

應用環境指標劃定阿里山溪集水區道路沿線崩塌潛勢之研究

林昭遠⁽¹⁾ 鄧亞恬⁽²⁾ 黃文政⁽³⁾

摘要

2009年莫拉克颱風侵襲台灣，累積雨量超過2500mm，造成中南部山區發生嚴重崩塌，其中嘉義阿里山地區累積雨量達3059.5mm，為莫拉克風災中降雨量最高的地區，使阿里山溪產生嚴重的崩塌情形，進而危害道路沿線與其他相關之保全對象；本研究旨在分析阿里山溪集水區內道路沿線之崩塌潛勢，利用SPOT衛星影像進行影像相減萃取新增之崩塌地範圍，結合土地利用及地形資料，運用各類環境指標，探討不同崩塌類型與道路崩壞之相關性，並以不安定指數(DVM)進行崩塌潛勢因子權重劃分。結果顯示道路沿線之地形濕度指數為道路崩塌之重要指標，其權重為0.28；將各崩塌潛勢因子套疊後，以高潛勢區域之崩塌率為最高，與實際莫拉克崩塌災害案例相符，故模式可有效標出危險路段之區位，供相關單位監測管理之用。

(**關鍵詞**：環境指標、不安定指數、崩塌潛勢)

Delineation of landslide potential along the roads in Alishan-Creek watershed by using environmental index

Chao-Yuan Lin⁽¹⁾ *Ya-TienTeng*⁽²⁾ *Wen-Cheng Huang*⁽³⁾

Professor⁽¹⁾, Graduate student⁽²⁾, Doctoral Student⁽³⁾, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

Typhoon Morakot lashed Taiwan in 2009. It brought more than 2,500mm accumulated rainfall and caused a lot of catastrophic landslides in central and southern Taiwan. The highest accumulated rainfall in the area of Alishan reached 3,059.5mm which is the highest in the island. The furious rainfall resulted in many massive landslides that affected the protected targets along the roads. The purpose of this study is to analyze the landslide potential along the roads in the watershed. Landslides extracted from SPOT images which coupled with environmental index calculated from land use and or topographic data was used to explore the correlation between landslide types and road failures. In addition, the Dangerous Value Method (DVM) is employed to derive the weight of factors to evaluate

(1)國立中興大學水土保持學系教授(通訊作者 e-mail: cylin@water.nchu.edu.tw)

(2)國立中興大學水土保持學系碩士班研究生

(3)國立中興大學水土保持學系博士班研究生

the vulnerability classes along the roads. The result shows that topographic wetting index with the weighting of 0.28 could be as an important factor to assess the landslide vulnerability along the roads. The highly potential areas are mostly located at the sites of highest landslide rate. It depicts that there is a good fit for the description of disaster sites caused by typhoon Morakot. Therefore the dangerous road sections could be efficiently identified as the hot spots for the use of further monitoring and maintenance.

(**Keywords** : Environmental index, Dangerous Value Method, Landslide potential)

前言

近年來由於氣候變遷造成全球各地災害頻傳，其中以風災豪雨為最主要災害(表1)。由於台灣山區占總面積三分之二以上，使得許多公路依山而建，所經地形起伏大且險峻；山區道路開發易造成周遭環境平衡遭破壞，若經豪雨侵襲易導致邊坡崩壞的趨勢，造成道路危險程度增加，嚴重損害生命財產之安全；如 2008 年辛樂克颱風於南投縣信義鄉降下連日豪大雨，造成豐丘明隧道鄰近邊坡發生大面積崩塌(交通部，2009；豐丘地滑機制評析，2009)，因此有關道路易致災路段之研究日益重要。過往研究中，道路邊坡破壞多以邊坡穩定與否或崩塌機率分析為主，較少針對因地形導致崩塌進行探討，若能納入考量並繪製風險圖，將有助於道路邊坡的分級管理及監測預警系統的建立，亦可針對不同的崩塌類型採取不同之邊坡保護措施。

崩塌發生原因可概分為潛因(inherent causes)與誘因(initiating causes)兩類(李三畏，1984)。潛因泛指坡地本身之自然環境，主要為地形與地質兩大特性所組成。而誘因則為外在誘發崩塌的因素，諸如地震、長期降雨、集中豪雨、溪流淘刷等，而道路的開闢與土石之開採活動，也皆屬於人為之誘因

影響。若當具備發生崩塌災害潛因之未穩定邊坡，在足夠誘因影響下，便會發生崩塌災害；由於誘因通常難以預測，使得潛因往往決定了潛在崩場地的空間分布，若能調查出潛在崩場地之分佈位置，對於災害管理或開發建設能夠提供適當的預防措施。

集水區地形指標可分為構造地形指標及地文因子，構造地形指標適用於偵測地形變動的量化分析技術(Stock and Dietrich, 2003; Paul et al., 2005; Chen et al., 2006; Crosby and Whipple, 2006)；因地理資訊系統技術的成熟，已提昇了指標分析的精度與效率，改善早期以紙本分析判讀的時間。此外；若道路沿河道兩岸開闢，其道路易受河道凹岸侵蝕影響，造成道路路基流失，發生大規模崩塌。黃凱君(2008)提到，河道形成地點一般地質較為脆弱，河道彎曲的區位，岩性強弱變化大，坡度較陡，配合兩岸週遭的地形，凹岸區位水流易對邊坡造成侵蝕破壞。本研究整合崩塌致災潛勢指標，論述集水區崩塌發生機制，應用不安定指數給予權重，繪製道路風險圖並進行危險分級；可供相關單位作為道路管理之參考。

陳志豪(2002)以南橫公路啞口至新武路段利用不安定指數法、岩體不穩定指數法、區別分析及類神經網路四種分析方式配合

現地調查獲得潛感值分級，進一步比較四種分析方法對研究之適用性。高嘉隆(2003)利用 GIS 空間分析技術，求出資料庫中地形、地質等邊坡崩塌潛感影響因子。將各因子分類等級求取各所占面積與崩壞面積，以崩壞百分比離散情形計算各因子權重值，並將結果製成山崩潛感圖。Kelarestaghi(2003)研究伊朗南部 Sari 山區，利用海拔高度、坡度、坡向、降雨、岩層種類、土地開發、道路距離、斷層距離、水系距離等九項因子作山崩危害分布圖，將 GIS 結合航照圖進行網格分析，以崩壞面積比之方式求出各分子權重，最後以線性疊加方式各個山崩危害值評

分。廖鳳卿(2004)以台 3 線南部路段軟岩區域為研究對象，運用多變量不安定指數法分析與多元線性迴歸分析等方法，推導出台 3 線之邊坡崩塌潛勢在風險評估模式在不同岩性之不安定指數曲線圖，經由曲線圖予以研判邊坡與護坡工程之不安定性，找出潛感路段藉由 GPS/GIS 等圖像資料建構台 3 線之護坡工程資料庫。

本研究參考前人之潛勢模式方法，選定莫拉克事件下之脆弱度評估因子，以不安定指數法計算各因子之權重，並建置其模式以推算於莫拉克事件之崩塌潛勢。

表 1 近年全球各地災害案例

Table 1 Global disaster cases in recent years

發生時間	發生地區	災害情況
2011 年 3 月	泰國南部	連續豪雨形成水災，造成洪水及土石流，使得交通停擺，各處水淹及腰，救援困難，導致糧食與燃料短缺；於災後 7 日雨勢緩和後，隨即派遣人員搶通道路，恢復通車。
2011 年 4-5 月	美國密西西比河流域	由於連日豪雨加上春雪融化，美國中西部發生 70 幾年來最大水患，淹沒沿岸數百公里的低窪地區，造成許多地區道路中斷導致嚴重傷亡。
2011 年 6 月	中國湖北	因城市的快速發展，缺乏完整下水道排水系統，當發生強大豪雨，使之河水氾濫，暴雨積水，多達 82 處路段出現滯水情況，水深高達 60~90cm，淹水面積超過 2000m ² ，交通癱瘓，多處路段被山洪沖刷，形成“懸橋”。
2011 年 7 月	中國四川省	2011 年 7 月 1 日水災造成「汶川生命線」之稱的國道 213 線多處道路中斷，緊急採取疏散措施，超過約 200 萬人受災。
2011 年 7 月	韓國首爾	強大連續暴雨事件，導致首爾市區淹水、停電、交通阻塞、街道與住災區淹水，全國約有 36 條主要道路被封閉，造成重大傷亡。
2011 年 12 月	菲律賓瓦西風災	災區官員表示，暴雨突然來襲，警報發佈得太慢，許多居民根本措手不及，造成水災及土石流導致上百人死亡，許多學校、道路、橋樑都嚴重受損，此災害被列為 2011 年傷亡最慘重之風災。

(資料來源：國家災害防救中心 2011 年報，2012)

研究流程

利用衛星影像以影像相減法萃取集水區崩塌資訊；藉由地形數值模型劃定集水區

源頭、凹岸區位、以及萃取地形濕度指數；另以土地利用圖資萃取道路上邊坡開發區位，組合上述相關資料，以不安定指數法分析脆弱度因子於道路沿線之影響權重，繪製

道路沿線危險潛勢分布圖，將其進行致災潛勢分級，研究流程圖如圖 1 所示。

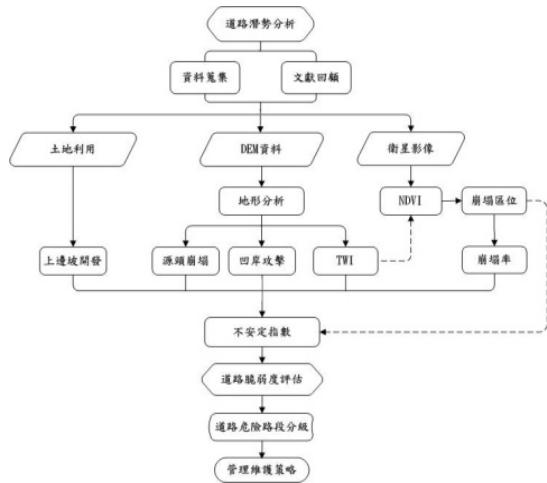


圖 1 研究流程圖

Figure 1 Flowchart of this study

研究材料與方法

1. 研究樣區

阿里山溪集水區位於濁水河流域，為清水溪之子集水區，集水區面積約為 6,653.84 公頃，其內包含嘉義縣梅山鄉太和村與阿里山鄉來吉村、十字村、香林村、達邦村、中山村與中正村，西鄰梅山鄉瑞峰村與瑞里村，南與竹崎鄉中和村、阿里山鄉樂野村相連，東接信義鄉神木村，北接阿里山鄉豐山村與古坑鄉草嶺村，地勢由西北向東南遞增，水流方向由東南向西北流；主要道路分別為台 18、嘉 155、縣 162 甲、縣 149 甲、縣 169，共五條，區位分布如圖 2 所示。

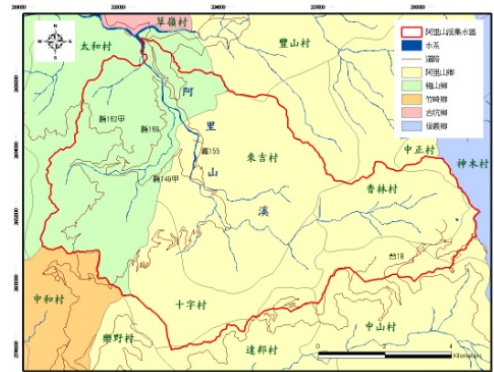


圖 2 阿里山溪集水區地理位置

Figure 2 Location of Alishan creek watershed

2. 研究材料

2.1 SPOT 衛星影像

採用國立中央大學太空及遙測研究中心購得之 2009/01/15 及 2009/09/26 兩期 SPOT 4 衛星影像(圖 3)，藉由影像相減法萃取阿里山溪集水區在莫拉克風災後新增崩塌之區位，再推算出風災後之新增崩塌量及崩塌率。

2.2 數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)

採用解析度為 5m×5m 之 DEM，重新取樣為解析度 10m×10m，以進行水系、地形分析之萃取與集水區劃分。

2.3 道路與土地利用

道路屬性資料是採用交通部運輸研究所提供之道路測量圖資，萃取阿里山集水區內五條主要道路，計算道路沿線崩塌致災潛勢指標之權重，作為道路風險圖繪製之依據。而土地利用部分，因上邊坡之開發行為與道路之開闢有密切關聯性，本研究採用上

邊坡開發之土地利用範圍以墾地、建物、公共設施為主，其資料來源為國土測繪中心所提供(表 3)。

表 3 研究圖層資訊

Table 3 Information of the used maps

類型	來源	年份
SPOT4 衛星影像	中央大學	2009.01.15
	太遙中心	2009.09.26
DEM	內政部	2003
數值航照圖	林務局	2009
道路	交通部運輸研究所	2006
土地利用	國土測繪中心	2008

3. 研究方法

3.1 崩塌地萃取

利用國立成功大學以中央大學福衛二號衛星影像判場地釋崩結果，將莫拉克颱風前崩塌地資料進行分析；而災後部分選定莫拉克風災前後所拍攝之 SPOT4 衛星影像，藉由常態化差異植生指標(NDVI)可利用植物強烈吸收紅光及反射近紅外光之特性，計算紅光及近紅外光波段之和差比值所得(Rouse, 1973)，以此萃取植生之分布，其計算公式如下：

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

式中：

NIR：近紅外光之光譜值。

R：紅外光之光譜值。

將計算出之 NDVI 採用影像相減法 (Image Differencing Method) 配合變遷門檻值 (Change Threshold) 方式進行崩塌地之區位萃取。

3.2 K-means 群集分類法

由 MacQueen(1967)所提出的分群演算法，必須事前設定群集的數量 k，然後找尋下列公式的極大值，以達到分群的最佳化之目的。

$$\arg \min \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} \|x_j - \mu_i\|^2$$

其中的 μ_i 是 S_i 群體的平均。

K-means 群集是知名的群集成員資格指派方法，作業方式是將群集中項目之間的差異最小化，並將群集之間的距離最大化。K-means 中的"means"是指群集的「距心」，這是任意選擇的資料點，在選擇後會反覆調整，直到能代表群集中所有資料點的真正平均值為止。"k"則是指用來植入群集程序的任意數目的資料點。K-means 演算法會計算群集中資料記錄之間的歐氏距離平方(Squared Euclidean Distance)以及代表群集平均值的向量，然後在總和達到最小值時聚合於最終的一組 K 群集。

3.3 不安定指數法

此指數法屬於多變量分析法 (Multivariate Analysis) 的一種，主要用以推算各邊坡崩塌影響因子之影響變異值，並可依其變異值大小排列判定其影響權重比例，給予各因子不同權重之評分值，進而推導出可適性高之多元非線性數學模式(簡李濱

1992；蘇苗彬等人,1998)。該方法透過因子指數運算，可獲得邊坡崩塌潛勢值，在各崩塌潛勢因子分級圖層建立完成後，將研究區內崩塌地圖層與各影響因子分級圖層進行疊合分析，以量化各崩塌影響因子與崩塌地間的關係。

崩塌潛勢因子評分是利用發生災害密度做衡量的基準。而災害密度值可由崩壞網格密度(G)表示，計算方式如下：

$$G_i = \frac{G_{\text{landslide}}}{G_{\text{total}}}$$

G_i ：第 i 級崩壞網格密度

$G_{\text{landslide}}$ ：該分級崩壞網格數

G_{total} ：表示該分級網格總數。

為比較不同因子間崩場地分布的特性，將崩壞網格密度(G)進行正規化，並定義為崩壞百分比(S)。

$$S_i = \frac{G_i}{\sum G_i}$$

S_i ：第 i 級崩壞百分比。

G_i ：該分級崩壞網格密度。

$\sum G_i$ ：表示崩壞網格密度和。

對於山崩潛感因子中之因子採用崩壞網格密度，來表示因子之強弱特性。將各分級之崩壞百分比對應至 1~10 之間，而其值即為以不安定指數求得各因子之評分值。

$$D = \frac{9(S_i - S_{\text{min}})}{(S_{\text{max}} - S_{\text{min}})}$$

D：因子之評分值。

S_i ：表崩塌百分比。

S_{max} 與 S_{min} ：分別表示因子分類中崩塌

百分比之最大與最小值。

因子權重值之計算方法主要之權重值是用以描述所有因子組合後，各因子對崩塌潛感值之影響程度。首先需求得各因子間權重之比較值，利用各因子內各級所佔有百分比的變異係數 (Coefficient of Variation)，代表各因子分級發生崩塌機率之靈敏度，當變異係數較小時，各分級發生崩塌機率相近，表示此因子之分類無法將崩塌機率高之地區反應出來；反之，若變異係數較大者，則可利用此因子分類，而可清楚反應出坡地安定等級。故可利用變異係數之計算做為各因子權重的比較值。

$$V = \left(\frac{\sigma}{\mu} \right) \times 100\%$$

V：變異係數。

σ ：為標準偏差。

μ ：平均值。

利用各因子間所計算出之變異係數，除以全部變異係數值之總和即可得該因子之權重值。

$$W_j = \frac{V_j}{\sum V_j}$$

W_j ：表第 j 個因子之權重值。

V_j ：表第 j 個因子之變異係數。

所得之各個權重值，則表各因子對坡地發生崩塌之影響程度潛感值，其範圍介於 0 ~ 1 間，且和為 1。

而崩塌潛感值之加疊方式，是利用先前所求算各因子各分級之評分及各因子之權重，進一步求算研究區域內，每一個網格所代表之潛勢程度，其數學關係如下：

$$D_t = D_1^{W_1} \times D_2^{W_2} \times D_3^{W_3} \times \dots \times D_n^{W_n}$$

式中 D_t 為崩塌潛感值， $D_1、D_2 \dots D_n$ 表各因子的評分值， $W_1、W_2 \dots W_n$ 表各因子之權重值。各因子加疊之後得到之不安定指數值介於 1~10 之間，值愈高表示發生崩塌的可能性愈大，反之則愈小。

3.4 移動平均法

移動平均法又稱滑動平均法、滑動平均模型法 (Moving average, MA) 是一種根據時間序列資料、逐項推移，依次計算包含一定項數的序時平均數，以反映長期趨勢的方法。當時間序列的數值由於受週期變動和不規則變動的影響，起伏較大，不易顯示出發展趨勢時，可用移動平均法，消除這些因素的影響，分析、預測序列的長期趨勢。移動平均法有簡單移動平均法，加權移動平均法，趨勢移動平均法等。本文選用簡單移動平均法，此方法設時間序列為： $y_1, y_2, \dots, y_t, \dots$ ；簡單移動平均公式為：

$$M_t = (Y_t + Y_{t-1} + \dots + Y_{t-N+1}) / N, t \geq N$$

由上式中可知， M_t 為 t 期移動平均數； N 為移動平均的項數。這公式表示當 t 向前移動一個時期，就增加一個新的近似數據，去掉一個相差較大之數據，轉而得到一個新的平均數。由於數值不斷地逐期向前移動，所以稱為移動平均法。本研究以此方法將道路沿線之點位數值平滑化，可反映危險區位之影響範圍。

脆弱度分析

1. 源頭崩塌潛勢

河道源頭多位於較少人為干擾之區位，除了維持良好植生覆蓋，其集水區土壤沖蝕情形相對也較輕微，然而當野溪或溝谷上游若無足夠之土砂運移下來，極端暴雨時可能導致河床向下刷深，造成源頭集水區崩塌而影響道路安全。將野溪級序 1 之集水區定義為源頭集水區(圖 4)，藉由計算坡面泥砂產量與河道輸砂量之比值，用以量化向源侵蝕指標，其值經線性反向配置後得源頭崩塌指標如下：其值越大表示向源侵蝕越嚴重，發生源頭崩塌之機率也隨之增加。

$$\text{源頭崩塌指標} = 1 - \frac{\text{坡面泥砂產量}}{\text{河道輸砂量}}$$

依照 Strahler 河川級序之原理將河川級序 1 劃分為源頭集水區，選定道路沿線之源頭集水區。透過泥砂產量與河道輸砂量之比值計算出道路沿線源頭崩塌指標之數值，並針對各源頭集水區作崩塌率之計算。

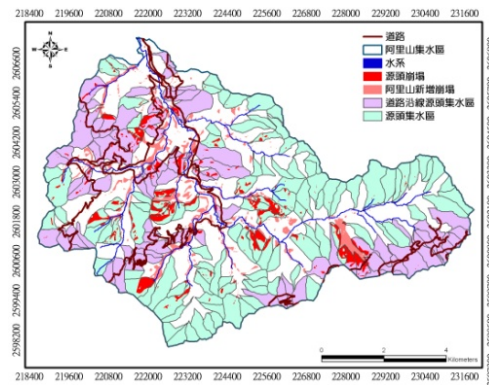


圖 4 源頭崩塌之空間分佈

Figure 4 Spatial distribution of headwater landslide

集水區泥砂產量為坡面土壤流失量與泥砂遞移率之乘積；土壤流失量推估部分，

使用通用之土壤流失公式(Universal Soil Loss Equation, USLE), 為現今世界各國最被廣泛利用之土壤沖蝕推估公式。其中所應用的方法及學理, 是依據水土保持技術規範第三十五條第一項之規定, 山坡地土壤流失估算, 得採用通用土壤流失公式, 其公式如下:

$$A_m = R_m \times K_m \times L \times S \times C \times P$$

A_m : 土壤流失量

R_m : 降雨侵蝕指數

K_m : 土壤沖蝕指數

L : 坡長因子

S : 坡度因子

C : 覆蓋與管理因子

P : 水土保持處理因子

泥砂遞移率指在某一時期內通過河流或溝渠某一段面之輸砂量與該斷面以上之集水區總沖蝕量之比, 稱為泥砂遞移率(Sediment Delivery Ratio, SDR)。為簡易計算坡面泥砂之遞移率, 假設坡面泥砂主要為坡面地表水所帶動, 運移至渠道(常流水)而流失, 所以集水區坡面上任一格點之泥砂遞移率假設為流入格點上游之地表水流長度(L_u ; $L_u = \sum L_i$)與流經該網格之總地表水流長度(L_t)的比值($SDR = L_u / L_t$; $L_t = L_u + L_d$; L_d 為格點至常流渠道之地表水流長度); 亦即若濱水區越靠近渠道之格點, 其坡面沖蝕之泥砂越容易進入渠道, 而增加河道之泥砂產量, 泥砂遞移就越高, 如下圖 5。(林昭遠、林文賜, 2001)

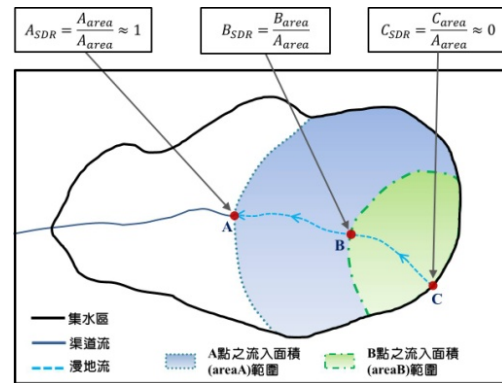


圖 5 集水區泥砂遞移率示意圖

Figure 5 Schematic map of sediment delivery ratio in a watershed

關於河道輸砂量之演算, 由於 Schoklitsch 式易使用且最為保守, 相較於其他公式更適用於台灣地區, 故本研究採用此式作為河道輸砂之計算。

$$q_s = \frac{2500}{\gamma_s} S^{1.5} (q - q_c)$$

$$q_c = 0.26 \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right)^{5/3} \frac{D^{3/2}}{S^{7/6}}$$

q_s : 單位河寬河床載運移量(kg/sec/m)

q_c : 單位河寬之河床載起動流量(cms/m)

q : 單位河寬之流量(cms/m)

γ_s : 泥砂密度(kg/m³)

γ : 水密度(kg/m³)

S : 河床坡度(%)

D : 河床材料粒徑(mm), 原模式採 D_{50} 為代表粒徑

2. 地形濕度

地形濕潤指數 (Topographic Wetness Index, TWI), 此指數說明地形對土壤濕度的

控制能力，其概念為坡度較陡時，逕流流速較快，使得入滲量變低，降低土壤中含水量；而於低平的地方時，由於集水區面積較大且坡度趨於平緩，使逕流於地表時間拉長而逐漸入滲，因此土壤中含水量相對的會較高，換句話說，若網格中所佔的土壤中含水量越低，則代表該網格具較佳之排水性(Wilson and Gallant,2002, Zaitchik and Es,2003)。地形濕度指數的公式如下：

$$\omega = \ln\left(\frac{A_s}{\tan \theta}\right)$$

式中：

As：特定集水區面積該網格之集水區面積；

θ ：該網格坡度。

道路邊坡排水主要沿著坡面之凹地，平常之水流雖有助於入侵植物之生長，植生演替初期對邊坡穩定是有正面之貢獻，惟暴雨或颱風來臨時，可能因土壤累積過多水體，造成土體荷重增加而不利於邊坡之穩定，圖6 即為莫拉克颱風事件所導致之崩塌，其多發生於地形上之內凹處。

將道路發生崩塌點位之地形濕度指數與 NDVI 以 K-means 群集分類法，分為大、小兩類(表 4、表 5)，探討崩場地與參數間之相互關係。其結果顯示，NDVI 與地形濕度指數均高之歸群有較多之崩塌(圖 7)，可知若道路位於地形上之凹地且植生生長茂密之坡面崩塌潛勢較高，故以地形濕度指數作為道路脆弱度之一。



圖 6 道路沿線莫拉克風災後航照圖
Figure 6 Aerial photo of the road suffered by Typhoon Morakot

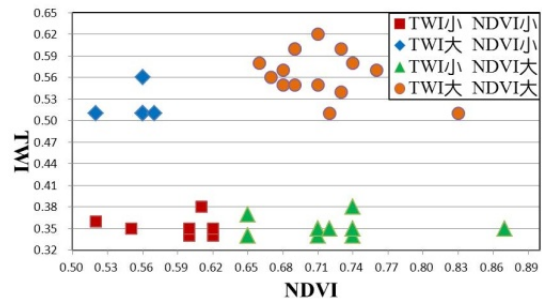


圖 7 以 TWI 及 NDVI 劃分道路崩塌點位之群集分析
Figure 7 Cluster analysis of road landslides using TWI and NDVI

3. 凹岸崩塌潛勢

凹岸崩塌主要為水流流經凹岸時會淘刷坡面之坡腳(圖 8)，一旦邊坡失去穩定便會產生崩塌，造成道路坡面大規模之崩塌。若將凹岸點位之分布納入崩塌潛勢評估之脆弱因子，可先預估河道凹岸衝擊道路之危險程度，進一步防止凹岸所帶來之災害產生，因此本研究在此提出凹岸邊坡崩塌作為潛勢之依據(圖 9)，計算凹岸點位對道路之高程

差與凹岸點位置道路最短距離之比值，當其值越大表示其脆弱度越高，反之則越低，計算方式如下：

$$\text{凹岸崩塌潛勢} = \frac{\text{保全對象距凹岸點位之高程差}}{\text{保全對象距凹岸點位距離}}$$



圖 8 河道凹岸航照圖

Figure 8 Aerial photo of concave bank

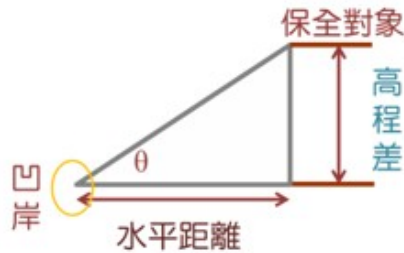


圖 9 凹岸邊坡崩塌計算示意圖

Figure 9 Index of collapse potential for concave bank

4. 上邊坡崩塌潛勢

上邊坡農地等開發地不當之排水，易造成下邊坡坡面淘刷崩塌，會影響下邊坡道路之安全(圖 10)，因此為反映下方保全對象受上邊坡崩塌之致災潛勢，以保全對象與上邊坡開發區位之緩衝距離為重要考量因子之一，此外當上邊坡墾地與保全對象間之退縮距離相同時，高程差若越大，相對的也提高

了保全對象之致災潛勢，故集水區保全對象之上邊坡崩塌潛勢計算如下：

$$\text{上邊坡崩塌潛勢} = \frac{\text{保全對象與上邊坡之高程差}}{\text{保全對象距上邊坡距離}}$$

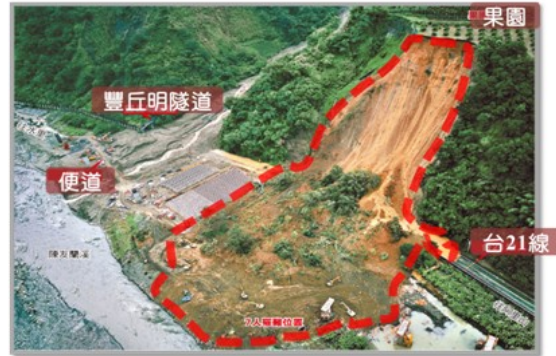


圖 10 豐丘明隧道上邊坡崩塌

Figure 10 Collapse at the upper slope of Fengchui open tunnel

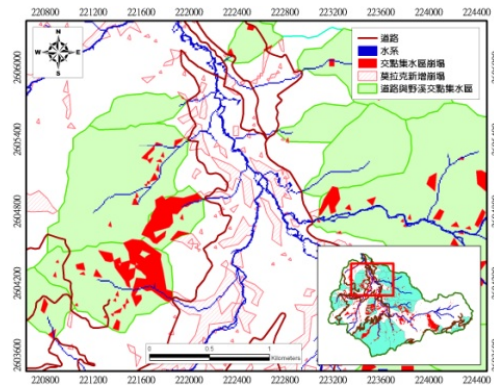


圖 11 道路與水系交點集水區崩塌分布圖

Figure 11 Spatial distribution of landslide at the watersheds determined using the cross points of road and stream as the outlet

5. 集水區崩塌率

前述四種脆弱度因子皆為一次災害，並無考慮崩塌後之土砂對下游地區之二次災

害，由於崩塌後之土砂易於暴雨來臨時形成土砂災害，本研究運用道路與水系之交點集水區，計算各集水區之崩塌率，並以此作為道路脆弱度因子(圖 11)。

崩塌因在此次事件下，導致阿里山溪集水區道路破壞之面積較少，因此兩指標之權重較低。

結果與討論

1. 集水區崩塌資訊之萃取

利用阿里山溪集水區莫拉克風災前、後期衛星影像萃取新增崩塌區位(圖 12)，可得集水區之崩塌面積及崩塌率為 559.98 公頃及 8.42%，以水利用地之崩塌率 13.76% 為最高，其次則為農業用地 8.97%，而道路崩塌率僅 6.71%，低於集水區崩塌率，與集水區相較下道路受災並不嚴重，顯示本集水區之道路區位較其他土地利用類別受土砂災害之影響較小。

表 6 集水區與道路崩塌資訊

Table 6 Landslide information of the analyzed roads and watershed

項目 \ 類別	區域面積 (ha)	崩塌面積 (ha)	崩塌率 (%)
農業用地	630.83	56.87	8.97
道路用地	78.44	5.26	6.71
森林用地	5076.37	434.28	8.55
水利用地	166.52	22.92	13.76
建築用地	1.71	43.65	3.92
公共用地	1.23	0.3	2.44
其他用地	656.78	39.21	5.97
集水區	6653.82	559.98	8.42

2. 道路沿線脆弱度分析

2.1 脆弱度權重分析

由表 7 可知崩塌潛勢之推估以地形濕度指數之權重值為最大，表示阿里山溪集水區於莫拉克風災下，道路崩塌之原因乃為瞬時暴雨，使多數道路沿線邊坡排水量超過邊坡負荷產生崩塌，為此，應於道路沿線之窪蓄區位廣設滯洪設施，暴雨期間將道路邊溝排水適時導入毗鄰滯洪池，可減緩地表逕流對河道之負荷，又滯洪設施可結合生態、景觀、灌溉等多功能環境營造。其次為道路集水區崩塌率，此指數權重值雖高，惟其道路崩塌率並非類別中較高之部分，表示在莫拉克事件下集水區崩塌率亦受其他因子影響；上邊坡崩塌潛勢、凹岸邊坡崩塌及源頭

2.2 道路沿線崩塌潛勢分級

為進一步了解阿里山溪集水區道路沿線之崩塌潛勢程度，運用上述所計算之結果，進行道路沿線各脆弱度因子之套疊，並依其等級劃分為高潛勢區、中潛勢區及低潛勢區等三級(圖 14)，將各級潛勢區域之實際崩塌面積與區域總面積之比值計算其崩塌率(表 8)，結果顯示，高潛勢區域所佔之崩塌率為 7.06%，高於中、低潛勢區之 6.61% 及 3.6%，低潛勢區域之崩塌區位多分布於中、高潛勢間，主要是中、高潛勢崩塌影響範圍邊界之小規模零星崩塌，不易造成道路中斷等嚴重土砂災害。顯示本研究所構置之道路崩塌潛勢評估模式能有效估算極端氣候下集水區道路沿線之崩塌潛勢。

表 7 脆弱度因子權重分析

Table 7 Analysis of weight for the vulnerability factors

數值範圍	相對崩塌率	不安定指數	影響分數	變異係數	權重
地形濕度					
0.15~0.24	9.05	1.00	0.28		
0.25~0.43	9.58	1.09	0.30		
0.44~0.60	17.93	2.47	0.68	103.78	0.28
0.63~0.73	63.44	10.00	2.76		
集水區崩塌率					
0	16.94	2.01	0.47		
0~0.24	11.76	1.00	0.24	88.73	0.24
0.24~0.5	58.11	10.00	2.36		
0.5~7.41	13.19	1.28	0.30		
上邊坡崩塌潛勢					
0.02~18.41	50.39	10.00	1.93		
18.42~55.15	12.95	1.41	0.27	72.33	0.19
55.25~89.13	25.46	4.28	0.82		
91.95~110	11.19	1.00	0.19		
凹岸崩塌潛勢					
<0	15.34	1.00	0.11		
0.01~0.38	26.85	5.40	0.60	41.74	0.11
0.39~0.67	18.92	2.37	0.26		
0.68~0.81	38.89	10.00	1.11		
源頭崩塌潛勢					
0.33~0.86	3.94	1.00	0.18		
0.87~0.93	20.41	4.61	0.85	69.15	0.18
0.93~0.98	30.64	6.85	1.26		
0.98~1.0	45.01	10.00	1.84		

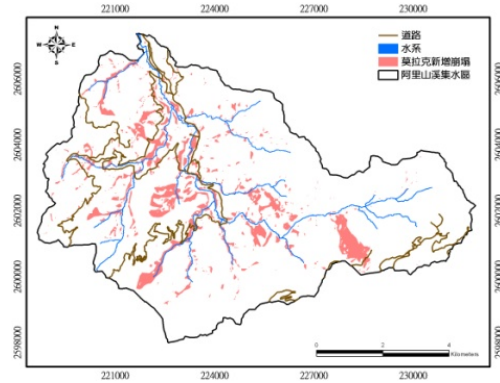


圖 12 阿里山溪集水區新增崩塌分布圖

Figure 12 Spatial distribution of new added landslide at Alishan creek watershed

表 8 各級潛勢路段之崩塌率

Table 8 Landslide rate of the road for each vulnerability potential type

項目類別	區域面積 (ha)	崩塌面積 (ha)	崩塌率 (%)
高潛勢	23.79	1.68	7.06
中潛勢	53.54	3.54	6.61
低潛勢	1.11	0.04	3.6

崩塌潛勢案例驗證

1. 嘉義 149 甲縣道

由於莫拉克風災帶來充沛雨量，使阿里山溪溪水暴漲，引起土石流潛勢溪流暴發土石災害，導致阿里山溪因土石流淤塞水位上升，造成多戶民宅受損，並沖毀來吉五鄰大橋聯外道路，縣道 149 甲因而受溪水淘刷，多處路基流失(行政院農委會水土保持局，2009)。將現地災害位置與崩塌潛勢對照，發現其位置正好吻合於崩塌潛勢預測中之高潛勢區位，且萃取出此段之道路危險潛勢權

重發現(如圖 15), 里程數於 50K~51K 為危險潛勢權重較高之路段, 其可驗證此地段之崩塌潛勢因子與本文採用之崩塌因子相符(圖

16), 當發生如莫拉克事件之頻率年災害, 可用於災前之危險潛勢預測評估作業, 將評估結果較為脆弱之路段作災害性之管理。

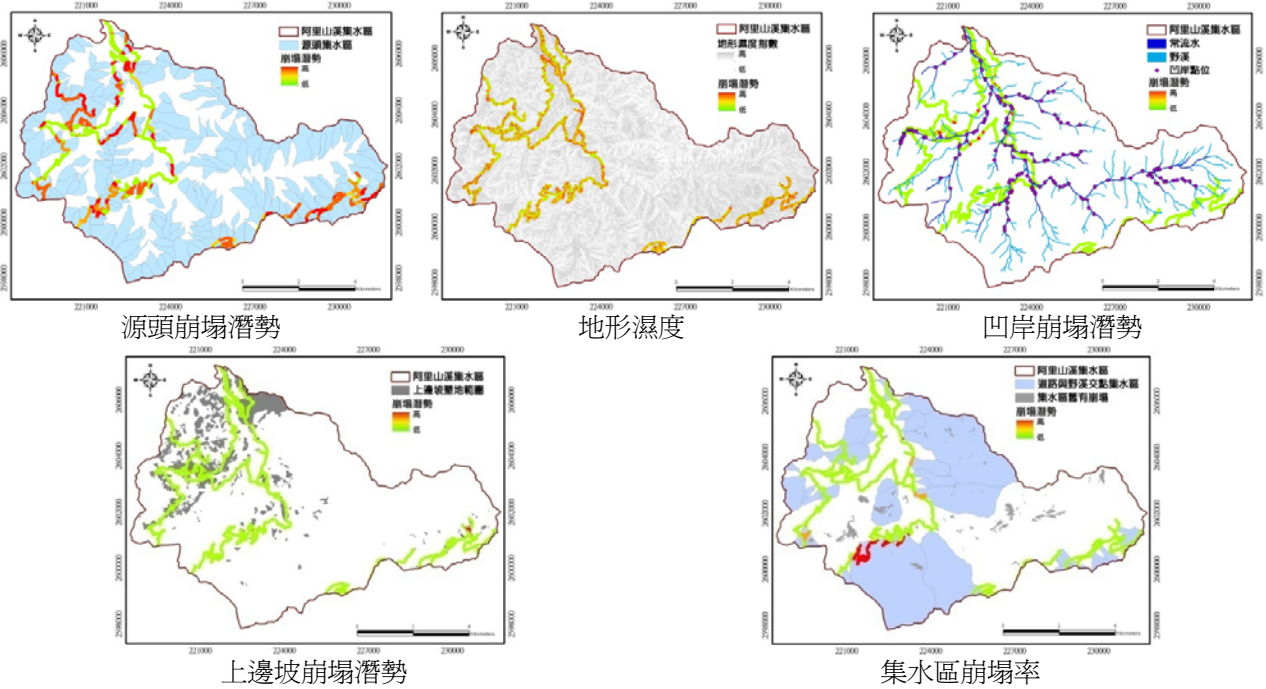


圖 13 道路沿線各脆弱度因子之空間分布

Figure 13 Spatial distribution of each vulnerability index along the roads

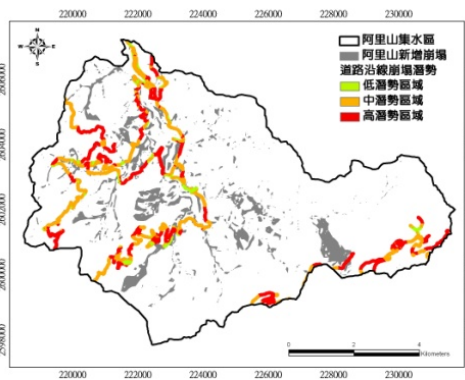


圖 14 道路沿線崩塌潛勢圖

Figure 14 Map of landslide potential along the roads

2. 嘉義 169 縣道

因土石流潛勢溪流爆發土石流災害, 使得阿里山溪洪水暴漲, 沖毀嘉義 169 縣道與 149 甲縣道之連接橋梁(社興橋)及河岸農田, 導致 169 縣道沿線多處上邊坡崩塌, 路基因而流失損毀, 部分道路中斷, 溪水夾帶之泥砂侵入國小宿舍, 其土石淤積掩埋仁和國小宿舍後方等 5 戶房舍(行政院農委會水土保持局, 2009)。將現地之災害位置與崩塌潛勢區位對照, 萃取出此段之道路危險潛勢值, 發現災害位置 9K~11K 處之危險潛勢

值多位於高潛勢區位(圖 17)，因此可驗證此地段之崩塌與高潛勢崩塌相符(圖 18)，當再次發生如莫拉克事件之頻率年災害時，可以此方式推估其災前之危險潛勢區位，以避免災害危險之發生。

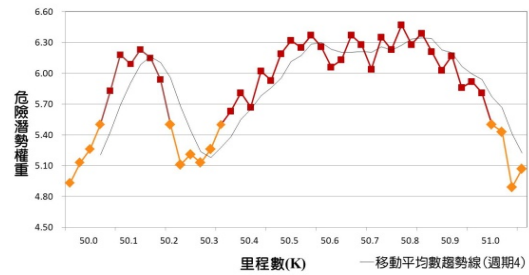


圖 17 嘉義 169 縣道 9K~11K 易致災潛勢圖
Figure 17 Map of vulnerability potential for Chiayi-169road at the section of 9K~11K

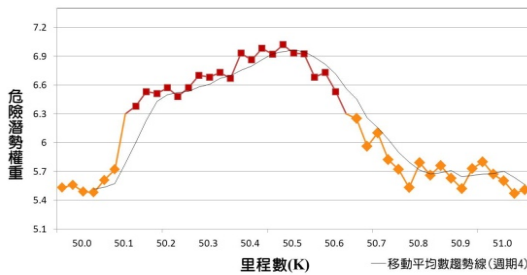


圖 15 嘉義 169 縣道 50K~51K 易致災潛勢圖
Figure 15 Map of vulnerability potential for Chiayi-169road at the section of 50K~51K

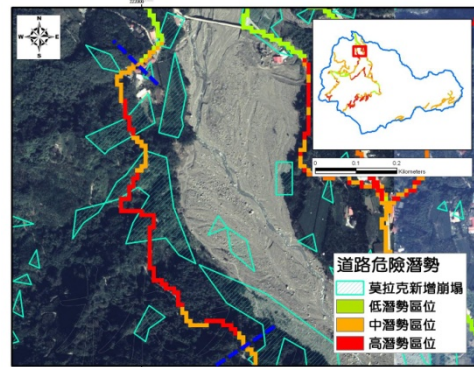


圖 18 嘉義 169 縣道重點區位崩塌潛勢分佈圖
Figure 18 Spatial distribution of landslide potential for the hotspot area along Chiayi-169 road

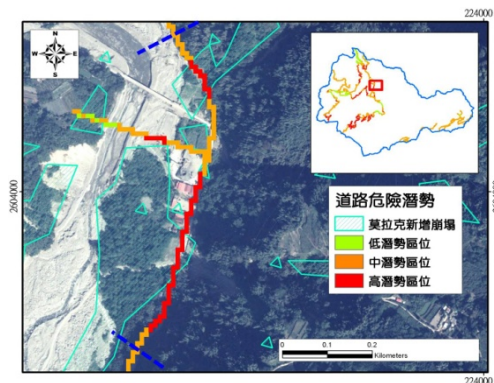


圖 16 嘉義 149 縣道重點區位崩塌潛勢分佈圖
Figure 16 Spatial distribution of landslide potential for the hotspot area along Chiayi-149 road

結語

道路乃維繫國家經濟之管線，一旦發生崩塌將影響人民之生命財產安全，因此對道路破壞潛勢之預測極為重要。本研究藉由 DEM 及衛星影像萃取五種致災潛勢指標，並以不安定指數計算其權重，繪製道路沿線脆弱度之空間分布，集水區的地形濕度指標為道路崩塌主要影響因子，可於道路沿線之適當滯蓄區位，廣設滯洪設施，串聯道路邊

溝排水，營造沉砂、滯洪、景觀、生態等多功能濕地，避免道路邊溝排水直接排放，造成中下游河道之負擔。另將道路沿線脆弱度進行分級，針對高脆弱度路段作適當的管理與維護，對於低脆弱度之路段可規劃為暴雨時行車避難路段。

誌謝

本研究承國科會計畫(NSC101-2313-B-005-021)補助經費，謹此致謝。

參考文獻

1. 李三畏(1984)，台灣崩塌問題探討，地工技術 7：43-49。
2. 吳至剛(2002)，「氣候變遷對高屏流域水資源衝擊之探討」，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文。
3. 林昭遠、林文賜(2001)，集水區資訊系統(WinGrid)入門，暉帥股份有限公司。
4. 許晃雄(2001)，「淺談氣候變遷的科學」，科學發展月刊，第二十九卷，第十二期，第 867-878 頁。
5. 林昭遠、黃凱君、莊智瑋、林家榮(2008)，地形指標與集水區地文因子關係之研究，中華水土保持學報，39(2): 183-194。
6. 吳從龍(2009)，山區道路邊坡崩塌潛勢之研究，逢甲大學運輸科技與管理學系碩士在職專班碩士論文。
7. 吳佐川(1993)，台灣地區崩塌地區域特性之研究，國立台灣大學森林學研究所碩士論文。
8. 高嘉隆(2003)，台十四省道 31~75K 沿線邊坡山崩潛感分析，碩士論文，朝陽科技大學營建研究所碩士論文。
9. 黃凱君(2008)，集水區潛在崩塌區位劃定之研究，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
10. 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。
11. 陳信州(2005)，邊坡破壞潛勢分析-以阿里山台 18 線公路為例，國立成功大學土木研究所碩士論文。
12. 陳志豪(2002)，變質岩公路邊坡破壞之潛感分析-以南橫公路啞口至新武段為例，國立成功大學資源工程學系碩士論文。
13. 蘇苗彬(1998)，集水區坡地安定評估之計量分析方法，中華水土保持學報 29(2):105-114
14. 趙衛君(2005)，應用高斯過程建立分階式山區道路邊坡崩塌預測模式之研究－以阿里山公路為例，國立台灣科技大學營建工程系碩士學位論文。
15. 廖鳳卿(2004)，GPS/GIS 應用於南台灣軟岩公路邊坡潛在災害評估分析模式之建立與應用，國立屏東科技大學土木工程學系碩士論文。
16. 賴世偉(2007)，不安定指數法應用於石

- 門水庫集水區崩塌潛感分析之研究，
國立中興大學水土保持學系碩士論
文。
17. 行政院農委會水土保持局(2009), 莫拉克颱風災重大土石災例最速報。
 18. 行政院交通部公路總局(2009), 豐丘地滑機制評析。
 19. 行政院災害防救委員會國家災害防救科技中心(2011), 國家災害防救科技中心 2010 年報。
 20. 行政院災害防救委員會國家災害防救科技中心(2012), 國家災害防救科技中心 2011 年報。
 21. Crosby, B. T. , and K. X. Whipple (2006), “Knickpoint initiation and distribution within fluvial networks: 236 waterfalls in the Waipaoa River,” North Island, New Zealand, *Geomorphology*, in press.
 22. Dai, F. C. and C. F. Lee (2002), “Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS,” *Journal of Geomorphology*, Vol.42, Pages 213-228.
 23. MacQueen, J. B. (1967), “Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations,” *Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Berkeley, University of California Press, 1:281-297.
 24. Wilson, J. P. and J. C. Gallant (2000), “Digital terrain analysis”. In: Wilson, J. P., Gallant, J. C. (Eds.), *Terrain Analysis*. John Wiley & Sons, New York, pp. 1–27.
 25. Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A. and D. W. Deering (1973) ,“Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS,” *Third ERTS Symposium*, Goddard Space Flight Center, Washington, DC. NASA SP-351, 390~317.
 26. Kelarestaghi, A. (2003) ,“Investigation of Effective Factors on Landslides Occurrence and Landslide Hazard Zonation,” *Conference of Map Asia 2003*, Poster.
 27. Stock, J. D. and W. E. Dietrich (2003), “Valley incision by debris flows: Evidence of a topographic signature,” *Water Resources Research* 39, 1089. doi:10.1029/2001 WR001057.
 28. Zaitchik, B. F. and H. M. van Es (2003), “Applying a GIS slope stability model to site-specific landslide prevention in Honduras,” *Journal of Soil and Water Conservation* 58(1):45-53.
-
- 102 年 05 月 02 日收稿
102 年 05 月 02 日修改
102 年 05 月 03 日接受