不同廣域降雨促崩分析模式於山崩預警應用之探討

陳嬑璇1 譚志豪2 冀樹勇3

¹ 中興工程顧問社大地工程研究中心研究員 ² 中興工程顧問社大地工程研究中心組長 ³ 中興工程顧問社大地工程研究中心經理

摘 要

本文針對工程界最常使用的 SHALSTAB、SINMAP 及 TRIGRS 三套廣域 降雨促崩模式進行研析,探討此三種大尺度模式應用於集水區降雨促崩分析 之差異性及適用性,並比較三者在山崩預警應用上之優缺點,相關成果將有 助於後續山崩預警系統之建立。初步分析結果可知,因 SHALSTAB、SINMAP 程式屬穩態水文模式,雖在操作及參數輸入上較為方便快速,但其分析單純 採用最大降雨強度分析,僅可得知特定時間之廣域山崩潛勢;至於考量降雨 延時及累積雨量對區域崩塌潛勢變化之影響,則仍以可考量暫態水文模式之 TRIGRS 程式具有較佳的成效。

關鍵詞:山崩、山崩潛勢分析、定值法、TRIGRS、SHALSTAB、SINMAP。

Comparison study of three deterministic models to predict regional rainfall-induced landslides for sketching early warning system

ABSTRACT

This paper assessed the regional rainfall-induced landslide potential of the watershed using the three most widely applied deterministic models in engineering practice (i.e. SHALSTAB, SINMAP and TRIGRS) and compared their applicability and limitation. The results of comparison show that the SHALSTAB and SINMAP models have some advantages, such as convenience of data input and easy program operating, because of their steady-state characteristic. Unfortunately, both of the steady-state models only consider maximum rainfall intensity, so that we can only obtain the stabilities of slope units due to the maximum rainfall intensity at specific time. On the other hand, the TRIGRS model can consider not only the effects of rainfall intensity on the slope stability but also the transient hydaulic modeling (such as the rainfall infiltration, the accumulated rainfall and the rainfall duration). According to comparison of models, we suggest that the transient model TRIGRS can successfully predict the scale, the spatial distribution and the triggered time of the regional shallow landslides by considering the spatial and temporal variabilities of hydro-geological parameters and the rainfall intensity/duration in the watershed. Our preliminary results could be regarded as a good reference to the authority for sketching an landslide early warning system in the future.

Key Words: Landslide, Landslide Potential Analysis, Deterministic Model Analysis, TRIGRS, SHALSTAB, SINMAP.

一、前 言

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 ,故每逢暴雨侵襲便常釀成規模不等的坡地災害, 嚴重危害集水區中、下游民眾生命財產安全。以2009 年8月侵台之莫拉克颱風為例,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、上游集 水區誘發2萬餘個大小不等的山崩及其伴隨而來的 台灣沿海鄉鎮造成民眾傷亡、公共設施損毀外, 所形成的複合型災害更是毀壞許多山區部落對外連 搖的困難度。此外,山崩造成的龐大土砂伴隨洪流宣 洩而下,除造成水庫嚴重淤積外,運移至下游地區更 造成嚴重的水患問題。鑑此,相關單位正急思一套有 效的山崩監測與預警系統,以作為集水區治理、保全 對策研擬及治山防災工程之參考基礎。

國內有關集水區開發治理之相關法令,除了現行 的「水土保持法」、「山坡地開發利用條例」及特定 水庫集水區治理特別條例等法令外,另一部「地質法」 業已於民國99年11月16日正式由立法院三讀通過。根 葉的質法第九條第二項所訂定之「地質敏感區基地質 實調查及地質安全評估作業準則」中更是明白指出, 今後針對山崩與地滑地質敏感區需進行完整的地質 許多研究,但傳統上多僅針對單一崩攝地進行調查 許多研究,但傳統上多僅針對單一崩攝地進行調查、 監測、評估或整治工作。但近年來因極端氣候事件所 造成有限的資源下,實無法針對集水區內龐大且廣布的 山崩與一個山崩可能的發生地點與時機以預作準備,針 對此一棘手問題,需尋找更妥適的方法方能因應。

本文以2009年莫拉克颱風產成大量山崩之高屏 溪流域邦腹北溪集水區為研究案例,應用三種工程界 最常使用的定率式廣域降雨促崩分析模式 (SHALSTAB、SINMAP及TRIGRS)進行集水區降雨 促崩潛勢分析。並透過敏督利颱風、海棠颱風及莫拉 克颱風之山崩目錄進行模式率定與驗證,使各模式均 能在正確率達一定程度以上之基準,再探討三者之差 異性與適用性及比較其在山崩預警應用上之優缺 點,相關成果將有助於後續山崩預警系統之建立。

二、工作方法

(一) SHALSTAB 简介

一般廣域降雨促崩模式受限於資料精度與計算時間,故常假設為無限邊坡破壞模式,模擬豪雨所造成之岩屑崩滑型山崩(或稱淺層崩塌)。至於降雨的影響若直接以某一降雨量所提高之地下水位來表示,而不考慮降雨入滲歷程,則稱之為穩態模式(steady-state model)。由於影響地下水位變化之因素甚多,如何估計降雨所提高的地下水位是穩態模式最重要的關鍵。

一般有地下水位之無限邊坡 (如圖1所示),其滑 動安全係數可以下式表示:

$$FS = \frac{\left[(1-m)\gamma + m\gamma'\right] \cdot h \cdot \cos^2 \alpha \cdot \tan \phi' + c'}{\left[(1-m)\gamma + m\gamma_{sat}\right] \cdot h \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha}$$
(2-1)

其中, h為覆土層厚度, α 為坡度, $m=h_w/h$ 為 顯示地下水位高之參數, h_w 為地下水面離滑動面的深 度; c', ϕ' 為邊坡材料之有效凝聚力與摩擦角; γ , γ_{sal} , $\gamma' 分別為邊坡材料之總體單位重、飽和單位重與有效$ 單位重。地下水位參數m除了受初始地下水位、地表植生覆蓋影響外,亦受到累積降雨量、入滲率與地層孔隙比等因素的影響,要準確估計不太容易。當<math>m=1表示滿水位,地下水位抬高至邊坡地表面; m=0表 示邊坡完全乾燥, 無地下水位。



圖 1 無限邊坡幾何條件示意圖

Dietrich & Montgomery (1994, 1998) 應用上述觀 念,提出結合降雨與無限邊坡之廣域淺層崩塌分析模 式 SHALSTAB (為Shallow Landsliding Stability之縮 寫)。令式(2-1)中FS=1,表示無限邊坡達到即將崩滑 之狀況,此時可將式子改寫為:

$$m_{cr} = \left(\frac{h_w}{h}\right)_{cr} = \frac{c'}{\gamma_w h \cos^2 \alpha \tan \phi'} + \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \phi'}\right) \qquad (2-2)$$

Dietrich & Montgomery (1994) 將 $m = h_w / h$ 稱為 土壤濕度指數w (soil wetness index)。

若假設有效降雨量完全轉化為平行於邊坡之地 下水滲流,而坡面有效降雨為q、集水面積為a,則 有效入滲雨量為 $q \cdot a$;至於邊坡滲流量根據達西定律 可表示為 $k \cdot i \cdot A = k \cdot (\Delta h_w / L) \cdot A$,其中斷面積 $A = b \cdot h_w \cos \alpha$ 。因此根據水平衡原理可推導出:

 $q \cdot a = k \cdot h_w \cdot \cos \alpha \sin \alpha \cdot b \tag{2-3}$

又在飽和土壤淺層地下逕流問題中,定義導水係 數T與土壤層深度h之關係為T=khcosα,代入式 (2-2),可推導出土壤濕度指數w:

$$w = \frac{h_w}{h} = \frac{q}{T} \cdot \frac{a/b}{\sin \alpha}$$
(2-4)

其中,a/b為坡面集水面積比 (specific catchment area),以坡面集水面積a除以坡面寬度b,再配合坡 度 α 即可求得土壤濕度指數w。式(2-4)顯示w受到下 列兩個因素的影響 (鍾欣翰,2008):

1. 水文比 (hydrologic ratio)

水文比為q/T,q為集水區降雨量,T=k.h.cosa 是土層傳送淺層地下水往下游流動的能力,若q/T越 大表示地下水位越高,土層越飽和,含水量越高。

2. 地形比 (topographic ratio)

地形比為(a/b)/sinα,當坡面越陡,地下逕流較 快,因此地下水位較低;當比集水面積越大,地下水 位則越高。

$$\frac{q_{cr}}{T}\frac{a/b}{\sin\alpha} = \frac{c'}{\gamma_w h \cos^2 \alpha \tan \phi'} + \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w} (1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \phi'})$$
(2-5)

Dietrich & Montgomery (1994) 依據地形、降雨條 件以及土壤參數,應用上式可判斷邊坡穩定與否,發 展出SHALSTAB邊坡穩定分析模式。Dietrich & Montgomery (1994) 認為地形主導崩塌的大小與行 為,因此利用此式可將集水區與水文有關之地形特性 分成四種類型:

1. 無條件不穩定 (unconditionally unstable)

$$\tan\theta > \tan\phi + \frac{c'}{\gamma_{sat}h\cos^2\theta}$$
(2-6a)

2. 不穩定 (unstable)

$$\frac{a}{b} \ge \frac{T}{q} \sin \theta \left[\frac{\gamma_{sat}}{\gamma_{w}} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) + \frac{c'}{\gamma_{w} h \cos^{2} \theta \tan \phi} \right] \quad (2-6b)$$

3. 穩定 (stable)

$$\frac{a}{b} < \frac{T}{q} \sin \theta \left[\frac{\gamma_{sat}}{\gamma_{w}} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) + \frac{c'}{\gamma_{w} h \cos^{2} \theta \tan \phi} \right]$$
(2-6c)

4. 無條件穩定 (unconditionally stable)

$$\tan \theta \le \tan \phi \left(1 - \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w} \right) + \frac{c'}{\gamma_{sat} h \cos^2 \theta}$$
(2-6d)

(二) SINMAP 簡介

Pack et al. (1998, 2001) 利用上述SHALSTAB相 同的觀念,以穩定降雨條件為基礎,發展出SINMAP (Stability Index Mapping) 分析模式,基本原理都相 同,僅改為以安全係數判斷邊坡穩定狀態,其計算式 如下:

$$FS = \frac{c'}{\gamma_w h \cos \alpha \sin \alpha} + \left[1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_{sat}} \left(\frac{h_w}{h}\right)\right] \left(\frac{\tan \phi'}{\tan \alpha}\right)$$
(2-7)

其中 h/h_w為土壤濕度指數,若以降雨量、水文比 及地形比予以表示,則可得到下式:

$$FS = \frac{c'}{\gamma_w h \cos \alpha \sin \alpha} + \left[1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_{sat}} \left(\frac{q}{T} \frac{a/b}{\sin \alpha}\right)\right] \left(\frac{\tan \phi'}{\tan \alpha}\right) \quad (2-8)$$

利用上式,SINMAP可將無限邊坡的穩定性與降 雨量聯繫起來,可估計某場降雨量廣域邊坡的安全 性,也可預估引致無限邊坡坍滑之臨界降雨量。

(三) TRIGRS 簡介

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: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。

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{d\Theta}{d\psi} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \alpha \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos \alpha \right) \right]$$
(2-9)

式中, ψ 為地下水壓力水頭; Θ 為含水量;t為時間;x,y,z分別為直角座標方向, α 為坡度; K_x , K_y , K_z 分別為x,y,z三方向之透水係數。

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。分析原理可參考圖2所示。

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:

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

$$(2-10)$$

式(2-10)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]β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 α ,z為垂直坡面方向、 α 為 坡度;d_z為穩態地下水位之深度,d_{1Z}為不透水邊界 深度; $\beta = \lambda \cos \alpha$, $\lambda = \cos \alpha - (I_Z/K_Z)_{LT}$ 為沿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。 再透過極限平衡法之無限邊坡穩定性分析理論,代入坡度 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:

$$F_{s} = \frac{\tan\phi}{\tan\alpha} + \frac{c - \psi(Z, t)\gamma_{w} \tan\phi}{\gamma_{s} Z \sin\alpha \cos\alpha}$$
(2-11)

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:

$$\psi(Z,t) \le Z\beta \tag{2-12}$$

美國地質調查所開發之TRIGRS 2002版所採用 之Iverson分析模式,並未發現其壓力水頭計算公式推 導有誤,故略為低估壓力水頭,且誤差會隨坡度增大 而增加。此一問題經由美國地質調查所之Baum博士 發現後做出修正,最新版TRIGRS 2008版已修正此一 問題。但因TRIGRS 2008版另加入未飽合分析模式, 所需參數變得更多,額外增加參數取得及分析之困難 度,故本研究仍以TRIGRS 2002版經本研究除錯後之 修正版本進行後續分析。



圖 2 TRIGRS 模式分析原理示意圖

(四) 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。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

前述模式率定輿驗證內容中,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:

$$MSR = 0.5 \cdot SR_{number} + 0.5 \cdot SR_{cell} \tag{2-13}$$

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 模式之總正確率本文建議以MSR較為合理。

表1 誤差矩陣法之相關參數定義

網格總數		模式預測結果	
N1 + N2 + N3 + N4		$(FS \le 1.0)$	(FS > 1.0)
實際 崩塌狀況	山崩	N1	N2
	非山崩	N3	N4

三、案例研究

本文以高屏溪流域之邦腹北溪集水區於莫拉克 颱風事件之山崩案例為例,說明三種定率式降雨促崩 模式之應用方式及成效。

(一) 地形概述

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 一南南西方向延展。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 (詳圖3)。至於本研究場址邦 腹北溪集水區位於高屏溪流域上游,行政區域隸屬高 雄市桃源區寶山村,附近著名景點為藤枝藤枝國家森 林遊樂區及藤枝部落。主要連外交通為藤枝林道 (舊 名荖濃溪林道)(詳圖4)。

(二) 地質條件







圖 4 邦腹北溪集水區之地理位置圖

(三) 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4,350 mm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 5 高屏溪流域地質圖(比例尺 1/50,000)



圖 6 邦腹北溪集水區之地質圖(比例尺 1/50,000)

四、分析成果討論

模式分析為適用於大尺度集水區,本文採用GIS 系統作為分析工作平台,以進行資料數化、儲存、圖 層套疊、整合分析及展示查詢等作業。 (一)參數圖層建置

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 (水系分布、地下水分布、雨量時空分布)、地工資訊 (基本物理性質、剪力強度特性、水力特性);若有必 要則利用ArcGIS所提供之空間分析功能(Spatial Analysis)將參數變異隨空間之分布情形透過內插運 算及資料格式轉換將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遙感探測RS (Remote Sensing)衛星影像、航空照片等圖層進行交叉套疊分

析以率定及驗證模式之準確度及其分析成效。

以下分別針對SHALSTAB模式、SINMAP模式及 TRIGRS模式應用上述3S技術 (GPS, GIS, RS) 所建 置之各項參數圖層介紹如下。至於模式輸入之相關參 數則綜合整理如表2所示。部分圖層如有共通者則合 併介紹、不重複贅述。

分析模式 所需參數	TRIGRS	SHALSTAB	SINMAP	
坡度α (度)	由 5m×5m DEM 產製			
土層厚度 (m)	迴歸式	_	_	
初始地下水位 (m)	由土壤濕度指數推導			
凝聚力 c (kPa)	2.9~7.5	2.9~7.5	2.9~7.5	
摩擦角 ϕ (度)	19.5~40.0	19.5~40.0	19.5~40.0	
單位重 γ_{sat} (kN/m ³)	20.5	20.5	20.5	
透水係數 K (m/s)	10-5~10-7	10-5~10-7	_	
擴散係數 D (m²/s)	10-4~10-6			
初始入滲係數 Iz(m/s)	10 ⁻⁶ ~10 ⁻⁸	_	_	
導水比 T/R	_	_	0.15~0.54	

表 2 三種分析模式之輸入參數值

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,以建立各模式所需之輸 入參數圖層。

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 製作之主要圖層介紹如后。

 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,流域內最陡處坡角達88度。
 研究區域以水保常用之坡地分級多屬於六級坡 (55%-100%),如圖7所示。

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,研究區域屬 潮州層。再蒐集過去研究區域內岩層之既有參數及現 地鑽探取樣試驗資料及文獻作為初值,最終透過降雨 促崩事件之山崩目錄進行參數率定,獲得相關參數代 表值,如表2及圖8至圖12所示。



 圖 7
 邦腹北溪集水區坡度圖層

 2000
 2000

 2000
 2000



邦腹北溪集水区凝聚力圆层

圖 8



圖 9 邦腹北溪集水區摩擦角圖層





圖 11 邦腹北溪集水區擴散係數圖層





圖 13 邦腹北溪集水區土壤厚度圖層







圖 15 邦腹北溪集水區初始地下水位圖層

3. 風化層厚度:本研究引用過去研究團隊於高 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d(單位: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(財 團法人中興工程顧問社,2009)。研究區域之土壤厚 度分布如圖13所示。

 $\ln(d) = -0.0454 \times s + 1.44 \qquad (r^2 = 0.81) \qquad (4-1)$

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。其原理利用比集水面積 (詳圖14)、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, 詳圖15。

5. 降雨促崩事件:本文以敏督利、海棠及莫拉克颱風等事件(如圖16至圖18)所誘發之山崩目錄(如圖19)作為最佳化參數率定及驗證之基準,以探討暴雨事件對研究區域坡地穩定之影響。



圖 16 敏督利颱風御油山雨量站之時雨量雨柱圖





圖 18 莫拉克颱風御油山雨量站之時雨量雨柱圖



圖 19 邦腹北溪集水區各促崩事件後之崩塌地分布

(二) 模式正確率評估

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兩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圖 8 至 圖 12 所示。以下分別列出以該代表性參數為基準, 針對模式率定及驗證正確性進行量化評估。

SHALSTAB 模式分析結果顯示,敏督利颱風模 式率定之山崩正確率為 77.2%、非山崩正確率為 95.9%,總正確率為 95.6%、MSR=86.5%;海棠颱風 模式率定之山崩正確率為 72.1%、非山崩正確率為 88.6%,總正確率為 88.2%、MSR=80.4%;莫拉克颱 風模式驗證之山崩正確率為 64.3%、非山崩正確率為 91.3%,總正確率為 87.6%、MSR=77.8%。

SINMAP 模式分析結果顯示, 敏督利颱風模式率 定之山崩正確率為 0%、非山崩正確率為 93.1%, 總 正確率為 91.7%、MSR=46.6%; 海棠颱風模式率定之 山崩正確率為 1.5%、非山崩正確率為 93.6%,總正確 率為 91.8%、MSR=47.6%; 莫拉克颱風模式驗證之山 崩正確率為 3.2%、非山崩正確率為 93.1%,總正確率 為 81.3%、MSR=48.1%。

TRIGRS 模式分析結果顯示,敏督利颱風模式率 定之山崩正確率為 67.5%、非山崩正確率為 97.6%, 總正確率為 97.1%、MSR=82.6%;海棠颱風模式率定 之山崩正確率為 66.6%、非山崩正確率為 91.5%,總 正確率為 91.0%、MSR=79.1%;莫拉克颱風模式驗證 之山崩正確率為 56.5%、非山崩正確率為 95.2%,總 正確率為 89.8%、MSR=75.9%。 在相同的代表性參數基準下比較三種模式之差 異,由上述結果可知,SHALSTAB 模式與 TRIGRS 模式因可考量各項參數之空間變異性,故正確率均有 不錯的表現;而 SINMAP 模式之部分力學參數結果 係以內建之反算程序所獲得 (例如凝聚力、摩擦角), 無法直接輸入經專業判斷後較具代表性之參數分布 圖層,僅考率水文因子及地形因子之貢獻而未考量力 學參數與水文地質參數在空間上之變異性,故在山崩 預測正確率方面表現則不如另外兩個模式。此外,由 SINMAP 分析案例探討可獲知,傳統誤差矩陣法在崩 塌較少之集水區將過於強調非山崩組正確率,故會有 超估總正確率之情形,故本文建議以修正成功率指標 MSR 來評估模式分析之整體正確率會較為適當。

另探討 SHALSTAB 模式與 TRIGRS 模式之差 異,因 SHALSTAB 模式僅考量特定降雨強度下之坡 地穩定性,即使輸入多場連續降雨,也皆為獨立事 件,其模式並未考慮淺層土層內之水壓累積情形,故 僅適合評估最終崩塌位置規模而無法獲知崩塌隨累 積雨量及降雨延時之關聯性,較不利於後續山崩預警 之應用。

為針對後續預警應用進行準備,以下則舉本研究 區域鄰近之御油山雨量站之 200 年重現期 24 小時累 積降雨 (1736 mm) 搭配該站之設計雨型 (詳圖 20) 為例,以此條件作為預測基準,說明三者於山崩潛勢 預測之應用情形,如圖 21 至圖 23 所示。

圖 21 至圖 23 中,透過安全係數將崩塌潛勢予以 分級,其中紅色區域代表高潛勢區 (FS<1.0)、黃色區 域代表中潛勢區 $(1.0 < FS \le 1.5)$ 、綠色區域代表低潛 勢區 (FS>1.5)。惟 SINMAP 模式係透過穩定性指數 SI 值分級,有其特定之分級標準 (Stable: SI>1.5; Moderately Stable: $1.25 < SI \le 1.5$; Quasi-stable: $1.00 < SI \le 1.25$; Lower Threshold: $0.5 < SI \le 1.0$; Upper Threshold: $0.0 < SI \le 0.5$; Defended: SI=0) (Pack et al., 1998; 2001)。為與其他二者有相近之基準,故本研究 將其 SI 值另設定為高潛勢區 (SI<0.5)、中潛勢區 (SI=0.5~0.75)、低潛勢區 (SI>0.75),以茲對比。

三者分析結果顯示, SHALSTAB 模式與 TRIGRS 模式在預測 200 年重現期 24 小時累積雨量條件下之 山崩發生高潛勢區分布位置相近,而 SINMAP 模式 則明顯較為低估。此外,因 TRIGRS 模式多考量了水 文地質參數 (例如初始入滲係數、透水係數及擴散係 數等因子)對淺層暫態水壓之影響,且可考慮降雨期 間降雨強度衰退所產生之暫態水壓消散效應,故所評 估的中潛勢區較 SHALSTAB 為多。



圖 20 御油山雨量站 200 年重現期 24 小時設計雨型



TRIGRS 於莫拉克颱風降雨第 24 個小時之

降雨促崩潛勢評估結果



圖 25 至圖 27 分別為邦腹北溪集水區於莫拉克颱 風降雨期間,第6小時、第12 小時及第24 小時之各 坡地網格單元之山崩潛勢評估成果之分布變化情形。

五、結論

 本文以高屏溪流域之邦腹北溪集水區為研究 案例,應用三種工程界常用的定率式降雨促崩模式進 行集水區降雨促崩潛勢分析。並在三者正確率達一定 程度以上之相同基準上,探討彼此的差異與適用性。 結果顯示因SHALSTAB、SINMAP程式屬穩態水文模 式,在操作及參數輸入上較為方便快速,但其分析係 採最大降雨強度,故僅能得知特定時間之廣域山崩潛 勢;至於TRIGRS程式尚可考量降雨延時及累積雨量 對區域崩塌潛勢變化之影響,屬暫態水文模式,在結 合即時雨量或預測雨量之山崩預警應用上具有較佳 的優勢。

2. SHALSTAB模式與TRIGRS模式因可考量各項 參數之空間變異性,故在模式率定及驗證之正確率均 有不錯的表現;而SINMAP模式之係以給定力學參數 值範圍(例如凝聚力、摩擦角)再透過內建之程序獲 得安全係數,無法直接輸入經專業判斷後較具代表性 之參數空間分布圖層,故僅考率水文因子及地形因子 之貢獻而未考量力學參數與水文地質參數在空間上 之變異性,故在山崩預測正確率方面表現則不如另外 兩個模式。

3.因TRIGRS具備動態模式特性,且可充分考量 地形、降雨入滲、暫態地下水壓力、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,能有效描述因降雨入滲所引致之岩屑崩滑型 山崩。透過本研究案例之評估實例獲得良好的驗證, 顯示模式具良好成。又因充分考量動態時間因素,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,後續可拓展開發成區域性岩屑 崩滑型山崩預警系統,即時提供相關預警資訊,有助 於後續山崩災害預警準則之建立及保全對策之擬訂。

4. 定率模式針對莫拉克颱風事件之驗證成果, 其山崩正確率仍不算太高。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,可預期正確率會偏低。

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 一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] 財團法人中興工程顧問社,「易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置一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 (2009)。
- [2] 陳建新、譚志豪、冀樹勇、蘇泰維,「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 上保持學報,第42卷,第1期,第1-11頁(2011)。
- [3] 鍾明劍、譚志豪、王金山、冀樹勇、蘇泰維,「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(2010)。

- [4] 鍾明劍、譚志豪、冀樹勇,「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(2011)。
- [5] 鍾欣漢,「考慮水文模式的地形穩定分析-以匹亞 溪集水區為例」,碩士論文,中央大學應用地質研 究所,台灣桃園 (2009)。
- [6] 譚志豪、呂昱達、冀樹勇、費立沅,「以定率法評 估集水區山崩臨界雨量」,地工技術,第129期(已 接受)(2011)。
- [7] 譚志豪、陳嬑璇、冀樹勇,「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(2009)。
- [8] Baum, R.L., W.Z. Savage and J.W. Godt, "TRIGRS -A fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis," U.S. Geological Survey Open-File Report 02-0424 (2002).
- [9] Dietrich, W.E. and Montgomery, D.R., "A Physically Based Model for TheTopographic Control on Shallow Landsliding", Water Resources Research, Vol. 30, 1153-1171 (1994).
- [10] Dietrich, W. E., and Montgomery, D.R., "SHALSTAB: A digital terrain model for mapping shallow landslide potential", http://socrates.berkeley. edu/~geomorph/shalstab/. (1998)
- [11] Huang, J.C. and Kao, S.J., "Optimal estimator for assessing landslide model performance", Hydrol. Earth Syst. Sci., 10, 957-965 (2006).
- [12] Iverson, R.M., "Landslide triggering by rain infiltration," Water Resources Research, Vol.36(7), pp.1897-1910 (2000).
- [13] Pack, R.T., D.G. Tarboton and C.N. Goodwin, "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).
- [14] Pack, R.T., Tarboton, D.G., Goodwin, C.N., "Assessing Terrain Stability in a GIS using SINMAP", in 15th annual GIS conference, GIS 2001, Vancouver, British Columbia, February 19-22 (2001).
- [15] Savage, W.Z., Godt, J.W. & Baum, R.L., "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 (2003).
- [16] Savage, W.Z., Godt, J.W. & Baum, R.L., "Modeling time-dependent slope stability", Proceedings of 9th international symposium on landslide: 23-28, 28 June-2 July 2004. Rio de Janeiro, Brazil (2004).
- [17] Tan, C.H., Ku, C.Y., Chi, S.Y., Chen, Y.H., Fei, L.Y., Lee, C.F. and Su, T.W., "Assessment of Regional Rainfall-Infiltration Landslide Susceptibility using the 3S-based Hydrogeological Model", The 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes, Xi'an, China (2008).