

## 應用二維水理模式於木瓜溪堰塞湖潰決評估

林駿恩<sup>1,\*</sup> 林恩如<sup>2</sup> 蔡元融<sup>3</sup> 林曉萱<sup>4</sup> 陳國威<sup>5</sup> 陳振宇<sup>6</sup> 陳俊廷<sup>7</sup>

<sup>1,\*</sup>農村發展與水土保持署減災監測組聘用研究員 (通訊作者e-mail: jasonsinline@gmail.com)

<sup>2</sup>農村發展與水土保持署減災監測組聘用副研究員

<sup>3</sup>國立成功大學防災研究中心創新育成組組長

<sup>4</sup>農村發展與水土保持署減災監測組副工程司

<sup>5</sup>農村發展與水土保持署減災監測組科長

<sup>6</sup>農村發展與水土保持署減災監測組組長

<sup>7</sup>財團法人農業科技研究院研究員

### 摘要

2024年4月3日遶近花蓮外海發生規模7.2強震，造成花東地區發生1,942處崩塌，其中林保署於4月22日發布木瓜溪上游因崩塌形成堰塞湖。在餘震頻繁影響下，無法進行現場調查，且氣象預報花東地區多雲有雨情況下，難以評估堰塞湖潰決影響範圍。本研究利用BigGIS輔助功能分析堰塞湖之蓄水範圍，透過水理模式進行潰決模擬，並於不同降雨情境下，評估堰塞湖潰決對下游沿線聚落之影響，可作為相關單位防災應變時之決策參據。

**關鍵字：**木瓜溪堰塞湖、HEC-RAS、潰決模擬

### 一、前言

堰塞湖形成主要受降雨及地震影響下，山區邊坡崩塌產生大量土體阻塞河道並形成堰塞湖 (Peng & Zhang, 2012; 陳昆廷, 2010; Costa & Schuster, 1987; Schuster & Costa, 1986)，再者，Costa and Schuster (1987) 研究指出，堰塞湖通於形成後約一天內即潰決約佔 27%，而存在時間約一星期約佔 40%、超過一年以上者約佔 15%左右。陳昆廷等人 (2010) 統計莫拉克期間所形成之堰塞湖，約九成於一星期內潰決。考量不同誘發因素，受地震誘發所形成之天然壩，其堰塞湖體積較降雨誘發形成之堰塞湖壩體體積大 (郭玉樹等, 2012)。再者，地震發生後崩塌土體運動較為活躍，以 921 集集大地震為例，主要是由於地震發生後崩塌及土石流發生之臨界降雨條件均大幅度下降 (Shieh et. al., 2009; Chen, 2011; Liu et. al., 2008)，震後之土石流發生臨界雨量甚至降為震前三分之一 (Lin et al., 2004; Yu et. al., 2014; Chen & Huang, 2021)，且隨著地震的地表加速度越大，除造成土石流活動週期增加外 (Yu et. al., 2014)，將使得恢復至地震之前臨界雨量約需十幾年以上時間 (Shieh et. al., 2009; Chen, 2011; Lin et. al., 2022)。再者，地震所引發之堰塞湖其天然壩體穩定性相較降雨誘發之堰塞湖穩定 (陳樹群、許中立, 2009)，且震後集水區土砂活動之降雨門檻下降，易引發後續土砂災害活動增

加 (Shieh et. al., 2009; Chen, 2011)，因此若於地震後遭遇降雨，將使得殘留於坡面或堆積於河道之不安定土砂料源對下游聚落造成嚴重威脅。不管是降雨或地震誘發之堰塞湖其存在時間不長，常於短時間內即產生潰決破壞，其中於地震誘發之堰塞湖若鄰近山區聚落處，後續潰決造成之危害將遠大於降雨誘發之堰塞湖。

在 4 月 3 日之地震規模為 7.2，並發生 2 起規模 6 以上餘震，而後於 4 月 23 日及 27 日共計發生 4 起規模 6 以上餘震。依據農村水保署衛星影像判釋新生崩塌資料，其崩塌數量 1,942 處，崩塌總面積 1,521.03 公頃。此外，林保署於 4 月 22 日發布，受地震影響導致木瓜溪上游邊坡崩塌並形成堰塞湖，蓄水面積約 43 萬立方公尺，其潰決恐對下游河道行水區內活動的人員有較直接影響。因此，於地震後如何判釋堰塞湖之幾何參數及快速評估堰塞湖潰決衝擊，將是防災單位第一線工作人員首重課題。

### 二、材料及方法

#### 2.1 花蓮地震事件

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 23 緯 23.77 度，東經 121.67 度)，地震深度 15.5 公里，最大震度為花蓮縣和平 (震度 6 強)。依據氣象署地震測報中心統計至 4 月底止，共觀測 1,400 次地震活動 (圖 1)，其崩塌或落石造成部

分連絡交通要道中斷。本次地震造成花蓮地區發生多處坡地崩塌，農村水保署由衛星影像判釋震後新生崩塌合計 1,942 處，崩塌總面積為 1521.03 公頃 (農村水保署，2024/6/4)。其中花蓮木瓜溪受地震影響於上游邊坡發生大規模崩塌，其土體阻塞河道並形成堰塞湖，蓄水面積 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 2)。

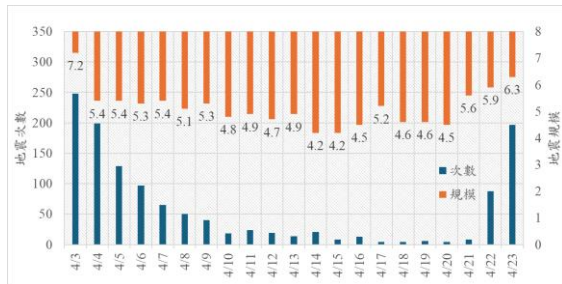


圖 1 花蓮地震次數與規模



圖 2 木瓜溪堰塞湖照片 (來源：林保署)

## 2.2 研究方法

在地震交通中斷且預報將發生大雨情況下，如何於防災應變期間快速評估堰塞湖潰決衝擊，對於主管機關進行防災與應變決策相當重要，本研究以二維數值模式，配合不同情境，評估震後堰塞湖潰決衝擊，以提供防災單位決策參據。因堰塞湖存在時間具高度不確定性，難以精確評估堰塞湖潰決時間點，其天然壩之土砂材料組成屬非均質性，故潰壞機制評估是非常複雜問題。因此，潰壩模擬之優劣取決於壩體幾何參數、蓄水體積、侵蝕系數 (Erosivity coefficient)、潰壞過程等參數及相關係數之設定 (Brunner, 2014; Singh and Scarlatos, 1988; Wahl, 2004)。

本研究採用美國陸軍工兵團水文工程中心所開發之河道水理分析系統 (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System, HEC-RAS)，模式提供一、二維水理模組，包含定量流

(Steady flow)、變量流 (Unsteady flow)、動床輸砂 (Sediment transport) 及水質模擬 (Water quality) 等模擬分析。控制方程式以維聖維南淺水波方程 (Saint Venant of the Shallow Water Equation) 說明，其連續及動量方程式如下：

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (1)$$

上式中，水位高為  $H = h + z$ ， $h$  為水深， $z$  為底床高程， $t$  為時間， $u$  及  $v$  分別為  $x$  及  $y$  方向之流速分量， $q$  為源項。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u = 0 \quad (3)$$

上式中， $g$  為重力加速度， $\nu_t$  為渦流黏滯係數， $c_f$  為底床摩擦係數， $f$  為科氏力參數。

HEC-RAS 已應用於都市洪水、河道分析、海嘯模擬及壩體潰壞等研究 (Brunner, 2014; Butt et al., 2013; Jung and Kim, 2017; Gibson et al., 2022; Marimin et al., 2018; Limbasiya and Jigneshkumar, 2022)，其模式可提供穩定且良好的模擬演算成果，並依據潰決洪峰、衝擊範圍、洪水波深度、流速等水理量評估分析，據以訂定適宜之緊急疏散及應變對策。

## 2.3 數值模式設定

本研究以政府資料開放平臺「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」之 20 米 DTM 資料為基礎，作為建置數值模式所需之地形檔案，其計算網格大小設定為 20m x 20m，計算網格共 553,770 個，模擬面積約 222.1 平方公里，模擬河道長度約 27,125 公里 (圖 3)。Wahl (2000) 統計 108 處壩體潰壞案例指出，潰壩延時介於 0.1 至 1 小時間，當潰壩延時越短，堰塞湖潰決所造成之衝擊影響越大，本研究以潰決延時 1 小時設定。在水文條件方面，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臺灣水文年報之木瓜溪下游仁壽橋 (H0190H01) 測站資料，其最大、最小與平均流量分別為 47.53、5.2、20.84 cms，本研究以平均流量 20 cms 作為基流量。洪峰流量則是利用氣象署預法超越機率 10% 之降雨資料配合 WFLOW 模式估算，其洪峰流量為 91.5 cms (圖 4)，下游邊界依據木瓜溪出口坡度，設定邊界條件為正常水深，下游河段之平均坡度約



1.02%。另外，針對模擬震後堰塞湖蓄滿後潰決情境，其堰塞湖依蓄水區水位-面積-體積關係曲線給定(圖 5)。在震後無法進行現調情況下，其曼寧 $n$ 值建議依模式預設值或參照 HEC-RAS 使用手冊，設定為 0.04 至 0.06 間。



圖 3 研究區域保全對象位置圖

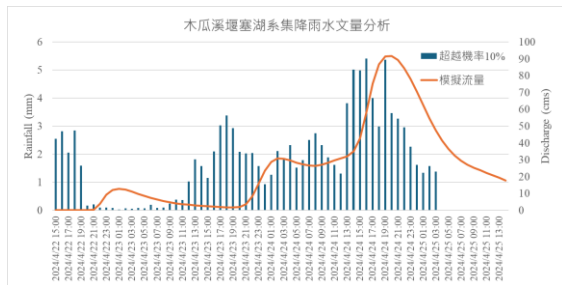


圖 4 堰塞湖水位-面積-體積關係曲線

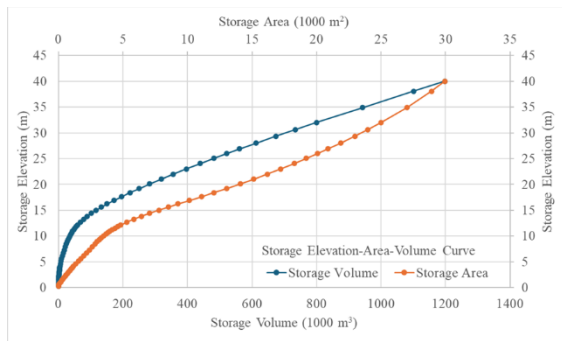


圖 5 堰塞湖水位-面積-體積關係曲線

### 三、成果討論

#### 3.1 不同潰決情境衝擊分析

在地震後形成堰塞湖，隨即遭遇降雨情境下，將使得堰塞湖潰決潛勢增加，可能威脅下游保全對象安危。本研究以二維水理模式演算堰塞湖蓄滿水體狀態下，其上游集水區有、無降雨匯流之潰決成果，如圖 6 至圖 8 所示。

於木瓜溪堰塞湖下游 5 公里之木瓜壩處，降雨情境潰決洪峰水深為 4.5 公尺、尖峰流量約 360 cms；距下游 15 公里處之銅門村落，降雨情境

潰決洪峰水深為 1.6 公尺、尖峰流量約 119 cms，其與聚落所在河岸高程差約 37 公尺，對於聚落不造成危害；距下游 21 公里處之台 9 線仁壽橋處，降雨情境潰決洪峰水深約 1.0 公尺、尖峰流量約 65 cms，其潰決洪峰與兩岸之高程差約 10 公尺，對於兩岸不造成影響。比對堰塞湖於蓄滿水體狀態下，疊加上游降雨逕流所匯集洪峰影響，其潰決洪峰之水量均大於無降雨情境。

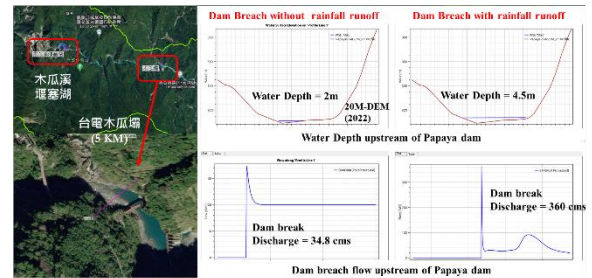


圖 6 木瓜壩處潰決水位與流量

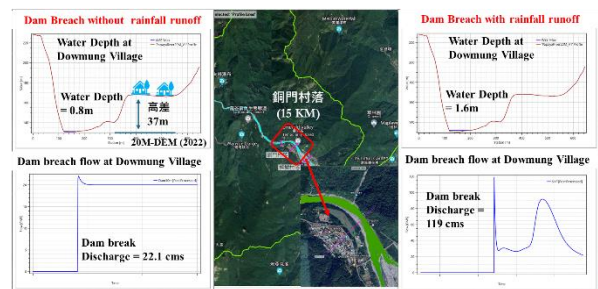


圖 7 銅門村處潰決水位與流量

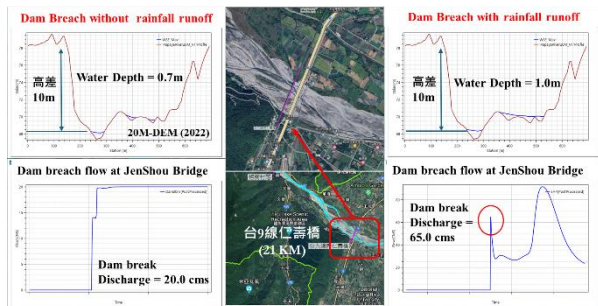


圖 8 仁壽橋處潰決水位與流量

### 四、結論與建議

本文以 0403 花蓮地震之木瓜溪堰塞湖潰決評估為例，藉由預報降雨進行降雨逕流估算、潰壩模擬配合有無降雨情境下，綜合評估堰塞湖潰決衝擊，相關結論如下。

1. 由氣象署之預報降雨資料，配合降雨逕流演算，可評估堰塞湖上游洪峰歷線。
2. 地震後堰塞湖潰決模擬成果顯示，堰塞湖於蓄滿狀態疊加上游集水區匯流影響下，

其潰決洪峰遠大於無降雨潰決洪峰。

3. 堰塞湖受上游集水面積及降雨量體影響，當降雨量越大，將使堰塞湖水位迅速上升，增加潰決風險。
4. 三處保全對象所在位置之河寬與河岸落差較大，在設定潰決情境下，下游保全對象皆無遭受潰決洪水波衝擊及溢淹影響。

本次潰決模擬採用溢流破壞型態，配合潰決延時為 1 小時進行演算，前人研究指出當潰決延時越小，潰決洪水波衝擊越大。此外，本文設定於防災應變開設情況下，為快速得到潰決衝擊影響，因此未討論不同潰決延時、破壞型態、網格解析度、上游暴雨情境等條件，建議後續可針對不同情境條件加以研究。

## 參考文獻

1. Butt, M. J., Umar, M., & Qamar, R. (2013). "Landslide dam and subsequent dam-break flood estimation using HEC-RAS model in Northern Pakistan." *Natural Hazards*, 65(1), 241–254.
2. 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.
3. Chen, J.-C., & Huang, W.-S. (2021). "Evaluation of Rainfall-Triggered Debris Flows under the Impact of Extreme Events: A Chenyulan Watershed Case Study, Taiwan." *Water*, 13(16), Article 16.
4. Costa, J. E., & Schuster, R. L. (1987). "The formation and failure of natural dams." *Open-File Report*, U.S. Geological Survey, 87–392.
5. Gibson, S., Moura, L. Z., Ackerman, C., Ortman, N., Amorim, R., Floyd, I., Eom, M., Creech, C., & 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), Article 3.
6. Jung, C.-G., & 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), Article 10.
7. Lin, C.-W., Shieh, C.-L., Yuan, B.-D., Shieh, Y.-C., Liu, S.-H., & 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.
8. Lin, C.-Y., Chen, Y.-C., Lin, J.-Y., Mao, Y.-S., & 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.
9. Liu, C.-N., Huang, H.-F., & 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.
10. Marimin, N., Razi, M., A. A., M., Adnan, M. S., & Rahmat, S. N. (2018). "HEC-RAS hydraulic model for floodplain area in Sembrong River." *International Journal of Integrated Engineering*, 10, 151–157.
11. Peng, M., & Zhang, L. M. (2012). "Breaching parameters of landslide dams." *Landslides*, 9(1), 13–31.
12. Schuster, R. L., & Costa, J. E. (1986). "A Perspective on Landslide Dams."
13. Shieh, C. L., Chen, Y. S., Tsai, Y. J., & 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.
14. Singh, V. P., & Scarlatos, P. D. (1988). "Analysis of Gradual Earth-Dam Failure." *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(1), 21–42.
15. Wahl, T. L. (2004). "Uncertainty of Predictions of Embankment Dam Breach Parameters." *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(5), 389–397.
16. Wahl, T., Farrar, J., Melena, J., Mares, D., & Mefford, B. (2000). "Prediction of Embankment Dam Breach Parameters A Literature Review and Needs Assessment DSO-98-004 Dam Safety."
17. Yu, B., Wu, Y., & Chu, S. (2014). "Preliminary study of the effect of earthquakes on the rainfall threshold of debris flows." *Engineering Geology*, 182, 130–135.
18. 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.
19. 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.