

中興工程

SINOTECH ENGINEERING



誠信・創新・品質・服務



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

154

2022年1月出刊
1983年10月創刊

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

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



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

臺北市內湖區新湖二路280號 Tel:886-2-87919198 / Fax:886-2-87912198
<http://www.sinotech.org.tw> / E-mail:sinotech@sinotech.org.tw



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

防震制振技術研究中心

Anti-Seismic and Vibration Control Technology Research Center

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

結構耐震安全整合服務

中興社結合結構工程及耐震安全多年研發經驗，戮力推廣結構耐震安全整合服務，為客戶提供全方位服務。

耐震安全評估、規劃與設計

中興社
結構耐震安全
整合服務

防震系統效益分析與設計

防震設備開發製造與銷售

監測系統研發與客製化設計

中興社防震設備產品



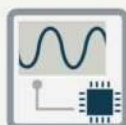
液流黏滯阻尼器(FVD)
FLUID VISCOUS DAMPER



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



防震設備型錄(DM)
SINOTECH ANTI-SEISMIC DEVICES

中興社防震力學試驗室

TAF 土木領域 認證編號：1589 認可項目 30 18 土木工程

消能元件 L999 消能元件力學試驗

內政部營建署建築物耐震設計規範及解說第十章第七節

全載最大荷重-拉伸 (196 to 1961) kN, (20 to 200) ton

全載最大荷重-壓縮 (196 to 1961) kN, (20 to 200) ton

最大位移量 ±185 mm

頻率 (0.00003 to 6.00) Hz

測試場地：桃園市蘆竹區南山路一段422號(防震試驗室)



A 114065 臺北市內湖區新湖二路280號
W www.sinotech.org.tw
T +886 2 87919198 F +886 2 87923070
E ast-proj@sinotech.org.tw

中興制振 · 智慧防震



環境工程研究中心

Environmental Engineering Research Center

SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.



核心能力

環境工程研究中心致力於提供高品質的研究服務和發展先進的環保技術，秉承永續發展的理念，針對水處理及再生技術、環境場址整治及褐地活化評析、資源循環再利用評估、廢污水處理效能診斷、新興污染物鑑定、碳管理及淨零技術等各領域進行研究；所屬環境實驗室獲得環保署地下水、土壤、水質水量及底泥等檢測類兩百餘項認證，提供高品質的檢測服務

技術研發



褐地活化及資源再利用



碳管理及淨零技術



廢污水處理效能診斷及水質模擬



新興污染物鑑識與污染改善對策

氣體採樣裝置
發明專利
第I522605號



高濃度藻類的
污水培養裝置
發明專利
第I534103號



多功能熱反應裝置
發明專利
第I617357號

臺灣頂尖

國際同步



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

114065 臺北市內湖區新湖二路280號6樓 Tel : 02-8791-9198 Fax : 02-2791-8858
<http://www.sinotech.org.tw/eerc-ctr/default.htm> Email : eerc-ctr@sinotech.org.tw





Disaster Prevention Technology Research Center (DPTRC)

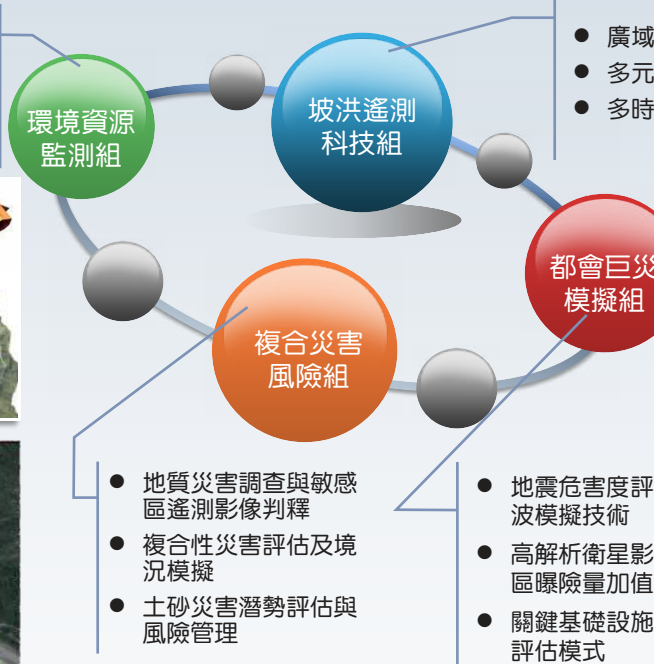
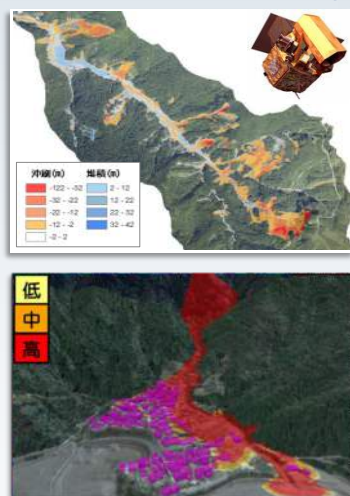
1 部門簡介

台灣位處環太平洋火山地震帶上，並經常遭受颱風豪雨之侵襲，今逢全球暖化與氣候變遷，發生地震、山崩、土石流、洪災、旱災等天然災害之頻率與強度可能趨高，致使台灣地區之工程耐震與防洪設計，以及災害管理，已面臨嚴峻挑戰。有鑒於此，中興社乃於民國101年1月1日成立防災科技研究中心，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，期能跨領域整合地質、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，提供政府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。

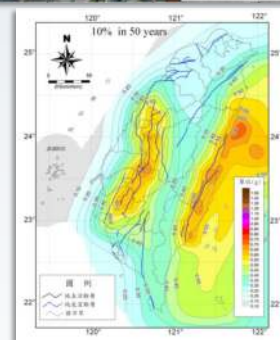


2 研究發展

- 防砂構造物延壽及智慧巡查評估技術
- 土砂收支物聯網及大數據分析技術
- 大規模土砂運移評估技術



- 廣域山崩潛勢與警戒雨量評估模式
- 多元尺度3D行動測繪技術
- 多時序雷達影像干涉分析與危害度評估



3 災害防治技術服務

- ✓ 水庫集水區健康檢查與評估
- ✓ 集水區土砂監測與分析評估
- ✓ 遙測影像分析與判釋
- ✓ 土砂收支物聯網及大數據分析技術
- ✓ 大規模土砂運移評估技術
- ✓ 防砂設施智慧巡檢及延壽評估

環境資源監測組

- ✓ 坡地災害調查與智慧巡勘
- ✓ 土石流風險評估與防災規劃管理
- ✓ 道路阻斷潛勢與聚落孤島效應評估
- ✓ 地質災害敏感區遙感影像判釋

複合災害風險組

- ✓ 核能等級地震危害度分析
- ✓ 場址地震動強度模擬
- ✓ 衛星影像於都會區天災曝險量分析
- ✓ 3D-GIS環境地質資料庫建置
- ✓ 「地質+地震+地工」數值模擬技術於防災規劃服務

都會巨災模擬組

- ✓ 豪雨誘發山崩災害潛勢評估
- ✓ 大規模崩塌e化調查與模擬
- ✓ InSAR於都會區及山區地表變位評估
- ✓ 多元遙測整合物聯網資訊平台
- ✓ 多元尺度3D測繪技術應用
- ✓ 邊坡土砂災害數值模擬

坡洪遙測科技組

地址：11494 台北市內湖區新湖二路280號 | 電話：(02) 8791-9198 | 傳真：(02) 8791-1536 |

E-mail：dptra-ctr@sintech.org.tw | 網址：https://dptra.sintech.org.tw

請上facebook 查詢關鍵字「防災科技研究中心-中興工程顧問社」





財團法人 中興工程顧問社

研究中心

大地工程

掌握先進地工技術

核心業務

蓄水庫
風險管理

地工試驗
與分析

隧道安全
與管理

水文地質

碳封存

地熱潛能評估
與產能分析

3D透地
雷達檢測

海域
地質調查

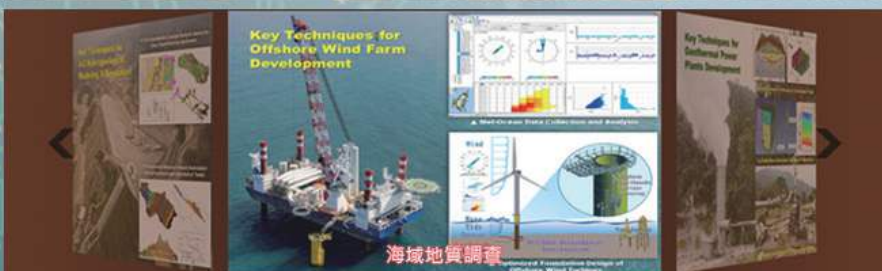
GERC RESEARCH CENTER



誠信
·
創新
·
品質
·
服務



大地工程試驗



海域地質調查



二氧化碳地質封存



水庫安全風險分析及監測



水文地質調查

地址：臺北市內湖區新湖二路280號3F
電話：(02) 8791-9198
<http://gerc.sinotech.org.tw>

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

徵稿簡則

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

中興工程第154期目錄

工 程 技 術

水土保持防砂設施非破壞檢測案例評估

.....林伯勳・許振崑・賴承農・林晉守・陳俊愷・高伯宗・詹坤哲..... 3

以音波反射振幅剖析井下岩層結構特徵新創技術簡介.....周柏儀・羅鴻傑..... 15

機率式火山危害度分析－以大屯火山群之火山灰災害為例.....

.....謝寶珊・林柏伸・賴憶菁・蕭丁槐..... 25

虛擬實境於工程管理之應用：以輔助監造職安衛訓練為例

.....黃琬淇・周淵清・吳中期・廖翊含・許睿叡..... 37

放射性核種吸附模型應用之探討.....林英傑・林伯聰..... 43

液流黏滯阻尼器應用於鐵路橋梁橫向錯位改善設計

.....謝崇偉・邱天宏・張 權・孫維忠・陳宏威・鄭書恒..... 53

水文地質對山岳隧道襯砌水壓與結構安全分析評估

.....張偉哲・辜炳寰・蕭富元・高憲彰..... 63

案 例／計 畫 報 導

全臺首座離岸風電深水試驗場之規劃與興建.....譚泳葵..... 73

廢污水中全氟化物之特性分析與國際管理趨勢

.....吳佳娟・林宜璇・許國恩・朱敬平・鍾裕仁..... 81

校舍結構耐震安全監測預警系統

.....陳景旭・孟 魁・薛 強・曾騰毅・翁健煌・劉建均・陳昭村・李其航..... 89

南迴鐵路電氣化工程－多良改線路段工程規劃設計.....梁智信・高贈智・林志豪・黃鳳岡..... 99

研 發 成 果 介 紹

放射性廢棄物最終處置場膠體對核種遷移的影響研究.....張皓鈞..... 109

工 程 窗 外

淺說黃道星座 談北極星和地球氣象.....張湧元..... 117

水土保持防砂設施非破壞檢測 案例評估

林伯勳* 許振崑** 賴承農*** 林晉守**** 陳俊愷*****
 高伯宗***** 詹坤哲*****

摘要

近年極端水文事件頻繁，颱風豪雨常引致大量崩塌與土石流災害，對於過往施設之治山防災構造物可能會造成衝擊，因此，如何在有限的政府資源下，使水土保持工程能持續發揮它的功能性，儼然屬未來重要的課題，為維持其工程構造物原有功能且延長壽命、以降低生命週期維護成本，創造工程最大價值。由於國內針對水土保持防砂設施相關巡檢作業常以定性之目視檢測為主，本文考量水土保持防砂設施常見劣化因子，研提水土保持防砂設施非破壞檢測作業，並於某一集水區水土保持防砂設施為案例，進行實際檢測，以確保並瞭解防砂設施是否仍能持續發揮既有功能，研擬相關改善對策。

關鍵字：水土保持防砂設施、非破壞檢測、敲擊回音法、透地雷達法、混凝土強度錘試驗

一、前言

近年極端水文事件頻繁，颱風豪雨常引致大量崩塌與土石流災害，對於過往施設之治山防災構造物可能會造成衝擊，尤其民國 97 年、民國 108 年發生二次嚴重斷橋事件，及民國 98 年莫拉克颱風造成全臺各地嚴重災害，政府機關即針對工程構造物全生命週期有關規範，進行相關修訂。

水利署（2008）「水利構造物檢查及安全評估技術規範」，係作為防水及洩水構造物檢查及

安全評估工作之技術規範，確保其檢查及安全評估作業之工作品質，以保障人民生命財產安全；水保局自民國 103 年開始自至民國 108 年期間，陸續完成調查山坡地範圍內 4,406 座防砂設施，莫拉克颱風後，對全臺各地嚴重災害區域投入治理工程與防砂設施改善者，於此期間所完成調查的防砂設施數量分居各年度第一及第二位，分別為民國 98 年 441 座，以及隔年民國 99 年 427 座，如圖 1 所示。水保局（2020）指出，依據水保局既有防砂設施調查資料彙整，其劣化營力主要包

* 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正工程師
 *** 中興工程顧問社防災科技研究中心副工程師
 **** 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
 ***** 行政院農業委員會水土保持局組長
 ***** 行政院農業委員會水土保持局副工程司

括有土石（或洪流）撞擊、溪床沖蝕、凹岸淘刷、溪岸溢流沖刷及其他（防砂設施遭植生覆蓋無法判斷）等，致使防砂設施有不同劣化型態（如圖2），其中又以裂縫、磨損最為常見，且易衍生其他不可逆之損壞情形，如傾倒、斷裂、沖毀等。水土保持防砂設施常以連續、符合野溪河道寬度形式設計，其數量多且防砂設施尺寸較傳統土木、水利構造物（如公路、橋梁、堤防）為小、且多位於山區僻徑，大型機具較不易抵達，因此其檢測作業應以運輸成本低、機具輕便易移動、施測範圍小且分析快速優先為主。本文考量水土保持防砂設施常見劣化因子，研提水土保持防砂設施非破壞檢測作業，並以集水區內防砂設施為案例，進行檢測作業，分析內部結構材料空洞化問題，研擬相關改善對策。

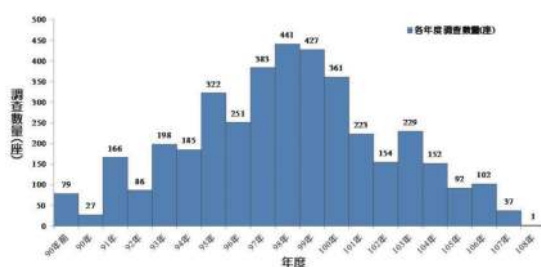


圖1 水土保持防砂設施各年度調查數量分布圖



圖2 水土保持防砂設施劣化型態示意圖

針對現行水土保持防砂設施、治山防災工程管理巡查維護，水保局僅以水土保持防砂設施之人員現地調查、目視檢測方式進行，仍較不足以量化資料，提供防砂設施處理對策或維護評估之

需求，故本文為解決上述問題，綜合目視及非破壞檢測之資訊，研擬其防砂設施劣化及材料變異檢測方式，依結構損壞破壞之理論進行診斷評估之工作，若結構之某些功能未能達到預期之性能指標時，就必須進行維修補強復健之工作，對於急迫性低之慢性老破壞病態則可採取監測手段作安全預警之規劃（水保局，2010）。

二、文獻回顧

交通部運研所（2003）指出，在發展永續智慧型民生基本設施體系的基礎研究中，其主要內容及目可為（1）偵測技術及開發、（2）感測器佈設、（3）數據分析，並提出一種評估、預警及永續應用的措施，於是就需要藉由非破壞理論以偵測損傷的位置、尺寸及種類。國外學者 Schabowicz et al.（2019）針對非破壞性檢測方式，依「檢測結構強度」與「檢測強度以外特性」進行細分，並彙整各項物理原理之非破壞性檢測方式。因不同水土保持防砂設施類別亦需依據不同發生原因提出修復對策及矯正方法，透過非破壞檢測方式，可提供深入分析與評估掌握其受損情形，作為後續追蹤及處理建議之執行參考，國內相關單位已針對其權責範圍內之工程構造物，研擬並落實其檢查及安全評估規範，彙整如表1所示。經彙整國內近年來土木及水利構造物之非破壞型檢測方式，如表2所示。考量水土保持防砂設施主要以混凝土澆製而成，因此檢測項目主要以混凝土強度、及其表面裂縫寬度、深度為主，各檢測項目之參照試驗規範、或使用儀器規格，如表3所示。由表中顯示，傳統土木、水利構造物大多為混凝土與鋼筋組成，因此其檢測方式多以檢測混凝土強度、表面瑕疵、及鋼筋銹蝕情形為主；相較之下，一般水土保持防砂設施多數亦以混凝土與鋼筋作為使用材料，故針對水土保持

防砂設施仍建議以混凝土強度、構造物內部構造、以及混凝土表面裂縫深度等非破壞性檢測方式進行，以確保防砂設施是否仍能持續發揮既有功能，作為設施改善措施之參考。

表 1 國內大型土木及水利構造物檢查規範彙整表

單位	相關規範	檢查對象	檢查頻率	檢查時機	檢查方法	評估方式
水利署	水利建造物檢查及安全評估技術規範（2008）	河堤、排水設施、海堤、抽水站、水門及分洪設施等防水、洩水構造物	定期檢查	每年四月底汛期前	外觀及功能檢查	D.E.R&U 方法
			不定期檢查	達一標準值之地震、洪水、豪雨後		
公路總局	公路橋樑檢測及補強規範（2020）	一般性橋梁、特殊性橋梁	定期檢測	每年四月底汛期前	外觀及功能檢查	D.E.R&U 方法
			特別檢測	依據不同災害或事故類型及嚴重程度		
			詳細檢測	必要時辦理	局部破壞檢測、非破壞檢測	依檢測項目評估

表 2 國內外非破壞性檢測技術相關文獻彙整表

項次	研究學者／單位	研究名稱	應用檢測技術
1	水利署（2000）	非破壞性堤身中空調查技術之研究	表面波譜法 透地雷達法
2	Hsu <i>et al.</i> （2017）	Using Multiple Non-destructive Testing Methods to Assess the Loss of Soil Inside Concrete Embankment	透地雷達法 室內透地雷達試驗 正規化敲擊回音法 飛行時間繞射法
3	水保局（2010）	水土保持工程設施破壞檢測分析與評估	目視檢查法
4	水利署（2011）	河堤淘空檢測方法之研究	目視檢查法
5	水利署（2017）	106 年度中港溪水系堤防結構安全檢測	目視檢查法 透地雷達法 敲擊回音法
6	Adam <i>et al.</i> （2016）	Investigation on the temperature of the asphalt-concrete facing of embankment dams	溫度感測法
7	Kobayashii <i>et al.</i> （2008）	Improvement of Elastic Wave Exploration as Nondestructive Investigation Method of Irrigation Tank Embankment	彈性波探測法
8	ZHU <i>et al.</i> （2010）	Experimental investigation on breaching of embankments	裂縫滲漏法

表 3 土木及水利工程構造物非破壞檢測方法彙整表

檢測項目		檢測目的	試驗規範 / 使用儀器		
非破壞型	混凝土強度錘試驗	混凝土強度	國別	廠商	儀器型號
			瑞士	PROCEQ	Schmidt Hammer (type-N)
	透地雷達法	構造物內部結構	美國	GSSI	SIR
			瑞典	MALA	RAMAC
			加拿大	Sensors& Software	EKKO
	敲擊回音法	混凝土表面裂縫深度	美國	IEI	LLC
			丹麥	Germann	DOCter
			加拿大	Tekron	PIES
			臺灣	中興工程顧問社	SINO-NDT-IE
	紅外線熱影像儀	表面裂縫	美國	FLIR	TG-267
	氯離子含量試驗	氯離子濃度	CNS3093		
	鋼筋腐蝕量測	鋼筋腐蝕深度	ASTM C876-85		

三、水土保持防砂設施非破壞檢測

本節以「混凝土強度錘試驗」、「超音波探測法」、「透地雷達法」等三項作為水土保持防砂設施非破壞檢測作業，分別說明如下：

(一) 混凝土強度錘試驗

混凝土強度錘又稱反彈錘（Rebound Hammer Method）、施密特錘（Schmidt hammer），此法係由瑞士工程師 Schmidt 於 1948 年所研發出來的，為目前較常用於測定混凝土強度的表面硬度法，且此法已被列入 CNS 國家標準中。利用其反彈數（Rebound Number）與強度之關係換算求得混凝土抗壓強度，並與其設計強度、最近一次鑽心取樣強度試驗資料、或相關規範（如水土保持技術規範）進行比對，研判混凝土強度是否仍符合標準值。參考交通部運研所（2000、2003）「橋梁檢測評估與維修人員訓練講習班論文集」施密特錘衝擊法量測方法，研擬混凝土強度錘試驗作業流程如圖 3 所示。

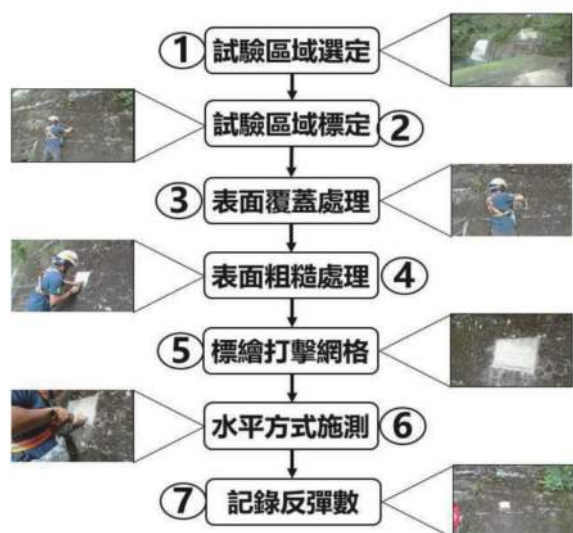


圖 3 施密特錘衝擊法檢測作業流程圖

(二) 透地雷達探測法

透地雷達探測法之原理為透過探頭發送雷達波（Radar Wave）訊號，並利用雷達波碰到不同材質之介電常數差異而產生的反射波，及波形識別、不同材料介電常數影響成像結果之差異，依據美國材料試驗協會訂定 ASTM D4748 10、ASTM D6087 08、ASTM D6432 11 等規範規定進行，相關流程如圖 4 所示。本文主要採用手持式透地雷達探測進行混凝土防砂設施淺層探查，可反映待測物內部 RC 鋼筋結構、混凝土鋪面裂隙，尚無法考量地層疏鬆、道路管線、或水位等情形。

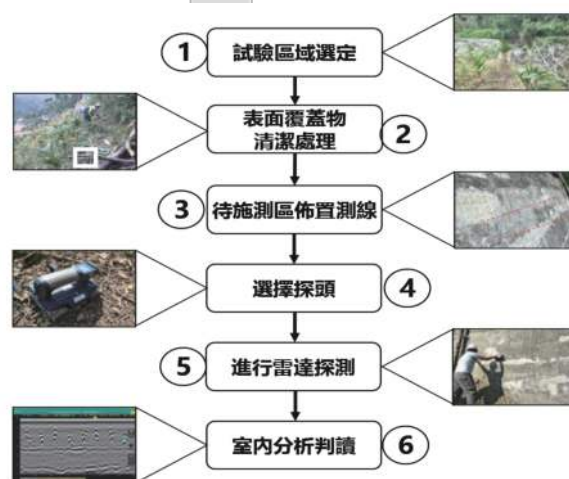


圖 4 透地雷達檢測混凝土防砂設施作業流程圖

(三) 超音波探測法

超音波檢測原理為藉由探頭（Transducer of Probe or search Unit）發射出低能量高頻率脈衝波，並經由接收器接收反射或透射訊號，進行物件內瑕疵檢測，其可適用於混凝土同表面上之檢測，並檢測混凝土構造物內部均勻性及瑕疵分布情形。依據美國材料試驗協會訂定 ASTM C597 「Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete」規範規定進行，相關流程如圖 5 所示。

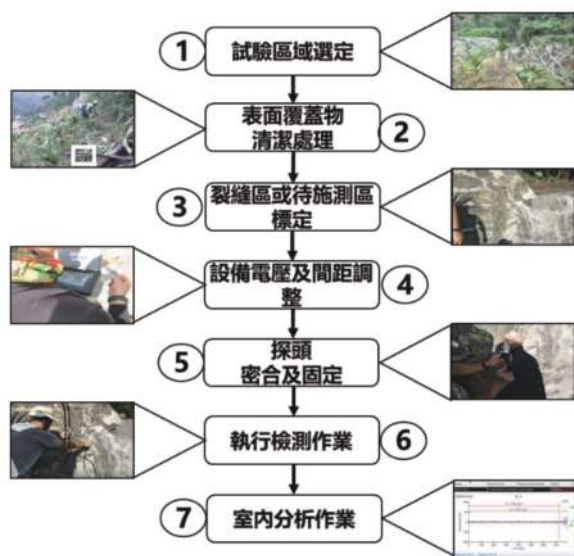


圖 5 超音波檢測混凝土防砂設施作業流程圖

四、研究案例

本文以嘉縣 DF008 土石流潛勢溪流集水區境內乙座防砂設施為研究案例，係因 109 年度 0522 豪雨事件曾造成境內嘉縣 DF008（鄰近地點為太和國小）土石流潛勢溪流發布土石流黃色警戒及土砂災害，另於現場勘查發現，防砂設施右翼有多處裂縫生成，故依據本計畫防砂設施非破壞檢測評估工作流程，進行防砂設施檢測，以瞭解其裂縫發展狀況與周圍材料影響範圍，相關成果說明如下。

嘉縣 DF008 土石流潛勢溪流集水區位於嘉義縣梅山鄉太和村，嘉縣 DF008 集水區面積達 1182.74 公頃，溪流長度達 9.675 公里，溪流與縣道 149 甲線 52.1k、53.5k 處分別交會於梅嶺大橋、太和橋，與 169 縣道交會於箱涵，為當地居民重要互相往來交通要道，而鄰近太和國小聚落東北側支流即為研究案例，集水區地理位置詳圖 6 所示。



圖 6 嘉縣 DF008 土石流潛勢溪流集水區地理位置圖

根據水保局（2009）「98 年重大土石災例現勘及報告彙編」災例報告，嘉義縣梅山鄉太和村於當（98）年度即發生土砂災害，該土石流潛勢溪流於民國 98 年隨即辦理 2 件水土保持治理工程；民國 98 年公開為土石流潛勢溪流後，統計民國 101、102 以及 108 年發布黃、紅色警戒總共計有 41 次，且其中實際降雨量達警戒值總共計有 10 次，詳圖 7 所示。

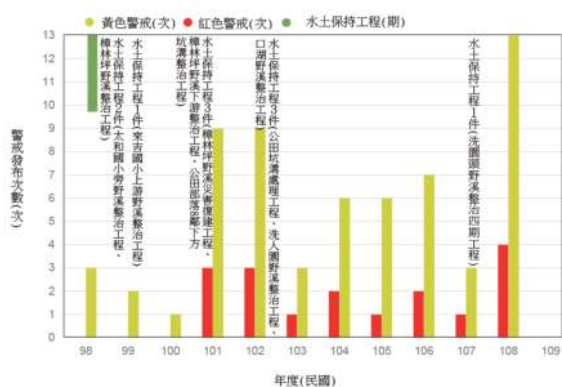


圖 7 嘉縣 DF008 土石流潛勢溪流警戒發布及竣工工程關係圖

針對嘉縣 DF008 土石流潛勢溪流上功能評估具 CD 級防砂設施、鄰近崩塌及土石堆積區域者為勘查對象，勘查結果發現，防砂設施受損或周遭環境較不佳者，以太和國小旁野溪整治工程之

構造物（以下簡稱為樟林坪防砂設施），樟林坪防砂設施位於地滑區內，且外觀有明顯表面張力裂縫，為整體性評估劣化營力對防砂設施所造成之影響，故挑選此座防砂設施，作為定量混凝土強度、超音波及透地雷達等檢測對象，如圖 8 所示。

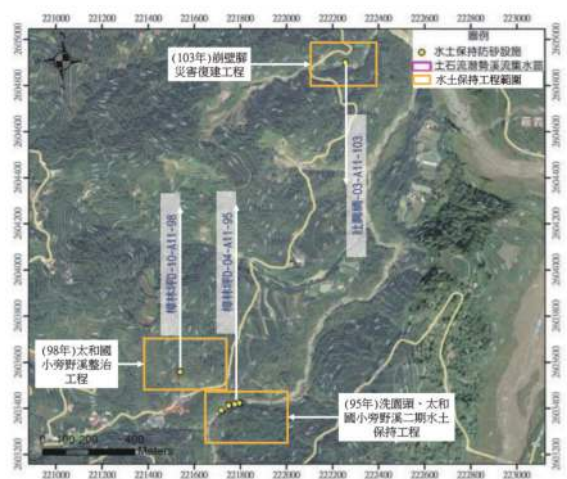


圖 8 嘉縣 DF008 土石流潛勢溪流防砂設施受損分布圖

五、檢測成果

針對阿里山溪樟林坪防砂設施非破壞檢測，各非破壞檢測之測線點位規劃分布圖如圖 9 所示。

以下茲就檢測作業範圍區域分「整體設施構件檢測」與「局部影響區檢測」兩部分說明。

（一）整體設施構件檢測

主要針對整體表面鋼筋與混凝土密合度以及結構內部空洞化等狀況進行檢測，檢測方式以透地雷達探測法（Ground-Penetrating Radar：Proceq GPR Live-GP8000）為主，現場透過回波檢視內部有無異常跡象，進以快速判釋防砂設施鋼筋與混凝土密合度、鋼筋排列間距、以及內部瑕疵或滲水情形。

（二）局部影響區檢測

主要針對結構表面強度、裂縫發生區與周圍影響範圍等進行檢測，檢測方式分別以脈衝速度超音波探測法（Ultrasonic Pulse Velocity：Proceq Pundit PL-200），陣列式超音波探測法（Phased Array：Proceq Pundit 250 Array）及混凝土強度錘試驗（Rebound Hammer Method）為主，進以分別獲得可視裂縫之深度與內部瑕疵狀況資訊與重要受力位置之表面混凝土材料抗壓強度。

1. 整體設施構件檢測

透地雷達探測法瑕疵檢測結果如下：

（1）整體構件內部瑕疵及滲水檢測選用手持式透地雷達做全區整體式掃描檢測。手持式透地雷達探測法之現場測線規劃與施測照片如圖 9 及圖 10 所示。

（2）G1 及 G2 瑕疵檢測測線於溢洪口右岸約 2 公尺至 8 公尺之間距表面 15 公分至 45 公分處存在疑似內部空洞訊號（如圖 11a）；G3 瑕疵檢測測線經室內訊號判斷則無明顯異常現象。此外 G4、G5 瑕疵檢測測線施測位置主要為針對防砂設施立面上方結構牆面掃描，影像上可看出鋼筋排列疑似有間距不連續的情況，且 G4 瑕疵檢測測線靠近溢洪口裂縫處甚至有鋼筋層與後方材料貼合不緊密的現象（如圖 11b）。

2. 局部影響區檢測：脈衝速度超音波裂縫檢測結果

針對既有裂縫深度檢測，由表面裂縫分布情況概略分為上（N1）、中（N2）、下（N3）等三部分裂縫檢測現場照片如圖 12。針對防砂設施兩處裂縫深度檢測結果分述如下：

（1）溢洪口與右側翼牆交接處在表面裂縫之裂縫檢測分析成果如圖 13 所示，其中包含儀器設定、增益大小、第一次回波到時及第二次回波到



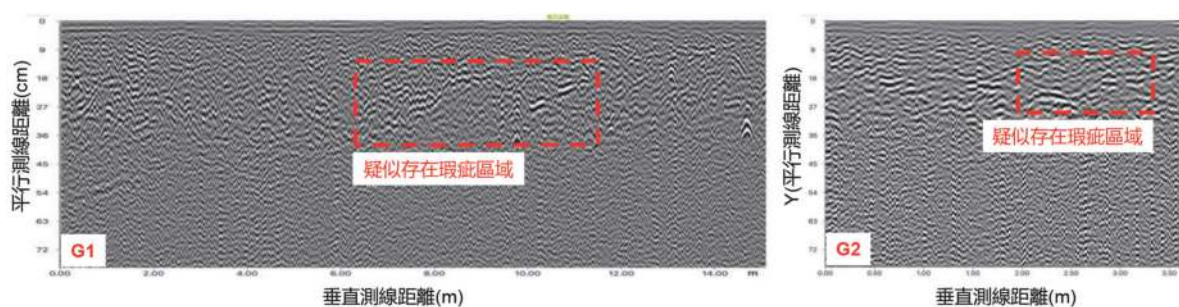
圖 9 樟林坪防砂設施外觀劣化現場照片圖



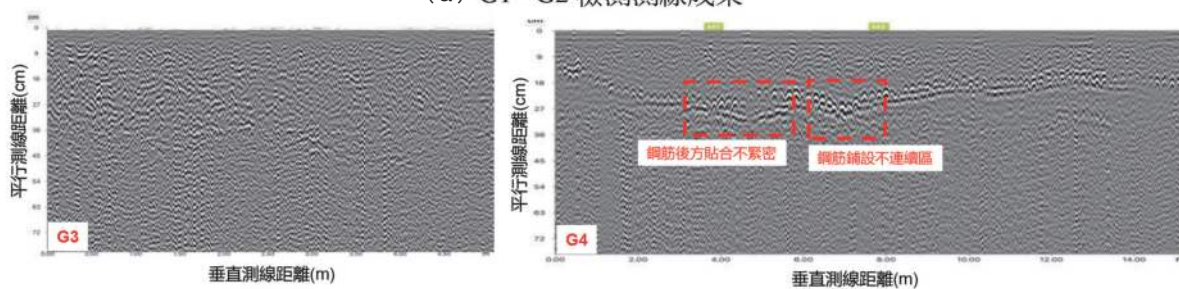
(a) 進行右翼頂部檢測
(G1)

(b) 進行立面檢測
(G4)

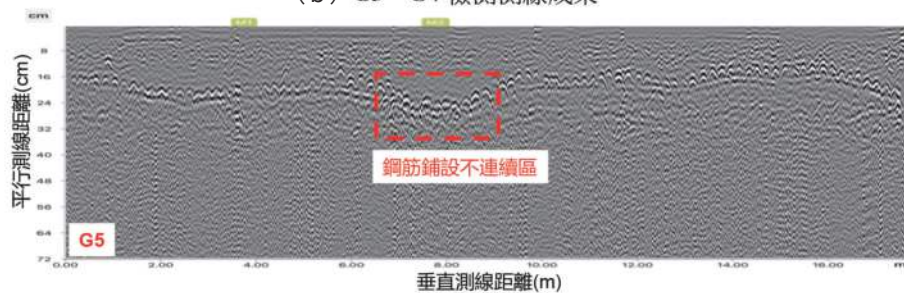
圖 10 手持式透地雷達現場檢測照片



(a) G1 ~G2 檢測測線成果



(b) G3、G4 檢測測線成果



(c) G5 檢測測線成果

圖 11 手持式透地雷達瑕疵檢測測線成果

時。根據裂縫深度分析結果，下測線之超音波無相關回傳資訊，裂縫深度應已達結構體對向，外在營力可能造成此裂縫範圍結構裂穿之現象，中段測線經波傳判斷裂縫深度應至少達於 73 公分以

上，上方測線經量測其裂縫深度應達 56.7 公分以上，整體結構劣化營力之應力作用經由裂縫深度變化狀況，猜測破壞營力可能係由下方往上方發展。



(a) 溢洪口與右側翼牆交接處——(b) 右翼末端 (N4) (N1)

圖 12 脈衝速度超音波裂縫檢測現場照片

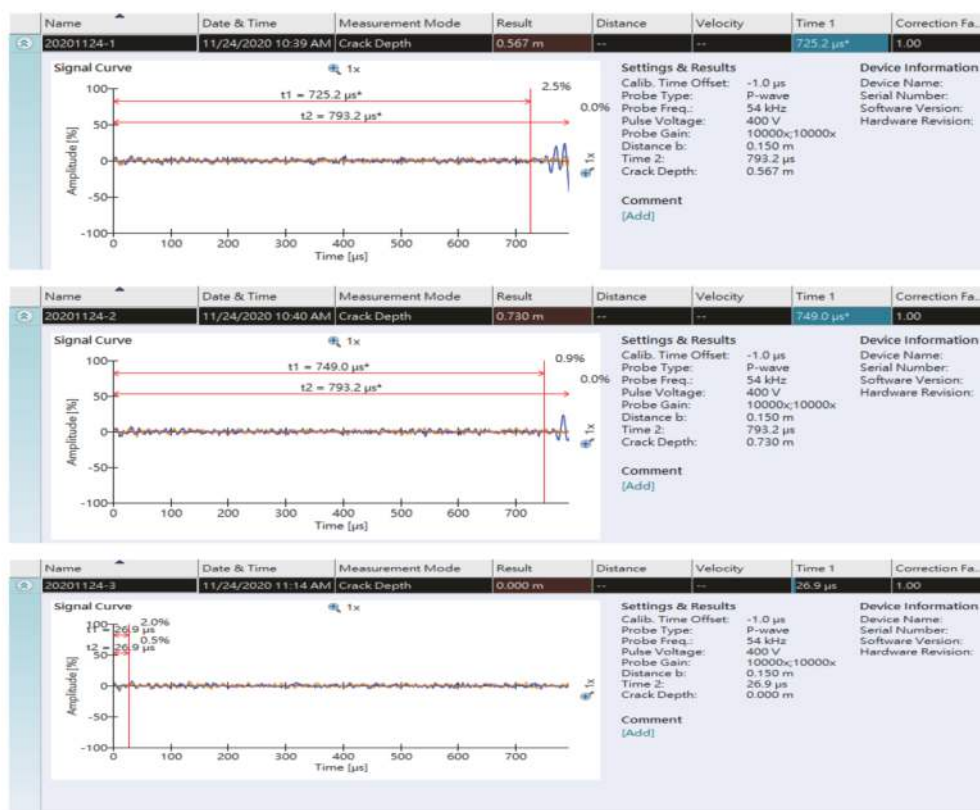


圖 13 脈衝速度超音波法探測成果圖

(2) 防砂設施右翼端點裂縫經現場判斷已裂穿至防砂設施對向，且於進行超音波上、中、下三條測線檢測時，其訊號均無法有效回傳，依現場防砂壩厚度量測，其裂縫深度應已達 3.5 公尺左右，推測內部破碎或路徑過長造成超音波能量大幅衰減至無法偵測，另於現地勘查加以判斷，右翼末端裂縫左右兩斷裂塊體已完全分離，防砂設施右翼端點可能已失去防砂設施穩定功能。另針對脈衝速度超音波探頭檢測裂縫深度彙整如表 4 所示。

表 4 脈衝速度超音波深度檢測彙整表

脈衝速度超音波深度測線位置	溢洪口與右側翼牆交接處	右翼末端
上方側裂縫 (N1)	>56.7 公分	裂穿
中段側裂縫 (N2)	>73 公分	裂穿
下方側裂縫 (N3)	裂穿	裂穿

經手持式透地雷達探測法檢測結果，可觀察其裂縫發生處附近內部鋼筋與混凝土密合性較屬不良，其鋼筋排列間距亦有產生不等距之內部瑕疵現象，上述狀況研判可能與結構內部應力變化造成裂縫發展有直接或間接之關係。此外，於手持式透地雷達檢測時同時亦可瞭解防砂設施保護層厚度及內部鋼筋排列情況，也可大致觀察鋼筋網排列狀況與混凝土是否存在密合度不良或剝離現象。

3. 局部影響區檢測：陣列式超音波瑕疵檢測結果

針對既有裂縫周圍瑕疵檢測，由表面裂縫分布情況概略分為上 (S1、S4)、中 (S2、S5)、下 (S3、S6) 等三部分瑕疵檢測測線進行。陣列式超音波瑕疵檢測之現場測線規劃與施測照片如圖 14。針對防砂設施兩處瑕疵檢測結果分述如下：

(1) 溢洪口與右側翼牆交接處在表面裂縫周圍之瑕疵檢測分析成果如圖 15 所示。經檢測結果發現，於三條測線之裂縫周圍兩側反射訊號均較強，內部瑕疵主要集中於中段測線部分 (S5)，

明顯可看出結構因應力集中作用後，附近材料之密合度產生變化，或甚至延伸出結構內部空洞化等現象。根據檢測影響範圍發現，此裂縫生成導致周圍材料發生影響之長度約介於 25 至 50 公分之間。



(a) 溢洪口與右側翼牆交接處 (S4) (b) 右翼末端 (S3)

圖 14 陣列式超音波瑕疵檢測現場照片

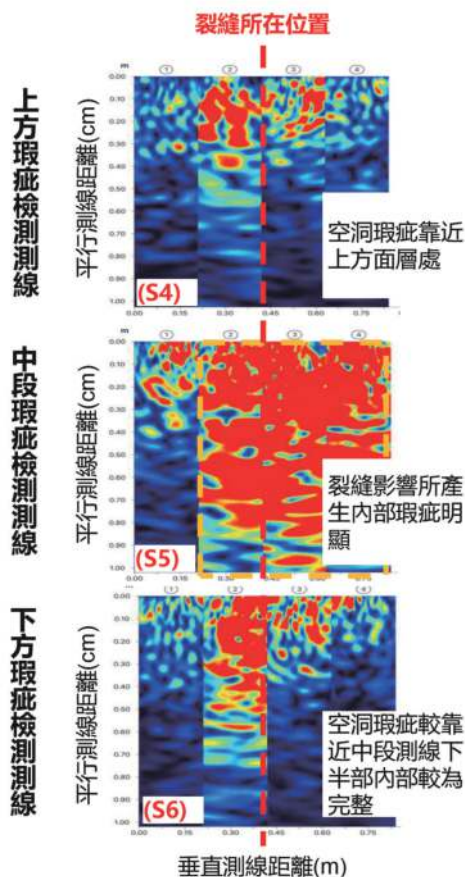


圖 15 溢洪口與右側翼牆交接處裂縫周圍陣列式超音波檢測成果

(2) 防砂設施右翼端點裂縫周圍經超音波上方瑕疵檢測測線(S1)、中段瑕疵檢測測線(S2)、下方瑕疵檢測測線(S3)成果發現，裂縫周圍所產生的影響範圍大約已達 1.5 公尺，而裂縫影響造成右側翼牆靠近翼洪口交接處鋼筋與混凝土之間密合度較不良與空洞狀況等瑕疵，主要集中於上方及中段測線部分，推測可能右側翼牆外面回填土石下移導致裂縫。另於上方測線(S1)發現距裂縫 1.8 公尺至 2.5 公尺之間範圍，可能係由不同事件造成混凝土瑕疵空洞區(如圖 16)，而其他檢測測線瑕疵檢測結果均屬良好。

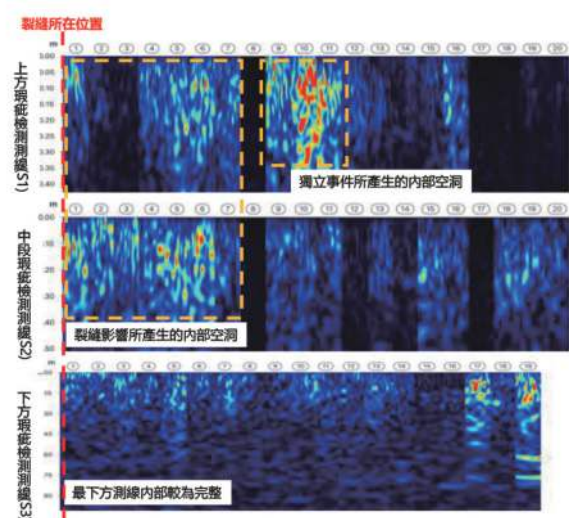


圖 16 右翼端點裂縫周圍陣列式超音波檢測成果

4. 局部影響區檢測：混凝土強度錘強度檢測結果
針對受損防砂設施進行混凝土強度檢測，試

驗樣區以混凝土強度較有疑慮之位置，如壩翼及溢洪口處進行檢測，總計共選擇 7 處重要受力區位進行強度檢測(彙整如表 3)。混凝土強度錘強度檢測之現場檢測點位規劃與施測照片如圖 17。



(a) 試驗樣區 1，溪流左側翼牆面層 (b) 試驗樣區 4，溪流右側翼牆面層

圖 17 混凝土強度錘強度檢測現場照片

針對此座防砂設施強度檢測結果彙整如表 5 所示，重要觀察結果分述說明如下：

(1) 各處檢測值區分為基礎、翼牆面、翼牆頂部，則檢測值呈現由下往上遞減現象，介於 210.91~294.96 kgf/cm² 之間，最低值為翼牆、溢洪口頂部(檢測點項次 5、6、7) 檢測平均值為 210.91 kgf/cm²，次低值為溪流兩側翼牆面層(如表 5 檢測點項次 2、3) 檢測平均值 252.89 kgf/cm²，以靠近基礎底部(如表 5 檢測點項次 2、3) 檢測平均值 294.96 kgf/cm² 為最高，防砂設施頂部非為防砂設施混凝土抗壓強度主要受力方向，且歷年受日照及降雨影響、或坡面逕流以及水流衝擊，相較其他區位強度檢測數值偏低許多。

表 5 混凝土強度錘強度檢測彙整表

項次	檢測樣區位置	打擊角度(度)	試錘反彈數(N)	檢測值(kgf/cm ²)
1	溪流左側翼牆面層位置	0	31.1	262.07
2	溪流左側溢洪口面層位置	0	33.6	302.86
3	溪流右側溢洪口面層位置	0	32.6	287.05
4	溪流右側翼牆面層位置	0	29.9	243.71
5	溪流左側翼牆上方位置	-90	24.8	213.63
6	壩體溢洪口上方位置	-90	24.9	214.04
7	溪流右側翼牆上方位置	-90	20.5	205.07

(2) 各處檢測值位置區分為左岸及右岸，溪流左岸檢測平均值為 259.52 kgf/cm^2 (檢測點項次 1、2 及 5)，溪流右岸檢測平均值為 245.28 kgf/cm^2 (如表 5 檢測點項次 3、4 及 7)，左側檢測值大於溪流右側檢測值，整體上因右岸於存在 2 處裂縫(溢洪口與右側翼牆交接處、右翼末端)，故於裂縫周圍其材料強度相較無受損區域其強度呈現些微衰減之狀況，裂縫之生成確實影響周圍材料強度折減之差異。

六、結論與建議

本文利用非破壞性檢測方式，針對嘉義阿里山溪集水區內嘉縣 DF008 土石流潛勢溪流乙處防砂設施透過透地雷達、超音波以及混凝土強度錘試驗等不同檢測方法，以瞭解裂縫深度及實際影響範圍，並獲得結構內部瑕疵狀況，以及混凝土面層材料強度差異；此外，陣列探頭、探測器可與平板連接使用，探測原理係以八通道做資料收集，一次可收集 56 組 A-Scan 做影像拼接，故可有較佳的解析能力與資料解析可進行詳細檢測；另經由裂縫深度變化狀況及發生位置推測，判斷結構破壞應與土砂或水流等外在營力無直接關係，惟該構造物建造於地滑區內且構造物右岸頂部有加載行為(30 噸蓄水水量之儲水桶)，是否因此而導致應集中而發生構造物損壞之情形；未來若其他鑽探或開挖等進行相互驗證，更客觀地證實其整體結果。

本文建議以透地雷達方法進行廣泛探，在有異常訊號位置再採超音波法確認，用兩種方法進行交叉比對確實為比較好的檢測方式，後續可依防砂設施損壞狀況，就不同探測設備的物理特性、擴充性及調查時效性來選擇檢測設備，於表面未有明顯損壞的區域可先行施作透地雷達掃描，檢視內部有無異常現象，若發現有異常訊號則可進

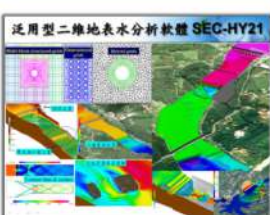
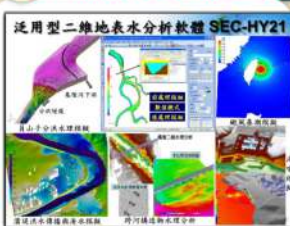
一步利用陣列式超音波法進行檢測，進以提供管理單位後續工程維護及結構安全補強改善之依據。

參考文獻

- Adam, K., Říha, J., and Špano, M. (2016) Investigation on the temperature of the asphalt-concrete facing of embankment dams, *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 9(1), pp.73-81
- Hsu, K.T., Cheng, C.C., Lin, Y.C., Chiang, C.H., and Chang, L.J. (2017) Using Multiple Non-destructive Testing Methods to Assess the Loss of Soil Inside Concrete Embankment, *Materials Science and Science*, 2017 International Conference on Transportation Infrastructure and Materials (ICTIM 2017), Qingdao.
- Kobayashi, A., Yamamoto, K., and Tsunematsu, H. (2008) Improvement of Elastic Wave Exploration as Nondestructive Investigation Method of Irrigation Tank Embankment, *Journal of Rainwater Catchment Systems*, Vol.14, No.1, pp.33-40
- Schabowicz, K. (2019) Non-Destructive Testing of Materials in Civil Engineering, *Materials*, vol.12, No.19, pp.3237
- Zhu, Y.H., Visser, P.J., Vrijling, J.K., and Wang, G.Q. (2011) Experimental investigation on breaching of embankments, *Science China Technological Sciences*, Vol.54, pp.148-155
- 三立新聞網 (2020) (<https://tw.sports.yahoo.com/news/直擊-阿里山-行諄橋-土石流狂瀉-114522253.html>)
- 公路總局 (2020) 「公路橋樑檢測及補強規範」
- 經濟部水利署 (2000) 「非破壞性堤身中空調查技術之研究報告」
- 經濟部水利署 (2008) 「水利構造物檢查及安全評估技術規範」
- 經濟部水利署 (2011) 「河堤淘空檢測方法之研究」
- 經濟部水利署 (2017) 「106 年度中港溪水系堤防結構安全檢測」
- 行政院農業委員會水土保持局 (2009) 「98 年重大土石災例現勘及報告彙編」災例報告
- 行政院農業委員會水土保持局 (2010) 「水土保持工程設施破壞檢測分析與評估」
- 行政院農業委員會水土保持局 (2020) 「水保局防砂設施整體調查報告 (108 年)」
- 交通部運輸研究所 (2000) 「八十九年度橋梁檢測評估與維修人員訓練講習」講義
- 交通部運輸研究所 (2003) 「九十二年度橋梁檢測評估與維修人員訓練講習」講義

土木水利及軌道運輸研究中心

計算流力及水利工程



- ✓ 地表水（河川、水庫、河口等）水理、污染質及泥砂傳輸模擬分析
- ✓ 跨河構造物水理分析
- ✓ 潰壩、潰堤、海嘯、颱風暴潮、滑波湧浪、渾水異重流及土石流等模擬分析

軌道運輸

列車運轉模擬軟體



- ✓ 列車運轉模擬
- ✓ 軌道容量分析
- ✓ 列車排點模擬
- ✓ 旅客人潮模擬
- ✓ 巨量資料分析
- ✓ 旅客需求預測
- ✓ 列車停站與服務規劃
- ✓ 延滯與安全風險分析
- ✓ 車輛與軌道運用規劃
- ✓ 軌道營收管理規劃
- ✓ 人員排班輪班規劃
- ✓ 資料視覺化分析

結構與地震工程

振動分析防治



耐震性能評估



- ✓ 建物及橋梁耐震性能設計、評估與補強之分析
- ✓ 建物及橋梁壽齡風險管理
- ✓ 震後損失評估與地震保險
- ✓ 結構智慧監測物聯網與健康診斷
- ✓ 振動量測模擬分析與防治

地理資訊及資訊應用

工業區地理資訊系統



- ✓ 地理資訊系統開發
- ✓ 電子政務管理系統開發
- ✓ 知識管理系統開發
- ✓ 水庫安全管理系統開發
- ✓ 大眾運輸安全管理系統開發
- ✓ RFID整合應用系統開發
- ✓ 平板電腦、手機整合應用系統開發
- ✓ 災害應變系統開發
- ✓ 先進無線感測網路開發
- ✓ 規劃設計自動化
- ✓ 資料倉儲系統

以音波反射振幅剖析井下岩層結構特徵新創技術簡介

周柏儀* 羅鴻傑*

摘要

本文旨在介紹近期研發中的一種針對井下音波振幅訊號的加值分析技術，用於提升井下孔壁立體成像效果，輔助現地工址地質調查之進行。技術組成包括資料庫模組、運算模組、圖形產出模組與水文地質架構分析模組，首先資料庫將擷取音射式孔內攝影儀所接收的連續性超音波訊號，分割出孔壁反射振幅數據，藉運算模組以進行統計與集群分析，再由圖形產出模組將平面強度分布的影像轉換成為具有深度的效果，產生類三維（Semi-3D）岩體結構立體圖，可提供工程地質、水文地質、應用地質專業領域更多元的參考依據。本文所介紹技術適用於多種地質環境調查，透過簡單的邏輯運算處理連續性反射振幅數據，產出之岩體結構立體圖可提供研究人員更有效掌握孔內岩層結構特徵。

關鍵字：井下攝影、音波反射振幅、水文地質特性調查

一、前言

早期岩盤工址地質鑽探調查多藉由觀察逐米記錄鑽探取出之岩心構造與裂隙位置，再統計地層弱面組數與位態變化，以掌握現場地質與工程環境。然而，岩心比對的工作需要高度專業及經驗積累，步調慢、工時長、加上取樣試體易受擾動，當岩心過於破碎或人為提取率過低時也容易造成人員對於地層實際狀況的誤判。為解決此問題，井下或孔內影像探測（Borehole televiewer logs, BHTV）成為現代岩盤工址地質調查工項中的關鍵利器，誠如其名，其主要功能即是輸出鑽孔岩心連續性的定向圖像（Oriented images），因此不易受人為提取率或岩心排列錯置所影響，也是少數可做到探勘即時資料視覺化（Data visualization）

的調查技術，提供眾多僅能以純量表示的地球物理特徵訊號直接的視覺化佐證。自 1960~1970 年代技術問世後，BHTV 即已應用於岩層地質評估、礦床資源探勘、油藏規模調查、岩體不連續面描述與多項延伸性的分析，例如主要裂隙識別和定位、地層學研究、現地應力、岩心定向（Core orientation）等議題。BHTV 孔內影像探測的執行模式一如傳統地球物理（電）井測法（Geophysical logging method），係在鑽孔貫穿地層之後，試驗人員以捲揚系統結合電纜將探測設備或井測儀器置入井內，並在吊放過程中將感測器所擷取之訊號回傳地表進行即時分析和解算，最後於顯示器輸出連續性孔壁影像，使試驗者可快速下拉觀察孔內岩層構造，再透過高階影像處理軟體進行弱面識別，提供構造位態的定量資訊（Lo et al., 2012）。

* 中興工程顧問社大地工程研究中心高級研究員

孔內影像探測技術廣義而言可分為光學式影像掃描與音射式造影兩種形式 (Williams and Johnson, 2004; Morin, 2005; Matter et al., 2006; 翁孟嘉等, 2006; 鐘志忠等, 2008), 而基於場址特性、環境適用性、井內試驗條件等, 兩種孔內影像探測設備通常可於現地併列使用, 相互搭配, 以供試驗人員完整窺究井下岩層分布。光學式孔內影像掃描設備 (Optical Televiewer, OTV) 主體包括一組環繞式光源、廣角魚眼鏡頭、雙曲面反射鏡、可記錄光線變化的 CMOS 影像感測器等用以如攝影機般捕捉並記錄孔內影像, 透過內裝加速度計與磁力儀設定環狀實像展開 (Image unwrapping), 輸出高解析度 (1280×1024 pixels) 如一般肉眼所見的 24-bit 彩色圖像。光學式孔內影像掃描設備最高可容受之井下溫壓條件因廠牌而異, 適用鑽孔孔徑普遍以 3~5 吋最佳, 吊放速度多半必須控制在每分鐘 2.0 公尺以下, 原則上圖像解析度要求越高則吊放速度需越慢, 以確保影像品質穩定。也因其內部感光元件受制於檢測環境明度, 當孔內地下水水質濁度過高或鏡頭汙損時, 影像產出品質易受到影響。

而隨著超音波成像技術的廣泛應用, 亦即分析音波在不同密度介質傳遞時的差異性, 前述另一種所謂高解析度音射式孔內造影 (High Resolution Acoustic Televiewer, HiRAT) 探測法也同樣受到相當多的關注。設備基本包括一組固定於探頭底端的聲波轉換器 (Acoustic transducer) 與接收設備, 以及可 360° 旋轉的反射鏡 (5~20 秒轉速), 其可聚焦超音波束 (Ultrasound beam) 掃描孔壁, 進行孔內全方位掃描。如同醫檢師會利用超音波診察患者身體組織病變狀況、肌腱斷裂型態、出血部位確認等來掌握病灶, HiRAT 探測因此也依循相仿的原理來協助大地工程師探查工址地層組成的形態與各種破裂面的空間分布。

就其原理, 在孔內探查吊放的同時, 以壓

電材料製成的晶體發射源可放送低能量高頻率 (0.5~1.5 兆赫) 的超音波, 透過地下水或鑽孔內液體作為媒介撞擊孔壁後立即反射回至探測儀 (Deltombe and Schepers, 2004), 探測系統轉換所接收到相當高精度 (1 mm) 之孔壁反射振幅 (Amplitude) 與走時 (Transit time) 訊號成為 256 色階 (8 位元 / 像素) 二向度 (2D) 影像。其適用鑽孔孔徑同樣以 3~5 吋最佳, 當 HiRAT 所掃描深度之岩體完整無破裂面時, 所接收到的訊號強度較高, 反射振幅較大, 其所對應的色階越亮; 反之, 當掃描深度之岩體出現弱面、空洞或裂隙時, 訊號強度較低, 反射走時長且振幅小, 其所對應的色階也越暗, 是故具體而言, 該二維影像是由具有不同亮度的複數像素所組成, 研究人員可透過在電腦螢幕上展繪出地層細部區段影像明暗度來掌握岩體強度, 以及觀察代表弱面或裂隙的暗色正弦軌跡線, 結合設備內建數位羅盤儀自動紀錄探測深度裂隙的位態, 搭配後處理程式 (WellCADTM) 依據音波反射走時資料繪製出鑽孔變形圖 (Breakout), 如此一來研究人員即可進一步掌握鑽孔受大地應力影響下的變形狀況, 對於工址調查所需相關地質統計工作相當有幫助。

有鑒於此, 相較於光學式影像掃描之技術限制, 雖然 HiRAT 探測輸出影像的解析度稍低, 但由於音波訊號之傳輸並不受地下水或鑽孔內液體濁度之影響, 因此只要探測範圍在水位面以下即可成像, 其環境適用條件較寬, 且可於下放或拉升的過程中連續紀錄地層細部區段影像, 直接觀察孔內裂隙實際分布位置、岩盤破碎程度等, 並與鑽探岩心紀錄相互比對。當鑽探遭遇岩心鬆軟、岩體破碎坍塌、夾心流失等狀況導致提取率偏低而需使用超泥漿穩定孔壁時, HiRAT 孔內造影提供絕佳的影像佐證, 所產出之圖資可提供研究人員針對岩體弱面進行詳細且即時性的判讀。

然而, 綜觀現階段探討不同孔內攝影技術功

能與應用限制之文獻（Williams and Johnson, 2004; Wacker and Cunningham, 2008; Lo et al., 2012），工程界現階段較熟知的 HiRAT 孔內影像分析技術多僅著重於區段性岩層特性的細部描繪，所產生的二向度影像實質上對於整體地層樣態的代表性有限，針對鑽孔地層組成架構、地質構造變化程度、水文地質特性等課題整體性的詮釋也較缺乏，如應用在複雜且形態多變的崩場地或高山裂隙含水層地質調查工作上常有疊影的狀況，仍需要搭配其他井測儀器紀錄成果或交互比對更多鑽孔成果才得以達成，其也無法提供針對地下水流動趨勢之分析。為此，本研究希望透過一簡單的數據演算法與圖形產出模組，萃取連續性反射振幅訊號進行加值分析，將二向度孔壁影像轉換成立體圖，建構一套新的孔內岩體結構特徵影像顯示技術。本新創技術業已通過臺灣發明專利（證號 :I626622）（周柏儀等，2018）與美國發明專利（US10,760,405B2）（Choua et al., 2020）智財局審查核准實施，顯示其符合產業利用性、新穎性與進步性實質要件。本文僅針對其技術內容重點與後續應用進行簡要說明，希望透過後續不同場址資料之比對，提升研究人員現地工作成效，也協助決策者更容易掌握地層岩體之水力特性。

二、孔內探測成像技術的改良

基於模組化設計的概念，本技術創作核心在於提供一種可快速顯示孔內岩體結構特徵的系統，系統主要包括資料庫模組、運算模組、圖形產出模組與水文地質架構分析模組（如圖 1 所示），技術執行流程摘錄如圖 2 所示，必需可靈活結合寫入可程式化邏輯裝置中。

（一）資料庫模組（Database module）

儲存 HiRAT 音射式孔內造影儀接收孔壁回傳

隨深度而有連續性變化的訊號，作為分析反射振幅的原始數據（.asc 檔），使用者可針對模組檔案中的資料執行讀取、更新和刪除等操作。一般現行傳統做法並不會直接擷取 HiRAT 訊號振幅進行分析，而是透過電腦後處理程式直接轉換反射訊號振幅成為 256 色階影像，並在電腦螢幕上展繪。

（二）運算模組（Calculation module）

連結資料庫，藉特定的程式以自動擷取資料庫內的反射振幅數據，同時依據固定的深度區間，對連續性的反射振幅數據進行切割與轉型，產生振幅訊號統計數值的運算結果，掌握數據的集中趨勢（Central tendency），抑或是振幅分布的中間值或中央值。深度區間之計算應視實際鑽孔的長度而調整，可擴充與重複運算。

（三）圖形產出模組（Pattern generation module）

連結運算模組，可藉由程式編寫自動擷取運算模組所產生的結果，尤其是針對每個深度區間所對應的反射振幅訊號統計數值資料，進行圖形產出及繪製程序，建立反射振幅數據隨深度變化的散布圖，輸出井下岩層特徵的立體成像，以剖析成對資料之間的相關性。舉例而言，圖形產出模組可使用試算表內建之立體泡泡圖（Bubble chart）來進行圖形產出及繪製程序，或任何可展現資料變化趨勢的繪圖工具均可。

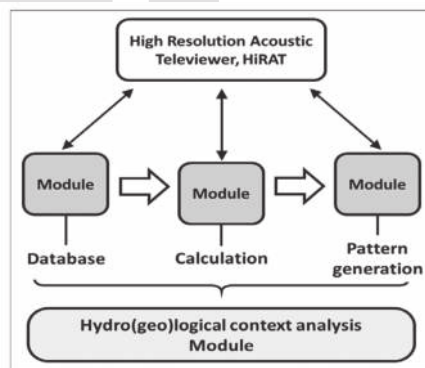


圖 1 孔內探測成像技術模組分析架構示意圖

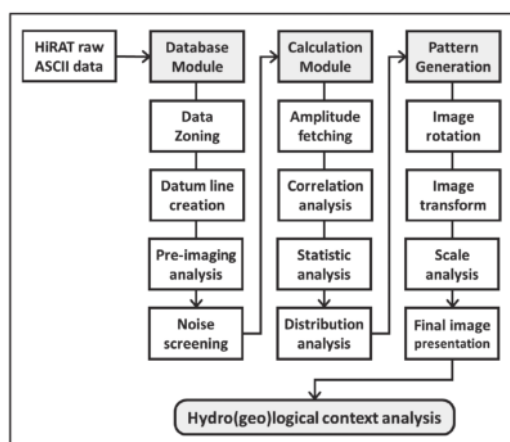


圖 2 孔內探測成像技術流程

本技術所搭配圖形產出模組需能產出類三維岩體結構立體圖，且依循著振幅大小與孔壁強度正相關的觀點來進行抽象化，其可產出四種形式的基本圖像，分別包括（1）特定深度音射振幅雷達圖、（2）音射振幅隨深度之分布趨勢圖、（3）區塊堆疊圖與（4）類三維岩層結構顯影，範例如圖 3 所示，圖像產出方式可透過 Excel 試算表繪製，也可透過專業繪圖軟體輸出。第一種雷達圖係由 HiRAT 在井下某特定深度所側錄得全方位反射訊號轉繪而成，概念如同 X 光電腦斷層掃描切面，當振幅落點越接近內圈中心即代表強度越低，越靠近外層則說明反射振幅強度越大，一者可觀察該深度之岩心弱面分布方位，二者可以掌握該區段鑽孔徑向結構強度的綜合表現。當雷達圖所展繪的振幅軌跡圈（Track circle）半徑越大圓周越完整，代表該區段岩體徑向結構較緊密及完整。相反地，若振幅軌跡圈半徑越小，圓周變化劇烈，則說明該區段岩層徑向結構疏鬆，基質密度低。

與之相較，第二種圖像形式係 HiRAT 井下音射振幅統計值隨深度之變化圖，可與同井非時變性訊號併列比較，主要可呈現鑽孔軸向結構強度的分布趨勢，當岩層結構越堅硬且完整時孔壁音波反射振幅越大，岩層結構越鬆散軟弱時反射振幅

則越小，而在岩盤破碎區段其反射振幅變化亦明顯較完整岩盤區段劇烈。第三種圖像形式係將振幅隨深度變化數值轉換為區塊堆疊圖，係以等距或集群分析將振幅訊號依岩層特性分割為多組塊體進行結構組成描述。從積木堆垛或疊書問題（Book stacking）理論可知，在堆疊過程中每一組積木塊體將承受其上方所有塊體的重量總和，當其上方塊體的質量中心或幾何重心（Geometric center）落在該單位塊體中心內側，則其不受下方塊體排列方式或堆疊結構所影響而坍塌；相反地，若上方塊體堆置型態所形成的傾覆力矩過大，兩者則容易產生結構體破壞與坍塌，藉此即可引申至岩盤結構的描述，甚至判斷優勢水流路徑出現的位置。

第四種圖像形式即結合上述反射振幅雷達圖、深度散布圖與區塊堆疊圖特點，透過調整色階對比轉換輸出成井下岩層特徵的立體成像，以剖析成對資料之間的相關性。與傳統所慣用的 256 色階二向度（2D）孔壁影像相較，圖形產出模組需能透過多重視深線索（Depth cue）將平面具強度分布的影像轉換成為具有深度的效果（Visualizing spatial depth），產出類三維岩體結構資訊不但改善圖像的可讀性和可理解性，且更貼近地層岩體堆疊實況，提供決策端更佳擬真的判釋效果。

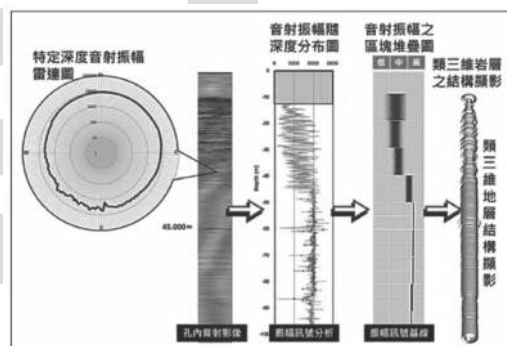


圖 3 孔內探測成像輸出形式範例（由左至右）：特定深度振幅雷達圖、既有二維孔內影像、振幅隨深度之分布圖、區塊堆疊圖與類三維岩層結構顯影

三、應用案例說明

本文藉由一處鄰近阿里山後堀溪上游的工地調查案例來說明（位置如圖 4 所示），該處現地調查期間所執行工項除了 HiRAT 音射式孔內影像探測外，還進行了若干常見的水文地質試驗，包括雙封塞水力試驗與孔內變形試驗，以旋轉式取心鑽探並記錄岩石品質指標（Rock quality designation, RQD），最後將岩樣攜回室內進行岩石三軸試驗、弱面直剪試驗、動彈性模數試驗及靜彈性模數試驗，求取包括抗張強度、單壓強度、彈性模數、剪力模數、凝聚力、摩擦角、P 波速、S 波速及包生比…等多項力學參數。

現地試驗工作主要係在地質鑽探完成後依所需試驗時間施作孔內攝影調查、孔內變形試驗及雙封塞水力試驗。由現地鑽探及孔內試驗結果可知，該處地層岩性以頁岩夾砂岩為主。孔內變形試驗係依據 ASTM 試驗標準 D4719 進行，在現場經由岩石品質指標判釋結果選取具代表性之區段，於鑽孔內約數倍孔徑之長度範圍內施加壓力，使孔壁在平面應變狀況下造成均勻之徑向變形；假設岩體為一均勻之彈性體，經由壓力與變形關係推求岩體之變形特性，並計算地層之變形模數（D）及彈性模數（E）。試驗分五階循環加壓，每階循環最大壓力分別為 20、40、60、80 及 100 kgf/cm²，加解壓速率基本上皆設定為 5 kgf/cm²/min。

雙封塞水力試驗係依據 ASTM 試驗標準 D4630 進行，主要利用橡皮封塞去分離鑽孔試驗區段，阻隔一個裂隙或是多個裂隙，再依據地質環境條件選擇試驗執行方法，其與習用微水試驗或琴透水試驗最大差別在於可依工作期程或調查目的隨意選擇岩盤範圍任一區段進行試驗，其觀測形式、時間、試驗條件的操作靈活性相對較高，所估算之水文地質參數也較具代表性（Chou et al., 2012, 2016, Choub et al., 2020; Lo et al., 2012;

周柏儀等，2019）。

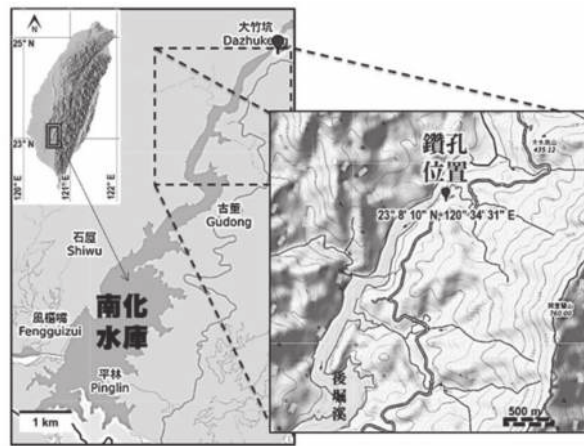


圖 4 工址調查位置
（來源：Kao et al., 2020）

室內試驗的部分包括岩石三軸試驗依據 ASTM 試驗標準 D2664 進行，將鑽探具代表性之岩心試體置入三軸室內以固定應變速率使試體軸向承受單軸荷重，使試體達到尖峰強度產生破壞，進而計算岩石材料抗壓強度相關參數，包括尖峰凝聚力（ C_p ）及尖峰摩擦角（ ϕ_p ）。岩石弱面直剪試驗依據 ASTM 試驗標準 D7012 進行，將準備完成之試體置入直剪機內之直剪盒中，並施加正向應力於試體進行壓密後開始剪動試體，剪力之施加係以應變控制方式持續增加剪力，以計算岩石弱面剪力強度相關參數，包括視凝聚力（ C_A ）、摩擦角（ ϕ_A ）、剪應力、正向變形與剪變形之關係曲線等。岩石彈性試驗依據 ASTM 試驗標準 D7012 進行，將試體以固定應變速率加壓，使其承受單軸荷重直至試體破壞，透過加壓過程記錄其軸向荷重、軸向變形及徑向變形，進而求取岩石材料之力學參數，包括岩心彈性係數 E 及柏松比等。

上述眾多常見的現地與室內岩石力學試驗多適用於特定深度或單一區段執行，僅 HiRAT 孔內

影像探測和岩石品質指標的計算可呈現隨深度的連續性紀錄，如圖 5 所示試驗結果包含過去熟知的二維音射孔內影像、以及岩石品質指標和新創音波反射振幅隨深度之分布圖，另盤點兩組調查數據並依五米為固定區間整理如表 1。

本孔 HiRAT 影像探測不連續面的標定結果顯示區間 No. 6~15 的裂隙與層面主控弱面位態方向相仿，岩層上部淺層區間 No. 1~5 與底層區間 No. 16 可觀察到若干高角度裂隙位態發育，惟其出現頻率相對較低。由圖 5 也可觀察到，音波反射振幅統計結果與人為計算的岩石品質指標的分布趨

勢相當一致，例如深度區間 No. 13 影像暗帶為強度相對軟弱的剪裂泥層，同步評估反射振幅與岩石品質指標統計結果皆較低，係本項技術所具備的優勢之一。

現地孔內變形試驗選擇在區段 No. 2, 8, 13 等區段進行，變形模數 (D1) 為平均約 2,500 MPa，彈性模數 (E1) 平均約落在 6,000 MPa，隨著岩盤破碎度或是岩覆應力的減少而降低。現地雙封塞水力試驗選擇在區段 No. 4, 8, 11, 15 等區段進行，所估算得水力傳導係數差異性達五個數量級。

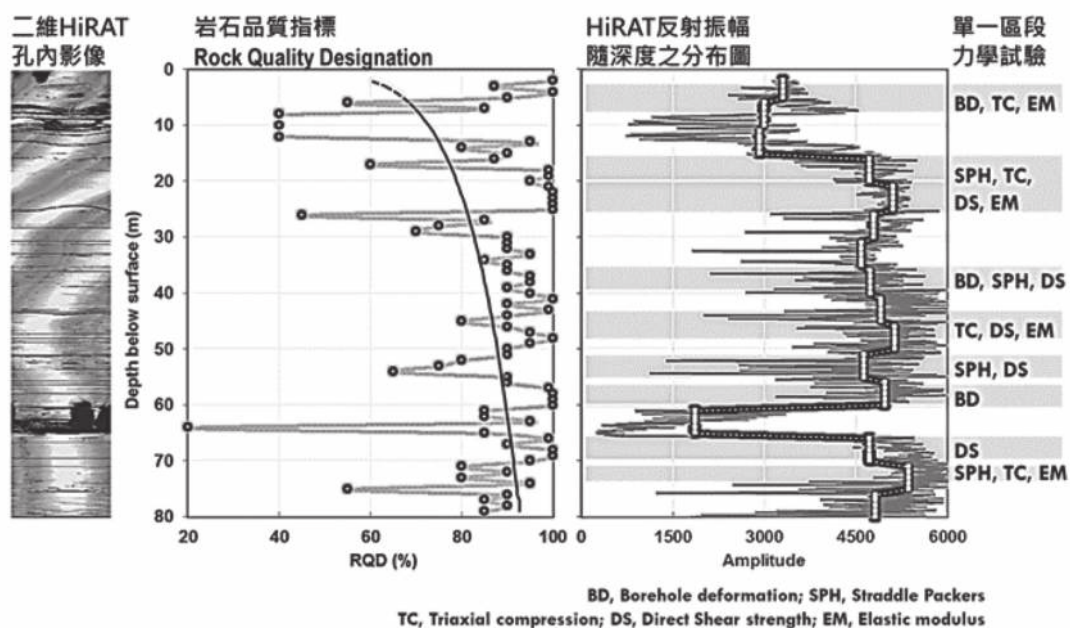


圖 5 現地音射孔內影像、岩石品質指標和音波反射振幅隨深度之分布結果 (來源: Kao et al., 2020)

彙整不同區段試驗結果與深度的關係如圖 6，可觀察到僅水力傳導係數、岩石彈性與剪力模數的估算結果與探測深度大致上呈現正相關，其他岩石力學參數與探測深度的相關性則相對低很多。就估算結果來說，雖然參數合理性與文獻記載相符，然此單點或非連續性、分散式的試驗結

果對於整體地層樣態的詮釋性仍然相當有限。此外，由於孔內變形與封塞水力兩種需接觸孔壁才得以進行的試驗極易受泥質軟弱影響，例如本孔在 No. 13 剪裂泥區段因初始加壓階段即產生塑性變形，導致試驗品質受阻甚至無法施測。

然而，透過本文所描述擷取音波反射振幅解

表 1 岩石品質指標和音波反射振幅隨深度之統計結果

No.	Depth [m]	Acoustic amplitude	RQD
1	0~5	3308 ± 228	87~100
2	5~10	2992 ± 1058	40~85
3	10~15	2922 ± 1019	40~95
4	15~20	4722 ± 398	60~99
5	20~25	5109 ± 125	99~100
6	25~30	4793 ± 438	45~90
7	30~35	4588 ± 410	85~95
8	35~40	4733 ± 476	90~95
9	40~45	4907 ± 593	80~100
10	45~50	5136 ± 312	90~100
11	50~55	4625 ± 778	65~90
12	55~60	4976 ± 339	90~100
13	60~65	1862 ± 1176	20~95
14	65~70	4718 ± 1532	90~100
15	70~75	5536 ± 370	55~95
16	75~80	4758 ± 696	85~90
Acoustic amplitude range takes the arithmetic mean ± one standard deviation RQD: Rock Quality Designation index [%] (source: Kao et al., 2020)			

算技術進行加值分析，產出本站特定深度音射振幅雷達圖、振幅隨深度之分布趨勢圖、區塊堆疊圖與類三維岩層結構顯影（如圖 7 所示），則可提供試驗人員對於地層組成架構、地質構造變化程度、水文地質特性等有更整體性的詮釋。以本孔案例來看，深度區間 No. 13 的剪裂泥係本孔最具討論性的區段之一；就結構而言，剪裂泥形成整體結構的束縮段，易造成地下水通路阻塞，由上下盤水力試驗水力傳導係數估算結果相差四個

數量級即可證明。而由振幅軌跡圖可觀察到剪裂泥區段上盤的結構完整度大致良好，但剪裂泥區段下盤似有弱面有轉動之跡象，其成因初步推斷有可能因河谷沖刷或解壓等應力作用影響所致，值得後續探討。而從區塊堆疊圖則可明顯觀察到剪裂泥區段上方塊體的幾何重心落在下方塊體邊緣外側，由靜力學的角度來看其形成的傾覆力矩過大，在此深度產生結構體破壞的趨勢相當大。

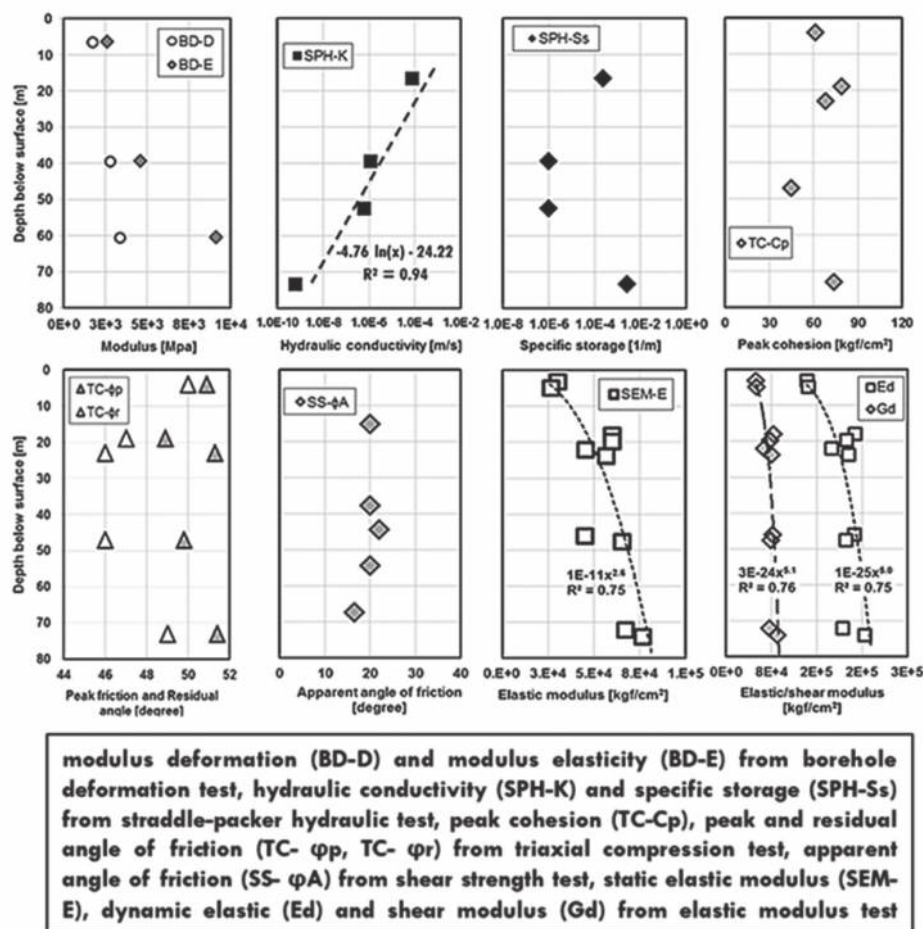


圖 6 現地與室內不同區段試驗結果與深度的關係彙整（來源：Kao et al., 2020）

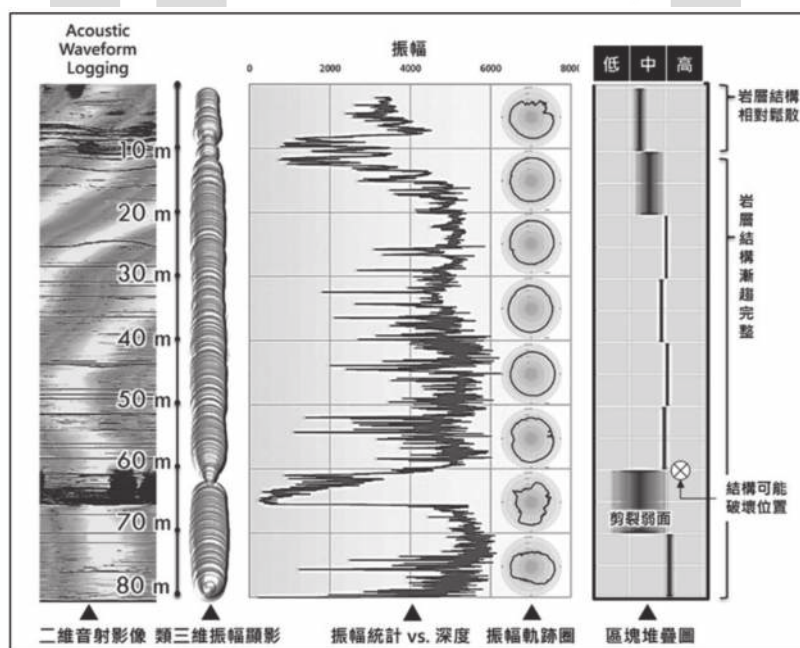


圖 7 音波反射振幅進行加值分析成果

四、結論與建議

井下影像探測乃現代岩盤工址地質調查的關鍵利器，一般來說無論光學式影像掃描與音射式造影，其施測目的主要係將鑽孔內部環景拉展外翻成平面影像，如此研究人員可按圖索驥盤點井下裂隙的分布與岩盤破碎狀況，或透過高階影像處理軟體識別不連續弱面的類型，建立鑽井構造位態的定量資訊。而一般平面影像在實務上仍侷限在岩層破碎度的判釋，且因缺乏立體深度感，故常有疊影、死角而造成辨識度的不確定，對於地層整體地質組成樣態、地質構造變化程度、水文地質特性之詮釋效果也相對有限，多半需要搭配其他井測紀錄和露頭調查，甚至交互比對數個鑽孔成果才得以達成。

本文旨介紹一項已通過專利審查的創新井下岩層特徵立體成像系統，並透過現地案例說明其應用方法。以成效面來說，該技術面可大幅提升井下岩層的成像效果，幫助試驗人員能更確切掌握地層結構變化。技術架構包括資料庫模組、運算模組、圖形產出模組與水文地質架構分析模組，執行概念包含啟動資料庫連續擷取音射式孔內攝影儀所接收到由井下岩層的孔壁反射而產生的反射振幅數據，藉運算模組以進行統計分析，並由圖形產出模組產生井下岩層特徵的立體成像，採用多重視深線索將平面強度分布的影像轉換成為具有深度的效果，系統可寫入任何可程式化邏輯裝置中。本創新技術內涵主要係針對連續性的反射振幅數據進行處理，透過簡單的運算，跳脫平面影像的限制並賦予深度的想像，在既有設備之功能環境下繪製出類三維（Semi-3D）岩體結構立體圖，其可與其它的調查結果交互比對，如本研究即發現到與岩石品質指標具有良好的一致性。

經由本文所述現地案例比對可知，本新創技術可提升岩層結構強弱、完整度、弱面分布判釋

的精準度，產出圖資可讀性和可理解性更好，能更貼近地層岩體樣貌實況。是故，建議未來可持續增加不同場址案例進行探討，包括探討施用不同泥漿密度所需之修正、區分裂隙介質或孔隙介質主控的滲流水路、蒐集更多資料如透水係數、波速及力學參數等，藉以尋求兩者間之關聯性，精進判讀經驗與技術，建立各種岩盤特性的預測指標，對於工程實務應用能提供莫大幫助。

參考文獻

- Chou, P. Y., Lo, H. C., Hsu, S. M., Lin, Y. T., & Huang, C. C. (2012). Prediction of hydraulically transmissive fractures using geological and geophysical attributes: a case history from the mid Zhuoshuei River basin, Taiwan. *Hydrogeology Journal*, 20 (6), 1101-1116.
- Chou, P. Y., Ke, C. C., Lo, H. C., Chen, P. J., & Hsu, S. M. (2016). Comment on "Determining transmissivity of fracture sets with statistical significance using single-borehole hydraulic tests: Methodology and implementation at Heshu well site in central Taiwan" [Eng. Geol. 198: 1-15]. *Engineering Geology*, 210, 231-232.
- Chou, P. Y., Lo, H. C., Chen, P. J., & Ke, C. C. (2020). "Apparatus and method for semi-three-dimensional rock formation imaging along the borehole sidewall" U.S. Patent 10,760,405B2, granted September 01, 2020.
- Chou, P. Y., Wang, C. T., Wu, N. C., & Kao, H. C. (2020). Identification of conductive fractures in perched formations with the use of a reformed packer test without well logging. *Hydrogeology Journal*, 28, 2275-2282.
- Deltombe J. L., & Schepers R. (2004). New developments in real-time processing of full waveform acoustic televiewer data. *Journal of Applied Geophysics*, 55(1-2), 161-172.
- Kao, H. C., Chou, P. Y., & Lo, H. C. (2020). An innovative application of borehole acoustic image and amplitude logs for geotechnical site investigation. *Acta Geophysica*, 68(6), 1821-1832.
- Lo, H. C., Chou, P. Y., Hsu, S. M., Chao, C. H., & Wang, C. T. (2012). Using borehole prospecting technologies to determine the correlation between fracture properties and hydraulic conductivity: a case study in Taiwan. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 17(1), 27-37.
- Matter, J. M., Goldberg, D. S., Morin, R. H., & Stute, M. (2006). Contact zone permeability at intrusion boundaries: new results from hydraulic testing and geophysical logging in the Newark Rift Basin, New York, USA. *Hydrogeology*

- Journal, 14(5), 689-699.
- Morin, R. H. (2005). Hydrologic properties of coal beds in the Powder River Basin, Montana I. Geophysical log analysis. Journal of Hydrology, 308(1-4), 227-241.
- Wacker, M. A., & Cunningham, K. J. (2008). Borehole geophysical logging program: Incorporating new and existing techniques in hydrologic studies. U.S. Geological Survey Fact Sheet 2008-3098, 4 p.
- Williams, J. H., & Johnson, C. D. (2004). Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies. Journal of Applied Geophysics, 55(1-2), 151-159.
- 周柏儀、吳年昌、王峻德、冀樹勇 (2019) 雙封塞水力試驗系統改良與量測技術之精進，中興工程季刊，145，頁 79-85。
- 周柏儀、羅鴻傑、陳柏瑞、柯建仲 (2018) 井下岩層特徵立體成像的系統及方法。中華民國發明專利第 626622 號。
- 翁孟嘉、冀樹勇、高憲彰、曾慶恩、張玉舜 (2006) 音射式孔內探測儀於岩石弱面分析之應用，中興工程季刊，91，頁 1-8。
- 鐘志忠、林志平、廖志中、唐禎國 (2008) 孔內聲波及光學造影儀於地質調查之應用，地工技術，115，頁 71-80。



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	柔性加勁檔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。

機率式火山危害度分析 —以大屯火山群之火山灰災害為例

謝寶珊* 林柏伸** 賴憶菁*** 蕭丁槐***

摘要

機率式危害度分析概念應用於地震及海嘯災害，在國內之經驗與技術已發展多年並日漸成熟，然機率式火山危害度分析（Probabilistic Volcanic Hazard Analysis, PVHA）在國內相關探討資料卻甚少，肇因於火山危害評估與地震及海嘯的危害評估目標較為不同，如地震的危害度評估係計算某場址於特定時間內發生指定地動值之超越機率，海嘯的危害評估則是計算場址在特定時間內發生特定波高之超越機率，而火山危害評估方面，由於火山災害類型本身就有區分類別，如火山灰、火山彈、火山泥流、熔岩流等，類型眾多之餘，但實際觀測樣本數少，導致建立火山災害傳播之影響程度預估模式評估不易，不像地震發生可利用豐富實測強地動記錄所建立之地動預估式進行預估，因此火山危害度評估之研究相對來說較少。本研究與國外具有相關經驗之 Lettis 公司（Lettis Consultants International, Inc）共同合作，進行火山灰、火山泥流及火山熔岩流之危害度分析相關研究，本篇以大屯火山群之火山灰災害進行案例分析，介紹整個建立火山灰之危害度曲線之評估程序。

關鍵字：火山危害度、蒙地卡羅、邏輯樹、大屯火山群

一、前言

國際原子能總署（International Atomic Energy Agency, IAEA）根據聯合國憲章運作，發布各種標準及準則（standards and guidelines）已六十餘年，2012 年召集一國際火山專家小組，編寫特別安全指南 SSG-21（Specific Safety Guide SSG-21）「核能設施場址火山災害評估（Volcanic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations（2012））」，目的除了在新設施選址應用外，該規範之概念和準則亦適用於評估現有設施之火山相關危害。

安全指南 SSG-21 內容提及定值法和機率法皆適用於火山危害度分析（第 2.20 節），其內容為「定值法使用一個或數個參數假設，評估最壞情境來評估火山災害。因此，他們使用門檻值來篩選特定現象，這些門檻值通常基於經驗證據，例如最大厚度或最大橫向擴散範圍的火山噴發物沉降。然而，這些方法因為資料不足，所以無法有合理評估模型去考慮參數及模型不確定性。而機率法考慮場址的所有潛在危害情境，將與每個情境相關的不確定性納入最終危害計算。這些分析通常考慮每個事件的發生率、強度和特徵，而這些參數都考慮其範圍（分布）而非單一值。定

* 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高級研究員

*** 中興工程顧問公司大地工程部地質師

值法和機率法的危害度評估都依賴於經驗調查和對火山發生過程的理論認識。盡可能同時使用定值法和機率法評估火山之能力和場址特定的火山災害，因為它們是互補的」。本研究以機率法概念，以歷史火山口位置，分析空間中未來可能的火山源噴發位置，並考量各參數的數值範圍，隨機組合火山源與參數，進行大量的火山傳播模擬，以符合有效的統計意義，分析場址在火山災害事件發生後，與火山源交錯、接觸或者覆蓋特定厚度的可能機率。大屯火山群可能引致的火山災害類型包括：火山灰、火山泥流、熔岩流及火山碎屑流，本研究以火山灰災害進行案例分析及介紹，建立火山灰之危害度曲線。

二、機率式火山危害度分析理論簡介

機率式火山危害度分析的概念即假設火山的發生及傳播係具有特定機率分布，計算特定場址在火山災害事件發生後，與火山源交錯、接觸或者覆蓋特定厚度的可能機率。火山危害度計算式如下：

$$v_i(t) = \iint_R \lambda(t) f(x, y) P_i(x, y) dx dy$$

其中 $v_i(t)$ 為評估場址與火山源接觸的年發生次數 (annual frequency of intersection)， $\lambda(t)$ 為單位時間單位空間內的火山事件發生率， $f(x, y)$ 為火山口之空間機率密度函數， $P_i(x, y)$ 為火山事件位置在 (x, y) 時且會接觸到評估場址的條件機率。

由上式可知，為求單位時間、單位空間內的火山事件發生率 $\lambda(t)$ 及火山口空間機率密度函數 $f(x, y)$ ，首先需建立時間模型 (Temporal model) 及空間模型 (Spatial model) (CRWMS M&O, 1996)。

(一) 時間模型 (Temporal model)

進行機率式分析時，需要了解可能影響研究區域設施的火山災害事件，並計算各災害事件的再現週期 (recurrence intervals)，通常利用歷史事件紀錄、文獻蒐集及野外調查來建立此時間模型。由文獻蒐集及野外調查決定各火山災害的事件數量，每單位時間火山事件的數量就是發生次數，通常以年發生次數 (頻率) 表示，其倒數即為再現週期。合理的再現週期需要學術理論基礎和資料證明來假設，可信的再現週期可由大量且高品質的定年資料支持。若缺乏完整或可靠的地質定年資料，可以假設一個均勻的 (uniform)、適用於研究區域內火山活動時期之發生率 (rate)。國際上多數執行 PVHA 時，皆使用不同品質的地質事件定年資料，整理各定年資料列表進行火山再現週期 (火山發生率) 評估。但若地質年代資料的數量足夠且品質好，那麼可以建立時間圖來計算火山復發的時間，包括：火山事件累積次數與時間的關係、熔岩流量的累積體積與時間的關係等。若有足夠的資料，則可以評估火山活動發生率是否隨時間而增加、減少、群聚或穩定 (均勻)。發生率的變化對於分析是重要的，因為 PVHA 的假設中「最近一次的火山活動紀錄」是評估火山活動在未來發生可能性的關鍵因子，而最近一次的火山活動證據也最有可能在地質記錄中被保存和露出。

(二) 空間模型 (Spatial model)

空間模型係利用空間統計方法，針對過去觀測到的或是野外調查推斷的火山口位置來評估未來可能發生的火山口位置。空間模型非用於預測未來火山的確切位置，而是根據觀察到的火山口分布提供空間密度 (每平方公里火山的估計數量) 圖。美國 Yucca Mountain 計畫中 (CRWMS M&O, 1996)，考慮兩種方法建立空間模型，一種是劃分區域的方法 (Zonation)，每個分區之

密度都不同；另一種是利用統計方法，根據地質調查成果建立之火山口分布圖，透過二元高斯或者 Kernel smoothing 方法建立密度圖，此種方法優於 zonation 之原因是不會在邊界處有突然的變化，而是平滑漸進的改變，較為合理。

（三）條件機率（Conditional probability）

PVHA 最後一部分即為 $P_i(x,y)$ ，為火山事件位置 (x,y) 時且會影響到評估場址之條件機率。此條件機率與火山災害設定、地形及場址相對位置有極大的關係。在早期， $P_i(x,y)$ 通常設定為 1，其意義代表場址就在火山影響範圍內，故接觸的機率為 100%。近期，如美國 Yucca Mountain 火山危害度分析計畫，其分析火成岩脈（Dike）與核廢料儲存庫（repository）接觸的條件機率，可隨著火成岩脈的長度（與儲存庫之間的距離）及方位角而改變。但因為火山資料及證據無法與地震資料相提並論，故需要用其他方法來得到其可能之火山傳播模型。本研究依據調查成果與蒐集各火山文獻，進行參數彙整，利用蒙地卡羅法，以數千個模擬之結果建立熔岩流淹沒和火山灰堆積之模式。

三、火山灰模擬參數邏輯樹

進行機率式火山危害度評估時，在選擇有限資料或可用資料輸入適當模型和模型參數時，將面臨相當大的不確定性，將這些額外的不確定性明確地納入機率危害度評估已成為一種標準做法。最明顯的例子就是用於機率式地震危害度分析（PSHA）方法（例如 Coppersmith and Youngs, 1986; EPRI, 1987; National Research Council, 1988, SSHAC, 1995）所需之參數均有其不確定性，此不確定性之原因有二，一為資料本身固有的隨機誤差分布，屬於自然的誤差特性；二為目前科學研究上之不確定性，將來隨著資料的累積

或是研究方法的突破可逐漸降低其誤差。

科學分析上常使用邏輯樹（logic tree）或決策樹（decision tree）來輔助分析各參數的不確定性對結果的影響。邏輯樹包含一系列的節點（nodes）與分支（branches），每一個節點代表任一參數或模式，由此節點延伸出的每一分支，代表此參數 / 模式的變化或可能性選擇，將各種選擇或變化適當的給予分配機率或權重，使各分支匯入上層節點的機率值總和為 1。

通常，權重在邏輯樹分支中具有兩種意義。第一種，權重代表了參數值的範圍或分布，例如，由於材料的地質年代和地表被侵蝕的不確定性，我們無法確認一次的火山事件期間所噴發出的噴發物體積，可以利用調查資料建立體積的最佳值和上下界限的範圍來表示，類似於常態或對數常態統計分布。這種類型的分布可以由邏輯樹的三個（或更多個）分支表示，Keefer and Bodily（1983）提出大多數分布可以用三個值可靠地表示：如中值權重設定 0.63，上下界值設定權重各為 0.185，可代表第 5 和第 95 百分位數（意即常態分布的正負 1.65 個標準差）。儘管在邏輯樹任一節點上可以使用大量分支來表示其分布，但是通常評估結果對於使用三個分支或是多於三個分支的差異不大（不敏感），故各節點通常使用三個分支來表示其分布之可能性。

權重的第二種設定方式則是表示對於兩個或以上的備選假設值的相對偏好或信任程度。例如，評估目前火山事件發生率的適當地質年代是不確定的，有兩種可能的選擇，可能是第四紀（過去 200 萬年）或上新世到第四紀（過去 500 萬年）。基於相關調查資料，分析者可以利用權重大小表示對這些參數的相對偏好。如果對分支選項沒有特別偏好，通常會為它們分配相同的權重（例如各 0.5）。雖然邏輯樹的權重是基於可靠資料的主觀判斷，但重要的是記錄下對於各參數的選擇理由和解釋以及

權重的分配，以便後續審查該過程之依據。

本研究針對特定火山事件特定分析場址建立模擬所需參數之邏輯樹，針對細部參數建立其參數不確定性。詳細可見後續說明。

為得到火山傳播模型 $P_i(x, y)$ ，本研究採用蒙地卡羅數值模擬方法，評估在空間隨機之火山口及不同參數組合下，可能產生的火山灰（tephra）傳播及沉降，在場址的累積厚度機率分布。模擬分析考慮參數包括煙柱高度（Plume Height）、噴發量（Eruption Mass）、火山灰粒徑分布（Grain size distribution）、風場剖面（Wind profiles）及噴煙柱隨高度變化模型（Plume model），下列將各別詳述參數之使用方法，並將上述參數以邏輯樹之呈現方式納入火山危害度分析，詳述如下。

（一）煙柱高度（Plume Height）

煙柱高度係根據適用的火山爆發指數（Volcanic Explosivity Index，簡稱 VEI）範圍和過去火山噴發事件的經驗觀測，設定上下限值，本研究使用之煙柱高度參考 Newhall and Self（1982）中 VEI 2 至 4 之範圍，即為 1 公里到 20 公里之間，並使用 Volentic et al.（2009）的對數均勻分布（log-uniform distribution）隨機採樣模擬噴柱高度。在本研究中，模擬之高度係為從火山口上方起算之煙柱高度，而每個模擬火山口位置之高度則是由數值高程模型擷取而得。

（二）火山噴發總量（Eruption Mass）

以 Volentic et al.（2009）（如下式）計算每個模擬噴發質量（ M_0 ，單位：kg）：

$$M_0 = T\rho\left(\frac{H_{max}}{1.67}\right)^4$$

其中 T 是以秒為單位的噴發持續時間， ρ 是沉積物的堆積密度（假設為 1000 kg/m^3 ）， H_{max}

是煙柱高度。

假設持續時間與 VEI 的噴柱高度相關聯（Newhall and Self, 1982），並從其表中擬定噴發持續時間是遵循均勻分布（uniform distribution），故噴發總量由上述設定之煙柱高度及噴發持續時間隨機採樣計算供後續模擬使用。

表 1 噴發持續時間與噴柱高度的相關性

Range for Duration (hrs)	Plume Height	Intensity of the Eruptive source
6—9	5-20 km	Plinian (普林尼式)
3—6	2-5 km	Vulcanian (伏爾坎寧式)
1—3	1-2 km	Phreatic (蒸氣噴發)

（三）火山灰粒徑分布（Grain size distribution）

火山灰之粒徑分布係使用模擬而得之中值（mean）和標準差（standard deviation）以對數常態分布（log-normal distribution）所建立而得。根據 Belousov et al.（2010）的描述，粒徑的中值取決於噴發源的強度，故火山灰粒徑中值亦與模擬之煙柱高度相關聯。參考 Volentic et al.（2009），粒徑分布之中值為均勻分布（uniform distribution），標準差 σ_ϕ 範圍為 2 到 3，其分布範圍基於適用的 VEI。

分析軟體（Tephra2）中粒徑尺度 ϕ 採用常態分布（ $\phi = -\log_2(d)$ ），其中 d 是粒徑大小（particle diameter），單位：公厘）。主要輸入 ϕ 的平均值（ μ_ϕ ）、標準差（ σ_ϕ ），以及積分之上下界（即 $\text{Min}\phi$ 和 $\text{Max}\phi$ ）。 μ_ϕ 和 σ_ϕ 值對於火山灰的堆積結果是敏感的，積分時 $\pm 2.5\sigma_\phi$ 應可涵蓋所有可能的粒度尺寸。

（四）風力剖面（Wind profiles）

評估火山灰傳播情形，需要風力分布，包括

海拔高度以上的風速（高度單位：公尺；速度單位：公尺/秒）以及不同高度之風向（單位：度）。本研究根據該地區可用的風速剖面隨機採樣，使用臺北所記錄之風力資料庫，時間涵蓋西元 2011 年至 2017 年，每天兩次，共包含 5,208 個風力剖面，其中風力剖面的風速和風向與海拔高度的關係如圖 1 所示。

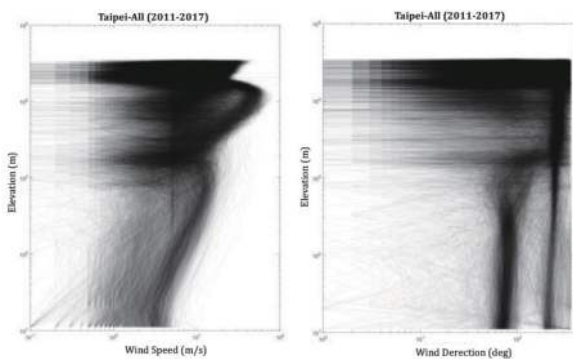


圖 1 2011 年至 2017 年臺北記錄的海拔高度與風速、風向關係圖

（五）煙柱模型（Plume model）

煙柱模型是由給定之粒徑大小對應煙柱高度可能之機率分布。此噴柱模型是採用 beta 分布（亦稱貝它分布，在機率論中，是指一組定義在 (0,1) 區間的連續機率分布），其由 2 個形狀參數 α 和 β 所表示， α 和 β 參數會改變分布曲線之形狀。在本研究中，煙柱模型是從圖 2 所示的範圍中隨機選擇，縱軸為噴柱高，橫軸為機率，對於該模型，

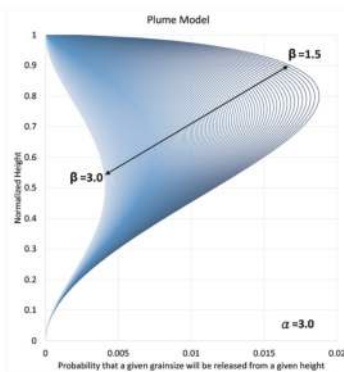


圖 2 用於火山灰堆積評估的噴柱模型範圍

α 值設定為 3，並且從 β 值 1.5 至 3.0 的均勻分布中隨機採樣。

以上模擬參數，若以邏輯樹圖展示，則如圖 3 所示。

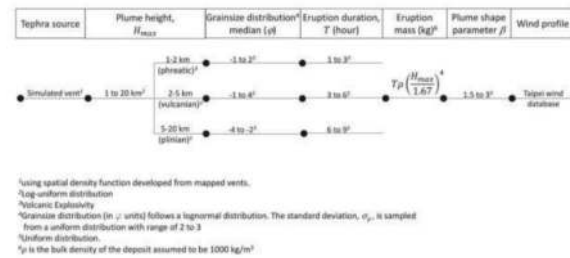


圖 3 火山灰模擬參數邏輯樹

四、火山口空間模型分析

安全指南 SSG-21 於第 2.19 節闡述了「能動（capable）」的火山或火山群的概念，即「（1）在重要設施的整個生命週期內，極有可能於未來活動的火山；（2）具有潛能發生火山災害進而影響重要設施之火山。」並於第 3.8 節內容說明「在危害評估中應該先一步的篩選掉不具備在評估場址產生火山危害之火山。」依據安全指南 SSG-21 第 2.19 節原則，透過陸域火山及海域火山島調查、火山情境評析、初始火山源生成及火山災害傳播模擬等成果，本研究進一步篩濾掉未來噴發潛能極低之火山與可能具有活動之火山但其因距離或是地形關係，而不會影響分析場址。其篩選原則簡述如以下四點：

- （一）活動潛能極低：基隆火山群依定年資料屬百萬年前活動之火山，且目前無後火山作用（溫泉、噴氣孔現象），岩漿活動後即已冷卻，無岩漿庫低磁的特徵，井下監測無火山活動訊息，顯示其再活動之潛能甚低。
- （二）缺乏地質證據：地質調查過程中及文獻資料無相關直接證據顯示特定火山災害存

在，且現地調查無火山爆發產物（如基隆嶼），因此不考慮熔岩流或火山灰等災害。

（三）火山源與場址空間分布位置：除火山灰外，各火山災害如熔岩流、火山泥流及碎屑流皆為地面型傳播，沿著地形低處流動，其流動距離與方位將決定是否影響至場址（如龜山島），因此可篩選掉距場址遠或不位於同一集水區之火山源。或是火山灰雖不受地形影響，傳播媒介為風，但隨著距離場址之距離增長，其可傳播之火山灰量有限（如彭佳嶼）。

（四）地形屏障保護：根據場址周圍地形判釋，部分場址位於山谷之間，兩側皆為山嶺，提供地形上的保護。

因此經由上述篩選原則，本研究篩濾掉基隆火山群、海域北方三島、基隆嶼及龜山島為非直接影響分析場址之火山，並以大屯火山群為主要火山源，其定年資料顯示為全新世活動之火山，具頻繁之後火山活動，地形上之火山形貌特徵顯著，監測資料顯示微震頻繁且噴氣化學分析具有岩漿來源訊號。而依地表地質調查成果指出，分析場址可能之火山災害以火山灰、熔岩流及火山泥流為主。

本篇後續將以大屯火山群及其火山灰災害進行機率式火山危害度分析。

由於大屯火山群非單一的火山，是由眾多亞群，具有多個大小不一火山所組合，因此火山噴發可能發生在此區域任一新的火山口（Vent），在空間分布上，不應該假設未來的火山災害事件只與現有的歷史火山口相關。因此利用中興工程顧問公司（簡稱中興公司）地形判釋及地質調查評估後之大屯火山群火山分布圖，透過 Kernel smoothing density function 建立密度圖，假設火山事件發生之地質過程是隨機性的，有可能發

生在岩漿庫上方的任何位置。因此在危害度分析中，納入火山口的潛在空間分布圖，考慮了潛在火山源位置的不確定性，作為分析的一部分。在美國 Yucca Mountain 計畫中，使用三種空間內插方法計算此空間模型，本計畫則選用 Kernel smoothing density function 方法，以過去（調查）火山事件的位置來預測未來火山事件，是一種非參數方法（Conner et al., 2012），空間密度估計的兩個重要部分是核函數（kernel function）及其帶寬（bandwidth）或平滑參數（smoothing parameter）。核函數（kernel function）是一種機率密度函數，定義了在選定的區域內未來火山口形成的機率（Conner et al., 2012）。

參考 Conner et al. (2012)，本分析使用中興公司之調查成果所圈繪的 41 個火山口，以漸近均方根誤差總和選擇器（Sum of the Asymptotic Mean Squared Error, SAMSE）產生最佳帶寬矩陣和相應之平方根矩陣，得到火山口之空間密度模型如圖 4 所示，其中紅色圓點為本計畫調查之 41 個火山位置，白色三角形為大屯火山群之竹子山、七星山和磺嘴山。空間密度模型表示發生各潛在噴發火山口，後續分析將以此空間密度模型，依每個 (x,y) 點的可能機率分布，在圖上隨機選取 10000 點，產生模擬所需的潛在火山口位置。

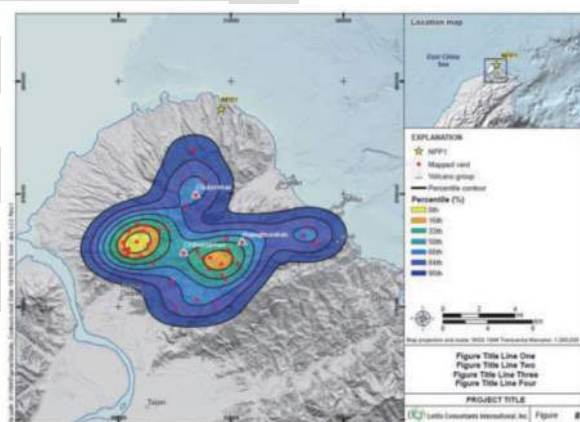


圖 4 大屯火山群火山事件發生機率之空間密度模型圖

五、火山活動發生率評估

火山的發生頻率通常是以過去的噴發事件來估算火山活動的發生率($\lambda(t)$)，後面我們會以火山事件的年發生率(λ)稱之，英文上則有多種說法，例如 recurrence rate, annual rate, rate 等。若紀錄火山爆發的目錄被認可是完整的，則年發生率(λ)可簡單地以火山噴發總數(N)除以時間範圍(T)來計算(Jenkins et al., 2012)：

$$\lambda = N/T$$

為決定研究區域大屯火山群(TVG)的年發生率，本研究決定由中興公司在大屯火山不同火山亞群野外調查中，所觀測到的熔岩流事件數量來進行計算。大屯火山群的五個火山亞群如圖5及表2所示，表2中對於每個亞群，包含最年輕和最古老的熔岩流的定年資訊，亦有觀測到的熔岩流數量(N)和觀測時間範圍，所謂觀測時間範圍(T)是由最年輕和最古老的熔岩流定年資料相減而得。假設火山事件的發生次數遵循泊松模型(Poisson model)。泊松模型提供用於評估遵循泊松過程事件發生機率的簡單框架，泊松過程是隨機過程的一種，描述在給定的時間區間內特定事件的發生數目是互相獨立的隨機變數。因此，我們假設所有表2的樣本其發生率 λ 是相同的，表示所有樣本是獨立的，且觀察到的變化是隨機統計變化。

表2 大屯火山群中不同亞群之熔岩流觀測資料

亞群名稱	最古老的熔岩流定年 (myr)	最年輕的熔岩流定年 (myr)	觀測到的熔岩流數量, N	觀測時間範圍, T (yr)
竹子山亞群	0.77	0.1	8	670000
大屯山亞群	0.75	0.11	10	640000
磺嘴山亞群	0.7	0.15	15	550000
七星山亞群	2.46	0.16	10	2300000
	0.76	0.26	3	500000
	0.4	0.13	2	270000
丁火朽山亞群	2.63	0.23	6	2400000

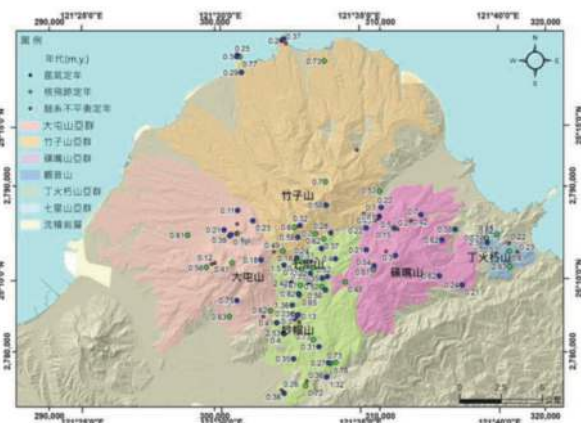


圖5 TVG各火山亞群分布圖

因此，依據表2的資訊，假設所有樣本來自五組不同的母體(populations)，這邊將利用統計方法，求得發生率 λ 之分布(中值及標準差)，以代入危害度分析計算。首先根據各亞群之熔岩流數量 N 除以該亞群的時間區間 T ，為每個亞群以樣本計算發生率的期望值 $E(\lambda)$ 。在統計時，假設最年輕的熔岩流時間為現今，因此最年輕的年齡設定為0。其中，遵循泊松模型，每個樣本觀測數量的預期值 $E(N)$ 與該樣本的觀測數量相同：

$$E(\lambda) = N/T, E(N) = N$$

$\sigma(N)$ 的為 N 的標準差，即泊松隨機變數； $\sigma(\lambda)$ 為 λ 的標準差：

$$\sigma(N) = \sqrt{N}, \sigma(\lambda) = \sigma(N) / T$$

使用 $E(\lambda)$ 和 $\sigma(\lambda)$ 計算變異係數 $cov(\lambda)$ ：

$$cov(\lambda) = \sigma(\lambda) / E(\lambda)$$

依上述統計公式，每個亞群樣本計算得到之發生率期望值 $E(\lambda)$ ，發生率標準差 $\sigma(\lambda)$ 和變異係數 $cov(\lambda)$ 皆列於表3中。接著將 $\sigma(\lambda)$ 的平均值和標準差轉移到自然對數空間，其中 $\mu_{\ln \lambda_i}$ 表示第 i 個亞群的平均發生率，由 $E(\lambda)$ 取自然對數而得， $\sigma_{\ln \lambda_i}$ 表示第 i 個亞群的發生率標準差(Benjamin and Cornell, 1970)：

$$\mu_{\ln \lambda_i} = \ln(E(\lambda)) ; \sigma_{\ln \lambda_i} = \sqrt{(\ln(1 + \text{cov}^2))}$$

計算結果如表 4。lnλ 的總平均值和標準差，即 $\mu_{\ln \lambda}$ 和 $\sigma_{\ln \lambda}$ ，使用以下方程式計算（Section B-6.0 of EPRI, 2013）：

$$\mu_{\ln \lambda} = \sum_i w_i \cdot \mu_{\ln \lambda_i}$$

$$\sigma_{\ln \lambda} = \sqrt{\sum_i w_i \cdot [(\mu_{\ln \lambda_i} - \mu_{\ln \lambda})^2 + \sigma_{\ln \lambda_i}^2]}$$

其中 i 表示獨立之亞群樣本， w_i 是每個亞群樣本的權重，這邊假設各亞群樣本具有相同之權重（即 $w_i = 1/7$ ）。式中 $(\mu_{\ln \lambda_i} - \mu_{\ln \lambda})$ 是模型偏差，用於量化每個樣本的平均值與總平均值的差異。 $\mu_{\ln \lambda}$ 和 $\sigma_{\ln \lambda}$ 等數值已列於表 4 中。

使用表 4 中的 $\mu_{\ln \lambda}$ ，計算發生率中值 $\hat{\lambda}$ ，為 $\exp(\mu_{\ln \lambda}) = 6.60\text{E-}06$ 1/yr。發生率中值的不確定性代

表了發生率的離散分布。在這種情況下，使用前述之三點近似法（three-point discrete approximation）（Keefer and Bodily, 1983），設定中值的權重為 0.63，第 5 和第 95 百分位數之權重為 0.185，可大致代表其值之分布（約常態分布的正負 1.65 個標準差）。使用表 4 中計算的 $\hat{\lambda}$ 和 $\sigma_{\ln \lambda}$ ，發生率的上下界（第 5 和第 95 百分位數）計算式為：

$$\lambda_{\text{upper branch}} = \hat{\lambda} \cdot \exp[z_{\alpha} \cdot \sigma_{\ln \lambda}]$$

$$\lambda_{\text{lower branch}} = \hat{\lambda} \cdot \exp[-z_{\alpha} \cdot \sigma_{\ln \lambda}]$$

其中 z_{α} 是標準常態分布的第 α 百分點。這裡 $z_{\alpha} = z_{0.05} = 1.645$ 。故發生率邏輯樹的上下分支可計算如下：

$$\lambda_{\text{upper branch}} = 2.65\text{E-}05 \text{ 1/yr}$$

$$\lambda_{\text{lower branch}} = 1.64\text{E-}06 \text{ 1/yr}$$

故本研究採用之火山發生率邏輯樹如圖 6 所示。

表 3 針對火山亞群樣本計算發生率 λ 各統計值

Sample	subgroup	E (λ)	E (N)	σ (N)	σ (λ)	cov (λ)
1	竹子山亞群	1.04E-05	8	2.83	3.67E-06	0.35
2	大屯山亞群	1.33E-05	10	3.16	4.22E-06	0.32
3	磺嘴山亞群	2.14E-05	15	3.87	5.53E-06	0.26
4	七星山亞群	4.07E-06	10	3.16	1.29E-06	0.32
5		3.95E-06	3	1.73	2.28E-06	0.58
6		5.00E-06	2	1.41	3.54E-06	0.71
7	丁火朽山亞群	2.28E-06	6	2.45	9.31E-07	0.41

表 4 計算 $\ln \lambda$ 的總平均值和標準差

Sample	subgroup	$\mu_{\ln \lambda_i}$	$\sigma_{\ln \lambda_i}$	bias ²	$\sigma_{\ln (\lambda)}^2$	$w_i [\text{Bias}^2 + \sigma (\ln \lambda)^2]$
1	竹子山亞群	-1.15E+01	0.34	2.06E-01	0.12	4.63E-02
2	大屯山亞群	-1.12E+01	0.31	4.95E-01	0.10	8.44E-02
3	磺嘴山亞群	-1.08E+01	0.25	1.39E+00	0.06	2.08E-01
4	七星山亞群	-1.24E+01	0.31	2.34E-01	0.10	4.71E-02
5		-1.24E+01	0.54	2.64E-01	0.29	7.88E-02
6		-1.22E+01	0.64	7.68E-02	0.41	6.89E-02
7	丁火朽山亞群	-1.30E+01	0.39	1.13E+00	0.15	1.83E-01

本研究亦利用表 2 中的每個火山亞群樣本，採用 Weichert (1980) 中的方程式 (11)，計算各亞群發生率之上下界範圍 λ_U 和 λ_L ，與邏輯樹之數值進行比較。圖 7 中三條直線（紅線、藍線及綠線）係依據邏輯樹（圖 6）三支，其代表不同亞群樣本組合後所計算之中值及上下分支，另外圓點則代表表 2 中每個亞群樣本分別計算之 λ 、 λ_U 和 λ_L 。可以發現，發生率邏輯樹的上下分支已大致涵蓋了從單個亞群樣本中所觀察到之差異，表示此邏輯樹應已考慮了大屯火山發生率之不確定性，後續將使用於危害度分析中。

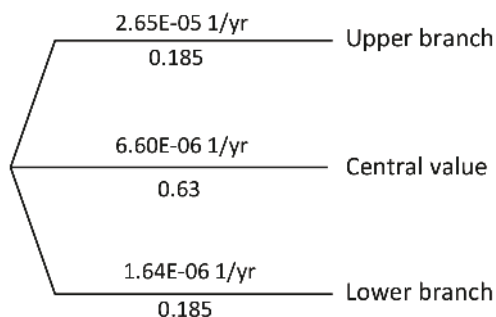


圖 6 火山發生率邏輯樹

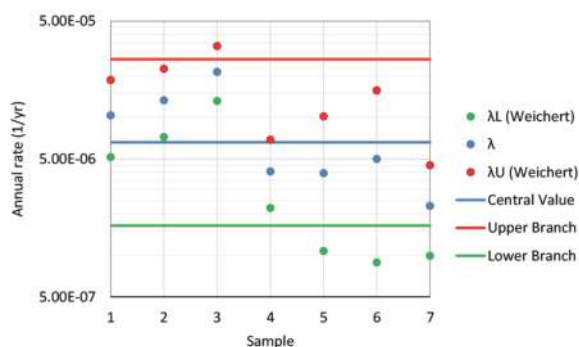


圖 7 發生率邏輯樹分支數值與各樣本分別計算的 λ 、 λ_U 和 λ_L 進行比較

六、場址火山危害度分析成果

依前述 PVHA 理論，要獲得評估場址與火山源接觸的年發生次數 (annual frequency of

intersection)，需要 (1) 時間模型： $\lambda(t)$ ，單位時間單位空間內的火山發生率；(2) 空間模型： $f(x,y)$ ，火山口分布之空間機率密度函數，及 (3) 條件機率（或稱災害發生之傳播模型）： $P_i(x,y)$ ，火山事件位置在 (x,y) 時且會接觸到場址的機率。本研究建立大屯火山空間模型及時間模型後，針對火山灰災害，建立參數邏輯樹，利用蒙特卡羅方法來模擬，隨機組合火山口位置與參數，針對鄰近大屯火山一測試場址進行數千至數萬次火山災害模擬，並依各個模擬結果，評估火山灰對分析場址造成的不同累積厚度相對應之機率為何，即火山灰危害度曲線代表場址在發生不同堆積厚度的超越機率 (Conditional probability of exceeding different thicknesses)。分析方法為利用空間密度函數所產生的 10,000 個火山口，並於每一個火山口位置，給予隨機的 4,000 組火山灰參數組合進行火山灰的飄散模擬，即可獲得 40,000,000 個火山灰於場址的堆積厚度結果，並以火山灰堆積厚度與其發生頻率，進而產生火山灰堆積超過各厚度之條件機率曲線，乘上火山事件年發生率即為火山灰危害度曲線。

為了計算超越機率曲線，首先利用模擬之結果構建所有火山灰厚度出現次數之直方圖。模擬期間共計算得到 40,000,000 個火山灰堆積厚度。這些值均勻分布在 $1e-7$ 到 $1e4$ 間的對數空間中，獲得的直方圖如圖 8 所示。若小於 $1e-7$ 的值皆被分在第一個 bin 中，其為在 $1e-7$ 處出現尖峰之原因。

使用圖 8 中火山灰堆積厚度直方圖計算火山灰厚度累積密度函數 (CDF)，而以 1 與其相減可得超越此火山灰堆積厚度之機率，累積密度函數及超越機率如圖 9 所示。

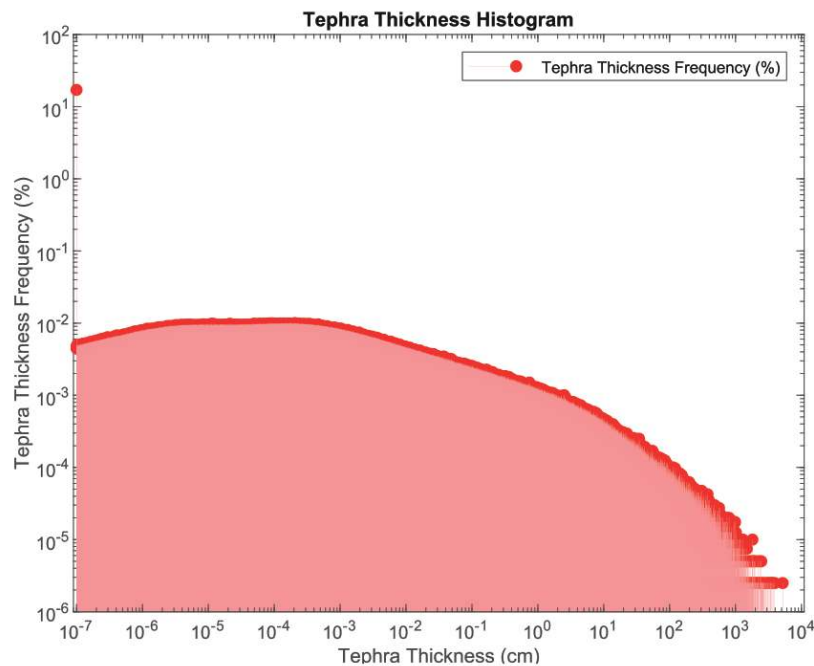


圖 8 火山灰堆積厚度模擬結果之直方圖

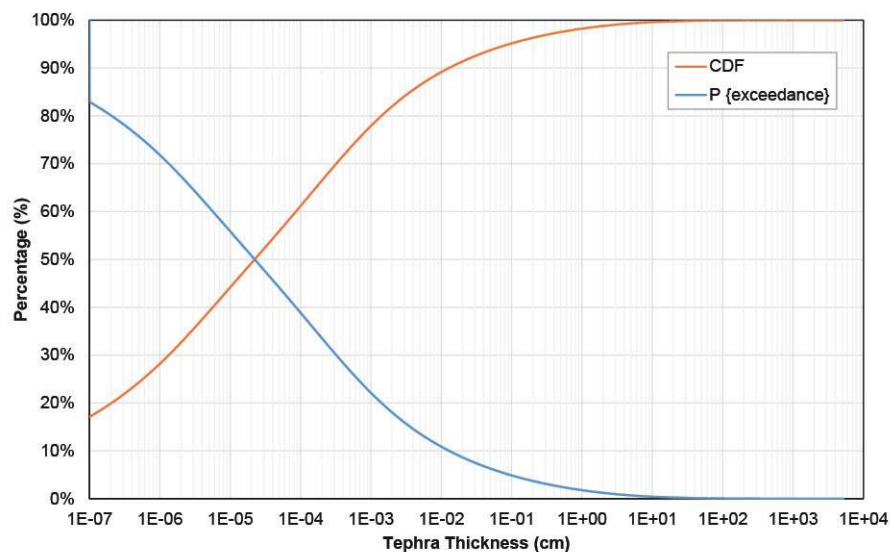


圖 9 分析場址火山灰厚度累積密度函數及超越機率分布圖

在分析場址之火山灰堆積超過各厚度之條件機率，如圖 10 所示，其中分析場址之平均火山灰堆積量約為 0.3 公分，其所對應之超越機率約為 3%。接著採用前述之火山事件年發生率 λ

（圖 6 中年發生率的邏輯樹），乘上圖 10 之條件機率曲線，得到包含不確定性之年超越次數（危害度曲線）計算火山灰不同厚度下之年超越機率，產製火山灰危害度曲線（如圖 11），其

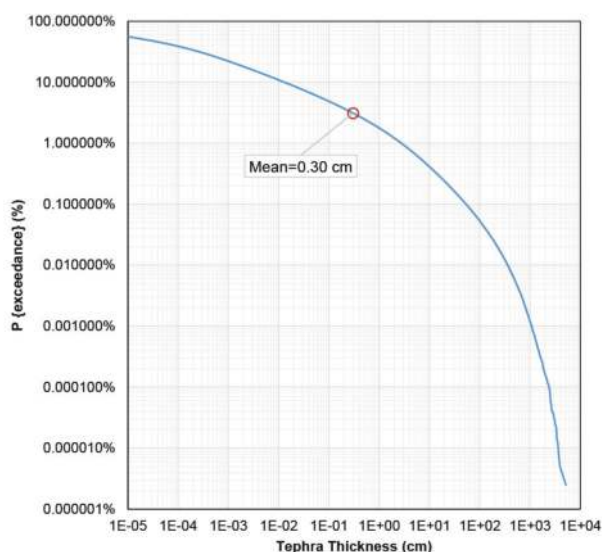


圖 10 分析場址火山灰超越機率曲線（顯示超過各厚度之條件機率）

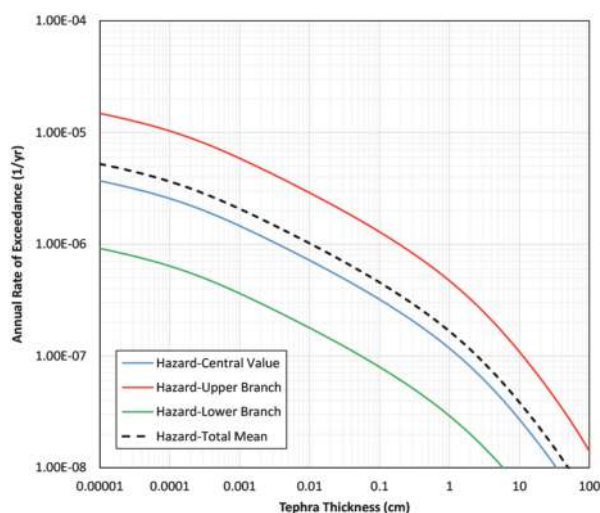


圖 11 研究場址火山灰堆積厚度危害度曲線

中黑色虛線為三個分支的加權平均值，即總危害度曲線。由圖中可以讀到，年超越機率 10^{-6} 的情況對應的火山灰堆積厚度為 0.1 公分，意即一百萬年中可能發生一次火山事件其火山灰堆積厚度超過 0.1 公分。製火山灰危害度曲線（如圖 11），其中黑色虛線為三個分支的加權平均值，即總危害度曲線。由圖中可以讀到，年超越機率 10^{-6} 的情況對應的火山灰堆積厚度為 0.1 公分，意即一百萬年中可能發生一次火山事件其火山灰堆積厚度超過 0.1 公分。

七、結論與應用

（一）本研究使用參數以既有文獻參數及中興公司計畫調查成果為主，並參考國外各火山之研究，以距離臺灣最近且同為島弧系統的日本火山噴發紀錄及文獻，依火山類型、噴發型式、主要岩漿或火成岩種類及火山爆發指數（VEI）等特性，篩選適合

臺灣火山活動及環境之相關參數，作為火山災害模擬之參數依據。

（二）機率式火山危害度分析概念即假設火山的發生及傳播係具有特定機率分布，由歷史火山口位置，分析空間中未來可能的火山源噴發位置，建立大屯火山空間模型；綜整各定年資料列表進行火山再現周期（火山發生率）評估完成時間模型，並考量各參數的數值範圍，隨機組合火山源與參數，以隨機火山口及參數組合，利用蒙地卡羅法，進行大量的火山傳播模擬，得到條件機率（或稱災害發生之傳播模型），並計算分析場址在火山災害事件發生後，與火山源交錯、接觸或者覆蓋特定厚度的可能機率。

（三）分析得到之火山危害度曲線或假想最大可能危害情節，期能作為修訂及改進各重要設施對火山災害之防範、保護與應變之依據。

(四) PVHA 將空間模型與時間模型相結合，未來可利用各權重因子建立未來可能發生的火山口位置分布及機率高低，可以讓空間模型更加有可信度，例如，過去火山口的位置可以根據其地質年代加權，活動年代較年輕的火山權重高；除年代以外的地質因素同樣納入考量，例如，具有活躍熱液噴口的區域可以強調是未來火山活動發生的高機率地區；地震活動度高（通常與熱液活動相關）的地區也需要重視；通過地球物理或監測顯示有岩漿生成和有深部儲存的區域也可給予較高的權重；即時的地震和熱液地球化學資料顯示可能有岩漿上升特徵，也應予以重視。

參考文獻

- Belousov, A., Belousova, M., Chen, C. H., & Zellmer, G. F. (2010). Deposits, character and timing of recent eruptions and gravitational collapses in Tatun Volcanic Group, Northern Taiwan: Hazard-related issues. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 191(3), 205-221.
- Benjamin, J. R., and Cornell, C. A. (1970). "Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers", McGraw-Hill Book Company.
- Connor, L.J., Connor, C.B., Meliksetian, K. and Savov, I., (2012). Probabilistic approach to modeling lava flow inundation: a lava flow hazard assessment for a nuclear facility in Armenia. *Journal of Applied Volcanology*, 1(1), p.3.
- Coppersmith, K.J., and Youngs, R.R (1986). Capturing uncertainty in probabilistic seismic hazard assessments within intraplate environments: Proceedings, Third National Conference on Earthquake Engineering, v1, p. 301-312.
- CRWMS M&O (1996). Probabilistic Volcanic Hazard Analysis for Yucca Mountain, Nevada. BA0000000-01717-2200-00082 REV 0. Las Vegas, Nevada: CRWMS M&O.
- ACC: MOL.19971201.0221.
- Electric Power Research Institute (1986). Seismic hazard methodology for the central and eastern United States: EPRI NP-4726, project 101-21.
- Electric Power Research Institute, EPRI (2013). Seismic Evaluation Guidance: Screening, Prioritization and Implementation Details (SPID) for the Resolution of Fukushima Near-Term Task Force Recommendation 2.1: Seismic EPRI, Palo Alto, CA: 2013. 1025287.
- IAEA (2012). Volcanic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. Specific Safety Guide No. SSG 21, Vienna.
- Jenkins, S., Magill, C., McAneney, J. and Blong, R. (2012). Regional ash fall hazard I: a probabilistic assessment methodology. *Bulletin of volcanology*, 74 (7), pp.1699-1712.
- Keefer, D.L., and Bodily, S.E. (1983). Three-point approximations for continuous random variables: *Management Science*, v. 29, p. 595-609.
- National Research Council (1988). Probabilistic Seismic Hazard Analysis: National Academy Press, Washington D.C., 97 p.
- Newhall, C. G., & Self, S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87 (C2), 1231-1238.
- Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC) (1995). Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: guidance on uncertainty and use of experts: U.S. Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-6372 and LLNL UCRL-ID-122160, sponsored by U.S. Department of Energy, U.S. Nuclear Regulatory Commission, and Electric Power Research Institute, pp.170.
- Volentik, A.C.M., Connor, C.B., Connor, L.J. and Bonadonna, C. (2009). Aspects of volcanic hazard assessment for the Bataan nuclear power plant, Luzon Peninsula, Philippines. *Volcanic and Tectonic Hazard Assessment for Nuclear Facilities*, pp.229-256.
- Weichert, D.H. (1980). Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70 (4), pp.1337-1346.

虛擬實境於工程管理之應用： 以輔助監造職安衛訓練為例

黃琬淇* 周淵清** 吳中期** 廖翊含** 許睿歆**

摘要

「滿足顧客的要求、落實知識管理、追求效益最大化、預防職業災害」為中興工程顧問公司（以下簡稱中興公司）的品質安衛政策，在預防職災部分，中興公司特別導入 ISO 45001 職業健康安全管理系統，並於民國 108 年取得第三方驗證，據以承諾建構一個消除危害及降低職業安全衛生風險的工作環境。依法規要求：對於進駐工地人員，應依據作業性質給予必要的安全衛生教育訓練；意即，就監造服務工作而言，須給予教育訓練以利人員能掌握工地可能發生的危害項目，及執行監造工作中需要檢查的安衛項目。為補強過去以文字、表格方式描述工地現場的狀況及職安衛檢查項目，常有自行想像以致於理解不佳或甚至錯誤的狀況，中興公司嘗試利用過去主要應用於展示工程規劃或設計成果的虛擬實境（VR）技術，依據工程管理部门集結各工地現場經驗彙整而得之職安衛檢查項目，建置監造職安衛虛擬實境教育訓練教材，並以此推動上機教育訓練，提高受訓人員正確辨識危害及採行適當消弭或降低危害措施的能力。產製過程與應用結果顯示，辦理監造職安衛虛擬實境教育訓練除可提升訓練成效外，還間接輔助了現行職安衛檢查項目的比對、檢討與確認，幫助工安檢查重點知識與經驗的留存，強化中興公司監造職安衛管理系統。

關鍵字：ISO 45001、虛擬實境（VR）、監造職安衛教育訓練

一、前言

工程顧問公司的各項專業服務項目中，最具危害風險的即為工程現場的監造服務工作。中興公司秉持「滿足顧客的要求、落實知識管理、追求效益最大化、預防職業災害」的品質安衛政策，對於勞工安全衛生高度重視，更於 2019 年取得 ISO 45001 職業安全衛生管理系統的第三方驗證。

依據職業安全衛生法第 5 條第 2 項及加強公共工程職業安全衛生管理作業要點第 9 條第 3 項

第二款：進駐工地人員，應依其作業性質分別施以從事工作及預防災變所必要之安全衛生教育訓練。而 ISO 45001:2018（CNS 45001:2018）附錄 A.6.1.1 提及：「使用新科技改進職業安全衛生績效」為改進職業安全衛生績效的選擇之一；又 2019 年國際勞工組織（International Labour Organization, ILO）亦提到：數位化與資通訊科技（digitalization and ICT）為影響職業安全衛生發展的科技之一。

整合前述概念，中興公司遂嘗試將虛擬實境

* 中興工程顧問公司研發及資訊部副經理

** 中興工程顧問公司研發及資訊部工程師

(Virtual Reality, VR) 技術應用於建置工程監造職安衛訓練教材，以基於工程管理專業經驗所彙整各種高風險、高重複性之工安與品管檢查項目為腳本，結合各式建模技術並與工地實景整合，建置具備施工現場臨場感的教材，藉以加強且落實現場作業人員的職前訓練，確保人員在進入現場作業時，能夠符合職業安全衛生之要求。

二、VR 技術於中興公司的應用

中興公司係於 2016 年購入首套 VR 設備，並進用專業人員進行內容開發；經過 4 年間的持續嘗試和精進，目前共歸納出三條發展軸線，分別為：勾勒願景、重現實景及訓練技職，如圖一所示。茲簡要說明三個軸線的目的與特色：

(一) 勾勒願景

即工程規劃與設計構想的實現。此部分採用 VR 之目的在於盡可能準確地傳達工程規劃與設計理念與構想，讓業主、民眾等利害關係者，能夠適切的了解提案內容，進而接受設計理念甚或聚焦議題，避免因為認知上的落差、溝通難以達意，繼而產生不信任等負面觀感。

除應用於工程規劃或設計概念的體現，中興

工程並應用 VR 進行人因工程的檢討，提升規劃設計成果的品質。

(二) 重現實景

即設計成果與施工過程之實景體現。每一次工程設計與監造作業的過程與結果，對於工程顧問公司來說，都是可貴的經驗傳承。尤其是有特殊意義的重大工程，透過 VR 完整而充分地回顧工程設計特色及施工管理的過程，對內可以提升團隊的榮譽感並建立知識傳承，對外則彰顯設計監造服務成果的品質保證以及能力展現。

為此，中興公司結合蘇花改工程計畫執行期間採用監造管理資訊系統 (PMIS) 之資訊，運用相關影像與工序資料的保存結果，以擴增虛擬實境 (Augmented Virtual Reality, AVR) 的概念打造白米景觀橋虛擬展示館；成功將 VR 技術應用於重現重要工程之關鍵工法及工序。

(三) 訓練技職

即施工現場危害預防之落實。在此係利用 VR 技術建置工地現場場景，加深監造同仁對於工地現場的了解，並透過提示字卡的核定，讓同仁熟悉工作場域內特訂工程項目的安全衛生檢查項目，藉以降低特定工程進行前、中、後的危害風險；相關成果與結論將於本論文後續章節進一步說明。



(一) 勾勒願景

(二) 重現實景

(三) 訓練技職

圖 1 虛擬實境 (VR) 技術於中興公司之應用：分三個軸線

三、監造職安衛虛擬實境教育訓練教材之建置與成果

(一) VR 技術與設備

VR 內容的製作流程可概分為兩部分：模型與仿真外觀建置及 VR 模組產生。茲簡要說明此兩部分作業重點，及目前於職安衛教育訓練教材建置時之應用方法。

1. 模型建立

模型來源可為 BIM 建模或影像重建建模；考量職業安全衛生教育訓練的重點為工程實場的了解與檢查要項的熟悉，且工安檢查之標的物許囊括工程機具及假設工程而非僅於工程主體，故模型建立以利用實場影像重建為主。然而，實場影像重建亦有其困難所在；為取得逼真的實景模型，過去主要是利用單眼相機連續單張拍攝後，再利用軟體建立模型，過程中會因為拍攝的角度、連貫性、清晰度，影響模型建立的速度和品質，侷限於取景人員的能力，以致無法大量且快速採集素材。

為改善實景素材蒐集的效益，中興公司去年起開始嘗試應用新一代的運動攝影機（GoPro HERO 9）作為取景設備，其感光元件尺寸加大、像素解析度大幅提升，故可藉其所拍攝的影片中，提取計算實景模型的照片。結果顯示，以此法計算出來的實景模型，與相機連續單張拍攝的

結果品質無分軒輊，但其操作簡單、裝置輕巧的特性，讓取景的工作能由現場人員執行，使得建立工地現場機具或假設工程的仿真 3D 模型，變得更加快速、容易且具有一定品質。

利用拍照或動態攝影蒐集到所需的影像素材後，則可進一步透過影像處理與建模專業軟體（Agisoft Metashape）完成模型建立與外觀建置，茲彙整模型建立作業之階段性對應成果示意如圖 2。

2. VR 模組產生

在模型製作完成後，則可利用遊戲平台開發軟體（Unity Pro）進行 VR 模組開發，主要分為三步驟：（1）匯入模型並製作外觀；（2）放置 VR 核心模組及安裝控制輸入模組；（3）測試及發布所開發之場景內容。

除了模型建立所需之素材蒐集作業係採用新設備，改善 VR 產製流程外，中興公司另購入新一代的 VR 一體機（Oculus Quest 2）作為體感設備，降低職安衛訓練教材操作的門檻，使 VR 教材能夠更有效地推廣。VR 一體機的特點為：（1）追蹤頭盔動態的系統改為由機身內部向外追蹤，無須光塔定位、單一設備方便攜帶且戴上即可使用；（2）可擺脫繁多線材單機運作，亦可連結電腦執行耗效能的逼真內容；（3）使用 Android 平台，開發上無縫接軌手機 APP 開發流程，未來可望更易普及。

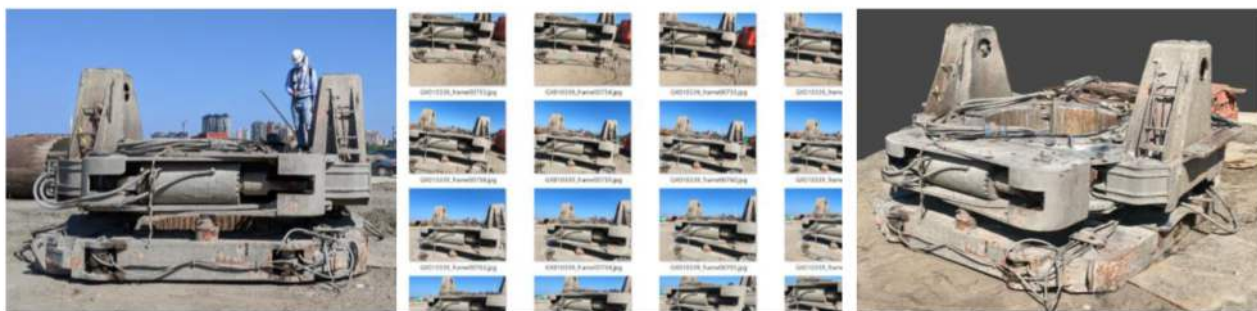


圖 2 職業安全衛生教育訓練教材素材蒐集、影像處理及對應之實景模型建置成果

(二) 監造職安衛 VR 教育訓練教材建置說明

前項主要是針對模型建立與模組產生等 VR 應用技術作說明，欲應用至監造職業安全衛生檢查專業主題時，則有賴工安檢查專業知識的導入，以確保教材製作的品質及效率。為此，中興公司研資部在 VR 教材模組產製之初，即與需求部門及工程管理部密切合作，基於各在建工程之監造經驗，依據分項工程特性及施工流程確認各工安檢查項目及需檢查之標的物，再就人員移動模式與檢查邏輯等整理成範例腳本，如圖 3 為基樁工程工安教育訓練教材腳本，作為部門提出 VR 工安教材製作需求、準備腳本時的參考。

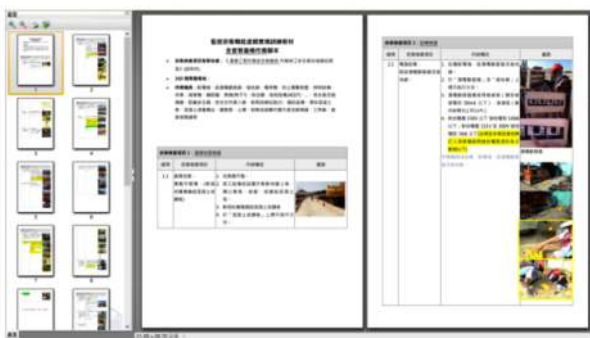


圖 3 職業安全衛生教育訓練教材腳本

有腳本為基礎，則相對較不熟悉工地實務的 VR 製作技術人員，可先根據各檢查項目文字與照片，評估實景模型製作所需，進而依循工管部掌握之各工地工程施作進度，自行亦或請求工地人員協助現場取景，而後據以建立模型與場景、完成該檢查項目的 VR 程式。至此，所完成的初版成果，透過討論會議邀集公司考核部職安衛系統稽核人員逐項進行確認，方成為正式上線服務的教材版本。完整教材製備分工流程如圖 4。

(三) 監造職安衛 VR 教育訓練教材之應用

根據前述流程製作完成之職安衛 VR 教育訓練教材，則可供各需求工地及部門進行申請運用。

申請的程序主要同本公司簡報設備借用程序，透過系統線上登記後，通知 VR 設備及教材管理人員於需求時間內備妥設備出借。

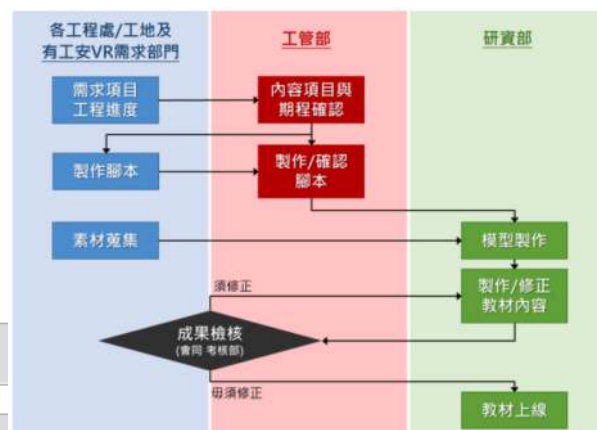


圖 4 職業安全衛生 VR 教育訓練教材建置分工流程

目前可供教育訓練用的設備係以整組借用為原則，出借內容包括：存有 VR 模組的電腦主機、VR 一體機、相關線材等；租借後實際操作狀況如圖 5。結果顯示，一體機的操作簡單，各單位人員僅在借用時由技術人員給予 10 分鐘以內的說明（檔案位置與開啟方式），即可在攜帶設備回工地後完成教育訓練，具體達成推廣與應用之功效。



圖 5 職業安全衛生 VR 教育訓練應用實況

四、結論與建議

本論文係針對中興公司導入 VR 技術於工程職業安全衛生教育訓練的過程、重點內容與實際應用進行說明，可獲致之結論與建議如下：

- (一) 相較於過去以文字、表格方式描述工地現場的狀況及職安衛檢查項目，以 VR 技術製作監造職安衛訓練教材，確實能夠幫助受訓的作業人員於從事相關作業前，即一定程度地掌握實場狀況，藉此增進工安檢查技能，降低職業安全危害發生的機率。
- (二) VR 監造職安衛訓練教材的製作技術可分為實景模型與 VR 模組製作兩大部分。不同於過去以單眼相機為取景設備、須動用專業人力與耗費較長時間，中興公司現已改採運動攝影機為取景設備，具有輕巧且簡單易操作等特質，讓建模素材蒐集作業可內化為日常工地巡察的作業項目之一，確實加快建模與接續產出 VR 模組的效率。
- (三) VR 模組製作的速度與品質與腳本有密切關聯，為此，中興公司監造職安衛訓練教材腳本內的檢查項目、標的物與場景等，都是經過需求部門與工程管理部门的共同彙整與檢討後完成；各式工程之安全衛生檢查項目與目的、執行檢查的標的物與位置，及檢查的方式等，在腳本整理過程中即被重複檢討與驗證。意即，各工程職業安全衛生檢查腳本定稿，即同時具備中興公司監造職安衛經驗保存與傳承的重要價值。
- (四) 目前所開發之 VR 監造職安衛訓練教材，使用時之配備需求僅為 VR 一體機和電腦主機。相較於過去還需要設定外置定位器的 VR 設備，一體機開機即用的簡易操作模式，大幅降低使用障礙，實現了無須 VR 技術人員也可流暢操作的期待，大幅提高

教育訓練教材的接受度以及開發效益。

- (五) 透過新的資訊科技、新型設備及應用模式，成功整合不同專業部門與內外業同仁，進行相關文字資料的蒐集與確認、素材的攝影與整理，VR 模組製作與成果確認，快速且大幅提升新技術應用的廣度與成效。
- (六) 為確保 VR 職安衛教育訓練施行之收效，中興公司目前已著手製作監造職安衛訓練測驗模組。不久的將來即可望藉由 VR 與電腦操作兩種方式，讓完訓同仁進行測驗、驗證學習成效。
- (七) 中興公司 VR 職安衛教育訓練現於工地推動時，屢獲業主及廠商熱切表達參與意願，並於實際操作後給予高度肯定及支持。未來俟相關模組化的內容更加完備後，可將業主及施工廠商人員納入共同進行訓練，擴大服務及影響層面，讓 VR 教材製備的效益最大化，以期全面防止工地的職安衛災害，確實保障工程人員安全與健康。

參考文獻

- International Organization for Standardization (2018) ISO Standard No. 45001: Occupational health and safety management systems - Requirements with guidance for use. <https://www.iso.org/standard/63787.html>
- 職業安全衛生法，法務部全國法規資料庫 (2019) <https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawHistory.aspx?pcode=N0060001>
- 加強公共工程職業安全衛生管理作業要點 (2014) 勞動部勞動法令查詢系統 <https://laws.mol.gov.tw/FLAW/>
- International Labour Organization, Safety and Health at the heart of the Future of Work: Building on 100 years of experience (2019) ISBN: 978-92-2-133152-0 (web pdf) https://www.ilo.org/safework/events/safeday/WCMS_686645/lang--en/index.htm
- 黃琬淇、周淵清、許睿叡、廖翊含、周頌安 (2021) 虛擬實境技術於工程實務之應用，土木水利雙月刊，第四十八卷第一期，pp.1-5。
- 周淵清、陳宜民 (2019) BIM 結合 VR 之工程應用，中興工程季刊，第 145 期，pp.15-20。

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：louis@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	雙封塞水力試驗測量裝置	新型第 M 418283 號	台灣	新型
2	岩盤入滲量測裝置	新型第 M 418937 號	台灣	新型
3	自動化地表滲水量測裝置	新型第 M 420684 號	台灣	新型
4	消能型金屬接合板消能機構	發明第 I 449832 號	台灣	發明
5	氣體採樣裝置與氣體採樣方法	發明第 I 522605 號	台灣	發明
6	高濃度藻類的污水培養裝置與方法	發明第 I 534103 號	台灣	發明
7	感測裝置及土石流監測系統	新型第 M 550399 號	台灣	新型
8	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 I 617357 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 I 626622 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 I 676151 號	台灣	發明
20	分離式封塞水力試驗測量系統	新型第 M 586745 號	台灣	新型
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
22	水砂盒	新型第 M 594123 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
29	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
30	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	不連續鋼板圍束鋼筋混凝土連接梁	發明第 I 737413 號	台灣	發明

放射性核種吸附模型應用之探討

林英傑 * 林伯聰 **

摘 要

本研究主要討論不同的吸附模型以及傳輸模式對於放射性核種傳輸的遲滯特性影響。目前國內外核廢料處置相關安全分析報告中，大多數報告在評估核種傳輸過程中，採用分配係數法（Distribution coefficient method）模擬放射性核種在不同特性的障壁系統內遲滯的現象。然而近年來國際上也逐漸開始透過地球化學傳輸模型（Geochemistry transport model）或是改良型的分配係數法來模擬放射性核種傳輸分析，希望能夠更準確地描述放射性核種傳輸的過程。本研究將分別採用分配係數法以及地球化學網路模型（Geochemistry network model），對於國內達仁鄉低放射性廢棄物建議候選場址之規劃設計，進行工程障壁系統放射性核種傳輸模擬，分配係數法主要採用 GoldSim 模式配合障壁系統相對應之分配係數進行放射性核種傳輸模擬，另外使用 HYDROGEOCHEM 模式配合地球化學網路模型進行放射性核種傳輸模擬，模擬的放射性核種分別是 C、Ni 以及 I。在模擬過程中針對於兩種截然不同的分析模式進行討論，從參數蒐集、模型建立到完成模擬一連串過程進行討論，並就目前國內發展現況進行建議。

關鍵字：放射性核種、分配係數法、地球化學網路模型、GoldSim、HYDROGEOCHEM

一、前 言

在處置設施安全評估當中，透過核種傳輸模擬，可以瞭解在不同情節下，對於生物圈可能產生之影響為何。然而在進行核種傳輸模擬時，工程障壁以及天然障壁對於核種的遲滯的能力是主要影響因素之一，目前主要評估方式為透過量測及分析瞭解不同材料對於核種的遲滯能力，並且將遲滯能力量化為分配係數（Kd），透過分配係數的概念可以在核種傳輸模擬時模擬不同障壁材料對於核種傳輸時的遲滯影響。除了透過分配係數的概念來進行核種傳輸模擬外，也可以將處置設施及周圍地球化學環境之影響也納入考量，

因為分配係數值非常容易受到環境變數影響而改變，例如環境溫度、水質酸鹼性以及氧化還原電位等，因此在長期核種傳輸模擬時，可能會遭遇到地下環境改變或是工程障壁材料對於周遭環境之影響，此時採用固定分配係數值，便無法準確評估核種傳輸的過程。為了更深入瞭解處置設施地下環境可能對於分配係數之影響，本研究將採用兩種不同模式，分別評估固定分配係數以及受環境影響分配係數之核種傳輸之差異性。處置設施安全評估當中，透過核種傳輸模擬，可以瞭解在不同情節下，對於生物圈可能產生之影響為何。然而在進行核種傳輸模擬時，工程障壁以及天然障壁對於核種的遲滯的能力是主要影響因素之

* 中興工程顧問公司核能後端專案工程師

** 中興工程顧問公司核能後端專案計畫經理

一，目前主要評估方式為透過量測及分析瞭解不同材料對於核種的遲滯能力，並且將遲滯能力量化為分配係數（Kd），透過分配係數的概念可以在核種傳輸模擬時模擬不同障壁材料對於核種傳輸時的遲滯影響。

在本研究中將運用 GoldSim 模式以及 HYD-ROGEOCHEM 模式（以下簡稱 HGC 模式）分別採用分配係數法（Kd）以及地球化學網路模型來進行達仁鄉低放射性廢棄物建議候選場址案例分析，透過分析過程檢討目前採用之分析方法以及分析模式其優劣處，並提出建議。

二、分析情節

台電公司（2020b）「低放射性廢棄物最終處置建議候選場址安全評估報告」對於國內 2 處建議候選場址之處置系統進行詳細說明與介紹，本研究僅就達仁鄉建議候選場址分析情節進行說明與討論。

（一）達仁鄉建議候選場址設施說明

達仁鄉建議候選場址採用坑道式處置概念，利用坑道內設置的多層工程障壁系統，搭配具有一定深度的天然障壁所組成的多重障壁，將低放射性廢棄物與類生活環境隔離，並盡可能將核種圍阻在障壁系統內，確保核種傳輸至人類生活環境時，其活度已衰減至不會對人類與環境造成危害的程度。達仁鄉建議候選場址之低放處置場，包括位於地表下之處置坑道區和地表上之輔助區，其平面配置如圖 1 所示。

整個系統包含了處置坑道區以及輔助區，其中處置坑道包括 1 條基礎型處置坑道、12 條混凝土窖型處置坑道，以及 2 條高阻水型處置坑道。基礎型處置坑道用以處置盛裝於 55 加侖桶且具有良好固化品質的 A0 類低放射性廢棄物，以及盛

裝於 HPCC 的 A0 類和 A1 類低放射性廢棄物，混凝土窖型處置坑道用以處置基礎型處置坑道以外之 A0 類和 A1 類低放射性廢棄物，高阻水型處置坑道則用以處置 B、C 類低放射性廢棄物。

輔助區規劃於進出處置坑道區的通行隧道出入口附近，主要設施包括接收大樓、行政大樓、職安大樓、車輛與機具維護工廠、污水處理廠、空調室、通風機室、警衛室和接收港等。

（二）分析情節說明

本研究採用台電公司（2020b）所建立之基本情節作為分析案例。依據達仁鄉建議候選場址的位置、處置概念、工程障壁系統和周邊環境狀況，以低放處置場封閉後最可能發生的設計情節為基礎，建構核種傳輸概念模型，如圖 2 所示。當低放處置場封閉後，地下水漸漸浸潤工程障壁系統並達飽和狀態，直到盛裝容器失效後，核種開始溶解於水中，藉由擴散、平流和吸附等作用，在填充層、處置窖、阻水層、回填層以及坑道結構等工程障壁間傳輸。當核種傳輸至擾動區外圍岩體時，受區域地下水流場影響，核種傳輸機制為平流和延散作用。核種隨著地下水流動而逐漸遠離處置坑道區，最後將流入鄰近河川或海洋，並依不同的曝露途徑使劑量在人體內累積。

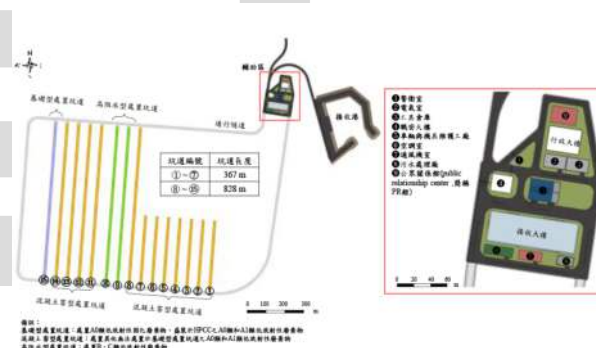


圖 1 達仁鄉建議候選場址低放處置坑道配置圖

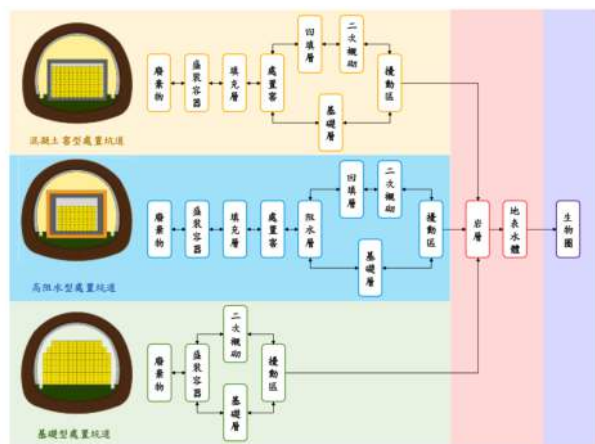


圖 2 達仁鄉建議候選場址之核種傳輸模型

考量三種處置坑道當中，混凝土窖型處置坑道以及高阻水型處置坑道為較重要的處置坑道。因此，本研究將分析這兩個坑道，模擬時間為2,000年。

三、核種吸附模型

本研究採用了分配係數法以及地球化學網路模型來描述核種在傳輸過程中，受到障壁材料遲滯的現象。分配係數法相關理論可參考 Marsily (1986) 以及 Bear (1979)，兩篇文獻對於傳輸方程式中考量核種衰變以及核種遲滯等理論有詳細說明以及推導，同樣地球化學網路模型可參考 Yeh (2012)，該文獻對於地球化學網路模型模擬理論以及如何與地下水傳輸模擬結合進行了完整說明。以下就兩個方法的概念進行簡介。

(一) 分配係數法

分配係數法主要概念為透過求得分配係數 K_d 來描述當物種在溶液與礦物中處於平衡狀態時，礦物中物種被吸附的量與溶於水中量的比值， K_d 公式如式 1 所示：

$$K_d = \frac{C_{ads}}{C_{eq}} \quad (1)$$

其中，

C_{ads} = 吸附平衡後吸附材料中核種濃度 [mg/g]。

C_{eq} = 吸附平衡後溶液中核種濃度 [mg/L]。

分配係數法並不考慮物種在該水質環境中，所受到遲滯的機制，直接考慮在該環境下，所有機制總合的結果。因此， K_d 值為該物種在該環境下之結果。

(二) 地球化學網路模型

地球化學網路模型則是考量，透過對應之地球化學反應式及平衡常數去描述實際可能發生之反應，因此需要建立完整的物種被遲滯的相關化學反應，包含了可能有水項錯合反應 (Aqueous complexation reaction)、吸附反應 (Adsorption reaction)、陽離子交換反應 (Cation exchange reaction) 以及沉澱溶解反應 (Precipitation dissolution reaction) 等，透過這些反應式可以描述物種是受到何種機制而被遲滯，且可描述在不同水質環境下之結果。

本研究對於上述兩種不同的吸附模型，分別採用 GoldSim (2018) 以及 HYDROGEOCHEM (2012) 模式來進行討論，台電公司 (2020b) 目前在低放射性廢棄物處置設施安全評估所採用之分析方法為使用 GoldSim 程式配合分配係數法進行核種傳輸模擬，而這種分析方法也是目前國際上主流之方式，障壁材料對於放射性核種遲滯的能力可透過一系列實驗室實驗，量測各核種在現地環境下的 K_d 值，便可快速進行核種傳輸模擬與分析，本研究所採用之 K_d 值為台電公司 (2020a) 進行之試驗成果，相關數據請參考表 1。

然而目前分配係數法的侷限性也受到了許多質疑與挑戰，例如長期演化場址周遭地化環境可能改變或是多種不同障壁材料可能造成局部區域內地化環境劇烈改變等，造成 K_d 值產生不適用之情況，另外以批次試驗獲得的 K_d 值，大多在

很高的固液比條件下獲得，而實際上核種發生洩漏情況下，實際核種遷移環境是極低固液比，因此實驗室中獲得的 K_d 值，未必適用於現地狀況。因此，目前國際上開始研究使用地球化學網路模型來取代分配係數法，然而使用地球化學網路模型必須蒐集更多資料，同時在模擬上也更為複雜且耗時，所以目前進展緩慢。本研究引用台電公司（2020c）核種吸附參數模擬報告所建立之地球化學網路模型，整個模型相當龐大，故不再此一一列舉。

表 1 核種於地下水環境中對各材料之吸附分配係數彙整表

吸附材料	核種分配係數 (L / kg)		
	C	Ni	I
混凝土	18.8	-	1.3
MX-80	6.6	105.9	-
硬頁岩	10.9	20,878	0.1

資料來源：台電公司（2020a）。

四、數值模型建立

本節將介紹 GoldSim 模式以及 HGC 模式分別採用分配係數法以及地球化學網路模型建立分析模型，詳細相關模式設定與參數請參考台電公司（2002c）文獻，受限於文章篇幅，本節僅有初步介紹。

（一）GoldSim 模式

GoldSim 模式依據達仁鄉建議候選場址的處置概念、工程障壁系統和周邊環境狀況，建構核種傳輸概念模型，如圖 3 所示。配合 GoldSim 軟體的設計概念，分析前須先將達仁鄉建議候選場址的核種傳輸模型進行合理簡化，假設以 1 個處置窖為 1 個分析單元，將處置窖內的廢棄物、盛

裝容器和填充層視為廢棄物體，基礎層則視為回填層的一部分。以前述建立之核種傳輸概念模型為基礎，於 GoldSim 中建置之數值分析模型如圖 4 所示，區分為源項和工程障壁系統，途中一共有兩種不同坑道類型，分別為混凝土窖型與高阻水型坑道，主要差異為高阻水型坑道會多一層膨潤土作為阻水之用。

後續便依圖 4 所建立之模型將各項的設定參數分別輸入。主要輸入之參數有源項以及工程障壁兩大類，設定項目如表 2 所示，廢棄物體以及障壁材料參數主要為廢棄物罐相關之材料參數設定，包含了乾密度、孔隙率、擴散係數、通過流量以及分配係數等，源項活度為廢棄物體內核種初始活度資料，詳細之數據請參考台電公司（2020c）報告。

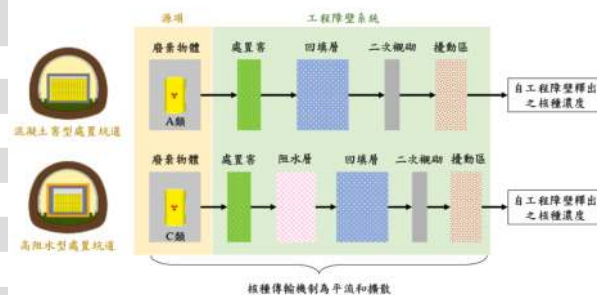


圖 3 GoldSim 核種傳輸概念模型

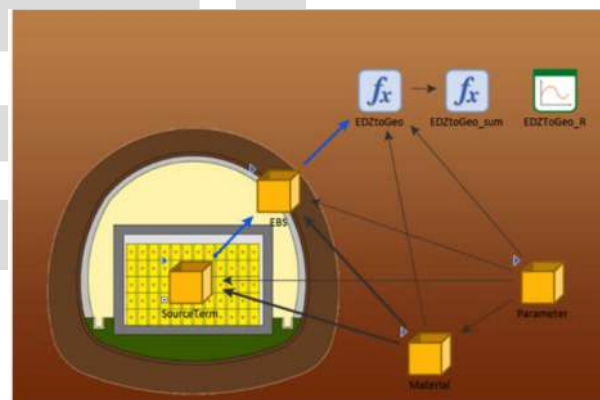


圖 4 GoldSim 數值分析模型

表 2 GoldSim 數值模型設定項目表

項次	源項	工程障壁
1	廢棄物體材料設定	障壁材料參數設定
2	廢棄物體傳輸參數	障壁材料傳輸參數
3	源項活度	—

(二) HYDROGEOCHEM 模式

本節將說明如何以 HGC 模式，建立達仁鄉建議候選場址核種遷移數值模型，主要包含了數值模型、網格生成、水文地質參數以及地球化學模型等。

圖 5 與圖 6 分別為達仁鄉建議候選場址混凝土窖型與高阻水型坑道示意圖，將以此為依據進行數值模型建立，模擬範圍為單一個處置窖體，大小為 40m×40m×8.1m 的區域，數值模型完成建置之後，便可進行網格建置，網格成果如圖 7 與圖 8 所示，本研究採用了非結構性網格來進行分析。

工程障壁材料的參數包含了乾密度、孔隙率、擴散係數以及水力傳導係數等等均與 GoldSim 模式使用相同參數，除了 GoldSim 模式是使用給定的流量而非真正模擬地下水流場。

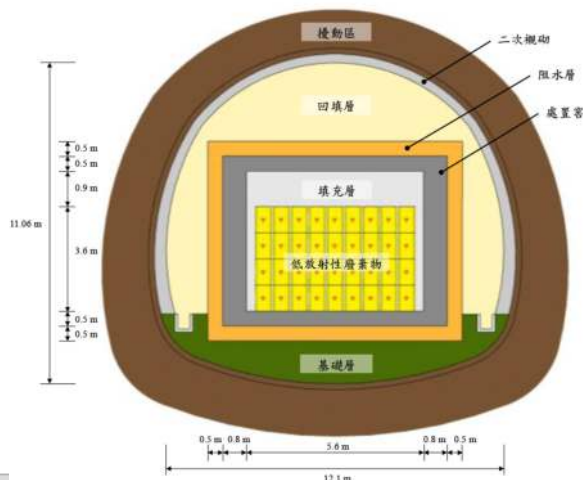


圖 6 高阻水型處置坑道工程障壁系統示意圖

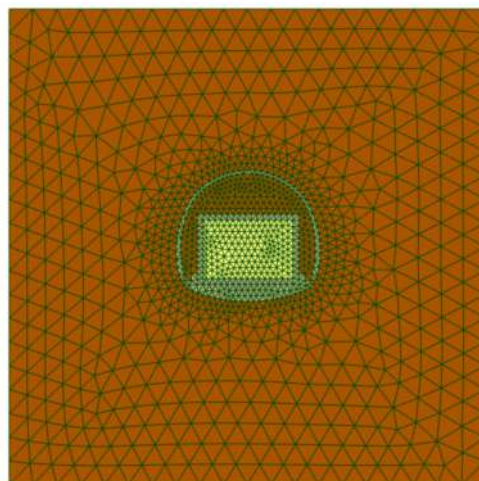


圖 7 混凝土窖型處置坑道網格示意圖

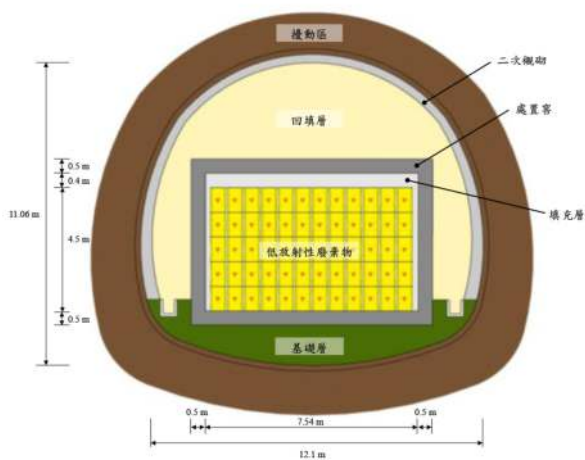


圖 5 混凝土窖型處置坑道工程障壁系統示意圖

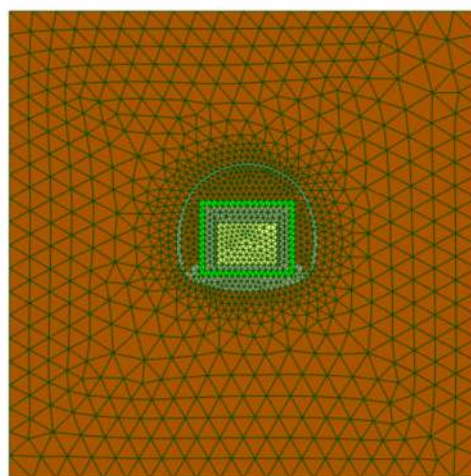


圖 8 高阻水型處置坑道網格示意圖

HGC 模式採用地球化學網路模型來描述核種被遲滯的現象，因此必須建立適當的地球化學網路模型，本研究採用日本核燃料開發機構（Japan Atomic Energy Agency, JAEA）為了高放射性廢棄物處置的安全評估所建立之熱力學資料庫（JAEA, 2019）進行分析，其中包含了的 C, Ni 以及 I 的水項錯合反應式以及沉澱溶解反應，本研究並結合台電公司（2002c）報告所推估之核種吸附反應式進行地球化學網路模型的建置。

地下水質條件主要參考台電公司（2020a）於達仁鄉建議候選場址所採取之地下水分析結果作為初始水質條件，水質數據請參考表 3。在圖 5 與圖 6 中顯示模擬區域內材料包含了硬頁岩（母岩），混凝土材料（包含了二次襯砌、回填層、處置窖、填充層以及基礎層），以及膨潤土（阻水層），在本研究中採用 MX-80 膨潤土作為高阻水型坑道使用，這些材料的礦物組成請參考台電公司（2020c）報告。廢棄物體內核種初始活度也如同 GoldSim 模式設定。

表 3 達仁鄉地下水化性分析表

分析項目	單位	達仁鄉地下水
pH	-	7.88
氯鹽	mg/L	13.3
硫酸鹽	mg/L	5.78
鈣	mg/L	20.4
鎂	mg/L	10.1
鈉	mg/L	7.64
鉀	mg/L	0.71
鋇	mg/L	0.113

五、模擬結果與討論—地下水流場模擬

在完成了 GoldSim 模式以及 HGC 模式相關設定之後，便可進行案例分析。

圖 9 與圖 10 分別為 HGC 模式模擬混凝土窖型與高阻水型處置坑道地下水流場結果，大致上兩處置窖流線趨勢均相似，因為處置坑道最外層的坑道結構都是同樣設計尺寸，而坑道內部滲流速度（Seepage velocity）則落在 10^{-8} ~ 10^{-9} m/day 左右與坑道外最高滲流速度有著 10^5 ~ 10^6 倍差異。為了能夠與 GoldSim 程式分析結果進行比較，本節所有 HGC 模擬之濃度歷線擷取位置均為處置坑道下游側，坑道結構與天然岩體交界位置處，實際位置請參考圖 11。

圖 12 為 GoldSim 模式與 HGC 模式模擬混凝土窖型處置坑道模擬結果，整體而言核種濃度趨勢均相符合，HGC 模擬 C 濃度歷線結果明顯低於 GoldSim 模擬結果，主要之原因在於 HGC 採用之地球化學反應模型，在推求過程中主要以人工地下水實驗結果為基準，配合人工海水試驗結果去推估平衡常數，因此當地下水環境變成達仁鄉地下水時，吸附結果與實驗室之 Kd 值仍有明顯差異，顯示目前所建立之地球化學模型仍缺乏部分影響吸附之反應行為在內。另外 Kd 吸附實驗均在單一障壁材料環境下進行而求得對應之 Kd 值，而 HGC 模擬是同時模擬混凝土材料、母岩材料以及膨潤土材料，材料之間的地球化學環境會互相影響，因此也會對於最後吸附模擬結果產生影響，而 I 本身特性較不易受到吸附之影響，因此 GoldSim 與 HGC 之模擬結果差異不大。

模擬結果另一個明顯不同之處，在於 HGC 模擬成果濃度傳輸速度較 GoldSim 之結果快釋出，GoldSim 採用之概念如圖 3 所示，在每一個單元內均為均勻之傳遞速度，然而 HGC 模式乃是直接依照實際坑道設計去建置流場模型，因此在模擬區域內流速並不會是固定的流速，而是會有快慢之分，部分區域核種會產生較快的移動速度，圖 14 為達仁鄉混凝土窖型處置坑道內流線圖，在

處置窖內流場相當緩慢，主要是擴散傳輸主導，當核種由處置窖內擴散到外面時，流速快的區域便會相對其它區域更快的將核種攜出，因此與 GoldSim 整體採用平均流速的概念在初期會有明顯差異。

圖 13 為 GoldSim 與 HGC 模擬高阻水型處置坑道結果，大致上與混凝土窖型處置坑道結果相同，HGC 模擬的 Ni 的濃度歷線初期（1,000 年以前）會較 GoldSim 成果高，之後便會逐漸低於 GoldSim 模擬成果，C 核種 HGC 模擬結果同樣受到環境影響吸附效果明顯高於 GoldSim 之結果。

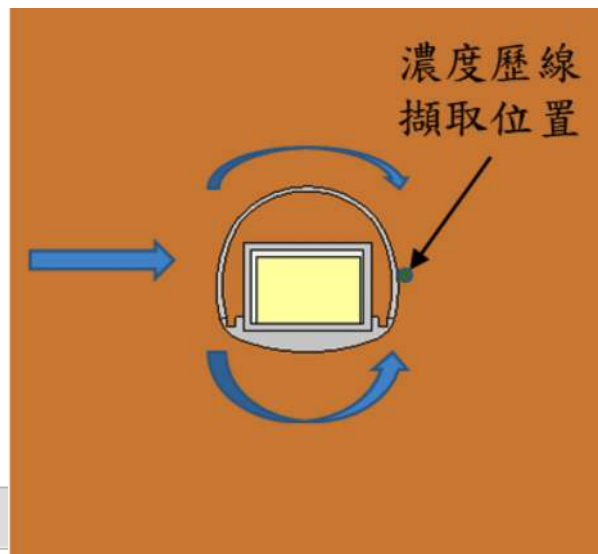


圖 11 濃度歷線擷取位置示意圖

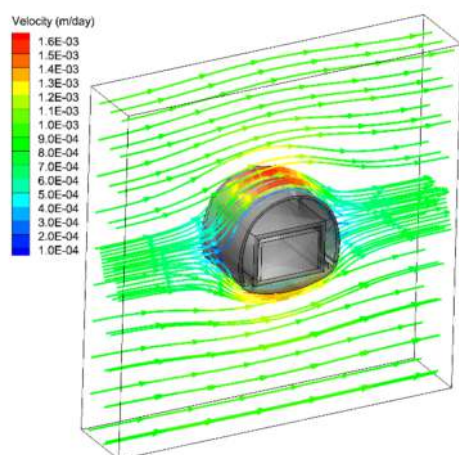


圖 9 混凝土窖型處置坑道流線及流速分布圖

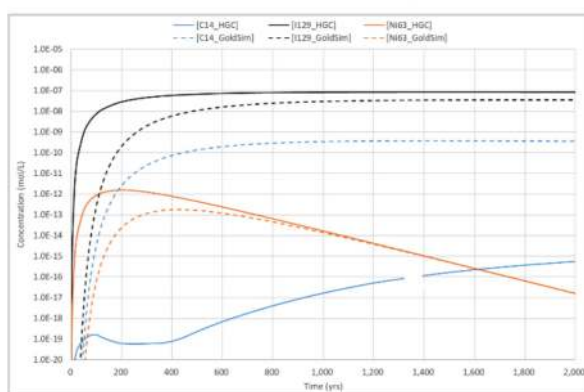


圖 12 混凝土窖型處置坑道濃度歷線結果比較圖

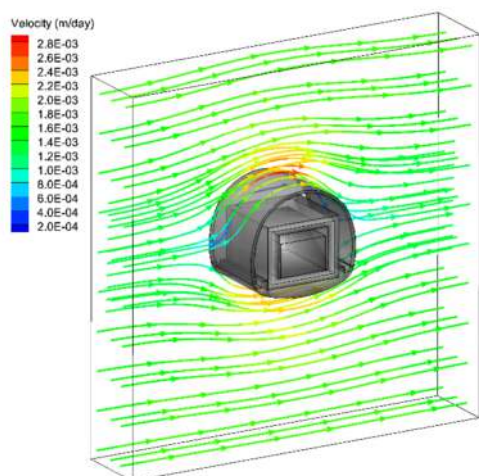


圖 10 高阻水型處置坑道流線及流速分布圖

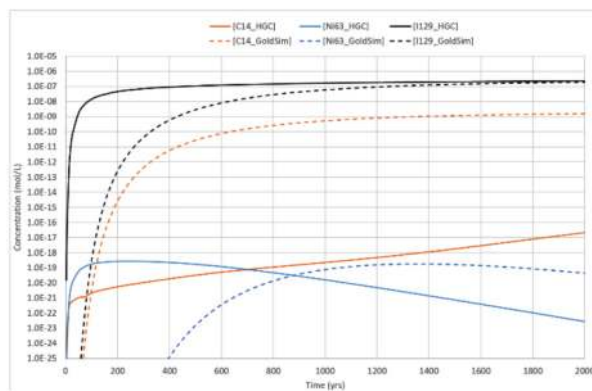


圖 13 高阻水型處置坑道濃度歷線結果比較圖

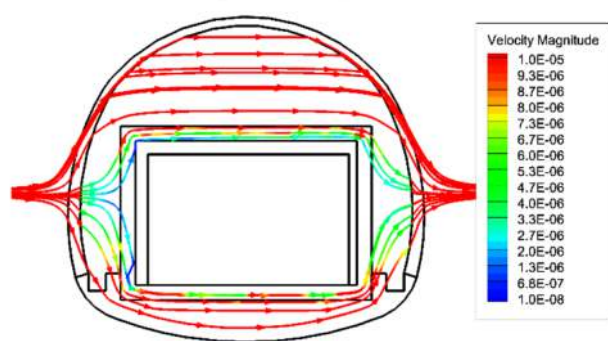


圖 14 混凝土窖型處置坑道障壁內流線分布圖

六、結論與建議

本研究分別採用 HGC 模式以及 GoldSim 模式，分別採用地球化學網路模型以及分配係數法進行 3 個核種的傳輸模擬，以下就 2 個方向進行討論。

(一) 結論

1. 分析方法差異

本研究採用了兩個概念上差異較大的分析方法進行傳輸模擬，分別是地球化學網路模型以及分配係數法，然而這兩個不同分析方法彼此之間差異非常大，以下就兩者之間特點進行說明。

分配係數法透過實驗室或是其它分析方式，將核種處在某特定地下水環境下，待反應平衡後測量水中核種殘餘濃度，並計算固體吸附的量與水中殘餘量的比值，而該數值便是用來描述礦物對於核種遲滯的能力，這個方法只看最終成果，即所計算出的 K_d 值，而不去另外將裡面所發生之地球化學反應機制去作探討，因此 K_d 值可能包含了核種沉澱溶解反應、離子交換反應以及吸-脫附反應等，所以 K_d 值通常會有其適用範圍，

例如 pH 範圍、溫度、地下水質以及礦物組成等。

地球化學網路模型主要建立在配合完整的熱力學資料庫，透過地球化學傳輸模式模擬核種在不同地下水質環境下化學反應特性。必須蒐集相關之熱力學資料庫，以利模擬地下水與岩體或是工程障壁組成之礦物相互之間的地球化學反應，除了地球化學環境模擬外，也包含了核種在該環境下化學反應的狀況、水相錯合反應，以及礦物沉澱溶解反應等。建置好地球化學網路模型後，便可透過地球化學傳輸模式進行模擬與分析。

由上述說明可以知道，兩個分析方法之間的差異，而這些差異也是造成最後核種傳輸模擬結果的差異。 K_d 值都是在單一環境下進行實驗推求，然而在本研究所分析之達仁鄉建議候選場址處置坑道設計就有三種不同類型，各坑道設計並非只有使用單一障壁材料，而會同時會有母岩、混凝土以及膨潤土存在之情形，因此整體地化環境便會受到這些障壁材料相互影響，同時地下水也會在不同障壁材料之間移動，造成的地化環境變化更是複雜。

2. 分析模式差異

本研究分別採用了 GoldSim 模式運用核種吸附實驗參數進行核種遷移模擬，與 HGC 模式運用核種吸附模擬參數進行核種遷移模擬。以下就兩個分析模式在進行核種遷移模擬中的差異進行說明。

GoldSim 模式本身並沒有真正的地下水流場分析模組，因此流場資訊必須先透過其它地下水分析軟體進行模擬，並相成果轉換到 GoldSim 所需要的資訊。此外 GoldSim 程式本身並沒有特定維度以及幾何外型的概念，因此在進行核種遷移模擬時，使用者可以依照需求建構單一維度傳輸模擬，也可以是平面上二維度傳輸模擬，甚至

是建構成三維度傳輸模擬，程式本身也對於污染物傳輸特別開發了一套適用的模組（GoldSim contaminant transport module），針對於污染物傳輸建立了許多常用的元件及功能。

HGC 模式則是結合了地下水傳輸模組以及地球化學反應模組建構而成，因此 HGC 模式可以同時模擬地下水流場變化以及核種傳輸過程，HGC 模式需要透過網格生成來描述模擬區域以及幾何，且具備二維及三維模擬能力。地球化學反應模組除了可以模擬水相錯合反應、離子交換反應、沉澱溶解反應以及吸-脫附反應之外，也提供使用者自訂功能，可以透過使用者自訂功能描述線性等溫線吸附模型（Linear isotherm model）（如同 GoldSim 採用的分配係數法）或是非線性等溫線模型（Non-linear isotherm model），因此 HGC 模式對於核種吸附處理較為彈性，在資料可取得範圍內，部分核種可以採用地化反應模擬，缺乏地化資料的核種採用線性等溫線吸附模型，來進行核種遷移模擬。

統整來說 GoldSim 程式提供了一個快速且簡便的工具，可以讓使用者很容易的建構所需要的分析模型，也可以很快速的得到分析結果，並且提供了完整的參數敏感度分析以及不確定性分析工具。HGC 模式則是提供了一套完整地下水傳輸以及地球化學反應模組，但是要花費很多心力建置分析模型，包含了網格生成、建立地球化學反應系統（包含吸附反應式等）以及數值模擬參數校調等，此外模擬時間也會因網格數量以及地化反應系統資料量，造成模擬時間較長。

的研究，推估出不同時間階段及情境下的 K_d 值，再將此結果建立在 GoldSim 或是 HGC 模式內進行核種遷移模擬，進而更準確地在不同時期採用適當之 K_d 值。

2. 簡化版地球化學網路模型

HGC 模式內的地球化學模組，提供了強大的使用者自定義功能，除了一般吸附反應外，使用者可以依照自己需求建立合適的反應模型，在現階段無法全面掌握核種與障壁之間的地球化學行為時，可以針對於影響吸附的主要幾項特點進行研究與討論，例如 pH 值、陽離子競爭或是礦物組成等，可以透過一系列研究配合實驗，回歸出各項因子對於 K_d 值的影響，並建立一組可受地化環境影響的 K_d 函數，取代不易求得的吸附反應式。

3. 混合模型配置

GoldSim 模式與 HGC 模式各有其優勢與劣勢，在安全評估相關分析相互配合，舉例來說 HGC 功能強大，但是地球化學相關資料取得困難且計算耗時，因此可以用來處理特殊問題或小區域問題，例如研究障壁材料介面演化問題、特定核種與材料交互影響分析或是局部三微現象強烈問題等；GoldSim 模式具有快速且簡易設定的特性，因此對於大規模數據處理或是分析是其優勢。未來應審慎思考在安全評估作業當中，如何整合不同特性模式，來產生最佳化配置，進而達到安全評估作業的需求。

（二）建議

1. 改良版分配係數法

可以透過對於處置坑道內地球化學特性改變

參考文獻

- Bear, J.(1979) Groundwater hydraulics, McGraw-Hill, New York.
- Ghislain De Marsily (1986) Quantitative Hydrogeology: Groundwater Hydrology for Engineers, Academic Press.
- GT Yeh, VS Tripathi, J Gwo, H Cheng, J Cheng, K Salvage, M Li, Y Fang, Y Li, J Sun, F Zhang, MD Siegel (2012) HYDROGEOCHEM: A coupled model of variably saturated flow, thermal transport, and reactive biogeochemical transport, Groundwater React Transp Models, p.3-41.
- GoldSim Technology Group LLC (2018) GoldSim 12.1 User Manual.
- JAEA (2018) Thermodynamics database 網頁資料 ; https://migrationdb.jaea.go.jp/nmdb/db/sdb/search_1.jsp .
- 台電公司 (2020a) 建議候選場址核種吸附實驗研究，LLWD2-SA-2019-01-V05。
- 台電公司 (2020b) 低放射性廢棄物最終處置建議候選場址安全評估報告，LLWD2-SA-2019-08-V05。
- 台電公司 (2020c) 核種吸附參數模擬報告，LLWD2-SA-2020-04-V02。

叢書訊息

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

液流黏滯阻尼器應用於鐵路橋梁 橫向錯位改善設計

謝崇偉 * 邱天宏 ** 張權 *** 孫維忠 **** 陳宏威 **** 鄭書恒 *****

摘 要

液流黏滯阻尼器 (Fluid Viscous Dampers, FVD) 是常見的橋梁補強工法，連接上部與下部結構，可有效地消散地震能量，以降低橋墩及基礎受力，但應用於結構變位控制卻不常見。全剛構架式橋結構形式可有效防止落橋危害；然而，振動單元相互獨立，又因為跨徑及柱高的不同，使得各單元自然振動頻率皆不一致，因此在外力作用時（如地震），在橋梁伸縮縫兩側會產生不同的橫向位移。

鐵路橋梁有橋面不連續變位之限制，避免因為過大的軌道錯位影響舒適性及安全性，因此本評估即在改善此種橋梁結構，藉由裝設阻尼器，減少不同結構單元間之橫向相對位移，以提升橋梁安全及鐵路服務水準。液流黏滯阻尼器除了可達到減少橋面相對位移的目的，同時也有吸收能量作用，可避免造成錯位問題移轉至相鄰伸縮縫，也可避免橋墩及基礎受力明顯增加而須額外補強。

關鍵字：全剛構架橋、液流黏滯阻尼器、歷時動力分析、橋面不連續控制

一、前 言

全剛構架式橋梁，橋墩皆以剛接 (rigid) 形式連接於大梁，結構常見於公路橋梁，特別是在鄰近斷層的地方，伸縮縫處上下構以固接形式相連，可提高結構靜不定度，減低落橋的風險。橋梁各振動單元因跨徑、柱高不同，使得各單元（縱、橫、垂直向）自然振動頻率皆不同；因此在外力來襲時（如地震），在橋梁伸縮縫兩側會產生不同的橫向位移。

全剛構架式結構常見於公路橋梁，大梁與橋墩固接，可提高結構靜不定度，且無須盤式支承、防震拉條或是鎖定裝置，對於後續維護管理有很大的優勢。然而，鐵路橋梁有橋面不連續變位之限制（包含垂直移動及折角、水平移動及轉角），避免因為過大的軌道變位降低舒適性及安全，尤其是在結構形式差異大（例如柱高、跨徑差異過大）的相鄰單元，容易造成更大的相對錯位。此外，過大的錯位，也有可能造成軌道的損害，甚至危害到使用者的安全。因此，本分析設計意即

* 中興工程顧問社防震制振技術研究中心副研究員
 ** 中興工程顧問社防震制振技術研究中心正研究員
 *** 中興工程顧問社防震制振技術研究中心高級研究員
 **** 台灣高鐵公司土建設施工程部高級工程師
 ***** 中興工程顧問公司副總經理

在改善此種橋梁結構，特別針對連續梁橋與單跨橋之間之相對位移進分析，量化其錯位量。

液態黏滯性阻尼器已常應用在橋梁補強，可有效地消散地震能量，以降低橋墩及基礎受力，但較少應用於結構變位控制，相較於地震力量分散裝置（或稱力量鎖定裝置）及其他直接鎖固方式。藉由裝設阻尼器，減少不同結構間之橫向相對錯位，同時也有吸收能量作用，可避免造成錯位問題移轉至相鄰伸縮縫，以提高橋梁結構安全並提升鐵路服務水準。

二、橋梁結構評估分析

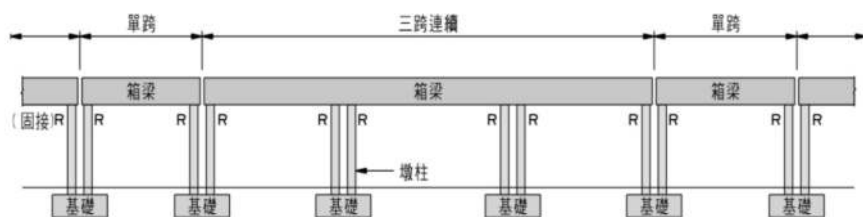


圖 1 鐵路橋梁結構配置圖及橋墩現況照片

（一）橋梁現況

鐵路橋梁位於臺南市歸仁區，主要分析之橋梁型式為三跨連續（ $34.7\text{m} + 41.6\text{m} + 34.7\text{m} = 111\text{m}$ ）預力箱型梁橋與其相鄰單跨橋之行為，其中 R 表示剛性接頭（rigid），其中北側銜接 30m 單跨橋，南側銜接 35m 單跨橋，連續梁在橋梁伸縮縫兩側會產生不同的橫向位移，橋梁單元配置示意詳如圖 1。此外在分析時，仍必須將更外側的鄰跨單元的影響亦納入考量。

鄰近高架橋型式大部分也為構架型結構系統（單跨或連續），將柱與上部結構箱梁剛接／固接（rigid），形成縱向門型構架，墩柱斷面為長扁型，縱向尺寸較小，形成接近門架結構行為。

（二）分析理念及設計流程

首先，為了解結構現況在地震下之動力行為，利用電腦輔助軟體建立分析模型，分析軟體為 SAP 2000，以量化各伸縮縫位置之相對錯位量。

在分析的過程中，檢視既有橋梁結構設計計算，並未發現軌道容許錯位檢核之相關文件；因此，為確認分析流程首先訂定結構伸縮縫改善的標準，參考「鐵路橋梁耐震設計規範」之規定，其中檢核震時軌道變位檢核（橋面不連續）考慮之載重組合（ $L1 + I1 + LF1 + CF1 + 0.5T + E + B + SF1 + EQ_{med}$ ），包含的地震力（ EQ_{med} ）係為中度地震等級。

考慮液態黏滯性阻尼器有吸收能量作用，可避免造成錯位問題移轉至相鄰伸縮縫，因次規劃階段便將 FVD 納入考量。然而，因為 FVD 為速度型阻尼器，在安裝後，應採用動力歷時分析之結果，因此配合設計目標，也將動力歷時分析作為現況評估的依據，若採用反應譜或其他分析，無法作為改善前後作一致性的比較。

參考耐震設計規範規定，採用三組地震歷時資料輸入模型內進行分析及改善成果比較；惟評估方案之目標，僅針對於橋面不連續進行改善。此外，減少震後阻尼器之維管成本，經鐵路橋梁維護管理單位確認後，將阻尼器設計需求強度、

衝程至少符合設計地震等級，確認在遭遇設計地震等級後，裝置安全無虞，避免過於頻繁地維護。

裝置配置須配合現況及各個伸縮縫相對錯位，FVD 參數的調整與裝置出力、消能情形有關，同時又影響到控制錯位的結果，相鄰伸縮縫之間的錯位控制有相互作用。因此，在規劃阻尼器配置時，採用試誤法以求得最佳解決方案。

(三) 地震歷時資料

地震歷時資料及採用橋梁工址當地之實測地震資料，評估所測得之地震記錄能反應工址之實際地震特性，且相較於反應譜相符（鐵路橋梁耐震設計規範中之中度地震）地震歷時求得之相對位移量更為保守，實測得地震一之時間為 2010/03/04，其中橫向最大之加速度為 171 gal；測得地震二之時間為 2016/02/06，橫向最大之加速度為 168 gal；測得地震三時間為 2012/02/26，橫向最大之加速度為 131 gal。

(四) 現況分析模擬

1. 電腦輔助分析

分析軟體採用商用軟體 SAP 2000，模擬之主要橋梁結構型式為三跨連續，為判斷鄰近單元造成之影響，將北南兩端延伸之單元也建在分析模型中，以北銜接 8@30m 單跨橋（剛接或鉸接），南側銜接 35m + 3@30m + 35m 單跨橋（剛接）以及一座 25m + 35m + 25m + 3@30m + 25m 連續梁橋。結構配置請詳圖（其中 R 代表剛接；F 代表固定端，鉸支承或是滾支承加鎖定裝置；M 代表活動端）。

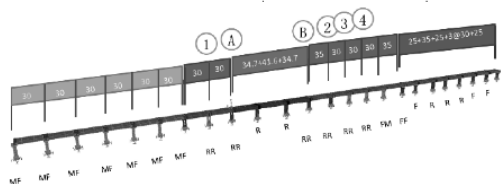


圖 2 橋梁分析模型

此外，由於伸縮縫處結構形式有單柱或是雙柱，而單柱形式不會造成伸縮縫處產生相對位移，意即其相對位移為零；因此，分析結果主要集中在六處橋墩結構形式為固接的伸縮縫，分別命名為 A、B 及 1~4，以利比對分析結果；其餘伸縮縫處結構形式為盤式支承，在正常情況之下不會有橫向錯位，故不額外列出分析結果。此外，SAP2000 模型 X 向為車行向，Y 向為垂直型車向，Z 向為垂直向。橋梁分析模型柱底以等值基礎彈簧建立，對於位移之分析，會較為保守。

2. 現況模擬分析結果

依據分析結果連續梁主要橫向振態為 Mode 1，週期為 0.998 秒。北側鄰跨主要橫向振態為 Mode 2、7、11，週期分別為 0.873 秒、0.810 秒及 0.796 秒。南側鄰跨主要橫向振態為 Mode 3、7、12，週期分別為 0.855 秒、0.810 秒及 0.777 秒。

SAP 2000 模型分析歷時分析係將 3 維（包含橫向、車行向、垂直向）實測歷時地震資輸入到模型內。根據分析結果，檢核軌道面變位，在實測地震歷時下，A、B 處（連續梁前後）所產生之相對位移相較其他處（1~4）明顯較大，六處伸縮縫錯位結果如表 1。

表 1 橋梁各伸縮縫處最大相對錯位量

單位 (mm)	伸縮縫 1	伸縮縫 A	伸縮縫 B	伸縮縫 2	伸縮縫 3	伸縮縫 4
地震一	18.85	63.51	72.22	12.58	11.95	11.75
地震二	16.30	43.02	45.87	8.36	11.32	11.05
地震三	9.24	49.49	52.63	13.06	15.61	16.34

三、改善設計成果

(一) 阻尼器參數設計及配置

液態黏滯性阻尼器是以活塞與油壓缸裝置提供速度相關之力學行為，透過能量消散或其他動

態束制的方式來改善結構的耐震性能。依本計畫設計理念及需求，在裝設後，兩種裝置皆可有效減少該伸縮縫之結構相對位移；然而，除了要減少相對位移，仍要考量避免裝置裝設後將問題移轉至其他位置。而阻尼器設計參數區主要分成三大項：設計荷載、衝程、阻尼特性。

設計荷載決定了阻尼器大部分的尺寸，如油缸內徑、油缸壁厚度、活塞桿直徑、活塞直徑等。活塞衝程即是阻尼器之設計位移量，亦即當活塞在油缸中央時，允許左右移動之最大位移量。阻尼器之設計衝程與被安裝阻尼器的結構自身特性有關，其需要經由結構分析才可得知，此係為阻尼器客製化的依據。

阻尼特性是阻尼器最重要的參數，依特性曲線公式 $F=CV^\alpha$ ，可知阻尼特性即由 C 值與 α 值表現，其中 C 值可藉由矽油流道尺寸、矽油黏度特性決定之。一般非線性黏滯阻尼器 α 值介於 0.1~0.4 之間，由特性公式可知採用阻尼器 α 值越小，阻尼器於小速度時即可提供較大出力，提供較好的消能效果。

為達橫向相對位移控制目標，於橋梁配置之阻尼器，需於中小地震時即發揮顯著作用。經分析結果，在連續梁前後伸縮縫裝設阻尼器，雖然可以減少錯位，但會影響到鄰跨。在嘗試過數種排列測試後，再配合目前市面上產品，橋梁規劃配置 TYPE II 阻尼器兩支，分別置於伸縮縫 A、B 及 1、3、4 等五處伸縮縫、TYPE III 阻尼器兩支，置於伸縮縫 2。其中 TYPE II： $\alpha = 0.15$ 、 $C = 190$ 、TYPE III： $\alpha = 0.15$ 、 $C = 280$ 。

(二) 裝置改善相關設定

本計畫將液流黏滯阻尼器納入分析模型，並重複前面分析，比較各地震下位移的差異。在橋墩頂靠近大梁底部連接一剛性連桿 (rigid bar) 模擬剛構托架接合，並連接阻尼器，其中黏滯阻

尼器以非線性桿件模擬，在 SAP 2000 模型顯示 Link 特性選擇 Damper-Exponent，其餘相關參數 Damping Coefficient 即為 C 值、Damper Exponent 為 α 值，根據阻尼特性進行修改。



圖 3 FVD 安裝模擬方式

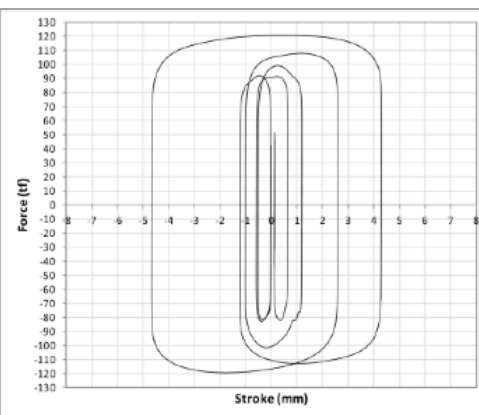
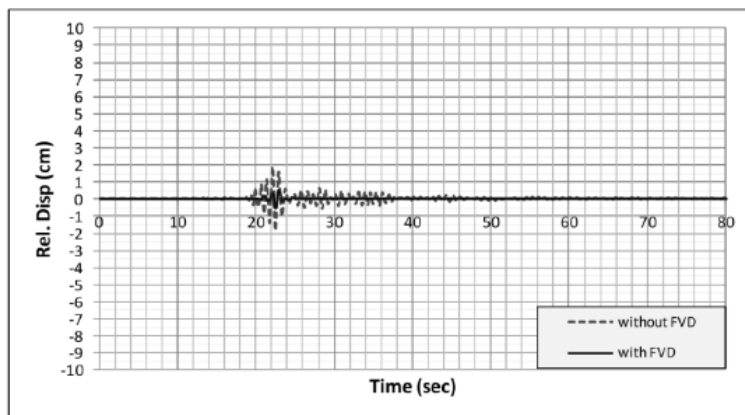
(三) 錯位改善成果及阻尼器檢核

橋梁結構分析模型加入阻尼器後，以實測地震資料進行線性歷時分析。阻尼器於小位移下即提供較大阻尼力，錯位控制效果顯著，相對位移量都能減少至少 50%，而軌頂面最大橫向相對位移皆可降至 8 mm 以下。

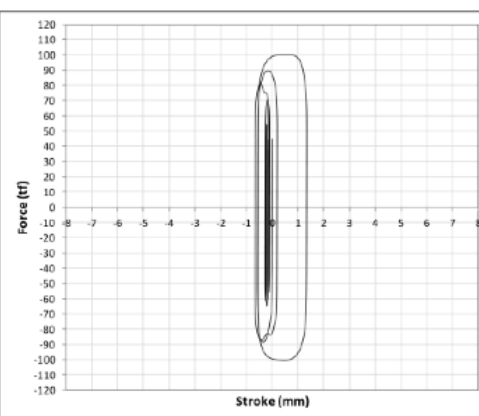
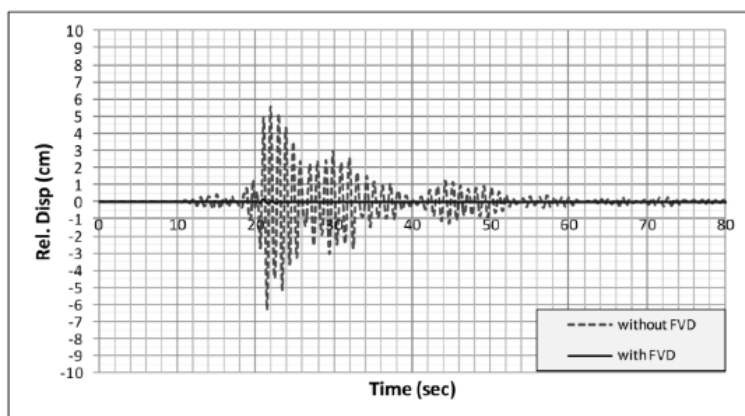
表 2 裝設 FVD 後各伸縮縫最大相對錯位

單位 (mm)	伸縮縫 1	伸縮縫 A	伸縮縫 B	伸縮縫 2	伸縮縫 3	伸縮縫 4
地震一	3.03	0.84	4.42	7.05	6.89	2.22
地震二	1.03	0.46	1.79	3.56	3.18	1.4
地震三	1.37	0.26	1.52	3.55	4.44	2.7
	減少 87%	減少 99%	減少 95%	減少 58%	減少 61%	減少 83%

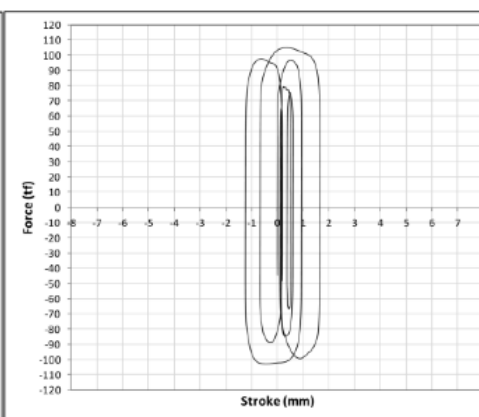
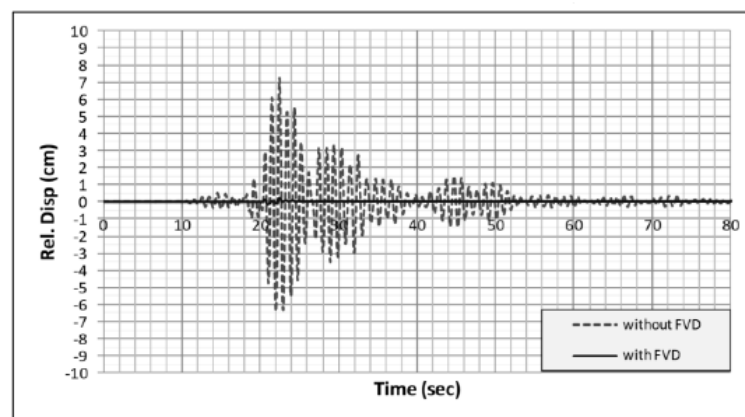
於地震一之地震歷時資料下，各位置橫向相對位移歷時及對應阻尼器裝置遲滯迴圈分別如圖 4 所示。依據分析結果可知各位置橫向相對位移皆可控制於 8 mm 以內。最大阻尼器出力發生於伸縮縫 2，大約為 171 Tf，由遲滯迴圈可以得知，此形式之 FVD 在中度地震下，即能發揮遲滯消能的作用。



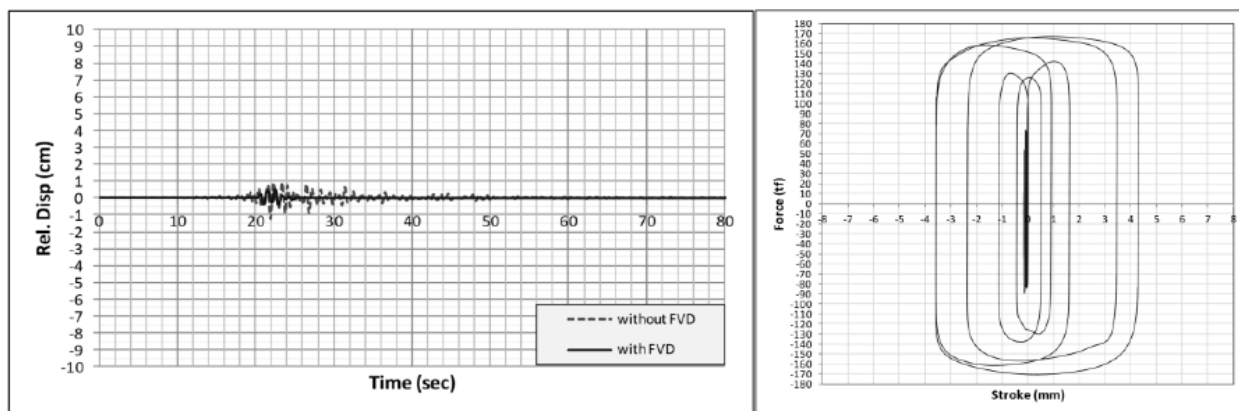
(伸縮縫 1)



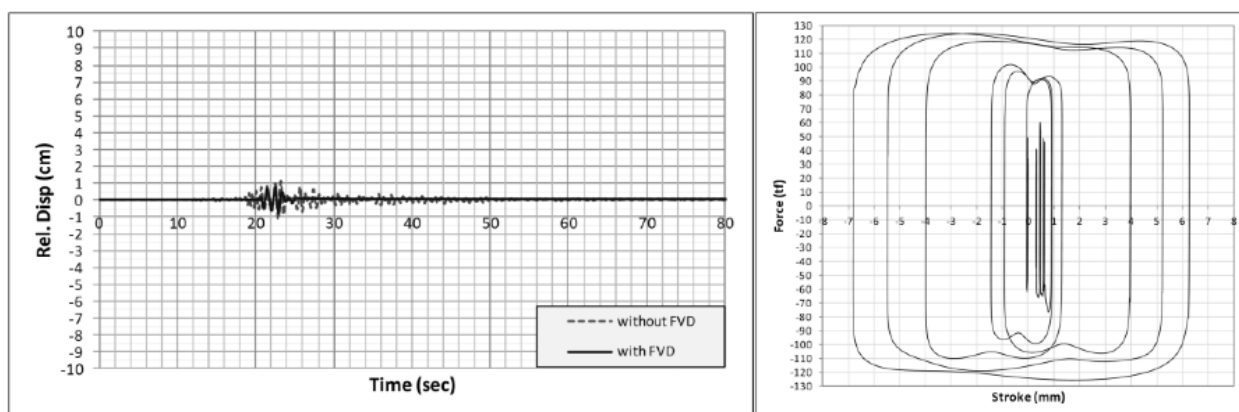
(伸縮縫 A)



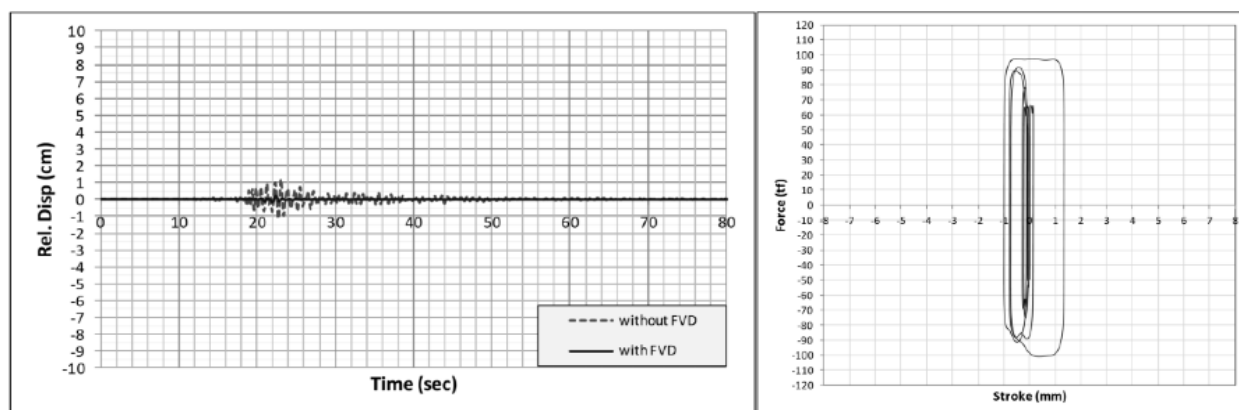
(伸縮縫 B)



(伸縮縫 2)



(伸縮縫 3)



(伸縮縫 4)

圖 4 橋梁各伸縮縫歷時相對錯位及 FVD 遲滯迴圈

(四) 阻尼器設計檢核

為避免因採用之裝置將問題移轉至其他伸縮縫位置，或是橋梁因過多額外的彎矩、剪力而需要進行補強，因此檢核安裝液態黏滯性阻尼器後，在設計地震狀態下，結構之強度是否足夠。利用既有實測地震來進行模擬與調整。經比較後，裝設阻尼器後柱底反力增量約 10%。

橋梁結構雖需在中度地震下有效減少錯位，但經檢討，裝置在設計地震力下應無須修復或是因失效而需要抽換，因此以工址設計地震之規模進行線性歷時分析。阻尼器衝程及各構件之強度以此進行檢核。各阻尼器之最大伸縮量、裝置最大出力如表 3，而衝程因保守採最大相對位移之兩倍以上進行設計。

表 3 FVD 各衝程及設計力

	伸縮縫 1	伸縮縫 A	伸縮縫 B	伸縮縫 2	伸縮縫 3	伸縮縫 4
最大 伸縮量 (mm)	36.06	30.25	21.07	25.13	26.19	15.80
最大 出力 (Tf)	157.8	155.5	147.4	213.9	151.3	141.0

(五) 接合細部設計

伸縮縫錯位要求是毫米等級，傳統插銷接頭會有若干縫隙影響成果，故改採用球型接頭（如圖 5），可消弭接頭之滑動量，方能使阻尼器有效地作動；因此，橋墩接合也必須配合阻尼器接頭型式進行設計，同時因應不同 FVD 所產生之阻尼力，進行不同版厚、螺栓尺寸的設計，以達到設計的最佳化，節省工程經費。

由於加裝阻尼器之設計目的在於減少橋面錯位，因此 FVD 安裝位置宜接近上構；然而，配合營運及施工可行性，捨棄安裝於箱梁內，同時

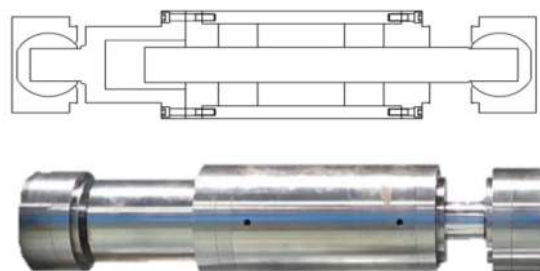


圖 5 阻尼器球型接頭設計圖及成品

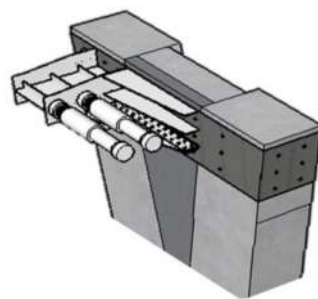


圖 6 單側橋墩接合安裝示意圖

也可避免施工不當危害既有鋼腱的可能。因此將 FVD 設計安裝於橋墩上。

由於鋼構托架型式較特殊，特別會造成化學螺栓受力不均，意即靠近阻尼器接合地方受力較大，遠處較小，因此接合設計之除了鋼構強度檢核外，也用電腦輔助程式（SAP 2000）建立一有限元模型，利用殼元素（shell element）將 FVD 接合鋼板離散化，並將阻尼力（軸向出力）及阻尼器自重（垂直軸向出力）以等值靜力形式平均施加於阻尼器接合螺栓位置處，並考量鋼構結構自身重量進行整體模型靜力分析，求得每個螺栓之拉、剪力之情形，進而進檢核。

簡化模型分析，僅針對橋墩內側面之鋼板進行分析，不考慮其餘兩側鋼板之強度貢獻，對於主要探討的構件（鋼托架及橋墩內側鋼板之接合化學螺栓）分析結果較為保守，鋼板邊界的部分設定為鉸接；此外，配合元素網格切割形式，茲

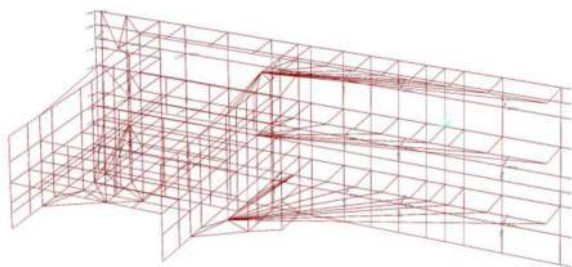


圖 7 阻尼器接合分析 (Joint Reaction)

於模型中微調化學錨栓配置，接合橋墩處以鉸接（釋放自由度 r_1 、 r_2 、 r_3 ）作為邊界條件。

TYPE II 阻尼器及 TYPE III 阻尼器接合鋼板托架分別採用 M30 及 M39 化學錨栓，螺桿最小標稱抗拉強度係依據 CNS3934 B2143 規範規定，根據分析結果，擷取模型中結點作用力，檢核螺栓之錨錠拉力、剪力及拉剪力作用下，均符合規範規定之標稱強度限度。

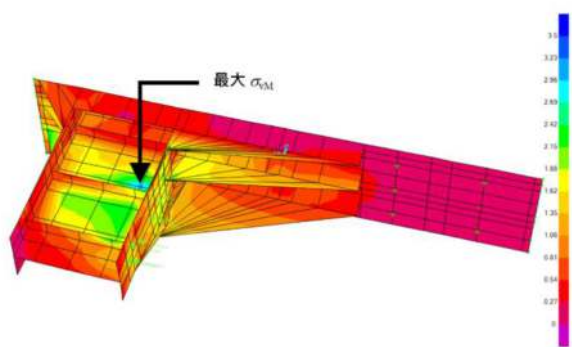


圖 8 鋼板接合應力分析結果示意圖

配合傳統鋼構強度設計，利用有限元模型進行鋼板應力檢核，檢核破壞準則採用最大 von Mises 應力準則，當達到應力極限時，延展性材料即在某個位置開始降伏，鋼板材料為延性材料，破壞是由降伏開始。

利用阻尼器所產生之最大出力，檢核構件之蒙氏 (von Mises) 應力是否小於降伏強度。在 TYPE II 阻尼器最大出力 150 Tf 時，應力最大值

(應力集中) 為 2.82 tf/cm^2 ；在 TYPE III 阻尼器安裝下，最大出力 220 Tf，應力最大值為 3.44 tf/cm^2 均小於鋼板降伏應力。

四、結論與建議

- (一) 依據目前耐震設計規範規定，橋面不連續檢核係在中度地震作用下，以目前實測地震歷時資料作為分析依據。結構模型搭配適當參數阻尼器進行動力歷時分析。伸縮縫 (1、A、B、3、4) 分別配置兩支 TYPE II 阻尼器，伸縮縫 2 配置兩支 TYPE III 阻尼器，一共裝設十二支。橋梁模型進行動力歷時分析後，阻尼器於小位移下即提供較大阻尼力，位移控制效果顯著，可減少 58% 以上之錯位量，使軌面最大橫向相對位移皆可降至 8 mm 以下。
- (二) 以電腦輔助分析的結果除了可以有效減少位移，裝設 FVD 後，震時柱底反力增加不到 15%，避免因採用之裝置造成橋墩因為額外的力量需要進行補強。
- (三) 橋梁結構雖需在中度地震下有效減少錯位，但阻尼器裝置應在經歷設計地震後下後仍可運行，因此阻尼器衝程及各構件之強度以此進行分析、檢核。
- (四) 液態黏滯阻尼器可有效地消散地震能量進而降低橋墩及基礎受力，已常見在國內外鐵、公路橋梁補強，卻少應用於結構變位控制。此外，傳統上阻尼器 (或是鎖定裝置) 應用在橋梁工法是安裝在大梁下方，連接上部與下部結構，主要是在控制橋梁車行向 (縱向) 的力量或位移，橫向行為的控制相當罕見。液流黏滯阻尼器除了可達到減少橋面相對位移的目的，同時也有消能作用，可避免造成錯位問題移轉至相

鄰伸縮縫。

- (五) 鐵路橋梁藉由裝設阻尼器，減少不同結構間之橫向相對位移，以提升結構安全及鐵路服務水準。目前國內橋梁橫向位移控制的相關工程較罕見，期望在依照本案分析及阻尼器設計成果順利竣工後，配合建置監測系統，可驗證產品的可靠度，提昇國內制震裝置技術水平，亦可提供未來相關應用之參考。

參考文獻

交通部 (2004) 鐵路橋梁設計規範
交通部 (2007) 鐵路橋梁耐震設計規範

邱天宏、薛強、張權、翁健煌 (2014) 非線性液流阻尼器應用於高樓結構消能減震，中華民國第十二屆結構工程研討會暨第二屆地震工程研討會，高雄。

張權、紀宛君、薛強、陳國慶 (2016) 中興社液流阻尼器之開發與應用，中興工程季刊，第 131 期，95-103。

張權、薛強、邱天宏、紀宛君、陳國慶 (2014) 液流黏滯阻尼器與地震力分散裝置於結構耐震之應用，第十二屆中華民國結構工程研討會，高雄。

AASHTO (American Association of State Highway Transportation Officials). (2017). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.

Taiwan High Speed Rail Project Contract No. C295 Foundation Design Report (2001).

Tien-Hung Chiu, Qiang Xue, Chyuan Chang & Jian-Huang Weng. (2014) Relocating fluid viscous dampers to improve seismic performance of RC buildings, The 5th Asia Conference on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan.

新書推介

(一) 廢污水生物急毒性檢測與應用評析

許國恩、林宜璇、吳佳娟、
烏春梅、林淑滿等 編著

2020年11月初版

(二) 台灣地區巨積混凝土配比與熱學特性之研究

詹穎雯、陳育聖、邱暉仁、
何季軒等 編著

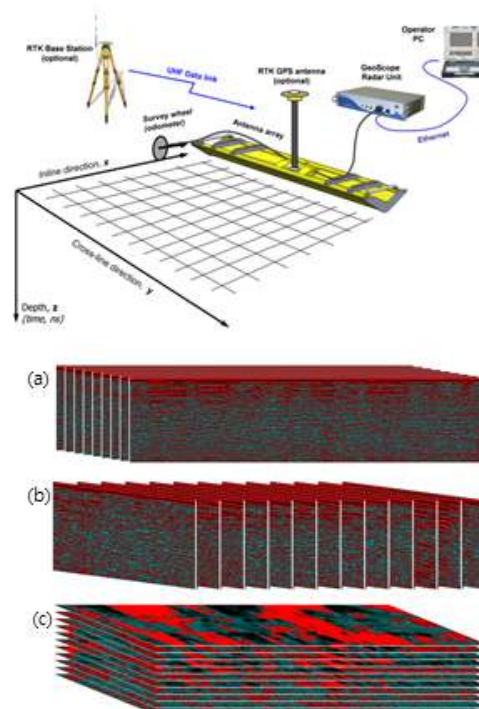
2020年7月初版

Looking into the earth -3D GPR

三維透地雷達(3D GPR)特徵如下:

- (1)多組頻道天線(9組/20組)
- (2)空氣耦合(天線不需貼地)
- (3)步頻雷達波(多重頻段)
- (4)全球衛星定位

三維透地雷達設備採車載方式,沿道路方向進行快速探查,車速最高可達90公里/小時,所得探查資料為格點形成的立方體,可獲得三方向剖面,分別為(a)沿測線剖面(b)垂直測線剖面與(c)深度切面,對探查目標物內部構造有更清楚的了解。主要應用在道路/隧道/河堤/道碴等探查工作。



如需進一步了解,請洽:財團法人中興工程顧問社 大地工程研究中心
葛文忠研究員 (02)87919198#352 wcko@sinotech.org.tw

水文地質對山岳隧道襯砌水壓與結構安全分析評估

張偉哲 * 辜炳宸 ** 蕭富元 *** 高憲彰 ****

摘 要

臺灣常年受各式氣候影響，如梅雨、颱風、強降雨等，降雨補注豐沛，蘊藏豐富地下水資源，且臺灣位處於太平洋地震帶，多元複雜的板塊活動孕育多樣的地質構造，山高水急的河川特性造就豐富的地理環境。近年來臺灣山岳隧道建設有逐漸朝東部山區發展趨勢，相對衍生的問題挑戰更為嚴峻，除隧道施工的安全穩定外，山區複雜水文地質環境對山岳隧道施工出水行為與長期營運襯砌水壓影響均為值得關注課題。本文以臺灣東部某遭遇複雜褶皺構造之山岳隧道工程為例，採用大地工程廣為應用之 FLAC3D 三維分析工具，依據現場調查成果建構該案例對應之複雜三維地質模型，並假設隧道長期營運遭遇一般降雨、豐水降雨兩種情境時，透過 Thick-Walled Cylinders 理論推導，建立快速的水壓評估計算機制，作為解析不同水壓之襯砌結構安全分析之參考。本文所發展之技術，冀能提供複雜水文地質之山岳隧道襯砌水壓與結構安全評估參考。

關鍵字：複雜褶皺構造、三維水文地質模型、襯砌水壓、結構安全評估

一、前 言

臺灣長年受周圍氣候環境（梅雨、東北季風、颱風）影響，降雨豐沛，山區蘊藏豐富地下水，且臺灣位於板塊交界帶，地質複雜破碎，尤其東部變質岩區岩性變化劇烈與褶皺構造發達，造就東部山區複雜之地下水流環境。臺灣山岳隧道興建施工過程中，出水問題時有所聞，施工遭遇突發性湧水時，除對施工安全與工期造成影響外，嚴重時更可能造成抽坍災變，甚或人員傷亡等事

件；在近年來在工期受限，工程搶通成為趨勢衝擊下，隧道出水問題常無足夠時間與經費妥為因應處理，其影響可能延伸擴及至營運階段，隧道排水設計若未有足夠餘裕空間時，施工發生湧水災變區段，營運時遭遇豪大雨時可能有水壓抬升與地下水滲流風險，嚴重時甚將影響用路人行車或列車行駛安全。

山岳隧道施工出水問題在國內日益受到重視，設計階段雖多已規劃各種湧水因應對策。惟由於臺灣山區複雜水文地質狀況實不易事先精確

* 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副研究員

*** 中興工程顧問社大地工程研究中心地工維安組組長

**** 中興工程顧問社大地工程研究中心副主任

掌握，故施工階段常見針對預期外的出水事件，而需進行必要之對策調整；此外，在國內環保意識逐漸抬頭之下，山岳隧道施工出水對鄰近區域水資源影響常成為環評關注重點。國內近期完工通車的指標性公路工程 - 臺 9 線蘇花公路山區路段改善計畫，即開創國內山岳隧道工程先例，在施工期間辦理水文地質觀測計畫，透過各種觀測資料（包括隧道出水量、降雨量、河川流量、地下水位變動等），全程記錄隧道施工出水行為，以及工程對鄰近區域地下水資源的影響衝擊（蕭富元等，2015；辜炳寰等，2019）。

目前對於山岳隧道出水問題的研究，主要集中在設計與施工階段道出水量推估、出水環境調查及出水因應對策等（傅子仁等，2004；顧承宇等，2005；蕭富元等，2014；Gattinoni etc., 2008；Hazeri etc., 2011），而對於營運期間之出水問題探討相對較少，實則隧道營運若持續出水將會降低營運服務品質，嚴重時亦將影響結構安全，實為需關注的課題。

本文乃以山岳隧道施工遭遇突發性湧水抽坍災變之實際工程為對象，隧道抽坍段雖在回填灌漿補強後，重新開挖貫通，惟隧道完工營運後仍持續出水，本文透過三維水文地質模式分析與降雨情境假設，探討遭遇強降雨，導致隧道上方含水層水壓大幅抬升，或排水系統阻塞而功能下降時，分析其襯砌可能承受之額外水壓，並進一步透過理論解推導，快速評估及探討水壓變化是否影響隧道結構安全。

二、山岳隧道三維水文地質模式

（一）案例水文地質背景

本案例的山岳隧道位於臺灣東部變質岩區，隧道開挖遭遇複雜多變岩性，包括雲母石英片岩、雲母片岩、綠泥石片岩、矽質片岩、大理岩

等交互出現，且地層劇烈褶皺。山岳隧道開挖過程並未遭遇明顯出水情形，但隧道開挖貫通尚未施作二次襯砌前，遭逢多日連續強降雨（3 日累積雨量達約 560 mm），隧道已開挖段發生大規模抽坍，同時伴隨大量湧水（瞬間最大出水量達約 15000 L/min）。根據災變發生後調查結果顯示，區域地下水補注主要來自於西南方向（靠山側）挹注，經由劇烈褶皺作用所形成之破碎或剪切錯斷構造，蓄積於隧道上方約 10~30 m 處之含水層內，連續 13 日降雨導致含水層水壓抬升，隧道頂拱處軟弱剪裂薄層及含水層水壓增加的雙重影響，導致既有支撐工的支撐力不足而發生抽坍，抽坍後含水層大量出水，致使災害進一步擴大，現場狀況如圖 1 所示。



圖 1 案例隧道施工抽坍湧水情形

（二）水文地質模式

水文地質模式分析基本上係從水平衡觀點著手，所涉及之集水區範圍常涵蓋數十公里以上區域，一般多採用廣域場分析，分析網格尺寸常達數十公尺甚或以上。惟廣域流場分析適用於區域地下水資源探討，不利於細部探討山岳隧道周圍鄰近區域地下水流行為，因此本研究先行透過廣域分析，瞭解大範圍集水區地下水補注與流場分布，比對現地水文觀測資料（包括地下水位高程

及隧道出水量等），驗證模式準確性；再將分析範圍縮小至隧道周圍約 150 公尺範圍，將網格單元細化至 1 公尺以內，建構近域流場模式，以廣域場的水文數據作為近域場水文邊界設置，方進一步分析探討山岳隧道鄰近區域水文變化對襯砌結構安全影響，如圖 2 所示。

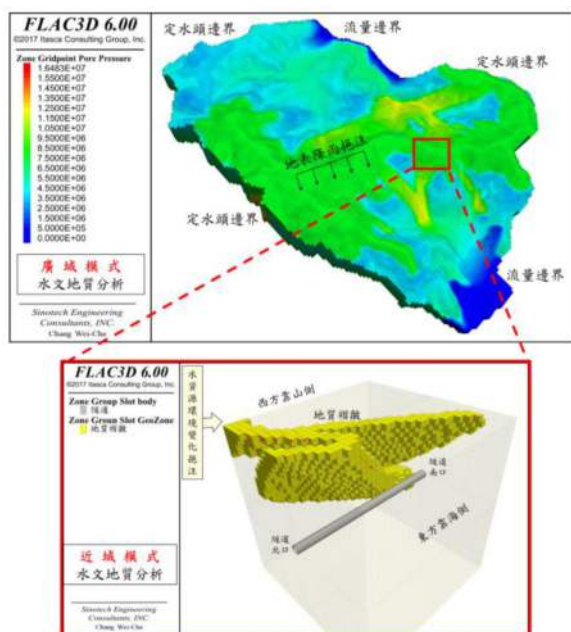


圖 2 近域流場模式與邊界條件示意圖

之側向補注，造成抽坍後持續長期出水情形。案例山岳隧道之複雜褶皺構造之三維水文地質模型如圖 3 及圖 4 所示（張偉哲等，2020）。

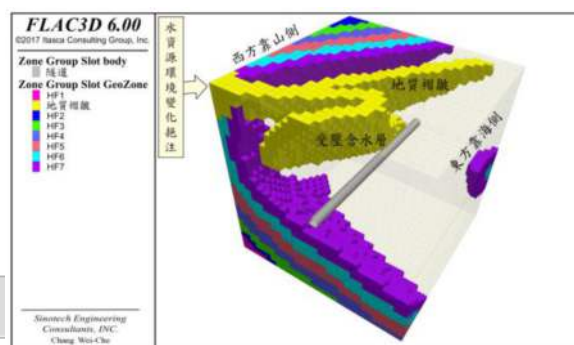


圖 3 案例隧道複雜褶皺地質模型

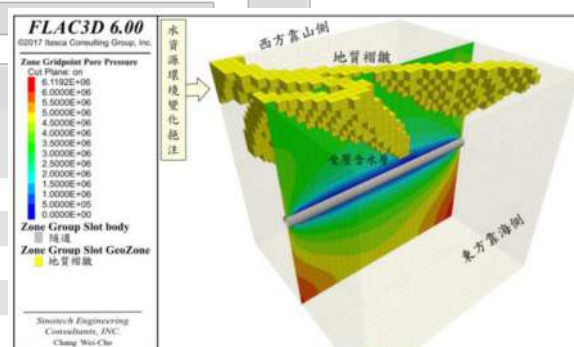


圖 4 案例隧道三維水文地質模型

根據案例的抽坍災變後的調查結果顯示，隧道沿線地層呈現複雜多期褶皺構造，抽坍區上方地層主要為雲母石英片岩間夾雲母片岩，岩材堅硬，但受複雜褶皺構造影響，呈現不規則狀分布，且具有高角度節理及裂隙；頂拱附近分布軟弱夾泥之綠泥石片岩夾雲母片岩，研判為主要阻水層，厚度約 3~5 公尺以上；抽坍區地質褶皺構造大致呈現桃心狀分布，由東南往西北逐漸皺褶傾沒，隧道上方存在由皺褶軸部擠壓所形成之含水層，含水層約在隧道頂拱上方約 12 公尺以上區域，地下水除由上方地表降雨沿高角度節理及裂隙入滲補注外，另有經由西南方山側地質褶皺構造裂隙

（三）模型水文分析參數

本文近域流場分析所用之透水係數，主要依據廣域模式分析所率定驗證之參數（財團法人中興工程顧問社，2019），本研究利用統計之冪級數分布（Power law distribution）來模擬設定透水係數之不均勻與變異性，設定後的透水係數範圍介於 $5 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-6}$ (m/sec) 之間，彙整如表 1 所示。

表 1 地質模式之透水係數參數彙整

地層名稱	透水係數 K (m/sec)
黑色片岩	$5 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-6}$
漢本大理岩	$5 \times 10^{-7} \sim 2.5 \times 10^{-6}$
綠泥片岩	$6 \times 10^{-7} \sim 2.32 \times 10^{-6}$
破碎砂質片岩	$7 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6}$
大理岩	$1.2 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$
抽坍區	$3 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$

三、隧道營運襯砌水壓情境分析

該案例隧道抽坍段經回填灌漿及混凝土襯砌澆築完成後，隧道出水量大幅減少，既有排水設施已可因應，抽坍災變發生後的設計變更將襯砌混凝土強度由 24.5 MPa 提高為 35 MPa，以因應襯砌可能承受應力增加問題，故後續營運期間隧道襯砌承受之水壓規模乃為值得關注課題之一。

本文利用上述已建構之案例山岳隧道近域流場水文地質模式（張偉哲等，2020），探討營運期間襯砌水壓可能增加的情境與影響，考量隧道已開挖貫通，周圍水文地質環境在正常情況下應不致再有明顯改變，隧道襯砌水壓增加主要可能來自於持續降雨所導致之地下水位抬升。本文乃蒐集案例山岳隧道鄰近氣象局雨量站資料，在民國 93 年～108 年間，本地區平均年雨量約 2,894 mm，最高年雨量為民國 107 年的 3,457 mm，最低年雨量為民國 105 年的 2,440 mm。故本文將民國 107 年的高年雨量（3,457 mm）設定為豐水降

雨情境，而以平均年雨量（2,894 mm）作為一般降雨情境；另本文再考慮隧道長期營運後，排水系統倘若發生堵塞，排水功能下降，將可能導致隧道周圍地下水蓄積及襯砌水壓增加情形，此情境乃透過將周圍岩體透水係數降低 0.1 倍方式進行模擬分析。本文共進行 4 種不同情境組合分析，包括：（1）一般降雨及排水功能正常情境、（2）一般降雨及排水功能降低情境、（3）豐水降雨及排水功能正常情境、（4）豐水降雨及排水功能降低情境，分別分析探討各情境下襯砌承受水壓狀況，分析結果說明如下：

（一）一般降雨情境

本情境分析結果顯示，在一般降雨及排水系統功能正常運作時，水壓變化呈環狀分布於隧道外側，且由隧道襯砌向外逐漸遞增，如圖 5。抽坍區隧道頂拱水壓約 0.04 MPa，側壁水壓約 0.09 MPa。整體而言，隧道排水系統正常運作下，隧道襯砌承受的水壓有限，應不致有安全疑慮；其次，檢視隧道縱向剖面水壓變化，水壓變化約略呈橄欖球型分布，影響範圍向上延伸約 30 公尺。分析顯示開挖擾動區附近水壓約 0.19 MPa，大致與抽坍後利用探查孔所進行之水壓觀測值（0.12 MPa）相近，而上方受壓含水層的水壓則達 1.78 MPa，除少量來自上方降雨補注外，亦有來自遠端高山集水區的側向地下水補注。

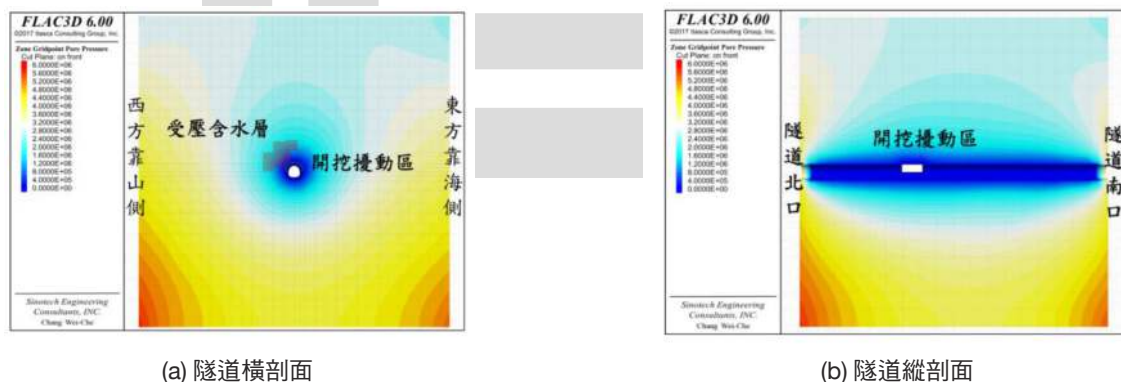


圖 5 一般降雨及排水功能正常之水壓分布圖

一般降雨情境分析進一步假設長期營運後，山岳隧道排水系統功能大幅降低，甚或失效情形下，分析探討隧道周圍水壓變化情形。分析結果（圖 6）顯示隧道頂拱襯砌水壓約達 4.02 MPa，

側壁處水壓約 4.03 MPa，比對排水系統功能正常情境之水壓值，顯示若排水系統功能大幅降低時，將可能導致襯砌水壓增加約 3.9 MPa 左右。

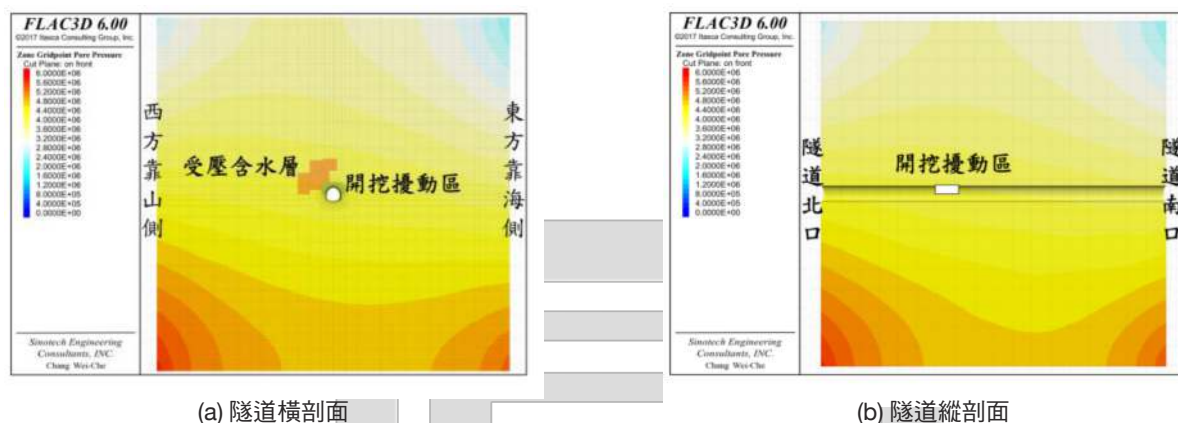


圖 6 一般降雨及排水功能降低之水壓分布圖

（二）豐水降雨情境

針對山岳隧道營運期間如遭遇豐水降雨時，模式分析結果彙整，如圖 7~8 所示。其中可見若排水功能維持正常時，抽坍段隧道頂拱襯砌水壓約 0.04 MPa，側壁處水壓約 0.10 MPa。比對上述正常降雨情境可見，豐水降雨雖使地下水補注量

增加，但透過排水系統運作，地下水順利排出洞外，襯砌水壓不致有顯著上升。此外，倘若山岳隧道長期營運後，排水系統功能大幅下降時，豐水降雨時，隧道頂拱襯砌水壓約 4.45 MPa，側壁水壓約 4.46 MPa，襯砌水壓明顯增加，將提高襯砌損壞的風險。

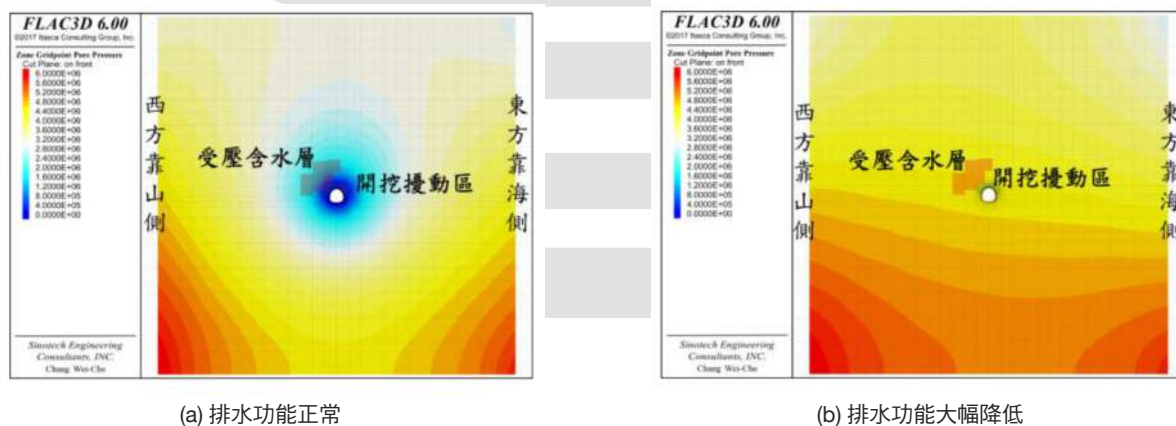
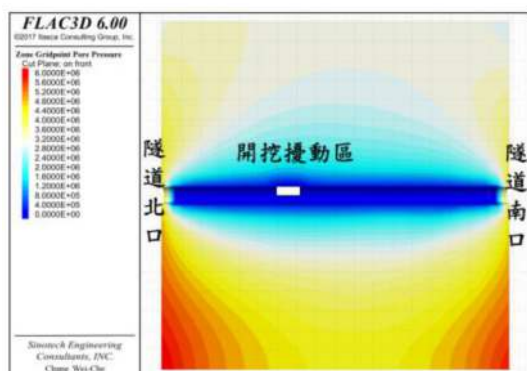
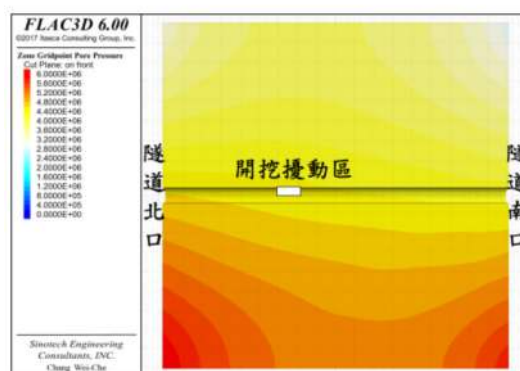


圖 7 豐水降雨情境之隧道橫剖面水壓分布圖



(a) 排水系統正常



(b) 排水系統失效

圖 8 豐水降雨情境之隧道縱剖面水壓分布圖

歸納上述分析結果，在隧道排水系統功能正常情況下，降雨補注量多寡（一般降雨情境或豐水降雨情境）對山岳隧道襯砌承受水壓影響差異有限；但倘若隧道排水系統功能大幅降低時，地下水無法宣洩排出，襯砌承受水壓將會明顯增加，增加襯砌損壞風險。本案例隧道遭遇複雜褶皺構造與地下水流場，雖已依據調查結果建構三維水文地質模型，惟各地層水文地質單元延伸分布與水力參數實仍存在相當程度不確定性，情境模式分析雖無法完全精確掌握隧道襯砌承受水壓值，但可大致瞭解不同狀況下，襯砌水壓變化趨勢與增加幅度，提供襯砌結構安全評估之參考。

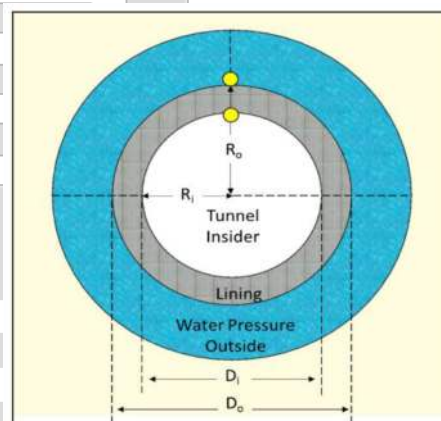


圖 9 Cylindrical Thick Wall Pressure Vessels 理論應用於隧道結構示意

四、山岳隧道襯砌應力安全評估

針對襯砌水壓對結構安全的影響，本文採用簡化圓形隧道及 Cylindrical Thick Wall Pressure Vessels 理論（如圖 9）進行襯砌應力解析。Thick-Walled Cylinders 理論將環狀結構應力區分為 External Pressure Vessels 及 Internal Pressure Vessels 兩部分，襯砌內側水壓為零；而襯砌外側水壓則受地下流場影響，倘若排水系統功能大幅降低，襯砌會承受額外蓄積水壓，如圖 10。

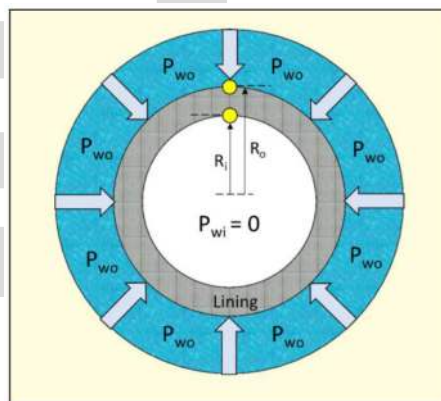


圖 10 External Pressure Vessels 之隧道襯砌水壓分布示意

(一) 襯砌應力理論推導

本文理論解析參數設定依據該案例山岳隧道設計圖資及上述情境模式分析結果，參數彙整如表 2。襯砌應力理論推導，依據 External Pressure Vessels 理論，將圓形隧道之環狀襯砌結構進行取半分析，如圖 11。根據垂直向靜力平衡方程式，取 $\sum F_z = 0$ 進行分析計算如下：

1. 襯砌環向應力所造成之向上作用力，為

$$F_1 = \sigma_t \times 2dr \times L$$

2. 內部徑向應力所造成之向上作用力，為

$$F_2 = \sigma_r \times 2r \times L$$

3. 外部徑向應力所造成之向上作用力，為

$$F_3 = (\sigma_r + d\sigma_r) \times (2dr + r) \times L$$

其中， P_{wi} 為隧道襯砌內部水壓力（單位：MPa）、 P_{wo} 為隧道襯砌外部水壓力（單位：MPa）、 r_i 為隧道內淨空半徑、 r_o 為隧道襯砌外半徑、 L 為隧道單位長度、 dr 為襯砌厚度、 σ_r 為隧道襯砌徑向應力（單位：MPa）、 σ_t 為隧道襯砌切向應力（單位：MPa）。

通過計算 $\sum F_z = F_1 + F_2 - F_3 = 0$

$$\sigma_t - \sigma_r - \frac{d\sigma_r}{dr} \times r = 0 \quad \dots(1)$$

$$\therefore \varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu}{E} [\sigma_y + \sigma_z]$$

$$\therefore \varepsilon_t = \frac{\sigma_t}{E} - \frac{\nu}{E} [\sigma_t + \sigma_r] \Rightarrow [\sigma_t + \sigma_r] = \frac{E}{\nu} \left[\frac{\sigma_t}{E} - \varepsilon_t \right]$$

$$[\sigma_t + \sigma_r] = 2A \text{ (constant)} \quad \dots(2)$$

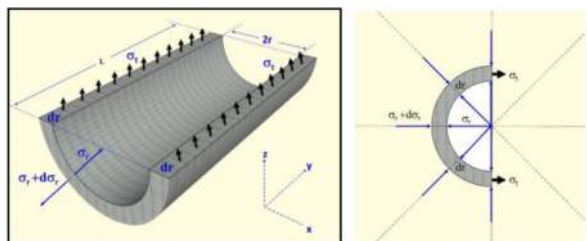


圖 11 圓形隧道襯砌取半分析示意圖

表 2 襯砌安全穩定評估量化分析參數彙整

符號	參數值	來源依據
P_{wo}	4.02(MPa) 4.45(MPa)	一般降雨情境 豐水降雨情境
P_{wi}	0 (MPa)	隧道襯砌內部水壓
t	0.6 公尺	襯砌厚度依據設計圖，VI 類岩盤襯砌最小厚度為 60 公分。
r_o	6 公尺	依據案例山岳隧道設計圖說，將隧道結構簡化設定為半徑 6 公尺之圓形。
C	7.1 (MPa)	混凝土強度由原來 24.5 MPa 提高為 35 MPa，襯砌凝聚力由 350 MPa 推估而求得。
f	45°	擬採混凝土內摩擦角。

eqn(2) - eqn(1)

$$2\sigma_r - 2A = -\frac{d\sigma_r}{dr} \times r \Rightarrow 2(\sigma_r - A) = -\frac{d\sigma_r}{dr} \times r$$

(divided by $1/d\sigma_r$)

$$\frac{d\sigma_r}{2(\sigma_r - A)} = -\frac{dr}{r} \Rightarrow \int \frac{d\sigma_r}{(\sigma_r - A)} = -\int \frac{2dr}{r}$$

$$\therefore \log(\sigma_r - A) = -\log r^2 + \log B = \log \frac{B}{r^2}$$

$$\therefore (\sigma_r - A) = \frac{B}{r^2} \Rightarrow \text{得證 } \sigma_r = A + \frac{B}{r^2} \quad \dots(3)$$

$$\text{代入 eqn(2)} \left[\sigma_t + A + \frac{B}{r^2} \right] = 2A \Rightarrow \text{得證 } \sigma_t = A - \frac{B}{r^2} \quad \dots(4)$$

根據 External Pressure Vessels 水文邊界條件，繼續推導如下：

$$r_i = \frac{D_i}{2} ; \sigma_{ri} = -P_{wi} \text{ (MPa)}$$

$$r_o = \frac{D_o}{2} ; \sigma_{ro} = -P_{wo} \text{ (MPa)}$$

$$\text{代入 eqn(2)} \quad \sigma_r = A + \frac{B}{r^2}$$

$$\sigma_{ri} = -P_{wi} \text{ (MPa)} = A + \frac{4B}{D_i^2}$$

$$\rightarrow \sigma_{ro} = -P_{wo} \text{ (MPa)} = A + \frac{4B}{D_o^2}$$

$$(-P_{wi} + P_{wo}) = \frac{4B}{D_i^2} - \frac{4B}{D_o^2}$$

$$(P_{wo} - P_{wi}) = 4B \left[\frac{D_o^2 - D_i^2}{D_i^2 D_o^2} \right] \Rightarrow B = \frac{(P_{wo} - P_{wi})(D_i^2 D_o^2)}{4(D_o^2 - D_i^2)}$$

$$\sigma_{ro} = -P_{wo} = A + \frac{(P_{wo} - P_{wi})(D_i^2 D_o^2)}{(D_o^2 - D_i^2) D_o^2}$$

$$-P_{wo} (D_o^2 - D_i^2) = A(D_o^2 - D_i^2) + (P_{wo} - P_{wi})(D_i^2)$$

$$A = \frac{(P_{wi} D_i^2 - P_{wo} D_o^2)}{(D_o^2 - D_i^2)}$$

故得證

$$\sigma_r = \frac{(P_{wi} D_i^2 - P_{wo} D_o^2)}{(D_o^2 - D_i^2)} + \frac{(P_{wo} - P_{wi})(D_i^2 D_o^2)}{4(D_o^2 - D_i^2)} \frac{1}{r^2} \dots (3)$$

$$\sigma_t = \frac{(P_{wi} D_i^2 - P_{wo} D_o^2)}{(D_o^2 - D_i^2)} - \frac{(P_{wo} - P_{wi})(D_i^2 D_o^2)}{4(D_o^2 - D_i^2)} \frac{1}{r^2} \dots (4)$$

推導所得公式可用以計算隧道承受外水壓作用時，襯砌內切向應力（Tangential stress, σ_t ）及徑向應力（Radial stress, σ_r ）變化情形。

（二）不同降雨情境安全評估

有關案例山岳隧道襯砌結構安全評估，在排水系統功能正常運作下，模式分析顯示襯砌承受之水壓極為有限（小於 0.1 MPa），故本文主要乃針對排水系統功能倘若大幅降低時，不同降雨情境之安全狀況評估，如下：

隧道內部水壓：

$$r_i = \frac{D_i}{2} = 6000 \text{ (mm)} ; \sigma_{ri} = -P_{wi} \text{ (MPa)} = 0 \text{ (MPa)}$$

一般降雨事件：

$$r_o = \frac{D_o}{2} = 6600 \text{ (mm)} ; \sigma_{ro} = -P_{wo} \text{ (MPa)} = 4.015 \text{ (MPa)}$$

$$\sigma_H = A + \frac{B}{r^2} ; \sigma_r = A - \frac{B}{r^2}$$

$$\sigma_{ri} = A - \frac{B}{6000^2} = 0.0 \text{ (MPa)}$$

$$\sigma_{ro} = A - \frac{B}{6600^2} = 4.015 \text{ (MPa)}$$

$$4.015 = -\frac{B}{6600^2} + \frac{B}{6000^2} \Rightarrow B = 8.328E+08 ; A = 23.134$$

頂拱襯砌內側 (Inner) 之水平切向應力：

$$\sigma_{H,inner} = 23.134 + \frac{8.328E+08}{6000^2} = 46.268 \text{ (MPa)}$$

頂拱襯砌外側 (Outer) 之水平切向應力：

$$\sigma_{H,outer} = 23.134 + \frac{8.328E+08}{6600^2} = 42.253 \text{ (MPa)}$$

同上述方式，將豐水降雨情境計算後彙整如表 3，整體案例隧道頂拱在不同降雨情境之襯砌水壓，可協助進一步以切向應力（Tangential stress, σ_t ）為襯砌最大主應力 σ_1 ，以徑向應力（Radial stress, σ_r ）為襯砌最小主應力 σ_3 ，透過莫爾庫倫破壞準則（Mohr-Coulomb Failure Criterion）與破壞包絡線（Failure Envelope），評估襯砌安全係數 FS，如圖 12 所示。評估結果顯示，案例山岳隧道襯砌水壓在不同降雨情境之安全係數分別為：FS_{一般}=1.12、FS_{豐水}=1.09。

表 3 案例山岳隧道不同降雨情境之襯砌水壓彙整

	一般降雨	豐水降雨
頂拱襯砌內側	$\sigma_t = 0$	$\sigma_t = 0$
水壓 (MPa)	$\sigma_h = 46.27$	$\sigma_h = 51.27$
頂拱襯砌外側	$\sigma_t = 4.02$	$\sigma_t = 4.45$
水壓 (MPa)	$\sigma_h = 42.25$	$\sigma_h = 46.82$

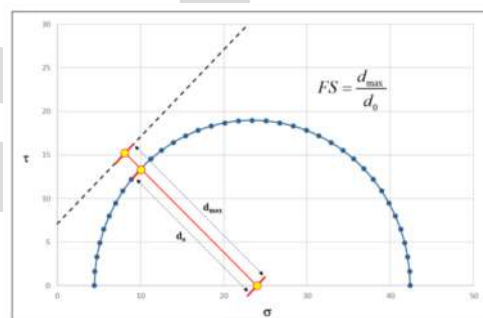


圖 12 隧道襯砌安全係數評估定義圖

結 論

在氣候變遷劇烈及臺灣環保意識日漸高漲情形下，未來工程的推動無可避免需面對地下水資源保護議題。本文透過廣域與近域水文流場結合方式，將複雜褶皺構造納入模式分析，除更真實呈現工程與周圍水文地質環境相互影響關係外，並進一步設定山岳隧道長期營運遭遇不同降雨事件的地下水流補注情境，分析隧道襯砌可能承受水壓的規模，進而嘗試透過 Cylindrical Thick Wall Pressure Vessels 理論解析，來快速量化與評估其隧道襯砌安全性。

本文建構山岳隧道遭遇複雜褶皺構造與地下水流場，長期營運之襯砌水壓安全評估方式，惟本文案例山岳隧道之劇烈褶皺構造環境，各地層水文地質單元延伸分布、水力參數及抽坍段補強成效等均無法精確掌握，透過情境模式分析與理論簡化解析方式，雖可進行襯砌結構量化安全評估，但仍有相當程度不確定性，故建議營運期間應持續辦理各項水文與結構安全監測，例如隧道排水量觀測、水壓量測、鄰近地下水位觀測、襯砌結構異狀檢測、隧道內空微變量測等，透過儀器監測與模式分析，評估隧道長期營運安全。

參考文獻

- 張偉哲、徐文杰、辜炳寰、蕭富元（2020）FLAC3D 應用於複雜褶皺構造之近域流場分析案例研究，中興工程季刊，第 149 期，第 19-25 頁。
- 周永川、楊智堯、許耀仁、林衍丞、鄭斯元、李魁士（2021）隧道長照～地下結構病兆與監測診斷例，地工技術，NO.168，第 25-34 頁。
- 傅子仁、薛文城（2004）新永春隧道高壓巨量湧水災害處理之檢討，地工技術，第 99 期，第 63-72 頁。
- 顧承宇、高憲彰、冀樹勇、陳錦清、楊豐榮（2005）山岳隧道湧水量之分析評估，第 11 屆大地工程研討會論文集，第 F09-1~F09-8 頁
- 蕭富元、高憲彰、邵厚潔、林廷彥（2015）蘇花改隧道施工對地下水文影響評估，地工技術，第 146 期，第 33-42 頁。
- 蕭富元、彭詩容、高憲彰、冀樹勇（2014），水文地質調查與分析在隧道工程中的應用探討，隧道建設，第 34 卷，第 6-14 頁，2014。
- 辜炳寰、蔡文瀚、蕭富元、高憲彰（2019）高出水潛勢隧道施工水文地質調查與地下水資源影響分析，中興工程季刊，第 143 期，第 57-67 頁。
- 辜炳寰、蕭富元、邵厚潔、林廷彥（2019）大理岩隧道開挖出水特性與因應對策案例探討，第十八屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會，四川重慶。
- 財團法人中興工程顧問社（2020）臺 9 線蘇花公路山區路段改善計畫水文地質模式檢測及區域水資源環境影響分析 - 計畫總結報告，交通部公路總局蘇花公路改善工程處。
- Gattinoni, P., L. Scesi, S. Terrana, 2008, Hydrogeological risk analysis for tunneling in anisotropic rock masses, World Tunnel Congress 2008, pp.1736-1747.
- Hazeri, H.R., A. Uromeihy, M. Sharifzadeh, 2011, Evaluation of high local groundwater inflow to a rock tunnel by characterization of geological features, Tunneling and Underground Space Technology, Vol.26, pp.364-373.



SINOTECH

*國立海洋生物博物館

宏觀視野與環境融合的工藝

建築是文明的表徵，是生活、機能與美學的共構體
中興工程顧問公司以規劃的專長、傲人的品質
對需求的洞察與創造力，精琢出內蘊深厚的建築
擴展至城鄉發展的舉劃，成為福爾摩沙地景的塑造者

建築美學團隊

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

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



正派經營 · 品質保證 · 追求卓越 · 創新突破

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



全臺首座離岸風電深水試驗場 之規劃與興建

譚泳蓁 *

摘要

配合行政院民國 106 年核定前瞻計畫「離岸風電水下基礎設施之推動規劃」政策，經濟部執行「風力發電 4 年計畫」並於高雄興達港規劃「海洋科技產業創新專區」。

專區中深水試驗池興建工程為未來離岸工程發展核心設計為目標，將凝聚政府及產業能量，成就身為海島國的臺灣，洞悉海洋科技、海洋工程、海底施工與營運維護專業人才，藉此提高我國海事工程水準、創造綠色能源設計領頭地位，儲備海事人力供給、促進孕育人力技術在地化並與國際接軌。

本文將提供專區中，全臺首座此規格深水試驗池興建歷程，從配合財團法人金屬工業研究發展中心、荷蘭 MARIN 顧問進行池中流體參數設計數值指導、深水試驗池規格配置、功能性大型設備效用、專管設計監造及發包等，以精要方式，條述此建物類型特性與架構，供各專業同仁翻閱，供未來承接相關工程之前導。

關鍵字：深水試驗池、海底環境模擬、離岸風電、海事工程、海底施工

一、前言

一座國際級海洋工程深水試驗池，可模擬海上風、波、流環境條件。國內建置首座具可模擬真實海域情況之深水試驗池，提供下列主要效益：

- (一) 培養離岸風機水下基座檢測維護技術
- (二) ROV 操作模擬訓練
- (三) ROV、AUV、水下 Robot 性能研發與測試
- (四) 水下聲納、通訊系統技術研發測試
- (五) 海上固定、浮動式結構物縮尺比例模型測試與參數回饋

(六) 動態定位控制、海底系統操作測試驗證

由於浮動式風機在施工段、運維段成本與技術難度均較固定式低，展望未來浮動式風機的商機與國際競爭力，深水試驗池的建置，將能協助國內廠商在浮式風機平台設計階段之測試驗證，並將測試模擬數據與相關 know-how 留在國內，從 OEM 邁進 ODM。

二、深水試驗池國家定位與效益

(一) 建置國家級深水試驗池之必要性

國內目前尚無可提供模擬臺灣近海海域，測

* 前中興工程顧問公司建築工程部建築師

試離岸工程作業之深水試驗池，反觀在離岸工程及能源發展興盛之歐洲國家皆設有深水試驗池來協助技術發展關鍵環節已為未來國際趨勢，影響產業甚廣，包含離岸風電、海洋能源、船舶、機電、海洋資源、海底營造工程產業等，實著重要。

設計建置階段，需委託國外大型深水試驗池機構，進行模型測試及認證。除了測試費用高、排隊等候時間長以外，設計參數資料難以保密且僅獲得最終測試結果報告，倘若要進行延續性的發展，測試驗證專案則需重啟。

如自設深水試驗池則可提供國內即時性與客製化服務。一方面可降低測試費用、國際溝通與

運送模型時間成本外，更佳是將高機密性模擬設計數據參數留在國內，加速產學研界研發能量趕上國際。

(二) 深水試驗池主攻要項

國內海事工程領域相關實驗水池多樣，惟缺本案規模及效用之水池，間接影響離岸風電/海洋能發電等系統設計驗證、大型海事工、水下施工作業訓練、海下儀器設備研發等技術發展緩慢國際 20 餘年。

此深水試驗池建置完成後，將成為可補足我國海域、港灣及河海工程研發領域能量的最後一塊拼圖，其發展多面向及重要性分述如圖一：

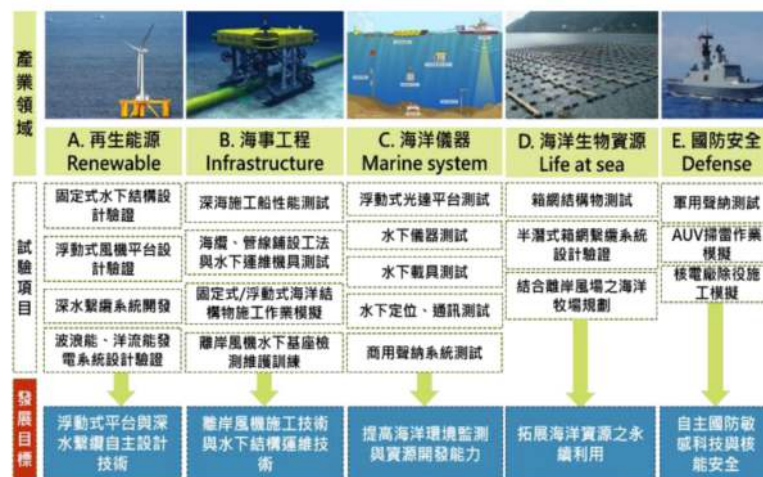


圖 1 深水試驗池發展簡述

(三) 臺灣目前既有其它種類之試驗池

為探究海洋科技領域相關測試及模擬所需，目前設有因應不同測試效能所需，設有不同規模、尺寸、深度及設備配置之試驗池如圖 2 所示（長度單位：m）。

圖 2 中水池多為船體試驗所需設置。說明本案深水試驗池具備之功能及效益。

本案深水試驗池規格為臺灣首座。為模擬臺灣周邊海域之波流狀況，備有造流、造波、池底升降平台、池面上工作台車等。規劃設計施工上，

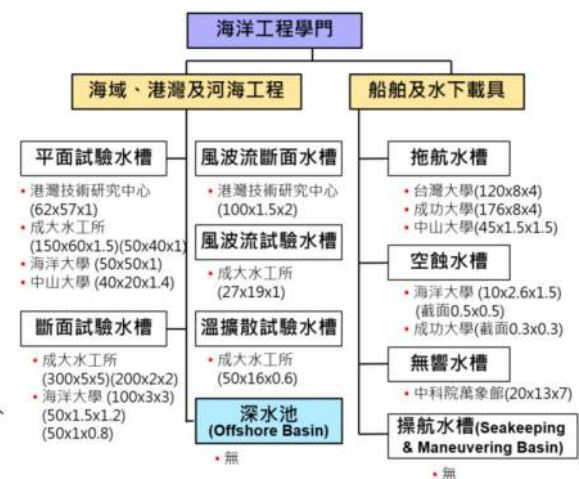


圖 2 臺灣既有之試驗池

聘請荷蘭海事科技前輩 MARIN 擔任架構建置顧問並提供模擬臺灣海域洋流設計圖面。國內由經濟部發起後，金屬工業研究發展中心承攬整體興建營運；中興工程顧問公司獲得完整專案管理角色；國內建築師為九典聯合建築師事務所；最後由興安營造股份有限公司承攬施工，共同打造國際級深水池試驗池。藉由本案產業技術引進、專案知識領域昇華，將專業知識根留臺灣，將在圖3領域範疇中，提供亮眼成績。



圖3 深水試驗池之產業發展效益

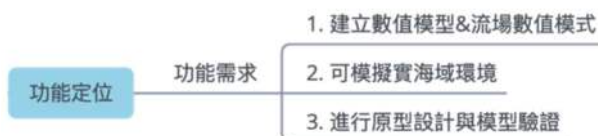


圖4 深水試驗池數值模擬生成與成果驗證

上述產業效益中，深水試驗池提供數值模擬生成與成果驗證。

三、臺灣首座離岸風電試驗池規格介紹

(一) 設置基地位置說明

臺灣四面環海，海洋資源豐富。過去偏向以漁業資源和船舶發展，近年因離岸風電產業盛行，連動促進海洋風能技術開發，掌握海洋資源開發與應用成為重要課題。

興達港位於高雄市茄萣區，基地位置鄰近在地產業，政府設立「高雄海洋科技產業創新專區」於此，以離岸風電產業發展，導入海洋科技產業，結合沙崙綠能科學城及路竹南科高雄園區，連串形成綠能科技廊帶。「高雄海洋科技產業創新專區」整體分為一區及三中心，本案隸屬於三中心

區塊，位於茄萣區正順東路及正大路交叉口，基地為紅色虛線處如圖5所示。



圖5 本案深水試驗池基地位置

依九典聯合建築師事務所設計，以海洋波浪翻起意象創造建築物外觀，掀起的部分為主要入口空間（如圖6）。



圖6 本案深水試驗池外觀示意圖

(二) 深水試驗池規格說明

1. 深水試驗池體內淨空間：

淨長 35m × 寬 28m × 深 12m 池體空間。

2. 可執行試驗測試空間區塊：

為可測得有效實驗數據，不受相關水流打至牆體反射產生紊流干擾，有效測試空間為池體中 1/3 中間位置。

3. 池體中，測試模型縮尺比例：1 / 20~1 / 60

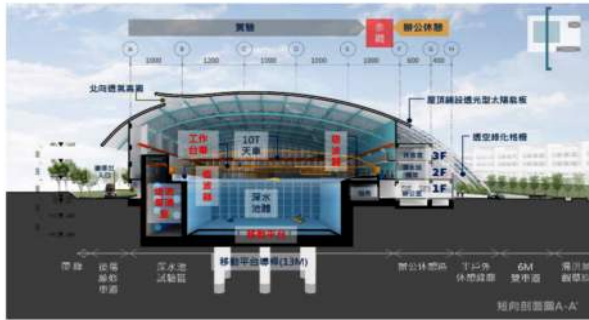


圖 7 本案深水試驗池剖面圖

4. 海浪模擬設備：

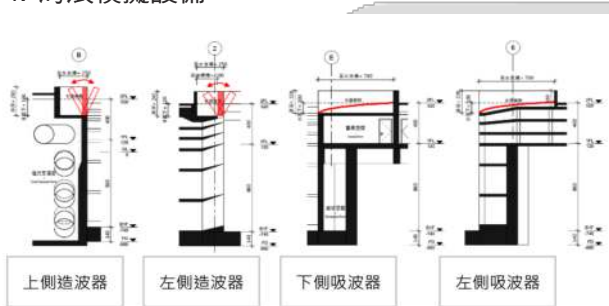


圖 8 造波設備剖面說明圖

設有 L 型造波設備如圖所示，造波採用多鰭片造波器 (multi-flapwave maker) 與吸波板 (beach) 分別設置於 X 軸及 Y 軸。

由水池短邊 (最大浪高 0.5m) 與長邊 (最大浪高 0.66m) 排列組合，搭配設計模擬需求產生規則波、不規則三維波浪、斜波及颱風巨浪。

5. 海風模擬設備：造風設備採 winch 模擬海面上之風向與風力。

6. 池體上方跨距 50m 天車：

水池上方設有跨約 50m 長之 10 噸天車。其 Y 軸 10 噸 + 2 個 3 噸吊鉤，供吊移測試模型使用。當天車底端吊鉤收回時，吊鉤底端需與水面淨高留設 7m 以上。

7. 模擬海底洋流之造流設備 (共六層，如圖 9)：

此造流設備是由六層循環水道、6 組泵浦、漸變水道產生流量壓力、出水水櫃口整流、回水水櫃口回水，搭配運作組成。整體採用外循環式

造流，水由池體左側短邊出水、右側短邊回水。

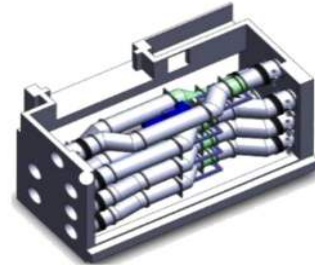


圖 9 造流設備泵浦室水道透視圖

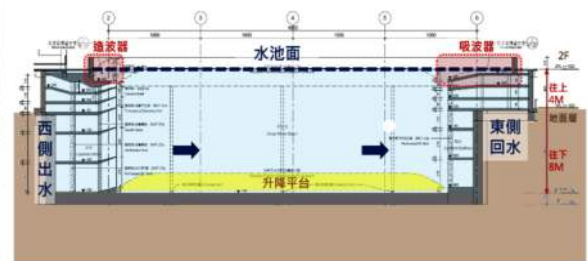


圖 10 水中造流效果剖面圖

利用縮尺比例壓力流速，模擬外海域不同層級流速，以提供模型測試用。

模擬造流構造較複雜，除了需要設計計算出水水櫃漸縮達到水流等壓流進水池內，亦須於出水口設置整流層，創造所需穩定之流速，從水櫃打進水池中，控制實驗變因與控制變因測驗後，得到有效設計數值回饋。造流水櫃從水面至池底共有六層 3D 曲面水道，藉由 Flow3D 計算 RC 管徑，依照設計形狀、水道完成表面粗糙度進行測試模擬，以達到各層所需之流速。水櫃內部 3D 構造複雜，以下提供水櫃三處斷面圖說明 (如圖 11)。

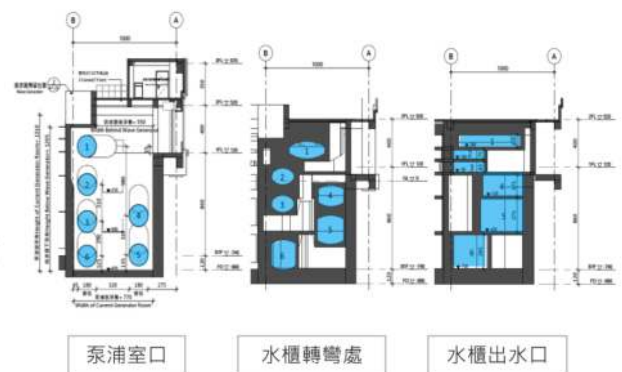


圖 11 造流設備水櫃三處剖斷面圖

造流水櫃水道頭尾由出水口及回水口從矩形到泵浦室圓形進行水道三項度漸變，同一條水道最大落差亦有 5m 落差，在施工上極具挑戰。

8. 約 35m×28m×2m (H) 之 RC 升降平台：

設於水底同池底面積大小之 RC 構造物平台，具備浮力需求與剛性結構，四邊與池壁結構體距離留設約 15cm 安全碰撞距離及防撞裝置。整體結構在池中移動軌跡形式如圖 12 紅色虛線及箭頭範圍。

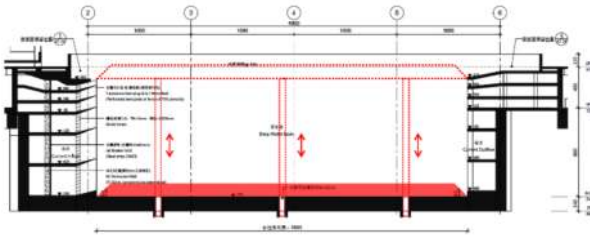


圖 12 升降平台結構與運作方向說明

如此大面積及高難度建置之平台，設置目的為模擬海底深度與洋流測試時，提供不同縮尺水深穩定之海底面。平台會在深 12m 池中移動，上升下降以浮力與纜繩控制。為避免平台上浮水壓力造成結構彎矩變形，計算設計平台總厚度約 2m，除了本身結構構造外，亦將高密度保密龍放置平台 RC 格狀結構中，計算水中浮力與平台自重分區配設，以減輕自重。運作上纜繩放鬆後，平台自身浮力上升至所需位置拉緊固定；下降時則以絞纜機配合纜線拉力下拉至池底固定。上升及下降位置定位點精密度需求高另設內部結構隔艙之水密壓艙箱構造來調整垂直升降精準平整度。有別於其他國家無地震帶，臺灣在建置上地震環境須於水的環境下承受 6.6 級 (340gal) 以上地震之搖晃，所以，如何在地震碰撞下保持水池壁體及平台安全，是本工程中多方考驗且極具挑戰項目。

9. 跨距 50m 水池面上 XY 項移動之工作台車（曳引台車）：

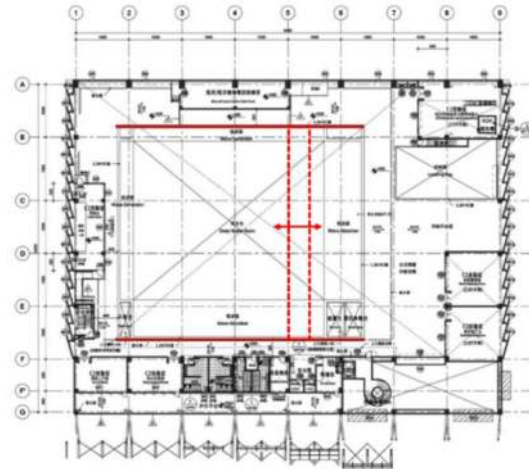


圖 13 工作台車設置位置及移動方向說明

架設於水面上之門型軌道台車（如圖 13 紅色框線標示位置及箭頭移動方向），台車上設置觀察控制室，讓作業員可於水面上任一點位置直接觀察水底測試情況。另外於台車下方亦設有掛鉤可拖曳模型架設偵測機具或照明設備。台車軌道架設在水池長邊 RC 矮牆上。由於經費編列與興建時程不同步，故興建完成階段先設置台車軌道，預留東側大型開口，供未來台車添購進場建置使用。

（三）深水試驗池空間詳述

除深水試驗池內特殊設備及空間外，另針對試驗池實際作業執行上，其它搭配所需空間如：樓高需求、各樓層作業位置、實驗室、會議室及模型空間等，簡述如表 1。

表 1 深水試驗池周邊空間說明

空間類別	
地上三層	水池作業及相關實驗空間 觀察室、辦公室(1間)、儲藏室、機房
地上二層	水池作業及相關實驗空間： 水池周邊作業空間、控制室、潛水設備室、測試工具室、ROV維修室、模型整備室、模型加工室、吊裝平台 服務空間： 醫護室、廁所(男女各1間)、淋浴間(男女各1間)、茶水間
地上二層	辦公室(3間)及會議室(1間) 服務空間： 大廳、展示區、廁所(男女各1間、無障礙1間)、茶水間
地上二層	機房空間： 卸貨區、台電配電場所、自設配電室、緊急發電機室、自來水機房、汙水處理機房、消防泵浦室、雨水回收機房、資訊機房、中央監控室
地下一層	深水池、造流泵浦室、維修空間

1. 測試監控室、測試工具室各一。
2. 設有天車之 ROV 操控模擬室。
3. ROV 整備維修室內淨高 6m、另設有 5T 天車及淡水池 (長 3m × 寬 3m × 深 3m) 供 ROV 清洗使用。
4. 池面同層之控制室及觀察室。
5. 模型整備室及模型加工室，室內淨高 6m 及各設有天車 2.8T。
6. 建物為大跨距鋼結構建築，室內中央屋脊高離地面約 22m。
7. 面南屋頂設置含自動清洗設備太陽能板供風扇、弱電等；面北屋頂設置隱藏式散熱設施。
8. 為防止池中微生物生長，2 樓水池區無設置窗戶、減少自然採光。
9. 全棟只有辦公室及實驗室設有空調系統，大面積水池區使用新鮮空氣降溫通道，引氣通風。
10. 另於水池內設有平衡池，以自動添補美日水池自然流失之蒸散水量。

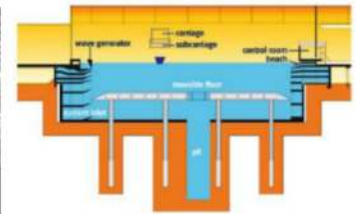


圖 14 荷蘭 MARIN 海事工程研究中心深水試驗池

1. 水池尺寸：長 45m × 寬 36m × 高 10.2m 及水池中設升降平台。
2. 鑽油測試深水坑：φ5m × 10D m。
3. 造風設備：24m 寬平台設置。
4. 造波設備：L 型多鰭片式 + Y 方向油壓式平推。
5. 造流設備：深 10.2m 配置六層造流水道，可產生 profile 流場。
6. 水池功能效益：模擬海上風、波、流環境，進行海上固定、停泊結構物、動態定位控制，以及淺水域船操縱等研究測試驗證。

四、課題探討

(四) 對照其它國家深水試驗池

對照其他國家深水試驗池建立時間與規模簡述標示如表 2：

表 2 其他國家水試驗池規格

	台灣 Formosa Ocean Basin	荷蘭 MARIN Offshore Basin	新加坡國立 大學 TCOMS	中國 上海交大	哈爾濱 工程大學 HEU Deepwater Basin	南韓 KIOST UTEC
建造 年分	2020 -	1998- 2000	2017-2019 (2020驗收中)	2004- 2008	2006-2008	2015 - 2017
深水 池尺 寸(m)	長：36m 寬：30m 深：10.2m	長：45m 寬：36 m 深：10.2m	長：60m 寬：48m 深：12m	長：50m 寬：40m 深：10m	長：50m 寬：30m 深：10m	長：35m 寬：20m 深：9.6m
造風	有	有	有	有	無	無
造波	有	有	有	有	有	無
造流	有	有	有	有	局部 (0.1m~0.5m)	分池 20'X5'X6'
升降 平台	有	有	有	有	無	無

(五) 國際案例荷蘭 MARIN 海事工程研究中心深水試驗池

(一) 海域模擬位置與可執行之縮尺比例

依照規劃規格訂定及與國外顧問研擬水池設備規格中，造波器在本身性能極限情況下造出所需波形進行海域海浪模擬，對應深水試驗池縮尺比例為 1 / 20~1 / 60，搭配造流設備，可模擬臺灣周邊海域，進行設計實驗及設計數據回饋修正。目前將針對彰化、新竹一帶風場進行離岸風機模擬建置。

(二) 定性定量回推建築及造流水櫃所需

訂定出縮尺比例後，便依照未來建置硬體縮尺比例回推建置最小水池面積及容量、相配應管道規格尺寸及附屬空間編列。由於水池中實際可測得有效數據位置於池中 1 / 3 處，其餘水域會因

壁體反射流、紊流、不穩定流等影響而無法得到較有效的測試回饋數值。造流水櫃如何達到水池中所需穩定流計算則由國外顧問提供計算結果，國內設計團隊繪製 Flow3D 模擬驗算後轉專管檢核。

（三）基地位置特性與價值工程之研討決策

確定水池規模及內部對應空間配置關係，回應到設置基地時，依照現地狀況進行價值工程決策及設置調整。例如，本案水池基地因鄰近大排，地下水位較高，整體安全及費用考量，規劃階段將深水試驗池作業平面層抬升至二樓，以減少下挖深度、減去大面積開挖空池結構體上浮需補足加重自重增加成本造價等。

（四）專管規畫、設計、發包與介面整合

深水試驗池土建與大型設備介面眾多，局部專業設備需由國外採購；此外有各項設備招標時程、介面圖面整合修正圖面審查核定、大型海外設備訂購運至現場維管搭配土建發包施工進度、施工介面責任歸屬與釐清、各廠商施工時程排序、施工介面點交驗收介面權屬等多項整合注意事項。

（五）政策搭配與預算執行

因本案規格池為全臺首座，其研發設計數值及產業成果皆屬領頭階段，許多後續營運支出及預算不確定性，實著成為政策整體開發考量應對處理之風險與重擔。

五、結 論

身為海島國家的臺灣，所管轄的海域約為陸地面積五倍之大，擁有豐富的海洋資源及極佳的海洋地緣戰略位置。

我國相較比其他先進國家海洋與科技發展起步較晚，近年政府政策，逐漸落實海洋領域建設發展，本案試驗池即為其中一項，期培育國內海洋科技工程人才，針對離岸風電工程技術、水下技術工程、浮動式離岸風機前端設計參數值之驗證測試及海事領域等。

對於身為規劃工程專業的同仁們來說，配合政府政策發展，同時吸取各國先進技術與專業，以累積公司未來工程技術發展之能量。

在此簡述本案建置過程中，相關架構與執行情況，供未來規畫同類型工程時，提供微薄基石，更快掌握全貌，以接續累積茁壯。

參考文獻

- 2020 年 6 月財團法人金屬工業研究發展中心深水試驗池專案團隊：郭子禎副處、陳政言專案經理及團隊同仁整理深水試驗池建置必要性與目標客戶簡報
- 2020 年 7 月財團法人金屬工業研究發展中心深水試驗池專案團隊：郭子禎副處、陳政言專案經理及團隊同仁統整深水試驗池執行必要性說明簡報
- 2020 年深水試驗池造流設備得標廠商三太造機廠股份有限公司，安裝報告，專管審查會議簡報
- 2019 年英國 ORE- Benefits of floating offshore wind to Wales and the South West
- 2019 年 31370-3-TT Questions put forward by MIRDC concerning design Formosa Offshore Basin 2019 week 44
- 2019 年中興工程顧問股份有限公司統整撰寫之深水試驗池規劃成果報告書
- 109 年前瞻基礎建設計畫—綠能建設 高雄海洋科技產業創新專區公共建設計畫第二期（核定本）
- 108 年「高雄海洋科技產業創新專區深水試驗池新建工程設計暨監造委託技術服務案」需求說明書
- 108 年高雄海洋科技產業創新專區深水試驗池新建工程設計暨監造委託技術服務案得標設計團隊九典聯合建築師事務所基本設計報告書
- 106 年行政院核定通過前瞻基礎建設計畫
- MARIN 網站 <https://www.sssri-marin-jv.com/>



SINOTECH

★北投垃圾焚化廠

用技術落實對地球的愛

徜徉在綠色大地，在健康的環境中無慮生活
「環境工程」是人類永續生存發展的重要關鍵
中興工程顧問公司以先進的技術，調和人與環境共處
積極的作為與自然同脈動，持續呵護著我們僅有的一個地球！

環境工程團隊

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

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



正派經營 · 品質保證 · 追求卓越 · 創新突破

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



廢污水中全氟化物之特性分析 與國際管理趨勢

吳佳娟* 林宜璇* 許國恩** 朱敬平*** 鍾裕仁****

摘要

全氟化物為一系列化性穩定之含氟化物，廣泛應用於高科技產業與傳統產業，因其不易分解且有顯著生物累積效應之特性，屬「斯德哥爾摩公約」列管之持久性有機污染物。臺灣環保署接軌國際動態，針對高科技產業、印染整理產業及化工業等可能運作全氟化物之事業進行廢污水含量調查，結果顯示，各產業別廢污水全氟辛烷磺酸及全氟辛酸檢出濃度介於奈克/公升至微克/公升等級。國際間目前針對全氟化物多優先採行源頭管制策略，另部分產業聯盟自主推動化學品使用管理。臺灣目前除已將全氟辛烷磺酸及全氟辛酸納入毒性化學物質管理，另半導體產業協會等亦已採行自主管理措施，除減量使用，同時積極尋求無氟替代化學品，藉由落實源頭管理，廢水全氟辛烷磺酸及全氟辛酸檢出濃度已持續降低。

關鍵字：全氟化物、源頭管理

一、前言

全氟化物泛指化學結構中具強碳氟鍵(C-F)之化合物，以全氟辛烷磺酸(Perfluorooctanesulfonic acid，簡稱PFOS)與全氟辛酸(Perfluorooctanoic acid，簡稱PFOA)兩個化合物的使用歷史最為久遠。全氟化物的結構具有疏水端(C-F骨架)與親水端(通常為羧酸官能基或磺酸官能基)，適合作為界面活性劑，目前廣泛應用於紡織、皮革、紙製品、工業表面活性劑、樹脂、模具、塑料及半導體業等。全氟化物化學安定性高，生物毒性與致癌風險也

被眾多研究報告證實，且具生物累積性，斯德哥爾摩公約(Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants，簡稱POPs公約)於2005年與2019年列管PFOS及其鹽類、全氟辛烷磺醯氟與PFOA，截至2020年POPs公約已限制或禁用30項POPs。

有鑑於PFOA與PFOS於環境累積性，國外已持續進行環境介質全氟化物流布調查，Chen *et al.* (2012)調查中國大陸12座污水處理廠，其中多數具有傳統活性污泥法或A2O處理單元，結果顯示進流水PFOA濃度為2.6~66,000 ng/L，PFOS濃度為1.8~176.0 ng/L；放流水PFOA濃度

* 中興工程顧問社環境工程研究中心副研究員

** 中興工程顧問社環境工程研究中心環境檢測技術組組長

*** 中興工程顧問社環境工程研究中心副主任

**** 中興工程顧問社環境工程研究中心主任

為 2.8~160,000 ng/L，PFOS 濃度為 1.1~74.8 ng/L，污水處理廠 PFOS 或 PFOA 的質量流量 (mass flow) 均未減少，顯示 PFOS 及 PFOA 皆無法藉由污水處理單元有效去除；Rahman *et al.* (2014) 提出因全氟化物具強碳氟鍵，且結構中羧酸官能基與磺酸官能基為吸電子官能團，推測此類物質可能抵抗氧化、生物降解和羥基自由基反應，綜整研究顯示傳統廢污水生物處理程序無法有效去除 PFOA 及 PFOS。近來研究顯示光化學氧化 (UV/Pb-TiO₂ 催化反應) 與薄膜 (薄膜外加電場) 等處理技術針對 PFOA 及 PFOS 之去除率可達近 90%。然鑒於廢水處理成本考量，國外目前主要採行「源頭管理」或「限制使用」，降低廢水全氟化物排放環境水體之風險。爰此，國外目前主要採行源頭化學品管理或限制使用，降低廢水全氟化物排放環境水體之風險。

二、國內全氟化物運作情形

臺灣目前無全氟化物製造廠商，事業使用之化學品均為進口，且多以混合物方式添加於各類化學品，依據財政部關務署統計資料查詢系統，分析國內民國 103 年至 108 年全氟化物相關物質之進出口貨物數量及價值，全氟化物相關物質可分為「全氟烷類」（包含全氟甲烷、全氟乙烷、全氟丙烷、全氟丁烷、全氟戊烷、全氟己烷、全氟庚烷和全氟辛烷等）、「全氟辛烷磺酸四乙基銨」、「全氟辛烷磺酸鉀」、「含全氟辛烷磺酸及其鹽類、全氟辛烷磺醯胺或全氟辛烷磺醯氟之混合物及製品」、「含全氟碳化物 (PFCs) 或氟碳烴化合物 (HFCs) 之混合物（但不含氟氯碳化物 (CFCs) 或氟氯碳氫化合物 (HCFCs)）」及「其他含全氟碳化物 (PFCs) 或氟碳烴化合物 (HFCs) 之混合物，但不含氟氯碳化物 (CFCs) 或氟氯碳氫化合物 (HCFCs) 」等 6 類。其中民國 103 年

至 107 年進口量以「含全氟碳化物 (PFCs) 或氟碳烴化合物 (HFCs) 之混合物（但不含氟氯碳化物 (CFCs) 或氟氯碳氫化合物 (HCFCs) ）」最高（介於 2,232~4,438 公噸），惟民國 108 年進口量降為 0 公噸，其次為「全氟烷類」，民國 103 年至 108 年進口量介於 655~834 公噸，「其他含全氟碳化物 (PFCs) 或氟碳烴化合物 (HFCs) 之混合物，但不含氟氯碳化物 (CFCs) 或氟氯碳氫化合物 (HCFCs) 」部分，民國 107 年和 108 年進口量分別為 129 和 213 公噸；出口部分，以「含全氟碳化物 (PFCs) 或氟碳烴化合物 (HFCs) 之混合物，但不含氟氯碳化物 (CFCs) 或氟氯碳氫化合物 (HCFCs) 」為最高。

依「公告列管毒性化學物質得使用用途一覽表」及附表「公告列管毒性化學物質禁止運作事項一覽表」規定，PFOS 仍可使用於半導體光阻劑和防反射塗層或化合物半導體蝕刻劑等用途，PFOA 部分則無禁限用規定，國內產業公會配合國際管理趨勢，多數廠家已自主性淘汰含氟光阻劑；此外，全氟化物亦可應用於布料等紡織品之防水、防油和抗污。

以晶圓製造及半導體製造業及光電材料及元件製造業等事業為例，黃光與顯影製程所使用之光阻劑、光阻去除液、稀釋劑、基板洗淨劑、光阻稀釋液、配向膜等化學品含有微克 / 公升數量級濃度的 PFOA 和 PFOS 等全氟化物，其中以 PFOA 檢出頻率較高，濃度介於 0.4~11.6 µg/L，但因其含量多遠低於 1%，化學品供應商多未將此微量成分標示於物質安全資料表。近年來，產業協會已持續評估 PFOS 及 PFOA 之替代化學品。

紡織產業運用全氟化物防水、防油與穩定的特性，製作防水用品之塗料以及機能性布料的表面塗層，隨客戶訂單需求不同，使用不同劑型之撥 / 撥水劑。一般而言，全氟化物碳鏈越長，防水抗污的效果越佳，常見的撥 / 撥水劑或防水

劑包含碳八（C8）、碳六（C6）、碳四（C4）含氟撥／潑水劑及無氟撥／潑水劑四類，布料中若使用碳八（C8）撥／潑水劑即含有 PFOA 或 PFOS。隨著國際對於全氟化物強化管理管制，目前國際長鏈全氟化物之供應商均已陸續停止生產，國內廠商配合客戶要求亦已陸續減少碳八撥／潑水劑使用，改使用碳六（PFHA）等低氟化物或無氟化物（PFC-free）撥／潑水劑；另製革業和造紙業特定製程產品亦可能使用含全氟化物之撥／潑水劑。此外，化工藥劑供應商配合客戶端使用需求，亦可能產製含全氟化物撥／潑水劑等化學品。

三、廢污水中全氟化物特性分析

環保署（2017、2019 和 2020）為了解國內產業廠商全氟化物排放情形，針對國內半導體業與光電業、紡織印染業、化工業、製革業、造紙業與等對象進行廢污水 PFOA 及 PFOS 等全氟化物分析，分析方法參考「全氟烷酸類化合物檢測方法—固相萃取與高效液相層析／串聯式質譜儀法」。各產業原廢水與放流水 PFOS 檢出濃度介於 ND~3.51 $\mu\text{g/L}$ ，PFOA 檢出濃度介於 ND~3.19 $\mu\text{g/L}$ ；半導體業與光電業廢水均有檢出 PFOA，紡織印染業、製革業、造紙業與化工業以 PFOS 檢出頻率較高最高。調查顯示部分產業之放流水 PFOA 及 PFOS 濃度高於原廢水，推測與製程採批次式生產模式、檢出濃度屬微量等級以及傳統生物處理及混凝沉澱對 PFOS 及 PFOA 去除效率有限相關。各產業檢測結果彙整如表 1，分述如下：

（一）半導體業與光電業

原廢水與放流水均檢出 PFOA，原廢水檢出濃度介於 0.012~0.061 $\mu\text{g/L}$ ，放流水檢出濃度則介

於 0.016~0.066 $\mu\text{g/L}$ 。PFOS 濃度檢出頻率與濃度皆較低，原廢水與放流水檢出濃度分別介於 ND~0.014 $\mu\text{g/L}$ 和 ND~0.214 $\mu\text{g/L}$ ，相較於環保署（2010）針對高科技產業廢水之調查結果低（原廢水和放流水 PFOS 檢出濃度介於 ND~4.60 $\mu\text{g/L}$ 和 ND~3.76 $\mu\text{g/L}$ ）。顯示隨著廠商自主性落實化學品替代，半導體產業廢水 PFOS 濃度有持續降低之趨勢。

（二）紡織印染業

原廢水 PFOS 檢出濃度介於 ND~0.0243 $\mu\text{g/L}$ ，放流水中 PFOS 濃度均低於方法偵測極限。原廢水與放流水 PFOA 檢出濃度分別介於 ND~0.103 $\mu\text{g/L}$ 和 ND~0.160 $\mu\text{g/L}$ 。其中各廠 PFOS、PFOA 檢出濃度與撥／潑水劑使用量無直接關聯性，但製程僅使用無氟撥／潑水劑或未使用撥／潑水劑之廠商，廢水 PFOS 及 PFOA 檢出濃度相對較低。

（三）化工業

調查之廠商屬事業製程製劑化學品供應商，產品主要為 C6 撥／潑水劑和無氟撥／潑水劑，據廠商提供之 C6 撥／潑水劑檢測結果，PFOS 及 PFOA 含量均低於方法偵測極限，惟廢污水中仍檢出微量 PFOS 與 PFOA。原廢水和放流水 PFOS 檢出濃度分別介於 ND~0.0255 $\mu\text{g/L}$ 和 ND~0.112 $\mu\text{g/L}$ ，PFOA 之原廢水與放流水檢出濃度分別為 0.0244~3.19 $\mu\text{g/L}$ 和 0.0585~2.47 $\mu\text{g/L}$ ，顯見撥／潑水劑仍可能含有微量 PFOS 或 PFOA（惟低於藥劑檢測之方法偵測極限）。美國密西根州 EGLE（2019）曾調查塗料製造業放流水中全氟化物，其檢出之 PFOS 濃度為 6.047 $\mu\text{g/L}$ ，高於前述調查結果。

（四）製革業

原廢水與放流水均檢出 PFOS，檢出濃度

分別介於 ND~0.0208 $\mu\text{g/L}$ 與 ND~0.0026 $\mu\text{g/L}$ ，PFOA 則均未檢出。其中 1 家廠商已於 2 年前停用含氟防水性塗料，推測微量之 PFOS 應源自殘留於製程或廢水槽體之含氟防水劑。另 1 家廠商則自 8 年起停用 C8 防水性塗料，改用 C4 或無氟類型。

(五) 造紙業

2 家造紙業製程均有使用撥 / 撥水劑，據廠方表示均屬無氟產品，惟廢污水仍有檢出 PFOS 與 PFOA。原廢水與放流水 PFOS 濃度分別介於 0.278~0.378 $\mu\text{g/L}$ 與 0.0731~3.51 $\mu\text{g/L}$ 。原廢水 PFOA 濃度介於 ND~0.0017 $\mu\text{g/L}$ ，放流水則均未檢出，全氟化物之來源推測可能來自殘留於製程或廢水槽體之含氟防水劑。

表 1 各產業廢污水 PFOS 與 PFOA 濃度

產業別	原廢水 ($\mu\text{g/L}$)		納管水或放流水 ($\mu\text{g/L}$)	
	PFOS	PFOA	PFOS	PFOA
半導體業與光電業 (n = 4)	ND ~ 0.014	0.012 ~ 0.061	ND ~ 0.214	0.016 ~ 0.066
紡織印染業 (n = 8)	ND ~ 0.0243	ND ~ 0.103	ND	ND ~ 0.160
化工業 (n = 3)	ND ~ 0.0255	0.0244 ~ 3.19	ND ~ 0.112	0.0585 ~ 2.47
製革業 (n = 2)	ND ~ 0.0208	ND	ND ~ 0.0026	ND
造紙業 (n = 2)	0.278 ~ 0.378	ND ~ 0.0017	0.0731 ~ 3.51	ND

註：n 為調查家數。ND 表示濃度低於方法偵測極限。

資料來源：[1] 環保署，產業廢水污染管制與特性分析研議計畫，2017。

[2] 環保署，事業廢水污染防治及標準管制成效評估計畫，2019。

[3] 環保署，事業廢水特性調查及管制策略研析計畫，2020。

四、國際全氟化物之管理趨勢

美國、韓國、日本、新加坡等國均未將全氟化物納入放流水標準管制，但美國及歐洲等部分國家針對飲用水、地下水全氟化物已陸續訂定管理規定，至於廢污水全氟化物管理部分，日本及美國及其州政府已積極推動相關污染調查及改善工作，另國外特定組織已針對全氟化物等有害化學物質採行源頭管理控管，相關作為說明如下：

(一) 日本

日本環境省 2010 年頒布含有全氟辛烷磺酸及其鹽類之廢棄物處理指引「Technical Guideline for the Environmentally Sound Treatment of PFOS Wastes」，該指引適用於含 PFOS 及其鹽類製造過程或使用含 PFOS 及其鹽類產品所產生之固態或液態事業廢棄物處理。另指引規範訂定全氟辛

烷磺酸及其鹽類之廢棄物去除效率 (Destruction rate) 須達 99.999%，而經由處理程序排放之放流水 PFOS 濃度須低於 0.002 mg/L，殘餘廢棄物濃度須低於 3 mg/kg (日本環境省，2013)。

(二) 美國環保署

依據美國環保署 (2019) 針對全氟與多氟烷基碳化物 (Perfluorinated and polyfluorinated alkyl substances, PFAS) 擬定之行動方案指出 (EPA's Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) Action Plan)，PFAS 可視為清潔水法規範之污染物，州政府可利用國家污染物排放削減許可制度 (National Pollutant Discharge Elimination System, 簡稱 NPDES) 控管排放含 PFAS 廢水於水體 (包含飲用水水源) 之點源排放者。另為協助州政府管理水體水質，環保署取得代表性數據後，依據清潔水法評估水質品質標準 (Water

Quality Criteria)，以利州政府許可核定作業。另美國環保署依據放流水標準指引（Effluent Limitation Guidelines and Standards, ELGs）作業程序及有限之數據，初步評估廢水可能排放PFAS之事業包含有機化學品、塑膠、合成纖維、紙漿和紙製品、紡織品和機場等，藉由綜整相關數據及資訊，評估管理管制規定。密西根州和威斯康辛州等州政府目前亦積極推動污染源調查及管理策略擬定。

此外，美國環保署為維持國家與公共飲水安全，針對PFOA與PFOS制定健康公告數值（Health Advisory Levels）為70 ng/L（兩化合物濃度合計）。

（三）美國密西根州

依據美國環保組織（Environmental Working Group，簡稱EWG）研究顯示美國PFAS環境污染較原預估的情形嚴重，其中密西根州PFAS污染情形相對較為嚴重，爰此，密西根州環境大湖和能源部（The Michigan Department of Environment, Great Lakes, and Energy，簡稱EGLE；原名為環境品質部 Department Environmental Quality，簡稱DEQ，於2019年4月22日更名）據以推動污染調查及管理管制規劃，EGLE為保護污水下水道系統及環境水體，以及減少危害污染物之排放，水資源處（Water Resources Division，簡稱WRD）針對工業廢水排入污水下水道系統訂定工業前處理計畫（Industrial Pretreatment Programs, IPP），規範納管對象應採行適宜之處理技術和管理措施。

EGLE為改善PFAS污染情形，考量PFOS和PFOA對人體健康和生物之可能影響，針對地面水水質訂定PFOS和PFOA水質基準（Water Quality Standards，簡稱WQS）。地面水作為飲用水水源時，PFOS基準為11 ng/L，若非屬作為

飲用水水源時，基準值為12 ng/L；至於PFOA部分，地面水作為飲用水水源時，基準為420 ng/L，若非屬作為飲用水水源時，基準值為12,000 ng/L。此外，EGLE進一步以此作為污水處理廠放流水PFOS濃度篩選依據，高於基準者，需進行污染改善。

（四）藍色標誌標準

藍色標誌標準（bluesign® standard）是由歐盟學術、工業、環保及消費者組織所共同訂定之規範，適用範圍包含紡織產品（及其加工）、皮革製品、組件的紡織品、用於上述提及產品製造使用之化學品、輔助原料與染劑、產品護理用品及戶外體育用品、用於紡織加工之技術等。bluesign®於產品製造前即先檢視成分及過程是否符合標準，並訂定化學成份標準之判定程序，將化學成份依生態與毒性的影響分類，進而將原料、化學成分與生產製程區分為灰色與藍色兩個部分。同時從水資源保護、廢氣及廢棄物排放管制、職工健康與安全、消費者安全、安全的製造和節省資源的方式等層面評估最終產品是否符合藍色標準規範。

bluesign®驗證作業主要包含化學品認可標準（Criteria for Homologation）、公司與製程相關標準（Criteria for Production Sites and Companies）及產品標準（Criteria for Consumer Goods）。其中化學品認可標準部分主要針對製程使用之化學品進行認可與分類。例如產品使用之助劑除考量其成分外，亦會針對該助劑於整體製程可能造成之環境衝擊進行評估。bluesign®據評估結果將紡織業使用之化學品歸類，包含：藍色化學品（可以符合bluesign®所有標準與要求之化學品）、灰色化學品（僅可於特定狀況下使用）和黑色化學品（不符合bluesign®標準與要求之化學品）。PFOA與PFOS均已歸屬為禁用物質。

（五）紡織、皮革和鞋類產業所組成之有害化學物質零排放聯盟

紡織、皮革和鞋類產業所組成之有害化學物質零排放聯盟（Zero discharge of Hazardous chemicals，簡稱 ZDHC）積極推動有害物質零排放之積極作為，包含訂定生產限用物質清單（Manufacturing Restricted Substances List，簡稱 MRSL）與數據報告限值。

以紡織品和合成革加工製程為例，針對原材料或產品供應商部分不得有意使用 PFOS 和 PFOA 等全氟化物，至於化學品供應商部分，允許化學品合理的雜質殘留濃度為 2 mg/L。ZDHC 另擬定廢水指南（ZDHC Wastewater Guidelines Version 1.1-The Roadmap To Zero Programme），該指引將傳統參數（Conventional Parameter，包含 COD、SS、氨氮、重金屬等）廢水排放限值設定為基礎等級（Foundational）、良好等級（Progressive）和最佳等級（Aspirational）。數據報告部分，經供應商允許，ZDHC 認可實驗室將檢測結果透過 ZDHC 網站數據和揭露平台，報告至 ZDHC 品牌商，檢測報告數據如超過傳統參數基礎等級限值或超過 ZDHC MRSL 的報告限值（PFOA 和 PFOS 均為 0.01µg/L），亦或超過該國法定許可限值，該生產工廠應通知管理部門及 ZDHC 品牌商和其他客戶檢測結果，並提交改善行動計畫，確認改善時間，並於發現該問題 30 日內，於 ZDHC 數據和揭露平台上傳發生問題原因分析及改善行動計畫，改善完成後，重新進行採樣分析，並上傳數據至前述平台。

五、臺灣全氟化物之管理措施

臺灣接軌國際管理動態，針對全氟化物採行化學品管理，並鼓勵業界減量使用，積極落實源頭自主性管理，現況說明如下：

（一）化學品管理

臺灣雖非 POPs 公約之締約方，但已於 2008 年制定「持久性有機污染物斯德哥爾摩公約國家實施計畫」，依隨 POPs 公約增列化學物質決議，滾動式檢討並研修實施計畫內容，以符合國際管制趨勢。環保署 2010 年依「毒性化學物質管理法」（2019 年 1 月 16 日名稱修正為「毒性及關注化學物質管理法」）將全氟辛烷磺醯氟、PFOS、全氟辛烷磺酸鋰鹽列管，並規定 PFOS、全氟辛烷磺酸鋰鹽之得使用用途；2018 年 6 月 28 日將 PFOA 納入毒性化學物質管理。2020 年 9 月 8 日公告修正「列管毒性化學物質及其運作管理事項」，修正 PFOS、全氟辛烷磺酸鋰鹽、全氟辛烷磺醯氟及 PFOA 之得使用用途。PFOS 部分，刪除照相顯影、液晶顯示器產業、半導體光阻劑、半導體光掩膜、防反射塗層及蝕刻劑、金屬鍍層、塗層及塗層添加劑、陶瓷過濾器、航空液壓油、封閉系統之電鍍液之製造或使用；彩色印表機及影印機之電氣及電子原件之製造或使用；其他醫療設備之製造或使用；化學用石油生產、地毯、皮革及服裝、紡織品及家居裝飾用品業、紙張及包裝業、橡膠及塑膠製品之製造或使用；另外，滅火泡沫之製造或使用部分，修正中華民國 111 年 12 月 31 日前，得用於泡沫滅火設備中 B 類火災之滅火泡沫。另外，仍可使用於封閉系統中硬金屬電鍍；PFOA 得使用用途為半導體的光刻或蝕刻製程、攝影底片塗層之製造、具撥油、撥水性之勞工用紡織品之製造等。

（二）業界自主性管理

配合國際管理趨勢，近年來各產業開始尋求替代化學品。半導體產業部分，臺灣半導體產業協會（TSIA）於 2010 年承諾禁用 PFOS 及逐步限用 PFOA。以臺灣積體電路股份有限公司為例（全氟烷基化合物管制情形如圖 1 所示），自民

國 99 年、104 年完全停止使用含 PFOS 及 PFOA 之原物料，所有產品亦不含此二類物質；而對於 PFOA 之相關物質包括其前驅物及衍生物，世界各國尚未限制使用於半導體製程，該公司提早於民國 105 年啟動化學品替代專案，截至民國 106 年底，已完成 82% 替代物質的製程驗證

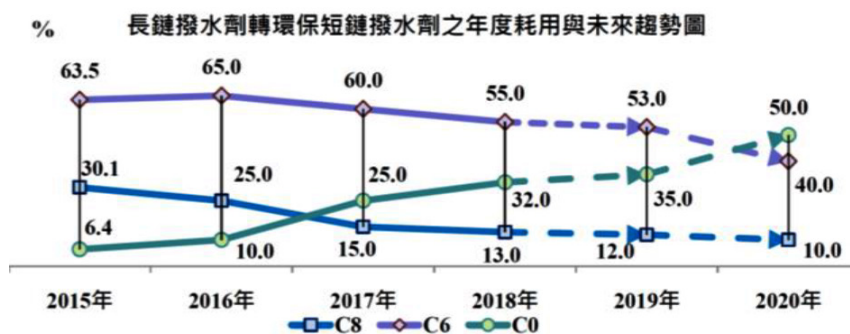
（臺灣積體電路股份有限公司，106 年企業社會責任報告書）。力晶科技股份有限公司於 2017 年底完成製程使用不含 PFOS 及全氟烷基磺酸（Perfluoroalkyl Sulfonat, PFAS）之化學品（力晶科技股份有限公司，106 年企業社會責任報告書）。

全氟烷基化合物管制情形與台積公司管理現況

	管制法規	台積公司管理現況
 全氟辛烷磺酸及其相關物質	聯合國持久性有機汙染物附件 B（豁免使用於半導體製程）	- 既有化學物質民國 99 年替代完成 - 列為台積公司禁用物質
 全氟辛酸及其相關物質	- 歐盟化學物質管制法附件 17（EU REACH Annex 17）：民國 109 年 7 月 4 日起開始禁限用（豁免使用於半導體製程） - 聯合國持久性有機汙染物附件 A（豁免使用於半導體製程）	- 既有化學物質完成 86% 替代 - 列為台積公司禁用物質
 含 5 至 7 個碳全氟烷基化合物	歐盟國家研究提案化學物質管制法之管制物質	列為台積公司管控物質（以不使用為原則。惟若因製程研發必須使用時，須經副總裁主管批准後方可使用）
 全氟丁烷磺酸及其相關物質	歐盟民國 109 年 1 月 16 日列為高度關注物質	列為台積公司關注物質，評估 3 奈米及其以下的先進製程不使用

資料來源：臺灣積體電路股份有限公司企業社會責任報告書，2019

圖 1 台積電全氟烷基化合物管制情形



資料來源：福懋興業股份有限公司，企業社會責任報告書，2017

圖 2 福懋興業長鏈撥 / 撥水劑轉環保短鏈撥 / 撥水劑之趨勢圖

紡織產業部分，國內已有染整紡織或化工產業之廠商加入有害化學物質零排放網關（ZDHC Gateway）或取得 bluesign® 認證，自源頭禁用含 PFOS、PFOA 之碳八（C8）撥／潑／防水劑，改用碳六（C6）、碳四（C4）或無氟（PFC free）撥／潑／防水劑。福懋興業股份有限公司（2017）企業社會責任報告書資料顯示，化學品管理係逐步朝 2020 危害性化學品零排放（ZDHC）邁進，長程目標部分，長鏈撥／潑水劑將轉為短鏈撥／潑水劑，進而朝向無氟撥／潑水劑，另針對廢液之回收處理善盡管理。宏遠興業股份有限公司逐步汰換碳八（C8）撥／潑水劑，朝向全部使用無氟撥／潑水劑的目標前進。另為防範無氟布種在製程內受到氟素污染，且避免與含氟撥／潑水劑製程混用，特別設立無氟製程專線，獨立生產無氟布種。遠東新世紀股份有限公司（2017）企業社會責任報告書資料顯示該公司於 2017 年達到全線產品無氟化（PFC-Free），在紡絲中添加不含氟素物質的環保撥／潑水劑，讓纖維呈現疏水快乾特性，達到乾爽舒適的要求。

六、結論

依據調查顯示國內特定事業製程廢污水及放流水有檢出微量 PFOA 和 PFOS，顯示全氟化物仍有流布於環境之虞。考量化學品研發替代使用及國內外管理動態，建議優先強化源頭管理機制，適度依國內產業製程現況，檢討 PFOS 及 PFOA 之得使用用途，進而予以禁限用；另產業端部分，透過自主性源頭減量管理，逐漸減少含 PFOS 或 PFOA 化學藥劑之使用量或改用替代原物料等，持續降低廢污水全氟化物之污染負荷。另環保署未來可持續配合國際管制動態趨勢，輔以歷年相關調查結果與廠商自主管理成效，適度評估廢污水管理訂定相關規定之必要性。

參考文獻

- Chen, H., Zhang, C., Han, J., Yu, Y., & Zhang, P., PFOS and PFOA in influents, effluents, and biosolids of Chinese wastewater treatment plants and effluent receiving marine environments, *Environmental Pollution*, 2012.
- Clara, M., Scharf, S., Weiss, S., Gans, O., & Scheffknecht, C., Emissions of perfluorinated alkylated substances (PFAS) from point sources— identification of relevant branches, *Water Science Technology*, 58, 59-66, 2008.
- Rahman, M. F., Peldszus, S., & Anderson, W. B., Behaviour and Fate of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) in Drinking Water Treatment: A Review, *Water Research*, 2014.
- 行政院環境保護署（2020）事業廢水特性調查及管制策略研析計畫
- 行政院環境保護署（2019）事業廢水污染防治及標準管制成效評估計畫
- 行政院環境保護署（2017）產業廢水污染管制與特性分析研議計畫
- 行政院環境保護署（2010）產業廢水污染調查及管制措施研議計畫（第二年）
- 財政部關務署（2020）統計資料庫查詢系統（<https://portal.sw.nat.gov.tw/APGA/GA01>）
- 臺灣積體電路股份有限公司企業社會責任報告書，2019。
- 臺灣積體電路股份有限公司企業社會責任報告書，2017。
- 力晶科技股份有限公司，企業社會責任報告書，2017。
- 福懋興業股份有限公司，企業社會責任報告書，2017。
- 宏遠興業股份有限公司，企業社會責任報告書，2017。
- 遠東新世紀股份有限公司，企業社會責任報告書，2017。
- 日本環境省，「Summary of the Guideline on the Treatment of Wastes Containing Perfluorooctane Sulfonic Acid (PFOS), and Its Salts in Japan」，2013。
- 美國環保署，「EPA's Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) Action Plan」，(2019)。

校舍結構耐震安全監測預警系統

陳景旭 * 孟魁 ** 薛強 *** 曾騰毅 **** 翁健煌 *****
劉建均 * 陳昭村 ***** 李其航 *

摘要

臺灣位處環太平洋地震帶，地震活動頻繁。為減少震後損失，除了建築物耐震評估補強以外，對於結構健康狀態的監測，特別是震後結構性能之快速診斷以及預警通報，有助於即時掌握地震造成之結構構件損傷，或者結構材料劣化等因素所導致的耐震能力降低，有利於後續維護管理決策。本文以明志科技大學校舍為例，利用建築物耐震能力評估結果，配合強震監測設備以及系統識別技術，建立結構耐震安全監測預警系統。經實際使用證實，可於地震後快速通報場址震度、結構整體以及構件之安全性能，並長期持續監測結構振動頻率之變化，達到即時發現損傷、定位損傷、量化損傷以及警示結構安全性之目的。

關鍵字：結構健康診斷、監測、預警、性能評估

一、前言

校舍建物因使用人數多，且兼具地震後緊急避難場所之功能，其耐震能力須特別關注。在地震發生後，建物可能因結構構件損壞，造成耐震能力下降，影響建物結構安全性，若每次地震後都進行建物耐震能力評估，所費不貲，若能建立一套結構耐震安全監測預警系統，對建物結構安全性進行持續監測，即時診斷並主動通報建物損傷狀況，即可提供管理者快速作出維護決策。

結構健康監測技術，已用於許多結構物與基礎設施中，也是結構耐震研究工作的一個重要項目（Antunes et al, 2012）。雖然監測本身並不會

提升結構系統的耐震能力，但是它可以在結構受損後提出適當的警訊，讓相關人員在恰當的時間，做適當的補強，避免進一步的傷害。結構健康監測技術，可以採用的感應器類型相當多種，其中加速規就是非常普遍被監測系統採用的感應器之一。該方法多採用加速規量得結構振動訊號，透過量測數據求得結構系統參數（如模態、頻率、阻尼比），根據結構系統參數於地震前後的變化，判斷結構是否損傷。然而，系統識別的健康診斷技術雖可精確反映結構損傷，但其所能提供的損傷資訊並不直觀，且需佈設較多精密監測儀器，建置成本高，實務接受度不高，同時因缺乏結構耐震能力，不易反映結構安全的餘裕度。另一損

* 中興工程顧問社土木水利及軌道運輸研究中心副研究員
** 財團法人明志科技大學總務處總務長
*** 中興工程顧問社土木水利及軌道運輸研究中心副主任
**** 中興工程顧問社企劃推廣處高級工程師
***** 中興工程顧問社土木水利及軌道運輸研究中心結構組組長
***** 中興工程顧問社土木水利及軌道運輸研究中心助理研究員

傷診斷方式則是利用耐震能力評估結果，將建物從正常使用至崩塌過程建立結構性能等級，配合地震動量測數據判定建物性能等級，藉此診斷建物損傷狀態（薛強等，2017），該方法監測儀器較少，建置成本低，同時，因有耐震能力評估成果，可明確反映結構安全的餘裕度。然而，後者若完全基於數值模擬分析，可能會與實際結構行為有明顯差異，故本案結合該兩種方法之優點，經由微振動量測識別結構系統之特性，用於數值模型校調，再依據數值模型分析結果作為結構整體以及結構構件之震損判定依據。

明志科技大學自 1963 年成立至今已 50 多年，校舍使用期間亦進行耐震能力評估與補強工程，然而，即使補強後亦可能因地震作用下造成損傷，影響建物耐震能力，對人員生命財產安全造成威脅，需特別關注校舍建物震後之結構安全性，故，本文延伸「醫療院區建物健康管理系統」（薛強等，2017）之系統模式，以明志科技大學之校舍共 23 棟為例，以強震監測設備，搭配既有耐震能力評估成果、系統識別技術，建立震後耐震安全監測預警系統，於地震後通報地區震度、結構整體性能、建物特性等狀態，達到即時發現損傷、

定位損傷、量化損傷以及警示結構安全性之目的，為管理人員提供後續維護決策參考。

二、系統架構與作業流程

本文結構耐震安全監測預警系統架構如圖 1，透過儀器與中央氣象局地震資料平台進行地震資料收集，傳送至系統網站伺服器，使用者可利用瀏覽器連結系統網站，查詢建物震後狀態、建物檢修紀錄等資訊。系統各部分功能架構詳述如下：

（一）地震資料收集

地震相關資料來源分為校區強震監測站與中央氣象局速報資料接收，內容如下：

1. 校區強震監測站

本案於校區設有一高精度自由場網路型三軸向加速規強震儀測站，進行地震震度量測。此外，為了使震後結構性能診斷結果更貼近真實建物反應，選擇於學三舍設置六台中精度加速規感測儀（簡稱建物感測儀）量測建物震時各樓層加速度反應。同時，亦藉由建物感測儀與自由場強震儀之量測結果，以雙選機制確認地震事件。

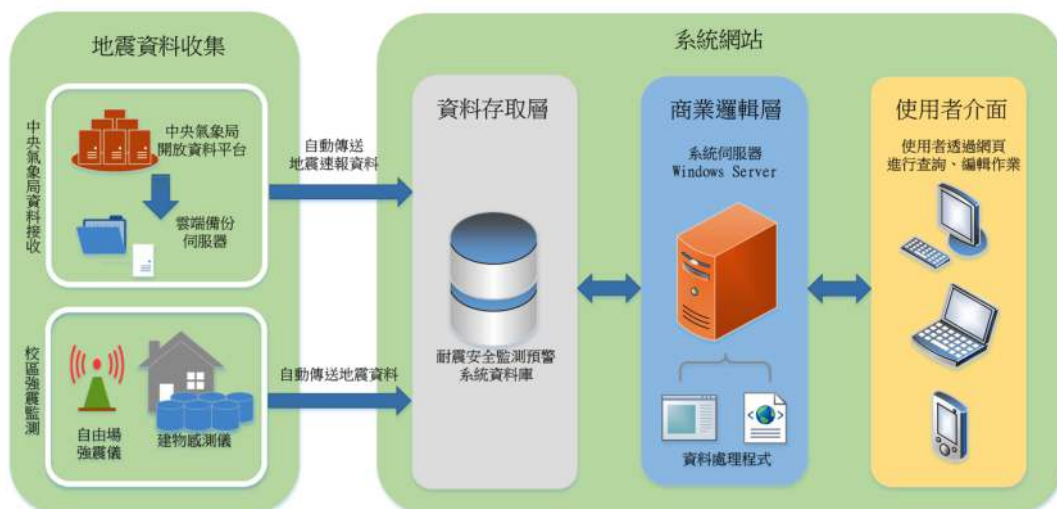


圖 1 結構耐震安全監測系統架構

校區強震監測作業流程如圖 2 所示，自由場強震儀與建物感測儀皆以原廠集錄軟體進行即時監控，當 PGA 達觸發值時，系統執行後處理程式記錄振動事件，並儲存該時段振動事件檔，隨後系統進行地震事件判定，判定方式為若自由場強震儀振動事件開始時之前後 90 秒內，建物感測儀也發生振動事件，則確認該振動事件為地震事件，並將數據匯入資料庫中，提供系統網站後續應用。

2. 中央氣象局資料接收

中央氣象局之開放資料平台（OPEN WEATHER DATA）提供最新地震資訊，本系統利用程式與該資料平台介接，即時監控地震資料

更新狀況，當有地震報告更新時，自動下載最新地震報告並匯入資料庫，供本系統網站查看地震速報以及後續地震預警通報之用。

（二）系統網站

系統網站採三層式架構（3-tier architecture）開發，將系統之資料呈現、資料處理及資料儲存各自分層分工，包括：（1）資料存取層（Data Access Tier）提供資料儲存與傳輸；（2）商業邏輯層（Business Logic Tier）接收使用者介面層資料，經運算處理後傳回客戶端；（3）使用者介面層（Presentation Tier）接收商業邏輯層之資料並顯示於 Web 網頁供使用者瀏覽與編輯。

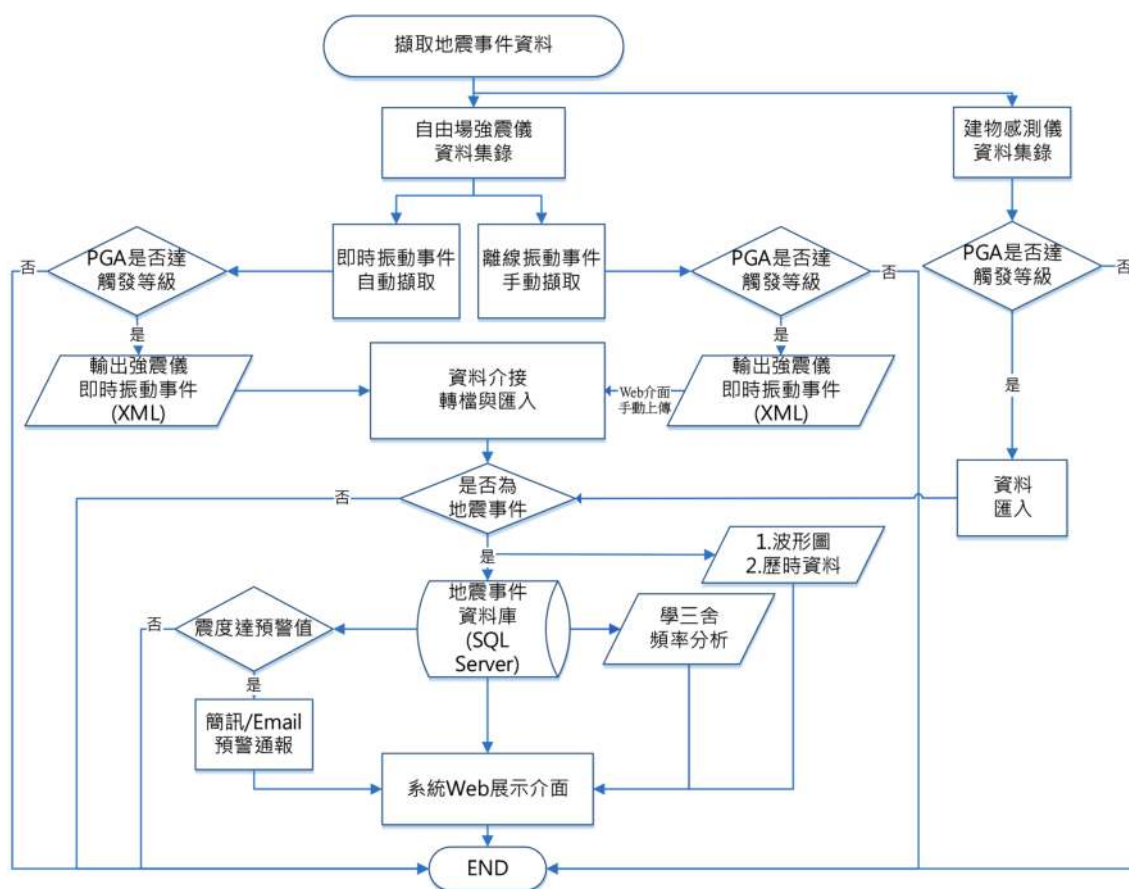


圖 2 校區強震監測系統架構

三、強震監測設備與設置

本系統利用強震監測設備收錄地震資料，作為地震事件震度以及評估建物震後性能之依據。

（一）自由場強震儀

強震記錄係從震源透過地盤、土壤、結構物及站房，最後收集至強震儀，彼此之間互制作用十分複雜，為了盡可能使地形與站房等影響降低，

FRP 自由場強震儀站房位置選擇須以適當原則（許明光等，1992）進行考慮。

（二）建物感測儀

為取得學三舍地震時各樓層加速度值，以利後續建物性能診斷與識別結構基本頻率之用，本案規劃於學三舍 1~3 層樓沿建物長向各設置兩台感測儀，安裝於各樓層頂版梁側，共六台，如圖 3 所示。



圖 3 建物感測儀安裝圖

四、耐震安全監測預警系統功能

本文耐震安全監測系統網站頁面如圖 4 所示，功能詳述如下：

（一）首頁資訊

首頁以校區內各校舍平面配置地圖為展示畫面，並顯示校區最近一次地震之震度、最大結

構性能等級、自由場強震儀連線狀態以及中央氣象局最新地震速報資訊，使用者透過首頁資訊可立即了解最近一次地震資訊及校舍結構健康狀況。

（二）地震事件查詢

經自由場強震儀與建物感測儀集錄振動資料，比對完判定為地震事件，將資料匯入系統資

料庫後，於系統網站上呈現（如圖 4），並提供震度範圍與日期查詢方式，查詢結果包括地震事件之起訖時間、最大地表加速度 PGA 值、最大

地表速度 PGV 值、對應之震度及歷時波形圖與其文字檔。



圖 4 系統網站頁面——最近地震震度

（三）震後結構性能查詢

本文校區需監測之建物共 23 棟，除學三舍以外，其中 22 棟建築結構依據已預先完成之耐震能力評估結果建立預警模式。而學三舍則依據本案設置之建物感測儀，記錄地震發生時結構反應，將該資料匯入系統資料庫，搭配歷時分析與微振動量測結果，進行更為詳細的震後結構整體與耐震構件性能診斷，達到損傷定位與量化之目的。

圖 5 所示為一測試地震下，前述 22 棟之一監測建物結構整體性能等級查詢結果，圖中主要顯示原耐震評估非線性側推分析之性能曲線 PGA 值與該建物結構整體性能等級級距之對應關係圖。其中，性能等級級距圖係利用耐震能力評估之結果，以結構於各性能表現下能抵抗之 PGA 值，將結構整體性能劃分為正常使用至可能崩塌等 6 個等級，等級 1 代表結構整體維持正常使用；PGA 超過等級 5 上限，屬等級 6，表示結構性能已超過定義之耐震能力極限，可能崩塌；等級 2~5 依序

大致對應結構小修可用、損傷可控制、可確保生命安全與結構不倒等性能等級（薛強等，2007）。該次地震事件之 PGA 值以紅色虛線表示，作為參考線，使用者可依地震 PGA 值或是圖示中紅色參考線對應至結構整體性能等級級距圖之位置，判斷該建物之結構整體性能等級。學三舍因於建物內設置有感測儀，可記錄地震時建物加速度反應，提供更精確的結構整體與耐震構件性能診斷。

圖 6 為一測試地震下，學三舍結構整體性能等級查詢結果，其中，底圖為 X、Y 向頂樓最大加速度與結構整體性能等級之對應關係圖，因學三舍早已採用液流阻尼器補強，故底圖之性能等級級距係採用增量動力分析結果，亦即每增加一步 PGA 都對應一個非線性歷時分析，作為結構耐震能力評估依據。圖 6 中，紅色虛線為該地震事件下建物 X、Y 向頂樓最大加速度值參考線，依兩向參考線之交點所在底圖位置決定結構整體性能等級。

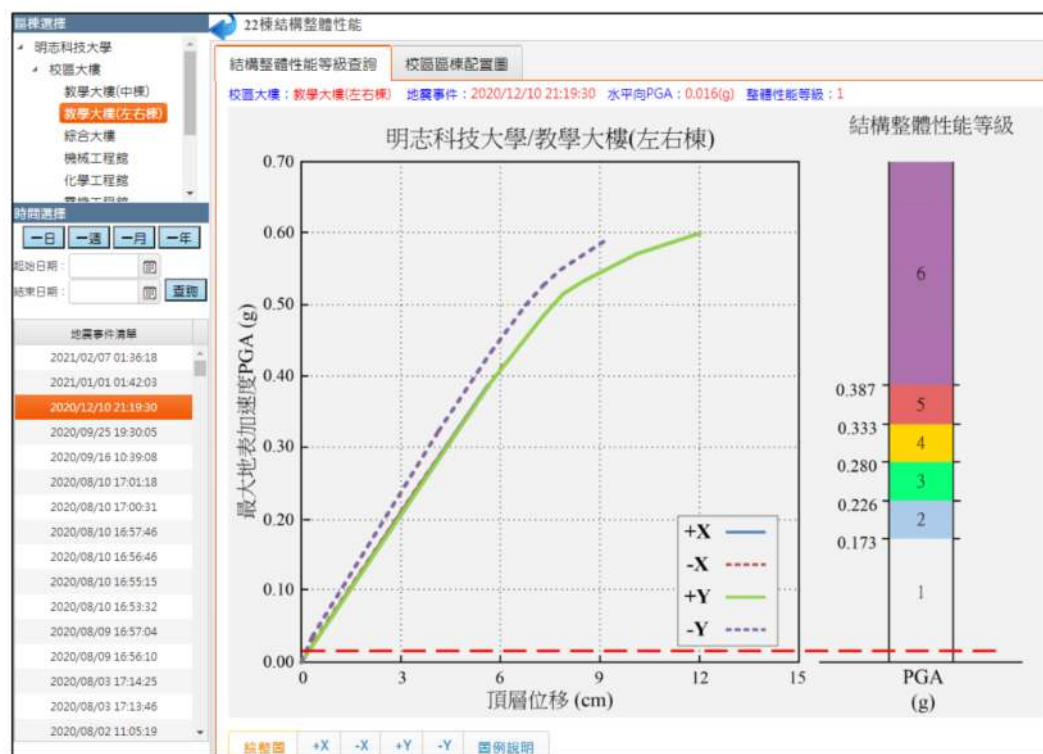


圖 5 震後結構整體性能等級查詢



圖 6 震後學三舍結構整體性能等級檢視

圖 7 為一測試地震之下，學三舍結構耐震構件性能查詢結果，此功能目的為協助管理者了解震後建物耐震構件損傷狀況，並於適當時機安排檢查維護工作。系統中以各樓層結構平面圖表示，圖中以學三舍 1 樓為例，各類結構構件依表 1 進行編號，作辨識損傷位置之用。

表 1 結構構件編碼方式

構件種類	方向	構件編碼
柱	-	C
大梁	X 向	GX
	Y 向	GY
RC 牆	X 向	SWX
	Y 向	SWY
磚牆	X 向	BWX
	Y 向	BWY

除磚牆性能等級依有無明顯損傷分為兩級以外，其他 RC 構件之性能等級則參考國內震後緊急鑑定與耐震評估所用結構構件塑絞性質（薛強等，2014），劃分為 I~V 級，性能狀況與標示說明如表 2。

表 2 大梁、柱及 RC 牆性能等級劃分

性能等級	狀況說明	性能等級圖（檢查圖）標示	
		構件上色	文字顯示等級
I	幾乎無損傷	未上色	未顯示
II	梁或柱有明顯裂縫；RC 牆有水平裂縫	藍色	顯示、粗體
III	梁柱裂縫寬度 >0.3mm、混凝土保護層可能脫落；RC 牆有斜裂縫	綠色	顯示、粗體
IV	可能看見箍筋或主筋	黃色	顯示、粗體
V	混凝土核心可能爆裂、箍筋可能斷裂、主筋可能挫屈	紅色	顯示、粗體

（四）建物基本振動頻率監測

學三舍利用建物感測儀記錄地震下樓版的加速度反應，除了提供更精確的震後結構整體與耐震構件性能狀態，另可進行震後系統識別，取得結構基本振動頻率。本系統頻率監測功能旨在提供使用者查詢指定振動事件之後學三舍的基本振動頻率，並透過與歷次正常狀態分析所得基本振動 2 倍標準差範圍（對應機率範圍約 95%）比對，以判斷建物的結構特性是否達到異常狀態。頻率監測功能介面如圖 8 所示，系統提供功能如下：

1. 基本資訊列：提供建物名稱、振動事件日期及基本振動頻率。
2. 基本振動頻率之常態範圍：顯示建物於歷次正常狀態下分析所得基本振動頻率。
3. 基本振動頻率參考線：顯示該振動事件進行系統識別分析所得的基本振動頻率。

（五）震後預警通報

本系統建置震後「預警通報」功能，於特定條件下以簡訊或 Email 方式將地震訊息傳送給特定人員。系統功能包括：通報門檻預警值設定、通報人員與通報種類設定、通報記錄查詢。圖 9 為 2021 年 6 月 23 日地震後系統發送之簡訊通報，第 1 則為依據本案建置於校區之強震儀與感測儀，經震後診斷分析結果進行建築物耐震安全性能通報，簡稱建安通報；第 2 則為中央氣象局地震速報相關簡訊。2 則簡訊均於震後約 10 分鐘左右收到，第 1 則比第 2 則提早約 2 分鐘收到，顯示本案結構耐震安全性能預警通報非常快速。相關通報紀錄亦可依通報種類以及通報時間進行查詢。

（六）檢修紀錄建置與查詢

本系統提供結構檢修紀錄建置與查詢功能，詳「醫療院區建物健康管理系統」（薛強等，2017）。

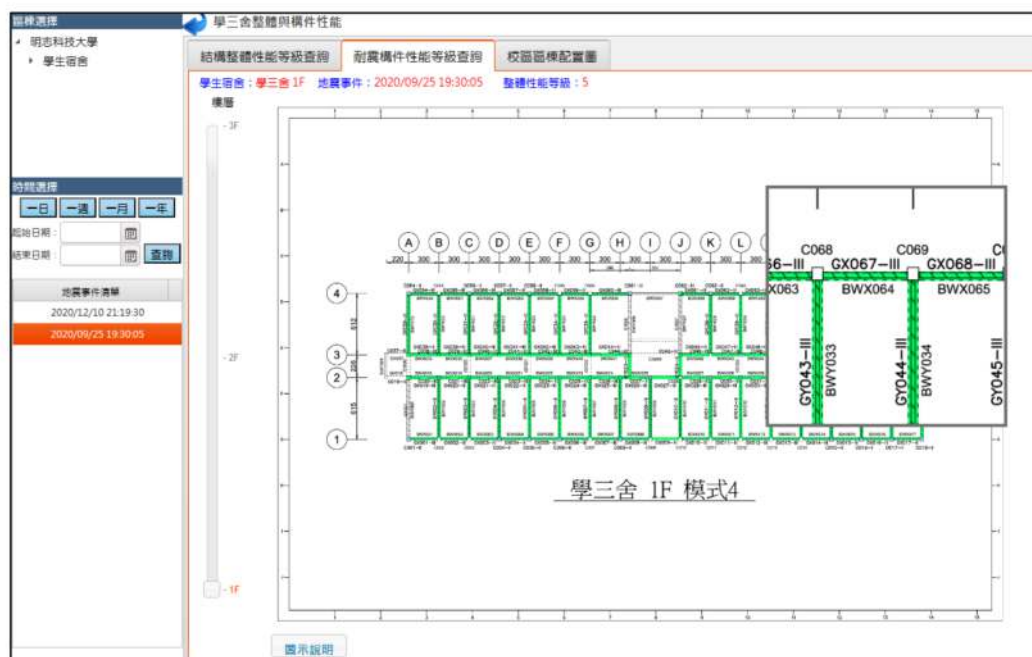


圖 7 震後耐震構件性能等級檢視

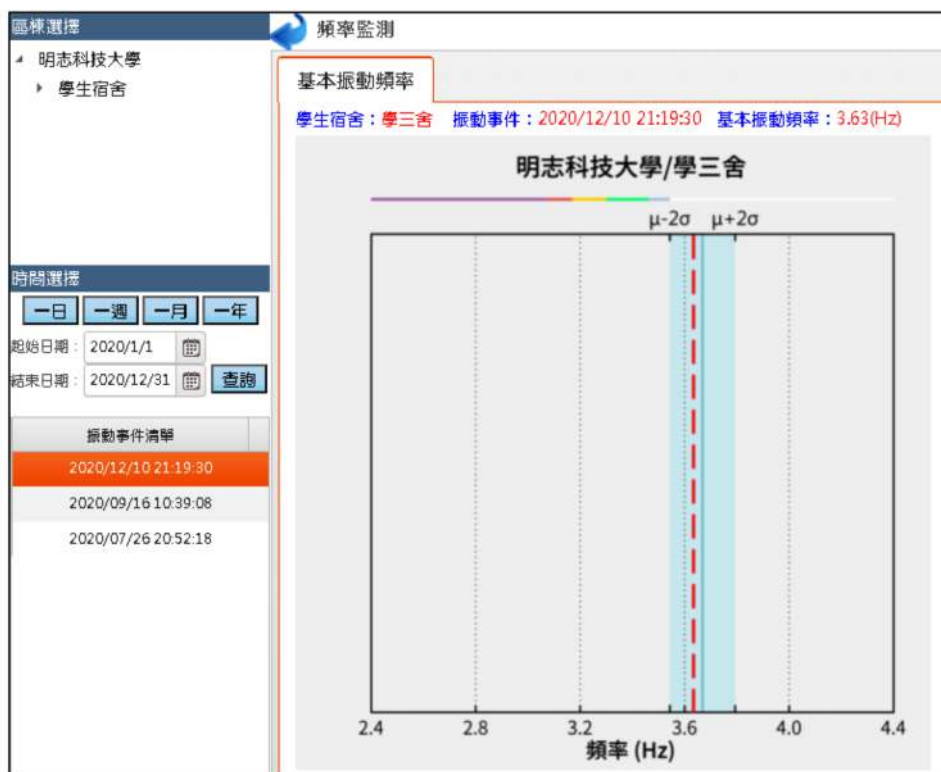


圖 8 基本振動頻率監測

訊息
前天 下午1:49

明志科大建安通報：06/23 13:40 震度1級；所有建物性能1級，可正常使用。

明志科大地震通報：06/23 13:40 規模4.9(位於花蓮縣秀林鄉);校園行政區震度：新北市1級。

圖9 簡訊通報

亦只能於震後觸發。當結構構件隨時間發生材料老劣化、或是外在環境變化，使結構特性如基本振動頻率、阻尼比等顯著改變，此時可能已影響結構安全，但會因尚未發生地震而無法察覺。建議後續研擬新增定期結構振動特性監測功能，常時持續監測結構振動特性之變化，必要時提早安排檢查與維修作業，達到持續監測建物安全風險、震前預警整備、震後速報應變之效益。

參考文獻

五、結論與建議

為了協助明志科技大學相關單位掌握校舍結構震後安全性能，本文依據耐震評估結果，配合強震監測設備、微振量測分析、數值模擬分析、系統識別結果建立耐震安全監測預警系統，經實際使用證實，可於地震後快速回報場址震度、結構整體（構件）性能以及建物振動特性狀態，達到即時發現損傷，定位損傷、量化損傷以及警示結構安全性之目的。

依據原規劃，本系統進行結構健康診斷之時機為地震發生時，因此相關設備採用事件驅動觸發。雖然，執行過程中已提供頻率監測功能，但

Antunes, P., Lima, H., Varum, H., Andr P. (2012). Optical Fiber Sensors for Static and Dynamic Health Monitoring of Civil Engineering Infrastructures: Abode Wall Case Study. Measurement, 45,1695–1705.

薛強、簡宗益、林威廷、翁健煌、張仁綺、白燕菁、曾騰毅、吳瑋晉、李其航、劉建均（2017）醫療院區建築結構健康管理，中興工程，第一百三十七期，2017年10月，第74-84頁

許明光、溫國樑、江憲宗、李白華、林尚正、劉宗翰、陳孟江（1992）自由場強震儀之安裝設計（I），交通部中央氣象局委託研究計劃成果報告（編號：MOTC-CWB-81-E-05）

薛強、吳嘉偉、陳正忠、陳國慶（2007）建築物耐震性能設計規範之研擬，結構工程，第二十二卷，第二期，2007年6月，第95-123頁

薛強、蕭輔沛、邱天宏、邱聰智、張權、周德光、翁健煌、葉勇凱、陳正忠、鍾立來（2014）以數值分析評估單棟RC建築物震後損失，結構工程，第二十九卷，第二期，2014年6月，第63~80頁



* 高速鐵路桃園段

縱橫四界的願景擘劃者

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

鐵道建設工程

中興團隊專業服務

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

聯絡資訊

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



正派經營·品質保證·追求卓越·創新突破



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



南迴鐵路電氣化工程— 多良改線路段工程規劃設計

梁智信 * 高贈智 ** 林志豪 *** 黃鳳岡 ****

摘要

交通部臺灣鐵路管理局南迴鐵路多良一號隧道受隧道襯砌異狀及加固工程影響，隧道淨空嚴重不足，在「南迴線土建及一般機電工程設計暨配合工作技術服務」計畫設計階段研議多個改善方案，最後經交通部同意以局部改線方式辦理。多良改線路段工程全長約 2,940m，局部改線方案線形以臺鐵路特甲級線標準進行規劃，定線考量前後銜接既有臺鐵路線之線形平順因素、避免增加計畫經費及延宕電氣化通車期程，並兼顧新路廊安全性與技術可行性，其中配置多種結構設施，包括橋梁段 2,454.75m（3 座構架橋、2 座高架橋及大溪五號橋擴寬）、路堤段 333.25m（5 處）與隧道段 152m（新多良一號隧道）。多良改線路段工程屬南迴線土建標 C712A 標，於民國 106 年 5 月 16 日開工，已於民國 109 年 5 月 28 日完成路線切換，同年 8 月獲交通部 109 年公共工程優良工程獎優等肯定，於民國 110 年 5 月 27 日完工。
關鍵字：南迴鐵路、多良改線、竹削擋土牆、垂直縫地工法、頂蓋工法隧道

一、前言

「臺鐵南迴鐵路臺東潮州段電氣化工程設計計畫」（以下簡稱南迴計畫）於民國 102 年 6 月 3 日奉行政院核定，總經費為新臺幣 278.94 億元。為儘速推動南迴計畫，交通部鐵道局（以下簡稱鐵道局）將計畫分成「潮枋段土建及一般機電工程設計暨配合工作技術服務」（以下簡稱潮枋段土建標）、「南迴線土建及一般機電工程設計暨配合工作技術服務」（以下簡稱南迴線土建標）及「系統機電工程基本設計、委託監造及專業技

術顧問服務」（以下簡稱系統機電標）等 3 個主要標案，中興工程顧問股份有限公司（以下簡稱中興公司）負責「南迴線土建標」之調查及設計工作。

南迴線土建標全線橋梁、隧道及邊坡擋土設施經安全檢測評估後，除多良一號隧道淨空嚴重不足與結構安全堪慮，及利嘉溪橋沉箱基礎嚴重裸露，兩路段須進行局部改線外，其餘橋梁、隧道及邊坡等結構設施經加固補強後，可符合南迴建設計畫提昇營運安全之目標。民國 104 年 10 月 26 日交通部召開「『南迴線鐵路局部改線方案』

* 中興工程顧問公司結構工程部計畫經理
** 中興工程顧問公司大地工程部工程師
*** 中興工程顧問公司軌道工程一部計畫副理
**** 交通部鐵道局東部工程處處長

討論會議」，同意多良一號隧道路段局部改線（於既有路段海測布設單軌 2.7 Km），於民國 105 年 4 月 8 號獲行政院公共工程委員會審議通過「多良改線路段」之基本設計及經費審議。

多良改線路段工程（以下簡稱本工程）隸屬於「南迴計畫」C712A 標菩安金崙段土建及一般機電工程（以下簡稱 C712A 標），本工程考量前後銜接既有臺鐵路線之線形平順、避免增加計畫經費及延宕電氣化通車期程，並兼顧新路廊安全性與技術可行性，規劃橋梁、隧道、軌道、邊坡護坡及施工鋼棧橋等工程。本文針對本工程之規劃設計進行說明，期能供後續類似工程參考。

二、多良一號隧道

多良一號隧道位於臺東縣太麻里鄉多良廢站南側，所處地層之岩性主要為板岩及硬頁岩，因受板塊擠壓之強大應力影響，易形成以褶皺為主，伴隨斷層、剪裂帶等複雜特徵構造。區域位於一大複背斜構造的東翼，此背斜構造的軸部和中央山脈嶺線位置一致，褶皺面向東傾斜（如圖 1 所示）。又因多良一號隧道圍岩弱面發達、岩體破碎，其強度隨時間增長而弱化，致增加作用於襯砌上之力量；隧道斷面呈單軌馬蹄形（如圖 2 所示），側向抵抗力較弱，當外力過大，易沿水平方向開裂，造成隧道持續變形。

交通部臺灣鐵路管理局（以下簡稱臺鐵局）曾於民國 95 年進行襯砌鋼板補強、民國 98 年採鋼支保、鋼襯板及固結灌漿方式進行補強（如圖 3 所示）。民國 103 年中興公司執行南迴線土建標，進行檢測時發現隧道因圍岩逐年弱化及潛變，襯砌受岩壓而生異狀，襯砌異狀屬 A、B 級（較差）者約占 45%，鋼支保有處挫曲變形情形（如圖 4 所示）。由於受隧道襯砌異狀及加固工程影響，隧道淨空嚴重不足，曾研議降道、擴挖等方式解

決隧道淨空不足問題。經多次協商，最終交通部於民國 104 年 10 月同意多良路段辦理局部改線。



圖 1 多良改線段區域地質圖

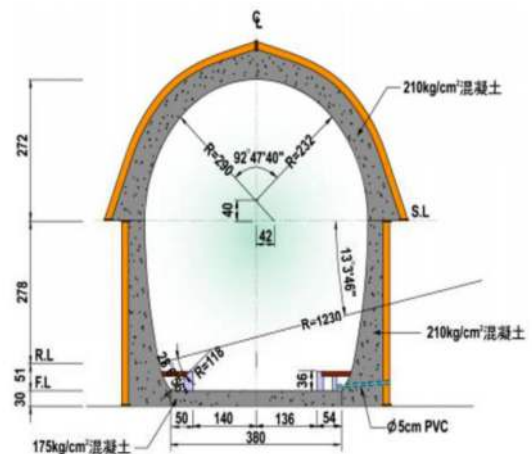


圖 2 多良一號隧道斷面圖



圖 3 多良一號隧道鋼支保補強情形



圖 4 多良一號隧道鋼支保挫曲變形情形

三、局部改線方案

局部改線方案線形以臺鐵路特甲級線標準進行規劃，定線考量前後銜接既有臺鐵路線之線形平順因素、避免增加計畫經費及延宕電氣化通車期程，並兼顧新路廊安全性與技術可行性，規劃沿既有路線東側（海側），另闢一新路廊，自既有南迴鐵路之大溪四號橋北側（里程 K58 + 060）沿鐵路東側岔出，由南至北依序繞越大溪六號橋、瀧溪隧道、多良一號橋、大竹四號隧道、多良二

號橋、多良一號隧道及多良三號橋，於多良車站南側（里程 K61 + 000）銜接回既有路線，路線共含 6 個曲線段，曲率半徑皆大於 1,000m。

本工程全長約 2,940m，其中結構設施包含橋梁段 2,454.75m、路堤段 333.25m 與隧道段 152m，有關結構設施及路線平、縱面圖詳見表 1 及圖 5。考量局部改線案線形鄰近山勢陡峭，為避免大規模之邊坡開挖，儘量以橋梁型式通過，避免鑿切山壁。此外，為減輕隧道偏壓程度，將隧道段之覆蓋深度儘可能控制在 3 倍隧道寬度以上，另為確保施工期間之路線營運安全，新舊隧道距離控制在 20m 以上。

表 1 多良改線路段工程結構設施表

區段	結構設施說明
橋梁段	3 座構架橋（25.5m + 74.9m + 143.25m）、2 座高架橋（1918m + 261m）、大溪五號橋（32.1m），總長度 2,454.75 m
隧道段	1 座隧道，長度 152 m
路堤段	5 處路堤，長度 333.25 m

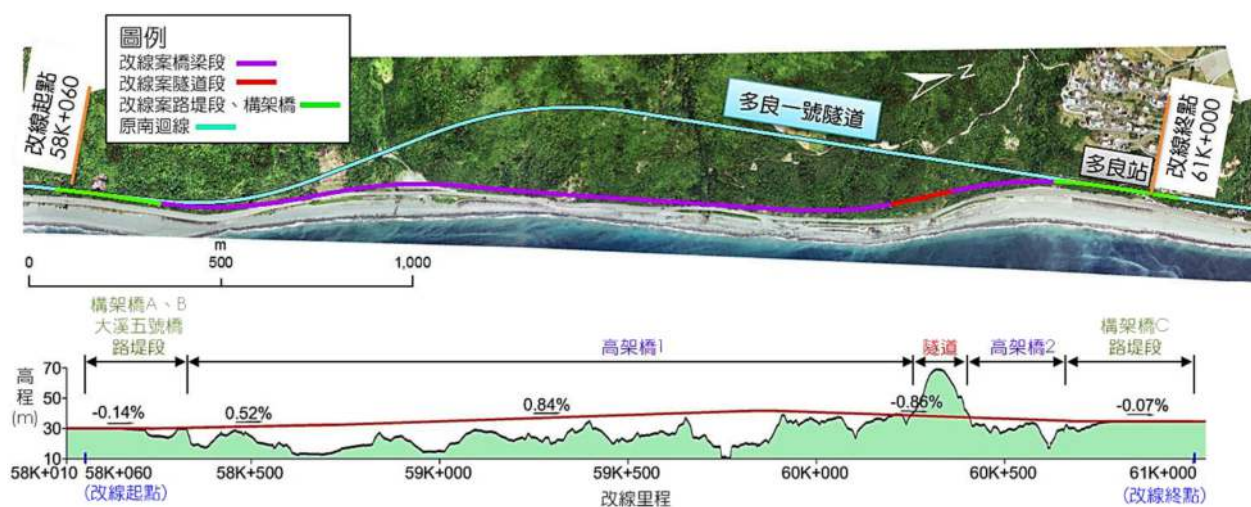


圖 5 多良改線路段工程平、縱面圖

四、橋梁工程

(一) 橋梁配置及跨度

路線由里程 K58 + 400 往東側岔出，在里程 K58 + 167.5~K58 + 300 間既有路堤及橋梁寬度已不敷路線用地需求，考量需求寬度逐漸變化、地理條件及避免對山壁的破壞，於里程 K58 + 167.5~K58 + 193 及 K58 + 225.1~K58 + 300 區間設置 2 座鋼筋混凝土構架橋銜接路堤段，大溪五號橋（里程 K58 + 193~K58 + 225.1）進

行擴寬。於里程 K58 + 330~K60 + 248 及 K60 + 410~K60 + 671 採預力混凝土高架橋，為降低梁深，結構系統主要採三跨連續梁（跨度 33m 或 35m）；局部路段於跨溪谷處採 33.5 + 57 + 33.5 三跨連續梁及 46.5 + 46.5 二跨連續梁配置。於里程 K60 + 671~K60 + 814.2 設置 143.25 鋼筋混凝土構架橋銜接路堤段，接續原路線。有關本工程橋梁結構配置及立面示意圖請參見表 2 及圖 6。

(二) 橋梁型式及尺寸

表 2 多良改線路段工程橋梁結構配置表

橋梁名稱	構架橋 A	大溪五號橋	構架橋 B	高架橋 1	高架橋 2	構架橋 C
區段里程	K58+167.5~K58+193	K58+193~K58+225.1	K58+225.1~K58+300	K58+330~K60+248	K60+410~K60+671	K60+671~K60+814.25
長度 (m)	25.5	32.1	74.9	1,918	261	143.25
跨距配置		1×32.1		12+(2@46.5)+4×(3@35)+(3@30)+ (3@35)+4×(3@33)+(2@33+30)+ (3@30)+2×33+(33.5+57+33.5)+ (3@33)+4×33+(3@33)+2×33+3	(3@30)+2×33+(3@35)	

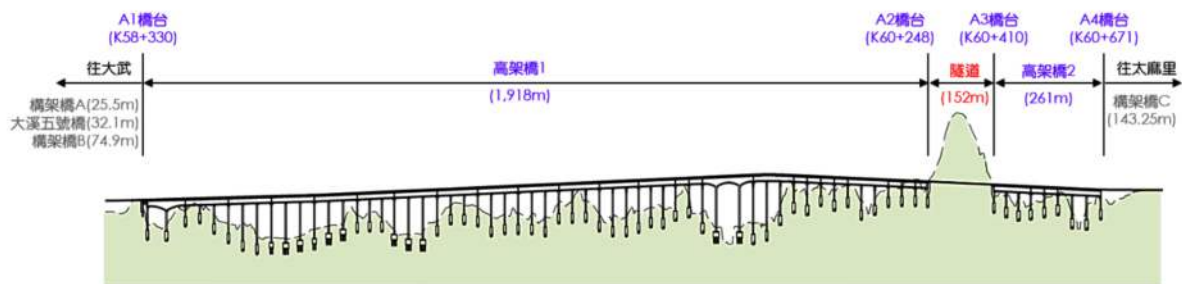


圖 6 多良改線路段工程橋梁立面示意圖

1. 鋼筋混凝土構架橋：採梁柱構架系統，依路線用地需求調整寬度，橋柱採矩形斷面，尺寸為 0.8m×0.8m（或 0.9m×0.9m）。有關鋼筋混凝土構架橋斷面請參見圖 7。
2. 大溪五號橋：上部結構新增 1 支 32.1m 預力 I 型梁進行橋面擴寬，下部結構拓寬既有大溪五

號橋橋台。有關大溪五號橋上部結構斷面請參見圖 8。

3. 高架橋：上部結構為單股道單孔預力混凝土箱型梁。跨溪谷處因主跨跨度較大達 57m（33.5m + 57m + 33.5m 三跨連續），採漸變梁深設計，由 2.5m 漸變至中間柱處 4.0m；另南端鄰

近橋台處，由於距現有軌較近，為減少基礎開挖對現有軌的影響，採較大跨度設計（2@46.5m 二跨連續梁）以減少落墩數，梁深由 2.5m 漸變至中央柱處 4.5m。其餘採等梁深設計，梁深 2.5m，箱梁頂部寬度 5.7m，底部寬度 2.9m，腹版厚 0.65m。下部結構採單柱式混凝土橋墩，矩形斷面（2.2m×2.2m、2.5m×2.5m、3.2m×3.2m、3.0m×2.2m 不等）。標準段橋面寬 5.7m，橋上左右兩側各有一電纜溝槽，內部

淨空 53cm (H) × 62.5cm (W)，電纜槽蓋板寬 80cm 兼走道之用，橋面兩側均有金屬欄杆以防人員掉落，如圖 9 (a)。為儘量避免影響旅客於多良站之視覺景觀，將電力桿設置於山側，橋面加寬為 6.6m，如圖 9 (b)。此外配合機電系統需求，橋上設有行車調度無線電話平台一處及號誌平台二處，橋面單側加寬，橋面加寬至 7.5m。

(三) 基礎工程

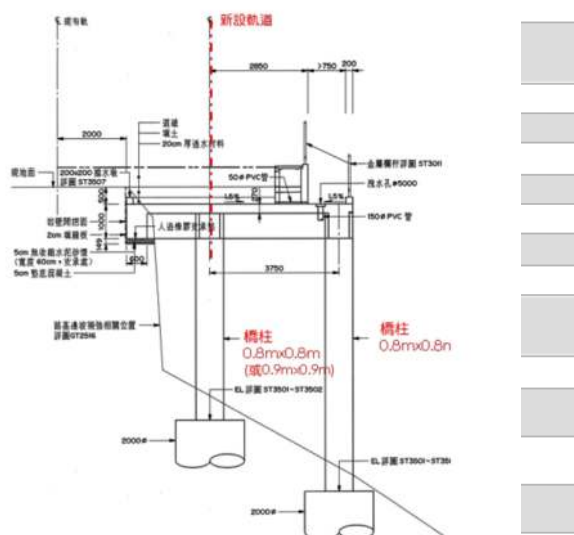


圖 7 鋼筋混凝土構架橋斷面圖

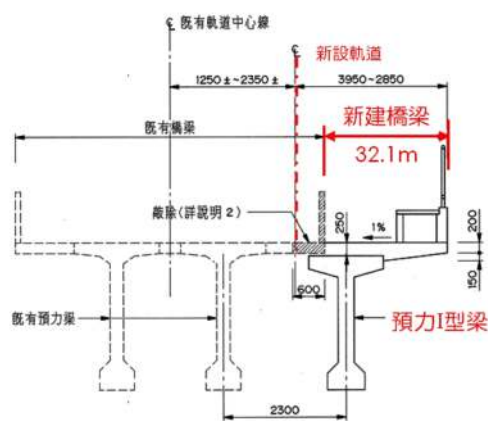


圖 8 大溪五號橋上部結構斷面圖

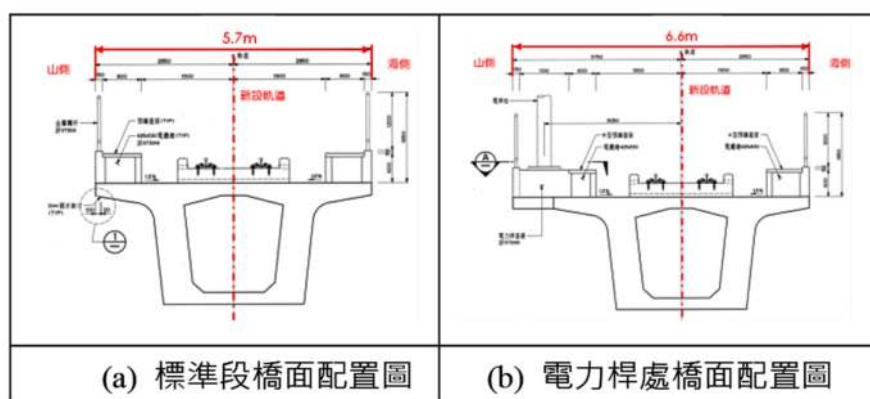


圖 9 高架橋橋面配置圖

本工程橋梁基礎多位於陡坡上，受到地形環境、作業空間及進出動線限制，無法採用需配合

大型機具（如搖管機）施作之基礎（如全套管基樁），因此基礎型式多採井式基礎（如圖 10 所

示)，井式基礎之施工作業限制較小，且基礎開挖影響範圍也較小。

高架橋因需承受較大載重，井基直徑採6m~8m，開挖後側壁以鋼筋籠作為擋土設施，并基上方邊坡增設竹削擋土牆（如圖11所示）以防邊坡坍滑。構架橋梁及大溪五號橋橋台之井基尺寸分別為2m及3m，因尺寸較小，開挖後則以鋼襯板作為開挖擋土設施。

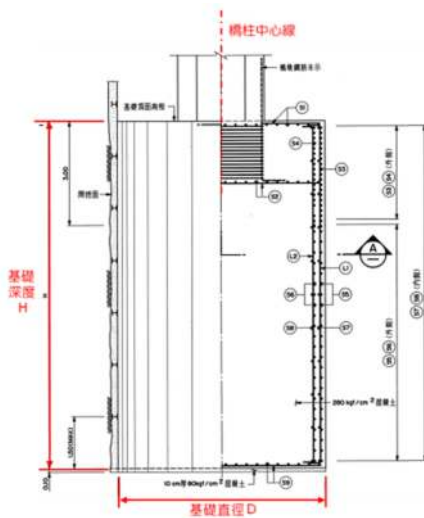


圖 10 多良一號高架橋井式基礎詳圖



圖 11 竹削擋土牆施工情形

另考量部分路段地下水位較高、需跨越野溪或橋梁跨距較大，選用樁基礎；樁徑採2m全套管基樁，樁長10~18m，樁基礎配置為2×2或

2×3，示意圖如圖12所示。

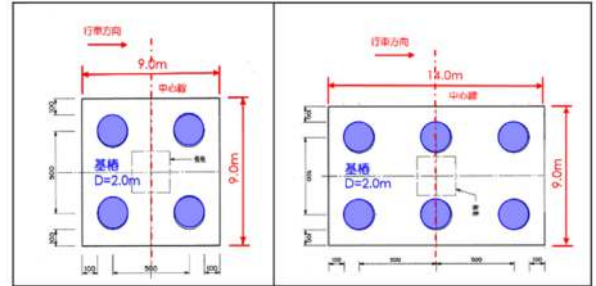


圖 12 多良改線段樁基礎配置平面圖

五、隧道工程

於里程 K60 + 253~K60 + 405 須穿越山坡，選擇採用隧道工程通過，以避免對既有山坡地進行規模過大之挖填作業。隧道總長約152m（包括鑽掘段及明挖覆蓋段），南北兩側各銜接5m路堤段後進入橋梁段，隧道相關平面配置圖請參見圖13。為與既有多良一號隧道區別，新建隧道命名為「新多良一號隧道」。

（一）鑽掘段（里程 K60 + 275~K60 + 390）

鑽掘隧道長度115m，採單軌倒U形斷面，由三心圓弧構成，全線設置仰拱，開挖寬7.4m、開挖高8.3m。隧道淨高為6.45m，下方設置0.5m之混凝土道床及軌道，故車輛淨空為5.95m。隧道內兩側設置寬0.8m、高2.2m之維修步道，步道下方配置0.3m電纜槽及0.3m排水邊溝。鑽掘隧道標準斷面，如圖14所示。

於里程 K60 + 275~K60 + 295 及 K60 + 360~K60 + 390 區段為解決洞口偏壓之問題、抑制邊坡滑動，採用垂直縫地工法因應，自隧道上方地表面打設一系列外徑76mm之縫地鋼管，並於鋼管尾端開設出漿孔進行固結灌漿，使隧道頂拱上方約3m範圍形成一固結承載環，以抑制邊坡滑動及增進地拱效應。縫地工法橫剖面示意如圖15所示。

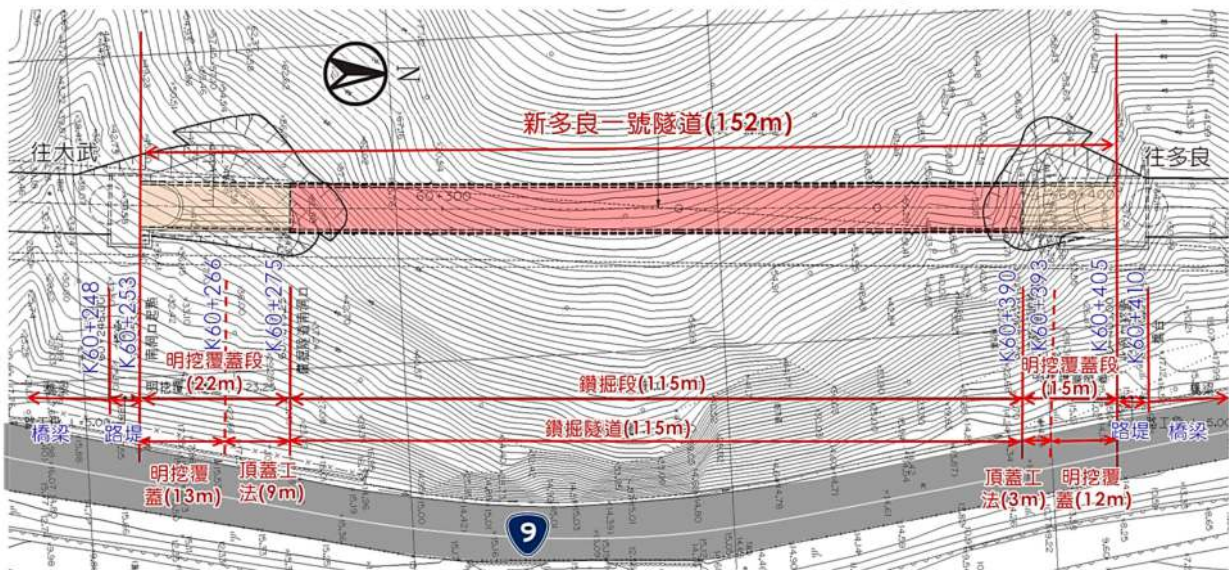


圖 13 新多良一號隧道平面配置圖

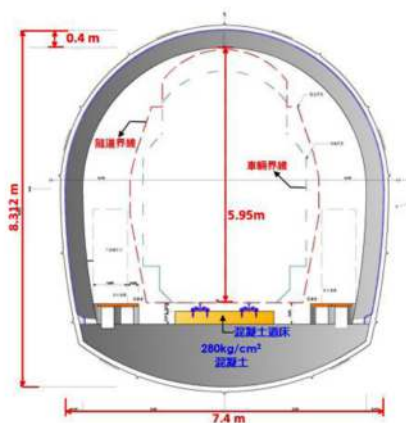


圖 14 鑽掘隧道標準斷面圖

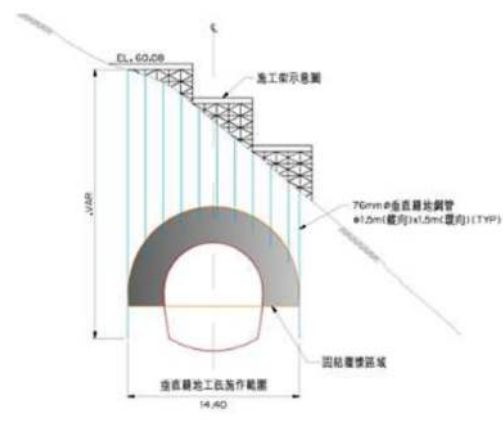


圖 15 縫地工法橫剖面示意圖

(二) 明挖覆蓋段（里程 K60 + 253~K60 + 275 及 K60 + 390~K60 + 405）

明挖覆蓋段開挖寬 7.8m、開挖高 8.1m，內部配置與鑽掘段相同。明挖覆蓋段包括明挖覆蓋隧道及頂蓋工法隧道。

1. 明挖覆蓋隧道：明挖覆蓋隧道範圍為里程 K60 + 253~K60 + 266 及 K60 + 393~K60 + 405，標準斷面如圖 16 所示。為提高抗剪能力及邊坡之安全係數，於隧道兩端明挖覆蓋段，各採用直徑 5m，深達 15~20m 之混凝土井式基礎作為

止滑樁，同時將載重傳遞至下方較佳之地盤，如圖 17 所示。

2. 頂蓋工法隧道：在里程 K60 + 266~K60 + 275 及 K60 + 390~K60 + 393 範圍為減少隧道洞口開挖量體及減少地盤擾動，採用頂蓋工法（如圖 18），以半邊式鋼筋混凝土拱型蓋板，有效降低地表土方開挖量，在維持原有地盤之平衡狀態下，可形成地拱效應以傳遞邊坡坡趾應力。此外，拱型蓋板可增加落石防護效果，且避免隧道主體結構暴露在外，並增加其耐久性。

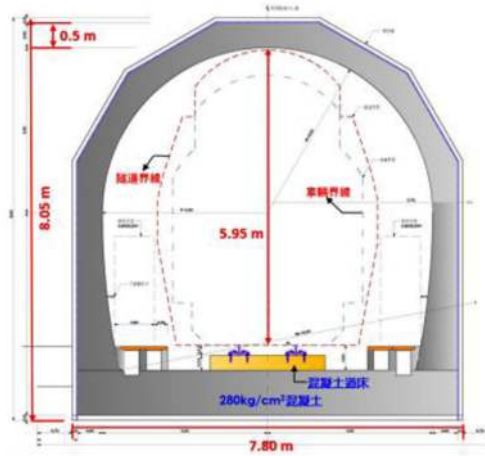


圖 16 明挖覆蓋隧道標準斷面圖

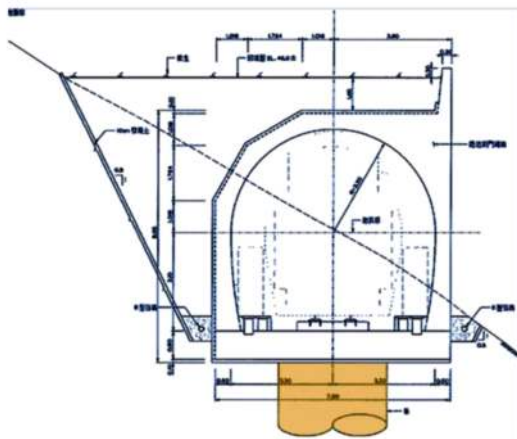


圖 17 止滑井基斷面圖

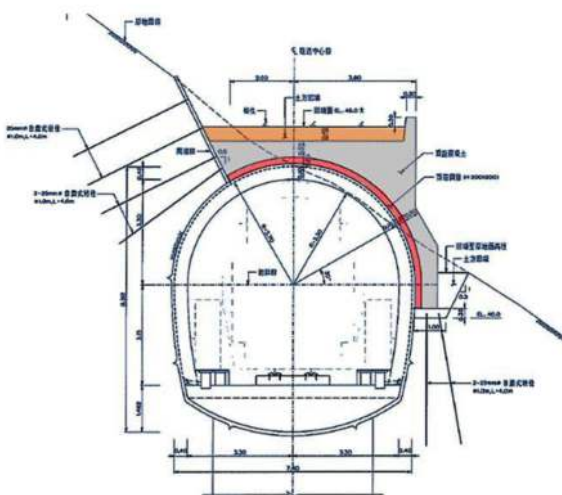


圖 18 頂蓋工法斷面圖

六、其他工程

(一) 軌道工程

本工程列車設計軸重以 KS-18 系統為主，設計列車速度為 130 Km/hr。採用 50kg/mN 型鋼軌。一般路基段採道碴軌道，隧道及橋梁段則採無道碴軌道（如圖 19 所示）。另無道碴與道碴銜接處設置加勁版。此外，軌道結構型式將充分考量維修步道、共同管線溝槽之設置及電務設施之預留空間。



圖 19 隧道段及橋梁段無道碴軌道

(二) 邊坡護坡工程

本工程之邊坡護坡工程，係綜合地表地質調查、地質鑽探與試驗成果，針對不同開挖及補強方式之邊坡進行邊坡穩定分析，分別考量常時、地震及高水位情況下之穩定性，並根據分析結果研擬邊坡坡度及邊坡保護或擋土措施。邊坡補強設施以自由型格梁護坡搭配自鑽式岩栓為主要，開挖坡比為 $V:H = 1:0.5 \sim 0.7$ ，如圖 20 所示。另為確保施工中台 9 線用路人之安全，於本路段沿線設置攔石柵，以阻擋施工中可能滑落之土石（詳圖 21）。



圖 20 邊坡保護設施



圖 21 沿台 9 線設置攔石柵情形

(三) 假設工程

本工程路線沿省道台 9 線山側，為盡量不侵占台 9 線路肩空間，部分區段搭設施工鋼棧橋。施工鋼棧橋佈設以 4M 寬為原則，另於適當位置加寬設置避車空間，有關施工鋼棧橋佈設情形請參見圖 22。



圖 22 北段施工鋼棧橋佈設情形

協商，後經交通部同意以局部改線方式辦理。改線路段工程全長約 2,940m，以橋梁結構為主，總長約 2,454.75m，並含一座 152m 之短隧道。

本工程屬南迴線土建標 C712A 標，於民國 106 年 5 月 16 日開工，已於民國 109 年 5 月 28 日完成路線切換，同年 8 月獲交通部 109 年公共工程優良工程獎優等（圖 23）肯定。C712A 標工程已於民國 110 年 5 月 27 日完工，有關多良改線路段工程完工通車情形，請參見圖 24 及圖 25。

七、結語

臺鐵局多良一號隧道受隧道襯砌異狀及加固工程影響，隧道淨空嚴重不足，設計階段經多次



圖 23 交通部 109 年公共工程優良工程獎優等



圖 24 多良改線路段工程南段完工通車情形



圖 25 多良改線路段工程北段完工通車情形

參考文獻

- 交通部鐵路改建工程局（2013）臺鐵南迴鐵路臺東潮州段電氣化工程建設計畫
- 交通部鐵路改建工程局（2013）臺鐵南迴鐵路臺東潮州段電氣化工程－（一）南迴線鐵路電氣化綜合規劃報告書
- 交通部鐵路改建工程局（2016）臺鐵南迴鐵路臺東潮州段電氣化工程建設計畫－公共工程計畫經費審議報告書

- 李怡德、李民政、高贈智（2017）南迴鐵路電氣化工程之推動與特色，中興工程季刊，第 137 期
- 交通部鐵道局（2020）臺鐵南迴鐵路臺東潮州段電氣化工程建設計畫－南迴線土建及一般機電工程設計暨配合工作技術服務－工程設計報告（定稿版）

放射性廢棄物最終處置場膠體 對核種遷移的影響研究

張皓鈞 *

一、前言

體影響而改變，進而使核種遷移至人類生活圈的時間發生變化：

對於用過核子燃料或高放射性廢棄物的最終處置，目前國際間大多採「深地層處置」的方式，將放射性廢棄物置放於地下數百公尺的穩定地層中，並利用廢棄物體、廢棄物包件、工程障壁及周圍岩層等「多重障壁」的設計，使其與人類生活圈完全隔離。

然而近年來研究發現，在放射性廢棄物最終處置場的環境演化過程中，地下水所含的無機膠體、有機膠體、以及障壁材料與周圍岩層受地下水侵蝕所釋放或分離的膠體，皆會因其單位質量比表面積較固相基質大，而對於放射性核種具有較高的親和性，容易吸附核種並在水流環境隨著地下水遷移至周圍母岩，甚至縮短放射性核種遷移至人類生活圈的時間，其中溶解度越低，吸附性越強的核種，在膠體濃度高的環境下，加速遷移的現象將會越明顯。因此掌握膠體的特性對理解放射性核種於地下水中的擴散和遷移，以及放射性廢棄物最終處置安全評估具有重要意義。

當放射性核種由用過核子燃料或高放射性廢棄物中釋出，藉由地下水通過障壁材料並遷移至岩層中時，若地下水環境中的膠體滿足圖 1 之五項特性，則核種於地下水中的遷移行為將易受膠

(一) 地下水中膠體含量：場址地下水中是否含有高濃度膠體，或是當處置場封閉後是否會開始增加地下水的膠體濃度。

(二) 膠體遷移行為：膠體是否可以不借助任何物理或化學作用，即能通過岩層中的裂隙。

(三) 膠體穩定性：地下水的離子強度、酸鹼值、溫度等環境特性是否有利於膠體穩定。

(四) 核種吸附：地下水的離子強度、酸鹼值、溫度等環境特性是否有利於放射性核種吸附於膠體表面。

(五) 吸附行為的可逆與不可逆性：放射性核種的吸附行為是否為不可逆。

據此本報告主要針對深地層處置場地下水環境中，膠體對放射性核種遷移影響的五項特性進行相關文獻的蒐集與彙整，藉此掌握處置場中的膠體類型、膠體成因、膠體穩定性、以及膠體對放射性核種遷移的影響，同時也蒐集文獻，瞭解國際間評估膠體對核種遷移影響的方法，藉此擬定一套本土化的評估流程供後續模擬分析與安全評估參考使用。

* 中興工程顧問公司核能後端專案工程師

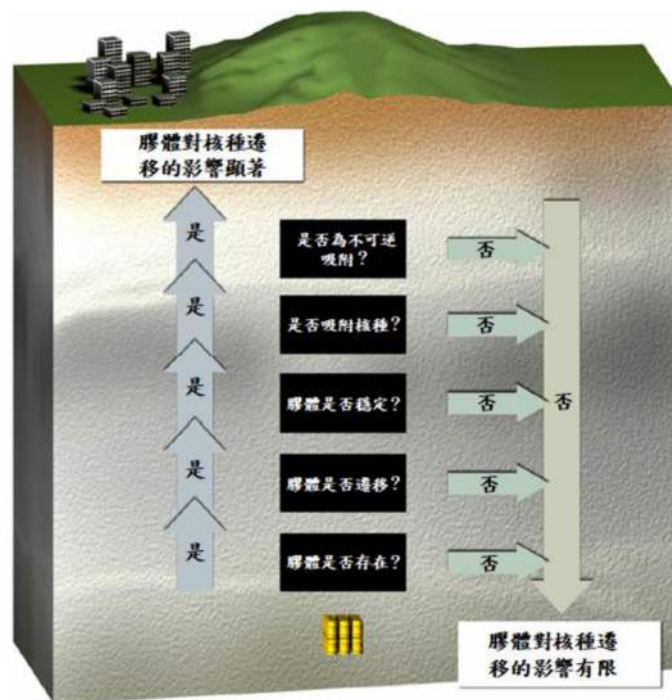


圖 1 膠體影響放射性核種遷移的情形

二、膠體種類與成因

(一) 無機膠體

深地層處置場地下水中的無機膠體大多與周圍岩層、障壁材料的成分相同，例如周圍岩層所產生的矽膠體、鋁膠體、鐵膠體、碳酸鹽膠體等，以及障壁材料所產生的膨潤土、水泥膠體等。

由周圍岩層釋出的無機膠體多為地下水滲透至岩層中時，其易溶於水的氫氧化鈣等物質逐漸溶出，並與溶液中的離子化合物反應生成所得。

膨潤土膠體的來源主要為緩衝材料。在高放射性廢棄物深地層最終處置場的概念設計中，目前國際間多以膨潤土作為緩衝材的障壁原料，然而當深地層處置場封閉後，地下水將藉由周圍岩層的裂隙逐漸滲透至膨潤土緩衝材表面，此時若流經緩衝材表面的水流流速超過 10^{-5} m/s，或因地下水入侵使得膨潤土成為過飽和狀態時，膨潤土緩衝材將會產生水合、回脹、擠壓等作用，並生

成粒徑尺寸不等的膨潤土膠體。

另外水泥膠體的主要來源則是處置坑道的回填材料或支保工材料等。

(二) 有機膠體

深地層處置場地下水環境中的有機膠體主要來自於周圍沉積物或土壤中的腐植質，腐植質係由生物死亡後所產生的木質素等物質，經微生物降解至最後生成。雖然腐植質的來源不盡相同，但性能卻非常相似，主要由溶於鹼不溶於酸的腐植酸 (humic acid)、酸鹼皆溶的富里酸 (fulvic acid)、以及酸鹼皆不溶的胡敏素 (humin) 構成。

由於胡敏素既不溶於酸也不溶於鹼，較不易以膠體形式溶存於偏鹼性的深地層處置場地下水中，因此在考量環境中的有機膠體時，主要以腐植酸、富里酸之溶解性有機碳 (Dissolved Organic Carbon, DOC) 為主。

1. 腐植酸

腐植酸是由芳香族及多種官能基構成的高分子有機酸，具有高吸收、錯合、交換等能力。腐植酸的主要組成元素為碳、氫、氧、氮、硫，是一種多價酚型芳香族化合物與氮化合物的縮聚物，分子量約數千至數萬，圖2為典型的腐植酸結構模型示意圖。

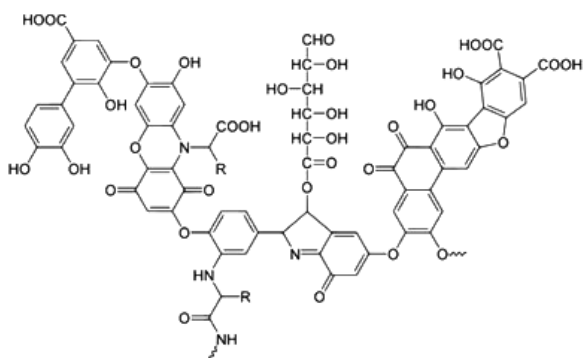


圖2 典型的腐植酸結構模型示意圖

2. 富里酸

圖3係典型的富里酸結構模型，相較於腐植酸，富里酸的分子量較低，約在750至2000之間，分子結構中的含碳量較少，含氧量較多，同時酮羰基、羥基、以及帶有酸性的羧基含量也較多，因此當富里酸溶於水中時具有較強的酸性。

由於富里酸結構中含有大量酚羥基、羰基等官能基，因此可與氧化物、金屬離子產生吸收、錯合等交互作用，進而影響其於環境中的物化行為。

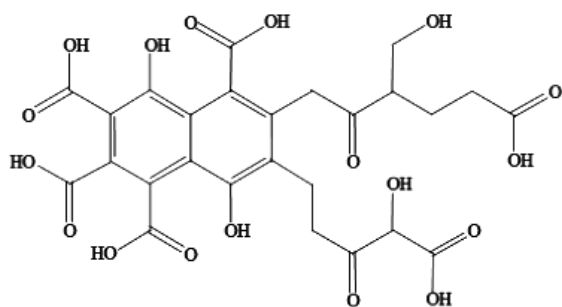


圖3 典型的富里酸結構模型示意圖

三、膠體遷移與穩定性

(一) 膠體穩定性的因素考量

由於膠體在溶液中具有高分散度以及高單位質量比表面積，因此膠體溶液屬於一個熱力學不穩定系統，造成膠體有自動凝聚與沉積的趨勢，然而實際上大部分之膠體可以長時間在溶液中維持穩定而不會產生凝聚與沉積的現象，其原因除了由布朗運動（Brownian motion）造成的動力穩定性之外，膠體的帶電性質亦是維持膠體穩定的重要因素。

當二個相同類型的膠體顆粒彼此接近時，顆粒間將因表面帶有電性相同的電荷而產生庫倫排斥力，同時也會因分子間的作用而產生凡德瓦爾吸引力，若吸引力大於排斥力，則膠體顆粒會不穩定的凝聚在一起形成凝聚結構；若排斥力大於吸引力，則膠體顆粒會以布朗運動方式反向移動，並穩定分散於溶液中，因此膠體周圍的電荷影響範圍與強度將會是決定膠體穩定性的重要因素，一般可用擴散電雙層理論加以說明，如圖4表面代負電荷的膨潤土膠體為例，而式（1）則是擴散電雙層中擴散層分布行為的經驗公式。

$$\frac{1}{K} = \left(\frac{\epsilon k T}{2e^2 n_0 v^2} \right)^{1/2} \quad \text{式(1)}$$

其中，

$1/K$ = 擴散電雙層厚度 [m]。

ϵ = 介質的介電常數 [$C^2/J \times m$ 或 F/m]。

k = 波茲曼常數 [$1.38 \times 10^{-23} J/K$]。

T = 絕對溫度 [K]。

e = 電子電荷 [$1.6 \times 10^{-19} C$]。

n_0 = 溶液的離子濃度 [$ions/m^3$]。

v = 離子價數 [-]。

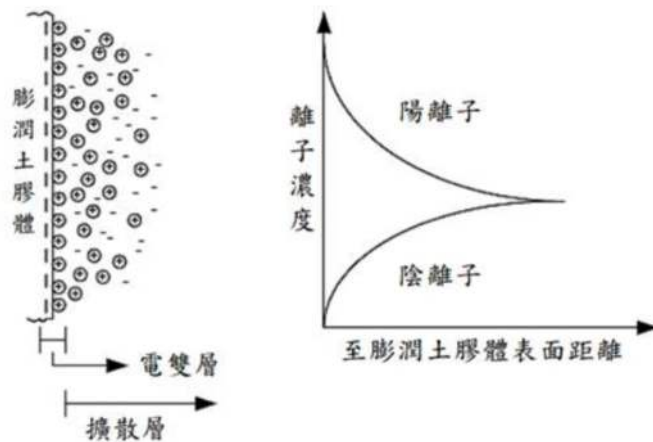


圖 4 擴散電雙層示意圖

由式(1)中可發現，直接影響擴散電雙層厚度的因素包括溶液離子濃度、離子價數、溫度以及介電常數，間接影響因素則包括 pH 值。

(二) 影響膠體遷移的因素

膠體遷移主要受到膠體穩定性影響，當膠體穩定分散於溶液中時，膠體易隨著水流於岩層中遷移；當膠體不穩定而產生凝聚或沉澱時，膠體將容易於岩層中產生遲滯作用，導致遷移速率降低，因此膠體遷移與膠體穩定性有密切關係，影響膠體遷移的因素也多半與影響膠體穩定性的因素相關，除此之外，膠體的粒徑、表面性質、以及岩層裂隙尺寸、裂隙表面性質與水流流速也是影響膠體遷移的重要因素。

四、核種吸附與吸附行為

(一) 膠體對核種的吸附作用

一定溫度下，某物質在二相（固液相、固氣相、氣液相）之間達到平衡時，此物質在二相間的濃度比即為分配係數（ K_d ）。藉由分配係數可以反映物質在二相中的遷移能力、吸附能力與脫

附能力，是描述物質在二相中行為的重要物理化學特徵參數。

然而不同的放射性核種因物理、化學性質相異，因此對於各物質具有不同的分配係數，另外分配係數也容易因外界因素影響而改變，例如酸鹼值、溫度、氧化還原電位等近場環境因素，以及吸附物質的組成、物理化學特性等。

(二) 核種吸附行為的可逆與不可逆性

膠體或岩層基質吸附放射性核種的行為可視為其表面對核種的親和力作用，依據不同的作用方式分為可逆吸附與不可逆吸附：

1. 可逆吸附

可逆吸附（reversible adsorption）係指改變環境條件時，吸附和脫附交替進行的過程，當發生可逆吸附時，吸附分子的性質不會發生變化。一般而言，物理吸附屬於可逆吸附，其原因在於物理吸附主要藉由吸附劑與吸附質分子間的凡德瓦爾力形成，然而透過凡德瓦爾力所形成的吸附行為，一般其結合力較化學鍵弱，吸附熱也不會超過 10 kcal/mol，因此被物理吸附的物質較容易因

環境條件變動而產生脫附行為。

2. 不可逆吸附

在環境條件改變的情況下，原本吸附於基質上的物質無法進行脫附，或是必須藉由性質改變才能進行脫附時，則稱之為不可逆吸附（irreversible adsorption）。一般而言，化學吸附屬於不可逆吸附，其原因在於化學吸附會於吸附劑與吸附質分子間形成結合力較強的化學鍵結，吸附熱也相近於化學反應熱，因此被化學吸附的物質需要較高的溫度才能將其脫附，並且即使完成脫附，也將因經歷過化學反應而與吸附前的性質有所相異。

雖然膠體可同時藉由物理和化學吸附核種，但其屬於可逆吸附或是不可逆吸附仍須透過相關試驗加以確認，藉此掌握膠體於不同環境中對核種的吸附比率、脫附比率、以及當膠體遷移至含水層時，部分核種由膠體表面脫附並吸附至周圍岩層，使兩介質間的吸附反應達到平衡之情形。

五、膠體對核種遷移影響的評估方法

由於用過核子燃料或高放射性廢棄物最終處置場環境中的膠體，對核種遷移的影響可能是一個長久且持續性的行為，因此目前國際間有許多研究藉助試驗裝置與數值分析模型的建置，模擬評估放射性核種受膠體影響後的長期遷移行為變化。

然而各國的放射性廢棄物最終處置場之場址環境、膠體種類、岩層性質不盡相同，長時間尺度安全評估所考量與設計的情節也有所不一，若全盤引用他國的研究成果作為後續評估模型的參數使用，可能會導致評估結果與處置場之實際情形有所差異，因此在進行數值模擬評估時，一般會先至場址附近取得地下水、沉積物、岩石等現地材料，並透過場址調查掌握岩層裂隙寬度、地

下水流速等環境現況，接著依據場址環境設計砂柱試驗與批次吸附實驗，藉此獲取遲滯因子、分散係數、擴散係數等有關膠體於場址環境中的遷移參數、以及放射性核種吸附於膠體、岩層的分配係數後，從中選出關鍵核種與膠體，再將氣溫、降雨量、海水位面升降等處置環境長期演化、以及工程障壁材料劣化對膠體濃度、核種遷移的影響情節一併代入評估模型進行核種遷移模擬。膠體對核種吸附、遷移的影響評估概要流程如圖 5 所示。

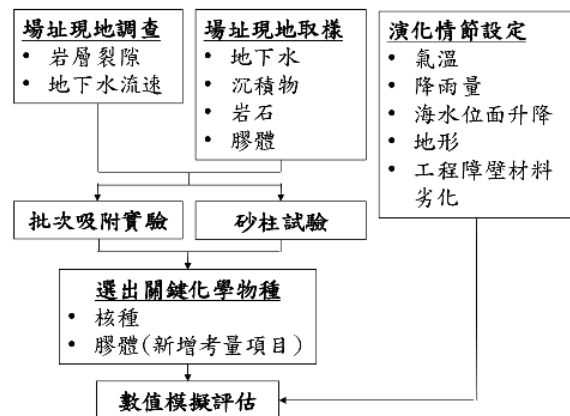


圖 5 膠體對核種遷移影響評估概要流程

六、結論與建議

用過核子燃料或高放射性廢棄物最終處置場周圍環境中的膠體係影響放射性核種遷移的關鍵，主要原因有以下二點：

- （一）膠體的粒徑尺寸普遍介於 1 nm 至 1,000 nm 之間，因此可以在裂隙或多孔隙介質間遷移。
- （二）由於膠體的單位質量比表面積非常大，因此當膠體和塊材係由同一材料構成時，每單位質量的膠體比起塊材更具有吸附能

力，換句話說，即使溶液中僅有少量的膠體，也可能會直接影響到固相基質的吸附能力。

基於此因，目前國際間大多數皆有針對候選場址附近之地下水進行膠體採樣分析，以掌握場址現地的膠體資訊。

然而膠體對放射性核種的分配係數，以及當核種吸附於膠體表面時，其係屬於可逆吸附或是不可逆吸附，皆會因場址環境的不同而改變，由於各國處置場場址的周圍環境不盡相同，因此不宜全盤貿然採用他國的研究成果作為我國後續處置場的安全評估分析參數使用。

故有關我國放射性廢棄物最終處置場膠體對核種遷移的影響評估，必須先制定一套本土化流程，透過現地採樣、調查、以及試驗取得我國場址現地環境、材料、膠體之物理特性與化學特性等相關參數後，選出關鍵核種與膠體，再選擇合適的模型程式將所得參數代入進行模擬分析評估，以確保評估結果能實際反映本土的場址狀況，促進處置場長期安全功能評估的準確性，評估流程請參閱圖 5，各流程之方法與建議事項如下四點所示：

（一）場址現地調查

透過場址現地調查，掌握場址環境演化與參數係處置場安全評估分析的最初步驟。當放射性核種由處置場釋出並開始遷移至人類生活圈時，隨著放射性核種於地層中深度、位置的不同，其周圍的場址環境也會不盡相同，因此放射性核種於地層中的遷移過程將持續且不斷受到場址環境演化影響。

由於場址環境演化對膠體濃度的影響甚鉅，並直接影響到核種的遷移速率，因此在進行現地場址豎井採樣分析時，應掌握環境隨深度演變與

膠體濃度之間的關係，包含環境 pH 值、離子強度、溫度等，而非僅進行單一深度的環境與膠體濃度量測。

至於採樣的方法可參閱行政院環境保護署環境檢驗所提供的監測井地下水採樣方法進行，並使用氣囊式泵浦或貝勒管（Bailers）進行採樣，以避免樣品與外界環境接觸，同時於採樣後盡快針對樣品進行分析。

（二）吸附相關試驗

有關吸附試驗的執行方法可參閱國際間常用的砂柱試驗或 ASTM C1733 批次吸附實驗進行。

另外在藉由實驗求得膠體、核種於不同環境中吸附於不同材料的分配係數時，除了 pH 值、離子強度、溫度、氧化還原電位等環境基本資訊外，建議也應將溶液中所含的膠體濃度、試驗材料的粒徑尺寸等具影響分配係數的可能因素一併詳細記錄，以求實驗參數資訊的完備。

同時也可以藉由試驗結果進行關鍵核種與膠體的篩選，從中選出分配係數易隨環境、吸附材料不同而有顯著變化的核種，以及處置環境中含量較多且對多數核種具有吸附能力的膠體進行評估，並將在不同環境下分配係數皆趨近於 0 的核種與膠體組合列為非首要考量項目，以減輕模擬程式系統計算上之負荷。

（三）膠體對核種遷移影響的評估模擬

由於膠體吸附放射性核種的分配係數，以及其穩定性與遷移行為易受環境的多項因素影響而變化，同時放射性核種於地下水中的遷移速率也會因環境中的膠體濃度不同而改變，在長時間的安全分析中，處置環境的長期演化會使多項參數不斷隨時間變動，增加模型分析時的演算負擔，據此建議採用專門能針對多項瞬時變化參數進行

模擬分析的地化傳輸模式如 HYDROGEOCHEM 等作為後續安全分析模型，以掌握膠體於多項瞬時變化參數中影響放射性核種遷移的情形。

(四) 長期演化情節的考量

臺灣係屬中低緯度國家，即使於冰河時期也未必會發生融水入侵岩層中的現象，因此全球氣溫下降造成地層冰凍，使處置場周圍膠體濃度發生變化的情節不一定為本土化安全評估之必要考量項目。

但臺灣獨特的季風氣候，其所帶來的降雨量未必能使處置場地下水流流速維持穩定狀態，另

外歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊的長期活動造成臺灣地區海水位升降以及地形演化，皆會導致處置場周圍地下水的水質發生變化，並間接影響到地下水中的膠體濃度，除此之外工程障壁因地下水入侵而產生的劣化效應也會影響到處置場周圍地下水的膠體濃度與核種遷移速率，因此在後續的本土化安全評估中，必須加以考量與分析。

至於整體的安全評估流程與演化情節的考量方法可參閱國際原子能總署（International Atomic Energy Agency, IAEA）於 2012 年所提供之安全論證執行架構進行。



應用程式

公開發售

結合 ETABS 之位移法耐震性能設計及評析程式

售價：新臺幣 9,190 元/套(含報告)

訂購電話：(02)8791-9198 轉 467 陳小姐

傳 真：(02)8791-2198

E-MAIL：louise@sinotech.org.tw



SINOTECH

*新竹寶山第二水庫
涓滴匯流出浩瀚成就

潤澤大地與豐沛生命，水是萬物不可與離的自然要素
中興工程顧問公司是水資源的專家，從涓滴細水到澎湃奔流
從崇山峻嶺至地下水源，始終以專業掌握每一滴匯聚生命的關鍵
為成就人類更好的生活而努力

水利資源工程

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

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

正派經營 · 品質保證 · 追求卓越 · 創新突破

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



淺說黃道星座

談北極星和地球氣象

張湧元

一、前言

我們日常生活中，和朋友一起聊天，時會談及生日、性格、運勢、十二生肖、以及所屬的星座；或問那一天是婚姻、喜慶、搬家、安床等的黃道吉日？我們東方人對十二生肖很熟悉，但星座似是西方人的東西，問所屬星座時，可能有很多人答不出來。以星座說一個人的性格，大家容易懂，但說運勢和黃道吉日卻是占星家們所能為者，我們只能從萬年農民曆中查得。以上這些要談究竟清楚，則必須從地球繞太陽公轉的有關「黃道」說起。因此本文特從淺說黃道來談一個人的所屬星座及其性格，再來談北極星和地球的氣象等，包括：地球與北極星的關係位置、太陽的直照和斜照、四季的成因、什麼是春分、夏至、秋分和冬至的一年四節氣、以及地球大氣流運行的大自然現象等等。然而，其中以四季寒暑的成因，是地球自轉又繞太陽公轉的動態三維立體關係，有其運動變化的複雜性。為此，謹撰述本文提供參考和指教，文中筆者並以製作的彩繪圖示來輔助說明，期能對這些日常生活聊天領域有興趣者有點幫助來參閱。

二、黃道

古人視宇宙為一大天球，眾恒星都分布在這

天球的球殼表面上，把天上一群相鄰較亮的恒星用直線相聯組合起來，成為一特定星座，再依其構成形狀，以神話中的人獸和器具等來命名；並把地球繞太陽公轉的軌道面向外闊展到天球，與天球表面相交的大圓圈稱為黃道，其構成的大平面稱為黃道面，它也是太陽系九大行星包括地球各繞行太陽公轉軌道而構成平面的平均位置。雖然地球以太陽為中心公轉，但古人認為自己才是宇宙的中心，坐位在太陽位置上。當地球人看太陽時，看到的是沿黃道上繞行地球及穿行於十二星座中的「視太陽」，見圖 1 所示。圖中從地球 A 往太陽 B 方向看，就看到視太陽 C，它每年沿黃道由西往東公轉繞行一圈 365 天。古人並把黃道一圈依照一年的月份數，切割成十二個等區間，各區間以一星座來命名，這就是所謂的四組「黃道十二星座」，有（一）白羊座、金牛座、雙子座；（二）巨蟹座、獅子座、處女座；（三）天秤座、天蠍座、射手座；（四）摩羯座、水瓶座、雙魚座，它們依序固定在黃道帶上，從白羊座到雙魚座圍成一圈。

一個人出生時，視太陽在黃道上正好經過的星座，就是這個人的所屬星座。例如某人在陽曆 3~4 月間出生時，在圖 1 中從 3、4 月間的地球位置，往太陽方向看視太陽時，該區間是白羊座，因此這個人的所屬星座就是白羊座。根據出生日期，由下列表中可以查得更正確的所屬星座，但

所屬星座的出生日期，各家看法有點不同。

下表的四組星座中，各組有三個星座，各組中依序代表一個季節的開始、過程及結束，是萬物生長或一件事務進行的三個階段。依此三個階段所屬的星座來說一個人的性格，在各方資料中，皆有共通的闡述，依其天賦及出生後環境的影響，而有不同的性格。筆者從好的方面歸納來比擬一個人的性格大致如次：（一）依萬物生長而言，如果所屬星座是開始者，是季節開始的星座，他就像依氣候和土壤等來選種花樹，主導旁人依此進行後續種植工作；若是過程者，是季節中間的星座，他續行除草、鬆土、灑水、施肥等，讓花樹在好的環境下，好好生長；若是結束者，是季節末端的星座，他照顧花樹的開花結果，防

止蟲鳥啃食等，在大家辛苦後，都得有美麗的花及甜的水果來共同享受。（二）依事務進行而言，若所屬星座是開始者，他凡事由觀察成因的道理來主導旁人做事，依主要目的行事，有開創和主動的性格；若是過程者，他凡事由開始成因規範的限制來進行事務，有承先啟後和繼續積極努力的性格；若是結束者，他凡事承接前面兩種人的開始與過程的發展，能適應變化，有讓大家都能享受到最後開花結果的清高性格。這三種人依其天賦及不同性格，在各工作領域上都有其不同的領導力，知道在其適當職位也無法越位下來進行事務，因此在大家共同努力之下，所有事務才得圓滿成功完成。

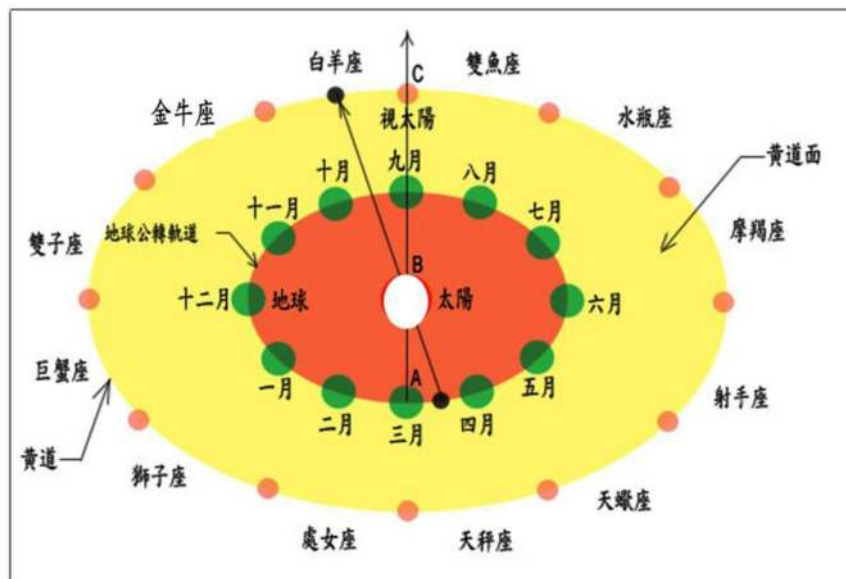


圖 1 地球、太陽、視太陽、黃道和黃道十二星座
(本圖為筆者繪製)

表一 出生日期與所屬星座

第一組		第二組		第三組		第四組	
出生日期	星座	出生日期	星座	出生日期	星座	出生日期	星座
03/21-04/20	白羊座	06/22-07/23	巨蟹座	09/24-10/23	天秤座	12/23-01/22	摩羯座
04/21-05/21	金牛座	07/24-08/23	獅子座	10/24-11/22	天蠍座	01/23-02/19	水瓶座
05/22-06/21	雙子座	08/24-09/23	處女座	11/23-12/22	射手座	02/20-03/20	雙魚座

三、地球與北極星的關係位置

地球自轉而繞太陽公轉時，地球的自轉地軸永遠指向北極正上方無窮遠的北極星（見圖2），因此一個人若在地球北半球要尋找北極星時，他的視線必須平行地軸並朝北方去尋找。例如：

（一）若站在緯度0度的赤道緯度上，必須朝北方的地平線以仰角0度的水平視線去尋找；（二）若往北方前走，必須朝北方的地平線（如圖2中CD線），再以所處緯度的仰角視線（如圖2中CE線）去尋找。例如在臺北的緯度是25度，必

須朝北方地平線以仰角25度的視線去尋找；（三）當走到緯度是90度的北極時，不論地球如何公轉，北極星永遠位在頭頂正上方，必須從地平線以仰角90度上方的視線去尋找。以上（一）及（三）的視線，很清楚可以知道是平行地軸，北極星就位在視線前方；至於（二）的視線為什麼也是平行地軸呢？筆者在圖2中有幾何數學的證明可供參閱。北極星是二等星，亮度不高，可以再配合四季不同星座如北斗七星等與其相關位置來尋找，則更容易找到它。

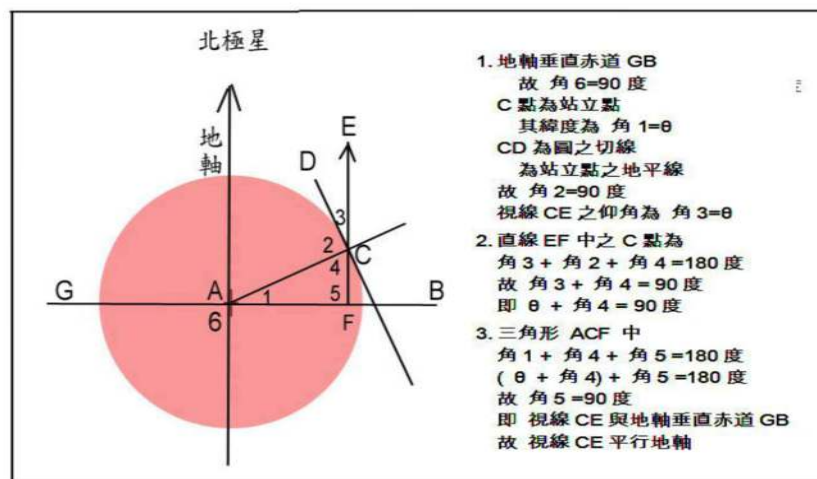


圖2 幾何證明朝北及緯度仰角的視線是平行地軸尋找北極星的方向
(本圖為筆者繪製)

若站在北極中心位置不動，固定相機向正上方北極星為中心慢速連續拍照時，由於地球的自轉，北極星在相機中心不動，周圍眾星星卻連續繞北極星圓圈移動，可以拍出眾星星連續繞北極星的軌跡之「眾星相拱」美麗夜空照片，因此有人說北極星是「帝星」。孔子說：「為政以德，譬如北辰，居其所而眾星共之。」所指的北辰就是北極星。

四、地球四季的成因

地球的自轉地軸指向北方的北極星，並傾斜於地球公轉的軌道面（即黃道面）。軌道面與地球的赤道面形成的黃赤交角為 $23^{\circ}26'$ ，見圖3所示。地球在軌道上公轉時，它的指向北極星方向、赤道面傾斜方向及黃赤交角度數，這三者始終保持不變。因此將本圖3直接平移貼繪在地球公轉軌道上任一點，即形成地球繞行太陽公轉的樣貌。

若將其貼在北西南東四個位置點，就形成如圖 4

中地球繞行太陽在春夏秋冬的位置圖。

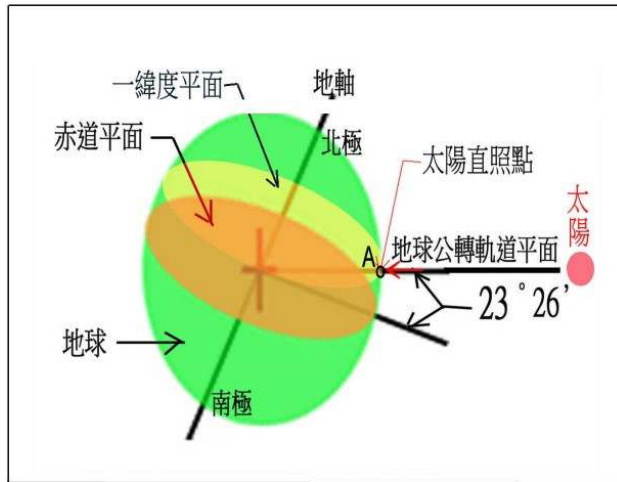


圖 3 地球赤道面與其公轉軌道面的傾角幾何關係和太陽直照地球示意圖（本圖為筆者繪製）

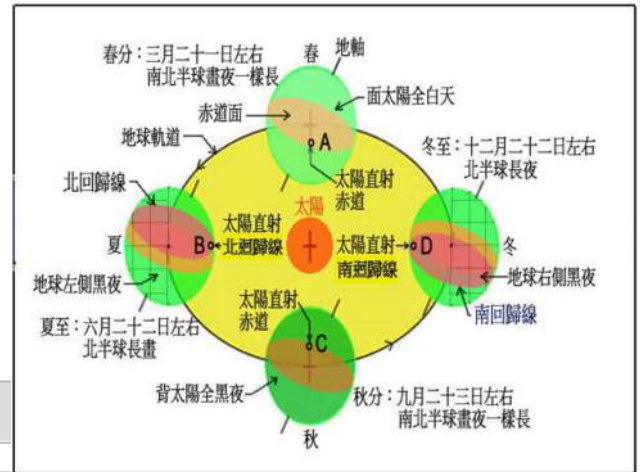


圖 4 地球繞太陽公轉四季變化示意圖（本圖為筆者繪製）

地球由西向東自轉一圈為一天，它在公轉軌道亦由西向東繞行太陽，其繞行軌道一圈的週期為一年，共 365 天。地球與太陽的動態關係是：地球自轉又公轉，永遠在動；太陽位在軌道面中心和地球繞太陽公轉的軌道面，這兩者位置永遠靜止不動，這是地球四季的成因。但地球人看太陽似自己不動，太陽在繞行地球，每日東升西落和一年中在南北回歸線之間來回緩慢行走，因此本文有時用兩者動靜交互混用文字來敘述以下之太陽直照和斜照、春夏秋冬四季寒暑變化、一年四節氣。這些均隨地球公轉一週，有規律地循環，終而復始。

（一）太陽直照和斜照

太陽直照地球之點為太陽與地球的最近距離，陽光最強；該點之外都是陽光斜照地區，距離該點越遠，陽光越弱。由於地球赤道面傾斜軌道面，如圖 3 所示，故地球表面與軌道面（即為圖中「地球公轉軌道平面」呈水平面之側邊）相

交處 A 點，有一平行赤道面的緯度線與軌道面相交在該相交處，如圖 3 中所示之「一緯度平面」。地球公轉時，太陽的陽光平貼軌道面，由該面中心位置照射地球在該一緯度線上的相切點 A，為太陽直照之地，該相切點將隨地球自轉在該一緯度線上日夜移動。例如：（1）圖 4 中地球公轉在軌道的夏和冬兩位置時，太陽直照的緯度分別為圖示之「太陽直射北回歸線」和「太陽直射南回歸線」的兩緯度線上，B 和 D 兩相切點是太陽的直照之地；（2）在春和秋兩位置時，太陽直照緯度線為圖示之「太陽直射赤道」的緯度線上，A 和 C 兩相切點都是太陽直照之地；（3）由於地球和太陽的空間運行關係不變，故一年當中，太陽直照地方只能在北回歸線和南回歸線（緯度各為 $23^{\circ}26'$ ）之間移動，它經過赤道兩次；兩歸線之外到兩極間之地區永遠是太陽斜照的地方，例如臺北緯度位在 25 度，永遠是陽光斜照地區，我們頭頂正上方不會有太陽直照。下文中說太陽走到那裡，是指太陽直照的緯度線。

（二）春夏秋冬四季寒暑變化

春夏秋冬四季是地球公轉在軌道的四個區間，我們臺灣 3~5 月為春天，6~8 月為夏天，8~11 月為秋天，11~2 月為冬天。圖 4 中，（1）地球由春天位置走過夏天位置再到秋天位置時，是太陽由赤道走到北回歸線，再走回赤道。此時北半球傾向太陽，進入夏天，越靠北方白天越長，到北極地區有半年時間是常晝。而此時南半球遠離太陽，與北半球的天候相反，進入冬天，越靠南方夜間越長，到南極地區有半年時間是常夜；（2）地球走到秋天位置時，因太陽在赤道附近，北半球地區涼爽，是為秋天；（3）地球由秋天位置走過冬天位置再到春天位置時，北半球遠離太陽進入冬天，南半球傾向太陽進入夏天。此時越靠南方白天越長，到南極地區有半年時間是常晝，與北半球的天候相反；（4）地球走到春天位置時，北半球地區氣候涼爽，是為春天。春天與秋天一樣涼爽，但春天沒有像秋天有「秋老虎」發威悶熱的天氣，有關秋老虎天氣見下述結語中說明；（5）赤道地區沒有四季之分，如印尼為跨赤道的週邊地區，是熱帶型氣候，在北半球 4~9 月夏季時是印尼的旱季，北半球 10 月到次年 3 月冬季時是印尼的雨季，印尼氣候只有旱季和雨季。

（三）一年四節氣

四節氣是一年二十四節氣中的春分、夏至、秋分和冬至，為地球公轉在軌道上的四個特定點，其日期和位置見圖 4 所示。當地球公轉走到太陽直照其南北回歸線上時，分別是冬至和夏至；當太陽一年兩次直照在赤道上時，是春分和秋分。茲說明如下：（1）當太陽走到夏天位置的北回歸線上時，是太陽能走到北半球的最北方位置，爾後再南下，故此時稱為北半球的夏至，北半球白天長。太陽南下走往赤道時，北半球開始漸變涼；（2）當太陽走到秋天位置的赤道緯度線上時，此

時南北兩半球是一樣的天氣，晝夜時間長短相等，故此時稱為北半球的秋分，此時南北兩極沒有長晝和長夜；（3）當太陽走到冬天位置的南回歸線上時，是太陽能走到南半球的最南方位置，爾後再北上，故此時稱為北半球的冬至，北半球夜間長。太陽北上走往赤道時，北半球開始漸變暖；（4）當太陽走到春天位置的赤道緯度線上時，此時北半球天氣同秋分一樣，南北兩半球是一樣的天氣，晝夜時間長短也相等，南北兩極也沒有長晝和長夜，故稱為北半球的春分。

五、地球大氣流運行的大自然現象

地球在北半球和南半球各有兩個風系，分別為（東北信風、西風帶）和（東南信風、西風帶）。當太陽走在赤道無風帶附近時，四個風系位置如圖 5 所示。以北半球而言：（一）東北信風沿地面吹到赤道無風帶，空氣因熱而膨脹，從地面向上升到高空，大氣流再向北流動；（二）西風帶熱空氣，由副熱帶無風帶沿地面吹來西南風熱氣團，與寒冷的極區氣團混合，從北極低壓區地面向上上升到高空，大氣流再向南吹；（三）這兩個風系在高壓區的副熱帶無風帶的高空相遇相混後，約位在北緯 30 度附近下降地面，再各分道揚鑣，分別往東南吹向赤道和由西南吹向極地低壓區。

南半球的兩個風系，其大氣流亦同北半球一樣運行，有：赤道無風帶，東南信風、西風帶西北風、和副熱帶無風帶。地球在赤道無風帶和南北半球兩個副熱帶無風帶附近，因大氣流分別向上及向下吹，而不是迎面吹來，故在這些地區感覺無風天氣悶熱。

六、結語

（一）黃道之名的由來，依筆者另外推想，是古

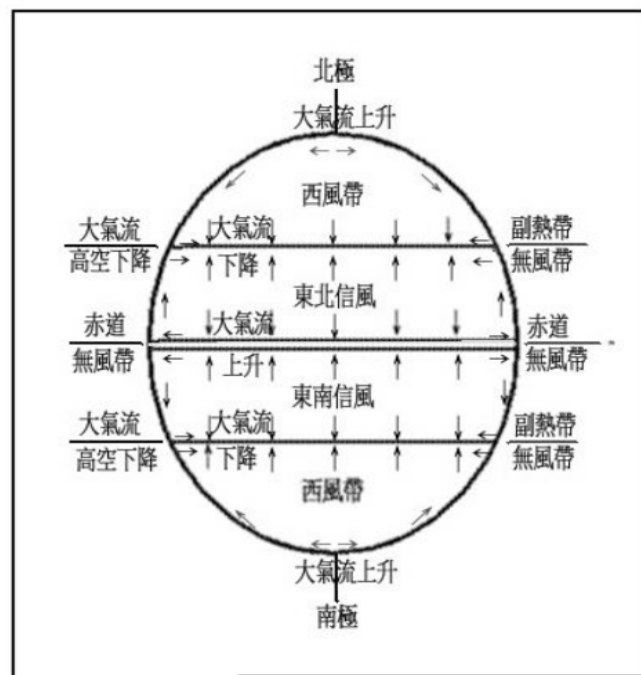


圖 5 地球大氣流運行示意圖
(本圖為筆者繪製)

人認為自己才是坐位在太陽的宇宙中心，但不敢講及請出安穩坐在皇宮金鑾殿上的「真黃帝」，因為他如坐位在金壁輝煌的太陽位置，是神聖不可侵犯的，怎可請出屈居反倒來繞地球，如眾星相拱老百姓呢？為避諱忌，把「視太陽」當作「視黃帝」，不讓祂反而感覺在繞行地球，將其行走天際之視路徑因呈金黃色，故說是「黃道」。另在所屬星座及說性格上，有人似不喜歡說他是結束者的星座，筆者不認同。在古書儒林外史中有故事描述說：王冕（依筆者認為他的所屬星座是結束者）幼年為放牛童子，工作認真，閒時勤讀書學繪畫，後來成名，是一位有骨氣脫俗之人。為政者要請他赴朝協助理朝政，但他認為這個職位與自己的性格不符，深知是無法越位

來接受的，他有他的天賦，因此遠避他鄉。如此清高而了然的嶙峋磊落性格，避開當時官場的虛偽和惡鬥，如他結束者的星座和性格有何不好和不接受呢？

(二) 宇宙大自然的天地萬象無奇不有：例如北極星的「眾星相拱」、春夏秋冬四季的成因、農民的春耕、夏耘、秋收、冬藏等農務依一年四節氣來進行；還有目前時間地球上常有大雨、大雪、酷熱等災害，說是因地球暖化溫度上升，但天氣變成那麼熱，怎麼有那麼多暴風雪呢？這些等等小朋友不瞭解，也許會問「為什麼」呢？或有問珍珠小小一顆只幾毫克而已，是否有重如地球的一顆珠子呢？石油是以前地上森林枯死而成的，但沙烏地阿拉伯天氣那麼熱，到處都是沙漠，而地球的四季寒暑與太陽

的關係位置也永遠不變，問沙國那來的一大片森林和那麼多石油呢？在學校上課時，小朋友們也許聽老師說過這些，但可能也僅一知半解或聽不懂。這些提問大人們是很好的現象，是我們為他們開啟知識的很好教育機會，我們的科學家不是常問「為什麼」而產生的嗎？

(三) 全世界有很多地區，以前不曾發生大雨、大雪、酷熱等災害，目前頻頻發生，大家都歸罪於地球氣候變遷。筆者以上述大氣流運行的相關，另外來解說這些氣候現象改變的原因及其他如下：(1) 在北半球冬季時，太陽移到南半球，此時北半球的兩個風系範圍變大，原來兩者相遇在北緯30度的副熱帶無風帶，也跟隨南移到較低緯度的地區；由於地球暖化，北極如格陵蘭島等地區冰雪融化快速，寒冷的極區氣團濕氣增加，西風帶地面吹來西南風，在極地低壓區上升後，冰冷大氣流從高空往南下，降到這些變動位置的緯度較低的副熱帶無風帶地區，致如美國德州緯度在26~37度之間，有些地區今(2021)年大雪冰封，甚至中東或沙漠地區也迎來罕見大雪。(2) 當北半球夏季時，太陽移到北半球，這兩個風系範圍變小，原兩風系交會地點北移到較高緯度地區；亦由於地球

暖化，赤道地區上升的濕熱氣團下降到這些變動位置的緯度較高的副熱帶無風帶地區，致如目前這些地區天氣比以往炎熱，例如加拿大溫哥華地區緯度約49度，最近曾高溫酷熱至攝氏近40度。

(四) (1) 每年秋季8月底至9月之間，我們常感覺天氣早晚清涼，秋高氣爽，但經白天日照後，午間晴朗少雲，高溫難受，這是「秋老虎」在發威。其形成原因是在秋天時，太陽由赤道南移到南半球，致北半球的副熱帶無風帶高壓區跟隨南移到我們臺灣上空，故我們感覺天氣無風而悶熱。(2) 另兩極地區風雪特大的原因，是南北兩半球因低緯度地面吹來的西北風和西南風兩氣團，分別由四方滙集在兩極小圈緯度地區的小面積範圍內，因此極區風雪特大。

(3) 世界的沙漠，大都分布在南北兩半球緯度23度上下的地區，如北半球的沙烏地阿拉伯和撒哈拉沙漠、南半球智利的阿他加馬沙漠，這些地區是全世界最乾燥的沙漠之地，是因位在大氣流的高壓區副熱帶無風帶地區，而且這些地區也無高山阻擋大氣流而下雨等所造成。緯度23°26'的北回歸線正通過副熱帶氣候型之臺灣的嘉義和瑞穗，還好臺灣是海島又有高山常下雨而有很多河流，才未淪為沙漠地區。

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	蝶閥啟閉過程中閥體受力之數值模擬	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）岸壁冲刷	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

類別	序號	書 名	編 號
大地工程類	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、地質模型建立與地工分析模式發展	R-GT-05-04
	19	新興感測科技於環片計測之應用（一）	R-GT-06-01
	20	強震資料庫建置與維護及使用者平台開發（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者平台開發（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—完整岩盤盤道影響探討	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	台灣山區地下水資源調查與評估技術之建立	R-GT-13-01
	35	隧道施工資料管理系統（二）—應用與改進	R-GT-13-02
環境工程類	36	地下水補注敏感區判釋與評估技術之建立	R-GT-15-02
	37	流體注儲行為之力學機制研究與工程應用	R-GT-16-01
	38	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
	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	應用固相微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	下水道污泥之矽直接分析	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	以化學氣相法處理受有機物污染之土壤	R-EV-04-08

類別	序號	書名	編號
	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
環境工程類	33	薄膜海水淡化廠出水水質穩定化控制技術	R-EV-06-02
	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、裂解與氣化	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
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

類別	序號	書 名	編 號
	23	特殊形狀建築物承受風壓分析－Phoenix 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
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

類別	序號	書 名	編 號
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



***台9線蘇花公路山區路段改善計畫(簡稱蘇花改)中仁隧道
用技術落實對安全及永續的執著**

(蘇花改)於台9線蘇澳至大清水間，分三段進行改善
中興工程負責蘇澳-東澳及和中-大清水兩路段之設計及施工監造
和中-大清水段主要構造之一為長4.8公里之中仁隧道
於2020年1月6日通車，提供一條往來宜蘭及花蓮之安全道路



工程監造團隊

中興團隊專業服務

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

聯絡資訊

105409 臺北市松山區南京東路五段171號
電話：(02) 2769-8388 傳真：(02) 2763-4555
E-mail : sinotech@sinotech.com.tw
<https://www.sinotech.com.tw>

正派經營 · 品質保證 · 追求卓越 · 創新突破



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



* 花東線鐵路月美段高架橋
縱橫四界的願景擘劃者

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

鐵道建設工程

中興團隊專業服務

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

聯絡資訊

10570 臺北市松山區南京東路五段171號

電話:(02) 2769-8388 傳真:(02) 2763-4555

E-mail : sinotech@sinotech.com.tw

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



正派經營 · 品質保證 · 追求卓越 · 創新突破



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





*花蓮和平工業區

接軌五洲七洋的雄心

台灣位處太平洋中一片蔚藍海所環繞的寶島
海岸及港灣工程是豐饒的基點，更是與國際接軌的要素
中興工程顧問公司以工程的專業，連結土地與海洋的關係
水岸工程與停泊的港灣，正是臺灣航向世界的出發點！

海岸&港灣建設

中興團隊專業服務

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

聯絡資訊

10570 臺北市松山區南京東路五段171號

電話：(02) 2769-8388 傳真：(02) 2763-4555

E-mail : sinotech@sinotech.com.tw

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



正派經營 · 品質保證 · 追求卓越 · 創新突破



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





* 國道4號臺中環線豐原潭子段第C715標潭子系統交流道工程

構築快速公路網絡

本案設計採用變形Y型之交流道型式，銜接台74線並在有限空間設計容納4條匝道之交流道外觀設計呈現多層次交疊，宛如彩帶環繞飛舞之意象。工程完工後可將國道3號、國道1號及台74線快速公路串連成為臺中都會區高快速公路網絡。



公路建設&監造團隊

中興團隊專業服務

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

聯絡資訊

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

正派經營 · 品質保證 · 追求卓越 · 創新突破



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



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

業務範圍：水利／電力／環境／交通／建築／機電



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

10570 臺北市南京東路五段171號

Tel: 886-2-27698388 / Fax: 886-2-27634555

www.sinotech.com.tw

e-mail: sinotech@sinotech.com.tw



◎ 封面圖片 - 南迴鐵路電氣化工程 多良改線路段

「臺鐵南迴鐵路臺東潮州段電氣化工程建設計畫」（簡稱南迴計畫）由中興工程顧問公司負責「土建及一般機電工程設計暨配合工作技術服務」之調查及設計工作。

多良改線路段工程隸屬「南迴計畫」之C712A標菩安金崙段土建及一般機電工程。本工程考量前後銜接既有臺鐵路線之線形平順，避免計畫經費增加及電氣化通車期程延宕，並兼顧新路廊安全性與技術可行性，規劃橋梁、隧道、軌道、邊坡護坡及施工鋼棧橋等工程，已於民國109年5月正式切換啟用。多良車站有全臺最美車站之稱。

中興工程

No.154 / January 2022

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

E-mail：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 ※

 財團法人中興工程顧問社



ISSN 0257-554X



9 770257 554007

SINOTECH ENGINEERING