

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

吳振佑^{[1]*} 林家興^{[1][2]} 陳國威^[1] 陳振宇^[1]

摘要 地震或降雨引致崩場所形成的堰塞湖，有可能導致嚴重的二次災害，故如何快速評估堰塞湖潰決後的衝擊與影響，係防災工作上的重要課題。本研究嘗試使用免費的 HEC-RAS 水理模式的二維洪水演算模組，建立一套快速評估堰塞湖潰決後對下游之衝擊與影響的標準作業程序，並以 2018 年 9 月 6 日日本北海道地震導致之厚真町堰塞湖為案例，藉由水理數值模式，分析堰塞湖潰決之洪峰水流運動特性，包括潰決時所產生之潰決尖峰流量、洪水到達時間、河道溢淹情況等。透過不同壩高與潰壩延時之潰壞參數變動情境模擬成果，可協助防災單位掌握相關風險，並據以劃定影響範圍及保全對象、研擬緊急避難計畫，以及設定警戒發布時機等相關防災措施。

關鍵詞：堰塞湖潰壩、洪水演算、影響範圍、北海道胆振東部地震。

Formation and Dam Breach Analysis of the 2018 Hokkaido Iburi-Tobu Earthquake-Induced Landslide Dam in Atsuma Town, Japan

Chen-Yu Wu^{[1]*} Chia-Hsing Lin^{[1][2]} Chen-Yu Chen^[1] Kuo-Wei Chen^[1]

ABSTRACT Landslide dams, whether induced by earthquake or rainfall, may cause serious secondary disasters. Therefore, assessing the disaster impact after a landslide dam breach is crucial for disaster response work. This study used a free two-dimensional flood-routing model on HEC-RAS to establish a standard operating procedure for rapidly assessing the impact of such a breach to protect downstream targets. The landslide dam caused by the Hokkaido earthquake in Atsuma Town, Japan on September 6, 2018 was studied in this research. A numerical model was selected to simulate the dam breach and analyze flood wave characteristics, including peak discharge, flooding arrival time, and the inundation area. Landslide dam heights and breach durations were simulated to uncover disaster risks. From these results, the emergency operation center can delimit the inundated area, protect targets, create emergency evacuation plans, and set early-warning criteria.

Key Words: landslide dam breach, flood routing, impact area, Hokkaido Iburi-Tobu earthquake

一、前言

近年來極端降雨事件頻傳，導致大規模崩塌與複合型災害發生頻率增加 (Shieh et al., 2009; Shieh et al., 2010)，其中部份大規模崩塌阻塞河道成為天然壩，並進一步形成堰塞湖，若發生堰塞湖潰壩將會導致嚴重的二次災害。2018 年中國四川金沙江上游發生 2 次大規模崩塌並形成堰塞湖，之後壩體潰決所形成的洪水沖毀許多橋梁與村落，疏散約 2 萬人 (許強等, 2018)；2004 年日本年新潟縣中越地震與 2008 年日本岩手宮城內陸地震，多處崩塌形成堰塞湖且第一時間因天候不佳未能即時察覺，潰決後衍生許多重大災情，日本政府從這些災害處理經驗中認知到堰塞湖災害的危險性與急迫性，並著手建立相關監視標準作業流程 (Standard

Operating Procedures, SOP) (田村圭司等, 2008)。台灣因地理條件特殊經常發生地震及颱風事件，時有大規模崩塌形成堰塞湖，如 1999 年集集大地震時形成之草嶺與九份二山堰塞湖；2009 年莫拉克颱風，造成全台形成了十多處堰塞湖 (陳昆廷, 2010；陳樹群與許中立, 2009)。

根據 Schuster & Costa (1986) 的統計，不論是地震或降雨崩塌引致的堰塞湖，約有 50 % 於形成後 10 日內潰決，約有 80 % 堰塞湖其形成時間約在半年內潰決，大約 85 % 於一年內潰決，僅 15 % 案例其存在時間超過一年。Costa and Schuster (1988) 則以地形學之分類將堰塞湖分為六個類型，第 I 型為崩塌阻塞河道，但未到達對岸；第 II 型為崩塌阻塞河道並到達對岸；第 III 型為崩塌阻塞河道並往上下游堆積；

[1] 行政院農業委員會水土保持局技術研究發展小組

Research and Technology Development Team, Soil & Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, Nantou 540, Taiwan, R.O.C.

[2] 財團法人農業科技研究院農業政策研究中心

Agricultural Policy Research Center Research Assistant, Agricultural Technology Research Institute, Hsinchu 300, Taiwan, R.O.C.

* Corresponding Author. E-mail: owen951753@mail.swcb.gov.tw

第 IV 型為兩側邊坡發生崩塌並阻塞河道；第 V 型為崩塌分成兩股進入河道；第 VI 型為天然壩係由河底之破壞面升起，

如下圖 1 所示。

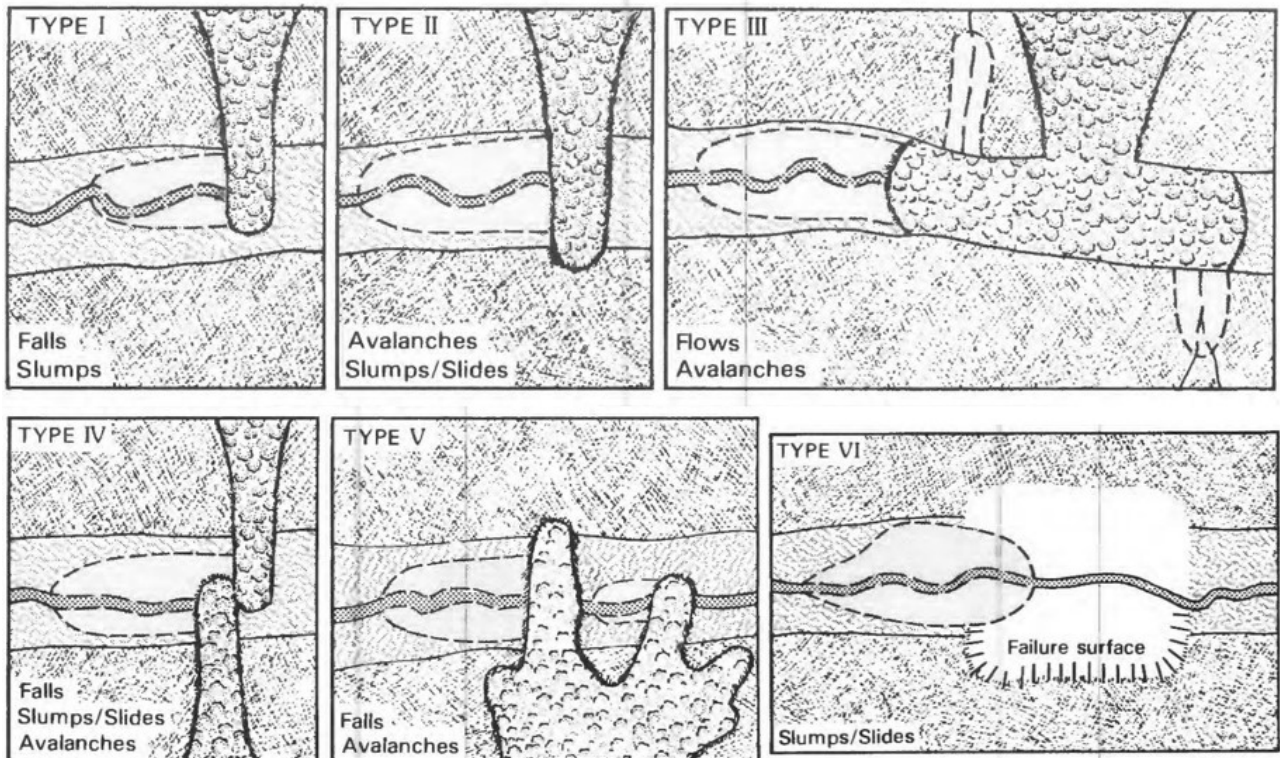


圖 1 天然壩類型 (Costa and Schuster, 1988)

Fig.1 Types of landslide dam (Costa and Schuster, 1988)

一般而言，發現堰塞湖形成後，首要須先判定其穩定性，目前國內外針對堰塞湖穩定性緊急評估最常使用的方法為無因次阻塞指標 (Dimensionless Blockage Index, DBI)。此法係由 Ermini and Casagli (2003) 所提出之經驗式，其統計天然壩壩高、天然壩體積與堰塞湖集水面積並推演出其與壩體穩定性之關係，使用上非常簡便：當 $DBI < 2.75$ 時壩體為穩定，當 $DBI > 3.08$ 時則壩體為不穩定，當 DBI 介於 2.75 至 3.08 之間，則屬於兩者之間的過渡範圍。

由於堰塞湖從形成到潰決期間，常受到諸多條件限制未必能於第一時間發現，且存在時間長短不確定，亦不易取得崩塌後壩體材料與幾何資料；甚至在颱風豪雨事件中形成之堰塞湖，經常伴隨著大雨直接發生潰決，導致大量土砂伴隨洪水沖至下游，形成河岸侵蝕、洪水溢淹、維生管道、設施損毀等情形，嚴重威脅下游聚落居民生命財產之安全。因此，如何在短時間內快速評估天然壩壩體是否穩定、堰塞湖對上下游保全對象的影響，甚至發生潰決事件後對下游保全對象的衝擊，以擬定緊急疏散及避難對策等是非常重要的課題。日本在 2004 年新潟中越地震時，成功處理崩塌所形成的堰塞湖避免二次災害的發生，並開始針對堰塞湖災害進行相關緊急應變策略之擬訂，於 2011 年修訂土砂災害防止法，規定堰塞湖災害緊急調查條件與初步影響範圍分析方法 (水野秀明等, 2011)，隔年紀伊半島豪雨透過 QUAD-L 模式之模擬成果，發布堰塞湖災害可能影響範圍資訊，提供縣市政

府初步需要疏散避難之區域 (清水武志等, 2012)。

由於天然壩之形成及其衍生之二次災害難以事前預測，故一旦發現後，其緊急應變計畫之研擬通常十分急迫。因此，如何以短時間內調查所得資料，並在最快速的時間內評估、判斷災害潛勢並發布防災避難決策，值得不斷探討與精進改善。對此，本研究期在建立一套災後可快速評估及預測堰塞湖潰決後各種可能情境之標準作業程序，以及上游迴水區與下游潰決後之淹沒區之影響範圍與衝擊程度，其研究流程如圖 2 所示，並以 2018 年北海道胆振東部地震 (Hokkaido Iburi-Tobu earthquake) 所造成之厚真町堰塞湖為研究案例並進行潰決模擬分析。

二、材料及方法

1. 北海道胆振東部地震及厚真町堰塞湖事件說明

2018 年 9 月 6 日凌晨 3 時 7 分北海道發生芮氏規模 6.7 地震，震央位於北緯 42.72 度，東經 142.0 度，震源深度約 37 km，屬西北-東南向之逆向斷層。依據日本氣象廳資料圖 3 顯示，最大震度發生在厚真町地區達 7 級，其他城市如札幌、千歲、夕張、函館等分別為 5 至 6 級 (Yamagishi and Yamazaki, 2018；中央災害防救會報, 2018)，地震導致北海道地區多處發生崩塌，崩塌面積估計約為 13.4 km²，創下從 1891 年紀錄以來日本崩塌面積最大的一次地震。本次地震

造成 42 人死亡、762 人受傷，日本緊急災害對策派遣隊 (TEC-FORCE) 成員出動 3,064 人次協助本次災害的調查與各項技術支援，根據調查結果顯示，土砂災害統計為 227 件，其中厚真町地區佔了 201 件，住宅損壞統計全倒 462 棟、半

倒超過 1500 棟，多處道路因地震而產生裂縫及高低落差，部分住宅區也發生土壤液化之情形（國土交通省北海道開發局，2019）。

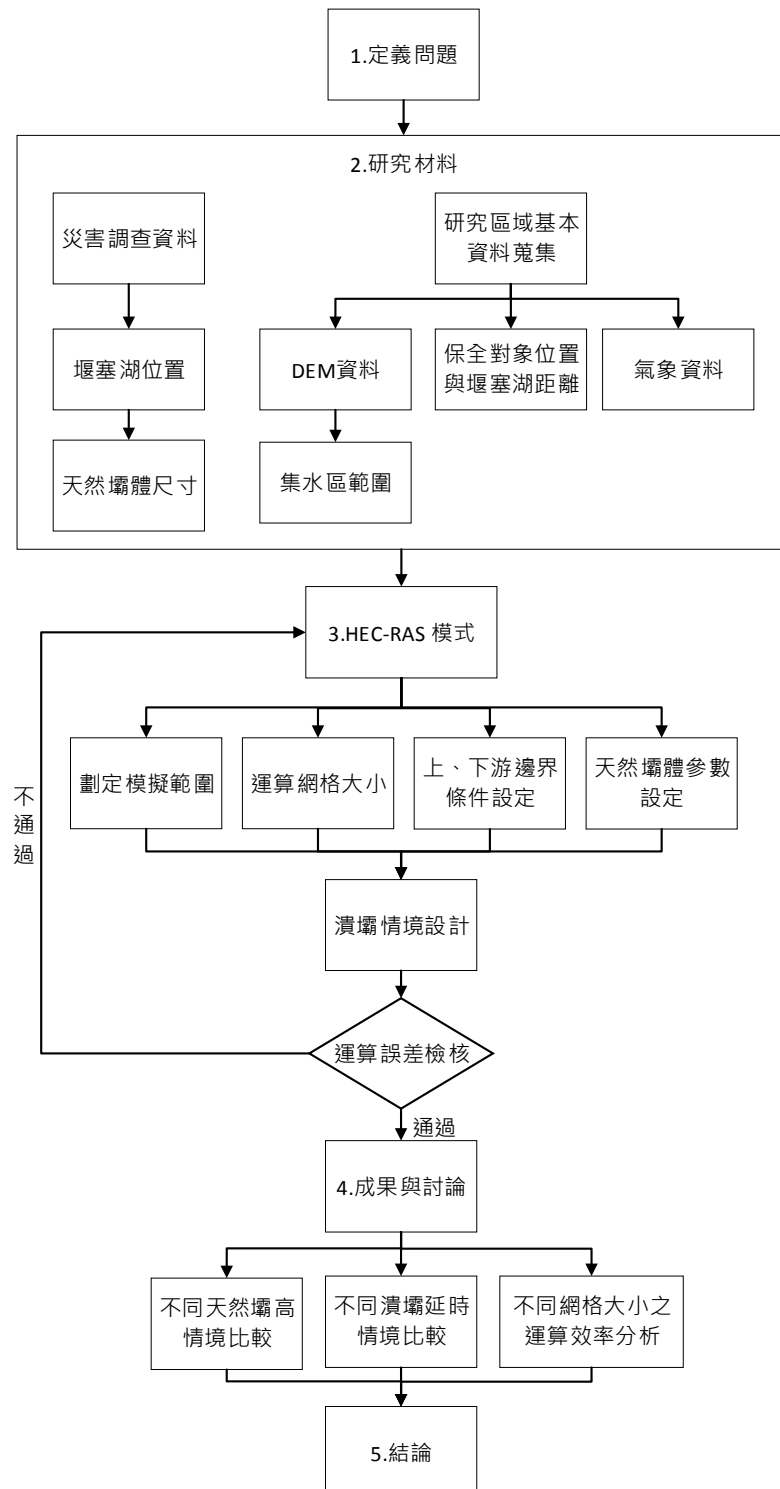


圖 2 研究流程圖

Fig.2 Flow chart of the study process

北海道胆振東部地震造成多處坡地崩塌，許多崩塌土砂堆積於河道與排水路上，導致河道阻塞形成天然壩，其中一處大規模崩塌位於厚真町厚真川上游的日高幌內川（如圖

4(a)：崩塌長度約 1 km，崩塌面積約 50 ha，崩塌土體阻塞河道長約 850 m，並形成高約 50 m、最大寬度約 230 m 之天然壩體，估計最大上游迴水長度可達約 2 km。由於該崩塌量

體較大，無法在短時間內透過工程手段移除土體，第一時間防災人員先進行堰塞湖基礎資料調查與緊急監視設備設置，日本國土交通省派遣之 TEC-FORCE 成員分別在天然壩上、下游設置水位監測設備，當天然壩體上游蓄水高度上升時，或天然壩體下游滲水量增加時，能夠提早提供下游保全對象疏散避難相關資訊。堰塞湖水位資料每日上網發布，提供民眾及相關防災人員目前水位高度，也透過 UAV 無人飛行載具空拍現場狀況，並進行地質鑽探了解該崩塌區域地質型態，

以利進行後續的挖降工程規劃。經由當地設置的災害復舊事業所持續監控與工程施作，於 2018 年 11 月開始進行崩塌所形成的天然壩體挖降工程，24 小時不間斷施工將天然壩體高度降低 25 m，並在 2019 年 3 月時完成了天然壩下游排水工程，持續穩定地將堰塞湖水排除來降低水位，解除了下游發生二次災害的危機（北海道開發局復興・強韌化推進本部，2019）。

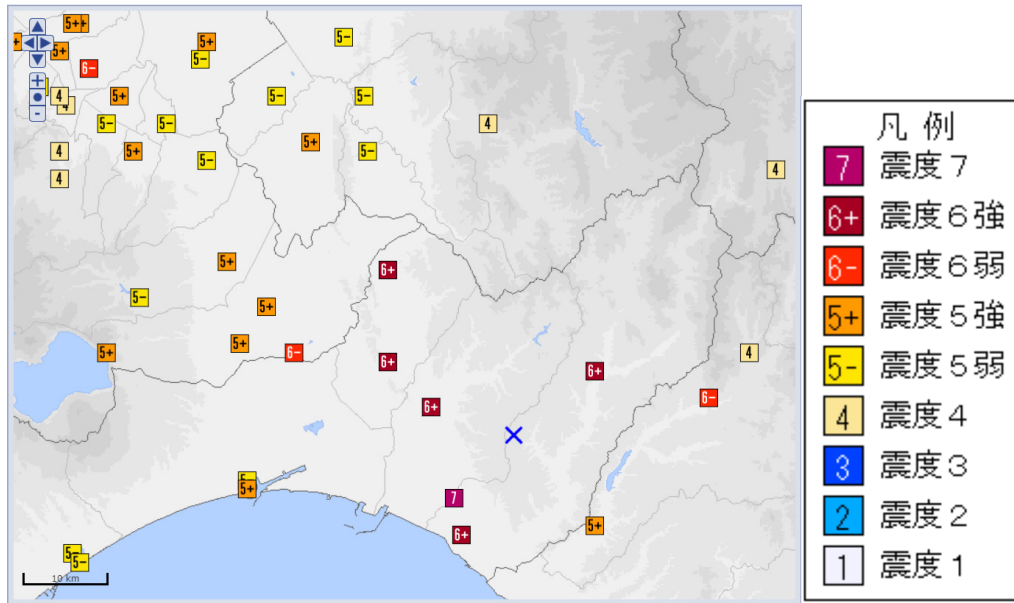


圖 3 北海道胆振東部地震震度分布圖（日本氣象廳）

Fig.3 Distribution of seismic intensity of the Hokkaido Eastern Iburi earthquake (Japan Meteorological Agency)

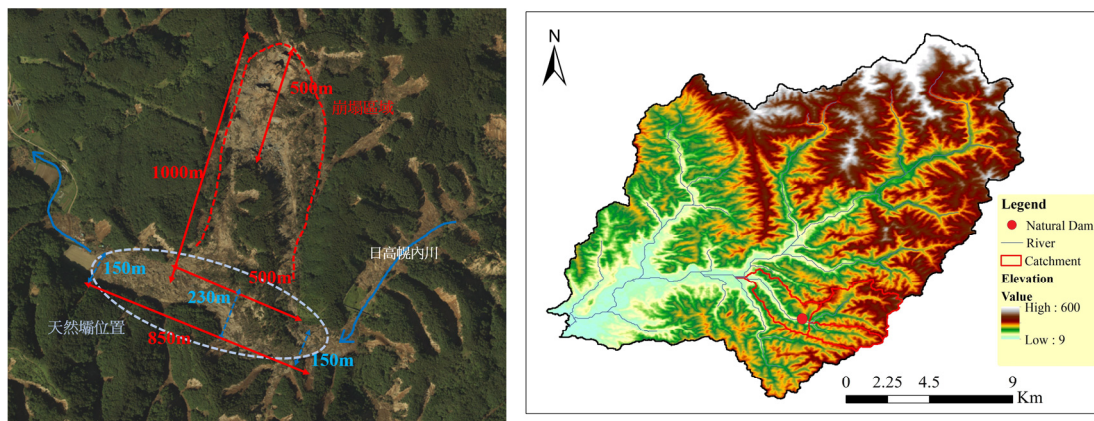


圖 4 (a) 崩塌調查資料示意圖（日本國土地理院）(b) 研究區域之集水區範圍

Fig.4 (a) A schematic diagram of Landslide size (Geospatial Information Authority of Japan) (b) The catchment area in this study

2. 研究區域基本資料

為了推估堰塞湖災害之可能災害潛勢範圍，本研究擬透過模式模擬天然壩體若發生潰決後對下游保全對象之影響。首先需透過基礎資料蒐集及現場相關調查資料，提供模擬環境參數設定及模擬情境設計，其模擬所需基礎資料包括數值

高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、當地氣象資料、上游與下游保全對象基本資料、天然壩體位置及其形狀相關資料。

本研究使用的 DEM 資料為美國太空總署 (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, ASTER) (Global Digital Elevation Model, GDEM) Version 2

的免費公開資源，該 DEM 為 2011 年產製的 30 m 解析度數值高程模型，分析研究區域之集水區資料如圖 4(b) 所示，日高幌內川集水區總面積為 13.59 km²，而天然壩上游集水區面積為 8.29 km²，平均坡度為 2.42 %，天然壩下游至厚真川匯流處平均坡度為 0.62 %，而厚真川模擬區域之河道平均坡度約為 0.19 %，相較於台灣的河川，該區域的河道坡度相對平緩，若發生潰壩導致之洪水將無法短時間內順利排除。本研究蒐集厚真氣象站紀錄自 1976 年至 2017 年的雨量資料，該氣象站距離天然壩約 9.5 km，平均年降雨量為 997mm，每年最大一小時降雨強度如圖 5 所示最大為 46 mm/hr，最小為 9 mm/hr，其平均為 22.85 mm/hr，日平均溫度約為 8 度，冬天氣溫會低於 0 度，導致降雪及蓄水區域結冰之情形，而到春天融雪時可能有大量水體補充至蓄水範圍內，或是透過地下水至天然壩體下游滲出，可能會造成天然壩體滲流破壞。

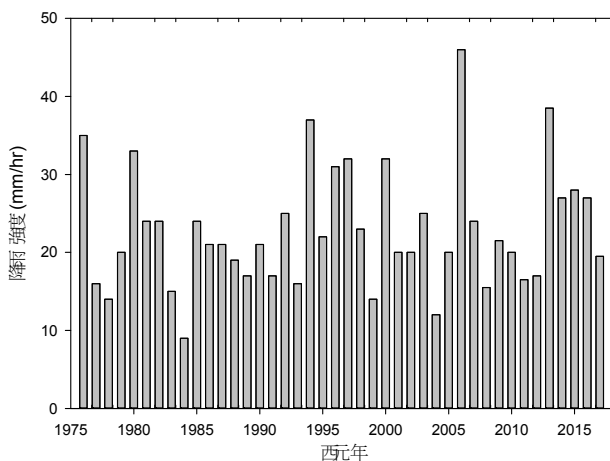


圖 5 厚真町地區歷年最大一小時降雨強度（測站名稱：厚真氣象站、測站編號：21111）

Fig.5 Maximum record of one-hour rainfall intensity every year in Atsuma Town (Station: Atsuma weather station. Station No: 21111)

為了降低堰塞湖災害對於保全對象的影響，在確認堰塞湖位置後立即調查天然壩上游迴水範圍內及下游行水區周邊保全對象之資料，本研究透過衛星影像初步確認該區域之建築物分布情形如圖 6，由於天然壩上游區域並無發現相關建築物，所以假設無保全對象位於此區，而天然壩下游依照建築物分布及潰壩可能影響的範圍，選定三處聚落作為災害可能影響之重點區域，並透過分析結果判斷影響範圍及其流速與水深。其中聚落 1 距離堰塞湖約為 0.5 km 約有 3 戶保全對象位於此處，聚落 2 距離堰塞湖約為 3.5 km 且有逾 20 戶住宅於此，若堰塞湖潰壩洪水衝擊此區域，恐將會造成嚴重的災害；而聚落 3 約有 8 戶保全對象，距離堰塞湖約為 5.5 km。三個聚落離河道都不到 50 m，且河道斷面深度約 3 m 至 5 m，洪水來臨時容易溢淹至兩岸，對於兩岸保全對象將有致災的風險。

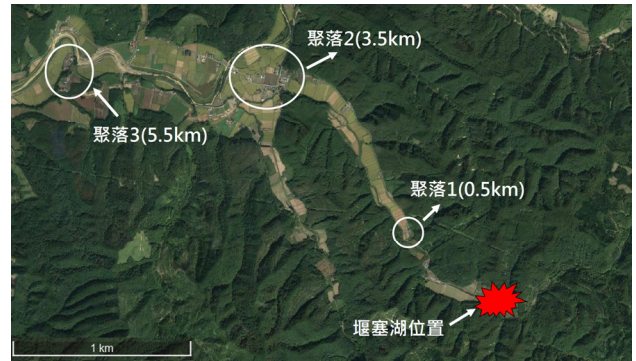


圖 6 研究區域之保全對象位置，括號為與堰塞湖之距離 (Google Map)

Fig.6 Position of protected targets and the distance from the landslide dam in parentheses (Google Map)

3. 模式介紹及情境設計

本研究採用美國陸軍工兵團水文工程中心所開發之 (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System, HEC-RAS) 模式河川分析系統，其提供一及二維河道水理演算模式，包含定量流 (steady flow water surface profiles) 計算、變量流 (unsteady flow water surface profiles) 計算及動床輸砂 (mobile bed sediment transport) 計算等三大項計算功能。

在定量流模組下，水理模式可分析模擬河川系統為單一河段或是網狀河川；另外，對於亞臨界及超臨界流況或是兩者混合之流況均可模擬進行水理計算。在變量流模組下，水理模式則是可進行超臨界、亞臨界或是混合流況之水理計算。輸砂/動床單元係用以模擬在中、長期內（一般為數年，單場洪水事件亦適用）河道沖淤變化所造成之輸砂/動床演算。輸砂潛能係依照粒徑分配計算，因此可模擬水力篩選 (Hydraulic Sorting) 及護甲作用 (Armoring)。

HEC-RAS 5.0 以上的版本提供二維水理分析模組，並透過 Mapper 圖台功能，簡化基礎資料輸入步驟。其二維運算模式可採用擴散波方程式 (Diffusion wave equation) 或是淺水波方程式 (Shallow water equation)，並可以依照模擬精度需求調整運算方法，再以二維水理演算透過有限體積法 (Finite Volume Method, FVM) 來解算結構及非結構化網格。此外，二維的分析方法較適用於寬廣的洪水平原模擬、潰堤後的下流流況、複雜流況等情境，亦較能處理匯流口水流交會、轉移之情形，但模型的整體大小與網格大小將會影響運算時間。HEC-RAS 二維水理分析模組經常被使用來計算暴雨事件下洪水對於都市、村莊的災害風險，搭配不同的解析度的 DEM 模擬不同降雨重現期之洪水災害風險評估 (Muhammad, 2019; Alivio, 2019)，Bagus et al. (2019) 透過 HEC-RAS 模擬在印尼 Negeri Lima 村莊上游曾經發生過大規模崩塌所形成天然壩，進一步改建為水庫的潰壩風險分析，以 overtopping 與 piping 兩種潰壩形式模擬最大可能降雨情境下，潰壩所造成的洪峰流量、影響範圍、洪水水深及抵達時間，來擬訂相關調適策略。

(1) 控制方程式

HEC-RAS 2D 變量流水利 (unsteady flow hydraulic) 控制方程式是藉由簡化納維-斯托克斯方程式 (Navier - Stokes equations) 而來, 並假設流體為不可壓縮 (incompressible flow)、靜水壓力 (hydrostatic pressure) 及均勻密度 (uniform density) (Brunner and CEIWR-HEC, 2016a, 2016b)。

本節 HEC-RAS 2D 之控制方程式以淺水波方程式進行說明, 其連續及動量方程式如下:

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

其中 $H=h+z$ 為水位高, 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 (source / sink flux term)。

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

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

其中 g 為重力加速度, ν_t 為渦流黏滯係數, c_f 為底床摩擦係數, f 為科氏力參數。在動量方程式等號左邊為對流加速度及局部加速度項, 而在方程式等號右邊為水壓力項、渦流擴散項 (eddy diffusion)、底床摩擦項及科氏力項 (Brunner and CEIWR-HEC, 2016b)。

為了離散化 (discretize) 連續及動量方程式, 藉由有限差分進行時間項離散化, 另外對空間項則是使用有限差分及有限體積的複合方式 (hybrid approximation) 進行離散化。

(2) 天然壩潰壩情境設置

本研究採用全區域透過二維水利網格建置模擬範圍如圖 7, 以 ASTER DEM 為底圖, 模擬總面積約為 25 km², 設定模擬網格大小為 50 m × 50 m 進行自動化計算平均分布, 考量地形關係及模擬範圍邊界, 統計使用的網格數為約為 28,775 個。在天然壩上游邊界, 設置為 3 處入流起點, 其入流量透過合理化公式計算, 其洪峰流量約為 40 cms, 出流終點處則為此天然壩集水區出口, 設定其邊界條件為正常水深, 且該區域平均坡度 0.19%。由於無法快速取得該地區土地利用分區圖層, 為加快模式計算速度及縮短成果取的時間, 本研究依手冊建議值, 曼寧 n 值採用 0.04, 作為洪水氾濫之行水區參考依據, 天然壩體距離匯流進主流厚真川約 3.5 km, 模擬河道總長度自天然壩下游處起算至下游邊界條件約為 12 km。

以 HEC-RAS 2D 執行潰壩模擬時, 需設定天然壩體位置形狀及潰壩時潰口等相關參數 (如圖 8); 其中在潰壩設定介面中有幾項重要的參數, 目前潰壩模式

能提供 2 種潰壩模式 (Failure mode) 為溢頂破壞和管湧破壞, 本研究採用最多歷史案例的溢頂破壞作為潰壩模式, 而在天然壩形狀及潰口參數方面, 除了現場調查壩體高度外, 另包含潰口堰流係數 (Breach Weir Coefficient)、潰壩延時 (Breach Formation Time)、啟動水位 (Starting WS)、最終壩體底部高程 (Final Bottom Elevation) 及潰口變化速率 (Breach Progression) 等相關設定。其中潰口變化速率可以依據實際潰壩的狀況設定, 也能夠過兩種預設參數假設, 分別是線性以及正弦波 (sine wave), 本研究因無現地天然壩體材料組成資訊, 又無法快速取得內部構造穩定分析, 採用手冊建議較為接近實際發生狀況之正弦波作為潰壩過程變化的參考速率, 在潰壩啟動時速率較慢, 隨著時間潰口冲刷的速率會持續變快, 而在潰壩結束前速率又會趨緩。考量現場狀況之不確定性及防災評估需求, 本研究將透過影響潰壩結果最大的參數, 壩體高度及潰壩延時組合進行不同情境之設計, 並假設當堰塞湖水體溢流過天然壩之後開始發生潰壩, 潰壩最終將會刷深至原地表高程值。

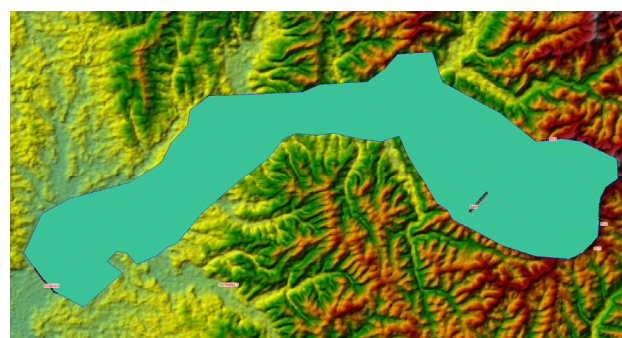


圖 7 研究區域之模式模擬範圍示意圖

Fig.7 Schematic diagram of model simulation area

為了能夠快速評估堰塞湖潰壩對下游保全對象的影響, 以及考量到對於天然壩體組成材料的不確定性, 本研究將透過不同天然壩壩高情境及潰壩延時, 探討堰塞湖上游迴水範圍以及潰壩後下游影響範圍, 再比較不同網格大小運算所需要的時間, 並分析其水深、流速及洪水抵達時間等結果, 模擬成果將能提供防災應變之參考依據, 表 1 整理本研究 10 種不同潰壩情境之參數設定。

表 1 潰壩情境參數整理

Table 1 Parameters of the landslide dam scenarios

NO.	壩高 (m)	潰壩延時 (hr)	網格大小	曼寧n值	上游入流量 (cms)
Case1	10	1	50 m × 50 m	0.04	40
Case2	20	1	50 m × 50 m	0.04	40
Case3	30	1	50 m × 50 m	0.04	40
Case4	40	1	50 m × 50 m	0.04	40
Case5	50	1	50 m × 50 m	0.04	40
Case6	50	0.5	50 m × 50 m	0.04	40
Case7	50	3	50 m × 50 m	0.04	40
Case8	50	6	50 m × 50 m	0.04	40
Case9	50	1	25 m × 25 m	0.04	40
Case10	50	1	100 m × 100 m	0.04	40

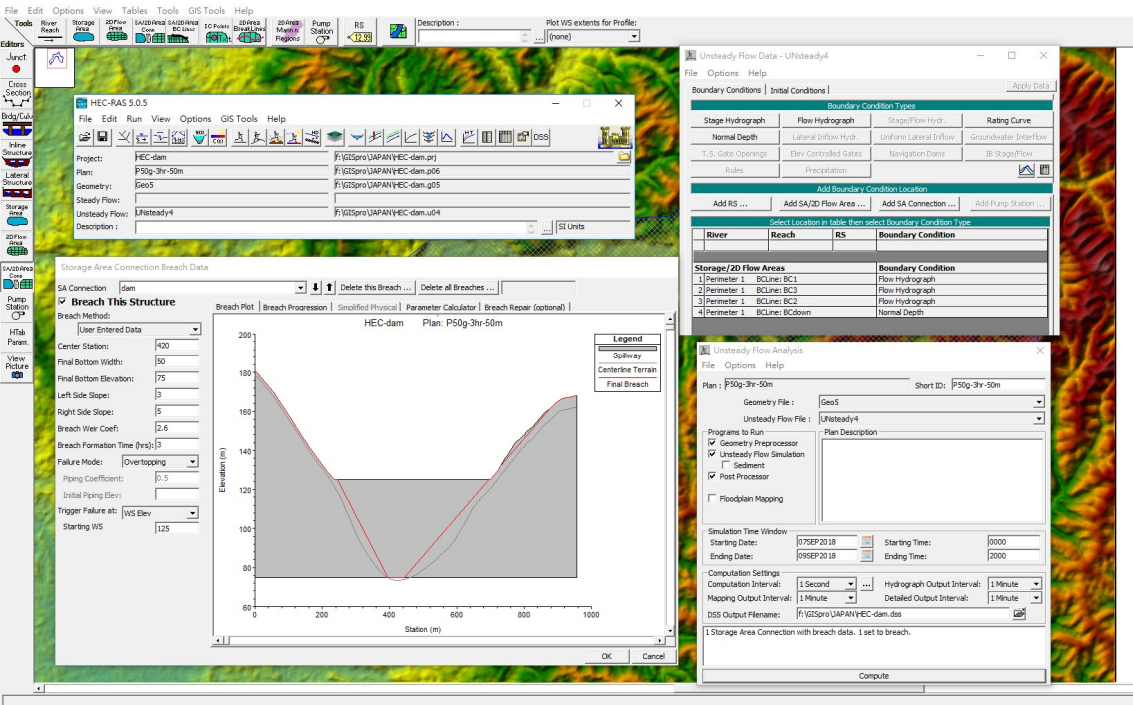


圖 8 HEC-RAS 模式 2D 潰壩參數設定介面

Fig.8 The input interface of landslide dam breaking conditions for the HEC-RAS 2D model

三、成果與討論

1. 不同壩高情境之災害潛勢分析

由於災害第一時間天然壩組成材料未必可得知，且壩體強度難以推估，無法在短時間內推理預測其潰壩形式及潰壩速率，故藉由不同壩體高度之設置，進行各種情境之潰決模擬分析，可以得知不同壩體高度所造成之上游迴水長度、蓄水面積、蓄水體積和對下游區域影響範圍，如表 2 所示。當壩體高度為 10 m 時，其所造成之蓄水體積約為 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，迴水長度約為 230 m，迴水面積約為 $60 \times 10^3 \text{ m}^2$ ，潰壩影響範圍約為下游 0.5 km，亦即包含聚落 1；壩體高度為 20 m 時，蓄水體積約為 $97 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，迴水長度約為 840 m，迴水面積約為 $125 \times 10^3 \text{ m}^2$ ，潰壩影響範圍落在聚落 1 與聚落 2 之間，洪水影響距離約為 2.2 km；壩體高度為 30 m 時，蓄水體積約為 $313 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，迴水長度約為 1 km，迴水面積約為 $320 \times 10^3 \text{ m}^2$ ，潰壩影響範圍擴大至聚落 2，潰壩影響距離較大幅升高至 4.2 km；壩體高度為 40 m 時，蓄水體積約為 $734 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，迴水長度約為 1.5 km，迴水面積約為 $495 \times 10^3 \text{ m}^2$ ，潰壩影響範圍擴大至聚落 3，潰壩影響距為 4.7 km；壩

表 2 不同壩高情境下之災害潛勢分析

Table 2 The results of scenarios with different landslide dam heights

No.	壩高 (m)	潰壩延時 (hr)	潰壩影響距離 (km)	洪水抵達保全 對象聚落	蓄水量 (10^4 m^3)	上游迴水面積 (10^3 m^2)	上游迴水長度 (m)
Case1	10	1	0.5	聚落1	20	60	230
Case2	20	1	2.2	聚落1	97	125	840
Cass3	30	1	4.2	聚落2	313	320	1,300
Case4	40	1	4.7	聚落2	734	495	1,500
Case5	50	1	5.5	聚落3	1,271	608	1,540

體高度為 50 m 時，蓄水體積約為 $1,271 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，迴水長度約為 1.54 km，迴水面積約為 $608 \times 10^3 \text{ m}^2$ ，潰壩影響範圍完全淹沒聚落 3，潰壩影響距為 5.5 km。

為了確定在不同天然壩體高度情境下對於保全對象的影響，針對模擬分析結果之洪水到達時間及各聚落淹水最大深度與最快流速如表 3 所示，在天然壩體高度為 50 m 之情境中，洪水在潰壩 20 分鐘後抵達聚落 1 並造成近四層樓高的洪水與 11.9 m/s 之流速，根據水土保持技術規範之混凝土最大容許流速為 6 m/s 而鋼筋混凝土則是 12 m/s，洪水將有可能對聚落 1 造成嚴重的破壞；而在潰壩發生後 31 分鐘抵達聚落 2，可能發生兩層樓高之洪水與強力洪水之衝擊，隨後洪水的衝擊力開始下降並在 57 分鐘到達聚落 3，水深與流速數值已經大幅減少，顯示堰塞湖潰壩的洪水主要影響最遠距離約在聚落 3 附近。在天然壩體高度 30 m 及 40 m 之情境中，潰壩洪水也會造成聚落 1 與聚落 2 嚴重之影響，且洪水抵達時間與天然壩體 50 m 之情境相差不到 10 分鐘，而隨著天然壩體高度降低至 20 m 以下，潰壩所導致的洪水僅影響聚落 1。

表 3 不同壩高情境之保全對象水理數值分析整理

Table 3 The protected targets hazard of scenarios with different landslide dam height

No.	聚落 1			聚落 2			聚落 3		
	洪水到達時間 (min)	水深最大值 (m)	最快流速 (m/s)	洪水到達時間 (min)	水深最大值 (m)	最快流速 (m/s)	洪水到達時間 (min)	水深最大值 (m)	最快流速 (m/s)
Case1	52	0.5	1.1	-	-	-	-	-	-
Case2	24	2.8	3.5	-	-	-	-	-	-
Case3	22	4.9	6.1	40	1.5	8.6	-	-	-
Case4	21	7.7	8.6	34	3.6	13.8	-	-	-
Case5	20	11.9	11.2	31	5.6	16.2	57	0.89	0.17

由於不同壩高可能造成上游迴水並導致聚落淹水其情境模擬，可應用 HEC-RAS 2D 分析工具模組，搭配線上免費底圖及匯入自製圖層，輔助災害潛勢範圍分析。如圖 9 為不同壩體高度情境時上游迴水範圍，透過不同顏色能夠快速分辨不同壩體高度情境之迴水可能影響的範圍；若上游有其他保全對住戶，將能夠及早透過水位監測，提供相關防災避難資訊。此外，為了解堰塞湖水位-迴水面積-蓄水體積之關係，以作為後續防災監測上之應用評估依據，本研究採用 ArcGIS 之空間分析模組估算高程-迴水面積-蓄水體積曲線，其結果如圖 10 所示，由天然壩體高度配合 DEM 模型進行估算，得知當壩體高度超過 30 m 時，蓄水體積將會呈線性的增高，而壩體高度在 20 m 至 30 m 蓄水面積擴大最快。

而從不同天然壩高情境成果中顯示，比較潰壩時洪水氾濫之主要區域，由圖 11 顯示當天然壩體高度為 50 m 時，堰塞湖潰壩將會直接衝擊天然壩下游三個不同的聚落，並淹沒洪水行經區域造成嚴重的災害，而天然壩體高度為 30 m 及 40 m 高度情境時，潰壩洪水主要影響的區域至聚落 2 的位置，並且衝擊厚真川主流，若天然壩體透過工程手段挖降至 20 m 以下，將能避免洪水衝擊影響至厚真川主流及聚落 2。以地圖的方式直接顯示不同潰壩情境之影響，相較於經驗公式推估，其相關資訊更能方便於民眾溝通，並擬定相關疏散避難計畫。

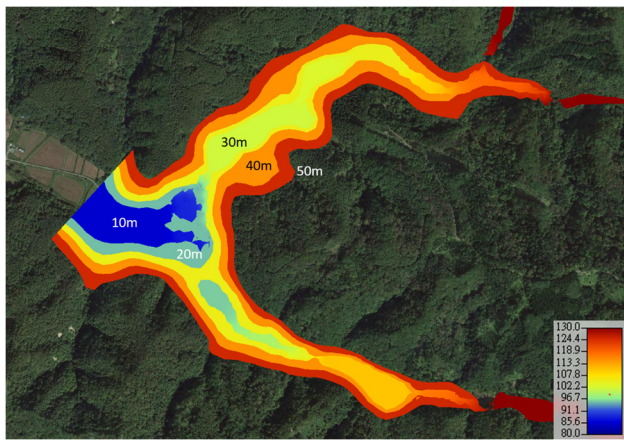


圖 9 不同壩高情境之上游迴水影響範圍

Fig.9 The return water area of scenarios with different landslide dam height

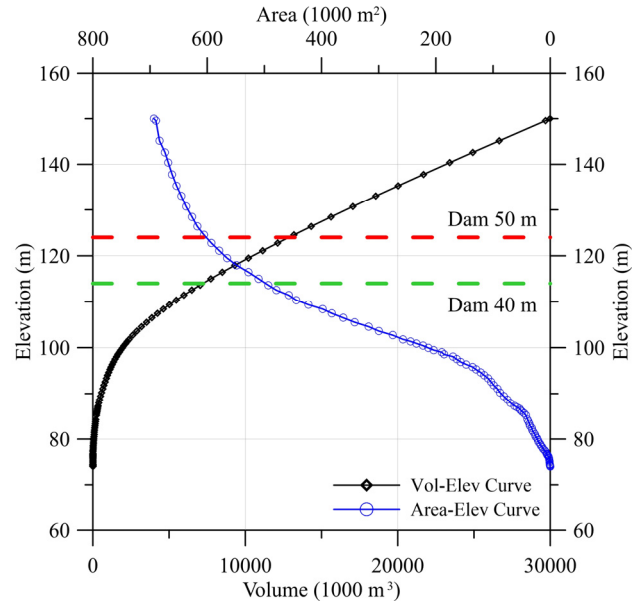


圖 10 堰塞湖水位-面積-體積曲線圖

Fig.10 The estimated elevation-area-volume curve of impounded lake

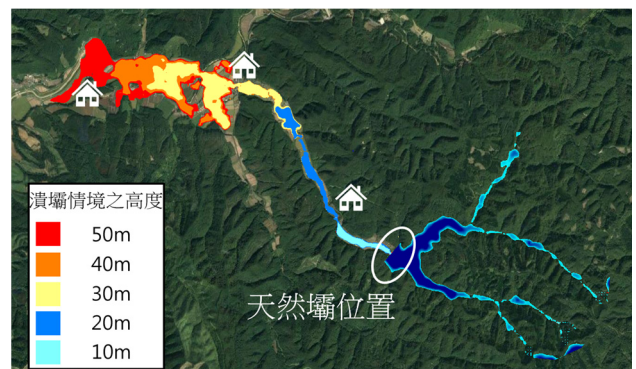


圖 11 不同壩高情境之下游影響範圍

Fig.11 The inundated area of downstream in different landslide dam height scenarios

2. 不同潰壩延時之災害潛勢分析

現場調查結果天然壩高最高約為 50 m，由於天然壩體的潰壩機制與其當下狀態、材料組成有許多影響因素，對於實際可能發生潰壩延時難以精準推估，考量不同潰壩延時可能對下游之衝擊不同，本研究模擬在相同天然壩壩體高度而不同潰壩延時之情境結果如表 4 所示。對下游河道沿岸所造

成之衝擊，以 Case6 天然壩體高度 50 m 及潰壩延時 30 分鐘最為嚴重，其在壩體潰決後第 11 分鐘即抵達第一個聚落，其產生之河道最快流速約為 14 m/s，第 19 分鐘後抵達第二個聚落，其最快流速約為 18.5 m/s，洪水將有可能嚴重衝擊其範圍內之構造物，第 39 分鐘後抵達第三個聚落，其最快流速降至約 0.2 m/s，但其水深仍有 0.9 公尺。由於聚落 1 離

表 4 不同潰壩延時情境之保全對象水理數值分析整理

Table 4 The protected targets hazard of scenarios with different breach formation time

No.	聚落 1			聚落 2			聚落 3			淹水面積 (km ²)
	洪水到達時間 (min)	水深最大值 (m)	最快流速 (m/s)	洪水到達時間 (min)	水深最大值 (m)	最快流速 (m/s)	洪水到達時間 (min)	水深最大值 (m)	最快流速 (m/s)	
Case5	20	11.9	11.2	31	5.6	16.2	57	0.89	0.17	5.7
Case6	11	15.2	13.9	19	6.8	18.6	39	0.92	0.17	5.9
Case7	47	7.8	7.4	69	3.8	12.2	121	0.87	0.16	5.4
Case8	80	6	5.4	116	2.9	9.8	206	0.86	0.16	5.1

從圖 12 中顯示當天然壩體高度為 50 m 及潰壩延時為 30 min 與 6 hr 情境下最大水深分布，可以當作潰壩時洪水經過的區域水深變化情形，並能顯示低窪地區可能因洪水發生嚴重淹水區域，當潰壩延時為 30 min 時天然壩下游日高幌內川流域中幾乎都有水深超過 10 m 的情形，洪水將有可能淹沒河道兩岸的房屋與道路，而在聚落 2 與聚落 3 區域的低窪處也會有較大的水深情形；當潰壩延時增加為 6 hr 時堰塞湖潰壩淹水深度超過 10 m 的區域減少，主要影響天然壩下游較低窪地區，從此情境可以看到洪水匯入厚真川主流後，洪水淹沒區域在潰壩延時快速與緩慢兩個情境中相似，因地形平緩並無明顯原始河道道路，導致該區域洪水以擴散形式滯留在該區域低窪處，天然壩體快速與緩慢潰決皆會對下游帶來一定的衝擊，位於水深較大區域應提早規劃疏散避難機制，若發生堰塞湖潰壩將能降低致災區域的風險。

透過流速大小可以評估堰塞湖潰壩後，洪水對於構造物的衝擊情形與洪水波主要影響範圍，當流速超過一定程度將有可能嚴重掏刷結構物甚至是直接沖毀。從圖 13 中顯示當天然壩體高度為 50 m 時，潰壩延時為 30 min 與 6 hr 情境中最大流速分布，當堰塞湖在短時間內完全潰決後，潰壩引致的洪水對於日高幌內川將造成破壞性的衝擊，由於流速在此區皆高於 6 m/s 可能會直接沖毀該區域所有的混凝土構造物，而流速在洪水匯入厚真川主流後逐漸降低。當堰塞湖潰壩延時拉長後，天然壩瞬時提供的流量下降，使得天然壩下游洪水流速明顯降低，只有零星坡度較陡區域有較高流速分布，而潰壩對於保全對象的影響主要以淹水為主，而在此情境中由於洪水來的較慢，能增加較多疏散避難之時間，若堰塞湖水位上升速度較快，除了投入抽水機降低水位外，應導入相關臨時工程避免潰口快速擴大及相關導流工程減緩水流淘刷天然壩趨勢。

降雨或堰塞湖潰壩引致的洪水災害，在洪水來臨時民眾若要自行疏散避難，必須考量到淹水深度及流速，避免在移動時無法抵抗洪水衝擊而發生意外，其步行抵抗流速與水深考量身高之比較如圖 14 所示 (小川芳也等，2014)。在 HEC-RAS 模式當中，透過計算每一時刻流速及水深相乘之值，並顯示每一網格之最大值如圖 15，在 50 m 壩高情境中，潰壩

堰塞湖距離近，在四個不同潰壩延時情境中，皆會有致災性的洪水發生；聚落 2、聚落 3 隨著潰壩延時之增加，其四種潰決模擬分析之結果皆顯示，到達時間、水深、流速及淹水面積等皆減緩，但仍具有危險性，隨著洪水抵達時間延長能夠增加疏散避難的時間，降低造成居民傷亡的可能。

延時 30 min 及 6 hr 兩個情境中顯示，在洪水來臨時日高幌內川流域內不適合在道路上移動，應在潰壩發生前提早離開該區域，而隨著洪水匯入厚真川主流區域後，潰壩延時較長之情境受到流速較低影響，黃、紅色高危險區域也較少，透過同時考量水深及流速對於避難之可行性，凸顯堰塞湖潰壩災害主要影響區域，若災害影響範圍較大，此項分析結果能夠做為災害潛勢區域避難分級劃設參考。

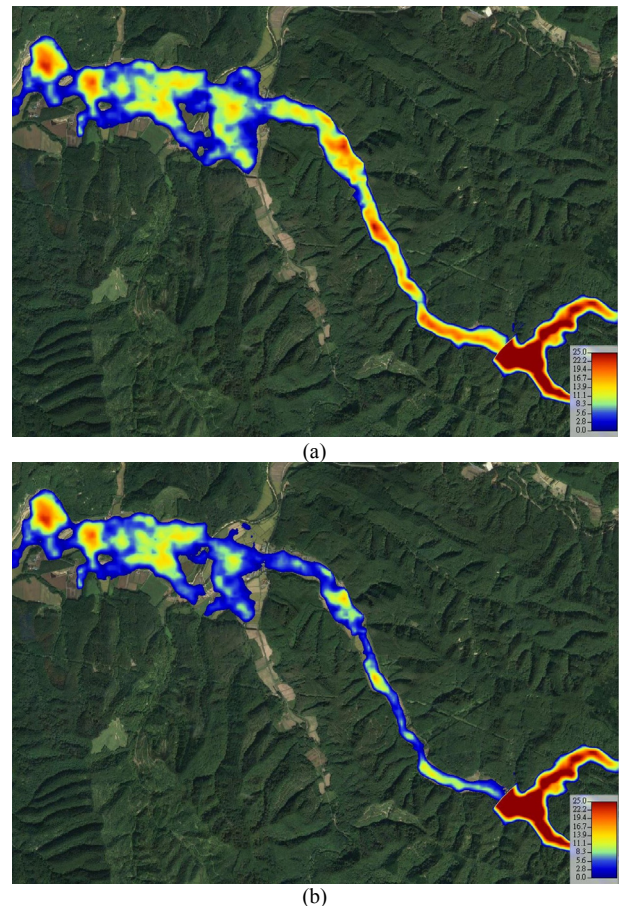


圖 12 (a) Case6 潰壩最大水深分布圖 (b) Case8 潰壩最大水深分布圖

Fig.12 (a) Distribution of maximum depth for case6 (b) Distribution of maximum depth for case8

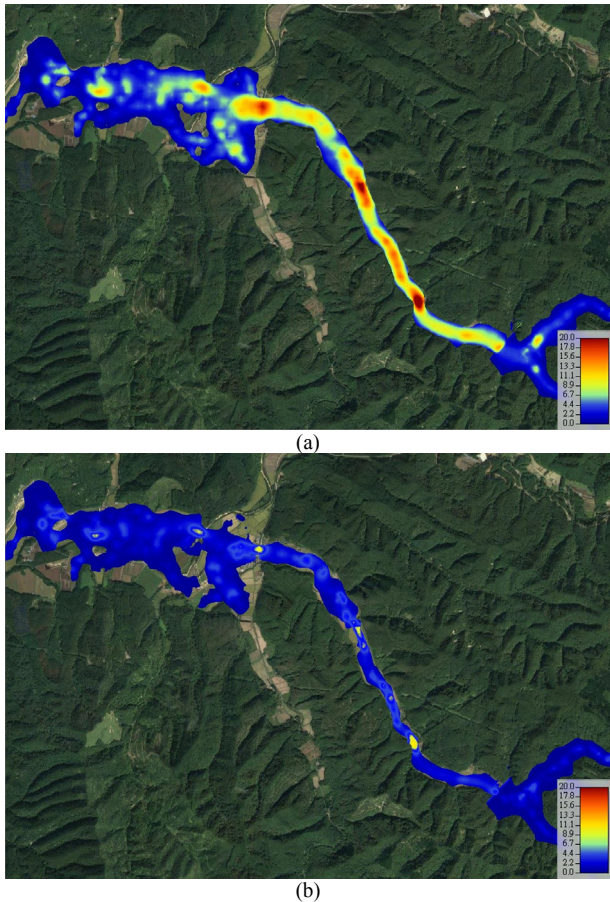


圖 13 (a) Case6 潰壩最快流速分布圖 (b) Case8 潰壩最快流速分布圖

Fig.13 (a) Distribution of maximum velocity for case6 (b) Distribution of maximum velocity for case8

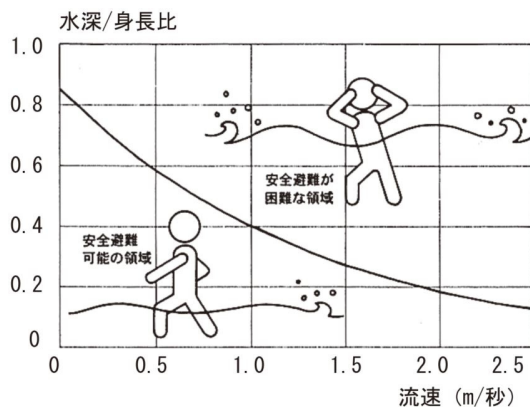


圖 14 洪水來臨時民眾可步行避難之流速及水深範圍 (小川芳也等, 2014)

Fig.14 A schematic diagram of the limitations with the flow velocity and depth/ height when people were evacuating (Ogawa et al., 2014)

3. 不同網格大小之運算效率分析

由於堰塞湖災害各種不確定因素及致災的危險性，在發現崩塌形成的堰塞湖後須盡早提出緊急應變對策，如何在短的時間內分析災害影響範圍是重要的課題，本研究嘗試比較此次堰塞湖潰壩模型，在不同運算網格精度情境下，運算所

需要花費的時間，由於每次災害事件蒐集災害現場資料與集水區基本資料所需時間不盡相同，若只單純考量每一個模型運算所需要的時間比較如表 5 所示，若採用 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ 的網格運算一個案例需要約一個半小時，隨著網格大小增加 4 倍，運算所需要的時間增加約 3.5 倍，而天然壩體形狀設計會隨著網格大小變化反應地形起伏真實程度，運算誤差也會隨著網格變小更能反應地形變化，而實際採用網格大小建議需考量每一個堰塞湖災害規模與地形模型之精度來調整。

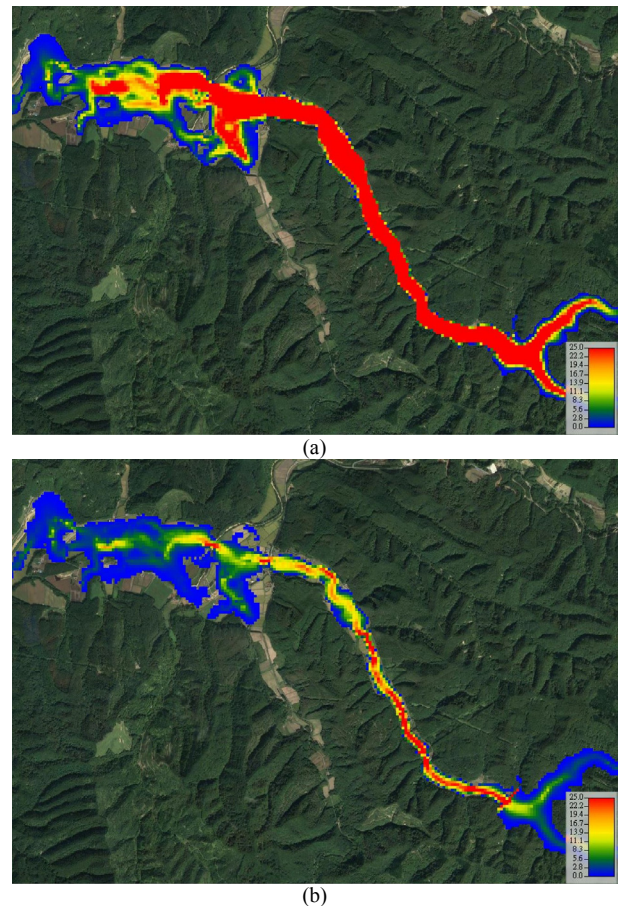


圖 15 (a) Case6 潰壩水深乘流速最大分布圖 (b) Case8 潰壩水深乘流速最大分布圖

Fig.15 (a) The maximum result of velocity times depth for case6 (b) The maximum result of velocity times depth for case8

表 5 不同運算網格大小情境之比較

Table 5 Comparison of scenarios with different computing grid size

No.	網格大小	運算時間 (hr)	天然壩體設計	運算誤差
Case5	$50\text{ m} \times 50\text{ m}$	1.5	普通	中
Case9	$25\text{ m} \times 25\text{ m}$	5.5	精細	小
Case10	$100\text{ m} \times 100\text{ m}$	0.5	簡略	大

四、結 論

崩塌形成天然壩堰塞湖由於存在時間不確定、崩塌材料組成強度較難估計、潰決時間無法預測、防災應變之時效性，

因此，其潰決一旦形成，將造成下游沿岸地區嚴重傷亡及財產損失。本研究依據文獻蒐集之資料，進行堰塞湖潰決之洪水模擬分析，模擬之結果顯示：

- (1) 利用 HEC-RAS 2D 模式，可模擬堰塞湖潰壩後河道內隨時間變化之洪水水深、流速、洪水抵達時間與淹水面積等影響範圍圖，透過衛星影像及模擬結果快速套疊分析結果，並且進一步評估不同潰壩情境之衝擊評估以作為未來相關單位研究與避難之參考。
- (2) 不同壩體高度所造成之堰塞湖迴水面積與蓄水量積截然不同，隨著壩體高度增加，其迴水長度越往上游發展，且蓄水深度超過 30 m 時，蓄水体積將會大幅增加，因此，上游地區如有保全住戶受到蓄水範圍之影響，應通知居民注意疏散避難訊息。
- (3) 經由模式中天然壩潰決模擬，其流速及水深分布圖成果顯示，不同壩體高度情境潰壩所造成下游影響範圍亦不相同，在降低受影響範圍考量下，建議將壩體潰口高度逐漸下降，以降低壩體後方蓄水體積，更可將潰決之衝擊逐漸減小，若能將壩體高度降低至 20 m 以下，將能避免厚真川主流區域之保全對象受到影響。
- (4) 在不同潰壩延時情境中，當潰壩延時越小，其所造成之衝擊越大，因此，需在天然壩形成之時，緊急設置雨量、水位及流量等觀測儀器，以作為監測警戒之用，其不同潰壩延時情境之洪水抵達時間也能作為應變計畫之疏散避難時間之參考，當集水區發生大量降雨造成水位急劇上升達到警戒水位時，應當立即執行緊急應變計劃，進行疏散避難。
- (5) 透過堰塞湖潰壩模擬隨時間流速及水深相乘最大之成果，提供影響範圍內主要受災區域範圍，並且評估保全對象需要提早撤離之區域，以及能夠自行抵抗較小洪水衝擊來避難的地區，在洪水災害影響範圍較大時，能夠提供疏散避難緊急程度之參考。
- (6) 由於堰塞湖災害有防救災之時效性，必須盡早提供防災應變策略計畫，建議分階段以不同精度之 DEM 以及運算網格大小來模擬災害影響範圍，透過經驗公式與模式模擬組合來提升防災應變之效率。

採用 HEC-RAS 2D 二維水理模式，有效分析潰決洪峰水流之運動特性。對於緊急評估分析下游保全住戶之影響，其可快速計算並評估潰壩時所產生之潰決洪峰流量、洪水到達時間、河道溢淹情況等模擬成果。另外可避免當天然壩穩定性未明情況下，進行現場調查作業之危險，降低衍生之現勘人員傷亡的風險，在颱風豪雨期間，災害應變中心於災情研判與決策分析上有直接助益。未來透過不斷精進的基礎資料建置與管理，將能在第一時間取得災害區域大範圍之基本重要資料，能夠提升緊急應變決策之效率，而隨著災害規模提升和複合性災害之衝擊，應及早透過不同情境之假設及模式模擬來規劃實際應變之相關策略。

參考文獻

- [1] 許強、鄭光、李為樂 (2018)，2018 年 10 月和 11 月金沙江白格兩次滑坡-堰塞堵江事件分析研究，*工程地質學報*, 26(6): 1534-1551, doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2018-406。(Xu, Q., Zheng, G., and Li, W.L. (2018). "Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3, 2018." *Journal of Engineering Geology*, 26(6), 1534-1551. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2018-406. (in Chinese))
- [2] 陳樹群、許中立 (2009)，莫拉克颱風形成之堰塞湖及危險度評估，*地工技術*, 122, 79-88。(Chen, S.C., and Hsu, C.L. (2009). "Landslide dams induced by typhoon morakot and its risk assessment." *Sino-geotechnics*, 122, 79-88. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 賴桂文 (2016)，HEC-RAS 水理模式 2D 模組介紹及應用，*臺灣省水利技師公會會訊*, 19, 1-17。(Lai, K.W. (2016). "Introduction and application of HEC-RAS water mode 2D module." *Taiwan Association of Hydraulic Engineer*, 19, 1-17. (in Chinese))
- [5] 謝正倫 (2009) 莫拉克颱風引致之堰塞湖，*地質季刊*, 28(4), 66-67。(Shieh, C.L. (2009). "The landslide dam caused by Typhoon Morakot." *Ti-Chih*, 28, 4, 66-67. (in Chinese))
- [6] 土砂管理研究グループ火山・土石流チーム (2008)・天然ダム監視技術マニュアル (案)，土木研究所，土木研究所資料 第 4121 号。(Erosion and Sediment Control Research Group Volcano and Debris Flow Research Team (2008). "Natural dam monitoring technical manual (draft)." *Public Works Research Institute. Technical note of Public Works Research Institute*, No.4121. (in Japanese)) (in Japanese))
- [7] 小川芳也、賴良昌憲、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))
- [8] 水野秀明、石塚忠範、小山内信智 (2011)，土砂災害防止法の改正に基づく緊急調査の手引き，*土木技術資料*, 53-12。(Mizuno, H., Ishizuka, T., and Osanai, N. (2011). "Guide to emergency investigation based on the revision of the landslide disaster prevention act." *Civil Engineering Journal*. 53-12. (in Japanese))

- [9] 清水武志、内田太郎、山越隆雄、石塚忠範 (2012)・天然ダムによる土石流想定範囲計算システム (QUAD-L) の開発と 2011 年台風 12 号災害における適用・土木技術資料・54-10。(Shimizu, T., Uchida, T., Yamakoshi, T., and Ishizuka, T. (2012). "Development of computer application for estimating debris flow prone area induced by landslide dam overtopping, and its application to landslide dams created by Typhoon Tales in 2011." *Civil Engineering Journal*. 54-10. (in Japanese))
- [10] 北海道開発局復興・強靱化推進本部 (2019)・平成 30 年北海道胆振東部地震 に係る復旧・復興等の状況・国土交通省北海道開発局。(Hokkaido development bureau reconstruction / resilience promotion headquarters (2019). *Restoration and reconstruction related to the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake. Hokkaido Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism*. (in Japanese))
- [11] Alivio, M.B.T., Puno, G.R., and Talisay, B.A.M. (2019). "Flood hazard zones using 2d hydrodynamic modeling and remote sensing approaches." *Global Journal of Environmental Science and Management*, 5(1), 1-16.
- [12] Butt, M.J., Umar, M., and Qamar, R. (2013). "Landslide dam and subsequent dam-break flood estimation using HEC-RAS model in Northern Pakistan." *Natural Hazards*, 65(1), 241-254.
- [13] Brunner, G.W. (2016). *HEC-RAS River Analysis System User's Manual Versions 5.0*. US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center.
- [14] Brunner, G.W. (2016). *HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual Versions 5.0*. US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center.
- [15] Brunner, G.W. (2016). *HEC-RAS River Analysis System Reference Manual*. US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center.
- [16] Bagus P.Y., Mohammad B.A., Iwan K.H., Yadi S., Joko N., and Arno A.K. (2019). "Analysis of flood propagation and its impact on Negeri Lima Village due to the failure of Way Ela Dam." *MATEC Web of Conferences*, 270(4), 04011. DOI: 10.1051/mateconf/201927004011.
- [17] Costa, J.E., and Schuster, R.L. (1986) "A perspective on landslide dams", In Schuster, R.L. (Edited), *Landslide dam: Processes Risk and Mitigation.* *Geotechnical Special Publication*, 3, 1-20.
- [18] Costa, J.E., and Schuster, R.L. (1988). "The Formation and Failure of Natural Dams." *Geological Society of America Bulletin*, 100(7), 1054-1068.
- [19] Ermini, L., and Casagli, N. (2003). "Prediction of the Behaviour of Landslide Dams Using a Geomorphological Dimensionless Index." *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 31-47
- [20] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. (2019). "Emergency sabo works will be implemented for landslide dam that occurred in the Hidakahoronagawa of Azumagawa water system." *Hokkaido Regional Development Bureau*. <<https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/release/splaat00000194ji-att/splaat000001esm3>> (Mar. 13, 2019).
- [21] Farooq, M., Shafique, M., and Khattak, M.S. (2019) "Flood hazard assessment and mapping of River Swat using HEC-RAS 2D model and high-resolution 12-m TanDEM-X DEM (WorldDEM)." *Natural Hazards*, 97, 477-492. <<https://doi.org/10.1007/s11069-019-03638-9>>
- [22] Shieh, C.L., Wang, C.M., Lai, W.C., Tsang, Y.C., and Lee, S.P. (2009). "The composite hazard resulted from Typhoon Morkot in Taiwan." *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, 62(4), 61-65.
- [23] Yamagishi, H., and Yamazaki, F. (2018) "Landslide by the 2018 Hokkaido Iburi-Tobu Earthquake on September 6." *Landslides*, 15(2), 2521-2524. <<https://doi.org/10.1007/s10346-018-1092-z>>

2019 年 11 月 21 日 收稿

2020 年 01 月 02 日 修正

2020 年 02 月 15 日 接受

(本文開放討論至 2020 年 03 月 31 日)