

福山試驗林聯外道路土砂災害潛勢評估之研究

A STUDY ON THE POTENTIAL ASSESSMENT OF SEDIMENT DISASTERS ALONG THE ACCESS ROADS TO THE FUSHAN EXPERIMENTAL FOREST

台灣坡地防災學會
研究員

吳 炤 緯
Shao-Wei Wu

永勝工程顧問有限公司
應用地質技師

陳 嘉 榮
Chen-Chia Jung

林業試驗所
森林經營組
副研究員

曾 俊 偉
Chun-Wei Tseng

國立中興大學
水土保持學系
教授

林 昭 遠
Chao-Yuan Lin

林業試驗所
森林生態組
助理研究員

涂 富 鈞*
Fu-Jun Tu

摘 要

25

近年極端降雨事件頻繁發生，常導致通往試驗林的唯一聯外道路中斷，進而使試驗林陷入孤立狀態。為維繫森林管理的持續性及降低保全對象暴露於災害環境，亟需全面盤點道路沿線邊坡之致災風險及潛勢分級評估，以作為災害預警、防治及監測之重要參考依據。

本研究基於災害風險模型，結合複合環境指標，建構道路邊坡土砂災害潛勢之概念性模式。透過歷年崩塌地的時空分布結果顯示，多數崩塌事件屬於面積小於 1 公頃之小規模崩塌，其發生位置與坡度、坡向，以及與道路與水系的距離因子呈高度相關，可作為篩選模型因子之重要依據。本研究建構之區域性土砂災害潛勢模型，係以脆弱度與暴露度兩項指標之乘積表示，用以評估未來極端降雨事件下之土砂災害風險。脆弱度綜合考量極端降雨抗性、道路開發及邊坡地質災害潛勢三項指標推估；暴露度則結合崩塌好發坡度、河道蜿蜒度及向源侵蝕三項指標進行綜合分析，作為調整脆弱度之重要因子。將模型與歷史崩塌事件進行驗證，結果顯示實際崩壞比與模型估計值（風險值）呈顯著線性正相關（ $R^2=0.91$ ， $p<0.001$ ），本模型對道路邊坡土砂災害具有 91% 之預測解釋力。

依據模型成果，將道路邊坡土砂災害風險劃分為三個潛勢等級，並針對高潛勢區域及其潛在破壞機制，提出相應的治理及管理維護原則，期能有效達成避災與減災目標，保障用路人之生命及財產安全。

關鍵詞：風險分析、災害潛勢、邊坡地質災害調查、森林集水區經營。

* 林業試驗所森林生態組助理研究員
100051 臺北市中正區南海路 53 號 · tufu@tfri.gov.tw

A STUDY ON THE POTENTIAL ASSESSMENT OF SEDIMENT DISASTERS ALONG THE ACCESS ROADS TO THE FUSHAN EXPERIMENTAL FOREST

Shao-Wei Wu

Taiwan Society of Slope and
Disaster Prevention and Mitigation

Chun-Wei Tseng

Taiwan Forestry Research
Institute
Division of Watershed
Management

Chao-Yuan Lin

Department of Soil and
Water Conservation,
National Chung Hsing
University

Chen-Chia Jung

Everwin Geological Engineering Consultant Co.,
Ltd. Management

Fu-Jun Tu*

Taiwan Forestry Research Institute
Division of Watershed Management

ABSTRACT

In recent years, extreme rainfall events have occurred frequently, often causing the only access road to the experimental forest to be interrupted, thereby isolating the forest. To ensure the continuity of forest management and reduce the exposure of protected objects to potential risk, it is imperative to comprehensively assess the disaster risk and potential classification on slope along the access road. This assessment will serve as an important reference for disaster warning, prevention, and monitoring.

This study is based on a disaster risk model, incorporating composite environmental indicators to construct a conceptual model for assessing the sediment disaster potential of road slopes. Analysis of the spatiotemporal distribution of historical landslides reveals that most events are small-scale landslides (less than 1 hectare), and their locations are highly correlated with factors such as slope, aspect, and distance to roads and rivers. These findings serve as an important basis for selecting environmental indicators.

The regional sediment disaster potential model developed in this study represents risk as the product of two key indicators: vulnerability and exposure, which are used to assess the risk of sediment disasters under future extreme rainfall events. Vulnerability is estimated by integrating three indicators: extreme rainfall resistance, road development, and the geological disaster potential of slopes. Exposure is determined through a composite analysis of three indicators: landslide-prone slopes, river sinuosity, and headward erosion, and is used as a key factor in adjusting vulnerability. Model validation using historical landslide events shows a significant positive linear relationship between the actual probability of failure and the model's estimated risk values ($R^2 = 0.91$, $p < 0.001$), indicating that the model demonstrates a 91% explanatory power for predicting sediment disasters on road slopes.

Based on the model results, the sediment disaster risk of road slopes is classified into three

potential levels. For high potential risk and their corresponding failure mechanisms, appropriate management and maintenance principles are proposed to effectively achieve disaster prevention and mitigation goals, thereby ensuring the safety of protected objects and property.

Keywords: Risk analysis, Disaster potential, Slope geological hazard investigation, Forest watershed management.

一、前言

近年來氣候變遷對台灣森林集水區的影響日益顯著，其中極端降雨事件的頻率與強度逐年增加，導致山區道路土砂災害事件大幅上升，對於山區的交通運輸、林業經營及居民安全構成嚴重威脅 (Chen, 2008; Lu, 2016; Wang, 2004; Wu *et al.*, 2010)。因此，道路邊坡的土砂災害防治、監測與管理已成為當前研究與實務應用的重要課題。其中，位於台灣北部的農業部林業試驗所 (以下簡稱：林試所) 所轄福山試驗林，保存著典型的天然闊葉樹林，擁有豐富的動植物種類，為生態保育與學術研究之重要研究中心 (農業部林業試驗所, 2025)。近年試驗林頻繁遭受颱風侵襲，並發生多處土砂災害事件。例如，2015 年蘇迪勒颱風造成 4.3K 路段邊坡崩塌，2021 年圓規颱風導致 4.8K 路段邊坡崩塌及路基流失，致使對外唯一聯絡道路中斷，不僅影響所內同仁之進出及森林經營管理作業，且對遊客公共安全構成嚴重威脅。為減少保全對象在潛在災害環境中的風險，確保用路人的生命和財產安全，有必要對聯外道路進行全面盤查，評估各路段土砂災害的潛在風險。

道路邊坡之土砂災害潛勢評估方法大致可分為定性法與定量法兩類 (Guzzetti *et al.*, 1999)。隨著大數據資料的取得日益便利，現今相關研究多採用客觀的定量分析方法，將崩塌潛勢相關因子進行統計模式分析，建立能夠判別崩塌發生與否的迴歸模型 (莫凡軍, 2019)。在崩塌潛勢的研究方法中，風險分析方法亦日益受到重視與廣泛應用。自 1970 年代以來，其概念不斷發展與演變，風險通常被量化為由危害度 (Hazard)、脆弱度 (Vulnerability) 及暴露度 (Exposure) 三項要素相乘所得 (Crichton, 1999; IPCC, 2014; Wu *et al.*, 2022)。許多研究已基於風險分析的概念，將其導入土砂災害潛勢之評估，並取得良好的研究成果及實務應用價值 (林炯明, 2009; 林昭遠等人, 2015; 洪鴻智與陳玲怡, 2007; 陳子晴, 2020; 莫凡軍, 2019; Lin *et al.*, 2022)。風險分析模型能結合環境因子與歷史災害紀錄，量化潛在土砂災害風險，進而作為災害管理與決策之重要依據。然而，不同地區影響土砂災害發生的因子往往因地而異，因此，過去學者透過分析該區域歷年崩塌地的空間分佈特性 (Lu *et al.*, 2011)，作為篩選致災環境因子之重要參考，並導入關鍵複合環境指標提升模型的準確度與適用性。此外，風險分析模型的應用亦有助於反映真實環境中多因子耦合作用對土砂災害風險的影響 (Guzzetti *et al.*, 1999; 陳文

山等人, 2012; Lin *et al.*, 2022)。

林業試驗 112 年所針對試驗林聯外道路 (總長約 8 公里)，依地形單元將進行劃分道路邊坡，共劃分為 46 個單元，並根據地質災害潛勢的分級結果，選取其中 15 處高潛勢邊坡進行現地地質露頭及地形調查，並據此進行邊坡穩定性分析。調查結果顯示，高潛勢路段主要集中於 4 K 至 6 K 路段 (農業部林業試驗所, 2023)。該研究表明，未納入水力侵蝕、植被覆蓋及水文因子等影響，僅以地表地質脆弱性代表，對整體土砂災害潛勢的評估仍具有限性；此結果亦顯示，整合關鍵複合環境指標並建立災害風險模型，對於全面評估土砂災害風險具有必要性。

本研究旨在基於風險分析概念模型，結合關鍵複合環境指標，建立道路邊坡土砂災害風險評估模式，以評估福山試驗林聯外道路各路段的致災風險，並將土砂災害風險劃分為高、中、低三個潛勢等級。辨識道路高潛勢分級的單元及其可能的破壞機制，作為後續相關當局擬定相應的治理與管理維護原則，以期達到避災減災的目標，確保用路人之生命財產安全，並促進永續林業之發展。

二、材料與方法

2.1 研究區域概況

福山試驗林隸屬農業部林試所之福山研究中心。位於臺灣新北市烏來區與宜蘭縣員山鄉交界處，試區範圍橫跨哈盆溪及粗坑溪兩大集水區，其中主要聯外道路通過粗坑溪與哈盆溪集水區 (圖 1)，總長度約 8 公里，自雙連埤海陸鱒魚餐廳(0 K) 經福山管制站至試驗林遊客停車場 (約 8 K)，是試驗林工作同仁與遊客通行之唯一道路。

福山試驗林總面積約 1,097 公頃，地處中央山脈北端與雪山山脈交會地帶，海拔介於 400 至 1,400 公尺，地形起伏劇烈，屬於典型的中低海拔山區。氣候方面，區內屬暖溫帶氣候，年降雨量豐沛，平均超過 4,000 毫米，終年潮濕，無明顯乾濕季，森林植被以亞熱帶濕潤常綠混合林為主 (陸象豫等人, 2021)。每年 7 月至 9 月之間為颱風主要侵襲的季節，颱風強大的風速以及大量的降雨經常對園區內森林植物造成嚴重的破壞 (盧光輝等人, 2008)。

參考中央地質調查所五萬分之一區域地質圖，聯外道路位在乾溝層 (Kk) 範圍內。乾溝層以深灰色硬頁岩偶夾薄至厚層深灰色細粒泥質砂岩為主，中間夾

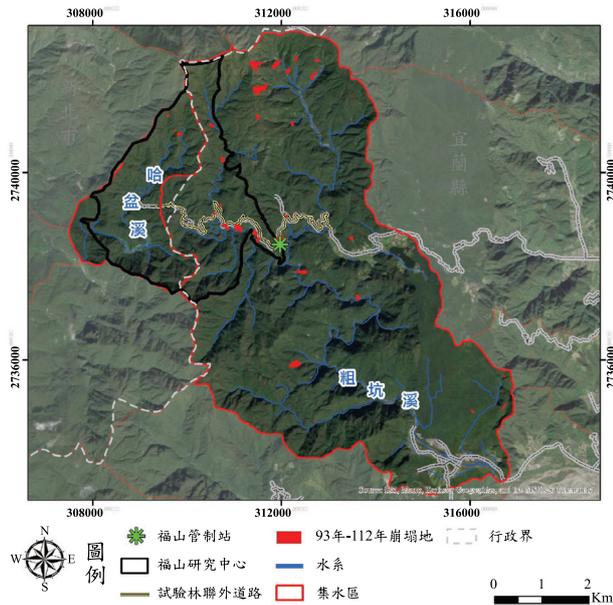


圖 1 福山試驗林地理位置圖

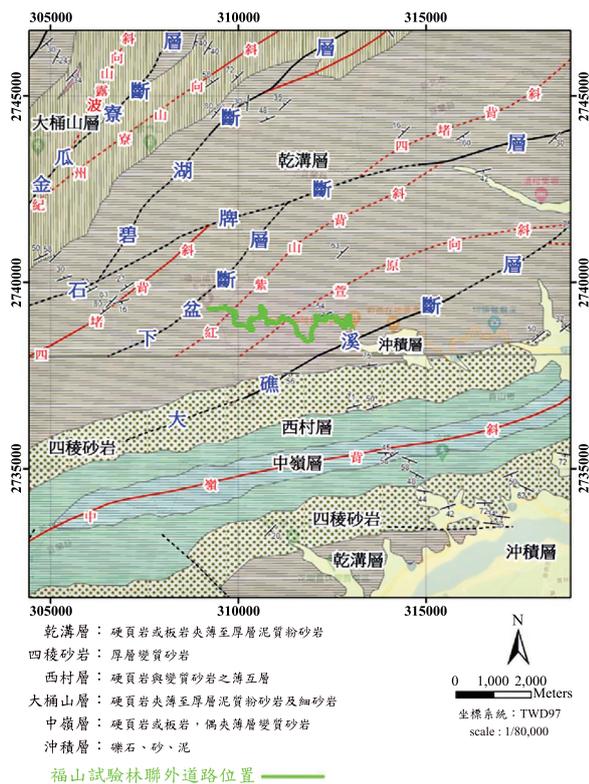


圖 2 道路沿線區域地質

底圖來源: 中央地質調查所五萬分之一區域地質圖

有一厚約 150 公尺之深灰色硬頁岩與灰色細粒泥質砂岩互層岩段。在區域地質構造方面，聯外道路鄰近有「下盆斷層」、「紅紫山背斜」、「荳原向斜」及「大礁溪斷層」等地質構造(圖 2)，岩層破碎且多斷層、褶皺構造，易受風化與水蝕作用影響，導致邊坡穩定性較差。

2.2 研究方法

2.2.1 歷年崩塌地空間分布特性分析

本研究旨在建立福山試驗林之土砂災害潛勢模型，首先針對歷年崩塌地進行空間分布特性分析。為確保統計分析具備足夠樣本數並提升分析結果之可靠性，考量同一集水區內具有相似地文水文特性，能有效反映該區域崩塌發生之潛在因子，選擇哈盆溪與粗坑溪兩大集水區作為研究範圍，並蒐集民國 93 年至 112 年間 (2004 ~ 2023 年) 20 年間的崩塌地資料，進行時空分布特性分析。

歷年崩塌地資料取得，93 年至 106 年間的崩塌地圖資源自農業部林業及自然保育署，其圖資係根據福爾摩沙高解析衛星影像進行判釋之成果，空間解析度達 2 公尺，並經 15 公分解析度航照影像驗證，判釋準確度高達 96%。至於 107 年至 112 年間之崩塌地圖資，本研究則採用 SPOT-6/7 衛星影像及無人飛行載具所拍攝之影像，作為判釋崩塌地之基礎圖資。

在崩塌地空間特性分析方面，本研究運用地理資訊系統 (GIS) 技術，萃取各崩塌區位的面積、平均坡度、平均海拔高度、整體坡向、距離水系 (常流水) 及道路之遠近，以及土地利用類型等環境因子。坡向則區分為八個主要方位，並計算各崩塌地內各方位所佔的面積百分比，選取其中最大值作為代表坡向，以利後續分析之應用。

2.2.2 土砂災害風險模式建置

本研究所建構之道路邊坡土砂災害潛勢概念性模式，係基於政府間氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) (IPCC, 2014) 所提出的風險定義，即「危害度 (Hazard)」、「脆弱度 (Vulnerability)」及「暴露度 (Exposure)」三者的乘積，亦即為災害風險值 (Risk of Disaster) 可視為三項指標相乘所得，用以評估災害發生的可能性。此風險定義已成為目前最具代表性且被廣泛引用的風險評估架構，並應用於土砂災害風險評估模型。土砂災害風險的計算公式如式 (1)：

$$\text{風險(Risk)} = \text{危害度} \times \text{脆弱度} \times \text{暴露度} \dots (1)$$

本研究以 Lin *et al.* (2017) 所提出之土砂災害風險模型為基礎，進一步建構適用於區域性道路邊坡土砂災害潛勢之評估模型。土砂災害風險評估中，「危害度」代表外部作用對環境造成災害的影響力。根據台灣學者針對崩塌災害風險的研究結果，造成崩塌的主要外力因素以降雨為主，其次則為強烈地震 (Chen

et al., 2010; Tsou et al., 2011)。台灣雖然國土面積不大，但受季風氣候與地形效應之影響，山區與平地之間的降雨特性存在顯著差異。然而，在本研究建構之區域性土砂災害風險模式中，降雨危害在空間分布上的差異性相對較不明顯。降雨過後，受地形特性及人工設施影響，常導致逕流集中，進而引發坡面沖蝕及土砂災害。因此，本研究著重於環境現況中脆弱度與暴露度兩項環境指標之討論，藉此評估未來極端降雨事件發生時，各坡面區位可能面臨的致災風險程度。

「脆弱度」反映環境本身對災害影響的抵抗能力，需透過多項環境因子組合而成的複合指標加以衡量。為篩選關鍵脆弱度指標，本研究根據歷年崩塌地空間分布特性分析成果為依據。最終納入以下三項指標以量化邊坡的脆弱度：(1) 極端降雨抗性指標：用以衡量地區長期環境承受極端降雨的能力；(2) 道路開發指標：結合道路密度與道路蜿蜒度，評估道路開發對邊坡穩定性的影響；(3) 邊坡地質災害潛勢指標：依據現地地表地質調查之脆弱程度成果，作為邊坡地質災害潛勢的代表性指標。將上述三項指標加總後，即可評估土砂災害脆弱度。

「暴露度」常用於修正危害度或脆弱度，以凸顯環境單元暴露於災害觸發因子（例如降雨-逕流、坡度等）的程度。本研究採用以下複合型指標來描述暴露度：(1) 崩塌好發坡度指標：用以調整因土壤深度與坡度之間，對於崩塌的抗剪強度影響；(2) 河道蜿蜒度指標：結合河道蜿蜒度與逕流量估計，計算水流對邊坡坡腳之沖刷程度；(3) 向源侵蝕指標：依據河川級序評估源頭型崩塌的潛勢。綜合上述複合型環境指標，即可量化道路邊坡土砂災害的暴露度。

為確保各指標能在相同基準下進行比較，本研究將所有指標進行正規化處理(Normalization)，使其值皆介於 0 至 1 之間，藉此直觀地反映各指標在空間分布上的相對強度與影響程度。其正規化公式如式 (2)：

$$N = \frac{(X - X_{min})}{(X_{max} - X_{min})} \dots\dots\dots(2)$$

式中， N ：指標之正規化值， X ：指標之原始數值， X_{min} ：指標中之最小值， X_{max} ：指標中之最大值。

「極端降雨抗性指標」用以反映不同區位在面對極端降雨時，對土砂災害的承受能力差異。若某區域長期承受高強度降雨之沖蝕，其對極端降雨的耐受力相對較高，災害發生機率較低；反之，若某區域較少發生高強度降雨，則其對降雨的承受能力相對較弱，於相同降雨強度下更容易發生崩塌災害。因此，極端降雨抗性指標可用以判釋集水區對暴雨侵蝕的脆弱因

子。極端降雨抗性指標值域介於 0 至 1 之間，值愈大代表對降雨的承受能力相對較弱；值愈小或為 0 時，對極端降雨的耐受力相對較高。

本研究使用「臺灣氣候變遷推估資訊與調適平台(Taiwan Climate Change Projection and Information Platform, TCCIP)」所提供之高解析度 (1 km × 1 km) 網格化日觀測資料，蒐集 1960 年至 2022 年，共計 63 年長期一日最大降雨量資料。為有效檢視集水區在極端條件下的耐受度，本文採用較嚴苛之情境，即以重現期距 200 年之一日最大降雨量作為極端降雨抗性指標之評估基準。降雨機率頻率分析採用甘保氏分布(Gumbel distribution, Extreme Value Type I)，此方法廣泛應用於暴雨事件之統計分析，具備良好之適用性與解釋力，且易於於實務上操作 (Gumbel, 1941)。其計算可藉由歷史觀測資料之一日最大降雨量之平均值與標準差，快速估算 200 年重現期距極端降雨量；相關計算式如式 (3) 與式 (4) 所示(王如意與易任, 1979)。

$$R_T = \mu + K_T \sigma \dots\dots\dots(3)$$

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left[0.5772 + \ln \left(\ln \frac{T}{T-1} \right) \right] \dots\dots\dots(4)$$

式中： R_T ：機率水雨量， μ ：採用 TCCIP 提供之歷年之日最大降雨之平均值， K_T ：頻率因子（可由頻率因子表查詢 (李光敦, 2024)）， σ ：標準偏差（由歷年之日最大降雨計算而得）， T ：重現期距。

為避免僅採用研究區域內最大/最小值進行正規化，導致不同集水區間缺乏一致性與模型可比性，並出現高山與淺山最大/最小值被視為相同耐受度等不合理情況，本文採用流域範圍的最大/最小值作為正規化基準。透過 TCCIP 提供之網格化日觀測資料，可獲得研究區域所在之兩流域重現期距降雨量分布（如圖 3），再經正規化公式 (2) 與線性反轉處理公式 (5)，即可推估極端降雨抗性指標，結果如圖 4 所示。

$$\text{極端降雨抗性指標} = 1 - nR_T \dots\dots\dots(5)$$

式中： nR_T ：正規化後 200 年重現期距距一日最大降雨量。

「道路開發指標」係由「道路密度」與「道路蜿蜒度」兩者相乘而得。於坡地開發道路時，原本分散的漫地流，因道路的設置而被攔截並匯集至道路邊溝；極端降雨量往往超過道路邊溝設計標準，溢流水便會沿著道路轉彎處或匯流點向下邊坡排放，進而轉變為渠道流，大量逕流集中導致路基淘刷及坡面侵蝕現象加劇，最終形成土砂災害破口 (Lu et al., 2011; 林昭遠等人, 2015)。道路開發指標值域介於 0 至 1 之間，

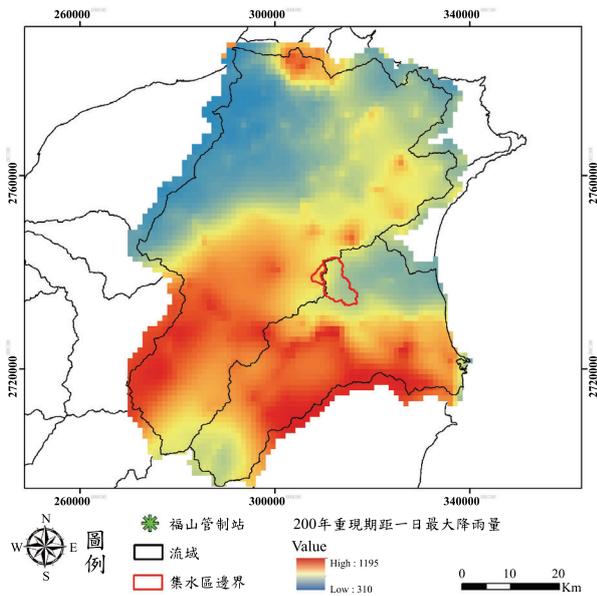


圖 3 200 年重現期距空間分布

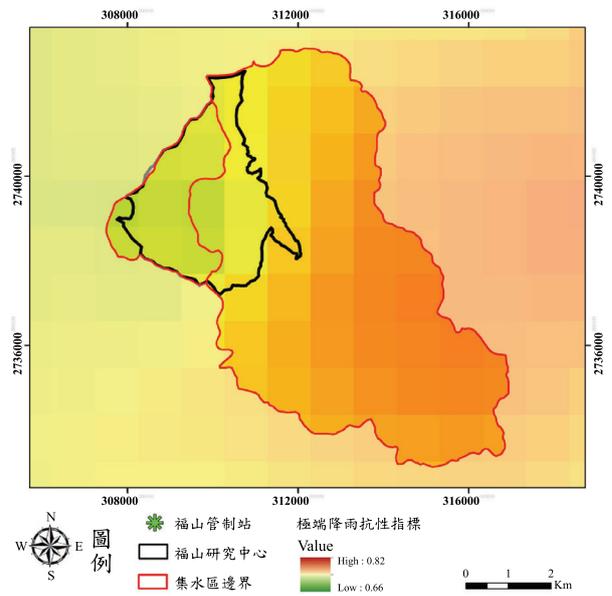


圖 4 集水區極端降雨抗性指標分布

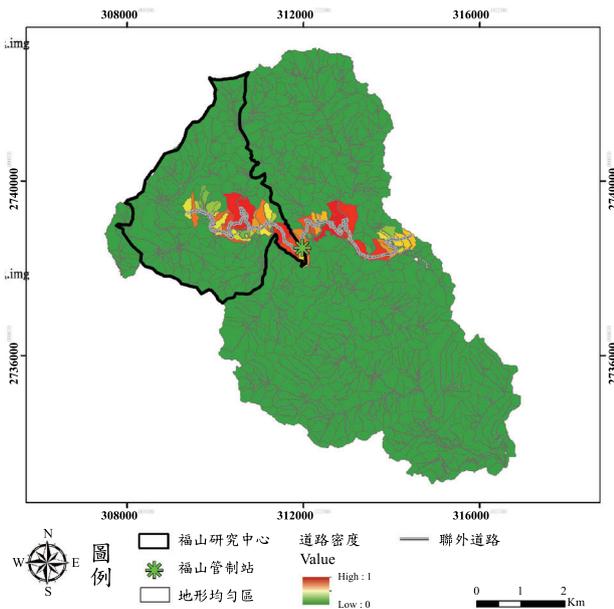


圖 5 道路密度空間分布

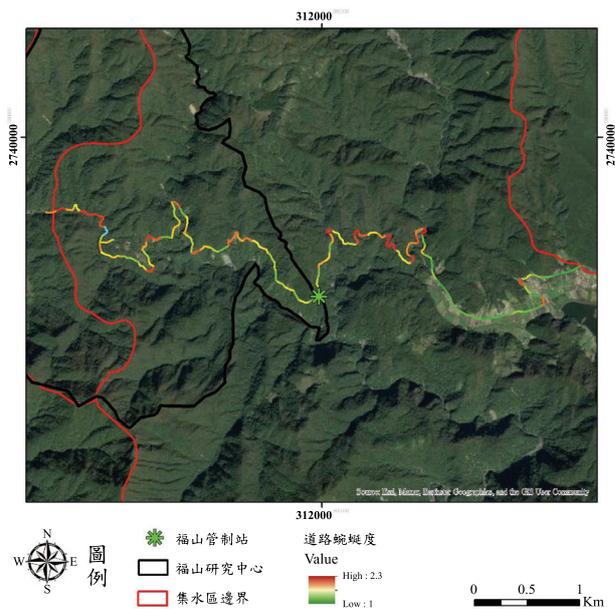


圖 6 道路蜿蜒度分布

值愈大代表邊坡受暴雨逕流集中及沖蝕破壞潛勢越高；值愈小或為 0 時，則反之。

在本研究中，道路類型主要為單一類型之林道，故未再進一步區分不同等級之道路。

「道路密度」為單位面積內道路的總長度，本研究以邊坡為單元，計算各單元之道路密度，如圖 5 所示。道路密度計算式如式 (6) 所示：

$$\text{道路密度} = \frac{\text{道路長度}(m)}{\text{單元面積}(m^2)} \dots\dots\dots(6)$$

「道路蜿蜒度」則代表道路的彎曲程度，其概念

與河道蜿蜒性相似，蜿蜒度越大，代表轉彎處越多，坡腳受水流掏刷風險越高，亦代表著邊坡穩定性相對較差。反之，蜿蜒度較小則表示道路較筆直，水流導引較穩定，坡腳受沖刷程度亦較輕微。道路蜿蜒度計算公式如式 (7)：

$$\text{道路蜿蜒度} = \frac{\text{道路長度}}{\sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2}} \dots\dots\dots(7)$$

式中： X_1 ：道路起點 X 座標， X_2 ：道路終點 X 座標， Y_1 ：道路起點 Y 座標， Y_2 ：道路終點 Y 座標。道路蜿蜒度計算成果如圖 6 所示。

表 1 邊坡地質災害潛勢指標依據

地質災害潛勢分級結果 (地況中心標準)	15 地質調查滑動潛勢分級結果	地質災害潛勢指標
低潛勢	未調查	0.2
中潛勢	未調查	0.4
	滑動角度小於 20°	0.6
高潛勢	滑動角度介於 20°至 25°	0.8
	滑動角度大於 25°	1.0

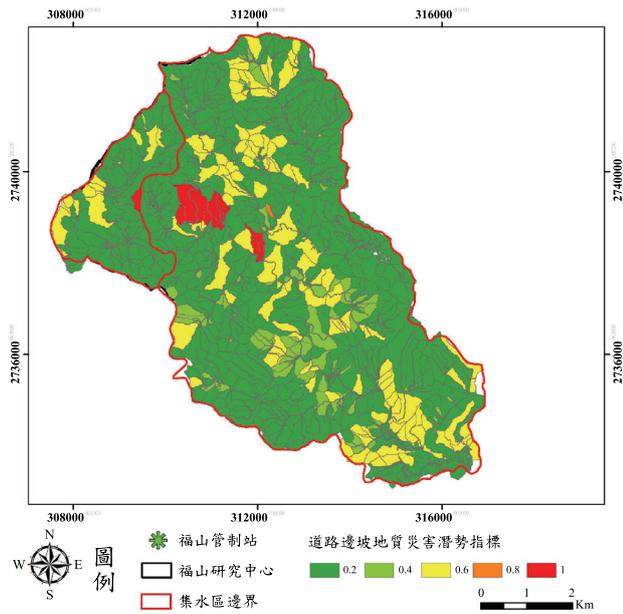


圖 7 地質災害潛勢指標

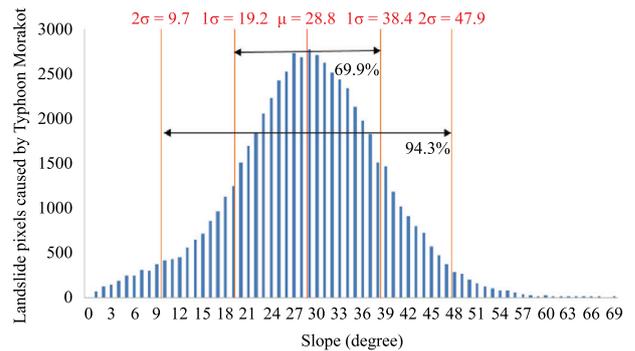


圖 8 莫拉克颱風事件之崩塌發生坡度統計結果 (陳子晴, 2020)

「地質災害潛勢指標」採用林試所於 112 年度所執行之「福山試驗林聯外道路邊坡地質調查工作」成果為基礎。調查過程中量測所得的邊坡方位與岩體不連續面(如劈理、節理)位態資料,應用立體投影圖分析法 (Hoek and Bray, 1981),並藉助 DIPS 軟體進行空間分析,以判斷不連續面與邊坡間的幾何關係,特別是是否形成順向坡結構,進而評估邊坡潛在破壞模式。

因現地無相關實際岩石試驗成果,本研究保守假設摩擦角為 15°作為分析參數,進一步計算各邊坡處不連續面交線與邊坡表面的夾角,評估其滑動潛勢與穩定狀況。

本研究之集水區「地質災害潛勢指標」,主要參考地質調查及礦業管理中心(以下簡稱地礦中心)所建立之山崩潛勢分級條件,評估因子包含地形坡度、岩體強度、歷史山崩紀錄及順向坡等,據此將潛勢劃分為低、中、高三類等級(地質調查及礦業管理中心, 2023)。惟受限於人力、物力及調查效益,本研究之實地調查範圍僅針對高潛勢等級之道路邊坡進行。調查結果顯示,15 處邊坡的潛在滑動角度介於 16°至 77°之間。本研究依據滑動角度區分潛勢等級:小於 20°者

視為低潛勢;介於 20°至 25°者歸類為中潛勢;大於 25°者則歸為高潛勢。綜合「地質災害潛勢分級結果」與「15 處現地滑動潛勢分析結果」,本研究進一步細分為五級潛勢等級(如表 1 所示),並對應賦予數值化的地質災害潛勢指標值,範圍介於 0.2 至 1.0 之間。指標值越高,表示該邊坡在地質條件上對於土砂災害的抵抗能力越弱,亦即脆弱程度越高,成果如圖 7 所示。

「崩塌好發坡度」係利用崩塌易發坡度進行模型調整。崩塌易發坡度與土壤深度密切相關, Wu *et al.* (2022) 指出當坡度介於 30°至 50°範圍時,崩塌的發生機率較高,該區間的分布於森林生長良好的區域,土砂料源較多。陳子晴 (2020) 與莫凡軍 (2019) 的研究亦指出,崩塌事件與坡度之間的關係大致呈現常態分布(如圖 8 所示),此結果與台灣地區主要崩塌坡度普遍分布於 20°至 50°的研究結果一致。

本研究參考台灣歷年崩塌坡度統計資料(陳子晴, 2020),並依據其平均值與標準差進行標準化計算(Z 值),再透過查表方式取得機率密度,乘以總樣本數後,即可推估各坡度區間的預期崩塌數量。進一步計算各分析單元的平均坡度,並轉換為「崩塌好發坡度」指標,其數值介於 0 至 1 之間。指標值越大,代表發生崩塌的機率越高,坡面具備較高致生崩塌之潛勢;反之,指標值越小,則可表示兩種情況,一坡度平緩,剪應力不足以驅動滑動;二坡度過陡則常伴隨表層土壤淺薄,缺乏足夠土體作為潛在崩塌料源。

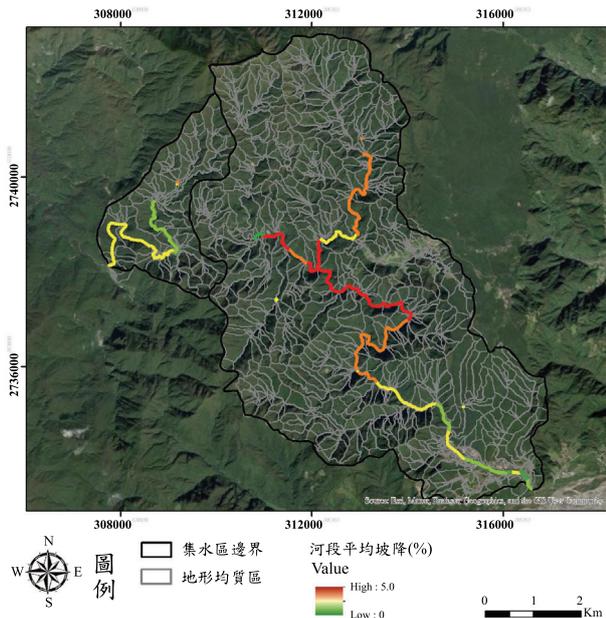


圖 9 篩選水系之分布

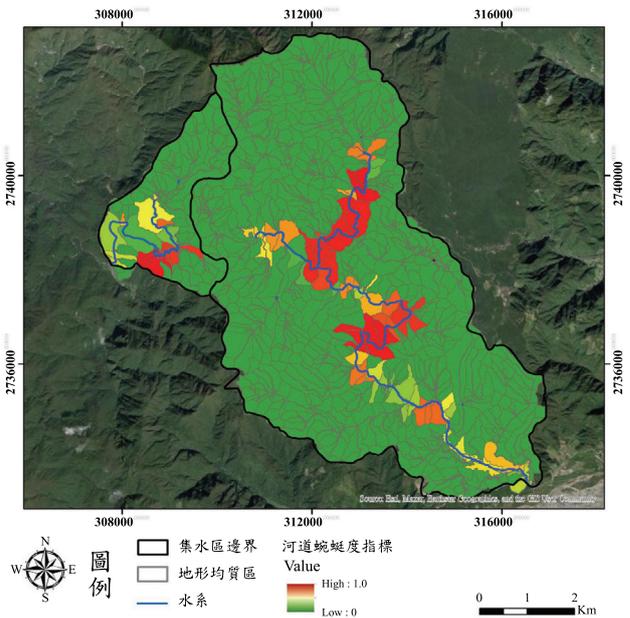


圖 10 河道蜿蜒度分布

「河道蜿蜒度指標」評估河道對邊坡坡腳破壞的影響。河道在多種內、外營作用下，常呈現蜿蜒曲折的流路。於彎道處，水流因離心力作用會產生側向推擠，進而加劇對河岸的沖刷與掏蝕作用。在極端降雨事件發生時，此侵蝕現象更為劇烈，導致河岸坡腳受損，若邊坡因此失去穩定性，便可能引發崩塌現象 (Jansen *et al.*, 2006；Lévy *et al.*, 2012)。

野溪側向沖蝕與掏刷的發生程度，與其集水面積與河段平均坡度密切相關。只有當超過特定門檻值時，野溪才具備明顯的側向沖蝕能力。針對台灣地區的野溪界定，不同研究已提出多種集水面積門檻值，如 50 公頃、200 公頃 (朱芳儀等人, 2018)，甚至高達 5,000 公頃 (周憲德, 2018)；此外，河段平均坡度大於 4% 也常被用作判定野溪的依據 (朱芳儀等人, 2018)。本研究採多重門檻方式進行水系篩選與劃定，輔以航照圖解析，選取具有明顯流路特徵之水系，條件為集水面積須大於 200 公頃，且河段平均坡度小於或等於 5%，水系篩選成果如圖 9 所示。

為評估河道對坡腳穩定性的影響，本研究進一步計算河道蜿蜒度，以量化水流曲折程度所造成邊坡的影響。蜿蜒度指數數值介於 0 至 1 之間，如圖 10 所示，數值越高表示河道轉彎處愈多，水流更易集中並衝擊坡腳，從而增加崩塌風險；相反地，蜿蜒度較低則代表河道較為筆直，水流沖刷效應較弱，對坡面穩定性影響較小。河道蜿蜒度計算公式如式 (8)：

$$\text{河道蜿蜒度} = \frac{\text{河道長度}}{\sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2}} \dots\dots\dots(8)$$

式中： X_1 ：河道起點 X 座標， X_2 ：河道終點 X 座標， Y_1 ：河道起點 Y 座標， Y_2 ：河道終點 Y 座標。

「向源侵蝕指標」評估邊坡發生向源侵蝕崩塌的潛勢。向源侵蝕 (headward erosion) 是指河流或溪溝的侵蝕作用沿著源頭方向持續向坡面或集水區內擴展的過程 (Judson and Kauffman, 1990)。一般而言，河道源頭多位於人為干擾較少的森林區，平時具備良好的保土蓄水功能，因此不易發生土壤沖蝕。然而，長時間的土體累積可能使坡面儲存大量土砂，當源頭遭受集中水流侵蝕時，將導致大量土砂釋放。因此，源頭區位的侵蝕風險應納入整體考量。

本研究依據 Strahler (1952) 提出的河川級序分類系統，將集水區內的河道依序級進行分類。由分水嶺發源之河段定義為第一級序，當兩條同級河段匯流後，提升為更高一級序的河段，如圖 11 所示。為評估源頭區位的向源侵蝕風險，將河川級序加以反轉並正規化其值介於 0 至 1 之間，產生向源侵蝕指標之空間分布。指標值越高，代表河段位階越低，亦即愈接近源頭位置，表示該區有向源侵蝕之潛勢區位，如圖 12 所示。

2.2.3 土砂災害風險模式驗證

本研究採用民國 93 年至 106 年歷年崩塌資料，結合崩塌比 (Probability of Failure, PoF) 概念 (簡達助與李錫堤, 2015；莫凡軍, 2019)，以驗證實際災害事件與土砂災害風險模型之準確性。崩塌比概念係將一系統視為整體，意指當單元內任一處發生崩塌時，即視該單元之崩塌發生機率为 1，若無則為 0，作為是

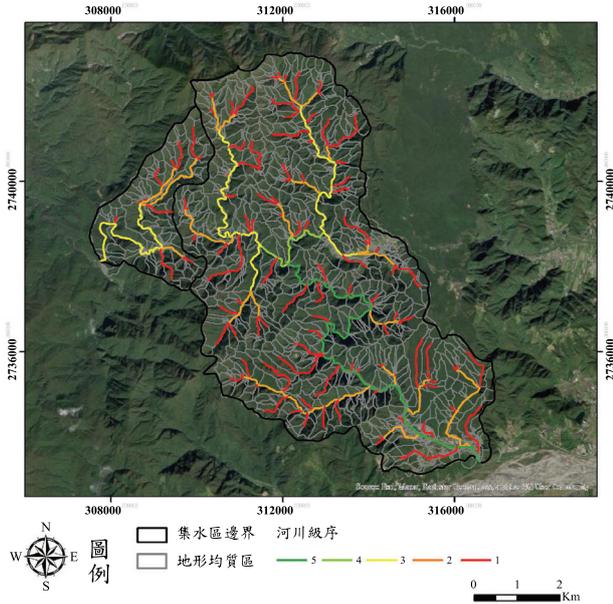


圖 11 河川級序劃定成果

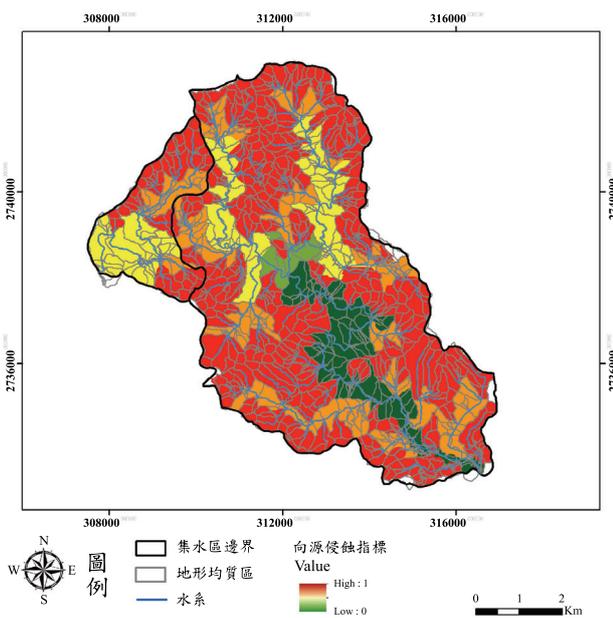
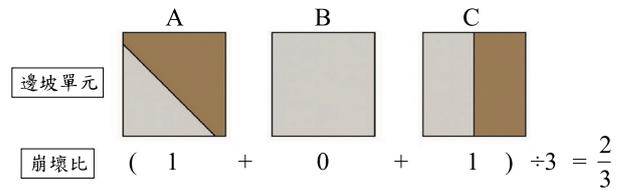


圖 12 向源侵蝕指標空間分布

否曾發生崩塌事件的統計指標。透過崩壞比，可評估在模型分析成果下，各風險等級中含崩塌邊坡單元占總邊坡單元之比例，其計算方式與概念如圖 13 所示。

基於「地形均質區」能有效反映坡地土地特性之基本單元，並作為驗證單元。地形均質區藉由自動集水區劃設來取得，透過 Jenson and Domingue (1988) 集水區自動劃分理論，使用者給定門檻值 (threshold) 而擬真繪製集水區範圍。依據台灣過去坡地保育及治理之經驗，形成野溪之集水面積為 20 公頃，而形成坑

相同風險等級單元



圖片來源：修改自莫凡軍 (2019)

圖 13 向源侵崩壞比計算示意圖

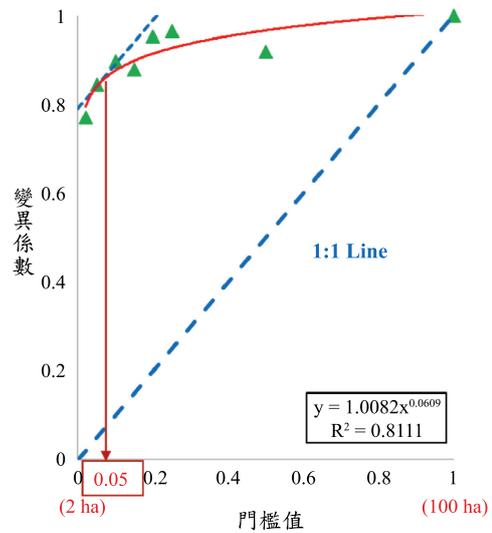


圖 14 以種數-面積曲線劃定最適均質區

溝之集水面積則介於為 2~20 公頃，紋溝之集水面積則小於 2 公頃。均勻區應為地形、坡度、坡向、等高線分布等條件大略一致之區位，再將劃定之集水區再細分為源頭、左岸及右岸三個坡面區位，視為「地形均質區」，又稱邊坡單元。

地形均質區劃定係依不同門檻值 (集水面積) 進行劃分，當門檻值越小時，其劃設單元趨於均勻，但因數量眾多不易於管理。最適均質區劃定應符合均勻坡概念，並且控制一定數量以便於管理。坡度在山坡地管理上具有參考價值，藉由計算不同門檻值所劃分均質區之坡度變異係數 (c_v) 作為評估依據，其計算公式如式 (9) 所示：

$$c_v = \frac{\sigma}{\mu} \dots\dots\dots(9)$$

式中，(c_v): 標準差 (σ) 與平均值 (μ) 之比，為無單位統計測量， c_v 代表數據的離散程度 (Niu *et al.* 2018)，坡度之變異係數可作為評估單元均勻程度。

為求得均質區之最佳劃定面積，即利用種數-面積曲線法之概念 (MacArthur and Wilson, 1967 ;

Rosenzweig, 1995)，以劃定均質區之門檻值（集水面積）及其單元所計算之坡度變異係數，兩者繪製種數-面積曲線，求得最佳劃定門檻值。以劃分地形均質區之門檻值為 X 軸，以坡度之變異係數為 Y 軸，繪製 1:1 之直線，並將直線平移至與曲線相切之點，即可得最適劃定地形均質區之門檻值，如圖 14 所示，其切線對應數值為 0.05，換算門檻值即為 5。本研究選用整數 5 公頃集水面積之門檻值，作為劃定均質區之門檻值。

三、結果與討論

3.1 歷年崩塌地空間分布成果

根據哈盆溪與粗坑溪集水區歷年崩塌地之空間分布，自 93 年至 112 年間，共辨識 37 處崩塌地，總崩塌面積約 12.7 公頃，佔整體集水區面積不到 1%，然而，從崩塌地的空間分布（如圖 15 所示），主要崩塌地集中分布於集水區的源頭及林道沿線，且近年（104 年至 112 年）則以林道沿線為主要分布區，對林道安全仍存在潛在衝擊。

為進一步探討崩塌地的潛勢特徵，本研究亦針對各崩塌地進行坡度、高程、坡向、距離河道與道路等空間因子的統計分析，以評估各因子對崩塌發生之關

聯性。歷年崩塌地面積之空間分布特性如表 2 所示。

在坡度分析方面，崩塌地主要集中於坡度 30 至 45 度之間，約佔總體崩塌地的 27 處，總面積約為 10 公頃，佔總崩塌面積的 78%。Lu *et al.* (2011) 指出，除垂直峭壁外，坡度越陡的邊坡通常越容易誘發崩塌。然而，並非所有陡坡皆為高潛勢區。坡度過緩時，剪應力不足以驅動滑動；而坡度過陡則常伴隨表層薄弱，

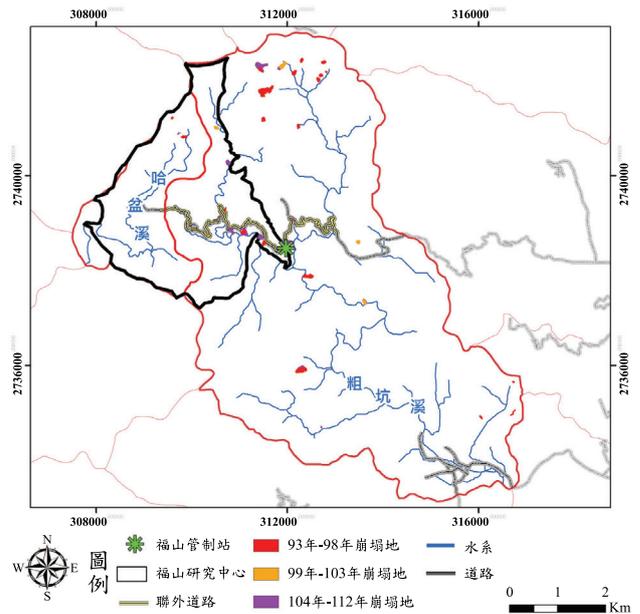


圖 15 集水區歷年崩塌地空間分布

表 2 哈盆溪與粗坑溪集水區崩塌地之空間分佈特性

面積(ha)	< 0.1	0.1 - 0.5	0.5 - 1.0	> 1.0		
數量	5	25	3	4		
總面積(ha)	0.1	5.2	2.0	5.4		
坡度(°)	< 15	15 - 30	30 - 45	45 - 50	> 50	
數量	1	3	27	3	3	
總面積(ha)	0.2	0.3	10	2.0	0.2	
高程	< 500	500 - 700	700 - 900	900 - 1,100	> 1,100	
數量	10	7	7	9	4	
總面積(ha)	3.6	2.6	1.4	3.6	1.5	
距道路距離	< 50	50-500	> 500			
數量	8	1	28			
總面積(ha)	2.9	0.2	9.6			
距水系距離	0 - 50	50 - 100	100 - 400	> 400		
數量	21	0	10	6		
總面積(ha)	6.3	0	1.1	5.3		
坡向	東北	東	東南	南	西南	西
數量	1	6	17	6	5	2
總面積(ha)	0.7	5.0	2.7	2.1	1.1	1.1
土地利用	森林	建築	其他使用			
數量	35	1	1			
總面積(ha)	12.3	0.2	0.2			

缺乏足夠土體作為潛在崩塌料源。Wu *et al.* (2022) 亦指出，坡度介於 30°至 50°為崩塌易發區段，此發現與本研究分析結果相符，顯示坡度對崩塌發生具有高度關聯性。

在高程方面，崩塌事件廣泛分布於各海拔範圍，顯示海拔高度與崩塌發生並無顯著相關性。

在坡向方面，崩塌多發於東南向，共計 17 處，其中以東向坡地的崩塌面積最大，達 5 公頃。這與集水區整體坡向以東南向為主相符，加上東、東南與南向常為颱風期間的迎風坡，受到較強的風雨侵襲，導致崩塌機率升高。此外，當坡面坡向與地層劈理方向一致時，形成順向坡，導致邊坡不穩定，進一步提升致災潛勢。因此，崩塌的發生不僅與坡度密切相關，亦與坡向及地層構造間的交互作用關係密切。

崩塌地與水系的距離關係可大致分為兩類：一為距離水系 50 公尺以內屬於近岸崩塌，另一為距離超過 400 公尺屬於離岸崩塌。其中，崩塌地位於水系 50 公尺範圍內者共計 21 處，總面積約 6.3 公頃；而距離水系超過 400 公尺的崩塌地有 6 處，總面積約 5.3 公頃。水系所引發的崩塌災害主要來自兩種機制：其一為水流對坡腳的側向沖刷，其二為上游源頭區的向源侵蝕。長期水流的作用可能導致坡腳結構削弱，引發邊坡不穩。側向侵蝕的影響程度與河川的逕流量及蜿蜒程度密切相關。當河道蜿蜒度指數較高時，代表河道地形多彎曲，轉彎處易使水流集中並加強對坡腳的沖刷，從而降低坡面穩定性 (Jansen *et al.*, 2006)。相對而言，蜿蜒度指數較低的直線型河道因水流分散，其侵蝕效應則相對較小。此外，源頭區域常位於 1 級序河川中，其支流特性為河道狹窄且坡度陡峭，水流向下切能力強，形成向源侵蝕型崩塌，成為重要的致災機制之一，

說明溪流與崩塌地形成之間存在高度相關性。

道路開發亦為影響崩塌的重要因素。研究結果顯示，距離道路上下邊坡 50 公尺範圍內發生崩塌地共 8 處，總面積約 2.9 公頃，雖僅占總崩塌地面積的 23%，但其位置多集中於主要聯外道路周邊，顯示道路開發與崩塌發生具有高度關聯性。

土地利用方面，崩塌地大多分布於森林用地，占總崩塌面積的 97%。由於本區土地利用類型以森林為主，因此土地利用變項在此區域對崩塌的解釋力有限，無法作為顯著的區分因子。

綜合崩塌地的空間分布特性可知，本區主要以面積小於 1 公頃的小規模崩塌為主。其發生與坡度、坡向、道路距離及水系距離等地形條件密切相關，上述因子可作為建立區域性土砂災害潛勢評估模型的重要依據。

3.2 土砂災害風險模式評估

土砂災害風險模式係建立於風險評估的基本概念上，結合降雨、地形與水文特性、土壤、地質構造以及人為開發等多項環境因子，以評估福山試驗林區域內的土砂災害潛勢。由於研究區域內的危害度 (即降雨強度) 在空間上的變異相對有限，且極端降雨事件的發生趨於不確定與難以掌握，因此本研究之風險模型特別著重於脆弱度與暴露度兩大指標的結合，以反映現況環境面臨土砂災害發生之風險。

脆弱度指標由「極端降雨抗性指標」、「道路開發指標」與「地質災害潛勢指標」疊加而成，並以地形均勻區作為分析單元，評估各單元面對降雨災害時的抵抗能力，如圖 16 所示，脆弱度的空間分布結果。

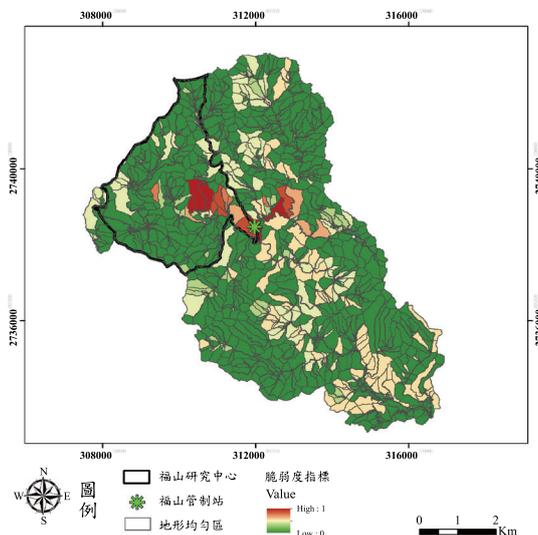


圖 16 脆弱度指標空間分布

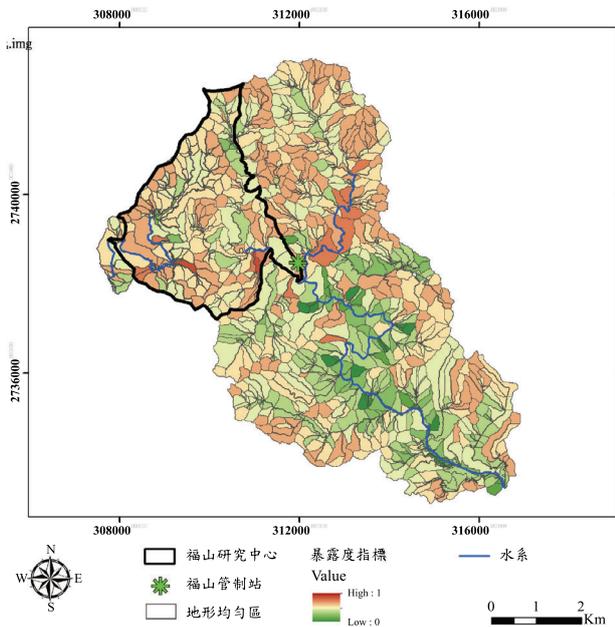


圖 17 暴露度指標空間分布

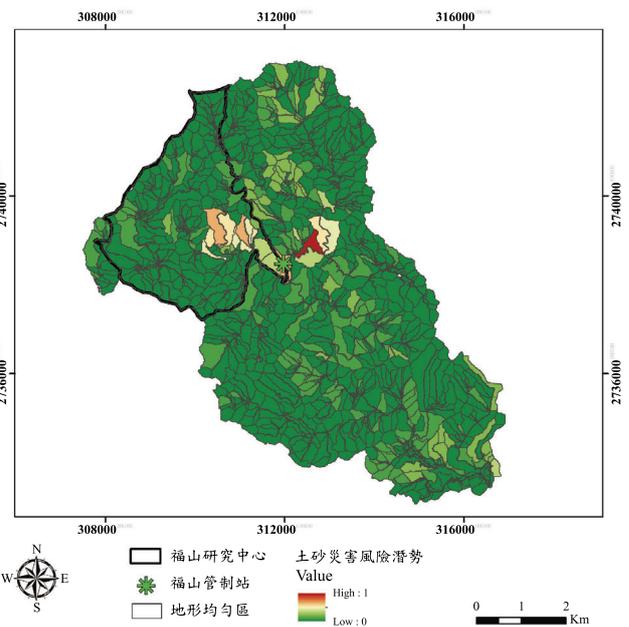


圖 18 土砂災害風險指標空間分布

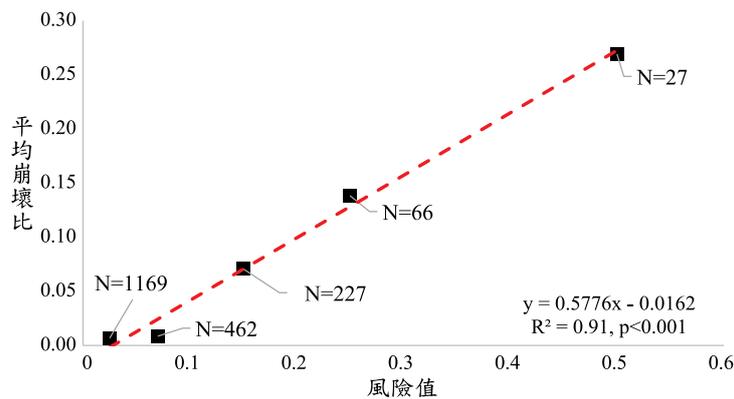


圖 19 土砂災害風險分級與崩壞比之統計結果

暴露度指標由「崩塌好發坡度」、「河道蜿蜒度」與「向源侵蝕潛勢」三項指標疊加而成，並以地形均勻區作為分析單元，作為修正環境脆弱度之依據，如圖 17 所示為暴露度的空間分布結果。

將脆弱度與暴露度兩項指標進行乘積運算後，可推估出整體土砂災害風險，其空間分布如圖 18 所示。風險值高的區域代表該區域在面對極端降雨時，具備多項不利的地形與環境條件，抗災能力相對較弱。研究結果顯示，高風險區主要集中於福山試驗林之聯外道路沿線，其次為源頭集水區、蜿蜒河段與好發坡度等三因子耦合的邊坡。透過建立災前土砂災害風險評估模式，不僅可提供災害防治決策參考，也有助於產製防災地圖，針對高風險路段進行事前防範管理，對保障用路人生命財產安全及提升整體防災韌性具重要

意義。

3.3 土砂災害風險模式驗證

本研究應用崩壞比的概念，作為驗證土砂災害風險模式預測準確性的依據。考量福山試驗林集水區多數分析單元屬於低風險潛勢 (如圖 18 所示)，因此，將土砂災害風險模式的輸出結果，依「單元數量」與「風險等級」進行 K-means 分群分析，並分為五個風險級距。針對各風險級距，統計其對應的崩壞單元占比，即計算平均崩壞比，用以驗證風險分級結果與實際崩塌事件之間的關係。

根據圖 19 的統計結果顯示，崩壞比與風險等級之間呈現顯著的線性正相關，判定係數為 0.91，並達到

高度統計顯著水準 ($p < 0.001$)。本研究建立之風險模型具有良好的預測能力。由平均崩壞比可見，集水區整體的崩壞比最高為 0.25，與整體崩塌率的結果相符。

3.4 高風險路段及潛在破壞機制

根據地質調查結果，結合複合指標進行綜合評估，以判定各路段的致災風險與潛勢等級，進一步探討道

路沿線土砂災害的潛在風險。針對聯外道路自 0 K 至 8 K 路段，共劃分出 46 個與邊坡對應的分析單元。呈現道路沿線土砂災害潛勢分級之評估成果，將風險值依 K-means 分群分析劃分為高、中、低三個等級進行分類。潛勢分級成果，有助於災前辨識高風險區域，達到避災與減災之目的。

表 3 彙整高潛勢單元及其對應的可能破壞機制，並說明各區段所面臨的潛在威脅。於評估過程中，綜合考量各單元之脆弱度與暴露度指標，進而推估其潛在破壞機制。此結果可作為管理單位後續針對邊坡進行治理對策與管理維護措施之重要參考依據。

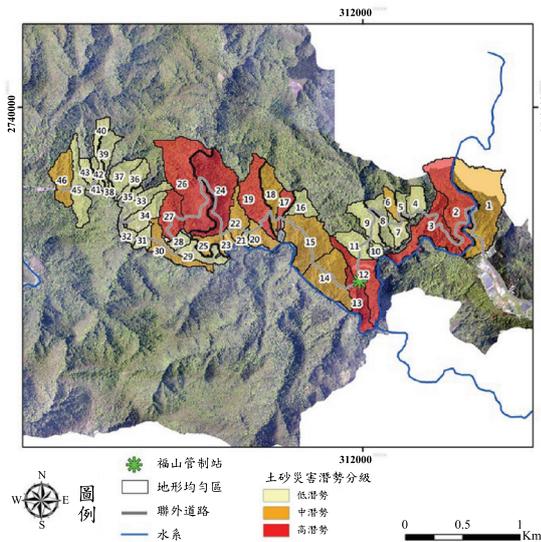


圖 20 道路土砂災害潛勢分級評估成果

四、結論與建議

本研究以福山試驗林集水區為研究範圍，結合風險分析概念模型，建立道路邊坡土砂災害風險評估模式，並整合崩塌潛勢相關因子，萃取脆弱度及暴露度等指標，以評估集水區內土砂災害風險的空間分布特性。研究結果顯示，該模式能有效識別高風險潛勢區，並與歷年崩落地資料進行驗證後發現，高風險潛勢區的平均崩壞比達 0.25，且與實際崩塌事件之間呈現高度線性正相關 ($R^2 = 0.91$, $p < 0.001$)，顯示模型具備良好的預測能力。

表 3 高土砂災害潛勢分級之單元及可能破壞機制

單元編號	里程	V1	V2	V3	E1	E2	E3	風險分級與值	可能破壞機制
02	0K+413.1 - 0K+981.0	0.78	0.91	0.2	0.58	0.87	0.49	高(0.59)	道路排水/近岸崩塌潛勢
03	0K+978.6 - 1K+537.4	0.79	1.00	0.6	0.74	0.87	0.62	高(1.00)	道路排水/近岸崩塌潛勢
12	2K+838.6 - 3K+051.9	0.76	0.29	1	0.30	0.83	0.70	高(0.63)	地質脆弱/近岸崩塌潛勢
13	3K+051.9 - 3K+176.6	0.76	0.16	1	0.83	0.83	0.30	高(0.61)	地質脆弱/好發坡度/ 近岸崩塌潛勢
17	4K+117.5 - 4K+169.5	0.74	0.08	1	0.83	0	1	高(0.51)	地質脆弱/好發坡度/ 向源侵蝕潛勢
19	4K+269.9 - 4K+467.4	0.72	0.28	1	1.00	0	1	高(0.66)	地質脆弱/好發坡度/ 向源侵蝕潛勢
24	4K+868.6 - 5K+470.0	0.72	0.79	1	0.67	0	0.51	高(0.56)	地質脆弱
26	5K+470.0 - 6K+022.6	0.71	0.71	1	0.83	0	0.51	高(0.61)	地質脆弱/好發坡度
27	6K+022.6 - 6K+371.5	0.71	0.53	1	0.97	0	0.51	高(0.59)	地質災害/好發坡度潛勢

備註: V1: 極端降雨抗性指標; V2: 道路開發指標; V3: 地質災害潛勢指標。E1: 崩塌好發坡度指標; E2: 河道蜿蜒度指標; E3: 向源侵蝕指標。

集水區內高風險潛勢區主要分布於聯外道路沿線、源頭集水區及蜿蜒河段，反映出地文水文特性及人為開發等多項環境因子對土砂災害風險的影響。當多個脆弱度指標耦合時，會使邊坡穩定性降低，成為潛在的災害熱區。此外，由於區域內降雨強度的空間變異相對有限，且極端降雨事件具有高度不確定性，研究結果強調現況環境中的脆弱度及暴露度指標在風險評估中的關鍵性。

依據模型成果，本研究將道路邊坡土砂災害風險劃分為三個潛勢等級，並針對高潛勢區及其潛在破壞機制，提出相應的治理及管理維護原則，以期達成避災及減災的目標，確保用路人生命財產安全與集水區經營與管理永續性。

謝誌

本研究感謝農業部林業試驗所提供科技計畫（計畫編號：112 農科-7.1.2-森-G1 及 113 農科-7.1.2-森-01）經費支持，並感謝科技部臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台（TCCIP）提供研究區長期氣候網格資料。

參考文獻

1. Chen, S.C., Weng, K.L., and Wu, C.H., "The Characteristics of Landslides and Landslide Size in Yu-Fong river Watershed," *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 41(3), pp.217-229, 2010.
2. Chen, Y.L., "Taiwan's Climate Change Over a Century," *Sci Develop*, (424), pp.6-11, 2008.
3. Crichton, D., "The risk triangle," *Natural disaster management*, pp.102-103, 1999.
4. Gumbel, E.J., "The return period of flood flows," *The Annals of Mathematical Statistics*, 12(2), pp.163-190, 1941.
5. Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., and Reichenbach, P., "Landslide Hazard Evaluation: A Review of Current Techniques and Their Application in a Multi-scale," *Central Italy. Geomorphology*, 31(1-4), pp.181-216.
6. Hoek, E., and Bray, J.W., "Rock Slope Engineering (3rd ed.)," *Institute of Mining and Metallurgy*, 1981.
7. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the IPCC," Geneva, Switzerland, 15, 2014.
8. Jansen, J.D., Codilean, A.T., Bishop, P., Hoey, T.B., and Persano, C., "Channel Sinuosity: Another Angle on Steady State and Transient Response in Bedrock Rivers Draining Active Mountain Belts," *European Geosciences Union*, 8, 2006.
9. Jenson, S.K., and Domingue, J.O., "Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11), pp.1593-1600, 1988.
10. Judson, S., and Kauffman, M.E., "Physical Geology, 8th ed.," Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1990.
11. Lévy, S., Jaboyedoff, M., Locat, J., and Demers, D., "Erosion and Channel Change as Factors of Landslides and Valley Formation in Champlain Sea Clays: The Chacoura River, Quebec, Canada," *Geomorphology*, 145-146(1), pp.12-18, 2012.
12. Lin, C.Y., Lai, Y.C., Wu, S.W., Mo, F.C., and Lin, C.Y., "Assessment of Potential Sediment Disasters and Resilience Management of Mountain Roads Using Environmental Indicators," *Natural Hazards*, 111(2), pp.1951-1975, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05126-5>.
13. Lin, C.Y., Lin, C.Y., and Chompuchan, C., "Risk-based Models for Potential Large-scale Landslide Monitoring and Management in Taiwan," pp.1-19, 2017.
14. Lu, S.Y., "Study of Rainfall Characteristics and their Changes on the Hengchun Peninsula," *J For Sci*, 31(1), pp.49-60, 2016.
15. Lu, S.Y., Lin, C.Y., and Hwang, L.S., "Spatial Relationships between Landslides and Topographical Factors at the Liukuei Experimental Forest, Southwestern Taiwan after Typhoon Morakot," *Taiwan J For Sci*, 26(4), pp.399-408, 2011.
16. MacArthur, R.H., and Wilson, E.O., "The Theory of Island Biogeography," Princeton University Press, 1967.
17. Niu, R., Ye, P., Sun, J., and Guo, H., "A New Index of Topographic Position Based on Multi-scale Analysis," *Geomorphology*, 300, pp.201-211, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.10.020>.
18. Rosenzweig, M.L., "Species Diversity in Space and Time," *Cambridge University Press*, 1995.
19. Strahler, A.N., "Hypsometric (Area-altitude) Analysis of Erosional Topography," *Bull. Geol. Soc. Am.*, 63,

- pp.1117-1142, 1952.
20. Tsou, C.Y., Feng, Z.Y., and Chigira, M., "Catastrophic landslide induced by Typhoon Morakot, Shiaolin, Taiwan," *Geomorphology*, 127, pp.166-178, 2011.
 21. Wang, C.H., "Precipitation Changes and their Impacts on the Water Resources Management in Taiwan," Proceedings of International Symposium on Hydrogeological Investigation and Remedial Technology, 15-16 November 2004, Jhongli, Taiwan: National Central Univ., pp.176-190, 2004.
 22. Wu, S.W., Lin, C.Y., Sun, M.Y., and Lu, S.Y., "Estimation of Soil Depth in the Liukuei Experimental Forest by Using Conceptual Model," *CATENA*, 209(2), 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105839>.
 23. Wu, Y.C., Chen, Y.M., and Chu, R.L., "The change trends of Taiwan's climate," *NARL Q*, 25, pp.40-46, 2010.
 24. 王如意、易任，*應用水文學*，國立編譯館出版，茂昌圖書公司，台北市，1979。
 25. 地質調查及礦業管理中心，「臺灣坡地環境地質圖集說明書」，美雅資訊有限公司，2023。
 26. 朱芳儀、吳俊毅、安軒霈、林仕修、陳樹群，「臺灣主要流域之河川型態及其野溪界點判定評估」，*中華水土保持學報*，第 49 卷第 3 期，頁 178-186，2018。
 27. 李光敦，「*水文學*，(第 4 版)」，五南出版，2024。
 28. 周憲德，「土石潛勢溪流之地文因子綜整判定」，2017 年度農委會水土保持局創新研究計畫，2018。
 29. 林昭遠、藍欣茹，「山區道路與小林村崩塌關係之探討」，*水土保持學報*，第 47 卷第 1 期，頁 1287-1296，2015。
 30. 林炯明，「侵台颱風之時空特性與災害個案分析」，臺灣師範大學地理學系博士論文，2009。
 31. 洪鴻智、陳羚怡，「洪災風險評估與災害風險稅課徵—以台北市為例」，*台灣土地研究*，第 10 卷第 2 期，頁 95-125，2007。
 32. 莫凡軍，「應用風險分析評估台 21 線道路邊坡土砂災害潛勢之研究」，國立中興大學水土保持學系碩士學位論文，2019。
 33. 陳子晴，「應用風險分析探討原住民保留地土砂災害與韌性調適策略之研究」，國立中興大學水土保持學系博士論文，2020。
 34. 陳文山、李文正、張明忠，「多因子交互作用對山崩風險影響之研究」，*地理學報*，第 80 卷第 3 期，頁 345-368，2012。
 35. 陸象豫、孫銘源、傅鶴翹、黃惠雪，「福山試驗林降雨及氣溫長期變遷趨勢之研究」，*台灣林業科學*，第 36 卷第 3 期，頁 235-244，2021。
 36. 農業部林業試驗所，「氣候變遷對森林環境衝擊之監測 (第 3 年/全程 4 年)」，農業部林業試驗所 112 年度科技計畫研究報告，2023。
 37. 農業部林業試驗所，「林業試驗所網站簡介」，<https://www.tfri.gov.tw/cp.aspx?n=7713&t=189>，2025。
 38. 盧光輝、張若韻，「福山實驗集水區颱風干擾植相對逕流型態的影響」，*華岡地理學報*，第 22 期，pp. 25 - 30，2008。
 39. 簡逢助、李錫堤，「山崩潛感值、崩壞比與降雨量之關係探討」，104 年地質與地球物理學術研討會大會手冊，頁 467，2015。

收稿日期：民國 114 年 06 月 19 日

修改日期：民國 114 年 10 月 02 日

接受日期：民國 114 年 12 月 03 日