

崩塌潛勢預測方法於台灣適用性之初探

吳俊鋐⁽¹⁾ 陳樹群⁽²⁾

摘要

本研究主要針對由降雨所導致崩塌發生之崩塌潛勢預測評估模式進行探討，影響崩塌之因子眾多且複雜，目前所使用之評估模式絕大部分乃以統計學理或崩塌物理力學機制為模式基礎。本研究列舉四個崩塌相關模式進行探討，分析各模式評估原理、方法及流程，再分析各模式應用於台灣之優缺點，探討往後發展適用於台灣之崩塌預測模式之流程及方法。

(**關鍵詞**：崩塌潛勢)

The Evaluation of the Landslide Potential Prediction Models Used in Taiwan

Chun Hung Wu

Graduate Student, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung Hsing University, Taichung 402

Su Chin Chen

Professor, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung Hsing University, Taichung 402

ABSTRACT

The study focuses on potential prediction models for landslide caused by rainfall. The governing factors of landslides are numerous and complex. Most landslide potential prediction models are based on statistical theory or landslide physical mechanism. The study evaluates the most used landslide potential prediction models in Taiwan with regard to the prediction theorems, methods and model processes. The study also discuss how to develop landslide potential prediction models that are suitable for application in Taiwan.

(**Keyword** : landslide potential)

一、前言

台灣集水區泥沙產量大，主要來源可概分為二：表層土壤沖蝕現象及邊坡崩塌現象，若以泥沙產量為區分，則邊坡崩塌所產出之泥沙量為最大，根據石門水庫管理局

(1990)調查資料顯示：於其水庫淤積量中，因邊坡崩塌所造成之土砂淤積量約佔水庫總淤積量之75%，由此現象可瞭解邊坡崩塌乃為集水區土砂產量之主要來源。而崩塌現象又可細分為二：山壁邊坡崩塌及河岸淘刷造成坡腳崩塌等，邊坡崩塌現象主因為該地

(1) 國立中興大學水土保持學系研究生

(2) 國立中興大學水土保持學系教授

區地質破碎、坡度陡峭及植生稀疏等，而在降雨集中季節常易引發邊坡崩塌；而河岸淘刷之主因乃因山區河渠水流沖毀邊坡坡腳，造成邊坡土體不穩定而形成崩塌現象。

崩塌現象除產出大量泥沙外，在台灣亦造成許多土砂災害，尤其在 921 集集大地震之後，每逢夏季颱風豪雨來襲，山區崩塌現象頻傳，崩塌土體可能造成之災害有二：一為崩塌土體遇集中降雨而形成土石流沖瀉而下，另一則為崩塌土體堆積在山壁邊坡，形成鬆軟之崩積土層，乃為邊坡下方居民之潛在危機。諸多學者專家皆致力研究發展預測崩塌潛勢之方法，但於至今發展之崩塌預測模式中，在預測上仍無法具有高準確度，探索崩塌潛勢難以預測之原因，則可概分為三：

- 1、引發崩塌發生之因子眾多且複雜：欲研發一崩塌模式，必須先篩選出與崩塌發生之相關因子，Koukis 與 Ziourkas(1991)曾提出可能引起山崩的因子達六十四個之多，其中尚可分為動態的誘因與潛在的環境因子等，動態之誘因即為降雨及地震因子，潛在之環境因子則相當繁多，如：邊坡坡度、邊坡地質、邊坡植生、邊坡面向、地下水位、邊坡坡型、覆土厚度...等等；眾多之引發崩塌因子也導出另外一個問題：每個因子皆為崩塌發生之充分因子，但卻沒有一個因子為崩塌發生之必要因子。
- 2、崩塌現象資料難以蒐集：由於崩塌潛勢模式乃預測崩塌是否發生之潛在勢能，因此需要邊坡崩塌發生時之相關數據引為佐證，惟真實邊坡崩塌發生常為瞬間啟動方式，因此崩塌發生時間難以準確掌握，而崩塌發生位置往往位於偏遠山區，監測人員難蒐集現場相關數據，此兩原因都造成崩塌模式預測值難以進行驗證。

- 3、預測模式是否具地域性：如以上兩點所述，崩塌預測模式必須經過篩選因子或理論架構導出初步關係式，再以特定地區以往崩塌發生案例之資料加以驗證，惟引發崩塌之因子眾多，各地區產生崩塌之機制或促因都不盡相同，因此利用特定地區之資料作驗證可能會使該模式所得出之崩塌預測方程式存在地域性問題。

本文主要研究目前在台灣常被用來預測崩塌之數種崩塌潛勢評估模式，探討其評估過程及結果於台灣之適用性，綜合幾種評估方法於台灣適用性上之缺點，歸納出未來發展適用台灣崩塌潛勢評估模式之條理。

二、崩塌潛勢評估模式主要分類

崩塌現象乃為綜合許多因子之自然現象，以往研究都曾嘗試從不同角度找出直接或間接影響崩塌崩壞發生的因子，以目前之崩塌潛勢評估之相關研究而言，其切入角度主要以兩個方向為主，一為以分析崩塌之物理特性及力學機制學理為基礎，找出促成崩塌產生之臨界條件方程式，輔以特定地區以往崩塌發生案例之數據加以驗證；另一則為採統計學理且以過往發生崩塌之案例為依據，對各影響或促崩因子進行回歸統計分析，以篩選相關因子及給定權重並評分的方式發展出評估模式。以往曾有許多研究針對崩塌預測模式進行分類，如國際土壤力學及基礎工程組織（簡寫為 ISSMFE）於 1997 年曾針對降雨因子引致邊坡崩壞之評估方法分為三等級：第一級乃利用地形學方法判斷豪雨可能發生崩塌之區域，第二級則先篩選引發崩塌之因子，並以區域評分方式判定可能發生崩塌之區域，第三級則在該地區進行詳盡之細部調查，如地形測量、地質分析、鑽孔及岩石力學試驗、震波探測、地下水量測及航空照片判釋等，方進行邊坡穩定分析；

國際土壤力學及大地工程組織（簡寫為 ISSMGE）於 1999 年亦針對地震因子引致邊坡崩塌之評估方法分為三等級：第一級乃利用地震規模與崩塌發生距離為主分析機制；第二級為乃將地震因子列為崩塌觸發因子，並以地震等級為評分標準，以篩選因子並進行區域評分方式評估崩塌發生地區；第三級則依據第二級方法，並加入邊坡穩定分析及充分細部的區域調查等。陳意旋（2001）針對崩塌預測模式是否考量促崩因子而將崩塌潛勢評估方法概分為兩個方向：山坡穩定評估與促崩因子潛勢分析。

台灣地區崩塌行為主要發生在大地震及夏秋季之集中降雨，惟大地震發生時間難以預測且週期較長，因此本研究將降雨設定為主要促崩因子，進而分析各類型之崩塌預測模式。

三、降雨因子引致崩塌發生評估模式之探討

由民國 85 年賀伯颱風開啟了台灣土石流災害後，近十年來台灣各地區每逢夏季颱風時節，土石流災情遍傳不斷，民國 88 年 921 地震改變了中部地區地質及土壤結構，民國 89 年桃芝颱風引發的土石流災害亦使台灣付出慘重代價。綜觀台灣地區土石流災害，主因乃是深山地區之邊坡崩塌，部分崩塌土體伴隨雨水而形成大量土石流沖洩而下，而部分崩塌土體則在山腰上形成崩積土層，亦有可能是下次土石流之土砂來源。引發邊坡大量崩塌的原因不外是地震及降雨兩大因子，對台灣地區而言，大規模之地震才可能引發崩塌行為或改變土體及地質結構，但大規模之地震週期通常超過 10 年且難以預測，因此本文將以降雨因子引致崩塌行為之預測模式為主探討焦點。

以降雨為促崩因子之相關研究方法如下分述：

1、經驗模式法

利用過往發生崩塌之案例數據，以迴歸方式求得崩塌行為或崩塌體積與崩塌相關因子間之迴歸式，相關研究如村野義郎（1966）針對日本地區因豪雨所造成之崩塌地而獲得崩塌面積率與累積降雨量之關係，打荻珠男（1971）利用村野義郎之公式，求得崩塌率與引發崩塌之臨界降雨關係式。

2、多變量分析法

以過往發生崩塌案例之數據建立資料庫，探討崩塌發生之各因子對崩塌行為產生之影響及各因子間之相互影響，以多變量分析建立崩塌預測模式，相關研究如王智仁（2001）利用多變量分析評估南橫公路梅山至啞口段之邊坡穩定，童啟哲（2001）以多變量分析建立山崩危險度預測模式。

3、不安定指數法

不安定指數法乃由簡李濱（1992）所提出，其評估方式乃以會引發坡地不安定之坡地災害為對象，以不安定指數建立邊坡穩定評估模式，此法通常會以 GIS 及 GPS 等資料庫系統展現其評估結果，相關研究如林書毅（1998）評估林口台地之山坡穩定性，陳凱榮（2000）評估中橫公路東勢至德基段之山崩潛感，林昆賢（2001）及王嘉燁（2002）評估南橫公路邊坡崩塌之研究，許煜煌（2002）評估地震引發之邊坡崩塌行為。

4、岩石工程系統

岩石工程系統方法乃由英國學者 Hudson（1992）所提出，乃為具解析特性之分析方法，本方法先分析各因子間之相互關係，並以此相互關係為決定因

子權重之依據。相關研究如陳凱榮 (1999) 評估中橫公路東勢至德基段之山崩潛感。

5、類神經網路法

以過往發生崩塌案例之數據，建立訓練對資料訓練類神經網路對崩塌因子與崩塌發生之學習與訓練，利用測試對資料測試類神經網路對崩塌行為預測之優劣，相關研究如張舜孔 (2002) 用於阿里山公路邊坡破壞之分析，林彥亨 (2002) 探討台灣中部大里至國姓地區地震因子對山崩行為之潛感分析，盧育聘 (2003) 評估南橫公路及阿里山公路之邊坡崩塌行為。

6、以崩塌力學機制發展之崩塌預測模式

以引發邊坡崩塌之力學機制推導崩塌行為發生方程式，相關研究如無限邊坡穩定模式及 Dietrich 和 Montgomery (1993) 以地形為主因子，探討土壤水分飽和區域預測崩塌發生之模式。

本研究將上述六種方法各列舉一研究案例，分析各種評估方法所考量之因子，如表 1 所示。而下述也分別探討經驗模式法、不安定指數法、岩石工程系統及崩塌力學機制為基礎之崩塌預測模式評估過程、可能面臨之問題及該模式於台灣之適用性。

A、經驗模式法--村野義郎及打荻珠男之崩塌體積估算公式

村野義郎 (1966) 針對豪雨所造成之崩塌地進行分析，發現累積雨量越大時，集水區崩塌面積率越大且崩塌地個數越多，其公式如下：

$$\frac{s}{a} = \frac{s}{n} \times \frac{n}{a} \quad (1)$$

於上式中，s 代表集水區崩塌地面

積，a 代表集水區總面積，n 代表集水區崩塌地個數。

打荻珠男 (1971) 採用村野義郎的分析結果，進一步討論降雨量與崩塌面積之關係，其採用不同流域之降雨資料，推求累積雨量和崩塌面積率之相關公式，如下式所示：

$$\frac{s}{a} = 10^{-6} K(P - P_0)^2 \quad (2)$$

於上式中， $\frac{s}{a}$ 稱為崩塌率，P 為累積雨量 (單位為 mm)，P₀ 為發生崩塌之臨界降雨 (單位為 mm)，K 則為待定係數。將 (2) 式乘以平均崩塌深度 h (單位為 m) 及崩塌發生面積 A (單位為 m²)，便可得出崩塌體積 V (單位為 m³)，估算公式如下式所示：

$$V = KA h(P - P_0)^2 \quad (3)$$

根據打荻式於日本數個流域的調查分析結果，K 之值大約在 0.5 4.5 之間，P₀ 之值大概在 250 450mm 之間。惟此公式應用在台灣會面臨兩個問題：決定 K 值需依賴大量崩塌資料及臨界降雨 P₀ 值難以推求。決定崩塌發生之臨界降雨值一直都是崩塌預測模式難以克服之盲點，原因如前所述：崩塌行為常發生在偏遠山區，且其為瞬間啟動行為，因此相當難以觀測。本模式雖考量臨界降雨，但亦無法評估『崩塌是否發生』，因此在使用上必須先判斷該地區崩塌行為是否發生，才能估算該地區總崩塌體積量。

表 1. 各崩塌預測模式考量因子分列表
Table 1. The factors in each landslide potential model.

因子類別	因子種類	多變量分析法	類神經網路法	不安定指數法	岩石工程系統	Dietrich
岩石地層	岩石種類	●				
	岩層強度	●	●			
	風化程度	●				
	節理組數		●			
	地層層別			●	●	
	不連續面組數	●				
	岩層破碎程度	●				
邊坡型態	邊坡坡向	●	●	●	●	
	邊坡坡度	●	●	●	●	●
	邊坡坡高	●	●		●	
	邊坡坡寬	●				
	邊坡形狀				●	
	邊坡規模				●	
	邊坡坡長					●
距破壞面距離	距道路距離	●		●	●	
	距摺皺距離			●	●	
	距斷層距離			●	●	
	距侵蝕溝距離			●	●	
水文因子	排水狀況	●				
	坡面滲水	●				
	坡面逕流	●				●
	地下水位					●
地表及土壤狀況	填充物狀況					
	覆土厚度	●	●		●	●
	植生狀況				●	
	安息角					●
	水力傳導度					●
促崩因子	累積雨量	●				
	當日雨量		●		●	
	地震級數		●			
其他	崩塌次數				●	

B、不安定指數法 (Dangerous Value Method)

本文引用陳凱榮 (1999) 對於中橫公路東勢至德基段山崩潛感評估為例，介紹不安定指數法之評估流程。

(1) 因子篩選過程：主觀篩選影響崩塌發生之影響因子，計地形面向之坡度因子及坡向因子、地質面向之地層因子及摺皺因子及區位面向之距侵蝕溝距離因子、距道路距離因子及距斷層距離因子等，並針對各因子進行細部分類，如將坡向因子區分為北、北東、東、

東南、南、西南、西及西北等八種分類。

(2) 因子評分過程：將研究區段 (於本文中為中橫公路東勢至德基段) 劃分為若干網格，估算在全部網格發生崩塌的網格與全部網格之比例，並估算發生崩塌之網格中六個因子所代表之屬性，根據崩塌網格發生所佔百分比以正規化方式給定該因子往後之評分依據。本文以坡向因子網格評估表為例，如表 2 所示。

表 2. 不安定指數法坡向因子評估表

Table 2. the slope aspect assessment of the Dangerous Value Method.

分類	坡向	分類網格數	崩塌網格數	崩塌發生百分比 (%)	崩塌面積百分比 (%)	評分
1	N	12577	84	0.67	9.73	3.67
2	NE	6629	54	0.81	11.87	4.41
3	E	5312	67	1.26	18.38	6.67
4	SE	8164	157	1.92	28.02	10.00
5	S	10291	129	1.25	18.26	6.63
6	SW	8051	44	0.55	7.96	3.06
7	W	8735	12	0.14	2.00	1.00
8	NW	11185	29	0.26	3.78	1.61
總和		70944	576	6.86	100	
變異係數		69.195				
權重		0.145				

附註 1：崩塌發生百分比 = 崩塌網格數 / 分類網格數。

附註 2：崩塌面積百分比 = 崩塌發生百分比 / 崩塌發生百分比總和。

附註 3：以最小之崩塌面積百分比之評分為 1，最大之崩塌面積百分比之評分為 10，以正規化方式給定各因子之評分。

- (3) 因子權重決定過程：因子之權重值用以描述『所有因子組合後，各因子對崩塌潛感值之影響程度』，因此先計算各因子之崩壞面積百分比之變異係數，藉以瞭解因子分類間對崩塌發生之敏感度。再以各因子所計算出之變異係數以(4)式進行權重值給定。

$$W_i = \frac{V_i}{V_1 + V_2 + \dots + V_n} \quad (4)$$

於上式中， W_i 代表第 i 因子權重值， V_i 代表第 i 因子變異係數值

- (4) 崩塌潛感評估疊加方式：各崩塌影響因子評分與權重間之疊加方式如(5)式所示：

$$D_{total} = D_1^{W_1} \times D_2^{W_2} \times \dots \times D_n^{W_n} \quad (5)$$

其中 D_{total} 代表總崩塌潛感評估值， D_1 、 D_2 ... D_n 則代表各崩塌潛感因子評分值，而 W_1 、 W_2 ... W_n 則代表各崩塌潛感因子權重值。總疊加值之範圍介於 1~10 之間，疊加值越高代表發生崩塌之可能性越大。

不安定指數法已具篩選因子及依據過往案例給予各因子權重之架構，但在使用上會面臨幾個問題：主觀篩選因子過程將會使結果因人而異；在因子評分過程乃根據特定區段以往發生案例之數據，會將該地區特定因子對崩塌之影響放大，如地質因子或植生因子，使驗證後之模式具地域性誤差。再則本模式並非依據崩塌之力學機制為基礎，因此在評估方程式上無法訂定崩塌是否發生之門檻值。

C、岩石工程系統 (Rock Engineer System)

岩石工程系統方法乃由英國學者

Hudson (1992) 所提出，相對於其他以統計為基礎之評估方法，岩石工程系統被視為具解析特性之分析方法，一般之統計分析方法乃根據以往發生案例之資料分析各崩塌影響因子與崩塌發生間之關係，並給予評分範圍及權重；而岩石工程系統則分析各因子間之相互關係，並以此相互關係為決定因子權重之依據。本文引用陳凱榮 (1999) 對於中橫公路東勢至德基段山崩潛感評估為例，介紹岩石工程系統法之評估流程。

- (1) 因子篩選過程：主觀篩選影響崩塌發生之影響因子，計地質構造面向之斷層因子、摺皺因子及岩性因子等、天然活動面向之地震因子及降雨因子等、邊坡狀況面向之坡度因子、坡向因子、坡高因子、坡型因子、邊坡規模因子、覆土厚度因子、植被因子、距侵蝕溝距離因子及崩塌次數因子等及人為開發面向之道路寬度因子等共 4 面向 15 項影響因子。
- (2) 矩陣編碼過程：將全部之影響因子分列於矩陣之對角線上，以二元法的方式進行各因子間之相互關係評分，評分標準：從 0 (無交互作用) 到 4 (高交互作用)，整個矩陣編碼過程如表 3 所示。矩陣中單一因子之橫列上所有值相加稱為誘因值，誘因值代表該因子影響其他因子之程度；而將單一因子之縱行上所有值相加稱為效果值，效果值代表該因子受其他因子影響之程度，利用單一因子之效果值與誘因值之累加，除以全部因子之效果值與誘因值之累加，以為該因子於本模式中之權重值，如下式所示：

$$W_i = \frac{(C + E)_i}{\sum (C + E)_i} \quad (6)$$

式中 W_i 代表第 i 因子之權重, C 代表該因子之誘因值, E 代表該因子之效果值。

- (3) 決定因子評分過程: 根據該因子以往相關研究報告, 以 0 (不具促成崩塌效用) 至 2 (最具促成崩塌效用) 為評分範圍, 決定各因子模式評分之依據, 如在降雨因子中之評分給定為: 當年降雨量小於 2000mm 時, 評分為 0 分; 當年降雨量介於 2000 至 2500mm 時, 評分為 1 分; 當年降雨量大於 2500mm 以上時, 評分為 2 分。

- (4) 岩石不穩定指數 (Rock Mass Instability Index, RMII): 將上述各因子評分及權重相乘便可得岩石不穩定指數值, 如(7)式所示。

$$RMII = \sum W_i P_i \quad (7)$$

式中 RMII 為某處之岩石不穩定指數值, W_i 則為該處各因子之權重值, 而 P_i 則為各因子之評分值。評估所得之 RMII 值越大, 代表發生崩塌之可能性越大。

岩石工程系統之評估過程已考量各因子間之影響, 但相較於不安定指數法之評估過程, 岩石工程系統之主觀評估成份較多, 如矩陣編碼過程中對各因子間之關係評分及因子評分過程中之標準給定等, 且亦無法定義崩塌發生之門檻值。

D、以崩塌力學機制為依據之理論模式

若探討引發崩塌之力學機制, 則促使崩塌發生之主因在於地震或降雨等因素促使崩塌土層鬆動, 崩塌土體無法承受向下之重力作用, 而產生崩塌行為。因此改變原來崩塌土體平衡狀態之促因便成為以力學機制探討崩塌行為發生之主因, 而在地震及降雨兩個促因中, 會形成大量崩塌之大地震週期較長且時間地點都難以預測, 集中降雨則常在夏秋颱風之際發生, 且以往降雨資料較易蒐集, 因此現今之促使崩塌發生力學機制理論以降雨因子為促因之模式較為常見。常被引用之模式則為 Dietrich 與 Montgomery (1993) 利用地形判斷區域土壤水分飽和評估崩塌發生可能性之理論, 本文列舉該模式近幾年之進展, 探討該模式於台灣之適用性。

Dietrich 與 Montgomery 之理論乃以地形因子為主因, 加入地下水位因子探討地表土壤飽和區域之分佈, 而其理論則起始於 O'loughlin 於 1986 年發表之有限深度土壤剖面之一維飽和流動理論, 提出區域表面土壤水分飽和發生條件如(8)式所示:

$$\frac{Aq}{b} \geq TM \quad (8)$$

於上式中, A 為集流面積, q 為直接逕流量 (即為降雨量扣除蒸發散量及深層排水損失), b 為集水區以網格劃分之等高線長度, T 為土壤傳導度, M 為局部表面坡度。而若在排水量穩定、出流量穩定及飽和區域的邊界穩定等假設條件下, 可以平均流域土壤傳導度 (\bar{T}) 推求出流域之濕潤係數 $w(x,y)$, 如(9)式所示:

表 3. 921 地震前中橫公路東勢至德基段，岩石工程系統法坡向崩塌影響因子矩陣編碼評估表

Table 3. The influence factors matrix assessment table of the Rock Engineer System.

																各因子誘因值	
	斷層	3	1	4	0	2	3	2	1	2	3	0	2	3	1	27	斷層
	3	摺皺	0	1	0	3	1	1	1	1	1	0	1	2	0	15	摺皺
	2	2	岩性	2	0	3	1	3	2	2	4	2	1	4	1	29	岩性
	0	0	0	地震	0	0	3	0	0	4	1	0	0	3	0	11	地震
	0	0	0	0	降雨	2	0	1	1	3	3	3	2	4	0	19	降雨
	0	0	0	0	0	坡度	0	2	3	2	2	3	0	3	1	16	坡度
	0	0	0	3	4	1	坡向	1	0	0	0	2	1	2	1	15	坡向
	0	0	0	3	1	2	0	坡高	3	3	2	1	1	3	2	21	坡高
	0	0	0	1	0	1	1	1	坡型	2	3	1	1	3	2	16	坡型
	0	0	0	0	0	1	0	1	1	邊坡規模	3	2	2	3	0	13	邊坡規模
	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	覆土厚度	3	0	2	1	8	覆土厚度
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	植被	0	3	0	6	植被
	0	0	0	1	0	2	0	1	2	1	1	1	蝕溝	3	2	14	蝕溝
	0	0	1	0	0	2	1	2	3	3	2	3	0	崩塌次數	2	19	崩塌次數
	0	0	0	0	0	2	0	0	2	2	1	2	0	2	路寬	11	路寬
各因子效果值	5	5	2	17	5	21	10	15	19	26	28	23	11	40	13	240	
附註	斷層	摺皺	岩性	地震	降雨	坡度	坡向	坡高	坡型	邊坡規模	覆土厚度	植被	蝕溝	崩塌次數	路寬	總和	

以矩陣之對角線將整個矩陣區分為上矩陣及下矩陣，上矩陣給定之評分皆為前影響因子對後影響因子之相關程度，下矩陣給定之評分則為後影響因子對前影響因子之相關程度，如降雨對崩塌次數之影響程度為 4，但崩塌次數對降雨之影響程度則為 0。

$$w(x, y) = \frac{1}{MbL} \left(\frac{\bar{T}}{T} \right) \int \left(\frac{q}{q} \right) dA \quad (9)$$

於上式中, L 為平均坡長。本理論便以此濕潤係數估算集水區之土壤飽和範圍。

Dietrich (1993) 對 O'loughlin 提出之理論加以延伸, 其認為孔隙水壓減少了土壤的摩擦力而無法抵抗重力時, 邊坡崩塌便會形成。假設土壤傳導度 T 乃為空間常數, 且利用地形指標 $\frac{A}{bM}$ 及水

文指標 $\frac{T}{q}$ 所表示地表之飽和程度條件下, 進而推求無黏性土壤坡度穩定界限, 公式如 (10) 式所示。

$$\frac{A}{b} \geq \frac{\rho_w}{\rho_s} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \frac{T}{q} M \quad (10)$$

於上式中, ρ_w 代表水的密度, ρ_s 代表土壤密度, θ 代表地表坡度, 而 ψ 代表土壤安息角。

Dietrich (1993) 延續之前研究, 認為地形因子決定崩塌行為及範圍, 假設水力傳導度在飽和情況不隨深度變化之情況下, 利用土壤水分濕潤值與降雨量及地文因子之關係, 推求出一區域土壤水分評估模式, 如 (11) 式所示:

$$W = \frac{qA}{bT \sin \theta} = \frac{h}{z} \quad (11)$$

於上式中, h 為地下水位高度, z 則為地層厚度。並將上式代入無黏性土壤之無限邊坡穩定模式, 如 (12) 式所示:

$$\tan \theta = \left[1 - W \left(\frac{\rho_w}{\rho_s} \right) \right] \tan \phi \quad (12)$$

並認為地形指標 $\frac{A}{b}$ 及土壤水分濕潤指標 W 為構成崩塌之誘因, 當地形指標 $\frac{A}{b}$ 值越大, 代表地形集中水流匯集處; 濕潤指標 W = 1, 代表土壤水分已達飽和, 則該處易發生崩塌。利用水文模式及無黏性土壤之無限邊坡穩定模式, 以地形及土壤因子將集水區邊坡崩塌穩定條件分成四部分, 如表 4 所示。

Dietrich 以土壤水分飽和區域預測崩塌發生之主模式如上式, 而後續有數篇研究承襲此一理論繼續擴展, 如 Dietrich (1995) 另外考慮土層厚度及水力傳導度在岩層及表土層之差異對預測淺層崩塌之影響, 指出土壤層厚度對崩塌行為形成具有極大影響。徐美玲 (1995) 則將動態空間的降雨分佈加入

表 4. Dietrich (1993) 發表之邊坡穩定條件評估表

Table 4. the slope stability assessment table.

邊坡穩定	條件	邊坡穩定	條件
無條件不穩定	$\tan \theta > \tan \phi$	不穩定	$\frac{A}{b} \geq \left(\frac{T}{q} \right) \sin \theta \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \left[1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right]$
無條件穩定	$\tan \theta \leq \tan \phi \left[1 - \frac{\rho_w}{\rho_s} \right]$	穩定	$\frac{A}{b} < \left(\frac{T}{q} \right) \sin \theta \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \left[1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right]$

模式考量，探討不同空間分佈之降雨情況對該地區地下水位產生之變異及促成崩塌行為發生的影響，其以美國加州 Marin 市的 Soltice 流域以往崩塌資料以為模式驗證，獲得結果與現地調查之崩塌資料有非常好的吻合，這也是該模式首次將降雨之空間分佈納入模式考量。

四、結果與討論

由於邊坡崩塌行為影響因素眾多，除地震及降雨兩誘發因子可掌握外，其他環境因子對崩塌行為之影響皆因各地區情況不一而有所差異，也因此使得現今所使用之崩塌預測模式難有較突破性之發展，由以上列舉之統計模式及力學機制模式等討論，可以發現現今使用之崩塌預測模式面臨幾個問題，如下分述：

(1) 模式無法評估誘發因子對崩塌行為產生之效應：自然界之崩塌行為往往會引發土石流災害，就防災觀點而言，崩塌行為發生之啟動條件及時間便為重要的關鍵，惟目前應用之統計模式或力學機制模式都無法求出崩塌發生之門檻值，如臨界地震規模、臨界累積降雨量或臨界時降雨量等條件，無法做到即時評估之應用。

(2) 統計模式之篩選因子及因子評分過程易偏主觀：由於崩塌因子眾多且複雜，根據以往崩塌發生案例資料，建構『忽略崩塌內部複雜機制作用，僅針對崩塌外部物理特性進行統計學理之歸納分析』所產生之統計評估模式，不失為發展崩塌潛勢預測評估模式可參考之流程，但如何讓篩選因子及因子評分過程趨於客觀，便成為該模式往後是否可廣泛應用之關鍵。

(3) 供力學機制之崩塌模式驗證之資料不足：以力學機制建構之崩塌預測模式乃最理想化之發展過程，但以往崩塌發生案例並無法提供力學機制模式中過多之參數資料，

會造成往後應用上之困難，且目前所能提供之崩塌資料大部分都為崩塌已發生後之資料，並非崩塌發生臨界之資料，對模式驗證將會產生偏差。

五、結論與建議

本文主要探討現今採用之崩塌模式於台灣之適用性，若以台灣之崩塌地而言，崩塌發生主影響因子有：邊坡坡度、邊坡地質、邊坡走向、邊坡植生、降雨量、地下水位、土壤水分、地震、崩塌地臨前狀況及人為開發等，面對台灣複雜之自然環境條件，本研究建議在發展模式上應朝向統計模式及力學機制模式合併之方式發展，以力學機制模式中因子取代統計模式之主觀篩選因子過程，採以往崩塌發生案例資料為根據給定每一因子評分標準，加入降雨因子為誘發因子，並探討降雨頻率年對崩塌行為發生之影響，期能建構較高精確度且避免地域性問題之崩塌預測模式。

六、參考文獻

1. 王智仁 (2001) 「以現場調查方式分析影響公路岩石邊坡穩定性之工程地質因子-以南橫公路梅山至啞口段為例」，國立成功大學資源工程研究所碩士論文。
2. 王嘉燁 (2002) 「GPS/GIS 應用於南橫公路邊坡崩塌災害調查與潛感危險路段之劃定研究」，國立屏東科技大學土木工程系研究所碩士論文。
3. 石門水庫管理局 (1990) 「石門水庫集水區第二階段治理規劃」。
4. 朱聖心 (2000) 「應用地理資訊系統製作地震及降雨所引致之山崩危險圖」，國立台灣大學土木工程學系碩士論文。
5. 打荻珠男 (1971) 「雨山腹崩壞」，新砂防 (79)，第 21 至 34 頁。
6. 村野義郎 (1966) 「山地崩壞 關

- 2,3 考察」, 土研報告 130 號。
7. 林昆賢 (2001) 「GPS/GIS 應用於南橫公路邊坡地工環境災害調查分析與資料庫系統之建立研究」, 國立屏東科技大學土木工程研究所碩士論文。
 8. 林彥享 (2002) 「運用類神經網路進行地震誘發山崩之潛感分析」, 國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
 9. 林書毅 (1998) 「區域性山坡穩定評估方法探討-以林口台地為例」, 國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
 10. 陳意旋 (2001) 「溪頭地區山崩潛感圖製作」, 國立台灣大學土木工程所碩士論文。
 11. 陳凱榮 (1999) 「中橫公路山崩潛感分級研究-以東勢-德基為例」, 國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
 12. 徐美玲 (1995) 「坡地土壤孔隙水壓動態空間分佈預測模式」, 國立台灣大學地理學系地理學報, 第十八期, 第 1-21 頁。
 13. 許煜煌 (2002) 「以不安定指數法進行地震引致坡地破壞模式分析」, 國立台灣大學土木工程研究所碩士論文。
 14. 張舜孔 (2002) 「類神經網路應用在阿里山公路邊坡破壞因子之分析研究」, 國立成功大學土木工程研究所碩士論文。
 15. 盧育聘 (2003) 「類神經網路於公路邊坡破壞潛能之評估」, 立德管理學院資源環境研究所碩士論文。
 16. 簡李濱 (1992) 「應用地裡資訊系統建立坡地安定評估之計量方法」, 國立中興大學土木工程學系碩士論文。
 17. Dietrich, W. E., C. J. Wilson, D. R. Montgomery (1993) "Analysis of erosion thresholds, channel network and landscape morphology using a digital terrain models," *The Journal of Geology*, Vol. 101, pp.259-278.
 18. Dietrich, W. E., R. Reiss, M.L. Hsu, D.R. Montgomery (1995) "A Process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data," *Hydrological Processes*, Vol. 9, No. 3, pp.383-400.
 19. ISSMFE (Asian Technical Committee on Geotechnology for Natural Hazards in ISSMFE) (1997) *Manual for zonation on areas susceptible to rain-induced slope failure*, pp.1-35.
 20. ISSMGE (Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4) (1999) *Manual for zonation on seismic geotechnical hazards*, pp.48-71.
 21. Koukis, G., C. Ziourkas (1991) "Slope instability phenomena in Greece: A statistical analysis" *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, No. 43, pp.47-60.
 22. Montgomery D.R., W.E. Dietrich (1993) "A physically based model for the topographic control on shallow landsliding," *Water Resource Research*, Vol. 30, No. 5, pp.1153-1171.
 23. O'loughlin, E.M. (1986) "Prediction of surface zone in natural catchments by topographic analysis," *Water Resources Research*, Vol. 22, No. 5, pp.794-804
-
- 93 年 10 月 21 日 收稿
93 年 11 月 12 日 修改
93 年 11 月 26 日 接受