

快速評估高度不確定性大規模崩塌潛勢區域 之可能破壞面與後續影響範圍研究

王福杰^{[1]*} 戴義欽^[1] 李哲宇^[2]

摘要 不同崩塌量體與範圍崩塌土砂分佈造成後續影響範圍與堆積深度對大規模崩塌災害評估與防減災規劃作業是一項關鍵的重要議題，此作業也非常仰賴長期的現場地質調查工作且需透過資深地質學者方可研判可能崩塌範圍與量體。而一般大規模崩塌事件，其崩塌破壞面趾部易受到崩塌塊體（或稱覆土層）所掩埋，導致推估可能的崩塌破壞面與其對應之崩塌量體及後續土砂影響範圍評估則存在高度不確定性。針對此狀況，本研究提出應用理想崩塌曲面法搭配不同起始搜尋點推估數塊崩塌滑動塊體，並將所推估之可能崩塌滑動塊體作為土砂運移模式起始條件，進行後續土砂影響範圍與最終堆積分佈之情境探討，為防減災設計規劃或建置現場監測系統提供參考依據。

關鍵詞：高度不確定性崩塌範圍、理想曲面法、崩塌破壞面與土砂影響範圍、評估指標

Preliminary Estimation of the Plausible Failure Surface and Endangered Area of High Uncertainty Large-scale Landslides

Hock-Kiet Wong^{[1]*} Yih-Chin Tai^[1] Zhe-Yu Li^[2]

ABSTRACT A crucial component of hazard assessment and disaster mitigation planning for large-scale landslide events is the evaluation of the possible area that may be endangered by the moving mass. Volume estimation and in-situ investigation of landslides are frequently used to identify possibly affected areas. Estimation of the actual landslide scarps, subsequent flow pathways of the moving mass, and potentially at-risk areas is highly uncertain because the toe of the failure surface is often covered by the material released during the landslide. This uncertainty is particularly substantial if thorough postevent surveys or on-site drilling investigations have yet to be conducted. The estimation of landslide volume based on only pre- and post-event digital elevation models is highly uncertain when the detailed height of the actual landslide failure surface is unknown. Accordingly, the development of quick and easy-to-use tools that can determine the approximate distribution of the final deposit, the associated endangered area, and the landslide failure surface remains crucial.

Key Words: landslide-prone area of high uncertainty, idealized curved surface, landslide failure surface and endangered area, assessment indicators

一、前言

邊坡災害防治規劃工作中，崩塌破壞面與其對應崩塌土砂量體為評估災害規模、影響範圍及後續整治規劃等的重要參考依據。一般狀況下，必須透過大量分佈且長期的現場監測可推估崩塌破壞面高程與範圍，然而因許多崩塌潛勢區域位於地形陡峻之山區，造成調查工作與監測系統建置受到限制，最終導致坡地防災、預警與減災規劃難以有效的進行。

除了現場監測系統建置具備一定難度外，甚至每一次的崩塌事件有可能由數塊崩塌滑動塊體組成。因而在防災規劃方面，面臨滑動塊體數與複合情境兩因素加乘下，有可能會

產生多重情境模擬需求。因此尋求一快速評估、操作簡單並可整合後續土砂運移行為數值模式之一系列分析方法，可大幅降低人力作業成本且可協助未來建置現場監測系統規劃設計，並於有限時間內提供可能崩塌破壞面、其對應崩塌量體與後續可能之影響範圍與最終土砂堆積分佈。

針對大規模崩塌潛勢範圍之劃定，現階段主要可分為兩種，(一) 現場調查：為目前最常實施之方法，其必須透過地質相關專家學者針對潛勢區域進行細部調查，瞭解其張力裂隙分佈、地質走向、微地形等特徵，最終依據調查結果研判可能崩塌與後續影響範圍，此方法的缺點為必須耗費大量的

[1] 國立成功大學水利及海洋工程學系
Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan

[2] 財團法人農業科技研究院
Agriculture Technology Research Institute, Hsinchu, Taiwan

* Corresponding Author. E-mail: n88085010@gs.ncku.edu.tw

人力和時間；(二) 衛星影像判識：為目前最節省人力和時間之方法，因目前遙測技術和無人機的高速發展，許多高解析度高精度航拍照和產製之地形資料（如 LiDAR-derived DEM）可協助推估崩塌潛勢範圍之劃定，而其缺點為若針對未發生崩塌或崩塌土體未完全滑動其後續影響範圍推估仍存在高度不確定性。Tang et al. (2020) 中也有提到若崩塌土體未完全滑動離開破壞面，只應用災害前後期數值地形資料相減所得之崩塌破壞面高程，作為驗證資料將低估位於覆土層之實際崩塌土體深度，因此發展可應用含有覆土層之災害前後期高程變化資料之驗證方法，將有效提升崩塌破壞面之推估精確性。

其中 Tai et al. (2020)、Jaboyedoff et al. (2020) 與 Tang et al. (2020) 都曾提及崩塌土砂量體對於土砂運移影響範圍推估扮演非常重要的角色。因此在發生崩塌後，是否可以在未進行詳細現場調查前快速評估可能崩塌土砂分佈與其造成影響範圍，對於防災應變和防減災規畫具有一定的急迫性和重要性。不論是經驗公式估算、災害前後期高程變化 (DEM of Difference, DoD) 或土砂運移數值模擬等，如能在災前或是災後第一時間，快速估算出合理的結果，對於相關土砂災害的防災整備與應變上將有莫大助益。

有鑑於此，本研究以 2022 年鵠鵠崙 (新北市-汐止區 D003) 大規模崩塌事件為例，應用 Wang et al. (2022) 精進之“基因演算-參考橢圓-理想破壞曲面法 (Genetic Algorithm Ellipse-Referenced Idealized Curved Surface, GA-ER-ICS)”搭配 Tai et al. (2019) 發展之二相流土砂運移行為數值模式，進行土砂量體估算及土砂運移影響範圍模擬分析，並以災害前後地形推估之高程變化資料作為驗證基準資料，此方式可快速分析崩塌量體、深度、面積、後續影響範圍與最終土砂堆積分佈，作為未來大規模崩塌潛勢區快速評估工具。

二、2022 年鵠鵠崙崩塌事件

1. 崩塌事件簡介

於 2022 年 10 月 17 日因尼莎颱風帶來大量降雨，造成位於新北汐止區東山里之鵠鵠崙 D003 大規模崩塌潛勢區域發生崩塌。國家災害防救科技中心 (2022) 提到其崩塌範圍長度約 300 m、寬約 110 m。且崩塌造成當地農路地基流失，以及 1 戶民宅傾斜，坡頂陷落約 2 m。崩塌土體進一步沿着支流河道最終堵塞於主河道之土石流潛勢溪流 (新北 DF197)。如圖 1 所示，2022 年鵠鵠崙 D003 大規模崩塌事件後之全景照片可見，崩塌土體現階段堵塞於下游 DF197 土石流潛勢溪流上，而部分崩塌土體 (覆土層) 仍停留於原邊坡上造成不易研判其確切崩塌破壞範圍，進而推估其可能崩塌量體時存在高度之不確定性。



圖 1 2022 年鵠鵠崙崩塌事件後現地狀況 (照片來源：國家災害防救科技中心，2023)

Fig.1 The current situation after the collapse of Huhulun-D003, 2022 (National Science and Technology Center for Disaster Reduction, 2023)

其中農村水保署 (臺北分署, 2022) 於災後 3 天已應用無人載具 (UAV) 產值地表高程資料 (digital surface model, DSM)，並經現場調查後研判崩塌面積與量體為 14,424 m² 及 103,800 m³，而堆積區域面積與土砂量體為 14,885 m² 及 131,000 m³。若應用此高程資料與災前 2014 年內政部所製作之 LiDAR-derived DEM 相減取得之堆積量體為 189,860m³ 與農村水保署 (臺北分署, 2022) 所研判之堆積量體約為 131,000 m³ 多了 45%。後續本研究為了減低堆積量體之偏差，將災後 DSM 中堆積範圍內之高程統一降低 3.5 m，最終所對應之崩塌量體為 131,400 m³。

如圖 2 為應用災害前後期數值地形資料分析之地形變化圖，圖 2 中紫色範圍為本研究模擬範圍；白色覆蓋範圍為本研究透過災後 UAV 正射影像所研判之崩塌與土砂運移以外之範圍；深藍至黃色顏色變化為災害前後期高程呈現負值範圍 (代表土砂侵蝕範圍)；黃褐色至深紫色顏色變化為災害前後期高程呈現正值範圍 (代表土砂堆積範圍)。由此災害前後地形高程差異圖 (圖 2) 可見，2022 年鵠鵠崙崩塌事件之影響範圍可初步研判由主 (東側) 與次 (西側) 滑動塊體導致。

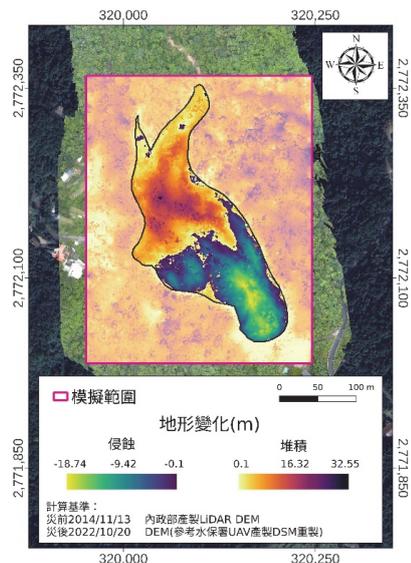


圖 2 2022 年鵠鵠崙事件前後地形高程變化

Fig.2 Changes of elevation before and after the landslide event of Huhulun-D003 in 2022

三、研究方法

透過 Tai et al. (2020)、Ko et al. (2021) 以及 Wang et al. (2022) 發展之 GA-ER-ICS 盡可能建置可能發生之情境 (調整起始搜尋點) 進行崩塌破壞面之推估, 並將對應之可能崩塌土體分佈作為後續土砂運移行為數值模式之起始條件。藉此兩數值模式可初步掌握可能崩塌土砂量體與後續影響範圍, 供邊坡防災規劃或應變提供參考依據。

1. 崩塌破壞面推估

理想曲面法的發展初衷為缺乏詳細現場調查前提下, 如確切崩塌破壞面分佈、崩塌土砂量體與範圍等, 仍可快速評估一可能崩塌破壞面與其對應可能崩塌土砂分佈。GA-ER-ICS 的發展史, 最早由 Tai et al. (2020) 提出由崩塌塊體主軸與側向軸兩種不同曲率建置一理想曲面 (Idealized Curved Surface) 近似實際崩塌破壞面, 此方法僅需要災前數值地形資料 (DEM)、崩塌破壞面範圍與實際崩塌量體, 即可快速推估一理想崩塌破壞面曲面; Ko et al. (2021) 則是參考 Taylor et al. (2018) 應用橢圓作為實際崩塌破壞面的分類方法, 透過放大、縮小、旋轉與平移“參考橢圓”, 再搭配 Guzzetti et al. (2009) 所提出之崩塌面積-體積統計迴歸關係, 可建置大量候選理想曲面, 進而可大幅度降低人為操作的偏差。因此單一模擬案例, 都必須先行建置高達 10,633 個起始搜尋點對應之候選理想曲面, 最終透過評估指標篩選最合適之理想曲面, 此方式最大缺點為須耗費龐大的計算資源。為了提升運算效率 Wang et al. (2022) 整合了基因演算法, 將原本運算耗時至 20 小時縮短至 13.5 分鐘, 此整合對於防災應變規劃則是非常有益。

其中 Tai et al. (2020) 透過理想曲面法 (ICS) 並搭配土砂運移行為數值模式 (Tai et al., 2019) 回推 2009 年小林村大規模崩塌事件, 由災後衛星影像與所推估之最終土砂運移路徑 (流動深度大於 1 公分者) 比較得知其偏差率僅坐落於 9.54%, 此結果也表示應用理想崩塌曲面法所推估之可能崩塌土砂量體作為土砂運移行為模式起始條件具備一定參考價值。

圖 3 為本研究主要探討崩塌類型之剖面示意圖, 因 GA-ER-ICS 在建置理想曲面前, 必須提供 4 個起始搜尋點, 分別為上邊界點 (圖 3 中粉紅點): 崩塌事件之崩崖位置; 下邊界點 (圖 3 中藍至紅點): 崩塌破壞面趾部; 左右邊界點: 由上下邊界點距離二分之一處之可能崩塌範圍外圍。圖 3 中黃點為本研究設定之侵蝕區參考點, 後續於本文“評估指標設計”中將說明如何計算其均方根。

因本研究主要探討崩塌情境為破壞面趾部被覆土層 (圖 3 中填充斜線範圍) 所掩埋 (無明確位置), 如圖 3 中空圈紅圈位置。使得在情境設計時必須先應用災前數值地形研判原邊坡坡趾位置或河岸位置, 往崩塌冠部方向設置初始下邊界點, 本研究建議其水平距離必須或至少為崩塌冠部至原邊坡坡趾處之三分之一作為依據。此距離為本研究透過災後正射影像發現原坡趾處至破壞面裸露區的水平距離。

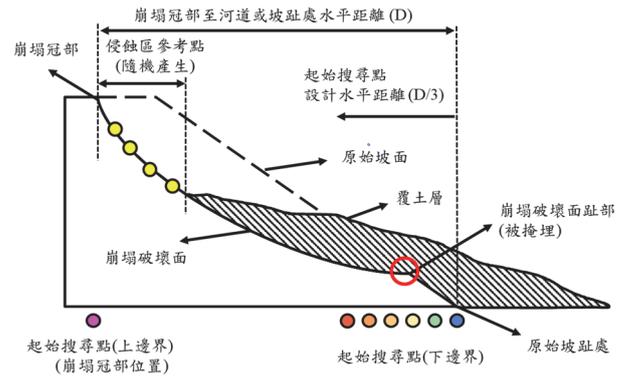


圖 3 情境設計剖面示意圖

Fig.3 Schematic of scenarios

雖然可透過災害前後地形變化差異值快速估算可能崩塌土體深度分佈與其對應之量體, 若崩塌土體未完全滑動離開崩塌破壞面或崩塌破壞面上含有覆土層狀況下, 直接視地形差異值為崩塌土體深度將存在高度不確定性。除此, 由地形差異圖 (圖 2) 可見, 2022 年鶴鳴崙崩塌事件有 2 處崩塌滑動塊體, 因此本研究分別應用 GA-ER-ICS 進行主與次滑動塊體之崩塌破壞面推估。

本研究應用災前數值地形資料 (2014 年 LiDAR-derived DEM) 作為 GA-ER-ICS 數值地形資料, 因主要探討崩塌破壞面趾部被掩埋之情況, 因此在給定 GA-ER-ICS 之起始搜尋點 (一組為 4 個, 上下左右邊界點) 時, 必須由災前數值地形資料研判其原邊坡坡趾或河岸處往崩塌冠部方向部設下邊界點, 而左右起始搜尋點之設定條件則是沿着嶺線或崩塌塊體之左右側, 上邊界起始搜尋點為固定於崩塌冠部。如圖 4(a) 為整體研究區域以及起始點分佈圖所示, 粉紅色點為位於崩塌冠部之上邊界起始搜尋點, 由藍色至紅色變化代表不同起始搜尋點之下左右邊界點。當具備上下左右起始搜尋點後, 即可透過 GA-ER-ICS 自動產生參考橢圓 (圖中黑虛線) 進行演算。針對本研究探討案例, 初步設定之起始搜尋點間距為 10 m, 加上由圖 3 說明本研究設計起始搜尋點的水平距離為原坡趾至崩塌冠部距離之三分之一。因此, 圖 4(b) 為主滑動塊體總水平距離為 270 m, 所設計的起始搜尋點數為 9 組顏色點與虛黑線之對應參考橢圓分佈; 而圖 4(c) 為次滑動塊體總水平距離為 120 m, 所設計的起始搜尋點數為 4 組顏色點與虛黑線之對應參考橢圓分佈。

因 GA-ER-ICS 於給定起始搜尋點後, 將自動產生參考橢圓並將其假設為參考崩塌面積, 後續透過 Guzzetti et al. (2009) 回歸 677 場崩塌事件之崩塌面積與量體之經驗式, 可得知所對應之可能崩塌量體作為建置 GA-ER-ICS 之深度參考依據。Guzzetti et al. (2009) 所回歸之經驗式為

$$V_L = 0.074 \times A_L^{1.450}$$

並與內文中提到其中 677 筆崩塌事件中 643 筆 (可視為 95% 信賴區間) 介於經驗式之 $0.5 * V_L$ 至 $7.0 * V_L$ 之間。因具備農村水保署 (臺北分署, 2022) 研判之可能崩塌量體 ($=103,800 \text{ m}^3$), 故本研究 GA-ER-ICS 搜尋崩塌量體範圍可大幅度縮小, 最終本研究假設其範圍自最小之 $1.0 * V_L$ 搭配起始搜尋點 9 之 $17,274 \text{ m}^3$ (可能崩塌量體約

0.15 倍) 至最大之 $5.0 * V_L$ 搭配起始搜尋點 1 之 252,266 m³ (可能崩塌量體約 2.5 倍)。

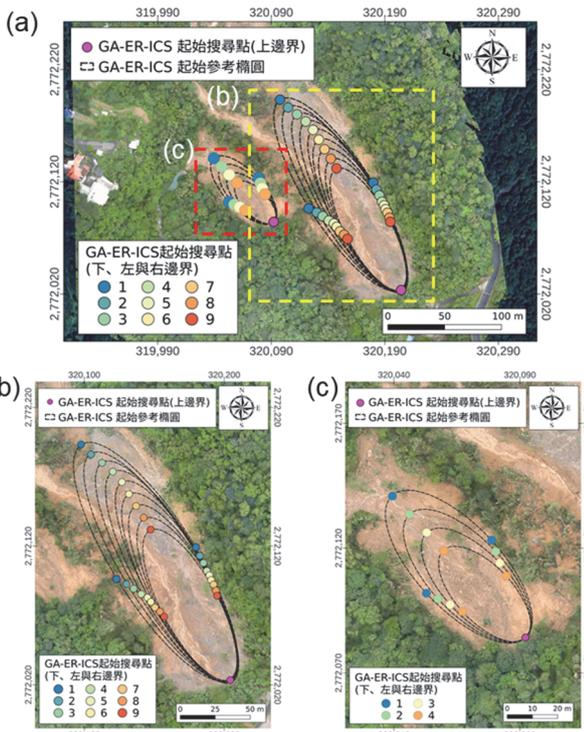


圖 4 GA-ER-ICS 起始搜尋點與起始參考橢圓 (a) 整體; (b) 主滑動塊體與; (c) 次滑動塊體

Fig.4 Distribution of GA-ER-ICS initial search points (a) whole; (b) main scarp; (c) secondary scarp

此為了比較已知與未知崩塌量體前提下所建置之 GA-ER-ICS 成效，本研究設計 6 種崩塌量體參考依據，包含 (1) 透過農村水保署 (臺北分署, 2022) 研判之崩塌量體; 以及本研究設計 5 種災害規模等級, (2) $1.0 * V_L$ 、(3) $2.0 * V_L$ 、(4) $3.0 * V_L$ 、(5) $4.0 * V_L$ 以及 (6) $5.0 * V_L$ 。因 GA-ER-ICS 參考橢圓面積受到起始搜尋點產生之起始橢圓面積不同，如圖 4(b) 黑色虛線可見起始搜尋點 1 所對應之起始參考橢圓面積較大，而起始搜尋點 9 所對應之起始參考橢圓面積較小，最終全部崩塌量體依據羅列於表 1。

表 1 崩塌量體依據一欄表

Table 1 Values of the reference landslide volume

起始搜尋點	依據崩塌量體(m ³)				
	$1.0 * V_L$	$2.0 * V_L$	$3.0 * V_L$	$4.0 * V_L$	$5.0 * V_L$
1	50,453	100,906	151,359	201,813	252,266
2	41,328	82,656	123,984	165,312	206,640
3	36,399	72,797	109,196	145,594	181,993
4	32,918	65,836	98,754	131,672	164,590
5	28,358	56,715	85,073	113,430	141,788
6	26,220	52,440	78,661	104,881	131,101
7	22,434	44,867	67,301	89,735	112,168
8	19,861	39,722	59,583	79,444	99,305
9	17,274	34,547	51,821	69,094	86,368

2. 後續土砂運移行為模擬

為了推估崩塌土砂後續影響範圍以及最終堆積深度分佈，本研究應用 Tai et al. (2019) 發展之土砂運移行為模式，此模式主要優勢為所需要輸入之參數僅有 6 種，包含起始固相與液相體積濃度 ϕ^s, ϕ^f 、底床摩擦角 δ_b 、交互作用係數 c_D 、類雷諾數 N_R 與液相阻尼係數 θ_b^f 。其中 Ma et al. (2022) 藉由改變間隙流體中細顆粒體積濃度，回歸土砂運移行為模式需要的參數關係式。透過災後影像以及相關資料得知崩塌發生時其崩塌土砂屬於未飽和狀態。因此假設細顆粒體積濃度為 0.145 作為依據，而 Ma et al. (2022) 設定小林村崩塌事件時應用之細顆粒體積濃度為 0.13125。最終本研究所使用之參數組為起始固相體積濃度 $\phi^s = 0.55$ ；起始液相體積濃度 $\phi^f = 0.45$ ；濃度比 = 0.56 (液相 = 1,464 kg/m³，固相 = 2,600 kg/m³)；交互作用係數 = 8.0；液相阻尼係數 = 5.8；類雷諾數 = 178.0。除此，本研究也參考 Scheidegger (1973) 提出之“崩塌土砂量體-固相摩擦角”經驗式，由農村水保署 (臺北分署, 2022) 研判之可能崩塌土砂量體 (= 103,800 m³) 為依據，所計算之建議固相摩擦角 δ_b 介於 26.13° 至 43.99°，本研究應用其中值 (= 35°)。最終將上述所使用到之參數組合羅列於表 2 中。

表 2 土砂運移行為參數一欄表

Table 2 Values of the parameters used in computation

參數	值	備註
ϕ^s, ϕ^f	0.55, 0.45	固相與液相體積濃度
δ_b	35°	底床摩擦角 參考 Scheidegger (1973)
c_D	8.0	交互作用係數
N_R	178	類雷諾數
θ_b^f	5.8	液相阻尼係數

針對土砂運移行為模式部分，首先模擬停止條件是依據 RAMMS 手冊 (2017) 透過模擬多起歷史案例建議應用動量百分比 (平均動量/時間序列最大平均動量) 介於 1%~10%，而本研究則是應用其中值 (= 5%)。另土砂影響範圍之劃定方式，則參考 Hürlimann et al. (2008) 與 Rickenmann (2005) 提出應用土砂流動深度與速度作為土石流風險地圖分級之依據。因此採用運移流程中流動深度大於 0.1 m 且流速大於 0.1 m/s 的範圍作為土砂影響的範圍。

3. 評估指標設計

為了可從眾多候選情境中挑選出最適的 GA-ER-ICS，本研究分別針對推估崩塌破壞面以及模擬後續土砂運移行為結果規劃 3 種評估指標，包含侵蝕區參考深度均方根；另為堆積區參考深度均方根與其影響範圍偏差率。圖 5 為本研究設計評估指標所需之基本資料，黑虛線為災害前後高程降低大於 0.1 m 範圍，且於此範圍內之黃點為侵蝕區參考點分佈；紅虛線為災害前後高程擡升大於 0.1 m 範圍，且於此範圍內之螢光綠點為堆積區參考點分佈；黑紅虛線與紅虛線涵蓋範圍將作為影響範圍偏差計算之基準。

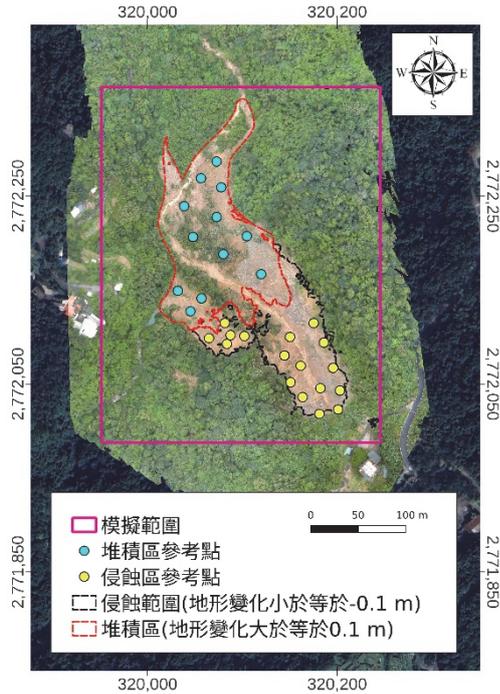


圖 5 侵蝕與堆積區參考點分佈

Fig.5 Distribution of assessment indicators

(1) 侵蝕區參考深度均方根 (RMS_{ICS})

由災害前後期數值地形資料差異可得知侵蝕範圍 (圖 2 之黑框) 與深度分佈 (圖 2 之深藍至黃色顏色變化)。針對主與次滑動塊體, 本研究於崩塌深度大於等於 0.1 m 範圍 (圖 5 之黑框) 內設置侵蝕區參考點 (圖 5 之黃點)。針對設置侵蝕參考點位置原則為最大崩塌深度位置、以及經災後正射影像拍攝之地表裸露區域, 最終本研究區域所選擇之總數為 12 個侵蝕參考點。並取得此位置上之崩塌深度作為參考依據, 其計算式為

$$RMS_{ICS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_{X,Y}^{ref} - d_{X,Y}^{ICS})^2}, \quad (1)$$

式中 $d_{X,Y}^{ref}$ 與 $d_{X,Y}^{ICS}$ 代表由災害前後期侵蝕區參考點位置上之實際崩塌深度與 GA-ER-ICS 推估之崩塌深度、 n 為分析之總數量。參考深度偏差 (RMS_{ICS}) 趨近於 0 代表理想崩塌曲面所對應之崩塌破壞面越貼合實際崩塌破壞面。

(2) 堆積區參考深度均方根 (RMS_{fp})

由災害前後期數值地形差異可得知崩塌後土砂堆積深度大於 0.1 m 範圍 (圖 5 之紅框), 與建置侵蝕區參考點之方式相同, 於堆積區內設置堆積區參考點 (圖 5 之藍點)。針對選定 4×3 個堆積參考點位置原則為最大堆積深度位置、經災後正射影像拍攝之地表裸露區域以及本研究關注之崩塌破壞面被掩埋之位置, 最終本研究區域所選擇之總數為 12 個堆積參考點。並取得該位置上之堆積深度作為本研究使用之土砂運移模式推估之最終土砂分佈為參考依據, 其計算式與式

(1) 類似

$$RMS_{fp} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_{X,Y}^{ref} - d_{X,Y}^{fp})^2}, \quad (2)$$

式中 $d_{X,Y}^{ref}$ 與 $d_{X,Y}^{fp}$ 為堆積區參考點位置上之實際土砂堆積深度與本研究應用土砂運移模式推估之最終土砂堆積深度、及 n 為分析之總數量。當堆積區參考深度均方根趨近於 0 時, 代表所推估之最終土砂堆積分佈與應用災害前後期地形資料得知堆積分佈一致。

(3) 影響範圍偏差率 (Λ_{fp})

由災後衛星或無人載具所拍攝之正射影像, 可快速研判地表裸露範圍, 因此本研究應用農村水保署 (臺北分署, 2022) 於災後 3 天所拍攝之 UAV 正射影像為基本資料, 所研判之地表裸露範圍 (圖 5 之) 作為運移範圍偏差率計算之依據範圍 A_{case} 。

因土砂運移模式可輸出指定時間間距之流動深度與流速, 本研究將土砂流動深度大於 0.1 m 與流速大於 0.1 m/s 標示作為本研究推估之土砂影響範圍, 後續本研究以 A_{sim} 表示。參考 Wang et al. (2022) 之評估法, 其路徑偏差率計算式如:

$$\Lambda_{fp} = \frac{|A_{case} - A_{case\sim sim}| + |A_{sim} - A_{case\sim sim}|}{A_{case}} \quad (3)$$

當此偏差率趨近於 0 時, 代表所推估之影響範圍與應用災後 UAV 正射影響辨識之運移路徑越相似。

四、結果與討論

針對最終如何篩選最合適結果, 本研究將先行應用 GA-ER-ICS 推估主與次崩塌滑動塊體, 再透過圖 5 中侵蝕區參考點 (黃點) 篩選合適之 GA-ER-ICS。經過交叉配對表現不錯的主與次滑動塊體, 再應用土砂運移行為數值模式推估其對應之堆積土砂分佈以及影響範圍。最終應用圖 5 中堆積區參考點 (藍點) 以及圖 5 中地表裸露範圍 (黑紅虛線與紅虛線涵蓋範圍) 評估最合適之組合。

1. 崩塌破壞面推估結果

透過圖 4(b) 主滑動塊體 9 組與圖 4(c) 次滑動塊體 4 組起始搜尋點搭配 6 種災害規模等級建置 GA-ER-ICS, 共計將推估 54 個主滑動塊體與 24 個次滑動塊體之候選 GA-ER-ICS。

圖 6 為候選 GA-ER-ICS 透過侵蝕區參考點 (圖 5 之黃點) 計算之均方根分析圖, 分別左為主滑動塊體結果與右為次滑動塊體結果。圖 6 中黑色虛線為本研究訂定之主與次滑動塊體篩選門檻值, 其大小設定依據為個別滑動塊體中最大崩塌深度之 35%。因此, 主滑動塊體之門檻值為 6.56 m ($18.74 \times 0.35\text{ m}$) 次滑動塊體為 2.79 m ($7.98 \times 0.35\text{ m}$)。經由此門檻值篩選 78 個候選 GA-ER-ICS 中, 分別 16 個 (主) 與 3 個 (次), 被篩選作為後續土砂運移行為模式模擬之起始土砂分佈組合。

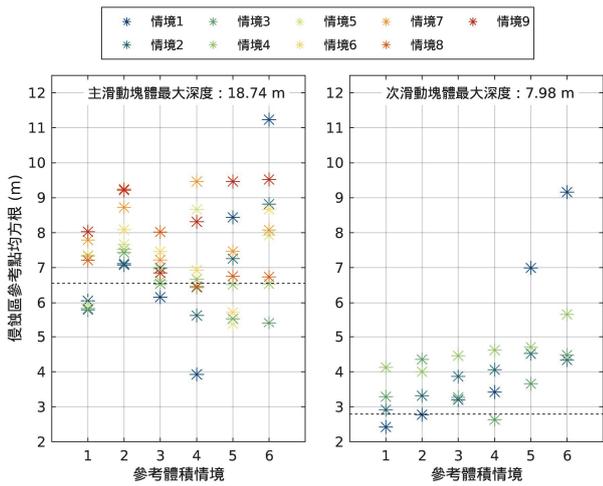


圖 6 GA-ER-ICS 之評估指標結果

Fig.6 Results of erosion area indicators

2. 後續土砂運移行為模擬結果

經過侵蝕區參考點評估後選取之情境，本研究共篩選主滑動塊體 16 個以及次滑動塊體 3 個進行交叉組合，其對應之組合編號及崩塌量體將羅列於表 3 中。後續由 48 個 GA-ER-ICS 組合推估最終土砂分佈與影響範圍。搭配圖 5 中堆積區參考點（螢光綠點）以及地表裸露區域（黑紅虛線與紅紅虛線涵蓋範圍）作為篩選最合適的 GA-ER-ICS 基準資料。

圖 7 為本研究整體推估最終土砂分佈與影響範圍之分析圖，(a) 為經侵蝕區參考點評估後選取之主與次滑動塊體對應之侵蝕區參考點均方根；(b) 為最終土砂分佈之均方根結果，可見約 35 組（約 72% 模擬結果）之結果介於 6.38~7.08 m，僅有少數之 13 組（約 28% 模擬結果）均方根大於 7.40 m；

表 3 本研究整體表現分析一欄表

Table 3 Overall Performance Analysis of the Study

編號	最終推估量體 (m ³)	堆積深度均方根 (m)	路徑偏差率 (%)	編號	最終推估量體 (m ³)	堆積深度均方根 (m)	路徑偏差率 (%)	編號	最終推估量體 (m ³)	堆積深度均方根 (m)	路徑偏差率 (%)
主01+次1	73,126	6.89	24	主01+次2	71,772	6.97	27	主01+次3	73,466	6.90	24
主02+次1	73,126	6.87	24	主02+次2	71,773	6.91	26	主02+次3	73,466	6.87	24
主03+次1	73,126	6.59	26	主03+次2	71,772	6.61	29	主03+次3	73,466	6.58	27
主04+次1	73,126	6.73	28	主04+次2	71,772	6.76	31	主04+次3	73,466	6.73	29
主05+次1	64,929	6.67	28	主05+次2	63,576	6.71	31	主05+次3	65,270	6.68	28
主06+次1	45,567	7.46	34	主06+次2	44,214	7.52	37	主06+次3	45,908	7.49	34
主07+次1	94,425	6.55	20	主07+次2	93,071	6.58	23	主07+次3	94,765	6.54	21
主08+次1	72,787	6.63	27	主08+次2	71,434	6.66	30	主08+次3	73,128	6.62	27
主09+次1	65,381	6.93	31	主09+次2	64,028	6.96	34	主09+次3	65,722	6.92	31
主10+次1	34,018	8.26	29	主10+次2	32,665	8.35	31	主10+次3	34,359	8.27	29
主11+次1	85,196	6.38	55	主11+次2	83,843	6.38	58	主11+次3	85,537	6.38	29
主12+次1	74,476	7.03	43	主12+次2	73,123	7.08	46	主12+次3	74,817	7.03	43
主13+次1	59,321	7.48	26	主13+次2	57,968	7.52	28	主13+次3	59,662	7.48	26
主14+次1	52,014	7.68	28	主14+次2	50,661	7.74	31	主14+次3	52,354	7.68	28
主15+次1	105,010	6.71	20	主15+次2	103,657	6.76	23	主15+次3	105,351	6.70	20
主16+次1	91,611	6.85	20	主16+次2	90,258	6.91	23	主16+次3	91,952	6.86	20

為了進一步探討取得崩塌土砂分佈之難易度對於最終結果之影響，本研究最終以 3 種情境進行總結，包含情境 A

與 (c) 為路徑偏差率計算結果，其中約 32 組（約 66% 模擬結果）之路徑偏差率小於 30%。

所對應之各組合編號、最終推估量體、堆積深度均方根以及路勁偏差率羅列於表 3 中。可發現編號“主 07+次 3”所對應之結果表現得最佳，其堆積區參考點均方根為 6.54 m 佔整體之第 3 順位且影響範圍偏差率為 21% 佔整體之第 6 順位，因此被選為本研究推估之最合適候選 GA-ER-ICS。

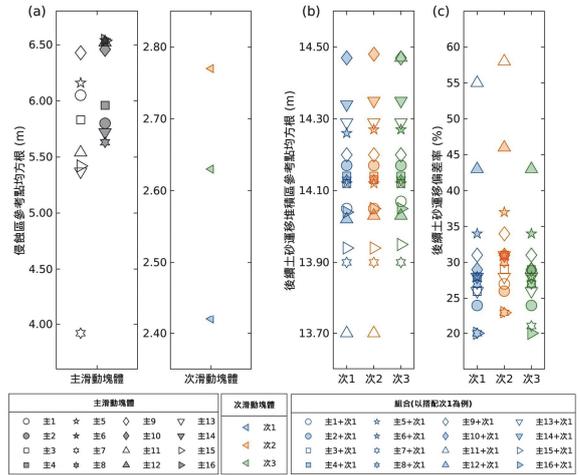


圖 7 本研究整體表現分析圖 (a) 崩塌土砂深度均方根 (左：主滑動塊體；右：次滑動塊體)；(b) 堆積土砂深度均方根；(c) 路徑偏差率

Fig.7 Overall Performance Analysis of the Study (a) RMS of the depth of landslide (left: main sliding block; right: secondary sliding block); (b) RMS of the depth of accumulation sediment; (c) the deviation of the flow paths

為直接應用災害前後期崩塌範圍內之高程變化，其對應之崩塌量體為 73,125 m³；情境 B 為透過農村水保署（臺北分署，

2022) 災後調查研判之崩塌量體 ($=103,800 \text{ m}^3$) 作為基準建置 GA-ER-ICS, 並應用相同的土砂運移參數組 (如表 2) 推估最終土砂堆積分佈以及影響範圍。情境 C 則是前述篩選之最合適 GA-ER-ICS 推估結果, 其主滑動塊體為 $3.0 * V_L$ 搭配起始搜尋點 1 與次滑動塊體 $3.0 * V_L$ 搭配起始搜尋點 1 組成, 所對應之崩塌量體為 $94,765 \text{ m}^3$ 。

圖 8 為本研究最終案例探討之比較結果圖, 第一列為土砂運移行為數值模式之起始土砂分佈, 包含 (a) 為直接應用災害前後期相減取得之崩塌土砂分佈、(b) 為應用農村水保署 (臺北分署, 2022) 災後調查研判之崩塌量體建置 GA-ER-ICS 所推估之崩塌土砂分佈、(c) 則是本研究篩選最合適之 GA-ER-ICS 組合之崩塌土砂分佈; 第二列為推估之最終土砂分佈, 黑虛線為各情境之起始崩塌土砂範圍, 可發現三者最終土砂堆積分佈於其起始崩塌土砂範圍 (黑虛線) 之趾部都出現堆積的現象, 此現象與災後調查狀況一致; 第三欄中紅框為本研究推估之影響範圍, 黃線為災後正射影像研判之地表裸露範圍, 因此可見三者都表現得不錯。

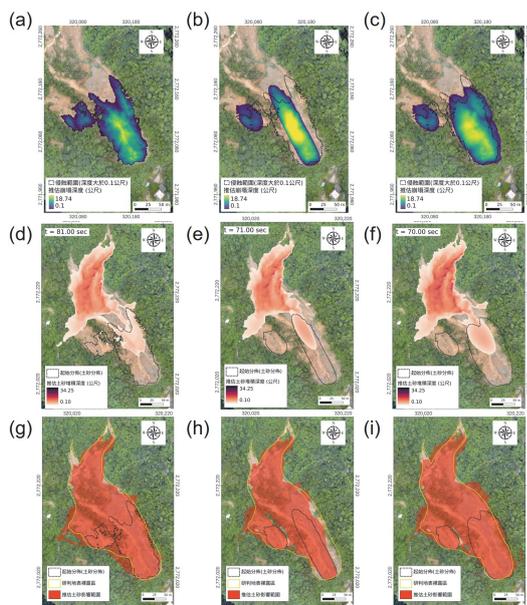


圖 8 不同崩塌土砂分佈之情境 A(a,d,g)、情境 B(b,e,h) 以及情境 C(c,f,g) 之結果圖; (a-c) 可能崩塌土體分佈, (d-f) 最終土砂堆積土砂分佈與 (g-i) 其影響範圍結果圖,

Fig. 8 Corresponding results for scenarios A(a,d,g), B(b,e,h), and C(c,f,g). (a-c) Distribution of potentially landslide; (d-f) Final stage of landslide distribution; (g-i) Endanger area distribution

最終透過本研究設定之堆積區參考點 (圖 5 之螢光綠點), 取得其深度均方根分別為 10.68、10.67 與 6.55 m; 而透過比較地表裸露範圍 (圖 8 之黃框) 計算影響範圍偏差率得知三者分別為 20%、24% 與 20%。由上述兩種評估指標得知, 若依據農村水保署 (臺北分署, 2022) 所研判之崩塌量體 ($=103,000 \text{ m}^3$) 建置 GA-ER-ICS (情境 B), 因本研究主要探討狀況為崩塌發生後, 覆土層掩埋了破壞面趾部, 因此在

研判崩塌量體上存在高度不確定性。所以最終由本研究所設計的不同規模災害中候選出最合適的 GA-ER-ICS (情境 C) 表現得最靠近實際土砂堆積分佈。

五、結 論

如何於災害發生後或未進行詳細災後調查前, 可快速推估崩塌土砂分佈與後續影響範圍評估之工具將對防災規劃作業提供助益。雖然本研究使用之 GA-ER-ICS 應用理想曲面方式近似實際崎嶇崩塌破壞面, 於未知實際崩塌破壞面高程分佈前提下, 應用 GA-ER-ICS 搭配土砂運移行為模式推估土砂影響範圍也具備一定參考價值。雖然本研究使用之土砂運移行為數值模式已大致可重現 2022 年鵠鵠崙崩塌事件之可能崩塌土砂分佈以及其後續土砂影響範圍, 而尚未考慮冲刷堆積造成地形變化對於運移行為之影響, 這些都是本研究團隊尚在努力的目標與方向。

因此透過本研究設計之情境以及評估指標, 可快速於諸多候選 GA-ER-ICS 中, 篩選最合適的 GA-ER-ICS 代表探討之案例。其中, 所使用之基本資料僅有災害前後期數值地形資料與災後 UAV 正射影像, 由災害前後期數值地形得知 2022 年鵠鵠崙崩塌事件實際崩塌與最終堆積土體之深度變化。

經最終比較不同起始崩塌土砂分佈所推估之堆積土砂分佈及影響範圍, 可見表現最佳的結果為情境 C 由 GA-ER-ICS 推估之“主 07+次 3”組合, 其崩塌量體分別為 $94,765 \text{ m}^3$, 與農村水保署 (臺北分署, 2022) 所研判之 $103,800 \text{ m}^3$, 雖然存在 8.7% 的偏差, 但其最終堆積土砂分佈與實際狀況最相符。另情境 A 及 B 於影響範圍偏差表現也不錯, 分別為 20% 及 24%, 但其堆積區參考點均方根相較於情境 C 差了 4.13 及 4.12 m。

誌謝

感謝農業部農村發展及水土保持署提供研究計畫經費 (創新研究計畫編號: ARDSWC-112-048), 謹此致謝。

參考文獻

- [1] 農業部農村發展及水土保持署台北分署 (2022). 111 年度鵠鵠崙地區潛在大規模崩塌調查監測計畫。 (Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation, MOA (2022). *Investigation and Mitigation Strategies planning for the Large Scale Landslide on Gugulun area (2020)*, Taipei Branch Office. (in Chinese))
- [2] 李哲宇、陳振宇、高百毅、戴義欽 (2023), 「應用橢圓-理想曲面法與簡易土石流模式於大規模崩塌之快速評估-以大規模崩塌潛勢區域 (新北市-汐止區-D003) 為例」, 中華民國地質學會 112 年暨學術研討會。(Li, Z.Y., Chen, Y.C., Kao, B.Y., and Tai, Y.C. (2023). “Application

- of the Ellipse Reference Surface Method and a Simple Debris Flow Model for Rapid Assessment of Large-Scale Landslides - A Case Study of a Large-Scale Landslide Potential Area (D-003) in Xizhi District, New Taipei City.” *2023 Annual Conference of Chinese Taipei Geophysical Society Located in Taipei*, May 17th-18th, Taoyuan City, Taiwan. (in Chinese)
- [3] 柯其均、王福杰、王子睿、戴義欽 (2020), 「沙堆的週期性顆粒崩塌與坡面穩定性分析」, 第 18 屆大地工程學術研究討論會 (Geotech2020)。(Ko, C.J., Wong, H.K., Wang, Z.R., and Tai, Y.C. (2020). “The periodic particle collapse of sand piles and stability analysis.” *Proceedings of the 18th Conference on Current Researches in Geotechnical Engineering in Taiwan*, September 1st-3rd, 2020, Kenting, Pingtung, Taiwan. (in Chinese))
- [4] 國家災害防救科技中心 (2022)·111 年度豪雨及颱風事件災情彙整報告。(National Science and Technology Center for Disaster Reduction. (2022). Report on Heavy Rainfall and Typhoon Disasters in 2022. (in Chinese))
- [5] Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Rossi, M., and Valigi, D. (2009) “Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy.” *Earth and Planetary Science Letters*, 279(3-4), 222-229.
- [6] Hürlimann, M., Rickenmann, D., Medina, V., and Bateman, A. (2008). “Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment.” *Engineering Geology*, 102(3-4), 152-163.
- [7] Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Couture, R., Locat, J., and Locat, P. (2004). “Toward preliminary hazard assessment using DEM topographic analysis and simple mechanical modeling by means of sloping local base level.” *Landslides evaluation and stabilization. Balkema*, 199-205.
- [8] M. Jaboyedoff, R. Couture, and P. Locat. (2009). “Structural analysis of Turtle Mountain (Alberta) using digital elevation model: toward a progressive failure.” *Geomorphology*, 103(1), 5-16.
- [9] Jaboyedoff, M., Carrea, D., Derron, M.H., Oppikofer, T., Penna, I.M., and Rudaz, B. (2020). “A review of methods used to estimate initial landslide failure surface depths and volumes.” *Engineering Geology*, 267, 105478.
- [10] Kuo, C.Y., Tai, Y.C., Chen, C.C., Chang, K.J., Siau, A.Y., Dong, J.J., and Lee, C.T. (2011). “The landslide stage of the Hsiaolin catastrophe: simulation and validation.” *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(F4).
- [11] Ko, C.J., Wang, C.L., Wong, H.K., Lai, W.C., Kuo, C.Y., and Tai, Y.C. (2021). “Landslide Scarp Assessments by Means of an Ellipse-Referenced Idealized Curved Surface.” *Frontiers in Earth Science*, 9, 862.
- [12] Ko, C.J., Chen, P.C., Wong, H.K., and Tai, Y.C. (2021). “MoSES_2PDF: A GIS-Compatible GPU-accelerated High-Performance Simulation Tool for Grain-Fluid Shallow Flows.” arXiv preprint arXiv:2104.06784.
- [13] Ma, C.Y., Ko, C.J., Wong, H.K., and Tai, Y.C. (2022). “Modeling three-phase debris flows in terrain-following coordinate system and its GPU computation with CUDA structure.” *Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering*, 34(7). (in Chinese)
- [14] RAMMS: Debris Flow User Manual. (2017). SLF/WSL: Zurich, Switzerland, 18-116.
- [15] Reid, M.E., Christian, S.B., Brien D.C., and Henderson, S. (2015). “Scoops3D-software to analyze three-dimensional slope stability throughout a digital landscape.” *US Geological Survey Techniques and Methods*.
- [16] Rickenmann, D. (2005). “Hangmuren und Gefahrenbeurteilung - Kurzbericht für das Bundesamt für Wasser und Geologie.” Unpublished report, Universität für Bodenkultur, Wien, und Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 18.
- [17] Scheidegger, A.E. (1973). “On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides.” *Rock mechanics*, 5(4), 231-236.
- [18] Tai, Y.C., Heß J., and Wang, Y. (2019). “Two-Phase Debris Flow over Rugged Topography: Modeling and Numerical Simulation.” *Journal of Geophysical Research - Earth Surface*, 124, 305-333.
- [19] Tai, Y.C., Ko, C.J., Li, K.D., Wu, Y.C., Kuo, C.Y., Chen, R.F., and Lin, C.W. (2020). “An idealized landslide failure surface and its impacts on the traveling paths.” *Frontiers in Earth Science*, 8, 313.
- [20] Tang, C., Tang, J., van Westen, C.J., Han, J., Mavrouli, O., and Tang, C. (2020). “Modeling landslide failure surfaces by polynomial surface fitting.” *Geomorphology*, 368, 107358.
- [21] Taylor, F.E., Malamud, B.D., Witt, A., and Guzzetti, F. (2018). “Landslide shape, ellipticity and length-to-width ratios.” *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(15), 3164-3189.
- [22] Wang, C.L., Ko, C.J., Wong, H.K., Pai, P.H., and Tai, Y.C. (2022). “An Approach for Preliminary Landslide Scarp Assessment with Genetic Algorithm (GA).” *Water*, 14(15), 2400.

2024 年 03 月 15 日 收稿

2024 年 07 月 08 日 修正

2024 年 09 月 18 日 接受