

中 | 華 | 技 | 術 | 119

CECI ENGINEERING TECHNOLOGY

2018. 7. 31 出版

隧道工程之 艱困與挑戰



國內
郵資已付

台北郵局許可證
台北字第3758號

專訪人物／

行政院公共工程委員會主任委員吳澤成

台灣電力公司董事長楊偉甫

中華民國隧道協會理事長陳志南

臺9線蘇花改計畫南澳和平段隧道特殊考量及
困難地質因應

南迴公路拓寬改善計畫安朔草埔段隧道設計特
色與施工精進作為

新烏山嶺引水隧道工程遭遇瓦斯處理工程探討

月世界地區隧道遭遇斷層之變位監測案例探討

特殊環境之潛盾隧道地中接合技術與風險探討

 財團法人中華顧問工程司 發行

CECI  台灣世曦工程顧問股份有限公司 編製



隧道工程之 艱困與挑戰

CONTENTS

中華技術 119

目錄

專輯前言

1 | 人物專訪

6. 訪行政院公共工程委員會主任委員吳澤成談「國家建設之推動」

..... 整理：周坤賢·攝影：詹朝陽

18. 訪台灣電力公司董事長楊偉甫談「電力建設與綠能」.....

..... 整理：周坤賢·攝影：詹朝陽

30. 訪中華民國隧道協會理事長陳志南談「隧道工程艱困與挑戰」.....

..... 整理：周坤賢·攝影：詹朝陽

2 | 工程論著

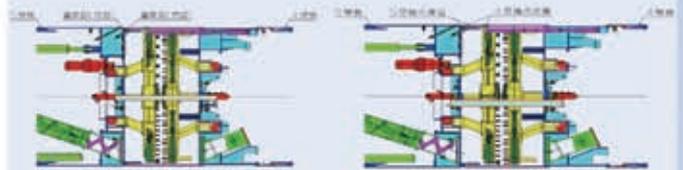
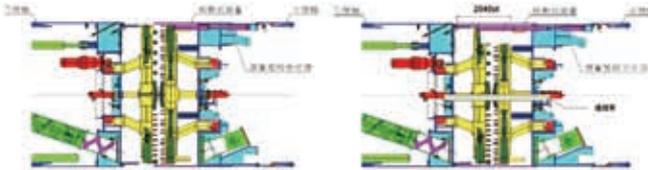
40. 大型山崩判釋新利器—結合InSAR與光達數值地形..... 陳柔妃、林慶偉



發行人 吳盟分
主任委員 陳茂南
發行所 財團法人中華顧問工程司
地址 台北市辛亥路二段185號28樓
電話 (02) 8732-5567
網址 <http://www.ceci.org.tw>

編審工作小組
總召集人 周禮良
副總召集人 王昭烈
119期召集人 廖學瑞
119期審查委員 吳文隆
總編輯 吳淑惠
副總編輯 李志宏
執行編輯 袁雅玲
編輯 詹朝陽、劉彥男、季竺貞
設計 台灣世曦工程顧問股份有限公司
地址 台北市內湖區陽光街323號
電話 (02) 8797-3567
網址 <http://www.ceci.com.tw>

◎ 經刊登之文章，文責由作者自負 ◎



3 | 專題報導

52. 臺9線蘇花改計畫南澳和平段隧道特殊考量及困難地質因應..... 邵厚潔、陳正勳、吳宗翰、林志權、郭育安、鄭斯元

68. 南迴公路拓寬改善計畫安朔草埔段隧道設計特色與施工精進作為..... 江金璋、羅國峯、吳文隆、蕭秋安、林志權、盧宥融、陳正勳

88. 新烏山嶺引水隧道工程遭遇瓦斯處理工程探討..... 汪世輝、吳文隆、周坤賢、黃威豪、許志宇

106. 月世界地區隧道遭遇斷層之變位監測案例探討..... 陳國隆、王吉杉、楊智堯、吳文隆、蕭秋安

122. 廣域大地變位之利用GPS監測分析與解算—以國道3號田寮3號高架橋及中寮隧道大地變位監測為例..... 楊名、景國恩、楊智堯、吳宗翰、吳文隆、蕭秋安



136. 特殊環境之潛盾隧道地中接合技術與風險探討..... 陳保陵、竺文彥、薛振興、張嘉興、李魁士、邱志榮、陳信吉

150. 卵礫石地層免開挖工法地下電纜洞道設計與施工—台電林口~頂湖345kV案例..... 江武照、郭晁坤、陳聰海、許耀仁、廖秋銘、周永川

164. 復刻回憶之高雄新鐵路地下化車站設計與工程特殊挑戰..... 伍育德、周永川、陳聰海、王景平、吳文隆



180. 台20線南橫公路勤和至復興路段複合災害之工程處理對策..... 林清洲、王慶雄、陳正偉、吳文隆、蕭秋安、張嘉興、王景平

196. 地工沉箱之問題探討與新時代之技術挑戰..... 柯武德、周永川、邱志榮、許耀仁、陳焜雯

編後語



專輯前言

臺灣面積約3萬6197平方公里，山地及丘陵佔全臺面積四分之三以上，平原僅佔四分之一，地形陡峭、崇山峻嶺海拔變化大，臺灣多山的地形，在經濟發展及縮短兩地交通的情況下，逢山開鑿隧道遍布全臺各地。今年是隧道工程佳績頻傳的一年，包括新烏山嶺引水隧道工程、蘇花改隧道工程、安朔草埔隧道工程等山岳隧道皆順利貫通；高雄鐵路地下化明挖覆蓋隧道工程、台電林口-頂湖345kV電力洞道工程即將完工啟用，代表著臺灣隧道工程邁向新的紀元。

欣逢此一令人感動的時刻，本期專輯以「隧道工程之艱困與挑戰」為主題，藉回顧這幾年隧道工程人員兢兢業業努力的成果，以全新的思維，對未來隧道工程規劃、永續經營及創新作為提供方向。人物專訪部分本期很榮幸能專訪公共工程委員會吳澤成主任委員談「國家建設之推動」，吳主委暢談再次回任主委，對於推動國內公共工程建設之願景及執行力；專訪台灣電力公司楊偉甫董事長談「電力建設與綠能」，闡述國內電力建設之困境及穩定供電之未來藍圖；專訪中華民國隧道協會陳志南理事長談「隧道工程艱困與挑戰」，強調隧道工程人才培養及厚植國家競爭力。

工程論著部分，很榮幸邀請文化大學陳柔妃助理教授及成功大學林慶偉教授，探討結合InSAR與光達數值地形於工程實務應用，尤其是針對大型山崩判釋，其主要優點在於快速、大面積、精準等。應用InSAR資料進行輔助判釋，以利瞭解邊坡地表位移情況，提高與修正大型山崩的潛勢區位判釋，以供日後細部調查及防災工程之參考。

專題報導部分，在山岳隧道工程有「臺9線蘇花改計畫南澳和平段隧道特殊考量及困難地質因應」，報導蘇花公路隧道挑戰

與困難克服；「南迴公路拓寬改善計畫安朔草埔段隧道設計特色與施工精進作為」，探討安朔隧道遭遇多次大湧水及抽坍困難之處理經驗；「新烏山嶺引水隧道工程遭遇瓦斯處理工程探討」，從調查、分析、設計、施工、管理等面向解決瓦斯氣體突出之災害。在面對旗山斷層、龍船斷層等特殊隧道工程監測及修復方面，包括「月世界地區隧道遭遇斷層之變位監測案例探討」、「廣域大地變位之利用GPS監測分析與解算_以國道3號田寮3號高架橋及中寮隧道大地變位監測為例」兩篇文章。在潛盾隧道技術方面有「特殊環境之潛盾隧道地中接合技術與風險探討」及「卵礫石地層免開挖工法地下電纜洞道設計與施工—台電林口-頂湖345kV案例」都是經典案例。在明挖隧道方面則是「復刻回憶之高雄新鐵路地下化車站設計與工程特殊挑戰」。其餘大地工程方面的技術探討，包括「台20線桃源勤和至復興路段複合災害之工程處理對策」及「地工沉箱之問題探討與新時代技術挑戰」等文章。本期各篇論文以學理為依據，工程案例實務為題材，理論與實務相輔相成，並對於大家所關心的主題，深入淺出的研析，最後成為工程案例，字字珠璣，篇篇精彩，值得大家一讀。



台灣世曦工程顧問股份有限公司

副總經理

A handwritten signature in black ink, appearing to be '張學瑞' (Zhang Xue Rui).

國內重大公共工程從可行性研究、規劃、設計、施工以及維護管理，往往經歷非常長的期間，特別是隧道工程更是耗時，相關工程之完成，皆代表參與同仁戮力以赴的辛勞及付出。最後，感謝各專訪人物、各篇作者及編輯同仁，於百忙之中不辭辛勞，默默地付出，使本期順利完成，值此付梓之際，爰綴數言，聊表十二萬分謝意。

1

人物專訪

| 中 | 華 | 技 | 術 |

INTERVIEW



訪行政院公共工程委員會主任委員

吳澤成

談

國家建設之推動

整理：周坤賢 · 攝影：詹朝陽

壹、前言

行政院政務委員兼臺灣省政府主席兼行政院公共工程委員會主任委員吳澤成先生，國立中央大學土木工程研究所碩士。從基層測量、設計、監造工作開始，歷任基隆市政府工務局局長、臺灣省政府住都局工務處長、臺北縣政府副縣長、工程會主任委員、宜蘭縣副縣長、代理縣長及再次回任工程會主任委員等職務，公務機關歷練十分豐富，縱向跨越地方、省府、中央各機關單位，橫向則跨越基隆市政府、臺北縣政府、宜蘭縣政府等三個縣市。

吳主任委員勉勵台灣世曦工程顧問公司，設計顧問公司要有一定的規模，強調團隊合作是非常重要的，可善用內部資源調度、技術互援，以提升全方位的問題解決能力，朝永續經營努力。但同時也提醒大型顧問公司要注意末端人員管理，尤應掌握分散在各地的工地管理作業，因為魔鬼常藏在細節中。

本期很榮幸於民國107年6月1日專訪吳主任委員，以下是訪談紀要：

貳、訪談紀要

問：主委從基層開始，歷任基隆市政府工務局局長、臺灣省政府住都局工務處長、臺北縣政府（後升格為新北市政府）副縣長、工程會主任委員、宜蘭縣副縣長、代理縣長及再次回任工程會主任委員等職務，請主委談談在工程會業務推動與地方政府工程執行讓主委「印象最深刻」的工程？

答：個人非常幸運能夠在公務機關充分歷練，畢竟能擁有這樣經驗的人不多，也因為這樣的

機緣，讓我能夠看得更多，學的更廣。

以工程面來看：我從第一線的工地測量、設計、監造等工作做起，親力親為建立紮實技術根基，從工地現場的工程師、工務所主任、隊長，到管理階層的工務局長，再到決策階層如秘書長、副縣長、工程會主委等職務，對於能在公務生涯深切體現規劃、設計、監造及施工到維護管理各階段，並從第一線承辦、管理、參與決策進而成為做決策的人，對我而言都是非常豐碩且珍惜的經驗。

參與的工作，從行政面來看包括省府住都

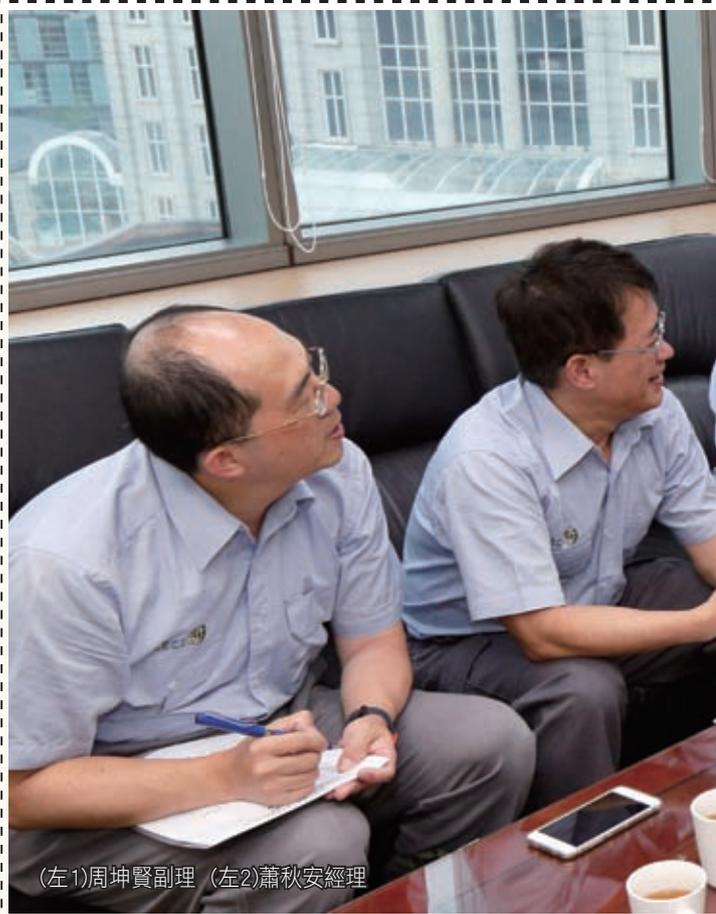


局、縣市政府(基隆市)、省政府、新北市(原臺北縣工務局局長、秘書長、副縣長)、宜蘭縣(副縣長、代理縣長)、再到中央機關。

由於參與的工程多，擔任的角色多，從不同角度、不同觀點看待事情的見解就會不一樣，之前曾與三個縣市的民意代表溝通，也更體會從不同的角度看待處理事情。

過去在新北市(原臺北縣)政府擔任工務局長任內，曾完成基隆河整治等多項公共工程，其中印象最深的是中永和地區的雙和醫院新建工程，這個工程是工程人員用專業的技能加上從人民的角度，用心解決過去17年來未能興建雙和醫院的困難。雙和醫院原規劃地點位處獨立山頭，山頂高程約40米，面積約4公頃，如果照一般傳統思維，以及建築技術規則與水土保持法等相關規定，一定會讓道路沿著山坡環繞一周爬坡至山頂，到最後醫院只剩下幾百坪的使用空間。

然而對工程人員來講，最重要的就是面對問題。建築技術規則及水保法的規定都是針對傳統單向斜坡的思維，當然是開挖越深越危險，但獨立山頭就不一定是如此。獨立山頭整座移平，才是最長治久安的方式，但要說服農委會、內政部卻非常不容易。為此，我們分析現地條件、做模型、研究法令並分析利弊，不



(左1)周坤賢副理 (左2)蕭秋安經理

僅做模型跟農委會及內政部溝通，也積極的尋求法令的解套，結果在一個月內成功說服農委會及內政部修改相關規定，於法令增修「公共設施經縣市政府審查通過者不在此限」的但書規定，終於讓案件能夠順利推動。本案開挖出來的土方，約37萬立方公尺，也加值運到新北市鶯歌區作為新生地回填使用【三鶯橋下游鶯歌堤防新建計畫堤後新生地填土工程】。在當時縣府積極作為下，雙和醫院順利蓋起來，現在每天提供5、6千人的診療服務，造福中永和地區的民眾。當年這個工程也是由台灣世曦工程顧問公司(中華顧問工程司)擔任設計、監



(右3)吳文隆協理 (右2)廖學瑞副總經理 (右1)吳澤成主任委員

造工作，在此也感謝世曦公司的協助與參與。

一般來說，做工程有不少會遇到民眾拉白布條抗爭。但這個案子卻做到讓民眾高掛紅布條感謝工程團隊的努力。對民眾來說，雙和醫院建設的落成不僅提供醫院服務，同時也一併解決過去民眾擔心邊坡因雨造成土石下滑的問題，這是一個以專業作後盾達成建設的絕佳案例。（編者註：主委也分享，時任中和市呂芳煙市長，相當關注雙和醫院建設，當年行政院衛生署雖同意籌建雙和醫院，但因院址屬山坡地，限於水土保持等法令限制幾乎胎死腹

中，土方移除及整地工程有如「愚公移山」般困難。呂芳煙市長曾為本案到中央多次陳情，其執行力和毅力值得敬佩，主委強調在爭取地方建設方面，只要在中央與地方合作並用心推動，定能克服困難並獲得民眾支持。）

另外任職省住都局擔任北工處處長時，中永和地區景平路的瓦礫溝排水不良造成淹水，因此設計雨水排水隧道，讓潛盾機在非常淺的覆土下穿越臺北市3.2m原水幹管，一般潛盾機需距離幹管要1.5D（幹管直徑）以上才安全，現場卻只剩下1.5m（不到0.5D）的淨距離。但



為了儘快解決淹水問題，當時省長宋楚瑜下達命令，指示不待相關單位協商要立即馬上穿越。然而，此幹管牽涉臺北市和新北市270萬人的飲用水，一旦工程出狀況，後續斷水修復恐長達3個月，由於工程風險過大，我在當晚緊急與住都局局長研商，懇請局長建議省長修正指示，改為「為讓中和永和地區免於淹水，命令住都局，在安全可行的情況下儘快穿越…」，終獲省長同意，後來緊急與相關單位協商，終在增加保全措施處置下，順利完成管線穿越的工作。此案例給我的最大心得，工程人員對於長官的指示，應以工程專業角度提出建議，而建議方式的選擇也十分重要。

另外民國72年我在省住都局首次擔任科長，主動請纓對全省道路交通做總體的整理分析，當時是蔡兆陽先生擔任局長，我自告奮勇就經建會所規劃全省各都市18個生活圈，提出一份從運輸交通規劃、現有運輸系統改善、生活圈道路建設計畫、捷運路廊規劃的計畫書。這本計畫書後來成了企劃案，後續省住都局也成立道路規劃隊及捷運處等單位據以落實執行。我想分享的是，不一定要等到晉升到決策地位才能做事情，在基層的人未必不能成事，只需多個寫企劃案完成簽報陳核的程序，同樣可以達到把事情作好的效果。

問：主委再次擔任工程會主任委員，請主委談談未來公共工程推動重點與施政方向？

答：第二次回任工程會主委，感觸更為深刻，過去十年間增加不少歷練，也體會到須從不同的角度瞭解，才能把事情真相看得更清楚。首先是法令應用觀念上會更透徹，處理事情能理出一定的定律，無論個案或通案，首要須釐清事端發生的緣由與狀況，瞭解來龍去脈後從中找出問題癥結，始提出見解對策，如同醫師看病一樣，先問病癥後才能對症下藥，藥到病除。其次是態度很重要，從對方的立場來換位思考，因為中央或地方官員看待事情角度與民眾出發點不同，所以不是一直固守法律，各說各話沒有交集。民眾常認為與政府單位接觸時，政府不講人情專斷執行；同樣地，當地方政府與中央部會溝通時，地方也認為中央有決定權而不講道理。對於事情認知，民眾與官方間、中央與地方間，同一法律和規定，看法時常會不同，倘若看法一致，就毋庸法院定奪。

以工程的推動進度為例，廠商及機關間執行遭遇跨單位的協調，工程會扮演營建管理者的角色，協調就是解決包括工程技術、都市計畫、用地取得、管線單位彼此間的問題。工程會針對重大公共建設計畫採取全生命週期協



1
人物專訪

吳澤成主任委員談中和地區的雙和醫院新建工程



處機制，從計畫各階段工作重點進行全面性管理，並針對重大政策目標採取分類專案管控方式，包括水資源、電力能源、五加二產業涉及公共建設之計畫、一般公共建設計畫及前瞻基礎建設計畫，協助提供產業營運所需之資源，並將管控目的明確化、系統化，協助重大建設如期如質完工。同時透過每月召開公共建設督導會報，配合「走動式管理」不定期安排正副首長進行實地訪查重大公共工程，深入瞭解問題，主動協調解決跨部會困難問題，協助計畫完成，發揮預定效益。

工程品質如何落實執行是最關鍵的，品質是直接反應在第一線施工的技術士。例如技術士的制度有法源依據，但目前除鋼構電焊外，真正落實的並不多。以台灣中油公司815事件為例，控制器維護更換造成臨時線路短路，經檢討後，竟發現未要求具證照的人來執行，這就是問題的根本所在。工程會致力於建構公共工程品質管理機制，提升工程人員品管觀念及法律素養，並為防止工安意外發生，導入源頭及動態管理，從規劃設計階段即應瞭解工安危險因子及作業環境危害辨識，核實編列工程預算，要求廠商每日辦理動前教育與危害告知等相關檢查，以落實工地職業安全衛生作業。

另外在維護管理方面，完工後的維護管理，在個別法規都有相關規定，問題在於有無

落實。例如目前各單位使用鋼結構工程愈來愈多，像是各縣市政府推出的天空步道及景觀吊橋等，然而鋼構卻是要定期維修、維護的。一般承受壓力的構件，比較不會有突發性的崩壞，但承受拉力的構件，例如吊橋、斜張橋、地錨及鋼索等，破壞都是一瞬間發生，所以定期巡檢、維護非常重要。由於公共工程營運階段之維護管理占全生命週期的時間最長，且其維護品質及落實度常被民眾關心，故工程會近期研擬「公共設施維護管理抽查機制」，未來將定期或不定期抽查各維管機關公共設施維護管理情形，該檢查要檢查，該維修要維修，以達公共設施永續使用。

問：工程會於107年度列管公共工程計畫，提升重大公共建設執行率，請問工程會現階段推動成效如何？

答：在公共工程整體推動上，工程會是扮演營建管理者的角色，如果光靠電腦資料數據收集，實質貢獻不大。一般除非施工廠商財務出問題，否則廠商定會想盡辦法完工。廠商通常遇到的問題，小者如機關不做決策，大者如跨單位協調不順利，而這些往往是影響工程進度的主要原因。工程會的作用在於，找出工程進度落後的部會或機關，歸納分析找出計畫出現狀況的異常原因，從旁輔導並協助解決問題。

以近期故宮工程進度落後為例，我們會前往第一線，查出真正問題所在，協助解決問題。

工程會列管五千萬元以上公共建設計畫，專案分類為水資源、電力能源、五加二產業、一般公共建設計畫及前瞻基礎建設計畫等項目。近期協處的重要工程包括：「臺鐵南迴鐵路臺東潮州段電氣化工程」協助解決進用外籍

段就要參與，因為計畫起始有問題，後面解決更不易。導入全生命週期之採購管理，鼓勵機關考量全生命週期採購概念，將規劃、設計、發包、施工、履約管理及營運維護各階段納入考量，以發揮最佳採購效益，預算編列應符合市場行情，並評估工程興建之預期效益。機關及專案管理廠商應落實設計審查機制，以確保設計品質。



「臺鐵南迴鐵路臺東潮州段電氣化工程建設計畫」潮枋段工程

營造人力問題，促使工程順利施作；「石門水庫阿姆坪防淤隧道工程」協調用地取得事宜，並督促內政部加速土地徵收計畫審查程序；「林口電廠更新擴建計畫」協調解決人力短缺、筒式煤倉橫梁開裂以及港池浚挖土方改運至臺北港二期物流倉儲區填築等問題。

工程會從計畫源頭開始審核，從國發會階

以採購策略及招標作業為例，藉由採購審查小組協助審查採購需求及經費、招標方式、決標原則及採購策略；並核實編列預算，考量成本及市場行情訂定底價，藉由給予合理的費用，提升採購品質。工程完工後涉及營運服務者，及早導入未來使用或營運單位之意見，避免造成二次施工且有利後續營運工作。



工程會採取全生命週期協處機制，自可行性研究、規劃設計、採購發包、施工管理等各階段全面協助，透過公共建設督導會報建立跨部會困難問題解決機制、實地訪查瞭解問題、適時召開專案協處會議等，逐案協助重大公共建設解決遭遇問題，以加速推動早日發揮效益。

在加速公共建設計畫推動，採取多項精進管控措施，定期召開「公共建設督導會報」，檢討各部會五千萬元以上公共建設計畫及前瞻基礎建設計畫執行情形，協調解決跨部會或通案性困難問題，並按季提報行政院院會。對政府重要政策，如水資源建設、電力能源、五加二產業專案、前瞻基礎建設計畫等計畫，採取分類專案列管，以「走動式管理」方式加強協處，確實掌握各計畫重要里程碑，積極辦理訪查，深入瞭解問題，適時協助各部會排除困難。加強管控未來一年預定完工啟用案件，如衛武營藝術文化中心、國家生技研究園區、高雄鐵路地下化、大林電廠更新改建（新2號機商轉）、擴建南港展覽館、臺南市美術館建設計畫、臺中都會區鐵路高架捷運化計畫（5座通勤站）、南化水庫防淤隧道工程等，如期如質完成提供民眾優質公共服務。



臺中車站（臺中都會區鐵路高架捷運化工程）

問：工程會統籌全國公共工程之規劃、審議、協調及督導，包括政府採購、工程技術、工程管理、爭議處理、技術鑑定等，政策上有何創新構想？

答：在政府採購法修法方面，工程會提出政府採購法部分條文修正草案後，立法委員也提出許多不同的版本，只要是所提內容有理，在確保公平、公正及採購品質前提下，工程會就會參考修正。目前政府採購法修正草案，行政院及立法委員提案版本計24案，立法院交通委員會已於107年5月10日逐條審查完竣，計增訂



3條，修正19條，並決議送院會前須經朝野黨團協商。立法院已於107年5月30日召開黨團協商會議，主席裁示依交通委員會審查結論通過，送院會處理。修正重點包括：(1)修正不良廠商之處罰規定，以更符合比例原則。(2)簡化最有利標作業程序、提升採購效率。(3)修正規範不足、配合實務作業需要之規定，例如巨額工程採購應成立採購工作及審查小組等。

至於各界關心的採購法第101條及103條部分，有關犯採購法第87條至第92條之罪，經一審有罪判決即構成停權要件，此部分未修

正，因為從檢察官起訴，到法院一審判決，已有二道關卡把關。至有關重大違約停權的部分，將適度調整；全國有上千個招標機關，只要是獨立預算就是一個機關，各招標機關在認定是否重大違約，標準不一致，此部分有改善的空間。修法的方向，將增訂機關審酌違約「情節重大」之考量因素，包括機關所受損害之輕重、廠商可歸責之程度、廠商的補救或賠償措施等；另由機關組成一個「採購工作及審查小組」，來認定廠商究是否構成違約「情節重大」，該不該停權。此外，廠商因違約而遭停權者，採累犯加重處罰方式，廠商5年內第1次被刊登者，停權3個月；第2次被刊登者，停權6個月；第3次以上被刊登者，停權1年。

在提升採購品質方面，承攬廠商之優劣為公共工程推動順利與否之關鍵，為促使廠商主動重視良好商譽，工程會積極推動公共工程施工廠商履歷制度，函頒「公共工程施工廠商履約情形計分要點」，以公正、公平、公開方式全面地評量廠商之履約過程，凡走過必留下痕跡。截至107年第1季，已累計78,968筆標案、11,589家廠商之計分成績，並已可初步區分廠商相對優劣。此外，工程會於106年1月1日及9月15日分階段將分數結果開放提供機關查詢，並於106年7月18日編修「公共工程履歷應用於政府採購作業參考手冊」，提供機關採購選商之綜合評判參考資料。工程會後續將以



「促使機關敢用、會用及肯用廠商履歷」為目標持續推動，以協助機關挑選有履約能力優良廠商、排除無法誠信履約之不良廠商，從而促使廠商自主良性機轉，帶動國內公共工程環境與品質向上提升。

在提升採購履約爭議處理效能方面，工程採購因履約期間較長，且常牽涉較高之契約金額，如發生履約爭議遲未解決，將影響工程順利進行。為即時解決工程履約爭議，以利公共建設之推展，工程會推動多元精進措施包括：

- (1)善用機關之採購工作及審查小組機制：從源頭協助審查招標文件及爭議處理事項，以適時消弭採購紛爭。
- (2)建立公共建設諮詢機制：工程會於107年1月11日訂定「行政院公共工程委員會公共建設諮詢小組設置要點」，建立諮詢機制，協助減少廠商與機關對公共建設契約條款認知之歧異，避免發生爭議。
- (3)簡化調解審議流程：透過調解審議方式之改善，簡化調解流程，以加速案件處理期程，兼顧案件處理之品質。
- (4)規劃於契約範本增訂爭議處理機制：規劃於採購契約範本，增訂機關與廠商就個案自行成立爭議處理小組，以即時解決工程履約爭議。

問：工程會對於技術升級國際接軌，目前有何具體作法或對未來發展規劃？

答：近年來東南亞國家基礎建設需求殷切，商機龐大，工程會依據新南向公共工程潛力領域計畫，協助我國工程業者爭取新南向基礎建設商機，達到暢通人流、金流及資訊流，並透過工程產業全球化平臺會議，協助解決進軍海外所遭遇之困難問題。目前主要有五大輸出團隊，包括經濟部主導電廠、石化；交通部主導智慧型交通運輸ETC、都會捷運；環保署主導環保工程等，在106年度於新南向區域已取得超過新臺幣252億元之佳績。107年截至目前為止，得標金額約100億元，持續朝每年200億元之目標努力。此外，工程會亦協助經濟部、外交部推動政府開發協助（ODA）案件，針對新南向國家及邦交國之公共工程，協助工程業者拓展海外市場，並取得工程實績，期逐年提高我工程產業於海外得標工程件數及金額。

另外，工程會也積極推廣BIM技術導入公共工程，BIM可以在數位虛擬空間中事先模擬營建工程各項作業的各種可能情境，在設計階段可偵測出設計錯誤與衝突，減少施工階段的人力、變更與成本，更可運用視覺化管理模式，深化應用至營運維護管理階段，目前先進國家皆已投入相關應用，臺灣營建產業界近年來也積極導入。工程會已成立BIM交流與推動平台，採「因案制宜」與「循序漸進」方式推動，以提升國內產業熟悉度及應用之廣度。目

前國內前50名的廠商，計有60%以上廠商導入BIM技術，顯見BIM已然為國內工程界未來發展的方向，未來持續與其他資通訊、AI領域結合應用，謀求跨域結合應用契機，以實現更安全、更高效的工程服務型態。

問：請主委談談您事業發展的轉捩點與最想要感謝的人？

答：民國87年，當時正在研議凍省，我那時是擔任省政府住都局工務處處長，即將併入中央政府單位。民國86年底，蘇貞昌先生當選臺北縣縣長，那一年溫妮颱風後，經過了半年多到民國87年中，仍然找不到工務局局長的合適人選。我當時和蘇貞昌縣長互不相識，也不曾見過面。但蘇貞昌縣長在旁人建議下竟邀請我擔任工務局局長。當時在住都局的同事都勸我說不要去，因為過不久住都局就會變成中央單

位，而且憂心我到臺北縣政府服務，風險可能會比較大。不過，在和蘇貞昌縣長面談完後，我那時心裏想，有機會去做事情，就放手去做吧！回想起來，當時因為踏出了這一步，整个人生和工程歷練豐富精彩許多。蘇貞昌縣長和我也從不相識的兩個人，到後來彼此間完全信任。因此，這一路走來我也格外感謝他的知遇之恩。



後記

吳澤成主任委員的公務資歷完整，是少數在中央及地方都任事過，且橫跨多縣市皆有優異政績，對於各項公共工程業務都侃侃而談如數家珍，讓採訪團隊印象深刻。承蒙吳澤成主任委員在百忙中撥冗接受本公司專訪，在本次融洽的訪談過程中，我們深切感受到吳主委對於國家公共建設前瞻視野及逐步落實的決心。

1

人物專訪

| 中 | 華 | 技 | 術 |

INTERVIEW



訪台灣電力公司董事長

楊偉甫

談

電力建設與綠能

整理：周坤賢 · 攝影：詹朝陽

壹、前言

楊偉甫董事長，於民國63年畢業於國立中興大學土木工程系，畢業後進入臺灣省政府水利局，參與石岡壩建設工程，隨後於民國73年赴美國科羅拉多州立大學進修取得土木工程學系碩士學位。

楊偉甫董事長從省府水利局基層做起，曾任經濟部水利署中區水資源局長、總工程司、副署長等職，民國98年升任經濟部水利署署長，於民國104年升任經濟部常務次長，並兼任水利署署長約10個月。民國106年815大停電事件後，代理台灣中油董事長二個月，於民國106年10月30日接任台電公司董事長。

楊偉甫董事長來自水利工程體系，曾在經濟部次長任內暫代中油董事長，如今再接任台電董事長，集合水、電、油三項民生專業於一身，曾被立委形容為超人董事長。

本期很榮幸於民國107年5月24日專訪楊偉甫董事長，以下是訪談紀要：

貳、訪談紀要

問：楊董事長由基層做起，長期在經濟部體系任職，尤其是水利署相關工作的推展具有卓越的貢獻，本次轉任台電公司擔任董事長，請教工作上最大的差異為何？

答：其實從水利署到經濟部次長，之後代理台灣中油公司董事長，再轉任到台灣電力公司擔任董事長，很多事情都是超乎自己的預期。會有這樣的人生歷程，其實充滿了驚奇，也充滿

了挑戰。對我來說，最大的變化及挑戰就是在從水利工程至電力工程跨領域的過程中，有些是自己能夠掌握的事？有那些是沒辦法掌握的事，需要聽專業的建議？在擔任國營事業台電公司的董事長之後，深刻地體會到真正的電力專業及工程專業要派上用場，並不是單純只有經營管理及決策工作而已。作決策就要有最基本的專業來輔助判斷，那些不足之處則要趕快去學習補足，而這都要靠同仁及團隊協助。

對於台電公司來說，組織很龐大，各專業分工很細，也擁有各方面的一流的人才。由於



聚集的團隊成員都是精英，就電力專業來說，國內並沒有比台電公司更為精熟的單位。我從外部到台電公司任職，從外面的角度來看，台電公司是國內唯一的電力事業，我們同仁在專業領域上表現很好，然而因為高度專業的關係，也間接造成了相對封閉的心態。

水利單位是直接面對個別的用水單位與民眾，以及具有四季週期性的水環境變化，由於可以觀察得到氣候變化的趨勢，所以會有警覺性的預期，例如若連續一段期間不下雨，水利同仁就會提早做準備。相較之下，台電公司同仁在對外溝通時，緊急應變能力和手法方面是比較脆弱的，在供電充裕的時候，通常溝通不是太大的問題，挑戰也不多。然而目前臺灣正處在進行能源轉型的過程中，社會非常敏感，在轉變的過程中，台電每天都處在緊張的狀況，尤其是社會對於電力供應穩定度、備用容量、備轉容量的高度關注。

台電和水利署的壓力是不同的，水利署一般是水太多或是水太少的問題，基本上是可以預測的，因為水情具有漸進發生的特性；但台電則是天天緊張，尤其今年是選舉年，對於政治人物來說，電力供應是很好發揮的主題，可以獲得媒體的關注。此外，由於工作環境不同，水利署同仁比較會積極主動對外溝通，而台電員工可能因為太過專業，不善言詞的工程



(左1)陳聰海副理 (左2)蕭秋安經理 (左3)吳文隆協理

師性格相當明顯，過去和社會溝通不夠直接，未來台電公司將更主動地推動「開放台電」，透明公開資訊，而這也是讓外界了解台電的最好方法。

台電公司近來面臨一波波的挑戰，像是最近因為雙北市在一個月內跳電達10次，台電公司在必要時比照往例採取減壓供電的方式緊急處理雖不影響用電品質，然而由於媒體關注集中報導，讓大眾覺得這個問題很嚴重。未來台電要強化危機管理的認知，過往是事後危機處理，但是事後危機處理是不足的，應該還要建



(左4)廖學瑞副總經理 (右3)楊偉甫董事長 (右2)王炤烈總經理 (右1)周坤賢副理

立事前溝通預防與緊急應變的機制，達到快速反應的能力，才是解決問題之道。另外有關深澳電廠更新計畫遭遇環保團體的抗爭，雖然通過了環差，但未來的挑戰才正要開始，後續要面臨更多辛苦的日子。

問：董事長經常擔任救火隊的角色，媒體形容董事長專接燙手山芋，請問董事長在面對這些高強度、高壓力的工作時，如此迅速有效，是否有什麼秘訣？

答：首先最重要的是要知道面對什麼問題？台電公司專業很強，是全世界數一數二的電力公司，在國際上台電公司是公認的模範生。台電應該在自己的優勢下，透過科學的方法及訓練，釐清真正面對的問題或挑戰是什麼，才能對症下藥。

面臨了挑戰，才有救火的角色。台電公司當前有二個重要的挑戰：第一個是在面臨轉型的過程中供電能力不足的情況下，由於台電公司專業的部分沒有其他單位可以取代，也無法提供協助，只能靠台電公司本身自立自強，強



化內部的危機感及發揮團隊精神，才是解決良方。第二個是台電公司因為組織龐大，專業分工很細，所以要在各系統間的界面搭上橫向的橋梁，讓部門間快速地連結，同心協力，例如整合高壓輸供電系統與地方配電系統的介面，讓相關的問題串連起來，才有辦法診斷出不同的問題點。

台電公司在面臨到許多壓力來源時，例如民意代表關心、民眾抗爭、歲修、大修趕工等，都有許多要學習改進的地方。個人在擔任經濟部次長期間，觀察到台電公司有些關鍵問題的解決方式可以再改進，像是去年的和平電廠電塔倒塌時緊急應變處理，或是臺澎海纜施工過程的抗爭問題，而這些問題的關鍵爭執點若沒有及時解決，對後續工作推動的影響會很大。以臺澎海纜為例，本來是因澎湖再生能源有多餘的電力，要送到臺灣本島，但澎湖端有民眾抗議風機影響風水的問題以及風力發電機噪音問題，過去都是由第一線處理，無法處理再逐步往上反應；而臺灣端電纜上岸要經過雲林口湖鄉市區，且規劃線路就經過小鎮最熱鬧的街上，所以遇到民眾抗爭的問題。這兩個問題解決的重點都在於如何當機立斷或如何與民眾溝通，我採取的方式是掌握時效立即行動及尊重並且到第一線傾聽地方的意見。

問：電力穩定除了是台電重要的工作目標，也是國家經濟的命脈，有關穩定供電，想請教董事長的想法。

答：隨著經濟不斷發展，穩定的電力供應越來越重要，近來每逢選舉年，電力的問題也會因為政治的效應而發酵。回顧過去，臺灣從早期的農業時代，到晚近的工業時代，不同階段都會設置發展不同的電力設施，如水力電廠、火力電廠、核能電廠，很巧的是在目前這個時間點上，許多設施的壽齡都接近或超過40年，包括電廠或輸變電纜線都面臨到生命週期該要更換的時候。一方面核能及火力電廠要轉型除役，另一方面再生能源的利用開發，時間點都集中在最近的10年期間，同時要做汰舊換新及再生能源發展，然而在轉型的過程中，電又是每天都不能缺的，所以未來10年是台電最艱困的10年。

近年的電力建設處在青黃相接階段，讓每年負責設施歲修及大修的同仁都不敢鬆懈，不管天氣再熱，工作再辛苦，都要維持穩定的電力供應。然而要如何克服艱困的挑戰呢？以運轉30年的老電廠為例，如何有效使用新科技以及大數據的經驗，透過監測系統輔助，並採用新的儀器做預測，例如一部發電機鍋爐管線長達400公里，要找出可能最容易出狀況的是的那幾條，那些是脆弱區，也就是熱區，能事先



1
人物專訪

楊偉甫董事長



找出這些點並做有效預先處置，就能在這樣的環境及條件下，維持供電穩定。

問：有關非核家園是政府重要施政目標，而在核電除役工作上，董事長擔任次長期間利用出國招商或參與國際會議的機會，曾訪問法國、荷蘭、瑞士、英國及德國等先進國家，對各國處理核廢料、核電廠除役方式有進一步了解，有關核電除役之步調、步驟、方法，以及如何加快腳步進行核電除役工作，請教董事長的看法。

答：國際原子能機構於 1995 年出版的報告中強調「核廢料的產出是歷史的共業，核廢料的妥善處置是世代責任」，貯存及處置設施不是虛擬設施，需要實際地點，而其涉及層面很廣，包含民意、政治、經濟、國土規劃等議題，是全國需要共同面對的問題。此外，台電公司身兼電力營運者與核廢處理者的雙重身分，執行核廢料貯存及處置任務或宣導時，較難取信於民。

我在擔任經濟部次長的期間，有機會到瑞典、法國及荷蘭等國考察，了解到這些國家在核後端除役的作法。這些國家皆具有實際核廢料處置的實務經驗，也由於都已成立國家放射性廢棄物處置專責機構，實質上建置有完整的

放射性廢棄物營運體系，對於核能設施除役、低放射性與高放射性廢棄物處置都有完善的系統規劃及具體的進度，他們在核能發電後端營運管理的體制、規劃與整合，以及民眾教育與溝通的素材、方法與成功推動核能後端營運的經驗，都值得我國借鏡參考學習，並作為我國核後端業務推行與政策擬定的借鏡。

核電廠的除役並不是新的科技，目前全世界核電廠仍不斷增加，除役的工作也只是基本技術，早已不是問題。關鍵的問題是核廢料要儲存於何處，如何獲得社會共識，基本上若能放到地底下，就優先放到地底下。

三個國家在核廢料處置上不約而同均採取類似「社區共榮方案」的作法，瑞典採取投資地方商業活動，增加就業機會、參與地方建設，振興地方經濟等做法；法國為深耕社區活動、增加地方就業、商業採購行為、增加地方稅收等方式；而在荷蘭則單純僅提昇地方就業層次、增加就業機會，間接帶動地方發展。

有關資訊的傳遞與有效理性的溝通方面的做法，主要在於因應地方文化，建置有效率而即時的溝通對話平台。尊重民眾關切議題、主動積極溝通及擴大民眾參與機制，逐步建立信任是其共同特點。最重要關鍵即在於公開、透明及充分而即時的資訊傳遞，並且將複雜而

專業的最終處置作業，以最淺顯易懂的方式傳達。尤其，資訊傳遞應立基於雙方平等的基礎，不要試圖隱瞞或強加自我認知於被溝通者身上。

除非核廢料以後能變成資源，以臺灣的地理條件，放在離島或是放在很深的地底應該是較佳的方案。國外的經驗是要經過有效的溝通，充分的教育，共榮發展等作法，經過相當程度的討論協商後，找到合理的解決方法，而在核廢料儲存場的周邊區域，會提供相關的回饋、工作機會。但國外的經驗在臺灣不一定能完全複製或是被接受，其關鍵問題在於如何建立信任關係，彼此有共識，如何透明的選址，在地的的工作如何進行。例如我在擔任次長期間曾經和離島的地方首長懇談，但最後都變成閒聊的談話會，未能達到共識。

原能會針對核廢料儲存的規定需要尋求民眾的共識，而反應爐內的高階核廢料，目前處理也還沒有法源依據。核能發電後端營運基金，在電廠設立時即開始累積基金，在安全不打折的條件下，如何與離島方圓50公里內的民眾協商或是採取公投的方式決定，尚待找出突破點。此外，核一廠在今年年底即將除役，如何踏出這關鍵性的第一步，也有待相關單位共同努力。

問：有關綠能是國際的趨勢，也是國家的重大政策，有關執行面，是否請董事長談談您的看法？

答：臺灣主要的綠能包括風力、太陽能、小水力發電等，雖然是由經濟部負責整合，但執行面屬於分散式的分工，由相關單位各自推動建置。這些綠能設施不是台電公司所能獨立完成，換句話說，台電在綠能領域雖然是擔任領頭羊的角色，但並不是全包。另外台電要負責將電網延伸到這些綠能開發的區域，這是個很大的挑戰，因為新的區域通常都是在現有電網達不到的區域。以太陽能發電為例，要有大的面積，通常就是相對偏僻的地方，也就是既有電網沒有到的地方，此時變電及輸配電系統的配合就很重要。究竟是先有電纜線路，用線路來找可能的綠能用地，還是有綠能用地再來建設電纜線路？若是先有用地再來找線路方案，通常都會有輸電能力短期不足的問題。



就離岸風電來說，應該要電網先行，因為離岸風電的電力設施一旦完備上線，若電網延遲無法輸送，就會產生延遲送電的相關費用要由誰來買單的問題。台電與廠商的契約通常都有要求必須在何時完成輸變電線路工程，但如果電力線無法即時配合，就會牽涉到滿複雜的問題，例如履約爭議。

其他分散式的綠能要視當地發展的情況而定，原則上台電公司能滿足各綠能發電的部分，都會盡力去滿足。有關綠能發電指標性的大案子，台電公司也會很謹慎的評估，過度的投資、太早的投資或過慢的投資，對於台電及整個國家都不是好事。

問：董事長長期在經濟部水利署工作，防洪治水有很重要成果，與民眾溝通協調，解決工程爭端，相關經驗如何應用於台電相關業務及政策的推展。

答：跟民眾溝通其實沒有太多的技巧，重點在於應將心比心。台電公司的技術人員都非常專業，但是在與地方進行意見交換或溝通上，表達及協調的能力可以再加強。個人在水利署服務期間，與地方、民眾面對面溝通的機會很多。水利設施的影響面通常比較大，例如水庫的興建、水患治理等，要進行治理或管理的集



水區範圍、河道範圍、淹水範圍等，都是需要較廣大的面積。而台電公司的設施通常是比較局部或帶狀的，例如電廠的利害關係人通常就是周遭範圍，而高架電塔就是沿線的局部帶狀區域，但一直以來同樣都遭遇不斷的抗爭，有許多案件甚至是長期都無法解決的。

水利署的技術人員，通常都是兼辦與民眾協調的溝通人員，以淹水問題為例，他們會傾聽民眾的意見，廣納好的建議。而台電公司的技術人員負責與溝通人員通常是分開的，技術歸技術，溝通則另外有溝通小組。台電人員



在溝通協調的過程，常是以同溫層的形式在討論事情，台電技術人員或溝通人員談了半天，但是一般民眾還是聽不懂。顯然溝通的方法及態度需要做改變，應該先站在對方的角度來思考，先聽清楚對方主張什麼，需求在那裡。然後針對有共識的部分，例如70%已有共識，就盡最大努力先確認，再就未有共識部分中針對對方的主張，找到那些是台電可以接受配合的。另外，溝通的語言要對，溝通的態度也要對，一定要用民眾聽得懂的語言來說明，而與民眾溝通最忌諱就是政令宣導式的告知，這種單向式的溝通是無法解決問題的。

通常地方的民意代表或是意見領袖是溝通對象中最很重要的一環，也就是以平衡正反方的意見的方法，設身處地去了解他們的想法。如果大部分民眾已同意，但仍沒有辦法克服少數人的影響力，就由地方的聲音來平衡，善用地方民意代表或意見領袖的影響力，儘量達到正反聲音的平衡。

問：董事長大學畢業，服完兵役後就進入水利署工作，從基層做起，在40年的公務員生涯中，董事長曾提到「溝通」、「凝聚共識」及「走動式管理」的重要，請問在推動上是否有特殊的方法及經驗？

答：我想大家都有溝通的經驗，簡單來說就是在工作的過程中，遇到問題時要怎麼去處理，怎麼去思考，要先理出完整的思緒與策略。溝通的最重要法門就在於傾聽，了解對方真正在乎的地方，再提出自己的看法，告訴對方自己打算怎麼做，同時希望對方怎麼配合你，達到雙贏，而在溝通的過程中，傾聽是不二法門。

我從年輕時代擔任第一線公務人員開始，因為個性的關係，很容易去傾聽別人的想法。那時曾經參與過的幾個大型工程，例如水庫的興建和河川治理工程，相關的溝通訓練對我來



說印象都很深刻。而在擔任基層主管，甚至是高階主管之後，經常會有主持協調會議或是地方說明會，需要到第一線和民眾面對面的機會。與民眾溝通、主持協調會或是說明會，最重要的就是要心平氣和，不能動怒，避免正面衝突或是場面失控。有時候民眾情緒不滿，甚至曾經遇到過撒冥紙或是其他更強烈的抗爭手段，在這樣的情況下，要注意如何讓自己或是同仁不會被傷害，以及如何掌握場面好讓失控不致繼續下去。溝通不一定能成功，但是如何達到場面不失控是很重要的。事前可能狀況的掌握也很重要，要知道那些利害關係人是屬於火爆型的，也要先與意見領袖好好協調，進行重點意見的交換，千萬不要用政令宣導的方式去告知而已。平常就要與地方首長及地方意見領袖有所接觸，至少在長期的協調過程中，讓他們知道你不是壞人，你沒有惡意想要侵犯他們的權益，等到衝突對抗的防備心降低，甚至消弭之後，再來逐步的溝通協調。另外溝通最忌諱就是改時間、改地點，要重視溝通前後的承諾，讓對方可以信任你，相信你。

問：可否請董事長談談您事業發展的轉捩點與最想要感謝的人？

答：人生中的貴人真的太多了，不同的成長階

段，身邊的每位同仁都是貴人。最要感謝的人是前台灣省水利局的洪炳麟總工程司帶我進入職場，他是中興大學的兼任老師。當年大學畢業後，一條路是進職場，另一個選擇是出國進修，由於我父親早年留美的不順利經驗，家人不太支持我出國念書，家人希望我投入職場。但我當時還是有準備出國的打算，所以申請在學校當助教。由於那時石岡壩正開始興建不久，後來在洪炳麟總工程司的鼓勵下，我還是選擇先進入職場歷練。



現在回想起來，當時洪炳麟總工程司等前輩非常有遠見，認為中型水庫要做的話，就要自己設計施工，才可以進一步提升技術，培養下一代的壩工人才。石岡壩是水利局自辦的工程，由機械工程隊施工，當時我們水利局的同仁算是大工頭，帶領木工、鐵工、混凝土工等廠商施作，有點像營造廠的角色。

1

人物專訪

那時候因交通不便大家都是住在工地宿舍，有些主管很兇，兇到讓我們年輕人都有點怕他，每天早上7點多要去工地時，若是看到他從東邊過來，就會想從西邊趕快避開。但是其實面對愈兇的主管，能學到的東西反而愈多，後來在改變心態後，進步就很大。記憶最深刻的是有一次在工地，長官看到我腰掛著S腰帶，鐵鎚、老虎鉗，隨身就帶在身上，長官問我是來做工的，還是來監工的？但後來他告訴我其實這樣做是對的，因為真的親自動手



做，才知道竅門在那裏，做中學才會學得快，學得紮實。那時木工和鐵工的工頭都是老師傅，也都是我的貴人。當時石岡壩有許多弧形的設計，在老師傅的指導下，對於木模要如何製造、施工的印象非常深刻。還有一個例子，早期的鋼筋組立都是用鐵線綁紮，我們算是第一代學習用電焊的方式焊接，但電焊沒有辦法每個點都焊，所以從老師傅身上學習那個點才

是重點焊接的位置。這些點點滴滴的實作經驗都是我後續人生歷練最重要的資產。

早年的機械工程隊曾參與石岡壩、榮華壩、鯉魚潭水庫等多項重大水利工程的建設，後來因為組織調整在民國85年裁撤。然而即使機工隊被裁撤，我們這些曾經在隊裡服務過的同仁，每年都還是會在石岡壩聚會，由於以前同住在工地一起奮鬥，感情也特別深厚，許多退休多年前輩都會不遠千里來聚會。迄今已辦了23屆，每一年聚會都還有百人以上參加，今年剛辦過，與會前輩年紀最大已有90歲，而85歲以上也有6人，真是一個水利大家庭。

回首公務生涯，時時刻刻都抱持著感恩的心，因為覺得處處都是貴人。

後記

承蒙楊偉甫董事長在百忙中撥冗接受本公司專訪，楊董事長集民生工程中最重要之水、電、油三項經歷於一身，對於工程人員在溝通方面的態度及方法更是有獨到見解，在各項領域中，擔任救火隊任務，同時永保樂觀正面的心情，積極任事，讓專訪團隊印象深刻。



訪中華民國隧道協會理事長

陳志南

談

隧道工程艱困與挑戰

整理：周坤賢 · 攝影：詹朝陽

壹、前言

陳志南教授現任中華民國隧道協會理事長，民國65及69年畢業於成功大學土木工程系及土木工程研究所，工作數年後復於民國75年進入美國明尼蘇達大學雙城校區土木工程系博士班，主攻岩石力學，民國81年取得博士學位即接受國立臺灣科技大學(以下簡稱臺科大)聘任返臺任教。

陳志南教授於臺科大營建系授課已超過25年，現為營建工程系名譽教授，主要研究領域為岩石力學、岩坡工程、隧道工程等，並建立了岩石力學試驗室，以提供教學與支援國家重大建設，另外陳教授指導過的碩博士生近百人，目前多於產官學研機構擔任重要職位。教學之餘，陳教授長期參與中華民國隧道協會工作，民國85年隧道協會成立時擔任第一屆副秘書長及第二屆秘書長等職，並持續參與協會理監事會及各委員會的服務，民國106年被推選為第十一屆中華民國隧道協會理事長迄今。

本期很榮幸於民國107年5月15日專訪陳志南理事長，以下是訪談紀要：

貳、訪談紀要

問：陳教授不僅長期從事教學與研究，也參與工程實務並擔任中華民國隧道協會理事長，在今日科技日新月異且工程環境與以往截然不同的時代，隧道工程人員宜具備那些專業能力與特質？

答：隧道工程在土木工程中造價高，所以在國內均屬公共工程，幾無私人興建。隧道工程涉及多個專業領域，在建造過程中地質及水之

調查與掌握尤為關鍵。隧道工程人員宜具備之專業能力大致可分為三部分，(1)專業技能及跨領域知識的訓練：隧道工程涵蓋地工、應用地質、結構、水文、鑽炸、機電、計測、資訊管理等諸多專業，涵蓋設計、施工、監造、安全評估、災變緊急處置、公務行政、專業機具等各領域，這些相關職能瞭解愈多愈好。(2)穩健的人格與倫理特質：隧道工程施工充滿許多變異性，常有邊設計邊施工的情況，過程中涉及業主、設計、監造、施工等單位之協調，除了工程人員本質學能外，當工程遭遇不順或須緊急處置時，是跟時間賽跑，所以在法理範



圍內，除了學理及專業判斷，能跳脫本位主義而達成共識，工程才能繼續進行。業主、監造與施工是三位一體，如果各自堅持己見互不退讓，必然造成工程延宕。(3)自學永無止境:科技日新月異，新的工法、設備、材料、特殊情況處置對策等源源不絕出現，持續終身學習已不能免。

臺灣是世界隧道業界矚目的市場之一，這是因為臺灣山多地少，政府推動基礎建設不遺餘力，如國道高速公路北二高工程就有24座隧道，高速鐵路工程也有48座隧道。此外，臺灣位處歐亞及菲律賓兩板塊之擠壓地帶，岩盤構造變異性大，工程難度與挑戰高，與工程人員過去熟知的西部濱海平原土壤調查與判釋經驗有很大的差異，土石流、順向坡、崩積層、斷層剪裂帶、高壓湧水區等都是在岩盤隧道中常遭遇的狀況。一般工程的地質調查，大部分利用鑽孔內插推估工程剖面，這種方式對沿海平原土壤調查是可信的，但是碰到岩盤則可能產生大的差異，因相鄰鑽孔間之地層構造往往差異甚大，尤其是存在易造成工程災變的破碎帶、剪裂帶、斷層帶、高湧水帶時更是如此，鑽孔岩心推估地層構造係屬外插推估方式，所以不確定性高，故施工中亦常需在隧道開挖面利用水平鑽孔、震測、地電阻等額外調查方式來掌握隧道開挖面前方地質狀況，並輔以施工監測，配合數值分析以進行必要之安全評估。



(左1)周坤賢副理 (左2)吳文隆協理 (左3)廖學瑞副總經理

問：大學及研究所的教育對於隧道工程師影響重大，應如何導引及確認國內各大專院校提供這樣的師資與場所？

答：目前國內有多所大專院校提供隧道工程、岩石力學、工程地質等隧道相關的課程，這些都是大地工程技師的專業範疇及考試科目。此外，隧道涉及的水文、機電、開炸、營建法規等，則可由相關系所支援或邀請隧道業界專家講授，以培育隧道人才需要之跨領域知識。就土木營建的核心技能來說，包含相關理論與力學機制學能的培養，在規劃調查、設計分析、

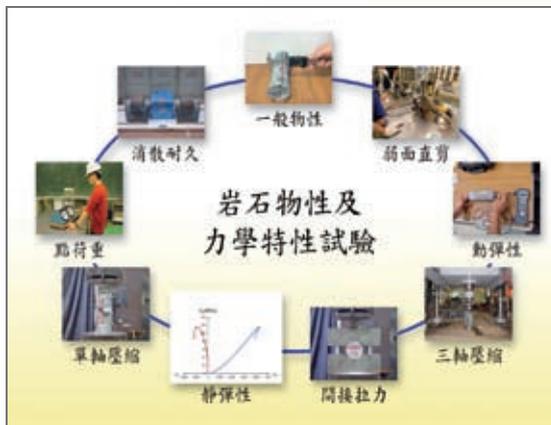


(右4)陳志南理事長 (右3)周永川經理 (右2)陳正勳副理 (右1)張嘉興副理

施工計測與安全評估、異狀緊急處置等，專業知識應涵蓋土壤力學、岩石力學、流體力學、水文學、工程地質、地球物理探測、土壤/岩石之室內及現地試驗、數值分析與電腦輔助設計等。

由於岩石與土壤之工程特性差異頗巨，提升對岩石特性之認知在山多地少之臺灣對學子就業很重要，利用岩石試驗的實作成果掌握岩石特性會有相當幫助，惟岩石力學試驗設備比土壤力學試驗費用昂貴，需要政府主管單位及校方經費支援方成。若岩石與土壤之基本參數

不檢測試驗而逕予自行假設，必然影響到後續的分析與設計，若導致災變往往修復更花錢，故力學試驗是隧道工程理論與實務的根本，相關試驗機具可包含高勁度的伺服控制壓力機、試體切割及打磨設備、消散耐久性試驗、點荷重試驗、單軸及三軸壓縮試驗、巴西劈裂試驗(間接拉力試驗)、弱面直剪試驗、動彈性試驗等，在臺科大營建系前後就花了近兩千萬元新台幣建置相關設備(如下圖所示)，來支援國內各類重大建設之選址與規劃設計。另外，現地試驗是顧問公司及學術單位可以合作發揮的地方。



由於電腦之發展，應用各類軟體來輔助分析與設計已是國際上的普遍趨勢，故在教學及實務應用方面扮演的角色愈來愈重，顧問公司除設計需出圖外，更常被要求檢附設計計算書。隧道工程常使用各種二維或三維分析軟體來進行分析及模擬，讓學子在就學期間瞭解及熟悉使用，對將來就業幫助很大。以臺科大為例，將軟體運算融入課程中，在不同課程中讓學生瞭解及使用相關程式提交作業，如邊坡穩定使用PC-STABLE或SLIDE、深開挖使用RIDO、完整岩盤或土壤使用FLAC與Plaxis、節理岩盤使用UDECC、微觀裂縫發展使用PFC等等，以累積踏進職場的本質學能。成果報告及簡報表達作業讓學生體驗分析與經歷設計實務，投入職場後雇用單位都予正面評價，不過這須學校支援經費購置教學軟體。

此外，在工程實務教學上，有關施工與災變緊急處置是很重要的，所以培育學生自己收集國內外隧道案例與分析建檔之能力也很重

要，學子要學習如何收集與自己消化，交通部高速公路局及中華民國隧道協會已出版一系列隧道工程實務專書是很好的理論及實務教材。其他如提升外語能力，參加研討會吸收新知，簡報製作與發表報告能力，都是在校應學習及將來職場必具之能力。

問：理事長在新世代隧道工程師的培育之經驗與心得，可否提供讓產官學研界能分享此一寶貴的經驗。

答：隧道工程有許多的不確定性，面對充滿挑戰的領域，可從以下幾方面來加強。首先是工程師理論與分析能力的具備，每一個隧道工程都可視為個案分析，因為每個隧道的斷面形狀、尺寸、功能各異，加上地質構造、開挖前之現地初始應力、周遭地質之力學參數都不相同，綜合這些資料，須要能掌握其中的關鍵課題及思索解決對策，所以主要執行人員應該具有這方面的分析能力。

其次，是有關現場重要資料之調查掌握，例如地質構造須要瞭解最接近實際之地層剖面、對應之物理性質及力學參數。此外，初始應力會影響到後續隧道之開挖與支撐設計也應盡可能去評估，重大地下工程能做主應力之量測得到初始應力之大小與方向最好與國外相



1
人物專訪

陳志南理事長



較，主應力量測重視程度在國內尚待加強。

第三是開挖設計與施工的緊密接合，設計工程師必須要瞭解施工的可行性與便利性，尤其地下工程之開挖與支撐是交互作用的，不同的開挖分區及分挖順序，支撐之受力就可能不同，所以設計工程師能考量最便利性之施工順序，來設計分區開挖與支撐是很重要的。另外，施工廠商也要理解隧道設計的專業配合執行。隧道工程設計，通常沒有標準答案，牽涉複雜需因地制宜，業主、設計監造、施工廠商如能三位一體，必然有利於工程不順利時之爭議解決。

問：隧道工程教學與實務如何緊密結合？

答：校內教學可盡量結合工程實務、理論和數值模擬，以得到最周全的設計與施工方案。譬如透過數值模擬開挖與支撐之交互作用，利用分析所得之開挖應力重分配、變形分布與塑性區發展，來訂定管理基準值及監測布設規劃，可避免僅依經驗出具設計圖而無分析計算書佐證設計之適宜性爭議。

至於校外工程實務之學習，可以透過產學合作，或至業界實習，且實習結束前之心得報

告及口頭簡報，讓學生瞭解職場需求及自我須加強處之體驗。

問：國內隧道工程遭遇許多工程上困難與挑戰，對於顧問公司未來在隧道領域的發展，是否有相關的建議？

答：隧道工程是目前大地工程中，比較可能完全由大地工程人員主導的計畫，隧道工程現場工作的經驗和辦公室設計經常會有不同的感受，建議有機會設計工程師要真的下工地去了解施工實務作業。另外針對工程顧問公司有幾點建議如下：(1)於國內，就近加強與學術單位交流，不必只侷限於委託研究案或產學合作案，相關演講、座談、專業諮詢都可考慮。(2)國外部分持續與專家與專業單位交流合作。(3)多多提供年青學子實習機會，譬如暑假實習或培訓，顧問公司也可從中儲備優質人選。(4)吸收優質東南亞諸國在臺學生，作為拓展海外或東南亞業務，這是可以深耕的地方。以臺科大為例，目前就有多位東南亞學生在本校進修碩博士班學程，顧問公司可透過學校幫助雇用優質人才。

早期隧道協會皆會利用國外頂尖專家學者如Hoek博士、Barton博士等來臺時，配合舉辦研討會或是工作會議，這種交流對增進隧道新

知與技術非常有幫助。另外吸收臺灣各類特殊地質及高難度隧道興建經驗，更是隧道從業人員自我提升的可行途徑，例如穿越卵礫石地質及高湧水之八卦山隧道工程、遭遇地質不利因素集大成的雪山隧道工程。這些我們遭遇險峻與克服經驗已為國際借鏡與採用，大英百科全書曾把雪山隧道列為當時世界十大困難工程之一，Discovery頻道更為雪山隧道出版了DVD專輯，當時負責的曾大仁處長與Barton顧問也都在影片中現身說法，這是參與隧道興建所有工作人員無怨無悔的血淚史與驕傲。

過去20年是臺灣隧道建設的高峰時期，未來海外隧道興建的參與可能是顧問公司會面臨的選項，目前於東南亞諸國不乏高速鐵路、捷運、公路隧道的規劃與興建，擴展海外隧道業

務也許是未來顧問公司可以開拓之處。

問：中華民國隧道協會近二年推動電子會訊，促進相關資訊之交流，相關之促成理念及構想為何？

答：協會自民國85年成立至今，主要任務在加強與團體會員及個人會員的互動，做為產官學研交流的平台。有鑑於電子媒體的日益發達及新知新訊息的時效性，電子會訊已縮短為每月發行，會訊包含會務訊息、活動訊息預告、臺灣隧道工程介紹、臺灣以外地區隧道工程介紹、隧道人物專訪等，是隧道資訊之公佈交流平台。



中華民國隧道協會近二年推動電子會訊



此外，過去二十年是臺灣隧道興建之高峰，這些隧道之參與菁英都是臺灣隧道界的活字典，不乏已經退休但身體仍然健朗者，協會正規劃請他們撰稿，留下臺灣隧道最珍貴之資料，並請他們演講提供經驗傳承。

問：隧道工程與日、韓、歐、美、大陸皆有交流，有關未來如何更進一步或是業務推展如何？

答：民國83年10月底，隧道協會創會理事長程禹先生應加拿大隧道年會邀請，作「臺灣地下工程之營建」專題演講，深受與會人士之重視。與當時國際隧道協會理事長Prof. Eisenstein會晤時，Eisenstein理事長強烈認為以臺灣地下工程之蓬勃及成就，應成立國家級的隧道組織，並參與國際隧道組織的活動。中華民國隧道協會於民國85年成立至今，國際交流一直持續不斷，並循奧運模式以Chinese Taipei Tunnelling Association(或簡稱CTTA)參加國際隧道的相關盛會。

隧道工程的技術發展日新月異，回想當年雪山隧道施工遭遇之困境，國內外專家共同參與解決問題，雖然國內隧道工程技術益發成熟，但國際上新技術、新工法、新材料仍不時推陳出新，我們自己也有臺灣特殊地質的處



台9線蘇花公路山區路段改善工程



理經驗，所以有許多可以交流及相互學習之處方。隧道協會成立已超過20年，經常性參與國際重要的隧道年會組織，如國際隧道協會(ITA)之運作；且每年固定有海峽兩岸隧道工程交流。每年舉辦之隧道協會年會皆邀請日本、南韓方面隧道協會共同與會研討。

後記

在近期國內有多條重要隧道工程貫通，包括新烏山嶺引水隧道、安朔草埔隧道及蘇花改隧道等，代表國內隧道工程的重大成就及參與工程人員的辛勞成果，與此同時，中華民國隧道協會永久辦公室購置完成，並喬遷至目前位於新北市永和區的新會所，代表隧道工程邁向新的里程碑。

隧道工程是公共建設非常重要的一環，而隧道工程人才更是工程良莠的關鍵，感謝陳志南理事長在百忙之餘撥冗接受專訪，就因應現今科技的發展及工程環境的改變，與我們分享隧道工程未來發展藍圖及策略，期待經由產官學研的共同努力，讓臺灣隧道工程更加成長茁壯。

大型山崩判釋新利器—— 結合InSAR與光達數值地形

A new and powerful Approach to mapping large-scale Landslides using InSAR and LiDAR derived DEMs

關鍵字(Key Words)：大型山崩(Large-Scale Landslides)、合成孔徑干涉雷達(InSAR)、光達數值地形(LiDAR derived DEMs)

中國文化大學／地質系／助理教授／陳柔妃 (Chen, Rou-Fei) ①

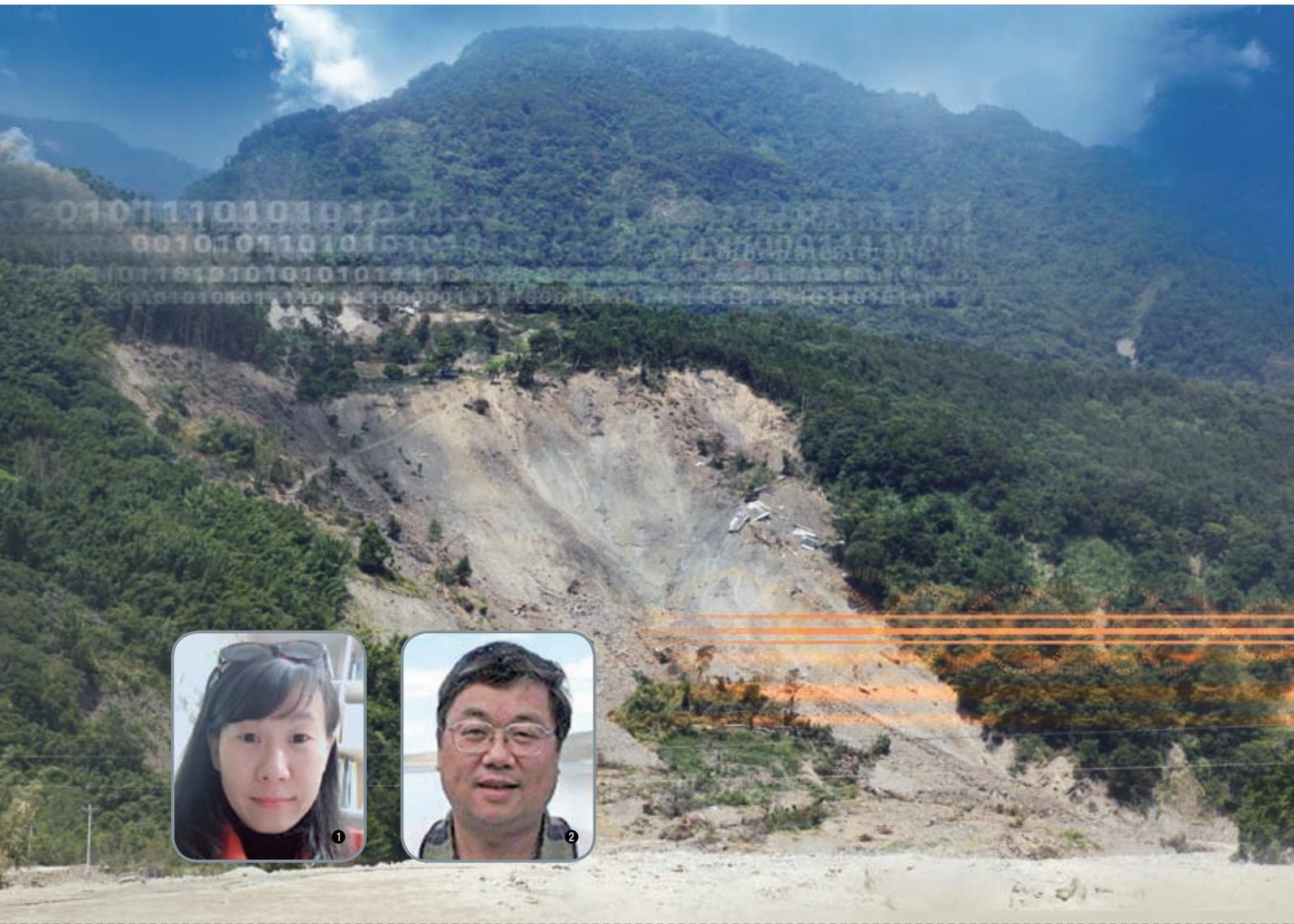
國立成功大學／地球科學系／教授／林慶偉 (Lin, Ching-Weei) ②

摘要 ABSTRACT

全球性極端氣候造成自然災變頻傳，而臺灣位處活動造山帶、山坡地佔全島總面積70%以上，陡峭的地形及脆弱的地質條件加上夏季颱風帶來之強降雨，使得臺灣山區甚多區位處在致災的高風險區。2009年莫拉克颱風在高雄市甲仙區小林里獻肚山發生之大型山崩造成450人亡或失蹤，突顯由潛在緩慢運動型態之重力變形邊坡轉換成劇變式山崩的危險與致災性。

自2010年來臺灣應用光達數值地形分析判釋具有崩移特徵之大型山崩潛勢發生區位已獲致具體成效，檢視全臺山區近五分之三的範圍內，目前已判釋出一萬餘處具滑移特徵且面積超過十公頃之大型山崩發生潛勢區位。透過保全對象及危險度之評估，相關單位篩選出182處重點邊坡做為工程治理與防災監測之目標。此外，應用合成孔徑雷達干涉技術(InSAR)評估重點邊坡之活動性，協助決定工程治理與否及防災監測系統建置之優先次序，亦是近年來政府各級單位在大型山崩防減災工作已見具體成效之工作。

本報告針對高度開發而失去原始地形特徵之山坡地，在不易單純使用光達數值判釋山崩地形特徵的區域，說明如何利用InSAR分析成果進行大型山崩潛勢區的修正，二者互相配合得以評估更準確的災害影響範圍。以南投縣定遠新村為例，原判釋成果為二處山崩潛勢區(南投縣-仁愛鄉-D057及D063)，透過時域性相關點合成孔徑雷達技術(TCP-InSAR)，進行多時序地表變形分析及判別其崩塌機制，認為南投縣-仁愛鄉-D057及D063都具有相同地表潛移模式，因此將此二處山崩潛在區位進行合併，以供日後細部調查及防災工程作為之參考。



Abstract

In recent years, natural disasters occurred more frequently than before mainly due to extreme rainfall arising from global climate change. Located in an active orogenic belt, Taiwan features great topographic relief, fragile geological conditions and heavy rainfall in summer, making landslides a severe threat to people living in mountainous area of the island. The Hsiaolin landslide that caused 450 casualties during the 2009 Typhoon Morakot is a typical example known to many people.

After Hsiaolin landslide, Central Geological Survey and Soil and water Conservation Bureau have devoted great efforts to map potential large-scale landslides using LiDAR-derived 1 m DEM. So far, over ten thousands of large-scale landslides have been identified. Considering vulnerability and risks involved, 182 deep-seated landslides have been selected for further landslide hazard mitigation. Additionally, InSAR analysis that can provide mm resolution displacement rate is also employed to help to determine which site needs to be paid more attention with.

This paper has selected Dingyuan New Village in Nantou County to illustrate how to use both of LiDAR derived DEMs and the results of Temporarily Coherent Point SAR Interferometry (TCP-InSAR) to locate large-scale landslides. With LiDAR derived DEM, two separate deep-seated landslides are recognized. However, as similar displacement patterns can be observed in InSAR, two potential sites are merged as a deep-seated landslide.

壹、前言

2009年莫拉克風災發生高雄市甲仙區小林里獻肚山大型山崩，造成450人死亡與失蹤之重大災害，喚起國內產官學界對大型山崩災害防治之重視與關注。大型山崩事件之發生數量雖然遠不及小型之淺層山崩，然而發生後超過數十萬立方公尺甚至近億立方公尺以上的滑動土體，其不但移動距離遠、破壞力強，且通常伴生土石流與堰塞湖之形成，造成複合型災害之發生，其對人民生命財產之危害與造成之損失，遠甚於常見之淺層山崩。

過去二十餘年來光達數值地形(LiDAR)與合成孔徑雷達干涉分析(InSAR)技術之發展是國際學界研究坡地災害之兩項重大突破，透過光達數值地形能夠反映真實地形紋理特徵之特性，對於已具滑移現象之坡面，透過其崩塌地形之判釋分析是確認崩塌位置之有效方法。此外，因為合成孔徑雷達干涉分析(InSAR)技術可以提供地表毫米精度之變形資訊，過去因數位影像購置經費昂貴，資料分析與操作門檻較高，以致於使用頻率不高，但近年來隨著衛星雷達影像開放免費使用、InSAR分析技術突飛猛進，以及電腦運算硬體日新月異，成功地使用合成孔徑雷達干涉分析，取得大面積之地表變形資訊，同時用以評估大型山崩發生潛勢區位之活動性。

自2010年來臺灣應用光達數值地形分析判釋具有崩移特徵之大型山崩潛勢發生區位已獲致具體成效，檢視全臺山區近五分之三的範圍內，目前已判釋出一萬餘處具滑移特徵且面積超過十公頃之大型山崩發生潛勢區位。透過保全對象及危險度之評估，相關單位篩選出182處重點邊坡做為工程治理與防災監測之目標。此外，應用合成孔徑雷達干涉技術(InSAR)評估重點邊坡之活動性，協助決定工程治理與否及防災監測系統建置之優先次序，亦是近年來政府各級單位在大型山崩防減災工作已見具體成效之工作。

本報告針對高度開發而失去原始地形特徵之山坡地，在不易單純使用光達數值判釋山崩地形特徵的區域，說明如何利用InSAR分析成果進行大型山崩潛勢區的修正，二者互相配合得以評估更準確的災害影響範圍。以南投縣定遠新村為例，原判釋成果為二處山崩潛勢區(南投縣-仁愛鄉-D057及D063)，透過時域性相關點合成孔徑雷達技術(TCP-InSAR)，進行多時序地表變形分析及判別其崩塌機制，認為南投縣-仁愛鄉-D057及D063都具有相同地表潛移模式，因此將此二處山崩潛在區位進行合併，以供日後細部調查及防災工程作為之參考。





2009年莫拉克風災·六龜新開部落災損

貳、研究方法

本研究結合InSAR分析山崩潛勢區內的活動性及光達數值地形之地表山崩地形特徵之辨認與判釋，進行大型山崩潛勢區域之判釋及修正。

一、衛星雷達影像地表變形解算

合成孔徑雷達干涉測量(Interferometric Synthetic Aperture Rada, InSAR)技術隨著訊息技術、攝影測量技術、數字訊號處理技術等之進步，本世紀來已迅速發展成高精度觀測新技術。它在地形測繪、地震同震變形、地表變形觀測、冰川運動研究等方面都表現出適用於大區域、全天時、全天候、高精度、高效率等之突出優勢。InSAR技術已經成為目前發展迅速、極具潛力的對地觀測及測繪新技術之一。

InSAR利用雷達回波信號來獲得地表三維資訊，通過差分合成孔徑雷達干涉(Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry，簡稱D-InSAR)可以得到地殼形變。D-InSAR技術利用兩張SAR影像在不同時間而相同區域，經過幾何校正進行干涉計算，扣除大氣、軌道和原始地形效應，得到純粹由地表與衛星間之雷達波相位差，並將相位回復成沿雷達視距方向(Line of Sight, LOS)，而得到高精度之地形變化量(圖1)。

D-InSAR技術用於偵測短時間內較大的地表變動，具有大面積覆蓋而非點位分布的優勢，在理想條件下之量測精度可達到公分級，(Massonnet et al., 1995; Amelung et al., 2000; Hung et al., 2010)，然對於長時間地表緩慢的變動(地層下陷、地表潛移等)，使用長時間基線之SAR影像可能使同調性降低而無法得到良好的結果。另在山區及植被較密集的地區，因地

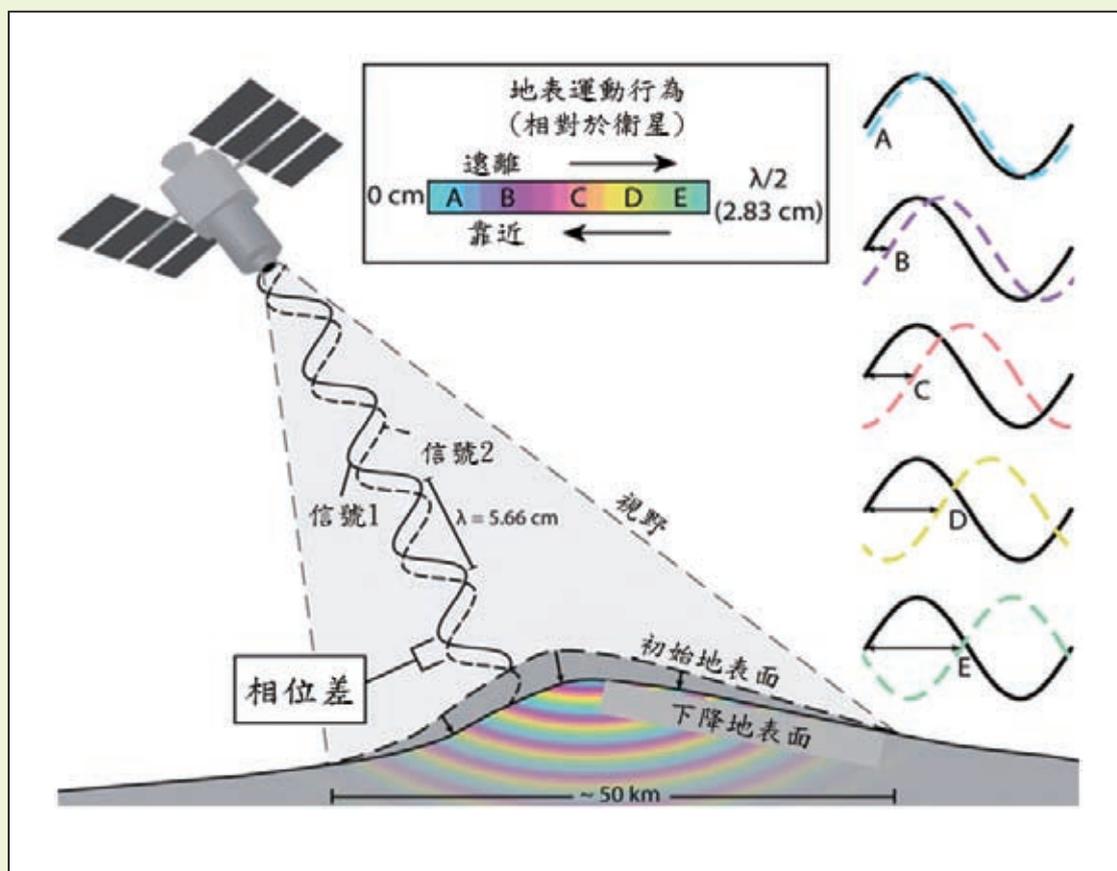


圖1 合成孔徑雷達干涉技術原理圖(引自Global Volcanism Program, 2012)

表特徵物會隨著時間變化及受大氣效應影響，使得干涉結果的精確性仍有待改進(Pathier et al., 2003; Hoffmann, et al., 2003)。

Ferretti等人(2001)提出永久射散體差分干涉(Permanent Scatterers Interferometry, 簡稱PS-InSAR)方法，有效地解決傳統干涉影像受到大氣影響、相位差以及地形誤差的問題。PS-InSAR技術依據不同時間序列的SAR影像中，尋找高相關性且長時間穩定的散射(Persistent Scatterer, 簡稱PS)點，這些點提供良好相位資訊，能克服SAR衛星資料受到時間和空間的影響，提高PS-InSAR的計算精度獲得較為可靠的相位資訊(圖2)。近年來，廣泛地運用在地震變形、地層下陷以及長時間緩慢運動之地表形變的監測(Hooper et al., 2007; Yen et al., 2010; 楊

佳祥, 2011; 蘇伯宗, 2012)，歸納其主要優點：1.具有高精確性基線計算 2.有效克服大氣因素 3.具高空間密度之單一散射體的位移量4.具有長期監測的優勢。

然因受限於地面穩定散射點選取上的限制，相對於開發較完整的都市區，地形起伏大、植被茂密的山區，僅能獲得少數資料。Zhang(2011)提出了時域性相關點雷達干涉技術法(Temporarily Coherence Point InSAR, 簡稱TCP-InSAR)技術，利用對PS點的相位差向量進行最小二乘法解算，通過殘差的大小來區別有模糊度和沒有模糊度的PS點，取代容易產生錯誤或失敗的相位解算步驟，進一步來計算地表變形率(圖3)。此一技術於國內已初步應用於廬山及清境地區之大型山崩之研究，解算結果經

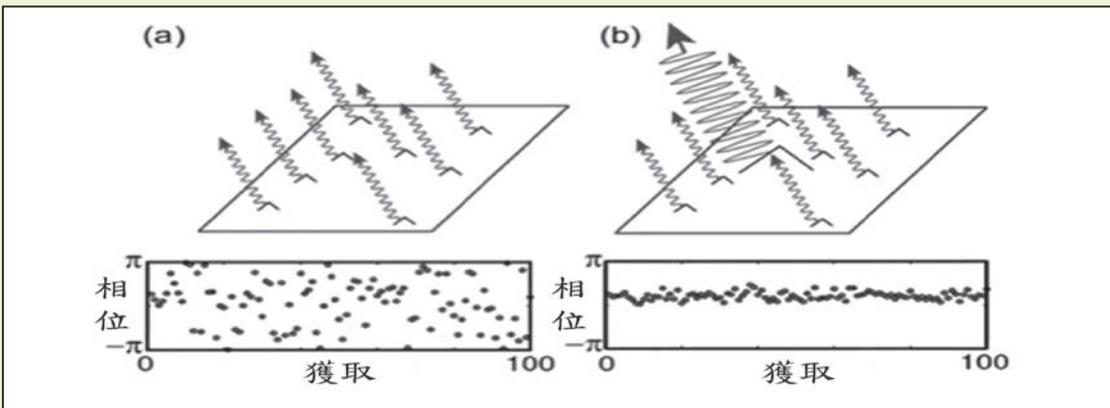


圖2 永久射散體差分干涉技術原理示意圖(Hooper et al., 2007)

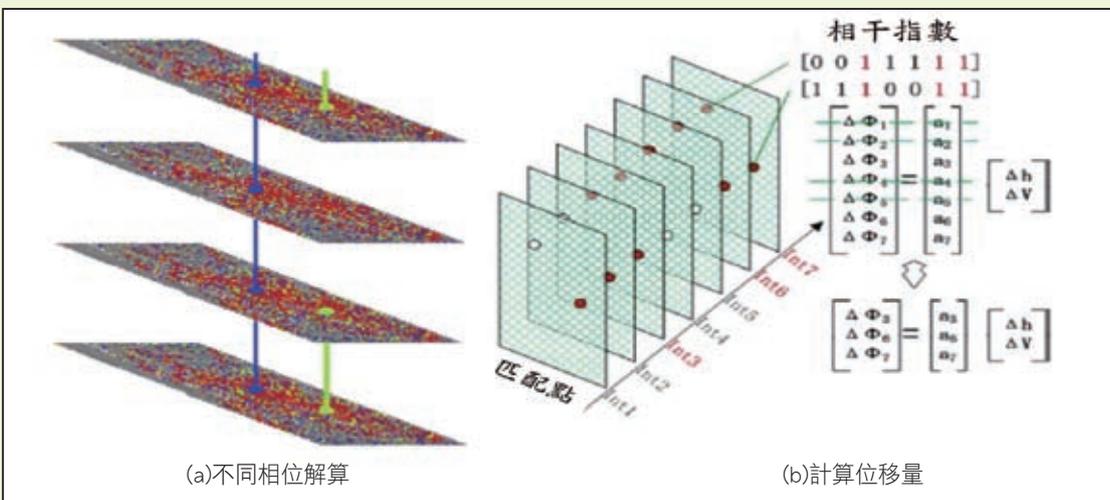


圖3 時域性相關點雷達干涉技術示意圖(Liu et al., 2014)。

與高精度數值地形判釋之成果及現地查核資料高度穩合，反應此一解算技術適用於本島植生茂密之山區。

二、光達數值地形地表山崩地形特徵

蒐集大型山崩潛勢區內衛星影像、航空照片及高精度數值地形資料，進行細部山崩地形特徵判釋，以瞭解大型山崩潛勢區位之山崩地形演化趨勢與內部山崩區位分布。此工作目的是因大型山崩潛勢區面積甚大、內部山崩常存在多處區位，彼此山崩活動性不一致，且現場調查常有地形陡峭及交通不可及等因素，難以直接進行坡面完整細部調查。因此在進行現場調查前，需進行大型山崩潛勢區細部特徵影像判釋，以事先掌握大型山崩潛勢區的山崩地形特徵與山崩區位附近的地形環境，其示意圖如圖4。此工作項目成果是作為大型山崩潛勢區可能的山崩發生機制的推測依據，並有利於現場調查細部調查工作。

可能原因與山崩發生可能的運動模型，此工作成果可做為日後防災工作或山崩活動性解釋等參考之用。而為整體瞭解山崩可能的山崩發生機制，山崩地表地形特徵主要判釋項目如下：

(一) 水系特徵

地表裂縫和岩盤破裂面是地表水入滲到岩盤的重要通道，若山崩區位坡面水系發育程度較周圍坡面高或距離較近，表示坡面受地表水表層沖蝕形成侵蝕溝之程度高，因此增加岩盤裸露範圍或地表裂縫之發育，坡面上的水系分布情況反應山崩區位表面材料抗侵蝕能力、山崩地形發育及岩盤受地表水沖蝕程度等現象，可以利用高精度數值地形上判釋坡面上侵蝕溝分布位置、長度等資訊，推測地表水與地表作用之關係。

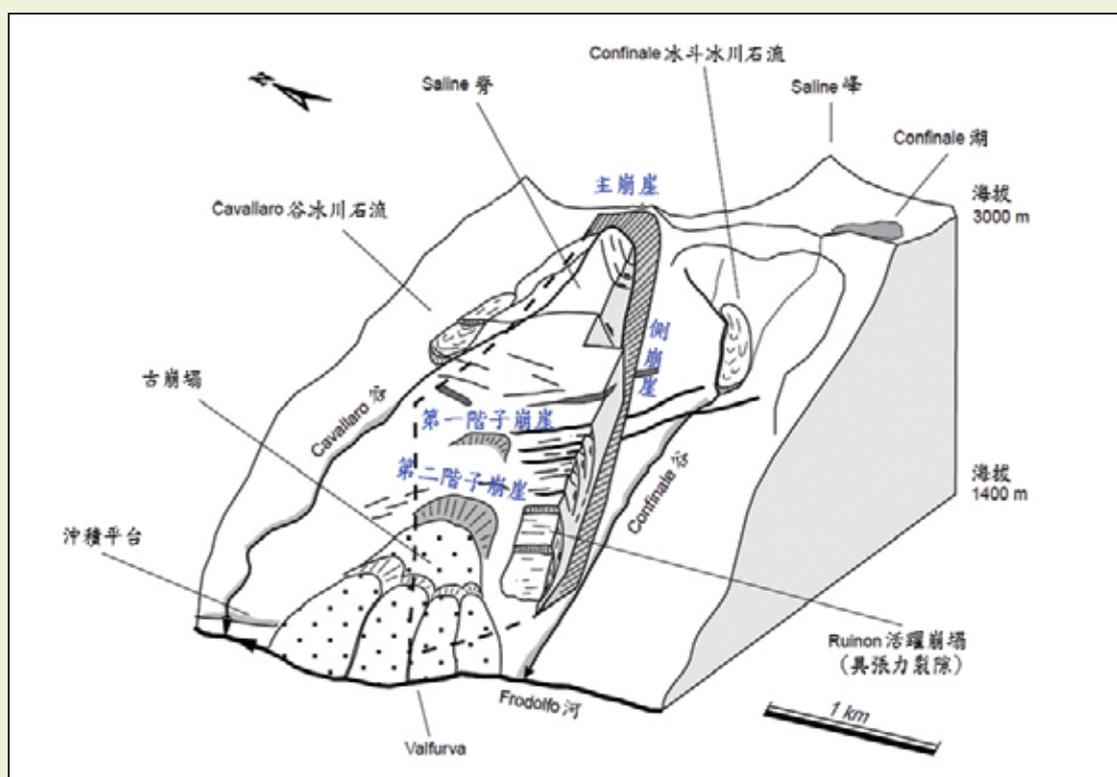


圖4 大型山崩特徵判釋示意圖(Agliardia, et al., 2001)

(二) 大型山崩潛勢區特性判釋

主要判釋之山崩特徵有主崩崖、內部崩崖、側邊崩崖、裂縫及多重山脊分布情況等。因潛在大型山崩內部常存在多處山崩區位(Lin, et al., 2013)，在山崩內部崩崖的判釋會以分階分級的方式進行分類。第一階子崩崖為主崩體內部最上方之子崩崖，因主崩體內部可能發育其他區位的小山崩，同理可再將崩崖細分為第二階子崩崖、第三階子崩崖等，示意圖如圖4。

(三) 大型山崩潛勢區分塊與分區

因大型山崩之面積廣大，其常由不同區塊之崩滑體共同組成一複合之大面積潛在滑動體。因此在大型山崩潛勢區之判釋中，經由崩崖位置及其連續性，結合平坦面區位與水系特徵之判釋，進行大型山崩潛勢區位個別山崩塊體之判釋與圈繪。

(四) 山崩周圍地形環境

山崩區域的周遭地形環境判釋是為了瞭解大型山崩潛勢區與周遭環境相互影響之關係。此判釋結果可大致了解山崩可能的外在觸發因子與坡趾是否受到河階台地保護等環境條件，如圖4。判釋項目包括河岸侵蝕位置、沖積扇及河階台地等區位。

參、案例說明

一、光達數值地形判釋成果

研究區域以南投縣定遠新村為例(圖5)，其鄰近坡面沒有明顯淺層山崩發生，上邊坡土地利用主要為農墾地，下邊坡則為原始林(如圖6，

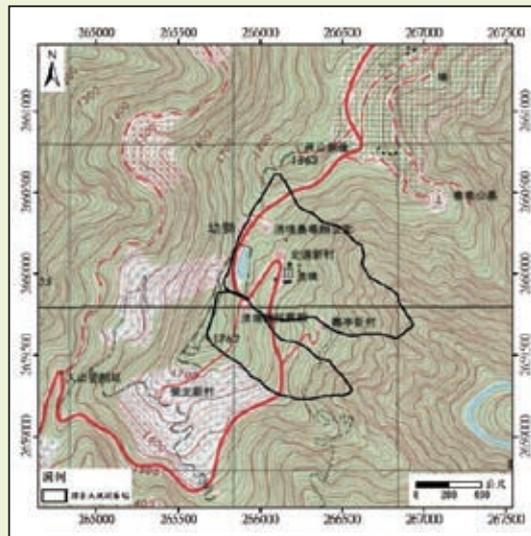


圖5 大型山崩潛勢區修正前分布位置

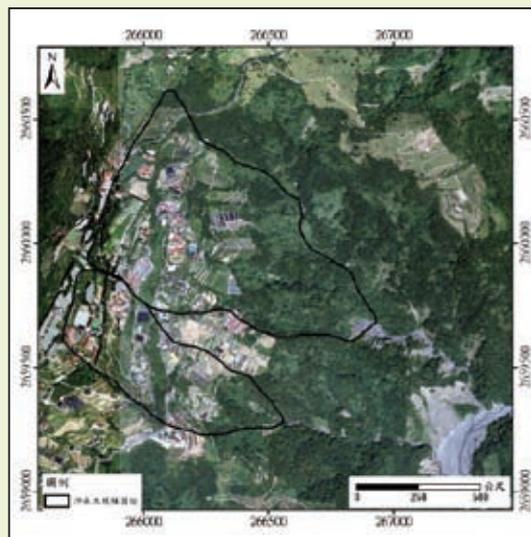


圖6 大型山崩潛勢區修正前航空圖

莫拉克災後影像2009年09月09日拍攝)。因植生覆蓋與人為開發破壞原始地貌的因素，利用衛星影像、航空照片等光學影像不易辨識出山崩微地形特徵，難以判釋潛在大型山崩特徵與位置。

高精度光達數值地形具有反應真實地表面與高解析度的優點，故近年來利用判釋大型山崩已有豐富成果。但在人為開發而破壞原始地形及崩崖連續性等因素，在某些案例不易判釋大型山崩潛勢區範圍。在南投縣仁愛鄉定遠新

村地區的坡面，利用光達數值地形進行大型山崩潛勢區判釋。因南投縣仁愛鄉定遠新村所在坡面中間為一山脊地形，且因人為開發破壞原始地形，在山脊沒有明顯的連續性佳的圓弧形崩崖或地形落差，故認為是相對穩定的地區，因此南投縣仁愛鄉定遠新村地區在利用高精度光達數值地形可判釋出兩處大型山崩潛勢區(圖7)，其山崩編號分別為南投縣-仁愛鄉-D057及南投縣-仁愛鄉-D063。D057面積60.2公頃，平均坡度26.0度，地形高差約590公尺；D063面積27.1公頃，平均坡度23.9度，高差約530公尺。

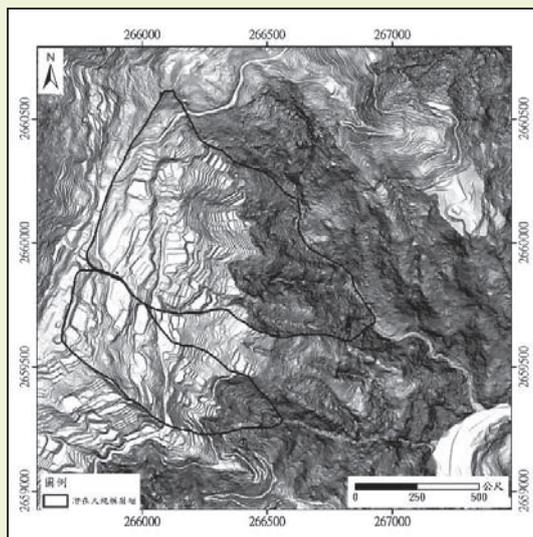


圖7 大型山崩潛勢區修正前光達數值地形

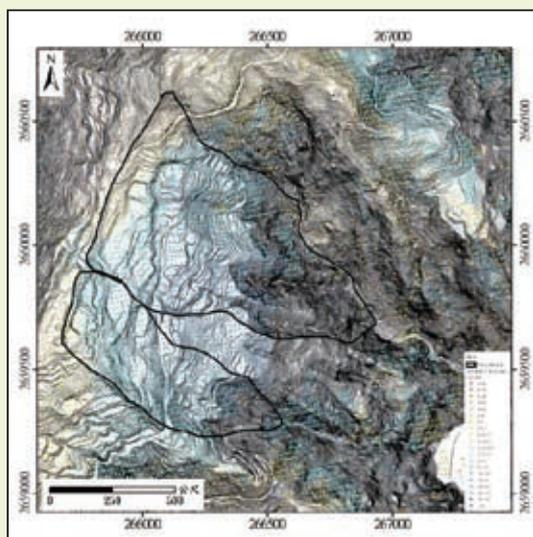


圖8 大型山崩潛勢區修正前InSAR點位分布

二、TCP-InSAR成果

南投縣仁愛鄉定遠新村地區所在位置坡面，利用ALOS雷達衛星影像，並使用TCP-InSAR解算結果。在2006-2011年期間，定遠新村鄰近地區坡面在稜線與山崩區兩側邊界的山脊線附近，其地表地形變化為抬升狀態，但坡面內部的山脊與山崩內部的地表位移都呈現沉降狀態，表示南投縣-仁愛鄉-D057及D063都具有相同位移模式(圖8)。

三、光達數值地形判釋結合InSAR影像判釋成果

在判釋的區域屬於高度開墾地區或是山崩特徵不易判釋的區域，利用光達數值地形判釋並結合InSAR影像，不僅可以利用山崩微地形特徵，也可以同時利用坡面長期地表變形狀況了解山崩坡面相對穩定與沉降的地區，以作為大型山崩潛勢區域圈繪與修正(圖9)。

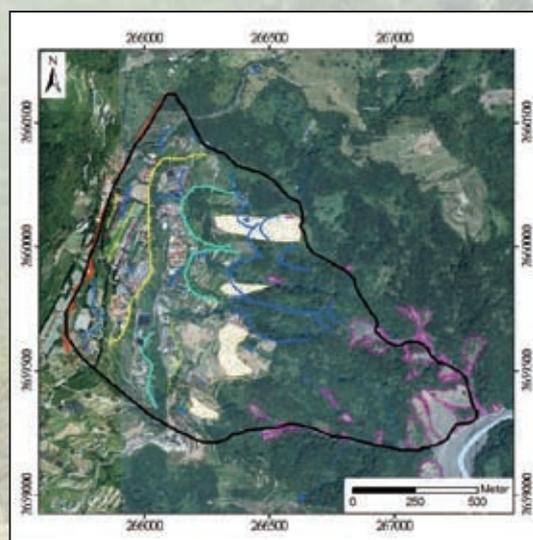


圖9 大型山崩潛勢區修正後範圍分布及山崩特徵(航照)

由南投縣仁愛鄉定遠新村地區結合高精度光達數值地形與InSAR影像，其結果顯示原先利用高精度光達數值地形判釋出南投縣-仁愛鄉-D057及D063，雖然因人為開發因素使得多數

崩崖地形遭到破壞，但由InSAR影像顯示南投縣-仁愛鄉-D057及D063鄰近地區具有相同地表位移

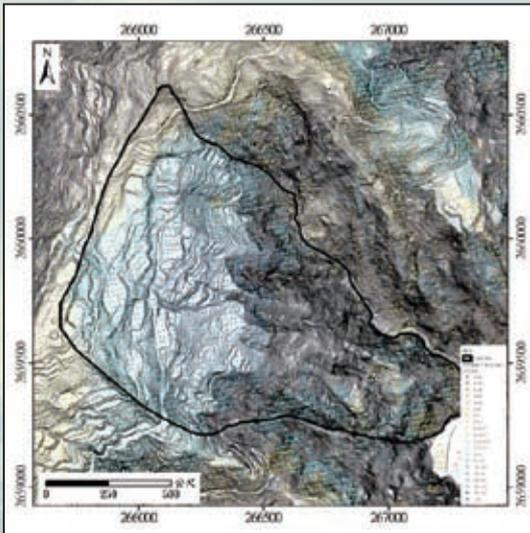


圖10 大型山崩潛勢區修正後範圍分布及山崩特徵(光達數值地形)

趨勢，表示南投縣仁愛鄉定遠新村所在坡面是可以歸為相同山崩區塊。修正後結果如圖10。

肆、結論

在大型山崩潛勢區判釋方法上，僅利用山崩微地形圈繪山崩範圍，在高度人為開發或地形特徵不明顯的情況下，山崩邊界不易界定。因此對照InSAR資料進行輔助判釋，以利瞭解坡面地表位移情況，日後可以提高與修正大型山崩的潛勢區位判釋，以供日後細部調查及防災工程作為之參考。

參考文獻

1. 楊佳祥，改良式永久散射體雷達干涉法，碩士論文，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文，臺南，(2011)。
2. 蘇柏宗，具多餘觀測的永久散射體雷達干涉測量法，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文，臺南，(2012)。
3. Agliardia, F., Crosta, G., Zanchib, A., Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics. *Eng. Geol.* 59, 83 - 102 (2001).
4. Amelung, F., J nsson, S., Zebker, H., and Segall, P., Widespread uplift and trap door faulting on Galapagos volcanoes, *Nature*, 407 : 993-996 (2000).
5. Hoffmann J., D.L. Galloway, and H.A. Zebker., Inverse modeling of interbed storage parameters using land subsidence observations, Antelope Valley, California. *Water Resour Res*, 39(2):1031. DOI10.1029/2001WR001252 (2003).
6. Hooper A., P. Segall. and H. Zebker., Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volc n Alcedo, Galapagos, *Journal of Geophysical Research*, 112 : B07407 (2007).

7. Hung W.C., C.W. Hwang, and Chung, C.P., n.d., Using Leveling, GPS, Subsidence Monitoring Well and D-InSAR to Monitor the Subsidence in Yunlin Region, Technical Paper in the Land Subsidence Database, WRA, Taiwan. (2010)

8. Lin, C.W., Tseng, C.M., Tseng, Y.H., Fei, L.Y., Hsieh, Y.C., Tarolli, P., Recognition of large scale deep-seated landslides in forest areas of Taiwan using high resolution topography, *Journal of Asian Earth Sciences*, 62, 389-400. (2013)

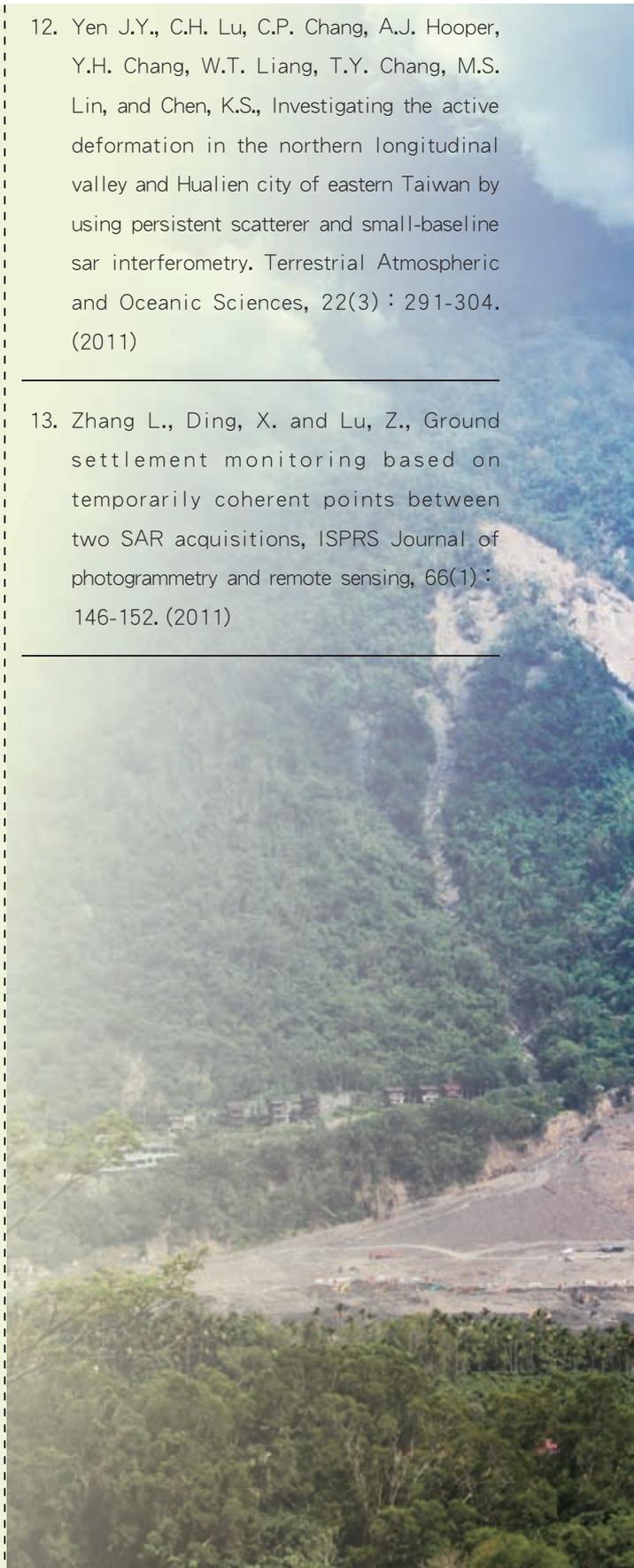
9. Massonnet, D., M. Rossi, and F. Adragna, CNES General purpose SAR correlator, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 32, 636 - 643, 1994b.

10. Pathier, E., B. Fruneau, B. Deffontaines, J. Angelier, C.P. Chang, S.B. Yu, and C.T. Lee., Coseismic displacements of the footwall of the Chelungpu fault by the 1999, Taiwan, Chi-Chi earthquake from InSAR and GPS data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 212 : 73-88. (2003)

11. Varnes, D. J., "Slope movement types and processes, in Schuster", R. L., and Krizek, R. J., eds., *Landslides-Analysis and control* , National Academy of Sciences Transportation Research Board Special Report176, pp 12-33. (1978)

12. Yen J.Y., C.H. Lu, C.P. Chang, A.J. Hooper, Y.H. Chang, W.T. Liang, T.Y. Chang, M.S. Lin, and Chen, K.S., Investigating the active deformation in the northern longitudinal valley and Hualien city of eastern Taiwan by using persistent scatterer and small-baseline sar interferometry. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 22(3) : 291-304. (2011)

13. Zhang L., Ding, X. and Lu, Z., Ground settlement monitoring based on temporarily coherent points between two SAR acquisitions, *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 66(1) : 146-152. (2011)





2009年莫拉克風災·六龜新開部落災損

2

工程論著

臺9線蘇花改 計畫南澳和平段 隧道特殊考量及 困難地質因應

關鍵詞(Key Words)：蘇花公路改善工程(The Su-Hua Highway Improvement Project)、
隧道(Tunnel)

交通部公路總局／蘇花公路改善工程處／處長／邵厚潔 (Shau, How-Jei) ❶

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／副理／陳正勳 (Chen, Cheng-Hsun) ❷

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／工程師／吳宗翰 (Wu, Tony) ❸

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／正工程師／林志權 (Lin, Chih-Chuan) ❹

台灣世曦工程顧問股份有限公司／蘇花改監造專案／工程師／郭育安 (Guo, Yu-An) ❺

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／工程師／鄭斯元 (Cheng, Szu-Yuan) ❻



摘要

臺9線蘇花公路山區路段改善計畫為愛臺十二項建設之一，其中南澳和平段包含武塔隧道、最長之觀音隧道及緊接之谷風隧道，為整體計畫之關鍵工程。本文首先就隧道工程遭遇特殊地質及其因應對策與特殊考量，最後介紹本工程面對生態環境及文化遺址等議題之具體措施，以供工程界參考。



The Special Considerations and Specific Measures to Complex Geology for Nanao-Hepin Section of Su-Hua Highway Improvement Project in Taiwan

Abstract

The Su-Hua Highway Improvement Project is one of i-Taiwan 12 Projects. Especially the Nanao to Hepin section plays a significant role in this project, including Wuta Tunnel, Guanin Tunnel (the longest) and Gufeng Tunnel. This article reviews complex geological conditions that exist in tunnel engineering and presents the methods that must be considered. In addition, this paper provides some specific measures for ecological environment and cultural heritage. This case is expected to be referred for similar projects in the future.

3

專題報導

壹、前言

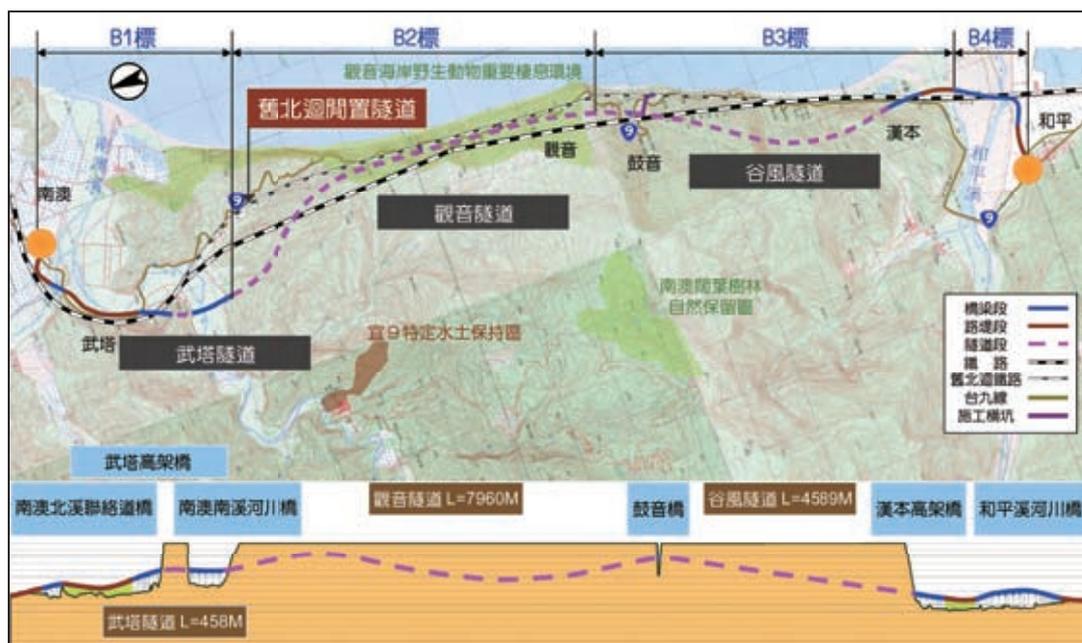
臺9線蘇花公路因受地形、地質條件限制，路線彎繞迂迴，道路標準及容量均較低，且每遇颱風豪雨經常坍方中斷，為積極改善臺9線蘇花公路危險路段，以提升蘇花公路之安全性與穩定性，滿足民眾行的安全，交通部公路總局爰積極推動「臺9線蘇花公路山區路段改善工程」(以下簡稱「本工程」)。本工程路線北起宜蘭縣蘇澳至花蓮縣崇德止，以路段災損阻斷及交通肇事頻率高之三個路段進行改善，包括蘇澳東澳段(約9.7km)、南澳和平段(約20km)及和中清水段(約8.7km)。三個改善路段總長度約

38.4km，其中隧道工程約23.4km、橋梁工程約8.5km及平面道路工程約6.5km，隧道為本工程主體，共有8座新建隧道，為國內近年隧道數量最多之重大建設工程，隧道位置如圖1所示。

南澳和平段包含武塔隧道、本工程最長之觀音隧道及谷風隧道，隧道基本資料如表1，考量長隧道安全規格、運轉服務性及環境影響，隧道採雙孔單向單車道配置，雙孔隧道線形為避免應力集中採間距分開，隧道單向單車道寬3.5公尺，並設置內路肩1.3公尺寬、外路肩3.0公尺寬及緊急逃生及維修步道1.0公尺寬(車道外側等同單車道寬)，單孔隧道開挖面積(有仰拱)



(a) 蘇花改工程範圍



(b) 南澳和平段隧道位置

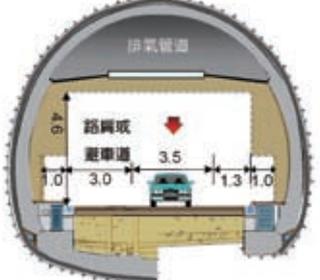
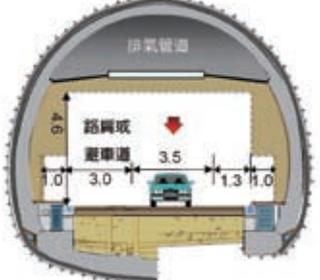
圖1 蘇花改工程範圍及南澳和平段隧道位置圖

為136平方公尺。隧道安全考量發生火災規模，採熱釋放率100MW，隧道配合通風系統規劃兩種斷面模式，觀音與谷風隧道採世界先進及國內首創之點排式通風系統(圖2)，隧道斷面因應於車行淨空上方設置通風管道(圖3a)；短隧道如武塔隧道採縱流式通風系統。觀音與谷風隧道

為本計畫最長隧道，二座隧道以長僅約60公尺之鼓音橋銜接(圖3b)，故二座隧道防災合併鼓音橋考量，為另一特色及挑戰。

本路段地質分區屬中央山脈東翼大南澳變質雜岩帶，地質構造相當複雜，例如褶皺構造

表1 南澳和平段隧道基本資料

隧道名稱	長度(m)	通風型式	隧道標準斷面
武塔	458	縱流式	
觀音	7,960	點排式	
谷風	4,589	點排式	

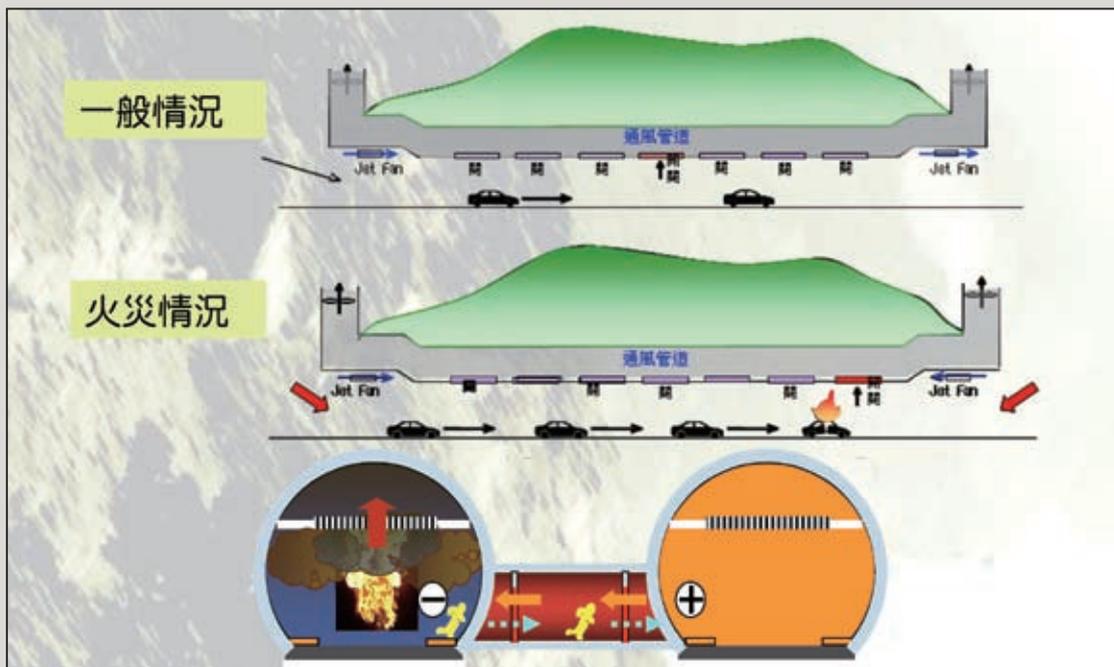


圖2 觀音、谷風隧道點排式通風系統示意圖

南澳和平幸福行旅-隧道模擬圖



(a) 觀音、谷風隧道模擬圖



(b) 隧道間銜接之橋梁模擬圖

圖3 觀音、谷風隧道及銜接橋梁模擬圖

常無固定波長，其岩性分布與褶皺構造有密切關係，且難以預測，也因此增加許多工程地質上之困擾。尤以隧道施工遭遇特殊地質及其因應對策與特殊考量(包含遭遇漢本遺址)等寶貴經驗，值得參考。另，本路段配合生態環境議題研擬具體措施，於設計及施工階段對於施工安全、湧水、空氣污染、水污染及生態等進行推動及監督。本路段隧道期望在業主、設計監造及施工單位全體齊心通力合作下，符合生態、環境要求完成臺灣新一代公路，並提供一條安全回家的路-「蘇花暢行」。

貳、地質研析

一、地形與地層

本工程南澳和平段，地形複雜且地質破碎，所屬岩層主要為上部武塔片岩，岩性主要為黑色片岩(雲母片岩或石英雲母片岩)穿插薄層至厚層綠色片岩(綠泥石片岩)、薄至中層大理岩，岩體裂隙常有薄層石英脈。詳細地層分布請參考圖4。

本段區域地質歷經南澳、蓬萊造山運動，中新世後應力型態由壓縮轉為伸張(葉恩肇，

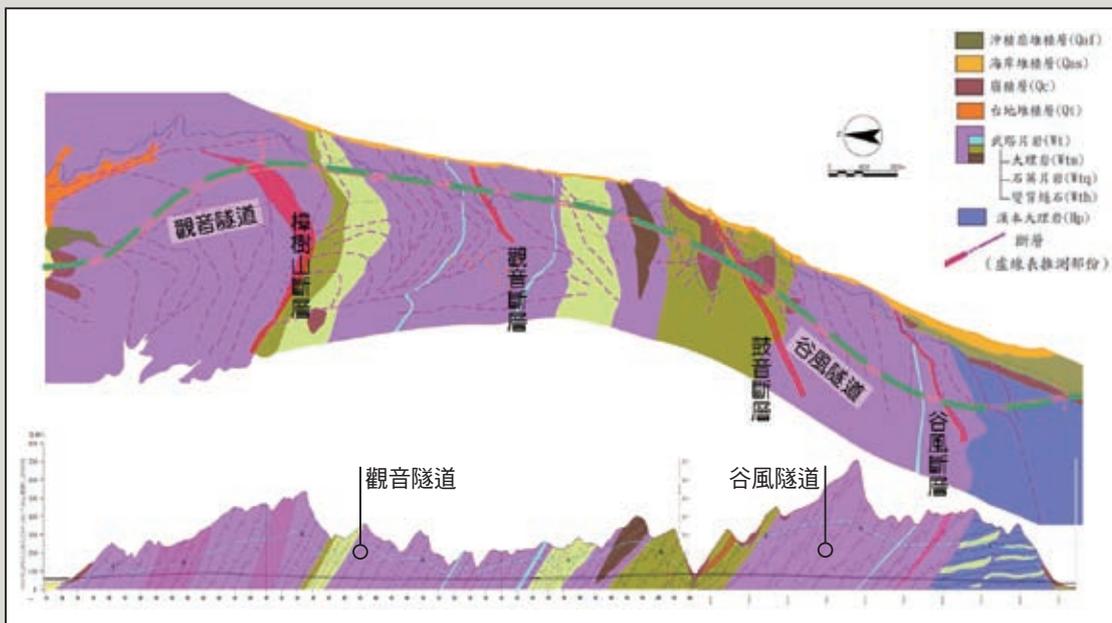


圖4 南澳和平段沿線地質圖

1998)，因此本區域有數道較顯著之斷層或構造帶，且穿插有局部較小型之剪裂帶，岩性雖單純，但岩體狀況卻相當多變且不均質，加上片岩強度具有高度不均質性。

二、隧道遭遇之斷層

本工程受板塊縫合帶的大地應力擠壓或剪切影響，沿地層葉理易產生剪裂錯動的剪裂破碎帶、斷層破碎帶等，葉理亦受擠壓作用滑動牽引，形成許多局部區域性的褶皺現象。所見之斷層型態主要為走向滑移，斷層走向與主應力方向之關係多為平行或共軛相交，南澳和平段隧道工程遭遇之主要斷層包括樟樹山斷層、觀音斷層、鼓音斷層及谷風斷層等，均非屬中央地調所(2012年)公告活動斷層，各斷層地質特性如表2。

三、隧道段水文地質

本岩性屬透水性較低之片岩，遭遇地下水時，其強度不易產生明顯弱化現象，故滲水、湧水帶主要係由岩體內之節理裂隙、斷層破碎帶以及沿葉理發育之剪裂帶等之地下水流通或蓄積造成。

四、礦區分布

本工程路廊沿線附近有18處礦區分布，其中有6處礦區位於南澳和平段之隧道區段，包括武塔隧道經過1處礦場、觀音隧道4處、谷風隧道1處，如表2所示。除谷風隧道段之扒里份礦

場係使用坑道方式開採白雲石外，其餘相關礦區主要為露天開採。

五、工程地質特性

本工程隧道施工時觀察發現，本區域之石英雲母片岩、石墨片岩與綠泥石片岩等所含的片狀礦物較多，屬於連續劈理，而石英片岩或雲母石英片岩則屬夾皺劈理。基本上劈理領域發達者，其岩體強度較夾質較多之片岩來得低。

觀音隧道片岩中之褶皺構造受強烈區域應力影響，褶皺型態以緊密～同斜褶皺為主，綜合施工階段調查結果，褶皺的波長極小，但在脆-塑性變形階段岩體之形變量無法如塑性變形階段大，因此劇烈的褶皺作用在此階段，常於岩性或岩石強度差異大之褶皺翼部發生移位構造，隧道內移位構造之出現代表岩石強度差異大，在區域應力持續作用的情況下，可能會在移位作用產生之斷塊周圍，產生特別破碎現象。

觀音隧道施工過程中發現若干疑似花狀構造型態的剪裂帶，因開挖斷面僅12公尺，對於完整的構造觀察實屬不易，但就剪裂帶性質探討及地質展開圖製作後，發現許多角度偏緩剪裂帶應屬花狀構造上部結構如圖5～6。另花狀構造可能造成高角度或低角度的厚層夾泥剪裂帶，且地下水易富集，對於隧道開挖屬高風險地質構造。除花狀構造外，也可發現斷層帶，伸張型斷層帶與錯動型斷層帶最大的差異點在

表2 設計階段評估隧道可能遭遇主要斷層及鄰近礦場一覽表

改善路段	影響隧道	斷層名稱	斷層型態	上/下盤(岩性)	沿線附近礦場
南澳和平段	武塔	-	-	-	武塔礦場
	觀音	樟樹山	逆斷層	片岩/片岩	旻昌石礦、南澳礦場、觀音礦場、白玉山礦業
		觀音	逆斷層	片岩/片岩	
	谷風	鼓音	逆斷層	片岩/片岩	扒里份礦場
		谷風	逆斷層	片岩/片岩	



圖5 岩性及結構形成岩體強度差異



圖6 觀音隧道小型花狀構造

於位態角度，伸張型斷層帶常位態較陡，但斷層泥含量較少，相對的充填礦物含量較高，斷層影響範圍或破碎帶較小。不論是何種性質的

剪裂帶或是斷層帶，只要規模達到一定程度，其剪裂帶將具規模，也提供地下水通路。

觀音隧道於施工階段亦發現沿線影響岩體風化程度最重要的因素為地下水，當局部岩體長期受地下浸潤，片岩中的雲母礦物會產生蝕變(Alteration)現象。當厚層的黏土礦物出現於隧道開挖面時，也常因其良好之阻水特性而伴隨著地下水富集，若遭遇黏土礦物則隧道容易變形。本區段隧道部份岩體遇水軟化研判主因為片岩受風化所致。

參、隧道特殊地質問題及對策

南澳和平段隧道主要分布岩性為片岩，屬「臺灣岩體分類與隧道支撐系統(PCCR系統)」A類岩體。

一、隧道特殊地質問題及對策

設計階段本工程隧道群可能遭遇特殊地質問題如表3。

表3 隧道可能遭遇特殊地質問題

隧道名稱	可能遭遇之特殊地質問題			
	淺覆蓋或偏壓	斷層破碎帶	滲、湧水	擠壓
武塔	-	-	-	-
觀音	-	◎	◎	◎
谷風	-	◎	◎	◎

表4 斷層破碎帶可選用之對策及工法

施工階段	對策及工法	備註
開挖前	水平排水孔、止水灌漿(水泥或化學藥劑)	地下水處理
	前進鋼管、鋼護板、管幕工法、地盤改良	軟弱地層、破碎帶處理
開挖中	縮短輪距、短台階或微台階、上半臨時仰拱、封面、仰拱閉合、環狀分區開挖	
支撐調整	重型支保、岩栓加長、岩栓加密、噴凝土增加厚度、擴大基腳、支撐樁	
開挖後	增加監測頻率、增加監測斷面及監測項目、儀器、背填灌漿、內襯砌配筋、內襯砌加厚	

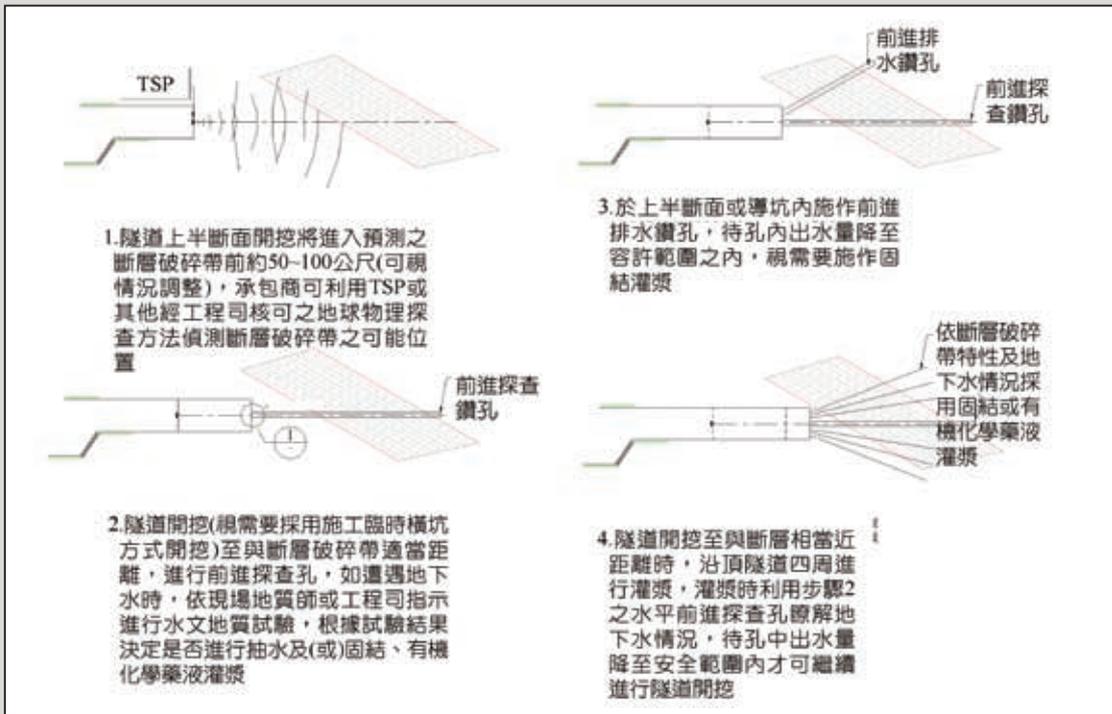


圖7 斷層破碎帶開挖面前方地質探查對策原則

(一) 斷層破碎帶對策

隧道施工遭遇斷層破碎帶，可能發生地下水沿破碎帶湧出，或者造成隧道開挖後變形程度過大情形，斷層破碎帶開挖面前方地質探查對策如圖7，對於隧道通過斷層破碎帶可考量選用之對策及工法如表4。

(二) 滲湧水對策

路線可能遭遇之地下水問題，湧水情況可考量選用對策與工法如表5。

(三) 擠壓對策

具擠壓潛能路段可能會有較大之變形，於此路段可考量採用主動式或允許較大變形之被動式，擠壓可考量選用對策與工法如表6。

表5 滲湧水可選用之對策及工法

對策	工法
排水工法	先進排水鑽孔 大口徑排水管(視需要)
阻水工法	化學灌漿、水泥漿灌漿等工法
併用工法	排水工法與阻水工法併用

表6 擠壓可選用之對策與工法

對策	工法
主動式 與 被動式支撐	<ul style="list-style-type: none"> 剛性支撐 固結及化學灌漿 局部岩錨(適用局部擠壓情況) 仰拱閉合 擴挖

(四) 監測與全生命週期管理

本工程隧道洞口佈設監測儀器包括水位觀測井、傾斜觀測管等，相關監測儀器於完工後，可移交公路養護單位，納入其維護管理系統中。隧道主體部份，於隧道開挖施工中即已設置隧道淨空斷面監測系統，以監測隧道開挖後周圍岩體變形量是否趨於穩定收斂。

二、隧道抽坍對策

例如圖8~9，谷風隧道亦於106年10月發生一大型抽坍，對施工團隊是一大挑戰。

南澳和平段觀音隧道於施工階段遭遇抽坍

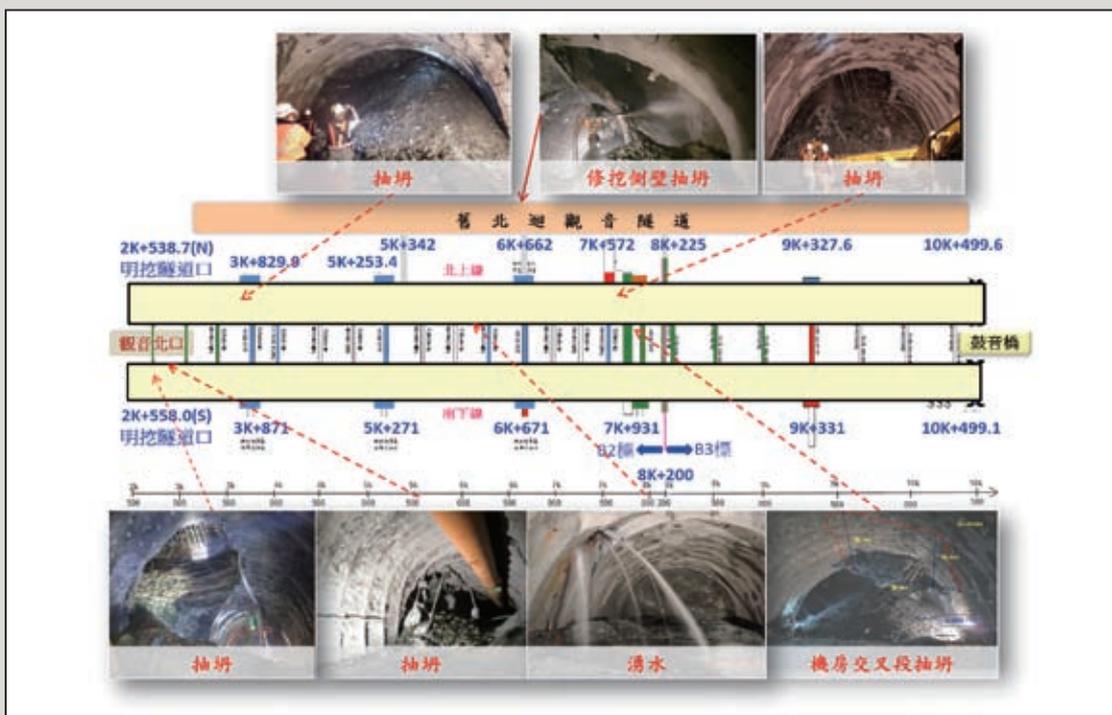


圖8 觀音隧道抽坍例

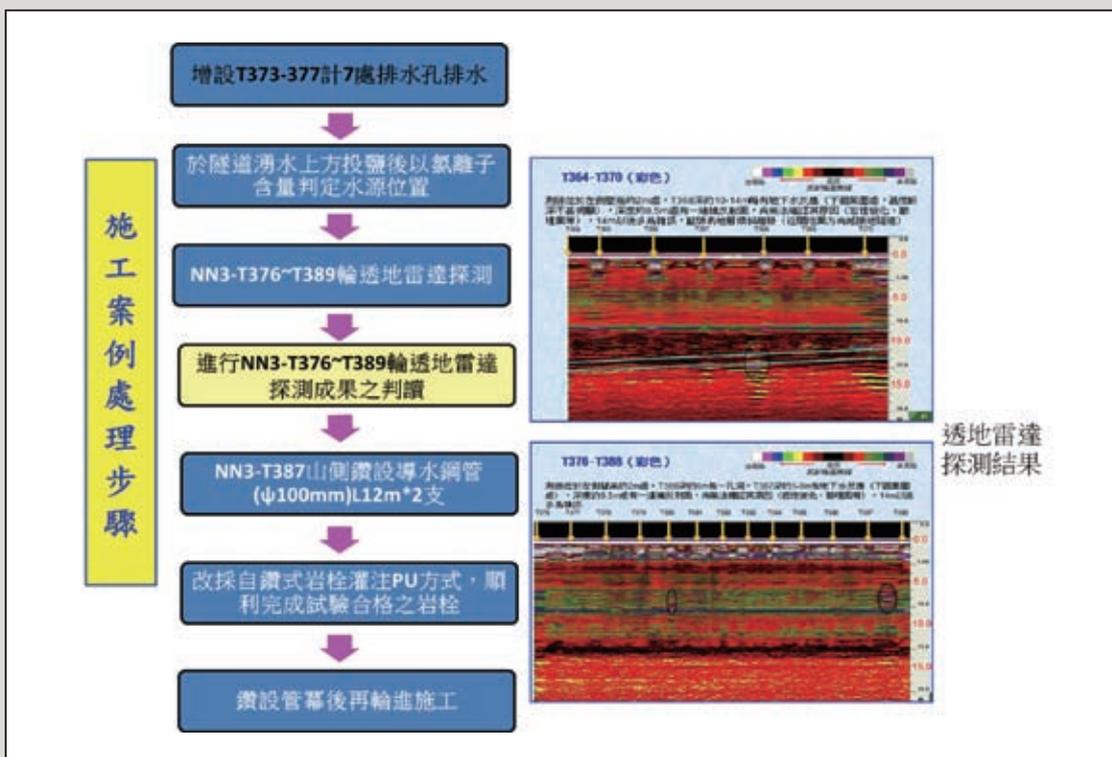


圖9 抽坍處理流程案例

抽坍預防措施如下：

(一) 不取心前進探查：

探測開挖面前方短距離之岩體強度概況及地下水狀況。不取心前進探查係利用鑽機於開挖面向前試鑽，以了解前方地質可能狀況。鑽進過程中，可注意鑽堡機或鑽桿不正常的震動以猜測弱帶位置。鑽堡迴水顏色參考研判前方岩性。另外迴水的狀態也必須要加以觀察，迴水中岩屑的種類可反映潛藏的地質弱帶，容易卡鑽也可能反應地質差異大狀況。施作不取心探查應由有經驗操作手執行，機具扭力不宜常變化。

(二) TSP隧道內震波探測：

探測開挖面前方約100公尺之地層強度

及地下水狀況，早期提出預警。TSP主要為隧道中開挖面前方不連續面、斷層及破裂帶探測所用，也可以3D和2D之方式來顯示隧道開挖前方軸向上所存在之不連續面及其界線。

(三) 地質開挖面研判：

經由鄰近已開挖隧道結合地質構造研判，推測未開挖區段之地質條件。地質預測綜合概念如圖10。

肆、特殊考量

蘇花改工程土建分標分為A、B、C標等(如圖11)，其中南澳和平段包含B1標(武塔隧道)、B2及B3標(觀音及谷風隧道段)工程。

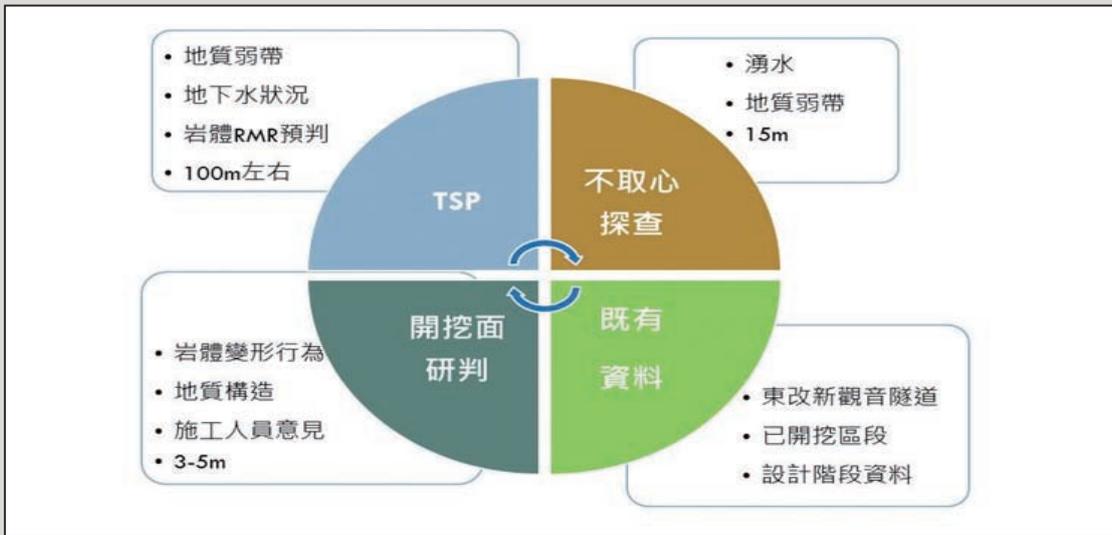


圖10 地質預測綜合概念



圖11 本工程土建分標圖



圖13 舊北迴隧道位置圖



圖14 舊北迴隧道改善成果圖



圖15 舊北迴隧道RFID管控示意圖



圖16 鐵路運輸

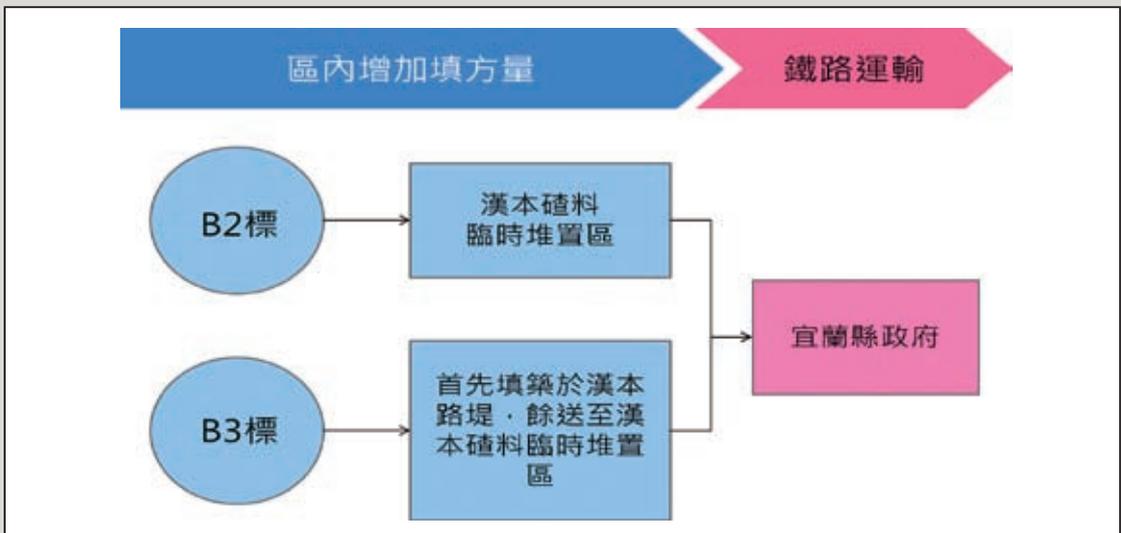


圖17 剩餘土石方處理方式

五、剩餘土石方之鐵路運輸應用及再利用

南澳和平段剩餘土石方分配填築至路權內填方區再利用，如仍餘土石方，為減少公路運輸土石方對臺9線交通影響及節能減碳，土石方以鐵路運輸至新馬車站交付宜蘭縣政府模式進行骨材及碎石級配等再利用如圖16及圖17。經與台鐵局運務處協商，考量運能及運量礙於南澳至漢本鐵路隧道之瓶頸點，每日僅可出車4對8列次，每列次可附掛之平車數為18輛，估算漢本站每列次運輸量為291立方公尺，每月(26天)可運輸30,264立方公尺。

伍、生態及環境影響課題與對策

一、生態課題與對策

本工程週邊範圍生態資源豐富，陸域、水域及海域等指標生物如圖18。優先發包路段在陸域部份政府已公告的保護範圍包括：烏石鼻海岸自然保留區、觀音海岸野生動物自然保護區、南澳闊葉林自然保護區等，另有南澳原生樹木園區及南澳農場等，皆為陸域重要的生態環境區；至於計畫範圍的河川如：南澳北溪、南澳南溪、和平溪等，都為本區域重要之生態廊道，不但流域沿線植被完整，水域陸域



圖18 本工程陸域、水域及海域等指標生物

生態相豐富。在兼顧道路開發與自然生態保護之原則下，本計畫依序以迴避、縮小、減輕、補償之友善策略，進行工程之生態保護規劃，隧道挖方填築之南澳路堤段，規劃設生態池及生物通道等。另，所有列管重要樹木，均陸續配合各標開工時間辦理移植，希望環境維護的理念和對工程與環保共生的意識能落實於本工程。施工前並針對工程人員排訂相關課程加以教育。

二、環境影響課題與對策

本工程相當重視環境影響課題，依本案環境影響說明書審查結論停工機制如表8。公路總局已成立環境監督小組，另因應民間團體要求，制定「臺9線蘇花公路山區路段改善計畫環境保護監督小組旁聽要點」，環境監測因應作法如圖19。

表8 施工中停工機制

項目	說明
隧道湧水	工作面如出現湧水，致使水資源流失連續24小時每分鐘超過2,100公升時，導致工作無法正常進行情形。
空氣品質	執行監測計畫不符合「空氣品質標準」×0.9，工程處於知悉結果後7日內無預警至該敏感受體複查，仍不符基準時則停工
噪音	本工程環境監測以低於噪音管制標準1 dB(A)為臨界值。執行監測計畫不符合臨界值時，於知悉結果後3日內無預警至工地複查，仍不符基準時則停工。
陸域生態	以工區附近之觀音海岸野生動物重要棲息環境為監測點，以白頭翁、麻雀、綠繡眼、小雨燕、紅嘴黑鵝、洋燕、繡眼畫眉、五色鳥及竹雞等9種之平均紀錄數量的50%為標準，以連續2次監測成果不符標準視為異常狀況，除進行補充監測確認外，經由監督小組評估決定停工與否。
海域生態	海域生態於本工程段有關之採樣點位於南澳溪河口、觀音溪口及和平溪口，以重要冬季浮游動物單位個體量連續2次調查平均紀錄數量的50%為標準。以連續兩次監測成果不符標準視為異常狀況，除進行補充監測確認外，經由監督小組評估決定停工與否。

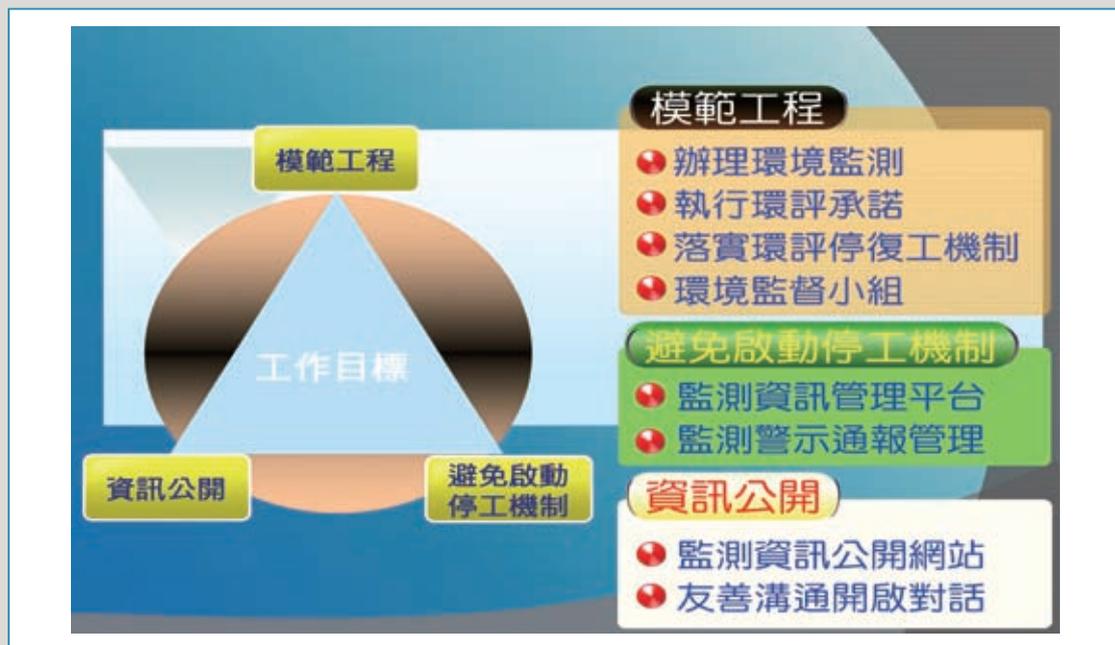


圖19 環境監測因應作法示意圖



圖20 漢本遺址發現及搶救發掘

三、文化遺址搶救及監看

101年3月5日B3標谷風隧道南口外里程約5K+400處土地公廟旁，於施工監看過程中發現本工程最大規模之「漢本遺址」，其發現及搶救發掘歷程如圖20，漢本遺址擁有史前上、下文化層堆積，從出土遺物與下文化層較為豐富的堆積研判，此處為一聚落型態的大型遺址，地表可見大量金屬器時期紅褐色色素面或帶有各類拍印紋飾的陶器殘件，亦包含打製的帶穿石環，但少見打製的有刃石器，如斧鋤形器等。同時亦發現有豬顎骨、豬臼齒、大型魚類脊椎骨等生態遺物。此外，重要的金屬遺物包括有鐵渣塊，顯示當時有冶鐵跡象。B3標谷風隧道南口雖為重要工作面，惟曾配合漢本遺址搶救及發掘暫時停工，先後挖掘出土石棺，並加以搶救，顯示本工程對於文化遺址之重視，並為尋求工程與文化遺址並重而努力。

陸、結論

蘇花改工程南澳和平段長20公里，構造複

雜且地質破碎，其中武塔隧道、觀音隧道及谷風隧道遭遇不良環境險阻，施工艱鉅，曾遭遇抽坍、湧水挑戰，屬蘇花改之關鍵工程路段。本工程除提出特殊地質及其因應對策外，並採全能作業輪班隧道施工、利用閒置北迴鐵路隧道結合作業面、以鐵路運輸土石方等創新作為。同時針對生態環境議題研擬具體措施，配合工程進度，積極搶救漢本遺址，以維護珍貴的文化資產。本路段在業主、設計監造及施工團隊全體齊力合作下，朝儘速通車目標大力邁進，期望為民眾打造一條防災、暢行且安全回家的路。

參考文獻

1. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，臺9線蘇花公路山區路段改善計畫建設計畫，交通部公路總局(2010)。
2. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，臺9線蘇花公路改善計畫工程規劃報告，交通部公路總局(2011)。

南迴公路拓寬改善計畫安朔草埔段隧道設計特色與施工精進作為

關鍵詞(Key Words)：隧道(Tunnel)、豎井(Shaft)、減碳(Carbon reduction)、防災(Disaster prevention)

交通部公路總局／西部濱海公路南區臨時工程處／處長／江金璋 (Chiang, Ching-Chang) ①

交通部公路總局／西部濱海公路南區臨時工程處／科長／羅國峯 (Lo, Kuo-Feng) ②

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／協理／吳文隆 (Wu, Wen-Long) ③

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／經理／蕭秋安 (Hsiao, Chiao-Ann) ④

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／正工程師／林志權 (Lin, Chih-Chuan) ⑤

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／工程師／盧宥融 (Lu, You-Rung) ⑥

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／副理／陳正勳 (Chen, Cheng-Hsun) ⑦

台9線南迴公路草埔段



摘要

安朔草埔段隧道工程係『台9線南迴公路拓寬改善後續計畫(安朔至草埔段)新闢四車道工程』的關鍵工程，隧道長度約4.6 km，採雙孔單向設計。本隧道設計特別引進世界先進防災理念及綠色工法，同時將隧道全生命週期之永續理念納入考量；施工階段則透過土石方應用於人工海岸養灘、碳足跡盤查等作為，讓防災安全、友善環境、減碳減廢及耐久延壽確實落實於設計及施工。此外，本隧道工程穿越中央山脈，沿線通過多處褶皺、剪裂破碎帶、湧水及擠壓等特殊地質，除設計階段預先規劃應對策略外，施工期間配合補充地質調查及輔助工法等逐一克服工程困難，工程極具挑戰性。



Design Features and Construction Advancement of Anzhen Caopu Section for Southern Cross Island Highway Improvement Project

Abstract

Anzhen Caopu section of the southern cross island highway improvement project in Taiwan is the key path of the whole project. The length of the tunnel is about 4.6 km. The tunnel design adopts the world's advanced disaster prevention concept and green work method. It considers the sustainable concept of the whole life cycle. This project pioneers to apply the disposal during construction phase to the artificial coastal beach. It utilizes carbon footprint check for friendly environment. Carbon reduction, waste reduction and durable life extension are indeed implemented in design and construction. In addition, the tunnel encounters various special geology ,such as folds, shear zone 、 amount of water inrush and squeezing problem. In addition to the pre-planning strategy during design phase, the geological survey and auxiliary methods are used to overcome one by one during the construction period. This project is extremely difficult and challenging.

3

專題報導

壹、前言

一、計畫緣起

台9線南迴公路為臺灣東部花東地區與南部高屏地區之主要通行運輸幹線，惟受限於地形條件，既有道路設計標準偏低、線形不佳、縱坡起伏大且路寬不足，加上高路堤及高邊坡多，易因天然災害受損而交通中斷，除生命財產損失外，亦對區域經濟及產業運輸造成重大影響，為配合國內產業東移、平衡區域發展等政策，遂積極推動本計畫。

二、計畫範圍

本計畫起自台東縣達仁鄉安朔村，至屏東縣獅子鄉草埔村，工程範圍為台9線安朔至草埔路段457k+000~472k+700(新橋號443k+000~454k+006)，全長11.006km，本文自台9線457k+000起算為里程0k+000。本段工程共分為5標，分別為C1橋樑標、C2隧道標、C3-EM機電標、CE3-T交控標及C4建築標，其中C2隧道標在團隊共同努力下，於107年5月18日全線貫通，地理位置詳圖1，平縱斷面詳圖2。



圖1 工程位置圖

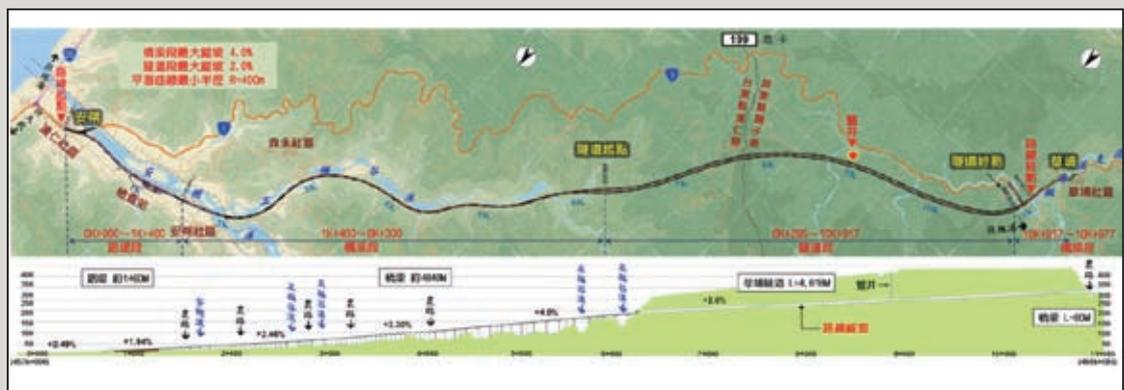


圖2 路線平縱斷面

貳、工程地質

計畫區域之地層主要為潮州層、河階堆積層及現代沖積層。現代沖積層主要分布在安朔溪及其支流河床，河階堆積層主要分布在溪流兩岸的河階上，其組成材料以礫石夾砂為主。範圍內潮州層岩性主要以硬頁岩為主，偶夾砂岩。計畫路線範圍內並無活動斷層構造通過，本區域主要之地質構造型態為褶皺；沿線緊密拖曳褶皺構造相當普遍，沿硬頁岩劈理面之剪裂帶發育亦相當常見，地層較為破碎。根據岩層位態變化，本路線主要地質構造包括3個背斜與1個向斜構造(詳圖3)。

本計畫工程地質探查工作內容，詳如圖4，包含地表地質調查、鑽探與試驗及取樣、開挖

調查、室內試驗、地球物理探測，其中國內首度於設計階段地質調查採用600m長距離水平鑽孔(圖5)，並首次於隧道全線採用地電阻影像剖面探查(RIP)，降低隧道施工風險，結果如圖6及圖7所示。由地電阻試驗推估的地層界面及水位面如圖中黑色及白色虛線所示，其中電阻率越低表示頁岩(硬頁岩)含量越高，電阻率越高表示砂岩(變質砂岩)含量越高。由地球物理探測成果顯示在豎井處附近淺層(深度<50m)為較風化或破碎之硬頁岩，深度大於50m後之地層為劈理或裂隙略發達之砂岩/硬頁岩層，地下水水位高且豐沛。

本工址在主隧道北口水平鑽探過程中，於前進至412m時出現湧水現象，湧水量約為72m³/hr，設計階段亦將類似地質之南迴鐵路中央隧道

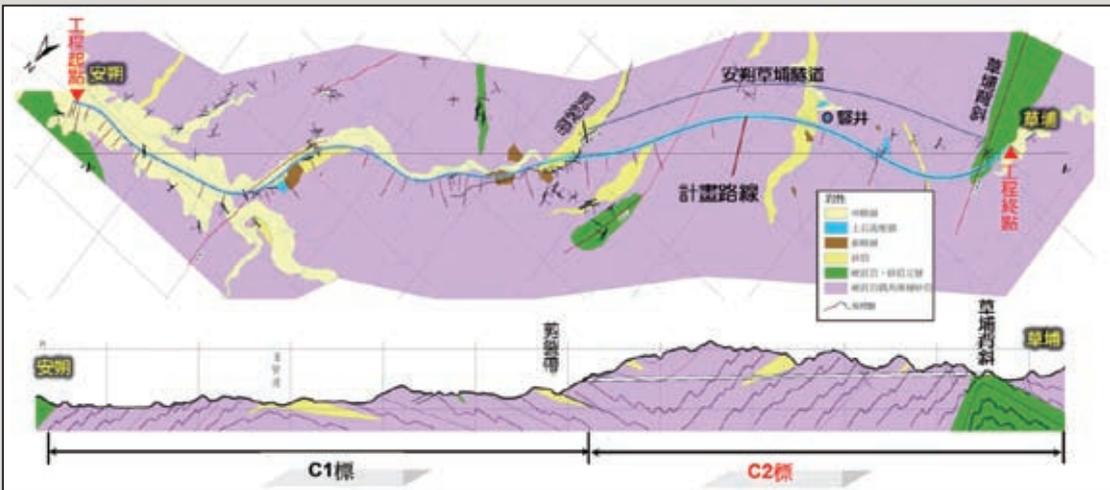


圖3 南迴公路安朔至草埔段地質平、剖面圖

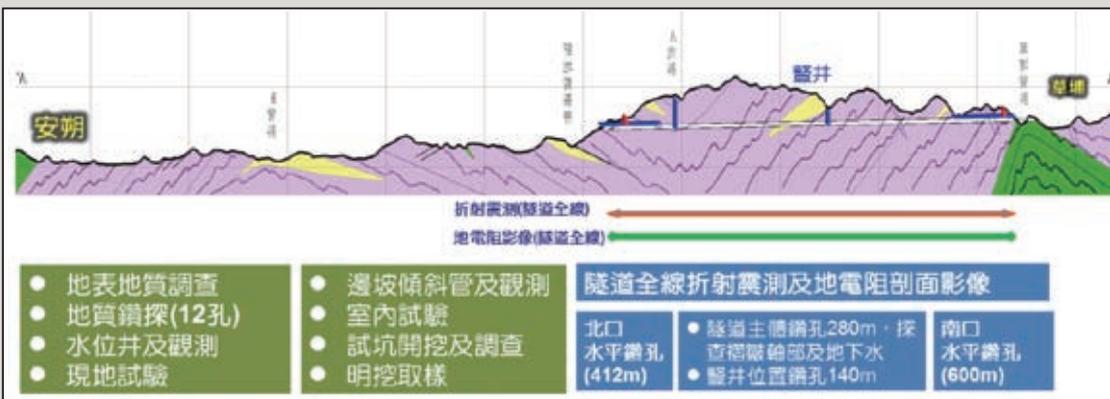


圖4 設計階段地質調查

於興建時所遭遇多次地質災害態樣納入特殊地質設計考量。

依臺灣岩體分類與隧道支撐系統—PCCR系統隧道沿線地質以中央山脈之變質岩及亞變質岩為主，除洞口段及特殊地質段外，歸屬A岩類。

參、隧道設計特殊考量

本計畫隧道長度為北上線4602.5m、南下線4617.5m，隧道以雙孔單向車道設計。主隧道行車淨空高為4.6m，每車道寬3.5m，車道兩側各留路肩寬0.3m。維修步道採15公分高之低步道



圖5 隧道南口長距離水平鑽探(長600m)

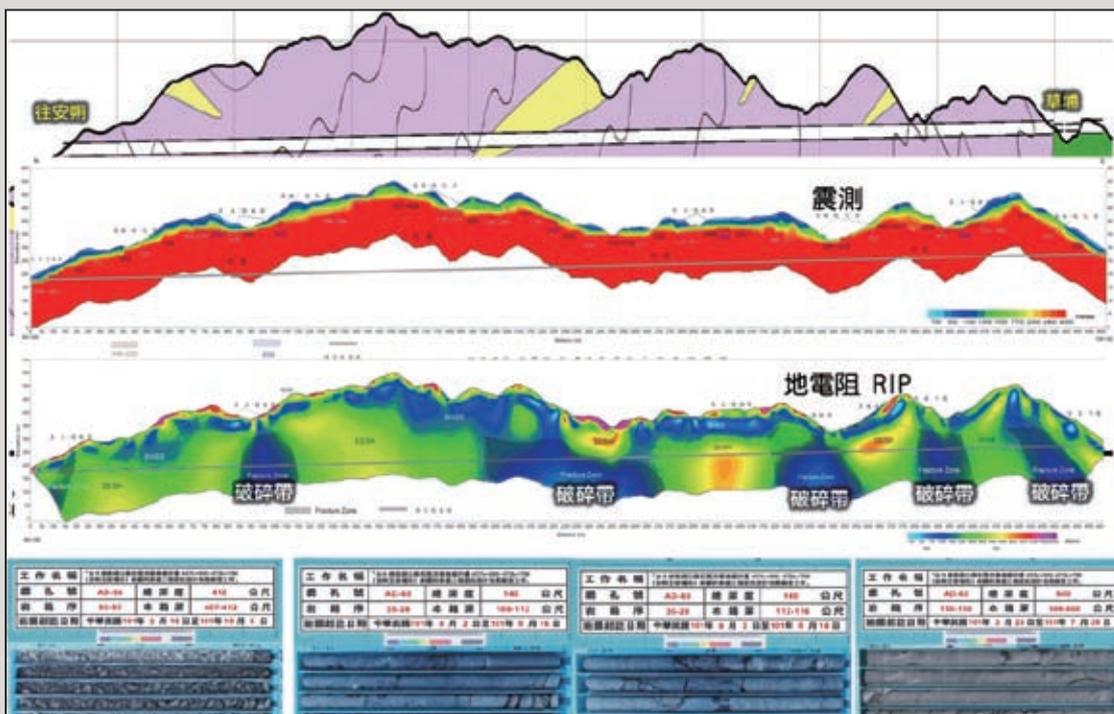


圖6 主隧道沿線地球物理探測成果

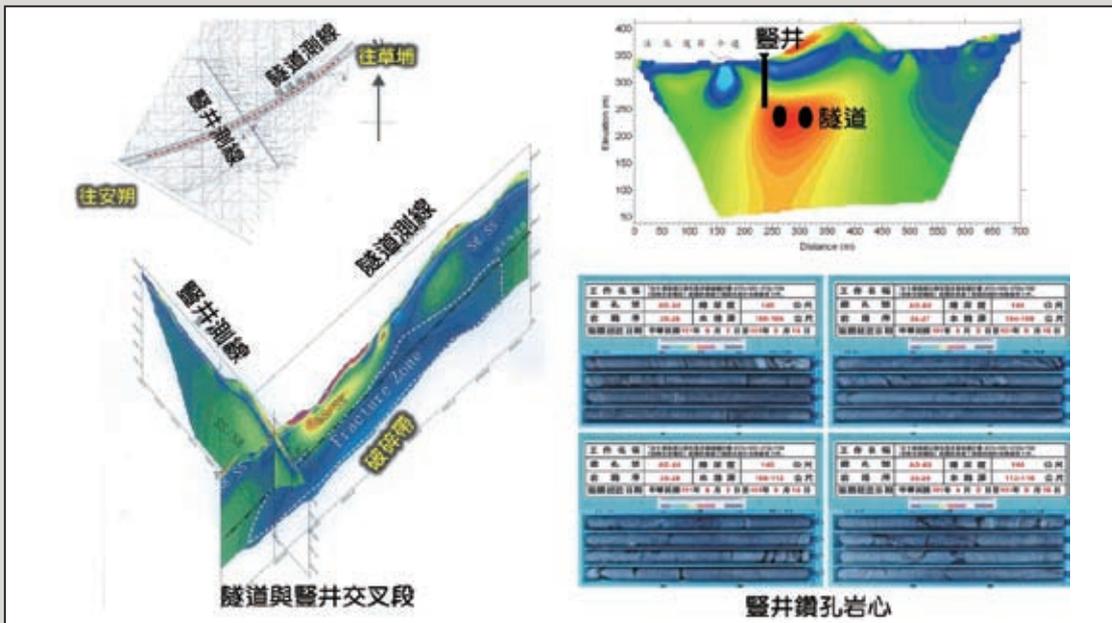


圖7 豎井區段地電阻影像剖面

配置，人行空間寬1.0m、高2.0m。其它服務主隧道之設施尚包括連絡通道、機房、輔助機房等，標準斷面詳圖8。

本隧道採新奧工法設計施工，將綠能、防災、生態及永續工程之理念導入設計，讓友善環境、減碳節能落實在設計與施工當中。主要之設計特殊考量如下：

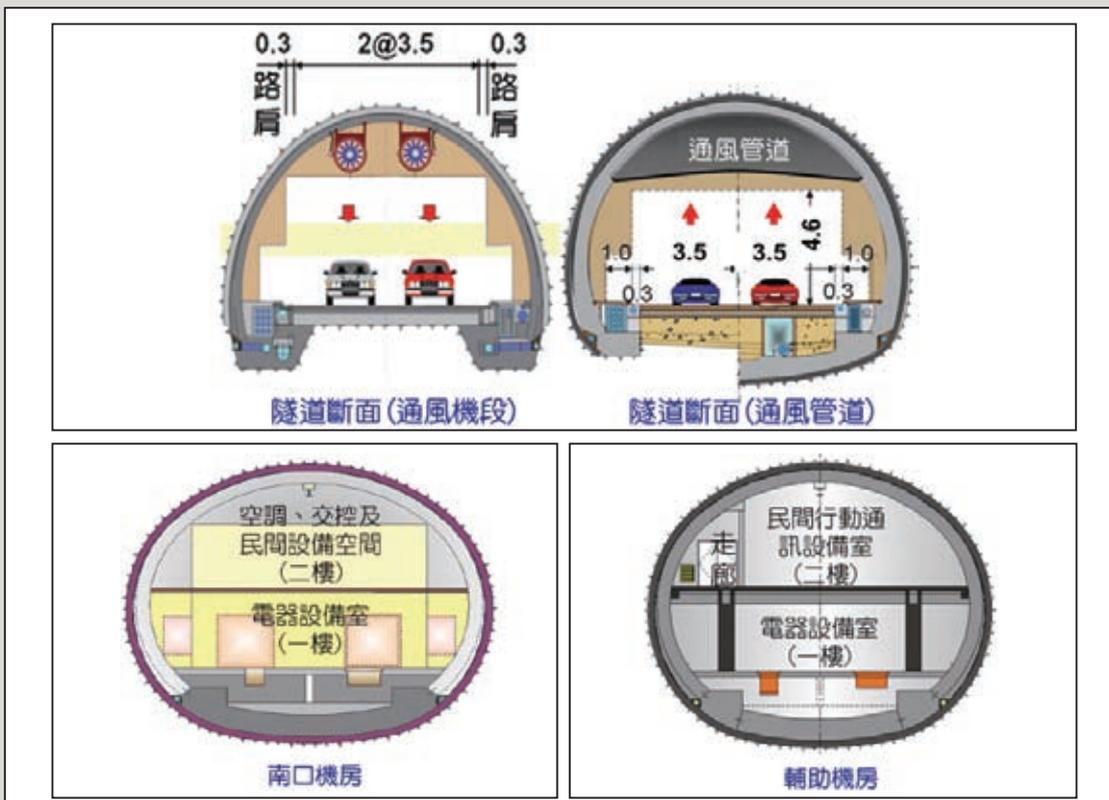


圖8 主隧道、機房及輔助機房標準斷面圖

一、路線設計

- (一) 隧道南口機房為避免拆遷墳墓與減少徵收土地，首創洞口機房置於隧道內，而施工期間併為炸藥庫，減少設置炸藥庫時程。
- (二) 設計階段將隧道縱坡由原規劃之3%調整為2%，除可增加隧道營運安全外，亦可降低營運期間車行之耗油量，以符合世界長隧道縱坡之潮流，如表1。
- (三) 於設計階段藉由更進一步現地資料之蒐集及詳細之方案研擬，設計團隊將隧道長度由規劃階段之5,000m，調整為約4,600m，縮短之400m隧道以中長跨度之橋梁替代，減少之土方開挖及結構設施材料使用，係為對節能減碳之有效作為。

二、隧道通風及防災設計

- (一) 長公路隧道因應地形及降低對環境影響，將豎井置於二隧道外側(靠近既有公路與位於平坦地)為國內首創，如圖9所示，除符合所採世界先進之點排縱流式通風系統，可快速排除煙霧度，並設置水霧降低火災時溫度，以及設置完整防災消防警示系統，有利人員安全逃生及提高救災可及性，經分析評估符合長隧道防災功能(含火災規模達100MW情況)。
- (二) 隧道全量空氣概分三段處理，進隧道500m為第一段，可由隧道入口引入一部分供氣藉Jet Fan推送，中段3600m為排氣模式，廢氣由隧道中央豎井排除，部分推至隧道下游端即將隧道氣流以縱流方式排出。點排式則當隧道

表1 世界長隧道縱坡一覽表

隧道名稱	功能	單孔/雙孔	隧道長度(km)	隧道最大坡度(%)
奧地利 Plabutsch隧道	公路	雙孔	9.8	1.0
法國-義大利間 Mont Blanc隧道	公路	單孔	11.6	0.16%
德國 Rennsteig隧道	公路	雙孔	7.9	1.52
挪威 Laerdal隧道	公路	單孔	24.5	2.7 (交通量1000輛/天)
瑞士 Gotthard 隧道	公路	單孔	16.3	1.4
日本 惠那山隧道	公路	雙孔	8.6	1.84
日本 關越隧道	公路	雙孔	11.5	1.65
日本 飛驒隧道	公路	單孔	10.7	2.0
臺灣 八卦山隧道	公路	雙孔	4.95	1.2
臺灣 雪山隧道	公路	雙孔	12.9	1.25
日本 青函隧道	鐵路	單孔	53.9	1.2
臺灣 安朔草埔隧道	公路	雙孔	4.61	2.0

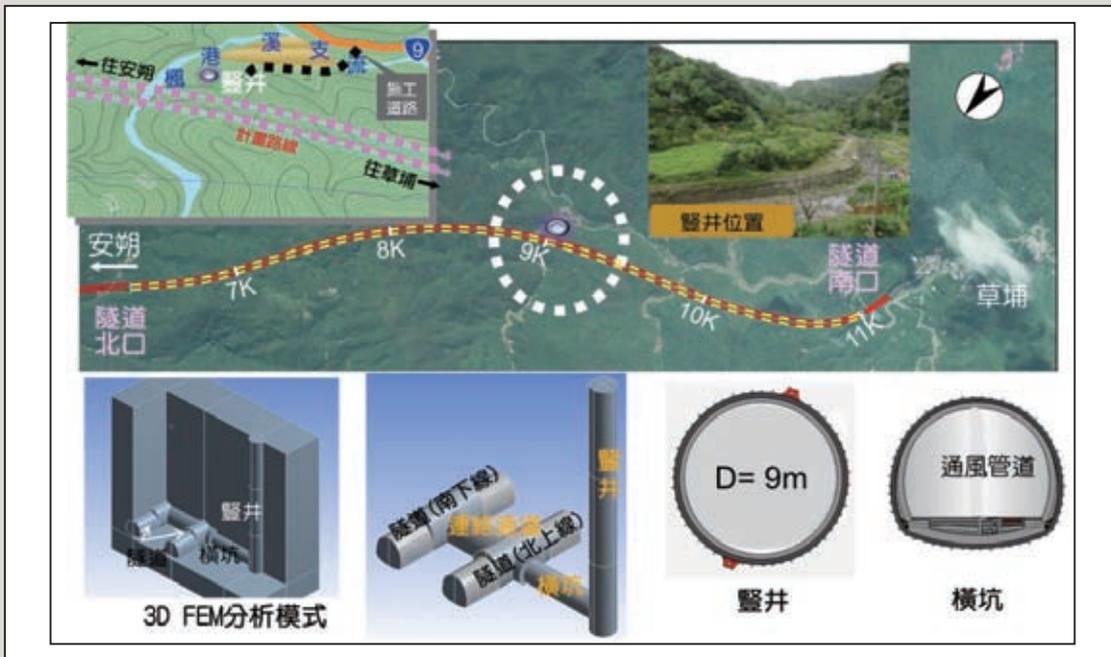


圖9 通風豎井與橫坑示意圖

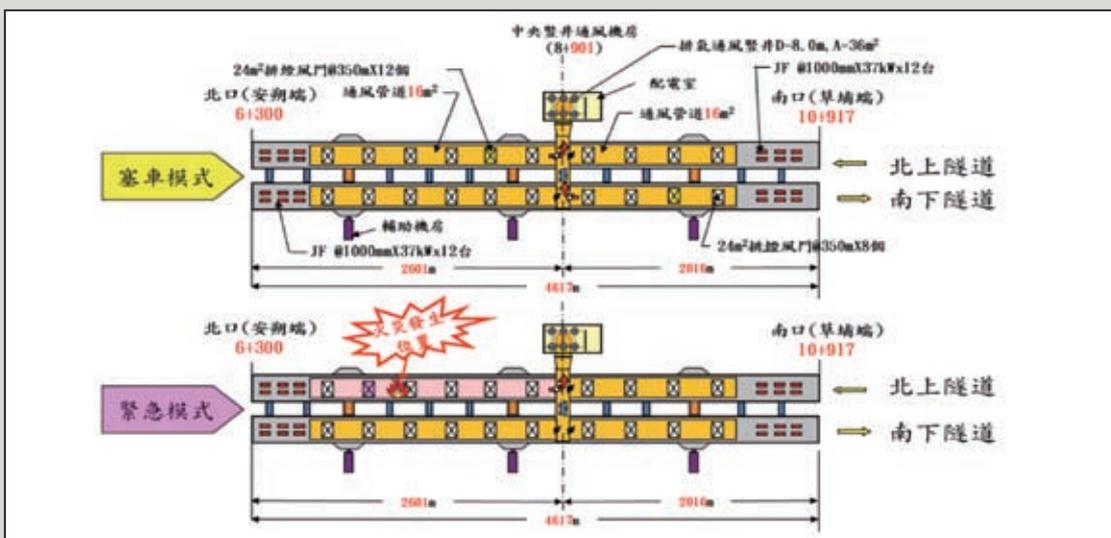


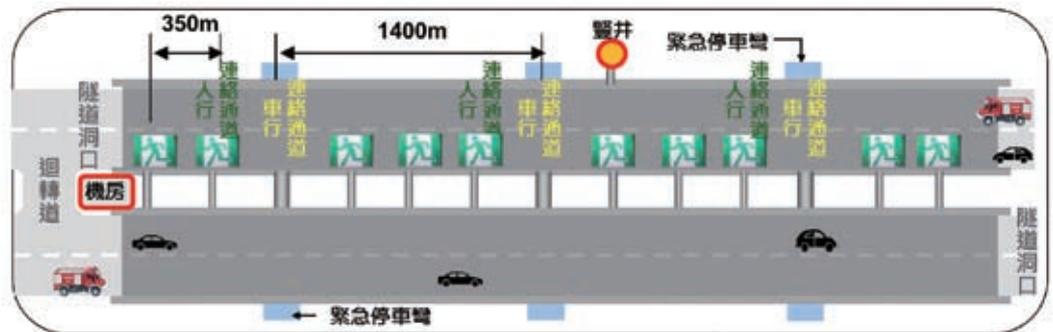
圖10 隧道通風示意圖

發生火災時可切換為該方式藉由隧道隔版開設之排煙口排除發生事故區之煙熱，以利用路人由兩端逃生。隧道通風示意圖詳圖10所示。

(三) 調整隧道縱坡由規劃之3%降為2%，車輛爬坡之廢氣排放降低，評估平均只需原規劃案之80%總稀釋通風量即能滿足通風要求，節省通風用電，並

減緩車輛因碰撞或傾倒時洩油擴大速度，較可抑制火災蔓延，並可加快用路人逃生速度，有利於防災與安全。

(四) 兩線隧道間每隔350m設置一處人行連絡通道，每隔1.4km設置一處車行連絡通道。緊急停車彎設置在車行連絡通道的相對側處，寬度為3m，長度60m，詳如圖11所示。



- 車行連絡通道：每1400公尺設置
- 人行連絡通道：每350公尺設置
- 緊急停車彎：每1400公尺於車行連絡通道另側



車行連絡通道



人行連絡通道

圖11 緊急停車及連絡通道配置圖



2010年

2011年

2012年

2014年

2015年

2016年

圖12 剩餘土石方再利用大武漁港人工養灘(福衛二號衛星影像)

(五) 研擬緊急應變計畫，確立隧道安全及設計目標、火災情況設計及火災發生時之軟、硬體之操作應變作為，並廣邀地方警、消等單位參與，提高救援時效性，確保用路人之行車安全。

三、剩餘土石方減量

(一) 將原規劃一長隧道(長4,840m)與一短隧道(長180m)，改為僅一長隧道(長約4600m)，縮減雙孔隧道總長度達約

800m；縮短規劃之豎井深度由140m降低為112m，合併縮短銜接豎井之施工與營運維修道路，由規劃之600m長減少為約250m，減少山坡地開挖闢路及對環境之影響。

(二) 隧道開挖之剩餘土方，除用於鄰標路堤回填再利用外，亦運於鄰近大武漁港人工養灘，土方再利用，並保護既有台9線公路及維護行車安全，此規劃設計為國內之創舉，如圖12。

(三) 國內首創以提高隧道襯砌混凝土強度(由 245kg/cm^2 提高至 280kg/cm^2)，減少襯砌厚度，同時減小開挖斷面及開挖土方與運送，亦達節能減碳之效益，如圖13。

四、褶皺密集及湧水地質層設計考量

(一) 本隧道地質構造主要受褶皺作用所影響，其軸部易形成破碎帶，向斜軸部則易蓄積地下水，隧道施工時易遭遇湧水及抽坍等地質災害。

(二) 路線可能遭遇之地下水問題，規劃隧道開挖前先行施作前進探查(預估湧水路段施作水平鑽孔)或TSP來預先掌握地下水情況。湧水處理之對策可分為湧水之排除與阻絕兩方式，以水平鑽孔兼排水孔洩除開挖面前方水壓，開挖面附近則採止水灌漿封堵岩體中水路，確保開挖及後續之營運安全。

(三) 隧道施工遭遇破碎帶，可能發生因地下水沿破碎帶湧出，或者造成隧道開挖後變形程度過大之情形。隧道開挖前先採用隧道震波探測(TSP)推估破碎帶位置，必要時鑽設長距離前進探查孔確認破碎帶位置與影響範圍以及滲水潛能；並以排水工法、止水工法(化學灌漿、水泥系灌漿或兩法併用)預先減輕或避免湧水之影響，再搭配管幕工法或地盤改良等措施因應。

五、生態景觀及節能減碳

(一) 設計前進行完整生態調查，並進行植物標示，確保降低施工過程之影響。設計

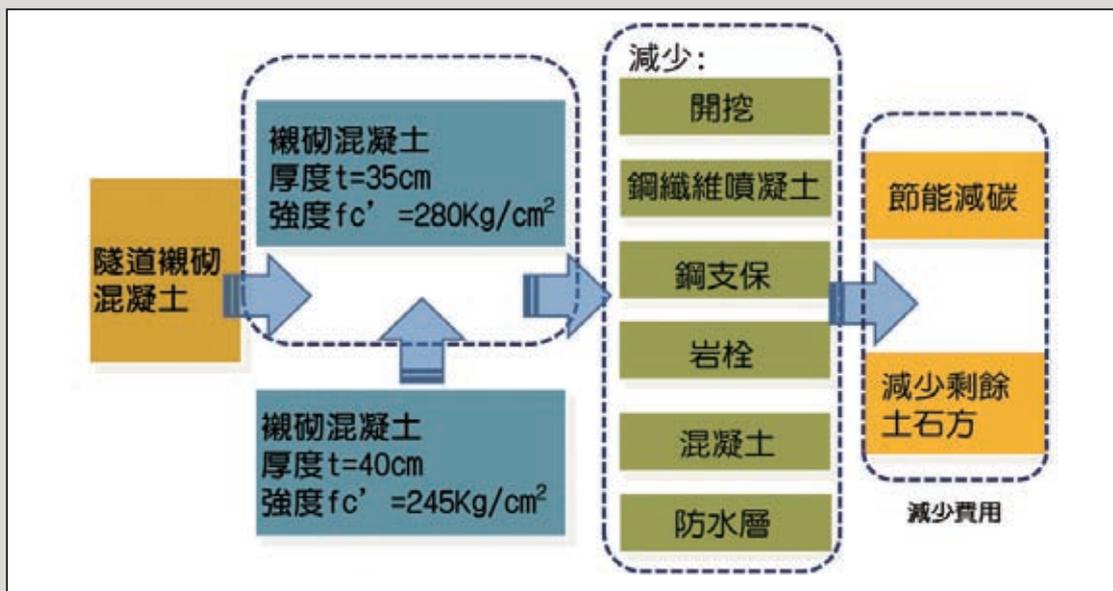


圖13 襯砌混凝土強度提高之效益

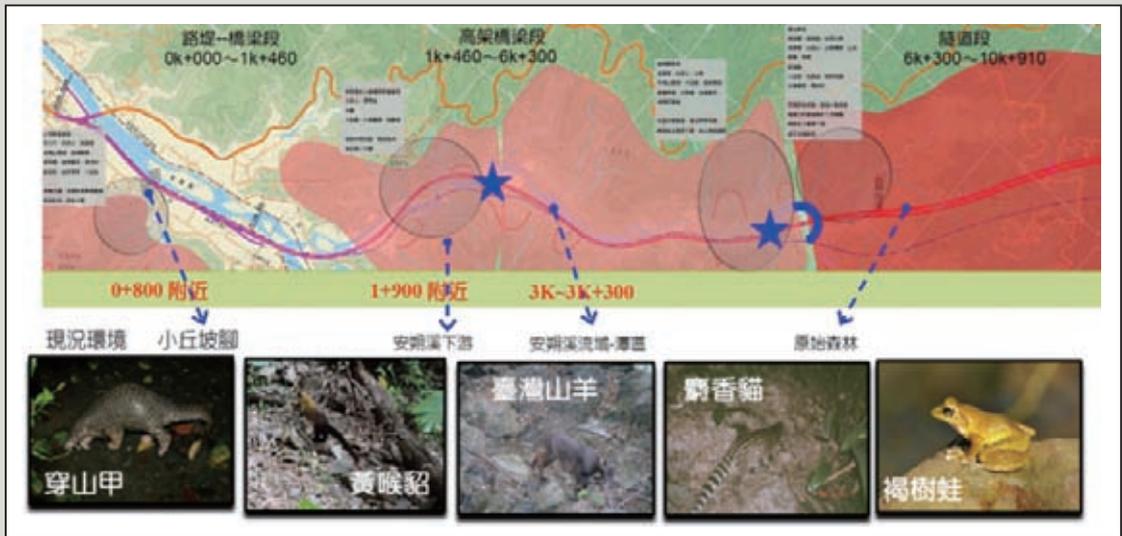


圖14 綠色環境動物調查

階段設置24小時紅外線偵測，確認楓港溪側生物覓食道路及敏感物種；後於設計圖之施工便道中，規範承商須設置便橋位置，以維持覓食路徑，如圖14。

(二) 隧道北口附近生態豐富，洞口上邊坡設置生態防護柵欄，避免營運階段動物誤入行車車道。隧道洞口及施工便道規劃迴避「大樹及稀有植物」；「潛勢小苗」施工前先行移植，保護原生苗木，落實保留在地物種多樣性。隧道洞口附近則加強植栽綠化，延伸道路綠帶範圍，提升綠覆率；溪流交匯或鄰水域等生態敏感區採施工便橋，降低生態衝擊。

(三) 水資源利用及節水部份，包含隧道施工期間採清汙水分流，減少汙水處理量，及清水放流自然水體再利用。

(四) 工程施作後，配合原區域生態屬性進行植被復原設計，以當地潛勢樹種及特色植栽作為復育主要選種之素材，施工完成面環境不利喬木生長時，則選擇僅噴植混合草籽或栽植耐陰灌木

方式綠化。

(五) 設計階段透過減少隧道長度與豎井深度、調整隧道縱坡、提高襯砌強度下減少襯砌厚度及剩餘土石方處理等措施，以達減碳減廢之效益。

六、隧道全生命週期

(一) 隧道長期穩定之考量、斷面設計納入維修補強淨空餘裕、排水設施與襯砌設計水壓、重點斷面(區段)的長期監測設施及導入全生命週期之營運維護檢測監測，詳如圖15所示。

(二) 設計階段考量營運階段監測，隧道混凝土襯砌面設計布置營運變形監測，並規定施工期間邊坡監測儀器於完工階段移交營運維管單位，以利營運維護管理。

(三) 豎井結構考量後續營運維護，於豎井一側設置樓梯，可供人員進行部份豎井襯砌面與管線巡檢及維護，另可利用豎井機房1樓樓版預留設備材料孔，

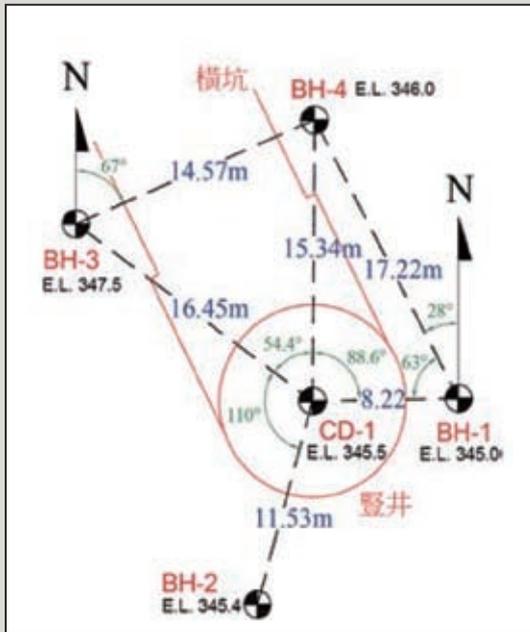


圖16 豎井鑽孔平面配置圖



圖17 岩心破碎帶照片

結果顯示破碎帶通過位置與湧水及抽坍發生位置吻合，如圖18。該地區地質受到拖曳褶皺、區域向斜構造及剪裂帶態等影響，破碎岩體孔隙有利於儲水及地下水流通，且附近有溪流存在，顯示本區應具有

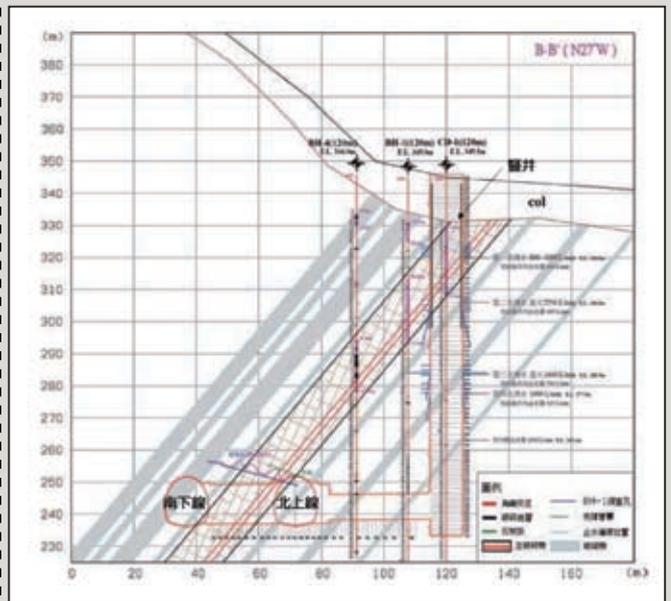


圖18 豎井與橫坑地質剖面圖

湧水潛能，而一旦隧道開挖挖破儲水層時可能會造成突發湧水，滲流水將裂隙間細粒料帶出，使岩盤鬆動岩體強度降低，將可能導致隧道抽坍情形。

另本案委託王泰典教授等研究(2017)，利用補充地質調查的4個鑽孔進行孔內攝影，獲得3400多條裂隙位置及位態，透過立體投影分析及統計分析，配合地表地質調查成果，歸納出5組主要裂隙及其空間分布情形，並建立水文地質模型提供地下水可能流通通路之位置、範圍及方向可作為緩解湧水工程對策之依據。

其具體解決豎井湧水之對策是藉由特徵化場址滲透特性研判湧水路徑，並於地表進行止水灌漿。取得湧水區段深度及方向，準確得進行深井降水，再由岩體破碎程度及滲透特性，研判湧水路徑及區域，於井內進行止水灌漿。(如圖19-圖20)

豎井開挖過程中共發生5次湧水事件，湧水量達600~2356公升/分，最大湧水量

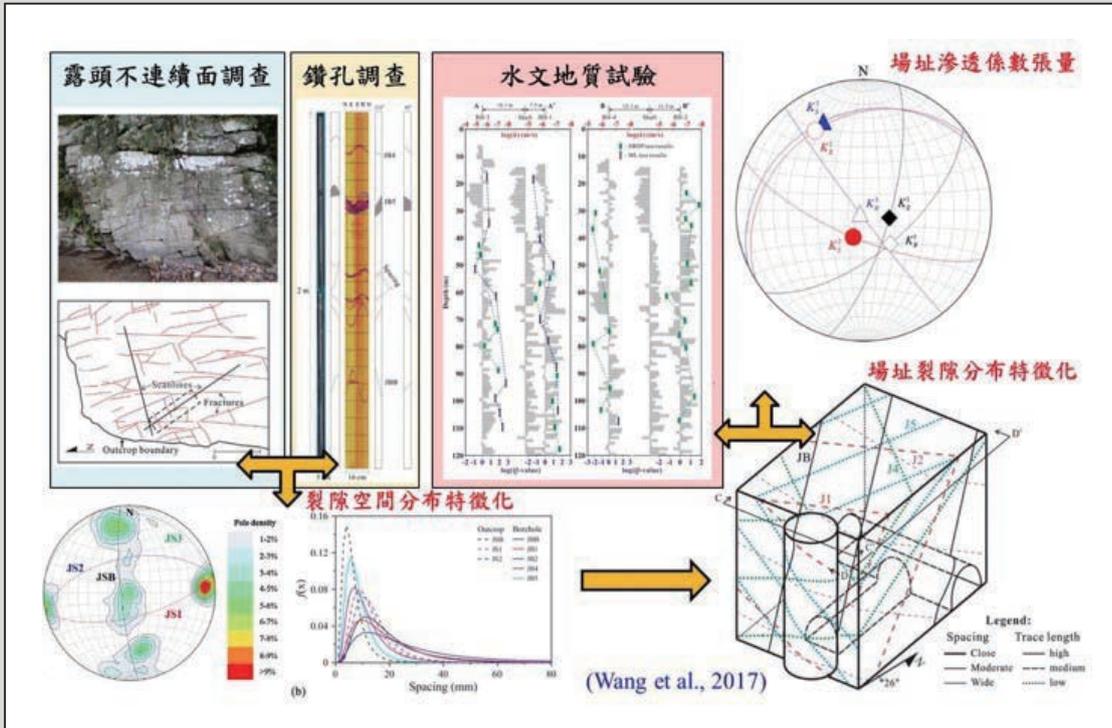


圖19 特徵化場址特性湧水路徑研判(王泰典,2017)

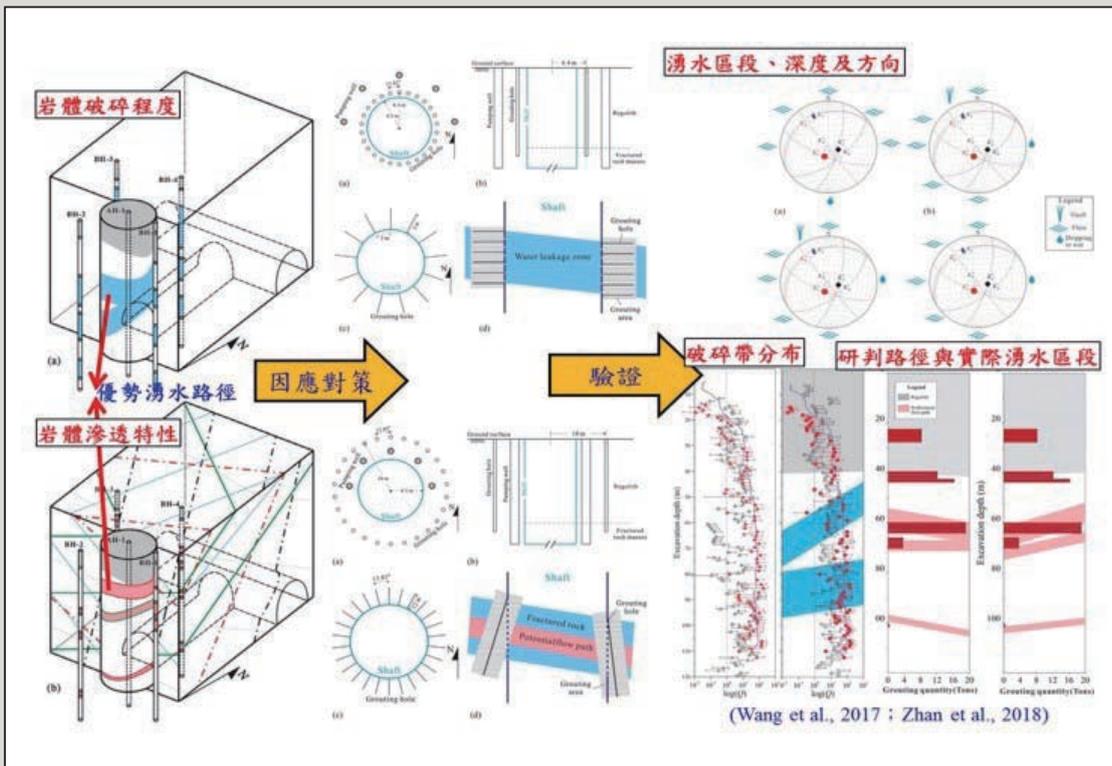


圖20 湧水路徑研判、對策研擬與驗證(王泰典,2017)



圖21 豎井止水灌漿

發生在開挖第34輪，處理方式為向下打設長6m@2.5之傘狀鑽孔並灌注聚胺脂樹脂(PU)，及向下打設12m@3.0m之傘狀管幕並灌注PU進行止水，如圖21，後續再設置5孔深井降水，使湧水逐漸趨緩後恢復開挖順利通過。

(二) 工程技術克服國內隧道湧水量第三高紀錄(27噸/分)

北口南下線(NS)開挖至里程7K+200.5(688輪)時，開挖面右側下方出現突發性大量湧水(圖22-23)，水量達27噸/分，導致



圖22 北口南下線里程7K+200.5(688輪)突發性大量湧水



6/7 NS687輪開挖面



6/8 NS688輪右側支保脚出水(5噸/分)



6/11 NS688輪右側支保脚較高位出水(27噸/分)



6/14 NS688輪右側支保脚較高位出水(27噸/分)



6/27 NS688輪右側支保脚較高位出水(24.1噸/分)



6/29 利用曼寧公式量測NS688輪出水量(23.1噸/分)

圖23 突發性大量湧水發生過程



圖27 施工階段三維數值分析檢核交叉段支撐與變位

交叉段因施工考量，拆除頂拱支保擴挖，開挖斷面大且應力集中，是本工程極具挑戰的環節，承包廠商為確保隧道之施工安全與穩定，於施工前先行就此區段模擬開挖與支撐進行三維數值分析(如圖27)，作為施工開挖順序安排與支撐檢核之重要依據，依三維數值分析結果，研擬弱帶地質改良、增加岩柱密度及提高噴凝土厚度等補強措施，同時佈設監測點密切注意圍岩與支撐之變位情況，在審密管控下順利完成此高難度作業。

二、工程碳管理及碳足跡盤查

(一) 碳足跡盤查

公路總局為順應世界潮流及政府節能減碳之政策目標，於101年初發展出「工程碳管理架構與機制」，係以工程生命週期之碳管理為目標，建立碳管理資料庫，可作為未來國內工程設計規劃減碳考量之依據，並針對施工期間進行減碳作為，展現整體工程減碳成效。本工程依土木、機電、建築等共分為5標，本文以本C2隧道標為例說明碳管理及碳足跡盤查之成果。

統計106年度1至12月碳足跡試算成果，以預拌混凝土、噴凝土、水泥、桁型鋼支保及竹節鋼筋為排放量之主要貢獻來源，材料使用碳排放量合計為55,599公噸二氧化碳當量，各材料排碳量分析如圖28。全工區碳排來源除材料使用外，上包含機具使用、運輸、用電等，106年度C2標工程施工碳排放量約為73,459公噸二氧化碳當量，如圖29。若以排碳量比例最高之材料使用依不同工程分區統計，係以主隧道(北上)及主隧道(南下)所佔比例最高，合計超過總工程91%，如圖30。

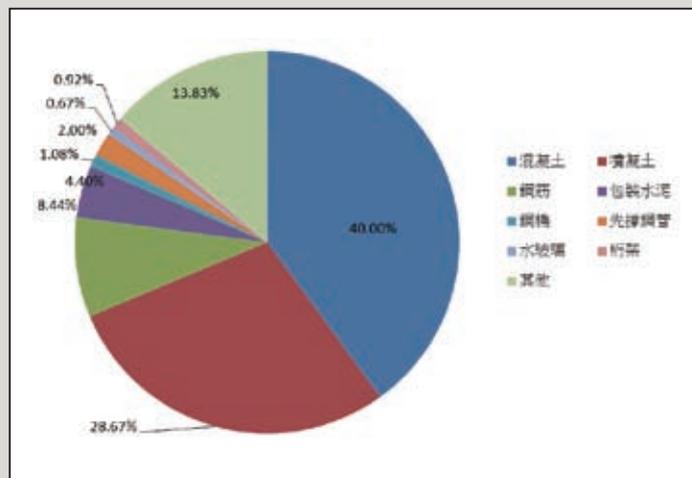


圖28 施工材料排碳量分析

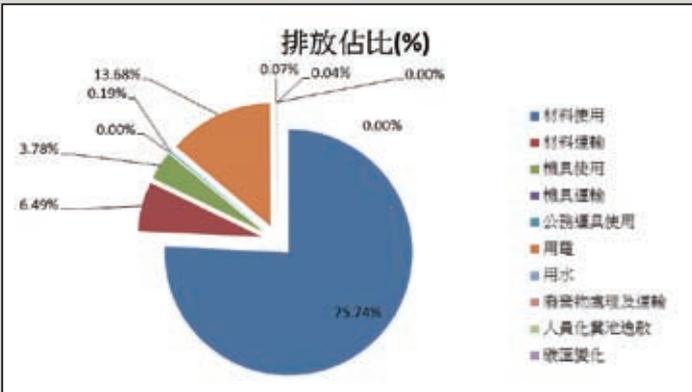


圖29 工程施工排碳量分析

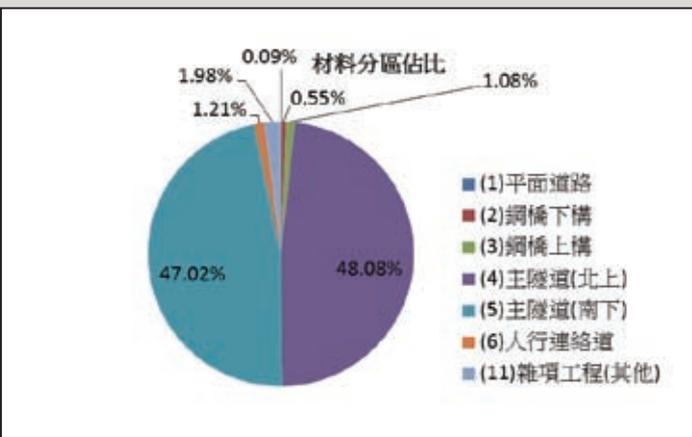


圖30 施工項目排碳量分析

(二) 工程減碳措施及效益

本標所使用之混凝土配比中，使用飛灰及爐石取代部分水泥用量，比例為爐石替代約25%，飛灰約10%，經統計可減少混凝土及噴凝土排碳量將近30%，在滿足設計強度前提下，儘可能選用具有水泥替代材料的混凝土，可提升工程減碳之效益。另工地採用專用預拌廠，減少混凝土運輸距離，減少運輸過程產生之排碳量，經計算可減少運輸碳排放量約90%。營運階段隧道內照明及交通標誌、號誌及緊急疏散指示牌面則均採用LED燈，係為綠能環保之有效具體作為。

此外，透過完善工程管理，如材料機具就地取材、妥善安排機具操作排程、機電設備使用具節能標章或可以電力取代燃油、減少水、電資源用量及妥善全能工班安排等，可進一步提升工程減碳效益。

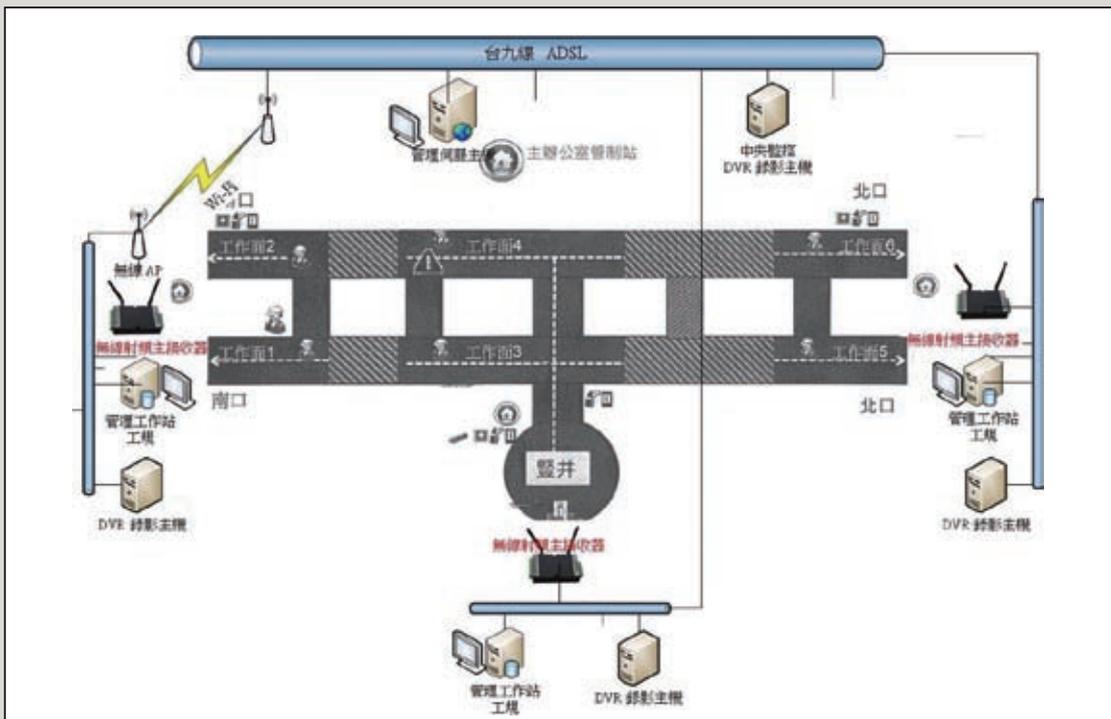


圖31 隧道內主動式人員車輛機具管理系統 (RFID)

三、主動式人車管理

為提高工區人員、車輛及機具進出之安全管控；隧道施工區內均佈設無線射頻(RFID)辨識系統，透過RFID的讀取器及資料傳送器(或中繼站)，將配帶感應晶片之人員、車輛及機具之動、靜態資料傳送至設置監控崗哨或工務所之PC監控程式內，進行全方位之安全監控，詳如圖31所示。

五、結語

台9線南迴公路為臺灣東部花東地區與南部高屏地區之主要通行運輸幹線，本計畫之推動不但可提供在地居民一條安全回家的道路，亦可平衡區域經濟及產業之發展。工程的開發為避免影響當地豐富之自然生態景觀，將綠能、防災、生態及永續工程之理念導入設計當中。透過路線方案之精進，減少工程開挖之剩餘土石方、配合民意首創將洞口機房置於隧道內，避免土地徵收問題，將空間作充分之利用。引

進世界先進之點排縱流式通風系統，並研擬緊急應變計畫，確保用路人之行車安全。設計階段設置24小時紅外線監測、隧道洞口設置生態防護柵欄等，保留在地物種多樣性，降低生態衝擊。國內首創將隧道開挖之剩餘土方應用於鄰近大武漁港之人工養灘，兼具生態及減碳之效益。以全生命週期之觀點，將營運階段之維護管理納入隧道設計當中，避免工程再度開發影響生態環境。透過工程碳足跡盤查、工程減碳之措施及妥善之工程管理，提升工程減碳效益。

本隧道工程穿越中央山脈，沿線施工穿越地質破碎帶及湧水帶等特殊地質，設計階段首創長距離水平鑽探及全線RIP調查，降低隧道施工風險，而於工程期間亦透過補充地質調查及相關輔助工法，將施工遭遇到之困難皆一一克服。在如此艱辛的地質環境下，工程師們群策群力刻苦耐勞的精神深獲中央肯定，全線貫通日由蔡總統親自主持貫通典禮(圖32)嘉勉工程團隊，足見本工程受到中央與地方高度的重視。



圖32 蔡總統親自主持貫通典禮

除工程技術亮眼的表現外，施工階段落實執行綠能、減碳、生態及友善環境與零工安管理的設計理念，除於106獲勞動部頒第十一屆公共工程金安獎外，於103年度獲交通部頒交通工程環境影響評估追蹤考核全國第一名並於103-105年內分別獲地方政府頒環保優良、貢獻獎，如圖33所示。

2. 台灣世曦工程顧問公司，「臺9線南迴公路拓寬改善後續計畫457k+000~472k+700(新樁號443k+000~454k+006)(安朔至草埔段)新闢四車道工程細部設計報告」，交通部公路總局(2012)。

3. 台灣世曦工程顧問公司，「臺9線南迴公路拓寬改善後續計畫安朔草埔段委託工程碳管理暨碳足跡盤查輔導及查證服務工作106年度年未進度報告」，交通部公路總局(2017)。

4. 交通部，「公路隧道設計規範」，(2003)。

5. 交通部，「公路隧道消防安全設備設置規範」，(2010)。

6. 林衍丞、蘇兆輝、周允文、賴明煌，「臺9線南迴公路安朔草埔段隧道豎井湧水及橫坑抽坍案例探討」，中華技術第168期，第168-183頁，(2015)。

7. 藍維恭、蘇文崎、林志權、周坤賢、陳正勳，「臺9線南迴公路安朔草埔段隧道工程特殊考量及施工挑戰」，中華技術第105期，第84-97頁，(2015)。

8. Tai-Tien Wang, Shang-Shu Zhan, Cheng-Hsun Chen, Wen-Chi Su, "Characterizing fracture to mitigate inrush of water into a shaft using hydrogeological approaches." Tunneling and Underground Space Technology, Vol.61, P.205 - 220, (2017)



圖33 本工程施工期間獲獎紀錄

參考文獻

1. 台灣世曦工程顧問公司，「臺9線南迴公路拓寬改善後續計畫457k+000-472k +700(新樁號443k+000~454k+006)(安朔至草埔段)新闢四車道工程委託設計(含測量及地質探查)地質鑽探工程報告」，交通部公路總局(2012)。

新烏山嶺引水隧道工程遭遇瓦斯處理工程探討

關鍵詞(Key Words)：引水隧道(divert water tunnel)、可燃性氣體(gas)、通風系統(ventilation system)

利德工程股份有限公司／副理／汪世輝 (Wang, Shih-Hui) ❶

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／協理／吳文隆 (Wu, Wen-Long) ❷

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／副理／周坤賢 (Chou, Kun-Hsien) ❸

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／工程師／黃威豪 (Huang, Wei-Hao) ❹

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／工程師／許志宇 (Hsu, Chih-Yu) ❺



摘要

烏山嶺引水隧道自通水啟用至今已超過80年，隧道結構已日漸劣化，為確保大嘉南地區有穩定水源，實有新建新烏山嶺引水隧道之必要。新烏山嶺引水隧道工程位於臺南市楠西區，曾文溪右岸曾文二號橋和曾文三號橋之間，亦即既設烏山嶺隧道東口堰下游側約80m處。

隧道全長3,422公尺，內徑為5.4m之馬蹄形隧道，隧道沿線由東至西分別通過鹽水坑頁岩、糖恩山砂岩、六重溪層及崁下寮層。經蒐集既設隧道施工期間於糖恩山砂岩地層中，有發生數次可燃性氣體滲出及氣爆意外事件，此外鄰近工程案例及鑽探調查成果及施工過程中皆發現，新烏山嶺引水隧道存在可燃性氣體湧出之風險。故本文將以此隧道為例，說明具可燃性氣體地層中隧道之地質調查、施工時之安全管理及因應對策，以提升施工安全，確保作業人員安全。



Discussion on Engineering Treatment Consideration for Encountering Gas in New Wu-shan-ling Divert Water Tunnel

Abstract

Wu-shan-ling tunnel has operated more than 80 years. The state of tunnel lining deteriorated could affect the original function. For maintaining the steady water supply in southern plain area, it is necessary to build New Wu-shan-ling divert water tunnel. The Wu-shan-ling tunnel is located in Nanxi District, Tainan City, between the No. 2 Zengwen Bridge and the No. 3 Zengwen Bridge on the right bank of Zengwen River, which is about 80m away from the east side of the Existing Wu-shan-ling Tunnel.

The total length of tunnel is 3,422 m and 5.4 m width. It will cross the Tangenshan Sandstone during the construction stage. In the same stratum, there were several gas explosion occurred in Wu-shan-ling tunnel. Therefore this project is probably at the risk of gas burst during the construction. This report will take this tunnel as an example to illustrate the geological survey, safety management and countermeasures of gas tunnel.

壹、前言

烏山嶺隧道為日本八田與一技師所帶領興建，其串聯曾文水庫與烏山頭水庫之重要且唯一的引水隧道，肩負大嘉南地區公共給水與工業之各類用水調度重責。因既設烏山嶺隧道自1930年通水啟用至今已超過80年，雖經數次維修補強，仍無法完全改善隧道結構品質日漸劣化，且無法長期停水進行全線補強加固下，隧道輸水能力漸降至40cms。為避免既設烏山嶺隧道發生突發性崩壞之斷水風險及恢復原有之56cms輸水能力，穩定提供大嘉南地區用水，經綜合評估確有興建本計畫新烏山嶺引水隧道之必要。

本引水隧道係採用56cms為設計輸水量，引水隧道全長約3,422m，內徑為5.4m之馬蹄形隧道，起點為東口攔河堰工程(含固定堰、副壩、排砂道、放水道、截水牆、導流牆、固床工)，位於曾文溪右岸曾文二號橋和曾文三號橋之間，亦即既設烏山嶺隧道東口堰下游側約80m處。經由取水口及引水隧道，終點西口出水口位於烏山頭水庫上游之姜仔寮附近，亦即既設烏山嶺隧道出水口西南方向約150m處，如圖1。

貳、地形、地質

本區域山脈及水系走向為東北-西南走向，本引水隧道連結東側的曾文溪集水區及西側的烏山頭水庫集水區，中間隧道穿越之山脊線為阿里山山脈南緣的分支，東側為西部麓山帶之山區地形，西側則為低矮的丘陵區，本區標高約在400~700m之間。

本區域地層走向多為東北-西南走向，從隧道東口至西口依序經過現代沖積層、鹽水坑頁岩、糖恩山砂岩、六重溪層及崁下寮層(圖2)。本區地層除形成山脊線的糖恩山砂岩屬巨厚的緻密砂岩外，其餘地層皆以頁岩或泥岩為主，如表1。

表1 本地區出露地層描述

地層名稱	岩性	年代
現代沖積層	未固結之砂、泥及礫	全新世
崁下寮層	泥岩偶夾砂質頁岩	更新世早期
六重溪層	泥質砂岩及粉砂質泥岩為主	上新世-更新世
鹽水坑頁岩	頁岩或砂質頁岩為主	上新世早期
糖恩山砂岩	細粒緻密砂岩與泥質砂岩	晚中新世



圖1 本計畫工址位置圖

本工址通過之地質構造由東向西依序分別為六龜背斜、崙後斷層及區域性小褶皺，構造走向為東北-西南走向至南北走向。本區構造以崙後斷層為界線，東側為波長較長之六龜背斜，其褶曲程度較小，西側為一連續且波長較短之褶皺，該區域地層變化甚大，且褶皺軸部

有機會發育成局部斷層破碎帶。崙後斷層為一向東傾斜的逆衝斷層，於經濟部中央地質調查所公告資料中歸類為非活動斷層，但本斷層往北可延伸至梅山-觸口斷層構造線(第一類活動斷層)，仍須特別注意其未來錯動的可能性，地質剖面如圖3所示。

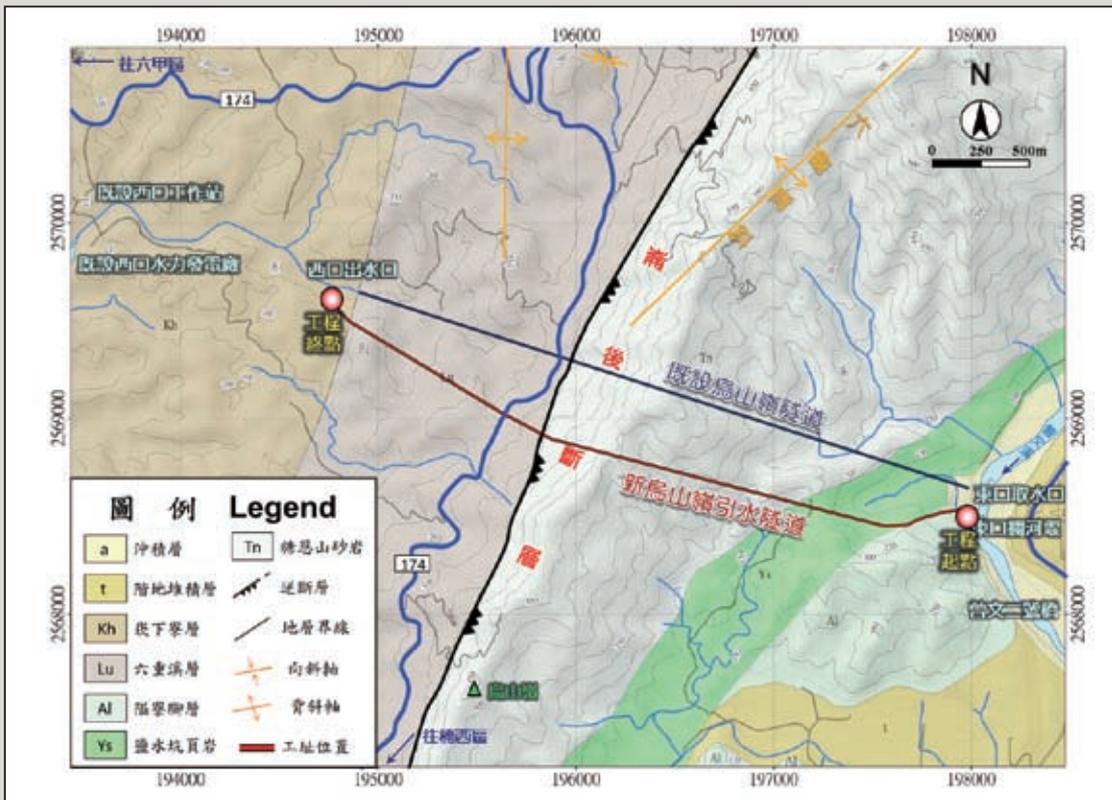


圖2 本工址區域地質圖



圖3 地質剖面示意圖

參、隧道遭遇有害氣體風險評估

臺灣含油氣層分布於中央山脈西側及東部海岸山脈之第三紀地層中，但產油及產氣可能性較大的構造主要分布於西部第三紀沉積岩中，如圖4，本計畫區位於中到高潛勢區，於日據時代開鑿之烏山嶺引水隧道，曾發生百人以上之多次隧道瓦斯爆炸事件。本工程遭遇之油氣尚不具有開採價值，惟其局部區域之突然噴出或是持續性的氣體逸出，對於隧道工程之施工，具有致命性的高風險。

另依據臺灣中油公司在本區域油氣探勘的結果，本區域下方約5~10公里範圍，存在一大型背斜構造，故油氣、瓦斯之溢出，應屬必然發生之現象。

由於有害氣體蘊藏之位置、儲存量等與隧道沿線地質弱帶間之相對關係，本計畫嘗試建立模式或以數值分析評估。依據文獻資料蒐集、鄰近工程案例、區域地質判釋、地表地質調查及鑽孔調查等方式予以評估有害氣體之潛能。

一、蒐集臺灣中油公司探查及生產紀錄發現，鄰近地質構造如牛頭山背斜及竹頭崎背斜皆有產氣及產油之紀錄，其代表性地層包含本計畫通過之六重溪層及糖恩山砂岩層。

二、既有烏山嶺隧道開挖地質紀錄顯示，隧道於1922~1929年施工期間曾遭遇多次災害事件，其中以糖恩山砂岩層發生瓦斯噴出及瓦斯爆發次數最頻繁，局部區段則有石油滲出或湧出事件(如圖5)所示。

三、根據歷年規劃設計階段鑽探調查顯示，於糖恩山砂岩段測得之最高甲烷濃度為3000ppm。

四、既有烏山嶺隧道歷次安全檢查中，仍有發現石油及瓦斯氣體持續滲出情形。

上述資料顯示本計畫範圍位於可能蘊藏可燃性氣體的地層當中，也預期施工當中將會遭遇到有害氣體等困難地質。故考量所在地層過去發生過氣爆之紀錄、通過地質構造種類、設計階段鑽探試驗紀錄及成果等，綜合評估隧道

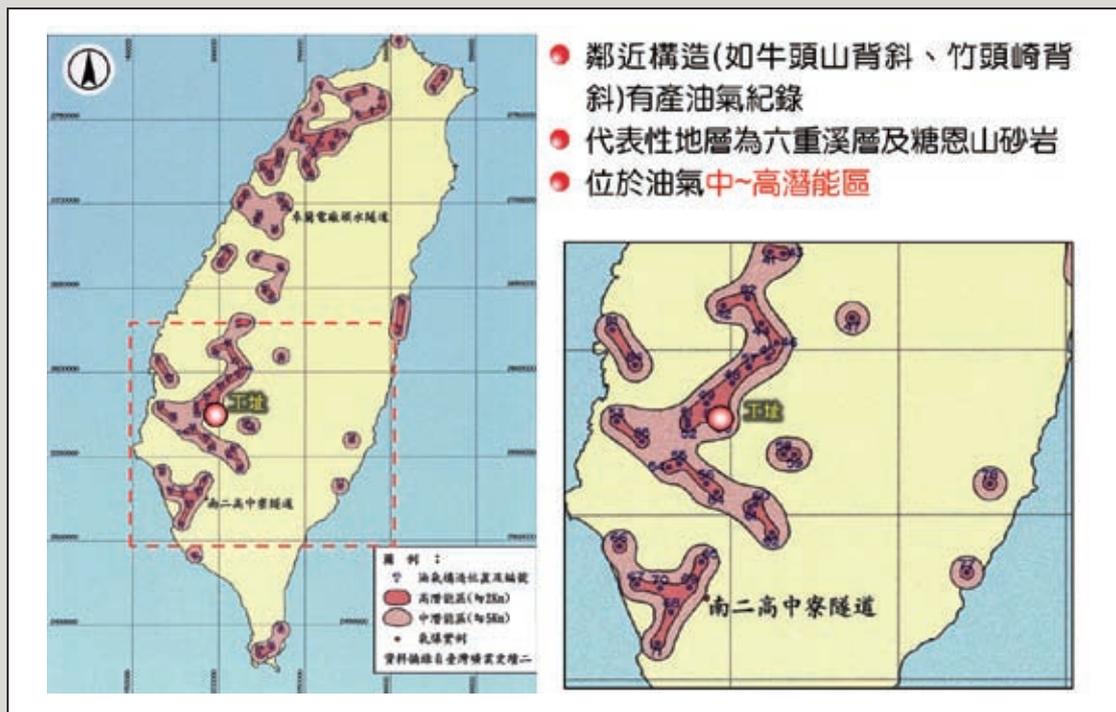


圖4 臺灣油氣層分布情形(修改自公共工程委員會，2003)

沿線遭遇有害氣體之風險，評估成果如圖6，除全線皆有發生風險外，其中1k+170~1k+260及

1k+870~2k+350更是高風險區域。



隧道掘鑿作業



東口隧道掘鑿作業

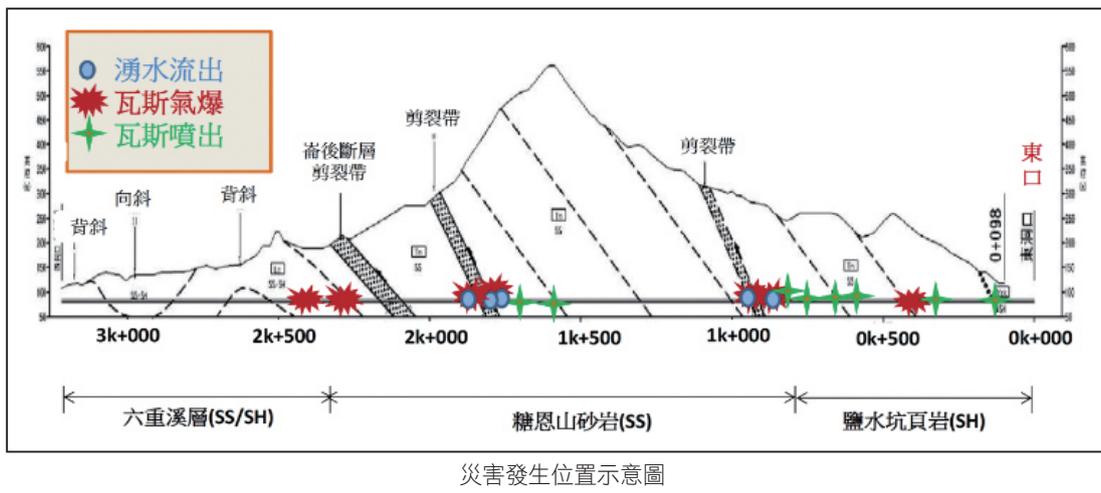


圖5 既設烏山嶺隧道施工照片及災害位置示意圖(整理自農田水利會聯合會)

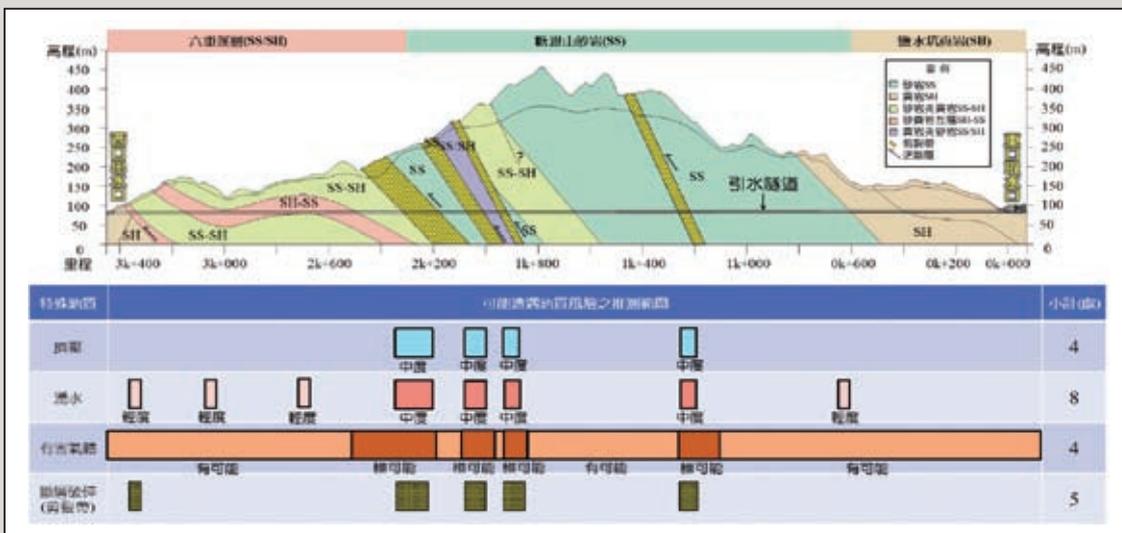


圖6 本工程可能遭遇特殊地質風險評估

肆、瓦斯氣體調查

為調查評估通過六重溪層背斜構造、崙後斷層破碎帶及糖恩山砂岩等高出氣潛能地層，本計畫利用鑽探孔井進行井內現地及室內試驗，以調查甲烷氣體蘊藏濃度與可能出氣量。試驗項目包括井內電測、井內音射式影像掃描、鑽井回水可燃性偵測、鑽井過程氣體濃

度偵測、井內氣體取樣與成分分析。配合可燃性氣體濃度偵測及取樣分析，以建立可燃性氣體濃度、出氣量與岩層位態、破碎程度之關聯性，推估可能地質模型及潛在出氣層資料。井內電測及孔內攝影現場施作照片如圖7所示，糖恩山砂岩東側段隧道開挖甲烷氣體可能逸出濃度推估如圖8所示。



圖7 井內電測及孔內攝影現場施作照片

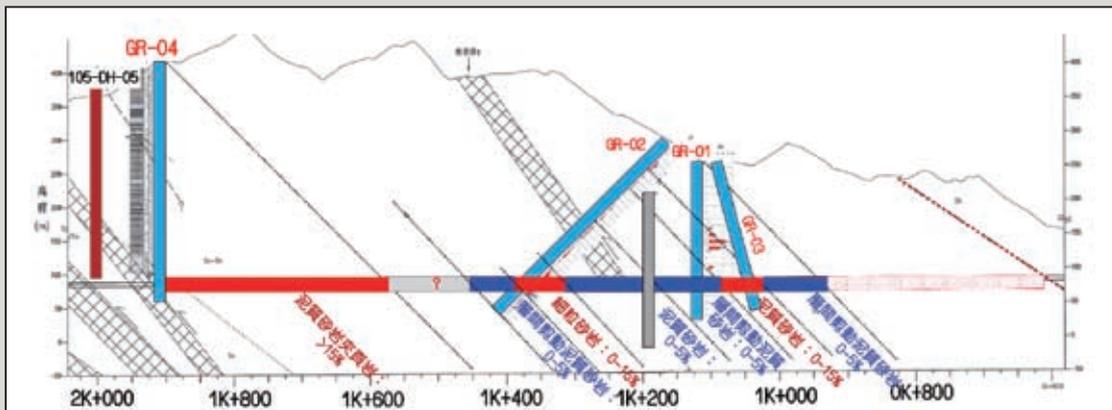


圖8 糖恩山砂岩東側段隧道開挖甲烷氣體可能逸出濃度推估圖

伍、隧道施工之可燃性氣體處理案例

本計畫蒐集國內外隧道於施工階段遭遇可燃性氣體之相關案例，參考學習過去工程克服困難地質之設計考量、施工工法、管理對策等經驗，根據本工程之地質、施工等特性，研擬隧道施工遭遇可燃性氣體之處理對策。茲將蒐集之案例依工程概述、地質、可燃性氣體、設計及施工等列表說明。

國內山岳隧道曾遭遇可燃性氣體主要案例包括：士林電廠頭水隧道、曾文水庫越引水隧道、萬松電廠引水隧道、國道三號中寮隧道等，其中士林電廠頭水隧道及曾文越引水隧道於施工階段時，因火源管理疏失而有發生氣爆之災害，相關資料彙整如表2所示。綜合過往案例主要處理係採用加強通風、加強火源管理、加強人員管制、增設通風豎井以及止氣灌漿等方式克服可燃性氣體問題。

陸、防範有害氣體災害之措施與對策

根據1920年代既有烏山嶺隧道之施工經驗及各階段調查成果，本工程隧道開挖過程中，將極有可能遭遇可燃性氣體之危害，於設計階段中則必須擬定防範可燃性氣體災害之措施與對策。參考過去隧道施工遭遇可燃性氣體之處理對策，其主要原則可歸納為「加強通風、勤作檢測、縮短輪進、降低爆破、增強支撐、儘早保護」，當上述措施仍無法有效降低可燃性氣體濃度時，則採取輔助工法避免發生危害進一步增加。除上述之對策及工法，施工中更重要的是落實安全管制措施，確實人員及火源管制，遭遇到可燃性氣體時之人員避難及管理措施等，方能確保工程順利進行及保障施工人員生命財產安全。本工程可燃性氣體處理原則如圖9所示，詳細說明如下：

一、加強通風：依據國內外相關經驗，加強通風為有害氣體處理最有效的對策。充分之

表2 國內隧道施工遭遇可燃性氣體之案例整理

編號	工程概況	地質	瓦斯	設計	施工	處理方式
1	士林電廠頭水隧道，隧道內徑3.5m、全長5524m	厚砂岩、砂頁岩互層為主，士林背斜	鑽炸法施工至里程1k+072可燃性氣體，因不明火源而氣爆。	水平探查孔偵測氣體濃度。設置水氣分離設備。	地表鑽設直徑0.65m通風豎井。設置偵測警示系統。前進面灌漿。止氣灌漿。火源、人員管制、施工機具設備防爆。	通風豎井及加強通風。 止氣灌漿降低高濃度可燃性氣體。
2	曾文越域引水隧道，內徑2.65m，隧道全長9628m	砂岩夾薄層頁岩	里程13k+300因可燃性氣於頂拱蓄積且啟動施工機具而發生氣爆	加強通風 安全管理	強化安全管理、固定式氣體偵測器，增加通風量至1800m ³ /min。防爆型照明設備，施工機具減焰裝置	氣體探查、氣體濃度監測、安全管理、加強通風、動火管制
3	松林頭水隧道橫坑	廬山層板岩	1K+998開挖面右下方可燃性氣體自開挖面滲出，濃度超過1.75%	加強通風 止氣灌漿 適度增加噴凝土厚度	局部改採機械開挖封面噴凝土降低滲出量 每6m施作12m之探查孔 前進面止氣灌漿 已開挖段止氣灌漿	由加強通風及止氣灌漿克服相關困難
4	國道三號中寮隧道	烏山層、砂頁岩互層蓋子寮層、頁岩層	頂拱抽心高達9m，並伴有甲烷、油氣及疑似黑色原油	預先排除可燃性氣體，氣體偵測器 火源管理管制 進出風速規定： 1.0m/sec以上 (遭遇瓦斯時)	緊急處理對策：噴凝土封面、打設排水孔導水、頂拱打設6m長鋼軌樁。 隧道內加強通風，設置固定式及攜帶式有害氣體偵測器，每天偵測2次。	隧道內加強通風，設置固定式及攜帶式有害氣體偵測器

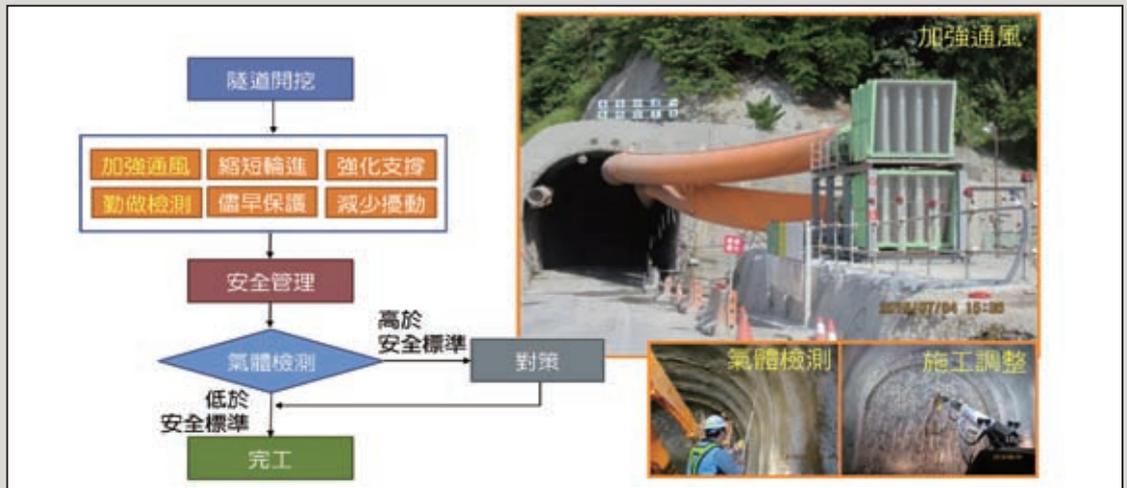


圖9 本工程可燃性氣體處理原則

風量及風速迅速將可燃性氣體濃度稀釋至安全範圍內，並排出隧道外，可確保隧道內施工人員及機具設備之安全。本工程隧道總長度約3,422m，開挖係由東西兩端向內鑽掘，各端最大施工長度小於2,000m，採用東西洞口兩端各設獨立通風系統，各自以風機搭配風管，送入新鮮空氣及排出粉塵及有害氣體。通風量需考量斷面面積、人員之呼吸量及可能含有有害氣體等需求，依據本工程環境影響說明書之規範要求，於有害氣體濃度大於2500ppm(0.25%或LEL=5%)區段，總送氣通風量需達2,750m³/min(含)以上。通風設備必須規劃為獨立電路，當遭遇可燃性氣體湧出時，切斷其他電器設備之電源及疏散人員之後，必須維持通風設備持續加強通風，至氣體濃度降至安全範圍內方可恢復一般通風。通風機需24小時專人負責正常運轉，一旦通風機停止運轉，隧道內就斷電撤人，直到恢復正常後，待勞

安人員檢查，可燃性氣體不超標情況下，方可進洞施工。

二、動作檢測：隧道內約間隔250m設置固定式有害氣體偵測器，拉線集中至隧道外控制室自動紀錄監控並連線自動警示系統，當有害氣體偵測濃度達警戒值(5000ppm、0.5%或LEL=10%)時，自動警示系統能自動發出警示聲光，警示各工作面及工地辦公室採取人員疏散與切斷電源等必要之措施，安裝位置配置如圖10。另外，須指派專人執行有害氣體檢測作業，於鑽孔、爆破前、爆破後進行氣體濃度之量測，特別針對開挖面、避車道、迴車洞及可能蓄積氣體之位置加強檢測。本工程採用之固定

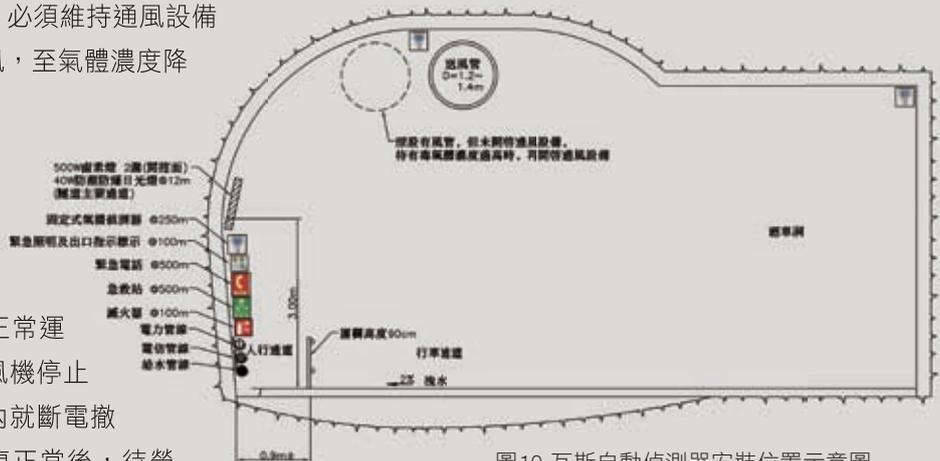


圖10 瓦斯自動偵測器安裝位置示意圖

式、攜帶式氣體偵測器及量測照片如圖 11 所示。有害氣體量測紀錄表如圖 12 所示。

三、縮短輪進：根據可燃性氣體湧出量估算成果，如圖 13 可知，每日開挖輪進長短將可能影響氣體湧出之量體，開挖輪進越長氣體滲出量將越多。因此，參考過去施工案例及本工程之地質狀況，建議當前進探查結果預期前方將可能遭遇可燃性氣體時(氣體濃度小於 2500ppm、0.25% 或 LEL=5%)，可評估每輪開挖長度控制在 1m 以內，保持每次開挖體積小，氣體逸出量不大，而開挖後能夠快速架設支撐系統。

四、降低爆破：施工時嚴格按施工計畫中各輪進開挖所需要之鑽孔深度、鑽孔間距及炸

藥用量施做，不得為增加輪進長度而增加裝藥量，無視安全的隱患。開挖面開炸的同時，亦可能造成已開挖區段岩體之擾動，而形成一逸氣通道，增加隧道施工之風險。此外，因爆破會產生燃燒及震動，因此本工程應儘可能採用煤礦准用低速炸藥、電雷管及防爆型照明等設備。

五、增強支撐：隧道開挖後，周圍岩體塑性區孔隙率隨著隧道變形增加，而導致可燃性氣體湧出量增加，詳圖 13，故加強支撐系統抑制隧道大量變形，以減少岩體塑性區範圍及可燃性氣體湧出量體。故於可能遭遇可燃性氣體危害之區段，開挖前視岩體狀況打設先撐鋼管或管幕鋼管，穩定開挖面岩體及抑制隧道過度變形。



固定式有害氣體偵測器

攜帶式氣體偵測器

以塑膠軟體吸取隧道頂部氣體進行量測

圖 11 本工程採用之固定式、攜帶式氣體偵測器及量測照片

利德工程股份有限公司
作業場所「危險」及「有害」氣體紀錄

施工單位：利德工程股份有限公司
工程名稱：新馬山引水隧道工程
檢測地點：隧道東口
檢測方法：四用氣體偵測器
檢查日期：105.7.27

項次	檢查項目	容許最高濃度	偵測時間	測試結果	不合格改善措施
檢測紀錄	一氧化碳	35PPM	07:10	0	
	甲烷	15000PPM	07:10	0	
	硫化氫	10PPM	07:10	0	
	氧氣	濃度 19% 以上	07:10	20.7	
檢測紀錄	一氧化碳	35PPM	13:20	0	
	甲烷	15000PPM	13:20	0	
	硫化氫	10PPM	13:20	0	
	氧氣	濃度 19% 以上	13:20	20.7	
檢測紀錄	一氧化碳	35PPM			
	甲烷	15000PPM			
	硫化氫	10PPM			
	氧氣	濃度 19% 以上			

說明：

1. 一氧化碳在空氣中易與人體血色素相結合，使體內組織氣之供應不足，形成窒息狀態。
2. 二氧化碳及甲烷氣體本身無味，但易使空氣中氧氣相對減少，造成缺氧環境。
3. 硫化氫屬窒息氣體，能導致呼吸停止，高濃度時刺激呼吸道，易生急性肺炎。
4. 各地工單位，對危險及有害氣體作業場所應於作業前實施檢測。
5. 容許最高含量或濃度之換算法：PPM=百分比*10⁴。
6. 於空氣中之甲烷濃度無法持續維持在 0.25% 以下，所以儀器均應採取防爆措施，若達 1.25%，隧道內除安全工作人員外，爆炸物及動力設備應嚴禁使用，非絕對安全之電力設備均應確實斷電，甲烷濃度若超過 2%，所有人員均應停止作業並撤離。
7. 測試結果超過容許最高濃度，需於「不合格改善措施」欄內說明改善方法並即辦理改善完成。

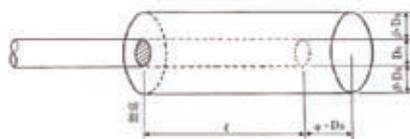
工地主任：[簽名] 安全衛生人員：[簽名] 檢查人員：[簽名]

圖 12 本工程有害氣體量測紀錄表

一、由影響範圍內的土體積推算

新烏山嶺案瓦斯定量湧出計算

隧道直徑 D_s =	6 m
每日進度 X =	3 m
開挖面前方影響參數 α =	1.5
隧道徑向影響參數 β =	1
影響範圍內的土體體積 V =	3,054 m ³
孔隙率 ϵ =	20 %
覆土深度 H =	250 m
土體每m ³ 所含瓦斯量 q =	5.2 m ³ /m ³
每日瓦斯湧出量 V_d =	15,879 m ³
每分鐘瓦斯湧出量=	11 m ³ /min
正常通風量	1,200 m ³ /min
加強通風量	2,750 m ³ /min
正常通風瓦斯濃度=	0.92%
加強通風瓦斯濃度=	0.40%



$$V = \pi \times \left(\frac{D_s + 2 \cdot \beta \cdot D_s}{2} \right)^2 \times (X + \alpha \cdot D_s)$$

$$q = \frac{\epsilon}{100} \times (1 + 0.1H)$$

二、由水溶性瓦斯之溶解度推算

預估湧水量 Q_w =	10 m ³ /min
某水溫下之瓦斯溶解度 α =	0.028
水壓 P =	25 kg/cm ²
瓦斯湧出量 Q =	7.28 m ³ /min
正常通風量	1,200 m ³ /min
加強通風量	2,750 m ³ /min
正常通風瓦斯濃度=	0.61%
加強通風瓦斯濃度=	0.26%

表 2-2 不同溫度下之瓦斯溶解度

溫度(°C)	溶解度	溫度(°C)	溶解度
10	0.042	38	0.029
14	0.038	40	0.024
18	0.034	48	0.022
22	0.032	50	0.021
26	0.030	60	0.020
30	0.028	70	0.018

$$Q = Q_w \times \alpha \times (1 + P)$$

圖13 本工程輪進與瓦斯湧出量概估

六、儘早保護：於每一輪開挖完成後應立即施做噴凝土，封閉周圍裸露岩體，避免岩體風化、墜落及變形，必要時應施作封面噴凝土。裸露岩體在經過噴凝土覆蓋後，亦可阻隔部份氣體逸出通道，減少氣體湧出之風險。此外，本工程除洞口段、擴挖段或地質破碎區段打設岩栓外，一般段之開挖支撐儘可能減少岩栓之使用，避免增加逸氣通道，在隧道支撐能達到功能性及安全性的需求下，應儘量減少岩層中可燃性氣體滲出之途徑。

七、輔助工法：當現場逸出之有害氣體持續過量時，可視狀況需要採氣密性噴凝土、輔助風機、地盤止氣灌漿、噴佈式阻氣層等輔助工法，抑制有害氣體之湧出。根據地

質調查成果，針對可能有較高出氣潛能之位置設置洩氣井，減緩隧道開挖遭遇可燃性氣體湧出風險。

柒、可燃性氣體隧道安全管理

可燃性氣體隧道之安全管理包括火源管制、人員管制、氣體濃度偵測及警示及應變措施等，當遭遇可燃性氣體時，各項說明如表3所示。為確保作業人員安全，應對作業環境進行定期監控，依據量測之氣體濃度所應有之管理作為及因應對策如表4，氣體量測位置及頻率如圖14。

表3 本工程可燃性氣體隧道安全管理措施

項目	管理措施
火源管制	<ul style="list-style-type: none"> ● 工區內嚴禁吸煙，隧道口準備儲物箱供進出人員存放香菸及打火機。 ● 禁止使用火焰切割及電焊，如有需要須全程量測氣體濃度。 ● 施工應避免火花產生，鑽孔應採用濕鑽。 ● 工作人員應定時以雙手碰觸開挖岩面消除靜電。
人員管制	<ul style="list-style-type: none"> ● 施工計畫應制定防爆任務編組，正確執行安全標準、事故處理及日常教育訓練工作。 ● 隧道洞口設置管制哨及警示標誌，進出人員配合RFID嚴格管制人員作業情形。 ● 工區應配置足夠之空氣呼吸器，並教育訓練配戴方式，供緊急使用。
氣體濃度偵測及警示	<ul style="list-style-type: none"> ● 每250m設置固定式氣體偵測器，含自動記讀、警報及自動斷電裝置。 ● 專人配戴攜帶型偵測器探測頂端凹處、鑽探孔及開挖面頂端等易蓄積氣體位置，每日量測2~3次。 ● 量測時應為工班換班後、開炸鑽孔中及開炸前、開炸通風後出渣前、探查孔鑽孔等。 ● 於有氣體逸出位置且可能發生危害之位置，裝設自動警報裝置，快速掌握氣體濃度變化及即時進行避難或切斷電源等因應措施。
應變措施	<ul style="list-style-type: none"> ● 確立聯絡、救援系統，備妥救援設備用具，平時編組訓練。

註：工作環境指距開挖面50cm處、開挖面頂拱及起拱線位置之氣體濃度

表4 工作環境人員管制作業規定

甲烷濃度			警報基準	瓦斯偵測	火源管制			對策 (換氣、抽氣)
體積比	LEL值	PPM			人員	動火	動力	
<0.25%	<5%	<2500	正常作業	攜帶式偵測 固定式偵測 *地質師 *監工 *工班	正常進出 *簽名 *翻牌 *RFID	*禁止吸菸 *禁帶打火機	*防爆型照明 *防爆型通訊 *防爆型開關	一般操作
0.25%(含) ~0.50%	5%(含) - 10%	2500(含) ~5000	注意基準 (停炸基準)	攜帶式偵測 固定式偵測 *地質師 *監工 *工班 *檢測專員	有條件進出 *無卡進入 *絕緣衣 *防靜電衣	*禁帶手機 (鬧鐘、視聽模式除外) *禁止電焊	*必要車輛， 以停駐坑外 為原則 *符合車裝設 滅焰器	局部加強通風 回風速0.5M/S
0.50%(含) ~1.00%	10%(含)- 20%	5000(含) ~10000	警戒基準 (停炸基準)	攜帶式偵測 固定式偵測 *地質師 *監工 *工班 *檢測專員	*無卡進入 *絕緣衣 *防靜電衣	*禁止爆破	*引擎啟動前 用攜帶型瓦斯 偵測	
1.00%(含) ~1.50%	20%(含)- 30%	10000(含) ~15000	避難基準 (停工基準)	固定式偵測 *檢測專員 (攜帶式偵測)	工班退避 禁止進出	*切斷電源	*擱置機具， 步行退避	全面加強通風 回風速1.0M/S
≥1.50%	≥30%	≥15000	禁止進入 (斷電基準)	固定式偵測	禁止進出		*開回停車場， 拔出鑰匙	洞外抽排 (沒氣孔)

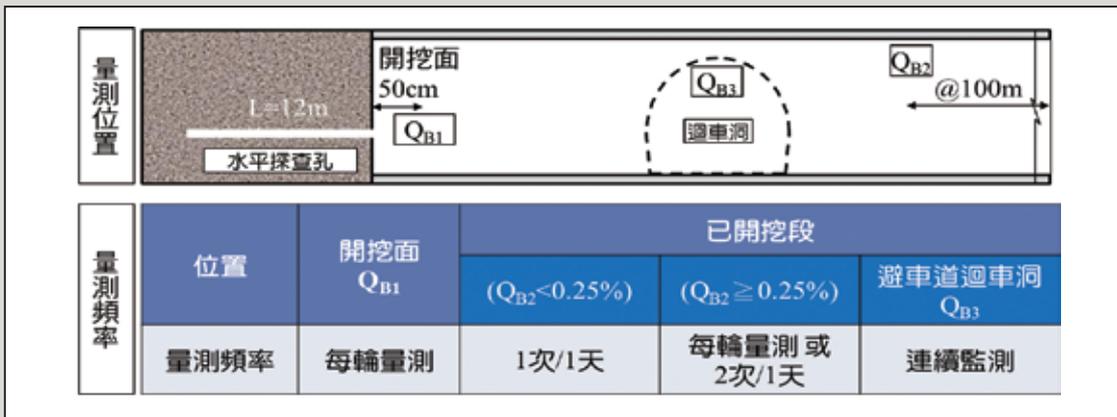


圖14 氣體量測位置及頻率示意圖

捌、本工程可燃性氣體處理輔助工法

在可燃性氣體濃度低於2500ppm(0.25%或LEL=5%)區段施工時，應確實落實前述之「加強通風、勤作檢測、縮短輪進、降低爆破、增強支撐、儘早保護」原則，並嚴格執行各項安全管制措施，參考過去施工案例，應可克服氣體逸出之問題。惟仍不排除會遭遇氣體濃度大於2500ppm(0.25%或LEL=5%)之情形發生，而後續通風及採取輔助工法之作業流程，開挖面遭遇可燃性氣體處理流程如圖15所示。已開挖段遭遇可燃性氣體處理流程如圖16所示。本工程隧道遭遇可燃性氣體處理防治工法比較表如表5所示。以下將針對加強通風後仍無法有效降低可燃性氣體濃度時，可採取之輔助工法逐一

說明。

開挖面氣體持續逸出時，必要時將採前進面止氣灌漿處理；已開挖面量測到氣體濃度超標時，除加強通風外，透過密集的量測可燃性氣體源，尋找確認可燃性氣體路徑及原因後，如因空間限制所造成之氣體蓄積可採行輔助風機等措施；如原因為已開挖段之氣體逸出，可採行預防性阻氣工法，如氣密性噴凝土、已開挖段止氣灌漿或噴佈式阻氣層等作為。相關處理措施為一配套，施工廠商因應現場情況，選用可行的方法，經工程司同意後施作。氣體濃度管制標準及相對應之處理對策如表6所示。本工程施工採用之洩氣井示意圖如圖17所示，各開挖輪進所量測之瓦斯氣體濃度如圖18所示。

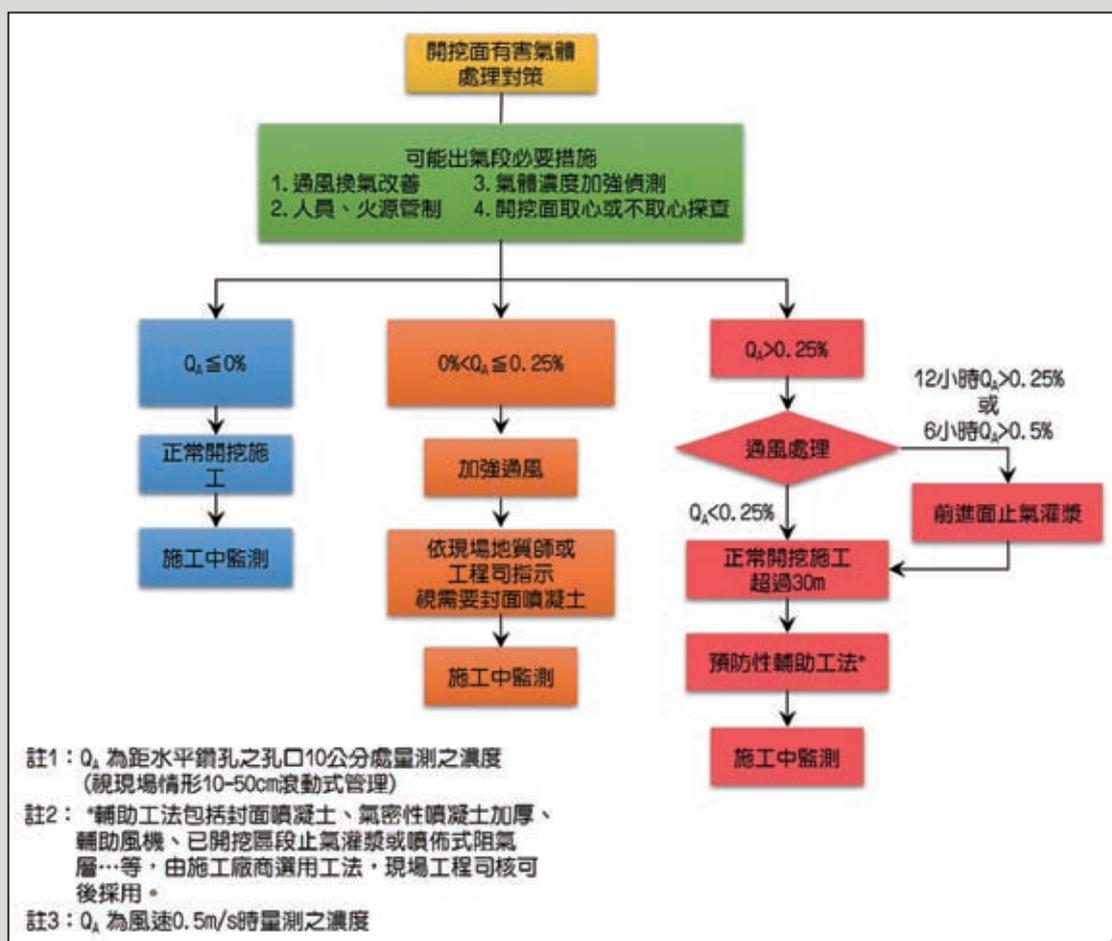


圖15 開挖面遭遇可燃性氣體處理流程圖

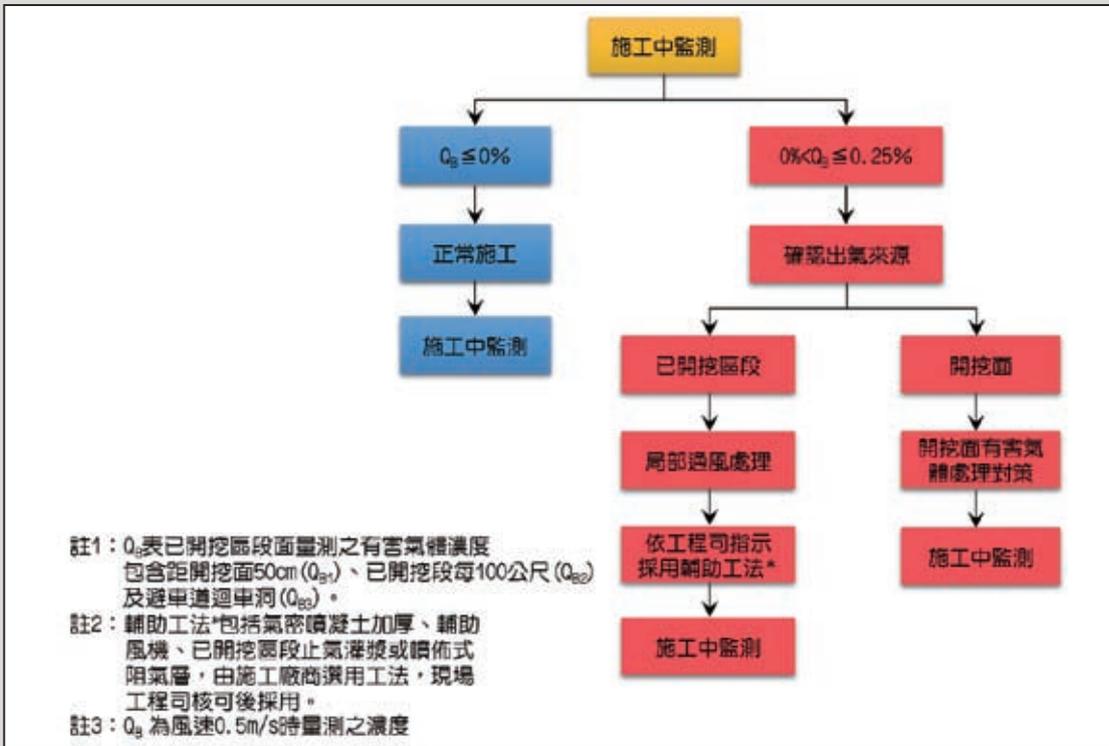


圖16 已開挖段遭遇可燃性氣體處理流程圖

表5 本工程隧道遭遇可燃性氣體處理防治工法比較表

防治工法	必要性 作為	輔助 工法	說明	限制條件	費用	影響 隧道 工期	初步評 估採用	
基本工法	隧道通風	✓	充分之隧道通風，遭遇可燃性氣體湧出時，開挖面1m/sec以上風速。必要時於避車彎配合輔助風機使用		中	無	已納入	
	安全管理措施	✓	人員進出管制，配合RFID系統管理動火源管理		低	無	已納入	
	瓦斯氣體偵測器	✓	每250m設置固定式氣體偵測器；搭配移動式氣體偵測器，量測以隧道上方、避車彎及左右起拱線位置		低	無	已納入	
	減少岩栓使用	✓	減少可燃性氣體逸出之途徑		低	無	已納入	
	安全爆材及設備		✓	煤礦准用炸藥及電雷管 防爆型照明	煤礦准用炸藥 國內用量少， 採購不易	中	無	防爆 照明
輔助工法	阻氣工法	氣密性噴凝土	✓	噴凝土添加劑，提升緻密性。	須試驗驗證成果	中	無	建議 施作
		止氣灌漿	✓	前進面止氣灌漿 已開挖面止氣灌漿 已有契約單價及規範	局部影響主隧道 施工，成效 較不易掌握	高	中	必要時
		噴佈式阻氣層	✓	採噴佈式阻氣層，必需全週噴佈， 噴佈範圍基本長度約10m	開挖面需乾燥	高	中	必要時
	高性能地層洩氣井		✓	以鑽孔及擴孔方式，增設垂直通風 管道	用地取得協商	高	低	必要時
	輔助風機或局部灑水		✓	改善局部區段之氣體積存		中	無	必要時

表6 遭遇可燃性氣體處理對策表

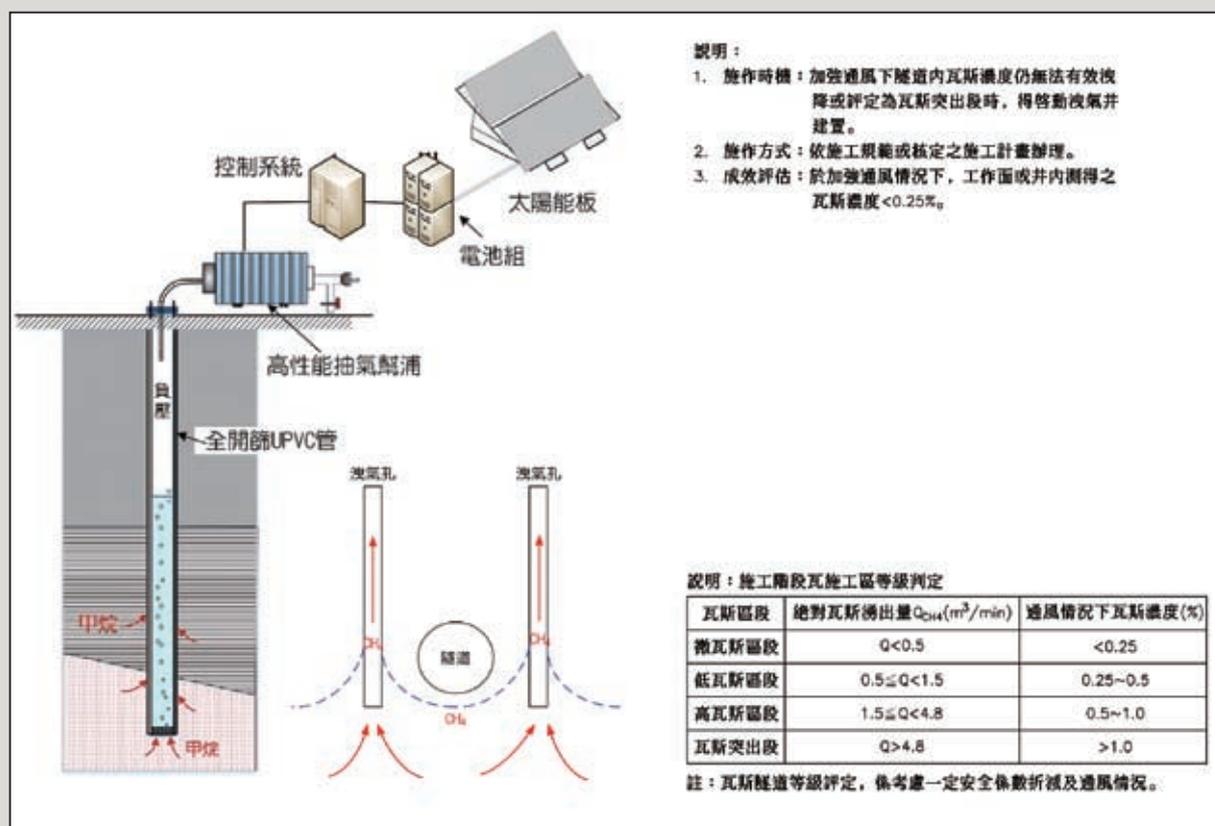
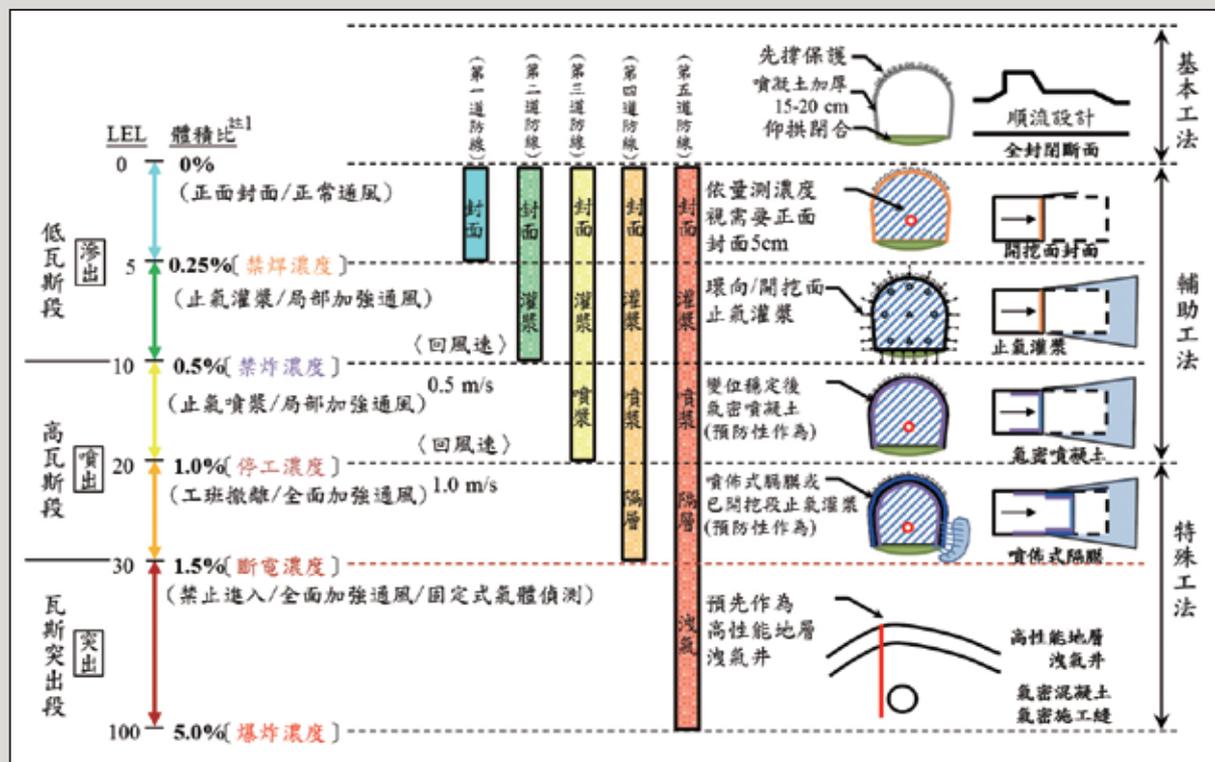


圖17 洩氣井示意圖

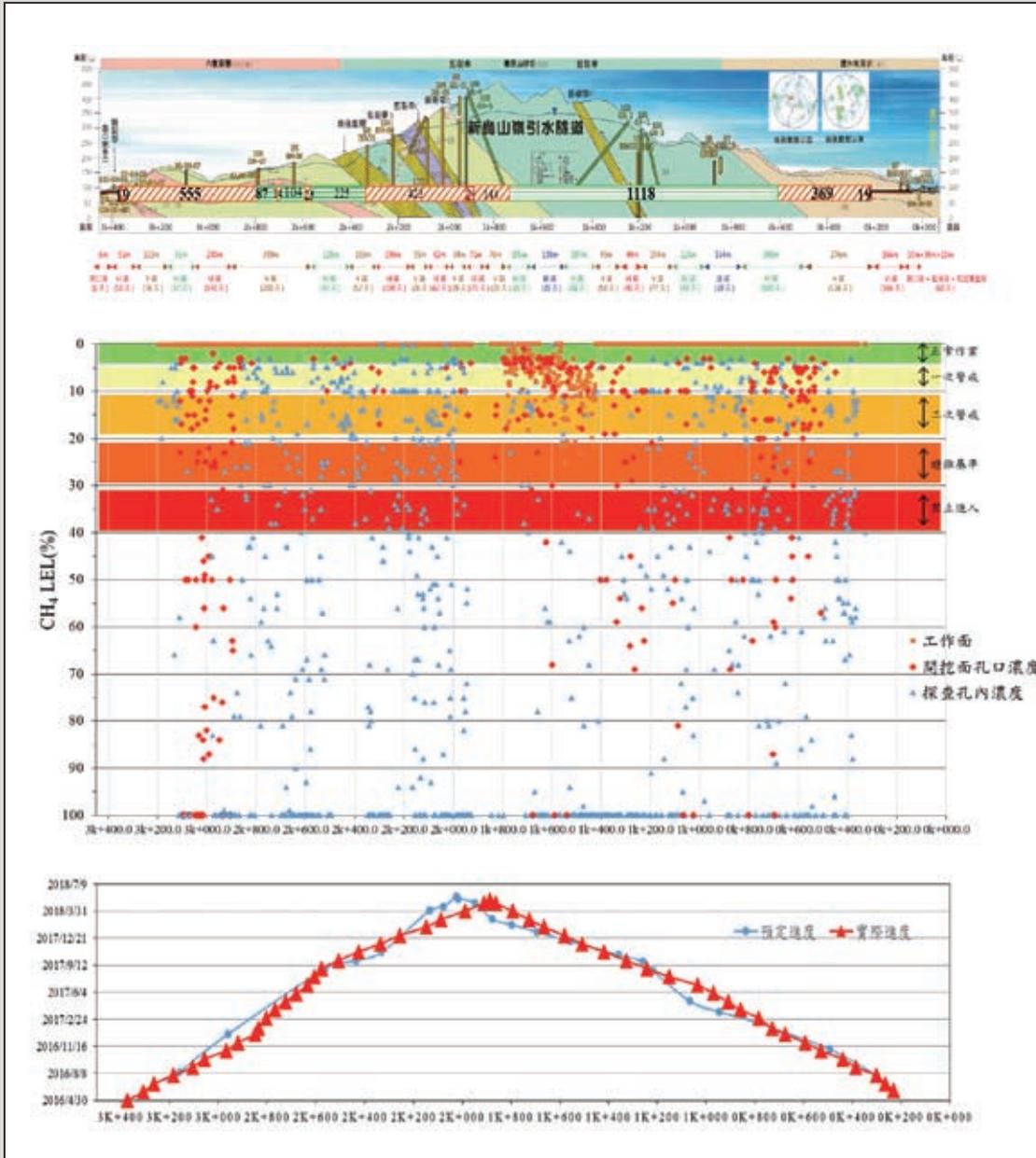


圖18 施工中探測-氣體量測成果

玖、結語

本引水隧道工程預期遭遇大量瓦斯氣體，於施工過程中亦多次有瓦斯氣體湧出超過警戒值及行動值，在全體團隊成員戒慎恐懼，努力以赴下，隧道工程於2018年5月23日順利貫通，貫通典禮照片如圖19。有關隧道開挖擾動造成岩體孔隙增加，有害氣體逸出量及濃度上升，

達可能爆炸範圍時，將嚴重影響工程安全。本工程藉由強制通風及有效管理火源、人員管制、固定式及移動式氣體監測等，是減少有害氣體發生氣爆之最根本作為。



圖19 新烏山嶺引水隧道貫通典禮照片

參考文獻

1. DOYLE B R. Hazardous gases underground : applications to tunnel engineering[M]. New York : CRC press , (2001)。
2. 營建署，隧道氣爆處理技術，(2007)。
3. 台灣世曦工程股份有限公司，新烏山嶺引水隧道統包工程-服務建議書，(2015)。
4. 公共工程委員會，臺灣地區隧道岩體分類系統暨隧道工程資料庫之建立，附冊二-山岳隧道工程輔助工法參考手冊(草案)，(2003)。
5. 何泰源，隧道施工遭遇可燃性氣體之調查與處理對策，中華技術第63期，(2004)。
6. 臺灣嘉南農田水利會，新烏山嶺引水隧道工程補充地質調查與地形測量作業成果報告，(2004)。
7. 臺灣嘉南農田水利會，新烏山嶺隧道遭遇可燃性氣體之因應對策報告之因應對策報告(第一版)，(2016)。
8. 臺灣嘉南農田水利會，臨時高性能洩氣井建置計畫成果報告(第一版)，(2017)。



月世界地區隧道遭遇斷層之變位監測案例探討

關鍵詞(Key Words)：中寮隧道(Chungliao tunnel)、旗山斷裂(Chishan Fault)、大地變位(earth displacement)、監控(monitors)

交通部高速公路局／總工程司／陳國隆 (Kuo-Long Chen) ❶

交通部高速公路局／北區養護工程分局／副分局長／王吉杉 (Chi-Shan Wang) ❷

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／計畫經理／楊智堯 (Chih-Yao Yang) ❸

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／協理／吳文隆 (Wen-Long Wu) ❹

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／經理／蕭秋安 (Chiu-An Hsiao) ❺

摘要

國道3號中寮隧道(南下378k+795~380k+653；北上378k+825~380k+653)位於國道3號田寮收費站及燕巢系統交流道之間，隧道長度分別為1858、1828m，於民國85年開始施工，民國89年完工，至今已通車使用約17年，通車期間於隧道北洞口處不斷有持續變位情況而造成損壞，經多次維修改善，仍無法徹底解決結構變形問題。為了進一步瞭解隧道變形之主要原因及破壞機制，乃於重要結構及關鍵區域布設相關監測設備，以蒐集長期之觀測紀錄，分析研判本路段隧道結構變形之主要原因，作為後續進行長期維護改善之設計施工依據。



The Case Study of the Deformation Monitoring of ChungLiao Tunnel with the Effect of Faults at TianLiao Moon World Area

Abstract

ChungLiao tunnel has been completed in 2000, is located between the Tianliao Toll Station and the Yanchao System Interchange on National Highway No. 3, with tunnel lengths of 1858m(SB) and 1828m(NB). The route passes through the Longchuan Faults and Chishan Fault crossing mudstone and sandstone area. It has been in operation for about 17 years. And in the recent years, it has been continuously deformation at the north entrance of the tunnel and caused damage. After many repairs and improvements, it still cannot completely solve the problems. In order to confirm the main causes of the tunnel deformation and the damage mechanism, the overall monitoring is used for the displacement observation. By analyzing the monitoring results, the earth displacement is the main cause of tunnel deformation.

3

專題報導

壹、背景說明

中寮隧道(南下378k+795~380k+653；北上378k+825~380k+653)位於高雄市燕巢區，國道3號田寮收費站及燕巢系統交流道之間，隧道長度分別為1858、1828m，如圖1。

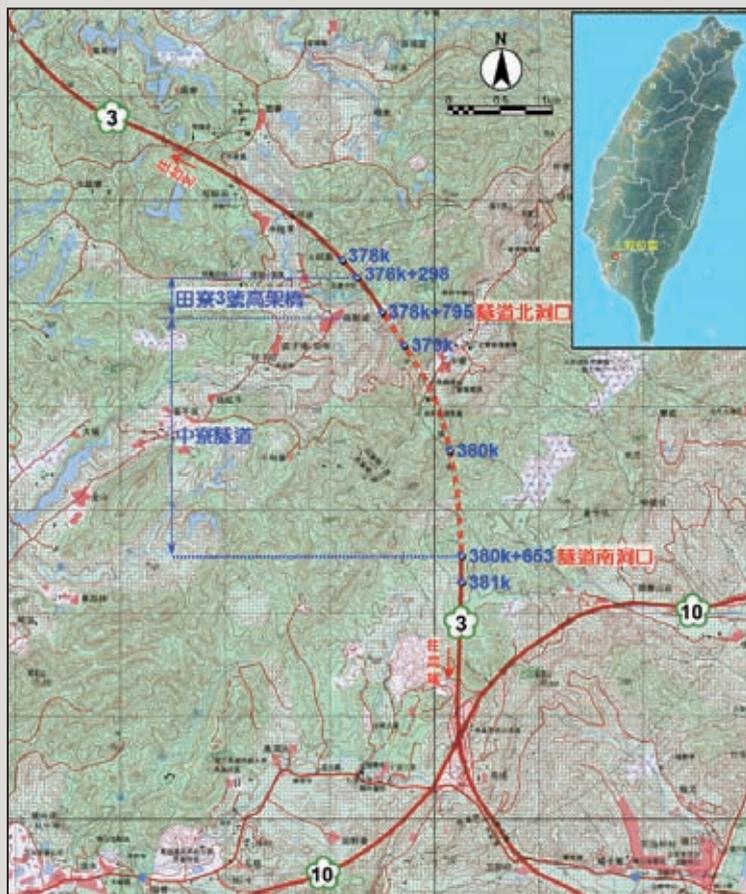


圖1 中寮隧道平面位置圖

隧道主要位於臺灣西南部中寮山區，山嶺走勢約呈東北西南走向，沿線地表高程約在20至360公尺之間，地形崎嶇起伏，目前地表多為雜林等植生，局部有居民種植。隧道沿線地層，主要為隧道北口路段的古亭坑層泥岩，中寮隧道北口至隧道中段之路段的烏山層砂頁岩，中寮隧道南段至隧道南口路段的蓋子寮頁岩，地層位態約呈東北西南走向，向南傾斜約30至70度不等。隧道鄰近有龍船斷層及旗山斷層，其中龍船斷層未直接穿過中寮隧道，位於

隧道北口北側約500公尺附近，而旗山斷層約呈東北走向延伸，直接通過中寮隧道北口路段，沿烏山層砂頁岩與古亭坑泥岩界面發育延伸，於南二高新建階段(民國82~88年)，原屬於存疑性活動斷層，但在近年經濟部中央地質調查所持續進行觀測與試驗，已證明本斷層於近一萬年內曾有活動，故於民國99年將其升級為第一類活動斷層，相關區域地質圖如圖2，中寮隧道沿線地質平面及剖面如圖3，地層分布及斷層說明如表1~2。

中寮隧道為雙孔單向三車道斷面，標準斷面如圖4所示，採新奧工法(NATM)設計、施工，主要開挖支撐為鋼支保、鋼線網噴凝土及岩栓，開挖斷面變位穩定後澆置內襯砌混凝土。

北上線全長1828公尺(含假隧道洞口15公尺、明挖覆蓋段34公尺、預襯支保段30公尺、覆版段25公尺及鑽掘段1724公尺)。南下線全長1858公尺(含假隧道洞口15公尺、明挖覆蓋段34公尺、預襯支保段30公尺、覆版段55公尺及鑽掘

段1724公尺)。

本隧道所經過的地質，除北口附近屬惡地地形之古亭坑層泥岩外，隧道本體所經過的岩體，主要為烏山層砂岩及蓋子寮頁岩。

中寮隧道於民國85年3月施工開挖並於89年2月完工通車，施工期間逢88年9月21日大地震，88年9月22日現勘，於北上線378k+880附近、南下線378k+890附近側壁局部發生裂



圖2 中寮隧道區域地質平面圖

表1 本計畫路段地層之地質特性說明表

時間	地層	地質特性說明
新生代	全新世 沖積層 (Qa)	未固結之砂、泥、礫石夾岩塊岩屑。
	上新世 古亭坑層 (Gt)	泥岩為主，呈黑灰色至深灰色，常夾數公分厚之薄層細砂岩。岩性軟弱不透水，岩體強度低，地表面幾無植生，常形成強烈切割之惡地地形。由所夾之薄層砂岩顯示地層位態變化範圍大，主要在N10°W~N30°E/50°~60°E之間，節理稀少，主要有N20°~30°E/60°~80°E，N30°~50°W/75°~88°NE，N80°~90°W/70°~80°S與80°~90°N。
	中新世 烏山層 (Ws)	厚層砂岩夾頁岩為主，砂岩細至中粒，岩體堅硬，節理發達，完整岩體單壓強度約130~330kg/cm ² ，節理破碎岩體單壓強度僅6~7kg/cm ² 。頁岩呈黑灰至深灰色，極細粒，頁理發達，完整岩體單壓強度約60~70kg/cm ² ，節理破碎岩體單壓強度僅6~7kg/cm ² 。本層層面與節理發達，地層位態主要在N30°~50°E/25°~60°SE，節理主要有N20°~40°E/35°~60°NW，N35°~50°W/40°~75°NE。
	中新世 至 上新世 蓋子寮 頁岩 (Ktl)	厚層頁岩為主，夾薄層砂岩與層之砂頁岩互層。頁岩呈深灰色，風化後呈灰褐色，極細粒，頁理發達，隧道通過路段多呈中度風化以上，完整岩體單壓強度約46~87kg/cm ² ，節理破碎風化岩體單壓強度僅8~9kg/cm ² 。本層層面與節理發達，地層位態主要在N35°~50°E/60°~80°E，節理主要有N10°E~N10°W/30°~50°SW或70°~80°NE，N30°~70°W/20°~80°SW或30°~70°NE。

表2 本計畫路段斷層之地質特性說明表

斷層名稱	地質特性說明
旗山斷層	約呈東北走向延伸經過隧道北口路段，由相關調查成果，穿越隧道北口路段之旗山斷層位態約呈N350E/650SE，斷層帶寬度達40~55公尺左右，上盤地層為烏山層砂頁岩互層；下盤為古亭坑層之泥岩，斷層帶主要由軟弱之風化破碎岩塊、角礫岩、糜稜岩及斷層泥等所組成，斷層泥厚度達10公尺或以上。依經濟部中央地質調查所公布之2010年臺灣活動斷層分布圖，旗山斷層分類上屬第一類活動斷層。
龍船斷層	約呈東北走向延伸經過田寮3號橋北橋台附近(由82年設計階段之地質調查成果)，斷層位態約呈N300E/40~800SE不等，斷層上下盤為古亭坑泥岩。依經濟部中央地質調查所公布之2010年臺灣活動斷層分布圖，龍船斷層並未屬活動斷層。

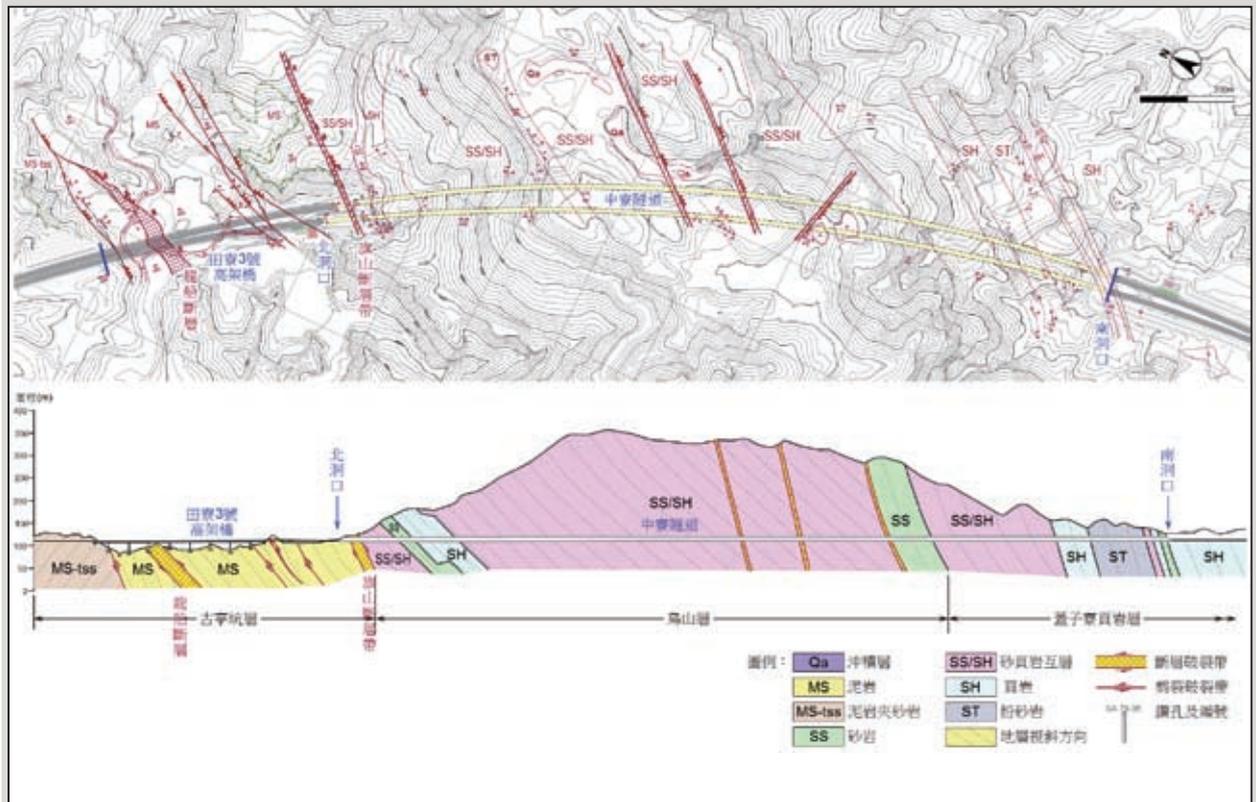


圖3 中寮隧道沿線地質剖面圖

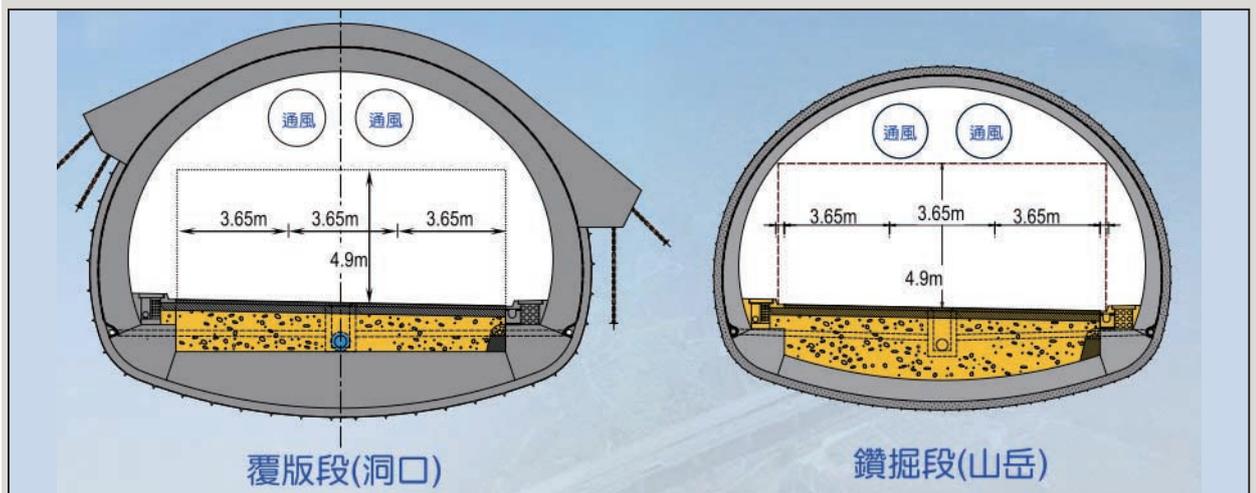


圖4 標準断面圖

縫，少數裂隙亦發生於維修步道，另外南下線 378k+890附近瀝青混凝土路面亦曾發生坍塌形成坑洞、路面持續下陷十幾公分。側壁裂縫經承包商以環氧樹脂及無收縮性水泥砂漿修補，路面沉陷亦多加重鋪整修，直到90年6月保固

期限屆滿期間裂縫亦陸續發現並經修補驗收合格。而後續隧道結構仍因不確定原因而持續有劣化及損壞情況，有關本隧道歷年來之維修紀錄如表3。

表3 中寮隧道損壞及維修紀錄

日期	監測及維護紀錄	備註
89年2月2日	通車	
93年12月	北口側壁修復及排水改善工程	國工局代辦工程
94年2月~95年5月	施工後監測	台灣世曦
96年4月	續辦後續監測作業	易鼎工程顧問 (終止契約)
97年8月	側壁伸縮縫覆蓋不鏽鋼板整平	年度維護契約
98年3月~8月	監測作業	德克皇工程顧問
98年6月	側壁伸縮縫覆蓋不鏽鋼板更換	年度維護契約
99年3月	改善路面不平整及修復裂縫	年度路面修補契約
99年5月	改善隧道內積水問題	屏東工務段
100年10月	更換抽水設備，並增加能量	屏東工務段
100年12月	隧道內排水改善工程及側壁裂縫填補	屏東工務段/台灣世曦
102年5月	隧道襯砌伸縮縫補強及頂拱裂縫填補	屏東工務段/台灣世曦
102年11月	隧道洞口邊坡排水改善	屏東工務段/台灣世曦

貳、監測系統規劃

由於本計畫路段自89年通車後，隧道結構即有持續不斷的變形發生，針對此異常現象，經過歷次整治維修仍無法有效解決結構變位問題，因此為能分析本路段結構變形之真正原因以對症下藥，為本計畫佈設整體監測之主要目的。

因本計畫路段區位環境較為複雜，包括邊坡、地下水、地質岩性以及地質構造等，皆有可能對本計畫路段造成影響而產生結構變形，而現況結構變形亦有可能為上述因素之加乘影響，但仍應有主要之影響條件，故將以本計畫整體監測結果來進行研判。

由於本計畫之中寮隧道及田寮3號高架橋疑似因旗山斷層活動而造成結構之異常變位，為確認是否因旗山斷層之活動性進而影響結構安

全，本計畫初步針對旗山斷層沿線之設施及結構物進行勘查，包括旗山鎮武德殿、高師大燕巢校區、國道10號11k+525高架橋以及13k+772車行箱涵(如圖5)，以瞭解旗山斷層對於沿線結構物之影響。而其中僅於高師大物理館前陸橋以及國道10號13k+772處路堤段車行箱涵發現異狀，其餘現況良好。

高師大物理館前陸橋現況有因差異沉陷變位產生裂縫，經洽詢該校營繕組人員，該橋應為校區開發填土所造成之沉陷，目前已並無持續變位情況，如圖6；而國十13k+772路堤下車行箱涵，現況可見有裂縫修補痕跡，經洽詢岡山工務段了解，該處裂縫為數年前所發生，已進行修補，近年來並無新增裂縫或持續發展情況，應非屬斷層持續活動所影響，如圖7。

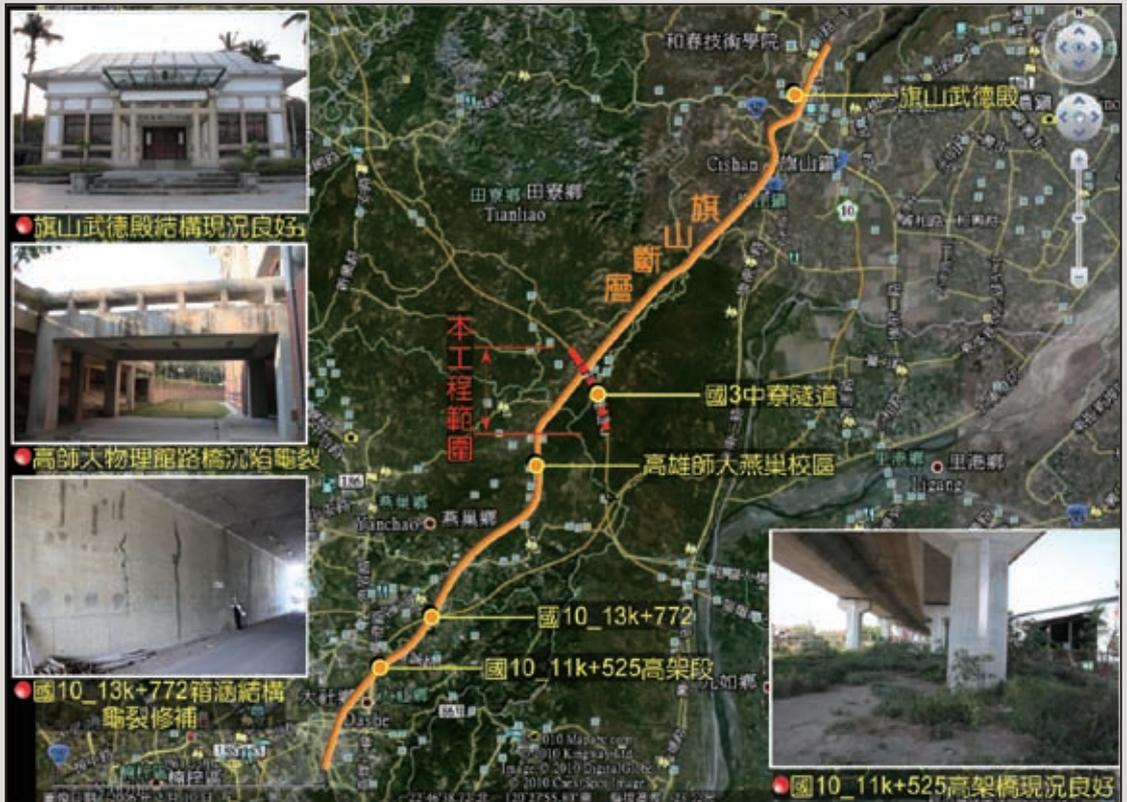


圖5 旗山斷層通過重要結構物



圖6 高師大物理館路橋結構裂縫



圖7 國十13k+772箱涵結構裂縫

綜合以上，旗山斷層目前雖為活動斷層，且斷層上下盤為相互擠壓之變位型態，惟參考既有大地相對變位量測(約10mm/yr)與隧道實際之結構變位(約50~100mm/yr)差距甚大，且於旗山斷層沿線亦未發現其他構造物如本路段有持續變位情況，對於斷層活動所產生之大地變位是否為造成本路段結構變位之主要原因，或是有可能旗山斷層於本工址處之活動量較大？為

瞭解本隧道實際造成結構變形與損壞之原因，並作為後續修復與改善之決策參考，乃針對大地變位、結構變位以及邊坡變位分別裝設相關監測設備，以釐清變形主因，並說明如下。

一、大地變位監測

大地變位監測點之佈設範圍以田寮3號高架

工區內大地變位監測點分布(本計畫佈設)

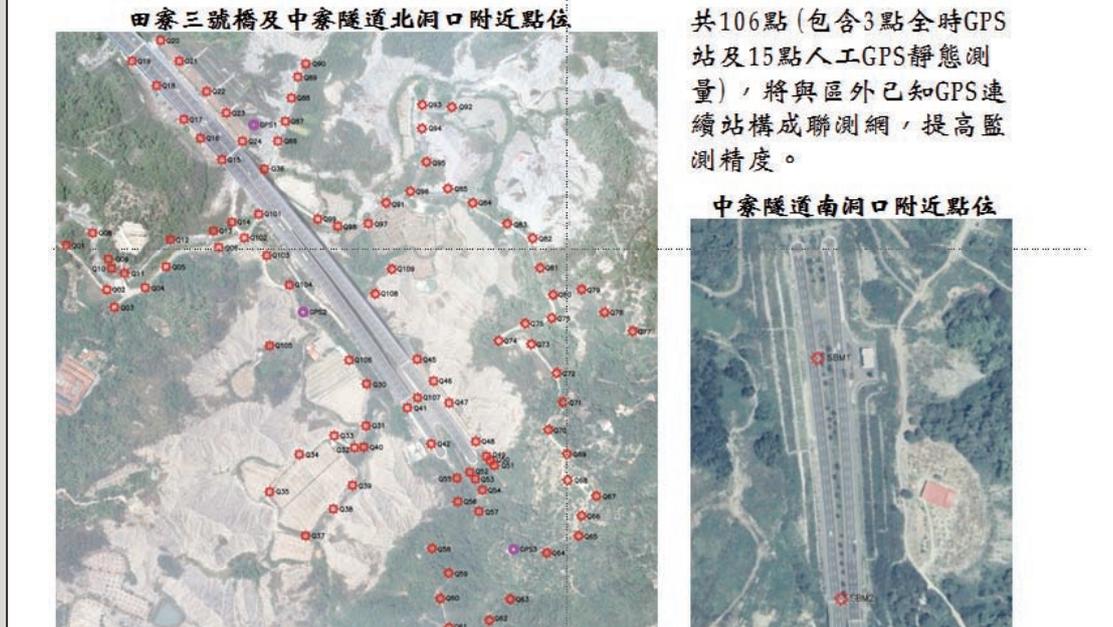


圖8 大地變位監測點分布平面圖

橋及中寮隧道北口路段附近之地表為主，而為確認本區域是否因斷層錯動影響，本計畫於隧道北洞口及田寮3號高架橋鄰近地表佈設共106點地表監測點，其中包含龍船斷層北側、龍船斷層～旗山斷層間及旗山斷層南側分別選取3個控制點在現場擺設全時觀測GPS，以及15處人工GPS靜態量測以作為測量之控制點(如圖8)。透過GPS不間斷且連續觀測，可記錄斷層在觀測期間的相對與絕對變位狀況，清楚地記錄大地變化。

二、結構變位監測

隧道結構變位監測主要利用菱鏡、桿式沉陷計及地表沉陷點觀測隧道結構變位情況，配置如圖9。菱鏡配置以每一襯砌節塊配置一處測量断面，每一測量断面配置7顆菱鏡，藉由菱鏡之相對變位可觀察隧道断面內淨空之變化情況。而桿式沉陷計之配置則以每支2m由北洞口

共106點(包含3點全時GPS站及15點人工GPS靜態測量)，將與區外已知GPS連續站構成聯測網，提高監測精度。

中寮隧道南洞口附近點位

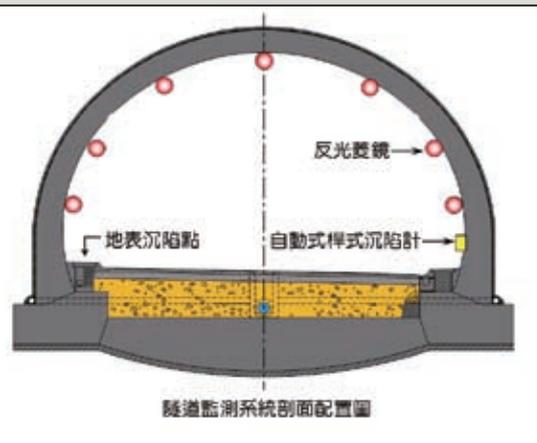


圖9 隧道結構變位監測配置断面圖

(南下378k+795；北上378k+825)開始連續布設至北上線N12節塊及南下線S16節塊，詳圖10所示，主要係觀察隧道縱向之相對變位情況，並與大地變位測量相互比較。而地表沉陷點則均勻布設於每個襯砌節塊之維修步道上，共694點，藉由定期量測沉陷點的平面座標以及高程，可比對全段隧道之變形情況。

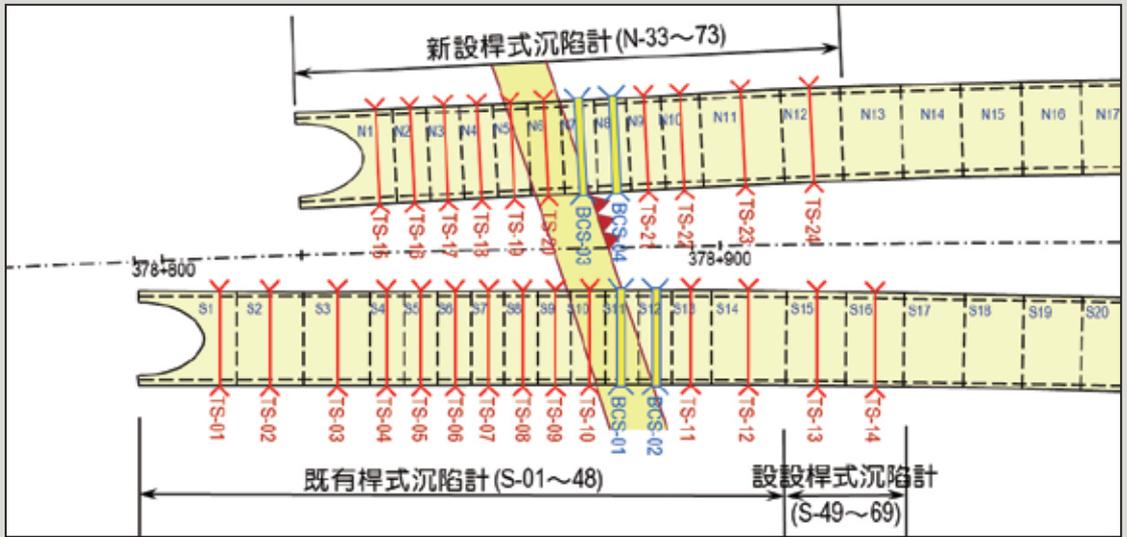


圖10 隧道結構變位監測配置平面圖

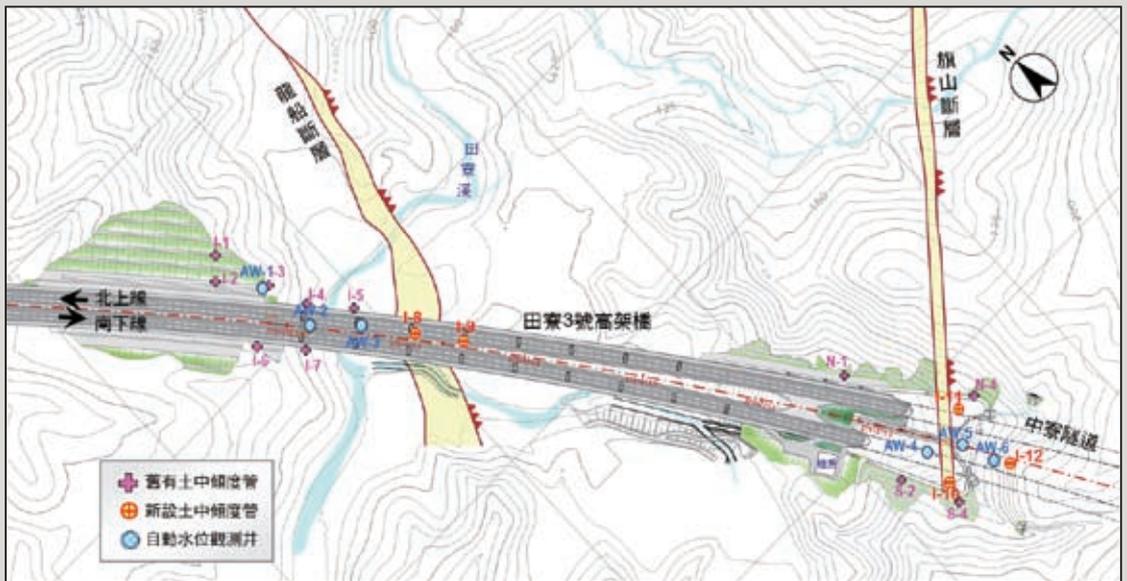


圖11 邊坡及地下水位監測配置平面圖

三、邊坡與地下水位監測

邊坡及地下水文監測主要範圍為田寮3號高架橋A1橋台~中寮隧道北洞口上方邊坡附近，其目的主要於監測取得長期之地下水變化以及地下地層之變形量，並與結構變位監測成果加以比對驗證，確認其是否與結構變形有關，更進而推斷造成結構變形之主因，並於後續辦理長期改善設計時納入參考，配置如圖11所示。

參、監測成果

一、大地變位監測

累積2011年11月至2016年2月期間之大地監測成果(如圖12)，將測區以斷層構造為界，劃分為三個塊體：龍船斷層以北(即龍船斷層之下盤)為塊體一(Block I)、龍船斷層以南至旗山斷層以北(即龍船斷層之上盤、旗山斷層之下盤)為塊體二(Block II)、旗山斷層以南(即旗山斷層之

上盤)為塊體三(Block III)。在水平速度場方面，塊體一主要以8~37 mm/yr之速度量朝西南方向移動並且具有逆時針旋轉之特性。塊體二主要朝西北方向移動，速度量值在接近龍船斷層時逐漸遞減並且有逆時針旋轉，並且在高架橋兩側略有速度差異，高架橋左側速度量在39~62 mm/yr，高架橋右側速度量在39~57 mm/yr。

在垂直速度場方面，塊體三的速度量最小，其次是塊體一，塊體二的速度量最為顯著。塊體一至塊體二的速度量變化為逐漸遞增，至中寮隧道北出口附近為最大值。塊體二至塊體三的速度量在中寮隧道北出口附近有相當顯著的差異，而塊體三本身的速度量變化並不明顯。

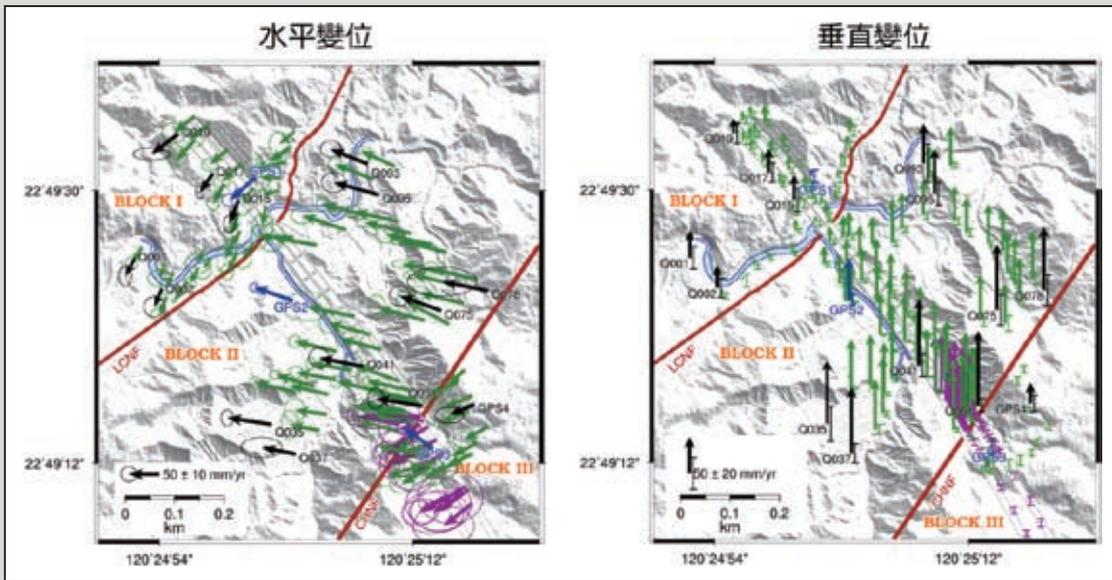


圖12 大地變位速度場分布平面圖

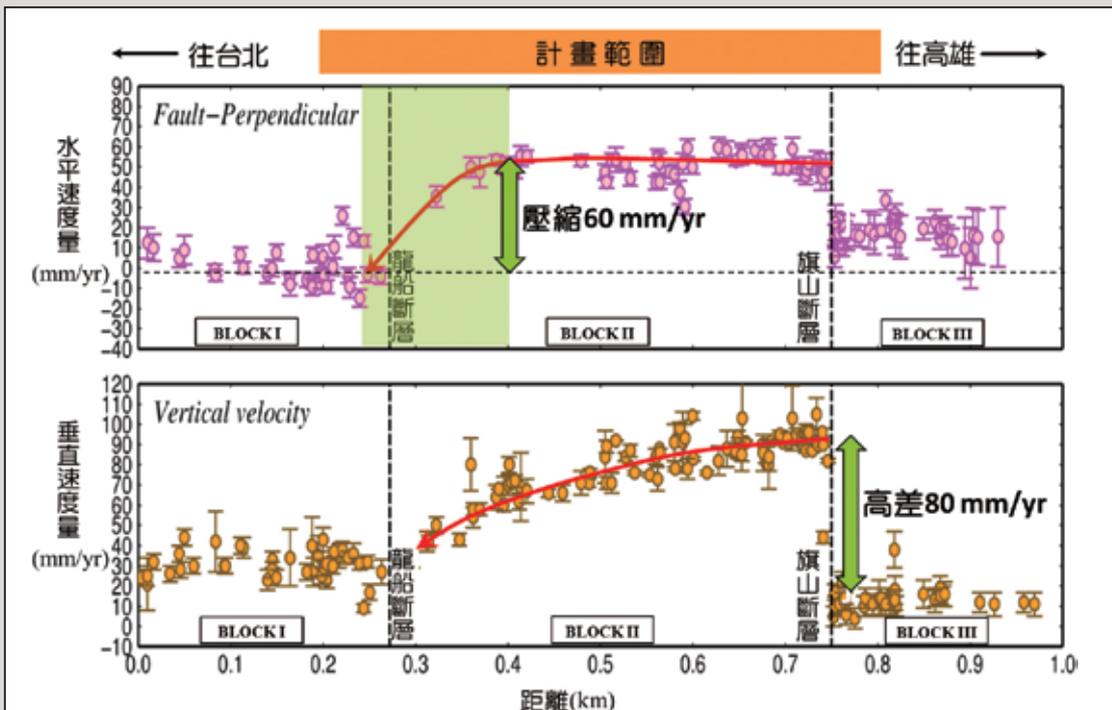


圖13 沿高速公路投影大地變位速度剖面圖

若將上述量測資料沿高速公路方向投影，整理各點位速度剖面如圖13，由此速度剖面圖可明顯觀察整體大地變位趨勢，在龍船斷層附近有明顯之水平壓縮情況(約6cm/年)，而在旗山斷層附近則有約3cm/年之拉伸量；而在垂直變位部分，則可觀察到旗山斷層以北區域整體皆為抬升趨勢，而且愈靠近旗山斷層處抬升量越大(約8cm/年)。

二、結構變位監測

整理隧道斷面內空變位資料，各節塊之頂拱皆有微小累積變位，且大多以東側肩部~頂拱的變位較大，而監測範圍內以N7節塊變位量較大，於東側肩部及頂拱有累積約24~39mm之變形(如圖14)，其餘節塊之累積變形則約於10~15mm，顯示此處仍有外力作用，對結構將造成不良影響。

比較88年10月竣工資料以及100年12月、101年10月、102年6月本計畫水準測量結果，

發現整體路段高程皆較竣工高程高約40cm~150cm(如圖15~16)，整體40cm差異可能為臺灣地盤抬升或為近年測量系統校正之影響，而差異量最大(150cm)之處則位於旗山斷層上之覆版段隧道，變位量逐漸向北上方方向收斂，但本計畫施測至田寮二號橋A2橋台為止，仍有約60cm之差距。以此推斷本區域可能受構造影響而有整體抬升之趨勢，並以旗山斷層帶附近，因為兩側岩性勁度差異最大，而使差異變位最大。

此外，觀察每個月之水準測量結果並與本計畫布設之側壁桿式沉陷計比對(如圖17~18)，自2011年9月~2013年10月為止北洞口路段之高程差異變位約160mm，平均約以5~10mm/月速度向上抬升。

三、邊坡及地下水位監測

由監測期間的地下水位資料觀察，地下水與降雨量有明顯的相互關係，2012年4~9

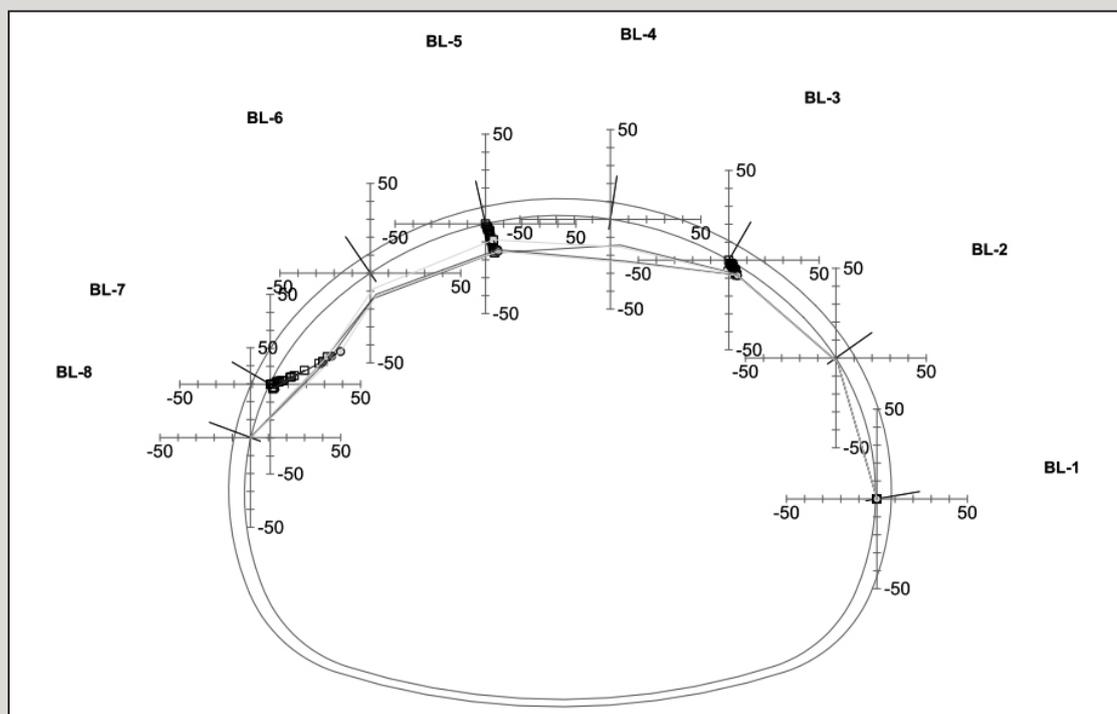


圖14 中寮隧道北上線N7襯砌內空變位監測成果

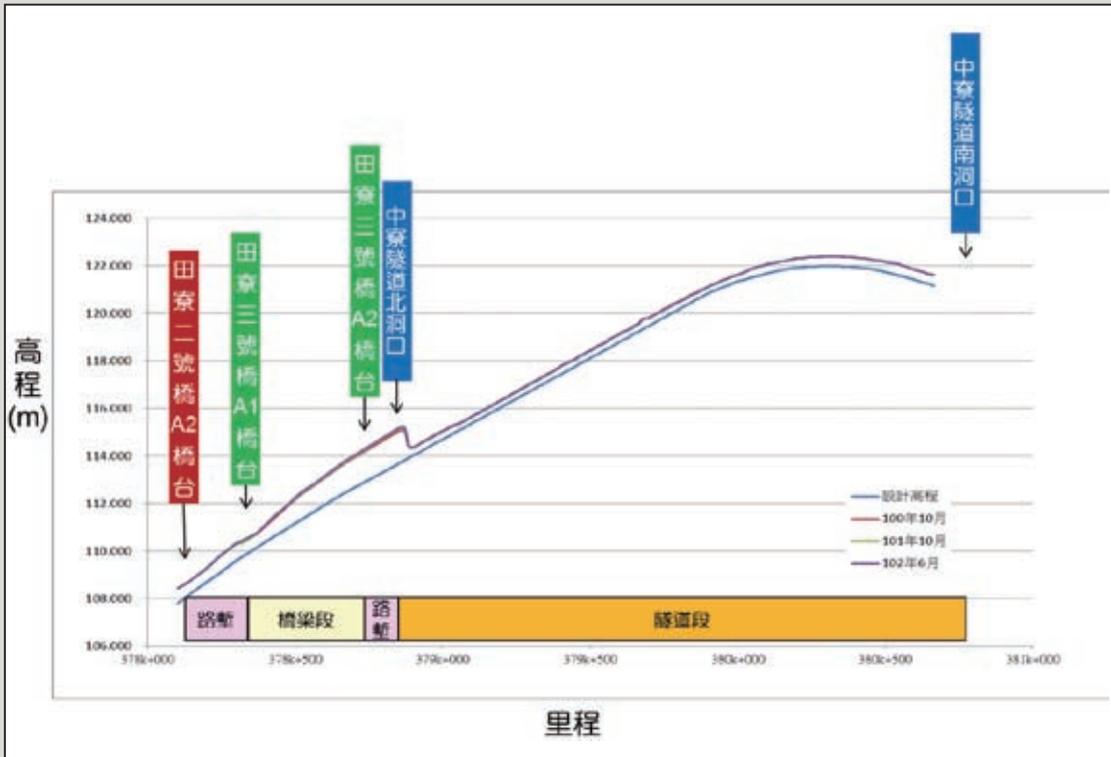


圖15 計畫路段竣工及現況高程比較圖

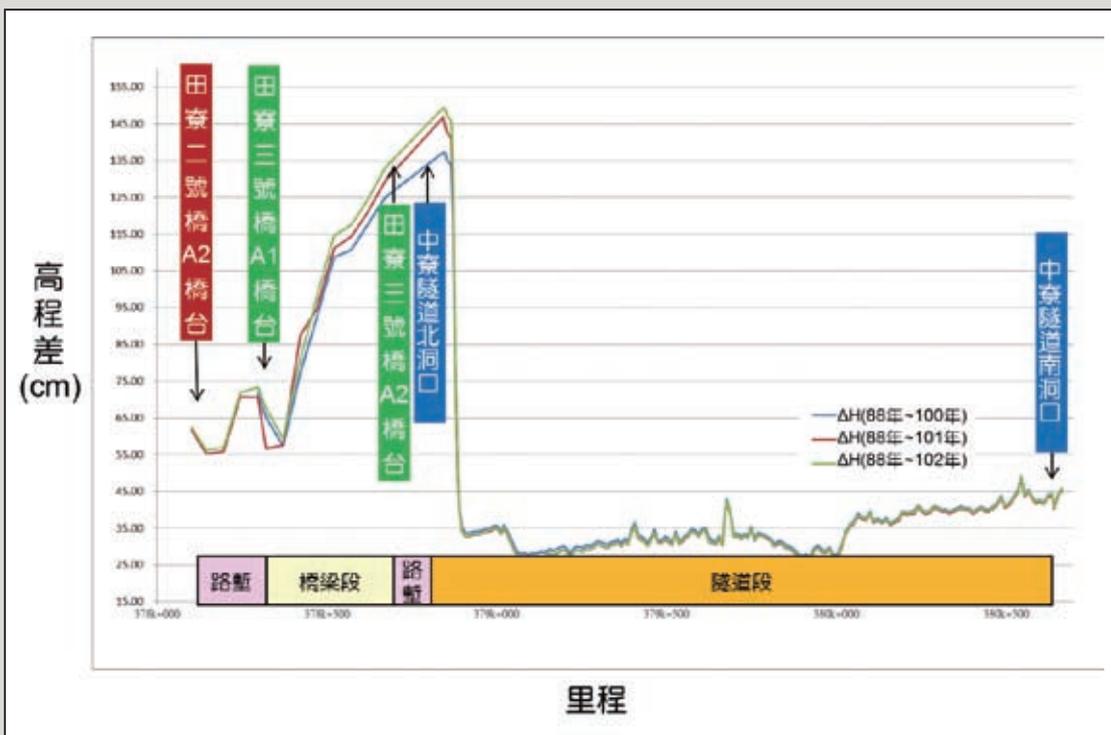


圖16 計畫路段各年度道路高程差比較圖

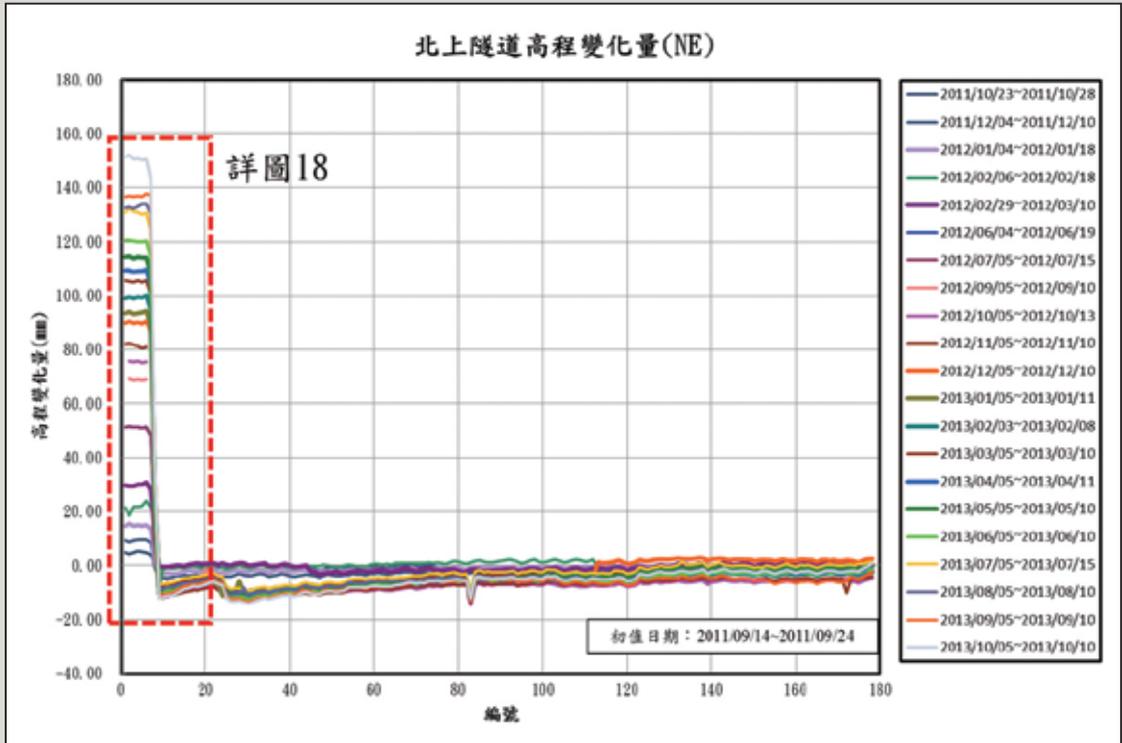


圖17 中寮隧道北上線東側步道水準測量高程差異變位圖

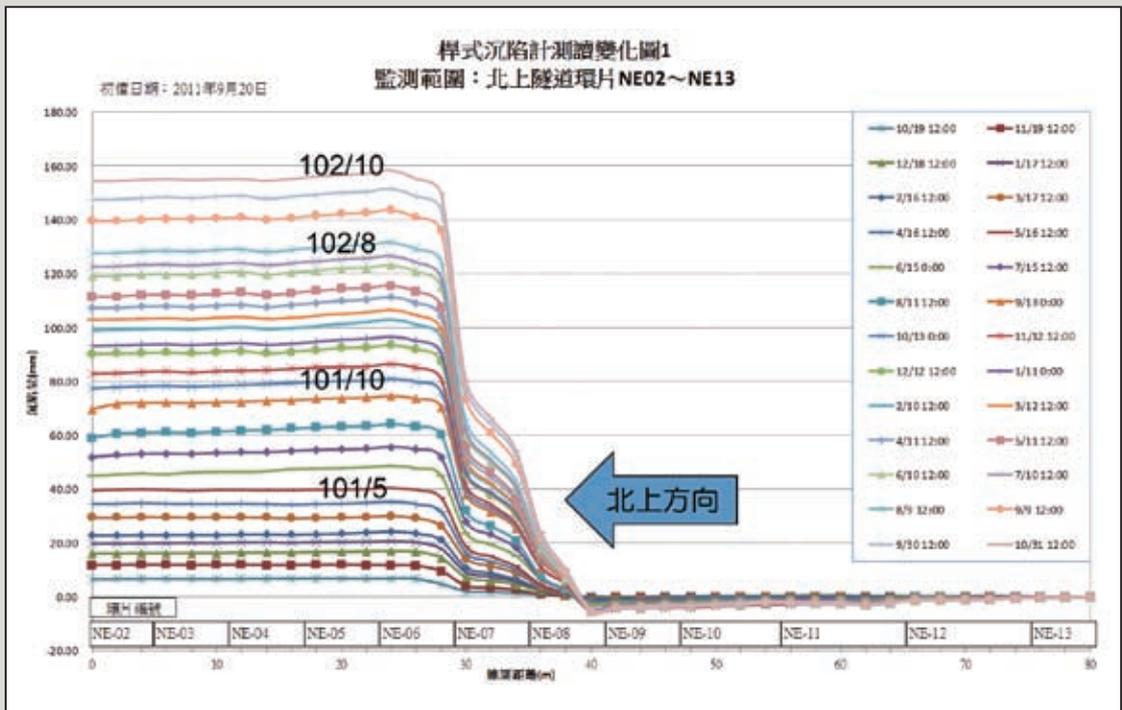


圖18 中寮隧道北上線東側步道桿式沉陷計差異變位圖

月為雨季，降雨量明顯較高，期間總雨量為2692mm，而比對此期間之地下水位觀測紀錄亦有升高之情況，而9月之後各監測井皆有下降趨勢，除了AW-5之外平均每月約下降1~2公尺，而AW-5因位在旗山斷層帶附近，當地下水位沿地形向下流動時，遭遇旗山斷層泥阻水以致地下水消散較慢，消散速度約0.1~0.2公尺/月。

另由雨量觀測資料，2013年4~8月總雨量為1682mm，明顯小於2012年度的降雨量，反映於地下水位並無明顯升高趨勢，僅呈現下降趨緩的現象。有關各孔位地下水位高程變化與相對雨量資料整理如圖19~20。

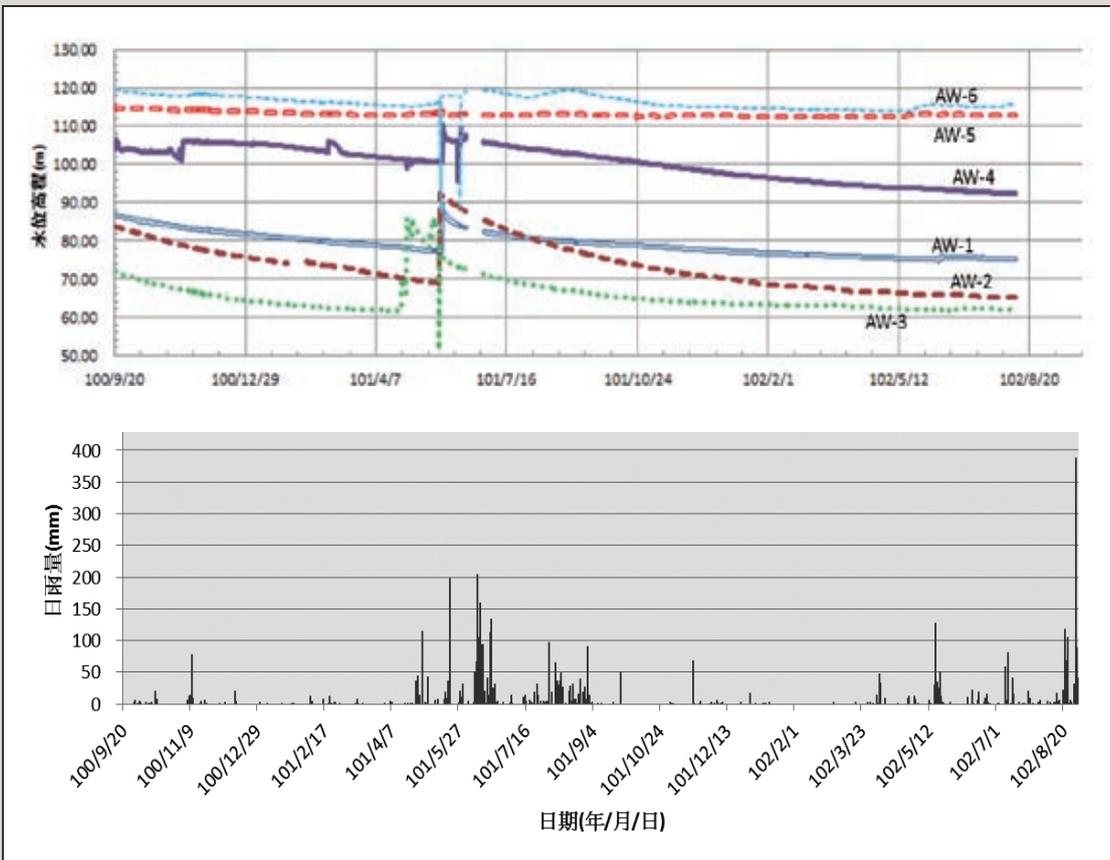


圖19 地下水位高程歷線及雨量紀錄分布圖

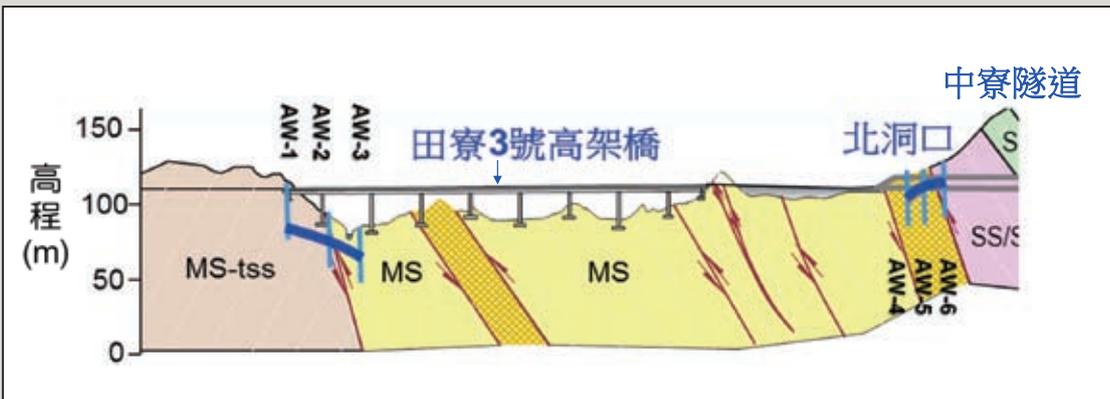


圖20 地下水位高程分布剖面示意圖

土中傾度管監測共計15孔採人工監測(如圖21)，經檢視分別位於A1橋台以及北洞口上方邊坡之舊有10孔傾度管之變形資料，並無太大變化，初步研判此處邊坡尚屬穩定，並無滑動之跡象。

但位於龍船斷層附近平坦地表面傾度管(I-8、9)卻有明顯側向變化，I-8位於龍船斷層下

盤側，於深度13m附近有持續向北變位趨勢，平均變化量約3~4mm/月；而I-9位於龍船斷層上盤側，於深度30m有明顯持續向北變位情況，平均變位量約3~4mm/月。因附近地勢平坦，故此處之側向變形與邊坡滑動無關，初步研判應為龍船斷層側向擠壓所造成側向變位(如圖22)。



圖21 本計畫土中傾度管分布平面圖

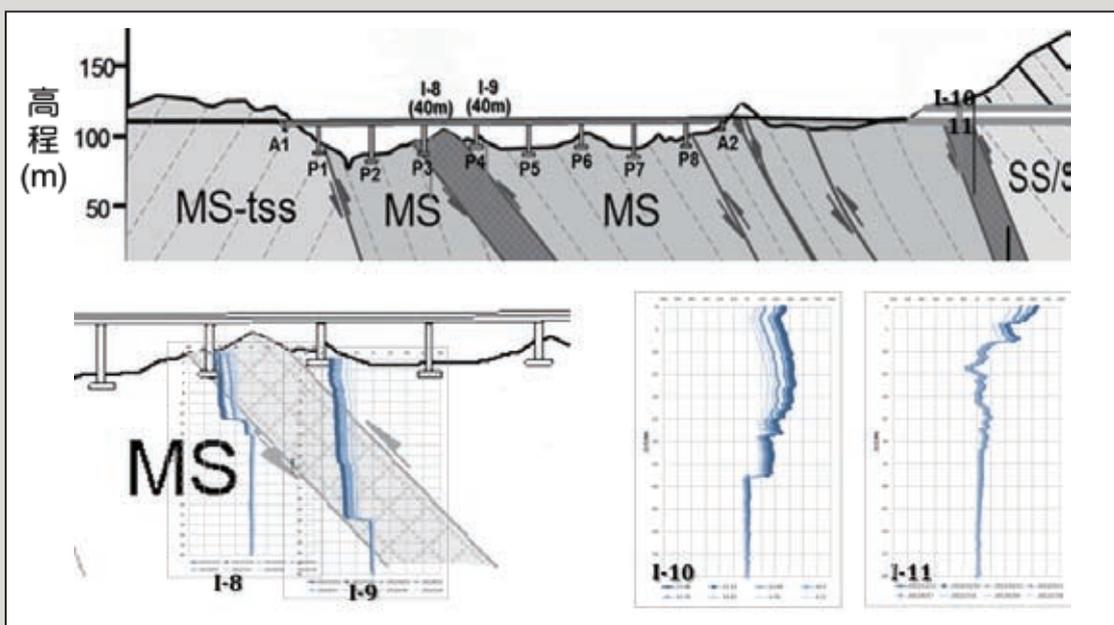


圖22 傾度管監測成果摘要圖

肆、變形原因與改善對策探討

由本計畫所執行之各項監測結果比對，隧道北洞口邊坡並無明顯側向滑動跡象，地下水位也相對穩定並無劇烈變化，故由監測結果可初步排除由邊坡滑動造成隧道結構變形裂損之原因。

另外，由整體大地變位監測結果比對隧道結構變位監測，發現兩者之間具有相當高之關聯性，而所分析之變位成果以相當吻合，因此，可推斷隧道北洞口之結構變形應由大地變位所導致。

臺灣位於歐亞大陸板塊及菲律賓海板塊交界處，地質構造以及活動相當密集且頻繁，以整體板塊活動監測結果來看，臺灣以東的菲律賓海板塊以及西北方歐亞大陸板塊大致以每年約82mm的速度相互擠壓（如圖23）。然而在通

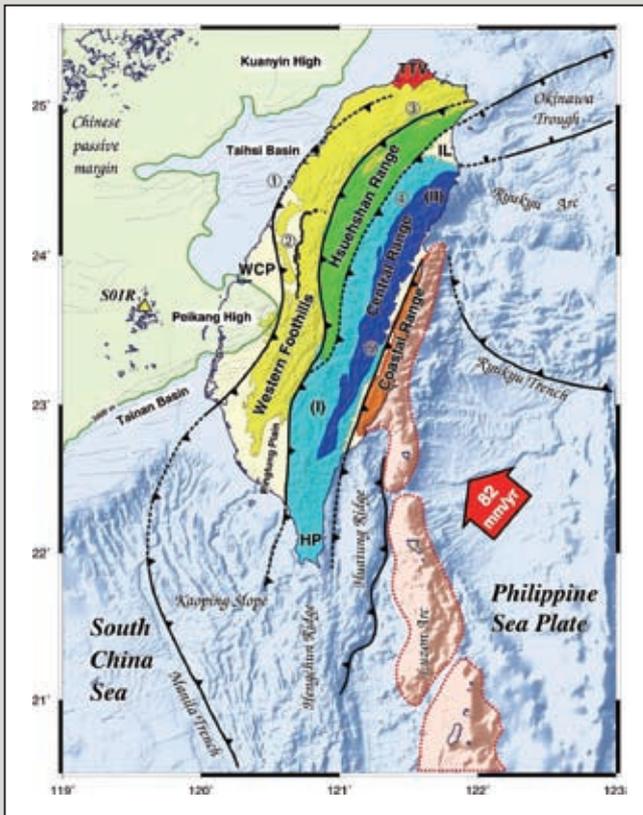


圖23 臺灣地區板塊運動平面示意圖

過臺灣東部的縱谷斷層已經被吸收掉約30 mm/yr的變位速度。此結果顯示本工程區域之應變量已遠遠超過板塊運動所能提供之能量，再加上本區域之垂直變位速度大於水平變位速度，顯示垂直變位不完全是地盤擠壓所造成之隆起現象。換言之，另有一個機制來提供產生此地區之變形能量。目前推測此機制可能與泥貫入體、背衝構造或高壓岩層有關，必須依據後續監測以及進一步深度調查予以研究確認。

基於上述工址變形機制的評估結果，本區域的自然變形是人為難以改變的現象，因此在長期改善方案之研擬必須以可吸收大地變形之柔性構造的觀點來思考。故目前本路段已由高速公路局執行長期改善工程，將位於變位帶中之橋梁與隧道等刚性鋼筋混凝土結構物改以柔性之路堤與路塹形式通過，以自然柔性材料順應自然大地變位之影響，以降低本路段之災害風險。

綜合上述之變位機制探討，大致歸納出本路段變形問題之主要原因應為區域構造之推擠作用加上地下水、斷層與岩性工程性質差異等因素影響，造成地盤變位而導致其上之結構物亦產生變形情況，將本區域的地表變形以概念模型圖表示，如圖24。

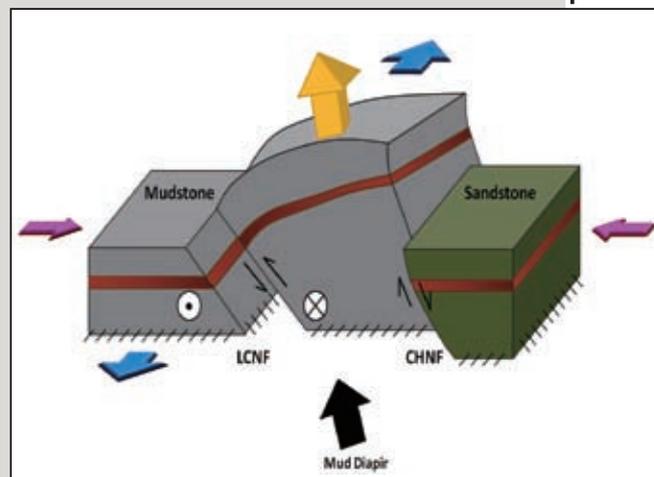


圖24 本路段地表變形之概念模型圖

廣域大地變位之利用 GPS監測分析與解算 —以國道3號田寮 3號高架橋及中寮隧 道大地變位監測為例

關鍵詞(Key Words)：GPS衛星測量(GPS satellite survey)、中寮隧道(Chungliao Tunnel)、
田寮三號高架橋(Tianliao No. 3 Viaduct)

國立成功大學／測量及空間資訊學系／楊名 (Ming Yang) ❶

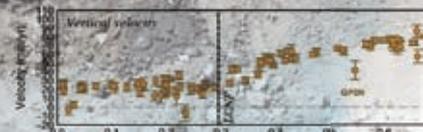
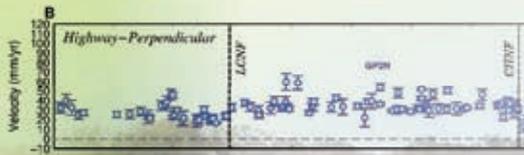
國立成功大學／測量及空間資訊學系／景國恩 (Kou-En Ching) ❷

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／計畫經理／楊智堯 (Chih-Yao Yang) ❸

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／吳宗翰 (Zong-han Wu) ❹

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／協理／吳文隆 (Wen-Long Wu) ❺

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／經理／蕭秋安 (Chiu-An Hsiao) ❻



摘要

臺灣地處菲律賓海板塊與歐亞板塊交界，兩個板塊間之碰撞擠壓導致山脈的發育，同時也生成許多的活動斷層。由於這些斷層活動，臺灣自從有地震儀器紀錄以來已發生超過十數次之重大災害性地震，造成民眾重大生命財產的損失。但即使沒有引發地震，部分活動斷層仍會持續滑動並產生明顯的地表變形，從而對於國家重要交通設施產生影響，例如目前進行之國道3號田寮3號高架橋及中寮隧道改建工程，便是一個明顯的範例。傳統大地變位監測技術受限於測站之間必須能夠互相通視，因此測區大小受限。此外如果測區內並不存在一個穩定的參考點，或是採用的參考點本身也受到大地變位的影響，監測成果也會產生偏差而導致誤判。放眼國際，GPS衛星測量是目前進行廣域大地變位監測的主流方法。本文將以國道3號田寮3號高架橋及中寮隧道大地變位監測計畫為例，簡要介紹如何利用GPS衛星測量解算與分析廣域大地變位之形態與特性。



Large-Area Crustal Deformation Monitoring by GPS- The Case of Tianliao No. 3 Viaduct and Jhongliao Tunnel on No. 3 National Freeway

Abstract

Taiwan is situated at the boundary of Philippine Sea Plate and Eurasian Plate. The fast mountain building processing has resulted in many active faults on the island. Due to these active faults, there have been many devastating earthquakes in Taiwan that caused significant damages to the lives and properties of the general public. However, even without triggering earthquakes, some active faults continue to creep and generate a rapid and distinctive crustal deformation pattern. This rapid and distinctive crustal deformation pattern has already caused significant effects on major transportation infrastructures, for example, on the Tianliao No. 3 Viaduct and Jhongliao Tunnel on No. 3 National Freeway. The traditional geodetic monitoring technique is limited by the inter-visibility between two adjacent stations. therefore the size of survey area is generally restricted. And if there cannot be found a stable reference point in the survey area, or the adopted stable reference point is actually under the influence of crustal deformation, the monitoring results will be biased and unreliable. Currently, GPS satellite surveying is the mainstream practice to perform large-area crustal deformation monitoring. This paper will briefly introduce how GPS satellite surveying was used for monitoring the pattern of crustal deformation along and nearby Tianliao No. 3 Viaduct and Jhongliao Tunnel on No. 3 National Freeway.

3

專題報導

壹、前言

全球定位系統(Global Positioning System, GPS)是美國為了軍事與民用導航目的而發展的衛星定位系統，自1978年第一顆衛星升空以來，至今已經有40年的歷史。最早發射的第一代(Block I) GPS衛星目前已全數停止使用，現在正在使用的衛星都屬於第二代(Block II)衛星，包含了Block II-R、II-RM、及II-F衛星。而美國從2018年開始發射的衛星都將是屬於第三代(Block III)衛星。

GPS的原始發展目的是為了導航用途，因此原本設想的定位方法是絕對定位(也稱為單點定位)，且定位精度等級僅在公尺等級。在1980年間，測量界提出將相對定位方法應用到GPS，並搭配使用精度較高的載波觀測量，使得GPS衛星

定位精度可以提升到公分等級，大幅擴展了GPS的應用領域。

在臺灣，最早使用高精度GPS相對定位技術是在測量界。內政部地政司自1993年起便開始採用GPS定位進行國家基本測量，在臺灣本島及外島設立8個GPS連續追蹤站，陸續完成一、二等GPS衛星控制點的建置工作，藉此定義1997臺灣大地基準(Taiwan Geodetic Datum 1997, TWD97)，並於2000年正式公告TWD97為國家測量基準(圖1)。

除內政部地政司外，臺灣許多單位也陸續運用GPS相對定位技術於大地變位監測，例如經濟部中央地質調查所、交通部中央氣象局、內

政部國土測繪中心等。主要的應用是瞭解臺灣地殼變動狀況與建立水平速度場(圖2)，以及監測斷層活動情形等。

本文將以國道3號田寮3號高架橋及中寮隧道大地變位監測計畫為例，簡要地介紹如何利用GPS衛星測量解算與分析廣域大地變位之形態與特性(楊名及景國恩, 2013; 2014; 2016)。

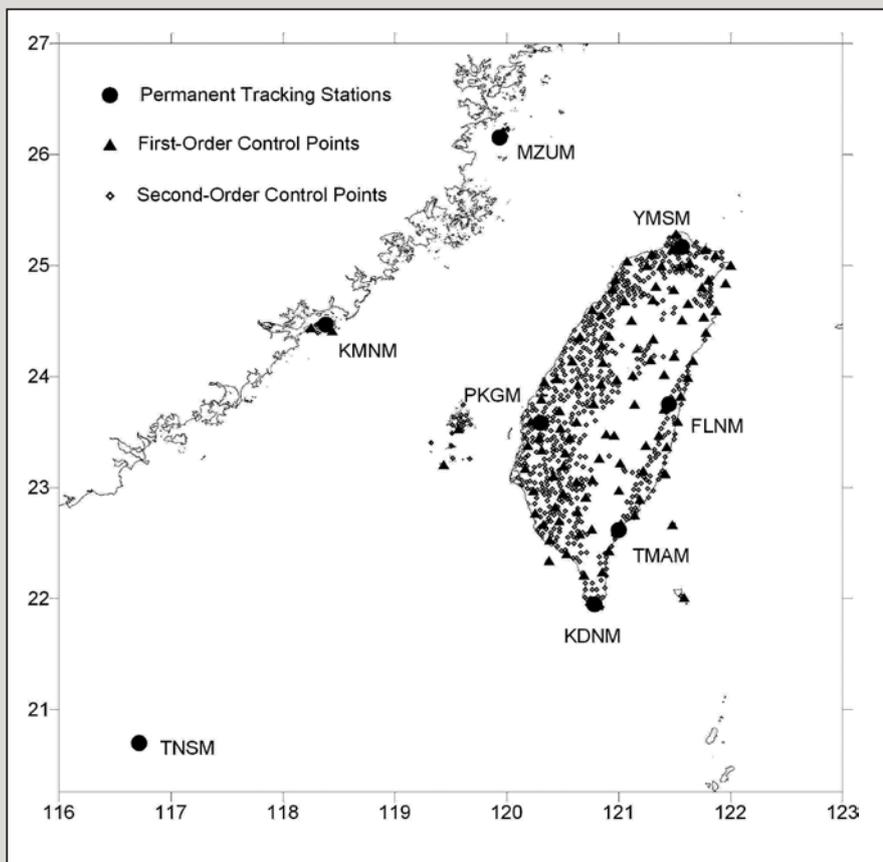


圖1 TWD97臺灣大地基準控制點分布圖(Yang et al., 2001)

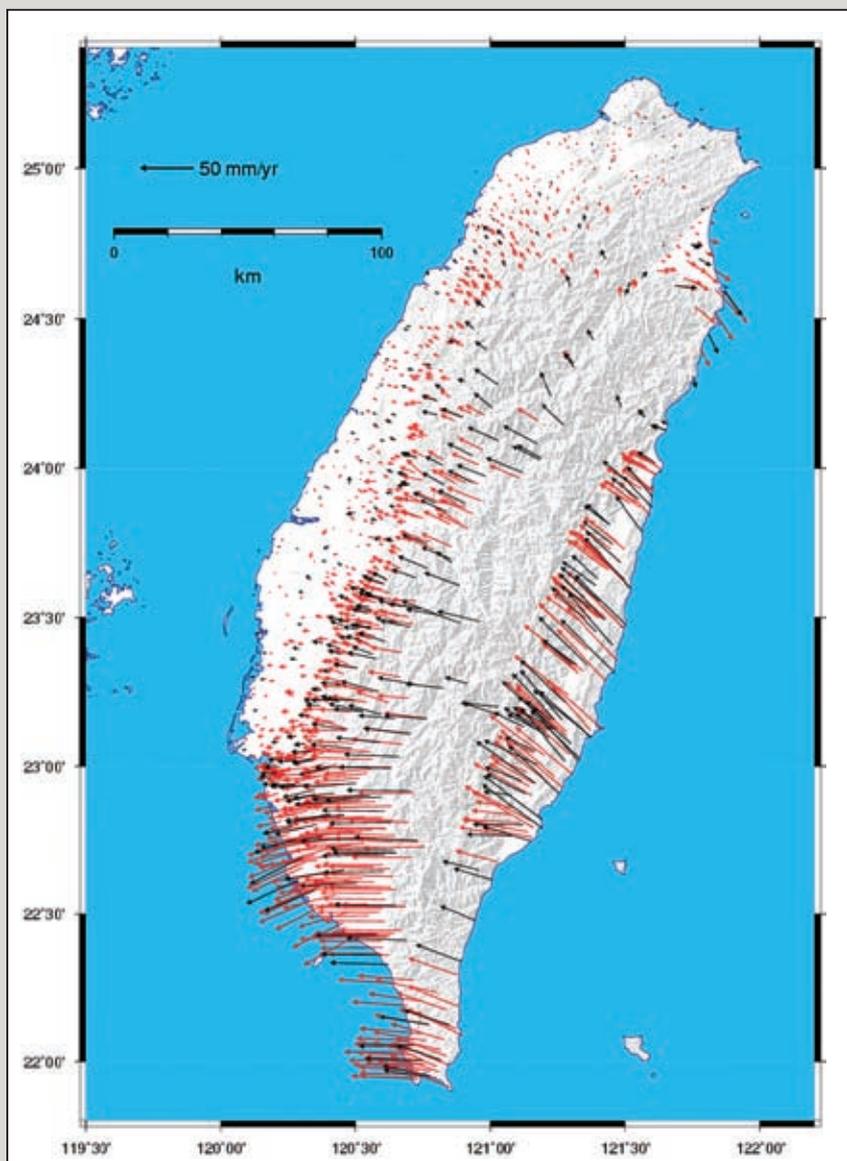


圖2 臺灣本島GPS水平速度場(楊名等, 2013)

貳、廣域大地變位之GPS解算與分析

本計畫之測區為國道3號田寮3號高架橋(南下378k+298~378k+713;北上378k+298~378k+673)及中寮隧道(南下378k+795~380k+653;北上378k+825~380k+653)。該區受大地擠壓與斷層活動等地質因素影響,持續導致橋隧結構產生變位,藉由蒐集監測資料並加以解算,以探討結構破壞與構造活動之相關性。

二階段為求解測區內GPS觀測站之坐標。考慮各國內約制站與測區內GPS觀測站間之距離,採用墾丁站KDNM、金門站KMNM、北港站PKGM、澎湖白沙S01R等4個測站為約制站(圖4)。根據KDNM、KMNM、PKGM、S01R測站於ITRF坐標系統下之坐標及速度場,再以線性關係式推出此4個連續站於觀測時刻之坐標並加以約制,解算測區內GPS觀測站定義於ITRF系統之坐標。由於約制之國內連續站與測區GPS觀測站距離皆在200公里內,相較於使用國際連續站聯合解算,

由於臺灣為歐亞板塊與菲律賓海板塊相互擠壓造成之碰撞造山帶,使得臺灣本島內部並不存在一個穩定的、位置不變的參考點。換言之,臺灣本島之地殼隨時都處於板塊聚合變形的狀態下。因此為瞭解計畫測區之地表變形行為,藉由與國際IGS (International GNSS Service)連續站資料之聯合解算,求解各測站定義於全球參考框架ITRF (International Terrestrial Reference Frame)之每日坐標解,以掌握測區地表位移之型態。

GPS解算過程分為兩個階段。第一個階段為求解國內約制連續站之坐標及速度場。採用IGS公告俄羅斯Irkutsk連續站(IRKT)、日本Tsukuba連續站(TSKB)、美國關島連續站(GUAM)、澳洲Perth連續站(PERT)、及印度Bangalore連續站(IISC),如圖3所示,以ITRF坐標系統時刻2000.0之位置作為計算依據,求解國內約制連續站於ITRF坐標系統時刻2000.0之坐標及速度場。第

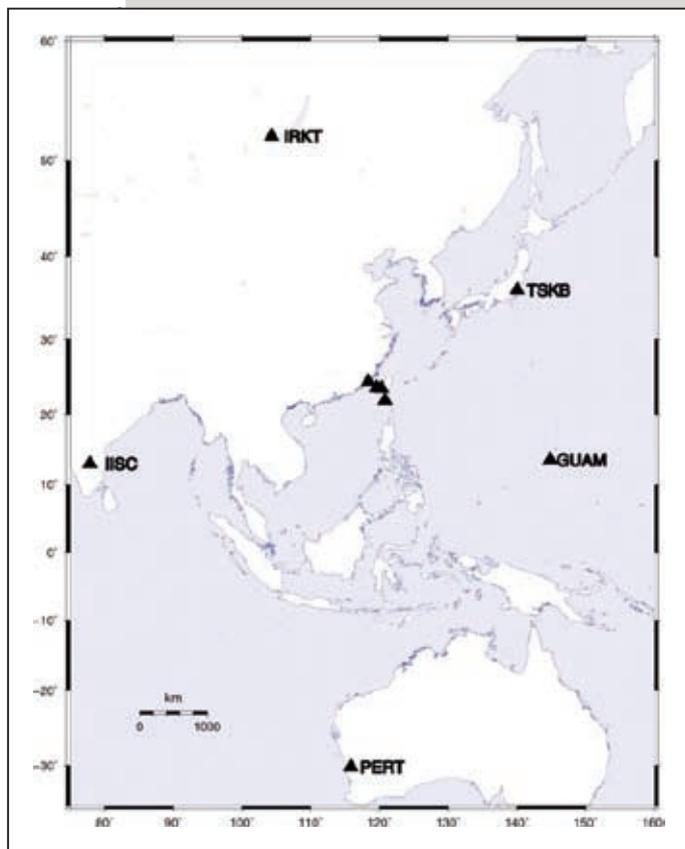


圖3 採用之IGS連續站分佈圖

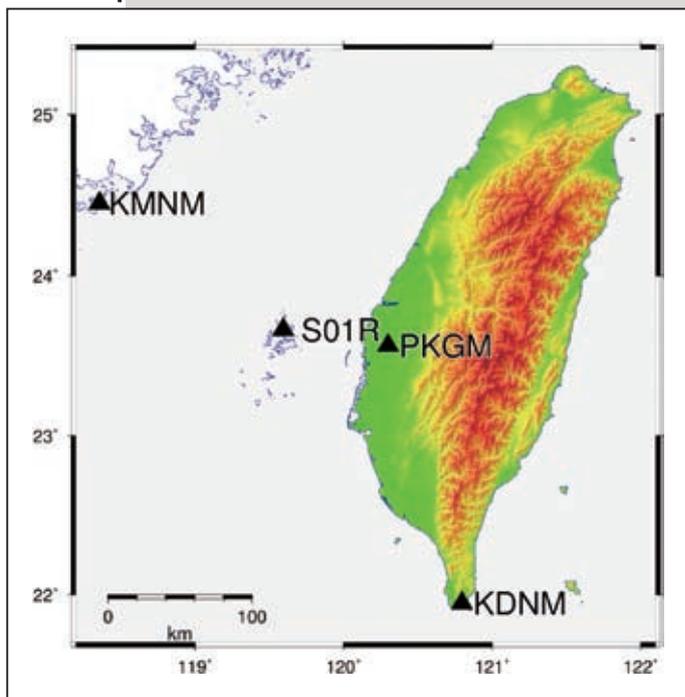


圖4 採用之國內GPS約制站分佈圖

可避免因基線過長造成解算精度不佳之情形。此外為避免此4個約制站的資料品質不佳而造成解算錯誤，在每次計算前將進行約制點檢核，並排除資料品質不佳的約制站。

在本計畫中，我們使用由瑞士伯恩大學發展的Bernese 5.0軟體解算IGS連續站、國內GPS約制站、鄰近區域以及測區內之GPS連續站；另外利用TBC (Trimble Business Center)軟體解算測區內大地變位監測點的GPS資料。測區內GPS點位分佈如圖5所示，其中藍點代表連續站，黑點為大地變位監測點。

利用Bernese解算出各GPS連續站於ITRF框架下之坐標每日解，將第一筆坐標定為起算原點，可繪製出各GPS連續站的坐標時間序列，如圖6所示。接著使用空間濾波(spatial filtering)技術來提高坐標成果精度。該技術首先剔除各站坐標時間序列內殘差量大於3倍標準差的資料，接著消除與空間相關的雜訊(Wdowinski et al., 1997)。完成空間濾波後，再以最小二乘法得到擬合線，並由此擬合線推求每日之坐標成果，在評估各站速度量時，以公式(1)對各站坐標進行時間序列擬合。

$$x_n^i(t) = a_n^i + b_n^i t + \sum_{j=1}^{n_g} g_{nj}^i H(t_i - T_{gj}) + \sum_{j=1}^{n_h} k_{nj}^i H(t_i - T_{hj}) t_i + v_n^i \quad (1)$$

其中， n 代表第 n 個測站， i 代表坐標之 N、E、U 分量， $x(t)$ 為坐標值、 a 為截距、 b 為速度(斜率)、 g 為事件(自然事件如地震造成的位移，人為因素如更換天線盤，或是其他原因造成坐標的位移)、 k 為事件(天線盤產生位移，且速度發生改變)、 H 為階層函數、 t 為時間(單位為年)、 T 為發生事件的時間點(單位為年)、 v 為殘差。圖7為推算GPS連續站速度量之示意圖。

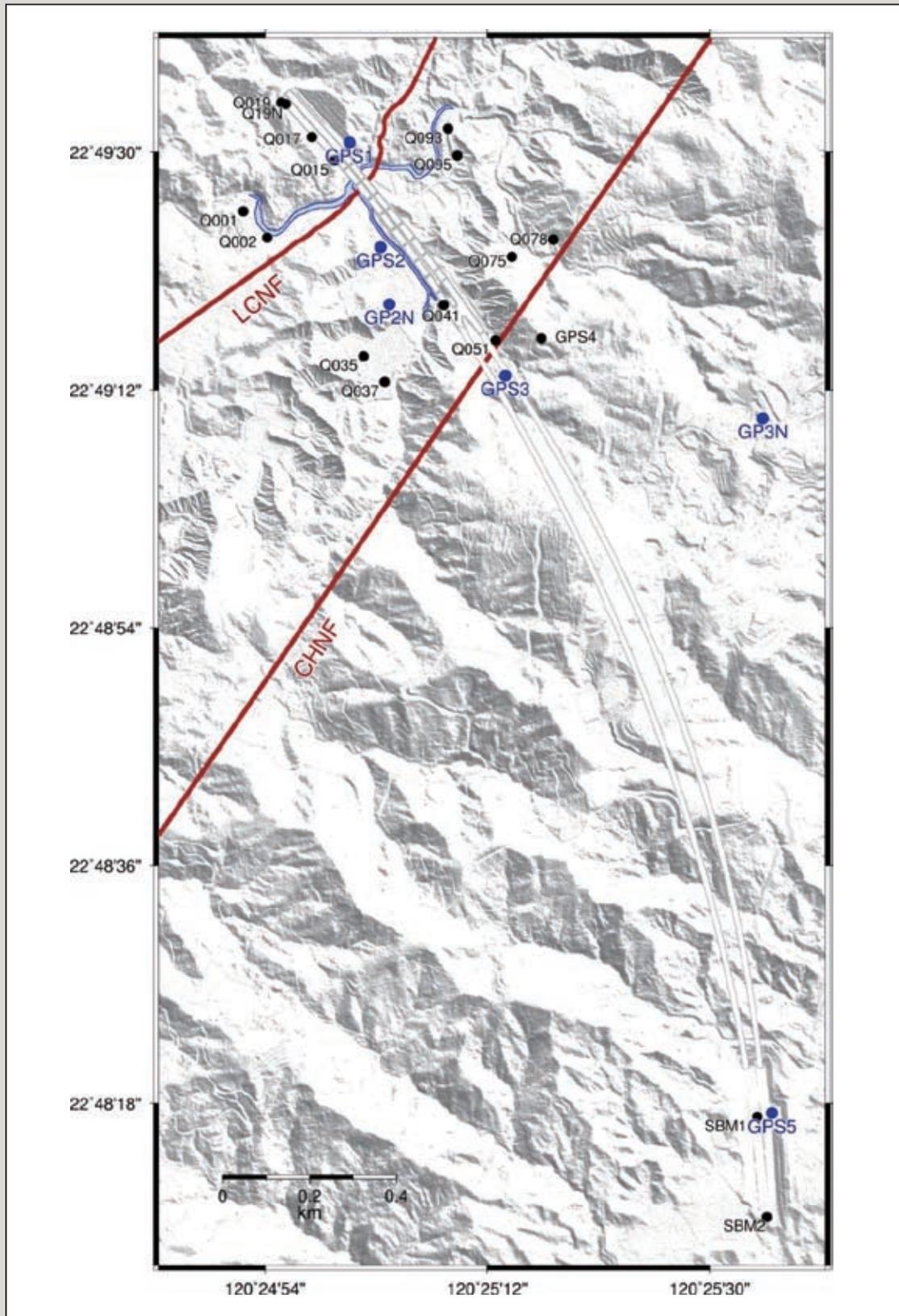


圖5 測區GPS監測點分佈圖。長條形為國道3號田寮3號高架橋和中寮隧道之位置。藍色區域為河流。紅色為斷層線。LCNF：龍船斷層，CHNF旗山斷層。

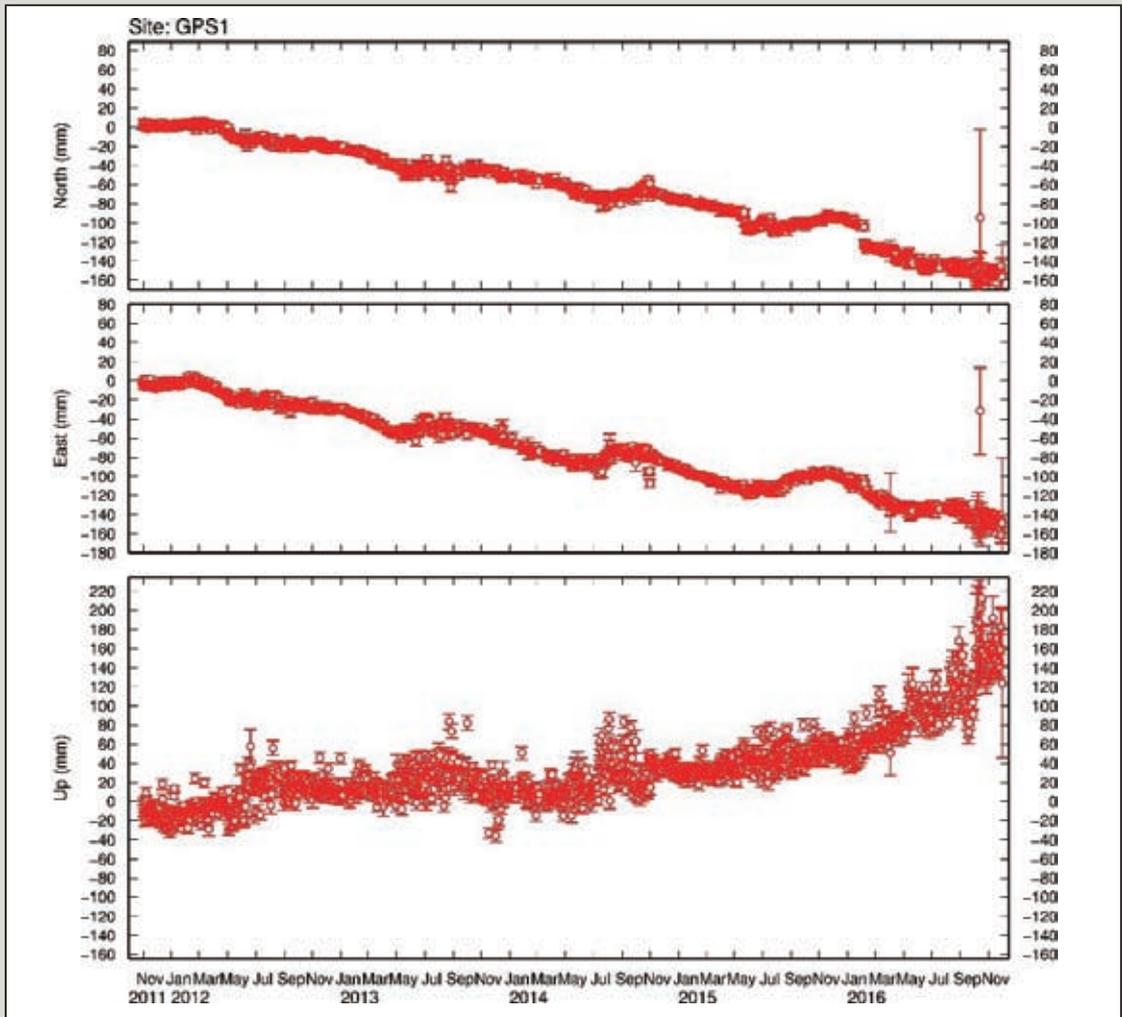


圖6 連續站GPS1坐標時間序列圖。

不同於GPS連續站每天都可獲得觀測資料，測區之大地變位監測點每一個月或每三個月才進行一次觀測，故無法對這些點位進行空間濾波，而是直接將監測點坐標時間序列使用公式(1)進行擬合來求得速度量，如圖8所示。

本計畫除GPS連續站及大地變位監測點資料外，並收集導線測量及水準測量資料以進一步對於測區控制點進行加密。導線點之坐標及水準點之高程均是根據GPS連續站及大地變位監測點坐標時間序列解算而得。

將2011年11月至2016年2月期間之大地監測成果的水平速度場、高程速度場分別繪於圖

9、圖10。由二圖可知，速度量之大小和方向在龍船斷層和旗山斷層的南北側有明顯不同，因此可將此區域劃分為三個塊體：龍船斷層以北(即龍船斷層之下盤)為塊體一(Block I)、龍船斷層以南至旗山斷層以北(即龍船斷層之上盤、旗山斷層之下盤)為塊體二(Block II)、旗山斷層以南(即旗山斷層之上盤)為塊體三(Block III)。在水平速度場方面，由圖9可知，塊體一主要以8~37 mm/yr之速度量朝西南方向移動並且具有逆時針旋轉之特性。塊體二主要朝西北方向移動，速度量值在接近龍船斷層時逐漸遞減並且有逆時針旋轉，並且在高架橋兩側略有速度差異，高架橋左側速度量在39~62 mm/yr，高架橋右側速度量在39~57 mm/yr。在垂直速度場方面，由

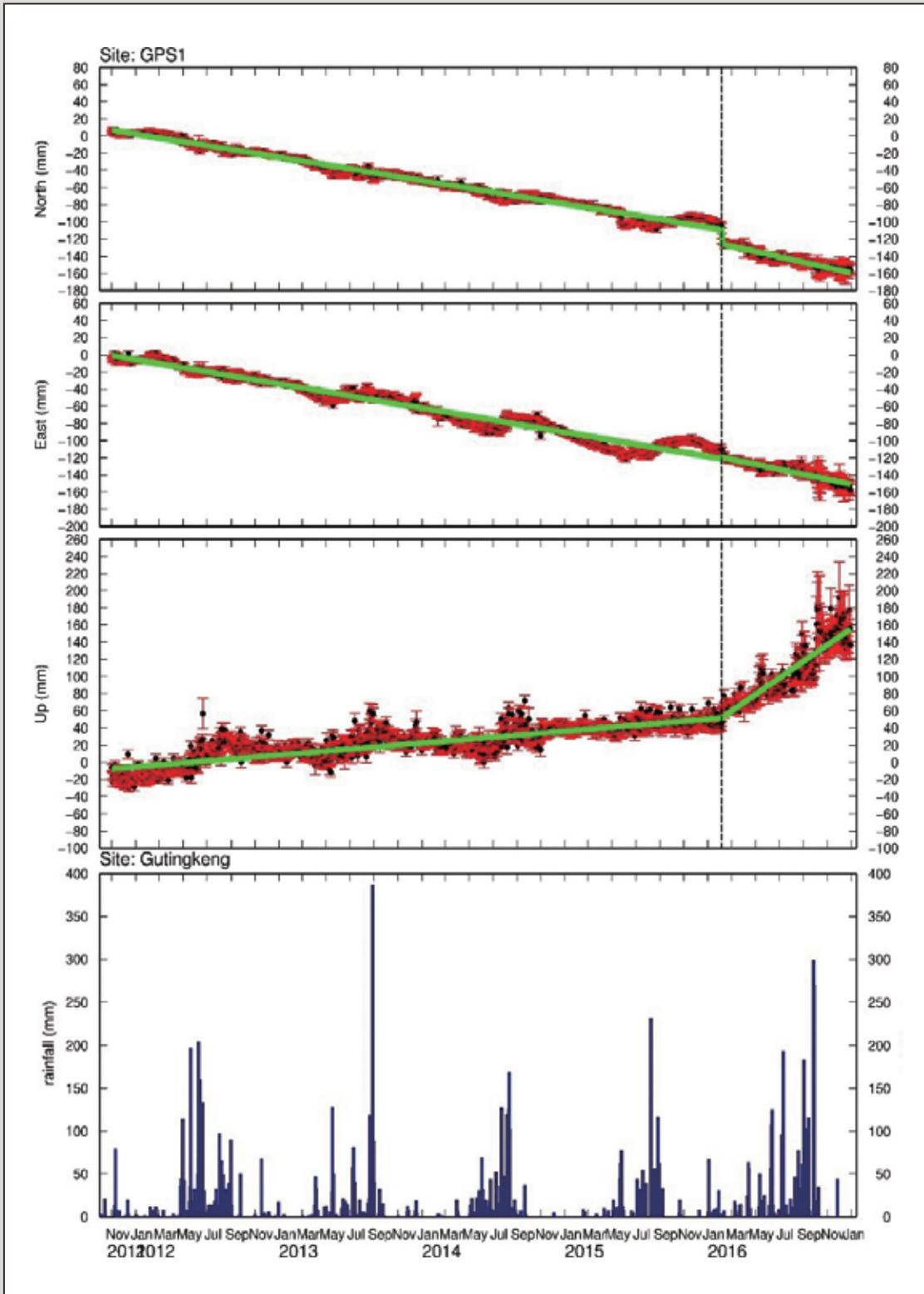


圖7 連續站GPS1速度量推求示意圖。黑色點為空間濾波後的坐標，綠色擬合線之斜率為點位速度量，黑色虛線為2016年高雄美濃地震發生時間。最底端的長條圖為古亭坑站雨量資料。

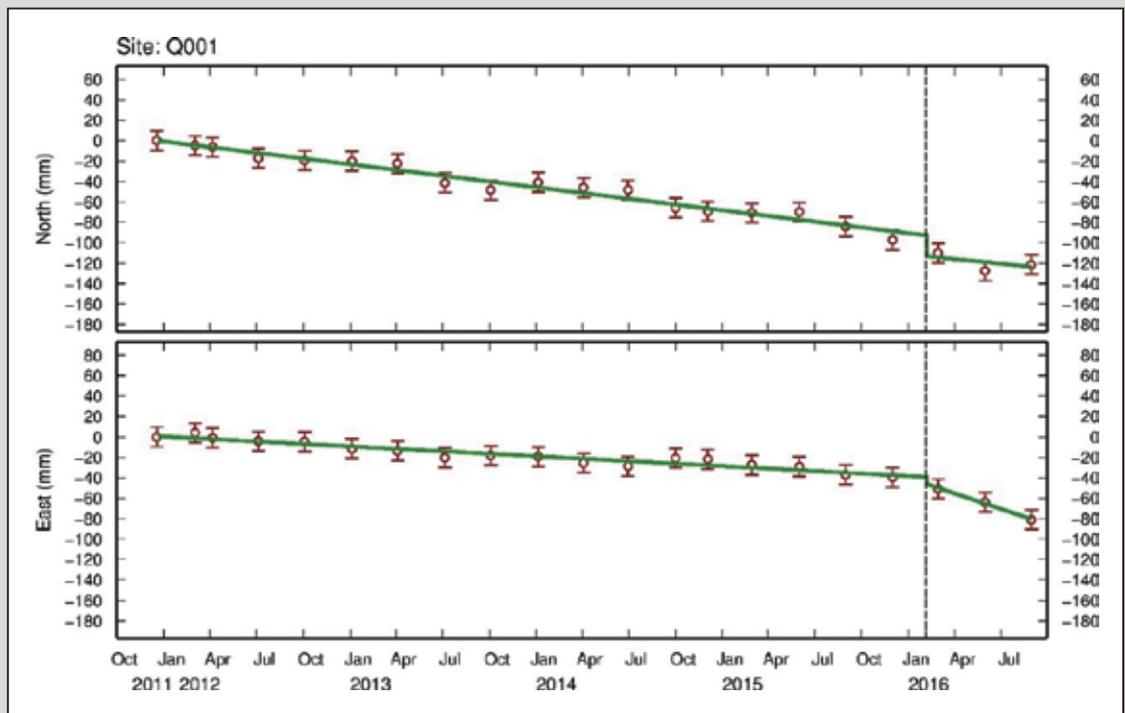


圖8 大地監測點Q001之速度量推求示意圖。紅色圓圈為坐標時間序列。綠色擬合線之斜率為點位速度量。黑色虛線為2016年高雄美濃地震發生時間。

圖10可知，塊體三的速度量最小，其次是塊體一，塊體二的速度量最為顯著。塊體一至塊體二的速度量變化為逐漸遞增，至中寮隧道北出口附近為最大值。塊體二至塊體三的速度量在中寮隧道北出口附近有相當顯著的差異，而塊體三本身的速度量變化並不明顯。

為了進一步分析斷層活動對於田寮3號高架橋及中寮隧道之影響，將水平速度量分解為平行國道3號高速公路走向與垂直高速公路走向，連同垂直速度量得到三維速度剖面，如圖11和圖12所示。由三維速度剖面可知，垂直速度在跨越旗山斷層有約80 mm/yr之顯著速度量差異(圖12最下方子圖)，造成中寮隧道北口的路面不斷地抬升；而水平速度則在兩個斷層之間有約60 mm/yr的變化差異(圖12中央子圖)，造成田寮3號高架橋的橋面伸縮縫不斷地擠壓。圖13則是顯示此測區的主應變率分佈，主要擠壓點明顯地是在田寮3號高架橋的橋台兩側(跨龍船斷層

處)，而主要伸張點則是在中寮隧道內接近北口處(跨旗山斷層處)。

由以上監測成果分析可知，自國道3號通車後，田寮3號高架橋及中寮隧道之大地地盤持續發生快速且顯著的水平及垂直變形，若忽視此問題將導致高架橋與隧道之結構受損。因此，高速公路局與台灣世曦公司根據以上廣域大地變位監測成果，設計了國道3號田寮3號高架橋及中寮隧道長期改善工程，將此路段改為柔性構造物，以路堤取代高架橋，並以路塹取代隧道(林佳煜，2017)。這是因應持續且快速的地表變形對國家重要經建工程造成潛在性災害影響的一個明顯範例。

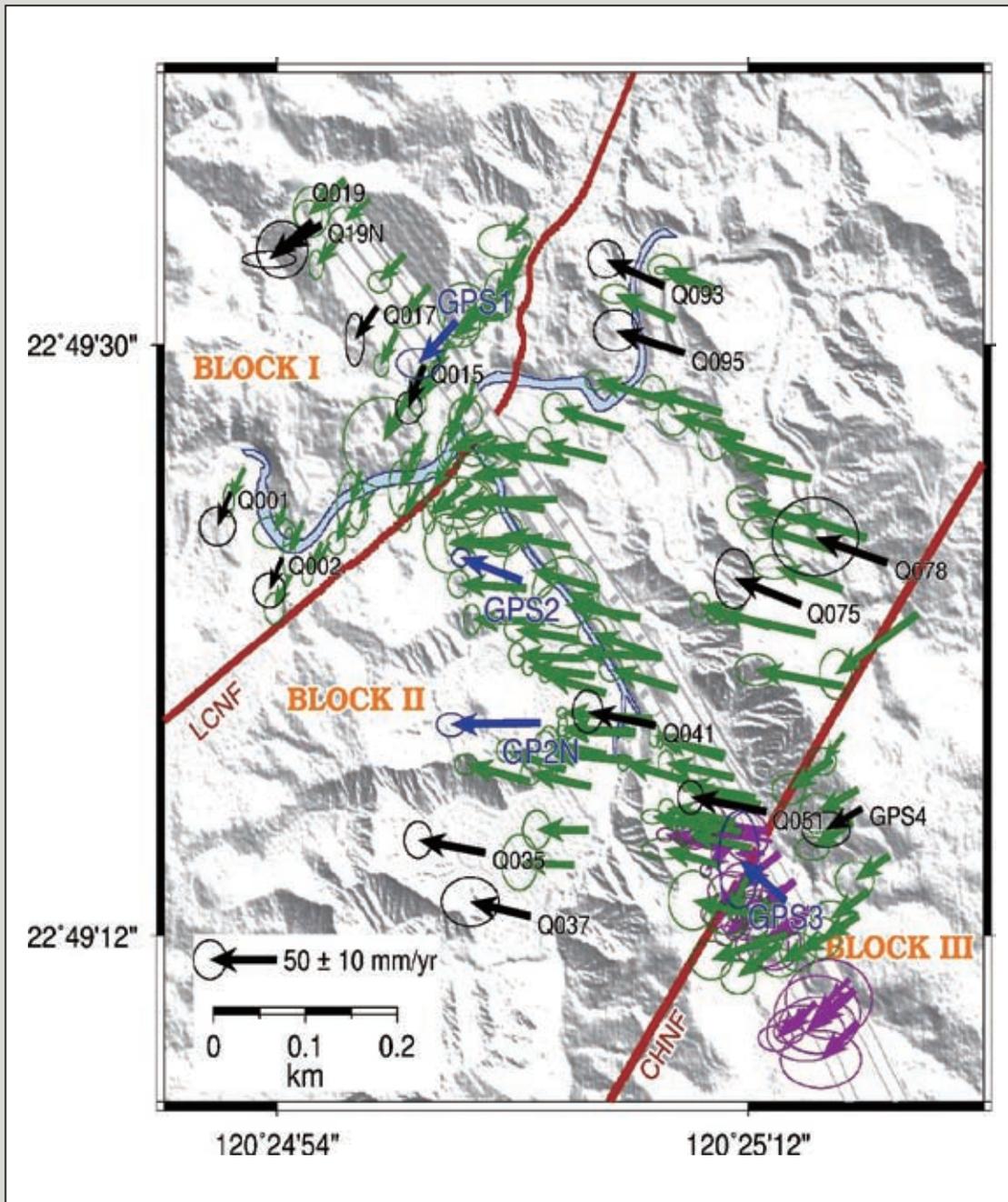


圖9 GPS監測點和導線點參考於ITRF之水平速度場(隧道北口至高架橋一帶)。藍色、黑色箭頭分別代表GPS連續站和大地變位監測點資料推求之速度向量。紫色和綠色箭頭分別代表隧道內、外導線點推求之速度向量。95%可信區間之誤差橢圓位於各速度量頂端。長條形為國道三號田寮三號高架橋和中寮隧道之位置。藍色區域為河流。紅色線條為斷層之位置。LCNF：龍船斷層，CHNF：旗山斷層。

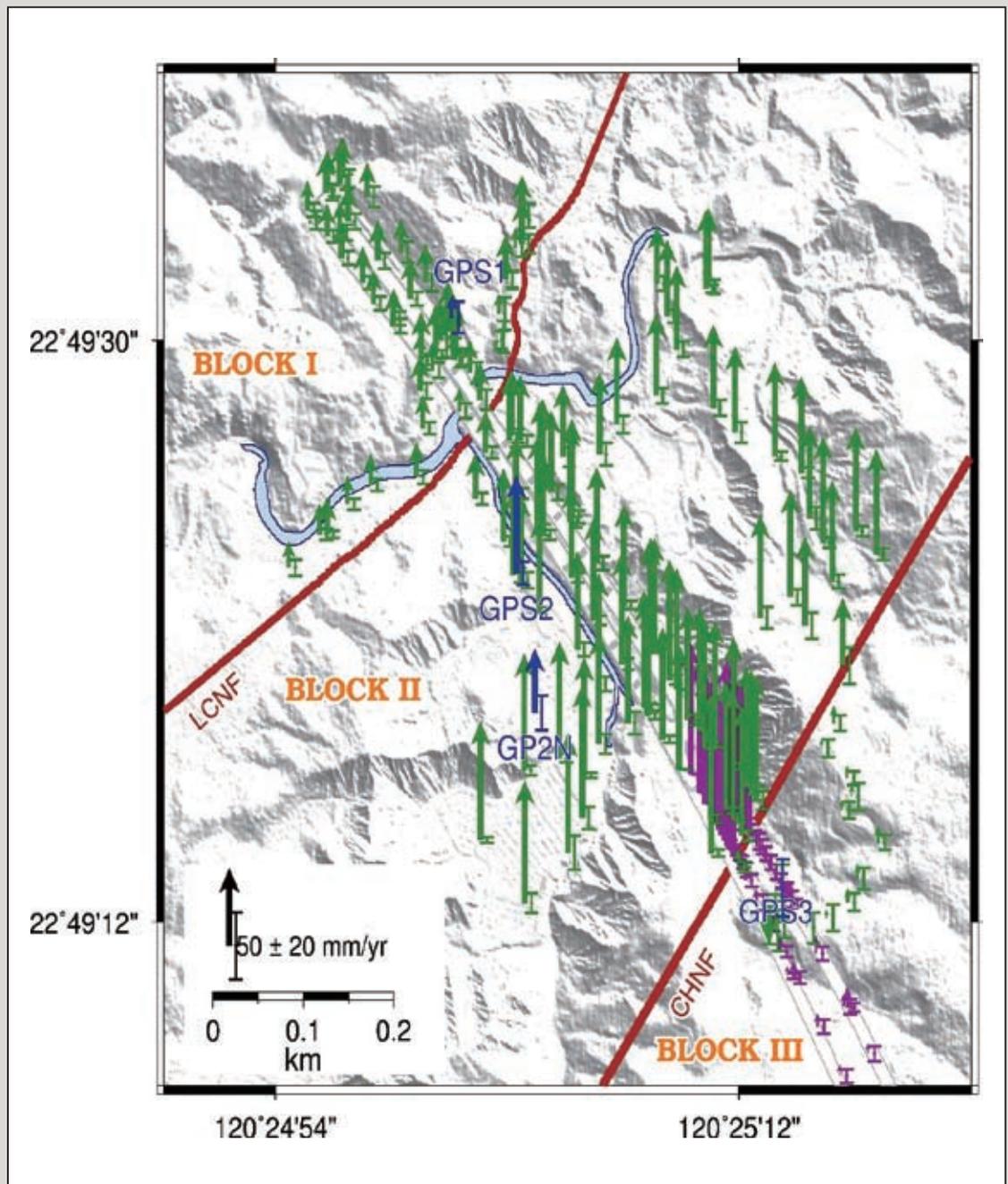


圖10 GPS連續站和水準點參考於ITRF之垂直速度場(隧道北口至高架橋一帶)。藍色箭頭代表連續站之速度量。綠色、紫色箭頭分別代表隧道外、隧道內水準點推求之速度量。95%可信區間之誤差範圍位於各速度量底端。長條形為國道三號田寮三號高架橋和中寮隧道之位置。藍色區域為河流。紅色線條為斷層之位置。LCNF：龍船斷層，CHNF：旗山斷層。

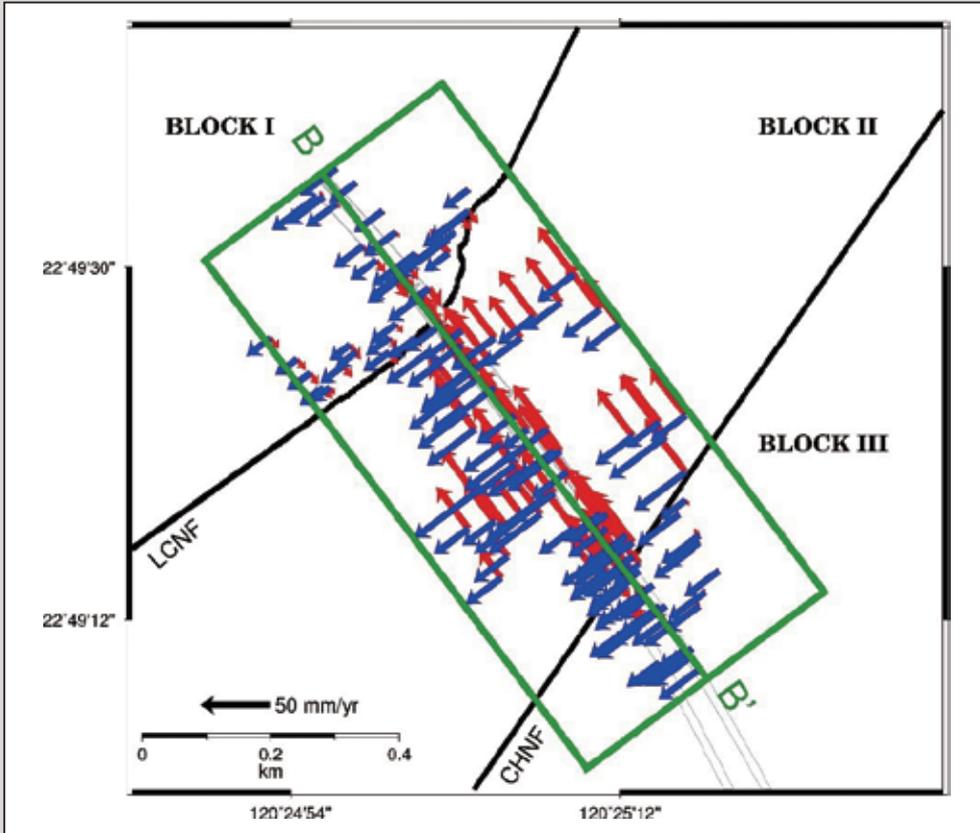


圖 11 水平速度場之速度剖面圖(沿田寮3號高架橋與中寮隧道走向)。綠色方框為速度剖面的範圍，方框內的點位速度量投影至B-B'剖面上，產生平行和垂直高架橋方向的速度量。平行高架橋走向分量以朝西北方向為正，垂直高架橋走向分量以朝西南方向為正。

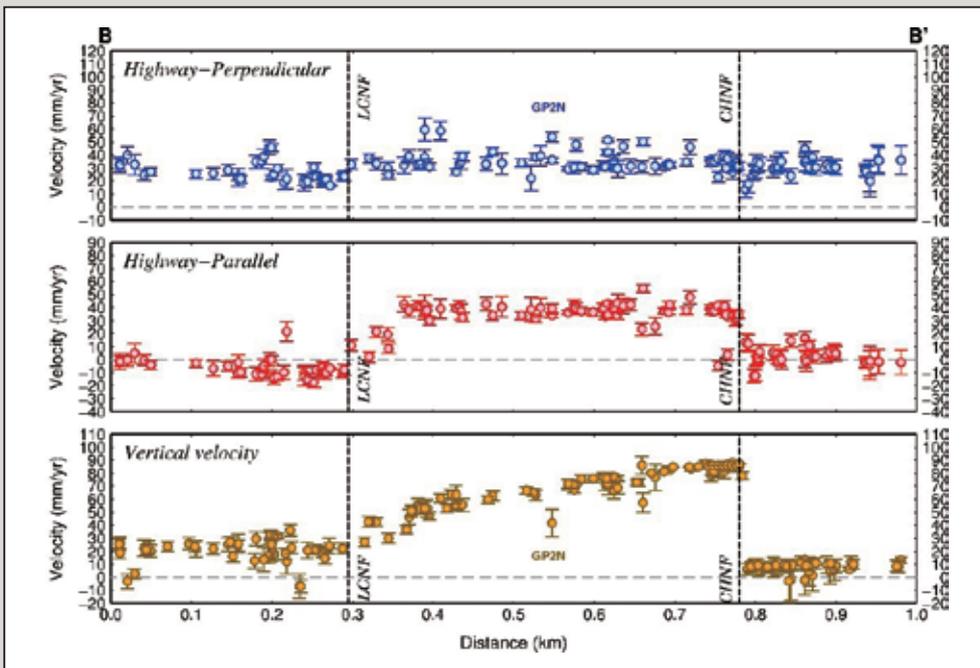


圖 12 三維速度剖面圖(沿B-B'剖面)。上方為垂直高架橋走向之速度分量，中間為平行高架橋走向之速度分量，下方為垂直速度量。X軸為沿B-B'剖面之投影距離。

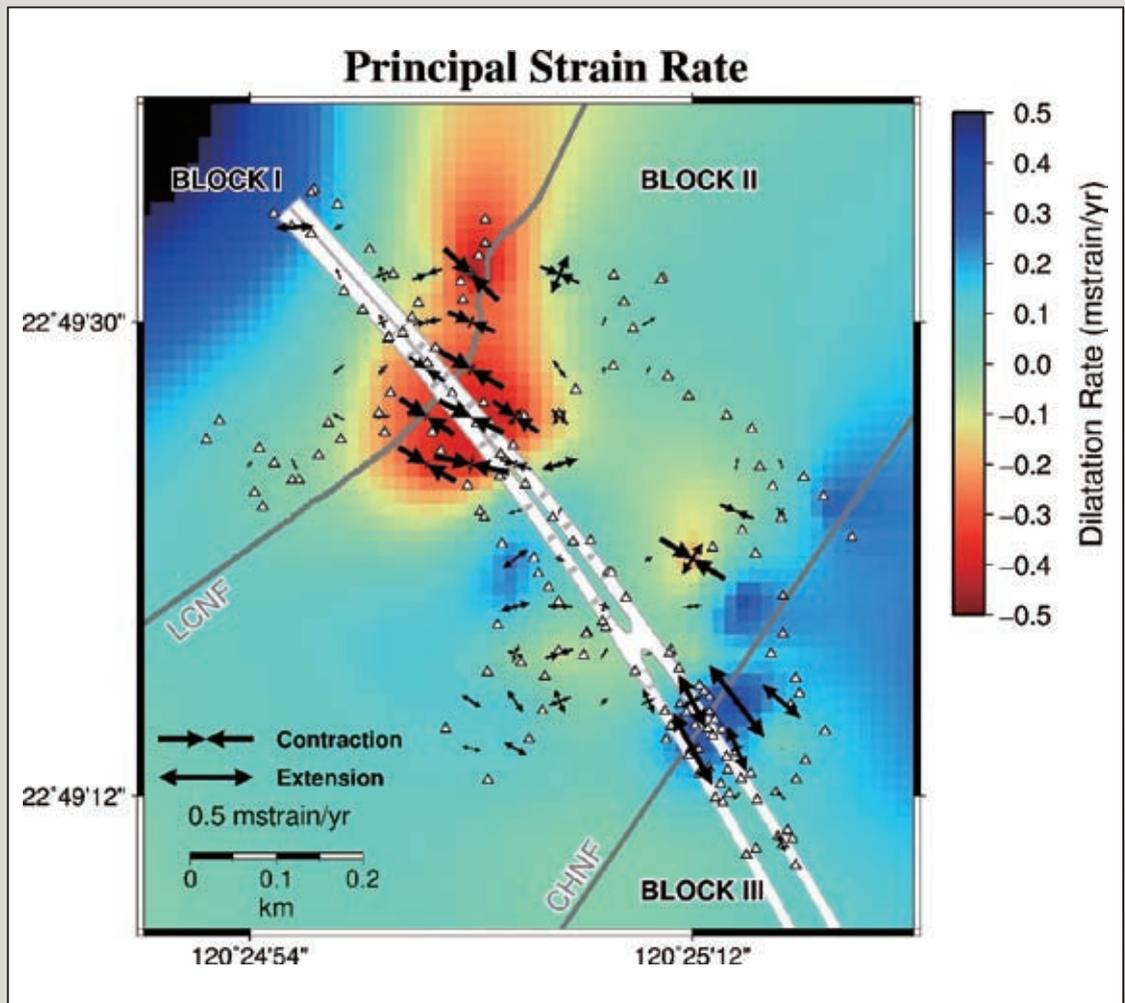


圖13 測區主應變率分佈圖。數值底圖為面膨脹率，正值代表伸張，負值代表擠壓。互相靠近的箭頭代表擠壓作用，互相遠離的箭頭代表伸張作用。白色三角形為測站位置。

參、結論

2010年4月25日北二高基隆七堵3.1K段嚴重走山事件以及雲林嚴重地層下陷對高速鐵路軌道線形的影響等事例，皆提醒我們持續且顯著的地表變形可能對國家重要經建設施造成潛在性的災害，必須防患於未然，也突顯出廣域大地變位監測的重要性。放眼國際，以GPS衛星測量進行廣域大地變位監測已是主流作法。傳統大地變位監測技術受限於測站之間必須能夠互相通視，因此測區範圍大小受限，同時如果測區內並不存在一個穩定的參考點，或是採用的

參考點本身也受到大地變位的影響，監測成果便會產生偏差而導致誤判。衛星測量則可藉由與國際IGS連續站資料之聯合解算，獲得各測站定義於全球參考框架之坐標與位移速度量，便可以從全球的觀點精確掌握調查區內地表位移之型態與特性，進而擬定對策解決問題。

參考文獻

1. 林佳煜，國道3號田寮3號高架橋及中寮隧道長期改善工程設計理念，國道3號田寮3號高架橋及中寮隧道長期改善工程技術研討會，106年12月22日，國立成功大學，臺南，(2017)。
2. 楊名、陳國華、景國恩，102年度建置現代化TWD97國家坐標系統變位模式，內政部國土測繪中心委託研究計畫報告，234頁，(2013)。
3. 楊名、景國恩，國道3號田寮3號高架橋及中寮隧道安全檢測、監測技術服務委外監測變位分析與評估工作，台灣世曦工程顧問公司委託計畫報告，145頁，(2013)。
4. 楊名、景國恩，國道3號田寮3號高架橋及中寮隧道安全檢測、監測技術服務委外監測變位分析與評估工作(103)，台灣世曦工程顧問公司委託計畫報告，162頁，(2014)。
5. 楊名、景國恩，國道3號田寮3號高架橋及中寮隧道長期改善設計、監測技術服務委外大地變位監測分析與評估工作(105)，台灣世曦工程顧問公司委託計畫報告，189頁，(2016)。
6. Wdowinski, S., Bock, Y., Zhang, J., Fang, P., and Genrich, J., Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the 1922 Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 102(B8): 18057-18070. (1977)
7. Yang, M., C. L. Tseng, and J. Y. Yu, Establishment and maintenance of Taiwan geodetic datum 1997, *Journal of Surveying Engineering-ASCE*, 127(4): 119-132. (2001)



特殊環境之潛盾隧道地中接合技術與風險探討

關鍵詞(Key Words)：潛盾隧道(Shield tunnel)、地中接合(underground connection)、風險(risk)

- 台灣電力股份有限公司輸變電工程處南區施工處／副處長／陳保陵 (Chen, Pao-Ling) ❶
 台灣電力股份有限公司輸變電工程處南區施工處／第六工務段段／經理／竺文彥 (Chu, Wen-Yen) ❷
 台灣電力股份有限公司輸變電工程處南區施工處／超設組／課長／薛振興 (Hsueh, Chen-Hsing) ❸
 台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／副理／張嘉興 (Chang, Chia-Shin) ❹
 台灣世曦工程顧問股份有限公司／管理部／協理／李魁士 (Li, Kweishr) ❺
 台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／計畫經理／邱志榮 (Chen, Hsin-Chi) ❻
 台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／正工程師／陳信吉 (Chiu, Chih-Jung) ❼



摘要

潛盾隧道工程之規劃、設計及施工，除需考量外在可能遭遇之工程環境因素外，潛盾機本身可能遭遇之相關風險，亦為規設單位及承攬廠商研析之主要重點。尤其臺灣之地質及水文條件複雜，因此對採用長距離高速潛盾及地中接合等施工方式，從規劃、設計一直到施工，隨已滿足各階段的規範要求，包括調查及設計條件之相關規定，但仍於施工時面臨不同之工程課題，故期望本工程經驗可作為類似工程之參考。



Discussion on Underground Connection Techniques and Risks of Shield Tunnels in Special Environments

Abstract

In a shield tunneling construction project, the environmental factors should be concerned at the planning, design and execution stage, as well as the risk of some negative effects on the tunnel boring machines. The safety of the tunnel boring machines is a main topic for engineers who implement the designing and execution work in the project. Due to the variability of geological structure and hydrologic environment in Taiwan, the long-distance high speed shield tunneling method and underground connection technique were adopted in the execution process in this project. From the planning, design to execution stage, the requirements in design rules were entirely met, including the rules of investigations and external conditions. Though the project was well-prepared, we faced a plenty of different problems during execution. Therefore, we decided to preserve these experience, and hope that they will be useful to similar constructions in the future.

3

專題報導

壹、前言

臺灣都會區人口密集、地面交通繁忙、道路下方管線多、新建工程受用地限制、沿線施工條件情況下(無法設置潛盾發進及到達之工作井)，長距離潛盾工程及地中接合方式，未來必成為地下輸電線路及捷運運輸等工程採用之趨勢，而潛盾工程之開挖施工系統必須能充分適應工址現況作業條件，尤其面對複雜地質及水文條件，採用開挖施工機具、設備及配合之施工作業系統，須能充分相互配合而發揮最佳施工之成效。

潛盾施工過程為確保所遭遇地層能保持穩定，於開挖、出渣、掘進時開挖面能保持平衡狀況。因此潛盾機必須事先予以規劃及設計，包括潛盾機開口、切削轉盤之扭力、推進千斤頂之推力及衝程、出土速度(含螺旋傳送機轉數或泥水輸送速度等)、土艙內之土壓或泥水壓等，以利施工時可平順運轉，降低可能遭遇之風險，方能如質、如期及如度之完成施工。

貳、特殊環境

本計畫潛盾工程沿線所屬小港區及大寮區，為住宅與工業集中分佈地區，其中住宅以中密度發展，工業則以高科技技術密集型與港倉儲工業為主。工程起點自南工P/S(#2直井)，沿東林路、北林路，至高坪二十二路旁之高坪配電所(高坪D/S之#3直井)，再沿大平路、新厝路，穿越新厝橋後，沿鳳林二路至工程終點之高港

超高壓變電所(高港E/S之#4直井)，全長約7km，詳圖1所示。

本工程位於臺灣西部丘陵地之南端，而由西往東大致可分為平原區之粉土質砂夾粘土為主之地層(自#2直井至#3直井之間)；穿越大坪頂鳳山丘陵地區之地層，則以泥岩/砂岩/砂質泥岩為主，N值均在50以上，泥岩之單壓強度約為5.9~16kgf/cm²(自#3直井至地中接合點)；之後為大寮平原區之地層，地層複雜以粗砂、礫石層為主體，再夾雜砂岩、砂質泥岩及粉土質粘土，礫石最大粒徑可達30cm以上，且其組成成分除砂岩外，亦存在變質砂岩及石灰岩等(自地中接合點至#4直井)，顯示本工程地質條件頗為複雜(詳圖2)，位於平原區之地下水位約在地表下2~4m，丘陵地區之地下水位則在地表下25~35m左右。



圖1 工程位置圖

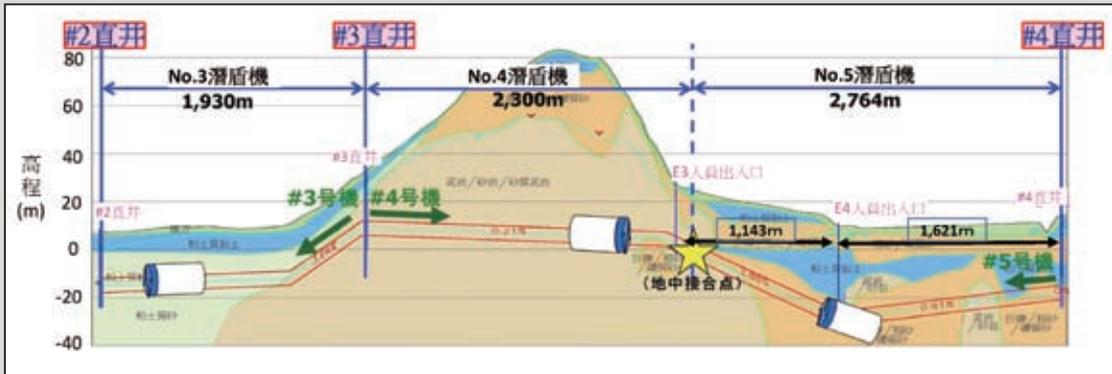


圖2 工程地質剖面圖

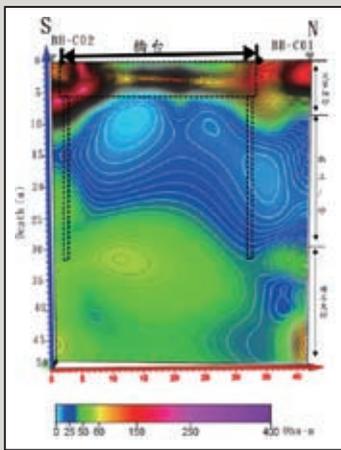


圖3 跨孔式電阻率影像探測成果圖

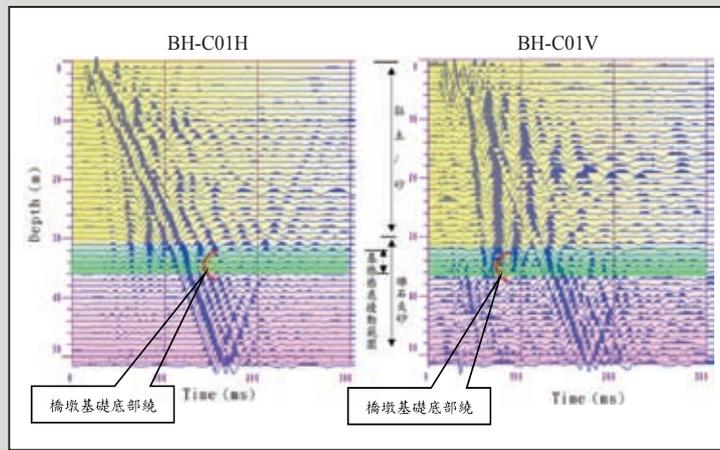


圖4 平行震測法震波系列記錄與對應界面解釋圖

此外，大寮區沿線管線密布，且本工程須穿越既有新厝橋(位於新厝路)及高港洞道(位於高港變電所)，洞道內徑5.2m，外徑5.93m；新厝橋為雙跨RC預力梁橋，除兩側橋台外於在菜大排水路中央設置一墩，橋台及墩座基礎均採基樁型式，基樁長度(不含橋台)長度為26m，而為進一步確認基樁長度，本工程於規劃設計階段，分別以跨孔式電阻率剖面探測及平行震測兩種方式進行探測，結果顯示跨孔式電阻率剖面探測成果，含鋼筋構件之基樁深度約 $32 \pm 1\text{m}$ (依電阻率等值線分佈推估)；平行震測法成果顯示北側橋梁基礎深度約 $34 \pm 1\text{m}$ ，南側約 $36 \pm 1\text{m}$ (依圖示之繞射波推估)，詳圖3及4所示。

參、規劃設計之技術探討

一、潛盾洞道線形

- (一) 由於用地取得不易，潛盾洞道除部分位於台電自有土地外，主要係配合既成道路之路型配置，以施工技術克服，避免土地購置。
- (二) 曲線段採用 $R \geq 100\text{m}$ 之方式規劃配置轉彎半徑，以減少鋼環片之設置，惟若受限於既成道路之路型，轉彎半徑亦大於30m，以利採短寬度鋼環片。
- (三) 潛盾洞道縱面線形規劃時以5%；S；0.2%方式辦理，以減少洞道內之積

水，並利潛盾洞道之施工。

(四) 因大坪頂地形起伏較大，如配合地形配置縱坡，將提高施工難度，故以近似水平的方式穿越大坪頂。

(五) 潛盾洞道於新厝路段遭遇新厝橋，因兩側用地多為私地，故僅得由橋墩下方穿越，洞道規劃由該樁基礎之下方2m處穿越(詳圖5)。

(六) 潛盾洞道於高港E/S發進後約50m遭遇台電自有之高港~五甲潛盾洞道，洞道規劃由該潛盾洞道之下方至少3m處穿越(詳圖6)。

二、潛盾洞道規劃

本工程潛盾洞道採用內徑5.7m ϕ ，詳圖7所示。洞道施築共採3部潛盾機，分別由No.3潛盾機由高坪D/S向南工P/S發進、No.4潛盾機由高坪D/S向高港E/S發進、No.5潛盾機由高港E/S向高坪D/S發進。沿線除#2~#4直井外，因無適當用地做為潛盾到達之用，故規劃No.4及No.5潛盾機採地中接合方式銜接。

潛盾洞道施工之最大縱坡並無相關限制，惟參考日本勞動安全衛生規則第422條之規定，考量潛盾隧道施工運送之工作性，在隧道縱坡超出5%以上時，需輔以必要之特殊輔助設備。雖在日本已有20%坡度電纜洞道採潛盾機施築完成之案例，但檢視本工程條件，採大坡度之潛盾隧道並未能大幅縮減直井深度。故規畫潛



圖5 新厝橋與基礎示意圖及現況圖

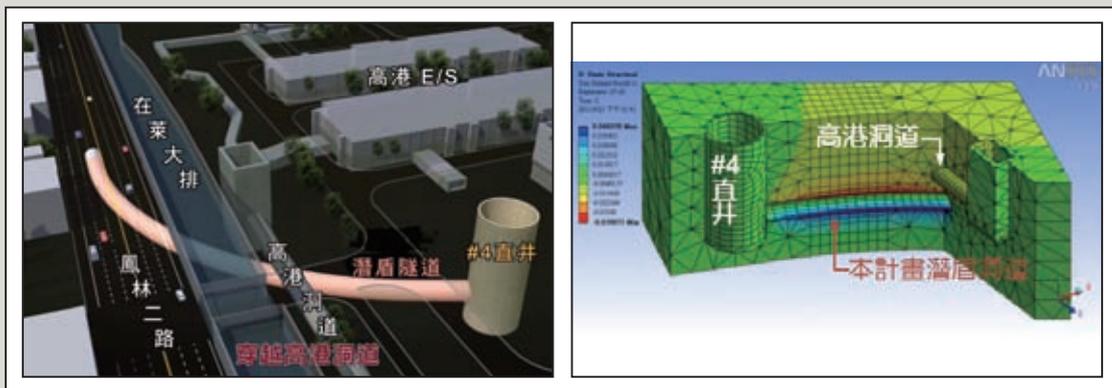


圖6 本工程洞道穿越高港五甲洞道下方示意圖及三維數值模擬結果

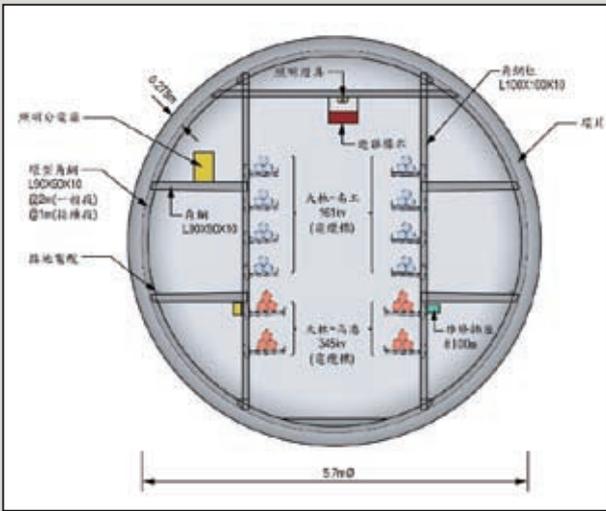


圖7 潛盾洞道斷面配置示意圖

盾隧道之最大縱坡以不大於4%作為洞道佈設之評估標準。而考慮洞道內之排水，本工程洞道路線之最小縱坡則採0.2%(詳圖2)。

肆、施工風險與對策

本工程之主要施工風險為地中接合工程，由於本工程受限於用地、交通量大、且地下管線密集，因此以潛盾地中接合方式克服所遭遇之困境，並在經濟性及不影響周邊環境考量下，以機械式潛盾機進行地中銜接，相關施工風險揭示與要求均已於機關需求書及潛盾施工規範詳列。統包商依招標文件之規定，於施工階段同步進行細部設計，並針對內外可能遭遇之風險進行詳細之評估，包括地中接合地點之檢討、施工流程、準備作業之規劃及緊急應變計畫等。

一、地中接合點之地質及測量用觀測孔

本工程所規劃地中接合位置為里程C2+300m處，詳圖8及9所示。即位於新厝路斜

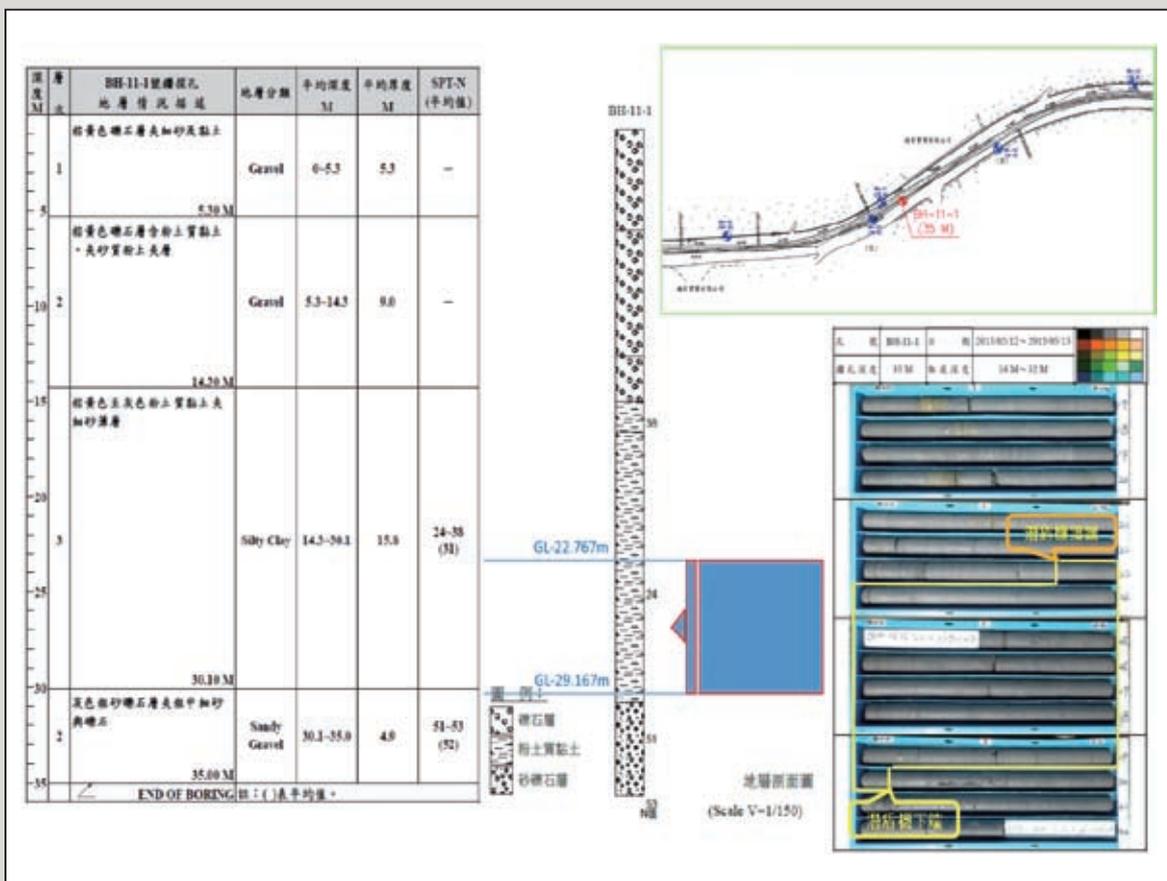


圖8 地中接合之地質條件



圖9 地中接合點及測量用觀測孔

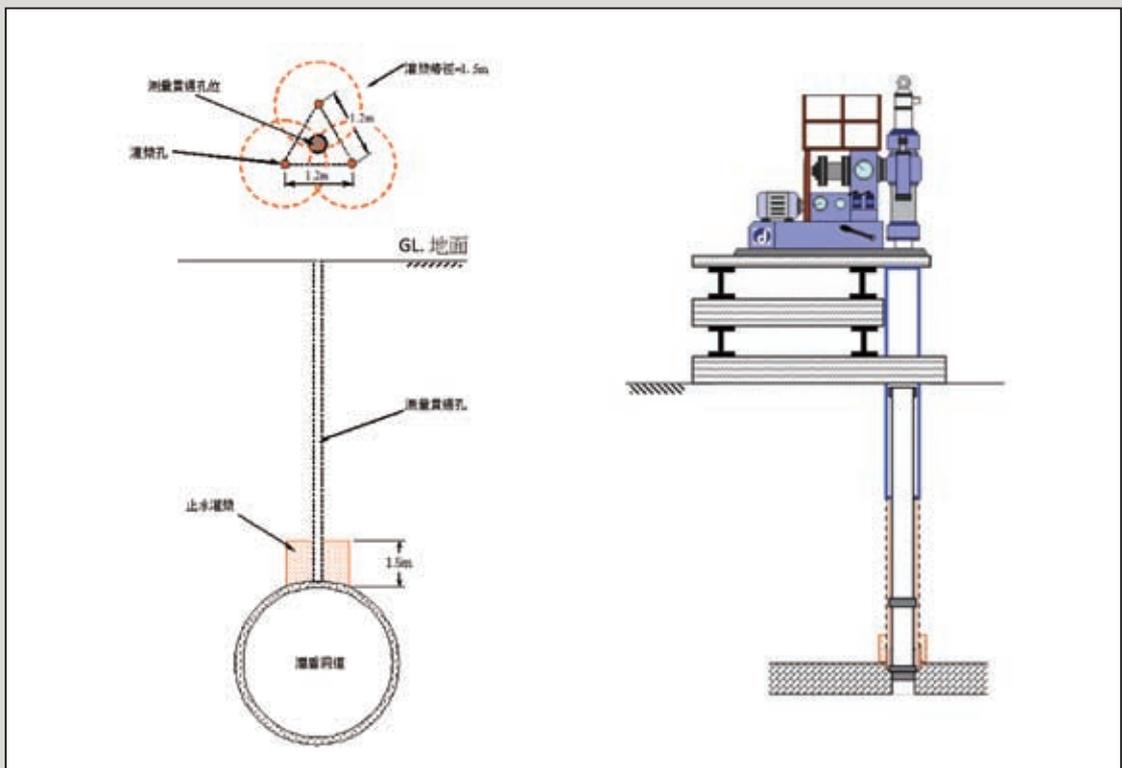


圖10 測量觀測孔之施作

坡路段上，E3及E4人員出入口之間接近E3處，洞道中心深度距地面約25m。依據補充地質鑽探報告BH-11-1孔可知，該處地質主要為粉土質黏土夾細砂薄層。而為確保地中接合點符合機關需求書之要求，另布置測量觀測孔，詳圖9及10所示。

二、地中接合施工流程圖

地中接合施工流程圖為主要施工檢核點之依據，因此為降低施工風險，所安排之施工流程必須合理及可行，詳圖11所示。本工程No.4潛盾機先到達預定地中接合點，隨即進行接合前準備工作，包括切刃轉盤退縮、螺運機後退、中折部及推進千斤頂與環片之固定。

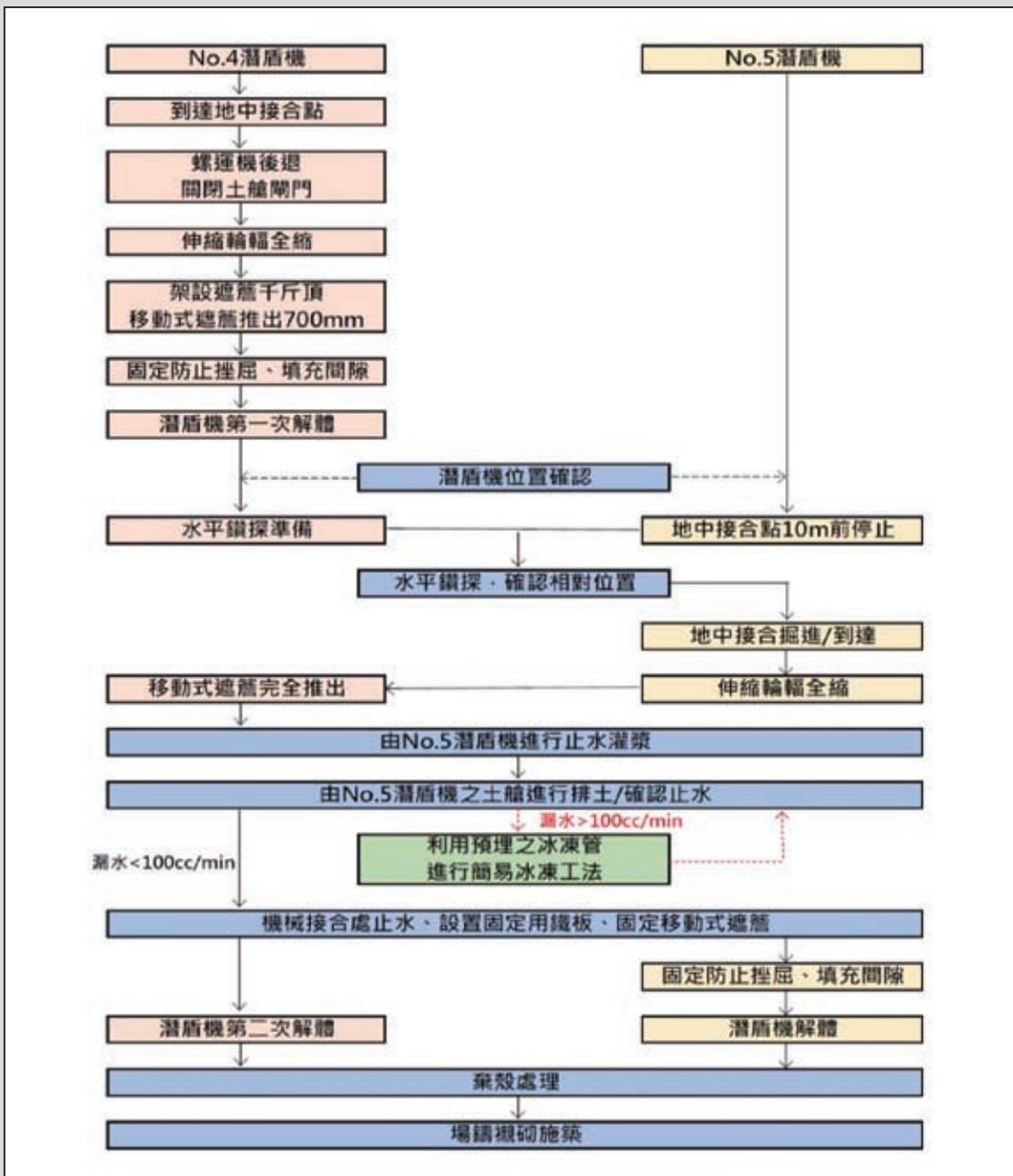


圖11 地中接合施工流程圖

完成上述作業後，開始進行No.4潛盾機第一次解體作業，其後即進行水平鑽探機具之安裝。地中接合之施作中，潛盾機相對位置之掌握極為重要，因此接合作業中，引進水平鑽探機，於2台潛盾機距離達10m時，自潛盾機內進行水平鑽探，以確認2台潛盾機之相對位置，以利No.5潛盾機到達前，可於鑽掘過程中修正潛盾機之位置，並確保地中接合之安全。

三、機械式地中接合

本工程採用之機械式地中接合方式，配合

地質及施工條件，採用改良式DKT工法，主要目的為達到最佳化之施工，詳圖12所示。

地中接合潛盾機之構造分為貫入側及承接側；貫入側於停止位置切刃刀盤正面(詳圖13)，No.4潛盾機移動式遮簷係由6處千斤頂操作延伸，每處皆有1個油壓千斤頂負責推移，並可同時推進或可個別調整推進，以利調整遮簷伸長度保持均等長度。惟推出遮簷時，須先將切刃刀盤軸梁位置調整於兩處加勁部之間，才不至於發生碰撞。因此須先調整刀頭至0度位置，詳圖14。此時切刃刀頭調整後之容許誤差在 ± 4 度以內。

承接側於停止位置切刃刀盤正面(詳圖16)，No.5潛盾機接續之容許誤差為 ± 30 mm以內，因此於掘進時需針對潛盾機方位角及坡度進行修正(詳圖17)，且切刃刀盤可完全縮入(詳圖18)，俾便精準地與No.4潛盾機進行地中接合。

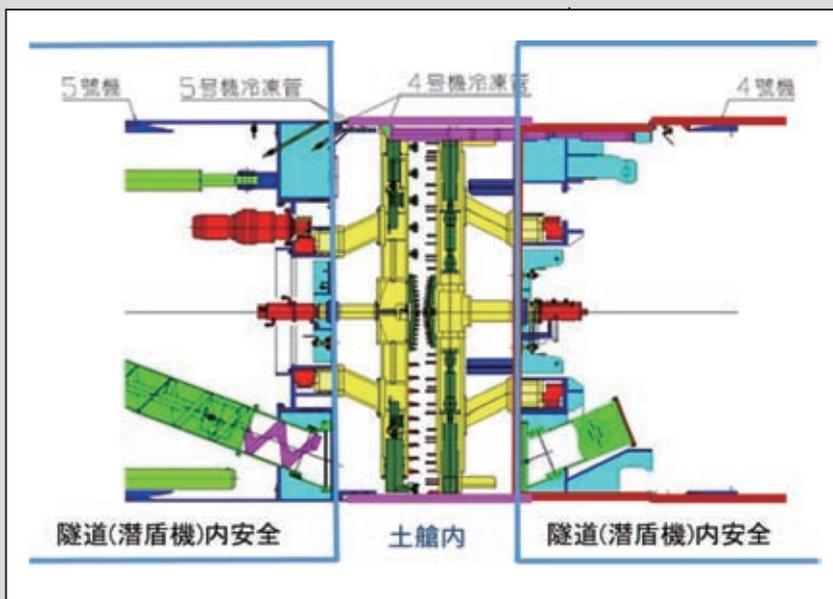


圖12 機械式地中接合改良式DKT工法



圖13 No.4潛盾機地中接合貫入側及切刃刀盤正面

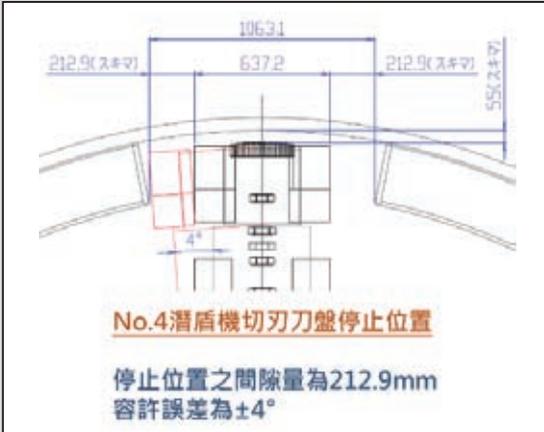


圖14 調整切刃刀盤停止位置示意圖

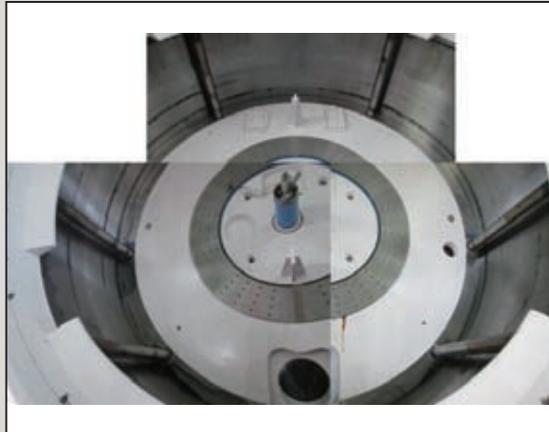


圖15 遮簷伸展狀況(完全推出時)

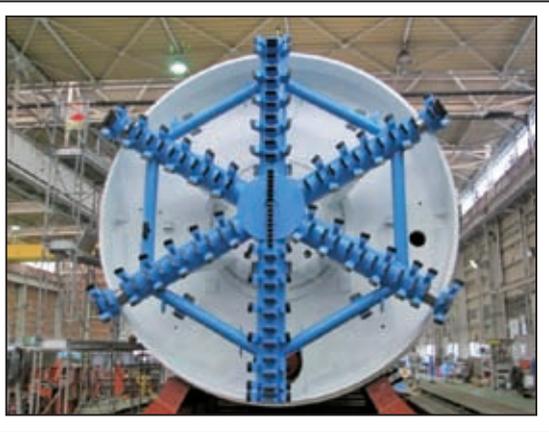


圖16 No.5潛盾機地中接合承接側及切刃刀盤正面

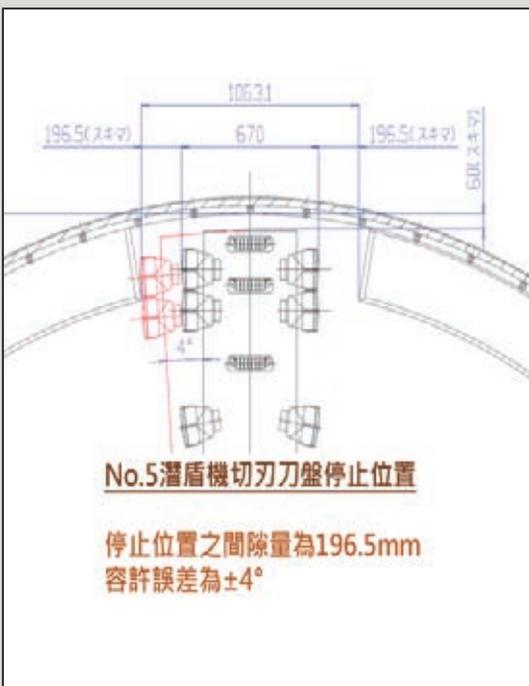


圖17 調整切刃刀盤停止位置示意圖

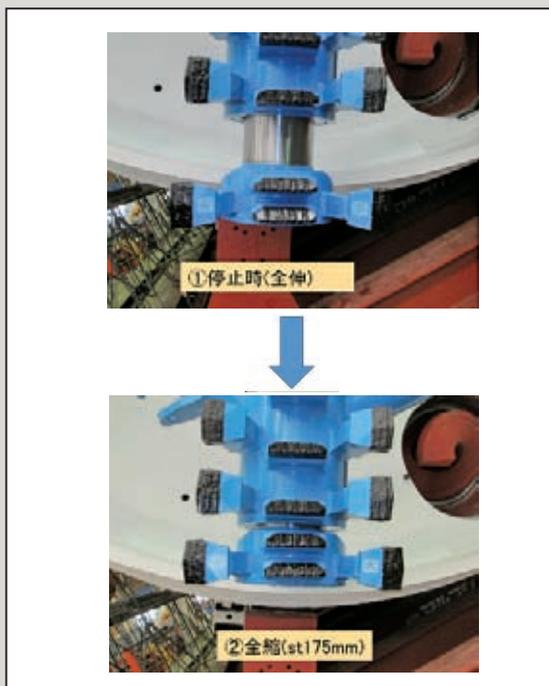
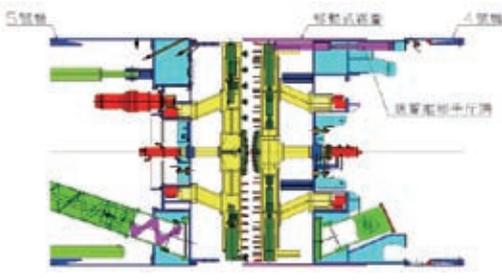
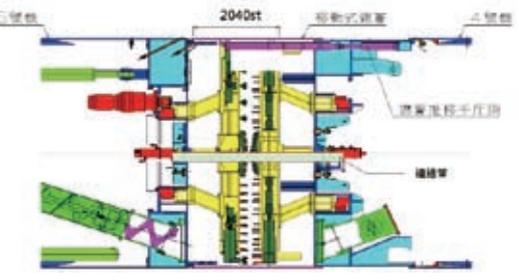
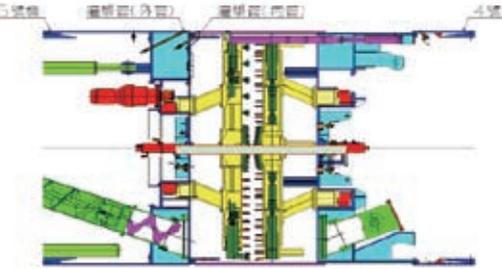
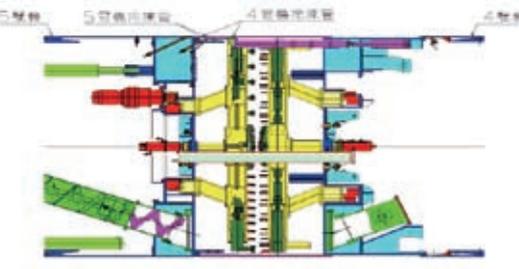
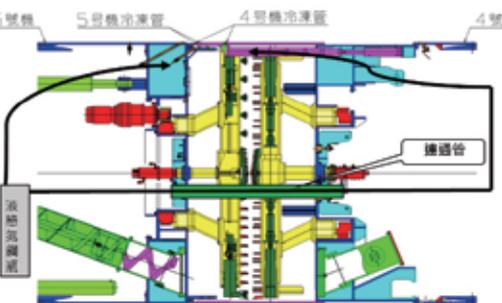
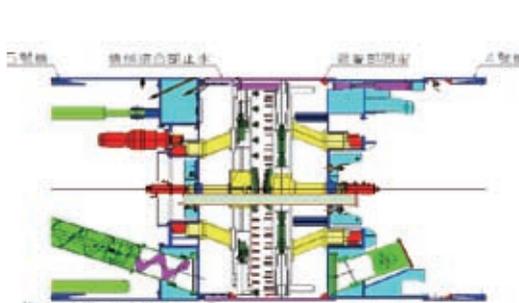


圖18 伸縮輪幅完全縮入

四、機械式地中接合步驟

No.4潛盾機與No.5潛盾機之地中接合作業流程如下：

本工程於灌漿(或冰凍)完成後，原則上係以螺運機進行土倉內排土，惟無法以螺運機排土時，在維持通風之狀態下，由5號機上之人孔進出採人力排土。另需注意，採用冰凍工法時，

	
<p>步驟一 No.4潛盾機之移動式遮簷往前推出 (700mm→1940mm)</p>	<p>步驟二 No.4潛盾機移動式遮簷完全推出 (1940mm→2040mm)</p>
	
<p>步驟三 由No.5潛盾機進行止水灌漿 先(外管)→後(內管)</p>	<p>步驟四 當灌漿無法完全止水時， 採用簡易冰凍工法並進行止水確認</p>
	
<p>步驟五 簡易冰凍工法</p>	<p>步驟六 機械接合處及移動式遮簷之止水 與焊接固定用鐵板</p>

為避免液態氮從配管外漏之可能性，應以攜帶式氣體偵測器進行偵測。排土後依序焊接止水及固定鐵板，本作業結束後，分別進行No.5潛盾機之解體及No.4潛盾機之二次解體作業。

五、機械式地中接合可之風險及處理方式

移動式遮簷與伸縮輪輻相抵觸(詳圖19)、潛盾機接合之角度不佳(詳圖20)、潛盾機之相對位置偏差太大(詳圖21)，惟本工程所遭遇到的問題，為在複合地層(包括土層、石英礫石及岩層等)長距離在掘進後，造成潛盾機殼磨損，未能完全伸出抵達5號機盾殼(約距離4號機75cm)，且冷凍管亦磨耗破損，因此採用地面雙環塞(馬歇管)灌漿方式，確認止水後，由上方隧道斷面開始進行排土，再以CT型鋼進行No.4潛盾機遮簷與No.5潛盾機之接合與固定(詳圖22)，待CT型鋼固定後，再以PU進行背面(地層側)填充灌漿，完成地中接合之作業。

伍、結語

地中接合已成為潛盾工程之發展趨勢，尤其在施工環境受限的情況下，諸如設置工作井位置不易取得、洞道長度愈來愈長、工期因需求需縮短等，均適合採用地中接合。

本工程為國內首次採用地中接合進行施工完成案例，且潛盾工程為地下工程中風險相對高之工程，地底下之條件多變，無法於基設階段所進行之調查，完全掌握狀況，雖於招標規定要求統包商需進行補充調查，但仍難免存在無法預期之條件發生。其中地中障礙物、劇烈變化地層及地下水之變化，諸如大卵石、複雜的複合地層等，均為非可預期之情形。

施工上必須隨時檢討及採取有效對策，來因應及處理現場所遭遇之狀況，方能有效克服

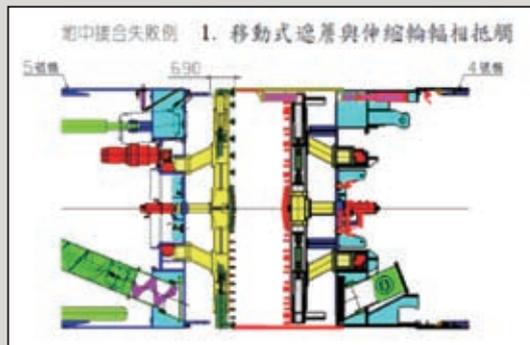


圖19 移動式遮簷與伸縮輪輻相抵觸

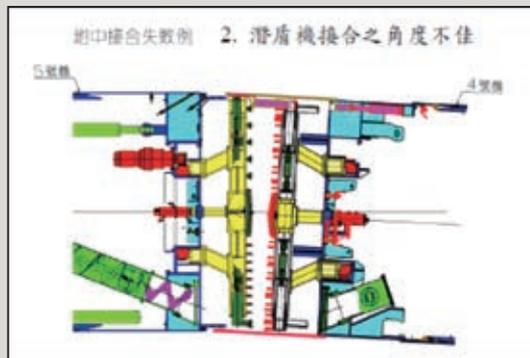


圖20 潛盾機接合之角度不佳

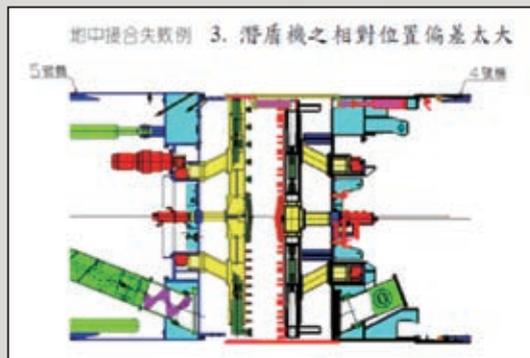


圖21 潛盾機之相對位置偏差太大

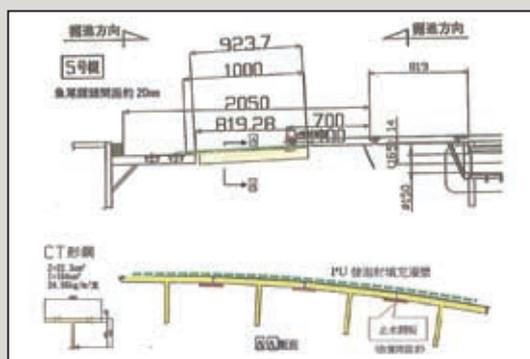


圖22 CT型鋼固定示意圖

所遭遇之問題，當然規劃、監造、細設及施工單位更應密集合作，當問題產生時應於第一時間召開會議，進行問題檢討及應採取之處理對策，儘量縮短問題處理之時間，如此工程才能順利進行。

參考文獻

1. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，大林～高港345kV電纜線路工程基本設計報告，(2012)。
2. 春原營造股份有限公司、萬鼎工程服務股份有限公司，大林～高港345kV電纜線路第一工區潛盾洞道暨大林、南工冷卻機房統包工程服務建議書，(2013)。
3. 日商鹿島營造股份有限公司，大林～高港345kV電纜線路第二工區潛盾洞道暨高港冷卻機房統包工程服務建議書，(2013)。
4. 中華民國隧道協會，軟土潛盾隧道工程設計與實例手冊，(2004)。
5. 中華民國隧道協會，潛盾隧設計與施工準則與解說，(2009)。
6. 預鑄混凝土環片快速接頭簡介，日本預鑄混凝土環片工業會，(2011)。
7. 潛盾洞道環片裂縫檢討報告書，日商鹿島營造股份有限公司，(2014)。
8. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，大林～高港345kV電纜線路第一工區潛盾洞道暨大林、南工冷卻機房統包工程，補充施工說明書細則第02427章預鑄隧道環片，(2013)。
9. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，大林～高港345kV電纜線路第二工區潛盾洞道暨高港冷卻機房統包工程，補充施工說明書細則第02427章預鑄隧道環片，(2013)。
10. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，大林～高港345kV電纜線路第一工區潛盾洞道暨大林、南工冷卻機房統包工程，基本設計圖，(2013)。
11. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，大林～高港345kV電纜線路第二工區潛盾洞道暨高港冷卻機房統包工程，基本設計圖，(2013)。
12. 朱旭、李魁士、何泰源、石原金洋，「潛盾隧道新技術之發展與應用」，中華技術第77期，(2008)。



3

專題報導

卵礫石地層免開挖 工法地下電纜隧道 設計與施工—台電 林口~頂湖345kV 案例

關鍵詞(Key Words)：免開挖工法(No-Dig Method)、電纜隧道(Power Cable Tunnel)、卵礫石(Gravel)

台電公司輸變電工程處/北區施工處/處長/江武照 (Chiang, Wu-Chao) ❶

台電公司輸變電工程處/北區施工處/副處長/郭晁坤(Kuo, Chao-Kun) ❷

台灣世曦工程顧問股份有限公司/大地工程部/副理/陳聰海 (Chen, Tsung-Hai) ❸

台灣世曦工程顧問股份有限公司/大地工程部/正工程師/許耀仁 (Hsu, Yao-Jen) ❹

台灣世曦工程顧問股份有限公司/大地工程部/正工程師/廖秋銘 (Liao, Chiu-Ming) ❺

台灣世曦工程顧問股份有限公司/大地工程部/經理/周永川 (Chou, Yung-Chuan) ❻

摘要

本文介紹林口-頂湖345kV線17km中唯一之地下化工程標，因須在用地及空間環境受限的條件下採急曲線方式穿越林口高含礫比且具大粒徑礫石之困難地層，由於施工困難度高，設計須妥善規劃並選擇妥適工法，俾利研提周延對策克服環境困難之挑戰。對於卵礫石地層中掘進施工困難挑戰，透過詳實的現地調查、風險辨識進行掘進機選擇及周詳研擬施工對策，施工完成後之精度及品質良好；另，本工程採用BIM技術整合各系統界面，充分利用有限空間、減少衝突及強化設計界面之溝通，據以提供一營運維護良好之巡檢環境，值得類似工程參考。



Application of No-dig Method on Underground Cable Tunnels Design and Construction in Gravel Formation – A Case Study of Taipower Linkou~Dinghu 161kV Cable Tunnel

Abstract

This paper provides an valuable case study on the use of No-dig method. The Linkou~Dinghu 161kV Cable Tunnel construction not only encountered lands acquisition difficulties, but had to work in limited space. Moreover, the case study had to use sharp curved line to pass the Linkou formation, which characterizes by high gravel ratio and large particle size. Several issues were consider in the case study to overcome above-mentioned problems. First, appropriate construction method should be chosen to solve the challenges from the environment. Secondly, the case study applied detailed geological survey, risk identification to find apposite tunnel machines and construction strategies. Besides, the case study adopted BIM technology to integrate interfaces in the system. Thus, the limited space was harnessed effectively, the conflicts were reduced, and the design communication were enhanced.

3

專題報導

壹、工程概述

為提升北部地區供電容量及良好的供電品質，並配合林口電廠更新擴建計畫，台灣電力公司規劃林口~頂湖345kV 輸電線路，由新北市林口區林口電廠向東南至桃園市龜山區頂湖超高壓變電所，全線長度約17km(圖1)。本工程為其中兩段地下線路區段，分別為#41連接站-#43連接站(以下簡稱第一工區)及#56連接站-頂湖E/S電纜終端(以下簡稱第二工區)之土建及相關附屬機電工程，佈設345kV 2500mm²交連PE電纜二回線複導體共12條電纜，工址平面概要詳圖2及圖3。

台電輸電線路傳統利用高架鐵塔架空線傳輸，不僅可符合供電需求且經濟效益較佳，但穿越市區之密集人口區或有高空障礙物時，則須規劃以地下電纜線路連接。地下電纜線路囿於地權限制，線路須配合道路分佈狀況配置線形，而兩端連接站則須先行辦理用地取得。在有限土地之有效利用考量上，其空間須滿足完整系統營運功能與施工，故施工須檢討急曲線洞道等嚴峻技術條件。本工程初期藉由風險辨識，透過詳盡之規劃設計檢討過程、進行適切的工法選擇及良好的施工管控，最終順利克服林口礫石層急曲線潛盾及長距離U型曲線推進工程的挑戰。



圖1 本計畫工區與全線相對位置圖



圖2 第一工區配置圖

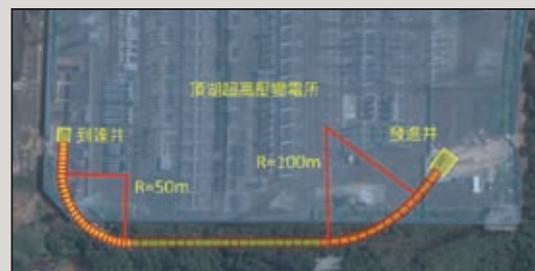


圖3 第二工區配置圖

貳、地質概況

一、地層與水文

工址位於林口台地西側頂部，海拔高程約250m，地形平坦。台地周緣溪谷為現代沖積層堆積，大南灣層分佈在林口台地下部，而所屬地盤則以礫石層為主之林口層(圖4)，表層局部因風化而為紅土所覆蓋，工址地層剖面如圖5所示；水系以林口台地為分水嶺向外分散，溪流特徵短且急。

二、卵礫石層調查

潛盾於礫石層施工不易，常見掘進過程

中高強度礫石對切刃齒磨耗大、礫石淘出則造成超挖量大或線形偏移，而巨礫排除耗時將導致施工延宕等問題，故施工前對於礫石特性之掌握相當重要，直接影響工程推動之成敗。本工程於計畫初期即透過文獻調查及工程案例蒐集，彙整林口台地之礫石分布情形、充分掌握礫石特性，並據以選用適當之施工機具及研擬施工對策，說明如下：

- (一) 依「我在林口台地的發現」論文調查顯示，林口台地礫石以泰山為中心點，向北、西、南三方擴散、堆積，愈往外圍、粒徑愈小。最大粒徑的等粒度線如圖6所示。

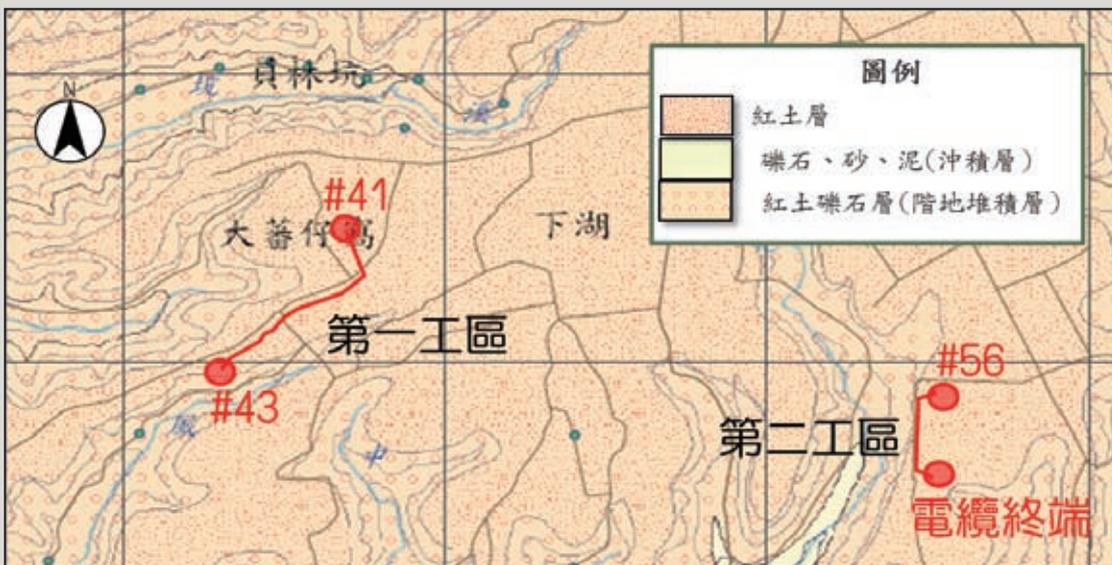


圖4 工址地質概況

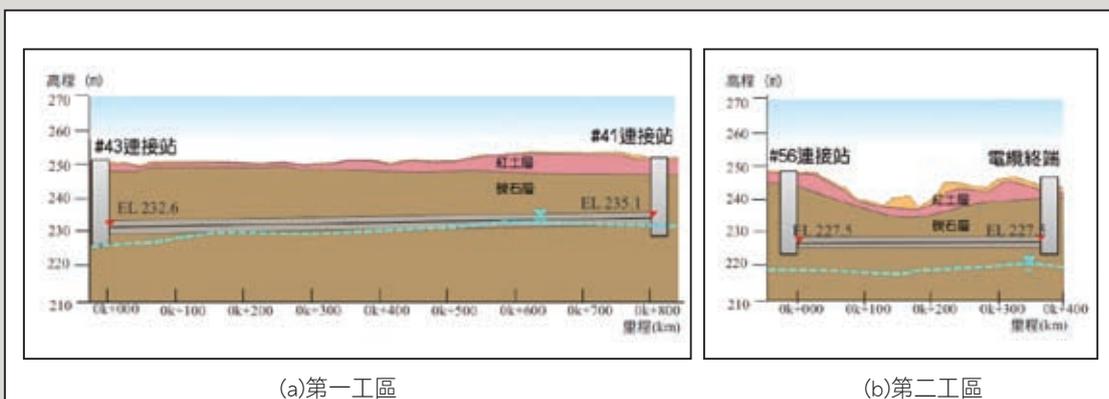


圖5 工程地層剖面圖

(二) 台灣世曦公司於林口台地周邊曾經參與多件公共工程，包含機場捷運、五楊高架拓寬、高鐵林口隧道等，經彙整施工過程之調查、出土及開挖面等資訊如圖7，林口台地礫石之最大粒徑分布與前述文獻調查結果相當(繪於圖6)。

三、現場地質調查

依本計畫現地調查及鑽探調查結果顯示，本工程第一工區#41~#43連接站之礫石最大粒徑約為30cm；第二工區於頂湖E/S下邊坡露頭調查，露頭高程約230m，由邊坡出露礫石中，最大粒徑可達80cm，一般礫石粒徑多在20~30cm左右，含礫比約為70%，如圖8所示。

參、設計課題與特色

為提升整體設計及施工品質，本工程因應現地條件及工程特性研提相關對策，以降低施工風險並減省工程經費，另採行多項新工法、新技術、新材料以提升工程品質，說明如下：

一、價工研析創造多贏

研提價值工程替代方案，包含(1)沉箱直井深度調整，經檢討減挖2.7m，水中混凝土自重仍符合上浮力安全需求，以降低開挖風險、節省經費436萬元，工期少2天、餘土減量891m³；(2)推進洞道線形調整，發進端轉彎半徑由R=50m調整為R=100m，以降低施工困難度、節省經費298萬元，工期少5天、餘土減量136m³，如表1。



圖6 林口台地礫石分佈調查成果



圖7 林口台地周邊公共工程之礫石資訊



圖8 工址礫石現地調查結果

表1 價工方案評估

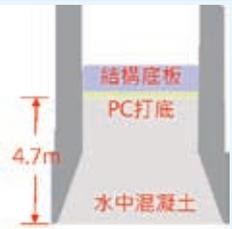
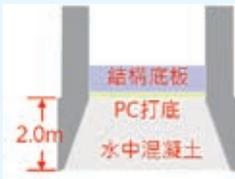
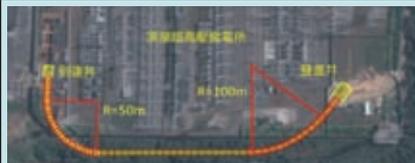
項目	原方案	替代方案	推動效益
直井深度			1.減價436萬元 2.工期少2天 3.降低風險 4.餘土減量891m ³
洞道線形			1.減價298萬元 2.工期少5天 3.降低困難度 4.餘土減量136m ³

表2 作業風險評估及減輕對策

編號	項目	原風險	減輕對策	殘餘風險
1	民眾抗爭造成工程無法推動	R1	1. 採用免開挖工法避免影響交通、環境 2. 增加洞道深度減少施工沉陷 3. 敦親睦鄰	R3
2	地中障礙物、卵礫石影響掘進	R2	1. 試挖調查地下管線及構造物 2. 降低洞道線形 3. 掌握地質條件慎選潛盾機型 4. 增加面盤開口率	R4
3	小轉彎半徑潛盾施工	R2	1. 選擇中折潛盾機 2. 保留施工餘裕度	R4
4	隧道漏水	R2	1. 增加止水條 2. 加大螺柱減少環片段差	R4
5	穿越高鐵隧道上方	R2	1. 監測斷面回饋最佳施工參數 2. 不間斷連續潛盾施工 3. 加強背填灌漿保護 4. 自動化監測系統全程掌控	R4

註：風險等級R1無法接受、R2勉強接受、R3可接受、R4可忽略

二、導入BIM技術整合設計提升效能

由於地下電纜工程中洞道及直井等空間不寬裕，電纜又有其最小轉彎半徑限制，故在洞道銜接直井及直井銜接涵洞等處常因電纜及設備管線數量較多，傳統以2D圖面溝通，不容易呈現現地真實狀況，故施工前配合BIM技術進行較繁複的整合作業。

BIM技術目前仍多用於建築設計之建模及設備管線配置，故BIM應用於地下電纜洞道工程為創新之作業模式，對實質設計及施工上之溝通整合有很大的助益。以BIM技術進行設計，無論

空間規劃、設備、管線…等元件均以實際尺寸數據輸入，並以3D檢核配置可行性，故模型之建置幾乎等同完工成果之預擬，能完全消弭過去以2D圖說判讀時易產生的認知落差，如圖9。

本工程導入BIM模型進行設計，於有限空間內整合電纜、通風、人員出入及吊物動線各個系統，可更有效利用潛盾發進/到達後所餘之地下空間，如圖10所示。

三、施工風險納入設計提升安全

為有效減少施工過程可能遭遇的未知風

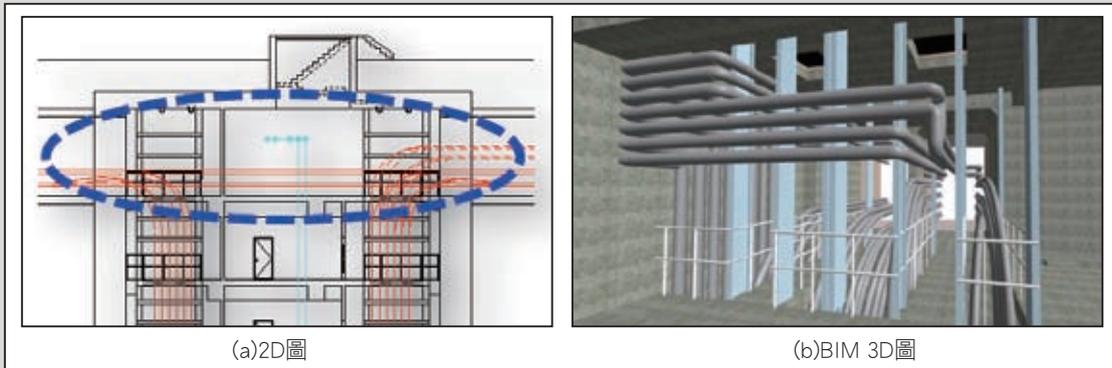


圖9 傳統2D與BIM 3D設計成果比較

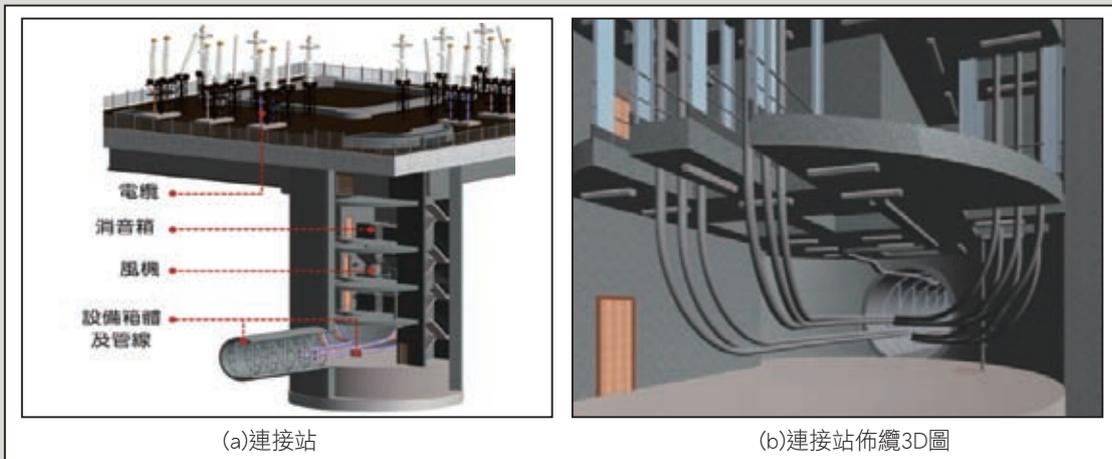


圖10 BIM整合成果

險，順利達到如期、如質、零工安的目標。本工程先透過風險辨識評析高風險作業，再藉由完善的規劃設計、適切的工法選擇並透過良好的施工管理，進行風險管控，俾將高風險作業降低至可承擔的範圍內，以期順利克服林口礫石層施工的挑战，風險評估及減輕對策綜整如表2。

相關風險對策檢討後落實於設計及施工，故採擇免地面開挖的潛盾工法及推管工法，減

少施工過程中對環境及交通的衝擊。潛盾機選用密閉型土壓平衡式，搭配大開口率掘進面盤及無軸式螺運機，大幅提升卵礫石地層中潛盾掘進的施工性。推進工程經考量國內首例且困難施工之U型曲線段及長距離、急曲線、卵礫石地層等施工風險特性，而採泥濃式工法推進。直井部分則考量沉箱直井無需人員下井架設支撐系統且為對施工人員友善之工法，如表3。

表3 選用之適切工法

位置	潛盾	推管	直井
因應對策			
	大開口率掘進面盤	泥濃式推進機	無內支撐之沉箱直井

四、衝突檢查與巡檢安全納入設計

地下電纜洞道工程須優先滿足電纜佈設需求，並整合附屬機電、人員及物料動線等土建機電介面。本工程將BIM技術導入設計，除可確實以3D模擬空間規劃及設備佈設的合理性，環控、電機等各專業協辦工程師亦可透過同步作業及中央模型的連結，即時展開衝突檢查及協調，在有限的空間內做出最可行的方案，幾乎可完全避免傳統2D疊圖整合、判讀高程等的時間耗用，消弭2D圖說判讀時易產生的認知落差，如圖11。

透過BIM技術完整建置各系統，有效減少系統衝突，並透過各系統動線整合與區隔，提升空間使用效率。直井各樓層設置整備平台，提供營運維護人員良好之作業環境。巡檢人員動線與電纜走向明確界定，確保巡檢人員安全，如圖12。

五、詳實檢核及納入自動化監測防災以確保重要結構安全

#43連接站平面距離高鐵林口隧道約100m，大於高鐵水平淨距60m之限建範圍，而潛盾洞道埋置於地表下約22m(底部高程約為EL.230.5m)，約距高鐵路頂部68m處跨越(圖13)，依高速鐵路兩側毗鄰地區限建範圍開發行為審核作業要點，屬TYPE III之無影響範圍。由於高鐵路係屬高重要性結構物，以ANSYS程式進行三維FEM數值模擬，詳細檢核洞道開挖解壓應力對於既有高鐵路道上抬之影響，經分析洞道開挖解壓可能造成高鐵路道的上抬量僅約1mm(圖14)。現地掘進及桿式變位計自動監測結果顯示，施工過程期間之高鐵路道上抬量均在警戒值 $\pm 3.3\text{mm}$ 範圍內，而潛盾掘進後之上抬量則收斂至0.66mm，可符合高鐵路營運安全需求(圖15)。

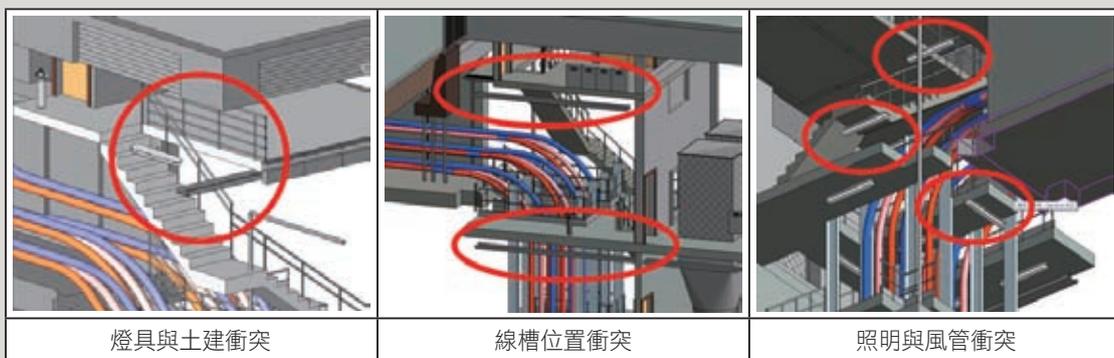


圖11 即時衝突檢查的回饋模式

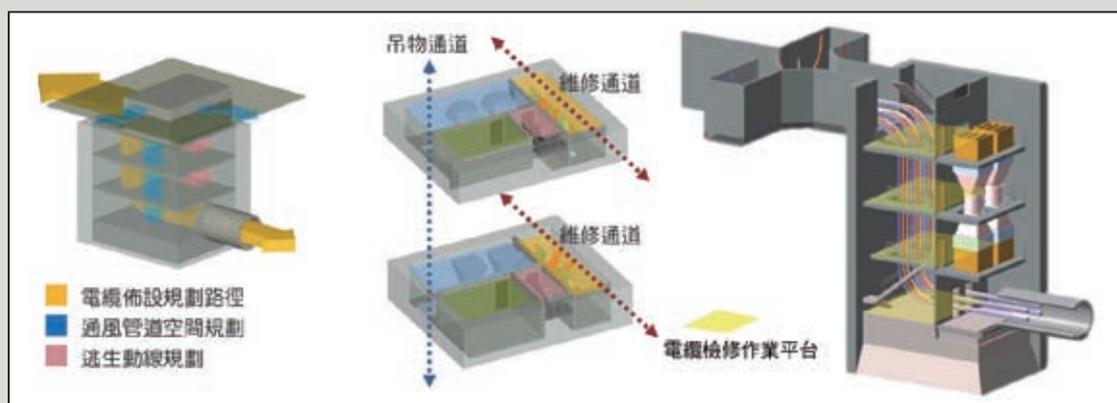


圖12 維護巡檢安全納入設計

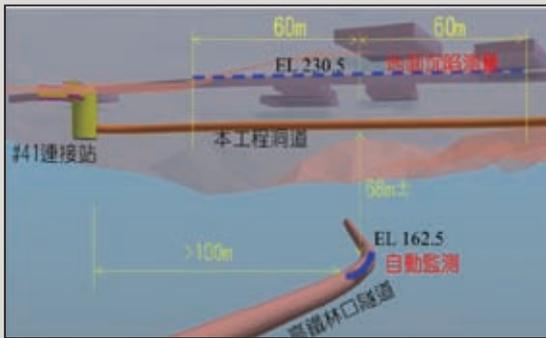


圖13 高鐵隧道與本工程地下空間關係

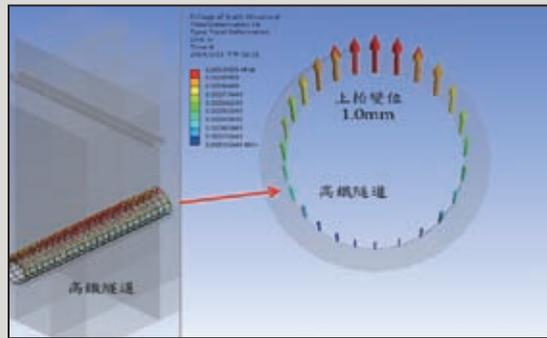


圖14 高鐵隧道受開挖解壓影響評估

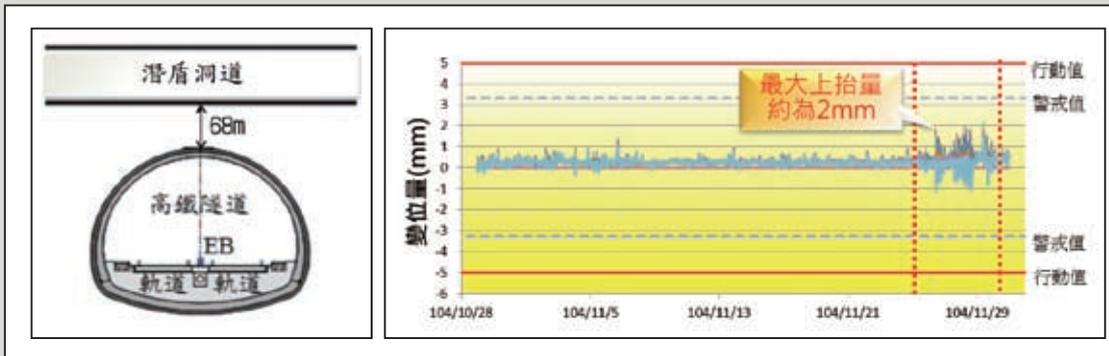


圖15 桿式變位計設置及自動監測成果

第二工區頂湖E/S係以大面積挖填整地方式建造而成，既設擋土牆深至地表下10m。為確保本工程轉彎推管洞道自擋土牆下方穿越之安全性，先採地球物理探測之時間域電磁法(TEM)探測，以確認基礎型式與深度，並採ANSYS程式進行三維FEM數值模擬電纜洞道穿越擋土牆，分析結果顯示推管施工過程中擋土牆可能產生之沉陷量小於1cm(圖16)。

本區段推管採泥濃式工法施工，並於機身周圍注入高比重及高濃度泥水材料以填充孔隙，減少地盤沉陷量，達到保護擋土牆之目的。依現地施工監測紀錄，實際沉陷量僅約為7mm(圖17)。

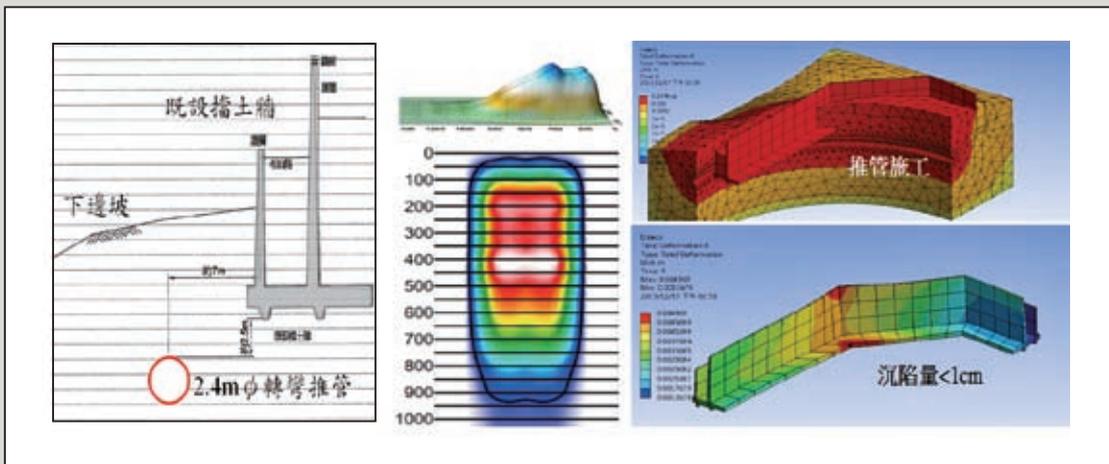


圖16 頂湖E/S擋土牆沉陷分析

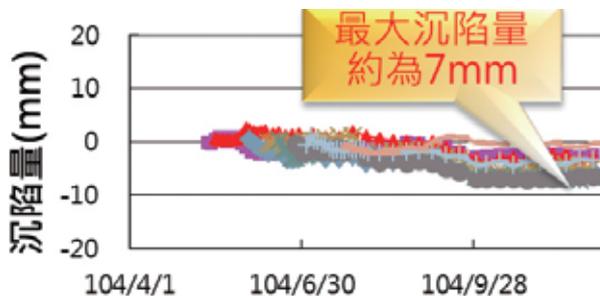
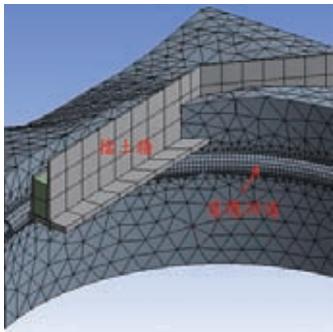


圖17 擋土牆沉陷監測成果

肆、施工挑戰與管控

工址施工條件嚴峻，施工不易，本統包團隊為確保施工過程順利，於施工前妥適規劃並研擬周詳對策，以避免施工事故並確保工程品質。

一、礫石層施工對策

為確保施工過程順利，減少停機維修、障礙物排除次數，本工程採行(1)增加潛盾機開口率、(2)選擇無中軸式螺運機、(3)土艙內設置攪拌棒、(4)設置可更換式切刀齒等礫石層施工對策(圖18)，以達到容易掘進、容易排土、容易維



高開口率面盤



無中軸式螺運機



土艙內設置攪拌棒



可更換式切刀齒

圖18 礫石層潛盾施工對策

修的目的，符合工期要求並減少施工事故。

即便採行多種礫石層施工對策，經實際掘進後發現，礫石粒徑及含礫比均高於原露頭調查資訊，掘進過程仍造成切刃齒及設置於土艙之攪拌棒折損，致本工程仍需停機檢修、更換切刃、清除礫石障礙等達12次。

二、急曲線潛盾施工

受限於用地範圍取得困難，電纜洞道須採急曲線施工，故潛盾洞道於樹人路轉進#41連接站時，潛盾洞道轉彎半徑僅能採 $R = 25m$ (圖2)佈設，以同級潛盾洞道工程而言，為迄今國內採行最小之轉彎半徑，亦為潛盾機訂製時所容許

之最小轉彎半徑，施工難度高。

礫石層急曲線施工最主要困難度在於轉彎掘進時，潛盾機須伸出超挖刀，藉由局部超挖，提供潛盾機轉向空間，但超挖刀伸出時較容易受卵礫石干擾，掘進速度緩慢、須加強背填灌漿數量填充超挖空隙，以減少施工沉陷量。

為確保潛盾施工精度，施工前將環片座標輸入全測站掘進系統，以控制潛盾機掘進方向及修正施工偏差，配合掘進施工過程中直線段：1次/日、轉彎段：1次/m之測量頻率，每100m進行複測。潛盾線形控制良好，洞道垂直與水平偏差量均小於管控值(10cm)，如圖19所示。

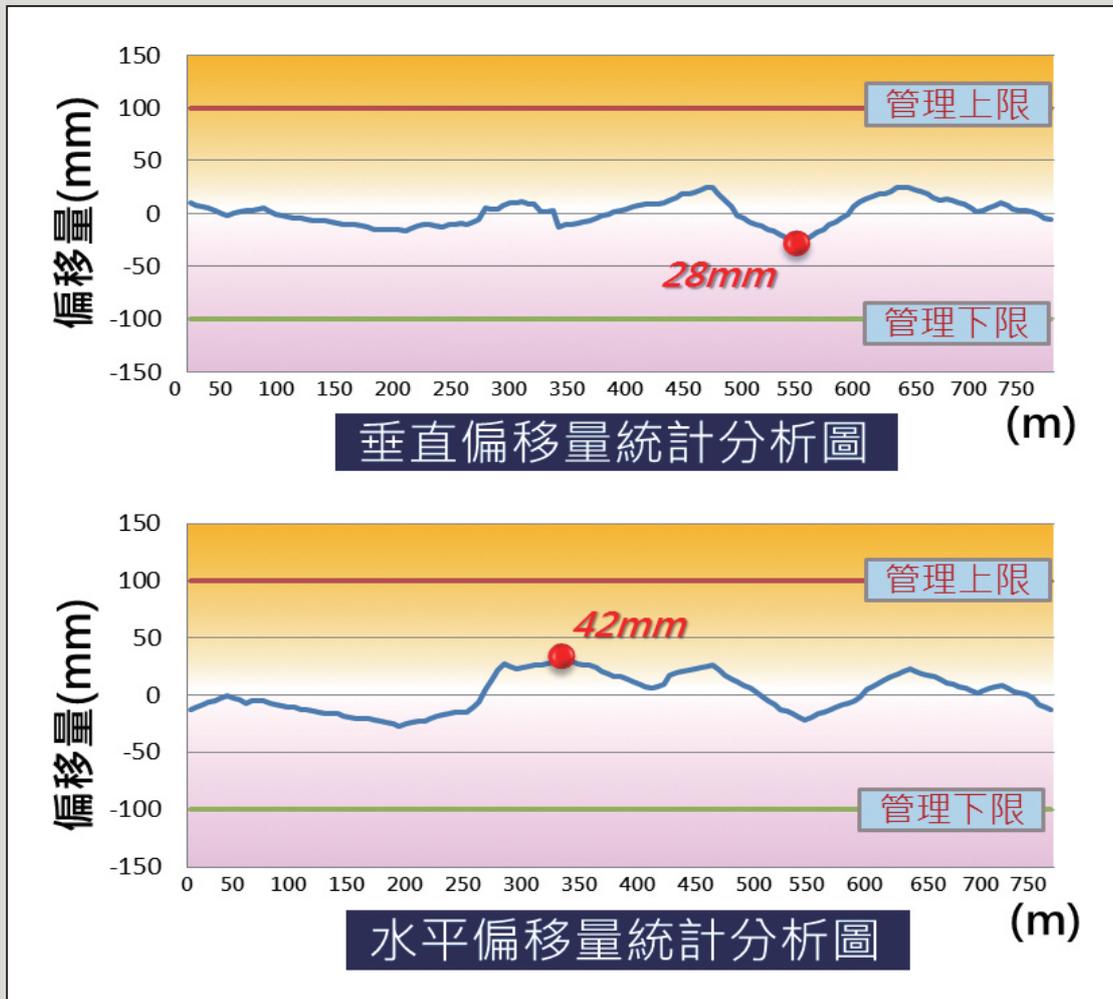


圖19 潛盾洞道施工偏移量統計

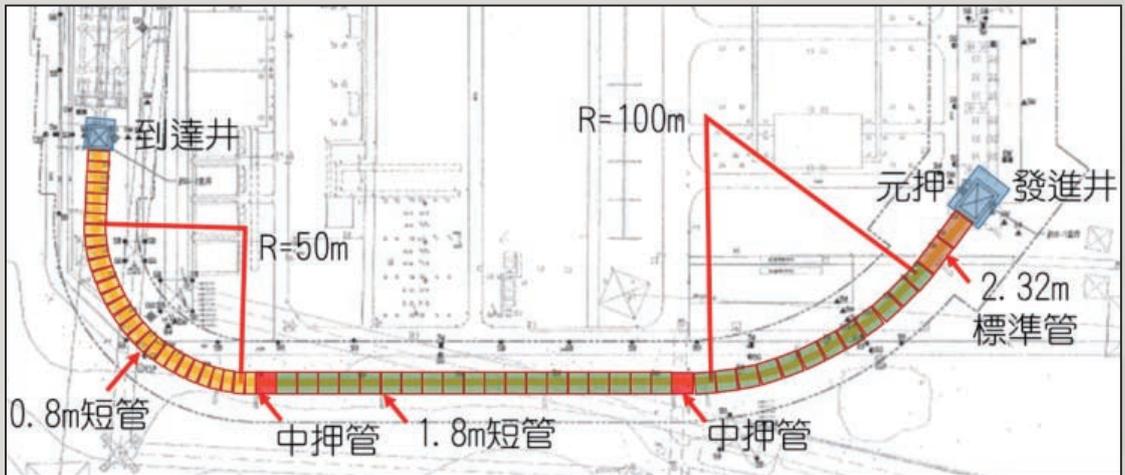


圖20 曲線推進管佈設

急曲線段掘進時，由於超挖刃遭礫石磨耗損壞無法縮回，無法僅於曲線內側範圍超挖，須採全斷面超挖5cm，由於全斷面開挖將無法由未超挖範圍提供地盤反力以促使潛盾機轉向，造成線形偏離。為避免洞道線形持續偏離，經檢討潛盾機採取較小轉彎半徑掘進，避免曲線外側超挖，同時採加強背填灌漿以穩固地盤、再強化線形測量並回饋施工，以確保線形精度。

三、急曲線推管施工

推進工法係藉由油壓千斤頂提供推進反力推送管材向前掘進，考量設置於發進井之元押千斤頂推力於通過曲線段之推力損失及對推進管材之偏壓陡升，須設置中押千斤頂分段推進。因本工程推進線形包含一段R=100m及一段R=50m，故分別於里程0K+110及0K+230設置中押千斤頂(圖20)，以減少推進壓力。

管材長度須配合推管所經曲線段轉彎半徑進行佈設，本工程通過R=50m及R=100m曲線區段分別採用0.8m及1.8m短管施作。為確保急曲線推進施工順利，除強化對中折千斤頂之控制，並於曲線段增加測量頻率並回饋至線形調整，以強化控制施工線形品質。透過上述適切

的推進機型式選擇、審慎施工規劃及良好線形控制，推進機出坑時垂直高程差為+83mm，方向偏左86mm，工程品質良好。

伍、結語

本工程為林口～頂湖345kV線路17km中唯一地下化且為困難度與挑戰性最高的標段，更是攸關全線能否順利完工送電的關鍵。遭遇有限空間環境、林口大粒徑礫石、高含礫比地層之不利施工條件下，透過整體工程之檢討、研擇適當掘進工法及控制方式更顯重要。在台電北施處及統包團隊齊心努力下，透過風險管控及採用新工法、新思維，始順利克服困難與挑戰，相關礫石地層洞道施工經驗提供各方參考。

參考文獻

1. 陳文福，「我在林口台地的發現」，地球科學園地第二十期，(2001)。
2. 交通部高速鐵路工程局，「臺灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫細部設計及施工監造顧問服務DU01標」之補充地質調查報告，(2007)。
3. 交通部高速鐵路工程局，「臺灣桃園國際機場聯外捷運系統建設計畫細部設計及施工監造顧問服務DE01標」之補充地質調查報告，(2007)。

復刻回憶之高雄新鐵路地下化車站設計與工程特殊挑戰

關鍵詞(Key Words)：鐵路地下化(Railway Underground)、木構造車站(Wood Station)、圍堰(Cofferdam)、托底(Underpinning)

交通部鐵道局／南部工程處／處長／伍育德 (Wu, Yu-Teh) ❶

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／經理／周永川 (Chou, Yung-Chuan) ❷

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／副理／陳聰海 (Chen, Tsung-Hai) ❸

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／計畫副理／王景平 (Wang, Cheng-Pin) ❹

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／協理／吳文隆 (Wu, Wen-Long) ❺

摘要

高雄車站以北區段之鐵路地下化工程穿越豐富之文化廊帶、百年車站、古蹟、愛河、人口稠密區、交通繁忙區及17座立體化橫交設施，新建鐵路車站因應豐富之環境廊帶，呼應在地淵源而做適切之特色化現代車站設計外，鐵路地下隧道施工更需配合環境設施，而以安全考量為前提進行審慎之設計、施工。本文將針對北高雄鐵路地下化工程因應特殊環境之車站設計特色進行介紹，更就兼顧交通需求之穿越地下道、高架橋施工，及受限於愛河寬度與通水之河中圍堰施作等地工挑戰，逐一說明，以為各界參考。



Memory Recovery Design for the New Kaoshiung Railway Underground Stations and Engineering Challenges

Abstract

The underground railway project in the north section of Kaoshiung passes through rich cultural corridors, 100-year old station, historic sites, love river, densely populated areas, busy traffic area, and 17 traffic crossover facilities. New underground stations respond to the old time memory of the local and make appropriate characteristics of modern station design. The construction of railway underground tunnels needs more detailed consideration of design while passing through the amount of crossover facilities. This paper will introduce the design features for the station of the northern Kaoshiung along the railway and it will also introduce the design about the cut&cover tunnel construction to cross an underground vehicle tunnel and important viaduct, as well as the challenges to construct the tunnel by using cofferdams method passing through the love river with narrow width as reference.

3

專題報導

壹、高雄鐵路地下化工程概況

高雄鐵路地下工程涵蓋「左營計畫」、「高雄計畫」及「鳳山計畫」，計畫全長約15.37km（詳如圖1）。工程全線以明挖覆蓋方式施築單孔雙軌隧道及10座地下車站，配合施工需求另新設2座臨時站（左營站及鳳山站），總工程經費約新台幣1,000億元，自2006年6月計畫核定起進行細部設計，2008年6月開始施工，預計2018年10月通車營運切換下地，整體工程之施工期程長達10年，工程標別主要分有土建標、機電系統標及軌道標，細部標別則計有23標（地面景觀標由高雄市政府代辦，3標）。

貳、北高雄鐵路地下化車站之設計特色

一、車站設計目標

（一）北高雄之地下化車站

北高雄區段涵蓋「左營計畫」及「高雄計畫」西段工程(DL01標)，「左營計畫」工程北起新左營站大中二路附近

(UK397+579)施築永久軌引道後，以明挖覆蓋隧道方式往南施築單孔雙軌隧道及左營、內惟二座岸壁式月台車站，並於UK401+700葆禎路附近連接高雄計畫，路線全長4.12km；「高雄計畫」西段工程範圍則為永久軌里程UK401+700~UK405+450之間，即起自葆禎路，南行迄至哈爾濱街附近，其東側與高雄車站路段工程為界，全長約3.75km，詳如圖1。本計畫DL01標於美術館、鼓山、三塊厝附近新建三處台鐵捷運化通勤車站，美術館站因考量作為未來快慢車待避列車營運調度之用，採2島式月台4股道規劃外，其餘通勤車站均以2座岸壁式月台佈設，5座車站之細部設計資訊詳如表1。

表1 各通勤站資訊

站名 說明	左營站	內惟站	美術館站	鼓山站	三塊厝站
長度(m)	260	286.2	339.5	293.4	270
寬度(m)	19.2	19.2	35.5	19.5	19.2
車站型式	地下兩層	地下兩層	地下兩層	地下兩層	地下兩層
月台型式	2岸壁式	2岸壁式	2島式	2岸壁式	2岸壁式



圖1 高雄地區鐵路地下化計畫路線圖

(二) 地下車站規劃及目標

通勤車站之設計包含出入口(地面層)、穿堂層(地下一層)及軌道層(地下二層)，車站內規劃通風井及機房等建築物及附屬設施。建築造型除滿足使用機能之外，亦以能表達捷運化通勤車站系統的空間自明性進行考量；景觀設計方面，在車站路權範圍內，盡量留設廣場、綠帶、綠地及周邊各項設施，以提供安全舒適的綠意通勤環境並創造以公共運輸串聯的都會生活圈，導入生態與綠建築環境之車站特色，藉由園道廊帶消除鐵路沿線兩側區域發展之阻礙，帶動站區及鐵路沿線周邊用地整合與利用，期待創造北高雄都市之再生契機。

二、車站設計特色

(一) 特殊開口聚天光引涼風之城牆式左營車站

左營站(舊城站)位居高雄都會區開拓最早的區域，鄰近左營古城區域(舊鳳山縣城)，也是高雄鐵路地下化工程的起始車站，本案將塑造左營站為打開古城記憶的珠寶盒，結合車站周邊古城垣，將車站轉換成進入高雄都會區的門戶意象。故以「古垣新圳」作為本車站之設計主題(詳如圖2)。本站導入風、光元素，因覆土淺故配合於頂版開口，塑造左營車站成為充滿光與綠的「會呼吸的城牆」，達節能減碳目的。

(二) 綠蔭穿陽尋秘徑之地景式內惟車站

「內圍」係清代防匪亂，府縣置兵鎮守保護地方，因而得名。光復後改「內圍」為「內惟」。因此設計上以弧形密林為牆垣之意象，加入景觀溼地傳達出「曲水風塘」之地域風貌。車站出入口以視覺穿透性高的鋼構框架組成，通風井分設於車站兩



圖2 左營車站(舊城站)

端，採上吹式設計以減少量體。通風井及冷卻水塔均座落於園道綠帶內，運用綠帶隱藏設計以降低對都市景觀之衝擊。站體頂版予以部分抬高，利用側窗採光至旅客公共區；月台中央部分則採用挑空設計，將引入公共區之自然光間接導入月台層，創新地下車站的視覺觀感(詳如圖3)。

(三) 第一座利用BIM技術進行3D設計之現代化美術館車站

本站鄰近饒富文藝氣息之內惟埤美術館文化園區，西有柴山，東則為高雄市新興的優質文教住宅區。配合都市環境氛圍與地景風貌，以雕塑手法創造地景藝術及空間情境，故以「藝風水美」作為本車站之設計主題意象。「回應自然」作為創意的源起，除以綠化的斜坡取代高直的水泥防洪牆外，地景建築以水景植栽、綠水化環境，回應洪流高程與都市熱島效應，可漫步休憩於林徑水溪畔，而與自然一起共鳴迴響。出入口造型以表達出輕巧之水波造型進行設計，材料主要為鋼構屋頂、金屬包框、玻璃帷幕、燒面與亮面花崗石基座、崗石地磚金屬，透水景觀鋪面；從建築概念開始即運用BIM技術配合理念、空間配置與機電設施等需求進行設計，建立3D視覺化溝通平台(詳如圖3)，促進問題溝通並強化構圖設計，效益大且至少節省30%以上人時。

(四) 記憶舊鐵路站場之地標式鼓山車站

本站基地西鄰元亨寺，東接愛河，跨中都橋銜接古蹟唐榮磚窯廠，位於「柴山」與「愛河」之山水交會點。建築及景觀設計構想藉由本站緊鄰鼓山之元亨寺古剎，串接柴山的鐘鳴鼓響與鐵道記憶作為設計發想；故以「鼓鳴水秀」作為本車站之設計主題意象。車站以山形及鼓韻轉換之曲線造型與地景起伏結合為一(詳如圖4)。

(五) 呼應百年風華之木造復古式三塊厝車站

本車站緊臨南、北兩側新闢道路，站址隔街面對三塊厝古蹟車站，為現存日治時代最古老的木造火車站，南面則鄰近三鳳中街商圈，為今社區繁華源頭，閃爍出城市絡繹景象。站區三塊厝古蹟木造火車站與三鳳中街，為早期高雄鐵道文化記憶的起點，鐵路廊帶設計為社區的中央綠軸線，軸線中央綠帶簡潔綠化形成自然的景觀綠地。建築造型融入地域情感、彰顯時代建築，故以「鳳凌棲木」作為本車站之設計主題意象，出入口設計以日式木構造，如寄棟(廡殿或五脊)、切妻(山牆)-屋頂、簷廊(廊下)、日式屋瓦等三塊厝舊站古蹟特色融入呼應，表現懷舊風格(詳如圖4)。



圖3 內惟及美術館車站



圖4 鼓山及三塊厝車站

參、地工設計及施工特色

一、課題概述

臺灣鐵路由於系統考量，地下化工程多採用明挖覆蓋工法施工，施工用地亦僅利用既有之鐵路廊帶(如圖5)，工程施工用地不僅受限亦須兼顧既有鐵路營運的安全，此為鐵路地下化工程的限制，也是特有的工程課題。鐵道兩側人口稠密腹地狹小，為利鐵路隧道之新建施工，需於既有鐵路橋東側及北側先行施作臨時

軌，並將列車切換至臨時軌營運後，方得拆除既有軌及進行永久軌隧道施工。另外，臺灣鐵路於都會區內進行地下化隧道施工亦常遭遇穿越河川、陸橋、地下道、平交道等橫交設施，工程設計不僅需閃避地上/地下結構衝突，亦須兼顧施工中設施之營運安全及確保其影響降至最低；以高雄地區辦理之左營計畫與高雄計畫西段工程為例，高雄車站以北計穿越17座橫交立體設與河川橋，故如何於有限用地條件下維持施工中鐵路正常營運，實需考量縝密之施工規劃、特殊工法及機具配合，以下僅就高架橋



圖5 緊鄰營運中鐵道及既有建物施工

梁托底、地下道半逆打工法、河中圍堰等，針對特殊橫交設施之挑戰及因應對策說明如下。

二、青海陸橋托底

因無法新增平交道且為市內砂石車通行限定道路之一，故在無法拆除狀況下，設計僅可考量以托底方式維持橋梁方式通行及兼顧施工；青海陸橋全長256.5m，跨徑配置為6@21.0m+1@25.5m(跨既有軌)+5@21.0m，兩側引道各約72m，共11座框架式橋墩，橋面寬度15m，橋墩P4至P9橋面寬20m(含兩側人行道寬各2.5m)，上部結構為預力梁配合場撐橋面版澆築而成。

(一) 施工方式

青海陸橋之P6及P7橋墩坐落在鐵路地下化工程開挖區內(里程約UK402+080)，與美術館站區位置衝突，另既有軌亦位於P6及P7橋墩間，托底樁與施工淨空及臨時軌佈設，故於橋墩切樁前，利用東側之擋土

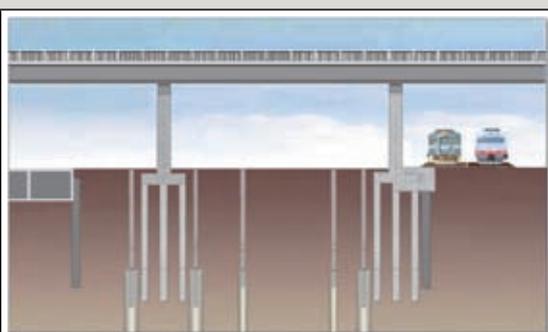
連續壁替代部分托底樁兼供承載，而將橋梁上部荷重移轉。由於施工開挖與荷重轉移複雜，施工過程配合監測儀器佈設進行安全管理，而橋下因淨高有限(僅6~7m)，施工亦以降挖配合特殊之限高型連續壁機具進行施工考量。

(二) 托底施工與步驟

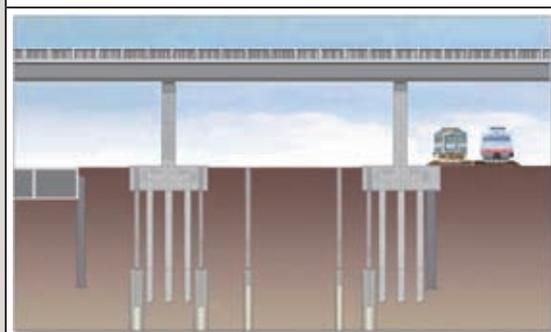
托底施工除須掌握原陸橋竣工狀況外，亦須兼顧地中障礙物衝突、環境及對車站施工影響等進行檢討，檢討項目包括有：(1)P6、P7橋墩新設臨時托底樁配置及托底樁容許承載力與沉陷；(2)開挖施工對鄰近鐵公路交通及鄰近建物、管線影響；(3)橋下限高條件對托底樁及擋土壁體型式選擇及施工影響；(4)臨時支承柱及鋼質支撐架配置對建築裝修及軌道佈設影響及傳遞載重等。托底施工因須於基礎下方增設鋼質支承柱，以兼顧陸橋車輛通行、鐵路營運，其施工步驟如下圖6~7所示。



步驟1 施築P7東側連續壁及托底板



步驟2 施築西側連續壁及鋼質支承柱



步驟3 施築托底板



步驟4 站體開挖支撐及切除橋墩基樁

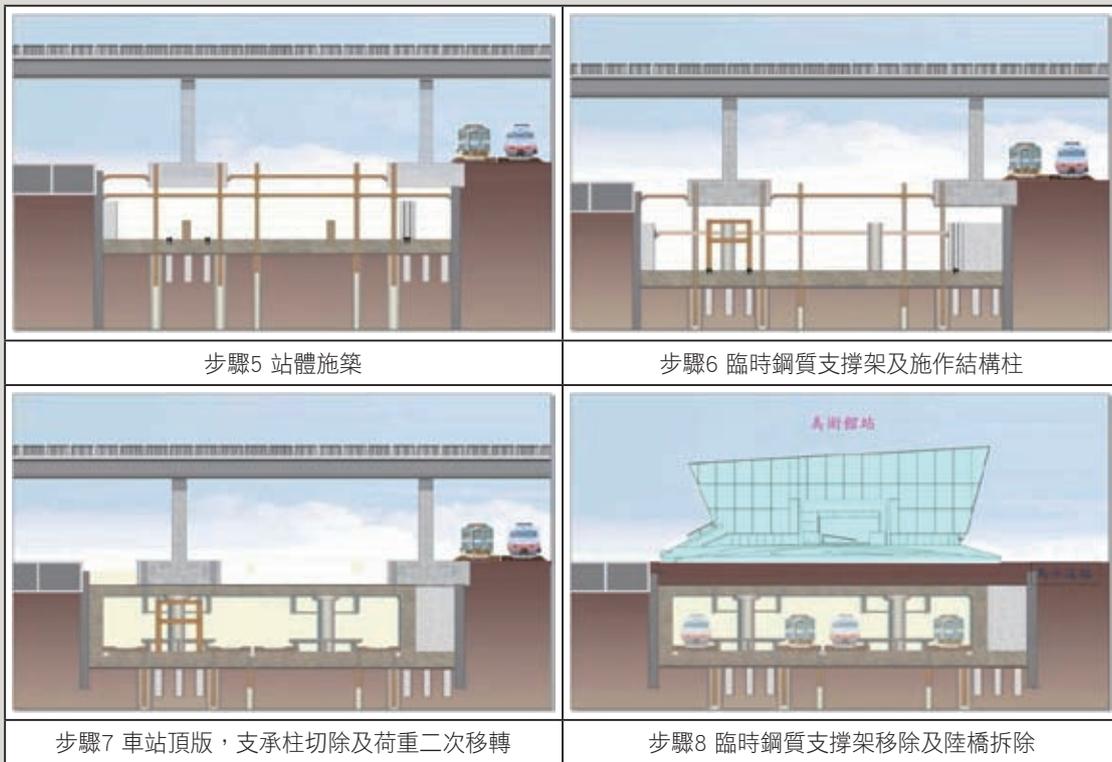


圖6 青海路橋托底工程施工步驟



圖7 東側P6與P7托底橋墩與支撐版、臨時支承柱施工狀況

(三) 陸橋荷重安全轉移機制

臨時支承柱係設置於既有橋墩樁基礎周邊範圍並坐落於鐵路永久軌設置區塊內，為切除臨時支承柱以進行軌道鋪設，需先完成車站內永久柱，並配合鋼質支撐架進行二次力量轉移，可藉由支撐架頂端的千斤頂將力量逐漸轉移至月台層永久柱上，以避免驟然切斷支承柱造成結構損壞

風險，於青海路橋拆除後則再切除臨時支承柱。

(四) 監測成果

橋墩荷重轉移過程中，原上部荷重將由新設之托底系統承受，除結構系統應力符合安全性需求外，橋梁結構變位量控制亦屬關鍵重要課題。設計於既有陸橋結

構裝設自動化之傾斜計(TI)及桿式沉陷儀(ELB)，以確實掌握托底施工過程中陸橋之變位行為，依監測結果顯示，P6橋墩傾斜量約85秒、P7橋墩傾斜量約60秒；依安裝於橋面上之桿式沉陷儀之量測值(參考圖8)，橋面版最大變位約18mm。

三、中華三路地下道半逆打工法

中華三路為高雄市南北向重要交通要道，近鄰三鳳中街及建國路，交通量大，原地下道

RC結構配合基樁構築，考量工址既存之基樁與未知之地下障礙物多，不適合採擇管幕工法或潛盾工法，加以中華三路車流量極大，且無法開設平交道，為維持地下道交通需求與品質，僅可在不減損原有交通車道及人行之狀態下，先改建人行道再分階段進行車流改道及擋土壁施工；本地下道汽車道無中隔牆，中央為標線分隔，汽機車地下道有不同高程，地下道兩側設有人行地下道，汽車道雙向各寬6.7m，兩側另有機車道3.0m，地下道淨寬達21.2m，如圖9。

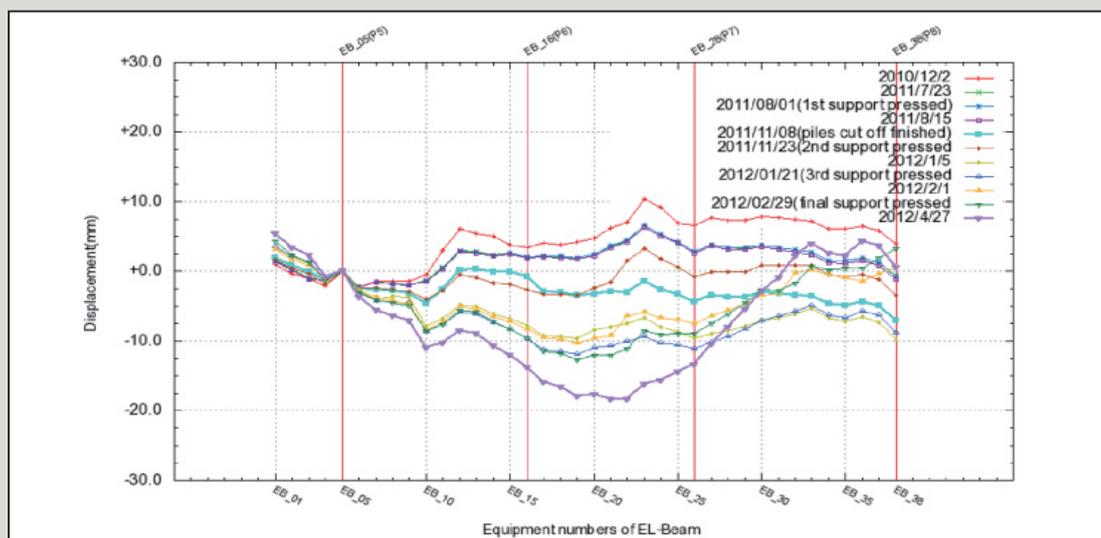


圖8 青海陸橋桿式沉陷儀變位量曲線圖



圖9 中華三路地下道斷面圖

(一) 施工方式

採用多階段半逆打隧道頂版工法施工，除可儘早提供汽機車通行外，施築隧道前先将機車道鋪設成平面車道，且將西側之人行通道改建為臨時之機車道(完成後恢復)，以增加施工期間之通道容量。

(二) 半逆打隧道頂版工法

為縮短地下道交維期程，設計分階段淺開挖施築隧道頂版(如圖10)，可即時恢復地下道路面交通，將施工中交通衝擊減至最低，臺鐵隧道日後可在逆打頂版下方進行開挖作業，可兼顧交通及工期需求，並避免傳統明挖工法之結構界面問題。

工址地下道範圍配合構台採 $\Phi 100\text{cm}$ 全套管切削樁為擋土壁，以破除地下障礙

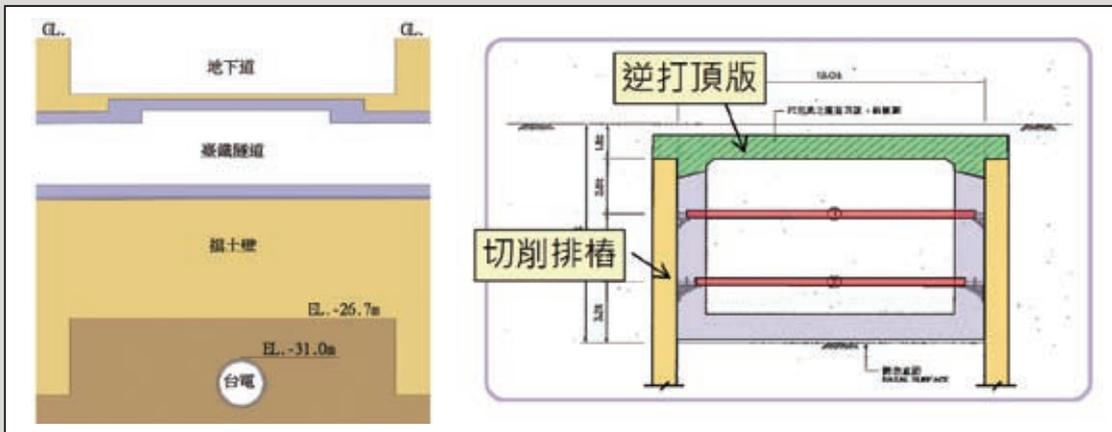


圖10 地下道與逆打隧道頂版工法施工示意圖

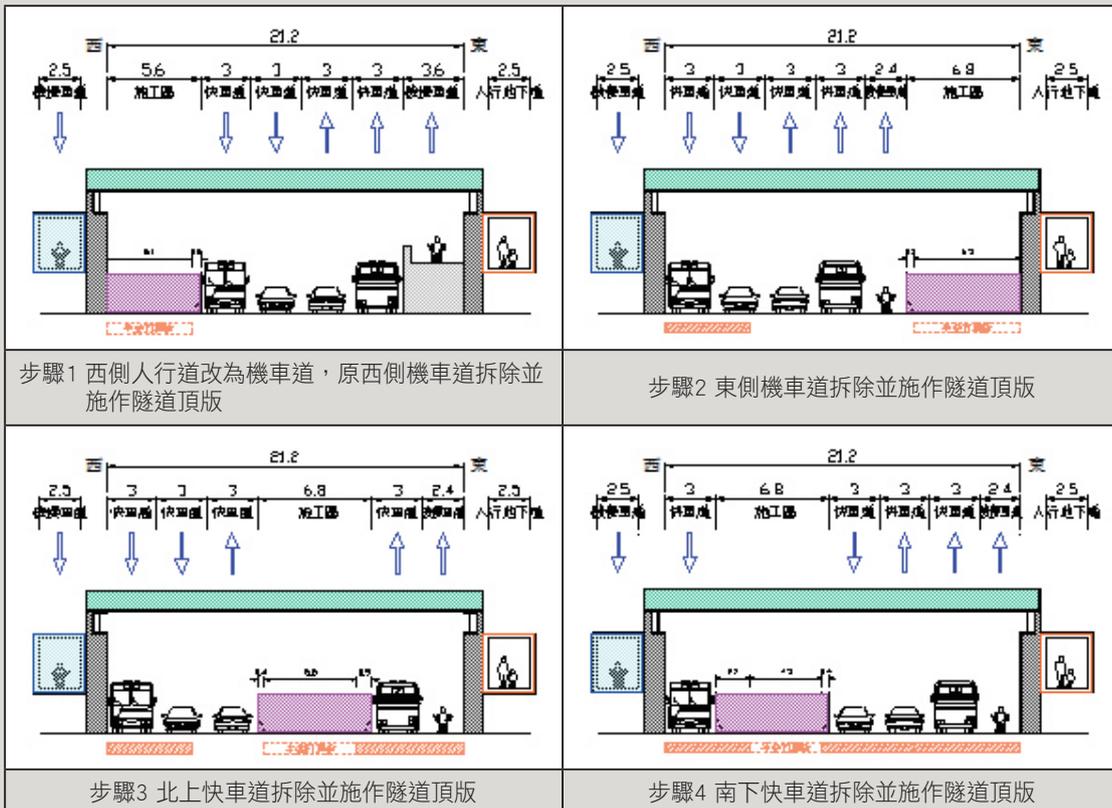


圖11 中華三路地下道擋土壁分階段施工步驟

物，另樁間配合高壓噴射水泥樁止水確保壁體止水性，因開挖深度約11.3m，除逆打隧道頂版外，並架設二階支撐。為利於狹小空間施工，設計取消回撐及中間樁，以減少施工界面，擷節擋土支撐系統工程費，並增加施工作业空間及縮短工期。逆打隧道頂版工法之深開挖分析，係將逆打隧道頂版視為第一階支撐，由於結構勁度大，加以無超挖情形，配合鋼支撐系統逐階降挖，不但大幅減少擋土壁變位量，亦可確保施工安全。

(三) 地下道施工步驟

本地下道原規劃採六階段交通維持，惟為考量縮短交維時程，以減少施工對周邊環境之衝擊，施工階段向市府提出修改為四階段交維施作，以維持原服務等級，並提昇施工品質與安全性。有限空間之四階段施工，係利用原西側之人行地下道進行改建為2.5m之南向機車道並將地下道內管線遷移，以供機車與汽車行駛，充份利用既有空間，而於維持既有車道數量之原則下，避免新建臨時穿越橋或平交道，且具節省公帑、工期與節能減碳之效益，四

階段之地下道施工步驟如圖11。

四、過愛河段圍堰

愛河為高雄市區主要河川，寬度僅約74m，為因應原鐵路橋下方施作鐵路地下化隧道，曾檢討考量採潛盾及沉埋隧道等方式構築，後因系統需求、定線、時程等因素故過愛河段臺鐵隧道仍以明挖隧道配合圍堰方式構築，永久隧道構築前則先於上游側施作臨時鐵路橋以供列車切換營運，由於90年7月18日潭美颱風及94年6月12日豪雨均曾造成愛河河水溢堤情況，水利主管機關要求河中作業僅限非汛期(每年12月至隔年4月)施工。

(一) 施工方式

圍堰工法為傳統常採用之過河段作業方式，具施工快、經費低的優點，但因圍堰工法將縮減河道通水斷面，較不利於狹窄河道施工，圍堰分區及其對水流影響須詳予檢討，並且須經水利主管機關同意始能施工。為縮短圍堰阻水期程及影響，經協調於非汛期採三階段圍堰方式施工，圍堰施工順序如圖12所示。圍堰內僅先施作

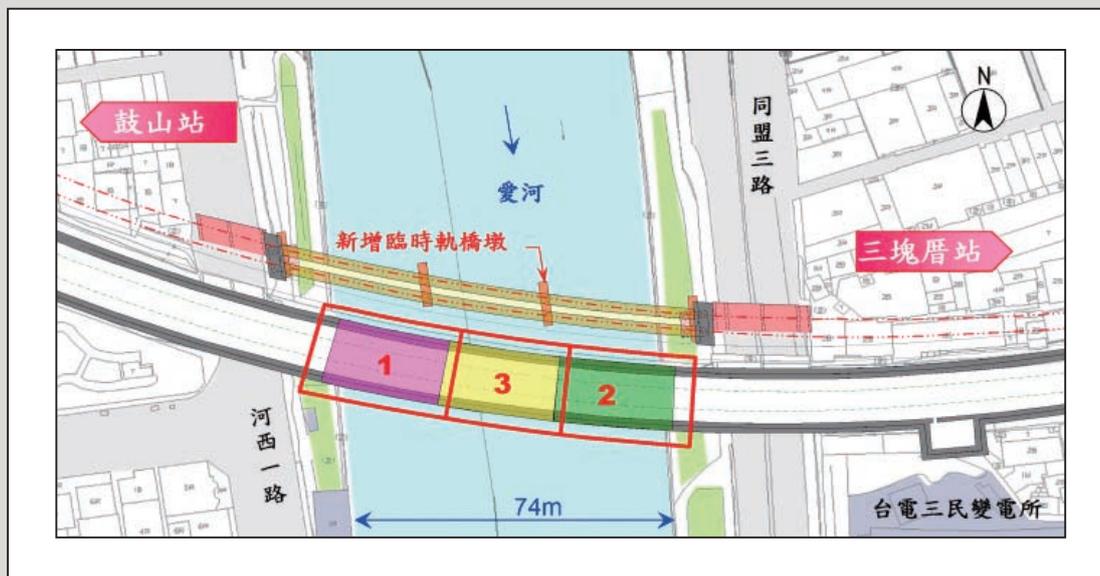


圖12 三階段圍堰示意圖

河道版將河道托底後即恢復通水，再從隧道開挖區進行河道版下方之開挖工作，並進行後續臺鐵隧道結構施築作業。

(二) 圍堰設計

河中圍堰開挖除須滿足深開挖之安全性外，如何降低圍堰施工對愛河影響為考量重點，本工程採取措施包括：

1. 水理檢討：圍堰工法之施工，僅限於每年之非汛期間(每年12~隔年4月)分階段施作，經以TABS-2模式中二維水流模式(RMA-2)進行計算，採用5年頻率流量進

行水理分析，本工程三階段圍堰河道版施工，以第3階段圍堰施工影響較顯著，分析結果(詳圖13)顯示圍堰平均水位壅高14cm，局部壅高25cm，滿足經濟部水利署「跨河建造物設置審核要點」規定。

2. 鋼管樁擋土壁：鋼管樁擋土壁具有減少壁體厚度、變形量、施工作業區範圍及施工快速等優點，相鄰鋼管樁間以卡榫公母對接(詳圖14所示)，配合接頭止水灌漿，可確保壁體之止水性能。
3. 設置河道版：為縮短河中作業期程，圍堰於河道版(圖15)施築完成即予拆除。

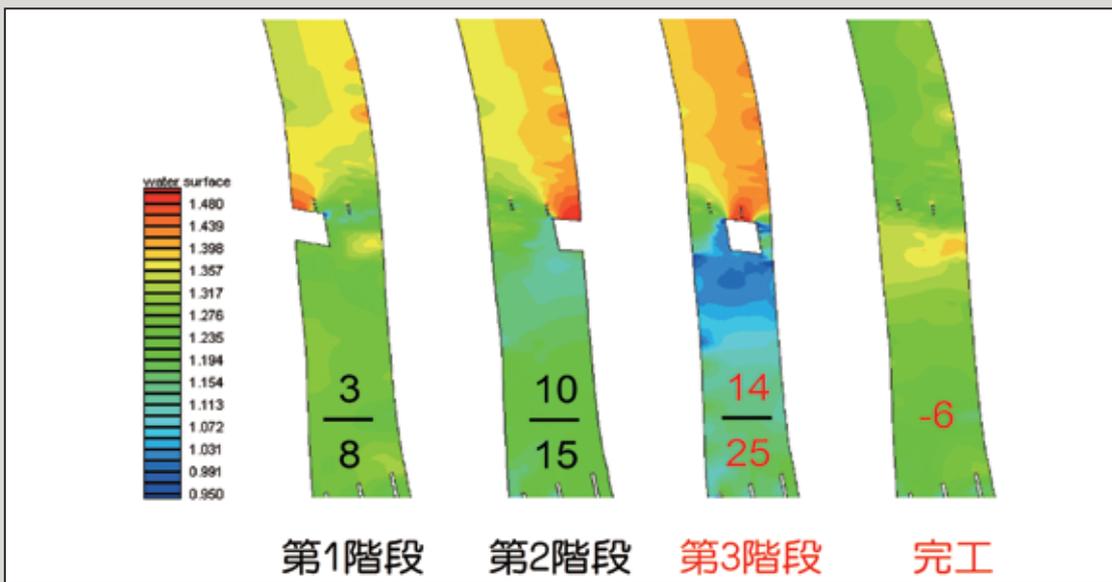


圖13 三階段圍堰水理分析成果

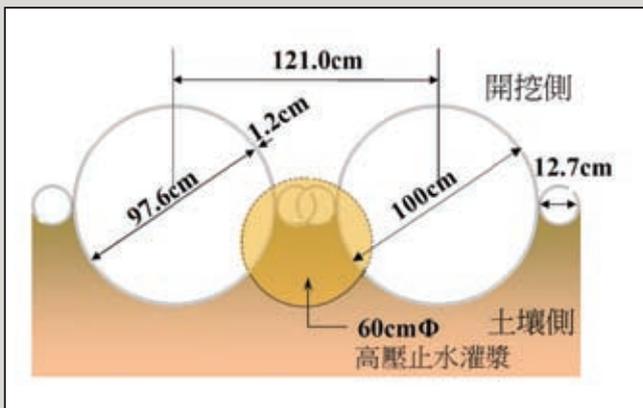


圖14 鋼管樁P-P接頭型式

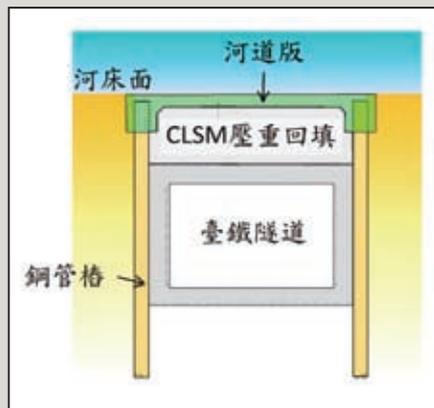


圖15 河道版示意圖

圍堰結構採二層鋼板樁間回填不透水性材料，配合內支撐系統，減少河道版開挖過程中鋼板樁之變位。

4. 半逆打方式施築隧道結構：河道版施築完成後，再從河西一路與同盟三路以半逆打方式進行河道版下方之開挖施工。

綜整過愛河段隧道之施工步驟，如圖16及圖17。

(三) 圍堰施工與回饋

過河段工程於2011年12月至2012年4月施作第1階段圍堰及河道版，2012年12月至2013年4月施作第2階段圍堰及河道版，均順利完工，施工過程如圖17所示。

第3階段圍堰及河道版自2013年12月開始施工，經累積第1及第2階段圍堰與河

道版施工經驗，預期第3階段圍堰與河道版施工可順利於汛期前完成，並仍有餘裕時間。考量加速河中施工作業之進行，檢討增加第3階段圍堰施工內容，將隧道底版之施工併入，即圍堰完成後分階開挖至設計底面，優先施築隧道底版，再構築河道版，待拆除圍堰恢復通水後，進行河道版下方之隧道側牆與頂版施築作業(世久營造，2013)，如圖18及圖19所示。因變更後之隧道開挖、架設支撐及底版施築採傳統明挖方式施工，工率較半逆打工法佳，經檢討縮短施工工期約40天。

(四) 監測成果

依監測成果顯示，圍堰河道版施工期間臨時鐵路橋橋墩最大傾斜量僅28秒，發生在圍堰鋼板樁打設時，最大軌道沉陷量約2mm(圖20)；河道版下方臺鐵隧道開挖期間傾斜量幾無變化，最大軌道沉陷量約

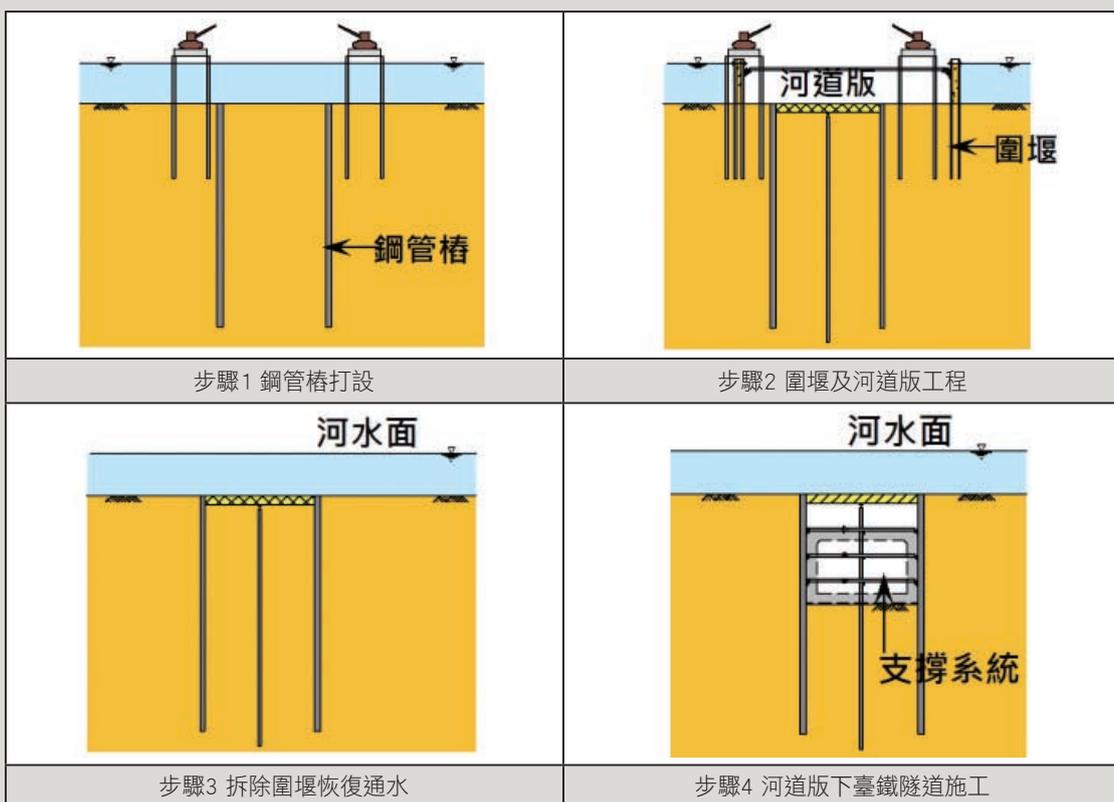


圖16 過河段第1、2階段臺鐵隧道施工步驟示意圖



圖17 圍堰河道版施工

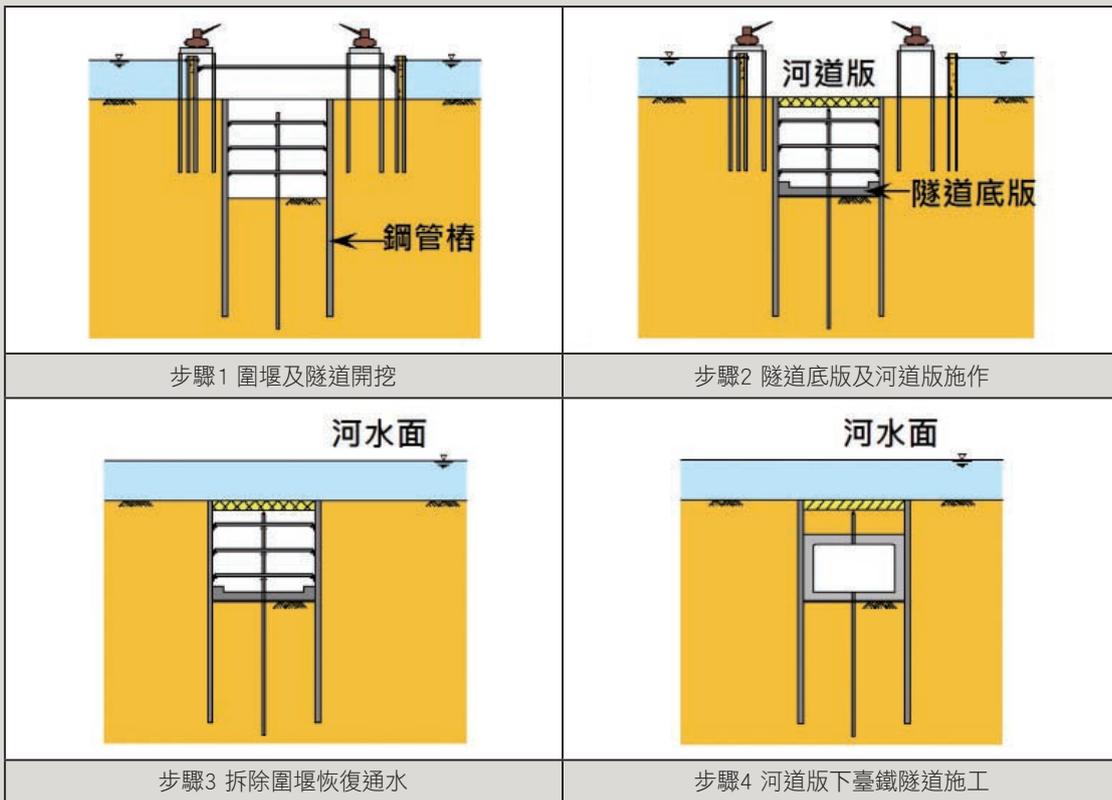
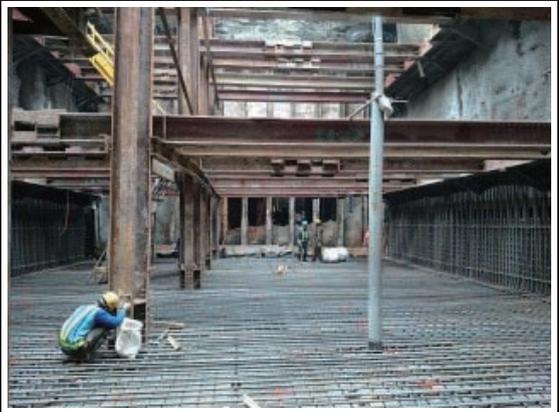


圖18 過河段第3階段臺鐵隧道施工步驟示意圖



(1) 鋼板樁打設圍堰



(2) 底版鋼筋綁紮



(3) 河道版重型支撐架



(4) 河道版完成

圖19 第3階段圍堰施工

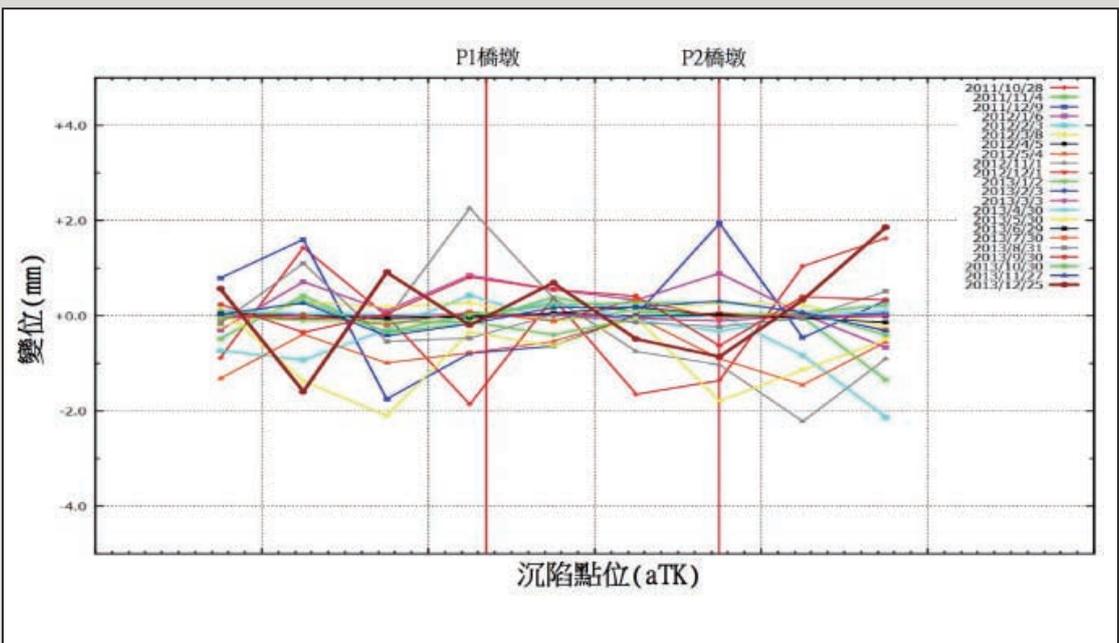


圖20 臨時鐵路橋鋼軌沉陷點變位曲線圖

1mm。顯示圍堰開挖對深基礎之臨時鐵路橋影響小，本工程河中段採半逆打工法施工，確能有效降低對臨時鐵路橋影響。

肆、結語

鐵路地下化工程縫合了都市紋理，並消除原有鐵路對市區之阻隔，紓解交通瓶頸，促進都市均衡發展，提昇都市土地利用價值及經濟活動力，將110年來阻隔的交通、陌生的情感再次交會融合。原來的鐵路廊帶將開闢成為綠園道，提供高雄市民一條可以悠閒漫步，亦能自在安全騎乘自行車的廊道。

橫交措施錯綜複雜，不論高架橋、橋涵、地下道或河川，設計單位縝密創新設計，採用新工法、新材料，減少對交通、環境衝擊。在鐵道局、設計單位、監造單位及施工廠商通力合作下，終克服營運中鐵路旁高風險施工作業的挑戰，順利完成困難任務。歷經12年的努力，轉眼地下化工程通車在即，僅將本文獻給曾經為高雄鐵路地下化工程奉獻心力的每個人，因為您的付出，我們一起完成了劃時代的使命。

參考文獻

1. W.K. Hsu, Y.C. Chou, 「Safety Challenge for Railway Underground Reconstruction at Metro Area of Kaoshiung in Taiwan」, JSCE, 2016.5。
2. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，高雄計畫西段工程細部設計技術服務(DL01標)-設計報告，(2008)。
3. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，高雄計畫西段工程細部設計技術服務(DL01標)-水力分析報告，(2008)。
4. 世久營造探勘工程股份有限公司，CL114標過愛河段圍堰施工計畫書，(2011)。
5. 陳聰海、吳文隆、彭家德，高雄鐵路地下化地工設計探討～以DL01標為例，地工技術第140期，第37～48頁，(2014)。

台20線南橫公路勤和至復興路段複合災害之工程處理對策

關鍵詞(Key Words)：複合災害(Complex Disasters)、沖刷(Scouring)、淤積(Deposit)、序率分析(Stochastic Hydrological Model)

- 交通部公路總局第三區養護工程處／處長／林清洲 (Lin, Qing-Zhou) ❶
交通部公路總局第三區養護工程處／主任工程司／王慶雄 (Wang, Qing-Xiong) ❷
交通部公路總局第三區養護工程處八仙工務段／段長／陳正偉 (Chen, Zheng-Wei) ❸
台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／協理／吳文隆 (Wu, Wen-Long) ❹
台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／經理／蕭秋安 (Siao, Ciou-An) ❺
台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／副理／張嘉興 (Chang, Chia-Shin) ❻
台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／專案副理／王景平 (Wang, Ching-Ping) ❼

摘要

台20線桃源勤和至復興路段於2009年莫拉克風災降下2,578mm雨量，造成荖濃溪河床淤高超過30~40m，沿線道路及橋梁完全覆滅於河床下，風災過後水文地質極不穩定，災害復建工程需考量崩塌、淤積、洪水及土石流等複合型災害。本工程先行辦理水文地質穩定性及穩定廊帶安全評估工作，釐清影響路廊安全之潛在危害，並採用水文序率分析妥善考量河床沖淤之變化，納入中期道路修復工程設計考量。本工程在工程團隊通力合作下，於惡劣施工環境中順利提前完工，得以保障用路人交通安全、維持民眾生計，讓南橫公路迎接「生命之路」的新希望。



The Complex Disaster and Engineering Treatment of No.20, Southern Cross Highway, Among Qinhe and Fuxing Villages

Abstract

The No.20 Highway among Qinhe, Fuxing Villages in Taoyuan District, Kaohsiung was severely damaged by Typhoon Morakot in 2009, which caused Laonong River to deposit debris of more than 30-40 m thick. The hydrological geology was so unstable that the rehabilitation should take complex disasters into consideration, including landslide, deposit, flood and debris flow. The safety assessment was carried out firstly as a reference for recovery construction. A stochastic hydrological model was adopted to determine the significant variation of deposit. The rehabilitation was completed successfully and gave a new hope for reopen of the southern cross highway.

3

專題報導

壹、前言

台20線桃源勤和至復興路段於2009年莫拉克風災降下2,578mm雨量(如圖1)，造成荖濃溪

河床淤高超過30~40m，導致沿線道路及橋梁完全覆滅於河床下(如圖2、圖3)，風災過後水

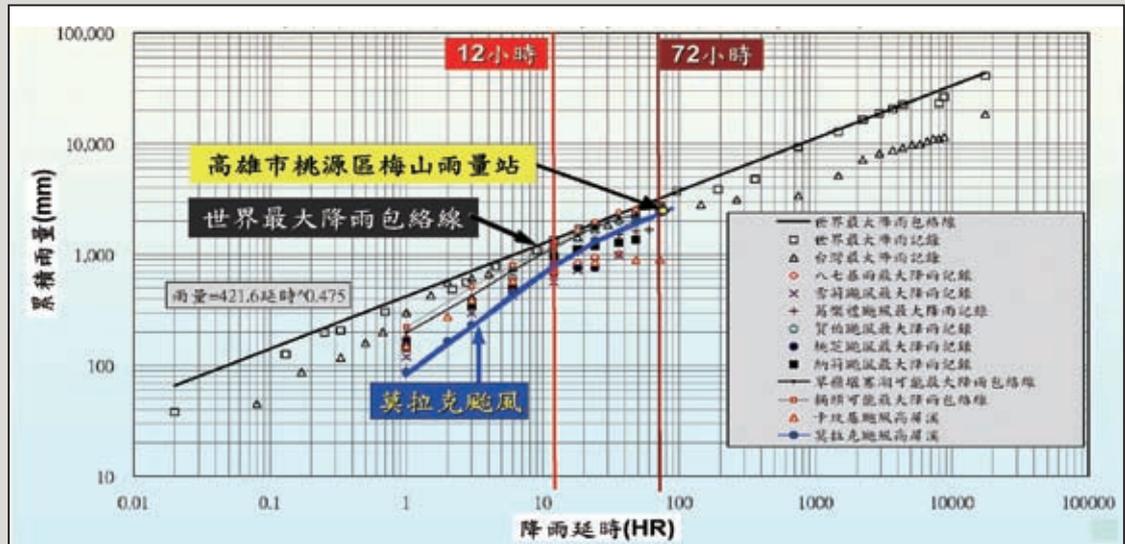


圖1 2009年莫拉克風災雨量紀錄



圖2 台20線勤和村照片比對(謝孟龍 教授 攝)



圖3 台20線勤和明隧道(削山便道段)照片比對(甲仙工務段 攝)



圖4 工址位置圖

文地質極不穩定，初期僅能以河床便道維持交通需求，惟每逢汛期或短時強降雨便道極易中斷，例如於2012年6月10日水災即遭遇1,340mm驚人累積雨量，再次挾帶大量土石將本路段所有公路設施沖毀殆盡，當全國各地莫拉克風災道路陸續修復完竣之際，本路段實為「莫拉克風災修復工程的最後一哩路」。

長期復建工程完成前，本路段進出交通採河床便道通行，為避免一再陷入搶修、施工、損毀之短期輪迴，使當地居民有條安全回家之路，公路總局於2014年爭取災害復建經費，採中期道路標準進行設計，預計使用年期為10~15年，完成設計後於2015年1月開工，施工期間經歷2015年蘇迪勒、杜鵑颱風，2016年0611豪雨、尼伯特、莫蘭蒂、馬勒卡和梅姬等颱風，在惡劣環境中工程進度管控得宜，整體施工進度良好，至2017年4月最艱難的B1標明霸克露橋提前完工通車，並經過2017年0602豪雨1,171mm雨量的考驗，終於擺脫使用河床便道的宿命，讓中斷8年後復通的台20線勤和至復興路段迎接原鄉的「生命之路」。

貳、工址概述及災害歷史

南橫公路的前身為日治時期的理蕃警備道「關山越嶺道」，起點臺南玉井、終點臺東海端，為臺灣南部橫貫中央山脈的重要公路；南橫公路自1968年開始修築，初始規劃是軍事用途，1972年開通時就全是碎石路面，直到1994年才全線加封瀝青混凝土，省道編號為台20線。

2009年莫拉克風災重創南橫公路，導致高雄山區寶來以上地區一夕形成孤島，其中勤和以上復興、拉芙蘭、梅山三部落道路及通訊完全中斷，更形成所謂孤島中的「重度孤島」。桃源勤和至復興路段全長約5公里，因老濃溪淤高導致道路埋沒，初期僅能以河床便道維持交通，目前勤和至復興中期道路修復工程及復興橋修復工程已陸續完工，使交通可順利通達至梅山口，惟梅山至臺東縣海端鄉向陽路段目前管制通行，多處災害路段仍持續辦理復建中(如圖4)。

一、地形及地質

本工程範圍位於高雄市桃源區境內，沿線

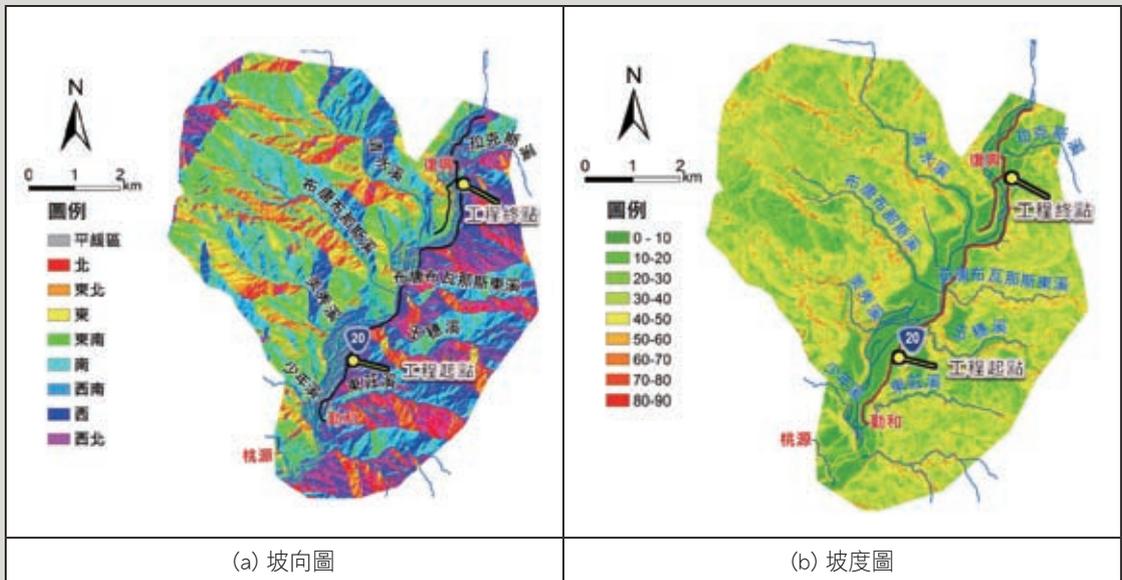


圖5 工程範圍地形分析

地勢高低起伏崎嶇，海拔高度在500~1,000m之間，在地形分區上屬於屏東山地中山帶(陳培源，2006，臺灣地質)。主要水系皆為東北-西南走向，支流多為西北-東南走向，荖濃溪部分屬於寬谷地形，河流攻擊側之邊坡較為高聳且陡峭(如主流之攻擊岸及支流沖積扇對岸)，堆積坡側則易產生地勢較為平緩的河階或沖積扇等地形。根據數值地形模型之分析，如圖5所示，工址附近兩岸集水區邊坡平均坡向為東南及西北向為主，平均坡度約34°。

工址鄰近土壠灣斷層(潮州斷層北段延伸)屬界線斷層，以西屬於西部麓山帶地質區之砂岩與頁岩，以東為中央山脈西翼地質區脊樑山脈帶之板岩夾變質砂岩。工址附近主要為一系列向東傾之逆斷層及褶皺，亦因這些地質構造影響，使地層頗為破碎，區域地質詳圖6所示。

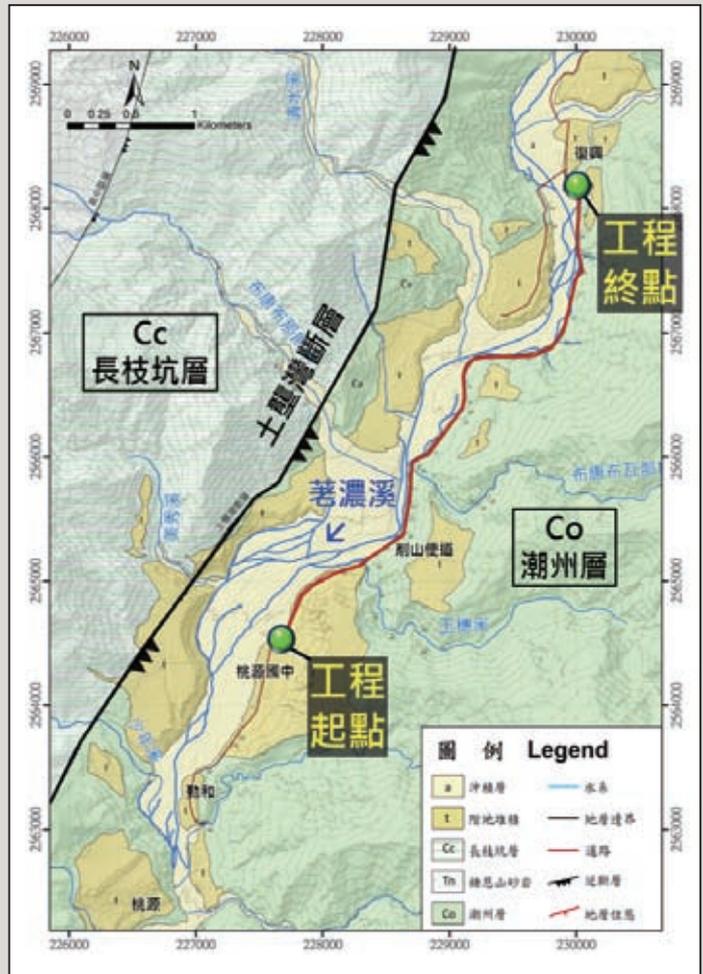


圖6 工址範圍區域地質圖(參考自中央地調所)



圖7 工址周邊水系及土石流分佈圖

二、水文與氣象

台20線位於荖濃溪溪谷，荖濃溪源於玉山東北坡，沿玉山山脈與中央山脈之間往南流，與旗山溪於屏東里港匯流，始稱高屏溪。荖濃溪在布農族語中意為「兇猛不定的河水」，附近並存在活躍的土石流運動，鄰近包括水保局公告之4條土石流潛勢溪流(編號分別為DF060、DF061、DF082及DF110)，及地調所亦將沿線兩岸之清水溪、美秀溪、玉穗溪及東莊溪劃設為土石流溪流。工程周邊水系及土石流潛勢溪流詳圖7。

本工程氣候屬於熱帶季風氣候，年平均降雨約3,700 mm，雨季以5~6月的梅雨季以及7~9月的颱風季為主。整理鄰近之高中、梅山、民族雨量站資料，降雨量集中於5~9月，多為梅雨或颱風所帶來之降雨量，如圖8所示。

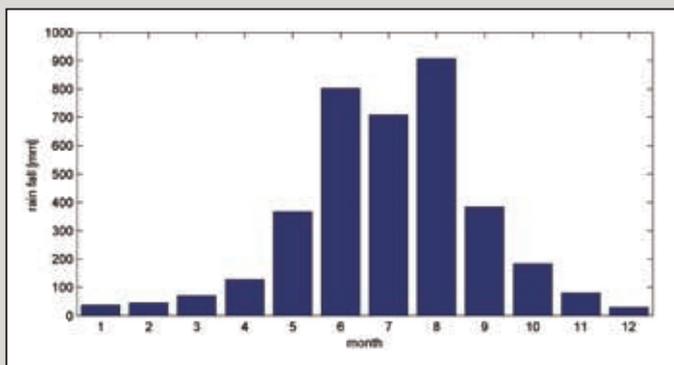


圖8 2005~2012年月平均雨量
(高中、梅山、民族雨量站平均雨量)

三、工址災害歷史

莫拉克颱風造成南臺灣自1959年八七水災以來最嚴重的水患，高雄市境內之多條省道交通中斷，桃源區之勤和至復興路段亦因為河床淤高，使得區域內多座橋梁(撒拉阿塢橋、勤和橋、明德橋)及勤和明隧道完全覆滅於河床下，為災害受損最為嚴重路段，主要災害及修復階段分別說明如下。

(一) 第一階段短期搶修：搶通河床臨時便道，採即壞即修方式維護，惟荖濃溪上游仍有超過10億立方崩塌土砂，至2010年汛期結束前，每逢下雨即受洪流土砂沖毀便道，導致交通中斷達134天。

(二) 第二階段中期提昇計畫(脫困計畫)：為提昇抗災能力，部分路段重新改道，並提高路基高度及加固，勤和段則開鑿右側山壁施作削山便道；而跨越河川部分，原採混凝土管涵鋪築便道，後改建為鋼便橋。歷經2011年颱風豪雨，局部便道路基流失及鋼便橋遭沖毀，惟交通中斷時間已大幅縮減至22天。2012年受5月初豪雨、0610豪雨

及7月蘇力颱風等影響，荖濃溪河床持續抬昇，多處道路橋梁被沖毀及掩埋(圖9、10)。

(三) 第三階段中期道路修復工程：為避免一再陷入河床便道搶修、施工、損毀之短期輪迴，加上原鄉部落通行安全強烈需求，2014年爭取復建經費辦理「台20線勤和復興中期道路提升工程」(本工程)，於2015年1月開工，在惡劣施工環境中工程進度管控得宜，整體施工進度良好，最困難之削山便

道段明霸克露橋，亦於2017年4月於汛期前開放通車。

中期道路修復工程施工期間，經歷2015年蘇迪勒、杜鵑颱風，2016年0611豪雨、尼伯特、莫蘭蒂、馬勒卡、梅姬等颱風，豪雨往往造成荖濃溪水暴漲、玉穗溪水土流失暴發，勤和至復興路段河床沖淤互現，並造成便道中斷數日至數週，全部工程於2017年9月竣工，完成中期道路提升目標(圖11)。



(a) 2012年5月水災前



(b) 2012年0610水災後

圖9 台20線清水溪鋼便橋照片比對

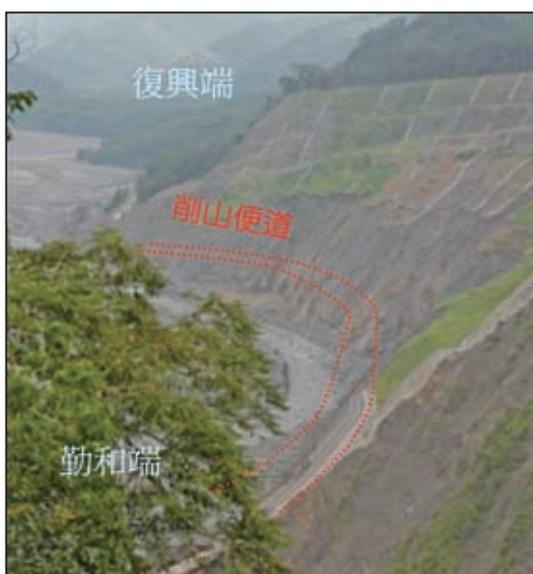


圖10 台20線削山便道照片比對



圖11 2016年豪雨及颱風災損照片

參、災害敏感區域辨識及穩定廊帶評估

台20線勤和至復興路段鄰近環境地質敏感地區，山區地形陡峻，於颱風及暴雨侵襲下發成大規模崩塌，合併洪水與土石流造成既有道路及聚落嚴重損毀，深受複合型災害之影響。台20線本路段地形地貌大幅變化，行政院莫拉克重建會2012年於610豪雨災後召開研商會議，結論略以：「由於現場環境尚未穩定，短、中

期及長期永久性路廊規劃請公路總局就整體水利、水保及地質面繼續評估」，爰此先行辦理水文地質穩定性及穩定廊帶安全評估，以利作為工程選線及規劃之參考。

水文地質穩定性及穩定廊帶安全評估工作，內容包括集水區基本資料調查與蒐集、高精度數值高程模型與航照基本圖建置、集水區崩塌多期遙測影像判釋與地貌變異分析等(圖12、13)，以進行地文、水文及環境等相關影響

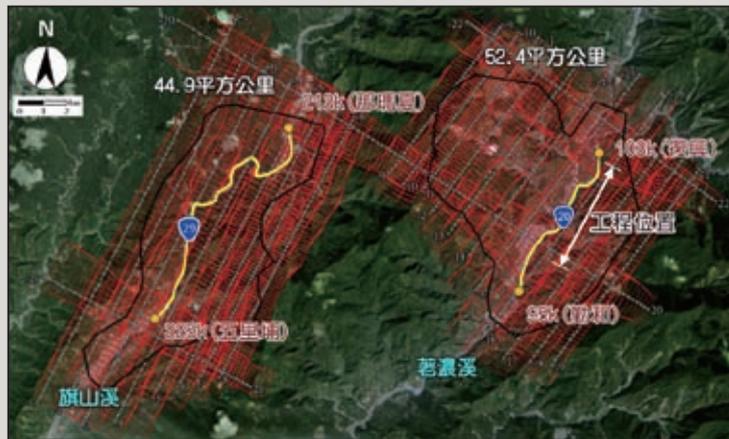


圖12 正射航照及空載Lidar施測規劃航線圖



圖13 正射航照與1m DTM立體影像模擬圖

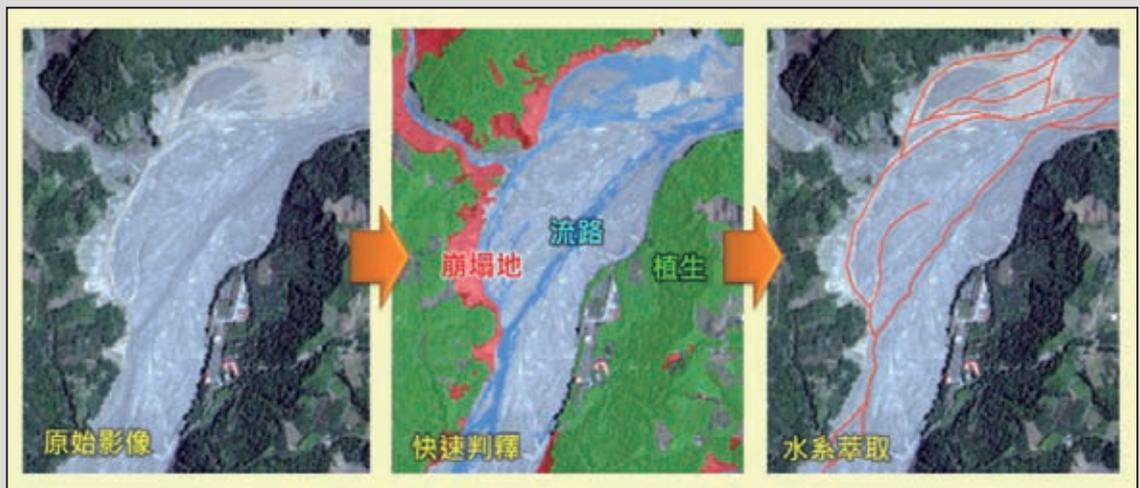


圖14 智慧化物件式影像判釋應用地貌變異分析

因子探討，釐清影響路廊安全之潛在危害。後續透過穩定區塊的串連構成路廊，續由路廊範圍來規劃復建路線，以利研選安全可靠的復建方案。

一、智慧化遙測影像判釋

本工程蒐集2005~2012年共24幅各期衛星影像，使用物件式影像判釋技術，能夠精準且快速的將大量的影像分類完成，藉由衛星影像波段特性、高解析數值地形特徵訂定分類指標，以試誤決定演算參數後建立流程自動判釋，可減少人為操作差異(圖14)。

由其成果可進一步產出所需要的各類基礎資訊，包括：主流河道線型及擺盪、河道深槽區變遷、堰塞湖範圍、崩塌裸露範圍及變化，用以區分地貌及水文變異，有效辨識環境地質敏感區域，分析結果如圖15、16所示。

二、水文序率分析妥善考量沖淤變化

工址區域內各集水區因邊坡大量崩塌，包含布唐布那斯溪、清水溪、玉穗溪、拉克斯溪等支流，提供河道大量淤積料源，使得荖濃溪主流、支流處於持續淤積狀態。故考量固定底床可靠度分析及序率底床模式評估，進行本路段之河床變動分析。

工址範圍之荖濃溪河床沖淤變動劇烈，因此水理演算需考量淤積及洪水發生時之複合式

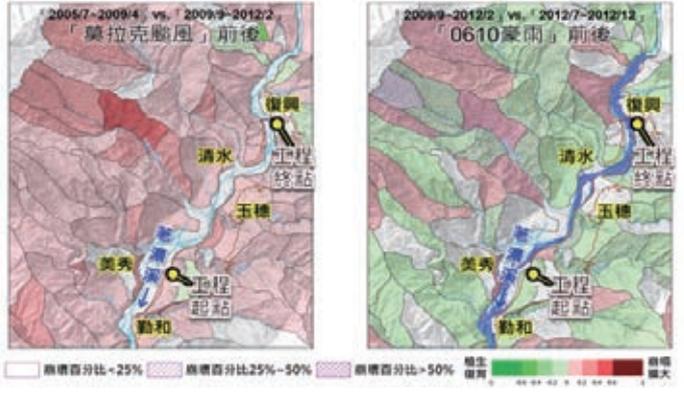


圖15 地形單元地貌變異以評估邊坡崩壞變化趨勢

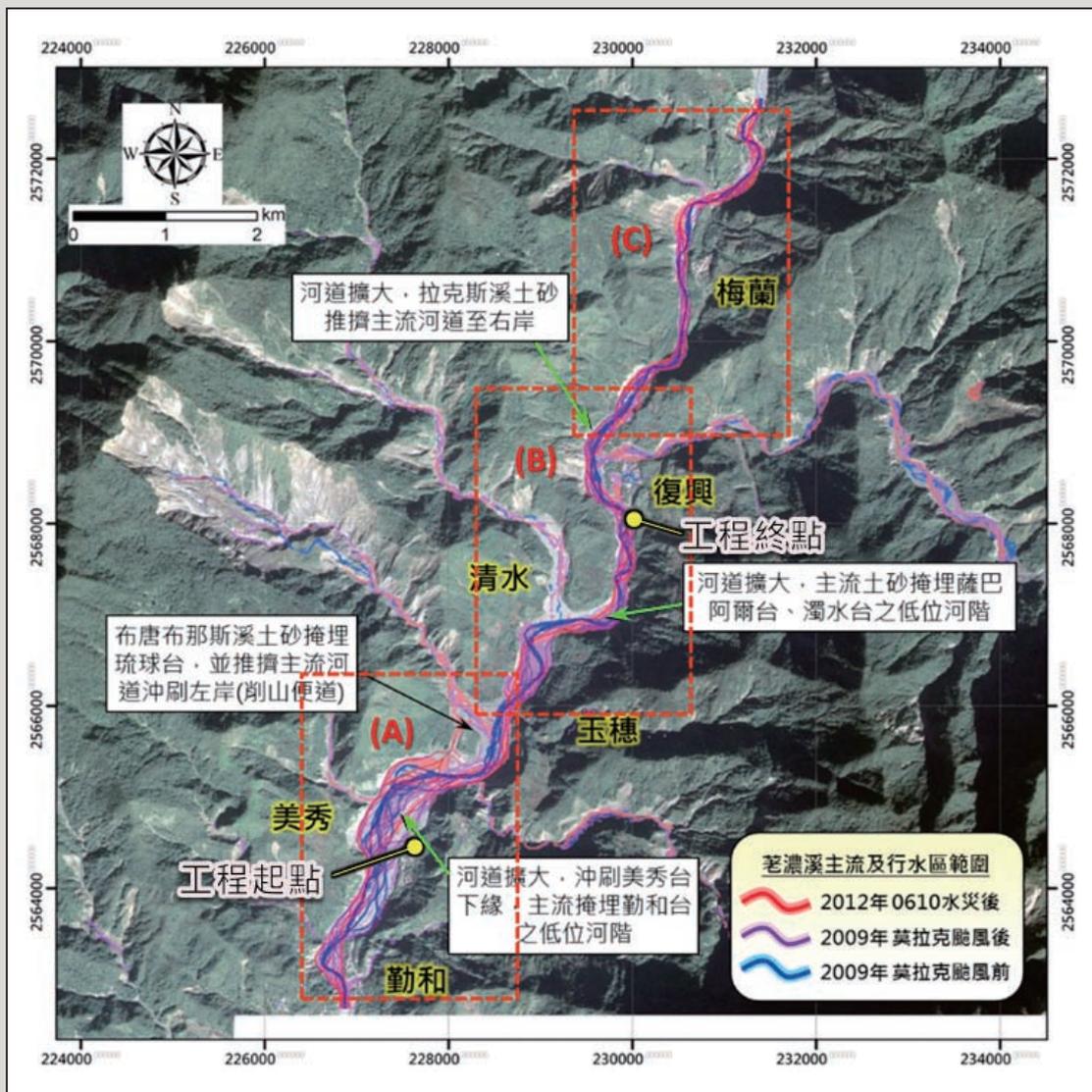


圖16 主流河道萃取應用於水文變異判釋

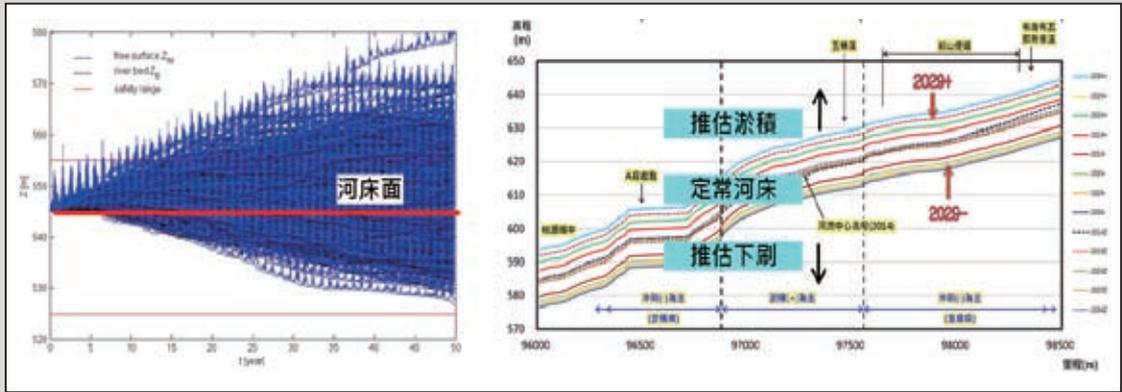


圖17 序率分析之河床高程變化圖

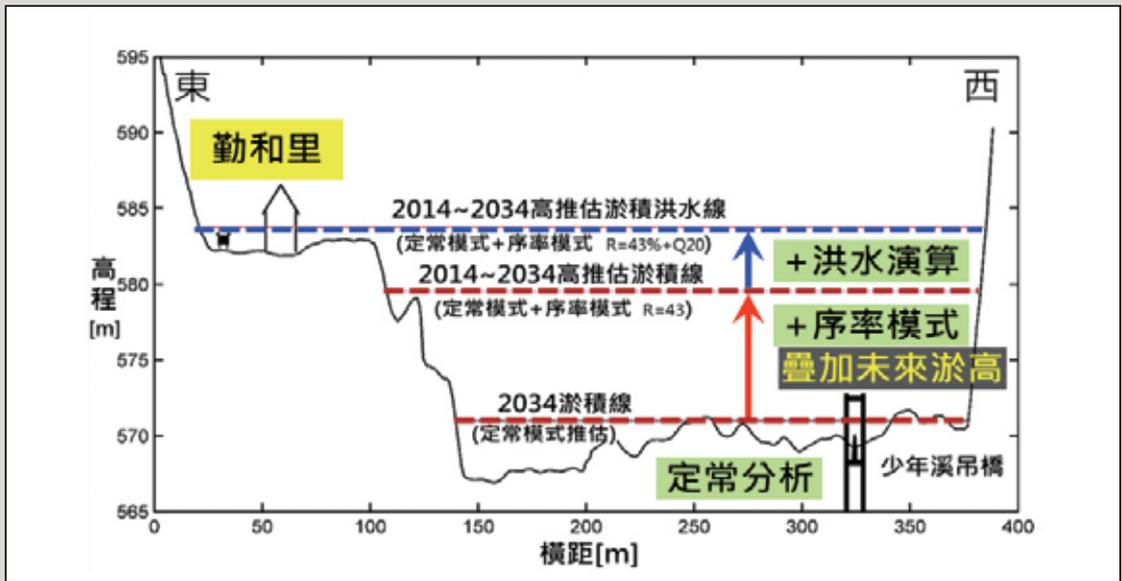


圖18 勤和里複合式情境模擬20年重現期距洪水高程

情境(scenario)，分析時考量定常分析之河床縱坡，疊加序率模式的河床可能變動，並以高推估的淤積斷面重新演算各重現期距洪水流量下之洪水位(圖17、18)。本計畫由臺灣大學卡艾璋教授研究團隊協助，進行主流淤積序率分析以推估10~15之淤積高程(2024₍₊₎、2029₍₊₎)，再進行不同洪水重現期Q₁₀、Q₂₀、Q₁₀₀水理分析，結果顯示河床沖淤高程變化遠大於洪水位之影響。

三、水文地質穩定性及穩定廊帶安全評估

水文地質穩定性及穩定廊帶安全評估工作，藉由前述地文、水文及環境等相關影響因

子評估，辨識相關影響路廊安全之潛在危害，判斷水文地質環境敏感區位及災害潛勢，產製工址鄰近範圍之「環境地質圖」及「災害潛勢圖」如圖19所示。

後續進行穩定廊帶評估工作，輔以「致災因子邏輯套疊」分析影響因子，予以區分A(不建議通過)、B(有條件通過)、C(可通過)三類區塊，綜合判斷工址鄰近範圍穩定區域。透過穩定區塊串連構成路廊，續由路廊範圍規劃復建路線。綜合判斷工址鄰近範圍穩定區域如圖20所示，惟其尚屬歷史資料判釋，仍待觀察工址長期崩塌及河床達穩定狀態，始得辦理長期路廊研選。

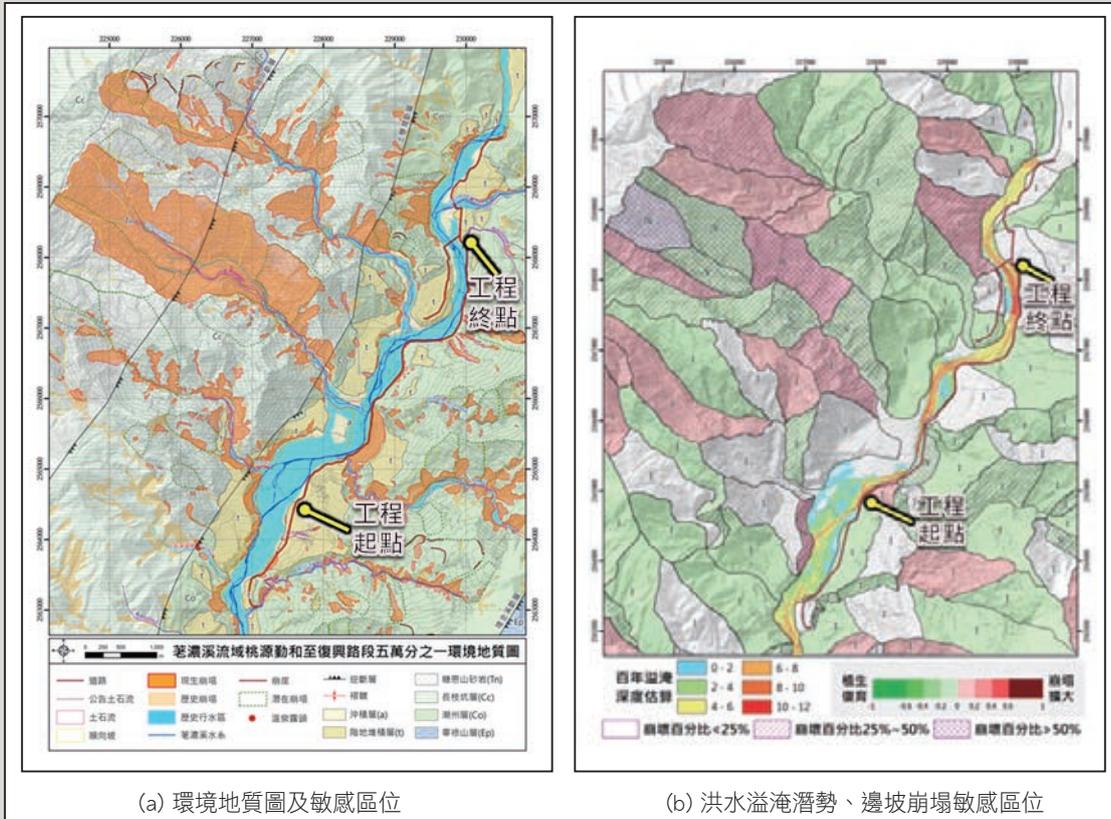
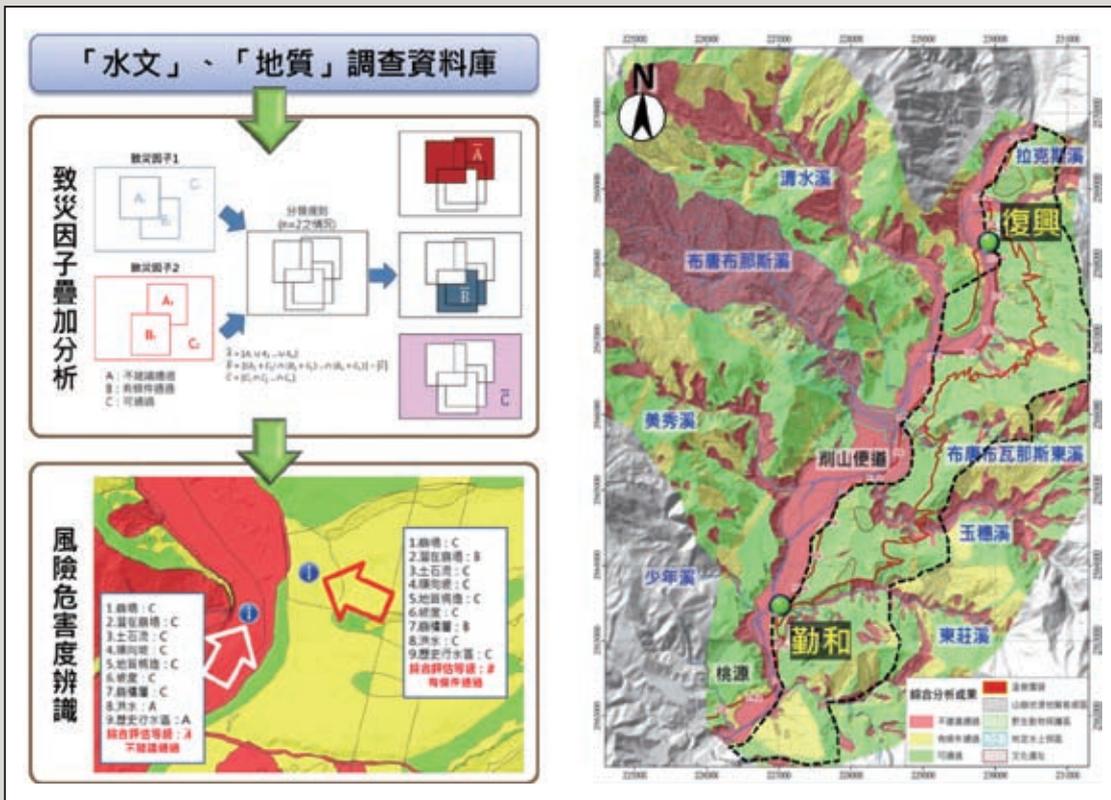


圖19 水文地質穩定性評估成果圖



肆、工程處理對策及配置

中期道路並非永久路廊，係於現階段達到通行目標，擇定相對安全的折衷方案。中期道路修復工程自勤和村至復興村共計約5km，設置於荖濃溪左岸，原有通行道路位於河床，耐洪能力不足，本修復工程目的在提昇道路防洪抗災能力，分為優先、A、B1、B2及C等五個施工標，工程範圍及配置詳圖21。其中，B1標明霸克露橋(695m)、B2標班順努安橋(70m)屬簡易鋼橋型式，跨越玉穗溪及布唐布瓦那斯東溪，平行荖濃溪主流佈設。B2標主要沿用濁水平台舊有台20線便道，進行道路線形及縱坡改善，其餘路段皆屬於沿河道新建擋土牆路基工程。

一、道路工程設計標準

本工程位於經常性坍方及落石路段，遇豪雨颱風或地震時，可能造成交通阻斷甚至危及用路人安全，故針對該危險路段進行改善，提高道路抗災能力及縮短道路搶修時間，以保障用路人安全及道路暢通。

本工程道路路堤路塹段為雙向雙車道，車道寬3.5公尺寬、路肩0.5公尺寬，路面全寬計8公尺，橋梁段為雙向單車道，車道寬4.5公尺寬、路肩0.5公尺寬，路面全寬計5.5公尺，外側各設置0.5公尺寬護欄。標準斷面圖如圖22所示。



圖21 勤和至復興路段中期道路修復工程範圍及配置圖

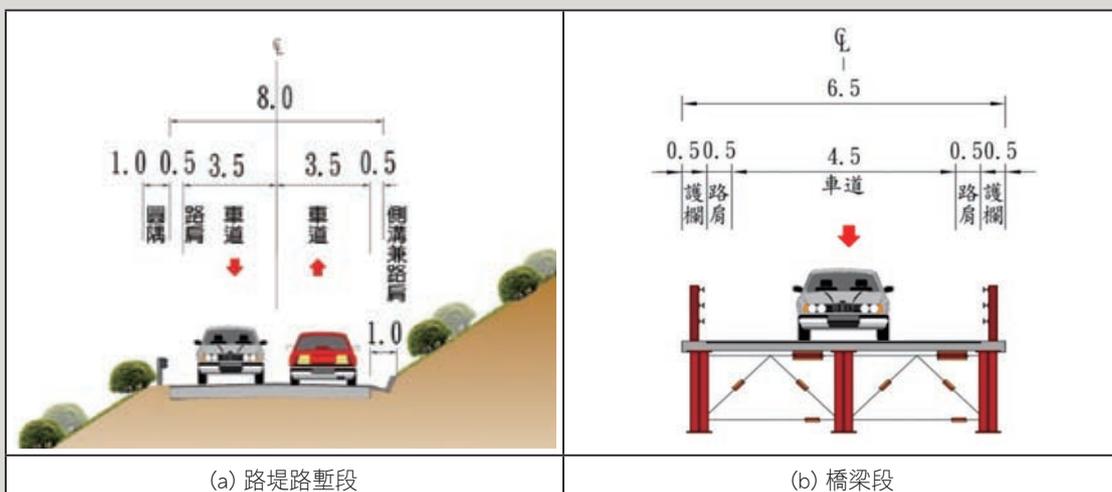


圖22 本工程道路標準斷面圖

二、橋梁工程設計原則

本路段明霸克露橋(B1標)跨越玉穗溪及削山便道、班順努安橋(B2標)跨越布唐布瓦納斯東溪，現有便道位於河床，耐洪能力不足，為提昇便道的防洪抗災能力，本路段採橋梁方式構築，預定使用年期為10~15年，作為長期路線完工前維持地區交通之維生道路。因此，橋梁結構型式研選應以符合施工快速、構造精簡、維護容易等需求為首要考量，且尚須考量下列因素：

- (一) 本工程屬中期道路修復，橋梁配置須儘量避開水流攻擊位置，並考量布唐布那斯溪土石流沖積扇與荖濃溪河道束縮之關係，及洪水高程、地質狀況、山側土石崩落影響等。
- (二) 橋梁高程考量荖濃溪20年重現期洪水位 Q_{20} ，及採用序率分析估算之15年期 $2029(+)$ 淤積高程，並檢核布唐布那斯溪沖積扇之影響(圖23、24)。

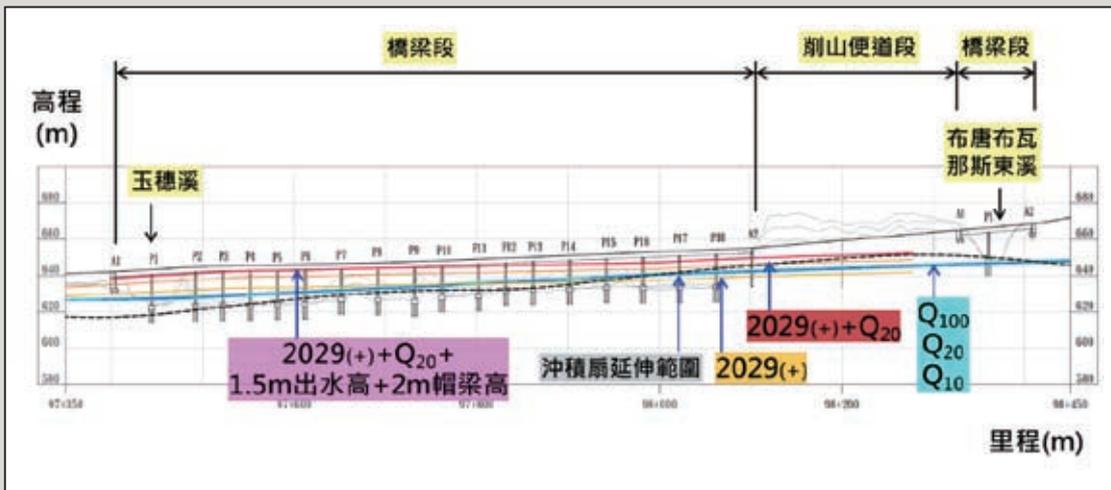


圖23 削山便道段明霸克露橋縱面設計標準

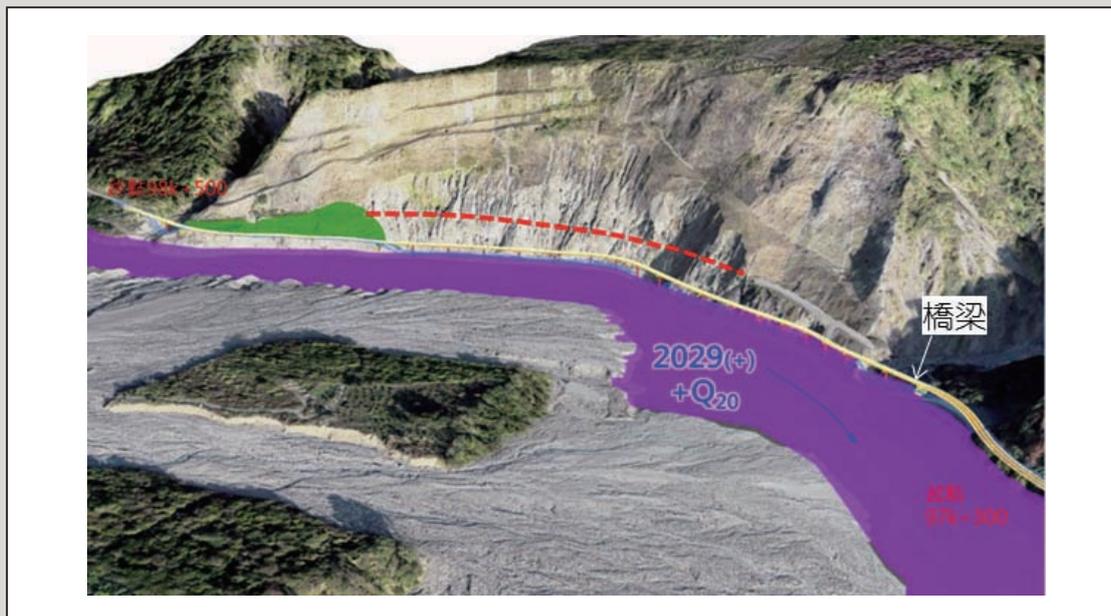


圖24 三維地形模擬明霸克露橋高程檢核

(三) 橋墩基礎應考量河川沖刷影響，擬以荖濃溪20年重現期之洪水位及工址鄰近之河床質粒徑資料，推估沖刷深度高程。

(四) 考量施工快速、構造精簡，新建鋼便橋上部結構以採用簡支梁型式為原則，橋面板採免模板工法之鋼承板橋面板，橋墩柱及基礎增設防撞鋼板保護。

三、路堤段防溢淹及沖刷設計考量

本工程優先標、A標及C標採路堤方案，設計重點考量為防溢淹及沖刷課題。計畫道路沿線緊鄰荖濃溪，除考量荖濃溪洪水位，尚須考量河床淤高造成之溢淹。相關設計考量說明如下：

(一) 路堤段防溢淹考量：水力分析根據荖濃溪20年重現期之洪水流量 Q_{20} 及泥砂條件，進行河床變化之模擬，並依分析結果將河流概略區分為沖刷段、淤積段及漸變段。而後，續採序率分析方式，推估10年及15年淤積高程(2024₍₊₎及2029₍₊₎)，再加上荖濃溪20年重現期 Q_{20} 產生之洪水位，作為A標及C標中期道路路堤段路面高程設計之依據，迎水面採RC擋土牆防止挾砂水流之沖蝕，分別以序率分析所得之15年(A標)淤積高程(2029₍₊₎)，及10年(C標)淤積高程(2024₍₊₎)作為RC保護高程(即牆頂高程)。針對沖刷段，擬直接採荖濃溪20年重現期 Q_{20} 產生之洪水位作為中期道路路堤段路面高程設計之依據(圖25)。



圖25 路堤段沖刷保護及路基高程設計標準



圖26 野溪坑溝佈設考量完工照片

(二) 路堤段沖刷考量：估算河床短期沖刷深度，降低擋土牆高程(覆土3m，臨河側增設1m截水牆)，並參考近年河道變遷，於河流轉彎、攻擊岸等沖刷較劇烈路段考慮加設樁基礎，位於凹岸易沖刷段，考慮增設導流工，降低流速，或挑流使主流遠離路堤。

(三) 野溪坑溝考量：上游增設攔砂擋牆及沉砂消能井，道路下邊坡埋設排水箱涵(或管涵)，出口處設置消能設施(圖26)。

伍、結論

本工程為「莫拉克風災修復工程的最後一哩路」，區域環境之水文地質非常不穩定，工程方案順應自然，設計準則與傳統考量標準不同，需多元考量各樣複合式災害潛勢及其影響，前期辦理水文地質穩定性及穩定廊帶安全評估，進行災害敏感區辨識、修復工程選線及方案評估，以利工程得以順利施工。

「台20線桃源勤和至復興路段中期道路修復工程」在工程團隊通力合作下，積極排除困難、研析解決方案，雖在惡劣環境中施工，整體施工進度管控良好，至2017年4月最艱難的B1標明霸克露橋提前5個月於汛期前通車，並經過2017年0602豪雨1,171mm雨量的考驗，中期道路提升工程的最後一塊拼圖讓中斷8年的勤和至復興路段復通，得以保障用路人交通安全，維持民眾生計。

本工程完工後效益顯著，可解決台20線復興部落梅山、拉芙蘭和復興里的居民每年防汛期都要面對道路中斷無法進出之困窘，有效解決學生就學、居民就醫、農作物外送等問題，並讓南橫公路浴火重生、重現昔日美景，讓原鄉族人迎接「生命之路」的新希望。

參考文獻

1. 經濟部水利署水利規劃試驗所，“高屏溪治理規劃檢討”，(2008)。
2. 經濟部中央地質調查所，“臺灣地質圖-甲仙圖幅”，(2000)。
3. 經濟部中央地質調查所，“易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置”，(2000)。
4. 經濟部水利署第七河川局，“莫拉克颱風高屏河流域受災特定區段急需防洪設施初步規劃”，(2010)。
5. 經濟部水利署第七河川局，“高屏河流域整體治理規劃”，(2011)。
6. 陳樹群，施珮瑜，吳俊鈺，趙益群，“巨額土砂匯入對和社溪河相演變之影響”，中華水土保持學報，第44卷，第4期，第302-310頁，(2013)。
7. 經濟部中央地質調查所，“高雄市-山崩與地滑地質敏感區劃定計畫書”，(2014)。
8. 林清洲、卡艾璋、姜繁洲、張嘉興、許文祥、莊心凱，“荖濃溪勤和至復興段河道變遷及沖淤評估”，中華技術第109期，第106~113頁，(2016)。
9. 李國誠、莊心凱、張嘉興、王景平、林清洲、王慶雄，“應用遙測影像分析技術於山區公路穩定廊帶之評估”，2016海峽兩岸地工技術/岩土工程交流研討會，成都，(2016)。

地工沉箱之問題探討與新時代之技術挑戰

關鍵詞(Key Words)：壓氣沉箱(pneumatic caisson)、壓入沉箱(press-in anchor caisson)、NF膜(no friction membrane)、無人化(un-manned)、高氣壓(high atmospheric pressure)、潛水失病(decompression sickness)

正修科技大學／土木與空間資訊系／助理教授／柯武德 (Ko, Wu-Te) ❶

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／經理／周永川 (Chou, Yung-Chuan) ❷

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／計畫經理／邱志榮 (Chiu, Chih-Jung) ❸

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／工程師／許耀仁 (Hsu, Yao-Jen) ❹

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／工程師／陳佩雯 (Chen, Pei-Wen) ❺

摘要

臺灣山區附近常遭遇卵礫石、高水位、沖刷大等具困難施工之河川環境，橋梁下部為降低大深度之施工困難度與風險，通常可考量沉箱工法，但傳統自重沉箱工程因採超挖沉降方式，常有超沉、突沉、沉箱傾斜、錯位、地盤沉陷等問題發生，目前雖有各種改善措施，惟因超挖沉降方式未作改變，成效受限；本文參酌國內外技術案例及執行經驗，提供大深度與大面積之沉箱設計施工考量、注意要項及國外沉箱技術挑戰發展，期可降低沉箱工程問題，及提供國內各界參考。



Geotechnical Evaluation for Caisson and Its Challenges in New Era

Abstract

Construction of bridge piers under gravel riverbed, high water level conditions are very difficult and risky. Due to the great depth and large area construction in such an environment, excavated with caisson is usually adopted to avoid risk. However, traditional caisson often induced sudden sinking, tilt, dislocation, adjacent facility subsidence, etc. problems according to the over-digging sinking. This article will include both of the domestic and foreign caisson cases for great depth and large area excavation with advanced technology and important caisson design consideration as reference.

3

專題報導

壹、沉箱應用溯源

沉箱最早之使用為1841年法國的塔利哥(M. Triger)，因遭遇高水位及卵礫石施工不易問題，故採用1m的鐵製圓形筒配合氣壓式閘門(Air lock)提供一約 $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 之氣壓，以輔助18m深之煤礦豎井施工；之後，此類工法發展為橋梁之深基礎施工，如美國紐約布魯克林大橋(Brooklyn Bridge，工期14年，1883年完工)，其橋墩下部($52.4\text{m} \times 31.0\text{m} = 1630\text{m}^2$)須將3000T之基礎深入基岩，因須深入水下約13.5及23m，故當時採用通氣設備將具壓力之空氣送至開挖面底部以抵抗水壓與土壓，再由工人配合水密性木製擋板逐步開挖沉降(示意如圖1)，本歷史性工程雖終究完成，但有超過100名工人因當時輸送之壓力空氣而得了潛水夫病，因此，紐約州政府就此案例深入檢討，而於1909年制定並通過了沉箱安全施工法案，以保障沉箱環境作業之工人健康(於19世紀之沉箱發展可詳表1)。

20世紀，美國紐約市興建超高層摩天大樓(Sky-Scraper)，這些超高層建築深度達地下4~

5層，因基礎需構築位於岩層，故採用數十個沉箱相互連結並形成一水密性良好的地下圓周壁結構，再以明挖進行開挖以達岩層，此類沉箱作為地下周壁之施工方法稱為牆沉箱(Wall Caisson)工法；近期沉箱於國內外案例則多用於潛盾發進/到達井及橋墩基礎、或匯流/連通設施、地下空間等之大面積、大深度設施施築。

貳、沉箱規劃設計與施工之探討

沉箱工法具低污染、不影響地下水文、毋須日夜連續施工、可減少擾鄰或降低交通衝擊之友善環境特性，採擇應依挖掘方式、施工場地、地盤條件、深度、對周邊環境影響、地下障礙物等因素決定適用方式；國內沉箱普遍應用於橋梁基礎施工，但近年因施工機械進步，國內橋梁下部基礎多採用樁基礎形式，但沉箱因具大口徑之斷面積大特性，其承載性、耐震性佳，較可避免瞬間破壞與挫曲折斷等問題，且主體結構在地面施築，品質易掌控、止水性較佳，特殊狀況較一般基樁適合採用。

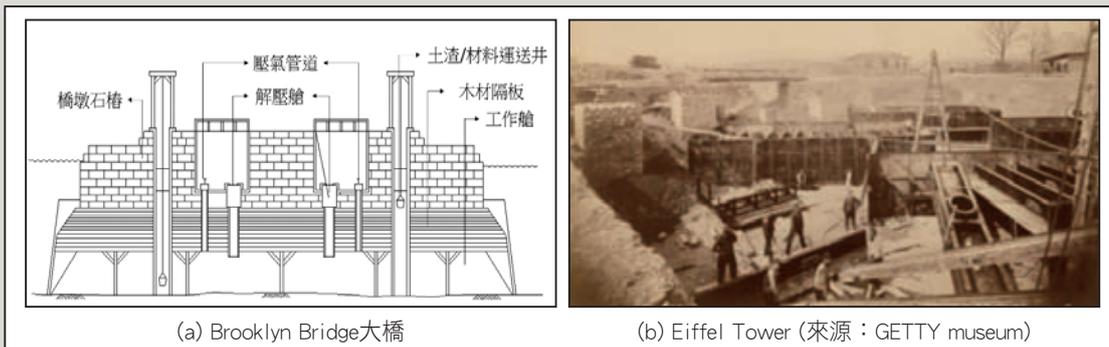


圖1 紐約Brooklyn Bridge大橋及巴黎艾菲爾鐵塔之基礎採壓氣沉箱施工

表1 十九世紀之沉箱發展

項次	年代	沉箱設施	沉箱形式	困難性	施工方式
1	1841	法國塔利哥構築煤礦豎井	ϕ 1m鐵製圓形筒	高水位及卵礫石、深18m	氣壓閘門(氣壓約 $2\text{kg}/\text{cm}^2$)
2	1850~1860	法國、英國鐵公路橋梁基礎	圓形基樁(Pneumatic Pile)， $\phi=2\text{m}$ 以下	尺寸大、深度深	壓氣工法
3	1883	美國布魯克林大橋基礎	2座木製擋板沉箱($52.4\text{m} \times 31.0\text{m}$)	河底面下13.5/23m	壓氣工法
4	1886	法國艾菲爾(Eiffel)鐵塔基礎	4座鐵製壓氣沉箱($15\text{m} \times 6\text{m}$)	河底面下10m	壓氣工法

一、沉箱適用性及特性比較

沉箱工法依施工方式而可區分為自重沉箱、壓入沉箱、與壓氣沉箱(圖2)，目前臺灣多採開口式沉箱利用自重下沉施工，但開口沉箱須在水中開挖，受限機械性能及水中開挖致

其效率較差，隨挖掘技術進步，除常見之蛤式或梅花式抓斗外，於硬質黏土地盤則可併用高壓水刀預先攪拌，或於岩盤先行預鑽換土，使在水中開挖之開口沉箱能運用於更多種類之地盤，參酌日本各類沉箱案例，歸納各工法特徵與應用比較如表2。

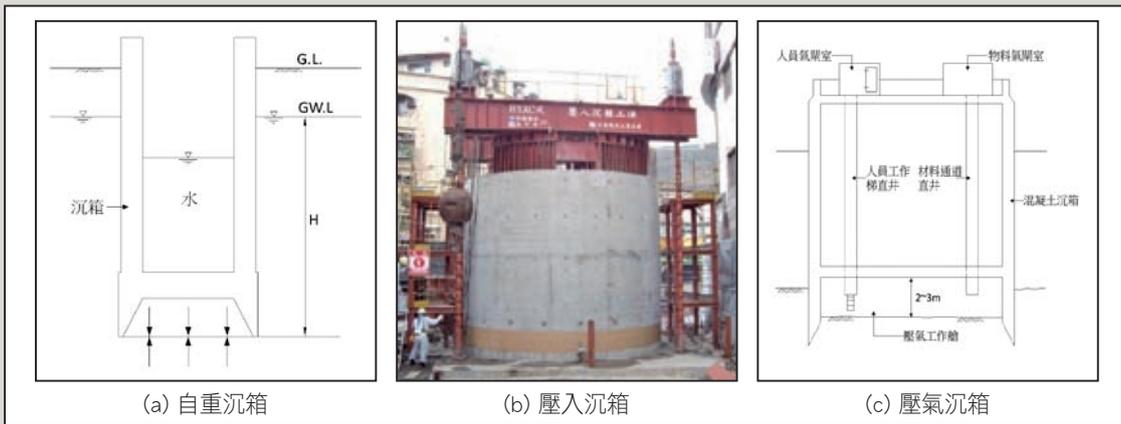


圖2 各類沉箱施工圖

表2 開口自重沉箱、開口壓入沉箱及閉口壓氣沉箱應用建議表[1]

名稱	開口自重沉箱		開口壓入沉箱			閉口壓氣沉箱
	預鑄或場鑄	場鑄式	環片式	預鑄式	預鑄式	
內部空間(m)	3~12	6~20(30)	3~11(13)	2~3(5)	3~30(70)	
刃口深度(m)	5-20	30(70)	30(70)	30(50)	30(70)	
適用形狀	圓形、矩形	圓形、矩形、長圓形	圓形、長圓形	圓形、矩形	圓形、矩形、長圓形	
※2 地盤適用性	沖積黏性土	○(需考量過度下沉對策)	○(同開口自重沉箱)	◎	◎	○(同開口自重沉箱)
	洪積黏性土	△(先行鑽孔)	○(先行鑽孔或採設置於刃口部位的掘削機)	○(先行鑽孔)	○(先行鑽孔)	◎
	沖積砂質土	△(需考慮砂湧及沉陷對策)	◎	◎	◎	◎
	洪積砂質土	○(同上)	○(先行鑽孔或採設置於刃口部位的掘削機)	○(先行鑽孔)	○(先行鑽孔)	◎
	砂礫土	○(需考量減少摩擦力及遇巨石對策)	○(同上)	○(同上)	○(同上)	◎
	岩層	○(先行鑽孔)	○(同上)	○(同上)	○(同上)	○(下沉時的震動)
特性及施工注意要項	多為RC結構，因受水中挖掘限制難以設置隔牆且受限於挖掘用桁架臂移動式起重機之作業範圍，一般在中~小規模沉箱案例較多。	沉箱本體為場鑄式，受限挖掘，通常於中小規模之沉箱採用。進行水中開挖需維持沉箱體內部水位，並防止挖削地盤可能引起之隆起、砂湧。內部有隔間時要注意其下方掘削方式。	環片為工廠製作品質穩定，小規模的工作井採用案例較多。由於不需在現場製作箱體與養護工作，因此適用於狹隘地點及緊急施工。	預鑄節塊品質較穩定，可應用於狹隘地點以及緊急施工。因需搬運單體節塊，一個單體節塊分割為2塊，可應用至直徑5m的沉箱製作。	開挖時依據底版之地下水位，採用相對之壓氣，因此不會影響地盤周邊的地下水位。	

※1：()內為最大實績

※2：適用性 △：採用時須注意 ○：需要檢討施工對策 ◎：適合

(一) 自重沉箱：在地面上構築鋼筋混凝土形成的筒狀框結構箱體，以桁架吊臂移動式起重機配戴抓斗進行挖掘沉箱底部地盤土砂，以自重下沉到達設計所需的支承地層之施工法，具工期快、費用低之優點。

(二) 壓入沉箱：在地上構築RC箱體、或鋼製/RC環片、或預力混凝土節塊，而以地錨反力將箱體下降後，再挖掘沉箱本體內部地盤。挖掘採挖斗式機械，另也可搭配水中挖掘機在沉箱內壁組裝軌道，利用軌道之水中挖掘機開挖刃口部位地盤。

(三) 壓氣沉箱(閉口沉箱)：離開挖面約2m處設置壓力艙與進出口區隔之作業室，在作業室開挖面以壓氣保持作業面乾燥以利挖掘，再利用自重或灌水沉降箱體。

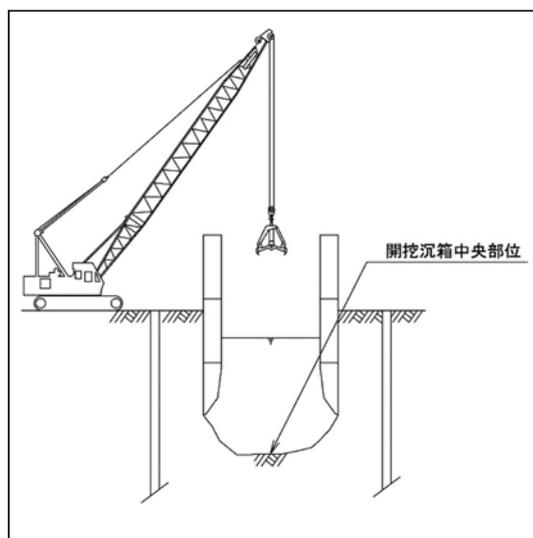
二、施工問題及對策探討

沉箱下沉開挖，通常須就內部水位進行

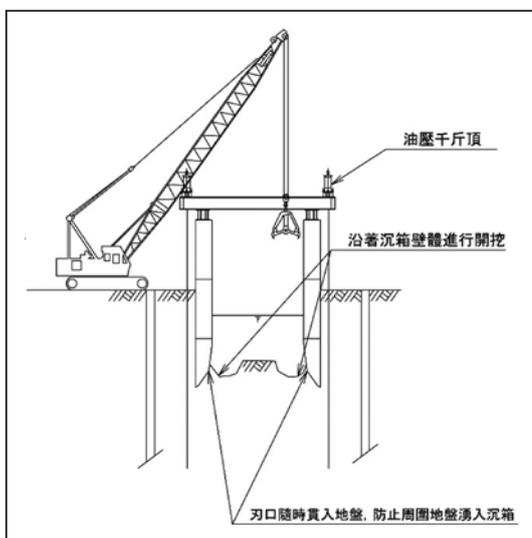
嚴格管控，以避免開挖地盤發生隆起、砂湧，另為防止沉箱周圍產生空隙、或因地盤被牽動造成周邊地盤下沉，則需採用注入皂土滑材將摩擦消除或構築鋼板樁等遮斷壁方式，說明如下：

(一) 自重沉箱：採箱體下先進行開挖，減少刃端抵抗力以利下沉之施工(詳圖3)，常因地下水位不易管控，致開挖面土體鬆解崩坍，此易致週邊地盤沉陷及損鄰。此外，亦有因沉箱下沉受力不均，常見沉箱垂直度偏移、扭曲難以修正超出設計考量之許可偏分量，且對沉箱節塊接合處將產生額外受力而於變形後破口滲漏。另，當地盤軟弱時，也易發生箱體因自重大於摩擦與刃口阻力而產生超沉、突沉現象。靠箱體自重下沉，但亦常因箱體自重不足，箱體刃口與箱體間常預留較大摩擦消除縫隙(friction cutter)或須採其他減少摩擦阻力對策，如設置NF(No-friction)膜、注入潤滑材等促進材料。

(二) 壓入沉箱：1960年代日本開發以地錨



(a) 自重沉箱



(b) 壓入沉箱

圖3 自重及壓入沉箱挖掘方式[1]

拉拔力作為反力(最大可使用3,500kN的大型壓入用千斤頂)，將箱體先壓入地盤內，再於箱體之貫入深度內進行水中開挖(詳圖3)之工法，其具周邊地盤沉陷小優點，可配合監測與控制油壓壓力沉降箱體。為克服沉箱自重不足導致下沉力不足，此工法也因可在沉箱側壁上任何位置自由的加載荷重，能精準、確實的控制沉箱下沉位置與精度，除可減低沉箱為下沉所需要自重，亦能減少沉箱側壁厚度，陸續也發展使用鋼環片或預鑄鋼筋混凝土環片等薄且自重輕的箱體，有利縮短場鑄鋼筋混凝土箱體構築期程、易於交通維持及都會區運用。惟當工址抗拉支承層過深無法有效設置地錨，或地盤水中開挖效率低，或沉箱尺寸過大超出挖土吊車桁架長度無法取土時，則宜考量改採壓氣沉箱工法。

(三) 壓氣沉箱：曾因人員須於異常氣壓下作業易致潛水夫病之等困境，工程案例漸減，國內迄今亦無案例。但壓氣沉箱工法適用於各種地盤條件，沉箱本體為場鑄式，不受形狀限制(可為不規則形狀、或超大尺寸，圖4)，可在乾燥的狀態以目視直接確認開挖狀態，小規模或大規模沉箱構造物皆可採用。由於國外無人化挖掘技術之普及，壓氣沉箱施工技術已發展出無人化施工技術等精進輔助工法，如日本東京晴豐2號橋下部工程(圖5)。

參、沉箱設計與施工之要領

一、設計重要考量

沉箱設計須考量固定載重、附加載重(設備載重、設備運作載重、行駛機械載重等)、

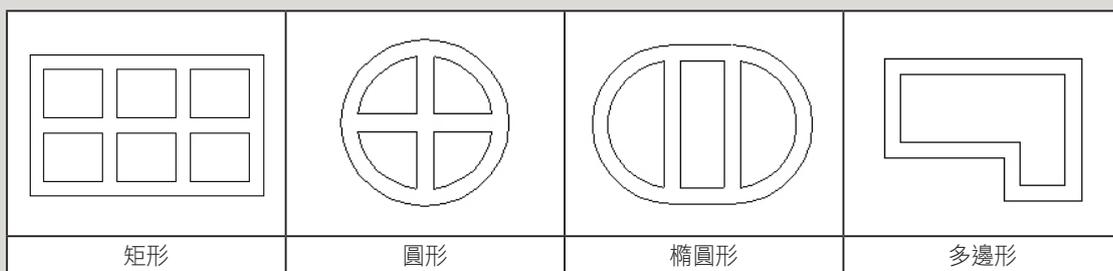


圖4 無人壓氣沉箱施工之形狀考量



圖5 日本東京晴豐2號橋下部工程採壓氣沉箱施工(2004.12~2006.9)

側壓、內水壓、溫度變化影響、乾燥收縮潛變影響、地震載重影響、最不利狀態的浮力作用 ($F=W_c/U>1.0$ ，周邊地盤摩擦可忽略不計)、沉箱施工時載重(不均勻土壓、作業氣壓產生的上揚壓力、刃口地盤反力、供下沉用的水載重、周面摩擦力等)等情境，三類型沉箱依施工方式，在設計上各有不同須配套及須留意之考量，以確保施工性並降低風險，彙整說明如表3。

沉箱於決定沉箱形狀尺寸後，需核驗沉箱的下沉與抵抗力關係，以確保下沉力大於阻力，其中下沉力包含箱體結構重量及必要之加載，阻力則來自於作用於基礎之浮力及摩擦力，如式(1)：

$$W_c + W_w > U + R \quad \text{式(1)}$$

式中，

W_c ：沉箱重量(kN)

W_w ：加載於沉箱之下沉載重(kN)

U ：若為壓氣沉箱，則為理論氣壓或作業氣壓之上揚壓力(kN)；若為開口沉箱，則為作用於基礎的浮力(kN)

R ：沉箱之下沉抵抗力(kN)，包含周面摩擦力(R_p)及刃端抵抗力(R_r)

一般沉箱周面摩擦應力可參考表4。表中之值為彙整沉箱未傾斜、設置摩擦消除縫隙且下沉狀況較佳者，實際仍需視情況予以修正，如採灌注潤滑材(皂土)約可再降低30%左右之周面摩擦力。

表4 一般沉箱周面摩擦應力考量(kN/m²)[1]

沉箱深度(m) 土質	8	16	25	30	40
黏性土	5	6	7	9	10
砂質土	14	17	20	22	24
砂礫	22	24	27	29	31

而不同之沉箱施工方式應採擇其適合之沉降關係及刃口設計，因沉箱刃口為當沉箱下沉時，一面需切削地盤內的砂礫，且一面需貫入的部分，有可能受到複雜的載重或撞擊，故其形狀須能易於下沉，為減少貫入阻力，一般刃口的尖端部分形狀細小、根頭粗大，呈錐形，

表3 各式沉箱工法之設計與施工重要考量

項目	自重沉箱	壓入沉箱	壓氣沉箱
斷面形狀	1. 矩形：需注意下沉施工時之穩定，並防止偏心，因角隅開挖困難，長短邊之比例以小於3：1為宜。 2. 圓形：有自體旋轉可能，下沉摩擦阻力較小。	多為圓形，長圓形，空間小時可採用矩形。	
側壁設計	須考量偏心狀態。	透過千斤頂控制，維持頂端水平，偏心較小。	須考量偏心狀態。
刃口設計	1. 自重沉箱須強化水平方向的補強刃口，且內壓與外側的靜水壓之差至少需有3m。 2. 須考量壓入反力對刃口的載重，而堅實地盤須考量擴大刃口肩部。		
下沉檢核 $W_c + W_w > U + R_p + R_r$	1. 除沉箱自重(W_c)外，開口沉箱應考量必要之壓重設施(W_w)如增加壁厚、臨時荷重、壓入沉箱則可加計地錨反力，壓氣沉箱則可考量頂棚底板上之加水載重。 2. 周邊摩擦力(R_p)及刃端抵抗力(R_r)應視實際開挖情境及下沉促進設施(增設噴氣設備、注入潤滑材、設置摩擦消除縫隙(刃口部略寬出箱體部)或其他降低摩擦力之設備)之採用與否計算考量，另詳下述說明。 3. 浮力或氣壓上揚壓力(U)，除下沉過程外，亦應檢核完成水中混凝土底版後抽排沉箱內積水後，地下水浮力對沉箱之影響。		
底板設計	水中混凝土施工，厚度至少2m，將地盤反力傳遞於側壁或隔壁並可納入抗浮。	頂棚底板，須加計考量施工狀態之水、氣壓。	
特別考量	若箱體受阻難下沉而擬將刃口底部土體挖除，俾利箱體下沉。此時應評估沉箱周遭地盤之沉陷量及保護鄰近構造物之對策。	1. 下沉促進設施之檢討，包含反力桁架、千斤頂、地錨等。 2. 壓入沉箱可設計較薄側壁，以壓入力補足自重不足問題。	1. 須考量送氣設備容量計算。 2. 構築箱體前及開始下沉時，需先核驗地盤的支承力，以免產生急遽沉陷。

此乃因地盤反力隨著沉箱下沉而遞增，有防止因急遽下沉而產生的不均勻沉陷、傾斜等功效，刃口設計特殊考量如下：

(一) 自重沉箱：於刃口附近因保留一部分未開挖，故表4之周面摩擦應力需另加約 10 kN/m^2 之刃端抵抗。若箱體受阻難下沉而擬將刃口底部土體挖除，俾利箱體下沉，此時應評估沉箱周遭地盤之沉陷量及保護鄰近構造物之對策。

二、沉箱沉降促進對策

(一) 下沉力提升對策之反力地錨

地錨之施作係為提供油壓千斤頂壓入箱體穩定沉降所需之反力，考量箱體施壓可能干擾影響地錨，設計時將地表至開挖箱體底部之地錨範圍考量不提供反力，視為安全係數之一部分。地錨固定端之錨頭拉拔設備如圖6。

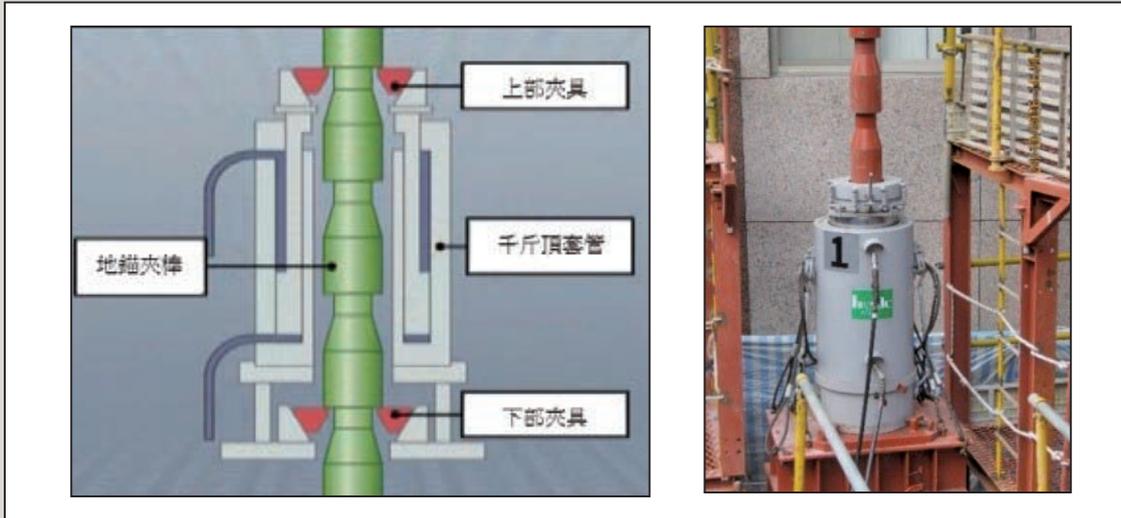


圖6 錨頭拉拔設備

(二) 壓入沉箱：因利用地錨反力將刃口壓入地層中，於刃口保護擋土下開挖箱體內地盤，故沉箱外周邊地盤沉陷量小。(須另行檢核刃端抵抗力)。

(三) 壓氣沉箱：於開挖刃口尖端底部地層時，壓氣沉箱之壓氣將水排出，開挖面尚能維持自立性。壓氣沉箱由於刃口尖端底部均開挖，故設計上無須考慮刃端抵抗力。

(二) 下沉阻力減低對策之NF膜

於刃口之外沉箱箱體，以特殊NF鋼膜(薄鋼板)密接於箱體外壁與地盤間來減少摩擦力，詳見圖7所示，並預留噴流口提供必要時可輔以噴射高壓空氣以降低摩擦阻力。當箱體定位後，亦利用噴氣孔進行背填灌漿以固定箱體。但沉箱下沉時周面摩擦力之值，宜根據沉箱周壁的材質、下沉通過之地質、深度及有否使用下沉促進工法等施工條件，而做適當計算，此可參考日本阪神高速道路公團之場鑄樁支承力設計綱要(1990年6月)進行計算(詳表5)修正。

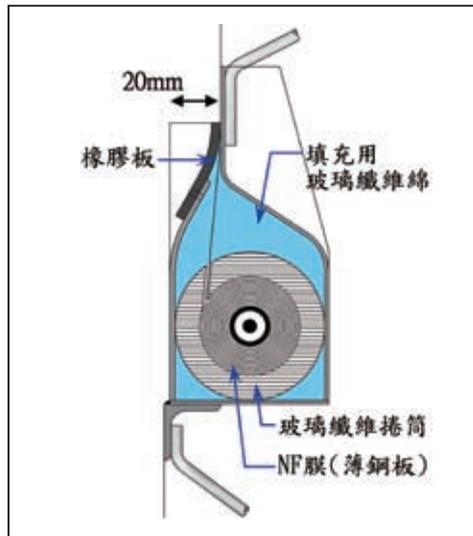
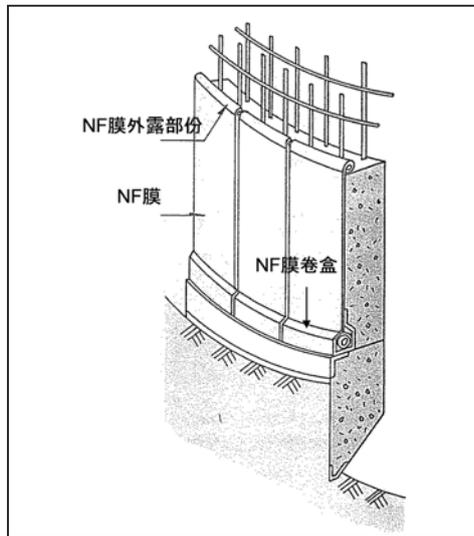


圖7 沉箱壁體密接NF膜示意圖

表5 使用下沉輔助促進工法之周面摩擦應力(kN/m²)建議

深度(m)	文獻 ※1	實測值		建議值
		魚崎濱 工區	助松 工區	
0~5	2	6	7	8
5~10	6	6	8	10
10~15	10	10~20	14	15
15~	12	10~20	14~17	20
備註	NF膜 高壓噴流			

※1：NF工法目錄建議值

(三) 施工精度確保對策之自動監控系統

為掌握施工中沉箱狀態並供施工管理而宜設適當監測儀器，一般沉箱可利用雷射測距儀進行下沉量測、水平變位量測，箱體頂部可設置雙向傾斜計、深度計，甚或刃口反力盤壓計，並銜接至自動化儀器監視，以控制千斤頂壓力而利於箱體穩定沉降及配合水中挖掘，減少對周遭地盤擾動。日本高速道路株式会社(NEXCO)對於偏心、傾斜建議之沉箱精度管理標準可詳表6，此標準適用於開口自重沉箱與壓氣沉箱工法，而一般之壓入沉箱工法垂直精度宜達1/300以內。

表6 沉箱精度標準建議(NEXCO)[1]

沉箱精度標準	
量測項目	規格值
平面位置(最後)	偏心15cm以內、旋轉3°以內
傾斜(最後)	1/100以下
計畫高、長度、平面尺寸	設計值±50mm以內

肆、新時代沉箱技術之困難挑戰

一、臺灣沉箱技術

於都會區或近接施工之工程已漸多採壓入沉箱工法，以克服不同工程課題，諸如大深度、窄小場地、高精度需求等，包括捷運工程、電力工程、污排水、自來水等，國內執行案例擇要彙整如表7所示。其中臺北捷運蘆洲線DL131標連絡通道豎井，因沿線道路狹窄，銜接巷弄多為商業重要據點，經評估既設管線、交通衝擊等各項因素，而在巷道寬度僅有8.5m之丁字路口設置工作井(參見圖8~9)。另，台電潛盾電纜洞道之連通井兼通風井，為儘可能縮小施工範圍以維持幹道交通，故設計短徑7m、長

表7 臺灣壓入沉箱案例[2]

項次	工程名稱/工程地點	施工廠商	數量	形狀	尺寸(長) (m)	尺寸(寬) (m)	深度 (m)	施工期
1	北捷蘆洲線CL700A區段標	日商清水營造	1	○	6 (外徑)	4.8 (內徑)	31	2006/08~ 2007/02
2	北捷松山線 CG590A區段標	日商前田營造	1	□	3.8 (外徑)	3 (內徑)	31.5	2009/10~ 2010/01
3	高雄中林路污水主幹管管線工程	豐源營造	2	○	12.4 (外徑)	10 (內徑)	26.4	2011/08~ 2013/01
			2	□	11.0	7.5	26.4	
4	台電大林~高港345kV電纜線路工程(第一工區)	春原營造	1	□	15.5	11.5	28.55	2013/09~ 2014/04
			1	□	25.0	15.5	31.3	
5	大安~松湖345kV電纜線路工程	日商鹿島營造	1	○	17.0	-	47.1	2014/05~ 2016
			1	□	17.2 (長徑)	7 (短徑)	54.8	
6	台水三義交流道至三義減壓池1000m/m管線工程	飛龍公司	1	○	12 (外徑)	10 (內徑)	12	2015/03~ 2015/06



圖8 北捷沉箱豎井工址



圖10 台電沉箱壓入



圖9 北捷壓入沉箱施工

徑17.2m、井深54.8m之沉箱豎井，沉箱刀刃高度5.2m，箱體區分10節塊(長約5.6m)分別沉降，詳圖10。

二、國外大面積之沉箱施工

壓氣沉箱之歷史已逾170年，近年來由於大深度地下結構物之需求增加，壓氣沉箱施工國外已發展出可預防高氣壓症(潛水夫症)之無人化配合遠端遙控施工技術，包括日本大阪寢屋川(Osaka Neyagawa)北部地下河川讚良立坑採無人化壓氣施工(圖11)，以因應地下結構物之大深度發展，因應特殊需求於亞洲使用壓氣沉箱之大面積工程實績可詳表8。採用形狀有包括矩形或不規則形狀、或超大尺寸面積及大深度之壓氣沉箱施築案例，開挖面積超過1,000m²之施工案例於日本則已有超過50例，代表者如1990年完工之東京彩虹大橋橋墩基礎(達3,200m²以

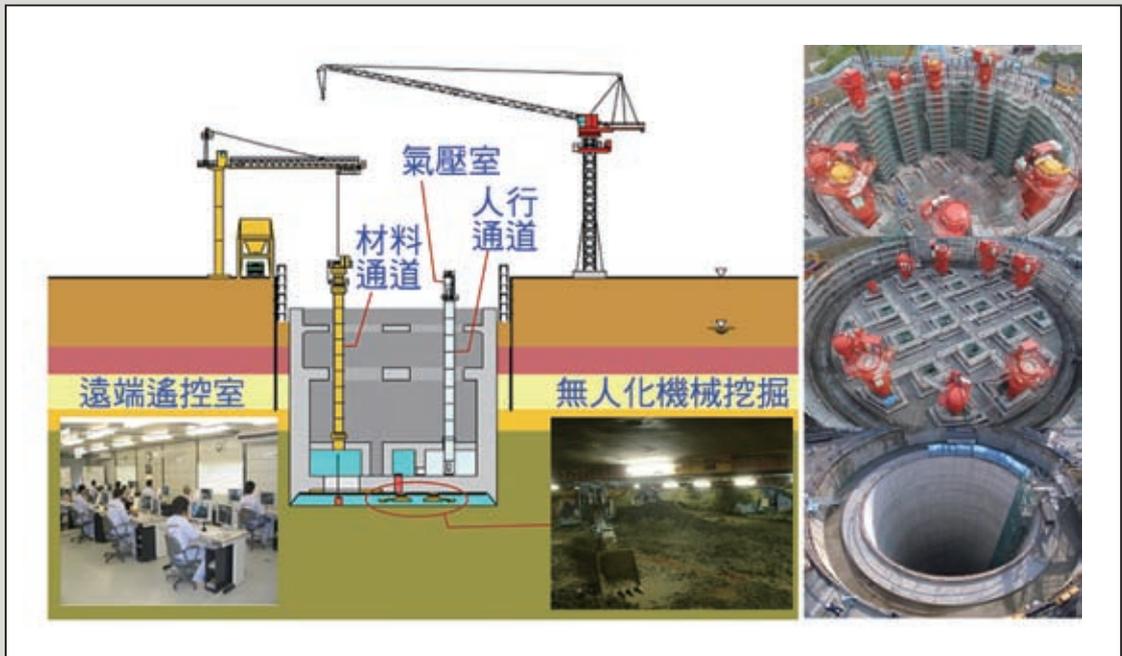


圖11 遠端遙控之無人化壓氣沉箱作業示意及日本大阪寢屋川北部地下河川讚良豐井(Sanra Shaft)無人化壓氣施工
(來源：中林建設株式會社)

表8 亞洲使用壓氣沉箱之大面積施工實績(1962~2012)[3]

項次	地點/工程	用途	外徑(m)	深(m)	完工	備註
1	Tokyo Higashi-Ogu Sewage Facilities	汙水池	62.1x77.9	41.0	2012	4,837m ²
2	Osaka Neyagawa Sanra Shaft	洪水導流井	φ 40	30-50	2012	
3	Korea Youngjong Grand Bridge	橋墩基礎	47x47	42.5	2000	
4	Tokyo Coastal Road Tunnel	隧道通風井	45.0x45	26.9	1997	
5	Kanagawa Tomei Ashigara Bridge	橋墩基礎	φ 18.0	22.0	1991	岩石
6	Tokyo Rainbow Bridge	橋墩基礎	45.1x70.1	36/49.5	1990	沖積層
7	Main Tower of Tsubasashi Bridge	橋墩基礎	40.1x40.1	28/33	1990	
8	Ichikawa Sewer Pumping Plant	汙水井	52.6x32.1	29.0	1984	
9	Pumping Building of Otagawa Sewer Treatment Plant	汙水井	48.2x37.3	27.1	1980	
10	Niigata Thermal Power Plant	橋墩基礎	59.0x36.0	13.0	1962	
11	Omiya Expressway East-West Connection Tunnel	鐵/公路隧道	221.5/6段	不詳	不詳	
12	Nagai River Bridge	橋墩基礎	47.6x18.0	26.0	不詳	卵礫石

上)、東京東尾久汙水淨化池(Tokyo Higashi-Ogu Sewage Facilities)，其沉箱面積達4,837m²，為迄今世界最大(2012年完工)。

三、國外之大深度、高氣壓之無人化施工技术

日本於1980年代開發於壓氣沉箱作業室

頂板安裝軌道，再於軌道上架設可移動之懸吊式挖掘機，並由地面上遠端遙控之無人化挖掘技術(詳圖11)；近年來，在日本當作業現場氣壓高於0.176MPa時，即須採用無人化挖掘方式施工，目前大阪柴島(Kunijima)之輸水幹管直井開挖則採0.539Mpa高氣壓，沉箱開挖深度達63.5m，為迄今世界最深(2000年完工)。此方面之壓氣沉箱工程實績可詳表9。新技術應用除了

表9 大深度及高氣壓之壓氣沉箱施工實績(2006~2016)[3]

項次	地點/工程	氣壓(MPa)	深(m)	完工	備註
1	Kunijima Water Pipeline Shaft	0.539	63.5	2000	高氣壓
2	Takasago Water Pipeline Shaft	0.441	51.5	2000	高氣壓
3	Inabegawabashi Bridge P1-P3	0.421	43.0	1998	高氣壓
4	Meiko Chuo Ohashi Bridge	0.294	52.5	1993	
5	Mikawashima Sewer Main Shaft	0.412	47.2	1993	高氣壓
6	Sakaebashi Power Cable Line Shaft	0.392	52.5	1989	高氣壓
7	Kitachiba Water Pipeline Shaft	0.314	49.4	1985	
8	Shin Moritsubashi Bridge	0.436	45.0	1985	高氣壓
9	Main Tower of Ktushika Harp Bridge	0.363	59.2	1983	
10	Nasagawa Bridge	0.402	42.0	1976	高氣壓
11	Ogijima Blast Furnace Foundation	0.294	56.3	1975	
12	Ajigawa Water Gate Substructure	0.314	51.5	1969	

大幅度地改善施工環境外，也得以實現未來進一步達到100m之超大深度施工。

四、潛水夫病預防技術

由於無人化挖掘技術之普及，人員雖已不需在高氣壓環境下挖掘施工，但仍需於高氣壓環境下維修挖掘機，及拆解挖掘完後的機具撤出、及實施地盤支承载力試驗等作業。此外，在作業氣壓高於0.4MPa之施工環境中，作業人員除需面臨潛水夫病風險外，也可能產生氮氣暈眩、氧氣中毒等症狀，雖也可採降低地下水位等輔助工法以降低作業氣壓等對策，但究竟並非解決之道。因此在1980年末期至1990年中期開發出混和氦氣之供氧系統設備(helium mixed gases breathing system)，此項技術是將深海潛水技術應用至壓氣沉箱作業，混合氦氣之供氧系統可減少並排出溶解在人體內的氮氣。在日本，目前只要是作業氣壓高於0.392MPa時，即必須採用混和氦氣之供氧系統設備及專用呼吸口罩吸入純氧，以加速排除溶解於體內及肺部中的氮氣，現今這項純氧減壓技術在日本已經是減壓作業之標準程序。

伍、結語

近期國內都會區常採用壓入沉箱，因其施工可克服於環境、交通限制及常見之地盤失穩、突沉、傾斜等問題，國外則針對於大面積及大深度工程應用了無人壓氣沉箱及混和氦氣之供氧系統設備，以改善人員施工作業環境，且已達地下63.5m施工深度，值得國內適當工程之個案參考。

參考文獻

1. 「沉箱設計施工準則」，臺北：中華民國大地工程學會，2017。
2. Kweishr Li; M.H. Lin; C.S. Chang; Yao-Jen Hsu, 「Press-In Anchor Caisson Shaft in Taiwan」, 19th Southeast Asian Geotechnical Conference & 2nd AGSSEA Conference (19SEAGC & 2AGSSEA), Kuala Lumpur, 31 May-3 June 2016。
3. Koichi Fujita, 「A remote-control system in the pneumatic caisson method」, Japan, Shiraiishi Corp., 2012。

稿約格式

一、文字：稿件應以中文或英文撰寫，中文及英文摘要以400字為限。

二、單位：所有含因次之量須採用SI單位公制。

三、打字：

來稿請使用電子檔（以Word編排）圖、文需以單欄橫向編排方式，共同排列在文稿內(過大的圖或表可以附件方式呈現)，論文之長度(含圖)字數限5-6,000字以內；左、右邊界2.5公分，上、下邊界3公分，內文字體為細明體12點字，行距為1.5倍行高。

四、題目／作者：

論文題目宜簡明，作者姓名、任職機構、部門、職稱、技師科別列於論文題之下方，其服務部門及職稱以1, 2, 3編號註記在首頁末，另附上作者之生活照高畫質之電子檔。

五、關鍵詞：在題目中須選出中文及英文二至四個關鍵詞，並置於作者姓名下方。

六、章節及標題：論文之章節標題須列於稿紙之中央對稱位置，且加編號。小節標題亦應加編號但必須從文稿之左緣開始，例

壹、大標題（居中）

一、中標題（齊頭）

（一）子標題（齊頭）

1、小標題（齊頭）

（1）次小標題（齊頭）

七、數學式：所有公式及方程式均須書寫清楚，其後標式號於圓括弧內。為清晰起見，每一式之上下須多空一列。

八、長度：論文之長度(含圖)，內文以不超過6,000字或其相當之長度為準(以A4規格約8頁(含圖)計算)。

九、插圖與圖表：不論在正文中或圖裡本身，所有圖表、照片必須附有編號及標題或簡短說明，其編號請用阿拉伯數字，不加括號表示。如圖1、表2；Table 1、Figure 2，表的標題置於表的上方中間，圖的標題置於圖的下方中間。

十、符號：內文所有符號須於符號第一次出現時加以定義。

十一、參考文獻：

所有參考文獻須按其在文中出現之先後隨文註號碼於方括弧內，並依序完整列於文末；文中引用提及作者時請用全名，未直接引用之文獻不得出現。

參考文獻之寫法須依下列格式：

(1)期刊

林銘崇、王志成，「河口海岸地形變化之預測模式」，中國工程學刊，第六卷，第三期，第141-151頁(1983)。

Bazant, Z. P., and Oh, B. H., "Strain-rate effect in rapid triaxial loading of concrete," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.108, No.5, pp.764-782(1982).

(2)書籍

張德周，「契約與規範」，文笙書局，台北，第177-184頁(1987)。

Zienkiewicz, O. C., "The Finite Element Method," McGraw-Hill, London, pp.257-295(1977).

(3)論文集

蔡益超、李文友，「鋼筋混凝土T型梁火災後彎矩強度之分析與評估」，中國土木工程學會71年年會論文集，臺北，第25-30頁(1982)。

Nasu, M. and Tamura, T., "Vibration test of the underground pipe with a comparatively large cross-section," Proceedings of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Rome, Italy, pp.583-592(1973).

(4)學位論文

陳永松，「鋼筋混凝土錨座鋼筋握裹滑移之預測」，碩士論文，國立成功大學建築研究所，台南(1982)。

Lin, C. H., "Rational for limits to reinforcement of tied concrete column," Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Texas, Austin, Texas (1984).

(5)研究報告

劉長齡、劉佳明、徐享崑，「高屏河流域水資源規劃系統分析之研究」，國立成功大學臺南水工試驗所研究報告，No.53，台南(1983)。

Thompson, J. P., "Fire resistance of reinforced concrete floors," PCA Report, Chicago, U.S.A., pp.1-15(1963).



編後語

自接獲指示辦理本期編輯重任後，即以戒慎恐懼、戰戰兢兢的心情執行任務，深怕因編輯不力而影響本刊所建立之良好口碑。期間針對專輯主題、人物專訪、專題報導等內容，經多次討論後定案，欣逢近期參與之重大隧道工程陸續貫通，迅速擬定編輯工作計畫，再依計畫逐步推動，主編同仁在平日工作忙碌情形下，又兼顧文章撰寫及編輯工作，時常挑燈夜戰，幸賴各級長官的指導及各方人力支持，終於如期完稿付梓。非常感謝吳澤成主任委員、楊偉甫董事長、陳志南理事長等三位專訪人物，於公務繁忙之中，特別撥冗接受本刊之專訪，他們的精闢見解及豐富人生歷練，特予整理專訪內容以饗廣大讀者。感謝各專題技術論文作者將專業工作上的努力成果，利用公忙之餘，費心撰寫專文，探討隧道工程之艱困與挑戰，文章中充滿新思維，很值得提供各界參考。於今終於順利完成任務，也在此一併致上謝忱。然而，吾等雖已全力以赴編輯本刊，歷經多次校對修改，惟才疏學淺，若有疏漏之處，尚祈各界先進，不吝指正。



附記：

本刊於每年一、四、七、十月份以季刊方式發行，來稿請備紙本稿件一式三份及原稿電子檔，以掛號郵寄台北市11491內湖區陽光街323號10樓，台灣世曦工程顧問股份有限公司／企劃部轉『中華技術』編輯小組收。

 **財團中華顧問工程司**
法人 **中華顧問工程司**
CHINA ENGINEERING CONSULTANTS, INC.

台北市10637辛亥路二段185號28樓
28F., No.185, Sec. 2, Sinhai Rd., Taipei 10637, TAIWAN
Tel: (02) 8732-5567, Fax: (02) 8732-8967, <http://www.ceci.org.tw>



第十六屆亞洲區土壤力學與大地工程學術會議

The 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 16ARC

會議主題：大地工程之新興市場及永續發展

台北國際會議中心 (Taipei Int. Convention Center)

2019年10月14日至18日

16ARC贊助機會如火如荼展開!

自1960年至今舉辦已近一甲子，為亞洲區土壤力學及大地工程領域重要指標的第16屆亞洲區土壤力學與大地工程學術會議 (The 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 16ARC)，首次由ISSMGE授權台灣大地工程學會主辦。此次活動為期5天，預計收錄論文數超過500篇，30個參展廠商，與會人數突破700人以上。

贊助方案

	項目	單項贊助金額
套裝贊助	鑽石級	NT\$400,000
	黃金級	NT\$200,000
	銀級	NT\$100,000
	銅級	NT\$30,000
單項贊助	標準展示攤位	NT\$100,000
	午餐研討會 (共3時段)	NT\$130,000 / 時段
	大會織帶 (獨家贊助)	NT\$80,000
	大會資料袋 (獨家贊助)	NT\$120,000
	大會工作人員制服 (獨家贊助)	NT\$100,000
	充電站 (獨家贊助)	NT\$100,000
	茶點 (共7時段)	NT\$60,000 / 時段
	大會手冊內頁廣告	NT\$30,000
	歡迎酒會	NT\$150,000
	亞洲理事晚宴 (獨家贊助)	NT\$200,000

另設有銅級個人贊助 (新台幣6,000元整)，贊助權益：感謝狀、大會手冊致謝。

*套裝贊助項目的選擇順位將依贊助款項入帳先後順序而定。

*請先聯繫大會秘書處確認您意屬的贊助套裝 / 項目尚可選擇，若該項目已無餘額則大會將無法提供相關服務。

*為提供更多元的參展內容及資訊，贊助廠商可向大會提出特殊需求規劃，由大會評估後決定。

如蒙贊助請與大會秘書處聯絡：

林先生

電話：02-2798-8329 #40

Email: sponsorship@16arc.org

<http://www.16arc.org/>

