

區域性山坡穩定分析之回顧與展望

李錫堤

國立中央大學應用地質研究所

黃健政

經濟部中央地質調查所

摘 要

區域性山坡穩定分析有別於一般特定邊坡常用之極限平衡分析，它在缺乏可用之強度資料及地下水文資料下，須進行廣大區域之山坡穩定評估及繪製全區之山坡穩定分級圖，以供區域規劃，工程選址及防災決策制定之需。它一般被稱為山崩潛感分析，早年多由專家根據經驗或簡單統計方法選擇及決定各種山崩潛感因子的內部評分與因子間的權重，並以線性疊加法計算山崩潛感值及繪製山崩潛感分級圖。近年來，統計多變量分析方法成為山崩潛感分析的主流；類神經網路方法也被運用來預測山崩的發生；採用極限平衡計算的無限邊坡分析方法也被廣泛的用來模擬地震或颱風誘發的山崩分布。本研究以台灣中部國姓地區最近的山崩潛感分析研究為例，說明國內此方面之最新進展。

未來於區域性山坡穩定分析之研究可能有下列幾個重點發展方向：(1)機率式山崩潛感分析，(2)與地震暨雨量機率分析之結合，(3)以山崩機率做為山崩潛感分級及製圖之依據，(4)更具物理意義的綜合性因子的追求，(5)各種山崩類型的山崩潛感分析，(6)廣域山崩潛感分析暨製圖之問題探討。

關鍵字：山崩、山崩潛感分析、邊坡穩定、判別分析。

REVIEW AND PROSPECT ON LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY ANALYSIS

LEE C. T.

INSTITUTE OF APPLIED GEOLOGY, NATIONAL CENTRAL UNIVERSITY, TAIWAN

HUANG C. C.

CENTRAL GEOLOGICAL SURVEY, MINISTRY OF ECONOMIC AFFAIRS, TAIWAN

ABSTRACT

Landslide susceptibility analysis (LSA) is different to a specific slope stability analysis; it needs to analyze slope stability in a region in a circumstance that strength data and groundwater data are lacking. The LSA is complicated, but it is required by regional planning, site selection, and policy making in hazard mitigation.

At the early stage, the LSA required expert decision of scoring of landslide susceptibility factors and weighting among them. A weighted summation of factors are use to calculate the landslide susceptibility index. Bivariate analysis was used to treat a factor and to assist the decision of weighting, sometimes in this stage.

In the recent years, multivariate analysis becomes master stream in the LSA. It is objective and efficient. The neural network method was also used to predict landslides. The infinite slope limit equilibrium method was also applied to the earthquake-induced landslide study and the storm-induced landslide study. A study in Central Taiwan, at Kuohsing, is selected to demonstrate recent development in the LSA of Taiwan.

Further study may include: (1) to develop probabilistic landslide susceptibility analysis, (2) to join the probabilistic analysis with a seismic hazard analysis or a frequency analysis of rainfall, (3) to use landslide probability in susceptibility mapping, (4) to search a more meaningful factor for LSA, (5) LSA for different landslide types, (6) LSA and mapping in a wide region.

KEY WORDS : landslide, landslide susceptibility analysis , slope stability, discriminant analysis.

土工技術

一、前言

過去，在大地工程及相關領域進行的山坡穩定分析，多使用極限平衡法做特定邊坡之安全係數分析。同一時期，環境地質及另一些領域的專家及學者在做區域評估時，則進行所謂的山崩潛感分析 (landslide susceptibility analysis, LSA)。LSA須聯合多種能辨識山崩的地形因子、地質因子、區位因子及水文因子等，共同找出一組能區別山崩與非山崩的因子權重組合，並計算山崩潛感值 (landslide susceptibility index, LSI) 及繪製全區之山崩潛感圖 (landslide susceptibility map, LSM)，以供區域規劃，工程選址及防災決策制定之用。

近年來，隨著經濟發展及人口增加，土地利用逐漸向山區發展，因而產生許多新的地質災害問題，區域性山坡穩定分析也逐漸受到重視。本研究將針對LSA之研究與應用做一回顧，並介紹國內外近年來的發展現況及預估未來於此一方面研究可能的發展。

二、國內外山崩潛感分析研究之回顧

從歷史發展的觀點來看，LSA方法上大體上可區分為定性/半定量法及定量法兩大類。定量法又包括了統計分析、定值分析及人工智慧之運用等三類。進十餘年來，由於GIS的普及加上數值地形模型 (Digital Terrain Model, DTM) 的精緻化，使用定量法常更為方便。茲將各種分析方法分別討論如后：

2.1 定性及半定量分析

定性及半定量分析可再分為地形判釋法及專家評分法兩種。地形判釋法是由專家依照經驗直接進行地形判釋及劃設山崩潛感區 (Carrara and Merenda, 1974; Meneroud and Calvino, 1976; Kienholz, 1978; Malgot and Mahr, 1979; Kienholz et al., 1988; Ives and

Messerli, 1981; Hansen, 1984; Varnes, 1984; Rupke et al., 1988)。地形判釋法的缺點是主觀性太強，不同專家所產製的山崩潛感區難以比較，且潛感圖也不容易更新。

專家評分法是由專家依照經驗，就現場實際之山崩情形，給予各山崩因子相對之排序，及賦予各因子之權重值，最後將各因子疊合，計算最終之LSI (Stevenson, 1977; Ives and Bovis, 1978; Sidle, 1985)。專家評分法的優點是程序簡便，但其缺點是人為給定之權重及因子評分不夠客觀，難有進一步發展。

在國內，張石角(1980)在都市坡地利用潛力調查與製圖中，以工程地質因子及動態地形因子利用線性組合法繪製工程地質圖及工程風險率。王鑫(1981)以地景法研究阿里山公路沿線的地形與地質因子及繪製不穩定邊坡分佈圖。陳振華及潘國樑(1985)在全省都會區環境地質資料庫中，以岩性、坡度、災害為因子，利用因子組合法進行了LSA及土地利用潛力評估，將山崩潛感分為低、中低、中高與高潛感四級，並製成比例尺五千分之一的LSM圖集。

近年，陳凱榮(2000)採用岩石工程系統及落石危害度評分系統針對中橫公路東勢到德基段進行山崩潛感分區。這可算是專家評分法的一種。

2.2 統計分析

統計方法係分析某一地區山崩地點及非山崩地點之因子組合及其統計參數特性，再以適當之線性方程式計算全區各點之LSI，並用來預估目前尚未發生崩塌但具有相似因子組合特性之區域發生山崩的可能性。運用在LSA的統計分析方法主要包括：多變量分析 (multivariate analysis) 中的羅吉斯迴歸 (logistic regression) 與判別分析 (discriminant analysis) 及條件機率分析 (conditional probability) 等。各種統計方法都是用來分析各因子間的權重值，再利用線性疊加法計算各點之LSI及完成LSM (Jones et al., 1961; Brabb et al., 1972; Neuland, 1976; Kobashi and Suzuki, 1988; Yin and Yan, 1988; Carrara, 1983, 1988; Carrara et al. 1990, 1991, 1992, 1999; Gao

and Lo, 1991; Koukis, 1991; Hearn, 1995; Lee and Min, 2001)。統計分析方法之計算模式較為複雜，資料的需求量較大，但其優點是較為客觀。其中，判別分析及羅吉斯迴歸分析更可以有效處理因子相依性的問題及獲得較為合理的因子間之權重值。

在國內相關研究方面，鄭元振(1992)運用地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)萃取最小邊坡單元，並以條件機率法將山崩潛感因子之評分及權重定量後進行疊加。簡李濱(1992)則將研究區域劃分為格網，並以不安定指數法進行區域性山坡穩定評估。陳永寬、賴晃宇(1994)則以坡度梯度、剖面曲率、平面曲率、上坡流域面積及蝕溝指數等五種因子由三階Lagrange多項式推估地景形態參數，並用以進行山崩潛感評估。林中興(1994)再是使用條件機率法，以水系的距離、坡度、坡型等因子針對梨山地區作LSA。游中榮(1995)則利用卡方檢定值評估因子間的權重，並針對北橫公路復興至巴陵段進行山崩潛感研究。黃士昌(1998)利用日本點數法、模糊集理論法及多變量分析法進行崩壞潛感值分析。林書毅(1999)利用多變量分析法中的主成份分析法對各項因子進行轉換，嘗試解決因子間相依性的問題。林昆賢(2001)針對南橫公路埡口至海端段以多變量分析法求取其不安定指數後，判定沿線各崩塌處之危險程度。王嘉燁(2002)利用現場調查及衛星影像，以坡度、坡向、斷層分佈、植生覆蓋等因子，經多變量分析，再以線性疊加的方式，劃設南橫公路潛在災害路段。Lee, et al. (2004)運用判別分析方法在國姓地區進行LSA，繪製集集地震、桃芝及賀伯颱風等暴雨促崩事件之LSM。

2.3 定值分析

LSA中的定值分析(deterministic analysis)係指無限邊坡模式(infinite slope stability model)。無限邊坡法基本上是假定山坡不穩定現象可以無限長的平面滑動模式代表，並可以極限平衡法計算得山坡穩定之安全係數及以此係數代表之LSI。這種分析方法通常被用到特定豪雨誘發山崩或地震誘發山崩之研究。它的缺點是全

區的強度資料及地下水文資料不易取得，而有賴分析前先進行強度參數之反算分析(back analysis)及水文參數之評估工作。

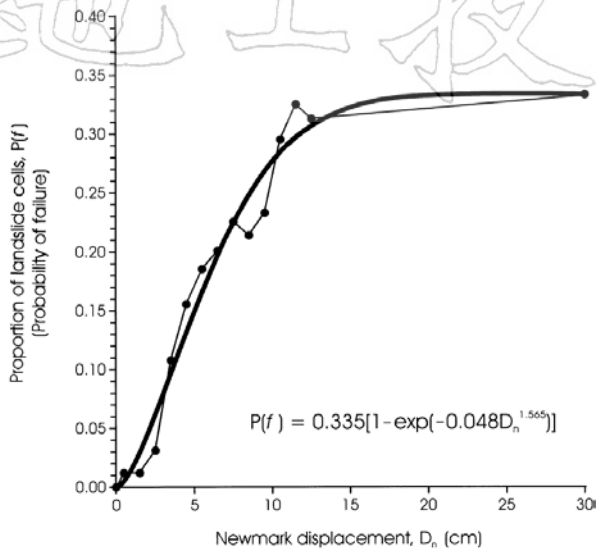
在豪雨誘發山崩分析中，水文參數方面主要是考慮到地下水位的變化上。Luzi and Pergalani (2000)以無限邊坡法及一般切片法(ordinary slices method)，嘗試製作義大利五萬分之一比例尺之安全係數分佈圖。朱聖心(2001)以無限邊坡安全係數的概念，分析天祥地區及中橫公路東段，評估1995年安珀颱風誘發山崩之潛感分布。陳熾璇(2002)則是以1996年賀伯颱風及2001年桃芝颱風為災害研究事件，以同樣的分析模式進行分析。

在地震誘發山崩方面，無限邊坡模式可提供仿靜態之邊坡穩定分析。但近年來國外對於地震誘發山崩分析已普遍採用所謂的Newmark位移法(Newmark, 1965; Jibson, 1998; Miles and Ho, 1999; Jibson et al., 2000; Keefer, 2000; Luzi and Pergalani, 2000; Refice and Capolongo, 2002)。為了評估地震誘發山崩的機率，一般均以Newmark永久位移值對應實際測繪之地震誘發山崩崩壞比進行迴歸，找出其關係式，如圖一所示。永久位移值與山崩崩壞比之關係建立後，即可用來進行區域性地震誘發山崩機率圖之繪製。

在國內相關研究方面，朱聖心(2001)、陳熾璇等(2002)、鄭傑銘(2003)、李馨慈(2004)等人均使用Newmark位移法進行地震誘發山崩之評估。Liao and Lee (2004)結合位移法地震誘發山崩分析及地震危害度分析，提出一套機率式地震誘發山崩危害度分析之評估方法及流程，並以集集地震實際誘發山崩進行驗證。

2.4 人工智慧方法

近年來人工智慧技術逐漸成熟，因此已有一些學者開始將其應用在LSA之上，其中最具代表性之方法為所謂的類神經網路(neural network)及模糊集(fuzzy set)之應用。許琦(1989)考慮地形、地質、環境、水文四大類共十七個因子，以模糊集進行山崩潛感分析。吳少明(1993)引用邏輯關係組合法中的層級規則組合法，對高雄甲仙地區進行山崩潛感及開發適宜性分析。



圖一 永久位移值與地震誘發山崩崩壞比之關係 (JIBSON ET AL., 2000)

謝獻仁(1998)利用類神經網路分析中橫谷關—德基水庫間落石坡危險度。楊智堯(1999)針對高雄縣岡山及楠梓地區，利用類神經網路求取各個山崩潛感因子與破壞潛感值之間的關係。王淑慧(2000)利用類神經網路預測道路邊坡落石坍方。周晏勤(2000)在南橫公路甲仙到埡口段，利用多變量分析方法與類神經網路法進行邊坡破壞因子之分析。謝豐隆(2000)則在中橫公路利用類神經網路方法建立落石危害等級評估模式及降雨引致落石危險度之評估模式。藍世欽(2000)針對南橫公路甲仙—梅山路段，以道路邊坡的工程地質因子，利用類神經網路及多變量分析法進行研究。Lee et al. (2001)針對韓國Yongin地區，建立地理人文及環境資料庫，以其中的坡度、坡向、地形曲率等七項因子與LSI進行類神經網路學習，並回想得到區域內LSM。王智仁(2001)利用類神經網路進行南橫公路邊坡穩定評估。林信亨與林美聆(2002)則利用GIS及類神經網路進行土石流危險溪流危險度判定。陳志豪(2002)針對南橫公路東段變質岩邊坡地區，以類神經網路進行道路邊坡破壞潛感分析。吳振威(2003)利用多變量區別分析及類神經網路分析南部國道3號之公路邊坡，了解各因子對於公路邊坡淺層穩定之影響。林彥享(2003)則以類神經網路探討山崩發生與山崩潛感因子間之關係，並首度引用模糊

隸屬函數的觀念於LSA，建立一套新的LSA模式。

2.5 小結

對於區域性LSA而言，定量法提供了較為客觀且量化的評分方式，當電腦運算速度及GIS發展均已成熟之際，定量法已成為LSA之主流。但在實際應用上仍存在著小區域訓練結果無法應用到大範圍的問題。其原因可能出在不同地質區的崩塌特性不同(張石角, 1995)，或不同地域(terrain)崩塌特性不同(吳佐川, 1993)之故。其解決之道將在後續章節中探討。

三、國外山崩潛感分析實際應用概況

美國地質調查所(USGS)在2000年所出版的National Landslide Hazards Mitigation Strategy中指出，LSM是建構機率式山崩危害度圖及進行風險評估時不可或缺的基礎資料。報告中指出，美國對於山崩潛感製圖尚未具備完善之統一標準，並具體建議美國應投入更多的資源進行LSM之製作標準及指導方針之訂定。

在美國聯邦政府體制下，負責LSM之調查及出版之單位主要以州政府為主，而美國地質調查所則主要負責實驗性質的山崩相關研究，再將成果推廣至各州政府及地方政府。目前較有系統性的LSM測製工作則以加州最具代表性。由於加州位處板塊邊緣，地震活動度高，因此特別針對地震防災成立了Seismic Hazard Mapping Program，地震誘發山崩危險區劃分是其中的一項重點工作。

根據1980年加州州政府通過的Seismic Hazard Act，加州地質調查所(California Geological Survey; 其前身為California Department of Conservation, Division of Mines and Geology)為地震危害度分區之主管單位。對於地震誘發山崩危險區之認定，由California State Mining and Geology Board 決定採用以下之準則：(1)可辨識之舊崩塌地區，包括堆積區及來源區，以及歷史上曾經有過地震誘發山崩記載之

區域，或(2)依據地質條件及地工條件分析可知其地質材料具有地震誘發山崩之潛在危險者；此部份目前主要以 Newmark 位移法進行分析及進行潛感區劃設。凡是位於所定義之高潛感(High)、中潛感(Moderate)及低潛感(Low)的區域(對應Newmark 位移值分別為30公分以上、15公分以上及5公分以上)，均須劃設為地震誘發山崩危險區。

對於位在地震誘發山崩危險區之開發案，開發者有義務聘請工程地質師及大地工程師進行較詳細的邊坡穩定評估及基地調查，確保開發案不受坡地災害之影響。這是在LSA後，必要的且較為務實之配套。

除了已經施行的地震誘發山崩危險區劃設準則外，利用GIS及多變量分析來進行LSA及潛感圖測繪工作，是目前某一些國外政府單位正在研究的另一個新課題。USGS在2001年曾針對Oakland地區進行泥流(earthflow)及滑動破壞(sliding)進行LSM之繪製。該工作主要採用的資料包括：(1)基盤及地表地質單元，(2)30公尺解析度之DTM，(3)舊崩塌地，(4)曾造成人為建物損壞之山崩紀錄。該工作初步根據各地質單元中舊崩塌地之崩壞比及其坡度來定義山崩潛感分級。

四、經濟部中央地質調查所進行之山崩潛感分析

4.1 概說

經濟部中央地質調查所(以下簡稱地調所)為有效地評估坡地地質災害發生的潛勢，以提供防災減災的參考，除了進行基本的地質調查及建立一套完整的坡地環境地質資料庫外，尚需進行各類型LSA及繪製LSM，以供進一步災害評估與防災規劃之用。

國立中央大學應用地質研究所(以下簡稱中大應地所)自民國92年6月開始接受地調所委託進行本LSA工作，為期三年。目標是研究出一套具體可行的方法與工作流程，並做技術轉移，使地調所能順利出版兼具技術水準與應用

價值的二萬五千分之一全國山崩潛感分幅圖。本章將說明整體規劃及民國92年在國姓地區的工作成果。

4.2 研究架構與工作流程

LSA目前仍屬研究發展階段，國際上尚未有統一的分析方法或準則可供依循。因此，在工作開始前必須先做整體研究發展架構規劃，並考慮實務需求及國內外發展現況及未來的發展趨勢，提出一套具體可行的研究發展架構及工作流程。

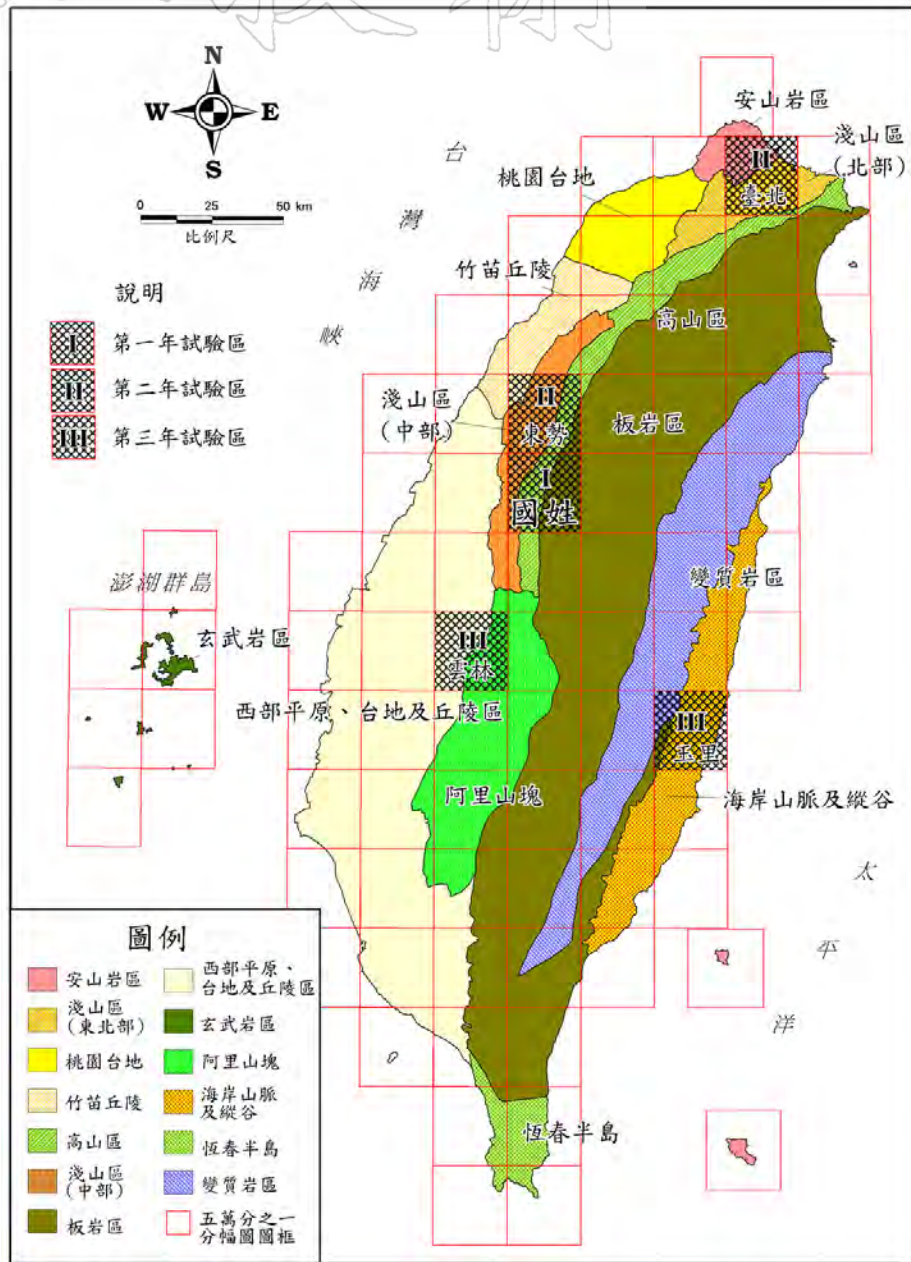
為繪製全國山崩潛感分幅圖，首先提出了地域單元分區(terrain unit division)的構想；假設同一地域單元內的各點能具有相近的山崩發生特性，所以在某一局部地區訓練出來的因子權重能適用於同一地域單元內的任何區域。如此一來，就不會有已往在某一地區訓練出來的因子權重不能適用於其他地區的缺點。

再者，須選擇適當的試驗區，實際進行LSA及繪製LSM。同時，實際測試的區域必須儘量涵蓋各個不同的地域單元。因此規劃的研究區包括：在資料最豐富的台灣中部國姓地區(國姓幅)及東勢地區(東勢幅)、人口稠密的北部地區(台北幅)、台灣西南部沉積岩區(雲林幅)及台灣東部變質岩區與海岸山脈(玉里幅)，逐年進行研究。

地域單元分區考慮了岩性、坡度、比高、全坡高、坡頂標高、地形粗糙度、坡度粗糙度及總地形曲率等八項因子進行分析，並以ISODATA分類法尋找均質區及做地域特性分類(林淑媛等, 2002)，最後考慮前人的地形分區(林朝榮, 1957; 陳正祥, 1960; 徐鐵良, 1993)與主要構造線，劃分地域單元。全台灣地域單元劃分區結果及各年的試驗區示如圖二。

第三，由於近年來DTM、強震資料及時雨量資料的取得較為方便，分析工具也快速進步，因此促崩因子(triggering factor)的考慮日益普遍(Keefer, 1984; Pearce et al., 1985; Tibaldi et al., 1995; Harp et al., 1995; Fukuoka, et al., 1997; Rodriguez, 1999; Polemic and Sdao, 1999; Khazai and Sitar, 2000)。在考慮促崩因子的狀

土工技術



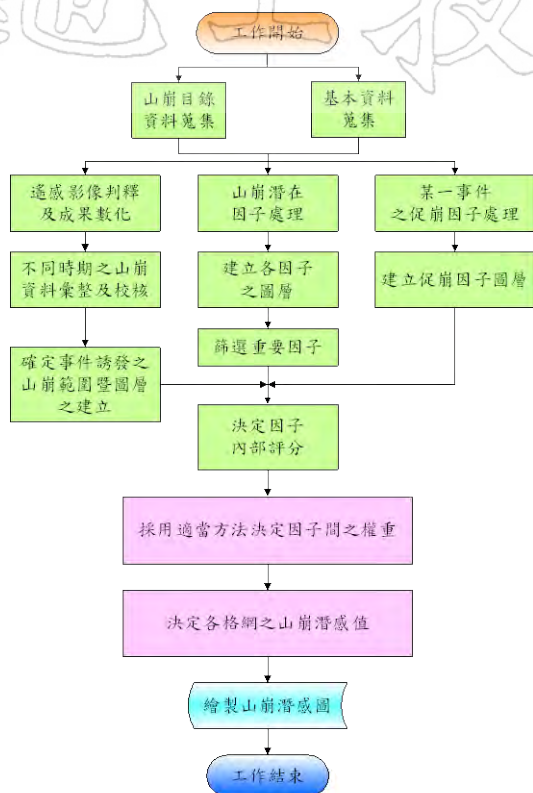
圖二 全台灣地域單元分區圖及各年度試驗區位置

況下，每一個試驗區須選取單一事件誘發的山崩來進行LSA，獲得該事件的因子權重組合。

最後，為取得每一個地域單元具有代表性的因子權重組合，在每一個試驗區必須選取數個具有代表性的事件（颱風或地震），分別分析出每一個事件的因子權重組合。在同一區塊訓練出來的因子權重組合，各個潛在因子的權重分配可能會具有相似的分佈形態（pattern），而可以代表該地域單元各個潛在因子的權重分

配。

單一事件之LSA工作流程如圖三。建立事件誘發山崩圖層、篩選因子及建立各因子圖層是流程中的前三項重要工作，接著進行因子間的權重分析。經初期研究後，決定採用多變量分析中的判別分析。其他方法，包括：類神經網路、無限邊坡及羅吉斯迴歸等，則在應地所另行研究。



圖三 單一事件山崩潛感分析流程圖

在同一試驗區內，通常會包含二至三個不同的地域單元。判別分析必須針對每一個地域單元做一次分析，各獲得一組權重，以進行全區LSI之計算。為比較地震誘發山崩與颱風誘發山崩因子權重之異同，本研究選擇進年來較重要的集集地震、桃芝颱風及賀伯颱風等三個誘發山崩事件進行研究。以下將針對在國姓地區三個不同事件的工作成果做說明。

4.3 資料選取

在兼顧精度、完整性及可取得性之下，基本資料蒐集包括：

(1) 地形圖：主要為研究區域內之1/5,000與1/10,000像片基本圖，可提供崩場地檢核、產業道路數化及地形地貌判釋之用。

(2) DTM：主要為全國40公尺解析度之網格DTM，可提供各項地形相關因子之計算。研究區域內DTM之瑕疵部分，由五千分之一像片基本圖數化補足。

(3) 地質圖：主要為研究區域內地調所出版之1/50,000地質圖，可提供地質研判及岩性

因子之產生。

(4) 雨量資料：主要為研究區及鄰近區域賀伯颱風及桃芝颱風之時雨量資料，可提供降雨強度及事件總雨量之計算。

(5) 地震資料：主要為研究區及鄰近區域強震站所收錄到的集集地震及其5個較大規模餘震之強地動資料，以計算研究區內尖峰地動加速度值(Peak Ground Acceleration, PGA)及愛氏震度值(Arias intensity) (Arias, 1970)。

(6) SPOT衛星影像：主要為向中央大學遙測中心申購之研究區主要災害前後Level 10之SPOT影像，包括賀伯颱風、集集地震及桃芝颱風等三大事件前後共六幅30公里見方的衛星影像(詳表一)，可提供山崩判釋及常態化差異植生指標(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)之計算。

表一 國姓幅研究購買之衛星影像一覽表

事件	影像時間	影像編號	影像類別
賀伯颱風前	1996/04/17	G0004681	XS
	1996/04/17	G0004683	PAN
賀伯颱風後	1996/11/08	G0009610	XS
	1996/11/08	G0005962	PAN
集集地震前	1999/04/01	G0012701	XS
	1999/04/01	G0013125	PAN
集集地震後	1999/09/27	G0013087	XS
	1999/09/27	G0013091	PAN
桃芝颱風前	2001/07/02	G0015182	XS
	2001/07/02	G0014757	PAN
桃芝颱風後	2001/11/10	G0014977	XS
	2001/11/10	G0014975	PAN

4.4 山崩判釋及成果檢核

在衛星影像的選取上，無論事件之前或事件之後，均以最接近事件發生時間點為考量重點，並以雲遮量低者為選取對象。購得之多光譜及全色態SPOT影像，先融合(fusion)成6.25公尺解析度之假色影像，以利崩場地判釋。

本研究進行三次促崩事件前後共六個時間點的衛星影像山崩判釋，判釋項目包括：淺層崩塌(含落石)、深層滑動、土石流、河彎側蝕及向源侵蝕等，但僅利用淺層崩塌來進行因子權重分析；河彎側蝕及向源侵蝕資料被當做一

項潛在因子；深層滑動、土石流及由地調所提供的順向坡資料，則用來規劃進一步做各種山崩類型LSA之用。

每一幅衛星影像判釋時，隨即在GIS下數化每一處山崩及記錄其屬性。在判釋及數化完成後，須先進行室內檢核，將山崩圖層套疊在像片基本圖上進行比對，去除人工建物及開墾區等誤判。同時檢查每一處山崩的坡度分布，能辨識的坡腳堆積區予以去除。事件後山崩目錄是要表示事件誘發山崩的分布，故每一山崩皆必須與事件前山崩目錄比較，檢查山崩範圍有無擴大及影像值是否變量，以去除事件前既存山崩的誤判。

室內檢核完成後，隨即赴野外進行重點查核，進一步去除各種可能之誤判。野外查核結果亦可對山崩的破壞機制能有更深入的瞭解，並可發現許多位於衛星影像陰影部分的山崩無法判釋，需進一步藉由航空照片或現地查核的方式將其增補於山崩圖層。三次促崩事件前後

共六個時間點的衛星影像山崩判釋及檢核結果如圖四所示。

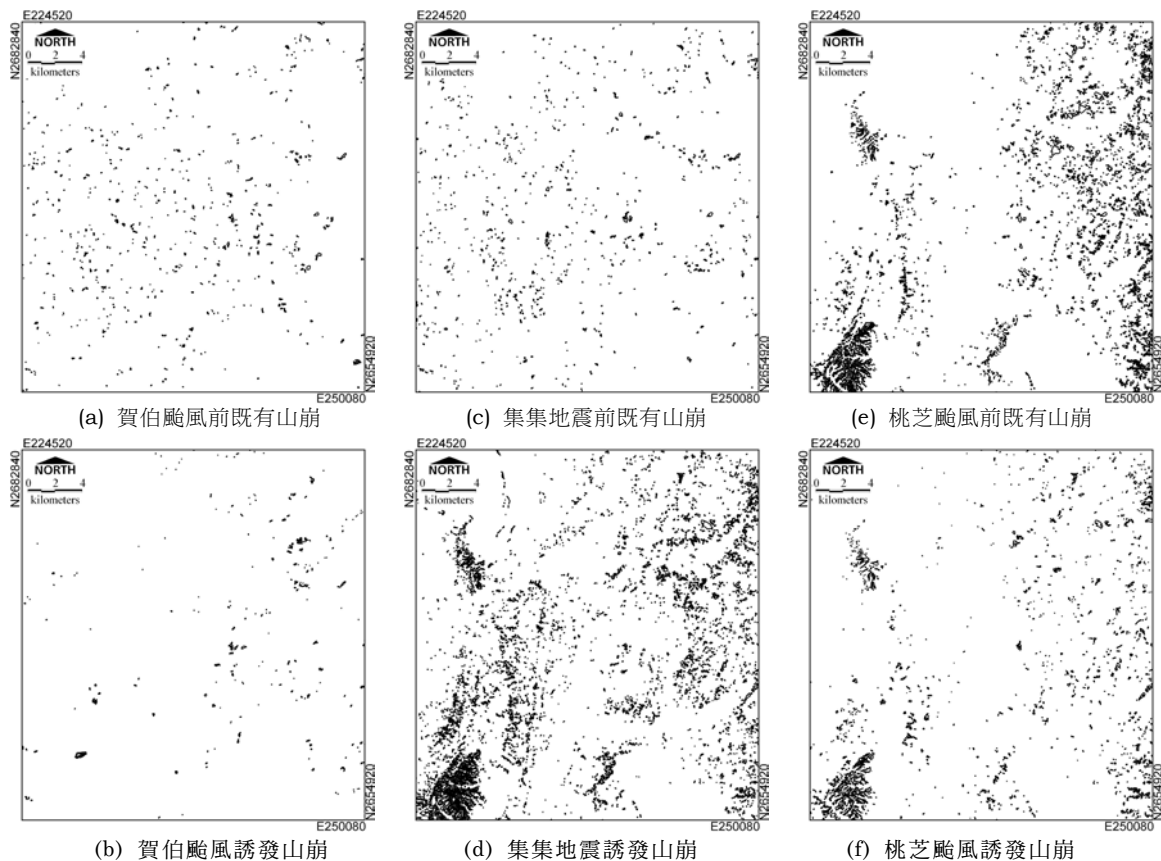
4.5 山崩因子處理與篩選

4.5.1 因子初選

經複核國內外之相關研究，曾被考慮或使用過的山崩潛感因子超過五十種。中央應地所根據各因子被使用過及被強調的次數，再根據經驗判斷，初步篩選出岩性、坡度、坡向、地形粗糙度、坡度粗糙度、地形曲率、NDVI、坡高、全坡高、道路距、斷層距、河彎距、源頭距、愛氏震度、雨量強度及總雨量等十六項因子，供進一步研究。

4.5.2 因子處理

考慮現有資料的精度及本研究預定繪製比例尺為五萬分之一的LSM之下，首先將DTM做曲面內插成為20公尺網格，所有由DTM衍生計算而得的坡度、坡向等均採相同的解析度。由SPOT衛星影像計算而得的NDVI經重新取樣為



圖四 山崩判釋及檢核成果

20公尺格網。山崩圖層、地質圖及道路距等向量圖層則經換為20公尺格網。資料處理工具主要是使用MapInfo及Erdas Imagine；前者是向量式GIS，後者是格網式GIS。每一個因子分別與山崩圖層套疊，並在每一個地域單元內，將該因子分為山崩及非山崩兩組，分別繪製次數百分比分布圖及崩壞比分布圖，如圖五。崩壞比(landslide ratio)是因子某一等級山崩格網數與該等級總格網數之比例 (Jibson, 2000)。

4.5.3 因子篩選

藉由因子次數百分比分布圖，選取山崩組分布與非山崩組分布得比較開者或交集較小者做為重要因子。本研究所選取的重要潛在因子包括坡度、坡向、地形粗糙度、坡度粗糙度、總地形曲率等五項因子，賀伯颱風及桃芝颱風事件增加NDVI及全坡高兩項因子。岩性為類別式資料，無法由其次數分布圖來觀察，但可由崩壞比分布明顯隨岩性為類別不同而變化，故亦被選為重要因子。

前述篩選出來的潛在因子須再進行各因子一對一之相關係數分析，若有相關性過高的因子，則須擇一剔除，以避免因子間相依性過高而降低後續分析之效率。

4.6 潛在因子評分

山崩潛感因子的評分原則上須按各個因子的崩壞比分布給予分數。本研究係先針對每一個因子分別擬合一適當之直線或曲線，得到一平滑化的因子等級與崩壞比之關係式。最後選定各因子有效區間的最大值與最小值後，將各因子正規化(normalization)為0至1之評分。

正規化評分之目的在使後續判別分析結果的各個因子之係數能代表各該因子之相對重要性或權重。

4.7 促崩因子處理及評分

4.7.1 震度因子處理及評分

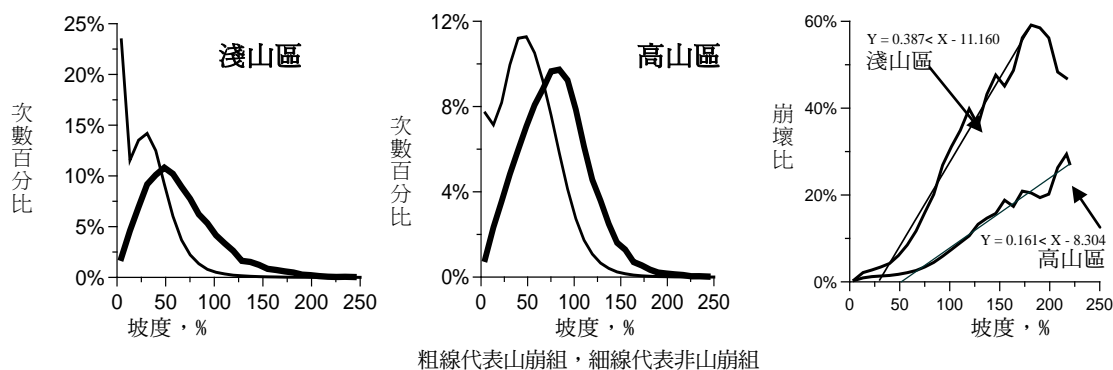
考慮本研究用來判釋崩塌地的衛星影像接收日期為9月27日，故選取集集主震及隨後五天內6次芮氏規模6.5以上的餘震資料來做分析。共計有7個地震事件，合計2379筆強地動紀錄。各筆強地動資料皆先經基本的波形檢查及基線校正。分析工作除了提供三個分量的PGA及PGV外供統計分析外，主要進行愛氏震度的計算。愛氏震度 I_a 定義如下：

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^T a^2(t) dt \quad \dots\dots\dots(1)$$

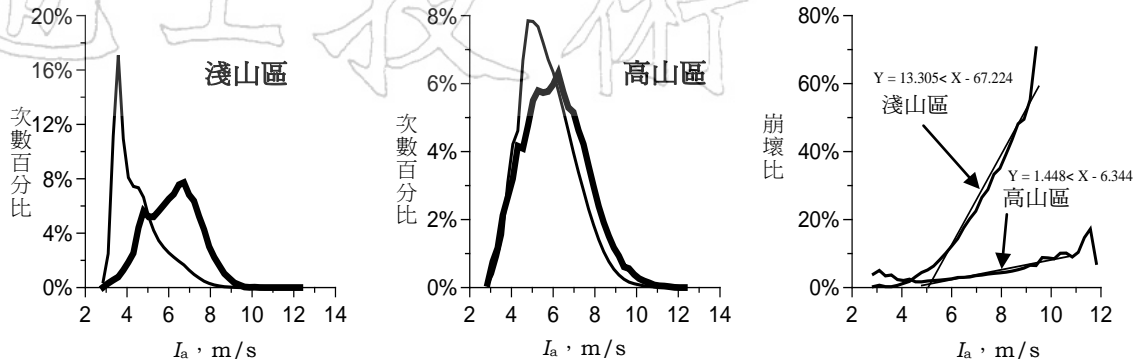
其中， g 為重力加速度(m/sec²)； t 為時間(sec)； a 為測站接收到的地動加速度(m/sec²)時間歷線。地動振幅會有地形放大的效應，從強地動資料計算的愛氏震度也同樣會受到地形效應影響。本研究採用地形比高做愛氏震度之地形效應修正 (林柏伸及李錫堤，2003)，修正後的愛氏震度與崩壞比成很好的正相關 (圖六)。最後按迴歸後崩壞比做正規化評分。

4.7.2 降雨強度及總雨量因子處理及評分

選取研究區塊及鄰近地區各雨量站在賀伯颱風及桃芝颱風期間的時雨量資料，做最大時雨量及累積雨量的分析，得到每一個雨量站的最大時雨量(降雨強度)及累積雨量(總雨量)。



圖五 國姓幅集集地震事件坡度因子統計成果圖



粗線代表山崩組，細線代表非山崩組

圖六 國姓幅集集地震事件愛氏震度因子統計成果圖

各雨量站的降雨強度值及總雨量值，再經克立金法 (Kriging) 內插為 20 公尺網格，完成降雨強度圖層及總雨量圖層。最後兩圖層再分別與山崩圖層套疊，並在每一個地域單元內，按山崩及非山崩兩組，分別繪製次數百分比分布圖及崩壞比分布圖，並按崩壞比做正規化評分。

4.8 因子間權重之決定

應用到 LSI 預估的多變量分析，無非是想藉由統計學方法找出一組山崩因子的最佳線性組合來計算山崩潛感值 λ 。這個線性組合可由下式表示：

$$\lambda_i = \sum_j w_j F_{ij} \dots\dots\dots(2)$$

其中， λ_i 代表第 i 點的 LSI； F_{ij} 是代表第 i 點第 j 個山崩因子的評分； w_j 是第 j 個山崩因子的權重，可由迴歸分析或由判別分析求得。

用來做山崩潛感的判別分析，基本上僅須將資料分為崩與不崩兩組，每一(點)資料都是由各個山崩因子組成的向量，第 i 點資料即：

$$\mathbf{F}_i = \langle F_{i1}, F_{i2}, F_{i3}, \dots, F_{ij} \rangle \dots\dots\dots(3)$$

將資料分為兩組時，我們可用 \mathbf{A}_i 是代表第 A 組資料，而用 \mathbf{B}_i 是代表第 B 組資料。

判別分析的標的是在找出能使組間變異相對於組內變異的比值為最大的一組最佳線性組合。進行分析時，首先須計算兩組資料的綜合變異共變異矩 (pooled variances and covariances matrix) \mathbf{S} 及計算兩組資料平均值的差別向量 \mathbf{D} ，再由：

$$\mathbf{SW} = \mathbf{D} \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{求得, } \mathbf{W} = \mathbf{S}^{-1}\mathbf{D} \dots\dots\dots(5)$$

此參數向量 \mathbf{W} 又可表示為：

$$\mathbf{W} = \langle w_1, w_2, w_3, \dots, w_j \rangle \dots\dots\dots(6)$$

在 LSA 中，若欲將此參數向量視為因子間的權重，則必須進一步考慮不偏估性 (unbiasedness)，即令：

$$\sum_i w_i = 1 \dots\dots\dots(7)$$

若各個因子的內部評分已經正規化處理到 0 至 1 之間，則所求得的 LSI 也會介於 0 至 1 之間。山崩判別指標 (discriminant index)， R_0 可由下式決定：

$$R_0 = \sum_j w_j X_j \dots\dots\dots(8)$$

$$\text{其中, } X_j = \frac{\bar{A}_j - \bar{B}_j}{2} \dots\dots\dots(9)$$

潛感值若大於 R_0 ，可被歸類為山崩群組。

4.9 分析結果

各事件資料經判別分析結果，在淺山區及高山區分別求得一個判別式及一個判別指標。由於因子已經正規化處理及判別式中的係數已考慮不偏估性，故該等係數可代表因子間的權重。三個事件共六個判別式的因子權重及判別指標詳列如表二。

研究區內之任一點，判別分數或 LSI 大於判別指標時，代表該點被歸類為山崩組；反之，被歸類為非山崩組。由表三可見，坡度因子及促崩因子的權重參數一致地呈現較大值，顯示了此兩因子的重要性。此外，NDVI 在兩颱風事件的高山區顯示了較高權重；地形粗糙度

表二 國姓地區山崩潛感分析成果因子權重及判別指標一覽表

事件及位置	岩性	坡度	坡向	地形粗糙度	坡度粗糙度	總曲率	NDVI	全坡高	促崩因子	判別指標
集集淺山區	.047	.334	.030	.061	.018	.044	-	-	.465	.250
集集高山區	.019	.413	.025	.205	.051	.022	-	-	.265	.226
桃芝淺山區	-.019	.162	.057	.479	-.108	.210	.090	.092	.038	.289
桃芝高山區	.024	.287	.103	.075	-.014	.006	.410	.005	.104	.319
賀伯淺山區	.038	.702	.092	.040	.136	-.061	.025	.016	.012	.365
賀伯高山區	.027	.411	-.046	.135	.084	.005	.275	.036	.072	.310

也偶有較高權重值出現，故亦具有其重要性。岩性、坡向、坡度粗糙度及總地形曲率偶有負值出現，顯示其重要性較低。

進行山崩潛感分級時，本研究將判別指標當做高潛感與中高潛感的界線，同時取指標值的一半當做中高潛感與中潛感的界線，及取指標值的四分之一當做中潛感與低潛感的界線。據此繪製LSM如圖七。若不計促崩因子—愛氏震度或降雨強度，則可顯現未受地震或颱風響前的山崩潛感分布情形，其結果亦示於圖七。

表三 六個代表不同時期的山崩潛感圖之正確率一覽表

代表時期	山崩組正確率	非山崩組正確率
桃芝颱風後	68.36%	82.06%
桃芝颱風前	67.85%	92.14%
集集地震後	54.66%	83.65%
集集地震前	13.18%	92.74%
賀伯颱風後	57.27%	80.19%
賀伯颱風前	37.31%	85.53%

4.10 成果評估

4.10.1 各事件山崩潛感圖與實際山崩分布之比較

LSA結果，實際山崩格網被預測為山崩的比例，稱為山崩組正確率；非山崩格網被預測為非山崩的比例，稱為非山崩組正確率。判別分析的結果，若潛感值大於判別指標，即被歸類為山崩組，也就是該格網被預測為山崩，或稱為高潛感。LSM與實際山崩分布之比較可由該幅圖的正確率來瞭解。國姓地區各幅LSM與實際山崩分布之比較結果示如表三。

表三顯示桃芝颱風事件的正確率最高，最具有預測能力，甚至連事件前的山崩都能有效地預測。集集地震事件與賀伯颱風事件的預測能力次之，但它們都不能對事件前的山崩做有效的預測，尤其是集集事件更不能預測事件前的山崩。由於地震前後山崩誘因不同，用集集地震後的資料所建立的潛感圖來預測地震前即有的山崩，基本上會有問題，故可不需加以討論。

若從山崩圖層與LSM層套疊的結果來看，每一個事件都有許多被歸為高潛感的地點，實際上並未有山崩發生的情形。就統計學的觀點而言，這是一種誤判。但就區位及實際地形與地質情形來看，這一些被歸為高潛感而未發生山崩的地點與已發生山崩的地點，是具有空間上的關聯性及地形與地質的相似性的。換言之，這一些被歸為高潛感而未發生山崩的地點，其實大多位在誘發山崩的鄰近地點，且與山崩點具有相近的地形與地質條件。就地質學的觀點而言，這一些地點與山崩點一同被歸入高潛感區，並非不合理。雖然統計學上有誤判之慮，但這可能也是LSA的獨特之處，日後進一步之學術研究必須再加以探討。但目前我們初步認為可能的解釋有二：其一是可能有一些重要因子被遺漏了，另一是也有可能是時間未到；那一些未發生山崩的高潛感區有可能在下一個地震或豪雨事件時才會崩下來。

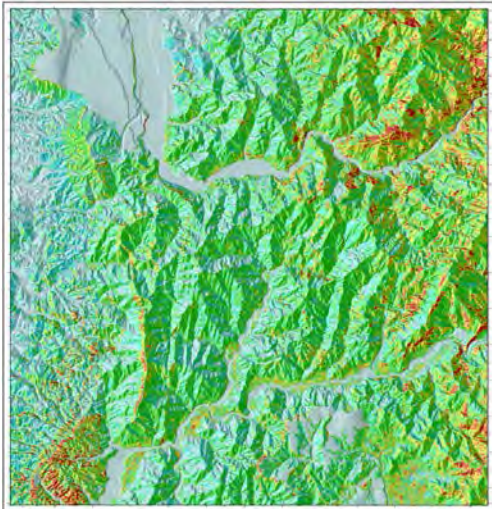
圖層套疊的結果，也有一些實際山崩係落於高潛感區以外。其原因複雜，除了資料誤差、山崩判釋錯誤及堆積區去除不全外，也有可能是局部地下水位較高、土體強度較低或岩體構造破壞，或其他未知原因所致。



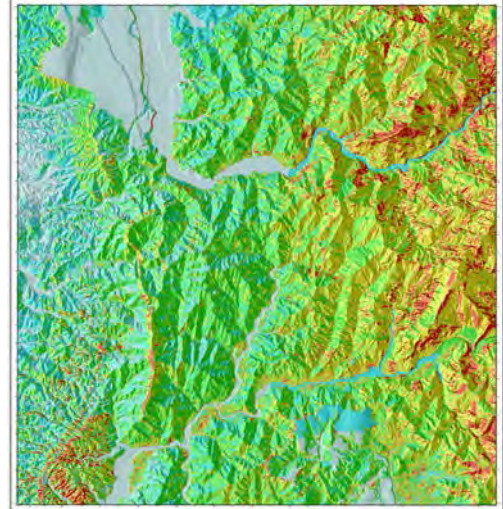
(a) 集集事件，不含促崩因子



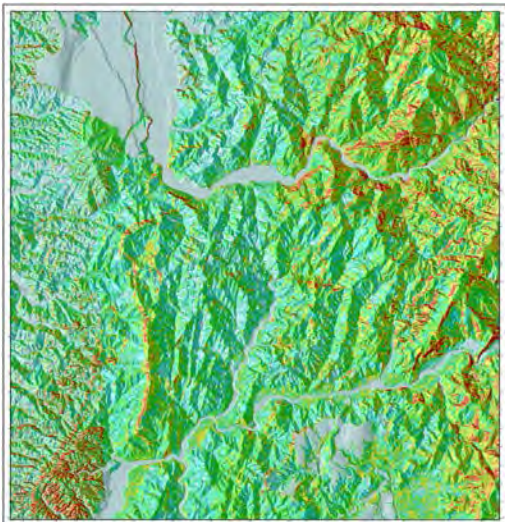
(b) 集集事件，含促崩因子



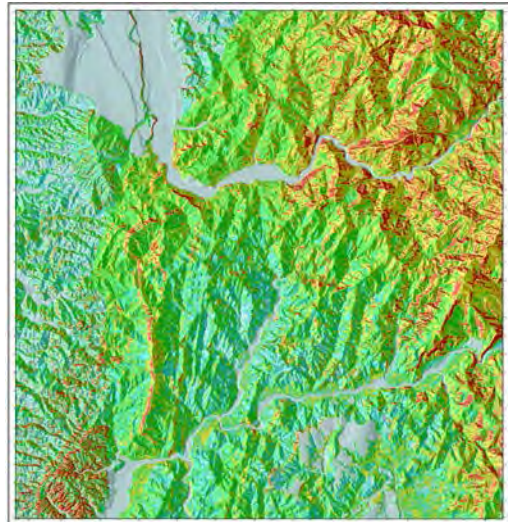
(c) 桃芝事件，不含促崩因子



(d) 桃芝事件，含促崩因子



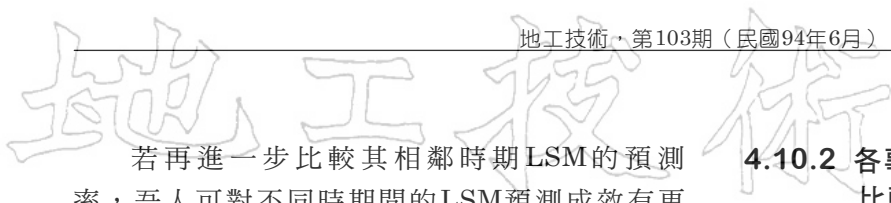
(e) 賀伯事件，不含促崩因子



(f) 賀伯事件，含促崩因子

■ 高潛感
 ■ 中高潛感
 ■ 中潛感
 ■ 低潛感
 ■ 穩定區

圖七 國姓地區山崩潛感圖

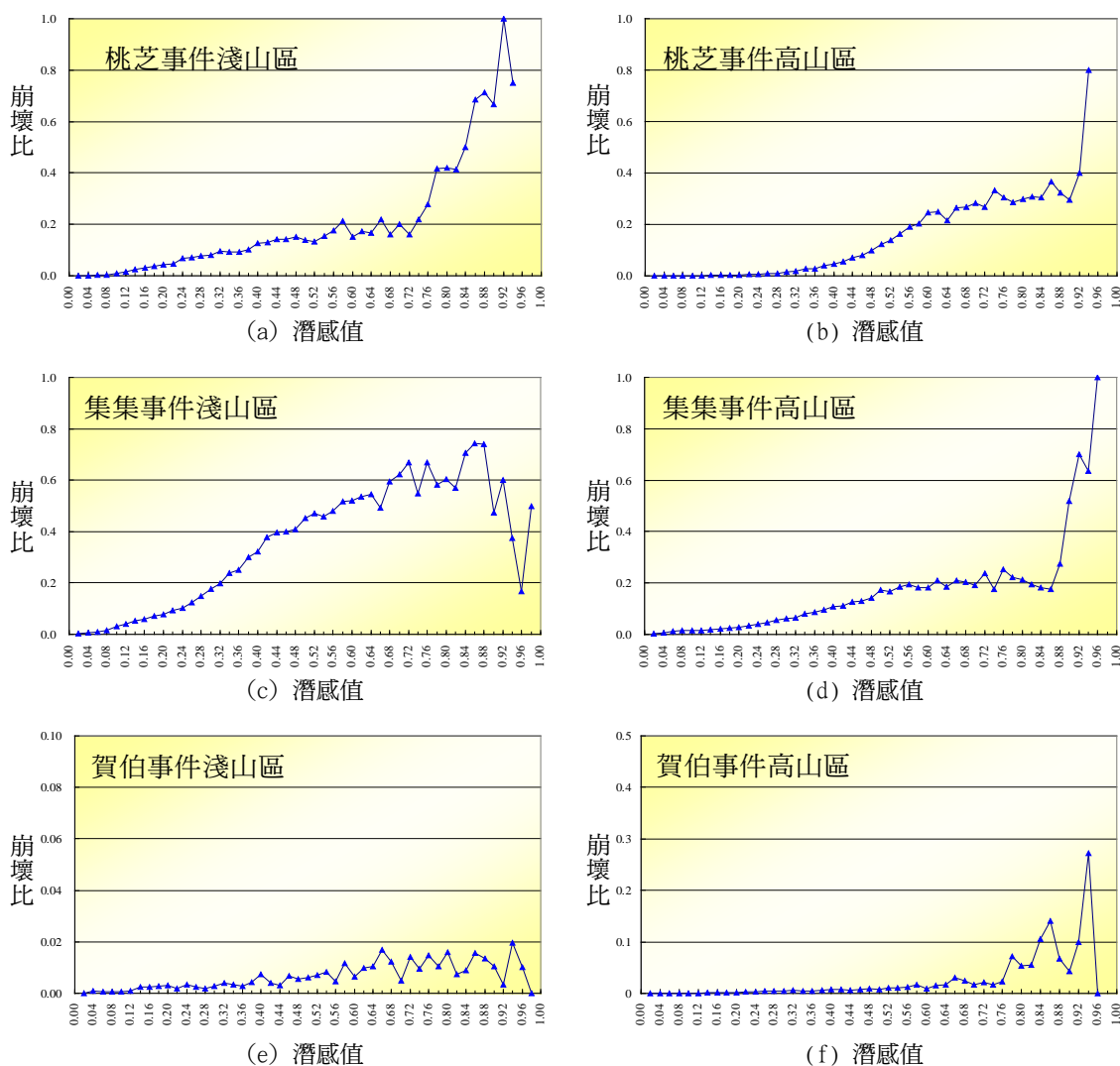


若再進一步比較其相鄰時期LSM的預測率，吾人可對不同時期間的LSM預測成效有更進一步的瞭解。若以集集地震後的LSM來預測桃芝颱風前的山崩，其山崩組與非山崩組正確率分別為：64.27% 及 83.56%。若以賀伯颱風後的LSM來預測集集地震前的山崩，其山崩組與非山崩組正確率分別為：38.85%及80.22%。這一些結果都在可接受的範圍，顯示各不同時期LSM間的一致性及其可預期性。

4.10.2 各事件山崩潛感與值與實際崩壞比之比較

各事件山崩潛感與值與實際崩壞比之關係如圖八所示。由此圖看來，各事件的崩壞比與LSI都有如預期的正相關。大體上，LSI大於判別指標後，崩壞比都有明顯上升的現象。尤其集集事件及桃芝事件上升現象更為明顯，且在達較高潛感值時崩壞比可達60%以上。相反的，賀伯事件的崩壞比雖有隨潛感值增加而上升的現象，但因山崩數量很少，故其崩壞比整個偏低。

崩壞比代表山崩發生的空間機率。故圖八也顯示了各事件中各LSI發生山崩的機率。



圖八 判別分析結果山崩潛感值與崩壞比之關係圖

4.10.3 不同事件間不含促崩因子之山崩潛感圖之比

為比較賀伯颱風、集集地震及桃芝颱風等三個不同事件不含促崩因子LSM之異同，我們進行了目視的比較以分辨三者整體分布形態的差別，也進行了定量的潛感值相減計算以確實瞭解各點的差異變化。由圖七之目視比較結果顯示，三張代表不同時期的LSM之整體分布模樣相似，高潛感出現的地點及總量皆相近。被預估容易發生山崩的地點，有以下的共同區域：

- (1) 九九峰及頭崙山一帶，頭崙山層礫岩段出現的地點；
- (2) 大橫屏山稜線附近，關刀山砂岩呈南北向分布的條帶；
- (3) 大甲溪左岸的新社河階崖，
- (4) 埔里大坪頂台地西北側台地崖，
- (5) 白冷層分布的高山地帶。

此一結果顯示了，三個不同事件不含促崩因子的LSM具有一定的相似性，局部的差異性可能是因為所代表的時間點不同所致。

4.10.4 小結

中央地質調查所進行中的LSA研究已初步建立了可適用於測繪全國LSM的架構。以事件為基礎的LSA可以充分掌握地震及豪雨等促崩因子，並能瞭解潛感值與崩壞比間的關係。所採用的判別分析方法理論明確且計算快速，具有可行性。

分析結果顯示，國姓地區於前述之事件坡度因子及促崩因子之權重參數一致地呈現較大值，明顯反應了此兩因子的重要性。事件前的NDVI因子在集集地震事件中預測山崩的效果不佳（有許多植被良好地區仍發生崩塌），但在桃芝及賀伯兩颱風事件中預測山崩的效果頗佳，權重參數也一致地呈現較大值，明顯反應了NDVI因子在颱風事件中的重要性。

各不同事件去除促崩因子的LSM具有相似性，可能可以反應一地區之基本特性，或一地區事件前的山崩潛感分佈。由於潛在因子中

NDVI值會隨著時間而變動，因此在選取代表一個區域的基本LSM時，可能須考慮最新的事件後能反應最新NDVI值的LSM。以本案例之國姓地區而言，可能可以將桃芝颱風事件不含促崩因子LSM之NDVI抽換成桃芝颱風事件後或更新的NDVI，成為國姓地區的基本LSM。

有了基本LSM後，當給予一個地震或颱風境況時，加入適當的促崩因子後，可模擬出該一事件的LSM，並可由崩壞比分布圖推論各個地點的山崩發生機率。

五、展望

5.1 資料品質上的改進

影響LSA結果最重要的資料有二：一是DTM的解析度與精度，另一是山崩目錄的正確性與精度 (Wills and McCrink, 2002)。國內現有40公尺網格DTM及6.25公尺解析度的衛星影像被用來繪製比例尺為五萬分之一的LSM，應可勉強接受。唯若DTM度能再提高，各項由其衍生計算而得的山崩潛感因子的品質也會隨之提高，尤其是在與地貌組織有關的因子上，更會有明顯的改善。衛星影像的解析度若能提升，影像組織會較清晰，對崩場地判釋的正確性也會有很大的幫助。

內政部進行中的全國五分之一地形圖重測將會在今(94)年內完成，屆時將會同時提供5公尺網格DTM。已於去(93)年初升空的福衛二號衛星目前已能提供空間解析度為2公尺的正射影像。這一些新資料將對新的LSA工作有很大的助益。福衛二號衛星在時間解析度也有大幅度的改進到1天，這將對監測山崩及各種相關的環境變遷很有幫助。

以往由不同單位測製的山崩目錄常常會有一些出入，若不論原始影像解析度上的差別，其原因不外乎人為判釋、轉繪及數化上的誤差。因此之故，山崩自動化判釋技術的提升，也會是此方面研究突破瓶頸的一項關鍵。

國內的地震資料目前已勉強夠用，但雨量資料卻明顯不足，以致在實際分析進行時無法

找到良好的崩壞比與雨量因子的關係式。為防災的目的，未來宜在山區增加雨量站的設置，以取得足夠的雨量資料供分析之用。

進一步研究也可考量選取適當試驗區，建立較高密度的雨量站網，觀測地形起伏地區的雨量變化，並用以分析雨量變化與坡向、坡度、坡高及地形標高等的關聯性，建立一地區的雨量變化關係式。有了這一些關係式之後，當可減輕對雨量站數量的需求，並可改善雨量因子的品質。

5.2 分析技術上的改進

在山崩圖層及相關因子圖層的精確性與精度獲得改善之時，另一方面應加強因子篩選及改進因子內部評分模式，並尋求更具物理意義的新因子或組合式因子。對於資料點太少的因子，吾人可以考慮使用組合式因子，例如：本文4.7.1節所介紹的愛氏震度與比高的組合即是一種組合式因子。山區雨量站太少，因此雨量因子急需組合式因子的採用。

因子內部評分方式基本上須按照崩壞比的分布趨勢給分，但若運用到較大範圍時，則須考慮評分標準的一致性。崩壞比分布的擬合模式須考量到各因子所代表的物理意義不同時，擬合模式也會有不同。未來需要針對個別因子，在各個不同的地形區/地質區或地域單元，及對不同的促崩事件，做崩壞比的分布特性分析，找出各個因子的崩壞比分布模式，因子內部評分才能改善。

現有的分析方法不限於判別分析，羅吉斯迴歸、類神經網路及無限邊坡法均應比較。新的分析方法可能可以考慮結合更多不同的人工智慧技術，包括：模糊理論、灰色理論、遺傳演算法及專家系統等。

採用無限邊坡法做區域性LSA時，全區各點的剪力強度、地下水位及滑動面深度都難以獲得。在地震誘發山崩問題上，可採總應力法分析而暫時免除地下水位之困擾，在假定深度下，剪力強度 c 、 ϕ 值的反算較易達成（廖啟雯及李錫堤，2004）。但在豪雨誘發山崩問題上，則無法避免地須考慮地下水位的變化，使問題更加複雜化（陳時祖，1996）。這一項水文參數因

子可嘗試由降雨量及入滲率等參數推算（陳憶璇，2002），或可能可以結合數種山崩潛感因子，藉由多變量迴歸而得。

5.3 山崩潛感分析與山崩發生機率之結合

近年來，國外的山崩潛感研究逐漸重視山崩發生機率的問題（Clerici et al., 2002; Lee and Min, 2002; Lee et al., 2001; Jibson et al., 2000; Dikau et al., 1996），希望建立預測山崩的機率模式。

一般的LSA結果皆可同時獲得研究區各點的LSI及每一山崩潛感等級的崩壞比。此一崩壞比即是該一山崩潛感等級發生山崩的機率。但是，因為以往有許多LSA混用不同發生時間的山崩目錄來做因子權重訓練，所以無法瞭解其崩壞比所代表的山崩發生機率是何種條件下的機率。

近年來，事件誘發山崩之LSA及促崩因子之妥善處理已受到相當的重視。因此基於事件誘發山崩之LSA結果就可能說明其崩壞比所代表的山崩發生機率是將來在相似促崩條件下發生山崩的機率。

未來在因子處理及潛感值計算過程中，尚須注意掌握資料的不確定性及分析結果的信賴區間（confidence interval）。

5.4 山崩發生機率與地震暨雨量機率之結合

由崩壞比建立的機率模式基本上是屬空間域的機率，適合用來預估一特定地震或暴雨事件發生時，某一地點發生山崩的機率；也就是適合用來做境況模擬（scenario）。若欲預估某一機率或再現期的地震或暴雨事件發生時，某一地點發生山崩的機率，我們可以先計算出該一機率或再現期的震度或雨量再求的該一點的山崩的機率。但是，當我們想知道某一點在未來若干年內發生山崩的機率，則我們必須聯合空間域的機率與時間域的機率，共同推求。

Liao and Lee (2004) 已開始嘗試結合機率式地震危害度分析與LSA，獲得初步的成果。未來宜進一步嘗試降雨頻率分析與LSA之結合。最後必須同時結合雨量暨震度之時間機率與山崩之空間機率，才能知道某一點在未來若

千年內發生山崩的機率，建立機率式山崩危害度分析模式 (probabilistic landslide hazard analysis) 及提供風險分析之用。

5.5 以山崩機率做為山崩潛感分級及製圖之依據

以往山崩潛感分級多以LSI為依據，但是許多LSA的結果其潛感值僅表示了相對的意義，不同的地區或不同的研究都無法直接比較。因之，若能以山崩發生的機率做為山崩潛感分級及製圖的依據，其物理意義就能明確，不同地區的分析結果或不同研究方法的分析結果就可能可以直接比較。

做為山崩潛感分級的山崩機率，初步可採用空間機率，即以崩壞比做依據；待機率式山崩危害度分析模式成熟後，則可合併空間機率與時間機率。前者是基於某一特定震度或與降雨量大小的山崩發生機率，後者是基於某一再現期震度或與降雨量大小的山崩發生機率。

5.6 更具有物理意義的綜合性因子的追求

林柏伸及李錫堤 (2003) 曾結合愛氏震度及比高，反應了地形的放大效應，並獲得頗佳的崩壞比分布。然而，目前在雨量因子的改善方面一直沒有突破。未來必須能更加掌握雨量因子，從降雨、入滲到地下水位抬升的作用過程，並能結合降雨強度、總降雨量、集水能力、NDVI、坡長、坡高、土壤與基岩類別等因子，形成一個新而實用的降雨促崩因子。

5.7 各種山崩類型的潛感分析

一般地震或豪雨所造成之山崩大多以淺層滑動及墜落型山崩為主 (李民等人, 2000; Baeza and Corominas, 2001; Borga et al., 1998; Harp and Jibson, 1995; Harp and Wilson 1996; Newmark, 1965)，故前人的LSA主要即針對此兩類型山崩做分析，其他類別的山崩一般在LSA之前即被剔除在山崩資料組外。以地震或豪雨做為促崩因子所進行的山崩潛感判別分析後，潛感值大於判別指標而被歸為高潛感區的地點，表示該點未來在遭遇同樣促崩事件時亦極可能發生山崩；山崩的滑動類別也極可能是淺層滑動及墜落的型式。

深層滑動及順向坡滑動等山崩類別，一般須要進行個案分析。例如：影響順向坡滑動最重要的因素是其坡腳狀況，其他因子相對的就沒有那麼重要。唯有進行個案分析，並且必須針對資料的不確定性進行蒙地卡羅模擬 (Monte Carlo simulation) 才能瞭解其未來發生崩塌的機率。LSA結果僅能提供此等類別的山崩做潛勢評估之用。例如：一個順向坡的坡腳如果出現高潛感值，表示其坡腳不穩定而有崩塌之虞；一個被劃為深層滑動的範圍如果出現的是較低的潛感值，則表示這已是一個漸趨於穩定的老崩場地。

土石流方面，近年來國內頗多潛勢 (potential) 研究進行 (林美聆, 1999; 林信亨及林美聆, 2002; 謝正倫與陳禮仁, 1993)。它也是結合多種因子的區域性研究，但此分析與LSA基本上是兩種獨立的工作。LSA僅評估一地區各點發生崩塌之可能性而不討論崩塌後的堆積作用，更不討論如何流動。不過，LSA結果仍可提供一土石流潛勢溪流源頭區在某一事件下可能發生崩塌的面積及推估之崩塌量，供後續土石流潛勢分析之用。

5.8 廣域性山崩潛感分析

地調所進行中的LSA研究及預定出版二萬五千分之一全國山崩潛感分幅圖的計畫，含蓋範圍較以往的區域性LSA更加廣大。一地區訓練的因子權重組合如何應用到它區，成為考慮之重點。

在目前建立的分析架構中，藉由地域單元的劃分及以事件為基礎之LSA，可能可以解決此一問題，在此稱之為廣域性山崩潛感分析 (LSA in a wide region or WLSA)。未來尚須在實際工作中做進一步之研究及成果評估，並對WLSA架構及分析流程做修飾。

六、結語

隨著經濟發展，近年來都市人口及產業漸漸由不敷使用之平地地區移往山坡地，使得原本就有山崩及土石流發生之山坡地，因人口之進駐而有人命或財產損失之災害發生。因此世

界各地之已開發國家及發展中國家無不開始重視山崩災害之評估與防治, 區域性山坡穩定分析技術也愈加重要。

在務實的防災利用考量上, 本文作者認為: (1)長程方面應加強區域性山坡穩定分析及廣域之LSA技術; (2)中程方面宜參考美國加州地質調查所, 根據現生暨歷史山崩及LSA結果之高潛感區, 劃設山崩危險區, 並立法規定開發者有義務針對工址進行較詳細的基地調查及邊坡穩定評估, 以確保開發案不受坡地災害之影響; (3)短程方面應儘快將各項調查分析結果提供防災單位, 做為山林整治及颱風期疏散計畫之參考。

致 謝

本研究是由經濟部中央地質調查所計畫支助, 並獲得地調所環境與工程地質組同仁在研究工作上及資料使用上的許多協助。研究計畫共同主持人潘國樑博士及林銘郎博士分挑重任, 並協助研究架構建立, 計畫顧問董家鈞博士, 審查委員王文能先生、江崇榮先生、林朝宗所長、林美聆博士、林慶偉博士、陳時祖博士、蔡光榮博士、張徽正先生及劉聰桂博士在研究期間提供許多寶貴的意見。地調所環境與工程地質組李錦發科長、艾克非先生及魏正岳先生協助山崩檢核, 應地所張瓊文、林彥享、林淑媛、呂玉苑、莊緯璉、張弼超、黃春銘及謝尚佑協助山崩數化、檢核及潛在因子處理, 應地所林柏伸、謝寶珊及台大土木所石秉根協助促崩因子處理, 在此一併申謝。

參考文獻

- 王士榮 (2002) 以位移法分析自然邊坡在地震力作用下的平面式破壞, 國立成功大學資源工程研究所碩士論文, 共98頁。
- 王淑慧 (2000) 類神經網路應用於道路邊坡落石坍方預測之可行性研究-以阿里山公路為例, 國立台北科技大學材料及資源工程研究所碩士論文, 共151頁。
- 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-以南橫公路梅山至埡口段為例, 國立成功大學資源工程研究所碩士論文, 共115頁。
- 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, 屏東科技大學土木工程研究所碩士論文, 共125頁。

- 王鑫 (1981) 地景法邊坡穩定性的分析研究, 工程環境會刊, 第2期, 第73-91頁。
- 朱聖心 (2001) 應用地理資訊系統製作地震及降雨所引致之山崩危險圖, 國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文, 共169頁。
- 吳少明 (1993) 環境地質調查與分析應用在都市坡地開發適宜性規劃—以甲仙地區為例, 國立成功大學地球科學研究所碩士論文, 共53頁。
- 吳佐川 (1993) 台灣地區崩塌地區特性之研究, 國立台灣大學森林研究所碩士論文, 共115頁。
- 吳振威 (2003) 公路邊坡保護工法之選擇模式研究—以南二高白河以南路段為例, 國立成功大學資源工程研究所碩士論文, 共144頁。
- 李民、張徽正、劉憲德、陳宏仁、高銘健 (2000) 陳有蘭流域山崩地質特性, 台灣山崩災害專輯(一), 經濟部中央地質調查所, 第47-68頁。
- 李馨慈 (2004) 應用累積位移法於地震引起之山崩潛勢分析, 國立成功大學資源工程研究所碩士論文, 共103頁。
- 林中興 (1994) 山坡穩定性評估之因子分析及地理資訊系統之應用, 國立中央大學應用地質研究所碩士論文, 共87頁。
- 林永祥 (2004) 環境地質因子對國道邊坡穩定之影響-以國道三號白河至竹山路段為例, 國立成功大學資源工程研究所碩士論文, 共122頁。
- 林柏伸、李錫堤 (2003) 山崩潛感分析中Arias Intensity的運用, 第十屆台灣地區地球物理研討會暨2003年中國地球物理學會年會論文集, 第91-96頁。
- 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, 屏東科技大學土木工程研究所碩士論文, 共155頁。
- 林信亨、林美聆 (2002) 地理資訊系統及類神經網路應用於土石流危險溪流危險度判定, 地工技術, 90期, 第73-84頁。
- 林彥享 (2003) 以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, 共81頁。
- 林書毅 (1999) 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, 共92頁。
- 林淑媛、李錫堤、廖啟雯、林彥享 (2002) 均質區處理及其在山崩統計分析之應用, 第九屆台灣地區地球物理研討會暨2002年中國地球物理學會年會論文集, 第337-340頁。
- 林朝榮 (1957) 台灣地形, 台灣省文獻委員會, 共424頁。
- 周晏勤 (2000) 以遙感探測方法探討南橫公路邊坡破壞的重要因子, 國立成功大學資源工程研究所, 共124頁。
- 徐鐵良 (1993) 地質與工程, 中國工程師學會, 第1-26頁。
- 張石角 (1980) 都市山坡地利用潛力調查與製圖—方法論與實例, 中華水土保持學報, 第11卷, 第1期, 第13-24頁。
- 張石角 (1995) 台灣東部之環境地質分區與崩塌類型, 工程環境會刊, 第14期, 59-85頁。
- 許琦 (1989) 模糊集理論在山崩潛感性分析之應用, 成功大學土木工程研究所, 第三屆大地工程學術研究討論會宣讀論文, 第23-33頁。

- 陳正祥 (1960) 臺灣地誌，數明產業地理研究所研究報告，第90號，第768-770頁。
- 陳永寬、賴晃宇 (1994) 數值地形模型應用於潛在崩塌地之預測，臺大實驗林研究報告，第8號，第47-64頁。
- 陳志豪 (2002) 變質岩公路邊坡之破壞潛勢分析-以南橫公路埡口至新武段為例，國立成功大學資源工程研究所碩士論文，共124頁。
- 陳振華、潘國樑 (1985) 臺北市山坡地住宅區環境地質調查研究，工研院能源與礦業研究所報告，第229號，共385頁。
- 陳時祖 (1996) 雨量與邊坡崩塌的關係，地工技術，57期，第78-80頁。
- 陳凱榮 (2000) 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，共120頁。
- 陳嬋璇 (2002) 溪頭地區山崩潛感圖製作研究，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，共141頁。
- 游中榮 (1995) 應用地理資訊系統於北橫地區山崩潛感之研究，國立中央大學應用地質研究所碩士論文，共192頁。
- 黃士昌 (1998) 高雄旗山與楠梓地區公路邊坡之特性調查與崩滑破壞潛感分析，國立成功大學土木工程研究所碩士論文，共186頁。
- 楊智堯 (1999) 類神經網路於邊坡破壞潛能分析之應用研究，國立成功大學土木工程研究所碩士論文，共110頁。
- 溫郁菁 (2003) 以位移法分析自然邊坡在地震力作用下的曲面形破壞，國立成功大學資源工程研究所碩士論文，共134頁。
- 廖啟雯、李錫堤 (2004) 位移法地震誘發山崩評估模式參數之探討，2004年第十屆台灣地區地球物理學術研討會論文摘要集，第78頁。
- 鄭元振 (1992) 地理資訊系統在區域邊坡穩定分析之應用-中橫公路天祥至太魯閣段，國立成功大學礦冶及材料科學研究所碩士論文，共87頁。
- 鄭傑銘 (2003) 應用 GIS 進行豪雨及地震引致山崩之潛感性分析，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，共136頁。
- 謝豐隆 (2000) 落石邊坡危險度與危害度分級與預報，國立交通大學土木工程學系碩士論文，共280頁。
- 謝獻仁 (1998) 類神經網路於落石坡危險度評估，國立交通大學土木工程研究所碩士論文，共147頁。
- 簡李濱 (1992) 應用地理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研究所碩士論文，共114頁。
- 藍世欽 (2000) 工程地質因子對道路邊坡穩定性之影響-以南橫公路甲仙至梅山段，國立成功大學資源工程研究所碩士論文，共128頁。
- ARIAS, A. (1970) A measure of earthquake intensity, in Seismic Design for Nuclear Power Plants, R.J. Hansen (Editor), MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 438-483.
- BAEZA, C. AND COROMINAS, J. (2001) Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques, Earth Surface Processes and Landforms, 26, 1251-1263
- BORGA, M., FONTANA G.D., ROS, D.D. AND MARCHI, L. (1998) Shallow landslide hazard assessment using a physically based model and digital elevation data, Journal of Environmental Geology, 35(2-3), 81-88.
- BRABB, E.E., PAMPEYAN, E.H. AND BONILLA, M.G. (1972) Landslide Susceptibility in San Mateo County, California. U.S. Geol. Surv., Misc. Field Studies Map, MF - 360.
- CARRARA, A. AND MERENDA, L. (1974) Methodology for an inventory of slope instability events in Calabria (southern Italy), Geologia Applicata e Idrogeologica, 9, 237-255.
- CARRARA, A. (1983) Multivariate Models for Landslide Hazard Evaluation, Mathematical Geology, 15(3), 403-427.
- CARRARA, A. (1988) Landslide Hazard Mapping by Statistical Methods: A "Black Box" Approach. In Workshop on Natural Disasters in European Mediterranean Countries, Perugia, Italy, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Perugia, 205-224.
- CARRARA, A., CARDINALI, M., DETTI, R. AND GUZZETTI, F. (1992) Uncertainty in Assessing Landslide Hazard and Risk, ITC Journal, 2, 172-183.
- CARRARA, A., CARDINALI, M., DETTI, R., GUZZETTI, F., PASQUI, V. AND REICHENBACH, P. (1990) Geographical Information Systems and Multivariate Models in Landslide Hazard Evaluation. In ALPS 90 Alpine Landslide Practical Seminar, Sixth International Conference and Field Workshop on Landslides, Aug. 31-Sept.12, Milan, Italy, Universita degli Studi de Milano, 17-28.
- CARRARA, A., CARDINALI, M., DETTI, R., GUZZETTI, F., PASQUI, V. AND REICHENBACH, P. (1991) GIS Techniques and Statistical Models in Evaluating Landslide Hazard, Earth Surface Processes and Landforms, 16(5), 427-445.
- CARRARA, A., GUZZETTI, F., CARDINALI, M. AND REICHENBACH, P. (1999) Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard, Natural Hazards 20, 117-135.
- CLERICI, A., PEREGO, S., TELLINI, C. AND VESCOVI, P. (2002) A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method, Geomorphology, 48, 349-364.
- DIKAU, R., CAVALLIN, A. AND JAEGER, S. (1996) Databases and GIS for landslide research in Europe, Geomorphology, 15, 227-239.
- FUKUOKA, H., SASSA, K., AND SCARASCIA-MUGNOZZA, G. (1997) Distribution of landslides triggered by the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake and long runout mechanism of the Takarazuka golf course landslide, J. phys. Earth., 83-90.
- GAO, J. AND LO, C.P. (1991) GIS Modeling of Influence of Topography and Morphology on Landslide Occurrence in Nelson County, Virginia: GIS/LIS '91 Proceedings, 1, 954-963.
- GUZZETTI, F., CARRARA, A., CARDINALI, M. AND

- REICHENBACH, P. (1999) Landslide Hazard Evaluation: A Review of Current Techniques and Their Application in a Multi-Scale Study, Central Italy, *Geomorphology*, 31, 181-216.
- HANSEN, A. (1984) Landslide Hazard Analysis. In *Slope Instability* (D. Brunsten and D.B. Prior, eds.), John Wiley and Sons, New York, 523-602.
- HARP, E.L. AND JIBSON, R.W. (1996) Landslides triggered by the 1994 Northridge, California, Earthquake, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 86(1b), 319-332.
- HARP, E.L. AND WILSON, R.C. (1995) Shaking Intensity Thresholds for Rock Falls and Slides: Evidence from 1987 Whittier Narrows and Superstition Hills Earthquake Strong-Motion Records, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 85(6), 1739-1757.
- HEARN, G. J. (1995) Landslide and erosion hazard mapping at Ok Tedi Cooper Mine, The Quarterly Journal of Engineering Geology, 28, 47-60.
- IVES, J.D., AND MESSERI, B. (1981) Mountain Hazards Mapping in Nepal: Introduction to an Applied Mountain Research Project, *Mountain Research and Development*, 1(3-4), 223-230.
- IVES, J.D. AND BOVIS, M.J. (1978) Natural hazards maps for land-use planning, San Juan Mountains, Colorado, U.S.A, *Arctic and Alpine Research*, 10(2), 185-212.
- JIBSON, R.W., HARP, E.L. AND MICHAEL, J.A. (1998) A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps: an example from the Los Angeles, California Area, *USGS Open-File Rep.* 98-113.
- JIBSON, R.W., HARP, E.L. AND MICHAEL, J.A. (2000) A Method for Producing Digital Probabilistic Seismic Landslide Hazard Maps, *Engineering Geology*, 58, 271-289
- JONES, F.O., EMBODY, D.R. AND PETERSON, W.C. (1961) Landslides along the Columbia River Valley, Northeastern Washington, Professional Paper 367, U.S. Geological Survey, Reston, VA., 98p.
- KEEFER, D.K. (2000) Statistical Analysis of an Earthquake-Induced Landslide Distribution - the 1989 Loma Prieta, California Event, *Engineering Geology*, 58, 231-249.
- KEEFER, D.K. (1984) Rock avalanches caused by earthquakes: source characteristics, *Science*, 223, 1288-1290
- KHAZAI, B., AND SITAR, N. (2000) Assessment of seismic slope stability using GIS modeling, *Geographic Information Sciences*, 5(2), 121-128.
- KIENHOLZ, H. (1978) Maps of Geomorphology and Natural Hazards of Grindelwald, Switzerland, scale 1:10,000. *Arctic and Alpine Research*, 10, 169-184.
- KIENHOLZ, H., MANI, P. AND KLAY, M. (1988) Rigi Nordlene: Beurteilung der Naturgefahren und Waldbauliche Prioritätenfestlegung, In *Proc., Interpraevent 1988, Graz, Austria*, 1, 161-174.
- KOBASHI, S., AND SUZUKI, M. (1988) Hazard Index for the Judgement of Slope Stability in the Rokko Mountain Region, In *Proc., Interpraevent 1988, Graz, Austria*, 1, 223-233.
- KOUKIS, G. AND ZIOURKAS, C. (1991) Slope Instability Phenomena in Greece: A Statistical Analysis, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, 47-60.
- LEE, C.T., HUANG, C.C., LEE, C.F., PAN, K.L., LIN, M.L., LIAO, C.W., LIN, P.S., LIN, Y.S., CHANG, C.W. (2004) Landslide Susceptibility Analyses Based on Three Different Triggering Events and Result Comparison, *Proceeding of International Symposium on Landslide and Debris Flow Hazard Assessment*, 6-1~6-18.
- LEE, S. AND MIN, K. (2001) Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea, *Environmental Geology*, 40, 1095-1113.
- LEE, S., CHANG, B., CHOI, W. AND SHIN, E. (2001) Regional susceptibility, possibility and risk analyses of landslide in Ulsan metropolitan city, Korea, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*.
- LEE, S., CHOI, J. AND MIN, K. (2002) Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability model, *Environmental Geology (Berlin)*, 43, 120-131.
- LEE, S., RYU, J., MIN, K., CHOI, W. AND WON, J. (2000) Development and application of landslide susceptibility analysis techniques using geographic information system (GIS), *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*.
- LIAO, C.W. AND LEE, C.T. (2004) Probabilistic Hazard Analysis of Earthquake-Induced Landslides - an Example from KouHsing, Taiwan, *International Symposium on Landslide and Debris Flow Hazard Assessment*, 7-1~7-9.
- LUZI, L. AND PERGALANI, F. (2000) A correlation between slope failures and accelerometric parameters: The 26 September 1997 earthquake (Umbria - Marche, Italy), *Earthquake Engineering*, 20, 301-313.
- MALGOT, J., AND MAHR, T. (1979) Engineering Geological Mapping of the West Carpathian Landslide Areas, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 19, 116-121.
- MENEROUD, J.P. AND CALVINO, A. (1976) Carte ZERMOS, Zones exposees a des Risques lies aux Mouvements du Sol et du Sous-Sol a 1:25,000, Region de la Moyenne Vesubie (Alpes-Maritimes), Bureau de Recherches Geologiques et Minieres, Orleans, France, 11p.
- MILES, S.B. AND HO, C.L. (1999) Rigorous landslide hazard zonation using Newmark's method and stochastic ground motion simulation, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 18, 305-323.
- NEULAND, H. (1976) A Prediction Model of Landslides, *Catena*, 3, 215-230.
- NEWMARK, N.M. (1965) Effects of Earthquakes on Dams and Embankments, *Geotechnique*, 15, 139-160.
- PEARCE, A. J. AND O'LOUGHLIN, C. L. (1985) Landsliding during a M7.7 earthquake: influence of geology and topography, *Geology*, 13, 855-858.

- POLEMIC, M. AND SDAO, F. (1999) The role of rainfall in the landslide hazard: the case of the Avigliano urban area (Southern Apennines, Italy), *Eng. Geol.*, 53, 297-309.
- REFICE, A. AND CAPOLONGO, D. (2002) Probabilistic modeling of uncertainties in earthquake-induced landslide hazard assessment, *Computer & Geosciences*, 28, 735-749.
- RODRIGUEZ, C.E. (1999) Earthquake-induced landslides: 1980-1997, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 18, 352-346.
- RUPKE, J., CAMMERAAT, E., SEIJMONSBERGEN, A.C. AND VAN WESTEN, C. J. (1988) Engineering Geomorphology of the Widentobel Catchment, Appenzell and Sankt Gallen, Switzerland: A Geomorphological Inventory System Applied to Geotechnical Appraisal of Slope Stability, *Engineering Geology*, 26, 33-68.
- SIDLE, R.C., PEARCE, A.J. AND O'LOUGHLIN, C.L. (1985) Hillslope stability and land use, *Water Resources Monograph*, 11, 140.
- STEVENSON, P. C. (1977) An Empirical Method for the Evaluation of Relative Landslide Risk, *Int. Ass. Eng.Geol. Bull.*, 16, 69-72.
- TIBALDI, A., FERRARI, L. AND PASQUARE, G. (1995) Landslides Triggered by Earthquakes and Their Relations with Fault and Mountain Slope Geometry, *Geomorphology*, 11, 215-226.
- VARNES, D.J. (1984) *Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice*, UNESCO Press, Paris, 63p.
- WILLS, C.J. AND MCCRINK, T.T., (2002) Comparing landslide inventories: The map depends on the method, *Environmental and Engineering Geoscience*, 8(4), 279-293.
- WILSON, R.C. AND KEEFER, D.K (1983) Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979 Coyote Lake, California, *Earthquake, Bull. Seis. Soc. Am.*, 73(3), 863-877.
- YIN K.L. AND YAN, T.Z. (1988) Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks, *Proceedings of the International Symposium on Landslides*, 5, 1269-1272.