

廣域降雨促崩模式之建置及應用-以高屏溪流域為例

陳建新^[1*] 譚志豪^[2] 冀樹勇^[3] 蘇泰維^[4]

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,並探討各項水文與地質因子對降雨入滲引致岩屑崩滑行為之影響。本文採用美國地質調查所發展之 TRIGRS 程式評估集水區內各邊坡單元之降雨促崩潛勢,並藉由邊坡安全係數臨界值之觀念推得集水區內各區域之山崩臨界雨量門檻值。文末則以莫拉克颱風事件為例,對高屏溪流域內特定聚落及交通要衝進行降雨誘發崩塌之潛勢評估,研判重要聚落或交通要衝鄰近區域發生岩屑崩滑型山崩之潛勢等級以預作防範。相關成果可供後續防、減災措施以及保全策略擬訂之參考。

關鍵詞: 山崩、定率法、臨界雨量。

Application of GIS-based Deterministic Model for Assessment of Regional Rainfall-induced Landslide Potential- Example of Gao-Ping River Watershed

Chien-Hsin Chen^[1*] Chih-Hao Tan^[2] Shu-Yeong Chi^[3] Tai-Wei Su^[4]

ABSTRACT An effective assessment of regional rainfall-induced landslide potential using the GIS-based deterministic model was presented. To consider the regional rainfall-induced shallow landslides, this study adopted the Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Slope-stability model (TRIGRS, developed by USGS) that couples an infinite-slope stability analysis with a one-dimensional analytical solution for rainfall infiltration. The model considers not only the conditions of topography, geology, hydrogeology and mechanics of the study regions but also the spatial distribution of rainfall intensity to evaluate the regional landslide potential. Simultaneously, the rainfall threshold for each sub-basin could also be obtained. Using the Morakot typhoon event as an example, we successfully predict the initiation locations of landslides for several dangerous villages and important transportation junctions in the mountain area of Gao-Ping River watershed by the model and the spatial overlapping technique of GIS. Our preliminary results can be regarded as a good reference for the authority to scheme out an early warning system in the future.

Key Words: Landslide, Deterministic Analysis, Rainfall Threshold.

-
- [1] 財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心研究員 (* 通訊作者 E-mail: Hflybear@sinotech.org.tw)
Researcher, Geotechnical Engineering Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Inc., Taipei, Taiwan
- [2] 財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心組長
Division Head, Geotechnical Engineering Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Inc., Taipei, Taiwan
- [3] 財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心經理
Manager, Geotechnical Engineering Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Inc., Taipei, Taiwan
- [4] 經濟部中央地質調查所環境與工程地質組科員
Associate Tech. Specialist, Envir. and Eng. Geology Division, Central Geological Survey, MOEA, Taipei, Taiwan

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。

針對淺層崩塌之臨界雨量評估，本文採用定率法進行。分析程序先探討降雨特性，乃至求解風化層之未飽和入滲問題，再進一步透過極限平衡法評估暫態地下水變化對邊坡穩定性之影響，最終透過輸入不同重現期距累積雨量進行區域性降雨促崩分析，藉以評估集水區各區域山崩臨界雨量。另針對集水區內特殊區域，如重要聚落、道路等，進行潛勢評估。除建立一套可評估廣域集水區山崩臨界雨量之分析模式外，另探討聚落、道路邊坡在不同的暴雨條件下可能之崩塌位置、規模及崩塌潛勢，可提供後續相關的預警準則及保全對策擬定時之參考。

二、研究區域概述

1. 地形概述

高屏溪流域之地形概況詳參圖 1。高屏溪流域在美濃以北、茂林至三地門一線以東地區屬於山地地形，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。荖濃溪以及旗山溪為高屏溪上游之兩大主要支流；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，在嶺口北方與高屏溪第二大支流旗山溪交匯。旗山溪發源於玉山主峰西南坡，大致平行流域西緣向南流，至嶺口北側與荖濃溪匯流後，在沖積平原上續往南流，形成高雄縣與屏東縣之縣界，故名為高屏溪。美濃以南、茂林至三地門一線以西地區，屬於屏東沖積平原。

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—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。由經濟部中央地質調查所之活動斷層分布圖顯示，高屏溪流域內之主要斷層中，六龜斷層被歸類為第二類活動斷層，旗山斷層、內英斷層、潮州斷層、土壠灣斷層與鳳山斷層則均歸類為存疑性活動斷層。藉由沙里仙溪斷層、眉溪斷層、土壠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；潮州斷層與土壠灣斷層以東屬中央山脈地質區；潮州斷層與土壠灣斷層以西屬於西部麓山帶地質區，詳圖 2(參考經濟部中央地質調查所 1/50,000 地質圖)。

3. 氣候條件

高屏溪流域位於北迴歸線南北兩側，因地形關係，氣候類型變化大，沿海平原及中海拔丘陵區屬於熱帶氣候，高山區屬溫帶氣候，形成垂直氣候帶。流域氣溫平地與山區差異較顯著，平地年平均氣溫 18℃~29℃，平均溫度約為 24.7℃；高山氣溫略低在 19℃~21℃間。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的豪雨所造成，而 8 月為單月降雨最多的月份。因降雨之時空分布極不平均，造成流量枯豐明顯。

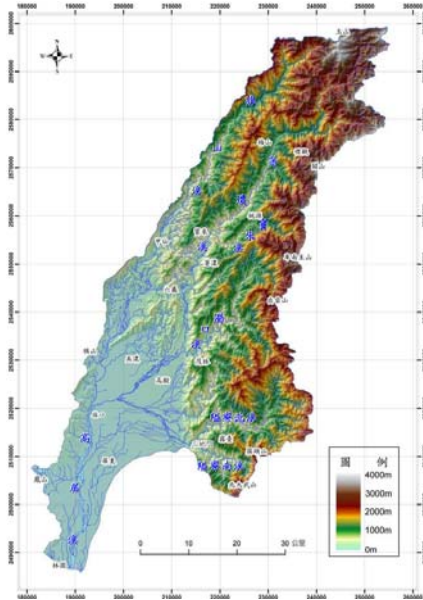


圖 1 高屏溪流域地形圖

Fig.1 Topographic map of Gao-Ping river watershed.

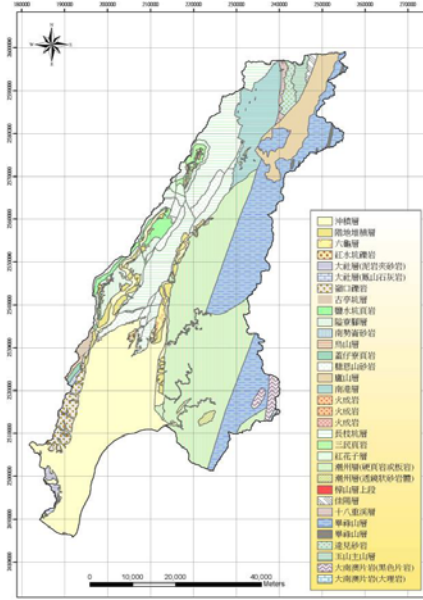


圖 2 高屏溪流域地質圖

Fig.2 Geologic map of Gao-Ping river watershed.

三、研究理論與方法

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 模式係將集水區離散成眾多網格單元之組合, 各網格單元之初始地下水位、水文地質特性 (如: 地表入滲率、水力傳導度、水力擴散度及剪力強度參數等) 及降雨強度延時等參數值均可隨空間或時間設定為不同, 再透過求解未飽和流動方程式 (Richards Equation) 即可獲得降雨期間各網格之暫態地下水位變動。待求得暫態地下水位分布後, 結合極限平衡理論即可求得各邊坡網格於此降雨入滲期間安全係數之變化。TRIGRS 模式考慮暫態地下水壓力水頭變化可由下列公式表示 (Baum et al., 2002), 即:

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

式(1)中, φ 為地下水壓力水頭, 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, $\beta = \lambda \cos \alpha$, $\lambda = \cos \alpha - (I_z / K_z)_{LT}$: 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， $ierfc(\eta)$ 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 $\varphi(Z,t)$ 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：

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

此外，TRIGRS 模式又針對 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：

$$\varphi(Z,t) \leq Z\beta \quad (3)$$

透過式(1)至式(3)即可獲得降雨期間各網格之暫態地下水位變動。待求得暫態地下水位分布後，結合極限平衡理論即可求得各邊坡網格於此降雨入滲期間安全係數之變化，其原理如圖 3 所示。

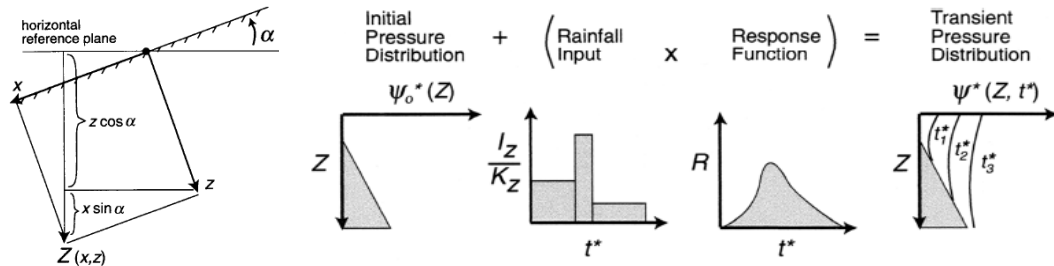


圖 3 TRIGRS 模式分析原理示意圖

Fig.3 The illustration of TRIGRS analysis.

四、模式建置與應用

1. 分析參數圖層建立

本文考量 GIS 系統之空間概念化、資料開放性、格式相容性及系統互通性等特點，選擇採用 GIS 系統做為主要分析工作平台，進行資料數化、儲存、圖層套疊、整合分析及展示查詢，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)、土工資訊 (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 TRIGRS 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下。

(1) 坡度

高屏河流域地勢陡峻，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。透過高屏河流域之數值地形模型資料建立坡度圖層，如圖 4 所示。

(2) 力學參數及水文地質參數

根據高屏溪流域 1/50000 流域地質圖 (經濟部中央地質調查所)，高屏溪流域可分為多個地質單元，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 2。本文根據過去研究區域內各岩層之既有參數資料庫，並透過降雨促崩事件之山崩目錄率定後，可獲得相關參數代表值，茲摘錄各地質分區風化土層之相關參數如表 1 所示 (財團法人中興工程顧問社，2009)。

表 1 高屏溪流域各地層分區之材料參數

Table 1 Material parameters of the geological zonations in the study area.

地質分區	γ_i	c	ϕ	K	D	I_s
	(kN/m ³)	(kPa)	(°)	10 ⁻⁶ (m/sec)	10 ⁻⁴ (m ² /sec)	10 ⁻⁸ (m/sec)
沖積層	16.5~19.5	2.5~3.5	23.1~32	25~29	75~88	25~29
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
六龜層	20.4~24	0.8~1.7	28~34	0.5~0.58	1.5~1.7	0.5~0.58
紅水坑礫岩	19.8~22	2~2.6	30~34	0.1~0.11	0.3~0.33	0.1~0.11
大社層	22.8~24	0.8~0.9	26~28	0.05	0.15	0.05
嶺口礫岩	21.2~25	2.1~2.8	33.1~39	0.18~0.21	0.54~0.63	0.18~0.21
古亭坑層	20.4~22.8	0.3~0.5	26~29	0.05	0.15~0.17	0.05
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
蓋仔寮頁岩	22.7~26.8	7.4~12.1	25~30	0.05~0.06	0.15~0.17	0.05~0.06
南港層	16.2~19.1	3.7~5.1	28~33	2.5~2.9	7.5~8.8	2.5~2.9
潮州層	22.1~26	4.1~5.2	27~32	0.5~0.55	1.5~1.7	0.5~0.55
畢祿山層	22.1~26	2.3~5.2	27~32	0.7~0.83	2.1~2.5	0.7~0.83

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 (2009) 成果。

(3) 淺層土壤厚度

就地形學的觀點而言，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 5 所示。

(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 6 所示。

(5) 分析颱風事件

本文以桃芝、敏督利、海棠、莫拉克颱風等為研究事件，探討暴雨事件對高屏溪流域坡地穩定之影響。桃芝、敏督利、海棠颱風事件收集 46 個雨量站之時雨量資料，而莫拉克颱風則收集 43 個雨量站之時雨量資料做為促崩因子。舉研究區域內之小關山測站為例，桃芝颱風期間所量測到之時雨量柱狀圖如圖 7 所示。至於降雨強度之空間分布則又隨降雨延時而異，以桃芝颱風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 8 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。為進一步考慮後續山崩警戒雨量之訂定，故本研究採用徐昇氏多邊型法，此法考

慮雨量站之空間分佈效應，其精確度較平均法合理，再山區有限的雨量站資料條件下較為適用。

(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。本文採用桃芝、敏督利、海棠及莫拉克颱風事件之山崩目錄進行後續模式率定與驗證工作。

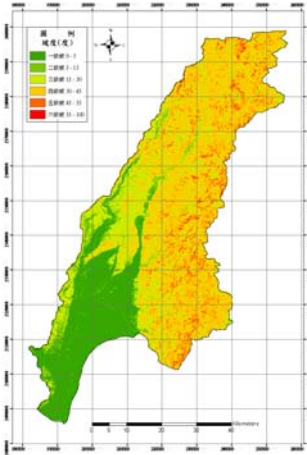


圖 4 坡度分布
Fig.4 Slope angle.

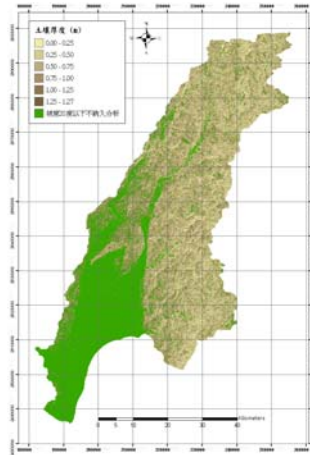


圖 5 風化土層厚度分布
Fig.5 Soil thickness.

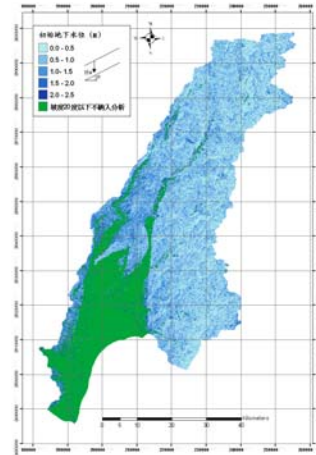


圖 6 初始地下水位分布
Fig.6 Initial Groundwater table.

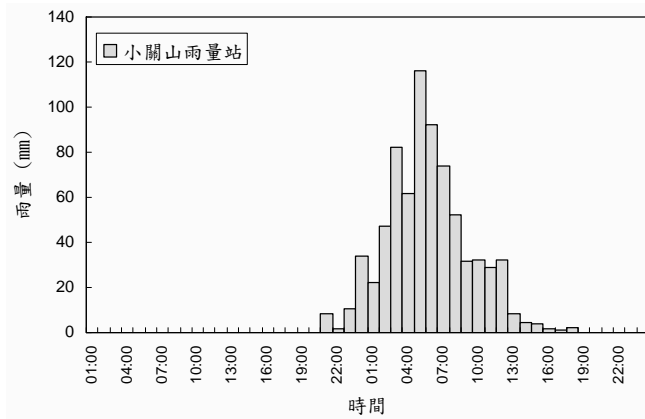


圖 7 桃芝颱風期間小關山雨量站之降雨歷時
Fig.7 The rainfall hyetograph during the Toraji typhoon.

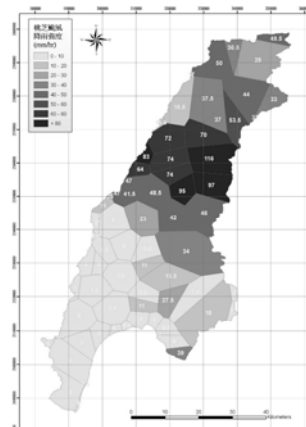


圖 8 降雨強度分布圖
(桃芝颱風 2001/07/30 05:00)
Fig.8 The spatial distribution of rainfall intensity (the Toraji typhoon, 2001/07/30 05:00).

2. 模式率定與成效驗證

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。本文採用桃芝颱風、敏督利颱風、海棠颱風及莫拉克颱風等四場降雨促崩事件之山崩目錄進行模式率定與驗證工作。

茲以桃芝颱風事件率定為例（見圖 9），黑色區塊為崩場地範圍，約有 3,874 處。分析其崩塌與非崩塌之網格數（見表 2），透過誤差矩陣法（定義詳見表 2）可量化其山崩正確率為 78.2%、非山崩正確率 90.4%、總正確率 90.3%，成功率指標 MSR 為 84.31%。同理，可獲得敏智利颱風驗證之山崩正確率為 76.2%、非山崩正確率 90.2%、總正確率 89.9%，成功率指標 MSR 為 83.2%；海棠颱風驗證之山崩正確率為 66.1%、非山崩正確率 87.6%、總正確率 87.4%，成功率指標 MSR 為 76.86%；莫拉克颱風驗證之山崩正確率為 43.26%、非山崩正確率為 88.15%、總正確率為 85.67%，成功率指標 MSR 為 65.71%。驗證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。

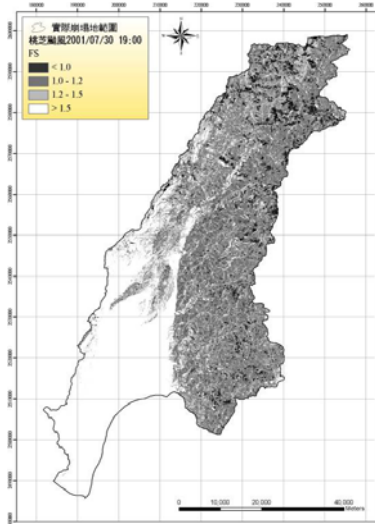


圖 9 率定結果與桃芝颱風山崩目錄之套疊比對
Fig.9 The calibration result compared with the landslide inventory of Toraji typhoon.

表 2 高屏溪流域模式率定成果 (桃芝颱風)

Table 2 The calibration result of Gao-Ping river watershed.(Toraji typhoon)

總網格數 2, 074, 053		模式預測結果 (網格數統計)	
		(FS ≤ 1)	(FS > 1)
實際 狀況	已崩塌	21, 208 (N ₁)	5, 916 (N ₂)
	非崩塌	195, 999 (N ₃)	1, 850, 930 (N ₄)
山崩正確率為 78. 2%、非山崩正確率為 90. 4% 總正確率為 90. 3%，MSR 為 84. 31%			

註：山崩正確率(SRn)定義為 $N_1 / (N_1 + N_2)$
 非山崩正確率(SRc)定義為 $N_4 / (N_3 + N_4)$
 總正確率定義為 $(N_1 + N_4) / (N_1 + N_2 + N_3 + N_4)$
 成功率指標 MSR 定義為 $(0.5 \cdot SRn) + (0.5 \cdot SRc)$

3. 集水區山崩臨界雨量評估

為進一步掌握流域內各區域之促崩雨量，本文透過區域性降雨促崩模式評估各區域之山崩臨界雨量。以下具體說明高屏溪流域臨界雨量評估之內容與成果。

(1) 設計雨型

根據中央氣象局小關山雨量站降雨資料，透過位序法進行雨型分析，獲得小關山雨量站 24 小時正規化雨型如圖 10 所示。

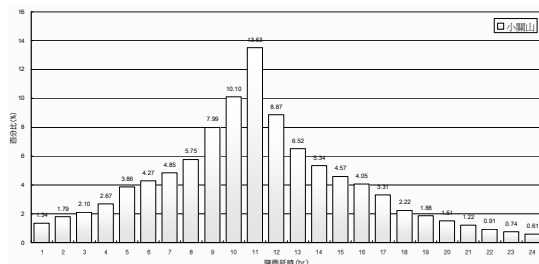


圖 10 高屏溪流域小關山雨量站一日設計雨型歷線
Fig.10 24-hour design hyetograph of Xiao-Guan-Shan rainfall station.

(2) 不同重現期距降雨量分布

依據上述設計雨型逐一輸入不同重現期距 24 小時累積總雨量至降雨促崩模式進行分析，藉以評

估研究範圍內不同重現期距不同延時累積雨量條件下該區域崩壞比隨降雨之變化。

本研究使用之不同重現期距不同延時累積降雨量係根據降雨頻率分析結果而來。本研究進行降雨頻率分析方法係參照「水利署水文分析報告作業須知」之規定，利用年最大值選用法(annual maximum series)採年最大降雨序列進行不同延時頻率分析，以常態、二參數對數常態、三參數對數常態、皮爾森 III 型、對數皮爾森 III 型及極端值 I 型等六種機率分布進行降雨頻率分析。各種分布最適性分析是依據平方差和(Standard Square Error, SSE)及標準差值(Standard Error, SE)來判定，若 SSE 和 SE 值愈小，則表示該分布愈合適。共計進行 2、5、10、25、50、100 與 200 年不同重現期距搭配 1、24 與 72 小時不同降雨延時之降雨頻率分析。

利用頻率分析成果及克利金空間內插法，可建立出集水區各重現期距各延時等雨量分布圖。圖 11 則以高屏河流域 200 年重現期距 24 小時延時頻率分析成果為例所獲得之降雨量等值圖。

為配合山崩警戒發佈機制，故後續分析之降雨量空間分布改採徐昇氏雨量站網方式進行。圖 12 則將上述降雨量空間分布轉為徐昇氏雨量站網形式表示。

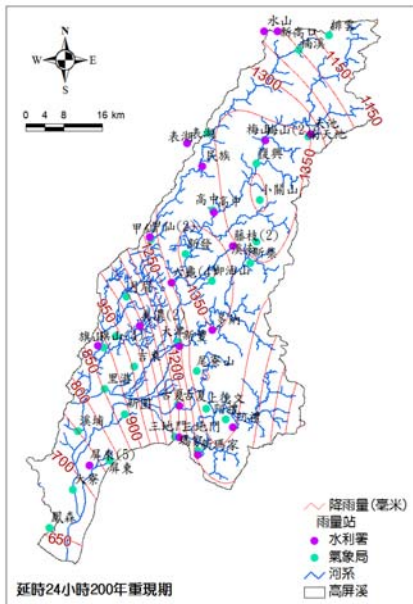


圖 11 高屏河流域 200 年重現期 24 小時累積雨量等值線分布(克利金法)

Fig.11 Contours of 24-hour accumulated rainfall of 200-year return period in the Gao-Ping river watershed. (Kriging method)

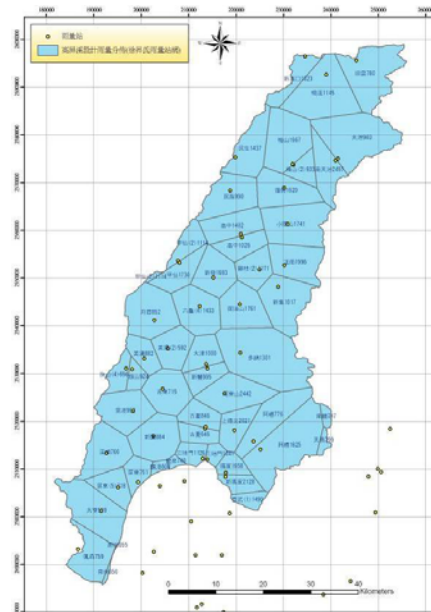


圖 12 高屏河流域 200 年重現期 24 小時累積雨量(徐昇氏雨量站網)

Fig.12 Spacial distribution of 24-hour accumulated rainfall of 200-year return period in the Gao-Ping river watershed. (Thiessen Polygons method)

(3) 集水區崩塌潛勢與臨界雨量分布

繪製徐昇氏雨量站網控制範圍內崩壞比隨累積雨量之變化關係，並由該關係曲線找出臨界雨量下限值及臨界雨量上限值。舉新瑪家雨量站控制面積為例，由圖 13 可看出當雨量累積約到 136mm 時，其崩壞比曲線斜率開始有明顯增加之趨勢，直到雨量累積至 747mm 開始趨於平緩。因此新瑪家雨量站網控制範圍內之臨界雨量建議值介於 136mm - 747mm 間。

參照上述方法，同樣針對高屏河流域內各控制面積進行山崩臨界雨量評估，其臨界雨量上、下限建議值分析成果如圖 14 所示；而流域一日累積雨量降雨促崩潛勢如圖 15 所示。表 3 則為高屏河流域於 200 年重現期距 24 小時延時降雨條件下各徐昇氏雨量站網控制範圍臨界雨量之成果整理。

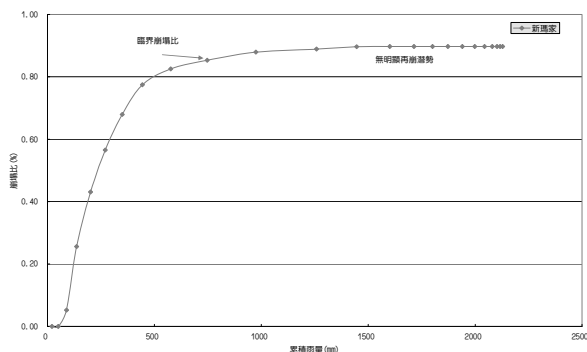


圖 13 高屏溪流域新瑪家雨量站臨界雨量值訂定

Fig.13 Determination of critical rainfall for the control area of the New Ma-chia rainfall station.

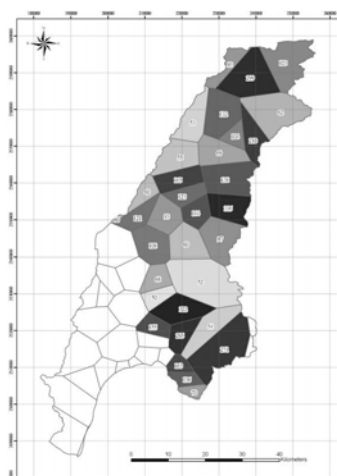


圖 14(a) 山崩臨界雨量建議下限值
Fig.14(a) Lower bound values of critical rainfall.

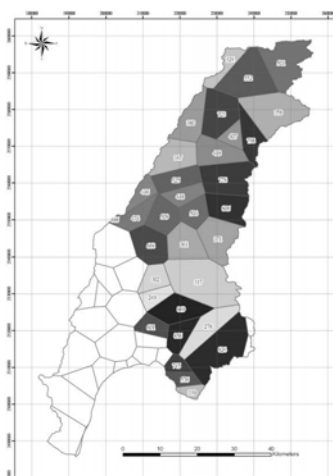


圖 14(b) 山崩臨界雨量建議上限值
Fig.14(b) Upper bound values of critical rainfall.

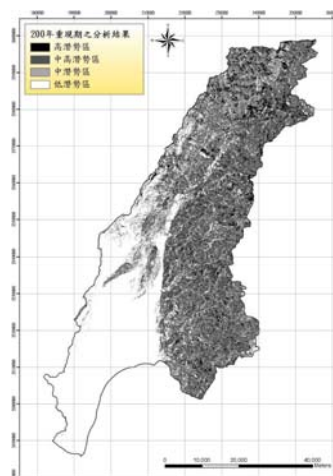


圖 15 200 年重現期一日累積雨量之降雨促崩潛勢分布圖
Fig.15 Landslide potential map of 24-hour accumulated rainfall and 200-year return period.

表 3 高屏溪流域之山崩臨界雨量建議值

Table 3 The suggested values of critical rainfall in the Gao-Ping river watershed.

站號	徐昇氏雨量站網 (站名)	臨界崩塌率 (%)	下限值 (mm)	上限值 (mm)	降雨後期 續崩潛勢
01Q910	阿禮	6.09	187	630	低
01Q920	新瑪家	0.85	136	747	低
01V010	高中	6.55	123	448	中
01V040	六龜(4)	1.33	108	688	低
01V050	藤枝(2)	3.04	144	504	低
01V060	梅山(2)	6.75	104	407	中
01V070	天池	16.33	62	438	低
COR100	尾寮山	1.81	195	652	低
COV250	甲仙	1.12	121	616	高
C1R120	上德文	1.78	187	630	低
C1V190	南天池	9.00	210	798	低
C1V200	梅山	6.52	132	703	中
C1V220	小關山	11.61	137	778	低

註 1：僅摘錄部分雨量站，詳見中興工程顧問社 (2009) 成果。

4、降雨促崩模式之應用

集水區廣域降雨促崩模式建置完成，即可針對特定山區聚落或交通要衝進行崩塌潛勢安全評估。本文例舉三個不同崩塌潛勢之聚落，比對崩塌潛勢與實際崩塌狀況間之關係，茲分述如后。

(1) 高崩塌潛勢案例：舊藤枝部落

舊藤枝部落位於高雄縣桃源鄉寶山村（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 16 為高屏流域域降雨促崩潛勢評估結果，並聚焦放大至藤枝地區（摘錄自圖 15），舊藤枝部落內邊坡單元多位於高潛勢或中高潛勢範圍。

莫拉克災後現勘成果顯示，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（見圖 17）。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) 中高崩塌潛勢案例：吉露部落

吉露部落位於台 24 線 46km 處下方，行政上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。圖 18 為高屏流域降雨促崩潛勢評估結果，並聚焦放大至吉露地區（摘錄自圖 15），顯示部落下邊坡位於中高潛勢範圍，上邊坡則位於中至低潛勢範圍。

莫拉克災後現勘成果顯示，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（見圖 19）。顯示吉露部落之大尺度降雨促崩潛勢評估成果在莫拉克颱風事件中獲得初步驗證。

(3) 低崩塌潛勢案例：寶隆場址

寶隆場址位於高雄縣甲仙鄉寶隆村匏子寮南緣，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。圖 20 為降雨促崩潛勢評估結果，並聚焦放大至寶隆地區（摘錄自圖 15），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。

莫拉克災後現勘成果顯示，寶隆場址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 21），對岸產業道路更因路基塌陷而成階梯狀破壞。寶隆場址之大尺度降雨促崩潛勢分析成果在莫拉克颱風事件中可獲得初步驗證。



圖 16 藤枝地區降雨促崩潛勢分布圖

Fig.16 Landslide potential map in the Teng-Zhi area.



圖 17 莫拉克颱風藤枝地區崩滑破壞情形

Fig.17 Teng-Zhi area collapsed during Morakot typhoon.

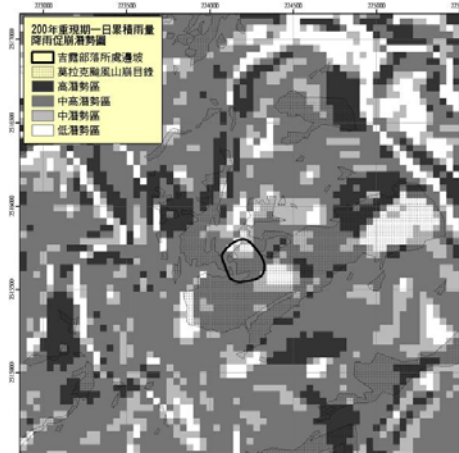


圖 18 吉露地區降雨促崩潛勢分布圖

Fig.18 Landslide potential map in the Ji-Lu area.



圖 19 莫拉克颱風災後吉露地區空拍影像

Fig.19 Widespread landslides of Ji-Lu area after Morakot typhoon.

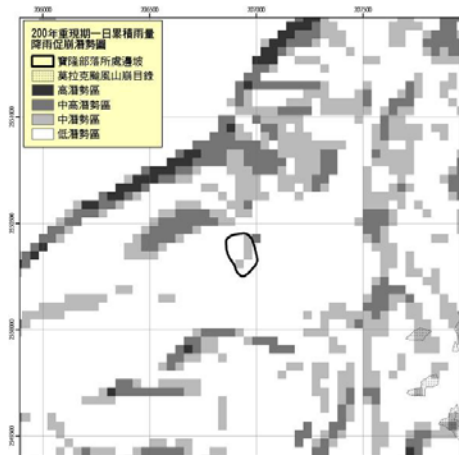


圖 20 寶隆地區降雨促崩潛勢分布圖

Fig.20 Landslide potential map in the Bao-Long area.



圖 21 莫拉克颱風後寶隆場址坡趾處局部崩滑

Fig.21 Local slide at the toe of slope in Bao-Long area after Morakot typhoon.

五、結 論

本文以高屏溪流域為研究案例，透過區域性降雨促崩模式 TRIGRS，針對桃芝颱風、敏督利颱風、海棠颱風、莫拉克颱風所造成的崩場地規模及位置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。舊藤枝部落、吉露部落及寶隆場址等不同崩塌潛勢驗證實例，均獲良好的驗證，顯示模式具良好成效，惟缺點為尚無法考量混合型的漸進式破壞模式。

研究同時採用不同重現期距不同延時累積雨量進行山崩臨界雨量及山崩潛勢預測，除能藉此預測流域內各子集水區之臨界雨量值上、下限值外，亦獲得該流域於此降雨條件下之可能崩塌位置及崩塌規模，若與山區聚落或交通要衝位置比對，對於聚落及道路的安全有進一步瞭解，決策者就能針對後續相關預警準則之建立及保全對策之擬定有更明確的方向。

誌謝

感謝經濟部中央地質調查所提供計畫經費及技術協助得使本文順利完成，特此誌謝。對於工作期間提供協助的相關單位及中興工程顧問社工作同仁，亦一併感謝諸位之付出與努力。

參考文獻

1. 財團法人中興工程顧問社 (2008~2009) 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。
2. 譚志豪、陳憶璇、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。
3. 譚志豪、陳憶璇、顧承宇、費立沅、李錦發、蘇泰維 (2008)，「廣域山崩災害預警系統之初步建置」，中華民國地質學會與中國地球物理學會九十七年年會暨學術研討會，台南成功大學，台灣。
4. 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.
5. Delmonaco, G., Leoni, G., Margottini, C., Puglisi, C. & Spizzichino, D. 2003. Large scale debris-flow hazard assessment: a geotechnical approach and GIS modeling.
6. Chen, C.Y., Chen, T.C., Yu, F.C. & Lin, S.C. 2005. Analysis of time-varying rainfall infiltration induced landslide, *Environmental Geology*. 48: 466-479.
7. Iverson, R.M. 2000. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resour Res.* 36(7): 1897-1910.
8. 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.
9. 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.*
10. 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 2008, Xi'an, China.*
11. Pack, R.T., Tarboton, D.G., and Goodwin, C.N., "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 (1998).*