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.

152
2021年7月出刊
1983年10月創刊

中興工程顧問

擅於建設 忠於生活的老朋友

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

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。

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

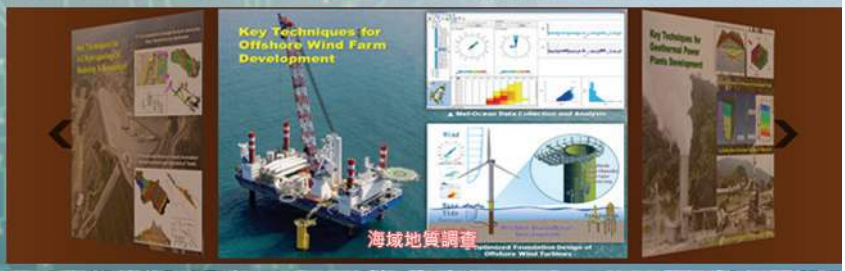
大地工程研究中心

GERC RESEARCH CENTER

掌握 先進 地工 技術

核心業務

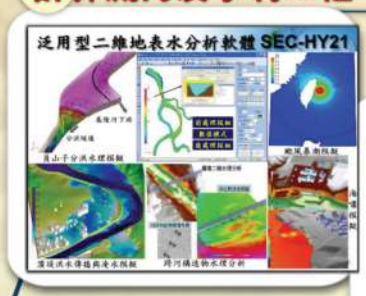
- 蓄水庫風險管理
- 隧道安全與管理
- 地工試驗與分析
- 水文地質
- 碳封存
- 地熱潛能評估與產能分析
- 3D透地雷達檢測
- 海域地質調查



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

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

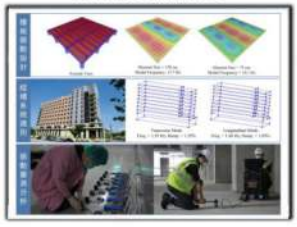
軌道運輸

- 列車運轉模擬
- 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

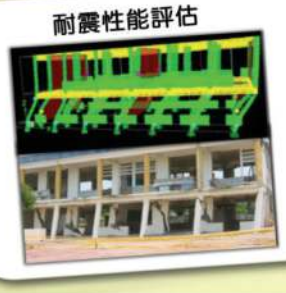
列車運轉模擬軟體

結構與地震工程

振動分析防治



耐震性能評估

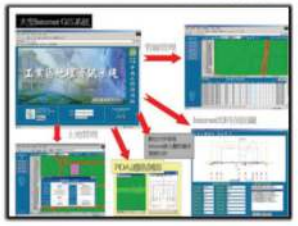


- 建物及橋梁耐震性能設計、評估與補強之分析
- 建物及橋梁壽齡風險管理
- 震後損失評估與地震保險
- 結構智慧監測物聯網與健康診斷
- 振動量測模擬分析與防治

地理資訊及資訊應用

- 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

工業區地理資訊系統



Sinotech Sinotech Sinote

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

地　址：臺北市內湖區新湖二路280號　電話：(02)8791-9198
網　址：www.sinotech.org.tw　傳真：(02)8791-2198
E-mail：chrc-ctr@sinotech.org.tw

SINOTECH 中興制震

防震科技專案計畫

SINOTECH ANTI-SEISMIC

誠信 創新 品質 服務

https://www.sinotech.org.tw/zh/SinotechDevices.aspx

中興社自主研發，提供
臺灣工程師優質國產化制震產品及客製化服務！

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
TAF 認證試驗室多項性能試驗以確保產品品質與消費者權益

中興制震產品

- 液流黏滯阻尼器 FVD
- 地震力分散裝置 STU
- 鋼板制震壁 SDW
- 位移型消能斜撐 SDB

結構耐震安全整合服務

- 制震設備之開發、製造與銷售
- 結構耐震安全評估、規劃與設計
- 隔減震系統效益分析與設計
- 微振動控制分析、設計與改善
- 工程監測系統技術研發、客製化設計

FVD 財團法人中興工程顧問社研究大樓

SDW
1.國震中心性能試驗
2.新北市蘆洲區長安公有市場耐震補強工程

SDB 警察廣播電臺建築物耐震能力補強

產品特色

FVD & STU

- 不改變結構勁度
- 出力穩定，優於國內外規範要求
- 性能安定，大地震後仍不影響使用性
- 產品受環境溫度影響甚微，大幅提升可靠度
- 可選配球型接頭，小地震及風載即能發揮功效
- 15年產品保固

SDW & SDB

- 利用鋼板材料之塑性行為，提供結構額外勁度及阻尼比
- 小地震下提供結構勁度，大地震下吸收地震能量
- 出力穩定、韌性高，優於國內外規範要求
- 製程優化且安裝簡易，應用成本低廉、整體效益高

我們有FB粉絲專頁囉!!! 歡迎大家踴躍參觀，並按讚分享!!
瞭解更多 安全更多

財團法人中興工程顧問社
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
11494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 : ast-proj@sinotech.org.tw

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、薄膜處理技術、環境場址整治及褐地活化評析、廢棄物減量與循環再利用技術評估等各領域進行研究；所屬環境實驗室獲得環保署地下水檢測類、土壤檢測類、水質水量檢測類及底泥檢測等兩百餘項認證，提供高品質的檢測服務

技術研發

- 褐地活化及風險決策模式
- 循環經濟及城市採礦技術
- 污水處理效能與再生及河川水質模擬
- 新興污染物整體解決技術

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

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

中興工程
SINOTECH ENGINEERING

第 152 期　2021 年 7 月 出刊

- 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／吳素禎　余信遠　習良孝　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／11494 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／大地印刷廠股份有限公司

※ 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、都市計劃、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列為水利工程、土木工程、結構工程、大地工程、測量、環境工程、都市計畫、機械工程、冷凍空調工程、電機工程、電子工程、資訊、工業工程、水土保持、應用地質、交通工程等科技師執業執照換發辦法內之「國內外專業期刊」，歡迎踴躍投稿，兼可取得換發執業執照所需積分。作者只需於申請技師訓練積分審查時附上「中興工程」季刊目錄及文稿（前開工程類相關文稿）影印本作為證明，經該會審核確認後，每篇文稿即可獲得六十分，作者兩人以上者，平均分配得分。

中 興 工 程 第 152 期 目 錄

工　程　技　術

利用三維離散元素法進行崩塌運動過程討論－以包盛社崩塌為例

.....黃淳銘・林冠瑋・鍾明劍・譚志豪.....3

從中興經驗解析產業園區的躍進 ..... 朱琦文.....13

藉由地質平衡剖面建立三維地質模型－以新竹地區為例 .....李易叡・黃宣維.....23

機率式海嘯危害度分析流程方法之探討 .....張家宜・許國強.....31

水土保持防砂設施淤砂坡度評估 .....林伯勳・許振崑・賴承農・謝孟荃・高伯宗.....39

選擇性觸媒脫硝系統在鍋爐煙氣低溫環境之應用展望 .....秦坦賢・施明源.....49

案 例 ／ 計 畫 報 導

雅加達捷運 CP103 標第三方設計驗證執行與計畫概述.....林志豪・黃世璋・鄭書恒.....59

地震對二氧化碳地質封存的影響－以苖小牧 CCS 示範計畫為例.....楊智豪・俞旗文.....67

BIM 輔助捷運 CSD/SEM 設計自動化發展與應用

.....倪寶惠・姜式真・王思涵・劉執敏・盧培文・賴建名.....77

研 發 成 果 介 紹

廢污水生物急毒性檢測與應用評析

.....林宜璇・吳佳娟・烏春梅・林淑滿・許國恩・鍾裕仁.....87

鐵路系統旅客運量預測方法研析－以台灣高鐵為例 .....吳明軒・許聿廷・孫千山・張恩輔.....93

工　程　窗　外

益智遊戲 ..... 張湧元.....98

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

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 3-12
http://www.sinotech.org.tw/journal/

利用三維離散元素法進行崩塌運動過程討論－以包盛社崩塌為例

黃淳銘*　林冠瑋**　鍾明劍***　譚志豪****

摘　要

本文利用 Itasca 公司研發的 PFC3D 軟體，模擬臺東太麻里溪上游包盛社崩塌塊體的運移過程，並考量複數崩塌塊體進行不同情境討論。由情境模擬結果與崩塌災害前後高程變化比對，可推測在颱風事件中，不同崩塌區塊體的運移順序。藉由調整模擬材料的力學參數發現，當有效摩擦係數為 0.15 時，模擬之塊體分布狀況較符合真實的塊體堆積範圍。從模擬結果可以推論，主要崩塌塊體於開始運移後約莫 32 秒及 43 秒時各發生了一次運動方向的轉折，隨後進入地形上的狹窄通道，並撞上河道對岸山壁，而使塊體速度快速下降，往河道東西側蔓延堆積。模擬所得到的塊體運動速度、運移方向的變化，皆與前人利用震波反演做出的結果相互呼應，顯示模擬結果具有足夠的可信度。

關鍵字：崩塌、離散元素法、數值模擬

一、前　言

臺灣因位處於板塊碰撞造山帶與環太平洋火山地震帶上，地震頻繁且地質條件不良（何春蓀，1986），加上年平均降雨量達 2,500mm 以上，颱風及梅雨事件夾帶的大量降水（陳怡良，2013），常造成邊坡的岩土破壞。

崩塌常造成建築物、道路的破壞，以及危害人民生命財產安全；如 1997 年溫妮颱風造成林肯大郡順向坡滑動並導致擋土牆破壞，及 2009 年莫拉克颱風引致小林村崩塌滅村事件，皆使許多人罹難，嚴重損害社會、經濟。山崩在臺灣頻繁發生且具高破壞性，為不可忽視的一大課題。

了解崩塌的破壞機制、運移過程與堆積影響範圍對於坡地災害的研究相當重要，但目前仍無良好的方法能完整地觀察崩塌發生過程。運用數值模擬方法，能藉由模型建置與現地材料參數設定，還原崩塌發生時的情況，得到崩塌塊體從破壞到堆積的整個過程，進而應用於推測潛在崩塌塊體的破壞運動情況，進行處置對策評估。

過去研究於崩塌數值模擬建模時，常常未考量崩塌區與堆積區量體是否一致，並且少將主要崩塌區以外的其他小型崩塌塊體納入考慮，因而可能造成模擬結果與真實情況有較大的差異。

影響崩塌數值模擬的重要因素之一為材料摩擦係數，而前人研究降雨造成的邊坡破壞，大多

*　中興工程顧問社大地工程研究中心助理研究員
**　國立成功大學地球科學系副教授
***　中興工程顧問社大地工程研究中心資深研究員
****　中興工程顧問社大地工程研究中心再生能源組組長

中興工程，第152期，2021年7月，PP. 3-12
http://www.sinotech.org.tw/journal/

以水體的加入、量體高速運動等為由調降摩擦係數，並經過長時間的試誤法不斷測試、調整材料參數，以達到最接近真實情況的模擬模型（謝嘉聲等人，2015；Lo et al., 2014）。此種方式在模型摩擦係數的初始設定上，容易因為無數值參考而花費較多時間做嘗試。

本文嘗試探討臺東太麻里溪上游包盛社崩塌主崩區，與其側邊小型崩塌之交互影響，並利用前人歸納統整的崩塌量體與摩擦係數關係曲線，作為摩擦係數初始設定的依據，分析模擬結果與真實情況的差異性，並探討崩塌塊體的運動過程。

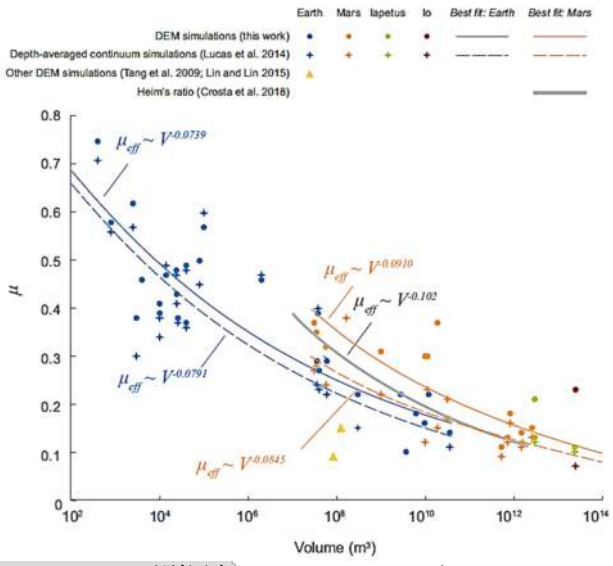
二、文獻回顧

本文使用的崩塌模擬工具 Partical Flow Code 3D（PFC3D），為一種常被用於模擬崩塌運動過程的離散元素分析工具。因其具有模擬塊體鍵結與分離的優勢，且對於顆粒運動的位移、旋轉行為未加以限制，可以模擬崩塌塊體變形的不連續行為，相較於有限元素法，能模擬出崩塌破壞發生的整個過程（張家銓，2007；謝嘉聲等人，2015；羅佳明等人，2016）。

降雨為造成崩塌發生的主要原因之一。由於雨水的入滲易造成岩土材料孔隙水壓及地下水位上升、材料強度下降，以及水造成的潤滑作用，使材料摩擦係數下降，增加崩塌發生的可能性（Lin and Lin, 2015；Lo et al., 2016）。摩擦係數也是影響崩塌運移距離與堆積範圍的重要因素，通常摩擦係數越低，塊體能運行的距離越遠，堆積範圍也越廣（唐昭榮等人，2009）。然而影響動摩擦係數的影響因素很多，如降雨入滲造成的潤滑作用、塊體應變軟化等。Lucas et al.（2014）認為摩擦係數與崩塌量體的體積大小呈負相關，量體體積越大的崩塌事件，其摩擦係數往往降得越低，實際崩塌發生時的材料動摩擦係數，因塊體運動過程中發生的摩擦係數弱化影響，常低於室內試驗的結果。

實際的動摩擦係數數值難以取得，前人多利用數值模擬方式推測，並利用試誤法不斷嘗試，找出模擬崩塌堆積形貌與真實情況最接近者之摩擦係數。羅佳明等人（2011）即利用 PFC3D 模擬國道三號順向坡滑動，摩擦係數測試區間為 0.01-0.3，最終得出摩擦係數設定為 0.03 時，模擬出的崩塌運移距離、堆積長度與寬度與真實情況最相符。但利用試誤法在大範圍區間不斷嘗試摩擦係數的最佳解相當耗時。

本文嘗試利用 Borykov et al.（2019）所提出之崩塌體積與有效摩擦係數之間的關係（圖 1），用以評估包盛社崩塌量體所對應之有效摩擦係數數值，將其值作為 PFC3D 模型參數的初始設定值。



（引用自 Borykov et al., 2019）

圖 1　有效摩擦係數與崩塌體積關係

三、分析方法

本文使用 PFC3D 模擬崩塌破壞機制、運移過程與堆積形貌討論；崩塌模型的建置，主要包含以彼此具鍵結力之剛性圓球體堆疊而成的崩塌塊體，以及三角網格拼接而成的牆體地形面。藉由模擬崩塌塊體在地形面上的運動，可以推測、紀

錄崩塌從破壞發生到最終堆積的整個過程。茲簡介 PFC3D 如後。

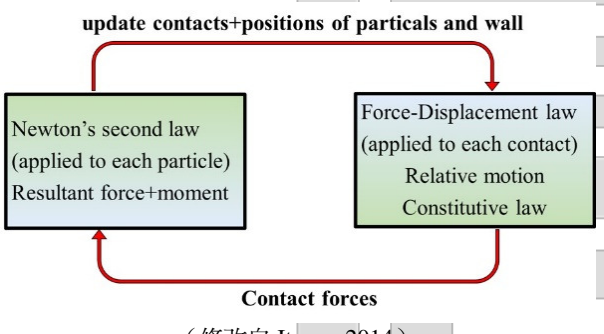
（一）數值模擬分析假設

PFC3D 數值模擬軟體主要包含下幾點假設（Itasca, 2014）：

1. 顆粒為剛性圓球體單元；
2. 單元間接觸面積為極小的點；
3. 顆粒內力和力矩在接觸位置上發生交互作用，遵守 Particle-Interaction Law；
4. 顆粒與顆粒間可以具有鍵結力；
5. 顆粒間的力傳遞遵守力與位移定律。

（二）PFC3D 模擬計算原理：

每一次的計算為一個循環分析步（calculation cycle），其分析步長指示每一次計算的時間間隔。每一個循環分析步開始時，皆重新計算所有顆粒與顆粒間、顆粒與牆體間的交互作用，由力與位移定律計算出所有接觸點的接觸力與力矩，並遵守牛頓第二運動定律，計算每個單元所受的合力與方向，更新單元的位置與速度。循環計算會持續進行，直到計算終止（圖 2）。



（修改自 Itasca, 2014）

圖 2　PFC3D 計算循環方式

（三）接觸與鍵結模式

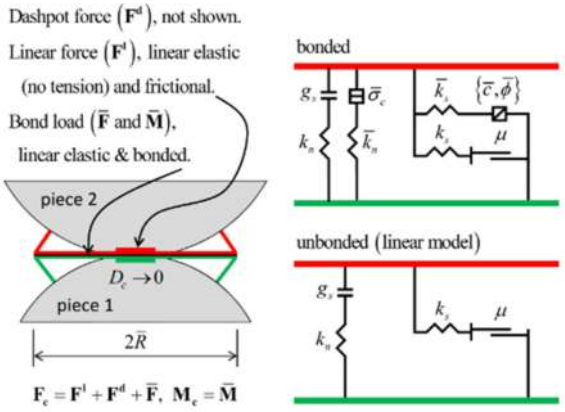
接觸勁度關係，主要分為正向勁度（kn）與切向勁度（ks），其影響著單元間的接觸力與位移，兩單元接觸時的接觸勁度關係如式（1）與式（2）。

$$k_n = (k_n^{[1]} \times k_n^{[2]}) / (k_n^{[1]} + k_n^{[2]}) \quad (1)$$

$$k_s = (k_s^{[1]} \times k_s^{[2]}) / (k_s^{[1]} + k_s^{[2]}) \quad (2)$$

顆粒所受的滑動力若大於摩擦阻抗力，將使顆粒產生滑動，而摩擦阻抗力主要受控於材料的摩擦係數，其對於塊體運移的速度與距離具有很大的影響力。

顆粒間的鍵結力，由正向平行鍵結力$\bar{k}_n$與切向平行鍵結力$\bar{k}_s$表示（圖 3），若顆粒受力作用大於顆粒間的鍵結力，將造成鍵結斷裂，而使顆粒產生分離。



（引用自 Itasca, 2014）

圖 3　平行鍵結模型示意圖

（四）微、巨觀參數轉換

微觀材料參數的決定，為利用室內試驗得出來的巨觀材料參數，如楊氏模數（E），經公式（3）、（4）、（5）、（6）轉換假設出試驗模擬的微觀參數，並經試驗模擬的試誤法做微觀參數微調率定，如正向勁度的設定上，初始設定依公式（3）轉換為一個定值，經參數微調進行率定，使試驗模擬的巨觀參數結果與真實試驗相符，其材料參數經過不同尺度顆粒半徑（R）公式轉換後，即為全尺度數值模型的材料參數。

$$k_n = 4 \times R \times E \quad (3)$$

$$k_s = k_n / 2.5 \quad (4)$$

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 3-12
http://www.sinotech.org.tw/journal/

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

$$\overline{k_n} = k_n/(\pi \times R^2) \quad (5)$$

$$\overline{k_s} = \overline{k_n}/2.5 \quad (6)$$

（五）阻尼器

阻尼器用以模擬材料運動過程中產生的能量消散，其中以黏滯阻尼係數的設定，能模擬材料在相互碰撞時造成能量消耗，貼近真實塊體運動的情形。黏滯阻尼係數可以由顆粒回彈係數（Coefficient of Restitution, COR）轉換求得，COR 值為塊體撞擊某一介面前後速度的比值（Pfeiffer and Bowen, 1973），具有正向及切向兩個方向。本文參照 Giani（1992）所做的現地試驗得到的黏滯阻尼係數，其歸納塊體撞擊不同材料介面時，依照撞擊前後的速度變化所得出的回彈係數轉換而來（表 1）。

表 1　現地黏滯阻尼轉換表

（修改自 Giani, 1992）

	正向回彈係數	轉換正向阻尼比	切向回彈係數	轉換切向阻尼比
基岩坡面	0.5	0.21	0.95	0.02
基岩覆蓋破裂岩塊	0.35	0.32	0.85	0.05
覆蓋岩屑及土壤之坡面	0.3	0.36	0.7	0.11
覆蓋植被之土壤坡面	0.25	0.4	0.55	0.2

（六）模擬方法限制

1. 本文使用的 PFC3D 軟體，因受限於軟體本身未包含流體模組，而難以將流體造成的影響直接反應在模型上，目前僅以重力作用驅動顆粒流向下運動。
2. 實際岩土材料具有不規則形狀及稜角，但 PFC3D 模型內部的材料皆為球形，且受限於電腦效能的影響，而使球體具有顆粒數量限制，無法完全反應真實崩塌情況。

四、包盛社崩塌案例

本文討論的包盛社崩塌案例位於臺東縣金峰鄉的太麻里溪流域上游，為一處大規模崩塌區（圖 4）。在發生崩塌前的 6 年間，太麻里溪流域曾受到 2004 年敏督利、南馬督颱風與 2005 年海棠颱風侵襲（林務局，2010），但並未產生大量崩塌。直到受 2009 年莫拉克颱風影響，其 3 日內累積降雨量達 2,000mm 以上（陳怡良，2013），連日強降雨事件造成臺灣發生多處大規模崩塌。包盛社崩塌因大量塊體快速向下滑動，堆積於包盛社舊址的東南邊，並阻塞河道，曾於崩塌堆積區西側形成堰塞湖（行政院農業委員會，2011）。

（一）案例背景介紹

包盛社崩塌發生時間為 2009 年 8 月 8 日，為一處受莫拉克颱風連日強降雨影響而引致的大規模崩塌事件，其主要崩塌區量體達 7,000 萬立方公尺以上（Pan et al., 2014）。此區域主要位於畢祿山層，岩性以變質砂岩、板岩、千枚岩為主（王源程、陳文福，2012）。

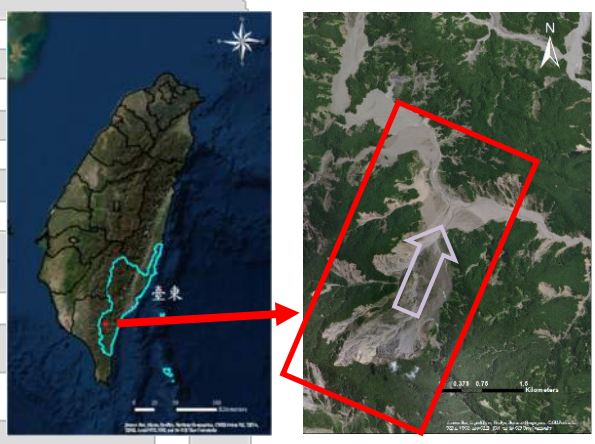


圖 4　包盛社崩塌區地理位置與塊體運移方向

（二）崩塌塊體劃分

本文利用崩塌災害前後的數值地形（Digital Elevation Model, DEM）相減，如圖 5 所示，得出地表高程下降與上升區域。其中所使用的災前

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程，第152期，2021年7月，PP. 3-12
http://www.sinotech.org.tw/journal/

DEM 為 2004 年林務局航空測量所製作之數值地形，而災後 DEM 則使用 2010 年臺灣內政部國家土地測繪中心製作之數值地形。陳亮谷（2018）利用波形反演方式，計算出此崩塌區域的運動方向、運移距離、崩塌質量與體積等資訊，經其研究判斷，此崩塌區下方的堆積區III量體，與源頭區I量體大小有所出入，主要造成此差異的來源，可能為未考慮源頭區II產生的量體。本文參照其崩塌與堆積範圍劃設，經崩塌及堆積區量體計算結果顯示（表 2），堆積區III量體大小與源頭區I、II量體和相符，故將源頭區I、II納入崩塌模擬考量，探討模擬之堆積形貌與真實情況的差異。

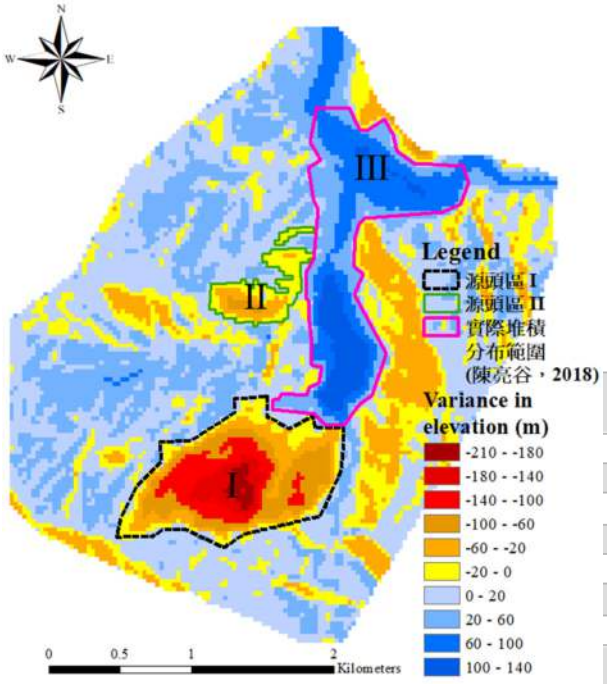


圖 5　災害前後地表高程變化

表 2　崩塌與堆積範圍分區體積變化

	源頭區 I	源頭區 II	堆積區 III
體積變化（$10^6 m^3$）	-75.9	-3.9	79

（三）數值模型建置

利用崩塌前後數值地形相減後，得到高程下降的崩塌區塊體，本文欲模擬的崩塌塊體為圖 5 中源頭區 I 和 II。其崩塌塊體以球體表示，其餘地形面皆為三角網格拼接而成的牆體（圖 6）。

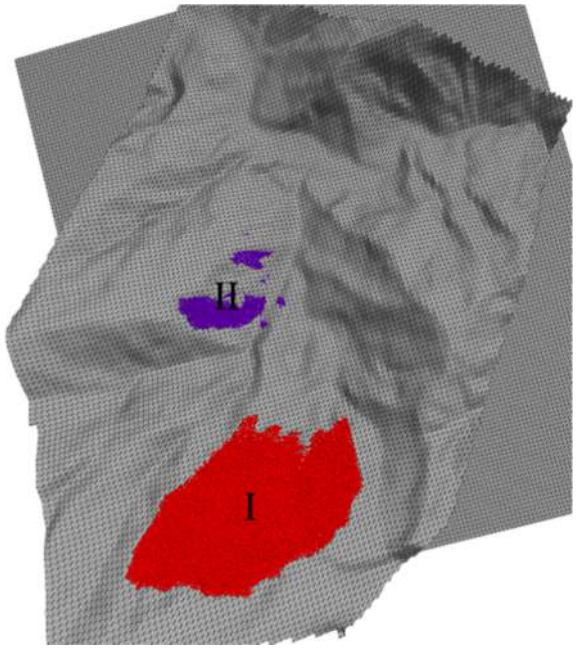


圖 6　PFC3D 初始模型設置

材料參數的選定，主要參考與調整自前人研究所做相同區域地層的試驗結果（表 3）。李明翰（2003）對板岩進行一系列力學試驗，測得其彈性模量約為 2.48GPa。施尊穎（2009）於鹿野溪的畢祿山層施作岩石強度試驗，統整及歸納其測試結果，得到此岩層單壓強度約介於 23.6MPa 到

表 3　模擬材料參數表

顆粒半徑（m）	5-10
顆粒密度（kg/m^3）	2,500
正向勁度（GN/m）	4.8
切向勁度（GN/m）	1.92
摩擦係數	0.15-0.23
平行鍵結正向勁度（MPa/m）	60
平行鍵結切向勁度（MPa/m）	24
內聚力（MPa）	2
正向黏滯阻尼比	0.21
切向黏滯阻尼比	0.02

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 3-12
http://www.sinotech.org.tw/journal/

47.1MPa 之間。蘇暉凱（2013）利用數值模擬方式，進行此區域堰塞壩研究，其利用模擬岩石材料單壓試驗的應力應變關係曲線，成功擬合與真實試驗結果相似的曲線形貌，並採用微觀與巨觀參數轉換公式，推測出邊坡尺度的材料參數。黏滯阻尼比參照 Giani（1992）所做的塊體撞擊試驗，依照其試驗結果與彈性回彈係數轉換所求得，並參照蘇暉凱（2013）模擬之數值進行設定，崩塌模擬過程皆設為定值。

（四）數值模擬分析結果與討論

因軟體上的限制，於模擬之源頭區塊體崩壞驅動方式，為假設降雨造成材料摩擦係數下降引致，與現實崩塌受降雨作用，使材料孔隙水壓上升而趨於破壞有所差異。

本文主要討論之崩塌塊體為圖 5 中的源頭區 I 和 II，兩崩塌塊體皆為莫拉克颱風事件降雨引致崩塌。若無利用攝影機或其他方式觀察，難以判斷崩塌塊體運動的先後順序。本文利用 PFC3D 模擬不同情境下的崩塌塊體運移情況，並與真實情形做比較，推論最有可能的崩塌塊體順序應該為何。

情境一：假定源頭區 I 塊體先行運動，待其開始自由運動 200 秒堆積靜止後，源頭區 II 塊體才開始自由運動，其最終堆積情形如圖 7 所示。

由圖 7 的最終堆積結果可以看出，有大量塊體殘留於源頭區 II 東側，其主要原因為源頭區 I 塊體向下運動堆積後，造成源頭區 II 塊體運動受阻，而大量阻塞於源頭區 II 下邊坡。如圖 8 所示，此堆積形貌與真實情況相去甚遠，可能並非為真實塊體相對運動順序之情境。

情境二：假定源頭區 II 塊體先行運動，待其開始自由運動 200 秒堆積靜止後，源頭區 I 塊體才開始自由運動，其最終堆積情形如圖 9 所示。

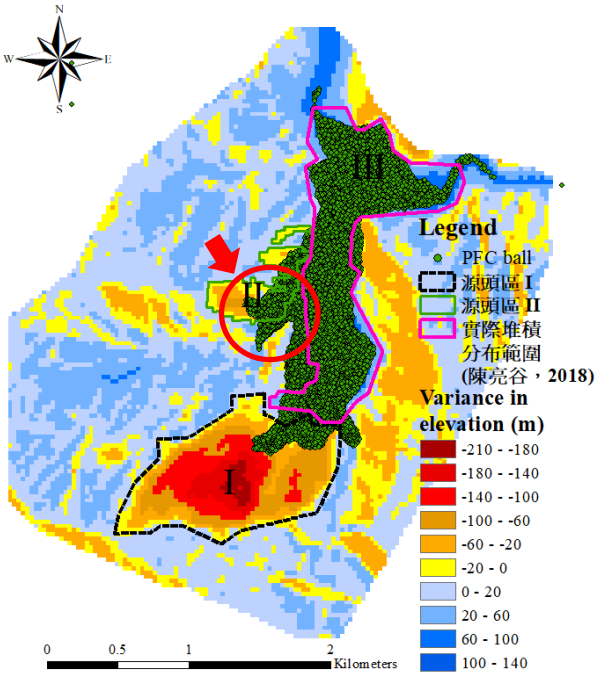


圖 7　源頭區 I 塊體先於源頭區 II 塊體運動堆積結果

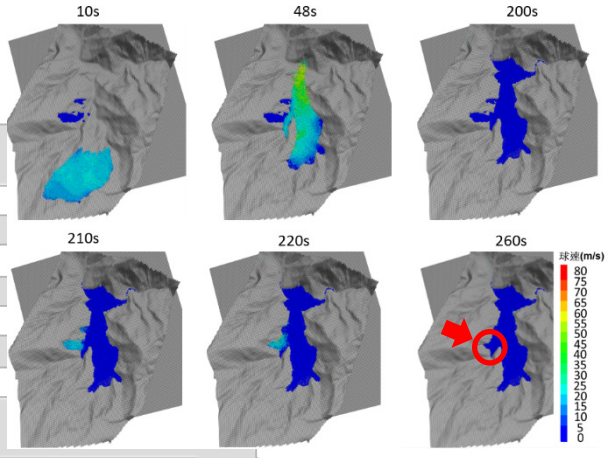


圖 8　情境一塊體運動速度時間變化

源頭區 II 塊體先崩塌，其塊體進入河道中，而不像情境一，因運動受阻而使塊體大量堆於源頭區 II 下邊坡。源頭區 I 塊體運動後，快速向下運動，約莫運動 150 秒後，塊體趨於靜止，如圖 10 所示。此情境在堆積形貌上，與真實情況較為相符，但在下游河道中，崩塌塊體堆積的量略顯不足，而在源頭區 I 範圍殘留較多的量體。

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 3-12
http://www.sinotech.org.tw/journal/

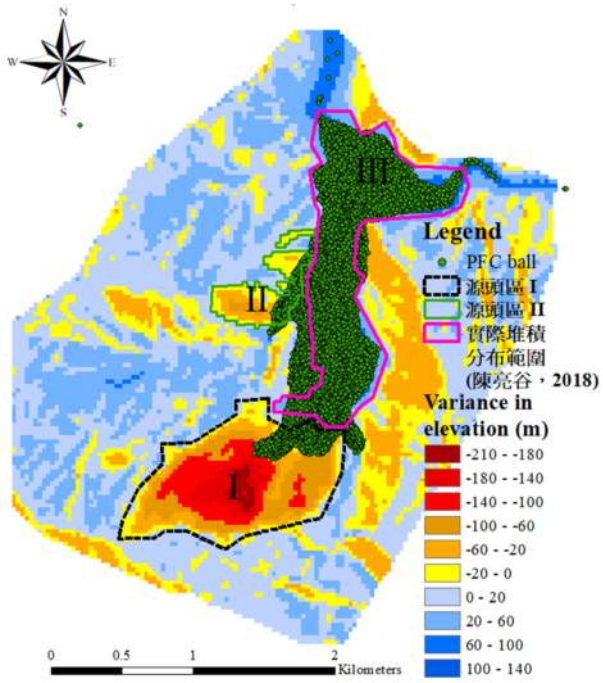


圖 9　源頭區 II 塊體先於源頭區 I 塊體運動堆積結果

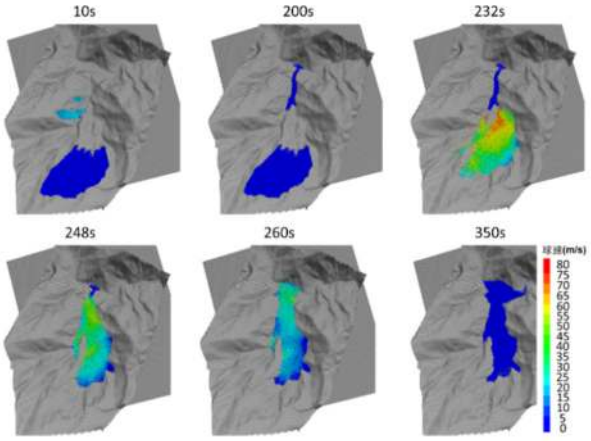


圖 10　情境二塊體運動速度時間變化

由堆積形貌上的判釋，情境二為本文推測較符合真實情況的崩塌順序情境，但其堆積範圍與真實情況仍有些差異。藉由 PFC3D 模擬塊體堆積結果與真實情況相近時，可以間接推測崩塌運動時的有效摩擦係數。因降水造成的影響致使崩塌材料摩擦係數下降，本文嘗試調降有效摩擦係數，以還原真實崩塌情境。

摩擦係數由初始設定的 0.23 向下調整，當摩擦係數為 0.2、0.17、0.15 時的模擬堆積形貌如圖 11 所示。由模擬結果可以看出，當摩擦係數為 0.15 時，堆積範圍與真實情況較為接近。其近源頭區 I 的殘留量體，與陳亮谷（2018）劃設的堆積範圍最為相近，且在圖 11 中的白色圓圈範圍內，其堆積形貌呈現的凹口，與真實堆積形貌也較為接近。在下游堆積區中，其塊體的堆積擴散範圍，也和真實情況相當接近，因此推論其摩擦係數值為 0.15 時，與真實崩塌情況較為相符。

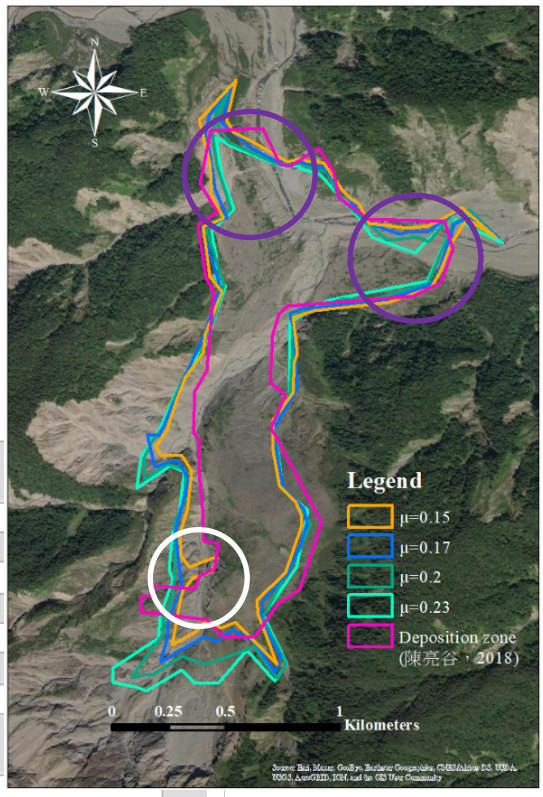


圖 11　摩擦係數（μ）分別為 0.23、0.2、0.17、0.15 時模擬的堆積範圍結果比較

包盛社崩塌的破壞運動過程模擬結果，如圖 12 所示，近下游河道的小型塊體，於開始運動後快速進入河道，待其堆積穩定後，主要崩塌塊體才開始快速向下運動，其間受地形影響，歷經了兩次運動方向明顯的轉折。如圖 12 中 232 秒、

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 3-12
http://www.sinotech.org.tw/journal/

243 秒中的紅色箭頭所示，當塊體運動至近下游河道時，遇到地形上的狹窄通道，大量降低了塊體速度。約莫 255 秒時，塊體撞上對岸山體，而使速度快速下降，並且向河道東西兩側方向蔓延，直到約 350 秒時，整體塊體大致上達到靜止。

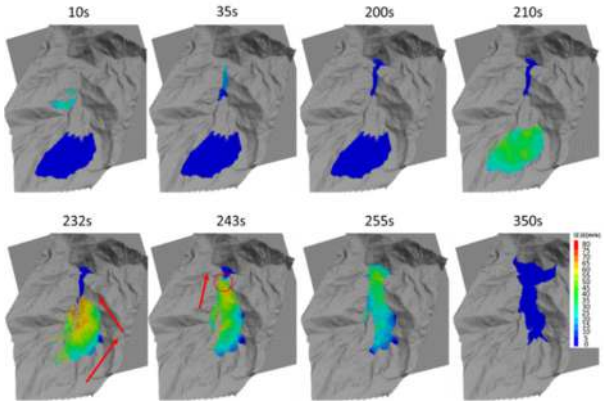


圖 12　包盛社崩塌模擬運移過程

於源頭區 I 上，平均設置監測球，監測塊體運動速度變化及路徑（圖 13），監測球的速度變化趨勢，大致上和陳亮谷（2018）利用震波反演算出的崩塌塊體速度變化相似。於崩塌運行 43 秒左右時，塊體因進入地形上的窄道，隨後撞擊河道對面山壁，而使塊體速度大幅下降。在崩塌運移軌跡方面，模擬結果也和陳亮谷（2018）震波反演結果相同，塊體因受地形影響而產生兩次主要運行方向轉折。由模擬結果可發現，塊體在發生第一次轉折時，因撞擊山壁、顆粒彼此擠壓而發生速度下降的變化；隨後向下運動時短暫的速度上升，於第二次發生轉折時，也發生了速度下降的變化，最後進入窄道及撞擊河道對面山壁而使速度大幅下降，並於 150 秒後塊體趨於靜止。

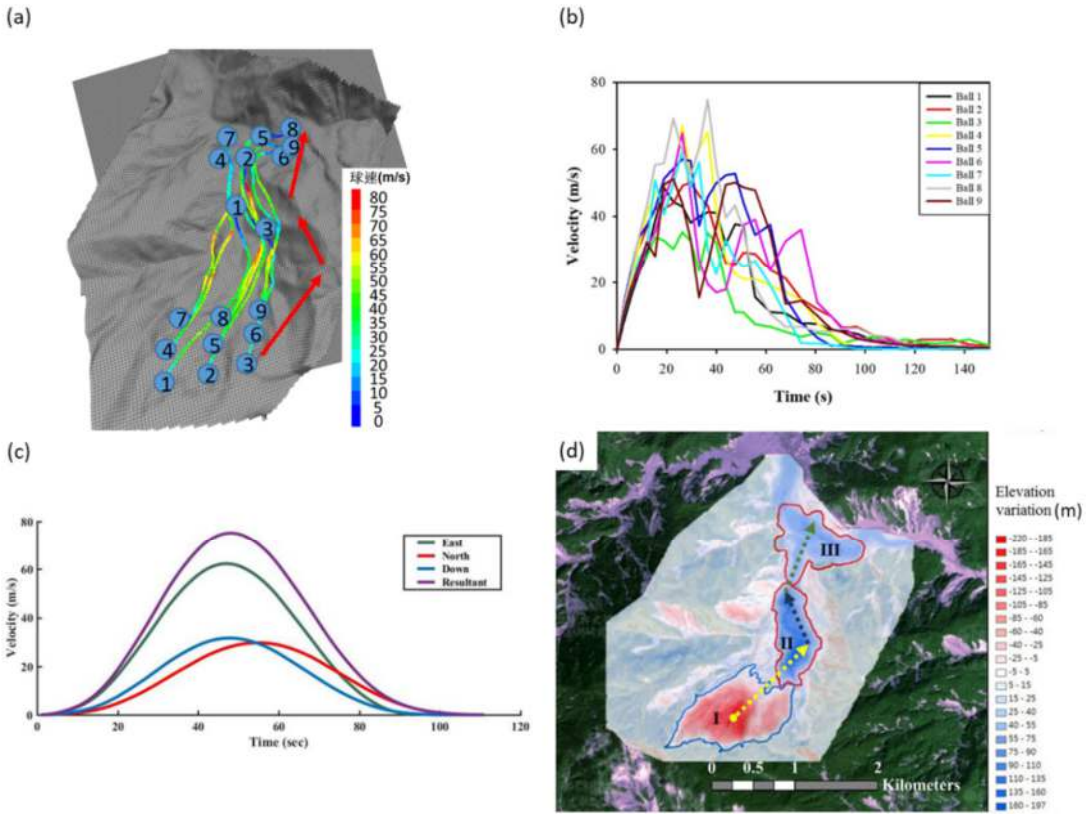


圖 13　（a）PFC3D 崩塌模擬監測球運移路徑及速度變化（b）PFC3D 監測球於崩塌模擬之速度－時間關係圖（c）包盛社崩塌震波反演速度變化圖（引用自陳亮谷，2018）（d）震波反演崩塌塊體運移路徑（引用自陳亮谷，2018）

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 3-12
http://www.sinotech.org.tw/journal/

五、結　論

根據前述研究成果可歸納以下結論：

（一）利用 PFC3D 軟體，可有效模擬崩塌從破壞到堆積的完整過程，有利於了解崩塌的運動行為。

（二）參考前人歸納的崩塌體積與有效摩擦係數關係，作為初始模型的摩擦係數設定，有利於減少試誤法耗費的時間。

（三）討論具複數崩塌區之山崩時，藉由 PFC3D 進行情境模擬，並配合災害前後高程變化判斷，可推估塊體運動的先後順序，利於還原及探討崩塌運移過程。

（四）於包盛社崩塌模擬中，模擬摩擦係數設為 0.15 時，模擬結果與真實情況較為相符，並藉由前人文獻的崩塌堆積區劃設、震波反演塊體速度變化、運移路徑改變趨勢的比對，有效驗證模擬結果具有足夠的可信度。

（五）由本文模擬結果得出，源頭區 II 塊體先於源頭區 I 塊體運動，並快速進入河道，其後源頭區 I 塊體向下運動，於運動後約莫 32 秒及 43 秒時，經歷了兩次運動方向的改變，接著進入地形上的窄道及撞擊河道對面山壁，造成塊體運動速度大幅下降，最終於約莫 150 秒時趨於靜止。

（六）利用 PFC3D 模擬崩塌破壞、運移、堆積過程，有助於了解崩塌特性及地形影響，甚至可應用於了解潛在崩塌區的塊體運移影響範圍，協助進行災害處置對策評估。

參考文獻

王源程、陳文福（2012），莫拉克颱風豪雨所致複合型災害分析及其改善方案探討－以台東太麻里溪為例，中華水土保持學會年會及學術研討會論文摘要集：1-16

李明翰（2003），岩坡傾倒破壞之研究－以台 14 線公路為例，碩士論文，朝陽科技大學營建工程研究所：1-138

何春蓀（1986），台灣地質概論，經濟部中央地質調查所出版：11-135

行政院農業委員會（2011），大自然的淚珠－包盛社堰塞湖的一生，農政與農情 100 年 7 月（第 229 期）

林務局（2010），太麻里溪包盛社堰塞湖緊急評估及全流域短中長期對策建議計畫成果報告書

施尊穎（2009），台東鹿野溪流域之地層滑動與河川化性在卑南地震後之相關性，臺灣大學地質科學研究所學位論文：1-108

唐昭榮、胡植慶、羅佳明、林銘郎（2009），遽變式山崩之 PFC3D 模擬初探－以草嶺與小林村為例，地工技術，第 122 期，143-152

陳怡良（2013），民國 98 年颱風調查報告－第 8 號莫拉克（Morakot）颱風（0908），民國 98 年颱風調查報告：17-43

陳亮谷（2018），波形反演法於山崩研究之可行性探討：以 2009 年太麻里崩塌為例，成功大學地球科學系學位論文：1-101

張家銓（2007），分離元素法於擬脆性岩材微觀破裂機制之初探，臺北科技大學土木與防災研究所學位論文：1-85

蘇暉凱（2013），暴雨誘發天然壩之重建數值模擬-太麻里溪堰塞湖為例，交通大學土木工程系所學位論文：1-128

謝嘉聲、蕭達鴻、唐昭榮、胡植慶（2015），利用顆粒體離散元素法模擬莫拉克颱風所引致之新開崩塌，中華水土保持學報，46（1），29-37

羅佳明、鄭添耀、林彥享、蕭震洋、魏倫瑋、黃春銘、林銘郎（2011），國道 3 號七堵順向坡滑動過程之動態模擬，中華水土保持學報，42（3），175-183

羅佳明、馮正一、鍾言鑫、董雅婷（2016），數值模擬與危害評估應用於潛在崩塌影響範圍之劃設，中華水土保持學報，47（1），13-23

Borykov, T., Mège, D., Mangeney, A., Richard, P., Gurgurewicz, J., & Lucas, A. (2019). Empirical investigation of friction weakening of terrestrial and Martian landslides using discrete element models. Landslides, 16(6), 1121-1140

Giani, Gian Paolo. (1992). Rock slope stability analysis, Balkema, Rotterdam, p. 361

Itasca (2014). Partical Flow Code – Version 5.0. Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, Minnesota

Lin, C. H., & Lin, M. L. (2015). Evolution of the large landslide induced by Typhoon Morakot: a case study in the Butangbunasi River, southern Taiwan using the discrete element method. Engineering Geology, 197, 172-187

Lo, C. M., Lee, C. F., Chou, H. T., & Lin, M. L. (2014). Landslide at Su-Hua highway 115.9 k triggered by typhoon Megi in Taiwan. Landslides, 11(2), 293-304

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 3-12
http://www.sinotech.org.tw/journal/

Lo, C. M., Li, H. H., & Ke, C. C. (2016). Kinematic model of a translational slide in the Cidu section of the Formosan freeway. Landslides, 13(1), 141-151

Lucas, A., Mangeney, A., & Ampuero, J. P. (2014). Frictional velocity-weakening in landslides on Earth and on other planetary bodies. Nature communications, 5(1), 1-9

Pan, Yii-Wen, Su, Hui-Kai, Liao, Jyh-Jong, & Huang, Ming-Wan (2014). Reconstruction of rainfall-induced landslide dam by numerical simulation-the Barrier Lake in Taimali River as an example. In ISRM International Symposium-8th Asian Rock Mechanics Symposium. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering

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：louise@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）輸進資料、(2) 地質資料、(3) 監測資料等處理系統及（4）隧道施工資料查詢系統	V2.0
23	沖刷監測預警裝置開發	V1.0

（註）：序號 18★之程式現階段僅開放政府機關申購。

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 13-21
http://www.sinotech.org.tw/journal/

從中興經驗解析產業園區的躍進

朱 琦 文*

摘 要

政府及民間開發之各類型產業園區為產業提供營運空間，提升產業發展效益，降低生產活動對環境的衝擊，並奠定臺灣經濟發展之基礎；然隨著時空環境的變遷，在歷經工業化、機械化、電子化、資訊化時代的洗禮後，現階段因應智慧化時代來臨，已邁入第四次工業革命階段。面臨能源匱乏與極端氣候影響日益嚴峻，及因應智慧創新的轉變與全球鏈結需求，產業園區的開發與營運也從過去注重生產效率的園區，推進到以韌性、智能與彈性利用的思維模式。中興工程顧問長期參與臺灣各類型產業園區之規劃與開發，本文即以園區開發的軌跡與經驗，研析產業園區以貼近產業與在地需求、關懷國土永續與環境保育為核心，導入彈性、跨域、加值、共生的前瞻規劃理念，及綠色、韌性、智慧、循環的永續工程技術，再創下一波新世代產業園區的發展量能。

關鍵字：第四次工業革命（工業 4.0）、共生、韌性

一、前 言

產業園區在臺灣經濟與工業發展歷程中扮演重要的角色，為孕育產業成長的載體，並藉由產業園區整體規劃，為不同產業提供進駐營運與群聚發展之空間、提升產業發展效益，與降低生產活動對其他土地使用與環境的衝擊。六十餘年來，由政府及民間開發之各類型產業園區面積約 3.8 萬公頃（依目的事業法令設置產業園區供給體系，包括工業區及產業園區、加工出口區、科學園區及環保暨農業生技園區），約占全臺灣開發用地（都市計畫之都市發展地區＋非都市土地之開發用地）面積之 10%，所創造之產值及國內生產毛額（GDP）皆占全國總量 3 成左右。

中興工程顧問（以下簡稱中興）自 1970 年起，即投入園區規劃與開發工作，歷經五十年來成長精進，辦理國內、外約 120 餘處、面積達 6.2 萬公頃產業園區之相關計畫，而其中位於臺灣之產業園區、科學園區屬已開發、開發中者計 58 處，面積約 3.2 萬公頃，占臺灣各類型產業園區面積之 68%，堪稱國內工程技術顧問領域中，參與產業園區「開疆闢地」成果最卓著的顧問機構，以前瞻與完善的技術服務，協助政府與民間致力推進臺灣產業發展的新頁。

（一）服務範疇：政策研議、區位勘選、可行性評估、實質規劃、工程規劃、環境影響評估、土地取得、產業引進、開發營運管理、土地租售、工程設計、施工監造等全程性的技術服務工作。

（二）設置區位：遍及都會地區、衛星城鎮、偏鄉地區；含括平地、山坡地到海埔地、填海造地。

（三）園區型態：一般工業區、離島型工業區、科技工業區、專業型園區、科學園區、自由貿易港區等。

（四）服務對象：中央與地方政府、民間開發單位、設廠廠商（興辦產業人）等。

* 中興工程顧問公司園區及路航工程部技術經理

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 13-21
http://www.sinotech.org.tw/journal/

隨著時空的演進與環境的變遷，產業發展在歷經工業化、機械化、電子化、資訊化時代的洗禮後，因應智慧化時代來臨，已邁入第四次工業革命（工業 4.0）階段，對產業園區在區位需求、法令規範、空間機能、營運管理等面向，產生了變革與影響，產業園區的規劃與開發亦須與時俱進重新編碼。以下乃以中興多年參與產業園區開發的軌跡與經驗，在面對較過去更為嚴苛的經濟競爭與環境調適的挑戰下，研析產業園區藉導入前瞻規劃思維與工程技術、貼近產業與在地需求、關懷國土永續與環境保育的三大核心理念，以能持續活化產業競爭力並延續產業發展之命脈。

二、因應經濟發展與產業轉型需求，肩負園區開發階段性任務

綜整各階段產業園區開發政策具備之功能主要有：（1）加速產業升級，促進國家經濟整體發展；（2）誘導產業、人口合理分布，促進區域均衡發展；（3）有效利用土地，減少公害污染之擴散；（4）提供企業良好之設廠環境，便利工廠之輔導及管理；（5）促進地方建設，繁榮經濟、增加政府稅收等。然從產業園區發展型態與開發方式的演進中，園區開發亦肩負不同的階段性任務。

（一）中央與地方分工，推動各類型園區開發

臺灣自 1952 年實施經建計畫以來，經濟發展階段歷經了進口替代、出口擴張、促進產業升級、發展高科技產業、推動全球運籌等重要變革。而在各個階段中，產業園區的開發亦呈現出不同的形態，包括如傳統綜合性工業區、科技工業區、離島型工業區、加工出口區、科學園區、農業生技園區、環保科技園區、自由貿易港區等。

回溯中興參與園區開發的經驗，肇始於 1970 年由工業局督導，中華工程公司委辦的「安平工業區」規劃設計工作，同時期並配合政策投入協助於偏鄉地區設置工業區，以發展工業創造就業機會，帶動區域發展均衡，包括樹林、大武崙、土城、屏東、大發、大社、新竹工業區等；後續亦按各時代之產業需求，規劃各類型之園區，包括如銅鑼、龍德、民雄、朴子、利澤、屏南、林園、觀音等一般綜合性工業區；和平水泥工業區、雲林、臺南科技工業區等專業型、科技型工業區；以及濱海地區涉及大規模填海造地的彰化濱海工業區、雲林離島式基礎工業區等。

1991 年，政府因應經濟與產業發展變遷，頒布「促進產業升級條例」取代已實施三十年的「獎勵投資條例」；該期間，產業園區開發的主體逐漸由工業局主導轉為地方政府與民間自行推動，中興亦從而加入地方政府與民間主導開發工業區的行列，協助地方政府與民間因應地方產業需求及產業發展群聚，開發各類型產業園區，包括如地方政府之嘉義大埔美、馬稠後工業區、臺南永康、七股科技工業區、臺中市精密機械科技園區、高雄仁武產業園區、民間之美超微科技園區、中鋼結構燕巢工業區等。

2002 年起，中興以園區開發累積之經驗及基礎，再將技術服務對象延伸至科技部（前身為國科會）開發的科學園區。含括南科（臺南園區）二期、竹科（銅鑼園區）、中科（二林園區）、中科（臺中園區）擴建、竹科（寶山用地）擴建、南科橋頭園區、南科園區擴大等；工作範疇包括科學園區的遴選、籌設、規劃、環評、設計及施工監造等工作。

（二）園區活化更新、轉型與在地化發展需求

園區的開發從政策形成、選址、規劃、編定、設計、建設、營運，有其生命周期；隨著園區環境、設施老舊後，又將面臨更新、轉型、再發展的議題。1996 年，因應南港軟體工業園區的開發管理需求，中興即協助工業局辦理都會科技型工

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 13-21
http://www.sinotech.org.tw/journal/

業區開發審查總顧問工作，辦理管理機構專業訓練與環境專案管理、開發成本財務掌控，及土地銷售策略研擬、推動公辦民營及標準作業化等工作。又 2009 年，工業局為推動各地區老舊工業區之更新活化，成立「工業區經營環境設施更新推動辦公室」，中興協助工業局及地方政府就 54 個老舊工業區辦理相關公共設施更新等作業，同時帶動園區廠商之新設與擴廠。

自 2017 年起，因都會區極化發展及產業群聚效應，廠商選址偏好多集中於北部及中部，導致區域產業用地供需失衡；加以部分工業區因公共設施負擔比例高，使得土地價格較高，廠商進駐意願偏低；或早期開發之工業區公共設施老舊，服務水準待提升，並面臨土地閒置或低度利用等情形。因此，工業局乃配合前瞻基礎建設政策，透過關鍵性財源補助之政策工具挹注，推動「強化地方工業區公共設施補助方案」、「設置平價產業園區補助方案」計畫，以在地思維協助地方政府增設適地性產業用地及增強園區環境設施服務水準，以提升產業用地利用效率與增加有效供給，解決產業用地供需失衡問題。中興並憑藉園區規劃與工程專業之經驗技術，協助辦理「開發在地型產業園區推動辦公室計畫」，輔導地方政府申請補助開發在地型產業園區，協助解決園區申設、規劃、開發、更新等階段遭遇之難題。

（三）配合外交及經濟政策，園區開發經驗輸出海外，協助臺商布局

1977 年到 1985 年間，配合政府外交政策，中興將服務對象擴展至海外，組成專案團隊協助沙烏地阿拉伯開發完成其國內三大工業城－利雅德、達曼、吉達工業區，合計 4,120 公頃，為沙國製造業與經濟多元發展奠下重要的基盤。同時期也由中央投資公司委辦越南新順工業區的規劃。

1993 年起，復配合政府啟動的外交及經濟政策，推動臺商海外投資，參與菲律賓蘇比克灣工業區之規劃開發工作，而後並擴及至印尼（Suryacipta 工業區）、緬甸（臺灣產業園區）、越南（立港工業園區、三陽試車場）、中國大陸（上海華陽工業區、青浦臺商工業園、嘉定工業區、福州平潭綜合實驗區、雲南臺灣產業園等）各類型工業園區之規劃、開發。

2016 年，行政院提出「新南向政策推動計畫」，期在面對區域經貿整合趨勢，及面臨外交艱困處境與中美貿易戰影響下，促進與東協、南亞及紐澳等國家區域交流發展與合作，打造臺灣經濟發展的新模式，並重新定位我國在亞洲發展的重要角色。配合政府新南向政策，中興亦積極前進泰國、印尼等工業區，參與臺灣專區的相關規劃工作，期藉在東協設置臺灣的園中園、區中區，以利臺商布局全球。其中泰國曼谷北部 AMATA 工業區擬設立臺灣智慧城市示範區，吸引臺灣智慧製造、智慧醫療、智慧城市等系統整合廠商進駐；印尼 JIIPE 吉沛工業區則擬劃設 100 公頃作臺灣專區，中興扮演單一窗口，協助廠商實地探勘，給予臺商一條龍式服務，並引進臺灣工業區管理經驗。

三、面對園區開發關鍵議題，整合各方立場尋求解方

園區要能即時、順利推動開發，並在穩定用地供給的同時，兼顧環境友善及社會公義，有賴於計畫執行過程中，與政府各部門主管機關及相關單位就重要議題持續溝通整合，在對立或介面衝突中尋求最適、彈性或階段性解方。

歸納長期以來園區開發被關注的議題，主要包括有：（一）開發行為與環境衝擊之平衡、（二）地方政府發展共識與民意整合、（三）產業需求掌握與時程配合、（四）土地取得公益性與必要性、（五）國土永續與有效利用等。

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 13-21
http://www.sinotech.org.tw/journal/

（一）開發行為與環境衝擊之平衡

園區開發為創造就業機會，促進產業聚集活化的重要手段，然開發行為也往往會對環境資源造成衝擊。環評制度形成之原因即基於環境之承載力有其極限，乃藉環境影響評估之實施，預防環境破壞，避免公害糾紛發生及作為計畫決策之依據，期在環境保護與經濟發展中尋求平衡點。環境影響評估制度建構的程序，可謂由專業菁英運作的專家知識系統；實施迄今，已因應各種開發行為特性及環境變遷等多次修法，而在環保團體及在地居民的意見日漸被重視後，也引發環評界與開發者對產業園區開發的衝擊與省思。

以彰化縣政府二林精密機械園區案為例，從2008 年迄今超過十年，目前仍處於環評審議程序，主要受關切議題包括產業需求、選址問題、農業用地流失、土壤液化、地層下陷及淹水疑慮、納入再生利用方案等。在經濟部門與環保部門的抗衡下，如何避免產生「環境失衡」與「開發過度」的衝撞，導致社會資源的浪費與時間空轉；如何尊重環評委員恪守保護環境的職責，並前瞻客觀反應整體社會對於經建發展與環境保護之間的價值取捨，藉透過專業與新技術、跨領域介面整合等，在兼顧計畫可行性下尋求解決對策，找到平衡點，是未來須持續努力的目標。

（二）地方政府發展共識與民意整合

早期工業區開發多由中央政府主導，民意發聲管道有限；隨著地方自治與公民團體日漸受到重視，地方政府與民意支持亦成為園區順利推動的關鍵因素。除環境議題外，地方亦關注園區開發對活絡地區發展、對地方既有產業的影響等。

鑑於園區之形成，從編定到開發往往耗費多年，應能從區址勘選時即能考量地方民意。除於規劃過程中，藉辦理公聽會、說明會等，預先蒐集整合地方公民團體意見外，也有賴地方政府應對區域整體產業布局預為擘劃，擬定各縣市政府產業用地發展計畫，以避免政府資源的耗費與相關建設計畫間之扞格。

（三）產業需求掌握與時程配合

過去產業園區開發由政府或委託公民營事業辦理報編作業後，繼而由受託開發單位籌措資金進行開發，並透過後續土地租售所得歸墊成本。惟因園區報編往往歷時三、五年之久，倘俟編定程序完竣始辦理工程施作及土地租售，恐無法及時滿足產業用地需求之迫切性；反之，當無明確產業需求時，於完成園區開發後，亦可能產生土地閒置、無法去化及開發成本積壓的問題。

因此，在園區規劃時即應預先透過廠商需求意願調查，掌握與媒合潛在產業需求，並於規劃階段即將產業對空間與設施之需求納入考量；再輔以於開發階段前，藉預登記方式，俟達到一定需地面積（如 70%）後啟動開發作業，以避免衍生開發後土地閒置與開發成本積壓等問題。

（四）土地取得公益性與必要性

早期政府開發產業園區多以徵收方式取得所需土地，惟囿於現今社會氛圍，土地取得之公益性及必要性屢受到公評。除政府已於 2012 年修正「土地徵收條例」，增訂需用土地人興辦事業徵收土地時，應依社會、經濟、文化及生態、永續發展等因素評估興辦事業之公益性及必要性，也促使政府開發產業園區時除顧及地主意願、不迴避公民參與外，亦可保障程序正當性。

產業園區土地取得方式的不確定性，是影響園區審議與開發成敗的關鍵因素之一，也往往因協調爭議造成園區編定時程的延宕。政府部門已持續檢討修正相關辦法，透過跨部會協商與相關單位溝通磨合，建立協商與合作機制；包括協議價購、徵收、合作開發或比照區段徵收之共同開發模式等方式，並針對個案衡酌開發主體需求與地主權益，考量地主意願、開發成本、土地分配、

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 13-21
http://www.sinotech.org.tw/journal/

營運管理、進駐廠商需求等面向，提出土地取得多元與合作模式方案，期以公平互惠原則確保開發單位、地主、進駐廠商等之權益平衡，並提高土地釋出方式之可行性與可操作性。

另因應產業用地之儲備，除配合產業政策與產業需求開發新產業園區外，仍宜優先以無使用計畫、閒置之公有及國營事業土地儲備產業用地，並以租售並行及提高出租比例方式，以維護用地取得之公益性及確保土地使用效率。同時建立產業用地效用指數信號，以產業用地廠商進駐率、廠商需地面積、可提供設廠土地面積等指標，衡量各地區產業用地呈現熱絡（紅區）、平穩（綠區）或過剩（藍區）之概況，以利整體產業用地政策之調控；如紅區可輔導廠商朝容積立體化發展或開發新園區；綠區則持續輔導廠商設廠使用；藍區則輔導廠商加速設廠或加強媒合土地釋出。

（五）國土永續與有效利用

產業園區發展迄今約有逾七成超過二十年，面臨公共設施老舊窳陋、機能不足等問題，單點式公共設施整建維護之更新方式，未必能滿足產業機能活化再生需求；加以部分產業園區土地雖有閒置之情形，多因土地區位及對地價期待之差異等，致土地租售供需媒合不易，區域產業用地供需未能平衡。

而因應「國土計畫法」之施行，為確保國土有序利用與成長管理，產業園區的規劃開發除考量區位之適宜性，如地方水電供應、環境敏感、產業群聚與人才資源等因素，也應納入總量管制，新闢及儲備之產業園區應符合縣市國土計畫產業部門計畫及中央產業政策之指導，並輔以工業局協助地方政府進行跨區域協商，可避免縣市間產業競爭或資源分配衝突。

另鑑於開發園區土地取得不易及部分既有園區土地閒置，產業創新條例已修法納入閒置土地強制拍賣機制，以確保廠商之實際建廠需求，並避免土地資源浪費；且採園區土地採租售並行的雙軌模式，除部分土地採出售以其所得歸墊開發成本，其餘採出租方式，可避免流於土地炒作外，對建立產業用地儲備機制，扶植產業發展與國土永續利用具正向意義。

四、因應環境變遷，產業園區開發設計新思維

臺灣在歷時六十年之園區開發發展歷程中，藉由完整之法令措施，並透過適當的區位勘選、周延的規劃設計、完善的開發建設、效率化的管理等程序，及全盤性考量經濟、產業、都市及區域計畫、環境保護等各個向度，創造許多具有高度附加價值之生產空間。

然而在產業發展邁入工業 4.0 之際，智慧製造、物聯網運用及綠色生產為未來工廠生存的必備元素，因此產業園區的開發與運營也可謂已從過去注重生產效率（園區 1.0）、到強化複合機能（園區 2.0），進而注重綠色內涵與環境友善（園區 3.0），未來應更推進到以彈性利用、智能加值的新思維模式，並具有韌性、客製化驅動特質的新世代產業園區（園區 4.0），以能持續孕育產業競爭力與延續產業發展之命脈。

（一）新世代產業園區面臨的挑戰

1. 有別於過去產業園區以生產為主，新世代產業園區應滿足土地多元使用與專業化需求

因應產業多元與智慧化發展，單一土地使用管制已無法符合產業需求，除既有生產、公共設施使用外，應思考在符合「工業園區各種用地用途及使用規範辦法」產業用地（一）及產業用地（二）容許使用類別之規範下，引進商貿、教育、物流、研發、數據與雲端服務、休閒等，以多元機能使用型態滿足廠商營運需求；並思考在產業

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 13-21
http://www.sinotech.org.tw/journal/

廊帶布局及區域產業分工下，以「產業專區」之設置引導園區適地、適性發展，並避免各縣市政府間引進產業之角力競爭，及政府資源的不當分配。

2. 因應極端氣候及能資源耗竭的困境，新世代產業園區應依循低衝擊開發與資源循環利用目標

隨著全球氣候變遷現象日益明顯，加劇災害發生之頻率及規模，因此開發行為該如何調整與適應極端氣候變遷所帶來的衝擊，是當前必須正視的重要課題。

另過去的經濟發展係建立於線性的工業系統，資源從開採、製造、使用到廢棄，導致許多資源未能妥善運用即價值流失。為使國土等資源永續利用，政府積極推動「循環產業化」、「產業循環化」，期透過「建構新循環示範園區」、「促進能資源整合與產業共生」等策略，提升能資源整合效率，促進產業循環共生及轉型，因此園區開發應兼顧促進企業將生產過程排放的能源、資源、廢棄物及廢水，妥善收集、再生及循環利用的需求，以建構產業循環共生聚落。

（二）秉持永續城市規劃理念，導入新世代產業園區開發設計新思維

產業園區可謂為小尺度的城市有機體，因此，於園區開發規劃設計的同時，亦應秉持永續城市規劃理念，讓土地在轉變用途的開發過程及營運期間，經由新思維、新工法的導入，挹注產業、城市與生態環境的永續動能。

以下分從「園區規劃」與「永續工程」兩個面向說明新世代產業園區應具備的內涵：

1. 彈性－跨域－對接的園區規劃

（1）土地集約與彈性使用，並著重在地產業與城鄉發展融合

因應產業跨域整合與多元化，單一土地使用管制已無法符合產業需求，除既有生產、公共設施使用外，檢討土地多元混合使用型態，並朝土地集約使用。又以往產業園區之公共設施比例偏高，多占園區面積之 30%~40%；依現行「產業創新條例」規定，已調降公共設施比例為 20%。在土地資源有限及土地取得不易下，應視基地條件及產業需求精實規劃；如過去部分園區強調林園大道軸線等意象的塑造，為公共設施比例較高的原因之一，惟考量產業運輸道路寬度需求及提高土地利用效率下，仍可藉結合交通動線、景觀、滯洪需求、建築退縮等方式更精實規劃。

另早期因應進駐產業型態，產業用地規劃考量製造業生產線與機具的布設，建築強度多以提供較大建蔽率滿足其平面需求，容積率則以較低樓層之利用為主。然因應生產技術進步、產業智慧化等生產型態的改變，立體高樓層使用的可能性增加，帶動產業使用立體化的發展趨勢。在都市地區產業用地取得不易情況下，都會型產業園區藉產業用地容積強度提高，可短時間內增加產業空間的實質供給，且透過更多廠商集約使用於同一土地上，較易整合成為產業聚落或產業鏈，並有利降低廠商土地成本。目前政府已因應趨勢制定「工業區更新立體化發展方案」，由廠商依需求申請工業區容積獎勵，除強化產業用地使用效率外，將可帶動產業園區土地利用型態的轉變。

此外，過去園區與周邊都市發展多各自獨立未有連結，或甚至被視為鄰避設施，因此應破除與地方發展之藩籬、共享資源，及著重在地產業與城鄉協同發展，並整合周邊都市商業、文化、公共設施等機能，以產興城、以城促產；即不僅以產業園區為動能，驅動城市活力和服務配套的完善，同時以城市為基礎，支撐產業空間的良性發展。

（2）適地與適性產業地圖，異態產業園區跨域合作

產業園區設置應以國土規劃的高度，藉由園

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 13-21
http://www.sinotech.org.tw/journal/

區間的群聚效益，促進產業廊帶布局與區域分工，且利於產業園區適地、適性發展。如資訊電子技術密集型產業多位於北部地區，鄰近都市地區；金屬機電、化學、民生工業則以中部、南部區域為主，具備產業群聚效果，應持續維持其良好發展，並透過引入研發及新材料生產基地、加強機械設備製造業的產業供應鏈，推動石化、鋼鐵產業高值化等，以提升競爭力及降低對環境的污染。

另考量資源利用與綠色生產，可加強異態產業園區間相互之資源協調與運用，並提升產業循環共生效能。以目前政府推動之「循環產業園區」為例，基於產業循環的整合模式可分為（a）園區內高值化材料及進駐廠商能資源等的內部循環，及（b）與區外石化、鋼鐵等基礎產業能資源等之外部循環，故除引進產業應與周邊既有工業區發展整合外，並考量各產業間能資源（能源、水資源、廢棄物等）的互補型態與其區位關聯性。

（3）智慧加值互聯，園區規劃以產業需求導向對接企業營運需求

產業園區開發已從過去的供給導向，轉為以企業需求導向進行開發，故因應產業發展已從大量生產，轉為產品生命週期短、少量多樣與客製化需求、電子商務與區域供應鏈物流加值服務、深度售後服務的型態。園區引入活動機能、基盤建設、虛擬空間建置與配套服務、營運管理效能等應能滿足產業轉型及與全球連結的需求；例如電子商務物流中心、觀光工廠複合商業服務、前店後廠樣品展示、會議教育中心、金融後勤中心等機能，以強化企業之全球運籌能力與營運效率。

2. 綠色－韌性－智慧－循環的永續工程

回顧中興參與園區規劃設計工作的足跡，早期（1970~1990 年）工業區開發的宗旨係以配合工業發展需要，提供成本低廉的建廠用地為目標。設施設置以滿足工廠運轉所需基本功能為考量主軸，工法運用多採傳統土木工法為主，以確保各項設施得以安全運轉為前提。

而 1991~2008 年代，因應國內多次天災對原有地貌與環境的破壞，各項開發建設在政府「促進產業升級條例」、「非都市土地開發審議作業規範」、「水土保持法」、「非都市土地使用管制規則」及「綠營建與生態工法」等相關政策與法令規範的持續發布下，逐步在規劃設計中強化「環境生態」面向。因此，產業園區規劃設計理念朝向以塑造兼顧環境紋理、基地保水、低環境衝擊及優質景觀綠化的園區。

2009 年迄今，面臨氣候變遷調適與國土永續利用議題，園區土地開發利用進一步考量環境敏感地區、災害潛勢地區與氣候變遷調適因應，從區位勘選、土地規劃、工程開發皆應檢視環境容受力，及落實綠色內涵與及生態韌性的低衝擊開發、低碳節能的資源循環利用原則，並藉智慧基盤建構達成智慧管理、安全監控的目標。因此，產業園區開發工程應能納入「綠色－韌性－循環—智慧」（Green-Resilient-Circular-Smart）作為園區開發工程的核心理念。

（1）綠色（Green Engineering）－融合自然生態系統，將綠色技術運用在能源、水、交通等基礎建設中，達到減排及低碳目標。

（a）綠色材料：包括綠建材標章之水泥製品、瀝青鋪面粒料、混凝土粒料、現場澆置之剛性透水鋪面等；省水設備及 LED 節能燈具等。

（b）模組化產品：包括預鑄人孔、預鑄箱涵、預鑄溝蓋板等。

（c）綠色運輸：以人為本，提供人行、自行車使用空間及規劃大眾運輸。

（d）綠色生態基盤：如盡量保持原有地形地貌及植栽；建構及補綴綠廊整合串聯公園、滯洪池及廣場綠地空間；採用多樣性原生植物及複層式植栽；採

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 13-21
http://www.sinotech.org.tw/journal/

用植生或生態工法保護邊坡；人行道、自行車道採用透水鋪面。

（e）綠色工法：如順應地勢整地、最小挖填土方量；低營運及維護成本之排水設施、管道以最小需求設計；寬頻與電信共構節省空間；結構設計輕量化、提高混凝土強度減少混凝土用量。

（2）韌性（Resilient Engineering）－於基礎建設建置中考慮極端氣候變化、環境敏感地區、災害潛勢地區等對所在區域之影響，提升抵禦危機的承受力。

（a）低開發衝擊（LID）：如停車場、自行車道、人行道及道路採透水鋪面設置；管理服務用地設置雨水貯留設施；公園、綠地之排水渠道及低地設置滲透陰井、草溝或雨水花園；滯洪池以生態形式規劃設計等，以創造兼具防洪與生態景觀之開放空間環境。

（b）防災道路：建構層級分明、系統健全之道路路網，於災害發生第一時間作為聯繫臨時緊急避難場所及防救災設施據點間的主要動線，以利逃生、避難及救援之路徑。

（c）建築物抗洪：如建築物設置雨水儲留設施減少逕流、增加抗旱能力等。

（d）公共設施韌性設計：包括自來水及污水管材採撓性接頭及易修復管材；機電設備加高、位於地下者則設置防洪閘門；橋梁提高結構強度及韌性等；機電設備設置備援系統及緊急發電設備；植栽樹種避免強風易傾倒及火災易燃樹種；公園設施、街道家具採防強風、耐水性設計等。

（3）循環（Circular Engineering）－導入區域能資源整合、再生能源與智慧電網、水資源循環、綠色運輸、廢棄物再利用等項目，並透過區域內各系統的合作，優化配置資源，提高資源的利用效率，使生產或營運過程中減少投入與排放，達成收益創造及永續利用。

（a）中水回收再利用：採用污廢水處理新穎技術（如結合生物除氮（AO）程序及活性污泥膜濾法（MBR）等），使污水經處理後達到特定的水質標準，水資源循環再利用。

（b）材料再生運用：如混凝土構造物採用水淬高爐石粉、飛灰替代部分水泥；再生瀝青；使用現地卵礫石為造景石材及鋪築施工便道。

（c）雨水收集利用：於廠房屋頂或其他公共設施收集雨水，經導管截引至地面（或屋頂）簡易過濾設施去除雜物後，再送至建物地下雨水貯留槽，供清掃、空調冷卻及景觀澆灌、沖廁用水等。

（4）智慧（Smart Engineering）－因應園區環境特性與廠商、管理單位、政府部門等使用者之需求，可落實的智慧項目包括智慧運輸、智慧供排水、智慧電網及智慧環境監測系統等，透過建置智慧基盤，蒐集基礎設施資料。

（a）智慧路燈：包括整合 LED 路燈控制器、顯示螢幕、環境監測、智慧監控（路口監視）、WiFi 熱點及視訊語音求助等。

（b）智慧防洪：如即時監控雨量資料、雨水下水道及滯洪池水位，若達警戒值則發布災害預警。

（c）智慧管線管理：應用地理資訊系統（GIS）整合各公共管線（3D/BIM）相關資料，於細部設計時即於可能衝突點套繪管線並進行干涉分析，以更精確掌握工程品質、時程與工程費。

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 13-21
http://www.sinotech.org.tw/journal/

（d）智慧水表：利用智慧電子水表具有的瞬間流量、漏水警訊、防竊水等水資源管理功能，並搭配訊號傳輸連結至遠端供水管理監控中心，使供水管理具有即時性及效能性。

（e）智慧化停車管理系統：如建置提供可用停車位資訊系統，並納入預約停車及導航功能等。

而為提高園區治理效率，園區內土地管理、廠商營運、物聯網、交通運輸、環境監測、污水廠管理、水資源等數據資訊，透過資料處理平台整合後，應能以公開透明方式適時發放綜合資訊，以提升系統運作效率。另因應產業提供服務加值的發展趨勢，可進一步以符合國際開放資料介接機制，延伸園區管理資訊提供外部介接使用，以帶動園區製造服務業之市場，協助助企業創新升級，創造服務經濟效益。

五、結　論

產業園區為產業發展之載體，在過去奠定了臺灣經濟發展之基礎；而因應能源匱乏與極端氣候影響日益嚴峻，及隨著產業智慧創新的轉變及全球鏈結需求，園區之規劃與開發應能立基於國土永續利用，並滿足新型態之產業營運需求，強化與國際、在地的連結，始能在世界創新經濟的浪潮下，持續協助產業深耕臺灣，放眼世界。

中興工程顧問集團協同政府與民間循著臺灣產業園區開發的軌跡，一路緊密攜手已走過五十個年頭，在面對較過去更為嚴苛的經濟競爭與環境調適的此刻，應能持續以導入前瞻工程與規劃技術、貼近產業與在地需求、關懷國土永續與環境保育的核心，推升園區開發以多元彈性、跨域合作、服務加值、產城共生的發展模式，及綠色、韌性、智慧、循環的工程理念，再創下一波新世代產業園區的發展量能。

參考文獻

臺灣產業 50 年紀念套書（2020）經濟部工業局
土地改革回顧與展望（2017）產業園區開發管理策略，曾參寶
中興工程 40 週年工程技術論文集（2010）工業區規劃設計之回顧與展望，陳廷雄

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

中興工程．第152期．2021年7月
http://www.sinotech.org.tw/journal/

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

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 23-29
http://www.sinotech.org.tw/journal/

藉由地質平衡剖面建立三維地質模型－以新竹地區為例

李易叡*　黃宣維**

摘　要

過去的研究者藉由區域平衡剖面可建立區域斷層構造的三維幾何面，然而要將平衡剖面中的地層建成三維幾何模型，目前則無人嘗試。主要的難處是因為地層在不同的剖面中會有尖滅及比對困難的問題，而當地層被斷層構造錯移時，更增加了地層排序的複雜程度。另外也缺少適合的工具可以將地層充填為實體模型。

本文嘗試以新竹地區為例，將數條平衡剖面的結果進行整合，建立區域的三維地質模型，選取的剖面為黃宣維(2012)彙整的 A、B、C、E 四條剖面。使用美國 C-Tech 公司所發展的 MVS(Mining Visualization System) 軟體作為三維地質模型的建置與展示工具。首先以密集的鑽井方式將四條平衡剖面數化，然後排列四條剖面的地層層序，順序為由最東邊斷層上盤最年輕的地層開始往下建立，直到外麓山帶斷層下盤最老的地層。完成地層層序建置後，在 MVS 中以六角柱立方晶格方式，將模型中的地層充填為實體模型。

本文針對完成的地質模型切平衡剖面 B 及剖面 C，並且和黃宣維（2012）原始圖資進行比較。地質模型大致上符合平衡剖面，證實本研究方法確實可建立合於各剖面的三維地質模型。而剖面數化的密度則會影響三維模型的精細程度。

目前臺灣西部地區雖然已完成由北往南眾多地質平衡剖面，然而臺灣北中南地區地層變動相當大，將來如要建立其他區域的三維地質模型，建議以同區域有相同地層層序較為理想。

關鍵字：新竹地區、平衡剖面、三維地質模型、MVS

一、前　言

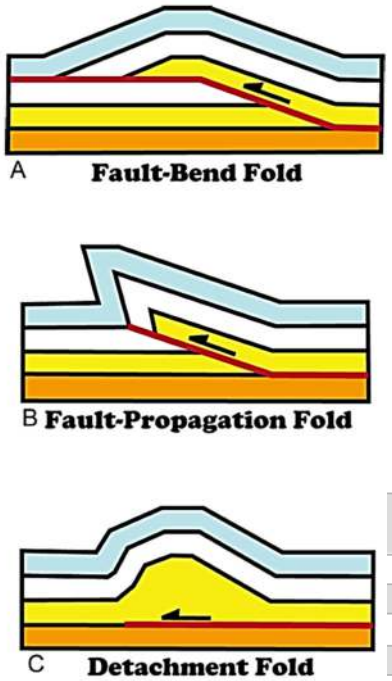
黃旭燦（2003）平衡剖面建立的目的，主要是為了瞭解臺灣造山變形前緣區域地體構造，而且在地質調查過程中發現，臺灣地體構造在很短的距離就會有很大的變動，因此他建立了臺灣西部地區由北往南，東西方向的地質平衡剖面共 28 條。

在造山帶的前緣及外麓山帶之地層未受變質作用，形成褶皺的變形機制是以曲滑褶皺作用（flexure-slip folding）為主。在此情況下變形前後地層厚度不變，且在地質圖、井下資料及震測資料的尺度下，其變形皆遵循平行地層行為的假設（Elliott, 1983；Mount et al., 1990）。在造山帶變形前緣的褶皺－斷層的關係，可分為斷層彎曲褶皺（Suppe, 1983）、斷層擴展褶皺（Suppe and

*　中興工程顧問社防災科技研究中心副研究員
**　台灣電力公司營建處地質師

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 23-29
http://www.sinotech.org.tw/journal/

Medwedeff, 1990）以及基底滑離褶皺（Homza and Wallace, 1995；Mitra, 1990），如圖 1 所示。根據變形前後岩體在體積、面積、長度以及厚度守恒的假設，上述這些構造類型其褶皺兩翼以及斷層面之間的夾角有一定的數學關係（Suppe, 1983）。因此，依據此關係，可以將地表地質資料及井下資料和震測資料，依一定的準則及程序來建構合理的地質平衡剖面，以顯示變形前緣及褶皺衝斷帶之構造形貌及特性。



（摘自黃宣維，2012）

圖 1　與逆衝斷層相關的三種褶皺作用示意圖

過去的研究者藉由區域平衡剖面已可建立區域斷層構造的三維幾何面，然而目前尚無人嘗試將平衡剖面中的地層建成三維幾何模型。主要的難處是因為地層在不同的剖面中會有尖滅及比對困難的問題，而當地層被斷層構造錯移時，更增加了地層排序的複雜程度。另外也缺少適合的工具可以將地層充填為實體模型。

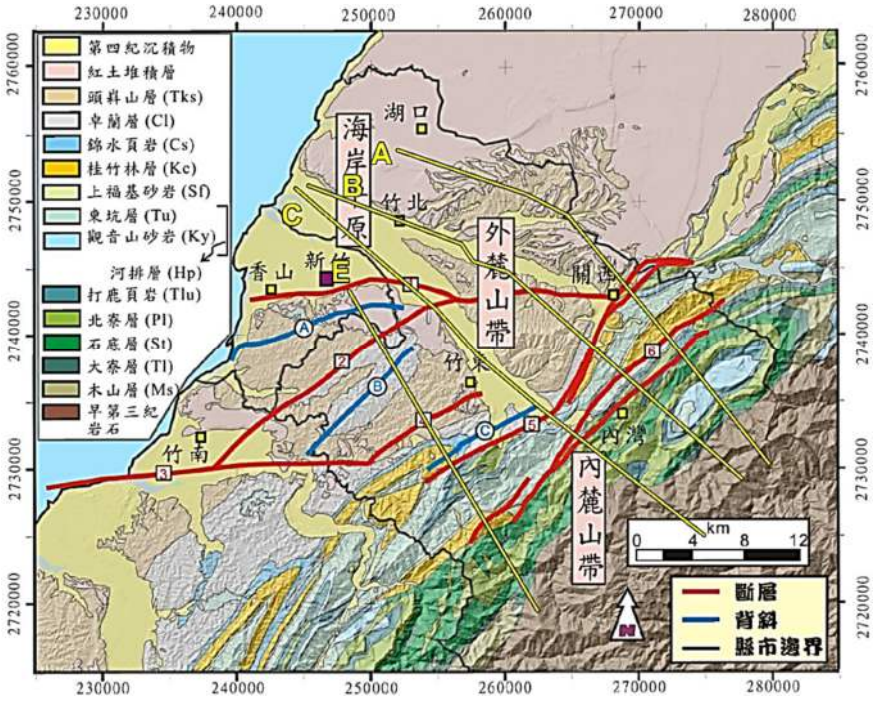
本文嘗試以新竹地區為例，將數條平衡剖面的結果進行整合，建立區域的三維地質模型。使用美國 C-Tech 公司所發展的 MVS（Mining Visualization System）軟體作為三維地質模型的建置與展示工具。MVS 是一套真實三維（True 3D）視覺化分析展示工具，由於 MVS 能與 GIS 系統（如 ArcGIS）進行無縫整合，使得建置在空間資料庫中的地質資料，能直接作為建立三維地質模型及分析資料來源，並可達到（1）真三維（True 3D）視覺化分析及顯示；（2）三維斷層圖塊產生；（3）三維地質資料空間克利金（Kriging）統計分析。MVS 可將各剖面中之相同地層進行連結，當地層延伸性不足時則以尖滅的方式呈現，也可建立被斷層錯移之地層。

三維地質模型的建置可提供專業地質工程人員以數值化的地質資訊與不同工程界面人員溝通；對於重要工程建設所面臨的地質問題，透過三維視覺化的處理，可使複雜的地質議題能簡易的讓社會大眾了解，增加政府與民眾的溝通效率。

二、剖面位置

本文選取黃宣維（2012）彙整的 A、B、C、E 剖面來建置三維模型。平衡剖面位置如圖 2 所示，位於新竹地區，包括西部麓山帶及海岸平原，西部麓山帶的構造又可以分為內麓山帶與外麓山帶兩部分（中國石油公司，1978、1994）。根據黃宣維（2012）的描述，內麓山帶以北北東－南南西走向的逆衝斷層為主，伴隨發育的是緊密與不對稱的褶皺系統，斷層的上下盤斷距通常很大；外麓山帶則為新期活動的構造為主，包括寬闊且開放型態的褶皺，以及東北－西南走向的逆衝斷層系統，此斷層系統的南北側被東－西走向的走向滑移斷層所截切。內外麓山帶通常以界線斷層做區隔，在新竹地區的邊界斷層為軟橋斷層；褶皺由緊密到開放性的型態，顯示西部麓山帶變形的程度由東向西逐漸變小。

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 23-29
http://www.sinotech.org.tw/journal/



斷層線 1. 新竹斷層；2. 新城斷層；3. 斗煥坪斷層；4. 竹東斷層；5. 軟橋斷層；6. 鵝公髻斷層；背斜 A. 青草湖背斜；B. 寶山背斜；C. 竹東背斜

（修改自黃宣維，2012）

圖 2　研究區域地質圖及本文選用的平衡剖面分布圖

三、研究方法

（一）剖面數化

剖面數化方式是以密集的鑽井方式來建檔，以圖 3 剖面 E 為例，上圖中每條黃色線段，在平面圖上看都只是一個點（x,y），只要知道每個黃色線段與原點的距離，即可在 GIS 系統中，測量重定位的底圖（例如圖 2）而獲得該黃色線段（x,y）座標。之後只要在剖面中測量每個地層的深度，即可建立黃色線段中類似鑽井紀錄的表格，並轉檔為 MVS 所需檔案格式（*.pgf）。在建立三維模型之前，也可將這些.pgf 檔先行讀取至 MVS 中進行檢核，圖 3 下圖即為剖面 E 建立的檔案。當然，建立的線段越密集，三維模型的精度也越高，然而 MVS 本身即會使用克利金（Kriging）法做空間內插，因此不一定要耗費過多心力去建立過於密集的柵狀圖。本文根據經驗彙整出需要建立點位的幾個原則歸納如下：（1）地層傾角改變處、（2）地層尖滅處、（3）經過斷層處、（4）剖面本身轉彎處。

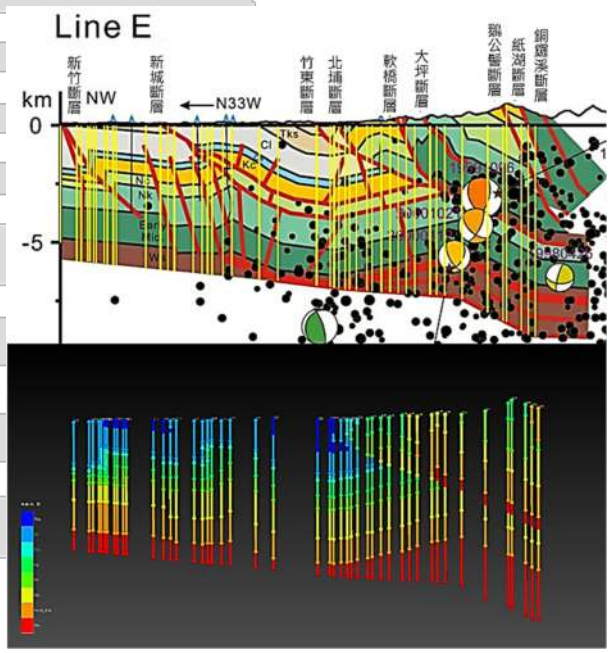


圖 3　平衡剖面 E 數化並呈現於 MVS 上

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 23-29
http://www.sinotech.org.tw/journal/

（二）判斷地層層位

MVS 三維模型建立地層的方式是由上往下，但是因為本區域剖面有逆衝斷層通過，因此需先從最東側的斷層上盤開始建立地層。圖 4 是以 Line A 為例，呈現地層建立的順序，地層上的數字為建立地層的順序，以此方式建立的模型才可正確呈現斷層錯動的樣貌。如果地層是連續堆疊且無構造通過，MVS 有自動化建立地層的功能，然而軟體本身並無法判釋有斷層錯移的地層，因此需要先行判釋地層層位再手動進行調整。

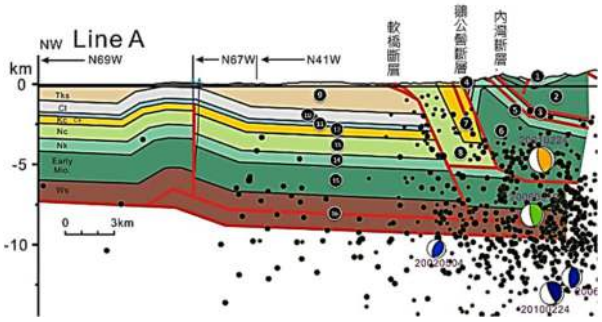


圖 4　層位判斷，地層上的數字為使用 MVS 建立地層的順序

另外，因本文使用了四條平衡剖面，所以還需考慮斷層於這四條平衡剖面的延伸情形，才能把四條剖面、同一斷層上盤的地層層序整合考慮。圖 5 即為本文將四條剖面中的斷層行連結，再根據前述的原則同時排列四條剖面的地層層序，順序為由最東邊斷層上盤最年輕的地層開始往下建立。

由於黃宣維（2012）已將四條剖面的各個地層都整合為相同的名稱，因此在建立層序上沒有遭遇太大的麻煩。然而，因為臺灣北中南地區地層變動相當大，將來如要建立其他區域的三維地質模型，建議以同區域有相同地層層序較為理想。

（三）在 MVS 中依序建立地層

圖 6 顯示了於 MVS 中依序建立地層面的過程，由上至下分別是由內麓山帶斷層上盤地層開始，到外麓山帶斷層下盤地層。由於部分地層並不存在於某些剖面中，因此在建立地層中需要挑選該地層存在的點位；而該地層不存在的點位，MVS 會對其進行減薄、尖滅的方式處理。

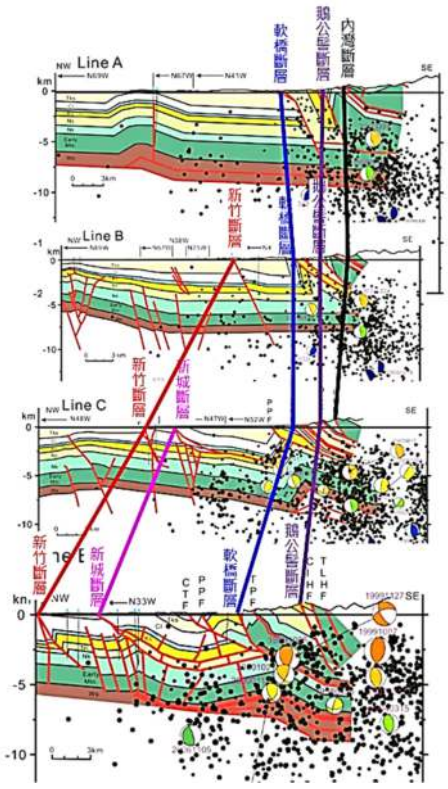


圖 5　將不同剖面中的相同斷層以粗線進行連結，以便同時判定四條剖面的地層層序

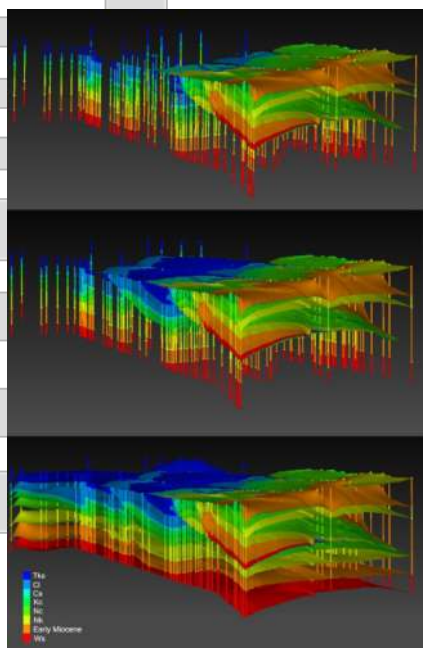


圖 6　依地層層序於 MVS 中建立地層

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 23-29
http://www.sinotech.org.tw/journal/

（四）組合為實體

完成地層層序建置後，會輸出成*.geo 檔，之後在 MVS 中以六角柱立方晶格方式，將模型中的地層充填為實體模型。在模型後處理部分，可藉由數值高程模型（DEM）建立區域地表地形面，MVS 可以用地表地形切割地質模型，使三維地質模型的地表面符合真實地表。另外，可選擇填入與平衡剖面一致的地層顏色，使得模型展示上與平衡剖面一致。圖 7 及圖 8 顯示了研究區域三維地質模型建置成果，地層顏色則與黃宣維（2012）平衡剖面一致。

四、結果與驗證

三維地質模型建置完成後，MVS 即可針對模型進行後續的分析及展示，本文針對地質模型切平衡剖面 B（圖 9）及剖面 C（圖 10），並且和黃宣維（2012）原始圖資進行比較驗證。從圖 9 及圖 10 中，可以看到地質模型大致上符合平衡剖面，本研究方法確實可建立合於各剖面的三維地質模型，然而可能點位密度不夠，與實際剖面仍有些微的不一致處。

另外，三維地質模型也可切任意剖面進行觀察，如圖 11 所示。

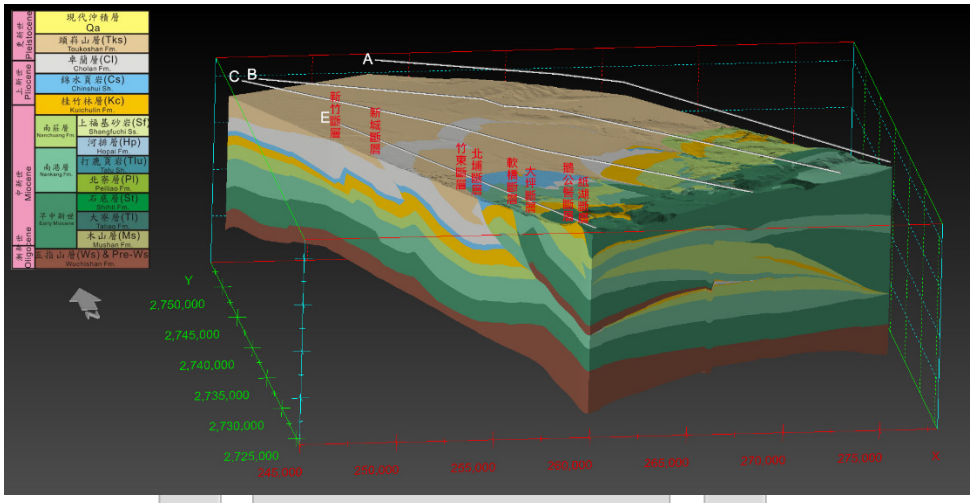


圖 7　新竹地區三維地質模型成果

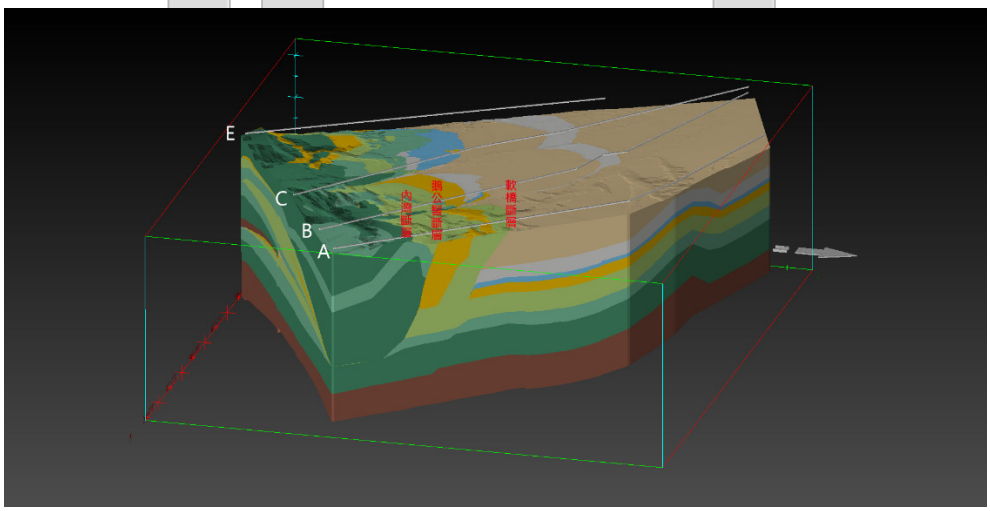


圖 8　新竹地區三維地質模型成果（另一視角）

中興工程，第152期，2021年7月，PP. 23-29
http://www.sinotech.org.tw/journal/

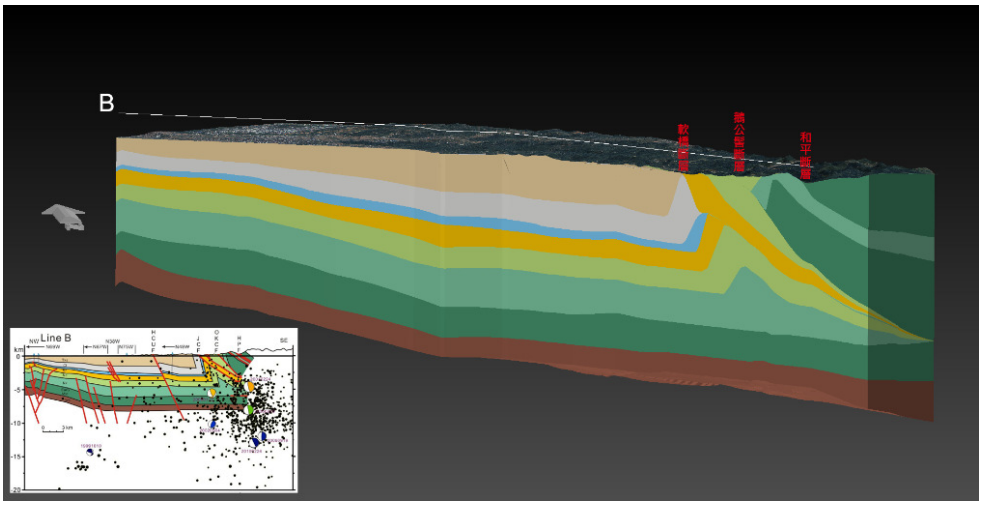


圖 9　地質模型切 B 剖面比對成果，左下圖為黃宣維（2012）平衡剖面 B 原始圖資

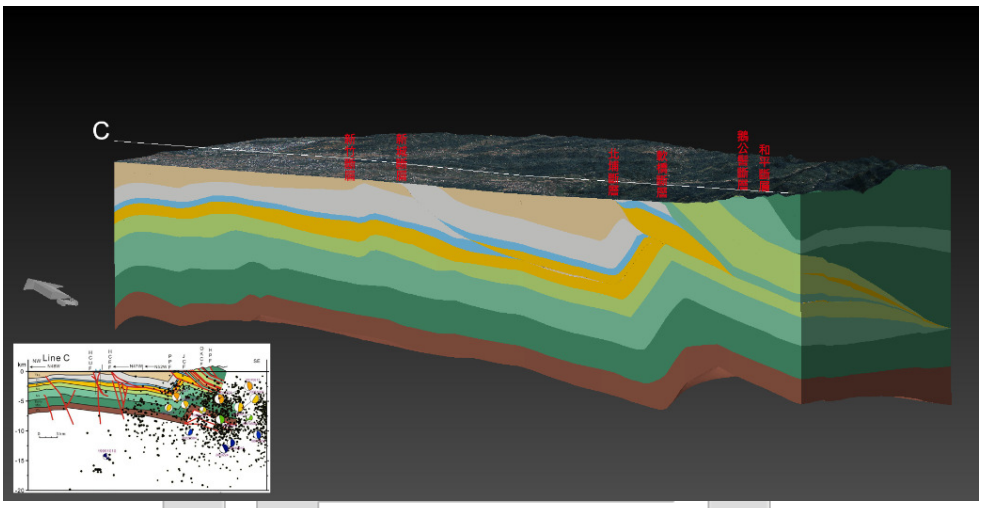


圖 10　地質模型切 C 剖面比對成果，左下圖為黃宣維（2012）平衡剖面 C 原始圖資

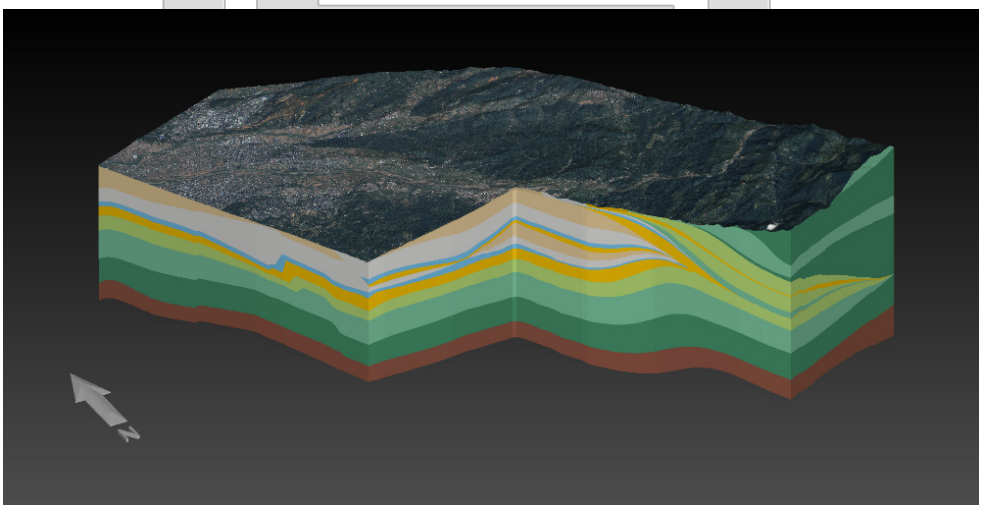


圖 11　地質模型切任意剖面

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 23-29
http://www.sinotech.org.tw/journal/

五、結論與建議

本文藉由數條平衡剖面，可在 MVS 中建立新竹地區的三維地質模型。剖面數化的密度會影響三維模型的精細程度，在進行剖面數化時，地層傾角改變處、地層尖滅處、經過斷層處及剖面本身轉彎處都應進行數化。

本文的數化方式是在 GIS 系統中藉由測量方式完成，較為耗時。將來若能搭配 GOCAD 軟體，將剖面圖資直接輸入到三維空間中，在 GOCAD 中點選即可直接獲取 x、y、z 座標，可更迅速直觀地完成高密度的數化工作。

目前臺灣西部地區雖然已完成由北往南眾多地質剖面，然而臺灣北中南地區地層變動相當大，將來如要建立其他區域的三維地質模型，建議以同區域有相同地層層序較為理想。

三維地質模型的建置可提供專業地質工程人員以數值化的地質資訊與不同工程界面人員溝通。對於重要工程建設所面臨的地質問題，透過三維視覺化的處理，可使複雜的地質議題能簡易的讓社會大眾了解，增加與民眾的溝通效率。

參考文獻

中國中油公司（1978）桃園－新竹地質圖（1:100,000），中國石油公司台灣油礦探勘總處出版

中國中油公司（1994）苗栗地質圖（1:100,000），中國石油公司台灣油礦探勘總處出版

黃旭燦（2003）台灣中南部褶皺逆衝斷層帶地質構造特徵分析。國立中央大學地球物理研究所博士論文，共 130 頁

黃宣維（2012）以三維構造幾何形貌和大地測量分析台灣西北部新竹地區之新期構造活動。國立台灣大學地質科學系碩士論文，共 139 頁

Elliott, D. E (1983) The construction of balanced cross-sections, Jour. Struc. Geol., 5, 101

Homza, T. X., and Wallace, W. K. (1995) Geometric and kinematic models for detachment folds with fixed and variable detachment depths, Jour. Struc. Geol., 17, 575-588

Mitra, S. (1990) Fault-propagation folds: Geometry, kinematic evolution and hydrocarbon traps, Am. Assoc. Petrol. Geol., 74, 921-945

Mount, Van S., Suppe, J., and Hook, S. C. (1990) A forward modeling strategy for balancing cross sections, AAPG, 74, 5, 521-531

Suppe, J. (1983) Geometry and kinematics of fault-bend folding, Am. Jour. Science, 283, 684-721

Suppe, J., and Medwedeff, D. A. (1990) Geometry and kinematics of fault-propagation folding, Eclogae Geol. Helv., 83, 409-454

中興社研發叢書及電腦程式銷售

中興工程顧問社已發行研發、編譯叢書 314 種及電腦程式 23 套，多屬規劃、設計、施工、管理等方面之工程技術，其叢書及程式目錄、售價、摘要、申購表、繳款方式及信用卡繳費單等，皆已上「中興工程顧問社」之網站 **www.sinotech.org.tw**，歡迎上網查閱選購；若需進一步查詢請電話或傳真至電話：**(02)8791-9198 轉 467** 陳小姐，或傳真：**(02)8791-2198**

中興工程・第152期・2021年7月
http://www.sinotech.org.tw/journal/

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 31-38
http://www.sinotech.org.tw/journal/

機率式海嘯危害度分析流程方法之探討

張家宜*　許國強**

摘　要

近十年以來，全球陸續發生災害性海嘯，如 2004 年及 2011 年因地震引致之南亞大海嘯與日本 311 大海嘯，近期則於 2018 年發生因火山噴發引發之巽他海峽海嘯，這些海嘯事件往往讓當地城市遭受嚴重破壞並造成重大傷亡。不同型態的海嘯源也喚起相關領域學者們之重視，而臺灣位處環太平洋火山地震帶，事先之海嘯危害度評估更是應該盡早完成，以利作為未來防救災參考。

本研究主要說明建立機率式海嘯危害度分析（PTHA）之方法流程，並先依照各種不同類型之海嘯源說明海嘯生成之機制與型式。常見海嘯源類型有：地震、海底山崩、海底火山爆發引致之海嘯。而依據機率式海嘯危害度分析理論，須將偶然不確定性及認知不確定性納入考量，分別為進行歷史海嘯模擬及執行邏輯樹各分支之海嘯模擬，接著便能透過公式計算海嘯波高超越機率值，並配合專家學者給定之邏輯樹各分支權重，即可得到最終機率式海嘯危害度曲線。

關鍵字：機率式海嘯危害度分析（PTHA）、地震海嘯、海底山崩海嘯、邏輯樹（logic tree）

一、前　言

2011 年 3 月 11 日於日本東北地方外海發生規模高達 9.0 之逆衝型強烈海底地震，並誘發大規模海嘯，進而引發一系列災害。除了直接淹沒沿海地區陸地並摧毀城市設施，亦不幸地造成福島核電廠的事故。此次災害造成日本傷亡慘重、經濟損失難以估量，但也因此喚起全球特別關注海嘯之危害性，以及專家學者對於海嘯相關研究之重視。臺灣地處太平洋火環帶，地震發生機率活躍，因此歷史文獻有不少海嘯紀錄。臺灣周圍海域潛在危害度之分析方法及流程也參考美國、日本的相關文獻規範而逐漸建立。

過去，不論是地震的危害度分析或是海嘯的危害度分析，大部分常以定率式分析方法進行（即定率式海嘯危害度分析，Deterministic Tsunami Hazard Analysis, DTHA），是以單一震源、單一特定地震情境的情況下，使用數值模式模擬海嘯波對於研究地區之影響，因此在海嘯源參數設定上為研究某一海溝或斷層可能發生之最大地震規模引發之海嘯；而近年來，危害度分析的觀念逐漸轉為考慮各種可能發生海嘯之情境，不再只是模擬單一海嘯事件（即機率式海嘯危害度分析，Probabilistic Tsunami Hazard Analysis, PTHA），此種分析方法將加入考慮各種不確定性因素（如：模式不確定性、震源參數不確定性），結合數值

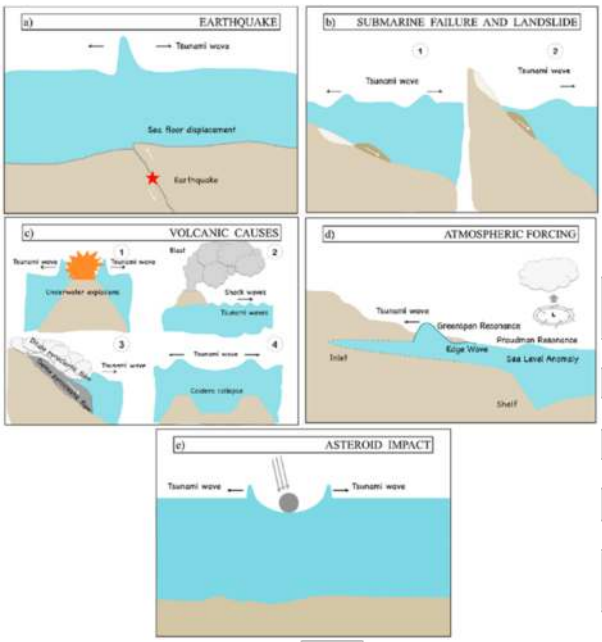
*　中興工程顧問公司電力及能源工程部工程師
**　中興工程顧問公司水利工程部協理

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 31-38
http://www.sinotech.org.tw/journal/

模擬結果與機率統計概念，來推求研究區域中特定位置的海嘯超越波高，以得知該處之海嘯危害度。

二、海嘯生成機制與型式

海嘯的產生源自於海水突然受到垂直型巨大能量干擾，例如：地震、海底山崩、海底火山爆發、大氣擾動事件或是隕石撞擊等如圖 1。不同的海嘯源生成之海嘯波形則各自不同，而全世界歷史海嘯中，產生災害性的海嘯主因分別為海底地震、海底山崩及海底火山爆發。因此在執行海嘯分析時，大多也以此三種因素為最先考慮之海嘯源。在 PTHA 之發展過程也是先以建立地震海嘯危害度曲線開始。



資料來源：Grezio et al., 2017

圖 1　可能造成海嘯之因素

瞭解不同類型之海嘯成因與物理機制，透過理論及方程式生成相異之初始海嘯波形，後續利用求解二維非線性淺水波方程式即可分析海嘯深海傳播、近岸溯升及溢淹成果。本文僅就海底地震、海底山崩、海底火山爆發海嘯源機制與對應引用之理論基礎於本節做基本介紹。

（一）海底地震

地震的發生是由於板塊錯動所引起，當海底發生深度較淺之大地震時，海底地形發生錯動而造成該區域海水直接抬升或落下，因此產生海嘯。地震海嘯之初始海嘯波形推求，常採用 Okada（1985）之研究，使用彈性半無限空間錯位模型（Elastic half-space dislocation model）來計算海底位移量。根據不同斷層錯動方式（如：平移斷層 strike-slip、傾向滑移斷層 dip-slip、張裂斷層 tensile-fault）產生各方向位移分量，以計算初始海嘯波形，而該模式需藉由八個參數來推求，分別為：震央位置（lon, lat）、震源深度（focal depth）、斷層（破裂）面長度（length）與寬度（width）、斷層走向角（strike）、傾斜角（dip）、滑移角（rake or slip）及錯動量（dislocation）等。

（二）海底山崩

山崩發生之機制為向下驅動力大於斜坡的抵抗力，當海底山崩土體滑動，將帶動水體移動而產生海嘯。海底山崩產生海嘯之機制主要可參照 Watts et al.（2005）建立之數學模型推論或是 Grilli and Watts（2005）、Enet and Grilli（2007）藉由水下滑坡實驗所提出的理論與波形控制方程，透過方程式建立初始海嘯波形。公式所需參數有：滑動塊體初始中心點位置（X、Y 座標）、塊體長度與寬度、塊體最大厚度、塊體最厚處之初始水深、坡度角、滑移方位、塊體移動距離、水動力拖曳係數、水動力附加質量係數、比密度。

（三）海底火山

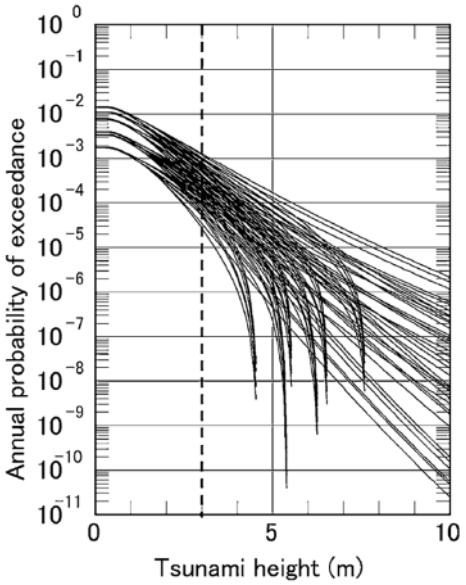
海底火山海嘯產生之機制包含水下噴發、火山碎屑流、側邊坡不穩定之倒塌、水下火山口崩塌等，由於機制之複雜性將產生不同類型的波，也因此此類型海嘯源之 PTHA 發展較為緩慢。而與地震產生之海嘯相比，水下火山噴發引致之海嘯特點為通常具有短波、更大分散性及有限的遠

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 31-38
http://www.sinotech.org.tw/journal/

場效應。水下火山噴發引致之海嘯，可採用 Le Méhauté and Wang（1996）之研究，其為以半經驗式所推導出之初始海嘯波形，Torsvik et al.（2010）針對水位不連續部分修改初始海嘯波形經驗式；而以上經驗式所需參數分別為：火山口中心點位置（X、Y 座標）、火山口深度、初始位移水位面特徵半經、爆發後初始水位面之遞減率、初始位移面最大位移量。火山側邊坡倒塌及水下火山口崩塌之機制則與其他山崩誘發的海嘯機制相似，處理上可視為塊體滑落引致之海嘯。

三、機率式海嘯危害度曲線建立

機率式海嘯危害度分析之相關研究在臺灣相對少見，在方法建立的過程中，主要參考國外文獻（如日本、美國）作為依據。日本作法主要參考文獻為 Annaka et al.（2007）（圖 2），該文使用邏輯樹（logic tree）方法，來進行日本太平洋沿岸地區之機率式海嘯危害度評估，海嘯源僅考慮地震引發之海嘯；美國作法則主要參考美國太平洋瓦電公司 PG&E 之研究報告（2010），該文獻主要為建立 Diablo Canyon 核能電廠（DCPP）之機率式危害度曲線分析方法，海嘯源除考慮地震（earthquakes）外，亦將海底山崩（landslides）及暴潮與潮汐（storms & tides）納入考慮，使整體的分析更趨完整。以下將以美國 PG&E（2010）研究報告為主要參考並以日本做法為參考輔助，進行地震海嘯源及海底山崩海嘯源之 PTHA 曲線詳細建立方法之說明。



資料來源：Annaka et al., 2007

圖 2　海嘯危害度曲線

（一）PTHA 理論介紹

PTHA 計算概念主要為透過數值模式計算各情境下海嘯波高值，再將各海嘯波高結果利用統計方法進行機率分析。PG&E（2010）研究報告假設海嘯波高分布為對數常態分布（lognormal distribution），在此情況下，海嘯波高超越條件機率可表示為：

$$P(W_{tsu} > z|M, Loc) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln z - \ln\left(\widehat{W}_{tsu}(M,Loc)\right)}{\sigma_{EQK}}\right) \quad \text{（式 1）}$$

其中，$W_{tsu}(M,Loc)$ 為在地震規模 M 及震源於 Loc 位置之條件下的中值波高（median wave height），σ_{EQK} 為標準差（standard deviation），Φ 代表累積常態分布函數（cumulative normal distribution）。當資料樣本數較少之情況下，海嘯波高年超越機率可表示為：

$$\nu_{EQK}(W_{tsu} > z) = \sum_{i=1}^{N_{FLT}} \sum_{j=1}^{NS_i} rate_{ij}\, P(W_{tsu} > z|M_{ij}, Loc_{ij}) \quad \text{（式 2）}$$

其中，$rate_{ij}$ 為在第 i 個地震源所引發第 j 個情境的海嘯發生機率。若為地震所引發之海嘯，rate 則為計算地震年發生率，即地震復現年之倒數，此部分可利用 Gutenberg-Richter 關係式求得，或是藉由板塊運動速率之方式間接推得。

當海嘯源為海底山崩時，計算之理論及方法與地震引發海嘯之方式相似，仍需透過海嘯模式模擬得海嘯波高，而其年發生率（rate）則需透過

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 31-38
http://www.sinotech.org.tw/journal/

現地調查（如：海洋沉積物取樣）並配合試驗分析之方式取得。

不確定性之部分，根據 Thio et al.（2010）可分為兩種：偶然不確定性（Aleatory uncertainty）與認知不確定性（Epistemic uncertainty）。偶然不確定性屬於數值產生的誤差，主要來自於模式的不確定性，因此藉由模擬結果與實測資料計算兩者間之標準差進行模式不確定性的判斷；認知不確定性為對於事物的了解不足，例如現階段學界對於地震發生之機制與過程尚未完全了解，因此在斷層參數的設定上會因知識不足而難以決定，此時則透過建立邏輯樹的方式來處理。

（二）工作方法與流程

不論海嘯源的類型為何，不同類型之海嘯源皆各自有其獨立之海嘯危害度曲線，海嘯危害度曲線繪製流程如圖 3。首先依據不確定性將工作分為兩大部分，第一部分為標準差（σ_{EQK}）之計算，需先進行歷史海嘯事件之模擬，並進一步比較多個潮位站之實際觀測資料與模式模擬之最大海嘯波高，藉由以下公式得標準差：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad （式 3）$$

其中，xi 為各潮位站觀測最大波高值與模擬最大波高值之比值，且因假設海嘯波高呈現對數常態分布，而需將此值取對數，$\bar{x}$ 為 xi 之平均值，n 為樣本數目。

標準差代表之意義為考慮偶然不確定性，即數值模式的不確定性。標準差越大代表準確度越低，相對的不確定性越高；反之，標準差越小代表準確度越高，不確定性越低。歷史事件的選擇上，由於臺灣海嘯事件發生之次數較少且需有實測水位紀錄的情況才能進行最大波高比對。一般而言我們會使用離臺灣較近且具有較多實測水位資料之 2011 年日本東北地方太平洋近海地震事件，而若需選擇臺灣附近之地震海嘯事件，則會選擇 2006 年屏東海嘯事件，但後者引起之海嘯波高較小，距震央最近之後壁湖潮位站最大海嘯波高也僅有約 0.5m，因此在潮位站選用上有些潮位站會有無海嘯波紀錄之情形。

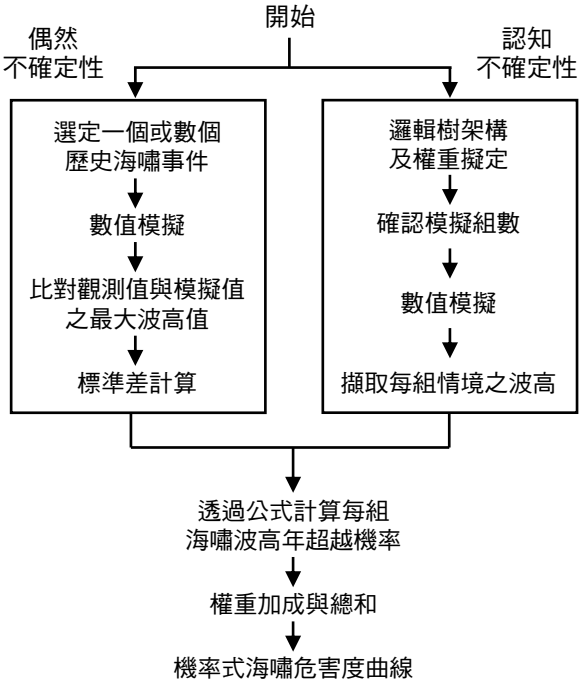


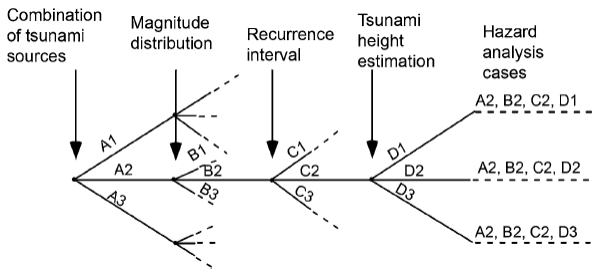
圖 3　PTHA 工作流程

第二部分則為邏輯樹（logic tree）之建置及各組震源參數之海嘯模擬。此部分為處理認知不確定性，由於對地震參數之設定上的認知不足，若要決定單一震源會有困難度而無法任意給定，需透過該領域之專家學者們依照斷層特性建立邏輯樹，並經過多次討論決定各邏輯樹分支之權重。邏輯樹整體架構及其節點將於下節中詳細說明。

最後，將邏輯樹各分支情境海嘯模擬結果代入（式 1）及（式 2）得各組海嘯波高年超越機率，再乘上各分支權重並加總，即可得到各海嘯源於目標計畫位置之機率式海嘯危害度曲線，而各不同類型之海嘯源也將有其各自獨立之危害度曲線。

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 31-38
http://www.sinotech.org.tw/journal/

（三）邏輯樹建立



資料來源：Annaka et al., 2007

圖 4　PTHA 邏輯樹示意圖

邏輯樹的建構包含節點與分支，每一節點代表某一參數或方法，即代表每一分支為不同參數或方法情況下之不同可能性。建立上之概念可參考圖 4，其為 Annaka et al.（2007）之研究，共分為四個節點，分別為海嘯源、地震矩規模分布、地震復現年、海嘯波高數值模擬方法等，而這些節點決定之方法可依各計畫之地理環境及目標需求而調整其複雜度，並需透過專家學者共同討論而完成。

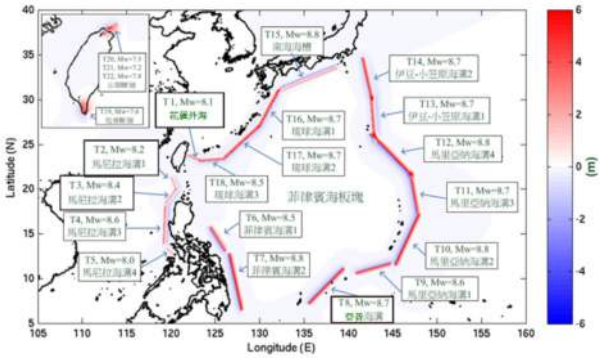
關於地震海嘯邏輯樹之基本架構，以下針對常見作為節點的部分進行說明：

1. 海嘯源

臺灣地區可參考科技部（2011）曾針對可能造成侵臺之海嘯源進行擬定，分為遠距之七大海溝（琉球、馬尼拉、菲律賓、亞普、馬里亞納、伊豆—小笠原、南海海溝）、近域之兩大斷層（恆春、山腳斷層），震源位置如圖 5，此節點亦可納入考量系統性震源之分段組合而細分各斷層分段破裂模式。例如科技部報告中馬尼拉海溝震源又分為 4 個破裂分段，即 T2、T3、T4、T5，可能單獨破裂也能設定有連續破裂（例如：T3+T4）之情形。

2. 地震矩規模分布

此參數為根據斷層面之長、寬或是面積透過經驗式進行推估，依不同經驗式之選擇而有不同地震矩規模結果，而常使用之地震矩規模推估經驗式有：Wells & Coppersmith（1994）、Strasser et al.（2010）、Yen & Ma（2011），因各回歸經驗式所使用之資料庫不同，可依計畫地區適用性做選擇。



資料來源：http://tsunami.ihs.ncu.edu.tw/tsunami/tsunami201701.htm

圖 5　嚴重影響臺灣之可能海溝及斷層帶海嘯震源位置圖

3. 地震復現期

地震復現期之計算目前常見方法有：Gutenberg-Richter 關係式，或是藉由板塊運動速率間接推得。

Gutenberg-Richter law（GR law）為由已知地震矩規模，推求其對應之復現期。首先需先蒐集地震目錄，計算劃定範圍之隱沒帶地震活動度，回歸成各隱沒帶海溝段之 G-R law 如下式：

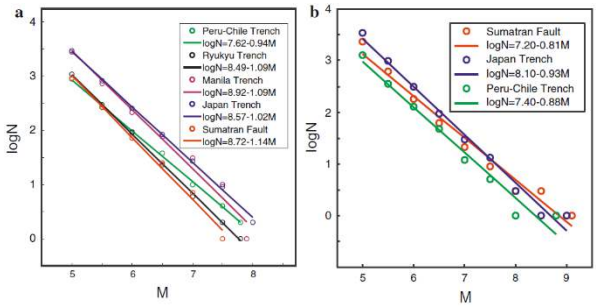
$$\log_{10} N = a - bM \qquad （式 4）$$

其中，N 為地震矩超過 M 之地震次數，M 為地震矩規模，a、b 為各海溝回歸之係數。圖 6 為 Jing et al.（2013）對於各海溝段地震活動度所回歸出之結果，其中包含馬尼拉海溝、琉球海溝等，再藉由下式推得地震重現期：

$$P_M = \frac{T}{N} \qquad （式 5）$$

其中，T 為地震紀錄時間（年），P_M 為地震重現期（年）。G-R law 回歸關係之 a、b 值將因選擇之地震目錄而有所不同。

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 31-38
http://www.sinotech.org.tw/journal/



資料來源：Jing et al., 2013

圖 6　各海溝之 G-R 關係回歸圖

另一種推求地震復現期方法為藉由板塊相對運動速率推得，由於大多數地區之地震活動歷史紀錄太短，在推求大地震發生頻率時，並無足夠把握來估計，因此我們可以藉測量主要斷層和板塊邊界的長期平均滑動速率進行復現年之估計。

4. 錯動量分布模式

在執行海嘯模擬工作時，會先推算該地震斷層面造成之錯動量，方能計算位於海床位置之海底變位量，並進而推求初始波高才能進行後續之海嘯模擬。而錯動量的分布可分為平均錯動模式及地栓（asperity）錯動模式，因真實地震之破裂情形，能量可能會集中在某些區塊，而地栓的位置就是斷層面上能量釋放較大、錯動量較大的區塊。

首先，平均錯動量之計算方式，需先藉由已知地震矩規模 Mw 經由公式（式 6），轉換為地震矩 M_0：

$$M_W = \frac{2}{3}\log_{10}(M_0) - 10.73 \quad （式 6）$$

再參考地震學理論基礎通式（式 7）求得錯動量：

$$M_0 = \mu A \bar{D} \quad （式 7）$$

其中，μ 為剛性係數（一般設定為 3~6×10^{10} N/m^2），A 為破裂面積（km^2），$\bar{D}$為平均錯動量（m）。

地栓設置準則可參考日本地震調查研究推進本部之 Recipe（Irikura and Miyake, 2011）方法；地栓錯動量為平均錯動量之 1.5 倍，背景區塊（即地栓區塊以外之剩餘區域）錯動量則為平均錯動量之 0.875 倍，使得地栓錯動模式與平均錯動模式之地震矩相等，並設定單一地栓區塊面積占全破裂面積之 20%，且維持長寬比例與原破裂面積之長寬比例相同。地栓放置的位置則先系統性簡化將斷層面劃分成若干區塊，以六個區塊為例，分別將能量集中在左上緣、中上緣、右上緣、左下緣、中下緣、右下緣。

錯動量分布模式之邏輯樹節點設置，由於若考慮地栓效應則會比只考慮平均錯動模式時增加 6 個分支（以 6 個區塊為例），執行工作中有時考量計畫時程，常將距離計畫區域較遠域而地栓效應對海嘯波影響性較小之海溝或斷層不予考慮地栓錯動模式，以此增快工作進度，對於結果之影響也不大。

海底山崩海嘯邏輯樹之基本架構部分，通常亦須先劃分海底山崩海嘯源，並以山崩體厚度及山崩復現期作為後續節點；上述參數需根據現地調查結果擬訂，調查工作包含地形測繪判釋、地球物理探查、海洋沉積物取樣並執行實驗室試驗。復現回歸期之計算方式，可利用海洋岩心中有孔蟲進行碳十四定年，進而推算山崩區域之平均沉積速率，再藉海洋岩心判斷出事件層分布深度後，推算各海底山崩之可能復現年。

四、結　論

本文旨在建立機率式海嘯危害度分析方法，過程中參考美國及日本相關文獻，但本文以美國 PG&E（2010）為主要架構參考基礎。而就現階段而言，PTHA 遇到的重大挑戰即是缺乏海嘯事件紀錄（尤其海底山崩海嘯與海底火山海嘯），另一個則為復現期的推算，此參數有較大之不確定

性。地震海嘯危害度曲線之做法相較於其他海嘯源完整，不論是歷史海嘯資料完整性、邏輯樹節點設置或是復現年評估方法，各部分之調查資料及文獻皆較海底山崩及海底火山海嘯源更為完整，在執行上參數之不確定性也相對較低。另外，邏輯樹之權重分配則需透過專家學者相互討論並決定，但基本上會先以權重平均分配之方式處理，除非在特定節點分支上，專家學者依照現有知識判斷其發生之機率微乎其微，或是以物理機制觀點判斷其發生機率可能較不合理時，才會進行各分支權重之調整。

機率式海嘯危害度分析方法因於邏輯樹建構上較為複雜且需模擬之組數較定率式增加許多，整體工作執行將花費較長的時間，但也因考慮各種不確定性，不再是以一個情境設定決定結果而讓分析更加完整。另外藉由研究區域中特定位置之機率式危害度曲線，可得知在特定年發生機率情況下之對應海嘯波高值；對於工程設計上，可由保護年限的觀點來進行海嘯危害度分析，相較於定率式海嘯危害度分析更能提供同時考慮工程經濟的情況。應用上除了知道特定位置之海嘯危害度曲線之外，也能配合概率淹沒圖來呈現，即為以一個研究區域面的角度，每年超越機率為特定值時相對應之溢淹深度，更進一步也能結合城市的人口與基礎設施計算整體的海嘯脆弱度等。

參考文獻

Annaka, T., Satake, K., Sakakiyama, T., Yanagisawa, K., & Shuto, N. (2007). Logic-tree approach for probabilistic tsunami hazard analysis and its applications to the Japanese coasts. In Tsunami and its hazards in the Indian and Pacific Oceans (pp. 577-592). Birkhäuser Basel

Davies, G., & Griffin, J. (2019). Sensitivity of Probabilistic Tsunami Hazard Assessment to Far-Field Earthquake Slip Complexity and Rigidity Depth-Dependence: Case Study of Australia. Pure and Applied Geophysics, 1-28

Enet, F., & Grilli, S. T. (2007). Experimental study of tsunami generation by three-dimensional rigid underwater landslides. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 133(6), 442-454

Grezio, A., Babeyko, A., Baptista, M. A., Behrens, J., Costa, A., Davies, G., ... & Harbitz, C. B. (2017). Probabilistic tsunami hazard analysis: Multiple sources and global applications. Reviews of Geophysics, 55(4), 1158-1198

Grilli, S. T., & Watts, P. (2005). Tsunami generation by submarine mass failure. I: Modeling, experimental validation, and sensitivity analyses. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 131(6), 283-297

Irikura, K., & Miyake, H. (2011). Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios. Pure and Applied Geophysics, 168(1-2), 85-104

Jing, H. H., Zhang, H., Yuen, D. A., & Shi, Y. (2013). A revised evaluation of tsunami hazards along the Chinese coast in view of the Tohoku-Oki Earthquake. Pure and Applied Geophysics, 170(1-2), 129-138

Le Méhauté, B., & Wang, S. (1996). Water waves generated by underwater explosion (Vol. 10). World Scientific

Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the seismological society of America, 75(4), 1135-1154

Pacific Gas & Electric Company(PG&E) (2010). Methodology for Probabilistic Tsunami Hazard Analysis：Trial Application for the Diablo Canyon Power Plant Site

Strasser, F. O., Arango, M. C., & Bommer, J. J. (2010). Scaling of the source dimensions of interface and intraslab subduction-zone earthquakes with moment magnitude. Seismological Research Letters, 81(6), 941-950

Thio, H. K., & Somerville, P. (2009). A probabilistic tsunami hazard analysis of California. In TCLEE 2009: Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment (pp. 1-12)

Torsvik, T., Paris, R., Didenkulova, I., Pelinovsky, E., Belousov, A., & Belousova, M. (2010). Numerical simulation of a tsunami event during the 1996 volcanic eruption in Karymskoye lake, Kamchatka, Russia. Natural Hazards and Earth System Science, 10(11), 2359-2369

Watts, P., Grilli, S. T., Tappin, D. R., & Fryer, G. J. (2005). Tsunami generation by submarine mass failure. II: Predictive equations and case studies. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 131(6), 298-310

Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bulletin of the seismological Society of America, 84(4), 974-1002

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 31-38
http://www.sinotech.org.tw/journal/

Yen, Y. T., & Ma, K. F. (2011). Source-scaling relationship for M 4.6-8.9 earthquakes, specifically for earthquakes in the collision zone of Taiwan. Bulletin of the Seismological Society of America, 101(2), 464-481
吳祚任（2011）台灣潛在高於預期之海嘯模擬與研究－地震海嘯模擬結果報告書
馬婉華（2015）機率式海嘯危害度分析方法建立－應用於核三廠
蕭士俊（2014）海嘯波高波傳機率模型之建置研究
蕭士俊（2015）海嘯波高波傳機率模型之建置研究

財團法人中興工程顧問社已獲得專利如下，若有需要，歡迎洽詢。
聯絡電話：(02) 8791-9198 轉 467 陳小姐
E-MAIL：louise@sinotech.org.tw
網　　址：http://www.sinotech.org.tw

序號	專利名稱	發明字號	核准地區	種類
1	雙封塞水力試驗測量裝置	新型第 M 418283 號	臺灣	新型
2	岩盤入滲量量測裝置	新型第 M 418937 號	臺灣	新型
3	自動化地表滲水量測裝置	新型第 M 420684 號	臺灣	新型
4	消能型金屬接合板消能機構	發明第 I 449832 號	臺灣	發明
5	氣體採樣裝置與氣體採樣方法	發明第 I 522605 號	臺灣	發明
6	高濃度藻類的污水培養裝置與方法	發明第 I 534103 號	臺灣	發明
7	感測裝置及土石流監測系統	新型第 M 550399 號	臺灣	新型
8	災害指示裝置以及災害應變系統	新型第 M 551733 號	臺灣	新型
9	多功能熱反應裝置	發明第 I 617357 號	臺灣	發明
10	邊坡感測裝置	新型第 M 561293 號	臺灣	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	臺灣	新型
12	現地表層沖刷無線監測系統	新型第 M 561201 號	臺灣	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	臺灣	發明
14	地層氣體紅外線光譜檢測系統	新型第 M 563548 號	臺灣	新型
15	高性能等時太陽能地層洩氣系統	新型第 M 565237 號	臺灣	新型
16	高精度無線節能傾斜感測系統	新型第 M 569420 號	臺灣	新型
17	監測框架	設計第 D 193440 號	臺灣	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	臺灣	新型
19	用來提升點雲精度之方法與裝置	發明第 I 676151 號	臺灣	發明
20	分離式封塞水力試驗測量系統	新型第 M 586745 號	臺灣	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	臺灣	新型
22	水砂盒	新型第 M 594123 號	臺灣	新型
23	隧道光標定位發射器	發明第 I 696807 號	臺灣	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	臺灣	發明
25	水砂盒	設計第 D 206644 號	臺灣	設計
26	環境資料之前處理系統	新型第 M 601347 號	臺灣	新型
27	建物震後性能診斷系統	新型第 M 601845 號	臺灣	新型
28	隧道空間紅外線光譜儀氣體量測方法	發明第 I 707132 號	臺灣	發明
29	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	臺灣	新型

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 39-47
http://www.sinotech.org.tw/journal/

水土保持防砂設施淤砂坡度評估

林伯勳* 許振崑** 賴承農*** 謝孟荃**** 高伯宗*****

摘 要

農委會水保局於民國 103 年至 108 年間，針對轄管重要集水區完成 4,406 座防砂設施，完成資料盤點與建置。本文係先介紹說明前述水保局防砂設施空間分布及功能評估狀況；接著，以流域尺度為單元，針對淡水河等五大流域水土保持工程施作點位，探討防砂設施溪床構築防砂壩後之淤砂坡度與原溪床坡度之比值，以及與設計淤砂坡度之差異比值狀況，探討三者關係。文中以濁水溪流域為案例，藉由蒐集原始溪床坡度、溪流淤砂坡度等資料，建立相關淤砂坡度經驗式，供未來設計分析應用。

關鍵字：水土保持設施、溪床坡度、淤砂坡度

一、前 言

臺灣自然環境欠佳，地質原本脆弱，又經過民國 88 年 921 大地震影響，造成地層表土鬆動，加上颱風豪雨事件頻仍，全臺各地引發嚴重土石災害。農委會水保局為保護山坡地範圍內人民生命財產安全，投入大量經費，控制集水區水上游不穩定土砂，加強災害環境復育改善，以維護地方環境居住安全及經濟產業經營與發展。

為有效抑制集水區上游土砂下移，影響下游保全對象的安全，防砂設施為集水區治理強而有力工具；由於防砂設施有其使用年限，結構材料易隨時間之質變老化，加上近年極端水文事件頻繁，對防砂設施造成極大的衝擊。鑑此，為確保工程構造物於完工後能持續發揮功能及抑制二次災害發生，水保局由民國 56 年起即辦理一系列的工程構造物調查，戮力及落實工程資產保存與管理；自民國 83 年起水保局及其各分局亦針對濁水溪流域、大甲溪流域、中部地區災後集水區及各分局轄區範圍，辦理治山防災構造物相關現場調查工作。民國 103 年起，水保局（2014）辦理重要治理區構造物調查，另為更有效管理構造物及資產維護，水保局及所屬其各分局自民國 104 年首先針對影響溪床安定性較大之防砂設施，屬於現況壩長 15 公尺且有效壩高（含基礎）5 公尺以上之防砂壩及固床工等防砂設施，進行調查及資料建置工作，至民國 108 年底完成全臺調查工作及資料建置（水保局，2020）。

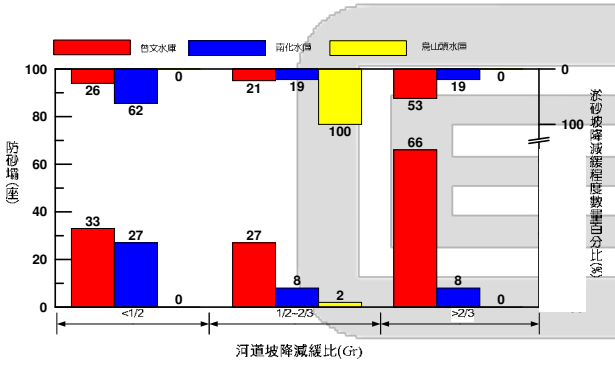
水土保持手冊（2017）說明防砂設施規劃設計原則，進行計畫淤砂坡度之設計，淤砂坡度係指防砂壩上游蓄積土砂所形成新的溪床坡度，淤砂坡度範圍即為防砂壩影響或防護範圍，與系列防砂壩之間距設計關係密切，是防砂壩設計時極為重要的參數之一；其中，針對淤砂坡度設計內

* 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
**** 行政院農業委員會水土保持局科長
***** 行政院農業委員會水土保持局組長

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 39-47
http://www.sinotech.org.tw/journal/

容提及「計畫淤砂坡度一般採用原河床坡度1/2~2/3間，河床粒徑粗大者採用2/3，粒徑較小者採用1/2」，其意義在於降低及舒緩溪床坡降，可有效削減河道輸砂與減少土砂流出量，該項比值亦可間接反應防砂設施現況淤砂情況是否已達預定之保育治理成效。

水保局（2012）以曾文、南化、烏山頭水庫集水區構造物現況調查資料，探討構造物溪床淤砂坡度及原溪床坡度之比值（定義為河道坡降減緩比，S_r），說明溪床坡降是否趨於穩定或達至預定之設計目標，如圖1。由圖可知，三座水庫集水區已淤滿初期之防砂壩，僅部分符合水土保持規範之設計淤砂減緩範圍（$1/2 \leq S_r < 2/3$），其餘大部分資料皆未落入；其中河道坡降減緩比≧2/3者，係因防砂設施多構築上遊陡度處，攔阻較粗粒料土石，調整坡度有限；河道坡降減緩比<1/2者，係河道下游緩坡或土砂堆積段且採序列式設置。由此可知，河道坡降減緩比係與構築於原溪床坡度及設置區位、上遊土砂材料性質及防砂設施組合類型（如獨立壩、序列性壩）有關。



（摘自水保局，2012）

圖1　曾文南化烏山頭水庫集水區河道坡降減緩分布圖

本文係先介紹近期全臺防砂設施調查，說明其調查分布及功能評估狀況；接著，以淡水河等五大流域為研究範圍，針對溪床構築防砂設施後溪床淤砂坡度，與原溪床坡度以及設計淤砂坡度，探討三者關係，遂進行濁水溪流域淤砂坡度經驗式之產製，以供未來設計分析應用。

二、全臺防砂設施調查成果

依據水保局民國103年至108年防砂設施調查計畫執行成果，由22個計畫所彙整資料統計發現，水保局防砂設施調查數量總數達4,652座，並經檢核上述計畫執行需求目標，剔除不同版次調查重覆部分，統計各分局內防砂設施調查數量總計共有4,406座。透過水保局工程管考系統以及各蒐集報告資料查詢防砂設施分布範圍進行數量統計，整體而言，各縣市完成數量區分，共計調查16個縣市，以臺中市722座最多，而基隆市僅有1座最少。統計各縣市防砂設施數量與分布點位如表1及圖2所示。說明如后。

表1　全臺防砂設施調查數量統計表

項次	縣市	調查數量（座）	小計（座）	百分比（%）
1	宜蘭縣	233	1,066	24.19
2	基隆市	1		
3	新北市	208		
4	桃園市	269		
5	新竹縣	355		
6	苗栗縣	243	965	21.90
7	臺中市	722		
8	彰化縣	10	1,096	24.88
9	南投縣	685		
10	雲林縣	24		
11	嘉義縣	377		
12	臺南市	329	867	19.68
13	高雄市	262		
14	屏東縣	276		
15	臺東縣	178	178	4.04
16	花蓮縣	234	234	5.31
總計（座）			4,406	100

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 39-47
http://www.sinotech.org.tw/journal/

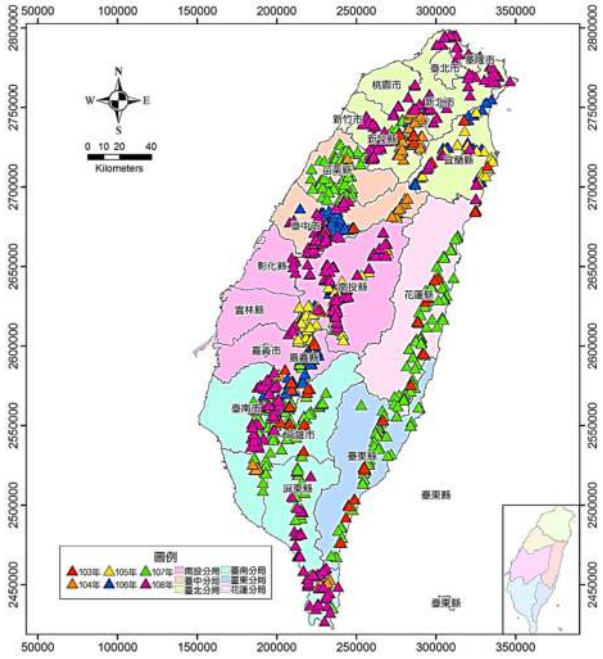
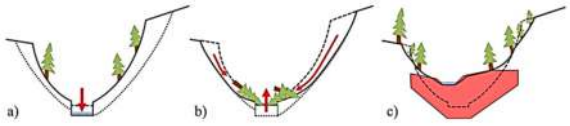


圖 2　全臺防砂設施調查點位分布圖

三、淤砂坡度探討

一般而言，從事集水區保育治理及防砂設施設計工作，對於溪床淤砂坡度控制及掌握係屬土砂防治及調節重要環節之一。當從事野溪治理設計時，若可正確估算其淤滿時之淤砂坡度（即為防砂設施之上游河床坡度）或控制於預期合理淤砂坡度範圍，除可獲得較佳的河床穩定效果外，對於治理工法設計調整與整治經費估算亦有助益。圖 3 溪床築構防砂設施穩定坡角示意圖；由圖可知，溪床未構築防砂設施前，呈自然合理下刷狀況且河床穩定均夷，如圖 3a；若遭遇洪水事件，致溪床嚴重下刷且侵蝕邊坡下方坡角，造成鄰近邊坡失穩及崩塌塊體滑落，如圖 3b；當溪床築構防砂設施後，壩後淤砂逐漸蓄積，坡降亦隨之調整至原溪床坡度時，其鄰近邊坡將恢復至原自然安定狀態，如圖 3c。



（摘自 Piton et al., 2016）

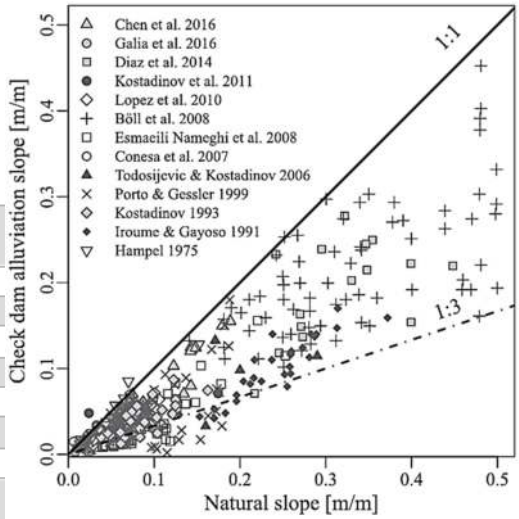
圖 3　溪床築構防砂設施穩定坡角示意圖

國內外眾多學者亦投注相當多淤砂坡度研究工作（王士紘，1974；山地農牧局，1982；林寶琴，1982；李榮珍，1984；吳平其，1985；何智武，1986；周明坤，1987；葉昭憲，1988；阮香蘭，1993；江祥平，1998；蕭惠民，2012；Guillaume et al., 2016）；一般而言，淤砂坡度比（S_r）可定義為溪床淤砂坡度（S）與原溪床坡度（S_0）之比值，如下式。

$$S_r = \frac{S}{S_0} \qquad (1)$$

式中，S 為溪床淤砂坡度；S_0為原溪床坡度。

由上式可知，當 $S_r < 1$代表構築後防砂設施具坡降減緩效果。Piton et al.（2016）曾整理世界各國 428 處，溪床構築防砂壩後之淤砂坡度與原溪床坡度之比值，發現值域判於 1.0~0.33 之間，如圖 4 所示。



（摘自 Piton et al., 2016）

圖 4　防砂設施構築於溪床之淤砂坡度與原溪床坡度關係圖

何智武（1986）曾彙整美國、日本及臺灣國等地區淤砂坡度研究調查資料，以美國而言，淤砂坡度與原溪床坡度之比值，細粒質者為 0.37，組粒質者為 0.49，一般範圍大致介於 0.22~0.66 之間。就日本而言，以松村和樹等（1988）所著之「土砂災害調查」為主，防砂壩淤砂坡度與原溪

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 39-47
http://www.sinotech.org.tw/journal/

床坡度之比較值，細粒料者為 1/2，粗粒料者介於 2/3~3/4，大致溪床土砂環境穩定後，其值約介於 0.5~0.75 之間。在國內山地農牧局（1982）及王士紘（1974）研究報告，彙整民國 70 年調查 1,385 座防砂壩，經分析顯示，其淤砂坡度與原溪床坡度之比較值約判於 0.54~0.67。上述研究成果大致顯示，防砂壩構築於野溪溪床愈陡處，淤砂坡度減緩愈為明顯。不同地區淤砂坡度比（S_r）平均值域，整理列於表 2。

表 2　不同地區淤砂坡度比（S_r）值域彙整表

研究地區	研究者	淤砂坡度比（S_r）平均值域
世界各國	Piton et al.（2016）	0.33~1.00
美國	何智武（1986）	0.22~0.66
日本		0.50~0.75
臺灣		0.54~0.67

考量實務工程應用及參數取得之可操作性，針對防砂設施設置前之原溪床坡度及設置後之現況所量測淤砂坡度進行相關性評估，主要探討因子舉凡有防砂設施上游之集水區面積、河幅寬、河道蜿蜒性、崩塌砂源、河床質粒徑；不同研究學者之所探討因子，彙整如表 3 所示（水保局，2017）。若暫不考量溪床流況條件及溪床堆積材料特性，參考李榮珍（1984）、王士紘（1974）以及何智武（1986）等研究成果進行迴歸分析，驗証其防砂壩之淤砂坡度與原淤砂坡度之比值，確實與原淤砂坡度有關；其相互關係式，公式如下：

$$S / S_0 = kS_0^{-a} \qquad (2)$$

式中，S 為現況淤砂坡度；S_0為原溪床坡度；k 與 a 為回歸係數，並與集水區特性有關。

表 3　影響淤砂坡度相關因子表

項次	研究者	坡度（%）		材料粒徑		河寬（m）		流量		防砂設施尺寸	防砂設施距離
		原河床坡度	淤砂坡度	原河床	構築後	原河床	構築後	原河床	構築後		
1	Amidon（1947）	v	v	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Baloiu（1972）	v	v	-	-	-	v	-	-	-	-
3	Brahms（1753）	-	v	v	v	v	v	-	-	-	-
4	Guillaume et al.（2016）	v	v	-	-	-	-	-	-	-	-
5	Heede（1965）	v	v	-	-	-	-	-	-	-	-
6	Kaetz&Rich（1939）	v	v	v	-	-	-	-	-	-	-
7	Kimura（1956）	v	v	v	v	v	v	-	-	-	-
8	Sugio（1973）	v	v	-	-	v	-	v	-	-	-
9	Tani（1952）	v	v	-	v	-	v	-	-	-	-
10	Tsuchiya（1969）	-	v	-	-	-	-	v	v	-	-
11	Woolhiser（1965）	v	v	-	-	v	v	v	v	-	-
12	山口（1985）	v	v	v	v	v	v	-	-	-	-
13	王士紘（1974）	v	v	v	v	v	v	-	-	v	-
14	臺灣省山地農牧局（1967）	v	v	-	-	-	-	-	v	-	-
15	臺灣省山地農牧局（1973、1982）、林務局（1991、1992）	v	v	-	-	-	-	-	-	-	-
16	何智武（1986）	v	v	v	v	v	v	v	v	-	-
17	何智武、阮香蘭（1993）	-	v	v	-	v	-	v	-	-	-
18	何智武、段錦浩、施東榮（1976）	v	v	-	-	-	-	-	-	v	-
19	吳平其（1985）	v	v	-	-	-	-	-	-	v	v
20	李榮珍（1984）	v	v	-	-	-	-	-	-	-	-
21	莊榮興（2002）	-	v	-	v	-	-	-	v	-	-
22	葉昭憲（1988）	v	v	-	-	-	-	-	-	v	-
23	葉昭憲、鄭永勝（1988）	v	v	-	-	-	-	-	-	v	-
24	蕭惠民（2012）	v	v	-	-	-	-	-	-	-	-

（摘自水保局，2017）

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 39-47
http://www.sinotech.org.tw/journal/

鑑於上述課題，本文採流域尺度為單元，針對淡水河等五大流域水土保持工程施作點位，探討防砂設施溪床構築防砂壩後之淤砂坡度與原溪床坡度之比值，以及與設計淤砂坡度之差異比值狀況；茲彙整水保局淡水河等五大流域內曾辦理現況調查之防砂設施共 2,278 座（含防砂壩與固床工），其中可與竣工資料比對者，共計 1,804 座，各流域統計數量如表 4。以濁水溪流域已完成調查防砂設施數量較其他流域筆數多，先以濁水溪流域為案例，產製流域淤砂坡度經驗式，分析成果，詳見如后。

表 4　淡水河等五大流域防砂設施構造物資料統計表

項次	流域別	防設砂施（座）
1	淡水河	238
2	大甲溪	494
3	濁水溪	592
4	曾文溪	346
5	高屏溪	134
合計（座）		1,804

（一）防砂設施之溪床淤砂坡度與設計淤砂坡度之差異性

表 5 及圖 5 分別為淡水河等五大流域防砂設施之設計淤砂坡度及溪床淤砂坡度之比較表及關係圖；其觀察結果如下：

1. 觀察淡水河等五大流域，其溪床淤砂坡度未超過設計坡度值數量比例，皆大於 60%；其中以淡水河最大，達至 84.3%。
2. 觀察淡水河等五大流域溪床淤砂坡度超過設計坡度值數量比例，多數發生於防砂設施構築於溪床坡度 20% 以下。

綜以上述，淡水河及高屏溪之設計淤砂線較符合現況；其他地區差異較大之可能原因，推測恐受其區域性地形及地質、部分水土保持設施構築於較緩溪床坡降，加上近年氣候變遷及上游土砂供應不均等因素所導致。

（二）防砂設施溪床淤砂坡度與原溪床坡度之差異性

表 6 及圖 6 分別為五大流域防砂設施淤砂坡度比（S_r）數量比例表及關係圖，其所占數量百分比皆大於 80%，其中以高屏溪最大，其次為大甲溪、淡水河、曾文溪以及濁水溪；另再統計五大流域平均淤砂坡度比，以高屏溪及淡水河流域坡度減緩效果最佳，其次曾文溪、濁水溪以大甲溪等三大流域。

本文根據水土保持技術規範（2014）訂定野溪構築防砂壩時，設計淤砂坡度以原始溪床之 1/2~2/3 為原則，據此探討各流域現況淤砂坡降相對於原溪床坡度，落於此一坡降區間之所占數量比例整理於表 7。茲將相關觀察條列如下：

1. 五大流域符合水土保持技術規範原則，表示淤砂坡度比介於 1/2~2/3 者，所占比例介於 5.2%~16.5%，僅約二成。
2. 五大流域淤砂坡度比小於 1/2 者，所占比例介於 49.1%~78.1%；大於 2/3 者，所占比例介於 16.7%~34.4%

由表可知，針對淤砂坡度比介於 1/2~2/3 之比例較低，而大部分淤砂坡度可調整至原河床坡度之 1/2 以下，現地大多屬細粒質為主控，是項觀察結果，可做後續保育治理規劃參考。

表 5　五大流域防砂設施溪床淤砂坡度與設淤砂坡度比較表

項次	流域	溪床淤砂坡度未超過設計淤砂坡度比例（%）	溪床淤砂坡度超過設計淤砂坡度比例（%）
1	淡水河	84.3%	15.7%
2	大甲溪	61.5%	38.5%
3	濁水溪	63.1%	36.9%
4	曾文溪	70.0%	30.0%
5	高屏溪	82.7%	17.3%

中興工程，第152期，2021年7月，PP. 39-47
http://www.sinotech.org.tw/journal/

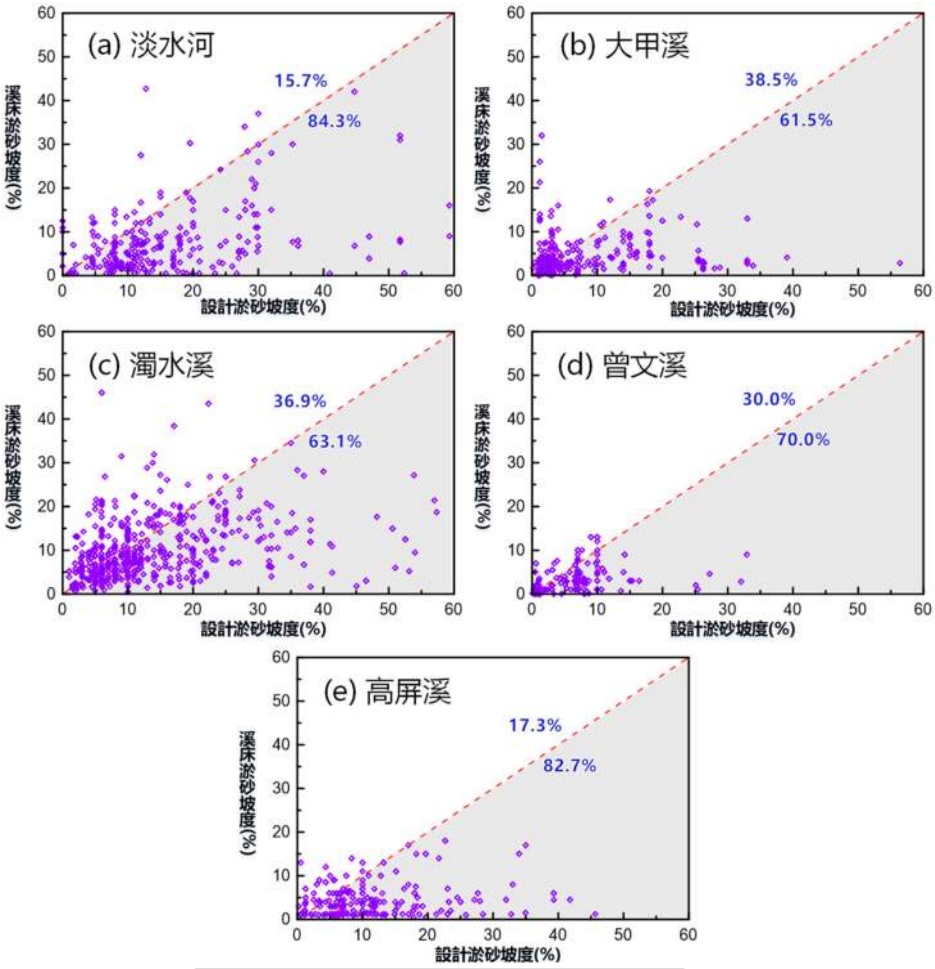


圖 5　五大流域防砂設施溪床淤砂坡度與設計淤砂坡度關係圖

表 6　五大流域防砂設施淤砂坡度比（S_r）數量比例表

項次	流域	$S_r < 1$ 防砂設施數量比例（%）	$S_r > 1$ 數量比例（%）	平均淤砂坡度比
1	淡水河	86.8%	13.2%	0.57
2	大甲溪	87.2%	12.8%	0.77
3	濁水溪	84.1%	15.9%	0.70
4	曾文溪	85.7%	14.3%	0.69
5	高屏溪	90.6%	9.4%	0.56

表 7　五大流域防砂設施淤砂坡度比統計彙整表

項次	流域	淤砂坡度比		
		<1/2	1/2~2/3	≧2/3
1	淡水河	70.60%	8.3%	21.1%
2	大甲溪	76.20%	5.8%	18.0%
3	濁水溪	49.10%	16.5%	34.4%
4	曾文溪	66.40%	9.3%	24.3%
5	高屏溪	78.10%	5.2%	16.7%

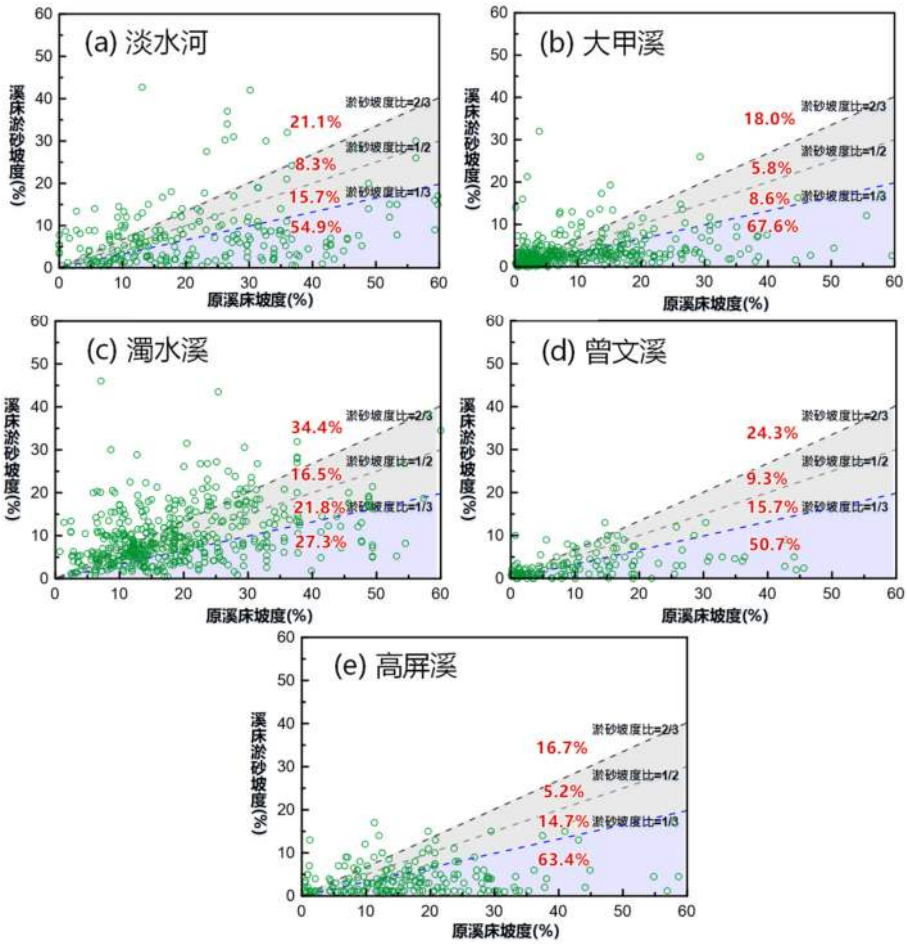


圖 6　五大流域原溪床坡度與溪床淤砂坡度關係圖

（三）淤砂坡度經驗式建立

為加值運用前述之原溪床坡度與溪床淤砂坡度相關資料，本節以淡水河等五大流域中，調查數量最多之濁水溪流域為分析樣區，採用前人研究採用淤砂坡度經驗式之標準式（如公式 2）進行統計回歸，產製代表此流域水土保持防砂設施淤砂坡度經驗式。為求建立迴歸經驗式品質且具一定合理性，於進行統計回歸前，需加以剔除離群值（Stevens, 1990），使其母體樣本具一定相似性。前述離群值發生原因，係因蒐集之溪床淤砂坡度資料，受野溪清疏、工程擾動以及人員現場量測等人為因素所致而遭其到污染。為解決上述可能衍生問題，本文假設蒐集淤砂坡度資料具有近似於常態分布的機率分布，約 95% 數值分布在距離平均值有 2 個標準差之內的範圍，屬正常觀測值（normal observation），其餘則稱之為離群值，予以剔除（Davies and Gathe, 1993）；然後，以 p-value 檢定淤砂坡度母體樣本比樣本是否其顯著水準（其 p-value 需小於 0.05），其經驗式建立之流程，如圖 7。

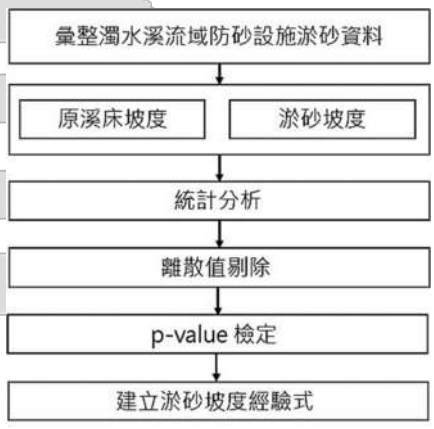


圖 7　淤砂坡度經驗式建立流程圖

中興工程，第152期，2021年7月，PP. 39-47
http://www.sinotech.org.tw/journal/

本文採用前述流程剔除離群值並進行 p-value 檢定，據以建立濁水溪流域之淤砂坡度經驗式，如下式：

$$S/S_o = 2.727S_o^{-0.68}\ 6\% \le S_0 \le 30\%\ R^2 = 0.58 \quad (3)$$

其中，S 為現況淤砂坡度；S_0為原淤砂坡度；R^2為判定係數；n 為樣本數。

圖 8 為濁水溪流域水土保持防砂設施淤砂坡度比與原溪床坡度關係圖，由圖可知，構築濁水溪流域水土保持防砂設施，就調查資料顯示原溪床坡度介於 6%至 30%間，隨著原溪床坡度增加，淤砂坡度比愈小，具明顯溪床減緩效果且土砂停淤目的，尤以原溪床坡度 20%至 30%，其調整可達 1/2 以下。相關觀察結果，可供後續治理規劃及工程設計之參考。

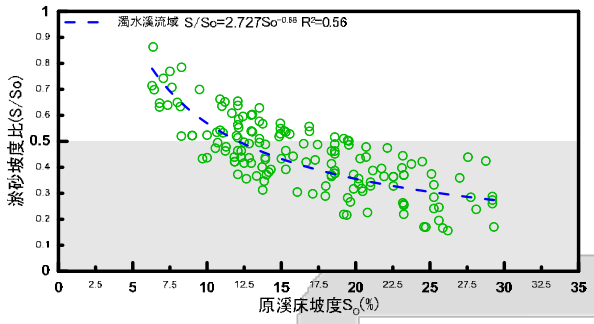


圖 8　濁水溪流域水土保持防砂設施淤砂坡度比與原溪床坡度關係圖

四、結論與建議

本文係說明近期全臺防砂設施空間分布及功能評估狀況，並以探討淡水河等五大流域流域尺度為單元，溪床構築防砂設施淤砂坡度與原溪床坡度以及設計淤砂坡度之差異比值狀況，探討三者關係，研究發現防砂設施構築於溪床坡度 8%以上，具明顯溪床減緩效果施且可達土砂停淤目的。文中亦以濁水溪流域為例，建立淤砂坡度經驗式，可供後續治理規劃及工程設計之參考。然溪床淤砂坡度，係仍受地形、地質、上游供砂條件、底床輸砂能力等因素影響，加上近年氣候變遷及上游土砂供應不均等因素，本文建議持續蒐集相關調查報告所分析粒徑資料，作為分類探討；未來應針對特定集水區進行小區域性細部調查，長期觀察上游來砂來水變化，降低對環境參數掌握之不確性因素，以建構更精確淤砂坡度調整之經驗式，更符合實際設計之需求性。

參考文獻

Amidon RE (1947) Model study of Brown Canyon debris barrier. In: Bermel KJ, Sank RL (ed.) Transaction, ASCE (112): 1016

Baloiu, V. (1972) Researches about the technical efficiency of the anti-erosional works in the Chineja watershed, Galati county - These for the doctorial degree, Brasov, Romania

Brahms, A. (1753) Anfangsgrunde der Deich-und Wasser-baukunst, Aurich

Heede, R.H. (1965) Multipurpose Prefabricated Concrete Check Dam, U.S. Dept. Agriculture Forest Service Research Paper RM-12. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Fort Collins, Colorado

Kaetz, A.G., and Rich, A.R. (1939) "Report of survey made to determine grade of deposition above silt and gravel barriers", Fire, U.S. Soil Conserv. Serv. Library, Albuquerque, N.M.(Unpublished memo, date Dec. 5, 1939)

Kimura, K.A. (1956) Method for Calculation of Accumulating Gradient, Shin-Sabo, No. 23, pp.16~18 (in Japanese)

Piton, G. and Pecking, A. (2016) "Design of sediment Traps with Open Check Dams. I: Hydraulic and Deposition Processes", J. Hydraulic Eng., 2016, 142(10):07016009-1

Piton, G., Carladous, S., Recking, A., Tacnet J.M., F Liébault, F. and Kuss, D. (2016) Why do we build check dams in Alpine streams? An historical perspective from the French experience, Earth Surface Processes and Landforms 42 (1), 91-108

Sugio (1973) Debris Slopes above Sand Barriers, Journal of Hydraulic Research,Vol. 11, No. 3

Tani, I. (1952) Debris Profiles above Sand Barriers, Shin-Sabo, No. 7., pp. 25 (in Japanese)

Tsuchiya,Yoshito(土屋義仁) (1969) Estimation of River Bed Aggradation due to Dam, Proc.13th, IAHR, pp. 297~322

Woolhiser, D.A. and Lenz, A. T. (1965) Channel Gradients above Gully-Control Structures, Journal of Hydraulics Division, ASCE. Vol.91, No. HY3, pp. 165~ 187

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程，第152期，2021年7月，PP. 39-47
http://www.sinotech.org.tw/journal/

Steven, J. P. (1990) Intermediate statistics, A modern approach. Hillsdale, New Jersey

Davies L. and Gather U. (1993) The identification of multiple outliers, Journal of the American Statistical Association, Vol. 88, No. 423, pp. 782-792

山口伊佐夫（1985）現代林學講義（4），砂防工學，日本地球位，第 197-210 頁

水保局（2016）105 年水庫集水區土砂環境檢查及治理成效追蹤，計畫成果

水保局（2018）107 年 66 座水庫集水區土砂環境檢查與評估，計畫成果

水保局臺北分局（2019）108 年度新竹縣茅圃及新北市基隆沿海等集水區之防砂設施調查建置，計畫成果

王士紘（1974）攔砂壩上游淤砂坡度之研究，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文

江祥平（1998）防砂壩改建為滯洪壩後上游河床型態變化之研究，國立中興大學水土保持研究所碩士論文

何智武（1986）陡坡河道之防砂壩上游淤沙坡度探討，中國農業工程學報，第 1、2 期

何智武、阮香蘭（1993）陡坡河道之防砂壩上下游沖淤問題探討，水土保持學報 25（1），第 111-120 頁

何智武、段錦浩、施東榮（1976）防砂壩之沖淤試驗與系統規劃研究（二）

吳平其（1985）台灣上游河道系列攔沙壩穩定河床效果之探討，國立中興大學水土保持研究所碩士論文

李榮珍（1984）臺灣地區蝕溝系統處理方法之分析探討，國立中興大學水土保持研究所碩士論文

阮香蘭（1993）陡坡河道之防砂壩上下游沖淤問題，國立中興大學水土保持研究所碩士論文

周明坤（1987）防砂壩上游河床之沖淤變化觀測與試驗研究，國立中興大學水土保持研究所碩士論文

松村和樹、中筋章人、井上公夫（1988）土砂災害調査マニュアル，鹿島出版社，日本，第 88-92 頁

林務局（1991）臺灣省早期防砂壩現況調查報告

林務局（1992）臺灣省近期防砂壩現況調查報告

林寶琴（1982）圓山溪攔砂壩囚砂特性研究，國立中興大學水土保持研究所碩士論文

莊榮興（2002）陡坡防砂壩之平衡淤砂坡度研究，逢甲大學土木及水利工程研究所碩士論文

葉昭憲（1988）系列防砂壩之沖淤試驗與初步規劃，國立中興大學水土保持研究所碩士論文

葉昭憲、鄭永勝（1988）系列防砂壩沖淤試驗，第 4 屆水利工程研討會論文，第 763-776 頁

臺灣省山地農牧局（1967）臺灣省攔砂壩工程初步調查報告

臺灣省山地農牧局（1973）臺灣省防砂壩工程調查報告

臺灣省山地農牧局（1982）臺灣省防砂壩工程調查報告，計畫成果

臺灣省山地農牧局（1982）臺灣省防砂壩工程調查報告

蕭惠民（2012）防砂設施淤砂坡度分析研究，國立中興大學土木工程學系所碩士論文

中興工程．第152期．2021年7月
http://www.sinotech.org.tw/journal/

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

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 49-58
http://www.sinotech.org.tw/journal/

選擇性觸媒脫硝系統在鍋爐煙氣低溫環境之應用展望

秦坦賢*　施明源**

摘　要

選擇性觸媒還原法（Selective Catalytic Reduction, SCR）是控制氮氧化物（NOx）排放的最有效技術，廣泛應用於火力電廠、焚化廠等鍋爐煙氣脫硝及柴油機動車輛尾氣淨化。該技術以尿素、氨水或液氨產生的 NH_3 為還原劑，核心技術在於選用的觸媒材料是否具備高度催化活性、良好還原性能、足夠機械強度及和緩慢毒化。電力行業氮氧化物排放控制採用中溫的釩鈦基 $V_2O_5/WO_3/TiO_2$ 觸媒，其工作溫度界於 300℃-400℃，目前發展成熟且商業化，但適用的溫度範圍較窄小；非電力行業則遭遇較大的困難，主因在於非電力行業的燃燒爐設備尾氣排放溫度常處於 120℃-300℃ 範圍，改採低溫 SCR 技術方能提高脫硝效率，符合日趨嚴格的空污排放標準。然而低溫觸媒材料存在易中毒、壽命低、處理流程等問題亟需解決，近幾年低溫 SCR 觸媒的研發工作漸有新突破性發展，本文先說明中溫及低溫 SCR 處理流程與觸媒特性差異，再探討低溫 SCR 觸媒的材料組成與性能、國外應用現狀、未來研發趨勢及應用前景等議題。

關鍵字：選擇性觸媒還原、低溫觸媒、氮氧化物去除、氨洩漏量、觸媒載體

一、前　言

氮氧化物（NOx）是大氣的主要污染物之一，對人體健康和生態環境都有巨大的危害，N_2O、NO、N_2O_3、NO_2、N_2O_4、N_2O_5 是 NOx 的主要存在形式。高濃度的 NO 會對人體產生強烈危害，NO 進入人體後會與血液中的血紅蛋白結合，降低紅細胞輸送氧氣的能力，引起組織缺氧。此外，NO 和 NO_2 是光化學污染中的一次污染物，經強烈太陽紫外線照射後會生成新的二次污染物，危害環境之衝擊廣泛且深遠，如酸雨、光化學煙霧、水質惡化及能見度降低等。

目前氮氧化物去除技術以燃燒後煙氣處理的選擇性觸媒還原（Selective Catalytic Reduction, SCR）及選擇性非觸媒還原法（Selective Non Catalytic Reduction, SNCR）為主。SCR 主要應用於電力行業，適用於煙氣 300℃-400℃ 中溫範圍，採用負載型 $V_2O_5/WO_3/TiO_2$ 作為觸媒，其脫硝效率能達到 90% 以上，但有（1）觸媒長期受到粉塵的磨損和堿/鹼土金屬的侵蝕容易中毒；（2）需要鍋爐系統在省煤器和空預器之間預留較大的布置空間；（3）存在一定的熱量損失等缺點。SNCR 價廉但無需用觸媒，主要應用於非電力行業，例

*　中興工程顧問公司機械工程部協理
**　中興工程顧問公司機械工程部正工程師

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 49-58
http://www.sinotech.org.tw/journal/

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

如焚化廠、工業鍋爐、玻璃陶瓷爐窯、水泥爐窯、鋼鐵冶金燒結爐、煉焦和石化系統的裂解設備等，適用於煙氣 950℃-1050℃ 的高溫範圍，但由於 SNCR 脫硝效率低於 60%，已不易因應未來 NOx 排放法規加嚴標準，改採 SCR 系統或增設 SNCR+SCR 的混合系統雖為解決方案，但煙氣排放溫度處於 120℃-300℃ 低溫範圍內，需再熱至 300℃-400℃ 中溫條件，方能改用 SCR 系統，從而衍生大量能耗問題，故低溫用 SCR 觸媒需求因應而生。低溫 SCR 技術具有能耗低、系統布置方便、操作成本低優點，將是未來重要發展趨勢。

二、主要煙氣脫硝技術性能比較

圖 1 為典型 SCR 系統示意圖，通常裝設於火力機組鍋爐的節熱器與空氣預熱器中間；圖 2 則為 SNCR 系統示意圖，最常應用於大型一般廢棄物焚化廠；表 1 為 SNCR、SCR 及 Hybrid SCR 控制技術性能比較。目前既存或新設的一般工業鍋爐依民國 107 年 9 月 19 日公告施行之鍋爐空氣污染物排放標準 NOx 法規排放限值均為 100ppm，而近期修法加嚴的草案彙整如表 2；可預見新建電力設施與焚化廠等大型固定污染源排放限值將持續下修至 60ppm 或更低，屆時 SCR 系統將是新爐必備或舊爐整建需優先增設的設備。

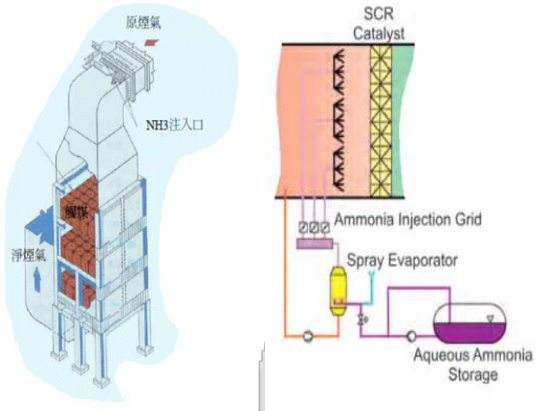


圖 1　火力機組之 SCR 系統示意圖

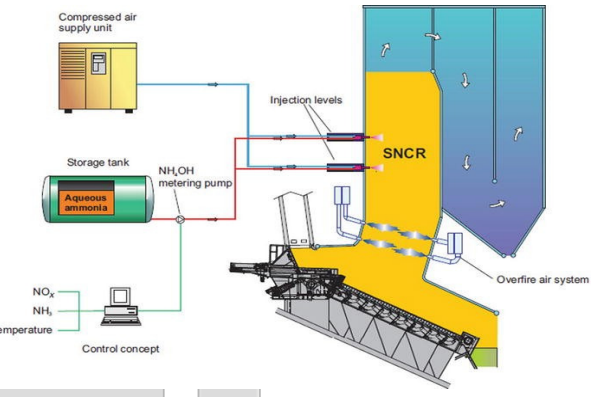


圖 2　焚化廠之 SNCR 系統組成簡圖

表 1　SNCR、SCR 及 Hybrid SCR 脫硝技術與性能比較

主要參數	SNCR	SCR	Hybrid SCR
NOx 去除效率	上限 60%	上限 95%	上限 90%
反應溫度 Temp. window	850℃-950℃（ammonia） 900℃-1050℃（尿素）	300℃-510℃	SNCR: 850℃-1150℃ SCR: 300℃-510℃
還原劑	氨水或尿素	液氨、氨水或尿素	液氨、氨水或尿素
還原劑莫耳比	1.0-1.5	1.0-1.05	1.0-1.05
氨轉換裝置	尿素時需要	尿素時需要	尿素時需要
反應器	直接注射	多層觸媒	直接注射+少量觸媒
氨洩漏量	10-20 ppmvd	5-10 ppmvd	5-10 ppmvd
觸媒容積	大量	無	少量
觸媒再生或運棄	不需要	需要	少於 SCR
初設成本	低	高	中
維修/更換成本	低	3-5 年（依使用狀況）	3-5 年（依使用狀況）
耗能	低	高	中

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 49-58
http://www.sinotech.org.tw/journal/

表 2　各類鍋爐氮氧化物 NOx（以 NO_2 表示）排放標準加嚴趨勢

氮氧化物 NOx（以 NO_2 表示）		O2 基準值（%）	既有設施（ppm）	新設設施（ppm）	備　註
工業用鍋爐		6	100	100	民國 107 年 1 月發布之現行標準。
電力行業	汽力機組	6	70	30	民國 103 年 12 月發布電力設施空氣污染物排放標準。
	氣渦輪機組	15	40	10	
	複循環機組	15	40	10	
	汽電共生設備	6	175 以下	43 以下	
一般廢棄物焚化爐	大型（10 噸／小時以上）	11	85	60	目前研擬中草案標準。既有者，自公告日起給予緩衝期 5 年，需由 120ppm 降到 85ppm。
	小型（10 噸／小時以下）	11	120	60	
事業廢棄物焚化爐	400kg／小時以上	11	220	180	目前研擬中草案標準。
	400kg／小時以下	11	250	180	

由表 2 可知，除事業廢棄物焚化爐排放限值 180ppm 仍有機會以 SNCR 系統處理外，任何新設機組（含一般廢棄物焚化爐）均需裝設 SCR 系統方能符合新排放標準，特別是複循環、汽力及汽電共生機組；而各縣市既有的大型一般廢棄物焚化爐需整建SNCR系統，提升脫硝效率或增設SCR系統方能符合加嚴後的標準。

三、中溫SCR系統之特性說明

（一）SCR 觸媒的表層反應機制

如圖 3 為 NO、NH_3 在 SCR 觸媒表層產生化學反應，生成為 N_2 與 H_20 的機制，依序為：

1. NH_3 通過層流邊界層，擴散至觸媒外表面
2. NH_3 通過觸媒微孔，向內部擴散
3. NH_3 吸附於觸媒活性表面
4. 氣相 NO 擴散到吸附於觸媒表面的 NH_3
5. NO、NH_3 產生化學反應，生成為 N_2 與 H_20。
6. 生成物自觸媒表面脫附。
7. N_2 與 H_2O 擴散轉變為氣相，自內部向外表面擴散至流場

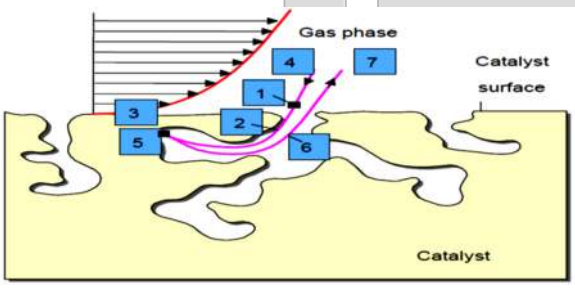


圖 3　NO、NH_3 在 SCR 觸媒區域生成為 N_2 與 H_2O 的示意圖

（二）SCR 系統不同裝設位置之比較

圖 4 為 SCR 系統在煙氣粉塵處理設備不同位置裝設之情況，包括（a）高粉塵 SCR；（b）低粉塵 SCR；（c）尾端 SCR 等三大類，其優劣比較如表 3。一般而言，高粉塵 SCR 與低粉塵 SCR 均採用中溫 SCR 觸媒，尾端 SCR 則需儘量選用低溫 SCR 觸媒，以免脫硝效率太低。

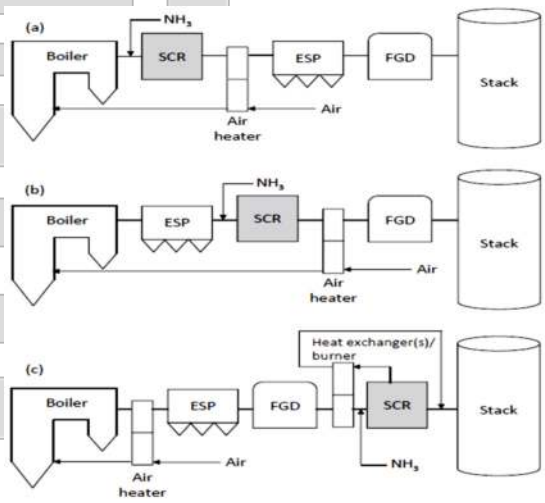


圖 4　SCR 系統不同裝設位置示意（a）高粉塵 SCR；（b）低粉塵 SCR；（c）尾端 SCR

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 49-58
http://www.sinotech.org.tw/journal/

表 3　SCR 系統不同裝設位置之優缺點比較

SCR 形式	優點	缺點
高粉塵 SCR	無需加熱	觸媒壽命明顯偏短 SOx 造成觸媒毒化
低粉塵 SCR	中等觸媒壽命	SOx 造成觸媒毒化
尾端 SCR	觸媒壽命長	煙氣需再熱而耗能

（三）不同 SCR 還原劑比較

SCR 主要還原劑包括液氨、氨水、尿素溶液三種，經不同反應機制產生 NH_3，各類還原劑特性比較如表 4。

四、低溫SCR系統之差異說明

（一）低溫 SCR 系統特性

由於低溫 SCR 系統將觸媒裝設於除塵器及 FGD（煙氣脫硫）後端，能有效減緩觸媒的堵塞、磨損問題，亦可緩解 SO_2 引起的觸媒失活以及硫酸氫銨產生等問題，且煙氣不需要加熱，所以不同材質的低溫觸媒研發一直是研發重點。研究文獻顯示使用 Mn，Ce，Fe 等之金屬氧化物擔持在 TiO_2 上效果較佳，可以在 120℃-200℃ 下達到 80%以上 NO 去除效率。低溫 SCR 觸媒得製備、金屬氧化物及觸媒載體材料選擇，對氮氧化物去除效率上有極大的影響。

（二）低溫 SCR 脫硝反應機制

低溫 SCR 技術是 O_2 和觸媒存在的條件下，在 100℃-300℃ 溫度範圍內，用還原劑 NH_3 將煙氣中的 NOx 還原為 N_2 和 H_2O，反應原理如下：

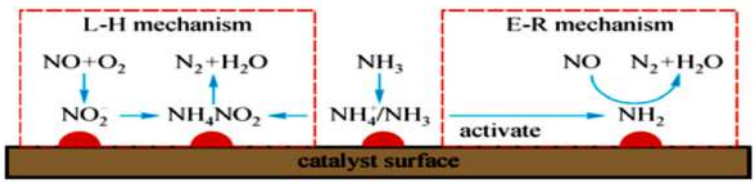
$$4NH_3+4NO+O_2\rightarrow 4N_2+6H_2O$$

$$8NH_3+6NO_2\rightarrow 7N_2+12H_2O$$

關於低溫 SCR 反應，許多研究人員依結果提出理論如圖 5 所示，首先 NH_3 被吸附在路易士酸（Lewis acid）中心上，並且形成 NH_{4+}和被吸附的 NH_3 的中繼物。接著若煙氣溫度低於 150℃，經由 Langmuir-Hinshelwood（L-H）機制，反應成亞硝酸鹽類再分解為 N_2 及 H_2O；若煙氣溫度高於 150℃，則經由 Eley-Rideal（E-R）機制，中繼物直接活化直接與煙氣內 NO 反應，分解為 N_2 及 H_2O。

表 4　不同 SCR 還原劑之特性比較

還原劑	優點	缺點	適用對象
液氨	1. 儲存空間小 2. 系統控制容易 3. 反應效率高	1. 壓力高、有毒氣體 2. 氨氣洩漏造成惡臭 3. 系統複雜、成本高 4. 安全防護設備要求高，須符合高壓氣體勞工安全規則，儲存量大時須申請危險工作場所	大型發電鍋爐
氨水	1. 常壓儲存及運輸沒有危險 2. 外洩量小、且較容易控制 3. 系統簡單	1. 氨水濃度約 25%-32%，貯存空間大 2. 氨水須熱汽化後才能注入煙道氣內，因此其水分含量高故能源耗損	汽電共生鍋爐 重油引擎發電機組
尿素溶液	1. 運輸及貯存量最為方便、且安全性最高 2. 不須安全防護設備	1. 因尿素與 NOx 反應之莫耳比較複雜、故脫硝效率控制較複雜 2. 脫硝反應過程中會有笑氣（N_2O）之產生 3. 尿素與水之混合槽及貯存槽占空間大	汽電共生鍋爐 重油引擎發電機組



（150℃ 以下採用 L-H 機制，以上採用 E-R 機制）

圖 5　Mn-Fe SCR 低溫觸媒之 NO 與 NH_3 反應機制

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 49-58
http://www.sinotech.org.tw/journal/

兩種不同的形式主要差別如下：

1. Langmuir-Hinshelwood 機制：在任何時間均吸附平衡，反應速率限制取決於觸媒上不同吸附物質間的反應，而非吸附或脫附步驟，亦即也就是 NO 分子被吸附到觸媒表面，然後與被吸附的 NH_{4+}和 NH_3 分子進行反應。
2. Eley-Rideal 機制：速率限制取決於吸附物質與來自流體分子間的反應，亦即氣相的 NO 分子直接與被吸附的 NH_{4+}和 NH_3 分子產生反應。

（三）低溫 SCR 之優點

表 5 為低溫 SCR 與中溫 SCR 性能比較，整體而言低溫 SCR 具體成本低、能耗少、應用前景大等優勢，但商業化技術尚未完備，有待優化。

（四）低溫 SCR 之劣勢

1. 脫硝活性低：脫硝觸媒活性一般隨著煙氣溫度的降低而降低，當溫度低於 200℃ 時，現有低溫觸媒的活性較低，會造成脫硝效率不達標，還會導致氨逃逸超標等二次污染問題。
2. 抗硫中毒性能差：煙氣中的 SO_2 和 SO_3，會和觸媒活性發生反應，導致活性數量的減少以及脫硝性能的下降。
3. 堵塞中毒嚴重：煙氣中的 SO_2 經氧化形成的 SO_3 會和 NH_3 反應生成硫銨鹽，附著在觸媒表面，造成觸媒活性位的覆蓋，而且硫銨鹽會進一步吸附煙氣中的飛灰，加劇堵塞，導致觸媒快速失活。研究數據顯示錳基低溫觸媒（Mn-Ce-Fe）當 SO_2 限值 30 ppmvd 時，脫硝效率幾無劣化。
4. 水蒸汽耐受性差：低溫 SCR 脫硝過程中，煙氣中存在的水蒸氣，會通過物理競爭吸附和化學吸附干擾反應，影響觸媒的脫硝效率。研究顯示 H_2O 限值 10% v/v 時，脫硝效率仍可維持 80% 以上。

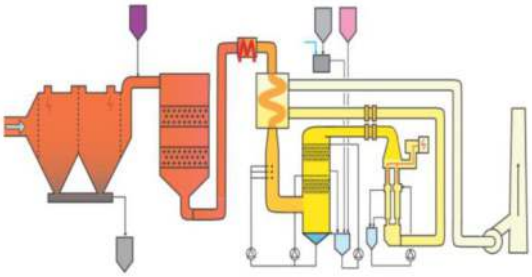
（五）低溫 SCR 系統之裝設位置探討

如圖 6（a）為傳統中溫 SCR 系統，以 $WO_3/V_2O_5/TiO_2$ 或是 $MoO_3/V_2O_5/TiO_2$ 為主要觸媒，此中溫觸媒具有良好之抗硫化能力，然而其操作溫度範圍過於狹窄（300℃-400℃），倘若煙道廢氣經除塵及脫硫設備處理後，則 SCR 入口端之廢氣溫度勢必降至 150℃ 以下，此時觸媒活性低於 20%，脫硝效率偏低；欲沿用中溫 SCR 處理，則須消耗大量能源使反應溫度提升至最佳處理狀

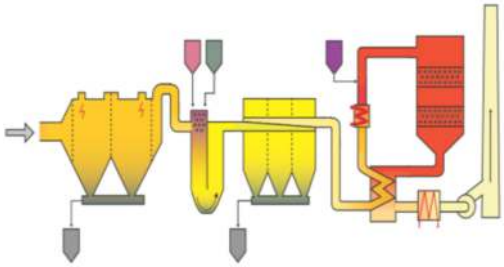
表 5　低溫 SCR 與中溫 SCR 性能比較

性能比較	低溫 SCR	中溫 SCR
煙氣組成	低灰、低硫	高灰、高硫
應用範圍	工業鍋爐、水泥玻璃窯爐、冶金鋼鐵燒結爐、石化催化裂解爐和化工與酸洗設備等領域，可處理高濃度氮氧化物煙氣（1500mg/Nm^3 以上），有廣泛的應用前景	較侷限於電力設施產業
操作溫度範圍	100℃-300℃	300℃-400℃
安裝條件	設備少、占地小和便於現場設計的特點，既適用於新舊設備煙氣治理（安裝位置可選擇性強）	只能用到新建設備，而舊設備由於場地狹小和熱量守恆估算等問題，難以安裝 SCR 反應器
觸媒需要量	煙氣溫度低，流率小，觸媒需要量約為中溫觸媒之 70%	觸媒需要量高
反應器容積	反應器整體容積減小，散熱面積減小，熱損小	反應器整體容積、散熱面積減、熱損大
能耗	煙氣無需再熱，減少能耗	若裝設於尾氣側，需用外加能源再熱至 300℃-400℃
初設成本	觸媒與熱交換設備投資節省 30% 以上	初設成本高
運維成本	運維成本低且壽命高	觸媒壽命短，約 4 年需更換，故成本高

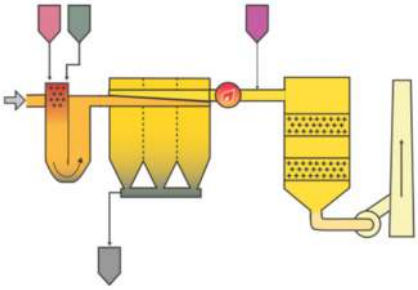
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 49-58
http://www.sinotech.org.tw/journal/



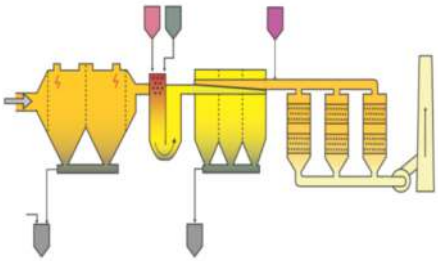
300℃-400℃
特徵：高粉塵+高 SO_2
（a）中溫 SCR 流程



220℃-250℃
特徵：低粉塵+低 SO_2
（b）低溫 SCR-尾端流程



180℃-200℃
特徵：低粉塵+極低 SO_2
（c）低溫 SCR- 煙氣再熱流程



180℃-200℃
特徵：低粉塵+低 SO_2
（d）低溫 SCR- 觸媒再生流程

圖 6　不同操作溫度範圍之低溫 SCR 系統

態，且煙道廢氣經脫硫設備處理後尚存有低濃度之 SO_2，易造成觸媒失活（deactivation）。因為觸媒毒化問題仍是不容忽視，故若能發展低溫 SCR 觸媒（指於溫度範圍 80℃-200℃ 下進行選擇性觸媒還原反應），並具有良好之抗硫化能力，使 SCR 脫硝還原反應可於 150℃ 以下順利發生，可顯著降低 SCR 之耗能與操作成本。圖 6（b）、（c）、（d）分別為尾端流程、煙氣再熱、觸媒再生流程等不同低溫 SCR 系統的反應器裝設位置及對應的運轉溫度範圍。

五、低溫SCR觸媒種類及其性能探討

（一）低溫 SCR 觸媒載體

低溫觸媒依其載體材料概分為 4 類：貴金屬觸媒、分子篩觸媒、金屬氧化物觸媒和碳基材料觸媒，以下分述其性能：

1. 貴金屬觸媒

在貴金屬觸媒中，$Pt/A1_2O_3$ 觸媒的活性最高，但 H_2O 會降低觸媒的活性及 NO 的氧化率。採用 $Pt/A1_2O_3$ 和 $Cu/A1_2O_3$ 製備的雙層觸媒，在 O_2 存在情況下，$Pt/A1_2O_3$ 首先促使 NO 氧化成 NO_2，而 $Cu/A1_2O_3$ 隨後促進催化 NO_2 脫除，以上 2 種活性成分協調分工使得雙層觸媒顯著提高 SCR 的活性。在 200℃ 反應環境溫度以下，雙層觸媒的脫硝率大於 80%。

2. 沸石分子篩觸媒

沸石分子篩是鋁矽酸鹽的固體吸附劑或觸媒，它能將不同大小的分子加以分離或選擇性反應。目前研究重點之一為負載過渡金屬或者離子交換的微孔分子篩觸媒，該觸媒一般以 Cu 或者

Fe 為活性成分。Cu 基分子篩觸媒具有良好的低溫催化能力；Fe 基分子篩觸媒能在高溫下保持較高的 NOx 轉化率；而過渡金屬氧化物 CeO_2，則因具有良好的氧化還原能力和強烈的金屬間相互作用，可滿足低溫 SCR 脫硝要求，三者之應用前景相當廣闊。

3. 金屬氧化物觸媒

目前工程中應用的 SCR 觸媒有以 TiO_2 為載體的負載型金屬氧化物觸媒和以 $A1_2O_3$、ZrO_2，SiO_2 等為載體的負載型金屬氧化物觸媒、非負載型金屬氧化物觸媒三大類。

（1）以 TiO_2 為載體的負載型金屬氧化物觸媒

TiO_2 因其表面具有路易士酸基、高熱穩定性及對硫毒化有較高忍耐性等優點，為現今常用之低溫 SCR 觸媒載體，所以 TiO_2 被廣泛地用作載體負載其它氧化物作為低溫 SCR 的觸媒。在 120℃下，各種負載金屬氧化物的活性可簡單表示為：Mn>Cu>Cr>Co>Fe>V>>Ni。Mn/TiO_2 觸媒活性最高，生成 N_2 選擇性和 NOx 的轉化率均為 100%，是一種理想的觸媒。錳氧化物 MnOx 因具有不同型態之晶格氧（labile oxygen），且研究顯示無晶型態（amorphous）之錳氧化物於低溫 SCR 反應下具有良好之活性，因此被廣泛應用於低溫 SCR 觸媒。

（2）以 Al_2O_3 載體的負載型金屬氧化物觸媒

Al_2O_3 因具有高比表面積、高熱穩定性、高化學穩定性、表面的酸性位有利於含氮物種的吸附等優點，因而廣泛用做金屬氧化物觸媒載體，其中又以 CuO/Al_2O_3 觸媒因具備良好的同時脫硫脫硝性能而受到關注。

（3）非負載型金屬氧化物觸媒

國外研究的非負載型金屬氧化物觸媒主要集中在 Mn 基、Ce 基和 Co 基，觸媒的非晶態結構是其具備高活性的主要原因。

4. 碳基材料觸媒

碳基材料觸媒為碳基材料為載體的觸媒，主要載體包括活性炭（AC）、碳納米管（CNTs）、活性炭纖維（ACF）等，其特徵在於提供大表面積的微孔結構，具有吸附性強，化學穩定性佳、活性小，且熱傳導高等。採用活性炭（AC）為載體時，通常採用 Mn_2O_3、V_2O_5 作為活性成分，最佳反應溫度 100℃-200℃，NOx 的最高轉化率即能達到 90% 以上。而採用活性炭纖維為載體時，由實驗探究可知，三氧化二錳、三氧化二鈷及氧化鐵三種金屬氧化物在活性炭纖維中的活性研究，活性度最高的就是三氧化二錳，反應溫度 150℃ 情況時，觸媒上 NO 轉化率 92%；而在 200℃ 時，轉化率可達到 90% 以上。

（二）活性成分

觸媒的活性成分在低溫 SCR 反應過程中，對反應物的吸附以及電子傳遞起著至關重要的作用，直接決定著反應能否順利進行，影響催化活性和 N_2 選擇性。常見的低溫 SCR 觸媒活性成分主要有氧化錳和二氧化鈰二種。

（三）助劑

離子摻雜可以有效的緩解觸媒燒結的現象，促進觸媒活性的提高。Ca 摻雜對 SCR 觸媒的活性有一定的抑制作用，但同時 Ca 摻雜對 N_2O 生成的抑制更大，從而促進觸媒的 N_2 選擇性，所以 Ca 摻雜對觸媒整體性能提升有良好的說明。適當的 Se、Sb、Cu、S 摻雜有利於 V_2O_5/TiO_2 催化活性的提高，在 150℃-400℃ 時，2% 的 Sb 摻雜的 V_2O_5/TiO_2 觸媒活性最好，同時 Sb 摻雜的觸媒在有水存在的條件下抗硫性能相對較好。

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 49-58
http://www.sinotech.org.tw/journal/

六、國外低溫SCR觸媒工程應用現狀

（一）低溫 SCR 觸媒製造廠商

1. 殼牌（Shell）

殼牌公司（Shell）的子公司 CRI Catalyst Company（CRI）於 20 世紀 90 年代開發出低溫氮氧化物系統（Shell DeN0x System，簡稱 SDS），它包括一種專利的 V_2O_5/TiO_2 顆粒狀觸媒，和一個低壓降的側流反應器（LFR），該觸媒顆粒形狀為擠製式三葉形，顏色從黃色、橙色到綠色；顆粒大小大小從 0.6mm 到 5.0mm。典型的商業應用級 SDS，操作溫度約在 140℃-400℃；空速在 2500-40000h^{-1}；可以在很小的氨逃逸率下達到高於 95% 的 NOx 轉化率。

殼牌公司 SDS 的觸媒為顆粒狀，不同於一般的平板式和蜂窩式觸媒，SDS 系統主要由殼牌側流反應器（LFR）與專利觸媒組成，處理後的氮氧化物排放小於 10-50ppmv，氨的逃逸量小於 5-10ppmv。由於低溫下具有高活性的觸媒，SDS 系統能在煙氣 130℃-160℃ 的低溫條件同時脫硝及去除戴奧辛為其最大競爭力，所以它可裝設於煙氣管道末端的煙囪前端，也因此避免再熱造成的能耗及效率降低影響。

SDS 不同於常規蜂窩型 SCR 系統的設計包括觸媒和側流反應器（LFR）模組如圖 7。殼牌觸媒為類多孔粒子，直徑大約在 1mm，由於其高活性，在較低的溫度（從 120℃）下即能獲得較高的去除氮氧化物的高效率。運輸前,這些觸媒均被預裝填於不銹鋼製的側流反應器模組內。LFR 為固定床式反應器，其壓降低可至 20 pa 以內,減少廢氣流通所需的能耗。此外，LFR 可讓觸媒快速安裝或卸載。

SDS 系統是已成功應用 23 年的領先且成熟高效脫硝技術，其主要優點如下：

（1）適宜溫度從 130℃-380℃，尤其特別的是可以在 130℃-160℃ 的低溫下處理

（2）可設置煙氣管道尾端的煙囪前

（3）脫硝後氮氧化物可小於 10-50 ppmv，能去除 60%-98% 的氮氧化物

（4）結構緊湊，體積小

（5）安裝簡便，停機數天內即可完成安裝

（6）催化劑活性高，一次性投入，壽命達 5 年以上

（7）壓降小，小於 10-20 pa

（8）可同時去除垃圾焚化產生的戴奧辛（dioxins）

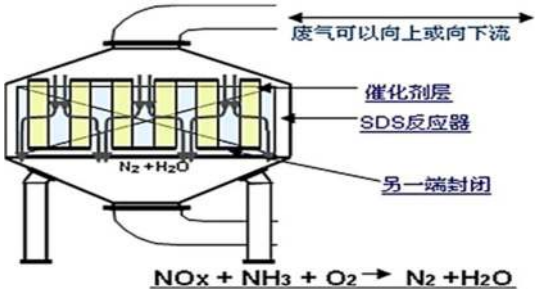


圖 7　Shell 之觸媒和側流反應器（LFR）模組

2. 奧地利 Ceram 低溫觸媒

Ceram 的觸媒的採用的也是 V-Ti 體系，其中 V 含量在 0 到 3% 之間，觸媒的活性溫度在 150℃-550℃ 之間。從 1990 開始 Ceram 從事的低溫脫硝項目包括垃圾發電，乙烯裂解爐，硝酸廠，燃氣輪機的廢熱鍋爐等。溫度最低的是 1995 年的 Wuppertal 項目，觸媒的反應溫度是 150℃。其中以城市垃圾和醫用垃圾，化學殘留物等垃圾爐的尾氣 SCR 處理最多，另外也有少量的少量乙烯裂解爐，硝酸廠，天然氣燃汽輪機等低溫 SCR 項目。

（二）低溫 SCR 觸媒應用實例

以下舉例說明目前較先進的 3 座國外廢棄物焚化廠的低溫 SCR 系統應用現況，三者均使用 V-Ti 基觸媒及煙氣再熱裝置，由此可知為滿足節能及降低成本，研發其他載體或活性成分的低溫觸媒確有甚大的發展空間：

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 49-58
http://www.sinotech.org.tw/journal/

1. 超低溫 SCR—Herten RZRII 焚化廠：160°C

德國 HERTEN 地區的 RZRII 焚化廠包含 2 條設計熱值 2580 kal/kg，420 噸/日爐之一般生活廢棄物焚化爐，該廠以 160°C 低溫運轉的 SCR 系統為其特色，連續平穩使用超過 8 年。其煙氣淨化流程包括半乾式吸收塔（SDA）→袋濾式集塵器（BHF）→氣對氣熱交換器（GGH）→HCl 洗滌塔→SO_2 洗滌塔→固定床活性焦炭過濾器（Fixed bed activated carbon filters）→煙氣蒸汽式加熱器（SGH）→SCR，其流程詳見圖 8。設置氣對氣熱交換器與煙氣蒸汽式加熱器的主因在於裝設 2 段濕法洗滌塔，溫度遠低於 160°C。

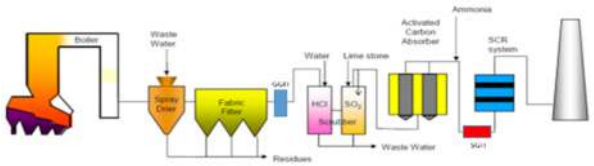


圖 8　RZR Herten 焚燒廠之煙氣淨化處理流程

SCR 系統採用主流的釩鈦基 40 孔蜂窩式觸媒，以 3+1 層方式布置，運轉於 160°C 低溫。儘管煙氣淨化流程設置 2 段濕法洗滌塔，SO_3 仍會不斷聚集而影響觸媒性能，故 SCR 前端增設固定床式活性炭過濾裝置，以確保系統長時間平穩運行，除去除有毒金屬（如汞等）和有機物外（戴奧辛/呋喃），固定床的活性炭過濾裝置也能有效阻擋 SO_3，從而減少下游形成硫酸氫氨的風險，進而減少對觸媒的影響，延長其使用壽命。實際空污排放 NOx 排放值為 129.6 mg/m^3（65ppm）。

2. 歐洲首例—Spittelau 焚化廠：190°C

歐洲第一套採用低溫 SCR 系統的是奧地利維也納的 Spittelau 生活廢棄物焚化廠，該廠規模為 2x360 t/d 處理量，興建於 1969 年，卻在 1987 年遭遇火災損毀。目前運轉的煙氣淨化系統於 1989 年重建並於 1992 年投入使用，其處理流程為靜電集塵器（ESP）→HCl 洗滌塔→SO_2 洗滌塔→靜電集塵器（WESP）→氣對氣熱交換器（GGH）→天然氣燃燒器→SCR，首次投入使用的 SCR 於 280°C 運轉，採用蜂窩式觸媒，其煙氣淨化處理流程如圖 9。2012 年該廠再次對煙氣系統進行整建，將靜電集塵器調整為袋濾式集塵器，並換裝新觸媒，反應溫度從 280°C 降到 190°C，另設置觸媒線上熱再生系統，熱源採用天然氣燃燒器，目前實際 NOx 排放值約為 21 mg/m^3（10ppm）

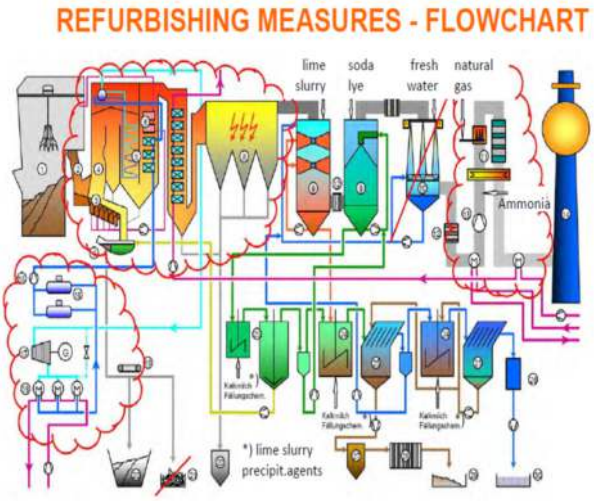


圖 9　Spittelau 焚化廠整建之煙氣淨化處理流程

3. 日本東京光丘焚化廠：210°C

1987 年三菱重工在東京光丘二期焚燒廠首次採用低溫 SCR 系統，這一時間比歐洲 1992 年首例 Spittelau 焚化廠投入的時間早了 5 年；該焚化廠為符合日本新排放標準，重建後 NOx 設計值降為 50 ppm，改建後的煙氣淨化處理流程與 Spittelau 焚化廠較為相似。

日本焚化廠的主流煙氣淨化處理流程為降溫塔→袋濾式集塵器（BHF）→濕式洗滌塔→煙氣蒸汽式加熱器（SGH）→SCR。SCR 觸媒以板式、波紋板和蜂窩 3 種較為常見，反應溫度 210°C-240°C 之間，煙氣加熱方式採用蒸汽加熱居多，而蒸汽加熱器占地較大為其弱點，另煙氣溫度需要從濕法洗滌塔出口的飽和溫度上升到 210°C，所以操作能耗較高。

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 49-58
http://www.sinotech.org.tw/journal/

七、低溫SCR觸媒未來應用前景

低溫 SCR 觸媒市場前景主要應用於以下九個行業領域之煙氣脫硝：（1）煉焦化學工業；（2）複循環燃氣電廠廢熱鍋爐；（3）水泥業；（4）玻璃製造業；（5）工業鍋爐；（6）垃圾焚化爐；（7）陶瓷窯爐；（8）鋼鐵冶金燒結業；（9）煉油企業觸媒裂解業。

八、結　語

低溫 SCR 脫硝技術在低硫低塵的尾端煙氣低溫環境已有少量工業化應用實績，其優勢包括反應塔布置較靈活、煙氣工況良好、不破壞原有的物料和熱平衡、占地面積小、改造費用小、操作方便且能耗低、操作成本低及初設投資大幅降低等，未來應持續研發強化的項目包括：

（一）提高觸媒活性與選擇性，在較低的溫度和較寬的溫度範圍內具有較高的氮氧化物轉化率；

（二）觸媒材料及其製備方法選擇，應致力於低反應溫度時有優異的抗二氧化硫和水毒化性質，延長更換或再生壽命；

（三）提高觸媒的機械強度和熱穩定性，減少壓力損失，降低造價和操作成本，早日商業化。

參考文獻

諾瓦材料科技&奧地利商雅苒環保科技公司型錄

Martin Waste-to-Energy Technology 出版文章

羅成信，觸媒於空氣污染控制應用及案例，2005/7/20 講習會

Carmen Schiel (2019). An Assessment of NOx Emission Control Techniques in Large Combustion Plants

張木彬，鍋爐氮氧化物之防制原理及設備簡介講義，第 51-57 頁

Junhua Li, Hong He, Chun Hu, Jincai Zhao (2013). The abatement of major pollutants in air and water environmental catalysis. Front. Environ. Sci. Eng., 7(3), pp. 302-325

Christophe Cord'Homme. Some deNOx process for large combustion systems. Oct. 2017, 3rd TFTEI Annual Meeting conference slides

殼牌低溫去除氮氧化物系統（SDS）在硝酸廠的應用（2014/5）

Bodo Rohs. Latest Design of WtE Plants in Europe Focus: Flue Gas Cleaning. May 2018, Conference slides

WTE SPITTELAU 1970-2014, ISWA - WGER MEETING VIENNA. April 17, 2014, Conference slides

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

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 59-65
http://www.sinotech.org.tw/journal/

雅加達捷運 CP103 標第三方設計驗證執行與計畫概述

林志豪*　黃世璋**　鄭書恒***

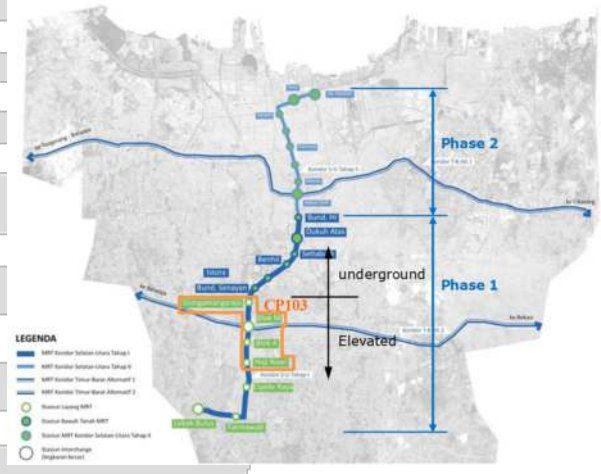
摘　要

雅加達捷運 CP103 標第三方設計驗證案（Third Party Design Verification）為中興工程顧問公司於印尼辦理捷運工程相關的計畫。CP103 標是印尼雅加達重運量捷運系統第一期工程中的一標，全長約 3.84 公里，包括高架橋、四座高架車站及出土段。該工程採統包方式辦理，由日商大林組、日商清水建設及印尼廠商聯合承攬。本文將概要說明高架橋梁及車站的型式及施工法，同時說明本計畫的工作內容、執行方式與工作成果，及分享相關海外工程資訊與經驗。

關鍵字：第三方設計驗證、聯合承攬

一、前　言

本計畫為印尼雅加達重運量捷運系統第一期工程中第 CP103 標土建工程之第三方設計驗證工作。第一期工程路線總長約 16 公里，共分七標，分別為 CP101~CP108 標。其中 CP101~CP103 為高架路段土建標，CP104~CP106 為地下段土建標，CP107 為系統及軌道標，CP108 為電聯車輛標，路線圖如圖一所示。第一期工程於 2013 年 10 月開工，並已於 2019 年 3 月完工通車；第二期工程路線往北延伸至 KOTA 站，目前印尼政府正進行第二期工程之設計及施工工作。CP103 標全長 3.84 公里，路線由南往北呈南北走向，全線主要均為高架路段，包括四座高架車站、站間高架橋、一座變電站及出土段，如圖 1 所示。四座高架車站分別為 HAJI NAWI 車站、BLOK A 車站、BLOK M 車站、SISINGAMANGARAJA 車站。中興工程顧問公司（以下簡稱中興公司）於 2013 年 12 月與統包商 OSJJV 簽訂第三方設計驗證服務契約後開始執行本計畫。



（圖片摘自 google 網頁）

圖 1　印尼雅加達捷運路線圖

*　中興工程顧問公司軌道工程一部計畫副經理
**　中興工程顧問公司軌道工程一部技術經理
***　中興工程顧問公司軌道工程一部資深協理

二、團隊組織架構

CP103 標工程各相關成員及關係如圖二所示，捷運業主（employer）為雅加達捷運公司（MRT Jakarta），施工管理顧問（engineer）為 JMCMC，統包商（contractor）則由日商大林組、日商清水建設及印尼廠商聯合承攬（JV）稱為 OSJJV。統包商下則有細部設計顧問公司及第三方設計驗證顧問公司；細部設計顧問為英商 Hewson，負責橋梁、車站結構設計；印尼本地 Arkonin 公司負責車站建築設計，中興公司則為第三方設計驗證顧問公司。

CP103 標工程團隊組織成員如圖 2 所示。

（一）業主 Employer：雅加達捷運公司 MRTJ（MRT Jakarta）

（二）施工管理顧問 Engineer：JMCMC（Jakarta MRT Construction Management Consultants）

（三）統包商 Contractor：OSJJV（Obayashi-Shimizu-Jaya Konstruksi JV）

（四）細設顧問公司 DDC：HEWSON Consulting Engineers（結構設計）、ARKONIN Engineer（建築設計）

（五）第三方設計驗證 3PV：中興公司 Sinotech

圖 2　CP103 標組織成員

第三方設計驗證計畫成員包括中興公司的軌道一部、軌道二部、建築部、機械部、電氣部及中興印尼辦事處組成，如圖 3 所示。各部門負責工作如下：

（一）軌道一部：負責計畫執行，橋梁結構、車站結構、出土段結構之設計驗證

（二）軌道二部：負責大地工程、基礎結構設計之設計驗證

（三）建築部：負責車站建築之設計驗證

（四）機械部及電氣部：負責車站水電環控之設計驗證

（五）中興印尼辦事處：負責文書信函往來、請款及與統包商聯絡協調工作

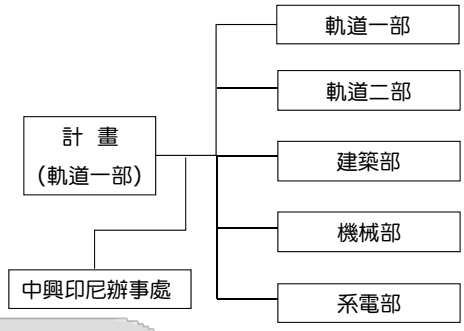


圖 3　中興公司成員（CP103 TPV）

三、工作內容

本計畫主要工作項目在於設計驗證，藉由中興公司各項專業長期以來在臺北捷運設計及施工中服務的經驗，對統包商提出的設計報告、設計圖說等進行設計驗證並提出審查意見。契約中對於工作項目、工作階段、工作期程等均有明確規定，作為本計畫執行的依據。

（一）工作項目

CP103 標工程依結構型式不同區分為四大部分，分別為：

1. 高架橋梁結構
2. 高架車站結構

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 59-65
http://www.sinotech.org.tw/journal/

3. 高架車站建築
4. 出土段結構

其中高架橋梁結構又分為上部結構、墩柱、基礎；高架車站結構亦分為月台層、穿堂層、基礎等分類。全線區分為數個區段（segment），每一區段再依上述工作項目細分，統包商依此逐段、逐項提送文件予本計畫進行設計驗證工作。

本工程高架橋上部結構為後拉預力箱型梁型式，標準路段箱型梁承載二股道，Blok M 前後則由二股道漸變至三股道，下部結構為單柱矩形橋柱，基礎為預鑄樁基礎。橋梁結構系統為簡支梁系統，標準跨度 36.65 公尺，橋面寬 9.0 公尺，箱型梁梁深 2.2 公尺，橋柱尺寸 2.25×2.25 公尺，預鑄樁直徑 D=600mm，標準斷面如圖 4 所示。上部結構箱型梁與墩柱之間以人造橡膠支承墊及剪力榫連接，人造橡膠墊承載垂直載重，剪力榫承載如地震力等之水平載重。橋梁施工採預鑄節塊工法施工，將上部結構箱型梁切割為約每 3 公尺一節塊，每一節塊均於預鑄場先行製作完成，而後再運送至現場吊裝，待該跨所有節塊吊裝固定後再施拉預力後完成整跨箱型梁之施作，如圖 5 所示。

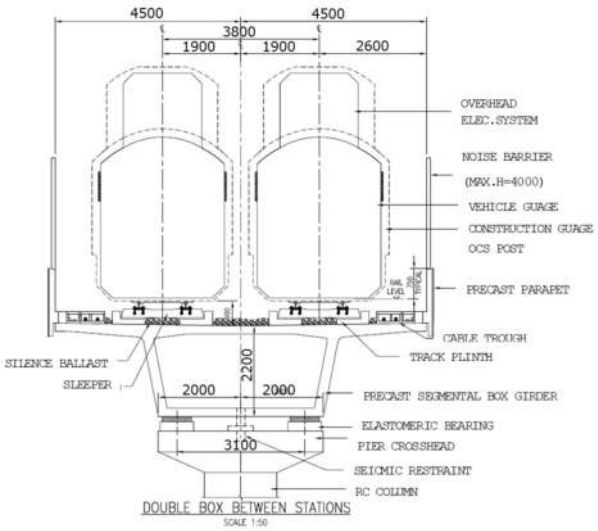


圖 4　高架橋標準斷面圖

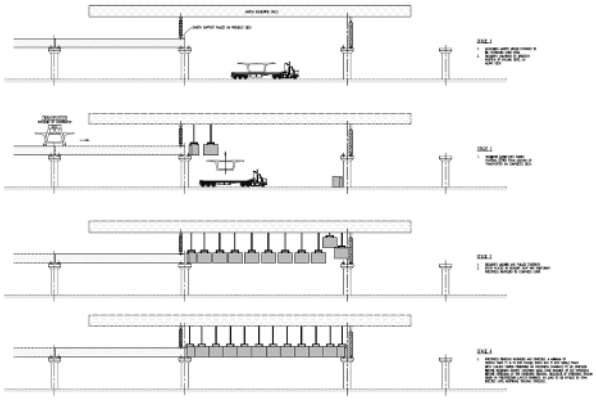
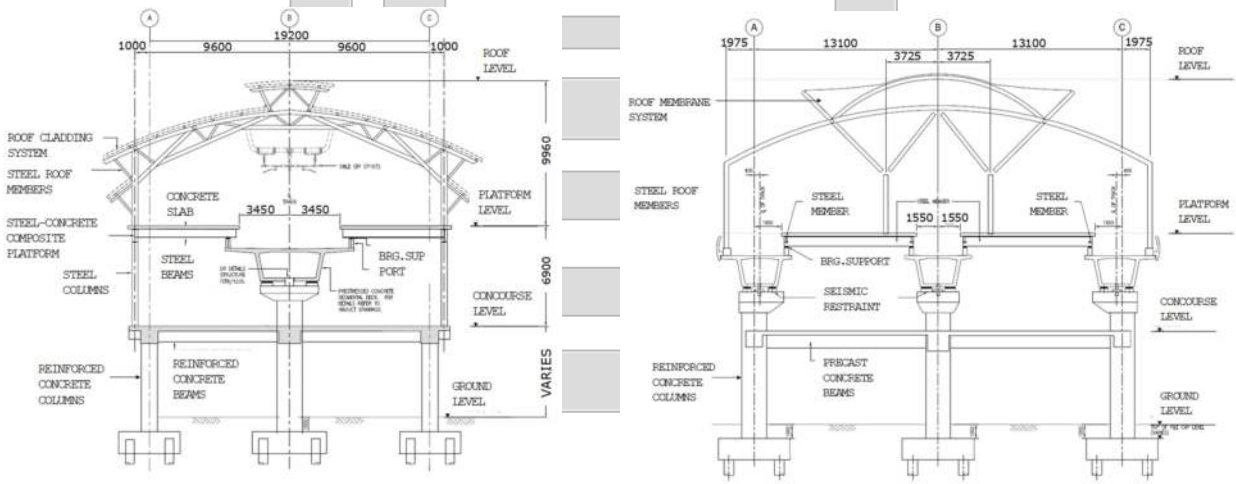


圖 5　高架橋施工方式示意圖

高架車站除 Blok M 車站為兩島三股道型式外，其餘三站均為二股道側式月台車站，如圖 6：



Haji Nawi、Blok A、Sisingamangaraja 車站　　Blok M 車站

圖 6　高架車站剖面圖

1. Haji Nawi、Blok A、Sisingamangaraj 車站：
（1）車站型式：兩股道側式月台車站
（2）車站尺寸：車站長 175 公尺，寬 21.2 公尺
（3）結構型式：多柱構架式結構
（4）構造型式：穿堂層（含）以下 RC 構造，穿堂層以上鋼構造
（5）屋頂型式：鋼桁架結構
2. Blok M 車站：
（1）車站型式：兩島三股道車站
（2）車站尺寸：車站長 175 公尺，寬 30.15 公尺
（3）結構型式：多柱構架式結構
（4）構造型式：穿堂層（含）以下 RC 構造，穿堂層以上鋼構造
（5）屋頂型式：薄膜結構

高架車站施工較為複雜，墩柱採傳統現場澆置工法；橫向大梁施工則為考量下方道路交通需求，採預鑄工法施作，其餘縱向大梁仍為場鑄施工；穿堂層 RC 樓版亦採中空預鑄樓板，降低對橋下道路交通的衝擊。月台以上及屋頂結構則為鋼構吊裝工法施工。

（二）工作階段

本計畫執行依契約規定分為四階段；第一階段為啟始報告階段 ICR（Inception Report），第二階段為細部設計階段 TD（Technical Design），第三階段為施工階段 CD（Construction Design），第四階段為竣工階段 AB（As-built）。其中第二階段細部設計 TD 階段為主要工作重點，花費較多人力資源與時間進行驗證與審查工作。

（三）工作期程

依據契約規定統包商每次提供設計文件後需於 14 天內完成驗證及審查工作，計畫執行時均於規定時間內提出審查意見。此外，因為本工程為統包工程，故除契約規定之基本時程外，有時亦需配合統包商現場施工需要，需於短時間內完成驗證工作，以利工地現場施作。

本計畫自 2013 年 12 月開始至 2018 年 6 月結束，共 4 年 7 個月，原契約期間為 2013 年 12 月至 2017 年 5 月，歷經三次延長契約期限，最後一次延長至 2018 年 6 月。主要執行高峰期在 2014 年至 2016 年之間，2017 年之後則主要為配合統包商變更設計及追加項目等之工作。

四、執行方式與過程

（一）啟始會議

本計畫於 2013 年 12 月與統包商簽訂 3PVC 契約後，隨即展開準備工作，並於同年 12 月至印尼雅加達參加啟始會議，參加成員包括統包商 OSJJV、結構細部設計顧問 Hewson 公司、車站建築設計 Arkonin 公司及第三方設計驗證中興公司 Sinotech。

（二）執行方式與作業平台 ACONEX

本計畫於初期派遣專業組長一名至雅加達執行工作，主要處理計畫初期與統包商間之溝通及協調工作，並配合參加業主（MRTJ）或施工管理顧問（JMCMC）召開之會議；待大致上軌道之後，則所有成員均於臺北公司執行計畫，期間視需要或統包商要求，數次派員至雅加達舉行工作會議。

第三方設計驗證工作乃針對 DDC 設計成果之驗證，並提出驗證及審查結果。當統包商提供文件予中興公司後，中興公司隨即由各專業組成員進行驗證工作，並提出驗證審查意見後回覆統包商，統包商修正後再度提送，直至驗證無意見為止，流程如圖 7 所示。

本計畫業主規定以 ACONEX 系統作為團隊各成員間之協同作業平台，所有文件傳遞、文件發布、訊息傳遞等均透過此系統完成。ACONEX 為一施工專案管理平台，功能包含施工專案的資訊與流程管理、施工現場管理、建築資訊建模

中興工程，第152期，2021年7月，PP. 59-65
http://www.sinotech.org.tw/journal/

（BIM）資料與流程管理等。為使本計畫成員熟悉平台使用，ACONEX 香港公司亦特別指派講師至本公司進行為期一天之教育訓練課程，使計畫成員能更快速上手。進入 ACONEX 平台後之網頁如圖 8 所示，平台功能強大，惟本計畫主要僅使用郵件（mail）功能，統包商將送審文件利用郵件功能上傳至平台給計畫指定窗口人員，同時系統亦會自動另寄電郵（Outlook Express）通知該指定窗口，以方便工作進行；驗證完成之成果或審查意見亦以郵件；功能回覆統包商。每份郵件均有編號、版次，也有歷史追蹤功能，以利日後檔案追蹤管理需求。

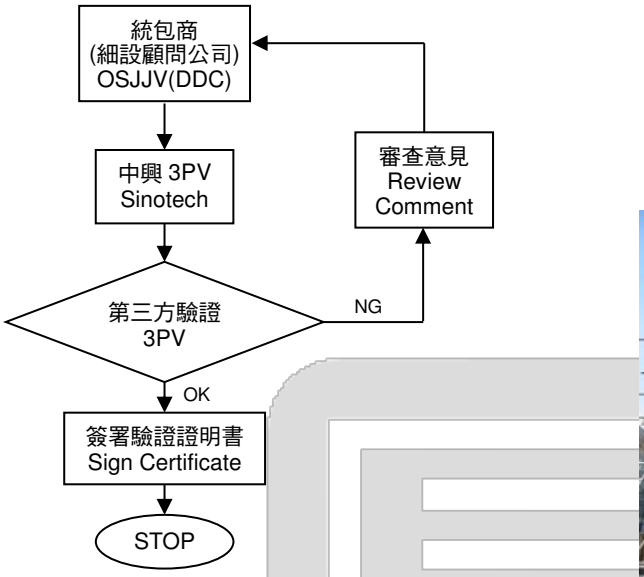
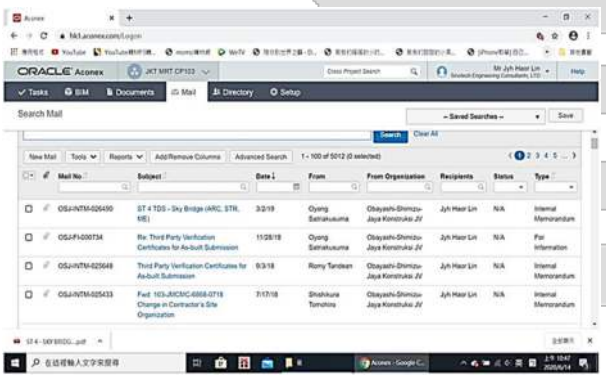


圖 7　3PV 驗證審查流程



（摘自 ACONEX 網頁）

圖 8　ACONEX 平台

（三）工作會議與工地視察

於計畫執行期間除啟始會議外，於 2014 年至 2016 年間數次分別派不同專業組別成員至雅加達與統包商舉行工作會議；會議內容主要係各專業組就驗證與審查過程中之疑義或建議與統包商及細設顧問 DDC 進行面對面的討論與溝通，同時會後並安排至工地現場視察，瞭解實際工程施工情形，如圖 9、圖 10。

圖 9　工作會議

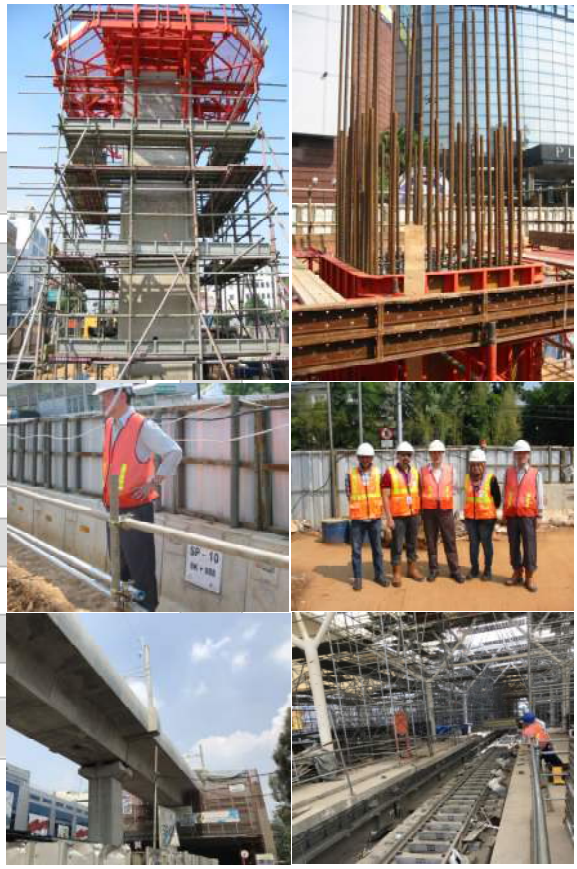


圖 10　工地現場視察

（四）第三方驗證審查

契約規定統包商提送文件給業主審查時須檢附第三方設計驗證單位簽署之驗證結果證明（certificate），因此，計畫執行時均須配合統包商提送時程，於規定時間內完成驗證及審查工作，並簽署驗證證明書交統包商進行後續工作。整體作業流程如圖 11 示。

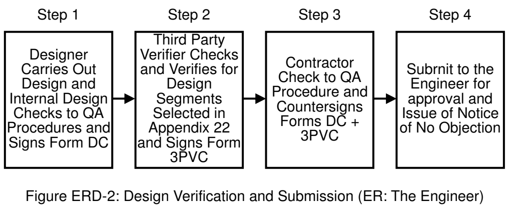
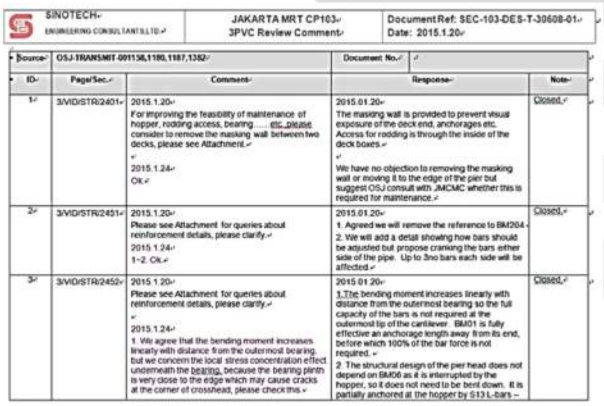


圖 11　設計文件提送流程

五、工作成果

（一）設計驗證及審查意見

本計畫期間共執行之驗證及審查文件甚多，每份統包商提出之文件均經由各專業組驗證及審查並提出審查意見，如圖 12 所示。由 ACONEX 紀錄資訊可知，本計畫回覆郵件達 1,794 件之多（郵件編號 SEC-INTM-001794），扣除部分僅傳遞訊息之郵件，具實質審查內容之回覆郵件達約 1,600 件之多，每份回覆郵件均代表各專業組成員的努力成果。文件經審查確認所有設計內容均無意見後統包商隨即併同 3PV 簽屬之證明書，圖 13，正式提送給 JMCMC 審查。



SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS LTD | JAKARTA MRT CP103 3PVC Review Comment | Document Ref: SEC-103-DES-T-30608-01 Date: 2015.1.20

Source	OSJ-TRANSMIT-001158,1180,1187,1382	Document No.		
ID	Page/Sec.	Comment	Response	Note
1	3/VID/STR/2401	2015.1.20 For improving the feasibility of maintenance of hopper, rodding access, bearing...... etc. please consider to remove the masking wall between two decks, please see Attachment. 2015.1.24 OK	2015.01.20 The masking wall is provided to prevent visual exposure of the deck end, anchorages etc. Access for rodding is through the inside of the deck boxes. We have no objection to removing the masking wall or moving it to the edge of the pier but suggest OSJ consult with JMCMC whether this is required for maintenance.	Closed.
2	3/VID/STR/2451	2015.1.20 Please see Attachment for queries about reinforcement details, please clarify. 2015.1.24 1-2. OK	2015.01.20 1. Agreed we will remove the reference to BM204 2. We will add a detail showing how bars should be adjusted but propose cranking the bars either side of the pipe. Up to 3no bars each side will be affected.	Closed.
3	3/VID/STR/2452	2015.1.20 Please see Attachment for queries about reinforcement details, please clarify. 2015.1.24 1. We agree that the bending moment increases linearly with distance from the outermost bearing, but we concern the local stress concentration effect underneath the bearing, because the bearing plinth is very close to the edge which may cause cracks at the corner of crosshead, please check this.	2015.01.20 1.The bending moment increases linearly with distance from the outermost bearing so the full capacity of the bars is not required at the outermost tip of the cantilever. BM01 is fully effective an anchorage length away from its end, before which 100% of the bar force is not required. 2. The structural design of the pier head does not depend on BM06 as it is interrupted by the hopper, so it does not need to be bent down. It is partially anchored at the hopper by S13 L-bars –	Closed.

圖 12　3PV 審查意見書（範例）

FORM 3PVC (Page 1 of 2)

THIRD PARTY VERIFICATION CERTIFICATE

This Design Certificate refers to Submission No. OSJ-103-VID-DSR-STR-0013 Rev - which comprises:

Design Segment No 303　Design Package No. 01

Design Stage: Technical Design

Documents in respect of:

The contents of this submission are listed in Section A below.

Documents for which a Notice of No Objection has previously been issued and which are of relevance to this Submission are listed in Section B below.

THIRD PARTY VERIFIER'S STATEMENT

We certify that the design of the Works, as shown and described in the drawings and documents listed in Section A below:

(a) has been independently checked and verified by us and complies with the Employer's Requirements and all other requirements of the Contract;

(c) includes all necessary and required approvals relating to the design;

(d) all effects of the design comprising the submission on, or from, the design of adjacent or other parts of the Works and interfacing Contracts have been fully taken into account in the design.

Signed by 'Authorised Representative' (for Third Party Verifier)

Name　Date

Position/ Designation

圖 13　3PV 驗證證明書（範例）

（二）執行期程

本計畫原契約期程自 2013 年 12 月至 2017 年 5 月止，其後配合統包商需求，共辦理三次延長，第一次自 2017 年 5 月延長至 2017 年 10 月，第二次自 2017 年 10 月延長至 2018 年 3 月，第三次自 2018 年 3 月延長至 2018 年 6 月總計共 4 年 7 個月。

（三）服務證明

本計畫結案後於 2020 年 4 月取得統包商服務完工證明書，如圖 14。

Obayashi – Shimizu - Jaya Konstruksi Joint Venture

CERTIFICATE OF COMPLETION

圖 14　第三方設計驗證服務完工證明書

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 59-65
http://www.sinotech.org.tw/journal/

六、結　論

本計畫為中興公司於印尼辦理與捷運工程相關的計畫，藉由在國內多年來累積的捷運工程設計及施工中服務經驗，以及團隊專業成員的努力下得以順利完成，亦獲得統包商 OSJJV 的肯定。經由本計畫的執行，瞭解國外營造廠商的營建管理、施工方式以及細設顧問公司的設計理念與方法，從中學習他人之長處，提升公司未來擴展海外市場的競爭力。2020 年中興公司再度順利取得雅加達捷運第二期工程 CP201 標（地下段工程）的第三方設計驗證案，期望藉由再次經驗的累積，為爭取海外捷運工程細部設計標案計畫奠定作業基礎。

參考文獻

Design Manual Viaducts and Transition Slabs, OSJJV
Viaduct Deck-Superstructure Design, Design Package Number: DES/T/30701, OSJJV
ORACLE Aconex 網站：https://hk1.aconex.com/Logon
Employer's Requirements-Design (2012)

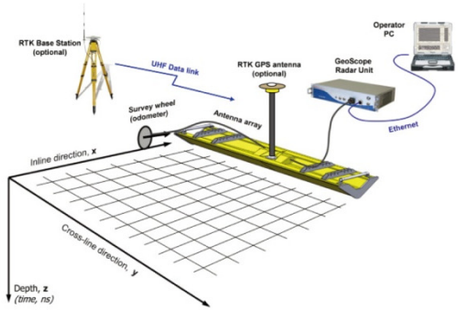
水利工程應用程式　**公 開 發 售**

SEC-HY21（二維泛用地表水分析軟體）
a. 網格及地形建立等前處理介面、電腦繪圖及流場視覺化
b. 定床水理模組
c. 水中生物物理棲地分析模組

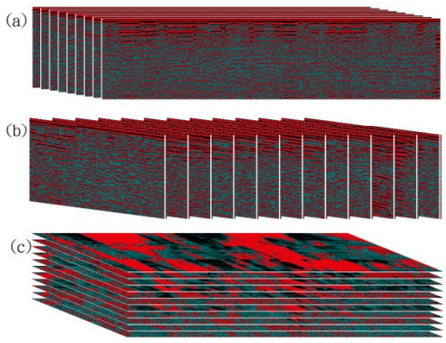
訂購電話：(02)8791-9198 轉 467 陳小姐
傳　　真：(02)8791-2198
E-MAIL：louise@sinotech.org.tw

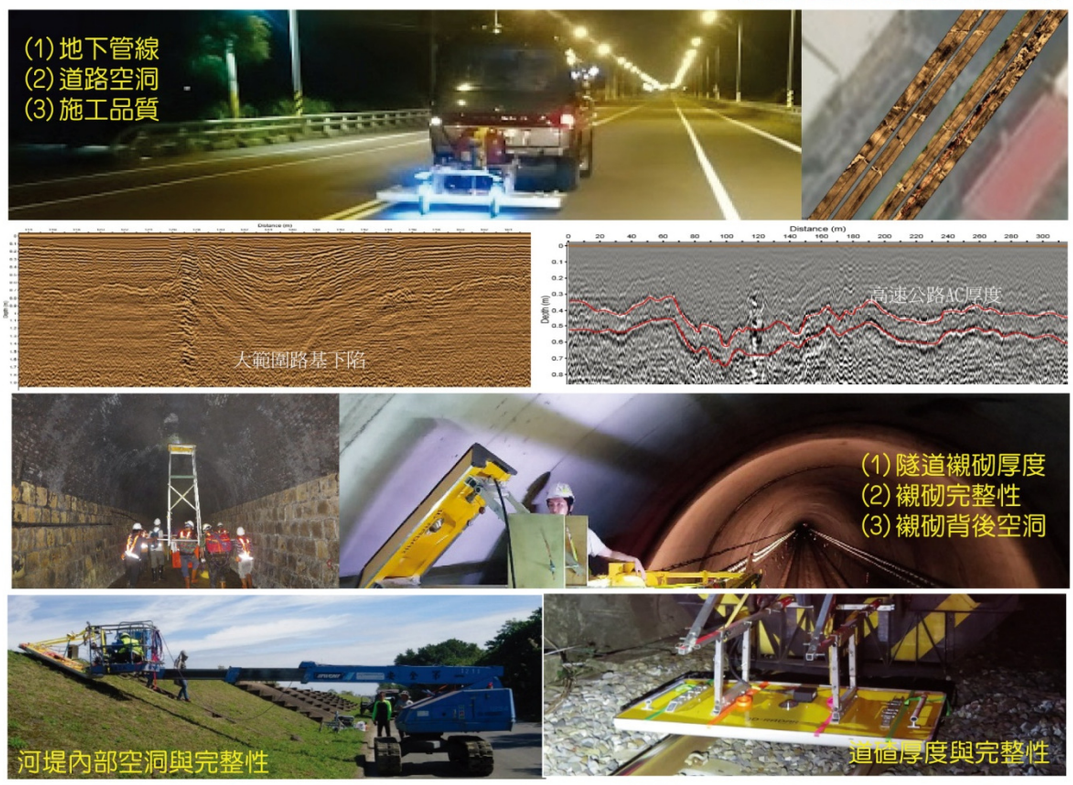
Looking into the earth -3D GPR

三維透地雷達(3D GPR)特徵如下:
(1)多組頻道天線(9組/20組)
(2)空氣偶合(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,可獲得三方向切剖面,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

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 67-76
http://www.sinotech.org.tw/journal/

地震對二氧化碳地質封存的影響－以苫小牧 CCS 示範計畫為例

楊智豪*　俞旗文**

摘　要

日本北海道苫小牧 CCS（Carbon Capture and Storage）示範計畫由日本政府推動，進行二氧化碳分離、回收、利用、運輸，地下封存技術調查與研發，商業化調查與驗證測試；整體計畫由日本 CCS 調查株式會社（簡稱 JCCS）負責執行。JCCS 在 2009~2011 年調查階段選定了北海道苫小牧港區下方兩組不同深度的地層（萌別層、滝ノ上層），作為二氧化碳封存的儲集層。示範計畫於 2019 年 11 月 22 日，已達成總灌注量約 30 萬噸的預設目標。

2018 年 9 月 6 日，北海道膽振東部發生規模 6.7 的地震。此事件提供了檢驗二氧化碳地質封存地震安全性難得的實例經驗。JCCS 根據其風險管理手冊，採取了緊急事件應變措施，並隨後進行與地震事件衝擊相關的安全評估作業，以昭公信。本文經由管道取得專家審定後完整的安全評估報告，特為文分享此案例經驗。本案例中，JCCS 綜合監測科學證據與模擬結果指出：（1）地震震源與灌注點位置比對顯示在地質上兩者並無連續性關係，可排除膽振東部地震是因為二氧化碳注入前述的兩個儲集層所誘發；（2）灌注區域連續進行微震監測關聯事件分析顯示地震前後並未有微震事件發生。因此排除二氧化碳封存作業與北海道東部膽振地震有直接關聯；（3）從數值模擬與實測的結果相互驗證，得知地震發生後監測到的壓力升高，可解釋為與震央位置附近的斷層位移，使得地殼變形所致；（4）根據實測儲集層壓力和溫度數據，得知北海道膽振東部地震並未造成地層內二氧化碳的洩漏。

關鍵字：苫小牧、CCS 示範、碳封存、膽振東部地震、北海道

一、前　言

2018 年 9 月 6 日凌晨 03:07 北海道發生了重大地震。震央位於北緯 42.7 度、東經 142.0 度，靠近北海道膽振（Iburi）綜合振興局所轄的勇拂郡厚真町附近，距札幌市約 70 公里，距東京都約 790 公里。本次地震規模為 Mw 6.7，震源深度約 37 公里（參考維基百科）。日本氣象廳命名為平成 30 年北海道東部膽振地震（Hokkaido Eastern Iburi Earthquake）。

地震震央也位在日本北海道苫小牧市（Tomakomai City）東邊約 30 公里，為苫小牧 CCS 示範計畫（Tomakomai CCS Demonstration Project）自 2016 年 4 月灌注二氧化碳開始以來，所遭逢的最大地震侵襲。震央距離二氧化碳注入區域水平距離約 30 公里，區域範圍內量測到最大震度為 7

*　中興工程顧問社大地工程研究中心助理研究員
**　中興工程顧問社大地工程研究中心副主任

級；在苫小牧 CCS 示範場址附近所量測到的震度則小於 5 級（158 gal）。隨後，於 2019 年 2 月 21 日，同地又發生了一次地震規模為 Mw 5.8。據示範計畫執行者日本 CCS 調查株式會社（以下簡稱 JCCS）在震後科學性自評證明：這兩次地震事件均未對場址造成嚴重影響，但事業主管機關要求 JCCS 必須對當地居民安排進行地質封存安全性公聽會，並邀集專家對 JCCS 提出的科學性安全評估報告作說明；此報告必須進行專家審查確認。

2019 年 8 月 28 日~30 日，本社派員隨同台灣碳捕存再利用協會（以下簡稱 TCCSUA），應日本 JCCS 邀請參觀苫小牧示範計畫場址。期間聽取地震事件對場址的影響評估，也取得了審查結果正式的安全評估英文報告書「Research Report on Impacts of Hokkaido Eastern Iburi Earthquake on CO2 Reservoir 2nd edition」（2019 年 8 月）。爰此，本文乃參考該報告的內容，分享此「地震是否危及二氧化碳的儲集層封存安全」難得的日本經驗。

二、苫小牧CCS示範計畫

日本北海道苫小牧 CCS 示範計畫由日本政府推動，進行二氧化碳分離、回收、利用、運輸，地下封存技術調查與研發，商業化調查與驗證測試；由日本 CCS 調查株式會社（以下簡稱 JCCS）負責執行。JCCS 公司創立於 2008 年 5 月，由 35 家與 CCS 產業相關的公司包含：電力公司、石油公司、石油開發公司和設備工程公司等合資成立。成立宗旨即為碳捕捉及封存整合性示範計畫在日本進行全面性的調查與研究。

示範計畫總時程共九年（如圖 1）。其中三階段時程規劃如下：

1. 2012~2015 年（準備階段）：在選址完成後，進行二氧化碳注入設備的設計與建造、鑽鑿注入井以及法規與安全準則之研究。
2. 2016~2019 年（灌注階段）：進行二氧化碳灌注作業，目標灌注量為 30 萬噸。
3. 2015~2020 年（監測階段）：2015 年起進行基線監測；2016 年灌注作業開始進行後，同步執行監測作業，直到 2020 年。之後，仍會另案延續灌注後長期監測。

（一）儲集層與灌注深度

計畫場址位於北海道苫小牧港區一帶，緊鄰北太平洋（如圖 2），在 2009~2011 年調查階段透過海域三維震測、探查井岩心分析、井測資料等，選定了兩組深度不同的砂岩、火成岩作為二氧化碳封存目標儲集層（Reservoir rock）。此二儲集地層之分層剖面示意圖（如圖 3）。

較淺 Moebetsu 層（萌別層），深度約在海床下 1,000~1,200 公尺，為第四紀砂岩層，岩層厚度約 100 公尺，孔隙率約 20~40%，滲透率約 9~25 md。此儲集層上方有厚度約 200 公尺泥岩作為蓋層（Cap rock）。

較深 t1 member of Takinoue 層（滝ノ上層的 t1 段），深度約在海床下 2,400~3,000 公尺，為中新世火成岩或火山碎屑岩，岩層厚度約 600 公尺，孔隙率約 3~19%，滲透率約 0.01~7 md。此儲集層上方有厚度約 1,100 公尺中新世泥岩層作為其蓋層。

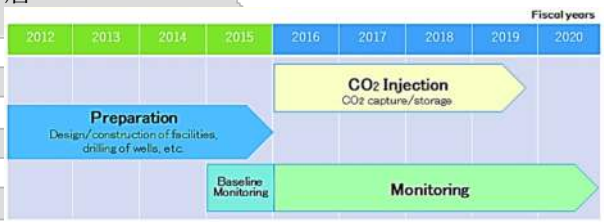


圖 1　苫小牧 CCS 示範計畫總時程（分三階段）

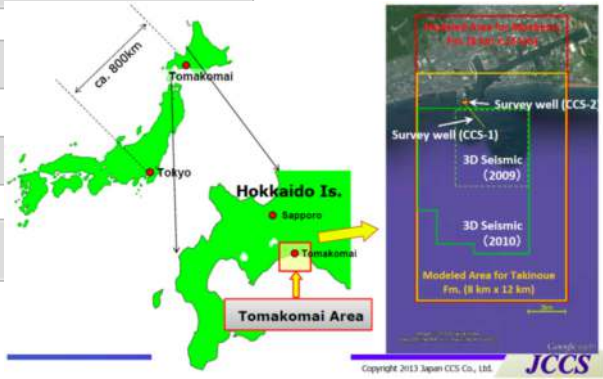


圖 2　苫小牧 CCS 示範計畫位置圖

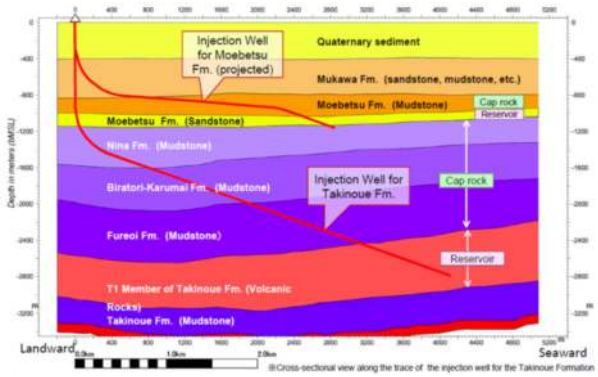


圖 3　苫小牧地區兩口 CO_2 注入井與地層剖面示意圖

（二）捕獲設備與灌注設備

目標儲集層調查工作完成後，JCCS 即開始著手設計與興建示範計畫地面設施，並鑽鑿兩口斜井至兩處目標儲集層。

苫小牧 CCS 示範計畫地面設備鳥瞰圖與標示各處相關設施說明（如圖 4）。地面設施包括：氣體供應與分流設備、二氧化碳捕獲設備（Absorption tower, Stripping tower, Flash tower）、二氧化碳灌注設備（Compressor, Injection wells），以及控制大樓（Control building）。二氧化碳來源為鄰近既有的「出光興產樣煉油廠」，在氫氣的製程中利用變壓吸附（Pressure swing adsorption, PSA）原理，純化製氫所剩之尾氣（Off gas）。

尾氣包含二氧化碳（體積約占 44~59%）、氫氣、甲烷、一氧化碳等，利用 2.5 公里長的管線，輸送到二氧化碳捕獲設備。

二氧化碳捕獲設備係採用胺類吸收法，捕獲純度大於 99% 二氧化碳，每年約可捕獲 220,000 噸（每天約 600 噸）二氧化碳供灌注使用。捕獲後剩餘的氣體，則回收作為鍋爐以及發電機組蒸氣渦輪用的燃料。

最後，經過壓縮機增壓後，純化的二氧化碳輸送至廠內地表注入設備，分別經由兩口注入井灌注至兩個不同的儲集層中。兩口注入井包括注入點位在 Takinoue 層的注入井（簡稱 IW-1），與 Moebetsu 層的注入井（簡稱 IW-2）。台灣 TCCSUA 協會成員於參觀場址當日（2019 年 8 月 29 日）站立在井頭旁合照（如圖 5）。

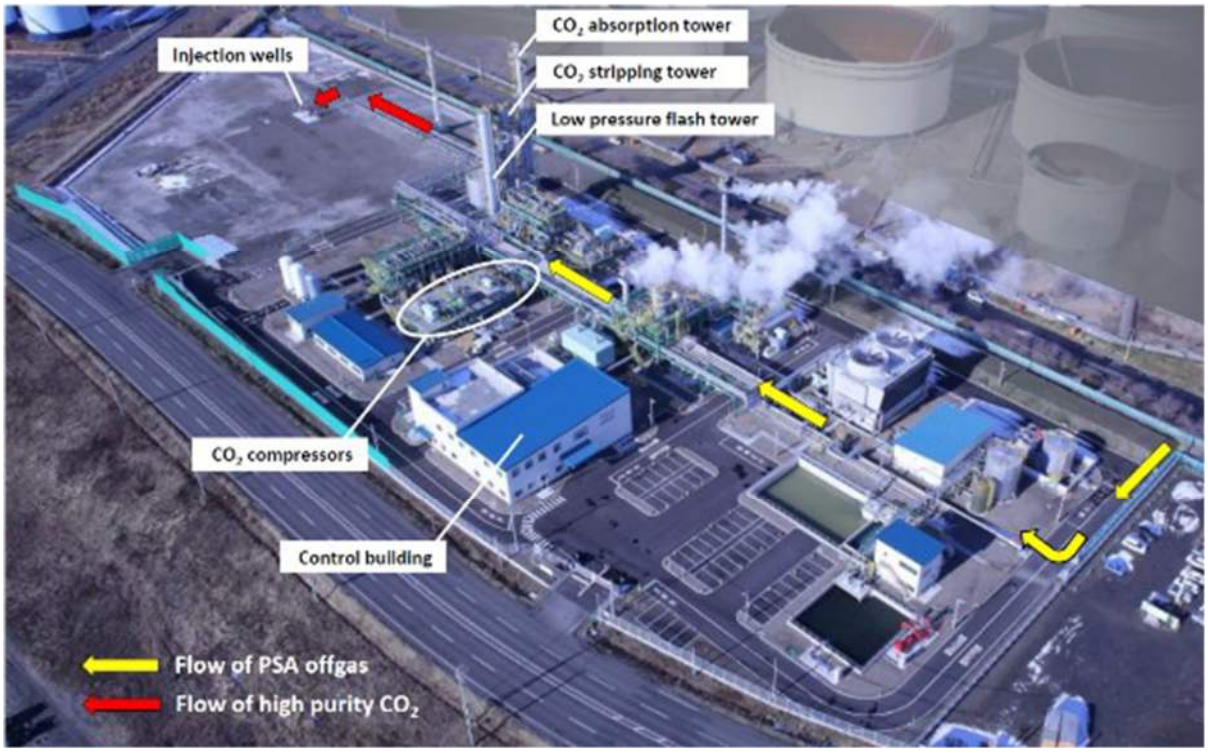


圖 4　示範計畫地面設備鳥瞰圖

注入壓力則依照不同岩層靜水壓來調整。Moebetsu 層最大操作注入壓力為 9.7 MPa；Takinoue 層最大操作注入壓力為 23 MPa。本示範計畫安全極限的灌注壓力，一般定為蓋層強度 90%，例如在 Moebetsu 層，極限灌注壓力定為 12.6 MPa。

二氧化碳注入速率取決於注入期間煉油廠的操作負載，同時也受儲集岩層條件影響。

圖 5　台灣 TCCSUA 成員參觀現地兩口注入井內外設施

（三）注入井與灌注作業

兩口注入井皆從陸域垂直往下深鑽，到了預定深度後轉向朝海域方向斜鑽，持續鑽進到最有可能的儲集層位置，穿孔注入點座落於離岸約 3~4 公里處。以 Takinoue 層為儲集層的注入井 IW-1 最大傾斜角度為 72 度，總計鑽進 5,800 公尺，鑽進垂直深度為 2,754 公尺，鑽進水平長度為 4,347 公尺。以 Moebetsu 層為儲集層的注入井 IW-2 最大傾斜角度為 83 度，總計鑽進 3,500 公尺，鑽進垂直深度為 1,161 公尺，鑽進水平長度為 2,900 公尺（如圖 3）。

淺的 Moebetsu 層灌注作業從 2016 年 4 月開始進行；深的 Takinoue 層灌注作業，則從 2018 年 2 月才開始進行。絕大部分二氧化碳灌注於 Moebetsu 層。因該地層壓力於灌注後仍保持穩定，升壓量很小，成為主要儲集層。Takinoue 層的火山碎屑岩，孔隙連通條件不佳，灌注過程發現升壓太快，因而於短期內便停止灌注。

本案至 2019 年 11 月 22 日終於達成計畫目標 300,000 噸二氧化碳灌注作業。最終累積灌注二氧化碳總量為 300,110 噸，包含 Moebetsu 層 300,012 噸與 Takinoue 層 98 噸。

（四）監測系統

為確保二氧化碳注儲的安全性與穩定性，監測二氧化碳在儲集層中的移棲行為，是一件相當重要的任務。因此必須建立一套縝密的監測系統，來偵測二氧化碳是否會洩漏至上方蓋層。

由於日本是一個地震相當頻繁的國家，必須透過詳細的測量與驗證以比對二氧化碳地質封存與地震間的關係。因此計畫主要監測設施除設置兩口注入井（IW-1, IW-2）外，尚有三口監測井（OB-1, OB-2, OB-3）、一條海底電纜（Ocean bottom cable, OBC）、四組海底地震儀（Ocean bottom seismometer, OBS）、一組陸上地震儀。

表 1 為示範計畫主要的監測設施與相關項目。各監測設施的空間配置情形（如圖 6）。為了解二氧化碳在地層中移棲行為，於 2017 年累積注入二氧化碳至 Moebetsu 層達到 65,000 噸後，進行三維震測與資料比對分析。比對分析主要係將量測結果與未注入前基線（Baseline）調查成果相互比較，從兩者震測比對訊號差異處可視為封存至該地層的二氧化碳分布範圍（如圖 7）。其分布範圍與模擬注入 61,238 噸的結果相似。由上述監測系統獲取的資料，可持續反饋以強化數值模擬模型，精進二氧化碳移棲分析，並進一步以持續性反饋預測後續增加注入的二氧化碳分布的範圍。

表 1　苫小牧 CCS 示範計畫監測設施

監測設施	監測項目	監測頻率
注入井	井下：溫度、壓力	連續監測
	井頭：壓力、二氧化碳注入率	連續監測
監測井	井下：溫度、壓力、微震、自然地震	連續監測
海底電纜	微震、自然地震、三維震測訊號	連續監測
海底地震儀	微震、自然地震	連續監測
陸上地震儀	微震、自然地震	連續監測
二維震測	二氧化碳移棲分布	定期監測
三維震測	二氧化碳移棲分布	定期監測
海洋環境監測	化學、物理、生物資料	定期監測

中興工程，第152期，2021年7月，PP. 67-76
http://www.sinotech.org.tw/journal/

圖 6　場址近域監測設施配置

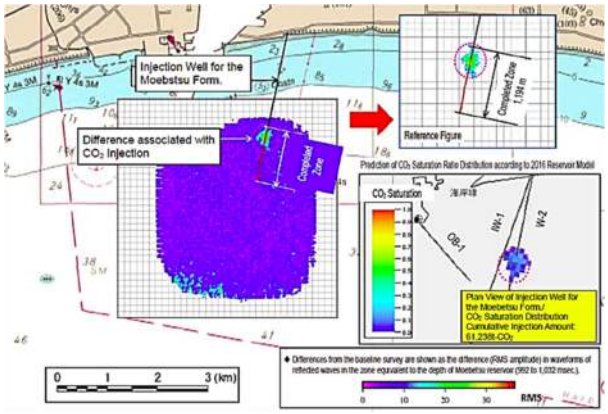


圖 7　三維震測監測結果示意圖

（五）緊急災害風險管理規則

2016 年 4 月二氧化碳灌注前，JCCS 針對發生緊急災害需採取的應變措施制訂內部規則。其框架根據基本風險管理手冊，為各計畫項目（包括：陸上捕獲設備、陸上注入設備、離岸儲集層、公共關係等）制訂一套風險管理手冊。地震發生時，便使用此手冊，採取相對應的措施。

JCCS 亦針對陸上捕獲與注入設備建立一套獨立的緊急停機系統（Emergency shutdown system, ESS）。當發生嚴重災害因子（例如：爆炸、火災、環境破壞、人為破壞、重要設備損壞）或設施異常，該設施於運行時可以安全地停止、關閉和隔離。

2018 年 9 月 6 日地震前後（2018 年 9 月 1 日~10 日）示範計畫之設備狀態，整理如表 2。地震發生當下，二氧化碳捕獲設備正處於關閉模式，但是如果設施處於正常運行模式，則緊急停機系統會被啟動，因為設施檢測到的加速度為 158 gal，此值已超過 150 gal 關閉的安全標準。

然而地震事件發生時，JCCS 尚未有針對長時間停電與網路斷線處置方案。因此注入井、監測井與海底電纜的資料數據收集中斷，亦無法進行資料驗證。因此 JCCS 為避免相關操作設備、辦公設備、通訊設備、資料監測設備因停電而失效，提出改善方法，包括：（1）新增示範計畫中心緊急電源供應（80kva）；（2）新增電池供應給注入井資料記錄計使用。

表 2　地震前後苫小牧 CCS 示範計畫之設備狀態

日期	設備狀態
2018/9/1	9/1 前二氧化碳捕獲與注入設備均運作正常。而後二氧化碳供應來源發生問題，乃暫時停止供應二氧化碳，以致二氧化碳注入作業也隨之暫停。因此二氧化碳捕獲與注入設備保持待機狀態，以便二氧化碳恢復供應後可以隨時重新注入。
2018/9/5	二氧化碳來源廠商延後恢復二氧化碳供應的時程，相關設施從待機模式切換至停止模式。
2018/9/6	03:07 發生地震，捕獲裝置附近的地震儀量測到 158 gal 的震動，若在正常運作模式下，該震度會觸發緊急停俥，但實際上設備處於停止模式，所以並未執行緊急停俥。停電導致監測設備停止。
2018/9/8	電力恢復供應。恢復捕獲與注入設備至地震前的停止模式。
2018/9/10	監測設備恢復運作。

三、二氧化碳注入與地震關聯性分析

北海道膽振東部規模 6.7 大地震，震央距離二氧化碳注入區域水平僅約 30 公里，在苫小牧 CCS 示範場址附近所量測到的震度小於 5（158 gal）。大地震勢必引發公眾對當地二氧化碳封存安全性疑慮。以下是整理 JCCS 計畫團隊，就所蒐集的監測量測資料，以科學性角度，分別評析探討二氧化碳注入與地震關聯性。旨在澄清地震是否因為二氧化碳注入地下深部儲集層誘發，或是否有洩漏之可能。

（一）地震震源與灌注點位置比對

由日本氣象廳自 1997 年 10 月起歷史地震資料得知，示範場址鄰近區域不時會發生規模 4.0 以上的地震，最近一次在 2017 年 7 月也曾發生規模 5.1 地震，震源深度為 27 公里。地震學家可由區域地體構造探究這些地震發生的原因。

北海道南部區域地體構造為太平洋板塊隱沒至千島海溝（Kuril trench），千島島弧（Kuril arc）由東往西碰撞東北日本島弧（Northeastern Japan arc）。千島島弧的上部地殼擠壓造成一系列的逆衝斷層，形成日高山脈（Hidaka mountain range）；千島島弧的下部地殼則向下移動至東北日本島弧之下（如圖 8）。

而在膽振東部區域，從日高（Hidaka）至浦河町外海（Offshore of Urakawa）一帶，地震的特徵是發生在外海的地震會比發生在陸上的地震，位於更深的位置。本次地震事件震源位於 37 公里深基盤。地質剖面 X-X’ 顯示地震震源位置（如圖 9），主要位於以變質岩為主的山脈逆衝斷層帶內，與逆衝斷層帶西側注入二氧化碳場址所在的沉積岩地區，在地質上並無連續性關係，應可排除膽振東部地震是因為二氧化碳注入僅有不到 3 公里地下深部的兩個儲集層所誘發。

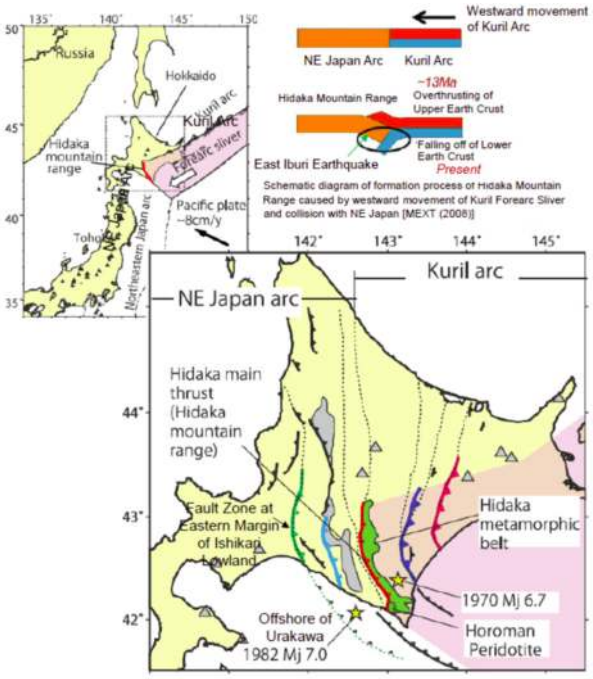


圖 8　北海道南部地體構造示意圖

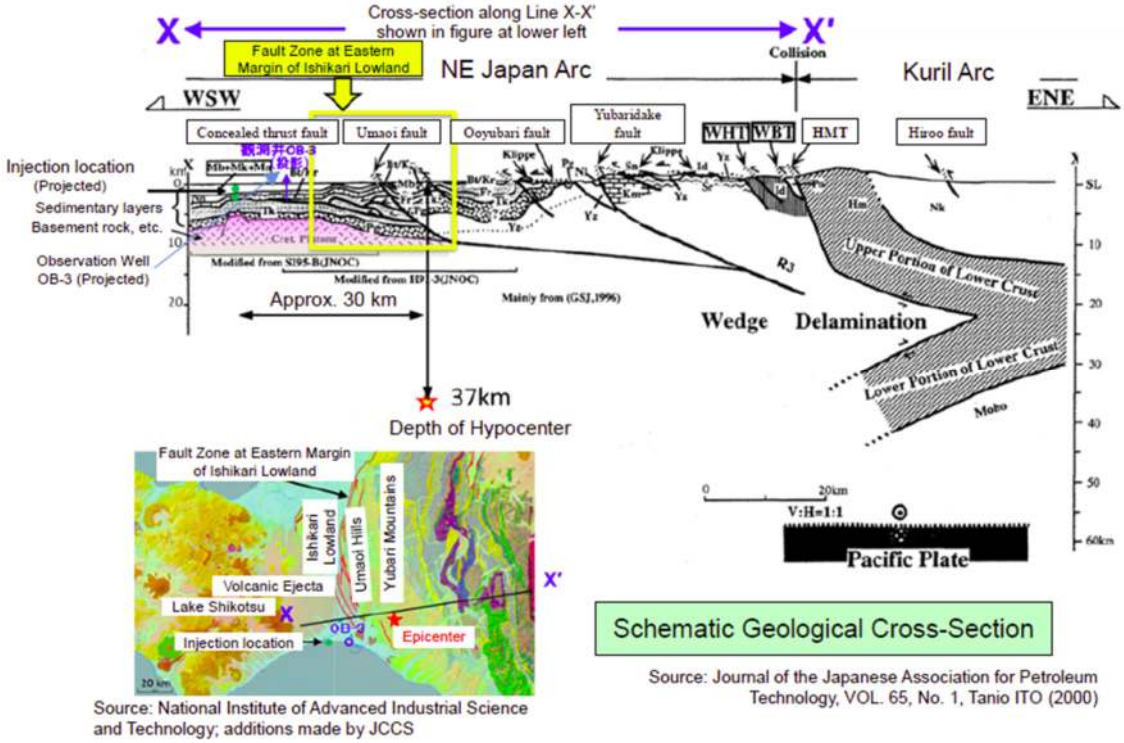


圖 9　北海道膽振東部地震震源與地層剖面示意圖

（二）地震活動與場址相關性分析

除了示範計畫監測設備所蒐集的資料，JCCS另外結合場址附近四個日本政府設置的 Hi-net（High-sensitivity seismograph network）自然地震網所形成的「自然地震監測區」，並將注入點周圍東西 6 公里、南北 6 公里，深度約 15 公里的區域，定義一處「微震監測區」，區內設置高感度微地震觀測網，透過觀測資料來評估注入作業對儲集層的影響。

微震監測區位置（如圖 10）。微震監測區內，監測系統能監測到所有與二氧化碳注入有關的微震活動，觀測精度可達地震規模 -0.5 以上的地震事件。

2015 年 2 月 1 日~2020 年 5 月 30 日之間，微震監測結果，偵測出發震事件的位置及深度與次數及時間序列（如圖 11）。在注入作業開始前，2015 年 4 月~2015 年 8 月之間，在微震監測區測到 9 次微震事件；在注入作業開始後，2017 年 8 月測到 3 次微震事件。這些微震均發生在約 6 公里或更深的位置，代表監測可以記錄到該地區可能發生之最小規模自然地震。2017 年 8 月 3 次微震事件後，在微震監測區域就未再監測到有類似微震事件發生。在圖 11 中時間序列亦包括 2018 年北海道東部膽振地震事件。

另外，與上述相同時間序列內，在自然地震監測區監測結果顯示樽前山（Mt. Tarumae）以南地區與石狩低地（Ishikari lowland）東部邊界斷層帶南部鄰近及其延伸地區，有明顯的微小地震活動。但這些監測到偶發的小地震和微震事件，與苫小牧場址注入作業時間點，以及 2018 年 8 月膽振東部地震時間點，並沒有明顯的相關性。

如先前所述，在地震發生前自然地震監測區確有觀測到許多小型地震活動。膽振東部地震發生後，在苫小牧港東部自然地震監測區內也可觀測到許多小地震和微震事件。這些地震被認為是主震後發生的餘震活動。儘管地震發生次數顯著增加，但震源位置並沒有超出先前歷史地震震源分布範圍。在二氧化碳封存位置附近微震監測區內，根據監測資料直到 2019 年底灌注結束，皆未觀察到與膽振東部地震對應的地震活動或區域變化。

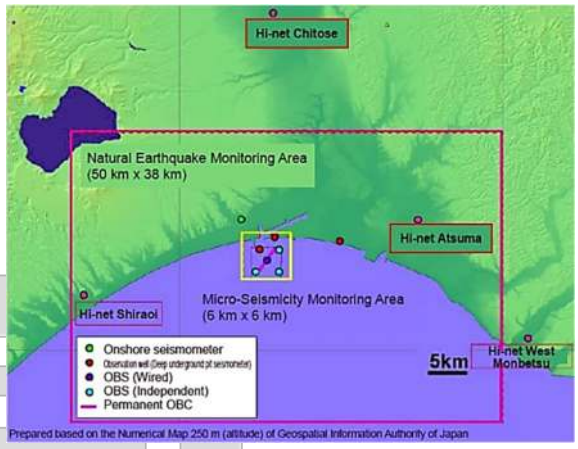
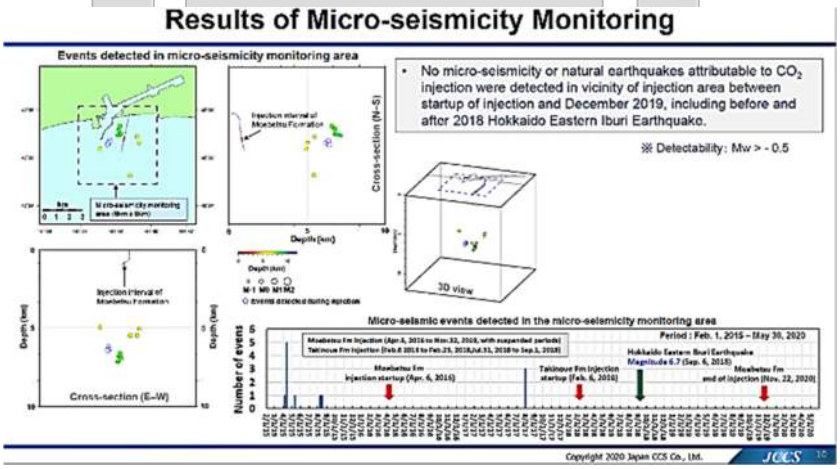


圖 10　場址廣域自然地震監測站配置



（2015 年 2 月 1 日~2020 年 5 月 30 日）

圖 11　微震觀測結果

（三）預測誘發地震機制數值模型分析

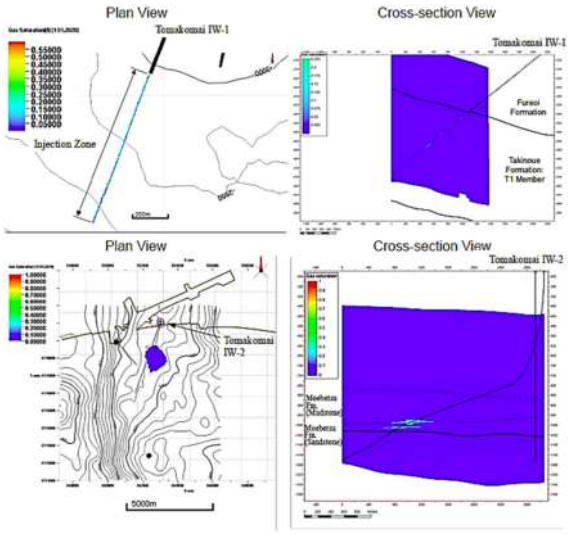
經過檢驗示範計畫實際蒐集的地震監測數據，整合數值模型分析與模擬二氧化碳注入行為，亦可作為評估二氧化碳注入與是否誘發地震之間關係的科學性驗證。

在 2011 年示範計畫開始前，JCCS 早已進行注入二氧化碳在儲集層與蓋層中發生誘發地震可能性評估。在模擬二氧化碳注入總量為 750,000 噸（每年注入 250,000 噸，共計 3 年）的情境分析中，二氧化碳注入造成應力變化，在岩石內斷層裂隙表面的摩擦力會因裂隙內液壓上升而下降，累積應變會被釋放，而誘發地震。其中一評估項目為滑移趨勢係數（滑移面上剪切應力與滑移強度的比值），當係數超過 1 時斷層裂隙將發生滑移。斷層滑移的空間分布，可作為研判分析情境下誘發地震潛在趨勢的重要參考。

在實際注入前 Moebetsu 層和 Takinoue 層滑移係數空間分布情境分析結果顯示，二氧化碳注入會使儲集層壓力上升約 2 MPa 左右；兩地層計算結果顯示該滑移係數上升皆未超過 1，故分析研判二氧化碳注入作業不會誘發斷層裂隙滑動，但不排除仍會有發生一些小規模微震的可能。

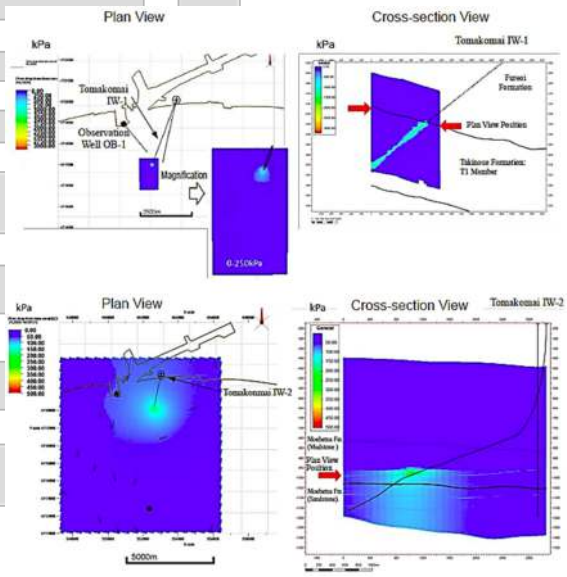
此外，為了解二氧化碳注入對震源斷層影響，研究團隊使用實際注入記錄建立的儲集層模型（更新至 2018 年 7 月），對二氧化碳注入結束後進行二氧化碳熱力學行為模擬，並假設累積的注入量（Moebetsu 層 300,000 噸、Takinoue 層 750 噸），重新估算儲集層中二氧化碳飽和度和壓力增量。

有關注入 300,000 噸後兩儲集層最終飽和度分布變化分析結果（如圖 12）。壓力變化分布結果（如圖 13）。此模型預測顯示：在 Takinoue 層，注入井中的壓力增加約 5 MPa（考量注入壓力上限），地層壓力到注入區域外約 50 公尺處遞減至 2 MPa，而距離 1 公里處的地層壓力則減至 0.25 MPa 以下；至於 Moebetsu 層，根據以往的注入記錄，注入井注入壓力上限導致地層壓力增加約 0.7 MPa。北海道膽振東部地震震央位置距離二氧化碳注入點超過 30 公里，因此二氧化碳注入造成震央位置的應力增量僅約為 1Pa（帕）。換言之，二氧化碳注入所造成的影響大約是潮汐（幾千帕）對地殼施加的應力變化 1/1000。這表示若與潮汐相比，其影響可以忽略不計，因此若考慮二氧化碳注入點位置與注入壓力微小變化，實不足以誘發北海道膽振東部地震。



（上）Takinoue 層、（下）Moebetsu 層

圖 12　預測注入作業結束後的 CO_2 飽和度空間分布

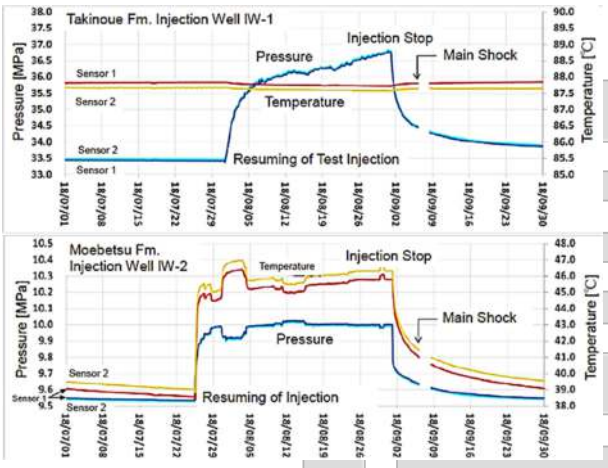


（上）Takinoue 層、（下）Moebetsu 層

圖 13　預測注入作業結束後的壓力增量空間分布

（四）地震發生地層注入溫度與壓力的變化

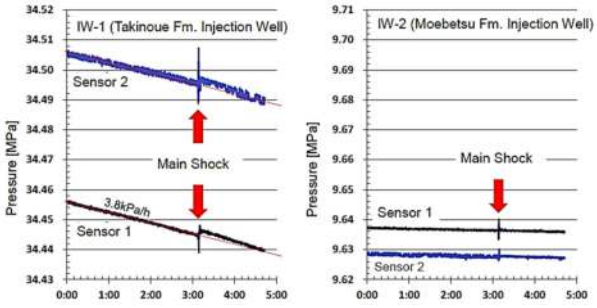
本計畫兩口注入井中，皆部署石英振盪高精度感測器，以進行井內溫度與壓力持續性觀測，經過井內觀測值歷時變化，可反饋改善數值模型分析準確性，亦可作為注入操作安全指引。因此膽振東部地震後，提供重要的安全評估佐證資料（如圖 14），並顯示深處 Takinoue 層注入井（IW-1）的測試灌注於 2018 年 7 月 30 日恢復，淺處 Moebetsu 層注入井（IW-2）的注入作業於 2018 年 7 月 25 日恢復。在地震發生前，於 2018 年 9 月 1 日，由於煉油廠源頭停止供應二氧化碳，使得注入作業暫時停止。因此，兩口注入井的壓力都呈現下降趨勢。在 IW-1 中地震發生時井下溫度呈上升趨勢，因為注入的二氧化碳溫度低於地層溫度；在 IW-2 中由於注入二氧化碳溫度高於地層溫度，井下溫度呈下降趨勢。由於地震停電導致監測數據中斷，但檢視整體資料，地震前、後井內溫度/壓力的變化趨勢，並沒有出現異常。



（上）Takinoue 層、（下）Moebetsu 層

圖 14　兩口注入井溫度壓力監測結果

IW-1 注入過程中壓力升高，反應了注入量與壓力之間的關係，Takinoue 層內壓力已增加到 37 MPa，雖仍低於壓力上限（38 MPa），已逼近管制值。儘管沒有發現由地震引起的溫度和壓力變化，但在主震發生後，由詳細的資料檢視發現 IW-1 井下兩個壓力計（sensor-1, sensor-2）卻都出現些微上升（如圖 15），但在地震發生前三小時壓降速率約為 3.8 kPa/hour，主震後井下壓力突然上升了約 1.8 kPa，隨後壓力隨著時間逐漸減小，並逐漸回復主震前的壓力回降趨勢。由於在地震發生後 95 分鐘停電，而停止數據記錄，因此無法完全了解當時數據情況，所幸從既有數據之趨勢可以推斷出，井下壓力在數小時內又恢復原來的壓力下降趨勢。



（左）Takinoue 層、（右）Moebetsu 層

圖 15　北海道 2018 年東部膽振地震前後井下壓力變化

在此處觀察到的壓力升高可被認為是某種類型的同震變化，而同震壓力變化的原因可能為：地震發生時靠近震央處的斷層發生位移，而導致地殼變形，進而引起地塊發生應變變化。關於這種靜態地殼變形，研究團隊考慮到初始餘震分布，建立震源斷層的數值模型（如圖 16）。模型分析計算場址觀察點的壓力變化估計值。計算結果顯示，二氧化碳注入點係位於震源斷層面解壓縮場域之中，地震後地層流體壓力升高，顯示其應變分布（如圖 17）與正應力變化（圖 18）。假設儲集層平均的走向和傾角（N45°W / 10°NE）與此處計算所得的整體應變分布有關。在 Takinoue 層的注入點，計算得到地層流體壓力上升約 1.9 kPa。此模擬結果與實際監測結果相近（上升約 1.8 kPa），因此可將監測的壓力升高，解釋為與震央位置附近之斷層位移，使得地殼變形所

致。由於 1.8 kPa 變化幅度非常小，監測到的壓力變化，並不會對儲集層中產生任何異常影響，也沒有因地質構造的破裂導致二氧化碳滲漏的可能性。因此，根據上述分析結果，2018 年 10 月 19 日由包含地震學專家組成的「苫小牧 CCS 示範計畫評審會議」達成以下共識：（1）地震沒有造成二氧化碳洩漏；（2）尚無數據顯示二氧化碳封存與地震之間存在直接關係。

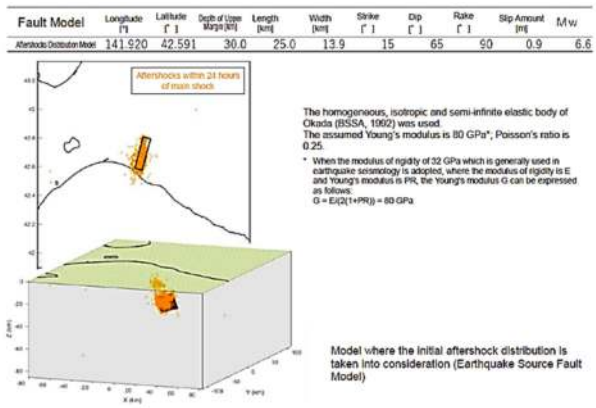


圖 16　震源斷層的數值模型

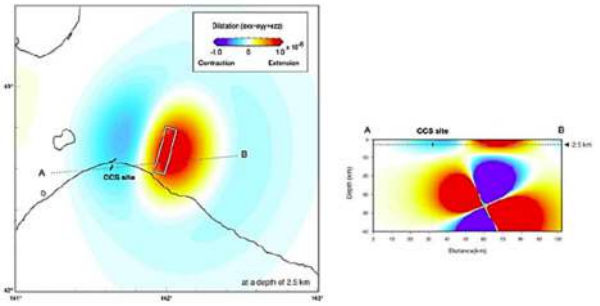


圖 17　應變之模擬結果

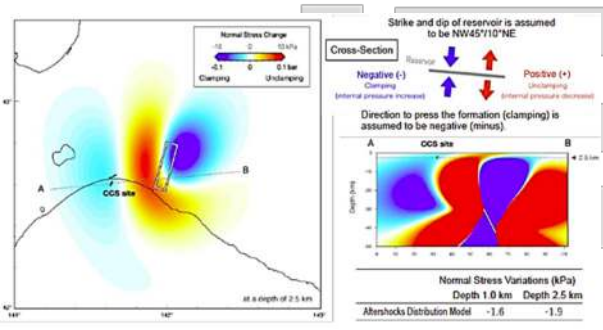


圖 18　正應力之模擬結果

四、結　論

北海道東部膽振地區 2018 年 9 月 6 日發生的規模 6.7 地震事件，提供檢驗二氧化碳地質封存地震安全性難得的實例經驗。JCCS 根據其風險管理手冊，採取緊急事件應變措施，並隨後進行與地震事件衝擊相關的安全評估作業，以昭公信。

經專家審定的安全評估報告中，JCCS 綜合監測科學證據與模擬結果指出：（1）地震震源與灌注點位置比對，顯示在地質上兩者並無連續性關係，可排除北海道東部膽振地震是因二氧化碳注入兩個儲集層所誘發；（2）灌注區域連續進行微震監測關聯事件分析，顯示地震前後並未有微震事件發生，因此排除二氧化碳封存作業與北海道東部膽振地震有直接關聯；（3）從數值模擬結果與實測結果相互驗證得知，地震發生後監測的壓力升高，可解釋為與震央位置附近之斷層位移，使得地殼變形所致；（4）根據實測儲集層壓力和溫度數據，北海道東部膽振地震並未造成地層內二氧化碳洩漏。

本案例因應地震發生的事前準備與事件衝擊安全評估經驗，適可提供國內未來推動二氧化碳封存計畫參考，俾規劃出適切的場址風險管理程序與完整安全監測系統。

參考文獻

Japan CCS CO., ltd.（2019）Tomakomai CCS demonstration project, 2019 年 8 月台灣碳捕存再利用協會參觀苫小牧示範計畫場址，日本 JCCS 簡報資料

Japan CCS CO., ltd.（2018）Research report on impacts of Hokkaido Eastern Iburi Earthquake on CO2 reservoir（Second edition），北海道膽振東部地震對 CO2 儲集層衝擊研究報告

産業技術環境局環境調和産業・技術室（2016）二酸化炭素削減技術実証試験事業（中間評価）事業成果（詳細版），平成 28 年 3 月 1 日第 30 回評価ワーキンググループ資料 3-3

澤田嘉裕（2020）Experience of Tomakomai CCS project, Deep dive workshop，Asia clean energy forum 2020 簡報資料

石井正一（2020）Tomakomai CCS demonstration project - achievements and future outlook，Japan-Asia CCUS forum 2020 簡報資料

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

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 77-85
http://www.sinotech.org.tw/journal/

BIM 輔助捷運 CSD/SEM 設計自動化發展與應用

倪寶惠*　姜式真*　王思涵*　劉執敏*　盧培文*　賴建名**

摘　要

本文以捷運細部設計標執行 BIM 及自動化程式輔助捷運 CSD/SEM 設計為案例，說明不同於以往 2D 圖說作業方式，發展以 BIM 模型進行捷運各專業組之設計整合流程（BIM 模型主要為土建模型及水電環控模型 2 大類型），透過衝突檢查軟體（Autodesk Navisworks）檢核各專業設計整合後成果之完整度及正確性，進而連結各專業組 BIM 模型以製作機電整合界面圖（CSD）及結構機電界面圖（SEM）。且為增進 CSD 及 SEM 圖說產出之效率，針對性質單純且動作反複之作業開發自動化程式，包含圖紙自動化、開口自動化、標籤自動化、預算自動化。此外，除了將土建與水電環控之需求納入 CSD/SEM 圖說外，亦納入機電系統廠商需求，以作為後續施工階段土建施工廠商與機電系統廠商之溝通基礎，以利後續發展施工階段之 CSD/SEM 圖說。

關鍵字：建築資訊模型（BIM）、機電整合界面圖（CSD）、結構機電界面圖（SEM）、土機界面、機機界面、衝突檢查、自動化程式

一、前　言

捷運設計涉及諸多專業，包含建築、結構（高架與地下）、土木、地工、水電環控等，因各專業圖說必須較為成熟後，才能整合並進行機電整合界面圖（Combined Services Drawings, CSD）與結構機電界面圖（Structural Electrical Mechanical Drawings, SEM）之圖說繪製。CSD 為套繪土建、水環及預留機電系統空間，SEM 為依據相關專業需求埋設管線、套管及放置各系統基座及開口；發展 CSD 圖可降低管線衝突、空間不足及改善大而不當之設計風險，而發展 SEM 圖則可避免因施工時程的差異或土木結構施工時由於施工承商眾多，造成界面繁雜統合不易，影響進度及改善缺漏施作項目之風險，避免事件發生後所產生二次施工或破壞結構疑慮，最終造及施工成本增加等之負面結果（蔡天和，2005）

過去於 2D 出圖作業時，計畫須訂定各專業上、下游交付時間以及相關圖說凍結版，以確保出圖版本採用一致性，此舉常造成設計時程較長，以及土建版本修正完成後，水環才能進行相關圖說製作或確認，導致設計期程長，且品質控管不易。

近年來相關捷運標案各專業，如建築機能、建築風貌、結構（高架與地下）、土木、地工、水電環控等均須採用建築資訊模型（Building

*　中興工程顧問公司軌道工程二部工程師
**　中興工程顧問公司軌道工程二部技術經理

Information Modeling, BIM）作業，故於設計階段，於內部界面可透過 BIM 進行實際土機界面（土建與機電系統間界面）、機機界面（機電系統間界面）檢核，並進行管線衝突調整以及預留空間之檢討。另外，於外部界面亦可實際透過 BIM 模型與機電系統廠商確認相互使用空間，並將需求納入 BIM 模型，免除過去 2D 圖說難以表現實際現場狀況，及必須於施工中才能發現並解決之相關衝突問題。

二、基設、細設及施工階段之CSD及SEM圖說

依據民國 107 年 11 月 30 日臺北市政府捷運工程局頒定之「臺北都會區大眾捷運系統捷運工程 CSD/SEM 設計準則」（臺北市政府捷運局，2018），CSD 及 SEM 圖說是用以協調及整合捷運各系統機電與土建工程間界面之工具，主要用於協調廠站與隧道之間各機電系統布置及土建上之開口、套管、基座及預埋物件等需求。

依基本設計、細部設計及施工等不同階段，分別產出 Category A（Cat. A）、Category B（Cat. B）及 Category C（Cat. C）階段性圖說。基本設計階段 Cat. A 圖說為土木單位依選定之捷運路線線型規劃出捷運車站範圍後，建築單位依捷運車站範圍規劃出車站基本外型，並進而由設施工程司依各機電系統設備之空間需求進行相關機房區空間之規劃。細部設計階段 Cat. B 圖說不得作為施工圖，其中 CSD 圖係用來協調所有系統與機電標之主要設備與管路，但僅只於說明；而 SEM 圖亦僅可作為土建工程、機電工程廠商製作施工圖之參考依據。施工階段 Cat. C 圖說係在水電工程及環境控制系統及其他系統完成發包作業後及施工進行前之階段，各關連廠商依 Cat. B 圖說提出意見及需求，而成為 Cat. C 圖說，再提供予各關連廠商製作施工圖及施工。

三、細設階段之CSD及SEM圖說結合BIM模型之執行流程

建築工程運用 BIM 模型進行建築及水電環控之設計及衝突檢查已逐漸廣泛，於 2015 年即有學術論文以辦公大樓為對象進行 BIM 模型建立、執行衝突檢查，提出導入 BIM 模型之可行性及使用限制（周鴻霖，2015）。此外，透過 BIM 技術於施工階段協助疑義澄清及溝通管理，亦可有效改善疑義澄清之事件管理，減少工程中因管理不善帶來之錯誤與浪費（林祐正、林秀如，2015）。水電環控系統管線、另料、器具眾多，通常依不同專業系統分別建置 BIM 模型，完成各水電環控系統之獨立架構設計，再將所有水電環控系統組成全系統整合模型，先初步使用 Autodesk Revit MEP 進行管線干涉檢查，再詳細使用 Autodesk Navisworks 進行整合檢查碰撞（陳珧華、李昀隆、廖祐政，2012）。

本文依據實際捷運細部設計標執行經驗，說明本公司於捷運細部設計階段如何以 BIM 及自動化程式改善捷運設計流程及作業方式，進而達到提升設計品質及效率之目標。

（一）計畫透過 BIM 執行流程管控設計進度

以 BIM 作業雖可較為即時，惟因捷運系統作業，具有經常性同時修正及建置 BIM 模型人員多之特性，考量建置時效性，採用各專業互相參考（非中央模型檔）方式製作各專業 BIM 圖說，因此各專業建置應有順序，以免後續 CSD/SEM 產生過多的衝突，影響進度及品質，故計畫考量各專業設計之先後順序，發展執行 BIM 設計之流程（如圖 1），依據此流程動態訂定各專業滾動式凍結時間，並配合 PMIS 平台進行設計進度管控（如圖 2），當確認土建及水電環控模型高度整合及臻於完善時，後續 CSD/SEM 圖說即可快速之建置。有關 BIM 建置及滾動式調整順序大致可分為土建模型建置及水電環控模型建置。

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 77-85
http://www.sinotech.org.tw/journal/

本公司自民國 107 年起導入計畫管理資訊系統（Project Management Information System, PMIS）（如圖 2），將管理者、執行者與外部成員集中同一平台，共享即時資訊以建立有效溝通機制，提供專案團隊協同作業環境；並於民國 108 年起將發展之 PMIS 平台結合 BIM 模組，包含元件共享、模型管理、程式更新、模型預覽、議題追蹤、整合報表、工作會議等模組使計畫成員可將階段性完成之 BIM 模型上傳至統一平台，讓管理者有效追蹤各專業組 BIM 模型建置進度，且透過議題追蹤模組，協助整合各專業組發展之 BIM 模型，以確保設計一致性（黃琬淇、郭瑋明、許睿叡等，2020）。

1. 土建模型建置

土木定線先行建置，建置完成後建築機能先行配置車站空間，再由建築造型與結構依建築機能設計成果發展，之後回到建築機能整合建築與結構間界面，為圖 1 所表示之群組 1。

結構定案的 BIM 模型交由地工及土木管線接續發展，地工部分在地下車站需建置連續壁、在高架車站需建置基樁及基礎等。需確認土木管線是否與地工連續壁、基樁與基礎等衝突。

2. 水電環控模型建置

水電環控各專業組（包含環控、機械、電氣）為圖 1 所表示之群組 2，待土建模型有初步成果後，依據車站土建配置（梁、柱、牆位置）布設各專業設備以及管線，並將基座位置、燈管位置、百葉通風需求、管道間需求、開口補強需求透過建置完成後回饋予建築機能、建築造型與結構。

土建與水電環控模型之建置需相互配合，且由於土建設計進度較水電環控設計進度早，需進行好幾次來回套疊，以確認彼此套用之正確性。

（二）水電環控之管線 BIM 建置原則

管線建置原則主要先訂定各管線高程，分為機房走道及公共區（有天花板）及機房區（無天花板）二種情境。在機房走道及公共區（有天花板）之管線高程由上而下，分別為（1）風管；（2）電纜架；（3）排水管、空調水管、給水管、消防管。在機房區（無天花板）之管線高程由上而下，分別為（1）消防管、排水管；（2）風管；（3）電纜架；（4）空調水管、給水管。前述管線高程的相關關係及分配位置，如圖 3、圖 4 所示意。

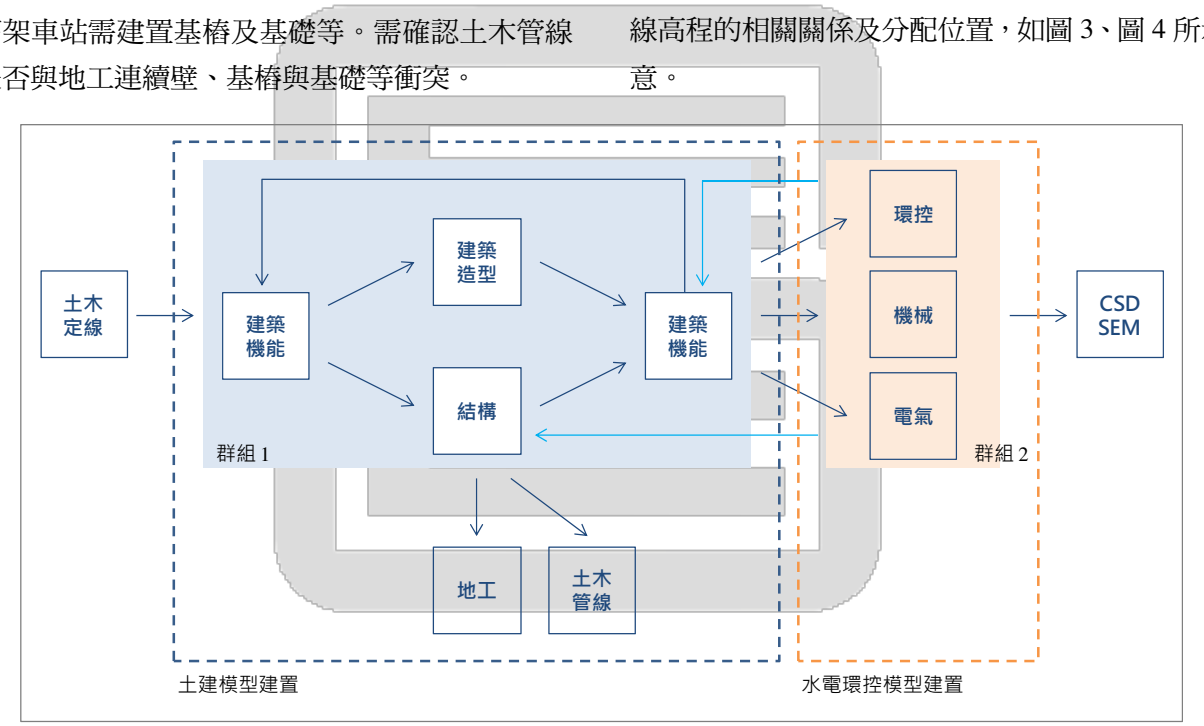


圖 1　捷運工程各專業組執行 BIM 流程

圖 2　以 PMIS 平台管控設計進度

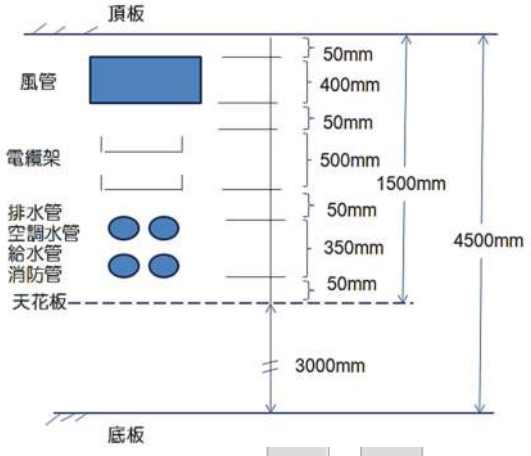


圖 3　管線高程訂定原則（有天花板）

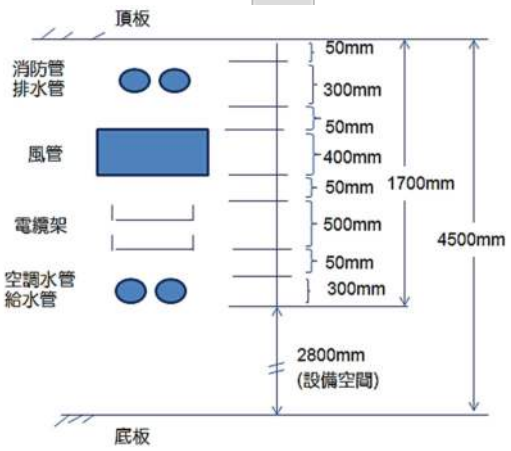


圖 4　管線高程訂定原則（無天花板）

如遇有管線衝突時，可參考以下交叉避讓原則，主要讓較易調整的管線讓較不易調整的管線，不易調整之管線，通常具有坡度要求如重力式排水管、尺寸較大如風管等特性。

1. 電氣讓水管
2. 水管讓風管
3. 分支管讓主幹管
4. 小口徑管讓大口徑管
5. 有壓管讓無壓管
6. 低壓管讓高壓管
7. 易彎曲管線讓不易彎曲管線

管線布設後需考量管線間距，管線間距至少相距 50~100mm，以利法蘭及吊支架安裝空間；如管線需要檢修設施，則與其相鄰之管線間距至少 150~200mm，此外管道間需預留足夠檢修空間。

（三）衝突檢查執行方式

BIM 模型建置過程中，BIM 經理及 CSD/SEM 組視模型發展之成熟度，協助以 Navisworks 及 PMIS 平台進行衝突檢查作業。使用 Navisworks 可篩選建築、結構、水電、環控各專業系統，進行衝突檢查；衝突檢查結果可於 PMIS 平台上發布

議題，以標示衝突位置、衝突內容、並安排專業組協助排解衝突並說明辦理情形，其執行方式如圖 5 所示。

衝突檢查內容包含土建間衝突檢查、機電間衝突檢查，以及土建及機電間衝突檢查。衝突檢查非一次性，需於模型建置過程中，視模型發展之成熟度，不斷重複協助各專業組進行衝突檢查。三大項衝突檢查內容分述如下：

1. 土建間衝突檢查

常見之土建間衝突，包含結構梁與電扶梯機坑衝突、建築與結構梁柱位置不一致、建築造型未配合結構需求或建築機能調整等。

2. 機電間衝突檢查

機電間衝突包含各子系統（環控、機械及電氣），如風管、電纜架、排水管、空調水管、給水管、消防管等，需依據前述管線 BIM 建置原則規劃高程，然仍無法完全避免管線間之衝突，故通常依據前述管線避讓原則，將優先處理與大型管線以及重力流管線之衝突。

3. 土建與機電間衝突檢查

常見之土建與機電間衝突包含管道間之管線外露、管線與高架車站結構梁衝突、開口位置與管線位置不符、建築百葉窗位置與機電需求不符、管線與天花衝突、管線與樓梯衝突等。

上述檢查採滾動式檢討，由計畫建立查核流程與機制，並於 PMIS 上做議題發布以達到即時協調之功效，提高各專業組間運作之順暢性。惟因捷運系統界面複雜，部分事項耗時費工，故於後端出圖作業開發自動化程式，以提高提送圖說之效率及品質。

圖 5　Navisworks 衝突檢查結果放在 PMIS 議題模組

四、BIM輔助執行CSD/SEM架構與流程

以往的 CSD/SEM 執行架構，為套疊水電、環控、電氣各專業之 2D 圖面後，以人工檢視圖面並放置開口及標籤。惟因僅有 2D 之平、剖面可作參考，單以人工方式判讀並放置管線開口之效率及精準度著實有限，且耗費人力及時間。

近年本公司執行捷運細部設計標嘗試以 BIM 輔助 CSD/SEM 自動化出圖，針對由 2D-CAD 改為 3D-BIM 之作業過程中性質單純且動作重複之步驟，開發自動化程式，包含圖紙自動化、開口自動化、標籤自動化、預算自動化等。藉由 BIM 及自動化程式之輔助，不僅提升 CSD/SEM 作業效率，亦精簡繁瑣過程及人力、時間成本，以 BIM 執行 CSD/SEM 流程如圖 6 所示。

（一）BIM 輔助 CSD 出圖方式及成果

CSD 為機電整合界面圖說，使各機電系統、水電、環控、軌道等各種設備與管路之配置不相互衝突。以 BIM 輔助 CSD 出圖，連結建築、結構及各水電環控系統之 BIM 模型，相較於以往的 2D 作業，以三維角度檢視各專業模型之相互關係，能更易找出實體衝突點或系統、設備擺放位置不合理處，並進行協調。在 CSD 圖上會顯示各系統之設備位置及主要管線路徑，當 CSD 模型整合完成，將另作為發展 SEM 圖之開孔、埋管之依據。

CSD 圖說就管線最為複雜之處亦輔以剖面展現，清楚讓業主得知管線衝突均已排除，且淨高均有符合設計準則於公共區與非公共區之規定。

CSD 模型完成後，藉由圖紙自動化程式自動生成帶有基本資訊的圖紙，大幅提升了原本重複且耗時的作業效率。

（二）BIM 輔助 SEM 出圖方式及成果

SEM 為結構機電界面圖說，會標示出各機電系統之設備基座、預埋管件、地板線槽及位於牆壁、樓板和梁之開口與套管等需求。以 BIM 輔助 SEM 出圖，並搭配開口、標籤自動化程式，能依據各專業元件提供的資訊自動生成開口及套管，並依照風管、電纜架及管件的順序自動放置開口及套管的編號。最後放上設備基座及預埋管件後，即完成 SEM 模型整合，且以 BIM 模型明細表之功能，可方便地統計各樓層各系統開口及套管之數量，作為後續編列預算之依據。

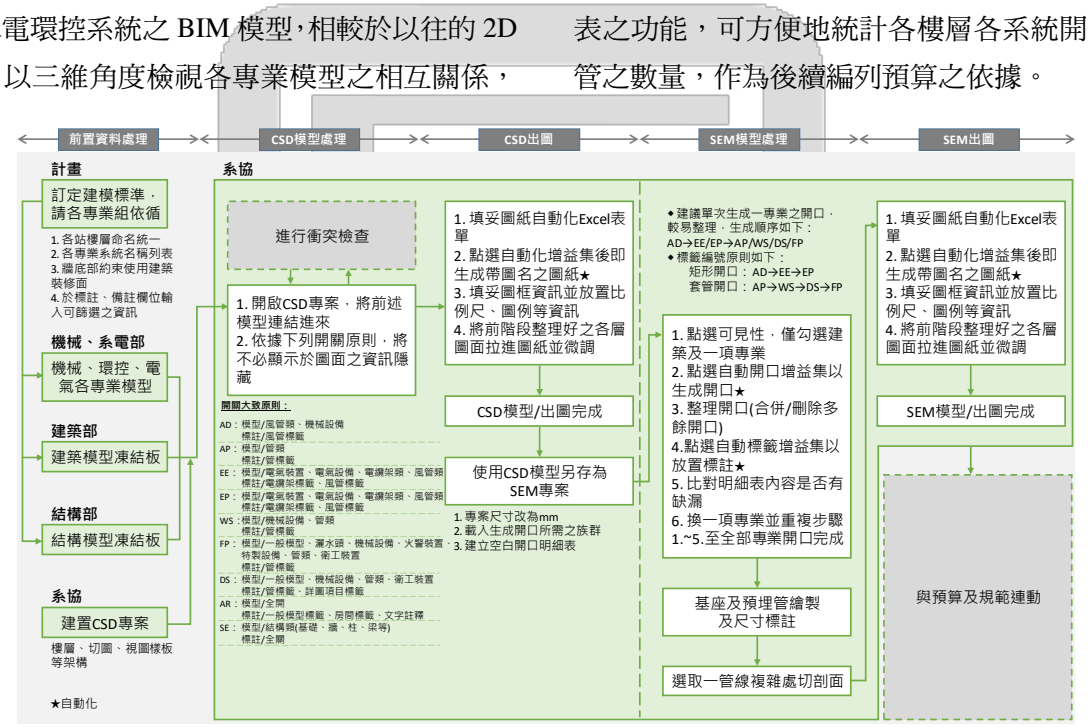


圖 6　以 BIM 執行 CSD/SEM 之流程

（三）配合 CSD/SEM 自動化程式開發以及運用

未發展自動化程式前，需以人工方式逐一檢視每個穿牆、穿樓板的管是否符合開口的需求（如管徑、牆的型式等），且劃設開口時需計算開口的大小及高度等，並逐一標籤，相當耗費時間。

本公司研發自動開口及自動標籤之自動化程式（如圖 7 所示），自動開口程式係將「連結」的 Revit 模型，自動偵測管道與牆樑板的干涉後自動開口，並依管道大小調整為正確尺寸與偏移高度，可避免人為操作漏掉開口之錯誤，以提升品質；自動標籤可依樓層、連結專案、及不同系統，自動依系統別進行標籤開口編號，可協助確認數量之正確性。

使用自動化程式必須有正確之 BIM 模型建置習慣，例如在牆的底部約束設定時，應設定為建築裝修面，而非結構面，才有正確的標示位置；在給予輕隔間牆名稱應有統一名稱，以避免自動化程式於輕隔間牆上進行開口；管道間應無樓板而是以隔柵方式建置，以避免自動化程式給予套管之錯誤等。

透過研發之自動程式，連動數量至經費電腦估算系統（PCCES），預計透過程式協助由 BIM 模型自動產出各種尺寸之預埋管線、開口、套管等 EXCEL 數量清單，並連結數量至相對應單價，以估算正確費用。

五、細設階段與機電系統廠商之界面協調

於細部設計階段需將機電系統廠商之需求納入 CSD 及 SEM 圖說。於 CSD 圖應清楚標示之內容包含標號、設備尺寸、安裝高程、距離牆/柱之位置等資料，以確認水電環控系統之設備/管線與機電標設備/管線安裝並無衝突；於 SEM 圖納入機電標預埋導線管、開孔及基座之需求。以下分別就車站空間、隧道段及出土段、高架橋梁段，分別說明與機電系統廠商進行界面協調之重點內容。

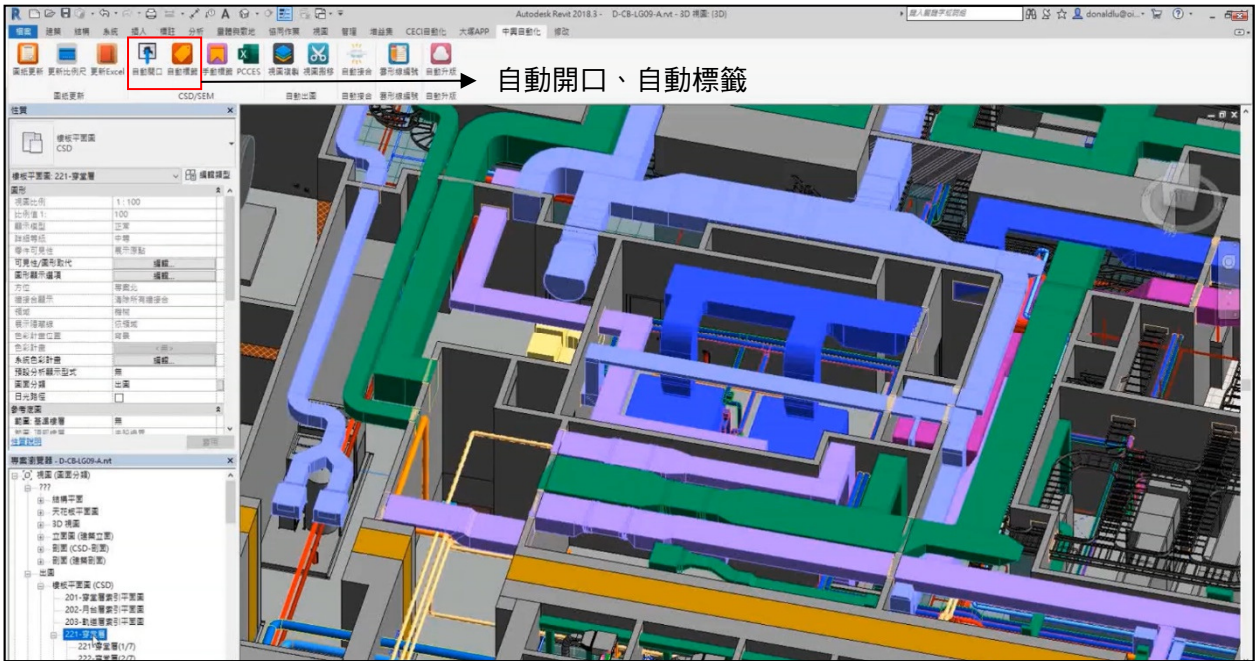


圖 7　自動化開口及標籤程式輔助以 BIM 模型製作 CSD/SEM 圖

（一）車站空間之界面協調

透過連結各專業組 BIM 模型（如建築、結構、水電環控等），以 Navisworks 軟體或 PMIS 之模型預覽模組呈現整合後之車站空間，如圖 8 所示。透過 3D 模型可輕鬆與機電系統廠商確認供電、號誌、通訊及自動收費系統等子系統之管線布設路徑，檢視是否尚能有足夠之淨高，是否會與水電環控之設備衝突等，並視空間位置提供機電系統廠商所需之管道間。

高架車站參考臺中捷運經驗，於月台層設置設備帶，並於設備帶預留 30cm×60cm 供機電系統廠商之管線使用。

（二）隧道段及出土段之界面協調

為確保機電系統廠商於不同曲線段之隧道內布設之相關設備不侵入淨空包絡線，以及保留後續施工階段 CIP 會議（Coordinated Installation Program, CIP）上與土建廠商協調確認之機制，於 CSD 圖說註明「相關系統標設施之安裝位置不得侵入淨空包絡線+100mm。除圖示設施外，於步道側尚有 CCTV 及行車監控相關設施，包括天線、設備箱、纜線、電纜溝槽側牆開口或預埋管等需求，惟其載重及設置位置需於 CIP C 階段會議與土建廠商協調確認」，以確保捷運行車淨空之安全。

出土段因需設置防水隔艙閘門，因該處機電系統廠商有通訊、號誌及供電子系統多支預埋管需求需於版中穿越，故需與結構工程師確認預埋之方式及位置，以避免穿管影響結構安全性。

（三）高架橋梁段之界面協調

於高架疊式或側式車站，列車進出站時有第三軌換側需求，需確認擴口之過軌步道前後有足夠空間。

為避免集電靴與電纜槽衝突，於高架橋面永久配置圖說標註說明最小之電纜溝槽與集電靴間之間距。

六、結　論

在土建與水電環控設計期程無法同步進行之先天限制下，透過提出完善之捷運車站以 BIM 設計之作業流程，掌控各專業組之設計進度，並透過衝突檢查軟體協助計畫整合各專業組 BIM 模型，以確保 CSD 及 SEM 圖說能順利在 BIM 模型正確性及完整度高之情況下出圖。並多次召開與機電系統廠商溝通討論之會議，雙方透過 3D 模型檢視車站空間，評估機電系統廠商所提需求是否與土建及水電環控無衝突，並協助納入 CSD 及 SEM 圖說。

此外，將性質單純且動作反複之作業開發自動化程式，包含圖紙自動化、開口自動化、標籤自動化、預算自動化，以提升 CSD 及 SEM 圖說產出之效率。

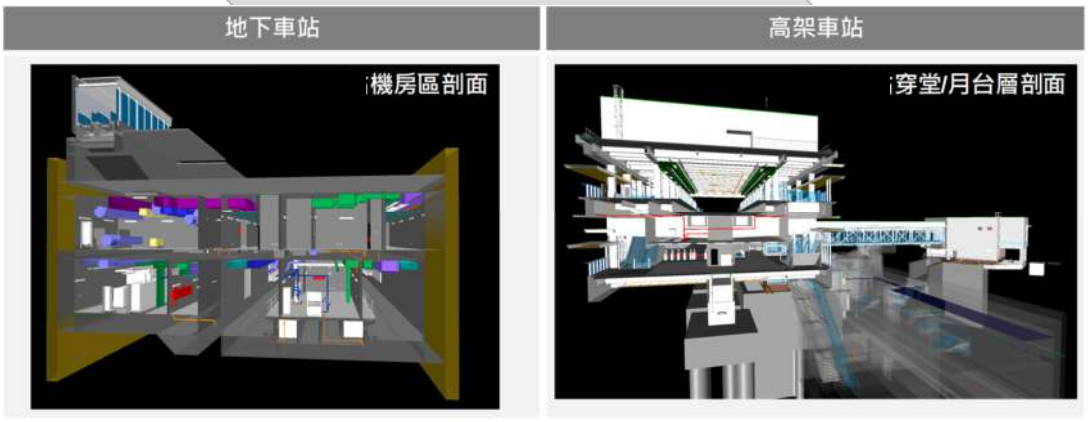


圖 8　以 BIM 整合及 3D 方式協調車站空間之需求

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 77-85
http://www.sinotech.org.tw/journal/

參考文獻

林祐正、林秀如（2015）BIM 技術在建築工程釋疑及溝通管理模式之研究，營建管理季刊 100 期（2015/05/11），第 14-32 頁

周鴻霖（2015）建築資訊模型（BIM）於營造施工階段之介面衝突檢討研究－以鋼骨構造大樓為例，國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文

陳珧華、李昀隆、廖祐政（2012）BIM 於水電環控工程之運用－以松山分局、中工處、機工處辦公大樓為例，捷運技術半年刊 第 47 期，第 117-122 頁

黃琬淇、郭瑋明、許睿叡、陳廣揮、吳中期、黃志民（2020）整合 BIM 模組之 PMIS 計畫管理平台，中興工程季刊 第 147 期，第 149-156 頁

臺北市政府捷運工程局（2018）臺北都會區大眾捷運系統捷運工程 CSD/SEM 設計準則

蔡天和（2005）捷運機電系統工程施工界面爭議之研究，世新大學法律學院碩士論文

新 書 推 介

(一) 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

(二) 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

(三) 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　　2017 年 1 月初版

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.

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 87-91
http://www.sinotech.org.tw/journal/

廢污水生物急毒性檢測與應用評析

林宜璇* 吳佳娟* 烏春梅** 林淑滿** 許國恩*** 鍾裕仁****

一、前　言

環保署為強化事業廢（污）水排放之風險控管，考量單一化合物管制指標，無法充分反映水體生物真實可承受之情形，爰訂定放流水生物急毒性管理策略。根據「水污染防治措施及檢測申報管理辦法（民國108年3月8日修正公告）」第84條之1和第84條之2規定，針對特定事業或工業區專用污水下水道系統核准許可廢（污）水排放量達每日2萬立方公尺以上者，應每6個月申報1次放流水水質之生物急毒性檢測（每次必須進行兩種物種測試，水蚤和米蝦擇一進行、鯉魚或羅漢魚擇一進行），並依據測試結果，調整檢測頻率；連續6次數據中累計3次水樣兩種生物急毒性單位 TU_a 值均超過1.43時，認定水質具有生物急毒性之虞者，事業或工業區專用污水下水道系統應提送毒性鑑定及毒性減量計畫書，並據以執行。

考量魚類等活體物種測試爭議，近年來許多研究評估改以魚類胚胎進行試驗，以減少引起動物痛苦知覺；爰此，環保署環境檢驗所分別於2013年和2016年推動斑馬魚胚胎毒性測試和細菌生物毒性測試評估計畫，並於2017年分別公告NIEA B909.10C與NIEA B301.10C生物急毒性檢測方法，斑馬魚胚胎急毒性評估指標為半致死濃度（Lethal Concentration 50%, LC_{50}）或急毒性單位（Acute toxic unit, TU_a），TU_a 為 LC_{50} 倒數，即 $TU_a = 100\% \div LC_{50}$；細菌急毒性評估指標則為半抑制之有效濃度（Effective Concentration, EC_{50}），LC_{50} 或 EC_{50} 愈低或 TU_a 愈高表示水樣急毒性愈顯著。

本研究藉由文獻蒐集與探討，建立水蚤、斑馬魚胚胎與細菌急毒性檢測程序，進行實際事業廢（污）水及環境水體生物急毒性測試，並同步比對文獻分析結果，瞭解不同物種間之相關性，評估斑馬魚胚胎及細菌作為「水污染防治措施及檢測申報管理辦法」監測物種之適宜性；另鑑於社會大眾對於環境水體品質要求愈臻提高，藉由環境水體生物急毒性測試，了解不同生物對污染較嚴重水體之可能急毒性反應。

二、實驗方法

本研究依據環檢所公告之生物急毒性檢測方法－水蚤靜水式法（NIEA B901.14B）、生物急毒性檢測方法－斑馬魚胚胎半靜水式法（NIEA B909.10C）及生物急毒性檢測方法-細菌冷光法（NIEA B301.10C），驗證水蚤、斑馬魚胚胎及細菌等生物急毒性檢測方法，方法簡述如下。

（一）水蚤急毒性測試

以水蚤（*Daphnia magna*）為試驗生物，計算48小時之半致死濃度（LC_{50}）或急毒性單位（TU_a），死亡判定係將試驗水樣輕微擾動，觀察水蚤是否仍會活動。

* 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助理研究員
*** 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主任

（二）斑馬魚胚胎急毒性測試

以斑馬魚胚胎為試驗生物，每 24 小時換水 1 次，計算 96 小時之半致死濃度（LC_{50}）或急毒性單位（TU_a），判定胎胚死亡準則包含胚胎凝結（Coagulation of the embryo）、體節構造發育不全（Lack of somite formation）、尾部從卵黃囊剝離不全（Non-detachment of the tail from the yolk sac）和心臟無跳動（Lack of heartbeat）。

（三）細菌急毒性測試

本法係於待測樣品中加入費氏弧菌（*Aliivibrio fischeri*）試劑，藉由測量不同時間點細菌之發光強度抑制率，此抑制率經計算轉換為 Γ 值，進一步藉由 Γ 值與樣品濃度線性迴歸關係，得到樣品半效應濃度（EC_{50}），即費氏弧菌發光量降至一半時的影響濃度。

放流水水蚤或斑馬魚胚胎無急毒性反應之 LC_{50} 為>100%（換算 TU_a 小於 1）；至於細菌部分，依公告檢測方法規定每個樣品需添加無菌氯化鈉調整樣品鹽度（取 2.5 mL 樣品加入 250 μL 無菌氯化鈉溶液，水樣濃度為 91%）後，取 900 μL 再與活化後之螢光菌（100 μL）混合進行測試（水樣濃度變為 81.9%），因此細菌無急毒性反應之 LC_{50} 為>81.9%（換算 TU_a 小於 1.22）。

本研究除測試廢（污）水及環境水體之生物急毒性，另同時進行 pH、導電度、含氮物質（含氨氮、凱氏氮、硝酸鹽氮和亞硝酸鹽氮）、自由有效餘氯、重金屬及類金屬、陰離子、揮發性和半揮發性有機化合物等檢測，以瞭解水質特性與可能含有之污染物。

三、結果與討論

（一）參考毒物之急毒性測試

本研究利用參考毒物試驗驗證各生物急毒性檢測方法之適用性，水蚤急毒性選用之參考毒物為氯化鈉，結果顯示氯化鈉對水蚤 LC_{50} 實驗平均值為 3,840 mg/L，與文獻值相符；斑馬魚胚胎之參考毒物則採用氯化鈉、硫酸銅、氯化鋅、硫酸銨及硫酸鎳，結果顯示斑馬魚胚胎 LC_{50} 實驗值分別為 11,100 mg/L、0.124 mg/L、13.78 mg/L、141.17 mg/L 以及 59.32 mg/L，亦與文獻值相符；而細菌之參考毒物選用硫酸鎳與酚，其 EC_{50} 實驗值分別為 21.49 mg/L 以及 17.39~27.3 mg/L（30 min），與文獻值結果相近。

（二）廢（污）水生物急毒性測試

本研究針對 2 家事業和 5 處科學工業園區專用污水下水道系統計進行 10 點次原廢水生物急毒性試驗，以評估不同事業廢（污）水之生物急毒性，2 家金屬基本工業 4 點次原廢水（包含煉鐵廢水、軋鋼廢水及煉焦廢水）水蚤和斑馬魚胚胎急毒性 TU_a 大於 5，顯示具有高度急毒性，另 2 廠煉焦廢水細菌 TU_a 分別為 132.96 和 245.76，進一步分析原廢水急毒性常見水質影響因子（表 1），其中導電度均高於 4,000 μS/cm，且煉焦廢水具有高濃度有機化合物（酚、4-甲基酚、2-甲基酚、苯胺、2,4-二甲基酚及吡唑等）、氯鹽和氨氮，兩廠煉焦廢水酚濃度均高於斑馬魚胚胎 EC_{50} 值 210 mg/L，推測可能為影響生物急毒性原因之一；另 A 廠煉鐵廢水和軋鋼廢水 pH 分別屬強酸及強鹼，且導電度均高於 4,000 μS/cm，推測亦可能影響生物急毒性。此外重金屬部分，A 廠煉鐵廢水、軋鋼廢水及 B 廠煉焦廢水具有高濃度鐵，超過文獻鐵對水蚤急毒性之 LC_{50} 值 2.3 mg/L；A 廠原廢水銀濃度均高於文獻銀對水蚤之 LC_{50} 值 0.0009 mg/L；A 廠煉鐵廢水鎘及鉻濃度分別為 0.015 及 0.194 mg/L，均高於文獻鎘和鉻對水蚤之 LC_{50} 值（分別為 0.0036 和 0.130 mg/L）；另 A 廠煉鐵廢水及軋鋼廢水銅和鋅濃度均高於文獻銅和鋅對水蚤之 LC_{50} 值（分別為 0.013 及 0.72 mg/L），推測廢水之鐵、銀、鎘、鉻、銅和鋅等重金屬為生物急毒性原因之一。至於 B 廠工業廢水部分，pH、導電度、重

金屬與類金屬與有機化合物等濃度均相對較不顯著，三種生物急毒性測試結果均無急毒性。

5 家科學工業園區原廢水斑馬魚胚胎急毒性 TU_a 均小於 1；科學工業園區 C 廠及 G 廠水蚤生物急毒性 TU_a 均為 4.1，其餘科學工業園區均小於 1.3；科學工業園區 E 廠細菌急毒性 TU_a 為 1.35，其餘科學工業園區均小於 1.22。分析原廢水急毒性常見水質影響因子（表 2），科學工業園區 C 廠和 G 廠原廢水鋁、鐵及銅等重金屬濃度較高，文獻結果顯示銅對斑馬魚胚胎 LC_{50} 值為 0.291 mg/L，C 廠和 G 廠原廢水銅濃度為 0.144 和 0.225 mg/L，顯示原廢水銅可能為造成部分斑馬魚胚胎死亡之原因。水蚤生物急毒性部分，科學工業園區 F 廠和 G 廠原廢水導電度分別為 6,770 和 5,000 μS/cm，而水蚤分別死亡 17 隻和 20 隻，環保署（2015）調查顯示放流水導電度過高時，

表 1　事業原廢水可能之急毒性影響物質

水質項目	A 廠煉鐵廢水	A 廠軋鋼廢水	A 廠煉焦廢水	B 廠煉焦廢水	斑馬魚胚胎 LC_{50}	水蚤 LC_{50}	細菌 EC_{50}
導電度	5,550	4,460	4,430	5,210	-	-	-
氟鹽 F^-	ND	6.17	85.1	75.2	-	-	-
氯鹽 Cl^-	1,420	64.1	737	877	11,100[6]	3,840[6]	EC_{50} (5 min)：20,000[11]
鐵 Fe	316	37.1	1.72	5.37	-	2.3[4]	-
銀 Ag	0.023	0.008	0.068	ND	-	0.00091[4]	-
鎘 Cd	0.015	0.002	0.001	0.001	-	0.0036[4]	-
總鉻 Cr	0.194	0.060	0.005	0.014	LC_{50} (72 hr)：15.99[7]	0.130[4]	· EC_{50} (1 hr)：59.33[3] · Cr (VI)之 EC_{50} (15 min)：38.2[5]
銅 Cu	0.027	0.042	0.009	0.004	· EC_{50} (致畸胎率)：0.04[1] · LC_{50}：0.291[12]	0.013[4]	· EC_{50} (5 min)：0.5364[2] · EC_{50} (15 min)：0.30[5]
鋅 Zn	0.182	1.65	0.103	0.059	LC_{50} (72 hr)：41.08[7]	0.72[4]	· EC_{50} (30 min)：4.64[8]
酚 Phenol	ND	ND	222	432	EC_{50}：210[10]	-	· EC_{50} (5 min)：16.06[9] · EC_{50} (15 min)：24.5[10]

註：導電度單位為 μS/cm，其餘項目單位為 mg/L；LC_{50} 和 EC_{50} 濃度均為 mg/L。

資料來源：
[1] 胡芳瑜（2015）半導體廢水主要毒性物質對水蚤及斑馬魚胚胎混合毒性之研究，國立交通大學環境工程研究所碩士論文。
[2] 陳紫睎（2014）Microtox®與真骨魚類生物急毒性檢測之相關性試驗與經驗模式之建立，國立嘉義大學水生生物科學系碩士論文。
[3] 陳建龍（2011）利用 Microtox®法評估複合重金屬之毒性，朝陽科技大學環境工程與管理系碩士論文。
[4] Okamoto A, Yamamuro M, Tatarazako N（2015）Acute toxicity of 50 metals to *Daphnia magna*. Journal of Applied Toxicology 35, pp. 824.830.
[5] Petala M, Tsirdis V, Kyriazis S, Samaras P, Kungolos A, Sakellaropoulos G P（2005）Evaluation of toxic response of heavy metals and organic pollutants using Microtox acute toxicity test. Proceedings of the 9th International Conference on Environmental Science and Technology.
[6] 本研究參考毒物試驗結果。
[7] Ansari S, Ansari B A（2015）Effects of Heavy Metals on the Embryo and Larvae of Zebrafish, *Danio rerio*（Cyprinidae）. Scholars Academic Journal of Biosciences 3, pp. 52-56.
[8] Teodorovic I, Planojevic I, Knezevic P, Radak S, Nemet I（2009）Sensitivity of bacterial vs. acute *Daphnia magna* toxicity tests to metals. Central European Journal of Biology 4, pp. 482-492.
[9] 行政院國家科學委員會（1999）以五種水中生物測試不同事業廢水之毒性。
[10] Lammer E, Carr G J, Wendler K, Rawlings J M , Belanger S E, Braunbeck T H（2009）Is the Fish Embryo Toxicity test（FET）with the zebrafish（*Danio rerio*）a potential alternative for the fish acute toxicity test? Comparative Biochemistry and Physiology, Part C 149, pp. 196-209.
[11] Gonzalez C, Greenwood R, Quevauviller P（2009）Rapid Chemical and Biological Techniques for Water Monitoring. John Wiley & Sons Ltd.
[12] Busquet F, Strecker R, Rawlings J M, Belanger S E, Braunbeck T, Carr G J , Cenijin P, Fochtman P, et al.（2014）OECD validation study to assess intra- and inter-laboratory reproducibility of the zebrafish embryo toxicity test for acute aquatic toxicity testing. Regulatory Toxicology and Pharmacology 69, pp. 496-511.

表 2　科學工業園區污水下水道系統原廢水可能之急毒性影響物質

水質項目	科學工業園區 C 廠	科學工業園區 E 廠	科學工業園區 G 廠	斑馬魚胚胎 LC_{50}	水蚤 LC_{50}	細菌 EC_{50}
導電度	3,680	6,770	5,000	-	-	-
自由有效餘氯	0.64	0.05	0.05	-	0.14 (NaClO) [7]	-
氯鹽 Cl^-	584	546	799	11,100[6]	3,840[6]	EC_{50} (5 min)：20,000[3]
鋁 Al	1.30	0.146	0.744	-	3.9[4]	-
鐵 Fe	0.266	0.620	0.870	-	2.3[4]	-
銅 Cu	0.144	0.008	0.225	· EC_{50} (致畸胎率)：0.04[1] · LC_{50}：0.291[8]	0.013[4]	· EC_{50} (5 min)：0.5364[2] · EC_{50} (15 min)：0.30[5]

註：導電度單位為 μS/cm，其餘項目單位為 mg/L；LC_{50} 和 EC_{50} 濃度均為 mg/L。

資料來源：
[1] 胡芳瑜（2015）半導體廢水主要毒性物質對水蚤及斑馬魚胚胎混合毒性之研究，國立交通大學環境工程研究所碩士論文。
[2] 陳紫睎（2014）Microtox®與真骨魚類生物急毒性檢測之相關性試驗與經驗模式之建立，國立嘉義大學水生生物科學系碩士論文。
[3] Gonzalez C, Greenwood R, Quevauviller P（2009）Rapid Chemical and Biological Techniques for Water Monitoring. John Wiley & Sons Ltd.
[4] Okamoto A, Yamamuro M, Tatarazako N（2015）Acute toxicity of 50 metals to *Daphnia magna*. Journal of Applied Toxicology 35, pp. 824.830.
[5] Petala M, Tsirdis V, Kyriazis S, Samaras P, Kungolos A, Sakellaropoulos G P（2005）Evaluation of toxic response of heavy metals and organic pollutants using Microtox acute toxicity test. Proceedings of the 9th International Conference on Environmental Science and Technology.
[6] 本研究參考毒物試驗結果。
[7] 行政院環保署環境檢驗所（2015）高科技產業放流水中生物效應評估及鑑識（3/4）－氧化物、高濁度、高酸鹼物質鑑定評估程序。
[8] Busquet F, Strecker R, Rawlings J M, Belanger S E, Braunbeck T, Carr G J , Cenijin P, Fochtman P, et al.（2014）OECD validation study to assess intra- and inter-laboratory reproducibility of the zebrafish embryo toxicity test for acute aquatic toxicity testing. Regulatory Toxicology and Pharmacology 69, pp. 496-511.

會造成水蚤急毒性，推測水中高濃度離子物質為造成水蚤死亡原因之一；另科學工業園區 C 廠原廢水自由有效餘氯濃度為 0.64 mg/L，超過餘氯對於水蚤之 LC_{50} 文獻值（0.14 mg/L），推測亦可能為造成水蚤死亡原因；此外，科學工業園區 C 廠和 G 廠原廢水銅濃度超過銅對水蚤之 LC_{50} 值 0.013 mg/L，推測原廢水銅濃度過高應影響水蚤死亡。細菌螢光抑制率部分，僅科學工業園區 E 廠細菌急毒性 TU_a 為 1.35，因 E 廠放流水有檢出氯仿及 2,4,6-三氯酚等有機化合物，推測可能為細菌抑制原因之一。

綜上所述，科學工業園區原廢水可能影響生物急毒性之污染因素為導電度、自由有效餘氯、重金屬（如銅等）及有機化合物。

（三）放流水生物急毒性測試

本研究 10 點次放流水生物急毒性試驗結果，僅化工業 D 廠放流水具生物急毒性，斑馬魚胚胎和水蚤急毒性 TU_a 大於 5，分析放流水急毒性常見水質影響因子，化工業 D 廠自由有效餘氯為 0.81 mg/L（總餘氯為 5.50 mg/L、結合餘氯為 4.69 mg/L），遠高於其餘 3 家事業（介於 0.01~0.23 mg/L），推測放流水急毒性來自餘氯影響。為釐清放流水急毒性影響，以化工業 D 廠水樣再進行一次放流水水蚤和斑馬魚胚胎急毒性測試，另同步添加還原劑硫代硫酸鈉以移除水中氧化性物質（餘氯），結果顯示第二次放流水水蚤和斑馬魚胚胎急毒性 TU_a 仍均大於 5，經添加硫代硫酸鈉移除餘氯之放流水水蚤和斑馬魚胚胎急毒

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 87-91
http://www.sinotech.org.tw/journal/

性 TU_a 均小於 1，且已未檢測到總餘氯，證實化工業 D 廠放流水急毒性來自餘氯影響。

另調查之 6 點次工業區專用污水下水道系統放流水均無生物急毒性，惟工業區 E 廠和工業區 H 廠生物死亡數量較高，分析影響放流水生物急毒性之污染因素為導電度及重金屬。

（四）環境水體生物急毒性測試

本研究針對南崁溪水質氨氮和銅濃度較高之大埔橋、大檜溪橋，以及接近感潮河段之竹圍大橋等點位進行採樣，了解可能之急毒性影響，3 處水體水蚤和斑馬魚胚胎急毒性 TU_a 均小於 1，細菌急毒性 TU_a 均小於 1.22，水樣均無急毒性。整體而言，目前南崁溪流域氨氮及銅等水質雖未符合地面水體分類及水質標準（氨氮甲類水域 0.1 mg/L、乙類及丙類水域 0.3 mg/L；銅 0.03 mg/L），惟以生物急毒性測試顯示，其水體水質對水中生物造成急毒性影響有限。

四、結　論

根據國內外研究調查顯示，水蚤、斑馬魚胚胎及細菌等不同物種對單一化學物質敏感度雖有所差異，但仍具有一定相關性，然真實廢（污）水或環境水體因污染物種類多元複雜，可能存在毒性加成或拮抗作用，如 E 廠等 5 處工業區、竹圍大橋、大檜溪橋和大埔橋等水樣銅濃度均高於文獻銅對水蚤之 LC_{50} 值，惟其水蚤 TU_a 值均小於 1，推測可能為污染物的毒性拮抗作用所致。另科學工業園區 E 廠原廢水自由有效餘氯、重金屬、氨氮及酚等項目濃度均與其他水樣相近，惟其細菌 TU_a 為 1.35，其急毒性可能來自其他未知污染物影響，或為污染物間加乘作用所致。

歸納國內外以斑馬魚胚胎與細菌進行化學物質生物急毒性檢驗之研究，證實斑馬魚胚胎與細菌皆具有良好之毒性敏感度，且與魚類急毒性測試結果相關性高，能有效預測魚類急毒性結果，多數研究認為未來斑馬魚胚胎與細菌將可取代魚類生物急毒性測試；此外，建議事業或工業區污水下水道系統可自主性導入細菌作為廢污水急毒性風險控管。

廢污水常見生物急毒性影響因子包含 pH、導電度、重金屬、有機化合物、氨氮、自由有效餘氯等，隨著環保署近年來持續增修放流水標準管制項目（如氨氮、重金屬及自由有效餘氯等），除降低放流水生物急毒性風險，亦提升水體水生生物生存環境品質。另國內外研究顯示水體環境仍存在微量之新興污染物（如全氟碳化物或個人保健藥品與產品等），未來除累積生物急毒性數據，可進一步推動生物慢毒性之影響研究，強化整體水環境之安全。

SINOTECH
*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.

財團法人中興工程顧問社 SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.
中興工程．第152期．2021年7月．PP. 93-97
http://www.sinotech.org.tw/journal/

鐵路系統旅客運量預測方法研析
－以台灣高鐵為例

吳明軒*　許聿廷**　孫千山***　張恩輔****

一、前　言

近年來，政府大力推廣軌道運輸系統，不論捷運、臺鐵或高鐵等軌道系統，旅運需求皆逐年成長。旅客需求往往具有週期性變化、尖離峰的特性，若能精準預測旅客的變化特性，則將有助於軌道營運機構，於尖、離峰時段透過座位管理、優惠票價方案等收益管理之措施，達到增加營運機構的營收、降低營運維護成本之效果。

本研究綜整過去實務經驗，發現業界普遍有運量預測的需求，類型包含 3 個月內的短期運測，1~3 年的中長期預測，及針對連續假期進行的運量預測。然而發現運量預測的方法眾多，為且因應不同需求類型（如連續假期或短期預測），所需要的預測資料及核心演算方法皆不相同，預測後的績效也有所差異。考量預測方法眾多，本研究案將研究範圍限定在短期、中期及連續假期運量預測，並依據過往專案經驗將方法收斂至 SARIMA、PANEL DATA、灰預測及類神經網路，並運用台灣高鐵的歷史運量資料，測試前述預測方法在不同情境下之預測成效。

二、預測模式說明

（一）短期預測

短期需求預測以 1 個月內的運量預測為目標。本計畫測試時，分別以時間序列模型及類神經網路模型兩種架構進行測試。時間序列模型所測試的方法包含：SARIMA、TSLM、TBATS 及 STLF 等方法。類神經網路則選用 LSTM 短期記憶網路作為測試方法。

1. 時間序列模型

本研究選用四種可將週期性納入考量之時間序列模型，包含 SARIMA、TABTS、STLF、TSLM 等方法，另選擇 MA 作為比較案例。五種方法的分別差異如圖 1 所示。各方法的詳細差異及操作過程，如下所述。

圖 1　時間序列方法分析圖

*　前中興工程顧問社土木水利及軌道運輸研究中心副研究員
**　國立臺灣大學土木工程學系副教授
***　中興工程顧問社土木水利及軌道運輸研究中心軌道運輸組組長
****　中興工程顧問社土木水利及軌道運輸研究中心高級研究員

（1）SARIMA

SARIMA 模式（季節性整合自我迴歸移動平均法）其運作邏輯係考量資料的長期周期性後，運用差分調整原始資料，再結合「自迴歸模型」及「移動平均模型」，由過往的數據資料判斷未來的發展趨勢。

（2）TSLM

TSLM 方法是運用線性模式將時間序列拆解成趨勢及週期性變化兩個類型。趨勢性包含線性分析方式及指數性的分析方式。週期性分析方式，主要為線性。

（3）TBATS

TBATS 運用 Box-Cox 轉換原本時間序列後，再運用指數平滑法分析時間序列趨勢、運用三角函數表示季節性變化、運用 ARMA 模型推估時間序列誤差的一種時間序列預測方法。

（4）STLF（Seasonal and Trend Decomposition using Loess）

STLF 是將時間序列拆解為趨勢、週期性及殘差值三種資料的方法，特色是在拆解上使用的局部加權回歸平滑法（Locally Estimated Scatterplot Smoothing, LOESS）。Loess 法會先透過設定選取資料後，以近鄰演算法的方式針對資料加權，之後得出估算值。

2. 類神經網路模型－LSTM

本研究選用的類神經網路模型為長短期記憶模型（Long Short-Term Memory, LSTM）。類神經網路型態眾多，其中遞迴神經網路（Recurrent Neural Network, RNN）是很常被使用的一種型態。本研究選用的 LSTM 是 RNN 的一種，其架構如圖 2 所示。

LSTM 模式透過變數貫串每一期的運算，在不同計算期該變數會受到前期預測值、本期輸入資料的影響，但該數值會持續記錄在每回合的運算。

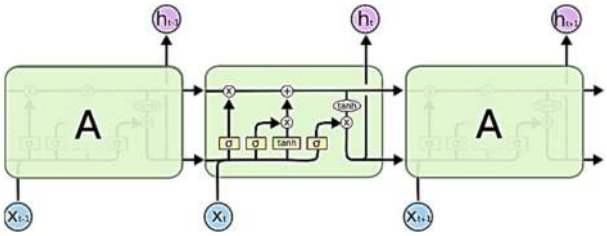


圖 2　LSTM 模型運作流程圖

（二）中期預測

中期需求預測以半年到 1 年內的月平均運量預測為目標。本計畫測試時，以 Panel Data 模式進行測試。面板數據（Panel Data）係指一組截面資料（Cross-sectional Data）在不同時間點上的變化紀錄，此類資料包含了時間和資料截面兩個維度上的變化，而透過面板數據分析，則可追蹤不同變數隨時間的變化趨勢，以及在截面維度上其他可能對所探討變數產生影響之因素。

Panel Data 選用外部資料用來反映外在環境對運量的影響性。選擇的外部資料即參考傳統運輸規劃時，在旅次產生的步驟時常用的因素，如：收入、人口、私有運具等資料類型。本次研究案例中，Panel Data 係預測月運量，所參考的外部因素若資料周期太長，如半年或年統計量，則模式不易判別運量與外部因素的關聯性。整體考量資料類型、更新週期後，蒐集下列外部因素資料。

1. 鄉鎮縣市人口

研究初期以高鐵車站所在的縣市人口作爲外部影響因子，以起站人口、迄站人口，起站跟迄站兩者人口相乘之乘積三種因子類型放入模式中測試，經測試後發現顯著性不高，便重新調整為車站周圍 50 公里內之鄉鎮縣市區的人口數。選取資料年限為 2015~2017 年，資料來源為內政部鄉鎮縣市人口統計資料。

2. 私有運具數量

私有運具係以自有機車及自有小汽車兩項作爲外部影響因子，以起站縣市自有汽車、迄站縣市自有汽車、起站縣市自有機車、迄站縣市自有

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 93-97
http://www.sinotech.org.tw/journal/

機車、起站及迄站縣市自有汽車乘積、起站及迄站縣市自有機車乘積等六種因子類型，放入模式測試。因政府公開資料僅提供至各縣市的私有運具數量，故使用上無法參照人口針對 50 公里影響範圍鄉鎮縣市的資料篩選方式。選取資料年限為 2015~2017 年，資料來源為交通部公開統計資料。

3. GDP

採用的是人均名目 GDP，以新台幣計。國內 GDP 統計最細的時間維度是以季為單位，因此在 Panel Data 模式測試外部資料顯著性時，當季所各月份使用的是相同的 GDP 參數。選取資料年限為 2015~2017 年，資料來源為主計總處公開統計資料。

4. 油價

油價採用的是 95 無鉛汽油當月平均油價。資料來源是經濟部能源局油價資訊管理與分析系統。選取 95 無鉛汽油的月平均價格。

（三）灰預測模型

灰預測模型（Grey Forecasting Model, GM）相較於迴歸分析、類神經網路，可透過少量樣本進行預測，相對的數學複雜度也較低。灰色預測通過鑒別系統因素之間發展趨勢的相異程度，進行關聯分析，並對原始數據進行生成處理來尋找系統變動的規律，生成有較強規律性的數據序列，然後建立相應的微分方程模型，從而預測事物未來發展趨勢的狀況。其用等時距觀測到的反應預測對象特徵的一系列數量值構造灰色預測模型，預測未來某一時刻的特徵量，或達到某一特徵量的時間。本研究採用 GM(1,1)模型進行預測。

三、案例分析

（一）短期預測

1. 時間序列模型

（1）SARIMA

SARIMA 模式預測未來 28 天內的運量結果，平日週一至週五的預測準確率誤差可限縮在 10% 以內；週六、週日的預測準確度誤差約 11%。其中，南港、苗栗、彰化、雲林等四座新增車站的誤差比例，在各星期別都相對偏高。推測上述新增車站為返鄉或旅遊旅次的比例較高，較缺乏規律性，造成 SARIMA 預測時不易掌握歷史變化特性。

（2）TSLM

TSLM 模式預測未來 28 天內的運量結果，平日週一至週五的預測準確率可限縮在 5% 以內；週六、週日的預測準確度誤差皆超過 11%。週一至週四間，往南港的起迄，誤差相對較高，推測為臺北都會區短途旅次，替代運具較高，所以旅次行為的隨機性質較高；週五則是由左營出發的旅次，誤差相對較高。

（3）TBATS

TBATS 模式預測未來 28 天內的運量結果，平日週一至週五的預測準確率誤差可限縮在 10% 以內；週六、週日的預測準確度誤差皆超過 11%。週一至週四間，往南港的起迄，誤差相對較高。週三至週六，新增車站的起迄誤差也相對較高。TBATS 在 Box-Cox 轉換成常態數列的過程中，即可能排除掉原本資料內的隨機性資訊。因此預測成果與 TSLM 相仿，在平日的新增車站起迄預測，以及假日預測的誤差都相對較高。

（4）STLF

STLF 模式預測未來 28 天內的運量結果，平日週一至週五的預測準確率誤差可限縮在 7% 以內；週六、週日的預測準確度誤差皆低於 11%。彰化往返雲林的起迄，在各星期別的誤差都相對較高。週一到週五，迄站為南港的起迄，預測誤差值也相對較高。週一、週二、週五在新增車站的起迄預測誤差相對較高。

綜整各預測方法誤差值如表 1 所示，使用時間序列方法預測短期運量時，TSLM 表現較佳，

預測誤差較低，STLF 在週末的預測表現較佳。顯示 TSLM 較適合預測規律性變化的時間序列；STLF 將數據拆分成季節性、趨勢性及隨機性後分別預測的方式，較適合預測隨機性占比較高的時間序列，如週六、週日。考量 STLF 預測週六、週日的準確性高，未來採用時間序列方法時，可以使用 TSLM 預測平日，結合 STLF 預測週六、週日。

表 1　預測方法比較表

方法	SARIMA	STLF	TSLM	TBATS
總計	-7.5%	-7.2%	-6.7%	-7.6%

2. 類神經網路模型

類神經網路使用過去 4 組的歷史資料預測未來 28 天後的運量，如圖 3 所示。本研究採用的是監督式學習類神經網路訓練模式，而不同起迄會訓練不同的 LSTM 類神經模式。

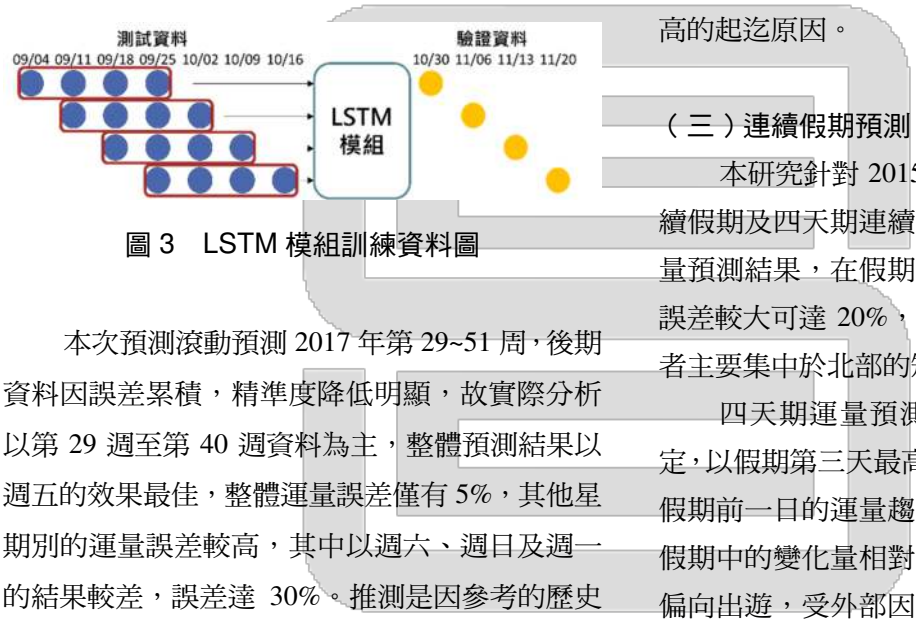


圖 3　LSTM 模組訓練資料圖

本次預測滾動預測 2017 年第 29~51 周，後期資料因誤差累積，精準度降低明顯，故實際分析以第 29 週至第 40 週資料為主，整體預測結果以週五的效果最佳，整體運量誤差僅有 5%，其他星期別的運量誤差較高，其中以週六、週日及週一的結果較差，誤差達 30%。推測是因參考的歷史運量點為過去 4 週，較長期的月分變化不易掌握。後續研究可朝向觀察提高參考歷史運量資料後，整體預測誤差性的變化程度。

（二）中期預測

本研究發現，高鐵熱門與冷門起迄的運量差異大，若將兩者同時納入外部影響分析時評估，運量小的起迄與時間或外部參數的連動性不易反映出來。因此，研究將高鐵所有起迄，依照運量分成四類後，再進行預測。

研究透過 R 軟體內建之 plm 函數，分析不同運量組合下，各外部參數影響性。運量較低的起迄，其變化量與人口數、摩托車數量關聯性較高；運量較高的起迄，變化量則與人口數、汽車數、摩托車數量關聯性較高。

分析預測結果，整體預測誤差多小於 10%。以各星期別預測成果而言，短程起迄，亦即起迄站鄰近的區塊，誤差相對較高。另一方面，起迄站其一為南港、苗栗、彰化、雲林等車站的起迄誤差也相對明顯。以月分來看，新竹到苗栗的誤差，在不同月份中都相對較高。因新竹到苗栗的分時運量數量不高，計算誤差時的分母相對較小，進而造成誤差值容易變高，此亦為新增車站南港、苗栗、彰化、雲林等站，容易成為誤差較高的起迄原因。

（三）連續假期預測

本研究針對 2015 到 2017 三年內的三天期連續假期及四天期連續假期分析。三天期連假的運量預測結果，在假期第一天、假期第二天的運量誤差較大可達 20%，其他天數約 10%。誤差較高者主要集中於北部的短程旅次。

四天期運量預測結果，整體預測誤差較穩定，以假期第三天最高達 10.8%，其他天期約 4%。假期前一日的運量趨勢較一致。其他天期在不同假期中的變化量相對較高。此種旅次性質可能較偏向出遊，受外部因素（如：天氣、油價）影響性較高。後續研究方向，可嘗試分析油價對運量的影響性，並測試結合 STLF 預測方法，針對隨機性較高的起迄運量進行預測。

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 93-97
http://www.sinotech.org.tw/journal/

四、結　論

鐵路營運單位擬定營運計畫時，運量預測為首要工作，其結果影響後續時刻表、車輛運用、人員運用及座位管理等規劃作業。然而，影響旅客行為的可能因素眾多，要如何選擇適當的預測模式以及在模式中該考慮哪些影響因素，實為關鍵的課題。本研究針對短期預測（SARIMA、TBATS、STLF、TSLM、類神經網路）、中期預測（Panel Data）、連續假期預測（灰預測），分別測試不同的預測方法，相關測試初步結論，綜整如下列幾點。

（一）短期預測以時間序列預測各星期別整日運量，可考慮結合使用 STLF 或 TSLM 方法，其預測精準度較高。使用 TSLM 預測平日，結合 STLF 預測週六、週日。若需針對隨機性較高旅次進行預測時，則可考慮使用 STLF 方法預測，STLF 在各方法中掌握隨機性的效果較佳。

（二）中期預測採用 Panel Data 時，將運量分群會有較佳的預測結果。模式採用的輸入資料以前一月的運量為主，運量較低的起迄，運量的變化量與人口數、摩托車數量關聯性較高；運量較高的起迄，變化量則與人口數、汽車數、摩托車數量關聯性較高。

（三）連續假期的假期性質因素會影響旅客起迄行為變化，其中三天期不同假期彼此間的差異較高，四天期則較為一致。旅客特性應可透過訂票紀錄的 ID 分析平日跟連續假期的訂票行為，進而推測假期內的旅次特性變化。

叢 書 訊 息

(一)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

(二)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

蔡婉楹、姜鴻菊、林淑滿、
莊謹綸、黃育德　等　編著　　2016 年 5 月初版

(三)集集南岸三小水力發電計畫可行性研究

吳念祖、黃敏智　等　編著　　2016 年 5 月初版

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 98-100
http://www.sinotech.org.tw/journal/

益 智 遊 戲

張 湧 元

一、前　言

本益智遊戲就像下象棋、趕圍棋，和摸牌打麻將等一樣，旨在休閒取樂。然這後三者遊戲要有點孔明或鬼谷子的頭腦，或像打麻將時也要有點運氣才能贏；而本遊戲不需要這些，只要懂得下述介紹的道理，對方總是神不知鬼不覺，莫然咬咬牙不信邪，心想怎麼會一直輸？本遊戲除可讓我們動動腦筋、讓年紀大者防癡呆外，亦可讓我們消遣取樂，稍解因工作忙碌而造成的身心疲勞。大家不妨來試玩一下，很好玩的。

二、抓石子遊戲

（一）遊戲規則

有三堆石子如圖 1 所示，每堆石子個數隨意，但三堆中不能有數目相同者。兩個人輪流隨意選一堆抓取一個以上的石子，也可以將選取的那一堆石子全部抓光，只剩兩堆。每一次輪流抓取可以隨意變更任選一堆，但抓取當下不能越堆抓取另外兩堆的石子。抓取過程中，兩方都希望最後只剩下一堆，而且也只剩一顆石子給對方，抓到最後一顆石子者便輸了。若利用圍棋的黑白子當石子玩則更方便。

（二）倍數數列

請先記住下面「倍數數列」，供下述說明如何抓取石子的方法。數列中各數字，除 1 之外，數列中都以乘 2 的倍數延伸增加，很好記。

1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, ...

（三）母和子的定義

如圖 1 中三堆 11, 7, 9 三個數字的石子數目，稱為三個「母」數字。將各母數字依次分解組合成如下之 ＋＝ 數列，稱之為「子」數列。每個母數之子數列的組成，係利用上述倍數數列中選取近該母數之最大數字後，剩下的餘數再用同法逐次分解組合之，至最後無法分解為止。譬如下面之 11 母數字分解「子」數列為例，倍數數列中最近該母 11 之最大者是 8，剩下 3，見圖 2；倍數數列中最近 3 之最大者是 2，剩下 1，見圖 3；最後 1 不能再分解了；因此 11 母數字分解後之組合是 8+2+1=11 的子數列。其他兩堆母數字 7 和 9 亦如同本方法分解組合之子數列如下所示，見圖 4。

11	7	9
8+2+1=11	4+2+1=7	8+1=9

上列是隨意數目的三堆石子如上列 11, 7, 9 的數目，稱為「布局」。開始玩時，會玩的明眼人一看就知道這三堆石子是輸而且是不好的數目布局，因此我們要先抓取以改變石子數目的布局。但有時遊戲開始時的石子數目不同，是贏且好的數目布局。至於什麼是好或不好的布局，及如何做好布局的方法，請見後述「遊戲例子」中說明。

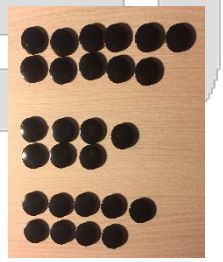


圖 1 數 11, 7, 9 三堆石子

圖 2 數 11 子數列的建立過程

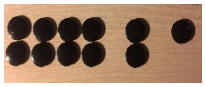


圖 3 數 11 子數列的建立完成

中興工程．第152期．2021年7月．PP. 98-100
http://www.sinotech.org.tw/journal/

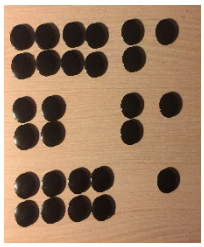


圖 4 數 11, 7, 9 的三堆石子的子數列

（四）抓玩用兵之道

開始玩時，若看是「不好」的布局，我們要搶先抓取來建設，使之成為好而贏的布局；相反的，若是「好」的布局，就讓對方先抓取，破壞原有的好布局，因為好的布局一經抓取後便被破壞，輪到我們時再來建設。遊戲就是這樣「對方破壞我建設」一路玩下去，就像張羅穴隧，使對方陷在網羅或泥淖中，處於輸的布局地位而無法脫困，而且他也不知道。當遊戲開始時，因為一般人不明這個道理去做布局，所以為不讓對方有疑，我們可以讓對方選擇先或後抓取，並學對方隨意抓取，使其不知我們已知道其中網羅或泥淖；知道布局卻裝作不知道；知道該抓哪一堆石子卻裝作猶豫不決以故布疑陣。我們也不用急著去數石子的數目，當剩餘石子數目較少而容易數時再做布局也不遲，因為當石子多時，數起來分解組合是很傷神很累人，腦筋很震盪的！此有點雷同戰場取勝用兵詭詐之術，或有人認為是狡黠；然能使遊戲興致達高潮，讓對方感覺在技術上只是勝敗稍差一籌，誘其有興趣再繼續玩遊戲，此乃本遊戲所謂用兵之道的理由和目的。玩本遊戲的前提，當然是與那些不明抓玩道理的人玩，而一般會玩的人不多。本遊戲就像變魔術一樣，說穿了不值錢，因此介紹的抓玩道理要保密，才有得好玩！

1. 遊戲例子

利用上述 11, 7, 9 三堆石子（圖 4）抓玩為例，上列三串「子」數列中的子數字有兩個 8，一個 4，兩個 2，三個 1。我們要建設成三堆的「子」數字都「成對」的布局才會贏；其中 4 和 1 子數字不成對，要選一堆抓取改變，因此把中間的母 7 的子數列 4+2+1=7 中之 4 和 1 去掉，只剩下原有之 2，也就是說從母 7 數中抓取五個石子，那麼所有的子數字就成對了，如下說明。成對和不成對在圖 4 中可以一目了然看清楚，而且圖 4 中各子數字都是上述「倍數數列」中的數字。

●（1）：開始第一手抓取。承上所述，因為上列三串「子數列」的子數字不成對，原三堆石子數目是不好的布局，我們要主動搶先抓取建設，使之成對而成為好的布局。從上面三堆之母 7 堆中抓取五個石子，剩下如下之 2，則三串子數列當中是兩個 8，兩個 2，兩個 1 的子數字，都是兩個成對的子數字，抓成好的布局了！這就是前述所言要如何做成好布局的方法及什麼是好或不好的布局。

11	2	9
8+2+1=11	2=2	8+1=9

□（2）：對方破壞布局。假設對方不明做布局的道理，隨意從上列母 11 堆中抓取石子，剩下如下之 6，結果破壞了原先已做成的好布局，因為子數列中的子數字變成不成對了，是不好的布局。

6	2	9
4+2=6	2=2	8+1=9

●（3）：我建設布局。我從上列母 9 堆中抓取石子，剩下如下之 4，又成對了。

6	2	4
4+2=6	2=2	4=4

□（4）：對方破壞布局。

3	2	4
2+1=3	2=2	4=4

●（5）：我建設布局。

3	2	1
2+1=3	2=2	1=1

□（6）：對方破壞布局。

1	2	1
1=1	2=2	1=1

●（7）：我建設布局。本布局見下述之「結尾時注意事項」說明。

1	1	1
1=1	1=1	1=1

□（8）：對方破壞布局。

1	*0*	1
1=1	0=0	1=1

●（9）：我建設布局。

0	0	1
0=0	0=0	1=1

最後一手第十次由對方抓取，是抓上列剩下最後的一堆和剩下的最後一顆石子 1，我們贏了。

2. 結尾時注意事項

抓取快到結尾時，注意要做成如下列三種數列之一才會贏。

（1）「1　2　3」為成對，如上述之 ●（5）。

（2）「1　1　1」是唯一不成對而是好的布局，如上述之 ●（7）。

（3）若抓取至僅剩兩堆，則要建設成兩堆數目一樣的石子給對方，這是做好成對布局，僅在結尾時，注意如上列之 □（8）除外。

在抓取過程中，若只剩兩堆石子時，我們就要建設成兩堆相同數目的布局給對方；他抓幾個石子，我們便緊接輪流在後，從另一堆石子中抓取相同數目，以永遠使兩堆石子保持同一數目。在前述「遊戲規則」中曾提到，剛開始玩此遊戲時，不能設含有兩堆相同數目的三堆石子，因為應用本方法，誰「先」抓取，將不同數目的那堆石子全抓取完，只剩下兩堆同樣數目的石子給對方，誰就贏了。因此在遊戲過程中，切記！若對方抓取後，三堆中有兩堆石子數目一樣時，趕緊把不同數目的第三堆全部抓完，只剩同樣數目的兩堆石子給對方，否則絕對不要隨意抓到只剩下兩堆。

三、結　語

本益智遊戲不限三堆，四堆或五堆以上抓取的布局道理都一樣，多玩幾次，自然就會熟能生巧。遊戲時，若不明抓玩的道理，任是一位懷有七竅玲瓏心很有心機而聰明之人也是很難取勝的！記得每每與朋友或在國外工作和異國友人玩本遊戲時，不入費力，手擎杯品茗，溫香撲鼻，透入囟門，卻看對方竭盡腦汁和屏息靜氣而專注，鑽研細尋想盡破解之道，且像在對弈時抓耳撓腮悄無聲息苦思纏鬥；或真切看到對方帶腮連耳通紅，額頭青筋暗暗透出，最後只得心中細細長嘆一聲說：「為何不能強的過他？」這些多少窘態包攬一盡，對方像個洩氣的球，心下不伏，幾次而說再來腦筋震盪一回的模樣，畢肖嚇忘技不如人，登時倒覺得煞是有趣！更有意思的是：與小朋友們拿石子或什麼的便快樂玩，小孩們七嘴八舌吆喝，東一句西一句好不熱鬧！偶爾讓他們贏，他們樂不可支，真是樂也妙煞！也告訴了一位老師，她在學校上課看到學生們打哈欠無精打采時，就與他們在黑板上用粉筆寫上三堆數字作耍玩，宣布贏兩次者有糖吃或獎品，當然其中有一次是放水，以引起他們的興趣，學生們都不想睡了，十分鐘後精神來了再繼續上課，很有意思！由本遊戲也讓筆者深深體悟到，若我們為人做事能與本遊戲一樣，懷著對方破壞我容忍、我容納、我再來建設的心，那麼我們在人生的道路上，一定會成功、一定會贏的！這些正是本遊戲的妙處，有訣竅和蘊奧，在此與大家分享，希望大家喜歡，把此一玩。

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

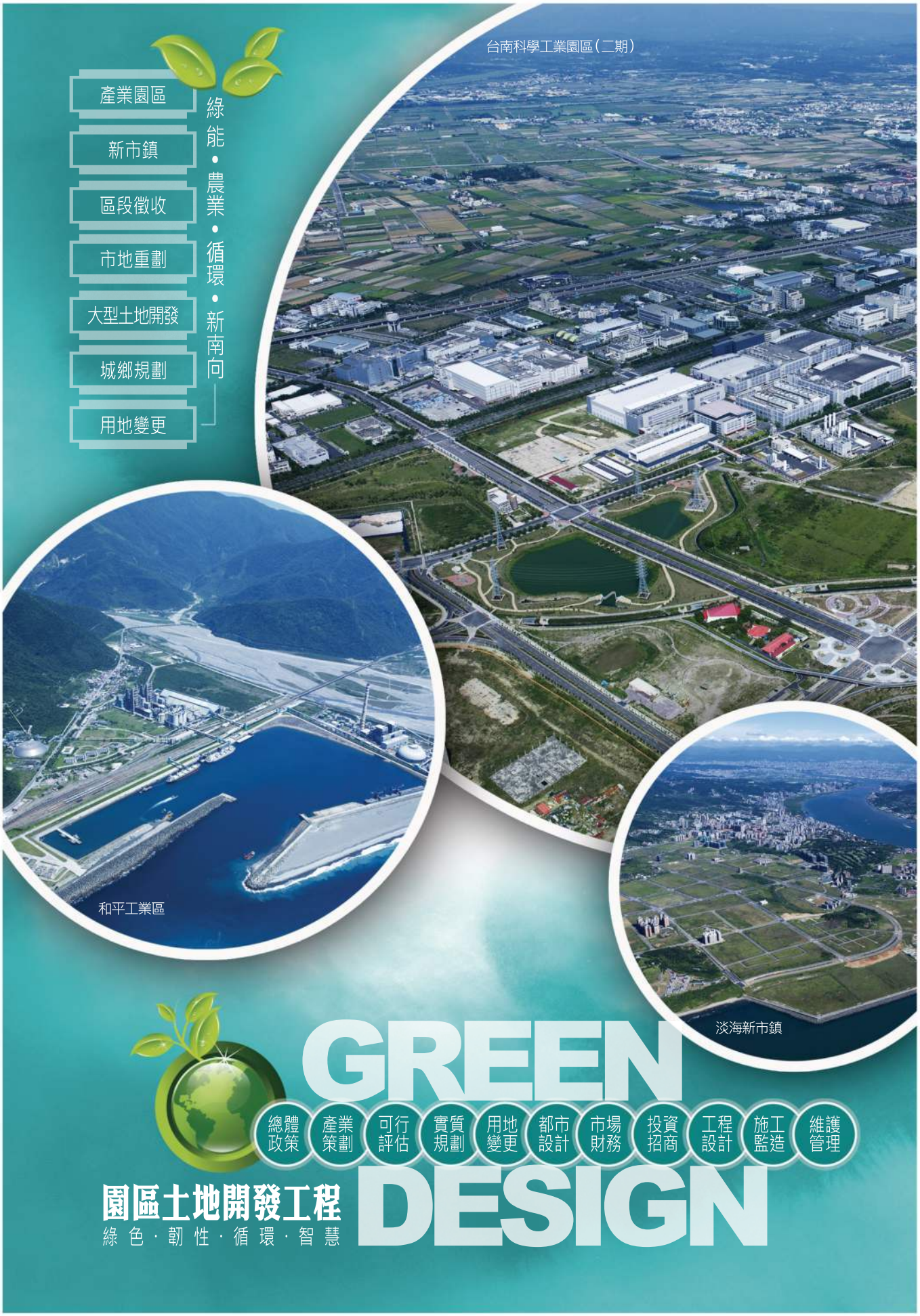
類別	序號	書　　名	編　　號
水利工程類	1	台灣南部區域枯旱特性	R-HY-01-01
	2	河川水理輸砂模式 SEC-HY11	R-HY-01-02
	3	台灣地區地面水及地下水調查與運用	R-HY-01-03
	4	混凝土壩非線性分析商業化程式發展（一）	R-HY-01-04
	5	攔河堰二維水理分析軟體 SEC-HY20	R-HY-01-05
	6	敲擊彈性波技術應用在巨積混凝土結構物裂縫之檢測	R-HY-01-06
	7	近岸地形變化之數值模式	R-HY-01-07
	8	敲擊回音儀器改善開發及在混凝土波速與裂縫檢測上之應用	R-HY-02-02
	9	巨積混凝土非破壞品質檢測技術之研發	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）岸壁沖刷	R-HY-10-01
	27	都市水岸縫合與環境改善研究－以美崙溪為例	R-HY-13-01
	28	宜蘭東澳地區海洋深層水多目標園區可行性研究	R-HY-14-01
	29	集集南岸三小水力發電計畫可行性研究	R-HY-16-01
大地工程類	1	堆石壩靜態與動態行為研究（二）軟岩材料含量對工程性質之影響	R-GT-01-01
	2	大地工程流形數值分析方法之發展（一）流形方法之引進與大地工程上之應用	R-GT-01-02
	3	隧道設計整合系統之發展（一）隧道支撐設計	R-GT-01-03
	4	隧道水文地質調查準則（含解說）	R-GT-01-04
	5	基樁完整性檢測技術發展與應用	R-GT-02-01
	6	多功能壓密沉陷數值程式之開發、模擬與驗證〔二〕施工模擬與尺寸效應	R-GT-02-02
	7	軟弱土層特性與深開挖行為〔三〕深開挖施工訊息化系統	R-GT-02-03
	8	岩盤隧道施工資料自動化處理系統	R-GT-02-04
	9	鬆軟地盤改良作業之評估、設計與檢驗方法	R-GT-03-01
	10	Seismic Resistance Design of Earth Structures and Deep Foundation-（1）Dynamic Effective	R-GT-03-02
	11	隧道施工專家系統	R-GT-04-01
	12	節理岩體力學特性研究（二）實際工程岩體力學參數之評估與應用	R-GT-04-02
	13	大地工程流形數值分析方法之發展（二）節理岩體斷裂破壞程式發展	R-GT-04-03
	14	地震時潛盾隧道與既有建築物之互制分析	R-GT-04-04
	15	樁基礎分析及設計程式發展	R-GT-05-01
	16	粉土細砂現地觸探結果設計參數之 CPT 標度	R-GT-05-02
	17	隧道交叉段力學行為與支稱對策	R-GT-05-03

類別	序號	書　　名	編　　號
大地工程類	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	預力混疑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－完整岩盤隧道影響探討	R-GT-12-02
	33	隧道開炸振動環境影響評估與技術準則之研訂	R-GT-12-06
	34	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
	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
環境工程類	1	加速型溶劑萃取法萃取底泥樣品中有機錫	R-EV-01-01
	2	土壤樣品中 Cu、Cd、Hg 和 Pb 的直接分析-利用 USS-ETV-ICP-MS 法	R-EV-01-02
	3	粉狀活性碳在降低消毒副產物生成之應用	R-EV-01-03
	4	界面活性劑液相層析質譜分析方法	R-EV-01-04
	5	自來水水質生物穩定性評估方法	R-EV-01-05
	6	應用固相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	下水道污泥之硒直接分析	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 VOC。	R-EV-04-01
	22	不明廢棄物棄置（掩埋）調查採樣計畫及污染判定標準程序訂定	R-EV-04-02
	23	以 HPLC/Fluo 分析環境空氣中真菌含量	R-EV-04-03
	24	空氣污染控制策略及成本效益分析	R-EV-04-04
	25	彰濱金屬區電鍍廢水高級處理與資源化技術	R-EV-04-05
	26	地下水 MTBE/BTEX 油品污染之物理處理技術	R-EV-04-06
	27	固定化微生物擔體於反應式阻牆技術之應用	R-EV-04-07
	28	以化學氧氣法處理受有機物污染之土壤	R-EV-04-08
	29	自來水供水系統微量臭味物質鑑定技術	R-EV-05-01
	30	塑膠管長期管剛性評估機制（一）	R-EV-05-02
	31	污染場址水文地質調查技術之發展	R-EV-05-03

類別	序號	書　　名	編　　號
環境工程類	32	高錳酸鉀氧化技術於地下水污染整治之應用	R-EV-06-01
	33	薄膜海水淡化廠出水水質穩定化控制技術	R-EV-06-02
	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
結構與耐震工程類	1	高壓阻尼器之研發	R-ST-01-01
	2	封閉式液流阻尼器結構減震之模型試驗	R-ST-01-02
	3	加長型單肋板補強梁柱接頭耐震行為與設計	R-ST-01-03
	4	鋼筋混凝土耐震結構性能設計法（二）直接位移法及其結構實驗	R-ST-01-04
	5	鐵路橋梁耐震設計可靠度分析（三）RC 連續橋梁地震反應分析	R-ST-01-05
	6	雙鋼管充填混凝土中空橋柱耐震行為（一）— 軸力與彎矩	R-ST-02-01
	7	斜張橋空氣動力穩定性之風洞實驗與數值分析	R-ST-02-02
	8	遲滯型消能器減震技術改良與應用加勁阻尼系統之結構耐震性能設計方法	R-ST-02-03
	9	預鑄混凝土橋墩之耐震行為（三）綜合應力行為	R-ST-02-04
	10	鋼骨箱型柱梁柱接頭耐震行為（一）鋼骨箱型柱肋板補強梁柱接頭耐震行為	R-ST-02-05
	11	地震工程性能設計法之應用（一）單自由度橋柱及建築物之耐震性能評析與設計	R-ST-02-06
	12	鋼筋混凝土耐震結構性能設計（三）消能隔減震系統之位移設計法	R-ST-03-01
	13	液流阻尼器全尺寸結構防振功能之振動台測試	R-ST-03-02
	14	雙鋼管充填混凝土中空橋柱耐震行為（三）中空雙鋼管混凝土柱與基礎接合耐震行為	R-ST-03-03
	15	斜張橋空氣動力穩定性之風動實驗與數值分析（二）	R-ST-03-04
	16	高韌性鋼橋柱耐震行為（一）－先期試驗	R-ST-03-06
	17	流場引致結構物振動之分析技術現況評析	R-ST-03-07
	18	垂提式閘門振動分析及評估指南	R-ST-04-03
	19	鋼骨箱型柱梁柱接頭耐震行為（二）箱型柱與鋼梁偏心接合耐震行為	R-ST-04-04
	20	載荷 100 噸級液流阻尼器特性試驗及技術推廣之預備工作	R-ST-05-03
	21	加消能裝置鋼構架位移設計法之試驗	R-ST-05-04
	22	建築結構之多振態性能評析與設計方法應用（一）考慮多振態之位移導向耐震評估與設計	R-ST-06-01
	23	特殊形狀建築物承受風壓分析－Phoenics 軟體應用手冊	E-ST-10-01
	24	雙間隙液流阻尼器	R-ST-10-01
	25	工程保險巨災風險評估模型開發	R-ST-10-02
	26	不規則建築物耐震性能導向設計與評析	R-ST-12-01
	27	建築物環控分析 Flair 軟體應用指引	E-ST-12-01
	28	橋梁監測及緊急調查回報系統	R-ST-14-02

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

www.sinotech.com.tw



- 產業園區
- 新市鎮
- 區段徵收
- 市地重劃
- 大型土地開發
- 城鄉規劃
- 用地變更

綠能・農業・循環・新南向

GREEN DESIGN

總體政策 · 產業策劃 · 可行評估 · 實質規劃 · 用地變更 · 都市設計 · 市場財務 · 投資招商 · 工程設計 · 施工監造 · 維護管理

園區土地開發工程

綠色・韌性・循環・智慧

中興工程顧問股份有限公司
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, LTD.
臺北市南京東路五段171號 電話:(02)2769-8388 傳真:(02)2763-4555 e-mail:sinotech@sinotech.com.tw

〈業務範圍〉水利・大地・電力・工業建設・環境・機械・電氣・交通・建築・系統・海岸及港灣・工業區及城鄉開發

SINOTECH

* 湖山水庫工程

掌握億萬年記錄的奧秘

湖山水庫由湖山主壩、湖山副壩及湖南壩等壩所組成
於清水溪建置桶頭攔河堰越域引水，並與集集攔河堰聯合運用
中興自2002年起參與大壩及溢洪道等結構物之規劃與設計
從大壩完工至今，持續負責水庫安全檢查與監測工作

大地工程團隊

中興團隊專業服務

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

聯絡資訊

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.

SINOTECH

*國道3號木柵交流道

縱橫四界的願景擘劃者

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

公路設工程

中興團隊專業服務

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

聯絡資訊

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

正派經營．品質保證．追求卓越．創新突破

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

*大鵬灣濱灣泊靠遊憩設施整建

用技術落實對安全及永續的執著

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

海事工程團隊

中興團隊專業服務

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

聯絡資訊

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

正派經營．品質保證．追求卓越．創新突破

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

www.sinotech.com.tw

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－竹科（寶山用地）第二期擴建計畫

竹科第二期擴建計畫位於新竹縣寶山鄉，面積約90公頃，由中興工程顧問辦理整體規劃與都市計畫相關作業。本計畫係爰於新竹園區現有廠房用地已有不足，科技部竹科管理局乃評估我國先進奈米製程發展需求及聚集效益，續於新竹園區周邊設置先進奈米製程量產廠房及所需公用設備，以強化產業布局及提升國際競爭力，帶動我國高科技產業持續發展。

中興工程 No.152 / July 2021

ISSN 0257-554X

出版者：財團法人中興工程顧問社

社　址：11494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：大地印刷廠股份有限公司

※ 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