

# 應用橢圓-理想曲面法與簡易土石流模式 於鵠鵠崙大規模崩塌土體運動型態之探討

李哲宇<sup>1 2)\*</sup>、陳振宇<sup>2)</sup>、高百毅<sup>2)</sup>、戴義欽<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> 財團法人農業科技研究院，300110 新竹市香山區大湖路 51 巷 1 號

<sup>2)</sup> 行政院農業委員會水土保持局技術研究發展小組，54044 南投縣南投市中興新村光華路 6 號

<sup>3)</sup> 成功大學水利及海洋工程學系，70101 台南市東區大學路 1 號

\* 通訊作者，E-mail: asdfghj544@mail.swcb.gov.tw

## 摘要

降雨或地震所引致之大規模崩塌災害，所產生巨量土體可能進一步轉換成土石流，其土砂運移過程亦可能阻塞河道形成堰塞湖，除形成迴水導致上游淹水外，一旦堰塞湖潰決更將造成下游受到洪水波衝擊等二次災害。以新北市汐止區鵠鵠崙大規模崩塌潛勢區(新北市-汐止區-D003)為例，因 2022 年東北季風及尼莎颱風之共伴效應與連日豪雨影響下，其邊坡土壤含水量增加進而產生崩塌事件，該崩塌土體堆積於下方土石流潛勢溪流(新北 DF197)河道上，造成上游有蓄水現象且減少溪流通洪斷面。因大規模崩塌事件之崩塌深度與量體於災前不易判釋，對於如何事前評估可能的崩塌深度、量體、及崩後土砂運移情形，仍亟待進一步研究。為快速評估大規模崩塌之土體與其運移影響範圍，本研究分別利用災害前之 HOST 地圖及災後崩塌處選定數個地表特徵點，使用橢圓-理想曲面法(ICS)推估可能最大與平均之崩塌深度、崩塌量體及面積；再由災後 UAV 產製 DSM 與災害前 DEM 之地形變異成果(DoD)作為驗證資料，並進行崩塌參數比對。再者為瞭解崩塌後土體運動型態，本研究應用水土保持局 BigGIS 平台內建簡易土石流模式(SDF model)進行崩塌土砂運移模擬，由現地材料源型態與體積濃度，探討材料參數並進行土體運動型態模擬試驗，進一步將地形變異(DoD)推估之平均崩塌深度，作為土砂運移模擬的材料參數，並以災害後遙測影像及災後 DSM 作為驗證比對。結果顯示，利用橢圓-理想曲面法(ICS)同時搭配簡易土石流模式(SDF model)於鵠鵠崙大規模崩塌事件，可快速推估崩塌之土砂量體、深度、面積、及崩塌後土砂運移之影響範圍，其成果與實際情形相近。其可作為各大規模崩塌潛勢區可能發生之土體破壞情境快速評估工具，並提供疏散避難規劃等防救災應變參據。

## 緒言

2022 年新北市汐止區鵠鵠崙地區受尼莎颱風及連日豪雨影響，發生大規模崩塌事件，造成上方農路地基流失及下方溪流通洪斷面減少。

對於崩塌事件災後立即影響範圍及相關土體參數調查上相對取得不易，常以經驗公式、航遙測影像或無人載具等方式評估。

其中對大規模崩塌事件之土砂量體估算，在崩塌災害發生前，經常使用「崩塌體積與面積」關係之經驗公式進行估算 (Guzzetti et al., 2009; 水土保持局, 2015; 林務局, 2012); 另外在崩塌災害發生後，除了藉由經驗公式估算外，經常以遙測影像判釋崩塌面積與現場調查崩塌平均深度，估算該事件崩塌體積；但上述兩種方法對台灣全島各區域的崩塌體積與面積估算成果差異極大。

相對而言，由遙測影像或是無人載具航拍並產製 DSM，與災前 DEM 進行地形變異分析(DoD)，則可得到較經驗公式估算準確之實際地形變異分析成果。但是由於天候、道路可及性、UAV 操作相關法令規定等因素，未必能於災後第一時間立即獲取災區現

場資料。

此外，災前對於土砂運移可能之影響範圍評估，一般多藉由數值模式解算，其中除地形資料可由 DEM 建置外，其模式所需之流變參數與土體材料參數等，皆需由現場調查之土體材料建立參數(林德貴等人,2008; Nakatani et al.,2016; O' Brien et al.,1993; Takebayashi,2009; Flo-2D, 2006)，但災後現場受氣候、交通可行性等，亦常導致土體參數資料蒐集不易。

不論是經驗公式估算、地形變異分析(DoD)或土砂運移等數值模擬，如能在災前或是災後第一時間，快速取得或估算出合理的結果，對於相關土砂災害的防災整備與應變上將有莫大助益。

本研究初步應用橢圓-理想曲面法(ICS)與簡易土石流模式(SDF model)此兩方法，其前者可藉由特徵點估算相關崩塌土體參數，後者只需崩塌深度與面積即可演算土砂影響範圍，藉此兩數值模式簡便參數設定方式，可初步掌握相關崩塌參數，作為災前災害潛勢評估及災後二次災害情境模擬的方法。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，進行土砂量體估算及土砂運移影響範圍模擬分析，並以災害後調查資料驗證，此方式可快速分析崩塌量體、深度、面積與影響範圍，作為未來大規模崩塌潛勢區快速評估工具。

## 方法

### 一、研究區域與案例

本研究案例為 2022 年 10 月 17 日 12 時發生於新北市汐止區鵠鵠崙地區之崩塌災害 (圖 1 右，TWD97：319982,2772380)，該處崩塌位於大規模崩塌潛勢區(新北市-汐止區-D003)之坡趾(圖 1 左)，崩塌下方水系為土石流潛勢溪流-保長坑溪(新北 DF197)，因東北季風及尼莎颱風之共伴效應，挾帶連日豪雨使邊坡土壤因含水量增加而產生崩塌，崩塌地之崩崖造成受災房屋之農路地基流失，並且崩塌土砂堆積於土石流潛勢溪流，使溪流通洪斷面縮小，造成上游蓄水現象，惟當下並無立即形成土石流之跡象 (水土保持局，2022)。

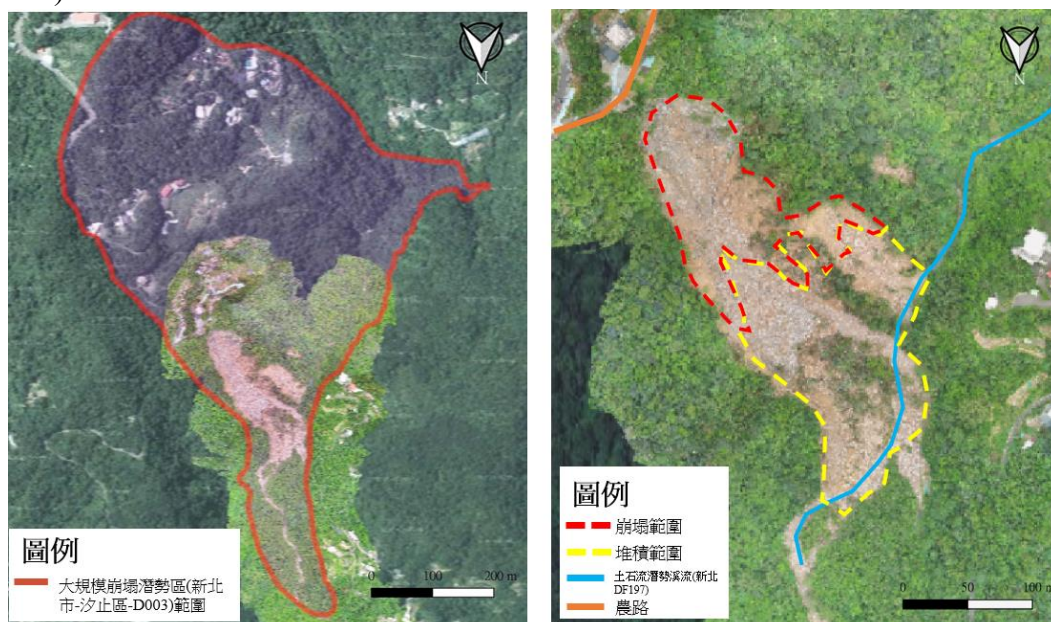


圖 1、研究區域大規模崩塌潛勢區範圍(新北市-汐止區-D0030)位置圖  
(圖左棕線：潛勢區範圍；圖右紅線：崩塌範圍；圖右黃線：堆積範圍)

### 二、地形資料

本研究使用水保局 BigGIS 平台 2010 年 HOST 地圖(圖 2 左)與災後航遙測影像的實際崩塌範圍(圖 1 右)，作為橢圓-理想曲面模式進行崩塌量體估算的位置參考依據；另外為計算災害前後之地形變異量，使用 2010 年 1m DEM (圖 2 中)與水土保持局臺北分局於 2022 年 10 月 20 日以 UAV 空拍產製之數值地表模型 (Digital Surface Model, DSM) (圖 2 右)，做為該崩塌事件地形變動比對之基礎資料。

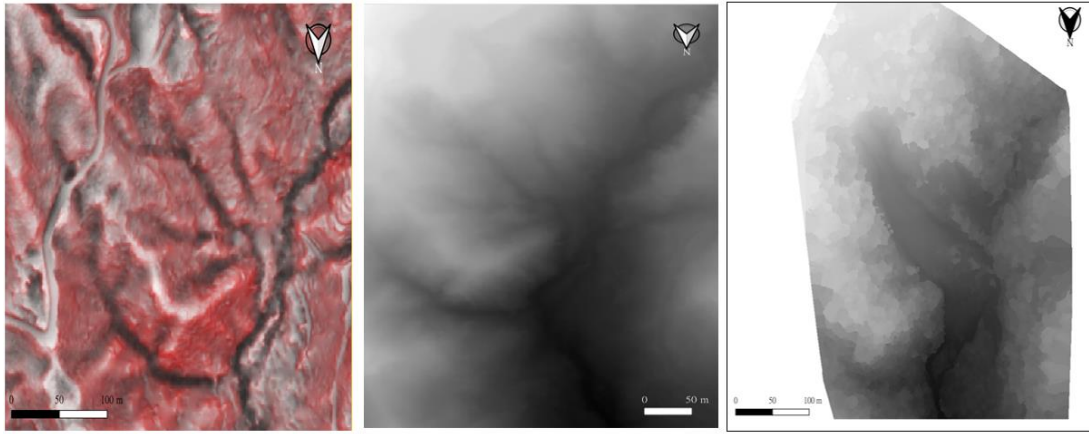


圖 2、本研究地形資料

### 三、橢圓-理想曲面法

本研究使用橢圓-理想曲面法(Ellipse-Referenced ICS method)進行土砂量體估算分析，得到崩塌參數。此模式係 Tai et al. (2020)以及 Ko et al. (2021)提出，只需應用數值地形模型(DEM)搭配崩塌目標區域對應之特徵參考點並建構破壞曲面，即可透過面積體積經驗式與破壞曲面推估其對應之崩塌量體、最大與平均崩塌深度及可能崩塌範圍，其破壞曲面估算方式簡述如下：

在崩塌表面上建立一理想曲面，其幾何特性主要由軸向曲率與側向曲率來估算軸向及側向崩塌最大深度( $d_1$  或  $d_2$ )(圖 3 左上)，並透過曲率中各幾何參數決定理想曲面破壞面對應之崩塌體積(圖 3 右上)，其中理想曲面套疊在崩塌表面的過程中，須進行理想曲面的平移、旋轉或是偏轉(圖 3 下)，以搜尋出估算之破壞範圍與規劃崩塌潛勢區域面積差異最小的理想破壞曲面，得到理想破壞曲面衍生的崩塌範圍；另外此方法須近似 Guzzetti et al. (2009)提出的迴歸崩塌面積與崩塌量體之經驗式( $V_L=0.0774 \cdot A^{1.450}$ )結果。

橢圓-理想曲面法可以使用的情境有二種：

- (一)崩塌發生前，先以地表地形特徵點找出未來可能滑動之塊體，並由橢圓-理想曲面法推估其可能崩塌量體、最大及平均崩塌深度與崩塌範圍。
- (二)崩塌發生後，由實際崩塌範圍之邊界選擇特徵點，以橢圓-理想曲面法法估算崩塌量體、最大及平均崩塌深度與崩塌範圍。

因此本研究以此兩種情境，在崩塌發生前利用災前 HOST 地圖，崩塌發生後利用災後航遙測影像的實際崩塌範圍邊界，分別選定特徵點，進一步使用橢圓-理想曲面法(ICS)推估可能崩塌量體、最大與平均之崩塌深度及面積。

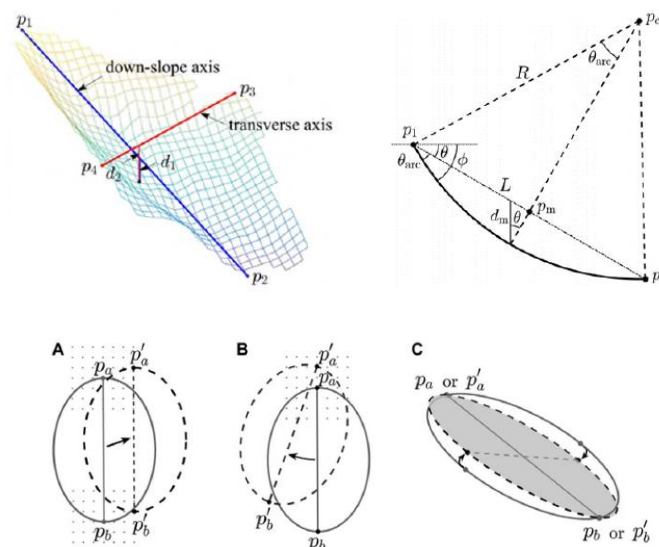


圖 3、橢圓-理想曲面法



四、簡易土石流模式

本研究使用簡易土石流模式(Simplified Debris-Flow model，Chen et al., 2018)模式進行土砂運移模擬分析，簡易土石流模式 SDF model 參考 (Hunt 1994)提出的以完全發展層流(Full developed laminar flow)為流體模型進行土石流運動之模擬，假設坡面土石含水量為飽和狀態、水分與泥砂為均勻混和、形成土石流流體後沿溪溝移動，其將複雜的土石流運動過程加以簡化，以增加演算效率。目前該簡易土石流模式已建置在水土保持局 BigGIS 圖台上，其模式須使用之參數分別為崩塌深度、土砂料源區、運動黏滯係數、體積濃度與演算時距等五項。

結果與討論

一、橢圓-理想曲面法(ICS)推估之崩塌參數與災害前後地形變異量(DoD)比較

本研究分為兩種情境進行討論，情境一為崩塌發生前，利用災前 HOST 地圖選擇地表地形特徵點，P1 選擇坡面最上方位置，P2 選擇整體坡面最下方位置，P3 選擇坡面最右側蝕溝，P4 選擇最左側山脊線位置(圖 4 中上)；情境二為崩塌發生後，利用災後航遙測影像的實際崩塌範圍邊界，選擇P1'、P2'、P3'、P4'等四個特徵點(圖 4 右上)；分別進行上述選擇後可得到本研究兩種情境的參考橢圓，進一步利用 ICS 分析得到上述兩個情境分別的四個崩塌參數，並進一步與 DoD 結果比較。

分析結果顯示，相較於以災害前後數值地型計算出之地形變異量(DoD)，情境一與情境二以 ICS 法估算之崩塌量體差異百分比分別為 23.1%與 4.2%，亦即 ICS 法估算結果具有一定參考價值；兩種情境在最大深度與平均深度差異百分比最大達 207.5%，推測結果原因，從實際的 DoD 結果可得知本研究崩塌集中在整體崩塌地上方且屬於平面型破壞型態的崩塌，而 ICS 分析軸向與側向斜率得到整體崩塌最大深度，以至於估算深度明顯較 DoD 深，另外情境二相較情境一集中接近於崩塌地上半部的實際崩塌範圍，呈現不規則形狀，ICS 參考橢圓因其不規則形狀而生成，深度明顯較近橢圓形狀的情境一來的集中且甚深；兩種情境在面積差異百分比最大為 54.6%，推測結果原因為 ICS 本身程式主要為橢圓型破壞曲面受深度影響較大，進而使破壞曲面下崩塌面積集中在較深的深度位置形成，因此面積較 DoD 結果小。

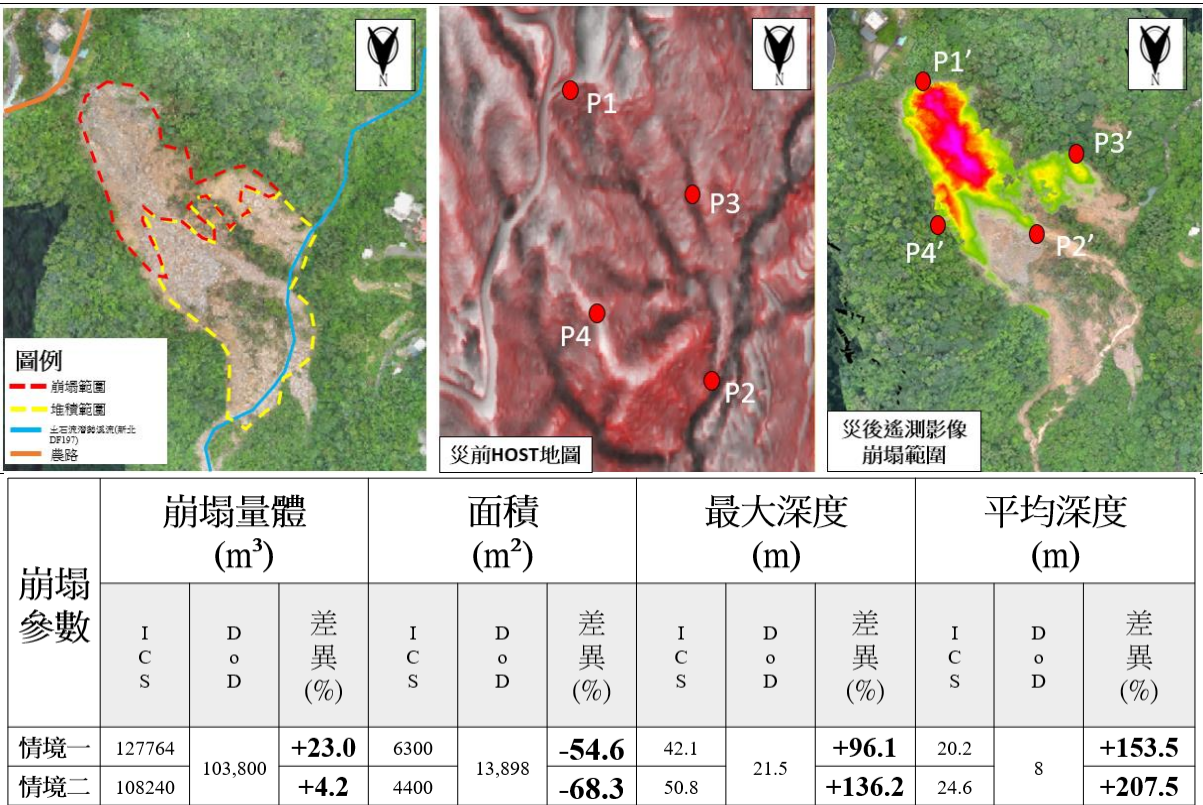


圖 4、橢圓-理想曲面法(ICS)與地形變異量成果(DoD)差異比較

二、簡易土石流模式(SDF model)模擬之崩塌土砂運移模擬分析

本研究依照地形變異量分析成果(DoD)，以平均崩塌深度 8 公尺與規劃之模擬參數(如圖 5 所示)，代入簡易土石流模式(SDF model)進行土砂運移模擬分析。其中本案例所使用的數值參數如下：

地形設定 SDF model 採用內政部地政司 20 公尺 DTM 開放資料；土砂料源區設定本案例實際崩塌範圍；運動黏滯係數參考水土保持局 112 年「鵠鵠崙地區及其現生崩塌地潛在大規模崩塌調查監測計畫」報告，因本案例地形變異成果(DoD)得到平均崩塌深度為 8 公尺，經報告地質鑽探結果得知該崩塌地主要為土壤、岩屑與大小不等之岩塊所組成，因此參照 SDF model 之建議值設定運動黏滯係數為  $2.0(m^2/s)$ ；體積濃度部分，參照 SDF model 之建議值分別設為 0.96 及 0.5，以探討崩塌後土砂直接堆積，以及受長延時降雨導致崩塌土砂形成土石流等二種不同運動型態；演算時距採用 SDF model 建議值( $V \cdot dt \leq 0.5 \cdot dx$ )，以穩定流動模擬並設定為 0.5 秒時距。

從結果可以看到，以體積濃度 0.96 進行模擬(圖左下)，其堆積範圍與災害後遙測影像土砂直接堆積範圍大致相符，亦即 SDF 可重現當時土砂堆積狀況；以體積濃度 0.5 進行模擬(圖右下)，其土砂運移明顯超過本研究崩塌之災害後遙測影像的堆積範圍，並形成土石流運移至下游位置。從兩者結果可了解崩塌土砂在不同情境下的運移狀況，並獲得相關土砂運移影響範圍。

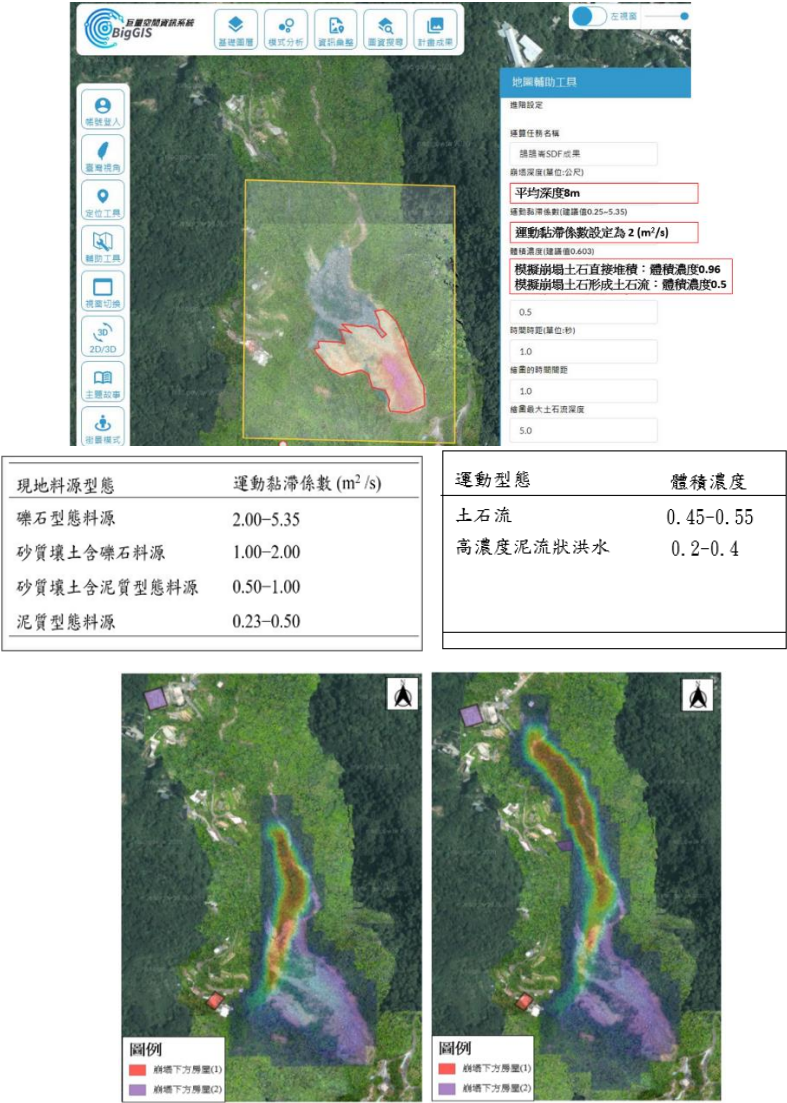


圖 5、簡易土石流模式(SDF model)成果-崩塌後土砂直接堆積(圖左下)、崩塌土砂形成土石流(圖右下)

## 結論與建議

當邊坡發生大規模崩塌災害後，為快速掌握崩塌土砂量體與其相關崩塌參數，並進一步了解崩塌土砂堆積與其後續可能土體運動影響範圍，從本研究結果可得知，依據 HOST 地圖與崩塌實際範圍邊界可輔助劃設特徵點，以配合橢圓-理想曲面法(ICS)可快速評估大規模崩塌潛勢區之崩塌深度、面積與體積等崩塌參數，具有一定之參考價值；再者由 BigGIS 內建的簡易土石流模式(SDF model)採雲端運算，僅需圈繪崩塌範圍並設定崩塌深度、運動黏滯係數、體積濃度等崩塌參數，即可快速演算並提供視覺化演算成果，可有效評估崩塌後的土體運動型態及影響範圍，其有助於提供相關單位防救災規劃參考。

當前 ICS 之評估形狀因近似橢圓形，較適用於圓弧型破壞型態之崩塌災害，該模式在平面型破壞型態之崩塌災害，所演算崩塌深度和面積部分可在精進。目前 Wang et al. (2022) 提出之基因演算-參考橢圓-理想崩塌曲面法(GA-ER-ICS)可使面積與體積更加精準，建議可作為本案例後續研究應用與分析。

## 引用文獻

- 1) 林德貴; 徐森彥; 趙啟宏; 溫惠鈺; 許世孟; 顧承宇; 冀樹勇 (2008)，土石流流動模擬技術於災害風險區劃定及災損評估應用之研究。中華水土保持學報，第 39 卷，第 4 期，頁 394-402。
- 2) 行政院農業委員會林務局 (2012)，國有林莫拉克風災土砂二次災害潛勢影響評估。行政院農業委員會林務局委辦計畫。
- 3) 行政院農業委員會水土保持局 (2015)，大規模崩塌防減災技術發展與應用。行政院農業委員會水土保持局委辦計畫。
- 4) 蕭宇伸 (2017)，以嶄新 3D 地形表現技術 (H.O.S.T. 地圖) 輔助地形判釋。行政院農業委員會水土保持局，共 131 頁。
- 5) 行政院農業委員會水土保持局 (2022)，重大災害事件。
- 6) Hunt, B. (1997). Newtonian fluid mechanics treatment of debris flows and avalanches., *Journal of Hydraulic Engineering*, 120, 1350-1363.
- 7) O' Brien, J. S. (2006). FLO-2D user's manual., Flo engineering, Nutrioso, version 2006.01.
- 8) Hopp, L. and McDonnell, J. J. (2009). Connectivity at the hillslope scale: Identifying interactions between storm size, bedrock permeability, slope angle and soil depth., *Journal of Hydrology*, 376(3-4), 378-391.
- 9) F. Guzzetti, F. Ardizzone, M. Cardinali, M. Rossi, and D. Valigi (2009) Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy., *Earth and Planetary Science Letters*, 279(3-4), 222-229, 2009.
- 10) K. Kanatani, S. Hayami, Y. Satofuka, T. Mizuyama. (2016) Case study of debris flow disaster scenario caused by torrential rain on Kiyomizu-dera, Kyoto, Japan – using Hyper KANAKO system., *Journal of Mountain Science*, 13(2), 193-202, 2016.
- 11) Chen, Y.-C., Wu, Y.-H., Shen, C.-W., & Chiu, Y.-J. (2018). Dynamic modeling of sediment budget in Shihmen Reservoir Watershed in Taiwan., *Water*, 10, 1808.
- 12) Y. C. Tai, C. J. Ko, K. D. Li, Y. C. Wu, C. Y. Kuo, R. F. Chen and C.W. Lin, J. J. (2020). An idealized landslide failure surface and its impacts on the traveling paths., *Frontiers in Earth Science*, 8, 313, 2020.
- 13) C. J. Ko, C. L. Wang, H. K. Wong, W. C. Lai, C. Y. Kuo and Y. C. Tai. (2021). Landslide Scarp Assessments by Means of an Ellipse-Referenced Idealized Curved Surface., *Frontiers in Earth Science*, 9, 862, 2021.