



預警及聯防機制

鐵路邊坡 土石流監測與 災害預警告警系統建置及成效

李冠宏／國立高雄科技大學鐵道技術中心 專案經理

張旭廷／國立高雄科技大學鐵道技術中心 工程師

張簡嘉壬*／國立高雄科技大學鐵道技術中心 主任

近年受極端氣候影響，臺灣地區強降雨、颱風及地質災害發生頻率顯著增加，對鐵道運行安全造成潛在威脅，尤以鄰近軌道之邊坡區域最易受土石滑動、土石流及異常崩塌等災害影響，因此亟需建置完善之安全監測與預警告警機制。本研究建置之鐵路邊坡土石流監測與災害預警告警系統，其主要目的在於即時監測可能危及列車運行安全之環境異常狀況，透過即時偵測與預警分析機制，掌握鐵路沿線潛在災害風險。該系統整合多元感測器網路、資料蒐集分析平台及通訊傳輸技術，可持續監測沿線雨量、風速、水位、土石流活動及異物入侵等關鍵環境參數，並透過智慧化判斷與告警邏輯，於災害發生前或初期即時發布警示訊號，提供行車調度單位迅速採取應變措施。系統之建置可有效提升鐵道災害預警能力，強化行車安全防护機制，降低災害事件對鐵道營運造成之衝擊。

前言

地質災害以土石流、崩塌及滑坡最為常見。崩塌好發於陡峭坡面，主因岩塊鬆脫引發垂直墜落；滑坡則受地震或降雨驅動，沿滑移面產生位移。土石流則是高含水量的泥石混雜物，具備強大衝擊力與流速。這類災害具備高度關聯與連鎖效應，尤其在強震使地層鬆動後，若遭遇豪雨或颱風極易產生大規模複合型災害，因此成為地災監控系統的重點對象^[1]。2024年4月3日，花蓮近海發生芮氏規模7.2強震，強震不僅全台有感，更是自921大地震以來台灣面臨的最大規模地震，導致東部山區地質高度鬆動。隨後，在氣候變遷引發的降雨型態改變下，東部地區陷入了嚴峻的複合式災難循環。同年

6月21日，受季節性降雨影響，花蓮和仁隧道南口發生土石流。台鐵229次自強號因土石淹沒軌道避讓不及，導致列車出軌並造成人員受傷。此事件顯示，震後鬆動的土石在一般降雨下即具備高度危險性。同年7月25日，凱米颱風由宜蘭登陸，短短4小時內預估累積雨量達歷史新高的1800毫米。即便已有前車之鑑，極端雨量仍重創東部鐵路，崇德至和仁段，軌道遭大規模土石流掩埋。基礎設施損毀，小清水鐵路橋樑（K56+650）遭沖毀，八掌溪橋（K306+714）南橋台路基嚴重掏空。進入秋季，地質不穩定的狀況在颱風連番打擊下更形惡化，山陀兒颱風於9月底緩慢侵襲，滯留時間長達4天，並為基隆等地帶來破紀錄的日雨量。康芮颱風10月底由台東登陸，花蓮局部降雨量破千毫米。根據中央災害應變中心統計，全台災情累計破萬件^[2]。

* 通訊作者，ccjr@nkust.edu.tw

鐵路邊坡災害告警系統之重要性在於確保行車安全並降低營運風險。由於鐵路列車具備高速行駛及煞車距離長之特性，當發生異物入侵或邊坡崩塌時，僅依賴人工目視巡查往往無法及時完成列車煞停或應變操作。鐵路邊坡土石流監測系統之建置重點在於「預防性監測」與「即時性告警」。此類系統可視為一種分層式（hierarchical）之系統架構，其核心目標在於縮短災害辨識至營運應變之時間延遲。系統通常由前端感測資料擷取、中端通訊傳輸與後端分析決策三個子系統所構成，各子系統之可靠度與即時性將直接影響整體預警能力與系統反應時間^[3]。

在前端配置上，感測器佈設強調空間代表性與關鍵位置覆蓋，例如潛在集水區出口、坡腳及既有弱面區域，以提高對局部異常之敏感度。不同於單點量測思維，近年系統逐漸朝向線性或區域型監測（如分布式感測技術）發展，使得沿線變化可被連續捕捉，降低因地形複雜所造成之監測盲區。通訊層面則需兼顧即時性與穩定性，特別是在山區環境中，常透過低功耗廣域網路或中繼傳輸機制確保資料不中斷。資料傳輸延遲與遺失率，為影響預警可靠度之關鍵因素，因此系統多設計備援路徑與斷線緩存機制，以維持關鍵資訊之完整性。

在後端分析部分，監測系統逐步由傳統經驗門檻判斷，轉向結合時序分析與機率模型之風險評估方法。透過長期監測資料建立基準行為模式（baseline behavior），可辨識異常偏移並進行趨勢外推，進而提供更具有前瞻性之預警資訊。此外，系統亦可與鐵路營運控制平台整合，將監測結果直接轉化為行車限制條件或自動化警示訊號。值得注意的是，系統設計需考量維護性與環境適應性，包括感測器耐候性、供電穩定性及設備可及性等因素。若缺乏長期穩定運作能力，即使監測技術先進，亦難以在實務上發揮效益^[4]。

綜合而言，鐵路邊坡土石流監測系統之發展已由單一參數觀測轉向整合式、智慧化之架構，其關鍵在於空間佈設策略、通訊可靠度及資料解析能力之協同優化，以支援高效率且低延遲之營運風險管理。

問題分析與對策

土石流對邊坡之破壞機制問題分析及對鐵路營運之風險特性

邊坡破壞引發土石流之過程，可視為由顆粒骨架

控制之固體力學行為，逐步演化為受固液耦合作用支配之流變行為。當降雨入滲坡體後，雨水進入土體孔隙，使基質吸力降低，並在排水不良條件下導致孔隙水壓上升將降低有效法向應力，進而降低土體剪力強度。依據 Terzaghi Effective Stress Principle 及 Mohr–Coulomb 破壞準則，土體抗剪強度將隨有效應力降低而下降。當坡體內部剪應力超過峰值抗剪強度時，將產生初始滑動或淺層崩塌。其後，在高含水率條件下，鬆散崩塌體可能因剪切軟化及超額孔隙水壓之生成，使有效應力逐步降低，進而轉變為具類液化特徵之流動行為。進一步演化為具黏滯與慣性特徵之土石流運動。其有效應力形式可由 Mohr–Coulomb failure criterion 表示^[5-7]：

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$$

τ_f ：破壞剪應力（kPa）

c' ：有效凝聚力（kPa）

σ' ：有效法向應力（kPa）

ϕ' ：有效內摩擦角

此理論主要用以描述土壤或岩體在法向應力與剪應力共同作用下之剪切破壞條件。由此可知，降雨強度、累積雨量及坡體孔隙水壓變化均為影響邊坡穩定性之重要因子。此外，坡腳侵蝕造成之局部支撐削弱，可能導致上部坡體再次失穩，形成連續性崩塌與持續供料現象，進而構成正回饋機制，使災害規模逐步擴大。此機制說明邊坡破壞與土石流形成具有高度耦合性，其演化過程常呈現非線性增長特徵。綜合而言，邊坡破壞演化為土石流之主要機制，可歸納為降雨入滲造成土體強度衰減、內部結構劣化導致顆粒重排與破碎，以及質量夾帶與坡體幾何回饋所引致之動力放大效應，其整體行為可視為多物理場耦合之非線性演化系統。土石流對鐵路營運之影響具有顯著之系統性與鏈結性。由於鐵路系統屬高度線性基礎設施，局部區段受災即可能造成路網服務能力下降，形成拓撲脆弱性。此外，土石流造成之道床污染、排水淤塞及坡體局部變形等隱性損傷，可能在後續降雨或列車動載重作用下逐步累積，進而演變為顯著失效。由於降雨與地質條件具有高度空間異質性，傳統固定閾值式預警模式往往難以準確反映各路段實際風險，易產生誤警或漏警情形。再者，土石流亦可能導致電力、通訊及號誌等附屬設施失效，進一步擴大營運風險^[8]。

台鐵軌道邊坡高風險路段預警告警系統建置規劃

綜上所述，土石流對鐵路營運之風險不僅表現為瞬時之物理性破壞，亦涉及系統脆弱性、結構損傷累積效應、決策不確定性及跨系統相依性等多重層面，其本質可視為隨時間與空間動態演化之複合型風險問題。為因應此類複合型風險，本中心建置一套鐵路邊坡土石流監測與災害預警告警系統，應用於台鐵軌道邊坡高風險路段，以提升邊坡災害即時辨識能力及整體營運安全韌性（參見圖 1）。

成果說明

土石流監測與災害預警告警系統建置

本中心建置之鐵路邊坡土石流監測與災害預警告警系統，整合多元感測器網路、資料蒐集與分析平台，以及通訊傳輸技術，可即時且持續監測鐵路沿線雨量、風速、水位、土石流活動及異物入侵等關鍵環境參數。系統透過智慧化分析與告警判斷機制，能於災害發生前或初期即時發布預警訊號，提供行車調度單位迅速掌握現場狀況並採取適當應變措施。於台鐵軌道邊坡高風險路段建置之相關設施及成果，說明如下：

建置項目	建置成果	說明
各式偵測器安裝施工		風速計：將空氣流動速度轉換成可量測的物理訊號，用來分析風的強弱與流動狀態。 雨量計：將降雨量轉換成可量測的物理數據，用來分析降雨強度與累積雨量。 水位偵測器：將液面高度轉換成可量測的物理訊號，再提供監測或控制使用。
傾斜偵測器安裝施工		傾斜偵測器：將物體相對重力方向的傾斜角度轉換成可量測的訊號，當物體傾斜時，感測元件與重力的相對方向會改變，用來判斷設備是否偏移、傾倒或角度改變。
阻隔設施安裝施工		阻隔設施：網狀結構設計可穿透或半穿透的阻隔面，限制特定物體通過。當土石撞擊時，網體會產生拉力，變形，傾倒。
高解析監視器安裝施工		高解析監視器：透過遠端監看地表與環境變化，判斷土石流發生的可能性與運動狀態，並提供預警資訊。
監控系統		監控系統：透過多種感測、資料傳輸、分析判斷與告警機制的整合，持續監測土石流形成條件與流動狀態，以達到預警、防災與災害管理目的。監控系統架設於花蓮工務段值班室。

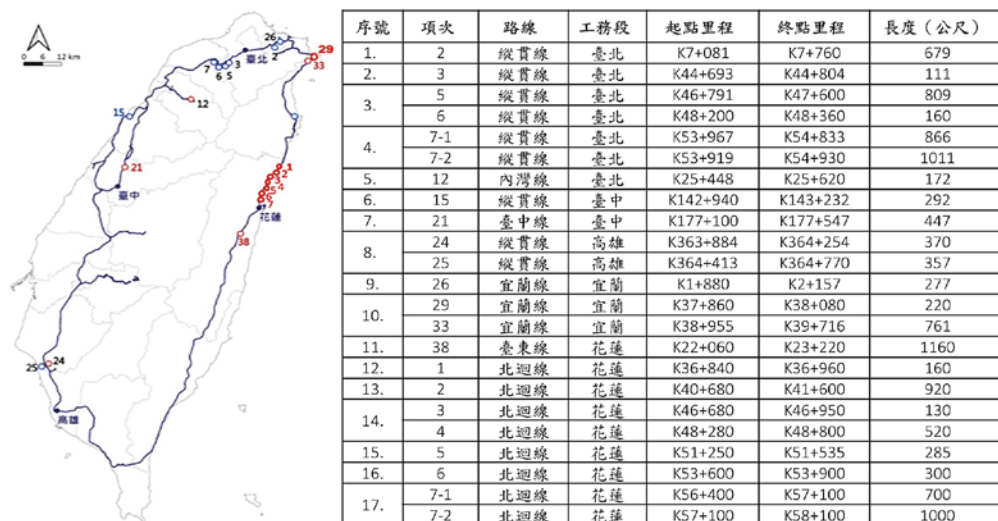


圖 1 鐵路災害預警告警系統全台分佈路段位置(引用台鐵資訊)

告警系統建置成效

2025 年 5 月 18 日，花蓮山區因持續降雨影響，導致大清水鐵路路段發生土石流災害並造成軌道淹沒。由於該區域已預先建置土石流告警系統，本次事件中系統成功發揮預警功能，使各級列車得以及時採取防護措施並提前迴避受災路段，避免進入災區而造成行車事故與人員及設備損傷。如圖 2 所示，於 16:07:18 可觀測到土石泥流開始衝擊坡面；至圖 3 之 16:08:37，



圖 2 大清水 K51 實況監視(16:07:18)



圖 3 大清水 K51 實況監視(16:08:37)

短短約 1 分 19 秒內，土石泥流即迅速漫流並入侵鐵道路線，造成鐵路運輸中斷。圖 4 為監控系統記錄水位感測器之監測結果，顯示於 16:07:55 水位快速上升並觸發告警訊號，並於 16:08:07 確認土石流已衝擊橋面結構。圖 5 為台鐵工務段值班室監控畫面，左上角顯示即時雨量資訊，左中區顯示即時水位變化，左下區顯示風速與風向資訊，中間區域為即時監視影像畫面，而中間下方及右下方則分別顯示阻隔設施與防護網之狀態資訊。整體監控系統可整合多源感測與影像資料，提供即時災害判斷與決策支援功能。

車輛及異物入侵告警系統建置

本中心延續「土石流監測與災害預警告警系統」之建置經驗，持續推動全台灣島鐵路網高風險路段之「車輛及異物入侵告警系統」建置工作。首先由各工務段盤點轄區路線資料，針對鄰近軌道區等可能發生車輛及異物入侵之高風險路段進行評估，並據以規劃優先設置阻隔設施之位置與範圍(參見圖 1)。

建置目標

針對各優先設置路段之地形環境、鄰近設施及潛在風險特性，選擇適當之阻隔設施型式，並於適當位置配置告警設備，以提升異常事件之即時偵測與通報能力。異物入侵為鐵路運輸系統行車安全的重要危害因子，可能導致列車撞擊、設備損壞及營運中斷等事故。因此，本研究以防止車輛及異物入侵軌道區為核心目標，透過阻隔設施與告警系統之整合建置，有效降低環島路網高風險路段之風險等級，進一步提升臺鐵整體行車安全與營運韌性。

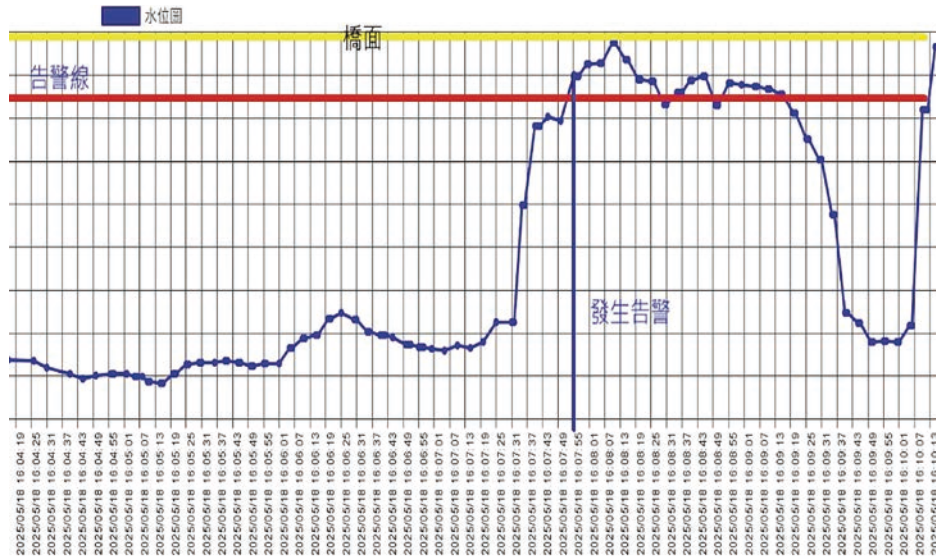


圖 4 水位偵測曲線圖



圖 5 花工段值班室土石流監控系統

系統架構

本研究之系統架構參見圖 6，主要功能設施包含圍籬設施、路側終端設施、封包交換網路及中心系統平台。系統透過封包交換網路，將多處路側終端設備連接至中心系統平台，形成集中監控與管理架構。中心系統平台可依據營運需求下達控制指令至各路側終端設備，以執行設備控制、參數設定及功能管理等作業；另一方面，各路側終端設備亦可將設備運作狀態、告警資訊及監測結果即時回傳至中心系統平台，供後續監控、分析與決策使用。透過上述架構，系統可有效整合現場感測、告警通報及集中管理功能，提升車輛及異物入侵事件之監測能力與應變效率，進而強化鐵路沿線高風險區段之行車安全。

透過路側設備與中心系統平台之整合運作，可建立完整之車輛及異物入侵偵測、告警傳輸、事件管理

及設備監控機制（參見圖 7），以達成降低車輛入侵風險及提升鐵路行車安全之目標。

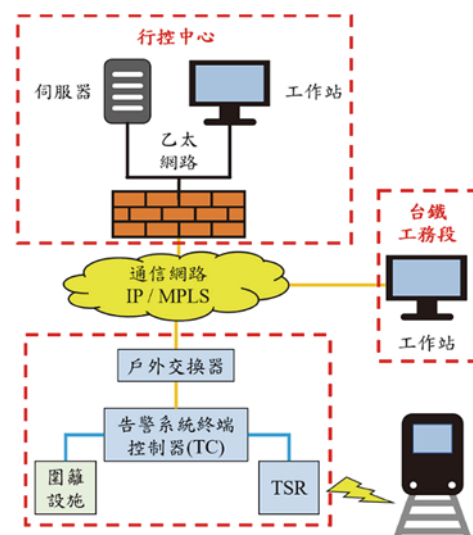


圖 6 車輛及異物入侵阻隔設施及告警系統架構圖



圖 7 車輛及異物入侵告警監測系統

長官實地視察情況

由於本系統達到有效告警作動，並降低災害發生的風險，圖 8 為 2024 年 7 月 23 日前台鐵－杜董事長蒞臨大清水 K51 工地現場視察，圖 9 為 2026 年 4 月 23 日台鐵鄭董事長陪同行政院工程會陳政務委員及各級長官，於花蓮工務段值班室視察土石流監控系統運作情況。圖 10 為 2025 年 12 月 23 日交通部廖副司長及各級長官實地視察告警系統架設安裝。



圖 8 前台鐵－杜董事長蒞臨大清水 K51 工地現場視察



圖 9 台鐵鄭董事長陪同行政院工程會陳政委視察



圖 10 交通部廖副司長及各級長官視察

結論

本研究建置之鐵路邊坡土石流監測與災害預警告警系統，透過整合多元感測器監測技術、即時資料蒐集分析平台及通訊傳輸架構，已具備對鐵道沿線環境異常狀況之即時監測與預警能力。系統可針對雨量、風速、水位、土石流活動及異物入侵等關鍵環境參數進行持續監測，並依據預設告警邏輯與風險判定機制，即時發出告警訊號，提供行車調度單位迅速採取應變處置之依據。實際應用結果顯示，本系統可有效達成預警告警作動，提升災害異常事件之即時辨識能力，縮短應變反應時間，並於災害發生前提供關鍵預警資訊，有效降低邊坡災害對鐵道運行安全造成之風險。同時，系統透過連續監測與資料分析，可作為鐵道沿線邊坡健康狀態評估與風險管理之重要依據，強化鐵道防災管理機制。此外，本系統之建置除提升鐵道營運安全性外，亦有助於降低因天然災害造成之行車中斷、設備損壞及維運成本，進一步提升鐵道系統整體韌性與可靠度。

參考文獻

1. D.M. Cruden and D.J. Varnes (1996). "Landslide types and processes," in Landslides: Investigation and Mitigation, Transportation Research Board Special Report 247, National Research Council, Washington, DC, USA.
2. O. Ghorbanzadeh et al., (2022). "Landslide4Sense: A benchmark dataset for landslide detection," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.
3. S.J.O. Hung, S. Leroueil, and L. Picarelli (2014). "The Varnes classification of landslide types, an update," Landslides.
4. H.K. Kim and C.Y. Choi (2018). "Failure Evaluation Method for a Slope Monitoring System," International Journal of Transport Development and Integration, Vol. 2, No. 3, pp. 298-309.
5. R.M. Iverson (1997). "The physics of debris flows," Reviews of Geophysics, Vol. 35, No. 3, pp. 245-296.
6. B.M. Das (2018). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Boston, MA, USA: Cengage Learning.
7. J.M. Duncan and S.G. Wright (2005). Soil Strength and Slope Stability. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons.
8. Y. Yan et al. (2019). "Monitoring and early warning method for rockfall along railways," Scientific Reports. 



阿里山森林鐵路42號隧道
第24屆金質獎土木類優等



花蓮箭瑛紀念大橋
第21屆金質獎土木類優等
第14屆金安獎優等



南化複線-南化至左鎮送水管(二)段-送水管
南化複線-南化至左鎮送水管(二)段-聯通管(併案)
第25屆金質獎水利類佳作



利德工程股份有限公司
RAITO ENGINEERING CORPORATION

橋梁	隧道
水利	港灣
土木建築	地盤改良
邊坡穩定	結構補強



10047
臺北市中正區館前路20號9樓
TEL:886-2-2311-8772
FAX:886-2-2311-5625



RAITO