

自適性坡地崩塌評估模式於崩塌災害警戒管理之研究

計畫編號：SWCB-109-299

執行單位：逢甲大學

計畫主持人：逢甲大學土木工程學系 李秉乾教授

共同主持人：逢甲大學都市計畫與空間資訊學系 雷祖強教授

協同主持人：逢甲大學營建及防災研究中心 謝孟勳研究助理教授

協同主持人：逢甲大學地理資訊系統研究中心 黃亦敏研究助理教授

協同主持人：逢甲大學地理資訊系統研究中心 方耀民研究副教授

協同主持人：逢甲大學土地管理學系 周天穎教授

摘要

本團隊近期在農委會水土保持局(以下簡稱水保局)相關計畫中，針對陳有蘭溪、旗山溪、荖濃溪集水區等示範區進行相關資料蒐集彙整，透過人工智慧類神經網路建立的崩塌潛勢評估模式，針對不同類型之坡面導出不同雨量觸發因子(最大小時降雨和總有效累積雨量)及崩塌地文因子(地質、坡度、坡向、河道遠近、植生、歷史崩塌)之崩塌潛勢評估模型，並與降雨危害曲線整合為一套崩塌風險警戒機制模式。

本計畫今年將以擴增各年度衛星判釋全島崩塌地圖萃取各年度間新增之崩塌地圖以及蒐集對應年度之颱風豪雨事件雨量組體資料進行崩塌關聯資料庫為主要目標，並探索及挖掘雨量時機點與實際發生崩塌之不確定性，透過更多時序的雨量特徵提取與過去年度崩塌進行關聯性模型訓練，使崩塌潛勢評估模型之準確性提高，進而提供更加精準之崩塌潛勢資訊，經過上述的人工智慧技術於崩塌潛勢評估模式精進後，後續亦將持續整合降雨危害曲線於本計畫過去所發展之崩塌風險警戒機制模式，同樣透過崩塌風險的三項因子(危害度、易損性以及暴露量)整合於崩塌風險警戒管理模式，其可有效掌握到個別因子的影響性，即降雨時序特徵對地面環境的影響性(危害度)、地面環境對於降雨的承受能力(易損性)以及保全對象所在的位置(暴露度)，因此為了能夠有效地應用於災害應變管理，對於設定各指標之警戒門檻則亦是本計畫今年度之研究目標，然過去在崩塌警戒管理上中本計畫僅透過歷史速報資料之最小機率作為最小致災門檻曲線，而其對於無速報資料之行政區無法有效之訂定警戒值，且因近年來受極端氣候常態化影響其不確定性增加，作為減災策略擬定之依據尚有許多不足之處；因此，對於本計畫後續針對多年度的崩塌雨量資料擴增，將嘗試利用 AI 技術的機器學習演運算，透過大數據崩塌雨量數據對警戒管理內容進行警戒值訂定模型之建置，並持續收蒐集崩塌事件進行模式驗證，以作為崩塌災害警戒值之訂定及管理應用之依據，有效達到協助防災應變決策之全面性以及提升國內坡地崩塌量化分析、警戒與風險評估之研究發展。

另一方面，如何有效提供民眾於崩塌災害前之重要潛勢風險資訊，亦是本計畫後續將崩塌災害警戒管理落實於自主防災之主要目的，所以本計畫將進行自主防災崩塌警戒發布管理流程設計，並挑選一處社區落實坡地崩塌評估模式於社區自主災害警戒應用，規劃相關避難路線及崩塌風險地圖等，進而達社區自主避災、防災及'減災的目標。

關鍵詞:崩塌、人工智慧、警戒模式、風險管理

Study of Adoptive Landslide Evaluation Model and Applications for the Landslide Disaster Response and Management

The research team have developed a system for Soil and Water Conservation Bureau (SWCB) about the subjects of landslide potential evaluation and landslide disaster warning model. The model was built based on the data from watersheds of Chen-Yo-Lan River, Qishan River, and Laonong River. The methods of artificial intelligent (AI) was used in the model to describe the influence of triggering factors of rainfall intensity and accumulation, as well as the environmental factors of geology, slope, aspect, distance to stream channel, vegetation, and historical landslides.

The program this year will be to expand the satellite interpretation images of each year's landslide map, and to collect the corresponding rainfall data of typhoons and heavy rainfalls in each year. The database will be used for exploring the correlation of landslide and environmental changes. Uncertainty about the timing of rainfall and actual landslide will be included in the model training. Through more time-series rainfall features in training, the model will be expected to be more accurate about the potential evaluation of landslide. After the above-mentioned artificial intelligence technology, the model is improved and integrated with previous fragility-curve model. The landslide risk, therefore, will be determined by considering hazard, vulnerability, and exposure factors in the model. The proposed model will be able to effectively capture the characteristics of landslide in terms of environmental susceptibility, withstand capability (fragility), and the object (exposure) to be protected. Therefore, in order to be effectively applied to disaster contingency management, setting the alert thresholds of various indicators is also the research goal of this plan this year. However, in the past, in regard to landslide alert management, the model only used the historical event notices to determine the minimum hazard threshold curve, and it cannot effectively set a warning value for regions without event notices. The uncertainty of landslide occurrence has increased due to the impact of extreme weather in recent years. There are still many deficiencies as a basis for the development of disaster reduction strategies. Therefore, an attempt will be made to use AI technology of machine learning algorithms to build a warning value model for landslide alert management. The proposed model and evaluation procedures will be effectively achieving the comprehensiveness of disaster prevention and response, and improve the understanding of landslide risk assessment.

On the other hand, how to effectively provide people with important potential risk information before the landslide disaster is also the main purpose of this study. Therefore, the program will conduct a procedure of landslide alert for autonomous disaster prevention communities. A community will be selected to implement the landslide alert assessment, including determining evacuation routes and making landslide risk maps. With the program, the community will achieve the goal of autonomous disaster prevention.

Keywords: Landslide, Artificial Intelligence, Warning Criteria, Risk Management

一、前言

921大地震後讓臺灣原已脆弱之地質更不穩定，加上全球氣候變遷，颱風豪雨之強度日益驚人，從桃芝、納莉、海棠、敏督利、辛樂克颱風，到重創大半個台灣的莫拉克颱風，暴雨導致之崩塌及土石流造成慘重之生命財產損失。加上近年來極端降雨事件發生頻繁，山坡地易因降雨引發不同規模崩塌，故對於山坡地的易崩特性、崩塌風險及警戒機制實有必要加以研究。

而本團隊參考水保局相關計畫，已透過大數據空間環境資訊空間環境資訊以及多年度的崩塌醬與資訊建立崩塌關聯資訊料庫，並於108年度計畫採用人工智慧機器學習之演算法對資料以及模式進行重新適配以及模型建置，針對坡地崩塌發生之可能性進行研究，針對陳有蘭溪、旗山溪、荖濃溪集水區等示範區進行相關資料蒐集彙整，針對集水區坡面導出不同雨量觸發因子(最大小時降雨和總有效累積雨量)及地文潛勢因子(地質、坡度、坡向、河道遠近、植生、歷史崩塌)之雙變量(I_{max}, R_{te})崩塌潛勢評估模型，並與降雨危害曲線整合為一套崩塌風險警戒機制模式，而為了精進本計畫所發展之崩塌風險警戒模式，進而根據上述問題分析，綜觀面對的問題可能是崩塌事件資料庫必須增加以及分析模式能夠處理未來不同規模的降雨強度的能力，再加上環境本身也有自癒能力，這會形成一個非常複雜機理之問題，而上述的兩種變動再加上模式本身必須快速演算的計算能力，就是本研究所要面對之研究課題。

另外，上述的人工智慧技術於崩塌潛勢評估模式精進後，後續亦將持續整合降雨危害曲線於本計畫過去所發展之崩塌風險警戒機制模式，同樣透過崩塌風險的三項因子(危害度、易損性以及暴露量)整合於崩塌風險評估模式，其可有效掌握到個別因子的影響性，即降雨時序特徵對地面環境的影響性(危害度)、地面環境對於降雨的承受能力(易損性)以及保全對象所在的位置(暴露度)，因此為了能夠有效地應用於災害應變管理，本計畫將崩塌災害警戒管理落實於自主防災為主要目的，將進行自主防災崩塌警戒發布管理流程設計並嘗試落實坡地崩塌評估模式於社區自主災害警戒應用於高風險潛勢社區，並規劃相關避難路線及崩塌風險地圖等，進而達社區自主避災、防災及減災的目標。

二、工作項目與內容

本計畫主要之工作流程如圖1所示，進而完成以下工作項目，以達成本年度之計畫目標。

- (一) 坡地崩塌因子資料庫擴增及更新
- (二) 坡地崩塌潛勢評估模式誘發因子檢討與更新
- (三) 崩塌風險評估模型精進
- (四) 崩塌風險警戒機制模式於精密防災之應用與實測
- (五) 自主防災崩塌警戒發布管理流程設計

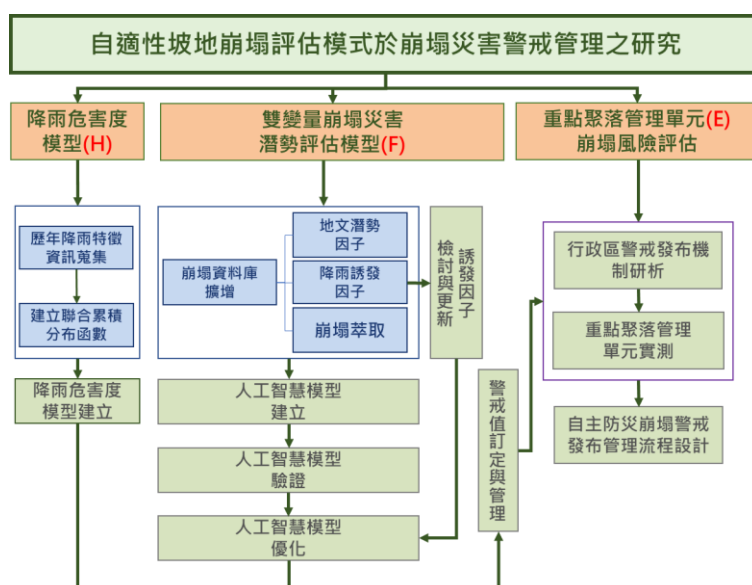


圖1 本年度工作項目與流程

三、計畫研究成果

(一) 研究地區崩塌資料庫

本計畫研究地區包含陳有蘭溪集水區、荖濃溪集水區、旗山溪集水區及等三個集水區，進行坡地易損性分析前須建立集水區各類環境因子資料，集水區資料蒐集自林務局農林航測所繪製之陳有蘭溪集水區、荖濃溪集水區和旗山溪集水區之相關地文、水文地理資訊圖資以及水土保持局全國集水區圖層，採用圖層範圍包括主、次、子集水區範圍圖、河系圖等地理資訊基本圖資。在集水區環境因子方面，本計畫藉由網格資料庫建置各類環境因子屬性、植生變異因子、驅動因子及崩塌事件等資訊。環境資料庫以 20m x 20m 之網格尺度使不同集水區範圍內所有屬性因子鏈結並進而透過坡面單元之繪製，將資料庫進行尺度之轉換以作為後續模型建置之分析單元，環境資料庫細分為四個部分：1. 環境潛勢因子；2. 前期擾動誘發因子；3. 降雨驅動因子及 4. 崩塌資訊。

依據坡面單元之劃設及篩選程序，陳有蘭溪集水區劃分完成之坡面單元總計有 6,651 個坡面單元。荖濃溪集水區劃分完成之坡面單元總計有 21,279 個坡面單元。旗山溪集水區劃分完成坡面單元總計有 10,985 個坡面單元，如下圖 2 所示。



圖 2 各集水區之坡面單元分布圖

1. 環境潛勢因子

本計畫在過去地文潛勢因子主要萃取地質、高程、坡度、波向、河道遠近以及植生作為各分析單元之差異性特徵來源，而為了提升分析單元之異質性以利後續建立坡面單元之崩塌關聯性，因此本計畫加以運用數值高程模型(digital elevation model; DEM)做更多之特徵萃取，如取率、坡度及坡向變率、地形起伏度、地表切割深度、地表粗糙度、匯流累積量以及水流長度等特徵，共擴增 9 種地文特徵因子，如下圖 3 所示。

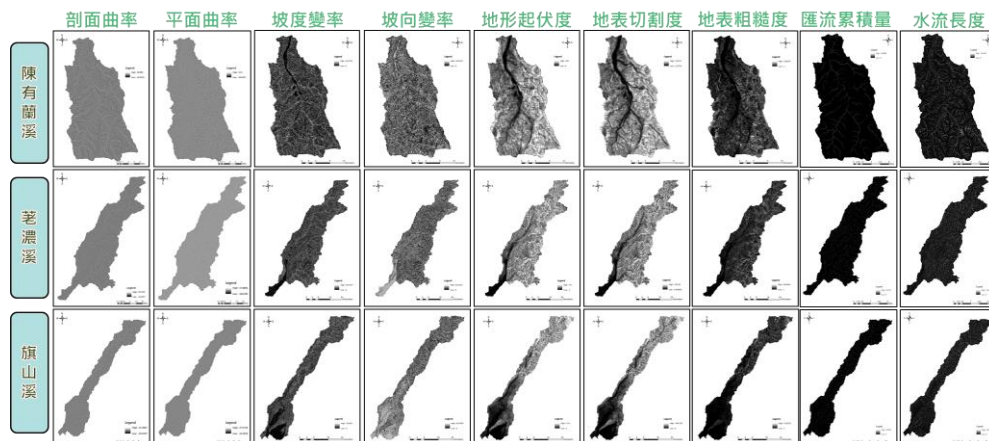


圖 3 各集水區之地文特徵萃取圖

2. 前期擾動誘發因子

對於各年度事件之崩塌地可藉由前後時期之裸露地變異情形獲得。本計畫將崩塌地分類為四類：(1)崩塌復育，(2)舊有崩塌地，(3)舊有崩塌地擴大以及(4)新生崩塌地。

本計畫透過政府開放資料平台取得由林務局委託成功大學，其是以各年度 1~7 月全島鑲嵌福衛二號衛星影像建立自動判釋崩塌地作業標準，繪製全島崩塌地判釋成果，並取得 98 年度至 106 年度(107 年度、108 年度尚未上網)之衛星判釋全島崩塌地圖，對各年度颱風事件前後時期之崩塌地圖資進行套疊，將各崩塌地之變異類型特徵化，由此獲得各類變異崩塌地類型與坡面單元間之變遷資訊，以提高資料中崩塌地與坡面單元間之空間鏈結，右圖 4 以 97 年度至 98 年度為例，各類崩塌變異之面積統計以及分布圖。

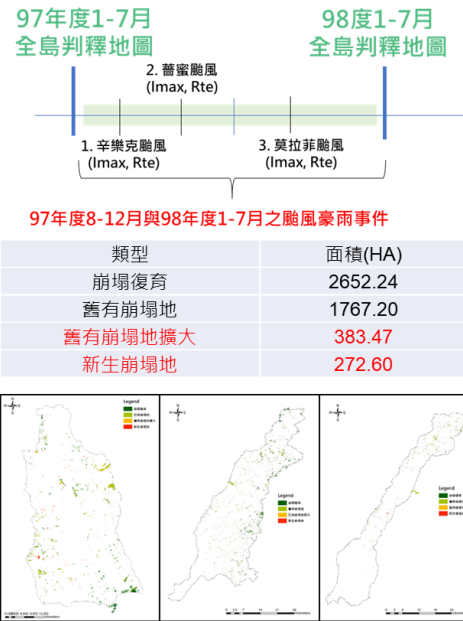


圖 4 97 年度至 98 年度間崩塌變異類型分布圖

3. 降雨驅動因子

本計畫依據中央氣象局公布的颱風侵台時間、經濟部水利署的颱洪事件以及農委會水土保持局過去於各颱風豪雨事件啟動應變小組之時間作為各事件影響目標集水區之時間，其中上述所考量之颱風豪雨事件期間，本計畫針對研究中集水區內篩選資料有問題及無紀錄測站後，共計 54 個雨量測站蒐集小時降雨以及前期累積降雨之歷時紀錄，根據本計畫定義之兩場事件，計算各場颱風事件雨量站之降雨因子，包括 I_{max} 及 R_{te} 。計算之結果利用地理資訊系統軟體內的空間分析工具，該工具之克利金空間內插模組來進行降雨空間分布推估。對於 $I_{max}-R_{te}$ ，各集水區內颱風事件之最大小時降雨強度及總有效累積雨量之空間分布如下圖 5 所示。

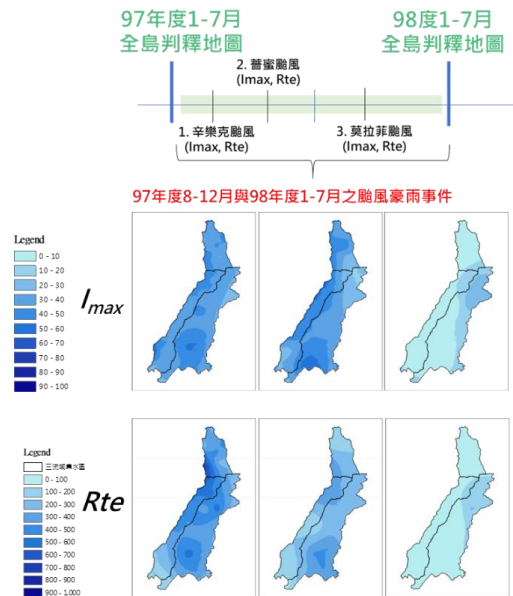


圖 5 97 年度至 98 年度各事件颱風豪雨雨量推估

4. 崩塌資訊

本計畫定義「新增崩塌地」則為「舊有崩塌地擴大」加上「新生崩塌地」的部分，即上述之(3)與(4)，對於前後期崩塌地變遷情形具有清楚的定義，可由此判定某區塊是否確實發生崩塌。然而，雖然在大部份的情形下，舊有崩塌地的擴大確實與事件相關，但無法確切知道舊有崩塌地也在該次事件產生崩塌。尤其擴大有時並非只是往外擴增，也可能有內部加深之情形；然而此狀況並不能以平面空間區位判別而獲得，且其內部是否真的發生加深情形，須進行現地勘查才可能得知，而本計畫將各年度前後期崩塌套疊結果中之舊有崩塌地擴大以及新增崩塌地相加，彙整於表 1。

表 1 颱風豪雨崩塌事件新增崩塌地詳表

年度間	集水區	新增崩塌地(面積)	年度間重大颱風豪雨事件	年度間	集水區	新增崩塌地(面積)	年度間重大颱風豪雨事件
98-97	荖濃溪	284.15ha	卡孜基颱風/鳳凰颱風/辛樂克颱風/蕃蜜颱風	103-102	荖濃溪	488.74ha	潭美颱風/康芮颱風/天兔颱風/0520豪雨/0606豪雨
	陳有蘭溪	183.79ha			陳有蘭溪	133.93ha	
	旗山溪	104.32ha			旗山溪	216.04ha	
99-98	荖濃溪	8,446.72ha	莫拉克事件	104-103	荖濃溪	378.72ha	鳳凰颱風/0520豪雨/蓮花暨昌鴻颱風
	陳有蘭溪	888.87ha			陳有蘭溪	101.15ha	
	旗山溪	3,027.11ha			旗山溪	148.27ha	
100-99	荖濃溪	1311.03ha	凡那比颱風/0924豪雨/1016豪雨/1017豪雨-梅姬颱風/艾利颱風	105-104	荖濃溪	514.47ha	蘇迪勒颱風/杜鵑颱風/0611豪雨/尼伯特颱風/0710豪雨
	陳有蘭溪	409.31ha			陳有蘭溪	134.76ha	
	旗山溪	493.63ha			旗山溪	178.55ha	
101-100	荖濃溪	1,796.45ha	南瑪都颱風/0610豪雨/泰利颱風	106-105	荖濃溪	1716.29ha	莫蘭蒂颱風/梅姬颱風/0601豪雨/尼莎暨海棠颱風
	陳有蘭溪	329.73ha			陳有蘭溪	200.32ha	
	旗山溪	389.44ha			旗山溪	393.76ha	
102-101	荖濃溪	1,371.89ha	天秤颱風/蘇拉颱風				
	陳有蘭溪	329.73ha					
	旗山溪	389.44ha					

(二) 坡地崩塌風險評估模型建立

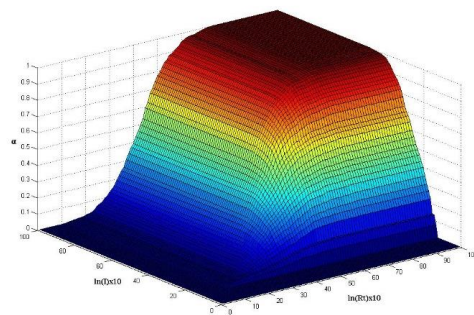
1. 崩塌降雨危害評估模型建立

由於土石流潛勢溪流都在山區，要實際量測土石流發生前溪流溝床內土體的孔隙水壓及地下伏流水狀況困難度很高，而降雨資料的取得又比孔隙水壓及地下伏流水資料來的容易。因此，在過去的研究中，大部份的研究人員都藉由土石流發生之前的降雨量（前期降雨）來間接說明土體的含水狀況（即孔隙水壓），直接探討降雨條件與土石流發生之關係，並利用降雨條件建立土石流發生降雨警戒關係式。因此本計畫團隊同理在分析崩塌災害發生降雨特性時，通常需考量崩塌發生當時的直接誘發雨量（包括降雨強度與當場累積雨量）及間接激發雨量（如前期降雨）。

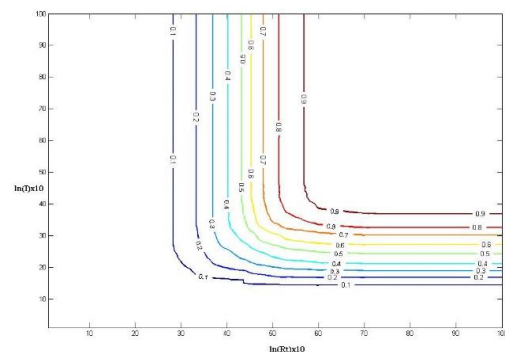
其中以 10 年間降雨資料作為建立雨量等比率曲線模式之基礎，歷史雨量資料庫依新年度持續更新，以反映近年氣候變化；透過將雨量資料先進行雨場分割，建立各雨場之 (lnR, lnI) 雨型組數據，並建立各重點聚落中歷史雨場之時雨量及有效累積雨量之聯合機率質量函數，將各雨量站民國 97 至民國 107 年之資料進行標準化等處理後，並基於全部無事件雨場之雨型組 (lnR_{ti}, lnI_j) 之聯合累積分布函數定義如下：

$$F_{lnRt, lnI}(lnRt, lnI) = \sum_{i=1}^{i: lnRti \leq lnRt} \sum_{j=1}^{j: lnIj \leq lnI} p_{lnRt, lnI}(lnRti, lnIj) \quad (1)$$

本計劃針基於 10 年雨量資料雨場之雨型組 lnRt 與 lnI 聯合機率質量函數計算成果代入(1)式進行計算，建立 FLR, LI(lnR, lnI)，透過各雨量站 10 年間雨量資料建立之三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖，並將其三維空間映射至二維空間，以建立各聚落鄰近雨量站之歷史雨場 (I1-Rte) 等比率曲線圖，以下以豐丘重點聚落管理單元最鄰近之瑪家雨量站繪製各歷史雨場等比率曲線圖如下錯誤! 找不到參照來源。所示：



(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖



(b) 雨量等機率線

圖 6 豐丘雨量站降雨危害度曲面

本研為明確表明人工智慧類神經網路基礎模型於坡地崩塌風險評估之預測能力，於模式建立之過程中，以抽樣 70%做為訓練神經網路模型之數據，30%做為測試訓練成果之數據，將前述之設定完成後，即開始進行訓練，總資料樣本數為 101,711 筆，訓練資料樣本數為 71,363 筆，測試資料樣本數為數 30,348 筆。

本計畫根據模型建立時隨機抽樣 70%資料作為訓練樣本輸入並於達到完成網路的訓練後，以餘下的 30%資料進行驗證，來評估網路學習成果的效能以及神經網路輸出之預測準確率，其為在驗證之前總是希望能控制所有會影響誤判的因素，但造成坡面崩塌的因素非常複雜，且崩塌災害是屬於隨機發生的事件，因此本計畫將針對不同的崩塌因素組合進行模式之建立比較，詳表如下表 3，分別討論過去僅用地文因子以及當年度之降雨驅動因子作為模式變數之輸入，以及地文因子加上前期擾動因子以及當年度之降雨驅動因子作為模式變數之輸入，以比較不同變數組合在模型表現上之成效。

在完成建立基礎類神經坡地風險評估模型，並將坡面單元環境因子組成，並加入為崩塌潛勢評估分析模型之變數，進行訓練已取得全域環境下適用之模型，並投入兩種雨量參數，分別為各年度颱風豪雨雨場中之最大之 $I_{max}(i)$ 及其對應之 $R_{te}(i)$ ，而在僅投入地文潛勢因子以及當年度降雨驅動因子(I_{max} , R_{te})之模型建立中驗證樣本得到 68.19%之準確率，因此在模式建立後，將資料庫 8 進行崩塌潛勢評估模式之獨立驗證，以取得實證範圍內合理的評估分布進行驗證，而資料庫 8 則是目標判釋年度為 105 年度至 106 年度，並同樣輸入地文潛勢因子以及當年度降雨驅動因子(I_{max} , R_{te})之模型建立中驗證樣本得到 67.89%之準確率，如下表 3，而 105 年度至 106 年度之崩塌判釋評估結果圖如下圖 8 (a) 所示；另外將比較投入地文潛勢因子、歷五年之崩塌時序特徵資料庫以及當年度降雨驅動因子(I_{max} , R_{te})之模型建立中全區域樣本得到 79.96%之準確率，而在資料庫 8 進行崩塌潛勢評估模式之獨立驗證中，並同樣輸入地文潛勢因子、歷五年之崩塌時序特徵資料庫以及當年度降雨驅動因子(I_{max} , R_{te})之模型建立中全區域樣本得到 85.76%之準確率，如下表 3，而 105 年度至 106 年度之崩塌判釋評估結果圖如下圖 8 (b) 所示，而根據兩種不同之變數模型組合之評估結果，其說明對於單一坡面單元於過去崩塌發生頻率以及變異狀況是有可能擾動坡面的結構進而影響該坡面發生崩塌的可能性。

表 3 資料庫 8 評估精度表

變數輸入類型		地文潛勢因子以及當年度降雨驅動因子				地文潛勢因子、歷五年之崩塌時序特徵資料庫以及當年度降雨驅動因子			
		分類結果		總計	生產者精度	分類結果		總計	生產者精度
		崩塌	未崩塌			崩塌	未崩塌		
地真分類	崩塌	22519	10209	32728	68.81%	28246	4482	32728	86.31%
	未崩塌	2285	3902	6187	63.07%	1059	5128	6187	82.88%
總計		24804	14111	38915		29305	9610	38915	
使用者精度		90.79%	27.65%		67.89%	96.39%	53.36%		85.76%

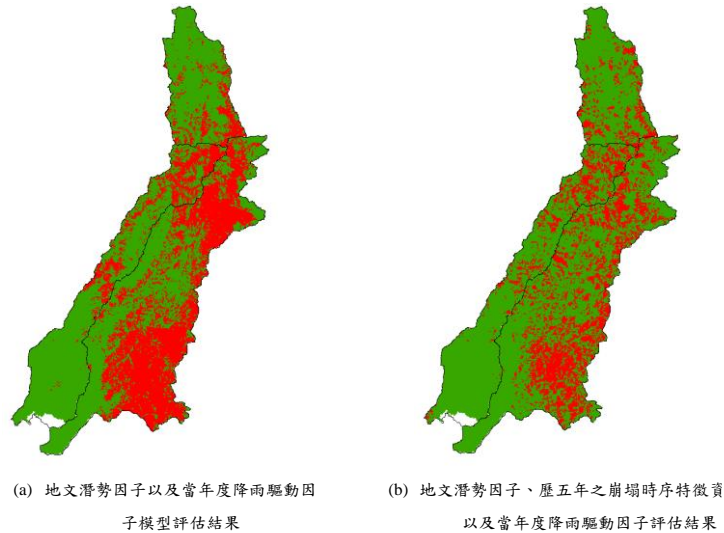


圖 8 105-106 年度(資料庫 8)驗證評估結果分布圖

3. 重點聚落崩塌風險警戒機制模式

本研究對於重點聚落崩塌風險警戒機制模式設計上，同樣也是採取建立所謂的風險矩陣的概念來建立崩塌風險評估模式，也就是所謂的崩塌風險管理圖(Landslide Risk Management Diagram, LRMD)的概念來建立崩塌警戒模式，經由前兩節所建立的各雨量站之崩塌降雨危害評估模型以及坡地崩塌潛勢評估模型後，而本節主要在建立重點聚落崩塌風險警戒機制評估指標上，並建立降雨危害評估以及坡地崩塌潛勢評估，並配合真實致災紀錄取得最小致災門檻臨界值，在此研究稱為降雨危害度最小致災門檻值(HC)以及坡地崩塌潛勢最小致災門檻值(FC)，就可繪製其一崩塌風險警戒機制圖，其中 X 軸所指的是降雨危害值(範圍從 0 到 1)，Y 軸所指的是坡地崩塌潛勢機率值(範圍從 0 到 1)，在這崩塌風險警戒機制圖中，透過降雨危害警戒曲線(HCL)及崩塌易損評估曲線(FCL)的劃定，其可分為安全、紅一警戒以及紅二警戒，關於警戒機制的發布流程與說明將於下一章節進行討論。

在訂定完本計畫試辦南部集水區之 17 處重點聚落的降雨危害度最小致災警戒值(HC)以及崩塌易損度最小致災警戒值(FC)，即可對各重點聚落繪製其崩塌風險警戒機制圖，如圖 9 以豐丘聚落為例，透過歷史降雨最小致災警戒曲線(HCL)及崩塌易損度最小致災警戒曲線(FCL)分別劃定該崩塌風險警戒機制圖之 X 軸以及 Y 軸，當中的 X 軸所指的是降雨危害值(範圍從 0 到 1)，Y 軸所指的是崩塌易損值(範圍從 0 到 1)，並其可分為成四個次空間，是 H 低-F 低的範圍，乃屬安全性高的空間；而是 H 低-F 高的範圍以及 H 高-F 低的範圍，乃屬中高風險的空間，已存在崩塌風險的不確定性區域；而是 H 高-F 高的範圍，則屬於高風險的空間，當雨量紀錄累積至此，重點聚落則存在高度崩塌風險，應當要積極的進行預警或警戒作為。而當一

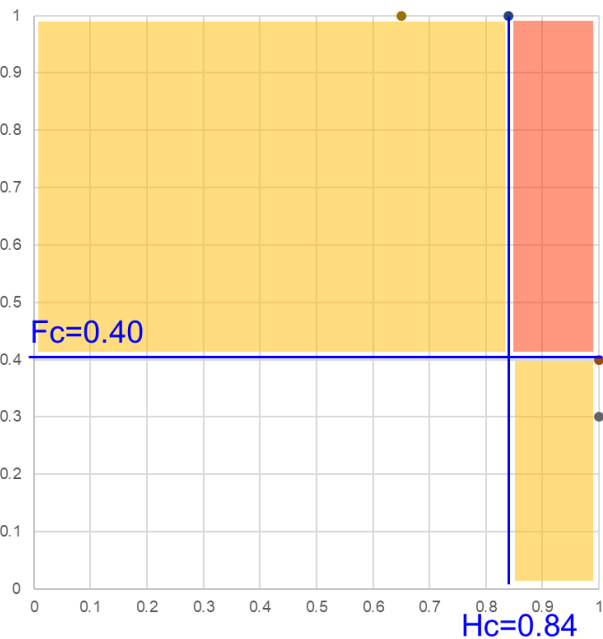


圖 9 豐丘社區-崩塌風險警戒機制圖

降雨時段的雨量資訊(雨場開始至該時段間之最大降雨量、最大三小時累積降雨以及有效累積雨量)分別於歷史降雨等比線曲線以及崩塌易損性曲線中之對應比率，並將其點(H_i , F_i)繪製於崩塌風險警戒機制圖，當該點碰觸到歷史降雨最小致災警戒曲線(H_{CL})則代表已達到高崩塌的情況，若降雨歷時點在延伸碰觸到崩塌易損度最小致災警戒曲線(F_{CL})，則應當積極進行疏散的狀態，並可細緻化的對坡面單元進行崩塌易損評估，可明確呈現高風險之坡面單元的位置，掌握何處發生崩塌的潛勢以及可能性較高，以進行相對應之警戒模式，更重要的一點則是不同的重點聚落則會存在不同的最小致災警戒值，這個概念融合了保全對象的暴露度精神在其中，因此透過上述的本研究完整的建立出崩塌風險評估模式。

更進一步來說，本模式的優勢在於過去國內外相關的研究多著重在危害度預警模式的建立，然如前述所討論之崩塌風險概念之內容，若是缺乏了與易損性機率值合併表述的機會，將會增加崩塌機制掌握的不確定性，也會不易改善崩塌預報高度不確定性這項課題。因此透過上述一系列程序的探討，本研究所發展出來之崩塌風險警戒機制模式可針對不同重點聚落之各種時空與環境不同等因素，建立出屬於各重點聚落特性之崩塌風險管理圖以及崩塌風險警戒機制圖(Landslide Alert Map, LAM)，這項工作的建立將有助於細緻化我國崩塌防災工作的整備與預警能力，因為重點聚落將會存在不同的時空與環境特徵，而這種特徵的有效呈現是目前防災工作尚未達到的項目之一。

(三) 自主防災崩塌警戒發布管理流程設計

1. 社區自主防災警戒發布機制研析

臺灣歷經多起重大天然災害，廣域防救災技術已達世界水準，然多數防災架構多以中央主管機關委託研發及應用，各類災害潛勢圖資、降雨預報及災害預警，僅能達到鄉鎮層級或村里層級，社區層級或邊坡層級等局部區域大比例尺的防災預警成果仍相當缺乏，致使地方政府難以聚焦於易致災。因此本計畫將建議社區自主防災需考量到社區管理層須優先接收到崩塌警戒之預警推播，若等到歷時雨量達到 H 指標或 F 指標，在進行防災應變決策恐怕因災害規模已達依訂標準，而導致防災決策難以執行，因此本計畫建議針對 H 指標或 F 指標下修一個標準差，作為社區警戒推播之標準，而其標準後續可再依據實測過程以及防災需求進行調整，而下圖以豐丘聚落之標準為例，豐丘聚落在前章節訂定之 H_c 以及 F_c 分別為 0.84 與 0.40，而分別下修一個標準差為 H_c' 以及 F_c' 分別為 0.70 與 0.30，作為豐丘聚落之社區警戒推播之標準，並依照崩塌風險警戒機制圖之不同階段建議不同對象之接收警戒推播，以提高民眾之風險警戒意識，因此本案設計社區自主防災警戒推播流程規劃如下圖 10 所示，當災害規模($I_{max}(i)$, $R_{te}(i)$)達一定標準觸碰到(F_c' , H_c')即下圖 10 之黃色區塊則建議社區管理層級提前接收警戒推播，而當($I_{max}(i)$, $R_{te}(i)$) 達一定標準觸碰到 F_c 或 H_c ，即下圖 10 之橘色(即紅 1)區塊則社區保全對象主動接收警戒推播，並建議當($I_{max}(i)$, $R_{te}(i)$) 達一定標準觸碰到 F_c 且 H_c ，即下圖 10 之紅色(即紅 2)區塊則建議社區以完成全面性疏散，並以此為基礎以作為未來進行推播系統雛型之參考。

而解除時機為雨場結束後，連續 12 小時內，時雨量都小於 4 mm 或累積雨量小於 10 mm 時，解除崩塌警戒。實際應用上會依應變中心解除時間來判斷，考量雨量對引發崩塌可能有時間延遲性，因此應變中心解除應變後，需要觀察一段時間(例如 12 小時)，再發佈解除崩塌警戒，本計畫內初步設定以 12 小時累積雨量小於 10 mm 為警戒解除依據，在試作案例結果中是可行的，考量崩塌發生的延遲特性，建議未來可以試行 24 小時或 48 小時的觀察期，用以評估崩塌警戒解除條件。

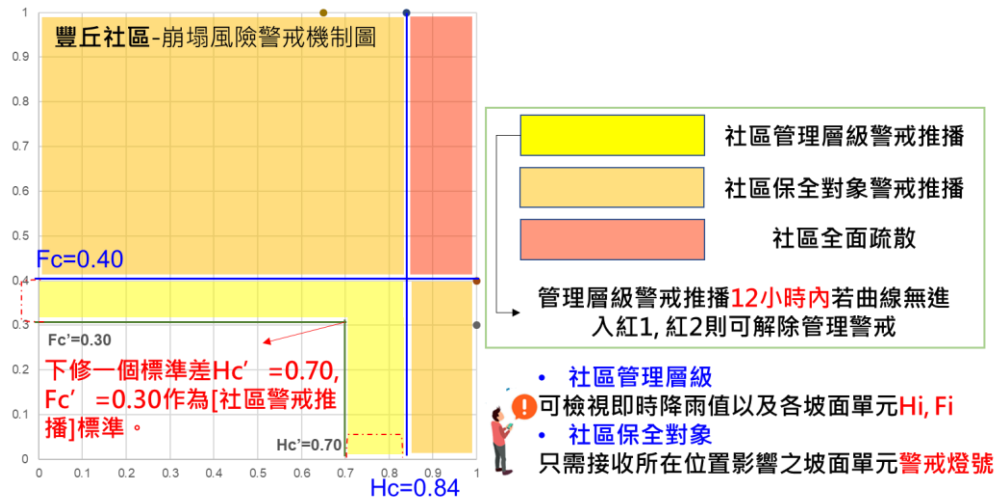


圖 10 自主防災警戒推播流程規劃

2. 崩塌風險警戒機制以及自主防災管理推播模式實測

在自主防災社區管理可行性評估中，本計畫以豐丘聚落為例，針對 109 年度 0522 豪雨為例，進行社區自主防災管理推播是作，而在降雨雨場開始以前，提供地文崩塌潛勢圖並套疊保全對象之位置圖資(如下圖 11 錯誤! 找不到參照來源。)以及周邊道路圖(如下圖 12)，其可讓管理層級能夠於災害發生前掌握全面之保全對象資訊，以及擬定合宜之疏散路線，進行風險評估，以作為社區災前應變之整備參考，而在災時應變時，本計畫以上德文雨量站之降雨歷時為例，評估各階段推播之時序，當 5/22 01:00 時，災害規模($I_{max}(i)$, $R_{te}(i)$)達 7mm 以及 119.3mm 時，(H_i , F_i)已達該時段最高(0.53, 0.40)，以達 $F_{c'}$ ，即黃色區塊，因此建議社區管理層級啟動警戒狀態，並關注後續動態降雨狀況，而當災害規模($I_{max}(i)$, $R_{te}(i)$)於 05/22 04:00 達 67mm 以及 203.83mm 時，(H_i , F_i)已達該時段最高(0.53, 0.40)，以達 F_c ，即紅 1 之狀態，因此建議社區保全對象能夠主動性接收到警戒推播，而當害規模($I_{max}(i)$, $R_{te}(i)$)於 05/22 14:00 達 36.5mm 以及 203.83mm 時，(H_i , F_i)已達該時段最高(0.85, 0.57)，已同時達 F_c 以及 H_c ，即紅 2 之極高風險狀態，因此建議社區進行全面之疏散，以避免二次災害之擴大，而降雨規模下之坡面警戒分布狀態則可透過視覺化之警戒分布圖進行檢視，而上述歷時推播歷時過程如下圖 13 所示，以作為決策應變之參考。

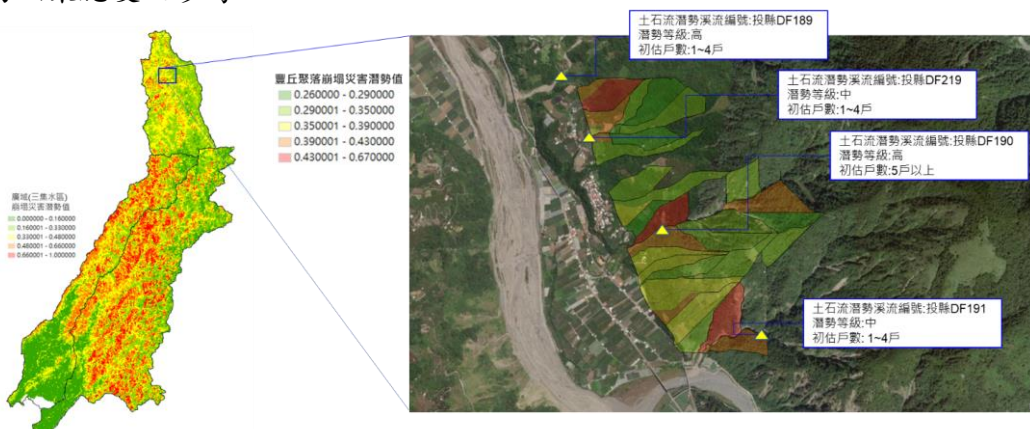


圖 11 豐丘聚落地文崩塌潛勢分布與保全對象空間套疊圖

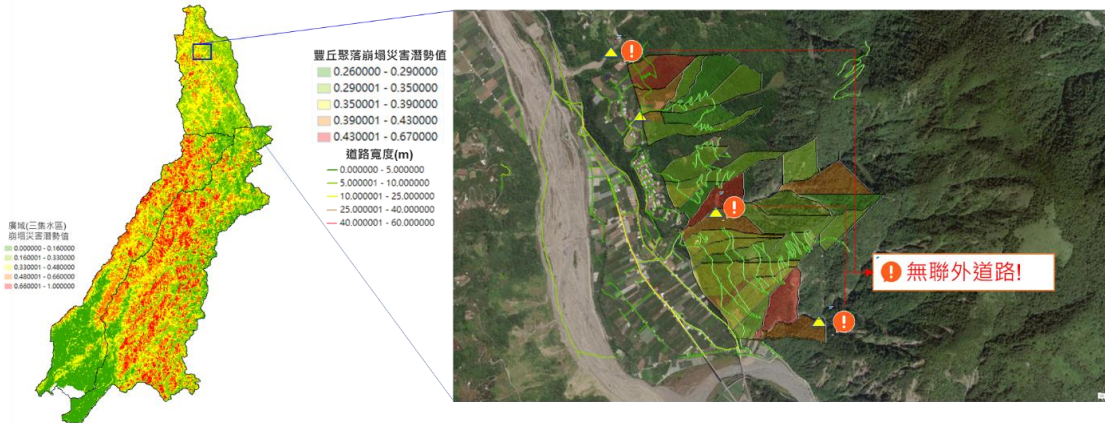


圖 12 豐丘聚落地文崩塌潛勢分布與疏散道路評估圖

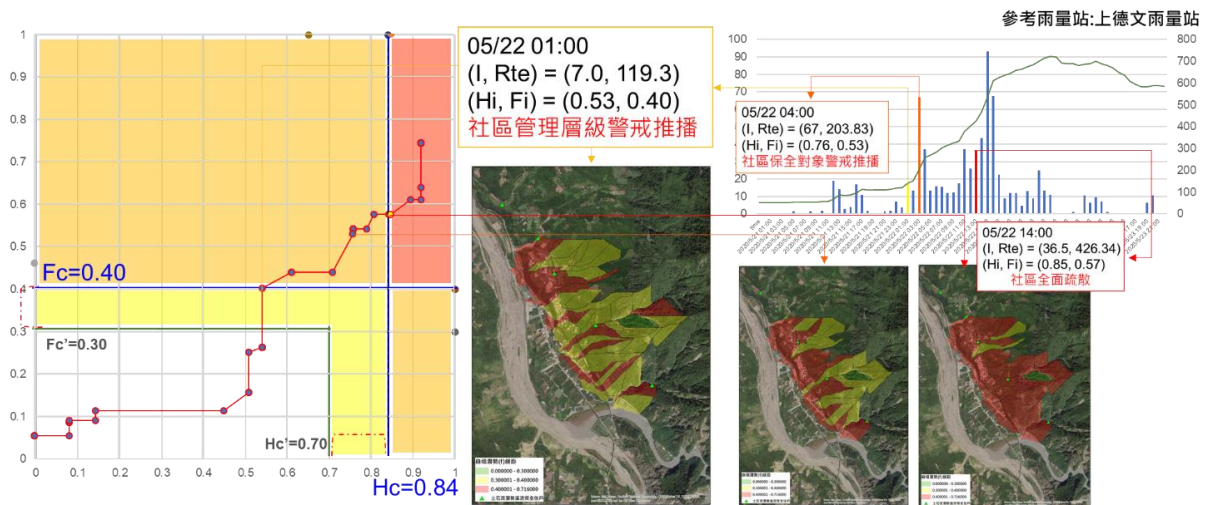


圖 13 豐丘聚落於 109 年度 0522 豪與社區自主防災推播建議歷程

四、結論與建議

- (一) 本計畫已完成針對研究區內陳有蘭溪集水區、荖濃溪集水區、旗山溪集水區之多元地文環境因子之擴增。
- (二) 本計畫已完成針對研究區內陳有蘭溪集水區、荖濃溪集水區、旗山溪集水區之崩塌事件資料庫擴增以取得更多事件(98 年度至 106 年度)崩塌樣本，而以擴增後之崩塌事件資料庫進行人工智慧演算法之模式訓練，進而探索全域變動因子(雨量驅動因子: (I_{max}, Rte) 以及 (R_{max}, II)) 對於坡地崩塌災害的影響性。
- (三) 本計畫完成建立基礎類神經坡地風險評估模型，並將坡面單元環境因子組成以及歷年的最大事件降雨擾動因子之崩塌時序特徵資料庫，加入為崩塌潛勢評估分析模型之變數，進行訓練已取得全域環境下適用之模型，並投入兩種雨量參數，分別為各年度颱風豪雨雨場中之最大之 $I_{max}(i)$ 及其對應之 $Rte(i)$ ，於驗證樣本中得到 77.64% 之準確率，其中輸入降雨參數為 (I_{max}, Rte) 之未發生準確率為 70.84%(誤判率為 0.29)，已發生準確率為 84.48%(漏判率為 0.16)。
- (四) 在模式建立後，將目標判釋年度為 105 年度至 106 年度之資料庫進行崩塌潛勢評估模式之獨立驗證，經過模式的驗證結果，其整體精度為 82.92%，其中未發生準確率為 82.66%(誤判率為 0.17)，已發生準確率為 84.27%(漏判率為 0.15)，其說明對於單一坡面單元於過去崩塌發生頻率以及變異狀況是有可能擾動坡面的組構進而影響該坡面發生崩塌的可能性。
- (五) 本計畫完成 0522 豪雨之自主防災風險警戒管理發布試作，其中各雨量站資訊透過

本計畫所建立之崩塌風險警戒機制模式後，經降雨危害 H 以及崩塌潛勢 F 之推估比率後，取得各時段之警戒狀態，其說明了本計畫所發展之風險警戒模式之適用性，並於坡面風險地圖進行空間視覺化展示，可提供後續自主防災應用之重要參考。

- (六) 本計畫發展之崩塌風險警戒機制模式並可細緻化的對坡面單元進行崩塌易損評估，可明確呈現高風險之坡面單元的位置，掌握何處發生崩塌的潛勢以及可能性較高，以進行相對應之警戒模式。
- (七) 本計畫以崩塌災害警戒管理落實於自主防災為主要目的，並完成進行社區自主防災崩塌警戒發布管理流程設計，提供豐丘專屬之崩塌警戒值、專屬社區空間崩塌風險潛勢圖，以協助社區自主防災應變決策，並規劃相關避難路線及崩塌風險地圖等，進而達社區自主避災、防災及減災的目標。

參考文獻

1. 行政院農業委員會(2012)。水土保持技術規範。農水保字第 1011862646 號公告修正。何春蓀(1999)。普通地質學。國立編譯館(修訂第三版)。
2. 王維毓(2016)。以坡地易損性曲面建立崩塌警戒機率值之研究，逢甲大學土木工程學系碩士論文。
3. 李三畏(1984)。台灣崩塌地問題探討。土工技術 7：43-49。
4. 李三畏(1986)。台灣的崩塌地。水土保持文獻專輯。
5. 李秉乾、周天穎、雷祖強、林哲彥、黃碧慧、吳政庭(2005)。利用集集大地震資料建立建築震害危險度評估模式 I-地震建築損害資料庫建立。中國土木水利工程學刊。17(1)：121-131。
6. 李秉乾、劉純之、雷祖強、謝孟勳、黃亦敏、方耀民、周天穎、連惠邦(2014)。易損性曲線於坡地崩塌警戒模式應用與坡地巨災保險研析。行政院農業委員會水土保持局，委託計畫成果報告。
7. 李秉乾、雷祖強、謝孟勳、黃亦敏、方耀民、周天穎、連惠邦(2015)。104 年應用坡地易損性模式於崩塌風險評估與警戒模式研析。行政院農業委員會水土保持局，委託計畫成果報告。
8. 李明熹(2006)。土石流發生降雨警戒分析及應用。國立成功大學水利及海洋工程研究所博士論文。
9. 余濬、洪志豪(2010)。降雨量重現期推估之探討—以莫拉克颱風甲仙雨量站為例。水利會訊，13：34-43。
10. 京華工程顧問股份有限公司(2010)。氣候變遷下台灣南部河川流域土砂處理對策研究—以高屏溪為例(1/2)。經濟部水利署水利規劃試驗所，委辦計畫成果報告。
11. 京華工程顧問股份有限公司(2011)。氣候變遷下台灣南部河川流域土砂處理對策研究—以高屏溪為例(2/2)。經濟部水利署水利規劃試驗所，委辦計畫成果報告。
12. 徐裕博(2016)。建立降雨引致崩塌之坡地易損性曲面及其驗證，逢甲大學土木工程學系碩士論文。
13. 許瓊文(2008)。應用類神經網路模擬高雄都會區臭氧濃度趨勢變化之研究，國立中山大學環境工程學系碩士論文。
14. 國立中興大學(2006)。水庫集水區崩塌地潛勢分析及崩塌土方量估算之研究。經濟部水利署。
15. 陳信雄(1995)。崩塌地調查與分析。渤海堂出版社，臺北。
16. 陳俞旭(2008)。地震對崩塌與土石流發生影響之研究。成功大學水利及海洋工程學系碩士論文，臺南。
17. 陳樹群、吳俊毅、黃柏聰(2007)。松鶴地區土石流災害之風險評估。中華水土保持學報，38(3)：287-298。
18. 張石角(1987)。山坡地潛在危險之預測及其在環境影響評估之應用。中華水土保持學報，18(2)：41-48。
19. 張石角(1998)。雪霸國家公園地質災害敏感地區之調查與防範研究(大雪山地區)。國家公園學報，8(2)，100-121。
20. 彭育隆(2002)。利用貝氏理論修正橋梁易損性曲線，國立中央大學土木工程學系碩士論文。

21. 溫振宇(2005)。結合地震與颱風因子之山崩模式分析。國立成功大學地球科學系博士論文。
22. 葉怡成(2003)。類神經網路應用與實作第八版。
23. 費立沅(2009)。臺灣坡地災害與地質敏感區的關係。地質，28(1)：16-22。
24. 董鴻誼(2017)。應用坡地崩塌易損性曲面於山區道路預警，逢甲大學土木工程學系碩士論文。
25. 楊智堯(1999)。類神經網路於邊坡破壞潛能分析之應用研究。國立成功大學土木工程研究所碩士論文。
26. 潘國樑(2007)。山坡地的地質分析與有效防災。科技圖書股份有限公司。
27. 蔡光榮、陳昆廷、王宣惠、林欽川(2008)。類神經網路分析法應用於台灣南投坡地社區環境潛勢災害風險評估模式之建置。鑛冶工程，52(43),55-74。
28. 賴志強(2007)。台灣地區降雨及地震誘發崩塌之特性研究。國立成功大學水及海洋工程學系碩士論文。
29. 謝孟勳(2013)。以網格集群最大概似法建立建築物易損性曲線及其用於震災緊急運送路徑之選擇。逢甲大學土木及水利工程博士學位學程博士論文。
30. 蘇苗彬(2009)。坡地防災預警技術(二)－坡地災害的分類。水保技術，2(4)：144-150。
31. Bonham-Carter, G. F. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*, Pergamon, Ottawa, 398 p. :305.
32. Burnett, A.D., Brand, E.W., Styles, K.A. (1985). Terrain classification mapping for a landslide inventory in Hong Kong, 4th International Conference and Field Workshop on Landslides, Tokyo, 63-68.
33. Carter, J.R. (1988). Digital Representations of Topographic Surfaces. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54: 1577-1580.
34. Crichton, D. (1999). The Risk Triangle. In *Journal Ingleton*, ed., Natural Disaster.
35. Carrara, A. (1983). Multivariate models for landslide hazard evaluation.
36. Carrara, A. (1988). Drainage and divide networks derived from high-fidelity digital terrain models. *NATO ASI series. Series C, Mathematical and Physical Sciences*, 223: 581-597.
37. Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P. (1995). GIS Technology in Mapping Landslide Hazard. *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 135-176.
38. Carrara, A., Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P. (1999). Use of GIS Technology in The Prediction and Monitoring of Landslide Hazard. *Natural Hazards*, 20: 117-135.
39. Fookes, P.G., Sweeney, M., Manby, C.N.D., Martin, R.P. (1985). Geological and Geotechnical Engineering Aspects of Low-cost Roads in Mountainous Terrain. *Engineering Geology*, 21: 1-152.
40. Giles, P.T., Franklin, S.E. (1998). An Automated Approach to the Classification of the Slope Units Using Digital Data. *Geomorphology*, 21(3-4), 251-264.
41. Hansen, A., Franks, C.A.M., Kirk, P.A., Brimicombe, A.J., Tung, F. (1995). Application of GIS to hazard assessment, with particular reference to landslides in Hong Kong, *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 135-175.
42. Koukis, G., Ziourkas, C. (1991). Slope Instability Phenomena in Greece: A Statistical Analysis. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, 47-60.
43. Lump, P. (1975). Slope failures in Hong Kong. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 8: 31-65.

44. Lewis , E. B., (1982). Control of body segment differentiation in *Drosophila* by the bithorax gene complex, *Embryonic Development, Part A:Genetics Aspects*, Edited by Burger, M. M. and R. Weber. Alan R. Liss, New York, 269-288.
45. Miller, C.L., Laflamme, R.A. (1985). The Digital Terrain Model-theory and Application. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 24(3): 433-443.
46. Rota, M., Penna, A., Strobbia, C.L. (2008). Processing Italian Damage Data to Derive Typological Fragility Curves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28, 933-947.
47. Makridakis,S., (1993). Accuracy measures:Theoretical and practical concerns. *Int. J.Forecast.*, 9, 527-529.
48. Rossetto, T. & Elnashai A. (2003). Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data. *Engineering Structures*, 25(10), 1241-1263.
49. Sidle, R.C., Percea, A.J., O'loughlin, C.L. (1985). *Hillslope Stability and Land Use*. American Geophysical Union, Washington, D.C: 19-20.
50. Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J. Naganuma, T. (2000). Statistical Analysis of Fragility Curves. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 126(7): 769-777.
51. Varnes, D.J.(1958). Landslide Types and Process. in E.B. Eckel (ed.). *Special Report 29: Landslides and Engineering Practice* (Washington, DC: HRB, National Research Council), 20-47.
52. 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 Environment*, 65: 167-184.
53. Xie, M., Esaki, T., Zhou, G. (2004). GIS-Based Probabilistic Mapping of Landslide Hazard Using a Three-dimensional Deterministic Model. *Natural Hazards*, 33: 265-282.
54. 齋藤迪孝(1980)。斜面崩壞予測。土と基礎，29(5)，72-8