

降雨誘發山崩災害之預警系統初步研究

譚志豪 陳熾璇 冀樹勇

蘇泰維 李錦發 費立沅

中興工程顧問社

中央地質調查所

摘要

本文研擬一套結合物理模式與即時雨量測報之廣域降雨促崩預警評估模式，藉以預測集水區內降雨誘發淺層崩塌之時機、規模與其空間分布。模式透過多次颱風事件之崩塌目錄進行率定與驗證，大幅提升模式的正確性及準確度。模式考量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各地區之山崩臨界雨量及其極限崩壞比，其成果可供後續防、減災措施及預警策略擬定之參考。

PRELIMINARY STUDY ON EARLY-WARNING SYSTEM OF RAINFALL-INDUCED SHALLOW LANDSLIDES

TAN, C. H. CHEN, Y. H. CHI, S. Y.

SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.

SU, T. W. LEE, J. F. FEI, L. Y.

CENTRAL GEOLOGICAL SURVEY, MOEA, TAIWAN

ABSTRACT

This paper presents the preliminary early-warning system of regional rainfall-induced landslides using a deterministic approach that couple the physical mechanism with the real-time rainfall data. The model could 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 imaginary. Preliminary results demonstrated that good agreement was found between predicted shallow landslide susceptibility and the inventory. Results of predicting the landslide susceptibility under specific rainfall intensities and estimating the critical rainfall thresholds for landslide could be regarded as a good reference to the authority for hazard mitigation.

一、前言

台灣因地形陡峭、地質複雜且豪雨集中等自然現象，再加上山坡地過量開發，導致山區經常發生山崩災害。尤其在1999年921集集地震後，台灣中部山區嚴重受創，又接連遭遇多次颱風侵襲，導致山崩、土石流頻仍，為台灣中部地區帶來相當嚴重的地質災害。直至今日每當重大暴雨事件侵襲時，仍陸續產生規模大小不等之災情。因此，如何發展一套有效且準確度高的山崩預警系統以減少生命財產損失，乃是當前政府相關單位正急思對策的重要課題。

本文透過定值分析法 (deterministic analysis) 探討降雨入滲導致暫態地下水位上升而進一步對邊坡穩定性所造成之影響。研究結合GPS, GIS及Remote Sensing技術，可將傳統單一邊坡穩定分析拓展至整個集水區範圍。其成果又可進一步結合氣象雨量預報資料，擴展成山崩預警系統以達成預警之目的。透過模式預測可獲得集水區內各邊坡單元在特定降雨條件下之可能崩塌時機及範圍，此成果可提供後續相關預警準則及保全對策擬定之參考。

二、研究案例概述

大甲溪流域崩塌類型多屬淺層崩塌。除表層風化層易受特定降雨事件驅動淺層崩落外，在921集集地震後之崩塌區域更是顯著擴增，並導致後續桃芝颱風、敏督利颱風、艾利颱風等事件又再驅動已鬆動之風化層而形成新增崩場地或造成原有崩場地持續擴增。以崩塌最為嚴重之德基至馬鞍間為例，根據遙測影像判視結果，該區域在集集地震、桃芝颱風及敏督利颱風事件前後分別新增近2,800萬 m^2 、670萬 m^2 及1,400萬 m^2 之新增崩場地。其中，敏督利颱風期間，大甲溪上游連續一小時最大降雨量超過200年頻率雨量，致使東卯溪、松鶴部落、麗台、永安、穿雲等地區產生大量的崩塌與土石流，而短延時暴雨亦造成河岸堤防潰損及德基、青山、谷關等電廠沖毀，災情十分嚴重。

2.1 地形概述

大甲溪流域位於台灣中西部（如圖1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。

2.2 地層與地質條件

大甲溪上、中游為古第三紀地層與新第三紀地層，岩層主要係由為硬頁岩、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。

2.3 氣候條件

大甲溪流域位於北迴歸線以北，處於亞熱帶季風氣候區。由於流域東西狹長、地形複雜，氣溫隨高程變化差異頗大，上游梨山地區年均溫約在攝氏15度，中游達見至谷關、東勢一帶約在19度，下游沿海地區則介於20-25度間。夏季為6至8月，冬季為12月至隔年2月。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3500 mm，中、下游地區約在2000至2500 mm，下游至沿海地區則約在1500至2000 mm。根據長期統計結果顯示，降雨多集中於5-9月，約佔全年總雨量75%。颱風季節集中在6-8月，颱風過境時日雨量常達500 mm以上。

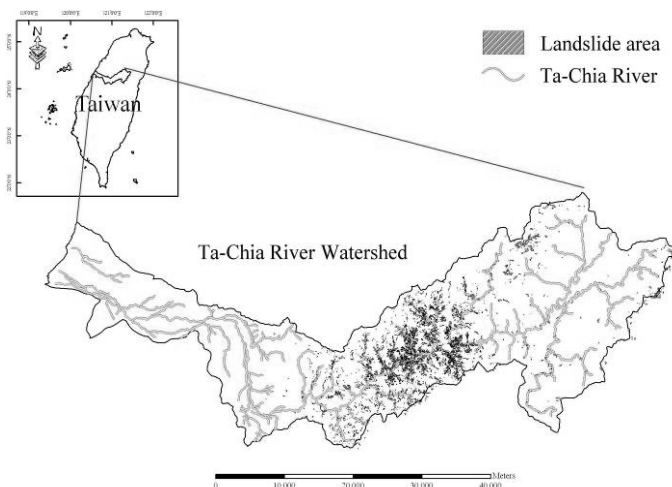


圖1 研究區域（大甲溪流域）

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:

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

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, $\operatorname{ierfc}(\eta)$ 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:

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

四、模式建置

本文採用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)、地工資訊 (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 (如克力金法、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 (經濟部中央地質調查所, 2008)。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圖2至圖6所示。

模式率定以桃芝颱風做為分析事件, 以反算出大甲河流域之合理參數範圍。為了解分析結果之準確程度, 需與桃芝颱風實際發生之山崩做一套疊比對 (如圖7(a)), 精算其山崩正確率為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。模式驗證則透過另一場敏督利颱風事件來檢驗模式分析之正確性與準確度。分析結果與敏督利颱風期間實際發生崩塌之範圍做一套疊比對 (如圖7(b))。統計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。

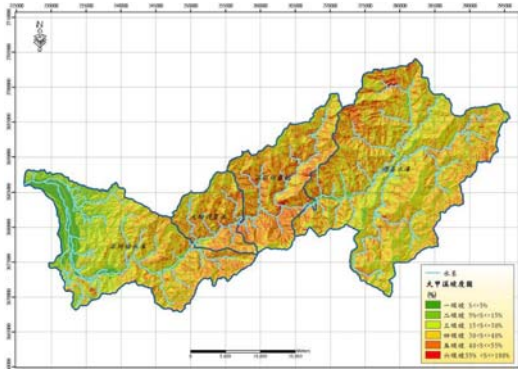


圖2 坡度

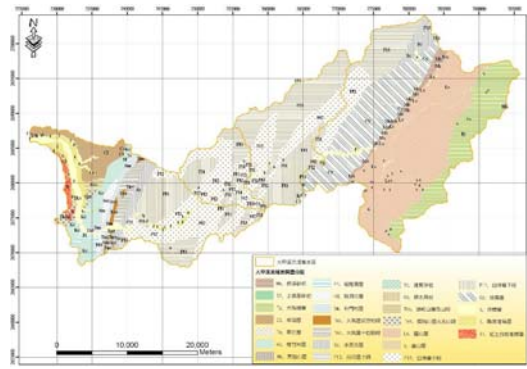


圖3 水文地質參數之地質分區

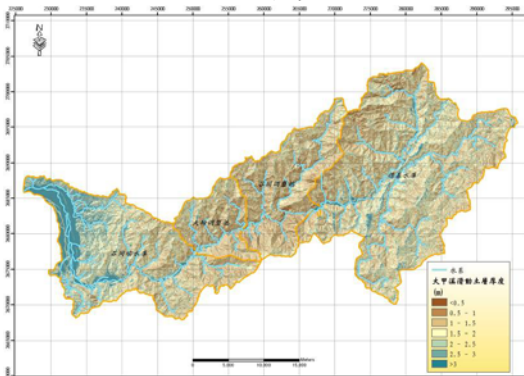


圖4(a) 風化土層厚度分布

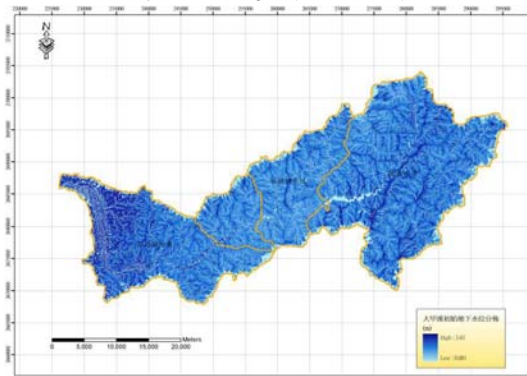


圖4(b) 地下水位分布圖

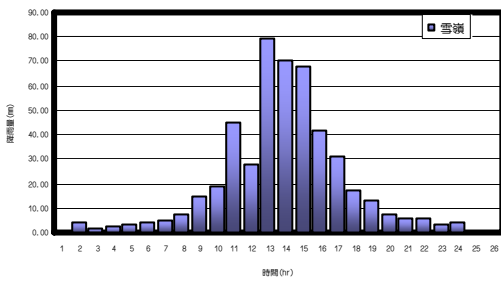


圖5(a) 桃芝颱風期間雪嶺氣象站之時雨量雨柱圖

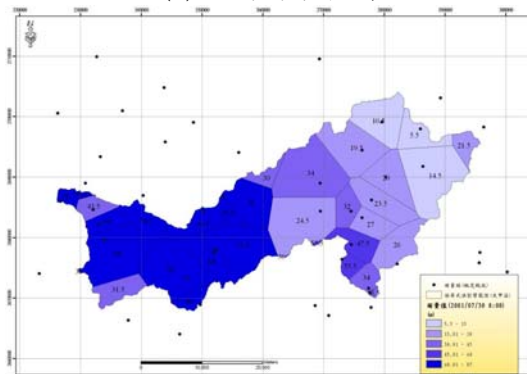


圖5(b) 大甲溪流域雨量分布圖 (桃芝颱風2001/07/30 08:00)

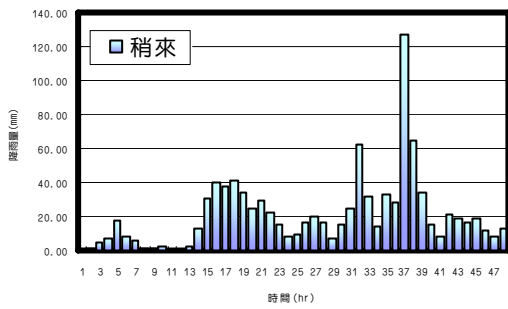


圖6(a) 敏督利颱風期間稍來氣象站之時雨量雨柱圖

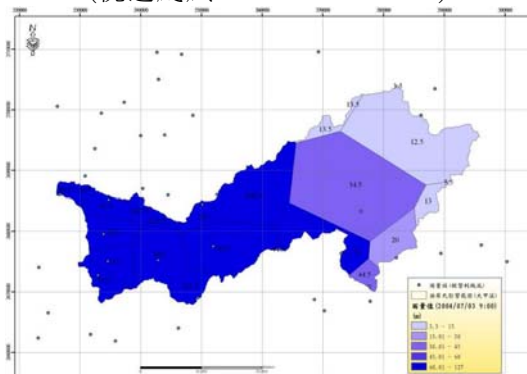


圖6(b) 大甲溪流域雨量分布圖 (敏督利颱風2004/07/03 09:00)

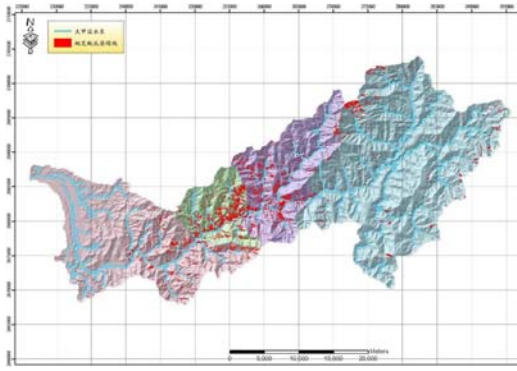


圖7(a) 大甲溪流域桃芝颱風新增崩塌

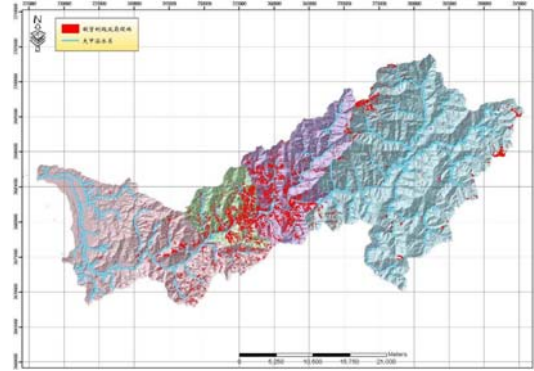


圖7(b) 大甲溪流域敏督利颱風新增崩塌

五、研究成果

5.1 降雨促崩潛勢預測

本分析將重現期距200年且降雨延時設定為24小時之累積降雨量 (選用梨山、上谷關等31個雨量站製作徐昇氏雨量站網以輸入雨量, 如圖8) 輸入前述已完成率定及驗證之大甲溪流域降雨促崩模式, 評估200年重現期距之一日累積雨量對大甲溪流域坡地穩定性之影響。

另將分析成果進一步劃分出高潛勢、中高潛勢、中潛勢及低潛勢四級等區域。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 (真實山崩被判釋出98%); 安全係數介於1.2~1.5定義為中潛勢區 (真實山崩被100%完全判釋); 其他安全係數大於1.5範圍定義為低潛勢區, 如圖9所示 (圖中徐昇氏雨量站網內數字為臨界崩塌比%)。此成果可進一步提供後續相關山崩預警及山崩災害管理之參考。

5.2 山崩臨界雨量建議

以梨山雨量站控制面積為例 (輸入雨型如圖10所示), 逐一輸入不同大小之累積總雨量至降雨促崩模式進行分析, 評估控制範圍面積內不同累積雨量條件下之崩壞比, 最終繪製控制範圍內崩壞比 (或稱崩壞比) 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上限值。由圖11可看出當雨量累積約到95mm時, 其崩塌比開始有明顯增加之趨勢, 直到雨量累積至190mm開始趨於平緩。因此建議梨山雨量站網控制範圍內之臨界雨量建議下限與上限值介於95-190mm間。利用上述方式針對大甲溪流域各區域進行山崩臨界雨量分析, 建立大甲溪流域全區之臨界雨量建議下限值與上限值分布圖 (如圖12所示), 作為大甲溪流域之山崩臨界雨量建議值。未來當豪雨事件發生時, 若配合中央氣象局即時雨量及預估雨量測報資料, 即可立刻評估各地區發生山崩之可能性, 此成果可供後續山崩預警及山崩災害管理之參考。

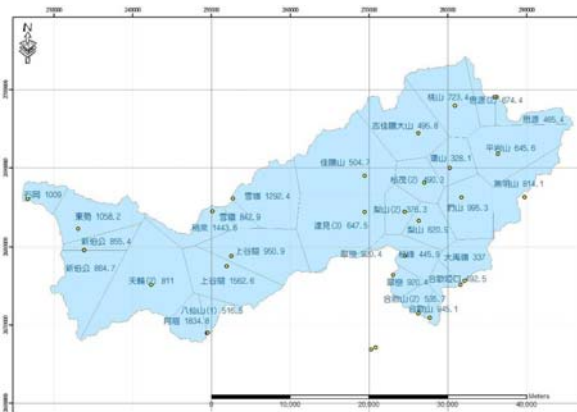


圖8 大甲溪流域200年重現期一日累積雨量分布

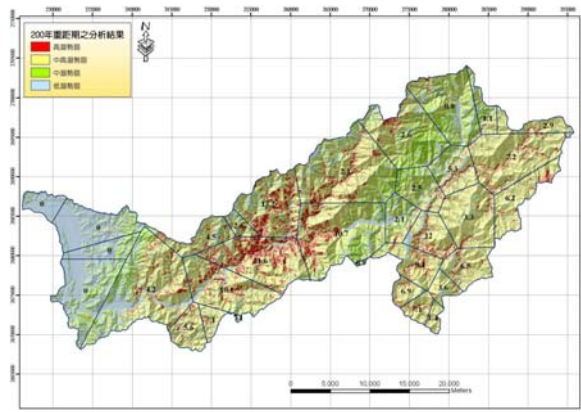


圖9 大甲溪流域200年重現期之崩塌潛勢分級圖

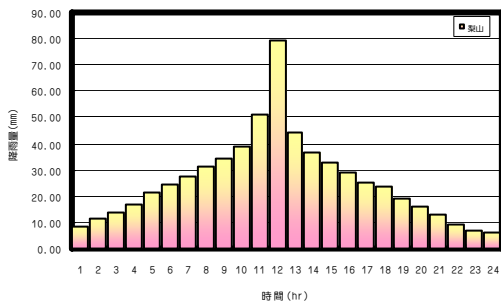


圖10 梨山雨量站之輸入雨型

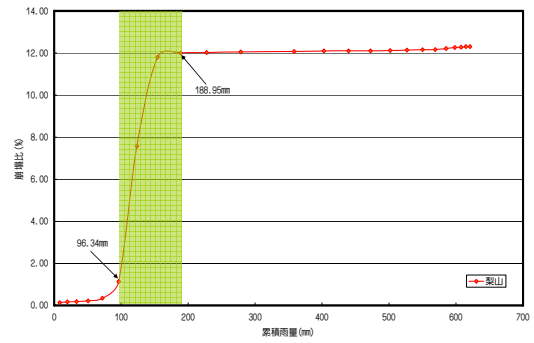


圖11 梨山雨量站控制範圍之臨界雨量值訂定

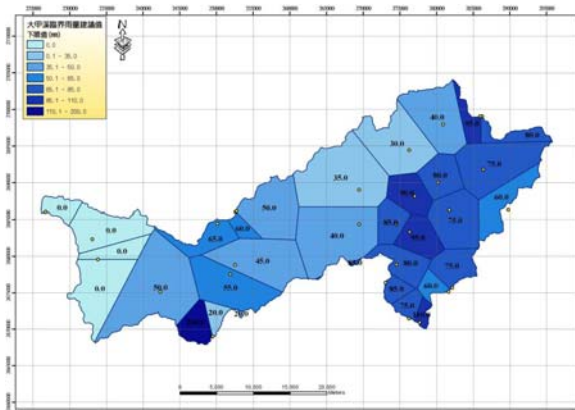


圖12(a) 大甲河流域山崩臨界雨量建議下限值

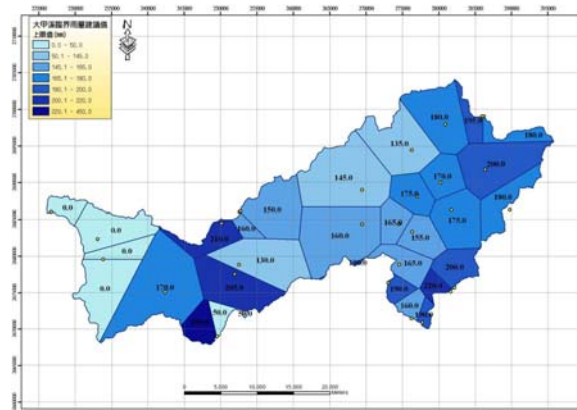


圖12(b) 大甲河流域山崩臨界雨量建議上限值

六、結論與建議

本文以大甲河流域為研究案例，透過廣域降雨促崩模式 (TRIGRS) 並結合3S技術，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，確保模式分析之正確性與準確度。模式考量了地形、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。同時採用200年重現期距單日累積雨量進行山崩潛勢評估，除能藉此預測該流域於此降雨條件下之可能崩塌位置及崩塌規模外，亦獲得流域內各子集水區之臨界雨量值上、下限值，對後續相關預警準則之建立及保全對策之擬定提供了良好的基礎。

誌謝

本研究感謝經濟部水利署及中央地質調查所提供經費來源及技術協助得以順利完成，特此誌謝。

參考文獻

經濟部中央地質調查所 (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。

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.