

崩塌危害分析模型之建立—以臺北水源特定區為例

陳樹群^[1] 吳俊毅^{[1]*} 謝政道^[2]

摘要 本研究結合崩塌空間機率、時間機率及崩塌規模機率，來進行崩塌危害分析。崩塌潛勢相關因子經篩選後包含 7 個內在地形因子及 2 個外在降雨因子，以建立崩塌潛勢模型；崩塌規模分析則先建立崩塌面積與非累積個數之幕次關係，再以機率密度函數將其轉為崩塌面積累積機率；最後以不同重現期距降雨之超越機率來做為該事件之時間機率，用以估算集水區發生崩塌面積大於一定規模之年計機率。經分析本區崩塌機率較高者為南勢溪上游區域，為未來經營管理之主要目標。

關鍵詞：崩塌潛勢、崩塌危害分析、臺北水源特定區。

The Establishment of a Landslide Hazard Analysis Model for the Taipei Water Source Domain

Su-Chin Chen^[1] Chun-Yi Wu^{[1]*} Cheng-Daw Hsieh^[2]

ABSTRACT Landslide hazard assessment includes the landslide spatial probability, temporal probability, and the probability of landslide area (or volume). Seven geomorphological factors and two rainfall factors, evaluated as effective factors because of the higher correlation with the landslide distribution, were considered in the landslide susceptibility model. The probabilities of landslide area (or volume) were developed by transforming the power law formula in the landslide frequency-area (or volume) distribution. Then, the landslide spatial probability and exceeding probability of different rainfall events as well as the probability of landslide area were used to predict the annual probability of each slope-unit with a landslide area greater than the threshold. The slope-units with high landslide probability were distributed over the upstream Nan-Shih Stream basin, which is the main region for managing serious sediment-related hazards in the future.

Key Words : Landslide susceptibility, landslide hazard analysis, Taipei Water Source Domain.

一、前言

降雨或地震所造成的崩塌為一自然現象，崩塌之土砂經水流之侵蝕、搬運進而堆積，若崩塌土砂未影響到人類社會，則可將崩塌視為天然危害 (natural hazards)，但若崩塌土砂波及到人類社會，則將其視為天然災害 (natural disasters)。而天然災害對人類所造成

之威脅大小，即是災害風險 (disaster risks) 的觀念，在防災工作越來越強調「風險管理」(risk management) 之情形下，崩塌災害風險之定量評估則日漸重要，其中之崩塌危害分析 (hazard analysis) 更是風險評估中最重要一環，因此，本研究擬建立一套崩塌危害分析模型，以做為進行崩塌風險分析之基礎。

崩塌危害最早被定義為「在特定期間特定區域內

[1] 國立中興大學水土保持學系

Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, R.O.C.

[2] 經濟部水利署臺北水源特定區管理局

Taipei Water Management Office, Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, Taipei, Taiwan, R.O.C.

* Corresponding Author. E-mail: d9442006@mail.nchu.edu.tw

某一崩塌現象之發生機率」(Varnes and IAEG, 1984), 而 Guzzetti et al. (1999) 則將「事件之規模大小」納入於上述定義, 即定義崩塌危害為「在特定期間特定區域內某種規模崩塌之發生機率」。Guzzetti et al. (2005) 進一步建立崩塌危害機率模型, 來預測崩塌發生的地點、發生的頻率及規模大小。本研究依此定義, 將崩塌空間機率、崩塌時間機率及崩塌規模機率結合為崩塌危害機率。

崩塌空間機率即為崩塌潛勢分析 (landslide susceptibility analysis), 可分為定性法及定量法兩大類, 定量法又可區分為統計分析及人工智慧方法。運用在崩塌潛勢的統計分析方法主要包括: 二變量分析 (bivariate analysis; Chung and Fabbri, 1993; Zêzere et al., 2007) 及多變量分析 (multivariate analysis)。多變量分析方法是利用多變量迴歸 (multivariate regression; Carrara, 1983; Baeza and Corominas, 2001)、羅吉斯迴歸 (logistic regression, Lee et al., 2008; Rossi et al., 2010) 或判別分析 (discriminant analysis; Guzzetti et al., 2006; Carrara et al., 2008) 得到一組能區別崩塌與非崩塌的線性方程式, 以求得各分析單元的崩塌潛勢值及完成崩塌潛勢圖。

一般在進行崩塌潛勢分析時, 可將集水區劃分成下列 7 種分析單元 (Van Den Eeckhaut et al., 2009): 網格、地勢單元、均一條件單元、邊坡單元、地形水文單元、地形單元及行政區域單元。最易使用的為網格式分析單元, 但因其面積固定且非以地形邊界作為分區邊界, 因此不利於崩塌之分析。故本研究參考 Carrara et al. (1991) 之分析概念, 以邊坡單元 (slope unit) 作為基本分析單元, 因其有較完整之地形分區邊界, 較具地形、地質上之意義。

在時間機率部分, 一般進行某特定危害分析時, 可以透過一定累積之統計資料, 合理地預估該危害發生之頻率。然而, 大部分之天然危害未必能有足夠之統計資料, 而且危害本身包含極高之不確定性 (uncertainty), 因此, 需採用變通之方法。以崩塌危害為例, 降雨因子為崩塌之重要誘發因子, 不同降雨頻率年之降雨強度, 會導致不同之崩塌危害, 以降雨頻率年之超越機率來推論崩塌發生機率, 某種程度亦可以達到估算時間機率之目的。

在崩塌規模機率部分, Bak et al. (1988) 以砂錐模型推求崩塌非累積個數與面積之分布, 發現在某一範圍內崩塌面積與非累積頻率呈現幕次關係 (power law)。Malamud et al. (2004) 分析三筆分別來自加州、

義大利中部及瓜地馬拉的崩塌地資料, 除驗證崩塌面積與非累積頻率之幕次關係外, 進一步將崩塌面積的機率密度函數 (probability density function) 與常見函數擬合, 以反伽瑪分布 (inverse gamma distribution) 所得結果最好。Stark and Hovius (2001) 則以雙柏拉圖分布 (double Pareto distribution) 來擬合崩塌面積的機率密度函數, 所得結果良好。

綜上, 本研究將集水區劃分為若干邊坡單元, 萃取並篩選邊坡單元之潛勢因子, 利用羅吉斯迴歸進行崩塌潛勢分析, 並結合降雨誘發因子之超越機率及崩塌規模之機率密度函數, 來建立降雨所造成之崩塌危害機率模型, 並應用於臺北水源特定區。本區位於大臺北地區東南隅, 面積約 717 km², 為大臺北地區主要供水水源之一。有鑒於颱風豪雨所造成之崩塌土砂, 常造成下游水質濁度飆高, 影響自來水水質。因此, 擬分析本區之崩塌危害情形, 以做為集水區經營管理之參考。

二、崩塌危害分析模型之建立

本研究之崩塌危害可定義為在特定期間特定區域內某種規模崩塌之發生機率 (Guzzetti et al., 2005), 因此, 對某一固定區域而言, 其崩塌危害機率 (H_L) 可視為崩塌空間機率 $P(S_L)$ 、某期間內崩塌發生時間機率 $P(N_L)$ 及崩塌地規模機率 $P(A_L)$ 之條件機率, 如下式所示。

$$H_L = P(S_L) \times P(N_L) \times P(A_L) \quad (1)$$

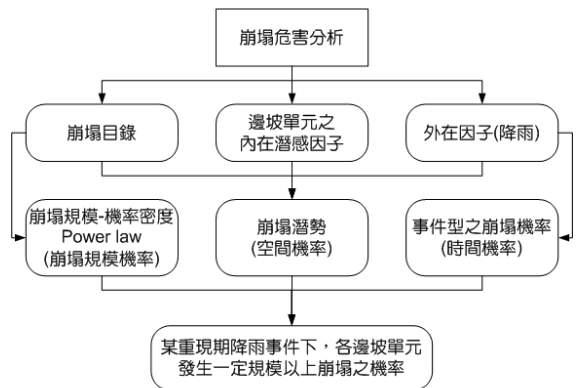


圖 1 崩塌危害分析

Fig.1 Landslide hazard analysis model

利用歷年崩場地圖資(崩塌目錄)、崩塌潛勢相關因子之圖資及崩塌事件之降雨資料來進行崩塌危害分析,包含崩塌潛勢分析(空間機率分布)、崩塌事件發生機率分析(時間機率分布)及崩塌規模分析,如圖1所示。其中,因研究區大部分崩塌圖資屬於颱風豪雨所誘發之崩場地,因此僅將降雨做為促崩因子。

1. 崩塌潛勢分析

本研究將集水區劃分為若干邊坡單元,萃取並篩選邊坡單元之潛勢因子,利用羅吉斯迴歸(logistic regression)進行崩塌潛勢分析,檢定與驗證模式後可得到崩塌空間機率分布,分述如下。

(1) 邊坡單元之劃分

邊坡單元(slope unit)因其有較完整之地形分區邊界,較網格式單元具地形、地質上之意義。因此,本研究以邊坡單元作為基本分析單元。參考 Xie et al. (2004) 之劃分方式,以 GIS 之 Hydrology 模組來劃分邊坡單元,其劃分步驟首先係針對原始地形劃分小集水區,次將原始地形反轉,再同樣針對反轉地形劃分小集水區,最後將反轉前後之小集水區疊合,即可得到左右兩側邊坡單元。邊坡單元之面積最小應大於崩場地之平均面積 (Van Den Eeckhaut et al., 2009),以減少同一崩場地被劃分到不同邊坡單元之情形,期得到較佳的分析結果。

在進行邊坡單元是屬於崩塌樣本或非崩塌樣本之分類時,乃利用邊坡單元中前後期新增崩場地面積大於 100m²時,定義該邊坡單元為崩塌樣本,小於 100m²則為非崩塌樣本。選擇 100m²為樣本之分界,乃為減小崩場地數化誤差之影響,因此以數化崩場地之影像解析度 10m 之 1 個網格面積 100m²為分類標準。

(2) 崩塌潛勢因子之初選

研究崩塌特性時,不難理解若考量影響崩塌之因子愈多,則所建立影響崩塌之模型愈完整。然而在實際分析上,受限於很多資料無法取得,特別是針對大區域的研究,所能獲得的資料更是有限。以致於到目前為止,並沒有一種通用的標準,不過參考相關文獻仍可歸納出選擇影響因子之原則有:(1) 有作用性 (operational), (2) 完整性 (complete), (3) 非均一性 (non-uniform), (4) 可量度性 (measurable) 及 (5) 非重複性 (non-

redundant) 等 5 項 (陳樹群、馮智偉, 2005)。

國內外相關研究中,曾被考慮或使用過的崩塌潛勢因子超過五十種 (林彥享, 2003),本研究根據上述原則初步選取岩性、坡度、坡向、植生覆蓋指數 (NDVI)、地形粗糙度、坡度粗糙度、全坡高、道路距、斷層距等作為內在潛勢因子,再選取降雨相關之資料為外在潛勢因子(促崩因子),各因子概述如下。

- ① 岩性：以中央地質調查所五萬分之一比例尺地質圖為主,依其岩性分類為硬頁岩、石英砂岩、硬砂岩及頁岩、砂岩及頁岩、台地及沖積層。
 - ② 坡度、坡向：坡度、坡向資料的取得係由數值地形模型 (DEM), 經 ArcGIS 之坡度、坡向計算程式處理之後的結果。
 - ③ 植生覆蓋指數 (NDVI)：利用綠色植物吸收紅光及反射近紅外光之特性,來反應植生狀態,其值介於-1 至 1 之間。
 - ④ 地形粗糙度：描述區內之地形變化程度,計算邊坡單元內高程之標準差來反應地形起伏程度,將其視為地形粗糙度 (Wilson and Gallant, 2000)。
 - ⑤ 坡度粗糙度：描述區內之坡度變化程度,計算邊坡單元內坡度之標準差來反應坡度變化程度,將其視為坡度粗糙度 (Wilson and Gallant, 2000)。
 - ⑥ 全坡高：邊坡單元內坡頂至坡趾之相對高差為全坡高。
 - ⑦ 道路距、斷層距：邊坡單元與道路或斷層線的垂直距離,可瞭解道路與斷層對崩塌之影響。
 - ⑧ 降雨因子：造成崩塌事件之颱風豪雨期間,其總雨量、最大時雨量、最大不同延時雨量之空間分布。
- (3) 崩塌潛勢因子之篩選

在崩塌潛勢因子複選部分,本研究參考中央地質調查所 (2009) 之量化山崩潛勢因子篩選流程,繪出各因子之成功率曲線 SRC (success rate curve,)、崩塌個數比圖、次數百分比分布圖及機率分布圖 (P-P plot),以進行因子的複選。

- ① 成功率曲線 (SRC)：用來判定模式對於訓練資料的解釋能力，可由曲線下面積 AUC (area under curve) 作為判定該模式良窳之依據 (Chung and Fabbri, 1999)。AUC 值介於 0~1，越接近 1 代表結果越佳。本研究利用此判定概念，以 SRC 之 AUC 值來評估潛勢因子描述崩塌的能力。
- ② 崩塌個數比圖：計算各因子在不同值域區間下，崩塌樣本數與該區間邊坡單元總數比值，繪製崩塌比值與不同值域之關係圖，可反應崩塌趨勢是否符合因子物理意義。
- ③ 次數百分比分布圖：主要目的為判別崩塌與非崩塌兩群組資料分布是否有區隔，即該因子是否具辨別崩塌與非崩塌的能力。
- ④ 機率分布圖 (P-P plot)：檢驗某變數與指定分配之間的關係，P-P plot 中有一條參考線，當資料型態越符合指定分布時，資料點分布會越靠近此參考線。

(4) 模式正確率評估

本研究之模式正確率評估包含分類誤差矩陣 (classification error matrix)、成功率曲線 (SRC) 及次數百分比分布圖。

- ① 分類誤差矩陣：依各邊坡單元中 Logistic 迴歸所得潛勢值之高低，將其分類為崩塌單元及非崩塌單元，並與邊坡單元實際屬於何種組別比較，以分類誤差矩陣 (classification error matrix) 來評估模式之正確率。
- ② 成功率曲線、次數百分比分布圖：計算方式如前一小節，差別為在此乃評估模式之區別崩塌與非崩塌的能力。

(5) 崩塌空間機率分布

完成崩塌潛勢模型並計算各邊坡單元之崩塌潛勢值後，一般會將邊坡單元依潛勢值大小分類為高潛勢、中潛勢、低潛勢等不同等級，以繪出崩塌潛勢圖。然其潛勢值高低 (0~1 之間) 並無法直接視為崩塌之空間發生機率，因此本研究以崩塌個數比與潛勢值之關係來做為空間機率。其方式為繪製崩塌比值與不同值域之關係圖，將不同潛勢值轉換為空間發生機率；由關係圖並可驗證實際崩塌趨勢是否與崩塌潛勢高低相符。

2. 崩塌規模分析

Bak et al. (1988) 以砂錐模型推求崩塌非累積個數與面積之分布，發現在某一範圍內崩塌面積與非累積頻率呈現幕次關係 (power law)：

$$N_L = C'A_L^{-\beta}$$

其中 A_L ：崩塌面積； N_L ：該崩塌面積之非累積個數 (noncumulative number)； β 與 C' ：常數。

目前已有相當多研究建立崩塌面積與非累積頻率之幕次關係 (power law)，包含降雨所引起崩塌之研究 (Fujii, 1969; Hovius et al. 2000; 翁愷翎, 2009)、地震所引起崩塌之研究 (Guzzetti et al., 2002) 等。

本研究以 Pearson Type 5 distribution (即反伽瑪分布) 來擬合崩塌面積的機率密度函數，先將崩塌面積由小至大排序，次與分布函數擬合得到各參數，再以此計算不同崩塌面積之累積機率，以作為邊坡單元發生崩塌時，其崩塌面積大小之機率。

除了崩塌面積與非累積頻率之幕次關係外，目前亦有研究針對崩塌體積建立其幕次關係，包含降雨所引起崩塌之研究 (Erismann and Abele, 2001)、地震所引起崩塌之研究 (Guzzetti et al., 2004)、海底崩塌之研究 (Hampton et al., 1996) 等。由崩塌體積所建立之幕次關係，其圖形與崩塌面積所建立之幕次關係相似，同理，亦可將此幕次關係轉為崩塌體積累積機率，以作為邊坡單元發生崩塌時，其崩塌體積大小之機率。

因此，由崩塌規模分析之結果，可得在已知邊坡單元有崩塌發生時，其崩塌面積超過某一規模的機率，或崩塌體積超過某一規模的機率。

3. 崩塌之時間機率

本研究針對崩塌時間機率之分析可依崩塌資料年份多寡分為兩種情況，第一種為只有單一事件前後之崩塌資料，則利用該事件之降雨量頻率分析結果，求得該事件之超越機率，即為事件型崩塌之時間機率。第二種為有多年紀錄之崩塌資料，則利用 Poisson 機率模型及假設未來崩塌維持相同的速率，來計算歷史崩塌事件的重現期距，並得到崩塌發生之時間機率。

(1) 事件型崩塌之時間機率

收集造成崩塌事件之颱風豪雨期間各相鄰雨量站之時雨量資料，進行降雨量之頻率分析，以求得該降雨事件之超越機率，做為事件型崩塌之時間機率。

(2) 多年期崩塌資料之超越機率

Poisson 機率模型 (poisson probability model) 及 binomial 機率模型 (binomial probability model) 常被用來分析自然隨機事件之重現機率 (Crovelli, 2000; Onoz and Bayazit, 2001)。而 Poisson 機率模型已在許多研究中被用來推估事件之時間重現機率，如洪水重現機率之研究 (Onoz and Bayazit, 2001)、崩塌重現機率之研究 (Guzzetti et al., 2005)。在時間間隔 t 內發生 n 個崩塌之 Poisson 機率模型如下式所示：

$$P[N(t) = n] = \exp(-\lambda t) * (\lambda t)^n / n! \quad (2)$$

其中 λ 為崩塌發生機率之平均值，其倒數為 μ ， μ 為各崩塌發生間距之平均值。而時間間隔 t 內發生 1 個以上崩塌之機率如下式：

$$P[N(t) \geq 1] = 1 - P[N(t) = 0] = 1 - \exp(-t/\mu) \quad (3)$$

分析步驟首先計算多期崩塌目錄在每個邊坡單元的崩塌事件數，再針對每個邊坡單元計算崩塌之重現期距，最後利用上式及假設未來崩塌維持相同的速率，以得到崩塌發生之時間機率。

三、臺北水源特定區之崩塌危害分析

1. 臺北水源特定區概述

臺北水源特定區位於大臺北都會區東南隅，包含新店溪之青潭堰上游集水區 (含北勢溪、南勢溪)，範圍內有翡翠水庫和供應大臺北自來水的直潭淨水廠，其分布範圍、水系如圖 2 所示。

在地形地貌方面，本區多為丘陵地形，南高北低，海拔高度 12~2,130 m。北勢溪流域之流域平均坡度(流域高程差/主流河長)僅 1.7%，南勢溪流域則為 3.6%，相對而言，北勢溪流域河川之沖蝕力較南勢溪低。在地質土壤方面，本區出露之岩層，在西部麓山帶有野柳群、瑞芳群與三峽群；在雪山山脈地帶有西村層、新高層、四稜砂岩、乾溝層、大桶山層與澳底層；分布於河流附近則有紅土土地堆積、台地堆積與現代之沖積層。土壤的分類，主要可分為黃壤、幼黃壤、石質土及淡色崩積土四大類。在土地利用方面，本區之土地利用主要多為未開發之林地，約佔總面積 92.59%。2001 年納莉颱風後本區之崩塌地面積約為 29.50

ha，約佔總面積之 0.04%，其中崩塌地分布於札孔溪上游居多。

2. 空間機率分析

本研究以 2001 年 9 月 16 日至 9 月 19 日影響臺北水源特定區之納莉颱風為分析對象，以建立崩塌空間機率之模型。

(1) 邊坡單元之劃分

本研究利用臺北水源特定區 DEM (5m) 來劃分邊坡單元，原始地形可劃分為 545 個子集水區；再將原始地形反轉後亦可劃分成不同子集水區單元，將反轉前後所得之子集水區單元結合即可得到邊坡單元。臺北水源特定區共可分為 26,951 個邊坡單元，平均大小約為 2.5ha。

(2) 內在潛勢因子之篩選

本研究初步選取岩性、坡度、坡向、植生覆蓋指數 (NDVI)、地形粗糙度、坡度粗糙度、全坡高、道路距、斷層距等作為內在潛勢因子。並以成功率曲線、崩塌個數比圖、次數百分比分布圖及機率分布圖，來進行潛勢因子的複選，各因子之分析結果如圖 3 所示。另外，在次數百分比分布圖中，亦可計算判別子 D_j 來判斷該因子對崩塌組及非崩塌組之區分能力，其中 $D_j = (\overline{A_j} - \overline{B_j})/S_j$ ， $\overline{A_j}$ 為崩塌組之平均值， $\overline{B_j}$ 為非崩塌組之平均值， S_j 為兩組的混合標準差；各因子成功率曲線之 AUC 值及 D_j 如圖 3 所示。

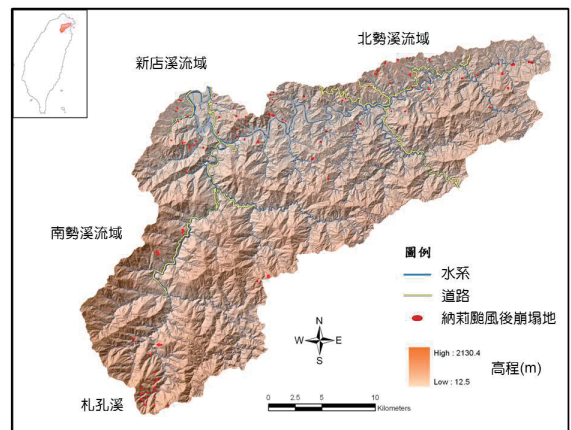


圖 2 臺北水源特定區分區範圍、水系及高程變化

Fig.2 The river system and altitude of Taipei Water Source Domain

在因子複選的選取標準方面, 第一步為因子之成功率曲線下面積 AUC 需大於 0.5, 若小於 0.5 代表該因子在模式中有如一隨機變數, 會提高模式誤差 (Dahal et al., 2008); 且其崩塌個數比圖需能符合因子之物理意義, 如道路距越大, 崩塌比應越小。由圖 3 之分析結果, 第一步剔除的因子有平均坡度、最高高程、平均高程、斷層距。第二步為因子之次數百分比分布圖中判別子 D_j 之絕對值需大於 0.05 (D_j 大於 0 代表崩塌組平均值較大, 小於 0 代表非崩塌組較大), 或其機率分布圖顯示其符合常態分布。由分析結果, 第二步剔除的因子為坡度粗糙度。最後選擇最大坡度、全坡高、地形粗糙度、平均坡向、NDVI、道路距及岩性分類做為內在潛勢因子。

(3) 外在潛勢因子之篩選

本研究以納莉颱風做為分析對象, 因此在降雨因子之篩選部分需以 2001 年 9 月 16 日 0 時至 9 月 19 日 24 時共 96 小時之資料做為分析, 分別計算各雨量站在納莉颱風期間之最大 1、2、3、6、12、24、48、72、96 小時雨量, 再利用地理統計內差方法推估全區之雨量分布情形。

在地理統計分析方法部分, 第一種為利用 Ordinary Kriging 進行分析, 第二種利用 CoKriging 方法, 以降雨量為主要變數, 結合高程輔助變數, 來進行分析, 第三種利用 CoKriging 方法, 以降雨量為主要變數, 結合高程、坡度及坡向等輔助變數, 來進行分析。三種方法在進行分析時, 亦分別選擇 Spherical、Gaussian 做為半變異模型, 因此, 共有六種組合: 以 Spherical 為半變異模型之 Ordinary Kriging、以 Gaussian 為半變異模型之 Ordinary Kriging、以 Spherical 為半變異模型並結合高程之 CoKriging、以 Gaussian 為半變異模型並結合高程之 CoKriging、以 Spherical 為半變異模型並結合高程、坡度及坡向之 CoKriging、以 Gaussian 為半變異模型並結合高程、坡度及坡向之 CoKriging。

不同模型的比較中, 可參考預測誤差 (Prediction Error) 中的幾個指標。符合以下條件的模型是最佳的: 平均值 (Mean) 最接近 0, 標準化平均值 (Mean Standardized) 最接近 0, 均方根預測誤差 (Root-Mean-Square) 最小, 平均標準誤差 (Average Standard Error) 最接近均方根預測誤差, 標準化均方根預測誤差 (Root-Mean-

Square Standardized) 最接近 1。此外, 本研究亦將地理統計方法所推估之降雨分布情形, 與納莉颱風後之崩塌地分布比較, 以繪製各種雨量分布之成功率曲線, 以計算 AUC 值。

由上述各項比較之結果, 本研究採用最大 1 小時雨量 (Gaussian 為半變異模型之 Ordinary Kriging)、最大 12 小時雨量 (Gaussian 為半變異模型並結合高程之 CoKriging) 來做為崩塌潛勢模型的外在促崩因子, 其分布情形如圖 4、圖 5。選擇 1 小時雨量、較長延時雨量等 2 種不同雨量資料之目的, 旨在反應該場颱風降雨之型態。

(4) 羅吉斯迴歸分析

本研究選擇最大坡度 (F_1)、全坡高 (F_2)、地形粗糙度 (F_3)、平均坡向 (F_4)、NDVI (F_5)、道路距 (F_6) 及岩性分類做為內在潛勢因子, 並選擇最大 1 小時雨量 (F_7)、最大 12 小時雨量 (F_8) 做為外在促崩因子, 進行羅吉斯迴歸分析, 羅吉斯迴歸式如下:

$$\begin{aligned} \ln(p/1-p) = & 0.023F_1 + 0.005F_2 + 0.001F_3 \\ & - 0.001F_4 + 0.81F_5 + 0.314F_6 + 0.01F_7 \\ & + 0.006F_8 + 1.636S_1 + 0.699S_2 + 1.904S_3 \\ & - 21.210S_4 - 5.016 \end{aligned}$$

其中, p 為羅吉斯函數, S_1 為岩性 2, S_2 為岩性 3, S_3 為岩性 4, S_4 為岩性 5。結果如圖 6、分類誤差矩陣如表 1、成功率曲線及次數百分比分布如圖 7 所示。由崩塌組正確率 71.0%、非崩塌組正確率 73.2%、成功率曲線下面積 0.786 及次數百分比分布圖中兩組之分離情形可知所建模型之適用性。

(5) 崩塌空間機率分布

在完成納莉颱風崩塌潛勢模型並計算各邊坡單元之崩塌潛勢值後, 進一步以崩塌個數比與潛勢值之關係來做為崩塌空間機率。如圖 8 所示, 崩塌比隨崩塌潛勢值增加而變高, 符合預期

表 1 納莉颱風事件之分類誤差矩陣

Table 1 Classification error matrix of the typhoon Nari

觀測資料 \ 預測結果	崩塌組	非崩塌組	正確率
崩塌組	98	40	71.0
非崩塌組	37	101	73.2
整體			72.1

結果，則可利用崩塌比做為該潛勢區間之崩塌空間機率，即利用關係式將崩塌潛勢值轉換為崩塌比，其結果代表在相同降雨情形下，該邊坡單元發生崩塌之機率。

2. 崩塌規模分析

本研究利用本區之崩塌地圖層資料來進行崩塌規模分析，分別先建立崩塌地面積與非累積個數之幕次關係、崩塌地體積與非累積個數之幕次關係，再以

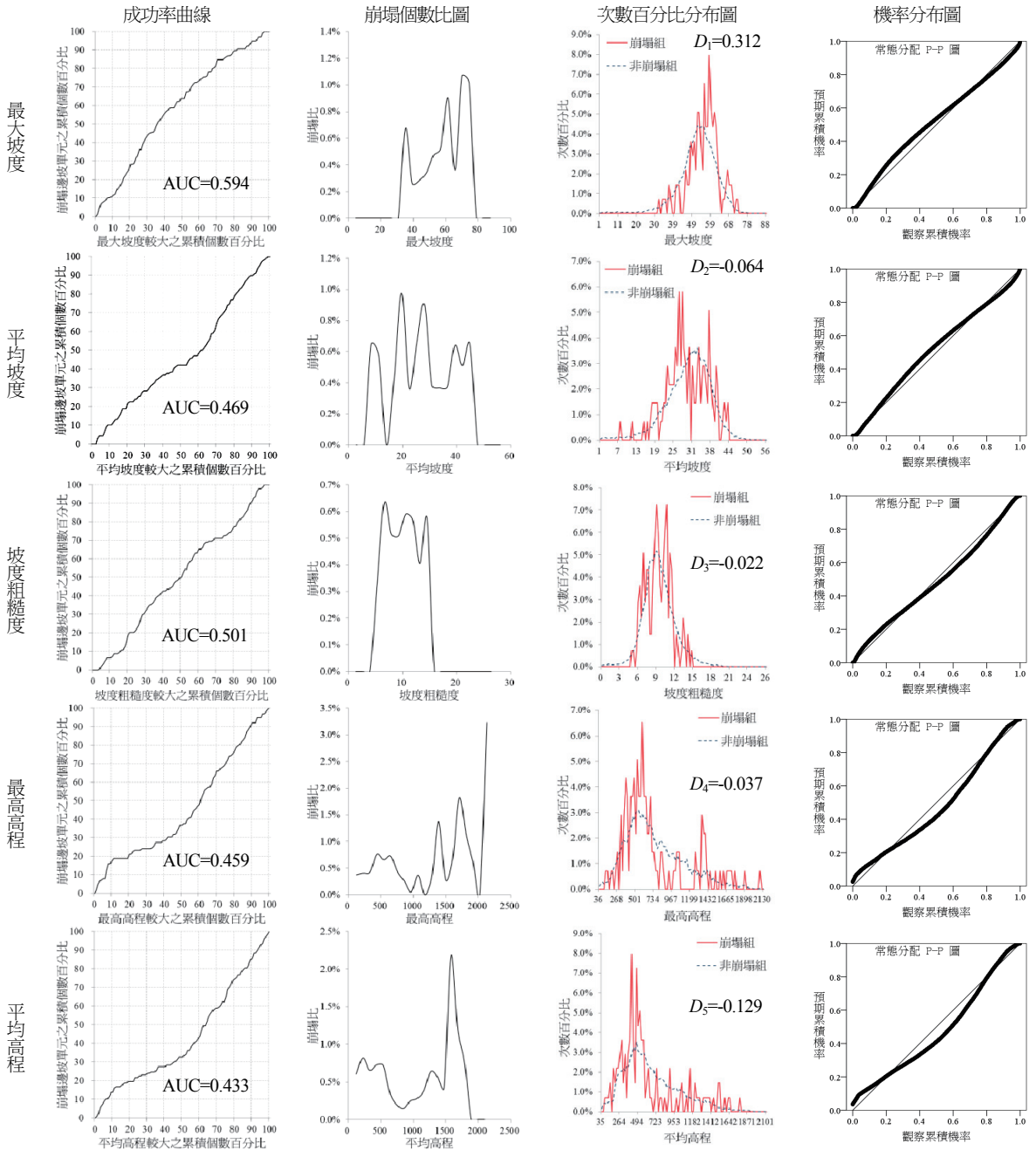


圖 3 各因子之成功率曲線、崩塌個數比圖、次數百分比分布圖及機率分布圖
Fig.3 Success rate curves, landslide ratio distributions, frequency distributions of landslide and non-landslide group, and probability-probability plots of factors

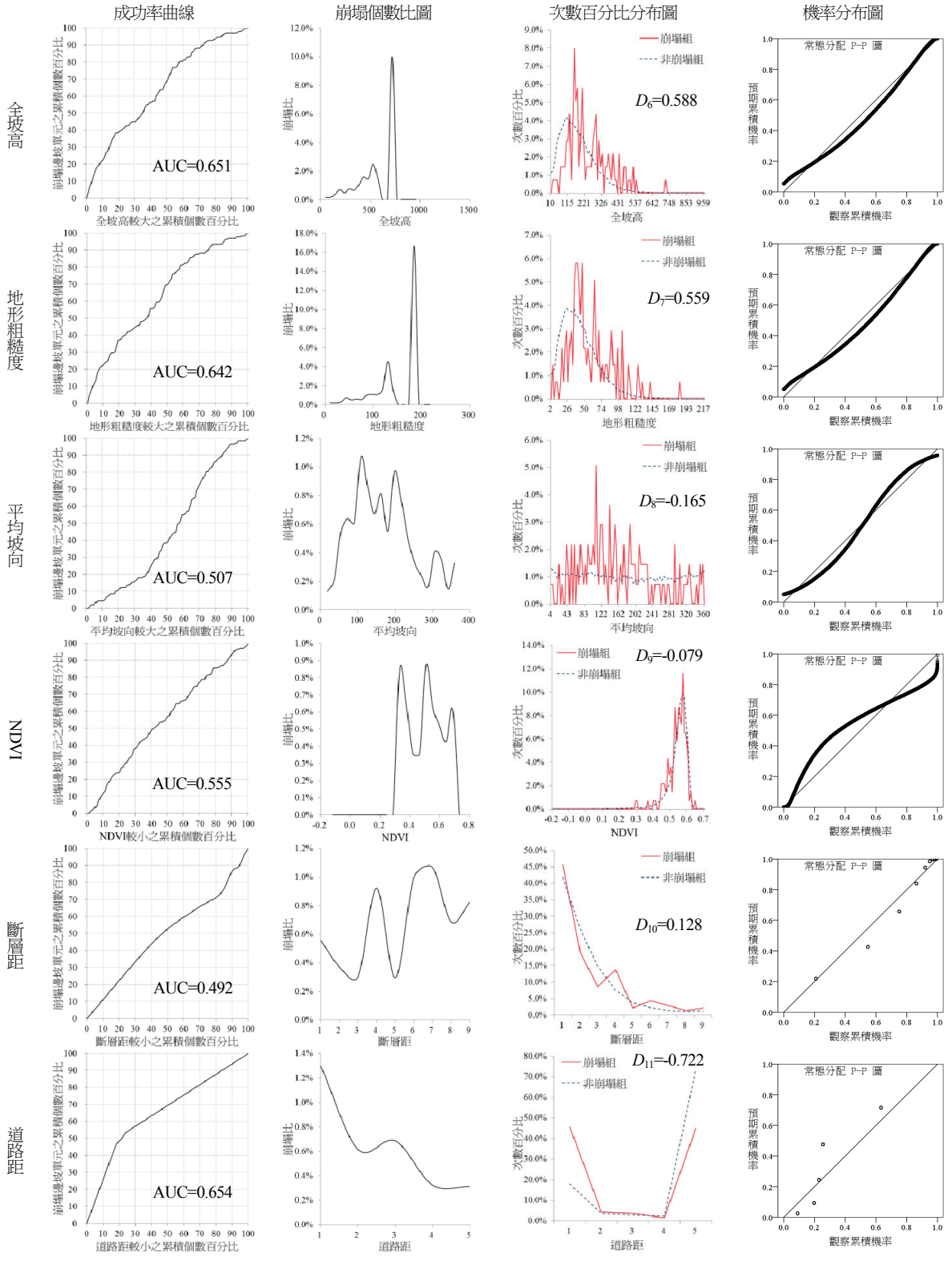


圖 3 各因子之成功率曲線、崩塌個數比圖、次數百分比分布圖及機率分佈圖 (續)
Fig.3 Success rate curves, landslide ratio distributions, frequency distributions of landslide and non-landslide group, and probability-probability plots of factors

Pearson Type 5 機率密度函數將其轉為崩塌面積 (或體積) 累積機率, 以推求崩塌發生時, 其規模超過一定大小之機率。

(1) 崩塌地面積之幕次關係

本研究利用 3 筆崩塌地圖層來進行分析, 第 1 筆崩塌地圖層為納莉颱風後圖層, 共有 109 處崩塌地, 面積分布範圍為 140~33,058m², 第 2 筆崩塌地圖層為重新繪製自國土測繪中心土地利用圖層, 共有 92 處崩塌地, 面積分布範圍為 81~231,564m², 第 3 筆為莫拉克颱風後所數化之崩塌地圖層, 共有 180 處崩塌地, 面積分布範圍為 16~118,108m²。3 筆資料之幕次關係其 C' 值為 2×10¹⁰、β 值為 1.563, 如圖 9 所示, β 值越高代表大面積之崩塌地相對比例越低。

(2) 崩塌地體積之幕次關係

本研究利用崩塌地坡度與崩塌深度之關係 (陳樹群等, 2010) 來推求上述 3 筆資料之崩塌體

積, 第 1 筆資料之體積分布範圍為 375~98,989m³, 第 2 筆資料之體積分布範圍為 147~840,577m³, 第 3 筆資料之體積分布範圍為 49~316,530m³。3 筆資料之幕次關係其 C' 值為 3×10¹³、β 值為 1.551, β 值越高代表大體積之崩塌地相對比例越低。

(3) 崩塌面積累積機率

本研究分別以 Pearson Type 5 及 Pearson Type 5 (3 參數) 等機率密度函數將幕次關係轉為崩塌面積累積機率, 以推求邊坡單元在發生崩塌時, 其面積超過一定大小之機率, 崩塌面積累積機率如圖 10 所示, Pearson Type 5 及 Pearson Type 5 (3 參數) 機率密度函數所得結果極為相近。由圖 10 可知, 本區某一邊坡單元發生崩塌時, 其崩塌面積大於 1,000 m² 之機率約為 35.0%, 大於 10,000 m² 之機率約為 0.3%。

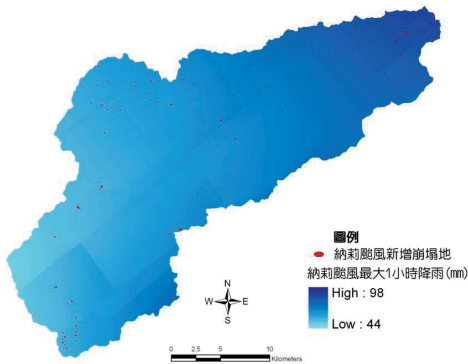


圖 4 納莉颱風事件最大 1 小時雨量之分布
Fig.4 Maximum 1-hour rainfall of the typhoon Nari

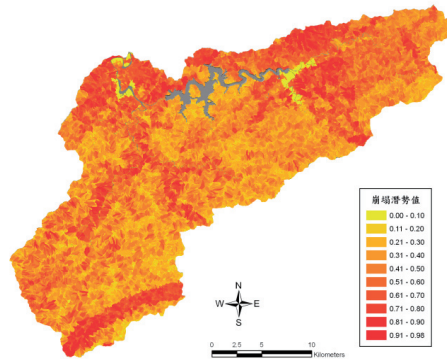


圖 6 納莉颱風事件之羅吉斯迴歸崩塌潛勢圖
Fig.6 Landslide susceptibility map of the typhoon Nari based on logistic regression model

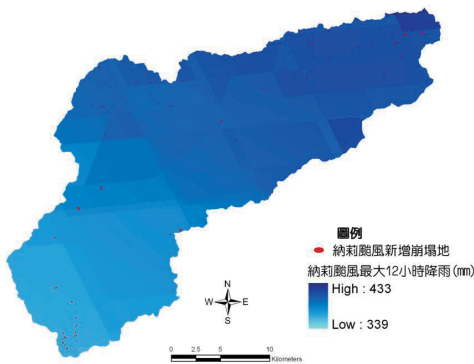


圖 5 納莉颱風事件最大 12 小時雨量之分布
Fig.5 Maximum accumulative 12-hour rainfall of the typhoon Nari

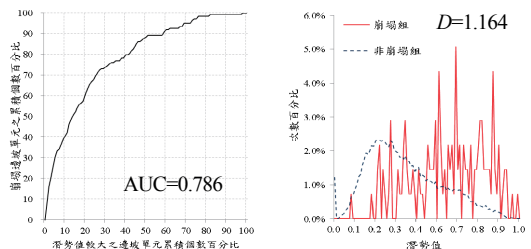


圖 7 納莉颱風事件之成功率曲線及次數百分比分布
Fig.7 Success rate curve and frequency distribution of landslide and non-landslide group of the typhoon Nari

3. 崩塌空間機率及規模之驗證

本研究另以艾利颱風事件之最大 1 小時雨量 (如圖 11) 及最大 12 小時雨量做為外在潛勢因子, 結合已建立之內在潛勢因子來計算本區之崩塌機率圖, 可得本區於艾利颱風降雨情況下, 各邊坡單元發生崩塌之機率。此崩塌空間機率可與實際新增崩塌地分布情形進行比較, 以評估模式之預測能力。

由表 2 可知艾利颱風事件之崩塌潛勢模型預測整體正確率為 79.2%, 為相當不錯的結果; 但崩塌組之正確率僅 50.0%, 推估其原因, 乃建立模型時所採用之納莉颱風降雨量較大 (如圖 4), 而艾利颱風之降雨量明顯較小, 故提高了誤判的情形。另由圖 12 中次數百分比可知, 崩塌組之潛勢值大於 0.5 者較少, 此亦是艾利颱風降雨量較納莉颱風降雨量少之影響; 儘管如此, 成功率曲線下面積仍有 0.749, 代表崩塌地都發生在潛勢值相對較高的地方。此結果說明了本模型除可應用於如建模時降雨量較大之狀況, 以預估「最嚴重」之崩塌情形來做為經營管理時之參考外; 在艾利颱風等降雨量較小之情況下, 仍有一定的準確率。

表 2 艾利颱風事件之分類表

Table 2 Classification error matrix of the typhoon Aere

觀測資料 \ 預測結果	崩塌組	非崩塌組	正確率
崩塌組	54	54	50.0
非崩塌組	5,564	21,279	79.3
整體			79.2

另由艾利颱風所造成的崩塌地有 190 處, 其中面積超過 1,000m² 有 65 處, 比例為 34.21%, 略小於 Pearson Type 5 機率密度函數所得崩塌面積超過 1,000m² 之機率 35.0%; 體積超過 1,000m³ 有 137 處, 比例為 72.11%, 亦略小於 Pearson Type 5 機率密度函數所得崩塌體積超過 1,000m³ 之機率 76.7%。

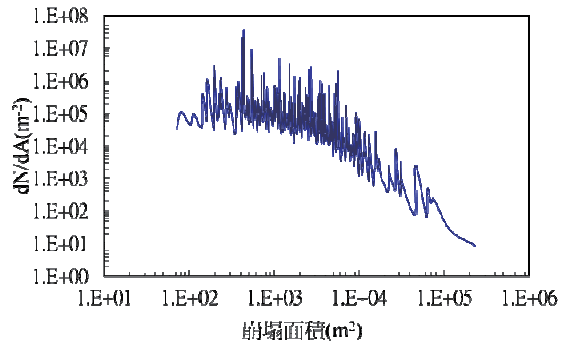


圖 9 崩塌面積之累次關係

Fig.9 The power law of landslide area

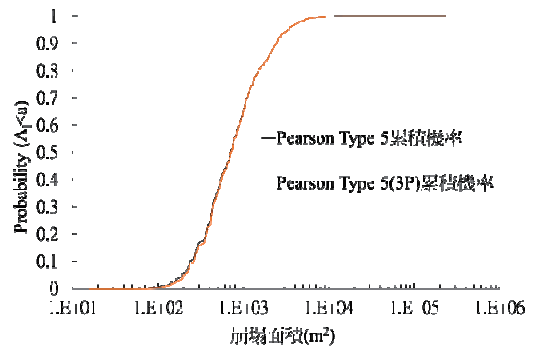


圖 10 Pearson Type 5 崩塌面積累積機率

Fig.10 The accumulative probability of landslide area based on Pearson Type 5 distribution

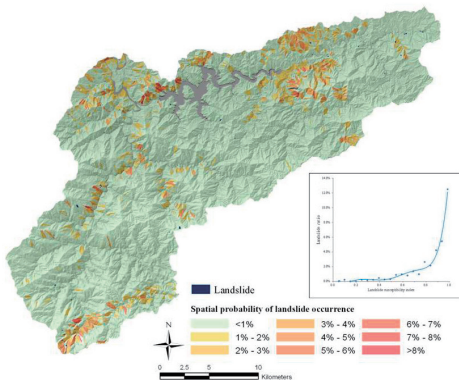


圖 8 納莉颱風之崩塌空間發生機率

Fig.8 Landslide spatial probability of the typhoon Nari

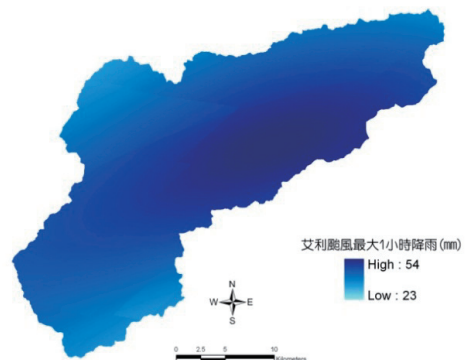


圖 11 艾利颱風最大 1 小時雨量分布

Fig.11 Maximum 1-hour rainfall of the typhoon Aere

四、年計崩塌機率

本研究進一步結合崩塌潛勢（空間機率分布）、崩塌面積機率及不同重現期降雨之超越機率（時間機率分布），來進行崩塌危害分析，並計算年計崩塌機率。

1. 不同重現期降雨之崩塌比

針對本區周遭雨量站中記錄年份超過 10 年之資料，分析此 26 站不同降雨延時下不同重現期之降雨量大小，以得到不同重現期之最大 1 小時雨量及最大 12 小時雨量。再由地理統計的方法分別計算不同重現期之最大 1 小時雨量及配合地形因子而得之最大 12 小時雨量。

再將所建立不同重現期之最大 1 小時雨量及最大 12 小時雨量做為外在潛勢因子，結合已建立之內在潛勢因子來計算本區之崩塌機率圖，並由崩塌潛勢與崩塌比之關係，可得本區於不同重現期之降雨情況下，各邊坡單元發生崩塌之機率，如圖 13 為本區在重現期 20 年之降雨情況下所得之崩塌機率。在此需說明的是，在推估最大 1 小時雨量及最大 12 小時雨量之空間分布時，係採用各雨量站之最大值進行分析，因此，所得到的崩塌潛勢為各站降雨同時達到最大值的狀況，可視為「最嚴重」狀況之預估結果。

2. 年計崩塌比

由不同重現期降雨所得之崩塌機率，代表的是在該事件發生時，各邊坡單元的崩塌機率，然各事件發生的機率不易推求；在此情況之下，可採取分析誘發因子之發生機率做為替代方法。因此，本研究以不同重現期降雨之超越機率來做為該事件發生之機率，並結合相對應之崩塌機率分析結果，來計算本區之年計

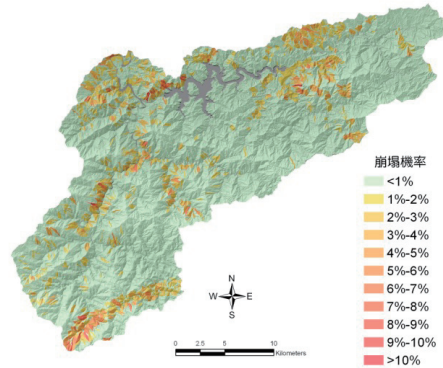


圖 13 重現期 20 年降雨下之崩塌機率
Fig.13 The landslide spatial probability of the rainfall event with 20-year return period

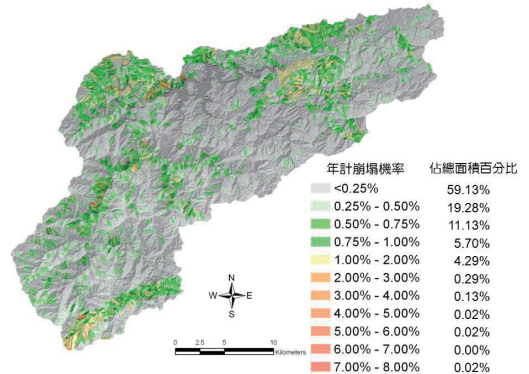


圖 14 臺北水源特定區之年計崩塌機率
Fig.14 The annual landslide probability of Taipei Water Source Domain

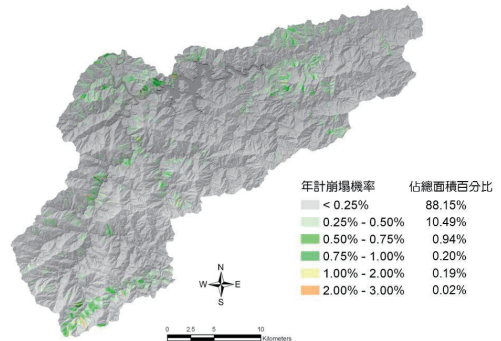


圖 15 發生崩塌面積大於 1,000m² 之年計機率
Fig.15 The annual landslide probability with landslide area more than 1,000m² in each slope unit

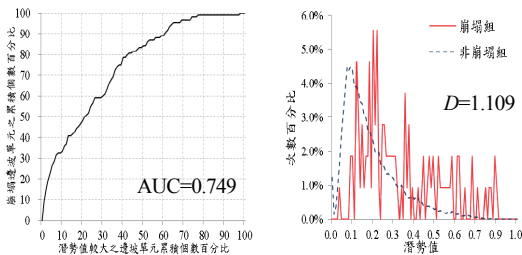


圖 12 艾利颱風事件之成功率曲線及次數百分比分布
Fig.12 Success rate curve and frequency distribution of landslide and non-landslide group of the typhoon Aere

崩塌機率，如圖 14 所示。由圖可知本區崩塌機率較高者為南勢溪上游區域，年發生機率最高約為 7%，北勢溪流域最高約為 4%，大部分地區皆為 1% 以下。

3. 結合崩塌面積之年計崩塌機率

進一步結合臺北水源特定區之年計崩塌機率及崩塌面積機率，即可得到本區邊坡單元發生某一面積以上崩塌之年計機率，如圖 15 為各邊坡單元發生崩塌面積大於 1,000 m² 之年計機率。

五、結論與建議

本研究將集水區劃分為邊坡單元，萃取並篩選邊坡單元之潛勢因子，利用羅吉斯迴歸進行崩塌潛勢分析，並結合降雨誘發因子之超越機率及崩塌規模之機率密度函數，來建立降雨所造成之崩塌危害機率模型。最後並將不同重現期降雨所得之結果結合，藉此預估各邊坡單元發生崩塌超過一定規模之年計機率；主要成果分述如下。

1. 以納莉颱風所造成之崩塌地做為事件型崩塌目錄，而崩塌潛勢相關因子經篩選後包含最大坡度、全坡高、地形粗糙、平均坡向、NDVI、道路距及岩性分類等內在潛勢因子，及納莉颱風最大 1 小時雨量、最大 12 小時雨量等外在促崩因子，由此來建立崩塌潛勢模型，其模型之整體正確率為 72.1%，成功率曲線下面積 (AUC) 為 0.786。此 AUC 值遠大於圖 3 中各崩塌潛勢因子之 AUC，亦說明了本崩塌潛勢模型判斷崩塌發生之能力較單一個別因子為佳。
2. 以艾利颱風事件之降雨量及崩塌地分布情形做為驗證，得到崩塌潛勢模型預測之整體正確率為 79.2%，AUC 為 0.749。結果顯示本崩塌潛勢模型可適用於本區，來預估不同重現期降雨量所造成之崩塌機率空間分布情形。
3. 進行本區之崩塌規模分析時，分別先建立崩塌地面積 (或體積) 與非累積個數之幕次關係，再以 Pearson Type 5 機率密度函數將其轉為崩塌面積 (或體積) 累積機率，以推求崩塌發生時，其規模超過一定大小之機率。由結果可知，本區邊坡單元發生崩塌時，其崩塌面積大於 10,000 m² 之機率約為 0.3%，大規模崩塌之機率較小。
4. 本研究已完成臺北水源特定區之崩塌危害分析，可得到在颱風豪雨事件下，各邊坡單元發生崩塌

面積大於 1,000 m² 之機率，可知南勢溪上游區域為本區之崩塌嚴重地區，為未來土砂經營管理之主要目標。未來可考慮進一步分析各邊坡單元之泥砂遞移率，藉此推估該事件之下游土砂流出量。

5. 本研究目前以降雨量頻率分析結果，求得該事件之超越機率，來做為事件型崩塌之時間機率；未來在有更多年紀錄之崩塌資料時，則可利用 Poisson 機率模型來計算歷史崩塌事件的重現期距，並得到崩塌發生之時間機率。

參考文獻

- [1] 中央地質調查所 (2009)，「都會區周緣坡地山崩潛勢評估」，財團法人中興工程顧問社。(Central Geological Survey, MOEA. (2009). *Landslide susceptibility zonation in slopeland of urban area*, Sino-tech Engineering Consultants Inc. (in Chinese))
- [2] 林彥享 (2003)，「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。(Lin, Y.H. (2003). *Application of Neural Network to Landslide Susceptibility Analysis*, Master thesis, National Central University, Taiwan. (in Chinese))
- [3] 翁愷翎 (2009)，「玉峰溪集水區崩塌型態與分布特性之探討」，國立中興大學水土保持學系碩士論文。(Weng, K.L. (2009). *Types and Distribution of Landslides in the Yufong River Watershed*, National Chung Hsing University, Taiwan. (in Chinese))
- [4] 陳樹群、吳俊銓、王雁平 (2010)，「地震或降雨誘發崩塌之崩塌特性探討」，中華水土保持學報，41(2)，94-112。(Chen, S.C., Wu, C.H., and Wang, Y.P. (2010). "The Discussion of the Characteristic of Landslides Caused by Rainfall or Earthquake," *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 41(2), 94-112. (in Chinese))
- [5] 陳樹群、馮智偉 (2005)，「應用 Logistic 迴歸繪製崩塌潛感圖—以濁水溪流域為例」，中華水土保持學報，36(2)，191-201。(Chen, S.C. and Feng, J.W. (2005). "The Application of Logistic Regression for Landslide Susceptibility Mapping in the Jhuoshuei River Basin," *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 36(2), 191-201. (in Chinese))
- [6] Baeza, C., and Corominas, J. (2001) "Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multi-

- variate statistical techniques.” *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1251-1263.
- [7] Bak, P., Tang, C., and Wiesenfeld, K. (1988). “Self-organized criticality.” *Physical Review*, A38, 364-374.
- [8] Carrara, A. (1983). “A multivariate model for landslide hazard evaluation.” *Mathematical Geology*, 15, 403-426.
- [9] 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 Landform*, 16, 427-445.
- [10] Carrara, A., Crosta, G., and Frattini, P. (2008). “Comparing models of debris-flow susceptibility in the alpine environment.” *Geomorphology*, 94, 353-378.
- [11] Chung, C.F., and Fabbri, A.G. (1993). “The representation of geoscience information for data integration.” *Nonrenew Resour*, 2, 122-138.
- [12] Chung, C.F., and Fabbri, A.G. (1999). “Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping.” *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65(12), 1389-1399.
- [13] Crovelli, R.A. (2000). *Probability models for estimation of number and costs of landslides*, United States Geological Survey Open File Report 00-249.
- [14] Dahal, R.K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamana, M., Dhakal, S., and Paudyal, P. (2008). “Predictive modelling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence.” *Geomorphology*, 102, 496-510.
- [15] Erismann, T.H., and Abele, G. (2001). *Dynamics of Rockslides and Rockfalls*, Springer.
- [16] Fujii Y. (1969). “Frequency distribution of landslides caused by heavy rainfall.” *Journal Seismological Society Japan*, 22, 244-247.
- [17] Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., and Reichenbach, P. (1999). “Landslide hazard evaluation: an aid to a sustainable development.” *Geomorphology*, 31, 181-216.
- [18] Guzzetti, F., Galli, M., Reichenbach, P., Ardizzone, F., and Cardinali, M. (2006). “Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, Central Italy.” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, 115-131.
- [19] Guzzetti, F., Malamud, B.D., Turcotte, D.L., and Reichenbach, P. (2002). “Power-law correlations of landslide areas in central Italy.” *Earth and Planetary Science Letters*, 195, 169-183.
- [20] Guzzetti, F., Reichenbach, P., and Ghigi, S. (2004). “Rockfall hazard and risk assessment in the Nera River Valley, Umbria Region, central Italy.” *Environ. Manage.*, 34(2), 191-208.
- [21] Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., and Ardizzone, F. (2005). “Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale.” *Geomorphology*, 72, 272-299.
- [22] Hampton, M. A., Lee, H. L., and Locat, J. (1996). “Submarine landslides.” *Rev. Geophys.*, 34, 33-59.
- [23] Hovius, N., Stark, C.P., Chu, H.T., and Lin, J.C. (2000). “Supply and removal of sediment in a landslide-dominated mountain belt: Central Range, Taiwan.” *Journal of Geology*, 108, 73-89.
- [24] Lee, C.T., Huang, C. C., Lee, J. F., Pan, K. L., Lin, M. L., and Dong, J.J. (2008). “Statistical approach to storm event-induced landslides susceptibility.” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 941-960.
- [25] Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F., and Reichenbach, P. (2004). “Landslide inventories and their statistical properties.” *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6), 687-711.
- [26] Onoz, B., and Bayazit, M. (2001). “Effect of the occurrence process of the peaks over threshold on the flood estimates.” *Journal of Hydrology*, 244, 86-96.
- [27] Rossi, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Mondini, A.C., and Peruccacci, S. (2010). “Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts.” *Geomorphology*, 114, 129-142.
- [28] Stark, C.P., and Hovius, N. (2001). “The characterization of landslide size distributions.” *Geophysics Research Letters*, 28(6), 1091-1094.
- [29] Van Den Eeckhaut, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Rossi, M., and Poesen, J. (2009). “Combined landslide inventory and susceptibility assessment based on different mapping units: an example from the Flemish Ardennes, Belgium,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 507-521.
- [30] Varnes, D.J., and IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements (1984). *Landslide Hazard Zonation: a Review of Principles and Practice*, UNESCO Press, Paris.

- [31] Wilson, J.P., and Gallant, J.C. (2000). *Terrain Analysis—Principles and Applications*, John Wiley & Sons, New York.
- [32] Xie, M., Esaki, T., and Zhou, G. (2004). “GIS-Based Probabilistic Mapping of Landslide Hazard Using a Three-Dimensional Deterministic Model.” *Natural Hazards*, 33, 265-282.
- [33] Zêzere, J.L., Oliveira, S.C., Garcia, R.A.C., and Reis, E. (2007). “Landslide risk analysis in the area North of Lisbon (Portugal): evaluation of direct and indirect costs resulting from a motorway disruption by slope movements.” *Landslides*, 4, 123-136.
-

2012年02月14日 收稿

2012年04月16日 修正

2012年04月23日 接受

(本文開放討論至2013年6月30日)