

GeoPORT 2.0：數位科技整合技術應用於山區公路防災預警系統

楊哲銘 國立臺灣科技大學營建工程系 / 副教授
 趙韋安 國立陽明交通大學土木工程學系 / 副教授
 黃韋凱 中興工程顧問社 / 正研究員
 藍彥林 中興工程顧問社 / 研究助理
 邱家吉 國立臺北科技大學材料及資源工程系 / 副教授
 翁孟嘉 國立陽明交通大學土木工程學系 / 教授
 林銘郎 國立臺灣大學土木工程學系 / 教授

林承翰 國立陽明交通大學土木工程學系 / 博士後研究員
 張睿明 國立陽明交通大學土木工程學系 / 博士後研究員
 李璟芳 創聚環境管理顧問股份有限公司 / 經理
 柳鈞元 創聚環境管理顧問股份有限公司 / 工程師
 黃明萬 中興測量有限公司 / 業務副總經理
 郭治平 國立雲林科技大學營建工程系 / 副教授

摘要

臺灣山區道路經常受颱風、豪雨與地震影響，邊坡崩塌與土石流災害頻傳，對交通運輸安全、居民生命財產與搶救災害工作構成嚴重的威脅。為提升山區公路邊坡災害偵查能力與降低風險，本研究團隊第一期（2020～2023）執行國科會災害防救科技創新服務方案—「道路邊坡災害資訊蒐集整合模擬暨研判系統發展」計畫，建立道路邊坡災害事件資料庫，整合現地調查、即時監測、遙測資訊與數值模擬分析，並將重大案例分析結果公開於社群平台，如 Facebook 社團：工程地質野外教室 -GeoRocker、社團法人中華民國地質學會【工程地質研究會】與公開網頁 <https://jatestrella.github.io/GeoPORT/> 提供參考，協助主管機關進行決策與應變。目前本研究團隊工作目標已進入第二期（2024～2027）執行國科會防災科技方案—「數位科技整合技術應用於山區公路防災預警系統」計畫，目標為開發一套可視化圖層與時序監測資料的網頁平台，欲建立臺灣山區公路邊坡災害之系統化資料庫，更透過智慧化監測平台實現道路邊坡災害之主動管理，對山區公路交通防災具有重要意義。

一、前言

臺灣山區地形陡峭以及颱風豪雨與地震頻繁，導致地表侵蝕速率高，並且斷層褶皺密集使地表地質材料脆弱，因此山區道路邊坡崩塌與落石事件屢見不鮮。傳統大地工程以災後修復為主的方式降低崩塌機率，或利用沿線調查找出潛在危險之坡面，仍無法避免突然發生之落石或無明

顯徵兆之崩塌，對於山區用路安全與災害防治的需求上，尚有改善之空間。本團隊 GeoPORT 自 2020 年以來，進行重大山區路段崩塌事件之調查、機制分析、數值模擬用於探討致災原因，並嘗試提供建議之防災處置策略，然而，仍處於事後諸葛的階段，因此，對於事前提出告警或提前掌握可能發生崩塌之時間，應如何透過監測技

術、資料整合與預警平台，實現道路邊坡的主動管理，成為 GeoPORT 2.0 之重要課題，第一期團隊、系統與發布成果之稱謂設計是以 Geohazard 和 Report 縮寫合併為 GeoPORT，而第二期強調平台的建立，而此平台著重於觀測資訊（監測數據）、報告快速自動生成、並對災害歷史熱區與其持續變化之追蹤，故仍維持 GeoPORT，但 PORT 各代表四個重要因子之字首，分別為：平台（Platform）、觀測（Observation）、報告（Report）、追蹤（Tracking）。

二、GeoPORT 工作團隊與專長背景

本節介紹 GeoPORT 團隊之成員與背景，計畫自 2020 年啟動，由國立臺北科技大學邱家吉副教授、國立陽明交通大學翁孟嘉教授、趙韋安副教授、張睿明博士、林承翰博士、國立臺灣大學林銘郎教授、國立聯合大學楊哲銘副教授及中興工程顧問社研究員黃韋凱、李璟芳、柳鈞元、徐文杰等單位成員組成跨領域合作團隊。計畫核心目標為建立道路邊坡災害資料庫，並發展監測、告警與決策支援平台，協助主管機關加強災害防減能量。

團隊成員專長涵蓋無人機測繪、地質調查、微地動分析、InSAR 遙測分析、數值模擬等，當重大災害發生後，檢視微地動自動辨識系統之報告，確認災害位置後工作啟動便快速整合既有情資（地形、地質、歷史影像、街景、相關

文獻與報告等），蒐集鄰近地區之近期降雨資料與地震紀錄，遙測分析搜尋災前變化之可能前兆，安排現勘由無人機測繪取得災後地形與地貌，地質調查則詳細觀察崩塌現象推估崩塌原因，同時持續蒐集新聞與社群網路之災害第一時間畫面與崩塌過程影片，提出地質模型（地表調查結果與地質剖面圖），描述災害過程與破壞機制，利用數值模擬重建或進一步分析後續可能之災害，提供相關單位防救災之可能建議。

三、第一期計畫成果（2020～2023）

邱家吉副教授為第一期計畫總主持人，主要負責安排與協調團隊工作，而第一階段重點在於建立道路邊坡災害事件資料庫，整合歷年崩塌案例、現地調查、航攝影像。同時開發了初步的 GeoPORT 系統平台雛型，提供災害案例查詢與檢索功能。另透過數值模擬分析典型崩塌案例，釐清災害觸發機制，為後續監測與預警奠定基礎（邱家吉等，2022）。第一期公開發布之分析案例共 8 件（表 1），圖 1 為目前累積 GeoPORT 公開發布分析案例之分布情形。

四、第二期計畫內容（2024～2027）

第二期由楊哲銘副教授擔任計畫總主持人，主要負責工作協調與掌握進度，團隊目標除了持續進行 GeoPORT 災害調查報導之外，發展場址型和路段型之山區公路防災預警系統平台，以北橫

表 1 重大災害事件報導

災害發生時間	災害地點位置	災害類型	文章著作
2020 年 6 月 12 日	臺 8 臨 37 便道 22.5K 崩塌	傾覆破壞	Weng <i>et al.</i> 2022
2020 年 12 月 4 日	臺鐵猴硐崩塌（新北市）	岩層滑動	楊哲銘等人，2022
2021 年 6 月 30 日	苗 62 線清安聯絡道路 2.3K 落石（苗栗縣泰安鄉）	巨石崩落	Yang <i>et al.</i> 2022
2021 年 8 月 7 日	玉穗溪土石流與明霸克露橋斷橋事件	大規模崩塌與土石流	Yang <i>et al.</i> 2022; Shiu <i>et al.</i> 2022
2022 年 2 月 20 日	臺 8 臨 37 線 17K 落石事件	巨石崩落	Yuen <i>et al.</i> 2023
2022 年 9 月 14 日	臺 7 線 49.8K 崩塌	岩屑崩滑	
2022 年 10 月 2 日	臺 7 線 49.7K 崩塌	岩屑崩落擴大	張等人，2024
2023 年 1 月 11 日	臺 9 線 153.9K 落石崩塌	巨石崩落	
2024 年 6 月 3 日	臺 2 線 70.1K 崩塌	岩體崩塌	
2025 年 5 月 12 日	苗 62 線清安聯絡道路 2.3K 落石	巨石崩落（再次發生災害）	
2025 年 5 月 18 日	大清水溪土石流調查	20240403 花蓮地震後降雨誘發土石流	

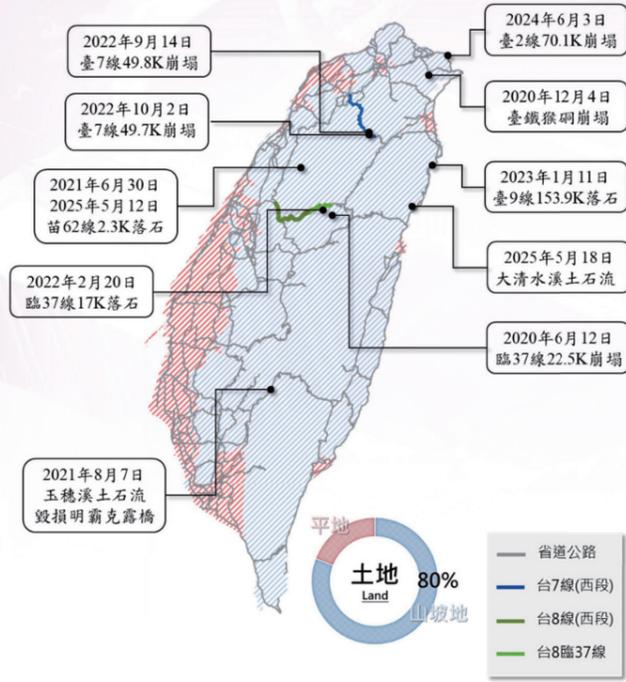


圖 1 GeoPORT 公開發布之分析案例

大曼崩塌（北橫台 7 線 49.7K，圖 2）作為測試區，如前期所使用之調查與分析方法執行地形與地質調查、無人機測繪、InSAR 遙測分析、數值模擬，並透過數位化防災整合技術之導入平台，提升公路防救災效能，進一步強化公路韌性管理，確保公路的長期穩定運作。第二階段計畫著重於監測與預警系統之實際應用，在北橫大曼崩塌場址設置微地動測站（荷蘭 SENSOR Nederland 三軸向 Geophone 與德國 DiGOS Potsdam GmbH 低功耗率數據紀錄器）與 GNSS 地表位移監測站（圖 3），並利用微地動偵測之落石訊號評估可能影響公路之程度，以及配合地表位移、雨量、地震等觀測資訊，提供公路管制放行之評估依據；中橫便道架設多部微地動站，以即時掌握區域路段邊坡活動與變化，提供管制通行車隊與巡查車相關資訊，以了解將通過之路段狀況。即時監測數據可透過平台即時更新，未來將嘗試設定門檻值分級告

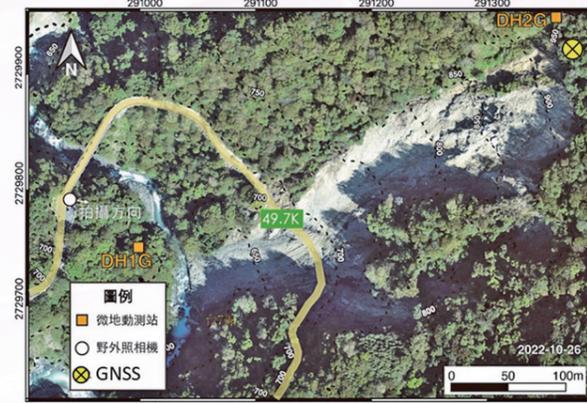


圖 3 大曼崩塌地監測儀器布設

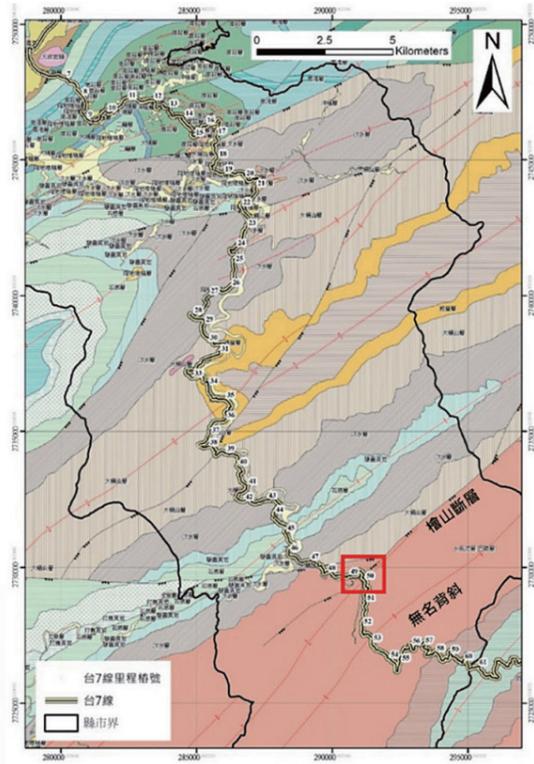
警機制，提供公路局中區分局更具體之決策資訊參考。第二期公開發布之分析案例目前共 3 件（如表 1 與圖 1），其中臺 2 線 70.1K 崩塌之 GeoPORT 快速報導作為公路局災後評估參考。

第二期計畫之出發點為公路局將災害歷史與不穩定徵兆作為判斷依據，並透過「定量分級管理制度」及「科技巡檢」篩選出「優先關注邊坡」來制定針對性的巡檢方式與頻率，將養護作為從「被動整治」提升到「主動預防」的層面（陳進發，2018）。轄下分局也訂定出公路防災預警系統，謹慎地由災害各階段（災前、災中、災後）並研擬出對應之防災決策與因應作為，本計畫亦提出對應災前、災中、災後之技術（圖 4）。災前可藉由 InSAR 分析進行廣域熱點篩選與變異偵查，災中則利用即時微地動訊號與 GNSS

位移了解場址之用路安全狀況，災後可透過現地調查與數值模擬評估邊坡狀態和潛在威脅。

五、北橫大曼崩塌案例分析

由前期光學影像蒐集後，針對大曼崩塌地之地貌變遷進行分析，依據調查成果的時間順序，逐步探討坡體變化的演進過程，並分析各階段崩塌機制與影響因子，進而勾稽前後期調查結果，建立完整的時序變化脈絡。2010 年至 2018 年之間變化如圖 5 所示，從 2010 年小規模的樹冠孔隙變異，2014 年發展出蝕溝，2016 年擴大為崩塌，之持續擴大面積再逐漸復育。至 2022 年 9 月再次發生坡體破壞之狀況，故開始透過多次無人載具空拍影像與數值地形模型分析，對坡體地形變異進行詳細分析，並進一步掌握坡體破壞之量體變化，相關分析結果與影像（圖 6）過程如下所述，2022 年 9 月至 2022 年 11 月期間，受梅花、南瑪都、尼莎等颱風與外圍環流引發多次崩塌事件（圖 6(a)）造成 143,654 m³ 的土石流失；2023 年 4 月至 5 月間，單次崩塌（圖 6(b)）即造成 117,941 m³ 的土石流失，為該區近年來最大規模的坡體變動事件。直至 2024 年 9 月整體邊坡整治後經觀測結果顯示（圖 6(c)），雖然坡體仍有零星變異，但大規模滑移情形相對減少，近期崩塌土石損失量維持在 1,382 m³ 以內，顯示坡體雖有變化，但近期坡面上不穩定土石量已有減少。



(a)



(b)

圖 2 (a) 台 7 線路段流域地質圖（介接自地礦中心山崩雲 WMTS），紅框為大曼場址；(b) 大曼崩塌地全景照片

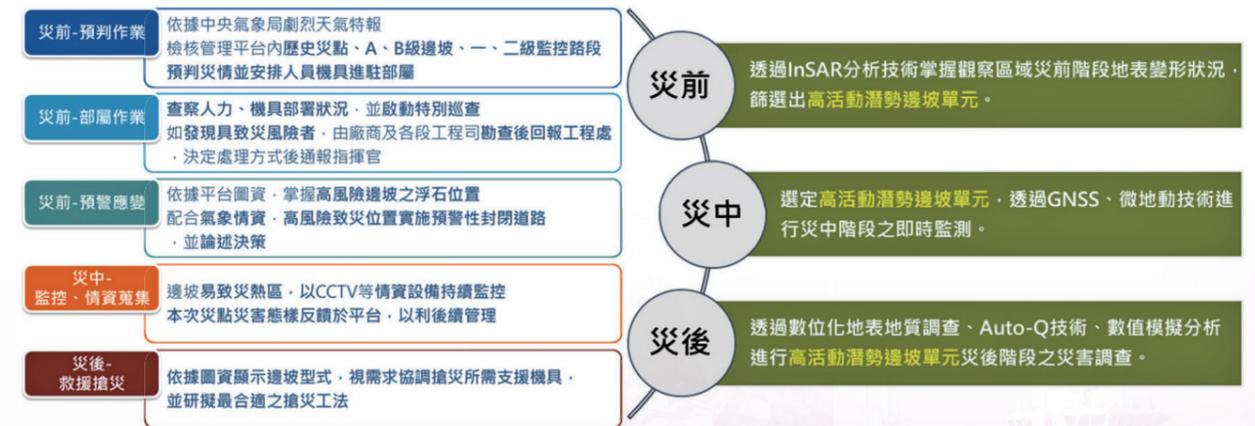


圖 4 公路防災預警系統與因應作為關係圖

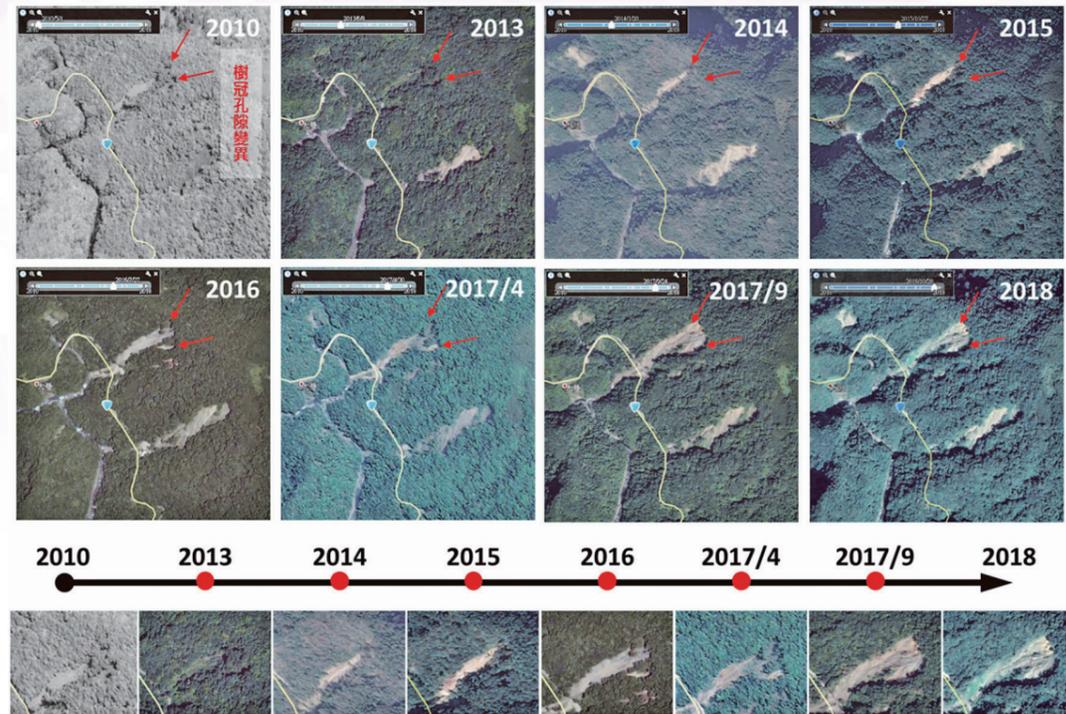


圖 5 大曼崩塌路段 2010 ~ 2018 年間 Google Earth 衛星影像判釋成果

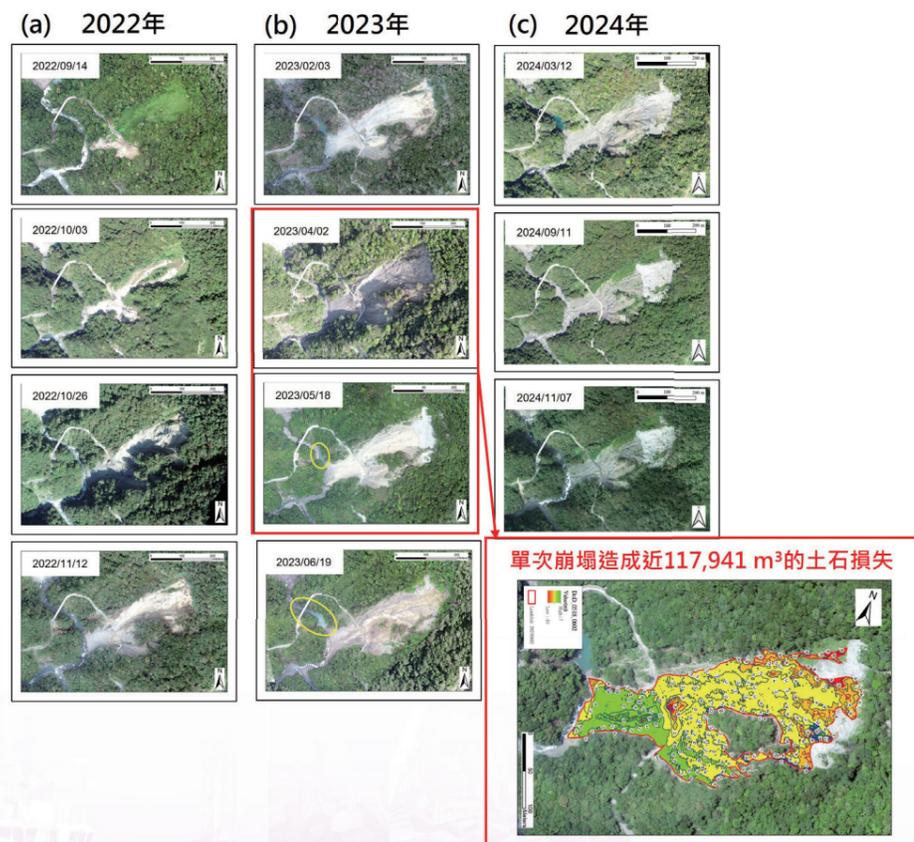


圖 6 大曼崩塌 2022 ~ 2024 年間無人機測繪地貌變異狀況

再以遙測多時序 InSAR 地表形變評估以 Sentinel-1 雷達影像分析多時序 DS-InSAR 影像間的地表位移量，分析時程為 2023/02/15 ~ 2025/02/04，探討大曼邊坡周緣區域之地表變動與位移趨勢。如圖 7 顯示合成孔徑雷達干涉測量 (DS-InSAR) 技術監測的地表形變速率，並包含大曼路段周圍的時間序列分析結果，圖中特別著重於 2024 年凱米颱風和山陀兒颱風之後的變化情形。該地區的地表變形主要發生在道路沿線與 45.5K 上邊坡裸露地區。在道路沿線黃色與橙色點顯示輕微至中等程度的坡體沉降 (-2 ~ -10.5 mm/yr)，可能與兩場颱風降雨入滲導致的表層崩落或地表沖刷有關，導致土壤沉降或路基變形。而在右側裸露地區 (上邊坡)，出現顯著沉降 (-10.5 ~ 21.3 mm/yr)，累積形變量達 9 mm，年沉降速率約 5 mm/yr，顯示此為需要特別關注的潛在滑坡或坡體沉陷區。

經由地形判釋、地質調查與剖面結果 (圖 8)，將地形特徵判釋數化套疊至正射影像上，包含不同時期之蝕溝、冠部裂縫、崩崖、坡面滲水點，以及岩段界線 (圖 8(a))，並由五萬分之一流

域地質圖呈現，大曼崩場地整體屬巴陵層 (硬頁岩與板岩)，並有檜山斷層 (逆斷層、推測) 以東北 - 西南方向通過此邊坡 (圖 8(b))，由圖 8(a) 可再以橘色虛線區分為上方板岩夾砂岩與下方板岩為主的兩岩段，崩塌判釋特徵呈現裸露區的蝕溝可以表現當降雨時或岩屑累積足夠後，材料向下運移的軌跡與範圍，此外，不同時期之崩崖或冠部裂縫的變化與長度亦反應此崩場地於上邊坡仍有潛在威脅之塊體，可作為數值模擬崩塌運移之參考。而滲水點分布位置大致接近岩段邊界之下方，或許反映出上部岩段 (板岩夾砂岩) 滲透性較高於下部岩段 (板岩)，故地下水流至滲透性較差之板岩時便以坡面滲出。藉由崩塌區右翼 AA 剖面、中心 BB 剖面與冠部 EE 剖面繪製，AA 剖面顯示淺層尚有破碎岩體可能崩落 (圖 8(b))，且趾部堆積大量岩屑使溪流流向對岸變遷；BB 剖面則可表示前期崩崖因為崩塌而後退，且冠部裂縫可能發育為下一次崩塌之崩崖 (圖 8(c))，此外，於坡腹至少有兩處小崖 (scarplet)，可能造成局部破壞。冠部的 EE 剖面則呈現滑動體可能的兩側邊界，以及裂縫分布的位置，為可能的入滲途徑。

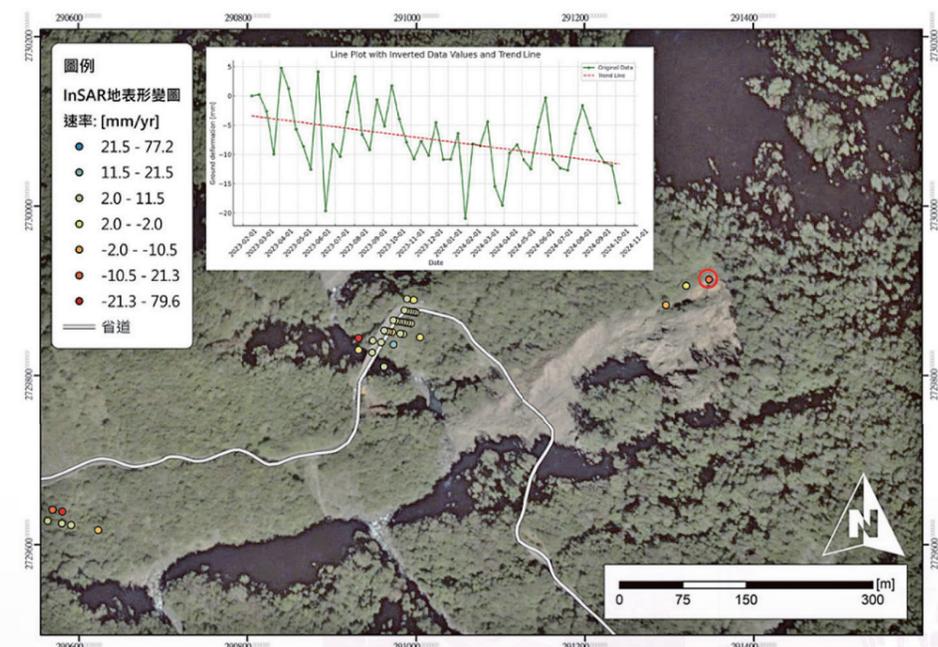


圖 7 大曼路段 DS-InSAR 地表形變分析結果 (分析時程: 2023/2 ~ 2024/11)

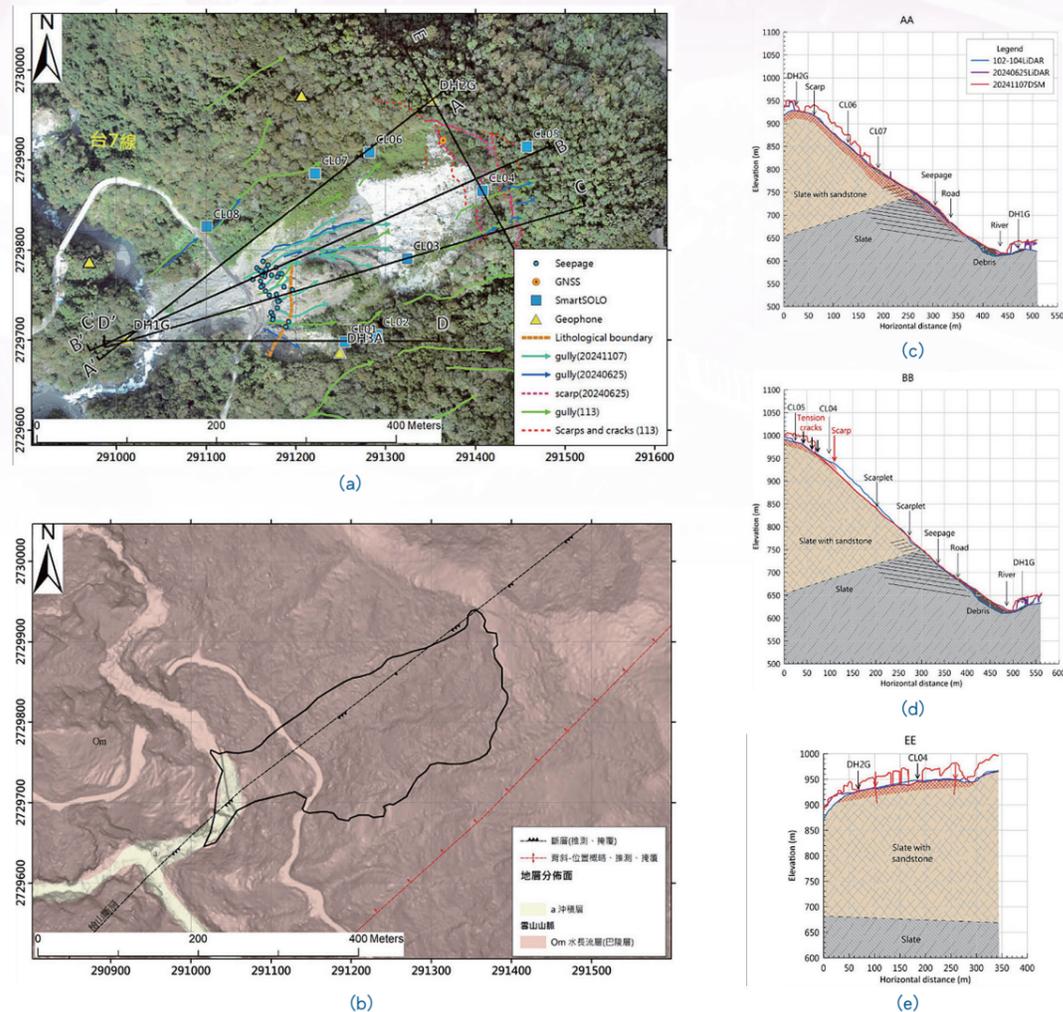


圖 8 大曼崩場地質調查結果：(a) 地形特徵判釋結果套疊於正射影像；(b) 大曼場址套疊流域地質圖；(c) AA 剖面；(d) BB 剖面；(e) EE 剖面

而微地動訊號分析方面，分別位於崩塌區冠部與趾部對岸架設 DH2G 與 DH1G 測站（如圖 3），兩測站間高程差為 300 公尺，北橫公路介於兩站中間通過，並同步於大漢橋頭架設野外照相機，以每分鐘一張照片的方式記錄近道路邊坡之狀況，可供訊號偵測邊坡活動之比對。微地動訊號監測落石的核心技術，在於利用微地動訊號之「路徑響應」，當震動源接近微地動測站時，儀器會記錄到顯著的振幅，當訊號源逐漸遠離時，振幅會逐漸變小，針對不同測站振幅值的變化，便可有效的偵測落石事件（圖 9(a)）。在本邊坡場址，落石事件共分為三種不同的型態，分別為落石類型一、二、三（圖 9(b)）：落石類

型一為落石最終停止於道路或道路以上之邊坡的落石，對道路安全並無立即的危害性，落石類型二為落石越過道路往下邊坡運移，對用路安全具有立即的風險，落石類型三為延長時間較長的落石事件，通常為量體較大的落石。

自架設微地動儀的 2022 年 10 月 27 日至 2023 年 12 月 31 日，共偵測辨識出 7,073 起落石類型一事件，3,145 起的落石類型二事件，以及 444 起的落石類型三事件（圖 10）。根據復興工務段所提供資料，於 2022 年 10 月 20 日及 21 日有崩塌擴大之情形，而從 10 月 27 日過後落石活動度最高的時間點，約略為 11 月中旬左右，之後落石活動度便有起伏變化之現象，然而，到了

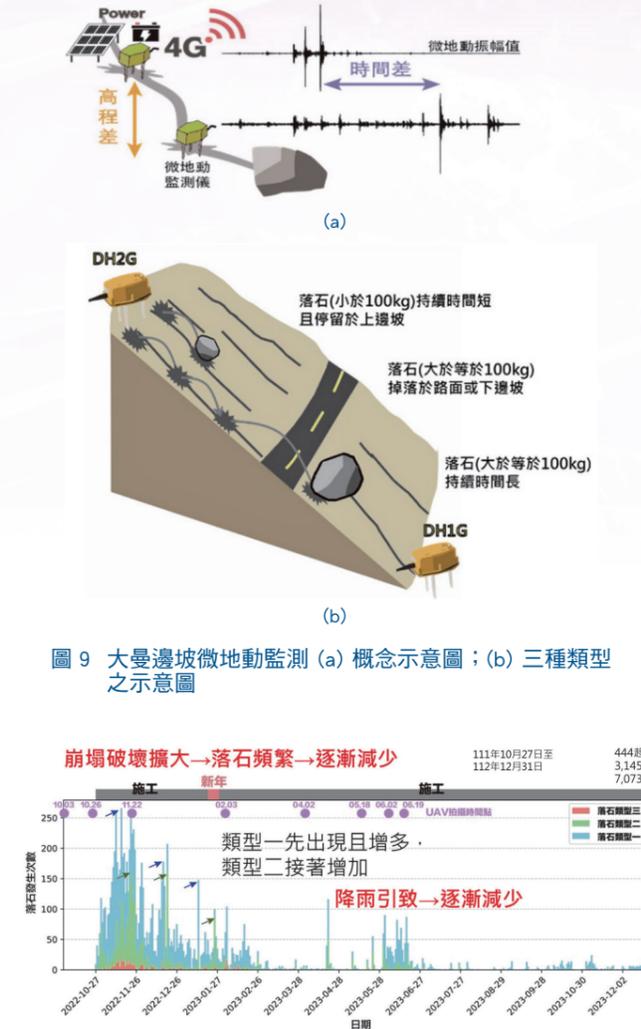


圖 9 大曼邊坡微地動監測 (a) 概念示意圖；(b) 三種類型之示意圖

圖 10 微地動分析結果

2023 年 4 至 6 月雨季時，落石的活動度則短暫的升高後，便隨即回到相對穩定狀態，該現象應是表現出，隨著時間坡面上不穩定的料源逐漸減少所致。另外，值得注意落石類型一和類型二之峰值時間點，前者出現的時間點往往早於後者（圖 10 箭頭處），指示出小落石頻繁的發生，可能會影響邊坡較大不穩定塊體的平衡，進而擴大災害的規模。此外，冠部區設置單點 GNSS 設備、傾斜計和雨量筒共站架設（圖 11(a)）。監測成果如圖 11(b) 所示，在 20240403 花蓮地震作用產生同震位移約 25 cm，地震後陸續經歷三次颱風，位移趨勢約略往南和下陷持續位移，可能受測站基盤不穩定所導致。

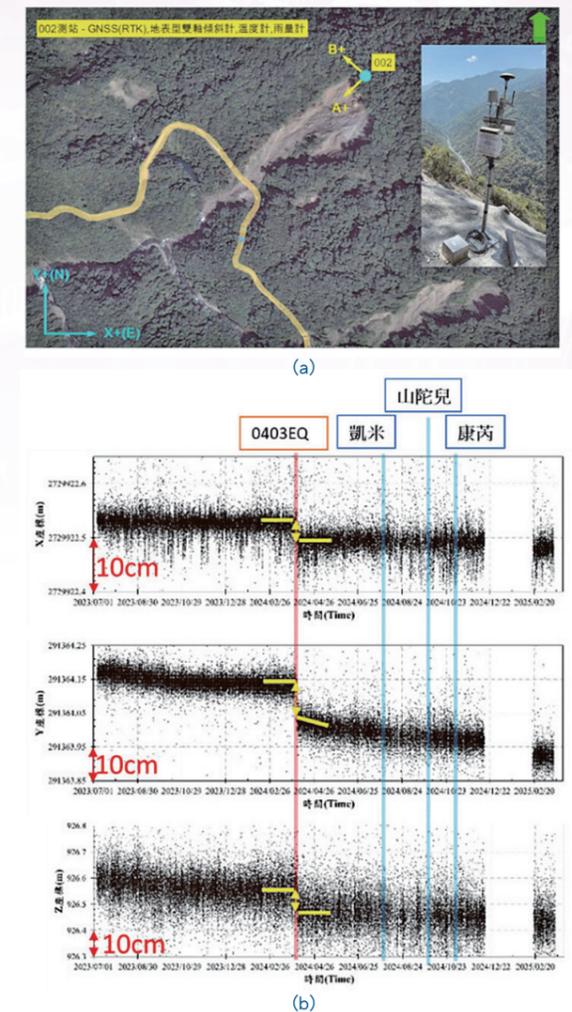


圖 11 (a) GNSS 監測設備位置圖；(b) 112 年 7 月至 114 年 2 月之監測成果

六、系統平台技術整合

鑑於北橫大曼場址崩塌事件的反覆性與研究價值，本計畫以該場址為示範，規劃並建置「數位科技整合技術應用於山區公路防災預警系統 (GeoPORTech)」(圖 12)。平台採用以戰情儀表板為操作介面的整合模式，透過彙整、展示與資料倉儲管理，協助主管機關在不同防災階段（災前、災中、災後）迅速掌握省道邊坡之監測狀態，作為綜合評估與決策之依據。

GeoPORTech 的建置目標對應九項數位轉型需求：A. 廣域篩選高活動潛勢邊坡單元；B. 直觀顯示公路之重點關注區域；C. 歷史災害資料

及調查報告管理；D. 監測資料即時更新及告警；E. 監測資料圖表即時更新與展示；F. 災害規模量化；G. 災害破壞機制分析；H. 二次災害擴大區位擬定；I. 災害影響範圍重現與預測。基

於上述目標，本系統整合團隊既有之遙測、無人載具、地表偵測與數值模擬等技術，並據此訂定各防災階段之操作流程，其系統目標與執行流程如圖 13 所示。

在災前階段，所提供之技術及流程包括：(1) 選擇指定省道公路，(2) 透過 InSAR 分析技術掌握指定公路地表高度變形之區域，篩選「高活動潛勢邊坡單元告警燈號」，(3) 以「高活動潛勢邊坡單元告警燈號」顯示重點關注區域，(4) 提供重點關注區域之歷史災點資訊與災害調查報告，(5) 將上述分析成果彙整於邊坡災害資訊整合平台（圖 14），作為災前預判、部署作業計畫參考。

災中階段提供之技術及流程為：(1) 選定高活動潛勢邊坡單元進行即時監測資料介接，(2) 以 GNSS 地表監測技術進行地表位移分析，(3) 以微地動崩塌與落石監測系統分析落石發生頻率及類型，(4) 介接邊坡單元區域即時雨量及地震資訊，(5) 將前述成果整合至邊坡災害資訊整合平台（圖 15），供業管單位評定災害規模與頻率，決定合宜之災害應變處置。



圖 12 數位科技整合技術應用於山區公路防災預警系統 (GeoPORTech)

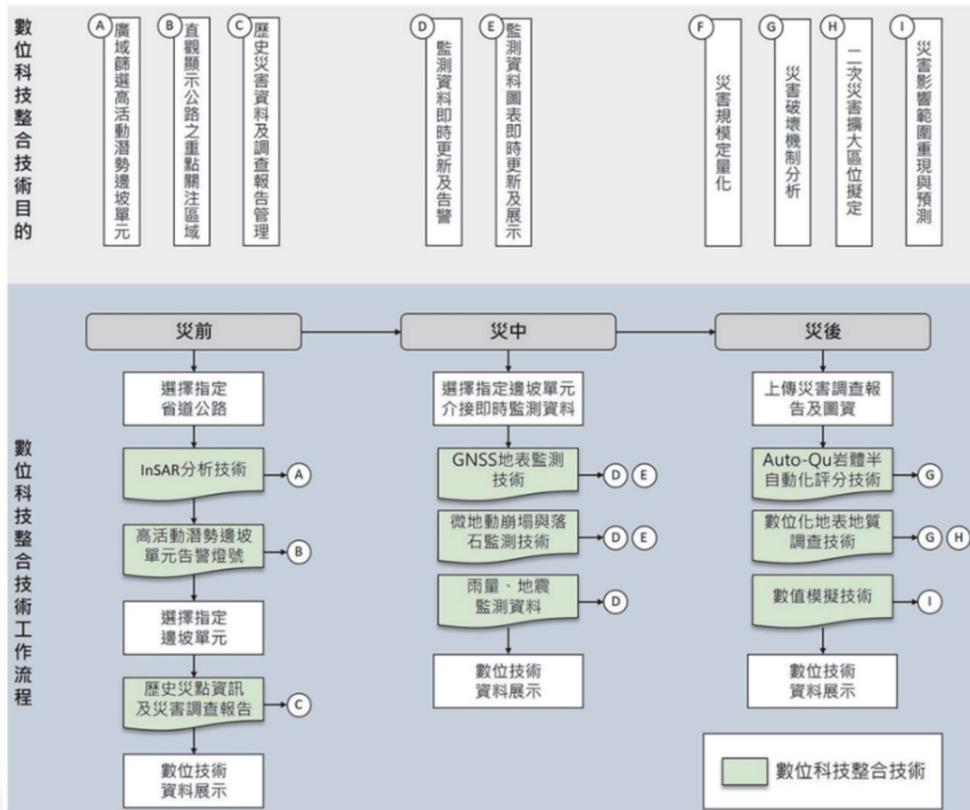


圖 13 數位科技整合技術應用於山區公路防災預警系統之建置目標及執行流程圖

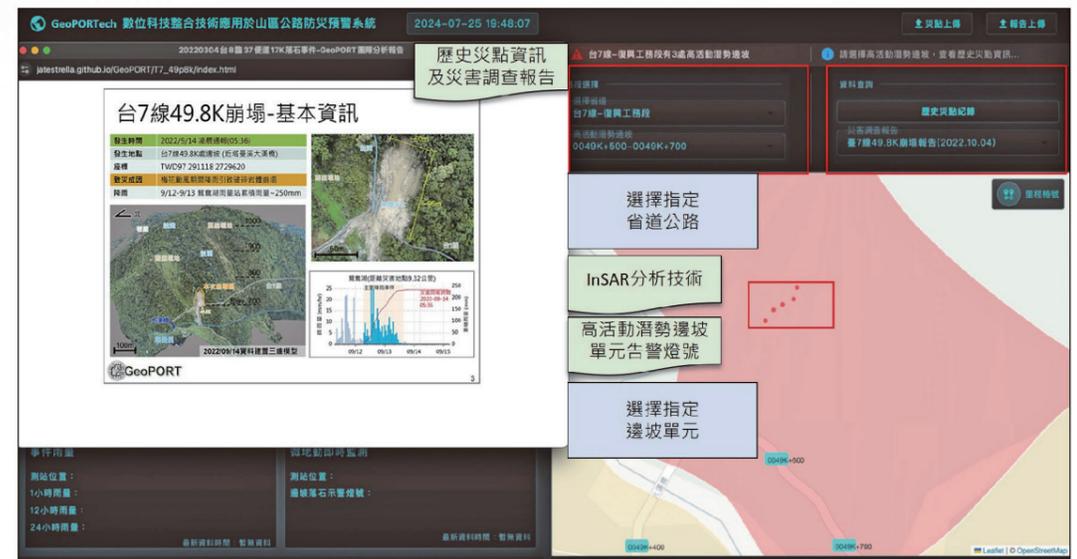


圖 14 GeoPORTech 平台於災前操作流程



圖 15 GeoPORTech 平台於災中之操作流程

災後階段之技術及流程則為：(1) 以數位化地表地質調查技術進行地質調查並蒐集災害資訊、(2) 透過數值模擬技術分析二次災害可能影響區域、(3) 上傳災害調查報告及技術圖資至邊坡災害資訊整合平台（圖 16），供主管機關救援搶災及邊坡治理計畫之參考。「數位科技整合技術應用於山區公路防災預警系統」（GeoPORTech）將有效整合道路邊坡在災害發生前後的各項科技技術與資料，快速掌握高風險邊坡狀況，協助主管機關在災害期間決策方面發揮作用。透過本計畫數位監測技術於大曼場址之建置成果，希冀協助主管機關於各邊坡場址監測技術之選擇，以建立更完善之邊坡監測與管理機制，進一步強化道路邊坡的整體防災韌性。

七、結論

本計畫透過整合多項遙測、調查與監測技術，建構出具系統性、即時性與決策支援功能之防災預警平台，增強現行監測體系之不足。以北橫大曼場址為例，結合微地動訊號、GNSS 監測、InSAR 分析及無人機測繪等技術，不僅提升了邊坡活動之偵測能力，也強化了跨資料

來源之交叉比對，進而增進對崩塌或落石事件之判讀與回應效率。目前以大曼為例，儀器選擇與配置方式如本文所述，適用於單一上下邊坡落石之對象，微地動落石監測技術屬於非接觸型監測手段，其可進行全坡面的落石事件觀測、架設彈性高且較不受地形限制。但是，該技術是根據兩個微地動觀測站之地動訊號參數特性與兩站訊號之關聯性進行落石事件監測，於測站安裝限制上，本計畫建議兩個微地動觀測站需至少須滿足垂直高程差 50 公尺以上（大曼案例為 300 公尺）；於落石事件偵測使用的地動訊號特徵門檻值，本計畫亦建議在不同測站空間配置的條件下，尚須仰賴熟悉微地動訊號專業人員進行動態修正。由於地動訊號特徵著重於落石彈跳與運移行為，因此，微地動監測技術僅受限於邊坡的落石彈跳特性影響（邊坡地形幾何主導），容易遷移學習落石微地動訊號紀錄豐富的經驗模型至資料相對缺乏的邊坡，仍然具有高度廣域應用的價值。此外，值得一提的是，微地動偵測極限與落石撞擊動能有高度相關性，本計畫提出當落石動能小於 10,000 kJ，落石微地動訊號可偵測的最大距離（公尺）約等於落石動能（kJ）的 2 倍，其代表若落石動

能為 500 kJ，其微地動訊號可傳遞至 1,000 公尺距離遠。因此，微地動監測技術可偵測的落石規模大小是受到測站與落石事件的距離大小限制。

此外，本計畫之技術架構與目標與交通部公路局近年推動之「公路邊坡韌性提升」策略相互契合：透過監測技術發展及資料共享平台建置，期望能由單點監測逐步提升為跨區域、整合性的監控與管理機制。惟系統實務推廣仍面臨資料標準化、跨機系統串接及長期維運資源等挑戰；因此，未來工作應重點放在資料標準與 SOP 的建立、演算法之持續優化，以及與管理機關之協調合作，以確保系統能長期穩定運作並實際支援山區公路防災決策。總體而言，GeoPORTech 已具備成為道路邊坡監測與預警示範系統之關鍵要素，對提升山區公路防災韌性與強化救災決策支援，具有明確的技術與實務價值。

誌謝

感謝國科會災防科技方案提供研究計畫經費（NSTC 113-2124-M-239-001）；感謝交通部公路局北區分局與中區分局合作、各合作學校、工程顧問公司、現場施工等人員之協助。

參考文獻

- Meng-Chia Weng, Cheng-Han Lin, Wen-Jie Shiu, Wei-An Chao*, Chia-Chi Chiu, Ching-Fang Lee, Wei-Kai Huang, Che-Ming Yang, 2022. Toward a rapid assessment of highway slope disasters by using multidisciplinary techniques. *Landslides* 19, 687-701.
- Che-Ming Yang*, Wei-An Chao, Meng-Chia Weng, Yu-Yao Fu, Jui-Ming Chang, Wei-Kai Huang, GeoPORT Working Group, 2022. Outburst debris flow of Yusui Stream caused by a large-scale Silabaku landslide, Southern Taiwan. *Landslides*. 19, 1807-1811.

- Che-Ming Yang, Chung-Hsun Lee, Chun-Yuan Liu, Wei-Kai Huang, Meng-Chia Weng*, Yu-Yao Fu, 2022. Assessing the impact of rockfall on the retaining structures of a mountain road: A case study in Taiwan. *Landslides*. 19, 2737-2746.
- Wen-Jie Shiu, Ching-Fang Lee, Chia-Chi Chiu*, Meng-Chia Weng, Che-Ming Yang, Wei-An Chao, Chun-Yuan Liu, Cheng-Han Lin, Wei-Kai Huang, GeoPORT Working Group, 2022. Analyzing landslide-induced debris flow and flow-bridge interaction by using a hybrid model of depth-averaged model and discrete element method. *Landslides*. 20(2), 331-349.
- Terry Y.P. Yuen, Meng-Chia Weng, Yu-Yao Fu, Guan-Ting Lu, Wen-Jie Shiu, Cheng-An Lu, Chun-Yuan Liu, Chia-Chi Chiu, Tzu-Han Wen, GeoPORT Working Group. (2023). Assessing the impact of rockfall on a bridge by using hybrid DEM/FEM analysis: A case study in Central Taiwan. *Engineering Geology*, 314, 107000.
- 陳進發（2018），「落石災害評分系統於省道邊坡分級管理之應用」，*臺灣公路工程*，10(44)，2-19。
- 邱家吉、翁孟嘉、柳鈞元、趙韋安、林銘郎、林承翰、楊哲銘、黃韋凱、李璟芳、徐文杰（2022），「道路邊坡災害資訊整合、模擬暨研判系統 -GeoPORT」，*台北市土木技師公會技師期刊*，96 期，34-43。
- 楊哲銘、柳鈞元、黃韋凱、GeoPORT 團隊（2022），「空間圖資整合應用於坡地災害的第一時間評估 - 以猴硐崩塌出發」，*台北市土木技師公會技師期刊*，96 期，20-25。
- 張睿明、趙韋安、黃韋凱、陳俊堯、吳世傑、劉書維（2024），「基於微地動訊號分析技術之公路落石預警系統運作」，*土工技術*，181 期，75-82。



圖 16 GeoPORTech 平台災後操作流程