

國道 4 號豐原潭子段主要工程地質考量與因應

林敬智 中興工程顧問股份有限公司大地工程部 / 計畫副理
 黃筱卿 中興工程顧問股份有限公司大地工程部 / 組長
 吳東錦 中興工程顧問股份有限公司大地工程部 / 技術經理
 江政恩 中興工程顧問股份有限公司大地工程部 / 協理
 李民政 中興工程顧問股份有限公司 / 副總經理

摘要

國道 4 號臺中環線豐原潭子段（以下簡稱本計畫）為強化臺中外環高速公路網之重要建設，路線全長約 11 公里，其中包含路段 2.1 公里、橋梁段 5.1 公里及隧道段 3.8 公里（共 3 座隧道）。本計畫路線穿越臺灣西部麓山帶之丘陵區，途中穿越車籠埔斷層及三義斷層等活動斷層，隧道洞口鄰近車籠埔斷層，且洞口通過多處山崩地滑地質敏感區，遂於隧道洞口段採全周式收縮縫及逆傾式洞門設計，確保用路人行車安全。此外，本計畫為國內高速公路隧道首次採用全周式防水膜之設計，以涵養珍貴的地下水資源，落實保護環境與睦鄰之理念。本文係針對國道 4 號臺中環線豐原潭子段隧道工程之地質條件、設計理念及如何提升營運安全與環境保護之具體作為進行說明，以供後續工程參考。

一、前言

隨著人口增加與產業發展，國道 1 號臺中系統交流道 - 大雅段交通壅塞情形日益嚴重。為舒緩並改善臺中地區交通服務水準，交通部高速公路局遂推動「國道 4 號臺中環線豐原潭子段計畫」（以下簡稱本計畫），提供台中都會區東側便捷之交通服務，與周邊既有路網發揮整體運輸效益，以帶動臺中都會區全面發展。

本計畫路線全長約 11 公里，由北而南依序分為 C711 標至 C715 標五個工程標段，由路堤

路塹、橋梁及隧道型式交互串聯而成，路線平縱面如圖 1 所示。路線沿線與車籠埔活動斷層兩次交會，一次跨越三義活動斷層，北段三座隧道局部洞口涉及山崩與地滑地質敏感區，且須設法降低新建隧道對上方民宅農地用水影響程度，此皆設計工作須妥善考量與因應之工程地質因素。

二、區域地形與地質

計畫路線北端工程起點以豐原高架橋經台中盆地沖積平原區向東行（詳圖 1），以路堤跨

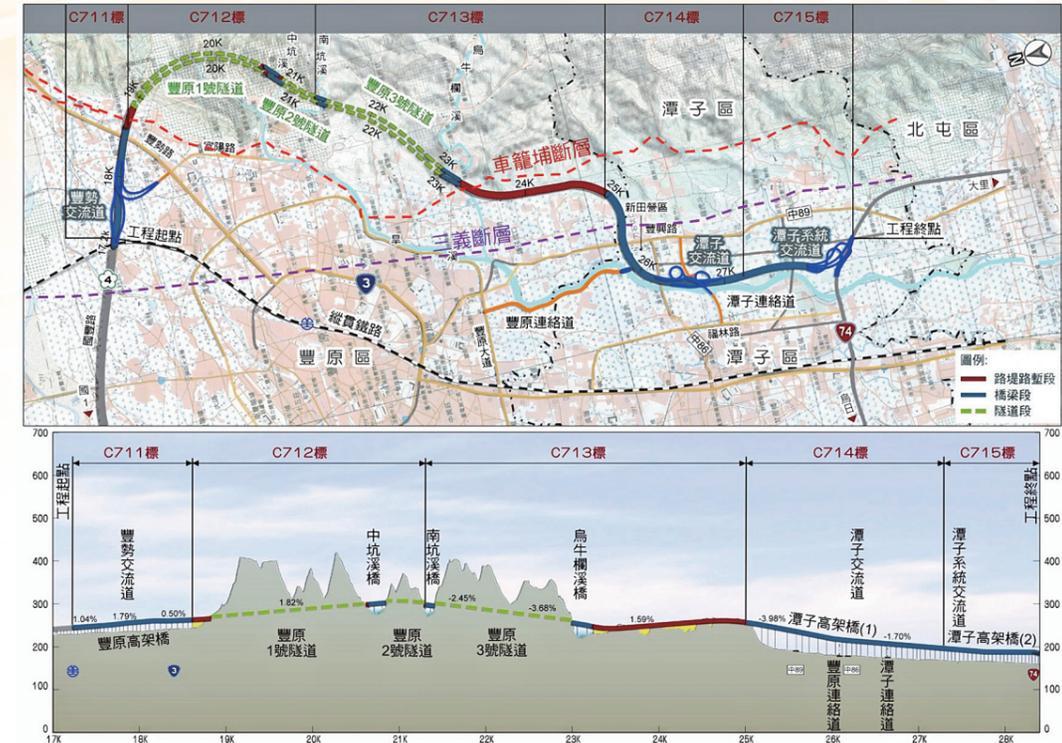


圖 1 國道 4 號臺中環線豐原潭子段計畫平縱面圖

越行經山麓的車籠埔斷層後，以三座隧道轉為東北 - 西南向穿越台中盆地東側丘陵區，隧道間以中坑溪橋及南坑溪橋銜接，豐原 3 號隧道南口出洞後接烏牛欄溪橋，續往南改以路堤路塹型式再次跨越車籠埔斷層並緊鄰斷層線西側行經山麓地區，於路線里程 25K 一帶以潭子高架橋轉往西行並跨越三義斷層，至里程 26K 附近再轉南續行至路線南端工程終點。

計畫路線沿線地質如圖 2 所示。路線北、南端均以高架橋坐落在台中盆地沖積層之上；台中盆地與東側丘陵區交界之山麓地帶地表分佈有崩積層及階地堆積層。丘陵區地表係出露錦水頁岩及卓蘭層，局部覆蓋有紅土台地堆積層。沖積層、崩積層及階地堆積層均由未固結的礫石、砂、粉砂及黏土組成，紅土台地堆積層地表有數公尺厚的紅土層，下伏未固結的礫石及砂土。錦水頁岩岩性以深灰色頁岩為主，間夾砂岩與泥岩；卓蘭層則以層狀砂岩、泥質砂岩、砂質泥岩、砂頁岩互層為主。岩層層面位態變化不大，

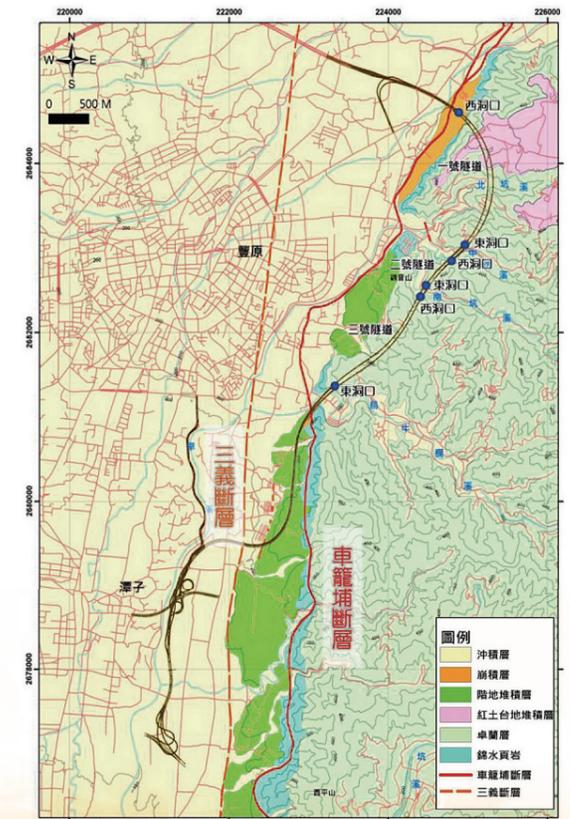


圖 2 計畫路線地質平面圖

走向大致呈北偏東 30° 至 60°，傾角向東約 20° 至 40°。

計畫區主要地質構造為車籠埔斷層及三義斷層（詳圖 2），均為斷層面向東傾斜之逆移斷層，且均屬第一類活動斷層。台灣於 1999 年發生之 921 集集大地震，即為車籠埔斷層活動所引起，伴隨 921 大地震產生之斷層地表破裂跡長達約 92 公里。車籠埔斷層與本計畫路線分別交會於豐原 1 號隧道西洞口外路堤段（詳圖 1），以及烏牛欄溪橋南側路堤路堑段。三義斷層原被列為第二類活動斷層，且於 2015 年公告其活動斷層地質敏感區；後因有證據顯示斷層曾錯移全新世低位河階堆積層與河床上土壤層，表示斷層在全新世曾經發生活動，於 2017 年改列為第一類活動斷層。三義斷層與計畫路線近乎正交於路線里程約 25.5K 處之潭子高架橋（詳圖 1）。

計畫路線北段以三座隧道穿越車籠埔斷層東邊丘陵淺山區，包含豐原 1 號隧道長 1,791 m，豐原 2 號隧道長 435 m 及豐原 3 號隧道長 1,585 m，皆採雙孔單向設計，隧道標準斷面如圖 3。隧道群遭遇地層均為卓蘭層，鑽孔

岩心之單軸壓縮強度試驗成果大致落在 50 至 250 kg/cm² 間，屬工程會「臺灣岩體分類與隧道支撐系統」（Public Construction Commission Rock Mass Classification，簡稱「PCCR 系統」）之 B 岩類。

隧道群穿越丘陵區，沿線地表高程約在 300 至 450 m 之間，最大岩覆僅約 135 m。隧道上方行經高爾夫球場且鄰近多處民宅、農地、果園與墓地等地下水用戶（詳圖 4），故須考量如何降低新建隧道對於地下水文的改變，以維持隧道沿線民宅、農地、果園等之地下水源。此外，部分隧道洞口涉及或鄰近山崩與地滑地質敏感區（詳圖 5），洞口地質安全亦須審慎評估與考量。



圖 4 計畫路線隧道群沿線地下水用戶分布概況



圖 5 計畫路線與斷層及地質敏感區相對位置

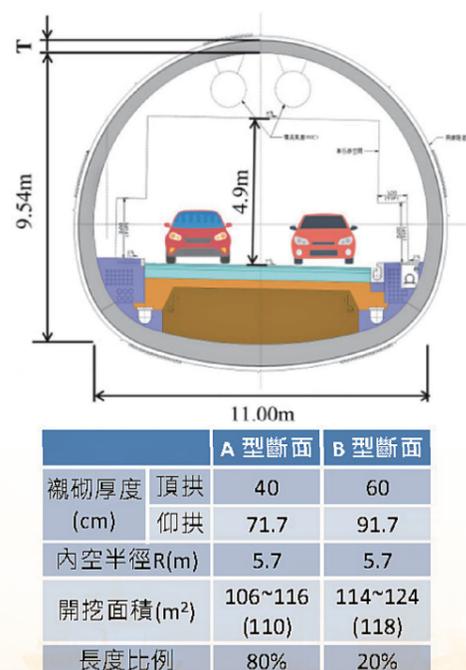


圖 3 隧道標準斷面圖

三、車籠埔斷層相關因應

3.1 以一般路堤型式跨越

車籠埔斷層與本計畫路線近乎正交通過豐原 1 號隧道西洞口外側（詳圖 1）。該交會處位於台中盆地平原與其東側丘陵區之間的山麓地帶，地勢平緩，地表被山麓崩積層覆蓋（詳圖 2）。

車籠埔斷層曾伴隨著 921 大地震在此交會處造成明顯的地表破裂跡，為車籠埔斷層地表位置提供了明確跡證。本計畫於設計階段在豐原 1 號隧道西洞口一帶，沿計畫路線線型完成了數孔地質探查孔（詳圖 6），除鑽獲車籠埔斷層面之外，另藉由各鑽孔岩心之剪裂程度，研判路線里程 18k+620 ~ 18k+815 之間應屬車籠埔斷層主要影響範圍。

斷層影響範圍與路線交會處地勢平緩且無既有民宅、私地等限制條件，故採用一般路堤型式通過，降低斷層錯動所造成之工程結構災損，災後也較易快速完成修復。惟為了盡可能避免因斷層再次活動對隧道結構造成破壞，故將豐原 1 號隧道西洞口微幅東移至車籠埔斷層主要影響範圍之外（詳圖 7）。洞口東移後，路面高程略高於原工程規劃，因而須加高路堤高度至近

12 m，採 1(V) : 2(H) 緩坡填築以提升路堤整體穩定性，並維持八寶圳原流路行經路堤段下方。豐原 1 號隧道西洞口與跨越斷層之路堤間，配合地形採低矮路堑銜接。

3.2 以加勁擋土牆跨越

第二處交會點位於烏牛欄溪左岸，路堤高達 18 m，因環境限制而無法採用緩坡填築，爰需特別考量，說明如後：

1. 現地環境

計畫路線南行通過豐原 3 號隧道後，以烏牛欄溪橋跨越烏牛欄溪，而後沿烏牛欄溪左岸續往南行。該區域於 921 地震時造成明顯地表破裂跡，以大角度與計畫路線斜交（詳圖 1），裂跡東側地盤抬昇約 3 m，致烏牛欄溪河道及護岸結構斷裂破壞；烏牛欄溪於 921 地震災後及重建後之現地狀況詳參圖 8。

2. 路線限制因素

計畫路線受到以下的限制因素，必須沿著烏牛欄溪左岸的狹長空間南行，道路路緣與烏牛欄溪護岸水平距離僅 10 m，垂直高差則達 18 m：(1) 烏牛欄溪右岸已有密集的民房（詳圖 9），為避免大規模拆遷，路線僅能佈設於左

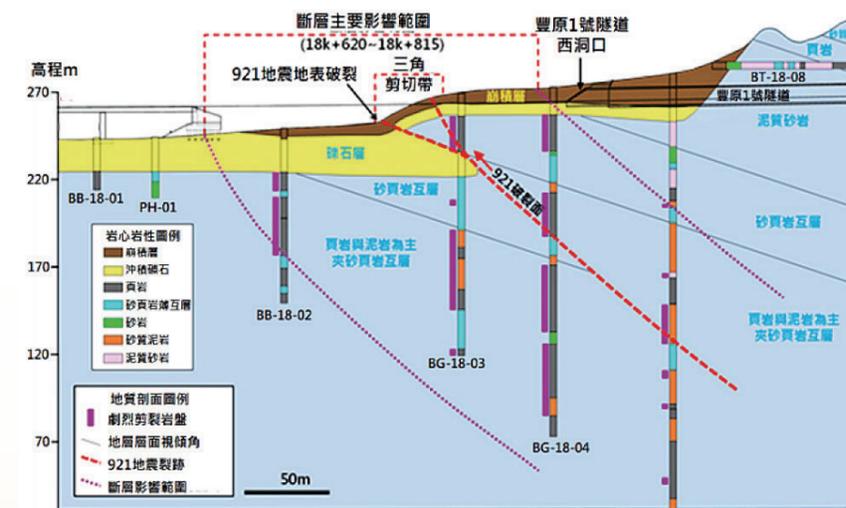


圖 6 豐原 1 號隧道西洞口一帶地質剖面圖

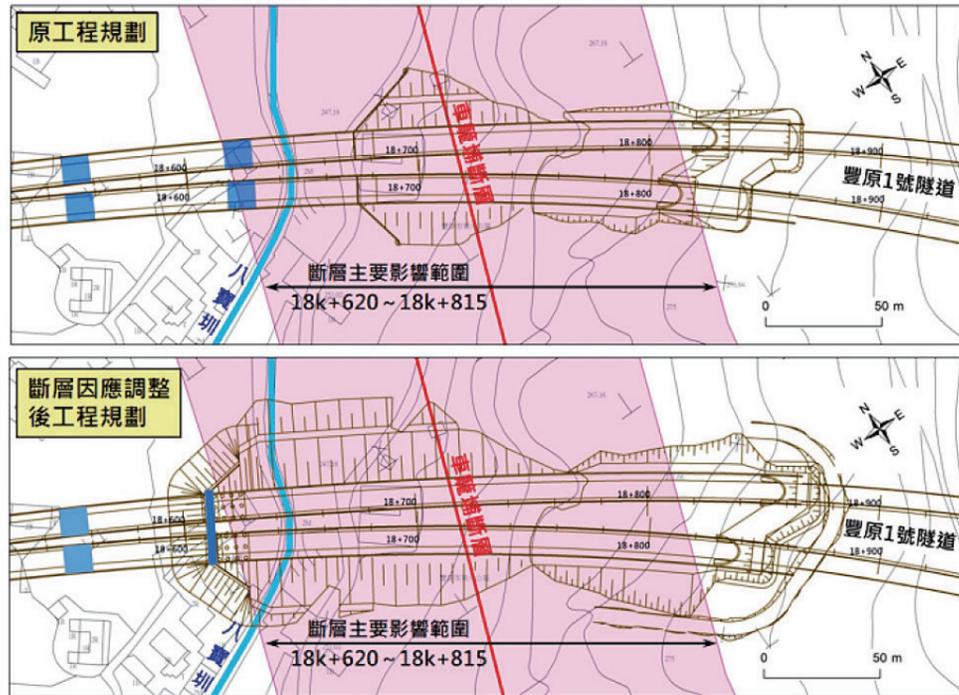


圖7 豐原1號隧道西洞口一帶以一般路堤通過斷層



圖8 烏牛欄溪於921地震災後及重建後狀況



圖9 車籠埔斷層於烏牛欄溪橋南側與路線交會

3. 路堤設計考量

本路段經評估後決定採高路堤通過，考量的可能型式包括(1)自然填坡、(2)RC擋土、(3)加勁擋土牆。自然填坡需採緩坡以維持穩定，本路段因空間侷限，沒有以緩坡構築路堤之條件。RC擋土牆具有剛性大之特性，斷層錯動勢將造成嚴重災損，且災後修復困難。加勁擋土牆則具有相對良好的柔性，相關文獻顯示加勁材可增加路堤抗震能力、吸收地震波並可減少

岸；(2)烏牛欄溪左岸緊鄰丘陵，為避免大規模邊坡開挖，路線僅能緊貼河岸通過；(3)受限於南坑溪橋下地方道路通行淨高，以及避免於隧道內設置爬坡車道，路線高程無法再降低；(4)基於營運安全考量，豐原3號隧道東洞口需設置迴車道，使得東、西行線不能有太大的高差，無法利用一高一低的路線配置來降低路堤高度。

斷層錯動所引發的路堤變形，災後修復相對較易。綜合上述考量，本路段決定採用加勁擋土牆型式填築路堤。

4. 加勁擋土牆標準剖面

加勁擋土牆坡面採1(V):0.2(H)以縮減路堤量體空間，分為三階填築，每階高度約為5m，平台寬約1.5m，每階最底層採用透水材料取代回填土，並佈設排水網管加強整體排水效能，平台設安全母索以供檢修人員確保安全；加勁擋土牆標準剖面詳參圖10。為了坡趾穩定及分散路堤載重，避免影響烏牛欄溪既有護岸之安全，於加勁擋土牆趾部設置坡趾擋土牆及直徑1.5m排樁，以確保路堤整體穩定性。

5. 加勁材之選用

加勁材可分為金屬及非金屬兩大類，金屬加勁材大多需搭配混凝土面版，面版於斷層錯動後之修復較困難，且不利坡面綠化植生，因此本

路段選用非金屬之地工格網作為加勁材。地工格網具有良好的延展性及土壤穿透性，可隨著變形而與土壤顆粒維持緊密互鎖，而且坡面可回包植生以達到綠美化效果，完工後可使加勁擋土牆融入自然環境。

6. 加勁回填土之選用

考量減少棄土、活化資源及平衡土方，通常以就地取材方式選用加勁回填土，其塑性指數PI不得大於6，其粒徑分布應符合表1。

本計畫隧道開挖料主要為砂岩及砂頁岩互層，路工段及橋梁段開挖料則多為崩積塊石及卵礫石，經評估可作為加勁回填土。

表1 加勁擋土牆回填土粒徑分布

粒徑 (美國標準篩)	通過百分比
102 mm (4 in)	100
0.425 mm (No. 40)	0 ~ 60
0.075 mm (No. 200)	0 ~ 15

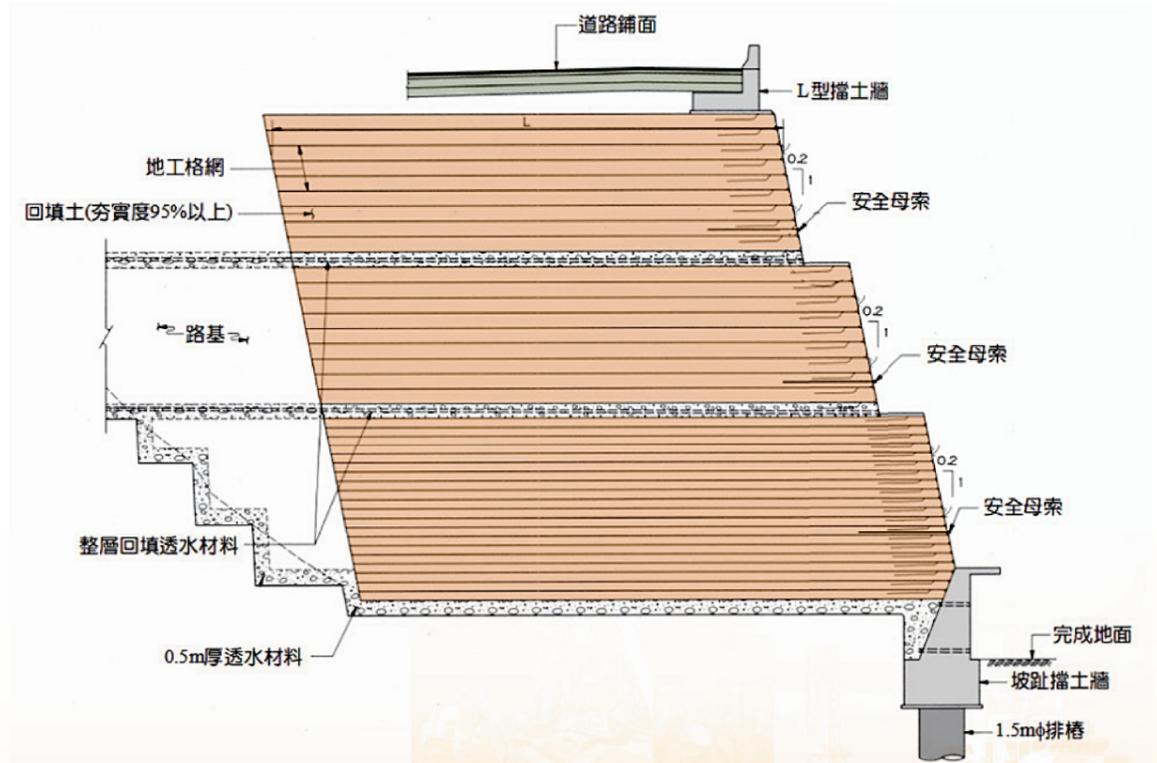


圖10 加勁擋土牆標準剖面

7. 加勁擋土牆施工說明

加勁擋土牆之施工步驟主要包含：(1) 開挖整地；(2) 格網鋪設；(3) 回填土料及夯實；(4) 回包處理；(5) 排水設施配置。於格網鋪設前，需先將原地面降挖至加勁擋土牆鋪設起始高程，並施作底部排樁及坡趾擋土牆（詳圖 11），而後分階降挖至加勁擋土牆預定填築高程。

考量格網主要受力為來自於牆體後方之土壓力，為了確保格網縱向強度完整性，格網須順著加勁擋土牆寬度方向鋪設，禁止縱向搭接，而橫向間搭接至少需 20 cm，並以錨定鋼筋固定，格網鋪設情況（詳圖 12）。

加勁擋土牆各層地工格網鋪設後，即利用植生袋回包填土以形成牆面，並利用挖土機之挖斗平整植生坡面。現場施工時需將格網拉緊，以

增加回包後牆面平整美觀及植生袋與加勁材間緊密度（詳圖 13）。

本路段加勁擋土牆於現場開挖整地完成後，即於底層及牆後鋪設 50 cm 厚之透水材料（詳圖 14），各階加勁回填的最底層亦採用透水材料回填，並以每 5 m 間距交錯排列 0.1 m ψ HDPE 排水網管，以形成一完整排水系統，確保地表逕流水及入滲水能沿排水路徑快速排出加勁擋土牆外。

利用加勁擋土牆在侷限空間內構築高路堤跨越車籠埔斷層，預期可大幅減少斷層錯動與地震可能造成的結構破壞，災後修復工作亦相對較容易；坡面回包植生的綠美化效果，亦使完工後之景觀可融入周遭自然環境（詳圖 15）。



圖 11 加勁擋土牆底部排樁施工情形



圖 13 加勁擋土牆回包牆面完成照片



圖 12 加勁擋土牆格網鋪設情形



圖 14 加勁擋土牆透水層施工照片



圖 15 烏牛欄溪橋南側加勁擋土牆完工後照片

3.3 隧道襯砌局部設置全周式收縮縫

豐原 1 號隧道西洞口與豐原 3 號隧道東洞口與車籠埔斷層地表裂隙距離相對較近，但藉由路線微調配合地形規劃，距離仍分別預留有 102 m 至 332 m（詳表 2），以期將斷層再次錯動時對隧道之可能危害程度盡可能降低。經與政府主管機關公告之車籠埔活動斷層地質敏感區比對，豐原 1 號隧道西洞口一帶之隧道段與車籠埔斷層地質敏感區重疊約 300 m 長，豐原 3 號隧道段則無重疊區域（詳表 2）。為進一步降低斷層錯動對隧道結構可能造成之災損，特別針對豐原 1 號隧道西洞口一帶約 300 m 長之隧道段襯砌結構設置全周式收縮縫，亦即要求施工時須將仰拱收縮縫與頂拱收縮縫設置在隧道同一斷面位置（詳圖 16），俾令隧道岩體因斷層再次活動而發生錯移

表 2 隧道洞口與車籠埔斷層之空間關係

隧道洞口	1 號隧道西洞口		3 號隧道東洞口	
	東行線	西行線	東行線	西行線
與斷層地表裂隙距離	102 m	128 m	281 m	337 m
地質敏感區內隧道長度	約 300 m	約 300 m	無	無

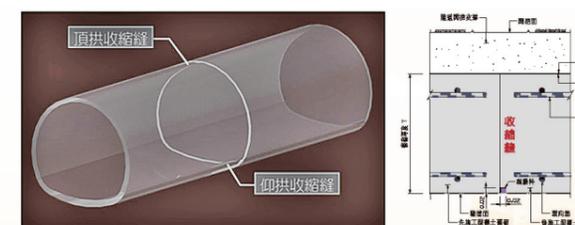


圖 16 全周式收縮縫示意圖

時，將岩盤錯移量盡可能控制發生在收縮縫位置，以減輕隧道襯砌損害程度，降低救災及災後修復工作難度。

四、三義斷層相關因應

三義斷層南段於 2015 年 12 月正式公告活動斷層地質敏感區。本計畫路線在路廊線型、用地、地形等限制條件下，於新田靶場一帶僅能規劃以潭子高架橋 (1) 大角度跨越三義斷層，故有必要釐清斷層位置與特性，據以研擬工程因應措施。

為釐清三義斷層特性辦理之相關地質探查項目，除了地表地質調查之外，尚包含地電阻影像剖面法、地質鑽孔以及槽溝開挖，相關位置詳圖 17；於槽溝開挖面採得之含碳物質另送實驗室辦理碳十四定年，據以探討斷層活動史。

計畫路線與三義斷層交會於新田靶場。靶場長約 400 m，長軸近東西向（詳圖 17），場區因已人為整地而未能發現斷層露頭及相關地形特徵，但在靶場東側高差約 40 至 50 m 之階地崖坡趾處發現一處斷層露頭，可見到風化砂岩層覆蓋於礫石層之上（詳圖 18），推測為東側上盤岩層往西逆衝覆蓋至礫石層上所致。由露頭所在位置研判，其應屬大致平行於三義斷層東側之三義分支斷層露頭。

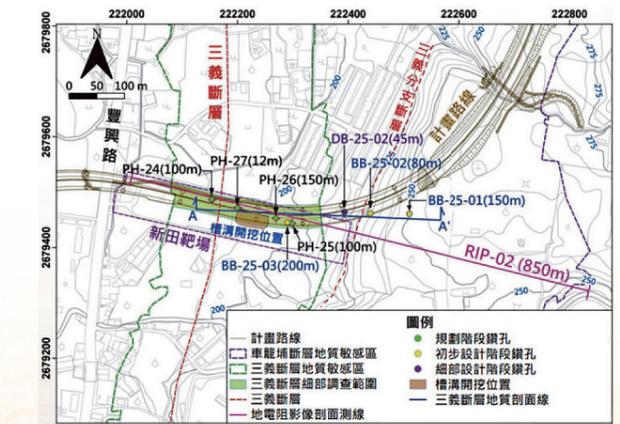


圖 17 三義斷層相關地質探查位置圖

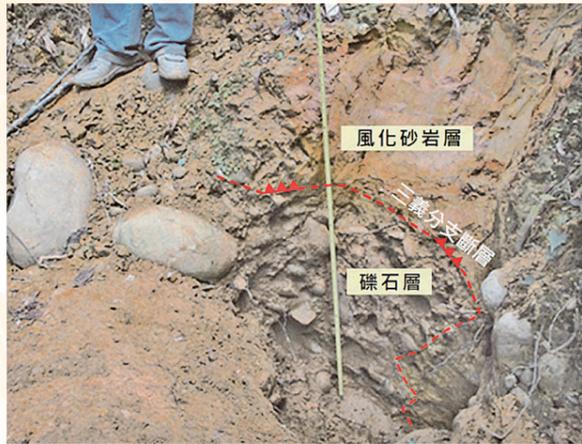


圖 18 新田靶場東側三義分支斷層露頭

由地電阻影像剖面測線 RIP-02 成果（詳圖 19）顯示，在測線剖面里程 220 m 及 410 m 處，兩側地層有較大地電阻率差異，可能分別為三義斷層及三義分支斷層影響所致。此外，由調查區 8 孔地質探查鑽孔施鑽結果（詳圖 20）顯示，鑽孔 BB-25-01 及鑽孔 BB-25-02 均鑽穿三義分支斷層面，鑽孔 BB-25-03 亦順利鑽穿三義斷層面，相關岩心照片詳圖 21。藉由

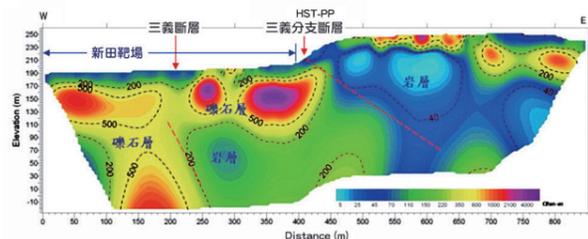


圖 19 RIP-02 地電阻影像剖面地質解釋

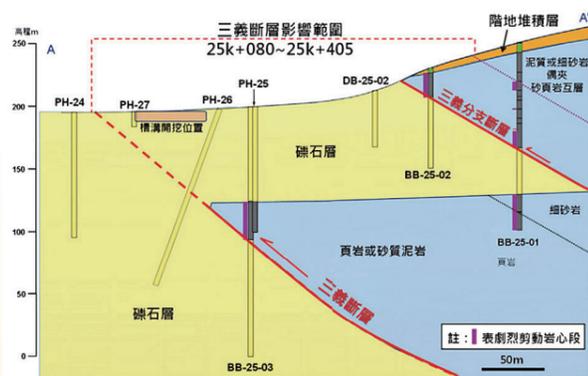


圖 20 三義斷層地質剖面圖（位置詳圖 17）

綜整地質鑽孔及地電阻影像剖面探查成果，即可明確掌握三義斷層及三義分支斷層在本調查區之地下分布樣貌，並據以推估斷層構造之可能地表影響範圍。

槽溝開挖調查可用於研判斷層的走向、傾角、位移方向、斷層活動事件（古地震）次數等重要斷層相關資訊，並配合碳十四定年取樣與試驗資料，推估斷層發生地震之再現週期及長期滑移速率等參數，供斷層位移危害度分析及工程設計運用。

在用地取得限制下，最終擇定於新田靶場內 PH-26 及 PH-27 兩鑽孔之間進行槽溝開挖調查（詳圖 17）。槽溝採 4 階開挖，最大深度約 8 m，長約 40 m，寬約 15 m（詳圖 22）。由槽溝南、北側牆剖面地質測繪結果可區分出 3 次古地震事件（詳圖 23），配合碳十四定年成果推估地震再現週期約為 1,620 年；以槽溝剖面中傾斜地層之最大位移落差與可能活動年代估算，其垂直抬升速率約 0.78 公厘/年，配合推估斷層角度計算得沿斷層面之長期滑移速率約 0.9 公厘/年。參照美國加州運輸部之建議，採用機率式分析與定值式分析結果之較大值進行設計考量，最終建議之三義斷層沿斷層面之設計考量位移量為 1.1 m。

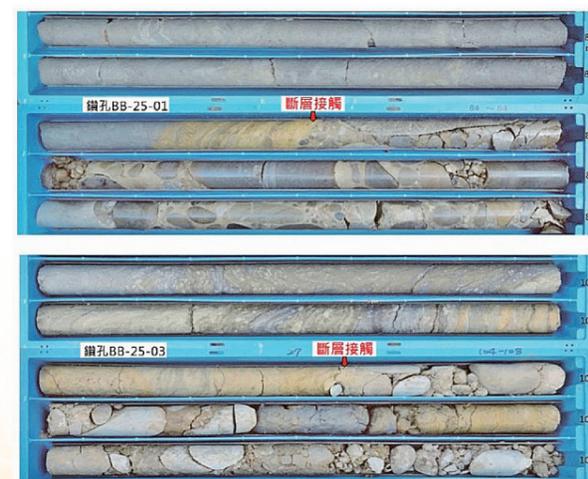


圖 21 三義分支斷層（上）及三義斷層（下）岩心照片



圖 22 三義斷層槽溝開挖影像

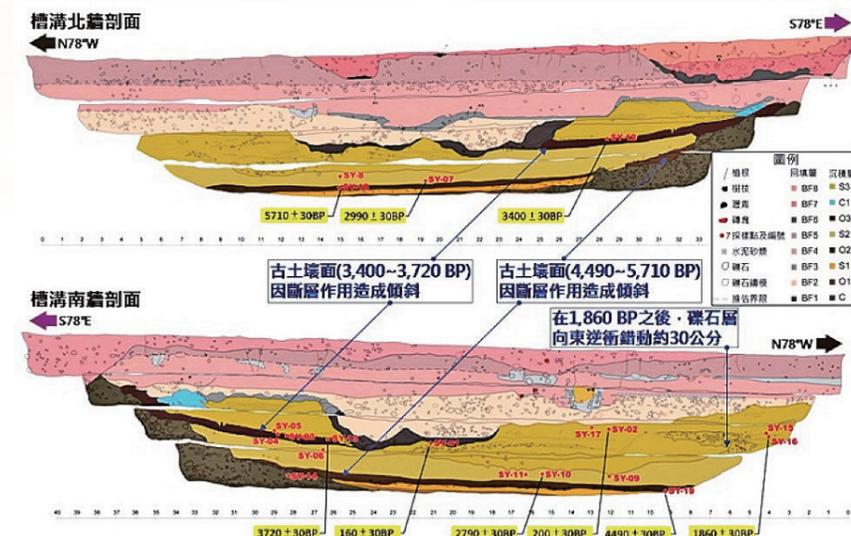


圖 23 三義斷層槽溝地質測繪及定年成果

藉由縝密地質探查規劃與執行結果，順利釐清三義斷層構造與本計畫路線之相關空間關係，作為決定墩柱位置及橋梁跨徑之重要參考依據。並求得斷層滑移速率及設計位移量等重要參數，令橋梁工程設計工作得以妥適因應。

橋梁上部結構採大跨徑鋼床板箱形連續梁橋跨越三義斷層與分支斷層，並採混凝土雙柱橋墩。連續梁橋具有結構穩定性較佳的優點，可相對降低地震時落橋之機率及可能災損。鋼材除具有優良之抗壓、抗張、材料强度高、韌性佳等能力，與混凝土橋相比具有質量輕之特點，可減少下構受地震力造成之巨大彎矩及剪力。

依地質調查結果建議之三義斷層沿斷層面之設計位移量為 1.1 m。斷層面傾角在近地表處約為 60°，較深處可能漸變至約 40°。以斷層面傾角 60° 計算得水平位移為 0.55 m、垂直位移為

0.95 m；若以斷層面傾角 40° 角計算，水平位移為 0.84 m、垂直位移為 0.71 m；橋梁設計時係採取較大水平位移 0.84 m 及較大垂直位移 0.95 m 納入考量。

潭子高架橋 (1) 於跨越三義斷層的橋梁單元跨徑採 140 m。東側橋墩（編號 P4）位於斷層上盤，與上部結構接合採用滑動支承，西側橋墩（編號 P5）位於斷層下盤，與上部結構接合採用固定支承。當三義主斷層沿斷層面錯移 1.1 m 時，垂直方向 0.95 m 的位移量，對跨徑 140 m 的橋梁單元兩端僅造成約 0.35° 的相對傾動角度，如圖 24 所示。當三義主斷層造成 0.84 m 的水平向位移時，相當於橋墩 P4 往橋墩 P5 的方向移動 0.84 m，此滑移量將由橋墩 P4 於其上部結構之間的滑動支承吸收，令上部結構完全不受擠壓縮短的力量影響（詳圖 24）。

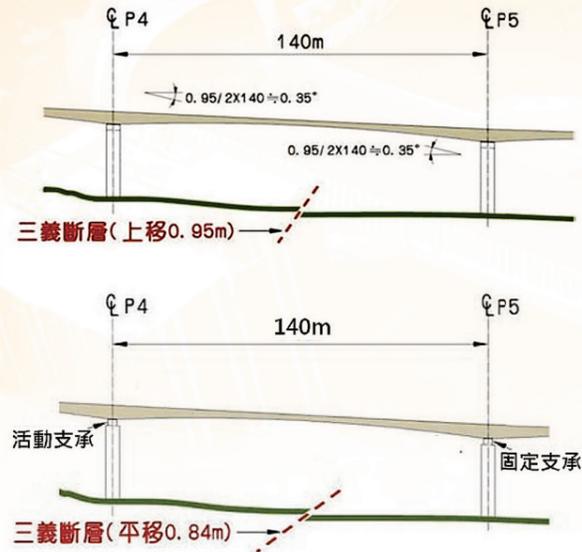


圖 24 高架橋跨越三義斷層因應概念

五、隧道段地下水資源相關因應

計畫路線三座隧道穿越丘陵區，最大岩覆僅約 135 m。隧道上方行經高爾夫球場且鄰近多處民宅、農地等地下水用戶（詳圖 4），故須考量如何降低新建隧道對於地下水文的改變，以維持隧道沿線民宅、農地等之地下水源。遂於調查階段蒐集鄰近水文地質背景資料，並依據隧道沿線地表水系、地層及地質構造分布，建立鄰近區域三維水文地質模型（詳圖 25），據以評估隧道施工及營運階段對地下水文之可能影響，以有助於評估隧道施工遭遇湧水之潛能。

此外，本計畫三座隧道全線設置仰拱並採全周式防水膜包覆，如圖 26 所示，即所謂的不

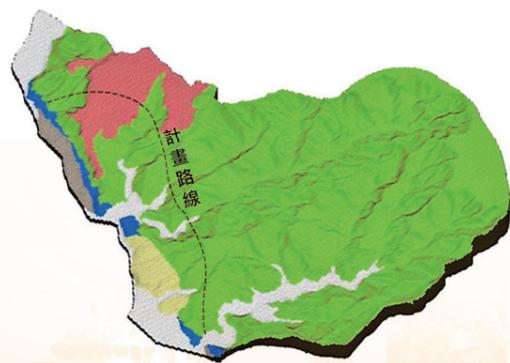


圖 25 隧道群鄰近地區三維水文地質模型



圖 26 隧道全周式防水膜包覆情況

排水隧道。目的在於避免營運階段隧道周遭的地下水流入隧道內，以盡可能降低新建隧道對於地下水文的改變。採取此一友善環境的設計創舉，令國道 4 號豐原潭子段成為台灣第一條全線隧道採不排水隧道設計之高速公路。

六、山崩地滑地質敏感區相關因應

部分隧道洞口涉及或鄰近山崩與地滑地質敏感區（詳圖 5），洞口地質安全亦須審慎評估與考量。遂於設計階段利用三維落石預測程式 CRSP (Colorado Rockfall Simulation Program) 分析落石可能彈跳高度與停留位置（詳圖 27）。分析結果顯示，大部分落石不會掉落於路面，然考量本計畫道路服務水準標準較高，為確保行車安全，故於落石潛勢較高的豐原 2 號隧道及豐原 3 號隧道東、西洞口，將橋台/井式基礎設置於洞口內，採用逆傾式洞門設計，其凸出之帽簷結構可防止落石災害，並於洞口上邊坡設置防落石柵（詳圖 28）。此外，豐原 2 號隧道東行線西洞

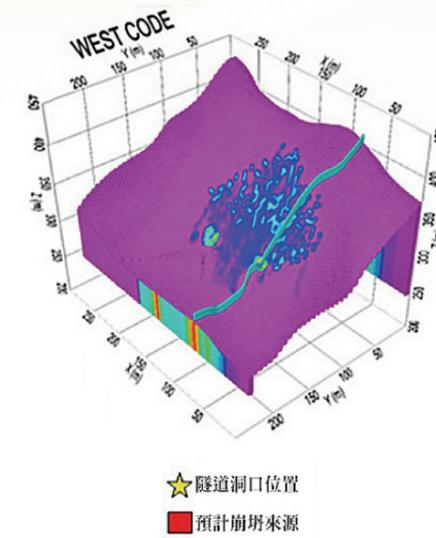
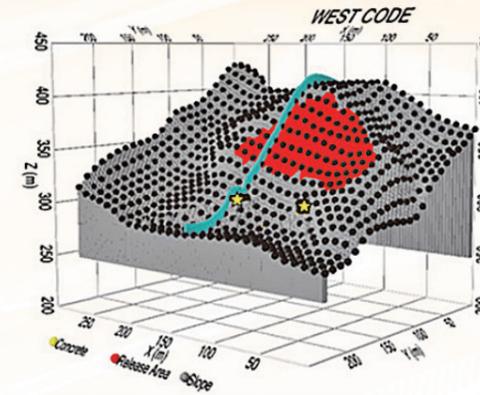


圖 27 豐原 3 號隧道西洞口三維落石分析結果



圖 28 豐原 3 號隧道西口橋台/井式基礎置於隧道內、逆傾式洞門及上邊坡防落石柵

口、3 號隧道西行線東、西洞口以及東行線西洞口，因地勢陡峻，將橋台與隧道洞口進行共構設計（詳圖 28），據以減少洞口開挖量體，盡可能保有原始自然景觀。

七、結語

「國道 4 號臺中環線豐原潭子段計畫」扮演大台中區域整體提升發展之重要角色。其中計畫路線通過多處活動斷層及山崩地滑地質敏感區與民生用地，為滿足安全性與降低施工對周遭環境衝擊，遂採謹慎評估風險、遠離風險、監控風險、提昇營運安全及加強環境保護作為等相關因應對策，並已順利於 2023 年 1 月 16 日全線通

車。本工程的設計施工經驗值得保存作為後續工程之參考。

參考文獻

1. 中興工程顧問股份有限公司 (2019), 「國道 4 號臺中環線豐原潭子段工程設計暨配合工作細部設計報告」, 交通部高速公路局。
2. 中興工程顧問股份有限公司 (2008), 「國道台中環線豐原霧峰段工程設計細部設計階段大地工程調查紀實報告」, 國道新建工程局。
3. 中興工程顧問股份有限公司 (2008), 「國道台中環線豐原霧峰段工程設計細部設計階段大地工程調查評估報告」, 國道新建工程局。