

誠信 · 創新 · 品質 · 服務

中興工程 162

SINOTECH ENGINEERING

1983年10月 創刊 | 2024年01月 出刊 | ISSN 0257-554X



封面故事 · 我國能源政策與低碳永續目標之實現
台西盆地深部鹽水層之二氧化碳封存移棲模擬分析
新建太陽能電廠之專案施工管理 (PCM) 經驗分享
濱海地區複合地層之地下洞道工程經驗回饋

工程不只源於需求 更在於生活價值的實現



財團法人中興工程顧問社係以提昇我國工程相關技術水準為宗旨之研發機構，
並經行政院國科會評鑑為「科技研發機構」土木工程領域之優等單位。

中興工程顧問

擅於建設 忠於生活的老朋友

主要研發領域：水利與電力工程／大地工程／環境工程／資訊應用／結構與地震工程／工程材料／工程管理／交通運輸



防災科技研究中心 專業服務

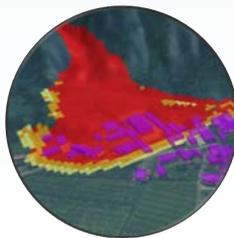
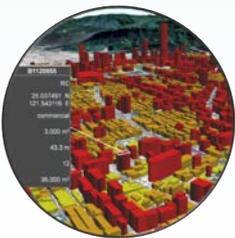
重要實績

- ✓ **農村水保署** 土砂收支物聯網及大數據分析技術
- ✓ **離岸風電** 地震數值模擬及地震危害分析
- ✓ **公路局** 山區公路邊坡科技管理技術
- ✓ **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、地工、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>





重要實績 專業服務

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

大地工程研究中心

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

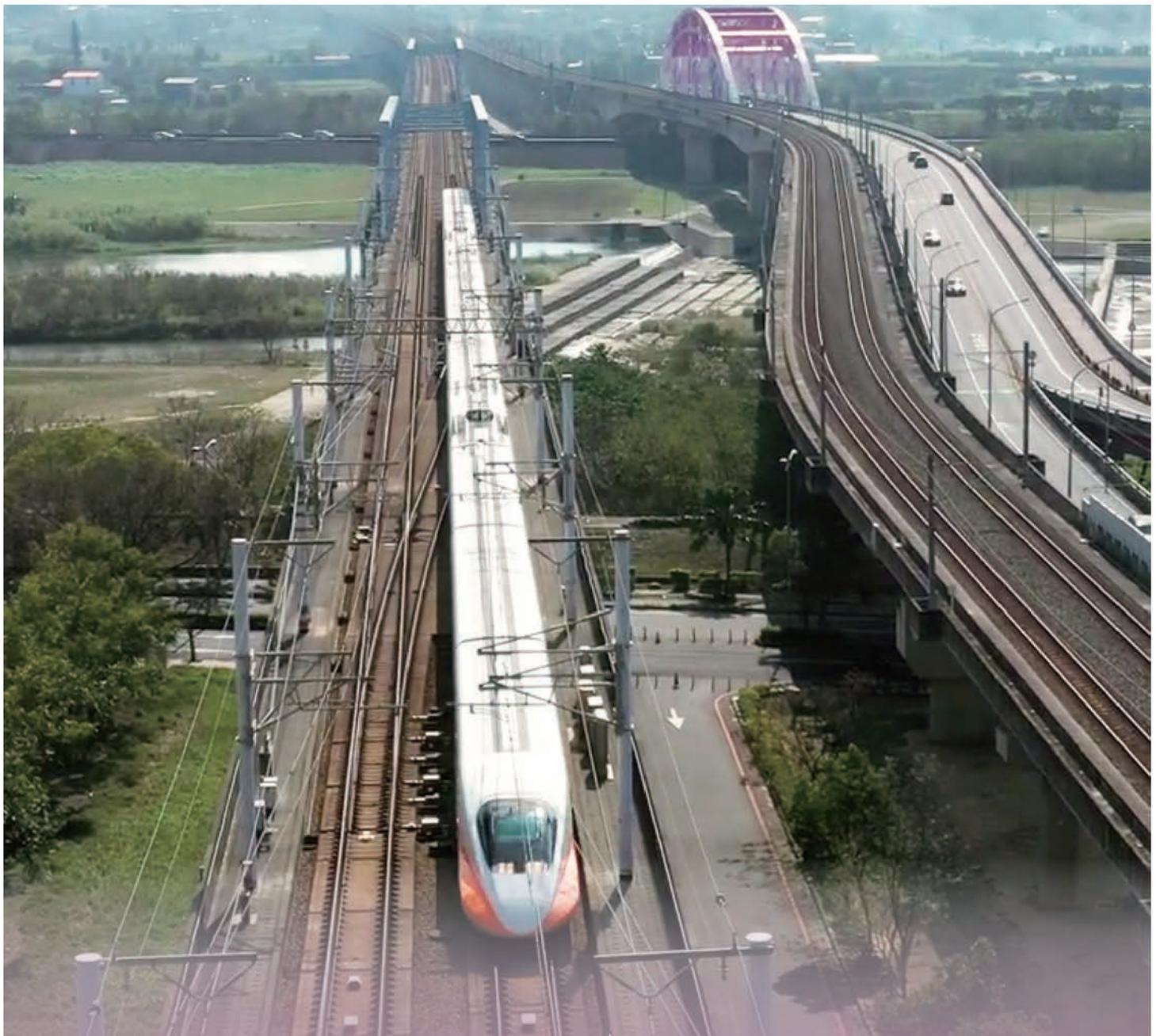
114065台北市內湖區新湖二路280號
電話：(02)8791-9198 傳真：(02)8791-1536
E-mail: gerc-ctr@sinotech.org.tw
<https://gerc.sinotech.org.tw>



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

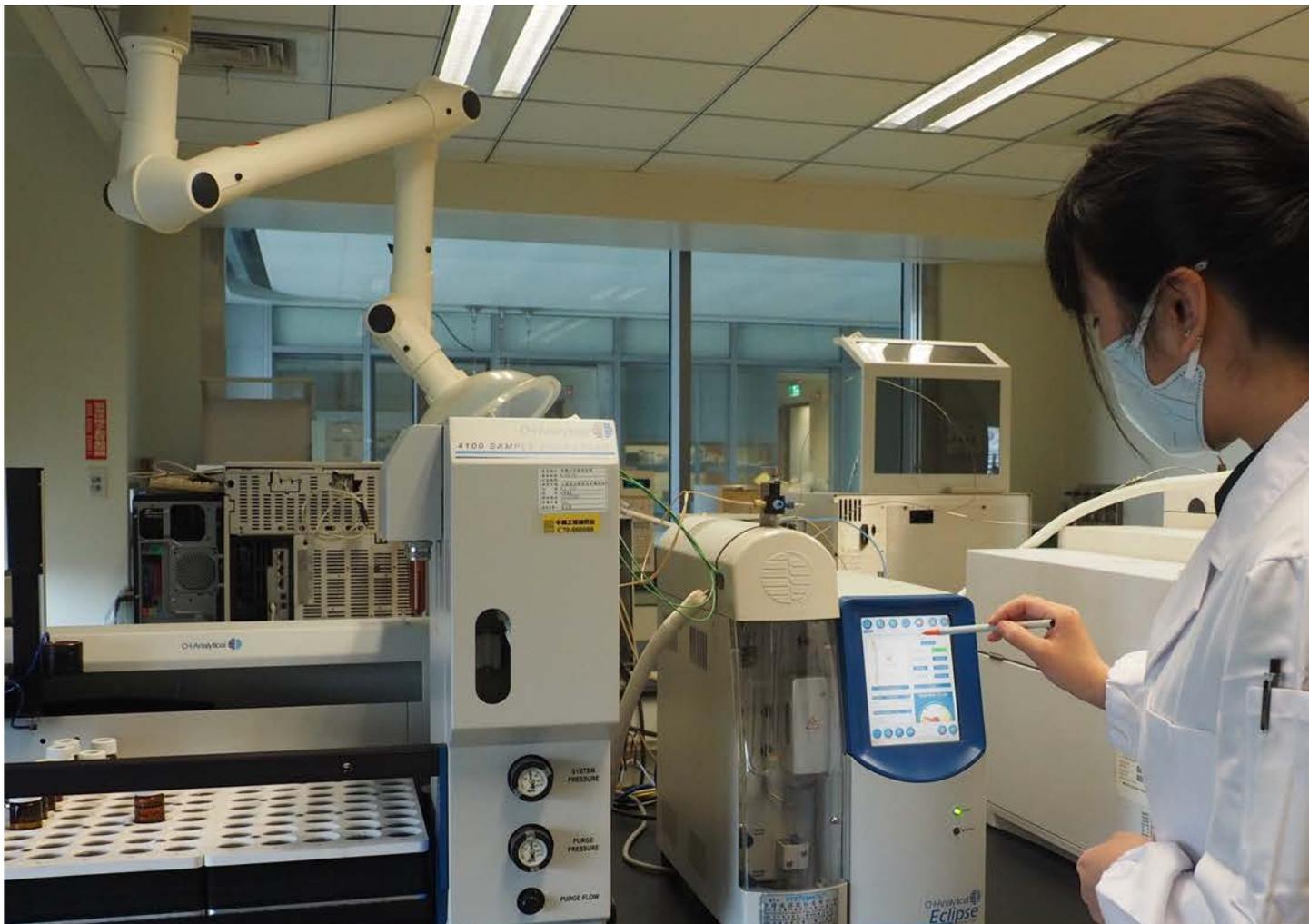
土木水利及 軌道運輸研究中心

鐵道系統之運轉及安全管理整合技術服務學劃
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





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境部認可實驗室，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.



- 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 嚴世傑 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、交通運輸、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，請投稿至「工程技術」及「案例／計畫報導」專欄，來稿請加註中、英文篇名、摘要及關鍵字。
- 二、有關介紹工程之遊記、工程界人物軼事等報導性文稿之文體應力求輕鬆活潑，請投稿至「工程窗外」專欄，惟此專欄僅接受中興工程集團之現職或退休同仁投稿。
- 三、來稿請附「中興工程季刊投稿人暨稿件資料表」並連同文稿電子檔 (.doc) E-mail 至 adm-dpt@sinotech.org.tw，撰寫時請參考「文稿格式範本」及「英文摘要範本」（上述表單及範本請至本社網站 www.sinotech.org.tw 下載，或洽本社行政處提供）。
- 四、「工程窗外」文稿以 5,000 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）為原則。
- 五、本刊所有度量衡單位請採用 SI 國際單位。
- 六、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。來稿如引用他人論文或著述，務請註明其出處，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、頁次等在參考文獻中註明。所附圖表或照片等須為作者自行創作，或取得原創者授權刊登使用。
- 七、本刊稿件之審查係由編審小組送請學者專家評審，審查通過後方具刊登資格，惟本刊編審小組保有最終刊登與否之權力。
- 八、來稿經刊載後將發給稿酬，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中興工程季刊編審小組。

註：本刊經行政院公共工程委員會名列為水利工程、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162期目錄

封面故事

我國能源政策與低碳永續目標之實現—訪經濟部能源署游振偉署長.....	
.....	中興工程編審小組..... 3

工程技術

台西盆地深部鹽水層之二氧化碳封存移棲模擬分析.....	吳柏林·譚志豪·俞旗文..... 9
臺南市土壤液化風險地圖製作初探.....	
.....	陳憶璇·譚志豪·王金山·冀樹勇·李易叡·邵國士·謝有忠·邱禎龍·盧詩丁..... 19
二氧化碳地質封存之地震監測.....	顏元奕·陳俊德·顏銀桐..... 33
新建太陽能電廠之專案施工管理（PCM）經驗分享.....	陳信宏..... 47
嘗試運用三維點雲模型進行節理岩體半自動化評分.....	柳鈞元·邱家吉..... 57
逾齡導水隧道水文地質調查與損壞機制研判之應用.....	周柏儀·蕭富元·徐星豪..... 67
調整型防砂壩不同情境水理分析與評估.....	
.....	林伯勳·牟彥蓁·陳俊愷·許振崑·張照宏·陳鶴勳·薛聖儒·李典耕..... 77
新北市安坑輕軌線形設計之精進.....	李政安·林逸羣·鄭凱元·林仁國·周易陵·劉嘉文..... 91

案例 / 計畫報導

除役金屬廢棄物盛裝容器開發經驗分享.....	張學植·黃秉修·林伯聰..... 99
濱海地區複合地層之地下洞道工程經驗回饋.....	
.....	曾脩夫·蔡宜璋·陳彥旭·游家豪·謝昇穎·葉明志..... 107

我國能源政策與低碳永續 目標之實現 ——訪經濟部能源署游振偉署長

中興工程編審小組

2021年4月22日世界地球日蔡總統宣示，2050淨零轉型是全世界的目標，也是臺灣的目標；要達到2050年淨零轉型，前提是必須堅定落實能源轉型。我國於2022年3月正式公布「2050淨零排放政策路徑藍圖」，臺灣面臨2050淨零排放跨世代、跨領域、跨國際之轉型工程，政府將建構科技研發及氣候法制等兩大面向之基礎環境，推動能源、產業、生活、社會等四大轉型策略。面對能源轉型及低碳永續議題持續受到高度重視，中興工程編審小組特別專訪能源署署長，瞭解當前政府推動能源轉型之具體路徑與作法。

提問一：企業引進國外技術規劃

依臺灣「2050淨零排放政策路徑藍圖」政策方向與資源主要鎖定在國內各機關及產業、社會的配合，針對國內廠商在引進外國資源包括相關能源技術、產業、資金及人才等，現階段政府是否有規劃相應的獎勵或輔導措施，使國內企業更有意願藉由外在技術來加速完成其在能源及產業之轉型。

回應：

淨零轉型在基礎環境建置很重要的一個環節是科技研發，相信大家可以理解光靠現行技術是難以達成的，2030前要以既有制度及能量盡量做，2030後亟需技術突破才可達成。目前主要由政府提供躉購費率來支持國內再生能源設置發展，躉購費率可反映業者實際投入成本，由經



濟部組成委員會審定，每年視各類別再生能源發電技術進步、成本變動、目標達成及相關因素，綜合考量各類別再生能源發電設備之平均裝置成本、運轉年限、運轉維護費、年發電量等進行檢

討或修正。此外，給予設置業者固定 20 年之設置誘因，增進業者投入再生能源設備建置之信心，促進短期 2025 年及長期 2050 年之推廣目標達成。

針對引進國外技術，以再生能源來講，尤其是地熱能及海洋能，必須透過與國外合作或提供獎勵誘因（如：業界能專或法人能專），以業界能專為例，本署持續推動「經濟部能源署業界能專計畫」補助研發計畫，包括進行能源領域前瞻技術、創新應用、關鍵技術研發、產品或技術加值與系統整合之開發及示範驗證，用意是鼓勵企業投入前瞻能源技術開發，提升我國能源科技之研究及發展。

針對離岸風電，政府更期待的是關鍵技術在地發展，為此持續規劃並推動我國離岸風電產業政策，並考量國外業者規劃作法及國內技術發展及產業量能現況，規劃產業發展項目及時程，並藉開發商與國內業者合作，於我國持續發展離岸風電關鍵技術量能，如風力機零組件及水下基礎等，以提升我國供應韌性，協助我國離岸風電產業在地發展。

提問二：企業購買綠電機制

在能源等轉型規劃中，一般企業對電子產業具有高價採購再生能源電力之優勢而憂慮有受壟斷之狀況，政府是否規劃售電機制可供其他產業或中小型企業也可取得再生能源電力？

回應：

我們常被問到這個問題。越大的企業可以用好的價格買到最多的綠電，那其他小企業怎麼辦？事實上，不只是小企業，許多中型企業也有同樣困擾。

但綠電其實關係到融資問題，對於開發商來說，綠電買家的信用越好，越容易取得融資。經濟部在了解這樣的情況後，標準局在 2022 年 4 月 20 日成立了綠電交易平台，協助綠電買賣雙方交易撮合，透過平台競價機制，由綠電需求者公開

競價，決定綠電價格，取得綠電憑證。目前交易平台的交易量已經有出現，可以媒合一些小企業買到小型太陽光電案場，但相較整個綠電的量體，可能還是比較少。

因此，如何增加中小企業的綠色交易量，就是我們持續努力的課題。

我們已推動「平價綠電專案」，釋出公有或國營事業土地標租案場保留部分比例綠電售予中小企業。這個專案特別的是，要求每一個案場，保留三成的裝置容量，一定要進入綠色交易平台。進入平台的三成綠電，有機會相對較低的價格，提供企業。

近期我們也與台電公司共同推動小額綠電，由台電公司於 2023 年底前釋出自建再生能源案場台南鹽田光電及彰化彰濱光電合計約 5,000 萬度綠電，將分批上架標檢局「綠電交易平台」公開標售，於 2024 年正式轉供售電，提供符合光電市場價格區間的綠電。首批 1,000 萬度於 2023 年 10 月底上架，共計 50 家企業參與，以製造業占最多數；以「5 萬度 5 年期」的長期穩定型商品最受歡迎，共 22 家，其次則是「1 萬度 1 年期」短期靈活型商品，共 13 家；投標金額大致落在每度 4.9 元至 5.5 元之間，符合光電市場的價格區間，並於 11 月 15 日推出第二波交易，上架 10 萬度商品，吸引不同客群，此次共有 66 家企業參與投標，較上次成長逾 3 成，主要來自製造業，佔最多數；投標商品中以「10 萬度 5 年期」的商品最受企業歡迎；其次為「1 萬度 1 年期」、「5 萬度 5 年期」商品，顯示企業除偏好購買高度數、年期長的綠電商品，也有意願試買小量短期商品；投標者出價金額大致落在每度 4.9 元至 6 元之間。

我們盡力做媒合，希望讓中小企業可以透過多項管道取得綠電，後續我們也會進一步強化再生能源售電業的營業體質健全和管理，來確保綠電市場交易秩序。

提問三：高耗能企業在減碳方面及企業未來發展

是否有獎勵措施

國內高耗能產碳之產業（如水泥業、民間火力電廠、鋼鐵業等），在能源政策中雖然有要求其製程改善及節能措施等政策規劃，但終究難以達成使其大幅實質減碳目標，因此在短期目標2030年之前或中長期目標至2050年，政府是否有甚麼措施來分別因應此種產業的發展？

回應：

提到高耗能產業確實是臺灣現在較大的難題！其實講回來，第一是能源使用效率如何讓它提升，效率提升就是節能的觀念，減少使用擺在第一位！要做到節能首先就是汰換為高效率設備，這是最簡單的作法，由政府提供誘因編列預算補助。

再來以效率來說，是系統節能，我們有提供輔導機制，這次疫後條例商業發展署和產業發展署已爭取經費協助企業做減碳，這面向比較強調系統節能，不僅是單機。

再來最深度節能和減碳就是製程調整，但也更複雜，從實驗室研發一直到試量產，到最終生產線，舉最明顯的例子，是中鋼現在正在研究中現在用焦炭還原鋼鐵能否用氫來取代，如果可行碳排將可以大幅下降，但重點是用氫還原後的鋼鐵是否能符合現在使用的要求，仍須研究，這樣的示範計畫或產業研發計畫落在技術司及產發署。

若非研發新製程，而是用既有製程設備提早汰換，就需要企業投入較高的投資金額，我們有提供多項的補助與財稅獎勵等誘因機制，來提高耗能產業之節能意願，比如說：推動以大帶小輔導模式，協助產業碳盤查、低碳化與智慧化診斷，並提供產業1+4智慧化轉型，每案最高2,000萬元；鼓勵廠商投入於智慧機械、5G或資安等相關設備，若廠商所投資之減碳製程或儲能設備具有智慧技術元素或智慧化功能，可申請產業創新條例第10-1條之投資抵減。

我們以管理面與輔導面措施來協助高耗能產業提升能源效率，針對耗能大之企業，推動企業提高節電目標，並鼓勵高耗能產業透過結合中、小用戶之合作模式（如：供應鏈內）共同實施節電；在輔導層面，透過擴散節能成功經驗，透過能源大用戶進行耗能設備診斷、產業標竿作法分享及推動ISO 50001普及管理，將具成本效益之節能作法對企業進行複製擴散，並針對石化、電子、鋼鐵、水泥、紡織與造紙等六大產業，也特別輔導協助進製程設備之升級與低碳轉型。

提問四：能源用地白皮書對於未來太陽光電推動之解方

現階段推動太陽光電，除面臨土地取得困難，亦遭遇農漁生產及環境生態兩大課題，面對當前



發生各類爭議，有何具體用地政策方向？如何導向與環境共榮、社區共好的再生能源發展策略？

回應：

這兩、三年，確實太陽光電面臨很多困難，要怎麼兼顧居民權益與生態環境，是我們現階段必須要面對的挑戰。

2050 淨零路徑太陽光電目標 40GW ~ 80GW，為達成我國淨零目標，光電需要更多空間規劃。除了採取屋頂型設置目標外，地面型光電以複合式多元利用及活化閒置土地方式推動，提高土地利用效益。另隨國土計畫法施行，我們也正研擬能源用地白皮書（光電篇），將太陽光電用地需求納入國土規劃架構下，以利與其他用地調和。

首先，白皮書 1.0 先作為政策溝通工具，提供溝通橋樑，也論述我國太陽光電政策方向，透過白皮書揭露光電發展現況成果，盤點當前政策遭遇之課題，進而梳理出因應的發展原則與策略，並建構光電發展整體框架。我們也將建立國家主導的示範區並導入專區管理制度使大規模的光電有序發展；接續白皮書 2.0 將會落實空間區位，依循光電開發與管理機制擘劃符合地方需求的光電空間發展區域，分階段逐步完成「發展策略」與「區位建議」等內容，接軌國土計畫體系。

未來國土計畫是剛性計畫，沒有個案變更路徑，只有符合功能分區下的容許使用，我們的策略不是為了保留大量工地，而是以複合式多元土地利用，在不影響原有土地使用下，提高土地附加價值，使綠能與生態環境共榮共存，未來除役不設置光電農地可回歸農用。此外，針對低地力且長期無生產力之土地，劃設專區規劃透過光電提供生產力、活化土地使用，並且把生產力回饋到地方，與地方共享再生能源帶來的惠益，包含優化綠電回饋地方（縣市與鄰里層級）發展的機制與配套，以及促進在地自主能源社群的發展。未來我們也會逐步加強對環境與社會考量的規範，包含先期區位選擇與社會溝通程序，並增列

地方政府協助再生能源開發與利益共享條款。

提問五：地熱發電政策推動規劃

目前國內綠能推動以太陽光電與風電為主，尤其是離岸風電，其成效已逐漸顯現，但距離達成綠能占比目標仍須有第三種選項，地熱可基載發電是其極大優勢，也是目前政府後續要推動的主要項目，地熱發電在臺灣早在太陽光電與風電之前就已經推動，其所遭遇之地質探勘、電網饋線與法規風險常造成業者卻步，想請教是否有相關配套規劃以加速地熱發電之推動。

回應：

就地熱發電來說，臺灣已經有明確目標，2025 年地熱累計裝置容量預計達到 20MW，2030 年為 56-192MW，2050 年目標大幅躍升，預計達到 3-6.2GW。

經濟部多管齊下推動地熱發展，首先，我們成立了「地熱發電單一服務窗口」，建置入口網站 (<https://www.geothermal-taiwan.org.tw/>)，提供友善探勘資料及相關法規查詢，輔導開發商善用政府資源，協調建立地熱開發適宜的行政程序，加速推廣設置地熱發電設備。

其次，立法院、行政部門在去年都針對「再生能源發展條例」的修正與施行做出努力，6 月已經完成修正公告並新增地熱相關條文，讓地熱業者從探勘、開發到營運期需通過的程序都更為便利，比如說：過去要完成興辦計畫跟用地變更，甚至要完成環境影響評估，但萬一探勘發現該處沒有地熱，一切都要重來，因此現在讓探勘可以先行；此外，也調整審查方式改為中央跟地方聯審，讓地熱發電計畫的許可更快一點；水權的年限與台電的收購年限同步，都是 20 年，穩定投資降低風險。

針對地熱開發風險，目前由經濟部中央地質調查及礦業管理中心主導，正進行全國性地熱探勘，鎖定全臺 9 處（臺北大屯山、花蓮瑞穗、臺東紅葉及霧鹿、臺中谷關、南投廬山及東埔、臺南關子嶺、

高雄寶來)來加速蒐集地熱潛能資訊,這些潛能場域,皆有機會直接進行熱能利用或從事地熱發電。後續我們會依潛能區域建立開發機制,如有較具規模的公有土地,建立引商機制加速開發。

對於地熱潛能規劃的配套協助,包括提供持續 20 年的躉購費率,以及分攤業者探勘風險,有助業者整體規劃並分攤風險。在躉購費率規劃,為前 10 年較高、後 10 年較低的費率設計,並針對 2MW 以下設置容量的小型地熱發電,給予較高躉購費率,對於在原住民區域設置的業者,也給予 1% 的額外利益。能源署也會給予業者探勘費用分攤,補助費用比例低於整體 50%、上限為新臺幣 1 億元,業者進行地熱相關的探勘、地質調查、鑽井等費用,都適用該補助方案。

為促進地熱發電設置量提升,先進地熱技術投入將扮演相當關鍵的腳色,今年由經濟部舉辦的「2023 臺灣國際地熱論壇」,國外地熱重要開發商都參加了,我們透過論壇和全球大廠深度交流,引進並建立適合臺灣地熱開發技術,明年也會持續辦理!

2023 年臺灣多個地熱電廠經歷行政流程、技術突破之後,開始併網發電。例如位於新北大屯山的四磺子坪先導電廠;位於臺東金崙由李長榮化工子公司全陽開發的地熱電廠;以及宜蘭仁澤電廠,鄰近宜蘭土場由中油開發的地熱案廠也預計在 2024 年併網。今年開始是臺灣加速推動地熱發電的一年,我們期盼地熱發電能加速腳步在短時間發展起來。



提問六：碳封存政策推動規劃

碳封存被國際認定為減碳最直接且有效的方式,國內在十年前的國家能源型計畫中淨煤主軸計畫與台電中油分別也推動了先導型試驗計畫,但因為客觀條件與技術成熟度不足,尚未有具體成果。目前國際上已有相當多碳封存示範案例,其技術與民眾接受度逐漸成熟,政府 2050 淨零碳排也列入為 12 項關鍵行動之一,除目前的台電與中油碳封存示範計畫外,想請教署長對於長期大規模政府與民間推動碳封存是否有具體規劃藍圖?

回應：

碳封存已由國營事業邁出第一步。在「臺灣 2050 年淨零排放路徑」中「碳捕捉利用及封存」(CCUS) 關鍵戰略行動計畫,規劃 2050 年 CCUS 減碳需求量達 4,020 萬噸。我國多個機關執行 CCUS 行動計畫,主要由國科會主政 CCUS 及技術研發,包含碳封存固碳速率機制、地質調查及探勘、可封存量評估等;環境部「氣候變遷因應法」第 39 條規範 CCUS,正修訂定子法等法規,提供政府及民間推動碳封存法制基礎;經濟部成立「碳捕捉利用及封存推動小組」,產業技術司及產業發展署分別開發、推動應用二氧化碳捕捉或再利用技術,能源署、台灣電力公司、台灣中油公司推動執行「二氧化碳捕捉及封存試驗計畫」,我國碳封存規劃為先陸域驗證後逐步擴展至海域深部鹽水層。

台灣電力公司刻正於臺中火力發電廠、台灣中油公司於苗栗縣鐵砧山建置試驗場域,訂於 2025 年啟動試驗灌注,驗證我國地質封存條件。本署協助開發地質封存安全監測、風險評估技術,並評估引進國際先進技術、參照案場實務經驗,推動於我國應用。

提問七：在能源相關產業中,技術服務廠商(例如中興工程、吉興工程)從事規劃、設計、

監造、專管等工作，署長對於我們有什麼期許？

回應：

中興工程是國內大型技術服務廠商，可提供豐富的工程設計、監造及專案管理服務，過去在政府推動的前瞻計畫，包含沙崙智慧綠能科學城、海洋科技產業創新專區、離岸工程中心等均提供專業服務，協助我國完善前瞻基礎建設。

配合國際淨零碳排規劃，我國積極發展低碳綠色能源產業，眾多國際開發商亦投入前瞻能源產業，如離岸風場建置等。而綠色能源產業是由機電、化學、結構、水利、海洋等多種專業工程領域組合而成，需要仰賴不同領域的專業人才及

資源整合。未來，中興工程除可提供國內前瞻建設經驗，協助國際開發商進行建置及機電整合外，亦可汲取國際開發經驗，推動我國能源產業邁向國際水準。

在離岸風電進入區塊開發部分，工程規劃設計為離岸風場開發關鍵項目，中興工程參與海洋示範風場、台電一期及二期風場等，已具備相關離岸風電服務能量與實績。我國離岸風電推動已進入區塊開發階段，相關工程設計亦納入產業關聯項目中，期待中興工程依過去參與離岸風場開發之經驗，持續投入區塊開發工程規劃設計與下部結構設計，提供豐富的設計、監造及專案管理等服務。



游振偉

經濟部能源署署長

游振偉署長，畢業於成大都市計劃碩士、文化建築及都市設計博士，於1991年公務人員高考二級考試都市計畫及格、專門職業及技術人員高等考試都市計畫技師及格。

歷任經濟部工業局主任秘書、副局長及能源局局長，並曾兼任中華民國能源經濟學會第十九屆理事長，專長為能源政策規劃、產業規劃、工安環保與產業園區規劃開發管理。

台西盆地深部鹽水層之二氧化碳 封存移棲模擬分析

吳柏林 * 譚志豪 ** 俞旗文 ***

摘 要

本文依據彰濱 TPCS-M1 3,000 公尺深鑽井資料所得之盆地地質模型，假定一位於台西盆地某處之虛擬二氧化碳先導尺度封存試驗場址（2,000 噸年注入規模），採用 R2 系統作為二氧化碳儲集層。基於該虛擬場址進行灌注操作情境分析，包括：（1）不同灌注速率之影響；（2）灌注次層深度之影響；（3）灌注次層厚度之影響。本文評比該等不同灌注操作情境條件之二氧化碳移棲範圍差異，並評估不同操作情境對地層穩定性影響程度。基於上述評估發現由於先導試驗灌注規模小，碳流團塊移棲範圍皆相當有限，在基本情境條件下即使於連續灌注操作 15 年，於 50 年後監測最大移棲距離僅約為 260 公尺。此外，在不同操作條件下灌注井壓力值約等同或略大於注入壓力（ P_{inj} ），皆仍遠低於 R2 系統岩體破壞所設定之安全灌注壓力上限（ P_f ）。因此，可知在先導試驗尺度條件下，進行灌注操作對地層穩定性應不致造成太大影響。

關鍵字：深部鹽水層、二氧化碳封存、移棲模擬

一、前 言

台灣電力公司於 2012 年進行中尺度反射震測調查，初步測定台西盆地南側地質區域上新世至更新世地層層序與地質構造。而後於 2012- 2013 年間進一步透過「二氧化碳地質封存先導試驗場址地質調查及技術研發（一）」計畫，於彰濱電廠區域內辦理 TPCS-M1 3,000 公尺深鑽井（以下簡稱彰濱深鑽井），基於該深鑽井確認本區域目

標地層層序、高程與厚度等資料，並取得岩心進行相關試驗及分析，以作為台西盆地深部鹽水層二氧化碳封存潛力重要參考依據。

依據本先導試驗尺度僅規劃注入約 2,000 噸二氧化碳規模，旨在監測與驗證研究超臨界二氧化碳之可注性、碳流移棲特性與地層穩定性等，並非以灌注大量二氧化碳為目的，因此先以數值情境方式評估各項關鍵因子之影響程度，建立模擬驗證技術，並回饋後續階段規劃設計監測井相

* 中興工程顧問社大地工程研究中心副研究員

** 中興工程顧問社大地工程研究中心再生能源組組長

*** 中興工程顧問社大地工程研究中心副主任

關儀設事宜以利推動先導試驗。本文擬依據前述彰濱深鑽井資料所得之盆地尺度地質模型，假定一位於台西盆地某處之虛擬二氧化碳先導尺度封存試驗場址，進行灌注操作情境分析，並評估在不同操作情境下二氧化碳棲移範圍及其對地層穩定性影響。

二、封存情境設定

由彰濱深鑽井資料所得之盆地尺度地質模型顯示，主要地層層序由上至下依序為：(a) 地表覆蓋沖積層與頭斜山層 (0 ~ 1,717 公尺)，(b) 卓蘭層 (1,717 ~ 2,135 公尺)，(c) 錦水頁岩 (2,135 ~ 2,295 公尺)，(d) 桂竹林層 (含魚藤坪砂岩段) (2,295 ~ 2,450 公尺)，(e) 觀音山砂岩 (2,450 ~ 2,608 公尺)，(f) 打鹿頁岩 (2,608 ~ 2,800 公尺)，(g) 北寮層 (2,800 ~ 3,005 公尺)。其中，符合二氧化碳地質封存安全的蓋層/儲集層配對條件封存系統共有三處，包括：(1) 卓蘭層上部/下部 (R1 系統)、(2) 錦水—桂竹林—觀音山 (R2 系統)、(3) 打鹿—北寮 (R3 系統)。

此外，參酌中油、台電既有深鑽井與台西前陸盆地反射震測地層分布之資料，以及考慮台西盆地略向東傾斜，假定一位於台西盆地南側緣西部濱海工業區之某處，虛擬二氧化碳先導尺度封存試驗場址。其地層深度略深於彰濱深鑽井範圍，而其採用之 R2 系統注入分析位置之地層深度，分別設定為：(a) 錦水頁 (2,535 ~ 2,695 公尺)，(b) 桂竹林層 (2,695 ~ 2,850 公尺)，(c) 觀音山砂岩 (2,850 ~ 3,008 公尺)。於該系統中錦水頁岩作為蓋層；桂竹林層、觀音山砂岩皆作為儲集層，亦為本研究分析封存情境之目標地層。

(一) 虛擬二氧化碳封存場平面配置

本文設定之虛擬封存場平面配置如圖 1 所示，規劃包括一口注入井與二口監測井。因場址地層為西高東低，監測井 (W) 設定在注入井正西方 50 公尺處，監測井 (S) 設定在注入井正南方 50 公尺處。

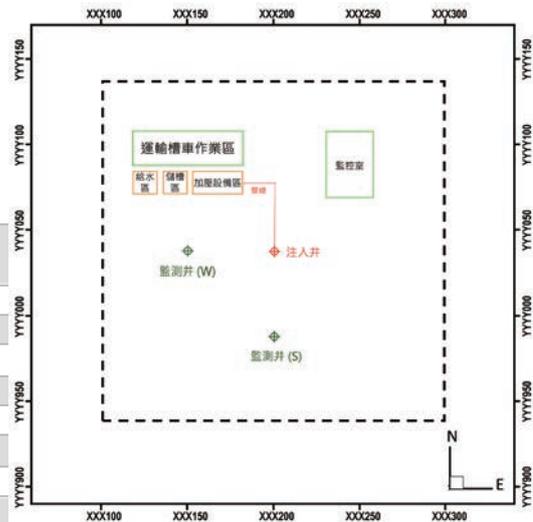


圖 1 虛擬封存場址平面配置圖

(二) 虛擬封存場址數值模型建構

數值模型目標地層包括蓋層 (錦水頁岩) 與儲集層 (桂竹林層、觀音山砂岩)，並採用 TOUGH2 數值模擬軟體，進行數值建模與分析。基於現有鑽井、地層界限深度、地層厚度、地質剖面圖等資料，以及彰濱深鑽井試驗資料與相關研究文獻，求得 R2 系統地層傾角向東傾斜約為 1.9 度。依此虛擬場址以注入井為中心假定地層傾斜角度為 2 度。為節省分析運算資源，除初始水壓平衡外，數值模型忽略目標層以上之地層 (即深度 2,535 公尺以上之部分) 不予建置，只針對目標地層進行運算。據此目標地層 (錦水頁岩、桂竹林層、觀音山砂岩) 數值模型建構，如圖 2 所示。

模擬灌注 2,000 噸規模的尺度下，由於桂竹林層與觀音山砂岩細分後並非均質砂岩體，而屬

砂頁岩互層構造，在此小規模條件下僅需擇定其中一砂岩儲集次層構造注入，其上下皆受頁岩次層封阻。為簡化模型假定位於錦水頁岩下方桂竹林層頂端具有一厚度 10 公尺之儲集次層，其餘桂竹林層與觀音山砂岩位置則假定為蓋層特性之次層，灌注位置如圖 3 所示。

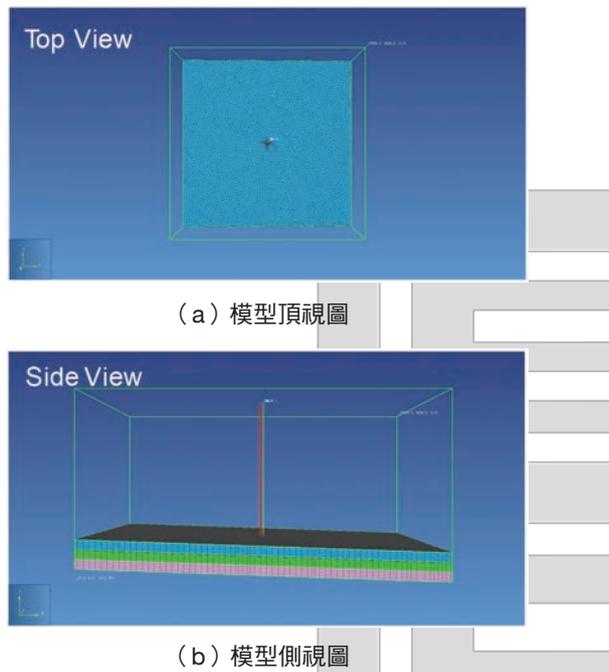


圖 2 R2 系統目標地層數值模型

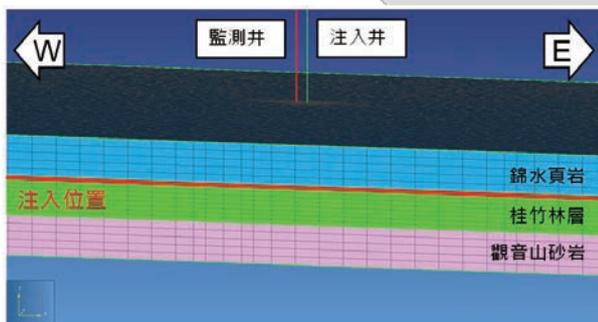


圖 3 井口配置與地層數值模型：包括蓋層（錦水頁岩）及儲集層（桂竹林層、觀音山砂岩）

虛擬場址依據彰濱深鑽井所取之各目標層岩心於實驗室量測所得之孔隙率、絕對與相對滲透率以及乾單位重（經由濕單位重與含水量換算）

彙整而簡化成地層參數剖面（台灣電力公司，2014），如圖 4 所示。本研究將虛擬場址情境案例進行假定一致之均質地層簡化參數以進行比較。依據圖 4 目標地層簡化參數剖面，合理假定地層密度為 $2,100 \text{ kg/m}^3$ ，孔隙率於蓋層與儲集層分別為 0.15 與 0.25，滲透率於蓋層與儲集層（參數剖面上限與下限）分別為 0.001 mD （滲透係數為 $1\text{E-}18 \text{ m}^2$ ）與 10 mD （滲透係數為 $1\text{E-}14 \text{ m}^2$ ），如表 1 所示。

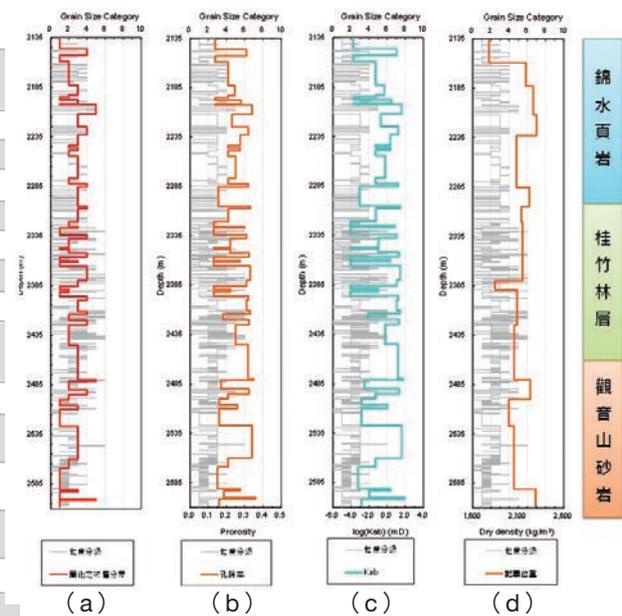


圖 4 目標地層簡化參數剖面：(a) 次層劃分；(b) 簡化孔隙率剖面；(c) 簡化絕對滲透率剖面；(d) 乾單位重

表 1 情境案例簡化參數

參數		蓋層	儲集層
密度 (kg/m^3)		2100	2100
孔隙率		0.15	0.25
滲透係數 (mD)		0.001	10
滲透係數 (m^2)		$1\text{E-}18$	$1\text{E-}14$
相對滲透率	形狀因子	0.655	0.809
	殘留水飽和度	0.539	0.151
	殘留氣飽和度	0.277	0.09
毛細壓力	形狀因子	0.589	0.369
	強度係數	$6.894\text{E-}07$	$3.309\text{E-}04$

三、虛擬場址灌注操作情境分析

(一) 不同灌注速率之影響

本文以評估先導尺度二氧化碳封存場址為目標，設定之灌注量為 2,000 噸，基本情境灌注期程為 1 年（注入速率 5.48ton/day），並設定於灌注期程內不同灌注速率之情境以評估灌注風險。

圖 5 所示為不同灌注速率（期程）之五個分析情境。此外，為比較長期擴大灌注量的衝擊，再加入第六個分析情境，考慮若連續 15 年進行每年平均 2,000 噸灌注量，同一注儲位置累積注入至 3 萬噸時可能的狀況。如以下說明：

- (1) 注入速率 43.8 ton/day（1.5 個月注完）
- (2) 注入速率 21.9 ton/day（3 個月注完）
- (3) 注入速率 10.95 ton/day（6 個月注完）
- (4) 注入速率 5.48 ton/day（12 個月注完）
- (5) 注入速率 2.74 ton/day（24 個月注完）
- (6) 長期灌注情境：連續 15 年進行每年平均 2,000 噸灌注量

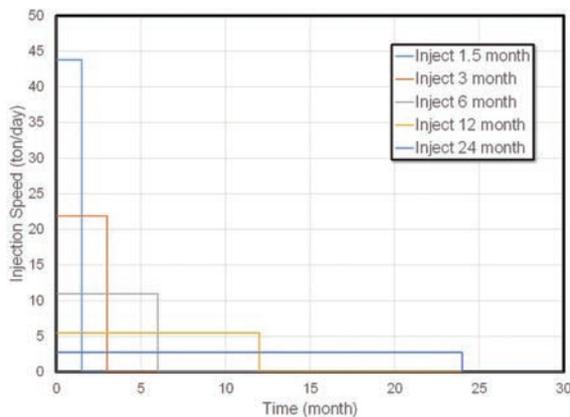
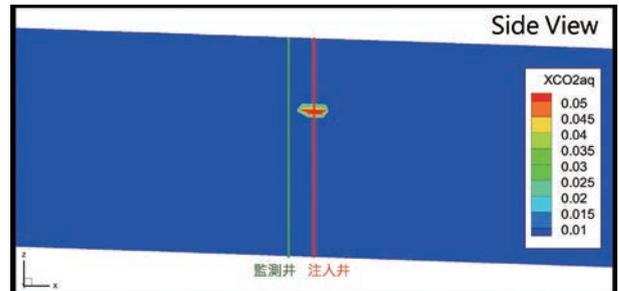


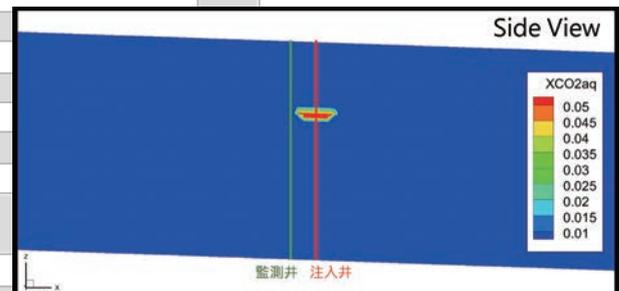
圖 5 不同灌注速率（期程）之情境說明

虛擬場址在二氧化碳 2,000 噸灌注總量條件下，二氧化碳於注入速率 5.48 ton/day 與注入速率 43.8 ton/day 移棲模擬結果，東西向剖面分別如圖 6、圖 7 所示。由圖中碳流移棲（Carbon plume migration）範圍顯示，即使在不同注入速率條件

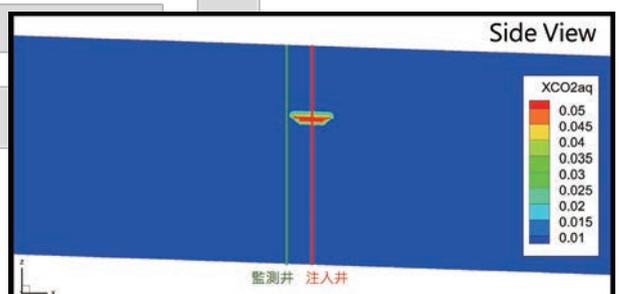
下，碳流往西移棲範圍皆屬有限（開始注入 1 年後介於 35 ~ 45 公尺、50 年後約至 90 公尺），其皆約 5 年後可抵達觀測井位置。觀察碳流水平移棲行為，由於地層向東傾斜，碳流主要將向西側移棲。



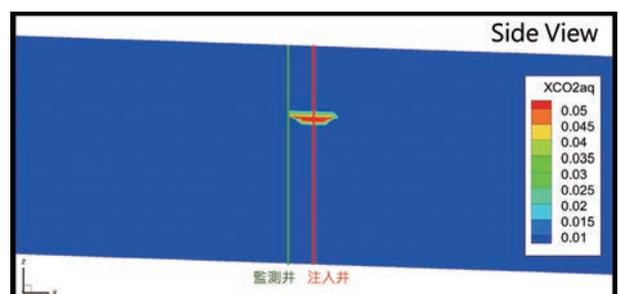
(a) 0.5 年



(b) 1 年



(c) 2 年



(d) 5 年

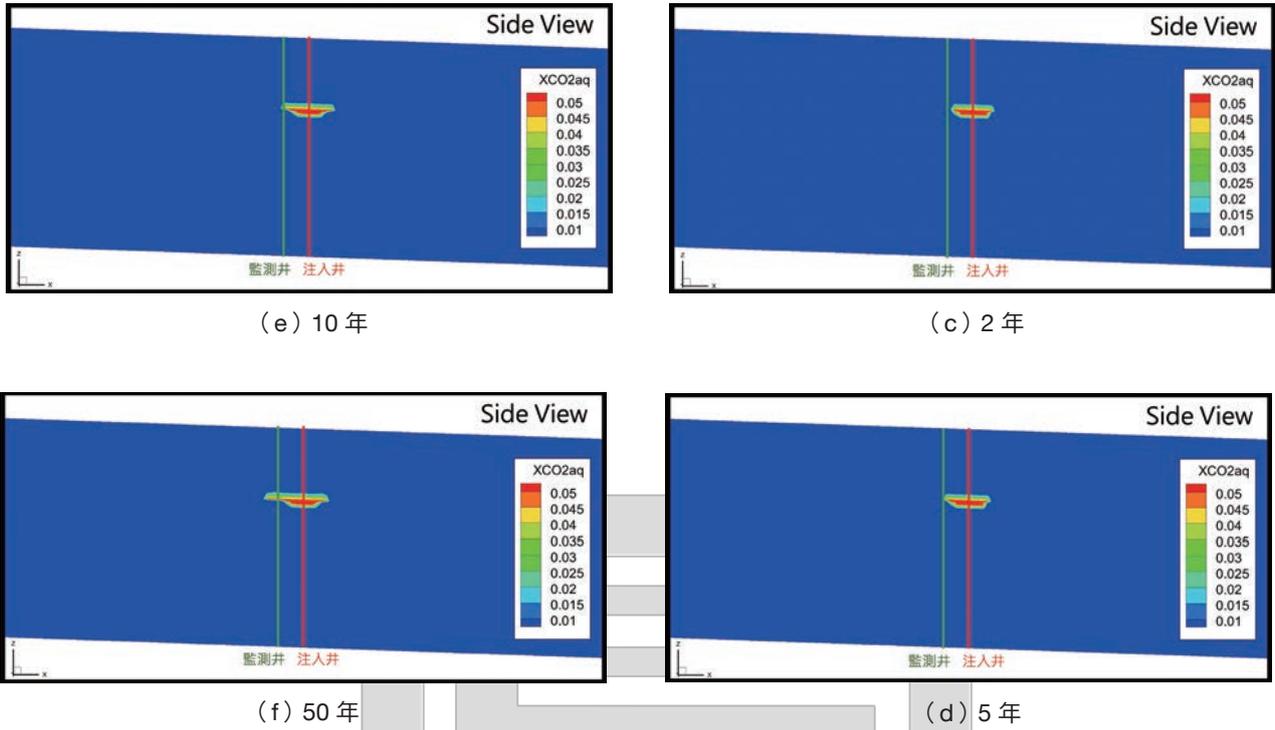


圖 6 注入速率 5.48 ton/day (12 個月注完) 之碳流移棲

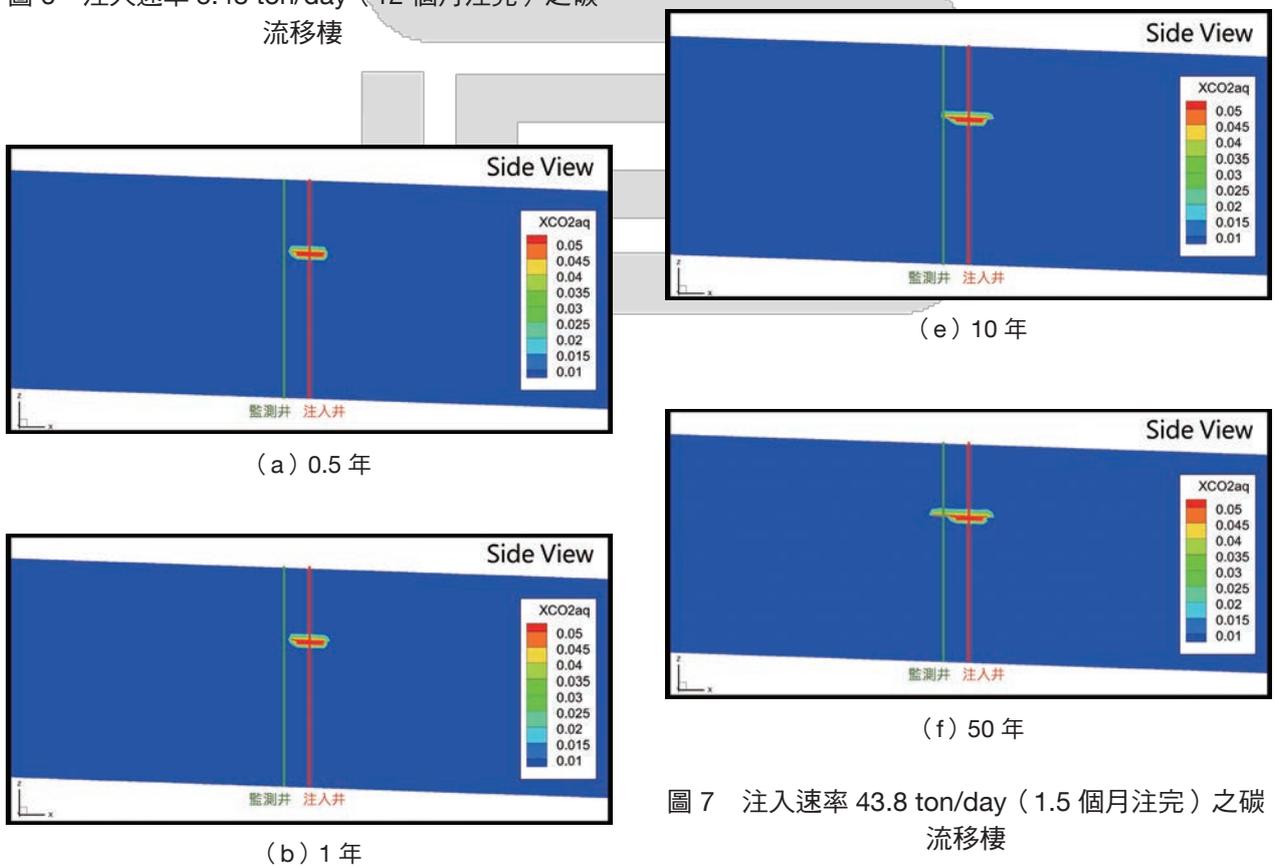


圖 7 注入速率 43.8 ton/day (1.5 個月注完) 之碳流移棲

分析不同注入速率對岩層穩定性風險提升之結果，如圖 8 與圖 9 顯示，當注入速率由 2.74 ton/day (24 個月注完) 提升至 43.8 ton/day (1.5 個月注完)，注入壓力提升約 2 MPa，相較於岩覆應力為 26.55 MPa 提升至 28.55 MPa，增加有限 (+7.5%)。初步評估變動灌注速率對地層穩定性影響並不顯著。

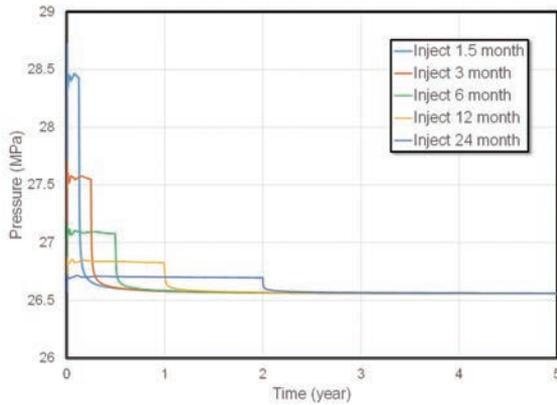


圖 8 不同灌注速率 (期程) 下注入井壓力之依時變化

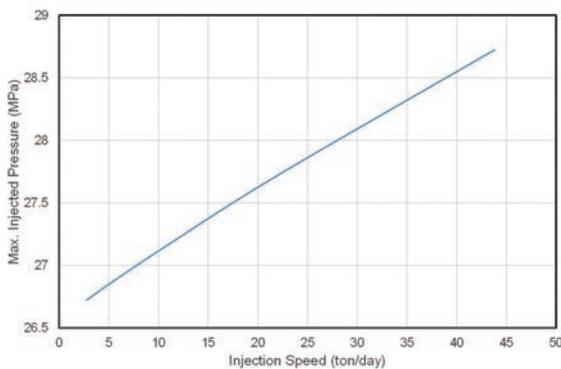
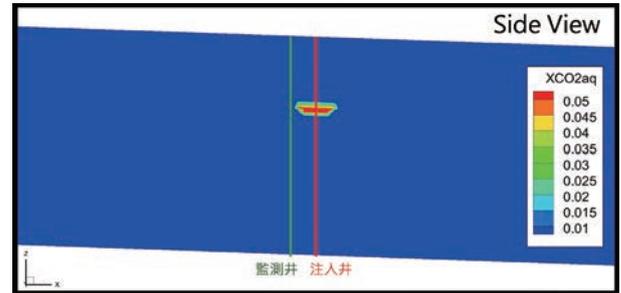


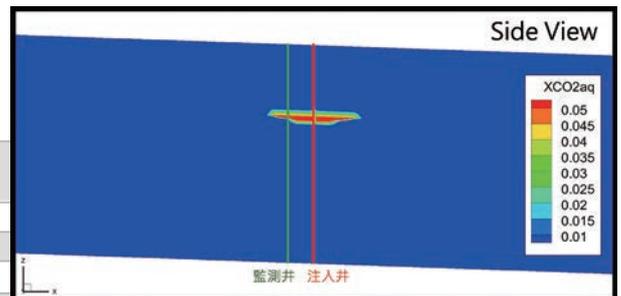
圖 9 注入井壓力與灌注速率之關係

由圖 10 顯示，在長期灌注情境下二氧化碳碳流移棲過程，假定為連續 15 年，進行每年 2000 噸灌注作業 (亦即注入速率 5.48 ton/day)，碳流會於灌注開始後 5 ~ 10 年。

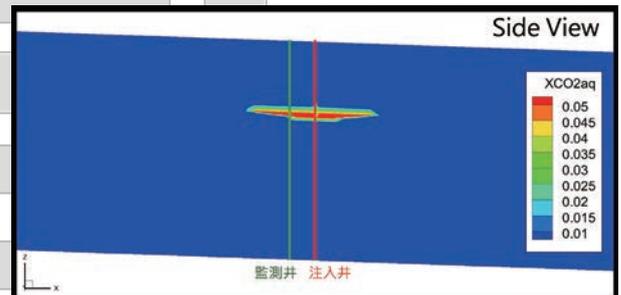
逐步向西側超出封存試驗場區範圍 (約 100 公尺)，並可知於灌注開始，於第 15 年累積注入至 3 萬噸時，再經過 35 年，到第 50 年後該情境之碳流將向西側移棲約 260 公尺。



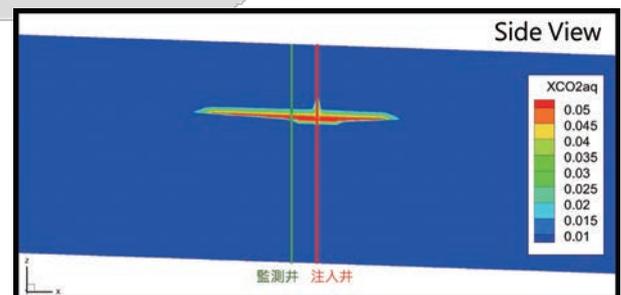
(a) 1 年



(b) 5 年



(c) 10 年



(d) 50 年

圖 10 注入速率 5.48 ton/day (連續注入 15 年) 之碳流移棲

此外，在長期灌注情境下井口壓力變化，如圖 11 顯示，僅有觀測井口壓力延時增加，但壓力並無堆疊增長之情形；注入井口壓力延時卻有

下降的趨勢。綜上所述在先導試驗規模尺度下，初步評估長期灌對地層穩定性影響應相當有限。

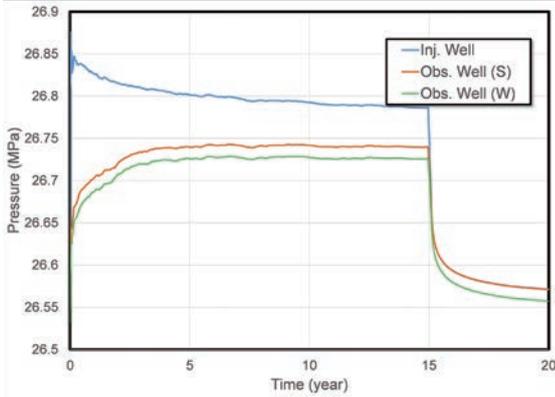
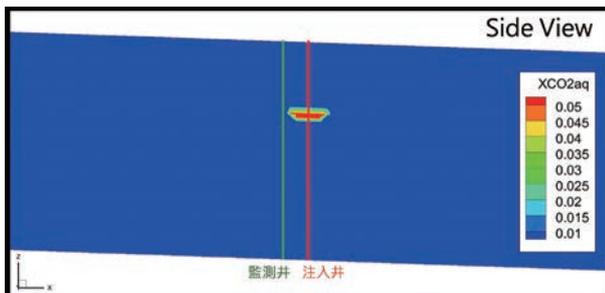


圖 11 連續注入 15 年下井口壓力之依時變化

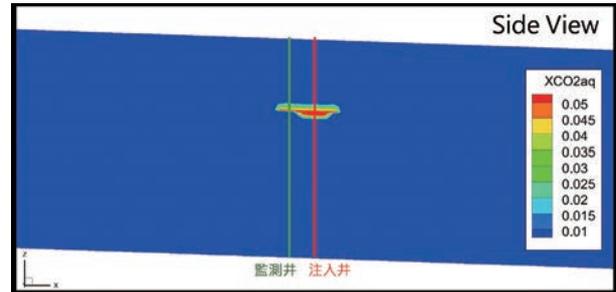
(二) 灌注次層深度之影響

虛擬場址二氧化碳在基本情境一年 2,000 噸灌注總量（注入速率 5.48 ton/day）條件下，注入位於桂竹林層頂部深度（2,695 ~ 2,705 公尺），如圖 3 所示，並評估注入位於桂竹林層底部深度（2,840 ~ 2,850 公尺）較深情境，經移棲模擬比較結果，東西向剖面分別如圖 12 所示。

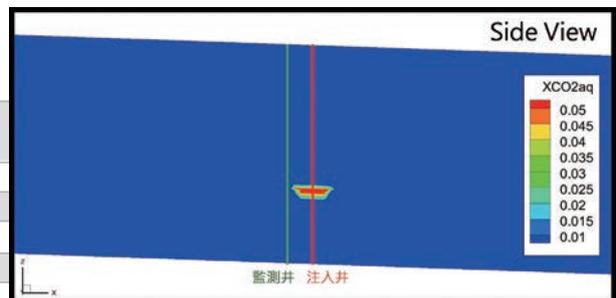
由圖中碳流移棲範圍顯示，在不同注入深度條件下，碳流往西移棲範圍差異不大（開始注入 1 年後介於 35 ~ 45 公尺、50 年約至 90 公尺）。然而由注入井壓力之評比結果，如圖 13 所示，依注入深度增加，注入壓力約為等比增長。因此於考量灌注設備規格時，須審慎考量規劃注入深度以符合灌注作業需求。



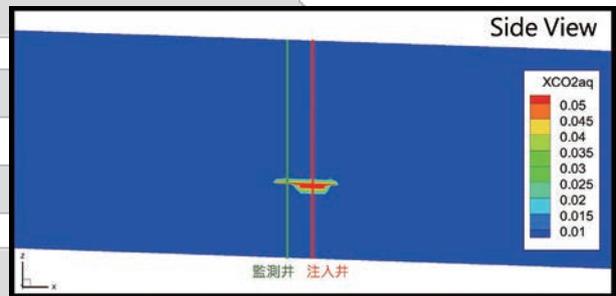
(a) 桂竹林層頂部（1 年後）



(b) 桂竹林層頂部（50 年後）



(c) 桂竹林層底部（1 年後）



(d) 桂竹林層底部（50 年後）

圖 12 不同灌注深度於之碳流移棲範圍比較

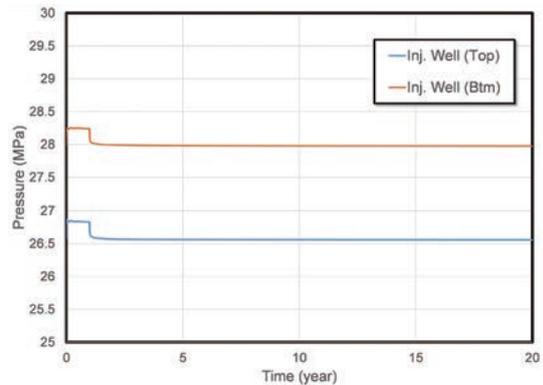


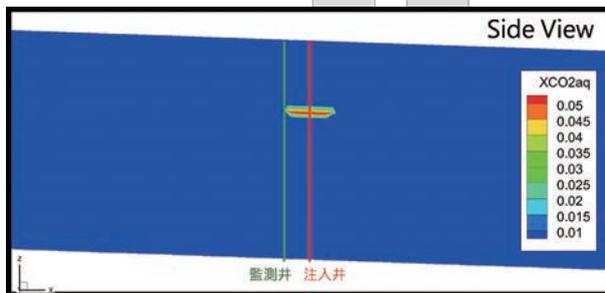
圖 13 不同灌注深度於之灌注壓力比較

(三) 灌注次層厚度之影響

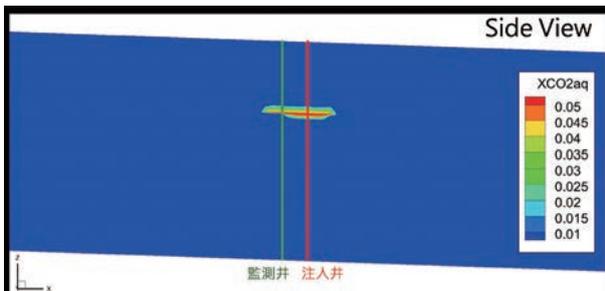
虛擬場址二氧化碳在基本情境一年 2,000 噸灌注總量（注入速率 5.48 ton/day）條件下，注入位置，位於桂竹林層頂端具有一厚度 10 公尺砂岩之儲集次層（2,695 ~ 2,705 公尺），如圖 3 所示。但為評比不同灌注次層厚度之棲移範圍，包括 3 種模擬情境如下：

- (1) 注入深度於 2,695 ~ 2,700 公尺、5 公尺厚度儲集層
- (2) 注入深度於 2,695 ~ 2,705 公尺、10 公尺厚度儲集層
- (3) 注入深度於 2,695 ~ 2,715 公尺、20 公尺厚度儲集層

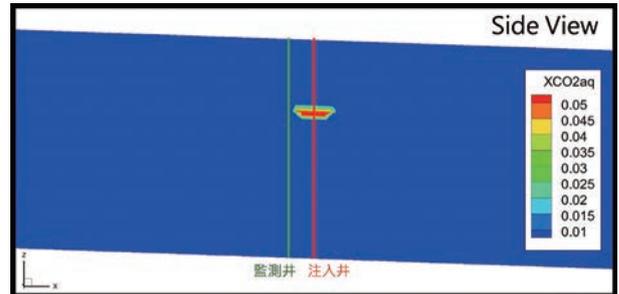
由圖 14 顯示，當注入儲集層厚度越薄，由於儲集層受到蓋層之限制，碳流團塊較薄，移棲範圍將延伸更遠。反之，當儲集次層厚度越厚，碳流團塊較厚，移棲範圍將小於薄次層之情境。然而，由灌注井壓力之評比結果，如圖 13 所示，較薄次層將予岩層更高之注入壓力。



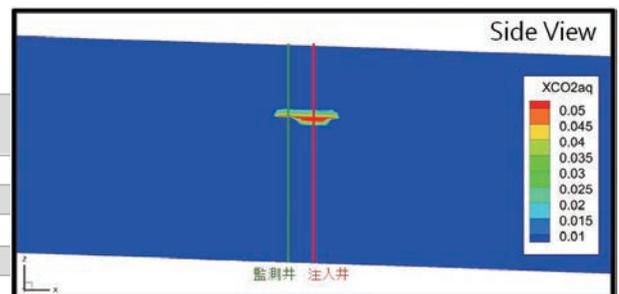
(a) 5m 儲集次層（1 年後）



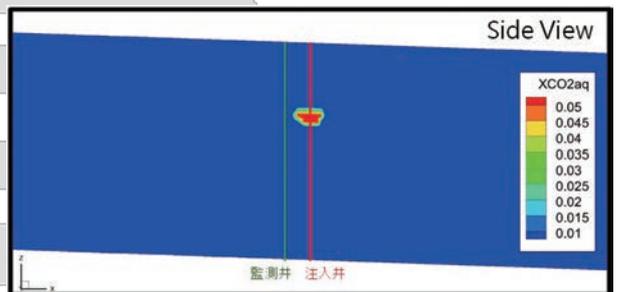
(b) 5m 儲集次層（50 年後）



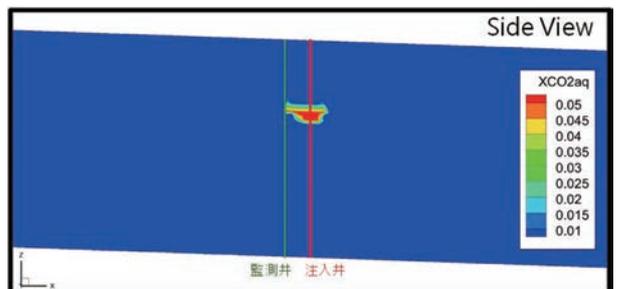
(c) 10m 儲集次層（1 年後）



(d) 10m 儲集次層（50 年後）



(e) 20m 儲集次層（1 年後）



(f) 20m 儲集次層（50 年後）

圖 14 不同灌注次層厚度於之碳流移棲範圍比較

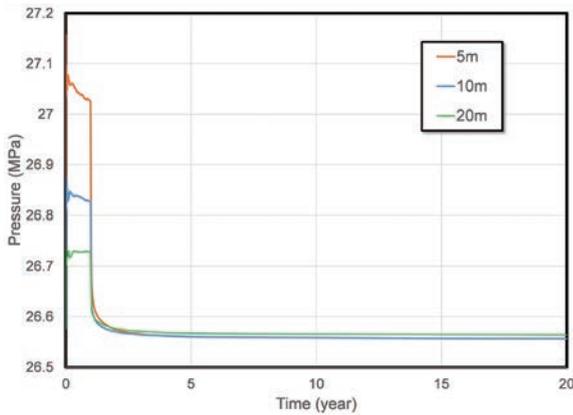


圖 15 不同灌注次層厚度於之灌注壓力比較

(四) 不同操作情境對地層穩定性之影響評估

為量化評估在先導試驗尺度一年 2,000 噸灌注總量條件下於各不同操作情境對地層穩定性之影響，台灣電力公司（2014）於彰濱深鑽井岩心資料所推估之灌注壓力上限，隨深度變化結果，如圖 16 虛線所示。

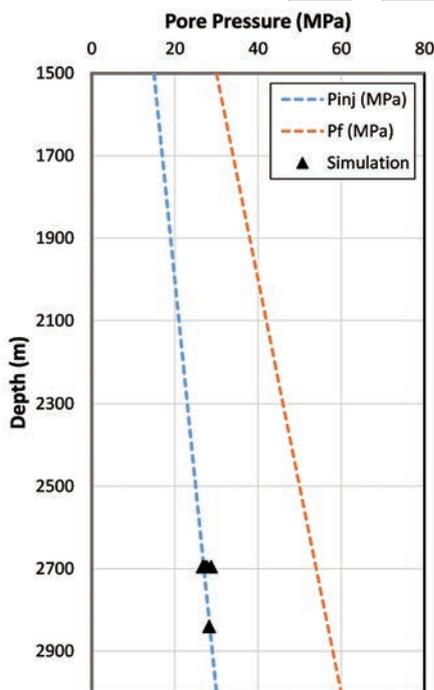


圖 16 灌注壓力模擬結果安全評估

將前述各情境模擬所得之最大注入井壓力套疊於該資料中，如圖 16 資料點顯示，在該等灌注規模條件下於考量不同操作情境時，由於灌注規模相當小，注入井壓力值約等同於可注壓力 P_{inj} ，仍遠遠低於 R2 系統岩體破壞所需之灌注壓力 P_f 。因此在先導試驗尺度（2,000 噸／年）條件下，對於地層穩定性影響應不顯著。

四、結論與建議

本文依據彰濱深鑽井資料所得之盆地尺度地質模型，假定一位於台西盆地某處之虛擬二氧化碳先導尺度封存試驗場址，採用之 R2 系統作為二氧化碳儲集層。基於該虛擬場址進行灌注操作情境分析，包括：（1）不同灌注速率之影響；（2）灌注次層深度之影響；（3）灌注次層厚度之影響。本文評比該等不同灌注操作情境條件時之二氧化碳移棲範圍差異，而後並評估不同操作情境對地層穩定性影響之程度，依上述評估發現，由於先導試驗規模灌注規模（2,000 噸／年）相當小，碳流團塊移棲範圍皆相當小；在基本情境條件下即使於連續灌注操作 15 年，於 50 年後監測之最大移棲距離僅約為 260 公尺。此外，在不同操作條件下灌注井壓力值約等同或略大於可注壓力 P_{inj} ，但皆仍遠低於 R2 系統岩體破壞所需之灌注壓力 P_f ，因此可知在先導試驗尺度條件下，對於地層穩定性應不致造成太大影響。

參考文獻

- 台灣電力股份有限公司（2011），二氧化碳地質封存試驗場址調查規劃與研究。
- 台灣電力股份有限公司（2014），二氧化碳地質封存先導試驗場址地質調查及技術研發（一）。
- 許樹坤、林欣怡、陳揚琛、林殿順（2011），臺灣彰濱外海的震測構造，國科會能源國家型科技計畫期末簡報資料。
- 財團法人中興工程顧問社（2012），國科會淨煤主軸 B 分

項計畫：二氧化碳地質封存，國科會能源國家型淨煤主軸專案計畫。

財團法人中興工程顧問社（2014），二氧化碳地質封存成本、安全與風險評估，財團法人臺灣經濟研究院委辦，國科會能源國家型淨煤主軸專案計畫。

邵國士、李易叡、俞旗文、葛文忠、冀樹勇（2013），台西盆地二氧化碳地質封存特性與封存量之探討，中興工程季刊第 118 期。

姜智文、俞旗文、楊智豪、楊明偉、焦中輝（2017），大地電磁法應用於二氧化碳地質封存場址調查，中興工程季刊第 137 期。

俞旗文、譚志豪、黃鐘、楊明偉（2022），先導 3000 公尺鑽井與深部鹽水層碳封存量估算案例，地工技術 No.174。

俞旗文、譚志豪、雷世璋、楊智豪（2019），力學耦合

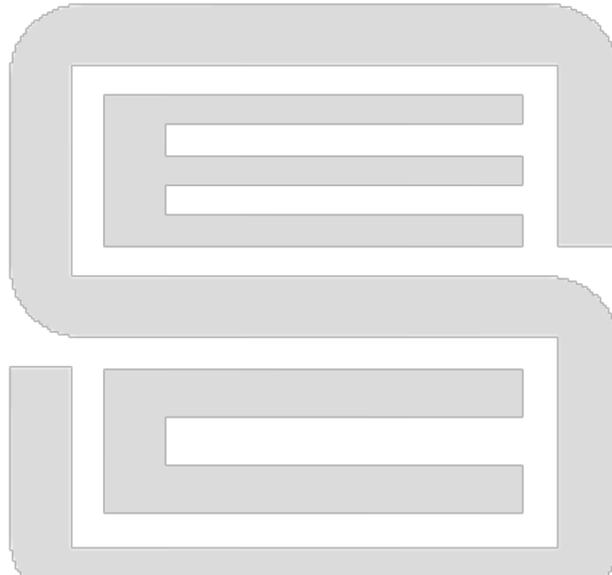
分析應用於深部鹽水層碳封存蓋層穩定性評估，中興工程季刊第 144 期。

陳揚琛（2011），利用震測方法探討台中至彰化外海的二氧化碳地質封存潛能，中央大學地球物理所碩士論文。

葛文忠、俞旗文、焦中輝、黃連通、楊明偉、王乾盈（2011），陸域反射震測探勘應用於二氧化碳地質封存場址調查，中興工程季刊第 113 期。

傅士齊、梁守謙、吳素慧、邱仲信、冀樹勇（1997），先新統震測層序分析及油氣潛能評估 -A 及 C 區，中國石油公司探採研究所彙報第 20 期。

IPCC (2005), Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Technical Report, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Prepared by Working Group III, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.



水利工程應用程式

公開發售

SEC-HY21 (二維泛用地表水分析軟體)

- 網格及地形建立等前處理介面、電腦繪圖及流場視覺化
- 定床水理模組
- 水中生物物理棲地分析模組

訂購電話：(02)8791-9198 轉 467 陳小姐

傳 真：(02)8791-2198

E-MAIL：louise@sinotech.org.tw

臺南市土壤液化風險地圖製作初探

陳嬋璇 * 譚志豪 ** 王金山 * 冀樹勇 *** 李易叡 **** 邵國士 *****
謝有忠 ***** 邱禎龍 ***** 盧詩丁 *****

摘 要

本研究彙整經濟部地質調查及礦業管理中心資料庫於臺南市收納之既有鑽探與試驗之大數據資料為基礎，進一步考量區域震源、隱沒帶震源及斷層震源之發震機率，並以既有建築物作為風險評估目標，納入國際防災領域慣用之風險定義（考量危害機率、脆弱度及暴露量等因素）進行土壤液化風險分析，提升土壤液化評估方法的應用性於產製臺南市土壤液化風險地圖，以反映建築物因土壤液化造成之危害風險，並針對以往發生過之液化災害事件進行比對驗證，以確保評估方式之準確性，作為未來各縣市製作土壤液化風險地圖方法之參考，以提供地方政府或相關業管單位進行防災決策應用。

關鍵字：土壤液化、地震機率、既有建築物、風險分析

一、前 言

臺灣位處環太平洋地震帶，地震頻仍，當大規模地震發生時，經常伴隨相關土壤液化災害。土壤液化發生的原因除需有足夠大的震度與延時作用外，亦須有砂質土壤與高地下水位兩項構成要件，故土壤液化容易發生在河川下游沖積平原、砂質海岸或人工水力回填新生地等地區，且具有地域性與重複性。土壤液化除產生地表冒水、噴砂現象外，甚至導致道路開裂、建築物下陷傾斜、

護岸堤防側潰、地下維生管線斷裂等損害。嚴重者甚至造成建築物破壞受損，間接造成民眾財產損失與影響居住安全。

以往對於廣域土壤化分析多以土壤液化簡化評估法，配合區域鑽孔進行土壤液化潛勢分析。本研究擬以經濟部地質調查及礦業管理中心資料庫於臺南市收納之鑽孔為液化分析基礎資料，進一步考量區域震源、隱沒帶震源及斷層震源之發震機率，並以建築物作為風險評估目標，納入國際防災領域慣用之風險定義（考量危害機率、脆弱度及暴露量等

* 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
*** 中興工程顧問社大地工程研究中心主任
**** 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天災風險分析組組長
***** 經濟部地質調查及礦業管理中心技正
***** 經濟部地質調查及礦業管理中心科長
***** 經濟部地質調查及礦業管理中心副組長

因素)進行土壤液化風險分析,提升土壤液化評估方法的應用層面,並對針過往發生過因液化產生災害之建物案例進行比對,了解研究方法之準確性,以作為未來各縣市製作土壤液化風險地圖方法之參考,提供給相關業管單位進行防災決策應用(財團法人中興工程顧問社,2002)。

二、研究區域地質條件與鑽探資料

(一) 地質條件

本研究範圍為臺南市,其中進行土壤液化研究主要以臺南市平原地區為主,本區位處嘉南海岸平原區,多由河川沖積扇與前方潮間帶之海相沉積層相接而成。在嘉南平原岸外多泥灘,上有潟湖和岸外砂洲平行排列,為一線狀碎屑質海岸(陳培源,2005)。

根據何春蓀(1986)之臺灣地質分區,本區屬濱海平原區,為一低平之第四紀沖積平原。本研究關注之淺部地層多屬第四紀全新世沖積層,岩性以砂、粉砂、礫石、黏土為主。全新世之中主要的海進期為臺南期,海相的臺南層則分布於臺南市海岸至關廟一帶(林朝榮,1972;陳于高等,1994),為河口與潟湖及濱海環境沉積,以黏土至粉砂質泥層為主,含有孔蟲及貝類化石,並夾有古砂丘。

另根據地調所之朴子、佳里及臺南五萬分之一地質圖幅(地調所,2011)可知,本區淺部多為晚全新世至現今的海相砂泥層或陸相的沖積層。根據張瑞津等(1998)、Chang and Chen(2001)之研究,本區域內砂丘主要分布在急水溪、將軍溪沿岸及離岸砂洲,即所謂「新期海岸砂丘」,至於由鬆軟之灰色或淡黃色細砂構成所謂之「舊期砂丘層」,主要分布在鹽水溪南側與二仁溪兩岸。

其他相關研究亦曾針對本區域鑽探資料進行

地層層序分析,例如「臺灣地區地下水觀測網第二期計畫」曾在嘉南平原區域進行33站水文地質鑽探,鑽井深度在250~300m(鑽井分布如圖1中星號所示);另於早期國科會補助計畫針對臺南西南部海岸變遷之相關研究,曾鑽探宅港與三寮灣兩口鑽井,並整理相關地層資料(地調所,2011)。研究顯示,土壤液化好發之淺部地層(20m以內)以沖積層、沼澤、潟湖及濱面沉積環境為主。

(二) 鑽探資料

盤點計畫範圍內經濟部地質調查及礦業管理中心資料庫所收納之鑽孔,位於臺南市研究區域內之鑽孔數共計4,689孔,其資料來源包含工程地質探勘資料庫系統GEO2010、營建工程資料庫、公共工程鑽探資料、建案鑽探資料及安家固園一、二期補充鑽孔等,考慮鑽孔參數是否滿足本研究所採用土壤液化評估方法JRA(2017)之需求,諸如:SPT-N值、土壤分類、總體單位重(或可換算之比重、飽和度、含水量、孔隙比等參數),經篩選後合乎JRA(2017)分析使用之有效孔數為3,103孔,如圖1。

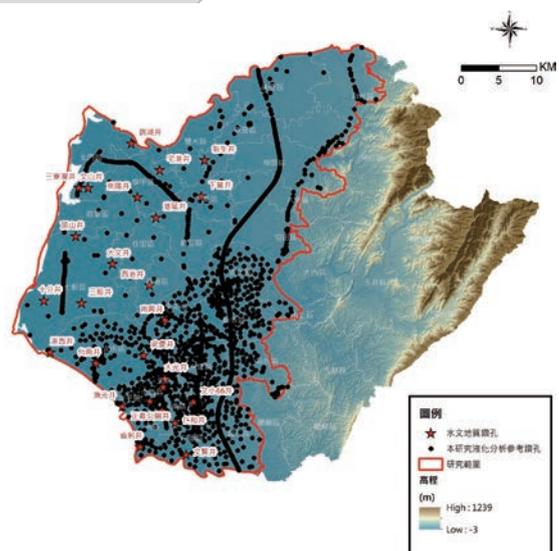


圖1 臺南市土壤液化分析鑽孔分布

三、土壤液化風險分析及圖資產製

(一) 風險定義與分析方法

風險一詞最早應用於 19 世紀末探討西方經濟議題上，現已廣泛應用於不同領域，在天然災害應用方面則始於 1970 年代。1979 年 7 月聯合國於瑞士日內瓦召開國際專家會議，針對各項名詞進行定義，聯合國災難救援組織（UNDRO）於該會議中將風險定義為「在特定事件下預估將導致的生命損失、人員受傷、財產毀損或經濟活動干擾」，並將風險定義成危害（Hazard）與脆弱度

（Vulnerability）的組合。

全球減少災害風險和災後恢復基金（GFDRR）曾對風險作出以下定義：風險由三項因子所組成，包括：危害度（hazard）、暴露度（exposure）與脆弱度（vulnerability），其中危害度為一種潛在的破壞性物理現象，暴露度為對社區（人口、建築物、工廠、農田等）很重要並且可能受到危害影響的資產位置、屬性和價值，而脆弱度則為資產在暴露於危險中時被損壞影響的可能性。吳瑞賢（2012）曾整理國內外災害風險之定義如表 1。

表 1 國內外災害風險定義（吳瑞賢，2012）

出處	災害風險定義
Hammer, 1972	$Risk = Probability \times Consequence$
UNDRO, 1980 ; UNDHA, 1992 ; Satu K., 2006 ; K.M. DeBruijn, F. Klijn, 2009 ; 行政院, 1995 ; 林漢良, 2008	風險 (Risk) = 危害 (Hazard) × 脆弱度 (Vulnerability)
Alexander, 2000	$Risk = Elements\ at\ risk \times Hazard \times Vulnerability$
Benouar and Mimi, 2001	$Risk = Hazard \times Vulnerability / Disaster\ Management$
The World Bank Hotspots, 2005	$Risk = Hazard \times Vulnerability \times Amount$
Villagra'n de Leo'n, 2006	$Risk = Hazard \times Vulnerability / Coping\ Capacity$
Yasuo Kannami and Kuniyoshi Takeuchi, 2008	$Risk = Hazard \times Exposure \times Vulnerability / Capacity$
蘇文瑞等, 2010	$R (災害風險) = S (災害潛勢) \times P (發生機率) \times L (損失程度)$ $R (災害風險) = H (危害度) \times L (損失程度)$
陳慶和等, 2012a, 2012b ; 黃筱媚, 2012	$Risk = (1 - 減緩危害能力) \times 危害性 \times 危害曝露率 \times (1 - 受災對象抵抗衝擊能力)$

綜合上述風險定義，本研究採用之土壤液化風險定義為：

$$風險 (Risk) = 危害機率 (Hazard) \times 暴露量 (Exposure) \times 脆弱度 (Vulnerability) \quad (1)$$

上式中，各項目之定義與操作方式如下：

1. 危害機率 (Hazard) (單位：%)：地震引致土壤液化災害之機率。本研究以 JRA (2017) 為主要分析方法，並設定地表累積液化沉陷量 30cm 為門檻值，以反算各地區欲達到累積

沉陷 30cm 相對應之臨界 PGA，再透過地震危害曲線 (Hazard curve) 求得該臨界 PGA 對應之發生機率。本研究目前僅考慮地震機率而暫未納入土壤液化評估方法與相關參數之不確定性，屬半機率式液化分析法。

2. 暴露量 (Exposure) (無因次單位，介於 0~1)：承受土壤液化風險之保全對象，現階段以各研究範圍內之建物面積密度 (正規化面積比) 作為主要分析對象。

脆弱度 (Vulnerability) (無因次單位，介於

0 ~ 1)：土壤液化可能造成之損壞程度。現階段主要以建物為目標，考量研究範圍內建物樓層高度、可能的基礎形式與基礎深度、建物抗液化能力及覆載荷重等條件，另再考量關鍵設施所處土地利用分區內之建物，強調與防災相關關鍵設施建物之重要性等因素，以綜合評估研究範圍內各建物之脆弱度。

風險地圖製作系先建置危害機率、暴露量以及脆弱度三個空間分布圖層，再按照(式1)即能計算出研究區域之風險值空間分布，並將量化後之風險值分級，以獲得土壤液化風險地圖。

源以求得危害度曲線，推估不同尖峰地表加速度PGA的年發生率及超越機率(詳圖3)。

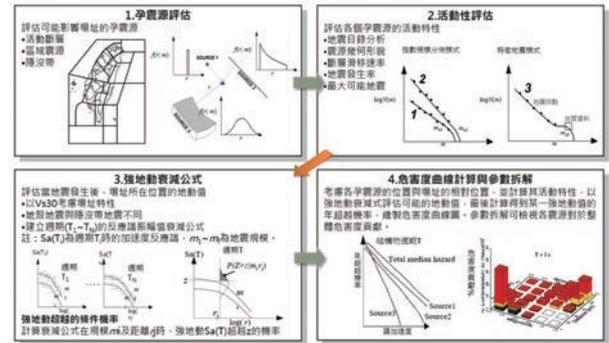


圖3 機率式地震危害分析流程圖

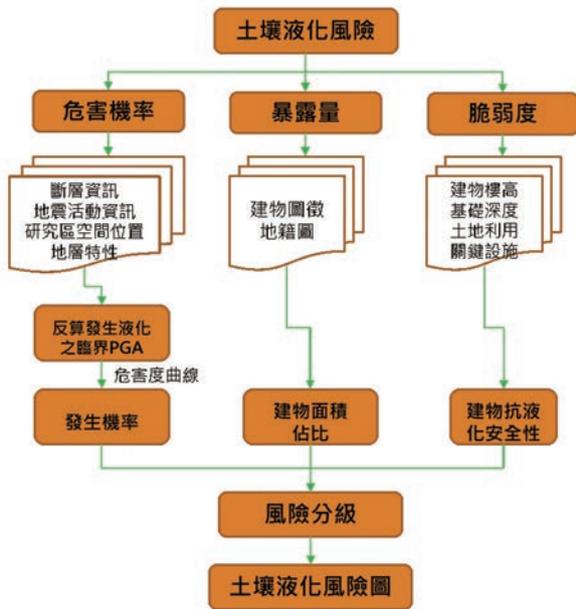


圖2 土壤液化風險地圖製作流程圖

(二) 危害機率評估

1. 發震機率及尖峰地表加速度評估

地震危害度分析一般可分為定值法(deterministic method)及機率法(probabilistic method)，本研究為了解研究區域造成土壤液化超越臨界PGA之發生機率，採用機率式地震危害度分析法(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)考量包含區域震源、斷層震源及隱沒帶震

分析主要考慮以下項目：(1)地震目錄分析：包含地震規模轉換、地震完整性分析及主震目錄確定；(2)震源分區與分類：包含區域震源(淺層及深層區域)、隱沒帶震源及斷層震源(如圖4所示)；(3)震源地震發生機率：一般可分為截切指數模式及特徵地震模式，本研究對於未知活動斷層分布的臺灣島外區域震源，以及隱沒帶板塊內部震源直接使用截切指數分布模式，來建立地震規模與發生率的關係；(4)強地動衰減式：包含地殼地震之強地動衰減式及隱沒帶地震之強地動衰減式；(5)機率法地震危害度分析：研究採用邏輯樹架構(如圖5)處理臺南市震源特性參數與模式的不確定性，包括：震源模式、強地動衰減式、震源深度分析、震源規模分布模式及斷層幾何等五項，藉以評估研究區域機率式之地震危害度，圖6為臺南市各行政區PGA總危害度曲線圖，為PGA危害度考慮強地動一個標準變異之分布情形。此外，為獲得區域特定使用年限之超越機率，採用Poisson model(即 $P = 1 - e^{-\lambda \Delta t}$)，以50年結構物使用年限($\Delta t = 50$)及各區危害度曲線PGA值對應年發生率(λ)進行評估。

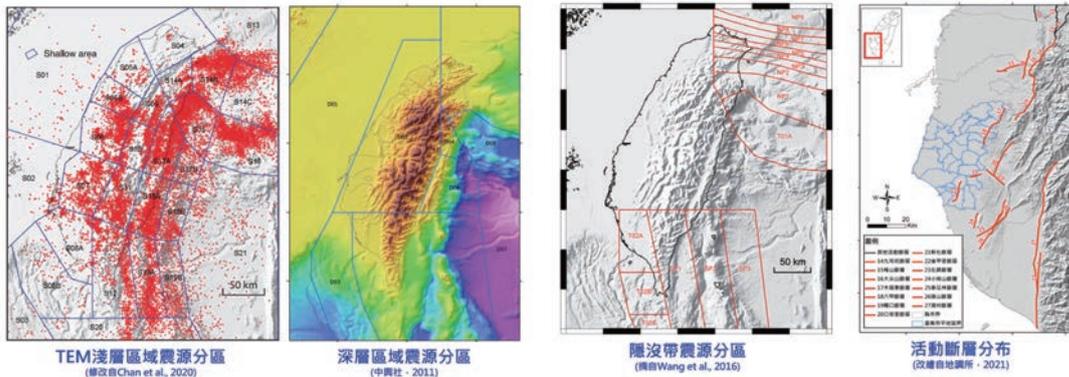


圖 4 研究採用之震源分區

震源模式	強地動震源式	震源深度分布	地震規模分布	斷層傾角	b值	斷層淨移速率/地震活動度 $N(m_0)$	最大可能地震 M_c		
區域震源 (Regional source)	S02	CRU	Uniform	截切指數模式	隨機	1.079 (0.165)	15.132 (0.165)	M_c 6.5 (0.2)	
	S06								
	S07								
	S08A								
	S08B								
	S11								
	S12								
	E01								
	E02								
	E03								
活動斷層震源 (Planar source)	九指坑	CRU	頂部0km, 底部12.5km	特徵地震模式	75°	0.677	1.5 mm/yr	M_c 6.1	
	輪山				80°	0.643	5.2 mm/yr	M_c 6.3	
	大尖山北				85°	0.699	9.9 mm/yr	M_c 6.5	
	碧州				(0.2)	(0.2)	(0.2)	(0.2)	
南部隱沒帶板塊 介面型震源 (Planar source)	T02A	SUB-INTER	頂部13km, 底部25km	特徵地震模式	23°	0.7	4 mm/yr	M_c 7.3	
	T02B				24°		8 mm/yr	M_c 7.5	
	T02C				26°		12 mm/yr	M_c 7.7	
	(0.3)				(0.3)		(0.2)	(0.2)	
南部隱沒帶板塊 內部型震源 (Planar source)	SP1	SUB-INTRA	頂部13km, 底部50km	截切指數模式	37°	0.744	1.206	M_c 7.6	
	SP2				35°		0.824	1.043	M_c 7.7
	SP3				47°		0.924	0.876	M_c 7.8
	(0.3)				(0.3)		(0.165)	(0.165)	(0.2)

圖 5 臺南市 PSHA 參數與模式不確定性之邏輯樹架構示意

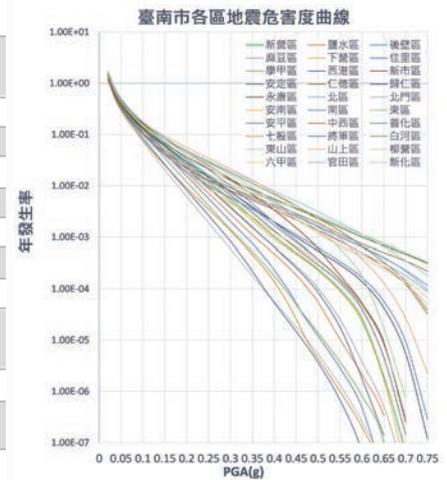


圖 6 臺南市各區 PGA 總危害度曲線圖

2. 土壤液化臨界 PGA 評估

傳統上進行土壤液化分析，多採用透過經驗迴歸公式或圖表，即可評估符合工程尺度需要之土壤液化簡化評估法，如 Seed 法 (186)、JRA 法 (1996)、NCEER 法 (1997)、T-Y 法 (1983)、HBF 法 (2012) 等。

簡化評估法之分析流程係屬正算分析 (forward analysis)，分析時輸入地震力參數 (尖峰地表加速度 PGA、地震規模 M) 及土層特性參數 (如 SPT-N、細料含量 FC、有效覆土應力 σ'_v 等) 於經驗公式後，透過反覆剪應力比 (CSR) 與抗液化剪力強度比 (CRR) 之比較，評估特定規模地震作用下土層是否發生土壤液化 (FL =

CRR / CSR，若 $F_L < 1.0$ 即表示發生土壤液化)。此法雖可快速評估該土層是否發生土壤液化，但究竟現地土層需要確切多少地震力來驅動土壤液化則仍未知。

為瞭解現地土層達土壤液化之地表尖峰加速度門檻值究竟為何，本研究透過反算分析 (backward analysis) 概念，結合自動化分析模組進行計算，為配合自動化反算分析，選擇以日本道路協會 JRA (2017) 簡化評估法作為液化評估判定基準，計算所輸入之 PGA 值是否已達到所設定之液化門檻，若未達到液化門檻則繼續增大 PGA 值直到達到所設定之土壤液化條件，並記錄下此時之 PGA 值，定義為土壤液化臨界 PGA 值。

為避免土層因一薄砂層安全係數 $F_L < 0$ 即判定整層土層發生液化會過於保守，且鑒於傳統使用液化潛能指數 P_L 值表述土壤液化嚴重程度，較無法直觀物理意義之方式。本研究假設整體土層液化沉陷量累積達 30cm 作為上述發生土壤液化危害之設定門檻，以求得臨界 PGA 值（詳圖 7 所示）。假設暫不考慮淺基礎容許沉陷量於不同基礎型式之不同規範要求，先以 Ishihara、Bray and Stewart（2000）針對建物受液化影響之破壞程度分級標準所建議之廣泛損壞或嚴重破壞程度，即建物沉陷量達 30 cm 作為基準。

液化沉陷分析以鑽孔分層為單位，先以 JRA（2017）法評估該鑽孔各砂性土層之液化安全係數 F_L ，而後將該砂性土層之 F_L 對應特定 N_1 值（或相對密度 D_r ）之體積應變曲線後，求得體積應變 ε_v （Ishihara & Yoshimine, 1992），再乘以土層厚度得其沉陷量。重複上述程序，求得該鑽孔各砂性土層之沉陷量，累積加總後即得到該鑽孔土層之液化後地盤沉陷量。以沉陷量作為門檻之反算 PGA 方式可較凸顯土壤液化多以地盤沉陷、乃至於造成建物傾斜等危害為主，較為直觀且較具物理現象，並可根據圖層分布結果初步看出研究範圍內哪些位置在地質先天條件上僅需要較小尖峰地表加速度值即有可能發生土壤液化，而哪些位置即使發生較大規模地震也不易發生土壤液化。

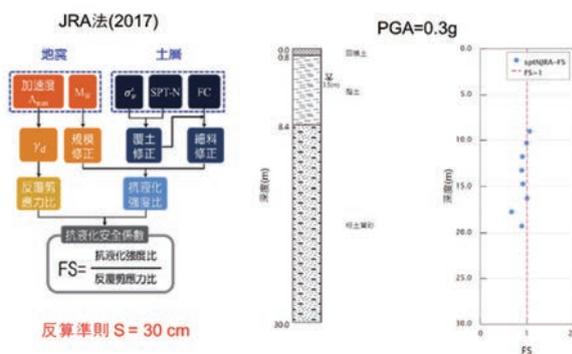


圖 7 土壤液化臨界 PGA 門檻設定 (S=30cm)

3. 危害機率

考量當地震期間若發生土壤液化時，對於研究區域內建築物可能造成之危害，故將危害機率（Hazard）定義為地震引致土壤液化災害之機率。先透過 JRA（2017）法進行土壤液化潛勢評估，並設定地下水位於地表之滿水位保守情境、累積土壤液化沉陷量達 30cm 作為達液化危害之門檻值，反算每個鑽孔發生土壤液化之臨界 PGA，再採用距離倒數權重法（IDW）進行空間內插，計算研究區域範圍內各網格（100 m×100 m）之臨界 PGA 空間分布圖，另將各網格之臨界 PGA 值比對臺南市各行政區中心位置之代表性地震危害度曲線（Hazard curve），基於建物使用年限為 50 年帶入公式 $P = 1 - e^{-\lambda \Delta t}$ ，求得臺南市研究區域內各網格臨界 PGA 所對應之土壤液化發生機率分布圖，如圖 8 所示。

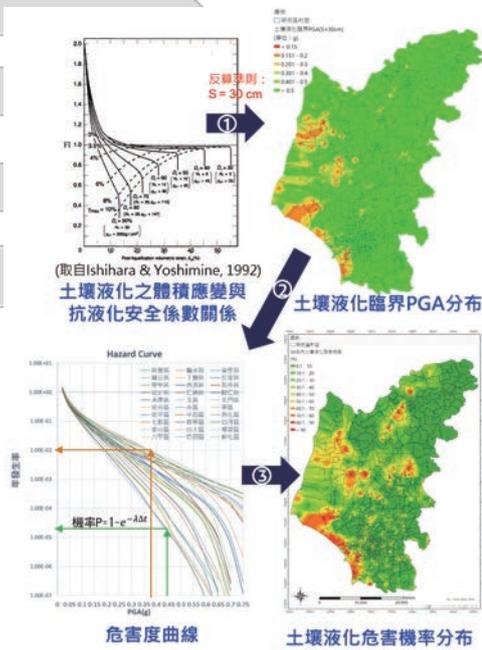


圖 8 危害機率評估示意圖

（三）建物之暴露量評估

暴露量（Exposure）原指暴露於該種危害下的人口或是資產量數（包含建物、經濟性、社會、

環境、歷史文化等)。惟根據歷來國際土壤液化案例經驗顯示，並無直接因土壤液化致命的案例，因此本研究定義之暴露量係指承受土壤液化災害之保全對象，即建物為主。研究先以區域內建物密度（建物面積比）作為暴露量評估之依據。

首先蒐集臺南市研究區域內之建物圖徵，臺南市建物資料為透過內政部國土測繪中心申請所公告之三維建物模型數值資料，惟其資料為三維建物近似化模型 KMZ 格式，故需先透過資料轉換將三維模型移除紋理貼圖轉為灰階立面模型，再透過地理資訊系統 ArcGIS 及 QGIS 軟體轉換為平面建物輪廓圖徵及建物高度與樓層數資訊，資料轉換流程如圖 9 所示。



圖 9 三維建物模型數值資料轉換示意圖
(以臺南孔廟附近為例)

然為求得更精細之計算結果，將研究區域離散為以 100m×100m 之網格為基礎單元，計算單元網格內每一建物所占之網格面積比定義為暴露量。圖 10 以臺南市中西區域隍里其中三個網格為例，分別為 Zone 1、Zone 2 區及 Zone 3。其中，Zone 1 共有 11 個建物區塊及 1 個非建物區塊，非建物區包含空地及道路用地等；Zone 2 共有 7 個建物區塊及 1 個非建物區塊；Zone 3 共有 10 個建物區塊及 1 個非建物區塊，計算區域內每一建物區塊之面積比，以其為暴露量之計算值，如表 2 所示。以此方式則可求得全區各單元網格內所有

建物之暴露量值，並於後與脆弱度相乘積，了解每個網格之危害後果值，以進行後續風險值計算。

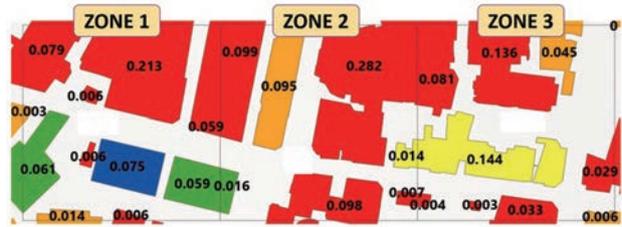


圖 10 單元網格暴露量計算示意圖

表 2 單元網格暴露量計算示意表

Zone1		Zone2		Zone3	
建物單元	暴露量	建物單元	暴露量	建物單元	暴露量
1	0.079	1	0.099	1	0.081
2	0.06	2	0.095	2	0.136
3	0.213	3	0.282	3	0.045
4	0.059	4	0.014	4	0.0000001
5	0.003	5	0.016	5	0.144
6	0.061	6	0.098	6	0.029
7	0.006	7	0.007	7	0.004
8	0.075			8	0.003
9	0.059			9	0.033
10	0.014			10	0.006
11	0.006				

(四) 建物之脆弱度評估

廣義的脆弱度 (Vulnerability) 是一種複雜的多維組合概念，可以涵蓋的組成範圍非常廣泛，包括：建物、經濟、社會結構、人口心理素質、環境變化、文化歷史、政治考量等因素，本質上可視為災害中可能造成的人員傷亡、建築環境損壞程度或是實體經濟損失等，在風險分析中被視為重要的關鍵因素。

研究定義之脆弱度主要以土壤液化發生過程可能造成建築物之潛在損壞為主。由於是以建物為主要評估目標，故實務評估過程係以建物之抗

液化能力作為定義脆弱度之主要評估項目。而建
 物之抗液化能力可從多方面考量，諸如基礎型
 式、基礎深度、地盤改良深度、上部建物覆載、
 建物構造型式、建物年限及不同時空背景下建築
 法規之相關規定（例如民國五十、六十年代舊版
 建築法、臺灣地區重要都市建築附建防空避難設
 備辦法等規定，老舊建物常設置地下室以作為緊
 急避難之用）。透過向內政部營建署申請研究區
 內建物使用執照存根，以了解建物實際之基礎可
 能深度（地下樓層數）、建物構造型式、建物年
 限等相關資訊，進一步推估建物之抗液化能力。

以內政部國土測繪中心公告之三維建物模型
 數值資料轉換出之建物輪廓圖徵及建物高度與樓
 層數資訊顯示（申請資料時間為民國 110 年），

全臺南地區共計 208,218 個建物區塊圖徵，其中
 1-4 樓建物圖徵占比 96%，而 5-6 樓建物圖徵占
 比 3%，顯示臺南地區建物圖徵大多屬於 1-6 樓
 層建物，另透過建物使用執照存根取得之資料，
 可獲得每個建物的地下樓層數，大部分有地下樓
 層之建物多為高樓層之建物，約為 7 層樓以上，
 而少部分 1-6 樓高之建物擁有一層地下層數。綜
 合以上資訊，利用建物樓高及地下室樓層數作為基
 礎資訊進行分級，考量 1 ~ 6 層樓在基礎及上部
 載重條件下之建物脆弱風險程度較高，將其依有
 無地下室再分為 0.8 ~ 0.5 之四個等級，給予較高
 之脆弱度評分，而後較高的樓層數則分為另外五
 個等級，評估其基礎可能型式及上部載重條件給
 予 0.4 ~ 0.1 之評分，如表 3 所示。

表 3 建物樓高及地下樓層數對應脆弱係數

樓層數	1-4		5-6		7-9	10-15	16-20	21-29	> 30
	無地下室	有地下室	無地下室	有地下室					
基礎及上部載重 脆弱係數 (A)	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1

註：脆弱度指標（單位：無因次，介於 0 ~ 1）

此外建物使用執照存根亦有建物發照日期，
 可用以了解該建物之屋齡狀況，在取得相關資料
 連結的建物圖徵中顯示，屋齡約介於新成屋（當
 111 年新建）至 46 年之間。考慮建物之建造年限
 及不同時同背景下之建築法規，如建築物耐震設
 計規範於 1999 年 921 之後提升相關震區的設計地
 震力及於 2003 年 1 月 1 日實施調整的混凝土結構
 設計規範，調整包括箍筋 135 度彎鉤等觀念，以
 加強建物之抗震能力，故參考以上資料以 2003 年
 及老舊建物 30 年限設立三個級數，設定建物屋齡
 脆弱係數，以作為老舊建物之抗液化安全性考量，
 如表 4，考量屋齡超過 30 年之老舊建物脆弱度風
 險程度較高，故將其係數放大 1.2 倍，而 2003 年
 後法規修改，建物之抗震能力增加，相效於其他

年份建物可能之脆弱度風險較小，故縮小其脆弱
 度係數為 0.8。

表 4 建物屋齡脆弱係數

屋齡	2003 年後	2003 年 前 ~ 30 年限	>30 年限
建物屋齡 脆弱係數 (B)	0.8	1.0	1.2

綜合基礎及上部載重脆弱係數及建物屋齡脆
 弱係數之分級方式進行計算，利用計畫區內各建
 物圖徵之樓層數、地下樓層數及屋齡資料推估脆
 弱度指標之空間分布，如表 5 及圖 11 所示。



圖 11 單元網格脆弱度計算示意圖

(五) 土壤液化風險地圖資產製與應用

危害機率圖層係以單元網格(100 m×100 m)呈現土壤液化危害機率之空間分布,而暴露量及脆弱度圖層則是更細緻化以各建物單元為主要計算單元,故圖層運算時,先將暴露量及脆弱度兩者之乘積值,轉換為單元網格(計算範例如表 6 及圖 12 所示)。

再依據風險值之定義,將前述已完成之危害機率圖層乘以暴露量與脆弱度兩者乘積,以獲得土壤液化風險值之空間分布(網格單元圖層)。為方便呈現,依風險值大小加以分級為低、中、高三個等級以獲得最終之土壤液化風險地圖,如

圖 13 所示。

表 5 單元網格脆弱度計算示意表

建物單元	Zone1			Zone2			Zone3				
	(A)	(B)	脆弱度(A*B)	建物單元	(A)	(B)	脆弱度(A*B)	建物單元	(A)	(B)	脆弱度(A*B)
1	0.8	1.2	0.96	1	0.8	1.2	0.96	1	0.8	1.2	0.96
2	0.8	1	0.8	2	0.6	0.8	0.48	2	0.8	1.2	0.96
3	0.8	1.2	0.96	3	0.8	1.2	0.96	3	0.6	0.8	0.4
4	0.8	1.2	0.96	4	0.4	1.2	0.48	4	0.6	1	0.6
5	0.6	1.2	0.72	5	0.3	0.8	0.24	5	0.4	1.2	0.48
6	0.3	0.8	0.24	6	0.8	1.2	0.96	6	0.8	1.2	0.84
7	0.8	0.8	0.56	7	0.8	0.8	0.64	7	0.8	0.8	0.64
8	0.2	0.8	0.16					8	0.8	1	0.8
9	0.3	0.8	0.24					9	0.8	0.8	0.64
10	0.6	0.8	0.4					10	0.6	12	7.2
11	0.8	1.2	0.96								



圖 12 單元網格暴露量與脆弱度計算示意圖

分級方式採用 ArcGIS 內建之自然斷點法、分位法、幾何間隔法及相等間隔法四種分級方式進行預先分級,並依其分級結果對應實際發生液化區域進行調整,最後採用風險值小於 0.05 為低風險分級,其意義為在 50 年期限內因土壤液化造成 30 公分沉陷量而引至建物可能受損之機率小於 5%,而中級為風險值介於 0.05 ~ 0.15 之間,其意指為在 50 年期限內因土壤液化造成 30 公分沉陷量而引至建物可能受損之機率於 5% ~ 15% 之間,高風險級則為風險值 >0.15,為 50 年期限內因土壤液化造成 30 公分沉陷量而引至建物可能受損之機率大於 15%。

表 6 單元網格暴露量與脆弱度計算示意表

Zone1				Zone2				Zone3			
建物單元	暴露量	脆弱度	乘積	建物單元	暴露量	脆弱度	乘積	建物單元	暴露量	脆弱度	乘積
1	0.079	0.96	0.076	1	0.099	0.96	0.095	1	0.081	0.96	0.078
2	0.006	0.8	0.005	2	0.095	0.48	0.045	2	0.136	0.96	0.131
3	0.213	0.96	0.204	3	0.282	0.96	0.270	3	0.045	0.4	0.018
4	0.059	0.96	0.057	4	0.014	0.48	0.006	4	0.000	0.6	0.000
5	0.003	0.72	0.002	5	0.016	0.24	0.004	5	0.144	0.48	0.069
6	0.061	0.24	0.015	6	0.098	0.96	0.094	6	0.029	0.84	0.024
7	0.006	0.56	0.003	7	0.007	0.64	0.005	7	0.004	0.64	0.003
8	0.075	0.16	0.012			Σ	0.5201	8	0.003	0.8	0.002
9	0.059	0.24	0.014					9	0.033	0.64	0.021
10	0.014	0.4	0.006					10	0.006	7.2	0.040
11	0.006	0.96	0.006							Σ	0.3863
		Σ	0.3983								

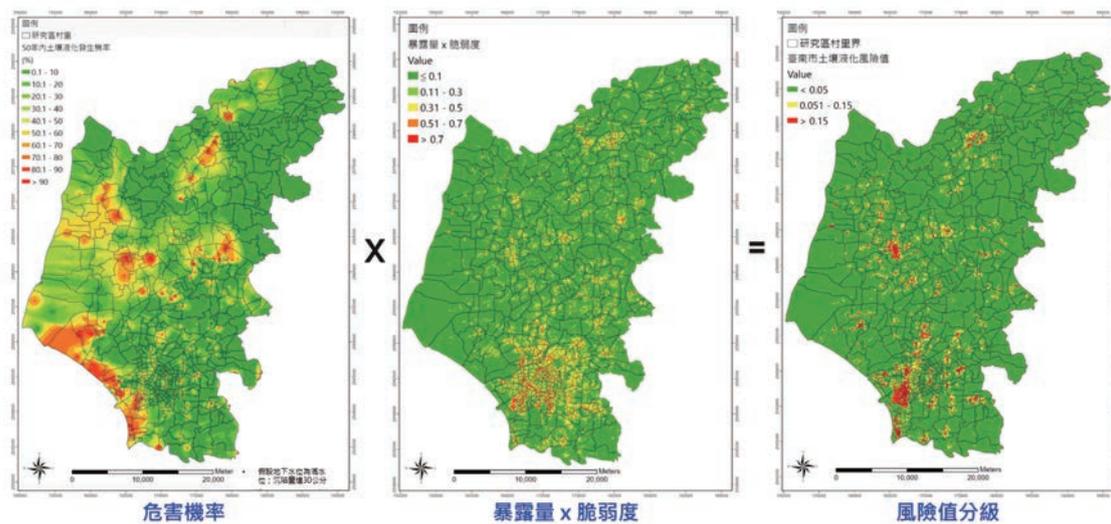


圖 13 臺南市土壤液化風險計算分級圖

相較於一般認知土壤液化多發生在沿海潟湖、砂洲或砂丘等砂性土層分布較廣厚之地區，主要差異在於本研究產製之風險圖除了考量素地發生土壤液化危害機率高低外，主要評估對象係為建物，綜合考量暴露量與脆弱度後，故空地較多的網格之風險值會普遍被稀釋而降低。

四、成果案例比對

為了解本研究方法之準確性及評估分級方式之適用性，針對曾經發生過土壤液化災害事件案

例進行比對。臺南市曾於 2010 年 3 月 4 日於桃源區及茂林區交界處發生芮氏規模 6.4 的地震，造成新化區多處區域發生土壤液化災害；而於 2016 年 2 月 6 日發生於高雄市美濃地區芮氏規模 6.6 的地震，全臺南市震度均在五級以上，新化更達到七級，於安南區、北區、中西區、新市區及新化區造成嚴重的土壤液化現象，安南區惠安德一帶、中西區文和街、新市區三民街一帶及永康區大灣國小等地均有街廓房屋不均勻沉陷、傾斜、屋內屋外噴水、噴砂等災害。因此，此處以安南區溪頂里及永康區東灣里兩個村里進行風險分析

結果與實際發生液化區域比對，以了解分析及分級結果之合理程度。

(一) 安南區溪頂里

安南區溪頂里位於曾文溪以南，該里北側為嘉南大圳排水線，南側為鹽水溪。依據臺南市政府水利局網頁公布資料，0206地震造成溪頂里多處受損，影響區域包含郡安路四段 253 巷部分區域、聖安街、賢安街、德安街、北安路二段 32 巷、府安路四段 151 巷至 185 巷之間及惠安街至惠安德 111 巷之間，受災影響範圍占全里之建物範圍 2/3 以上。

將其受災範圍繪至於溪頂里風險圖上，如圖 14 所示，可看出郡安路四段 253 巷部分區域、聖安街、賢安街、德安街、北安路二段 32 巷及惠安街至惠安德 111 巷之間均為高風險區，而府安路四段 151 巷至 185 巷之間範圍則部分位在高風險區域，由結果看來該村里之風險分析結果與實際發生液化區域有良好對應。

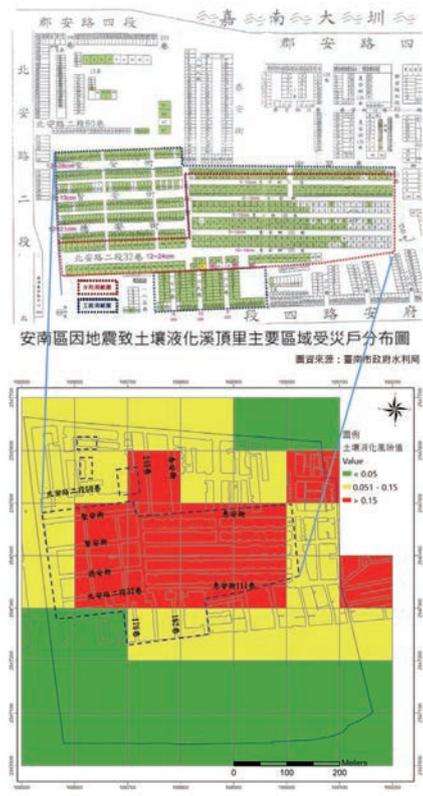


圖 14 臺南市溪頂里土壤液化風險分級與實際液化案例比對

(二) 永康區東灣里

永康區東灣里位於市道 177 甲線旁為一長形村里，里內建物多集中於大灣東路北側，區內有一大灣國小，在 0206 地震中亦發生多處液化災害。依據「中華民國 56 屆中小學科學展覽會作品說明書 - 再度甦醒的大地」之相關資料顯示，在東灣里的大灣國小校舍及操場多處發生液化噴砂現象，另於大灣路 488 號至 494 巷之間亦造成噴砂、地下水湧出並有多處住宅產生下陷傾斜。

將其受災範圍對應於永康區東灣里風險圖上，如圖 15 所示，可看出東灣里在建物較密集大灣一街以北大多為高風險區，而大灣一街與大灣東路之間則多為中風險區，而大灣國小活動中心範圍及大灣路 488 號至 494 巷間即為分析結果高風險區域，由結果看來該村里之風險分析結果與實際發生液化區域有良好對應。

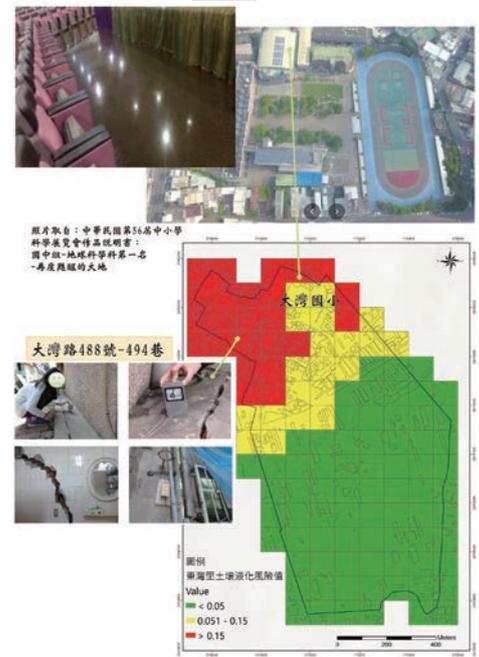


圖 15 臺南市東灣里土壤液化風險分級與實際液化案例比對

五、結論與建議

(一) 本研究彙整中央地質調查所鑽探資料庫既有鑽探與試驗之大數據資料為基礎，有別於傳統土壤液化潛評估，採用機率式地震危害度分析(PSHA)，考量區域震源、隱沒帶震源及斷層震源之發震機率，並基於JRA(2017)評估法，透過自行開發之土壤化自動化分析模組，反算研究區內所有液化分析鑽孔達累積沉陷量30cm之土壤液化臨界PGA，透過地震危害度曲線獲得危害機；再以即有建築物作為風險評估目標，結合建物暴露量及脆弱度等因素，最終建立研究區域之土壤液化風險圖。

(二) 以臺南市為研究區域產製出土壤液化風險地圖，並針對2016年2月6日地震造成液化發生而使得建物造成災害之安南區溪頂里及永康區東灣里進行比對，由比對結果得知風險分析結果與實際生液化區有良好的對應關係。

(三) 本研究初步以半機率式土壤液化評估法，以機率式地震危害度分析結果合定率式土壤液化評估法，進行土壤液化風險分析，建議後續可針對土壤液化評估方法及參數不確定性進行研究，以使成果臻完善。

(四) 在既有建物之脆弱度分級方面，本研究初步以專家評分法，利用樓高、地下樓層數及屋齡等相關資訊進行專家評分法進行評級，較具假設及不確定性，此部分後續將對建物屬性資料進行更詳細之蒐集，或可進一步針對不同種類建物進行更詳細的脆弱度曲線建立，以加強該項目之精進。

誌謝

感謝經濟部地質調查及礦業管理中心提供計畫經費得使本研究順利完成，特此誌謝。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研究相關同仁，亦一併感謝。

參考文獻

- Ellsworth, W.L., Matthews, M.V., Nadeau, R.M., Nishenko, S.P., Reasenber, P.A., and Simpson, R.W. (1999), "A physically-based earthquake recurrence model for estimation of long-term earthquake probabilities", U. S. Geological Survey, OFR 99-522, 23p.
- Ishihara K. and Yoshimine M. (1992), "Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Liquefaction During Earthquakes", Soils and Foundations, Vol. 32, Issue 1, pp. 173-188.
- Kagan, Y.Y., and Knopoff, L. (1987), "Random stress and earthquake statistics; time dependence", Geophys. J. R. Astr. Soc., 88, pp.723-731.
- Lemon & Jones (2003), "Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections", Computers & Geosciences, 29, pp. 547-555.
- Lin, P.-S., C.-T. Lee, C.-T. Cheng, and C.-H. Sung (2011), "Response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes in Taiwan", Engineering Geology, 121(3-4), pp.150-164, doi:10.1016/j.enggeo.2011.04.019.
- Wells, D. L., and Coppersmith, K.J. (1994), "New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement", Bull. Seism. Soc. Am., 84, pp. 974-1002.
- Yen, Y. T., and Ma, K. F. (2011), "Source-Scaling Relationship for M 4.6–8.9 Earthquakes, Specifically for Earthquakes in the Collision Zone of Taiwan", Bull. Seismo. Soc. Am., 101(2), pp. 464-481.
- Youngs, R.R., and Coppersmith, K.J. (1985), "Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates", Bull. Seism. Soc. Am., 75, pp. 939-964.
- 日本道路協會(JRA)(2017)，新道路格示方書同解説，V耐震設計篇。
- 何春蓀(1986)，臺灣地質概論(第二版)，經濟部中央地質調查所。
- 林啟文、劉彥求、周稟珊、林燕慧(2021)，「臺灣活動斷層調查的近期發展」，經濟部中央地質調查所彙刊，第34號，第1-40頁。
- 林朝榮(1972)，臺南地方之第四紀地層，經濟部礦業研究所出版。
- 邱奕洲、許硯淇、蔡敏暄，(2015)，再度甦醒的大地。中華民國第5-6屆中小學科學展覽會作品說明書，桃園。

- 陳景文、盧之偉（2017），「從 0206 美濃地震在臺南地區造成之土壤液化災害談起」，技師期刊，46-52。
- 陳于高、劉聰桂等（1994），臺南層年代問題的檢討，中央地質調查所刊，第八號，第 171-180 頁。
- 陳培源（2005），臺灣地質，科技圖書出版社。
- 吳瑞賢（2012），水土資源利用管理及災害風險管理方法與系統之研究 - 水土資源利用管理及災害風險管理方法與系統之研究：水土災害預警與風險評估機制與系統之研究（I），行政院國家科學委員會專題研究計畫（NSC 100-2621-M-008-006）。
- 財團法人中興工程顧問社（2022），土壤液化風險地圖產製與監測場址建置（1/6），經濟部中央地質調查所 111 年度委託計畫正式報告書，共 180 頁。
- 張瑞津、石再添、陳翰霖（1998），台灣西南部嘉南平原的海岸變遷研究，國立臺灣師範大學地理研究報告，第 28 期，第 83-105 頁。
- 黃俊鴻、楊志文（2003），「以集集地震案例探討現有 SPT-N 液化評估方法之適用性」，土工技術，第 98 期，第 79-90 頁。
- 經濟部中央地質調查所（2011），朴子、佳里、臺南（臺灣地質圖幅及說明書 1/50,000）。
- 顏銀桐、徐濬德、張玉焱、李易叡、謝寶珊、謝銘哲、莊怡蓉（2020），臺灣活動斷層潛勢圖精進與震源構造特性評估，經濟部中央地質調查所 109 年度委託技術服務執行總結報告書，共 388 頁。

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) 輪進資料、(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。

「跨山渡河無畏懼，探深納淺我都行！
橫向東西縱南北，惟有中興深地質！」

我們是一群擁有十年以上山區及平原區地下水資源調查經驗的探勘者，也是觀遍全台崩塌地影像的鑑識家，未來將整合創新科技ABCD*，邁向深地質科技跨領域結合研究！

* A (Artificial Intelligence), B (Big data), C (Cloud computing), D (Domain Knowledge)



深地質研究 專案計畫

▼ 專業服務內容

I. 進階型孔內水文地質調查

高精度地下水流速 / 深層水化學特性調查 / 單(跨)孔示蹤劑試驗

II. 智慧崩塌地(坡地)調查分析技術

空拍影像之PIV分析 / UAV鏡頭調查及位態分析
多尺度地球物理 / 地球化學觀測系統整合規劃
智慧山崩目錄判釋與檢核技術

III. 數值模式分析

裂隙岩體之複合DFN-EPM模型建立與分析
地球科學領域之場址描述模型建置

IV. 高階岩石力學試驗 (Carried out by MTS Model 815 System)

高強度(460T)單壓試驗 / 高圍壓(80MPa) 三軸試驗

▼ 部門重要業績

臺灣山區及平原補注敏感區之地下水資源調查研究
區域地質描述模型建置及評估模式應用
山崩巨量資料應用及智慧動態山崩模式發展
潛在大規模崩塌調查、監測及規劃

▼ 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
Email：agr-proj@sinotech.org.tw

廣告

誠信 創新 品質 服務

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

二氧化碳地質封存之地震監測

顏元奕 * 陳俊德 ** 顏銀桐 ***

摘 要

近年來，全球均致力於能源轉型及淨零碳排目標，期望藉由減少二氧化碳的排放來減緩全球暖化趨勢。為此，臺灣政府積極推動再生能源，然受限於臺灣的天然環境，燃煤、燃氣等火力發電仍占據極大的能源供應比例。透過化學或物理手段收集發電廠產生二氧化碳之捕捉及封存技術 (Carbon Capture and Storage, CCS)，將其以超臨界狀態灌入數百公尺至數公里深之地層，達到永久與大氣隔離之封存目標，成為一項重要的減碳關鍵。但由於臺灣地質構造複雜，地震活動相當頻繁，如何確保二氧化碳的封存完整性以及降低二氧化碳誘發地震的風險，均是未來此項技術面對的重要難題。本文整理各國 CCS 之示範場或商業運轉計畫的地震監測手法，並比較各計畫執行後的地震發生行為，將計畫內容的地震監控分成「地震事件的監控及分析」及「可能誘發地震之風險監控」兩大部分進行著墨，提供臺灣碳封存之發展研究參酌。

關鍵字：CCS、地質封存、地震監控、誘發地震

一、前 言

全球暖化是當前全球關注的重要議題之一，其中二氧化碳排放量為主要貢獻因子。為了減少二氧化碳排放，國際社會已在 2015 年簽訂了《巴黎協定》；除期望全球溫度增長不得超過 2°C，並控制升溫幅度在 1.5°C 以內。臺灣政府也在 2021 年宣示，2050 年須達到淨零排放的目標，並於 2022 年公布了「臺灣 2050 淨零轉型階段目標及行動」；訂定了減碳的目標和相應的政策。

碳捕捉及封存技術 (CCS) 是一項關鍵的減碳技術。目前最普遍的方式是透過「燃燒後捕獲」的方式將發電廠產生的二氧化碳收集，並透

過槽車或管道輸送到適當的地點進行地質封存，達到與大氣隔離的目的，本文探討之 CCS 計畫不包含藉由將二氧化碳灌注至地下石油或天然氣蘊藏區域，降低石油或天然氣黏滯力達到強化開採效率之 EOR (Enhanced Oil Recovery) 及 EGR (Enhanced Gas Recovery) 技術。臺灣位於地震活躍的環太平洋火山帶上，地震頻繁發生，其分布範圍遍布全島 (圖 1)。經濟部地質調查及礦業管理中心公布已知活動斷層有 36 條 (圖 2)，而由交通部中央氣象署資料顯示，臺灣近十年每年約有三萬五千多次的地震事件，其中有 60-190 次顯著有感地震，規模六以上的地震更每年平均發生 4.9 次。國外不乏因流體而誘發地震的案例。

* 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正研究員

*** 中興工程顧問社防災科技研究中心地震災害評估組組長

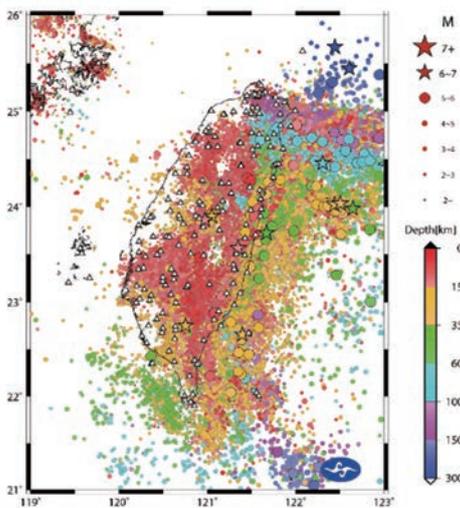
因此，地震活動對於二氧化碳地質封存的影響以及灌注二氧化碳是否會誘發地震等相關議題極為重要。若能在碳捕捉及封存技術的發展中，先行考慮到地震災害的風險，確保其可靠性和安全性，同時要加強監測和管理措施，則得以降低地震災害對於碳捕捉及封存技術的影響。本文旨在比較世界各國的 CCS 先導或商轉計畫所採用的地震監控方法，期望臺灣能借鏡獲得最合適的監測方案。

二、國內外案例探討

要將二氧化碳穩定的封存在地質構造中，最適當的方式是將二氧化碳保持在超臨界流體狀態，在溫度 304.1K（約 31°C）以上、壓力大於 7.38MPa 時，二氧化碳會同時具有氣體狀態般的可壓縮性，也會具有液體般的流動性（Poling et al., 2001），是最適合封存的狀態，為此須將二氧化碳注入 800 m 以下的地層來達到合適的溫壓條件。然而，過去數十年的研究表明，人為將液體注入地下會有誘發地震的風險，因為這些深井的流體可能會流入附近活躍斷層的孔隙內，增加斷層孔隙壓並降低摩擦力導致破裂的發生，並將此區地層累積的能量以地震方式釋放。由庫倫破壞公式（Mohr-Coulomb failure envelope）可以簡易推估斷層的破裂條件：

$$\tau > \mu (\sigma_n - P) + \tau_0$$

τ 是斷層面上的剪切應力（shear stress）， μ 是摩擦係數， σ_n 是作用在斷層面上的正向應力（normal stress）， P 是孔隙壓， τ_0 是斷層面上的凝聚力。當液體流入斷層裂隙時，區域的孔隙壓 P 會增加，導致作用在斷層面上的正向應力被抵銷，使摩擦力降低，當摩擦力與岩石凝聚力的總和小於作用於此區的剪切應力時，斷層便會破裂產生地震，而這些滑動行為也可能進而改變周圍區域的應力，使周圍斷層也發生破裂行為。該現象早在 1960 年代科羅拉多州的丹佛市（Denver）便有注水觸發地震的紀錄（McGarr et al., 2002）。此區域在過去幾乎沒有任何有感地震的紀錄，故美國陸軍的兵工廠為處置化學廢液，將廢液注入一口三公里的深井，卻在 1961 年至 1966 年灌注期間引發 13 次規模大於 4.0 之地震，其誘發的地震規模最高達到了 4.85，且 1967 年停止注水後，仍發生最大規模達 5.2 的地



（資料來源：中央氣象署網站）

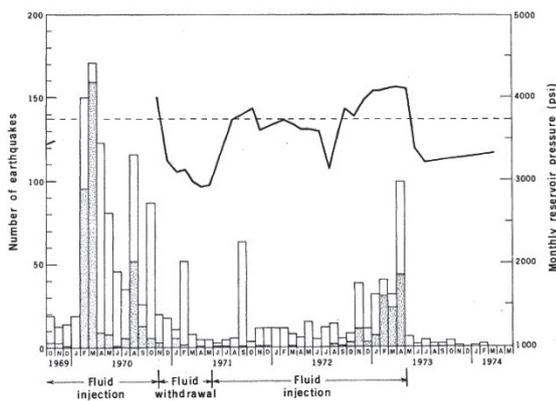
圖 1 臺灣地區 2015 年地震分布圖



（資料來源：經濟部地質調查及礦業管理中心網站）

圖 2 2021 年臺灣活動斷層分布圖

震，而後該區域的地震頻率也隨之減少。為此，Raleigh et al. (1976) 在科羅拉多州西部的蘭芝利油田 (Rangely oil field) 進行實驗測試，透過改變注水的壓力，比較注入井井底一公里內地震事件的數量變化 (圖 3)，發現地震主要發生時間與注水壓力 (圖 3 黑色實線) 超過預期岩層破裂壓力 (圖 3 灰色虛線) 的時間高度相關。此外，在美國特立尼達 / 拉頓 (Trinidad/Raton) 地區也因在煤氣層注水引發規模 5.3 的地震 (Zoback, 2012)。這些事實表明，向地層下方注入流體會增加地震風險。如果在打算封存二氧化碳數百年甚至上千年的地層中，發生了一定規模以上的地震，可能會有導致洩漏危害的風險。



(Raleigh et al., 1976)

註：灰色實心長條為發生在注井一公里內地震事件。

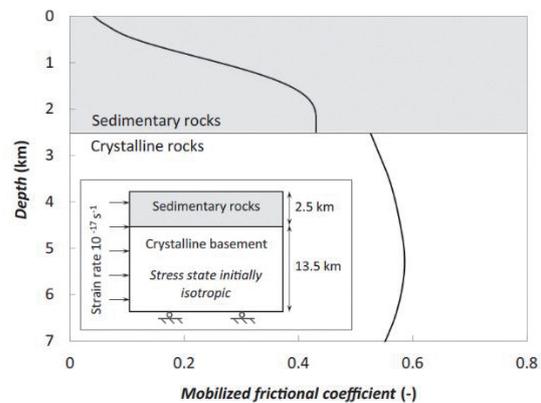
圖 3 注水壓力變化與地震誘發數量關係實驗圖

(一) 液體注入誘發地震之風險

液體注入地層導致誘發地震的事件層出不窮，Zoback & Gorelick (2012) 也認為二氧化碳誘發地震的風險不容忽視。然而並非將二氧化碳注入地底儲藏層，就一定會導致地層的破裂，造成二氧化碳外洩。Global CCS Institute (2022) 的報告中提到，在 2022 年 9 月中旬時，各國運行中的 30 個計畫已將每年實際總灌注量提高到了 42.5 百萬噸 (Mtpa)。而截至目前為止 (2023 年

10 月) 各國的 CCS 計畫均未引發任何有感地震。就算是在阿爾及利亞的因薩拉 (In Salah)，因注入二氧化碳導致地底累積巨大的壓力，所引發的地震規模最大也僅達 1.7。

Vilarrasa & Carrera (2015) 認為沉積岩層在封存二氧化碳時不太可能受到過度的壓力。他們建立模型進行實驗，假設灌注區域位於板塊內部，上層為 2.5 km 厚的沉積岩層，下方到 16 km 深為結晶岩，兩者最初的應力方向是各向均同性的，代表上方沉積岩層與下方結晶層的磨擦係數 (friction coefficient) 為 0。此時增加一個典型的板塊構造應變速率 10^{-1} s^{-1} ，如圖 4 所示，當 600 萬年過後結晶層累積的壓力遠大於沉積層，且約 5 至 6 km 深的位置累積到接近臨界應力 ($\mu = 0.6$)，而沉積岩則由於較為鬆軟所以累積較小的應力 ($\mu = 0.4$)。這一項實驗結果與現今觀測到的板塊內部地震 (intraplate seismic) 發生率較低的結果一致，且最大累積應力的地方也與現今許多板塊內部地震發生的區域極為相似，例如中國海城、希臘塞薩洛尼基 (Thessaloniki)、猶他州漢塞爾谷 (Hansel Valley)、愛達荷州的皮卡特洛山谷 (Pocatello Valley)、加州的 Coso 地熱田、猶他州的加利西亞 (Galicia) 及加州的聖安地列斯斷層 (San Andreas Fault) 邊界。



(Vilarrasa & Carrera, 2015)

圖 4 不同岩層之累積應力實驗

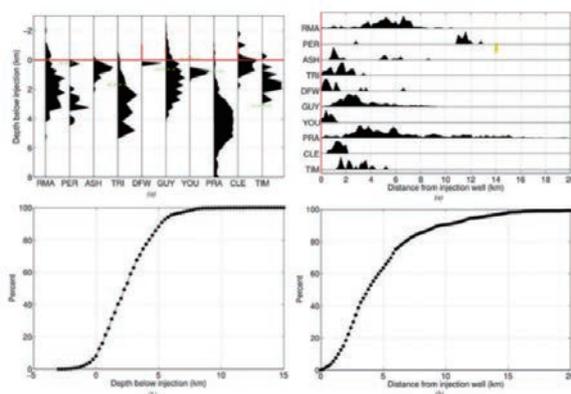
沉積岩層沒有受到嚴重壓力的證據似乎與過往注水誘發大地震的案例互相矛盾，但實際上這些地震的定位結果顯示，是在嚴重受壓的結晶基底層被觸發，而非在注入廢水的沉積層中。廢水被注入沉積岩層導致了其下結晶基底的斷層增壓，進而誘發了斷層的破裂。例如阿肯色州的 Guy 和 Greenbrier 地震序列，廢水被注入 3 km 深的 Ozark 含水層，並滲漏到了更深的斷層當中，誘發了 4 次規模 3.9 以上的地震，最大規模高達 4.7。表 1 顯示了過去 50 年間因注水引發的較大規模事件，各計畫的注水及地震深度位置則如圖

5 左所示，可以發現如 Vilarrasa & Carrera (2015) 所描述，被誘發的地震事件主要集中在注水層的下方，且如果將各事件之震源與注入井進行水平距離的排序 (圖 5 右)，超過 99% 的地震事件集中在注水井 20 公里的範圍內 (Verdon, 2014)，而絕大多數的誘發地震事件發生在注入井的 5 公里範圍內，代表隨著離注入井距離越遠，受液體壓力導致破裂的可能性越低。因此未來在 CCS 計畫中若能對壓力、流量及二氧化碳的擴散情形進行即時、持續監測，將有助於監控地震觸發的行為。

表 1 各國注水計畫誘發地震目錄

ID	計畫	注入時間	最大規模	注入體積 (× 10 ⁵ m ³)	注入速率 (m ³ /month)	參考來源
RMA	Rocky mountain arsenal, CO	1961-1968	5.3	6.25	34000	Major & Simon (1968), Hsieh & Bredehoft (1981)
PER	Perry, OH	1975-1986	5.0	13.3	11000	Nicholson et al. (1988), Ahmad & Smith (1988)
ASH	Ashtabula, OH	1987-1994	4.3	3.4	5000	Seeber et al. (2004)
TRI	Trinidad, CO/NM	1988-	4.6	4	30000	Shirley (2001), Meremonte et al. (2002)
DFW	Dallas-Forth Worth, TX	2008-2009	3.3	3.5	52000	Frohlich et al. (2010)
GUY	Guy-Greenbrier, AR	2010-2011	4.7	4.6	95000	Horton (2012)
YOU	Youngstown, OH	2010-2011	4.0	0.8	10000	Ohio Department of Natural Resources (2012), Kim (2013)
PRA	Prague, OK	1993-2011	5.7	1.5	1400	Keranen et al. (2013)
PDX	Paradox Basin, CO	1991-	4.3	27	60000	Ake et al. (2005)
CLE	Cleburne, TX	2005-2010	2.9	28	54000	Justinic et al. (2013)
TIM	Timpson, TX	2006-2013	4.8	39	45000	Frohlich et al. (2014)

備註：彙整自 Verdon, 2014



(Verdon, 2014)

註：左圖為注入位置與誘發地震深度之關係；右圖為注入位置與誘發地震水平距離之關係圖。

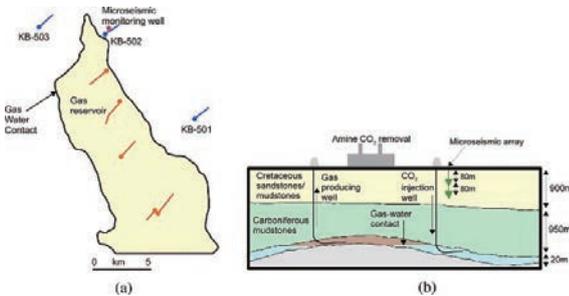
圖 5 近 50 年流體誘發地震位置關係圖

(二) 各國 CCS 計畫的地震監控

1. 阿爾及利亞因薩拉 (In Salah) CCS 計畫

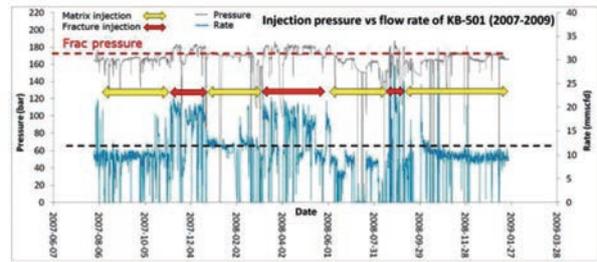
位於阿爾及利亞中部的 In Salah CCS 計畫是世界上第一個陸上純粹用於二氧化碳捕集與封存的先導計畫，將阿爾及利亞北部的三座天然氣田 -Tegentour、Reg 與 Krechba 產生的二氧化碳運輸至 In Salah 的 Krechba 天然氣田進行地下存放。第一階段於 2004 年 8 月開始營運，每天約有 140 萬立方公尺的二氧化碳由三口灌注井 (KB-501、502 及 503) 注入到 Krechba 地底的低滲透度砂岩，並於 2011 年 6 月結束灌注，累

積注入達 3.8 百萬噸。而針對不同的外洩風險，In Salah CCS 計畫擬定十項不同的監控手段：(1) 注入井井口及井底壓力及流速變化監測；(2) 全氟碳化物示蹤劑 (Perfluorocarbon tracers) 追蹤可能外洩之二氧化碳來源；(3) 震測成像；(4) 儲藏區域淺部含水層地下水監測；(5) 儲藏區域地表土壤氣體採樣；(6) 注入井周圍環狀氣體監測；(7) 微震監測；(8) 重力儀監測；(9) 傾斜儀監測；(10) 衛星干涉合成孔徑雷達 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)。而地震監測部分，該計畫設置一口 500 m 深的微震觀測井，於 30 至 500 m 間每 10 m 佈放一個可記錄及偵測地震的三分量地震感測器 (geophone)，其中六個與地面記錄器相連。然而在 2011 年 6 月檢測時，只有 80 m 及 160 m 深的 geophone 具有可靠的數據 (圖 6)，且僅有 80 m 深的可以準確修正儀器在井下旋轉的方向。但在僅有一個測站可用的情況下，仍然在 2010 年偵測到了超過 1500 起微震事件 (Oye et al., 2013)。且地震發生的時間及二氧化碳注入壓力及速率變化具有高度相關性，當壓力超過了臨界壓力，地震活動率便會大幅提升 (圖 7)。而使用單站 P-S 波到時差及極化分析定位也顯示這些事件主要分布在二氧化碳灌注的最大應力方向，故認為此區的微地震事件是由二氧化碳灌注所誘發 (Oye et al., 2013; Stork et al., 2015)。



(Stork et al., 2015)

圖 6 In Salah 的微震監測陣列及觀測井位置圖



(Oye et al., 2013)

註：藍線代表注入速率，灰線為壓力，紅、黃色箭頭分別標示有、無誘發地震事件時段。

圖 7 KB-501 注入率和注入壓力的關係圖

2. 美國伊利諾伊州迪凱特 (Decatur) CCS 計畫

伊利諾伊州的 CCS 示範計畫是美國第一個大規模 CCS 的地下鹽水層封存示範計畫，旨在以商業規模評估和測試 CCS 技術。該計畫分成兩個階段，第一階段是伊利諾伊州盆地—迪凱特計畫 (Illinois Basin-Decatur Project, IDBP)，由伊利諾伊州地質調查所 (Illinois State Geological Survey, ISGS) 領導。在 Archer Daniels Midland Company (ADM) 的玉米加工廠附近鑽探了四口井 (圖 8)，包含一口注入井 (CCS1)、兩口監測井 (VW1、VW2) 及一口地球物理觀測井 (GM1)。於 2011 年 11 月 17 日開始將工廠產生的二氧化碳注入 2.1 km 深 460 m 厚的西蒙山砂岩 (Mount Simon Sandstone) 中，在為期三年的時間內累積注入了 999,215 噸的超臨界二氧化碳，並於 2021 年 5 月 19 日宣告計畫的成功。

第二階段則是 2014 年 9 月後由 ADM 管理的伊利諾伊州工業 CCS 計畫 (Illinois Industrial CCS project, IL-ICCS)，新增了兩口鑽井，分別為原先 CCS1 東北方的 CCS2 注入井，以及相鄰其側的第二口地球物理觀測井 (GM2) (圖 8)。從第二口注入井 (CCS2) 每天注入約 3000 噸，至 2021 年 5 月時兩個階段已經累積封存 340 萬噸二氧化碳。

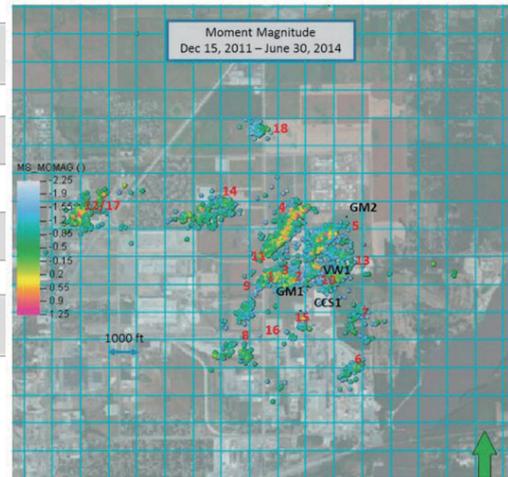


(Coueslan et al., 2014)

圖 8 伊利諾伊州迪凱特 CCS 計畫的航空照片

為了此項計畫的安全，ISGS 及 ADM 提出了一系列的監測、確認及審核計畫 (monitoring, verification, and accounting, MVA)。包含以下五種方法：(1) 異時儲層飽和度工具 (time-lapse reservoir saturation tool, time-lapse RST) 用於估計注入井附近的二氧化碳飽和度；(2) 儲藏層上方、內部及下方的連續壓力和溫度測量；(3) 異時三維垂直地震剖面 (time-lapse vertical seismic profile, time-lapse VSP) 調查；(4) 微震監測；(5) 深部地層流體取樣。而為了進行地震監測，

在 VW1 井的 1750 m 處和 1870 m 處裝有兩個地震儀，並在 GM1 井中布置了一個由 31 個三分量 geophone 組成的陣列。深度分布在 42 至 1050 m 之間，其目的在於 VSP 的測量及微震監測。但因數據解析力不足，2013 年 9 月又在 VW2 部屬了 5 個 geophone (深度在 1875 至 2118 m 間)。注入期間成功定位了約 3400 起事件 (圖 9)，占總事件約 50%。主要發生在剛開始注入的期間，於 2012 年 1 月達到短暫高峰 (每天約 750 起事件)，隨後事件數目便急遽下滑，而有時也會因注入中斷引發短時間的數量增長。微震規模展現相似的模式，最大規模的事件發生在注入初期，隨著注入時間的推移逐漸下降，在注入三年期滿後平均規模只剩下 -0.89，期間也沒有發生任何的有感地震。



(Coueslan et al., 2014)

圖 9 2011/12/15-2014/06/30 微震事件分布圖

3. 加拿大奎斯特 (Quest) CCS 計畫

加拿大殼牌石油公司 (Shell Canada)、加拿大雪佛龍石油公司 (Chevron Canada) 以及馬拉松石油公司 (Marathon Oil Sands) 為了降低因油砂開採而產生的二氧化碳，共同於 2009 年提出 Shell Quest 計畫。此計畫目標每年捕集、封存 120 萬噸二氧化碳，並成功運行 25 年，預

計至少封存 2500 萬噸二氧化碳。該計畫位於加拿大阿爾伯塔省 (Alberta) 的薩斯喀徹溫堡 (Fort Saskatchewan) (圖 10)，2015 年 8 月 23 日從三口注入井 (SCL THORH 5-35-59-21、SCL RADWAY 8-19-59-20 及 SCL RADWAY 7-11-59-20) 中的兩口正式開始注入二氧化碳到地下約 2 km 深的寒武紀砂岩層 (Basal Cambrian Sands)。每口注入井旁均搭配一口深層監測井 (約 1.7 km 深) 及一口淺層地下水監測井 (< 0.2 km 深)。每小時注入率約為 70 噸二氧化碳，每次使用兩口井合計注入約 150 噸/小時。此區的地質構造平緩且安靜，沒有明顯的地質活動。但為了監控誘發地震的風險，Quest 計畫提出了兩套監控措施：

(1) 主動技術監測 (Proactive technical monitoring, PTM)；(2) 基於例外情況的監測 (Exception based surveillance, EBS)。

Quest 計畫中的井下陣列是一個半永久性的設施，由 8 個三分量 15 Hz 的 geophone 佈放在 1250 至 1640 m 的深度所組成 (圖 11)。此區在灌注前無任何地震事件被偵測到，第一個可定位事件發生在開始灌注後十個月。而自 2017 年 1 月以後，井下陣列每年約可以偵測到 120 起事件，至 2020 年 12 月 31 日時已經偵測到 486 起可供定位的事件，平均的規模為 -0.7，最大規模為 0.8。定位結果顯示事件均發生在儲藏層下方的基底岩層，且沒有對儲藏層密封性造成任何的傷害。然而雖然是在 CCS 計畫啟動後才觀察到地震的活動，但這些可能的誘發地震事件並未觀察到與二氧化碳注入參數 (速率、壓力及體積) 的直接關聯。且兩口井注入壓力均低於地層的破裂壓力，因此地震的誘發與注入間的因果關係仍有許多尚待釐清的問題。

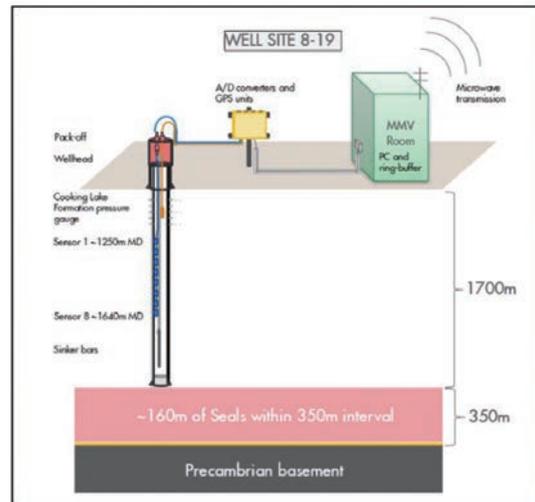


(Rock et al., 2017)

圖 10 Quest 設施分布圖

其中 PTM 微震監測的流程如下：

- (1) 8 個三分量 geophone 組成井下陣列 (架設於三口注入井的中心位置)
 - (2) STA/LTA 進行前一天完整數據的掃描
 - (3) 清晰的 P、S 波到時被定義為可定位事件
 - (4) 偵測到的事件發送給 EBS 系統進行分析
- EBS 的流程如下：
- (1) 檢視數據是否成功接收或有無遺失缺損
 - (2) 檢查是否記錄了可定位的事件
 - (3) 將事件的定位及規模與過去事件進行比較



(Harvey et al., 2021)

圖 11 Quest 計畫微震觀測陣列佈放示意圖

(三) CCS 計畫誘發地震之風險比較

根據 Global CCS Institute 2022 年的報告，截至 2022 年 9 月全球正在開發的 CCS 計畫，其捕獲及封存量已經高達每年 42.5 百萬噸 (Mtpa)，然而因 CCS 誘發地震的案例仍屈指可數，並且尚

未有任何有感地震的紀錄，但誘發地震的潛在風險仍然需要謹慎地探討評估。為討論 CCS 誘發地震的風險，Streibel et al. (2014) 比較了 Ketzin CO₂ SINK Project 及 Illinois Basin-Decatur Project 兩個陸上計畫。Ketzin 屬於先導示範計畫，藉由小規模（預期 8 萬噸）的二氧化碳注入，驗證長期封存的可靠及監控技術。而 Decatur 則屬於 CCS 的大型計畫（目標 >100 萬噸），期望透過大規模封存，證實 CCS 商業的可行性。兩者的比較如表 2 所示：

表 2 Ketzin、Decatur CCS 計畫比較

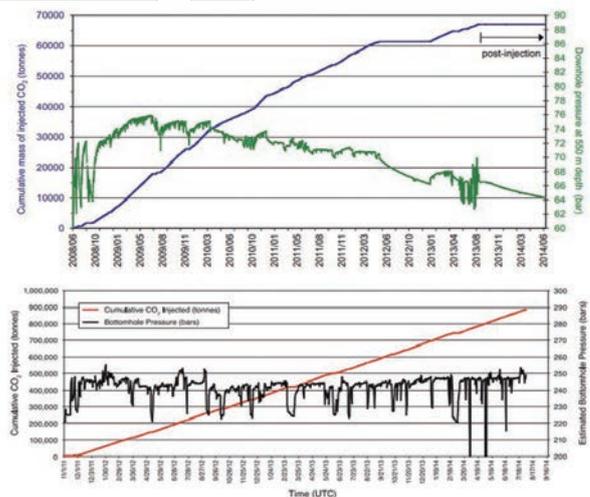
	Ketzin	Decatur
灌注井深度	750m	2200m
監測井位置	1. 兩口深部監測井 (750、800m 深) 2. 一口 456m 深淺部觀測井	1. 一口 2200m 深監測井 2. 一口 1060m 深地球物理觀測井
總灌注量	6.7 萬噸	100 萬噸
灌注壓力	約 65 bars (最高 78 bars)	約 93 bars
灌注溫度	約 42°C	約 35°C
灌注速率	約 1000 噸/月 (最高 2300 噸/月)	約 1000 噸/日
二氧化碳狀態	氣態	超臨界流體
二氧化碳濃度	> 99.7%	> 99.9%
儲藏層深度	632-642 m 及 645-654 m	2130-2149 m
二氧化碳密度	300 kg/m ³	500-650 kg/m ³

註：彙整自 Streibel et al. (2014)

這兩個 CCS 計畫中，Ketzin 的二氧化碳注入量隨時間減少，壓力變化趨勢也是在注入開始後約一年的時間達到高峰，而後緩慢下降。Decatur 的二氧化碳灌注量則幾乎從一開始便維持在每天 1000 噸的速率，並持續到灌注結束，壓力則大多穩定維持在相同的程度（圖 12）。其中 Ketzin 並沒有任何地震事件被誘發，Decatur 則約有數

千個人體無感的微震發生，由於兩者均是陸上的 CCS 計畫且封存在孔隙度及滲透性相似的砂岩之中，最大的差異便是在於二氧化碳的灌注量及灌注速率，故二氧化碳灌注的速率及壓力被認為是最可能決定誘發地震與否的關鍵。在 In Salah 也顯示相似的情況 (Oye et al., 2013)，然而加拿大 Quest 計畫則沒有發現明顯的關聯。

本文整理了七個 CCS 計畫，比較了灌注量與是否誘發地震的結果（表 3），在目前地震誘發的案例當中，大多發生在灌注規模較大 (>100 萬噸) 的計畫之中，例如阿爾及利亞的 In Salah (總灌注 380 萬噸)、美國的 Decatur (100 萬噸) 及加拿大的 Quest (600 萬噸)，而較小規模的試驗計畫則沒有看到類似的現象，例如德國的 Ketzin (約 6.7 萬噸)、澳洲的 Otway (8 萬噸) 以及日本的苫小牧 (30 萬噸)。此一現象似乎支持了庫倫破壞公式的說法，然而並非所有的大規模灌注均會誘發地震的發生，例如挪威的 Sleipner (1700 萬噸)，因此除了灌注壓力和速率的影響外，當地的地質條件可能也是誘發地震評估的重要根據。



(Streibel et al., 2014)

註：上圖為 Ketzin，下圖為 Decatur，藍、紅線為二氧化碳累積灌注量，綠、黑線為井底壓力。

圖 12 Ketzin 及 Decatur 二氧化碳累積灌注量與井底壓力關係圖

表 3 各計畫灌注量與誘發地震比較表

地點	灌注量	是否誘發地震
阿爾及利亞—In Salah CCS 計畫	每年 100 萬噸，總累計 380 萬噸	是
美國—Illinois Basin-Decatur Project	每日 1000 噸，2014 年 11 月達成 1 百萬噸	是
加拿大—Quest project	預計每年 100 萬噸營運 25 年，截至 2022 年已達 600 多萬噸	是
德國—Ketzin CO ₂ SINK project	2013 年 8 月結束，共注入 67,271 噸	否
日本—苫小牧 CCS 示範計畫	2019 年 11 月達成 30 萬噸	否
澳洲—CO ₂ CRC Otway Project	第一階段：6 萬 5 千噸 第二階段：累積至 8 萬噸	否
挪威—Sleipner CO ₂ storage project	每年 100 萬噸，到 2017 年時已注入 1700 萬噸	否
中國—鄂爾多斯盆地神華 CCS 示範工程	2015 年 4 月達成 30.3 萬噸	否

階段。對於封存方面僅有 2014 年台電公司在台西盆地的 3,000 m 深鑽井調查及 2012 年中油公司在苗栗永和山嘗試推動的 CCS 試驗計畫，但中油公司的計畫因臺灣法規尚未完備且受當地居民抗議而延宕。台電公司於 2014 年的「二氧化碳地質封存先導試驗場址地質調查及技術研發（一）」計畫中，完成 3,000 m 深鑽井調查，確立台西盆地可能的三大深部鹽水層地層封存系統，預估封存潛能為 137.3 億噸。目前預計在台中發電廠內進行先導試驗計畫，將以每年灌注不超過 2,000 公噸之超臨界二氧化碳為目標，該試驗計畫之儲集層為桂竹林層，並以錦水頁岩作為其蓋岩。該試驗計畫將建置 2 口垂直深鑽井，包含 1 口灌注井及 1 口觀測井，井深預估為 3,000 m，並在灌注結束後定期紀錄二氧化碳移棲監測的結果。

2. 建議可採用的地震監測技術

（四）國內 CCS 計畫及地震風險控管建議

二氧化碳的封存必須考慮儲藏層的溫度及壓力，使二氧化碳能自然停留於超臨界流體狀態。而足夠的孔隙率、滲透率及儲藏層體積，才能保證二氧化碳封存量及移動空間。其上則需要覆蓋結構完整的不透水蓋岩，確保二氧化碳能穩定且長期的與一般的生物圈進行阻隔。臺灣地區的煤層偏薄且厚薄分布不均，不具備良好的封存條件。油氣田雖適合封存，但與位於西部海岸的台電火力電廠距離較遙遠，經濟可行性較低，故必須採用深部鹽水層封存才能滿足商轉尺度的封存需求。然而臺灣因斷層密布，若要避免因二氧化碳流體誘發地震，必須對於二氧化碳的封存地點及過程進行嚴密的調查、分析及監控。

1. CCS 先導計畫

臺灣對於 CCS 計畫的研究，目前大多還停留在封存地點調查及二氧化碳來源捕集技術的研發

與各國 CCS 的計畫比較，台中發電廠之 CCS 先導計畫預估封存量為每年 2,000 公噸，應不至於觸發斷層破裂引發地震，雖然離鄰近的大甲斷層僅有 7 公里，但澳洲 Otway 計畫顯示小規模的二氧化碳封存觸發斷層的破裂機率較低，Verdon（2014）的研究也顯示絕大多數（約 90%）的流體觸發事件均發生在水平距離 5 公里內，且隨著注入位置與斷層距離增加，事件被觸發的機率就越低。但各地區域地質條件不同，而地震發生成因複雜，建議建立地震監控系統掌握即時狀況，可以分成兩個部分進行考量：第一部分為地震事件的監控及分析，第二部分為可能誘發地震之風險監控。

地震事件的監控及分析部分，可使用井下 geophone 陣列搭配加拿大 Quest 計畫的 PTM 及 EBS 系統能進行每日地震監控及自動化的事件定位比較，Verdon & Stork（2016）提出了一種能推估誘發地震最大的可能規模以及灌注量和微震發

生率的關係法，使用了 Stork et al. (2015) 在 In Salah 計畫中的微震目錄，從 2009 年 8 月到 2011 年 6 月中偵測了超過 6000 筆被觸發的微震事件，其中最大規模為 1.7。假設所有因注入二氧化碳而導致的形變都在地震中釋放，其累積的地震能量 $\sum M_0$ 可由以下公式表示：

$$\sum M_0 = G \Delta V$$

此處的 G 為岩層的剪切係數 (shear modulus)， ΔV 為注入二氧化碳的總體積。然而實際上並非所有形變都會轉換成地震能量，因此需加入一個地震轉換的效率係數 10.5 (seismic efficiency, S_{EFF})：

$$\sum M_0 = S_{EFF} G \Delta V$$

若結合 Gutenberg-Richter 的 b 值公式：

$$\log_{10} N = a - bM$$

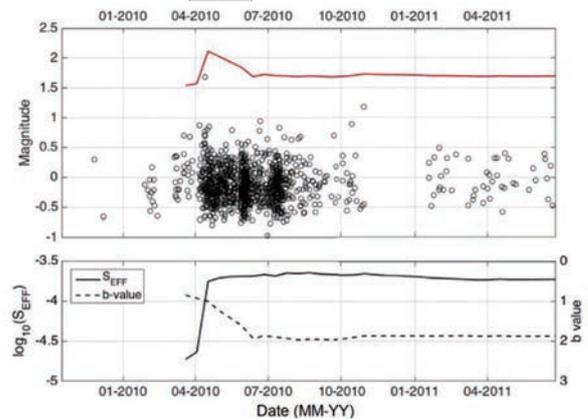
(N 為規模大於 M 以上的地震數量； a 、 b 為常數； a 代表地震總數； b 值則是斜率，表示規模與某一地區大於或等於該規模的地震數量之間的關係，當 b 值大代表該地區以小規模地震為主。反之 b 值小則代表該地區具有較多規模大的地震。故 b 值的連續變化可以呈現該區域地震的發生潛勢) 假設這裡的 S_{EFF} 為固定不變，而 b 值可以由長時間觀測求得，此處地震可能發生的最大規模 M_{MAX} 可由此公式計算 (Hallo et al., 2014)：

$$\sum M_0 = 10^{9.1} \frac{10^{ab}}{1.5-b} [10^{M_{MAX}(1.5-b)} - 10^{M_{MIN}(1.5-b)}]$$

其中 M_{MIN} 是在觀測 b 值時定義的最小規模，而 a 可寫作：

$$a = bM_{MAX} - \log_{10}(10^{b\delta} - 10^{-b\delta})$$

δ 則是定義最大規模 M_{MAX} 的概率半區間大小 (probabilistic half-bin size)。 M_{MAX} 與實際觀測的結果如圖 13 所示，下圖是觀測期間不斷更新的 b 值 (虛線) 及 S_{EFF} (實線)，上圖的紅線則是計算出來可能的最大規模 M_{MAX} ，黑色空心圓圈則是觀測到的地震事件，因此可以推估誘發地震的最大規模。在物理模型的建置上，若假設誘發的地震都是在已知的斷層及裂隙上產生，當裂隙的位置、方向及大小獲知下，便能模擬計算出當液體注入後所產生的應力變化及影響，進一步推估何時產生的應力會超過庫倫破壞力導致地震的發生。



(Verdon & Stork 2016)

圖 13 In Salah 推估最大規模與實際觀測資料比較圖

第二部分可能誘發地震之風險監控，一般認為超臨界二氧化碳會觸發地震是因為其灌注之壓力導致地層破裂或因岩石孔隙壓被提高導致斷層滑動，故可以針對二氧化碳的流量、壓力及移棲行為進行監控。流量及壓力可參考日本苦小牧 CCS 計畫的壓力控管，進行壓力、流量的即時監測。若壓力超過岩層臨界壓力的 90% 時，可以降低二氧化碳灌注速率，減少誘發地震的風險。二氧化碳在地下地層的移棲行為可以參考以下五種技術進行監測：

(1) 同區異時震測；(2) 井下 DAS (Distributed Acoustic Sensing) 監測；(3) 壓力層析成像；(4) 地球潮汐監測；(5) InSAR 監測。其中最為準確的方式為同區異時震測，此方法廣泛被使用在 CCS 計畫中。美國 Decatur、德國 Ketzin、阿爾及利亞 In Salah 及澳洲 Otway 等計畫均使用此方法進行二氧化碳的後續追蹤，然而成本也最為高昂，且缺乏連續性的即時觀測。

井下 DAS 監測被認為是較為可靠的替代方案，澳洲 Otway 使用 4 條鋪放在監測井內的光纖，搭配 9 個 SOV (Surface Orbital Vibrators) 產生人工震源，準確地於灌注開始後第二日偵測到了 300 公噸二氧化碳的蹤跡，並在後續三個月成功追蹤其移棲軌跡。相關技術也被應用於德國 Ketzin 的計畫上，其優點能降低鋪設成本並提高監測網密度。缺點是 DAS 只能記錄單一方向的應變或應變率，對於微震的觀測定位應用上之技術門檻較高。

地球潮汐、壓力層析成像以及 InSAR 三種監控技術也是二氧化碳遷移的追蹤技術。前兩者是澳洲 Otway 試驗計畫提出來的的方法，目前尚無其他計畫使用。透過主動於觀測井內注水引發地層壓力變化或是監控天體重力引起的潮汐效應，檢查不同時間地層壓縮變化的效果，達到監測地底二氧化碳分布變化的目標。然而此法要求的觀測井數目較多，且尚缺乏其他案例的支持，其準確度仍有待評估。

InSAR 技術是五種技術中價格最為低廉的技術，透過地表地形的變化來監控地下二氧化碳移棲行為，阿爾及利亞 In Salah、美國 Decatur、加拿大 Quest 等計畫均有使用。然而截至 2021 年，全球僅有不到十個計畫成功利用 InSAR 技術監測二氧化碳的流向，主要問題在於辨識的精確度，大氣波動、植被及當地地質景觀等都有可能對 InSAR 造成影響。為此 Zhang et al. (2022) 透過

分析成功的監測案例，提出一項 InSAR 的可行性評估技術，針對兩項 InSAR 技術本體侷限性和六項封存場的特徵變因進行評分，期望未來能對於 InSAR 技術的使用評估提供參考的依據。

三、結論與建議

根據 Global CCS Institute 2022 的報告，全球在 2022 年 9 月時執行中的 CCS 計畫已經達到了 30 個，捕集封存能力已達到每年 42.5 百萬噸 (Mtpa)。而截至目前為止 (2023 年 10 月) 各國的 CCS 計畫均未引發任何的有感地震。紀錄中因二氧化碳灌注所引起最大規模的地震為 In Salah 的規模 1.7 事件。雖然臺灣地質構造複雜，地震發生頻繁且斷層密布，但同樣相鄰斷層的澳洲 Otway 試驗計畫也無觸發地震之案例。而一般民眾擔心地震導致二氧化碳外洩的風險，北海道膽振地區 2018 年規模 6.7 的地震事件，提供了檢驗二氧化碳地質封存耐震的實際經驗。雖然震源離封存場僅僅只有約 30 公里的距離，但經 JCCS (日本 CCS 調查株式會社) 2020 年的報告書表明，調查後發現並無任何外洩的影響，且此地震活動與二氧化碳封存並無任何明顯關聯，能提供一般民眾對於二氧化碳封存的信心。

二氧化碳與觸發地震間的關聯仍充滿不確定性，雖然目前國際間並沒有因二氧化碳封存所引起的任何自然或人為危害，但若能於封存計畫進行事前、事中及事後詳細的調查分析及評估，將有助於降低地震引致災害之風險。本研究整理各國在灌注期間針對地震事件採取的監控手法，分成兩大目標進行討論：(一) 針對地震事件，可以採取一般的寬頻地震儀或是 geophone 進行事件的監測，並參考國外的監控及分析系統 (Harvey et al., 2021)，來達到自動化偵測及後續可能危害分析的目的 (Verdon & Stork 2016)。(二) 針

對二氧化碳活動對斷層造成的可能影響，提出五種國際間的監控技術，同區異時震測具有最高的準確性但成本最為昂貴，DAS 的技術被認為能替代前者但對微震監測幫助較小，地球潮汐、壓力層析成像以及 InSAR 均能長時間連續觀測且成本較低，但技術仍處於開發階段，若要實施須進行謹慎的研究、開發及評估。

總體而言，目前的研究試驗計畫表明二氧化碳的地質封存對人類尚無明顯且直接的危害，若能透過詳細的事前規劃調查、灌注封存期間謹慎地監控管理，對於達成聯合國及我國規定的 2050 年碳排放淨零目標，CCS 將會是一項可行且必要的手段。

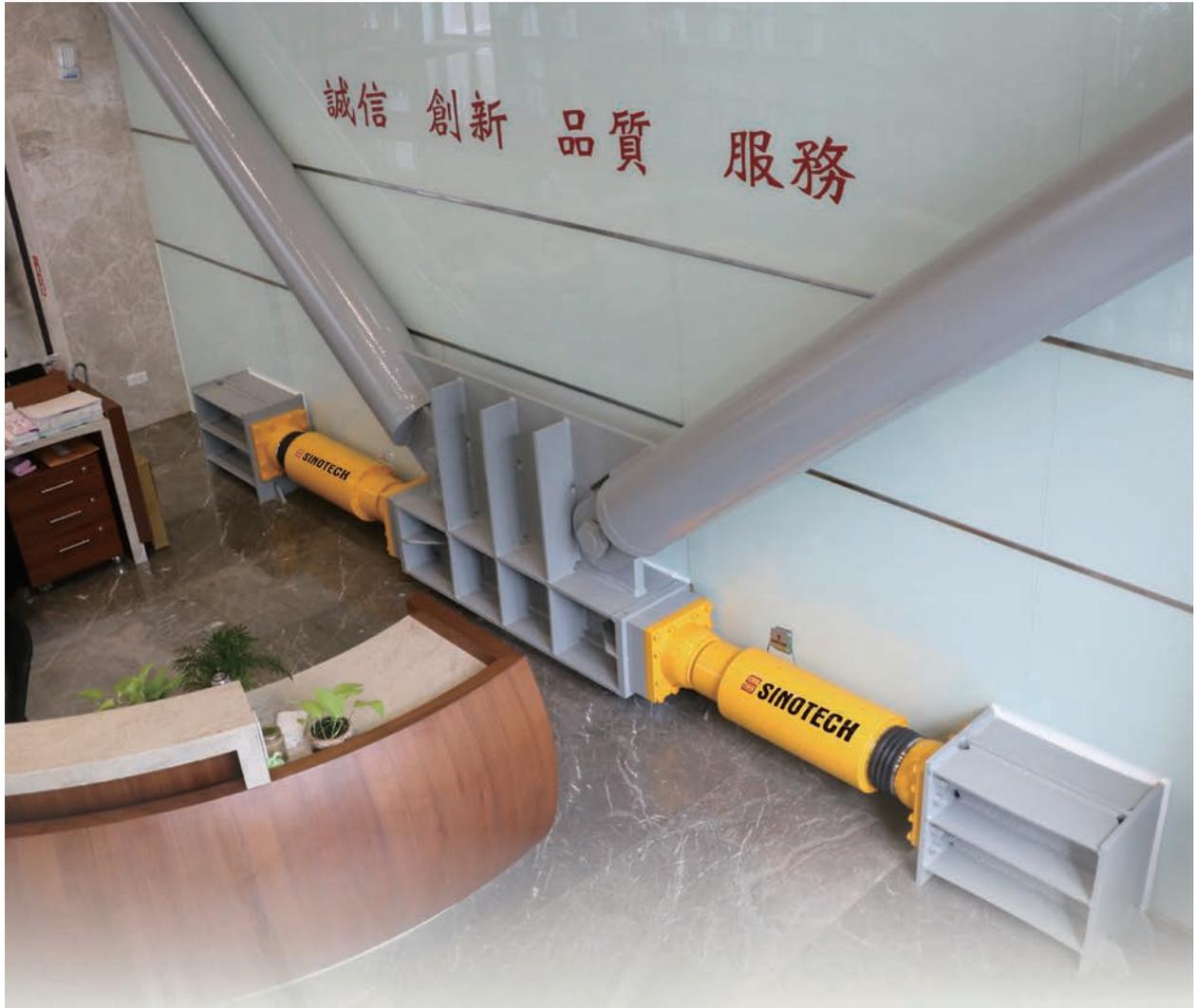
參考文獻

- Ahmad, M. U., & Smith, J. A. (1988). Earthquakes, injection wells, and the Perry nuclear power plant, Cleveland, Ohio. *Geology*, 16(8), 739-742.
- Ake, J., Mahrer, K., O'Connell, D., & Block, L. (2005). Deep-injection and closely monitored induced seismicity at Paradox Valley, Colorado. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(2), 664-683.
- Couëslan, M. L., Butsch, R., Will, R., & Locke II, R. A. (2014). Integrated reservoir monitoring at the Illinois Basin-Decatur Project. *Energy Procedia*, 63, 2836-2847.
- Frohlich, C., Potter, E., Hayward, C., & Stump, B. (2010). Dallas-Fort Worth earthquakes coincident with activity associated with natural gas production. *The Leading Edge*, 29(3), 270-275.
- Frohlich, C., Ellsworth, W., Brown, W. A., Brunt, M., Luetgert, J., MacDonald, T., & Walter, S. (2014). The 17 May 2012 M4. 8 earthquake near Timpson, East Texas: An event possibly triggered by fluid injection. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(1), 581-593.
- Global CCS Institute. (2022). *The Global Status of CCS Report 2022*.
- Harvey, S., O'Brien, S., Minisini, S., Oates, S., & Braim, M. (2021). Quest CCS facility: Microseismic system monitoring and observations. In *Proceedings of the 15th greenhouse gas control technologies conference* (pp. 15-18).
- Hallo, M., Oprsal, I., Eisner, L., & Ali, M. Y. (2014). Prediction of magnitude of the largest potentially induced seismic event. *Journal of Seismology*, 18, 421-431.
- Horton, S. (2012). Disposal of hydrofracking waste fluid by injection into subsurface aquifers triggers earthquake swarm in central Arkansas with potential for damaging earthquake. *Seismological Research Letters*, 83(2), 250-260.
- Hsieh, P. A., & Bredehoeft, J. D. (1981). A reservoir analysis of the Denver earthquakes: A case of induced seismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B2), 903-920.
- Japan CCS CO., Ltd. (2021). 苫小牧における CCS 大規模実証試験 30 万トン圧入時点報告書，日本 JCCS 報告書
- Justinic, A. H., Stump, B., Hayward, C., & Frohlich, C. (2013). Analysis of the Cleburne, Texas, earthquake sequence from June 2009 to June 2010. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(6), 3083-3093.
- Keranan, K. M., Savage, H. M., Abers, G. A., & Cochran, E. S. (2013). Potentially induced earthquakes in Oklahoma, USA: Links between wastewater injection and the 2011 Mw 5.7 earthquake sequence. *Geology*, 41(6), 699-702.
- Kim, W. Y. (2013). Induced seismicity associated with fluid injection into a deep well in Youngstown, Ohio. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(7), 3506-3518.
- MAJOR, M. W. (1968). A seismic study of the Denver (Derby) earthquakes. *Quart. Colo. School Mines*, 63, 9-55.
- McGarr, A., Simpson, D., Seeber, L., & Lee, W. (2002). Case histories of induced and triggered seismicity. *International Geophysics Series*, 81(A), 647-664.
- Meremonte, M. E., Lahr, J. C., Frankel, A. D., Dewey, J. W., Crone, A. J., Overturf, D. E. (2002). Investigation of an earthquake swarm near Trinidad, Colorado. (open-file report 02-0073). US Geological Survey.
- Nicholson, C., Roeloffs, E., & Wesson, R. L. (1988). The northeastern Ohio earthquake of 31 January 1986: Was it induced?. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(1), 188-217.
- Ohio Department of Natural Resources (ODNR). (2012). Preliminary report on the Northstar 1 Class II Injection Well and the seismic events in the Youngstown.
- Oye, V., Aker, E., Daley, T. M., Kühn, D., Bohloli, B., & Korneev, V. (2013). Microseismic monitoring and interpretation of injection data from the In Salah CO2 storage site (Krechba), Algeria. *Energy Procedia*, 37, 4191-4198.
- Poling, B. E., Prausnitz, J. M., & O'Connell, J. P. (2001). *Properties of gases and liquids*. McGraw-Hill Education.

- Raleigh, C. B., Healy, J. H., & Bredehoeft, J. D. (1976). An experiment in earthquake control at Rangely, Colorado. *Science*, 191(4233), 1230-1237.
- Rock, L., O'Brien, S., Tessarolo, S., Duer, J., Bacci, V. O., Hirst, B., Randell, D., Helmy, M., Blackmore, J., Duong, C., Halladay, A., Smith, N., Dixit, T., Kassam, S., & Yaychuk, M. (2017). The Quest CCS project: 1st year review post start of injection. *Energy Procedia*, 114, 5320-5328.
- Seeber, L., Armbruster, J. G., & Kim, W. Y. (2004). A fluid-injection-triggered earthquake sequence in Ashtabula, Ohio: Implications for seismogenesis in stable continental regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(1), 76-87.
- Shirley, K. (2001). Tremors prompted by industry activity? Colorado quakes cause concern. *AAPG Explorer*, December.
- Stork, A. L., Verdon, J. P., & Kendall, J. M. (2015). The microseismic response at the In Salah Carbon Capture and Storage (CCS) site. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 32, 159-171.
- Streibel, M., Finley, R. J., Martens, S., Greenberg, S., Möller, F., & Liebscher, A. (2014). From pilot to demo scale—Comparing Ketzin results with the Illinois Basin-Decatur project. *Energy Procedia*, 63, 6323-6334.
- Verdon, J. P. (2014). Significance for secure CO₂ storage of earthquakes induced by fluid injection. *Environmental Research Letters*, 9(6), 064022.
- Verdon, J. P., & Stork, A. L. (2016). Carbon capture and storage, geomechanics and induced seismic activity. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(6), 928-935.
- Vilarrasa, V., & Carrera, J. (2015). Geologic carbon storage is unlikely to trigger large earthquakes and reactivate faults through which CO₂ could leak. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(19), 5938-5943.
- Zhang, T., Zhang, W., Yang, R., Gao, H., & Cao, D. (2022). Analysis of Available Conditions for InSAR Surface Deformation Monitoring in CCS Projects. *Energies*, 15(2), 672.
- Zoback, M. D., & Gorelick, S. M. (2012). Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(26), 10164-10168.
- Zoback, M. D. (2012). Managing the seismic risk posed by wastewater disposal. *Earth*, 57(4), 38.

中興社研發叢書及電腦程式銷售

中興工程顧問社已發行研發、編譯叢書 317 種及電腦程式 23 套，多屬規劃、設計、施工、管理等方面之工程技術，其叢書及程式目錄、售價、摘要、申購表、繳款方式及信用卡繳費單等，皆已上「中興工程顧問社」之網站 www.sinotech.org.tw，歡迎上網查閱選購；若需進一步查詢請電話或傳真至電話：(02)8791-9198 轉 467 陳小姐，或傳真：(02)8791-2198



誠信 創新 品質 服務

中興制振·智慧防震
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) SINOTECH MECHANICAL LABORATORY FOR VIBRATION

防震制振技術研究中心

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
消能元件性能試驗
- 國防減振研製**
高效能減振機械研發客製
國防減振測試方法開發

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

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

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 F (02)8792-3070
E ast-ctr@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.



新建太陽能電廠之專案施工管理 (PCM) 經驗分享

陳信宏 *

摘要

施工管理是指在新建專案（尤其指建築工程）中，負責監督和協調工程各項工作的一種管理活動。其範圍涵蓋了工程計劃、人力資源、物資供應、預算控制、進度管理、品質管理、安全管理等多個面向；主要目的是確保專案能夠按照預定計劃順利進行，達到安全、高效、優質、節約成本的建造目標。

但是要怎麼做？有哪些管理手段或要求可以參考？相信很多同仁還難以入手或摸不著頭緒。故將擔任臺灣某太陽能電廠（272MW）新建案之專案施工管理（PCM）計畫經理於案場推動之管理經驗做整理，期望能藉由此案分享供參考外，後續能衍生出新的管理思維，以使施工管理模式更加健全。

關鍵字：施工管理、太陽能、EPCM

一、前言

現行臺灣許多的太陽能開發商，為對新建案場的設計、採購有更高的控制權、決策權及議價權以降低建設成本，紛紛棄用傳統 EPC 統包發包模式，改採 EPCM 模式進行發包。

EPCM 是「設計、採購和施工管理」（Engineering, Procurement, and Construction Management-E+P+CM）的縮寫，是指由專業技術服務公司（如工程顧問公司或工程建設公司）為專案提供全面的工程設計、採購和施工管理服務；在此模式下，業主可保留工程設計、選型、選商和採購的決策權，由業主直接與承包商／供應商進行議價、簽約合

作及支付款項；由專業技術服務公司代表業主對施工進行管理服務，包括專案管理、工程設計、採購、施工管理、品質控制、成本控制和安全管理等方面，負責協調所有工程相關方面的工作，以確保專案在預算和時間內完成。

本太陽能電廠（272MW）新建案之專案施工管理案（PCM-Project Construction Management）即是屬於 EPCM 模式，由業主委外設計、主要設備自行選型、選商、議價、採購、簽約，再另外發包由中興工程顧問公司機電監造工程部主任承攬專案施工管理和監造一案。

EPCM 承包商不同於 EPC 承包商，其承擔契約與財務風險限制在一定的範圍內；但由於要

* 中興工程顧問公司機電監造工程部主任工程師（曾任韋能能源雲林新興發電廠專案施工管理與監造案計畫經理）

對專案的各個階段進行全面的管理，所以承擔著另一個更大的風險——即「公司聲譽」。本計畫同仁必須要想辦法使分包商的工作安排能得到控制、準確到位，並採用一切有效的管理方法、最佳化的工進安排及物料配置來確保工程進度達到業主的期望。

二、案場概述

(一) 案場資訊

1. 面積：226 公頃（約 376 個足球場面積）。
2. 裝置容量：272 MWp。
3. 模組：68 萬片 400Wp 模組。
4. 支架基樁：9.1 萬支。
5. 電纜長度：1,971km（約 5 個臺灣南北距離）。
6. 電力輸出：以 161kV 自設新建昇壓站經 2.7 公里地下電纜併接至台電公司 D/S。

(二) 主要施工項目

1. 270MWp 太陽能發電設備建置工程

太陽能案場分南北兩區分別完工及送電，太陽能模板組串之直流電力於 Array Box 集結送至 PV Box（變流器）轉換為交流電力，變流器輸出端變壓器採用 3 ϕ 33kV 油浸式變壓器，經 MV 電纜將電力送至特高壓變電站。

工程項目含：

- (1) 土木工程：廠區整地、假設工程、道路鋪設、排水工程、擋風牆、PV 基樁打樁、圍籬。
- (2) 機構工程：支架組裝及 PV 模組安裝。
- (3) 機電工程：PV 模組接線、PV Box（變流器）設置、交/直流電纜鋪設及接線、單機及 PV 區域系統測試、與變電站之整體系統測試工作。

2. 特高壓變電站興建工程

特高壓變電站採用氣體絕緣開關設備（GIS），將 PV Box（變流器）送過來之 33kV 電力透過 4 台特高壓變壓器升壓至 161kV，經特高壓傳輸線送至台電 D/S 變電站，與台灣電力公司既有電力網路併聯。

3. 161kV 特高壓傳輸線工程

自廠區昇壓站鋪設 161kV 高壓地下電纜到台電 D/S 變電站，總長度約 2700 公尺。

4. 既有施工便橋結構改善工程

對案場出入口之既有老舊施工便橋進行結構改善，將舊橋面板及鋼樑拆清，既有鋼骨橋墩防鏽處理及試樁，再安裝新鋼骨橫梁及橋面板、護欄、照明及橋面鋪設。

(三) 承攬組織架構

本案業主分別與供貨商、施工商、設計商簽訂設備供貨合約、施工合約、設計合約；由 EPCM 承攬人代表業主對施工進行管理，其承攬組織架構圖如圖 1 所示。



圖 1 承攬組織架構圖

與 EPC 模式下，無論是設計、設備採購還是施工廠商，均由 EPC 承包商自主定約有所不同。

(四) 安環衛數據統計

本案自 2020 年 9 月起施工，至 2022 年 12 月底止收尾完成，期間共計 28 個月，尖峰施工期每

日進場人數約 550 人，各項統計數據如下：

項目	統計數據
進場施工人數	150,599
工作時數 (hrs)	1,257,808
工具箱會議 (hrs)	37,649.75
安環衛教育訓練 (hrs)	3,356.5
安環衛會議 (次)	94
不安全行為/狀況開單數	430
虛驚事件數	4
急救事件數	2
無災害工時	1,257,808
罰款金額 (NTD) @ 罰款件數	645,000 @ 95

三、前期施工規劃

本案各功能組 Key man 於施工前半年即投入與業主進行前期施工規劃討論，目的是了解業主需求，確保專案所有細節能得到充分考慮，使施工期間的工作推動能達到預期的結果，其規劃涵蓋了以下幾個方面：

(一) 工程範圍

定義工程範圍、目標和預期結果，以及任何特定需求或限制。

1. 參與設計討論，了解業主需求與設計現況，以確保後續施工與設計一致。
2. 確認業主自購設備範圍及廠家，釐清各施工商之供料責任。
3. 評估發包策略，確認施工分包數及工作範圍。
4. 確認 EPCM 工作範圍及責任。
5. 確認調試及試運轉的指揮責任。

(二) 里程碑及排程

確定工作進度和完工日期，以利優化資源分配和專案排程。

1. 定義及確認各重大里程碑時間。

2. 依發包策略評估各廠商施工工進 (KPI) 要求，進行各工種間之工作排程優化，以符合里程碑要求 (如圖 2 所示)。

(註：以 KPI 推算時，應預留 Buffer，如一周以工作 6 天、預留 1 天，以避免 KPI 過於理想或天氣不良影響施工)

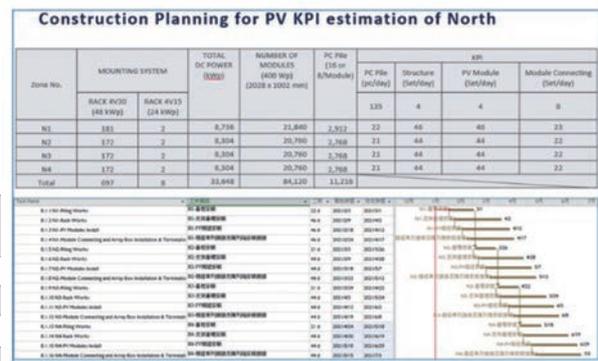


圖 2 各廠商工進 (KPI) 估算及專案時程甘特圖

3. 依工進要求及工作排程進行業主供料之各物料消耗估算，並設置前置量及前置時間，提出每月之物料需求計畫 (MRP-Material Requirement Planning) (如圖 3 所示)。

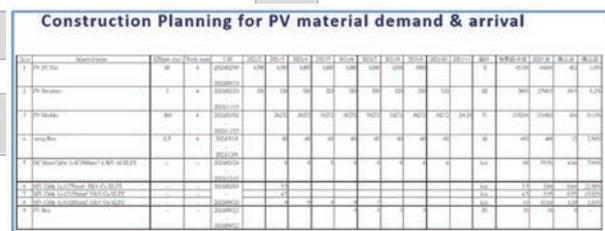


圖 3 每月之物料需求計畫 (MRP)

4. 發布核定之專案時程甘特圖，使專案團隊目標一致。

(三) 資源需求

確定所有必要的人力、物力和財力資源，包括所需的材料、設備和人員，以確保專案成功完成。

1. 依發包策略辦理施工廠商評選、投標說明會及疑義澄清。

支架組裝完成、PV 模組安裝完成、移交完成) 分別以紅色、橙色、黃色、綠色進行顏色區分；當該 Table 完成某一階段時，即在 Excel 表中該 Table 編號的相對應欄位填上「O」，圖像化圖形中的相對應 Table 即會跟著變換顏色，並完成進度統計。

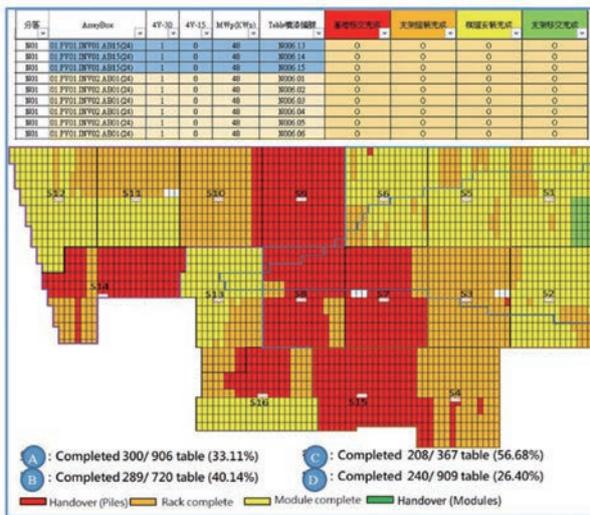


圖 7 圖像化管理工具

圖像化管理工具有以下優點，對於施工管理非常有幫助：

1. 加強溝通和決策：圖像化展示工作進度，讓所有人都能快速、清晰的了解施工計劃和進度，可以加強團隊之間的溝通，利於決策分析，並可有效與承包商進行工進管理、物料分配及工作界面討論協調。
2. 提高效率：簡單輸入、自動整理數據和快速呈現的圖像化管理工具，消除了手動輸入和管理資料的麻煩，減少了錯誤和失誤的風險。同時，還能幫助管理人員快速識別和解決問題，提高工作效率。
3. 加強品質控制：圖像化展示施工進度和結果，讓每個階段的工作都能按照品質查驗程序進行查驗安排，以確保專案最終達到高品質的交付標準。

4. 提高安全性：幫助管理人員了解現場的施工進度及施工工種狀況，及時提醒並預防潛在的風險及加強現場查核，可以減少施工現場的工安事件，保護工人和現場人員的安全。

(二) 各工種施工管理會議

通過定期召開各施工工種的施工管理會議，可以確保專案按照預定計劃進行，提高達成里程碑的成功率，施工管理會議需注意的重點有：

1. 於 Kick off meeting 發布，確定會議召開的目的和議程、參與會議的人員（應包括施工商的工地主任和有決定權之廠商管理代表），並訂定無故不參加之處罰規定。
2. 訂定會議時間和地點並提早發布通知。如本案各工種施工管理會議於每週召開一次，並在現場會議室舉行。
3. 準備會議相關資料，如安環衛宣導、廠商工作報告及協調事項、物料供應、問題和解決方案、追蹤事項、管理要求宣導……等。會議資料並提前以郵件發布，以供與會人員提早準備。
4. 在下一一次會議前，需要跟進上一次會議的追蹤事項及行動方案，確保議題已得到處理或持續關注。
5. 簡潔有效率的會議。大部分問題應盡量在施工管理會議前以臨時性小會得到解決，僅在施工管理會議報告問題及已處理之方案，並控制及拒絕冗長無用的討論。
6. 詳實明確的會議紀錄。會議議題和決議方案應詳實記錄，避免簡單、模糊用語，並經計畫主管及業主核定後公告及發送，以作為未來有爭議時之判斷依據。

(三) Mock-up

引述在維基百科搜尋「Mock up」的一段話：「在製造及設計上，mockup 是一個設計或是設備

的模型，用來教學、展示、設計評估、推廣或是其他用途……。」

本案對於重複性高之工作（如基樁打樁、支架組裝、模組安裝、施工架組裝、Solar 佈線、整線……等），均要求承包商於大量施工前，由同一工種之承包商（擇一）先組裝一組示範樣品（模型），會同業主、PCM、OE（Owners Engineer）、承包商於組裝時進行觀摩、檢查及確認要求後，向承包商發布品質要求及檢驗表單，使施工品質能一致化，如圖 8 所示。



圖 8 Mock-up 會同檢查與標準發布

推動 Mock-up 之優點為：

1. 藉由現場試組裝、觀摩及會同檢驗，促進業主、PCM、承包商間之溝通，從而達成共識。
2. 藉由試組裝之示範，優化組裝動線和步驟，減少施工摸索期，從而提高施工效率。
3. 於現場可清楚看到試組裝的品質要求，從而提高整體施工品質及可靠性。
4. 能及早發現施工問題並加以解決，從而減少可能導致大量錯誤的風險及成本損失。
5. 能評估和預防施工過程中的安全問題，從而提高施工的安全性。

（四）滾動式計畫

做計畫的人時常提到的一句話「計畫趕不上變化」，意即無論計畫再周詳，事情總會出現變化；故計畫必須具備靈活性和適應性，隨著實際狀況去滾動調整，以因應變化帶來的挑戰，保證最終目標能夠實現。

在此不談敏捷（Agile）的滾動式規劃（Rolling Wave Planning）技術，也不談 PMBOK；簡單的說法就是按照「近細遠粗」的原則來制定一段短期計畫與目標，然後按照目前執行的情況和環境變化，去追蹤、調整和推動下一個計畫期，進而向前滾動發展、達成目標。茲就本案推動情況說明如下：

1. 由於本案在前期施工規劃時，已經將各重大里程碑時間、廠商施工工進（KPI）要求及各工種間之工作排程優化完成，並將每月之物料需求計畫（MRP）訂定並要求執行；後續在施工期間便依據此原則去訂定短期（依情況調整，通常為 2～4 周）細部目標，進而依照實際物料到貨、施工工進、品質抽驗、介面移交……等現況，去調整、修正計畫安排，並在各種會議（如每日晨會、每日收工會議、周施工管理會議）與業主、承包商進行討論、協調及配合。
2. 舉例來說，PV 區之主要工項依序為整地、基樁打設、支架組裝、模組安裝後，才能交由機電包進行後續佈纜、接線；因此短期計劃就會以各工項在 2～4 周內需要多少完成量為目標，去進行細部安排，考量的範圍包括有：
 - （1）完成量：以近期（4 周）各施工包之平均 KPI 及進場人數，作為下一周期完成量估算；除特殊狀況外（如缺料），否則應不得少於前期施工規劃所預設之 KPI，以免延誤總里程碑目標。
 - （2）施工區域安排：以利各施工包對小包或小小包之工作分配、物料安排及接續工種施工安排等介面協調。
 - （3）物料到貨及分配：明確及追蹤物料到貨計畫，依照各施工包之 KPI 表現，妥善分配各施工包可使用之物料，避免多料、缺料或斷料。
 - （4）天氣：關注氣候（雨天、強風及落雷）對

人員及設備安全、施工 KPI 及物料輸送的影響。

3. 使用工具

(1) 每日施工工進及人數紀錄表完成量：

以 Excel 形成資料庫架構，進行每日施工工進及人數紀錄，並進行施工工率計算，其優點為：

- A. 可確實呈現廠商施工效率，並提早發現問題而加以處理。如圖 9 範例所示，B 廠商當日完成 10 組模組鋪設，完成數量看起來

比 C、D 廠商好，但出工人數 72 人其工率卻遠低於其他三家包商，也低於平均施工率，即應與包商工地主任討論原因及處理。

B. 每日記錄形成資料庫，以周為單位即可統計分析 KPI 及呈現各承包包商之工進優劣圖表，可作為後續物料分配及接續工種施工安排考量之依據。

C. 數據形成圖表，可作為周施工管理會議之檢討依據，進行工作檢討以提高工進。

南區	施工區	設計數量		實際施工量		已領料數量		剩餘料數量		未完工數量		小計	當日施工(%)	累積施工(%)	施工人數	小機組人數	操作工率	備註	
		4V30	4V15	4V30	4V15	Frame	Table	Frame	Table	Frame	Table								
South																			
A	S1~S4 S15	884	22	161	2	38,430	320	18,990	158	87,960	733	13	1.43%	17.99%	54	0	0.24		
B	S5~S8	712	8	103	0	30,343	253	17,983	150	73,560	613	10	1.39%	14.31%	72	0	0.14		
C	S13~S16	363	4	129	0	21,004	175	5,524	46	28,320	236	8	2.18%	35.15%	25	0	0.32		
D	S9~S12 S14	890	19	152	3	33,604	280	15,184	127	89,520	746	7	0.77%	17.05%	17	0	0.41		
合計		2,849	53	545	5	123,381	1,028	57,681	481	279,360	2,328	38	1.31%	18.95%	168	0	0.23		

圖 9 每日進行施工工進及施工人數紀錄

(2) 物料到貨、施工追蹤、預測曲線及目標設定：

以 Excel 形成資料庫架構，每周五定期將以下內容之數據填入，以形成追蹤、預測曲線以及目標設定：

- A. 累計已到貨：每周實際已到貨量。
- B. 累計已完成：每周實際已完成量。
- C. 預計累計到貨：將短期內已確認可交貨數量、中長期預計可到貨數量，以周為單位輸入。
- D. 預計累計完成：依近期（4 周）各施工包之平均 KPI 值或前期施工規劃所預設之 KPI 值作為預測 KPI，以周為單位算出近期完成量以作為預計累計完成量。
- E. 原計畫累計到貨：原訂貨合約中的計畫交貨量，可作為實際與計畫到貨之比對。
- F. 短期完成目標、長期完成目標。

如以下「模組計畫與完成曲線圖」圖 10 範例所示，在 4/28 當周填入實際之「累計已到貨」、「累計已完成」以及修正之近期「預計累計到貨」數據後可發現及因應：

- A. 原①「預計累計完成」之線形將會在 5/19 當周與③「預計累計到貨」線形形成死亡交叉，造成斷料及無料可用之狀況。
- B. 故須降低施工速率、修正「預計累計完成」至④之線形，並有三周緩衝期可與承包商溝通及因應，以避免斷料造成承包商全員退場以及後續返工動員費用增加。（KPI 由 6.25 table/day 降至 3.44 table/day）
- C. 原 ②5/24 COD II 之「短期目標」（94.8MWp）將因 ③「預計累計到貨」到貨延誤及修正短期 KPI 而無法達成。
- D. 修正未來之短期及長期目標，並持續追蹤。
- E. 要求採購部門催促物料廠商交貨。

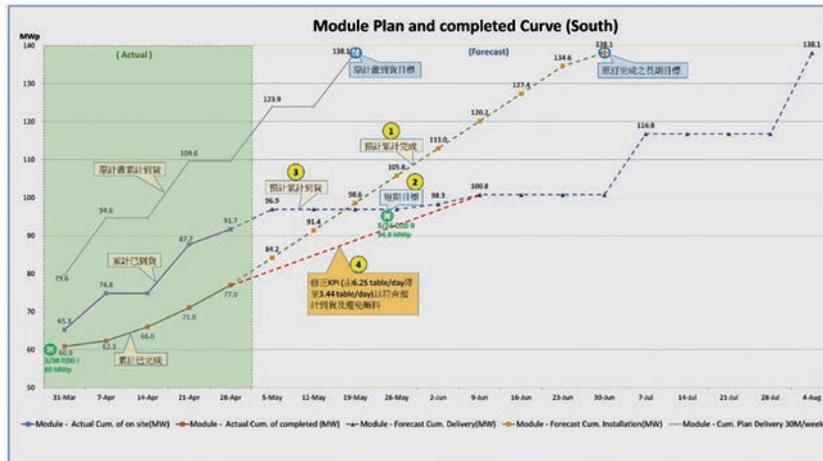


圖 10 模組計畫與完成曲線圖

(3) 圖像化呈現短期計畫目標

將施工完成量、物料到貨之實際與預測情況

做滾動調整後，應於建立好之圖像化地圖，進行工作區域規劃分配及短期計畫目標呈現，使團隊及施工廠商能快速且清晰的了解短期目標，以有效進行工作配合與推動，如圖 11 所示。

上班；辦公室全員配戴口罩，除用餐、喝水外，不脫下口罩。

2. 要求施工廠商工人依其作業性質、最低人力配置進行分組，避免上班中群聚。
3. 便當由餐廳廠商直送工地，禁止工人至餐廳取餐及於餐廳用餐。

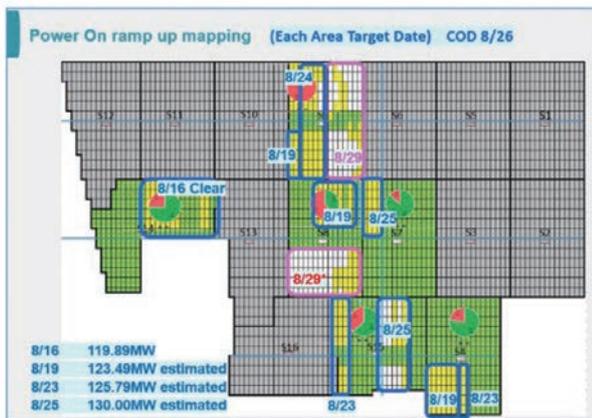


圖 11 圖像化呈現短期計畫目標

(五) COVID-19 防疫措施

疾病管制局自 2021 年 5 月陸續發布新冠肺炎 2、3 級警示後，PCM 與業主即於各階段實施不同的管制措施，以預防疫情蔓延進而影響現場施工工進，簡列如下（現場管理情況如圖 12 所示）：

1. 因應疾病管制局發佈新冠肺炎 3 級警示，承包商管理人員與業主、PCM 人員進行分流、分區

4. 每週 HSSE (Health, Safety, Security and Environmental) 例會改以視訊線上開會。
5. 配合工業局政策，外勞禁止入場；後期開放持有快篩陰性證明者可進場。
6. 採取實聯制並於入場前強制量測體溫。
7. 工具箱會議時，人員間保持 1 公尺以上距離，並辦理足跡疫調及體溫量測記錄。
8. 聯合辦公區及承商辦公區加強消毒。
9. 製訂「體溫異常通報處理流程」要求遵循及因應。
10. 加強疫情及衛教宣導。
11. 2021 年 11 月起，獎勵承包商要求工人接種疫苗並同步查驗勞工查驗接種證明，第一劑疫苗接種率於 2022/1/14 達 91.7%，於 2022/3 月底達 98.5%。
12. 要求未接種過疫苗之入場勞工，須自備快篩試劑、並篩檢陰性後，發給 7 日臨時通行證，以管理手段促使工人接種疫苗。



圖 12 COVID-19 防疫措施

五、結論與建議

以上是本案在施工管理上的經驗分享，實際上還需要根據各專案的具體情況進行調整和應用，在此對本案經驗做一個總結與建議：

(一) EPCM 承攬範疇及權責

在前言所提，EPCM 是「設計、採購和施工管理」的縮寫，EPCM 承包商提供工程、採購、施工管理等專業服務；但由於工程、採購的主導權在業主，所以需依業主的選擇去釐清及確認業主、供應商、施工商、EPCM 間的範疇、權責、介面與合約關係，以減少未來專案推動的糾紛。

另外，在本案與其他相關太陽能 PCM 案的參與和執行過程中，發現不同業主對專案工作內容有許多不同權責的解釋而產生爭議；因此未來隨著此類型案件的需求增加，在投標事前應要充分與業主對 EPCM 或 CM 的承攬範疇及權責討論清楚。

(二) 團隊成員的挑選及建置

EPCM 團隊承擔著「公司聲譽」的高風險，且人員專業要含括專案管理、時程控制、工地行政、安環衛管理、物料管理、現場工程師及現場監造工程師…等領域，以確保專案能順利進行並達到成本、時間、範疇及品質的要求，因此在團隊成員挑選及建置時應注意以下幾點：

1. 專業技能及經驗：團隊成員應要擁有廣泛的專業技能及豐富經驗，以協助專案經理推動及管理專案工作，進而解決問題、提高工作效率；切勿抱持著「有人就好」的心態去安排人員、組織團隊。
2. 職位、權責明確：應明確將各職位角色、工作內容與權責劃分明確傳達給團隊同仁，可以讓同仁更加有效率的執行自己的職責，以避免工作職責混亂與重複、降低工作衝突，使團隊合作更加緊密。
3. 工作心態與熱情：EPCM 的工作不再是被動地等待被通知查驗，而是將自己轉換為工頭角色，去看待現場施工及專案管理的各項執行細節；並應對工作充滿熱情，才能更有動力、細心和創意地去完成工作。

(三) 快速反應與處理

在施工過程中常常會出現各種問題，如施工品質不良、材料不足、工程進度落後、設備故障、意外事件……等等，EPCM 管理團隊需要快速反應與處理這些問題，以確保工程進度和品質得到保障。快速反應與處理要注意以下幾點：

1. 建立良好溝通渠道：善用電子通訊軟體，建立不同工作群組，並告知團隊選擇適當群組及時通知及發布消息。
2. 確定問題嚴重性：問題回報後，應先確認問題嚴重程度，並採取適當措施去處理問題。
3. 追蹤處理進度及解決問題：確認責任人並追蹤問題處理情況，直到問題得到解決。
4. 經驗學習及傳遞：將重大問題處理情況化為文字記載，並分享給適當的人員進行經驗學習，避免問題再發生。

參考文獻

碩力光能雲林新興發電廠 工作週報
PCM 竣工報告

嘗試運用三維點雲模型進行 節理岩體半自動化評分

柳鈞元* 邱家吉**

摘 要

近年來測繪技術蓬勃發展，利用光達掃瞄或攝影測量技術建構岩盤露頭的三維點雲模型已成為岩盤工程調查中的重要步驟，岩體中的節理分布與基本性質與更是調查重點，為了提高岩盤露頭調查的效率與安全性，本研究使用開源軟體自主研發可用於節理岩體調查之半自動化岩體評分程式—AutoQ。AutoQ 程式會計算三維點雲模型的空間資訊，並針對岩石品質指標（RQD）、節理組數（Jn）和節理粗糙度（Jr），此三個主要岩體評分指標進行自動化評估。

AutoQ 採用隨機抽樣演算法（RANSAC）來識別主要節理面，萃取出主要節理面後再計算其加權節理密度（wJd）及其對應的 RQD；再透過球形集群分析演算法（spherical K-means clustering）計算主要節理組數量，並進一步轉換為 Jn；最後，藉由 a/L 方法來評估擬合節理平面的粗糙起伏程度，計算節理粗糙係數（JRC）後再轉換為所需的 Jr，除了評分數值，AutoQ 還會產製量化分析圖表，供使用者瞭解節理位態分布與節理面粗糙度變異性，使用者只須根據現場狀況填入節理品質（Ja）、節理滲水情形（Jw）與現地應力狀況（SRF），即可完成岩石邊坡 Q 法評分。

關鍵字：節理岩體、Q 法岩體評分、點雲模型、半自動化判釋

一、前 言

岩盤露頭調查是進行岩石邊坡工程或隧道工程調查時不可缺少的基本工作。一般而言，從露頭調查中，可獲知岩層的位態、節理間距、節理持續性、節理面滲水狀況、節理面材料風化情形……等影響節理岩體穩定性的關鍵因子。透過岩體評分法的方式，將上述關鍵因子進行綜合評

估，可以得到一個量化的評估結果，使工程師能夠量化評估節理岩體的工程性質。

然而，儘管岩體評分法中已經制定了各種指標的評分標準，但許多評分參數仍須依靠大地工程師或地質師進行目視觀察並主觀判定，如此一來評分便有了下列限制：（1）各細項評分結果可能因人而異，無法得到相對客觀的調查結果；（2）岩體評分為單點式調查，因此需耗費較多時間；

* 中興工程顧問社防災科技研究中心副研究員

** 國立臺北科技大學材料及資源工程系助理教授

(3) 評分時因需於野外露頭或開挖面進行近距離觀察，具有一定危險性；(4) 評分資料多以紙本紀錄，因此在內業部分仍需花費時間進行資料謄寫及整理。

近年來測繪技術進步十分迅速，特別是無人機與光達掃描技術的成熟，極大地提昇地質災害調查與岩盤工程調查的精確度。以無人機為例，使用者可遠端遙控並拍攝高解析度的露頭影像，並透過 SfM (Structure from Motion) 技術，從不同角度拍攝多張二維照片建構三維立體模型，或能製作正射影像以及數值地表模型 (DSM) 等。其中，透過 SfM 技術所獲得的點雲 (Point cloud) 具有相當高的分析價值。如將空間分布趨勢相近的點雲判釋為一道節理面，便能在分析軟體中量測現地岩體的位態分布。這種基於測繪技術的分析方式，不僅能一次性且客觀地獲得大量分析結果，也能讓工程師在安全的地方進行岩盤露頭調查，更重要的是，這些三維點雲資料皆為數位化資訊，可避免了人工紀錄可能造成的遺漏，也降低了工程師的內業負擔，更提供各種潛在加值應用的可能性。

本文結合點雲資料分析與傳統岩體評分法，輔以電腦程式彙整資訊，改善岩體評分法主觀、耗時、危險且繁雜的缺點。透過無人機航攝或光達掃描所獲取之點雲資料，以開源軟體 CloudCompare 與本文自主開發之 AutoQ 程式擷取岩體節理之特徵，轉換為 Q 法岩體評分所需之資訊，加以彙整以完成岩體評分之工作。這種半自動化的地質調查方法使得節理岩體之評分更加客觀、迅速和安全，成為一種新興的現地調查方式。

二、研究方法

由於無人機技術的蓬勃發展，國內外已發表許多相關研究包括點雲匹配、點雲資料處理、

平面擬合以及後續的建模應用 (如: Ozturk et al., 2019, Battulwar et al., 2021, Buyer et al., 2020, Kong et al., 2021, Riquelme et al., 2017, Chen et al., 2017)。

岩體評分方面，主要有 RMR 法 (Bieniawski 1973) 與 Q 法 (Barton et al., 1974) 兩大體系，由於 RMR 法中需要岩體單壓強度 (Uniaxial compressive strength) 之參數，調查人員勢必要直接接觸欲調查的岩體才能完成評分，這樣可能對調查效率和人員安全造成疑慮。反之，Q 法系統中的參數皆可目視判定，意即有機會以測繪工具與工具程式來協助人員現地作業，免去人員與欲調查岩體需直接接觸之必要性。

在評估各文獻中使用的演算法優缺點和野外作業可行性之後，本研究選擇使用 Python 來編寫程式，並選擇 Q 法 (Q-system rating) 作為岩體評分的指標，進程式開發和初步測試，以確立岩體評程式的主要結構和執行邏輯。同時，這個階段也可以確認程式計算的基本元件是否正常運作，減少後續繁瑣的除錯工作。

Q 法為挪威地工技術研究所 Barton 等人 (1974) 提出，旨在為隧道支撐設計提供一套岩體評分方法，並以六個參數來綜合評估隧道節理岩體的 Q 值 (式 1)：

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (\text{式 1})$$

式 1 大致可分為岩體完整度、節理品質與場址現地應力，三大指標，各子項目分述如下：

RQD 為岩石品質指標 (0 ~ 100)，表示從岩心樣本中完整取樣長度超過 10 公分的部分，占整個岩心樣本總長度的百分比。

J_n 為節理組數 (0.5 ~ 20)，當相同位態之節理面出現超過一次以上視為一組，僅出現一次者視為偶現節理。

Jr 為節理粗糙度 (0.5 ~ 4)，評估最不利岩體穩定之節理面粗糙度，主要分為波浪狀與平直狀節理，以及有無擦痕存在。

Ja 為節理品質評分 (0.75 ~ 20)，節理受風化、銹染後，填充物與岩壁是否維持接觸影響節理摩擦力。

Jw 為節理滲水評分 (0.05 ~ 1)，節理滲水情形影響節理摩擦力。

SRF 為現地應力狀況 (0.5 ~ 400)，如：剪裂帶、厚層岩體、擠壓性與膨脹性岩盤。

Q 法評分表範例如圖 1，工程師於任一處節理岩體露頭挑選數個調查點位，並針對各細項給予評分來計算該點位的 Q 值，Q 法評分可以幫助工程師了解岩體完整度、節理性質、節理特徵以及現地應力因素等，進而進行岩體工程設計和評估，更可從各調查點 Q 值之最大值、最小值與平均值來評估該處節理岩體的變異程度，概觀了解露頭的岩體工程力學性質。

本研究挑選數個合適岩石邊坡場址作為傳統岩體評分與半自動岩體評分的評比對象，考量岩體評分法中須針對岩體節理做詳盡的調查與測量，理想研究場址需符合以下幾個條件：

1. 一定範圍的岩盤出露，少有植生遮蔽，確保岩體的大部分特徵都能夠被觀察和評估。
2. 場址具有多組節理，節理具有延續性佳、間距不一、起伏不等之特點。確保在評估過程中可以觀察到不同種類和性質的節理。
3. 有多個調查面（平面、立面）可供人員進行全方位的調查和無人機拍攝工作調查。
4. 非屬管制區的開闊空域，供無人機安全飛行。

綜合以上四點理想條件，本文挑選龍洞海蝕平台作為 AutoQ 評分試驗場址（圖 2），龍洞區域出露龍洞砂岩，以厚層石英砂岩為主，且東北角地質構造發達，岩層經過多期構造應力作用，使砂岩層中存在多組節理，雖然節理特徵較為單調，仍不失為一個合適的調查場址。

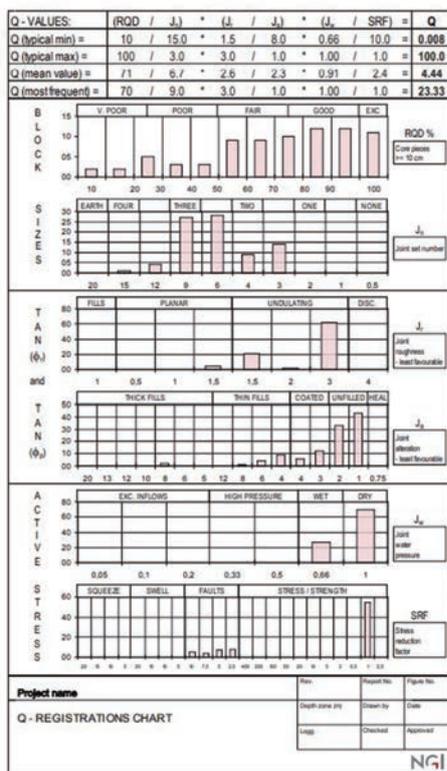


圖 1 Q 法評分表 (NGI, 2015)

(一) 傳統地質調查

本文將選定的岩石邊坡進行傳統地質調查，Q 法岩體評分系統調查開始，先選定好數個欲調查岩壁面，並拍照標注各個調查點位，觀察各調查點位的節理分布樣貌，並假想一鉛直基線作為 RQD 評分參考線，根據調查面上的節理延伸狀況來給定 RQD 值；接著使用地質羅盤測量各調查點位的節理位態，統計平均位態分布與節理組數 J_n；於節理上選定數個測線，將梳齒（取型器）貼附於測線上，利用梳齒紀錄節理起伏程度與樣貌，並將梳齒成果描繪於紀錄本上，並以此為依據來判定該節理的 J_r；再由人員目視判定調查點位的節理起伏與夾心狀況 J_a，以及節理滲水狀況 J_w，最終考量現場大地應力情形來給定 SRF 值，即完成一處露頭的 Q 法評比（圖 2）。

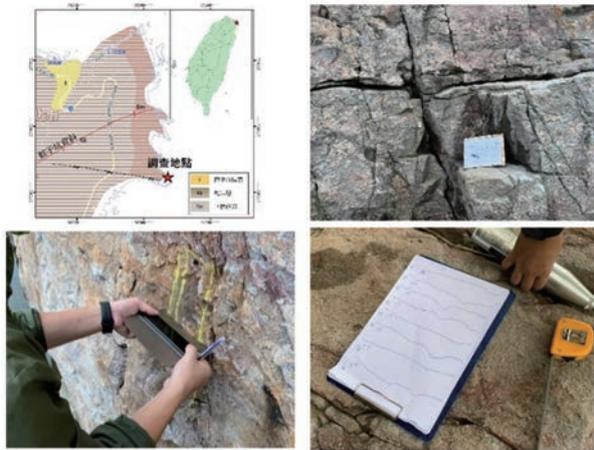


圖 2 本文調查地點與現地進行傳統 Q 法岩體評分

(二) 科技輔助調查

為獲取岩石邊坡點雲資料，本研究利用無人飛行載具 (UAV) 進行航空拍攝，利用多航線、低高度、多視角來捕捉調查場址之細部節理特徵 (圖 3)，並於調查場址四周佈設 3 處地面控制點，使用國土測繪中心網路進行虛擬基站即時動態解算 (VBS-RTK) 測量，獲取公分級的地面控制點坐標。接著，將地面控制點坐標輸入商業建模軟體 ContextCapture，以產製高精度、高解析度三維點雲模型、正射影像與地表數值高程模型，精細的攝影測量作業使得點雲資料足以反映岩石邊坡的地形起伏與節理特徵，可作為後續半自動岩體評分程式的輸入資料。

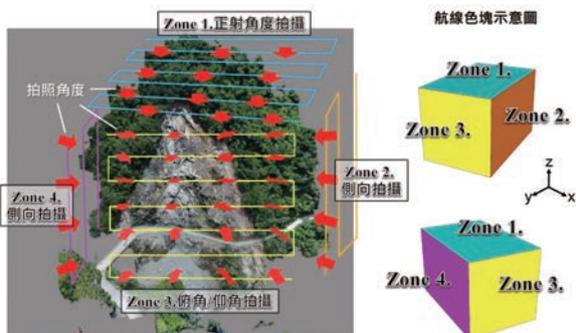


圖 3 多航線多視角拍攝節理岩體，產製高解析度三維點雲模型
 (交通部公路總局第一區養護工程處，2019)

三、點雲分析與半自動化岩體評分程式開發

本文以開源軟體 CloudCompare 程式作為點雲分析主要工具，並以 Python 程式語言撰寫岩體評分程式 AutoQ。

CloudCompare 是一款免費開源的點雲處理軟體，能分析無人機航攝或光達掃描所產製之點雲資料，也能夠處理三角形網格。CloudCompare 最初由 Daniel Girardeau-Montaut 博士研發，主要目的是快速檢測工業設施或建築工地中以光達掃描獲取的三維高密度點雲變化。後來它加入了更多的點雲分析演算法以提升其功效。可貴的是，CloudCompare 為一款獨立的免費開源軟體，符合 GNU 通用公正授權的條款，任何人都可以自由使用它。此外，有許多網友也開發了各種豐富多樣功能的擴充模組，持續豐富了 CloudCompare 的功能。

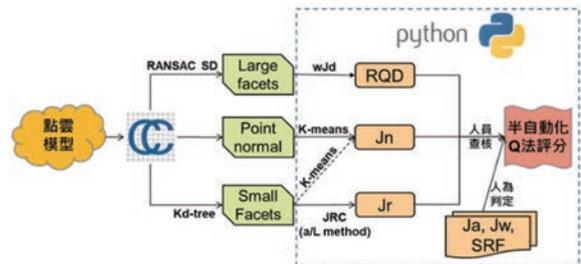


圖 4 半自動化岩體評分分析流程

CloudCompare 提供了一套基本工具，可以手動編輯和分析三維點雲，同時也包括了許多進階的演算法，如投影、比對、距離計算、統計分布、點雲分割、點雲疏化、幾何特徵估計等，使用者可以透過視覺化的方式在軟體中快速獲取點雲的資訊。CloudCompare 可以處理大多數主流的點雲資料格式，包括 obj、stl、las、ASCII、ply 等。另外，也能透過外掛功能引入許多高階的分析演算法如 M3C2、點雲特徵擷取……等。

在本研究中，我們主要使用 CloudCompare 的點雲特徵擷取功能，根據點雲的空間分布趨勢擬合出節理平面，並以此進行進一步的分析，再透過 Python 進行岩體評分法之計算。

本研究選擇 Python 作為程式撰寫工具之原因有二。第一是 Python 為免費開源之軟體，在程式開發上不受專業軟體之商業應用限制，取得容易也易於推廣。其次，Python 在網絡社群中具有豐富的函式庫資源。函式庫是指其他人撰寫的 Python 程式，使用者可以透過下載並安裝這些模組，直接調用模組中的功能，而不需要理解其內部程式碼。這些函式庫都是公開放置於網路上，內容相當豐富，Python 使用者可以免費下載並使用它們。因此，開發人員使用 Python 時，可以顯著減少撰寫基本分析工具之負擔，而能直接針對核心演算法建構分析程式。本研究在編寫程式時，亦需要利用 Python 的函式庫來完成許多特定功能，如三維點雲讀取與計算分析、呼叫 CloudCompare 程式、分析成果製圖、成果介面展示等。

本文案旨在針對傳統 Q 法中的 RQD、J_n 及 J_r 三參數進程式化與自動化，減少人員現場作業負擔與增加作業效率，參考前人文獻後，本文援引適合的岩體評分概念或代替指標，將其加以程式化與自動化，相關流程（圖 4）與參數細節說明如下：

（一）RQD

本參數主要用以量化岩體中節理的空間分布狀況，反映岩體的完整程度。挪威工程地質專家 Palmstrom（1995）提倡加權節理密度法（weight joint density, wJd），wJd 係根據單位面積內節理數目與各自的真傾角，來評估空間中節理的分布密度（圖 5）。因此，wJd 的概念和數值與傳統的節理密度 J_v 相似，可通過 J_v 與 RQD 的經驗公式（式 2）來轉換成 RQD 參數。

$$RQD = 110 - 2.5 * J_v \cong 110 - 2.5 * wJd \text{ (式 2)}$$

本研究利用 CloudCompare 程式內建的 RAN-SAC SD 演算法（Fischler and Bollers, 1981; Schnabel et al., 2007）來萃取同一道節理面上的點雲數據，並產製迴歸平面（本文稱為 Large Facets），藉此代表延續性較佳之節理切割岩體的狀況，並根據 Large Facets 的傾角與水平投影面積來計算露頭點雲模型的 wJd，再轉換成 RQD 參數。

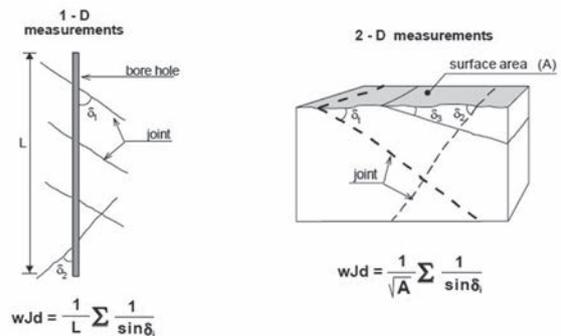


圖 5 wJd 概念示意圖（Palmstrom, 1995）

（二）J_n

本參數為露頭內的節理組數。本文採用兩種方式來評估露頭點雲模型中的節理組數。

第一種為利用 CloudCompare 內建功能計算露頭點雲模型的法向量數據，再利用資料科學中常用的 K-means 演算法來找出法向量數據的聚集中心（位態）與數目（Tokhmechi et al., 2008; Oh et al., 2012; Mammoliti et al., 2022）。

第二種方式為利用 CloudCompare 程式內建的 Kd-tree 演算法來產製長 10 公分的迴歸平面（稱為 Small Facets），再利用 K-means 演算法來找出 Small Facets 數據的聚集中心（位態）與數目。

K-means 演算法預設從 5 組聚集中心開始搜尋，在迭代過程中，若任兩聚集中心相距小於 40 度，則將他們視為同一組位態，將減少中心數目後再次重新搜尋，多次迭代後即可找分析出露頭

點雲模型中的節理組數，且若聚集中心 10 度內的位態數量小於分析位態的 10%，則該聚集中心將被視為偶現節理。

(三) Jr

本參數為節理上的粗糙起伏程度。傳統上皆以定性分級來評估粗糙度，少有定量判定的基準，在此我們沿用 Jn 參數所需之 10 公分的迴歸平面 Small Facets，並根據 Oppikofer 等人 (2011) 提出的建議公式 (式 3)，根據迴歸平面長度 (L，10 公分) 與最大起伏 (a) 來估算各迴歸面的節理粗糙係數 JRC，並依 Barton 等人 (1985) (式 4) 之建議將 JRC 轉換為 JRC₂₀，再統計 JRC₂₀ 的眾數來代表該節理岩體，最後參考 ISRM (1978) 建議，即可將 JRC₂₀ 之眾數轉換為 Q 法所需的 Jr 參數。

$$JRC = a\sqrt{0.2L - \log 80} = 0.447aL^{-0.9515} \quad (\text{式 3})$$

$$JRC_{20} = JRC \left[\frac{L_{20}}{L} \right]^{-0.02JRC} \quad (\text{式 4})$$

JRC₂₀：20 公分之等效 JRC

L₂₀：20 公分

(四) 其餘評分參數

Ja：本參數用來評估節理面的接觸狀況，包括節理面是否有軟弱夾心或曾發生剪動情況。一般是由工程師目視與觸覺檢查節理表面風化或銹染情形，若需自動化辨識則需要進階影像辨識，因此本參數由使用者依據原始近距離空拍照片或高密度彩色點雲模型，視節理表面現況來判定分數。

Jw：本參數為節理面滲水狀況。由於坡面滲水情況需要進行進階的影像辨識，因此本參數由使用者依據原始近距離空拍照片或高密度彩色點雲模型來判定分數。

SRF：本參數為調查場址的現地應力狀況。

本參數可由使用者依據調查場址特性、原始近距離空拍照片或高密度彩色點雲模型來判定分數，一般情況下邊坡場址的 SRF 約在 1 ~ 2.5 之間。

四、AutoQ 程式驗證與討論

(一) AutoQ 可行性驗證

根據 5 萬分之 1 地質圖 (黃鑑水、劉桓吉，1988) (圖 2)，本次調查場址位於蚊子坑背斜南翼，層面大致往南緩傾 10 度，由於岩性組成較缺乏明確的頁岩或泥岩來定義良好的層面，因此本文將接近層面位態的節理與其他節理皆統一歸類為節理，暫不獨立標示層面位態。

岩體完整度部分，龍洞場址主要為厚層砂岩出露，多數調查點位 RQD 值達 70 ~ 100，岩體完整度佳，唯少數調查點位有節理密集帶，RQD 值較低，平均 RQD 值為 90，而從露頭照片亦可明顯分辨龍洞場址的節理組數多為 3 組，常有偶現組節理出現，對應的 Jn 為 12 ~ 15。

節理品質部分，厚層砂岩中的節理多呈波浪起伏，偶有平面狀節理，平均 Jr 為 3，而節理多呈緊閉狀況，部分節理因海浪侵蝕因素呈現打開狀況，但未有填充軟弱夾層，對應的 Ja 為 1。

場址現地應力部分，節理多為乾燥，高程較低、靠海平面的節理因偶有海浪噴濺，因此呈現潮濕狀態，整體而言 Jw 為 1，現地應力屬於近地表的低應力狀態，因此 SRF 為 2.5。

綜整以上 6 項 Q 法參數，根據傳統 Q 法的計算，龍洞場址的 Q 值約為 7.2 ~ 9.0。

科技輔助調查方面，利用精細的露頭點雲模型來進行 AutoQ 分析，依第三節所述利用 CloudCompare 來產製兩種所需 Facets，兩種 Facet 產製成果如圖 6，將原始點雲模型和兩種 Facets 匯入 AutoQ 程式計算 RQD、Jn 和 Jr 三項參數。

AutoQ 計算龍洞場址的 wJd 為 0.785，將 wJd 代

入式 2 得 RQD 為 100；K-means 演算法算出 4 個資料聚集中心，代表有 4 組節理，因此 J_n 為 15；再根據點雲起伏算出 JRC_{20} 的眾數為 16.7，換算 J_r 為 3.4（波浪狀，粗糙或不規則的）。

剩餘三參數， J_a 、 J_w 和 SRF，則依據傳統 Q 法調查之評分帶入，AutoQ 將自動計算岩體參數並產出節理位態分布與粗糙度分布圖。所得的 Q 值為 9.07。

以龍洞場址來說，傳統 Q 法之評分為 7.2 ~ 9.0，而本文研發之半自動岩體評分系統 AutoQ 所得之 Q 值為 9.07，兩種方法所得之數值僅有微小差異，若考量自然界節理面具有隨機性和自然分布特性，以及傳統 Q 法調查在挑選露頭時亦包含人員主觀因素，龍洞場址之評比差異尚屬合理範圍內，AutoQ 分析結果與傳統人為調查評分可謂十分接近。

然而，除了人為主觀判定因素外，點雲品質和演算法的準確度與適用性，以下初步探討 AutoQ 的分析限制與可能產生分析偏差，作為後續精進 AutoQ 程式的基礎。

1. 點雲模型的品質和解析度。點雲模型的精度和詳細程度可能會影響到自動分析的準確性。因此，在進行 AutoQ 分析之前，必須確保使用的點雲模型具有足夠的品質和解析度，分析區域點雲間距建議優於 1 公分。

2. RQD 的評分限制，依據露頭點雲模型產製 Large Facets，係考量延續性較佳的節理切割空間中的岩體，因此延續性較差的節理、密集節理帶或出露面積不顯著的偶現節理容易被排除在計算之外，特別是在調查場址的節理延續性不佳，或者節理過於密集的情況下，如砂、頁岩互層，將導致 AutoQ 的 RQD 值被高估。

3. J_n 部分，若節理出露的面積過小，則點雲模型中的節理數據容易不足，此時不論是依據原始點雲的法向量或 Small Facets 來進行 K-means 演算法找出聚集中心，都將因數據不足而使延續性較差的節理、偶現節理或出露面積不顯著的節理被程式認為沒有足夠聚集性，因此 J_n 項目可能被低估。

4. J_r 部分，節理的起伏從毫米級到公分級都有，亦有波浪狀起伏與階梯狀跳階的差異，若要精確掌握些震幅較小或跳階較小的節理起伏，則需超高解析度之測繪技術，因此露頭點雲模型的

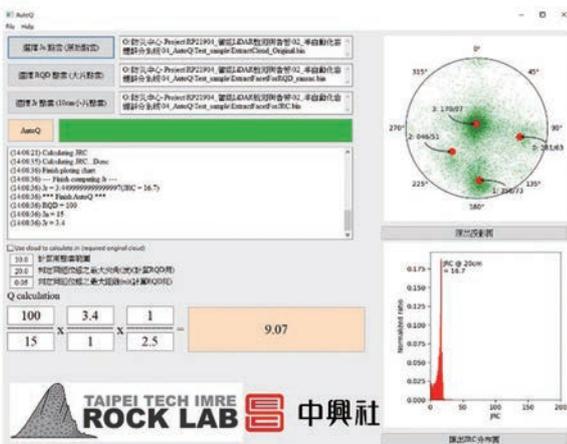
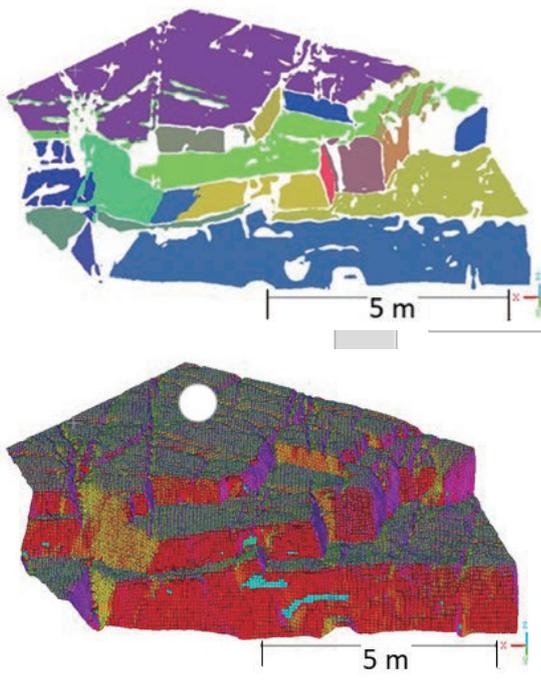


圖 6 龍洞場址所產製之 Large Facets、Small Facets 與 AutoQ 分析成果

點雲密度將不同程度地影響粗糙度評分精確性，若點雲密度不足則無法捕捉到節理的起伏，但若進行超高解析度之掃描作業又需耗費大量時間與作業成本。因此在執行空拍規劃時就需一併考慮作業經濟性與分析準確性，評估拍攝的精度與解析度是否能呈現節理起伏樣貌，若點雲品質不佳將嚴重影響分析成果。另一個可能的誤差來源是節理若有擦痕或剪動跡象，此特殊狀況需由人員詳細調查才有可能發現，現有遙測技術的露頭點雲模型較難偵測節理上的擦痕或剪動，在此種特殊狀況下 J_r 項目可能會被高估。

(二) 點雲密度對 AutoQ 程式分析可靠度之影響

為了進一步了解點雲密度對 AutoQ 程式分析可靠度的影響，選定台三線大埔路段一處倒懸、緩傾角砂頁岩互層邊坡進行高密度 UAV 航拍與地面光達掃描，並選定其中節理發達區域（寬 12 公尺，高 8.6 公尺），分別比較高密度 UAV 點雲（約 480 萬點，間距約 1 mm）、疏化 UAV 點雲（158 萬點，間距 5 mm）與地面光達（139 萬點，間距約 1mm）的分析結果。

分析區域彩色點雲與位態分布、Large Facets 和 Small Facets 擬合節理面如圖 7，從露頭中大致可辨識出 3 組主要節理，但平行坡面的解壓節理稍有起伏變化，因此在大圓投影中可見向西傾的節理組較為散亂，其餘兩組節理有明顯的聚集中心，彼此接近正交。

利用 AutoQ 程式分析三種點雲，無論是高密度 UAV 點雲（間距 1mm）還是疏化 UAV 點雲（間距 5 mm）以及地面光達，所有點雲都給出了相同的 RQD 評分（100），從彩色點雲模型來看此邊坡的砂頁岩互層相對較完整，互層處亦無明顯凹凸，與 AutoQ 分析結果尚屬符合，也顯示間距 1 mm 與 5 mm 的點雲皆可足夠反映此倒懸邊坡的岩體完整概況。

J_n 部分則出現差異，因為分析區域主要由平行坡面的解壓節理組成，朝北傾的節理組出露面積較少，因此在間距 5 mm 的點雲中 K-means 演算法僅偵測到 2 組節理，亦即 J_n 僅有 4，相較之下在間距 1mm 點雲中則可偵測到 3 組節理與 1 組偶現節理， J_r 為 12，顯見點雲密度與出露面積比例顯著影響 AutoQ 的 J_n 分析成果；另一個影響是點雲的覆蓋度，地面光達雖然提供倒懸區塊詳細的空間資訊，但地面光達掃描視角有限，使得部分測區點雲較稀疏，點雲密度不足將影響 J_n 的計算成果。

J_r 部分三者皆獲得 $J_r = 4$ （連續性不佳）之評分，研判為具有起伏變化的解壓解理占據多數面積，使得粗糙度評分相對來的高（圖 8）。

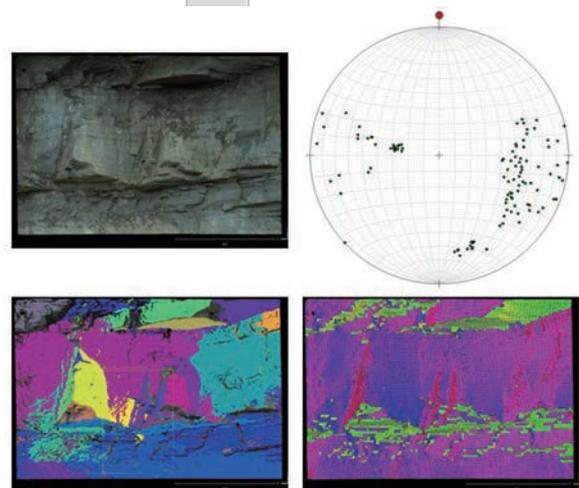


圖 7 倒懸邊坡點雲模型與節理分布、Large Facets 和 Small Facets 擬合節理面

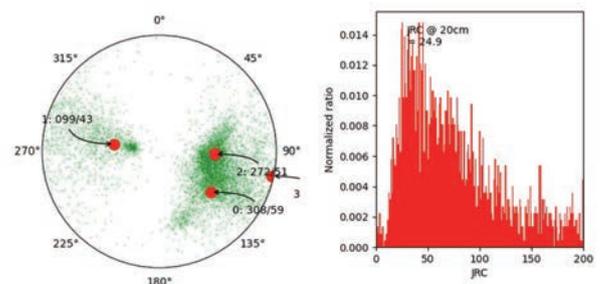


圖 8 台三線大埔路段倒懸邊坡 AutoQ 分析之 J_n 與 J_r 分布

五、結論與建議

經過多次試驗、調整並驗證分析參數，再藉由龍洞海蝕平台之現地驗證與台三線倒懸邊坡之資料敏感度分析，本文研發的半自動岩體評分程式 AutoQ 已在岩體品質較佳、節理特性明顯或層狀岩體的場址，例如：厚層沉積岩區、或者結晶岩體，取得初步成果；然而對於岩體狀況較為破碎、節理特性複雜的場址，因露頭點雲模型的精細度有限，點雲間距可能不足以反映出真實節理細微起伏樣貌，使分析結果較容易偏離現況，雖然縮短無人機、光達的測量距離可有效改善點雲間距不足之問題，來獲取更精細的點雲，地面光達掃描亦有機會獲取張開的節理間的空間資訊，有助於進一步分析節理性質，但須注意有無光達掃描盲區，且過度追求點雲密度將將造成工作效率下降與作業成本增加。

借鑒國內外相關文獻的經驗，本文嘗試經由三維點雲模型進行多項岩體指標分析，綜合評估節理岩體之工程性質，並已取得初步成效。未來將持續改良精進，期望未來可用於實際工程調查案例，協助工程師更安全、有效地進行的節理岩體調查作業。

致 謝

感謝中興工程顧問社小型創意研發案 (RD 21904) 提供研究經費，感謝國立臺北科技大學黃哲彥、卓訓申與洪定義同學協助野外調查，感謝匿名審查委員提供寶貴建議。

參考文獻

黃鑑水、劉桓吉 (1988)，五萬分之一臺灣地質圖及說明書：雙溪圖幅，經濟部中央地質調查所出版。
交通部公路總局第一區養護工程處 (2019)，第一區養護工程處易致災路段 UAV 配合科技監測器材進行邊坡管

理作業之研究，委託研究報告。

- Barton, N., Bandis, S., & Bakhtar, K. (1985, June). Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* (Vol. 22, No. 3, pp. 121-140). Pergamon.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock mechanics*, 6(4), 189-236.
- Battulwar, R., Zare-Naghaddehi, M., Emami, E., & Sattarvand, J. (2021). A state-of-the-art review of automated extraction of rock mass discontinuity characteristics using three-dimensional surface models. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(4), 920-936.
- Bieniawski, Z. T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *Civil Engineering= Siviele Ingenieurswese*, 1973(12), 335-343.
- Buyer, A., & Schubert, W. (2017). Calculation the spacing of discontinuities from 3D point clouds. *Procedia engineering*, 191, 270-278.
- Chen, N., Kemeny, J., Jiang, Q., & Pan, Z. (2017). Automatic extraction of blocks from 3D point clouds of fractured rock. *Computers & Geosciences*, 109, 149-161.
- Fischler MA, Bolles RC. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Commun ACM*. 1981;24(6):381-395. doi:10.1145/358669.358692
- Kong, D., Saroglou, C., Wu, F., Sha, P., & Li, B. (2021). Development and application of UAV-SfM photogrammetry for quantitative characterization of rock mass discontinuities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 141, 104729.
- Mammoliti E, Di Stefano F, Fronzi D, Mancini A, Malinverni ES, Tazioli A. A Machine Learning Approach to Extract Rock Mass Discontinuity Orientation and Spacing, from Laser Scanner Point Clouds. *Remote Sens*. 2022;14(10):2365. doi:10.3390/rs14102365
- NGI. (2015). Using the Q-system : Rock mass classification and support design. <https://www.ngi.no/eng/Services/Technical-expertise/Engineering-geology-and-rock-mechanics/Q-system>
- Oh S, Park HD, Jo YD. Automatic extraction of rock joints from laser scanned data by moving least squares method and fuzzy k-means clustering. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol XXXVIII-5-W12. Copernicus GmbH; 2012:243-246. doi:10.5194/

- isprsarchives-XXXVIII-5-W12-243-2011
- Oppikofer T, Jaboyedoff M, Pedrazzini A, Derron MH, Blikra LH. Detailed DEM analysis of a rockslide scar to characterize the basal sliding surface of active rockslides. *J Geophys Res Earth Surf.* 2011;116(F2). doi:10.1029/2010JF001807
- Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Pedrazzini, A., Derron, M. H., & Blikra, L. H. (2011). Detailed DEM analysis of a rockslide scar to characterize the basal sliding surface of active rockslides. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(F2).
- Ozturk, H. S., Kocaman, S., & Gokceoglu, C. (2019). A low-cost approach for determination of discontinuity orientation using smartphone images and application to a part of Ihlara Valley (Central Turkey). *Engineering Geology*, 254, 63-75.
- Palmstrom A. RMI-A for Rock Mass Characterization System for Rock Engineering Purposes. Ph. D. Thesis. University of Oslo; 1995.
- Riquelme, A., Cano, M., Tomás, R., & Abellán, A. (2017). Identification of rock slope discontinuity sets from laser scanner and photogrammetric point clouds: A comparative analysis. *Procedia engineering*, 191, 838-845.
- Schnabel R, Wahl R, Klein R. Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection. *Comput Graph Forum.* 2007;26(2):214-226. doi:10.1111/j.1467-8659.2007.01016.x
- Tokhmechi B, Memarian H, Noubari H, Moshiri B. Joint Study Based On K-Means Clustering, Asmari Formation, South West Iranian Oil Fields. In: ; 2008. Accessed August 24, 2022. <https://onepetro.org/ISRMARMS/proceedings/ARMS508/A11-ARMS508/ISRM-ARMS5-2008-159/170337>

叢書訊息

(一) 堆填壩施工手冊(增修版)

邱鴻章 編著

2022 年 2 月初版

(二) 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

(三) 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

逾齡導水隧道水文地質調查 與損壞機制研判之應用

周柏儀* 蕭富元** 徐星豪***

摘 要

臺灣在清領與日治時期各地為因應農業用水需求，常由地方仕紳或官方籌資共同興建了許多水圳和隧道，導引水源自高地至低處農田進行灌溉，在竣工百年後的今日尚在營運供水者不在少數，甚至仍為區域民生、工業與灌溉用水的命脈。然而，結構老劣化導致損壞風險提高是許多逾齡導水隧道共同面對的課題，如不予理會勢必逐漸造成輸水效能的降低。本文針對我國逾齡導水隧道可能損壞機制進行初步整理，並從逾齡導水隧道內部構造調查與外部環境水文地質調查兩部分進行探討，再以實際案例之處理對策說明如何透過有效的調查技術從地表、地層及隧道內三方面進行探測，掌握隧道結構、周圍地層及地下水文狀況，據以診斷損壞成因，提出最適合的對策與修復工法。

關鍵字：逾齡導水隧道、水文地質調查

一、前 言

基礎建設乃維持都市運作、公共服務和保障人民生活的關鍵系統工程，然其功能在興建完成後隨著時間推移多會逐漸出現不同程度的損壞和劣化，若未有效掌握其建設背景與結構現狀，定期進行檢測與補強，功能衰退的幅度與速度預期將會相當顯著（Mottahedi et al., 2021）。作為常見基礎建設之一，隧道在都會運輸、灌溉、發電、排水等各工程領域中都扮演著重要的角色，特別是在地質活動相對頻繁的地區，隧道被視為

相對理想的選擇，係由於其可克服地質變動，穿越山脈、丘陵、河流或其他地理障礙，減少對地表空間的占用，從而提供有效的運輸和通行方式（Ganesha et al., 2017）。如前人所述，在許多都市發展的歷史脈絡中，隧道是一必要但卻往往容易受到忽視的存在（Squire & Dodds, 2020）。

就形式而言，導（供）水隧道的功能係將水從水源地或水庫輸送到需要用水的地方，滿足系統長距離供水需求，且多半是從山區藉由重力將水源轉移到低地，或搭配各種類型的閘門和泵站進行揚水（Grigg, 2012）。與交通運輸型隧道相

* 中興工程顧問社大地工程研究中心高級研究員

** 中興工程顧問社大地工程研究中心前地工維安組組長

*** 農業部農田水利署桃園管理處管理組組長

較，就設計上的需求來說，導水隧道除了需特別注重流量、水壓和環境水力特性，主體結構更需考量採用耐水壓、耐磨損與抗腐蝕的設計，使其可承受水流壓力變化和環境承載的影響，確保計畫水量得以有效運輸。就目的來說，導水隧道所肩負的任務除了區域水源調配、水力發電、水資源儲存、城市供水之外，最重要且常見的功能乃灌溉系統的串聯，將水從河流、湖泊或水庫引導

到農田進行灌溉，促進作物生長和穩定農業產量。而與灌溉系統中其他常見設施相較，前人統計指出各農業大國在導水隧道所投入的建設成本固然較高，但在後續操作與維護成本上的投資卻往往偏低（表 1），這說明瞭導水隧道在許多灌溉系統中乃不可或缺的一環，但由於空間、長度、位置、內部資訊的侷限，使例行性調查與維護更加困難。

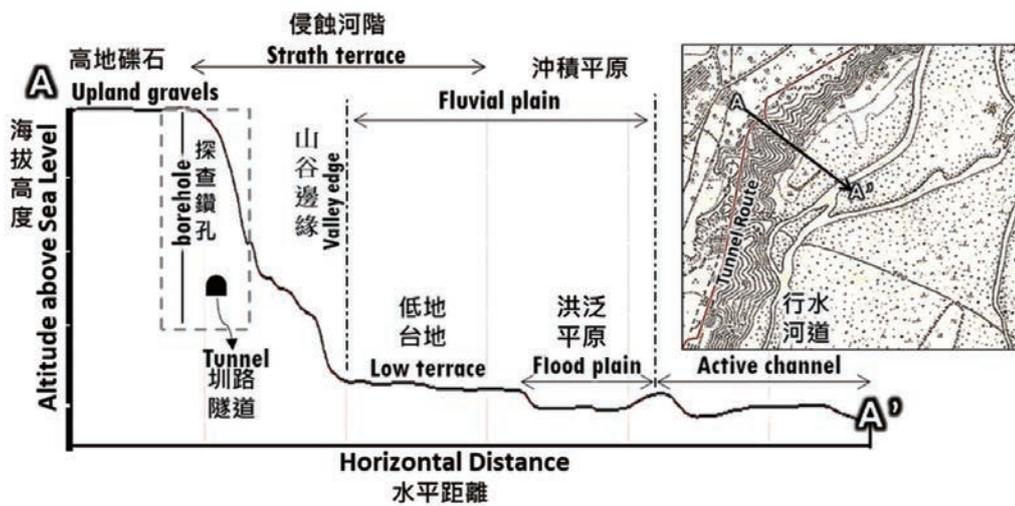


圖 1 沿河階地形鑿設灌溉引水隧道之空間概念圖

表 1 常見基礎灌溉設施建設與操作維護成本比較

構造設施類型	設施用途	成本	
		建設	操作維護
水庫／壩 (dam/reservoir)	貯水	高	中
蓄水池 (storage tank)	貯水	中	低
埤塘 (farm pond)	貯水	中	低
隧道 (tunnels)	輸水	高	低
渡槽 (aqueducts)	輸水	中／低	中
灌溉管道 (canals)	輸水	中	低
排水道 (drainages)	排水	中／高	低
水閘 (gates)	輸水	低	低
幫浦 (pumps)	揚水	中／低	高
管線 (pipes)	輸水	中	低
井 (wells)	取水	中／低	中／高

參考資料：Ward (2010)

自清朝治臺、日本領臺，乃至於臺灣光復後，伴隨各地不同時期灌溉事業之演進，臺灣早期為滿足區域性的穩定灌溉用水需求興建了許多水圳系統，並順著丘陵與河階地形起伏鑿設了為數眾多的導水隧道進行串聯（如圖 1 所示），成為解決地表水源時空分布不均的方案。如《彰化縣志》所載「……穿山鑿石數十丈，流出灌溉七十餘……」即描述了位於草屯鎮北投新圳（原名險圳）將烏溪河水透過人工鑿設隧道穿越茄荖山，引至草屯地區進行灌溉的過程，時人並以「石圳穿流」稱之（陳哲三，2006）。包括新北市瑠公圳（大坪林）引水石硿、雙興里自來水隧道、桃園市龍潭區桃園大圳導水隧道、大溪區月眉圳石

碇、新竹縣竹東圳導水隧道、南埔圳導水隧道、苗栗縣尖山下圳水隧道、臺中市後裡圳隧道、新社鄉白冷圳隧道、南投縣中寮鄉永芳圳隧道、國姓鄉龍泉古圳隧道、嘉義市道將圳導水隧道、臺南市舊烏山嶺引水隧道、高雄旗山東埔導水隧道、圓潭子導水隧道、屏東縣春日鄉內溪圳幹線隧道、臺東縣鹿野大圳隧道、竹湖圳隧道、花蓮縣吉安鄉吉野圳隧道、玉里鎮迪佳圳隧道、宜蘭縣三星鄉大光明圳渠隧道、叭哩沙圳隧道……等，皆年復一年承擔著農田灌溉、民生用水的多元任務。

從許多歷史文本的資料可知，早期因工藝、機具與技術的缺乏，導水隧道工事的進行多是透過人力挖掘或鑽炸的方式進行開鑿，並以磚造或砌石的方式作為襯砌支撐材料，工程艱辛且漫長，施工過程中崩塌事故的發生也時有記載。時至今日，這些年近百齡的灌溉關鍵設施多數仍持續維持營運，實屬不易。然而，與他國所存在的現況相仿（Ward, 2010），基礎設施逾齡和維管成本不足乃主管機關所面臨的共同問題，加上部分導水隧道既有規劃功能已無法滿足現今社會需求，在氣候變遷、人口增長、糧食安全等政策思辨中，問題將變得更加複雜。可預期當水文環境時空條件改變，結構老化與損壞風險的提高是許多逾齡灌溉型導水隧道勢必面對事實，如不予理會將逐漸降低渠道之輸水效能，無論地方政府、國營事業或農田水利單位都應即早進行更有前瞻性的完整評估（農田水利署桃園管理處，2022）。因此，本文撰寫的目標乃提出逾齡導水隧道可能損壞機制，並從隧道內部構造調查與外部環境水文地質調查兩部分進行探討，再以實際案例之處理對策與建議來說明。

二、導水隧道損壞機制

與其他基礎設施相較，隧道建設面臨最大的

挑戰在於開挖時遭遇未知地質狀況，使得工程的複雜性和風險逐漸增加，例如無法預期是否在開挖過程會遭遇岩層物理特性改變、地下水位的變化和流動、斷層或剪裂帶的出現。前人（Efron & Read, 2012）藉由多年國際案例回顧指出，隧道建設的成功與效益會受到舉凡施工方法、襯砌形式、材料設備、隧道幾何、工料測量、勞動人力，乃至於法規限制等許多直接和間接因素之影響，而這些因素都與隧道建設所在場址所具有的水文地質條件（Soldo et al., 2019）緊密相關。唯有採取適當的調查方法蒐集或補足資訊，並制定靈活的風險管理計畫，才能減少水文地質未知性所帶來的負面影響。

參考日本土木學會 2003 年發行的「トンネルの状メカニズム（隧道變形機制）」（蘇藤成譯）一書所載，要維持導水隧道內的流水在無損失的情況下順暢流通，必須確保隧道構造穩定、水流阻力小、隧道內流速與流量在可控範圍內，其與隧道所處外在環境息息相關（中興工程科技研究發展基金會，2007）。另就日本農林水產省農村振興局（2016）頒布之《農業水利施設の機能保全の手引き》所述，常見農水灌溉隧道按斷面形狀來區分，主要包括圓形（円形）、馬蹄形和拱形（ほろ形），其中又以馬蹄形過水斷面因具有水流條件好、受力性能優越，故獲得廣泛採用；就水力特性而言，可分為壓力式及無壓力式隧道水路，前者為滿管狀態，內部水頭壓力會作用在隧道結構上，後者具自由水位面，內部水壓並不作用於隧道結構；按地質型態來區分，農水灌溉隧道有岩石隧道及土層隧道的分別，岩石隧道係指建構於風化程度低的基岩及高度固結的軟岩，土層隧道則主要在鬆散土層與低度固結軟岩中建造。

臺灣早期灌溉型導水隧道斷面尺寸和規模通

常較小，係以可承載其上方覆土荷載進行設計，且多採用木板樁進行支撐；內部覆工襯砌可能由一或至數層磚塊堆疊組成，堆砌數量與形式繁複且受施工條件所影響，磚的吸水量和耐壓強度品質也因燒製狀況有所不同；而受地質掌握度及施工技術等因素影響，磚造隧道實際開挖斷面尺寸形狀常與原設計略有差異，不整合面必須透過木頭、米糠或小磚塊等材料填塞，使支撐襯砌能發揮其效果。惟木頭及米糠填塞物的耐久性不足，無法完全充分填塞情形下，隧道砌磚與周圍地層常有空隙出現；一旦支撐工無法與襯砌後方地盤完全密接，很容易在襯砌背後形成空洞，除了空隙易有地下水蓄存，亦不利於襯砌受力穩定；若在襯砌施築完成時未確實回填砂礫或渣料，或回填料逐漸老化流失，襯砌後方地盤將逐漸鬆弛，將導致隧道襯砌結構（石材或砌磚）錯動變形，

成為構造上的弱點。

再者，對於以傳統工法搭配磚造材質襯砌進行建造的隧道來說，其結構功能將受到地層應力、地下水壓、上覆地層條件改變、設計或施工不良、襯砌背面空洞回填不實等諸多因素所影響，逐漸使隧道出現不同形式的異狀或損傷，舉凡磚塊材料劣化、磚塊表層剝離及剝落、砂漿保護層剝離及剝落、襯砌表面附著煤煙、襯砌裂縫、滲漏水、磚塊勾縫材料流失、磚塊錯動、襯砌變形擠壓等。此外，臺灣位於板塊聚合帶，地質破碎且大地應力複雜，圳路與導水隧道的興建受圍岩應力作用、地下水流滲透、淘蝕等因素影響，不僅需克服地形起伏與河川襲奪的挑戰，也面臨暴雨與地震的威脅。如圖 2 所示為日本農林水產省農村振興局（2016）所歸納出農水灌溉隧道功能損壞或劣化的主要原因、徵兆與後果。

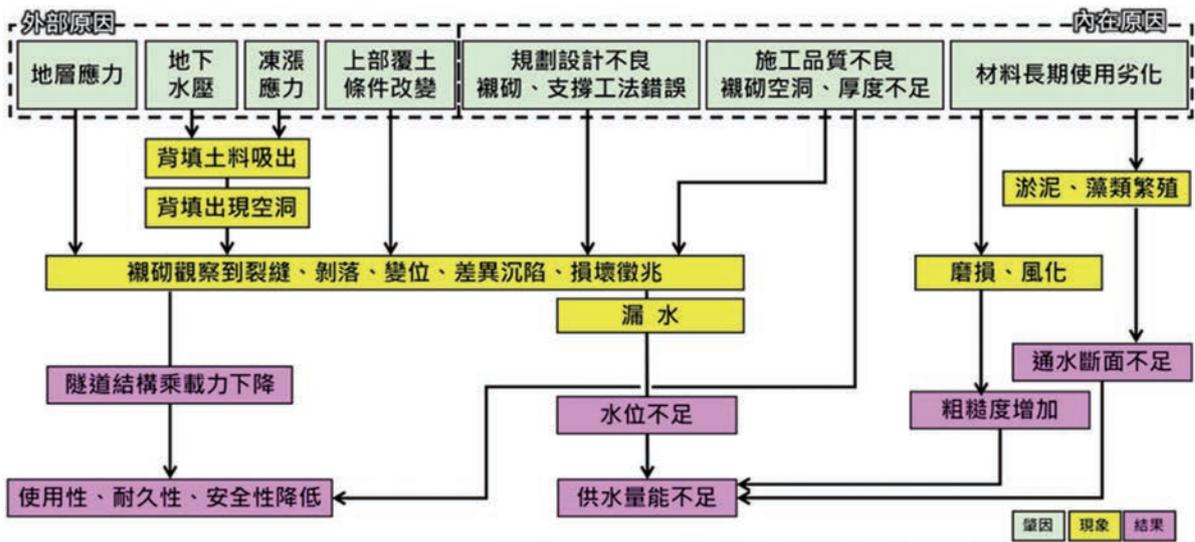


圖 2 農水隧道功能劣化的原因、徵兆與後果（日本農水省農村振興局，2016）

許多針對日治時期水利工程進行考證的文獻皆指出，圳路隧道工程往往必須邊挖邊修正，建造過程危險且艱難（于景讓，1950；范德星，

2007；林煒舒，2020）。也因此，臺灣早年所興建的水利隧道由於設計觀念與施工技術相對較為原始，加上長期使用和水岩交互作用的影響，隧

道各種元素必然出現不同程度的劣化，結構安全與功能隨時間也將大幅降低，導致部分區段崩塌或瀕臨損壞而需予以重建。例如在日治大正五年（1916年）動工以八年的時間完成的桃園大圳幹線，乃北臺灣第一大水圳系統，其沿線計有8座隧道，施工期間曾遭遇地層結構不穩，施工期間土砂崩塌導致坑道掩埋與工事中斷的狀況，而1924年通水啟用後也曾發現有仰拱隆起損壞（圖3）、地表塌陷、襯砌磚塊脫落，崩塌阻斷通水的



圖3 桃園大圳3號隧道仰拱隆起實況案例
（本團隊拍攝）

紀錄；日治大正十一年（1922年）興所建負責供應烏山頭水庫水源的舊烏山嶺引水隧道，自1929年通水啟用發現隧道結構老化，襯砌結構出現剝落、錯位、斜向裂縫、滲漏水等諸多問題，輸水能力降低，歷經多次修補，仍無法復原其設計功能及結構性能，後才在2013年開鑿新烏山嶺引水隧道取代（林與陳，2018）；日治昭和元年（1926年）興建迄今灌溉面積達800公頃的竹東圳，是新竹縣重要水利工程，主要攔取上坪溪溪水穿行竹東丘陵之東北山麓供灌至竹東地區，灌溉田地面積將近800餘公頃，沿線計有十三座導水隧道皆由人工開鑿，結構在持續淘刷與地層擠壓作用下已出現抽心、變形及坍塌的狀況（魏與楊，

2004）。又如更早期據聞建於清朝道光25年（1845年）新竹縣北埔鄉南埔圳是當地重要的灌溉水源設施，幹線系統有一半以上由磚造隧道組成，由於所在地質環境為鬆軟的岩層，常有淤積情況發生，雖曾經於1991年進行整修，引水隧道工作空間狹小，工程機具難以到達，年久失修，接連出現崩塌、淤積、滲漏狀況，近年更曾出現斷水現象。

三、逾齡導水隧道內部構造調查

逾齡導水隧道損壞經常不是源自於單一肇因，例如長期使用和老化磨損導致裂縫和漏水異狀有可能因其他因素例如地震活動、水壓變化或地質變化進一步加劇和擴大，而隧道的設計、建造和維護過程所存在的缺陷或錯誤，例如材料選擇不當、建造技術不足或維護工作的疏忽，也有可能導致隧道損壞點逐漸暴露或惡化，如何透過調查與專業評估相關可能成因相當重要。

從隧道內部結構的調查來看，參考日本農林水產省所（2006）公布的農業灌溉設施功能保護指南，不同地質條件可能造成隧道變形的應力形態不同，而襯砌出現結構損傷或異狀乃隧道已發生損傷的最直接證據，如襯砌裂縫彎曲度、剪切形式、位置、長度、方向、發展速度等，皆可用以隧道損傷成因評估與程度之研判。參考日本農水省農村振興局（2016）所彙整隧道變形模式有三：

——**塑性地壓**（日文名稱：塑性圧）泛指隧道開挖時次應力（secondary stress）超過周邊地盤強度所產生的塑性區，其隨時間推移膨脹而使地層鬆動並發生塑性變形的現象。而當隧道完成後，隧道下方地盤有可能處於非束縛狀態而出現隆起，隨時間日久塑性區逐漸擴大，連帶有可能

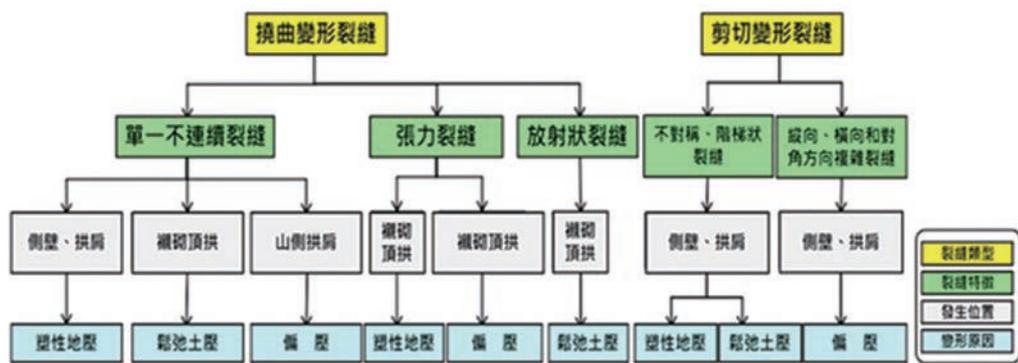
產生擠壓現象，並間接引起壓縮裂縫、開口裂隙、剪力裂縫、側壁擠出、隆起等狀況。由於塑性地壓所引起的變形多半是長期而緩慢的發生，日本農林水產省所（2006）農業灌溉設施功能保護指南建議在隧道內部調查時需確認的特徵包括在側壁或頂拱是否出現縱向張力裂縫（開口裂縫）、在側壁觀察是否有因擠壓而導致淨空寬度減少、施工縫錯動、仰拱基座開裂上浮、隧道頂部發生挫曲等。

——鬆弛土壓（日文名稱：緩み圧）泛指因隧道開挖，因支撐下陷或襯砌背面出現空隙而引起隧道上方地盤鬆弛，例如鬆弛岩塊崩落，上覆地盤的垂直向荷重直接作用於襯砌而導致破壞。此狀況最容易出現在無黏土成分的破碎岩盤、砂岩岩盤、高度風化岩盤。鬆弛土壓的大小和速率與上覆土層特性、時間因素和荷載條件有關，日本農林水產省所（2006）農業灌溉設施功能保護指南建議需確認的特徵包括隧道頂端是否存在縱向張力（開口）裂縫，而側壁卻未發現擠出或隆起現象、若襯砌變形存在，則拱肩部至起拱線附

近是否有縱向壓縮裂縫、觀察裂縫是否移動，或在襯砌厚度極端變化處是否出現剪力裂縫。

——偏壓（日文名稱：偏圧）泛指隧道橫斷面左右非對稱作用於襯砌的地壓，相對於隧道斷面中心線，頂拱單側形成主動土壓作用區，並在反側背向上推舉形成被動土壓作用區。特別是當覆土層較薄，地層傾斜時最容易發生，包含邊坡潛變、坍方、隧道側施工開挖均為可能的偏壓肇因。偏壓所引起的隧道變形多出現在受地形影響的隧道洞口或淺覆土層段。由於其為地層左右不均勻載重作用之影響，日本農林水產省所（2006）農業灌溉設施功能保護指南建議包括在山側拱肩部是否觀察到水平開口裂隙、在頂拱或谷側是否有挫曲、在山側的逆襯砌封頂部分是否觀察到接縫錯位、斷面軸是否發生旋轉，隧道向谷側變形、谷側側壁是否出現水平開口裂隙等是主要關注重點。

如圖 4 所示為日本農水省農村振興局針對磚造農水隧道襯砌裂縫評估所彙整出的觀察重點與原因。



「無筋コンクリート覆工形式(支保工有・無)」の性能低下プロセスの例

圖 4 農水隧道襯砌裂縫觀察重點（日本農水省農村振興局，2016）

日本農林水產省農村振興局（2016）指出，針對農水隧道之調查除可在通水期間使用依靠水流帶動的水下攝影設備進行調查外，調查期間應

配合斷水在隧道內無水（或低水位）情況下進行調查，本文整理其建議內部構造損壞調查的項目與紀錄方式如表 2 所示。

表 2 日本農水隧道內部構造調查項目與紀錄方式

功能表現	分類	調查項目	調查方式	紀錄手法
安全性	裂縫	最大裂縫寬度	定量計測	定量記錄
		裂縫擴展長度	定量計測	照相記錄
		裂縫類型	類型鑒定	繪圖
		裂縫間距	目視確認、 定量計測	定量記錄
	變形、 扭曲	內空斷面位移	目視確認、 簡易計測 (鉛錘、電 桿)	定量記錄
抗壓 強度	抗壓強度	抗壓強度 (回彈錘 法、機械阻 抗法)	定量記錄 照相記錄	
安定性	出水 帶砂、 漏水	滲漏狀況	目視確認	照相記錄 繪圖
	不均勻 沉降	沉降曲折 狀況	目視確認、 簡易計測 (量尺)	定量記錄 照相記錄 繪圖
	地盤 變形	襯砌背面掏空	敲擊回音 調查	照相記錄
		地面沉降/ 凹陷/開裂	目視確認	繪圖
前次調查 記錄複查	接縫 損傷	接縫開口	目視確認、 計測量尺	定量記錄
		接縫間距	目視確認、 計測量尺	照相記錄
		止水板破損	目視確認	照相記錄
		接縫處滲漏	目視確認	繪圖
		混凝土缺陷	簡易計測 (量尺)	定量記錄

參考資料：日本農水省農村振興局 (2016)

四、導水隧道外部環境水文地質調查

有鑑於結構與通水效能可能受到多種外部環境因素例如水壓變化、溫度變化、地質活動而有不同程度的損害，從許多過往研究案例的歸納可知，隧道損壞與其內部結構、周圍地層及地下水文狀況三者的連動與互制有絕對的關聯性。針對日治時期興建的圳路隧道系統來說，目前對於早年施工當下的環境、條件、設備、甚至評估標準之記載往往付之

闕如，在無工程實證記錄的狀況下，無論是追溯其水力行為的改變或早期地質活動對於隧道所造成的影響多數都基於不確定的假設，規劃適當且有效的水文地質調查工作即相當重要。

隧道水理安全檢測與損壞調查方法眾多，各種方法各有其特點與適用性，過往經驗顯示不同地層所展現的水文地質特性，乃至於所引發的力學破壞機制皆有所不同，如果僅針對個別調查資料探討，將可能失之偏隅。

有鑑於國際上隧道的維護觀念為「主動預防式維護」與「延壽」，意即對隧道結構功能應進行積極且全面檢視，精準掌握結構現況及潛在弱點，因此就逾齡磚造導水隧道的特點來看，本團隊認為有效的作法是需規劃經常性隧道內部水理功能巡檢（項目建議如表 3 所示），並在隧道沿線辦理系統性水文地質特性調查（工作概念流程如圖 5 所示），布置動態監測系統，由外而內掌握導水隧道外部環境實際水文地質現況。

表 3 日本農水隧道內部水理功能調查與紀錄方式

調查項目	調查方式	紀錄手法	說明
排水設施、 安全設施狀況	目視確認	狀態記錄、照 相記錄	非灌溉期
氧氣濃度、有 毒氣體、泉水	氣體測量、 目視確認	定量記錄、照 相記錄	非灌溉期
通水流量	流速測量	定量記錄、照 相記錄	灌溉期
通水水位	固定水尺	定量記錄、照 相記錄	灌溉期
通水斷面	土砂堆積測量	定量記錄、照 相記錄	非灌溉期
隧道坡度	縱向測量、水 準測量	定量記錄、照 相記錄繪圖	非灌溉期
通水面磨損 狀態	目視確認	照相記錄、繪 圖	非灌溉期
是否有變 形狀況	定量測量、目 視確認	定量記錄、照 相記錄繪圖	非灌溉期
坑道口水位 變化	目視確認	照相記錄、繪 圖	灌溉期

參考資料：日本農水省農村振興局 (2016)

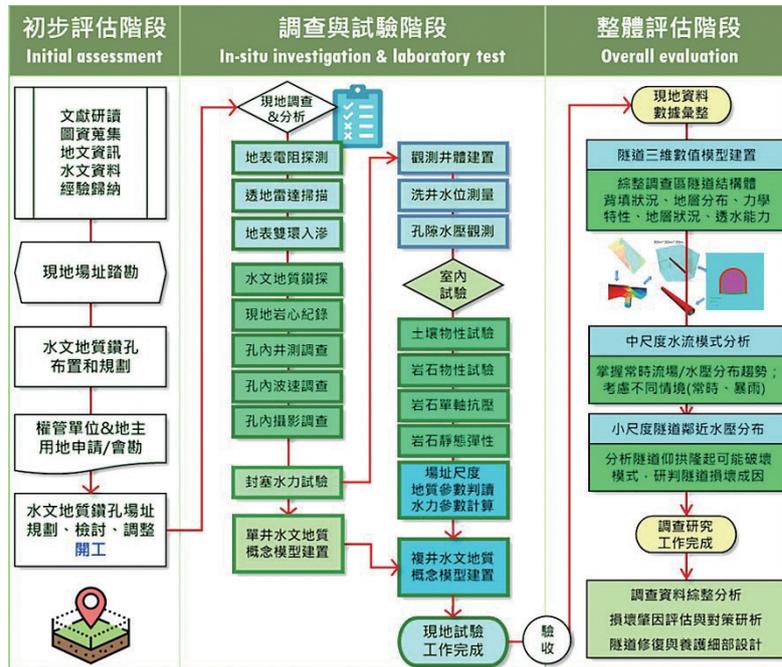


圖 5 隧道沿線水文地質特性調查工作概念流程

五、處理對策案例

每一條逾齡然尚營運中的導水隧道無論在歷史背景或環境條件上都有其獨特性，內在損壞問題與肇因亦復如斯。以古名八塊厝申壩附近埤圳（今桃園大圳）引水隧道為例，過往資料指出該隧道在施工期間曾數次因地層結構不穩，土砂崩塌導致坑道掩埋與工事中斷，乃至於變更隧道設計路線，竣工初期亦有多次結構損壞而進行修繕的紀錄，報載隧道沿線也曾出現零星地表塌陷情形。近年，在隧道其中一處關鍵轉折段於巡檢過程中更發現仰拱曾經修復後又再度隆起的狀況，這說明其損壞的肇因與機制可能比預期中複雜。為避免此隆起段進一步惡化，影響導水路結構安全及系統整體供水穩定，本團隊受主管機關委託於隧道短暫斷水或處於低水位情況下進行一系列水文地質調查，釐清隧道損壞肇因，據以設計出適合的修復工法。

著眼於該隧道所串連的圳路系統乃桃園及新竹地區農田灌溉的命脈，且圳路沿線亦有其他用水企業，隧道內的調查因此需配合民生與工業需用水時機之空檔分次進行。本團隊從地表、地層及隧道內三個方面以目標性導向為原則（如圖 6 所示）進行試驗工序的規劃，確認技術相關環節之間的邏輯關係。其中包括透過現地試驗（水文地質鑽探調查、井下地球物理探測、井內水力試驗、地表雙環入滲試驗）來獲取不同尺度的水文地質參數，比對並整合連續性探測資料，再搭配地球物理技術（例如透地雷達）研判之襯砌背後空洞分布，將不同水文地質調查成果資料（含水層構造、地層透水性、地下水流等）交互比對之後，針對鑽孔特定區段水文地質特性提出更細緻的描述，包括場址水力結構特性及地下水流動特性分析，回饋後續數值模擬的驗證與破壞模式分析。

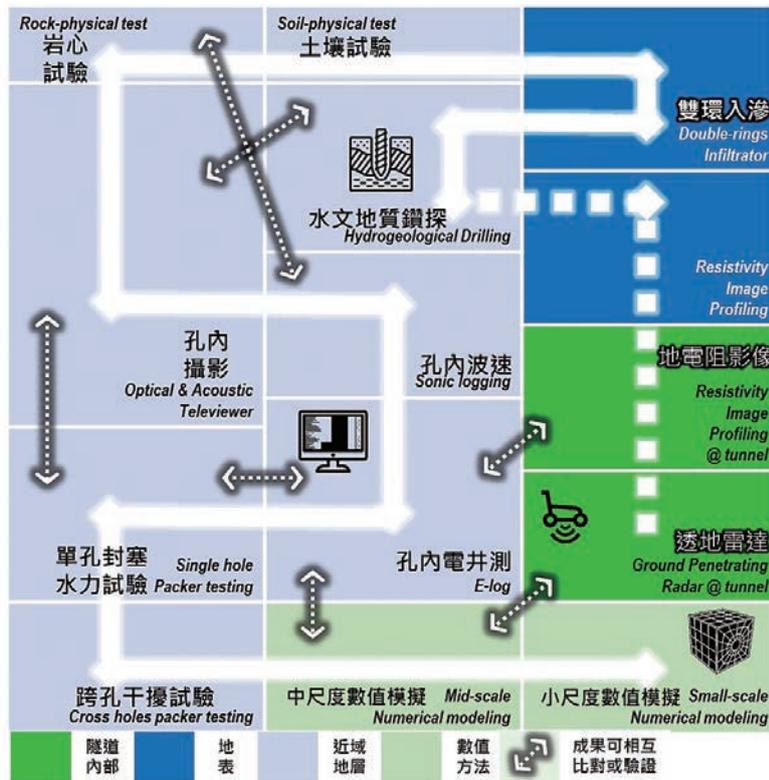


圖 6 串聯地表、地層及隧道內水文地質調查技術之規劃概念圖

調查結果顯示該案例地質單元主要包含桃園層及卓蘭層，前者由礫石與砂所組成，頂部覆蓋紅土屬於含砂之低塑性黏土，後者主要為厚層細至中粒砂岩及頁岩互層；透過地表地電阻影像調查可知上下地層因岩性不同而呈現電阻率差異，而比對常時與強降雨後之結果可觀察到上部地層出現高低電阻率改變，說明其因結構相對鬆散、破碎而在雨後有明顯含水量比例上的差異。由水文地質鑽探調查可知上部地層卵礫石分布密集，礫間所夾黃棕色砂土在未飽和層中形成優勢水流路徑，導引入滲水體快速往岩層交界面蓄積，下部岩盤地質材料強度低，屬於軟弱岩層，搭配室內試驗數據可知具有膠結不良，浸水軟化且易風化崩解之特性；而從現地兩處鑽孔等深資料之比對，可觀察到地下水滲流方向在隧道周邊出現改變，研判係因隧道周圍軟弱岩層膠結不良，開挖

日久岩層解壓、鬆弛而產生新的地下水滲流路徑之故。雙環入滲試驗結果顯示入滲潛能極佳，孔內地球物理探測結果顯示下部砂岩層整體反應為質地軟弱的訊號特徵，連續性力學參數推估也呈現強度降低的現象，為孔隙率高、裂隙少的多孔結構形態；透過封塞水力試驗可知本處場域透水潛能大，蓄水係數高。依此歸納，該隧道區段仰拱隆起應為地下水滲流、隧道圍岩軟弱破碎、仰拱結構支撐力降低、洩水功能失效等複合因子所造成的綜合效應，後續修復設計即應採疏導為主防堵為輔之策略為佳。

六、結論

基礎設施的老化並非直接指涉其結構已具有脆弱度，而是說明了其作為基礎設施的角色與功

能具有難以替代性。導水隧道由於長時間受到覆土壓力和水流的作用，常年處於潮濕環境，構造侵蝕、腐蝕、損壞等問題勢必隨著時間的推移逐漸增加，連帶系統的可靠性和安全性也會降低。與多數基礎建設相同，隧道可使用年限同樣取決於初始設計條件、建造標準和預期環境條件，然而逾齡隧道與現代化隧道相比，最顯著的差異性在於今日水文或地質環境狀態可能與當年所預期的條件大相逕庭。誠如前人所述，隧道維護管理的思維應以「主動預防式維護」與「延壽」為導向，對於逾齡導水隧道的維護管理來說，關鍵前提至少有三：

(一) 水文地質調查：對所處的水文地質條件進行詳細調查和評估，以了解隧道所面臨的水文環境和地質條件，包括地下水位、岩層結構、岩性特徵、地下水質等，提前辨識潛在風險。

(二) 結構組成檢核：透過非破壞檢測技術確認包括斷面尺寸、支護結構、襯砌厚度、洩壓設計、材料級配等是否遵循標準和規範，以應對可能的地質變化，確保隧道結構穩固性。

(三) 定期監測和檢查：建立有效的監測系統，對導水隧道的水位、水壓、水質、結構變形等進行定期監測，從而實施相應的預防措施。

致 謝

本文特別感謝農田水利署桃園管理處管理組灌溉股股長王秀娟協助提供參考資料與撰寫方向之討論，使本文得以順利完成。感謝本文匿名審查委員所提供之寶貴意見，使本文更臻完善。

參考文獻

于景讓，(1950)，臺灣的水利問題，臺灣銀行季刊，第3卷，第3期，第1-67頁。
中興工程科技研究發展基金會，2007，隧道的變形機制「トンネルの変状メカニズム」(蘇藤成譯，原由日

本土木學會 2003 發行)，320p。
日本農林水產省農村振興局，(2016)，農業水利施設の機能保全の手引き，農業土木事業協会(日文文獻)，104p，www.maff.go.jp/j/nousin/mizu/sutomane/attach/pdf/kinouhozen-101.pdf (access at 111.08.01)
林得志、陳榮燦，(2018)，新烏山嶺引水隧道工程簡介。水利會訊，第21卷，第85-99頁。
林煒舒，(2020)，張令紀與桃園大圳的建造。臺灣學通訊，第118期，第14-15頁。
范德星，(2007)，日治時期桃園大圳建設 - 以澤井組為中心。淡江大學日本研究所碩士論文，198頁。
陳哲三，(2006)，清代臺灣烏溪流域的移墾與水圳修築。逢甲人文社會學報，第13期，第205-223頁。
農田水利署桃園管理處，(2022)，桃園大圳導水路維護管理方針計畫成果報告，(執行單位)財團法人中興工程顧問社。
魏賢培、楊德川，(2004)，竹東圳的歷史與新生。農田水利，第51卷，第2期，第94-99頁。
Efron, N., & Read, M. (2012). Analysing international tunnel costs. An Interactive Qualifying Project. Worcester Polytechnic Institute: Worcester, MA, USA.
Ganesh, A. V., Prakash Narasimha, K. N., & Kumar, L. P. (2017). Geological investigation on the causes of collapse of irrigation tunnel.-a case study from Hulikere, Mandya district, Karnataka. Journal of Engineering Geology, 42(1-2), 264-274.
Grigg, N. S. (2012). Water, wastewater, and stormwater infrastructure management. CRC press.
Mottahedi, A., Sereshki, F., Ataei, M., Qarahasanlou, A. N., & Barabadi, A. (2021). Resilience estimation of critical infrastructure systems: Application of expert judgment. Reliability Engineering & System Safety, 215, 107849.
Soldo, L., Vendramini, M., & Eusebio, A. (2019). Tunnels design and geological studies. Tunnelling and Underground Space Technology, 84, 82-98.
Squire, R., & Dodds, K. (2020). Introduction to the special issue: Subterranean geopolitics. Geopolitics, 25(1), 4-16.
Ward, F. A. (2010). Financing irrigation water management and infrastructure: A review. International Journal of Water Resources Development, 26(3), 321-349.

調整型防砂壩不同情境水理 分析與評估

林伯勳* 牟彥蓁** 陳俊愷*** 許振崑****
張照宏***** 陳鶴勳***** 薛聖儒***** 李典耕*****

摘要

防砂壩係指為攔蓄及調節溪流土砂、減緩溪床坡度、穩定流心、防止侵蝕、崩塌或抑止土石流所構築之橫向構造物，其目的為控制土砂生產與流失。水土保持局臺中分局針對轄區內重要治理區易沖淤河川—廊子坑溪 5k + 024 處，新設調整型防砂壩，希冀透過調整型防砂壩將上游堆積土砂，安全地往下游沖刷嚴重河段運移，達河道土砂沖淤平衡之目標。本文係利用 CCHE2D 進行數值模擬，針對不同流量、地形及調整型防砂壩操作條件等不同情境進行土砂運移情形模擬，據以評估調砂操作後廊子坑溪可能之地形變遷。

關鍵字：調整型防砂壩、水理分析、土砂沖淤平衡

一、前言

防砂壩係指為攔蓄及調節溪流土砂、減緩溪床坡度、穩定流心、防止侵蝕、崩塌或抑止土石流所構築之橫向構造物，其目的為控制土砂生產與流失（水土保持局，2017），故攔阻砂石、抑止土石流是防砂壩空庫時的重要功能，但防砂壩淤滿後，亦能使上游溪流坡度減緩，使河道沖蝕的能力降低，具穩定兩岸邊坡、防止崩塌等功能，因此，防砂壩不論是否淤滿，都具有安定溪流土

砂的正面功能，並廣泛使用於世界各國的高山溪流，且防砂壩一旦興建完成後基本都以不拆除為原則。

早期的防砂壩多為高聳且全封閉式的壩型，惟自然溪流產砂量變動性高，興建封閉式防砂壩雖能於地震或豪雨事件發生時攔阻大量土砂，卻會在來砂量減緩時，造成防砂壩下游嚴重沖刷，進而衍生壩基掏刷、下游護岸掏空、阻斷溪流棲地的縱向連續性，使棲地區塊化、洄游性生物因壩體阻隔而難以順利溯溪，及出海口減淤等問題，

* 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助理研究員
*** 中興工程顧問社防災科技研究中心高級研究員
**** 中興工程顧問社防災科技研究中心高級工程師
***** 農業部農村發展及水土保持署臺中分署科長
***** 農業部農村發展及水土保持署臺中分署正工程司
***** 農業部農村發展及水土保持署臺中分署副工程司

另外，防砂壩淤滿後清淤之土砂，如何妥善處理為關鍵課題。近年氣候變遷、降雨事件極端化，加上生態保育意識抬頭，陳樹群與邱渝方（2019）提出「會呼吸的防砂壩」概念，利用調整型防砂壩，因應溪流狀態、來砂情形、壩體庫容等條件，在確保安全無虞的前提下，進行調整型防砂壩操作，滿足溪流不同時期的輸砂、防災及生態需求，同時達到還砂於河、溪流棲地復育、增加防砂壩生命週期等目標。

本文首先闡述調整型防砂壩定義、功能，及設計，再以臺中分局轄區內重要治理區易沖淤河段一廊子坑溪為例，簡述廊子坑溪地文、水文及河性等基本資料，並說明廊子坑溪調整型防砂壩之設計及調整配置，最後，透過不同情境（如：入流歷線、壩體及下游地形條件等），以數值模擬方法進行調節式防砂壩操作評估，基於數值模擬分析結果，評析調砂操作後廊子坑溪之地形沖淤變化。

二、調整型防砂壩

為應付臺灣劇變的溪床土砂環境，同時兼顧溪流輸砂平衡、棲地連續性、減緩災害，及延長防砂壩使用年限等四大需求（圖1），隨著集水區產砂情況改變而隨之因應、調整防砂壩的結構，將得以維護溪流輸砂平衡，減緩防砂壩對溪流環境之破壞及避免生態廊道完全阻斷，並得提升防砂壩永續性，延長其使用年限，此等隨著來砂量改變而調整防砂壩結構的概念，即為調整型防砂壩。



圖1 調整型防砂壩主要功能圖

調整型防砂壩因拆卸組裝施工容易特性，經歷土砂災害後，在確保保全對象安全的前提下，可根據上游來砂量及崩場地現況，依次拆解壩體上設施，增加防砂壩的通透性，加速壩體上游淤積土砂的流出，進而維持防砂壩庫容、補充下游砂源，並提升生態棲地的連續性，亦因其易於安裝的特性，可視防災等級的要求，在短時間內完成壩體設施安裝，快速地建構出具有防災能力的壩體，滿足防災需求，又稱為「會呼吸的防砂壩」（陳樹群，2019）。

調整型防砂壩設計型態可參考圖2，高來砂量時期防砂壩可採用開口型防砂壩，且在開口處裝置鋼管壩及格柵設施，隨著泥砂量減少可逐步拆除橫材，其次是縱材，以允許部分淤積之泥砂流出，若來砂量再次減少，且上游不再有崩塌，即可視需求將防砂壩降低成固床工的型態，甚至將固床工設計成自然的潭瀨結構，終極目標在維持基礎輸砂平衡、防止河道下切及維持生態連續性。（陳樹群，2020）

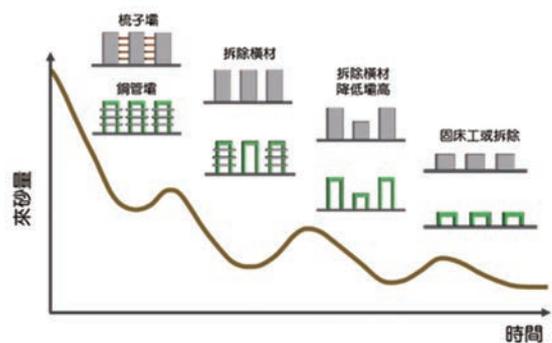


圖2 因應上游土砂量變遷的防砂壩經營管理圖
（摘自陳樹群等，2016）

三、廊子坑溪及其調整型防砂壩

廊子坑溪，位於三角埔重要治理區之南側，其集水區分布如圖3所示。主流長度11.61公里，集水區面積21.41平方公里，行政區隸屬於臺中市太平區北部及北屯區南端。為太平區與北屯區

之界河，主流發源於大橫屏山山脈之頭崙山西側（海拔高 859 公尺），向西沿臺中市北屯、太平區交界流經內坪林後，轉向南進入太平區境，與大坑溪合流後，始稱大里溪。

（一）地文資料

集水區地形由西向東漸高，高程分布於海拔 78m 至 844m，其坡度分布，以一級坡占 28.08% 比例最高，整體地勢較平緩，六級坡則分布於太平二圳支流及主流最上游地區，坡向分布以西向、西南向及西北向居多。地層分布為沖積層、錦水

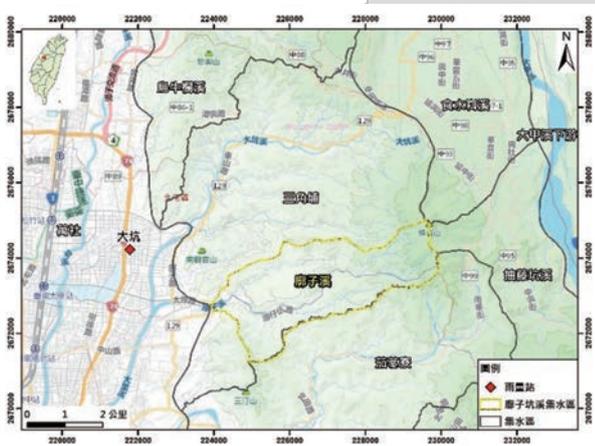


圖 3 廬子坑溪集水區地理位置圖

頁岩、卓蘭層及頭崙山層。卓蘭層岩性為青灰色至灰色泥質細粒至粗粒混濁砂岩、粉砂岩、砂質頁岩及砂頁岩互層所組成。錦水頁岩層主要由青灰色、暗灰色至灰色頁岩、和粉砂岩組成；頭崙山層岩性則分別以砂岩及礫岩為主。

（二）水文資料

廬子坑溪屬於次集水區大里溪範圍，支流自下游往上游分布為飲水坑溪、太平一圳、芋園坑溪、太平二圳、北坑溪、廬子坑溪及早溪，鄰近水文站為氣象局雨量站：大坑、新社及龍安等站，惟新社及龍安在稜線外，不屬於同個集水區，資料筆數較少（2011 年建站），大坑站不僅資料筆數（1995-2020）充足，根據「水土保持技術規範」，水文分析建議統計資料年數為 15 年以上，且大坑站緊鄰三角埔集水區下游，故本文水文分析予以採用，表 1 為大坑雨量站頻率分析結果，此分析結果結合單位歷線方法，可用以推估集水區降雨延時 1440 分鐘不同重現期之流量歷線，圖 8 至圖 14 之流量歷線均以此頻率分析結果為基礎進行水理演算。

表 1 大坑（C0F970）降雨延時 1440 分鐘之頻率分析彙整表

機率分布	1.11 年	2 年	5 年	10 年	20 年	25 年	50 年	100 年	200 年	500 年
常態	49.3	234.1	354.9	418.1	470.3	485.5	529.0	568.2	604.0	647.4
二參數對數常態	101.0	201.5	316.5	400.9	487.3	515.8	606.9	702.5	803.1	944.6
皮爾森第三類	85.1	201.9	333.8	424.3	511.4	539.0	623.9	707.9	791.4	901.5
對數皮爾森第三類	105.8	190.8	308.9	410.9	529.6	572.0	719.1	892.6	1097.4	1426.2
極端值第一類	75.6	210.5	337.4	421.4	502.0	527.5	606.3	684.4	762.3	865.1

（三）調整式防砂壩

廬子坑溪為高變動性河段，起點（0K）至上游土砂料源發生區民國 83 年林務局大坑第三號潛壩為終點（7K + 212）；另依河段土砂變動狀況，由上游至下游，分為土砂料源段、嚴重沖淤段、劇烈沖刷段，以及土砂堆積段等四個河段。鑑於溪流河段土砂失衡與既有防砂壩損壞，水保局臺中分局 110 年「廬仔溪上游 4K 附近災害復建工程」規劃於廬子坑溪集水區上游 5K + 024 處（原

里程 5K + 120）規劃設置一座調整型防砂壩及整流工程，進行土砂調節，希冀將上游堆積土砂，安全往下游運移，改善土砂失衡問題。理論上，壩口拆除深度愈深，下游土砂愈容易淤積，使上下游高度相差逐漸縮小，調緩溪床坡度。廬子坑溪土砂收支河道平衡治理規劃對策則如圖 4，調節式防砂壩設計如圖 5，該工程於民國 110 年 12 月 3 日竣工，如圖 6 所示，此調節型防砂壩係藉由混凝土調控模塊進行防砂壩開口調節。

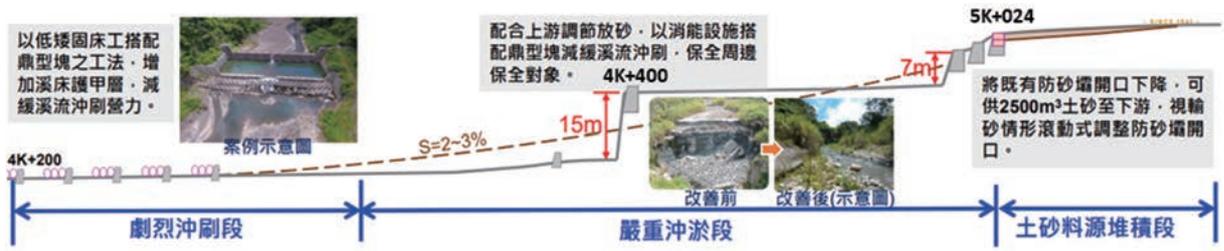


圖 4 廊子坑溪土砂收支河道平衡治理規劃對策圖 (摘自水土保持局, 2022)

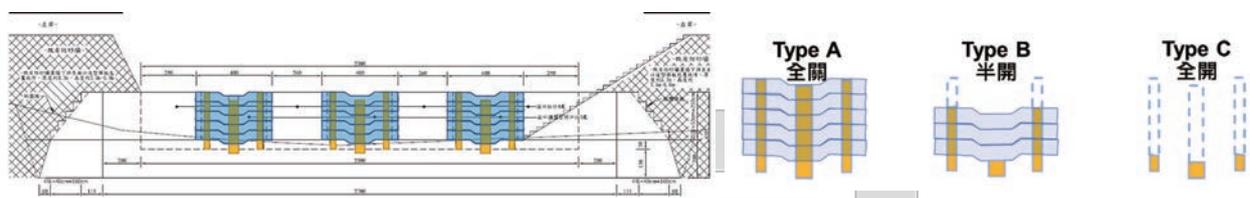


圖 5 廊子坑溪調整型防砂壩設計圖 (摘自水土保持局, 2022)



圖 6 廊子坑溪調整型防砂壩完工照片

CCHE2D 可探討集水區及河道網路模擬、河川治理及復育、潰壩及其風險分析、水工建造物附近流場、橋墩局部冲刷、岸壁冲刷、泥砂及污染物傳輸等水利工程常見問題，為國內經濟部水利署認可且常用之水理數值模式。溪床沖淤影響評估流程如圖 7。

四、數值模擬

為針對廊子坑溪調整型防砂壩進行合理操作建議，判斷防砂壩調節後河道可能沖淤情況，考量山坡地集水區土砂生產及移動機制相當複雜，實測樣本仍不足，可能動態預測不易，故藉由基礎資料彙整、水文及流況設定、現地勘查（輔以無人機施測），進行數值模擬分析。

本文採用 CCHE2D 進行河道水理輸砂模擬，CCHE2D 係美國密西西比大學內之國家水科學及工程中心（National Center for Computational Hydroscience and Engineering, NCCHE）所開發之模式，NCCHE 為美國國家級研究單位，長期從事河川及海岸先進數值模式之研發與應用，

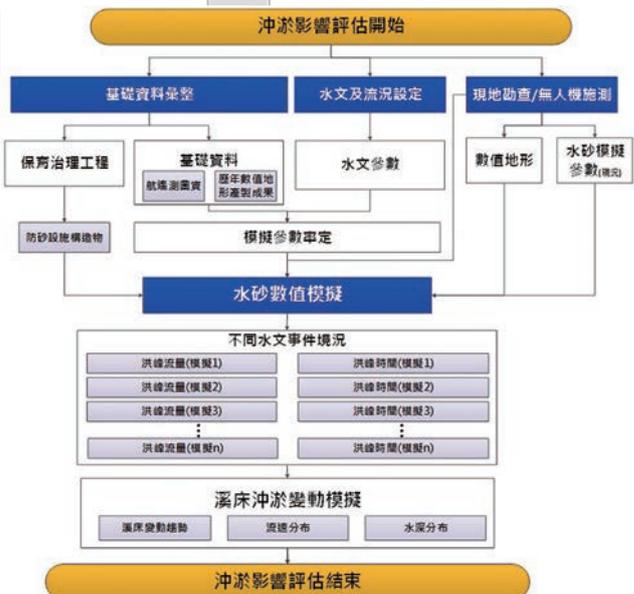


圖 7 溪床沖淤影響評估流程圖

(一) 基礎資料彙整

蒐集廊子坑溪集水區模擬範圍之水文資料、航遙測圖資、歷年數值地形、保育治理工程等相關基礎資料，作為水理數值模式模擬之參數率定及後續案例模擬所需參數依據。

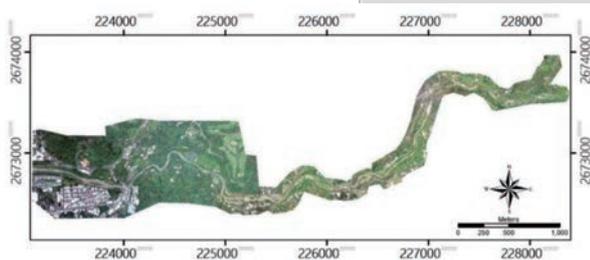
(二) 水文及流況設定

由颱風事件期間降雨量推估或及重現期之流量歷線為上游入流邊界條件，而泥砂入流歷線則基於各時刻流量，按水土保持技術規範，以 Schoklitsch (1950) 推移載運移公式計算。

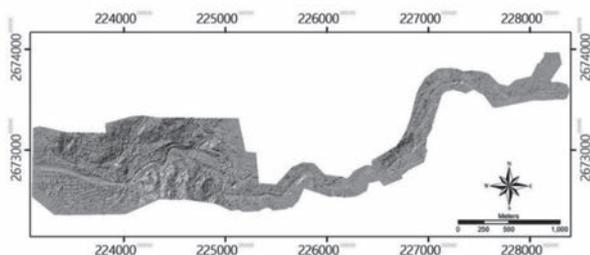
$D_{50} = 0.04\text{m}$ 取自「廊子坑溪中上游集水區（廊仔坑橋以上）整體治理調查規劃」報告書，曼寧 n 值河床 n 採 0.03、平整混凝土面 $n = 0.015$ 、乾砌塊石 $n = 0.033$ ，下游邊界則採自由出流 (Open boundary condition) 設置。

(三) 初始地形

本工程工作施作前，先以無人機進行空拍作業，施測地形資料，並建立高精度數值地形資料 (如圖 8)，供作為初始地形建置。



(a) 正射影像



(b) DSM 轉繪陰影圖

圖 8 廊子坑溪河段初始地形建置

(四) 水砂數值模擬

模式參數率定係針對模式參數進行調整並分析，藉以獲得能反映河道水理特性之參數，作為後續模擬之基礎。本文針對影響底床沖淤變化較劇烈之因子，包含：輸砂公式、混合層厚度及調適長度等三項因子，採用不同時期之高精度數值地形模型，評估模擬沖淤趨勢分布與實際地形變化類似程度，取得率定後之最適參數，再針對試驗區河段之沖淤模擬成果，綜合評析沖淤變化區位及可能溪床變動深度、水深及流速，作為後續防砂壩調整作業參考。

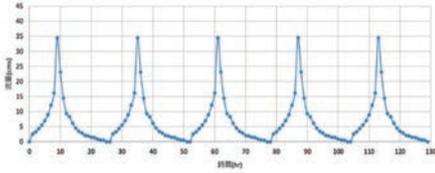
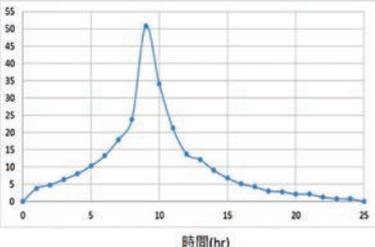
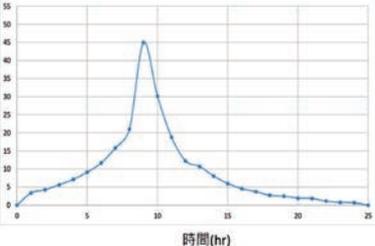
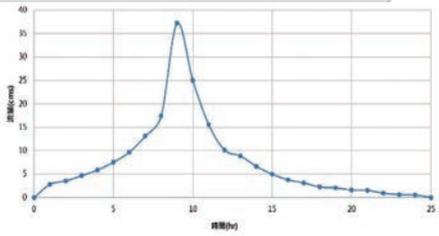
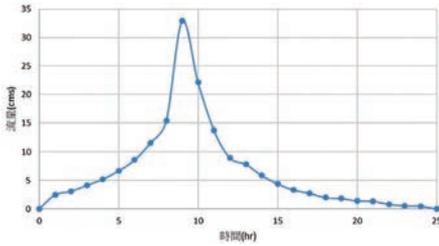
針對廊子坑溪以數值模擬方法進行調整型防砂壩操作評估，不同情境水理模擬條件綜整 (如表 2)。

(一) 模擬情境一

採近 5 年 (2016 ~ 2021) 之 12 場真實事件降雨，配合修正三角單位歷線法獲得入流量，其 24 小時延時最大累積降雨量為 205.5mm，48 小時延時最大累積降雨量為 317.5mm，若以對應重現期估算，相當於 2 ~ 5 年重現期之降雨事件，顯示近年無重大水文事件影響。針對調整型防砂壩不同開度 (圖 5 之 Type B 及 Type C) 分析模擬成果如後。

1. 水深分析成果：模擬結果顯示 (如圖 19)，河道均無溢淹情形因調整型防砂壩具開口之設計，減緩壩體上游壅水情形，壩體上游水深最深約 2 m 至 2.5 m 左右。
2. 流速分析成果：模擬結果顯示 (如圖 20)，上游調整型防砂壩全開 (Type C) 時，壩體開口處最大流速達 8 m/s 左右，而調整型防砂壩半開 (Type B) 時，部分水流受阻於混凝土模塊，開口處最大流速略下降為 7.3 m/s。
3. 底床變化分析成果：模擬結果顯示 (如圖 21)，Type B 方案壩體上游沖刷深度為 2.3 m，下移土砂量體為 343m³；Type C 方案壩體上游沖刷深度為 2.4m，下移土砂量體為 353m³。

表 2 不同情境水理模擬綜整表 (續)

編號	模擬目的	入流條件	入流量歷線	壩體及地形條件
情境三	了解發生五場 50 年重現期距降雨事件時河道的輸砂能力。	模擬近五年中，每年發生一場重現期 50 年之降雨事件，且每場事件相互獨立，流量歷線無疊加情況。	 <p>圖 14 支流旱溪發生五場 50 年重現期獨立降雨事件流量歷線</p>	地形條件模擬壩前已完成疏濬，製造主深槽，並針對開度最大的狀態 (圖 5 之 Type C)，搭配下游 4K + 560 防砂壩拆除。
情境四	了解發生單場 200 年重現期距降雨事件時河道的輸砂能力。	模擬發生一場重現期 200 年之降雨事件，主流 $Q_p = 50.83\text{cms}$ 、支流 $Q_p = 44.98\text{cms}$ 。	 <p>圖 15 主流廊仔溪 200 年重現期流量歷線</p>  <p>圖 16 支流旱溪 200 年重現期流量歷線</p>	調整型防砂壩開度最大的狀態 (圖 5 之 Type C)，搭配下游 4K + 560 防砂壩拆除。
情境五	了解輔以輕度人為擾動後發生單場 25 年重現期距降雨事件時河道的輸砂能力。	模擬經歷一場 Q_{25} 降雨事件。	 <p>圖 17 主流廊仔溪 25 年重現期流量歷線</p>  <p>圖 18 支流旱溪 25 年重現期流量歷線</p>	經適度人為疏浚，將調整型防砂壩上游大塊礫石疏浚至防砂壩下游，製作似護甲層構造。

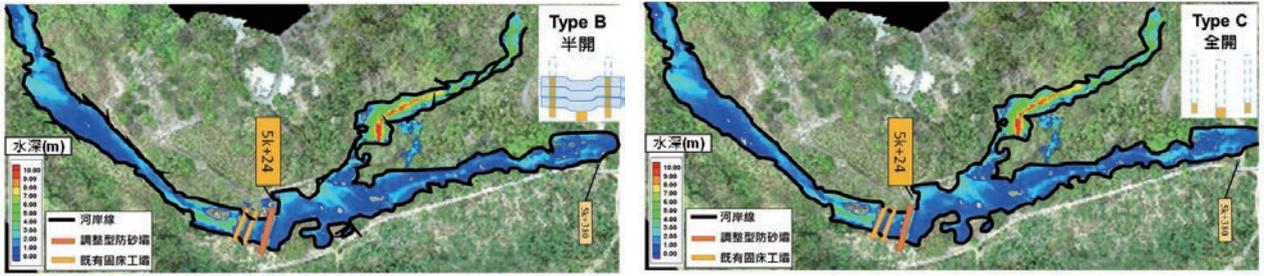


圖 19 情境一 5k + 024 上游水深變化模擬結果圖

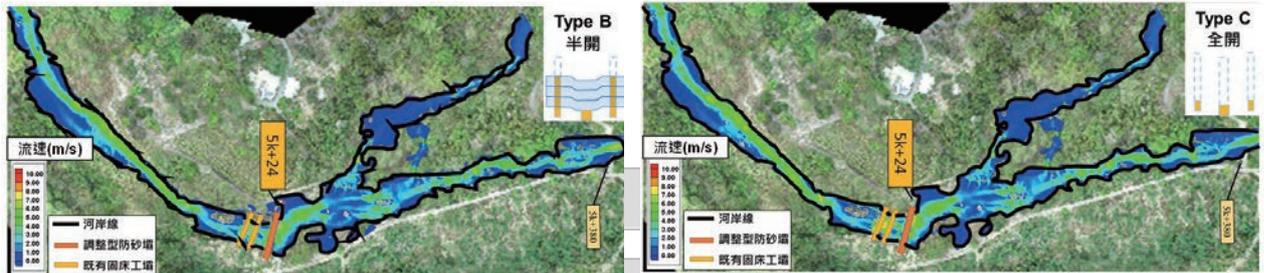


圖 20 情境一 5k + 024 上游流速變化模擬結果圖

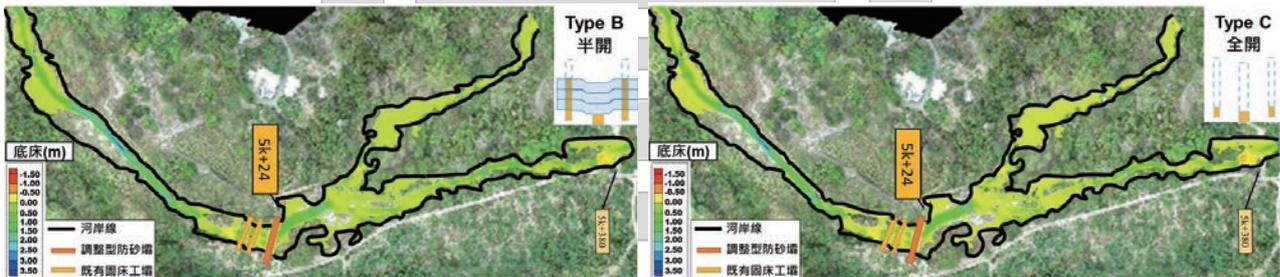


圖 21 情境一 5k + 024 上游底床變化模擬結果圖

(二) 模擬情境二

採 50 年重現期距暴雨推估入流歷線，其中主流廊仔溪 $Q_p = 39.02\text{cms}$ ，支流旱溪 $Q_p = 34.53\text{cms}$ 。經歷單場 50 年重現期距降雨事件後，針對調整型防砂壩不同開度（圖 5 之 Type B 及 Type C），搭配下游 4K + 400 防砂壩拆除，分析模擬成果如后。

1. 水深分析成果：模擬結果顯示（如圖 22），河道歷經單場 50 年重現期豪雨事件後，支流 0K + 145、0K + 175 及主流 5K + 024 處右岸有

溢流情形，水流沿農路及農田漫流。

2. 流速分析成果：模擬結果顯示（如圖 23），主流 4K + 400 至 4K + 640 處河道斷面束縮，流速提升至 6m/s，且流心偏向右岸，有冲刷右岸坡腳，危及農路安全的風險。

3. 底床變化分析成果：模擬結果顯示（如圖 24），Type B 方案 4K + 400 ~ 5K + 012 壩體，兩壩間河段多呈冲刷趨勢；Type C 方案 4K + 400 ~ 5K + 024 壩體，兩壩間河段冲刷現象因上游來砂補充而趨緩。

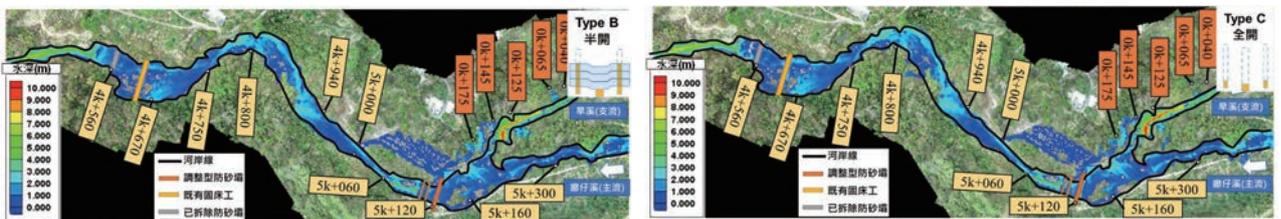


圖 22 情境二入流條件下水深變化模擬結果圖

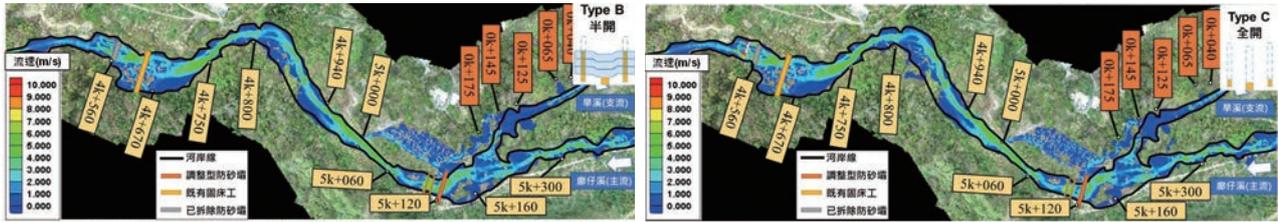


圖 23 情境二入流條件下流速變化模擬結果圖

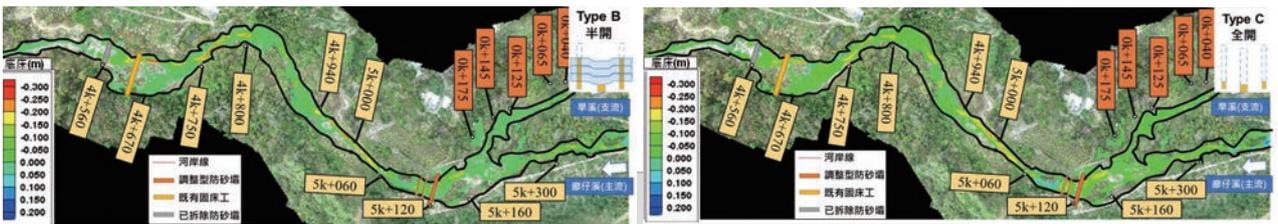


圖 24 情境二入流條件下底床變化模擬結果圖

(三) 模擬情境三

模擬近五年中，每年發生一場重現期 50 年之降雨事件，主流 $Q_p = 39.02\text{cms}$ 、支流 $Q_p = 34.53\text{cms}$ ，且每場事件相互獨立，流量歷線無疊加情況，地形條件部分，模擬壩前已完成疏濬形成主深槽，並針對調整型防砂壩模塊完全撤離、開度最大的狀態（圖 5 之 Type C），搭配下游 4K+560 防砂壩拆除，分析模擬成果如後。

1. 水深分析成果：模擬結果顯示（如圖 25），上游支流因河寬狹窄，故水深較深，另外，模擬河道均有部分溢淹情形，然溢淹區域初步釋無重要保全對象。

2. 流速分析成果：模擬結果顯示（如圖 26），主流深槽明顯，流速較高且集中，5K + 024 上游經河道疏濬並將壩體開口全開後，壩前開口處流速高，壩前流速約達 5 ~ 6m/s，研判將有助於帶動泥砂往下游輸送。

3. 底床變化分析成果：模擬結果顯示（如圖 27），5K + 024 上游明顯有冲刷趨勢，於情境一的冲刷深度可達 0.4 ~ 0.6 公尺，土砂於緊鄰 5K + 024 之兩座固床工的下游落淤，5K + 024 下游固床工至 4K + 400 壩體間河段整體冲刷明顯，4K + 400 下游則呈現淤積趨勢。



圖 25 情境三入流條件下水深變化模擬結果圖

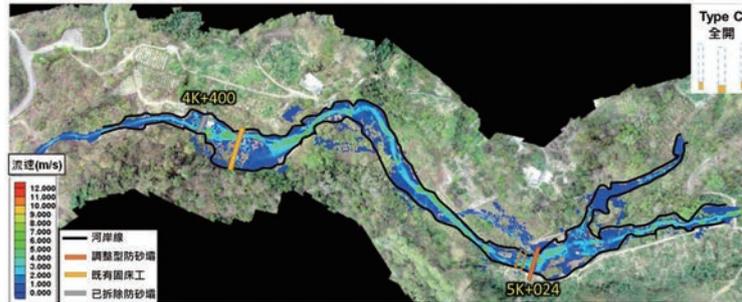


圖 26 情境三入流條件下流速變化模擬結果圖

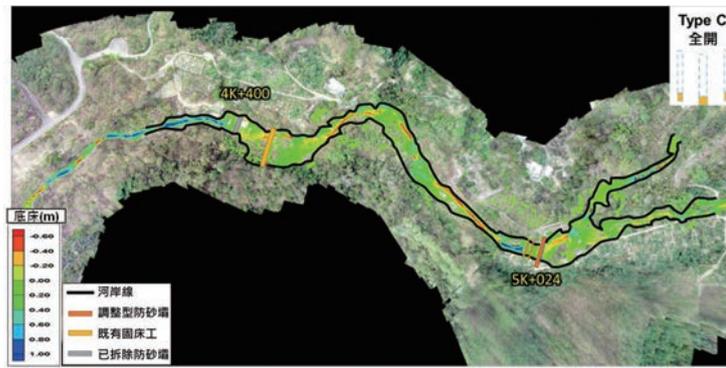


圖 27 情境三入流條件下底床變化模擬結果圖

(四) 模擬情境四

模擬發生一場重現期 200 年之降雨事件，主流 $Q_p = 50.83\text{cms}$ 、支流 $Q_p = 44.98\text{cms}$ ，針對調整型防砂壩模板塊完全撤離、開度最大的狀態（如圖 5 之 Type C），搭配下游 4K + 560 防砂壩拆除，分析模擬成果如后。

1. 水深分析成果：模擬結果顯示（如圖 28），上游支流因河寬狹窄，故水深較深，另外，模擬河道均有部分溢淹情形，4K + 400 上游河道束

縮處，水深約達 3 公尺。

2. 流速分析成果：模擬結果顯示（如圖 29），5K + 024 調節型防砂壩上游流速可達 8 ~ 9m/s，河道整體流速均上升，研判將有助於帶動泥砂往下游輸送。

3. 底床變化分析成果：比較情境二（如圖 24）與情境三（如圖 27）之模擬結果可以發現，廊子坑溪在經歷多場 Q_{50} 的降雨事件後所造成的沖淤變化，遠較經歷單場 Q_{200} 降雨事件顯著。

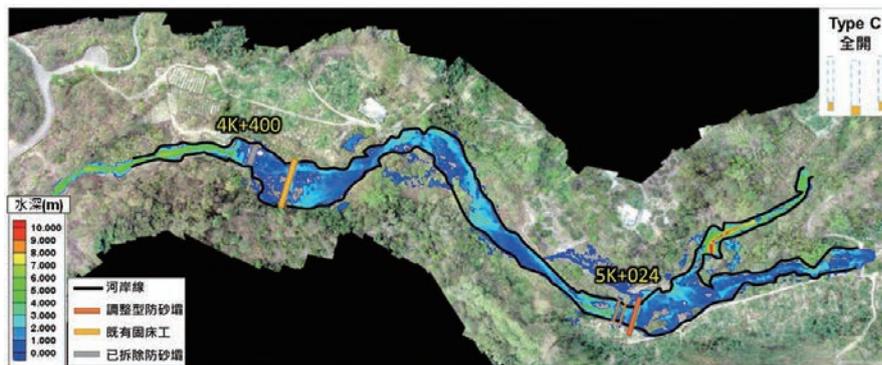


圖 28 情境四入流條件下水深變化模擬結果圖

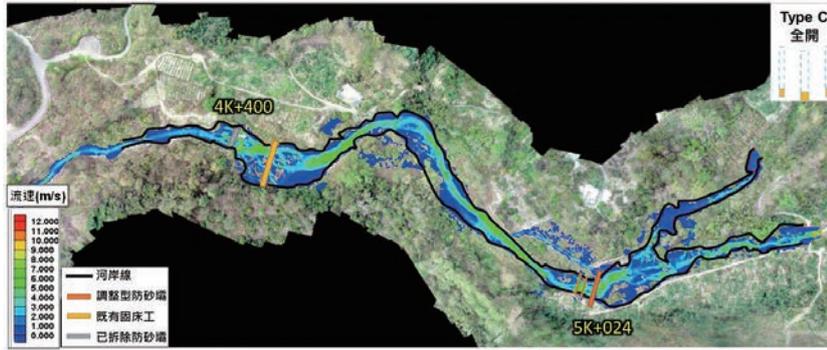


圖 29 情境四入流條件下流速變化模擬結果圖

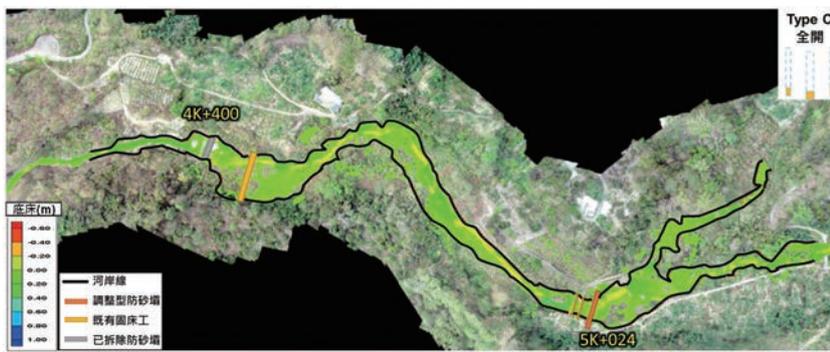


圖 30 情境四入流條件下底床變化模擬結果圖

(五) 模擬情境五

考量近年缺乏得以帶動粗粒料泥砂的高流量降雨事件，且本區域河床質粒徑較大，致使調節式防砂壩下游回淤成果受限，建議若以輕度人為擾動並挖掘防砂壩上游粒徑較大之顆粒填補至下游掏刷處，於壩體下游構築類似護甲層之構造，應有助於帶動減緩下游掏刷、調降河川坡降，遂進行本情之模擬，以設定防砂壩下游之粗粒料堆置區底床曼寧糙度 n 值，反映水流通過粗粒料堆

積區護甲層之流況，並以 Q_{25} 流量進行數值模擬，相關分析模擬成果如圖 31 至圖 33。

模擬結果顯示，情境五方案於壩體上游形成的沖刷效果介於情境二與情境三之間，沖刷量體可達 503.2 立方公尺，模擬結果顯示，壩體上游在經歷一場 Q_{25} 降雨事件後，沖刷效果較經歷單場 Q_{200} 降雨事件顯著，可見適度疏浚、挖填土方工程方案於壩體下方形成護甲層，確具有其效益，能減緩下游沖刷現象，並有助於上游土砂往下游運移。

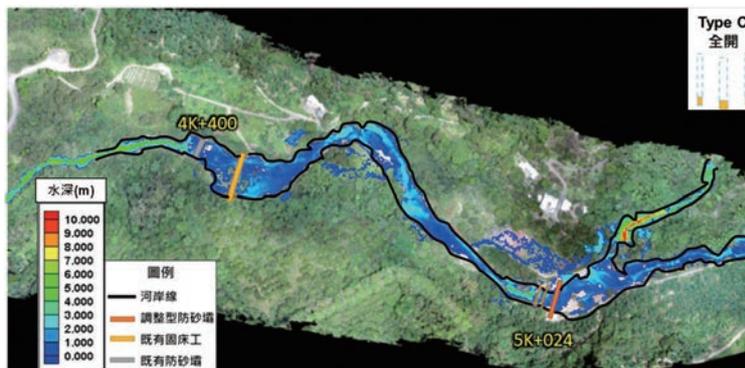


圖 31 情境五入流條件下水深變化模擬結果圖

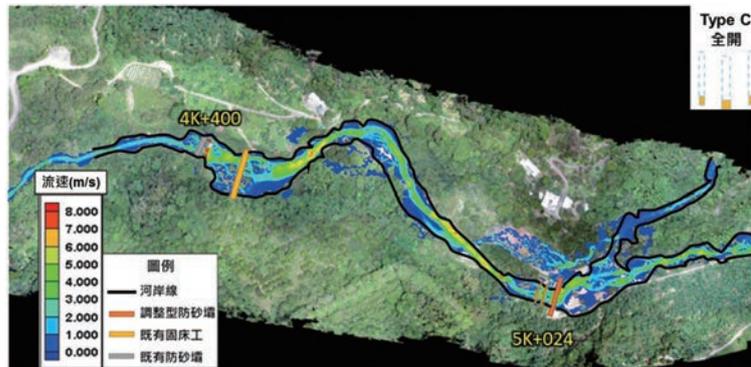


圖 32 情境五入流條件下流速變化模擬結果圖

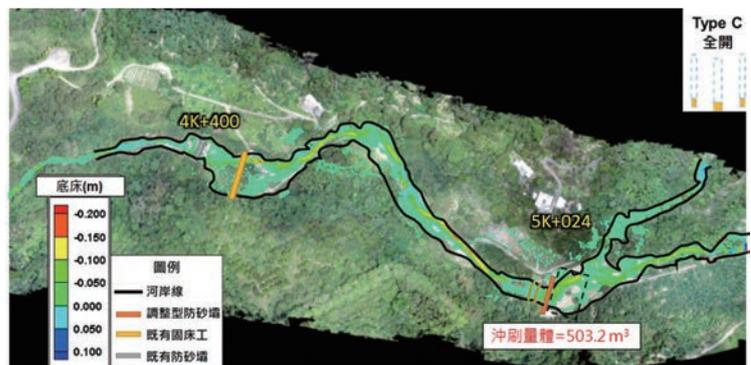


圖 33 情境五入流條件下底床變化模擬結果圖

五、結 論

本文利用 CCHE2D 進行數值模擬，針對不同流量、地形及調整型防砂壩操作條件進行土砂運移情形模擬，據以評估調砂操作後廊子坑溪可能之地形變遷，根據數值模擬結果歸納以下結論：

(一) 由於近年無重大水文事件發生，帶動的泥砂量體有限，若進一步將下游 4K + 400 處受淘刷影響之防砂壩拆除，模擬結果顯示土砂下移現象明顯提升，確實能使增進廊子坑溪河道調節土砂效益。

(二) 情境二與情境一相比，顯示廊子坑溪若發生單場重現期距 50 年之降雨事件，將明顯提升河道土砂下移效率；情境二與情境三比較顯示若發生五場重現期距 50 年之降雨事件，將明顯提

升河道土砂下移效率。

(三) 廊子坑溪在經歷多場 Q_{50} 的降雨事件後所造成的沖淤變化，遠較經歷單場 Q_{200} 降雨事件顯著，可見歷經多場足夠大的降雨事件，能最有效調節河川土砂，逐步恢復河道土砂沖淤平衡。

(四) 若輔以輕度人為擾動，挖掘防砂壩上游粒徑較大之顆粒填補至下游掏刷處，於壩體下游構築類似護甲層之構造後，壩體上游經歷一場 Q_{25} 降雨事件，沖刷效果較經歷單場 Q_{200} 降雨事件顯著，可見適度疏浚方案確具有其效益，能減緩下游沖刷現象，有助於上游土砂往下游運移。

六、建 議

面對土砂量高度變動的野溪，必須依據土砂災害發生前後、及保育治理措施投入後之變動境況，適時調整其保育治理策略，以達溪流土砂之平衡，以回歸自然野溪為最終目標。未來希望能結合現地數值地形資料及數值模擬結果，提出廊子坑溪調節型防砂壩操作標準作業程序準則。本文建議廊子坑溪未來後續可辦理相關工作：

(一) 多元尺度環境監測：建議持續辦理多元尺度環境監測，建立上游坡面、河道地形等各項比較參考基準，並視情況搭配水文模擬分析成果輔助判斷，滾動式調度調整型防砂壩之調整模組；

(二) 成效評析：追蹤階段可藉記錄監測數據與操作成效，由調節式防砂壩治理成效評析，建立其治理履歷，回饋相關保育治理工作參考。

(三) 建立預警機制：由前述兩項追蹤相關工作，亦可逐步建立環境變異、土砂調控作業啟動等預警或操作門檻值，有利於相關防災預警操作，並加速落實智慧管理與治理。

謝 誌

感謝農業部農村發展及水土保持署臺中分署，提供計畫（編號 SWCB-111-153）經費，以及中興大學水土保持系勳全教授提供水理模擬專業技術指導與意見詢，作者深表謝忱。

參考文獻

陳樹群、安軒霏、國領ひろし、林永欣（2016），「野溪高土砂災害之模組化防砂壩管理」，中華水土保持學報，47（3），111-121。

行政院農業委員會水土保持局（2017），「水土保持手冊」。

行政院農業委員會水土保持局（2020），「108年水土保持防砂設施調查及工程延壽策研擬」。

行政院農業委員會水土保持局臺中分局（2020），「廊子坑溪中上游集水區（廊仔坑橋以上）整體治理調查規劃」。

陳樹群、邱渝方（2019），「會呼吸的防砂壩」。科學發展，560期，56-62頁。

陳樹群、邱渝方（2020），「調整型防砂壩之技術研發與應用（3/3）」。

行政院農業委員會水土保持局（2022），「111年臺中分局水砂觀測維護設置暨水土保持構造物巡查」。

新 書 推 介

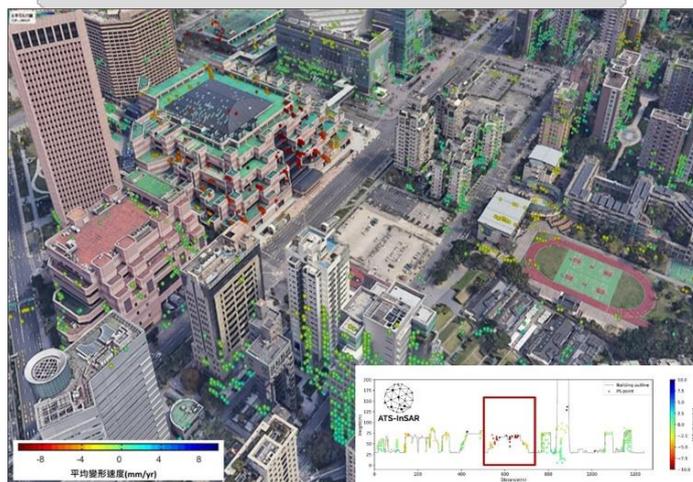
(一) 環境水體關切藥物及六溴環十二烷分析方法開發

許國恩、劉婉儀、吳佳娟、
林宜璇、吳紗糸、李品蕙、
楊淑娟、林淑滿 編著

2023年2月初版

人工智慧與衛星影像於廣域智慧 防災之多元應用技術

有鑑於政府與民間單位對於導入人工智慧用在廣域智慧防災為未來的需求，中興社以 AI 技術主軸研發了：(1)AI 辨識及萃取都會區建物屬性技術，結合遙測影像與 AI 為都會區建置建物曝險基本資料庫且效率式更新，可用於都市巨災風險評估與防災措施規劃。(2)AI 於合成孔徑雷達影像分析技術與都會區廣域防災應用，結合 SAR 影像與 AI 技術建立都會區房建物安全監測分析方法，可評估工址開挖或地下施工於不同時期之沉陷槽與影響範圍，提供鄰損鑑定之量化數據，亦可結合土壤液化高潛勢圖進行變形區監測分析，評估潛在地下層下陷熱區或建物潛在沉陷。(3) AI 機器學習於廣域邊坡安全評估技術，透過 AI 資料庫與使用者介面輸入岩坡基本參數如擾動因子 D 、地質強度指標 GSI 、岩性係數 m_i 、坡度、坡高(m)、地下水位比、岩石單壓強度與單位重等，可初步求得廣域岩坡淺層岩屑滑動之安全係數與機率。



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
邵國士博士(02-87919198, 分機 323)、李璟芳博士(分機 344)
臺北市內湖區新湖二路 280 號

新北市安坑輕軌線形設計之精進

李政安 * 林逸羣 ** 鄭凱元 *** 林仁國 ****
周易陵 ***** 劉嘉文 *****

摘 要

鑒於安坑輕軌列車通過新和國小站前後之晃動現象，探討軌道線形設計可精進之處，本文將針對軌道平面線形之設計進行探討。第二章文獻回顧，比對各規範及文獻對於軌道線形之考量；第三章安坑輕軌軌道線形與車輛參數比對，分析說明車輛參數與軌道線形長度之關係；第四章輕軌列車轉向架通過關鍵線形之狀態，分析輕軌列車於該路段動態行為；最後於第五章結論與建議，歸納本文軌道定線參數之探討及精進建議。

關鍵字：軌道定線、轉向架中心距、圓曲線、緩和曲線、獨立查證與確證 (IV&V)

一、前 言

安坑輕軌於營運初期發現列車通過新和國小站前後之晃動現象，藉由新北市政府捷運局、專管顧問與獨立查證與確證單位對於軌道定線設計參數的重新計算檢核驗證，並針對列車通過本路段之狀態進行計算及比對，藉以判斷相關軌道設計參數精進的可能性，探討過程詳如後續章節所述。

本章節為文獻回顧，歸納各規範、文獻及專案需求，綜分直線、緩和曲線及圓曲線三種線形之長度，探討其中所訂定的因素：

(一) 曲線間直線

直線長度之考量為使車輛在前一曲線產生振動衰減後再進入第二個曲線，不致兩曲線振動疊加，這段直線即為所需的振動衰減時間距離，參考其他鐵路系統與各規範對於曲線間直線線形要求訂定如下，並彙整如表 1 所示。

1. 依據歐洲標準 EN 13803-1:2010，最嚴苛條件為

二、文獻回顧

* 新北市政府捷運工程局局長
** 新北市政府捷運工程局副總工程司
*** 新北市政府捷運工程局科長
**** 新北市政府捷運工程局幫工程司
***** 中興工程顧問公司軌道工程一部技術經理
***** 台灣德國萊因公司專案經理

兩 $R=150m$ 反向彎道間直線長度為 $10.78m$ 。

2. 依據美國聯邦運輸局 FTA 之 Track Design Handbook for Light Rail Transit，兩圓曲線間最小直線長度為 $L(m) = 0.57V(kph)$ ，與車輛行駛速度具有相依性，但若有配置緩和曲線則不需設置直線。
3. 依據中國大陸 GB 50157-2013 地鐵設計規範，曲線間直線長度之決定：
 - (1) 舒適性標準考量乘客舒適性評價，考量列車於直線段振動衰減的振動數及週期，經推算訂為 $L(m) = 0.5V(kph)$
 - (2) 安全性標準考量一車廂不跨越多種線形，訂為 $L(m) >$ 一車廂長度 (m)
4. 依據中國大陸 DB11T 1707 有軌電車設計規範，兩相鄰圓曲線間直線長度不應小於 $15m$ ，困難情況下不應小於一模組長度。
5. 依據中國大陸 CJJ T 295 城市有軌電車工程設計標準，曲線間直線長度不宜小於 $15m$ ，困難情況下不應小於一車廂全軸距。

表 1 曲線間直線線形要求

法規標準	訂定內容
EN 13803-1	$L > 10.78 m$
Track Design Handbook for Light Rail Transit	$L = 0.57V$ 若配置緩和曲線則不需設置
GB 50157	舒適性： $L = 0.5V$ 安全性： $L >$ 一車廂長度
DB11T 1707	$> 15 m$ ， 困難情況下 $>$ 一模組長度
CJJ T 295	$> 15 m$ ， 困難情況下 $>$ 一車廂全軸距

(二) 緩和曲線

在直線與曲線間所設置之一段半徑逐漸減小的過渡曲線以緩和因曲率變化所造成的衝擊之線形稱為緩和曲線，根據新世紀鐵路工程學以及各專案資料，臺鐵、捷運採用之緩和曲線長度之規

定採下述 L_1, L_2, L_3 三項公式計算值，並取其最大值作為緩和曲線設計之最小長度：

1. 因超高漸變，使內外軌高度不同，為避免轉向架四個鋼輪因僅三點與鋼軌接觸（即三點支承上浮）而導致出軌（如圖 1 所示），須限制超高漸變量，因此訂定 L_1 公式，參考其他鐵路系統與各規範訂定如下，並彙整如表 2 所示：

$$L_1 \geq nC, C: \text{超高}$$

- A. 考量單一轉向架固定軸距內超高變化量

$$n = \frac{\text{固定軸距}}{\text{最小上浮量} - \text{高低公差}}$$

- B. 考量單位距離超高變化量

$$n = \frac{l}{\text{單位距離超高變化量}}$$

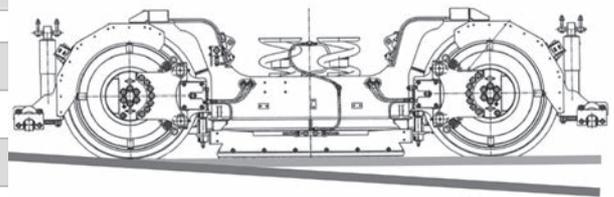


圖 1 轉向架因超高漸變三點支承上浮示意圖

- (1) 依據歐洲標準 EN 13803-1:2010，單位距離超高變化量為 $2.5mm/m$ 。
- (2) 依據美國聯邦運輸局 FTA 之 Track Design Handbook for Light Rail Transit， n 訂為 0.38 。
- (3) 依據日本國土交通省令，普通鐵道固定軸距 $< 2.5m$ 車輛之 n 訂為 0.3 。
- (4) 依據中國大陸 GB 50157-2013 地鐵設計規範，單位距離超高變化量為 $3mm/m$ 。
- (5) 依據中國大陸 DB11/T 1707 有軌電車工程設計規範，單位距離超高變化量為 $2mm/m$ 。
- (6) 安坑輕軌細部設計時，為避免三點支承上浮，考量單一轉向架固定軸距內超高變化量，代

入軌道及車輛設計參數計算後，將n訂為0.3。

表 2 緩和曲線 L_1 之線形要求

法規標準	n 訂定內容
EN 13803-1	相當於 $n = 0.4$
Track Design Handbook for Light Rail Transit	n 訂為 0.38
日本國土交通省令	n 訂為 0.3
GB 50157	相當於 $n = 0.33$
DB11/T 1707	相當於 $n = 0.5$
安坑輕軌細部設計	n 訂為 0.3

2. 因列車由直線進入彎道，彎道之超高導致列車傾斜，為使行駛過程列車傾角變化率適中，故須限制單位時間超高變化率，因此訂定 L_2 公式，參考其他鐵路系統與各規範訂定如下，並彙整如表 3 所示：

$$L_2 \geq a CV, C: \text{超高}, V: \text{設計速度}$$

$$a = \frac{l}{\text{單位距離超高變化量}}$$

- (1) 依據歐洲標準 EN 13803-1:2010，單位時間超高變化量訂為 50mm/s（正常值）或 70mm/s（特例值）。
- (2) 依據美國聯邦運輸局 FTA 之 Track Design Handbook for Light Rail Transit，a 訂為 0.006。
- (3) 依據中國大陸 GB 50157-2013 地鐵設計規範，單位時間超高變化量訂為 40mm/s。
- (4) 安坑輕軌細部設計時，單位時間超高變化量訂為 55mm/s，將 a 訂為 0.005。

表 3 緩和曲線 L_2 之線形要求

法規標準	a 訂定內容
EN 13803-1	相當於 $a = 0.0056$ （正常值）或 $a = 0.0040$ （特例值）
Track Design Handbook for Light Rail Transit	a 訂為 0.0060
GB 50157	相當於 $a = 0.0069$
安坑輕軌細部設計	a 訂為 0.0050

3. 因彎道設計超高對應之平衡速度可能較實際速度低，列車以高於平衡速度行駛於彎道時將因超高不足，使列車相對軌道面有側向加速度，為提升旅客乘車舒適性，設計上應使側向加速度變化量適中，以臺鐵為例，規定離心加速度增加率 $\leq 0.03 \text{ g/sec}$ ，故需限制單位時間超高不足變化量，因此訂定 L_3 公式，參考其他鐵路系統與各規範訂定如下，並彙整如表 4 所示：

$$L_3 \geq a' C_d V, C_d: \text{超高不足}, V: \text{設計速度}$$

$$a' = \frac{l}{\text{單位時間超高不足變化量}}$$

- (1) 依據歐洲標準 EN 13803-1:2010，單位時間超高不足變化量訂為 95 mm/s（正常值）或 120mm/s（特例值）。
- (2) 依據美國聯邦運輸局 FTA 之 Track Design Handbook for Light Rail Transit，將 a' 訂為 0.008。
- (3) 安坑輕軌細部設計時，單位時間超高不足變化量訂為 55 mm/s，將 a' 訂為 0.005。

表 4 緩和曲線 L_3 之線形要求

法規標準	a' 訂定內容
EN 13803-1	相當於 $a' = 0.0029$ （正常值）或 $a' = 0.0023$ （特例值）
Track Design Handbook for Light Rail Transit	a' 訂為 0.0080
安坑輕軌細部設計	a' 訂為 0.0050

除上述三項公式外，仍有相關規範及文獻訂定其他條件，詳述如下：

1. 與車廂度相關：
依據中國大陸 GB 50157-2013 地鐵設計規範，應大於一節車廂長度。
2. 限制總長度：
依據歐洲標準 EN 13803-1， $L > 20m$ （正常）或 $0m$ （特例）。

(三) 圓曲線

比較各規範訂定之圓曲線之最小長度，考量因素包含舒適度及安全性，舒適度相關之條文如下：

➤美國聯邦運輸局 FTA 之 Track Design Handbook for Light Rail Transit 規範考量乘車舒適度， $L = 0.57V$

安全性相關之圓曲線長度其限制目的是避免車輛的一個模組同時跨越在三種線形上，造成車輛運動軌跡之過渡不順暢，進而可能出現脫軌事故，目前中國大陸輕軌車輛一個模組長度均小於 15 公尺，故相關規範從運行安全性考慮，規定圓曲線長度不宜小於 15 公尺，困難情況下不得小於車輛相鄰轉向架的全軸距，與此相關之條文綜整如表 5 所示：

表 5 曲線線形要求

法規標準	訂定內容
GB 50157	採 A 型車 25m 採 B 型車 20m 困難情況下 > 一車廂全軸距
GBT 51263	>15m， 困難情況下 > 兩模組全軸距
CJJ T 295	>15m 困難情況下 > 一車廂全軸距
DB11T 1707	>15m 困難情況下 > 一模組長度

1.GB 50157 地鐵設計規範，採 A 型車圓曲線長度不應小於 25m（車長 22.1m）；採 B 型車為 20m（車長 19m），困難情況下不應小於一車廂全軸距。

2.GBT 51263-2017 輕軌交通設計標準，圓曲線長度不宜小於 15m，困難情況下不得小於兩個模組間全軸距。

3.CJJ T 295 城市有軌電車工程設計標準，圓曲線長度不應小於 15m，困難情況下不應小於一車

廂全軸距。

4.在 DB11T 1707 有軌電車設計規範中，圓曲線長度不應小於 15m，困難情況下不應小於一模組長度。

根據上述文獻回顧，可以發現不論是直線、緩和曲線或圓曲線任一種線形，均涵蓋兩類制定原則：

- 1.以物理量來訂定，如速度、加速度、單位時間或距離之線形參數變化量等。
- 2.直接訂定一數值，部分規範與列車之參數相關，包含訂為一節車廂長（或較一節車廂再增加數公尺長）、一節車廂之全軸距等。

三、安坑輕軌軌道線形與車輛參數

根據上述文獻回顧，不論是直線、緩和曲線或圓曲線任一種線形，制定原則包含與列車相關之參數，而由於輕軌列車與一般一節車廂具有兩個轉向架之捷運電聯車配置不同，安坑輕軌列車具有 5 個模組（M1~M5），模組間採用鉸接式關節式聯結裝置連接，雖此裝置具有較佳的過彎能力（於平面可旋轉 22 度），但於進入彎道時，因超高將產生車輛傾斜，聯結裝置在承受因傾斜造成之扭轉時，應使列車傾斜角度盡量與軌道一致，符合前述軌道線形設計，以提升舒適度，此為關鍵之因素；其中僅 M1、M3、M5 模組具有轉向架，故線形長度設計應以轉向架中心距作為考量，安坑輕軌列車設計 M1 至 M3 或 M3 至 M5 之轉向架中心距為 11.4 公尺，如圖 2 所示。



圖 2 安坑輕軌列車構成

當此型列車跨越多種線型時會造成較大的傾斜，如以單一組轉向架中心距設計線形長度，易造成列車扭轉的現象，如將設計線形長度大於最前至最後之轉向架中心距，將可減緩此狀態，故建議需大於 22.8 公尺。

參照安坑輕軌竣工圖，可發現部分線形長度較安坑輕軌列車最前至最後之轉向架中心距 22.8 公尺要來得短，尤其是在新和國小站（以下簡稱為 K8）往十四張站（以下簡稱為 K9）方向第一個彎道的圓曲線特別短，詳見圖 3 與圖 4，上下行分別為 16.317 及 17.687 公尺，且緩和曲線僅 20 公尺，以此為案例做進一步探討。

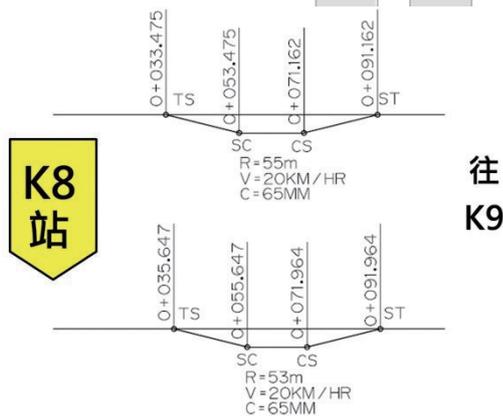


圖 3 竣工圖之線形
(上方為下行軌、下方為上行軌)

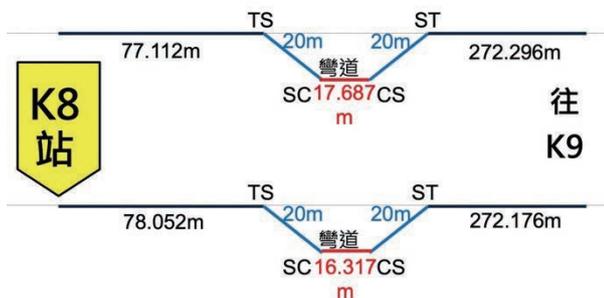


圖 4 將竣工圖依線形種類分顏色繪製（黑色為直線、藍色為緩和曲線、紅色為圓曲線）並註記長度

四、輕軌列車轉向架通過關鍵線形之狀態

接續第三章的分析，為檢核列車通過這段線形的狀態，在此章節介紹檢核與計算方式、案例分析以及計算結果及發現，敘述如下：

（一）檢核與計算方式：

1. 分析 M1、M3、M5 轉向架中心點，分別位在三種不同線形之最極端狀態，由於安坑輕軌轉向架與列車間不會旋轉，故以轉向架之運行狀態進行分析，可近似於該車廂行駛中的情形。
2. 藉由線形幾何資料，計算各位置相對於直線段之旋轉弧度及對應的超高值，藉以算出轉角及傾角。
3. 計算轉向架因彎道曲率形成之轉角，即偏擺（Yaw）姿態變化，如圖 5 所示。
4. 計算轉向架因超高形成之傾角，即翻滾（Rolling）姿態變化，如圖 6 所示。
5. 再計算 M1 與 M5 相對於 M3 模組的姿態差異值。

註：上述分析方法僅為分析軌道幾何條件，實際轉向架通過曲線之動態行為與此有誤差。

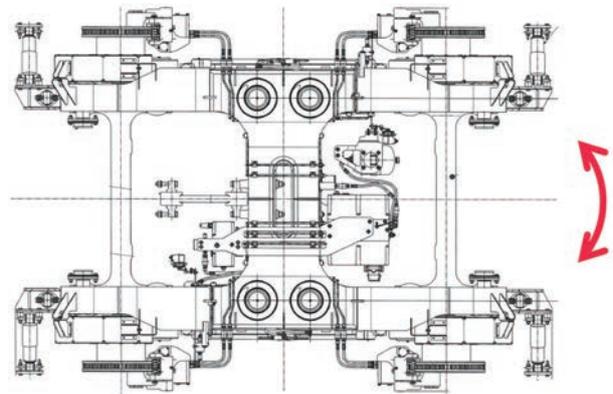


圖 5 轉向架轉角示意圖（右方為行進方向）

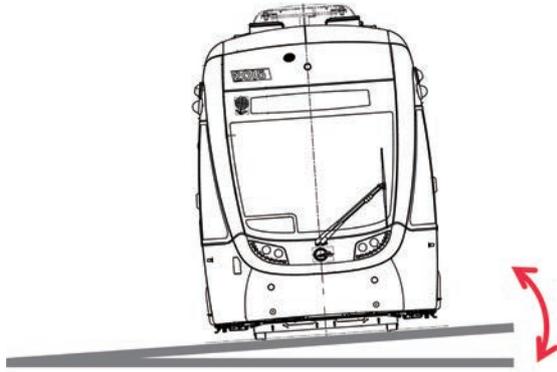


圖 6 轉向架傾角示意圖（進入圖面為行進方向）

（二）案例分析：

以輕軌列車通過由 K8 站往 K9 方向第一個彎道之狀態比較，探討列車跨越三種線形之狀態，如圖 7 所示，分別列為 Case1-4 敘述如下：

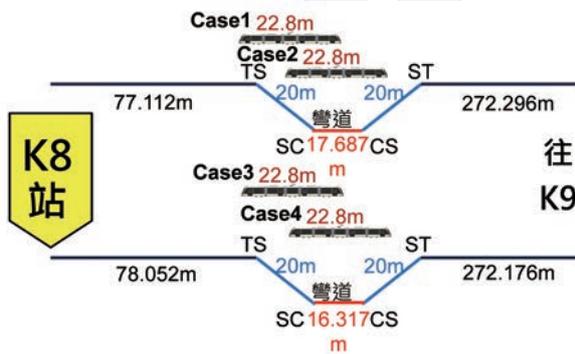


圖 7 分析之四種情境示意圖

1. 下行軌案例：

- (1) Case 1 M1 轉向架位在直線與緩和曲線交界點 (TS)。
- (2) Case 2 M3 轉向架位在圓曲線中點。
- (3) 因列車離開彎道之狀態與 Case1 對稱，故不分析。

2. 上行軌案例：

- (1) Case 3 M1 轉向架位在直線與緩和曲線交界點 (TS)。
- (2) Case 4 M3 轉向架位在圓曲線中點。
- (3) 因列車離開彎道之狀態與 Case3 對稱，故不分析。

（三）計算結果及發現：

1. Case 1 M1 轉向架位在彎道下行軌 TS 點

依據本章節介紹之計算方式，由線形幾何資料，計算出 M1、M3、M5 轉向架所在位置，即可依竣工圖線形資料計算出各位置相對於直線段之旋轉弧度及對應的超高值，藉以計算出各轉向架之轉角及傾角，計算結果如表 6 所示。

表 6 Case1 各轉向架姿態計算結果

條件	轉向架	位置	轉角(°)	轉角差值(°)	傾角(°)	傾角差值(°)
下行軌	M1	直線	0.00	-	0.00	-
	M3	緩和曲線	3.38	3.38	1.48	1.48
	M5	圓曲線	13.22	9.84	2.59	1.11

因轉向架與列車間不會旋轉，故以該姿態代表該車廂姿態，各車廂狀態如圖 7 所示，可見列車跨越三種線形（依顏色區分，灰色為直線、藍色為緩和曲線、紅色為圓曲線）。

由於列車由直線進入彎道，曲率漸增，見圖 7 左側可得知 M1 與 M5 車相對於 M3 車轉角分別為 3.38 及 9.84 度，均小於聯結裝置可承受之限度；另外隨著超高漸增，見圖 8 右側可得知使傾角由 0 度漸增至 2.59 度，M1 與 M5 相對於 M3 之相對傾角最大值為 1.48 度。

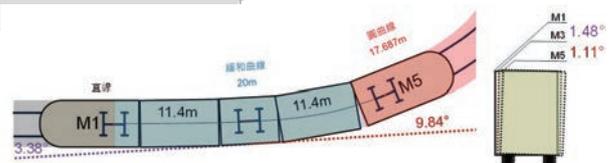


圖 8 Case1 列車通過此線形之狀態

2. Case2 M3 轉向架位在彎道下行軌圓曲線中點

計算過程同 Case1 不在此贅述，計算結果及列車通過狀態分別如表 7 及圖 9 所示。

表 7 Case2 各轉向架姿態計算結果

條件	轉向架	位置	轉角(°)	轉角差值(°)	傾角(°)	傾角差值(°)
下行軌	M1	緩和曲線	8.17	-	2.26	-
	M3	圓曲線	20.25	12.08	2.59	0.33
	M5	緩和曲線	32.32	12.08	2.26	-0.33

列車跨越圓曲線及前後的緩和曲線，M1 與 M5 車相對於 M3 車轉角均為 12.08 度，均小於聯結裝置可承受之限度；另外前後之緩和曲線超高分別為遞減及遞增，使傾角由 2.26 度漸增至 2.59 度再降至 2.26 度，M1 與 M5 相對於 M3 產生反向的傾角，此時造成列車處於扭轉的狀態，相對傾角為正負 0.33 度。

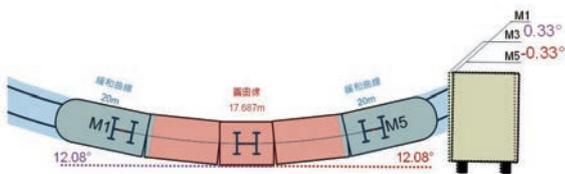


圖 9 Case2 列車通過此線形之狀態

3. Case3 M1 轉向架位在彎道上行軌 TS 點

計算結果及列車通過狀態分別如表 8 及圖 10 所示。

表 8 Case3 各轉向架姿態計算結果

條件	轉向架	位置	轉角(°)	轉角差值(°)	傾角(°)	傾角差值(°)
上行軌	M1	直線	0.00	-	0.00	-
	M3	緩和曲線	3.51	3.51	1.48	1.48
	M5	圓曲線	13.71	10.20	2.59	1.11

由於列車由直線進入彎道，曲率漸增，M1 與 M5 車相對於 M3 車轉角分別為 3.51 及 10.20 度，均小於聯結裝置可承受之限度；另外隨著超高漸增，使傾角由 0 度漸增至 2.59 度，M1 與 M5 相對於 M3 之相對傾角最大值為 1.48 度。

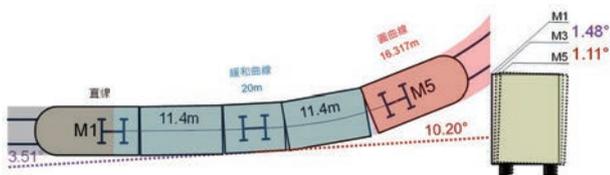


圖 10 Case3 列車通過此線形之狀態

4. Case4 M3 轉向架位在彎道上行軌圓曲線中點

計算結果及列車通過狀態分別如表 9 及圖 11 所示。

表 9 Case4 各轉向架姿態計算結果

條件	轉向架	位置	轉角(°)	轉角差值(°)	傾角(°)	傾角差值(°)
上行軌	M1	緩和曲線	7.55	-	2.17	-
	M3	圓曲線	19.50	11.96	2.59	0.42
	M5	緩和曲線	31.48	11.96	2.17	-0.42

列車跨越圓曲線及前後的緩和曲線，M1 與 M5 車相對於 M3 車轉角均為 11.96 度，均小於聯結裝置可承受之限度；另外前後之緩和曲線超高分別為遞減及遞增，且相較於 Case2，在本案例由於圓曲線長度更短，列車跨越進前後之緩和曲線長度更長，超高之漸變量更大，使傾角由 2.17 度漸增至 2.59 度再降至 2.17 度，M1 與 M5 相對於 M3 產生反向的傾角，因而造成列車處於扭轉的狀態，相對傾角達正負 0.42 度。

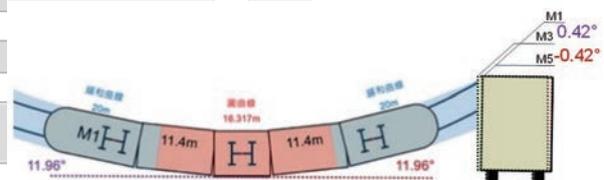


圖 11 Case4 列車通過此線形之狀態

以列車經由上下行線各位置之狀態計算結果分析，發現當 M3 車在圓曲線中點時，前後車廂會有反向傾角的扭轉現象。

五、結論與建議

根據前述章節的分析，在圓曲線長度短於 22.8 公尺時，當 M3 車位在圓曲線中點時，M1、M5 車位在前後緩和曲線，列車形成兩不同方向之傾角，最大達正負 0.42 度，使列車扭轉，致使車廂晃動較為明顯。

安坑輕軌之圓曲線長度雖符合文獻回顧中各規範之要求，但日後定線設計時，在用地限制許可下，建議可將有設置超高之圓曲線長度設計精進為大於列車最前至最後之轉向架中心距（若採

用此型列車則為大於 22.8 公尺)，以避免同一列車跨越多種線形，藉以減緩晃動之現象，提供更佳的旅客舒適度。

藉由本案例之發現與分析內容，可回饋予國內外輕軌捷運之定線設計，以降低旅客搭乘時之不適，使未來的輕軌捷運系統提供更佳的服務品質。

謝 誌

本文得以順利完成，特別感謝廖慶隆教授，於發現此問題時，提供技術支援剖析問題關鍵，更多次親赴現場指導，成就與精進本國未來輕軌建設發展。

參考文獻

EN13803-1:2010 Railway applications - Track - Track

alignment design parameters - Track gauges 1435 mm and wider - Part 1: Plain line

Track Design Handbook for Light Rail Transit, Federal Transit Administration

Modern Railway Track (2nd, Coenraad Esveld, 2001)

鉄道に関する技術上の基準を定める省令の解釈基準

GB 50157-2013 地鐵設計規範

GBT 51263-2017 輕軌交通設計標準

CJJ T 295-2019 城市有軌電車工程設計標準

DB11/T 1707-2019 有軌電車工程設計規範

新世紀鐵路工程學（基礎篇），黃民仁著（2005）

安坑輕軌運輸系統計畫機電統包工程一關節式聯結裝置細部設計（AKLR1-TK02-DDD-ERS-1028）

安坑輕軌運輸系統計畫機電統包工程一車輛穩定性模擬分析計算書（AKLR1-TK02-CAS-ERS-1019）

安坑輕軌運輸系統計畫土建統包工程一細部設計報告（AKLR1-TK01-REP-GEN-1001）

安坑輕軌運輸系統計畫土建統包工程一軌道定線竣工圖（AKLR1-TK01-ABD-ETK-0001）

安坑輕軌運輸系統計畫土建統包工程一軌道工程竣工圖（AKLR1-TK01-ABD-ETK-0002）

應用程式

公开发售

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：louise@sinotech.org.tw

除役金屬廢棄物盛裝容器 開發經驗分享

張學植 * 黃秉修 ** 林伯聰 ***

摘要

依據修訂後的電業法要求，2025年前我國所有的核電廠必須停止運轉並進行後續的除役工作，達成非核家園的目標。但在核電廠除役過程中，核反應爐於切割移除時，相當數量的極高比活度金屬放射性廢棄物將會產生，這些廢棄物因放射性劑量極高，必要時須以水下作業進行切割或拆解，同時必須要有適當容器盛裝相關廢棄物，以確保相關除役工作得以順利執行。然而，綜觀我國目前核准的低放射性廢棄物盛裝容器，或因輻射屏蔽能力不足或因承載重量不足，不適用於盛裝核能電廠除役期間之高比活度金屬放射性廢棄物及其他除污過程產生之高比活度二次放射性廢棄物。台電為了確保作業人員、民眾與環境之輻射防護安全，台電公司必須開發出新的盛裝容器並獲得主管機關使用許可，確保電廠除役作業順利執行。

新開發之核能電廠除役金屬專用容器，供除役作業期間之金屬廢棄物裝填、傳送與運輸，以及後續之貯存與處置作業使用。研訂專用容器開發計畫管理目標的過程，除了考量合理抑低輻射曝露與符合法規安全管理的要求外，更需要全盤考量容器全生命週期的使用狀態。自容器製造與檢驗、裝填作業與容器封蓋、設施內之容器吊卸與搬運、廠內傳送與廠外運輸作業、中期貯存與最終處置等階段之作業過程其階段主要功能需求不盡相同，但均需在開發初期訂定功能目標時納入考量。在各項功能目標考量中，以「放射性物質安全運送規則」各項一般狀況與意外狀況試驗要求最具挑戰性。

考量我國放射性廢棄物容器產業市場規模較小，且無合格試驗單位與設備場地可供執行容器試驗。同時考量國內亦缺乏開發乙（M）型包件實際經驗，最終決定廣邀國際廠商參與專用容器開發之公開招標。計畫順利招標後，旋即遭遇新冠肺炎疫情的衝擊，跨國工作團隊受到國家邊境管制而無法至現場勘查與討論，同時要面對團隊成員可能突然確診與隔離，使雙方團隊於執行與管理上均遭遇了意外的挑戰。為了確保計畫可以持續推展，台電公司計畫管理工作小組與承商團隊透過更頻繁的視訊會議進行協調與溝通，滾動式的制定與修訂各工作項目的執行與管理規劃。最終，專用容器的許可申請書於民國 111 年 2 月提交管制單位，專用容器原型的本土化製作業亦將於近期展開。台電公司計畫管理工作小組表示對於計畫的目標和願景仍然保持信心，期待能實現取得專用容器使用執照，協助順利推動除役作業，與促進我國除役產業鏈本土化發展的計畫目標和願景。

關鍵字：除役金屬廢棄物專用容器、乙（M）型包件、第二型工業包件

* 台灣電力股份有限公司核能後端營運處處長
** 台灣電力股份有限公司核能後端營運處資深專業工程師
*** 中興工程顧問公司核能後端專案計畫經理

一、前言

核一廠運轉執照於 2019 年屆滿，現已依通過環評與原能會核可之除役計畫執行除役作業。除役計畫前 8 年為「過渡階段」，接續 12 年為「拆廠階段」，於此階段將開始拆除反應爐及汽機等金屬組件，拆除後之金屬材料若無法透過除污方法去除其放射性，則歸類於除役金屬廢棄物。依國際上各國拆廠經驗與除役計畫分析，所拆除之金屬組件均屬於低放射性廢棄物分類，需依「放射性物料管理法」與其相關規定，辦理後續之低放射性廢棄物裝載、運送、貯存與處置等作業。核能電廠的盛裝容器選擇與使用，依法亦須取得主管機關核准才能使用，以保障公眾健康及安全。

核電廠運轉期間，低放射性廢棄物主要來自於受污染的工作人員防護與作業設備、化學與洗滌廢液，以及處理放射性廢液所產生之廢樹脂與過濾殘渣等。固體類運轉廢棄物多具可燃燒或可壓縮特性，經減容處理後之廢棄物體積小重量輕，接續的廢棄物安定化處理對於容器亦無特殊要求。因此，運轉階段所產生的低放射性廢棄物，對於盛裝容器的容積、尺寸與承重能力要求並不高，有相當多的盛裝容器種類可供選用。因此，核一廠及各國核能電廠於運轉時期之主要盛裝容器均為 55 加侖桶，其他已取得主管機關核准於核電廠使用中之容器尚有少量之 3×4 重裝容器與高性能混凝土處置容器，如表 1 所列。

核電廠除役需進行反應器壓力槽、反應器壓力槽內部組件、控制棒、燃料池格架組件、反應器一次側系統、爐水淨化系統、再循環系統、餘熱移除系統、廢料系統等組件切割，將產生相當數量較運轉時比活度更高之低放射性廢棄物。核電廠反應器壓力槽因長期運轉受高中子通量照射，內部組件含有高比活度之活化金屬，須以水

下作業方式進行切割或拆解，同時必須以具適當屏蔽功能之容器盛裝相關放射性廢棄物。如圖 1 所示。

表 1 核電廠使用中之盛裝容器規格

容器類型	55 加侖桶	3×4 重裝容器	高性能混凝土處置容器
容積尺寸	內徑 572 mm 桶深 884 mm	2,700 mm × 2,050 mm × 920 mm	內徑 652 mm 桶深 930 mm
容積	0.225 m ³	5.1 m ³	0.3 m ³
空重	34kg	不含外加屏蔽 2,500 kg 含外加屏蔽 7,900 kg	620 kg
最大總重	734 kg	17,700 kg	1,820 kg

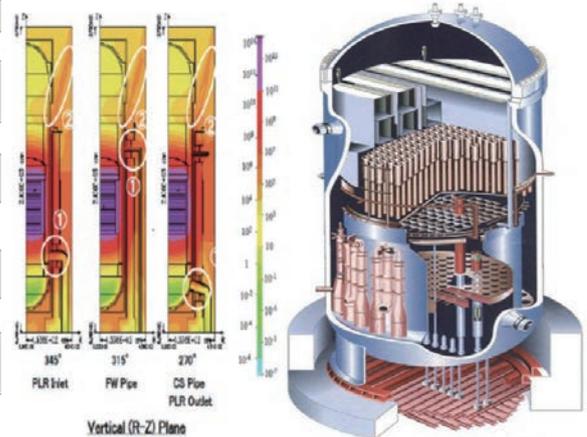


圖 1 核反應爐比活度分布示意圖

目前台電公司已獲主管機關核准的低放射性廢棄物盛裝容器，因屏蔽不足或容量不足，不適用於盛裝反應器壓力槽及其周邊系統組件之活化或受較高污染切割後之金屬廢棄物，爰於民國 108 年啟動除役金屬廢棄物專用容器開發計畫。台電公司後端處處長表示，為了可以合理抑低除役作業期間現場人員可能接受之輻射曝露劑量。在招標階段規劃盛裝容器設計目標時，即決定所開發的容器除了須滿足除役作業需求之外，必須具備足夠輻射屏蔽

能力，與滿足取得盛裝容器使用許可之法規要求，作為容器開發核心目標。容器開發案的招標作業準備，則交由台電後端處低放處置組主導。在招標工作準備階段的初期，作業團隊同步研讀了國內外對於盛裝容器功能的法規要求，並收集了國際上已實際進行核能電廠除役作業國家所使用的容器選用經驗，進行研究與分析。

二、合理抑低輻射曝露需求

當容器貯存於設施中，可藉由貯存設施提供必要之輻射屏蔽功能，加上貯存設施通常距離民眾生活圈有較遠之距離，在輻射法規限值管理上，通常是以設施廠界輻射劑量為管理標的。而容器於運輸過程中，則是仰賴容器與運輸載具提供輻射屏蔽功能，若採用陸運方式，則運輸過程將與民眾生活圈有較短距離之接觸，故容器之輻射劑量管理法規對於運送狀態之容器有較嚴格之要求。

因此，為了實現減少除役作業期間之人員輻射劑量核心目標，最終決定開發兼具貯存與運輸功能的除役金屬廢棄物專用容器。即所開發的容器必須要能符合我國「放射性物質安全運送規則」與國際原子能總署發布之最新的 SSR-6 規定。首先，即參考法規之輻射量管理限值，於容器的包件或外包裝其外表面上任一點之最大輻射強度不得大於每小時 2 毫西弗，距外表面 2 公尺處不得大於每小時 0.1 毫西弗。據以訂定除役金屬廢棄物專用容器開發之輻射屏蔽設計功能，採用與法規相同之容器表面劑量與外表面 2 公尺處輻射劑量限值，作為輻射屏蔽設計目標以符合法規要求。

三、容器全生命週期安全與作業需求

容器的使用生命週期包含：容器製造與檢驗、

裝填作業與容器封蓋、設施內之容器吊卸與搬運、廠內傳送與廠外運輸作業、中期貯存與最終處置。除了容器製造與品管檢驗主要是在製造端執行外，後續各項作業均涉及輻射防護、放射性廢棄物安全管理、容器裝填與搬運等作業考量。在前述合理抑低輻射曝露的容器開發目標下，專用容器將可提供充足的輻射屏蔽能力，同時也確定了容器於各作業階段可提供之輻射防護能力。為了讓容器可符合未來的除役作業使用需求，作業團隊亦根據反應爐各組件鈷六十 (Co-60) 比活度計算結果及容器尺寸推導之最適化裝填率，訂定容器開發之尺寸目標、最小裝載重量與 Co-60 比活度裝載限值等功能需求目標。例如為了增加各類金屬切割作業裝填效率，最終選擇箱型容器外型，外尺寸規劃為 2 公尺 × 1.85 公尺 × 1.85 公尺，並訂定於研發時廠商有 10% 之尺寸可調整範圍。為了因應於設施內之吊卸與搬運需求，容器的材質選用與結構設計需要能維持作業過程的密封性與完整性。容器也需要能在貯存期間具備足夠的散熱、抗堆疊與抗腐蝕能力，便於日後運送至最終處置場進行處置時，容器仍具備密封性與完整性，足以確保運送過程的安全需求。對於容器的安全設計而言，以運送作業階段所需考量之安全需求最高，需要能夠在各種正常運送條件與假定事故情境下，保持廢棄物包件的完整性且不會發生放射性物質的逸散。為了確認其安全性，法規有不同的試驗與檢驗要求，用以確認容器可於正常運送條件與假定意外事故情境下之安全性。在處置作業階段，由於除役金屬廢棄物專用容器僅規劃作為貯存與運輸兩用容器，因此需要處置於具有多重安全功能之處置障壁系統中，並不須如高性能混凝土處置容器提供處置所需安全功能。但是，盛裝於容器內的廢棄物，仍需處理至符合最終處置場之接收要求。以盛裝於金屬材質容器之除役金屬廢棄物而言，目前規劃可利用

灌漿固結方式進行處理。

四、容器設計與試驗需求

依據除役畫推估之除役金屬特性，對於如 Co-60 超過 4×10^{10} Bq/kg 之高比活度廢棄物而言，適用於乙 (M) 型包件要求，其餘 Co-60 比活度較低之金屬廢棄物則適用於第二型工業包件要求。因此，專用容器開發案對於設計與試驗的要求項目與目標研擬，主要參考法規對於此兩類包件之要求。容器設計的一般要求主要是以作業與貯存安全為主要考量，如：外表無突出物且易於除污、外層設計儘可能防止積水、搬運時易於固定、各類作業配件不應減損容器安全性、容器應可承受衝擊、鎖定裝置不會因為運輸時產生之震動而鬆脫、容器與其組件不會因廢棄物之物理性質、化學性質或輻射照射而導致性能改變等。乙 (M) 型包件對於與容器包封完整性有關的識別與控制裝置設計有更進一步的要求，如：閉鎖裝置不會因壓力差或於無意間被開啟、容器周圍壓力降低時仍可維持放射性包容物之完整等。2022 年 9 月，T Box 全部於德國完成並成功製造，如圖 2。

依「放射性物質安全運送規則」之相關試驗方法規定說明 (如圖 3) 如下：

(一) 噴灑試驗：樣品應承受水噴灑試驗，模擬每小時約 5 公分之雨量，且至少需 1 小時。

(二) 自由墜落試驗：金屬專用容器包件重量均大於 15,000 公斤，墜落高度自樣品最低點至目標物之最上層表面間應不少於 30 公分。

(三) 堆積試驗：如果容器的形狀能有效防止堆積，樣品應能承受 24 小時之 5 倍包件重量重壓。

(四) 貫穿試驗：樣品應置於一堅硬、平坦之水平表面，在試驗進行時，此表面應不至有顯著之移動。然後以一直徑為 3.2 公分、具有半球形尾端、質量為 6 公斤之棒狀物，沿長軸方向垂

直墜落於樣品最脆弱部分之中心，使其如貫穿夠深，將擊中其包封容器。墜落高度自棒之最低點至樣品上表面受撞擊處之距離應為 1 公尺。



圖 2 T Box 於 2022 年 9 月全部於德國完成成功製造

(五) 第一種墜落：墜落高度自樣品最低點至目標物上表面應為 9 公尺。

(六) 第二種墜落：樣品應墜落至一牢固裝置且垂直於目標物之棒上。墜落高度自樣品上欲使其受撞擊之點至棒之上表面應為 1 公尺。棒應為堅實軟鋼製成，切面為圓形，其直徑為 15 公分，長度為 20 公分。

(七) 第三種墜落：樣品應置於目標物上使其承受 500 公斤塊狀物，自 9 公尺高度墜落至此樣品並使其蒙受最大之動力壓擠。此塊狀物應為 1 公尺 × 1 公尺用堅實軟鋼製成之正方形鋼板，並以水平方位落下。墜落高度應自鋼板之下表面量至樣品之最高點。

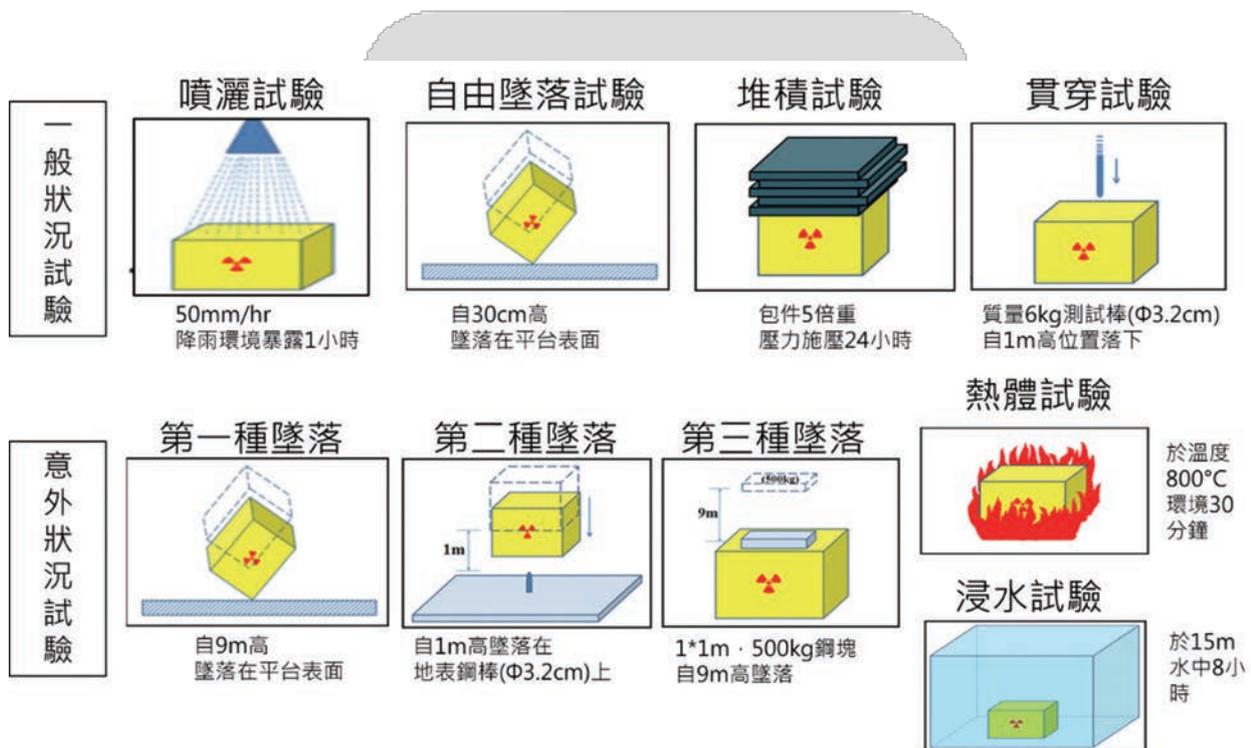
(八) 熱體試驗：熱體試驗為使樣品曝露於除簡單支撐系統外完全陷入一範圍足夠寬廣之碳氫化合物燃料及空氣產生之火焰中，並在一足夠

靜止之環境下，能提供一平均發射係數至少為 0.9 及平均火焰溫度至少為攝氏 800 度，歷時 30 分鐘。燃料源在水平方向應超出樣品任何外表面至少 1 公尺但在 3 公尺以下，樣品並應位於燃料源表面上方 1 公尺處。當外加熱量停止後，樣品應使其自然冷卻，且樣品任何可燃燒之物質，亦應讓其自然進行燃燒。

(九) 熱體試驗：熱體試驗為使樣品曝露於除簡單支撐系統外完全陷入一範圍足夠寬廣之碳氫化合物燃料及空氣產生之火焰中，並在一足夠

靜止之環境下，能提供一平均發射係數至少為 0.9 及平均火焰溫度至少為攝氏 800 度，歷時 30 分鐘。燃料源在水平方向應超出樣品任何外表面至少 1 公尺但在 3 公尺以下，樣品並應位於燃料源表面上方 1 公尺處。當外加熱量停止後，樣品應使其自然冷卻，且樣品任何可燃燒之物質，亦應讓其自然進行燃燒。

(十) 浸水試驗：樣品應浸入一水面深度至少高於樣品上表面 15 公尺之水中，時間不少於 8 小時。



參考資料：放射性物質安全運送規則

圖 3 一般狀況與意外狀況試驗要求

第二型工業包件需執行噴灑試驗、自由墜落試驗、堆積試驗及貫穿試驗。於執行試驗後，應能防止放射性包容物之失落或逸散，仍能使包件外表面上任何一點之輻射強度增加量，在原數值百分之二十以下。

乙 (M) 型包件亦需通過噴灑試驗、自由墜落

試驗、堆積試驗及貫穿試驗。於執行試驗後，應能限制放射性包容物流失率低於每小時一百萬分之一的 A2 值以下，仍能使包件外表面上任何一點之輻射強度增加量，在原數值百分之二十以下。為了證明具有承受運送時意外事故狀況能力，另須執行包含 9 公尺墜落等三種不同情境之墜落試

驗、熱體試驗與浸水試驗。於執行試驗後，應能限制放射性包容物流失率於一週內累積流失之放射性包容物在 A2 值以下，且能保證在盛裝此包件所設計最高數量之放射性包容物時，距包件表面一公尺之輻射強度，在每小時十毫西弗以下。前述之 A2 值為「放射性物質安全運送規則」對於包件中放射性物質活度的管理值，每一種放射性核種皆有其對應之 A2 管理值，如表 2。

表 2 每一種放射性核種對應之 A2 管理值

核種	A2
	TPq (10 ¹² Bq)
C-14	3.00
Ni-59	NO Limited
Nb-94	0.70
Tc-99	0.90
I-129	NO Limited
TRU Pu-238	0.001
Pu-241	0.06
Cm-242	0.01
Co-60	0.40
Ni-63	30.00
Sr-90	0.30
Cs-137	0.60
Fe-55	40.00

若放射性包容物屬混合放射性核種，則需依公式導出混合物 A2 管理值，其公式如下：

$$X_m = \frac{1}{\sum_i \frac{f(i)}{X(i)}}$$

式中 $f(i)$ 為混合核種中 i 核種活度或活度濃度之分量， $X(i)$ 為核種之 A2 值， X_m 為混和物 A2 值。

五、招標與容器開發過程管理

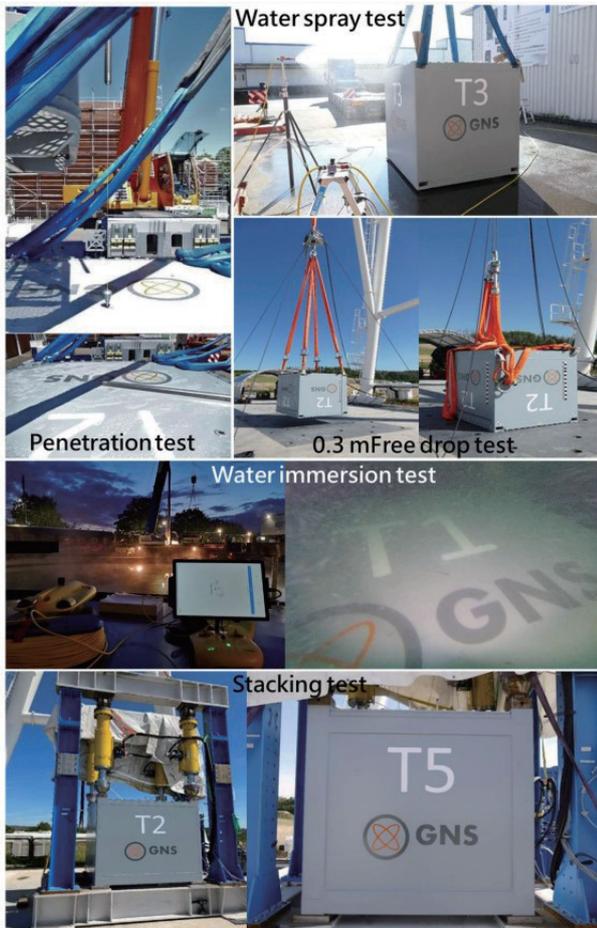
考量國內產業缺乏開發乙 (M) 型包件實際經驗，亦無合格試驗單位與設備場地可供執行容器試驗，故決定廣邀國際廠商參與專用容器開發之公開招標。為達成促進除役產業鏈本土化發展，

於招標規範中要求得標廠商必須提交容器製造與檢驗程序書，提供國內廠商必要技術輔導，並在臺灣製造一套容器原型，證實我國鋼鐵產業具備生產此容器之能力。容器開發計畫招標程序於民國 108 年底啟動，經公開評選後由德國 GNS 公司得標，最終於民國 109 年 1 月完成簽約程序。由於專用容器未來將在臺灣進行大量製造，本土鋼鐵產業技術與設備能力成為容器開發設計的重要考量因素。為此於計畫決標後，承攬商即赴我國與潛在製造廠商進行製造能力訪談。同時，亦與台電公司工作團隊進行計畫開案階段的各項工作討論與時程安排。

孰料我國於民國 109 年 3 月 19 日零時起開始實施入境管制，德國亦於民國 109 年 3 月 17 日實施出境管制，直接導致原定後續各項現場勘查與訪談作業無法實現。同時新冠肺炎已在全球各城市擴散並傳出相當數量的感染人數，各國政府為了控制新冠肺炎擴散，限制各種類型的群聚行為，各公司也逐步採用在家辦公與線上會議的作業模式。受到硬體設備限制、作業習慣差異、作業人員確診與被隔離等因素影響，各項會議溝通與作業效率均受到影響。

在此期間，計畫管理工作小組與承商團隊的電子郵件往來數量與頻率日漸頻繁，而後雙方均研判疫情發展會有長期影響，且會對計畫規劃執行進程產生實質影響。為因應雙方均有邊境管制且無法預測人員何時會被感染與隔離的狀態，計畫管理工作小組決定於定期專案會議之外，每兩周進行一次雙方的視訊會議，用以解決無法至現場勘查與討論的困境，同時可以掌握承商的工作執行狀況。然而，在新冠肺炎持續蔓延與防疫措施管制的衝擊下，鋼鐵材料的生產與供應鏈亦受到相當程度衝擊。德國的粗鋼產量自平均每年 4,285 萬噸下滑至民國 109 年的 3,570 萬噸約減少 17%。由於乙 (M) 型容器之鋼板厚度較厚，並

非鋼板市場主流產品，導致容器原型製作材料的採購發生意外的延遲。在雙方團隊的通力合作下，終於在民國 111 年底完成所有原型容器之試驗項目，如圖 4。



參考資料：電廠低放射性廢棄物盛裝屏蔽容器巡查 / 稽查會議

圖 4 專用容器噴灑試驗、貫穿實驗、浸水試驗、堆積試驗及 30 公分自由墜落試驗

台電公司亦派員至德國執行 9 公尺自由墜落試驗見證與品質保證文件稽查，如圖 5。品保稽查團隊發現 GNS 公司品保作業落實得相當完整，每個單位執行的權責與確認單位於表單設計上都相當明確，且逐步確認後方可進行下一步，從文件記錄軌跡，可以看到 GNS 公司對於品保作業的落實度非常完善。



圖 5 T1 Box 於 2022 年 12 月於德國通過火測及 9 公尺自由墜落試驗

六、結論與展望

專用容器開發計畫受到新冠肺炎疫情影響，雙方團隊於執行與管理上均遭遇了意外的困難。透過更頻繁的視訊會議進行協調與溝通，台電公司計畫管理工作小組與承商團隊滾動式的制定與修訂個工作項目的執行與管理規劃，使得計畫在受到新冠肺炎疫情衝擊之下，仍可持續地推進。專用容器的許可申請書於民國 111 年 2 月提交申請，專用容器的本土化原型製造作業亦將於近期展開。台電公司計畫管理工作小組表示對於計畫的目標和願景仍然保持信心，雖然計畫後續執行與本土化製造推廣仍可能遭遇挑戰，但我們有信心可以克服這些挑戰，實現取得專用容器使用執照，協助順利推動除役作業，與促進我國除役產業鏈本土化發展的計畫目標和願景。

參考文獻

- IAEA (2018) Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (SSR-6), 2018 年 6 月
- 行政院原子能委員會 (2007) 放射性物質安全運送規則，2007 年 12 月，取自：<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawHistory.aspx?pcode=J0160005>
- 台電公司 (2022) 電廠低放射性廢棄物盛裝屏蔽容器巡查 / 稽查會，2022 年 12 月，取自：<https://report.nat.gov.tw/ReportFront/PageSystem/reportFileDownload/C11100894/001>



財團法人中興工程顧問社已獲得專利如下，若有需要，歡迎洽詢。

聯絡電話：(02) 8791-9198 轉 467 陳小姐

E-MAIL：louise@sinotech.org.tw

網址：http://www.sinotech.org.tw

序號	專利名稱	發明字號	核准地區	種類
1	消能型金屬接合板消能機構	發明第 I 449832 號	台灣	發明
2	氣體採樣裝置與氣體採樣方法	發明第 I522605 號	台灣	發明
3	高濃度藻類的污水培養裝置與方法	發明第 I534103 號	台灣	發明
4	感測裝置及土石流監測系統	新型第 M 550399 號	台灣	新型
5	災害指示裝置以及災害應變系統	新型第 M 551733 號	台灣	新型
9	多功能熱反應裝置	發明第 I617357 號	台灣	發明
10	邊坡感測裝置	新型第 M 561293 號	台灣	新型
11	山區部落智能供水與坡地安全防護系統	新型第 M 561200 號	台灣	新型
12	現地表層沖刷無線監測系統	新型第 M 561201 號	台灣	新型
13	井下岩層特徵立體成像的系統及方法	發明第 I626622 號	台灣	發明
14	地層氣體紅外線光譜檢測系統	新型第 M 563548 號	台灣	新型
15	高性能等時太陽能地層洩氣系統	新型第 M 565237 號	台灣	新型
16	高精度無線節能傾斜感測系統	新型第 M 569420 號	台灣	新型
17	監測框架	設計第 D 193440 號	台灣	設計
18	水流分離裝置及包含其之水流量測系統	新型第 M 581200 號	台灣	新型
19	用來提升點雲精度之方法與裝置	發明第 I676151 號	台灣	發明
21	隧道空間紅外線光譜儀氣體量測系統	新型第 M 592513 號	台灣	新型
23	隧道光標定位發射器	發明第 I 696807 號	台灣	發明
24	分離式封塞水力試驗測量系統與方法	發明第 I 698574 號	台灣	發明
25	水砂盒	設計第 D 206644 號	台灣	設計
26	環境資料之前處理系統	新型第 M 601347 號	台灣	新型
27	建物震後性能診斷系統	新型第 M 601845 號	台灣	新型
28	隧道空間紅外線光譜儀氣體量測方法	發明第 I 707132 號	台灣	發明
28	井下岩層特徵立體成像的系統及方法(APPARATUS AND METHOD FOR SEMI-THREE-DIMENSIONAL ROCK FORMATION IMAGING ALONG THE BOREHOLE SIDEWALL)	US10,760,405 B2	美國	發明
30	人工沖蝕渠槽自動化監測裝置	新型第 M 603040 號	台灣	新型
31	角反射器及雙軌雷達反射器	新型第 M 607200 號	台灣	新型
32	高性能等時太陽能地層洩氣系統	ZL 2019 1 0329350.5	大陸	發明
33	運用遙測資料建置災害曝險資料之系統	新型第 M 609811 號	台灣	新型
34	單攝影機建築結構層間變位監測系統及相關方法	發明第 I 730859 號	台灣	發明
35	不連續鋼板圍束鋼筋混凝土連接梁	發明第 I 736494 號	台灣	發明
36	人工沖蝕渠槽自動化監測方法	發明第 I 737413 號	台灣	發明
37	自供電角反射器	新型第 M 616769 號	台灣	新型
38	三維透地雷達的影像解析輔助裝置	新型第 M 621844 號	台灣	新型
39	智慧型變位監測系統	新型第 M 626729 號	台灣	新型
40	運用遙測資料建置災害曝險資料之系統	發明第 I 764326 號	台灣	發明
41	橋梁鋼纜振動檢測裝置	新型第 M 634672 號	台灣	新型
42	三維透地雷達的影像解析輔助系統	發明第 I 786802 號	台灣	發明
43	隧道空間紅外線光譜儀氣體量測方法(METHOD OF INFRARED SPECTROMETRIC MEASUREMENT OF TUNNEL GAS)	US11,567,000 B2	美國	發明
44	模組化消能機構	新型第 M 638935 號	台灣	新型
45	模組化消能機構	發明第 I 808029 號	台灣	發明

濱海地區複合地層之 地下洞道工程經驗回饋

曾脩夫 * 蔡宜璋 ** 陳彥旭 *** 游家豪 ****
謝昇穎 ***** 葉明志 *****

摘要

為提升北部地區送電容量及供電品質，確保電力穩定供應，計畫於大潭新電廠～林口電廠間興建電纜線路，並計畫以地下洞道方式穿越多處過河段，搭配明挖管路進行串聯銜接。

本工程地下洞道主要行經之地層為卵礫石層及砂岩，其中，卵礫石粒徑大且强度高，複以全線鄰近濱海地區並緊鄰台 61 線西濱快速道路，設有多處急曲線轉彎段，故施工風險甚高。工程團隊透過量身訂製的潛盾機及推管機，成功克服複合地層之施工課題，並結合先進的無線自動化監測系統，即時掌握鄰近橋梁之沉陷及變位。此外，本工程使用高強度、抗侵蝕性及止水性佳之材料，並創新採用 Ω 柔性接頭增強結構耐震性，達到施工安全，延長結構壽命及降低後續維護管理之需求。

關鍵字：潛盾隧道、轉彎推管、複合地層

一、前言

程來傳輸供應，分散電纜線路過度集中之風險，穩定北部地區供電品質。

（一）緣起及目標

台電公司配合政府能源轉型政策，並因應未來用電需求與供電缺口，以「展綠、增氣、減煤、非核」作為未來電源開發策略，推動「大潭電廠增建燃氣複循環機組發電計畫」，於大潭電廠廠址內增建 3 座高效率燃氣複循環機組，並新建「161kV 大潭新～林口地下電纜線路」電源線工

本計畫電纜線路全長約 30 公里，共劃分為四個工區同時進行施工，其中，「161kV 大潭新～林口線地下電纜管路統包工程（第二工區）」（以下簡稱本工程）因行經多處過河段，規劃以潛盾洞道及推管洞道進行穿越，同時以沉箱工作井作為潛盾、推管發進井及到達井，並與明挖段進行串聯銜接。

* 中興工程顧問公司大地工程部計畫副經理
** 中興工程顧問公司大地工程部計畫經理
*** 豐順營造股份有限公司董事長
**** 台灣電力股份有限公司輸變電工程處北區施工處工程師
***** 台灣電力股份有限公司輸變電工程處北區施工處課長
***** 台灣電力股份有限公司輸變電工程處北區施工處經理

(二) 工程概述

本工程工址位於桃園市大園區及觀音區，全線毗鄰台 61 線西濱快速道路高架橋施設。工程全長約 9 公里，主要工作項目包括 6 座沉箱工作井，2 段 $\Phi 3.9\text{m}$ 的潛盾隧道，長度分別為 1,265m 及 890m，另有 1 段 $\Phi 2.4\text{m}$ 推管隧道，長度為 74m，其餘路段則採用挖管路進行串聯銜接。

二、工程挑戰性

本工程為臺灣首座臨海、近橋、行經複合地層之長距離隧道工程（詳圖 1 及圖 2），挑戰性極高，說明如下：

(一) 本工程工作井與地下隧道緊鄰台 61 線西濱快速道路高架橋（以下簡稱台 61 線高架橋）施作，沿線地下存在既有橋墩，並密布高危險性油氣電力等維生管線，故如何在不經過私有地之

前提下，研選合適之路徑以維持台 61 線高架橋之運量需求、確保台 61 線高架橋梁結構基礎安全、妥善保護與遷移地下既設維生管線，為本工程成敗關鍵。

(二) 工作井開挖及潛盾、推管掘進遭遇礫石／砂土／巨石等複合地盤，如何擬定合適之工作井位置及隧道深度，減輕高空作業與局限空間作業危險性，並評估適宜之開挖及鑽掘工法以維持工進，為本工程另一項關鍵課題。

(三) 潛盾隧道位處高地下水位及高鹽害環境中，設計時所採用之止水性及抗侵蝕性對策，亦至為重要。

(四) 本工程設計內容複雜性高（涵蓋土建、機電、電纜等工程），若能應用高端科技軟體輔助設計及施工管理，將有助於本工程如期如質如度完成。



圖 1 本工程電纜線路平面位置圖

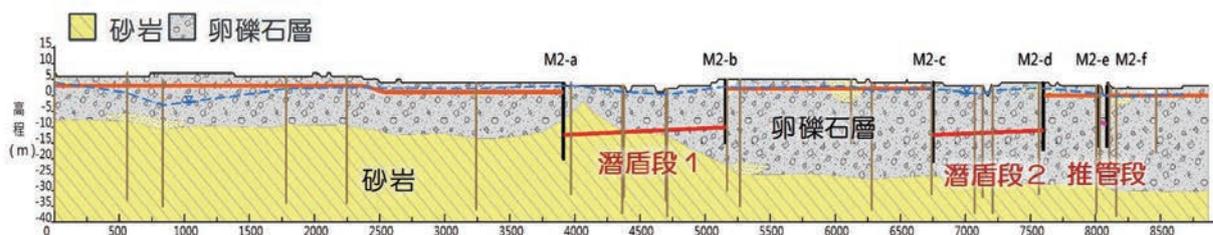


圖 2 本工程地質剖面圖

三、工程特點及精進作為

(一) 高架橋之安全確保

1. 優化工程路徑

本工程潛盾隧道緊鄰台 61 線高架橋（詳圖 3），為減輕潛盾鑽掘對既有橋梁之影響，設計階段即調整隧道線形路徑及埋深，加大隧道與橋梁間之距離（詳圖 4），並整合統包商施工技術，佈設連續急曲線轉彎（ $R=50m$ ）避開私有地（詳圖 5、圖 6）。

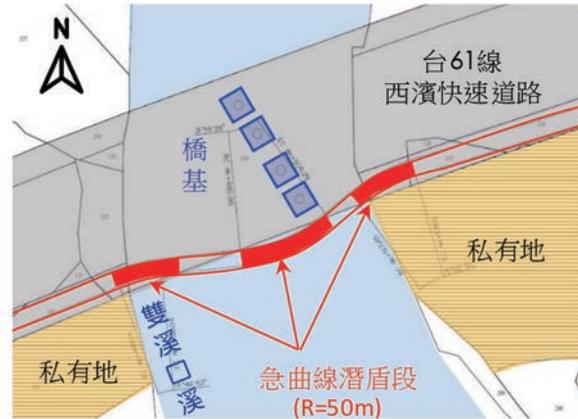


圖 5 洞道急曲線轉彎段



圖 3 本工程與鄰近台 61 線高架橋合成圖



圖 6 洞道急曲線轉彎段照片

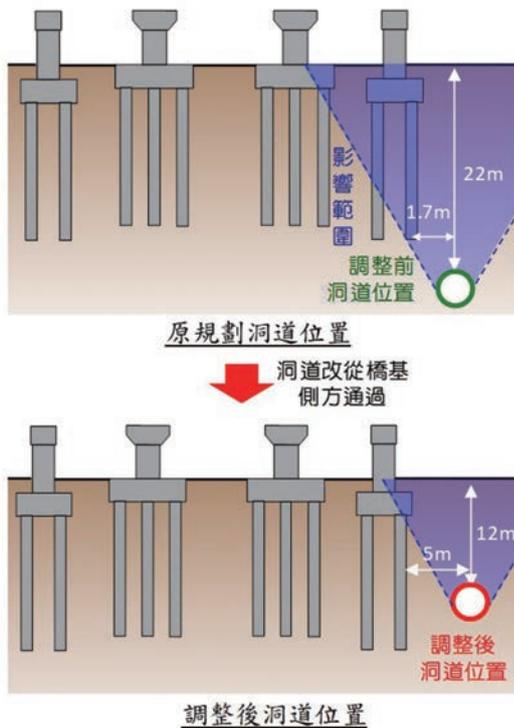


圖 4 洞道線形路徑及埋深調整比較示意圖

2. 慎選施工工法

針對潛盾洞道之工作井開挖，一般常採鋼襯板工法施工，然考量工址位處高地下水位之環境，開挖期間，地下水位易從開挖面滲入，且易攜帶砂土造成土層掏空，致路面沉陷而影響鄰近台 61 線高架橋梁結構及用路人安全。緣此，為有效減輕開挖擾動，工作井改採用高精度、低風險之壓入式沉箱工法（詳圖 7）施作，其具有下列優點：

- (1) 以地錨配合千斤頂進行壓入，利用監測儀器確保沉箱頂面水平，準確控制沉箱穩定下沉。
- (2) 具高水密性，且可完全防止滲水，同時提昇結構物耐久性。

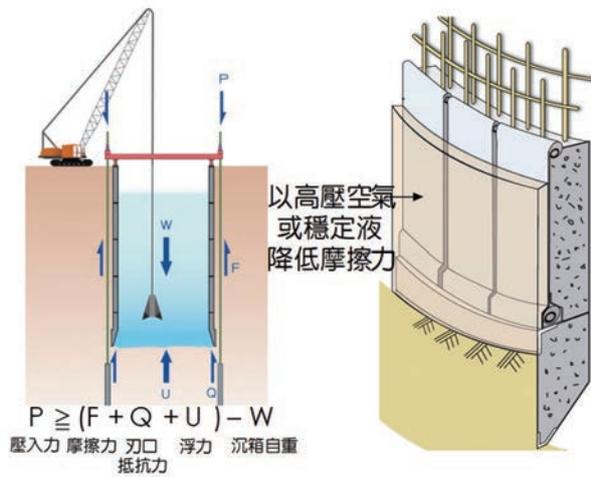


圖 7 壓入式沉箱施工原理

- (3) 節塊構體强度高及勁度佳，除可滿足日後機電設備、電纜佈設及人員巡檢空間之條件外，亦可縮小開挖量體，降低環境衝擊影響。
- (4) 施工階段無須架設支撐，可避免機具、環片、管材或土碇吊放之碰撞風險。

另為求慎重，於鄰近沉箱及洞道之橋基周圍規劃設置微型樁（詳圖 8），並利用有限元素軟體進行橋梁變位分析（詳圖 9），藉以預先評估沉箱施工期間對周遭地盤之影響，同時據以規劃相關監測系統。

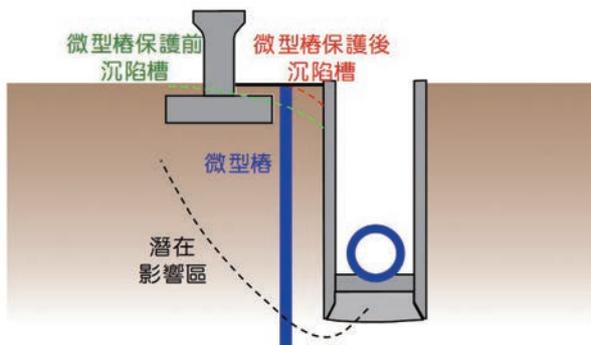
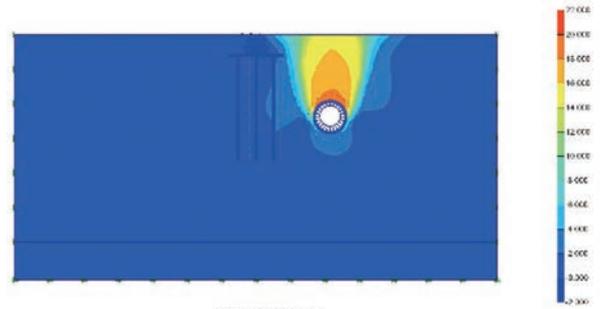
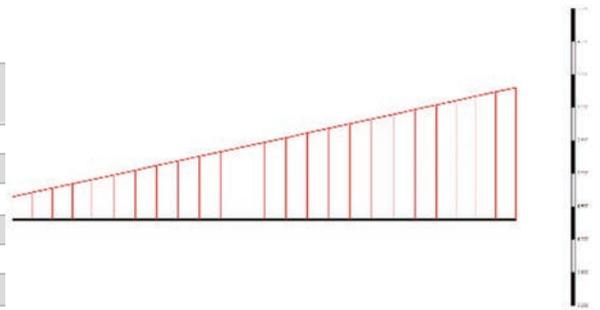


圖 8 微型樁保護橋基示意圖



(a) 洞道鑽掘變位圖



(b) 洞道鑽掘造成橋墩垂直變位圖

圖 9 洞道鑽掘橋梁變位模擬分析

此外，因應濱海地區高地下水位條件，避免破鏡時砂水湧漏，規劃於鏡面外側進行雙環塞地盤改良（W=10.4m、H=9.4m、L=7.0m），並於內側裝密封鋼製止水箱，且配合進行水平注漿止水作業以確保破鏡安全。

3. 規劃周全監控

為有效管控殘餘風險，設計階段即針對地下洞道段規劃設置無線自動化監測系統（詳圖 10），利用傾斜儀、測距儀、裂縫儀、水位觀測井及監測主機等設備進行「全段、全時監控」，施工期間，本系統係利用 wifi 及 GIS 定位技術即時上傳監測資料供相關單位參考；若有異常狀況，自動告警系統會立即發出警示通知相關人員。本工程所設置之無線自動化監測系統具有下列優點：

- (1) 資料採無線傳輸，免受訊號纜線配置之限制，可針對地下洞道全段實施全時監測，完整掌握施工前、中、後之沉陷變化。
- (2) 結合 GIS 定位系統，並與雲端同步，可即時掌握監測異常所在位置。
- (3) 資料可採點對點與多路徑傳送，可確保資料傳送的完整性。
- (4) 以太陽能板作為主要電源，並輔以鋰電池作為備用電源，在外部電力匱乏條件下，仍可持續運轉數個月之久。



圖 10 無線自動化監測儀器及即時雲端數據

(二) 高水位及複合地盤之開挖策略

依據地質補充調查資料顯示，本工程地下水位高，且地下洞道掘進過程中，將遭遇礫石／砂土／巨石等複合地盤，其中卵礫石最大粒徑達 80cm，強度逾 2,400kgf/cm²。另為確保台 61 線高架橋之安全，沿線亦規劃設置連續急曲線轉彎 (R=50m)，整體施工難度高。

緣此，為確保地下洞道之施工安全，本工程於設計期間，特邀集設計單位與施工單位相關成

員成立風險評估小組，針對潛盾施工等高風險工項進行風險辨識，並依據統包商之工程經驗與施工量能擬訂因應對策，發揮統包綜效。其中，最關鍵之密閉型土壓平衡式潛盾機及泥濃式推管機為量身訂製，其具有下列特色：

1. 提昇鑽掘精度：可遠端操作，並設置自動化測量及遠端監控系統 (詳圖 11)，精準控制潛盾鑽掘偏差量在 4cm 以內，遠低於規範值 (8cm)。
2. 落實磨耗管理：選用超硬刀製作潛盾刀刃，並設置磨耗感應器 (詳圖 12)。
3. 確保土石輸送：因應較大礫石，潛盾機選用無中軸式螺運機 (詳圖 12) 輸送。
4. 避免地面沉陷：針對急曲線 (R=50m) 轉彎推管段，鑽掘時同步灌注高濃度泥水及滑材 (詳圖 13)，即時填補機具與土層間隙，有效控制沉陷量僅 0.7cm。另於承口配置雙層止水膠圈，並設置止水劑用注入孔以提昇止水性。
5. 備妥防災計畫：針對鑽掘時之可能突發砂水湧入情況，本工程設置活動式氣密隔艙 (詳圖 14)，可於 4 小時內完成艙體阻隔及氣密程序，並預留監視器。此作法可保持洞道結構完整，並控制災損範圍，避免地面沉陷。



圖 11 潛盾機之遠端操作系統

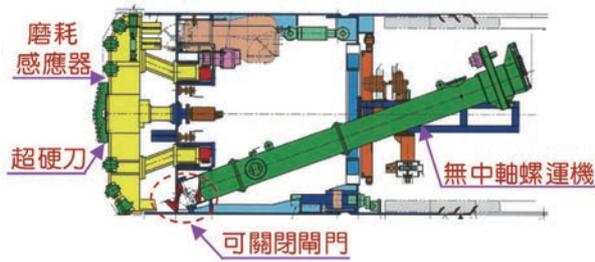


圖 12 本工程採用之潛盾機配備示意圖

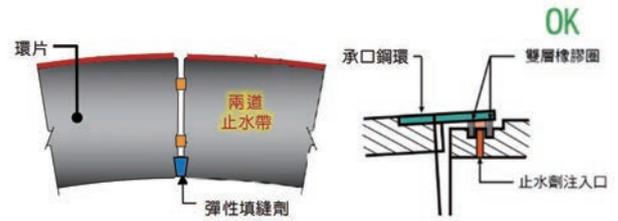


圖 15 潛盾環片(左)及推管管材(右)止水設計

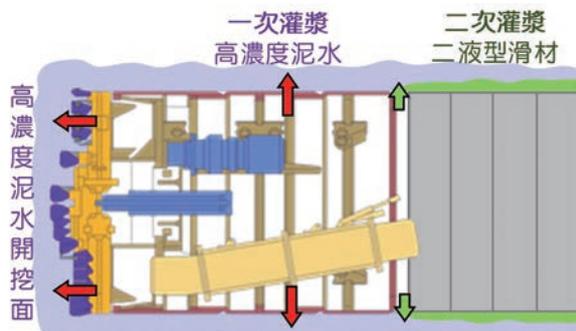


圖 13 泥濃式推管機運作示意圖

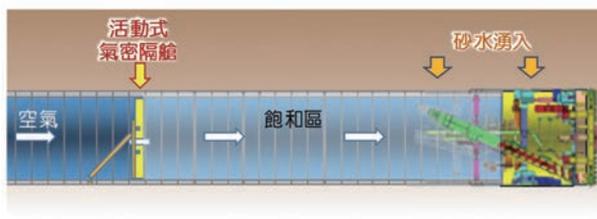


圖 14 活動式氣密隔艙示意圖

(三) 防蝕、止水、耐震設計

因工址鄰近濱海地區，屬高地下水位、高鹽害之施工環境，為增強材料抗侵蝕性及止水性，本工程主體結構物之混凝土皆採用 II 型抗硫水泥，鋼環片採熱浸鍍鋅處理，並於四周加塗船底防鏽漆，外側亦塗佈環氧樹脂柏油漆，厚度另加 2mm 以加強整體防蝕效果；此外，於潛盾環片及推管管材間分別設置兩道止水帶及止水膠圈（詳圖 15），防止地下水滲入。

至於鏡面部分，考量沉箱工作井與洞道勁度差異較大，地震時之變位常導致結構體產生差異沉陷並造成界面破損及漏水情況。緣此，本工程於各沉箱工作井及洞道界面間設置 Ω 柔性接頭，以提高整體結構系統之耐震性能，進而避免因鏡面破損而導致外水滲入。

考量鏡面出露時間較長、初期掘進機械操控磨合等不確定因素，故規劃於沉箱工作井外側進行雙環塞地盤改良，並透過試水作業確認地改成效，同時於鏡面設置雙層止水膠圈，及於兩膠圈間注入止水油灰，作為防止砂水湧入之第二道防線。此外，為求慎重，避免機身出坑時與鏡面非完全密合，及掘進震動恐使地改範圍產生龜裂，故特別於到達端之井內規劃設裝置鋼製止水箱（詳圖 16），並於止水箱體內進行水平注漿，完整包覆鏡面及鑽掘機面盤，達到鏡面完全止水之功效，進而避免潛盾機出坑造成砂水湧漏。



圖 16 鋼製止水箱裝設照片

(四) BIM 輔助設計及施工

考量本工程具高危險性（鄰近橋墩）、高承載量（長達 9km 之土建、機電、電纜設施）及高複雜性（具 3 維流線拋物線形之電纜）等特性，一般 BIM 軟體無法適用，故設計單位特別導入國外應用於航太、汽車等精密科技產業之 Dassault 系統進行輔助設計，此為國內電力工程應用該系統之首次案例，相關說明如下：

1. 建置「既有+新建工程」等大尺度模型：結合空拍技術及 GIS 定位系統建置大尺度模型以掌握現地條件，據以優化工程佈置（例如調整平縱面線形以加大洞道與橋梁間距），可以減輕施工風險。
2. 建置「土建+機電+電纜工程」等完整設施模型（詳圖 17）：可減少土建與機電工程間之界面衝突、提供最佳化之工區配置及人員機具行走動線、確保電纜延放可行性（一般 2D 圖面無法確保電纜延放之可行性），可以減輕界面風險。
3. 建置「永久+假設工程」等施工檢視模型（詳圖 18）：可辨識工地的潛在危害，進而選擇安全的工法予以減輕。

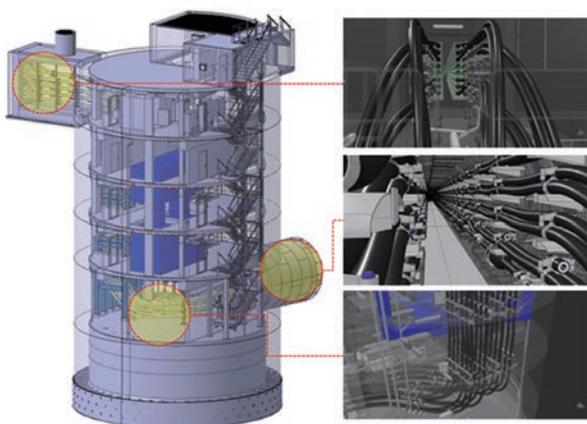


圖 17 「土建+機電+電纜」完整 BIM 模型

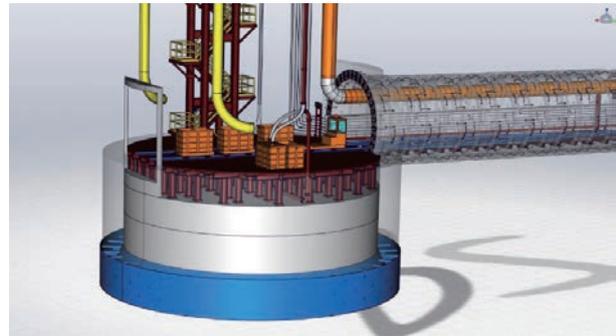


圖 18 假設工程 BIM 模型

(五) 應用 VR 技術強化勞安意識

為讓工程人員實際感受工地危害，本工程特別以時下盛行的 VR 技術作為訓練之媒介，建置「營造工地虛擬實境輔助教育訓練系統」，將設計階段所建置之 BIM 模型予以導入，以「體驗學習」之教學模式，透過逼真的畫面及互動式操作，讓統包商之施工人員在實際施工前，即可如親臨現場般的去實際感受各工作項目的危險性。

除應用前述 BIM 軟體所建構之虛擬模型（詳圖 19）建構訓練系統外，本工程更配合現場工作之推展，另採「攝影實景」進行建模，以 UAV 及含 GPS 定位之相機，於工址現場拍攝 360 度環景照片，並採用縫合線算法將現場拍攝之照片製作成實景三維模型（詳圖 20），據此進化原本建構之「營造工地虛擬實境輔助教育訓練系統」，提供施工人員更逼真的沉浸式體驗。



圖 19 營造工地虛擬實境輔助教育訓練系統操作畫面（BIM 模型）



圖 20 營造工地虛擬實境輔助教育訓練系統操作畫面（實景三維模型）

（六）導入「局限空間即時定位與生命徵象監控系統」

為確保施工人員於局限空間內之施工安全，本工程特別導入「局限空間即時定位與生命徵象監控系統（PVMS 系統、詳圖 21）」，讓工程人員配戴藍牙心率手環以全程監控其心跳及所在位置，並以無線 wifi 傳送至工務所中央資訊看板，俾利工地管理階層即時掌握每一位工程人員之身心狀況，並提供必要救助。同時，將本系統結合人員進出管制系統，以資訊系統代替傳統人員管理機制，另可同步於資訊看板上呈現局限空間內之氣體偵測訊息，提升管理品質，降低工程風險。



圖 21 局限空間即時定位與生命徵象監控系統

四、工程效益

本工程自設計階段開始，即積極進行消除、減輕、管控等相關風險評估作業，並透過優化設計、慎選工法、周延監控等方式有效掌控風險，且導入 BIM、VR、大數據分析、GPS 等創新科技，已獲得下列顯著效益，並榮獲多項優良事蹟。

（一）工程效益

本工程施工迄今歷經已逾 25 萬工作人時，始終維持零工安、零事故的紀錄，且直井及地下洞道監測數據皆精準控制在規範值內，有效確保台 61 線高架橋安全。同時，地下洞道之鑽掘速率及精度皆符合預期，整體進度始終穩定超前 2 ~ 3%，相關工程效益簡述如下：

1. 鄰近橋梁最大傾斜量（40 sec）小於警戒值（ ± 206 sec.）。
2. 鄰近橋梁最大沉陷量（-7.12mm）小於警戒值（ ± 10 mm）。
3. 沉箱最大傾斜率（3/1,000）遠小於規範值（1/100）。
4. 潛盾於卵礫石層之平均鑽掘速率 120m / 月，單日最快達 6m。
5. 潛盾鑽掘精準控制洞道偏差量在 4cm 以內，遠低於規範值（8cm）。
6. 推管段最大偏差量（1.4cm）皆遠小於規範值（28.5cm）。
7. 潛盾掘進期間落實刀刃磨耗管理，期間共經歷 5 次換刃作業，每次換刃後約可掘進 300m，遠優於國內類似地盤之潛盾工程（平均約 200m）。

（二）優良事蹟

本工程在主辦機關 / 監造單位台灣電力公司輸變電工程處北區施工處、設計單位中興工程顧

問股份有限公司、施工廠商豐順營造股份有限公司等工程團隊通力合作下，秉持工程如期如質完工，致力於零工安、零事故，樹立優良的工程楷模，深獲各界信賴與肯定，並榮獲多項優良事蹟（詳圖 22），包含：

1. 經濟部 110 年度土建工程類「公共工程優質獎」。
2. 勞動部 110 年度第 15 屆「優良工程金安獎」（優等）。
3. 中華民國地下管道技術協會 2021 年度「優良地下管道工程獎」（特優）。
4. 中國土木水利工程學會 2021 年度「工程數位創新應用獎」。
5. 大地工程學會 111 年度「大地工程傑出工程獎」。



圖 22 本工程獲獎榮耀

五、結論與建議

（一）本工程完工後，可將大潭電廠之電力引接至林口電廠，有效分散龍潭變電所線路過度集中之風險，提升北部地區用電穩定性。

（二）電纜線路全線毗鄰台 61 線高架橋設施，為顧全橋梁結構安全，設計階段即優化工程路徑、嚴選安全工法（壓入式沉箱工法、雙環塞地盤改良）以減輕施工風險，並規劃「全段、全時無線自動化監測系統」以即時掌握施工作業對高架橋之影響。

（三）本工程於複合地盤中進行潛盾及推進作業，且面臨急曲線轉彎段之挑戰，為發揮統包綜效，設計階段即邀集施工單位成立風險評估小組，依周遭地質條件進行風險辨識及評估，量身訂製潛盾機與推管機，並針對高風險工項擬定對策（如微型樁、鋼製止水箱），確保工進。

（四）本工程鄰近濱海地區，屬高地下水位、高鹽害環境，故特別針對混凝土及鋼結構進行防蝕與防鏽處理。各節塊間亦有相對應之止水及耐震設計（兩道止水帶及止水膠圈、Ω 柔性接頭），以增加結構物使用壽命，降低維管需求。

（五）有鑑於工程困難及複雜性高，本工程特別採用智能科技輔助設計及施工管理，導入 Dassault 系統（4D-BIM 智能科技）、建置「營造工地虛擬實境輔助教育訓練系統」（VR 技術）、協助建置「局限空間即時定位與生命徵象監控系統」（PVMS 系統），除提昇設計品質，更預防可能發生之災害。

參考文獻

- 中興工程顧問股份有限公司（2020），「161kV 大潭新～林口線地下電纜管路統包工程（第二工區）」細部設計成果。
- 中華民國隧道協會（2009），「潛盾隧道設計及施工準則解說」。
- 中華民國隧道協會（2009），「隧道施工技術、品管與案例彙編」。
- 推進工法設計積算要領，泥濃式推進工法篇，日本下水道管渠推進技術協會，2006 年版。
- 泥濃式推進工法 $\phi 600\text{mm} \sim \phi 2,400\text{mm}$ ，超流泥濃式推進協會，平成 18 年度改訂版。

財團法人中興工程顧問社經累積多年之研發成果，已出版下列各項工程類別之銷售叢書，其內容精闢專業，深具參考價值。若有需要，歡迎申購。

聯絡電話：(02) 8791-9198 轉 467

E-MAIL：louise@sinotech.org.tw

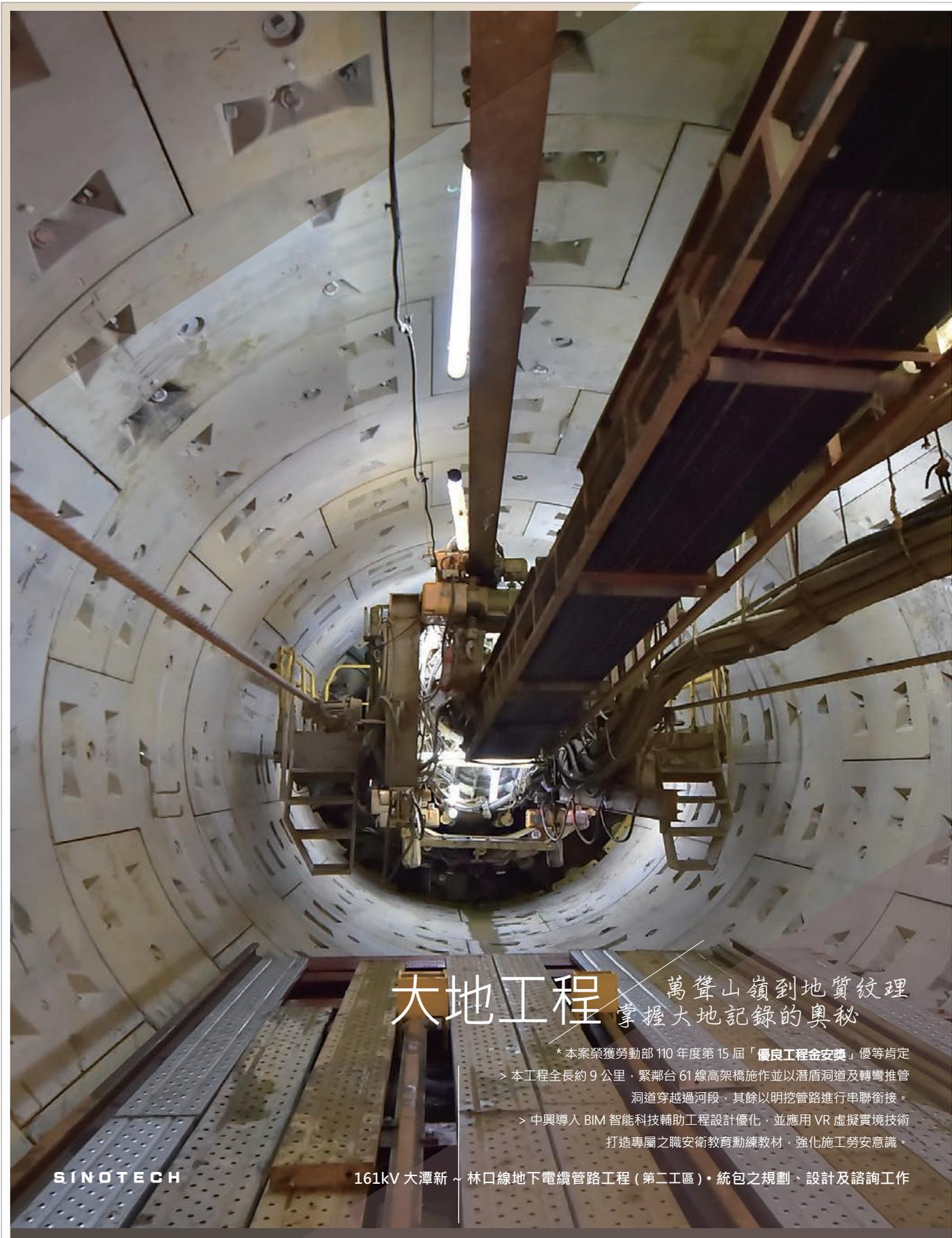
網址：http://www.sinotech.org.tw

類別	序號	書名	編號
水利工程類	1	台灣南部區域枯旱特性	R-HY-01-01
	2	河川水理輸砂模式 SEC-HY11	R-HY-01-02
	3	台灣地區地面水及地下水調查與運用	R-HY-01-03
	4	混凝土壩非線性分析商業化程式發展(一)	R-HY-01-04
	5	攔河堰二維水理分析軟體 SEC-HY20	R-HY-01-05
	6	敲擊彈性波技術應用在巨積混凝土結構物裂縫之檢測	R-HY-01-06
	7	近岸地形變化之數值模式	R-HY-01-07
	8	敲擊回音儀器改善開發及在混凝土波速與裂縫檢測上之應用	R-HY-02-02
	9	巨積混凝土非破壞品質檢測技術之研發	R-HY-02-03
	10	橋基側向侵蝕防治技術與設計指引(彩色版)	R-HY-02-04
	11	水平二維動床模式之應用	R-HY-02-05
	12	多座水庫系統聯合運轉模式(四)多目標水庫串聯系統與攔河堰聯合運轉	R-HY-02-06
	13	混凝土壩應力分析之工程應用模式建立(一)	R-HY-03-01
	14	即時逕流與河川演算人機介面模式	R-HY-03-02
	15	敲擊回音儀器改善開發及其在巨積混凝土裂縫與隧道襯砌厚度檢測上之應用	R-HY-03-04
	16	區域水資源系統即時操作模式之建立	R-HY-04-02
	17	混凝土壩非線性分析商業化程式發展(二)	R-HY-04-03
	18	混凝土壩非線性分析商業化程式發展(三)	R-HY-04-04
	19	河川水理、輸砂及污染質傳輸模式 SEC-HY11	R-HY-05-01
	20	混凝土非破壞檢測儀(Sino-NDT-IE)之改良	R-HY-05-04
	21	含自由液面之三維不可壓縮黏性流數值模式發展與應用	R-HY-05-05
	22	類神經網路於河川洪水預報系統	R-HY-07-02
	23	蝶閘啟閉過程中閘體受力之數值模擬	R-HY-07-03
	24	橋梁水理資訊系統	R-HY-09-01
	25	蓄水庫風險管理(二)風險辨識與風險控制及壩安全導則研訂	R-HY-09-02
	26	水平二維動床模式之研發及應用(二)岸壁沖刷	R-HY-10-01
	27	都市水岸縫合與環境改善研究——以美崙溪為例	R-HY-13-01
	28	宜蘭東澳地區海洋深層水多目標園區可行性研究	R-HY-14-01
	29	集集南岸三小水力發電計畫可行性研究	R-HY-16-01
大地工程類	1	堆石壩靜態與動態行為研究(二)軟岩材料含量對工程性質之影響	R-GT-01-01
	2	大地工程流形數值分析方法之發展(一)流形方法之引進與大地工程上之應用	R-GT-01-02
	3	隧道設計整合系統之發展(一)隧道支撐設計	R-GT-01-03
	4	隧道水文地質調查準則(含解說)	R-GT-01-04
	5	基樁完整性檢測技術發展與應用	R-GT-02-01
	6	多功能壓密沉陷數值程式之開發、模擬與驗證〔二〕施工模擬與尺寸效應	R-GT-02-02
	7	軟弱土層特性與深開挖行為〔三〕深開挖施工訊息化系統	R-GT-02-03
	8	岩盤隧道施工資料自動化處理系統	R-GT-02-04
	9	鬆軟地盤改良作業之評估、設計與檢驗方法	R-GT-03-01
	10	Seismic Resistance Design of Earth Structures and Deep Foundation-(1) Dynamic Effective	R-GT-03-02
	11	隧道施工專家系統	R-GT-04-01
	12	節理岩體力學特性研究(二)實際工程岩體力學參數之評估與應用	R-GT-04-02
	13	大地工程流形數值分析方法之發展(二)節理岩體斷裂破壞程式發展	R-GT-04-03
	14	地震時潛盾隧道與既有建築物之互制分析	R-GT-04-04
	15	樁基礎分析及設計程式發展	R-GT-05-01
	16	粉土細砂現地觸探結果設計參數之CPT標度	R-GT-05-02
	17	隧道交叉段力學行為與支稱對策	R-GT-05-03
	18	地理資訊系統於大地工程之應用(一)地質資料輸入、地質模型建立與土工分析模式發展	R-GT-05-04
	19	新興感測科技於環片計測之應用(一)	R-GT-06-01

類別	序號	書名	編號	
大地工程類	20	強震資料庫建置與維護及使用平台開發(一)	R-GT-06-02	
	21	預力混凝土既有應力非破壞檢測技術開發	R-GT-07-01	
	22	柔性加勁擋土牆之設計參數與數值分析方法	R-GT-07-02	
	23	台灣地區地震危害度分析程式發展與強地動衰減模式建立	R-GT-09-01	
	24	強震資料庫建置與維護及使用平台開發(二)台灣地區隱沒帶強震資料建立	R-GT-09-03	
	25	暨有混凝土橋梁內部損傷監測資料無線傳輸技術開發及應用測試(二)無線音射資料感測模組研製	R-GT-10-01	
	26	落石問題分析技術	R-GT-10-02	
	27	隧道施工專家系統整合應用與改進	R-GT-10-03	
	28	集水區土砂災害分析	R-GT-10-05	
	29	遙測技術於土木水利工程上之應用(一)——台灣中部地區土石災害潛勢研究	R-GT-10-06	
	30	景美礫石層降水工法於大台北都會區深開挖工程之應用	R-GT-10-07	
	31	隧道前方地質弱帶探查技術	R-GT-12-01	
	32	高岩覆對隧道設計與施工影響研究——完整岩盤隧道影響探討	R-GT-12-02	
	33	隧道開炸振動環境影響評估與技術準則之研訂	R-GT-12-06	
	34	堆填壩施工手冊(增修版)	E-GT-12-01	
	35	台灣山區地下水資源調查與評估技術之建立	R-GT-13-01	
	36	隧道施工資料管理系統(二)——應用與改進	R-GT-13-02	
	37	地下水補注敏感區判釋與評估技術之建立	R-GT-15-02	
	38	流體注儲行為之力學機制研究與工程應用	R-GT-16-01	
	39	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	R-GT-17-01	
	環境工程類	1	加速型溶劑萃取法萃取底泥樣品中有機錫	R-EV-01-01
		2	土壤樣品中 Cu、Cd、Hg 和 Pb 的直接分析——利用 USS-ETV-ICP-MS 法	R-EV-01-02
		3	粉狀活性碳在降低消毒副產物生成之應用	R-EV-01-03
		4	界面活性劑液相層析質譜分析方法	R-EV-01-04
		5	自來水水質生物穩定性評估方法	R-EV-01-05
		6	應用固相萃取法偵測水中微量亞拉生長素	R-EV-01-06
		7	消毒系統在工業區廢水處理之應用	R-EV-01-07
		8	國內污水下水道管材使用現況與發展趨勢	R-EV-02-01
		9	去除染整廢水中色度及殘餘 COD 高級處理技術	R-EV-02-02
		10	石化業製程廢水及污泥處理技術	R-EV-02-03
		11	以 Fenton 法處理柴油污染之土壤	R-EV-02-04
		12	工業區污水處理廠提昇生物處理技術	R-EV-02-05
		13	下水道污泥之銻直接分析	R-EV-02-06
		14	粉狀活性碳對自來水中土臭味物質之控制應用	R-EV-03-01
		15	自來水處理之薄膜積垢物去除技術	R-EV-03-02
		16	空氣污染排放總量及背景空氣品質預測	R-EV-03-03
		17	利用陰離子界面活性劑移除土壤中重金屬	R-EV-03-04
		18	利用不要的米(Unwanted Rice)製造活性碳之技術研發	R-EV-03-05
		19	周界空氣中揮發性有機物分析 TO-14A 樣品製備及質譜鑑定分析	R-EV-03-06
20		水中鹵化乙酸(HAA)之鑑定	R-EV-03-07	
21		幾丁聚醣擔體固定化細胞技術處理水中 VOCs	R-EV-04-01	
22		不明廢棄物棄置(掩埋)調查採樣計畫及污染判定標準程序訂定	R-EV-04-02	
23		以 HPLC/Fluo 分析環境空氣中真菌含量	R-EV-04-03	
24		空氣污染控制策略及成本效益分析	R-EV-04-04	
25		彰濱金屬區電鍍廢水高級處理與資源化技術	R-EV-04-05	
26		地下水 MTBE/BTEX 油品污染之物理處理技術	R-EV-04-06	
27		固定化微生物擔體於反應式阻牆技術之應用	R-EV-04-07	
28		以化學氧氣法處理受有機物污染之土壤	R-EV-04-08	
29		自來水供水系統微量臭味物質鑑定技術	R-EV-05-01	
30		塑膠管長期管剛性評估機制(一)	R-EV-05-02	
31		污染場址水文地質調查技術之發展	R-EV-05-03	
32		高錳酸鉀氧化技術於地下水污染整治之應用	R-EV-06-01	
33		薄膜海水淡化廠出水水質穩定化控制技術	R-EV-06-02	

類別	序號	書名	編號	
環境工程類	34	含高濃度 BTEX 尾氣之處理技術評估	E-EV-06-01	
	35	生物反應式透水阻牆整治工法應用研究——材質開發與模場驗證	R-EV-06-03	
	36	工業區污水處理廠放流水再生利用	R-EV-07-01	
	37	三合系統於場址評估之應用與方法建立	R-EV-07-02	
	38	塑膠管長期管剛性評估機制(二)	R-EV-07-04	
	39	Bio-MF 應用於都市污水處理之探討研究	R-EV-07-05	
	40	交通噪音振動改善措施研究	R-EV-08-02	
	41	生物性緩釋材之開發與應用	R-EV-08-03	
	42	MBR 薄膜系統原型機開發與應用	R-EV-08-04	
	43	廢水處理廠生物即時監測系統	R-EV-09-01	
	44	現地氧化試劑配方之快速評估程序開發	R-EV-09-03	
	45	以截流式微過濾膜回收淨水場快濾池反沖洗水並產生污泥餅之研究	R-EV-10-01	
	46	不同化學氧化法搭配生物復育技術降解土壤中 BTEX 污染物	R-EV-10-02	
	47	生質物之造粒、裂解與氯化	R-EV-11-01	
	48	中空絲超過濾膜膠體性阻塞趨勢與系統效能之評估	R-EV-11-02	
	49	以末端過濾操作微過濾薄膜分離富含油脂之藻類	R-EV-12-02	
	50	以液相層析串聯質譜儀建立水中全氟化物及抗生素之分析方法	R-EV-12-06	
	51	溫室氣體總量管制政策工具應用於能源技術服務之法規機制可行性評估	R-EV-12-08	
	52	以雙槽式薄膜反應器 (Dual MBR) 進行小球藻培養及濃縮之研究	R-EV-13-02	
	53	碳抵換合作模式分析研究	R-EV-13-03	
	54	人工濕地作為低碳污水處理單元之生命週期研究——以高雄洲仔濕地為個案探討	R-EV-15-01	
	55	添加生物炭對土壤污染之影響研究——針對重金屬污染土壤與酸洗後土壤改良之評估	R-EV-16-01	
	56	廢污水生物急毒性檢測與應用評析	R-EV-20-01	
	57	環境水體關切藥物及六溴環十二烷分析方法開發	R-EV-23-01	
	結構與耐震工程類	1	高壓阻尼器之研發	R-ST-01-01
		2	封閉式液流阻尼器結構減震之模型試驗	R-ST-01-02
		3	加長型單肋板補強梁柱接頭耐震行為與設計	R-ST-01-03
		4	鋼筋混凝土耐震結構性能設計法(二)直接位移法及其結構實驗	R-ST-01-04
5		鐵路橋梁耐震設計可靠度分析(三)RC連續橋梁地震反應分析	R-ST-01-05	
6		雙鋼管充填混凝土中空橋柱耐震行為(一)——軸力與彎矩	R-ST-02-01	
7		斜張橋空氣動力穩定性之風洞實驗與數值分析	R-ST-02-02	
8		遲滯型消能器減震技術改良與應用加勁阻尼系統之結構耐震性能設計方法	R-ST-02-03	
9		預鑄混凝土橋墩之耐震行為(三)綜合應力行為	R-ST-02-04	
10		鋼骨箱型柱梁柱接頭耐震行為(一)鋼骨箱型柱肋板補強梁柱接頭耐震行為	R-ST-02-05	
11		地震工程性能設計法之應用(一)單自由度橋柱及建築物之耐震性能評析與設計	R-ST-02-06	
12		鋼筋混凝土耐震結構性能設計(三)消能隔減震系統之位移設計法	R-ST-03-01	
13		液流阻尼器全尺寸結構防振功能之振動台測試	R-ST-03-02	
14		雙鋼管充填混凝土中空橋柱耐震行為(三)中空雙鋼管混凝土柱與基礎接合耐震行為	R-ST-03-03	
15		斜張橋空氣動力穩定性之風動實驗與數值分析(二)	R-ST-03-04	
16		高韌性鋼橋柱耐震行為(一)——先期試驗	R-ST-03-06	
17		流場引致結構物振動之分析技術現況評析	R-ST-03-07	
18		垂提式閘門振動分析及評估指南	R-ST-04-03	
19		鋼骨箱型柱梁柱接頭耐震行為(二)箱型柱與鋼梁偏心接合耐震行為	R-ST-04-04	
20		載荷 100 噸級液流阻尼器特性試驗及技術推廣之預備工作	R-ST-05-03	
21		加消能裝置鋼構架位移設計法之試驗	R-ST-05-04	
22		建築結構之多振態性能評析與設計方法應用(一)考慮多振態之位移導向耐震評估與設計	R-ST-06-01	
23		特殊形狀建築物承受風壓分析——Phoenics 軟體應用手冊	E-ST-10-01	
24		雙間隙液流阻尼器	R-ST-10-01	
25		工程保險巨災風險評估模型開發	R-ST-10-02	
26		不規則建築物耐震性能導向設計與評析	R-ST-12-01	
27		建築物環控分析 Flair 軟體應用指引	E-ST-12-01	
28		橋梁監測及緊急調查回報系統	R-ST-14-02	

類別	序號	書名	編號
資訊應用類	1	台灣地區水庫資訊系統(二)	R-CS-01-01
	2	電腦繪圖支援系統(一)——Visual Fortran 繪圖程式庫	R-CS-01-02
	3	地理資訊系統的發展及在營建工程上的應用與研發	R-CS-01-03
	4	向量式地理資料在 Internet-Intranet 之應用	R-CS-01-04
	5	台灣地區水庫資訊系統：水庫安全評估子系統(一)	R-CS-02-01
	6	PDA 圖型編繪核心及無線通訊、GPS 整合	R-CS-03-01
	7	Development of Neural Networks for Seismic Safety Evaluation of Prestressed Concrete Bridges	R-CS-03-02
	8	PDA 與無線通訊、GPS 整合之應用——現場調查	R-CS-04-01
	9	知識管理系統(一) 電子圖書館	R-CS-04-02
	10	PDA 圖形編繪核心與 Web GIS 整合	R-CS-06-01
	11	台灣地區大眾捷運安全管理系統(I)：緊急應變及視訊監控子系統	R-CS-08-01
	12	台灣地區水庫資訊系統：水庫安全評估子系統(二)	R-CS-08-02
	13	射頻識別應用在設施與設備安全管理之研究	R-CS-12-01
	14	台灣地區大眾捷運安全管理系統之建立(二)——設施巡檢、監測預警與基於風險之決策支援子系統	R-CS-12-03
工程管理類	1	工程契約模式(一) EPC 統包與簡易型工程契約 EPC 統包與簡易型工程契約中興樣本	R-CM-02-02
	2	公共工程施工管理與作業要點第一篇工務管理與作業標準(全兩冊)	E-CM-03-03
	3	契約管理常見問題及其解決預防之道	E-CM-03-05
	4	契約管理作業概要	E-CM-04-01
	5	公共工程品質管理作業指南	E-CM-05-01
	6	公共工程施工品質查核常見錯誤態樣及改善對策	E-CM-06-01
	7	工程專業管理人員處理及預防工程爭議之研究	R-CM-07-01
	8	工程規劃設計階段之安衛風險管理研究	R-CM-09-01
	9	工程契約管理與爭議處理案例研析	E-CM-10-01
	10	公營事業閒置土地資產活化開發模式研究——以台鐵局及都更再開發案為例	R-CM-14-01
工程材料	1	於地熱環境下澆置的鋼筋混凝土強度與耐久性	R-MT-06-01
	2	自充填混凝土施工監造技術指引	E-MT-06-01
	3	混凝土問題診斷與處理對策	E-MT-07-01
	4	新舊混凝土黏結介面品質之非破壞檢測評估	R-MT-07-02
	5	卜作嵐混凝土使用手冊	E-MT-07-03
	6	自充填混凝土最佳化配比與水合特性之整合	R-MT-08-01
	7	混凝土結構物修補技術指引	E-MT-09-01
	8	混凝土工程監造技術指引	E-MT-09-02
	9	高流動化混凝土材料配比及施工規範探討	R-MT-10-01
	10	開發應力波檢測技術以推估混凝土之早齡期強度	R-MT-12-01
	11	高飛灰摻量混凝土於中興社研發大樓新建工程之應用	R-MT-13-01
交通運輸	1	台北與東部運輸走廊交通預測模式建立	R-TR-07-01
	2	台灣高鐵營收管理模式研發(一)	R-TR-08-01
	3	鐵路車站轉乘設施設計準則	R-TR-11-03
防災科技	1	遙測技術於土木水利工程上之應用(二)——土砂災害資料倉儲系統建置及莫拉克災區案例分析	R-DP-13-01
	2	坡地災害風險管理及其應用(一) 莫拉克颱風災區坡地災害研究	R-DP-13-02
	3	因應地質法與極端氣候研擬坡地防災調適策略——以坡地住宅及土地利用為例	R-DP-14-01
	4	應用雷達影像評估坡地災害	R-DP-16-01
其他	1	軌道運輸系統營運模式現狀評估	R-MS-01-01
	2	半導體廠製程排氣設計方法(二)	R-MS-01-02
	3	捷運地下車站火災時人員安全避難容許時間之探討與分析模式	R-MS-01-03
	4	3C 最佳化風管設計方法	R-MS-02-01
	5	發電系統穩定度	R-MS-02-03
	6	寬頻接取技術現況與趨勢	R-MS-02-04
	7	長隧道通風研究(一) 列車隧道空氣動力模擬程式研發	R-MS-08-01
	8	長隧道通風研究(二) 隧道空氣動力模擬程式視窗展示前後處理軟體研發	R-MS-09-01
	9	建築節能之被動冷卻系統分析法——FDS5 軟體應用指引	E-MS-12-01
	10	台灣地區巨積混凝土配比與熱學特性之研究	R-MS-20-01



大地工程

萬聳山嶺到地質紋理
掌握大地記錄的奧秘

* 本案榮獲勞動部 110 年度第 15 屆「優良工程金安獎」優等肯定

- > 本工程全長約 9 公里，緊鄰台 61 線高架橋施作並以潛盾隧道及轉彎推管
隧道穿越過河段，其餘以明挖管路進行串聯銜接。
- > 中興導入 BIM 智能科技輔助工程設計優化，並應用 VR 虛擬實境技術
打造專屬之職安衛教育動練教材，強化施工勞安意識。

SINOTECH

161kV 大潭新 ~ 林口線地下電纜管路工程 (第二工區) • 統包之規劃、設計及諮詢工作

本廣告圖文未經同意不得轉載
中興工程顧問集團廣告

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.





機械工程

動力文明創造樂活世界

新桃燃氣複循環發電廠內設三部燃氣渦輪發電機、三部廢熱回收鍋爐及一部蒸汽渦輪發電機，總裝置容量為 628MW。其附屬設施有機電、廠房土建、GIS 開關場設備、天然氣輸氣管線、計量站設備與 161KV 輸電線等。

新桃燃氣複循環發電廠·營建管理

SINOTECH

本廣告圖文未經同意不得轉載
中興工程顧問集團廣告

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.



機電監造工程

逐夢踏實 理想革新的實踐者

- > 亞太地區最具規模之再生能源開發商 韋能能源於經濟部工業局辦理「雲林離島式基礎工業區新興區東二區土地設置太陽能發電設備開發案」中取得開發權，中興工程顧問公司協助韋能能源於該案建立雲林新興發電廠，設置地面型太陽能光電裝置 (272MW)，其電力由自備 161kV 特高壓變電站，以地下電纜併接至台電電網；該電廠年發電量達 4 億度，可提供 9 萬用戶家庭用電，為台灣能源轉型提供強而有力的支持。
- > 機電監造工程內容包含太陽能系統工程、變電站系統工程、機電界面整合職業安全衛生實施與物料管理，為台灣能源轉型嚴格把關，以實現 2050 淨零排放目標。

韋能能源·雲林新興發電廠·專案施工管理及監造技術服務
(照片提供：韋能能源)

SINOTECH

本廣告圖文未經同意不得轉載
中興工程顧問集團廣告

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.



系統電氣工程

從概念到穩定營運 智慧化機電工程的領先者

> 工程位於高雄阿公店水庫蓄水範圍設置國內首座水上型
(Floating Type) 太陽能光電示範區
水庫總蓄水範圍面積 405 公頃，本太陽能光電系統規劃設置專區
面積約 15 公頃，已於 107 年底竣工，發電總發電量約為 10MW
中興公司負責電力系統衝擊分析與辦理併聯細部協商。

辰亞阿公店水庫水面型太陽能工程

SINOTECH

本廣告圖文未經同意不得轉載
中興工程顧問集團廣告

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.





風力開發工程

廣博深奧的綠能技術 點亮世代的重要推手

> 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。

離岸風力發電業務

SINOTECH

本廣告圖文未經同意不得轉載
中興工程顧問集團廣告

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.



正派經營 · 品質保證 · 追求卓越 · 創新突破
工程不只源於需求，更在於生活價值的實現

中興工程顧問

規劃設計 · 施工監造 · 專案管理
業務範圍：水利 / 電力 / 環境 / 交通 / 建築 / 機電



封面(底)照片 | 彰濱崙尾東臨五區太陽能光電廠

為配合國家能源政策及低碳永續之目標，推動太陽能光電發展。本案由中興工程系電部主辦，機械、地工、結構、建築（景觀）及電力等部協辦，提供變電站、設備平台、擋浪設施、22.8kV地下管路等工程之規劃、細部設計及界面整合工作。廠域坵塊面積約71公頃，太陽光電模組裝置容量67MW，加上先前已完成併聯之181MW第一、二區水面型太陽能發電，辰亞能源在水面型太陽能發電之總設計裝置容量已達248MW，為全球最大海上型太陽能光電廠。



中興工程 Vol.162 / JANUARY 2024
ISSN 0257-554X



9 770257 554007 >

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
* 本刊圖文未經同意不得轉載 *

誠信·創新·品質·服務

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