降雨期間影響邊坡穩定機制研究

關鍵詞：坡地崩塌、降雨門檻值、即時預警

國立交通大學／土木工程系／教授／楊錦釧 ❶
國立嘉義大學／土木與水資源工程學系／副教授／蔡東霖 ❷
台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／正工程師／李國誠 ❸
台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／資深協理／李順敏 ❹

摘 要 ABSTRACT

臺灣目前對於崩塌潛勢研判與即時預警分析多依據現地監測資訊結合過去歷史資料，再以工程經驗作為研判之基礎。隨著近年資料品質之提升及各項技術的迅速發展，藉由更新的數值模式解析崩塌機制並即時掌握其潛勢已臻成熟。本研究利用具物理原理之邊坡穩定分析模式解析降雨引致邊坡崩塌之機制，探究各項影響因子與崩塌之交互關係，進而發展實用性之崩塌潛勢研判與即時預警分析方法。本研究建構之方法、流程及成果，可提供未來工程界對於保全區域崩塌分析之參考，並可依建構之降雨門檻值曲線，訂定合宜之預警條件。

壹、前言

臺灣在地狹人稠之條件下，山坡地開發成為無可避免之選擇，由於地質條件脆弱，而山坡地開發之行為可能會降低邊坡穩定性，因此毗鄰或位處山坡地之道路、公共建物等之建設發展皆面臨極高之災害風險。臺灣坡地天然災害中發生頻率較高者為降雨引致之崩塌，如2001年桃芝颱風及2009年莫拉克颱風等，歷年來的風災已造成無數之損壞與損失。

為有效避免或降低降雨引致之邊坡災害，精確之邊坡崩塌潛勢研判與即時預警分析為必要之工作，崩塌潛勢研判目的在判斷邊坡崩塌可能性之高低，此資訊可做為工程可行性評估選址、規劃及設計之依據；而即時預警則可於降雨期間針對特定邊坡即時預測其穩定性以及可能發生崩塌之時間。臺灣對於前述兩項工作多是依據現地監測資訊結合過去歷史資料，再以經驗加以判斷，然因降雨引致邊坡破壞之過程為複雜之物理現象，實應藉由理論基礎嚴謹之邊坡穩定分析模式解析降雨引致邊坡崩塌之機制，探究水文、地文、地質等條件與崩塌四者間之交互關係，並進而結合Arc-Hydro地形判釋模組，發展實用性之崩塌潛勢研判與即時預警分析方法，如此始有助於未來山坡地相關開發與預警之工作。

貳、邊坡穩定相關研究彙整

一、邊坡穩定分析

影響邊坡穩定性之因素可概分為兩大類，即潛在因素(土壤強度、地下水、植被、邊坡幾何、風化等條件)與驅動因素(降雨或地震等)。在邊坡崩塌預測分析方面，可概分為三種方法，即經驗法、統計法與定率模擬法。

相較於經驗法、統計法，「定率模擬法」以物理原理所建立之數學模式模擬邊坡穩定性，其輸出可為安全係數。為詳實模擬前述降雨入滲與邊坡穩定間之機制，Tsai et al. (2008)發展一維未飽和坡地崩塌模式，而此模式亦已成功應用於石門水庫集水區坡地崩塌潛勢之分析。

二、邊坡即時預警

對於以降雨為觸發因素之邊坡即時預警而言，目前多數研究皆是以降雨特性做為預警研判之依據，即「降雨門檻值」。以統計法為基礎所推估之降雨門檻，因在實際應用上須仰賴過去大量之崩塌調查資料而常受到限制。因此，近年來部分即時預警研究改採定率模擬法以推估降雨門檻曲線，茲說明以定率模擬法之優點如下：

(一) 資料主要以數學模式模擬而得，僅需少量過去崩塌資料做為驗證用。

(二) 適用於工程完工後之即時預警研判。

(三) 係以模擬發生崩塌時刻之累積降雨量與降雨延時為分析依據，因此所推估之曲線能更正確表達降雨與崩塌間之關係。

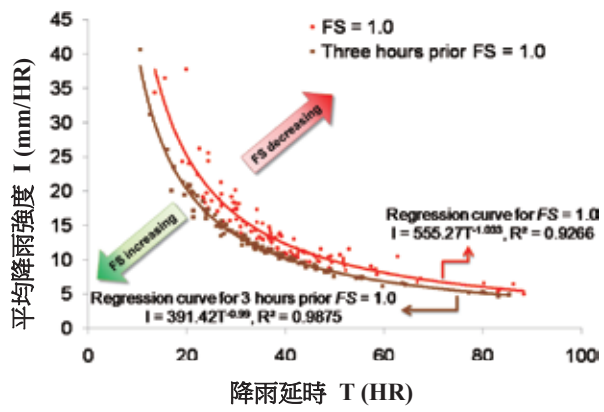


圖1 南投縣九份二山龍南道路上邊坡崩塌降雨門檻曲線

(四) 由於可藉由模擬獲得邊坡發生崩塌之時刻，配合逐時之降雨資料，即可繪製崩塌發生前數小時之降雨門檻曲線。圖1為水土保持局(2010)針對南投縣九份二山龍南道路之上邊坡，利用Tsai and Yang (2008)所發展之一維飽和坡地崩塌模式，分析可能造成該邊坡發生崩塌以及崩塌前三小時之降雨延時與平均降雨強度組合，因此若配合實際觀測降雨資料，決策者即可客觀地依據預警發布後至完成應變所需之時間，利用圖1決定預警發布之時刻。

參、邊坡潛在因素對邊坡穩定性之敏感度分析

不同參數對邊坡穩定之影響程度不一，藉由敏感度分析可瞭解對於邊坡穩定性具有重要影響之潛在因素以及模式忽略之機制其影響性。以下藉由Tsai and Chen (2010)所發展之一維崩塌模式為基礎，考慮模式參數在其變異範圍內變動時對孔隙水壓力與邊坡安全係數之影響程度，對模式輸出以整體敏感度方法做分析。

一、整體敏感度分析之方法

本文依據Jacques et. al. (2006)提出之變異數敏感度分析方法，以蒙地卡羅模擬為概念之計算方式，可得一階敏感度指數與全域敏感度指數。而一階與全域敏感度指數間之差異可用以判斷該模式輸入參數彼此間在模式計算中是否具有交互作用，以及全域敏感度指數本身可做為低影響因子篩選之依據，若一階式輸入參數之全域敏感度指數很小，代表該輸入條件在其可能範圍內任意變動時，並不致對模式輸入產生顯著影響。

二、資料選取概述及參數設定

降雨資料係採用石門水庫集水區三光雨量站所量測之2004年8月23日艾利颱風48小時降雨事件之資料(如圖2)，土壤參數資料選用「石門水庫集水區崩塌與庫區淤積風險評估研究」計畫(2008)所完成相關土讓試驗之資料數據，選定位置如圖3，數值高程模式DEM選用工研院製作之5m DEM資料。模式保水曲線之參數資料則是根據砂崙仔崩塌工址，土壤粒徑屬粗粒土壤，故採用Carsel and Parrish (1988)所提出之砂質土壤保水曲線參數值。

三、參數敏感度分析

為了使研究案例可明確地表示出不同DEM解析度下，不同的坡度對模式輸入參數敏感度之影響。並進一步在案例上做細分，將土層以相對之位置做3等分，探討不同深度下，隨時間變化之參數敏感度。

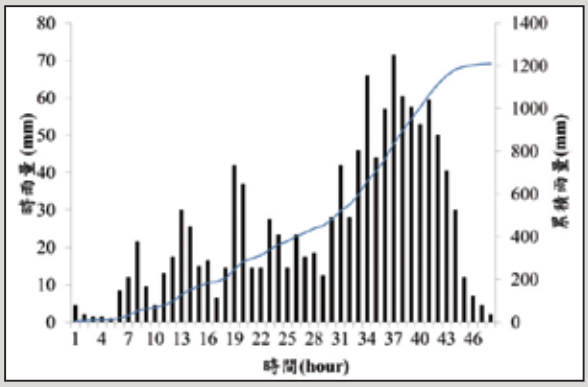


圖2 艾利颱風期間三光站時雨量組體圖

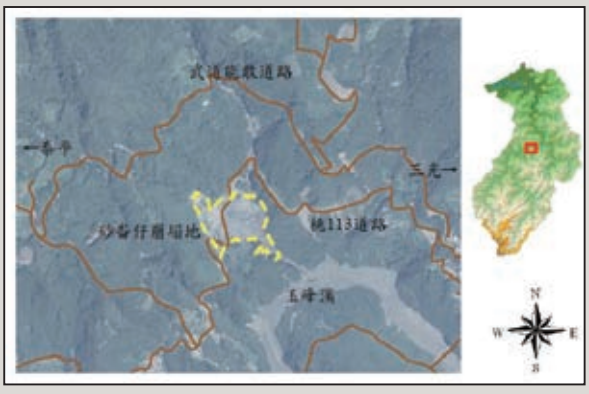


圖3 砂崙仔崩塌地位置

(一) 孔隙水壓力敏感度分析

模式內降雨將直接影響孔隙水壓力之變化，藉由孔隙水壓力進一步影響安全係數之變化，結果分析如圖4。

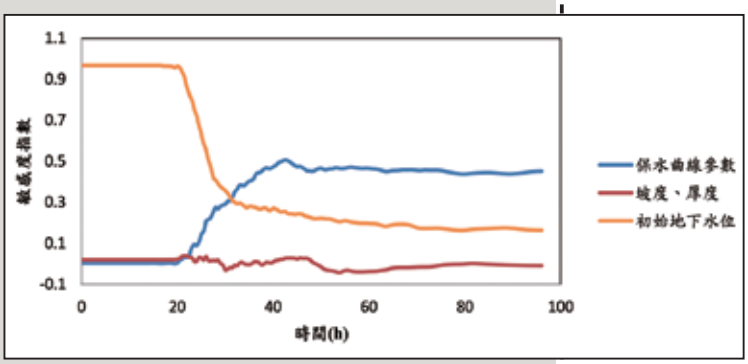


圖4 孔隙水壓力一階敏感度指數

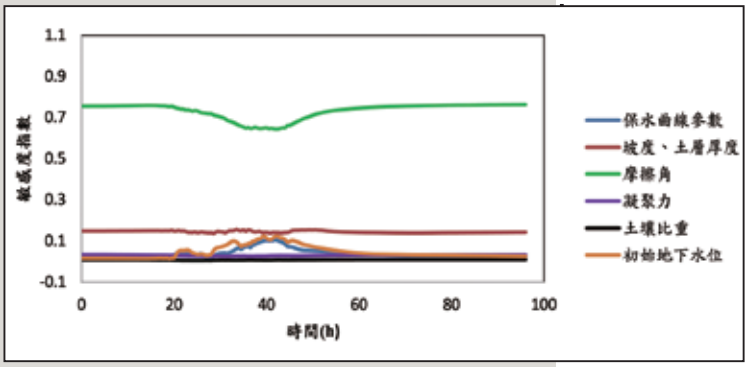


圖5 安全係數一階敏感度指數

圖4之降雨入滲未到達飽和時，以初始地下水位敏感度最大。大約在20小時後受到降雨影響，初始地下水位敏感度開始下降，保水曲線參數敏感度上升，坡度、土層厚度敏感度係數趨近於零。

(二) 安全係數敏感度分析

進一步探討模式內直接影響孔隙水壓力之保水曲線參數與初始地下水位之變異對安全係數之影響，以及直接影響安全係數之參數變異對其自身之影響。如圖5所示，降雨起始時參數敏感度以摩擦角為最大，次要為坡度、土層厚度，其餘參數敏感度皆趨近零。

(三) 小結

保水曲線參數變異性對孔隙水壓力之影響，隨累積降雨增加而增加，但初始地下水位變異性對孔隙水壓力之影響則隨累積降雨增加而降低。在敏感度分析方面，保水曲線參數與初始地下水位對敏感度指數影響皆隨累積雨量增加而增加。敏感度指數分析顯示土壤比重對安全係數影響不大，摩擦角對於安全係數較重要。

肆、降雨條件對邊坡穩定性之影響

外在降雨條件為改變邊坡穩定之主要關鍵，本研究利用不同設計雨量、延時與雨型對二維降雨引發坡地崩塌模式進行模擬，探討外在因子對邊坡穩定之影響。

一、雨量與延時

考慮一假設坡面坡降(S)為0.6，坡度約31°，地下水位於地表下方4m，土壤參數如表1，考量坡面不受其他坡面逕流與地下水影響，因此，假設土層左側為固定地下水位邊界，右側與下方為不透水邊界。圖6及圖7為不同延時下之均勻降雨，總降雨量分別為300mm與500mm之坡地穩定分析模擬結果。經分析結果可知，安全係數隨降雨過程下降，在降雨過後安全係數隨時間上升。此外，安全係數隨降雨強度愈大下降速率愈快。

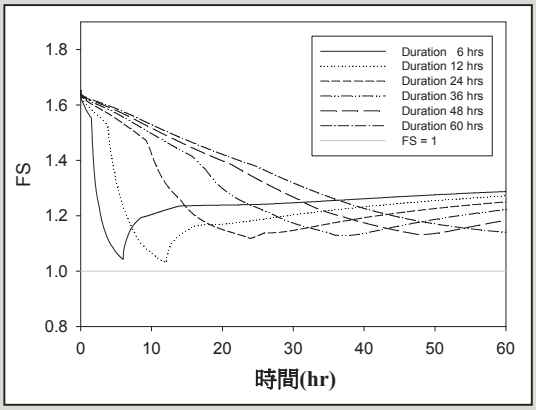


圖6 在300mm雨量下安全係數變化圖

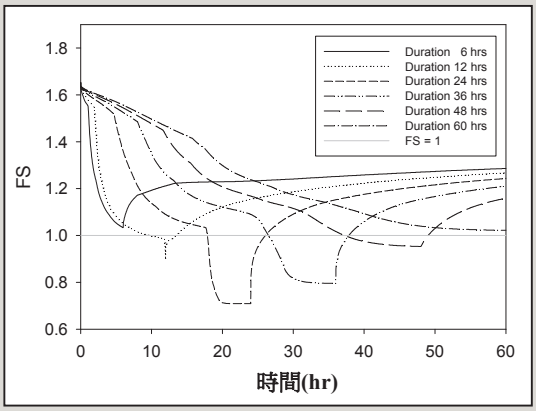
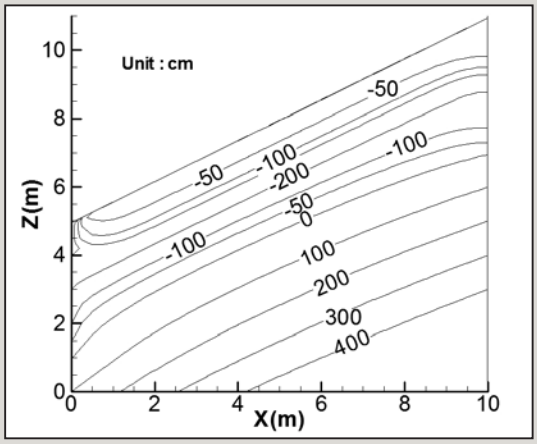


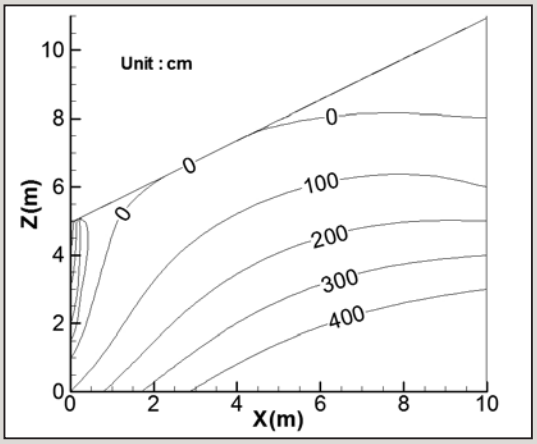
圖7 在500mm雨量下安全係數變化圖

表1 崩塌模擬參數表

參數	值
曼寧摩擦係數 n	0.05
比重 Gs	2.65
凝聚力 c'	0.5 kPa
內摩擦角 φ'	26°
基質吸力增加所造成土壤之摩擦角度 φ^b	(1/2)*
飽和水力傳導係數 K_s	75 cm/day
孔徑指數 N	2.0
飽和含水量 θ_s	0.47
殘餘含水量 θ_r	0.17
進氣潛能因子 ζ	0.01



(a)12hr



(b)36hr

圖8 降雨量500mm延時12及36小時情況下坡地內孔隙水壓力分佈圖

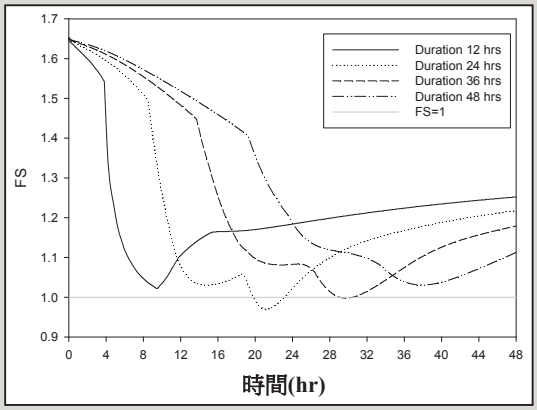


圖9 中央型雨型在400mm雨量下穩定分析

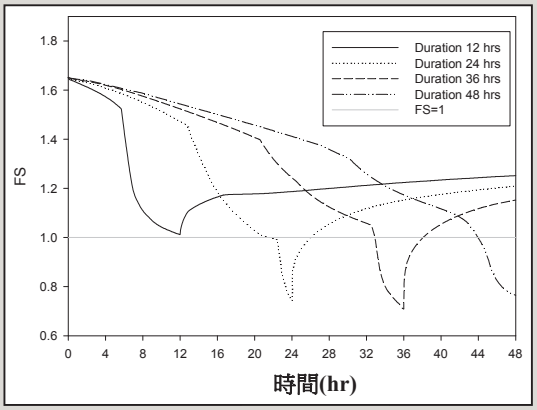
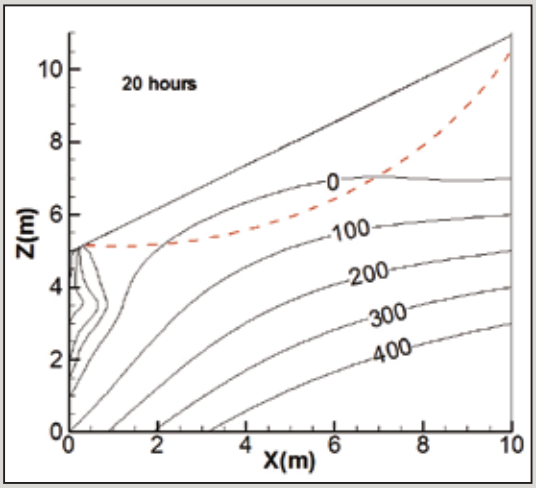


圖10 後退型雨型在400mm雨量下穩定分析

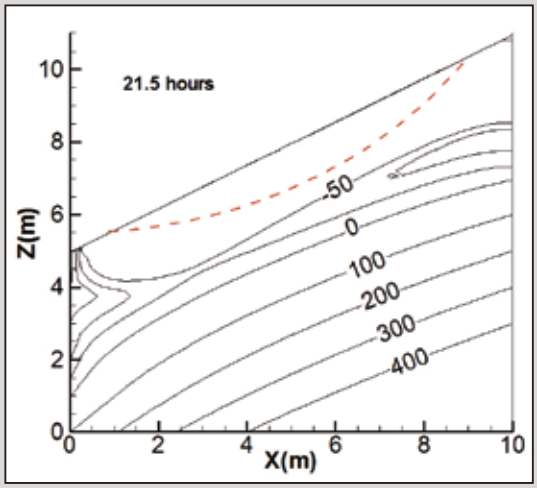
圖8為降雨量500mm與延時12及36小時情況下坡地內孔隙水壓力分佈變化，過程中坡地內基質吸力隨時間下降，地下水位則隨時間上升，圖8(b)顯示當坡地近似飽和，土體內孔隙水壓力變化呈現穩態，則安全係數不隨時間變化；另在降雨過後坡地內基質吸力隨時間上升，地下水位則隨時間下降。因此，吾人可知降雨之雨量與延時明顯影響坡地破壞是否發生，對坡地發生破壞深度與破壞時間有重大之影響。

二、雨型對邊坡穩定性分析

相同坡地條件下，圖9至圖10為不同雨型在總降雨量為400mm不同延時下模擬結果。在降雨延時24小時下，中央型發生破壞於20小時，後退型發生破壞於21.5小時；在降雨延時48小時下，中央型未發生破壞，後退型發生破壞於44小時，如前節所述，於特定雨量延時下，雨型改變將進一步影響坡地破壞發生之可能。圖11為總降雨量400mm與延時24小時下，不同雨型孔隙水壓力與破壞面分布；其中，中央型破壞深度較深，後退型破壞深度較淺。因此，可知雨型亦明顯影響坡地破壞是否發生，坡地破壞深度與發生時間皆可能因不同雨型而變化。



(a)中央型



(b)後退型

圖11 不同雨型坡地內孔隙水壓力與破壞面分布圖

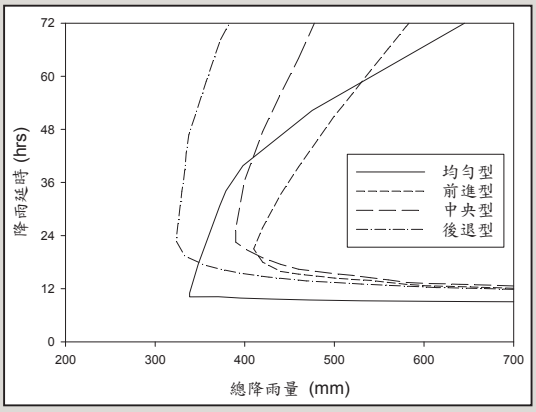


圖12 不同雨型降雨門檻值圖

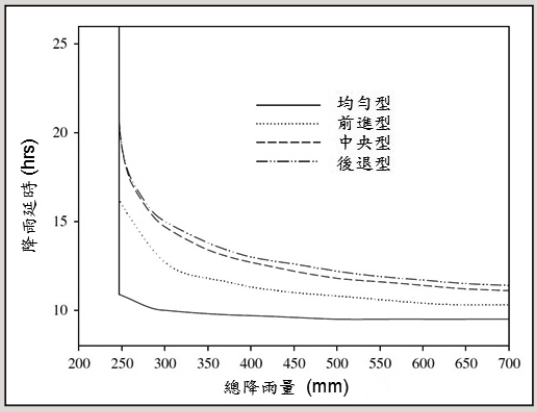


圖13 一維崩塌模擬不同雨型降雨門檻值圖

三、降雨門檻值綜合探討分析

進一步製作不同雨型下雨量與延時之降雨門檻值圖，如圖12。圖12顯示不同雨型之門檻值曲線將門檻值圖劃分為兩區域，雨量延時於曲線之右邊，表示坡地破壞；反之，左邊區域表示坡地穩定。例如總降雨量400mm與降雨延時48小時下，後退型發生破壞，其他雨型呈現穩定。圖12顯示不同雨型門檻值曲線具有上邊界與下邊界，如相同雨量下，降雨延時高於上邊界或低於下邊界，則坡地未發生破壞，與過去一維崩塌模擬所產生降雨門檻值圖有所差異，一維模擬結果僅具有下邊界，上邊界則為一固定雨量值，如圖13；由雨量與延時分析模擬結果可知，相同雨量下，降雨延時短，降雨強度大，如多數雨量沿地表逕流，則地表入滲量愈少，愈不易發生崩塌，因此門檻值具下邊界；另在側方向地下水流出影響下，致使長延時低強度降雨不易發生崩塌，門檻值之上邊界為側方向地下水流影響所產生，一維模擬由於無法考量側向水流影響，因此上邊界為一固定雨量值。由降雨門檻值圖可了解，不同降雨條件下，會產生不同門檻值曲線，工程師如欲在一局部區域建立警戒降雨條件，需藉由當地歷史降雨資料，配合模式模擬分析建立符合現地之降雨門檻值曲線。

伍、結論與建議

一、結論

本研究利用具物理原理之一維與二維邊坡穩定分析模式解析降雨引致邊坡崩塌之機制，探究水文、地文、地質等條件與崩塌四者間之交互關係，並進而結合Arc-Hydro地形判釋模組，進行崩塌潛勢之研判並建立即時預警機制，各項研究成果如下列所述。

(一) 邊坡穩定相關研究彙整：應用物理原理所建立之數學模式模擬邊坡穩定性，可獲取最佳之量化資訊，近年已逐步考量降雨入滲或地表水流之影響。過去應用統計方法建立之降雨門檻值因缺乏崩塌發生確切時刻，所推估之降雨門檻曲線可能過於樂觀，近年利用數學模式模擬結果，以模擬發生崩塌時刻之累積降雨量與降雨延時為分析依據，能更正確地表達降雨與崩塌間之關係。

(二) 邊坡潛在因素對邊坡穩定性之敏感度分析：全域敏感度指數分析結果顯示，土壤比重對安全係數影響不大，摩擦角對於安全係數有極為重要之影響。孔隙水壓力敏感度分析結果顯示，保水曲線參數變異性對孔隙水壓力之影響隨累積降雨之增加而增加，而初始地下水位之變異性對孔隙水壓力之影響隨累積降雨之增加而降低。另外在安全係數敏感度分析方面，保水曲線參數與初始地下水位對安全係數之影響皆隨累積雨量之增加而增加。敏感度分析結果可提供工程師瞭解影響邊坡崩塌之重要因子，未來在判斷坡地崩塌上，可依此結果獲取較重要因子，並忽略對崩塌影響較輕微之因子。

(三) 降雨條件對邊坡穩定性之影響：由不同設計降雨條件對邊坡模擬結果可知，降雨之雨量、延時與雨型明顯影響坡地破壞是否發生，對坡地發生破壞深度與破壞時間有重大之影響。二維模擬因考慮側向水流之影響，降雨門檻值圖具上邊界，在不同降雨條件下，會產生不同門檻值曲線，在局部區域建立警戒降雨條件，需藉由當地歷史降雨資料，配合模式模擬分析建立符合現地之門檻值曲線。

(四) 崩塌潛勢研判與即時預警方法與流程：本研究建構之方法與流程，可提供未來工程師對於保全區域崩塌分析之參考，並可依建構之門檻值曲線，訂定合宜之預警條件。

二、建議

(一) 利用歷史雨量資料建立不同預備時間下警戒門檻曲線，為較簡易獲得即時預警條件之方法，另可利用崩塌模式結合雷達雨量預警資料，即時模擬可更精確獲得即時警戒之條件。

(二) 本研究現地應用模擬所採用參數條件，其假設模擬區域土壤為均質，僅能簡單代表特性。然而，區域模擬中，不同位置之土壤參數均存在變異性，如欲精確獲得各處崩塌潛勢，需搭配更多現場量測與調查，於重點坡地設立地下水即時監測井並配合即時模擬，以利模式檢定與驗證。

參考文獻

1. 行政院農業委員會水土保持局(2010)，「九份二山崩塌地觀測及警戒機制整合平台建立」。

2. 經濟部水利署(2008)，「石門水庫集水區崩塌與庫區淤積風險評估研究(3/3)」，經濟部水利署臺北辦公室。

3. Carsel RF, Parrish RS (1988). "Developing Joint Probability Distributions of Soil Water Retention Characteristics." Water Resources Research, 24(5):755-769.

4. Jacques, J.,Lavergne, C. and Devictor, N.(2006). "Sensitivity analysis in presence of model uncertainty and correlation inputs." Reliability Engineering and System Safety, 91：1126-1134.

5. Tsai, T. L., Chen, H. E. and Yang, J. C. (2008). "Numerical Modeling of Rainstorm-Induced Shallow Landslides in Saturated and Unsaturated Soils." Environmental Geology, 55(6), 1269-1277.

6. Tsai T.L., Chen H.F. (2010). "Effects of degree of saturation on shallow landslides triggered by rainfall." Environmental Earth Science, 59(6):1285 - 1295