



防災體系之實務成果

臺鐵集集線 地質複雜 邊坡坍塌整治 及 老舊隧道 損壞重建

古正育／國營臺灣鐵路股份有限公司專案工程處 處長

賴杏福／國營臺灣鐵路股份有限公司嘉義施工隊 隊長

邵文郁／國營臺灣鐵路股份有限公司嘉義施工隊 主辦工程司

周永川／台灣世曦工程顧問股份有限公司大地工程部 協理

陳正勳／台灣世曦工程顧問股份有限公司大地工程部 經理

楊智堯／台灣世曦工程顧問股份有限公司大地工程部 經理

林俊良／台灣世曦工程顧問股份有限公司大地工程部 計畫工程師

陳楚禮*／台灣世曦工程顧問股份有限公司大地工程部 工程師

臺鐵集集線為國內具有名氣的觀光路線，興建於民國 14 年。2 號隧道與 3 號隧道（里程 K23 + 720 ~ K23 + 845）位於南投縣集集鎮與水里鄉間區，民國 110 年 8 月 14 日、8 月 24 日集集線 K23 + 720 ~ K23 + 745 路段因豪雨發生二次邊坡崩塌，造成隧道結構嚴重損壞，入侵行車淨空，為快速復舊以利復駛，故集集車站以東停駛並進行隧道復建及邊坡整治修復工程。前述復建工程進行期間，於 111 年 5 月 18 日豪雨不僅造成 K23 + 720 ~ K23 + 745 範圍外之東側邊坡持續崩塌，復於 111 年 9 月 2 日現勘發現 3 號隧道（集集線 K23 + 745 ~ K23 + 800）隧道已有明顯變形損壞，並有坍塌土石衝入堆積致隧道無法行車，且 K23 + 800 ~ K23 + 845 間之隧道結構則有滲水與結構裂縫等嚴重異狀，考量路段災情有擴大且保護不足之情形，故進行 K23 + 745 ~ K23 + 845 受損隧道重建及其上之邊坡整治修復。

透過高精度光達調查、地質鑽探、地球物理探測與水文分析，掌握崩積地層之複合式破壞機制。在「穩固崩塌源頭、排除地表與地下水、分階修坡加固及明挖隧道復建」之防護策略下，成功克服了斷層剪裂帶等破碎地質挑戰。特別是在汛期極端豪雨環境下，面對上方邊坡崩積層的巨大側向土水壓力，克服了明挖覆蓋隧道開挖擋土之極高困難性與變形風險，以鑽掘擋土排樁與臨時地錨進行分階降挖加固，在變化破碎地層中，達成「零工安意外」目標並提早交付工作界面。除全面提升鐵路支線之基礎設施韌性與營運安全外，更將為南投地區之觀光產業與交通活化帶來顯著效益。

關鍵詞：邊坡工程、隧道重建

前言

臺鐵集集線為南投縣境內唯一的鐵路客運路線，興建於民國 14 年，全線自二水站起至車埕站止，全長約 29.7

公里，是聯繫彰化平原與南投山區的重要交通管道。作為全台現存最長、且最具代表性的鐵路支線，集集線不僅承擔沿線居民的日常通勤與民生物資運輸，同時配合日月潭水力電氣工事興建，現已轉型旅遊路線。集集線除了肩負南投縣名間、集集、水里地區的交通外，也是國內具有名氣的觀光鐵路線，此路線為非電氣化區間，全線皆由彰化

* 通訊作者，chenchuli82@ceci.com.tw

機務段所屬的冷氣柴客行駛，受到民國 110 年邊坡坍塌以及後續隧道老舊擴孔工程影響停駛，預計於民國 115 年 7 月全線復駛。

工程案例發生於集集～水里間集集線 2 號隧道與 3 號隧道間，於民國 110 年 8 月 14 日、8 月 15 日以及民國 111 年 5 月 18 日、111 年 8 月陸續於集集線 K23 + 720 ~ K23 + 800 處隧道上方發生邊坡坍塌，分別造成 2 號隧道及 3 號隧道受土石擠壓而損壞，遂依序辦理 2 號隧道（集集線 K23 + 720 ~ K23 + 745）新建明挖覆蓋隧道工程、集集線 K23 + 745 ~ K23 + 845 臨時防災措施，以及 3 號隧道（集集線 K23 + 745 ~ K23 + 845）隧道受損重建工程，本工址位置如圖 1 所示。

致災原因探討

工程受災及復建歷程

臺鐵集集支線為民國 14 年日治時代建造，原採磚造隧道襯砌（45 cm），斷面淨空約 4 × 4 m，民國 88 年集集大地震時第 1、2、3、5 號隧道發生損害，進行緊急搶修工程，而為避免隧道異狀持續惡化影響行車安全，遂於 98 年進行集集線加固工程設計及施工，隧道增加鋼支保、噴凝土，詳如圖 2^[1]。

本工程起於 110 年 8 月 14 日及 8 月 24 日於集集線 K23 + 720 ~ K23 + 745，因豪雨發生二次邊坡崩塌，造成隧道結構嚴重損壞，故於 110 年 10 月與 12 月分辦理 2 號隧道（K23 + 720 ~ K23 + 745）明挖覆蓋隧道工程。



圖 1 本工程案例位置圖

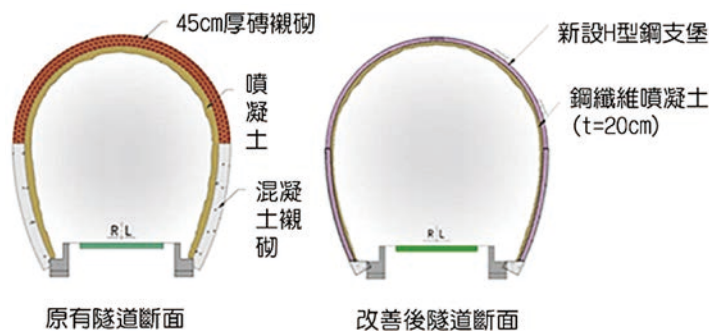


圖 2 集集大地震後改善示意圖

上述工程施工期間，111 年 5 月 18 日、111 年 6 月 3 日降雨與地震誘發 K23 + 725 ~ K23 + 745 工程範圍外之東側邊坡坍塌並掩蓋隧道，上方強化型鋼樁則因衝力損壞使隧道二度掩蓋；之後則再於 111 年 8 月強降雨誘發邊坡再坍塌並引致 3 號隧道擠壓坍塌，遂先於 112 年 4 月辦理集集線 K23 + 745 ~ K23 + 845 臨時防災措施，並於 112 年 5 月汛期前完成；並於 113 年 9 月 13 日啟動 3 號隧道 K23 + 745 ~ K23 + 845 受損重建工程。其本工址災害歷史詳圖 3。



圖 3 工址災害歷程

工區環境調查

地形調查

本工程邊坡以高精度光達數值地形赤色影像圖進行崩塌特徵判釋（圖 4），初步判釋結果發現數組早期發育之舊崩場地冠部邊緣，顯示本區域之邊坡具岩屑崩滑之歷史及潛勢。

本工程工址位於南投縣集集鎮及水里鄉之間沿台 16 線；鄰近河系包含南側緊鄰之濁水溪、北側之清水溪及數條野溪等。區域地形上屬一古沖積扇，研判應為古清水溪發育階段匯入濁水溪後，因地體抬升、河川下切遺留之高位階，整體地勢東高西低如圖 5。邊坡

底部高程約 E.L. 200 m，扇頂高程位於 E.L. 300 ~ 400 m 間；階地邊緣處因地表逕流冲刷、颱風或豪雨等緣故，常於冠部發育馬蹄狀崖坡，引致朝南向之坍塌事件，亦為本工程災害之緣由。

地質調查

經地質鑽探與地表地質調查成果，本工程細部地質平面圖詳圖 6。區內地層組成包含樟湖坑頁岩（Ce）、頭嵙山層（Tkh）及階地堆積層（t），並包含雙冬斷層剪裂帶貫穿。此外計畫亦位於山崩地滑敏感區，顯示地質條件複雜且極具不穩定性，對於隧道復建及邊坡整治工程極具挑戰。



圖 4 既有光達數值地形影像圖



圖 5 計畫範圍內水系圖

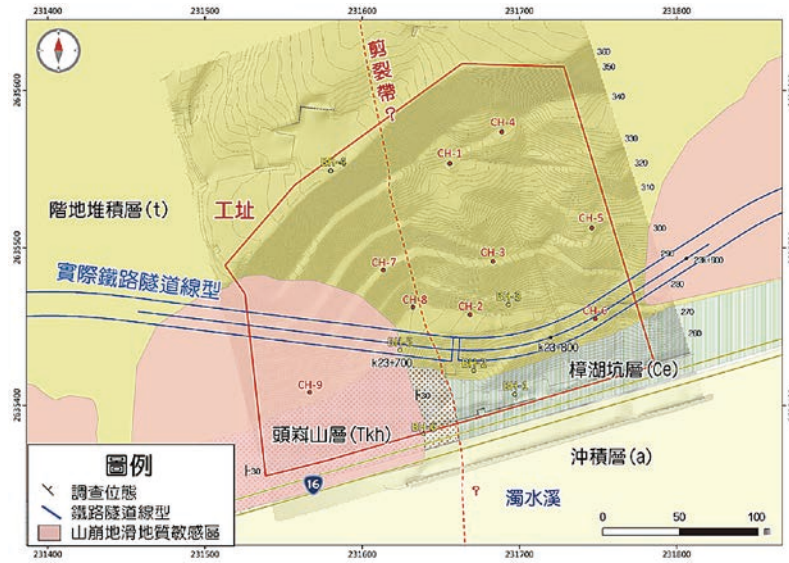


圖 6 細部調查區地質平面圖

計畫範圍內邊坡上方主要為階地堆積層，主要為表土、膠結不佳之礫石、岩塊與砂泥層，主要分布地表下深度約 0 ~ 10 m，厚度可達 20 ~ 60 m。堆積層下方則為岩層，主要包括邊坡西側的礫岩層及邊坡東側的砂泥岩互層，平均分布於地表下深度 10.0 m 以下。

礫岩層主要為膠結良好之礫岩夾砂岩，沉積物礫徑肉眼可辨，平均層理 20° ~ 30° 之間。而砂泥岩互層主要為灰色塊狀泥岩或粉砂岩所組成，不易有明顯層理，同於鑽探中發現剪裂帶與岩層擾動，整體相對破碎。依據上述調查結果，繪製地質剖面詳圖 7 及圖 8 [2]。

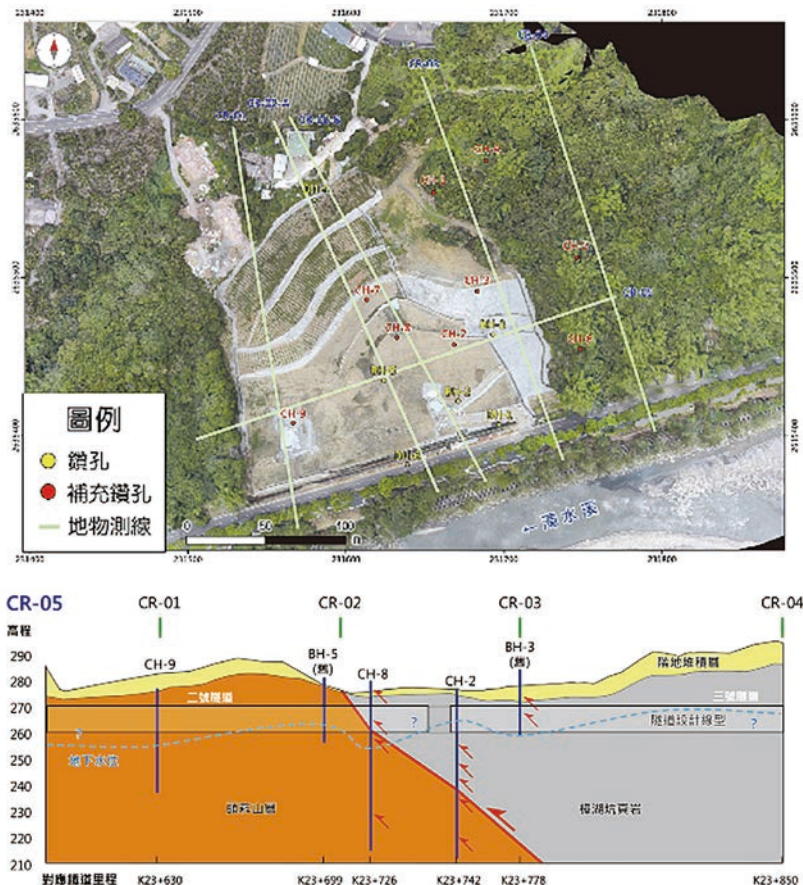


圖 7 剖面線配置(上)與細部調查區地質剖面圖(下)

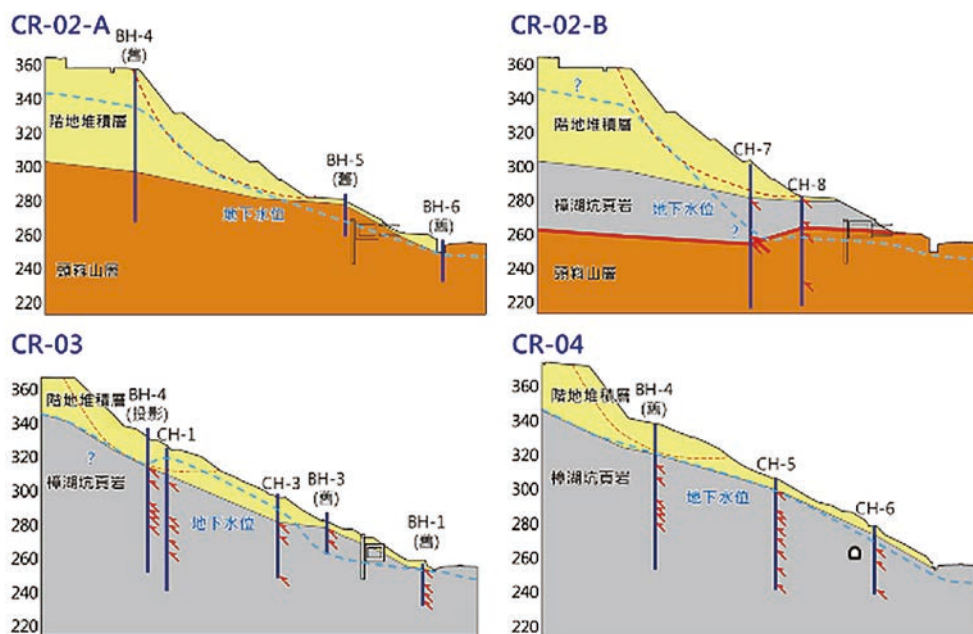


圖 8 細部調查區地質剖面圖

排水調查

經為了解坡面滲水及排水問題，進行工址上游集水區水文調查，並以 1/5,000 像片基本圖沿著等高線繪製集水區範圍（約有 15.25 公頃）如圖 9。本工址係沿永昌國小東側旁道路及前方道路（大坪巷）進行調查，確認集水區範圍及排水路現況，調查位置編號及現況相片與說明如圖 10，調查結果說明如下：

1. 上游集水區多以乾砌石構築平台栽種雜林或果園，沿路側溝為淺溝，溝內淤滿落葉。
2. 排水明溝主線，三面乾砌塊石，寬約 1.3 m × 高約 1 m，排水坡度約 8%，乾砌塊石易有入滲情形。
3. 排水明溝支線，三面乾砌塊石，寬約 0.8 m × 高約 0.6 m，並有破損情形，易有較大量入滲情形。
4. 末端乾砌塊石排水明溝不明顯，已被雜草與雜物覆蓋。



圖 9 工址上方集水區範圍調查位置



圖 10 工址上方集水區範圍調查現況照片

5. 道路（大坪巷）過路箱涵，寬、高各約 1.5 m，無明顯破損情形。
6. 道路（大坪巷）道路側溝，發現多處裂縫。

現場環境調查

本工址於 111 年 8 月現場環境調查，於 K23 + 800 ~ K23 + 845 處為局部原生植被與經濟作物覆蓋，已發育一系列西北－東南向之張力裂縫（詳圖 11），影響範圍向東延伸百公尺，顯示邊坡表層仍持續潛移，有潛在滑動之可能。



圖 11 發育（111 年）東側 K23 + 800 ~ K23 + 845 處多張力裂縫

邊坡崩塌及隧道受損調查及研析

經地表地質調查與岩心判釋結果，計畫工址岩層並無特別系統性之節理，僅 2、3 號隧道間於緊急搶修施工時於岩盤發現疑似剪裂帶存在，而岩心亦可發現深度 60 m 以下岩層受剪切擾動；依據地形測量結果，主要坍塌之滑動面呈現圓弧形，頂部坡面角度 80 度，漸次變緩為 50 度，依據原崩積物厚度推估，滑動面發育於階地堆積層之內，並未切穿岩土交界面，或位於岩土交界面上，坍塌災害之滑動面與既有剪裂帶並無直接關係。

對比計畫工址致災情形與現地邊坡位態調查資料研判，地表為厚層固結不佳之階地堆積層，由礫石、岩塊、砂土與風化土壤所組成，推估計畫工址邊坡潛在破壞型式包含：淺層岩屑崩滑與較深部圓弧形滑動破壞，為一複合式破壞，破壞型態詳如圖 12 [2]。

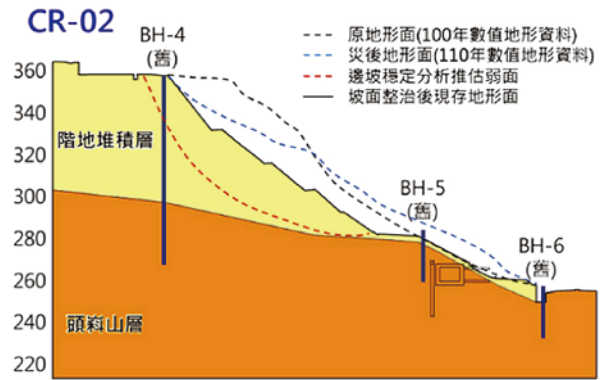


圖 12 推估邊坡滑動面

另觀察民國 110 年 8 月 14 日隧道襯砌環狀裂縫樣態，公路側噴凝土局部襯砌剝離；110 年 8 月 24 日隧道環狀裂縫變化加劇，兩側噴凝土襯砌大面積剝離，另於隧道山側岩栓佈設範圍亦有嚴重裂縫及襯砌剝離情形，規模可達 20 cm，如圖 13，研判為因邊坡坍塌推擠及隧道上方鬆弛覆土堆積導致，上方土壓荷重增加 2.5 ~ 3 倍（如圖 14），使隧道山側產生較嚴重大型裂縫與擠壓異狀；遂先於民國 110 年 12 月 ~ 112 年 6 月辦理 K23 + 720 ~ 745 明挖隧道工程施工（2 號隧道部分）；民國 111 年 5 ~ 8 月因豪雨於前期計畫範圍外 K23



圖 13 細部調查區地質剖面圖

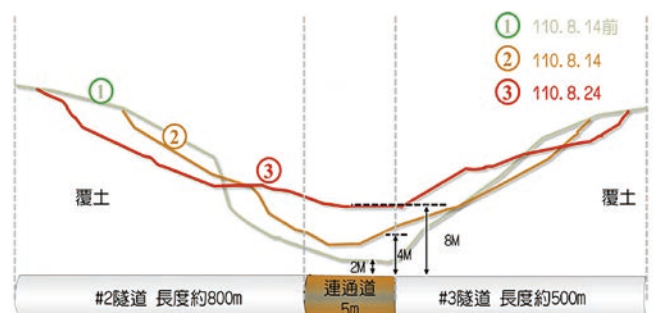


圖 14 隧道縱向覆土示意即發生機制

+ 745 東側邊坡發生坍塌土石侵入 3 號隧道 K23 + 745 ~ K23 + 800 產生嚴重擠壓及鋼支保破壞如圖 15，另於災後進入 3 號隧道調查（如圖 16），隧道里程 K23 + 800 ~ K23 + 845）發現多處裂縫及滲水。

綜上所述地形、地質、排水以及現場環境調查，研判本工址致災原因主要為地層層孔隙大、膠結差、地下水豐沛、坡面無保護，老舊隧道受坍塌側壓及堆積擠壓，使隧道受損破壞（如圖 17）。



圖 15 集集線 K23 + 745、K23 + 845 既有隧道受損斷面

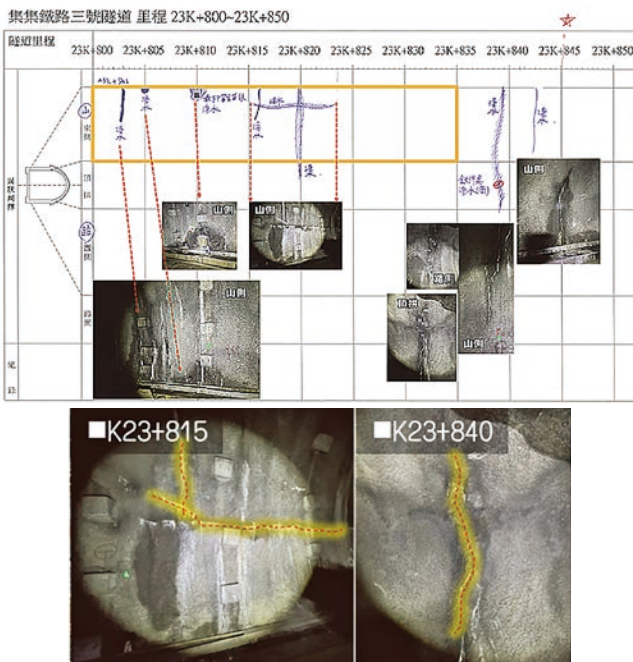


圖 16 K23 + 800 ~ K23 + 845 既有隧道異狀

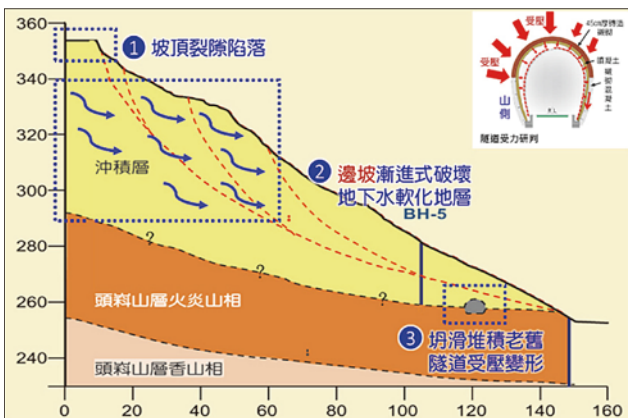


圖 17 災害肇因及機致

整治復建工程設計對策

整體施工規劃

本工程主體為集集線受損隧道重建，而其肇因為邊坡坍塌造成，因此除了重建隧道之外亦需整治其上邊坡，於最上邊坡先行施工穩固崩塌源頭及排除地表水及地下水，而後進行分階修坡及坡面保護，並於崩塌邊坡較穩固時，再進施作擋土排樁臨時擋土，採用挖覆蓋隧道進行隧道重建（詳如圖 18、圖 19）^[3]。

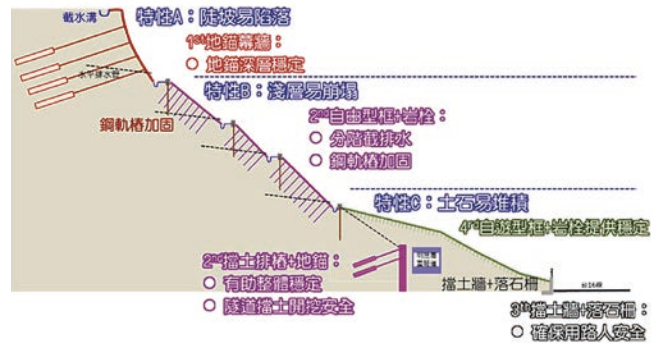


圖 18 工程剖面示意圖

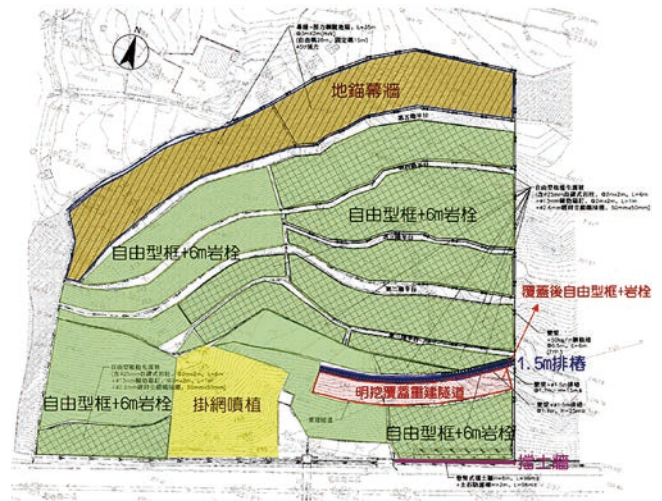


圖 19 工程規劃平面圖

邊坡整治工程

穩固崩塌源頭

本工址邊坡崩塌主要均於坡頂發生張力裂縫，地表水與地下水四處竄流，因水土壓力達臨界程度發生整體崩塌；因此針對崩塌源頭以地錨（L = 35 m）配合鋼筋混凝土幕牆進行坡頂附近垂直邊坡之保護，如此可有效穩固崩塌源頭。

地表水與地下水排除

本區地層屬崩積層，大部分膠結疏鬆，孔隙大且不均勻，除地表水冲刷坡面灌入張力裂縫增加額外驅

動力外，地下水自局部竄出侵蝕邊坡亦為破壞主因；因此邊坡整治除加強地表排水系統，配合邊坡分階佈設外，另增設水平排水管排除地下水，減少邊坡下滑驅動力，確保穩定性。

分階修坡與加固

前述之地表與地下排水系統，須配合修坡分階佈設，如此各階坡長可減少，亦可有效降低地表逕流冲刷力；另外各階平台可打設加固鋼軌樁並以繫梁連結，提升分階邊坡穩定之效益。

坡面有效保護

本區崩積層膠結疏鬆，坡面保護需達一定深度方得以增加其整體凝聚力，配合現地條件，建議以自由型框植生工法+岩栓進行坡面保護，可增加邊坡穩定性並可抵抗坡面冲刷；針對坡度較緩部分，建議以掛網噴植工法並加長錨錠鋼筋或佈設一定數量之灌漿錨筋，可有效增加坡面穩定性。

明挖隧道重建工程

隧道山側岩栓佈設範圍曾發現有 3~5 m 之橫斷大型裂縫及襯砌剝離情形，裂縫寬度達 3~6 mm 以上，於山側襯砌受擠壓剝離變位量可達 20 cm 情形（參見圖 13）。依日本道路協會分類，隧道已屬丙~丁之危險等級，另隧道襯砌為老舊磚造型式，由所發現之外部異狀推估，隧道應已有內部損傷，易於異常外力作用下造成安全威脅。

此區段隧道位處山崩與地滑地質敏感區，此次災害之肇因係因隧道上方邊坡土石滑落，隧道受邊坡滑動而受偏壓及土石堆積壓重，導致隧道變形受損及襯砌剝離。隧道結構由現況異狀研判屬不穩定之危險狀態，但採補修原有隧道結構已不易恢復且提升其支承力，加以裂損異狀有明顯加劇變化之不穩定狀態，宜做整體改善提升安全性後，始宜通車。

經評估本處將以新建明挖覆蓋隧道維持鐵路安全，明挖覆蓋新建隧道之施工，配合整地擋土後施工始，步驟如下：

- 步驟一、先行施築隧道上方之基樁擋土措施。
- 步驟二、基樁完成後配合降挖及移除隧道加固措施、逐階敲除既有隧道結構。
- 步驟三、第一階段降挖施作第一階段地錨背拉。
- 步驟四、第一階段地錨背拉完成再降挖及施作第二階段地錨背拉。
- 步驟五、第二階段地錨背拉完成後再降挖至預定高程及施作隧道結構及與舊隧道銜接。
- 步驟六、完成明挖覆蓋新建隧道後，再完成隧內管線處理與排水銜接至舊隧道，如圖 20。

本工址明挖覆蓋隧道規劃配合銜接前期內部淨寬 8 m，淨高 6.65 m，配置單一軌道，常時覆土 1.5 m，並以最大覆土高度 15 m 管控以維持隧道結構穩定及安全，如圖 21 [3]。

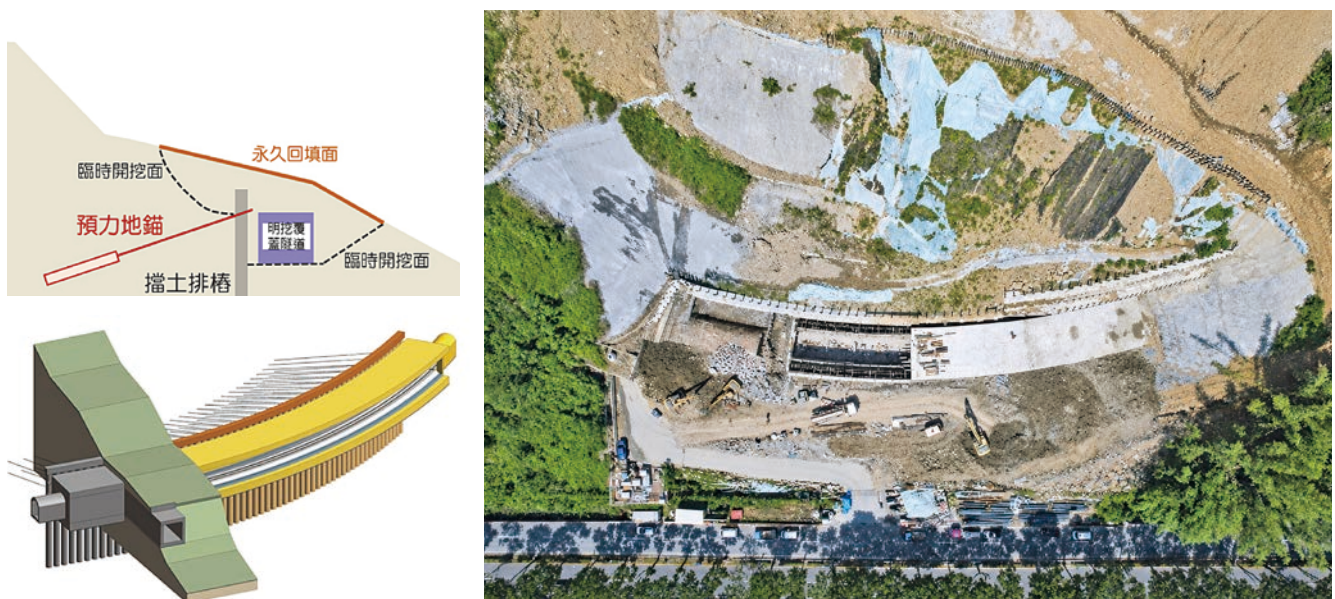


圖 20 明挖覆蓋隧道剖面示意圖（左上）、明挖覆蓋隧道 3D 示意圖（左下）、明挖覆蓋隧道 114.09.30（右）

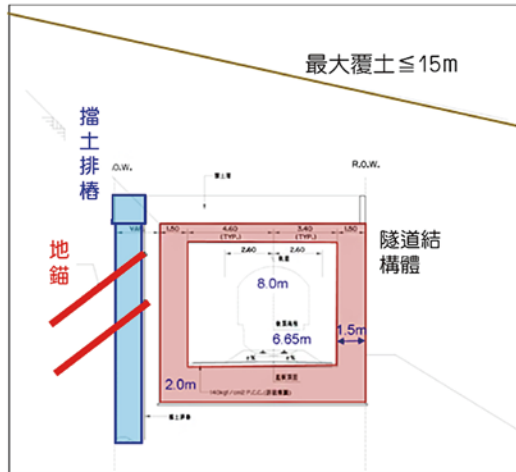


圖 21 隧道剖面示意圖

考量隧道結構防蝕，採用較高強度混凝土，水泥需符合施工規範第 03052 章規定之第 II 型水泥。

另工址位於南投縣集集鎮，依規定需考量活動斷層近域效應，鄰近有大茅埔－雙冬斷層為活動斷層，故最小設計水平地震力及垂直地震力將依規範考量反應譜之加速度係數。另隧道底版將採加厚方式以增加結構自重與底部之摩擦力，以提供地震時抗滑能力。

重建後之效益

工程與營運效益

本工程除了能透過重建隧道提升集集線整體的營運年限，更能實質帶動彰化至南投區間的鐵路客運與觀光效益。參考臺鐵公司民國 108 年（集集線停駛前一年）的各站運量統計，集集線全年上車人數旅客達 526,664 人次^[4]，足見其未來復駛後所能創造的經濟效益極為可觀。

過去集集線停駛期間，旅客與居民必須多花 15~20 分鐘在濁水站或集集站轉乘公路接駁車。全線直達通車後，每年將為通勤族與旅客省下累計達數萬小時的時間成本。同時，鐵路復駛能鼓勵民眾搭乘大眾運輸、減少自小客車出車架次，進而降低每年碳排放量，有助於落實淨零碳排與綠色經濟政策。隨著商圈復甦，地方社區將獲得自主資金來源，促進青年與在地居民回鄉就業，全面活化社區再生。

本工程除了達成隧道復駛之核心目標，亦同步完成該路段之邊坡整治如（圖 22），大幅提升鄰近台 16 線的邊坡穩定。台 16 線為

聯繫集集、水里及信義鄉之交通動脈，更是通往日月潭與玉山等重要景點的觀光門戶；本工程之邊坡整治，不僅有效降低土石災害風險，更實質提升了該重要幹道的整體用路安全與運輸韌性。

疏運管理目標的實現

本工程為配合「臺鐵集集支線基礎設施改善計畫一隧道及邊坡改善統包工程」之整體進度，積極協調並提早開放工作界面。在本工程團隊全力趕工下，順利於民國 114 年 10 月 28 日提前達成「明挖覆蓋新建隧道」之階段性里程碑。此項關鍵工程的提前完工，不僅有效推進了後續各項軌道、機電等整體工程的界面銜接，更為後半段全線通車奠定了基礎。隨著明挖覆蓋隧道的達陣與邊坡修復進入尾聲，台鐵已於民國 115 年 4 月 29 日派出由柴電機車牽引莒光號客車的試運轉列車，進行全線挺進終點車埕站進行路線測試。全力衝刺並落實於今年暑假旺季前（115 年 6 月 25 日）前全線通車之目標如圖 23。

結語

本工程針對臺鐵集集線 K23 + 720 ~ K23 + 845 路段因豪雨誘發之大規模邊坡崩塌及隧道損壞，透過高精度光達調查、地質鑽探、地球物理探測與水文分析，已精確掌握崩積地層之複合式破壞機制。在「穩固崩塌源頭、排除地表與地下水、分階修坡加固及明挖隧道復建」之主動防護



圖 22 本工程範圍邊坡整治施工前後對照



圖 23 明挖隧道完工臺鐵公司
鄭光遠董事長蒞臨指導

策略下，團隊成功克服了剪裂帶等破碎地質挑戰。特別是在汛期極端豪雨環境下，面對上方邊坡崩積層的巨大側向土壓力，團隊克服了明挖覆蓋隧道深開挖擋土之極高困難性與變形風險，結合鑽掘擋土排樁與高規格臨時地錨進行分階降挖加固，在動態變化的破碎地層中，達成「零工安意外」目標並提早交付工作界面。除全面提升鐵路支線之基礎設施韌性與營運安全外，更將為南投地區之觀光產業與交通活化帶來顯著效益。

誌謝

本工程之完成，仰賴臺灣鐵路公司專案工程處、以及臺灣鐵路公司嘉義施工隊、台灣世曦工程顧問股份有限公司、旭盛營造公司及各協力單位全體同仁之共同投入。於歷次颱風、地震及新發災害處置期間，各級主管持續提供必要支援與協調，對工程如期推進與順利完成具有關鍵作用，謹此致謝。

參考文獻

1. 聯合大地工程顧問股份有限公司（2008），集集線全線老舊隧道安全檢測及改善規劃設計工作現場檢測、資料處理判釋與安全評估報告。
2. 台灣世曦工程顧問股份有限公司（2024），集集線 K23 + 745 ~ K23 + 845 隧道受損重建工程（委託設計及監造部分）地質敏感評估報告。
3. 台灣世曦工程顧問股份有限公司（2023），集集線 K23 + 745 ~ K23 + 845 隧道受損重建工程（委託設計及監造部分）基本設計報告。
4. 國營臺灣鐵路股份有限公司（2019），中華民國 108 年各站客貨運起訖量。



臺北市政府捷運工程局
<http://www.dorts.gov.taipei>

地址：臺北市中山北路二段48巷7號
電話：886-2-25215550

廣告