 (M_n) 時所對應之剪力大小，假設試體雙曲率對稱變形，則 V_{mn} 可由 $2M_n/l_n$ 計算。就使用對角線鋼筋試體而言，表 2 提供考慮表層鋼筋與不考慮表層鋼筋之 M_n 計算結果，實驗結果顯示考慮表層鋼筋之 M_n 預測強度與實驗數據較為接近（雖然表層鋼筋提供之發展長度小於規範規定），可能原因是試體承受之軸壓對鋼筋握裹強度有幫助、且頂部與底部混凝土塊提供良好圍束環境，圖 2 黑色實線代表包含表層鋼筋之 V_{mn} 計算結果。

由圖 2 與表 2 分析結果可以發現所有試體強度應由撓曲主控，ACI 318-14 強度評估公式 V_n （式一）嚴重低估使用對角線鋼筋試體之剪力強度，對於跨深比較低試體（跨深比 1.5）似乎更為明顯，主要原因應是該公式忽略混凝土貢獻，而混凝土在試體達最大強度點時都尚屬完整，為了避免低估連接梁強度造成耦合剪力牆系統負面效應，本研究建議使用對角線鋼筋與使用鋼板圍束之剪力連接梁以 V_{mn} （考慮所有縱向鋼筋）來評估連接梁之設計強度。

表 2 試體設計參數

試體	D1.5_L	D1.5_H	C1.5_HP	D2.5_L	D2.5_H	C2.5_HP
跨深比	1.5	1.5	1.5	2.5	2.5	2.5
$\frac{V_{peak}}{A_{cv}\sqrt{f_c}}$ (MPa)	1.32	1.75	1.84	1.03	1.32	1.32
V_{peak}/V_{mn}	1.07	1.13	1.21	1.08	0.99	1.17
V_{peak}/V_n	2.55	2.15	-	2.01	1.29	-
d_u (%)	5.85	6.01	7.90	6.46	7.51	10.6
	5.34	5.76	8.60	6.70	6.39	9.39

表 2 極限層間變位角 (d_u) 係由以下兩個條件先發生者決定之：（1）根據試體測試之力量-位移曲線，當力量減少最大側向力之 20% 時所對應之層間變位角；（2）在某層間變位角下第三

週期強度與第一週期強度相比損失超過 20%，且下一層間變位角第一週期強度又低於第三週期強度，則該位移等於 d_u 。

圖 5 顯示試體極限層間變位角 (d_u) 與跨深比 (l_n/h) 關係，圓形表示剪應力需求約 0.48 之試體，菱形表示剪應力需求約 0.96 之試體，而方形表示使用鋼板包覆之試體。由圖 5 可知，試體剪應力需求對試體極限層間變位角影響並不顯著，反而隨著試體跨深比增加有增加的趨勢，在相同跨深比與剪應力需求下，使用鋼板圍束之試體 C1.5_HP 與試體 C2.5_HP、其極限層間位移角分別大於試體 D1.5_H 約 40% 與試體 D2.5_H 約 44%，顯示鋼板圍束試體可以達到與使用對角線鋼筋連接梁相同設計強度、且維持其設計強度至更大位移量。

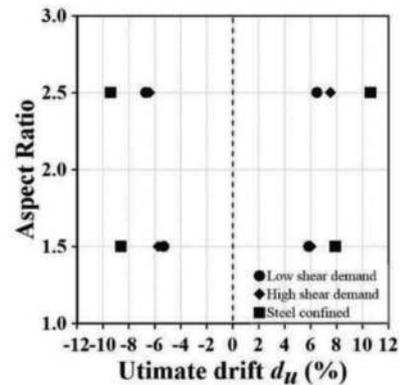


圖 5 試體變形能力

五、結論

本研究探討對角線鋼筋連接梁在不同跨深比與不同設計剪力下的往復載重行為，同時評估新型鋼板圍束剪力連接梁之可行性，本研究總共測試六組連接梁試體，其中四組試體滿足現行規範 ACI 318-14 使用對角線鋼筋，另外兩組試體使用傳統梁配筋但於試體四面提供鋼板圍束。試體主

要測試變數包含：(1) 試體跨深比 (l_n/h)，本實驗採用兩種試體跨深比分別為 1.5 與 2.5；(2) 根據式一所得試體設計剪應力大小；與 (3) 配筋與圍束型式。根據試體測試結果，初步結論如下：

- (一) ACI318-14 規範剪力評估模型即式一嚴重低估試體強度，特別是低跨深比試體，這對耦合剪力牆系統可能造成負面的影響。
- (二) 試驗結果顯示所有試體最大側力應由撓曲強度控制，本研究建議無論使用對角線鋼筋或鋼板圍束試體，剪力連接梁最大強度可由考慮斷面所有撓曲鋼筋（含表層鋼筋）所得撓曲強度合理評估。
- (三) 試體設計剪應力大小對於極限層間變位角 (d_u) 影響並不顯著；在相同設計剪應力下，極限層間變位角 (d_u) 似乎隨跨深比增加而有增加的趨勢。
- (四) 使用鋼板圍束之試體 C1.5_HP 與試體 C2.5_HP、其極限層間位移角分別大於試體 D1.5_H 約 40% 與試體 D2.5_H 約 44%，顯示鋼板圍束試體可以達到與使用對角線鋼筋連接梁相同設計強度、且維持其設計強度至更大位移量。

最後，根據鋼板挫屈行為與連接梁變形能力關係，建議未來可以探討鋼板厚度的影響。

參考文獻

ACI Committee 318, 2014, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-14)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. 519 pp.

Barney, G. B.; Shiu, K. N.; Rabbat, B. G.; and Fiorato, A. E., 1976, "Earthquake Resistant Structural Walls – Tests of Coupling Beams," Progress Report, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 137 pp.

Galano, L.; and Vignoli, A., 2000, "Seismic Behavior of Short Coupling Beams with Different Reinforcement Layouts,"

ACI Structural Journal, V. 97, No. 6, Nov.-Dec., pp. 876-885.

Hindi, R.; and Hassan, M., 2007, "Simplified Trilinear Behavior of Diagonally Reinforced Coupling Beams," ACI Structural Journal, V. 104, No. 2, Mar., pp. 199-206.

Lagos, R.; Kupfer, M.; Lidenberg, J.; Bonelli, P.; Saragoni, R.; Guedelman, T.; Massone, L.; Boroschek, R.; and Yanez, F., 2012, "Seismic Performance of High-Rise Concrete Building in Chile," International Journal of High-Rise Building, V. 1, No. 3, Sep., pp. 181-194.

Lequesne, R. D., 2011, "Behavior and Design of High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Coupling Beams and Coupled-Wall Systems," Ph.D. Dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, MI, pp. 277-298

Moehle, J. P.; Ghodsi, T.; Hooper, J. D.; Fields, D. C.; and Gedhada, R., 2011 "Seismic Design of Cast-in-Place Concrete Special Structural Walls and Coupling Beams: A guide for practicing engineers," NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 6, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 36 pp.

Paulay, T.; and Binney, J. R., 1974, "Diagonally Reinforced Coupling Beams of Shear Walls," Shear in Reinforced Concrete, SP-42, American Concrete Institute, Detroit, Mich., Jan., pp. 579-598.

Tassios, T. P.; Moretti M.; and Bezas A., 1996, "On the Behavior and Ductility of Reinforced Concrete Coupling Beams of Shear Walls," ACI Structural Journal, V. 93, No. 6, Nov.-Dec., pp. 711-720.

Tegos, I. A.; and Penelis, G. G., 1988, "Seismic Resistance of Short Columns and Coupling Beams reinforced with Inclined Bars," ACI Structural Journal, V. 85, No.1, Jan.-Feb., pp. 82-88.

Wallace, J. W., 2011, "February 27, 2010 Chile Earthquake: Preliminary Observations on Structural Performance and Implications for U.S. Building Code and Standards," ASCE Structure Congress, Las Vegas, Nevada, Apr., pp. 1672-1685.

Wood, S. L.; Wight, J. K.; and Moehle, J. P., 1987, "The 1985 Chile Earthquake Observation on Earthquake-Resistant Construction in Vina Del Mar," Report to the National Science Foundation, University of Illinois, 187 pp.

Wood, S. L., 1991, "Performance of reinforced concrete buildings during the 1985 Chile earthquake: Implications for the design of structural walls," Earthquake Spectra, V. 7, No.4, Nov., pp.607-638.



* 國道3號西湖大甲段

縱橫四界的願景擘劃者

溝通兩地的交通，聯繫著家人的情感，促發著經濟的繁盛
中興工程顧問公司以全方位的服務，串起臺灣交通建設網絡
在縱橫阡陌的路網與城鄉之中，構築出臺灣的發展動脈
也為每個角落延伸無限出廣闊願景

公路建設工程

中興團隊專業服務

水利、大地、電力、結構、建築、軌道、交通、系統
機械、環境、海岸及港灣、都市設計、工業城鄉開發
園區規劃等之規劃、設計與施工監造管理

聯絡資訊

10570 臺北市松山區南京東路五段171號
電話: (02) 2769-8388 傳真: (02) 2763-4555
E-mail: sinotech@sinotech.com.tw
https://www.sinotech.com.tw



正派經營 · 品質保證 · 追求卓越 · 創新突破

中興工程顧問股份有限公司
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, LTD.





*大鵬灣濱海泊岸遊憩設施整建
用技術落實對安全及永續的執著

辦理濱灣公園2號、4號碼頭新建及景觀整建工程
中興工程顧問公司提供近全浮動獨立系統設計
減少連接件所造成之弱面，增加整體之穩定性
結合轄區內景點之開發及建設
塑造悠閒、環保及結合水域活動之觀光遊憩場域

海事工程團隊

中興團隊專業服務

水利、大地、電力、結構、建築、軌道、交通、系統
機械、環境、海岸及港灣、都市設計、工業城鄉開發
園區規劃等之規劃、設計與施工監造管理

聯絡資訊

105409 臺北市松山區南京東路五段171號

電話:(02) 2769-8388 傳真:(02) 2763-4555

E-mail: sinotech@sinotech.com.tw

<https://www.sinotech.com.tw>



正派經營 · 品質保證 · 追求卓越 · 創新突破

 中興工程顧問股份有限公司
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, LTD.



*基隆河員山子分洪隧道
掌握億萬年記錄的奧秘

成就穩固與安全的工程，必須瞭解歷經億萬年變遷的大地
中興工程顧問公司在踏實立足大地的同時，更以對基礎專業的堅持
致力探索地面之下蘊含的秘密，對土地更深層的掌握與瞭解
方能成就出磐石般的工程品質。

大地工程團隊

中興團隊專業服務

水利、大地、電力、結構、建築、軌道、交通、系統
機械、環境、海岸及港灣、都市設計、工業城鄉開發
園區規劃等之規劃、設計與施工監造管理

聯絡資訊

10570 臺北市松山區南京東路五段171號
電話:(02) 2769-8388 傳真:(02) 2763-4555
E-mail : sinotech@sinotech.com.tw
<https://www.sinotech.com.tw>



正派經營·品質保證·追求卓越·創新突破

中興工程顧問股份有限公司
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, LTD.





* 鳶山堰閘門更新改善工程

用技術落實對安全及永續的執著

中興工程顧問公司承辦鳶山堰21門排砂道及排洪道閘門以及取水口閘門與機電設備更新工程之設計及監造工作
對於設備安全性、排洪及取水操作穩定性
於設計及施工規劃上，展現創新及周延性之特色
曾榮獲工程會第18屆公共工程金質獎設施類佳作肯定

結構工程團隊

中興團隊專業服務

水利、大地、電力、結構、建築、軌道、交通、系統
機械、環境、海岸及港灣、都市設計、工業城鄉開發
園區規劃等之規劃、設計與施工監造管理

聯絡資訊

105409 臺北市松山區南京東路五段171號

電話：(02) 2769-8388 傳真：(02) 2763-4555

E-mail : sinotech@sinotech.com.tw

<https://www.sinotech.com.tw>



正派經營 · 品質保證 · 追求卓越 · 創新突破

中興工程顧問股份有限公司
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, LTD.





* 臺鐵南迴鐵路電氣化 縱橫四界的願景擘劃者

中興公司負責範圍從臺鐵南迴線枋寮站至台東站，長約98.2公里
本標計畫含10座客貨運站、2座號誌站、5處廢站
及臺鐵臺東機務分段，協助辦理電氣化工程細部設計工作
如質如實的完成最後一哩鐵路電氣化，達成環島鐵路電氣化目標。



鐵道建設工程

中興團隊專業服務

水利、大地、電力、結構、建築、軌道、交通、系統
機械、環境、海岸及港灣、都市設計、工業城鄉開發
園區規劃等之規劃、設計與施工監造管理

聯絡資訊

10570 臺北市松山區南京東路五段171號
電話：(02) 2769-8388 傳真：(02) 2763-4555
E-mail : sinotech@sinotech.com.tw
<https://www.sinotech.com.tw>

正派經營 · 品質保證 · 追求卓越 · 創新突破

中興工程顧問股份有限公司
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, LTD.



封面照片 | 台電離岸風力發電第一期計畫 | 台電離岸風電第一期示範風場係台電出資開發，由比利時商楊德諾公司 (Jan De Nul) 及日商日立公司 (Hitachi) 共同承攬風場設計、生產及施工服務，並委由中興工程顧問公司與丹麥商尼阿斯公司 (NIRAS) 提供顧問技術服務工作。本風場係能源局離岸風場示範案之一，總計安裝21部風力發電機，每部風機裝置容量為5.2MW，總容量達109.2MW。預計全數併聯發電量可達每年3.6億度以上，可供約9萬家戶一年用電。（*此照片由台電公司營建處授權提供）



中興工程 Vol.155 / APRIL 2022
ISSN 0257-554X



本刊圖文未經同意不得轉載

出版者：財團法人中興工程顧問社
社址：114065 臺北市內湖區新湖二路280號
電話：(02) 8791-9198
傳真：(02) 8791-2198
網址：www.sinotech.org.tw
E-mail：adm-dpt@sinotech.org.tw
印刷：鴻友印前數位整合股份有限公司

誠信·創新·品質·服務

 財團法人中興工程顧問社
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.