

一維與二維水理整合模式應用於堰塞湖潰壩模擬初探

吳振佑^{1*} 林家興^{1,2} 陳振宇¹ 嚴曉嘉¹

【摘要】近年來在全球氣候變遷的影響下，災害事件可能擴大為複合型災害，如地震與颱風造成的大規模崩塌，導致滑落土砂達到溪谷對岸形成堰塞湖，一旦堰塞湖潰決，大量洪水伴隨土砂下移，可能形成二次災害，嚴重危及下游居民之安全。為快速評估堰塞湖潰決後，洪水對於下游保全對象影響程度，本研究採用 HEC-RAS 水理模式，以 2017 年 6 月鹿谷小半天崩塌形成堰塞湖事件為例，根據現場調查報告與數值高程模型資料，建立天然壩與溪流之數值模型。天然壩體高度為現場調查之 7 m 與可能之最大高度 17 m 兩種尺寸，分析 5 種不同潰壩延時對河道流量、水位與影響範圍，比較一維與二維模型在堰塞湖潰壩的模擬結果。從成果中顯示兩種模型對於天然壩體的位置認定方式不同，導致潰壩流量、水深的差異，而透過新增的檢視功能，將可以快速評估堰塞湖潰壩之影響範圍。在一維模式當中能提供簡易的模擬與內插成果，在初步危險度評估時能節省計算所需要的時間，而在二維模式當中，能夠克服較複雜的地形，並在淹水模擬有較好的效果，其相關成果可為未來災害事件進行潰壩風險評估之參考。

【關鍵詞】堰塞湖、HEC-RAS 模式、溢頂潰壩、水理模式。

A PRELIMINARY STUDY BASED ON HYDRAULIC ANALYSIS MODEL TO SIMULAE LANDSLIDE DAM BREAKING

Chen-Yu Wu^{1*} Chia-Hsing Lin^{1,2} Chen-Yu Chen¹ Hsiao-Chia Yen¹

【Abstract】 Due to the influence of climate change, sediment-related disaster events may develop into compound disasters, such as large-scale landslides caused by earthquakes and typhoon events lead to sediment moving into the riverbed and forming a landslide dam. Once the landslide dam is broken, lots of sediment combined with flood

¹行政院農業委員會水土保持局技術研究發展小組，*通訊作者。電子郵件：owen951753@mail.swcb.gov.tw
Research and Technology Development Team, Soil & Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, Taiwan

²財團法人農業科技研究院。

Research Assistant, Agricultural Technology Research Institute, Taiwan

may rush to downstream and will seriously jeopardize the safety of downstream residents and endanger protected targets. To estimate the safety of protected targets downstream after landslide dam breaking, this study used the HEC-RAS numerical model to simulate the peak discharge after landslide dam failure. According to investigation report and digital elevation model, the landslide dam and stream numerical model of the Xiao Ban Tain slope failure at Lugu County were established. We designed two sizes of dam according to the site investigation and the maximum estimated height with top dam height of 7 m and 17 m, respectively. Simulating and comparing discharges, flow depth and influential area by one-dimensional and two-dimensional models for five different dam breach durations. Results indicated that two models have different ways to identify the position of dam failures and lead to differences of simulated discharges and water depths between those two dimensions. Through the new inspection function, it will be able to quickly assess the scope of impact of the landslide dam break. After comparing with two different dimensional models, one-dimensional model provides simple simulation and interpolation results that saving the time for calculation in the preliminary risk assessment. In the two-dimensional model, it can overcome more complex terrain and have better results in flood simulation. In the future, the simulation process will assist with risk assessment of landslide dam breaking disaster.

【 Key words 】 Landslide dammed lake, HEC-RAS model, Overtopping failure, Hydrodynamic model.

I、前言

台灣每年地震和豪雨事件頻繁，導致山坡地發生崩塌事件，當崩塌土體可抵達溪谷對岸與土體最小堆積高大於溪谷水深時，將會形成一座天然壩體，並在壩體後方蓄積水體而形成堰塞湖，若堰塞湖發生潰決，大量洪水伴隨土砂下移，可能形成土石流、洪水等二次災害，嚴重危及下游居民安全。如九二一地震在南投九份二山所造成的韭菜湖溪堰塞湖及澀仔坑溪堰塞湖，當時各界十分關注，並執行緊急工程與架設相關監測設備，經過詳細評估並確認其壩體的安全性，未來不會造成立即性的災害事件。

加上近年來在全球氣候變遷的影響下，極端降雨所導致的災害事件規模愈大，而在山坡地上引發大規模崩塌，並導致洪水、土石流、堰塞湖等複合型災害，如

2009 年莫拉克颱風事件，豪雨造成了大規模崩塌，加上堰塞湖潰壩所帶來的洪水、土石流導致小林村滅村事件，另外在南部不同流域中，總共形成了十多個堰塞湖，其中有幾個堰塞湖同時存在於一個流域當中，若發生連續潰壩事件後果不堪設想，這也讓堰塞湖災害的緊急應變措施，需重新考量同時發生多個災區時該如何處理，也必須加強每一次事件的應變效率。根據水利署水利規劃試驗所在 2004 年統計，世界過去 285 個案例，約有二成的堰塞湖形成後在一天內就會潰決，約有三成的堰塞湖緊急應變的時間不到一星期，有一半以上的堰塞湖在一年內就會消失，這讓堰塞湖災害的處理難度更高，需在短時間內完成初步危險度評估，並建立潰壩影響範圍與預警機制，確保上、下游保全對象的安全，避免二次災害的發生。

為了能夠快速評估堰塞湖災害的危險性，除了統計回歸公式與經驗公式外，加入發展成熟的水文水理模式，將能針對壩體蓄水時間，不同潰壩情境所導致的淹水範圍等進行模擬，在初步危險度評估與詳細調查評估進行上，提供有利的參考數據，本研究以 2017 年 6 月在南投鹿谷鄉東埔蚋溪上游所發生的堰塞湖災害為例，使用 Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS) 水理模式建置一維與二維之數值模型，探討一維與二維模型在不同潰壩情境模擬的成果，並如何提升在緊急應變標準作業流程中的評估作業。

II、材料與方法

(I)鹿谷小半天崩塌事件說明

本研究以 2017 年 6 月份的豪雨事件，在南投縣鹿谷鄉竹林村小半天瀑布風景區，發生的崩塌事件導致堰塞湖災害為例，推估於 6 月 3 日晚上 11 點時發生崩塌，當時的累積雨量達到 605 mm，降雨強度為 47 mm/h，在瀑布下方的河道左岸發生順向坡崩塌，並阻塞河道形成堰塞湖，崩塌土體與河川之縱剖面關係如圖 1 所示。經由民眾通報後，在專業團隊抵達現場時，堰塞湖已經發生溢流情形，由於壩體的蓄水體積不多，初步評估並無立即性的危險，天然壩體也在數月後的降雨事件消失。

根據現場調查結果如圖 2 所示，崩塌面積約為 2 ha，其中已裸露 0.5 ha，平均崩塌深度為 3 m，已崩塌土方量約為 15,000 m³，崩塌土體所造成的天然壩高約 7m，而潛在崩塌面積約為 1.5 ha，預估崩塌體積為 45,00 m³，若整個潛在滑動坡面崩塌，將可能會形成 17 m 的壩高，天然壩後方的迴水長度約為 80 m，蓄水量約為 5,000 m³ 至 8,000 m³。小半天瀑布上游集水區約為 475 ha，以合理化公式推估當時的入流量約為 50 cms，而東埔蚋溪從瀑布至下游匯流口距離約為 3.5 km，河道平均坡

度約 6.3%。

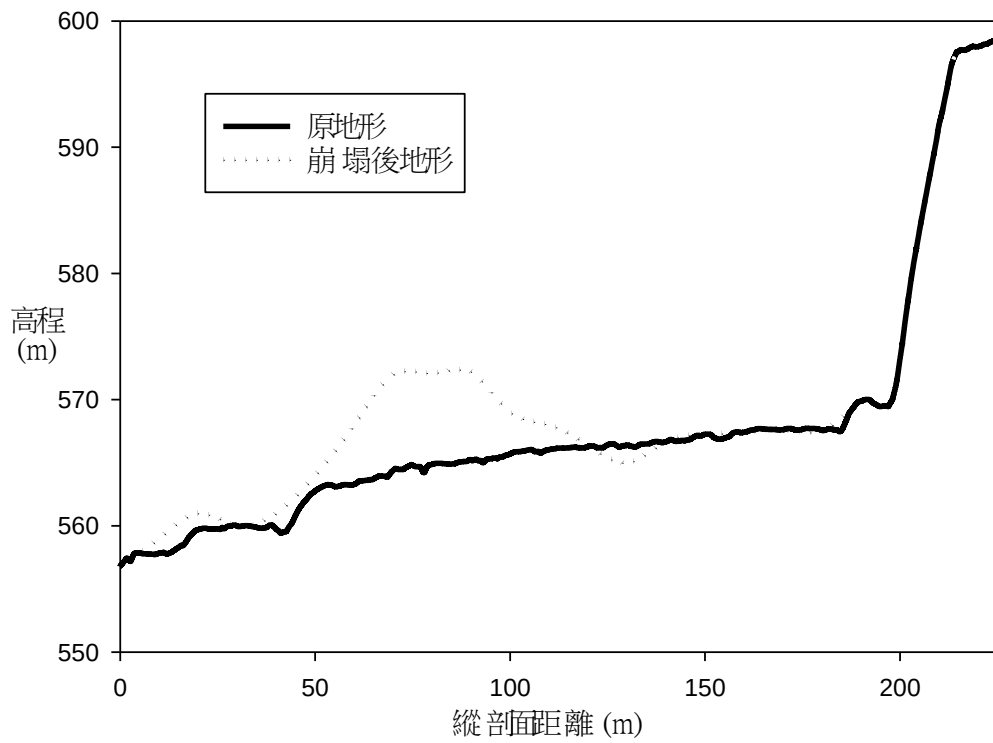


圖 1 小半天瀑布下游崩塌前、後之地形高程變化

Fig.1 Riverbed variation before and after the Xiao Ban Tain landslide dam

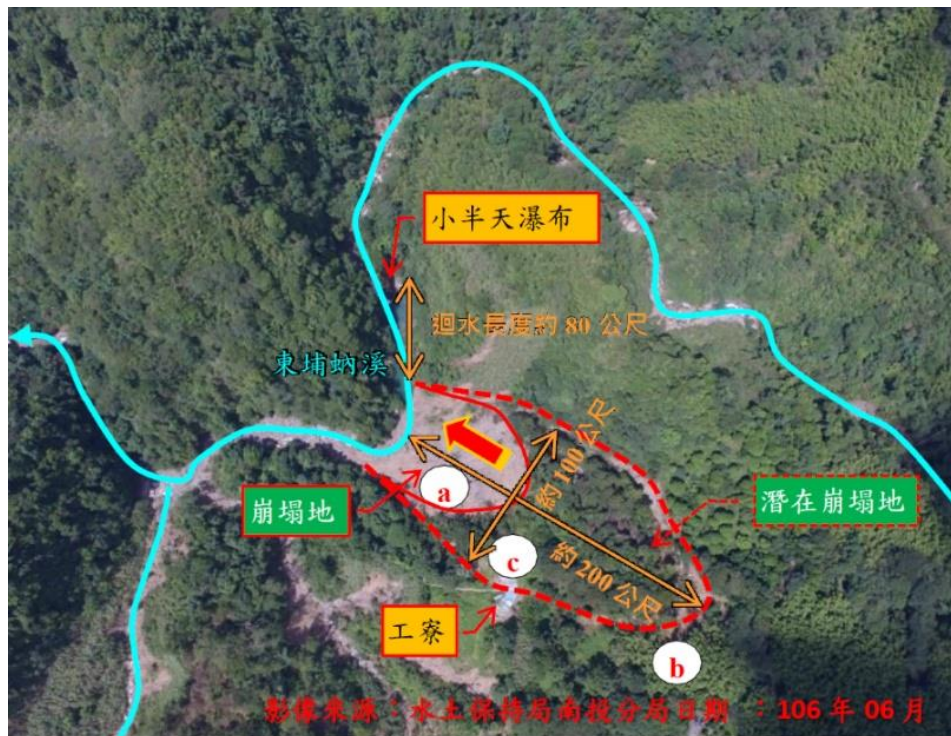


圖 2 現場災害調查空拍圖

Fig.2 Aerial-photo of Xiao Ban Tain landslide dam

(II)HEC-RAS 模式介紹

HEC-RAS 模式為美國陸軍工兵團水文工程中心所開發之河川分析系統，由於該模式發展許久和便利的操作方式，經常被使用來模擬定量流及變量流的河道水理演算，也可模擬輸砂及簡易的水質、水溫變化，其中還能模擬常見河川中的構造物如橋梁、涵管、閘門、堰等對於河道水理的影響，在進行一維河道水理演算時，常被各界所使用的模式，而在堰塞湖潰壩的模擬中，台灣學者也曾使用過 HEC-RAS 進行災害歷程重現，曾皇銘在 2011 年模擬莫拉克颱風時，在小林村發生大規模崩塌所導致的堰塞湖潰壩，對洪峰流量、水位歷線的影響變化，並以下游流量、水位測站，證明該模式可以模擬堰塞湖潰壩之情境。

在 2016 年時，HEC-RAS 推出二維水理分析功能，以及 Mapper 功能，增強對 GIS 圖資的處理能力，透過內插計算，能夠快速檢視一維及二維模擬成果之流速、水深、流場以及洪水淹沒範圍，其二維模型的建置方式以 Digital elevation model (DEM)數值地形模型為底圖，劃設水理演算區域，並使用內建網格生成系統產生二維的網格，再透過特徵線調整地形上變異過大的區域，針對河道及洪氾區域進行詳細的模擬，其中還能連結一維河道模型，設計不同的蓄水區及水工構造物，進行潰壩等混合流況的模擬，改善複雜水系與匯流口之模擬品質，而在解算二維變量流的方程式為聖維南方程 (Saint-Venant equations) 及擴散波方程 (Diffusion Wave equations)，數值方法則採用有限體積法求解，由於國內應用其二維模型相關研究較少，本研究希望嘗試利用該功能建立堰塞湖潰壩模型，並與一維之水理模型進行比較。

(III)一維及二維水理模型建置

本研究建置模型的範圍以小半天瀑布作為上游邊界開始至下游匯流口處，總長度約為 3.5km，以崩塌前幾年之 DEM 資料為底圖，分別建置一維及二維之水理模型，上游邊界之入流量為推估崩塌時間之附近雨量站所測得之降雨強度，以合理化公式所推估而得之逕流量，模擬的時間從發生崩塌形成堰塞湖後 3 小時，計算間隔為每 0.5 秒計算一次，每一分鐘輸出一筆資料，由於該支流過去並沒有整治工程為原始河道，溪流兩岸也較無保全對象，所以河床之粗糙係數沒有相關調查資料，本研究採用使用者手冊所建議之範圍為 0.03 至 0.05 之間，輸入至一維河川斷面之中與二維網格之中。

在一維的模型當中，採用 ArcGIS 當中的輔助程式，約每 50 公尺取一個寬度為 250 公尺的斷面資料，總共建置了 69 筆斷面資料，從上游至下游依照離匯流口

距離依序編號如圖 3 的 (a)。而在二維的模型當中壩體後方的蓄水區設置為純蓄水空間，避免在計算的過程中因迴水導致的計算誤差，壩體下游的部分則是以二維網格涵蓋所有可能行水區的範圍，再以特徵線將河道兩岸加強，降低計算過程中網格之間高程變異過大導致的誤差。而在網格的設定上每一格以邊長 4m 的正方形進行自動建置，而特徵線所經過的網格再細分為邊長 2m 的網格，最終總共建置了 21,730 個計算網格如圖 3 的 (b) 所示。

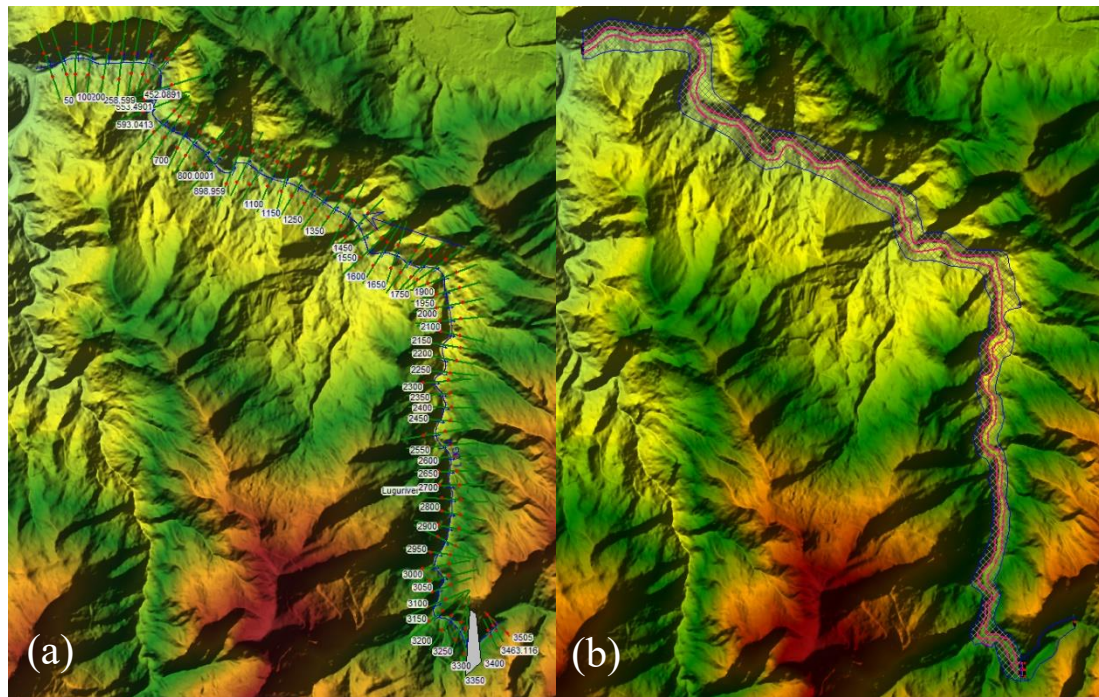


圖 3 HEC-RAS 模型建置示意圖： (a)一維模型、 (b)二維模型

Fig.3 Schematic diagram of HEC-RAS : (a) one-dimensional model 、 (b) two-dimensional model

為了模擬河道中之天然壩體潰堤之情形，將利用 HEC-RAS 模式當中，河川構造物的天然壩或堰的功能，在一維模式中設定其與其他斷面之間的距離關係，壩體之寬度與其高程等資訊，而在二維模式中則是以地圖中設置邊界條件形式，並設定其堰的高程來當作天然壩體，而本研究是利用上游之蓄水區水位達到溢頂水位時，發生潰壩行為並將水體導向至下游二維水理網格當中。

由於並無實際壩體破壞歷程記錄，在災害發生當下也無法在短時間內完成實驗室土壤試驗，並計算壩體穩定分析得到可能之破壞類型與潰口形狀，所以通常只能進行假設來計算災害影響範圍，在模式當中針對潰壩的設定包含潰口的形狀設定、潰壩的形式、潰壩的發生條件、潰口沖刷的速度係數、壩體復原的機制等如圖 4 所示。

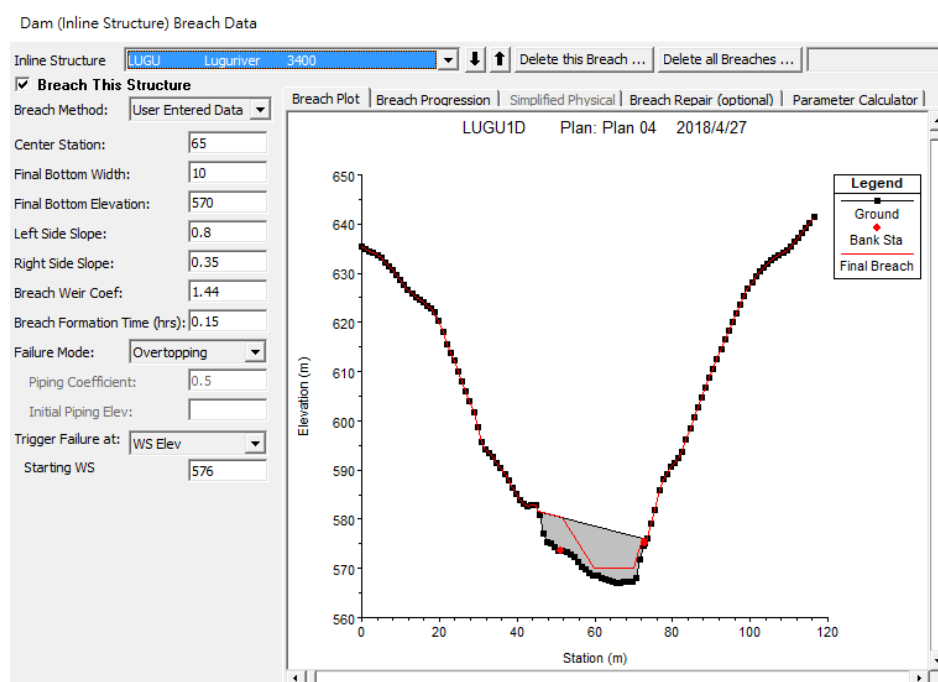


圖 4 在 HEC-RAS 中潰壩條件輸入介面

Fig.4 The input interface of landslide dam breaking conditions for the HEC-RAS model

為探討一維及二維模型在潰壩模擬中的成果比較，依據現場調查結果設計天然壩尺寸，其中將有 7m (現況)與 17m (最大可能高度)兩種壩高情境，並假設其皆會發生溢頂破壞事件，由於不知道其潰壩延時，但其為重要的影響參數，所以設定 3 分鐘、5 分鐘、10 分鐘、30 分鐘、60 分鐘五種不同潰壩延時情境，探討潰壩對下游河道之流量、水位等水理數據之影響，並比較其可能之洪氾影響範圍，再針對一維及二維模擬成果進行比較，所以上述所提到之情境皆會在一維及二維中進行模擬運算，總計有 20 個情境。

此次事件之模擬範圍內並無設置流量、水位測站，所以無法進行校正或驗證，而堰塞湖這類型的事件也大多發生在流域內較上游的地方，很少能夠取得完整的監測資料，所以必須利用少許的參考數據，評估可能的災害風險，本研究希望能提供一個可能持續發展的方向，在未來若發生重大災害時，有一個平時已經熟練其相關建置方式的模式，來進行初步或細部的評估。

III、 結果與討論

(I)潰壩之流量、水位歷線

依據天然壩體之現況調查條件，與假設其潛在崩塌坡面全部破壞滑落至溪谷中，所形成之規模更大的天然壩，並模擬天然壩因溢頂破壞而導致不同延時之潰壩水理情境成果如下。在一維模式中，假設天然壩體為 7m 高與 17m 高，並在一開始時就發生溢頂破壞之情形，其流量變化情形在不同潰壩延時中如圖 5 所示，隨著潰壩延時愈短和高度較高的壩體，流量歷線的洪峰值愈高，其中在最極端的情境 17m 壩高並在三分鐘內潰壩時，洪峰流量為 $220\text{m}^3/\text{s}$ ，增加約 3.5 倍的原始流量，其餘的情境當中，7m 壩高洪峰流量超過 $100\text{m}^3/\text{s}$ 的情境為 3 分鐘的潰壩延時，而 17m 壩高的情境為 10 分鐘以內的潰壩延時，造成洪峰流量大於 $100\text{m}^3/\text{s}$ ，並使壩體刷深至指定高程。

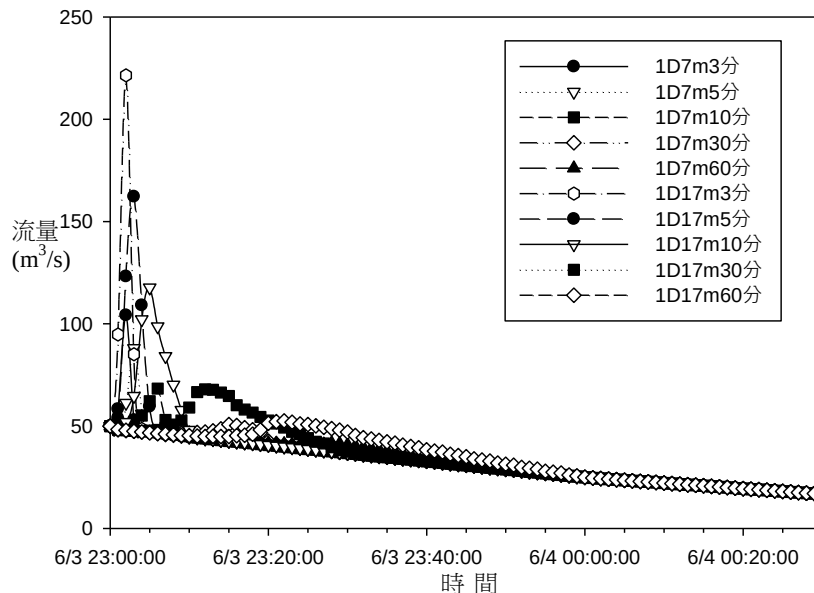


圖 5 一維模型中不同潰壩延時情境之流量歷線

Fig.5 Discharge hydrographs of different dam breach durations scenarios in 1D model

從下游邊界斷面水深變化來看，如圖 6 中顯示，最短潰壩延時與最高的天然壩體所造成的最大水位抬升量為 1m 左右，而從發生潰壩到洪峰流量到達下游的最短時間為 8 分鐘，最長約為 35 分鐘，另外在兩種不同壩高的情境模擬結果中可以發現，在天然壩較高的情況時，後方蓄水量也較大，在相同潰壩延時下，洪峰流量到達下游的時間會比較快，相對於壩體較低的情境中更加危險。以小半天崩塌事件這個案例來說，在不同潰壩延時的模擬結果來看，對於下游流量、水位的衝擊，在現況調查 7m 高度的壩體時，潰壩延時超過 10 分鐘以上，就不會明顯感受到洪峰到達的影響。

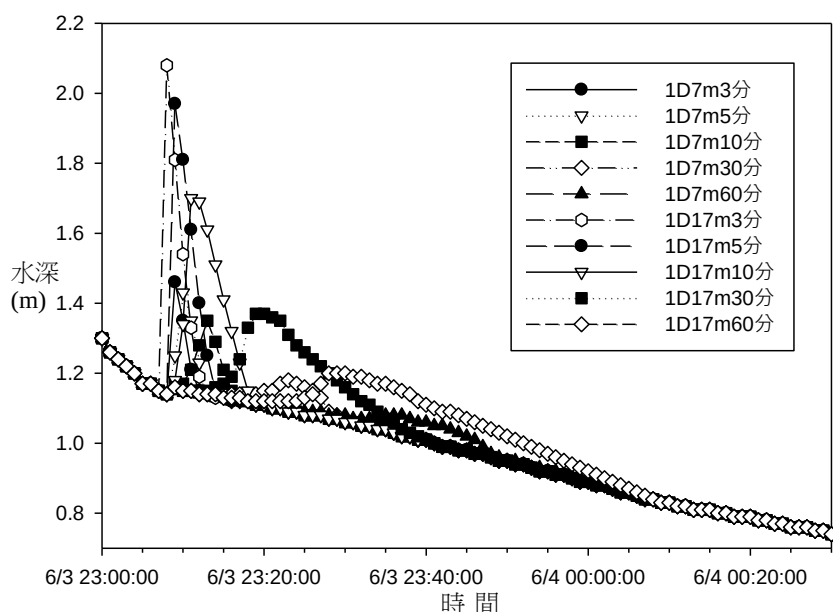


圖 6 一維模型中不同潰壩延時情境之下游水深歷線

Fig.6 Downstream boundary water depth hydrographs of different dam breach time scenarios in 1D model

在二維的模型當中，天然壩體之後方蓄水區假設為一個純蓄水空間，而當水位漫淹過天然壩體時，發生溢頂破壞，從圖 7 當中顯示蓄水區的水深變化，在壩高為 7m 的時候，蓄水時間大約 3 分鐘，而當壩高為 17m 時，蓄水時間約為 16 分鐘，由於蓄水空間就是天然壩體至瀑布前的空間，從入流時間至發生潰壩時間推估蓄水量在 7m 壩高的情境中約為 1.4 萬 m^3 ，在壩高 17m 的情境當中約為 4.8 萬 m^3 。

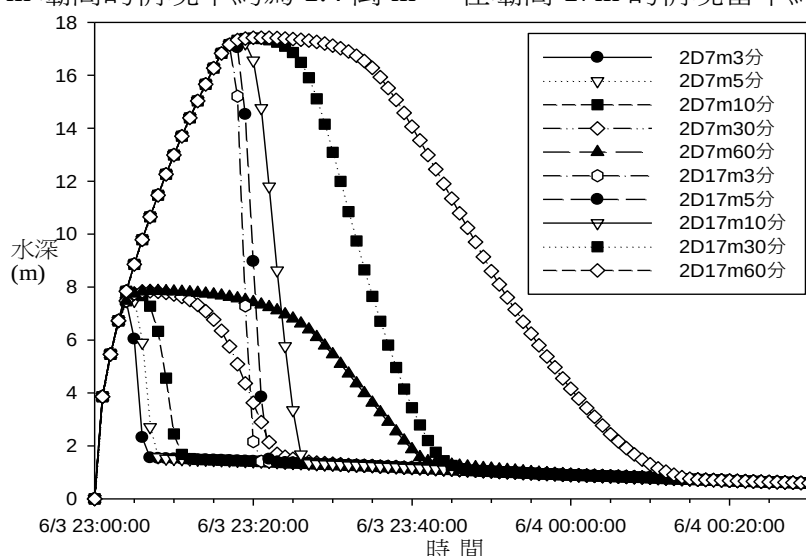


圖 7 二維模型中不同潰壩延時情境之壩體水深歷線

Fig.7 Landslide dam water depth hydrographs of different dam breach time scenarios in 2D model

從到達壩頂發生潰壩後，到潰壩結束時的水位變化也能從圖中看到所設定的

破壞模式，在開始與結束時沖刷速度較慢，而中間過程較快的現象，未來如有記錄更多不同的類型的破壞歷程，將可以增加模擬的真實性。

而在二維情境中，潰壩所造成的流量歷線變化如圖 8 顯示，在兩種不同的壩高情境中，可以發現因為考量蓄水時間，所以洪峰流量明顯分為兩群，在壩高為 7m 的情境當中，潰壩延時最短的案例中，洪峰流量接近 200m³/s，而壩高 17m 的 3 分鐘潰壩延時情境中，洪峰流量到達了 440m³/s 左右的值，相較於一維模擬的結果大了一倍，探究其可能原因在於，HEC-RAS 在建置一維壩體時，是以壩體上方最近的一個斷面做為參考基準，沒辦法利用壩體所在位置的 DEM 高程來模擬，所以當初建立的模型，造成壩體後方的蓄水體積會較少的現象，在壩高為 7m 與 17m 時，其一維模型中的蓄水體積約為 0.54 萬 m³ 與 1.82 萬 m³，導致在壩高與潰壩延時都和二維相同時，洪峰流量會有一個倍數的差異，這也是未來在執行初步評估時需要特別注意，模式在建立時的壩體設置位置與最近斷面的關係。

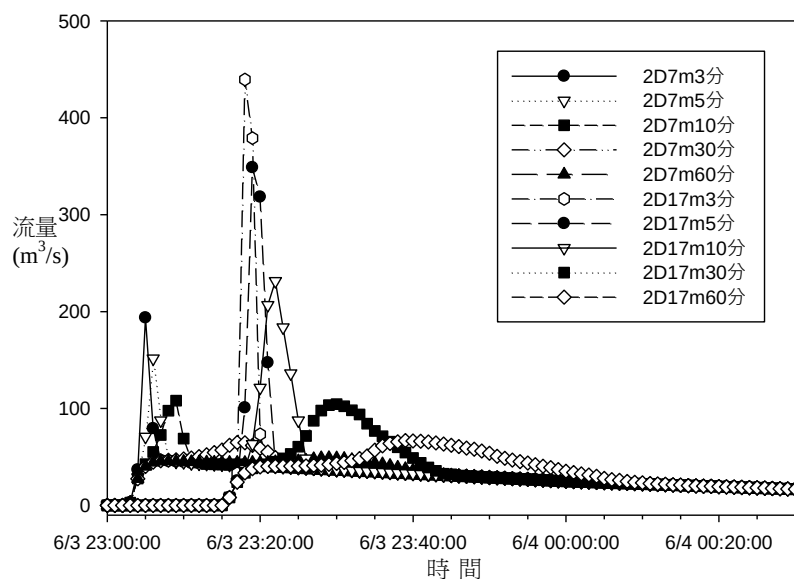


圖 8 二維模型中不同潰壩延時情境之壩體流量歷線

Fig.8 Landslide dam discharge hydrographs of different dam breach time scenarios in 2D model

在下游邊界條件水深變化的結果，如圖 9 所示，由於在二維模式建置中，本研究假設為乾床，壩體之上游蓄滿水後，發生潰壩至洪水到達下游邊界條件的時間約為 8 至 12 分鐘，而在潰壩延時大於 10 分鐘的情境當中，洪峰流量出現的時間會根據其潰壩延時設計，拉長洪峰到達時間，另外洪水所導致的水位提升相較於一維模擬結果，最大水位增加量約為 1.2m，這與先前所提到之壩體在兩種不同環境中

設置所導致的差異也有關係。而在洪水水位的變化中可以發現某些潰壩延時較長的情境會大於潰壩延時較短的情境，這可能與乾床的設定在潰壩延時短的情況下，二維計算所造成的誤差，或是資料在輸出時，由於是每分鐘擷取一筆資料，在短延時的變化中，洪峰流量變化也較快，模式並不會輸出其時間內最大值，導致結果不符合潰壩延時愈短洪峰流量愈高的情況。

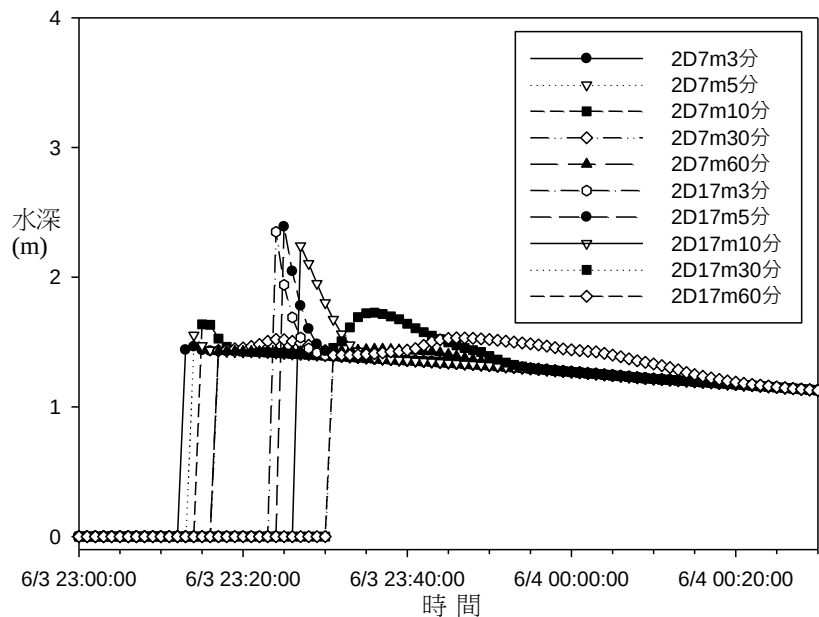


圖 9 二維模型中不同潰壩延時情境之下游邊界水深歷線

Fig.9 Downstream boundary water depth hydrographs of different dam breach durations scenarios in 2D model

(II)潰壩影響範圍比較

利用 HEC-RAS 中內建的 Mapper 功能，可以將一維或二維模擬的結果，呈現在匯入的底圖中，或是連結線上的圖資，快速比對模擬的結果，圖 10 為由上游至下游潰壩所造成的河道最大水深，並套疊線上的衛星影像圖層，檢視是否會影響致河道周邊的保全對象，除此之外能檢視隨著時間變化，河道之水理數值變化，也能夠過視覺化的方式，了解二維平面水理變化情形。

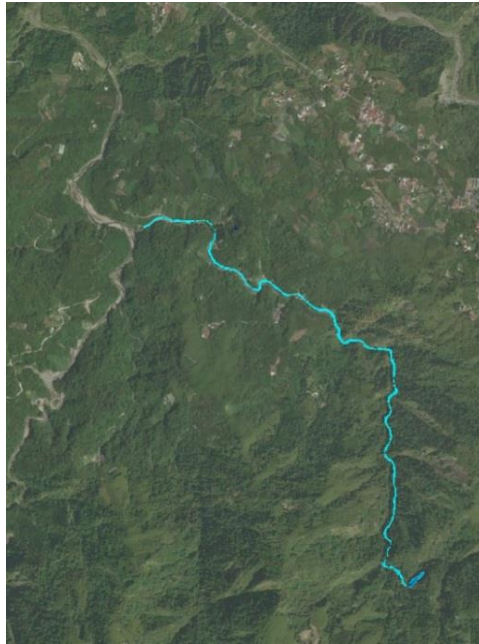


圖 10 在衛星影像中檢視潰壩的影響範圍

Fig.10 Assessing the scope of influence of landslide dam breaking in satellite imagery

利用不同圖層的開關、堆疊，能快速比較不同潰壩延時對河川水深變化與其影響範圍，如圖 11 所示，為 2D 情境中壩高 7 m 與 17 m 兩種情境，對於天然壩體後方淹水範圍的計算結果，快速比較出不同壩高的影響範圍，在 7 m 壩高的情境中，迴水面積約為 2560 m^2 ，而 17 m 壩高的情境當中，迴水面積約為 4460 m^2 ，在潰壩所造成的洪水也能利用相同的方式，比較不同的洪峰流量對於兩岸保全對象的影響，計算每一個情境當中，所增加的影響範圍。

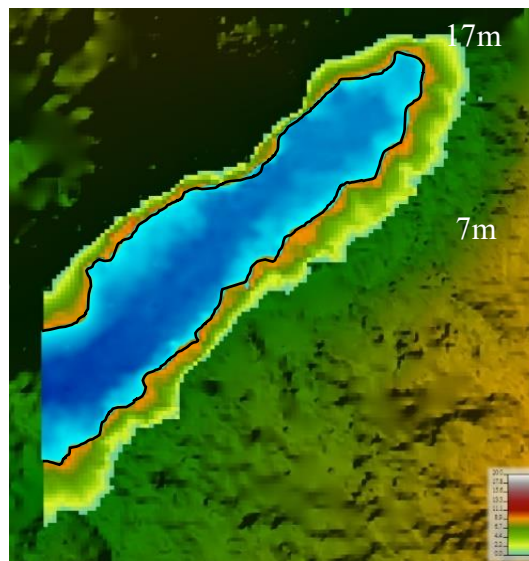


圖 11 二維模型中 7 m 和 17m 壩高的淹水範圍比較圖

Fig.11 Inundation area of different dam height with 7m and 17m in 2D simulation

IV、結論

應用 HEC-RAS 模式建置一維及二維水理模型，模擬鹿谷小半天崩塌事件之堰塞湖若發生潰壩將會對下游造成的影響，其中針對不同的壩高、潰壩延時總共設計了 20 個情境，依據建置的過程與模擬的成果整理出以下幾個重點。

1. 利用模式模擬可以快速計算出符合河道地形與不同斷面或網格之水理數據，相較於過去經驗公式能獲得更多的詳細的資訊，在一維與二維的模擬結果中發現在建置模型的過程中，由於其判斷壩體位置的基準不同，可能會造成洪峰流量與水位推估上的誤差，而在二維模式當中更能完整模擬從蓄水至潰壩在每一個網格的變化。
2. 在 HEC-RAS 最新版本的模式當中，提供快速檢視成果的工具，能夠匯入圖資或是使用網路上免費之線上圖資，快速評估堰塞湖之可能上游淹水範圍、面積，在潰壩造成的洪水影響範圍也能透過不同的情境，確認對於下游保全對象的影響，這能加速初步及細部評估的速度。
3. 在一維模式當中，壩體的相關地形數據是參考最近一個河道斷面，並假設其以內差的方式與下一個河道斷面連接，而在二維模式當中是以使用者所繪製之範圍中最靠近的網格，將其設置成邊界條件，較能針對實際地形模擬天然壩體的影響。
4. 實際在使用模式的過程中，一維模式建置的時間較短，每一個情境計算的時間與調整的時間也較短，由於計算成果是斷面之間的內插，對於較寬闊的河川或是淹水的情境模擬成果較差，但在初步評估時已經能提供許多有用的資訊。二維模型雖然對於較複雜之地形與淹水能夠模擬較精細，但是建置時間與計算時間將會因模型的大小，而有極大的差異，建議在有較詳細的調查資料與足夠的建置時間時應用。

V、參考文獻

- 行政院農業委員會水土保持局 (2017) 鹿谷小半天瀑布崩塌事件速報。行政院農業委員會水土保持局。
- 行政院農業委員會林務局 (2017) 國有林地堰塞湖應變標準作業程序。行政院農業委員會林務局。
- 國立交通大學防災工程研究中心 (2004) 堰塞湖引致災害防治對策之研究。水利規劃試驗所。
- 曾皇銘 (2011) 小林村潰壩研究。國立成功大學。107 頁。
- 賴桂文 (2016) HEC-RAS 水理模式 2D 模組介紹及應用。水利技師公會。
- 謝正倫 (2009) 莫拉克颱風引致之堰塞湖。經濟部中央地質調查所。66-67 頁。
- Butt, M.J., Umar, M. and R. Qamar (2013). Landslide dam and subsequent dam-break flood estimation using HEC-RAS model in Northern Pakistan. Natural Hazards. Volume 65, Issue 1, pp 241–254.
- 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.
- 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.
- Brunner G.W. (2016) HEC-RAS River Analysis System Reference Manual. US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center.
- Carling, P., I. Villanueva and J. Herget (2010), Unsteady 1D and 2D hydraulic models with ice dam break for Quaternary megaflood, Altai Mountains, southern Siberia, Global and Planetary Change, Volume 70, Issues 1–4.