



0403 震後二次坡地災害評估

王國隆*／國立暨南國際大學土木工程學系 教授
陳昭維／青山工程顧問股份有限公司 總經理
高振誠／青山工程顧問股份有限公司 副總經理
呂家豪／青山工程顧問股份有限公司 經理
邱昶瀚／青山工程顧問股份有限公司 副理
汪俊彥／青山工程顧問股份有限公司 副理
陳彥澄／青山工程顧問股份有限公司 組長
劉宇凡／內政部國家公園署 組長
郭育廷／內政部國家公園署 組長技正
何文晟／內政部國家公園署太魯閣國家公園管理處 科長
鄭凱文／內政部國家公園署太魯閣國家公園管理處 技正
詹家賓／安誼工程顧問公司 土木技師

本文探討 0403 地震後可能衍生地坡地災害，0403 地震後，農村發展及水土保持署持續數化了兩個月後，崩塌地的總數為 1,948 處，總面積達 1,522 公頃，大部位崩塌位置距離震央超過 10 公里。這些全面性破壞的崩塌形成土方，可能在下次地震或颱風豪雨來臨時造成二次災害。本文嘗試使用現生崩塌地位置，利用流向演算法計算可能遭遇衝擊的位置，蘇花公路和平至崇德間，大部分位置均可能遭受到後續的落石或土石流二次災害。大清水溪上游大量的土石尚未輸送至下游，未來可能造成更多的土方往下移動。石公溪上游大量土石運移至下游時，因河道蜿蜒堆積，造成高位河改道，現有匯德隧道東口下方的涵洞，僅能提供水流通過，一旦土石堆積將會造成阻塞。台 8 線太魯閣國家公園路段，因地形因素也有不同的落石發生機率，可利用分析結果研擬落石能量消減或明隧道阻絕。

0403 地震坡地災害

依據農村水保署發表於 Big GIS 之 5 月 31 日圈繪結果，合計圈繪 1948 處崩塌地，及總面積約為 1,522 公頃；此一圈繪結果利用 0403 地震後的各期可用光學衛星、航照等影像圈繪所得，圈繪結果如圖 1 所示。圖中計算之 PGA 採計太魯閣地震站資料，PGA 訊號與震央距離關連性較小，此外由圖中可知，崩塌地

位置主要位於震央北北西方向，與地震波傳遞相關性高。然光學判釋結果僅能顯示全面性破壞位置，亦即光學上肉眼可辨識點位，如崩塌地產生變形但未導致全面性破壞，則可能為未來產生坡地破壞之隱憂，此一潛在可能破壞位置，加上已經全面破壞點位，將導致未來發生二次邊坡破壞乃至於土石流之可能性。

在圈繪的崩塌區位上，蘇花公路及鐵路臨海路段、台 8 線太魯閣國家公園路段有多處崩塌，後續二次災害討論位置將以這兩處來進行探討。

* 通訊作者，klwang@ncnu.edu.tw

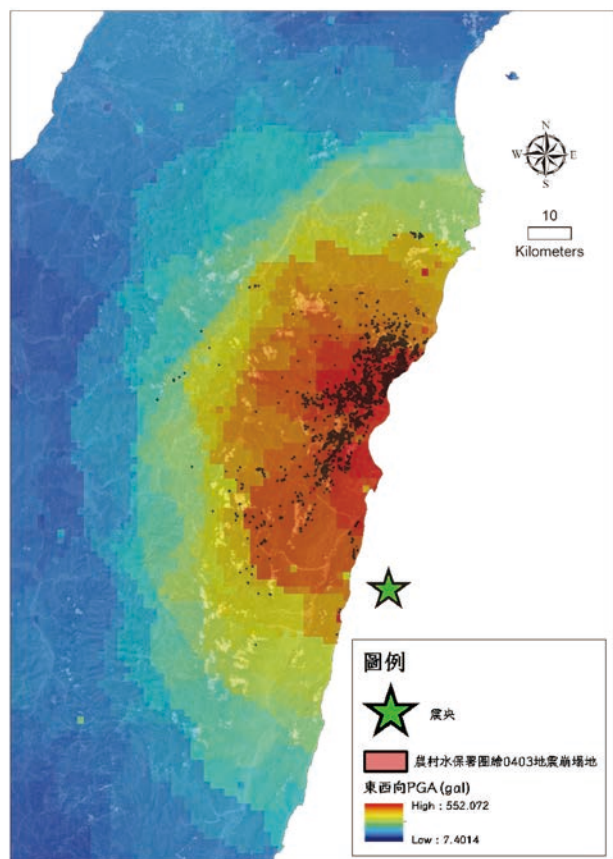


圖 1 0403 地震崩塌地與東西向 PGA

和平至崇德坡地災害

先將和平至崇德之地震破壞位置圈繪如圖 2 所示，由圖中可知大部分之崩塌地圈繪位於大清水溪至崇德間，然此一結果可能存在鬆動或產生裂隙而尚未全面破壞位置。此一潛在位置利用差分干涉合成孔徑雷達方法 (DInSAR) 計算變位來獲得，將此一地區地震前 (2023 年 1 月) 至地震後 (2023 年 7 月) 之合成孔徑雷達資訊利用短基線法 (SBAS) 進行分析，所得之垂直高程變化速度如圖 3 所示，圖中資訊結合上升軌與下降軌衛星訊號，分析所得結果以年高程變化速度表示，由圖中可以獲得訊息如下，其一在崩塌地圈繪以外仍有高程變化劇烈情形，顯示可能存在更多潛在快要崩滑的崩塌地，其二，大清水溪河道存在淤高情形，如上游持續輸送崩塌土方，未來可能面對更多的淤積情形。

和平至崇德間之二次災害模擬與調查

為能有效利用農村水保署圈繪之崩塌地，將崩塌



圖 2 和平至崇德間圈繪之地震邊坡破壞位置

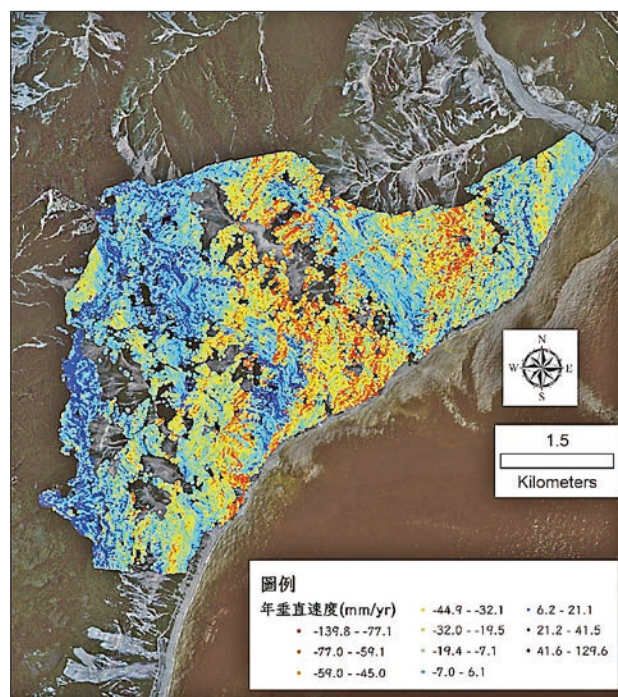
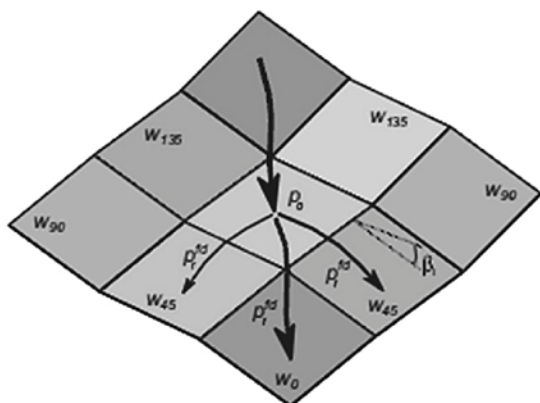


圖 3 和平至崇德間之 DInSAR 分析成果

地位置設定為土石方材料來源，使用流向演算法進行影響範圍分析。

以流向演算法去計算崩塌或土石流的流動範圍、並根據摩擦理論評估跳動距離。並且加入持久性函數針對在重現行為慣性，並根據流量方向加權相對於前一個方向的方向變化^[1]，如圖 4 所示。

圖 4 流向演算法結合持久性公式示意圖^[2]

然而有幾種流向演算法在軟體中，但不是所有都與土石流模型有關 D8^[3,4] 算法提供了收斂但是不切實際的直線流動，散佈太有限^[5-8]。但是，它可以有效快速評估參數與最遠距離的相關性。故在本研究中分析時將使用 D8 流向演算法做為設定值；相同的也有許多摩擦力計算方式在軟體中可供選擇，本研究中採用了有最小陰影角概念的摩擦角理論做為能量消損的設定值，而此處摩擦角與岩土力學中的材料摩擦角不同，如圖 5 所示。

流向演算法之分析結果如圖 6 所示，圖 6 所得結果使用一旦通過時的速度表示，由圖中可知從和平至崇德段不管鐵路或公路均可能遭受已圈繪的崩塌撞擊，區別只在於撞擊速度差別，如已使用隧道通過則無須考慮可能的落石或土石流災害。

各處目前均已進行災後防護設計，部分或可使用落石攔阻設施或土砂攔阻設施降低災害，本文僅就大清水溪及石公溪兩處提出提醒。

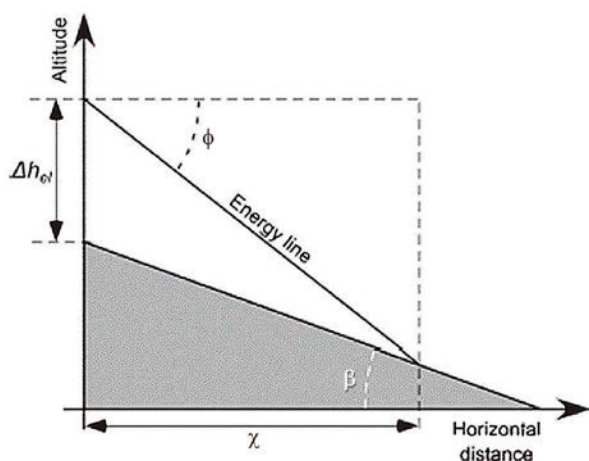
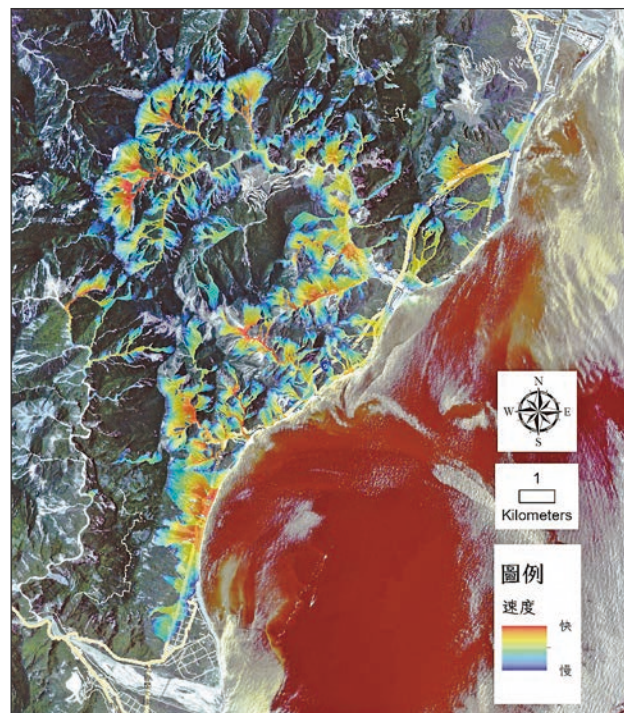
圖 5 坡度(β)，流出距離(χ)及摩擦角度 the friction angle (ϕ)之關係^[2]

圖 6 使用流向演算法計算之坡地二次災害落石及土石流通過速度(底圖為 2024 年 8 月 2 日 Sentinel-2 衛星影像)

大清水溪

首先就大清水溪位置將 2024 年 4 月 29 日及 2024 年 8 月 2 日 Sentinel-2 衛星影像分別繪製如圖 7 及圖 8 所示，4 月 29 日為地震後 3 週，可看出裸露地位置，這些位置未必為本次 0403 地震影響，亦可能是過去崩塌後植生未能復育所致。然 2024 年 8 月 2 日之衛星影像出現更多之裸露地，表示有相當多的數量原先地震時並未全面性破壞失去植生，在 2024 年 7 月凱米颱風後產生更多的崩塌地。另外，觀察大清水溪主河道，原因狹窄的中上游區域出現明顯的流動與堆積情形，以及在坡面上新增的土砂均可能為未來往下游輸送產生土石流的來源，尤其下游鐵路橋發生土石流衝上鐵軌導致列車撞擊土石情形未來仍有極高可能性。

石公溪

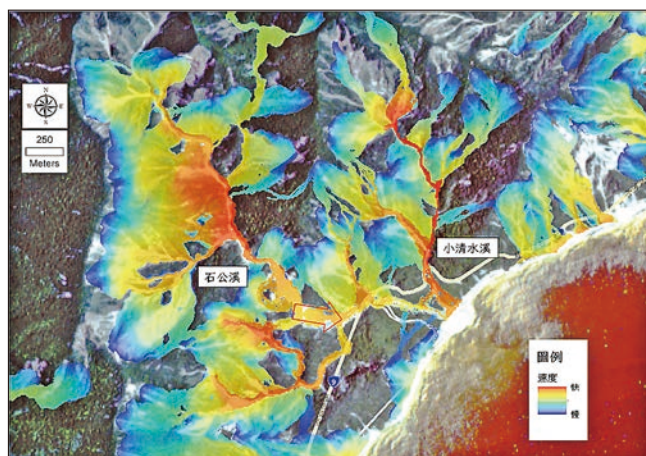
另一需要關注的位置為石公溪位置，亦即匯德隧道東口附近，將前述流向演算法成果繪製如圖 9 所示，需注意情形有二，其一為小清水溪土石流除往主流流出之外，亦可能有旁支流往鐵路軌道。其二則為石公溪產生高位河改道情形，原先在上游的土石不斷往下游輸送的情況下，讓本應該往主流逐漸輸送的土石，在匯德隧道東口西側上方大量越稜往下流，此一



圖 7 大清水溪 2024/4/29 衛星影像 (Sentinel-2)



圖 8 大清水溪 2024/8/2 衛星影像 (Sentinel-2)

圖 9 匯德隧道東口流向演算法計算成果
(底圖為 2024 年 8 月 2 日 Sentinel-2 衛星影像)

土方量如僅只考慮道路兩側土石將會遠遠低估。此分析結果已於凱米颱風期間驗證，圖 10 為 2024 年 8 月 1 日無人機空拍正射影像套疊成果，圖中圈繪位置為 0403 地震崩塌地，如僅考慮道路邊之崩塌位置，所造成之土方有限，然如圖中所示，大量來自石公溪上游



圖 10 匯德隧道東西無人機空拍 (2024/08/01；空拍照片安誼工程顧問詹家賓技師提供)

土石流，在匯德隧道東口西側遭遇阻礙後，變大量越過稜線往匯德隧道東口流去，然此一情形，並非將下游土石移除就可解決，上游仍存在大量土石等待下一次發生土石流往下游輸送，再次發生機率甚高。

太魯閣遊客中心至天祥間二次災害

先將太魯閣遊客中心至天祥間地震邊坡破壞位置圈繪如圖 11 所示，由圖中可知大部分之崩塌地並非位於台 8 線兩側，而是位於立霧溪各支流上游，然此一結果可能存在鬆動或產生裂隙而尚未全面破壞位置。此一潛在位置利用差分干涉合成孔徑雷達方法 (DInSAR) 計算變位來獲得，將此一地區地震前 (2023 年 1 月) 至地震後 (2023 年 7 月) 之合成孔徑雷達資訊利用短基線法 (SBAS) 進行分析，所得之垂直高程變化速度如圖 12 所示，圖中資訊結合上升軌與下降軌衛星訊



圖 11 太魯閣遊客中心至天祥間圈繪之地震邊坡破壞位置

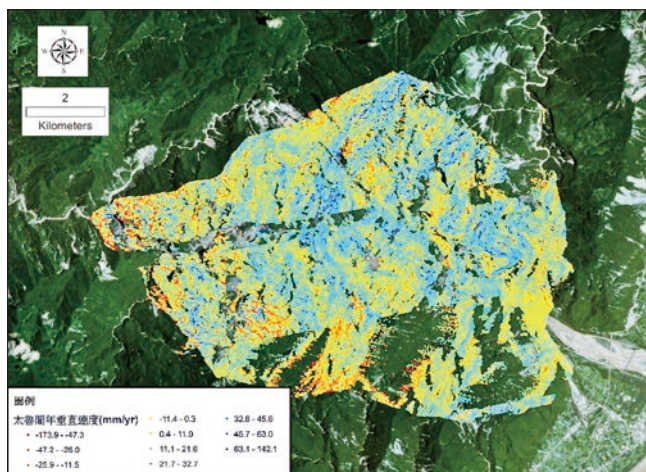


圖 12 太魯閣遊客中心至天祥間之 DInSAR 分析成果

號，分析所得結果以年高程變化速度表示，部分位置位於圖幅交界處本文未能即時處理，故部分位置未能解出與地形無關。由圖中可以獲得訊息如下，在崩塌地圈繪以外仍有高程變化劇烈情形，顯示可能存在更多潛在快要崩滑的崩塌地。

使用流向演算法

同樣為能有效利用農村水保署圈繪之崩塌地，將崩塌地位置設定為土石方材料來源，使用流向演算法進行影響範圍分析。分析所得之結果如圖 13 所示，由圖中可知台 8 線沿線大多可能遭遇落石及土石流通過，其差別為通過時速度，未來可利用此一分析結果就設計條件為明隧道或落石攔阻設計之初步探討。將其中白沙二橋至燕子口路段結果繪製如圖 14 所示，可看出沿線落石及土石流通過時可能的速度，然此一分

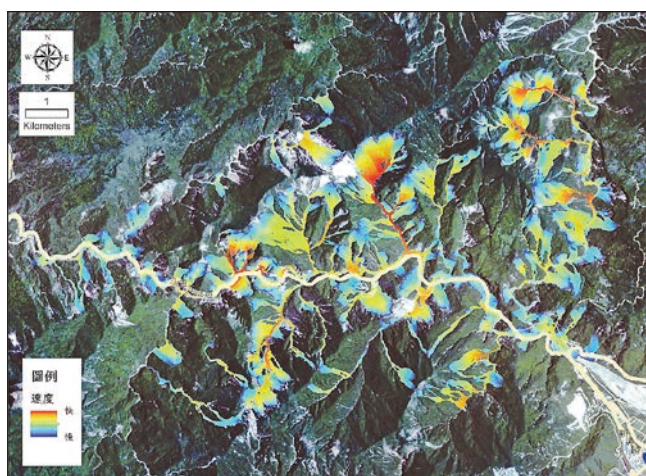


圖 13 太魯閣遊客中心至天祥使用農村水保署圈繪 0403 崩塌地進行分析之落石及土石流運動速度（底圖為 2024 年 8 月 2 日 Sentinel-2 衛星影像）

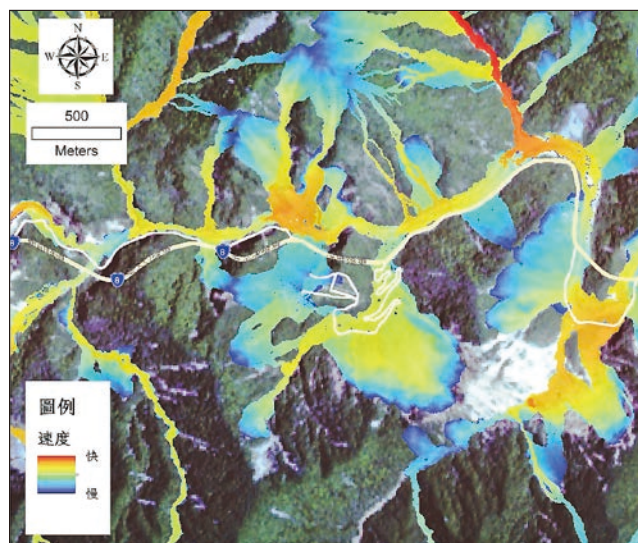


圖 14 白沙二橋至燕子口使用農村水保署圈繪 0403 崩塌地進行分析之落石及土石流運動速度（底圖為 2024 年 8 月 2 日 Sentinel-2 衛星影像）

析為基於大範圍下之落石及土石流二次災害分析，假設之石塊大小最大為 1 立方公尺，特定地點如圖中之山月村需要更進一步詳細各種不同尺寸探討，本文後面將會探討山月村附近之調查成果。

使用地形學模式

由於仍有多處未圈繪區可能產生落石，故本文中嘗試使用地形能量法來進行模擬，在不考慮落石位置的情形，尋找落石通過的機率。

Evan and Hungr^[9] 將落石發生區與落石曾經最遠落點連線，定義出最小陰影角 β 視為落石影響最遠之極限範圍，如圖 15 所示。並結合 Hungr and Evans^[10] 發展出隨機碰撞模型 (ROCKFALL) 預測落石的滾動行為；類似的方式被 USGS^[11,12] 對 Yosemite Valley, California 落石風險評估，利用 β 角的概念劃設出 Yosemite Valley 落石紅黃警戒線剖面圖，如圖 16 所示。

使用此一方法概念分析太魯閣遊客中心至天祥台 8 線沿線兩側 500 公尺可能落石位置，將落石通過機率繪製如圖 17 所示，由圖中可知在未給予落石發生起始點的情況下，分析出可能每一點落石通過的次數，台 8 線沿線幾乎均可能發生落石，差別僅在於落石通過機率高低，而其中燕子口至慈母橋路段天然條件下落石通過機率最高，將其結果繪製如圖 18 所示。此一方法在未指定落石源頭，僅就地形上計算落石通過機率，如需設計時仍需就設計路段再進一步分析落石通過時之能量。

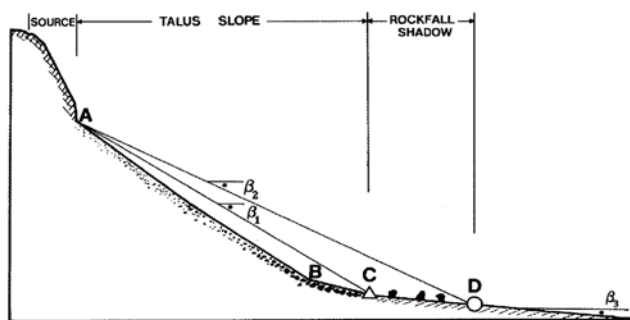
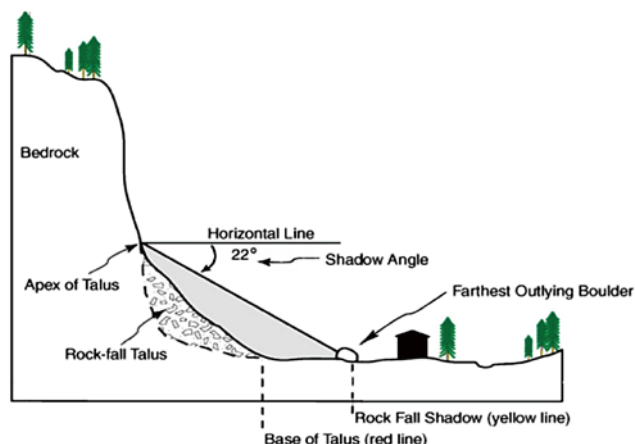
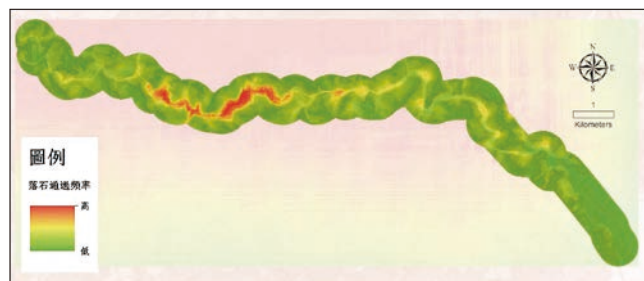
圖 15 落石路徑剖面圖^[9]圖 16 Yosemite Valley 落石紅黃警戒線剖面圖^[11,12]

圖 17 太魯閣遊客中心至天祥台 8 線沿線兩側 500 公尺地形學模式計算落石通過機率

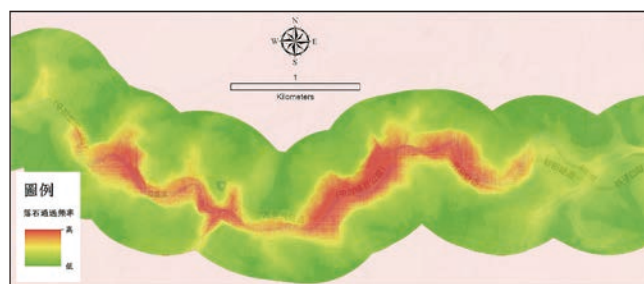


圖 18 燕子口至慈母橋台 8 線路段地形學模式計算落石通過機率

太魯閣山月村（布洛灣竹林步道）評估

布洛灣竹林步道位於山月村，環繞山月村而行。由現勘結果顯示，竹林步道崩塌災害來源主要來自西南側邊坡產生山崩及落石源，並進一步運動至竹林步

道周圍造成步道損壞，落石尺寸較大者甚至滾動至山月村內，影響山月村安全。其中一棟木屋於 0403 地震中，即因受落石撞擊而破壞。

由現場調查結果發現，布洛灣竹林步道及山月村周圍除 0403 地震引致之新生落石外，亦可見既有舊落石散布，故整體而言布洛灣臺地應位於落石重複發生區位。綜合災前 LiDAR DEM 資料及災後衛星影像等資料判釋及現地調查結果，初步將布洛灣臺地山月村範圍內之落石來源分為 A、B、C、D，並因位於落石路徑，推測於落石滾動磨蝕過程而形成長條型裸露坡面。其中，路徑 A、B、D 於 0403 地震已有落石侵入竹林步道、山月村及周圍設施，影響其安全性。推測崩塌機制可能為邊坡發生岩石崩坍，冠部材料崩落後磨蝕坡面，於坡面形成長條形之裸露「傷痕」（裸露坡面）。

圖 19 為利用空拍照片全景說明路徑 A 至 D 之空間位置分布關係，由比對災前 LiDAR DEM 及災後 UAS 空拍、衛星影像，可知以路徑 A 崩塌冠部高程約 810 m 最高，以路徑 D 崩塌趾部高程約 389 m 最低。其中，以路徑 C、D 之崩塌源已接近坡頂山稜線上。由現地調查結果，可知路徑 A、B、D 於本次 0403 地震中已影響至竹林步道及山月村周圍。

其中，以路徑 D 最接近布洛灣山月村，也是 0403 地震中災損中最嚴重區域，為最需關注區域。

路徑 A、B 於 0403 地震中可見巨大落石滾落至竹林步道附近，其中路徑 A 落石造成蓄水設施受損，落石 B 落石滾動至木屋前，造成步道受損。由於崩塌裸露坡面形成，未來在強降雨沖刷或入滲影響下，或地震等環境事件中皆可能再次產生崩塌而引致災害或規模擴大（可能為不同崩塌機制），需持續注意。另於山月村入口處及廣場內，亦可見巨大既有落石分布，隱含布洛灣臺地應為落石重複發生區，而過去落石最遠滾動距離可能至此。

路徑 C 於 0403 地震中暫未見明顯災損，然於竹林步道附近可見規模大小不等之既有落石散布，顯示此路徑亦可能為落石重複發生區，且由衛星影像亦可觀察到上游處已崩塌裸露坡面，未來在強降雨沖刷或入滲影響下，或地震等環境事件中皆可能再次產生崩塌而引致災害或規模擴大（可能為不同崩塌機制），需持續注意。



圖 19 布洛灣－竹林步道現地調查結果

綜合現階段調查結果，初步研判竹林步道崩塌災害以落石為主。依據前述方法，因竹林步道（山月村）位於上臺地地形、地質條件相同，原則皆屬第2類，惟依據調查 0403 地震後新生落石及既有落石位置分布與現場致災程度有所差異，將竹林步道區分為2個部分，說明如下：

竹林步道西南側 (0k + 086 ~ 0k + 300)

本步道段為 0403 地震事件落石主要影響位置，於布洛灣臺地後方高陡邊坡落差約 240 ~ 430 m 處產生落石，研判包括 A、B、C、D 等 4 落石來源，其中，路徑 A、B、D 於 0403 地震已有落石侵入竹林步道、山月村及周圍設施，影響其安全性。以路徑 D 落石直接砸損下方木屋，災害最為嚴重，對於遊憩經營之衝擊也最大。

檢視落石源頭處，可見岩體出露受節理切割而較為破碎。此等岩體後續在外在營力作用下，如強降雨及地震等，可能再次造成破碎岩體擾動，進而分離產生落石進而影響下方布洛灣臺地竹林步道、山月村及相關設施安全。

竹林步道西南側 (0k + 086 ~ 0k + 300) 為 0403

地震災害直接影響位置，由於現場人員尚可進出，但後續仍可能有落石災害風險，故將此段評估為【第2類】。後續須透過相關作為，降低落石危害，配合處置後以開放通行，後續對策研擬如下：

1. 工程處置：目前大致可以分為 4 個主要落石來源，且落石源可見破碎岩體，後續再崩塌時易沿此溝谷再產生落石災害。因步道周圍 0403 地震新生落石直徑約 4 ~ 8 m，且高差達 240 ~ 430 m，落石能量甚大，非一般防護柵可完全處理；此外，未來落石彈跳後，位置甚難有效掌握，亦即可能發生其他落石路徑，故就緊急搶修之先期調查角度，建議可直接進入中、長期工程處置，於落石可能影響範圍設置防落石土堤約 220 m，並針對 3 條產生災害之主要落石滾動路線上 (A、B、D)，再強化防護或消能設施，如設置多道土堤或防護網等。詳細之工程配置，包括防落石土堤高度及範圍，應配合後續詳細調查評估包括落石軌跡分析決定之。
2. 非工程處置：
 - (1) 短期建議採不開放遊憩管制。

- (2) 利用遙測技術，持續巡檢，滾動檢討。
- (3) 山月村利用可行性評估，配合詳細落石分析，評估落石可能最遠路徑及最大能量，評估後續使用方式。
- (4) 設置落石預警系統，供疏散避難參考。

竹林步道東北側 (0k + 300 ~ 0k + 086)

本次 0403 地震事件未直接受落石災害影響，然現場調查發現可見數處既有舊巨大落石殘跡，初步研判為未來若再度產生落石的可能影響範圍之一，因目前尚可通行，故將此段評估為【第 2 類】。後續對策研擬如下：

1. 工程處置：原則配合竹林步道西南側 (0k + 086 ~ 0k + 300) 處置。
2. 非工程處置：同竹林步道西南側 (0k + 086 ~ 0k + 300) 處置。

結論與建議

0403 地震造成之邊坡災害集中於蘇花公路沿線及台 8 線太魯閣國家公園路段，農村水土保持署於震後持續數化崩塌地，然因雲覆無法即時獲得全貌，整體崩塌位置圈繪於 2024 年 5 月 31 日結束，本文引用之崩塌位置即為最終 5 月 31 日之版本。

光學影像圈繪之位置僅能顯示出已經發生全面性破壞造成地形地貌改變位置，對於產生變形或裂縫但未全面性破壞位置則無法顯現，可利用 DInSAR 方法補充部分未來可能發生破壞區位。

利用已圈繪崩塌位置，進行大面積落石及土石流分析結果顯示，蘇花公路沿線和平至崇德段幾乎都可能遭遇後續落石及土石流，亦即震後二次災害機率極高，其中大清水溪及石公溪均需注意上游仍有大量土石尚未輸送至中下游，宜提前做好防災準備。

經由流向演算法及地形學法均能顯示出大範圍可能致災位置，包含通過機率及通過時之速度，此一結果可提供後續初步規劃佈設參考。

參考文獻

1. Gamma, P. (2000). "dfwalk-Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung." Geographisches Institut der Universität Bern (in German).
2. Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B., and Zimmermann, M. (2013). "Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale." Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13, pp. 869-885.
3. O'Callaghan, J.F. and Mark, D.M. (1984). "The extraction of drainage networks from digital elevation data, Comput." Vision Graph, 28, pp. 328-344.
4. Jenson, S. and Domingue, J. (1988). Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54, 1593-1600.
5. Desmet, P.J.J. and Govers, G. (1996). "Comparison of routing algorithms for digital elevation models and their implications for predicting ephemeral gullies." Int. J. Geogr. Inf. Syst., 10, pp. 311-331.
6. Endreny, T.A. and Wood, E.F. (2003). "Maximizing spatial congruence of observed and DEM-delineated overland flow networks." Int. J. Geogr. Inf. Sci., 17, pp. 699-713.
7. Erskine, R., Green, T., Ramirez, J., and MacDonald, L. (2006). "Comparison of grid-based algorithms for computing upslope contributing area." Water Resour. Res., 42.
8. Tarboton, D.G. (1997). "A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models." Water Resour. Res., 33, pp. 309-319.
9. Evans, S.G. and Hungr, O. (1993). "The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes." Canadian Geotechnical Journal, V. 30, pp. 620-636.
10. Hungr, O. and Evans S.G. (1989). "Engineering aspects of rockfall hazards in Canada." Geological survey of Canada. <https://doi.org/10.4095/130673>
11. Wiecek, G.F., Morrissey, M.M., Iovine, G., and Godt, J. (1998). "Rock-fall Hazards in the Yosemite Valley." USGS.
12. Wiecek, G.F., Morrissey, M.M., Iovine, G., and Godt, J. (1999). "Rock-fall Potential in the Yosemite Valley." USGS. 

社團法人中國土木水利工程學會

會址：10055 台北市中正區仁愛路二段一號四樓

網址：<http://www.ciche.org.tw>

e-mail: service@ciche.org.tw

電話：(02) 2392-6325

傳真：(02) 2396-4260



歡迎加入學會



下載入會申請書