



災害鏈型態之防災觀點與省思一 0403 花蓮地震及次生坡地災害為例

財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心組長 / 陳俊愷
財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心組長 / 顏銀桐
財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心副主任 / 曹鼎志

關鍵字：災害鏈、0403 花蓮地震、坡地災害、風險管理

摘要

強震事件後，土石流、崩塌等土砂災害發生的頻率增加，為降低災害影響，強化中央政府、地方政府與民眾之間的合作與資訊交流，有必要採取跨學科方法於地震災區進行災害風險治理。災害鏈具備時間、空間與因果關聯性，通常由地震或降雨引發原生災害，隨後轉化為碎屑流、堰塞湖及潰決洪水等次生災害。本文將藉由 0403 花蓮地震及次生坡地災害為例，回顧當重大災害發生後，可能對彼此生活環境造成何種影響，作為未來防救災應變處置、災害風險管理、甚至個人檢視所處環境可能遭遇風險之參考。

一、前言

臺灣山坡地佔全島四分之三以上面積，加以位處西太平洋之地震好發區域，伴隨每年平均並有 3 至 4 個颱風侵襲，故常於颱風季節發生山崩、土石流等土砂災害。由原生災害觸發、多種次生災害依序或併發，從而在更長時間和更大範圍內持續產生災害效應形成之鏈式災害系統被稱之為「地質災害鏈」。地質災害鏈空間影響範圍廣、時效長，且隱蔽性強，難以預測和防範，從而可能對工程建設和環境造成巨大破壞，進而對重大工程和人民生命安全構成嚴峻挑戰或造成重大損失，具有災種轉化、鏈式傳播擴展、時空放大、難以預測等特徵 [1,2]。



2024年4月3日花蓮發生大規模地震(後文簡稱為0403地震或0403花蓮地震)，事件發生後，多處山區邊坡出現崩塌、落石與局部土石鬆動，造成沿線道路中斷、車輛受損及人員傷亡，即便經過搶修處理通行，仍具有極高的致災風險。臺灣東部從蘇澳至花蓮海岸沿線地形陡峭、地質破碎與氣候多雨的高風險環境中，山區公路、隧道出口與邊坡工程臨近急峻山坡，一旦遭遇強震或豪雨事件，或是強震與颱風的加乘效應，極易造成重大邊坡災害。相比於地震發生後較常聚焦的都會區建物震害，東北部沿岸及其山區坡地災害帶來的是交通中斷、聚落孤島、物資與救援受限，對整體社會韌性的影響更為長遠。

本文將著重於地震發生後，因地震源及地震動型態的特性，針對花東坡地衝擊影響，探討衍生的災害鏈型態及整體如何進行防減災之策略觀點。嘗試回應下列問題：

1. 0403地震在震源機制與地震動特性為何？
2. 0403地震特性有哪些足以影響沿岸及山區坡地的關鍵特徵？
3. 地震後坡地災害的分布與型態及其背後的控制因子為何？
4. 地震與後續降雨如何形成「延續性的山區災害風險」？
5. 從防災治理角度，0403地震引致之災害風險判釋及安全管理有何啟示？

透過上述探討，期望為「防災」議題提供一個以災害鏈為主軸的整體防治概念圖像。

二、地震源及其震波帶來的地震動衝擊

2.1 地震震源與發震斷層型態

2024年4月3日上午7時58分，臺灣東部花蓮發生了芮氏規模7.2的強烈地震，初版之中央氣象署地震速報資訊顯示震央位於花蓮縣政府南南東方25公里處之臺灣東部海域上，震源深度為15.5公里。後續資料更完整之後，經重新定位的結果，震央調整至花蓮壽豐，芮氏規模下修為7.1，震源深度19.7公里，屬於淺層地震。這起地震從全臺灣佈署的強震測站收錄的地震波資料，訂出了每個測站的最大震度，顯示除了造成全臺有感強烈震動外，於花蓮縣和平鄉測得最大震度6強，而周邊廣泛地區也達到5強以上，顯見其近場地震動的強大威力，地震震度分布如圖1。當地震發生時，地底岩層的錯動會產生「壓縮」與「拉張」兩種力量，地震學家透過「走向(strike)、傾角(dip)、滑動角(rake)」三個關鍵參數，利用投影技術轉化為二維的圓形圖示，稱為「震源機制解」，俗稱「海灘球」(圖2)。海灘球上深色與淺色相間的區塊，由斷層面與輔助面所劃分，分別顯示岩層受壓與被拉伸的區域，透過判讀球體上中心是白色或深色的圖案特徵，即能快速辨識出地震屬於正斷層、逆斷層或橫移斷層。據此，0403地震由海灘球顯示為一起逆斷層型態的地震。

主震發生後，餘震活動頻繁，僅13分鐘後即發生了規模6.5的強烈餘震，之後餘震活動極為頻繁且能量釋放持久，經統計至2024年4月12日中午，已記錄到861起餘



色與分布形狀，揭示了幾個重要的物理機制，可釐清島內的震度分均勻的分布的背後原因。一般地震能量會隨著距離的增加而逐漸遞減，因此從震央往外當距離越來越遠的時候，震度就會降低，然而，這起地震的兩個關鍵因素，導致出現造成坡地衝擊的震度型態，其一首要的是，近場與極淺層震源的影響，由於此次地震為深度 19.7 公里之淺層地震，地震波傳遞至地表的幾何擴散距離極短，能量在傳抵地表前耗損極少，這也導致震央上方的花蓮地區承受了最直接且劇烈的能量衝擊，因而在震央附近產生 6 強以上的震度。

最大地動速度 (Peak Ground Velocity, PGV) 通常與中長週期結構物之損壞及大範

圍山崩有較高之相關性。觀測數據顯示 (圖 3)，近斷層區域之 PGV 數值顯著相對較大，提供了巨大之動能，預期足以克服岩體間之摩擦阻力，觸發大規模之滑動與崩塌。而花蓮地區坡地陡峭地形的分布，基本上為太魯閣國家公園之山區及沿岸，恰巧就坐落在此次 0403 地震的最大震度衝擊區域，也因此造成如此重大的坡地災害。

2.3 為何是一場坡地災害比結構災損更嚴重的地震事件？

在重大之地震事件後，因山坡地遭遇地震擾動，山崩、土石流等二次災害發生之機率大幅增加，如 1999 年臺灣之 921 地震後，

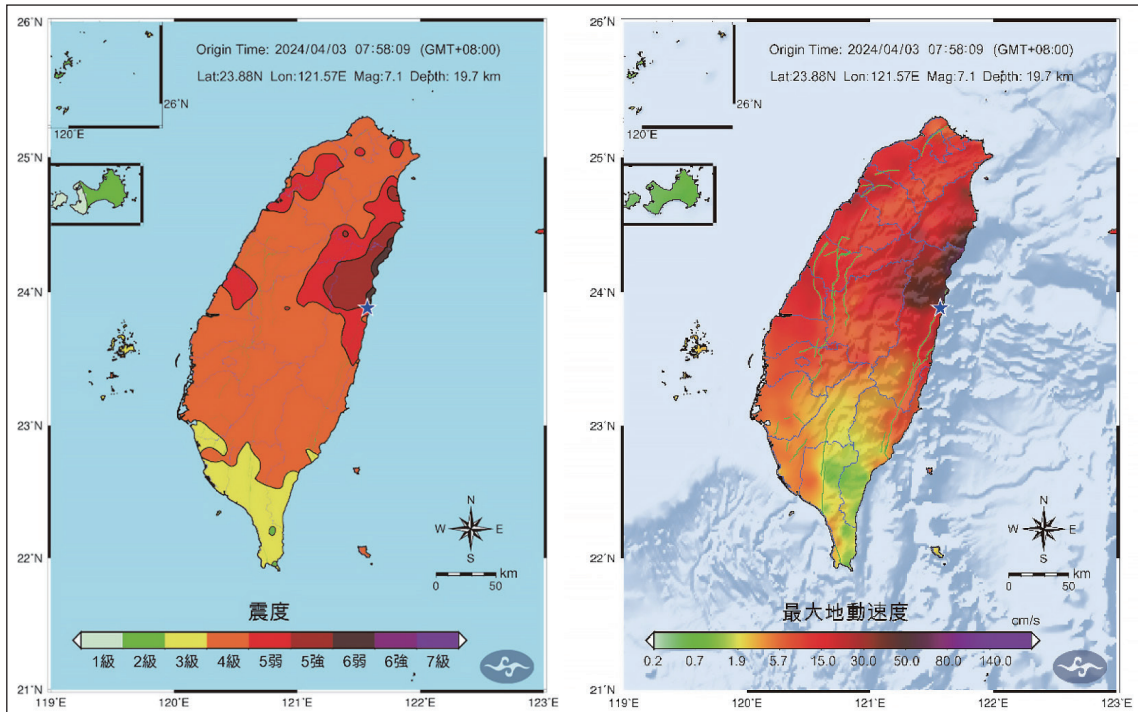


圖 3 0403 地震之震度 (左) 及最大地動速度分布圖 (右) [4]



2001 年之颱風事件即造成地震災區大量坡地災害並造成重大傷亡；2008 年中國汶川地震後，於後續數年之雨季造成強震地區之山崩、土石流重大災害。根據研究，因強烈地震而導致坡地災害頻率增加之影響期間可達 5 至 10 年以上，且其規模與範圍亦會較往常增加，對於地震後土砂災害之風險治理為一大挑戰。

花蓮北段的地形造就了不同於傳統地震災害常聚焦於都市建築物損毀，本次地震的一大關鍵特徵在於其引發了大量的次生坡地災害，包括大規模崩塌、落石與邊坡滑動，尤其嚴重衝擊了中橫公路等多條沿山道路的交通，造成物資運輸與緊急救援受限，凸顯了山區社會韌性的脆弱性。因此，0403 地震的影響絕非單純的結構物破壞，它更是一場以災害鏈型態呈現、坡地災害比結構災損更為嚴重的地震事件，為臺灣的地震與坡地防災治理帶來了深刻的省思與挑戰。

三、坡地致災環境與脆弱度

3.1 地形與地質背景

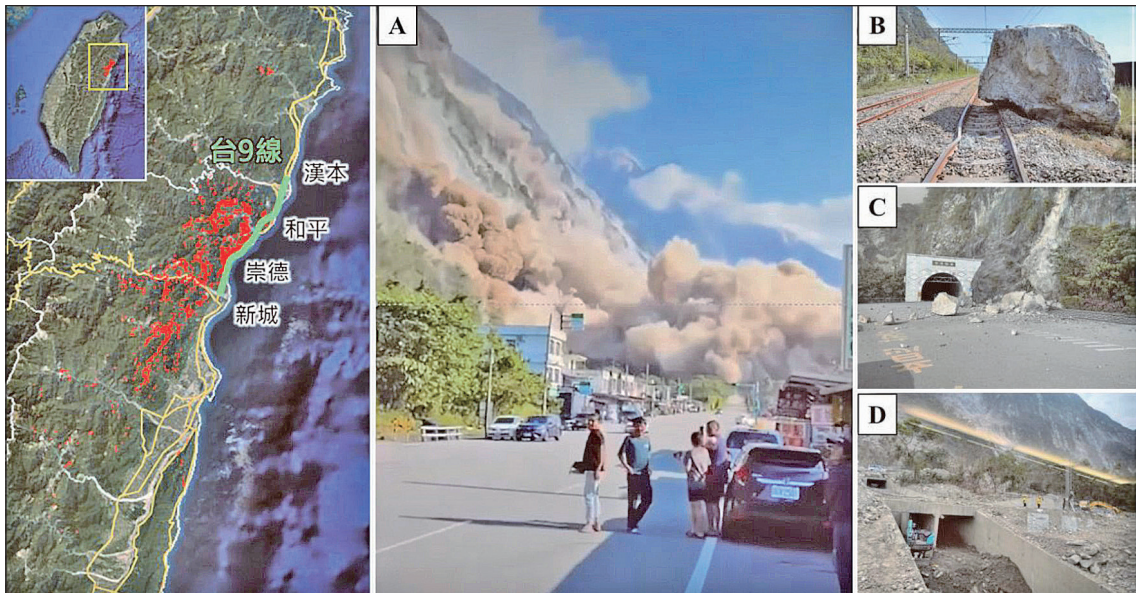
0403 花蓮地震主震的震央位置位於花蓮縣壽豐鄉，依臺灣地質構造區分類 [5]，在海岸山脈地質區 (VI) 之外。震央西側海岸山脈地質區 (VI) 以火成岩與沉積岩為主要組成，其地形、岩層、斷層與褶皺等主要構造多呈北 10 度至 20 度東走向，大致平行於板塊邊界縱谷斷層走向。縱谷西側屬於脊樑山脈地質區的大南澳片岩帶 (V)，是臺灣陸上最老的地質構造單元，主要由綠色片岩相以上的變質岩構成的變質岩 [6]。脊樑山脈與海岸山脈間為寬度介於 3 至 6 公里之縱谷平原，

主要是未膠結沖積扇與沖積層，泥沙與礫石所組成的沉積物來源為西側脊樑山脈與東側海岸山脈的岩層，局部受到縱谷的斷層系統影響，而有褶皺或斷層。地形上，自西側高達上千公尺的中央山脈，向東下降到略高於海平面的縱谷平原與米崙台地，再向東上升到丘陵地至局部數百公尺之山脊，再向東快速下降至近海區域，不論在岩石特性、變形與變質程度或地形特徵上，均顯現板塊交界位置特徵 [6]。

3.2 暴露度與脆弱度

0403 花蓮地震因強地動造成的各項地震災害，包含公私有建物毀損、鐵路等交通系統衝擊、地震山崩、人員傷亡等災情資料。

1. 建物聚落：0403 花蓮地震後，內政部國土管理署派請專業技師前往災後現場，針對受損建物進行判斷；鄰近震央的花蓮縣有 91 棟紅單建物、89 棟黃單建物，全臺超過一半的紅黃單建物分布於花蓮縣 [7,8]。另外，和中、和仁等社區因被土石流潛勢溪流包圍，震後上方崩塌地隨時有落石或土石流風險。
2. 交通設施：0403 花蓮地震後，災防科技中心於中央災害應變中心的第一次工作會報，提醒花蓮北部山區可能存在大範圍的高風險崩塌區域；在眾多遭受衝擊的公路系統中，以台 9 線與台 8 線最為嚴重，鐵公路與橋梁遭受落石崩落及碎屑崩塌，致使許多路段中斷、橋梁斷裂。台 9 線 (圖 4)，漢本、和平、崇德區域皆有山崩阻斷道路與落石掉落於鐵軌使鐵路中斷狀況，其中以位於清水、



左側地圖之紅色區域為農業部農村發展及水土保持署之 0403 花蓮地震崩塌判釋成果。A 圖：和平地區在主震後民眾拍攝之大量山崩造成大規模揚塵。B 圖：漢本至和平間的台鐵鐵軌被落石阻斷。C 圖：崇德隧道口被落石阻斷。D 圖：主震 4 個月後(2024 年 08 月 05 日)，崇德地區仍然有大量的落石與崩塌碎屑堆積於公路與鐵軌旁，清理作業持續進行中。(資料來源：公民回報、農業部農村發展及水土保持署。D 圖由楊清淵拍攝。)

圖 4 0403 地震台 9 線受災情形 [7]

大清水隧道旁的清水橋受損最為嚴重，橋體於 0403 地震時直接遭大型岩塊砸斷 [9]。此外，蘇花公路與台鐵北迴線邊坡上方存在眾多崩場地，嚴重威脅交通安全。

游光復鄉、萬榮鄉及鳳林鎮淹水，台 9 線橋梁受損。

3.3 從危險坡地到山區風險

3. 堰塞湖：0403 花蓮地震後導致山區土石鬆動，引發多處堰塞湖，主要分布在木瓜溪、萬里溪及馬太鞍溪上游。地震後加上同年度凱米颱風等後續強降雨，使這些天然壩體曾面臨潰壩風險，威脅下游包括秀林鄉、鳳林鎮、光復鄉及萬榮鄉等居民安全。經過監測，木瓜溪與萬里溪堰塞湖已於凱米颱風後潰散消失，但馬太鞍溪堰塞湖則在 2025 年 9 月發生嚴重溢流，導致下

0403 花蓮地震後，除造成花蓮市區多棟建築物受損倒塌之外，亦造成了鐵路、公路、橋梁、供水設施等公共設施之損毀，尤其於花蓮山區誘發了超過 1,900 處新增崩塌，崩塌與落石阻斷花蓮之對外交通。然而臺灣地區之汛期始於每年五月，颱風事件常帶來達 500 至 700 毫米之雨量，此對於地震災區極易引致嚴重之坡地災害，故相關機關災前整備工作之時間相當有限。



2024 年花蓮地震後第一個侵臺、影響臺灣為凱米颱風（7 月 23 日至 26 日間），全臺灣最大累積雨量為高雄市茂林區之 1,933.5 毫米（96 小時），於花蓮北部地震災區亦達約 550 公釐之累積雨量，於蘇花公路及北迴鐵路路廊引致嚴重之山崩及土石流災害。花蓮地區北向之唯一連外道路省道台 9 線（蘇花公路）於短短 5 公里長度內發生 5 處嚴重之崩塌或土石流災害，至 7 月 30 日才全面通車。北迴線鐵路亦完全中斷，同樣於約 5 公里長度內發生 3 處土石流淹沒鐵軌之災情，以及 21,500 立方公尺土石流沖毀鐵路橋之災害，造成鐵路交通中斷 10 天。

臺灣過去 20 年來於土石流防災上雖有顯著成效，但重大地震事件後之坡地災害規模往往勝於以往，影響之範圍與層級亦超出先前之經驗，地方政府與民眾常因未曾經歷該等重大事件，故無法依照往年之經驗有效預防後續衍

生之山崩與土石流災害，加上崩塌土石除影響社區民眾外，亦可能造成廣域鐵路、公路交通之毀損及阻斷，此等規模之複合災害應變於臺灣亦無太多前例可循，故民眾、地方政府、山坡地防治、交通運輸等機關必須緊密合作以降低可能之災害風險，以達成有效之風險治理。

四、0403 地震引發的坡地災害圖像

4.1 災害類型與空間分布

依據過往於地震後之經驗，除造成山區邊坡崩塌鬆散，並可能有大量崩塌進入河道，若遇強降雨極易引發土石流、不安定土砂下移引致二次災害，如圖 5 所示 [18]。依過往研究指出 [10-14]，若歷經規模大於 7 以上之強震後，誘發土石流之降雨門檻將於第一年急遽下降，其最大有效降雨量僅需震前的 1/2 ~ 1/9，證實地震對誘發土石流造成一定影響 [15-17]。

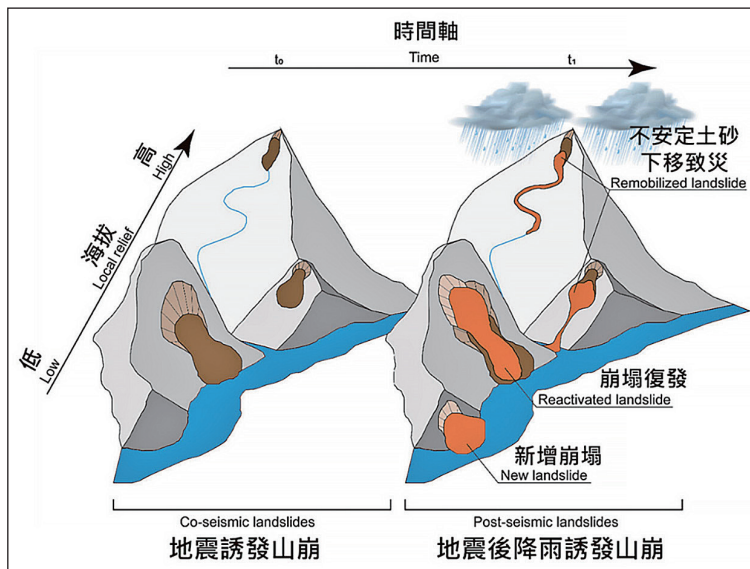


圖 5 地震誘發之山崩及後續降雨引發二次災害示意圖（摘譯自 [18]）



4.2 典型破壞型態與道路影響

參考農業部農村發展與水土保持署（以下簡稱農村水保署）於 0403 震後影像分析判釋，由 BigGIS 巨量空間資訊系統資料得知，此次地震造成全臺共計 1,942 處新生崩塌，主要分布於花蓮縣、宜蘭縣、南投縣及臺中市等 4 縣市、9 鄉鎮市區，總計新生崩塌面積為 1,521 公頃 [14,19-21]。循過往地震後之經驗，未來臺灣東部地區遭受山崩與土石流之災害發生頻率更勝於以往，中興社依據農村水保署於花蓮 0403 地震後之新生崩塌分類及處理原則（如圖 6 所示），以新生崩塌、是否具溪谷地形及重要保全對象臨近等相關條件進行檢視，並初步遴選出以下三類：

1. Type A – 評估調整土石流潛勢溪流風險等級：係指震後衛星影像判釋之新生崩塌位於既有土石流潛勢溪流集水區；
2. Type B – 評估新增土石流潛勢溪流：係指震後衛星影像判釋之新生崩塌具備溪谷地

形與保全住戶，但非位於土石流潛勢溪流集水區者；

3. Type C – 評估劃設震後土砂敏感區：係指震後衛星影像判釋之新生崩塌經評估其崩落土砂之影響範圍內具保全住戶，但未具備溪谷地形者。

中興社協助農村水保署針對花蓮 0403 地震後造成 Type B 野溪集水區進行評估，其上游坡面殘有大量不安定土砂，後續若遭受強降雨誘發新崩塌或使舊崩塌擴大，極易引發土石流等二次災害。以 Type B 之台 9 丁線 65.5 K（鄰近和仁車站）野溪為例，其溪流長度約 0.816 km，集水區面積約 30.46 公頃，最高海拔約為 990 m，地勢往東陡降至海拔 65 m，高差約為 925 m。溪流共有 4 次歷史災害記錄，分別為 2009 年莫拉克颱風、2012 年蘇拉颱風、2024 年 0403 花蓮地震後之 4 月 22 日豪雨及 6 月 29 日豪雨，均曾發生土石流災害，同時皆導致下游蘇花路廊阻斷（如圖 7 所示）。

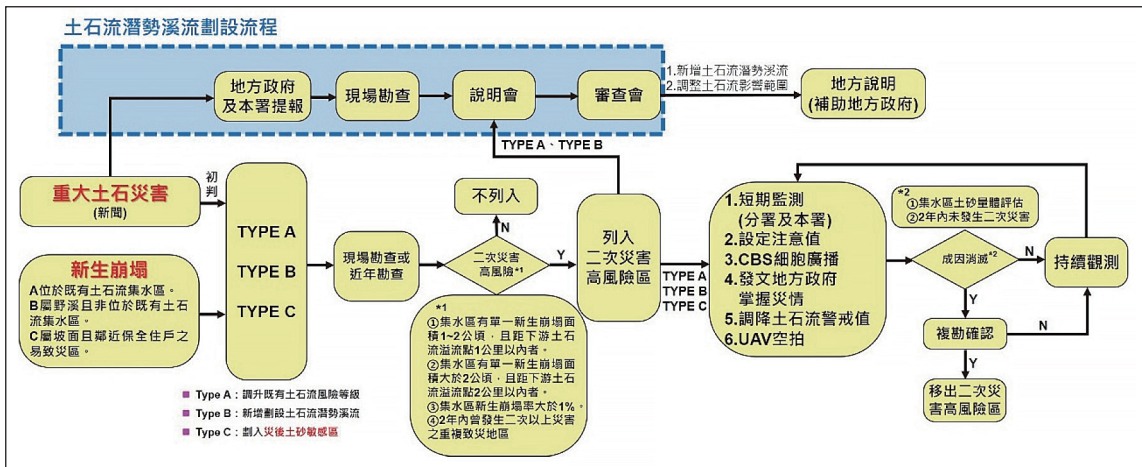


圖 6 二次災害高風險區評估流程圖 [19]



圖 7 Type B 之台 9 丁線 65.5 K 野溪（鄰近和仁車站）土石流災害歷史紀錄

4.3 關鍵設施與聚落的暴露

於震後 4 月 22 日首次土石流事件後，研究團隊於 5 月 8 日至現地勘查（如圖 8 所示），據訪談臺鐵人員得知，4 月 22 日土

石流約在下午兩時二十分發生，土石流發生流動後先阻斷台 9 丁線，並於兩時四十分淤埋東、西正線鐵路，該次事件造成台 9 丁線及鐵路分別遭土砂掩埋長度約 130 m 及 150 m。

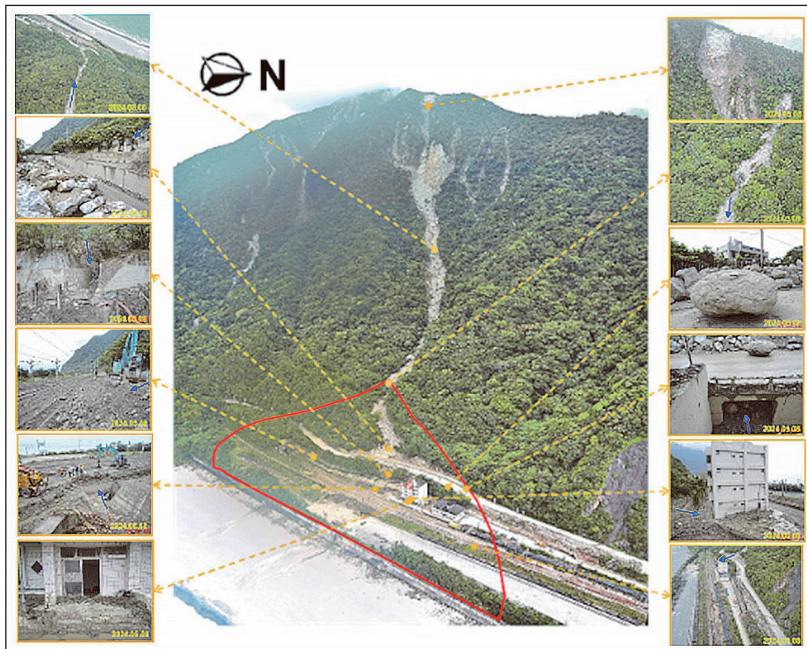


圖 8 0403 震後土石流現地調查



經現勘後，評估源頭崩塌地及坡面上之不安定土砂仍可能提供土石流料源，且下游左岸臺鐵宿舍緊鄰流路有再次受災之虞，故建議新增為土石流潛勢溪流（新增後編號為花縣 DF172）。土石流影響範圍之劃設以台 9 丁線上游之地形開闊處起點作為溢流點，於溢流點處先以 105 度夾角展開，並依池谷浩經驗公式計算淤積長度 604 m 向下游劃設，再依據 LiDAR 坡度圖修正影響範圍前緣並以等坡線 2 度處作為邊界，最後依現勘地形修正影響範圍不可能到達之區域及兩側高出 10 ~ 12 m 進行影響範圍調整。

五、從搖晃到崩塌：災害鏈的風險管理觀點

災害風險管理目標不在於完全消除無法預測的風險，而是將風險控制在可承受範圍內，確保即使發生鏈鎖反應，社會或企業仍具備營運持續能力。地震後災區之土砂災害風險治理專注於評估危害度、脆弱度與暴露度，並利用「風險評估、降低、轉移、避開」等策略，優先確保人員安全並提升整體系統的韌性。依據國際上標準之天然災害風險管理架構，坡地災害之風險管理與治理包含風險分析（風險辨識、風險估計）、風險評估、風險處理、風險溝通等主要項目。

本文綜整於 2024 年 0403 花蓮地震後，相關權責機關辦理之各項防災整備作為，依前述四大程序，個別說明如下：

1. 風險辨識 (Risk Identificaiton)：利用衛星影像比對震後新生崩塌地，截至 2024 年 5 月底共判釋出 1,942 處，總面積達 1,521 公

頃，多數集中於震度六強區域，其中 57 處鄰近重要鐵公路，相關 GIS 圖層已公開。針對可能危害保全住戶之崩塌地，召集專家學者進行現地勘查，以科學方法確認受災型態與範圍。經勘查，6 月初緊急新增 4 處土石流潛勢溪流及 8 處震後崩塌土砂敏感區，並繪製影響範圍圖。同時依據現勘結果，請地方政府建立包含人數與聯絡方式之保全住戶清冊，以利後續疏散作業。

2. 風險評估 (Risk Estimation)：鑑於重大地震後坡地災害誘發雨量門檻大幅降低，依據科學學理針對震度 5 強以上地區調降警戒值。地震災區共計 92 條雨量警戒值調降 50 至 150 mm，並據此調整土石流紅、黃色警戒發布機制。此外，針對震後土砂敏感區內存在大量不安定土砂者，為防範二次災害，額外設定雨量注意值。當降雨達標時，透過簡訊細胞廣播、LINE 通知等多元手段，提醒社區民眾提前進行防災準備。

3. 風險溝通 (Risk Communication)：透過各類媒體傳達科學分析結果，說明地震崩塌分布及颱風期土砂災害風險，呼籲民眾配合疏散。農村水保署派員訪視縣市政府與基層村里，說明防災資訊並要求更新疏散計畫，至 6 月初已完成 12 處重點拜訪。針對受創嚴重的花蓮縣籌組專屬防災 LINE 群組，納入縣長及中央駐地機關等，即時分享災情。此外，與鐵公路單位機動召開聯防整治會勘，並每月舉行跨部會的水土林治理平台會議，促進資訊共享與協作治理。

4. 風險治理 (Risk Treatment)：邀集專家學者現勘研議因地制宜的工程對策。針對集



水區堆積大量崩塌土方者，緊急辦理疏通或囚砂設施以減緩衝擊。各級政府機關依權責區域，分別辦理災後緊急搶通及長期復建工程。在高風險土砂災害地區架設 CCD 攝影機，即時監控現場狀況以利應變。颱風豪雨期間，依據劃設之影響範圍及設定之雨量警戒值發布紅黃警戒，並配合保全住戶清冊，落實疏散避難計畫，將居民撤離至安全處所。

五、監測、預警與整備

5.1 新技術的機會與限制

0403 花蓮地震不僅再次提醒地質脆弱性，更是一次對防災科技應用的「實戰壓力測試」。在面對震後大規模且離散的坡地災害時，深知傳統的人力勘查已遭遇瓶頸。新技術的導入雖提供前所未有的「全知視角」，但也存在不可忽視的技術盲區與執行限制。

(一) 從被動救災到主動感知的數位轉型機會

1. 立體建模與變異分析的精準化：此次災害中，光學雷達 (LiDAR) 與無人機 (UAV) 航拍技術成為關鍵。透過建立高精度的「數位孿生」(Digital Twins) 地形模型，工程人員得以運用「虛擬移除植被」技術，透視被樹木遮蔽的地表裂隙與潛在滑動面。這讓過去難以抵達的蘇花公路高位邊坡，能進行全斷面的量化變異分析，精準辨識出「浮石」與「高危險岩體」，大幅提升了風險評估的可靠度。

2. AI 賦能的即時監測與預警：結合物聯網

(IoT) 與邊緣運算的 AI 影像辨識技術，正改變監測模式。對於餘震不斷的花蓮山區，AI 模型可全天候分析 CCTV 影像或微震訊號，自動過濾風雨雜訊，精準捕捉落石揚塵或邊坡位移的徵兆。這不僅爭取了黃金避難時間，更降低了巡查人員身處落石區的風險。

(二) 技術極限與實務應用的落差限制

1. 極端環境下的物理與通訊死角：0403 地震震後伴隨的濃霧與強風，曾導致光學衛星無法成像、無人機無法起降；太魯閣峽谷深邃的地形更造成通訊訊號遮蔽，導致即時監測數據無法回傳。新創技術設備在惡劣天候下的妥善率與續航力，仍是目前防災應變的硬傷。

2. 數據解讀門檻與「假警報」困境：技術產生了巨量數據，但各處監測資訊皆為獨立個體，缺乏因地制宜且足夠數據可供作為各處獨立模型與樣態訓練、供專家經驗來解讀。此外，過度敏感的 AI 預警模型若頻繁發出「假警報」(狼來了效應)，將導致民眾與管理單位的疲乏與不信任。故新創科技僅能「預警」而非「阻擋」，監測技術不能完全取代實體防災工程，對於大規模崩塌或災害事件，工程手段仍不可或缺。

新技術賦予「看見風險」的能力，但防救災工作與工程專業的價值在於「管理風險」。未來的防災策略，應是在承認技術限制的前提下，將高科技監測與傳統大地工程經驗深度融合，才能在面對下一次災害鏈時，建構出更具韌性的防護網。



5.2 預警資訊轉化為行動

預警資訊的終極目標是「避災」。在 0403 花蓮地震的複合型災害鏈中，科技監測進步同時，也暴露「資訊」與「行動」間的斷鏈。預警系統的價值，不在於數據的精密，而在於能否在黃金時間內觸發正確的避難行為。如馬太鞍溪堰塞湖之潰決導致下游光復鄉、萬榮鄉及鳳林鎮淹水，台 9 線橋梁受損。但如何在防災系統的技術設備基礎上，建立一套建立「分眾化」與「直觀化」的資訊傳遞機制，從「人為決策」走向「自動化阻斷」，克服人性遲疑、即時啟動防護機制的「軟體決策流程」，才是降低傷亡的關鍵。

1. **資訊轉譯的必要性：**監測儀器回傳的是位移量 (mm) 或加速度 (gal)，這對一般民眾毫無意義。未來的防災系統必須具備「即時轉譯」功能。針對管理者 (如公路局)，需提供精確的工程數值以利決策；針對用路人與居民，則應轉化為直觀的「紅綠燈號」或明確指令 (如：立即停車、遠離邊坡)。0403 地震震後，許多車輛在落石區猶豫不決，顯示出缺乏明確指引的危險性。
2. **多元管道的強制推播：**應借鏡細胞廣播 (CBS) 的經驗，將坡地災害納入區域性警示。當 AI 偵測到邊坡不穩或落石發生時，系統應能自動強制介入車載導航或手機，發出高分貝警示與避難路徑指引，解決山區視線死角造成的資訊不對稱。
3. **去中心化的自動封控系統：**傳統防災仰賴「監測→人工判讀→下令封路」，這在應對地震引發的瞬時崩塌時緩不濟急。工程

規劃應導入與監測系統連動的「自動化柵欄」或「智慧號誌」。例如在蘇花改等關鍵路段，一旦感測器觸發「行動值」(Action Level)，隧道口閘門應自動降下或號誌轉紅，物理性地阻絕車流進入致災區，消除人為判斷的遲疑時間。

4. **動態調整的警戒標準：**行動的觸發標準不能一成不變。工程顧問需協助建立動態風險模型，依據地質鬆動程度 (如 0403 地震震後) 與降雨量 (如颱風季)，動態下修封路或撤離的警戒值。震後的邊坡只需少量降雨便可能致災，預警行動的門檻必須隨環境脆弱度機動調整。

5.3 建立持續學習機制

考量災前整備之時間甚短、影響範圍甚廣、可預見之災害規模較大，防災之權責橫跨多個機關及中央、地方政府，但各利害關係人對於可能受影響之區位、規模、時機等並無專業判斷能力，故應透過專業知識之研判、資料之公開，及跨領域之溝通，向各級地方政府、民眾、交通管理機關等說明地震後可能之災害地點及災害規模，以提升地震後坡地防災之整備成效。此等屬於跨土木、水保、地質、遙測、防災、公共行政、交通運輸、民防等領域之縱向與橫向溝通之性質，若以傳統之分析或溝通聯繫模式恐怕效率不彰，故應當以跨科際之方式進行風險治理。

近年來應用跨科際方法 (Transdisciplinary Approach) 處理災害議題已於國際上漸有共識 [22]，已有多個研究採用跨科際方法分析



洪水、地震、山崩、永凍土等天然災害，跨科際方法可用來解決具多個利害關係人、多個部門之防災議題，其係基於科學實證，且結合公部門、私部門及民眾等。由風險辨識、風險分析、風險溝通、風險治理之角度，擬定地震後至防汛期前應完成之災前整備項目，且與地震災區之其它公務機關、地方政府、社區民眾分享並宣導防災訊息。此種跨機關、跨學科、跨不同利害關係人之天然災害風險治理，即為典型之跨科際處理方式。

導致了災難性之落石與崩塌。下清水橋之斷裂與太魯閣步道之毀壞，皆非單純結構強度不足，而是遭受了超出設計預期之環境外力衝擊。隨後之災害鏈演變警示我們，地震之結束往往是另一場災害之開始。大量震後鬆動土石在颱風季節轉化為土石流，對蘇花路廊與太魯閣峽谷構成持續性威脅，且此影響將持續數年之久。

六、結論

0403 花蓮地震不僅是一次地殼能量之釋放，更是一場對臺灣山區防災韌性之總體檢。從地震觀測數據可見，逆衝斷層機制與淺層震源造成了劇烈之地表震動；結合花蓮東部陡峭之變質岩地形與發達之節理構造，

藉由地質災害鏈智能防控體系(如圖9)，在於對災害的精準識別與監測。透過整合衛星遙感、無人機及地面感測器，構建「空-天-地」一體化的多源觀測網絡，實現對潛在災害源(如滑坡、崩塌)的早期識別。結合人工智慧(AI)技術，如深度學習算法，能從海量數據中自動識別災害特徵，並釐清災害鏈的觸發機制與演化規律(如地震如何誘發滑坡，進而轉化為泥石流或堰塞湖)，

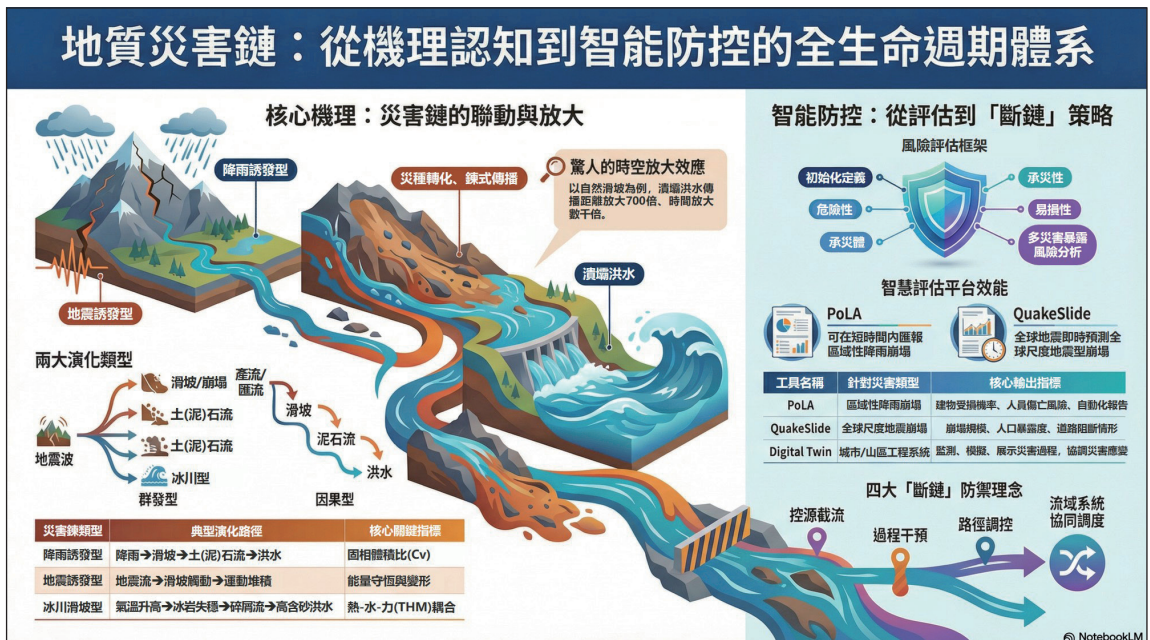


圖 9 地質災害鏈智能防控體系 (整理自 [2])



為後續模擬提供科學依據。經將物理世界的地質環境與災害過程即時映射至虛擬數位空間，實現災害過程的可視化與交互分析。結合「斷鏈減災」的主動防禦理念，系統可輔助決策者制定精準的工程調控措施（如預判關鍵斷鏈點）及人員疏散方案，實現從被動救災向主動防控的轉變，顯著提升城市與重大工程的韌性。

未來恐難避免遭遇較具規模地震、颱風等天災，面對轉趨為常態化之複合災害風險，防災觀點必須從傳統「人定勝天」之工程對抗，轉向「順應自然」之韌性適應。臺灣若能從 0403 事件中學習，將經驗轉化為規範、制度與社會溝通的一部分，便有機會在維持山區發展與交通需求的同時，逐步降低整體災害風險，邁向更具韌性的坡地環境。

參考文獻

1. Fan, X., Scaringi, G., Korup, O., West, A. J., van Westen C. J., Tanyas H., et al., "Earthquake-induced chains of geologic hazards: Patterns, mechanisms, and impacts," *Reviews of Geophysics*, 57, 421–503, 2019. <https://doi.org/10.1029/2018RG000626>
2. 張利民 (2026), 地質災害鏈風險防控 [J]. *岩土工程學報*, 2026, 48(1): 1-14. DOI: 10.11779/CJGE20250999
3. TEC 即時地震報導。2025 年 1 月 31 日，取自 <https://smiletaiwan.cw.com.tw/article/3978>。
4. 中央氣象局地震測報中心地震活動彙整。2025 年 1 月 31 日，取自 <https://scweb.cwa.gov.tw/zh-tw/earthquake/data/>
5. 陳文山 (2016), 臺灣地質概論, 中華民國地質學會, 第 101-124 頁。
6. 經濟部地質調查及礦業管理中心 (2024), 20240403 花蓮地震地質調查報告。2024 年 5 月。
7. 國家災害防救科技中心 (2025), 2024 0403 花蓮規模 7.2 地震及地質分析說明。2025 年 1 月 31 日，取自 <https://den.ncdr.nat.gov.tw/1330/1342/20538/20588/>
8. 國家災害防救科技中心 (2025), 0403 花蓮地震應變作業、地質特性及災情資料綜整。2025 年 1 月。
9. 鄭宏達、李明儒、周孜恆、郭俊麟 (2024), 以 UAV 空拍技術進行地震災損 3D 地形環境快速建模及 StoryMaps 網站分享。 *土木水利*, 第 51 卷, 第 30-37 頁。
10. Keefer, D. K. (2000). "Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution — the 1989 Loma Prieta, California event," *Engineering Geology*, 58, 231-249.
11. 林美聆、游繁結、林炳森、范正成、王國隆 (2000), 集集震後土石流二次災害危險性之評估, *土工技術*, 81 期, 第 97-104 頁。
12. 張振生、王志豪、劉維、廖禎茹、陳信雄 (2004), 921 地震後溪頭水文分佈特性與土石流防災相關之研究, *中華林學季刊*, 37 卷 3 期, 第 283-292 頁。
13. 陳振宇 (2018), 921 地震後坡地災害風險與因應對策, 農業部農村發展與水土保持署簡報, 資料連結: <https://www.ardswc.gov.tw/symposium/ReadFile/?p=Article&n=e90530cc6f984e92800edfb83deca073.pdf>
14. 李易諭 (2024), 從地震的角度看坡地災害, 資料連結: <https://tech.ardswc.gov.tw/EPaper/Home/EPaper?PaperID=31b5b8a0-a72a-4a0d-8371-94bf202ae69>
15. Lin, C. W., Shieh, C. L., Yuan, B. D., Shieh, Y. C., Liu, S. H., and Lee, S. Y. (2003). "Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan," *Engineering Geology*, 71, 49-61.
16. 陳俞旭 (2008), 地震對崩塌與土石流發生影響之研究, 博士論文。
17. 陳宏宇 (2014), 防災工作與土地利用, 103 年中國礦冶工程學會年會, 國家災害防救科技中心簡報。資料連結: <https://www.cimme.org.tw/images/Publications/3-seminar/103/103-seminar-1.pdf>
18. Tanyaş, H., Kirschbaum, D., Görüm, T., van Westen, C. J., Tang, C., and Lombardo, L. "A closer look at factors governing landslide recovery time in post-seismic periods," *Geomorphology*, Volume 391, 107912, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107912>
19. 農業部農村發展與水土保持署, 土石流及大規模崩塌防災資訊網, 網址: <https://246.ardswc.gov.tw/>
20. 農業部農村發展與水土保持署, BigGIS 巨量空間資訊系統, 網址: <https://gis.ardswc.gov.tw/>
21. 農業部農村發展與水土保持署, FEMA 土石流及大規模崩塌防災應變系統, 網址: <https://fema.ardswc.gov.tw/>
22. K. Takeuchi, L. Mangada, M. Inoue et al., "Challenges of transdisciplinary approach in disaster recovery management," *Natural Hazards*, 120, 12471–12489, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06693-z>.