

計畫編號：SWCB-105-122

崩塌地幾何形貌分析方法之建立
Analyzing and Modeling Geometric
Feature of Landslides
(初稿)

執行單位：國立中央大學

執行期間：105 年 4 月 1 日至 105 年 12 月 31 日

計畫主持人：姜壽浩 助理教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 105 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

崩塌地幾何形貌分析方法之建立

摘要

過去集水區尺度的崩塌研究多注重崩塌地位置的預測，除了崩塌的空間位置之外，崩塌地的幾何形貌對評估崩塌災害的影響亦為一個重要的關鍵因素。本計畫提出一崩塌幾何形貌演算法 (landslide geometry generating algorithm, LsGA)，可根據崩塌圖資以及地形資料來自動界定崩塌地冠部、底部及側部等邊界位置及其長度，以快速量化崩塌地的幾何形貌特性。本計劃也應用了機率型之崩塌判釋方法，針對崩塌之侵蝕面進行判釋，使判釋結果可直接用於 LsGA。本研究區為高屏溪之子集水區，使用 2009 年莫拉克颱風後期之福衛二號影像進行崩塌判釋，並應用 LsGA 擷取崩塌幾何形貌並進行統計分析，發現：(1)統計平均值顯示崩塌地主要為細長、倒三角之形貌，崩塌地之面積、長寬比以及冠底比之機率分布相似；(2)當崩塌地面積較大時，其形貌越趨近方圓的樣貌；(3)上邊坡(靠近稜線)易出現面積較大之崩塌；下邊坡(靠近河道)易出現面積較小之崩塌，形狀多為細長。

關鍵詞：崩塌幾何形貌、崩塌幾何形貌演算法、機率型崩塌判釋方法

Analyzing and Modeling Geometric Feature of Landslides

Abstract

Previous landslide prediction studies have focused on the assessment of location of landslides. Besides location, landslide geometric features (i.e., size and shape) are important factors that influence the distribution and dynamics of landslides. In this study, a landslide geometry generating algorithm (LsGA) is developed for quantifying landslide geometric features. In addition, a probabilistic landslide detection method is also applied for detecting the erosion phase of landslides, and the derived inventory can be directly used for LsGA analysis. The Kaoping watershed in Southern Taiwan is selected as the study area, and the detected landslide inventory after Typhoon Morakot (August 2009) were applied for LsGA analysis. Cluster and logistic regression analysis were used to correlate landslide geometric features, slope and contributing area (CA). Preliminary findings are: (1) smaller landslides are generally longer than larger landslides, (2) the upper length of small landslides is relatively wider than large landslides, (3) small landslides are more likely to be observed over gentle slopes, and (4) small landslides are more likely to be observed over lower part of slopes (high CA value, near channels).

**Keywords: Landslide geometric features, Landslide Geometry
Generating Algorithm, Probabilistic landslide detection**

目次

摘要.....	I
Abstract.....	II
目次.....	III
表次.....	IV
圖次.....	V
第一章 緒論	1-1
第一節 背景說明	1-1
第二節 研究目的	1-3
第二章 研究方法	2-1
第一節 崩塌地幾何形貌演算法	2-1
第二節 機率型崩塌影像判釋方法	2-4
第三節 事件型崩塌潛勢分析	2-5
第三章 研究區與研究資料	3-1
第一節 研究區概述	3-1
第二節 颱風事件	3-2
第三節 研究資料	3-3
第四章 研究成果與討論	4-1
第一節 崩塌地人工影像判釋	4-1
第二節 機率型崩塌地半自動化判釋	4-3
第三節 崩塌地幾何形貌分析	4-5
第四節 崩塌特徵形貌與地形分布之概念模式	4-7
第五章 結論及建議	5-1
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附錄-1

表次

表 2-1 崩塌地幾何形貌演算法所得之幾何因子.....	2-3
表 3-2 福衛二號衛星影像特性說明.....	3-4
表 3-2 崩塌潛勢模式輸入之土壤參數值.....	3-6
表 4-1 判釋之崩塌與土石流面積統計.....	4-1
表 4-2 判釋成果之正確率錯差矩陣.....	4-3
表 4-3 崩塌地形貌因子統計成果.....	4-5
表 4-4 集群分析成果.....	4-8
表 4-5 邏輯回歸分析成果.....	4-11

圖次

圖 2-1 崩塌邊界示意圖.....	2-1
圖 3-2 研究區位置圖與地質概況.....	3-2
圖 3-2 莫拉克颱風路徑圖.....	3-3
圖 3-3 研究區地形資料(a)高程(b)坡度(c)集水面積.....	3-5
圖 3-4 莫拉克颱風期間之雷達降雨資料(24 小時最大累積降雨) ...	3-6
圖 4-1 莫拉克颱風事件崩塌地人工判釋成果.....	4-2
圖 4-2 (a)最大概似法求得之裸露地(包含崩塌地)之機率.....	4-4
圖 4-3 崩塌地幾何參數機率分布(a)面積 (b)長寬比 (c)冠底比.....	4-6
圖 4-4 崩塌地長寬比(α)與面積關係圖.....	4-7
圖 4-5 崩塌地冠底比(β)與面積關係圖.....	4-7
圖 4-6 崩塌地之特徵形貌示意圖.....	4-9
圖 4-7 崩塌地幾何形貌在地形分布區位概念圖.....	4-12

第一章 緒論

第一節 背景說明

崩塌為台灣山區常見之災害類型，而過去在區域尺度或集水區尺度的崩塌研究多注重在崩塌模式的發展，主要為使用經驗模式與統計模式(Caine 1980; Cannon and Ellen 1985; Terlien 1996; Wieczorek and Glade 2005; Guzzetti et al. 2007; Chang et al. 2008)，或者是以無限邊坡分析(infinite-slope stability analysis, Taylor 1948)與有效應力(effective stress principle, Terzaghi 1925)為基礎的作用模式(Sidle 1992; Montgomery and Dietrich 1994; Dietrich et al. 1995; Wu and Sidle 1995; Chiang et al. 2012; Chang et al. 2014)。而這些崩塌研究方法所關注的對象主要為針對崩塌地位置(或是區位)的預測。然而，本計畫認為，除了崩塌的空間位置之外，崩塌地的幾何形貌(如大小、形狀)對評估崩塌災害的影響亦為一個重要的關鍵因素，舉例來說，崩落物質(如土石流)的運動及其影響範圍，與崩塌源頭的面積與量體有直接的關聯(Chiang et al. 2012)。現今崩塌模式的相關研究，不論統計方法或是物理模式，主要關心的重點在於界定邊坡破壞之門檻值(threshold)與邊坡破壞的機制問題，考量如雨量、地形地質條件，動態或靜態之土壤含水量變化等因素的影響；關於崩塌地大小、形貌(landslide size)雖然並非完全缺乏研究與討論，但目前的主要研究方法乃是透過崩塌圖資(landslide inventory)，來分析崩塌面積其機率函數之特性(Hovius et al. 1997; Malamud et al. 2004; Guzzetti et al. 2009; Chen et al. 2015)，並延伸至集水區崩塌侵蝕、地表作用與輸砂能力的探討(Hovius et al. 1997; Chen et al. 2015)。回顧目前崩塌相關研究，對於邊坡作用、水文機制

等因素如何影響崩塌地大小、形貌等幾何特性了解甚少(Casadei and Dietrich 2003; Milledge et al. 2014)，也就是說，目前研究並無法回答集水區內，個別崩塌地大小、形貌的成因問題，更重要的是，目前亦無一個系統性的研究方法來分析、量化崩塌地的形貌特徵。

過去有極少的研究針對崩塌地的幾何形貌提出量化的因子(Taylor and Malamud 2012)，如崩塌長度(L)、崩塌寬度(W)、長寬比(L/W)以及長寬乘積(L×W)；而上述這些因子並無幾何向性(topology)的資訊，如前後、上下、高低、內外等相對性的空間關係(spatial relationship)。本計畫認為若能考慮幾何向性關係，則可以進一步界定出崩塌地更多的形貌因子，如崩塌破壞邊界的冠部位置、底部位置跟側向邊緣位置，量化這些崩塌邊緣位置可以有助於分析土體破壞之主動土壓力、被動土壓力以及側向剪力之分布，而這些剪應力的分布，目前已有研究顯示與淺層崩塌的形貌與大小有關(Casadei and Dietrich 2003; Milledge et al. 2014; Bellugi et al. 2015)，值得深入研究。據此，本計畫將提出一個分析崩塌地幾何形貌的演算法(landslide geometry generating algorithm, 簡稱 LsGA)，可以根據現有的崩塌圖資以及地形資訊，來解析出崩塌地冠部、底部及側部等邊界位置及其長度，以量化崩塌地的幾何形貌特性。

在操作上，對崩塌地幾何形貌進行分析時，必須使用數值化的崩塌圖層。為取得多時序、大範圍的崩塌圖層，利用高解析度的遙測影像進行崩塌地判釋為現行的主流的方法，可分為人工判釋、自動判釋、半自動判釋等的判釋技術(Guzzetti et al. 2000)。一般來說，人工判釋耗時、成本高，且難以應用於災後大範圍的緊急判釋作業；反之，自動化以及半自動化的快速判釋技術則相當有助於進行緊急性的崩塌

災情分析(Mondini et al., 2014)。事實上，目前發展的自動或半自動之崩塌地判釋技術，不論是根據統計方法或是機器學習法(machine learning)，已可以正確地將崩塌造成邊坡裸露範圍正確地界定出來(Guzzetti et al. 2000, 2012; van Westen et al. 2006; Mondini et al. 2011, 2013)，然而，這些判釋成果往往混合了邊坡的侵蝕部、搬運部以及堆積部(Guzzetti et al. 2012)，就邊坡破壞機制的角度來看，由於混合了不同的崩塌過程機制(Chiang et al. 2012)，使得難以用於崩塌模式的訓練、率定與驗證工作。同樣地，在進行崩塌地幾何形貌分析時，需明確針對「崩塌侵蝕部」作為分析對象，因此目前現行的崩塌判釋方法所產生之崩塌圖資並不能滿足本計畫需求。然而，Mondini and Chang (2014)針對此問題提出了一個機率型之崩塌判釋方法，有極高的潛力來解決上述問題。Mondini and Chang (2014)提出之方法為一機率型影像判釋方法，結合了影像光譜特徵分類的概似性(likelihood)以及事件型崩塌潛勢機率；首先，依據衛星影像之光譜資訊進行崩塌裸露的判釋，隨後加入事件之崩塌潛勢機率來進一步界定出崩塌破壞的發生部。因此本計畫認為，此判釋方法產製的崩塌圖資可直接應用在本計畫的崩塌幾何形貌分析。

第二節 研究目的

具體來說，本計畫之目的為提出一個用於量化崩塌地幾何形貌的演算法(LsGA)，嘗試歸納出不同樣貌的崩塌地(如面積大小、細長、寬窄等)及其分布位置，並檢視不同幾何形貌特徵之崩塌地是否會發生在特定的空間區位，例如坡度陡緩、上邊坡或下邊坡等位置。舉例來說，Casadei and Dietrich (2003)指出，淺層崩塌在土壤含水較高的情形

下，發生邊坡壞需要較小的土壤量體，並且較為細長；反之，在土壤含水較少的情形下，則需要較大的土壤量體，且崩塌面有較長的寬度。一般來說，土壤含水常與地形有相關性，如集水區面積(contributing area)；因此，本計畫預期崩塌之幾何形貌或許亦與地形地貌具有關聯性，同時也預期將本計畫之研究成果與其他崩塌、土石流相關研究進行連結，例如分析所得崩塌大小面積及其空間區位之關聯，以可嘗試作為連結土石流模式料源材積預估之依據，並以之估測崩塌、土石流之影響範圍(Chiang et al. 2012; Chang et al. 2014)。本計畫所提出之崩塌形貌研究方法，期能更進一步精進現行之災害預測方法，並開啟崩塌相關研究一個可能的新方向。

第二章 研究方法

第一節 崩塌地幾何形貌演算法

本計畫提出崩塌地幾何形貌演算法(landslide geometry generating algorithm, 簡稱 LsGA)，為一網格式演算法。具體來說，應用此演算法可以根據現有的崩塌圖資(僅考慮崩塌的侵蝕部)來界定出個別崩塌地主要的幾何形貌(含空間關係)，包含面積、總周長、冠部邊長、底部邊長以及側部邊長等(見圖 2-1)。

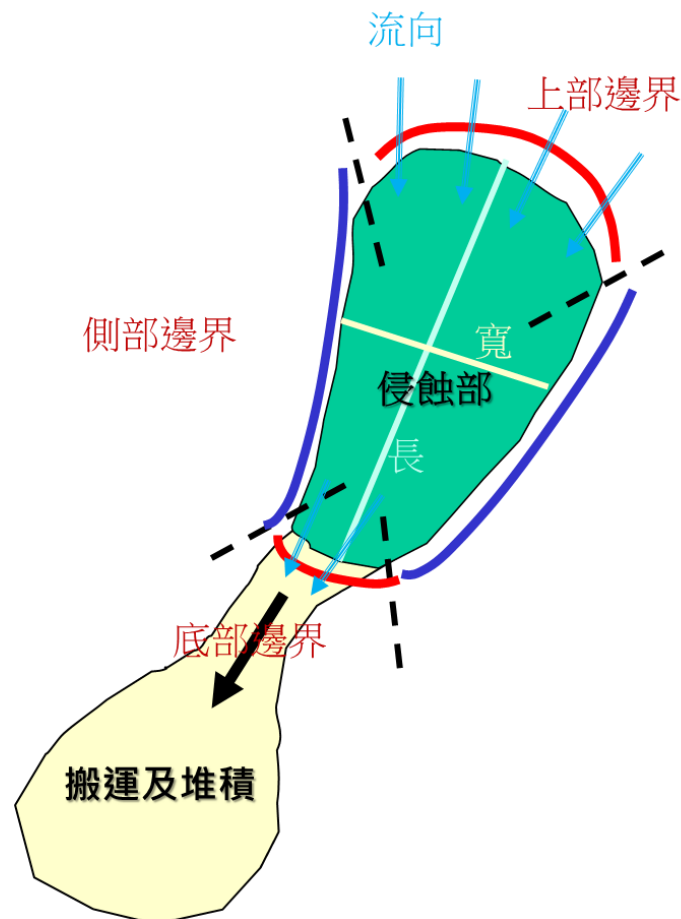


圖 2-1 崩塌邊界示意圖

在 LsGA 的計算上，崩塌地之冠部及底部的界定是利用流向演算方法來進行判定，其演算規則說明如下：

- (1) 崩塌地冠部定義：當流向為從崩塌地外圍流入崩塌地內部時，流向與崩塌地邊緣之交界則定義為冠部邊界；
- (2) 崩塌地底部定義：若當流向為從崩塌地內部流向崩塌地外圍時，流向與崩塌地邊緣之交界則定義為底部邊界；
- (3) 崩塌地側部定義：非冠部及底部區域之其餘邊界則為側部邊界。

在分析上乃是利用 DEM (Digital Elevation Model) 資料配合流向演算(D-8 法)進而界定崩塌幾何關係(上下、內外)。輸入崩塌圖資之後，透過 LsGA 演算可針對每一筆崩塌地自動產出 10 個幾何形貌因子(表 2-1)，在幾何維度上可分為二次幾何因子(如面積)、一次幾何因子(如邊長)以及零次幾何因子(如比率)。

表 2-1 崩塌地幾何形貌演算法所得之幾何因子

幾何維度	幾何因子	符號	計算方法	說明
二次	面積	A	$N \times d^2$	N:崩塌侵蝕範圍內網格總網格數;d:DEM 網格空間解析度
	長寬乘積	O	$L \times W$	崩塌長度與寬度之乘積
一次	周長	P	$U + L + D$	崩塌總邊長
	冠部邊長	U	$d \cdot \sum I$	I:崩塌冠部網格
	底部邊長	D	$d \cdot \sum J$	J:崩塌底部網格
	側邊總長	R	$d \cdot \sum K$	K:崩塌側部網格
	崩塌長度	L	$d \cdot \sum M$	M:崩塌侵蝕範圍內之最長流路網格
	崩塌寬度	W	$d \cdot \sum N$	N:崩塌侵蝕範圍內最長等高線網格
零次	長寬比	α	L / W	崩塌長度與崩塌寬度之比值
	冠底比	β	U / D	崩塌冠部與底部長度之比值

說明：d 為 DEM 資料之網格大小

第二節 機率型崩塌影像判釋方法

此判釋方法為由Mondini and Chang (2014)所提出，為監督式崩塌地判釋技術，此方法了結合影像分析及崩塌潛勢分析兩種方法來進行崩塌地位置之判釋。上述兩種方法為以機率呈現，並假設兩者機率為相互獨立，則崩塌位置為兩獨立事件之乘積，可表示如下：

$$p(L)= p(LP) p(LO) \quad (1)$$

其中 $p(L)$ 為一網格之崩塌地機率， $p(LP)$ 為影像分類所得裸露地(包含崩塌侵蝕、搬運堆積部位)之機率，可由分析影像光譜資訊得到。另外， $p(LO)$ 為崩塌之潛勢，以機率表之。首先，在此方法中， $p(LP)$ 裸露地之分類機率乃是使用最大概似法(Maximum likelihood)來求得可表示如下：

$$p(\omega_i|x)=p(x|\omega_i)p(\omega_i) \quad (2)$$

上式中 $p(\omega_i)$ 為類別 ω_i 出現在影像中之機率，而在一空間位置 x 屬於 ω_i 類別之機率 $p(x|\omega_i)$ 可以表示如下：

$$p(x|\omega_i)=(2\pi)^{-N/2} \Sigma_i^{-N/2} \exp\{(-1/2(x-m_i)^t \Sigma_i^{-1}(x-m_i))\} \quad (3)$$

其中 Σ_i 以及 m_i 為 ω_i 類別中之光譜反射值之共變量以及平均值， N 為 ω_i 類別之訓練樣本數。可依據上式改寫成特定類別 ω_i 出現在一空間位置 x 之機率：

$$p(\omega_i|x)= \exp[g_i(x)] / \{\Sigma_i^N \exp[g_i(x)] = p(LP)\} \quad (4)$$

上式中 $g_i(x)$ 為 i 類別之判別方程式(discriminant function)，表示如下：

$$g_i(x) = \ln p(\omega_i) - (1/2) \ln |\Sigma_i| - (1/2) \{ (x - m_i)^t \Sigma_i^{-1} (x - m_i) \} \quad (5)$$

崩塌潛勢以機率表示為式(1)中之 $p(LO)$ ，本計畫採用降雨型崩塌整合型模式(integrated model for rainfall induced landslide, Chang and Chiang, 2009)取得崩塌潛勢機率，說明如下節。

第三節 事件型崩塌潛勢分析

本計畫採用降雨型崩塌整合型模式(integrated model for rainfall induced landslide)進行崩塌潛勢分析，以應用於機率型崩塌影像判釋方法作。此模式為整合物理型模式—臨界降雨模式(critical rainfall model)以及邏輯迴歸分析(logistic regression analysis)來估算一地區於特定降雨事件下之邊坡破壞發生機率(Chang and Chiang, 2009; Chang et al., 2014)。該模式不僅考慮了降雨強度(rainfall intensity)與降雨延時(rainfall duration)等雨量變數作為分析變量，並且也包含區域之地形、地質及土壤物理等參數進行崩塌發生機率分析，故稱為一整合型模式。由於該模式為「事件型模式 (event-based model)」，適合用於颱風、暴雨事件之坡地災害預測。此模式應用於高屏溪流 2001-2009 期間之 9 場颱風事件(包含莫拉克颱風)，並進行了模式驗證，正確率均可超過 70%(Chang et al., 2014)，本團隊將應用此模式於國家公園內之崩塌位置之預測，並配合野外現勘資料進行模式率定及驗證。臨界降雨模式及邏輯迴歸分析則分別詳述如後。

一、臨界降雨模式 (critical rainfall model)

此模式針對一給定之降雨事件下，對地表與母岩之間土壤層中之土壤水變動進行預測。一般來說，在強降雨事件下，陡坡下的土壤水可快速變動，且主要發生在地表與母岩之間的土壤層中；邊坡穩定計算之對象為因降雨所誘發之崩坍，並依據無限邊坡假設配合莫爾-庫倫破壞理論進行計算。由於土壤濕度在邊坡穩定計算中僅考慮孔隙水壓的舉升，忽略含水量對土壤有效強度的弱化，因此相關土壤強度之參數(如結持力、內摩擦角)均假設為飽和狀態，此分析方法為當前最為廣泛使用之分析方法，其公式如下：

$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2 \theta (\rho_s h - \rho_w u_w) g \tan \phi}{\rho_s g h \sin \theta \cos \theta} \quad (6)$$

上式 FS 即為安全係數，理論上，當 $FS < 1$ 則表示邊坡為不穩定，反之若 $FS \geq 1$ 則為穩定。上式中 C_r 為植根凝聚力 [Nm^{-2}]， C_s 為土壤凝聚力 [Nm^{-2}]。 g [9.81 ms^{-1}] 為重力加速度， θ [$^\circ$] 為坡度， ϕ [$^\circ$] 為內摩擦角； ρ_s 與 ρ_w [gcm^{-3}] 分別為土壤與水之密度； h [m] 為土壤厚度， u_w [m] 為地下水頭高度(即 $h - h_w$)。上式中水文控制項可改寫成臨界降雨 Q_{cr} [m/h]，將邊坡穩定給定為臨界條件 $FS=1$ ，則 Q_{cr} 可表示如下：

$$Q_{cr} = T \sin \theta \left(\frac{b}{a} \right) \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \left[1 - \frac{(\sin \theta - C)}{(\cos \theta \tan \phi)} \right] \quad (7)$$

在計算上， $C_r + C_s$ 此項簡化為 C ，稱作有效凝聚力。其中 a [m^2] 及 T [$\text{m}^2 \text{h}^{-1}$] 分別集水面積(upstream contributing area)及土壤水分傳輸率(transmissivity)，式中 a/b [m] 為比集水面積(specific contributing area)，為集水面積除以水份輸出口之距離寬度(可為 DEM 網格之寬度，即網

格大小)， T 為土壤厚度與水力傳導度(hydraulic conductivity)之乘積。根據計算所得之土臨界降雨 Q_{cr} 可用來決定邊坡穩定程度，當 Q_{cr} 值越小，邊坡穩定程度較低，越容易發生崩坍。

二、邏輯迴歸分析 (logistic regression analysis)

降雨整合型模式不僅使臨界降雨，也同時納入降雨強度(rainfall intensity)與降雨延時(rainfall duration)；在邏輯迴歸分析時，使用降雨強度差值(rainfall intensity difference, RID)與降雨延時作為分析變量。其中 RID 乃是降雨事件實際發生之最大降雨強度(如 24 小時延時最大降雨強度)與臨界降雨 Q_{cr} 之差值且，因此使得此模式不僅能包含降雨變量，也同時包含區域之地形、地質及土壤物理等參數，故稱為一整合型模式。而邏輯迴歸分析公式為：

$$\text{logit}(y) = a + b_1 \text{RID} + b_2 D + e \quad (8)$$

其中 a 為常數項， b_1 及 b_2 均為迴歸式中之變量係數， e 為隨機誤差項。而邏輯迴歸乃是依據自然對數分布去估計依變量(logit of y)之勝算比：

$$\text{logit}(y) = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) \quad (9)$$

其中 p 則為依變量發生之估計機率。而機率值之求解可以根據下列公式計算：

$$p = \frac{\exp[\text{logit}(y)]}{1 + \exp[\text{logit}(y)]} \quad (10)$$

此邏輯迴歸模式可以使用 receiver operating characteristic (ROC) 曲線進行模式評估，乃是計算該曲線下正確預測之累積分布比 AUC(area under the ROC curve)，簡單來說，AUC 值約大，模式預測成效越佳。

第三章 研究區與研究資料

第一節 研究區概述

本計畫選定台灣南部山區高屏溪流域上游作為研究區(圖 2-1)，高屏溪發源於中央山脈西南麓，集水區內高山聳立、河道蜿蜒，地形高度落差大，大致由東北向西南遞減。研究區面積約為 11,600 公頃，處於中、低海拔，高程分布於 258~1,676 公尺，平均高度為 716 公尺，約有 82%之面積位於 1,000 公尺以下。坡度分布於 0~71.8 度，平均坡度為 26.9 度，地勢相當陡峭。研究區地屬熱帶海洋季風氣候，氣溫約在 19°C~21°C 間，以一月最低，七月最高。年降雨量約為 3,400 公厘，雨量集中於 5~10 月間，佔全年 90%，季節性豐枯明顯。

研究區內之岩層分布主要為中新紀至上新紀之砂岩與頁岩，高屏溪右岸主要為長枝坑層，左岸為廬山層，於集水區南部地帶則包含部分頭嵙山層礫岩(圖 3-1)。河流兩岸可見台地分布，主要為更新世之古河流沖積層，屬第四紀之階地堆積。丘陵低山地區為崩積土、黃壤及石質土等土壤，高山地區大部份為石質土。除部分河階台地分布有聚落建地外，其餘多為林地，占研究區超過 85%。本研究區於 2009 年莫拉克颱風期間研究區內發生多處崩塌，傳出許多嚴重之土石流災情

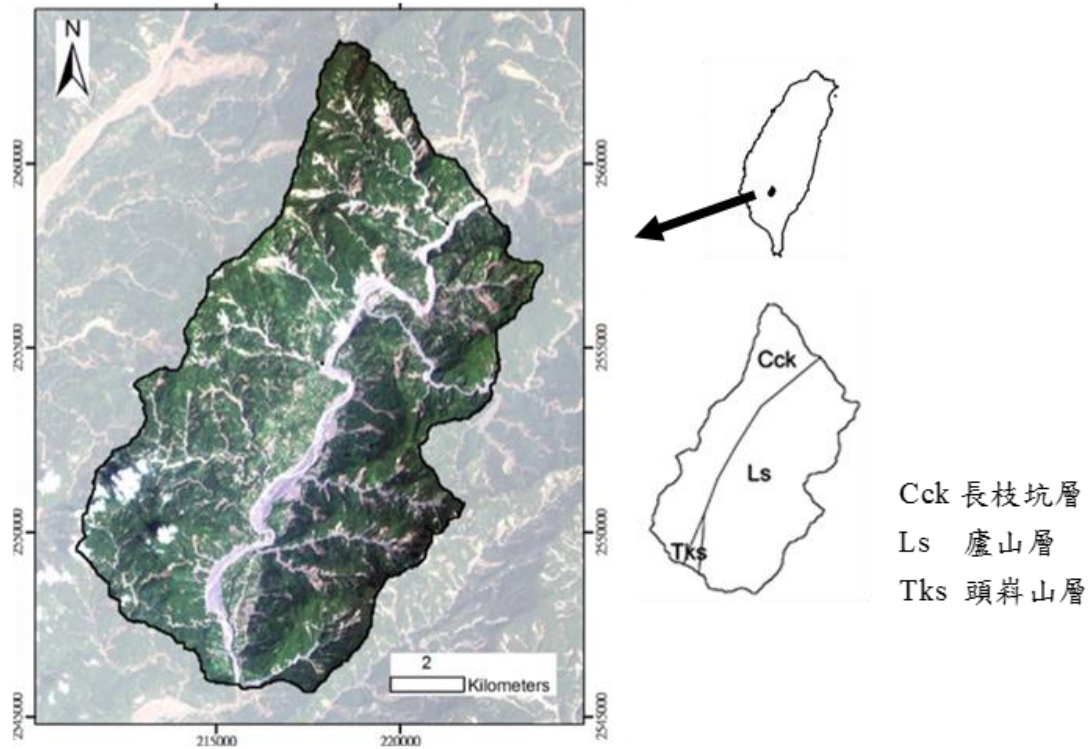


圖 3-1 研究區位置圖與地質概況

第二節 颱風事件

伴隨颱風而來之強降雨為台灣山區邊坡崩塌之主要原因，故本計畫將針對颱風事件收集各項研究資料。本計畫檢視 2009 莫拉克颱風所誘發之崩塌地作為研究對象。根據中央氣象局之颱風警報發布概況表，莫拉克颱風(Morakot)生成於菲律賓東北方海面，於 2009 年 8 月 8 日侵台，颱風最大強度達中度颱風，近中心之最大風速達 40.0 m/s。5 日 20 時增強為中度颱風並向西移動，進入台灣東部近海時受地形影響，速度略為減慢並轉向西北，7 日 23 時 50 分左右在花蓮市附近登陸，8 日 14 時左右在桃園附近出海，於 9 日 18 時 30 分左右在馬祖北方進入福建(圖 3-2)。災情部分，受颱風及西南氣流影響，中南部、

東部多處地區降下刷新歷史紀錄的雨量，引發嚴重水患，造成台南、高雄、屏東及台東等縣重大災情，鐵、公路多處路基流失造成交通中斷，多處地區發生嚴重土石流災害。計有 673 人死亡，26 人失蹤，農損逾 195 億元。

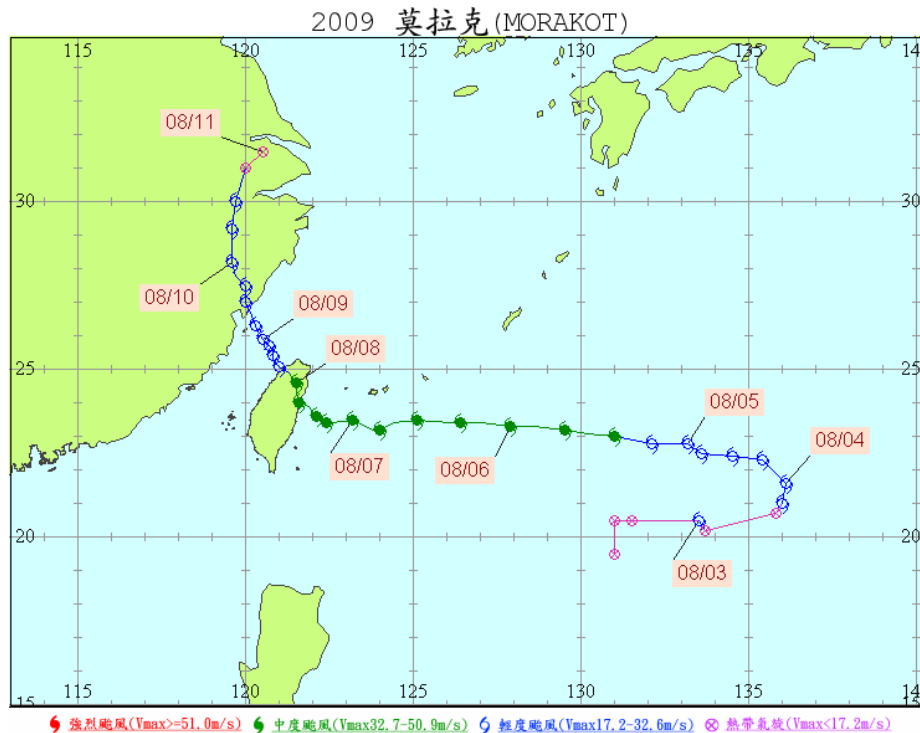


圖 3-2 莫拉克颱風路徑圖

資料來源：中央氣象局颱風資料庫：

http://rdc28.cwb.gov.tw/TDB/ntdb/pageControl/ty_warning

第三節 研究資料

本研究收集莫拉克災後福衛二號衛星影像進行崩塌判釋，拍攝時間為 2009 年 8 月 17 日。衛二號衛星具備空間解析度 2 公尺之黑白影像，以及空間解析度 8 公尺之彩色影像，每日更新且涵蓋範圍

廣泛(影像樣本 ≥ 24 公里，側視角 ± 45 度)。本研究使用 2 公尺黑白及彩色融合影像進行崩塌地人工判釋，而空間解析度 8 公尺之彩色影像則應用於機率型崩塌自動化判釋，表 3-1 為福衛二號之衛星影像特性說明。

地形資料部分，本計劃使用內政部 5 公尺 DEM，經資料編修消除不規則之地形雜訊後重新取樣至 10 公尺，並據此使用 GIS 軟體 ArcGIS 10.1 產出坡度及集水面積(圖 3-2)。

表 3-1 福衛二號衛星影像特性說明

特性	類別	解析度
Band	Panchromatic	2 m
	Multispectral (R, G, B, NIR)	8 m
波長 (μm)	Panchromatic	0.52~0.82
	Blue	0.45~0.52
	Green	0.52~0.60
	Red	0.63~0.69
	NIR	0.76~0.90
Footprint (km)	--	24 x 24
Spectral resolution	--	8 bits/pixel
Revisit Time	--	每日
視角	Along and across track	+/- 45°

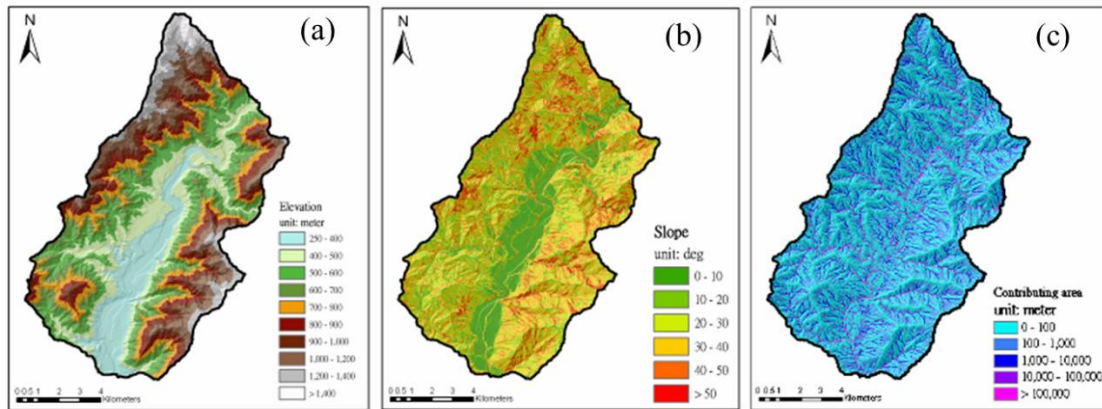


圖 3-3 研究區地形資料 (a)高程 (b)坡度 (c)集水面積

雨量資料方面，降雨之空間代表性為評估降雨相關災害時必須關注的問題，尤其在處理山區以及大區域尺度之災害問題時，雨量站數量及其空間位置分布的合理性成為相關模式的一大限制。雷達降雨資料則提供了解決此一問題的可能性。本研究使用莫拉克颱風（2009 年 8 月 5-10 日）之 QPESUS（Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensors）雷達降雨資料，主要乃是使用都卜勒雷達網，以雷達回波值之強度大小來估計大氣中之水氣，因此可估計大區域尺度的水氣分布情形，本計劃使用之 24 小時延時最大降雨量之降雨空間分布見圖 3-4。

計本畫其他使用資料為土壤物理參數，主要應用於整合型崩塌模式分析，此物理參數乃是根據地質岩性進行區分(表 3-2)。

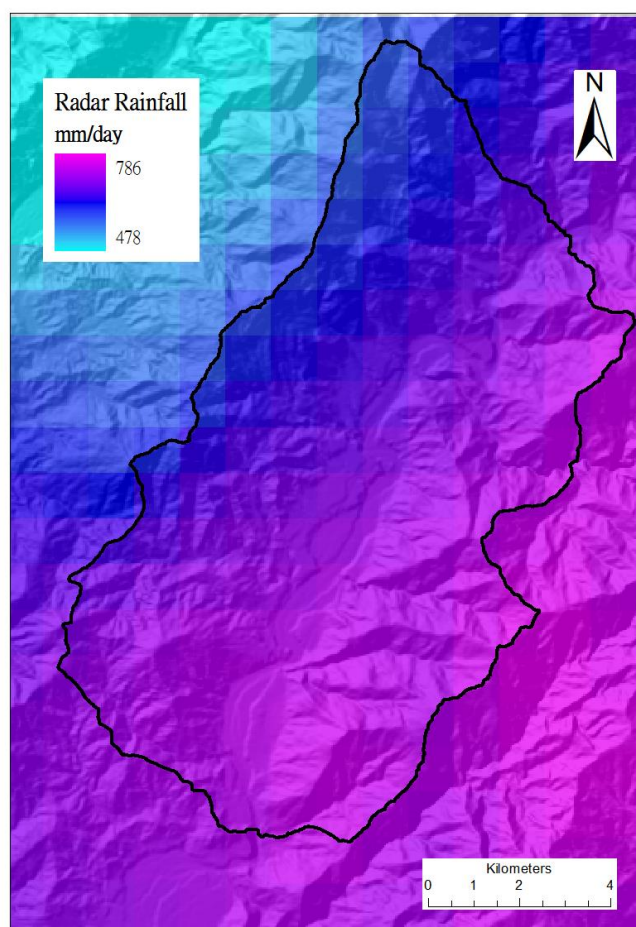


圖 3-4 莫拉克颱風期間之雷達降雨資料(24 小時最大累積降雨)

表 3-2 崩塌潛勢模式輸入之土壤參數值

地層及岩性		ρ_s [gcm^{-3}]	k_s [mh^{-1}]	ϕ [$^\circ$]	C_s [kPa]
長枝坑層	砂頁岩互層	1.7	1.25	33	2.6
廬山層	硬頁岩、板岩、千枚岩	1.8	1.5	31	2.6
頭嵙山層	礫岩	2.0	2.5	28	3.0

資料來源：Chiang et al., (2012)

第四章 研究成果與討論

第一節 崩塌地人工影像判釋

人工判釋與數化乃是直接以肉眼的方式於影像上進行辨識數化。本計畫將針對崩塌地的侵蝕部進行判釋。人工判釋時依循的準則為：崩塌地趾部與搬運部的交界處坡度會有明顯的變化，因此在數化崩塌地時，可以藉由套疊等高線圖，輔助辨識侵蝕部與搬運部的交界。

本研究使用福衛二號莫拉克颱風後期影像針對研究區內之崩塌地侵蝕部位、搬運及堆積部位以及河道進行判釋，成果如下圖 4-1。判釋之崩塌侵蝕部與搬運堆積部之相關面積統計則列於表 4-1。本計畫使用此人工判釋成果，作為後續機率型崩塌自動判釋成果之依據。

表 4-1 判釋之崩塌與土石流面積統計

類別	崩塌侵蝕部(單位：ha)				搬運及堆積部(單位：ha)			
統計 事件	個數	平均值	總面積	標準差	個數	平均值	總面積	標準差
莫拉克	5362	0.19	1043.14	0.81	1082	1.28	1381.71	16.88

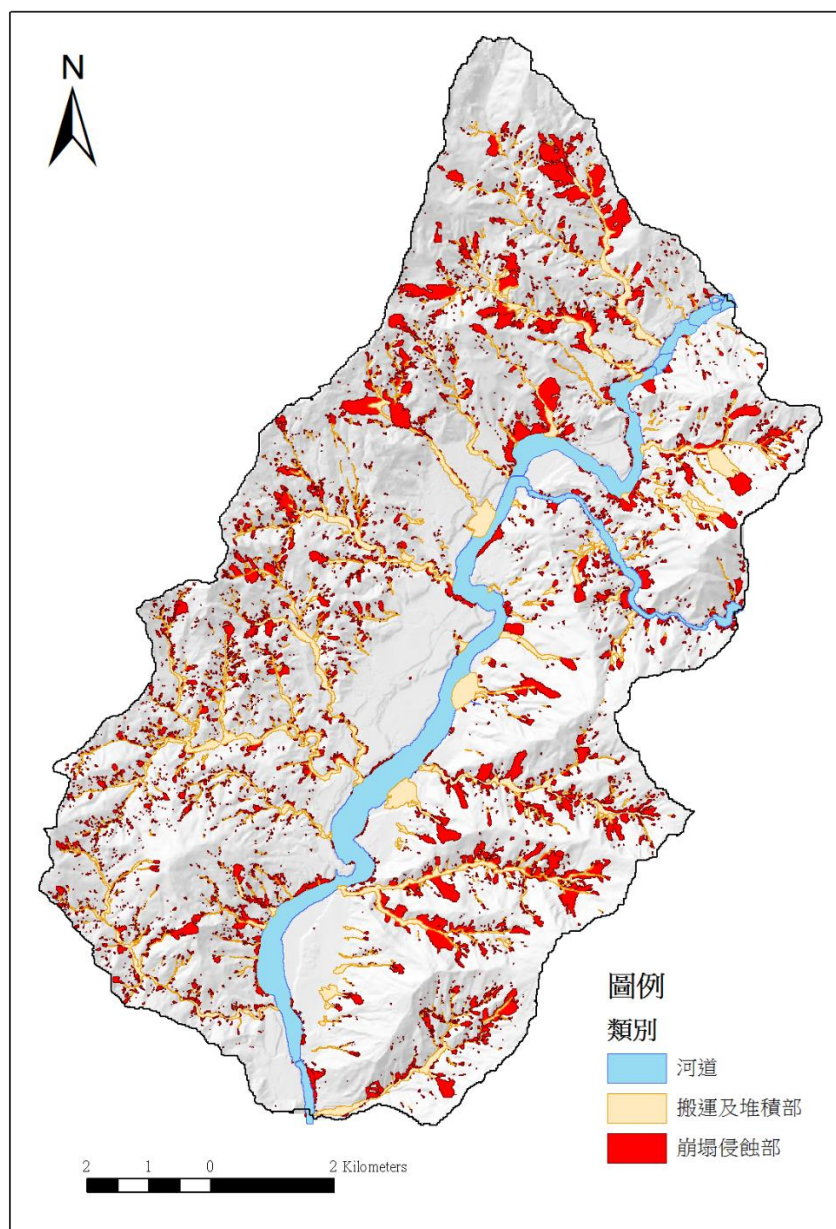


圖 4-1 莫拉克颱風事件崩塌地人工判釋成果

第二節 機率型崩塌地半自動化判釋

本研究利用機率型崩塌地影像判釋方法，以最大概似法所得裸露地(包含崩坍地)之機率 $p(LP)$ ，見圖 4a。整合型崩塌模式所得之崩坍潛勢 $p(LO)$ ，見圖 4b。使用貝氏方法將兩者整合之崩塌(判釋)機率成果則見圖 4c。

從圖 4a 可以發現，由於土石流流經之邊坡與溪溝造成溪溝、河道含砂量極高，因此使用傳統之判釋方法(如最大概似法)，易將裸露地與崩塌地混淆；而圖 4d 為考慮判釋機率(圖 4c)大於 0.5 者，此即為機率型崩塌地半自動化判釋之成果。此成果與人工判釋之崩塌侵蝕部進行比較後(圖 4-1)可利用錯差矩陣計算正確率(表 4-2)，得總體正確率(overall accuracy, OA)為 90.68%， $Kappa$ 為 0.87，為相當良好之判釋結果。

表 4-2 判釋成果之正確率錯差矩陣

錯差矩陣		機率型崩塌判釋面積 (ha)		
		崩塌侵蝕	非崩塌侵蝕	加總
人工判釋 面積 (ha)	崩塌侵蝕	1,035.18	638.19	1,673.36
	非崩塌侵蝕	442.28	9,477.87	9,920.15
	加總	1,477.46	10,116.06	11,593.51
$OA=90.68\%$ $Kappa=0.87$				

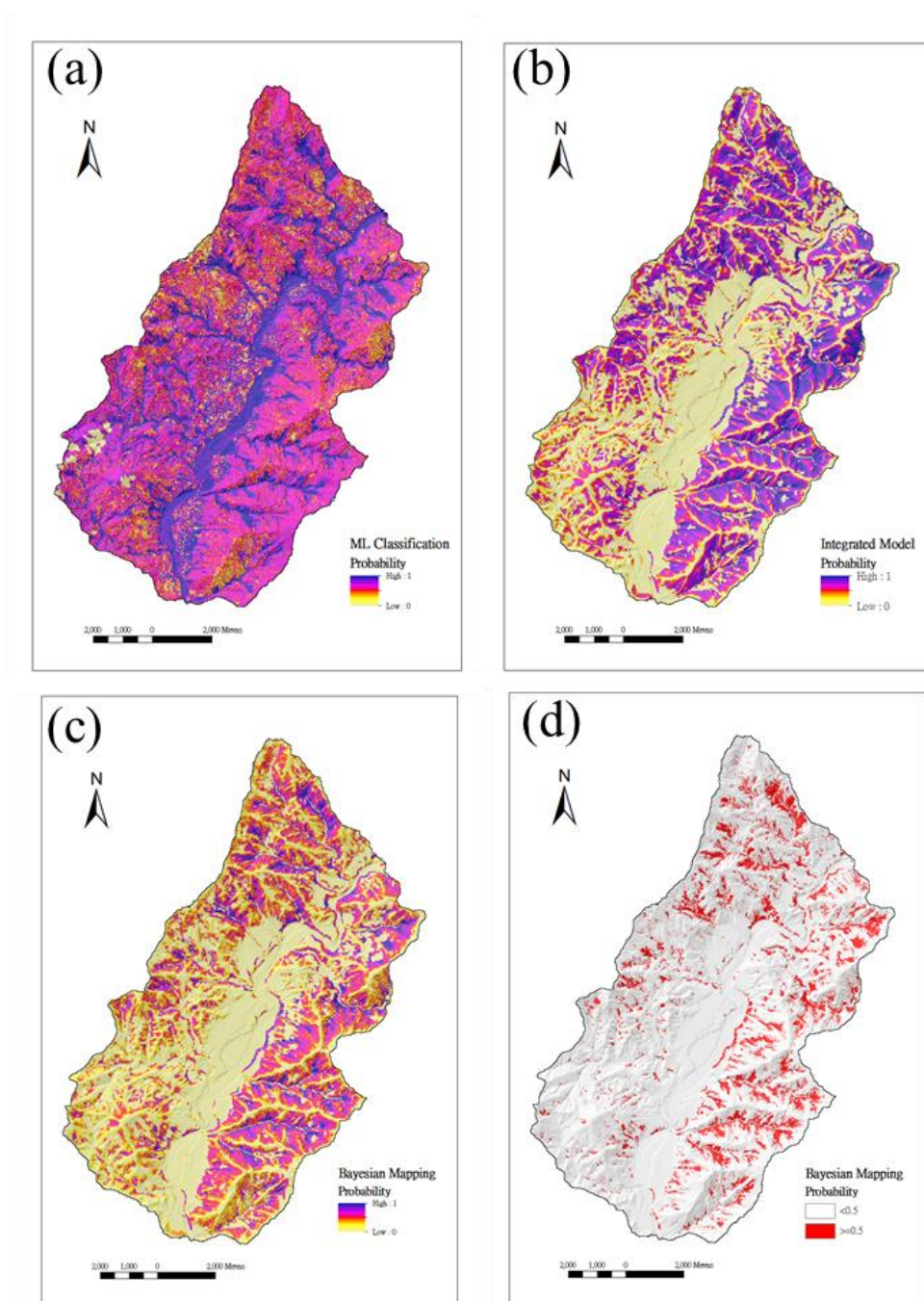


圖 4-2 (a)最大概似法求得之裸露地(包含崩塌地)之機率；(b)整合型崩塌模式所得之崩坍潛勢；(c)貝氏方法將兩者整合之崩塌(判釋)機率；(d)以判釋機率(圖 4c)大於 0.5 者作為機率型崩塌地半自動化判釋之成果，反映崩塌侵蝕部之判釋成果。

第三節 崩塌地幾何形貌分析

一、崩塌地幾何形貌統計

本研究根據研究區內之崩塌地(侵蝕面)，利用崩塌地幾何形貌演算法(landslide geometry generating algorithm, LsGA)進行分析，表 4-2 為三個主要利於描述崩塌地形貌因子的統計成果，分別為面積、長寬比 α 以及冠底比 β ，其他因子難以單獨解釋崩塌形貌，因此在後續僅針對上述三項因子進行分析。

從表 4-3 可以發現，以平均值來說，崩塌地之長寬比以及冠底比均大於 1，顯示，在分析的崩塌樣本中，崩塌地主要為長條且為倒三角之形貌，此樣態與一般於野外觀察之經驗相符。

表 4-3 崩塌地形貌因子統計成果

形貌因子統計	面積 A (ha)	長寬比 α	冠底比 β
平均值 Mean	11.2	2.8 (>1)	2.6 (>1)
標準差 STD	15.5	2.4	3.0
最大值 Max	91.2	20	22
最小值 Min	1.2	0.4	0.2
值域範圍 Range	90	19.6	21.8

本研究進一步分析此三樣形貌參數之統計分布特性(如圖 4)，發現崩塌地之面積(圖 4-3a)、長寬比(圖 4-3b)以及冠底比(圖 4-3c)之機率分布特性相似。本研究認為此特性或可為未來進一步將崩塌地形貌模式化之基礎。

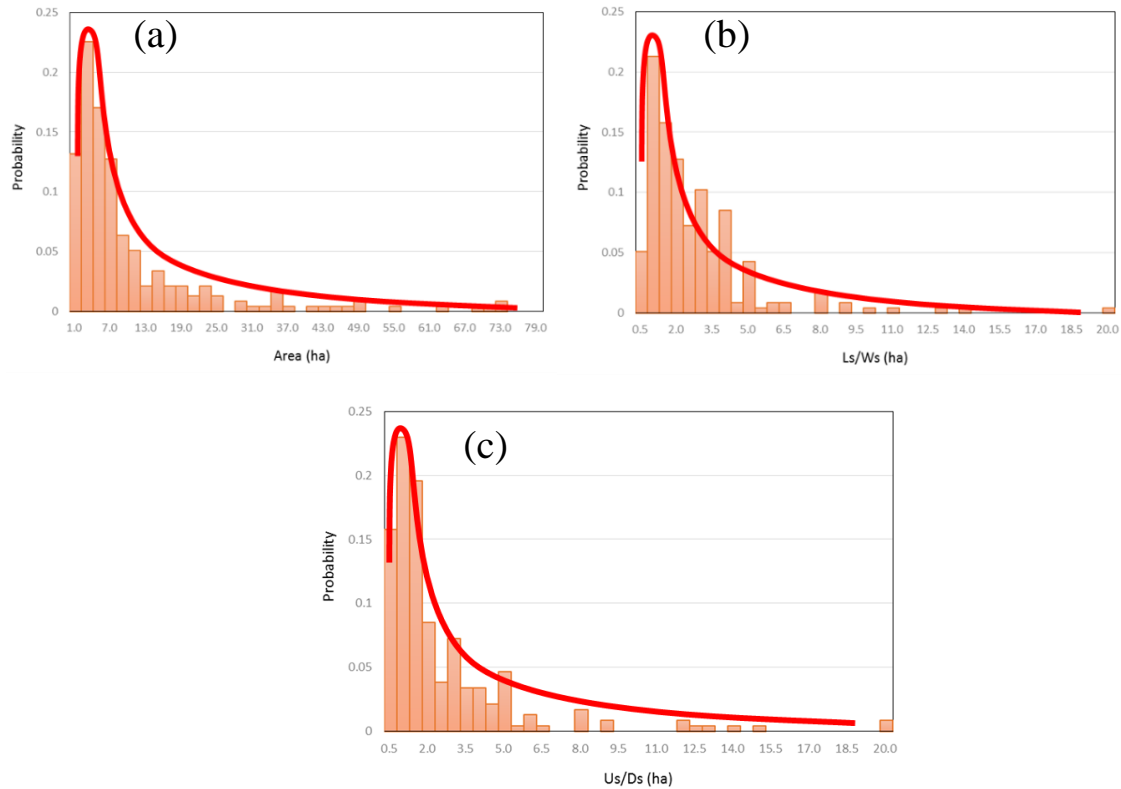


圖 4-3 崩塌地幾何參數機率分布(a)面積 (b)長寬比 (c)冠底比

二、崩塌幾何形貌與面積之關係

為進一步了解崩塌地的幾何形貌是否與崩塌地面積是否有關連性，本計劃分析了崩塌長寬比、冠底比與面積之關係。將此兩形貌參數與面積資料繪於圖 4-4(面積與長寬比)與圖 4-5(面積與冠底比)，兩圖顯示了相近的分布趨勢。

首先長寬比的部分，可以發現面積較小之崩塌地，其長寬比分布的變異較大，而當面積越大時，則此比例越趨近於 1，也就是崩塌地其形貌較為方圓；而同樣的分布趨勢也可見於面積與冠底比之關係。簡言之，當崩塌面積較小時，其形貌的變異較大，然而當崩塌地面積較大時，其形貌越趨近方圓的樣貌。

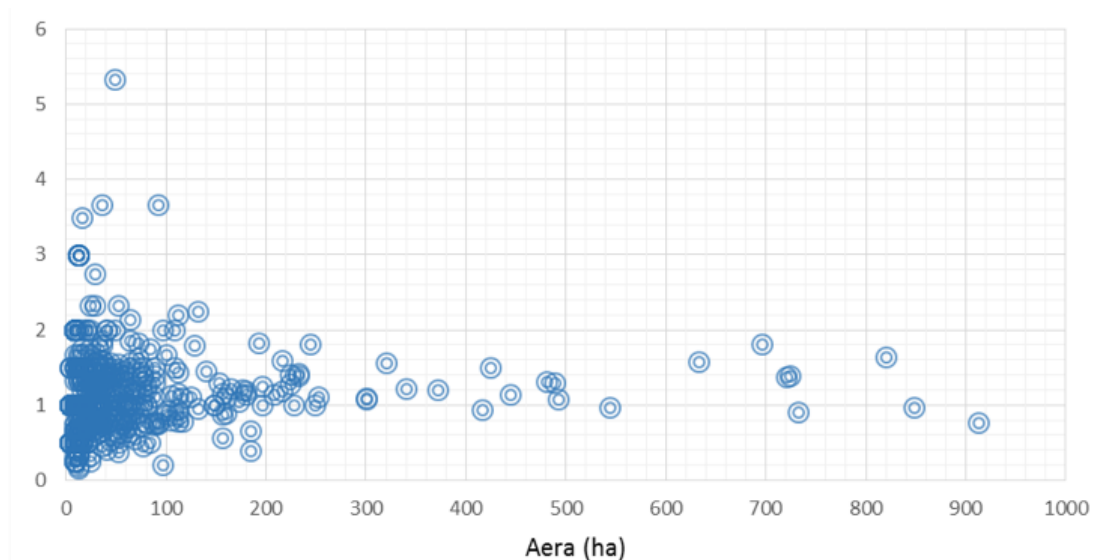


圖 4-4 崩塌地長寬比(α)與面積關係圖

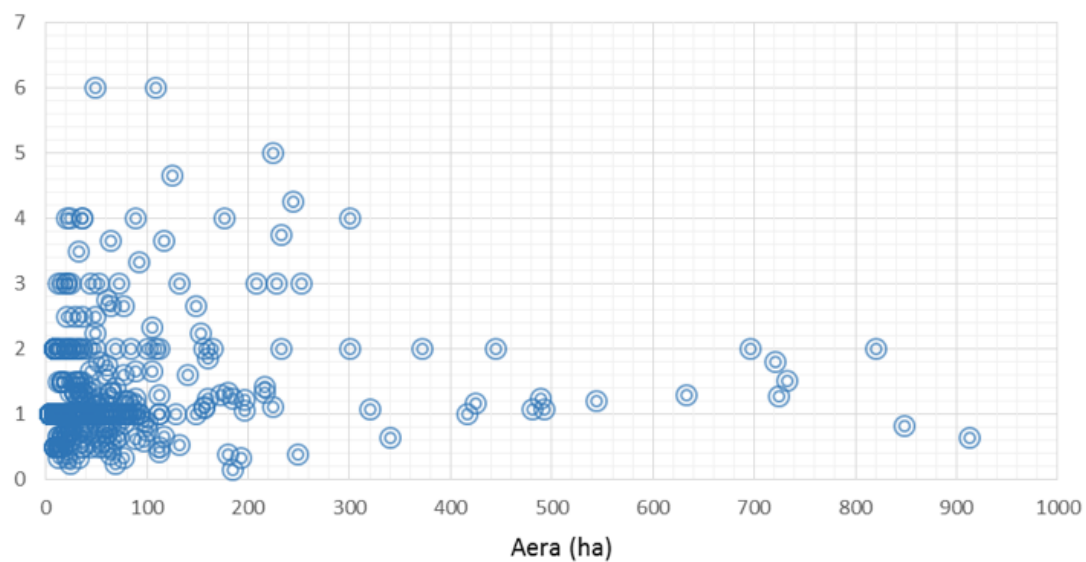


圖 4-5 崩塌地冠底比(β)與面積關係圖

第四節 崩塌地特徵形貌與地形分布之概念模式

一、崩塌地特徵形貌

本研究進一步使用集群分析 K-means 方法，針對崩塌地之面積、長寬比與冠底比等三個主要幾何形貌參數進行分群，嘗試利用崩塌地

之面積、長寬比與冠底比等特性上將崩塌地進行分群，以了解崩塌地在幾何特性上是否在具有統計上的差異。

首先以試誤法嘗試不同群數，分析結果顯示至多在分成 3 群時各群的面積、長寬比與冠底比仍具顯著差異($p\text{-value}<0.05$)。集群分析之結果可見表 4-4。

表 4-4 集群分析成果

集群中心	群 1	群 2	群 3
面積(ha)	5.7	27.6	73.6
長寬比(α)	1.9	1.2	1.0
冠底比(β)	2.4	3.9	1.7

分析結果呈現此三群在面積上有明顯之區隔，群 1 面積為最小、群 2 次之，而群 3 最大。整體來說崩塌地主要為長條且為倒三角之形貌，而小面積之崩塌地則較為細長，反之較大的崩塌地則較為方圓。另外，根據分析結果，本計畫可依據此三群之集群中心長寬比(α)以及冠底比(β)數值做為代表此群崩塌地之特徵幾何形貌，並為依據，按照比例繪製各群之崩塌地特徵形貌(見圖 4-6)。

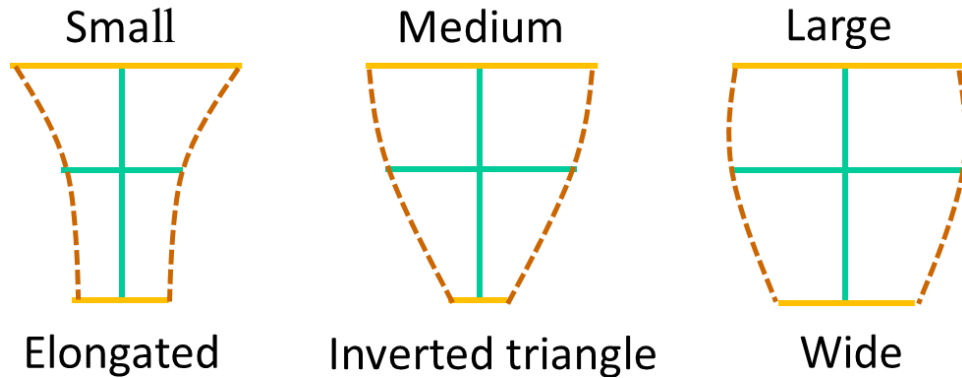


圖 4-6 崩塌地之特徵形貌示意圖

二、崩塌地幾何形貌之邊坡區位之關聯

本研究利用邏輯回歸分析(logistic regression analysis)，以坡度(slope)以及集水區積(contributing area, CA)二種地形參數來分析具有不同幾何形貌特徵之崩塌(群 1、群 2 及群 3，見表 4)是否在崩塌發生之邊坡位置上亦有所差異。

在定義邊坡區位上，本研究參考 S 型之邊坡之標準邊剖面地描述方法(Carson and Kirkby, 1972)，而坡度以及集水面積此兩種地形參數則可以用來表達邊坡之不同區位(Montgomery, 2001)：上邊坡近稜線區域坡度較緩而集水面積較小；下邊坡同樣坡度較緩，然而集水面積較大；而集水面積介於兩者且為坡度較大的區域則為中坡，為坡形由凸坡(或發散坡, divergent or convex slope)轉折到凹坡(或匯聚坡, convergent or concave slope)的過渡位置。

為表現地形的區位，本計劃利用邏輯回歸分析(logistic regression analysis)，自變數則為集群分析所得之三類型，應變數部分則採用了四個變數，分別為崩塌地內之坡度平均值(slope mean)、崩塌地範圍內

之坡度值域(slope range)、崩塌地內集水區面積之對數平均值(log CA mean)及崩塌地內 log CA 所佔值域範圍(logCA range)。Log CA 可用以表示崩塌所在之邊坡相對位置，log CA 值小時為較靠近稜線，處於相對上邊坡位置；而 log CA 值較大時則較靠近河道(或水系)，處於相對下邊坡的位置。本研究以群 2 之崩塌集群做為參考項，進行邏輯回歸分析之成果可見表 4-5。

表 4-5 邏輯回歸分析成果

模式與變數*		Coefficient	P-value
群 1 (面積小之崩塌地)	Intercept	4.836	.079
	Slope (mean)	-.027	<0.05
	Slope range	-.147	<0.01
	logCA (mean)	2.719	<0.01
	logCA range	-2.452	<0.01
群 3 (面積大之崩塌地)	Intercept	7.627	.163
	Slope (mean)	-.104	<0.05
	Slope range	.056	<0.05
	logCA (mean)	-6.123	<0.01
	logCA range	3.740	<0.01

邏輯回歸分析結果顯示，群 1(面積較小之崩塌地)相對於中等大小面積之崩塌地(群 2)處於坡度較緩(slope mean 係數為負)、相對下邊坡(log CA mean 係數為正)之位置；反之群 2(面積較大之崩塌地)相對於中等大小面積之崩塌地(群 2)同樣處於坡度較緩(slope mean 係數為負)之邊坡，然而其位置則處於相對上邊坡(log CA mean 係數為負)之位置。

本研究以上述之標準邊坡地形剖面來畫分(S 型剖面)，則可歸納出崩塌地幾何形貌在地形分布區位上的特徵(圖 4-7)，此崩塌地形貌與其發生邊坡區為之概念模型為：上邊坡(靠近稜線)：易出現面積較大之崩塌，形狀多為方圓；下邊坡(靠近河道)：易出現面積較小之崩塌，形狀多為細長。

就物理上的成因來說，此現象符合 Casadie et al. (2003)針對淺層崩塌地的寬度進行的研究所提出之論述，在坡度較緩且上邊坡(含土壤水較少)的位置，需要較大的面積(質量)以及較長的寬度去克服上下邊界的阻抗，進而導致邊坡不穩定。

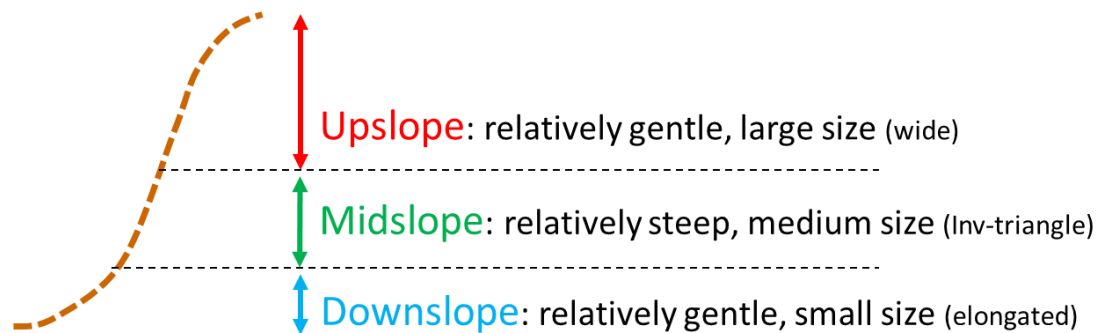


圖 4-7 崩塌地幾何形貌在地形分布區位概念圖

第五章 結論及建議

本研究試驗了機率型崩塌地半自動化判釋方法，可針對崩塌地(侵蝕面)獲得相當良好之崩塌判釋成果。過去針對崩塌地的幾何形貌之研究相對少見，且在定義相關形貌因子上缺乏一致、統一的定義，並且未曾考慮幾何向性的概念，本計畫目前針對三項幾何形貌因子：面積、長寬比以及冠底比，透過崩塌地幾何形貌演算法(landslide geometry generating algorithm, 簡稱 LsGA)進行分析，可以進行崩塌地的幾何形貌的量化及統計分析。主要有下列發現：

- (1) 平均來說，崩塌地之長寬比以及冠底比均大於 1，顯示，在分析的崩塌樣本中，崩塌地主要為長條且為倒三角之形貌，此樣態與一般於野外觀察之經驗相符。
- (2) 本研究進發現崩塌地之面積、長寬比以及冠底比之機率分布特性相似，此特性或可為未來進一步將崩塌地形貌模式化之基礎。
- (3) 針對崩塌地面積與形貌關係的分析結果發現，本研究發現當崩塌面積較小時，其形貌的變異較大，然而當崩塌地面積較大時，其形貌越趨近方圓的樣貌。
- (4) 崩塌地在地形上的分部特性為：上邊坡(靠近稜線)易出現面積較大之崩塌，形狀多為方圓；下邊坡(靠近河道)易出現面積較小之崩塌，形狀多為細長。

本研究之目前成果顯示，根據崩塌與邊坡區位的分析，可知坡度與集水面積此二地形因子與崩塌之面積大小與形貌有所關聯，因此可以嘗試將其利用於崩塌面積之模式發展上；本研究同時也建議後續研究應朝向將不同類型之崩塌現象分別進行模式化之研究，或能更加精進崩塌預測模式之應用性。

目前研究成果主要為根據本研究之崩塌樣本進行分析後所得，後續若能考量不同區域特型，如雨量、地質、以及其他地文及水文條件進行更進一步分析，則有機會更完整地釐清崩塌及其幾何形貌在空間分布上之特徵與背後之影響的機制。

參考文獻

1. Bellugi, D., Milledge, D. G., Dietrich, W. E., McKean, J. A., Perron, J. T., Sudderth, E. B., Kazian, B., 2015. A spectral clustering search algorithm for predicting shallow landslide size and location. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120: 300-324.
2. Casadei, M. and Dietrich, W. E., 2003. Controls on shallow landslide width. In D. Rickermann & C. L. Chen (eds.), *Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment; Proceedings of the Third International DFHM Conference*. Davos Switzerland, September 10-12, 2003: 91-102.
3. Carson, M. A., and Kirkby, M. J., 1972. *Hillslope Form and Process*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K, pp: 297.
4. Chang K. T. and Chiang S. H., 2009. An integrated model for predicting rainfall-induced landslides, *Geomorphology*, 105: 366-373.
5. Chang, K. T., Chiang, S. H., Chen, Y. C., Mondini, A. C., 2014. Modeling the spatial occurrence of shallow landslides triggered by typhoons. *Geomorphology* 208 137-148.
6. Chen, Y.C., Chang, K.T., Lee, H.Y., Chiang, S.H., 2015. Average landslide erosion rate at the watershed scale in southern Taiwan estimated from magnitude and frequency of rainfall, *Geomorphology*, 288: 756-764.
7. Chiang S. H., Chang K. T., Mondini A. C., Tsai B. W., and Chen C. Y., 2012. Simulation of event-based landslides and debris flows at watershed level. *Geomorphology*, 138: 306-318
8. Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P., Carrara, A., 2000.

- Comparing landslide maps: a case study in the upper Tiber River Basin, Central Italy. *Environmental Management* 25 (3), 247-263.
9. Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Rossi, M., Valigi, D., 2009. Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 279(3), 222 – 229.
 10. Guzzetti, F., Mondini A. C., Cardinali M., Fiorucci F., Santangelo M., Chang K. T., 2012. Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews* 112 (1), 42-66.
 11. Hovius, N., Stark, C. P., Allen, P. A., 1997. Sediment flux from a mountain belt derived by landslide mapping, *Geology*, 25(3), 231 – 234.
 12. Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 2004. Landslide inventories and their statistical properties, *Earth Surf. Processes Landforms*, 29(6), 687 – 711.
 13. Milledge, D., Bellugi, D., McKean, J. A., Densmore, A. L., Dietrich, W. E., 2014. Multidimensional stability model for predicting shallow landslide size and shape across landscapes. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119: 2481-2504.
 14. Mondini, A. C., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Rossi, M., Cardinali, M., Ardizzone, F., 2011. Semi-automatic recognition and mapping of rainfall induced shallow landslides using satellite optical images. *Remote Sensing of Environment* 115, 1743 – 1757, doi:10.1016/j.rse.2011.03.006.
 15. Mondini, A. C., Marchesini, I., Rossi, M., Chang, K.-T., Pasquariello,

- G., Guzzetti, F., 2013. Bayesian framework for mapping and classifying shallow landslides exploiting remote sensing and topographic data. *Geomorphology* 201,135-147, doi:10.1016/j.geomorph.2013.06.015, 2013.
16. Mondini, A. C., Chang, K.-T., 2014. Combining spectral and geoenvironmental information for probabilistic event landslide mapping. doi:10.1016/j.geomorph.2014.01.007.
 17. Mondini, A. C., Viero, A., Cavalli, M., Marchi, L., Herrera, G., and Guzzetti, F., 2014. Comparison of event landslide inventories: the Pogliaschina catchment test case, Italy *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2, 1093-1125, 2014.
 18. Montgomery, D. R., 2001. Slope distributions, threshold hillslopes, and steady-state topography. *American Journal of Science* 301(4-5):432-454.
 19. Taylor F. E., Malamud B.D., 2012. The statistical distribution of landslide length to width ratios. *Geophysical Research Abstracts*, 14 EGU2012-826, EGU General Assembly 2012.
 20. van Westen, C. J., van Asch, T. W. J., Soeters, R., 2006. Landslide hazard and risk zonation why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65, 167-184.

附錄

附錄一、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	建議清楚說明本研究使用福衛二號影像的類型與拍攝時間。	本研究收集莫拉克災後福衛二號衛星影像進行崩塌判釋，拍攝時間為 2009 年 8 月 17 日。已於研究資料進行補通說明。
二	宜說明利用衛星光學影像進行崩坍地之侵蝕部、堆積部及側部之可信度？	單以光學影像進行區判在理論上較難進行，因此本研究提出之判釋方法乃是加入潛勢分析。判釋之成果與人工判釋之崩塌侵蝕部進行比較後利用錯差矩陣得總體正確率 90.68%， <i>Kappa</i> 為 0.87，為相當良好之判釋結果。
三	利用水系流向演算區別不同崩塌區位似為一可行之方法，但若位有災後數值地形時當如何處理？又側部與侵蝕部及堆積部如何區分？	若災後無可用之數值地形可使用災資料前，若考慮分析對象為淺層崩塌(深度 0-4 公尺)，而地形無劇烈時，改變對結果影響甚小，若地形音崩塌遭受劇烈改變則必須使

項次	審查意見	回覆辦理情形
		<p>用災後數值地形。在高解析度之衛星及航照資料可取得性越來越高的狀況下，災後數值地形資料也較易產製，有利於相關分析。區分侵蝕部與堆積部依循的判釋準則為：崩塌地趾部與搬運部的交界處坡度會有明顯的變化，因此在數化崩塌地時，可以藉由套疊等高線圖，輔助辨識侵蝕部與搬運部的交界。而崩塌則部分區分之定義為非冠部及底部區域之其餘邊界則為側部邊界。</p>
四	崩塌地之崩塌區與堆積區重疊時應如何處理？	<p>在研究上，若崩塌區與堆積區重疊乃以區分時則不考慮該樣本進行分析。</p>
五	機率型半自動化崩塌判釋為本計劃之關鍵技術，其原理、方法及誤差等，建請補充說明。	<p>已於第一章背景說明一節以及第二章機率型崩塌影像判釋方法一節加強說明。</p>

項次	審查意見	回覆辦理情形
六	本計劃將崩塌地形貌因子如何統計歸納為僅剩面積、長寬比及冠底比等三個參數，另未含坡度參數是否合理，建請補充。	在研究中發現，使用其他因子時難以單獨解釋整體的崩塌形貌，因此在後續僅針對上述三項因子進行分析。 已補充說明於第四章第一節。另外，坡度在於邏輯回歸分析中已納入分析。
七	本計劃研究成果如何應用，以及如何進一步精進現行崩塌之預測，建請補充。	本研究補充說明於第五章結論與建議：本研究之目前成果顯示，根據崩塌與邊坡區位的分析，可知坡度與集水面積此二地形因子與崩塌之面積大小與形貌有所關聯，因此可以嘗試將其利用於崩塌面積之模式發展上。
八	除崩塌區外，堆積區為至災區域，能否納入分析，建議補充。	未來將考慮針對堆積區進行相關幾何形貌分析。
九	從衛星影像中，如何分辨崩塌及土石流，其面積如何計算，邊界如何劃定？	區分侵蝕部與堆積部依循的判釋準則為：崩塌地趾部與搬運部的交界處坡度會有明顯的變化，因此在數化崩塌

項次	審查意見	回覆辦理情形
		地時，可以藉由套疊等高線圖，輔助辨識侵蝕部與搬運部的交界。而崩塌則部分區分之定義為非冠部及底部區域之其餘邊界則為側部邊界。本研究所指面積為數化後所得數化多邊形於平面投影之面積。
十	有關崩塌形貌幾何參數(面積、長寬比、冠底比)，為何不以實際崩塌地之航照分析，以得到更精確的成果？	在分析上，若直接以航照進行判釋，則可能有人為標準不一的情形，因此設計此演算法使標準統一，再者，自動化之演算法能快速針對大區域資料進行分析。
十一	同一集水區有各種大小之崩塌地、如何以面積大小區分不同集群，並和不同環境條件(水文地形)進行連結？	集群分析為自動分群過程，本研究考量在統計顯著的情形，最少可得幾群(三群)。而面積的差異則為分群之後得到的資訊；本研究使用邏輯回歸將各群與坡度以及集水面積進行關聯性分析。

項次	審查意見	回覆辦理情形
十二	崩坍幾何形貌演算法中使用流向演算法決定崩塌底部及冠部，DEM的精度很可能影響分析結果，對於流向演算所要求之精度為何？	DEM 須求之精度隨分析之崩塌地大小有所不同，在 DEM 精度與網格大小能適當呈現崩塌地形貌，不至於過度概括化時便可接受。
十三	對於不同發生類型如新增崩塌、舊崩塌擴大等，此方法能否再區隔出來？	若加入事件前期影像進行分析則可以將新增以及擴大之崩塌地進行區隔。

附錄二、期末聯合審查會主管機關意見回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	分析崩塌形狀(如侵蝕)，並分析參數(長、寬)與崩塌面積間關係，定並未說明其如何進行崩塌規模或體積預測，無法看出研究潛力。	本研究補充說明於第五章結論與建議：本研究之目前成果顯示，根據崩塌與邊坡區位的分析，可知坡度與集水面積此二地形因子與崩塌之面積大小與形貌有所關聯，因此可以嘗試將其利用於崩塌面積之模式發展上。
二	若加入傾斜管理設，由監測邊坡地移動資料，輔助分析山坡崩塌面積預測災害範圍或事先預警控制。	感謝評審意見。
四	研究結果以崩塌的形貌與位置及面積有關，是否可以物理特性或力學特性來做解釋。	本研究針對其物理意義於第四章進行加強說明：就上邊坡(靠近稜線)易出現面積較大之崩塌，形狀多為方圓、下邊坡(靠近河道)易出現面積較小之崩塌，形狀多為細長之情形，就物理上的成因已有研究說明在坡度較緩且上邊坡(含

項次	審查意見	回覆辦理情形
		土壤水較少)的位置，需要較大的面積(質量)以及較長的寬度去克服上下邊界的阻抗，進而導致邊坡不穩定。
五	崩塌源頭分析後續是否能與雨量、地質、水文等條件一起分析。	目前研究成果主要為根據本研究之崩塌樣本進行分析後所得，後續若能考量不同區域特型，如雨量、地質、以及其他地文及水文條件進行更進一步分析，則有機會更完整地釐清崩塌及其幾何形貌在空間分布上之特徵與背後之影響的機制。