



防災體系之實務成果

平溪線鐵路 邊坡崩坍 預警與復舊 及全線 災害熱區巡檢

連建智／國營臺灣鐵路股份有限公司宜蘭工務段 段長

賴泓羽／國營臺灣鐵路股份有限公司宜蘭工務段 技術員

林于超*／台灣世曦工程顧問股份有限公司鐵道工程部 工程師

郭觀豪／台灣世曦工程顧問股份有限公司鐵道工程部 正工程師

邱文峰／台灣世曦工程顧問股份有限公司鐵道工程部 副理

陳俊樺／台灣世曦工程顧問股份有限公司鐵道工程部 經理

歐文爵／台灣世曦工程顧問股份有限公司鐵道工程部 資深協理

李魁士／地新科技顧問有限公司 執行長

本研究針對平溪線支線鐵路，探討極端氣候強降雨下之邊坡致災潛勢，並建立科技防災維運管理機制。整合全線大範圍科技巡檢（包含 InSAR 微波遙測、地形開闢度分析）與現場長距離徒步巡檢，對軌道區、下邊坡及上邊坡進行全線構造物與地質之特徵診斷。針對高陡密林等傳統圖資難以判釋之區域，則利用 UAV-LiDAR 與手持雷射掃描（SLAM）技術，成功克服植生遮蔽並將地形模型解析度提升至公分等級，精準掌握潛在張裂隙與侵蝕溝分布。此外，依據歷史災損頻率與現場劣退化狀況，建置三級風險分級管理架構，其顯示平溪線歷史災害高達 68% 事故集中於冬季非汛期（10 月至 2 月）。最終，將評估成果導向實務應變處置，提出包含精準辨識、降低致災率、優化演練程序及落實預防性維護等四大效益，透過平時視覺化巡檢影像與科技巡檢資料之主動判釋，可作為維運單位採取防護工程之依據，對保障百年支線鐵路營運韌性與公共安全具備關鍵之實用價值。

前言

臺灣鐵路平溪線為單線非電氣化支線，全長 12.9 公里，自三貂嶺車站至菁桐站。沿線地質條件較為複雜，緊鄰基隆河谷地興建，部分路段下邊坡坡趾直接面臨河岸侵蝕威脅；且長期降雨等氣候因素，常有邊坡崩塌、落石等災害風險；加上通車逾百年、基礎設施老化，構成多重複合致災條件，不僅影響列車行車

安全與營運穩定，也對旅客生命財產及地方交通造成潛在威脅。2025 年 10 月受鋒面影響，連續降雨導致全線發生 10 處重大邊坡災害（詳圖 1），其中 K1 + 965 ~ K2 + 300 及 K9 + 820 ~ 920 兩處下邊坡路基流失，造成全線中斷。因此，建立完善之邊坡崩坍預警機制、強化災後復舊效率，以及推動全線高風險熱區巡檢作業，為平溪線鐵路維運管理的重要課題。

本計畫針對邊坡地質環境、歷史災害紀錄及既有設施現況進行整體盤點與分析，配合邊坡監測、現地巡

* 通訊作者，yuchao@ceci.com.tw



圖 1 平溪線 2025 年 10 月致災路段分布位置

查、三維模型建立等方法，於全線歷史災害熱區進行系統性診斷，藉以建立完整之邊坡現況資料與風險評估基礎，作為後續監測、維護及災害應變之重要依據，提升災害發生前之預防能力以及鐵路系統之韌性與安全性。

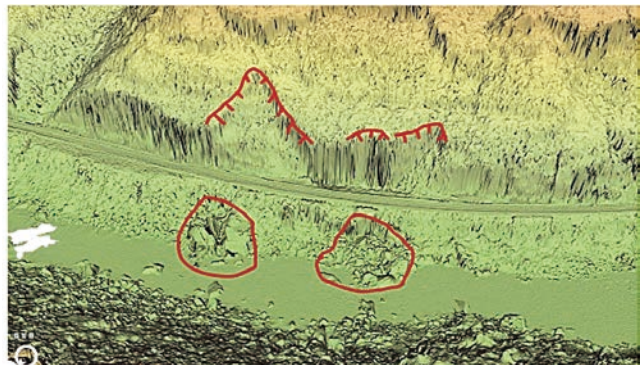
全線邊坡科技巡檢技術與診斷方法

影像測繪及分析

為全面掌握平溪線沿線邊坡地形特性與潛在災害風險，傳統邊坡巡檢主要仰賴人工目視檢查，但受限

於地形、視距及植生遮蔽等因素，對於高處邊坡及基隆河之下邊坡較難全面掌握。為提升巡檢效率、判釋精度及傳統人工巡檢之限制，本計畫採用 UAV-LiDAR 與手持式 SLAM-LiDAR 測繪作業（精度為 25 公分），針對鐵路全線熱區進行整體調查與空間資訊建置，詳圖 2。透過高精度、多視角之影像與三維地形模型分析，可有效辨識邊坡幾何特徵、裂縫分布等資訊，並可藉由不同時期資料及模型比對，分析坡面之位移、局部侵蝕等現象。

平溪線 K2 路段



平溪線 K9 路段

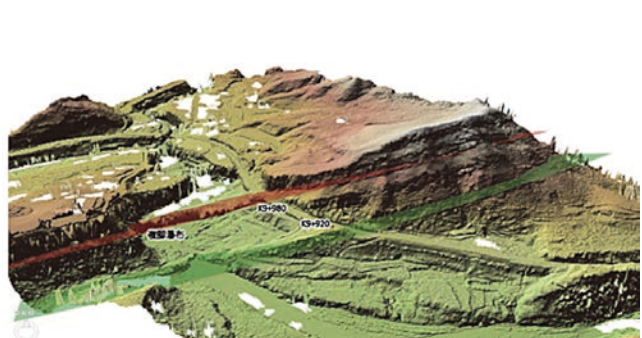


圖 2 影像測繪及分析成果

現地調查

本計畫所採用之 UAV-LiDAR 測繪及 SLAM-LiDAR 測繪作業，其精度雖較於傳統空拍影像高，但仍難以有效辨識僅有數公分至毫米等級之細微構造特徵。因此，對於上邊坡潛在崩落風險之精確評估，仍有賴專業地質技師進行近距離現地調查。現地調查採徒步巡檢方式進行（詳圖 3），雖然作業期程較長，但能全方位辨識如構造裂隙、異常滲水等微小變異。巡檢過程中，團隊針對各災害點逐一記錄災況並量測規模，同時詳查地質條件（如岩性、節理與風化程度）與既有防護設施（如擋土牆、排水系統）之現況，亦評估復舊工程進度與品質，藉此綜合研判致災原因及潛在風險，作為提出後續改善建議之可靠依據。



圖 3 平溪線徒步巡檢之照片

地質災害潛勢診斷

針對平溪全線地質災害，可藉由「臺鐵邊坡科技巡檢（1期）」所建置之基本圖資，搭配本計畫全線現場巡查成果，進行災害潛勢診斷。上述圖資包含衛星影像、地形坡度、地質圖、InSAR 活動度、地形開闊度等（詳圖 4），各圖資判讀目的及風險指標如表 1 所示。透過各項圖資之綜合分析與現地調查成果比對，可進一步掌握沿線邊坡之地形特性、地質條件及災害潛勢，評析各路段之潛在風險等級，作為常態化監測追蹤機制建立之依據，以提升整體邊坡安全管理效能。

表 1 診斷圖資類型及判讀目的彙整表

圖資類型	主要判讀目的	高風險指標
衛星影像	地表現況、植生異常	裸露地、植生稀疏帶
地形坡度	邊坡陡峭程度	坡度 $> 55^\circ$
地質圖	岩性與構造弱面	砂頁岩互層、斷層帶
InSAR	地表長期活動性	持續位移暖色區
地形開闊度	細部地形特徵	侵蝕溝、崩崖、凹陷地
歷史災害	重複致災潛勢	多次紀錄、規模擴大

平溪線全線邊坡致災潛勢與風險分級成果

歷史災害紀錄

統計 2021 年 10 月至 2026 年 4 月間，平溪線全線共計有 67 處歷史致災路段（表 2）^[1,2]，包含 2025 年 10 月致災的 10 處重點路段。這 67 處災害點涵蓋各種類型，包括落石、崩塌、路基流失、擋土牆破壞等，顯示平溪線全線普遍具有邊坡災害潛勢。

由歷史災害分布可知，部分路段具有重複致災特性，且災害規模呈擴大趨勢，反映該區地質條件較為脆弱，或既有邊坡防護與排水設施效能不足。多數災害屬小規模落石或淺層崩塌，崩落量多為數立方公尺以內，通常僅造成列車短暫停駛，經搶修後即可恢復通車。綜整歷史災害資料顯示，重複致災路段具有明顯集中性與再發潛勢，可作為後續邊坡監測、災害預警及熱區巡檢之重要依據。

邊坡致災因子剖析

平溪線高風險路段之共同特徵，主要源於地質條件險峻與既有設施老化。鐵路依傍基隆河谷興建，兩側緊鄰坡度超過 55 度（紅色區域）的砂頁岩互層高陡邊坡，不僅頁岩易風化軟化，砂岩發達的節理與構造更易引發落石及楔形崩塌（詳圖 5）。而多數災害發生

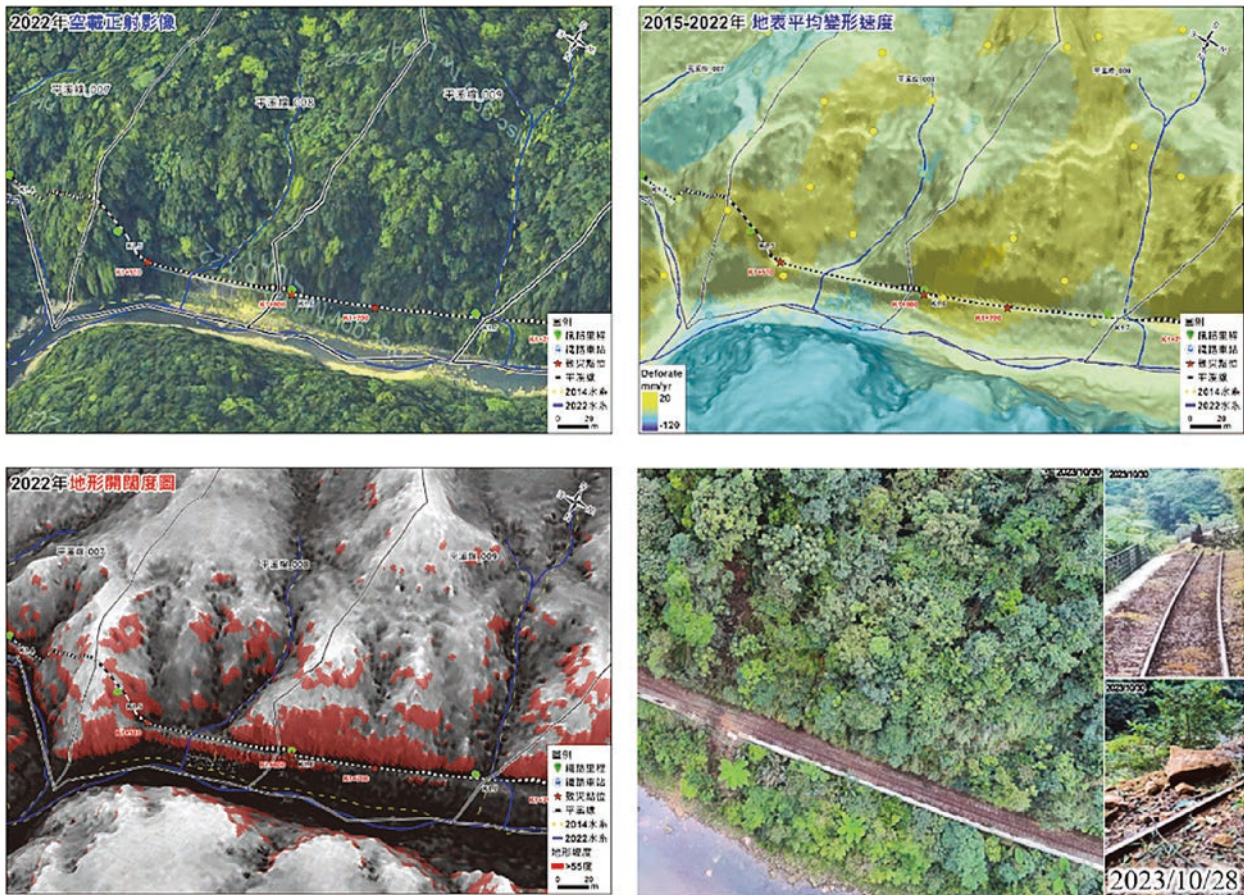


圖 4 平溪線潛在災害之資料蒐集及判釋

表 2 平溪線歷史災害事故路段（2020～2026 年）

1)	K0+220	16)	K2+390	31)	K5+100	46)	K9+980~990	61)	K11+900
2)	K0+350	17)	K2+500	32)	K5+130	47)	K10+000	62)	K12+070
3)	K0+510	18)	K2+600	33)	K5+230~245	48)	K10+030	63)	K12+365
4)	K0+610	19)	K2+850	34)	K5+586	49)	K10+250	64)	K12+370
5)	K0+680	20)	K2+900	35)	K5+670	50)	K10+300	65)	K12+375
6)	K1+000	21)	K3+400	36)	K7+100	51)	K10+350	66)	K12+660
7)	K1+305	22)	K3+450	37)	K7+650	52)	K10+550	67)	K12+700
8)	K1+510	23)	K4+100	38)	K7+720	53)	K10+615	68)	
9)	K1+600~700	24)	K4+150	39)	K7+770~860	54)	K10+670	69)	
10)	K1+750	25)	K4+350	40)	K8+400	55)	K10+700	70)	
11)	K1+800	26)	K4+500	41)	K8+700	56)	K10+750	71)	
12)	K1+900	27)	K4+670	42)	K8+950	57)	K10+800	72)	
13)	K1+965~K2+100	28)	K4+750	43)	K9+680	58)	K10+900	73)	
14)	K2+260	29)	K4+800	44)	K9+920~980	59)	K11+200	74)	
15)	K2+300	30)	K5+050	45)	K9+970~980	60)	K11+400	75)	

藍色為 2025 年 10 月事故路段；2021～2026 年間共計 67 路段

於 10 月至翌年 2 月，雖非颱風汛期但東北季風帶來持續性降雨，使邊坡長期處於高含水狀態；加上現場排水溝普遍遭淤土與植生堵塞，軌道草滋生，地表逕流無法有效排除，大幅削弱了路基與邊坡的穩定性。此外，沿線重力式、漿砌卵石等擋土牆已出現老化、開裂與排水不足等問題，顯見既有設施已不敷現況防災

需求。最後，沿線茂密的植生遮蔽了坡面，導致傳統人工巡檢難以察覺潛在的危岩與裂隙，增加了邊坡災害判釋的困難。綜合上述，平溪線地形高陡、地質脆弱、排水失效及設施老化，未來應將重複致災路段列為巡檢之優先評估區域。



圖 5 平溪線三貂嶺至菁桐全線 LiDAR DEM 地形坡度圖

潛在風險路段判釋與邊坡分級成果

邊坡分級管理依據風險程度及優先處理之急迫性，將全線邊坡區分為三級管理（詳表 3）：

- 第一級（高風險）：包含 K1 + 600 ~ 700、K1 + 965 ~ K2 + 300、K8 + 400、K9 + 920 ~ K9 + 980、K10 + 800 附近路段。此類路段具下邊坡路基流失或重複大型落石紀錄，應列為優先整治對象；其中 K1 + 600 ~ 700 上邊坡料源多，且為大尺寸巨石，臺鐵已發包採掛網保護，建議進行專案地質調查，並建立自動化監測系統全年運作。
- 第二級（中風險）：包含 K4 + 100 ~ K5 + 245、K7 + 600、K8 + 700 等路段。具重複落石紀錄但規模較小，建議每半年進行 UAV 測繪比對，並於雨季、颱風季節前後加強人工巡檢。
- 第三級（低風險）：其餘歷史災害路段，建議納入年度常態巡檢，並建立異狀通報機制。

災害熱區工程復舊設計與施工實務

復舊工程限制條件與分階段施工規劃

本復舊工程面臨極其嚴峻之工期壓力與營運環境限制。平溪線鐵路因 114 年 10 月 22 日望古至嶺腳間（K9 + 920 至 K9 + 980）發生下邊坡嚴重坍滑與軌道路基流失，以及 10 月 24 日三貂嶺至大華間（K1 + 965 至 K2 + 300）發生下邊坡坍滑造成軌道沉陷，導致全線實施停駛。為降低對地方民生疏運與觀光產業之衝擊，本案必須克服山區多雨之惡劣氣候，全力於 115 年 1 月 31 日前恢復通車，以因應農曆年節之疏運需求。於僅有約三個月之工期限制與緊鄰基隆河谷之狹窄腹地內，本案採取分階段、由上往下之施工程序進行規劃^[3]：

1. 第一階段（上邊坡既有人工構造物與軌道復原工程）
- 因應下邊坡坍滑引發之路基流失與軌道沉陷，本階段重點為穩定上邊坡軌道區域，藉此避免荷重加劇邊坡之漸進式破壞及災害範疇持續擴大。團隊採取「由上往下」的施工程序，優先於軌道與臨軌側進行

表 3 平溪線全線邊坡風險分級彙整表

風險分級	關鍵里程範圍	災害特徵概述	管理作為
第一級 (高風險)	K1 + 600 ~ 700、K1 + 965 ~ K2 + 300、K8 + 400、K9 + 920 ~ K9 + 980、K10 + 800	路基流失、 重複巨石災害 (大規模)	列為優先整治對象，並建立自動化監測全年運作。
第二級 (中風險)	K4 + 100 ~ K5 + 245、K7 + 600、K8 + 700	重複落石災害 (小規模)、 岩屑崩滑	每半年 UAV 測繪比對，雨季、 颱風季節前後加強人工巡檢。
第三級 (低風險)	其餘歷史災害路段	尚無明顯惡化徵兆	納入年度常態巡檢、建立異狀通報機制。

關鍵防護設施、地表逕流導排與路基回填，以確保上方軌道基礎之穩定與行車安全，使鐵路得以在最短時間內具備通車條件，達成過年前通車之目標。

2. 第二階段（下邊坡穩固坡址工程）

上方鐵路正式恢復通車後，不影響列車營運、利用非通行時段之有限腹地內，由下邊坡進行穩固坡趾、區域導排系統之防護工程，以抑制潛在剪切破壞面之發展，確保全線邊坡之長期安全。

復舊工程設計方案與挑戰克服

本案於設計階段運用高精度 UAV-LiDAR 測量成果建置公分級三維數值地形模型，並透過二維極限平衡分析與有限元素分析軟體，進行災害機制反算與邊坡穩定評估，以驗證崩塌行為並研擬最適復舊方案。分析結果顯示，本災害屬下邊坡失穩引致之路基支承流失問題，潛在滑動面已延伸至軌道基底下方，致使路基承載能力顯著降低，需採深層基礎結構進行穩定處理（詳圖 6 與圖 7）。另工址鄰近基隆河谷地形，受地形條件限制，施工腹地狹窄，無法採用傳統重力式擋土構造物，且大型施工機具亦缺乏進出及迴轉作業空間，致使工程設計與施工規劃面臨高度挑戰。

K9 路段（望古－嶺腳間）

A. 設計與施工限制條件：

本路段坍滑深度較大，路基流失嚴重，考量滑動面承載力不足，設計排除高自重重力式結構，以避免增加

坡體負荷造成二次滑動。此外，既有聯外道路狹窄，大型施工機具無法進入，施工須配合軌道拆除及動線調整。

B. 工法與限制因應方案：

第一階段（軌道下方基樁式懸臂擋土牆），施工前協調居民及地主採臨時借道方式解決機具進場問題。為快速恢復路基承載能力，於軌道下方設置基樁式懸臂擋土牆，牆高約 5 至 6 公尺，基礎採三排直徑 80 公分基樁梅花型配置，並嵌入穩定岩盤至少 3 公尺，以提升抗剪及抗傾覆能力。施工採螺旋鑽工法及 H 型鋼抗剪構件，以因應狹小腹地施工限制；另導入毛細式透排水帶及水平排水管設施，主動排除坡體內部之地下水，降低孔隙水壓對邊坡穩定之影響。

第二階段（下邊坡階梯式擋牆與坡趾排樁），恢復通車後，於下邊坡續建第二道基樁式擋土牆，並於坡趾增設擋土排樁，形成多層防護系統，以提升坡腳支撐能力並抑制深層滑動發展。同時設置橫向排水設施及豎向排水溝，完善地表逕流收集與導排機制，降低雨水沖刷及坡趾掏刷風險，提升邊坡長期穩定性。

K2 路段（三貂嶺－大華間）

A. 設計與施工限制條件：

本路段臨軌側坡面陡峭且緊臨基隆河，下邊坡呈現漸進式破壞特性，邊坡穩定風險較高。另因該區無既有道路可供進出，施工機具及材料須仰賴鐵路運輸進場，施工條件受限。

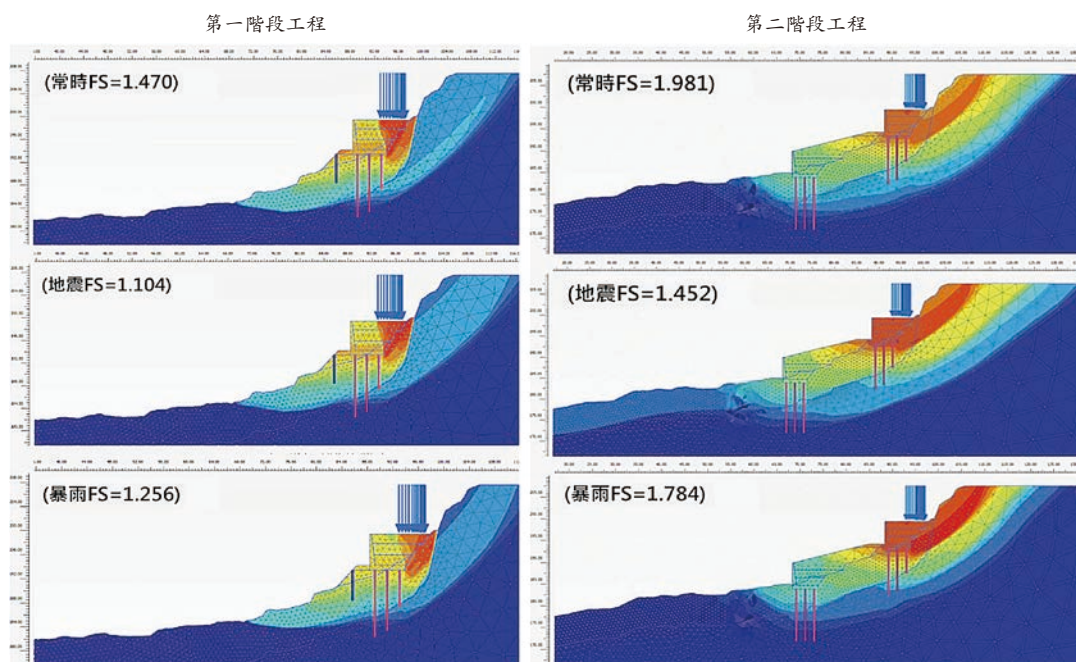


圖 6 平溪線 K9 路段邊坡穩定分析成果

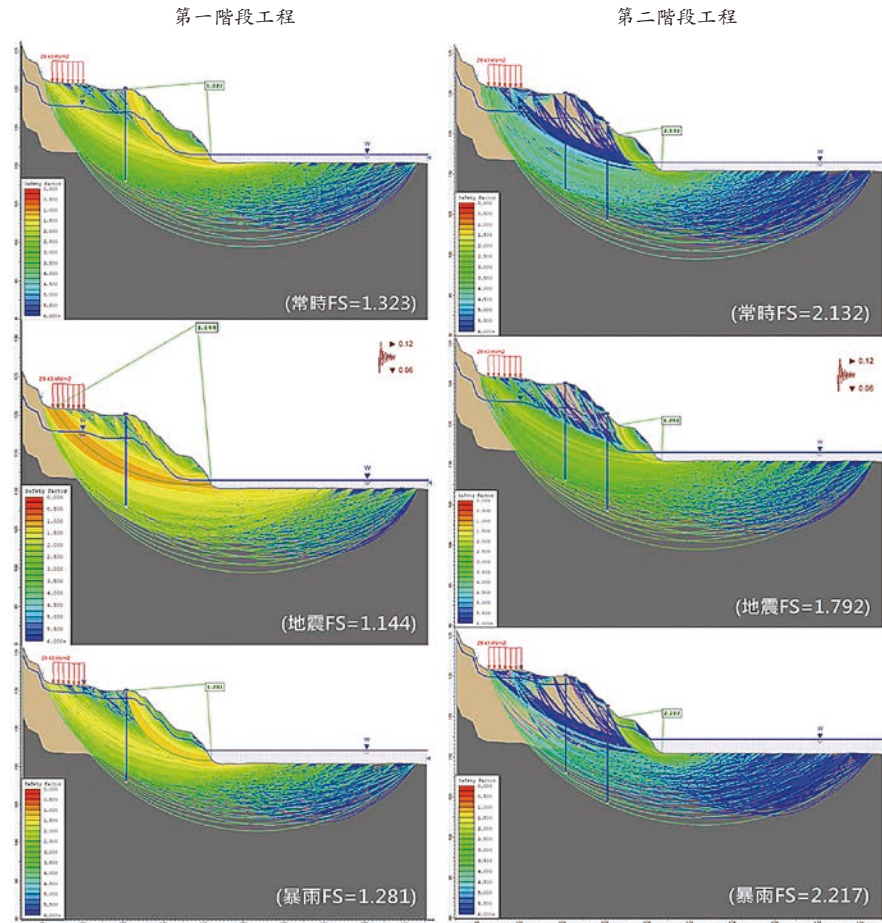


圖 7 平溪線 K2 路段邊坡穩定分析成果

B. 工法與限制因應方案：

第一階段（臨軌側第一道排樁工程），考量工區無道路可達，施工機具與材料先運送至大華車站鄰近空地集結，再以軌道板車駁運至工址；運輸過程嚴格管制設備外緣與隧道建築界限，以確保既有設施安全。針對下邊坡坍塌造成之軌道沉陷問題，優先於臨軌側施作第一道擋土排樁，採螺旋鑽掘工法施工，並以 H 型鋼抗剪構件取代傳統鋼筋籠，在受限腹地快速建立側向支撐能力，控制軌道及路基變位，防止土體持續滑移，確保搶通作業順利完成。

第二階段（下邊坡臨基隆河之排樁工程），全線恢復通車後，於下邊坡增設第二道擋土排樁，並施作繫梁及橫梁系統，與第一道排樁帽梁整體連結。藉由雙排樁及橫向連結構造形成整體受力系統，有效抑制深層滑動面發展，降低邊坡漸進式破壞風險，提升坡體長期穩定性及營運安全。

自動化監測與營運安全驗證機制

考量本案工址鄰近營運線且施工腹地受限，於 K2

及 K9 災區之臨軌側人工構造物設置電子式傾斜計，搭配無線傳輸模組進行即時監測，並依分析成果建立警戒值及行動值，以掌握復舊結構物及下邊坡長期穩定性。以 K9 路段 115 年 2 月 1 日至 5 月 2 日監測資料為例（詳圖 8），各測點傾斜變位均穩定維持於 0° 附近，歷時曲線未見突發性變位或累積性滑移趨勢，且監測值皆低於設計警戒值，顯示復舊結構具良好整體剛度與穩定性能，有效確保通車後營運安全。

沿線邊坡科技預警判釋與實務應變效益

鑑於平溪線鐵路部分路段具重複致災特性，且在極端氣候強降雨下災害規模呈擴大趨勢，本案建立主動式預警機制，利用高精度 UAV-LiDAR 地形掃描、步踏巡檢與歷史災害資料進行多維度整合，於災前優先判釋潛在致災路段（詳圖 9），並導出關鍵問題，其關鍵實務效益如下：

1. 辨識潛在在不穩定區域：整合地質條件、歷史災損與高精度 UAV-LiDAR 地形資料，建立邊坡資訊管理架構，作為後續評估與決策之依據。

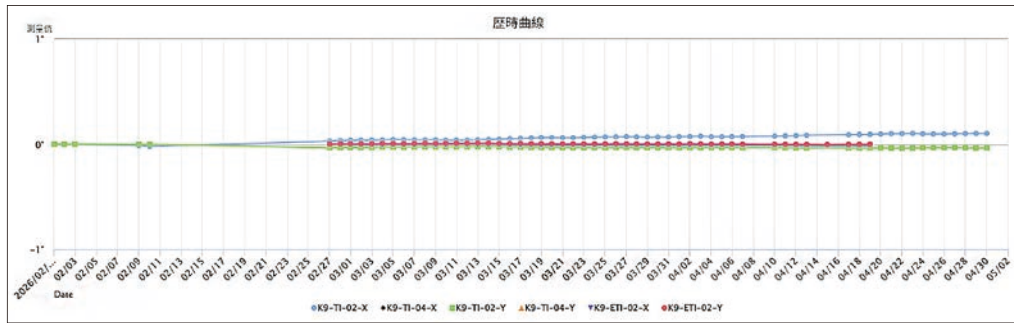


圖 8 平溪線 K9 路段電子式傾斜計監測圖 (115/2/1 ~ 5/2)

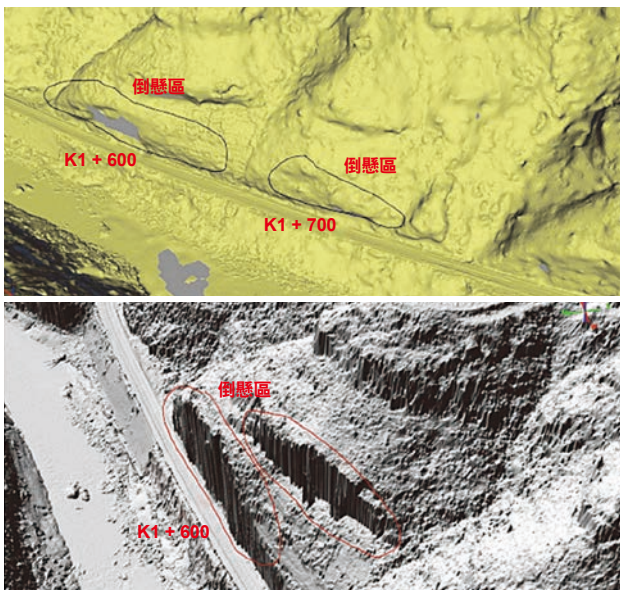


圖 9 高精度 UAV-LiDAR 邊坡產出成果與倒懸辨識成果 (K1 + 600 ~ K1 + 700)

2. 降低突發性大規模致災機率：透過自動化監測與定期巡查互補，可及早掌握坡面裂縫發展、地下滲水或落石跡象等異常徵兆，提早進行預警處置，避免災害擴大。
3. 優化流程並提升復舊效率：建置標準化緊急應變程序，並適時辦理全線邊坡災害演練（涵蓋通報、列車疏散、鄰軌搶修），確保維運單位熟稔程序，提升資源調度與搶修效率。
4. 落實平時巡檢與預防性維護：透過建立常態化巡檢紀錄制度，落實動態影像與現場拍照資料蒐集，引導管理單位掌握設施設備劣化狀況並及時進行小規模修繕，達到主動式預防維護、延長設施壽命之目的。

結論

1. 平溪線鐵路邊坡之主動式預警與災害熱區巡檢，是營運管理與科技防災結合的實務展現。利用高精度 UAV-LiDAR 地形掃描與定期巡檢建立之風險

判釋，不僅能實質提升支線鐵路的營運韌性，亦可作為後續山區鐵路邊坡治理之技術參據。

2. 有鑑於臺鐵宜蘭工務段長期落實巡檢紀錄制度，透過現場影像及資料蒐集，建立完整之資料庫。雖巡檢作業具例行性與繁複性，惟其累積第一線視覺化資訊，為災害研判、風險評估及後續決策提供重要依據，有效提升鐵路營運之安全管理。
3. 透過沿線長距離徒步巡檢與現地調查，掌握極端氣候作用及高陡破碎地質環境下之邊坡變化，發現既有防護設施因長期受環境作用而逐漸降低防護能力。面對複雜地形與潛在災害風險，建立「災前風險判釋」機制，成為推動預防性維護與提升鐵路防災韌性之重要目標。
4. 平溪線歷史災害高達 68% 集中於冬季非汛期的特殊時間分布特徵，主管機關、營運單位及技術顧問，透過科技手段掌握異狀並及時採取防護工程作為，這份對品質的盡心付出與積極處置，是對支線通勤居民與觀光旅客安全最實質的保障，謹藉本文向所有默默堅守在鐵路邊坡第一線的營運與巡檢人員致敬。

誌謝

本計畫之完成，感謝國營臺灣鐵路股份有限公司工務處與國營臺灣鐵路股份有限公司宜蘭工務段之指導與支持，仰賴新北市應用地質技師公會、地新科技顧問有限公司、台灣整合防災工程技術顧問有限公司及台灣世曦工程顧問股份有限公司等全體同仁之共同投入。

參考文獻

1. 國營臺灣鐵路股份有限公司，「平溪線歷史災害紀錄統計表（2021 ~ 2025 年）」。
2. 台灣整合防災工程技術顧問有限公司，「平溪線邊坡定期巡檢與監測年度報告（2022 ~ 2025 年）」。
3. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，「臺鐵邊坡科技巡檢計畫（1 期）成果報告」，交通部臺灣鐵路管理局委託，2023 年。