

地震與降雨交互影響下堰塞湖潰決風險評估與災害應變對策

林駿恩^{[1]*} 林恩如^[1] 陳振宇^[1] 沈志全^[2] 鍾曉緯^[3]

摘要 地震或降雨引致崩塌所衍生之堰塞湖，一旦潰決後可能嚴重威脅下游聚落安全。統計顯示約 40% 的堰塞湖於形成後 1 週內即潰決，因此如何在短時間內快速偵測到堰塞湖的形成並模擬其潰決後可能的衝擊係防災單位的重要課題。儘管前人研究已提出一些方法，但多僅單純考量堰塞湖蓄滿潰決情境，較少納入地震導致堰塞湖形成後，後續如遇強降雨可能升高潰決的風險。本研究提出混合模式 (Hybrid Model) 進行地震誘發堰塞湖潰決衝擊評估，結合中央氣象署超越機率降雨資料與 WFLOW 逕流模擬，推估震後降雨匯流的影響，並應用 HEC-RAS 2D 水理潰壩模式，進一步分析堰塞湖蓄滿水體潰決後洪水波的傳遞特性。研究結果顯示，若震後短期內發生強降雨，堰塞湖潰決洪水波將顯著加劇下游衝擊，提高災害風險。本研究提供一套震後堰塞湖潰決風險快速評估流程，補足現有模型對地震與降雨交互影響的考量不足，未來可作為防救災單位進行災害應變與警戒發布之決策依據。

關鍵詞： WFLOW、HEC-RAS、堰塞湖潰決、NDWI、水體偵測。

Impact Assessment and Response to Landslide-Dammed Lake Breaches Triggered by Earthquake-Rainfall Interactions

Chun-En Lin^{[1]*} En-Ju Lin^[1] Chen-Yu Chen^[1] Cooper Sen^[2] Hsiao-Wei Chung^[3]

ABSTRACT Landslide-dammed lakes, which are formed by earthquake or heavy rainfall, are highly unstable, with more than 40% failing within 1 week after formation. Failure of such lakes poses severe threats to downstream communities. Rapid detection of the formation of landslide-dammed lakes and assessment of potential breach impacts are crucial for government authorities in preventing major catastrophes. Studies on landslide-dammed lakes have mostly simulated scenarios where inflow fills the barrier lake, leading to overtopping failure. Although overtopping from excessive upstream inflow is a major cause of landslide-dammed lake breaches, many studies have neglected the influence of heavy rainfall following earthquakes. This oversight can lead to the underestimation of breach risk, given that extensive rainfall markedly increases the risk of failure. In the present study, we developed a hybrid method for evaluating the effects of landslide-dammed lake breaches induced by heavy rainfall following earthquakes. First, precipitation forecast data from the Central Weather Administration and the distributed hydrological model wflow_sbm were combined to simulate catchment hydrological processes. Then, the HEC-RAS 2D hydraulic breach module was applied to simulate the flood wave propagation due to landslide-dammed lake breaches. Our findings suggest that heavy rainfall strengthens the effects of flood waves that occur because of landslide-dammed lake breaches. Overall, this study clarifies the effects of landslide-dammed lake breaches and provides valuable insights for disaster emergency response and public authority operational strategies.

Key Words: WFLOW, HEC-RAS, landslide-dammed lake breach, normalized difference water index, water body detection

一、前言

堰塞湖形成主要受降雨及地震等外力作用影響，當山區邊坡因強降雨或地震作用發生大規模崩塌時，崩落土體可能阻塞河道並形成堰塞湖。相關研究顯示，當堰塞湖形成後，其穩定性往往有限，約 27% 於形成後 24 小時內即發生潰決，存續時間約一週者佔 40%，而能持續存在超過一年以上者約僅佔 15% 左右 (Costa and Schuster, 1988; Peng and Zhang,

2012; Schuster, 1986)。此外，陳昆廷等人 (2010) 統計莫拉克期間所形成之堰塞湖，發現約 90% 堰塞湖於一週內即發生潰決。進一步考量誘發因素影響，由地震所誘發之天然壩，其堰塞壩體積普遍大於降雨誘發形成者 (郭玉樹等, 2012)。然而，過往研究結果顯示，無論是降雨或地震所誘發之堰塞湖，其存續時間普遍較短，且潰決破壞往往發生於短時間內。其中，若地震誘發之堰塞湖鄰近山區聚落，其潰決後所引發之衝擊影響通常較降雨誘發者更為嚴重。因此，在地震發生

[1] 農村發展及水土保持署減災監測組

Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation, MOA, Taiwan, R.O.C.

[2] 方圖科技股份有限公司

Fondus Technology, Taichung, Taiwan

[3] 鉅星數位科技股份有限公司

GeoStar Inc., Tainan, Taiwan

* Corresponding Author. E-mail: jasonslin@gmail.com

後，如何迅速評估堰塞湖的潰決風險與可能衝擊影響，是防災單位第一線應變人員須優先關注的核心課題。

根據 Malamud et al. (2004) 研究指出，當地震規模達 7.0 以上時，將引發數以千計的崩塌，受影響區域可超過 10,000 km² 以上，且隨地震規模增加，崩塌影響面積亦呈現擴大趨勢 (Keefer, 1984)。2024 年 4 月 3 日，花蓮地區發生芮氏規模 7.2 主震，並伴隨兩起規模 6.0 以上餘震。後於 4 月 23 日及 27 日，該地區再發生四起規模 6.0 以上餘震 (中央氣象署, 2024)。為評估此次地震引發的崩塌情形，農村水保署利用 Pleiades 及 SPOT-6 衛星影像進行新生崩塌判釋，結果顯示本次地震共造成 1,942 處崩塌，總崩塌面積達 1,521.03 公頃 (農村水保署, 2024)，其中並於花蓮木瓜溪上游形成堰塞湖。

以 921 集集大地震為例，地震發生後崩塌土體運動顯著增加，主要原因在於地震後，崩塌及土石流發生的臨界降雨條件大幅度下降 (Shieh et al., 2009; Chen, 2011; Liu et al., 2008)。研究顯示，土石流發生臨界雨量甚至降至震前的三分之一 (Lin et al., 2004; Chen and Huang, 2021)，並隨著地震引發的地表加速度增加，不僅造成土石流活動週期延長 (Yu et al., 2014; Yang et al., 2023)，更需十年以上時間才能恢復至地震前的臨界雨量水平 (Shieh et al., 2009; Chen, 2011; Lin et al., 2022)。此外，地震所誘發的崩塌坡度通常較降雨事件所引發者更為陡峭 (Lin et al., 2004; Lin et al., 2006)，其崩塌產生的大量土砂量易阻塞上游山區河道，形成堰塞湖。雖然地震所形成堰塞湖相較降雨誘發者較穩定，但震後土砂運動之降雨門檻值顯著下降，進一步促使後續土砂活動增加 (陳樹群、許中立, 2009; Shieh et al., 2009; Chen, 2011)。因此，若地震發生後遭遇降雨，殘留於坡面或堆積於河道之不安定土砂料源可能對下游聚落構成嚴重威脅。

堰塞湖潰決所引發嚴重災害，包括潰決洪水波所造成的巨大衝擊，對下游聚落的溢淹、河道沖刷及橋梁毀損等影響。此外，若堰塞湖上游發生降雨事件，可能導致蓄水體積快速增加，進一步提高潰決風險。同時，在頻繁餘震的影響下，崩塌堆積的土體可能增加，使天然壩的高度或堆積範圍擴大，進而擴大堰塞湖迴水範圍，並提高潰決所帶來的潛在危

害。

Peng and Zhang (2012) 的研究指出，降雨與地震誘發堰塞湖的形成比例約介於 40% 至 42% 間，且潰決機制主要以溢流破壞為主 (佔 91%)，其次為滲流破壞 (佔 8%)。此外，若有複數堰塞湖依序潰決時，將產生數次洪水波向下游傳遞，增加災害風險。由於人們可能因第一波潰決洪水波通過後誤以為安全，而忽略隨後潰決洪水波衝擊，進而導致財產損失甚至生命傷亡 (Zhu et al., 2021)。因此，防災單位在制定堰塞湖潰決預警機制時，應綜合考量溢流破壞所造成的警戒水位、上游迴水區域、下游潰決淹沒區域與洪水波傳遞影響等因素。此外，仍需考量是否存在複數堰塞湖，以降低因多個堰塞湖串聯潰決 (Cascade breach)，所導致的警戒資訊發布時間差影響，以提升預警系統的準確性與時效性 (He et al., 2022; Limbasiya et al., 2022; Zhu et al., 2021)。

由於堰塞湖主要受降雨或地震誘發形成，其潰決衝擊評估通常僅考慮堰塞湖蓄滿後的潰決情境，以評估洪水波對下游的衝擊。然而，花蓮木瓜溪堰塞湖在地震誘發後即遭遇降雨，使得在震後堰塞湖蓄滿情況下，更須進一步考量天然壩上游匯聚之洪峰流量。因此，對於地震與降雨兩種外力交互作用所導致的潰決衝擊更加難以評估，評估過程同時需考量地震後堰塞湖蓄水體積變化、未來可能發生的降雨情境、天然壩上游集水區所匯聚之洪峰流量以及潰決延時等因素，進而評估對下游沿岸聚落的潛在衝擊。此外，由於堰塞湖形成至潰決時間很短，且位處深山難以現勘取樣，故在有限時間內如何合理評估參數設定及快速模擬潰決後的影響及衝擊，實為防災單位常面臨的難題。因此，本研究提出運用混合模式 (Hybrid model) 方法來評估震後堰塞湖潰決衝擊，先利用氣象署之超越機率降雨資料，結合 WFLOW 模式進行降雨逕流模擬；其次，應用 HEC-RAS 2D 水理潰潰模式與參數相關建議值設定合理參數，分析堰塞湖蓄滿水體後，再疊加上游匯聚的洪峰逕流影響，以綜合評估潰決衝擊，其研究流程如圖 1 所示。本研究所提出的地震後堰塞湖潰決衝擊評估方法，可作為防救災單位於地震災後初期現勘難以執行時的重要應變與決策參據，進而提升災害應變能力與防災規劃。

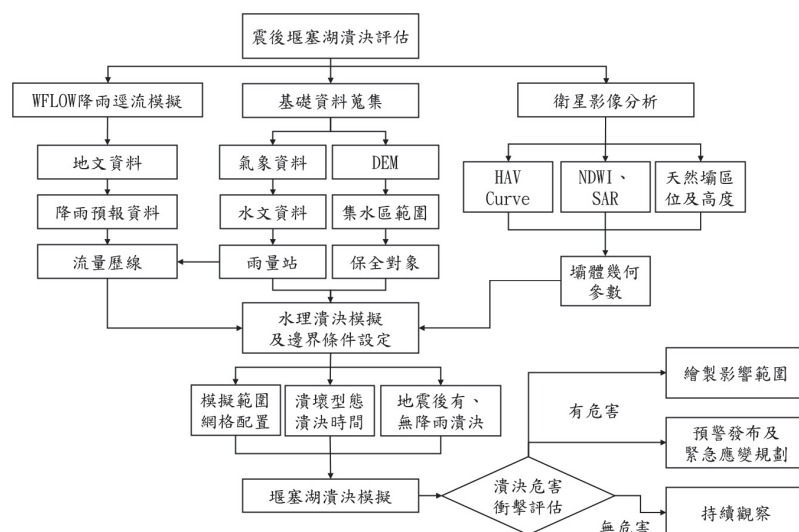


圖 1 研究流程圖

Fig.1 The Flow chart of landslide-dammed lake breach

二、材料及方法

1. 0403 花蓮地震事件說明

2024 年 4 月 3 日上午 7 時 58 分，於花蓮縣近海發生芮氏規模 7.2 地震（震央位置：北緯 23.77 度，東經 121.67 度），震源深度 15.5 公里，最大震度為花蓮縣和平（震度 6 強），其次為花蓮市（震度 6 弱）。隨後分別於 8 時 11 分發生規模 6.5 餘震（震央位置：北緯 24.13 度，東經 121.65 度，震度 5 弱）及 10 時 14 分發生規模 6.2 餘震（震央位置：北緯 24.15 度，東經 121.98 度，震度 4 級）。此外，經地震測報中心統計 2024 年 4 月份，已觀測到 1,408 餘次不同規模的地震活動（圖 2）（氣象署地震測報中心，2024）。本次花蓮地震造成花蓮縣受災最為嚴重，導致多處坡地發生崩塌。依據農村水保署 BigGIS 災害事件衛星影像判釋成果，此次震後新生崩塌共計 1,942 處，總崩塌面積為 1521.03 公頃，其中花蓮地區新生崩塌 1,352 處，總面積達 934.82 公頃。

此外，地震導致花蓮木瓜溪上游邊坡發生崩塌，大量土體阻塞河道並形成堰塞湖，其蓄水面積達 5.6 公頃、壩體高度約 30 公尺、迴水長度約 700 公尺、蓄水體積約 43 萬立方公尺（圖 3）（林業保育署，2024/4/22）。在林業保育署 4 月 22 日發布林業新聞的隔日後，又發生 3 起規模 6 之餘震。同時，氣象署鋒面降雨趨勢預報顯示，未來一週受鋒面影響，天氣不穩定，易有短延時強降雨發生，且宜花地區預期降雨量較大。

2. 衛星影像研究材料與方法

由於多數堰塞湖在短時間內即可能潰決，針對木瓜溪堰塞湖之形成時間與潰決衝擊評估，本研究考量地震後餘震頻繁、高雲覆率、預報強降雨以及現地交通受阻等情況下，這些因素均不利於現地調查和災害情資蒐整。因此，本研究為估算堰塞湖上游之入流量，必須確認堰塞湖形成時間及後續蓄水面積與體積變化資料，故採用光學與雷達遙測影像分析，以偵測堰塞湖形成時間點，並利用降雨逕流模擬與潰決模擬等方法，估算天然壩上游洪峰流量、並評估潰決對下游沿岸聚落之潛在衝擊，以提供主管機關作為預警發布和應變對策擬定之參據。

(1) Sentinel-2 衛星影像 NDWI 頻譜分析

在應變期間首重災害情資蒐集與整合，以協助災情研判並提供應變決策參據，其中現調資料與資訊彙整更是災害應變工作的核心，因此，即時獲取有效用的衛星影像及災區判釋資料，以掌握最新災情，對於應變輪值期間的災情彙整、受災範圍評估與應變策略制定極為重要。在地震發生後，因交通中斷導致無法立即進行受災區域之現地勘查，此時，衛星影像成為獲取災區情資的首要來源。利用前後期影像比對與判釋，可提供災區的時空變化資訊，協助研判地表特徵變化。

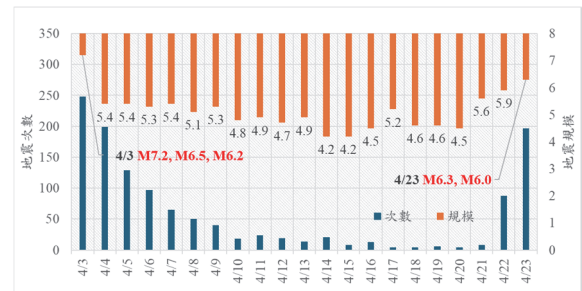
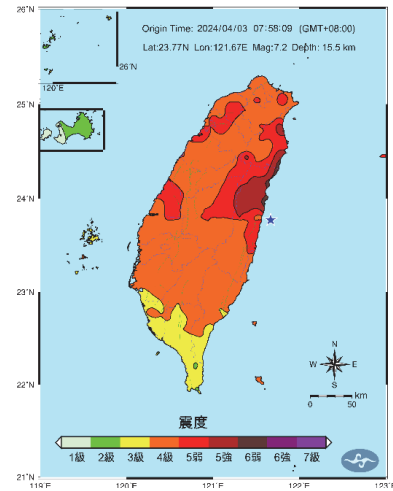


圖 2 花蓮地震之震度分布圖與地震數量逐日統計圖（氣象署地震測報中心）

Fig.2 Distribution of seismic intensity and waveform acceleration of the Hualien Earthquake (Seismological Center, CWA)



圖 3 木瓜溪堰塞湖空拍圖（林業保育署）

Fig.3 Aerial photo of Landslide Dammed Lake of Pappaya River (Forestry and Nature Conservation Agency, MOA)

本研究利用光學衛星影像結合 NDWI (Normalized Difference Water Index) 指標進行分析，以有效識別水體並透過指標數值強化水體特徵 (Lekhakh, 2023; McFeeters, 2013; Sun et al., 2012)。目前，NDWI 指標的計算上可分為兩種：其一是偵測植被含水量改變 (Geo, 1996)，其二是偵測水體含水量改變 (McFeeters, 1996)。而 McFeeters (2013) 考量都市環境對 NDWI 指標影響，其會議反射建築物的綠、紅光波段與水體類似而造成誤判，所以對 NDWI 指標調整以降低應用於都市環境的誤判率，因堰塞湖位於山區而非都市區域，故本研究採用 McFeeter (1996) 所定義之 NDWI 指標，該指標更適用於堰塞湖蓄積水體變化之偵測。同時，使用 Sentinel-2 開放衛星影像資料，其具備多光譜 (Multispectral) 特性，並具有 10 至 60 公尺之空間解析度 (表 1)。根據 McFeeters (1996) 所提出之 NDWI 計算公式 (式 1)，以及 EOS DATA ANALYTIC 之說明，選擇 Sentinel-2 頻譜中的 B8 波段作為近紅外光 (NIR)，B3 波段作為綠光 (Green)，以進行 NDWI 指標運算。

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR) \quad (1)$$

上述式 (1) 所對應之 NDWI 值如下表 2 所示，應用衛星影像 NDWI 指標分析水體含水量方式，可作為交通中斷無法現地勘查時之替代方案，適合針對堰塞湖形成前後期影像，分析河道水體面積變化。

表 1 Sentinel 2 衛星影像波段表

Table 1 Sentinel 2 Multispectral Bands Range

Band	Resolution (m)	Central Wavelength (nm)	Band	Resolution (m)	Central Wavelength (nm)
B1	60	443	B8	10	842
B2	10	490	B8a	20	865
B3	10	560	B9	60	940
B4	10	665	B10	60	1375
B5	20	705	B11	20	1610
B6	20	740	B12	20	2190
B7	20	783			

source: <https://gisgeography.com/sentinel-2-bands-combinations/>

表 2 Sentinel 2 衛星影像 NDWI 值表

Table 2 Sentinel 2 NDWI Range

NDWI	Feature	Reference
0.2至1間	Water surface	EOS
0.0至0.2	Flooding, humidity	EOS
-0.3至0.0間	Moderate drought, non-aqueous surfaces	EOS
-1至-0.3間	Drought, non-aqueous surfaces	EOS
< 0.3	Non-Water	McFeeters (2013)
>= 0.3	Water	McFeeters (2013)
<= 0	Non-Water	McFeeters (1996)
> 0	Water	McFeeters (1996)

Note: EOS Weblink <https://eos.com/make-an-analysis/ndwi/>

(2) Sentinel-1 雷達影像分析

在降雨及雲覆遮蔽影響下，光學影像無法透過 NDWI 指標分析堰塞湖水體。然而，雷達影像具有全天候及日夜皆能偵測水體特性，因此在天候不良情況下，雷達影像更適用於偵測水體 (Huang et al., 2018; Gulácsi and Kovács, 2020; Twele et al., 2016)。在雷達影像的水體範圍判釋方面，可概略分為三種方法：長條圖門檻法 (Histogram thresholding)、分類方法 (Classification approaches)、多時期門檻法 (Multi-temporal thresholding) (Huang et al., 2018; Clement et al., 2018; Westerhoff et al., 2013; Santoro et al., 2014)。長條圖門檻法藉由收集雷達回波訊號，用以建立水體與非水體之回波訊號特徵分布直方圖，並依對應門檻值來判斷所偵測像素是否為水體。分類方法是對開放水體 (Open Water) 及其他特徵物體提取像素值，通常以監督式或非監督式演算法來分類水體與非水體，如 Morandeira et al., (2016) 採用 Wishart 無監督分類法 (Wishart unsupervised classifier) 進行區域分割、無監督分類、類別標籤等程序來區分水體。多時期門檻法則比對同一區域在多時期的雷達回波訊號，在門檻值設定是依統計影像差異特性，如平均值或標準差，以此來判別水體。三種雷達影像的水體範圍判釋方法上，長條圖門檻法是三者中最簡單快速方法，但缺點是易誤判雷達陰影或非水體之低反射為水體；分類方法則是需要多時期影像及大量特徵樣本進行訓練，模式訓練成功後具高準確度，但訓練過程及模式調校相當複雜；多時期門檻法前置處理上，需要有多時期影像進行影像差異特徵統計作業，但其判釋準確性較前兩者穩定。此外，雷達回波訊號的強度會依據地面粗糙度的變化，其反射訊號強度亦不同，主要可分為表面散射、二次散射及體散射三者類型。其中，水體的雷達回波訊號 (Backscatter coefficients) 較弱，因此在影像中顯現較暗的灰階值 (Brisco, 2015; Taghvakish, 2012)。

本研究採用農村水保署所建立的雷達影像自動偵測堰塞湖模組，以進行堰塞湖形成偵測，該偵測方法以「最小值門檻法」與「統計值門檻法」兩種方法來偵測堰塞湖，其屬於多時期門檻法的一種，並以 2015 年 7 月至 2020 年 7 月五年間影像統計資訊為基礎，作為分析水體範圍的門檻值依據。前者以統計期間的影像像元 DN 值 (Digital Number，為萃取判釋影像之像元數值) 最小值作為門檻，萃取影像中 DN 值小於門檻的像元；後者以統計期間的影像數據計算平均值與標準差，萃取影像 DN 值小於兩倍標準差以下作為門檻 (圖 4)。同時，該自動偵測模組，依據山坡地範圍、河道總通量大於 4 (Liu et al., 2016)、坡度小於 30 度、既有已知水庫水體、非雷達陰影區等多項條件進行篩選，以提高偵測準確性 (農村水保署，2023)。

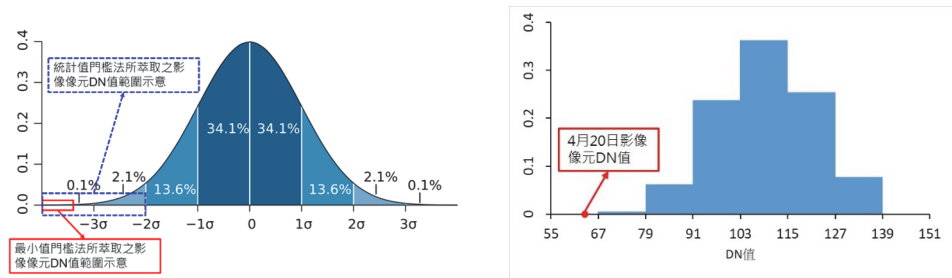


圖 4 不同門檻值選定法之像元值示意 (左) 與 2015 年 7 月至 2020 年 7 月木瓜溪堰塞湖位置 Sentinel-1 影像 DN 值統計 (右) 圖 (資料來源：農村水保署，2023)

Fig.4 Digital Number (DN) Value for different Threshold Selection Methods (Left) and DN Value Statistics of Sentinel-1 Image from July 2015 to July 2020 of Papaya River (Right) (Source : ARDSWC, 2023)

3. 數值模式研究材料與方法

(1) 空間分布式水文模式

WFLOW 模式為荷蘭國家水文研究院 (Deltares) 所開發的空間分布式水文模式 (Spatially distributed hydrological model)，其模式利用雷達降雨資料與水文模型模擬水文循環過程，包括降雨、截流、蒸發散、土壤、地表水和地下水交互作用等，並使用運動波方式 (Kinematic wave method) 進行漫地流及河道水理演算 (van Verseveld et al., 2024)。目前 WFLOW_sbm 模組 (Simple bucket model)，是以 Vertessy and Elsenbeer (1999) 所提出之 Topo_SBM 模型為基礎衍生，並考量不同土地利用特性。該模式採用網格式資料建置，所需要的基礎資料包含數值高程模型、土地利用、土壤種類、集水區範圍及河川網絡等。同時，輸入時序降雨量或特定點流量資料，並藉由歷史雨量資料進行模式率定與驗證，更利用即時監測數據調整模式輸出，以提高模式預測準確性 (Imhoff et al., 2024; Jeong et al.,

2024; Tama et al., 2023)。

本研究依據中央氣象署降雨預報資料，其顯示於 4 月 23 日至 28 日間將有較大降雨發生，針對研究區域建置 WFLOW 網格式化資料，其模式參數設定可參考相關前人研究 (Eilander et al., 2021; Imhoff et al., 2020; Imhoff et al., 2024; van Verseveld et al., 2024; Hengl et al., 2017; Clark et al., 2017; Knoben et al., 2021)，並結合氣象署雷達降雨、雨量站觀測資料及 WEPS (Weather Research and Forecasting model Ensemble Prediction System, WEPS) (Li et al., 2020) 預報超越機率 10% 降雨資料，演算各網格平均降雨及其對應堰塞湖上游集水面積所匯聚之洪峰流量。並將模擬結果輸出集水區時序降雨量及流量歷線，作為堰塞湖潰決模擬上游邊界條件 (圖 5)。根據氣象署 WEPS 預報 4 月 22 日當日下午 3 時至 4 月 25 日凌晨 3 時之降雨資料，透過 WFLOW 逕流模擬結果顯示，花蓮木瓜溪堰塞湖上游區域，在 4 月 23 日最大流量為 15.7 cms、4 月 24 日為 91.5 cms、4 月 25 日為 70.5 cms (圖 6)。

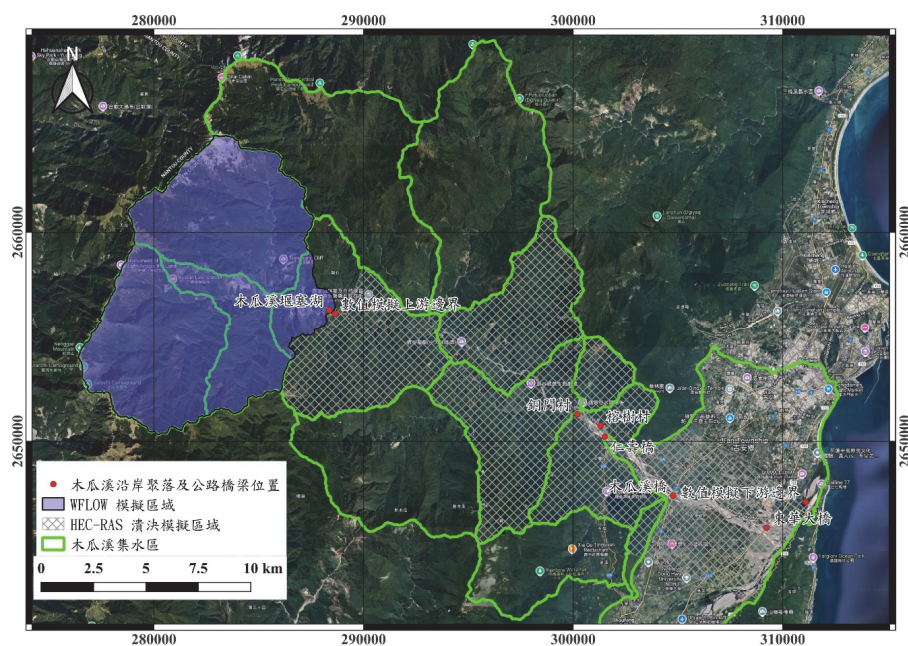


圖 5 木瓜溪堰塞湖模擬範圍區域圖

Fig.5 Numerical Simulation Domain of Landslide-dammed Lake breach of Papaya River

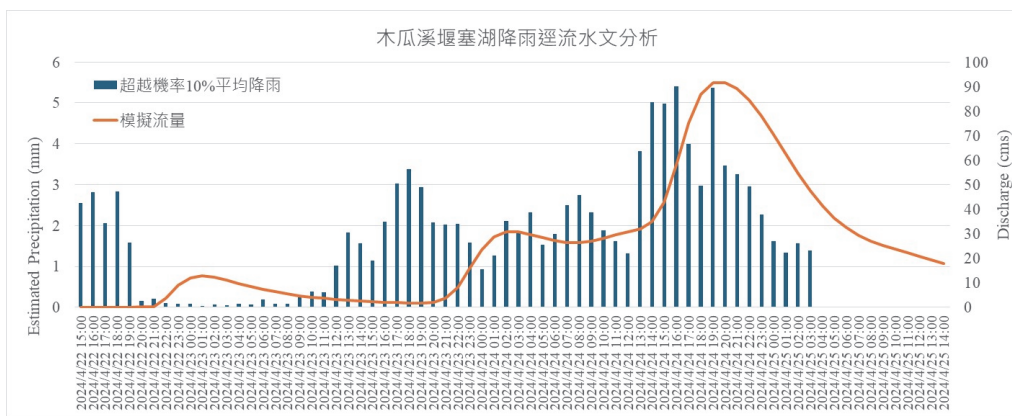


圖 6 降雨逕流時序圖 (氣象署 WEPS 預報超越機率 10%降雨，時間 4 月 22 日下午 3 時至 4 月 25 日上午 3 時)

Fig.6 Ensemble Precipitation Prediction and Runoff Discharge Hydrograph

(2) 二維水理模式與情境設定

由於堰塞湖潰決具有高度不確定性，其潰壞機制 (Failure mechanism) 與潰決時間點難以評估。因此，在發現堰塞湖形成後，如何快速評估其潰決可能潛在衝擊影響範圍，對於主管機關的防災應變措施極為重要。本研究採用美國陸軍工兵團水文工程中心 (Hydrologic Engineering Center) 所開發的河道水理分析系統 (River Analysis System, HEC-RAS)，其數值模式為 6.4.1 版本 (Brunner, 2024)。HEC-RAS 已廣泛應用於洪水傳遞模擬、河道水理分析、海嘯模擬及壩體潰壞等研究 (Amaliah, 2023; Butt et al., 2013; Jung and Kim, 2017; Gibson et al., 2022; Marimin et al., 2018; Limbasiya et al., 2022; 吳振佑等, 2019; 林家興, 2019)。該模式可提供潰決洪峰流量、衝擊範圍、水深與流速等水理參數的模擬分析成果，以供規劃緊急疏散與訂定應變對策參據。

本研究以政府資料開放平臺提供之「2022 年版全臺灣及部分離島 20 公尺網格數值地形模型」DTM 資料，作為數值模式建置所需的基礎地形資料，模式計算網格大小設定為 20 m × 20 m，總計算網格為 553,770 個，模擬區域面積約 221.5 平方公里，涵蓋堰塞湖下游沿岸河道長度約 27,125 公尺。在潰壩延時設定上，參考 Wahl et al., (1998) 之壩體潰壞統計案例，該研究顯示潰壩延時介於 0.1 至 1 小時間，且當潰壩延時越短，則堰塞湖潰決所造成之衝擊影響越大，本研究採用 0.5 及 1 小時作為潰壩延時設定。在邊界條件方面，天然壩上游設置 1 處入流邊界，其入流量由基礎流量和洪峰流量組成，基礎流量參考水利署「2023 年臺灣水文年報」中木瓜溪下游仁壽橋 (H0190H01) 測站資料，其最大、最小與平均流量分別為 47.5、5.2、20.8 cms，本研究以平均流量 20.8 cms 作為基流量。洪峰流量則依據氣象署預報超越機率 10%降雨資料，結合 WFLOW 模式估算，其結果顯示洪峰流量為 91.5 cms；在下游邊界設定上，依 HEC-RAS 手冊建議，下游邊界條件設置應延伸至不致影響分析河段範圍，因此在與銅門村相距約 12 公里處設定下游邊界，並依據

木瓜溪下游出口河段之平均坡度(約 1.02%)進行設定，另在 HEC-RAS 模式參數設定上可參考相關前人研究 (Ahmad et al., 2023; Beza et al., 2023; Brunner, 2014; Gaagai et al., 2022; Gibson et al., 2022; Najjar and Gul, 2022; Shrestha et al., 2025; 吳振佑等, 2019; 林家興, 2019)。

此外，本研究模擬震後堰塞湖蓄滿後之潰決情境，並利用 DTM 及衛星影像資料評估堰塞湖蓄水量，依據蓄水區高程-面積-體積關係曲線進行模式設定 (圖 7)，其中壩高依溢流之蓄水長度及 DTM 資料推算，設置為 25 公尺。因震後餘震頻繁，現地調查受限，本研究參考 HEC-RAS 使用手冊(Brunner, 2014)建議之曼寧係數 n 值範圍 0.04 至 0.06 間，並採用 0.06 進行參數設定。本次花蓮木瓜溪堰塞湖於形成後，除持續受餘震影響，更面臨氣象預報將有強降雨發生，因此，在模擬情境設計上，特別考量堰塞湖上游集水區所匯聚逕流洪峰與天然壩蓄水的疊加效應。本研究以堰塞湖開始蓄水為初始條件，設定兩種模擬情境：(1) 地震後無降雨影響之潰決情境，即為堰塞湖蓄滿後潰決情境；(2) 地震後受降雨影響之潰決情境，即為上游洪峰流量疊加堰塞湖蓄滿後潰決，相關潰決情境及模式參數設置如表 3 所示。

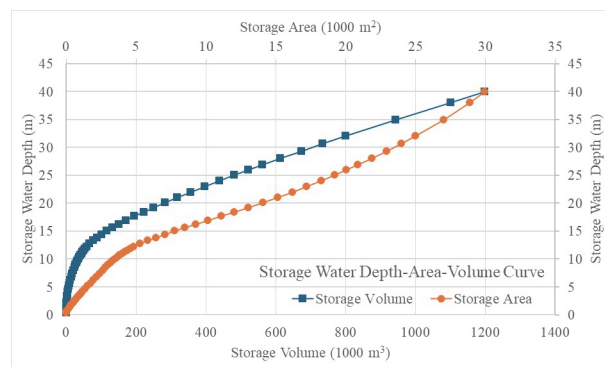


圖 7 堰塞湖水深-面積-體積曲線圖

Fig.7 Stage Water Depth-Area-Volume Curve

表 3 潰決情境及參數設定表

Table 3 Parameters of Landslide-dammed Lake simulation

Case	模擬情境	潰決延時 (hr)	基流量 (cms)	入流邊界 洪峰流量 Q_p (cms)	壩高 (m)	網格大小
Run 1	震後無降雨	1	20	無	25	20 x 20
Run 2	震後有降雨	1	20	91.5	25	20 x 20
Run 3	震後無降雨	0.5	20	無	25	20 x 20
Run 4	震後有降雨	0.5	20	91.5	25	20 x 20
Run 5	溢流無潰決	-	20	無	25	20 x 20

註：洪峰流量為依據中央氣象署降雨預報資料配合 WFLOW 模式演算成果。

三、成果與討論

1. 衛星影像判釋成果

本文採用 2024 年 4 月 3 日花蓮地震發生前後之 Sentinel-2 影像來進行水體判釋，選取 2024 年 4 月 4 日至 4 月 29 日期間的 6 個時期衛星影像 (圖 8)。在剔除雲覆率過高影像後，以 GIS 軟體判釋堰塞湖位置、邊坡崩塌面積，並結合 DEM 資料推估天然壩壩體高度、迴水長度及蓄水面積與體積。此外，本研究蒐集 BigGIS 平台上不同時期的 Sentinel-2 衛星影像，並以 NDWI 指標進行水體判釋。但由於 4 月 9 日、4 月 19 日及 4 月 24 日的影像受高雲覆率影響，無法計算 NDWI 判別水體，因此本研究最後以 4 月 4 日、4 月 14 日、4 月 29 日影像進行分析。

本研究以 Sentinel-2 影像進行 NDWI 水體分析，判釋不同時期堰塞湖的形成與變化情形。分析 2024 年 4 月 4 日之 NDWI 指標成果顯示 (圖 9)，河道內並無大範圍蓄水或水面寬顯著擴大情形，其水體之 NDWI 指標值介於 0 至 0.044 間。於 4 月 14 日，堰塞湖水體 NDWI 判釋成果顯示，天然壩壩體後方蓄水區範圍明顯較 4 月 4 日判別範圍增加，水體之 NDWI 指標值介於 0 至 0.106 間，由此可知河道已有蓄水一段時間且水體範圍呈擴大現象，可判斷崩塌土體已於此時時間點之前形成堰塞湖。進一步分析 4 月 29 日 NDWI 水體指標值介於 0 至 0.144 間，河道蓄水區域顯著擴大，且天然壩下游河道亦出現水體分布，顯示堰塞湖蓄水已發生溢流 (圖 9)。綜合 NDWI 水體判釋成果推測，0403 花蓮地震發生後，第一時間可能造成坡面大量土體崩落，使得河道受到阻塞，再加上多次餘震影響，其河道明顯出現水體蓄積與迴水現象。此外，於 4 月 29 日影像顯示堰塞湖上游河道蓄水長度已達最大範圍，惟其確切形成堰塞湖時間僅能推測介於 4 月 4 日至 4 月 14 日間。

由於光學影像配合 NDWI 指標水體分析，受限部分影像品質不佳，無法精確縮小堰塞湖形成時間範圍。此外，臺灣地處亞熱帶屬多雲雨區域，平均雲覆率高達 80%，可用之無雲影像較稀少 (徐逸祥、朱子豪，2013)。因此，為克服光學影像雲覆率過高的限制，利用 Sentinel-1 雷達影像回波強度分析，以輔助判釋木瓜溪產生堰塞湖時間點。先利用雷達影像自動偵測堰塞湖模組進行影像判釋，統計 2015 年 7 月至 2020 年 7 月木瓜溪堰塞湖所在位置之影像 DN 值，其最小門檻值法所萃取 DN 值介於 55 至 67 間，後蒐集地震發生前後不同時期之 Sentinel-1 雷達影像，其中升軌影像時間分

別為 3 月 27 日、4 月 8 日、4 月 20 日，降軌影像則為 3 月 29 日、4 月 10 日、4 月 22 日。以升軌影像分析為例，利用 3 月 27 日與 4 月 20 日堰塞湖形成前與已明顯蓄水之影像進行差異分析，計算水體回波強度變化，判別水體存在範圍值約介於 42 至 79 間，此範圍值小於最小門檻值法所萃取 DN 值，顯示最小門檻值法統計之 DN 值可反應堰塞湖所蓄積水體之像元值，其可作為判別水體存在標準區間。再比對 3 月 27 日與 4 月 8 日影像，其水體存在範圍值約介於 46 至 96 間，據此推估堰塞湖應是於 4 月 4 日至 4 月 8 日間形成。然而，比對 3 月 29 日與 4 月 22 日之降軌影像分析，其水體存在範圍值約介於 33 至 82 間，但是 3 月 29 日與 4 月 10 日影像分析效果不佳，因降軌影像判釋水體範圍位於地形遮蔽所造成陰影區，其受陰影影響易將非水體低反射地物誤判為水體，以致無法有效確認水體範圍變化。因此，根據升軌雷達影像分析結果，推估堰塞湖形成時間應介於 4 月 4 日至 4 月 8 日間 (圖 10)。

2. 堰塞湖潰決成果

堰塞湖形成及存在時間具高度不確定性，且天然壩為非均質性土砂材料組成，故難以精確評估堰塞湖之潰壞機制 (Failure mechanism) 與潰決延時 (Breach formation time)。本研究堰塞湖潰決設定為溢流破壞型態，依蓄水潰決時間及上游疊加逕流洪峰效應情境下，分析潰決衝擊水理量及安全避難可能範圍，用以評估衝擊影響，並提供於主管機關研擬防災應變決策參據。

(1) 蓄水潰決時間

依據木瓜溪堰塞湖之水深、面積與體積關係分析成果，在地震後堰塞湖蓄滿並潰決情境下，壩體高度為 25 公尺，蓄水量體約 $4.81 \times 10^5 \text{ m}^3$ ，考量下游仁壽橋之最小流量 5 cms 及平均流量 20 cms 作為堰塞湖上游入流量，計算其蓄滿時間分別約需 26.7 及 6.7 小時。若壩體高度增加至 30 公尺，則蓄水量體約為 $7.35 \times 10^5 \text{ m}^3$ ，相應的蓄滿時間分別約為 40.8 及 10.2 小時。然而，當考量降雨逕流洪峰影響時，堰塞湖上游洪峰流量為 91.5 cms，在此情境下，壩體高度分別為 25 與 30 公尺時，蓄滿時間大幅縮短至約 1.46 小時與 2.2 小時。堰塞湖在洪峰流量條件下之蓄滿時間顯著縮短，從發現堰塞湖至蓄滿潰決的時間，相較最小流量與平均流量條件下縮短約 4.6 及 18.5 倍。因此，在上游洪峰流量疊加效應下，從堰塞湖開始蓄水至蓄滿潰決的時間將劇烈縮短，進而大幅度減少沿岸聚落的預警及避難反應時間，對防災應變與決策產生重大影響。

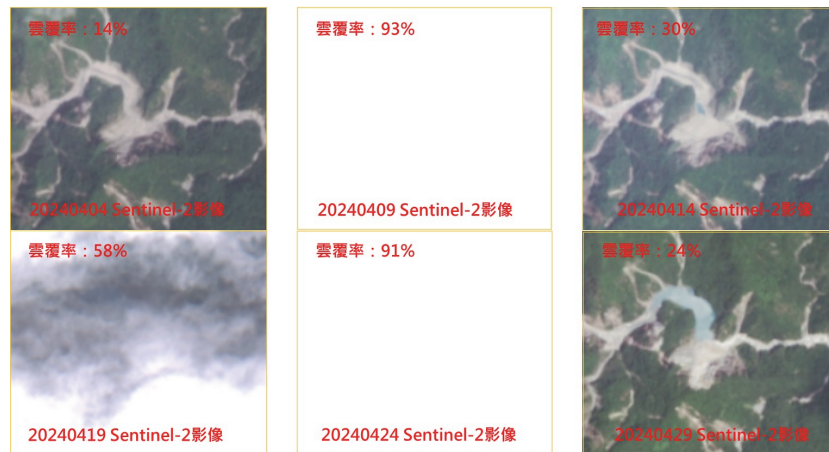


圖 8 Sentinel-2 影像 (影像時間：20240404、20240409、20240414、20240419、20240424、20240429; 資料來源：BigGIS <https://gis.ardswc.gov.tw/>)

Fig.8 Sentinel-2 images (Time: 20240404、20240409、20240414、20240419、20240424、20240429; source: BigGIS <https://gis.ardswc.gov.tw/>)

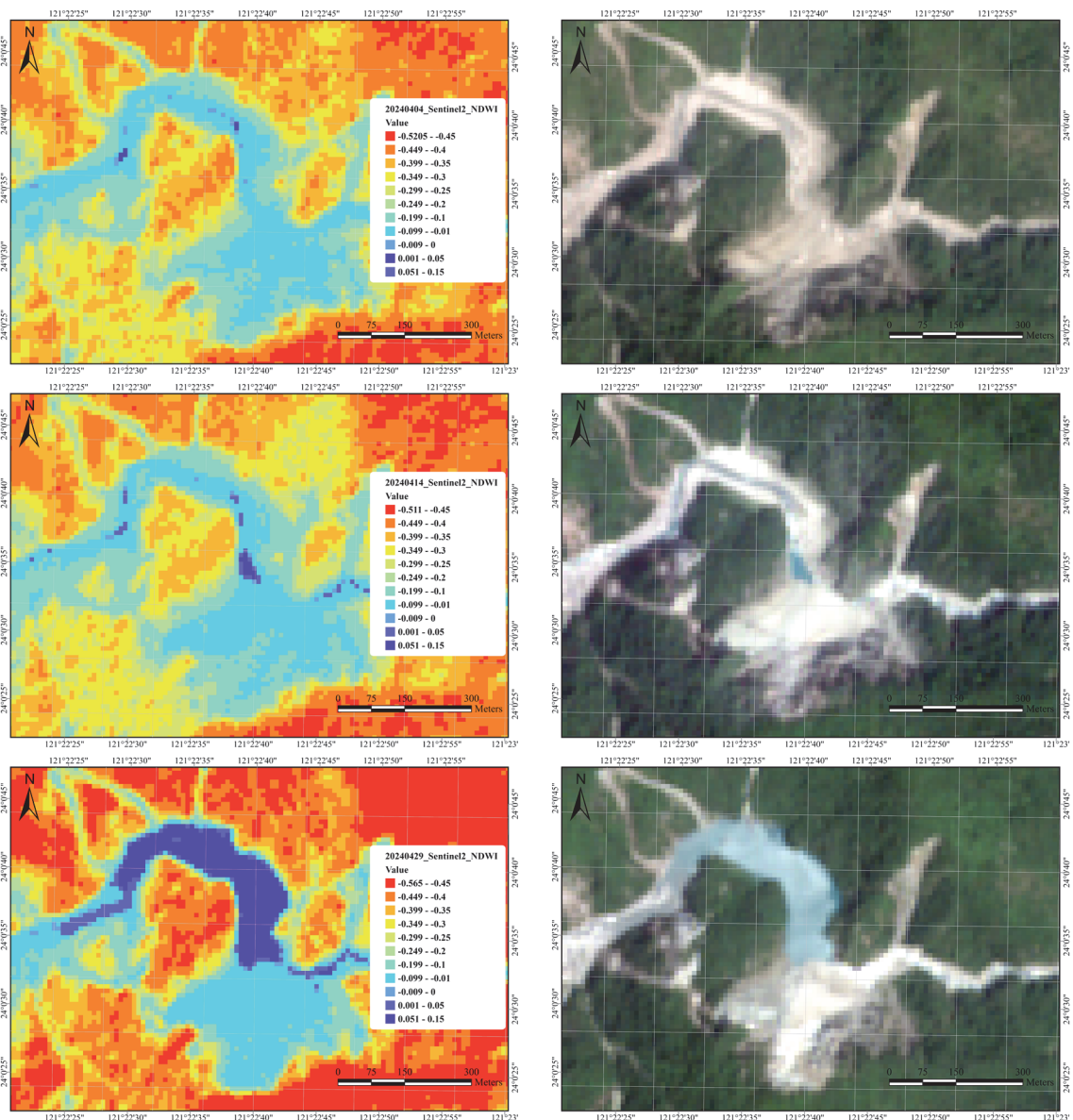


圖 9 NDWI 指標判別水體圖 (影像時間：上 20240404、中 20240414、下 20240429)

Fig.9 The water body is identified by NDWI (Date: up 20240404, mid 20240414, down 20240429)

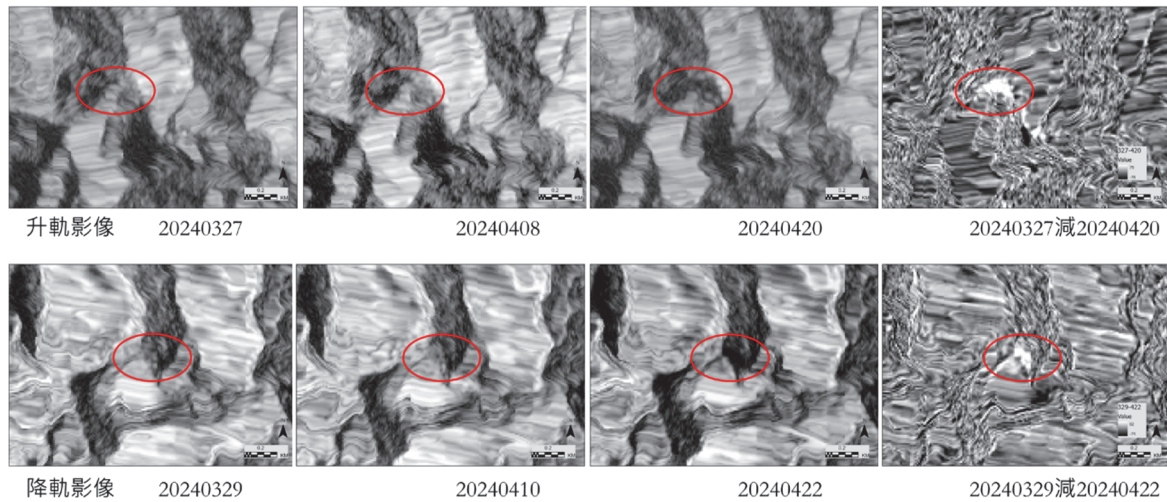


圖 10 雷達影像回波強度圖

Fig.10 The water body is identified by backscatter of SAR images

(2) 潰決洪水波水理量

依據堰塞湖潰決所傳遞洪水波之水理量演算成果，當堰塞湖蓄滿後溢流但不潰決情境下 (Run5 演算結果)，以銅門村所在位置之演算成果為例，洪水流速為 0.84 m/s，洪水波到達時間約 8.6 小時，水深約 0.8 公尺，洪水波流量約 20.0 cms (圖 11)。當堰塞湖蓄滿後潰決且潰決延時為 1 小時情境下 (Run1 演算結果)，其潰決洪水波水理特性皆增加，流速增至 1.75 m/s，水深增加至 1.6 公尺，洪水波到達時間縮短為 1.8 小時，潰決洪峰流量增至 119.6 cms；但當堰塞湖蓄滿後潰決且潰決延時縮短至 0.5 小時情境下 (Run3 演算結果)，其與潰決延時 1 小時演算之水理量變化差異不大，僅潰決洪水波之到達時間，由 110 分鐘縮短為 100 分鐘，惟因河道水面距離聚落之高程差約為 37 公尺，故洪水波並不會直接影響聚落安全。

進一步考量疊加上游集水區匯聚之逕流洪峰影響，在潰決延時 1 小時情境下 (Run2 演算結果)，其潰決洪水波水理特性顯著提升，流速增至 3.08 m/s，洪水波到達時間縮短為約 1.1 小時，水深增至 3.2 公尺，洪峰流量達 613.9 cms。此外，當潰決延時進一步縮短為 0.5 小時下 (Run4 演算結果)，其流速增至 3.1 m/s，洪水波到達時間縮短為約 0.9 小時，水深增至 3.1 公尺。此結果顯示出上游集水區所匯聚之逕流量，將顯著加劇潰決洪水波對下游沿岸區域的影響，增加洪水災害潛勢。主要是因為木瓜溪堰塞湖上游集水區面積約佔整體集水區的 1/5，其匯聚之洪峰量相當可觀。然而，綜合評估水理演算結果，因木瓜溪下游河床距聚落位置之平均高程差約 20 至 30 公尺間，河道寬度約 150 至 400 公尺間，儘管洪水波水理量顯著大幅增加，仍不至於對聚落安全造成影響。

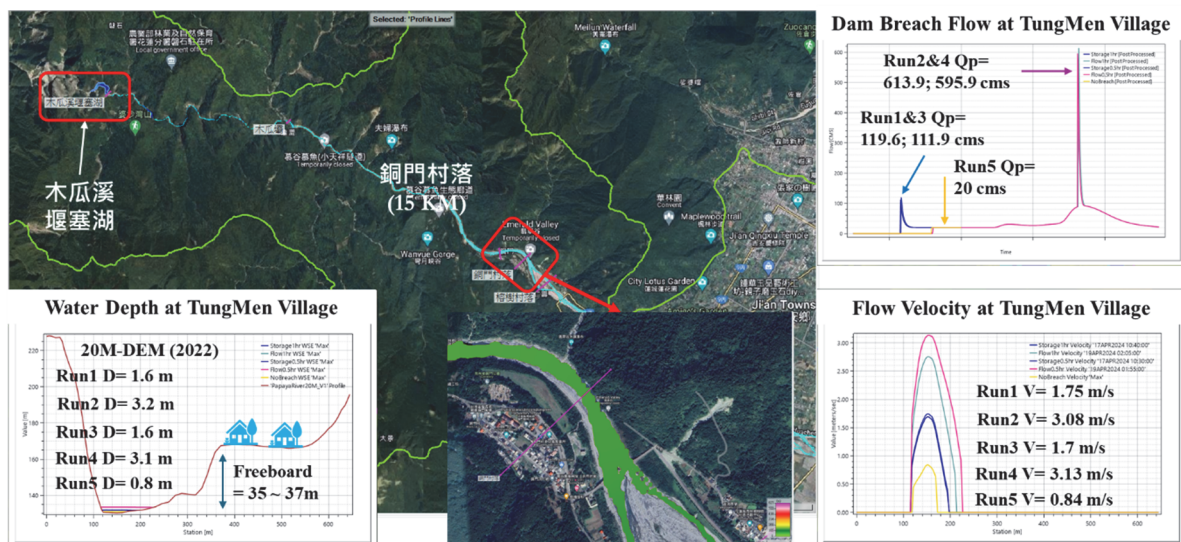


圖 11 銅門村處潰決洪水波之水位及洪峰流量圖

Fig.11 Dam breach of water depth and peak flow discharge at Tungmen Village

(3) 潰決洪水波水深與流速對人員衝擊

在堰塞湖蓄滿後潰決且潰決延時 1 小時情境下 (Run1 演算成果)，當洪水波通過銅門村聚落時，其最大流速為 1.75 m/s，所對應之水深為 1.6 公尺。根據小川芳也等人 (2014) 之研究成果，以避難人員平均身高 1.6 公尺為例，當洪水流速為 1.75 m/s 時，演算所得之水深與身高比值約為 1，遠超過安全避難可能範圍內的水深與身高比 (應低於 0.2 以下)。在考量上游集水區匯聚逕流洪峰且潰決延時同為 1 小時情境下 (Run2 演算結果)，洪水波最大流速為 3.08 m/s，對應水深達 3.2 公尺，其水深與身高比值約為 2，已顯著超過安全避難可能範圍。再者，當為溢流無潰決情境下 (Run5 演算結果)，其溢流最大流速為 0.84 m/s、水深為 0.8 公尺，所對應之水深/身高比約為 0.5，仍高於安全避難可能範圍 (約為 0.4 以下)。雖然此情境下的洪水波對人員衝擊相對較低，但若人員進入河道，仍有受傷之虞(表 4)。因此，依據堰塞湖潰決衝擊危害分析結果，當降雨發生導致潰決風險提高時，應發布預警並禁止人員進入河道，以降低避難者或巡守人員穿越河道受洪水波衝擊而受傷害的風險。

表 4 潰決衝擊危害水力分析 (曼寧係數 n 值為 0.06)

Table 4 Parameters of Landslide-dammed Lake simulation (Manning's n = 0.06)

Case	距聚落高程差 (m)	到達時間 (min)	流速 (m/s)	洪峰流量 (cms)	水深 (m)	水深/身高	避難安全 可能範圍	危害可能
Run 1	36.4	110	1.75	119.6	1.6	1	0.2	Y
Run 2	35.6	70	3.08	613.9	3.2	2	流速大於臨界值	Y
Run 3	36.4	100	1.7	111.9	1.6	1	0.2	Y
Run 4	34.9	55	3.13	595.9	3.1	1.9	流速大於臨界值	Y
Run 5	37.2	520	0.84	20.0	0.8	0.5	0.4	Y

註：避難安全可能範圍(水深/身高)以人員身高 1.6 公尺計算。

表 5 潰決衝擊危害水力分析 (曼寧係數 n 值為 0.04)

Table 5 Parameters of Landslide-dammed Lake simulation (Manning's n = 0.04)

Case	距聚落高程差 (m)	到達時間 (min)	流速 (m/s)	洪峰流量 (cms)	水深 (m)	水深/身高	避難安全 可能範圍	危害可能
Run 1	36.3	90	2.7	201.4	1.72	1.1	流速大於臨界值	Y
Run 2	35.1	60	4.15	722.8	2.87	1.8	流速大於臨界值	Y
Run 3	36.4	80	2.6	183.1	1.65	1	流速大於臨界值	Y
Run 4	34.9	45	4.44	821.9	3.08	1.9	流速大於臨界值	Y
Run 5	37.3	465	1.06	20.0	0.66	0.4	0.4	Y

註：避難安全可能範圍(水深/身高)以人員身高 1.6 公尺計算。

四、結 論

本研究以 2024 年 4 月 3 日花蓮地震所形成木瓜溪堰塞湖為例，探討震後暴雨對潰決風險及衝擊危害影響。在考量震後堰塞湖蓄積水體與上游洪峰流量疊加效應下，藉由水力潰壩模式與安全避難可能範圍分析，綜合評估堰塞湖潰決衝擊對下游區域影響，主要研究結論如下：

1. 花蓮木瓜溪上游邊坡因地震發生崩塌，並阻塞河道形成堰塞湖。由於震後餘震頻繁 (該月千餘起地震發生)，且災區雲覆率高，衛星影像受限於氣象條件無法即時獲取堰

(4) 不同曼寧 n 值之洪水波水理量變化

考量不同曼寧 n 值對於水理量之變化影響，參照 2017 年水土保持手冊 (農村水保署，2017)，其指出山區河道之曼寧值介於 0.03 至 0.05(河底為礫石、卵石間有孤石)、0.04 至 0.07(河底為卵石和大孤石)，因本研究區域集水區為山區天然河道，故採曼寧係數 n 值 0.04 到 0.06 為山區河道合理區間值，並探討曼寧 n 值 0.04 與 0.06 間之堰塞湖潰決洪水波之流速、水深與到達時間變化。在曼寧 n 值為 0.04 條件下，其演算流速皆較曼寧 n 值 0.06 情況增加，而洪水波到達時間約減少 10 至 20 分鐘，但於溢流無潰決情況下 (Run5 演算結果)，其到達時間減少約 1 小時。另比對不同曼寧 n 值下其避難安全可能範圍，在曼寧 n 值 0.04 條件下流速皆增加，造成流速大於臨界值，顯示此堰塞湖潰決情況下人員皆無法抵抗其水流衝擊力。因此，在潰決衝擊危害水力分析時，在曼寧 n 值參數設定上可採用水土保持手冊 (農村水保署，2017)、HEC-RAS 手冊 (Brunner, 2014) 及前人研究成果等建議值作為設定值，以綜合評估堰塞湖潰決衝擊。

塞湖之位置、蓄水狀態及天然壩體積等資訊，直至十餘天後始得知堰塞湖形成。

2. 衛星影像受限於山區崩塌之土砂粉塵影響、雲覆率、交通可及性及氣象狀況等因素，難以立即獲取現場資訊。本研究綜合運用不同時間點之 Sentinel 光學影像與雷達影像，透過 NDWI 指標與雷達回波強度分析成果，以時間序列影像分析輔助判釋蓄水情形，並整合不同時期判別資料以估算迴水長度及蓄水面積。
3. 以中央氣象署預報降雨量資料，透過 WFLOW 分布式降雨逕流演算，推估堰塞湖匯流點之流量歷線，並作為水力模式潰決情境模擬所需之邊界條件，以評估降雨影響下

潰決洪水波的傳遞特性。

4. 利用二維水理模式分析震後堰塞湖潰決對下游聚落的衝擊影響, 考量蓄水體積變化、預報降雨情境及上游匯聚洪峰疊加效應, 解析堰塞湖潰決過程並輸出成果至 GIS 軟體套疊或以動畫方式呈現, 可供主管機關擬定應變對策參據。
5. 在發布堰塞湖潰決預警時, 除提供潰決洪水波到達時間、水深及流速等資訊外, 應額外加註「安全避難可能範圍」資訊, 以降低民眾對水理量數據的誤解, 並減少因錯誤認知而穿越河道的風險, 此資訊可作為警示提醒並提供預警發布及緊急應變規劃之參據。

由於堰塞湖通常形成在山谷中, 對中下游沿岸保全住戶具有危害潛勢, 因此解析堰塞湖潰決過程並視覺化衝擊影響範圍, 對主管機關進行災害管理與制定應變計畫具重要關鍵性。但由於地震後形成堰塞湖往往無法即時獲取現地調查資料, 難以推算堰塞湖形成與溢流發生時間及其穩定性。此外, 堰塞湖潰決模擬的準確性關鍵仰賴於潰壞條件設置, 因此追蹤堰塞湖形成與溢流的時間點用以確定潰決發展程度極為重要。再者, 潰壩模擬之優劣取決於堰塞湖幾何參數、蓄水體積、潰壞過程等模式參數設定 (Brunner, 2014; Singh and Scarlatos, 1988)。因此, 在防災單位應變開設階段, 以快速評估方式可先參採前人研究或模式預設值, 待有現地調查資料後再逐步更新數值模式參數, 進行更詳細演算。未來在颱風或地震發生後, 建議先利用不同時間序之遙測影像進行監測判釋分析, 以在第一時間獲取堰塞湖基礎資料, 並結合水理演算評估潰決衝擊影響, 作為預警發布及應變操作參據, 透過發布潰決洪水波資訊, 確保沿岸聚落獲取充足的疏散與避難時間, 進而提升災害應變能力。

參考文獻

- [1] Ahmad, I., Waseem, M., Ashraf, A., Leta, M.K., Ahmad, S., and Wahab, Hira. (2023). "Hydrological risk assessment for Mangla Dam: compound effects of instant flow and precipitation peaks under climate change, using HEC-RAS and HEC-GeoRAS." *SN Applied Sciences*, 5, 344. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05579-2>
- [2] Amaliah, R., and Ginting, B.M. (2023). "Investigating the Capability of HEC-RAS Model for Tsunami Simulation." *Journal of the Civil Engineering Forum*, 9(2), 161-180. <https://doi.org/10.22146/jcef.6140>
- [3] Beza, M., Fikre, A., and Moshe, A. (2023). "Dam Breach Modeling and Downstream Flood Inundation Mapping Using HEC-RAS Model on the Proposed Gumara Dam, Ethiopia." *Advances in Civil Engineering*, 2023, 1-15. <https://doi.org/10.1155/2023/8864328>
- [4] Brisco, B. (2015). "Mapping and Monitoring Surface Water and Wetlands with Synthetic Aperture Radar (Page 119-136).", CRC Press, <https://doi.org/10.1201/b18210-9>
- [5] Brunner, G.W. (2014). "Using HEC-RAS for Dam Break Studies." US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC), TD-39, 74. <https://www.hec.usace.army.mil/publications/Training-Documents/TD-39.pdf>.
- [6] Brunner, G.W. (2024). "HEC-RAS River Analysis System User's Manual" US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/r2dum/latest>
- [7] Butt, M.J., Umar, M., and Qamar, R. (2013). "Landslide dam and subsequent dam-break flood estimation using HEC-RAS model in Northern Pakistan." *Nat Hazards*, 65, 241-254. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0361-8>
- [8] Chen, J.C. (2011). "Variability of impact of earthquake on debris-flow triggering conditions: Case study of Chen-Yu-Lan watershed, Taiwan." *Environmental Earth Sciences*, 64(7), 1787-1794. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-0981-4>
- [9] Chen, J.C., and Huang, W.S. (2021). "Evaluation of Rain-fall-Triggered Debris Flows under the Impact of Extreme Events: A Chenyulan Watershed Case Study, Taiwan." *Water*, 13(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/w13162201>
- [10] Clark, M.P., Bierkens, M.F.P., Samaniego, L., Woods, R.A., Uijlenhoet, R., Bennett, K.E., Pauwels, V.R.N., Cai, X., Wood, A.W., and Peters-Lidard, C.D. (2017) "The Evolution of Process-Base Hydrologic Models: Historical Challenges and the Collective Quest for Physical Realism." *Hydrology and Earth System Science*, 21(7), 3427-3440. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3427-2017>
- [11] Clement, M.A., Kilsby, C.G., and Moore, P. (2018). "Multi-temporal synthetic aperture radar flood mapping using change detection." *Journal of Flood Risk Management*, 11(2), 152-168. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12303>
- [12] Costa, J.E., and Schuster, R.L. (1988). "The formation and failure of natural dams." *GSA Bulletin*, 100(7), 1054-1068. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<1054:TFAFON>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<1054:TFAFON>2.3.CO;2)
- [13] Eilander, D., van Verdevelde, W., Yamazaki, D., Weerts, A., Winsemius, H.C., and Ward, P.J. (2021). "A Hydrography Upscaling Method for Scale-Invariant Parametrization of Distributed Hydrological Models." *Hydrology and Earth System Science*, 25(9), 5287-5313. <https://doi.org/10.5194/hess-25-5287-2021>, 2021
- [14] Gaagai, A., Aouissi, H.A., Krauklis, A.E., Zekker, I., Boudoukha, A., Benaabidate, L., and Chenchouni, H. (2022). "Modeling and Risk Analysis of Dam-Break Flooding in a Semi-Arid Montane Watershed: A Case Study of the Yabous Dam, Northeastern Algeria." *Water*, 14(5), 767. <https://doi.org/10.3390/w14050767>
- [15] Gao, B. (1996). "NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space." *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257-266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- [16] Gibson, S., Moura, L.Z., Ackerman, C., Ortman, N., Amorim, R., Floyd, I., Eom, M., Creech, C., and Sánchez, A. (2022). "Prototype Scale Evaluation of Non-Newtonian Algorithms in HEC-RAS: Mud and Debris Flow Case Studies

- of Santa Barbara and Brumadinho.” *Geosciences*, 12(3), 134. <https://doi.org/10.3390/geosciences12030134>
- [17] Gulácsi, A., and Kovács, F. (2020). “Sentinel-1-Imagery-Based High-Resolution Water Cover Detection on Wetlands, Aided by Google Earth Engine.” *Remote Sensing*, 12(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/rs12101614>
- [18] He, J., Zhang, L., Xiao, T., and Chen, C. (2022). “Emergency risk management for landslide dam breaks in 2018 on the Yangtze River, China.” *Resilient Cities and Structures*, 1(3), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.rcns.2022.10.003>
- [19] Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G.B.M., Gonzalez, M.R., Kilibarda, M., Blagotic, A., Shangguan, W., Wright, M.N., Geng, X.Y., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M.A., Vargas, R., MacMillan, R.A., Batjes, N.H., Leenaars, J.G.B., Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S., and Kempen, B. (2017). “SoilGrids250m: Global Gridded Soil Information Based on Machine Learning.” *PLoS ONE*, 12(2), 1-40. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
- [20] Huang, W., DeVries, B., Huang, C., Lang, M.W., Jones, J.W., Creed, I.F., and Carroll, M.L. (2018). “Automated Extraction of Surface Water Extent from Sentinel-1 Data.” *Remote Sensing*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/rs10050797>
- [21] Imhoff, R.O., Buitink, J., van Verseveld, W.J., and Weerts, A.H. (2024). “A Fast High Resolution Distributed Hydrological Model for Forecasting, Climate Scenarios and Digital Twin Applications Using Wflow_sbm.” *Environmental Modelling and Software*, 179, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106099>
- [22] Imhoff, R.O., van Verseveld, W.J., van Osnabrugge, B., and Weerts, A.H. (2020). “Scaling Point-Scale (Pedo)transfer Function to Seamless Large-Domain Parameter Estimates for High-Resolution Distributed Hydrologic Modeling: An Example for the Rhine River.” *Water Resources Research*, 56(4), 1-28. <https://doi.org/10.1029/2019WR026807>
- [23] Jeong, M., Kwon, M., Cha, J.H., and Kim, D.H. (2024). “High flow prediction model integrating physically and deep learning based approaches with quasi real-time watershed data assimilation.” *Journal of Hydrology*, 636, 131304. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131304>
- [24] Jung, C.G., and Kim, S.J. (2017). “Comparison of the Damaged Area Caused by an Agricultural Dam-Break Flood Wave Using HEC-RAS and UAV Surveying.” *Agricultural Sciences*, 8(10), 1089-1104. doi: 10.4236/as.2017.810079
- [25] Keefer, D.K. (1984). “Landslides caused by earthquakes.” *GSA Bulletin*, 95(4), 406-421. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1984\)95<406:LCBE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1984)95<406:LCBE>2.0.CO;2)
- [26] Knoben, W.J.M., Clark, M.P., Bales, J., Bennett, A., Gharrari, S., Marsh, C.B., Nijssen, B., Pietroniro, A., Spiteri, R.J., Tang, G., Tarboton, D.G., and Wood A.W. (2022). “Community Workflows to Advance Reproducibility in Hydrologic Modeling: Separating Model-Agnostic and Model-Specific Configuration Steps in Applications of Large-Domain Hydrologic Models.” *Water Resources Research*, 58(11), 1-37. <https://doi.org/10.1029/2021WR031753>
- [27] Lekhak, K., Rai, P., and Budha, P.B. (2023). “Extraction of Water Bodies from Sentinel-2 Images in the Foothills of Nepal Himalaya.” *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 10(2), 70-81. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.1240074>
- [28] Li, C.H., Berner, J., Hong, J.S., Fong, C.T., and Kuo, Y.H. (2020). “The Taiwan WRF Ensemble Prediction System: Scientific Description, Model-Error Representation and Performance Results.” *Asia-Pac. J. Atmospheric Sci.*, 56 (1), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s13143-019-00127-8>
- [29] Limbasiya, J.M., Desai, P., and Shah, M. (2022). “Dam Break Analysis using HEC-RAS: A Case Study of Karjan Dam.” *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, 06. <https://doi.org/10.55041/IJSREM14546>
- [30] Lin, C.W., Shieh, C.L., Yuan, B.D., Shieh, Y.C., Liu, S.H., and Lee, S.Y. (2004). “Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: Example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan.” *Engineering Geology*, 71(1-2), 49-61. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00125-X)
- [31] Lin, C.Y., Chen, Y.C., Lin, J.Y., Mao, Y.S., and Wu, S.W. (2022). “Key indicators describing the evolution of landslides in the Zhuoshui River Basin caused by the Chi-Chi earthquake in Taiwan.” *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 474-500. <https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2037739>
- [32] Liu, C.C., Luo, W., Chen, M.C., Lin, Y.T., and Wen, H.L. (2016). “A new region-based preparatory factor for landslide susceptibility models: the total flux.” *Landslides*, 13 (5), 1049-1056. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0620-3>
- [33] Liu, C.N., Huang, H.F., and Dong, J.J. (2008). “Impacts of September 21, 1999 Chi-Chi earthquake on the characteristics of gully-type debris flows in central Taiwan.” *Natural Hazards*, 47(3), 349-368. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9223-9>
- [34] Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F., and Reichenbach, P. (2004). “Landslide inventories and their statistical properties.” *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6), 687-711. <https://doi.org/10.1002/esp.1064>
- [35] Marimin, N.A., Razi, M.A.M., Ahmad, M. A., Adnan, M.S., and Rahmat, S.N. (2018). “HEC-RAS Hydraulic Model for Floodplain Area in Sembrong River.” *International Journal of Integrated Engineering*, 10(2), 151-157. <https://doi.org/10.30880/ijie.2018.10.02.029>
- [36] McFeeters, S.K. (1996). “The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features.” *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- [37] McFeeters, S.K. (2013). “Using the Normalized Difference Water Index (NDWI) within a Geographic Information System to Detect Swimming Pools for Mosquito Abatement: A Practical Approach.” *Remote Sensing*, 5(7), 3544-3561. <https://doi.org/10.3390/rs5073544>

- [38] Morandeira, N.S., Grings, F. Facchinetti, C., and Kandus, P. (2016). "Mapping Plant Functional Types in Floodplain Wetlands: An Analysis of C-Band Polarimetric SAR Data from RADARSAT-2." *Remote Sensing*, 8(3), 174. <https://doi.org/10.3390/rs8030174>
- [39] Najar, M., and Gül, A. (2022). "Investigating the Influence of Dam-Breach Parameters on Dam-Break Connected Flood Hydrograph." *Teknik Dergi*, 33(5), 12501-12524. <https://doi.org/10.18400/tekderg.796334>
- [40] Peng, M., and Zhang, L.M. (2012). "Breaching parameters of landslide dams." *Landslides*, 9(1), 13-31. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0271-y>
- [41] Santoro, M., and Wegmüller, U. (2014). "Multi-temporal Synthetic Aperture Radar Metrics Applied to Map Open Water Bodies." *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(8), 3225-3238. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2289301>
- [42] Schuster, R.L., and Costa, J.E. (1986). "A Perspective on Landslide Dams." <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:132943285>
- [43] Shieh, C.L., Chen, Y.S., Tsai, Y.J., and Wu, J.H. (2009). "Variability in rainfall threshold for debris flow after the Chi-Chi earthquake in central Taiwan, China." *International Journal of Sediment Research*, 24, 2, 177-188. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(09\)60025-1](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(09)60025-1)
- [44] Shrestha, B., Kafle, M.R., and Bhattarai, S. (2025). "Downstream Flood Inundation Assessment Due to Dam Breach of Dudhkoshi Storage Hydroelectric Project Using HEC-RAS 2D." *Advances in Civil Engineering*, 2025, 1-26. <https://doi.org/10.1155/adce/2856022>
- [45] Singh, V.P., and Scarlatos, P.D. (1988). "Analysis of Gradual Earth-Dam Failure." *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(1), 21-42. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:1\(21\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:1(21))
- [46] Sun, F., Sun, W., Chen, J., and Gong, P. (2012). "Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery." *International Journal of Remote Sensing*, 33(21), 6854-6875. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.692829>
- [47] Taghvakish, S. (2012). "Refined Freeman-Durden for harvest detection using POLSAR data." <http://hdl.handle.net/11023/257>
- [48] Tama, D.R., Limantara, L.M., Suhartanto, E., and Devia, Y.P. (2023). "The Reliability of W-flow Run-off-Rainfall Model in Predicting Rainfall to the Discharge." *Civil Engineering Journal*, 9(7), Article 7. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-07-015>
- [49] Twele, A., Cao, W., Plank, S., and Martinis, S. (2016). "Sentinel-1-based flood mapping: A fully automated processing chain." *International Journal of Remote Sensing*, 37(13), 2990-3004. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431161.2016.1192304>
- [50] van Verseveld, W.J., Weerts, A., Visser, M., Buitink, J., Imhoff, R.O., Boisgontier, H., Bouaziz, L., Eilander, D., Hegnauer, M., ten Velden, C., and Russell, B. (2024). "Wflow_sbm v0.7.3, a spatially distributed hydrological model: From global data to local applications." *Geoscientific Model Development*, 17(8), 3199-3234. <https://doi.org/10.5194/gmd-17-3199-2024>
- [51] Vertessy, R.A., and Elsenbeer, H. (1999). "Distributed modeling of storm flow generation in an Amazonian rain forest catchment: Effects of model parameterization." *Water Resources Research*, 35(7), 2173-2187. <https://doi.org/10.1029/1999WR900051>
- [52] Wahl, T., Farrar, J., Melena, J., Mares, D., and Mefford, B. (2000). Prediction of Embankment Dam Breach Parameters A Literature Review and Needs Assessment DSO-98-004 Dam Safety. <https://www.semanticscholar.org/paper/Prediction-of-Embankment-Dam-Breach-Parameters-A-Wahl-Farrar/384880731dfbab10b1bcac66423fbde99dbcb56>
- [53] Westerhoff, R.S., Kleuskens, M.P.H., Winsemius, H.C., Huizinga, H.J., Brakenridge, G.R., and Bishop, C. (2013). "Automated global water mapping based on wide-swath orbital synthetic-aperture radar." *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(2), 651-663. <https://doi.org/10.5194/hess-17-651-2013>
- [54] Yang, Y., Tang, C., Cai, Y., Tang, C., Chen, M., Huang, W., and Liu, C. (2023). "Characteristics of Debris Flow Activities at Different Scales after the Disturbance of Strong Earthquakes-A Case Study of the Wenchuan Earthquake-Affected Area." *Water*, 15(4), 698. <https://doi.org/10.3390/w15040698>
- [55] Yu, B., Wu, Y., and Chu, S. (2014). "Preliminary study of the effect of earthquakes on the rainfall threshold of debris flows." *Engineering Geology*, 182, 130-135. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.04.007>
- [56] Zhu, Y., Peng, M., Cai, S., and Zhang, L. (2021). "Risk-Based Warning Decision Making of Cascade Breaching of the Tangjiashan Landslide Dam and Two Smaller Downstream Landslide Dams." *Frontiers in Earth Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.648919>
- [57] 小川芳也、頼良昌憲、澤井健二、足立考之、小笠原裕介、正岡聡 (2014) 氾濫解析とリンクした洪水時の避難判断支援情報の提供に関する研究, 自然災害科学, J. JSNDS, 33-1, 43-52. (Ogawa, Y., Sera, M., Sawai, K., Adachi, T., Ogasawara, Y., and Masaoka, S. (2014). "Study on the information for the evacuation from flood disaster linked with inundation analysis." *Bulletin of the Natural Disaster Science. J. JSNDS*, 33-1, 43-52.(in Japanese))
- [58] 中央氣象署地震測報中心, 地震資訊, <https://scweb.cwa.gov.tw/>。(Central Weather Administration Seismological Center, Earthquake information, <https://scweb.cwa.gov.tw/>)
- [59] 交通部中央氣象署, <https://www.cwa.gov.tw/V8/C/>。(Central Weather Administration, <https://www.cwa.gov.tw/V8/C/>)

- [60] 吳振佑、林家興、陳國威、陳振宇 (2019), 「2018 年北海道胆振東部地震引起的厚真町堰塞湖之形成與潰決潛勢分析」, 中華水土保持學報, 50(4), 154-165。 (Wu, C.Y., Lin, C.H., Chen, C.Y., and Chen, K.W. (2019). "The Formation and Dam Breach Analysis of Landslide Dam Lake in Atsuma Town in Japan." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 50(4), 154-165. (in Chinese))
- [61] 林家興、吳振佑、蔡元融、陳振宇 (2019), 「HEC-RAS 2D 於天然壩潰決模擬評估」, 中華防災學刊, 11(2), 137-150。 (Lin, C.H., Wu, C.Y., Tsai, Y.J., and Chen, C.Y. (2019). "Apply HEC-RAS 2D on Natural Dam Breach Assessment." *Journal of the Taiwan Disaster Prevention Society*, 11(2), 137-150. (in Chinese))
- [62] 林業及自然保育署 (2024), 「花蓮地震後木瓜溪上游新增堰塞湖 林保署花蓮分署成立應變機制」, 林業新聞, 發布日期: 2024/04/22, <https://www.forest.gov.tw/ForestNews/0073543>。 (Forestry and Nature Conservation Agency. (2024). "New Landslide-dammed Lake forms upstream of the Papaya River after Hualien Earthquake; Hualien Forestry Branch sets up emergency response." News, 20240422, <https://www.forest.gov.tw/ForestNews/0073543>)
- [63] 徐逸祥、朱子豪 (2013), 「光學式衛星影像雲層處理之研究」, 航測及遙測學刊, 17(2), 115-134。 (Shiu, Y.S., and Chu, T.H. (2013). "The Study on Cloud Processing in Optical Satellite Imagery." *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 17(2), 151-134. (in Chinese))
- [64] 郭玉樹、邱盛彥、陳昆廷、謝正倫 (2012), 「台灣地區地震及降雨引致崩塌形成堰塞湖之壩體形狀分析」, 中華防災學刊, 4(2), 143-152。 (Kuo, Y.S., Chiu, S.Y., Chen, K.T., and Shieh, C.L. (2012). "Geometry Parameters for Earthquake-induced and Rainfall-induced Landslide Dams in Taiwan." *Journal of the Taiwan Disaster Prevention Society*, 4(2), 143-152. (in Chinese)) <https://doi.org/10.30052/JTDPS.201208.0002>
- [65] 陳昆廷、臧運忠、郭玉樹、呂明鴻、謝正倫 (2010), 「莫拉克颱風引致堰塞湖之案例分析」, 中華防災學刊, 2(1), 43-50。 (Chen, K.T., Tsang, Y.C., Kuo, Y.S., Lu, M.H., and Shieh, C.L. (2010). "Case Analysis of Landslide Dam Formation by Typhoon Morakot." *Journal of the Taiwan Disaster Prevention Society*, 2(1), 43-50. (in Chinese)) <https://doi.org/10.30052/JTDPS.201002.0006>
- [66] 陳樹群、許中立 (2009), 「莫拉克颱風形成之堰塞湖及危險度評估」, 土工技術, 122, 79-86。 (Chen, S.C., and Hsu, C.L. (2009). "Landslide Dams Induced by Typhoon Morakot and Its Risk Assessment." *Sino-Geotechnics*, 122, 79-86. (in Chinese))
- [67] 農村水保署 (2023), 「112 年多元遙測影像整合建置與加值服務應用計畫」, 農村水保署成果報告。 (Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation. (2023). *2023 Integration and processing of multi-source remote sensing imagery and value-added service/application project*, Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation, MOA (in Chinese))
- [68] 農村水保署, BigGIS 平台-災害事件衛星影像判釋成果, <https://gis.ardswc.gov.tw/map/>。 (Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation, BigGIS-Satellite image Interpretation of the Disaster Event, <https://gis.ardswc.gov.tw/map/>)
- [69] 農村水保署 (2017), 「水土保持手冊」, 行政院農業部農村發展及水土保持署, 台灣。 (Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation, *Soil and water conservation handbook*, Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation, MOA (in Chinese))

2025 年 03 月 03 日 收稿

2025 年 06 月 03 日 修正

2025 年 08 月 22 日 接受