



災害模擬與防護對策

臺鐵 北迴線 K48 路段 土石流風險模擬 及 因應對策與設計

林承翰*／國立陽明交通大學防災與水環境研究中心 助理研究員

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

林子超／台灣世曦工程顧問股份有限公司鐵道工程部 工程師

翁孟嘉／國立臺灣大學土木工程學系 教授

邱家吉／國立臺北科技大學材料及資源工程系 副教授

林銘郎／國立臺灣大學土木工程學系 教授

地震對山區邊坡所造成的災害不僅僅有同震山崩，在震後的一段時間山體會更頻繁的發生地質災害，整體的地質地形條件也需要長時間才能由不穩定的狀態趨緩，此為地震災害鍊。由 2024 年 4 月 3 號發生的花蓮地震震後對臺鐵北迴線和仁至崇德路段的土石流災害調查經驗得知，此範圍內的土石流料源，除了受震強度降低的岩體材料，更多屬於停留於坡面的同震山崩堆積材料，由於鐵路網易受到運移快速的土石流影響，整治策略的優先順序便取決於對每個鐵路路段遭受土石流風險的準確評估。對此，本文透過數值分析技術來實現逆算分析、量體重建與影響範圍模擬，為評估震後落石暨土石流之之災害鍊風險影響提供了一套可移植之分析方法學。本文以北迴線和仁車站（里程 K48）為研究場址，藉由 20240403 花蓮地震震後半年間三起土石流事件，建立基於數值模擬的運移與堆積分析模型，反算校核成果顯示數值模型具備重現多次土石流事件疊加導致地形變化之潛力，並進一步考量不同土石流風險與整治策略情境，評估潛在的土石流衝擊風險與工法配置有效性，提供最終整治設計上量化的參考依據。

關鍵詞：20240403 花蓮地震、北迴線 K48 路段、地震災害鍊、土石流模擬、風險評估

前言

大地震震央區域的山崩災害是一個長期的地質過程，這個過程同時包括同震山崩，以及震後二次災害將堆積物從山體坡面帶往下游沉積物匯聚口的行為，此即「地震災害鍊」，對於經常緊鄰高陡邊坡興建，或

者橫切山體通過的鐵路等交通運輸網絡而言，地震災害鍊經常直接導致交通中斷，甚至威脅駕駛與乘客的生命財產安全。例如 2024 年 4 月 3 號發生的花蓮地震（下稱 20240403 花蓮地震），同震落石事件造成臺鐵北迴線多處受損與中斷（圖 1a）^[1]，儘管掉落至軌道範圍內的岩塊可以迅速地移除並搶通交通，但震後至今 2 年期間，每逢豪雨颱風便好發土石流等二次災害

* 通訊作者，chenghan.stephan.lin@proton.me

事件，即使距離土石流發生區甚遠，也可能遭受廣泛的破壞；另一方面，相較於同震落石，受土石流影響所導致鐵路運輸的中斷，所需要的搶修時間和復建經費更為巨大，顯示震後落石暨土石流之災害鍊對軌道與鐵路相關設施的整治復建工程，存在長期的風險影響，如何有效地評估鐵路軌道等線形基礎設施暴露於土石流災害鍊風險對於規劃整治復建方案至關重要。

本文以北迴線 K48 路段為案例場址，該路段緊臨和仁車站，其東、西正線南側分別銜接臺鐵和仁隧道北口與新和仁隧道北口，鄰近地勢西高東低（圖 1b 紅框），東側緊鄰太平洋，整體高程在 1,000 m 以內，且在高程 500 m 至 600 m 間存在一區域性的陡崖特徵。K48 上邊坡溪流屬於編號花縣 DF172 之高風險土石流潛勢溪流，集水區面積為 0.3046 km²，均位於國有林班地內。沿此溪流基於光達地形資料繪製一 20240403 地震前地形剖面，如圖 1 所示，溪流坡度由源頭至最下游從 53°、42°、33° 緩至 24°，且上述區域性的陡崖也存在溪流中上游處，陡崖坡度約為 71°。地質岩性方面，本文團隊於 K48 路段上邊坡的現場調查發現，20240403 同震落石的掉落岩塊多屬於大理岩，同時比對地礦中心 1/50,000 地質圖和平圖幅、1930 年日治時期

地質圖，確認了所關注 K48 路段的上邊坡地層屬於葉理發達的開南崗片麻岩，更高處則為厚層塊狀的九曲大理岩，地層界線位置恰位於蝕溝中上游的地形遷急處（高程約 400 m），是以上述區域性的陡崖特徵，應屬大理岩與片麻岩岩體強度不同所反映的地貌。

基於 20240403 花蓮地震震前航空照片、震後衛星影像、震後 UAV 影像進行比對判釋，用以釐清地震期間以及震後約四個月內，發生於北迴線 K48 路段的地震災害鍊的發展。如圖 2 所示，除同震落石外，震後四個月共發生三起衝擊 K48 路段的土石流災害，以及一起震後落石事件，以下針對三起土石流災害說明如下：

1. 災後衛星影像、災後 UAV 影像（20240422 土石流）：如圖 2(c) 所示，20240422 土石流的主要料源為同震落石堆積在蝕溝中的岩塊，但影響鐵路設施的是土石流沿蝕溝流動時額外挾帶的土砂。災前、災後衛星影像可以觀察到上邊坡兩處主要落石來源區已露出新鮮岩盤陡面，且下方來源區趾部仍堆積大量岩塊，此外，下坡處災後 UAV 影像可清楚辨識巨石位置，經災前、災後比對確認其並未移動，可以作為多期影像的位置標定，UAV 影像也指出 20240422 土石流在行經巨石後，轉往

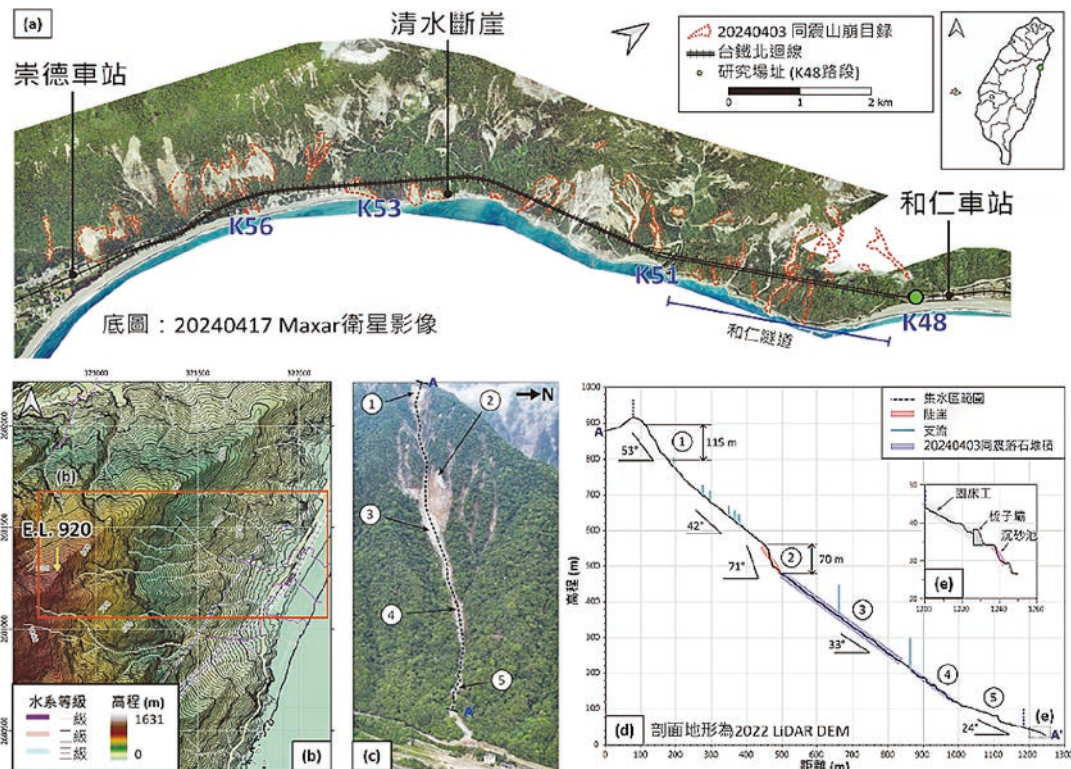


圖 1 (a) 20240403 花蓮地震同震山崩與臺鐵北迴線之空間分布；(b) 地形、陰影與水系分布；(c) 20240429 UAV 空拍照片；(d) 地震前之地形剖面與下游既有防砂設施。

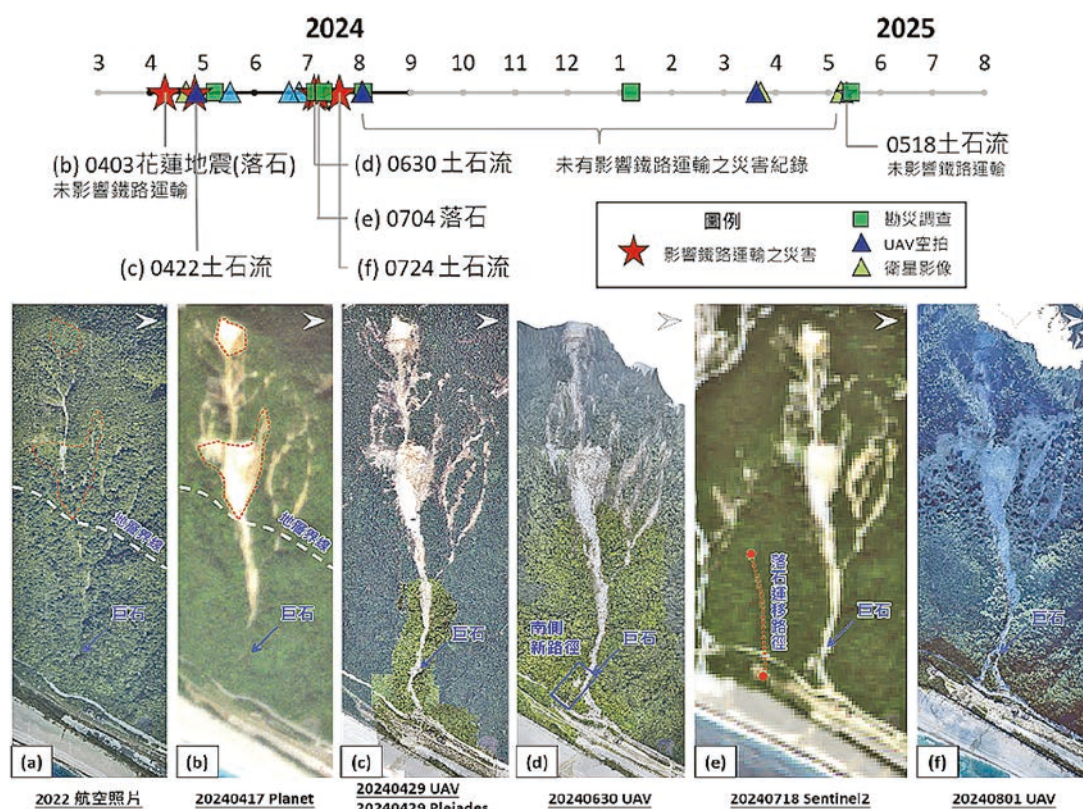


圖 2 臺鐵北迴線 K48 路段地震災害錄、勘災調查與影像判釋之時間軸對照。

北側的路徑運移流向公路與鐵路設施。

2. 災後 UAV 影像 (20240630、20240701 土石流)：如圖 2(d) 所示，20240630、20240701 土石流在前期流動路徑上，在行經巨石後發展出一條南側的新路徑，此南側路徑直接朝往新和仁車站北口方向，使 20240630、20240701 土石流在 K48 路段之地震災害鏈中扮演了災情擴大的關鍵角色。此外，觀察土石流原流路與蝕溝均相較前期影像有明顯擴大，顯示 20240630、20240701 土石流除了有更大的量體規模，同時大量降雨的影響也導致堆積在蝕溝內的鬆散土石移動，以及蝕溝源頭擴大成崩塌。
3. 災後 UAV 影像 (20240724 土石流)：20240723 到 20240726 登陸臺灣的凱米颱風是自 20240403 花蓮地震發生以來首個強颱風威脅^[2,3]，如圖 2(f) 所示，凱米颱風期間於 K48 路段所發生的 20240724 土石流，其量體規模更勝前兩次土石流災害，且由於 20240630、20240701 土石流已發展出來新的南側流路，造成 20240724 土石流所挾帶的土砂材料多往該路徑流動，從災害 UAV 影像可以明顯觀察到南側路徑的擴大，以及路徑直進方向上的鐵路受損嚴重，土砂影響範圍達到海岸位置。儘管災害

UAV 影像在邊坡高處有扭曲缺漏現象，仍可以觀察到 20240403 花蓮地震同震落石的堆積物已慢慢沿蝕溝向下運移，且在上游蝕溝匯聚處有明顯擴大，以及蝕溝右岸的下刷特徵。

本團隊亦基於 2023 年內政部航拍與 2025 年 3 月航拍之兩期 LiDAR DEM，進行 DOD (Difference of DEM) 分析來獲得 2024 年震後災害鏈之地表變化，在使用的 DEM 資料所覆蓋的時間段，2024422、20240630 ~ 20240701、20240724 三起震後土石流事件為導致地表地貌變化的主要災害，因此 DOD 分析結果可視為 K48 路段震後災害鏈的土砂侵蝕與堆積量，如圖 3 所示，主要侵蝕量約為 4.5 萬方，主要堆積量（即坡面殘餘不安定土砂量）約為 2.7 萬方。

土石流災害鏈模擬方法與參數校核

本文採用 RAMMS::Debrisflow 軟體，是一種基於質量動量守恆原理以及深度平均運動方程（淺水方程）的數值方法，在流變學模型上則基於雙參數 Voellmy 流體摩擦模型，該流體摩擦模型視土石流為單相流體，即數值模型中並無將土石流區分為流體相和固相，而將土石流模擬為材料整體的流動行為，雙摩擦係數決定了模

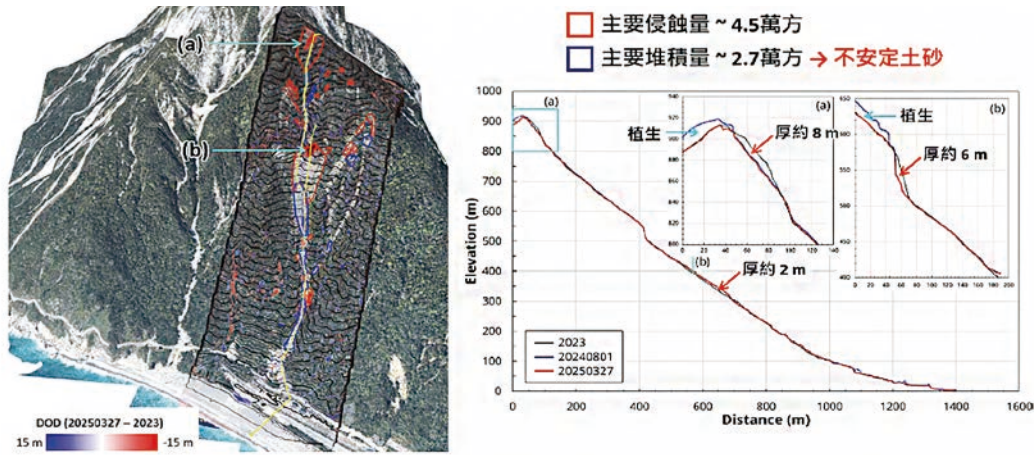


圖 3 20250327 LiDAR DEM 與 2023 LiDAR DEM 之 DOD 與剖面分析

擬中的流動行為：當流動接近停止時，與法向應力相關之庫倫乾摩擦係數 (μ) 佔主導地位；當流動快速流動時，與速度平方相關之黏滯湍流摩擦係數 (ξ) 佔主導地位。此外，RAMMS::Debrisflow 中的侵蝕模組則可以模擬土石流在渠道中流動時經常夾帶河床沉積物，而導致河床高程的淨下降，造成侵蝕與量體增加的現象。

有別於過去土石流相關模擬分析多屬單一事件案例，本文旨在建立一套用於量化分析地震災害鍊中土石流災害的分析方法學。因此，歷次土石流事件之間的數值模型連貫性是本計畫的另一重點項目，為了達到此目的，本文首先基於 2023 年內政部 LiDAR DEM 來建立 20240422 土石流的數值模型 (K48 路段地震災害鍊首起事件)，並進一步以前期地形加上前期 (20240422) 土石流模擬在流動侵蝕區之淤積結果，建立出新的災前地形面，來建立第二起 (2024629、20240701) 土石流災害的數值模型，以此類推後續災害鍊之模型建立，並根據歷次土石流災害之堆積形貌來校核雙摩擦係數 μ 與 ξ 。

在初始來源區的條件上，設定來源區與堆積區的範圍維持相同，假設各來源區皆為 0.1 m 崩塌深度，故各事件之來源區料源體積皆為 2,416 m³，考量到支流與主流土石流材料匯聚處以降可視為一完整的土石流行為，因此將流動區由 0403 同震落石堆積下緣向上提升到主流匯聚處，並加上南側蝕溝範圍一同視為流動侵蝕區，是以歷次土石流事件模擬之總流出土砂量體，視為料源體積加上歷次事件之渠道侵蝕土砂體積。

圖 4 整理了 RAMMS::Debrisflow 模擬 K48 震後災害鍊的模擬成果與影響範圍，其中 20240704 落石事件之模擬方法學可參考林承翰等人^[4]，本文著重於探討土石流災害模擬。模擬歷次土石流事件之侵蝕量與堆積土方量則統計如表 1 所示。基於相同來源區料源的假設條件下，歷次土石流災害侵入鐵路設施的土方量大小主要受到土石流侵蝕所額外增加的土砂，同時，模擬影響範圍也與歷次災害後的現場紀錄有一定的可比性，即 20240422 土石流主要衝擊北側鐵軌里程與

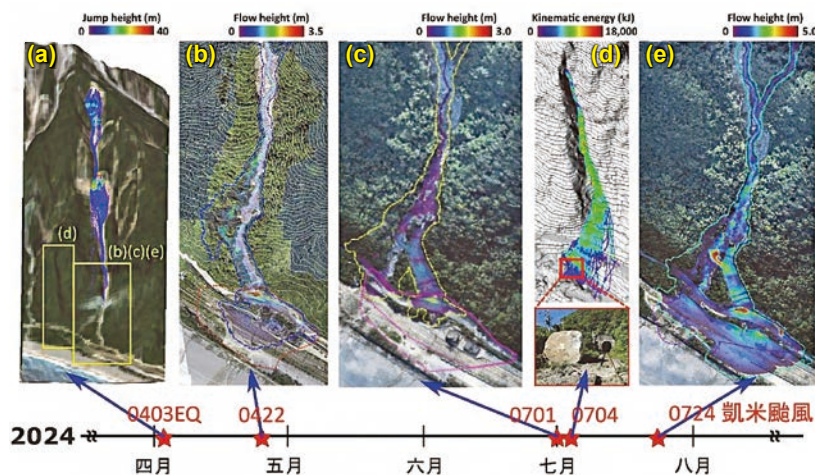


圖 4 RAMMS::Debrisflow 反算模擬 K48 路段之落石及土石流災害鍊成果

道班房，20240630、20240701 土石流則僅有少量土砂越過擋土牆到達南側新和仁隧道前的軌道，20240724 土石流有最廣的影響範圍，且土砂與岩塊堆積明顯擴及東西正線軌道。上述模擬影響範圍的變化，是受惠於歷次土石流數值模型均考慮了前期土石流在下游流動段所造成的蝕溝淤積，此蝕溝地形的變化，也是 20240630、20240701 土石流轉往南側蝕溝流動形成新流路的原因之一。根據反算模擬，2024422、20240630 ~ 20240701、20240724 三起震後土石流災害鍊的流出到鐵公路的堆積土方量總共為 12,105 m³（約 1.2 萬方，如表 1），假設此為 2024 年震後土石流災害鍊共流出的土砂量，則反算模擬流出土砂 1.2 萬方 + 坡面殘餘 2.7 萬方 = 3.9 萬方，接近 DOD 分析所得到的主要侵蝕量 4.5 萬方（圖 3），因此驗證本研究建立之分析方

表 1 RAMMS::Debrisflow 模擬 K48 路段 20240422、20240630 與 20240701、20240724 三次土石流災害之侵蝕與堆積土方量。

災害日期	20240422	20240630、20240701	20240724
模擬料源量 (m ³)	2,416	2,416	2,416
侵蝕量 (m ³)	186	982	6,597
堆積土方量 (m ³) *	2,586	1,029	8,490

* 堆積土方量為計算各數值模型中堆積區範圍的模擬淤積量體。

未來風險影響與整治策略評估 風險情境與數值模型建立

經 2024 年震後土石流災害鍊的數值方法驗證與校核模擬參數，本研究進一步應用 RAMSS::Debrisflow

三維數值模型來評估臺鐵北迴線 K48 路段針對未來土石流災害之防護工程有效性。相關防護工程如圖 5(a) 所示，鐵路路權內配置了包含台 9 丁公路靠海側高 3 公尺的擋牆、位於臺鐵西正線鐵軌北側高 10 公尺的擋牆、西正線之導流假隧道、深 6 公尺的沉砂池與東側 3 公尺高擋牆；而農業部林保署則配置了一座高 9 公尺的護岸與高 6 公尺的潛壩兩座，各優化工程針在建立數值模型所需要的空間幾何尺寸（高度、角度與長度），均詳列在表 2，在 RAMMS::Debrisflow 中各防護工程皆視為不可破壞之剛體，故本章節所進行的防護工程有效性評估主要針對各防護設施的導流及沉砂能力。

本研究團隊在 K48 場址所設定的災害風險分析情境，是基於以下準則：

1. 短期災害發生後能夠盡速搶修、通車為主。
2. 中期所完成的被動防護工程應以 0403 地震誘發之災害規模為設計目標。
3. 長期上以針對超過 0403 地震所誘發之災害規模為設計目標。

表 2 於蝕溝下游和臺鐵路權範圍所分別配置之被動防護設施與幾何尺寸。

林保署整治配置（蝕溝下游）	
護岸	H = 9 m ; W = 3 m
潛壩	H = 6 m ; W = 4.1 m
臺鐵整治配置（臺鐵路權範圍）	
導流假隧道	兩側溢牆 H = 3 m ; 頂板傾斜 6°
沉砂池	D = 6 m（池底高程 14.14 m）
擋牆 A（公路側）	H = 3 m
擋牆 B（西正線側）	H = 10 m
擋牆 C（沉砂池南側）	H = 3 m

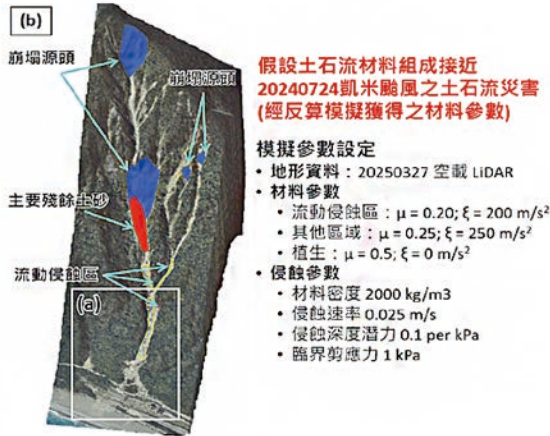
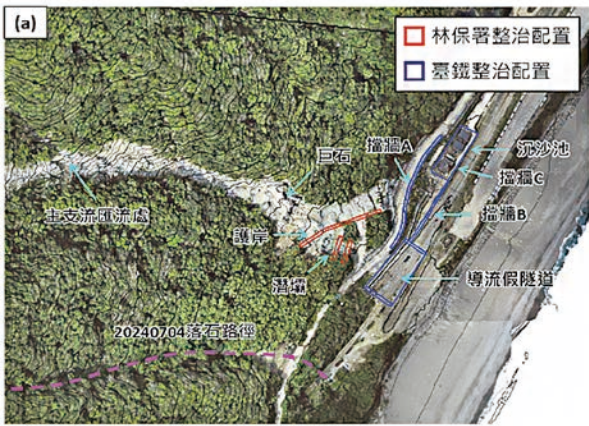


圖 5 (a) 針對 DF172 土石流潛勢溪流所配置之被動防護設施與空間分布；(b) K48 路段未來土石流風險情境模擬之數值模型與參數設定

北迴線 K48 路段在 2024 年地震後至今所記錄的最大規模災害為 20240724 凱米颱風所造成土石流事件（圖 2(f)、圖 4(e)），據以建立本案例合理的土石流風險情境，與 2024 年 7 月凱米颱風所誘發的土石流量體規模（8,490 m³）相比，本階段所設定的中期、長期與極端土石流風險情境，分別對應約 90%、300%、450% 的震後最大土石流災害規模，若與 DOD 分析成果得到的目前蝕溝內殘餘不安定土砂量（如圖 3，約 2.7 萬方）相比，本階段所設定的長期與極端土石流風險情境，則分別對應殘餘土砂完全流出（~ 100%）和極端災害情境（~ 140%）。此外，由於潛在風險評估應考慮 0403 地震後的土石流潛勢與威脅，故本文團隊透過 2025 年 3 月 27 號所拍攝之正射影像暨 LiDAR DEM 進行潛在來源區的判釋，判釋圈繪時亦參考 DOD 分析成果來釐清蝕溝內現有土砂堆積區域，作為未來土石流災害時可能受侵蝕的額外土砂來源，分析模型與參數設定如圖 5(b) 所示，由於目前現場缺乏土石流相關監測儀器，因此依循反算分析所建立的分析方法，假設塊體均由源頭區釋放，土砂單位重和地形解析度則分別設定為 20 kN/m³ 和 1 m，並基於 DOD 分析成果設定最大可侵蝕深度為 1 m。

比較不同整治策略情境

為釐清不同整治策略的有效性，本研究利用 RAMMS::Debrisflow 數值模型模擬四種整治策略情境，本階段分析情境包括：

1. 未進行整治（編號 A）。
2. 僅農業部林保署針對中下游蝕溝整治，即圖 5(a) 中護岸與潛壩（編號 B）。
3. 僅臺鐵針對鐵路權責範圍進行整治，即圖 5(a) 中導流假隧道、擋牆與沉砂池（編號 C）。
4. 整體整治配置，即圖 5(a) 中所有防護工法（編號 D）。

基於殘餘土砂完全流出（~ 2.9 萬方）的長期土石流風險進行有效性評估，圖 6 為比較不同整治策略情境的最大流高模擬結果。首先觀察未進行整治的模擬結果，其土石流最終影響範圍接近 2024 年 7 月凱米颱風所發生的土石流災情，土砂將從北、南兩流路侵入臺 9 丁公路以降，最終掩蓋了西正線北隧道口前，到既有沉沙池與道班房之間的軌道設施，且與上述凱米颱風之土石流事件相比，圖 6 顯示未進行整治且若殘餘土砂完全流出，則土砂流經鐵路權責範圍內的最大流動高度將會顯著增加，達到接近 5 公尺左右，並進而造成大量的土砂堆積在鐵軌設

施上；另一方面，若僅農業部林保署針對中下游蝕溝進行整治，而臺鐵未新增任何防護設施，模擬結果指出，土砂自中游行經護岸位置時，土石流材料將受引導轉往北側流路運移，僅有極少數漫流至南側流路，在此調適引導下，土石流流動行為將維持直進式朝北側流路下游設施衝擊，最終雖然新和仁隧道口的位置免於受到衝擊，但由於主砂全數往北側流路下方運，反而使既有沉沙池與道班房之間形成更廣、更高的堆積影響範圍，在西正線的最大流動高度也達到 4 ~ 6 公尺左右；另一僅臺鐵針對鐵路權責範圍進行整治的情境模擬結果則顯示，由於 DF172 土石流潛勢溪流已在 2024629、20240701 土石流事件中形成新的南側主要流路，因此在 C2 情境中土砂將多數沿南側流路流出，受到假隧道導流的作用，雖使最終最大土石流流高和土砂堆積高度顯著下降，但同時也造成土砂影響範圍擴及至東、西正線兩鐵軌設施，此外，儘管部分土砂仍沿原北側流路往下游流出，但新設擋牆、沉砂池等設施發揮了良好的攔阻與沉砂效果，因此鄰近原道班房的鐵軌設施在 C2 情境中未受顯著衝擊。若採取整體整治配置，如 D2 情境模擬結果，不但可引導土石流流路轉往北側流出，並可將多數土砂材料阻攔在西正線前（圖 6），且假隧道也預期能夠將少數往南側流路漫流的土砂，發揮往出海口位置導流的功效。

比較不同災害規模情境

經 3.2 小節比較不同整治策略之有效性，本研究確認在殘餘土砂完全流出的長期土石流規模風險下，若為達到土砂不侵入鐵軌設施之整治目標，則須在同時配置中下游蝕溝和臺鐵路權範圍內的被動防護工法（如圖 6 之 D2 模擬結果）。而為了進一步釐清在整體整治配置條件下，不同災害規模情境下的土砂衝擊危害度，本研究利用 RAMMS::Debrisflow 數值模型模擬五種風險規模情境，本階段分析情境包括：

1. 極端災害情境，總流動土砂約 3.8 萬方（編號 D5）；
2. 長期風險情境，總流動土砂約 2.9 萬方，即目前殘餘土砂完全流出之情境（編號 D4）；
3. 中長期風險情境，總流動土砂約 1.9 萬方（編號 D3）；
4. 中長期風險情境，總流動土砂約 3.8 萬方（編號 D2）；
5. 中期風險情境，總流動土砂約 0.8 萬方，即 20240403 地震災害錄迄今紀錄最大土石流事件規模（編號 D1）。

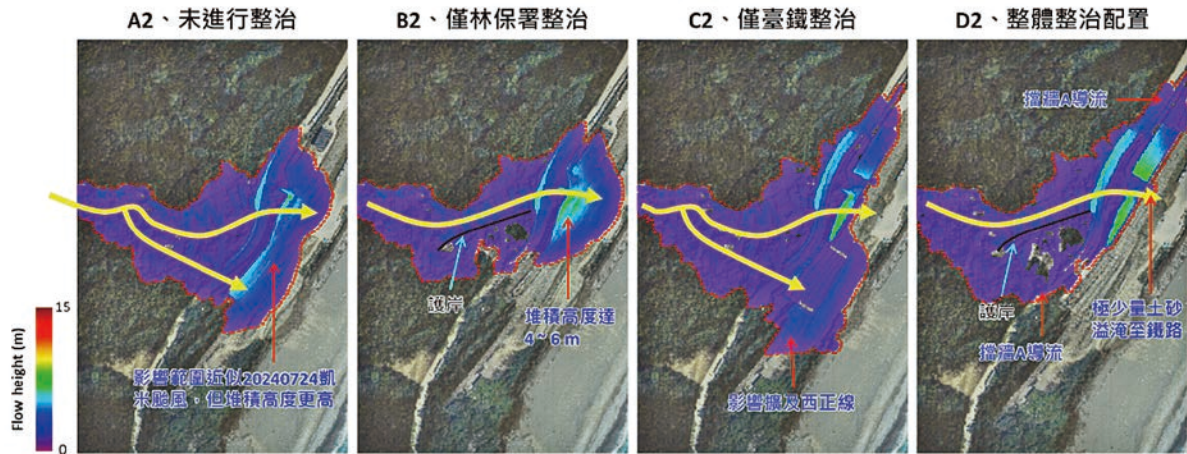


圖 6 在土石流中期風險規模下比較不同整治策略情境模擬之最終堆積高度

首先，將 D1 模擬結果與 20240724 凱米颱風情境（圖 4(e)）比較，如圖 7 所示，可以明顯觀察到由於 D1 模型中新增加了下游蝕溝的護岸，使土砂運移時將受到引導往北側流路行進，而使在相同災害規模下，D1 模型中南側流路以降的結構物設施幾乎未受到土砂衝擊，且受益於臺鐵新增的三道擋牆，也能夠將往北側流路運移的土砂有效的攔阻在鐵軌之前，免於軌道設施受到衝擊；當 K48 路段範圍納入整體整治配置，則土砂不侵入鐵軌設施之整治目標，要當土石流風險規模達到 1.9 萬方時（D3 模型），才有少量土砂自擋牆 B 與沉沙池之間溢淹至軌道，然而根據 RAMMS::Debrisflow 模擬之最大流動高度僅小於 1 公尺，相較於 2024 年震後土石流災害鍊對於軌道設施的衝擊已有顯著的下降；當殘餘土砂完全流出時（長期風險情境），原道班房位置新設的沉沙池將接近淤滿，而擋牆 A、擋牆 B 的攔阻空間也接近設計上限，由於土石流流露受到防護工法往北側的引導，因此

多餘的土砂將持續地朝臺 9 丁與沉沙池北側漫淹；根據 RAMMS::Debrisflow 之情境模擬結果，即使在極端災害情境下（~ 140% 之 20240724 凱米颱風土石流規模），目前整體整治配置仍可大致達成土砂不侵入鐵軌設施之整治目標，且若有超過本研究設定之極端災害規模事件發生，新設假隧道以上的南側流路也還有囚砂空間的餘裕，且新設假隧道也能發揮其導流土砂至出海口的效果。

風險情境成果綜整

圖 8(a) 為比較不同整治策略情境下的土石流最終影響範圍，模擬結果指出各整治策略對臺鐵 K48 路段的影響主要包括：(1) 土砂是否導往北側流路，以及 (2) 土砂堆積高度。此外，減災防災的另一項關鍵是災害應變時間與位置，模擬成果顯示，在土砂自源頭區釋放 150 秒後，土石流侵入鐵路設施的位置，主要取決於中下游蝕溝是否進行整治，而土石流侵入鐵路設施的時間則取決於鐵路權責範圍是否進行整治，尤其擋

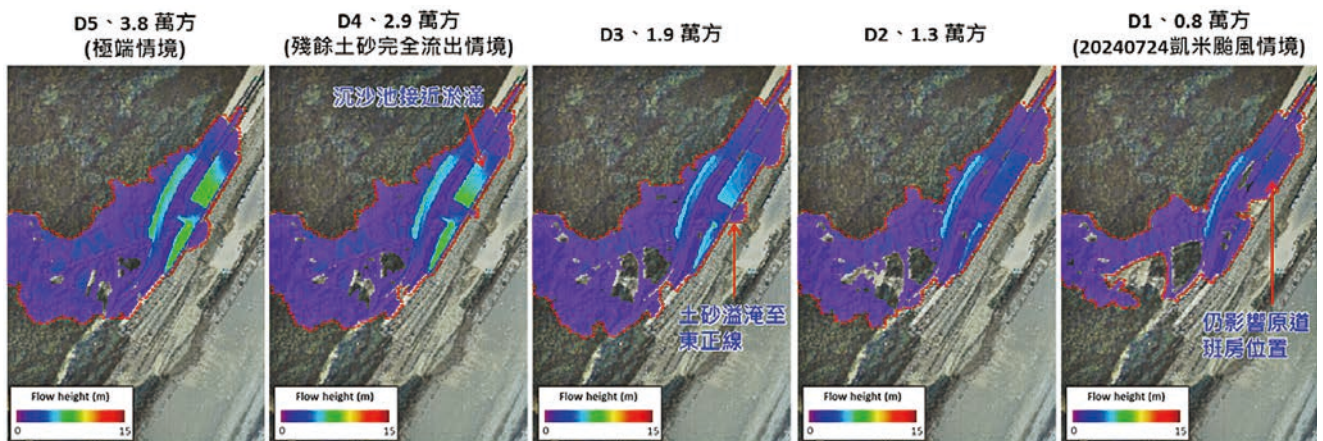


圖 7 在整體配置條件下比較不同土石流風險情境模擬之最終堆積高度

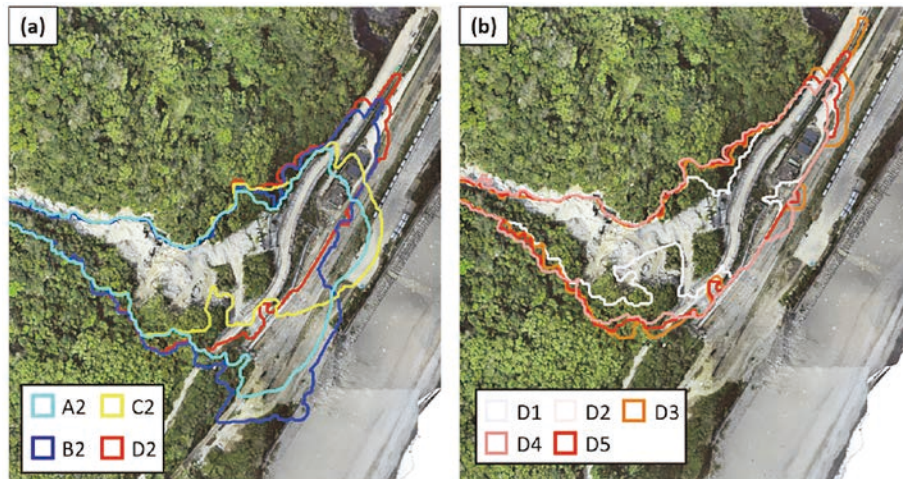


圖 8 在 (a) 土石流中期風險規模下與 (b) 在整體配置條件下分別比較不同整治策略與不同土石流風險情境模擬之最終影響範圍。

牆 A 對延緩土砂流向鐵軌有良好的效果（如情境 B2 與 D2），針對目前缺乏保護的新和仁隧道口，採取假隧道導流確實能夠大幅降低土砂堆積在鐵軌設施的關鍵位置 and 高度（如情境 A2 與 C2），但若殘餘土砂完全流出，仍未能完全將土砂導流至鐵軌之外。此外，圖 8(b) 為比較不同災害規模情境下的土石流最終影響範圍，模擬結果指出土石流最終影響範圍隨災害規模增加而逐漸擴大，且當設計採用整體整治配置之策略，則影響範圍主要朝北側擴大，沉砂池效果約可承受 D4 土砂規模情境（即殘餘土砂完全流出），導流假隧道則在 D5 土砂規模情境仍可發揮其預期效果。綜上所述，本文目前模擬成果顯示採取整體整治配置，可引導土石流流路轉往北側流出，並將多數土砂材料阻攔在東正線前，達不影響鐵軌設施的目標，在殘餘土砂完全流出的條件下，此時鐵路範圍內的堆積土方量為 19,585 m³，略低於目前設計假隧道、擋牆、沉砂池等被動估法提供的總共 2.2 萬方的囚砂空間。

結論與建議

本文主要針對北迴線 K48 路段在 20240403 花蓮地震後，所發生的地震災害鏈影響衝擊，透過 RAMMS::Debrisflow 數值模擬技術建立分析方法學，並針對 K48 路段已擬定的整治對策，量化評估其在不同災害鏈風險情境下的工程有效性。所建立之分析方法，透過將前次災害的模擬堆積地形將加回原始地形面，做為下一次土石流事件的初始地形，使各次災害的數值模型間具有連貫性，並能克服缺乏多期災後地形資料之反衍困難。基於來源區量體相同的假設條件下，本文模擬指出災害鏈

中土石流影響規模的擴大，是來自於侵蝕河床所挾帶的額外土砂，以及災害鏈過程中河床地貌與流路的改變。最後應用所建立分析方法學，評估不同整治配置、不同災害規模之情境，結果顯示在考慮整體整治配置與殘餘土砂完全流出（約 2.9 萬方）的條件下，在鐵路範圍內的堆積土方量為 19,585 m³，土砂到達臺鐵整治設施的時間約為 150 秒，情境模擬也指出在該模型條件下，目前所配置的被動防護工法所能提供的囚砂空間將接近緊繃，而土石流受到工程設施導流之影響，也造成多餘土砂也將開始往沉砂池北側溢淹。在目前數值模型中，並無法模擬護岸、擋牆受土砂衝擊力的結構破壞，考量現實中防護構造若因土石流衝擊而破壞，將失去攔阻引流的預期效果，建議未來實務設計時可藉由模擬獲得的最大土石流流速，帶入水保手冊中的經驗公式來檢核土石流靜動態衝擊力，評估防護工程結構的強度，方能確保本報告中各情境模擬成果的合理性。

參考文獻

1. 王國隆、柯明淳、林聖琪、柯永彥、林承翰、周昕成、郭觀豪、林于超、陳俊樺、楊哲銘、吳重君、詹家賓、林俊廷（2024），「2024 年 0403 花蓮地震地工災害初步調查報告」，地工技術，第 180 期，第 91-102 頁。
2. 國家災害防救科技中心（2024），「113 年凱米颱風災情彙整報告」，國家災害防救科技中心。
3. 農業部農村發展及水土保持署（2024），「重大土砂災例正式報告—113 年凱米颱風—花蓮秀林-001」，農業部農村發展及水土保持署。
4. 林承翰、郭觀豪、林于超、周昕成、陳俊樺、邱家吉、翁孟嘉、林銘郎（2025），「0403 花蓮地震後落石災害危害度評估—以臺鐵北迴線 K51 路段為例」，地工技術，第 184 期，第 83-92 頁。

