

台灣西部地區降雨促崩潛勢特性分析

陳建新^{[1]*} 陳憶璇^[1] 譚志豪^[1] 冀樹勇^[1] 蘇泰維^[2]

摘要 本文採用定率法結合 GIS 技術, 評估流域內各邊坡單元於特定降雨條件之穩定性隨時間的變化關係, 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 200 年重現期 24 小時累積降雨延時條件下之崩塌潛勢、時機及範圍, 除能評估各邊坡單元在特定降雨條件下之崩塌潛勢之外, 進一步針對潛勢區分布之水文地質特性探討, 提供相關崩塌特性之資訊, 其成果可供後續防、減災措施擬定之參考。

關鍵詞: 定率法、水文地質特性、崩塌。

Characteristic Analysis of Rainfall-induced Landslide Potential in Western Taiwan

Chien-Hsin Chen^{[1]*} Yi-Hsun Chen^[1] Chih-Hao Tan^[1] Shu-Yeong Chi^[1] Tai-Wei Su^[2]

ABSTRACT This paper presents a preliminary early-warning system for regional rainfall-induced landslides using a deterministic approach that integrates a physical mechanism with real-time rainfall data. The model can predict the scale, the triggered time and the spatial distribution of rainfall-induced shallow landslides by considering the spatial and temporal variability of hydro-geological parameters and rainfall intensities. Model calibration was conducted with the use of multi-temporal satellite imagery. Preliminary results demonstrated that good agreement was found between predicted shallow landslide susceptibility and the inventory. Results predicting landslide susceptibility under 24-hour accumulated rainfall at the 200-year return period and analyzing the hydro-geological characteristics of landslide susceptibility areas can serve as good references for authorities involved in hazard mitigation.

Key Words: Deterministic Analysis, hydro-geological characteristic, landslide.

一、前言

台灣先天上具有地形陡峻、地質複雜且豪雨集中等特性, 故每逢暴雨常釀成規模不等的坡地災害, 嚴重危害民眾生命與財產安全。近年來全球氣候異常,

水文極端現象更趨明顯, 除造成道路中斷與房舍掩埋等災害外, 集水區下游易淹水地區亦產生水患問題。為此, 相關權責單位正急思一套有效的山崩預警系統, 以擬定相關的防治與保全對策。山崩預警系統的參考指標有很多, 諸如: 降雨強度、累積雨量、地下

[1] 財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心

Geotechnical Engineering Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Inc., Taipei, Taiwan.

[2] 經濟部中央地質調查所環境與工程地質組

Specialist, Envir. and Eng. Geology Division, Central Geological Survey, MOEA, Taipei, Taiwan.

* Corresponding Author. E-mail: chchen@sinotech.org.tw

水位抬升量、地表變形量、地中變形速率等。為能早一步發揮示警功效, 普遍採用降雨指標作為預警系統之參考依據。

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感區進行安全評估, 需有適當的分析模式方可達成目標。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

1. 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 (林信亨與林美聆, 2002)、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 (陳熾璇, 2002; 吳佳郡, 2006; 譚志豪等, 2009)。

2. 各評估方法之優缺點

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。

三、研究理論與方法

針對降雨引致區域性山崩之潛勢評估課題, 本文以定率模式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。

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,

$$\begin{aligned} \psi(Z, t) = & [Z - d_z] \beta \\ & + 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nz}}{K_Z} H(t - t_n) [D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \operatorname{ierfc} \left[\frac{(2m-1)d_{LZ} - (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] + \operatorname{ierfc} \left[\frac{(2m-1)d_{LZ} + (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} \\ & - 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nz}}{K_Z} H(t - t_{n+1}) [D_1(t - t_{n+1})]^{\frac{1}{2}} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \operatorname{ierfc} \left[\frac{(2m-1)d_{LZ} - (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t - t_{n+1})]^{\frac{1}{2}}} \right] + \operatorname{ierfc} \left[\frac{(2m-1)d_{LZ} + (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t - t_{n+1})]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

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。 $Z = z \cos \alpha$ ， z 為垂直坡面方向、 α 為坡角， d_z 為穩態地下水位之深度， d_{LZ} 為不透水邊界沿 Z 軸方向之深度， $\beta = \lambda \cos \alpha$ ， $\lambda = \cos \alpha (I_Z / K_Z)_{LZ}$ ：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 步階函數， $\operatorname{ierfc}(\eta)$ 為互補誤差函數。

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 $\Psi(Z, t)$ 及風化土壤剪力強度參數 c 與 ϕ 後，解得各網格單元之崩塌安全係數為：

$$F_s = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{c - \psi(Z, t) \gamma_w \tan \phi}{\gamma_s Z \sin \alpha \cos \alpha} \quad (2)$$

2. 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

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：凝聚力、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：

(FS \leq 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。本文評估模式良窳採用兩種方式：(1) 誤差矩陣、(2) 修正成功率指標，兩者內容敘述於后。

(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。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： $(N1+N4)/(N1+N2+N3+N4)$ 。相關參數定義如表 1 所示。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模式之總正確率，此部分需加以檢討。

(2) 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:

$$MSR = 0.5 \cdot SR_{number} + 0.5 \cdot SR_{cell} \quad (3)$$

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, 同時亦避免傳統 ROC 曲線法之 AUC 值過於強調山崩組正確率而有超估山崩範圍之缺點, 故在綜合評估模式之總正確率以 MSR 較為合理。

四、模式建置與分析

1. 研究區域

本文以中央山脈西側之主要流域為研究範圍, 探討定率式降雨促崩模式建置及應用。研究範圍共包含淡水河、南崁溪、大漢溪、鳳山溪、頭前溪、中港溪、後龍溪、大安溪、大甲溪、烏溪、濁水溪、北港溪、曾文溪、高屏溪、知本溪等 15 個主要流域 (如圖 1), 研究區之高程分布如圖 2 所示。

2. 分析參數圖層建立

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。

首先透過 GPS 系統將地表高程測量、現地調查與試驗位置及既有參數資料庫等資訊透過三維坐標方式予以標定連結; 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 (地下水分布、雨量分布)、地文資訊 (物理性質、強度特性、水力特性); 再利用 ArcGIS 所提供之空間分析功能 (spatial analysis) 將上述資訊透過運算 (如克利金法、或徐昇氏多邊形法) 及資料格式轉換將 Raster 網格式資料轉換為模式輸入所需之 ASCII 格式, 以進行後續降雨促崩潛勢分析。最終將分析成果結合 RS (remote sensing) 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套疊分析以驗證分析成效。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。

表 1 誤差矩陣

Table 1 Error matrix

網格式總數 N1 + N2 + N3 + N4		模式預測結果	
		(FS ≤ 1)	(FS > 1)
實際崩塌狀況	山崩	N1	N2
	非山崩	N3	N4



圖 1 研究區域

Fig.1 Study area

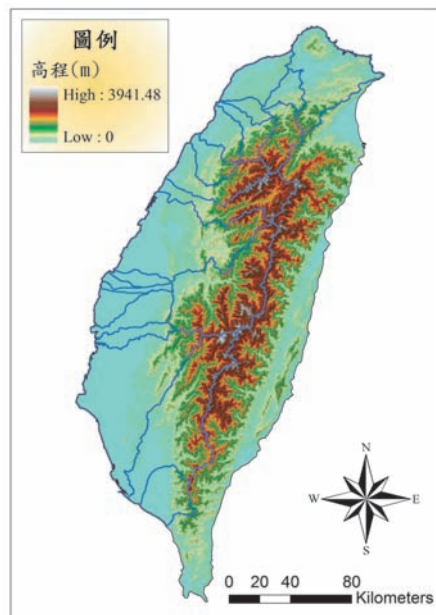


圖 2 研究區域高程分布

Fig.2 Elevation variation of study area

(1) 坡度

研究區之坡度圖層係由經濟部中央地質調查所提供之 5m 解析度 DEM 所產製。研究區內共有 15 個流域，茲以曾文溪流域為例說明，透過數值地形模型資料建立坡度圖層，如圖 3 所示。

(2) 力學參數及水文地質參數

根據研究區之 1/50000 流域地質圖（經濟部中央地質調查所），將流域分為多個地質單元，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，可獲得相關參數代表值。

研究區內共有 15 個流域，茲以曾文溪流域為例，摘錄各地質分區風化土層之相關參數如表 2 所示（財團法人中興工程顧問社，2011）。

(3) 淺層土壤厚度

依中興工程顧問社（2011）研究成果所進行的關聯性分析顯示，當坡度愈陡時，其風化殘餘土層之厚度愈薄。反之，當坡度愈緩則其厚度愈厚。本文除實際針對研究範圍進行風化土層厚度調查外，亦累積相關文獻資料（Delmonaco et al., 2003; Salciarini et al. 2006）進行統計，獲得本研究區域可能發生岩屑崩滑之淺層土壤厚度分布，如圖 4 所示。

表 2 地層分區之材料參數（以曾文溪流域為例）

Table 2 Material parameters of the geological zonations

地質分區	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	K 10 ⁻⁴ (m/sec)	D 10 ⁻² (m ² /sec)	I _z 10 ⁻⁶ (m/sec)
階地堆積層	19.5~23	2.3~3.5	23~28	0.63~0.74	1.8~2.2	0.63~0.74
南莊層	17.8~27.5	4.9~20	23~32	3.5~10	7~20	3.5~10
茅埔頁岩	23.4	7.19~32.1	30~33	0.15~15	0.3~30	0.15~15
烏嘴層	22.1~26.1	6.0~8.0	30~36	0.1~0.2	0.3~0.35	0.1~0.2
大社層	22.8~24	8.0~9.0	26~28	0.05	0.15	0.05
沱水溪層	24.2	14.6~126	30~36	1.2~120	2.4~240	1.2~240
北寮頁岩	24.4	13.1~45	27~30	0.05~50	0.01~100	0.05~50
嶺口礫岩	21.2~25	4.1~5.1	33.1~39	0.18~0.21	0.54~0.63	0.18~0.21
隘寮腳層	22.1~26	0.4~0.6	30~35	0.2~0.23	0.6~0.7	0.2~0.23
鹽水坑頁岩	22.1~26	3.3~5.1	21~25	0.07~0.08	0.21~0.24	0.07~0.08
紅花子層	22.1~26.1	2.5~3.6	31~36	0.1~0.2	0.3~0.35	0.1~0.2
糖恩山砂岩	22.6~26.6	2.5~4.6	28~33	0.08~0.09	0.24~0.28	0.08~0.09

註 1：分析參數是以地層分區之表層風化層為主。

註 2：僅摘錄部分地層，詳見中興工程顧問社（2011）成果。

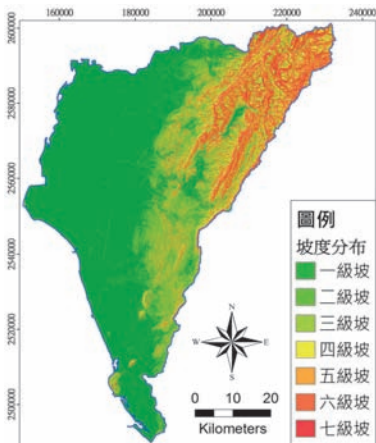


圖 3 坡度分布
Fig.3 Slope angle

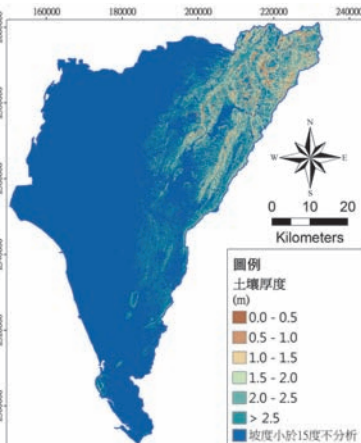


圖 4 風化土層厚度分布
Fig.4 Soil thickness

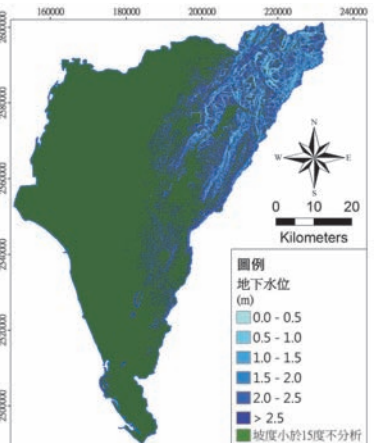


圖 5 初始地下水位分布
Fig.5 Initial groundwater table

(4) 初始地下水位

集水區廣域降雨促崩模式分析主要考慮當豪雨事件發生時，淺層可能滑動層內之水壓變化情形，進而評估水壓對邊坡穩定性之影響程度，故於分析時需考慮風化土層內初始之水壓分布狀況。本研究採用 SINMAP 模式 (Pack et al., 2002) 計算風化土層內之初始飽和度，其利用比集水面積配合坡度及地下水穩態補注量作為推估孔隙水壓的有效參數。根據上述模式，可求得大範圍集水區面積內各單元土體之飽和水位線位置，即視為淺層風化層之初始水位高度，如圖 5 所示。

(5) 分析颱風事件

各流域颱風事間篩選之依據，主要考量造成流域發生較大山崩災害之颱風事件。以曾文溪流域為例，曾文溪流域以賀伯、納莉、海棠、莫拉克颱風等為研究事件，探討暴雨事件對曾文溪流域坡地穩定之影響。賀伯颱風收集 70 個雨量站之時雨量資料；納莉颱風收集 54 個雨量站之時雨量資料；海棠颱風收集 76 個雨量站之時雨量資料；而莫拉克颱風則收集 59 個雨量站之時雨量資料做為促崩因子。以莫拉克颱風為例，颱風期間所收集之雨量站分布如圖 6 所示；至於降雨強度之空間分布則隨降雨延時而異，以降雨尖峰期間之雨量空間分布為例，研究區域內特定小時之雨量分布如圖 7 所示。因此，進行降雨促崩分析時，上述之降雨時空分布差異均需納入考量。

由於台灣地區之雨量站並非平均分布，特別是山區，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。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，則可進行警戒或行動措施。

(6) 災害事件山崩目錄

在建立降雨促崩潛勢分析模式時，主要透過反算方式率定研究範圍各分區之力學參數及水文地質參數，分析結果須與現地實際發生崩塌之區域進行比對，以瞭解模式分析之準確度。以曾文溪流域為例，採用賀伯、納莉及海棠颱風事件之山崩目錄進行模式之率定工作；以莫拉克颱風事件之山崩目錄進行模式驗證工作。

3. 模式率定與成效驗證

為瞭解模式率定結果之準確程度，需與颱風實際發生之山崩做一套疊比對，再套用前述誤差矩陣法及修正成功率指標 MSR 予以量化。經由人工試誤法針對

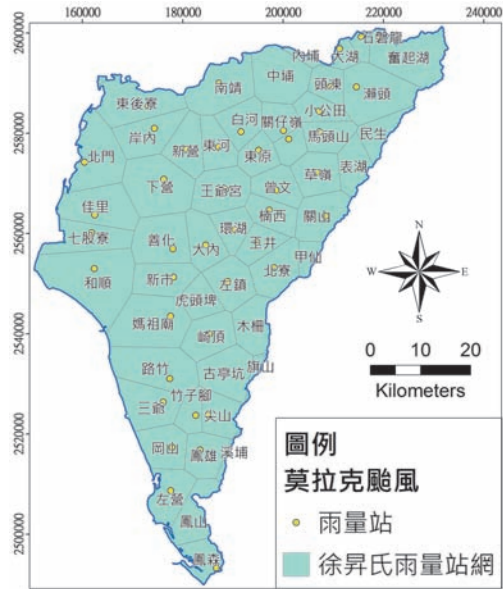


圖 6 莫拉克颱風雨量站分布

Fig.6 The spatial distribution of rainfall stations during Typhoon Morakot.

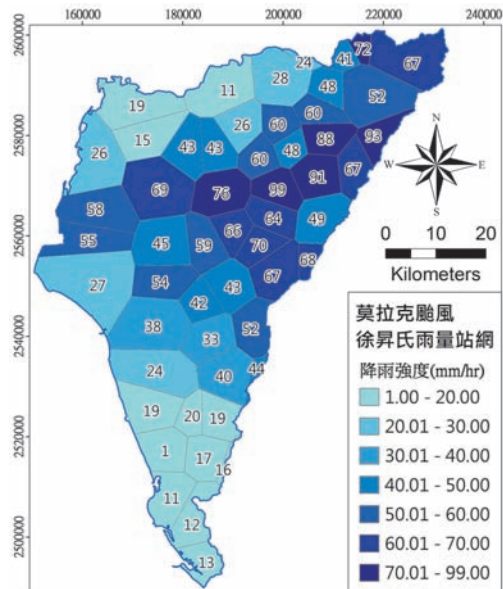


圖 7 降雨強度分布圖 (莫拉克颱風 2009/08/09 09:00)

Fig.7 The spatial distribution of rainfall intensity (Typhoon Morakot, 2009/08/09 09:00)

幾場颱風事件進行模式率定，並由一場颱風事件進行模式驗證，最終所獲得之代表性參數如前述表 2 所示。針對研究區內共計 15 個流域，以代表性參數進行模式率定及驗證工作，以下以曾文河流域為例，說明颱風事件之率定與驗證結果。

透過分析其崩塌與非崩塌之網格數，並採誤差矩陣法（定義詳見表 1），可量化賀伯颱風之率定成效（如表 3），其山崩正確率為 70.9%、非山崩正確率 94.6%、總正確率 94.2%。同理，可獲得納莉颱風驗證之山崩正確率為 77.4%、非山崩正確率 92.1%、總正確率 92.6%；海棠颱風驗證之山崩正確率為 75.9%、非山崩正確率 92.7%、總正確率 92.5%；莫拉克颱風驗證之山崩正確率為 58.0%、非山崩正確率為 94.0%、總正確率為 92.6%。而四場颱風事件之修正成功率指標分別為 82.8、84.8、84.3 及 76.0，驗證成果顯示本模式經率定後之正確性及準確度均在工程可接受之範圍內。

4. 降雨促崩潛勢特性

(1) 降雨促崩潛勢

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。本研究以 200 年重現期 24 小時延時之設計雨型做為模式輸入之降雨條件，以研究區內曾文河流域為例予以說明。

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（舉曾文河流域中埔雨量站為例，如圖 8）及 200 年重現期累積降雨量製作成徐昇氏雨量站網（如圖 9），並輸入至降雨促崩模式，藉以預測曾文河流域 200 年重現期 24 小時累積雨量條件下，曾文河流域之降雨促崩潛勢。

曾文河流域 200 年重現期 24 小時累積降雨之促崩潛勢預測結果如圖 10 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）

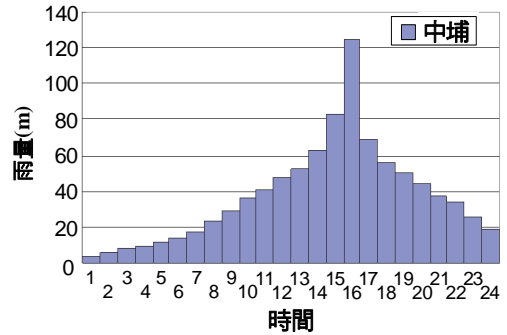


圖 8 曾文河流域中埔雨量站一日設計雨型歷線
Fig.8 24-hour design hyetograph

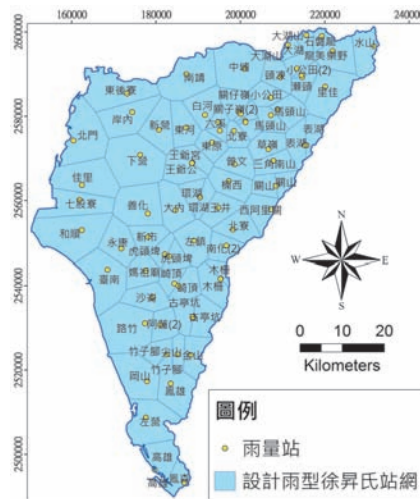


圖 9 設計雨型徐昇氏雨量站網
Fig.9 Thiessen design rainfall net

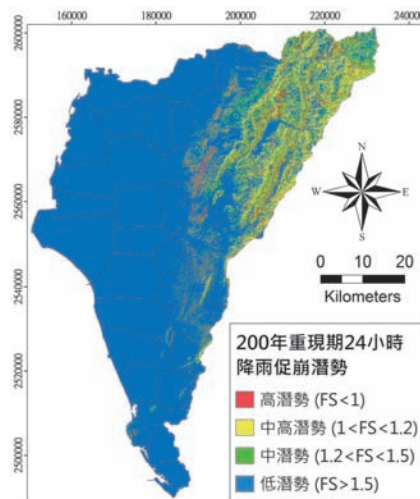


圖 10 曾文河流域 200 年重現期一日累積雨量降雨促崩潛勢分布圖

Fig.10 Landslide potential map of Tseng-Wen river watershed

表 3 颱風事件正確率(以曾文河流域為例)

Table 3 Accuracy rate of typhoon event

誤差評估	誤差矩陣法			成功率指標
	山崩正確率 (%)	非山崩正確率 (%)	總正確率 (%)	MSR (%)
降雨促崩事件				
賀伯颱風	70.9	94.6	94.2	82.8
納莉颱風	77.4	92.1	92.6	84.8
海棠颱風	75.9	92.7	92.5	84.3
莫拉克颱風	58.0	94.0	92.6	76.0

頒布之建築物基礎構造設計規範針對路堤邊坡之安全係數分界。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。

(2) 特性分析

各流域因水文地質條件不同, 降雨分布特性亦不盡相同, 故各流域邊坡發生岩屑崩滑之潛在可能性亦不同。本文以 200 年重現期 24 小時累積雨量作為分析條件, 評估各流域集水區內各邊坡之山崩潛勢, 所得成果如圖 11 所示, 至於各流域評估為高山崩潛勢區域占該流域總面積之比例關係則統計如圖 12 所示。

成果顯示, 台灣山區山崩高潛勢區域以濁水溪、大漢溪及大甲溪等流域所占比例較高。此外, 高屏溪流域之高潛勢區域所占比率亦相對大, 此結論在降雨條件與分析條件相近的莫拉克颱風事件中亦獲得驗證。惟此結果未對各流域之坡地面積作正規化權重調整, 此種呈現方式較能凸顯各流域發生土砂災害時對該流域整體所造成影響的嚴重程度。

由於台灣地質條件相當複雜多變, 各流域往往涵蓋數十個地層單元。為方便呈現崩塌與地層特性之趨勢關係, 本研究採何春蓀 (1986) 建議之七個地質分區版本 (圖 13(a)) 進行統計, 以呈現高山崩潛勢區域於不同地質分區之分布差異。

各流域範圍內各地質分區之高潛勢面積占流域內所有高潛勢面積之比例如圖 13(b)。初步獲知中央山脈西側之北部流域上游, 以西部麓山帶地質區之高潛勢面積比最高; 中部流域則以雪山山脈帶地質區高潛勢面積比較高; 西南部北港、曾文一帶之流域則以西部麓山帶地質區最高; 南部流域則以脊梁山脈地質區較高。其中, 又以濁水溪流域橫跨西部麓山帶、雪山山脈帶及脊梁山脈帶三個地質區, 其高潛勢區域分布較為平均。

進一步針對各流域之地形坡度進行分析, 各流域內高潛勢區域之坡度分布如圖 14 所示。結果顯示各流域最易發生岩屑崩滑型山崩多集中在 30~45 度邊坡(六級坡), 其中又以大漢溪、濁水溪、東港溪流域六級坡之高潛勢比例較高; 其次為 23~29 度邊坡 (五級坡), 其中以鳳山溪、南

崁溪流域五級坡之高潛勢比例較高。

各流域高潛勢區域之主要分布地層整理如表 4 所示。表中, 高潛勢相對面積比則指該地層之高潛勢區域面積占該流域內所有高潛勢區域總面積之比例; 至於地層占流域面積比係指該地層在流域內之分布面積占流域總面積之比例。結果顯示多數流域均係岩性以板岩、硬頁岩為主之地層所佔高潛勢相對面積比為最高, 諸如潮洲層、巴陵層、乾溝層等地層。中部之大安溪、大甲溪及烏溪則以白冷層為主, 其岩性以砂岩為主。

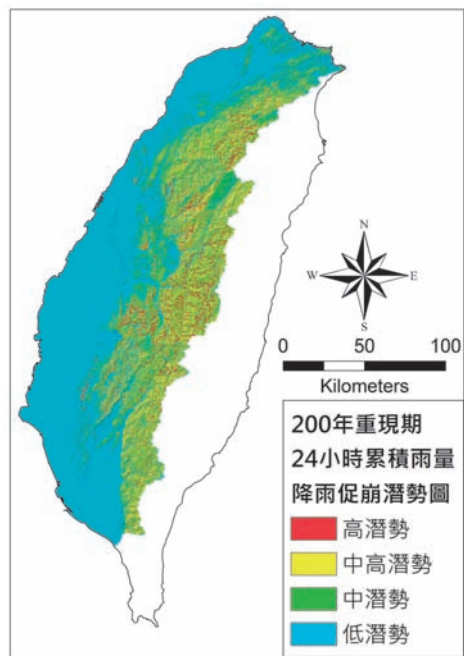


圖 11 研究區 200 年重現期一日累積雨量降雨促崩潛勢分布圖

Fig.11 Landslide potential map of study area

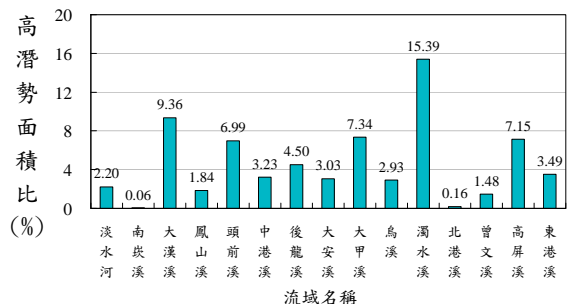
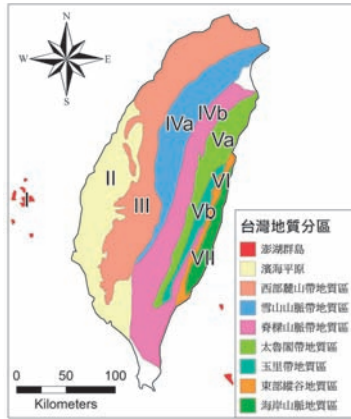


圖 12 各流域山崩高潛勢區域所占面積比率之比較

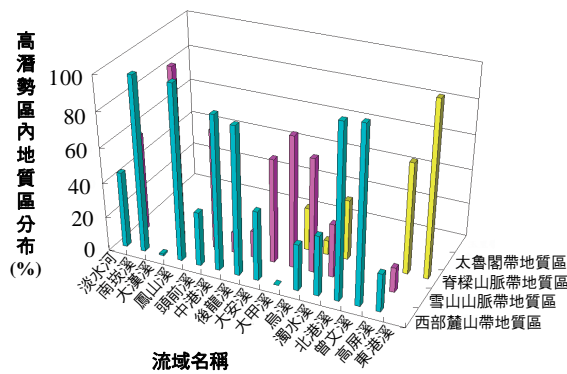
Fig.12 A comparison of the area ratio of high potential areas

五、結 論

1. 本文以中央山脈西側流域為研究案例，透過區域性降雨促崩模式 TRIGRS，針對造成流域發生較大山崩災害之颱風事件進行模式率定與驗證，確保模式分析之正確性與準確度。模式可考量地形、暫態地下水位、風化土層厚度、風化土層力學與水力特性以及降雨在空間與時間分布等因子，故能有效描述因暫態降雨入滲所引致之淺層崩塌。透過多場降雨促崩事件進行模式率定與驗證，其平均正確率普遍可達 70% 以上。



(a) 台灣地質分區 (何春蓀, 1986)



(b) 各流域不同地質分區之高潛勢區域面積比

圖 13 不同地質分區之山崩高潛勢區域所占面積比之比較

Fig.13 A comparison of the area ratio of the high potential areas of different geological zoning

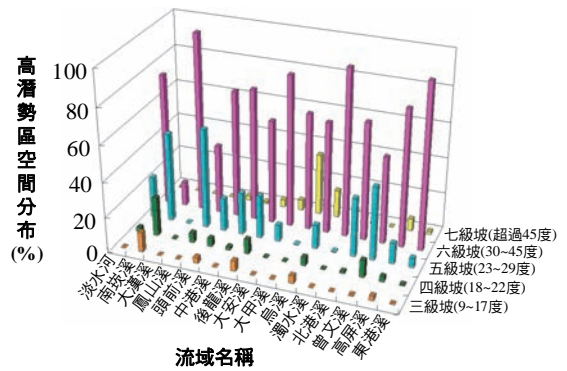


圖 14 各流域山崩高潛勢區域之坡度分布

Fig.14 Slope distribution of the high potential areas

表 4 各流域山崩高潛勢區域之主要分布地層岩性及相對面積比

Table.4 The main formation lithology and relative area ratio of high potential area

流域名稱	地層	主要岩性	高潛勢相對面積比 (%)	地層占流域面積比 (%)
淡水河	乾溝層	硬頁岩或板岩夾薄至厚層泥質粉砂岩	27.03	6.23
南崁溪	大南灣層	泥岩、砂岩及礫石	50.89	3.58
大漢溪	巴陵層	硬頁岩、板岩夾砂岩	51.25	32.57
鳳山溪	大茅埔礫岩	礫石	39.05	18.06
頭前溪	巴陵層	硬頁岩或板岩	40.76	28.01
中港溪	石底層	厚層細至中粒白色砂岩	23.20	7.08
後龍溪	南莊層	薄至厚層至中細粒砂岩	18.51	18.23
大安溪	白冷層	變質砂岩	40.85	30.56
大甲溪	白冷層中段	砂岩、板岩互層	37.07	18.08
烏 溪	白冷層	厚層至塊狀粗粒或白色礫質石英岩質砂岩	28.46	8.60
濁水溪	大禹嶺層	板岩、千枚岩及變質砂岩	16.47	15.07
北港溪	頭嵙山層香山段	砂岩、粉砂岩、頁岩之互層	75.07	6.51
曾文溪	糖恩山砂岩	厚層塊狀砂岩和泥質砂岩	19.04	3.74
高屏溪	潮州層	板岩或硬頁岩	33.60	22.71
東港溪	潮州層	板岩及硬頁岩	90.25	28.10

2. 本文採用 200 年重現期距 24 小時累積雨量進行山崩潛勢預測, 除能獲得研究流域於該特定降雨條件下之潛勢分級, 針對崩塌高潛勢區所進行地質、地形、地層及岩性之特性分析, 更能掌握高潛勢區域之崩塌特性。而高潛勢區可能之崩塌位置及崩塌規模, 透過 GIS 平台進行山區聚落及交通要衝位置套疊比對後, 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。
3. 本文以中央山脈西側各流域為研究範圍進行山崩潛勢預測, 針對高潛勢區進行特性分析探討, 依地質分區、坡度、地層岩性等分類歸納, 有利於瞭解高潛勢區之相關資訊。後續仍可加入其他因子, 進行更多層面之探討。
4. 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, 期能以預測雨量資料評估即時之潛勢預測結果, 擴展成山崩預警系統。

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。亦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

- [1] 林信亨、林美玲 (2002), 「地理資訊系統及類神經網路應用於土石流危險溪流危險度判定」, 地工技術, 第 90 期, 第 73-84 頁。(Lin, H.H., and Lin, M.L. (2002). "Application of GIS and Artificial Neural Network on Risk Assessment of Potential Debris Flows." *Sino-Geotechnics*, 90, 73-84. (in Chinese))
- [2] 陳熾璇 (2002), 「溪頭地區山崩潛感圖製作研究」, 國立台灣大學土木工程研究所碩士論文。(Chen, Y.H. (2002). "*The Research of Landslide Susceptibility Mapping in Xitou Area.*" Master thesis, National Taiwan University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [3] 吳佳郡 (2006), 「降雨誘發山崩之潛感分析初探」, 國立暨南國際大學土木工程研究所碩士論文。(Wu, C.C. (2006). "*Preliminary Study of Rainfall-Induce Landslide Susceptibility Analysis.*" Master thesis, National Chi Nan University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [4] 譚志豪、陳熾璇、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。(Tan, C.H., Chen, Y.H., and Chi, S.Y. (2009). "Using Deterministic Method to Estimate the Regional Landslide Rainfall Threshold." *Sinotech Engineering*, 105, 5-16. (in Chinese))
- [5] 財團法人中興工程顧問社 (2011), 「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。(Sinotech Engineering Consultants, INC. (2011). "Geological investigation and database construction in the Upstream watershed of flood prone areas - The investigation and assessment report about the influence of hydrogeology on slope stability of the watershed.", *Central Geological Survey, MOEA, research report.* (in Chinese))
- [6] Iverson, R.M. (2000). "Landslide triggering by rain infiltration," *Water Resour Res.*, 36(7), 1897-1910.
- [7] Godt, J.W. (2004). "Observed and Modeled Conditions for Shallow Landsliding in the Seattle," *Washington Area*, Ph.D. Dissertation, University of Colorado.
- [8] 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.
- [9] Baum, R.L., Savage, W.Z. & Godt J.W. (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.
- [10] Huang, J.C. and Kao, S.J. (2006). "Optimal estimator for assessing landslide model performance," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 957-965.
- [11] Delmonaco, G., Leoni, G., Margottini, C., Puglisi, C. & Spizzichino, D. (2003). "Large scale debris-flow hazard assessment: a geotechnical approach and GIS

modeling,” *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 3(5), 443-455.

- [12] Salciarini, D. et al. (2006). “Modeling regional initiation of rainfall-induced shallow landslides in the eastern Umbria Region of central Italy,” *Landslides*, 3, 181-194.
- [13] Pack, R.T., Tarboton, D.G., and Goodwin, C.N. (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, 1157-1165.

2013 年 01 月 15 日 收稿

2013 年 01 月 30 日 修正

2013 年 03 月 04 日 接受

(本文開放討論至 2013 年 12 月 31 日)