

以定率法評估集水區山崩臨界雨量

譚志豪* 陳憶璇** 冀樹勇***

摘 要

本文採用定率法評估集水區山崩臨界雨量。定率法具有明確的物理意義與力學機制，且可廣納多項地文及水文因子於空間與時間之變異特性，除能評估各邊坡單元在特定降雨條件下之崩塌潛勢之外，並可藉由邊坡安全係數臨界值之觀念反向推得集水區內各區域之山崩臨界雨量、臨界崩壞比及再崩潛勢等重要特性參數。模式分析首先由降雨特性開始探討，進而求解降雨期間淺層風化層之未飽和入滲以估算暫態地下水位之上升幅度，並進一步利用極限平衡法評估地下水位變化對邊坡穩定性之影響。再透過多次颱風事件之山崩目錄率定模式各項參數，以提昇模式之正確性及準確度。待模式完成率定及驗證後，即可透過定率式模式分析評估大尺度區域性山崩潛勢及山崩臨界雨量，所得成果可供後續防、減災措施及保全策略擬訂之參考。

關鍵字：臨界雨量、山崩、定率法、預警系統

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。為此，相關權責單位正急思一套有效的山崩預警系統，以擬訂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。為達預警目的，首先須先推估邊坡開始產生崩塌狀態之臨界降雨條件，以作為後續訂定警戒值或行動值之訂定基準。

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。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，另探討集水區邊坡在不同的暴雨條件下坡地之可能崩塌位置、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訂時之參考。

二、山崩臨界雨量研究現況

(一) 臨界雨量

臨界雨量 (Critical Rainfall) 定義為誘發山崩之最小累積降雨量，即在降雨事件期間，自降雨強度開始明顯增加，至邊坡開始發生崩塌為止之累積降雨量。又依據研究尺度之不同而分為：

* 中興工程顧問社大地工程研究中心水文地質模擬組組長

** 中興工程顧問社大地工程研究中心研究員

*** 中興工程顧問社大地工程研究中心經理

全域性 (Global)、區域性 (Regional) 及局部性 (Local) 三類臨界雨量 (Guzzetti et al., 2005)。其中, 全域性臨界雨量係採用跨地區之降雨促崩資料評估山崩臨界雨量, 因此其結果不受地區差異影響而一體適用, 惟其成果可能是極保守之下限值。至於區域性臨界雨量則需考量各區域氣象、地質及地文等特性對坡地穩定性之影響, 故評估所得之臨界雨量將受上述條件所影響而有區域性之差異。至於局部性臨界雨量則多以局部單一邊坡案例作為研究對象, 探討累積雨量達某局部性臨界雨量後則邊坡會開始產生破壞。本研究屬區域性臨界雨量研究, 研究對象以流域內各集水區為主, 並推估各集水區之山崩臨界雨量。

除了上述定性說明臨界雨量之基本定義及其適用範圍之外, 為求得山崩臨界雨量門檻值 (Rainfall Threshold), 則需透過定量方式予以評估。傳統上, 山崩臨界雨量之評估可透過統計法 (Statistical Approach) 或定率法 (Deterministic Approach) 進行, 兩者概念不同, 茲將其差異說明於后。

(二) 統計法

統計法係利用過去山崩歷史資料與當時降雨特性資料, 包括降雨強度、降雨延時、累積雨量或前期雨量等特性參數, 透過統計分析方法推估發生山崩時之臨界降雨特性。以統計法評估臨界雨量之研究最早可溯自 Caine (1980), 該研究蒐集 73 個世界各地山崩土石流案例之降雨強度與降雨延時資料, 並根據資料下限值統計迴歸出一條線性關係曲線, 視為臨界線 (Critical Line), 並將其應用在評估土石流之發生門檻值。後來陸續有許多研究基於此觀念推廣應用在判定山崩及土石流發生條件判定及訂定相關警戒準則之用。

統計法依據選定之特性參數不同, 其推估臨界雨量模式可再區分為: (1) 降雨強度-累積雨

量、(2) 降雨強度-降雨延時、(3) 累積雨量-降雨延時及 (4) 降雨強度-前期雨量等四種配對方式作為臨界雨量之判定指標 (Keefer et al., 1987; Terlien, 1998; Jakob & Weatherly, 2003)。針對上述指標之配對組合, 將各降雨事件特性資料繪製於圖上 (例如降雨強度-累積雨量圖), 其中降雨誘發山崩之降雨事件與未誘發山崩之降雨事件以不同的符號表示。再透過統計方法將兩類事件以迴歸線區隔開, 視該迴歸線為降雨臨界曲線。當未來某場預測降雨事件之降雨特性達到降雨臨界曲線以上時, 則推定該場預測降雨引致山崩之發生機率相當高; 反之, 則發生山崩之機率明顯較低。

(三) 定率法

定率法係以物理模型結合力學理論推估山崩時之降雨特性。自降雨落於坡面後, 雨水經由入滲作用進入地中, 造成坡地內部力學性質的改變 (例如單位重增加、孔隙水壓上升、剪力強度降低等), 進而影響邊坡穩定性。當邊坡穩定性達到臨界破壞時, 往往開始造成岩體滑動或崩落進而形成山崩災害。因此降雨誘發山崩之機制應與邊坡之岩土成分、組構、含水量及入滲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 (Reid, 1994; Iverson, 2000; Godt, 2004; Savage et al., 2004)。

此法首先需整合坡地水文及地質特性資料以建立物理模型。隨後再輸入降雨歷程, 並透過未飽和傳輸理論評估降雨入滲對地下水壓之影響程度。再採用極限平衡法求得邊坡單元之穩定性隨水壓之變化。最終輸入不同大小的降雨量, 計算出邊坡穩定性達極限狀態時 (即安全係數 $FS=1.0$) 所對應之累積雨量, 該雨量即視為該邊坡單元之山崩臨界雨量 (Montgomery & Dietrich, 1994; Wilson & Wicczorek, 1995; Crosta, 1998; Terlien, 1998)。

由於台灣山區發生山崩與其相連結之降雨資料相當缺乏且不易取得，故利用統計方法推估計畫區內驅動山崩發生之臨界雨量，其精度恐嫌不足。本文在山崩臨界雨量推估上主要採用定率式方法，利用區域性降雨促崩潛勢分析模式 TRIGRS 評估集水區內各邊坡單元於臨界滑動狀態下之降雨促崩門檻值。

三、定率式臨界雨量分析理論

(一) 區域性山崩臨界雨量定義

本文提及之區域性山崩臨界雨量係針對集水區範圍內各邊坡進行山崩臨界雨量評估。由於各區域邊坡受到氣象、地質及各項地文因子之影響而使發生崩塌之時間不盡然相同。因此，為定義區域性山崩臨界雨量，崩塌面積隨累積雨量之關係曲線斜率達急遽變化區段之累積雨量。

(二) 區域性降雨促崩分析模式建立

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, TRIGRS) 進行集水區坡地降雨促崩潛勢分析 (Baum et al., 2002)。TRIGRS 模式乃基於 Iverson (2000) 之研究成果發展而來，旨在求解區域內各無限邊坡網格在降雨入滲條件下邊坡安全係數隨孔隙水壓之變化情形。

該模式首先將集水區離散成眾多網格單元之組合，而各網格單元之初始地下水位、幾何特性 (如：坡度、土層厚度)、水文地質特性 (如：地表入滲率、透水係數、擴散係數及剪力強度參數等) 及降雨強度延時等參數值均可隨空間或時間設定為不同之分布型態，再透過求解未飽和流動方程式 (Richards Equation) 評估降雨入滲之坡地對孔隙水壓 (或含水量) 之變化，即：

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} \frac{d\theta}{d\phi} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(\phi) \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} - \sin \alpha \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(\phi) \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\phi) \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} - \cos \alpha \right) \right] \quad (1)$$

式中， ϕ 為地下水壓力水頭， θ 為含水量， t 為時間， x 、 y 、 z 分別為三個直角座標方向， α 為坡角， K_x 、 K_y 、 K_z 分別為 x 、 y 、 z 三方向之透水係數。

TRIGRS 模式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)，該式可透過值選定來通盤考量均質無限邊坡或有限深度內存在相對不透水基岩之狀況，即：

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

式中， 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。而極限平衡法係透過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 $\phi(Z, t)$ 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：

$$F_s = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{c - \phi(Z, t) \gamma_w \tan \phi}{\gamma_s Z \sin \alpha \cos \alpha} \dots \dots \dots (3)$$

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：

$$\phi(Z, t) \leq Z\beta \dots \dots \dots (4)$$

透過式(2)至式(4)即可獲得降雨期間各邊坡單元網格之暫態地下水位變動。待求得暫態地下水位分布後，結合極限平衡法之無限邊坡理論，計算邊坡單元之安全係數，即可求得各邊坡單元網格於此降雨入滲期間穩定性之變化，其原理如圖 1 所示。

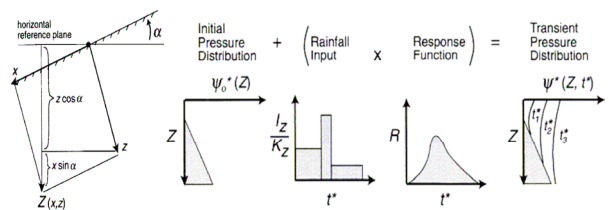


圖 1 TRIGRS 模式分析原理示意圖

(三) 模式率定與驗證

進行集水區廣域降雨促崩模式分析時，由於現地調查、試驗及監測之數量往往受限於執行經費與規模而未臻充足，使得模式分析結果可能存在著模型概念化、水文地質參數給定及統計資料運用等階段所產生之不確定性。因此有必要針對模式進行參數率定，以確保模式分析之正確性及準確度。所謂模式率定係透過反算分析方法找出模式內各地質分區最適當的物理、力學及水文地質參數。模式率定程序係結合最佳化概念反覆修正各參數至誤差縮小至工程可接受之精度為止。誤差估算方式係透過比對模式分析所得之崩塌網格位置與既有暴雨事件誘發之崩塌位置，並透過誤差矩陣法 (Stehman, 1997) 量化模式分析之正確率。

待廣域降雨促崩模式建置完成且相關水文地質及力學參數通過率定後，仍須透過模式驗證以確保模式之正確性及適用性，方可用來預測未來於特定降雨條件下集水區範圍坡地之穩定性與崩塌潛勢。本文選取一場造成嚴重山崩災害之颱風事件率定模式及分析所需參數後，再挑另一場曾發生顯著崩塌之降雨事件輸入其降雨歷時資料並進行降雨促崩模式分析，最終將模式分析結果與該事件實際造成之崩塌位置比對，以驗證本模式分析於預測重大降雨事件崩塌位置與規模之正確性與準確度。

(四) 臨界崩壞比與再崩潛勢評估

使用定率法評估山崩臨界雨量之另一項優點為可同時獲得兩項重要崩塌特性參數：(1) 臨界崩壞比、及 (2) 暴雨再崩潛勢。所謂臨界崩壞比係指集水區範圍內之崩壞比 (崩塌面積除以總面積) 不再隨累積雨量增加而急遽上升，甚至趨於平穩時之崩壞比稱之。至於暴雨再崩潛勢則定義為當降雨量不斷增加甚至超過該區域之山崩臨界雨量後，區域內崩塌面積再持續增加之可能潛勢。詳細說明參見本文研究案例。

四、研究案例

(一) 研究區域概述

大甲溪流域位於台灣中西部(如圖 2 所示),山區最高可達海拔 3,875 m 以上。河床坡度自上游發源地逐漸向中、下游遞緩。流經德基後坡度轉緩,至谷關後河谷漸趨狹窄,為典型之峽谷地形。谷關以西河岸較為開闊,河床寬達百公尺,流勢漸緩,上游攜帶之砂石紛紛沉積。馬鞍起河流轉向北行 10 餘公里,至東勢復向西流至石岡。石岡為大甲溪下游沖積扇的扇頂位置,至此以下迄河口長約 30 km,流入平原後河寬達數百公尺以上,河床滿佈砂礫與沉積物。

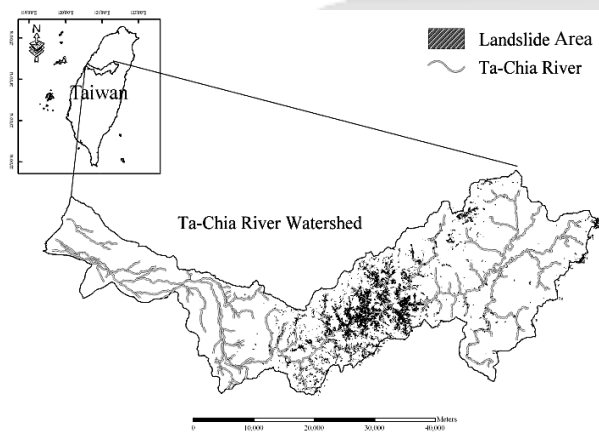


圖 2 研究區域(大甲溪流域)

(二) 地質與水文概述

大甲溪上、中游為古第三紀地層與新第三紀地層,岩層主要係由硬頁岩、板岩、石英岩、砂岩、頁岩及混質粉砂岩所組成,由東向西包括廬山層、水長流層、佳陽層、四稜砂岩、達見砂岩、白冷層等;中游則為新第三紀地層,含國姓層、關刀山層、錦水層及卓蘭層等。上述區域性劈理、節理構造極為發達,岩層易風化破碎,加上地層傾斜與源於此山地的溪流也多屬陡急的坡降,故造成本區內劇烈的河川侵蝕以及頻繁的崩塌現象。下游為第四紀地層,含火炎山層、洪積

層及沖積層。至於地質構造方面,大甲溪流域普遍受到斷層與褶皺影響,因此具多處剪裂帶及破碎帶。沿谷關至德基間之台 8 線公路可見大規模之褶皺群。岩層中亦頗常見錯動之逆斷層。

大甲溪流域雨量豐沛,現有自記式雨量測站約有 20 餘處,惟上游山區設置較少。上游地區平均年雨量介於 3000 至 3500mm,中、下游地區約在 2000 至 2500mm,下游至沿海地區則在 1500-2000mm 左右。根據長期統計結果顯示,降雨多集中於 5 至 9 月,約佔全年總雨量 75%。颱風季節集中在 6 至 8 月,颱風過境時日雨量常達 500 mm 以上。

(三) 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 系統作為主要分析工作平台,進行資料數位化、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驗證分析成效。茲將本研究區域應用上述 3S 技術(GPS, GIS, RS)所製作之各項圖層介紹如下。

1. 坡度

大甲溪流域地勢陡峻，高程落差大，研究區域內除河谷鄰近區域外，邊坡坡角多介於 28 至 45 度間，流域內最陡處坡角可達 75 度。透過大甲溪流域之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

大甲溪流域可分為數個地質單元，包括廬山層、乾溝層、大桶山層、四稜砂岩層等，其分布位置可參考圖 4 之 1/250,000 地質圖。根據過去研究區域內各岩層之既有參數資料庫顯示，各地質分區淺層土壤之力學參數與水力參數如表 1 所示。本文假定淺層土壤之力學性質與其基岩有著正向關係，故輸入參數初值以地質分區設定。

表 1 大甲溪流域各地層分區之材料參數

地質分區	γ_t	c	ϕ	K	D	I_z
	(kN/m ³)	(kPa)	(°)	10 ⁻⁶ (m/sec)	10 ⁻⁶ (m ² /sec)	10 ⁻⁷ (m/sec)
四稜砂岩	22	6.8	27	10	100	1
瑞芳群及其相當地層	20	16	28	1	10	0.1
廬山層	22	12.5	29	1	10	0.1
三峽群及其相當地層	20	16	28	1	10	0.1
野柳群及其相當地層	25	19	27	1	10	0.1
乾溝層	22	6.5	23	0.5	10	0.1
大桶山層	21	17	28	1	10	0.1
卓蘭層及其相當地層	26	15.5	27	0.01	1	0.001
頭嵙山層及其相當地層	26	15.5	27	0.01	1	0.001
紅土臺地堆積	18.6	22	20	0.005	0.5	0.05
臺地堆積	18.6	20	20	1	10	0.1
沖積層	18.6	20	20	1	10	0.1

註：分析參數是以地層分區之表層風化土層為主。

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淺層崩塌之淺層風化土壤厚度分布，如圖 5 所示。

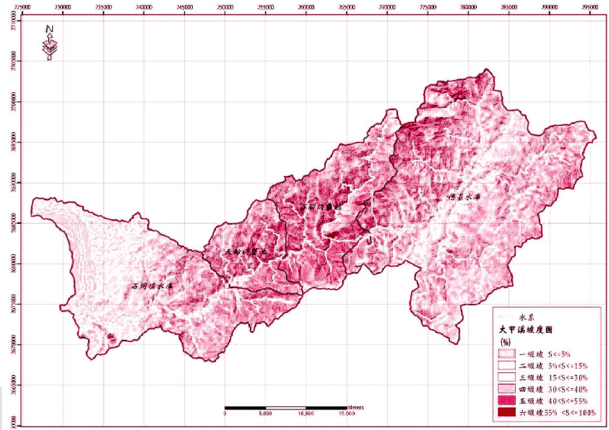


圖 3 坡度分布

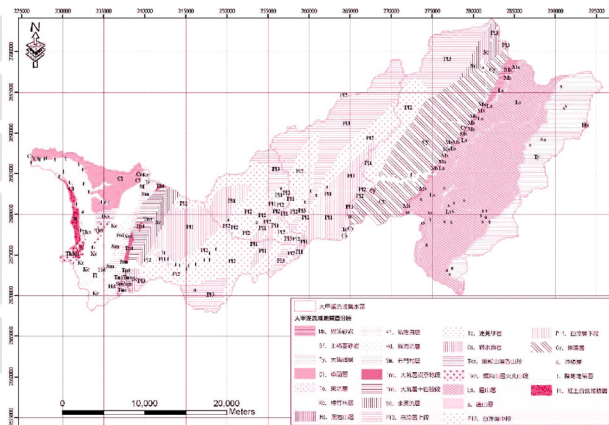


圖 4 水文地質參數之地質分區

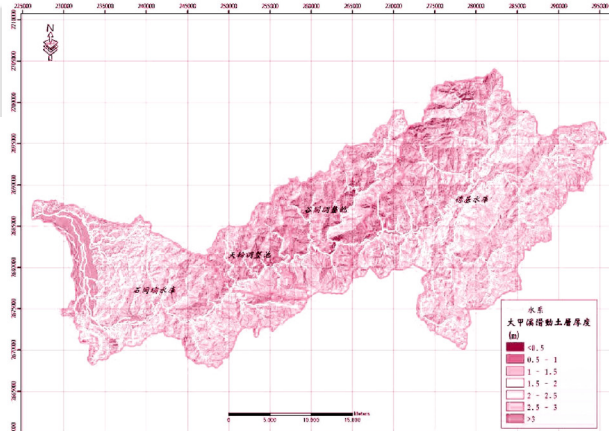


圖 5 風化土層厚度分布

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 (Saulnier et al.,1997; Watler 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。

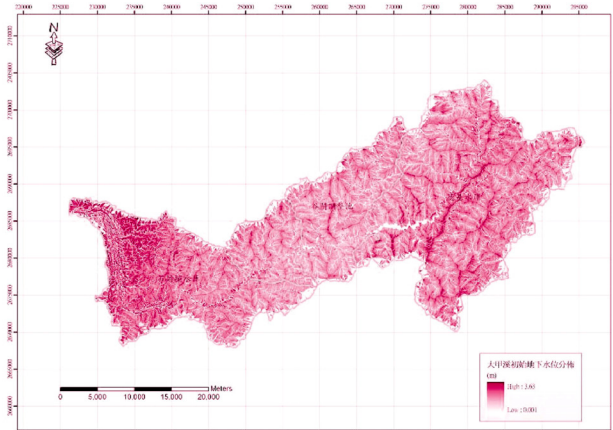


圖 6 地下水位分布圖

5. 分析颱風事件

本文以桃芝颱風及敏督利颱風為研究事件，探討兩次暴雨事件對大甲河流域坡地穩定之影響。桃芝颱風事件收集包括上谷關、松茂等 33 個雨量站之時雨量資料，而敏督利颱風則選用白冷、梨山等 23 個雨量站之時雨量資料作為促崩因子。舉研究區域內之雪嶺測站為例，桃芝颱風期間所量測到之時雨量柱狀圖如圖 7(a) 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 7(b) 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。圖 8(a) 與 8(b) 則為敏督利颱風期間之時雨量柱狀圖及特定小時雨量分布圖。

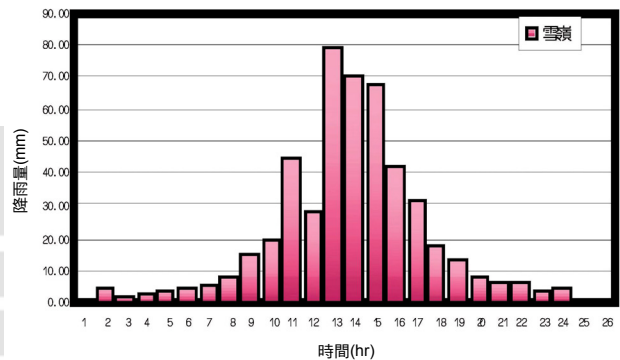


圖 7(a) 桃芝颱風期間雪嶺氣象站之時雨量雨柱圖

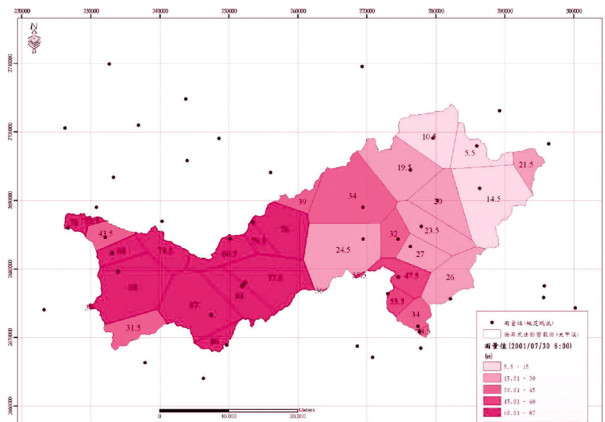


圖 7(b) 大甲河流域雨量分布圖
(桃芝颱風 2001/07/30 08:00)

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布效應，其精確度較平均法合理，在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。本文採用桃芝颱風事件及敏督利颱風事件之山崩目錄進行後續模式率定與驗證工作。

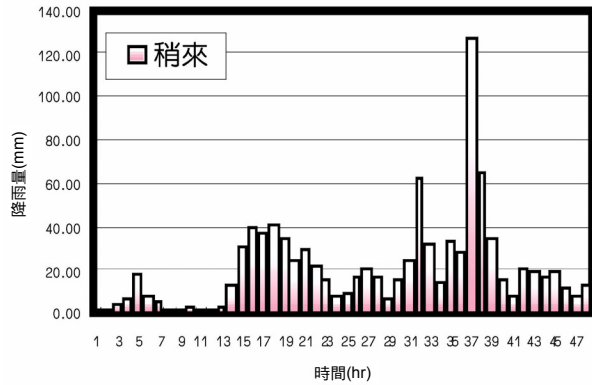


圖 8(a) 敏督利颱風期間稍來氣象站之時雨量雨柱圖

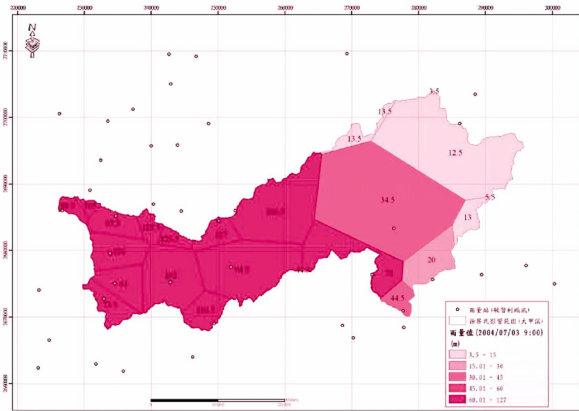


圖 8(b) 大甲溪流流域雨量分布圖
 (敏督利颱風 2004/07/03 09:00)

(四) 模式率定與驗證成效

為瞭解模式率定結果之準確程度，需與桃芝颱風實際發生之山崩做一套疊比對（詳圖 9），黑色區塊為崩塌地範圍，約有 3841 處，可得到在空間分布上，安全係數小於 1.0 之邊坡網格單元與實際發生山崩之比較約為 92%；同時分析其崩塌與非崩塌之網格數，如表 2，並計算其山崩正確率為 64.23%、非山崩正確率 94.76%、總正確率 94.19%，均在率定原則之內，尚於可接受之範圍。

為掌握模式預測結果之準確程度，分析結果須與敏督利颱風期間實際發生崩塌之範圍做一套疊比對（詳圖 10），黑色多邊形為實際崩塌範圍，計 4733 處崩塌地。模式分析結果可獲得在空間分布上有 95% 以上之崩塌地被模式評估出崩塌網格（安全係數小於 1.0）。統計集水區範圍分析所得之崩塌與非崩塌網格數（詳表 3），精算出本次模式分析之山崩正確率為 68.94%、非山崩正確率為 94.60%、總正確率為 91.20%。此結果驗證本模式在敏督利颱風事件之崩塌預測上其正確性及準確度均在可接受之範圍。

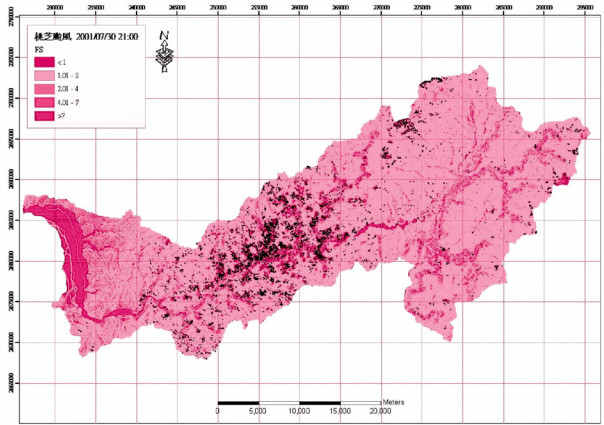


圖 9 大甲溪流流域模式率定結果與桃芝颱風山崩目錄之套疊比對

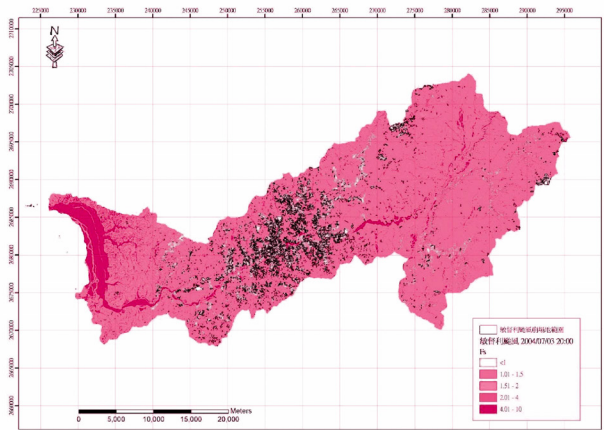


圖 10 大甲溪流流域模式驗證結果與敏督利颱風山崩目錄之套疊比對

表 2 大甲溪流域模式率定成果 (桃芝颱風)

總網格數 686362		模式預測結果 (網格數統計)	
		(FS≤1)	(FS>1)
實際 狀況	已崩塌	8315	4631
	非崩塌	35277	638139
山崩正確率為 64.23%、非山崩正確率 94.76%、 總正確率 94.19%			

表 3 大甲溪流域模式驗證成果 (敏督利颱風)

總網格數 666362		模式預測結果 (網格數統計)	
		(FS≤1)	(FS>1)
實際 狀況	已崩塌	16494	7430
	非崩塌	34710	607728
山崩正確率為 68.94%、非山崩正確率 94.60%、 總正確率 91.20%			

(五) 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。以下舉大甲溪流域梨山雨量站控制範圍之臨界雨量評估為例，具體說明本工作之內容與成果。

1. 設計雨型

根據中央氣象局梨山雨量站降雨資料，透過位序法進行雨型分析，獲得梨山雨量站 24 小時設計雨型如圖 11 所示。

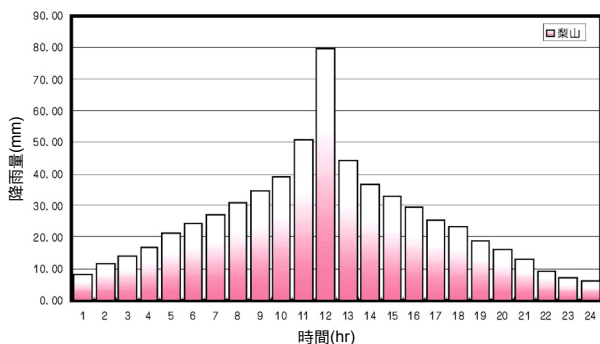


圖 11 大甲溪流域梨山雨量站之 24 小時設計雨型

2. 不同重現期降雨量分布

依據上述設計雨型逐一輸入不同重現期 24

小時延時降雨至廣域降雨促崩模式進行分析，藉以評估研究範圍內不同重現期之各延時降雨條件下該區域崩壞比隨降雨之變化。

本研究所使用之不同重現期之各延時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各延時等雨量分布圖。圖 12 則以大甲溪流域 200 年重現期 24 小時延時降雨之頻率分析所獲得之成果為例予以說明。

為配合未來山崩警戒發布機制之草擬，期能以各雨量站所測得之雨量為基準，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 13 則將上述降雨空間分布轉為徐昇氏雨量站網形式表示。

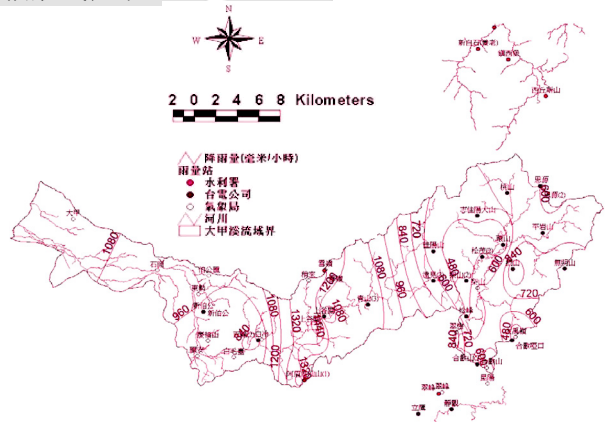


圖 12 大甲溪流域 200 年重現期 24 小時延時降雨等值線分布 (克利金法)

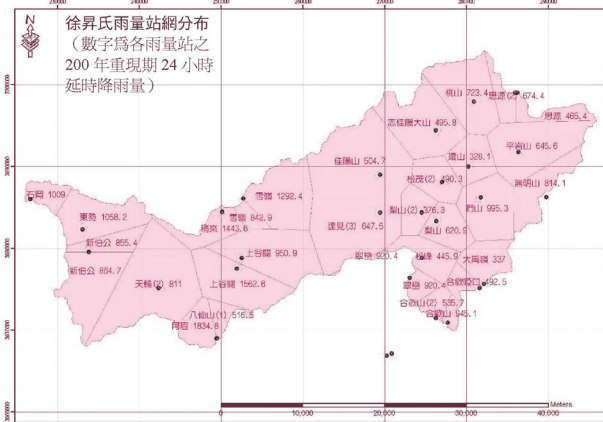


圖 13 大甲溪中、上游地區之 200 年重現期 24 小時延時降雨分布

3. 集水區山崩臨界雨量分布

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。舉梨山雨量站控制面積為例，由圖 14 可看出當雨量累積約到 95mm 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 190mm 開始趨於平緩。因此梨山雨量站網控制範圍內之臨界雨量建議值介於 95mm 至 190mm 間。

參照上述方法，同樣針對大甲溪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 15 所示。

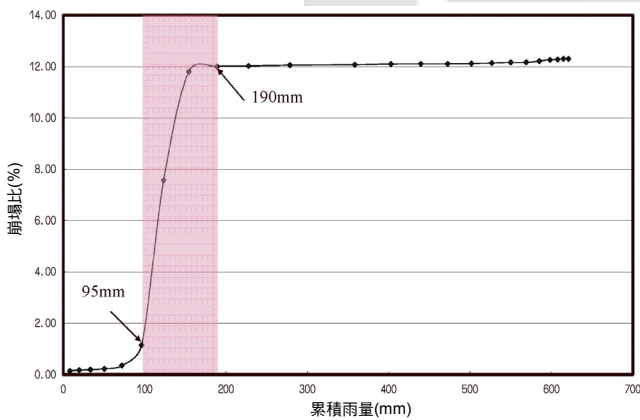


圖 14 梨山雨量站控制範圍之臨界雨量值訂定

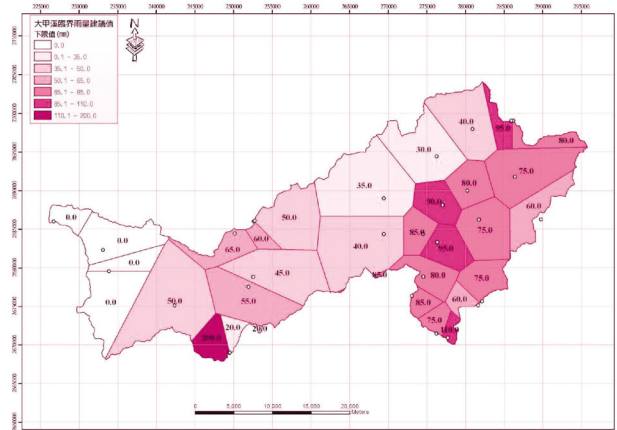


圖 15(a) 大甲溪流域山崩臨界雨量建議下限值

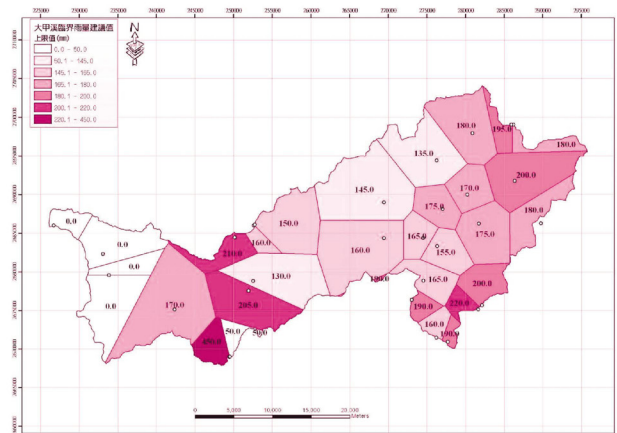


圖 15(b) 大甲溪流域山崩臨界雨量建議上限值

4. 集水區臨界崩壞比與再崩潛勢評估

本文定義臨界崩壞比係指當集水區內眾多邊坡於山崩臨界雨量期間發生急遽崩塌，所累積之崩塌面積最終趨於穩定，此時崩塌面積佔整體集水區面積之比例稱為界崩壞比。至於再崩潛勢則定義為集水區崩塌面積達臨界崩壞比後，隨著累積雨量持續增加而又再次發生較大規模崩塌之趨勢。圖 16 則舉雪嶺雨量站網控制範圍為例，說明極限崩壞比及暴雨再崩潛勢之定義。圖 17 則為大甲溪流域於 200 年重現期 24 小時延時降雨條件之降雨促崩潛勢分級與臨界崩壞比之分析成果。表 4 則為大甲溪流域於 200 年重現期 24 小時延時降雨條件下各徐昇氏雨量站網控制範圍崩壞比及暴雨再崩潛勢之成果整理。綜合結果可得

知，大甲溪流域之暴雨再崩潛勢近半為低，但有部分區域之暴雨再崩潛勢為中或高，顯示這些區域在累積雨量遠超過臨界雨量後仍有可能再次發生第二階段之崩塌。

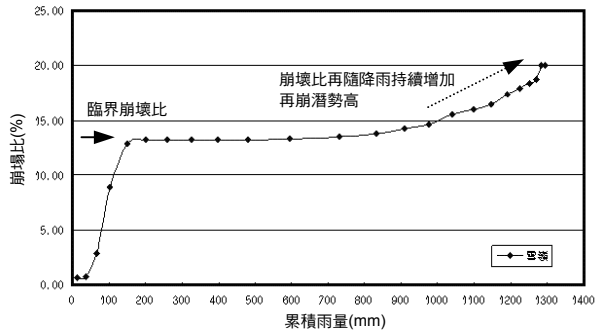


圖 16 臨界崩塌比及再崩潛勢示意圖
(以雪嶺雨量站網分析成果為例)

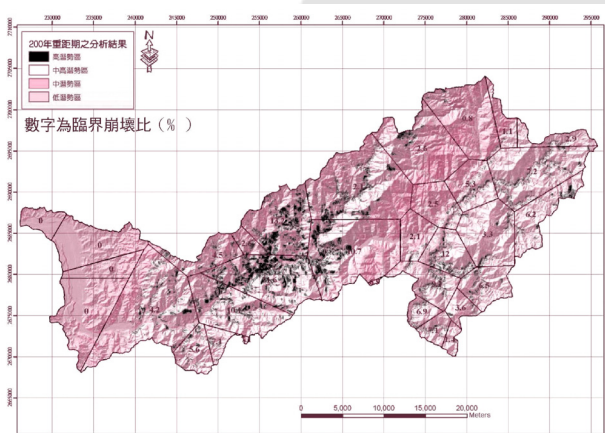


圖 17 大甲溪流域 200 年重現期 24 小時延時降雨之崩塌潛勢分級圖

五、結 論

根據前述研究成果可歸納以下結論：

1. 本文採用定率法進行廣域降雨促崩潛勢分析，並評估集水區山崩臨界雨量。模式分析考量地形、暫態地下水位、風化層厚度、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。
2. 模式採 40m×40m 精度之 DEM 資料進行網格建置，並採用 1/250,000 地質圖作為地質分區

依據，故較適用於大尺度的廣域集水區範圍之相關研究。

3. 本文以大甲溪流域為研究案例，針對桃芝颱風、敏督利颱風所造成的崩場地規模及位置進行模式率定與驗證，預測分析成果之山崩正確率普遍可達 65% 以上。惟後續針對山崩及非山崩正確率之計算，後續可再做進一步探討。
4. 本文同時採用不同重現期之各延時降雨資料進行山崩潛勢預測及山崩臨界雨量評估，除能藉此預測流域內各集水區之臨界雨量值上、下限值外，亦能獲得該流域於此降雨條件下之可能崩塌位置、崩塌規模及再崩潛勢等資訊，對於後續建立相關預警準則及擬訂保全對策提供了良好的基礎。

表 4 大甲溪流域臨界雨量及再崩潛勢評估

雨量站站號	徐昇氏雨量站網(站名)	臨界雨量下限值(mm)	臨界雨量上限值(mm)	臨界崩塌比(%)	暴雨再崩潛勢
01F350	雪嶺	60	160	2.60	高
41F190	志佳陽大山	30	135	2.60	低
C1F870	上谷關	55	205	10.10	低
C0T790	大禹嶺	75	200	6.50	低
40F130	達見(3)	40	160	10.70	低
41F240	捫山	75	175	3.30	低
C0F950	合歡山	110	190	1.40	低
C1F890	稍來	65	210	4.50	高
C1F940	雪嶺	50	150	13.20	高
40F12	環山	80	170	5.30	低
41T14	合歡啞口	60	220	3.60	低
40F160	梨山(2)	85	165	2.14	低
41F210	佳陽山	35	145	2.10	中
41H220	合歡山(2)	75	160	7.10	低
C0F860	梨山	95	155	12.00	低
C1F880	阿眉	200	450	5.60	低
C1H850	翠巒	85	190	6.90	低
C0U730	思源	80	180	2.90	低
40F17	松茂(2)	90	175	2.50	低
41F22	桃山	40	180	0.76	低
41U09	思源(2)	95	195	1.10	低
40F150	上谷關	45	130	21.60	中
40F280	天輪(2)	50	170	4.20	中
41F200	平岩山	75	200	7.20	低
41F260	松峰	80	165	9.10	低
41F250	無明山	60	180	6.20	低
01F100	八仙山(1)	20	50	7.10	低

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。

參考文獻

- 財團法人中興工程顧問社 (2008) 易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置 (第 1 期 96 年度)-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
- 譚志豪、陳熾璇、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
- 譚志豪、陳熾璇、冀樹勇、費立沅、李錦發、蘇泰維 (2008) 結合廣域降雨促崩模式及 3S 技術之山崩災害預警系統初步建置，第六屆海峽兩岸山地災害與環境保育學術研討會，台中逢甲大學，台灣
- 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
- Chen, C.Y., Chen, T.C., Yu, F.C. & Lin, S.C. (2005) Analysis of Time-varying Rainfall Infiltration Induced Landslide, Environmental Geology, 48, pp. 466-479
- Delmonaco, G., Leoni, G., Margottini, C., Puglisi, C. & Spizzichino, D. (2003) Large Scale Debris-flow Hazard Assessment: a Geotechnical Approach and GIS Modeling, Natural Hazards and Earth System Sciences, 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
- Iverson, R.M. (2000) Landslide Triggering by Rain Infiltration, Water Resour Res., 36 (7), pp. 1897-1910
- Salciarini, D. et al. (2006) Modeling Regional Initiation of Rainfall-induced Shallow Landslides in the Eastern Umbria Region of Central Italy, Landslides, 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, September, Davos, Switzerland, pp. 179-187
- Savage, W.Z., Godt, J.W. & Baum, R.L. (2004) Modeling Time-dependent Slope Stability, Proceedings of 9th International Symposium on Landslide, June-July, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 23-28
- 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

中興工程公開徵稿啟事

為了回應讀者意見調查之建議，除了本刊「徵稿簡則」已列舉者外，誠摯歡迎社會各界人士、學者、專家以及中興員工投稿有關：(1) 工程政策面及產業界之現況及論述；(2) 營建管理或專案管理；(3) 軌道工程技術及其工程管理技術；(4) 土木或機電設施可靠度與維護管理；(5) 有關土木和機電介面施工管理成果報導；(6) 新工法、新技術及新工程材料介紹；(7) 國內外重大工程的設計及施工技術介紹；(8) 地工技術包括地下管線推進、潛盾施工技術及遭遇障礙之解決方法、大地工程災損之調查、施工失敗案例等；(9) 就工程課題提出不同意見及觀點之討論，以作為工程界及社會進步之動力；(10) 歡迎業主對中興社及中興公司技術服務成果提供回饋性文稿。