

崩塌流體化地形之判釋分析模式

邱惠靖^[1*] 陳天健^[2] 楊婉君^[1]

摘要 台灣颱風豪雨頻繁，崩塌或土石流災害發生機率甚高。流體化崩塌也稱之為坡面型土石流，於土石流災害中，邊坡流體化崩塌常出現在聚落周邊之山坡，其地形與坡面崩塌之地形相近不易區分，居民常居於危地而不自知，因此坡面型土石流對山區居民安全影響甚大，本文旨在發展坡面型土石流之判釋分析模式，此一成果能判釋坡面型土石流較危險的坡面地區，有效協助災害防治及預警工作。本文採用莫拉克颱風高屏流域之坡面型土石流與未發生土石流之坡面資料各 30 處，萃取判釋率最高之特性因子，進行坡面型土石流區別分析。研究結果以形狀係數比、坡面平均坡度比、有效集水指標、發生區平均寬度、流動段平均坡度、流動段深寬比、崩塌潛感面積及淺層崩塌預測模式百分比等 8 項為因子時，可得最佳正判率，整體正判率達 90%。再以不同組資料進行驗證時，正判率亦可達 85%，顯示此一模式為可以實用之坡面型土石流判釋模式。

關鍵字:坡面型土石流、SHALSTAB、判釋模式

Recognition Model of Fluidized Landslide Slope

Hui-Ching Chiu^[1*] Tien-Chien Chen^[2] Wang-Chun Yang^[1]

ABSTRACT Caused by Typhoons and monsoon rains frequently, Taiwan is in a high precipitation environment. The probability of slope disaster and mudslides rises year by year. Fluidized landslides often occur and damage the heritage in mountain area causing the serious impact to residents. Fluidized landslide also called Hillslope Debris Flows (HDF) and it's difficult to distinguish with terrain slope landslide from topography. This study proposals a HDF recognition model. 30 HDF and 30 non-HDF induced by Typhoon Morakot in Kaoping River are employed to develop the model. 20 factors of HDFs relating to topography, hydrology, and landslide susceptibility in the watershed were selected. The result of the discriminate analysis shows the classification rate reached 90% in which the catchment indicator, form factor ratio, q/t area percentage of prediction landslide, landslide susceptibility area, average width of effective watershed, hillslope aspect ratio of flow, average slope of flow, and hillslope average slope ratio are the most effective indexes of the model. It is expected that the HDF recognition mode will improve the slope disaster prevention and early warning work to heritages..

Key Words : Hillslope debris flow, SHALSTAB Model, Recognition Model

壹、前言

台灣位處歐亞板塊與菲律賓板塊之交界處，板塊運動作用下，斷層、摺皺等地質構造發達，地震頻繁。同時台灣四面環海，颱風豪雨頻繁為高雨量的環境，河流下切作用旺盛造成陡峭且短而湍急的河川，山坡地土地利用的高度開發，以致坡地災害與土石流發生機率逐年上升；於諸多土石流災害中，流體化崩塌也稱之為坡面型土石流，於土石流災害中，邊坡流體化崩塌（Fluidized landslide）常出現在聚落周邊之山坡，其地形與坡面崩塌之地形相近不易區分，居民常居於危地而不自知，因此坡面型土石流對山區居民安全影響甚大。民國 98 年莫拉克颱風侵襲台灣，造成台灣中南部山區許多土砂災害，尤其高屏流域沿岸坡面出現坡面型土石流，造成許多民眾傷亡。

坡面型土石流比起一般常見之溪流型土石流規模小，地形上不一定有明顯溪溝與坡面崩塌之地形相近不易區分，發生時因坡面坡度陡峭造成流動速度較快，且流動距離短，常直接衝擊下方聚落或民宅，相對

[1]屏東科技大學水土保持系研究生(*通訊作者 zero7961@gmail.com)

Master, Department of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung 912, Taiwan. (* Corresponding Author. E-mail: zero7961@gmail.com)

[2]屏東科技大學水土保持系副教授

Associate Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung 912, Taiwan.

可預警時間也較短，因此若能事前掌握坡面型土石流潛勢較高之坡面地區，將有助於土石流災害防治與預警。

近年來國內外學者對於坡面型土石流(Hillslope debris flow, HDF)之研究，較集中於地形、產狀、特性等描述。坡面型土石流與一般坡面崩塌之判釋分析模式則較少學者進行研究。本文以高屏溪流域受莫拉克風災後所觸發之坡面型土石流為研究對象，旨在發展坡面型土石流之判釋分析模式，此一成果能判釋坡面型土石流較危險的坡面地區，以供山區聚落附近之坡面形成坡面型土石流風險評估之參酌。

貳、研究區域概述

高屏溪流域包括旗山溪、隘寮溪、高屏溪、荖濃溪等，主流為荖濃溪，全長 171 公里為全台第二長之河川，流域面積為 3,257 平方公里。高屏溪流域內平均年雨量達 3,046 毫米，每年 5 至 9 月為此流域之降雨季節，平均年逕流量約 84.5 億立方公尺，平均年輸砂量每平方公里流域面積約 530 噸。

地層與地質構造亦呈北北東—南南西走向延伸，流域內出露之地層可以土壠灣斷層以及潮州斷層的連線概略劃分為兩大區塊，斷層線以東出露地層以脊樑山脈帶之變質岩與亞變質岩地層為主，包含大南澳片岩、十八重溪層(板岩)、達見砂岩、畢祿山層(板岩及硬砂岩)、佳陽層(板岩)及廬山層(板岩)；斷層以西出露地層則屬西部麓山帶之沈積岩地層為主，包括南港層、南莊層、桂竹林層、古亭坑層與頭嵙山層之相當地層，岩性以砂岩、粉砂岩、頁岩與泥岩為主。

參、判釋分析模式因子

一、圖資資料庫

研究資料庫除了野外調查資料外，同時為了確認土石流類型、產狀、災害範圍等，亦配合基本圖資如航空照片與衛星影像(配合 Google Earth 套疊圖層使用)等進行檢核，並能於地理資訊系統平台產製相關地文因子，以下為本研究使用之相關圖資，包括：野外地形及產狀調查記錄、內政部第三版 1/25000 地形圖、流域地質圖幅、衛星影像及航空照片、莫拉克颱風崩塌圖層、以及數值高程模型等。

二、分析因子資料庫建置方法

本研究使用之坡面型土石流資料，為高屏溪流域莫拉克颱風災後野外調查(王振宇, 2012)，確認具有土石流堆積特性之坡面型土石流點位。於圈畫集水區前，透過莫拉克風災前後之航照，再次確認災前無明顯崩塌與流路且植被復育良好，災後符合王振宇(2012)提出之坡面型土石流 12 項判釋準則，篩選出 30 筆坡面型土石流資料並圈畫集水區，坡面型土石流以 HDF 表示。

為了建置未發生土石流之坡面以提供判別分析使用，本研究透過 ArcHydro (Maidment, 2002)，利用災前 DEM 產生邊坡單元，並隨機圈選於坡面型土石流周圍，自然條件相近之坡面，並由莫拉克颱風災後航照檢視，確認無土石流流動、堆積等現象，圈選出共計 30 筆地質條件相近之未發生土石流坡面集水區，未發生土石流之坡面以 NDF 表示，點位分布如圖 1。

另為模式驗證所需，亦選高屏溪流域坡面型土石流與未發生土石流之坡面集水區各 10 筆資料，驗核判釋分析模式之效力。

(一)特性因子之建置

本研究參酌相關學者之研究，分別考慮地貌、集水區、水文等特性，挑選 20 項出較適用於坡面型土石流之地文因子，因子如表 1 所示。囿於篇幅以下僅說明數項因子。

表 1 區別分析之各因子使用代號表

特性因子	使用代號	特性因子	使用代號
集水區面積	WA	有效集水指標	EWAI
發生區凹陷程度	HARO	流動段深寬比	HARF
隘口高程比	DHPR	流動段高程差	DHF
發生區起伏比	TRO	流動段起伏比	TRF
發生區形狀係數	FO	形狀係數比	FR

集水區平均寬度	W	發生區平均寬度	WO
流動段平均坡度	ASF	流動段長度	LF
崩塌潛感面積	LSA	崩塌潛感面積比	RLSA
集水區坡面平均坡度	HASW	坡面平均坡度比	HASR
發生區坡面平均坡度	HASO	q/t 百分比	QT

1. 土石流發生區面積(EWA)

本研究之土石流發生區面積，為一坡面區域其上坡面至下坡面間，地形開始束縮成一流路之隘口以上之有效集水面積，於此稱之為有效集水面積。利用 GIS(地理資訊系統)配合災前航照、等高線及數值高程模型(DEM)等圖資，由束縮地形上設定隘口，並圈畫隘口以上之集水區作為土石流發生區，如圖 2。進一步探討 HDF 與 NDF 之集水區面積、發生區面積及有效集水指標分布情形，結果以兩個因子之相互關係呈現，結果如圖 3 及圖 4。其中圖 3 可看出兩種類型之發生區面積大小無明顯差異，而集水區面積分布稍為分散，且 HDF 集水區面積較 NDF 大，因此，以集水區面積再與有效集水指標比較(圖 4)，發現有效集水指標區分結果較為良好，於 0.4 有一較明顯界線(HDF 有效集水指標值偏小，NDF 有效集水指標值偏大)，因此將集水區面積與有效集水指標選為區別因子之一。

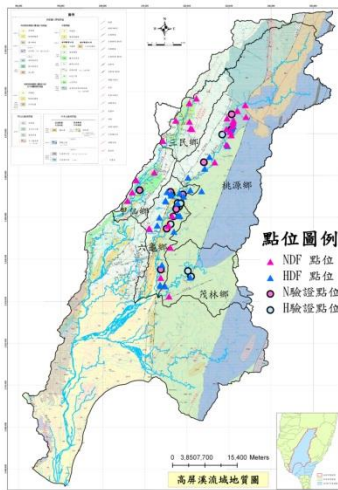


圖 1 點位分布圖

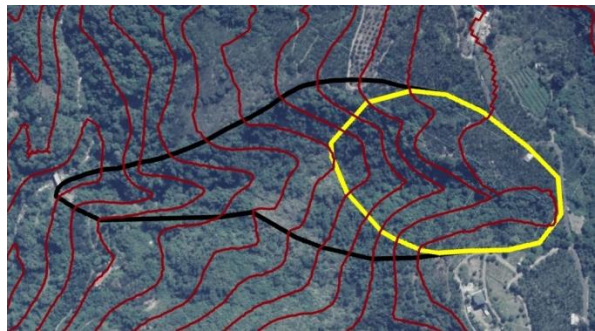


圖 2 隘口與發生區選取示意圖

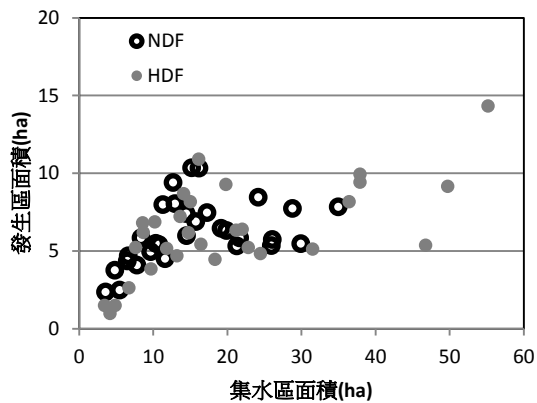


圖 3 集水區面積與發生區面積分布情況

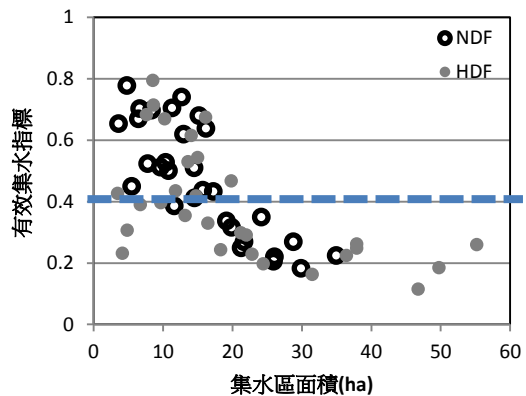


圖 4 集水區面積與有效集水指標分布情況

2. 隘口高程比

以隘口高程差除以集水區高程差，可得隘口高程比，隘口高程比可間接表示發生區位於坡面縱剖面之區位，值越大則表示隘口接近坡趾，為大型崩塌，流動區短，較不易形成土石流，反之，其值越小，隘口位於坡腹至坡頂間，其流動距離長，較易形成土石流。進一步探討 HDF 與 NDF 之流動段高程差與集水區高程差及隘口高程比分布情形，結果以兩個因子之相互關係呈現，結果如圖 5 及圖 6。其中圖 5 可看出 NDF 分布較為集中，而 HDF 分布較為分散，兩種類型之流動段高程差與集水區高程差呈現正比，有一線性關係，

其中 HDF 之流動段高程差分布稍為分散，且 HDF 流動段高程差較 NDF 大，因此，以流動段高程差再與隘口高程比進行比較。圖 6 發現隘口高程比區分結果較為良好，於 0.5 有一較明顯界線，HDF 之隘口高程比值分布偏小，而 NDF 之隘口高程比值分布偏大，表示 NDF 之發生區分布多位於坡腹至坡趾處，而 HDF 則多位於坡腹至坡頂處，因此將流動段高程差與隘口高程比選為區別因子之一。

3. 流動段長度(L_f')

在地理資訊系統(GIS)中所直接測繪之河道長度是應用於正射投影觀念下產製而成，依照其工具所測繪之長度為水平距離(L)，但其真實長度為斜距(L_f')，將 L_f 除以 $\cos \theta_f$ 可求其較真實之流動段長度。其中 L_f' 為流動段長度之斜距(m)， L_f 為流動段長度之水平投影距離(m)， θ_f 為流動段之平均坡度($^\circ$)。

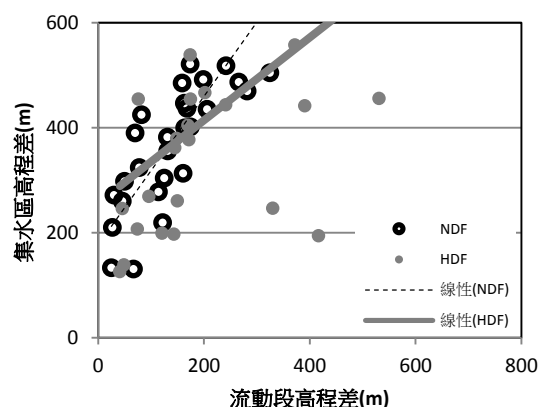


圖 5 流動段高程差與集水區高程差分布情況

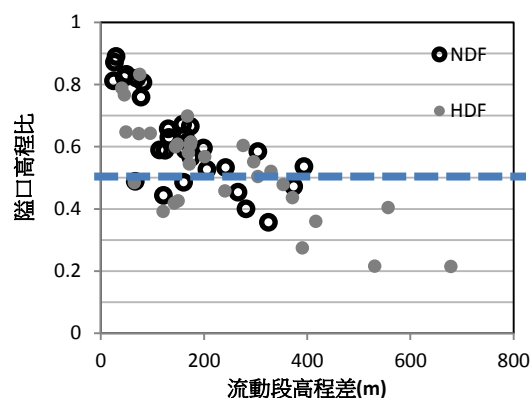


圖 6 流動段高程差與隘口高程比分布情況

4. 集水區平均寬度(W)

利用地理資訊系統(GIS)產製之集水區面積(WA)與集水區之全長(Lw')後，以集水區面積(WA)除以集水區之全長(Lw')即計算集水區平均寬度。發生區平均寬度(W_o)產製亦同於上述方法，發生區為土石流發生之材料來源，其形狀因子更能表示該區土石材料產生情形。

5. 坡面深寬比(HAR)

為了更明顯看出整體集水區橫剖面變化情形，本研究將集水區分為兩個區位，分別產製發生區深寬比(HAR_o)及流動段深寬比(HAR_f)，進一步探討整體集水區橫剖面變化與地形演化情形。根據前述日本河川局砂防部溪谷地形之判釋方法，利用兩萬五千分之一地形圖，求取集水區、發生區及流動段之最大寬度作為坡面寬 a ，該平面之深度為坡面深 b ，以坡面深 b 除以坡面寬 a 計算深寬比。進一步探討 HDF 與 NDF 之流動段深寬比、隘口深寬比及發生區深寬比分布情形，結果以兩個因子之相互關係呈現，結果如圖 7 及圖 8。Steven(1987)提出，坡面上因地形內凹，崩積屑積聚，導致在暴雨期間淺層地下逕流集中於發生部之凹陷，比路邊斜坡更容易發生山崩，並構成土石流，發生部之凹陷是造成土石流的必要的地貌特徵，圖 7 中可看出 NDF 之隘口深寬比與發生區深寬比略小於 HDF，多分布於圖 7 左下角，而 HDF 分布較為分散且略大於 NDF，此結果與 Steven(1987)相符；將兩種類型(HDF、NDF)之隘口深寬比與發生區深寬比資料取線性來看，HDF 之隘口與發生區深寬比成正比例關係，而 NDF 為直線，由此可得知其發生區凹陷程度不隨隘口深寬比改變。因前述學者曾提出坡面型土石流之發生區與流動段不易區別，也就是隘口連接處不明顯，因此，特將隘口之深寬比與流動段進行比較，結果如圖 8，可看到 HDF 之分布較為分散，NDF 較為集中，兩者之線性關係皆呈正比，且斜率大致相同，HDF 值稍大於 NDF。本研究以上述三種深寬比兩兩相除，求其比值，若比值趨近於 1，表示地形上無明顯變化，反之則地形有明顯變化，藉以探討地形演化之情形。

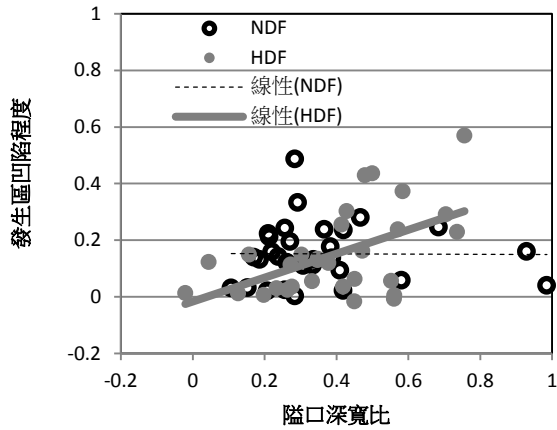


圖 7 隘口深寬比與發生區深寬比分布情況

以流動段與發生區之深寬比相除，若其值趨近於 1，表示發生區至流動段於地形上無明顯變化，反之則地形有明顯變化。其關係式如下：

$$HAR_{fo} = \frac{HAR_f}{HAR_o} \quad (式 1)$$

結果如圖 9 顯示，發現 NDF 地形變化較不明顯，而 HDF 的地形變化較為明顯， HAR_{fo} 值為 10 時有一較明顯界線，表示 HDF 集水區由上坡面至下坡面有明顯下切情形。

以隘口與發生區之深寬比及隘口與流動段之深寬比相除，若其值趨近於 1，表示上坡面至下坡面於地形上無明顯變化，反之，值越大則地形變化明顯。其關係式如下：

$$HAR_{po} = \frac{HAR_p}{HAR_o} \quad (式 2)$$

$$HAR_{fp} = \frac{HAR_f}{HAR_p} \quad (式 3)$$

結果如圖 10 顯示，集水區由發生區發展至隘口時 NDF 地形變化較不明顯，而 HDF 的地形變化較為明顯， HAR_{po} 值為 5 時有一較明顯界線，部分有下切情形，再與圖 4-23c 比較，可看出由隘口至流動段，NDF 與 HDF 地形變化相似，表示兩者皆於隘口處開始下切，符合地形切蝕演變。由圖 4-23a、圖 4-23b 及圖 11 三張圖得到之結果為，HDF 由發生區開始由堆積轉為凹陷，為明顯下切，並形成隘口，而隘口與流動段地形則無明顯變化，而 NDF 由上坡面至下坡面與 HDF 變化稍小，但也可看出其地形有下切之情況，因此，將 HAR_{fo} 與 HAR_{po} 再進行比較，結果如圖 12，NDF 與 HDF 之地形演化，其發生區至隘口，或發生區至流動段都有明顯的下切情況，而 HDF 變化明顯較大，表示 HDF 災前地形變動較大，NDF 則變動較小，由上述結果，本研究選取發生區深寬比及流動段深寬比作為區別因子之一。

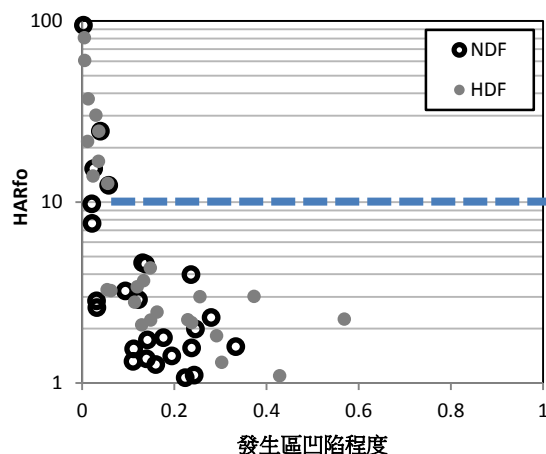


圖 9 HAR_{fo} 與發生區深寬比分布情況

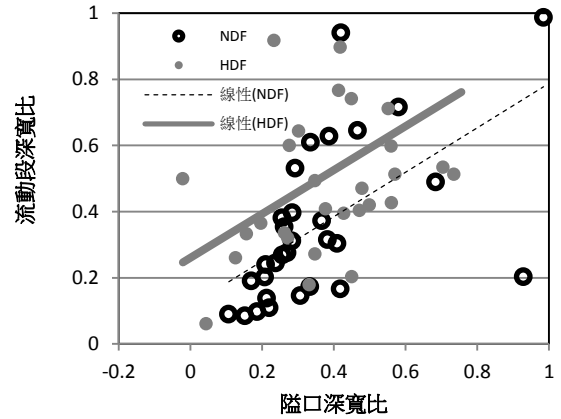


圖 8 隘口深寬比與流動段深寬比分布情況

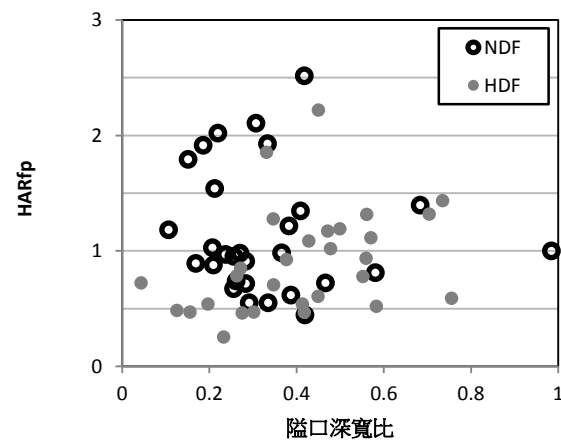


圖 11 HAR_{fp} 與隘口深寬比分布情況

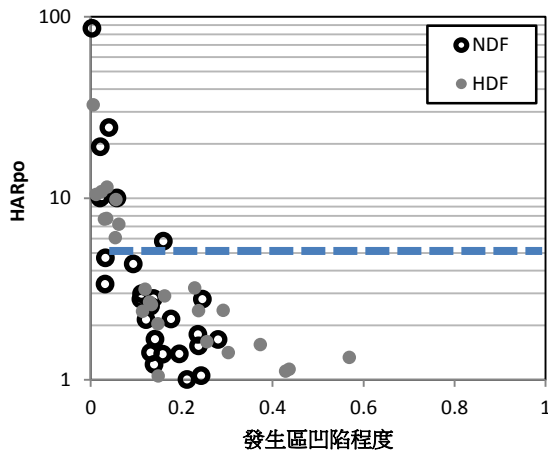


圖 10 HAR_{po}與發生區深寬比分布情況

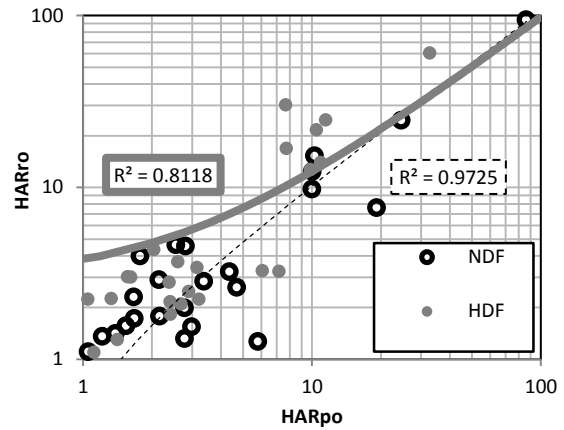


圖 12 HAR_{ro}與 HAR_{po}分布情況

6.起伏比(TR)

為了更明顯看出整體集水區縱剖面變化情形，本研究產製了三個區位之起伏比，分別為發生區起伏比 (TR_o)、流動段起伏比 (TR_f) 及集水區起伏比 (TR_w)，進一步探討整體集水區縱剖面變化情形。利用地理資訊系統 (GIS) 產製之高程差 (ΔH) 與水平距離 (L) 後，以高程差 (ΔH) 除以水平距離 (L) 計算起伏比。本研究進一步探討兩種類型 (HDF、NDF) 之流動段起伏比 (TR_f) 與發生區起伏比 (TR_o) 分布情形，結果以兩個因子之相互關係呈現，結果如圖 13。圖中可看出 NDF 之流動段起伏比與發生區起伏比分布較集中於一斜線上，兩個因子之間成正比，而 HDF 分布較為分散，兩個因子之間略呈正比，但相關性明顯不大。因此，仍保留流動段起伏比與發生區起伏比作為區別因子之一。

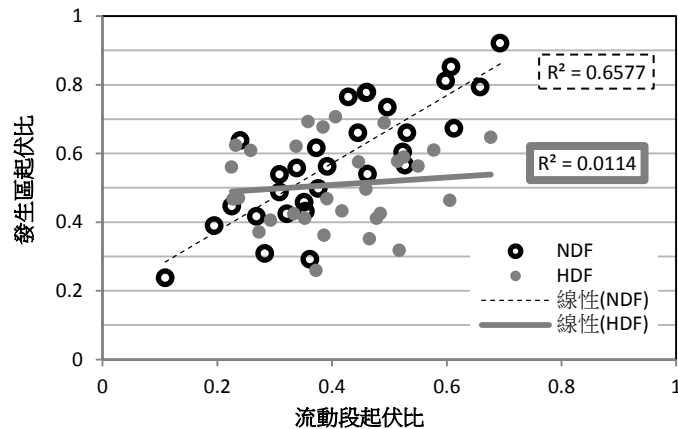


圖 13 發生區起伏比與流動段起伏比分布情況

7.坡面平均坡度

利用地理資訊系統 (GIS) 之空間模組內的坡度分析 (Spatial Analysis Slope)，可由集水區範圍內之數值高程模型計算出集水區坡面平均坡度，並應用此方法另計算發生區坡面平均坡度。進一步探討 HDF 與 NDF 之集水區坡面平均坡度、發生區坡面平均坡度及坡面平均坡度比分布情形，結果以兩個因子之相互關係呈現，結果如圖 14、圖 15。圖 14 中可看出 NDF 之集水區坡面平均坡度與發生區坡面平均坡度分布較廣 (集水區坡面平均坡度約分布於 18° 至 45°，發生區坡面平均坡度亦分布於 18° 至 45° 之間)，並集中於一斜線上，兩個因子之間成正比，而 HDF 分布較為集中 (集水區坡面平均坡度約分布於 25° 至 40°，發生區坡面平均坡度則約分布於 20° 至 38° 之間)，兩個因子之間成正比。接著以集水區坡面平均坡度再與坡面平均坡度比進行比較 (圖 15)，發現 NDF 之坡面平均坡度比集中於 1，表示其集水區坡面整體坡度變化不大，而 HDF 之值分布較為分散，表示其坡面整體變化大，兩種類型 (HDF 與 NDF) 有明顯的區分，因此將集水區坡面平均坡度、發生區坡面平均坡度及坡面平均坡度比三者作為區別因子之一。

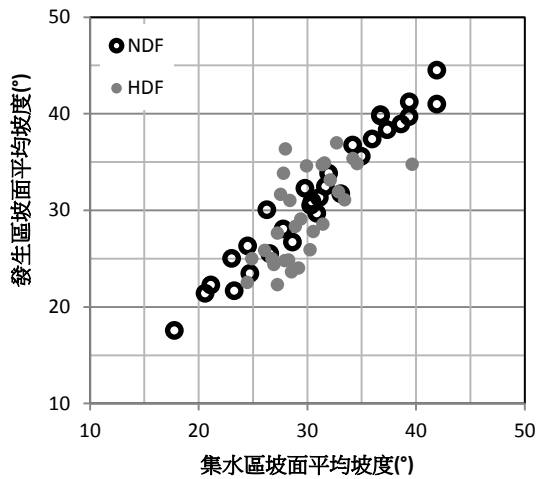


圖 14 集水區坡面平均坡度與發生區坡面平均坡度分布情況

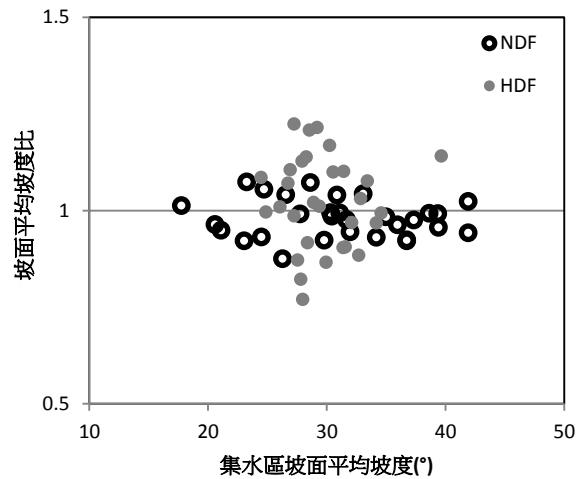


圖 15 集水區坡面平均坡度與坡面平均坡度比分布情況

8. 崩塌潛感面積比(RLSA)

為了找到更具代表影響土石流發生之材料因子，本研究延續前人研究中陳柏龍(2013)使用之崩塌潛感面積比，為崩塌潛感面積(LSA)除以集水區面積(WA)，取其百分比。當崩塌潛感面積比越大，此區域之可能崩塌範圍較廣；反之則可能崩塌範圍較小。

本研究選取之崩塌潛感坡度區間依據前人研究，發生區崩塌坡度主要發生於 18-45 度之間，統計 HDF 與 NDF 各坡度區間平均格數，圖 16 表示兩種類型之崩塌潛感坡度區間平均格數統計結果，由此圖可知崩塌潛感坡度主要分佈於 20-44 度間，與前人研究結果略為相符。將坡度以 1 度(小數點以下四捨五入)作為區分所得之嘗試結果如圖 17，可看出坡度於 30-35 度之間有明顯區分，本研究以此結果產製 LSA 及 RLSA 作為區別因子之一。

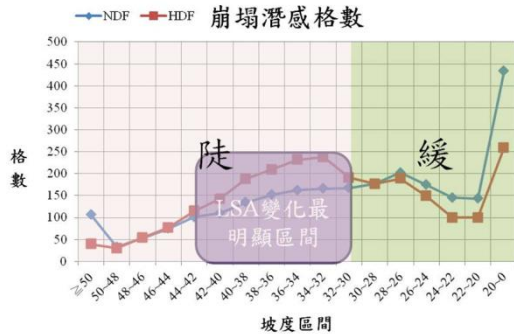


圖 16 崩塌潛感坡度區間與平均格數分布圖

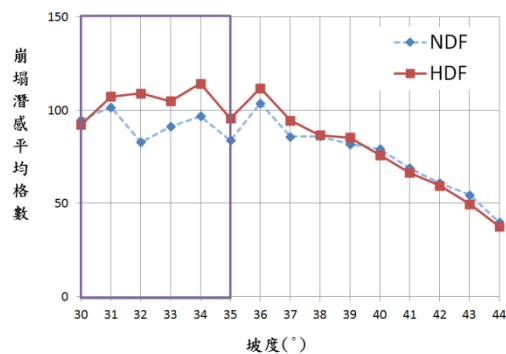


圖 17 崩塌潛感坡度與平均格數分布圖

9. 淺層崩塌預測模式

前述為針對土石流三大發生條件將特性因子分為三大類，其中代表材料因子部分，大多是採各種坡度值當作可能觸發崩塌的指標，為了找出更能代表材料之特性因子，本研究利用 SHALSTAB 模式進行坡面不穩定之範圍分析，預測崩塌範圍面積作為材料因子使用。進行 SHALSTAB 模式所需輸入各項參數如式 4，其中 C、 ϕ 、b、 γ_s 、 γ_w 為定值， θ 、Z、a、則為變動之值，參數設定如表 1:

$$\frac{q}{T} = \left\{ \frac{C}{\gamma_w Z \cos^2 \theta \tan \theta} + \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \left[1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right] \right\} \left[\frac{b \sin \theta}{a} \right] \dots \dots \dots \text{式 4}$$

表 2 SHALSTAB 模式採用之參數值之設定

參數	參數值
水單位重 γ_w (kg/m ³)	1000
土壤單位重 γ_s (kg/m ³)	1800
單位寬度 b(m)	5
變質岩土壤 凝聚力 C (kPa)	17.8

	變質岩土壤 摩擦角 ϕ (degree)	25
	沉積岩土壤 凝聚力 C (kPa)	11.7
	沉積岩土壤 摩擦角 ϕ (degree)	27.3
變值	集水區面積 a	地理資訊系統計算求得
	坡度 θ (degree)	地理資訊系統計算求得
	土壤深度 Z (m)	由坡度推求
	高程值 h(m)	地理資訊系統計算求得

(1)SHALSTAB 模式參數之應用與調整

SHALSTAB 模式分析後可得每網格之 q/t 值， q/t 值大於 0 為坡面較穩定； q/t 值小於 0 則為坡面較不穩定，不穩定之區域為可能崩塌處，可視為土石流材料之預測。SHALSTAB 模式結果如圖 18 所示，套疊災後航照後發現不穩定區域多落於河道(越靠近下游，集水面積 a 值越大)。SHALSTAB 模式於參數敏感度測試中發現，a 值於上坡面影響 q/t 值較小，而於下坡面影響 q/t 值較大，且該模式為結合降雨-水文模式與無限邊坡之坡地穩定模式，其中無限邊坡運算時，由 3 維方向力轉為 2D 維方向力，少考慮一方向力，即不考慮變形破壞，造成高估最後計算之值，本研究為增加第三方向力影響 SHALSTAB 之不穩定度 q/t 值變化，參考楊奕岑(2005)、蔡光榮(2008)等前人，利用類神經網路研究集流面積與山崩災害等議題，並使用類神經網路中之最陡坡降法(The Gradient Steepest Descent Method)觀念、陳樹群等人(2010)提出地形在面積遞增率隨高程變化上產生影響，由上述概念加入梯度下降法作為 q/t 值之修正係數。

利用 GIS 求取數值高程模型(DEM)資料中每網格之高程值(h)，高程值為垂直分量變化，而一地形除了垂直分量變化外，還須要有水平分量，因此以 a 值作為水平匯水量變化，a 值與 h 值皆以每一格變化為單位，經由最陡坡降法之公式計算，所得之值作為修正係數 H 值，對 q/t 值修正，使低處匯流量高的地區(尤其是河道)穩定度上升，如圖 19 所示，可看出坡面型土石流之崩落地不穩定度 q/t 值有明顯增加，而一般坡面單元集水區之誤判不穩定度 q/t 值有明顯減少。

利用 GIS 比對坡面型土石流之主崩塌圖層中之 q/t 值分布，人工比對後發現崩塌多分佈於 q/t 值於 -0.75 至 -2 之間，因此，本研究計算此區間佔不穩定區域之面積百分比，稱為 q/t 值面積百分比，作為特性因子之一加入區別分析。



圖 18a 莫拉克颱風災後航照(立體圖)

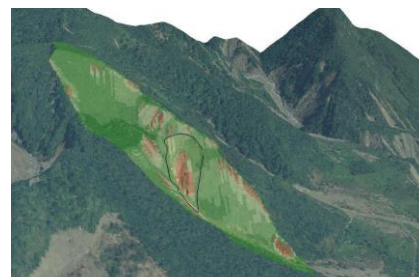


圖 18b SHALSTAB 模式分析結果套疊災後航照(立體圖)

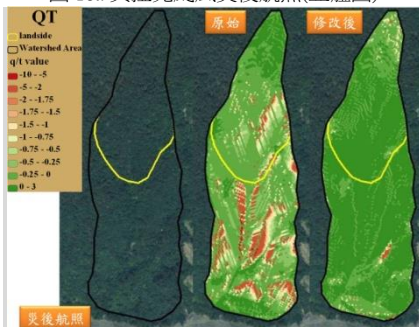


圖 19a 未發生土石流之坡面集水區(NDF)以 SHALSTAB 模式分析，加入 H 值之修改前後結果與災後航照(平面圖)

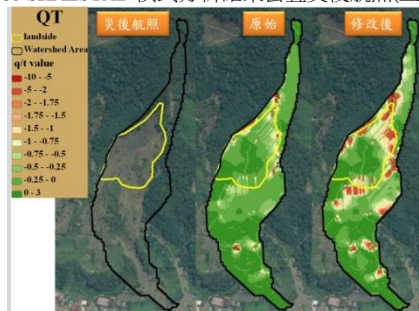


圖 19b 坡面型土石流集水區(HDF)以 SHALSTAB 模式分析，加入 H 值之修改前後結果與災後航照(平面圖)

肆、區別分析結果與討論

本研究使用區別分析建立坡面型土石流判定模式。以 20 項因子進行區別分析，觀察土石流材料因子對於區別分析之正判率影響，取得最佳判定之 8 項地文因子，得到坡面型土石流潛勢分析模式，並圈選出 20 個集水區作為驗證樣本群，依照區別分析結果之區別函數值進行驗證，最後進行坡面型土石流潛勢分級。

一、區別分析變數組合與結果

本研究進行區別分析時採用 SPSS 統計軟體進行分析，為了使兩母體驗前機率相同，坡面型土石流與未發生土石流，兩個群組各選定 30 筆觀測資料，共 60 個樣本，並事先給予類別編號：坡面型土石流資料為 1 及未發生坡面型土石流為 2 作為分組變數，此時坡面型土石流潛勢分析模式中之判別因子至多為 12 個，因此，選定地文因子及淺層崩塌因子共 20 項因子為預測變數進行區別分析(將資料輸入 SPSS 時使用代號如表 2 所示)，區別分析使用因子組合與過程如表 3。

表 3 區別分析使用因子組合與過程表

使用因子組合	正判率
WA+EWAI+DHF+DHPR+ASF+LF+FO+FR+W+WO+HARO+HARF+TRF+TRO+HASW+HASO+HASR+LSA+RLSA+QT	86.7%
EWAI+DHF+DHPR+ASF+LF+FO+FR+W+WO+HARO+HARF+TRF+TRO+HASW+HASO+HASR+LSA+RLSA+QT	86.8%
EWAI+DHPR+ASF+LF+FO+FR+W+WO+HARO+HARF+TRF+TRO+HASW+HASO+HASR+LSA+RLSA+QT	86.7%
EWAI+DHPR+ASF+LF+FR+W+WO+HARO+HARF+TRF+TRO+HASW+HASO+HASR+LSA+RLSA+QT	86.7%
EWAI+DHPR+ASF+LF+FR+WO+HARO+HARF+TRF+TRO+HASW+HASO+HASR+LSA+RLSA+QT	90.0%
EWAI+DHPR+ASF+LF+FR+WO+HARF+TRF+TRO+HASW+HASO+HASR+LSA+RLSA+QT	86.7%
EWAI+DHPR+ASF+LF+FR+WO+HARF+TRF+HASW+HASO+HASR+LSA+RLSA+QT	88.3%
EWAI+DHPR+ASF+LF+FR+WO+HARF+TRF+HASR+LSA+RLSA+QT	83.3%
EWAI+DHPR+ASF+LF+FR+WO+HARF+TRF+HASR+LSA+QT	86.7%
EWAI+ASF+LF+FR+WO+HARF+TRF+HASR+LSA+QT	88.3%
EWAI+ASF+FR+WO+HARF+TRF+HASR+LSA+QT	90.0%
EWAI+ASF+FR+WO+HARF+HASR+LSA+QT	90.0%

將 20 項特性因子資料輸入 SPSS 進行區別分析程序，並逐一剔除觀察正判率之變化選出正判率最佳之組合，可得未標準化之區別函數(式 5)：

$$y=0.594X_1+8.525X_2-1.536X_3-0.031X_4-0.034X_5+3.092X_6+0.003X_7-0.020X_8-7.058 \quad (\text{式 } 5)$$

其中 y 為區別函數， X_1 為形狀係數比， X_2 為坡面平均坡度比， X_3 為有效集水指標， X_4 為發生區平均寬度， X_5 為流動段平均坡度， X_6 為流動段深寬比， X_7 為崩塌潛感面積， X_8 為 q/t 值百分比。

當區別函數之係數為負值時，此因子與區別分析之線性函數成反比，即：有效集水指標、發生區平均寬度、流動段平均坡度及 q/t 值百分比與判定模式呈負相關；反之則與判定模式呈正相關，此類因子有：形狀係數比、坡面平均坡度比、流動段深寬比、崩塌潛感面積。若區別函數值 y 大於 0，判定為坡面型土石流；當區別函數值 y 小於 0，則判定為未發生土石流。區別分析之判定結果如表 4 所示，整體正判率為 90.0%，其中各項影響因子經相關性檢定(表 5)後，為中低度相關，代表各項因子彼此之間不會互相影響為獨立因子。

圖 20 為發生坡面型土石流及未發生土石流區別函數之分佈情況， x 軸為區別函數， y 軸分別為資料數佔全資料之百分比。坡面型土石流之函數值分佈於 -1.71~2.44 之間；而未發生土石流之函數值分佈於 -2.21~2.31 之間。

測試各因子對於正判率之影響，統計區別函數各因子之係數絕對值，如表 6 及圖 21 所示，其中材料因子對於正判率影響最為大，代表崩塌之預測，對於判別坡面型土石流之發生極為重要

表 4 區別分析結果

結果呈現	原始	預測		總和
	類別	HDF	NDF	
個數	HDF	27	3	30
	NDF	3	27	30
百分比(%)	HDF	90	10	100
	NDF	10	90	100
整體正判率 = (27+27)/(30+30)×100% = 90.0%				

表 5 區別因子之相關性檢定結果

相關矩陣	FR	HA SR	EW AI	WO	ASF	HA RF	LSA	QT
FR	1	0.23	-0.12	0.54	-0.07	0.11	0.14	-0.09
HASR	0.23	1	-0.02	0.09	0.27	-0.09	-0.26	-0.30
EWAI	-0.12	-0.02	1	0.06	-0.05	-0.17	0.25	0.11
WO	0.54	0.09	0.06	1	-0.29	0.31	0.54	-0.23
ASF	-0.07	0.27	-0.05	-0.29	1	-0.36	-0.04	0.18
HARF	0.11	-0.09	-0.17	0.31	-0.36	1	-0.08	-0.19
LSA	0.14	-0.26	0.25	0.54	-0.04	-0.08	1	0.11
QT	-0.09	-0.30	0.11	-0.23	0.18	-0.19	0.11	1

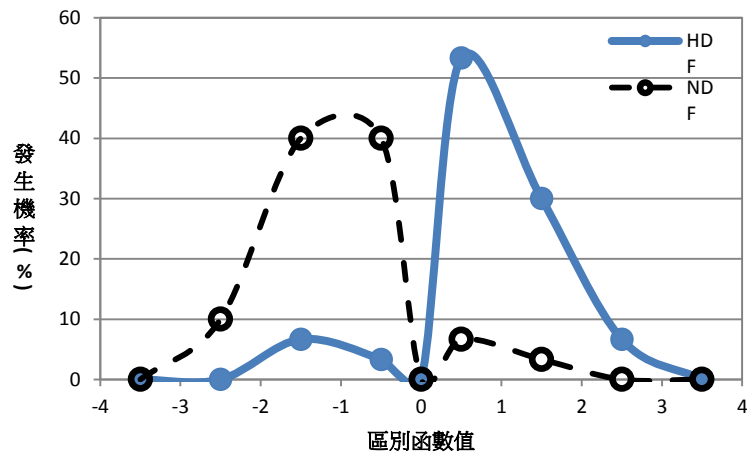


圖 20 坡面型土石流與未發生土石流之區別函數分佈圖

表 6 區別因子對於正判率之影響

土石流三要件	特性因子			影響率(%)
	區別函數之係數			
材料因子	HASR	LSA	QT	41.6
	0.739	1.152	0.139	
地形因子	HARF	ASF		20.9
	0.796	0.226		
水文因子	EWAI	FR	WO	37.4
	0.280	0.286	1.259	

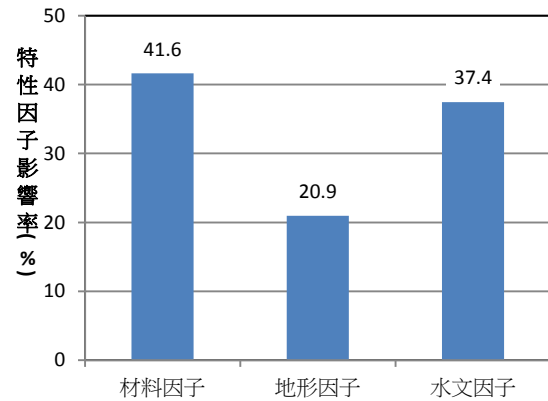


圖 21 土石流發生三大條件之特性因子影響率

二、區別分析判定模式驗證

驗證樣本為選自同一研究試區(高屏溪流域)，母體樣本附近之坡面型土石流與未發生土石流之坡面集水區各 10 筆資料。產製 20 筆驗證點位之 8 項區別因子資料(形狀係數比、坡面平均坡度比、有效集水指標、發生區平均寬度、流動段平均坡度、流動段深寬比、崩塌潛感面積及 q/t 值百分比)，代入式 2，得到驗證結果，如圖 22 所示，可看出判別情況良好，計算各點位驗證所得之 Y 值，統計其判別率為 85%，由此可知，此坡面型土石流潛勢判定模式可有效判別出高屏溪流域坡面之可能發生坡面型土石流之機率。

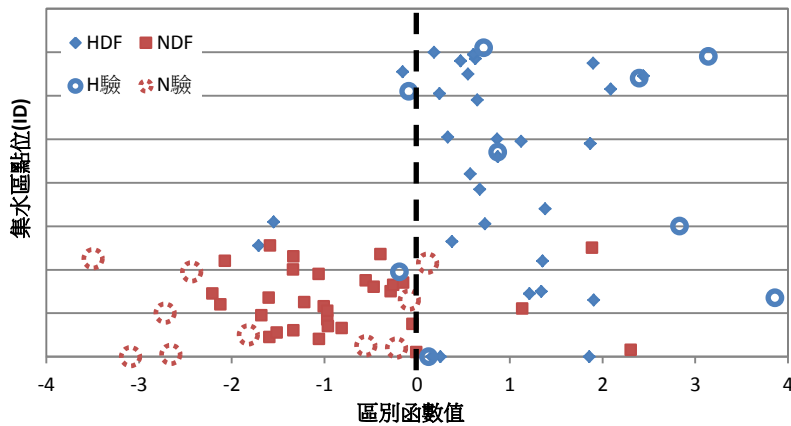


圖 22 HDF 與 NDF 之驗證點位與母體之區別函數分佈圖

伍、結論

本研究以高屏溪流流域坡面型土石流為研究對象，依據土石流三樣條件適當坡度(地形因子)、充分的水量(水文因子)及足夠之土砂量(材料因子)，挑選出 20 項特性因子建立資料庫，以區別分析建置坡面型土石流潛勢判定模式，並進行驗證，探討不同位態可能影響坡面型土石流之因子選擇，並將得到之結果進行潛勢分級希冀提供致災坡面之危險程度評估之參酌，其綜整結果如下：

1. 本研究分析之 20 項特性因子，區別分析結果最後以形狀係數比、坡面平均坡度比、有效集水指標、發生區平均寬度、流動段平均坡度、流動段深寬比、崩塌潛感面積、 q/t 值百分比等 8 項因子為預測變數時正判率最佳，整體正判率為 90%。
2. 驗證坡面型土石流潛勢判定模式，圈畫母體樣本集水區附近之坡面型土石流與未發生土石流各 10 處，依相同方法產製特性因子，代入坡面型土石流區別函數判定公式進行驗證，得到之正判率為 85%。
3. 統計坡面型土石流與一般坡面各坡度區間平均格數，崩塌潛感坡度主要分佈於 20-44 度間，並於 30 度有明顯之格數變化，一般坡面在緩坡(小於 30 度)部分格數多於坡面型土石流，而於陡坡部分則反之，表示坡面型土石流於發生區之潛感坡度較陡，且於坡度區間 30 至 35 度之間 LSA 變化最為明顯。
4. SHALSTAB 模式加入梯度下降法予以修正，其坡面型土石流之崩塌地不穩定度 q/t 值明顯增加，而一般坡面單元集水區之誤判不穩定度 q/t 值明顯減少。

參考文獻

- [1] 王振宇(2012)，「坡面型土石流判勢準則與地形演化作用」，碩士論文，國立屏東科技大學，水土保持研究所，屏東。
- [2] 建設省河川局砂防部砂防課(1989)，「土石流危險溪流および土石流危險區域調査要領」，日本。
- [3] 洪新原，孫敏育，洪萬富(2000)，「統計分析技術在國內資訊管理研究的使用調查－主要期刊論文之內容分析」，國立中正大學資訊管理學系，第 11 屆國際資管學術研討會。
- [4] 陳柏龍(2013)，「坡面型土石流潛勢分析與堆積特性」，碩士論文，國立屏東科技大學，水土保持研究所，屏東。
- [5] 陳樹群(2008)，「崩塌型土石流集水區總量估算之研究-子計畫：崩塌引發漂流木之運動機制與防治對策」，國家科學委員會研究計畫，NSC96-2625-z-005-001-MY3。
- [6] 楊奕岑，徐美玲，賴進貴(2005)，「DEM 解析度暨流向演算法對於集流面積計算之影響」，地理學報，第 39 期，第 71-90 頁。
- [7] 蔡光榮，陳昆廷，王宣惠，林欽川(2008)，「類神經網路分析法應用於台灣南投坡地社區環境潛勢災害風險評估模式之建置」，中國鑛冶工程學會會刊，第 52 卷，第 4 期，第 55-54 頁。
- [8] ArcGIS9.0. (2005). ESRI Ltd., Homepage. <http://www.esri.com/>, Accessed Nov 4, 2005.
- [9] Hair, J.F. Jr., Anderson, R. E., Tatham, R.L., and Black, W.C. (1998). Multivariate Data Analysis, Fifth-Edition, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- [10] Maidment, D.R. (2002). Arc Hydro: GIS for Water Resources, ESRI Press, Redlands, Calif.