



馬太鞍堰塞湖應變與反思

國立臺灣大學土木工程學系教授兼主任 / 游景雲

關鍵字：堰塞湖、潰壩、淹水模擬、流域、風險治理

摘要

本文以 2025 年馬太鞍堰塞湖潰決事件為案例，系統說明天然壩潰壩之分析架構與應變歷程。研究首先進行邊坡穩定與地震影響評估，其次採用理論模式推估潰壩流量歷線，並以二維水理模式模擬洪水傳遞與淹水範圍，比較不同洪峰流量情境對下游聚落與基礎設施之衝擊。結果顯示洪水自壩址傳至下游時間僅約 30 至 40 分鐘，應變時間極為有限；潰壩洪峰流量推估具高度不確定性，需採保守原則規劃撤離範圍。研究亦指出高含砂洪流可能呈現非牛頓流體特性與非平衡輸砂行為，傳統清水模式恐低估實際風險。最後從管理與政策層面檢討跨部門協調、專業支援機制與長期土砂治理策略，強調應以流域尺度進行動態風險評估與韌性規劃，以降低未來複合型災害衝擊。

一、前言

在極端氣候事件頻率增加與地質活動活躍的背景，由大規模山崩所形成之天然堰塞湖，其後續潰決事件往往釋放巨大的位能並轉化為高動能洪流，常伴隨大量土砂運移，對下游聚落與重要基礎設施構成高度致災風險。潰壩分析對人工壩而言，關乎工程設計安全與容錯能力；對天然壩而言，則是預警發布、緊急撤離與災後復原規劃的重要科學依據。花蓮馬太鞍流域所發生之堰塞湖潰決事件，為全國高度關注的重要災害案例。2025 年 9 月 23 日下午，受颱風豪雨影響，馬太鞍溪堰塞湖發生溢流潰壩，洪水沖毀台 9 線馬太鞍溪橋並淹沒光復鄉，造成嚴重災情，為臺灣近年代表性的重大水患事件之一。



此案例具備典型性且具有一定觀測資料基礎，可作為天然壩潰決研究與防災應變的重要參考。整體過程涵蓋上游山體大規模崩塌、河道阻塞形成蓄水體、蓄水位抬升至溢流潰決，以及高含砂洪流衝擊下游地區等多重災害鏈機制，其複雜性不僅涉及潰壩歷程與水理模擬分析，也牽涉高濃度含砂水流之流變特性、河床地形快速演變與沖淤互制等關鍵問題。

堰塞湖形成初期，由於位置偏遠且監測訊號判讀尚具不確定性，並未於第一時間被發現與通報。農村水保署於事發後透過雷達衛星影像判識大範圍地形異常，並進一步利用光學衛星影像確認堰塞湖位置；同時，美國地質調查局（USGS）透過地震儀資料偵測到地動訊號，並經國外學術單位詢證後確認事件發生。其後，國內相關機關陸續展開跨單位應變與監測作業，中央亦成立跨部會專案小組進行整體因應。整體而言，堰塞湖之發現與確認主要仍仰賴國內行政體系完成。馬太鞍溪堰塞湖潰決事件在臺灣災害防救史上具有高度指標意義，即使置於國際天然壩潰決案例中，其規模與影響程度亦屬重大等級。整體分析與應變歷程中，仍存在許多值得深入檢討與反思之面向，可作為未來防災制度精進的重要借鏡。

二、堰塞湖分析概念

馬太鞍事件屬天然壩潰決案例，相較人工水庫壩體，堰塞湖潰壩長期並非工程界熟悉之議題，但過去人工土石壩潰壩研究所建立之理論與分析架構，仍具有重要參考價值。一般潰壩分析流程可概括為四個主要階段，包括壩體

破壞機制評估、潰壩流量歷線推估、洪水波演算，以及下游衝擊評估，如圖 1 所示。各階段均需合理設定物理參數假設、進行機制分析並評估不確定性，而這些因素將直接影響模擬結果判讀與後續決策品質。

就天然壩而言，其組成材料多為未經人工壓實之鬆散崩積土石，與傳統人工土石壩相比，具有剪力強度低、膠結程度弱及組成高度不均勻等特性，使其在外力作用下相對脆弱。由於天然壩通常缺乏工程設計之溢洪

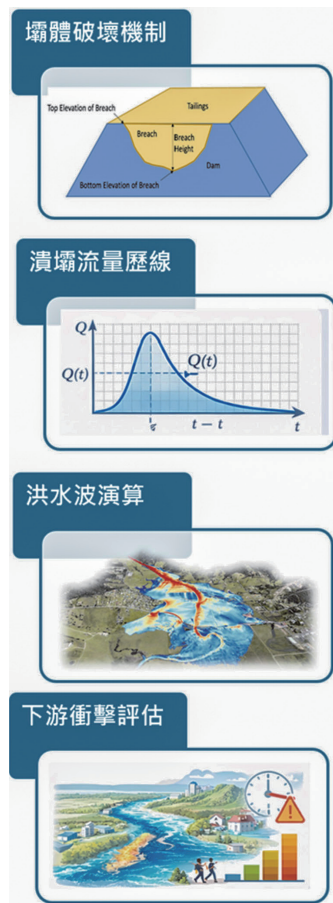


圖 1 壩體破壞機制評估流程圖



道，一旦水位上升至壩頂，即極易發生溢流沖刷潰決；其他可能破壞型態尚包括滲流管湧與壩體滑動等地質破壞機制，整體潰決行為具有高度不確定性。除非在特定條件下可逐漸穩定並演變為天然湖泊，多數堰塞湖仍可能於一定時間內發生潰決。

在壩體破壞機制評估方面，溢流沖刷為最常見之破壞模式。當上游入流使蓄水體達到壩頂高度時，水流跨越壩頂形成漫流，迅速侵蝕表層土石並形成初始潰口；隨著流速與動能增加，潰口進一步發生縱向切穿與橫向擴張，最終導致全面潰決。滲流與管湧機制則係壩體內部滲流水攜帶細顆粒流失，形成孔道並削弱內部支撐結構而造成破壞。然而當堰塞湖規模較大且壩體厚度足夠時，管湧現象往往不易觀察，其主要破壞動力仍以地表溢流水侵蝕為主。

潰壩流量歷線推估旨在建立潰決過程中隨時間變化之出流量條件。由於潰決為高度動態演變過程，過去常透過參數模型或物理機制模型推估潰口幾何形態與演變速率，包括基於歷史案例回歸分析之經驗方法，以及結合土壤力學與侵蝕機制之物理模式。本次馬太鞍相關分析所採用方法，即屬此類範疇，例如 BREACH、BEED、DB-IWHR 等模式 [1-3]，或基於 Capart 提出之擴散理論模型等 [4]。國際上對人工壩潰壩亦常建議採用半經驗模型 (semi-empirical approaches)，結合已知物理條件與潰口擴展速率進行推估，以決定流量歷線。關鍵參數包括最終潰口寬度與潰決形成時間等，研究指出尖峰流量估計誤差與這些參數高度相關，亦為潰壩分析不確定性的重要來源。對大型蓄水體而言，若潰口形成速度極

快，尖峰流量通常出現在潰口達最大深度時；若蓄水量相對較小且潰口發展較慢，尖峰流量則可能隨水位下降而逐漸減弱。

在洪水波演算階段，潰壩流量歷線可作為上游邊界條件輸入水理模式進行洪水傳遞模擬。傳統一維模式適用於地形規則且流向單一之河谷環境，但馬太鞍下游地形由狹窄河谷進入沖積扇及寬廣洪氾平原，地形平坦且水流具有明顯二維擴散特性；此外，當堤防發生漫頂或潰決時，水流亦將向多方向展布，流況呈現高度平面變化。因此，此類情境較適合採用二維水動力模式，以獲得較精細之流速與淹水分佈資訊，但同時亦需相對應之高品質地形與水文資料支撐。相關模擬成果對於避難範圍劃定與衝擊程度判定具有關鍵意義。

下游衝擊評估則不僅止於水理模擬結果本身，更重要在於對模式輸出之整合解讀。透過水位、流速、淹水深度、影響範圍與歷時等指標分析，可進一步評估不同條件下對基礎設施與保全對象之影響程度，進行風險與脆弱度評估。在此基礎上，透過多重情境設定比較不同方案之衝擊差異與不確定性，可作為災害管理、應變規劃與長期調適策略之決策依據。

整體而言，潰壩分析之不確定性為評估過程中不可避免之核心議題。即使建立高解析度且完整之數值模型，其結果仍受多重因素限制，包括輸入資料品質、物理過程簡化假設，以及自然系統本身之高度變異。例如壩體材料組成差異將直接影響侵蝕速率與潰口發展機制；地形資料解析度則對洪水模擬精度具有決定性影響，但解析度提升亦可能伴隨資料誤差放大與計算成本增加，因此需



在精度需求與實務可行性間取得平衡。就目前技術發展而言，潰壩分析工具已相當成熟，無論一維或二維模式均可支援情境推演與風險評估；然而在工具選擇、參數設定、結果詮釋與風險溝通轉譯等環節，仍高度仰賴專業判斷與經驗進行整合與權衡。

三、分析歷程

臺灣大學團隊於9月3日受內政部長委託，就地震訊號判釋與疏散撤離策略等議題進行專業分析，並於9月19日完成相關圖資與簡報成果提供內政部決策參考；其後於9月21日列席樺加沙颱風應變專案會議，進一步說明評估結果與建議。災害發生前，相關單位依據本校團隊建議執行預防性撤離作業，雖未能完全避免人員傷亡，但已有效降低災害衝擊程度，避免更大規模之損失。

臺灣大學團隊相關工作如上述分析架構包括數個部分，整體分析流程可分為地震力影響下邊坡穩定分析、潰壩流量推估、淹水模擬與風險評估四個主要階段。首先，在邊坡穩定評估方面，研究團隊因現地資料缺乏、採用附近大富之相關地質資料為參考，建立壩體與材料之力學參數，採用有效應力分析並考量地下水穩態與暫態滲流條件，模擬當時水位、颱風豪雨水位快速上升、平時水位緩升以及地震作用等多種情境，以評估壩體在不同外力條件下之安全係數變化。分析結果顯示，在與高水位條件下壩體邊坡安全係數均略高於1，屬臨界穩定狀態，而當地震動強度5強規模以上，安全係數將降至1以下，顯示壩體存在潛在失穩風險，與當時主管機關以5弱為主要判斷標準一致，對

於地震影響之應變仍建議依當時處置為主，整體而言，溢流漫頂所造成之潰壩風險仍大於地震誘發破壞風險。

在潰壩流量推估方面，團隊採用 Capart 提出之理論 [4]，以壩體剖面近似三角形為基本假設，假定壩底可自由侵蝕且潰口有效寬度固定，其以 Exner 方程為基礎，假設輸砂率符合 stream power law，結合湖水位變化之 level-pool routing 等概念予以計算，建立潰壩歷線數值模型。模型關鍵參數包含壩高、坡度、湖面面積與潰口寬度，並採用文獻案例驗證之擴散係數進行計算。結果顯示潰口寬度對洪峰流量具有顯著影響，潰口越窄，下切深度越大，洪峰流量越高，在不圖考量下，建議可能最大洪峰流量約可達 15,801 cms，與先前原先分析最可能情境推估之 16,336 cms 流量接近，然與後修正潰壩分析假設情境洪峰流量（約 9,000 cms）有相當差距，然潰壩歷程有相當之不確定性，因此也嘗試跟歷史資料進行比對。

圖 2 顯示了兩條潰壩壩體因子與洪峰流量之包絡關係 (envelope relationships)：MacDonald and Langridge-Monopolis (MLM) 與 Hagen [5,6]，以及兩條最佳擬合關係 (best-fit relationships)：Costa 與 MacDonald and Langridge-Monopolis [5,7]。這四條關係式與 Wahl 所整理之 43 筆資料點一同繪製於圖中 [8]。兩條包絡關係 MacDonald and Langridge-Monopolis 與 Hagen 幾乎涵蓋所有案例研究 [5,6]，僅有一筆資料例外。圖中亦顯示，Costa 與 MacDonald and Langridge-Monopolis 的最佳擬合方程具有非常相近的斜率 [5,7]，其中 MacDonald and Langridge-

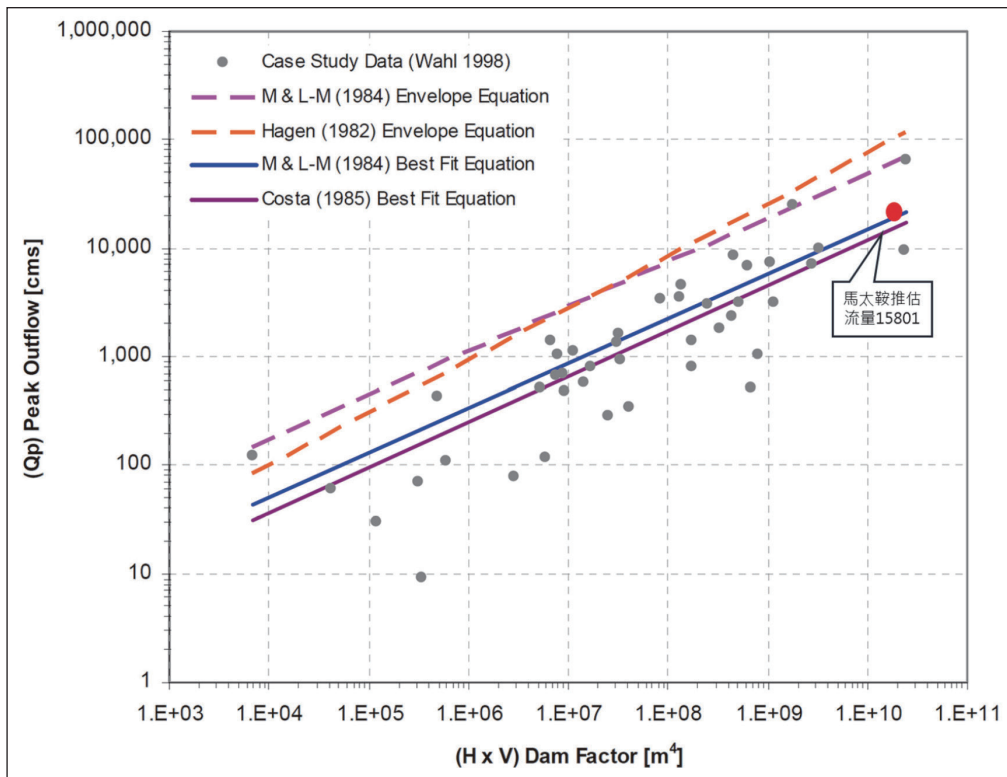


圖 2 歷史潰壩洪峰流量與壩體因子關係及馬太鞍溪推估比較 (原圖 [9])

Monopolis 方程相對較為保守，而本次推估與 MLM best-fit 相近，顯示本次估算具合理性，然考量天然壩風險更高，因此決定採用團隊推估流量作為分析洪泛參考。

在淹水模擬部分，團隊採用兩套二維水理模式進行交叉驗證，包括 COS-Flow 模式 [9,10] 與 HEC-RAS 二維模式，並採用由國土測繪中心提供之最新版水利數值地形模型 (Hydraulic Digital Elevation Model, HyDEM) [11]。該模型為內政部近年推動之高精度地形資料成果，空間解析度達 1m x 1m，並針對各類水利構造物進行專門化優化處理，可更精細呈現地形微地貌變化

與高程起伏，對淹水模擬與災害衝擊評估具有顯著助益。隨著地形資料精度提升，相關分析成果亦能更貼近實際情境，進而提升防災決策品質與應變效率。分析上經考量潰壩可能產生之高含砂水流，因此在情境考量上並未將所有防災措施均予以納入，如部分堤防採砂包增加通洪能量，簡單考量其高含砂水流之動能與砂包能承受之水壓力之差距，因此分析上也未予以納入。洪泛分析上，分別輸入既有潰壩歷線 (16,336 cms) 與本研究更新歷線 (15,801 cms) 進行模擬比較。

整體分析結果顯示不同模式在水流動力細節上雖存在差異，但整體淹水範圍與洪水

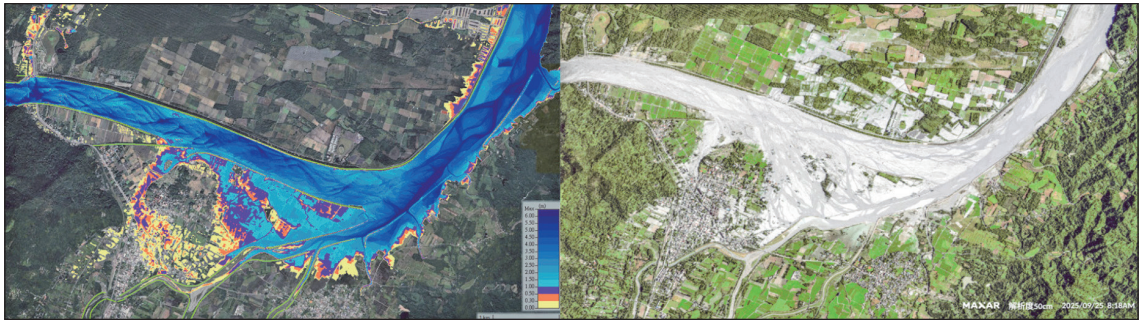


圖3 HEC-RAS 分析結果與衛星影像比對

傳遞時間具有一致趨勢，洪水自壩址至下游重要位置之到達時間約 30 至 40 分鐘，洪峰抵達時間約 1 小時左右，顯示災害反應時間極為有限，但如考量泥砂黏滯力可能速度會較為緩慢些。此外 COS-Flow 在網格處理上初步分析採用較粗網格，因此淹水範圍較大，而 HEC-RAS 以 5m 網格為基礎，因此較為接近合理狀況，此外研究也對網格粗細與上游流量進行敏感度分析，基本上無影響決策之明顯差異，且若考慮高含砂洪流可能造成河床淤積與堤防沖擊，實際風險可能高於純水流模擬結果。考量防災上之需求，基本上仍建議以保守為原則進行撤離應變。

最後在風險評估與應變規劃方面，在初期提供政府機關相關參考資料時，並無詳細居住資料，團隊以最小戶籍單位依據公開資料進行分析，並提出各村里撤離路線與避難地點建議。研究亦指出潰壩發生時橋梁與堤防可能承受高流速及高含砂衝擊，不宜進行現場搶險作業，以避免次生傷亡，而分析馬太鞍橋部分，依據水理分析結果，水面高度高出梁底約 0.5 ~ 1 m 左右，因馬太鞍溪橋屬簡支梁結構設計，因此考量相關挾砂水流強度，因此認為橋梁有沖毀風險，非僅如先前

分析提出僅有漫淹可能，強烈建議橋梁應予封閉並避免部屬人員機具。綜合分析結果，研究建議地方政府應以保守情境規劃撤離範圍，提前完成疏散準備與預警機制建置，以降低潰壩事件可能造成之生命與財產損失。

馬太鞍堰塞湖於 9/23 發生潰決，整體評估結果與團隊推估相近，初步檢視檢討相關成果，就相關水理條件分析，馬太鞍溪 Q100 流量約為 2,040 cms，但由於本段多屬於超臨界流，因此出水高較高，團隊初步水理檢核評估馬太鞍溪橋能容納約 9,000 cms 左右之通洪容量、而光復段出水高較少，約未 8,000 cms 左右之通洪量，本次分析與實際差距上，鳳林並無預期之影響，因此洪峰流量可能略低於 16,000 cms，依據主管機關根據下流斷面推估，其流量高達 8,860 cms，但此量體未納入光復段溢流條件。據相關資料顯示，潰壩也分為兩階段發生，因此流量上也會略有差距，而分析上也未實際考慮潰堤因素，整體上分析仍有相關探討空間。後續團隊也持續進行驗證工作，然林務署花蓮分署相關監測分析資料，受限於執行單位意願，仍未能順利取得，因此部分現場狀況重建仍基於假設進行。



三、相關研究議題

3.1 管理層面議題

過去筆者曾就管理層面，於平面媒體提初步建議，本文在予重提，其中包括現行採購法規過於僵化，且審計壓力常使公務員在災害初期不敢尋求頂尖專業支援。建議針對法定災害應變期間，建立明確的免責條款或避風港制度。只要程序經特殊核定且無貪瀆事證，應免除決策者的行政與刑事責任，以確保能即時提升應變效能。另外防救災量能不應僅依賴短期合約，應翻轉目前以「學術產出」為主的評鑑導向，強化實務型研究。政府應編列長期經費維繫與學研單位的連結，避免因計畫中斷導致專業人才斷層。透過長期的數據累積與實務參與，培養出在極端情境下能提供協助判斷的國家級智庫，而當初也一再提醒，應遴選具備充足經驗與研發量能的專業團隊進行深入研析，避免徇私非議，而今不論國科會與工程會均有邀請學者投入，也值得再次檢視反思。而複合型災害涉及林務、水利、內政與地方政府，現行分層負責制度常導致資訊零散與決策孤島。建議由工程會統籌，打破轄管藩籬，針對未來5至10年的土砂收支進行整體規劃。政策溝通應轉向長期韌性調適，面對清淤速度難及土石產出的現實，確立分階段的治理目標，此一部份也稍微讓人失望，同時間各項治理規劃、工程計畫等同時急於進行，彼此間缺乏一致步調方向，彼此間多有衝突，前後順序也難以協接，至今仍未見完整藍圖。

3.2 高含砂水流 (High sediment laden flow) 相關分析理論不足與工具侷限

堰塞湖潰壩分析因壩體多由鬆散土石材料構成，其潰決後向下游傳遞之洪水並非單純清水流，而是夾帶大量泥土與砂石之高含砂濃度混合流體。此類現象在人工土石壩潰壩案例中亦屢見不鮮。高度複雜之水理與泥砂交互作用行為，對數值模擬與理論解析均有相當挑戰。過去國際間多數潰壩分析仍以清水模式為主，部分原因即在於泥砂耦合機制之高度不確定性與模式限制。實際潰壩過程中的泥砂運動並非傳統河川輸砂理論所能充分描述，其流況往往屬於過飽和、非平衡狀態，亦非異重流、二相流系統。在部分實驗與現地觀測中，常可見泥砂或高濃度前緣較清水部分先行推進，其動力機制與一般輸砂模式存在顯著差異。此外當含砂體積濃度達一定閾值時，流體之剪力應力與剪應變速率間關係不再呈線性，開始展現屈服應力與黏滯性顯著增加之非牛頓流體特性。此種行為使流動呈現類似泥流或土石流之力學特徵，對傳統基於牛頓流體假設之水理模式之適用性也不同，因此也有幕僚團對於災前運用河川水理泥砂模式建議75%泥砂會淤基於溢流口下方6 km之不合理判斷，故如何在潰壩分析中合理處理高濃度泥砂流之力學特性與傳遞機制，或是如何適當考慮，也為堰塞湖風險評估中重要議題。

就目前馬太鞍地區而言，除堰塞湖潰壩本身所衍生之洪水衝擊問題外，現況關鍵議題在於後續歷程中究竟有多少土砂將隨洪流向下游傳遞，以及其傳遞型態與時空分布特徵造成之長期河床演變，在運用既有模式工



具方面，現行主流水利模擬軟體於處理高含砂濃度水流時各具優缺點。HEC-RAS 近年已新增非牛頓流模組，FLO-2D 本身亦具備處理泥流相關功能。然而，不同模式於物理假設、數值穩定性與參數需求上仍存在差異，因此在實務應用時，除直接採用專用模組外，應對各種模式之適用條件與保守假設，並提出相關設定與限制說明建議。

3.3 馬太鞍溪現況持續動態變動下游風險

馬太鞍河流域自上游至中下游均處於高度動態變化，上游受到山體崩塌與地形持續調整等天然因素影響，亦因中下游河道整治與堤防建設等人為擾動，使整體水砂條件與風險結構不斷變動。在上游部分，馬太鞍溪崩塌區後續將呈現長期地貌演變過程。潰壩後原堰塞湖面積大幅減小，另外後續人工挖掘也讓其目前不再蓄水，但崩塌坡面仍顯著不穩定之風險因素。現階段推估，殘留壩體仍約 1.2 億立方公尺土砂量，另山頂尚未下滑之鬆動土方約 1 億立方公尺，合計約 2 億立方公尺之潛在土砂量，鳳凰颱風造成下游約 800 萬方之淤積量，今年汛期於豪大雨觸發下，對下游將造成相當淤積或阻塞風險。相關研究與經驗指出，此類大規模崩塌之影響期可長達 10 至 20 年，未來相當長時間內，河床抬升與局部壅塞情形可能反覆出現，區域風險具有顯著延時性與累積性，都需要予以掌握。在下游治理方面，面對龐大土砂壓力，主管機關已同步推動疏濬與堤防強化工程。首先於 2025 年 10 月完成臨時土堤，目前仍持續推動河道疏濬作業，目前疏浚完成量達約 910 萬立方公尺，另永久性復建堤防工程亦於 2026 年 4 月完成，採混凝土包覆與

深基礎設計，並規劃於 2027 年底前完成約 8 公里之深槽流路與高標準堤防系統。

目前馬太鞍未來之主要風險為上游大量崩塌量體造成之泥砂運移，在不同事件下往下游運移，並造成防洪容量不足，在馬太鞍溪河段因下游堤防沖毀，目前以暫時堤防因應，然未來堤防高程之設定以土砂淤積潛勢為主要因素，然花蓮溪整體河段仍為動態變化趨勢，上游既有崩塌堆積量體，會受水力作用影響往下游移動，並以擴散波形式逐漸傳遞，隨時間往下游遞移並均化其土砂衝擊 (sediment pulse) 變遷影響，因此在短、中、長期土砂淤積情勢均會有所不同，堤防之設計與土砂條件相關，目前據瞭解初步僅考慮後續 5 m 之淤積深度，依據相關學理而言過於低估，對於下游相關風險評估，需進一步整合土砂殘餘量評估、河道演變趨勢與工程進度條件，進行動態風險分析，以提供整合性的決策支援基礎，而是否應當於北岸設置合理洪泛區域降低主要保全對象風險，也建議應納入分析考量，以風險概念進行規劃。

四、結論

馬太鞍堰塞湖事件為臺灣近年少見之大型天然壩潰決災害案例，其形成、演變至潰決過程充分展現複合型災害鏈之高度複雜性，本文初步介紹當初透過邊坡穩定分析、潰壩歷線推估、二維淹水模擬與風險評估等系統化方法提出防災應變建議之歷程。本事件亦突顯高含砂洪流對傳統水力分析工具之挑戰，天然壩潰決後洪流往往呈現非牛頓流體特性與非平衡輸砂行為，使得單純清水模式可能低估實際衝擊強度。未來潰壩分析應



更積極整合泥砂力學、流變特性與河床演變機制，以提升風險評估可信度。

在管理與政策層面，本事件反映跨部門協調、專業支援機制與長期風險治理規劃仍有精進空間。面對持續存在之龐大崩塌殘餘量與長期土砂運移壓力，馬太鞍流域風險並未因單次潰壩而消失，而轉移成長期土砂面向之影響，未來治理策略應由單一災害應變思維，轉向流域尺度之長期土砂管理與動態風險評估，並結合工程措施與空間風險規劃，以降低下游聚落脆弱度。

整體而言，馬太鞍事件不僅為重大災害案例，更提供臺灣建立天然壩風險管理制度之重要契機。透過科學分析、制度調整與跨領域整合，可逐步建立更具韌性之防災體系，作為未來類似災害應對之重要參考。

參考文獻

1. Fread, D. L. (1988). BREACH, an erosion model for earthen dam failures (Vol. 855). MD, United States: Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, NOAA.
2. Singh, V. P., Scarlatos, P. D., Collins, J. G., & Jourdan, M. R. (1988). Breach erosion of earthfill dams (BEED) model. *Natural Hazards*, 1(2), 161-180.
3. Chen, Z.Y.; Xu, Y.; Sun, P. Slope stability analysis method considering the anisotropic characteristics of rock body shear strength. *J. Lanzhou Univ. (Nat. Sci. Ed.)* 2015, 51, 759-767.
4. Capart, H. (2013). Analytical solutions for gradual dam breaching and downstream river flooding. *Water Resources Research*, 49(4), 1968-1987.
5. MacDonald, T. C., & Langridge-Monopolis, J. (1984). Breaching characteristics of dam failures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(5), 567-586.
6. Hagen, V. K. (1982, August). Re-evaluation of design floods and dam safety. In *Proc., 14th Congress of Int. Commission on Large Dams* (pp. 475-491). Paris: International Commission on Large Dams.
7. Costa, J. E. (1985). *Floods from dam failures* (Vol. 85, No. 560). US Geological Survey.
8. Wahl, T. L. (1997, August). Predicting embankment dam breach parameters—a needs assessment. In *Proceedings of the Congress-International Association for Hydraulic Research* (pp. 48-53). LOCAL ORGANIZING COMMITTEE OF THE XXV CONGRESS.
9. Pierce, M. W., Thornton, C. I., & Abt, S. R. (2010). Predicting peak outflow from breached embankment dams. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(5), 338-349.
10. Jang, J. H., Chang, T. H., & Chen, W. B. (2018). Effect of inlet modelling on surface drainage in coupled urban flood simulation. *Journal of Hydrology*, 562, 168-180.
11. Jang, J. H., Hsieh, C. T., & Chang, T. H. (2019). The importance of gully flow modelling to urban flood simulation. *Urban Water Journal*, 16(5), 377-388.
12. Chang, C. H., Hsu, C. H., Hsu, C. T., Wu, S. J., & Chung, P. H. (2022). Hydrological topography data set (HTD)—the data set for high resolution 2D urban flood modeling. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 88(7), 439-450.