

整合廣域崩塌敏感度與力學分析之機率式坡地危害評估系統——以濁水河流域萬大崩塌地為例

Probability-Based Landslide Assessment System Integrating Susceptibility and Failure Mechanism: A Case Study of Wanda Slope in Jhuo shuei River Basin

國立臺灣大學生物環境系統工程學系

碩士生

陳語晞

Yu-Hsi Chen

教授

廖國偉

Kuo-Wei Liao

摘要

濁水河流域屬於台灣重要之農業區，有著密集的人口與農業活動，然此區域除下游沖積扇外大多皆屬岩體年輕脆弱之山坡地，考量在極端氣候情境下短延時高強度降雨事件將越發頻繁，強降雨所引致的山坡地災害也將相應提升，因此亟須針對保全對象密集之濁水溪山坡地範圍評估在極端情況下之崩塌危害。

本研究將建立一套結合廣域地文統計、坡地力學運動過程以及可靠度分析的坡地危害量化評估方法，首先收集地文資料與崩塌歷史，以「頻率比法」(Frequency Ratio Method)產出濁水河流域坡地範圍之坡災危害度地圖，再藉以進一步針對其中高危害度且保全對象密集之特定坡地進行力學運動分析。經上述流程，本研究篩選出「萬大崩塌地」做為後續力學分析的示例，本階段將透過收集地質圖與鑽井資料建立小尺度之地下三維模型，並從中切分關注坡地之二維剖面，再以「物質點法」(Material Point Method)分析坡地破壞後之變位情況，最後納入考量地工參數之不確定性，以 AK-PSO-HHs 方法進行可靠度分析，明確量化出萬大崩塌地在各可能地下水位高度下之崩塌失效機率，展示實現一結合廣域統計經驗、坡地物理機制下的坡地危害量化方法之可能性。

關鍵詞：坡地危害分析，物質點法，可靠度分析

Abstract

Jhuo shuei River Basin is a vital agricultural area in Taiwan, with a dense population and intensive farming activities. However, apart from the downstream alluvial fan, most of this region consists of young, fragile slopes. With the increasing frequency of short-duration, high-intensity rainfall events due to extreme climate scenarios, the risk of rainfall-induced slope disasters is expected to rise. Therefore, it is essential to assess the landslide hazards under extreme conditions in the densely populated slopes of Jhuo shuei River Basin.

This study aims to develop a quantitative landslide hazard assessment method that combines regional landslide susceptibility analysis, slope failure mechanism, and reliability analysis.

Geomorphological data and landslide history will be collected to create a slope hazard map of Jhuo shuei River Basin using the Frequency Ratio method. Slope failure mechanisms analysis will then be conducted on high-hazard slopes with protection targets.

Following this process, the Wanda slope was selected as a case study for subsequent mechanical analysis. In this phase, geological maps and borehole data will be used to establish a small-scale 3D subsurface model, from which a 2D section of the slope will be extracted. The Material Point Method will then be applied to analyze the displacement of the slope post-failure. Finally, incorporating the uncertainty of geotechnical parameters, the AK-PSO-HHs method will be used for reliability analysis to quantify the failure probability of the Wanda slope under various potential groundwater levels. This approach demonstrates the feasibility of a quantitative landslide hazard assessment method that integrates statistical experience with slope failure mechanism.

Keywords: Landslide susceptibility, Material Point Method, Reliability analysis

一、前言

坡地崩塌在廣泛的定義上可包含所有沿邊坡的岩石與土壤材料運動 (Varnes & IAEG, 1984)，這樣的災害型態往往能帶來巨大衝擊，據 Centre for Research on Epidemiology of Disasters 資料庫統計，在 1900 至 2009 期間內崩塌災害已造成全球六萬以上人口死亡 (EMDAT, 2010)，相關的財物損失更是不計其數；而在氣候變遷的情境下，坡地崩塌又將受短延時高強度的極端降雨影響而更為加劇 (Crozier, 2010)，由此可見，對於崩塌災害做到更詳盡且全面的了解實為現代防災的一大重點工作。

雖然未來災害頻率可能增加，但透過提前的妥善認知，至少有 90% 以上的崩塌相關損失可以被避免 (Brabb, 1993)，有鑑於此，近年來針對崩塌危害分析的研究產量也迅速增加，在此之中最常見的研究方法可以分為：廣域範圍常使用的統計方法 (Statistical-based approach)、針對特定關注坡地的物理機制方法 (Physical mechanism approach)，以及機率式或可靠度方法 (Probability/Reliability-based)。

廣域統計方法又可分為雙變量分析 (Bi-variate analysis) 及多變量分析 (Multi-variate analysis) (Pardeshi et al., 2013)，雙變量分析比較各個崩塌相關因子圖層與既存崩塌空間分佈的關係 (Kanungo et al., 2009)，如頻率比法 (Frequency Ratio Method)、信息量法 (Information Value Method)、證據權重模型 (Weights of Evidence Model) 等方法屬於此類；多變量分析則考慮各資料層對於崩塌敏感度的相對貢獻 (Kanungo et al., 2009)，如羅吉斯回歸 (Logistic Regression)、判別分析 (Discriminant Analysis)、複回歸模型 (Multiple Regression Model)、條件分析 (Conditional Analysis)、人工類神經網路 (Artificial Neural Networks, ANN) 等方法屬於此類。

物理機制方法則多針對重要場址做定量風險評估 (董家鈞與涂家輝, 2022)，此類方法基於力學原理描述崩塌過程，如極限平衡法 (Limit Equilibrium Method, LEM)、有限元素法 (Finite Element Method, FEM)、物質點法 (Material Point Method) 與 TRIGRS 模式 (Transient Rainfall Infiltration and Grid based Slope Stability)。

機率式分析可分為考慮時、空間及規模機率(Size probability)的區域性分析(Guzzetti et al., 2005)以及考慮地工參數空間變異性的可靠度分析。前者在機率函數的架構下比較可解釋參數與崩塌空間分佈的關係(Kanungo et al., 2009)，如貝葉斯推論(Bayesian Inference)、確定因子(Certainty Factor)、適宜性函數(Favorability Function)；後者則透過假設參數的不確定性分佈，以多次執行定然式模型來計算出系統失效機率，如點估計法(Point Estimates)、蒙地卡羅模擬(Monte Carlo Simulation, MCS)、一階可靠度法(First-Order Reliability Method)、自適應克里金蒙地卡羅法(Adaptive Kriging-Monte Carlo Simulation, AK-MCS)與 Adaptive Kriging Adopting PSO with Hollow-Hypersphere space (AK-PSO-HHs)，本研究後續討論的機率式方法以可靠度分析一類為主。

上述方法各有合適的用途與產出，然而也都有未能完全處理的部分。將三類方法的優劣勢與常見產出成果整理如表一，可看出此三類方法之優劣勢實可做到長短互補；又考量台灣仍屬於年輕且仍活躍上升的造山帶(鄧屬予，2007)，國土面積有約 74%為山坡地，且因地狹人稠之故坡地使用率高，在先天環境脆弱加上人為開發影響之下，每逢強降雨及地震事件時崩塌災害總是層出不窮，因此若可將以上三方法整合為一套更加全面的崩塌危害評估流程，應能對台灣的崩塌災害防治產生一定貢獻。

表一 崩塌危害常見分析方法類別

分析方法	常見產出成果	優勢	劣勢
廣域統計方法	崩塌危害度地圖	可明確一區域中崩塌危害之分佈，有利針對高危害處分配防災資源。	1. 危害度僅為相對數值，意義難以直觀對應災害程度。 2. 難以處理過去經驗以外的情境。 3. 無法提供特定坡地的崩塌過程描述。
物理機制模型	安全係數、變形過程	1. 可提供直觀對應災害程度的結果，如安全係數、位移量。 2. 可描述特定坡地的崩塌過程。	1. 無法進行大範圍分析。 2. 未考慮地工材料非均質性。 3. 分析結果需經轉換才能對應災害風險。
可靠度分析	失效機率	1. 考慮地工材料非均質性。 2. 分析結果可直接對應災害風險。	1. 無法進行大範圍分析。 2. 計算時間成本較高。

台灣的崩塌地主要沿中央山脈與海岸山脈分佈，因此大多也涵蓋於發源於高山的河川流域之中，本研究將首先選擇中部的濁水溪流域作為研究區域。濁水溪流域之農業與人口活動密集，然而此區域除下游沖積扇外大多皆屬岩體年輕脆弱之山坡地，判斷在未來情境下此區域將具有密切的崩塌危害分析需求。

因此，本研究將針對濁水溪流域建立一套結合廣域統計、坡地物理機制以及可靠度分析的坡地危害量化評估系統，具體將選擇廣域統計方法中的「頻率比法」，物理機制方法中的「物質點法」以及可靠度分析中的“AK-PSO-HHs”來實現。

整體研究流程首先將收集地文資料與崩塌歷史，以頻率比法產出濁水溪流域坡地範圍之坡災危害度地圖，再進一步明確出其中高危害度且保全對象密集之特定坡地，以物質點法對其進行運動分析得坡地之變位情況，最後納入考量地工參數之不確定性，以AK-PSO-HHs方法進行可靠度分析，量化出關注坡地在不同地下水位高度情境下之崩塌失效機率。

本次研究之目的為展示實現一結合統計經驗與力學計算下的機率式崩塌危害量化方法之可能性，並期望在未來可透過本研究建立之分析流程，協助災害管理單位做到防災的重點聚焦。

二、文獻回顧

1. 頻率比法

當崩塌研究的區域較為廣泛，如以集水區、流域為單位時，最常以「崩塌敏感度 (Landslide Susceptibility)」做為量化災害潛勢的指標，其定義為一地基於其地形與環境條件下，崩塌發生的可能性 (Brabb, 1984)，可用以計算崩塌在何處更有可能發生 (Guzzetti, 2006)。

頻率比法是一種常用於崩塌敏感度分析的方法，基於未來崩塌發生之模式也與過去相同的假設，此方法將崩塌頻率比 FR 值定義為「在給定屬性下，崩塌發生的機率與不發生的機率之比值」 (Bonham-Carter, 1994)，計算公式如下：

$$FR = \frac{N_{ij}}{A_{ij}} \div \frac{\sum N}{\sum A} = (\text{因子類別崩塌密度}) \div (\text{研究區域崩塌密度}) \quad - (1)$$

其中： N_{ij} ：第 i 個因子中第 j 個類別所佔的崩塌面積； A_{ij} ：第 i 個因子中第 j 個類別所佔的總面積； $\sum N$ ：研究區域總崩塌面積； $\sum A$ ：研究區域總面積。

並定義崩塌敏感度指標 (Landslide Susceptibility Index, LSI)：

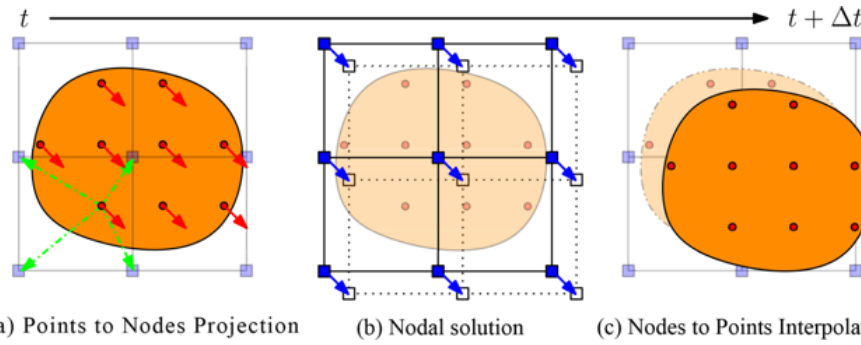
$$LSI = \sum FR \quad - (2)$$

LSI 值的意義為崩塌發生的相對危害度，其值越高便表示崩塌發生的風險越高 (Lee and Pradhan 2007; Lee and Dan 2005)。

2. 物質點法

物質點法常被使用於分析大規模變形行為如坡地崩塌、雪崩等事件的運動機制模擬 (Wyser et al., 2020)，此方法相對於極限平衡法 (LEM)、有限元素法 (FEM) 的優勢在於能處理大位移量之山坡地崩塌問題，概述其計算流程如下 (圖一)：(1) 將欲分析的連續體離散為多個「物質點」，分別賦予狀態變數如質量、應力、速度等，並將物質點的狀態映射到網格節點上做計算；(2) 在網格節點上以控制方程式求解；(3) 將節點上的解以內插方式回傳至物質點上更新其狀態，再將變形之網格回復原狀，並重複以上過程的循環 (Wyser et al., 2020)。

透過上述流程及回復變形網格的方式，物質點法可不受網格限制，實現針對大位移量之坡地運動過程分析，故選擇物質點法做為本研究之坡地崩塌模擬的定然式 (deterministic) 分析法。



圖一 物質點法計算流程圖；其中橘色部分為欲分析之連續體，紅點為物質點，藍色方形則為網格節點（Wyser et al., 2020）。

3. AK-PSO-HHs (Thedy & Liao, 2023)

近年來在可靠度分析中，基於自適應克里金（Kriging-based）的方法因計算結果優於其他常見可靠度方法而受到矚目（Thedy & Liao, 2023），此類方法中以結合自適應克里金與蒙地卡羅模擬的 AK-MCS 較早被發展出來，後續也衍生出許多基於其架構作出改進的研究，AK-PSO-HHs 便屬於其中的一種。

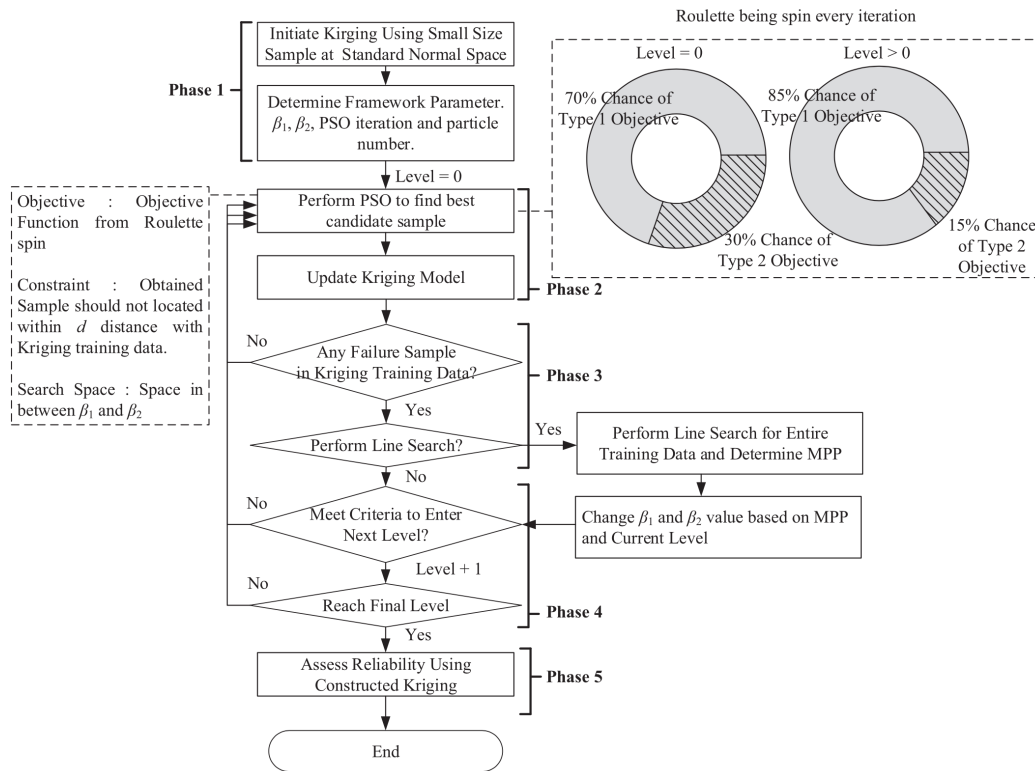
與 AK-MCS 最大不同之處在於，AK-PSO-HHs 使用粒子群最佳化（Particle Swarm Optimization, PSO）中的元啟發式算法（Metaheuristic）改善了 MCS 過程中大量生成樣本的問題，可藉此進一步提升計算效率，概述其演算流程如下。

AK-PSO-HHs 的流程分為 5 個階段（圖二），階段 1 首先透過拉丁超立方抽樣（Latin Hypercube Sampling）隨機生成樣本點，並初始化架構參數（framework parameters），如用來形成 HHs 空間以限制搜索範圍的 β_1 、 β_2 ，以及預計進行迭代的次數。

後續的流程進一步分為內圈（inner loop）與外圈（outer loop），內圈的目的在透過粒子群最佳化來選擇出用以更新克里金代理模型（surrogate model）的最佳候選樣本；外圈則用以判斷系統等級（system level）是否已達成停止條件，若滿足條件則可進入下個等級。

整個流程共需要經過數個等級的運算（等級數量=兩倍隨機變數總數）來確保克里金代理模型已有取代原始問題方程式的足夠能力。

AK-PSO-HHs 已經過充分驗證且結果理想，詳細方法描述可參考 Thedy & Liao (2023)。



圖二 AK-PSO-HHs 演算流程圖 (Thedy & Liao, 2023)

三、研究方法

1. 廣域崩塌敏感地圖及關注坡地識別

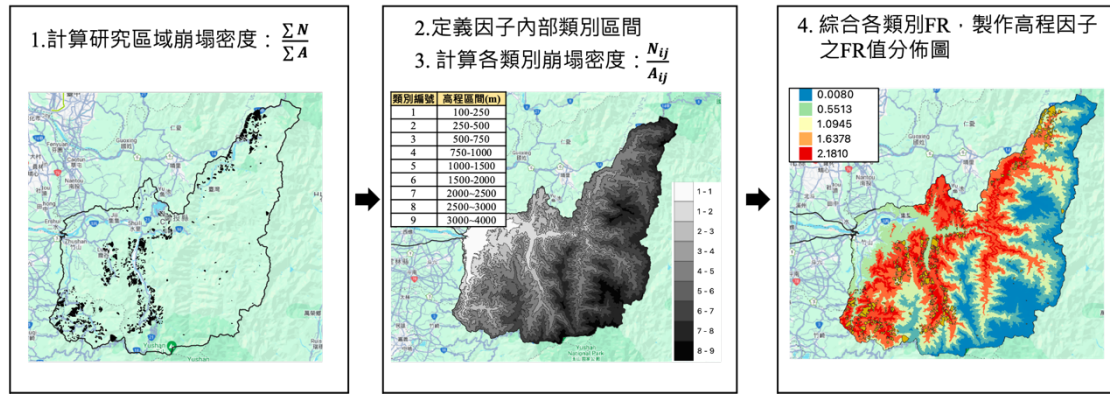
(1) 濁水溪流域崩塌敏感地圖 (Landslide Susceptibility Map) 製作

本研究以頻率比法製作廣域崩塌敏感地圖，其中歷史崩塌紀錄取自經濟部地質調查與礦業管理中心 WMS 服務之「台灣坡地環境地質圖集 (111 年) — 老山崩」；並綜合考慮因子常用性與資料取得完整性，選出欲採用的因子共計 10 項：

- i. 地形因子：高程、坡度、坡向、粗糙度。
- ii. 地質因子：岩性、活動斷層距離與構造距離。
- iii. 水文因子：與河距離—主流、與河距離—支流。
- iv. 土地利用因子：土地利用類別、道路距離。

根據式(1)，欲計算各因子類別的崩塌頻率比 FR 值需要兩個部分：研究區域崩塌密度及因子類別崩塌密度，其中前者為共用資訊，直接計算研究區域內山崩地面積與總面積比值即可求得；後者則需分別計算各因子類別中的崩塌密度，再將此值與研究區域崩塌密度相除即為該類別之 FR 值。最後綜合計算結果，每個因子便可產出 FR 值分佈圖，以下以「高程」因子做流程示意說明 (圖三)。

依上述流程可製作出所有因子的 FR 值分佈圖，並根據式(2)將所有因子的 FR 分佈圖相疊加，便可得出所有 FR 值加總之崩塌敏感度指標 (Landslide Susceptibility Index, LSI)，其意義為崩塌發生的相對危害度，數值越高便表示崩塌發生的風險越高，並可產出濁水溪流域坡地區域崩塌敏感度地圖。



圖三 FR 值分佈圖流程示意說明，以高程為範例

(2) 關注坡地識別

本研究目的為篩選出同時具有「高崩塌危害」且「保全對象分佈密集」的坡地範圍，從而欲進行崩塌過程詳盡分析及防災資源重點分配的建議。在以崩塌敏感度地圖明確出整體區域的危害分佈後，本研究考慮與人口分布的相關性，將土地利用類別中的「農業」、「建築」定為本次之保全對象。將上述保全對象分佈與崩塌敏感度地圖的高危害區域做交集計算，即可進一步找出適合進入下一階段分析的候選區域。

為完整展示分析流程，後續將從候選區域中擇一具體坡地作為本研究示例。

2. 降雨引致崩塌過程—物質點法模擬

(1) 事前資料收集

由於進行物理模式模擬需較充分的資料，以下概述主要的資料收集與補缺方法。

i. 地下構造與坡地剖面：

若待分析坡地已有現成剖面調查資料，可直接採用之；若無則可搭配利用五萬分之一地質圖及區域鑽井資料做地理空間內插，並由內插出的區域地下三維地層分佈在切分出目標坡地的二維剖面。

ii. 土壤與岩層參數：

關注坡地的土壤、岩層重要參數如：有效凝聚力、有效摩擦角、單位重及楊氏模數等，若已有前人針對此坡地的研究或鑽井試驗參數則優先採用，若無則可參考相似之地工材料合理範圍做替代。

iii. 現地監測資料：

為驗證物理模擬之結果是否為可信，也需要收集可供比對結果的現地監測資料。本研究所處理的問題為「降雨引致的坡地崩塌、失穩事件」，因此事件降雨量為必要資訊之一；另外降雨事件下坡地失穩之所以發生，根源大多是受孔隙水壓上升、有效應力下降所致，因此地下水位資訊也是物理模型的一項關鍵輸入。最後上述條件所導致的坡地位移則可作為驗證模型理想與否的直接比對，此類資料若有特定位置的深度—位移量資料（傾斜管數據）為佳。

(2) 崩塌過程模擬

本研究以物質點法做坡地破壞過程分析，並以 Anura3D 2023 版本軟體實現計算。本次採用雙相單點的物質點設定與二維平面應變分析邊坡運動問題，材料種類則依破碎岩層及完整岩盤分別設定：破碎岩層設定為不飽和材料之水力耦合分析，使用莫爾—庫倫組成律；完整岩盤則設定為乾燥材料，使用線彈性組成律。

計算網格採用三角形元素，網格大小為 8 公尺；邊界條件則將坡地底部設定為鉸支承（Hinge）固定橫向與縱向，以左右兩邊以滾支承（Roller）固定橫向位移。

本研究參考 Anura3D community（2023）將降雨引致崩塌分為三階段描述：

階段 1: 初始化並施加坡地材料載重，歷時 1 個計算步距。

階段 2: 降雨入滲過程模擬，本階段為引致邊坡失穩的主要影響，歷時 12 個計算步距。

階段 3: 坡地回穩，此階段為坡地在破壞後重回平衡穩定狀態的過程，歷時 6 個計算步距。

(3) 可能情境假設—以地下水代表調控

由於 Anura3D 尚未有直接輸入降雨量的功能，因此需討論代替降雨量做情境設定的合適條件，且此條件也應與降雨導致崩塌的原因相關，回顧降雨致崩的機制，可分為：

- i. 降雨入滲：表層入滲水使土體孔隙水壓急升，有效應力隨之下降且摩擦力降低，最終導致崩塌。
- ii. 地下水位抬升：地下水位抬升使水由岩盤出滲至岩層，岩層土體孔隙水壓上升，有效應力隨之下降且摩擦力降低，最終導致崩塌。

其中以入滲為主的邊坡失穩通常引致的為較淺層的崩塌，牽涉地下水出滲的則會形成較深層的滑動面（Girardi et al., 2023）。此二者的改變量皆與降雨強度成正相關，然而就改變尺度而言，經驗上入滲量通常為數毫米，地下水位上升量卻常可見增加數公尺，且考量深層崩塌的發生通常主要受地下水位改變為主，因此認為以地下水位高度作為討論情境的代表應更為合適，故本研究後續也將使用不同可能地下水位情境來分別討論關注坡地在不同狀況下之失效機率。

3. 可靠度分析—AK-PSO-HHs 各情境失效機率計算

在可靠度分析的部分，本研究將以 AK-PSO-HHs 呼叫執行物質點法定然式模型以做失效機率的計算。在進行可靠度分析前須先決定(1) 隨機變數種類；(2) 各隨機變數之平均值；(3) 各隨機變數之變異係數；(4) 各隨機變數之機率分布形態，以及(5) 極限方程式，即何謂「失效」的定義。

本研究選擇與崩塌最相關的參數：有效凝聚力、有效摩擦角、單位重及楊氏模數作為本次分析之隨機變數；依岩層取文獻回顧值作為隨機變數平均值，變異

係數分別使用如下：有效凝聚力使用 0.25、有效摩擦角使用 0.15、單位重為 0.05，楊氏模數則取 0.20；隨機變數之機率分布形態皆採對數常態分佈。

而失效定義則參考台灣坡地監測常參照使用的日本地滑對策技術協會（1978）建議規範中的「緊急變動月變位量」—500 毫米，即當降雨事件引致位移量大於 500 毫米時則判定為坡地系統失效。

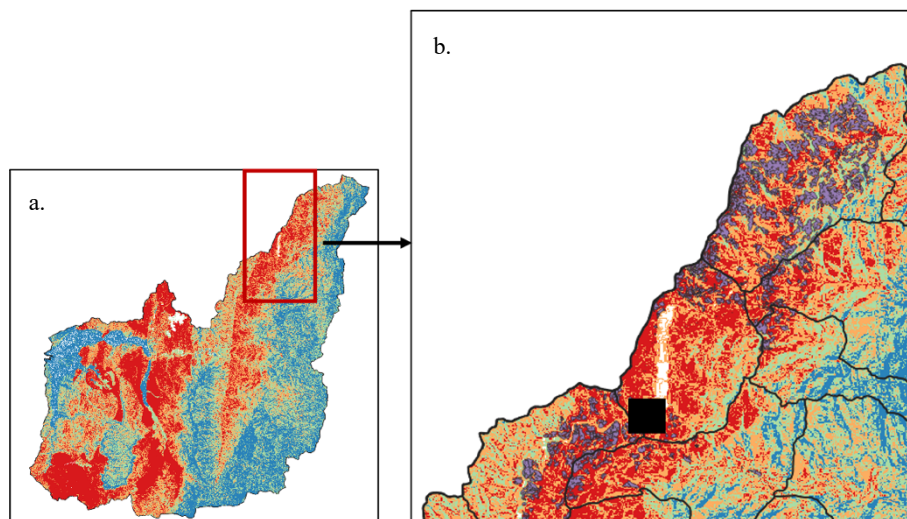
四、研究結果

1. 廣域崩塌敏感地圖及關注坡地識別

依三、1.所述，將十項崩塌相關因子之 FR 分佈圖做疊加，即可得出濁水溪流域坡地範圍內各處之崩塌敏感度指標（LSI），接著採用 GIS 中的 Quantile 分類，基於 LSI 值將區域分做 5 個危害度等級區間，即可產出完整之濁水溪流域崩塌敏感度地圖，本文暫以 5 因子之示意圖做展示之用（圖四 a）。

訂定崩塌敏感度地圖中危害等級第四與第五區間為高危害區域，結合土地利用資料可交集計算出落在高崩塌危害區域中之保全對象（農地、建築），根據交集之分佈狀況，可進一步限縮討論範圍為數個關注分區，由各分區之中再切分出的特定坡地即為繼續進入下一階段物理分析的候選坡地單元。

為方便完整展示分析流程，本次選擇研究區域東部分關注分區中的「萬大崩塌地」作為後續之分析對象（圖四 b）。



圖四 a.崩塌敏感度地圖之 5 因子之示意圖；b.選擇東部分關注分區中的「萬大崩塌地」（圖 b 黑框處），其中紫色區塊為保全對象分佈

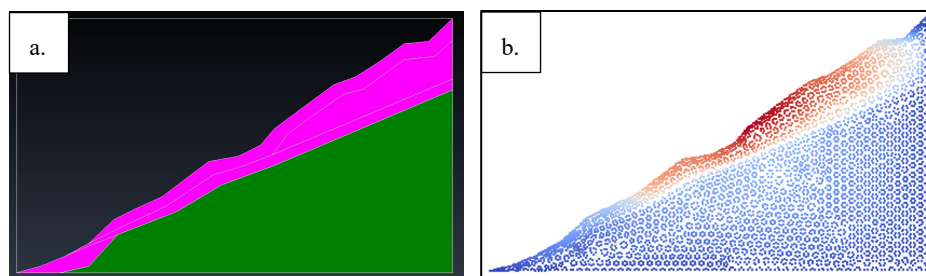
2. 物質點法降雨引致崩塌過程模擬

選定萬大崩塌地後，為因應物理分析之資料需求，本研究使用地礦中心之水文鑽井岩芯以及五萬分之一地質圖，以距離反比權重法做地理空間內插，產出萬大崩塌地所屬之地層單位—「廬山層」範圍之地下三維地層分佈，再從中提取待使用的萬大坡地二維剖面，剖面輸入 Anura3D 之型態示意如圖五 a；地層參數則參考該地之前人研究或相似地層材料建議範圍，將剖面主要岩層參數整理如表

二；模擬事件與監測資料則參考王金山等（2009）之 2008 年卡玫基颱風之降雨量、地下水位及傾斜管紀錄。

依照三、2. (2)說明之條件與模擬過程，將表二之參數資訊輸入 Anura3D 並計算後可得視覺化之降雨事件引致之坡地變形過程，如圖五 b 所示。

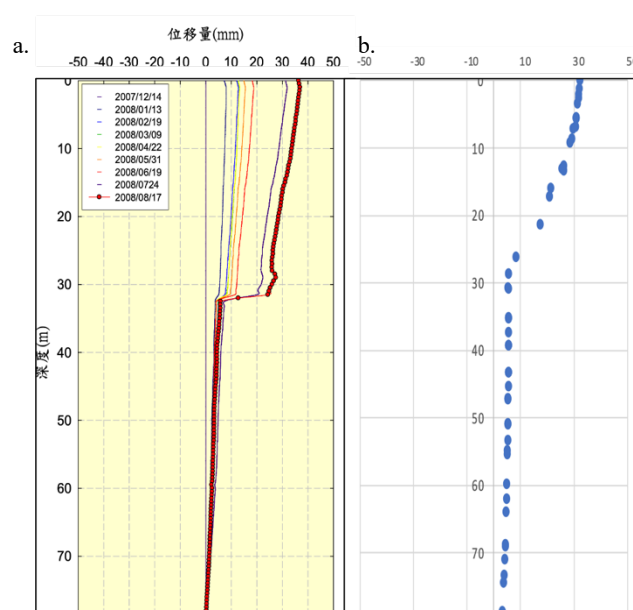
為驗證本次物質點法模型之模擬結果，取王金山等（2009）於卡玫基颱風後之傾斜管現地監測數據（2008/07/24）（圖六 a）與本模型中相應位置的位移模擬結果（圖六 b）比較，可發現兩者於變位型態、位移量值與滑動面皆能良好對應，顯示本次模擬結果應較理想可信。



圖五 a. Anura3D 中萬大崩塌地二維剖面之型態示意；b.視覺化之降雨事件引致之坡地變形結果示意圖

表二 萬大剖面主要岩層參數

參數種類\材料	破碎板岩	參考來源
孔隙率	0.36	Swiss Standard SN 670 010b
單位重 kg/m^3	2161.06	王金山等（2009）
有效凝聚力 kPa	90	
有效摩擦角 $^\circ$	31	
有效楊氏模數 kPa	320000	Obrzud & Truty（2012）
有效柏松比	0.3	—



圖六 a.萬大崩塌地現地傾斜管監測數據，其中 2008/07/24 為卡玫基颱風後的監測數

據；b.在本模型中與王金山等（2009）之傾斜管相應位置之位移模擬結果

3. AK-PSO-HHs 各情境失效機率計算

可靠度分析中為了驗證方法有效性，通常會將蒙地卡羅模擬的結果當作參考答案來做比較。考量計算時間有限，本研究使用稍加簡化的萬大崩塌地物質點法模型來分別以蒙地卡羅模擬、AK-PSO-HHs 做可靠度分析，得出的計算結果如表三所示，AK-PSO-HHs 得到的失效機率為 0.0214，計算耗時約 10.2 小時；蒙地卡羅模擬得到的失效機率為 0.0206，計算耗時約 404.2。

比較後可發現兩者的失效機率結果相當接近，然而 AK-PSO-HHs 的計算時間卻顯著低於蒙地卡羅模擬，顯示此方法於本次研究案例中不僅具有可信的準確度，更大幅提升了計算效率。

表三 蒙地卡羅模擬與 AK-PSO-HHs 之結果比較

可靠度方法	失效機率	執行定然式模型次數	計算時間（小時）
蒙地卡羅模擬	0.0206	4850	404.2
AK-PSO-HHs	0.0214	122	10.2

如三、2.(3)所說明，在不直接以降雨量為輸入的情況下，以地下水位來代表情境會是較合適的替代方案，故本研究將基於四、2.之驗證後模型，使用三個不同地下水位高度來討論萬大坡地於不同情境下的失效機率，分別為：(1) 地下 35 公尺深，此水位為卡玫基颱風時之監測地下水位（王金山等，2009）；(2) 地下 20 公尺深，以及(3) 滿水位至地表之極端情況。

以位移量 500 毫米為極限方程式，使用 AK-PSO-HHs 分別計算三種狀況後得到之結果如表四所示。

表四 萬大崩塌地於不同地下水位情境下，使用 AK-PSO-HHs 之可靠度分析結果

討論情境	地下水位（m）	失效機率
(1)	35	0.033
(2)	20	0.043
(3)	0	0.125

五、討論與結論

由 AK-PSO-HHs 可靠度分析結果（表四）可看出，隨著萬大崩塌地的地下水位高度上升，其相應的崩塌失效機率也呈現非線性的快速增加，若再考慮強降雨事件中地下水位的增量幾乎完全受降雨強度或累積降雨量所決定，則也可間接延伸理解本結果為在未來更加極端的降雨情境下，萬大崩塌地可能面臨的崩塌災害機率也將顯著上升。本研究討論的地點與情境於數量上尚有限制，但就目前階段已可看出所得到的分

析結果與經驗上的理解相符，且能以量化的方式將需要關注的高危害、高保全坡地之失效機率明確出來，使在評估階段便可讓災害發生機會的概念得到具體化。

另外本次方法所計算出的失效機率也可應用於災害風險期望值的計算，在此概念下定義「 $\text{風險} = \text{失效機率} \times \text{崩塌災害所帶來的損失}$ 」，因此可進一步提供管理單位甚至災害保險做相關的延伸分析與評估。

本研究整體目標在於透過整合三種常見崩塌分析方法的優勢，建立出一個更為全面的崩塌評估系統，此系統可協助將關注對象從廣泛的流域、集水區範圍，逐漸聚焦到實際具有較高崩塌危害與保全對象分佈的特定坡地，使有限的資源得到妥善分配，具體則透過建立廣域的崩塌敏感度地圖、計算與保全對象分佈之交集、做物質點法崩塌模擬與 AK-PSO-HHs 可靠度分析來實現。

為完整展示分析流程，本文僅暫以萬大崩塌地為例做展示，並計劃在未來針對更多濁水溪流域之待關注坡地進行分析，加以完善整體之崩塌評估成果，期能協助此區域即使在未來之極端挑戰下也可盡量降低崩塌災害所帶來的損失。

參考文獻

- Anura3D MPM Research Community (2023). Anura3D MPM Software Tutorial Manual, Anura3D MPM Research Community, The Netherlands, 273p.
- Brabb, E.E., “Innovative approaches to landslide hazard mapping”, *Proceedings of 4th International Symposium on Landslides, Vol.1*, pp. 307-324, 1984.
- Brabb E., “Proposal for worldwide landslide hazard maps”, *Proceedings of 7th International Conference and field workshop on landslide in Czech and Slovak Republics*, pp. 15-27, 1993.
- Crozier, M.J., “Deciphering the effect of climate change on landslide activity: A review”, *Geomorphology, Vol. 124*, No.3-4, pp. 260-267, 2010.
- EMDAT, “Emergency Disasters Data Base, Volume 2010: Brussels, Belgium, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters”, Ecole de Santé, Publique Université Catholique de Louvain, 2010.
- Girardi, V., Yerro, A., Simonini, P., Gabrieli, F. and Ceccato, F., “Wetting induced instabilities in layered slope: A Material Point Method analysis”, *Engineering Geology, Vol. 313*, 106978, 2023.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M. and Ardizzone, F., “Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale”, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, Vol. 72*, pp. 272-299, 2005.
- Guzzetti, F., “Landslide Hazard and Risk Assessment”, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, University of Bonn, Bonn, Germany Ph.D. Thesis. 389 p, 2006.
- Kanungo, D., Arora, M., Sarkar, S. and Gupta, R.P., “Landslide Susceptibility Zonation (LSZ) mapping-a review”, *Journal of South Asia Disaster Studies, Vol. 2*, pp. 81-105, 2009.

- Lee, S. and Dan, N.T., “Probabilistic landslide susceptibility mapping in the Lai Chau province of Vietnam: Focus on the relationship between tectonic fractures and landslides”, *Environmental Geology*, Vol. 48, No.6, pp. 778-787, 2005.
- Lee, S. and Pradhan, B., “Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models”, *Landslides*, Vol. 4, pp. 33-41, 2007.
- Obrzud R. and Truty, A. THE HARDENING SOIL MODEL-A PRACTICAL GUIDEBOOK Z Soil.PC 100701 report, revised 31.01.2012
- Pardeshi, S.D., Autade, S.E and Pardeshi, S.S., “Landslide hazard assessment: recent trends and techniques”, *SpringerPlus*, Vol. 2, 523.
- Swiss Standard SN 670 010b, Characteristic Coefficients of soils, Association of Swiss Road and Traffic Engineers.
- Thedy, J. and Liao, K. W., “Adaptive Kriging Adopting PSO with Hollow-Hypersphere space in structural reliability assessment”, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 103513.
- Varnes D, IAEG, Landslide hazard zonation: a review of principles and practice, United Nations Scientific and Cultural Organization, Paris, 1-6, 1984.
- Wyser, E., Alkhimenkov, Y., Jaboyedoff, M and Podladchikov, Y.Y., “A fast and efficient MATLAB-based MPM solver: fMPMM-solver v1.1”, *Geoscientific Model Development*, Vol. 13, No. 12, pp. 6265-6284, 2020.
- 日本地滑對策技術協會，「地滑對策技術設計實施要領」，1978。
- 王金山，鍾明劍，譚志豪，冀樹勇，蘇泰維，李錦發，費立沅，「颱風事件引致崩塌地滑動之研究—以濁水溪流域萬大崩塌地為例」，第十三屆大地工程學術研討會，2009。
- 彭逸蘋，「以物質點法探討光華崩塌地滑動面深度與運動行為」，臺灣大學土木工程學研究所，碩士論文，2022。
- 董家鈞與涂家輝，「邊坡危害度評估、風險管理與地質模型不確定性：從山坡地開發建築之角度思考」，技師期刊，98 期，25-35 頁，2022。
- 鄧屬予，「臺灣第四紀大地構造」，經濟部中央地質調查所特刊，18 期，1-24 頁，2007。