

中寮隧道北洞口邊坡變形之斷層調查與改善對策

許慧玲 交通部高速公路局南區養護工程分局屏東工務段 / 段長
 陳琨曜 交通部高速公路局南區養護工程分局屏東工務段 / 副段長
 黃竣楷 交通部高速公路局南區養護工程分局屏東工務段 / 工程司
 紀建宇 台灣世曦工程顧問股份有限公司 / 應用地質技師
 林信宏 台灣世曦工程顧問股份有限公司 / 大地工程技師

摘要

中寮隧道於民國 85 年開始施工，民國 89 年完工，然而完工通車後中寮隧道北洞口（約 378k+700 ~ 378k+950）路段因持續變位而造成損壞，檢視既有損壞維修紀錄及監 / 檢測資料，迄民國 106 年為止中寮隧道北洞口的結構抬升高程差異已累積超過 130 cm，造成高速公路結構損壞並影響行車安全。高速公路局乃於 106 年辦理改善工程將長期受變位影響之隧道路段拆除，改以路塹方式通過。而本路段鄰近有車瓜林斷層與旗山斷層通過，原規劃（民國 80 年）、設計（民國 82 年）及施工（民國 85 ~ 89 年）階段時，上述兩條斷層皆非屬活動斷層，後續因調查設備與技術的進步，經濟部中央地質調查所陸續確認斷層之活動性，分別於民國 90 年及 110 年將旗山斷層及車瓜林斷層由原存疑性活動斷層提升為第一類活動斷層。

由於本路段恰好位於車瓜林斷層與旗山斷層最接近之處，本文藉由地表地質調查確認斷層構造的分布，及後續監測變形與大地變位之資料比對，瞭解本路段結構變形之主要原因。因大地變位乃人為無法改變之自然現象，即使改變結構形式亦僅能降低地表變位之影響風險，並無法阻止地表變形持續發生。故長期改善工程之後高速公路局仍持續進行相關監測，藉由監測成果隨時掌握地表變形情況，並辦理必要之改善，以維護高速公路之結構穩定與用路人之行車安全。

一、遙測影像判釋

本案例調查範圍位於高雄市田寮區，主要結構物為高速公路路堤及隧道北洞口邊坡，車瓜林斷層通過高速公路里程約 378k+450 附近，而旗山斷層則通過中寮隧道北洞口（378k+850）附近，如圖 1 所示。

由於斷層錯動後所產生之剪裂泥，存在緻密且不易透水之特性，因此在泥岩區中抗雨水侵蝕能力相較於泥岩岩體略佳。此外，剪裂泥於野外之產狀也多呈深灰色至黑色之色澤。藉由上述之現象，利用高解析度航照影像，於室內進行調查區域附近之裸露地判釋，標繪出斷層於地表之特徵線性，如圖 2。

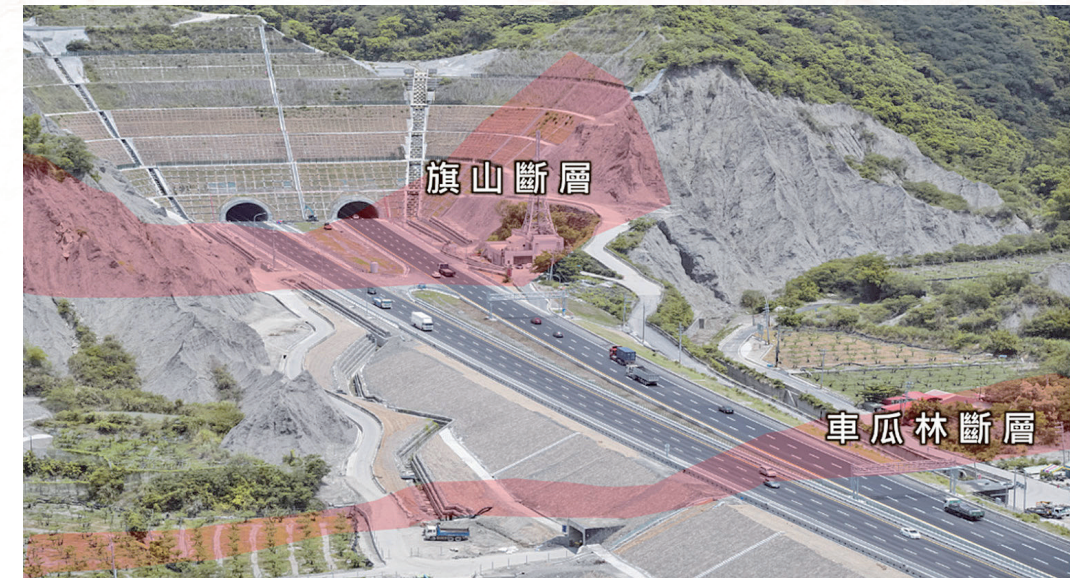


圖 1 工址位置空拍照片與斷層套繪圖



圖 2 利用高解析度之航照影像判釋斷層線性

由於航照影像無法對於植被覆蓋之區位進行判釋作業，另利用高解析度之數值地形，針對地表地形起伏異常之區位進行特徵判釋，如圖 3。

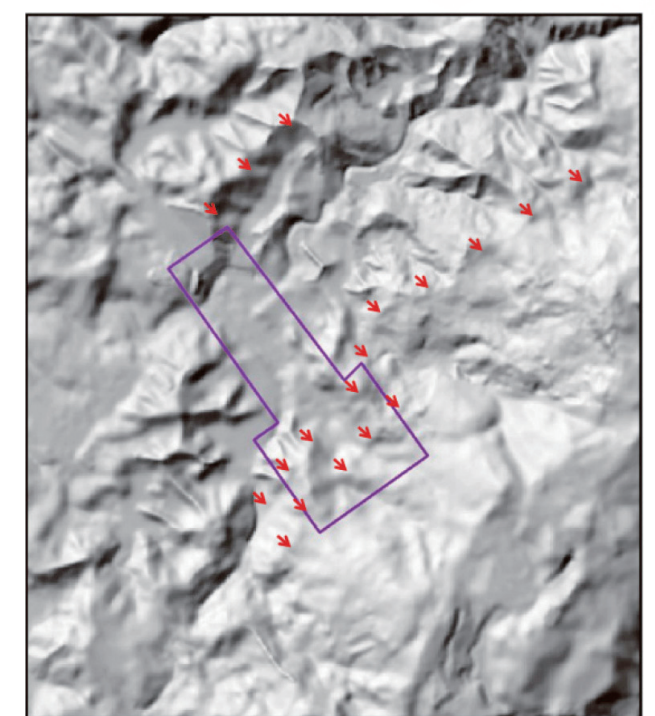


圖 3 利用數值地形對於斷層線性特徵進行判釋

二、野外地質調查及測繪成果

本案例調查範圍位於古亭坑層及烏山層交界，岩性主要為泥岩及砂頁岩互層（經濟部中央地質調查所，2008）。古亭坑層多以泥岩為主，層間偶夾有薄層之砂岩層，厚度約在 10 ~ 30 公分不等，接近斷層位置之薄層砂岩則多為透鏡

狀，延續性普遍不好且多受到剪力作用而產生拖曳褶皺。本區域內之泥岩因受到車瓜林斷層及旗山斷層的影響，經常可在現場發現泥岩中具有顏色較黑且結晶度較好的剪裂帶，該剪裂帶於現場調查中發現延續性良好。區域內泥岩照片如圖 4，照片內含薄層砂岩及剪裂帶。泥岩中薄層砂岩之位態大區域走向為北偏東向南傾斜，局部因受到斷層帶影響，位態轉變為北偏西向北傾斜。烏山層的岩性於本區域以砂頁岩互層為主，但山區多為崩積層且植被茂密，少有明顯的露頭出露，僅於隧道上方兩側土石流溪溝整治設施旁可見較為新鮮之岩盤如圖 5。

烏山層與古亭坑層以旗山斷層為交界，約在隧道洞口上方兩條溪溝之匯流處，由隧道洞口往南的岩性分別為砂岩（SS）、頁岩（SH）及砂頁岩互層（SS\SH）（陳柏村，2005）。

旗山斷層介於烏山層跟古亭坑層間，根據現場檢核 11 個觀察點的結果，除主斷層帶外可再分

出四條分支斷層，整體斷層走向約在北 30 ~ 70 度東之間，向東傾斜約 50 ~ 70 度。

車瓜林斷層由高速公路南北兩側皆可發現明顯的露頭顯示該斷層的位置分布。

上述調查點位分布詳圖 6；各調查點細部描述如表 1。

本區域地層分布主要可分為泥岩偶夾薄層砂岩及砂頁岩互層兩種，以隧道口附近為界，以北為泥岩區，以南為砂頁岩互層區，兩區因岩性差異造成地勢起伏及裸露程度明顯不同，可輕易區分兩側岩性之不同。

調查區域內地質構造部分，經由影像判釋及現場檢核後可找到旗山斷層主斷層帶、旗山斷層四條分支斷層及車瓜林斷層分布位置，與前期資料大致相符，並依現場調查結果修正各剪切帶位置，如圖 7 所示。

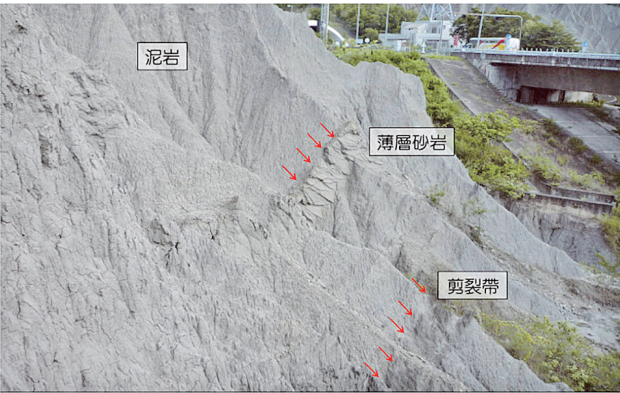


圖 4 區域內泥岩產狀



圖 5 區域內砂岩露頭產狀

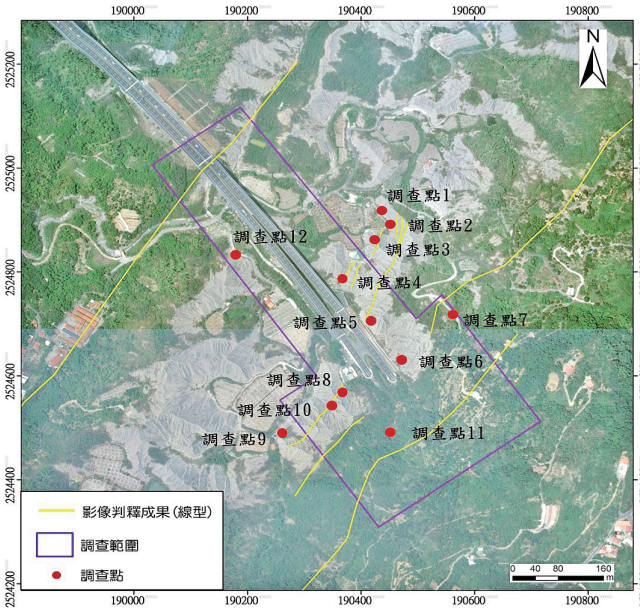


圖 6 調查點位置分布圖（套疊影像判釋成果圖）

三、隧道洞口路塹邊坡現況說明

原中寮隧道北口覆版段因受旗山斷層以及大地變位影響，於北上線里程 378k+825 ~ 378k+900、南下線里程 378k+795 ~ 378k+900 之隧道有隨地盤抬升，造成於里程 378k+860 ~

表 1 現地地質調查說明一覽表

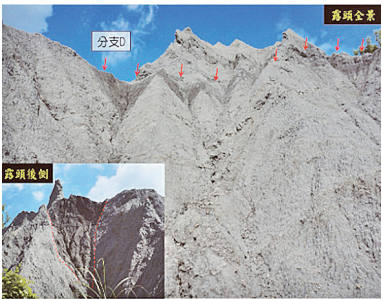
調查點 1

位於分支斷層 D 附近，灰色泥岩偶夾薄層砂岩（厚約 5 ~ 30 公分），有高角度剪裂帶，位態約為 N15°E，62°E



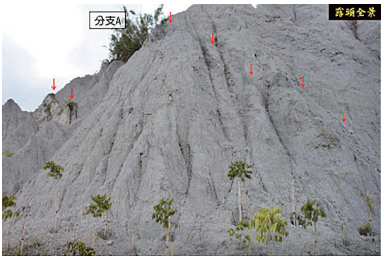
調查點 3

分支斷層 D 附近，斷層厚度約 1 ~ 2 公尺，位態約為 N15°E，80°E



調查點 5

分支斷層 A 附近，剪切帶位置明顯，且延續性良好。此處剪切帶位態約為 N16°E，60°E



調查點 7

位於旗山斷層主斷層附近，道路嚴重變形，地表破裂、隆起；擋土牆外推



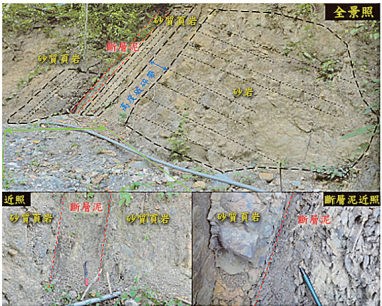
調查點 9

厚層泥岩夾砂岩，量測局部斷層位態約為 N70°E，56°E，寬度約 20 ~ 30 公分，下盤薄砂岩位態 N49°E，32°E



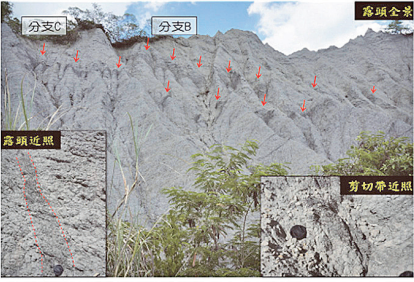
調查點 11

位於主斷層附近，以砂岩為主，斷層泥厚度約 1 公尺，具有高塑性，且產狀有剪切特徵，有明顯差異



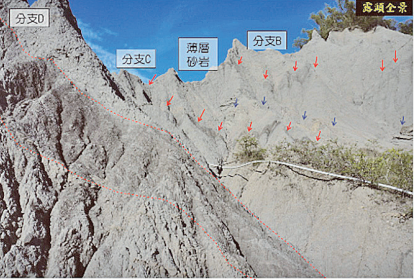
調查點 2

分支斷層 B、C 附近，灰色泥岩偶夾薄層砂岩，有兩條高角度分支斷層，位態約 N15°E，80°E



調查點 4

分支斷層 B ~ D 附近，三條分支斷層厚度分別為 20 ~ 40、15 ~ 30、100 ~ 150 公分，此處量測斷層位態約 N30°E，58°E



調查點 6

泥岩為主，剖面上方為顏色較深且遭受到擾動過的泥岩體（主斷層帶），邊坡岩體遭受過強烈的剪動作用



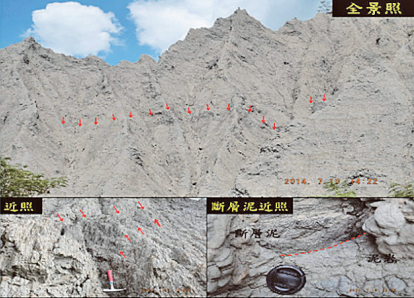
調查點 8

斷層跡象明顯，斷層泥外觀呈現深黑色條帶狀，量測之斷層位態為 N34E，56E，斷層帶寬度約 30 至 40 公分



調查點 10

斷層位態約為 N50°E，67°E，斷層泥之產狀明顯，且斷層帶寬度約為 2 公尺之高角度斷層



調查點 12

顏色差異可區分車瓜林斷層主斷層帶，邊界下方（紅色虛線）為斷層剪切帶位置，斷層位態約為 N78°E，35°E



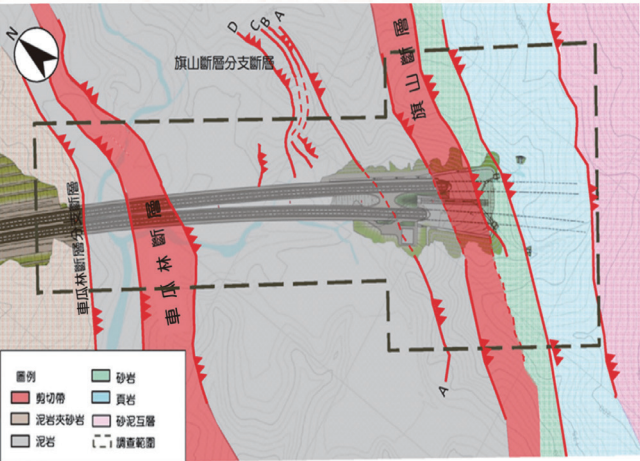


圖 7 區域地質調查成果圖

378k+890 之隧道因差異抬升而結構損壞，危及行車安全。因此，於民國 106 年之改善工程拆除北上線里程 378k+825 ~ 378k+900、南下線里程 378k+795 ~ 378k+900 之隧道結構，改為路塹方式通過此一斷層變位段。

路塹邊坡以水平：垂直 = 1：1 之坡比開挖，最高開挖面約 80 m，考量邊坡保護，每階開挖高度不得超過 10 m，並於每階邊坡間設置平台與排水溝，降低逕流入滲與坡面沖刷。

本路塹段之地層包含古亭坑層泥岩、旗山斷層帶以及烏山層砂岩，岩層位態屬於逆向坡與斜交坡形態，不易產生大規模邊坡滑動，但可能因為工程開挖，導致淺層坡體產生解壓節理，而有淺部地層之岩屑崩滑或落石災害。改善工程考量本處路塹邊坡之不同地層岩性特性，於古亭坑層泥岩邊坡因無適用之護坡工法，故採取自然裸坡方式，於坡腳處保留 10 m 寬之緩衝帶，以收納緩衝泥岩沖蝕之泥流；而於烏山層砂岩邊坡則考量開挖解壓採用 9 m 長岩栓加勁，在於坡面以植生格框護坡保護邊面降低風化影響，並於維修平台設置落石防護柵，確保即使零星落石亦能保護高速公路主線行車安全，如圖 8。

長期改善工程於 109 年 4 月完工後迄今已逾 4 年，此期間因旗山斷層剪裂帶仍因大地變位影響而持續有錯動情況，於 110 年 3 月進行現地巡查時，發現於南下線側邊坡第 3 ~ 7 階已陸續發生寬度不一的垂直向裂縫，為瞭解裂縫之發展情況，乃於裂縫處設置裂縫尺如圖 9。發生裂縫之位置主要分布於公路兩側之邊坡，由裂縫之發展型態觀察，主要為沿坡面垂直向發展，大致平行於旗山斷層變位帶。

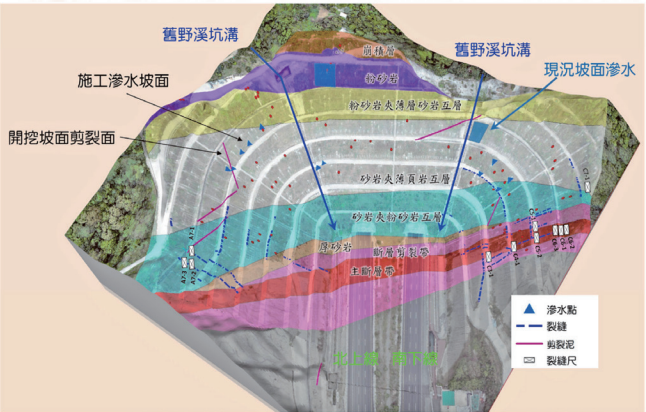


圖 9 裂縫及裂縫尺平面分佈圖

於 111 年 9 月 18 日臺東地區發生芮氏規模 6.8 的地震，地震深度僅約 7 公里，造成台東地區最大震度為 6 強，本工址所位於之高雄市震度約為 4 級，如圖 10。另參考工址附近之旗山地震站，因本次地震造成之最大地表加速度水平向約 0.052 g、垂直向約 0.024 g（如圖 11），小於設計地震標準，應無邊坡因地震造成滑動之虞。惟地震雖未造成邊坡安全威脅，但地表震動仍造成護坡設施之變位，其中以南下側第 4 ~ 6 階最為明顯。顯示斷層破碎帶之既有裂縫因地震影響有局部加寬之情形，因地震產生之新裂縫並不

多，推估應為既有裂縫已成為應力釋放之介面，故並無因應力累積而產生新的裂縫。

地震發生前，工址即因大地變位以及斷層破碎帶影響，已有裂縫發生，且有持續張裂之情況，並以 C4-1、C5-1、C6-1、C6-2 變位速率較大，約以 1.27 ~ 1.81 mm / 月之平均速率張裂，如圖 12 和圖 13。與隧道拆除前，大地變位監測觀察北洞口處約以 20 ~ 30 mm / 年張裂之速率相近（台灣世曦，2014），推估本處裂縫之發育應與斷層與大地變位較具相關性。

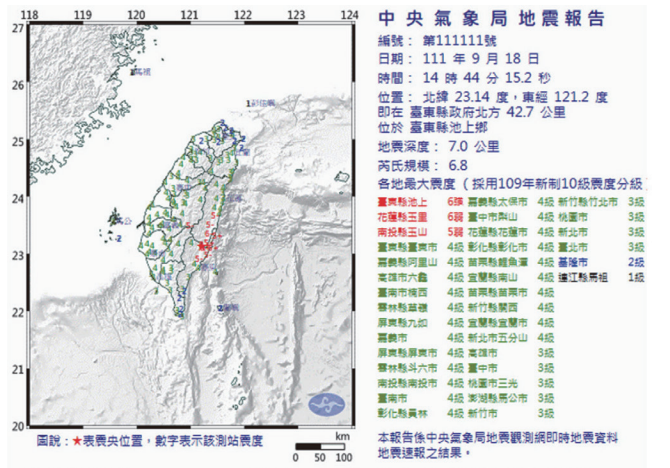


圖 10 111 年 9 月 18 日池上地震震度分佈圖

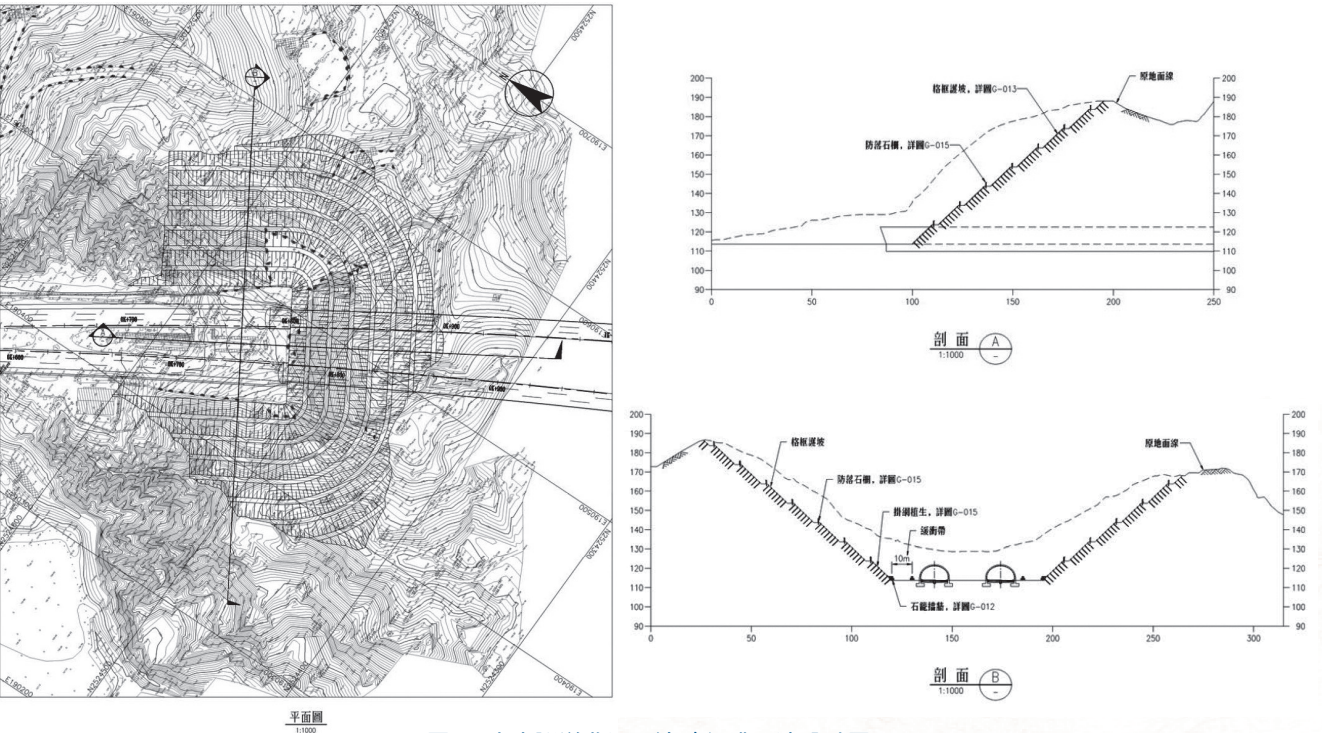


圖 8 中寮隧道北洞口邊坡保護工法設計圖

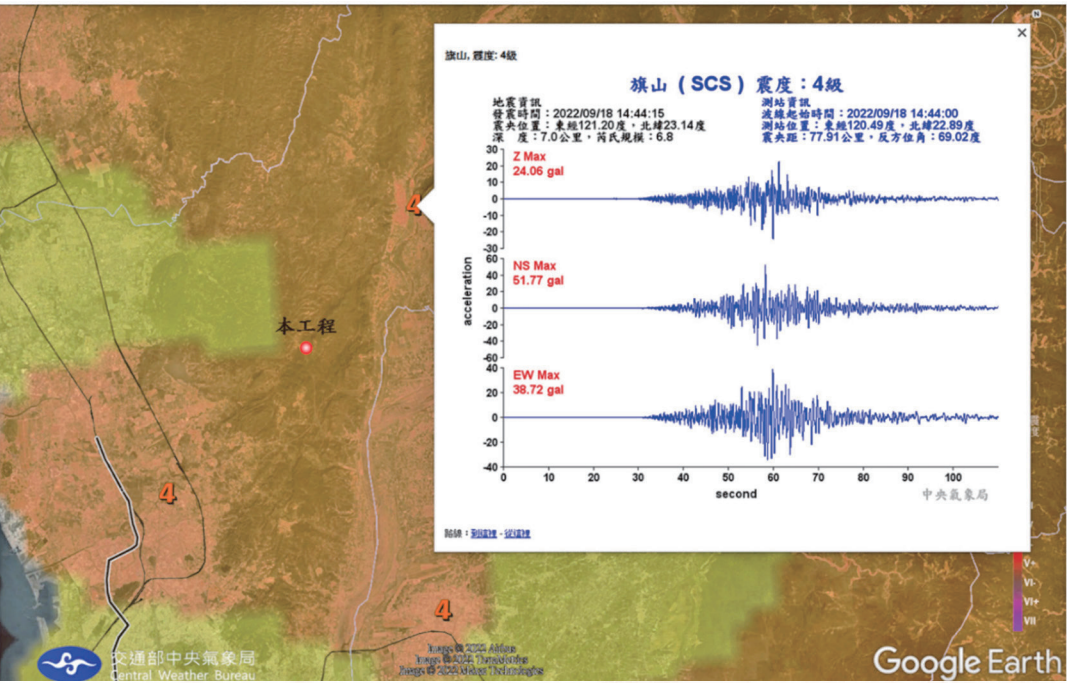


圖 11 池上地震工址臨近地表加速度分佈

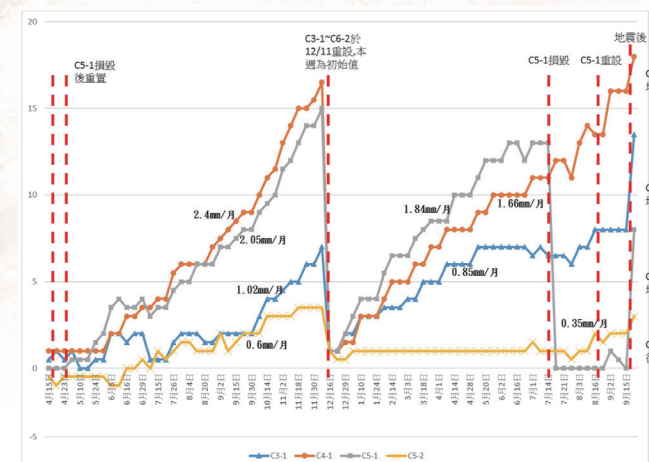


圖 12 C3-1~C5-2 裂縫尺變形曲線圖

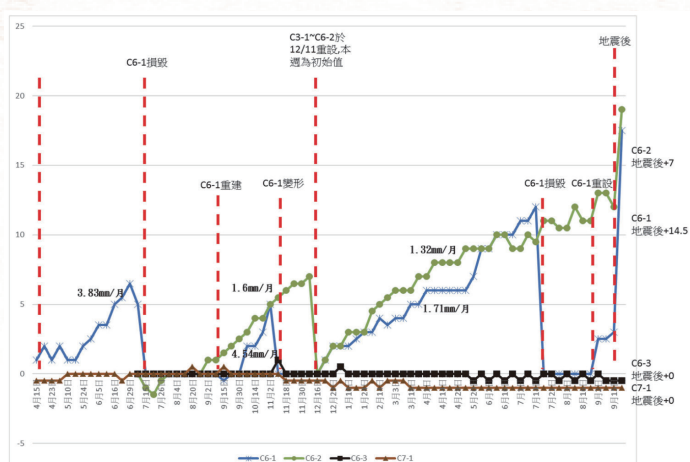


圖 13 C6-1 ~ C7-1 裂縫尺變形曲線圖

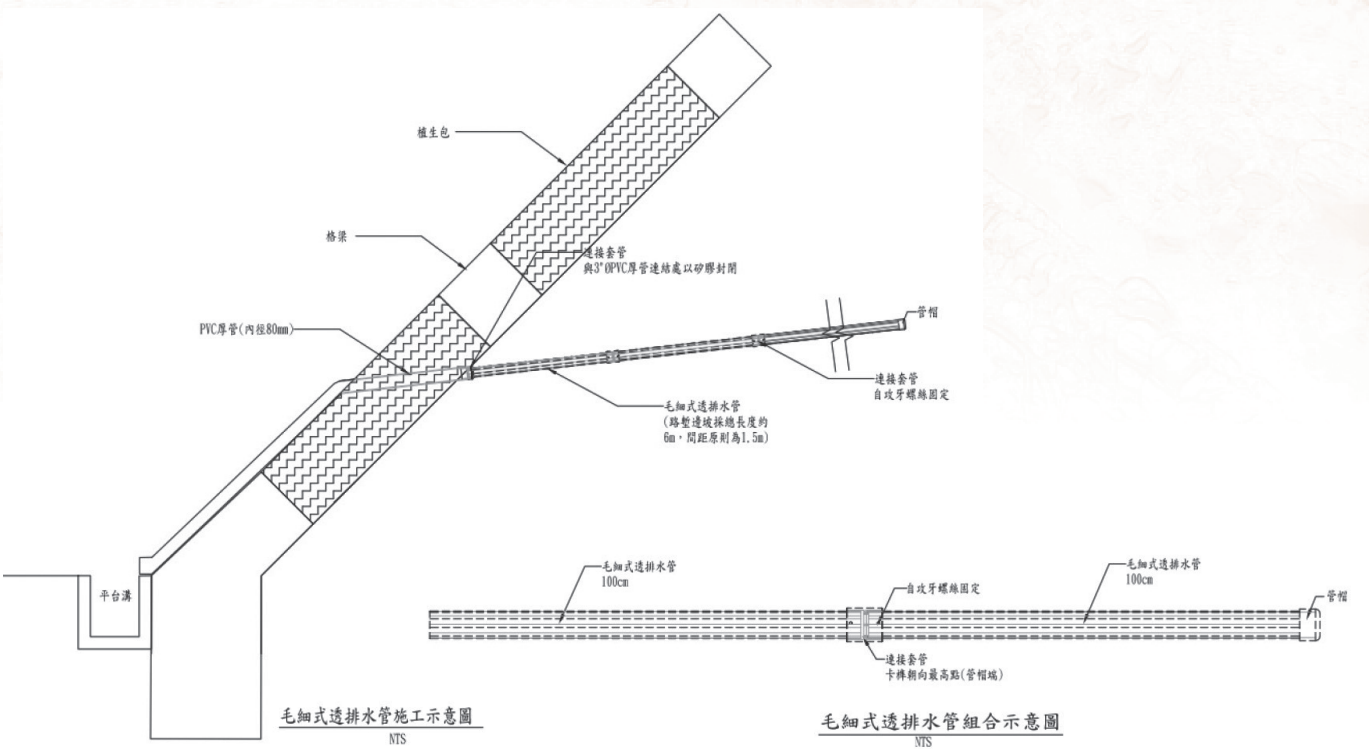


圖 15 邊坡毛細式水平排水管示意圖

排水管係為全斷面排水且利用毛細力、虹吸力等作用，具有不易堵塞，排水力強等特點，如圖 15，已成功運用於多項工程（國 1 南下 10.1k 路段、高鐵 TK126 路段等），利於坡體內地下水之排放，提升邊坡穩定安全。

五、結語

本文工程原考量隧道洞口位於斷層帶，地質較為破碎，為避免洞口邊坡大挖大填，故於民國 85 年新建工程時，即考量採用覆版開挖進洞之方式，減少對邊坡之擾動。然而，所料未及的是，工址鄰近的旗山斷層與車瓜林斷層經後續的調查結果顯示，都是屬於具有活動性的第一類活動斷層，加上西南部泥岩地區可能亦有地下泥貫入體 Mud Diapir 的分布，因此造成本路段完工後持續有結構變形的情況發生。雖然，後續利用監測與調查確認了變形主因，並將受到變形影響的隧道段結構拆除改為路塹方式通過，已大幅降低災害風險，但大地變位仍將持續發生，必須藉由後續長期維護與改善來維持結構安全。

上述問題在過去調查方法與工具尚未足夠精密的年代，都是無法預測與納入設計評估的盲點。由於本工程案例相當特殊，並也因本工程的相關監測與調查成果，促使經濟部地質調查與礦業管理中心進一步確認斷層的活動性，劃設與公告車瓜林斷層為第一類活動斷層，希望藉由本文的說明，可以提供相關經驗與各工程界分享，作為後續相關工程之參考。

參考文獻

- 台灣世曦工程顧問股份有限公司（2014），國道 3 號田寮 3 號高架橋及中寮隧道長期改善工程設計、監測技術服務補充地質調查分析及評估報告書。
- 陳柏村（2005），旗山斷層南段變形特性研究，國立成功大學地球科學系碩士論文，台南。
- 經濟部中央地質調查所（2008），都會區及周緣坡地環境地質圖資料庫圖集，南部地區—里港圖幅。

四、後續維護與改善對策

由於上述坡面裂縫係因大地變位與斷層構造所造成，且由監測觀察其趨勢仍將持續，並無停止跡象。雖然目前裂縫尚未直接影響邊坡安全，但長期下去，確可能因裂縫造成地表逕流入滲，弱化坡體強度或造成掏空，影響邊坡安全。

考量本處坡面裂縫仍將持續發育，若以灌漿方式進行填補，後續仍將繼續開裂，故本次改善工程擬以皂土漿進行裂縫填補，後續若繼續開裂時，皂土漿遇水將自行膨脹調整，填補開裂空間。

為降低坡面逕流由裂縫處入滲，首先在平台溝裂縫處以皂土漿填補，並設置上下兩層交疊可錯動之防水層（土工織布＋防水布＋土工織布），使溝體若再開裂時，水流仍可順利導排至下游，不會直接入滲。而坡面之裂縫則主要沿混凝土格框伸縮縫分布，擬於伸縮縫兩側以防水層交錯連接固定於格框上，可降低坡面逕流之直接入滲，皂土漿亦可修補破洞，適合坡面的不均勻開裂、沉降，及有利於平時養護作業，如圖 14。另為降低坡面逕流入滲影響邊坡安全之情形，於剪裂帶兩側增設毛細式水平排水管，此種

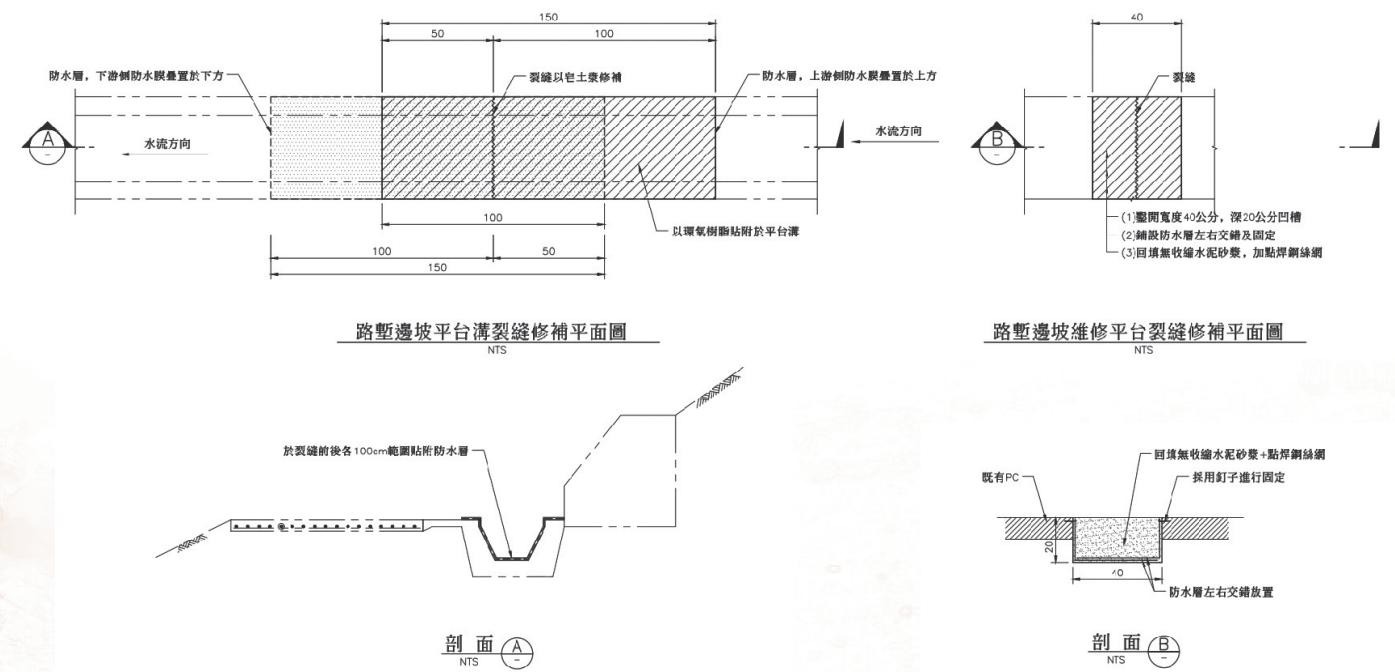


圖 14 邊坡平台裂縫補強與修復示意圖