

以 IRIS 模式模擬長延時降雨入滲崩塌－以基隆槓子寮崩塌為例

莊承穎^{12)*}、陳振宇²⁾、詹婉妤²⁾

¹⁾ 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

²⁾ 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。

* 通訊作者，E-mail: cyc0109@mail.swcb.gov.tw。

摘要

長延時降雨導致土體孔隙水壓上升，往往造成崩塌等災害，惟多數邊坡穩定分析模式，無法完整呈現降雨入滲、孔隙水壓變化與臨界滑動面等耦合分析過程。2022 年 1 月 1 日 0 時至 2 月 24 日 0 時基隆地區連續降雨數十日，累積雨量達 1,237 mm，已逾年平均雨量 3,055 mm 之 40%，並造成基隆市信義區槓子寮山區崩塌事件。本研究以 2022 年 2 月 23 日 18 時發生於槓子寮的長延時降雨促崩事件為例，以 IRIS (Integrated Rainfall-Infiltration-Slope stability model) 模式進行降雨、入滲現象及邊坡穩定分析模擬，完整呈現各階段土體孔隙水壓變化情形，並自動判定臨界滑動面位置及崩塌時間。模擬結果顯示，IRIS 在崩塌時間之模擬結果與實際崩塌時間相近，惟崩塌規模略小於災後 UAV 空拍成果，推測過程中可能有多次崩塌之現象，但模擬於第 1 次崩塌發生時即停止。

緒言

發生崩塌等地質災害的原因，可分為地質、地形等內在基因與降水、地震等外在誘因二類。而地質構造的探勘，大多費時且價格昂貴。許多研究指出地層中水份的流動，會影響坡面的穩定性，因而應用水文地質學 (Hydrogeology) 分析地面下的地質構造，如地下水或降雨-入滲-逕流之關係。部分研究因考量資料取得之便利性，針對降雨與逕流的變化資料進行研究分析。如恩田裕一等人 (1999) 嘗試使用 4 年半的觀測資料，由降雨-逕流之關係建立崩塌預警系統。然而，研究或文獻較少對於降雨-入滲-逕流與崩塌規模、時間之具體關連性進行探討。

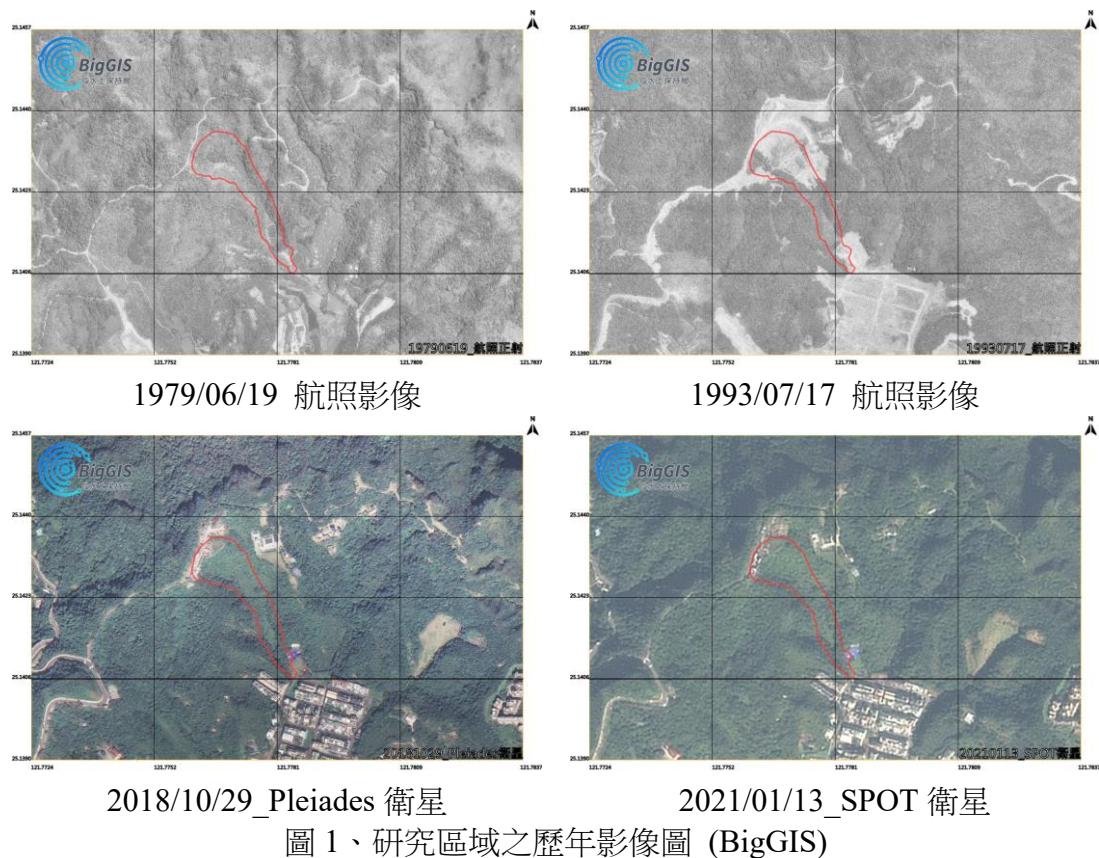
現地觀測對於地質研究具有重要意義，惟實務上易受限於現地環境或人員危害性之限制。若能先以數值模擬方式初步掌握相關變因之關聯性與其變化趨勢，對於崩塌或相關土砂災害的後續研究有莫大助益；Hopp and McDonnell (2009) 曾將坡面坡度、土壤厚度、雨場規模及基岩滲漏性設為變因，配合現地實測資料，以有限元素法模擬在坡面尺度下土壤水分移動與逕流生成之影響。

本研究藉由數值模擬方式，探討 2022 年初基隆槓子寮崩塌事件，模擬長延時降雨對土體含水量、孔隙水壓變化與崩塌時間及崩塌規模之分析。

方法

一、研究區域與案例

本研究案例為 2022 年 2 月 23 日 18 時發生於基隆市信義區槓子寮之崩塌 (TWD97: 328313, 2781855)，該處崩塌之土方為回填土，且邊坡無水系經過。崩塌邊坡最高點海拔約 144 m，最低點海拔約 77 m，崩塌最大深度約 25 m，崩塌及堆積區面積約 2 公頃，初估土砂量約 79,000 m³。而崩塌邊坡坡型為凹挖型，平均坡度約 20 度，坡向朝向東南方。由水土保持局建構之巨量空間資訊系統 (BigGIS) 蒐集歷年航照及衛星影像 (圖 1)，顯示該地區於 1979 到 1993 年間曾有大型開發，且後續未設擋土牆，並於崩塌前作為廢棄物回收場使用。



二、地形資料

本研究使用 2015 年內政部數值地形模型 (Digital Elevation Model, DEM) 作為災前地形，災後地形則使用水土保持局台北分局於 2022 年 2 月 24 日以 UAV 空拍產製之數值地表模型 (Digital Surface Model, DSM) 及正射影像 (圖 2 左)。為選定崩塌最深處作為崩塌代表滑動面，本研究使用災後 DSM 製作坡向圖 (圖 2 右)，並選定兩個坡向相對處作為地形剖面位置，據此於災前 DEM 及災後 DSM 製成間隔 5 m 地表剖面線 (Ground Surface)，以做為後續模擬使用之地形資料。

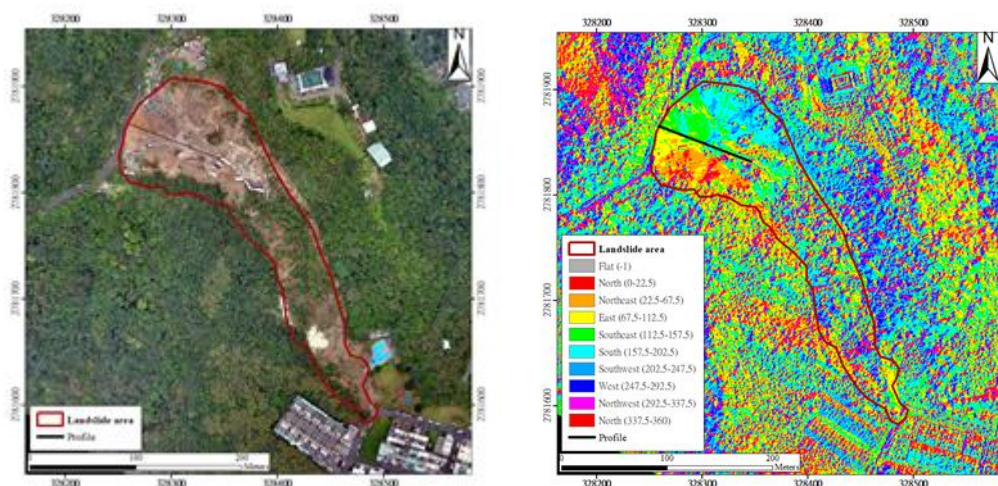


圖 2、本研究地形剖面線位置

三、雨量資料

本研究採用距離案例約 3.8 km 之基隆雨量站 (站號：466940) 進行雨量分析，雨量資料頻率為 10 分鐘 1 筆。自 2022 年 1 月 1 日 0 時至 2 月 24 日 0 時，其累積雨量為 1,237 mm (如圖 3)，約占 1960 年至 2019 年之年平均雨量 3,055 mm 的 40.5%。

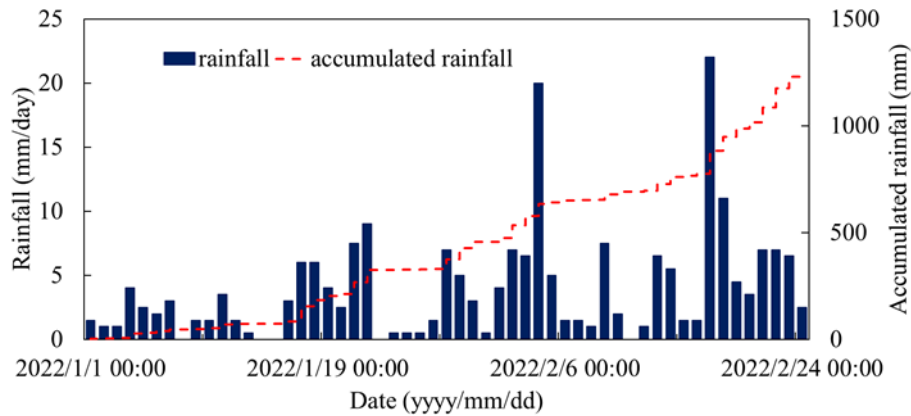


圖 3、基隆雨量站 2022 年 1 月 1 日至 2 月 24 日之日雨量及累積雨量分布圖

四、整合式降雨-入滲-邊坡穩定分析模式

本研究使用 IRIS (Integrated Rainfall-Infiltration-Slope stability model) 模式進行降雨-入滲及邊坡穩定分析。此模式係由堤大三發展 (陳振宇等, 2014)，整合降雨、入滲及邊坡穩定分析等多個模組，其理論與方式簡述如下：

(1) 降雨-入滲模組

該模組係使用 3 維 Richard' s equation 來模擬土層之降雨-入滲過程中孔隙水壓變化，土壤水分特性曲線 (Soil Water Characteristic Curve, SWCC) 則採用 Kosugi (1996) 所提出的 LN 模式 (Lognormal Model)，此模式係假設土壤孔隙半徑為對數正規分布，關係式具有高度非線性，不易有解析解，故 IRIS 模式使用有限元素法求解 (Tsutsumi and Fujita, 2008)。

上述由有限元素法求解之降雨-入滲分析結果，可計算出土層中每個有限元素法分析網格上之土壤孔隙水壓，此結果將被用來進行邊坡穩定分析之計算。IRIS 模式採用可分析任何形狀滑動面之簡易 Janbu 法進行計算，先將滑動土體分割成諸多垂直切片，再據以計算其應力平衡結果。

(2) 臨界滑動面分析模組

IRIS 模式採用動態規劃法 (Dynamic Programming Method, DP) 結合變分法方式計算出安全係數最小之臨界滑動面 (陳振宇等, 2014)。如前所述，本研究將設定 $Fs < 1$ 時坡面即發生崩塌，而所對應之滑動面即為臨界滑動面 (Critical Slip Surface)。

五、簡化坡面模型

為簡化分析，本研究採用三維之四面體元素建構有限元素法之分析網格。而在降雨入滲地表面之入滲率邊界條件方面，本 IRIS 模式假設地表層土體尚未飽和時，所有降雨均滲入土體；土體一旦飽和後，則降雨全數轉為地表逕流 (Surface Runoff)。此外，計算過程中，當表層土體之網格節點壓力水頭大於零時，則設定其為飽和狀態，先計算該節點所在之四面體元素朝向地表之通量 (Flux)，並將此通量值設為該處地面滲出之 Interflow 量後，再將該節點壓力水頭設為零。

六、模擬所用相關參數

本研究區域為回填土，無相關地質分層資料，故假設基岩面上方之土壤為均質，即每個土壤分層皆設為相同參數。然因現地未有實際取樣之土壤水分特性曲線相關研究或報告，暫依現場空拍影像之土壤特徵，參考一般森林土層的壤土參數作為設定，並對土壤凝聚力 C 值及土壤摩擦角 φ 值作多組測試 (C 值為 $1.5 \sim 2.0 \text{ t/m}^2$ ； φ 值為 $18^\circ \sim 21^\circ$)，找出模擬所得之崩塌發生時間及規模最接近現場狀況的參數值 (如表 1)。同時假設坡趾

土層厚為 2 m，依地質圖上該處之位態資訊，設定不透水之基岩坡度為 6°。

表 1 2022 年基隆槓子寮崩塌模擬相關參數

Table 1 Hydraulic characteristics and soil strength of the soil of the slope in Keelung city, Taiwan

Hydraulic parameters	K_s cm/s	θ_s m ³ /m ³	θ_r m ³ /m ³	ψ_m cm	σ -
Surface	5.00×10^{-3}	0.645	0.398	-43.9	1.19
Middle	5.00×10^{-3}	0.645	0.398	-43.9	1.19
Lower	5.00×10^{-3}	0.645	0.398	-43.9	1.19
Soil strength	γ_{sat} t/m ³	C tf/m ²		ϕ degree	
	2	2.0		19.11	

七、土體內初始孔隙水壓設定及降雨-入滲-崩塌模擬

本研究為模擬自然情況下，坡面內土壤水份分布情形，並消除土體內不同起始孔隙水壓條件對後續模擬之影響，乃先設定所有坡面內全部土壤之初始壓力水頭均為 -0.01 m，再給予強度為 0.1 mm/h 之固定降雨，持續進行降雨-入滲模擬直至土壤內總含水量不再變動為止（本案例為 600 天）。正式模擬階段，則採用 2022/1/1~2022/2/23 基隆雨量站之 10 分鐘雨量資料。

結果與討論

經測試，採用如表 1 之參數，該坡面之降雨-入滲-崩塌模擬之崩塌時間為 2022 年 2 月 23 日 17 時 50 分 (77,390 min)，與水土保持局重大土砂災例報告紀錄之實際發生崩塌時間 2022 年 2 月 23 日 18 時相近 (水土保持局，2022)。檢視 2022 年 1 月 1 日 0 時至 2 月 24 日 0 時之雨量資料，基隆地區連續降雨數十日，累積雨量達 1,237mm，而 IRIS 模式可完整模擬降雨過程中土壤含水量及安全係數 F_s 之變化 (如圖 4a)，當土體含水量逾一定門檻時，代表地下水位快速升高，進而造成安全係數 F_s 快速下降。其中 1 月 1 日 0 時之單位寬度土體含水量為 870.5 m³/m，而 2 月 23 日 17:50 崩塌發生時，單位寬度土體含水量已升高為 952.9 m³/m，亦即已上升約 9.5%，最終導致邊坡失穩造成崩塌。而圖 4b 顯示，模擬崩塌當下土壤含水量分布，以及發生崩塌時之臨界滑動面位置。

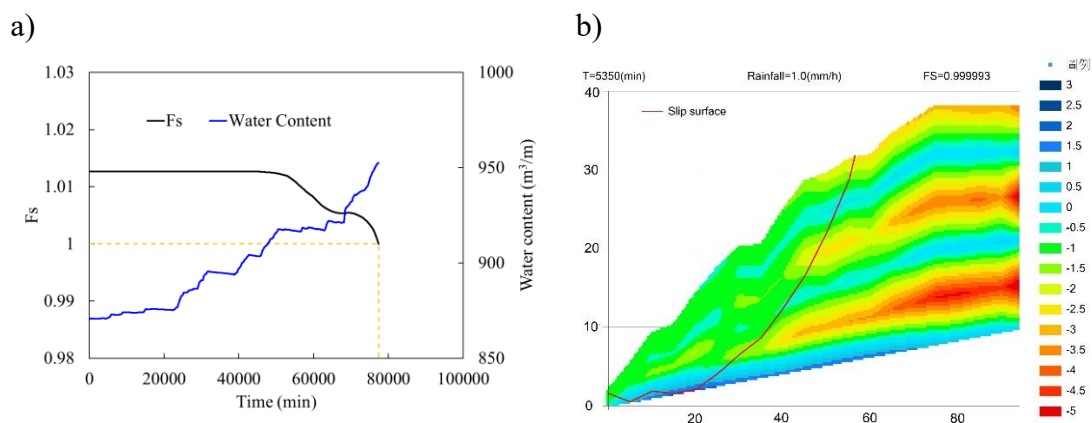


圖 4、IRIS 模擬結果。a) 土壤含水量與 F_s 關係圖、b) 臨界滑動面分析結果

為進一步比照模擬之崩塌規模與現地狀況之差異，本研究將模擬出之臨界滑動面與實際崩塌之前後期地形剖面進行比對 (圖 5)，顯示 IRIS 模式所模擬的崩塌規模

(Calculated Slip Surface，紅色虛線) 較實際崩塌情況 (Observed Slip Surface，藍色實線) 小。推測研究區域於崩塌時可能發生多次崩塌，才達到坡面的穩定，惟 IRIS 模式之模擬於第 1 次崩塌發生後即停止計算。此外，根據陳振宇等人 (2014) 研究指出土壤摩擦角愈小，初次崩塌時規模愈大。本研究區域之崩塌土體係為回填土，目前尚無實際採樣之土壤參數可供模擬使用，因此本研究以經驗值範圍測試與崩塌時間及規模最接近的土壤凝聚力 C 值及土壤摩擦角 ϕ 值，後續如能取得現場採樣之土壤參數，將可進一步驗證模式之適用性。

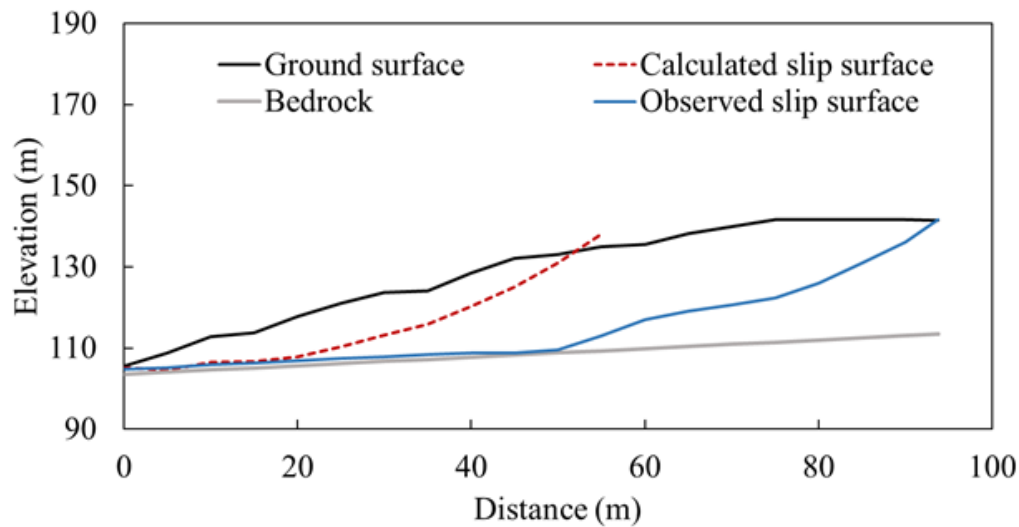


圖 5、臨界滑動面與崩塌前後之地形剖面

結論與建議

邊坡崩塌相對於其它類型的土砂災害發生機率較高，且其土砂堆積物易再衍生形成如土石流等二次災害。因此，邊坡之定期觀測及地形特徵變化之掌握係為邊坡安全管理上的重要議題。本研究使用 BigGIS 內建之巨量且多時期衛星及航空影像，可提供目標研究區域之過去到現在的多時期影像，並探討該區域是否曾經歷大型開發或屬於相對脆弱的地質敏感區。長延時降雨導致土體孔隙水壓上升，往往造成崩塌等災害，惟多數邊坡穩定分析模式，只能分別模擬降雨-入滲後，再將其結果應用於邊坡穩定分析，無法完整呈現降雨入滲、孔隙水壓變化與臨界滑動面等耦合分析過程。IRIS 模式目前可同步進行降雨、入滲現象及邊坡穩定分析模擬，完整呈現各階段土體孔隙水壓變化情形，並自動判定臨界滑動面位置及崩塌時間，未來如能進一步擴充為 3 維模式，將有助於崩塌防減災工作。

引用文獻

- 1) 恩田裕一、小松陽介、辻村真貴、藤原淳一 (1999)，「降雨流出ピークの遅れ時間の違いからみた崩壊発生時刻予知の可能性」，砂防学会誌，51(5)，48-52。
- 2) 陳振宇、藤田正治、堤大三 (2014)，「基岩位置及土層特性對降雨逕流與大規模崩塌之影響」，中華水土保持學報，45(4)，pp.243-256。
- 3) 水土保持局 (2022)，重大土砂災例 (2022)。
(<https://246.swcb.gov.tw/Achievement/MajorDisasters>)
- 4) Kosugi, K. I. (1996). Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, Water Resource Research, Vol. 32, No. 9, pp. 2697-2703.
- 5) Tsutsumi, D. and Fujita, M. (2008). Relative importance of slope material properties and

timing of rainfall for the occurrence of landslides, International Journal of Erosion Control Engineering, Vol. 1, No. 2, pp. 79-89.

- 6) 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.