集水區降雨促崩潛勢分析

譚志豪 呂昱達 冀樹勇

費立沅

財團法人中興工程顧問社

經濟部中央地質調查所

摘要

本文研擬一套結合定率模式與最佳化技術之廣域降雨促崩潛勢分析方法,藉以預測集水區內降 雨誘發岩屑崩滑之發生時間、規模及空間分布。模式考量地文及水文因子於空間與時間之分布變異, 透過評估降雨入滲導致暫態地下水壓上升進而對坡地穩定性所造成之影響。另結合GIS技術,將傳 統單一邊坡穩定分析拓展至整個集水區範圍,同時預測集水區內所有邊坡單元在特定降雨條件下之 崩塌潛勢、時機及範圍。由於定率模式之成效取決於參數能否取得及其代表性,本文將最佳化技術 納入定率模式,並透過多次颱風事件之山崩目錄進行最佳化模式率定與驗證,除提升模式之正確性 及準確度外,更可大幅縮短率定時間。實務應用上,本方法除能評估降雨促崩潛勢與時機外,後續 可進一步結合氣象雨量即時與預報資料,擴展成山崩預警系統,可供相關單位後續於預警準則及保 全對策擬訂時參考。

關鍵字:山崩、岩屑崩滑、山崩潛勢、定率法、最佳化。

Regional Landslide Potential Analysis Using a Deterministic Dynamic Model Integrated with Optimization Techniques

Chih-Hao Tan Yu-Da Lyu Shu-Yeong Chi

Li-Yuan Fei

Sinotech Engineering Consultants, Inc.

Central Geological Survey, MOEA

Abstract

This paper presents an effective method that integrated the GIS-based deterministic dynamic model with the optimization technique to estimate the regional rainfall-induced landslide potential. The deterministic dynamic model, TRIGRS, couples an infinite-slope stability analysis with a one-dimensional analytical solution for rainfall infiltration. To improve the obtainment of representative parameter values of deterministic model, the optimization techniques were creatively applied for model calibration and verification accroding to the typhoon event-based landslide inventories. The calibrated and verified model can predict the triggered time, the scale, and the spatial distribution of shallow landslides by considering the spatial and temporal variabilities of hydro-geological parameters and rainfall intensities. Using the Morakot typhoon event as an example, the model successfully predicted the initiation locations of landslides in the mountain area of Kao-Ping River watershed. Our preliminary results could be regarded as a good reference to the authority for landslide hazard mitigation and risk management.

Key Words : landslide, shallow landslide, landslide potential, deterministic method, optimization.



近年來全球氣候異常,水文極端現象明顯, 再加上台灣先天具有地形陡峻、地質複雜且豪雨 集中等特性,故每逢暴雨侵襲便常釀成規模不等的坡地災害,嚴重危害流域中、下游民眾生命財 產安全。以2009年8月侵台的莫拉克颱風為例, 強大的雨勢不僅在南台灣沿海鄉鎮造成嚴重的 水患,更在流域中、上游山區誘發2萬餘個大小 不等的山崩及伴隨而來的土石流災害,除直接造 成民眾傷亡外,山崩與土石流毀壞山區對外連絡 交通形成所謂的孤島效應,增加救援的難度。此 外,龐大的土砂伴隨洪水宣洩而下,除造成水庫 嚴重淤積外,運移至下游更造成嚴重水患。鑑 此,相關單位正急思一套有效的山崩預警系統並 擬訂相關防治與保全對策。

我國地質法已於民國 99年11月16日正式 由立法院三讀通過。根據地質法第九條第二項所 訂定之「地質敏感區基地地質調查及地質安全評 估作業準則」中明白指出,今後針對山崩與地滑 地質敏感區需進行完整的地質調查及安全評 估。根據歷年地質災害調查成果顯示,山崩與土 石流的發生易受地質、地形與水文環境之影響, 具有地域性及重複性,且影響範圍廣布。因此, 欲針對集水區內範圍廣布且數量龐大的地質敏 成目標。唯傳統坡地穩定評估模式多僅針對單一 邊坡進行相關調查、試驗與分析作業,屬小尺度 模式分析。若欲將分析尺度擴大至整個大尺度集 水區廣闊範圍時,則常受制於現地調查、試驗參 數及監測設施之規模與數量不足,而無法同時針 對集水區內數以百計的邊坡單元同時進行分 析。因此, 國際間針對集水區之山崩潛勢評估研 究多以大尺度模式為之。

二、文獻回顧

2.1 廣域山崩潛勢評估方法回顧

根據統計,台灣山區所發生之山崩災害約 70%為發生在岩屑層之岩屑崩滑(可類比於國外 文獻常稱之淺層山崩 Shallow Landslides)。其 發生機制為降雨落於坡面後,雨水經由入滲作用 進入岩屑層,造成坡地特性改變(包括單位重增 加、暫態孔隙水壓上升、剪力強度降低等),進而 影響穩定性。當坡地穩定性達到臨界破壞狀態 時,則開始產成崩滑進而形成山崩災害。

國際間評估針對區域性岩屑崩滑型山崩之 潛勢分析方法可概分為四類:第一類評估方法為 專家法,包括地形判釋法及專家評分法,主要由 專家依坡地所處之地形、地質或水文等條件及其 主觀經驗決定各評估因子之權重後,透過加權疊 加方式決定其山崩潛勢。第二類方法為統計法, 包括:多變量分析、羅吉斯迴歸、判別分析、條 件機率分析等,透過統計手法建立各影響因子與 山崩發生之關聯性,藉以評估具相似因子組合特 性之坡地後續發生山崩之可能性。第三類方法為 人工智慧法,係運用人工智慧技術,如:類神經 網路法、模糊理論、基因演算法等,建立各影響 因子之權重組合關係。第四類方法為定率法(或 稱定值法),該法以極限平衡法為基礎,建構坡地 單元之物理概念模型並輸入相關力學與水文地 質參數,藉以評估特定降雨條件下坡地之穩定性 (李錫堤、黃健政,2005;李錫堤,2009;譚志 豪等,2009)。

2.2 各評估方法之優勢與應用限制

上述各類方法均有其優、缺點及應用限制。 其中,專家法簡易方便,專家評分搭配GIS圖幅 套疊,可迅速獲得各區域之山崩潛勢。惟其主觀 性強烈,且無通用判斷準則可循,不同專家所建 議之山崩潛勢亦視分析區域之地形、地質及水文 等條件不同而異,彼此難以比較。

統計法較專家法為客觀中性,特定區域之評 估結果也因影響因子之普遍性而較易擴及適用 於其他區域。統計法對影響因子之選用是否夠代 表性及對資料樣本之數量及正確性需求較高。因 此,若僅採地形相關因子、或是僅以有限樣本個 數所統計獲得之成果來推論整個母體行為,則將 存在較大的誤差,且各影響因子之權重常不具物 理意義。又由於統計模式多無法考慮動態時間因 素,且較難取得山崩發生時間所對應之累積雨量 進行統計,故後續在即時預警應用將有所限制。

人工智慧法藉由山崩與非山崩資料訓練模 式並進行學習,進而建立規則,藉以對山崩潛勢 進行分類,並從中區隔出較具山崩潛勢之區域。 惟相關分析理論較為艱深、不易推廣應用,且易 受到訓練因子之代表性、相依性及資料良窳等因 素而影響成果。此外,多未考量動態時間因素, 故後續於即時預警應用將受限制。

至於定率法,目前國際間之研究現況已發展 至可結合降雨入滲之未飽和行為及考量降雨延 時影響之動態模式 (Dynamic Model),有利於後 續結合即時雨量資料甚至預報雨量進行坡地安 全預測。此外,各分析網格可獨立運算或可考量 地表逕流量於網格間之流通,亦可結合不平衡力 等力學機制評估崩塌區及堆積區之變遷情形,模 擬適應能力較佳。惟定率法所需使用之相關力學 及水文地質參數常受限於調查與試驗規模不足 而難以取得廣大集水區範圍之代表性參數,使得 應用上常遭遇困難。

2.3 定率分析之突破

定率法需具備代表性參數才能發揮其最大 功效。惟早期國內在流域中、上游山區所進行之 水文地質調查、試驗與評估工作甚少,故相關可 供廣域降雨促崩模式分析使用之參數亦少。所幸 自民國 95 年起,經濟部中央地質調查所主導之 「易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建 置-集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查 評估」專案計畫,逐年按區域針對全台各流域進 行水文地質對坡地穩定性影響之調查評估工 作,除進行大規模鑽探調查及相關室內外試驗以 廣泛取得相關水文地質特性參數之外,更透過執 行一系列山崩與水文地質特性之關聯性研究,搭 配最佳化參數率定技術,已大幅提升定率法於參 數取得方面之經驗與成效,可供學術界進行後續 研究及提供相關主管單位研擬減災、治災對策及 國土復育管理之參考。

三、研究方法

針對降雨引致區域性山崩之潛勢評估課 題,本文以定率式模式結合最佳化參數反算技術 進行廣域降雨促崩潛勢分析。其中,定率模式可 結合地質特性、地下水位、水文地質特性、降雨 強度與延時等參數之空間分布差異,且考量動態 時間因素,求解降雨期間地表風化層之未飽和入 滲問題,並進一步透過極限平衡法評估降雨期間 集水區各邊坡單元之穩定性變化,模式具有強烈 的空間性及依時性。

為克服傳統定率模式於參數率定所需耗費 之人力與時間資源,本文引入最佳化技術 (Optimization Technique)於降雨促崩定率模 式分析,並透過設定相關率定原則,進行自動化 參數率定,使目標函數最小化,以獲得較佳之參 數組合。 後續應用上,可進一步透過已率定完成之模 式,預測特定降雨強度及延時分布條件下流域內 各邊坡單元發生崩塌時之規模、位置及其對應之 臨界雨量,相關成果可提供後續研擬相關預警機 制及保全對策之參考。茲將本文所提出之動態模 式與最佳化技術基本原理概述於后。

3.1 降雨促崩動態模式簡介

為考量因降雨入滲引致山崩之破壞機制,除 考量一般的地形因子外,應與坡地之岩性、風化 程度、初始含水量、未飽和層入滲行為及材料強 度弱化等特性有著密切的關係,上述因素將影響 山崩發生的時間與規模 (Iverson, 2000; Godt, 2004; Savage et al.,2003; Savage et al.,2004)。

本文採美國地質調查所(USGS)發展之區 域性暫態降雨入滲邊坡網格穩定分析模式 (Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-Stability Model, 以下簡稱TRIGRS)進行集水區坡地降雨促崩潛 勢分析(Baum et al., 2002)。TRIGRS模式係 將集水區空間離散成眾多網格單元之組合,各網 格單元之幾何特徵(如:坡度、厚度)、物理參數 (如:單位重)、力學參數(如:城聚力、摩擦角)、 水文地質參數(如:地表入滲率、透水係數、擴 散係數)及水文特性(如:地下水位及降雨強度) 等參數值均可在空間及時間上設定其變異性。

模式首先透過求解未飽和流動方程式 (Richards Equation)獲得降雨期間各網格之地 下水壓力之動態變化。待求得暫態地下水壓力分 布後,再結合極限平衡法之無限邊坡理論求得各 邊坡網格於此降雨期間安全係數之變化。 TRIGRS 模式考慮地下水壓力水頭隨時間之動 態變化可由下列公式表示,即:

$$\begin{split} \psi(Z,t) &= [Z - d_Z]\beta \\ &+ 2\sum_{n=1}^{N} \frac{I_{nZ}}{K_Z} H(t - t_n) [D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}} \\ &\times \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ ierfc \left[\frac{(2m-1)d_{IZ} - (d_{IZ} - Z)}{2[D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] + ierfc \left[\frac{(2m-1)d_{IZ} + (d_{IZ} - Z)}{2[D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} \\ &- 2\sum_{n=1}^{N} \frac{I_{nZ}}{K_Z} H(t - t_{n+1}) [D_1(t - t_{n+1})]^{\frac{1}{2}} \times \\ &\sum_{m=1}^{\infty} \left\{ ierfc \left[\frac{(2m-1)d_{IZ} - (d_{IZ} - Z)}{2[D_1(t - t_{n+1})]^{\frac{1}{2}}} \right] + ierfc \left[\frac{(2m-1)d_{IZ} + (d_{IZ} - Z)}{2[D_1(t - t_{n+1})]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} \end{split}$$

$$(1)$$

式(1)中, $\psi(Z,t)$ 為地下水壓力水頭分布,Z 軸垂直向下為正,t為時間,等式右邊第一項 $[Z-d_z]\beta為穩態時之地下水壓力水頭分布,其餘$ 項為暫態地下水壓力水頭分布。Z=z/cosa,z為 $垂直坡面方向、α為坡角,<math>d_z$ 為穩態地下水位之 深度, d_{1Z} 為不透水邊界沿Z軸方向之深度, $\beta = \lambda cosa$, $\lambda = cosa - (I_z/K_z)_{1T}$:沿Z軸方向之 長期穩態地表流通量, K_z 為沿Z軸方向之飽和水 力傳導度, I_z 為沿Z軸方向之穩態入滲率, I_{nz} 為 降 雨 期 間 各 延 時 區 間 之 降 雨 強 度 , $D_1 = D_0 cos^2 \alpha$, D_0 為飽和水力擴散係數,N為總 區間數目,H(x)為 Heavyside 階梯函數, $ierfc(\eta)$ 為互補誤差函數。m 為考量無限邊坡若於有限深 度內具不透水邊界之條件下,互補誤差函數級數 解之累積項數

再透過極限平衡法之無限邊坡穩定性分析 理論,代入坡角 α 、土與水之單位重 γ_s , γ_w 、暫 態地下水壓力水頭 $\psi(Z,t)$ 及力學參數凝聚力c與 摩擦角 ϕ 後,解得各網格單元之崩塌安全係數為:

F -	$tan \phi$	$\frac{c-\psi(Z,t)\gamma_w}{\tan\phi}$	(2)
$\Gamma_s -$	$\tan \alpha$	$\gamma_z Z \sin \alpha \cos \alpha$	

此外,TRIGRS模式針對 Iverson (2000)之 研究成果增加了下列條件限制,以確保入滲期間 地下水位不至高出地表,即:

 $\psi(Z,t) \le Z\beta \dots (3)$

3.2 最佳化技術於山崩潛勢評估之整合應用

遺傳演算法(Genetic Algorithms, GA)為 國際間近年來常用的隨機搜尋與最佳化方法。該 法最早由密西根大學 Holland (1962)等人所提 出,其概念是模仿遺傳學上「物競天擇,適者生 存」的自然演化法則。透過模擬自然遺傳和淘汰 的數學模型,應用於學習、適應與搜尋最佳解的 問題。遺傳演算法將欲求解問題中之多組設計變 數定義為染色體(Chromosome)。評估染色體的 好壞係採用適應函數(Fitness Function),其適 應值(Fitness Value)越好則代表對外部環境 的適應性高,越能留在族群中繁衍下去。遺傳演 算法中擁有多條染色體之集合稱為族群 (Population),其大小需視問題的種類來決定。 一般而言,族群內染色體數越多代表著基因種類 越多,越具多樣性。族群在演化過程中,會迭代 進行著選擇 (Selection)、交配 (Crossover) 與 突變 (Mutation) 等運算來交換染色體間的基 因資訊。最終藉由累積前代的優秀基因得到更佳 的子代 (Offspring)。

本文採用實數編碼遺傳演算法(Real-coded Genetic Algorithms, RGA) 作為主要演算核 心,基因直接以實數方式作表達,不需進行編碼 與解碼的動作。將上述遺傳演算應用於最佳解組 合之搜尋,其中染色體代表搜尋空間中的某特定 位置,透過選擇、交配與突變等運算,在搜尋空 間上進行跳躍式搜尋,不僅可有效避免局部最佳 解的陷阱,更可以藉著累積前代的優秀基因得到 更佳的子代,進而加速達到最佳化目標。

最佳化所採用的束制函數處理方法為懲罰 策略 (Penalty Strategy),其操作為在原目標函 數中增加一懲罰項,其懲罰值大小視其個體違反 限制式的程度而言。違反越多則懲罰越大,反之 則越小。如此可將有限制式問題轉換成無限制式 問題,方便求解。懲罰策略為傳統數學規劃法的 常用方法,係將目標函數與束制函數予以加權組 合後得到一個無束制化的擬目標函數 (Pseudo Objective Function),並將其定義為適應函數。 利用最佳化技術進行參數率定時,其率定之結果 好壞受到適應函數影響極大,好的適應函數將能 有效幫助最佳化搜尋並縮短分析時間,而壞的適 應函數除導致分析結果不盡理想外,甚至找不到 合理之反算分析結果(呂昱達, 2011)。

本研究針對降雨促崩定率模式之參數最佳 化問題,採下列數學模型作為適應函數,針對力 學參數(*c*, *ø*)及水文地質參數(*K*, *D*, *I*_z) 進行量化(各束制函數均正規化至0~1數值)。另 考量既有崩坍地、水系與道路對環境之影響,本 研究係採折減該區力學參數與水文地質參數之 方式呈現。

最佳化目標除將傳統崩塌正確率作為考量 因素外,另特別納入崩壞比與累積雨量之相關性 作為參數率定基準,使參數最佳化成果能更臻合 理完善(特別是針對水文地質參數)。適應函數可 表示為:

 $F = g_1 \times FSI + g_2 \times N_2 N_{12} + g_3 \times N_3 N_{34} \dots (4)$ + $g_4 \times RN_1 + g_5 \times RN_4 + g_6 \times RC$

其中,g,為各束制函數之懲罰值,而各束制

函數說明如下:(1) FSI 為降雨初期即誤判山崩 之情形,定義為 $FSI = (N_{ini} - FS_{in})/N_t$,其中 N_{ini} 為 未降雨時崩壞之網格總數、FS_{ini}為未降雨時崩壞 之各網格安全係數總和、N,為網格總數,定義為 *N_i* = *N*1+*N*2+*N*3+*N*4,其中,*N*1~*N*4定義同前 述計算山崩正確率之誤差矩陣法;(2) N,N,,為山 崩組誤判情形,定義為 N2/(N1+N2);(3) N₃N₃₄為 非山崩組誤判情形,定義為 N3/(N3+N4);(4) RN,為山崩組 N1安全係數過低之情形,定義為 RN₁=1-(FS_{N1}/N1),其中,FS_{N1}為N1網格之安 全係數總和;(5) RN₄為非山崩組 N4安全係數過 高之情形 (TRIGRS分析之安全係數最高 FS=10), 定義為 RN₄ = [(FS_{N4}/N4)-1]/9, 其中, FS_{N4}為N4網格之安全係數總和;(6) RC為衡量 水力參數率定良窳之標準,定義為 RC = (1-C)/2,其中,C為各小時累積崩壞面積 比與累積降雨強度之樣本相關係數,定義如下:

$$C = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}} \dots \dots (5)$$

式(5)中, S_x 為各數值 x_i 與其算術平均數 \bar{x} 之差異平方和的平方根; S_y 為各數值 y_i 與其算 術平均數 \bar{y} 之差異平方和的平方根; S_{xy} 為變數 x與 y的差異積項和; x_i 視為崩壞面積比、 y_i 視 為時雨量。

上述公式為計算單一目標函數時狀況,若為 N場降雨事件之多目標函數F_{all},其計算方式可 針對各單一目標函數F_i之總和進行求解,即:



3.3 模式分析之正確率評估

為了定量衡量模式率定、驗證或預測成果之 正確性與準確度,有必要針對模式分析所得之山 崩區域 (FS ≤ 1.0)、非山崩區域 (FS > 1.0) 與實 際山崩目錄進行比對,以量化數據評估模式之執 行成效。廣域山崩分析中,常用來評估模式良窳 之方法有:(1) 誤差矩陣、(2) 預測率曲線、(3) 修 正成功率指標。三者內容敘述於后。

1. 誤差矩陣

前述模式率定與驗證內容中,正確率之評估 可利用誤差矩陣法 (error matrix method) 予 以表示 (參考自Stehman, 1997),藉以個別評估 模式預測山崩之正確率、預測非山崩之正確率及 模式預測之總正確率。

誤差矩陣相關參數定義如表一所示。其中, 山崩正確率定義為:N1/(N1+N2);非山崩正確 率定義為:N4/(N3+N4);總正確率定義為: (N1+N4)/(N1+N2+N3+N4)。

此法同時考量山崩組與非山崩組之正確 率,惟在崩塌面積所占比例不高之集水區,一般 多會因過度強調非山崩組之正確率而導致高估 了模式之總正確率,此部分需加以檢討。

表一 誤差矩陣法之相關參數定義

網格總數	t	模式預測結果		
N1 + N2 + N3	3 + N4	$(FS \leq 1.0)$	(FS > 1.0)	
富败出自山口	山崩	N1	N2	
真除朋场状况	非山崩	N3	N4	

2. 預測率曲線

預測率曲線(或採ROC曲線)通常用以驗 證模型的預測能力。繪製預測率曲線時,先以潛 勢值(或安全係數)做分級,接著計算每一等級 解釋山崩的能力(即落入該等級的山崩面積除以 該等級全部分析單元面積),最後繪製由高潛勢值 (或低安全係數)到低潛勢值(或高安全係數) 之累積曲線。橫軸及縱軸範圍均為0至1,曲線下 面積(area under curve, AUC)亦介於0至1。 AUC值接近1.0表示該模型正確率極高;AUC值 接近0.5則表示該模型與隨機猜測相近。

預測率曲線之AUC值可客觀衡量模式良 窳,但缺點為較強調山崩組之正確率,只要實際 山崩範圍能落於預測之高潛勢範圍,即使模式超 估高潛勢面積,仍會得到偏高的AUC值,後續預 警應用上需詳加確認是否超估山崩範圍的問題。

3. 修正成功率指標

修正成功率指標係針對山崩組與非山崩組 之成功率進行加權修正 (Modified Success Rate, MSR),綜合考量山崩組與非山崩組之正確 率,藉以評估模式率定或驗證之良窳。該指標由 Huang and Kao (2006)所提出,其定義為:

式中,SR_{number}為預測山崩之正確率(%);SR_{cell} 為預測非山崩之正確率(%)。

修正成功率指標通盤考量山崩組與非山崩 組之正確率,並以等權重方式看待山崩組與非山 崩組之正確率,改進誤差矩陣法過於強調非山崩 組權重之問題,同時亦避免預測率曲線法AUC值 過於強調山崩組正確率而有超估山崩範圍之缺 點,在綜合評估模式之總正確率較為合理。

四、降雨促崩模式分析案例

4.1 案例簡介

1. 地形概述

高屏溪流域在美濃以北、茂林至三地門以東 地區屬於山地地形。荖濃溪及旗山溪為高屏溪上 游之兩大主要支流,荖濃溪以西屬於阿里山山 脈,荖濃溪以東則屬關山山塊,兩山體主要稜線 均呈北北東-南南西方向延展。荖濃溪發源於玉 山主峰東北坡,向東北流經八通關山崖附近轉 向,蜿蜒南流,縱貫高屏溪流域之中心位置,在 嶺口北方與旗山溪交匯。旗山溪發源於玉山主峰 西南坡,大致平行流域西緣向南流,與荖濃溪匯 流後為高屏溪,在沖積平原上續往南流,形成高 雄與屛東之縣界。高屏溪流域地形概況詳圖一。

2. 地質條件

高屏溪流域之地層與區域性地質構造大致 呈北北東一南南西走向延伸,主要斷層線多數為 由東向西逆衝之逆斷層。藉由沙里仙溪斷層、眉 溪斷層、土壟灣斷層以及潮州斷層,將流域分為 三個地質區塊。位於流域北段,眉溪斷層與沙里 仙溪斷層之間所出露的地層屬於雪山山脈地質 區之變質岩層;潮州斷層與土壟灣斷層以東屬中 央山脈地質區;潮州斷層與土壟灣斷層以西屬於 西部麓山帶地質區,詳圖二(參考經濟部中央地 質調查所1/50,000地質圖)。

3. 水文條件

由歷年雨量資料顯示高屏溪流域內各測站 年平降雨量介於1,980至4,350mm之間,年平均 降雨量分布趨勢,靠近中 央山脈地區較大,平 地及沿海地區則較小。此外,該流域降雨量的時 間分布多集中在5至9月之豐水期,約佔全年雨量 的90%,主要原因為颱風及後續所帶來西南氣流



圖二 高屏溪流域地質圖

的豪雨所造成,而8月為單月降雨最多的月份。因降雨時空分布極不平均,造成流量枯豐明顯。

4.2 分析參數圖層建置

為適用於集水區尺度,本文採用GIS系統作為主要的分析工作平台,進行資料數化、儲存、圖層套疊、整合分析及展示查詢等作業,以建立TRIGRS程式所需之輸入參數圖層(中興工程顧問社,2009)。

首先透過坐標定位將地表高程測量、現地調 查與試驗位置及既有參數資料庫等資訊予以標 定連結;再透過GIS系統分層建立研究區域之各 類分析圖層,包括地理空間資訊(高程、坡度、 坡向)、地質資訊(地質分區、地質構造)、水文 資訊(地下水位分布、雨量分布)、地文資訊(物 理性質、力學特性、水力特性);再利用ArcGIS 所提供之空間分析功能(Spatial Analysis)將 上述資訊透過內插運算(如克力金法、或徐昇氏 多邊形法)及資料格式轉換shape向量格式轉成 Raster網格格式,並輸出成TRIGRS模式所需之 ASCII格式;再結合RS衛星影像、航空照片等圖 層所建立之事件型山崩目錄進行交叉最佳化參 數率定並驗證其分析成效。茲將本研究區域應用 上述3S技術所製作之各項圖層介紹如后。

 1. 坡度:係由經濟部中央地質調查所提供之 5m解析度DEM所產製。高屏溪流域地勢陡峻, 高程落差大,研究區域內除河谷鄰近區域外,扣 除平原區邊坡坡度多介於20至51度間,流域內最 陡處坡角可達88度。

2. 力學參數及水文地質參數:根據中央地質 調查所之高屏溪流域1/50,000流域地質圖,先將高 屏溪流域分為多個地質單元,包括潮州層、畢祿山 層、長枝坑層、南港層、廬山層…等,其分布位置 可參考圖二。再蒐集過去研究區域內各岩層之既有 參數及文獻作為初值,最終輸入降雨促崩事件之山 崩目錄進行最佳化參數率定,獲得相關參數代表值 (包括: c, , K, D, I_z),如表二所示。

── 參數	с	ϕ	Kz	D	Iz
	(1 D.)	(0)	$ imes 10^{-6}$	$ imes 10^{-4}$	$ imes 10^{-8}$
地質分區	(kPa)	(*)	(m/sec)	(m2/sec)	(m/sec)
沖積層	$2.5 \sim 3.5$	23~32	$25 \sim 29$	$75 \sim 88$	25~29
階地堆積層	$2.3 \sim 3.5$	23~28	0.63~0.74	1.80~2.20	$0.63 \sim 0.74$
六龜層	$0.8 \sim 1.7$	28~34	$0.50 \sim 0.58$	$1.50 \sim 1.70$	$0.50 \sim 0.58$
紅水坑礫岩	2.0~2.6	30~34	0.10~0.11	0.30~0.33	0.10~0.11
大社層	0.8~0.9	26~28	0.05~0.07	0.15~0.17	$0.05 \sim 0.07$
嶺口礫岩	2.1~2.8	33~39	0.18~0.21	$0.54 \sim 0.63$	0.18~0.21
古亭坑層	$0.3 \sim 0.5$	26~29	$0.05 \sim 0.07$	$0.15 \sim 0.17$	$0.05 \sim 0.07$
鹽水坑頁岩	$3.3 \sim 5.1$	$21 \sim 25$	0.07~0.08	$0.21 \sim 0.24$	0.07~0.08
蓋仔寮頁岩	7.4~12.1	$25 \sim 30$	0.05~0.06	$0.15 \sim 0.17$	$0.05 \sim 0.06$
南港層	$3.7 \sim 5.1$	28~33	2.50~2.90	7.50~8.80	$2.50 \sim 2.90$
潮州層	$4.1 \sim 5.2$	27~32	$0.50 \sim 0.55$	1.50~1.70	$0.50 \sim 0.55$
畢祿山層	2.3~5.2	27~32	0.70~0.83	$2.10 \sim 2.50$	0.70~0.83

表二 各水文地質單元參數率定成果

註1:各參數是以地層分區之表層風化層為主

3. 風化層厚度:本研究於高屏溪流域中、上游地區進行風化層厚度廣泛調查,共進行150處之風化層厚度鑽掘調查。研究成果顯示風化層厚度/電位:m)與坡度s(單位:度)之關聯性強烈。統計成果作為研究區域風化層厚度依據。

 $\ln(d) = -0.0454 \times s + 1.44 \qquad (r^2 = 0.81) \dots (8)$

根據本研究多年累積之調查經驗顯示,因各 流域之地層分布、岩性及水文等條件皆不同,故 統計迴歸成果亦不盡相同。此外,一般坡地坡腳 處多有崩積層、河道侵蝕堆積或受人為開發之影 響,故本研究僅針對坡度介在15度至60度之自然 邊坡進行調查,故式(8)較佳的適用範圍限定在 15度至60度間。

本研究目前正積極蒐集過去台灣山區鑽探 岩心資料,嘗試進行風化層厚度與岩屑層之關聯 研究,另亦嘗試透過山崩案例反算實際發生岩屑 崩滑型山崩之深度,惟此部分牽涉眾多因子之關 聯研究仍在進行而尚未有明確結論,故目前仍以 調查所得之風化層作為評估目標。

4. 初始地下水位:本研究採用SINMAP模 式 (Pack et al., 1998) 計算風化層內初始飽和 度以推估初始水壓分布狀況。其原理利用比集水 面積、坡度及地下水穩態補注量作為依據推估初 始飽和度分布,以推估集水區內各單元土體之飽 和水位線位置。

 5.降雨促崩事件:本文以桃芝、敏督利、海 棠、莫拉克颱風等事件誘發之山崩目錄(如圖三) 作為最佳化參數率定及驗證之基準,以探討暴雨 事件對高屏溪流域坡地穩定之影響。

由於降雨強度及延時將影響坡地穩定性,故 進行降雨促崩分析時,降雨時空分布差異均需納 入考量。由於台灣山區雨量站並非平均分布,因 此大區域降雨分布情形需透過分區計算平均降 雨量方式進行。為進一步考慮後續山崩警戒雨量 之應用,故本研究採用徐昇氏多邊形法考慮雨量之 空間分布效應,在山區有限的雨量站資料條件下較 為適用。圖四與圖五則舉桃芝颱風期間小關山雨量 站資料為例說明雨量資料之時空變異情形。

4.3 最佳化參數率定之成果說明

本文透過前述實數編碼遺傳演算法 (RGA) 針對桃芝、敏督利及海棠三場颱風進行多目標最佳



圖五 降雨強度分布圖(桃芝颱風2001/07/30 05:00)

化參數率定,並透過莫拉克颱風進行模式驗證。經 模式率定及驗證後之參數整理如表二所示。

透過前述TRIGRS模式及最佳化率定成果,輸入各颱風雨量歷時資料進行分析,可獲得模式分析 高屏溪流域於桃芝颱風事件之山崩正確率為 78.2%、非山崩正確率90.4%,修正成功率指標 MSR為84.3%;於敏督利颱風事件之山崩正確率為 76.2%、非山崩正確率90.2%、總正確率89.9%, 修正成功率指標MSR為83.2%;於海棠颱風之山崩 正確率為66.1%、非山崩正確率87.6%、總正確率 87.4%,修正成功率指標MSR為76.9%。另以莫拉 克颱風雨量資料驗證模式之山崩正確率為 43.3%、非山崩正確率為88.2%、總正確率為 85.7%,修正成功率指標MSR為65.7%。

為方便探討前述不同正確率評估方法之差 異,以下則縮小探討範圍,具體舉高屏溪流域中 游之邦腹北溪子集水區為例予以說明。

邦腹北溪集水區位於高屏溪流域上游,附近 著名景點為藤枝藤枝國家森林遊樂區及藤枝部 落。邦腹北溪集水區地質屬潮州層,岩層以深灰 色硬頁岩與板岩為主,間夾透鏡狀變質砂岩或輕 微變質之薄砂頁岩互層。

圖六為邦腹北溪子集水區之模式於莫拉克颱風 事件之驗證成果。透過前述3種正確率評估法評估其 正確率:(1)誤差矩陣:山崩正確率36%、非山崩 正確率80%、總正確率74%;(2)預測率曲線下面積 AUC值為0.6;(3)修正成功率指標MSR值為58%。 顯示模式針對莫拉克颱風此一極端降雨事件之預測 準確度僅差強人意。檢討其可能原因為定率式動態 模式僅能預測山崩發生之起始位置與時機,而無法 評估山崩後所引致之複合型破壞,例如河岸沖刷引 致上方坡頂崩滑、抑或土石流運移等,因災後遙測 影像判釋之山崩目錄多涵蓋各種複合型破壞,故用 其作為正確率計算基準,可預期正確率將偏低。

圖七為假設之超估山崩面積範例,同樣以上 述三種正確率評估法表示:(1) 誤差矩陣之山崩 正確率72%、非山崩正確率38%、總正確率42%; (2) 預測率曲線AUC值為0.78;(3) 修正成功率 指標MSR值為55%。由上述探討可知,誤差矩陣 過於強調非山崩組正確率;AUC值則過於強調山 崩組正確率,無法反應超估山崩之情形。MSR值 常不若前二者為高,但兼顧山崩組與非山崩組之



圖六 邦腹北溪集水區之模式驗證成果(莫拉克颱風)



圖七 邦腹北溪集水區之超估山崩面積假設範例

正確率,較不會有過於樂觀或錯估情況發生,故 本文建議以MSR值來衡量模式正確率之良窳。

4.4 定率式動態模式分析之應用

完成模式率定與驗證後,即可針對未來特定 降雨條件進行降雨促崩潛勢預測。為說明此模式 應用成果,本研究以200年重現期24小時延時之 降雨條件為例予以說明。

首先透過降雨頻率分析及雨型分析建置流域內 各雨量站24小時延時之正規化設計雨型(舉小關山 雨量站為例,如圖八)及200年重現期累積降雨量製 作成徐昇氏雨量站網(如圖九),並輸入至降雨促崩 模式,藉以預測高屏溪流域200年重現期24小時累 積雨量條件下,高屏溪流域之降雨促崩潛勢。

高屏溪流域200年重現期24小時累積降雨之 促崩潛勢預測結果如圖十所示,本文將分析結果 依安全係數劃分成高潛勢、中高潛勢、中潛勢及 低潛勢四級等區域。分級係參考內政部(90)頒布 之建築物基礎構造設計規範針對路堤邊坡之安



圖九 高屏溪流域200年重現期24小時累積雨量分布



圖十 200年重現期24小時累積雨量之潛勢分布圖

全係數分界。其中,安全係數小於1.0之範圍定義 為高潛勢區;安全係數介於1.0~1.2定義為中高潛 勢區;安全係數介於1.2~1.5定義為中潛勢區;其 他安全係數大於1.5範圍定為低潛勢區。

由於高屏溪流域幅員廣闊,為方便說明成 果,本文列舉三個不同崩塌潛勢之聚落場址,並 藉由相當規模之莫拉克颱風事件評估三處之降雨 促崩潛勢與實際莫拉克颱風引致之山崩進行驗證 比對,以瞭解模式評估成效。茲將三處案例之相 關資訊及驗證成果分述如后(陳建新等,2011; 鍾明劍等,2011;譚志豪與蘇泰維,2010)。

1. 高潛勢案例:藤枝地區

藤枝地區位於高雄市桃源區寶山村(藤枝林 道20km處),鄰近藤枝國家森林遊樂區。此區地 質屬樟山層下段,岩層以深灰色硬頁岩與板岩為 主,間夾透鏡狀變質砂岩或輕微變質之薄砂頁岩 互層。圖十一為藤枝地區200年重現期24小時累 積雨量之降雨促崩潛勢評估結果(由圖十聚焦放 大至藤枝地區),屬於高潛勢或中高潛勢區域。

莫拉克颱風災後現勘成果顯示,藤枝林道沿 線多處崩塌,舊藤枝部落所在地除原先張裂縫再 度張裂外,道路沿線商家均往下邊坡滑動,下滑 深度約一層樓高,且隨處可見顯著張裂縫(詳圖 十二),產業道路更因路基塌陷而成階梯狀破壞。 舊藤枝部落之降雨促崩潛勢分析成果在莫拉克 颱風事件中可獲初步驗證。

2. 中高潛勢案例:吉露部落

吉露部落位於台24線46km處下方,隸屬於屏東 縣霧台鄉吉露村,部落居民以魯凱族為主。地層 屬於潮州層,岩性以硬頁岩或板岩為主,間夾透 鏡狀變質砂岩體(鍾明劍等,2010)。圖十三為 吉露地區200年重現期24小時累積雨量之降雨促 崩潛勢評估結果(由圖十聚焦放大至吉露地區),部落多處於中高潛勢範圍。

莫拉克颱風災後現勘成果顯示,部落產生岩體 滑動,而部落西側及南側皆有大型岩屑崩滑,造成 聯外道路(台24線)完全中斷。部落內自上邊坡至 下邊坡皆有張力裂縫產生,下邊坡則因溪溝坡趾侵 蝕,直接崩滑,屬於複合型破壞(詳見圖十四)。

3. 低潛勢案例:寶隆場址

寶隆場址位於高雄市甲仙區寶隆村匏子寮 南緣,主要通達道路為縣道高128線,地層屬於隘



圖十一 藤枝地區模式預測與實際山崩之比較



圖十二 莫拉克颱風後藤枝地區之崩滑破壞情形



圖十三 吉露地區模式預測與實際山崩之比較



圖十四 莫拉克颱風後吉露地區之岩屑崩滑情形



圖十五 寶隆地區模式預測與實際山崩之比較



圖十六 莫拉克颱風後寶隆場址坡趾處局部崩滑情形 寮腳層,岩性以薄層的頁岩和粉砂岩所組成的帶狀 互層為主(鄭清江等,2010)。圖十五為降雨促崩 潛勢評估結果,並聚焦放大至寶隆地區(由圖十聚 焦放大至寶隆地區),顯示寶隆場址內多數邊坡單 元位於低潛勢範圍,少數位於中潛勢範圍。

莫拉克颱風災後現勘成果顯示,寶隆場址僅 於西側產生兩處小規模之岩屑崩滑,坡趾處則因 溪溝侵蝕而產生崩滑(見圖十六)。

4. 案例評析

本文建議之廣域降雨促崩模式可同時針對 集水區內所有坡地單元進行分析。舉三處本研究 團隊曾進行相關現地調查之地區為例進行成效 說明。藤枝地區於莫拉克颱風期間誘發大規模的 岩屑崩滑(未有明顯深入岩體之深層滑動面)。而 吉露村部落位置之滑動及寶隆地區之局部崩坍 似與岩盤深層水壓上升較有關聯,較類似岩體滑 動型山崩機制,故單純以本文建議之降雨入滲結 合無限邊坡模式則無法獲得十分良好評估成果。

此外,因為山崩具重複性及地域性,特別是 岩屑崩滑型山崩(或稱淺層崩塌)。因此經本模式 評估為降雨促崩高潛勢之區域,即使已進行工程 整治,但因其先天的水文與地質條件易引發山崩 (易鬆動、積水),故更需注意工程設施材料老化 的問題並留意異常的水文地質現象。本模式可提 供作為一個預先示警的提醒作用。

五、結論與建議

 本文以高屏溪流域為研究案例,應用定率 式降雨促崩模式TRIGRS結合最佳化參數率定技 術,針對桃芝颱風、敏督利颱風、海棠颱風及莫 拉克颱風之山崩目錄進行模式率定與驗證。根據 模式正確率評估,各降雨促崩事件之正確率普遍 可達70%以上。經案例探討,建議以修正成功率 指標MSR評估模式良窳較不會有過於樂觀或錯 估情況發生。

本文所採用之定率式動態模式可充分考量地形、降雨入滲、暫態地下水壓、風化層厚度、風化層力學與水文地質特性及降雨在空間與時間之分布變異,能有效描述降雨入滲所引致之岩屑崩滑。並透過舊藤枝、吉露及寶隆場址等不同山崩機制案例探討本模式之適用性。結果顯示本模式針對岩屑崩滑型山崩可獲較佳的評估成效。

 植物根系對對土壤凝聚力及透水性有相 當大的影響,目前針對廣域植被考量尚未有完整 的研究成果。後續研究建議將衛星影像所獲得之 NDVI值納入模式率定考量,以考慮植被此一重 要因子之影響。

4. 定率模式針對莫拉克颱風事件之驗證成 果,其山崩正確率偏低。檢討其原因主要為模式 僅能預測山崩發生的初始位置與時機,而無法評 估山崩後所引致之複合型漸進式破壞,例如河岸 沖刷引致上方坡頂崩滑、土石流運移等,且因災 後遙測影像所判釋之山崩目錄可能涵蓋多種複 合型破壞,故用該山崩目錄作為正確率計算基 準,可預期正確率將較為偏低。需先釐清崩塌機 制後,再做正確率研判會較為適當。

5. 定率式動態降雨促崩模式之優點為考量 動態時間因素,可將即時雨量資料甚至預報雨量 資料輸入模式進行即時降雨促崩潛勢評估。本文 採用徐昇氏雨量站網作為雨量空間分布輸入之 基準,其主要目的是為了後續執行山崩警戒發佈 之考量。由於徐昇氏雨量站網內各雨量站控制範 圍僅有一個地面雨量站資料,而當降雨期間該雨 量站量測值大於山崩警戒值時,則進行警戒或行 動措施。此舉雖犧牲了降雨量空間分布之精度, 但卻免除了即時預警時鄰近雨量站間存在資料 內插所衍生的權重考量及究竟以哪個雨量站測 值為基準值的問題,故徐昇氏法在定率式即時預 警上仍有其優勢與益處。本研究後續將朝向結合 QPESUMS 劇烈天氣監測系統之即時雨量資料 之目標努力,應可改良徐昇氏雨量站網之不足, 以獲得更具代表性及價值的評估成果。

6. 透過定率式模式評估於特定降雨條件下 之可能崩塌位置及崩塌規模,再透過GIS平台進 行山區聚落及交通要衝位置套疊比對後,即時提 供相關預警資訊。本研究成果後續可拓展開發成 區域性岩屑崩滑型山崩預警系統,可供主管機關 對聚落及道路安全有初步的掌握,有助於後續山 崩災害預警準則之建立及保全對策之擬訂。

誌謝

本文得以順利完成,首先感謝經濟部中央地 質調查所「易淹水地區上游集水區地質調查及資 料庫建置-集水區水文地質對坡地穩定性影響之 調查評估計畫」提供經費資源協助及技術支援。 亦感謝中央大學土木工程學系黃俊鴻教授在最佳 化技術領域之大力幫忙。最後對財團法人中興工 程顧問社參與本計畫全體同仁之付出與辛勞致上 最誠摯的謝意。

參考文獻

- 李錫堤,黃健政 (2005),「區域性山坡穩定分析之回顧與展望」, 地工技術,第104期,第33-52頁。
- 李錫堤 (2009),「山崩及土石流災害分析的方法學回顧與展望」 台灣公共工程學刊,第五卷,第一期,第1-29頁。
- 呂昱達 (2011),橋梁基礎最佳化設計之研究,博士論文,中央 大學土木工程學系,台灣中壢。
- 財團法人中興工程顧問社 (2009),「易淹水地區上游集水區地 質調查及資料庫建置-集水區水文地質對坡地穩定性影 響之調查評估計畫計畫成果報告」,經濟部中央地質調查 所研究報告,第151-198頁。
- 陳建新、譚志豪、冀樹勇、蘇泰維 (2011),「廣域降雨促崩模 式之建置及應用-以高屏溪流域為例」,中華水土保持學 報,第42卷,第1期,第1-11頁。
- 鄭清江、譚志豪、鍾明劍、李錦發、費立沅 (2009),「莫拉克 降雨引致高屏地區邊坡淺層崩塌災害勘查與穩定性數值 分析案例」,地工技術,第122期,第133-142頁。

鍾明劍、譚志豪、王金山、冀樹勇、蘇泰維 (2010),「莫拉克

颱風引致吉露部落崩塌之案例研究」,中華水土保持學報,第41卷,第4期,第333-342頁。

- 鍾明劍、譚志豪、冀樹勇 (2011),「不同尺度分析模式於崩塌 潛勢評估之整合應用-以莫拉克颱風事件為例」,中興工 程季刊,第111期,第47-59頁。
- 譚志豪、陳嬑璇、冀樹勇 (2009),「以定率法評估集水區山崩 臨界雨量」,中興工程季刊,第105期,第5-16頁。
- 譚志豪、蘇泰維 (2010),「山林變色部落悲歌」,營建知訊, 第324期,第28-33頁。
- Baum, R.L., W.Z. Savage and J.W. Godt (2002), "TRIGRS -A fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis," U.S. Geological Survey Open-File Report 02-0424.
- Delmonaco, G., G. Leoni, C. Margottini, C. Puglisi and D. Spizzichino (2003), "Large scale debris-flow hazard assessment: a geotechnical approach and GIS modeling," Natural Hazard and Earth System Sciences, Vol.3, pp.443-455.
- Godt, J.W. (2004), Observed and modeled conditions for shallow landsliding in the Seattle, Washington area, Ph.D. dissertation, University of Colorado.
- Holland, J.H. (1962), "Outline for a logical theory of adaptive system", Journal of the Association for Computing Machinery, Vol. 3, pp. 297-314.
- Huang, J.C. and Kao, S.J. (2006), "Optimal estimator for assessing landslide model performance", Hydrol. Earth Syst. Sci., 10, 957–965.
- Iverson, R.M. (2000), "Landslide triggering by rain infiltration," Water Resources Research, Vol.36(7), pp.1897-1910.
- Pack, R.T., D.G. Tarboton and C.N. Goodwin (1998), "The SINMAP approach to terrain stability mapping," the 8th International Congress of the International Association of Engineering Geology and the Environment, Vancouver, British Columbia, Canada, September 21-25, pp.1157-1165.
- Salciarini, D., Godt, J.W., Savage, W.Z., Conversini, P., Baum, R.L. and Michael, J.A. (2006), "Modeling regional initiation of rainfall-induced shallow landslides in the eastern Umbria Region of central Italy," Landslides, Vol.3(3), pp.181-194..
- Savage, W.Z., Godt, J.W. & Baum, R.L. (2003), "A model for spatially and temporally distributed shallow landslide initiation by rainfall infiltration", Proceedings of 3rd international conference on debris flow hazards mitigation: mechanics, prediction, and assessment: 179-187, 10-12 September 2003. Davos, Switzerland.
- Savage, W.Z., Godt, J.W. & Baum, R.L. (2004), "Modeling time-dependent slope stability", Proceedings of 9th international symposium on landslide: 23-28, 28 June-2 July 2004. Rio de Janeiro, Brazil.
- Tan, C. H., Ku, C.Y., Chi, S.Y., Chen, Y.H., Fei, L.Y., Lee, C.F. and Su, T.W. (2008), "Assessment of Regional Rainfall-Infiltration Landslide Susceptibility using the 3S-based Hydrogeological Model", The 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes, June 30-July 4, Xi'an, China.