
**震後不安定土砂災害評估模式
與潛勢分析之研究**

**A Study on Post-earthquake Unstable Soil
and Sand Disaster Assessment Model and
Potential Analysis**

執行單位：中國科技大學

執行期間：113 年 02 月 08 日至 113 年 12 月 31 日

計畫主持人：土木與防災系謝孟勳助理教授

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 113 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

震後不安定土砂災害評估模式與潛勢分析之研究

摘 要

本計畫之研究目的，係強烈地震後早期崩塌狀況通常是未知的。因此如何在地震早期評估中，掌握震後不安定土砂之狀況及影響就相當重要。本研究利用震後脆弱度及風險之角度，分析不安定土砂集水區之安定性並提早預測可能的土砂災害。此外，目前不安定土砂分析方法是以新生崩塌地為依據，但對於強烈地震後造成地質脆弱，土砂鬆散的程度無法掌控，因此根據坡地易損性評估方法，本研究建構震後不安定土砂評估模式，並以 0403 花蓮地震和情境模擬的方式，評估目前不安定土砂區在受震後的可能災害風險和潛勢變動情況。

本研究提出之震後不安定土砂潛勢分析和震後土砂潛能促進因子評估方法，以實際地震事件驗證方法之可行性，在震後不安定土砂潛勢分析中，顯示不安定土砂潛勢值變化之幅度，可作為震後評估短期土砂災害高風險地區之參考，亦有利於進行震後不安定土砂評估、治理和進一步的減災策略擬定實務應用面參考。

關鍵字：地震早期評估、不安定土砂、坡地易損性、震後土砂潛能促進因子、
潛勢分析

A Study on Post-earthquake Unstable Soil and Sand Disaster Assessment Model and Potential Analysis

Abstract

The purpose of this research project is to address the fact that the conditions leading to early collapse after strong earthquakes are often unknown. Consequently, it is crucial to comprehend the status and implications of unstable sediment following seismic events during the earthquake early assessment. This study adopts a perspective focused on post-earthquake vulnerability and risk to evaluate the stability of areas susceptible to unstable sediment, as well as to anticipate potential sediment-related disasters in advance. Moreover, the existing analytical approach for unstable sediment relies on identifying new collapse sites; however, the degree of looseness in the sediment remains uncontrollable due to the geological fragility induced by significant seismic events. Consequently, this study develops an assessment model for post-earthquake unstable sediment, utilizing the slope fragility assessment method. The model employs data from the 0403 Hualien earthquake and scenario simulation techniques to evaluate potential disaster risks and the possible changes in areas characterized by unstable sediment following an earthquake.

This study presents a method for analyzing the potential of unstable sediments following an earthquake, as well as a technique for assessing the factors that promote soil and sand instability in post-earthquake scenarios. The feasibility of these methods is validated through actual earthquake events. The analysis of unstable sediment potential reveals the extent of changes in potential values, which can serve as a reference for evaluating areas at high risk of short-term soil and sand disasters in the aftermath of an earthquake. The findings of this study offer valuable insights for the practical application of post-earthquake assessments of unstable sediments, treatment methodologies, and the development of disaster reduction strategies.

Keywords: earthquake early assessment, unstable sediments, landslide fragility, sediment potential catalysis factor, potential analysis

目次

中英文摘要	I
目次	III
表次	V
圖次	VII
 第一章 前言	1
第一節 計畫緣起與目的	1
第二節 工作項目與內容	4
第三節 計畫執行流程與進度	5
第二章 國內外相關文獻回顧	7
第一節 地震易損性分析	7
第二節 集水區不安定土砂	11
第三章 坡地易損性模式	13
第一節 地震易損性分析	13
第二節 高震度區坡地易損性曲線建立及適用範圍	19
第三節 分析資料庫建立	22
第四節 環境因子資料庫	29
第五節 崩塌評估坡面之分類	35
第六節 雙指標坡地易損性曲線	40
第四章 震後不安定土砂評估資料庫與模式建立	45
第一節 地震早期評估模式	45
第二節 基於地震速報之快速評估 (防護斷層模式)	47
第三節 防護斷層模式簡介	48
第四節 防護斷層模式之坡面單元評估資料庫	52

第五節 震後不安定土砂評估資料庫建立和評估模式探討.....	76
第五章 震後不安定土砂潛勢分析方法.....	81
第一節 坡地易損性曲線應用於震後不安定土砂分析.....	81
第二節 2024 年 0403 第 019 號花蓮地震事件分析與探討.....	83
第三節 第 019 號地震分析結果討論.....	118
第四節 震後不安定土砂潛勢分析方法建立.....	122
第五節 震後不安定土砂災害評估模式建立.....	125
第六節 0403 花蓮地震事件震後不安定土砂潛勢分析結果.....	127
第七節 不同地震規模情境之震後不安定土砂潛勢分析.....	129
第六章 BigGIS 系統地震早期評估模組精進.....	131
第一節 震後快速評估模組精進.....	131
第二節 坡地易損性曲線更新.....	138
第七章 結論與建議.....	139
參考文獻.....	141
附錄一 計畫書審查意見回復.....	附錄-1
附錄二 期中審查意見回復.....	附錄-3
附錄三 期末審查意見回復.....	附錄-5

表 次

表 1-1	研究工作執行進度表.....	6
表 3-1	氣象局地震震度分級對照表(2020 年版).....	20
表 3-2	研究地區裸露地統計.....	23
表 3-3	研究地區新增崩塌地統計	25
表 3-4	李錫堤教授提出之台灣地區地質分類	30
表 3-5	地質分類統計(以研究區域為例).....	35
表 3-6	坡向分類統計(以研究區域為例).....	37
表 3-7	坡度分類統計(以研究區域為例).....	38
表 3-8	以 PGA 為致災因子之 12 類坡地易損性參數表	40
表 3-9	以 PGV 為致災因子之 12 類坡地易損性參數表	42
表 4-1	全國各河川流域坡面單元劃定基礎資料	53
表 4-2	坡面單元編碼.....	59
表 4-3	各河川流域坡面單元有效數量統計	63
表 4-4	防護斷層模式各河川流域坡面單元類型之數量統計-G1 類.....	66
表 4-5	防護斷層模式各河川流域坡面單元類型之數量統計--G2 類.....	71
表 4-6	不安定土砂坡面單元編碼	79
表 5-1	2024 年 0403 花蓮壽豐地震後之顯著餘震	83
表 5-2	各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/RSG 快速評估)..	85
表 5-3	各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGV/RSG 快速評估)..	91
表 5-4	各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/RSG 詳細評估)..	93
表 5-5	各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGV/RSG 詳細評估)..	99
表 5-6	各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/IDW 快速評估)	101
表 5-7	各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGV/IDW 快速評估)	107
表 5-8	各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/IDW 詳細評估)	109

表 5-9	各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGV/IDW 詳細評估)	115
表 5-10	RSG 方法和 IDW 方法比較.....	117
表 5-11	2024 第 019 號地震各河川流域崩塌地統計	118
表 5-12	2024 第 019 號地震各集水區崩塌地和評估結果排序	119
表 5-13	土砂潛能促進因子分級	126
表 5-14	0403 花蓮地震($M_w=7.4$)之震前-震後潛勢分級比較.....	127
表 5-15	車籠埔斷層地震事件($M_w=7.6$)之震前-震後潛勢分級比較.....	129
表 6-1	快速評估與詳細評估特性比較	133
表 6-2	以 PGA 為致災因子之 12 類坡地易損性參數表更新	138
表 6-3	以 PGV 為致災因子之 12 類坡地易損性參數表更新	138

圖 次

圖 1-1	研究流程圖.....	5
圖 2-1	不同損害分級之易損性曲線關係	7
圖 2-2	崩塌殘坡受降雨或地震影響之長期變化	11
圖 2-3	崩塌殘坡受降雨或地震影響之長期變化	12
圖 2-4	不安定土砂集水區潛勢分級	12
圖 3-1	坡地易損性分析流程.....	21
圖 3-2	研究區域.....	22
圖 3-3	九二一地震前後期裸露地分布	23
圖 3-4	崩塌地變遷及分類示意	24
圖 3-5	921 地震新增崩塌地.....	25
圖 3-6	尖峰地表加速度 PGA 分布	28
圖 3-7	尖峰地表速度 PGV 分布	28
圖 3-8	本研究採用之地質分類	31
圖 3-9	坡向圖(以研究區域為例).....	32
圖 3-10	坡度圖(以研究區域為例).....	33
圖 3-11	順向坡分布圖(以研究區域為例).....	34
圖 3-12	坡面單元地質分類(以研究區域為例).....	35
圖 3-13	坡面方位角和震波方位角的關係	36
圖 3-14	坡向敏感因子定義.....	37
圖 3-15	坡面單元坡向分類(以研究區域為例).....	37
圖 3-16	坡面單元坡度分類(以研究區域為例).....	38
圖 3-17	G1A1S1 易損性曲線(PGA).....	41
圖 3-18	G1A1S2 易損性曲線(PGA).....	41
圖 3-19	G1A1S3 易損性曲線(PGA).....	41

圖 3-20	G1A2S1 易損性曲線(PGA).....	41
圖 3-21	G1A2S2 易損性曲線(PGA).....	41
圖 3-22	G1A2S3 易損性曲線(PGA).....	41
圖 3-23	G2A1S1 易損性曲線(PGA).....	41
圖 3-24	G2A1S2 易損性曲線(PGA).....	41
圖 3-25	G2A1S3 易損性曲線(PGA).....	42
圖 3-26	G2A2S1 易損性曲線(PGA).....	42
圖 3-27	G2A2S2 易損性曲線(PGA).....	42
圖 3-28	G2A2S3 易損性曲線(PGA).....	42
圖 3-29	G1A1S1 易損性曲線(PGV).....	43
圖 3-30	G1A1S2 易損性曲線(PGV).....	43
圖 3-31	G1A1S3 易損性曲線(PGV).....	43
圖 3-32	G1A2S1 易損性曲線(PGV).....	43
圖 3-33	G1A2S2 易損性曲線(PGV).....	44
圖 3-34	G1A2S3 易損性曲線(PGV).....	44
圖 3-35	G2A1S1 易損性曲線(PGV).....	44
圖 3-36	G2A1S2 易損性曲線(PGV).....	44
圖 3-37	G2A1S3 易損性曲線(PGV).....	44
圖 3-38	G2A2S1 易損性曲線(PGV).....	44
圖 3-39	G2A2S2 易損性曲線(PGV).....	44
圖 3-40	G2A2S3 易損性曲線(PGV).....	44
圖 4-1	地震評估模式.....	45
圖 4-2	基於防護斷層之坡地崩塌評估模式	47
圖 4-3	台灣活動斷層分布(2021 年版).....	49
圖 4-4	防護斷層模式之震源分區	51

圖 4-5	地礦中心繪製之全臺各集水區坡面單元分布	58
圖 4-6	113 年全臺 1218 處不安定土砂集水區潛勢	76
圖 4-7	全台集水區範圍與不安定土砂潛勢區範圍比較	77
圖 4-8	不安定土砂潛勢區範圍與坡面單元比較	77
圖 4-9	QPE 網格與坡面單元比較	78
圖 5-1	不安定土砂肇因分類.....	81
圖 5-2	震後不安定土砂潛勢評估流程	82
圖 5-3	第 019 號地震中央氣象局地震報告	84
圖 5-4	全台最大地動加速度分布	84
圖 5-5	全台最大地動速度分布	84
圖 5-6	PGA 分布(RSG 快速評估).....	90
圖 5-7	PGA 崩塌機率分布(RSG 快速評估).....	90
圖 5-8	PGA 最小崩塌面積估計(RSG 快速評估).....	90
圖 5-9	PGA 可能最大崩塌面積估計(RSG 快速評估).....	90
圖 5-10	PGV 分布(RSG 快速評估).....	92
圖 5-11	PGV 崩塌機率分布(RSG 快速評估).....	92
圖 5-12	PGV 最小崩塌面積估計(RSG 快速評估).....	92
圖 5-13	PGV 可能最大崩塌面積估計(RSG 快速評估).....	92
圖 5-14	PGA 分布(RSG 詳細評估).....	98
圖 5-15	PGA 崩塌機率分布(RSG 詳細評估).....	98
圖 5-16	PGA 最小崩塌面積估計(RSG 詳細評估).....	98
圖 5-17	PGA 可能最大崩塌面積估計(RSG 詳細評估).....	98
圖 5-18	PGV 分布(RSG 詳細評估).....	100
圖 5-19	PGV 崩塌機率分布(RSG 詳細評估).....	100
圖 5-20	PGV 最小崩塌面積估計(RSG 詳細評估).....	100

圖 5-21	PGV 可能最大崩塌面積估計(RSG 詳細評估).....	100
圖 5-22	PGA 分布(IDW 快速評估)	106
圖 5-23	PGA 崩塌機率分布(IDW 快速評估).....	106
圖 5-24	PGA 最小崩塌面積(IDW 快速評估).....	106
圖 5-25	PGA 可能最大崩塌面積(IDW 快速評估).....	106
圖 5-26	PGV 分布(IDW)	108
圖 5-27	PGV 崩塌機率分布(IDW 快速評估).....	108
圖 5-28	PGV 最小崩塌面積(IDW 快速評估).....	108
圖 5-29	PGV 可能最大崩塌面積(IDW 快速評估).....	108
圖 5-30	PGA 分布(IDW 詳細評估).....	114
圖 5-31	PGA 崩塌機率分布(IDW 詳細評估).....	114
圖 5-32	PGA 最小崩塌面積估計(IDW 詳細評估).....	114
圖 5-33	PGA 可能最大崩塌面積估計(IDW 詳細評估).....	114
圖 5-34	PGV 分布(IDW 詳細評估).....	116
圖 5-35	PGV 崩塌機率分布(IDW 詳細評估).....	116
圖 5-36	PGV 最小崩塌面積估計(IDW 詳細評估).....	116
圖 5-37	PGV 可能最大崩塌面積估計(IDW 詳細評估).....	116
圖 5-38	2024 第 019 號地震崩塌地判釋與比較	118
圖 5-39	震後坡地評估與新生崩塌地結果比較	121
圖 5-40	QPE 網格之地文脆弱度分布情形	122
圖 5-41	QPE 網格之危害程度	123
圖 5-42	震後不安定土砂潛勢分析模式	126
圖 5-43	0403 花蓮地震高震度地區不安定土砂潛勢分布	128
圖 5-44	0403 花蓮地震震後高震度地區不安定土砂潛勢地圖(PGV)	128
圖 5-45	0403 花蓮地震震後高震度地區不安定土砂潛勢地圖(RSG).....	128

圖 5-46	0403 花蓮地震震後高震度地區不安定土砂潛勢地圖(IDW)	128
圖 5-47	車籠埔斷層事件高震度地區不安定土砂潛勢分布($M_w=7.6$).....	130
圖 5-48	車籠埔斷層事件震後高震度地區不安定土砂潛勢地圖(PGV) ...	130
圖 5-49	車籠埔斷層事件震後高震度地區不安定土砂潛勢地圖(PGA) ...	130
圖 6-1	BigGIS 災害事件震度資料套疊	131
圖 6-2	BigGIS 震後崩塌評估模組資料發布	132
圖 6-3	震後坡地崩塌評估模式整體分析架構更新	134

第一章 前言

第一節 計畫緣起與目的

台灣位處菲律賓板塊和太平洋板塊交接處的環太平洋地震帶上，地質年輕且經常性的地殼變動造成土質鬆軟且不穩定，本島和鄰近海域平均每 2.5 年就發生一次規模達到 7 以上的地震，具有很高的地震危害度。強烈地震時除了常見的建物損害，震後引起的地質不穩定、坡地崩塌、土砂運移也是地震後可能的災害風險，對於山坡地佔 74% 的台灣，全國山坡地的減災管理對於地震引致坡地災害的風險即必須重視，例如震後山坡地產生的鬆軟土石、崩塌堆積在河道的土方若在尚未復育期間遭受颱風、豪雨等的侵襲，也極易引起二次崩塌、地滑、土石流等土砂災害的發生。台灣本島自 1999 年 921 地震以來已久未發生規模 7 以上的地震，但孕藏積累的地震能量與不確定性更需加以重視，如 2022 年 9 月 17~18 日發生於台東池上，地震規模分別為 6.6 和 6.8 的連續地震，地震樣態不僅少見，其誘發斷層和地震規模的不確定性引起學界廣泛討論；2024 年 4 月 3 日發生於花蓮壽豐鄉，地震規模達 7.2，在全台造成 18 人罹難、1,155 人受傷，震後更誘發花東地區多處崩塌，根據農村水保署在地震後的新生崩塌地判釋成果，主震與其餘震誘發了近 1,948 處的新生崩塌地，其面積達 1,523 公頃，因此對於震後坡地災害的減災管理更應積極面對。

現今科技對於地震仍難以準確預測，誘發坡地崩塌的潛因、誘因和物理機制又極為複雜，導致地震直接誘發引起的廣域淺層坡地崩塌難以預測、預警及評估。過去相關研究中常見以理論法建立局部崩塌的工程模式，這類方法以蒐集崩塌案例及地震觀測紀錄再輔以地質調查進行工程模式分析。然而這類方法囿於崩塌災害樣態及因素複雜，要進行強烈地震時的廣域崩塌評估仍有侷限。此外，地震誘發之坡地災害潛勢，目前無法如颱風或豪雨般利用即時監測系統進行災前預警 (pre-disaster prevention)，造成突發地震事

件中對於坡地崩塌狀況無法及時掌握，後續的緊急應變方案及災害管理策略將難以順利進行。反之，若能在地震前能夠可靠地掌握可能的地震崩塌範圍，或是在地震早期能夠快速地掌握可能引致嚴重崩塌發生的區域或高風險聚落，對於地震引起的坡地災害將可有效地擬定相應的土砂減災策略，進而降低震後崩塌可能造成的損失。而對於這個問題，除了發展可靠的震後坡地崩塌評估模式之外，藉由台灣具有全球密度最高的強地動觀測網（平均每 5 平方公里一個測站），具有在震後數分鐘內推估全國各地震度的能力，因此應用先進的資通訊技術、數據處理及地理資訊系統建立高效率的自動化快速評估系統，將更有利於掌握地震早期可能之崩塌危害。

近年來農村發展及水土保持署積極推動集水區不安定土砂相關研究，其源起來自於原本坡地的脆弱性，造成集水區坡面或河道上可能殘存不安定土砂，其型態可能為坡體位移後（降雨、地震等因素）形成的殘坡或是河道上堆積未流出之土砂，可能受降雨或地震進一步誘發土砂災害。因此，不安定土砂的問題並非天然坡地一次性流出之土砂問題，而是和歷史崩塌次數、累計崩塌面積、土砂料原位置、河流長度、出流點位置等息息相關。例如震後坡地產生的鬆軟土石、崩塌堆積在河道的土砂，若在尚未完全復育的不穩定期間再次遭受降雨、強震等的襲擊，其土砂運移行為將造成中下游土砂災害。

本研究團隊在先期的創新計畫中已建立地震引致崩塌之坡地易損性曲線 (Landslide Fragility Curves, LFA) 分析模式，並建立全台之震後坡地崩塌評估架構及實作，並針對 BigGIS 巨量空間資訊系統（以下簡稱 BigGIS 系統）建議可行之快速評估程序與方法，建立以坡面單元為評估基礎之震後坡地崩塌評估模式，可進行包括基於防護斷層模式之快速評估和基於確切震源斷層之詳細評估。同時，對於 BigGIS 系統之地震早期評估提出模式整體分析架構，因此對震後坡地崩塌易損評估已建構良好的基礎。因此，對於本

計畫之震後不安定土砂災害評估模式與潛勢分析研究，將解決以下問題。

首要問題是強烈地震後早期崩塌狀況通常是未知的，因此如何建構震後早期不安定土砂狀況及震後之影響，則有必要以脆弱度及震後風險之角度，掌握不安定土砂區其安定性並提早預測可能的土砂災害。第二個問題是目前不安定土砂分析方法是以前生崩塌地為依據，但對於強烈地震後造成地質脆弱，土砂鬆散的程度無法掌控，因此根據坡地易損性評估方法，本計畫將建構震後不安定土砂災害評估模式，並以地震情境模擬的方式，預估目前不安定土砂區在受震後的可能災害風險和潛勢變動情況。

本年度計畫之研究目的，係根據既有不安定土砂潛勢之研究基礎，掌握不安定土砂區在受震後之安定性，了解不安定土砂區的潛勢可能變動情況，並提早預測可能的土砂災害。主要的計畫目標有二：

- 1.基於不安定土砂潛勢和坡地易損性研究成果，建立以機率為基礎的危害度及風險分級之震後不安定土砂災害評估模式。

- 2.針對不同斷層情境和地震規模下不安定土砂之影響程度進行模擬評估，建立震後不安定土砂潛勢分析方法和評估指標。

本計畫預期藉由上述計畫目標，達到可有效應用於地震早期緊急評估不安定土砂安定性之潛勢評估方法，並選定 1~2 處斷層之地震事件，產製震後不安定土砂潛勢地圖，作為未來坡地災害減災管理以及應變對策擬定的參據。

第二節 工作項目與內容

本計畫主要工作項目分述如下：

一、震後不安定土砂評估資料庫建立

建立以集水區為單元之不安定土砂評估所需之基本資料庫，研析不安定土砂 QPE 網格與坡面單元之尺度關係，探討其空間適配關係、分析空間關聯性、基本物理特性和資料庫架構。(第四章第五節)

二、震後不安定土砂潛勢分析方法建立

探討震後不安定土砂風險描述與定義，以坡地易損性、地文脆弱度、危害程度、不安定土砂潛勢值等參數，建構震後不安定土砂評估指標，建立震後不安定土砂潛勢值與指標計算方式，並以 2024 年 0403 花蓮地震之案例說明其適用性。(第五章第四節)

三、震後不安定土砂災害評估模式建立

根據既有不安定土砂潛勢和坡地易損性分析方法，建立震後不安定土砂災害評估模式，考量方法適用性、地文條件、地震規模、震度門檻與分析條件，研析 12 類坡地易損性分類與地文脆弱度之相關性，建立不安定土砂評估分析流程。(第五章第五節)

四、不同地震規模之情境模擬與潛勢地圖

除 2024 年 0403 花蓮地震外，選定一處不同斷層及規模事件，以不同地震規模之情境模擬震後不安定土砂潛勢值及風險分級變動情況，探討潛勢分析方法和潛勢地圖適用性。(第五章第六節、第七節)

五、BigGIS 系統地震早期評估模組精進

本項工作延續前期計畫，除持續依新發生之地震崩塌事件調整更新易損性參數，持續與開發單位完善震後崩塌易損評估模式整體分析架構，提供更新之評估流程與計算步驟，協助更新模式整合至 BigGIS，並追蹤震後易損評估模組開發進度，評估管理機制之效果和實用性，並及時提出改善建議。

第三節 計畫執行流程與進度

依研究工作項目及內容，前節所述之研究流程如圖 1-1 所示，研究執行進度如表 1-1 所示。

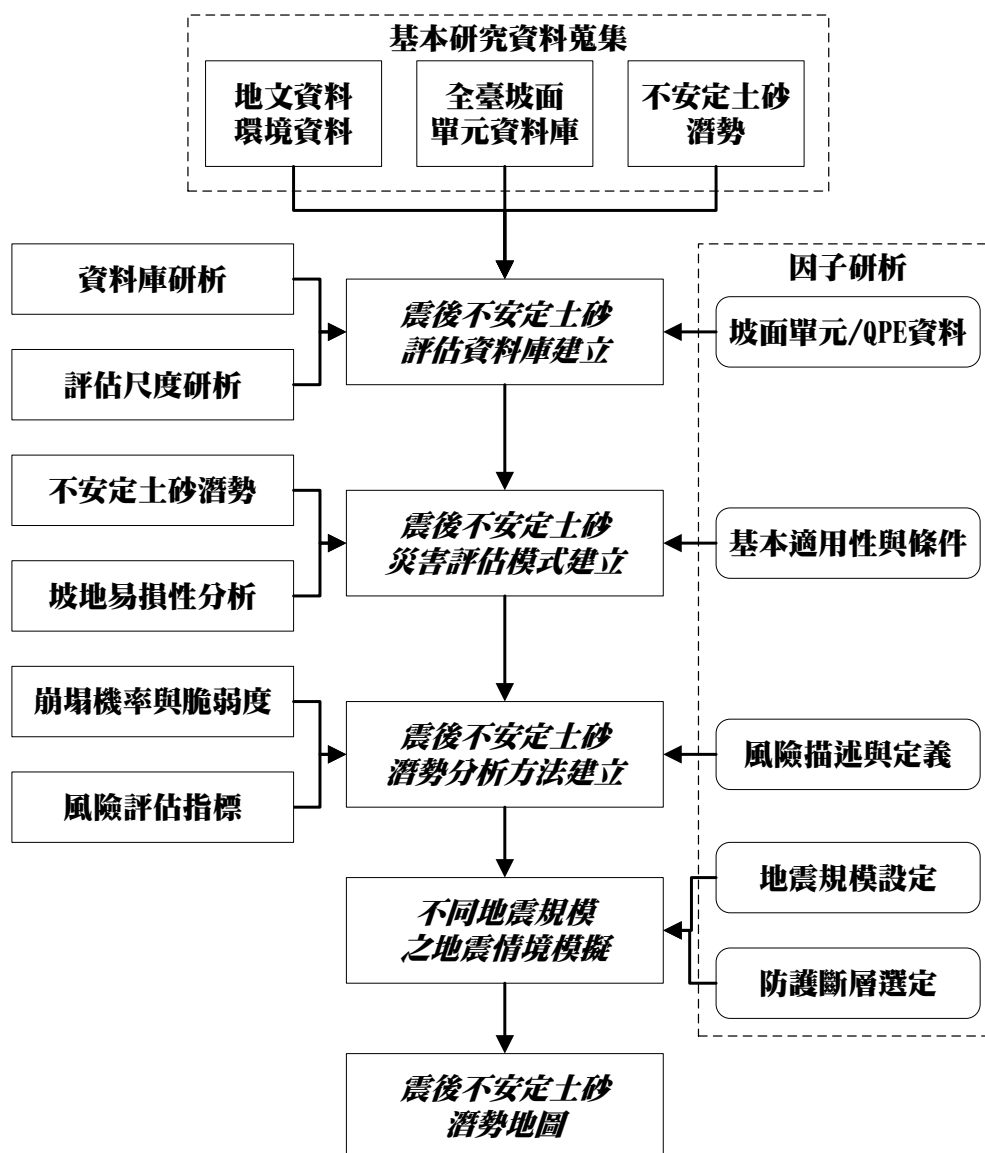


圖 1-1 研究流程圖

表 1-1 研究工作執行進度表

工作項目	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
國內外相關文獻探討	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
BigGIS 系統地震早期評估模組精進	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
震後不安定土砂評估資料庫建立		■	■	■	■	■	■	■			
震後不安定土砂災害評估模式建立				■	■	■	■	■			
震後不安定土砂潛勢分析方法建立						■	■	■	■		
不同地震規模之情境模擬與潛勢地圖							■	■	■	■	
期中/期末報告						■				■	□

■ 已完成進度；□ 未完成進度

第二章 國內外相關文獻回顧

第一節 地震易損性分析

易損性曲線 (fragility curve) 的概念最早被地震工程專家應用於描述地震中橋梁或建築物之損害可能性評估 (Shinozuka *et al.*, 2000a; Rossetto and Elnashai, 2003; Rota *et al.*, 2008; 李秉乾等, 2005a, 2005b)。主要在探討構造物遭致地震侵襲時的破壞, 被描述成高度複雜因子的統計問題。針對這樣的問題, 統計學家及地震工程學家提出以建築物易損性曲線描述建築物受震時可能的破壞機率。近年來, 由於越來越重視地震災害的威脅, 建築物易損性曲線已成為地震災損評估及風險分析必要的工具之一。

易損性曲線即是描述在不同的強地表因子下 (如尖峰地表加速度、尖峰地表速度、地表最大位移等) 產生不同損害狀況的機率值; 如圖 2-1 所示, 不同損害程度可藉由累積機率分布曲線各別描述, 可應用於評估建築物在地震後的可能損壞情形及修復所需的成本, 並廣泛地應用於地震早期災損評估及減災規劃上, 提供評估經濟損失、災後緊急動員之參考。

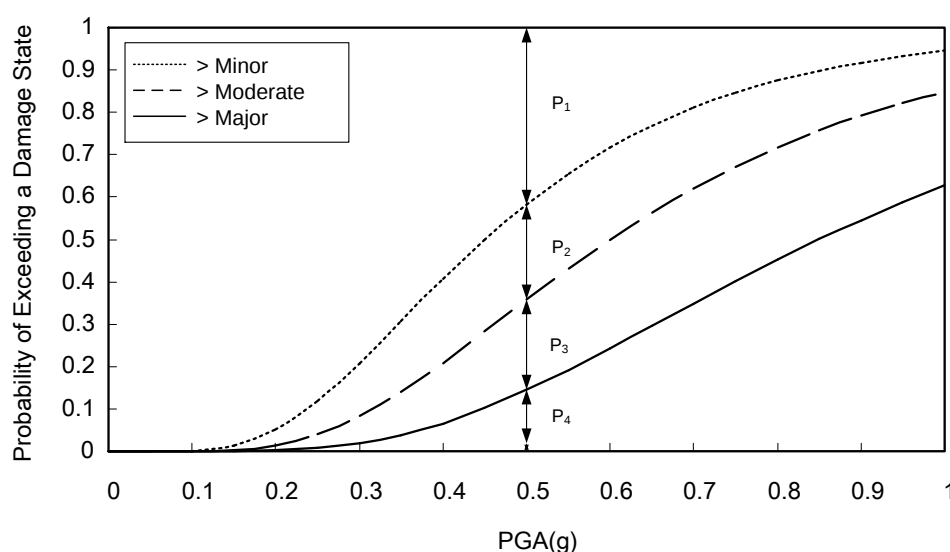


圖 2-1 不同損害分級之易損性曲線關係

一、易損性曲線的求取方法

對於外力引致損害的問題常使用損害機率矩陣 (damage probability matrices; DPMs) 或是易損性曲線來表示致災因子與災害的關係。損害機率矩陣係將損害程度與致災因子以矩陣型式描述其關係，藉由矩陣關係可以進一步求取特定因子與損害程度的機率關係 (例如 Basöz *et al.*, 1999; Sarabandi *et al.*, 2004; Muñoz *et al.*, 2007)。由於自然災害現象之致災原因有時不只一個，例如降雨引致坡地崩塌之原因可能來自於短時最大降雨、長時累積降雨、地下水…等，又或地震引致的崩塌可能原因來自地質、地層弱面、坡度、震波強度、頻率等，因此易損性曲線描述受災本體在災害侵襲時的易致災特性，並表達特定致災因子對於受災本體達到或超過某種損害狀態的超越機率。在地震引致建築物損害課題的相關研究，易損性曲線的分析方法非常多元，藉由可取得的致災資料 (vulnerability data) 可細分五類方法求取 (謝孟勳, 2013)，包括專家判斷法、靜力分析法、動力分析法、經驗分析法及混合法等。易損性曲線發展迄今專家判斷法仍是不可或缺的重要基準，也就是基本上仍須依據專業定義是否損害或其損失程度，其它方法亦是建立於專家判斷法的基礎上而發展。而對於不確定因素高的天然災害，廣泛認為經驗分析法最為詳實可靠。即藉由過去發生的災害事件取得致災資料，經由假定機率分布配合統計推論方法來決定模式之機率分布。

二、易損性曲線之分析模式

易損性曲線表達特定致災因子對於受災本體達到或超過某種損害狀態的超越機率。為了合理表現這個關係必須假定事件機率分布函數以可靠地描述災害發生之特性。這個合理可靠的機率分布函數有兩種求取方式，第一種方式為假定事件發生的機率密度函數 (f : probability density function; PDF)，再利用統計學的分析方法進行參數推估進而繪製累積分布函數 (F : cumulative distribution function; CDF) 以表達易損性曲線，例如最小平方估計

(least squares estimation; LSE)或最大概似估計(maximum likelihood estimation; MLE)。既有的易損性曲線相關研究在機率密度函數上常見採用常態分布、對數常態分布或 Beta 分布等來描述致災因子與災害發生之關係。以地震為例，大部份學者普遍認為對數常態分布較能夠符合自然災害引致之外力與受災本體損害之關係。相關論證如 Onose (1982)以鋼筋混凝土建築物遭受地震後之實際損害率探討損害分布的關係，發現致災力與損害發生之關係皆接近對數常態分布：

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta x} e^{-\frac{(\log x - c)^2}{2\zeta^2}} \quad (2-1)$$

上式中： c 為中位數， ζ 為標準差。

第二種方式為假定一個因變量在 0 至 1 間簡單連續且嚴格遞增的函數來表達易損性曲線。此類方法決定分布函數的型式後利用線性或非線性之曲線擬合 (curve fitting) 求取易損性曲線，因此不受機率密度函數的限制。**錯誤！找不到參照來源。**所述之機率分布亦可以此類方法求取其累積分布函數，而常見曲線擬合的方法可應用最小平方迴歸估計其待定係數。

經驗分析法中損害調查紀錄的可用性是影響可靠度的重要關鍵。損害調查紀錄需要獲取可用的致災資料並確保適用於災害評估。因此，發展可靠的經驗易損性曲線，應儘可能要求損害調查紀錄的完整性，其中包括必須具備「損害分級」、「損害與否」及「致災因子」三個明確的資訊。「損害分級」通常係經由專家決定損害判定標準，這個判定標準可根據事件前的防災需求或應變計畫來訂定。「損害與否」即藉由事件後完整詳細的調查得到。藉由完整的事件後調查紀錄所建構之致災資料及假定之機率分布函數，即可經由參數推估建立易損性曲線。目前對於經驗分析法已發展出許多有用的致災資料產生方法。這些方法分為二大類，分別為「地域單元法」和「完全調查樣本法」，以下即針對致災資料產生的方法分別介紹。

(一)地域單元法

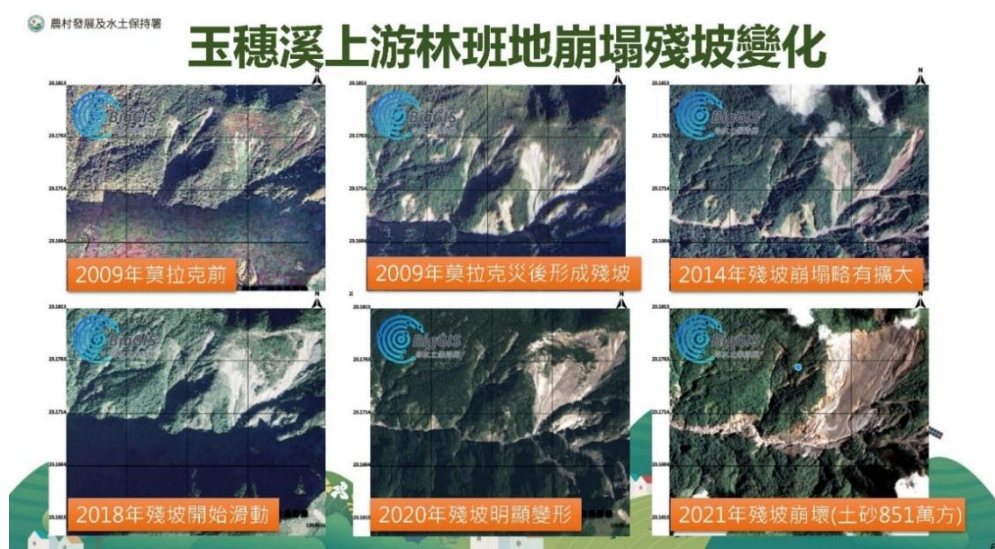
在大部分的文獻中，基於某區域(例如行政區、集水區等)為單元之損害紀錄可以利用集群分析 (cluster analysis) 產生數個資料集 (dataset) 來作為致災資料，並估算每筆致災資料的損害率和致災因子。這些致災資料通常是數個基於地域型損害紀錄所形成的資料集。有了這類百分比型態的致災資料，即可利用機率分布函數的最小平方曲線擬合得到最佳的易損性曲線參數。最小平方估計法最不易控制的變異在於致災資料空間尺度的大小不易掌握，不同空間尺度資料可能求得不同的易損性分析結果，因此實務上需進行易損性曲線的可靠度分析及驗證。

(二)完全調查樣本法

完全調查樣本法係基於最大概似估計法為核心所發展。最大概似估計法之原理是使觀測的樣本發生機率為最大以評估機率分布函數的估計參數。所謂樣本發生機率即概似函數 (L : likelihood function)，係可觀察的隨機變量之聯合機率密度函數 (joint probability density function; JPDF)。利用最大概似估計法求取易損性曲線的相關研究雖不多，但已成功地應用於建立橋梁易損性曲線。例如 Shinozuka(1998) 和 Shinozuka *et al.* (2000b,2003) 利用 1994 年北嶺地震後 Caltrans 及阪神地震後 Hanshin Expressway Public Corporation's 的高速公路橋梁損害調查記錄，將橋梁分為無損、輕度、中度、重度及全倒等五種損害程度，再以最大概似估計法對假定之機率分布函數進行參數推計，分別建立兩個地區的橋梁易損性曲線。在 Shinozuka *et al.* (2003) 的研究中採用具有雙估計參數之對數常態分布表示第 j 類損害程度之易損性曲線 F_j ，分別為中位數 (c_j : median) 和對數標準差 (ζ_j : log-standard deviation)；而概似函數被假定以伯努利試驗 (Bernoulli experiment) 描述，即 1 代表發生而 0 代表不發生的二元型式，並用來求取各類橋梁之各類損害分級的易損性曲線。

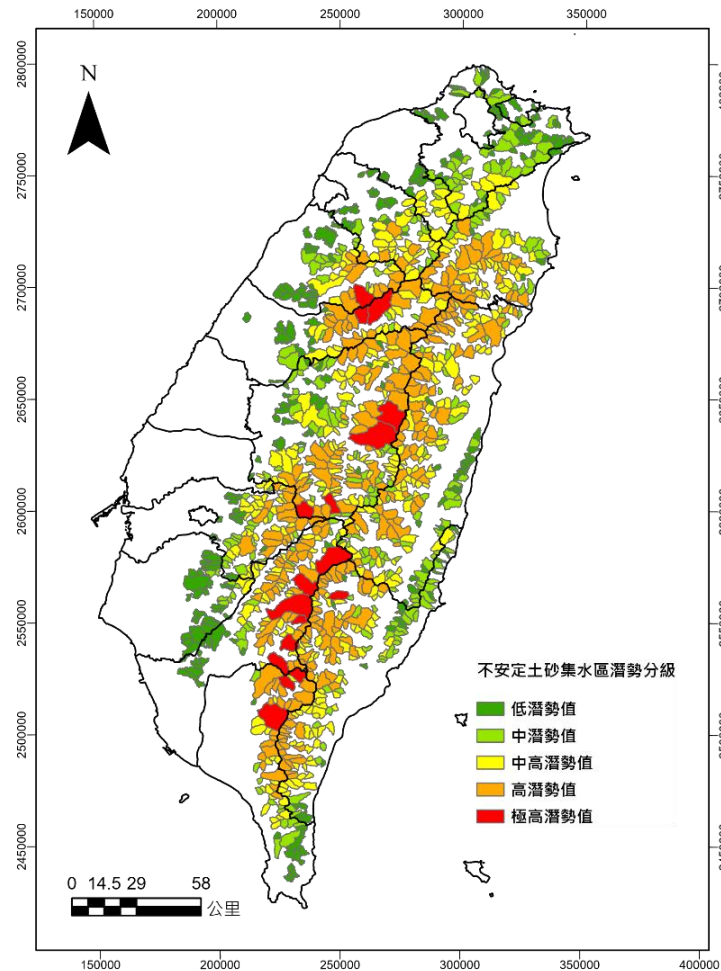
第二節 集水區不安定土砂

集水區之坡面或河道上可能殘存舊有或新增崩塌所產生的不穩定土石方，稱之為不安定土砂，其型態可能為坡體位移後(降雨、地震等因素)形成的殘坡或是河道上堆積未流出之土砂，可能受降雨或地震進一步誘發土砂災害，如圖 2-2 所示。根據陳振宇等人 (2017,2019) 的研究，不安定土砂可定義為「集水區內坡面或河道上，屬暫態平衡或不穩定平衡狀態下之殘坡或河道堆積之大量土砂。」這類型土砂不像地文條件通常是穩定的、變動週期長的，其可能因一次降雨或地震即發生改變，因此具有動態特性而難以全面調查和監測掌握，對於業務管理單位極難掌握和評估。目前，農村發展及水土保持署根據地文脆弱度、危害程度等指標，進一步計算全國之不安定土砂集水區潛勢值，如圖 2-3 所示，將全國之集水區不安定土砂分為低、中、中高、高及極高等五級，共計 1218 處不安定土砂集水區，而屬於高潛勢以上者 322 處，並建立不安定土砂集水區潛勢分級表，如圖 2-4。上述不安定土砂潛勢圖係基於 QPE (Quantitative Precipitation Estimation) 網格點進行評估，其考量歷史崩塌次數、累計崩塌面積、高程差、水平流路距離等因子，對於表達集水區之不安定土砂有一定能力，並可根據新增崩塌地分布更新。



資料來源：陳振宇 (2023)。

圖 2-2 崩塌殘坡受降雨或地震影響之長期變化



資料來源：<https://tech.swcb.gov.tw/Results/UnstableSediment>

圖 2-3 崩塌殘坡受降雨或地震影響之長期變化

潛勢分級	P值	分群	各分級數量		
			中央管 河川	縣市管 河川	總計
低	0 ~ 0.5	1	197	47	244 (20.0%)
中	0.5 ~ 1.5	2	216	60	276 (22.7%)
中高	1.5 ~ 3.5	3	309	77	386 (31.7%)
高	3.5 ~ 10	4	240	55	295 (24.2%)
極高	>10	5	17	0	17 (1.4%)
合計			979	239	1,218 (100%)

資料來源：<https://tech.swcb.gov.tw/Results/UnstableSediment>

圖 2-4 不安定土砂集水區潛勢分級

第三章 坡地易損性模式

第一節 地震易損性分析

事件發生可能性（例如崩塌）與地震因子之關係，可藉由易損性分析原理建立特定地震因子下某類坡地對於致災因子可能引致崩塌發生之機率，這個關係建立在有良好致災資料所建置之災損資料庫。對於廣域崩塌評估即可依據不同之地文分類及驅動力指標建立不同類別之坡地易損性曲線。

以完全調查樣本法來發展坡地易損性模式，係基於最大概似估計法為核心所發展，其原理是使觀測的樣本發生機率為最大以評估機率分布函數的估計參數。將每個調查樣本可能存在的損害分級是「發生」或「沒有發生」的紀錄納入易損性分析中，因此不會有樣本空間尺度變異的問題。某損害程度之伯努利試驗概似函數可表示如式(3-1) 所示：

$$L_j(c_j, \zeta_j) = \prod_{i=1}^N [F_j]^{n_i} [1 - F_j]^{1-n_i} \quad (3-1)$$

上式中， N 為調查之受災本體總數； c_j 和 ζ_j 分別為第 j 類損害程度之中位數及標準差； n_i 為伯努利隨機變數指標 (Bernoulli random variable)，表示在致災因子下，若第 n 個受災本體達到第 j 類損害程度， $n_i=1$ ；否則， $n_i=0$ 。對於對數常態分布之之中位數及標準差，可經由求取式(3-1) 概似函數之最大值而得，即最大概似估計。

易損性分析係對於發生之災害達到或超越某個程度的超越機率。為了合理表現這個關係必須假定事件機率分布函數以可靠地描述災害發生之特性。這個合理可靠的機率分布函數有兩種求取方式，第一種方式為假定事件發生的機率密度函數，再利用參數估計繪製累積分布函數以表達易損性，例如最小平方估計或最大概似估計。由於易損性模式係表達崩塌發生之隨機變量 x 之分布函數 $F(x)$ 模型，基於假定(或觀察)的自然災害發生分布模式，

通常採用對數常態分布表達發生之頻率分布。隨機變量即為致災因子對於事件的機率分配數學方程式，而機率分配數學方程式由中位數及標準差決定 (Shinozuka *et al.*, 1998, 2000a, 2000b；李秉乾等人，2005a，2005b；謝孟勳，2013)，稱為雙估計參數。如式(3-2) 所示：

$$f_j(x; c_j, \zeta_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_j x} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(x/c_j)}{\zeta_j} \right]^2} \quad (3-2)$$

其中， f_j 為對數常態分布之機率密度函數； c_j 為中位數； ζ_j 為標準差； x 為隨機變量。雙估計參數之機率分配數學方程式即為隨致災因子變化而引致受災本體發生之機率密度函數。其累積分布即為易損性曲線。對數常態累積分布函數解析式表示為：

$$F_j(x; c_j, \zeta_j) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(x/c_j)}{\zeta_j \sqrt{2}} \right] \quad (3-3)$$

上式中，即為第 j 類損害程度之累積分布函數； erf 為高斯誤差函數，其解析式為：

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (3-4)$$

當雙估計參數決定後，即可利用「標準常態累積分布函數」推求損害機率與累積分布函數，也就是第 j 類損害程度之易損性曲線。中位數和標準差之決定可透過最大概似法進行求解。傳統的最大概似估計法將具隨機特性的每次事件發生（樣本）的概似值皆納入分析之中，進而得到事件發生與否的概似函數。以最大概似估計法評估對數常態累積分布之雙估計參數可依致災資料之事件分布型態建立其概似函數。然而，因探勘資料型態的不一致性及隨機特性，亦可結合集群分析得到一致性之致災資料。所謂一致性即包含空間影響及權重大小的一致性，這類一致性的致災資料可透過網格分析

結合集群分析並進行最大概似估計，此即網格集群最大概似法（謝孟勳，2013），而若無資料集群的需求，則可直接以樣本致災資料求取。此外，依據易損性曲線分析原理，亦可發展多種損害狀態之易損性曲線，以下分別以網格集群最大概似法介紹二項分布型以及多項分布型的原理。

一、二項分布型

當損害資料為巨量的網格資料時，通常可將資料予以適當的分類或分群，所以對於第 k 個集群內假定有 J 個可能損害分類，二項分布型之聯合機率分布表達了每次試驗（受災本體）僅有一個可能的損害結果，且每次試驗是獨立且互斥的。對於第 j 個損害分級，在第 k 個集群內 X 次試驗中達到之次數表示為 x_k 。因此機率分布的聯合機率質量函數 (join probability mass function; JPMF) 可用典型二項分布定義如下：

$$f_{kj}(X) = \binom{X}{x_k} [F_j]^{x_k} [1 - F_j]^{X - x_k} \quad (3-5)$$

因此，基於此聯合機率質量函數，對於被分成 K_g 個集群的所有事件資料，第 j 類損害程度之概似函數 L_j^B 可表示為：

$$L_j^B(c_j, \zeta_j) = \prod_{k=1}^{K_g} \binom{X}{x_k} [F_j]^{x_k} [1 - F_j]^{X - x_k} \quad (3-6)$$

上式中， K_g 為致災資料數量； X 為每個致災資料的坡地總面積， x_k 為第 k 個資料點之崩塌面積。式(3-6) 中，二項函式分別代表發生（左項）與未發生（右項）之崩塌機率。因此，對於崩塌易損性曲線之中位數和標準差，式(3-6) 可經由求取概似函數之最大值進行估計。藉由取對數後一階偏導函數求解雙估計參數，聯立方程表示如下：

$$\frac{\partial \ln L_j^B(c_j, \zeta_j)}{\partial c_j} = \frac{\partial \ln L_j^B(c_j, \zeta_j)}{\partial \zeta_j} = 0 \quad (3-7)$$

上式之推導須引入標準化參數 λ_{kj} ，即

$$\lambda_{kj} = \ln(x / c_j) / \zeta_j \quad (3-8)$$

即可導出第 j 個損害分級之非線性聯立方程式如下：

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{k=1}^{K_g} R_{kj} \left\{ \frac{-e^{-\frac{1}{2}\lambda_{kj}^2}}{1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\lambda_{kj}}{\sqrt{2}}\right)} \right\} + \sum_{k=1}^{K_g} (1 - R_{kj}) \left\{ \frac{e^{-\frac{1}{2}\lambda_{kj}^2}}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\lambda_{kj}}{\sqrt{2}}\right)} \right\} &= 0 \\ \sum_{k=1}^{K_g} R_{kj} \left\{ \frac{-\lambda_{kj} e^{-\frac{1}{2}\lambda_{kj}^2}}{1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\lambda_{kj}}{\sqrt{2}}\right)} \right\} + \sum_{k=1}^{K_g} (1 - R_{kj}) \left\{ \frac{\lambda_{kj} e^{-\frac{1}{2}\lambda_{kj}^2}}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\lambda_{kj}}{\sqrt{2}}\right)} \right\} &= 0 \end{aligned} \right. \quad (3-9)$$

其中；

$$R_{kj} = x_{kj} / X_k \quad (3-10)$$

上式中， x_{kj} 表示第 k 個群組中第 j 個損害分級之崩塌面積； X_k 表示第 k 個群組之總面積。式(3-10) 即為以第 k 個集群內之崩塌率表示之最大概似估計聯立方程。若每個集群之致災資料可得到，包含集群之震度值和崩塌率，則易損性曲線之 c_j 和 ζ_j 即可以求解。另一方面，由式(3-10) 亦可知，當資料不需要進行集群分析時，直接消除方程式中每個集群總數 X_k 求解即可。

二項分布型的特徵是，各類損害狀態 j 並無關聯性，也就是說各類損害之易損性曲線是分別求取的，這對於某些具連續性的物理現象可能並不適用，例如當受災本體的輕、中、重等損害分級是逐步累積下的連續過程，不同損害狀態並非獨立，因此若是資料不足則可能在繪製不同損害狀態的易損性曲線時產生不合理的交錯，也就是會無法避免統計樣本精密度不同而產生的誤差。因此，二項分布型法適用於受災本體僅有發生與不發生二種情況，或是其受災情況為不連續的情況時，否則必須採用多項型分布法。

二、多項分布型

同樣地，當損害資料為巨量的網格資料時，通常可將資料予以適當的分類或分群，所以對於第 k 筆試驗資料，多項分布型之聯合機率分布表達每次試驗皆有 J 個可能的損害程度，且每次試驗是獨立且互斥的。因此，在 X 次試驗中，發生第 j 個損害分級之結果可被表示為 x_{kj} ，若發生則為 $x_{kj}=1$ ，若不發生則為 $x_{kj}=0$ 。因此機率分布的聯合機率質量函數可以多項分布定義：

$$f_k(X; P_0, P_1, \dots, P_J) \equiv \binom{X}{x_{k0}, x_{k1}, \dots, x_{kJ}} \prod_{j=0}^J [P_j]^{x_{kj}} \quad (3-11)$$

其中；

$$\sum_{j=0}^J x_{kj} = X \quad (3-12)$$

式(3-11) 中， P_j 為第 j 個損害程度至第 $j+1$ 個損害程度的區間機率，即：

$$P_j = F_j(x; c_j, \zeta_j) - F_{j+1}(x; c_{j+1}, \zeta_{j+1}) \quad (3-13)$$

且；

$$\sum_{j=0}^J P_j = 1 \quad (3-14)$$

其中 $F_0=1$ 且 $F_{J+1}=0$ 。對於 X 次試驗中所有損害程度之聯合機率分布，可以式(3-11) 之聯合機率質量函數來表達。因此，概似函數 L^M 則可表示為：

$$L^M(c_1, c_2, \dots, c_J, \zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_J) = \prod_{k=1}^K \binom{X}{x_{k0}, x_{k1}, \dots, x_{kJ}} \prod_{j=0}^J [P_j]^{x_{kj}} \quad (3-15)$$

其中 K 為資料數量。對於不同損害分級易損性曲線之 c_j 和 ζ_j ，即可經由求取概似函數之最大值進行評估。其聯立方程式表示如下：

$$\frac{\partial \ln L^M(c_1, c_2, \dots, c_j, \zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_j)}{\partial c_j} = \frac{\partial \ln L^M(c_1, c_2, \dots, c_j, \zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_j)}{\partial \zeta_j} = 0 \quad (3-16)$$

本研究中損害程度分為二類，即 $J=2$ ，包含未崩塌 ($j=0$) 及崩塌 ($j=1$)。若每筆坡面之致災資料可得，包含坡面之震度值 x 和是否發生崩塌，則易損性曲線之 c_j 和 ζ_j 即可以式(3-16) 求其數值解。當參數決定後，即可繪製依據強地動因子之崩塌發生累積機率分布函數。當 $J=2$ 時式(3-16) 之解析解與二項式相同，表示在此情況下僅有一條曲線，因此無需考慮曲線交錯。

本研究將致災因子與事件發生的關係假設為對數常態分佈，其隨機變量即為震度指標 PGA 或 PGV。對於坡地易損性分析利用二項分布型建立坡地受地震引致崩塌之概似函數。對於某個受災事件，表示在致災因子作用下僅有二個可能的損害結果，即發生與不發生的二元模式，且每次試驗皆是獨立且互斥的，其涵意為某震度指標下災害發生有多少可能性。因此對於崩塌機率評估之結果，指的是某個坡面單元在某震度指標下有多少機率可能會發生崩塌。多項分布型則表達在致災因子作用下坡地有多個可能的損害狀態，由於災害狀態可能是逐步累積下的連續過程，所描述損害機率之意義，係指在某震度指標下達到或超越某種損害狀態的機率，其涵意係某類型坡地在某震度指標下發生崩塌的可能性。因此在本研究中崩塌機率評估之結果，指的是某個坡面單元在某震度下有多少機率可能會發生崩塌，進而推估集水區崩塌情形。上述兩種模式所有的事件資料皆可利用網格分析來定義致災資料的崩塌。以資料取樣觀點，所有致災資料被災害發生與不發生所定義，由此兩元素來推論事件機率分布情形。因此致災資料可用連續型或不連續型資料表示，連續型資料可用發生率（例如崩塌率）表示，不連續型則可用 0/1 定義是否發生；前者即可用網格法推求崩塌率，後者可用坡面法評估是否發生崩塌。

第二節 高震度區坡地易損性曲線建立及適用範圍

地震引致崩塌現象通常要在一定震度以上才會出現，例如 921 地震事件中震級 6 區域開始出現零星事件，震級 7 以上區域才有明顯的大量事件(王文能、尹承遠等人，2000)，然而有時即使震度很高卻不發生崩塌，這表示地震引致崩塌現象除了具有臨界現象，也具不確定性，這些不確定來自局部的非均質的地文條件，例如地質、坡度、坡向...等。因此就巨觀而言，藉由統計機率方法評估地震誘發崩塌的可能性，就可作為有效地進行廣域崩塌的評估方法之一。

另一方面，過去研究中囿於真實地震紀錄可得資訊有限，調查報告大多以中央氣象局（以下簡稱氣象局）地震分級作為概略的描述，而我國因地震儀器布建越來越精密，舊制震度分級偶爾會出現小規模地震但震度很高的極端情形，這是因為地震在一瞬間發生了很大的加速度，然而這類型的地震由於動量不足通常不足以產生災害，也因此常見震度達烈震以上等級，但卻沒有任何災情傳出的情形。因此，經過專家學者的建議，氣象局為了使震級劃分和實際災害的嚴重程度有更好的相關性，於 109 年 1 月起發布新制震度分級表（震度分級以下簡稱震級），如表 3-1，將震級 4 以下和震級 5 以上切分為二部分，震級 4 以下依原分級標準以 PGA 定義，震級 5 以上則以 PGV 定義，並給予新的震度區間分級標準。此外，將原 8 區震級擴增為 10 區震級，其中震級 5 和震級 6 分別劃分為震級 5 強和 5 弱、震級 6 強和 6 弱，使震級區分更為細緻。

震級評估的實際過程是以地震測站觀測到的地震振幅時間歷時後，先計算各測站之 PGV 和 PGA，經由空間內插推估（採用 IDW）得到全域之震度分布，根據震度分布依表 3-1 之標準，PGV 達 15cm/s 以上之區域即為震級 5 弱，PGV 在 15cm/s 以下（震級 4）以 PGA 定義，由此評估全國之震級劃分，而震級 5 弱以上之 PGA 值則做為各業務單位參考。

表 3-1 氣象局地震震度分級對照表(2020 年版)

震度分級		PGA (gal=cm/s ²)	PGV (cm/s)
0 級	無感	0.8 以下	0.2 以下
1 級	微震	0.8~2.5	0.2~2.7
2 級	輕震	2.5~8.0	0.7~1.9
3 級	弱震	8~25	1.9~5.7
4 級	中震	25~80	5.7~15
5 弱	強震	80~140	15~30
5 強		140~250	30~50
6 弱	烈震	250~440	50~80
6 強		440~800	80~140
7 級	劇震	800 以上	140 以上

資料來源：中央氣象局，[2020](#)。

坡地崩塌發生可能性與地震因子之關係，可藉由易損性分析原理建立特定地震因子下某類坡地對於致災因子可能引致崩塌發生之機率，即可建立坡地易損性曲線。由於地震誘發崩塌具有一定地域性，發展基於經驗統計法的坡地易損性模式需要充分且客觀的災損資料和地震紀錄，由於過去重大地震引致崩塌之地震紀錄並不多，本研究採用的是基於 921 地震事件之崩塌資料建立之地震誘發坡地崩塌之坡地易損性曲線，可適當表現本土之強震特性與地文環境特性。以 921 地震中為例，除針對研究地區的基本資料蒐集外，亦蒐集包括河川流域範圍、集水區範圍、5m 數值高程模型、水系、地質、岩性等相關資料；以及事件資料，包括地震歷時紀錄、921 地震前後期衛星影像等。藉由地震危害度分析和衛星影像判釋崩塌地等技術，將環境及崩塌資料建置成網格式崩塌資料庫。另一方面，藉由 DEM 進行坡面單元分析，提供坡面崩塌評估資訊。再利用網格集群最大概似分析法，可將各類坡地分類資料進行坡地易損性分析，進而繪製易損性曲線。

坡地崩塌的幾何特性也必須考量。對於網格崩塌資訊，可藉由高精度衛星影像判釋得到，但未必完全符合地形特性，實際具有一定的不確定性。因此，考量地形特徵單元與評估合理性可以坡面單元作為評估單元，坡面單元因具有符合地形特徵之特點，相較網格單元更合理及利於坡面影響評估。

坡地易損性曲線建立流程如圖 3-1 所示。本計畫在前期計畫中已分別完成 PGA 及 PGV 為誘發因子的 12 類坡地易損性曲線，基於氣象局新制地震震度分級對照表，並考慮實際上震級 5 以下區域多為零星且隨機的崩塌，因此採用震級 6 以上區域的崩塌致災資料分析，也就是不考慮震級 5 以下區域之致災資料之影響，建立適於震級 6 以上地區 ($PGA \geq 250\text{cm/s}^2$ ； $PGV \geq 50\text{cm/s}$) 之坡地易損性曲線。

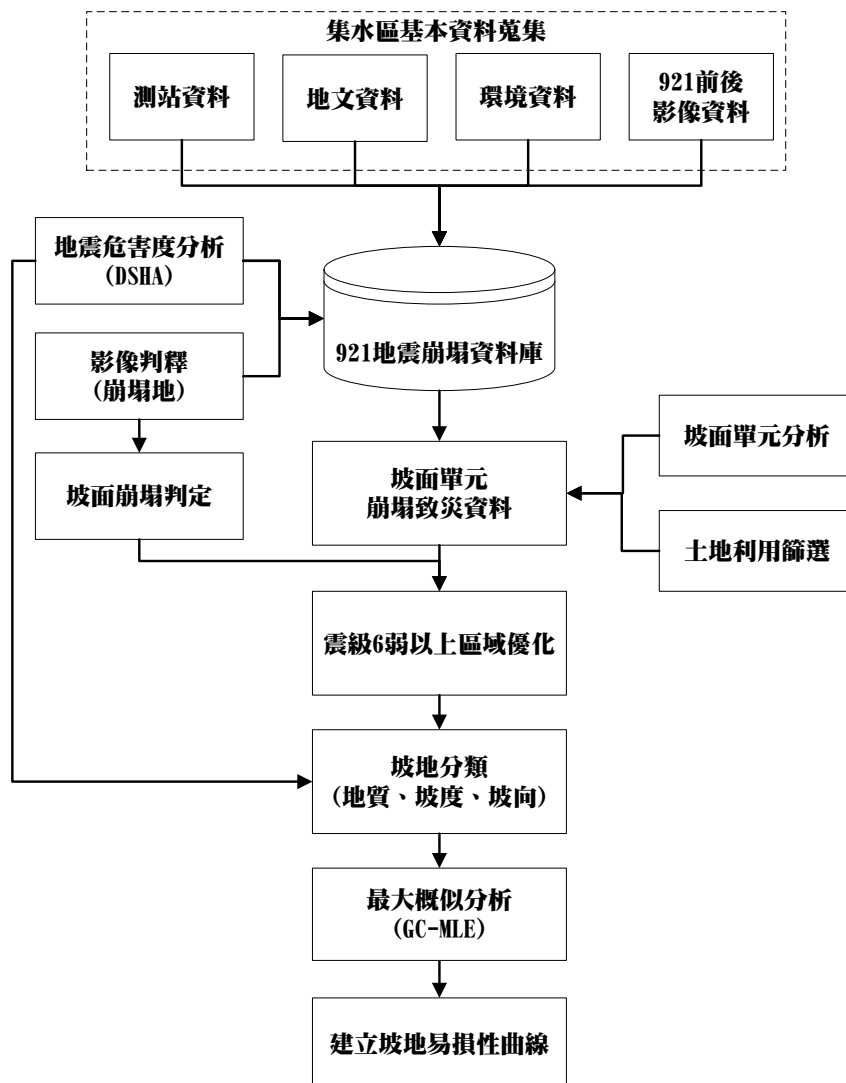


圖 3-1 坡地易損性分析流程

第三節 分析資料庫建立

一、基本資料

本研究以具代表性的 921 地震為對象，作為本研究建立坡地易損性曲線的研究地區，優選具高潛勢危害地區，也就是選擇車籠埔斷層鄰近範圍，所選地區同時也是在地震中的高災損地區。同時，由於 921 地震的逆衝斷層效應，上盤（斷層東側）遠比下盤（斷層西側）嚴重，地表加速度和災損相對較高。因此，本計畫研究區選擇烏溪流域集水區周邊範圍，行政區域隸屬於台中及南投，由大里、北港、烏溪、貓羅溪、南港溪、水里溪，六個集水區所組成，劃定之集水區面積 658.34 平方公里，如圖 3-2 所示。

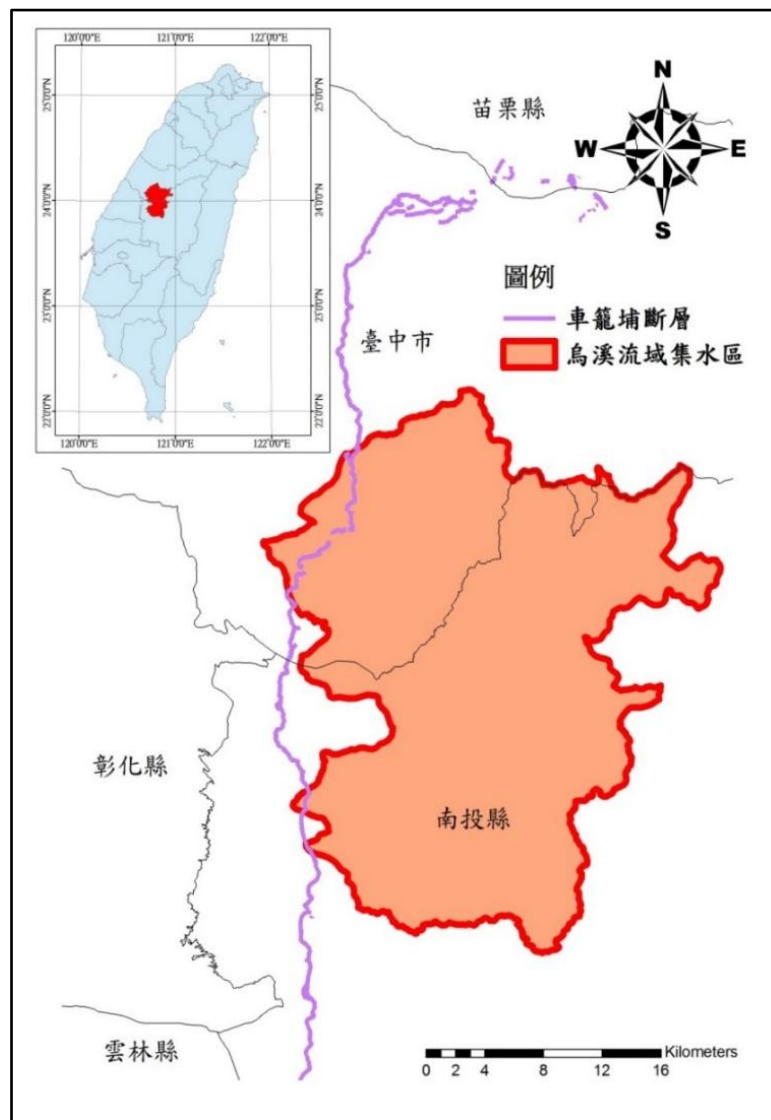


圖 3-2 研究區域

二、事件前後期裸露地

本研究以各期事件衛星影像可進行裸露地判釋，初步瞭解可能崩塌地位置。所使用必要之原始影像資料為自中央大學太空及遙測研究中心購買之 SPOT 衛星多波段 (XS) 影像資料。前後期裸露地之狀況如圖 3-3 所示。裸露地面積統計如表 3-2。

表 3-2 研究地區裸露地統計

事件名稱	集水區有效面積	裸露地面積	裸露比例
921 地震前期	38,446.00ha	236.04ha	0.61%
921 地震後期		1688.40ha	4.39%

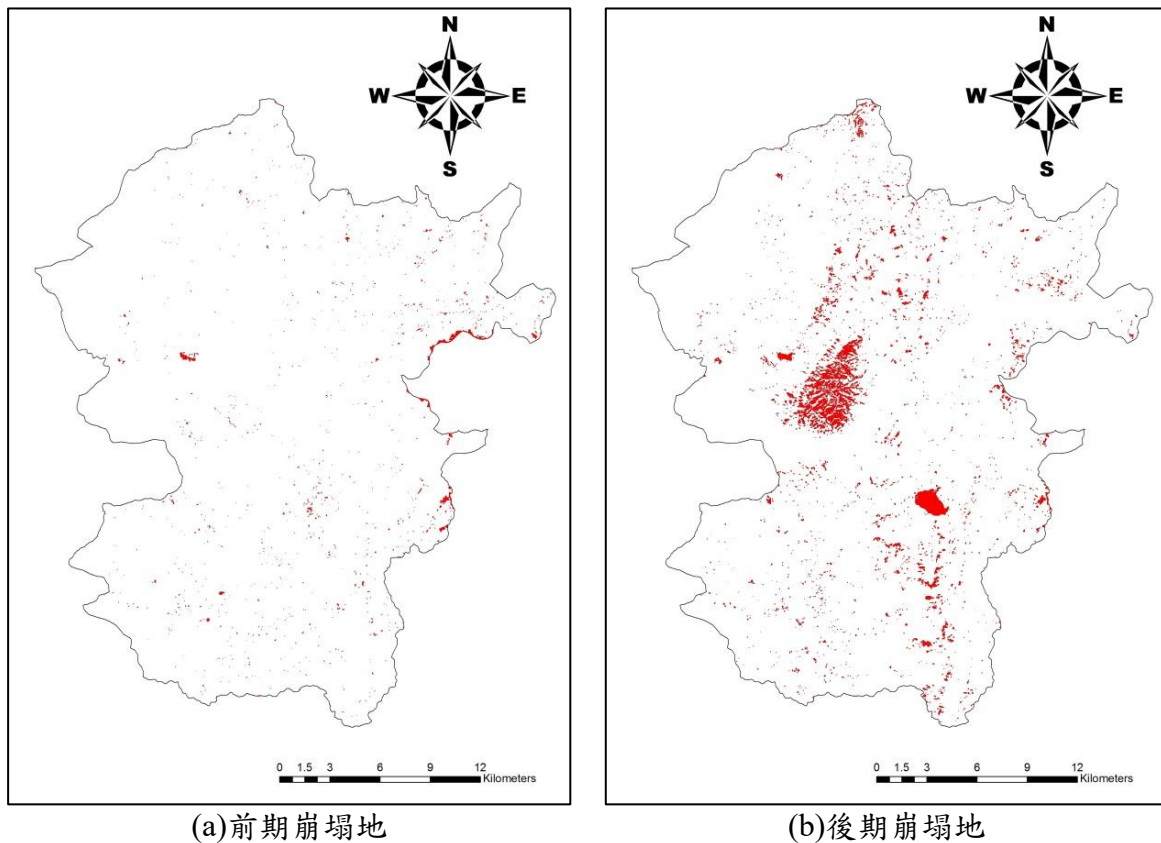


圖 3-3 九二一地震前後期裸露地分布

三、新增崩塌地

事件崩塌地之變遷狀況，可藉由前後時期之裸露地變異情形獲得。賴志強 (2007)、陳俞旭 (2008) 等人對於地震及降雨引致之崩塌地分類，考慮植被復育之影響，將崩塌地分類為四類。如圖 3-4 所示，包括：

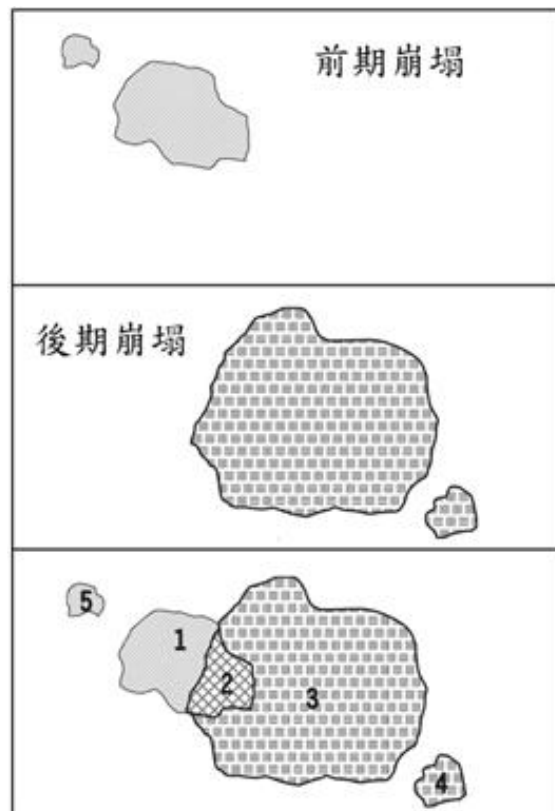
(一) 崩塌復育：(1) 與 (5)

(二) 舊有崩塌地：(2)

(三) 舊有崩塌地擴大：(3)

(四) 新生崩塌地：(4)

而其定義「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 (3) 與 (4)。上述之分類方法，對於前後期崩塌地變遷情形，在技術具有清晰的定義，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，舊有崩塌地地的擴大確實與事件相關，但並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；此狀況並不能以空間區位判別而獲得，且其內部是否真的發生加深情形，須現地勘查才可能得知。根據上述崩塌地之分類，本研究將各事件前後時期之崩塌地圖資進行套疊，由此獲得崩塌地變遷資訊。



資料來源：修改自賴志強 (2007)；陳俞旭 (2008)

圖 3-4 崩塌地變遷及分類示意

新增崩塌地可直接針對裸露地進行套疊，即可顯示出崩塌地相對應位置的集水區網格，藉由前後期裸露地得到之崩塌地，即為 921 地震後所造成之崩塌，如表 3-3 及圖 3-5 所示。

表 3-3 研究地區新增崩塌地統計

崩塌類別	921 地震
集水區有效面積	38,446.00ha
新增崩塌地面積	965.84ha
新增崩塌率	2.51%

資料來源：本研究整理

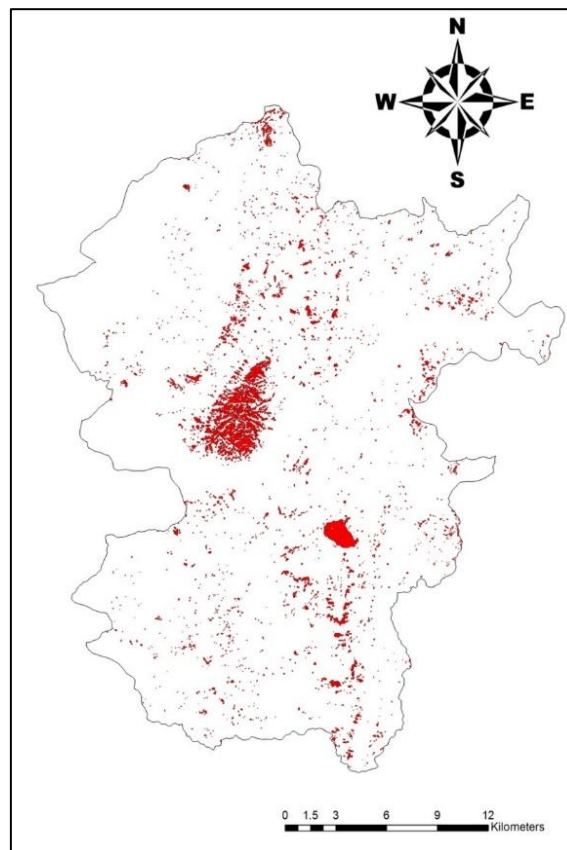


圖 3-5 921 地震新增崩塌地

四、地表震度

為了進行地表震度之空間分布，本研究自 TSMIP 中蒐集經氣象局校正且可信度較高之 444 個臺灣本島強地動測站紀錄，得到 921 地震主震之三軸向地表震度歷時記錄，分別取歷時記錄中最大值做為該測站之場址三軸向震度值。然而，對於地震引致損害主要係水平向地震力所造成，因此某測站之場址震度值多以較為重要之雙軸水平向震度進行探討。過去許多研究曾採用雙軸水平向震度之幾何平均值 (geomean)、最大值 (maximum value) 或算術平均值 (average) 等作為某測站之場址震度值，本研究則採用其中的幾何平均值定義，可表示如下：

$$S_{site} = \sqrt{S_x S_y} \quad (3-17)$$

上式中， S_{site} 為某測站之場址震度值； S_x 及 S_y 分別為測站之東西向及南北向震度值。測站之場址震度值可作為未設測站場址推估震度分布之基準值。

(一) 地表震度衰減率

震度衰減率之選擇必須符合地域性和通用性原則，實際上能夠適用於台灣且符合 921 地震特性之衰減率其實並不多。對於本研究採用之地表震度衰減率，則根據前人研究建議採用學者吳逸民等人對於臺灣地區之衰減率研究成果 (Wu et al., 2001，以下簡稱 Wu 衰減率)。吳逸民等人針對 1995—1999 年臺灣地區發生之 60 筆地震事件記錄進行統計回歸，其所得之水平向地表震度衰減率表示為：

$$\log_{10}(S_h) = 0.00215 + 0.581M_w - \log_{10}(R + 0.00871 \times 10^{0.5M_w}) - 0.00414R \quad (3-18)$$

$$\log_{10}(V_h) = -2.49 + 0.810M_w - \log_{10}(R + 0.00871 \times 10^{0.5M_w}) - 0.00268R \quad (3-19)$$

式(3-18) 和式(3-19) 中， S_h 為雙軸水平向 PGA 之幾何平均值，單位為 cm/s^2 ；式(3-19) 中， V_h 為雙軸水平向 PGV 之幾何平均值，單位為 cm/s ；

M_w 為地震之震矩規模； R 為場址至震央之距離，單位為 km，定義為斷層帶至場址最短距離。震度衰減率是蒐集多次地震實測記錄後之回歸結果，實際上不完全能夠適用 921 地震實測資料，因此尚必須對地表震度衰減率進行修正以反應衰減率之函數特性。地表震度衰減率修正之方法係將震矩規模 M_w 與場址至斷層帶之最短距離 R 分別帶入衰減率中，得到震度之推估值後再乘上修正係數，並使測站實測值與修正後推估值間之誤差絕對和為最小，即可分別求取修正係數。修正之模型如下式：

$$\min \Delta = \sum_{m=1}^M |(S_m)_T - \alpha (S_m)_E| \quad (3-20)$$

上式中 $(S_m)_T$ 為第 m 個強地動測站之實測資料； $(S_m)_E$ 為第 m 個強地動測站以地表震度衰減率推估之結果； M 為測站數量； α 為修正係數。曾有文獻提出 921 地震之衰減趨勢與全世界資料相差不多，但加速度值較小約 0.4—0.7 倍（溫國樑與柴駿甫，1999）。本研究利用 444 個測站進行地表震度衰減率之修正，所得到之加速度與速度之修正係數分別為 0.568 和 0.520。

(二) 強地動因子空間推估

對於地表震度之空間分布，本研究採用克利金空間內插方法。克利金空間內插方法係利用已知位置之觀測資料，藉由地理統計技術推估空間中未觀測位置之隨機變數的內插方法（即在任意 x 處之區域化隨機變數值 $Z(x)$ ）（Matheron, 1971; Journel, 1983; Journel and Rossi, 1989; Cressie, 1993）。克利金空間內插方法使用變異函數表達隨機變數的空間變異，而其估計原理係使分布於空間中已知位置之觀測資料的誤差預估值為最小（Cressie, 1993）。因此，克利金空間內插方法係建立在線性回歸的基本假定上，使假定之共分散模型的估計變異為最小（Journel, 1983）。過去有許多研究已應用克利金空間內插方法在地表震度之推估及模擬，並進一步地應用於地震危害評估。

本研究利用 921 地震強地動測站之場址震度值，採用 Wu 衰減率做為

定率函數分別以一般克利金系統方程式推估未設測站之全域空間分布，並以 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 之網格作為空間全域推估之尺度。藉由殘差分量套配之最佳半變異數模式及參數，利用 ArcGIS 之克立金空間分析內插模組推估空間中之隨機變動值。空間推估之隨機變動值 $R(x)$ 再與區域趨勢值 $M(x)$ 相加，即可完成地表震度之全域推估 $Z(x)$ 。

藉由克立金空間內插方法先針對已知測站之推估值比較，實測值(PGA_T)與推估值 (PGA_E) 之比較結果平均絕對誤差為 1.87%，此準確度已可作為推估全域地表震度之有效基準。PGA 和 PGV 之空間推估結果分別如圖 3-6 和圖 3-7，由圖 3-6 中顯示在車籠埔斷層帶沿線之推估結果較高，最大 PGA 值為 815.07cm/s^2 ，由圖 3-7 中顯示最大 PGV 值為 130cm/s ，此結果顯示出由於 PGA 和 PGV 不同的物理量，因此其在空間分布上的不同，最高震度區域發生在不同的位置。

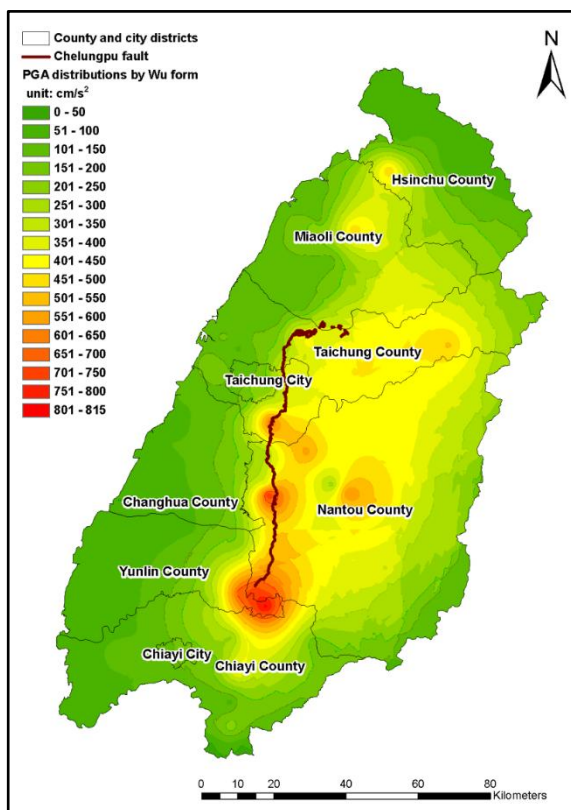


圖 3-6 尖峰地表加速度 PGA 分布

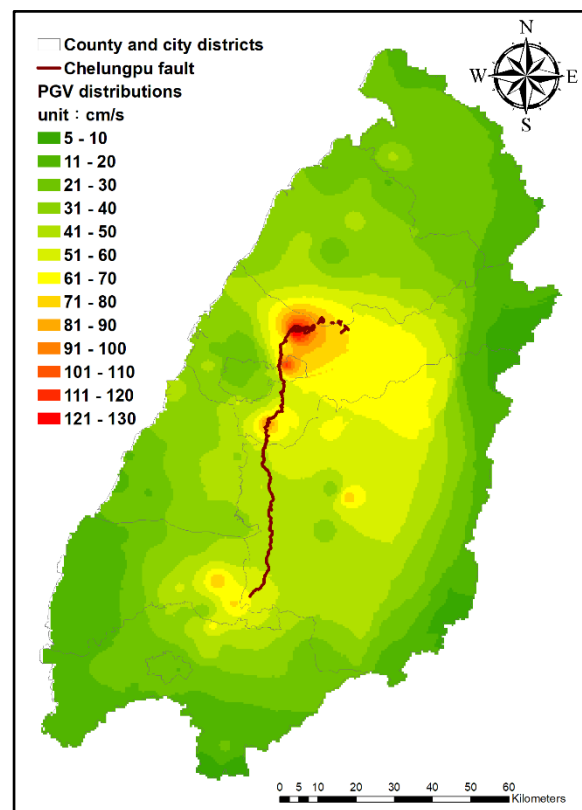


圖 3-7 尖峰地表速度 PGV 分布

第四節 環境因子資料庫

進行坡地易損性分析前須建立河川流域各類環境因子資料，集水區資料蒐集自林務局農林航測所以及水土保持局全國集水區圖層，資料範圍包括烏溪流域集水區及鄰近集水區之相關地文、水文地理資訊圖資，採用圖層範圍包括集水區範圍圖、河系圖等地理資訊基礎圖資。在集水區環境因子方面，本研究藉由網格資料庫建置各類環境因子屬性及其崩塌事件等資訊。環境資料庫將以 20m×20m 之網格尺度將不同集水區範圍內所有屬性因子鏈結。資料庫基礎為調查蒐集之基本資料，例如集水區基本圖資、事件衛星影像、數值高程模型 (5m×5m)、五萬分之一地質圖、國土利用圖等基本共通資料，並且須進一步處理各類資訊，例如坡度、坡向、高程、順向坡、事件陰影、崩塌地資訊等。此外，篩選因子中部份不適用區域被剔除，例如無法判釋區 (陰影區塊)、已開發地區 (建物、農地、行水區)、河系 (河流、湖泊)、地質 (沖積層)、較緩坡度區 (1~3 級坡) 等。

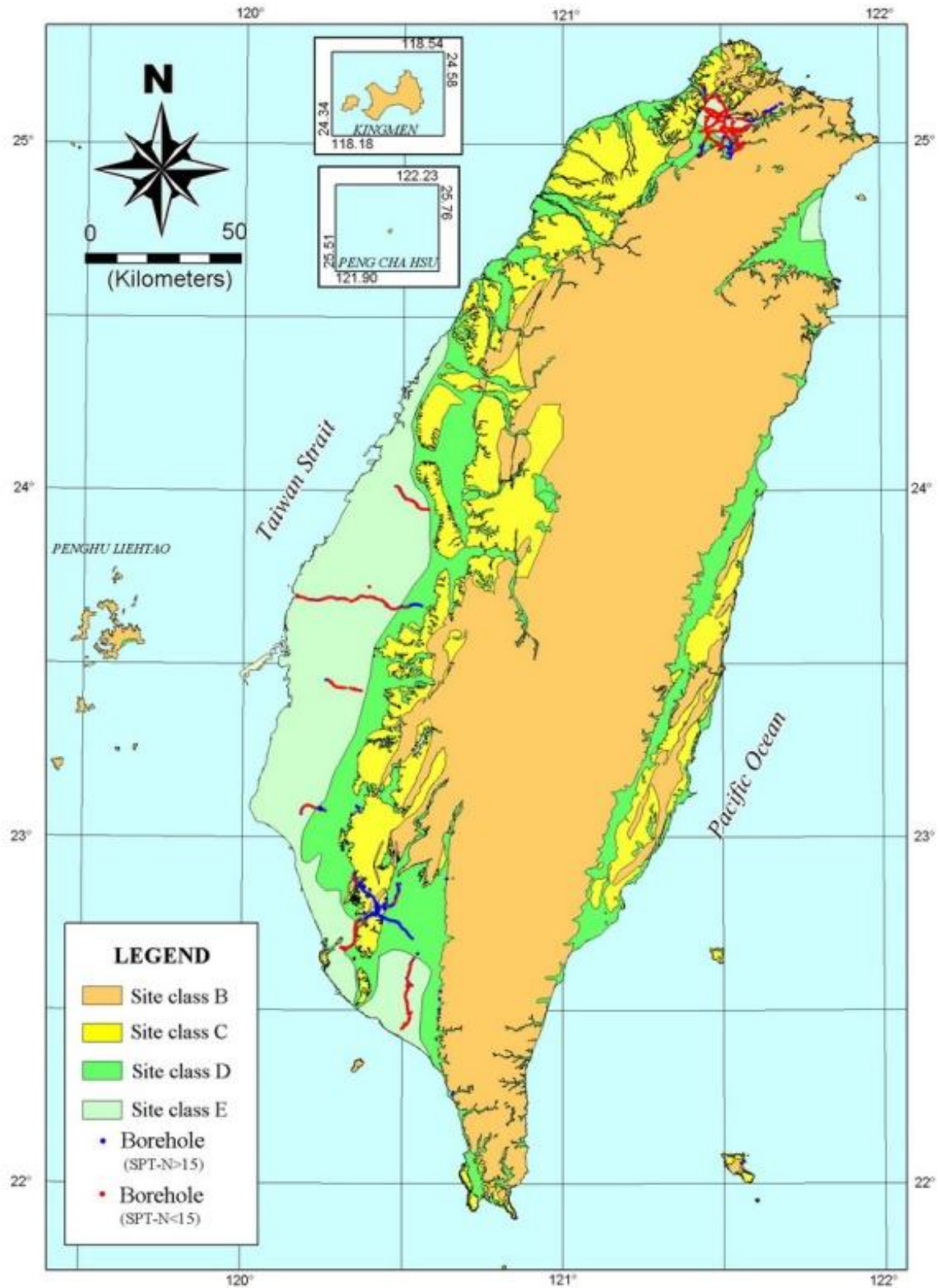
一、地質資料

根據過去研究，地震引致的崩塌與年代、岩性、地層的相關性較不易確認，而與地震引致的振動、加速度與波速更為直接相關。以地震工程學的角度，地震波的傳遞與岩土硬度具有較大關係，影響地振動的大小，通常堅硬的岩盤傳遞更多能量至地表，也引致更高的震度。李錫堤等人 (Lee et al., 2001) 將全台灣地區的地震測站所在之場址，由硬至軟依序分為 B、C、D、E 四類如表 3-4 及圖 3-8 所示，本研究依據該研究之分類將地質圖資套疊至集水區網格內。此分類模式將適於作為地震崩塌評估的地質參數。

表 3-4 李錫堤教授提出之台灣地區地質分類

分類	1997UBC 分類準則	台灣地區分類準則
B	Rock, shear velocity is from 760 to 1500 m/s	中新世或較老的地層, 包含石灰岩、火成岩及變質岩等
C	Very dense soil and soft rock, shear velocity is from 360 to 760 m/s, Undrained shear strength ≥ 2000 psf ($us \geq 100$ kPa) or $N \geq 50$ blows/ft	上新世及更新世地層, 包含礫石層、火山角礫岩、火山碎屑岩...等, 以及紅土台地
D	Stiff soils, shear velocity is from 180 to 360 m/s, Stiff soil with undrained shear strength 1000 psf $\leq us \leq 2000$ psf (50 kPa $\leq us \leq 100$ kPa), or $15 \leq N \leq 50$ blows/ft	更新世晚期與全新世地層, 低位河階地, 以及緻密的黏土層或砂泥層平均地表 30m 內 SPTN 值 ≥ 15
E	Soft soils, Profile with more than 10 ft (3m) of soft clay defined as soil with plasticity index $PI > 20$, moisture content $w > 40\%$ and undrained shear strength < 1000 psf (50 kPa), or $N < 15$ blows/ft	全新世沈積物及回填物等, 平均地表 30m 內 SPTN 值 < 15

資料來源：Lee *et al.* (2001)。



資料來源：Lee *et al.* (2001)。

圖 3-8 本研究採用之地質分類

二、坡向資料

回顧過去大多數地震和降雨引致崩塌的相關文獻中皆顯示 (Sidle *et al.*,1985)，坡向與崩塌具有一定的相關性，但無法有一個定性的關係，主因在於降雨或地震與坡向的關係是變動的相對關係，因此難以掌握其定性關係。坡向是指坡面的朝向，它表示表面某處最陡的傾斜方向。它可以被認為是山體所面向的坡向或指南針的方向。在計算坡向的過程中，坡向以度為單位按逆時針方向從 0 度 (正北方向) 至 360 度來度量，可分為九方向，包含平坡及北向、東北向、東向、東南向、南向、西南向、西向、西北向等。坡向圖中的每個網格單元的值表示此網格單元所在坡的面向。水平的坡沒有面向，均被賦予「-1」值。本研究將坡向納入環境因子之分析考量，並考慮其與地震波方向的相關性。坡向可以研究區 DEM 之資料計算各網格坡向，如圖 3-9 所示。

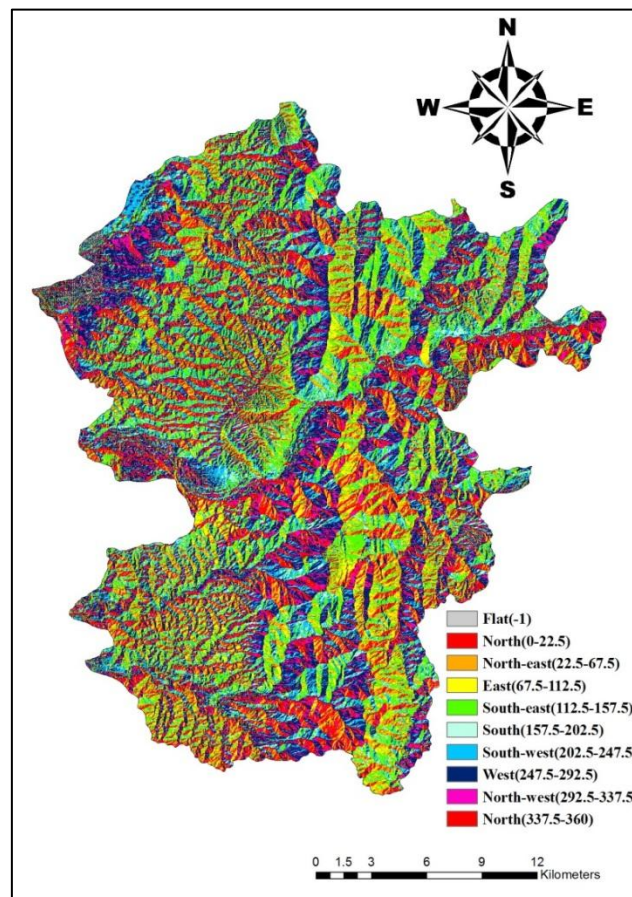


圖 3-9 坡向圖(以研究區域為例)

三、坡度資料

地形的斜度即為坡度，用於標記丘陵的傾斜程度，一般坡度的數值是以角度 (degree) 表示 (三角函數的正切函數)，亦有以百分比表示，即為「高程增量除以水平增量再乘以 100」。而水土保持技術規範 (2023) 第 23 條指出：「山坡地坡度係指一坵塊土地之平均傾斜比」。本研究坡度亦以此定義，其計算方式係以 DEM 資料利用 ArcGIS 軟體輔助計算集水區 5m 網格之平均傾斜比。ArcGIS 預設坡度計算係採用「坵塊法」，為技術規範內容許方法之一 (另一為等高線法)。如圖 3-10 所示，研究區以 10° 為級距分析各網格之坡度值，所得數值可為度數 ($^{\circ}$) 或是百分比型式 (%)。

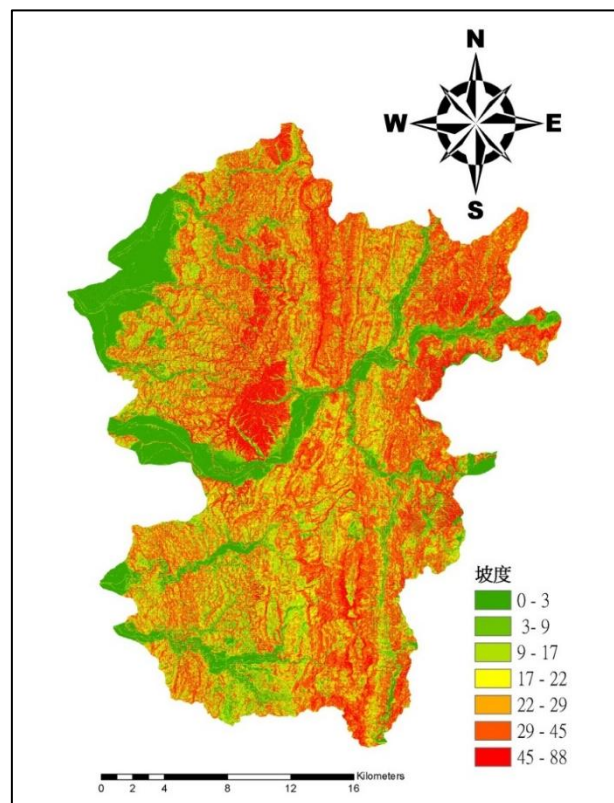


圖 3-10 坡度圖(以研究區域為例)

四、順向坡資料

順向坡是與岩層面或其他規則而具延續性之不連續面大致同向之坡面，在地質上表示一個坡面的沈積堆疊方向，因其地層走向與坡面相同，地勢影響下較逆向坡容易發生崩塌，在防災工程中屬危險山坡，必須要嚴謹處理。在台灣過去的災例中，1997 年 8 月的林肯大郡災變、2009 年 8 月的小林村災變以及 2010 年 4 月的福爾摩沙高速公路崩塌災變，皆是順向坡地滑崩塌所造成。順向坡的崩塌大多半隨著地滑機制呈現，因此對於地震而言，順向坡地勢更容易產生崩塌，而順向坡地勢因地質條件的不同，有些非常容易崩塌，輕微的振動可能就會造成崩塌，因此也更難評估。本研究針對順向坡資料，蒐集地礦中心已公布的順向坡調查資料，作為本研究坡向敏感因子資料選取的參考依據，如圖 3-11 所示。

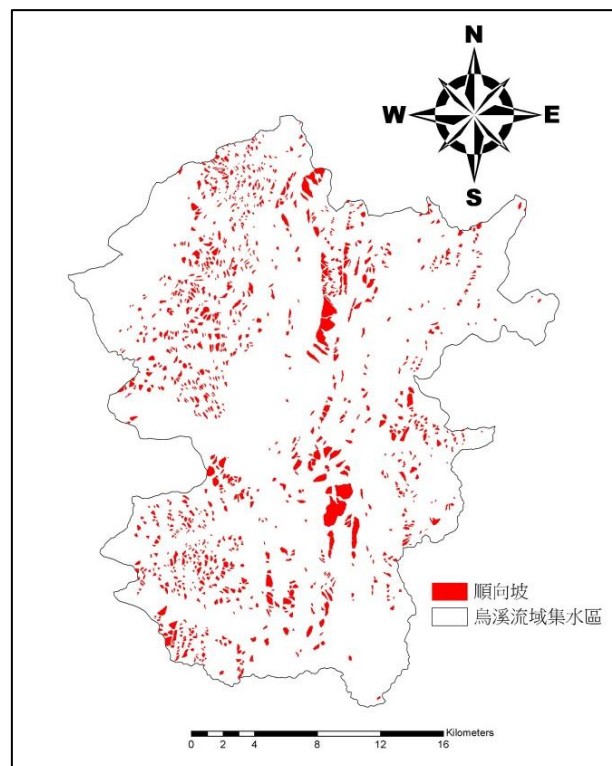


圖 3-11 順向坡分布圖(以研究區域為例)

第五節 崩塌評估坡面之分類

一、坡面之地質分類 (G)

地質因子採用李錫堤教授之分類，依照網格法計算以佔較多面積的分類為依據分出兩種類別，siteclassB 為堅硬且脆性的岩石為地質分級一、siteclassC 為密集的土壤和軟岩為地質分級二。以研究區為例，地質分類完成之崩塌地統計如表 3-5 和圖 3-12 所示。

表 3-5 地質分類統計(以研究區域為例)

級序	地質	坡面數	崩塌地		非崩塌地		崩塌比
			個數	%	個數	%	
G1	SiteB	1,039	125	12.03%	914	88%	12.03%
G2	SiteC	5,294	896	16.92%	4,398	83%	16.92%
總和		6,333	1,021	100.00%	5,312	100.00%	16.12%

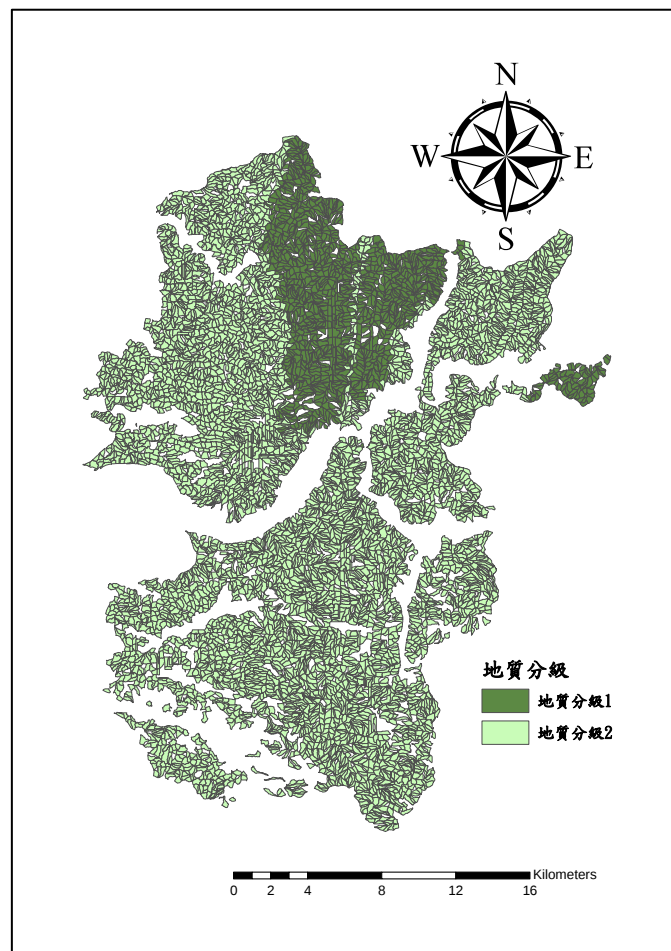


圖 3-12 坡面單元地質分類(以研究區域為例)

二、坡面之坡向敏感因子 (A)

由於坡面崩塌受地震波方向的影響極大，震波衝擊的方向是否與坡面呈正向或平行關係影響是否容易崩塌，因此本研究考慮坡面法線方向與地震波方向（波向）的關係，如圖 3-13，將坡向敏感因子分為弱面與強面兩類。弱面 (A1) 表示該坡面法線方向與震波方向平行或接近平行利於崩塌狀態，強面 (A2) 表示該坡面法線方向與震波方向垂直或接近垂直的不利崩塌的狀態，此即坡向敏感因子。

為簡化分類過程，本研究假定地震可能發生在斷層面上的任一處，即任一處之地震波係沿著斷層線任一點切線向外傳遞（即線斷層模式），因此地震發生後任一個坡面單元受衝擊的震波方向，即可定義為坡面形心距斷層線的最短距離所指的方向，稱之為震波方位角。其次，再以坡面單元最高點至最低點的反函數計算出坡面方位角，此坡面方位角和震波方位角所夾的角度越小則越有利於崩塌，也就是傾向於弱面的情況。如圖 3-14 所示，本研究以 30° 為強面與弱面之分界評估某坡面單元之坡向敏感分類，也就是當所夾角度為 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 以及 $150^\circ \sim 210^\circ$ 時定義為弱面。此外，本研究考慮順向坡的影響，當坡面為順向坡時則保守地直接定義為弱面。以研究區為例，坡向敏感因子分類完成之崩塌地統計如表 3-6 和圖 3-15 所示。

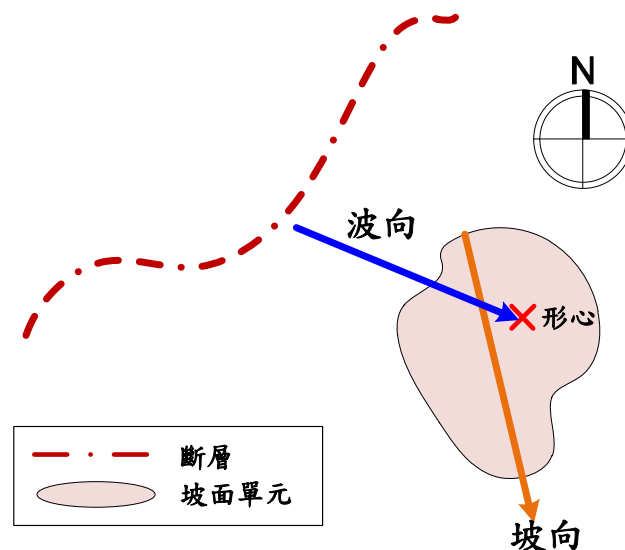


圖 3-13 坡面方位角和震波方位角的關係

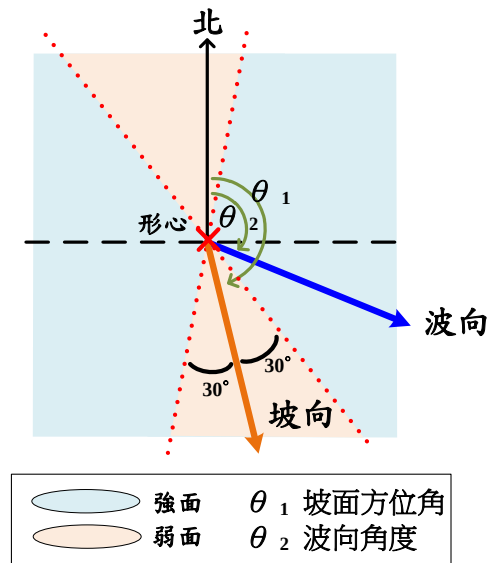


圖 3-14 坡向敏感因子定義

表 3-6 坡向分類統計(以研究區域為例)

級序	坡向	坡面數	崩塌地		非崩塌地		崩塌比
			個數	%	個數	%	
A1	強面	3,188	492	48.19%	2,696	50.75%	15.43%
A2	弱面	3,145	529	51.81%	2,616	49.25%	16.82%
總和		6,333	1,021	100.00%	5,312	100.00%	16.12%

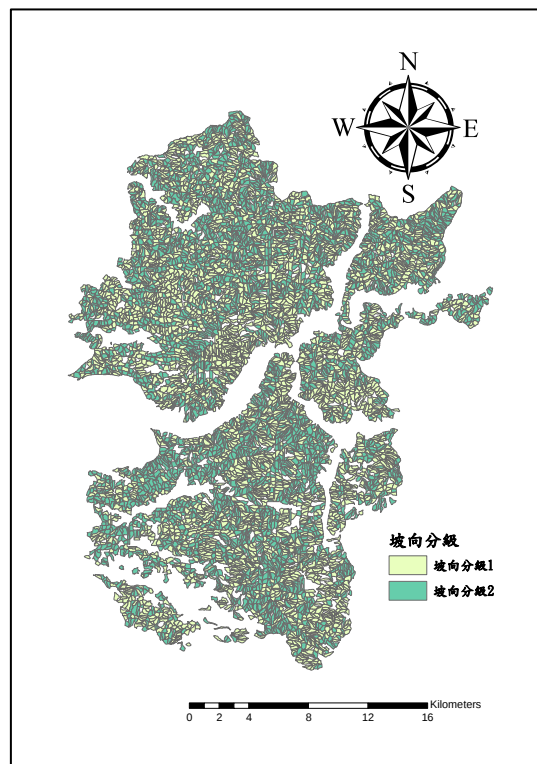


圖 3-15 坡面單元坡向分類(以研究區域為例)

三、坡面之坡度分級(S)

坡面單元的坡度分級參考水土保持技術規範 (2023) 坡度分級定義，將坡度自五級坡之上下界簡化為三個分類，定義為 S1 (緩坡)、S2 (中坡) 以及 S3 (陡坡)，如表 3-7 所示。坡面單元採用坡面斜率法來計算坡面單元坡度，計算方式是以坡面單元最高點至最低點的高程差作為坡高，及最高點至最低點水平投影下的水平距離作為坡長，計算該坡面單元之斜率即求得坡度分級。以研究區為例，坡度分類完成之崩塌地統計如圖 3-16 所示。

表 3-7 坡度分類統計(以研究區域為例)

級序	坡度	坡面數	崩塌地		非崩塌地		崩塌比
			個數	%	個數	%	
S1	三、四級坡	3,605	570	55.83%	3,035	57.13%	15.81%
S2	五級坡	1,400	212	20.76%	1,188	22.36%	15.14%
S3	六、七級坡	1,328	239	23.41%	1,089	20.50%	18.00%
總和		6,333	1,021	100.00%	5,312	100.00%	16.12%

註：一、二級坡在網格資料庫中已刪除，但坡面單元計算仍可能有三級坡坡度值。

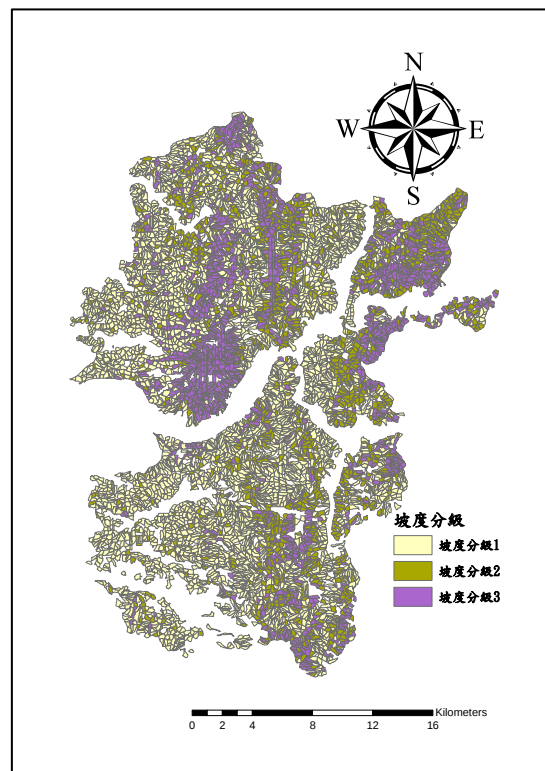


圖 3-16 坡面單元坡度分類(以研究區域為例)

四、坡面單元崩塌定義

坡地易損性曲線係描述單一坡面單元在某震度下之崩塌機率，就是不論坡面單元的實際大小，以崩塌機率的方式表達某坡面單元的崩塌可能性。以統計而言，崩塌機率所描述的是某個崩塌狀態發生的可能性，也就是必須針對坡面定義某種崩塌狀態是否發生，再根據定義進行機率分析，通常最簡單直接的作法，是以訂定崩塌門檻值作為某種崩塌狀態。此外，亦要考慮崩塌量體和崩塌表面積的相關性，並將判釋所得的崩塌水平投影與實際崩塌量體之關係量化修正。這個修正概念在過去已有許多研究者針對崩塌斜面積、體積與深度的關係作過相關研究（經濟部水利署，2006,2010,2011）。

本研究推估崩塌體積期望值下產生之崩塌斜面積，再由已知坡度計算可能的崩塌水平投影面積。因此將參考該計畫所調查崩塌地中，屬中高嚴重程度崩塌地之平均崩塌體積約 $V=5,692$ 立方公尺來估算，藉由反推崩塌斜面積並估計不同坡度分類下的崩塌水平投影面積門檻。在 S1~S3 的坡度分類下，各類坡度取平均值計算可能的崩塌水平投影面積，並結合崩塌率（崩塌水平投影面積/坡面單元水平投影面積）和判識所得之崩塌水平投影面積以試誤法得到較佳門檻值組合，定義如下：

1. S1 類坡度：坡面單元崩塌率達 5%，或崩塌水平投影面積達 0.28ha 者為崩塌（7 個網格以上）；其餘為未發生崩塌。
2. S2 類坡度：坡面單元崩塌率達 5%，或崩塌水平投影面積達 0.24ha 者判定坡面單元為崩塌（6 個網格以上）；其餘為未發生崩塌。
3. S3 類坡度：坡面單元崩塌率達 5%，或崩塌水平投影面積達 0.22ha 者判定坡面單元為崩塌（5 個網格以上）；其餘為未發生崩塌。

上述崩塌率 5% 門檻值的設定，主要是考量當坡面單元過小時，僅考慮崩塌水平投影面積可能無法定義崩塌坡面的情形，例如當坡面單元 3ha 時，5% 的崩塌率約僅 4 個網格。

第六節 雙指標坡地易損性曲線

本研究利用前述 921 地震崩塌資料以坡地易損性分析方法進行各類型坡地之易損性分析。根據前述因子定義之分類將坡面環境因子分類屬性賦予固定編碼以顯示其環境特徵，分別建立 G(地質)、A(坡向敏感)、S(坡度)之編號順序組合，其中包括地質二類、坡向敏感二類以及坡度三類，共計 12 種類型坡地組合。

依據本章第二節所述震度分級表篩選高震度區（六弱級以上）之資料，其中包括每個坡面在 921 地震中之 PGA 及 PGV 震度值，以及該坡面是否發生崩塌（有崩為 1，未崩為 0），各類坡地之崩塌致災資料數量如表 3-8 所示，經由易損性分析各類坡地即可根據崩塌致災資料求解其中位數及標準差等易損性參數。以 PGA 為致災因子分析所得之坡地易損性參數結果如表 3-8 所示。各類坡地易損性曲線如圖 3-17 至圖 3-28 所示。根據機率曲線對應的 PGA 關係，可計算該類坡地在某 PGA 震度下的崩塌機率，估計地震下之崩塌可能性。

表 3-8 以 PGA 為致災因子之 12 類坡地易損性參數表

分類編號	數量	中位數	標準差	適用範圍 (cm/s ²)	
G1A1S1	261	0.952	0.681	250.00	474.48
G1A1S2	131	0.771	0.581	250.00	476.34
G1A1S3	116	0.683	0.498	250.00	480.94
G1A2S1	262	1.035	0.734	250.00	473.17
G1A2S2	67	0.878	0.662	250.00	462.68
G1A2S3	63	0.789	0.598	250.00	484.24
G2A1S1	1498	0.496	0.128	250.00	592.74
G2A1S2	553	0.482	0.118	250.00	573.98
G2A1S3	552	0.486	0.112	250.00	558.90
G2A2S1	1354	0.525	0.164	250.00	601.62
G2A2S2	474	0.521	0.152	250.00	595.41
G2A2S3	543	0.518	0.139	250.00	585.77

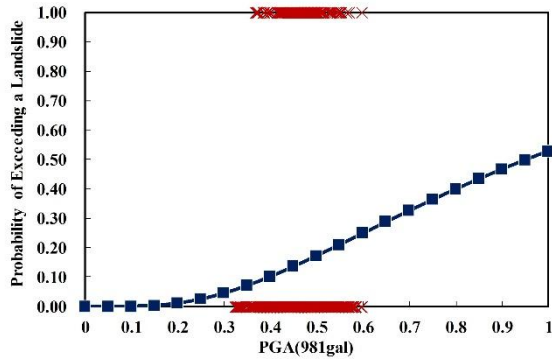


圖 3-17 G1A1S1 易損性曲線(PGA) 圖 3-18 G1A1S2 易損性曲線(PGA)

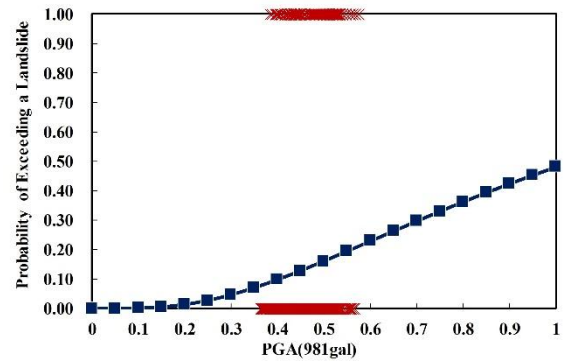
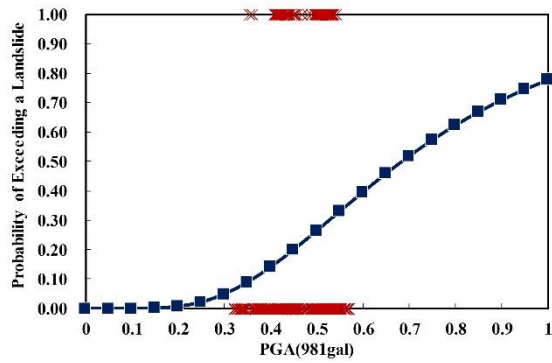
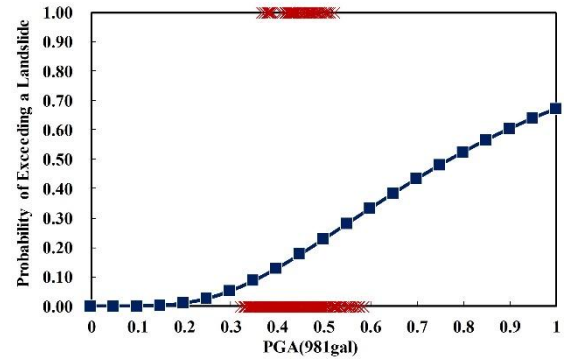


圖 3-19 G1A1S3 易損性曲線(PGA) 圖 3-20 G1A2S1 易損性曲線(PGA)

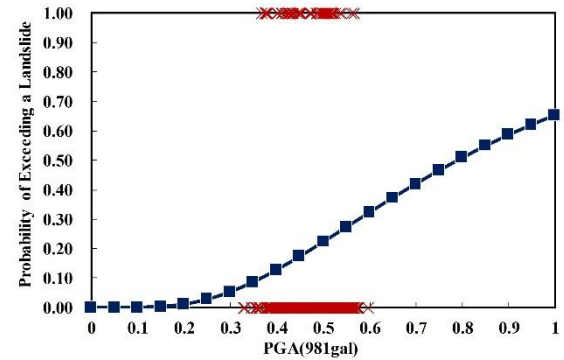
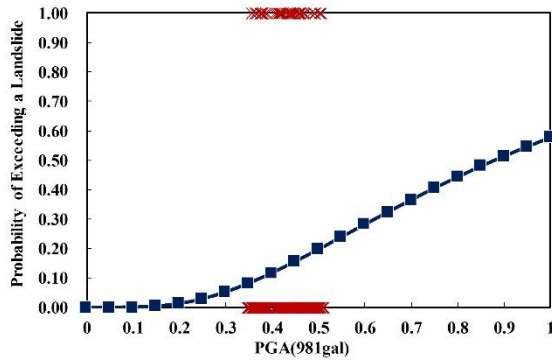


圖 3-21 G1A2S2 易損性曲線(PGA) 圖 3-22 G1A2S3 易損性曲線(PGA)

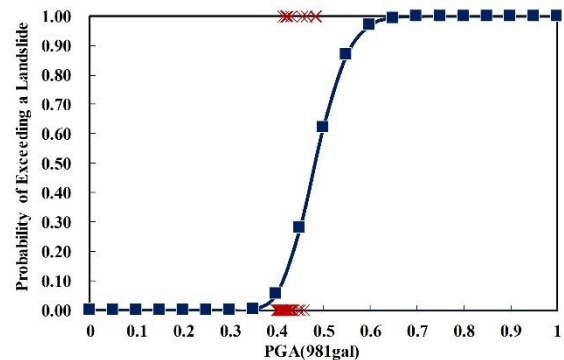
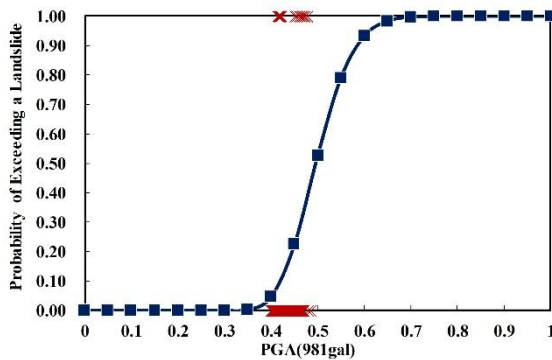


圖 3-23 G2A1S1 易損性曲線(PGA) 圖 3-24 G2A1S2 易損性曲線(PGA)

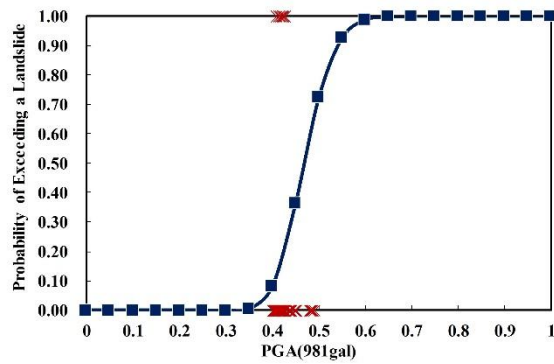


圖 3-25 G2A1S3 易損性曲線(PGA)

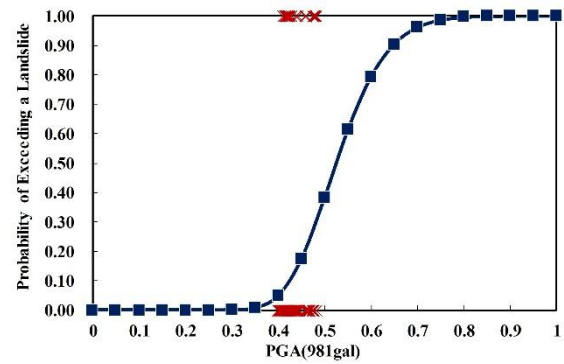


圖 3-26 G2A2S1 易損性曲線(PGA)

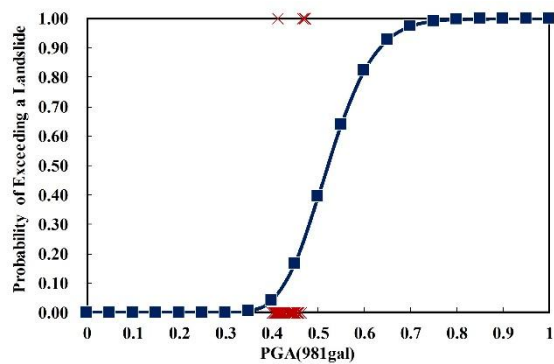


圖 3-27 G2A2S2 易損性曲線(PGA)

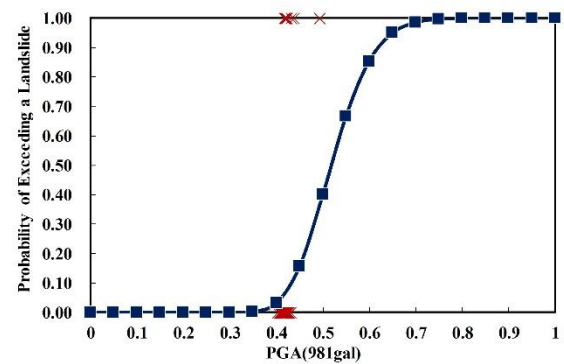


圖 3-28 G2A2S3 易損性曲線(PGA)

表 3-9 以 PGV 為致災因子之 12 類坡地易損性參數表

分類編號	數量	中位數	標準差	適用範圍 (cm/s)	
G1A1S1	261	0.836	0.644	50.00	88.75
G1A1S2	131	0.700	0.559	50.00	94.73
G1A1S3	116	0.573	0.487	50.00	101.50
G1A2S1	262	1.061	0.750	50.00	88.51
G1A2S2	67	0.926	0.686	50.00	92.02
G1A2S3	63	0.855	0.629	50.00	102.20
G2A1S1	1498	0.431	0.120	50.00	108.59
G2A1S2	553	0.418	0.111	50.00	111.87
G2A1S3	552	0.406	0.105	50.00	115.67
G2A2S1	1354	0.456	0.154	50.00	110.21
G2A2S2	474	0.452	0.143	50.00	116.04
G2A2S3	543	0.450	0.131	50.00	121.23

在 PGV 方面，分析所得之坡地易損性參數結果如表 3-9 所示。各類坡地易損性曲線如圖 3-29 至圖 3-40 所示。根據機率曲線對應的 PGV 關係，可計算該類坡地在某 PGV 震度下的崩塌機率，估計地震下之崩塌可能性。

上述表現 PGA 或 PGV 二種物理量引致崩塌的各別機率，由於二者為時間積分關係，因此瞬間的震度延時會有很大的影響；也就是說，在某時間域較高的 PGA 若僅是在極短的時間內出現，經過時間積分後不一定是較高的 PGV；反之，較高的 PGV 不一定會產生於較高的 PGA 時間域，這也表示 PGA 或 PGV 之易損性曲線並不會一致。目前研究多認為地震延時可能對災害的發生相較加速度更為重要，易因累積足夠的動量而導致災害發生，這也是氣象局將高震度區改以 PGV 定義的主因，因此可以預期在同場地震事件中，若以 PGA 為致災因子所得之崩塌易損評估結果，相較於 PGV 為致災因子所得結果會較保守，也就是崩塌機率和崩塌量估計會較高。

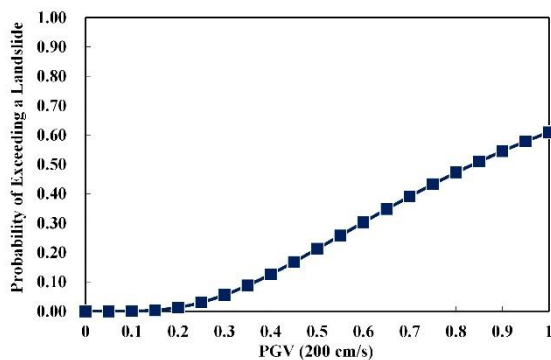


圖 3-29 G1A1S1 易損性曲線(PGV)

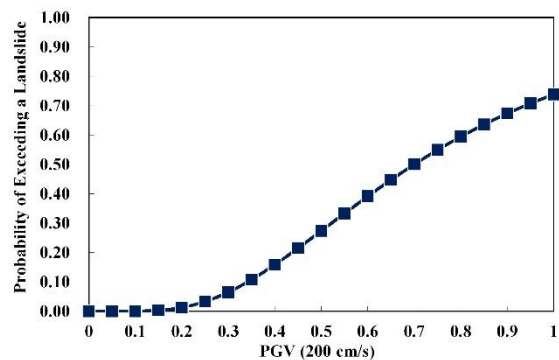


圖 3-30 G1A1S2 易損性曲線(PGV)

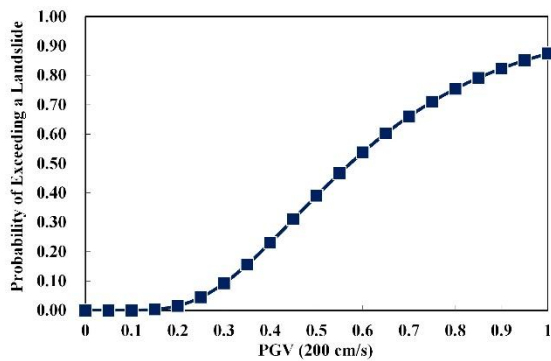


圖 3-31 G1A1S3 易損性曲線(PGV)

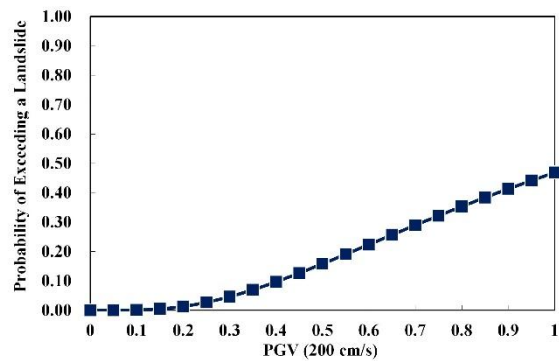


圖 3-32 G1A2S1 易損性曲線(PGV)

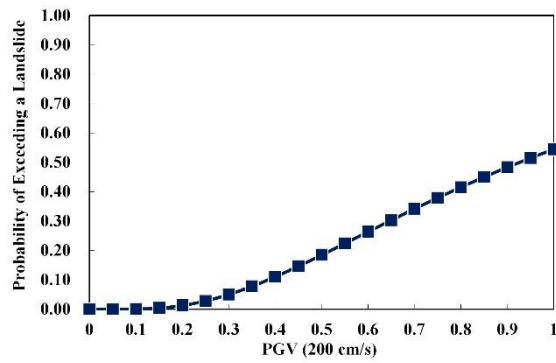


圖 3-33 G1A2S2 易損性曲線(PGV)

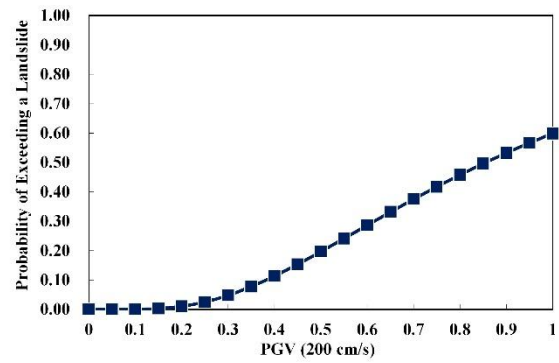


圖 3-34 G1A2S3 易損性曲線(PGV)

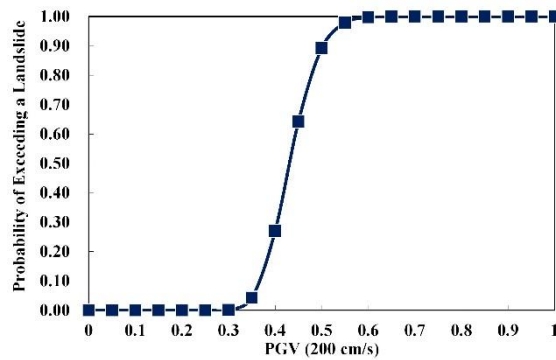


圖 3-35 G2A1S1 易損性曲線(PGV)

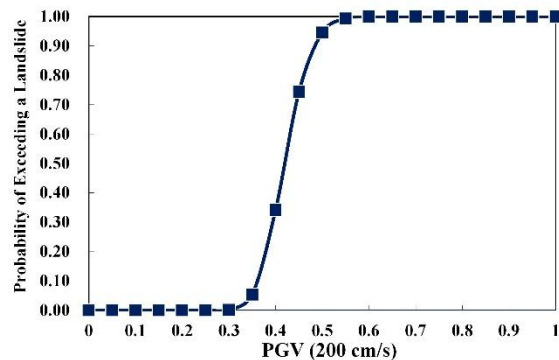


圖 3-36 G2A1S2 易損性曲線(PGV)

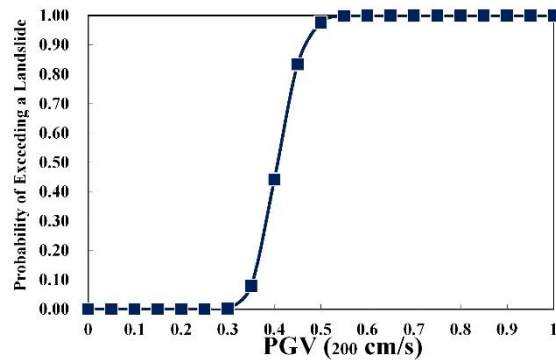


圖 3-37 G2A1S3 易損性曲線(PGV)

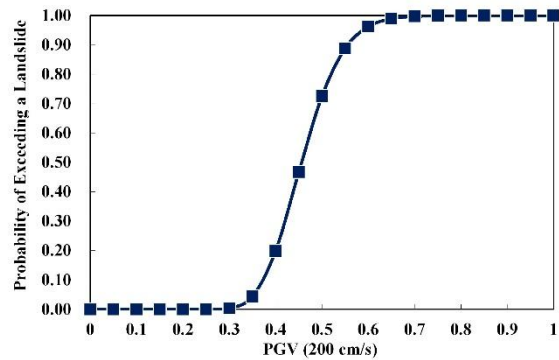


圖 3-38 G2A2S1 易損性曲線(PGV)

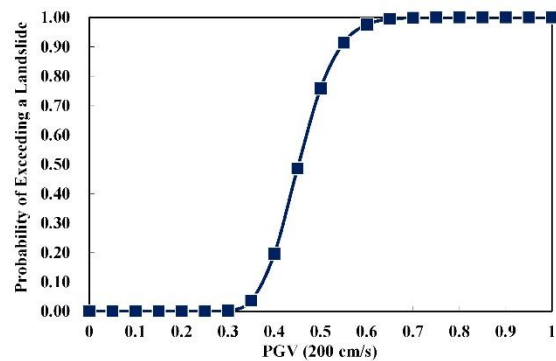


圖 3-39 G2A2S2 易損性曲線(PGV)

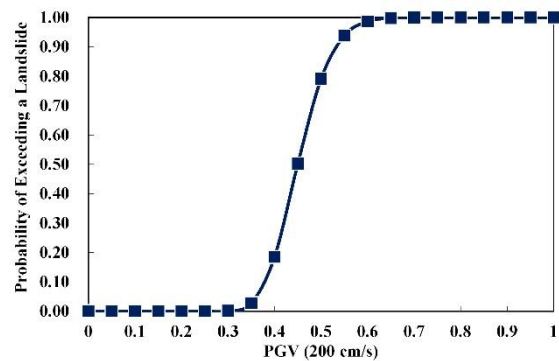


圖 3-40 G2A2S3 易損性曲線(PGV)

第四章 震後不安定土砂評估資料庫與模式建立

第一節 地震早期評估模式

建立坡地易損性曲線可應用於地震之坡地崩塌評估，其目的是藉由建立致災誘因與崩塌的簡易關係，能夠快速地評估出災害的大致情況，而其系統化則有助於地震後短時間內進行地震早期評估，及時了解高震度區可能受災情況。對於實際地震之坡地崩塌評估考量二種情況，第一種情況是已知斷層的地震，第二種情況則是未知斷層的地震。前者由於斷層已知，故可由明確的斷層系統推估震度分布，進而評估可能災情，在災前亦可利用地震情境模擬作為震災準備方案。而未知斷層的地震則須依據氣象局即時地震速報的震度資料獲得震度資料後，再進行震後坡地崩塌評估。因此對於未知斷層的地震評估模式，更有賴於準確的地震觀測資料和震度推估模式。

在一般情況下，地震初期對於誘發斷層通常是未知的，甚至大多是目前未見露頭的盲斷層地震。因此，基於氣象局地震速報資料的地震早期評估通常是未知斷層的地震評估模式，待接收到更可靠的地震資料並輔以地質模式判斷後方能確定誘發斷層，再進行已知斷層地震評估模式，如圖 4-1 所示。因此，建立地震早期評估模式的關鍵要素是建立在良好的地震速報體系和強地動觀測系統，透過現今高速電腦及資通科技應用，在實際災情不可得的情況下，達到短時間內進行災損評估的目的。

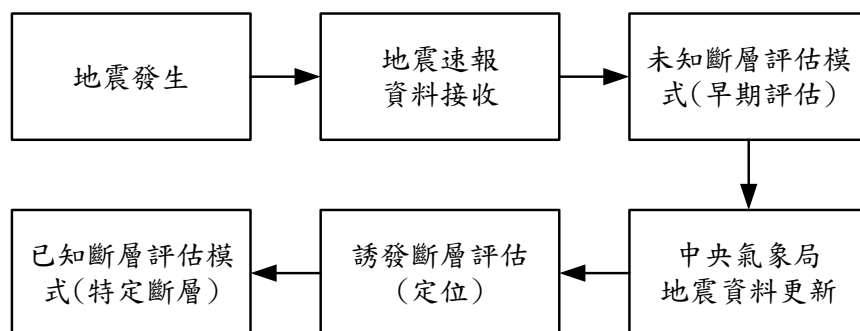


圖 4-1 地震評估模式

本計畫對於應用 BigGIS 系統建立震後地震評估，所期待的並非精確地計算出崩塌量體大小或是具體位置，而是在重大災害性地震後快速地得到可能發生災害的高風險地區或相對嚴重地區，使能夠在災害早期進行應變作為和救災資源有效地利用。坡地易損性模式提供了對於地震誘發坡地災害能夠及時評估的解決方法，其核心技術即是坡地易損性分析，由於易損性分析係機率化評估，因此在實際應用層面可進行災損評估、風險估計等分析。另一方面，台灣具有全球密度最高的強地動觀測網（平均每 5 平方公里一個測站），藉由地震網觀測定位出地震震央位置及深度，在震後數分鐘內即可估計出全國各地震度，這樣的地震速報體系使得發展地震早期評估模式具有良好的基礎條件。除此之外，平時整備中已知斷層模式仍可做為災前減災規劃或情境模擬的工具，了解斷層可能帶來的危害與風險，及早進行相關震前準備和預估可能的防救災資源。也就是說，對於災害的平時減災、前期整備、災中應變皆可利用這個模式，提供一個具備科學基礎的可靠依據。

由於震後坡地崩塌評估之坡向敏感因子是與斷層位置相關的，對應不同目標斷層或震央時坡面類型將可能不同，因此影響崩塌易損分析的結果。這表示在進行震後坡地崩塌評估時，坡面單元分類因子中的坡向敏感度因子具備變動條件，進行震後崩塌評估時不同震央位置計算之坡地分類亦不相同，這是易損性模式的特點。若已知震央或斷層位置及其對應之坡面崩塌評估資料庫，即可得知坡面單元對應的坡向敏感度分類進行分析。然而，在實際地震時斷層未知的情況，若每次地震皆需重新進行坡地分類，將大幅降低震後坡地崩塌早期評估的效率。

對此問題，本計畫發展防護斷層模式 (Defence Fault Model)，應用於 BigGIS 地震早期評估模組，可將評估流程更簡化，有利於系統開發時程與快速評估應用，實際應用可利用 NCDR 即時地震網格化等震度資料 (Real-time Seismic Gridded Iseismicity Data; RSG) 資料進行坡地崩塌快速評估。

第二節 基於地震速報之快速評估 (防護斷層模式)

在地震初期，氣象局藉由全國之地震測站資料 (地震速報)，可快速推估包括震央位置、地震規模和深度等震源參數，因此地震速報通常僅就震央位置、地震規模、深度和震區 (由測站判定) 予以公布，地表震度空間推估完成後即可進行坡地崩塌之地震早期評估。本計畫發展之防護斷層模式如所圖 4-2 示，係以 20 條斷層之震源分區資料庫做為崩塌評估基礎資料庫，20 條斷層之坡地崩塌評估基礎資料庫對於震後坡地崩塌早期評估之精度與系統效益將有效提升。防護斷層模式在進行地震早期評估時無須如區域震源模式般需要震央位置資訊，而僅需氣象局之全域地表震度資料即可，不僅可提升評估效率，相較區域震源模式可更為簡化且快速。

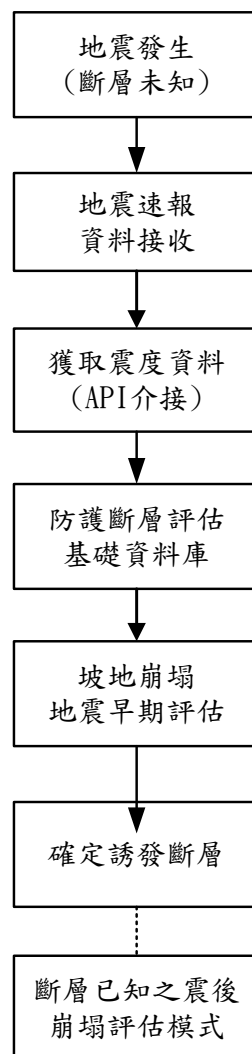


圖 4-2 基於防護斷層之坡地崩塌評估模式

第三節 防護斷層模式簡介

一、防護斷層之選擇

為了提升地震早期評估的效率，防護斷層模式係以斷層作為數個集水區之防護對象，並分別評估建置每條防護斷層之震源分區資料庫，再整併為全台之坡地崩塌評估資料庫。因此，在進行地震早期評估時無需再如區域震源模式般調用不同北中南東區域之資料庫，而僅需使用一個資料庫即可。此外，由於實際地震中高震度區域其實範圍並不大，因此以斷層作為集水區之防護對象，不僅可藉此提升評估效率，亦可更準確的將未知斷層地震鎖定再一定範圍內，雖然仍會產生一定之誤差，但相較區域震源模式將可更為快速且準確。

防護斷層模式首要考慮未來可能發生的地震是與既有活動斷層是高度相關的，因此活動斷層的位置必需優先考慮，目前地礦中心公布之 36 條活動斷層分布 (2021 版)，圖 4-3 所示。由於這些斷層皆可能具有地動潛勢，因此必須優先考慮。然而活動斷層雖具有地動潛勢，但其於未來某個活動週期內之最大可能地震規模和發生機率卻會因斷層活動歷史和週期特性不同而有相當之差異。此外，由本研究過去之坡地崩塌評估分析經驗可知，震後誘發之坡地崩塌需有一定程度之地表震動強度才會發生，因此地震規模不大之地震，未必會有達到門檻值之高震度區域，即無法誘發坡地崩塌評估，這表示並非每條活動斷層都需要考慮為防護斷層。

目前台灣地震模型團隊 (Taiwan Earthquake Model; TEM) 完成之地震危害度分析 (2021 年版) 係以 44 條構造斷層進行分析，而非地礦中心公布之 36 條活斷層帶，分析顯示各構造斷層在 50 年再現期下具有不同之最大可能地震規模和發生機率，並可知各斷層最大可能地震規模差異極大，而地震規模將直接影響地表震動強度大小，也將影響坡地崩塌評估結果，而本計畫亦參考此地震危害度分析成果應用於防護斷層之選擇。

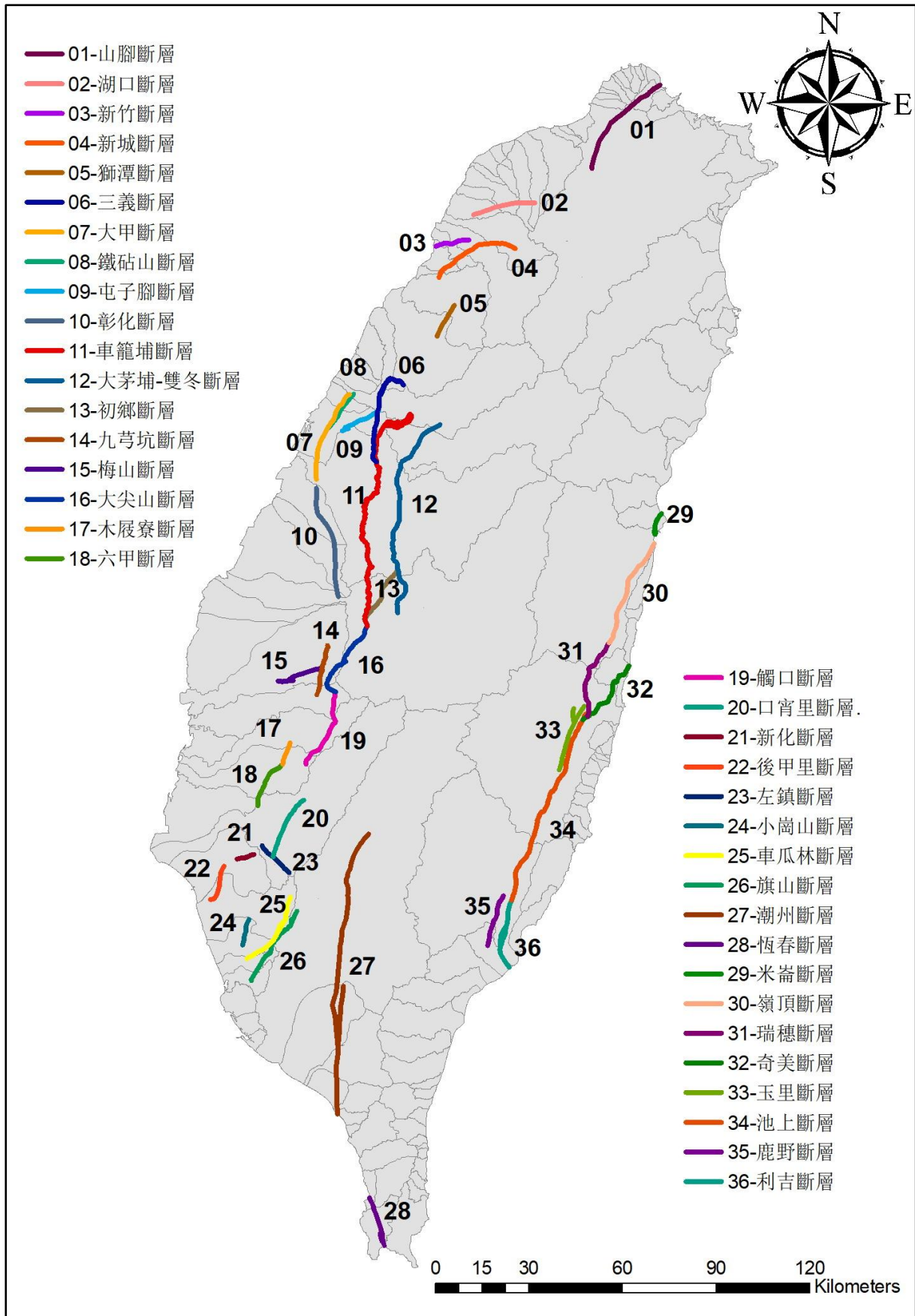


圖 4-3 台灣活動斷層分布(2021 年版)

二、防護斷層之震源分區

由於台灣斷層帶密集，防護斷層模式係以各河川流域為標的，設定各河川流域之防護斷層再建置其崩塌評估基礎資料庫，如此不僅可細化坡地崩塌評估基礎資料庫，對於應用於 BigGIS 震後坡地崩塌早期評估之精度與系統效益亦將有效提升。各河川流域之防護斷層選擇首先係以跨越或鄰近斷層做為初選條件，並再適當考慮其地動特性做為評估條件，綜合評估斷層對河川流域的風險。本計畫中防護斷層之選擇則主要以地礦中心公布之活動斷層帶為主，而當地礦中心地震危害度分析資料不足時，則參考台灣地震模型之構造地震危害度分析成果，以利進行防護斷層選定。

防護斷層選擇的危害因子根據可蒐集調查之代表性資料和前人研究成果進行分析，分為斷層物性因子與特徵因子，物性因子包括集水區與斷層距離、斷層走向、斷層長度等基本因子，特徵因子係經由進一步研究分析所得之斷層特徵，包括最大可能規模、未來 50 年發生規模 6.5 以上機率、未來 50 年台灣孕震構造之發震機率、未來 50 年地表震度 PGA 分布等七項因子。

由各河川流域之防護斷層分析可知，雖然全台河川流域達到 136 個，但許多比鄰流域之防護斷層是相同的，這是由於危害較高之斷層在鄰近河川流域自然也具較高風險，因此比鄰之河川流域選出之防護斷層基本具一致性，所以實際上需建置之崩塌評估基礎資料庫即可減少許多，最終自然形成之防護斷層為 20 條活斷層，如此即有助於降低需要建置之資料庫數量，又能突顯區域斷層的重要性，提升崩塌評估之精度。此外，相同防護斷層之集水區可自然形成各防護斷層之震源分區範圍，如圖 4-4 所示即為細化之震源分區。

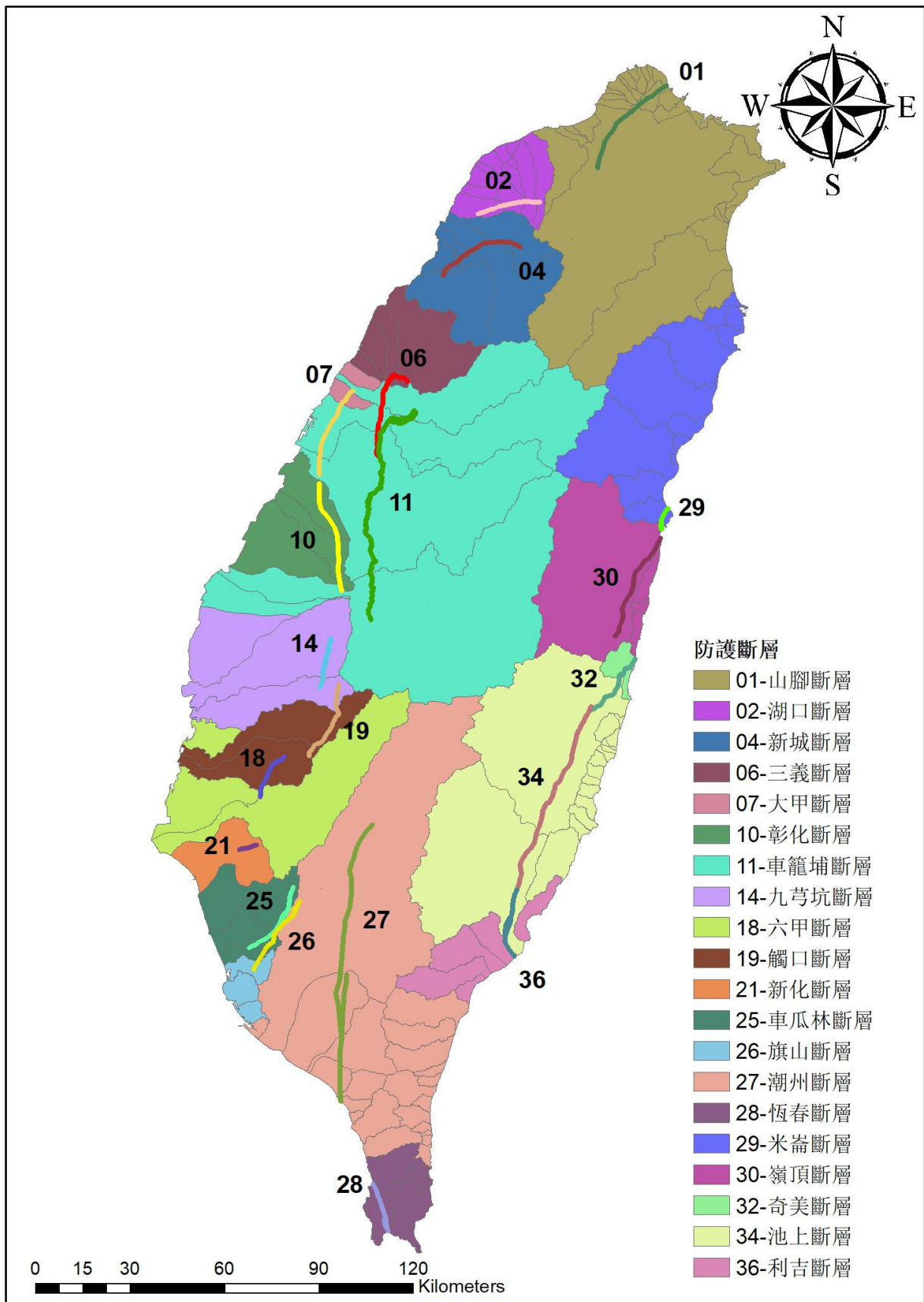


圖 4-4 防護斷層模式之震源分區

第四節 防護斷層模式之坡面單元評估資料庫

一、全台坡面單元資料庫

崩塌危害評估模式係以坡面單元為評估單元，為了能夠有效地進行坡地崩塌評估工作，需要建置全台之坡面單元及完整的地文因子資料庫，以坡面單元為基礎的資料庫須考慮地文因子、致災因子等，由於各式資料乃至於震度資料皆為網格式資料，因此還需將網格資料庫與坡面單元資料庫予以介接，固定編碼及位置。本研究採用地礦中心已繪製完成的全台坡面單元成果作為資料庫建置基礎，並以此為基礎進行坡面單元之地文分類屬性定義。各類地文因子所需基礎資料如下概述：

1. 地質因子：地質分類 (100m×100m)；
2. 高程因子：數值高程模型 DEM (20m×20m)；
3. 坡度因子：數值高程模型 DEM (20m×20m)；
4. 坡向因子：數值高程模型 DEM (20m×20m)；
5. 斷層因子：全台斷層圖資；
6. 順向坡因子：全台順向坡圖資。

上述 1~4 的基礎資料皆是以網格型資料建立，可基於這些資料計算坡面單元之地質分類 (G)、坡向敏感因子 (A)、坡度分類 (S)。此外，坡地崩塌評估基礎資料庫與斷層帶相關，不同斷層對坡面之方位不同因此其影響不同，必須逐一建置對應斷層之坡地崩塌評估基礎資料庫。本計畫以地礦中心繪製之全台坡面單元圖資為依據，該圖資係建置更新於民國 108 年，係根據 20m-DEM 所劃定，並以全台縣市為區塊獨立劃分坡面單元後再行整併。本計畫根據各縣市之坡面單元資料，重新整併為以河川主流為單元的坡面單元資料庫，集水區則是民國 110 年農村水保署(原水保局)發布之新版集水區界。如所圖 4-5 示，可知坡面單元涵蓋全台 136 個河川流域中的 127 個主要流域，其中未劃定坡面單元的河川流域有 9 個，分別是富林溪流域、大

堀溪流域、觀音溪流域、新屋溪流域、福興溪排水流域、萬興排水幹線流域、新虎尾溪流域、舊虎尾溪流域以及龍宮溪流域，這些流域屬平原地帶，因此沒有繪製坡面單元的需求。

如所表 4-1 示，經河川主流逐一校對查驗，全台主要流域共計 143819 個坡面單元，佔全台面積 68.21%；數量最多的前三個分別是濁水溪流域(15773 個，佔流域面積 85.26%)、淡水河流域(14907 個，佔流域面積 83.07%)、高屏溪流域(14788 個，佔流域面積 75.60%)；數量最少的前三個分別是埔心溪流域(1 個，佔流域面積 0.04%)、後州溪流域(6 個，佔流域面積 11.20%)、將軍溪排水流域(8 個，佔流域面積 0.18%)。

表 4-1 全國各河川流域坡面單元劃定基礎資料

編號	主流名稱	主流總面積 (km ²)	坡面單元總面積 (km ²)	坡面單元面積 占比(%)	坡面單元數量
1	礮溪	49.490	42.035	84.94	162
2	小坑溪	15.544	13.809	88.83	49
3	乾華溪	11.512	10.382	90.18	37
4	石門溪	8.760	8.096	92.42	31
5	老梅溪	19.331	17.675	91.43	84
6	楓林溪	9.911	6.915	69.77	44
7	埔坪溪	14.813	9.415	63.56	47
8	八蓮溪	15.171	10.911	71.92	44
9	大屯溪	28.384	18.372	64.73	93
10	後州溪	7.173	0.803	11.20	6
11	興仁溪	13.651	3.672	26.90	21
12	林子溪	25.857	11.848	45.82	50
13	淡水河	2734.058	2271.191	83.07	14907
14	水仙溪	35.812	22.604	63.12	132
15	寶斗溪	9.288	6.422	69.15	48
16	林口溪	22.202	11.056	49.80	62
17	南崁溪	197.559	46.599	23.59	463
18	埔心溪	131.397	0.056	0.04	1

表 4-1 全國各河川流域坡面單元劃定基礎資料

編號	主流名稱	主流總面積 (km ²)	坡面單元總面積 (km ²)	坡面單元面積 占比(%)	坡面單元數量
19	老街溪	115.245	5.426	4.71	31
20	富林溪	20.427	0.00	0.00	0
21	大堀溪	54.158	0.00	0.00	0
22	觀音溪	32.544	0.00	0.00	0
23	新屋溪	23.521	0.00	0.00	0
24	社子溪	98.388	10.451	10.62	77
25	福興溪排水	41.397	0.00	0.00	0
26	新豐溪	98.450	15.467	15.71	115
27	鳳山溪	256.325	174.553	68.10	1358
28	頭前溪	567.478	451.619	79.58	2250
29	客雅溪排水	62.015	30.681	49.47	347
30	鹽港溪排水	64.723	41.175	63.62	510
31	新港溪	13.989	1.019	7.29	27
32	中港溪	450.285	357.024	79.29	2660
33	後龍溪	558.160	438.477	78.56	3111
34	西湖溪	121.248	81.039	66.84	704
35	通霄溪	96.108	61.726	64.23	584
36	苑裡溪	41.483	21.510	51.85	230
37	房裡溪	57.409	9.111	15.87	91
38	大安溪	769.192	669.532	87.04	3458
39	溫寮溪	63.848	1.778	2.79	23
40	大甲溪	1404.333	1088.772	77.53	6552
41	烏溪	2054.711	1378.491	67.09	9001
42	洋仔厝溪	248.795	33.802	13.59	440
43	員林大排水	226.915	24.131	10.63	214
44	萬興排水幹線	428.877	0.00	0.00	0
45	濁水溪	3167.481	2700.600	85.26	15773
46	新虎尾溪	237.484	0.00	0.00	0
47	舊虎尾溪	449.025	0.00	0.00	0
48	北港溪	773.386	123.157	15.92	1178

表 4-1 全國各河川流域坡面單元劃定基礎資料

編號	主流名稱	主流總面積 (km ²)	坡面單元總面積 (km ²)	坡面單元面積 占比(%)	坡面單元數量
49	朴子溪	418.973	96.799	23.10	1171
50	龍宮溪	121.574	0.00	0.00	0.00
51	八掌溪	463.433	187.784	40.52	1937
52	急水溪	410.720	127.073	30.94	1845
53	將軍溪排水	372.706	0.667	0.18	8
54	曾文溪	1253.720	917.366	73.17	8473
55	鹽水溪	404.471	64.070	15.84	1103
56	二仁溪	413.212	144.348	34.93	2317
57	阿公店溪	155.405	24.463	15.74	409
58	典寶溪排水	83.717	12.059	14.40	221
59	後勁溪	85.754	19.110	22.28	381
60	愛河	85.686	12.694	14.81	55
61	前鎮河	45.534	1.614	3.54	42
62	鹽水港溪	26.331	1.630	6.19	27
63	高屏溪	3318.393	2508.579	75.60	14788
64	東港溪	477.238	81.899	17.16	465
65	林邊溪	316.326	267.464	84.55	1048
66	北勢溪	95.057	15.372	16.17	84
67	率芒溪	91.742	86.192	93.95	400
68	南湖溪	31.976	26.966	84.33	158
69	十里溪	11.221	10.606	94.52	52
70	枋山溪	144.250	136.179	94.40	681
71	楓港溪	110.554	102.537	92.75	606
72	石盤溪	29.581	25.515	86.26	162
73	四重溪	130.660	112.492	86.10	721
74	保力溪	125.346	65.408	52.18	498
75	港口溪	179.165	148.684	82.99	898
76	九棚溪	24.214	21.130	87.26	131
77	巷子溪	17.170	15.940	92.84	102
78	旭海溪	22.976	20.740	90.27	180

表 4-1 全國各河川流域坡面單元劃定基礎資料

編號	主流名稱	主流總面積 (km ²)	坡面單元總面積 (km ²)	坡面單元面積 占比(%)	坡面單元數量
79	乾溪	9.090	8.754	96.30	52
80	塔瓦溪	4.906	4.782	97.47	27
81	達仁溪	14.939	14.058	94.10	105
82	安朔溪	58.361	54.951	94.16	328
83	朝庸溪	21.053	18.385	87.33	101
84	大武溪	110.258	104.883	95.13	533
85	烏萬溪	21.319	20.283	95.14	116
86	津林溪	22.241	21.577	97.01	92
87	大竹溪	145.152	137.934	95.03	591
88	金崙溪	152.134	147.978	97.27	559
89	太麻里溪	230.215	216.297	93.95	844
90	文里溪	35.080	27.660	78.85	72
91	知本溪	199.463	179.988	90.24	748
92	利嘉溪	182.112	148.067	81.31	550
93	太平溪	109.955	48.303	43.93	197
94	卑南溪	1605.222	1430.746	89.13	5717
95	都蘭溪	94.354	69.101	73.24	404
96	馬武溪	191.746	171.960	89.68	1070
97	成功溪	23.283	19.153	82.26	111
98	富家溪	33.857	27.828	82.19	147
99	都威溪	30.133	25.975	86.20	147
100	沙灣溪	23.494	21.267	90.52	165
101	寧埔溪	14.057	12.908	91.83	91
102	竹湖溪	19.848	16.597	83.62	108
103	大德溪	19.860	18.836	94.85	114
104	長濱溪	11.123	6.130	55.11	41
105	城埔溪	7.342	4.771	64.98	26
106	馬海溪	5.305	3.599	67.84	21
107	山間溪	14.665	10.986	74.91	53
108	水母溪	42.109	42.069	99.91	192

表 4-1 全國各河川流域坡面單元劃定基礎資料

編號	主流名稱	主流總面積 (km ²)	坡面單元總面積 (km ²)	坡面單元面積 占比(%)	坡面單元數量
109	三富溪	5.374	3.769	70.12	21
110	秀姑巒溪	1795.278	1571.635	87.54	5891
111	豐濱溪	101.595	95.403	93.91	607
112	加蘭溪	35.165	33.039	93.96	118
113	蕃寮溪	16.259	15.717	96.67	77
114	水璉溪	54.195	49.945	92.16	227
115	花蓮溪	1551.298	1248.159	80.46	4947
116	美崙溪	92.080	47.518	51.61	154
117	三棧溪	136.310	125.698	92.21	467
118	立霧溪	633.108	614.112	97.00	2722
119	石公溪	24.201	23.090	95.41	70
120	大清水溪	62.867	59.089	93.99	240
121	和平溪	587.437	572.611	97.48	2256
122	南澳溪	328.618	310.438	94.47	1138
123	東澳溪	40.894	36.876	90.17	144
124	蘇澳溪	35.094	28.074	79.99	231
125	新城溪	58.480	44.666	76.38	303
126	冬山河	93.230	24.990	26.80	151
127	蘭陽溪	1014.986	767.069	75.57	4063
128	得子口溪	87.387	32.617	37.32	237
129	金面溪	7.998	6.005	75.08	43
130	福德溪	10.778	8.548	79.31	57
131	頭城溪	10.791	6.473	59.99	53
132	大溪川	58.219	52.057	89.42	343
133	雙溪	143.828	131.445	91.39	1024
134	尖山腳溪	61.278	53.279	86.95	487
135	瑪鍊溪	58.353	49.907	85.53	357
136	員潭溪	31.517	22.936	72.77	91
合計		36003.707	24557.766	68.21	143819

資料來源：本研究整理

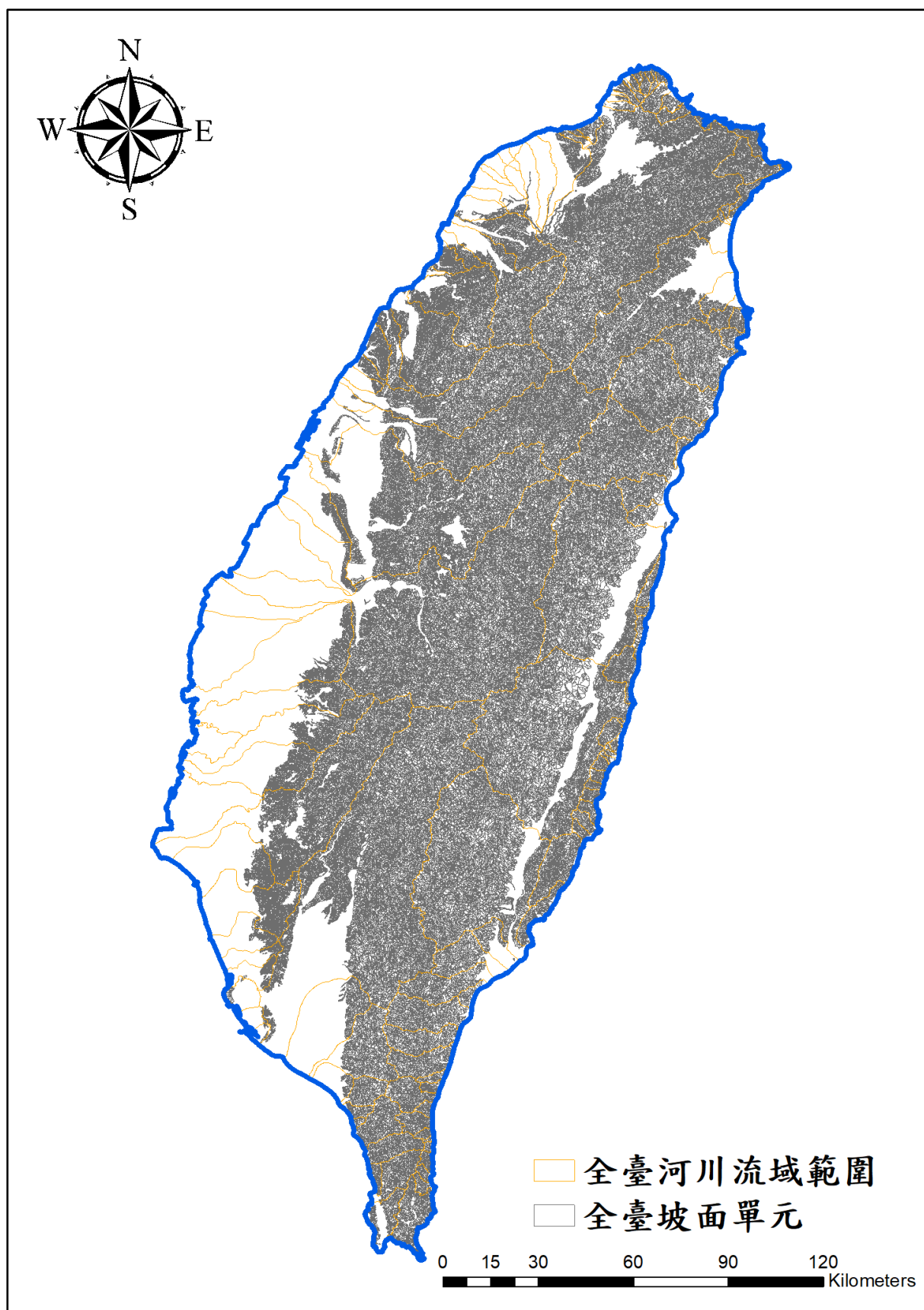


圖 4-5 地礦中心繪製之全臺各集水區坡面單元分布

二、坡面單元資料庫編碼

坡面單元資料庫的一個重要目的，即是便於未來能夠進行系統化的資料庫運算；同時，也必須是一個具有穩定的資料庫結構型態的數值資料。為了能夠達到這個目的，本研究將全台坡面單元重新進行資料庫分類整理，並賦予固定編碼和因子定義，以便於未來應用流通。此外在 BigGIS 系統的整合中，借助固定編碼資料，可利於資料庫的運算及製圖。

如表 4-2 所示，坡面單元編碼為 12 位 string 格式，其中包含河川主流、集水區、坡面單元等資訊，其中河川主流和集水區依全國統一規定編碼，坡面單元編碼由本研究自行依序編定。坡面單元完整編碼以【河川主流】+【集水區】+【坡面單元】的方式組合成 12 位之 string 格式。坡面單元編碼具坡面集水區資訊且是唯一的身分標識，未來將可依此編碼進行相關資料庫關聯運算，並可便於如水利署等相關單位的資料流通使用。

表 4-2 坡面單元編碼

欄位名稱	定義
【BASIN_ID】	河川代碼 4 碼
【BASIN_NAME】	主流名稱
【WS_ID】	集水區代碼 7 碼(河川代碼 4 碼+集水區 3 碼)
【WS_NAME】	集水區名稱
【SLOPEID】	坡面單元 5 碼
【SLOPECODE】	坡面單元完整編碼，共 12 碼

資料來源：本研究整理

三、坡地崩塌評估基礎資料庫

根據各河川流域防護斷層分析結果，基於防護斷層模式之坡地崩塌評估基礎資料庫，內容包括地質、坡度、坡向、順向坡、斷層方位等地文條件屬性，並針對各防護斷層進行全台坡面單元屬性分析，擴充坡地崩塌評估基礎資料庫，作為震後坡地崩塌早期評估之基礎。

崩塌評估基礎資料庫之坡面單元屬性係結合各因子資料及斷層特性描述某類型坡面單元之易損特徵，各斷層由於對坡面單元的坡向敏感度不同，因此須要建立對應的評估基礎資料庫，本計畫中防護斷層模式納入 20 條斷層的坡向敏感因子特徵，最後並整併為單一資料庫，以提升系統評估效率。

(一)地質因子

地質因子分析方法如前節所述，全台坡面單元地質因子係以李錫堤等人 (Lee *et al.*, 2001) 之地質分類，由硬至軟依序分為 B、C、D、E 四類。各集水區坡面單元地質因子以比例法決定（多數法則），少數坡面單元地質無法以比例法決定時則採用參考地質，即是以相鄰坡面單元地質來決定，其中 B、C 類地質為較主要之地質，D 類地質則較少，E 類地質則無。

進一步地，坡面單元地質分類即依據前述之分類方法予以決定，各類坡面之地質被分類為 G1、G2 二類，其中 G1 類 99548 個坡面，G2 類 42139 個坡面，共計 141687 個坡面。由於目前坡地易損性曲線並無 D 類地質，因此坡面單元地質因子屬 D 類地質則被歸屬於不適用地質 (N/A)，共計有 2132 個坡面，在震後崩塌分析中不作評估。大部分坡面單元仍屬有效地質，僅少數坡面單元不適用，對整體坡面評估影響較小。

(二)坡向敏感度

在坡向敏感度分析方面，由於本因子與斷層方位相關，根據坡面單元對各斷層帶的方位不同將具有不同的坡向敏感度。坡向敏感度分析方法如前述，其中包括幾個重要因子，包括坡向因子、斷層方位角、順向坡因子等綜

合考量。首先，各河川流域坡面單元坡向因子利用 DEM 資料套取坡面單元最高最低點座標後予以計算坡面方向；斷層方位角則選取各防護斷層計算各坡面單元到斷層的最短距離相應位置，並計算各防護斷層方位角；坡面方位角（坡向）與斷層方位角之夾角即為各防護斷層夾角，表示坡面方位角和震波方位角之關係。坡向敏感度還須考量順向坡因子，本計畫以坡面單元套疊分析全國順向坡圖資。坡面單元屬順向坡則被歸類為 A1 類弱面，共計 28864 個，佔總體坡面約 20.07%。

坡面單元坡向敏感度依據前述之分類方法予以決定，各類坡面之坡向敏感度被分類為 A1、A2 二類，其中 A1 類 50582 個坡面，A2 類 93230 個坡面。由於存在平坡坡面，因此坡面單元坡向敏感度存在不適用坡面 (N/A)，在震後崩塌分析中不作評估。大部分坡面單元仍屬有效地質，僅烏溪流域 4 個、濁水溪流域 2 個和曾文溪流域 1 個等 7 個坡面單元不適用，對整體評估影響不大。

(三)坡度分級

坡度分級分類方法如前節所述，坡面單元的坡度分級參考水土保持技術規範 (2023) 坡度分級定義，將坡度自五級坡之上下界簡化為三個分類，定義為 S1 (緩坡)、S2 (中坡) 以及 S3 (陡坡)。各河川流域坡面單元坡度分級以坡面斜率法決定，利用 DEM 套取高程後與以計算。進一步地，坡面單元坡度分類即依據前述之分類方法予以決定，各類坡面之坡度被分類為 S1、S2、S3 二類，其中 S1 類 53619 個坡面，S2 類 35111 個坡面，S3 類 43387 個坡面。由於目前坡地易損性曲線僅涵蓋技術規範三~七級坡，一、二級坡和平坡坡面則被歸屬於不適用地質 (N/A)，共計有 11702 個坡面。在後續分析中將不作評估，大部分坡面單元仍屬有效地質，僅少數坡面單元不適用，約佔 8%。

(四)坡面單元分類

完成前述地質、坡向敏感度、坡度等坡面單元屬性分析後，即可據以進行坡面單元分類，根據前述因子定義之分類將坡面環境因子分類屬性賦予固定編碼，以 G(地質)、A(坡向敏感)、S(坡度)之編號順序組合，其中包括地質二類、坡向敏感二類以及坡度三類，共計 12 種類型坡地組合。

由於坡面屬性分析中具有不適用坡面 (N/A)，這些坡面屬性組合後將形成無效坡面，經綜合分析後各河川流域坡面單元統計如表 4-3 所示，在 143819 個坡面中，有效坡面為 130619 個坡面，無效坡面數量為 13200 個坡面，有效坡面比例達 90.82%。少數的有效坡面比例較低，例如後州溪流域、埔心溪流域、楓林溪流域等低於 50%，主要原因是該類坡面原本的有效坡面數量較少，因此比例較低。綜上所述，後續坡面單元評估實際數量為 130619 個坡面，選定之斷層帶不影響坡面單元評估之數量，各區之崩塌評估基礎資料庫亦不影響坡面單元評估之數量。

防護斷層模式之全台河川流域坡面分類結果表 4-4 及表 4-5 所示，各河川流域中各類坡面單元總計 130619 個，其中 G1 類型的坡面共 98061 個，其中 G1A1S1 類 11530 個、G1A1S2 類 13185 個、G1A1S3 類 17412 個、G1A2S1 類 15121 個、G1A2S2 類 17116 個、G1A2S3 類 23697 個；G2 類型的坡面共 32558 個，其中 G2A1S1 類 12598 個、G2A1S2 類 2224 個、G2A1S3 類 1059 個、G2A2S1 類 13184 個、G2A2S2 類 2370 個、G2A2S3 類 1123 個；前述以 G1A2S3 最多，G2A1S3 最少，各類坡面單元分布與區域震源模式差異不大，但也更均勻。各類坡面數量總和如表中最後一列所示。

表 4-3 各河川流域坡面單元有效數量統計

主流編號	有效數量	無效數量	有效比例	主流編號	有效數量	無效數量	有效比例
1	151	11	93.21%	25	-	-	-
2	27	22	55.10%	26	62	53	53.91%
3	25	12	67.57%	27	1005	353	74.01%
4	8	23	25.81%	28	2107	143	93.64%
5	60	24	71.43%	29	210	137	60.52%
6	9	35	20.45%	30	207	303	40.59%
7	15	32	31.91%	31	6	21	22.22%
8	29	15	65.91%	32	2147	513	80.71%
9	36	57	38.71%	33	2764	347	88.85%
10	0	6	0.00%	34	392	312	55.68%
11	7	14	33.33%	35	297	287	50.86%
12	38	12	76.00%	36	75	155	32.61%
13	14300	607	95.93%	37	77	14	84.62%
14	94	38	71.21%	38	3376	82	97.63%
15	25	23	52.08%	39	20	3	86.96%
16	20	42	32.26%	40	6346	206	96.86%
17	222	241	47.95%	41	7995	1006	88.82%
18	0	1	0.00%	42	219	221	49.77%
19	16	15	51.61%	43	206	8	96.26%
20	-	-	-	44	-	-	-
21	-	-	-	45	15352	421	97.33%
22	-	-	-	46	-	-	-
23	-	-	-	47	-	-	-
24	27	50	35.06%	48	910	268	77.25%

表 4-3 各河川流域坡面單元有效數量統計

主流編號	有效數量	無效數量	有效比例	主流編號	有效數量	無效數量	有效比例
49	914	257	78.05%	70	670	11	98.38%
50	-	-	-	71	581	25	95.87%
51	1636	301	84.46%	72	149	13	91.98%
52	1530	315	82.93%	73	683	38	94.73%
53	5	3	62.50%	74	275	223	55.22%
54	7265	1208	85.74%	75	660	238	73.50%
55	553	550	50.14%	76	126	5	96.18%
56	1525	792	65.82%	77	87	15	85.29%
57	255	154	62.35%	78	169	11	93.89%
58	152	69	68.78%	79	47	5	90.38%
59	256	125	67.19%	80	27	0	100.00%
60	40	15	72.73%	81	104	1	99.05%
61	12	30	28.57%	82	321	7	97.87%
62	14	13	51.85%	83	92	9	91.09%
63	13708	1080	92.70%	84	524	9	98.31%
64	436	29	93.76%	85	113	3	97.41%
65	1022	26	97.52%	86	92	0	100.00%
66	66	18	78.57%	87	588	3	99.49%
67	398	2	99.50%	88	552	7	98.75%
68	155	3	98.10%	89	837	7	99.17%
69	52	0	100.00%	90	66	6	91.67%
91	739	9	98.80%	112	113	5	95.76%
92	544	6	98.91%	113	74	3	96.10%
93	171	26	86.80%	114	219	8	96.48%

表 4-3 各河川流域坡面單元有效數量統計

主流編號	有效數量	無效數量	有效比例	主流編號	有效數量	無效數量	有效比例
94	5536	181	96.83%	115	4841	106	97.86%
95	304	100	75.25%	116	143	11	92.86%
96	931	139	87.01%	117	463	4	99.14%
97	80	31	72.07%	118	2707	15	99.45%
98	128	19	87.07%	119	69	1	98.57%
99	143	4	97.28%	120	238	2	99.17%
100	154	11	93.33%	121	2246	10	99.56%
101	79	12	86.81%	122	1133	5	99.56%
102	100	8	92.59%	123	139	5	96.53%
103	103	11	90.35%	124	225	6	97.40%
104	27	14	65.85%	125	299	4	98.68%
105	10	16	38.46%	126	133	18	88.08%
106	12	9	57.14%	127	3900	163	95.99%
107	38	15	71.70%	128	207	30	87.34%
108	188	4	97.92%	129	38	5	88.37%
109	20	1	95.24%	130	56	1	98.25%
110	5612	279	95.26%	131	53	0	100.00%
111	602	5	99.18%	132	335	8	97.67%
133	959	65	93.65%	135	338	19	94.68%
134	454	33	93.22%	136	77	14	84.62%
				合計	130619	13200	90.82%

資料來源：本研究整理

表 4-4 防護斷層模式各河川流域坡面單元類型之數量統計-G1 類

編號	主流名稱	G1A1S1	G1A1S2	G1A1S3	G1A2S1	G1A2S2	G1A2S3	合計
1	礪溪	11	10	4	37	9	4	75
2	小坑溪	1	0	0	1	0	0	2
3	乾華溪	0	1	0	3	1	0	5
4	石門溪	0	0	0	0	0	0	0
5	老梅溪	18	5	1	10	4	1	39
6	楓林溪	4	0	0	0	0	0	4
7	埔坪溪	9	0	0	6	0	0	15
8	八蓮溪	11	3	0	11	4	0	29
9	大屯溪	6	10	0	4	1	2	23
10	後州溪	0	0	0	0	0	0	0
11	興仁溪	1	0	0	2	0	0	3
12	林子溪	6	4	0	3	5	0	18
13	淡水河	2283	1519	1075	3877	2717	1715	13186
14	水仙溪	2	0	0	1	0	0	3
15	寶斗溪	0	0	0	0	0	0	0
16	林口溪	0	0	0	0	0	0	0
17	南崁溪	0	0	0	4	0	0	4
18	埔心溪	0	0	0	0	0	0	0
19	老街溪	0	0	0	0	0	0	0
20	富林溪	0	0	0	0	0	0	0
21	大堀溪	0	0	0	0	0	0	0
22	觀音溪	0	0	0	0	0	0	0
23	新屋溪	0	0	0	0	0	0	0
24	社子溪	0	0	0	0	0	0	0
25	福興溪排水	0	0	0	0	0	0	0
26	新豐溪	0	0	0	0	0	0	0
27	鳳山溪	252	73	18	84	15	4	446
28	頭前溪	273	480	399	134	246	192	1724

表 4-4 防護斷層模式各河川流域坡面單元類型之數量統計-G1 類

編號	主流名稱	G1A1S1	G1A1S2	G1A1S3	G1A2S1	G1A2S2	G1A2S3	合計
29	客雅溪排水	0	0	0	0	0	0	0
30	鹽港溪排水	0	0	0	0	0	0	0
31	新港溪	0	0	0	0	0	0	0
32	中港溪	320	195	102	201	143	93	1054
33	後龍溪	600	322	172	384	238	157	1873
34	西湖溪	33	7	0	48	14	2	104
35	通霄溪	0	0	0	0	0	0	0
36	苑裡溪	0	0	0	0	0	0	0
37	房裡溪	0	0	0	0	0	0	0
38	大安溪	247	333	722	261	386	849	2798
39	溫寮溪	0	0	0	0	0	0	0
40	大甲溪	378	631	1667	322	662	1599	5259
41	烏溪	329	545	911	329	483	837	3434
42	洋仔厝溪	0	0	0	0	0	0	0
43	員林大排水	0	0	0	0	0	0	0
44	萬興排水幹線	0	0	0	0	0	0	0
45	濁水溪	945	1757	3192	1159	2136	4230	13419
46	新虎尾溪	0	0	0	0	0	0	0
47	舊虎尾溪	0	0	0	0	0	0	0
48	北港溪	40	18	19	19	18	11	125
49	朴子溪	49	62	44	60	32	44	291
50	龍宮溪	0	0	0	0	0	0	0
51	八掌溪	200	169	92	148	137	84	830
52	急水溪	112	44	25	96	28	19	324
53	將軍溪排水	0	0	0	0	0	0	0
54	曾文溪	707	784	480	521	565	392	3449
55	鹽水溪	0	0	0	0	0	0	0
56	二仁溪	46	11	3	41	16	1	118

表 4-4 防護斷層模式各河川流域坡面單元類型之數量統計-G1 類

編號	主流名稱	G1A1S1	G1A1S2	G1A1S3	G1A2S1	G1A2S2	G1A2S3	合計
57	阿公店溪	19	0	0	11	0	1	31
58	典寶溪排水	0	0	0	4	0	0	4
59	後勁溪	0	0	0	0	0	0	0
60	愛河	1	0	0	0	0	0	1
61	前鎮河	0	0	0	0	0	0	0
62	鹽水港溪	0	0	0	0	0	0	0
63	高屏溪	1058	1538	2654	1613	2290	3409	12562
64	東港溪	42	45	35	119	120	59	420
65	林邊溪	50	72	88	156	306	328	1000
66	北勢溪	25	6	1	23	1	0	56
67	率芒溪	20	28	38	79	124	103	392
68	南湖溪	23	14	11	49	45	13	155
69	十里溪	9	4	0	26	10	2	51
70	枋山溪	83	93	29	147	200	78	630
71	楓港溪	149	52	10	204	75	16	506
72	石盤溪	25	13	4	63	26	6	137
73	四重溪	128	17	7	329	74	12	567
74	保力溪	53	4	0	96	10	0	163
75	港口溪	89	5	0	319	23	2	438
76	九棚溪	37	1	0	70	6	0	114
77	巷子溪	22	3	1	49	0	0	75
78	旭海溪	50	3	0	77	6	1	137
79	乾溪	8	2	1	18	1	1	31
80	塔瓦溪	7	1	0	11	4	0	23
81	達仁溪	23	1	1	52	9	0	86
82	安朔溪	34	15	3	158	37	4	251
83	朝庸溪	23	2	0	35	2	0	62
84	大武溪	43	44	10	133	153	86	469

表 4-4 防護斷層模式各河川流域坡面單元類型之數量統計-G1 類

編號	主流名稱	G1A1S1	G1A1S2	G1A1S3	G1A2S1	G1A2S2	G1A2S3	合計
85	烏萬溪	31	1	0	54	12	2	100
86	津林溪	15	4	1	37	23	4	84
87	大竹溪	37	73	23	120	164	120	537
88	金崙溪	25	88	82	80	118	150	543
89	太麻里溪	47	111	110	118	214	222	822
90	文里溪	4	7	4	26	17	1	59
91	知本溪	61	107	71	108	214	167	728
92	利嘉溪	24	40	66	56	149	203	538
93	太平溪	18	24	4	11	37	14	108
94	卑南溪	287	690	740	391	1064	1816	4988
95	都蘭溪	2	7	27	10	4	35	85
96	馬武溪	45	29	28	56	27	30	215
97	成功溪	3	2	15	0	2	10	32
98	富家溪	3	7	9	5	7	24	55
99	都威溪	0	10	14	6	16	22	68
100	沙灣溪	0	0	6	0	1	10	17
101	寧埔溪	0	0	5	0	0	1	6
102	竹湖溪	0	0	0	0	0	0	0
103	大德溪	0	0	4	0	0	5	9
104	長濱溪	0	0	2	0	0	3	5
105	城埔溪	0	0	4	0	0	0	4
106	馬海溪	0	0	0	0	0	5	5
107	山間溪	0	0	1	0	0	3	4
108	水母溪	12	10	15	20	19	24	100
109	三富溪	2	0	0	0	0	0	2
110	秀姑巒溪	388	740	1112	437	694	1371	4742
111	豐濱溪	13	3	4	27	12	9	68
112	加蘭溪	4	0	0	4	0	0	8

表 4-4 防護斷層模式各河川流域坡面單元類型之數量統計-G1 類

編號	主流名稱	G1A1S1	G1A1S2	G1A1S3	G1A2S1	G1A2S2	G1A2S3	合計
113	蕃寮溪	2	0	1	4	0	0	7
114	水璉溪	0	0	0	1	2	0	3
115	花蓮溪	217	460	968	305	745	1724	4419
116	美崙溪	0	4	37	5	25	64	135
117	三棧溪	4	33	122	6	52	239	456
118	立霧溪	92	296	664	85	373	1190	2700
119	石公溪	0	0	23	0	1	15	39
120	大清水溪	0	5	95	0	4	101	205
121	和平溪	178	353	455	168	422	629	2205
122	南澳溪	110	230	179	89	198	224	1030
123	東澳溪	5	18	29	6	12	28	98
124	蘇澳溪	23	24	12	19	35	10	123
125	新城溪	23	48	45	27	69	49	261
126	冬山河	16	26	8	10	14	7	81
127	蘭陽溪	433	625	547	456	713	746	3520
128	得子口溪	50	16	7	54	39	11	177
129	金面溪	2	3	1	18	9	2	35
130	福德溪	14	13	5	8	10	4	54
131	頭城溪	20	0	0	5	2	0	27
132	大溪川	56	45	16	56	52	14	239
133	雙溪	230	61	23	371	103	27	815
134	尖山腳溪	48	11	7	142	51	5	264
135	瑪鍊溪	72	13	2	97	8	0	192
136	員潭溪	10	2	0	16	1	0	29
合計		11530	13185	17412	15121	17116	23697	98061

資料來源：本研究整理

表 4-5 防護斷層模式各河川流域坡面單元類型之數量統計--G2 類

編號	主流名稱	G2A1S1	G2A1S2	G2A1S3	G2A2S1	G2A2S2	G2A2S3	合計
1	磺溪	15	6	3	36	15	1	76
2	小坑溪	8	0	0	17	0	0	25
3	乾華溪	8	0	0	12	0	0	20
4	石門溪	2	0	0	6	0	0	8
5	老梅溪	9	1	0	10	1	0	21
6	楓林溪	3	0	0	2	0	0	5
7	埔坪溪	0	0	0	0	0	0	0
8	八蓮溪	0	0	0	0	0	0	0
9	大屯溪	5	0	0	7	1	0	13
10	後州溪	0	0	0	0	0	0	0
11	興仁溪	1	0	0	3	0	0	4
12	林子溪	9	3	0	5	1	2	20
13	淡水河	332	29	10	648	76	19	1114
14	水仙溪	34	3	0	52	2	0	91
15	寶斗溪	6	0	0	18	1	0	25
16	林口溪	3	0	0	17	0	0	20
17	南崁溪	70	2	0	141	4	1	218
18	埔心溪	0	0	0	0	0	0	0
19	老街溪	9	0	0	7	0	0	16
20	富林溪	-	-	-	-	-	-	-
21	大堀溪	-	-	-	-	-	-	-
22	觀音溪	-	-	-	-	-	-	-
23	新屋溪	-	-	-	-	-	-	-
24	社子溪	3	0	0	23	1	0	27
25	福興溪排水	-	-	-	-	-	-	-
26	新豐溪	15	0	0	46	1	0	62
27	鳳山溪	159	2	2	387	8	1	559
28	頭前溪	111	17	1	225	26	3	383

表 4-5 防護斷層模式各河川流域坡面單元類型之數量統計--G2 類

編號	主流名稱	G2A1S1	G2A1S2	G2A1S3	G2A2S1	G2A2S2	G2A2S3	合計
29	客雅溪排水	73	3	0	128	6	0	210
30	鹽港溪排水	60	0	0	140	6	1	207
31	新港溪	0	0	0	6	0	0	6
32	中港溪	294	15	6	724	44	10	1093
33	後龍溪	243	21	8	525	72	22	891
34	西湖溪	92	3	1	183	7	2	288
35	通霄溪	73	3	1	217	3	0	297
36	苑裡溪	27	0	0	47	1	0	75
37	房裡溪	11	0	0	62	3	1	77
38	大安溪	170	32	18	284	48	26	578
39	溫寮溪	9	0	0	9	2	0	20
40	大甲溪	145	94	125	317	160	246	1087
41	烏溪	1281	314	104	2102	563	197	4561
42	洋仔厝溪	67	2	1	146	2	1	219
43	員林大排水	64	0	0	138	3	1	206
44	萬興排水幹線	-	-	-	-	-	-	-
45	濁水溪	448	139	96	730	318	202	1933
46	新虎尾溪	-	-	-	-	-	-	-
47	舊虎尾溪	-	-	-	-	-	-	-
48	北港溪	200	10	2	542	21	10	785
49	朴子溪	200	10	6	383	14	10	623
50	龍宮溪	-	-	-	-	-	-	-
51	八掌溪	213	41	21	451	49	31	806
52	急水溪	322	29	7	751	81	16	1206
53	將軍溪排水	1	0	0	4	0	0	5
54	曾文溪	993	135	34	2226	355	73	3816
55	鹽水溪	162	5	2	355	22	7	553
56	二仁溪	412	47	4	858	75	11	1407

表 4-5 防護斷層模式各河川流域坡面單元類型之數量統計--G2 類

編號	主流名稱	G2A1S1	G2A1S2	G2A1S3	G2A2S1	G2A2S2	G2A2S3	合計
57	阿公店溪	69	5	0	130	16	4	224
58	典寶溪排水	49	6	0	89	4	0	148
59	後勁溪	82	3	3	149	17	2	256
60	愛河	15	2	0	22	0	0	39
61	前鎮河	4	0	0	8	0	0	12
62	鹽水港溪	5	0	0	8	1	0	14
63	高屏溪	343	35	9	624	106	29	1146
64	東港溪	6	1	0	6	3	0	16
65	林邊溪	5	1	4	8	3	1	22
66	北勢溪	2	0	0	8	0	0	10
67	率芒溪	4	0	0	2	0	0	6
68	南湖溪	0	0	0	0	0	0	0
69	十里溪	0	0	0	0	1	0	1
70	枋山溪	9	9	1	19	1	1	40
71	楓港溪	22	7	1	34	9	2	75
72	石盤溪	6	0	0	5	0	1	12
73	四重溪	38	5	1	58	11	3	116
74	保力溪	45	1	0	62	4	0	112
75	港口溪	74	2	1	134	11	0	222
76	九棚溪	4	1	0	4	3	0	12
77	港子溪	3	0	0	7	2	0	12
78	旭海溪	6	0	0	22	3	1	32
79	乾溪	3	0	0	9	3	1	16
80	塔瓦溪	0	0	0	3	0	1	4
81	達仁溪	8	1	0	8	1	0	18
82	安朔溪	16	0	2	47	5	0	70
83	朝庸溪	9	0	0	19	2	0	30
84	大武溪	2	2	5	30	15	1	55

表 4-5 防護斷層模式各河川流域坡面單元類型之數量統計--G2 類

編號	主流名稱	G2A1S1	G2A1S2	G2A1S3	G2A2S1	G2A2S2	G2A2S3	合計
85	烏萬溪	4	1	0	7	1	0	13
86	津林溪	0	0	0	2	6	0	8
87	大竹溪	8	6	4	13	17	3	51
88	金崙溪	1	3	0	1	2	2	9
89	太麻里溪	2	2	0	2	8	1	15
90	文里溪	0	1	0	6	0	0	7
91	知本溪	1	2	2	5	0	1	11
92	利嘉溪	0	2	0	3	1	0	6
93	太平溪	16	0	0	42	4	1	63
94	卑南溪	130	21	2	327	56	12	548
95	都蘭溪	48	7	18	91	22	33	219
96	馬武溪	146	46	26	308	135	55	716
97	成功溪	6	6	1	26	6	3	48
98	富家溪	14	5	2	36	9	7	73
99	都威溪	9	1	2	46	12	5	75
100	沙灣溪	26	1	8	76	5	21	137
101	寧埔溪	5	4	1	49	4	10	73
102	竹湖溪	17	8	1	53	14	7	100
103	大德溪	14	3	6	53	9	9	94
104	長濱溪	8	0	1	5	1	7	22
105	城埔溪	0	1	0	1	2	2	6
106	馬海溪	1	0	2	3	1	0	7
107	山間溪	1	1	4	14	6	8	34
108	水母溪	15	6	2	25	23	17	88
109	三富溪	4	0	0	10	3	1	18
110	秀姑巒溪	188	71	26	391	130	64	870
111	豐濱溪	125	49	22	201	91	46	534
112	加蘭溪	21	3	3	56	18	4	105

表 4-5 防護斷層模式各河川流域坡面單元類型之數量統計--G2 類

編號	主流名稱	G2A1S1	G2A1S2	G2A1S3	G2A2S1	G2A2S2	G2A2S3	合計
113	蕃寮溪	13	1	2	46	4	1	67
114	水璉溪	41	16	14	91	30	24	216
115	花蓮溪	94	22	8	220	68	10	422
116	美崙溪	1	1	2	2	1	1	8
117	三棧溪	0	0	0	1	1	5	7
118	立霧溪	0	3	1	0	1	2	7
119	石公溪	0	1	11	0	1	17	30
120	大清水溪	0	0	5	1	5	22	33
121	和平溪	0	5	7	0	7	22	41
122	南澳溪	16	11	13	18	26	19	103
123	東澳溪	1	7	8	4	6	15	41
124	蘇澳溪	18	13	7	32	20	12	102
125	新城溪	8	5	2	17	6	0	38
126	冬山河	29	2	3	12	5	1	52
127	蘭陽溪	103	61	19	111	69	17	380
128	得子口溪	11	3	0	12	2	2	30
129	金面溪	1	0	0	1	1	0	3
130	福德溪	0	0	0	1	1	0	2
131	頭城溪	6	3	0	14	2	1	26
132	大溪川	14	12	8	42	18	2	96
133	雙溪	52	7	2	76	6	1	144
134	尖山腳溪	53	4	6	89	20	18	190
135	瑪鍊溪	44	4	0	84	14	0	146
136	員潭溪	8	0	0	37	3	0	48
合計		12598	2224	1059	13184	2370	1123	32558
G1/G2 總計		24128	15409	18471	28305	19486	24820	130619

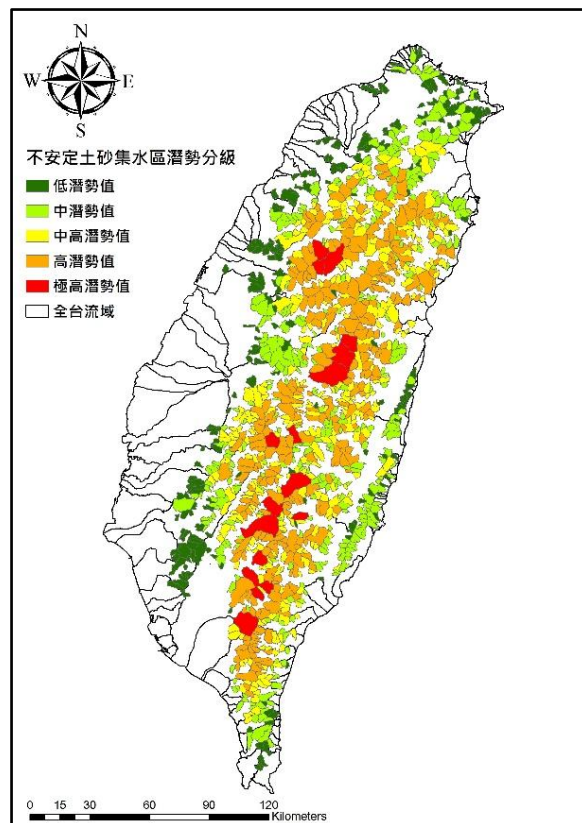
資料來源：本研究整理

第五節 震後不安定土砂評估資料庫建立和評估模式探討

2024 年 0403 花蓮地震案例可提供本研究震後不安定土砂災害評估模式建立之參考，尤其是 0403 震後造成土質鬆動引發多起坍方，震後一定降雨易發生崩塌或土石流，對於未來大規模地震後之土砂災害評估研究發展將有所助益。目前不安定土砂集水區潛勢之劃定成果，可結合坡地易損性分析進一步發展震後不安定土砂評估，在既有震後崩塌易損評估架構下，首先解決評估資料庫整合、尺度轉換和物理特性合理化等問題，以下說明之。

一、震後不安定土砂評估基礎資料庫

震後崩塌易損評估架構是以集水區中之坡面單元為評估基礎，因此同樣需要建立以集水區為單元之不安定土砂評估資料庫，探討其空間適配關係、空間關聯性、基本物理特性和資料庫架構。目前最新之不安定土砂集水區潛勢如圖 4-6 所示，全台共計 1218 處主要分布於中央山脈二側和東部海岸山脈，並根據不安定土砂潛勢值區分為低、中、中 high 和極高五個分級。



資料來源：農村發展與水土保持署 (2024)，本計畫重繪。

圖 4-6 113 年全臺 1218 處不安定土砂集水區潛勢

全台集水區範圍與不安定土砂潛勢區範圍比較如圖 4-7 所示，可知不安定土砂集水區潛勢之劃定是以比目前河川集水區 (839 集水區) 更小之集水區所劃定而成，其多數範圍與民國 100 年版之子集水區相符，亦經實際情況做修正。因此就空間範圍而言，目前之不安定土砂潛勢區版本不一定為整個 839 集水區，大多數潛勢區僅為目前 839 集水區之一部分，亦有整個集水區皆為潛勢區之集水區；就評估資料庫而言，二者整合預期會有一定難度，且檢視相關屬性資料尚未給予固定之編碼或特定名稱。

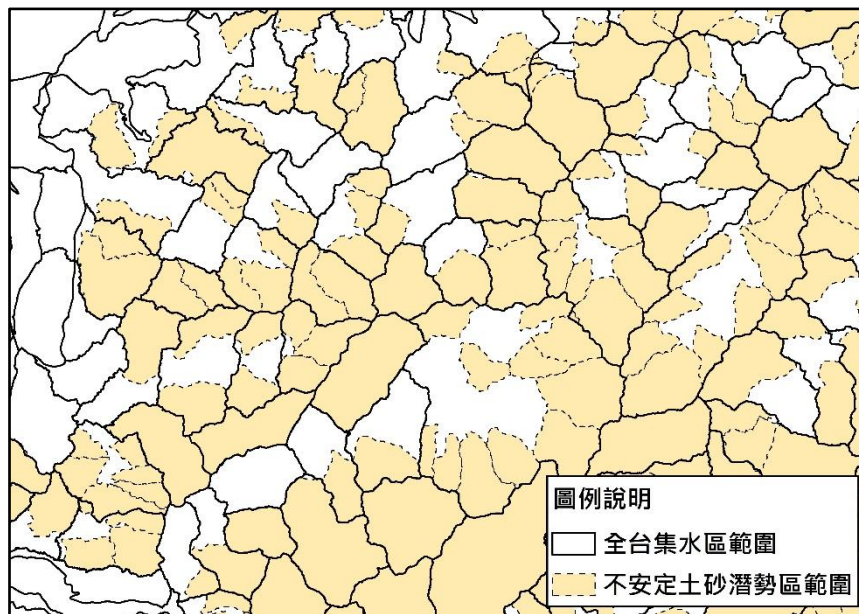


圖 4-7 全台集水區範圍與不安定土砂潛勢區範圍比較

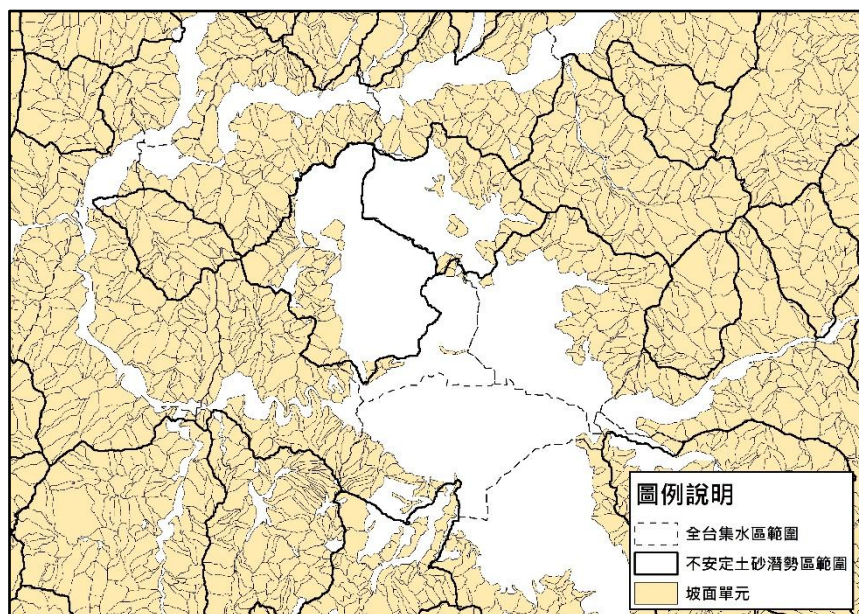


圖 4-8 不安定土砂潛勢區範圍與坡面單元比較

本計畫為達成研究目標，進一步將不安定土砂潛勢區範圍與本研究採用之坡面單元進行比較，如圖 4-8 所示。顯示坡面單元也不一定涵蓋整個不安定土砂潛勢區範圍，也就是說，單一不安定土砂潛勢區之範圍不一定全部有坡面單元（大部分全部還蓋）。因此在空間幾何適配度方面，後續模式建立及評估模型就必須注意：若以不安定土砂潛勢區作為評估對象，除了面積大小亦必須考慮其面積比例，避免產生權重不均的誤判情形。

由於不安定土砂集水區潛勢是根據不安定土砂潛勢值 (P 值) 計算而得，係基於 QPE 網格進行計算，因此 QPE 網格之空間關聯性亦需予以考慮。如圖 4-9 所示，由於 QPE 網格大小為 $1.3 \text{ km} \times 1.3 \text{ km}$ ，而坡面單元係不固定尺度，其面積大小介於 $0.11 \text{ ha} \sim 524.78 \text{ ha}$ ，因此大多數 QPE 網格將包含數個坡面單元，少數坡面單元包含數個 QPE 網格（最多 4 個 QPE 網格點），因此需要建立一個空間屬性規則，再以不安定土砂潛勢區關聯兩者建立不安定土砂潛勢區之空間資料庫，每個不安定土砂潛勢區（亦代表集水區）即可作為唯一的 QPE 網格屬性和坡面單元屬性之基本尺度，這也表示在震後不安定土砂潛勢分析方法上，仍需考慮坡面單元不定尺度的影響，使後續潛勢值計算模式之尺度保持一致。

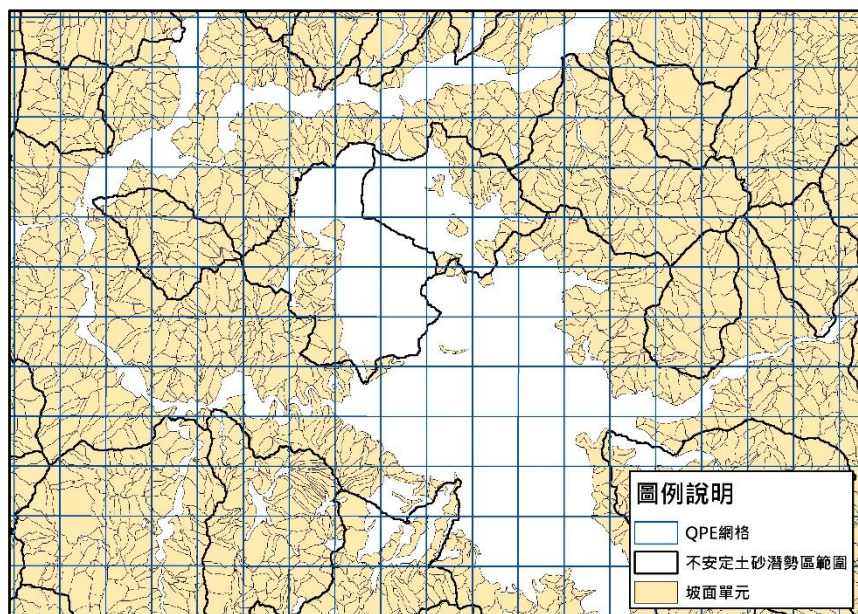


圖 4-9 QPE 網格與坡面單元比較

二、不安定土砂之坡面單元資料庫編碼

建立不安定土砂坡面單元資料庫的目的，是便於未來震後能夠進行即時不安定土砂潛勢變動值運算，因此必須是一個具有穩定資料庫結構型態的數值資料，BigGIS 並可藉由此固定編碼資料進行潛勢地圖繪製。

如表 4-6 所示，不安定土砂坡面單元編碼係由坡面單元資料庫擴展為 16 位 string 格式，其中包含河川主流、集水區、不安定土砂潛勢區、坡面單元等資訊，其中河川主流和集水區依全國統一規定編碼，坡面單元編碼與震後坡地崩塌評估之編碼相同 (如表 4-2)。不安定土砂坡面單元完整編碼以【河川主流】+【集水區】+【坡面單元】+【不安定土砂潛勢區】的方式組合而成，不安定土砂坡面單元編碼可提供相關資料庫關聯運算，未來將有利於供後續研究計畫發展使用。

表 4-6 不安定土砂坡面單元編碼

欄位名稱	定義
【BASIN_ID】	河川代碼 4 碼
【WS_ID】	集水區代碼 7 碼(河川代碼 4 碼+集水區 3 碼)
【SLOPE_ID】	坡面單元 5 碼
【USP_ID】	不安定土砂潛勢區代碼 4 碼
【USPSLOPE_CODE】	不安定土砂坡面單元完整編碼，共 16 碼

資料來源：本研究整理

三、不安定土砂潛勢集水區之更新與本研究相關性

不安定土砂潛勢集水區會於每年度進行全面之更新與圈繪，本計畫著重震後評估模式研究，尚未採用 113 年度農水署之不安定土砂相關委辦計畫執行成果，而是以 113 年版之不安定土砂潛勢集水區為研究材料。本研究所建立之評估模式成果，可待未來新版不安定潛勢集水區更新後，重新予以進行資料更新和運算即可。

第五章 震後不安定土砂潛勢分析方法

第一節 坡地易損性曲線應用於震後不安定土砂分析

根據不安定土砂之定義，不安定土砂是由地震或降雨所造成可能的未流出且不穩定之土砂，如圖 5-1 所示，其中地震引起的不安定土砂主要是由震後坡地崩塌所造成之殘坡或是崩落的土石，以及原本的不安定土砂受地震而進一步運移。對於震後崩塌所產生的不安定土砂，或是原本不安定土砂因地震造成其更具潛勢，可利用坡地易損性模式進一步分析評估，原本不安定土砂受震後的運移，亦可藉由不安定土砂集水區潛勢圖，進一步分析不安定土砂極高或高潛勢地區受震後的潛勢變化。例如高震度地區鄰近不安定土砂中高或高潛勢地區，即可能受地震影響而進一步惡化為極高潛勢地區。因此，對於不安定土砂之潛勢分析，除可經由每年之新增崩塌地分布圖更新，亦可藉由震後坡地評估方法評估未來之不安定土砂災害潛勢。

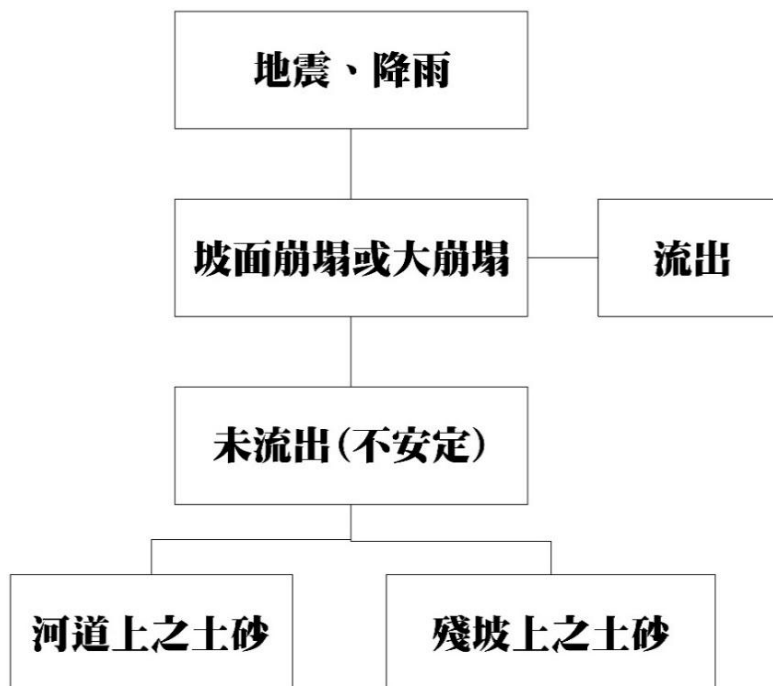


圖 5-1 不安定土砂肇因分類

在分析流程方面，坡地易損性曲線指坡地在誘發因子下達到或超越某種損害狀態的機率，表達坡地在某震度下發生崩塌的可能性，因此可以在地震後評估坡面單元崩塌的可能性，並計算其崩塌期望值來描述其風險，而該崩塌期望值亦可視為土砂生產期望值。進一步說明，此崩塌期望值即可能是地震後集水區產生土砂的來源，也是地震後可能新增的不安定土砂潛勢地區。此外，原本的不安定土砂潛勢集水區亦可能在遭受地震後，其不安定潛勢增加而升高土砂災害風險，此即需要進行不安定土砂潛勢地區震後影響分析，進而評估震後不安定土砂潛勢。坡地易損性曲線應用於震後不安定土砂潛勢評估之流程如圖 5-2 所示，承上所述，藉由目前已成熟且已實用化之坡地易損性評估程序，可應用於以潛勢分析為基礎之不安定土砂評估，進行震後之不安定土砂潛勢評估。以下即以 2024 年 0403 第 019 號地震分析結果進一步探討震後不安定土砂潛勢評估模式。

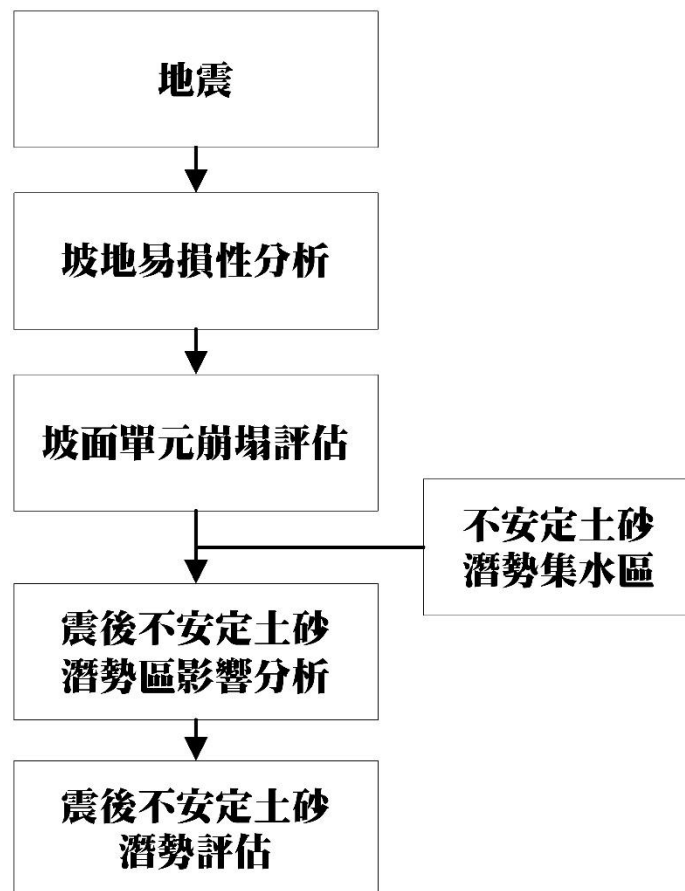


圖 5-2 震後不安定土砂潛勢評估流程

第二節 2024 年 0403 第 019 號花蓮地震事件分析與探討

一、地震概述

依據交通部中央氣象署發布的地震測報，2022 年 4 月 3 日早上 7 時 58 分 09 秒於花蓮縣外海（花蓮縣政府南南東方 25.0 公里）發生芮氏規模 $M_L 7.2 (M_w=7.6)$ 之地震，震央位置在北緯 23.77 度、東經 121.67 度，震源深度為 15.5 公里，並在花蓮縣秀林鄉和平村觀測到中央氣象署地震分級中最大震度 6 強的地震，震央鄰近受影響之地表活動斷層包括米崙斷層和嶺頂斷層，震後野外調查證據顯示這二條斷層雖無直接關係，但有零星地表噴砂現象（地質調查及礦業管理中心，2024），因此研判係屬近海地下深處的斷層構造所引致，為北北東走向之左移形式斷層錯動所造成。

地震期間共發佈 2 則國家級警報，分別為上午 7 時 58 分 18 秒及 24 秒，地震在全台造成 18 人罹難、1,155 人受傷。地震後共計有三次地表震度達 5 強以上之餘震紀錄，如表 5-1 所示，分別為第 113021 號、第 113300 號和第 113307 號地震，其中第 307 號地震最大震度為 6 弱級，最大 PGV 為 67.54cm/s，雖達崩塌評估啟動門檻，但僅發生在非常小之範圍。根據 BigGIS 在地震後的新生崩塌地判釋成果，主震與其餘震誘發了近 1948 處的新生崩塌地，其面積達 1523 公頃，而本團隊和 BigGIS 系統震後崩塌評估模組在第一時間即啟動震後詳細崩塌評估和快速評估，並於 48 小時內完成初步評估報告。

表 5-1 2024 年 0403 花蓮壽豐地震後之顯著餘震

編號	發生時間	震央位置	震源參數	6 弱以上震度區	誘發斷層
第 021 號	4 月 3 日	N24.1/E121.66 (花蓮縣近海)	規模 6.5 深度 5.5	無(最大震度 5 強)	近海北北東 走向之左移 形式斷層錯 動所造成
第 300 號	4 月 23 日	N23.85/E121.55 (花蓮縣壽豐鄉)	規模 5.7 深度 8.1	無(最大震度 5 強)	
第 307 號	4 月 23 日	N23.84/E121.57 (花蓮縣壽豐鄉)	規模 6.1 深度 11.7	6 弱(花蓮鹽寮)	

資料來源：中央氣象局 (2024)，地質調查及礦業管理中心 (2024)。

二、花蓮地震震後崩塌評估 (地震規模 7.2，最大震度 6 強)

本次地震係編號第 019 號地震之主震，氣象局地震報告如圖 5-3 所示，全台最大地動加速度分布和最大地動速度分布分別如圖 5-4 和圖 5-5 所示。以下分為快速評估和詳細評估結果分別說明。

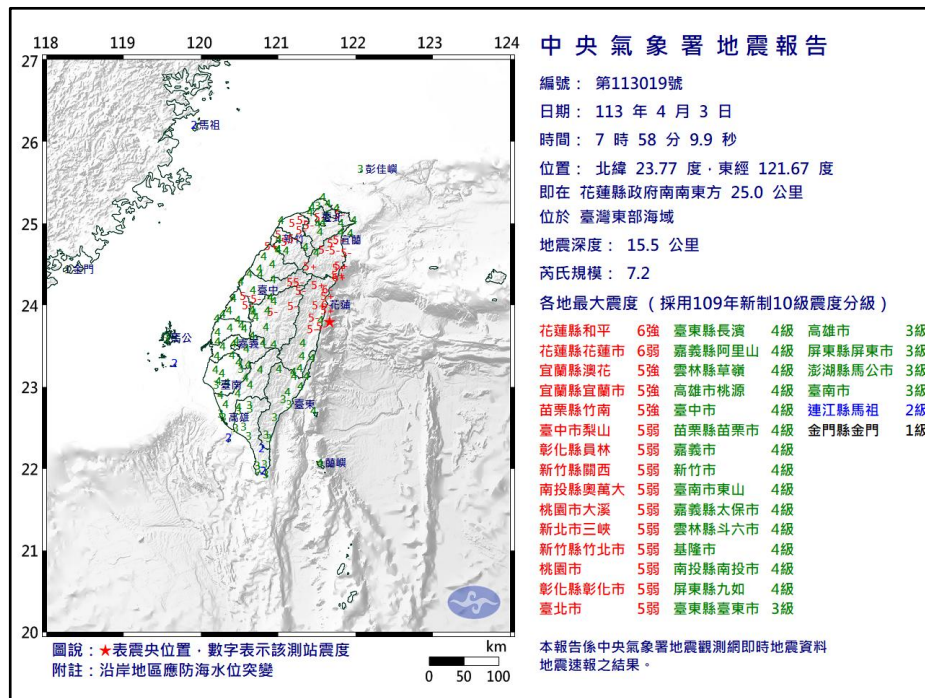


圖 5-3 第 019 號地震中央氣象局地震報告

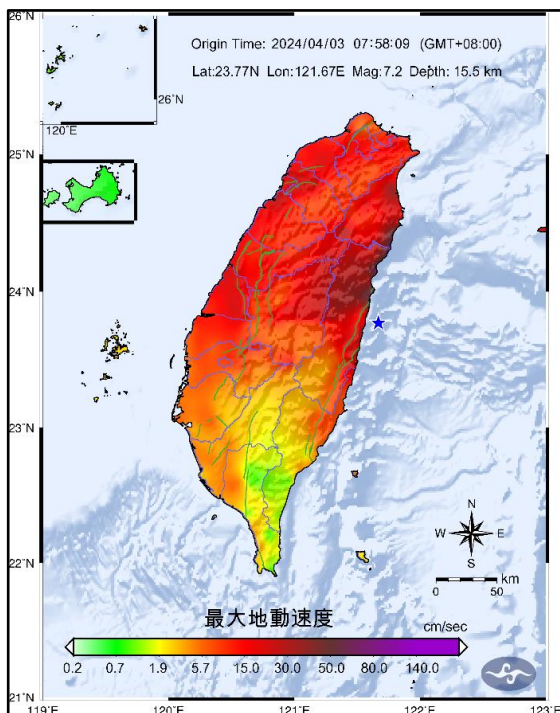


圖 5-4 全台最大地動加速度分布

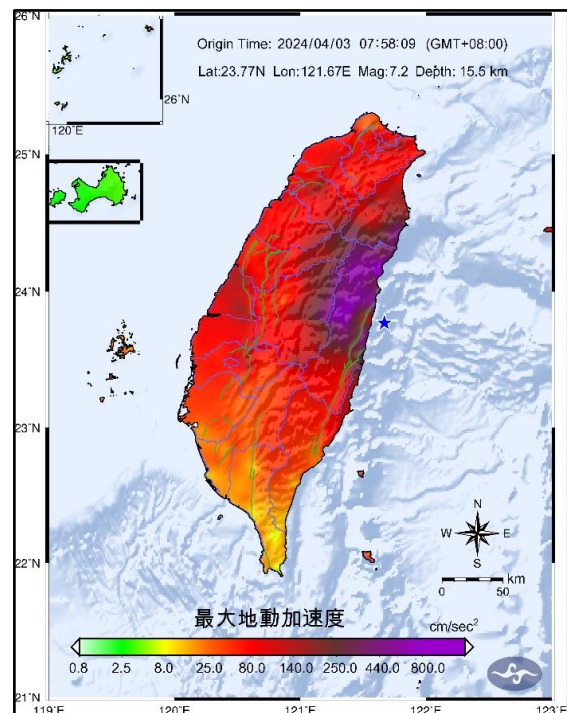


圖 5-5 全台最大地動速度分布

資料來源：中央氣象局 (2024)，本計畫整理。

三、基於 RSG 之震後崩塌快速評估

1. 以 PGA 為致災因子

以下為 RSG 震度資料之快速評估結果，表 5-2 為各集水區快速評估結果，圖 5-6 ~ 圖 5-9 為各集水區崩塌機率分布和崩塌期望值：

表 5-2 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/RSG 快速評估)

編號	河川/集水區	PGA _{min} (gal)	PGA _{max} (gal)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
1	和平溪/和平南溪	390	722	0.096	0.560	203.08 ~ 2792.87	0.011	0.146
2	和平溪/和平北溪	263	522	0.033	0.308	88.18 ~ 1717.52	0.003	0.062
3	立霧溪/砂卡礑溪	764	1065	0.359	0.824	122.99 ~ 1342.86	0.029	0.318
4	石公溪/小清水溪	725	964	0.489	1.000	94.01 ~ 996.28	0.041	0.439
5	三棧溪/三棧溪	358	504	0.080	0.253	52.22 ~ 851.68	0.006	0.095
6	大清水溪/良里溪上游	575	846	0.346	0.680	67.65 ~ 743.90	0.023	0.257
7	立霧溪/老西溪	547	816	0.249	0.654	56.44 ~ 668.04	0.019	0.220
8	立霧溪/立霧溪上游	360	497	0.094	0.275	38.45 ~ 666.58	0.005	0.094
9	大清水溪/良里溪	593	791	0.328	1.000	56.99 ~ 616.74	0.026	0.282
10	立霧溪/九曲洞	476	702	0.183	0.470	48.70 ~ 578.73	0.015	0.175
11	立霧溪/陶塞溪	382	574	0.095	0.308	28.98 ~ 536.85	0.005	0.095
12	花蓮溪/巴托魯溪	423	468	0.128	0.235	25.35 ~ 534.59	0.004	0.093
13	立霧溪/長春祠	590	954	0.292	0.761	48.71 ~ 523.47	0.028	0.296
14	立霧溪/砂卡礑溪上游	663	841	0.308	0.676	46.58 ~ 522.61	0.024	0.273
15	立霧溪/托博瀾溪	381	461	0.099	0.226	28.70 ~ 480.73	0.005	0.079
16	大甲溪/南湖溪上游	251	393	0.029	0.142	3.74 ~ 435.26	<0.000	0.039
17	花蓮溪/龍溪	366	438	0.082	0.181	16.92 ~ 433.73	0.003	0.070
18	立霧溪/小瓦黑爾溪	351	489	0.089	0.263	20.16 ~ 420.64	0.004	0.075
19	和平溪/飯包山	422	610	0.116	0.426	29.96 ~ 409.68	0.009	0.118
20	立霧溪/瓦黑蘭溪	316	497	0.067	0.275	12.06 ~ 391.08	0.002	0.068
21	三棧溪/三棧北溪	307	643	0.000	0.467	31.00 ~ 388.70	0.009	0.114
22	立霧溪/燕子口	645	816	0.379	0.654	32.90 ~ 348.95	0.027	0.285

表 5-2 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/RSG 快速評估)

編號	河川/集水區	PGA _{min} (gal)	PGA _{max} (gal)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
23	和平溪/和平溪	436	593	0.169	0.476	25.45 ~ 324.43	0.011	0.137
24	加蘭溪/加蘭溪	335	539	0.002	0.864	24.32 ~ 324.03	0.007	0.099
25	南澳溪/舊武塔	313	435	0.054	0.193	10.78 ~ 320.17	0.002	0.053
26	花蓮溪/木瓜溪	340	435	0.084	0.167	14.67 ~ 315.52	0.003	0.064
27	立霧溪/塔次基里	321	403	0.058	0.143	10.61 ~ 307.67	0.002	0.052
28	花蓮溪/木瓜溪中游	424	487	0.145	0.260	17.54 ~ 304.40	0.006	0.101
29	花蓮溪/銅門	362	487	0.102	0.260	20.87 ~ 290.96	0.006	0.086
30	美崙溪/美崙溪上游	424	506	0.142	0.262	20.93 ~ 289.89	0.007	0.102
31	立霧溪/立霧溪	643	941	0.378	1.000	23.85 ~ 252.34	0.034	0.360
32	大清水溪/和中沿海	494	663	0.273	0.998	23.52 ~ 250.52	0.029	0.308
33	南澳溪/南澳南溪	386	426	0.097	0.167	14.31 ~ 249.97	0.004	0.068
34	濁水溪/濁水溪上游	288	381	0.043	0.129	1.93 ~ 239.00	<0.000	0.041
35	花蓮溪/大清水溪	337	405	0.067	0.156	11.33 ~ 238.98	0.003	0.054
36	花蓮溪/天長溪	332	393	0.065	0.142	7.86 ~ 230.86	0.002	0.055
37	和平溪/澳花	355	593	0.008	0.446	14.60 ~ 224.49	0.005	0.073
38	南澳溪/水源山	226	357	0.000	0.098	0.26 ~ 210.07	<0.000	0.021
39	立霧溪/鍛鍊山	541	697	0.241	0.532	14.54 ~ 196.53	0.013	0.175
40	花蓮溪/榕樹	424	506	0.118	0.348	16.35 ~ 196.47	0.008	0.098
41	立霧溪/朝瞰山	536	663	0.192	0.492	11.63 ~ 193.38	0.010	0.162
42	水璉溪/水璉沿海	236	592	0.000	0.971	15.71 ~ 181.19	0.009	0.109
43	立霧溪/丹錐山	556	733	0.290	0.572	16.60 ~ 180.34	0.021	0.231
44	立霧溪/上梅園	443	541	0.129	0.333	8.15 ~ 176.53	0.005	0.109
45	蘭陽溪/米磨登溪	259	370	0.028	0.117	1.32 ~ 148.05	<0.000	0.032
46	南澳溪/金洋	362	410	0.010	0.159	6.06 ~ 147.53	0.002	0.055
47	花蓮溪/檜溪	284	351	0.041	0.097	2.66 ~ 132.17	0.001	0.033
48	立霧溪/綠水	497	548	0.217	0.343	10.49 ~ 128.93	0.012	0.150
49	花蓮溪/朝保	225	592	0.000	0.971	8.97 ~ 128.79	0.005	0.073

表 5-2 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/RSG 快速評估)

編號	河川/集水區	PGA _{min} (gal)	PGA _{max} (gal)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
50	花蓮溪/吉安溪	489	491	0.161	0.626	11.49 ~ 123.35	0.015	0.158
51	美崙溪/美侖溪	366	491	0.009	0.302	8.55 ~ 119.23	0.006	0.081
52	大甲溪/碧綠山	252	360	0.029	0.106	0.51 ~ 117.66	<0.000	0.030
53	立霧溪/下梅園	481	541	0.189	0.282	6.55 ~ 116.18	0.007	0.118
54	濁水溪/塔羅灣溪	234	332	0.000	0.080	0.71 ~ 115.98	<0.000	0.022
55	南澳溪/金岳	242	358	0.000	0.104	2.94 ~ 115.07	0.001	0.028
56	花蓮溪/荖溪	309	424	0.058	0.179	5.18 ~ 112.34	0.002	0.051
57	蘭陽溪/四重溪	289	371	0.045	0.110	1.36 ~ 103.55	<0.000	0.035
58	立霧溪/谷園	481	625	0.200	0.342	5.31 ~ 103.02	0.007	0.130
59	立霧溪/天祥	456	548	0.171	0.281	6.83 ~ 99.67	0.008	0.120
60	花蓮溪/安來溪	234	321	0.000	0.070	0.23 ~ 98.71	<0.000	0.019
61	蕃寮溪/蕃寮溪	251	521	0.000	0.794	6.31 ~ 95.03	0.004	0.064
62	大甲溪/西合歡山	199	355	0.000	0.101	0.71 ~ 94.45	<0.000	0.023
63	蘭陽溪/實谷富溪	229	356	0.000	0.102	1.34 ~ 93.30	<0.000	0.026
64	花蓮溪/壽豐溪上游	250	337	0.024	0.084	0.52 ~ 93.08	<0.000	0.025
65	花蓮溪/丸田溪	306	370	0.060	0.108	1.10 ~ 91.93	0.001	0.046
66	花蓮溪/大清水溪上游	276	357	0.037	0.103	0.00 ~ 90.42	0.000	0.032
67	南澳溪/南澳北溪	350	393	0.004	0.142	1.39 ~ 89.08	0.001	0.048
68	花蓮溪/翡翠谷	487	506	0.211	0.286	7.73 ~ 87.67	0.011	0.125
69	蘭陽溪/夫布爾溪	232	340	0.000	0.080	0.77 ~ 79.47	<0.000	0.020
70	花蓮溪/壽豐溪	234	344	0.000	0.090	0.85 ~ 67.51	<0.000	0.016
71	濁水溪/平靜	215	295	0.000	0.053	0.00 ~ 65.55	0.000	0.012
72	烏溪/梅松山	233	326	0.000	0.074	0.52 ~ 64.94	<0.000	0.022
73	立霧溪/立霧	524	599	0.192	0.411	4.83 ~ 64.23	0.010	0.134
74	大甲溪/有勝溪	242	302	0.000	0.058	0.00 ~ 58.35	0.000	0.019
75	花蓮溪/白鮑溪	275	381	0.010	0.094	0.56 ~ 53.70	<0.000	0.029
76	濁水溪/北溪	226	302	0.000	0.057	0.00 ~ 53.25	0.000	0.010

表 5-2 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/RSG 快速評估)

編號	河川/集水區	PGA _{min} (gal)	PGA _{max} (gal)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
77	花蓮溪/清昌溪上游	309	356	0.052	0.097	0.39 ~ 52.42	<0.000	0.038
78	蘭陽溪/白嶺溪	226	304	0.000	0.059	0.00 ~ 52.20	0.000	0.017
79	花蓮溪/山興	317	444	0.001	0.184	0.85 ~ 51.83	<0.000	0.025
80	南澳溪/南澳	282	410	0.000	0.142	0.75 ~ 50.23	<0.000	0.020
81	蘭陽溪/加納富溪	189	323	0.000	0.069	0.00 ~ 31.61	0.000	0.010
82	東澳溪/東澳溪	217	300	0.000	0.057	0.00 ~ 31.04	0.000	0.009
83	蘭陽溪/土場溪	202	286	0.000	0.048	0.00 ~ 23.73	0.000	0.010
84	大甲溪/碧綠溪	184	286	0.000	0.048	0.00 ~ 21.58	0.000	0.010
85	花蓮溪/阿羅朗	186	393	0.000	0.123	0.00 ~ 21.06	0.000	0.008
86	濁水溪/馬海僕溪	230	284	0.000	0.047	0.00 ~ 19.08	0.000	0.009
87	大甲溪/茶岩山	177	279	0.000	0.044	0.00 ~ 17.91	0.000	0.004
88	和平溪/谷風	355	373	0.004	0.111	0.28 ~ 16.25	<0.000	0.013
89	花蓮溪/花蓮溪	404	581	0.109	0.917	1.04 ~ 15.57	0.013	0.189
90	花蓮溪/怡堪溪	224	288	0.000	0.049	0.00 ~ 14.86	0.000	0.004
91	烏溪/力行	189	282	0.000	0.045	0.00 ~ 13.05	0.000	0.005
92	花蓮溪/米棧	225	374	0.000	0.073	0.00 ~ 12.00	0.000	0.010
93	花蓮溪/壽山	249	351	0.000	0.051	0.00 ~ 11.89	0.000	0.011
94	花蓮溪/大安山	228	258	0.000	0.033	0.00 ~ 11.69	0.000	0.005
95	豐濱溪/豐濱沿海	217	314	0.000	0.064	0.00 ~ 10.44	0.000	0.005
96	蘭陽溪/石門溪	166	263	0.000	0.037	0.00 ~ 8.00	0.000	0.002
97	花蓮溪/安東軍山	208	262	0.000	0.036	0.00 ~ 6.53	0.000	0.002
98	豐濱溪/溪底	246	376	0.000	0.069	0.00 ~ 6.05	0.000	0.002
99	蘭陽溪/埤南溪	158	259	0.000	0.035	0.00 ~ 5.24	0.000	0.001
100	蘭陽溪/燒水溪	191	259	0.000	0.033	0.00 ~ 4.34	0.000	0.001
101	豐濱溪/豐濱溪	175	280	0.000	0.036	0.00 ~ 4.22	0.000	0.002
102	豐濱溪/貓公溪	214	370	0.000	0.055	0.00 ~ 3.10	0.000	0.002
103	花蓮溪/鯉魚山	402	402	0.066	0.066	0.00 ~ 2.75	0.000	0.033

表 5-2 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/RSG 快速評估)

編號	河川/集水區	PGA _{min} (gal)	PGA _{max} (gal)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
104	大甲溪/五羅府山	165	265	0.000	0.037	0.00 ~ 2.22	0.000	0.001
105	水璉溪/水璉溪	172	382	0.000	0.035	0.00 ~ 2.19	0.000	0.001
106	濁水溪/南溪	190	250	0.000	0.031	0.00 ~ 1.97	0.000	<0.000
107	大甲溪/七家灣溪	169	269	0.000	0.038	0.00 ~ 1.59	0.000	<0.000
108	淡水河/他開琴溪	159	254	0.000	0.030	0.00 ~ 1.45	0.000	<0.000
109	蘭陽溪/翻社坑溪	185	261	0.000	0.035	0.00 ~ 1.19	0.000	<0.000
110	烏溪/翠巒	161	260	0.000	0.033	0.00 ~ 0.73	0.000	<0.000
111	蘭陽溪/加蘭溪	125	259	0.000	0.033	0.00 ~ 0.60	0.000	<0.000
112	秀姑巒溪/奇美西溪	163	264	0.000	0.037	0.00 ~ 0.18	0.000	<0.000
	合計					1588.6 8 ~ 25582.21		

資料來源：本計畫製作。

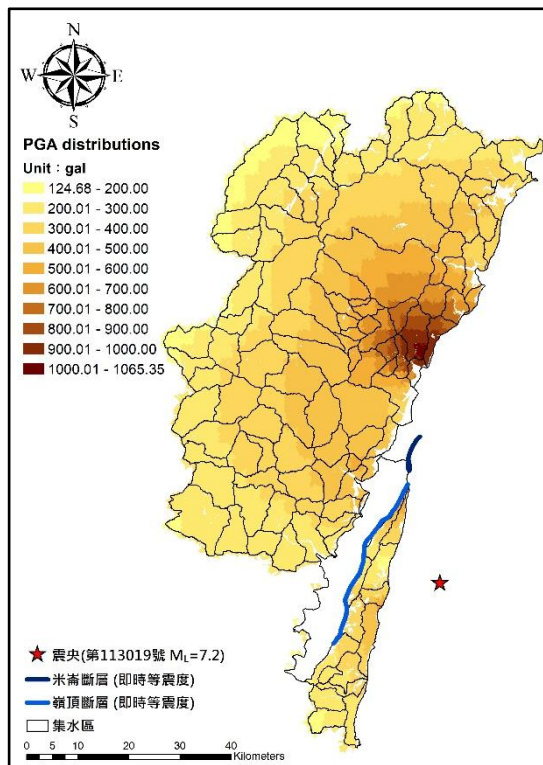


圖 5-6 PGA 分布(RSG 快速評估)

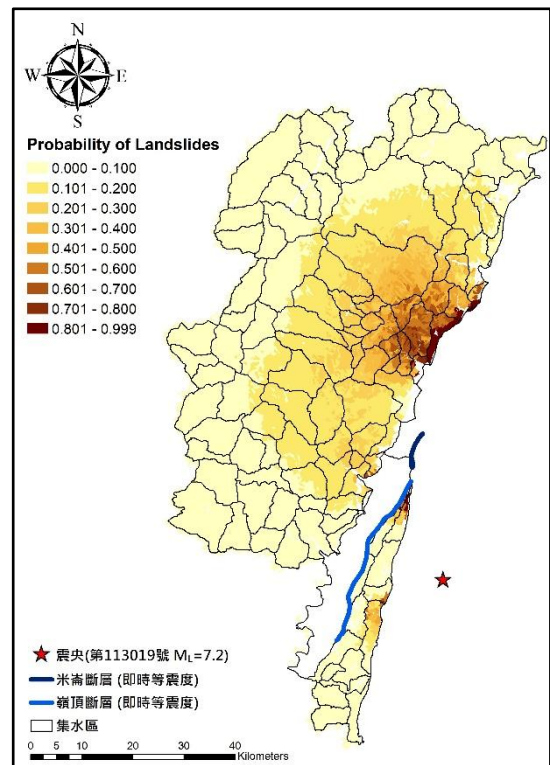


圖 5-7 PGA 崩塌機率分布(RSG 快速評估)

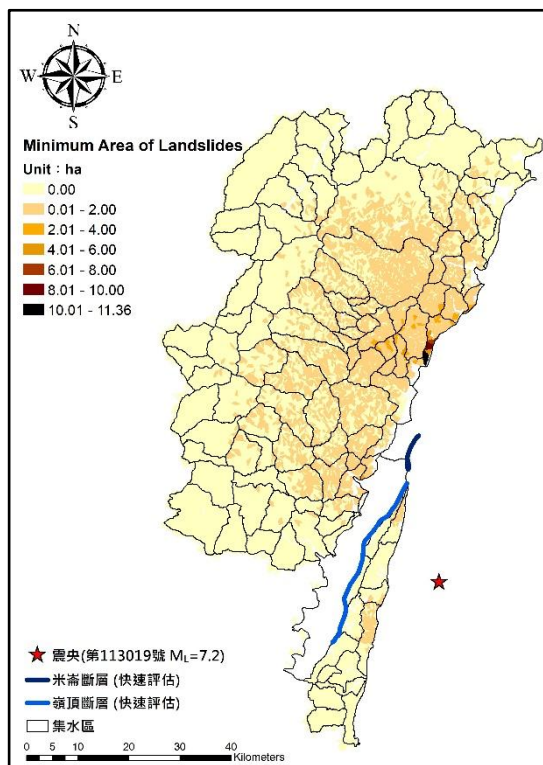


圖 5-8 PGA 最小崩塌面積估計(RSG 快速評估)

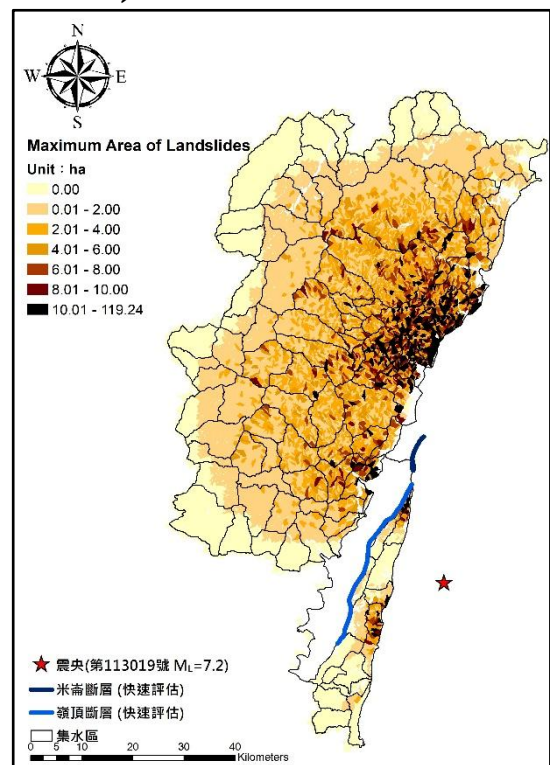


圖 5-9 PGA 可能最大崩塌面積估計(RSG 快速評估)

資料來源：本計畫製作。

2. 以 PGV 為致災因子

以下為 RSG 震度資料之快速評估結果，表 5-3 為各集水區快速評估結果，圖 5-10～圖 5-13 為各集水區崩塌機率分布和崩塌期望值：

表 5-3 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGV/RSG 快速評估)

排序	河川/集水區	PGV _{min} (cm/s)	PGV _{max} (cm/s)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
1	大清水溪/良里溪上游	54	65	0.034	0.123	2.43 ~ 102.92	0.001	0.035
2	大清水溪/良里溪	63	75	0.007	0.206	2.74 ~ 99.89	0.001	0.046
3	立霧溪/砂卡礑溪	49	63	0.000	0.093	0.52 ~ 95.52	<0.000	0.023
4	和平溪/和平溪	49	68	0.000	0.114	0.82 ~ 68.12	<0.000	0.029
5	和平溪/澳花	46	74	0.000	0.162	1.36 ~ 59.04	<0.000	0.019
6	石公溪/小清水溪	56	70	0.000	0.131	0.54 ~ 44.61	<0.000	0.020
7	和平溪/和平南溪	35	55	0.000	0.063	0.00 ~ 43.55	0.000	0.002
8	大清水溪/和中沿海	70	80	0.073	0.206	2.58 ~ 43.45	0.003	0.053
9	和平溪/飯包山	45	59	0.000	0.086	0.00 ~ 28.34	0.000	0.008
10	立霧溪/砂卡礑溪上游	44	57	0.000	0.058	0.00 ~ 20.16	0.000	0.011
11	立霧溪/長春祠	41	54	0.000	0.062	0.35 ~ 14.61	<0.000	0.008
12	立霧溪/立霧溪	44	56	0.000	0.071	0.00 ~ 10.74	0.000	0.015
13	和平溪/谷風	50	71	0.000	0.069	0.00 ~ 5.13	0.000	0.004
14	南澳溪/金洋	42	55	0.000	0.034	0.00 ~ 1.82	0.000	0.001
15	美崙溪/美崙溪	42	50	0.000	0.046	0.00 ~ 1.41	0.000	0.001
16	花蓮溪/花蓮溪	33	53	0.000	0.058	0.00 ~ 0.65	0.000	0.008
	合計					11.34 ~ 639.97		

資料來源：本計畫製作。

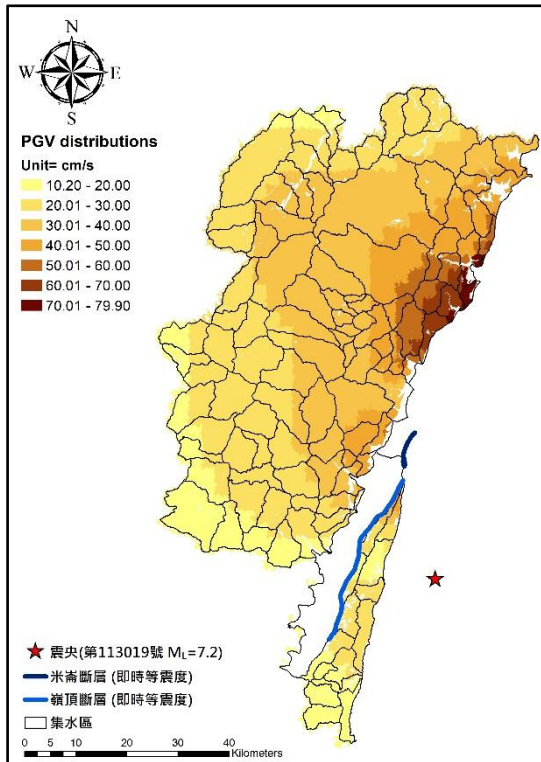


圖 5-10 PGV 分布(RSG 快速評估)

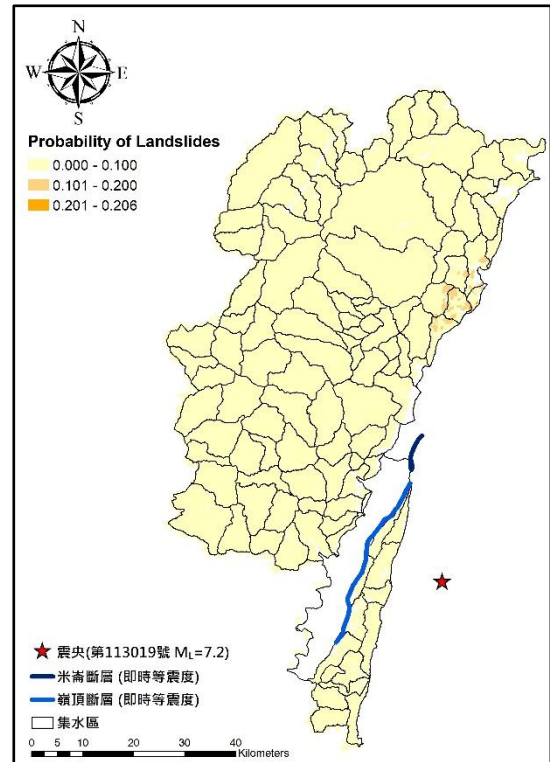


圖 5-11 PGV 崩塌機率分布(RSG 快速評估)

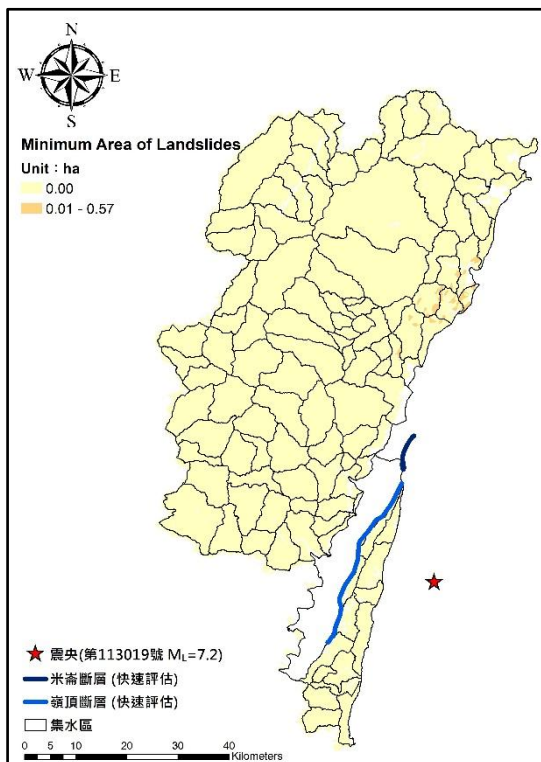


圖 5-12 PGV 最小崩塌面積估計(RSG 快速評估)

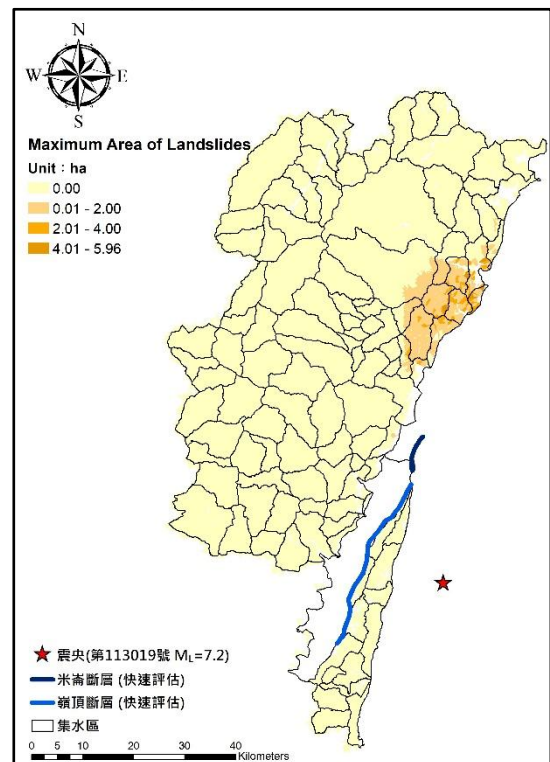


圖 5-13 PGV 可能最大崩塌面積估計(RSG 快速評估)

資料來源：本計畫製作。

四、基於 RSG 之震後崩塌詳細評估

1. 以 PGA 為致災因子

以下為 RSG 震度資料之詳細評估結果，表 5-4 為各集水區詳細評估結果，圖 5-14～圖 5-17 為各集水區崩塌機率分布和崩塌期望值：

表 5-4 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/RSG 詳細評估)

編號	河川/集水區	PGA _{min} (gal)	PGA _{max} (gal)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
1	和平溪/和平南溪	390	722	0.100	0.560	206.71 ~ 2826.88	0.011	0.147
2	和平溪/和平北溪	263	522	0.033	0.308	87.68 ~ 1711.86	0.003	0.062
3	立霧溪/砂卡礑溪	764	1065	0.359	0.824	126.98 ~ 1384.61	0.030	0.328
4	石公溪/小清水溪	725	964	0.489	1.000	94.56 ~ 1002.06	0.042	0.441
5	三棧溪/三棧溪	358	504	0.080	0.284	55.15 ~ 865.50	0.006	0.097
6	大清水溪/良里溪上游	575	846	0.309	0.619	67.40 ~ 738.49	0.023	0.255
7	立霧溪/老西溪	547	816	0.249	0.654	58.08 ~ 685.47	0.019	0.226
8	立霧溪/立霧溪上游	360	497	0.094	0.275	38.66 ~ 661.82	0.005	0.093
9	大清水溪/良里溪	593	791	0.328	1.000	55.96 ~ 611.44	0.026	0.280
10	立霧溪/九曲洞	476	702	0.183	0.537	47.52 ~ 568.68	0.014	0.172
11	立霧溪/陶塞溪	382	574	0.092	0.378	30.74 ~ 550.26	0.005	0.097
12	花蓮溪/巴托魯溪	423	468	0.127	0.235	25.19 ~ 532.03	0.004	0.092
13	立霧溪/砂卡礑溪上游	663	841	0.281	0.676	46.13 ~ 512.91	0.024	0.268
14	立霧溪/長春祠	590	954	0.267	0.761	46.66 ~ 499.44	0.026	0.282
15	立霧溪/托博瀾溪	381	461	0.099	0.226	28.92 ~ 479.53	0.005	0.079
16	花蓮溪/龍溪	366	438	0.085	0.197	17.97 ~ 441.08	0.003	0.071
17	大甲溪/南湖溪上游	251	393	0.031	0.142	3.52 ~ 435.26	<0.000	0.039
18	立霧溪/小瓦黑爾溪	351	489	0.086	0.263	21.59 ~ 425.68	0.004	0.076
19	和平溪/飯包山	422	610	0.116	0.426	30.08 ~ 407.00	0.009	0.117
20	立霧溪/瓦黑蘭溪	316	497	0.065	0.275	13.56 ~ 399.59	0.002	0.070
21	三棧溪/三棧北溪	307	643	0.000	0.467	29.13 ~ 375.68	0.009	0.110
22	立霧溪/燕子口	645	816	0.379	0.654	31.12 ~ 330.28	0.025	0.270

表 5-4 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/RSG 詳細評估)

編號	河川/集水區	PGA _{min} (gal)	PGA _{max} (gal)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
23	南澳溪/舊武塔	313	435	0.054	0.193	10.94 ~ 320.05	0.002	0.053
24	加蘭溪/加蘭溪	335	539	0.003	0.864	24.01 ~ 318.39	0.007	0.097
25	花蓮溪/木瓜溪	340	435	0.084	0.192	14.14 ~ 316.69	0.003	0.064
26	花蓮溪/木瓜溪中游	424	487	0.145	0.260	18.69 ~ 314.48	0.006	0.104
27	和平溪/和平溪	436	593	0.169	0.476	24.05 ~ 310.52	0.010	0.131
28	立霧溪/塔次基里	321	403	0.058	0.154	11.50 ~ 307.19	0.002	0.052
29	花蓮溪/銅門	362	487	0.102	0.260	21.26 ~ 295.12	0.006	0.087
30	美崙溪/美崙溪上游	424	506	0.142	0.262	21.27 ~ 292.66	0.008	0.103
31	大清水溪/和中沿海	494	663	0.273	0.998	25.56 ~ 270.09	0.031	0.332
32	立霧溪/立霧溪	643	941	0.378	1.000	23.72 ~ 251.03	0.034	0.359
33	南澳溪/南澳南溪	386	426	0.094	0.181	13.53 ~ 245.60	0.004	0.066
34	濁水溪/濁水溪上游	288	381	0.042	0.129	1.93 ~ 239.00	0.000	0.041
35	花蓮溪/大清水溪	337	405	0.067	0.156	10.81 ~ 237.94	<0.002	0.054
36	花蓮溪/天長溪	332	393	0.065	0.142	8.01 ~ 230.17	0.002	0.055
37	和平溪/澳花	355	593	0.008	0.446	14.13 ~ 218.17	0.005	0.071
38	南澳溪/水源山	226	357	0.000	0.098	0.26 ~ 209.27	<0.000	0.021
39	花蓮溪/榕樹	424	506	0.131	0.533	17.57 ~ 206.52	0.009	0.103
40	立霧溪/鍛鍊山	541	697	0.241	0.532	14.87 ~ 198.71	0.013	0.176
41	立霧溪/朝瞰山	536	663	0.192	0.411	10.14 ~ 187.21	0.008	0.156
42	立霧溪/丹錐山	556	733	0.254	0.572	16.07 ~ 174.74	0.021	0.224
43	立霧溪/上梅園	443	541	0.129	0.282	7.67 ~ 171.99	0.005	0.106
44	水璉溪/水璉沿海	236	592	0.000	0.971	14.68 ~ 171.83	0.009	0.104
45	蘭陽溪/米磨登溪	259	370	0.028	0.117	1.57 ~ 147.97	<0.000	0.032
46	南澳溪/金洋	362	410	0.010	0.159	6.32 ~ 147.02	0.002	0.054
47	花蓮溪/檜溪	284	351	0.041	0.097	2.66 ~ 131.56	0.001	0.033
48	立霧溪/綠水	497	548	0.217	0.343	9.88 ~ 127.49	0.012	0.148
49	美崙溪/美崙溪	366	491	0.009	0.366	8.87 ~ 122.68	0.006	0.083

表 5-4 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/RSG 詳細評估)

編號	河川/集水區	PGA _{min} (gal)	PGA _{max} (gal)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
50	花蓮溪/朝保	225	592	0.000	0.832	8.20 ~ 119.83	0.005	0.068
51	立霧溪/下梅園	481	541	0.189	0.333	7.45 ~ 119.23	0.008	0.121
52	花蓮溪/吉安溪	489	491	0.161	0.613	11.01 ~ 118.26	0.014	0.151
53	大甲溪/碧綠山	252	360	0.029	0.100	0.51 ~ 117.68	<0.000	0.030
54	濁水溪/塔羅灣溪	234	332	0.000	0.080	0.71 ~ 115.84	<0.000	0.022
55	南澳溪/金岳	242	358	0.000	0.104	2.48 ~ 114.63	0.001	0.028
56	花蓮溪/荖溪	309	424	0.058	0.157	4.89 ~ 110.84	0.002	0.050
57	蘭陽溪/四重溪	289	371	0.044	0.102	1.13 ~ 103.48	<0.000	0.035
58	立霧溪/谷園	481	625	0.189	0.342	5.28 ~ 102.11	0.007	0.129
59	立霧溪/天祥	456	548	0.160	0.342	6.86 ~ 100.78	0.008	0.122
60	花蓮溪/安來溪	234	321	0.000	0.070	0.23 ~ 98.85	<0.000	0.019
61	蕃寮溪/蕃寮溪	251	521	0.000	0.794	6.47 ~ 94.32	0.004	0.064
62	大甲溪/西合歡山	199	355	0.000	0.101	0.71 ~ 94.24	<0.000	0.023
63	蘭陽溪/實谷富溪	229	356	0.000	0.102	1.10 ~ 94.10	<0.000	0.026
64	花蓮溪/壽豐溪上游	250	337	0.027	0.084	0.75 ~ 93.41	<0.000	0.025
65	花蓮溪/丸田溪	306	370	0.058	0.116	1.34 ~ 91.66	0.001	0.046
66	花蓮溪/大清水溪上游	276	357	0.038	0.103	0.00 ~ 90.36	0.000	0.032
67	南澳溪/南澳北溪	350	393	0.003	0.134	1.39 ~ 88.32	0.001	0.048
68	花蓮溪/翡翠谷	487	506	0.211	0.286	7.65 ~ 87.34	0.011	0.124
69	蘭陽溪/夫布爾溪	232	340	0.000	0.084	0.78 ~ 79.44	<0.000	0.020
70	花蓮溪/壽豐溪	234	344	0.000	0.087	0.84 ~ 68.02	<0.000	0.016
71	立霧溪/立霧	524	599	0.198	0.411	4.97 ~ 65.92	0.010	0.137
72	濁水溪/平靜	215	295	0.000	0.053	0.00 ~ 65.62	0.000	0.012
73	烏溪/梅松山	233	326	0.000	0.074	0.52 ~ 64.81	<0.000	0.022
74	大甲溪/有勝溪	242	302	0.000	0.058	0.00 ~ 58.70	0.000	0.019
75	花蓮溪/白鮑溪	275	381	0.005	0.091	0.55 ~ 53.72	<0.000	0.029
76	濁水溪/北溪	226	302	0.000	0.057	0.00 ~ 52.72	0.000	0.010

表 5-4 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/RSG 詳細評估)

編號	河川/集水區	PGA _{min} (gal)	PGA _{max} (gal)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
77	花蓮溪/清昌溪上游	309	356	0.052	0.097	0.41 ~ 52.59	<0.000	0.038
78	蘭陽溪/白嶺溪	226	304	0.000	0.059	0.00 ~ 52.28	0.000	0.017
79	花蓮溪/山興	317	444	0.000	0.239	0.82 ~ 51.38	<0.000	0.025
80	南澳溪/南澳	282	410	0.000	0.142	0.48 ~ 49.15	<0.000	0.019
81	東澳溪/東澳溪	217	300	0.000	0.057	0.00 ~ 31.03	0.000	0.009
82	蘭陽溪/加納富溪	189	323	0.000	0.072	0.00 ~ 30.58	0.000	0.010
83	蘭陽溪/土場溪	202	286	0.000	0.048	0.00 ~ 22.94	0.000	0.010
84	大甲溪/碧綠溪	184	286	0.000	0.048	0.00 ~ 20.61	0.000	0.009
85	花蓮溪/阿羅朗	186	393	0.000	0.123	0.00 ~ 20.52	0.000	0.008
86	濁水溪/馬海僕溪	230	284	0.000	0.047	0.00 ~ 18.80	0.000	0.009
87	大甲溪/茶岩山	177	279	0.000	0.044	0.00 ~ 18.19	0.000	0.004
88	和平溪/谷風	355	373	0.004	0.120	0.28 ~ 16.47	<0.000	0.013
89	花蓮溪/花蓮溪	404	581	0.109	0.917	1.04 ~ 15.49	0.013	0.188
90	花蓮溪/怡堪溪	224	288	0.000	0.049	0.00 ~ 14.59	0.000	0.004
91	烏溪/力行	189	282	0.000	0.045	0.00 ~ 13.18	0.000	0.005
92	花蓮溪/米棧	225	374	0.000	0.073	0.00 ~ 12.06	0.000	0.010
93	花蓮溪/壽山	249	351	0.000	0.051	0.00 ~ 11.96	0.000	0.011
94	花蓮溪/大安山	228	258	0.000	0.033	0.00 ~ 11.72	0.000	0.005
95	豐濱溪/豐濱沿海	217	314	0.000	0.066	0.00 ~ 10.45	0.000	0.005
96	蘭陽溪/石門溪	166	263	0.000	0.037	0.00 ~ 7.76	0.000	0.002
97	花蓮溪/安東軍山	208	262	0.000	0.036	0.00 ~ 6.39	0.000	0.002
98	豐濱溪/溪底	246	376	0.000	0.069	0.00 ~ 6.33	0.000	0.002
99	蘭陽溪/埤南溪	158	259	0.000	0.035	0.00 ~ 4.83	0.000	0.001
100	豐濱溪/豐濱溪	175	280	0.000	0.037	0.00 ~ 4.49	0.000	0.002
101	蘭陽溪/燒水溪	191	259	0.000	0.033	0.00 ~ 4.24	0.000	0.001
102	豐濱溪/貓公溪	214	370	0.000	0.055	0.00 ~ 3.04	0.000	0.002
103	花蓮溪/鯉魚山	402	402	0.068	0.068	0.29 ~ 3.00	0.003	0.036

表 5-4 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/RSG 詳細評估)

編號	河川/集水區	PGA _{min} (gal)	PGA _{max} (gal)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
104	水璉溪/水璉溪	172	382	0.000	0.035	0.00 ~ 2.19	0.000	0.001
105	大甲溪/五羅府山	165	265	0.000	0.037	0.00 ~ 2.19	0.000	0.001
106	濁水溪/南溪	190	250	0.000	0.031	0.00 ~ 1.77	0.000	<0.000
107	大甲溪/七家灣溪	169	269	0.000	0.038	0.00 ~ 1.59	0.000	<0.000
108	淡水河/他開琴溪	159	254	0.000	0.033	0.00 ~ 1.52	0.000	<0.000
109	蘭陽溪/翻社坑溪	185	261	0.000	0.035	0.00 ~ 1.20	0.000	<0.000
110	烏溪/翠巒	161	260	0.000	0.033	0.00 ~ 0.73	0.000	<0.000
111	蘭陽溪/加蘭溪	125	259	0.000	0.035	0.00 ~ 0.64	0.000	<0.000
112	秀姑巒溪/奇美西溪	163	264	0.000	0.037	0.00 ~ 0.30	0.000	<0.000
	合計					1596.5 6 ~ 25600.07		

資料來源：本計畫製作。

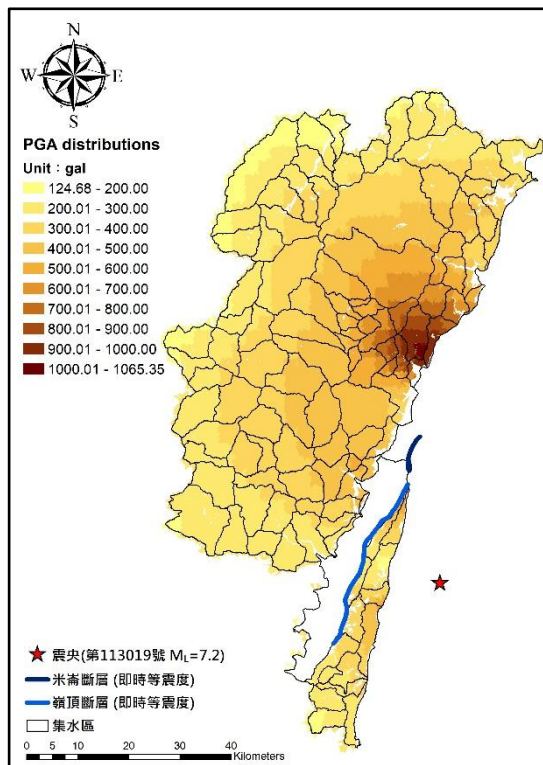


圖 5-14 PGA 分布(RSG 詳細評估)

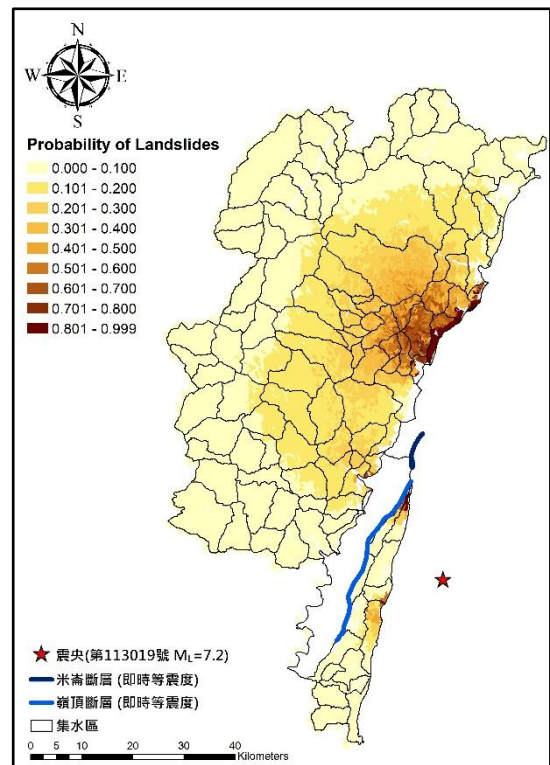


圖 5-15 PGA 崩塌機率分布(RSG 詳細評估)

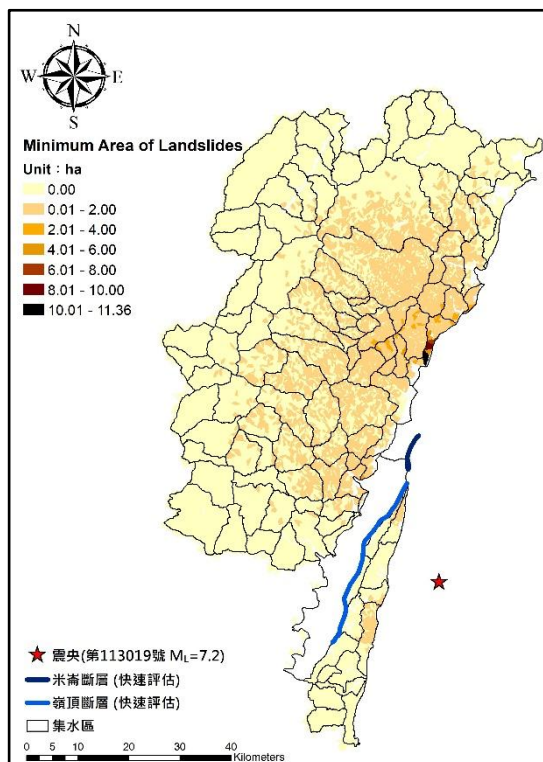


圖 5-16 PGA 最小崩塌面積估計(RSG 詳細評估)

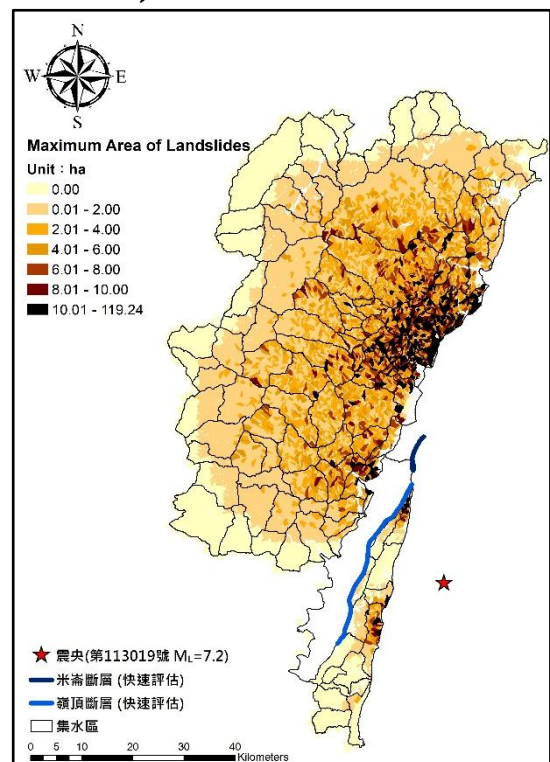


圖 5-17 PGA 可能最大崩塌面積估計(RSG 詳細評估)

資料來源：本計畫製作。

2. 以 PGV 為致災因子

以下為 RSG 震度資料之詳細評估結果，表 5-5 為各集水區詳細評估結果，圖 5-18~圖 5-21 為各集水區崩塌機率分布和崩塌期望值：

表 5-5 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGV/RSG 詳細評估)

排序	河川/集水區	PGV _{min} (cm/s)	PGV _{max} (cm/s)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
1	立霧溪/砂卡礑溪	49	63	0.000	0.110	1.06 ~ 107.30	<0.000	0.025
2	大清水溪/良里溪上游	54	65	0.034	0.123	1.72 ~ 97.66	0.001	0.034
3	大清水溪/良里溪	63	75	0.007	0.206	2.66 ~ 95.01	0.001	0.044
4	和平溪/和平溪	49	68	0.000	0.114	0.54 ~ 62.48	<0.000	0.026
5	大清水溪/和中沿海	70	80	0.073	0.439	4.47 ~ 60.35	0.005	0.074
6	和平溪/澳花	46	74	0.000	0.114	1.68 ~ 55.01	0.001	0.018
7	石公溪/小清水溪	56	70	0.000	0.131	1.20 ~ 47.23	0.001	0.021
8	和平溪/和平南溪	35	55	0.000	0.063	0.00 ~ 42.23	0.000	0.002
9	和平溪/飯包山	45	59	0.000	0.086	0.00 ~ 26.79	0.000	0.008
10	立霧溪/砂卡礑溪上游	44	57	0.000	0.073	0.00 ~ 19.76	0.000	0.010
11	立霧溪/長春祠	41	54	0.000	0.062	0.29 ~ 12.66	<0.000	0.007
12	立霧溪/立霧溪	44	56	0.000	0.071	0.00 ~ 9.54	0.000	0.014
13	和平溪/谷風	50	71	0.000	0.098	0.00 ~ 8.22	0.000	0.007
14	南澳溪/金洋	42	55	0.000	0.038	0.00 ~ 2.04	0.000	0.001
15	美崙溪/美崙溪	42	50	0.000	0.026	0.00 ~ 0.94	0.000	0.001
16	花蓮溪/花蓮溪	33	53	0.000	0.058	0.00 ~ 0.62	0.000	0.008
	合計					13.61 ~ 647.85		

資料來源：本計畫製作。

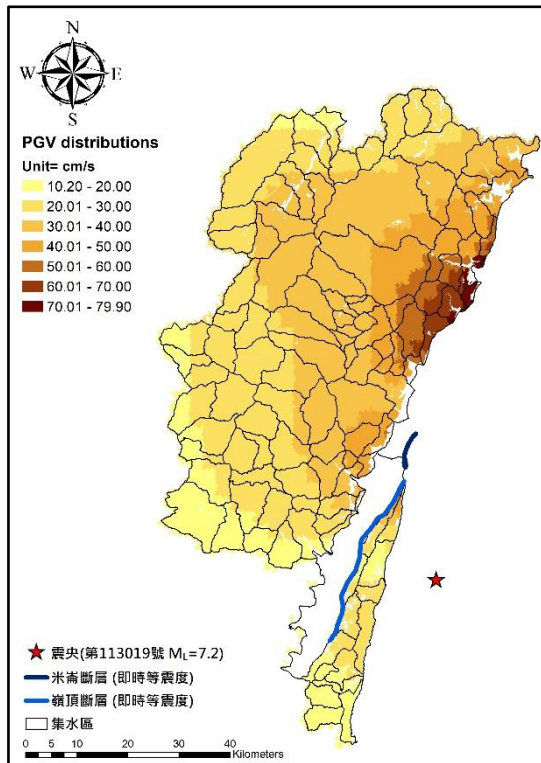


圖 5-18 PGV 分布(RSG 詳細評估)

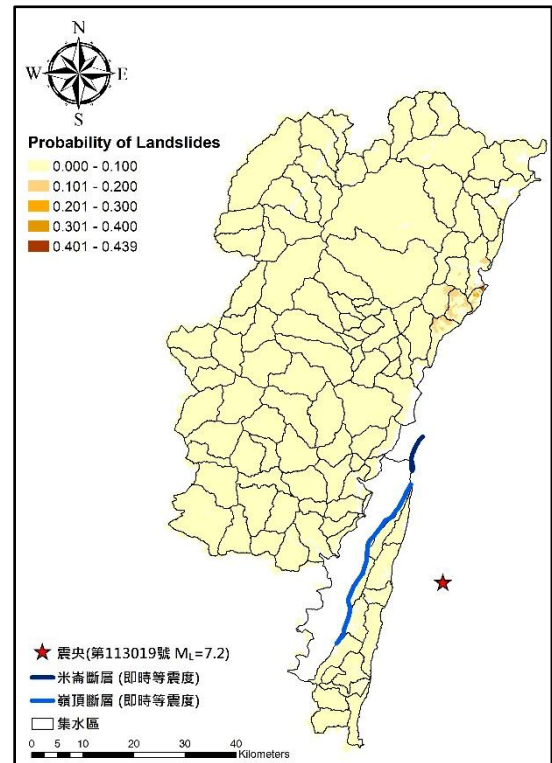


圖 5-19 PGV 崩塌機率分布(RSG 詳細評估)

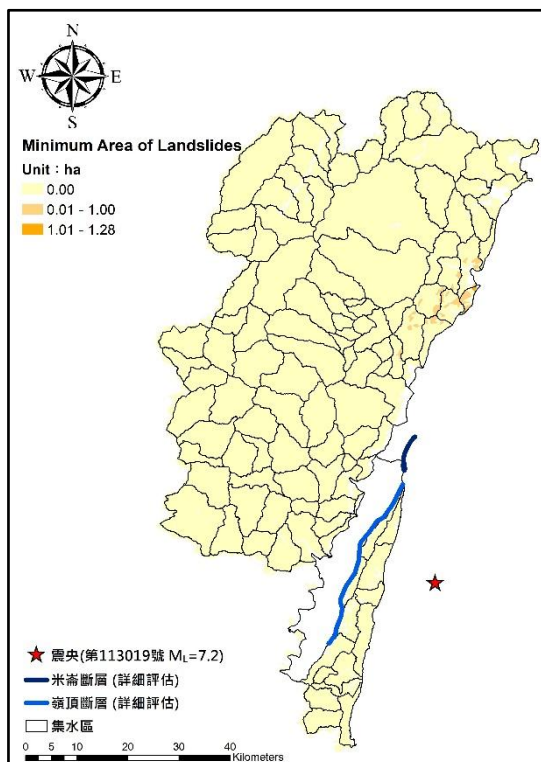


圖 5-20 PGV 最小崩塌面積估計(RSG 詳細評估)

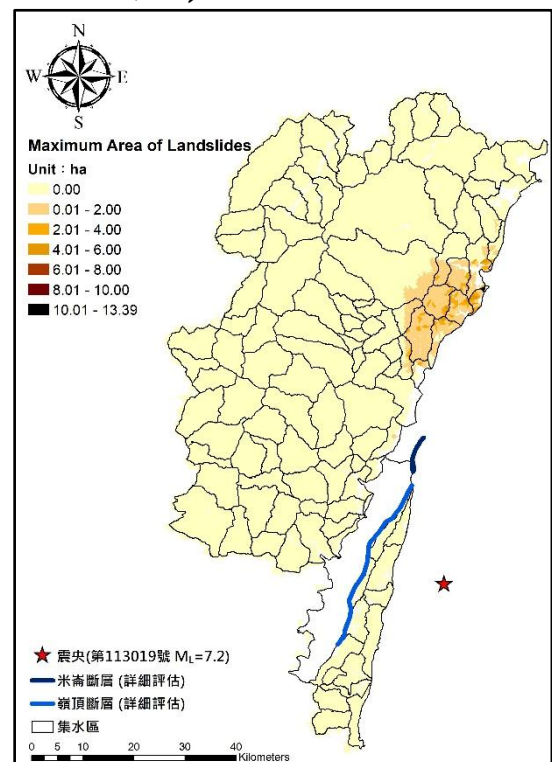


圖 5-21 PGV 可能最大崩塌面積估計(RSG 詳細評估)

資料來源：本計畫製作。

五、基於 IDW 之震後崩塌快速評估

1. 以 PGA 為致災因子

以下為 IDW 震度資料之快速評估結果，表 5-6 為各集水區快速評估結果，圖 5-22～圖 5-25 為各集水區崩塌機率分布和崩塌期望值：

表 5-6 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/IDW 快速評估)

編號	河川/集水區	PGA _{min} (gal)	PGA _{max} (gal)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
1	和平溪/和平南溪	341	565	0.077	0.366	76.28 ~ 1653.06	0.004	0.086
2	立霧溪/砂卡礑溪	556	1084	0.220	0.833	100.31 ~ 1131.49	0.024	0.268
3	和平溪/和平北溪	205	401	0.000	0.146	28.91 ~ 958.99	0.001	0.035
4	三棧溪/三棧溪	318	521	0.068	0.306	62.80 ~ 925.25	0.007	0.104
5	石公溪/小清水溪	537	986	0.308	1.000	81.27 ~ 870.55	0.036	0.383
6	立霧溪/立霧溪上游	354	522	0.100	0.304	49.81 ~ 777.29	0.007	0.109
7	立霧溪/九曲洞	517	750	0.211	0.589	53.10 ~ 623.68	0.016	0.188
8	立霧溪/長春祠	755	1089	0.455	0.829	57.29 ~ 611.37	0.032	0.345
9	花蓮溪/巴托魯溪	443	485	0.137	0.250	33.93 ~ 602.28	0.006	0.105
10	加蘭溪/加蘭溪	326	568	0.001	0.916	52.46 ~ 593.53	0.016	0.181
11	立霧溪/老西溪	530	740	0.202	0.554	40.67 ~ 545.49	0.013	0.180
12	立霧溪/托博瀾溪	368	480	0.105	0.252	33.53 ~ 526.47	0.006	0.086
13	立霧溪/小瓦黑爾溪	379	489	0.101	0.263	30.17 ~ 503.43	0.005	0.090
14	立霧溪/瓦黑蘭溪	337	497	0.075	0.273	24.30 ~ 489.10	0.004	0.085
15	花蓮溪/龍溪	369	465	0.084	0.232	23.47 ~ 485.14	0.004	0.078
16	立霧溪/陶塞溪	359	510	0.082	0.242	20.86 ~ 461.88	0.004	0.082
17	三棧溪/三棧北溪	288	793	0.000	0.633	38.72 ~ 458.77	0.011	0.134
18	大甲溪/南湖溪上游	272	391	0.038	0.133	3.05 ~ 440.51	<0.000	0.040
19	花蓮溪/木瓜溪	410	473	0.108	0.232	27.85 ~ 439.77	0.006	0.090
20	水璉溪/水璉沿海	329	618	0.002	0.984	34.68 ~ 396.94	0.021	0.240
21	花蓮溪/大清水溪	409	476	0.113	0.246	27.18 ~ 389.10	0.006	0.089
22	花蓮溪/銅門	431	512	0.144	0.294	31.17 ~ 377.06	0.009	0.111

表 5-6 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/IDW 快速評估)

編號	河川/集水區	PGA _{min} (gal)	PGA _{max} (gal)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
23	大清水溪/良里溪上游	402	589	0.143	0.398	27.68 ~ 370.09	0.010	0.128
24	立霧溪/砂卡礑溪上游	530	728	0.217	0.566	30.98 ~ 366.66	0.016	0.192
25	立霧溪/燕子口	673	917	0.435	0.717	33.81 ~ 358.61	0.028	0.293
26	花蓮溪/木瓜溪中游	471	503	0.154	0.282	23.03 ~ 348.40	0.008	0.116
27	美崙溪/美侖溪上游	435	496	0.153	0.273	22.79 ~ 308.11	0.008	0.109
28	立霧溪/立霧溪	859	1097	0.569	1.000	28.14 ~ 295.43	0.040	0.422
29	立霧溪/塔次基里	322	411	0.062	0.154	9.77 ~ 288.72	0.002	0.049
30	大清水溪/良里溪	397	549	0.132	0.632	19.32 ~ 272.59	0.009	0.125
31	花蓮溪/天長溪	356	424	0.079	0.179	12.29 ~ 270.78	0.003	0.064
32	花蓮溪/朝保	215	615	0.000	0.982	20.41 ~ 263.37	0.012	0.150
33	濁水溪/濁水溪上游	293	371	0.048	0.117	2.28 ~ 260.02	<0.000	0.045
34	花蓮溪/榕樹	461	509	0.159	0.451	21.89 ~ 250.16	0.011	0.125
35	花蓮溪/安來溪	313	410	0.057	0.160	7.23 ~ 247.36	0.001	0.047
36	南澳溪/舊武塔	254	376	0.029	0.122	4.20 ~ 228.56	0.001	0.038
37	立霧溪/丹錐山	655	917	0.382	0.736	20.72 ~ 219.37	0.027	0.281
38	南澳溪/南澳南溪	358	411	0.081	0.156	11.20 ~ 215.48	0.003	0.058
39	花蓮溪/壽豐溪上游	327	409	0.072	0.158	9.10 ~ 212.86	0.002	0.058
40	和平溪/飯包山	366	432	0.084	0.186	7.20 ~ 212.67	0.002	0.061
41	花蓮溪/檜溪	314	391	0.055	0.140	6.51 ~ 189.15	0.002	0.047
42	花蓮溪/荖溪	375	470	0.090	0.232	13.07 ~ 175.40	0.006	0.079
43	立霧溪/上梅園	446	516	0.137	0.288	7.61 ~ 174.38	0.005	0.108
44	花蓮溪/大清水溪上游	323	424	0.060	0.179	2.22 ~ 163.93	0.001	0.059
45	立霧溪/鍛鍊山	507	589	0.205	0.363	9.72 ~ 154.56	0.009	0.137
46	花蓮溪/山興	323	494	0.002	0.565	6.51 ~ 152.70	0.003	0.074
47	立霧溪/朝瞰山	495	551	0.167	0.320	7.46 ~ 150.32	0.006	0.126
48	南澳溪/金洋	373	418	0.020	0.161	5.76 ~ 147.84	0.002	0.055
49	蘭陽溪/米磨登溪	275	330	0.043	0.077	0.00 ~ 140.96	0.000	0.031

表 5-6 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/IDW 快速評估)

編號	河川/集水區	PGA _{min} (gal)	PGA _{max} (gal)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
50	花蓮溪/丸田溪	368	412	0.106	0.159	5.88 ~ 138.98	0.003	0.069
51	和平溪/澳花	352	397	0.004	0.135	6.13 ~ 138.82	0.002	0.045
52	美崙溪/美侖溪	371	485	0.018	0.319	10.05 ~ 134.56	0.007	0.091
53	花蓮溪/壽豐溪	242	382	0.000	0.129	4.05 ~ 133.83	0.001	0.032
54	和平溪/和平溪	361	405	0.008	0.156	5.73 ~ 132.18	0.002	0.056
55	濁水溪/塔羅灣溪	217	358	0.000	0.102	1.39 ~ 129.43	<0.000	0.024
56	花蓮溪/吉安溪	480	494	0.156	0.641	11.44 ~ 122.70	0.015	0.157
57	立霧溪/綠水	504	551	0.191	0.347	9.87 ~ 122.00	0.011	0.142
58	立霧溪/下梅園	486	506	0.177	0.267	6.35 ~ 112.65	0.006	0.115
59	花蓮溪/安東軍山	275	330	0.041	0.073	0.00 ~ 111.80	0.000	0.028
60	蘭陽溪/夫布爾溪	265	315	0.031	0.066	0.52 ~ 108.99	<0.000	0.027
61	花蓮溪/怡堪溪	266	347	0.035	0.090	2.57 ~ 108.35	0.001	0.028
62	大甲溪/碧綠山	253	355	0.030	0.101	0.49 ~ 108.22	<0.000	0.028
63	南澳溪/金岳	233	345	0.000	0.090	1.63 ~ 105.78	<0.000	0.025
64	烏溪/梅松山	263	357	0.030	0.102	1.56 ~ 101.70	0.001	0.035
65	大甲溪/西合歡山	192	357	0.000	0.103	0.52 ~ 99.11	<0.000	0.024
66	濁水溪/北溪	213	326	0.000	0.074	0.00 ~ 98.04	0.000	0.018
67	立霧溪/天祥	489	520	0.171	0.281	6.06 ~ 95.09	0.007	0.115
68	花蓮溪/清昌溪上游	379	423	0.097	0.171	3.95 ~ 92.54	0.003	0.067
69	立霧溪/谷園	489	534	0.164	0.289	4.21 ~ 89.66	0.005	0.113
70	花蓮溪/翡翠谷	497	510	0.214	0.282	7.86 ~ 88.89	0.011	0.127
71	花蓮溪/大觀	270	297	0.036	0.052	0.30 ~ 88.30	<0.000	0.022
72	花蓮溪/白鮑溪	307	431	0.051	0.154	3.68 ~ 87.29	0.002	0.047
73	花蓮溪/清水嶺	268	301	0.033	0.057	0.54 ~ 85.79	<0.000	0.024
74	花蓮溪/大安山	298	340	0.054	0.086	1.24 ~ 82.84	<0.000	0.033
75	濁水溪/平靜	212	339	0.000	0.083	0.00 ~ 82.69	0.000	0.015
76	蘭陽溪/實谷富溪	240	316	0.000	0.067	0.24 ~ 82.23	<0.000	0.023

表 5-6 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/IDW 快速評估)

編號	河川/集水區	PGA _{min} (gal)	PGA _{max} (gal)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
77	花蓮溪/草山	255	303	0.028	0.058	0.25 ~ 80.60	<0.000	0.023
78	南澳溪/南澳北溪	338	378	0.003	0.117	1.07 ~ 79.05	0.001	0.043
79	大甲溪/有勝溪	261	308	0.030	0.061	0.00 ~ 71.23	0.000	0.023
80	蘭陽溪/四重溪	247	321	0.000	0.070	0.00 ~ 69.51	0.000	0.023
81	濁水溪/南溪	165	317	0.000	0.065	0.00 ~ 68.01	0.000	0.007
82	蕃寮溪/蕃寮溪	201	520	0.000	0.692	4.20 ~ 66.02	0.003	0.045
83	南澳溪/水源山	188	341	0.000	0.083	0.00 ~ 63.72	0.000	0.006
84	花蓮溪/馬大鞍溪中游	214	270	0.000	0.040	0.00 ~ 57.98	0.000	0.010
85	立霧溪/立霧	489	513	0.167	0.291	3.52 ~ 53.25	0.007	0.111
86	花蓮溪/鳳林溪	243	288	0.000	0.048	0.53 ~ 52.42	<0.000	0.016
87	花蓮溪/北丹大山	221	285	0.000	0.047	0.00 ~ 50.96	0.000	0.010
88	花蓮溪/萬里橋溪	269	286	0.037	0.048	0.81 ~ 48.39	<0.000	0.022
89	南澳溪/南澳	287	387	0.000	0.108	0.84 ~ 43.35	<0.000	0.017
90	大清水溪/和中沿海	376	456	0.015	0.347	2.39 ~ 38.80	0.003	0.048
91	花蓮溪/壽山	259	431	0.000	0.159	1.05 ~ 29.26	0.001	0.028
92	花蓮溪/萬榮	258	282	0.000	0.044	0.00 ~ 27.52	0.000	0.017
93	烏溪/力行	188	324	0.000	0.072	0.00 ~ 26.47	0.000	0.011
94	東澳溪/東澳溪	200	307	0.000	0.060	0.00 ~ 26.04	0.000	0.007
95	大甲溪/七家灣溪	194	282	0.000	0.044	0.00 ~ 22.49	0.000	0.006
96	大甲溪/茶岩山	167	280	0.000	0.045	0.00 ~ 22.41	0.000	0.005
97	花蓮溪/馬大鞍溪上游	161	275	0.000	0.043	0.56 ~ 21.71	<0.000	0.003
98	濁水溪/馬海僕溪	213	311	0.000	0.064	0.00 ~ 19.48	0.000	0.009
99	和平溪/谷風	364	374	0.008	0.110	0.50 ~ 19.37	<0.000	0.016
100	淡水河/他開琴溪	135	273	0.000	0.039	0.00 ~ 19.09	0.000	0.001
101	花蓮溪/花蓮溪	542	583	0.210	0.921	1.34 ~ 19.07	0.016	0.231
102	花蓮溪/阿羅朗	237	396	0.000	0.132	0.00 ~ 18.62	0.000	0.007
103	大甲溪/五羅府山	193	274	0.000	0.042	0.00 ~ 14.44	0.000	0.004

表 5-6 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/IDW 快速評估)

編號	河川/集水區	PGA _{min} (gal)	PGA _{max} (gal)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
104	花蓮溪/鯉魚山	473	473	0.301	0.301	1.26 ~ 13.22	0.015	0.158
105	花蓮溪/米棧	203	381	0.000	0.098	0.00 ~ 12.80	0.000	0.011
106	濁水溪/卡社溪	101	260	0.000	0.033	0.00 ~ 8.38	0.000	0.001
107	豐濱溪/豐濱沿海	182	293	0.000	0.039	0.00 ~ 8.22	0.000	0.004
108	花蓮溪/馬大鞍溪	240	262	0.000	0.035	0.00 ~ 7.69	0.000	0.008
109	烏溪/瑞岩溪	171	268	0.000	0.036	0.00 ~ 5.81	0.000	0.001
110	烏溪/翠巒	170	276	0.000	0.037	0.00 ~ 5.65	0.000	0.001
111	豐濱溪/溪底	261	352	0.000	0.071	0.00 ~ 5.21	0.000	0.002
112	大甲溪/碧綠溪	167	262	0.000	0.035	0.00 ~ 5.11	0.000	0.002
113	大甲溪/四季郎溪	180	263	0.000	0.034	0.00 ~ 4.76	0.000	0.001
114	蘭陽溪/加納富溪	183	258	0.000	0.034	0.00 ~ 3.91	0.000	0.001
115	豐濱溪/貓公溪	244	316	0.000	0.044	0.00 ~ 2.15	0.000	0.002
116	蘭陽溪/白嶺溪	182	265	0.000	0.036	0.00 ~ 1.13	0.000	<0.000
117	豐濱溪/豐濱溪	203	262	0.000	0.031	0.00 ~ 0.84	0.000	<0.000
	合計					1417 ~ 24796		

資料來源：本計畫製作。

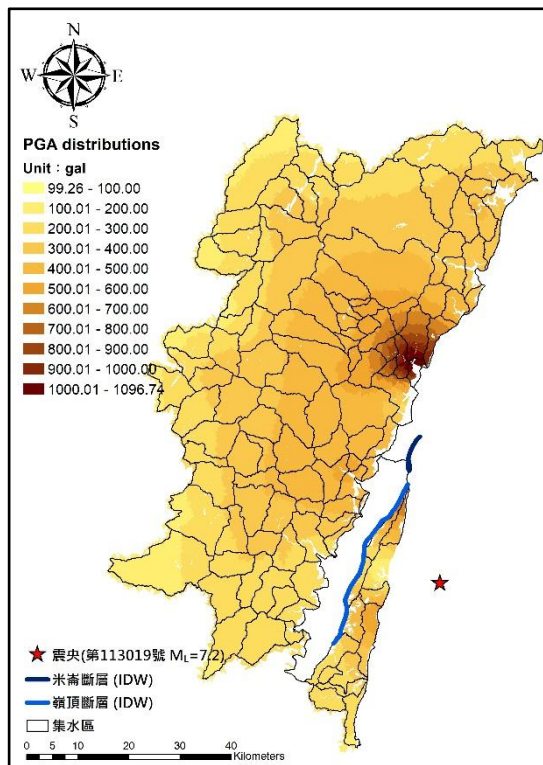


圖 5-22 PGA 分布(IDW 快速評估)

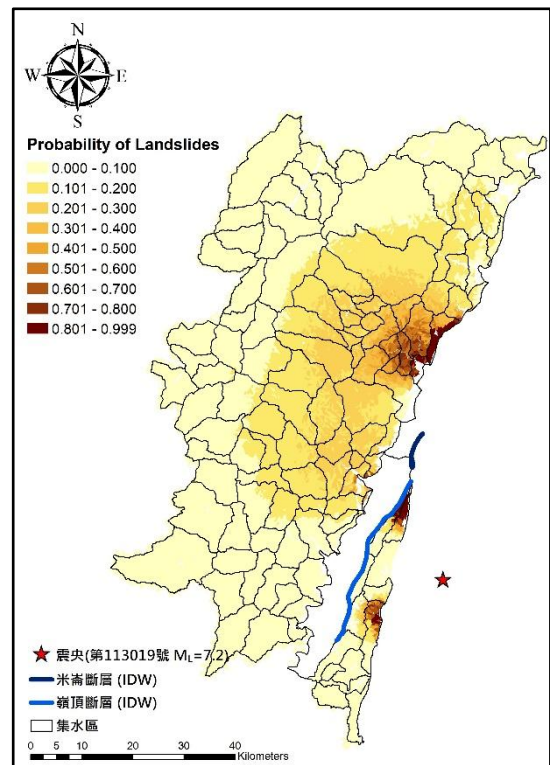


圖 5-23 PGA 崩塌機率分布(IDW 快速評估)

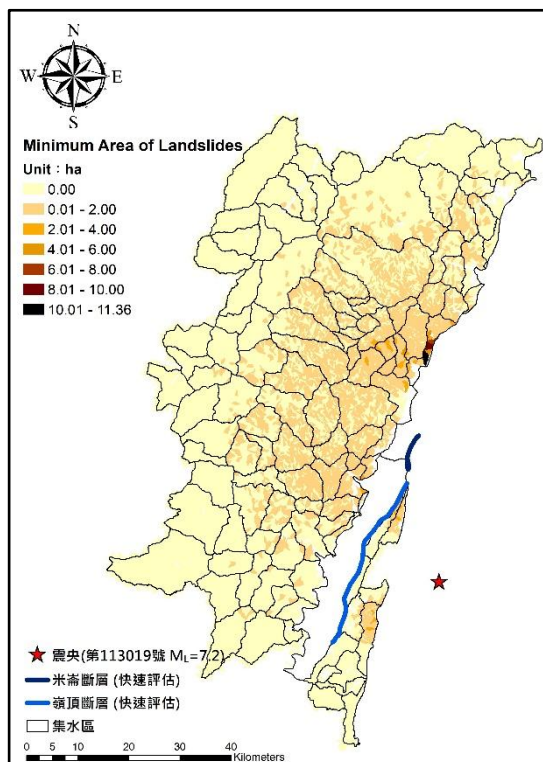


圖 5-24 PGA 最小崩塌面積(IDW 快速評估)

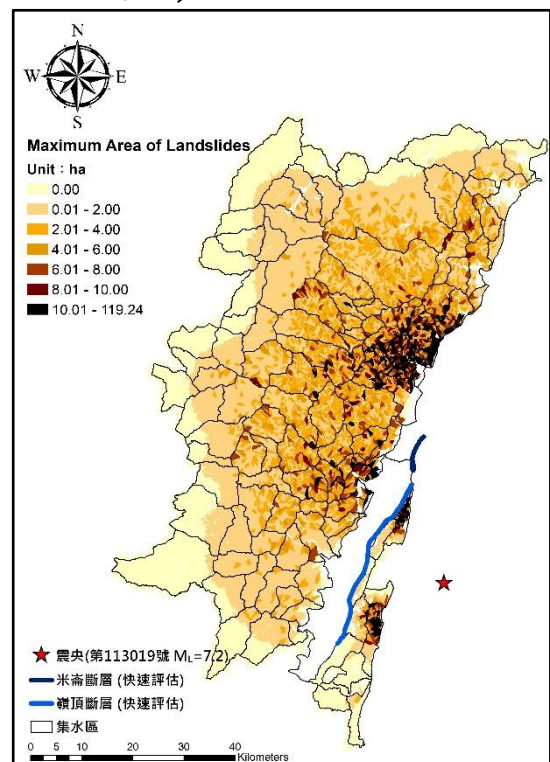


圖 5-25 PGA 可能最大崩塌面積(IDW 快速評估)

資料來源：本計畫製作。

2. 以 PGV 為致災因子

以下為 IDW 震度資料之快速評估結果，表 5-7 為各集水區快速評估結果，圖 5-26~圖 5-29 為各集水區崩塌機率分布和崩塌期望值：

表 5-7 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGV/IDW 快速評估)

排序	河川/集水區	PGV _{min} (cm/s)	PGV _{max} (cm/s)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
1	立霧溪/砂卡礑溪	52	59	0.030	0.089	0.00 ~ 87.97	0.000	0.021
2	和平溪/和平南溪	35	55	0.000	0.067	0.00 ~ 87.42	0.000	0.005
3	大清水溪/良里溪上游	54	61	0.033	0.098	0.87 ~ 85.30	<0.000	0.029
4	和平溪/飯包山	50	58	0.028	0.082	0.61 ~ 78.51	<0.000	0.023
5	和平溪/澳花	50	77	0.000	0.308	1.51 ~ 77.92	<0.000	0.025
6	和平溪/和平溪	55	67	0.000	0.107	0.53 ~ 73.23	<0.000	0.031
7	大清水溪/良里溪	58	65	0.000	0.116	0.78 ~ 66.65	<0.000	0.031
8	立霧溪/長春祠	50	60	0.026	0.088	0.46 ~ 44.54	<0.000	0.025
9	石公溪/小清水溪	55	58	0.000	0.080	0.00 ~ 25.21	0.000	0.011
10	立霧溪/砂卡礑溪上游	47	53	0.000	0.055	0.00 ~ 23.54	0.000	0.012
11	大清水溪/和中沿海	62	75	0.005	0.153	0.85 ~ 19.28	0.001	0.024
12	立霧溪/立霧溪	53	60	0.000	0.090	0.49 ~ 18.89	0.001	0.027
13	立霧溪/燕子口	47	55	0.000	0.064	0.26 ~ 15.85	<0.000	0.013
14	和平溪/和平北溪	28	53	0.000	0.053	0.00 ~ 12.70	0.000	<0.000
15	立霧溪/丹錐山	47	55	0.000	0.066	0.00 ~ 10.48	0.000	0.013
16	南澳溪/南澳南溪	45	53	0.000	0.040	0.00 ~ 8.00	0.000	0.002
17	南澳溪/金洋	46	52	0.000	0.037	0.00 ~ 6.16	0.000	0.002
18	和平溪/谷風	48	65	0.000	0.054	0.00 ~ 4.70	0.000	0.004
19	立霧溪/老西溪	38	51	0.000	0.045	0.00 ~ 2.13	0.000	0.001
20	三棧溪/三棧北溪	34	51	0.000	0.049	0.00 ~ 2.06	<0.000	0.001
21	美崙溪/美崙溪	39	52	0.000	0.046	0.00 ~ 1.41	0.000	0.001
22	立霧溪/九曲洞	40	50	0.000	0.044	0.00 ~ 0.52	0.000	<0.000
23	花蓮溪/花蓮溪	45	51	0.000	0.049	0.00 ~ 0.38	0.000	0.005
	合計					6.36 ~ 752.84		

資料來源：本計畫製作。

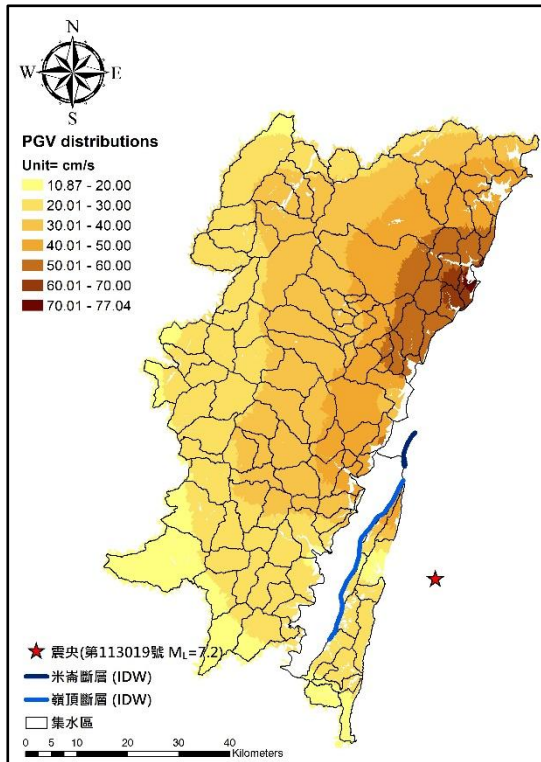


圖 5-26 PGV 分布(IDW)

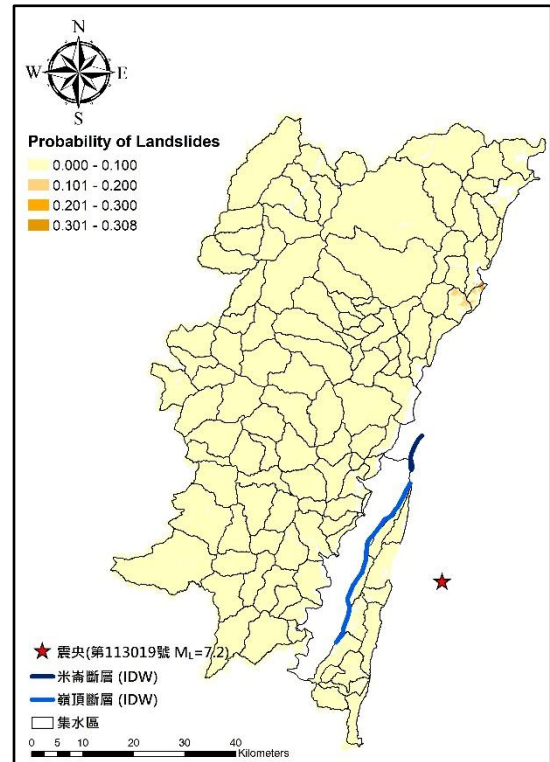


圖 5-27 PGV 崩塌機率分布(IDW 快速評估)

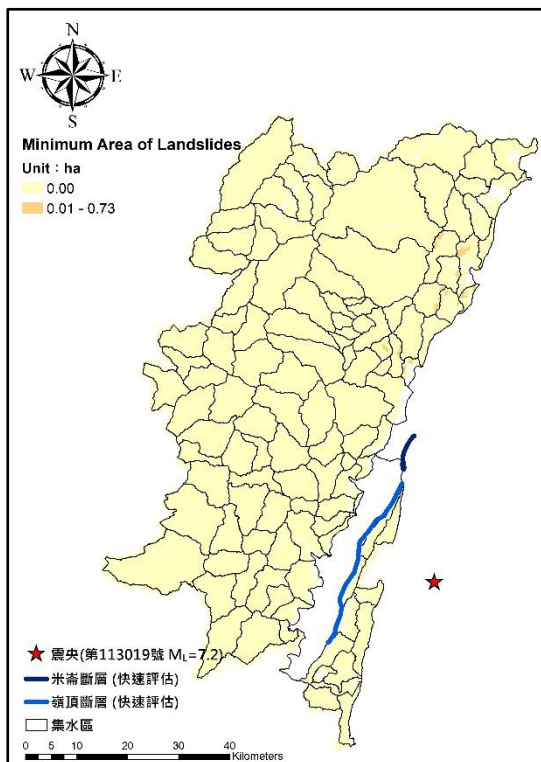


圖 5-28 PGV 最小崩塌面積(IDW 快速評估)

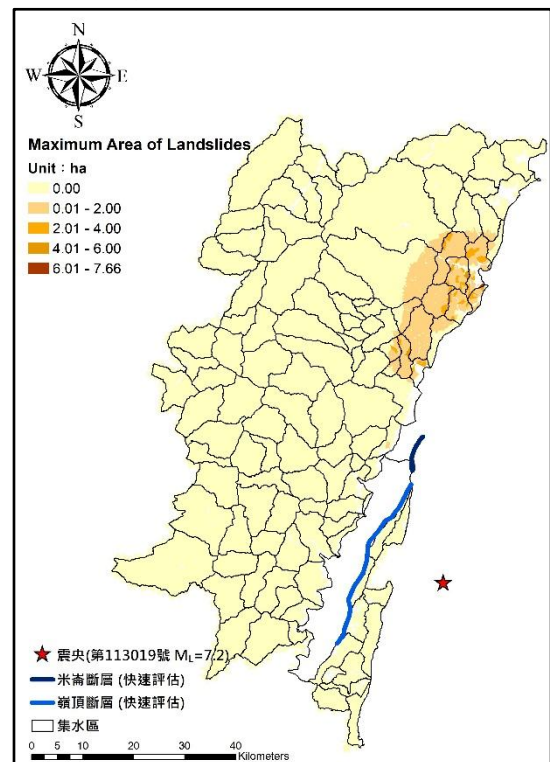


圖 5-29 PGV 可能最大崩塌面積(IDW 快速評估)

資料來源：本計畫製作。

六、基於 IDW 之震後崩塌詳細評估

1. 以 PGA 為致災因子

以下為 IDW 震度資料之詳細評估結果，表 5-8 為各集水區詳細評估結果，圖 5-30～圖 5-33 為各集水區崩塌機率分布和崩塌期望值：

表 5-8 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/IDW 詳細評估)

編號	河川/集水區	PGA _{min} (gal)	PGA _{max} (gal)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
1	和平溪/和平南溪	341	565	0.075	0.364	77.19 ~ 1667.78	0.004	0.087
2	立霧溪/砂卡礑溪	556	1084	0.220	0.833	104.89 ~ 1167.16	0.025	0.277
3	和平溪/和平北溪	205	401	0.000	0.146	28.75 ~ 955.77	0.001	0.035
4	三棧溪/三棧溪	318	521	0.068	0.303	65.09 ~ 941.05	0.007	0.105
5	石公溪/小清水溪	537	986	0.287	1.000	81.60 ~ 874.09	0.036	0.385
6	立霧溪/立霧溪上游	354	522	0.096	0.307	49.26 ~ 770.94	0.007	0.108
7	立霧溪/九曲洞	517	750	0.211	0.589	52.44 ~ 611.89	0.016	0.185
8	花蓮溪/巴托魯溪	443	485	0.137	0.250	33.45 ~ 598.97	0.006	0.104
9	加蘭溪/加蘭溪	326	568	0.001	0.913	52.22 ~ 593.64	0.016	0.181
10	立霧溪/長春祠	755	1089	0.413	0.795	54.82 ~ 585.88	0.031	0.331
11	立霧溪/老西溪	530	740	0.202	0.561	42.80 ~ 559.36	0.014	0.184
12	立霧溪/托博瀾溪	368	480	0.105	0.252	33.93 ~ 524.30	0.006	0.086
13	立霧溪/小瓦黑爾溪	379	489	0.100	0.263	31.55 ~ 511.10	0.006	0.091
14	立霧溪/瓦黑蘭溪	337	497	0.075	0.271	24.85 ~ 500.11	0.004	0.087
15	花蓮溪/龍溪	369	465	0.087	0.232	23.42 ~ 493.43	0.004	0.080
16	立霧溪/陶塞溪	359	510	0.080	0.280	21.44 ~ 471.60	0.004	0.083
17	花蓮溪/木瓜溪	410	473	0.108	0.238	28.79 ~ 443.75	0.006	0.090
18	三棧溪/三棧北溪	288	793	0.000	0.589	36.88 ~ 442.17	0.011	0.129
19	大甲溪/南湖溪上游	272	391	0.037	0.134	3.05 ~ 441.13	<0.000	0.040
20	水璉溪/水璉沿海	329	618	0.002	0.979	33.81 ~ 389.99	0.020	0.236
21	花蓮溪/大清水溪	409	476	0.108	0.240	26.71 ~ 387.92	0.006	0.088
22	花蓮溪/銅門	431	512	0.144	0.294	31.92 ~ 382.89	0.009	0.113

表 5-8 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/IDW 詳細評估)

編號	河川/集水區	PGA _{min} (gal)	PGA _{max} (gal)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
23	大清水溪/良里溪上游	402	589	0.137	0.396	28.04 ~ 366.89	0.010	0.127
24	花蓮溪/木瓜溪中游	471	503	0.155	0.282	24.07 ~ 361.42	0.008	0.120
25	立霧溪/砂卡礑溪上游	530	728	0.216	0.566	29.48 ~ 359.38	0.015	0.188
26	立霧溪/燕子口	673	917	0.407	0.717	31.87 ~ 340.27	0.026	0.278
27	美崙溪/美侖溪上游	435	496	0.159	0.273	23.66 ~ 311.55	0.008	0.110
28	立霧溪/立霧溪	859	1097	0.569	1.000	28.18 ~ 295.85	0.040	0.423
29	立霧溪/塔次基里	322	411	0.062	0.163	9.55 ~ 288.66	0.002	0.049
30	花蓮溪/天長溪	356	424	0.079	0.179	12.25 ~ 269.78	0.003	0.064
31	花蓮溪/榕樹	461	509	0.149	0.633	23.30 ~ 265.18	0.012	0.132
32	大清水溪/良里溪	397	549	0.123	0.805	17.75 ~ 262.78	0.008	0.120
33	濁水溪/濁水溪上游	293	371	0.047	0.117	2.29 ~ 260.21	<0.000	0.045
34	花蓮溪/朝保	215	615	0.000	0.987	19.57 ~ 254.19	0.011	0.145
35	花蓮溪/安來溪	313	410	0.057	0.162	7.26 ~ 248.41	0.001	0.048
36	南澳溪/舊武塔	254	376	0.028	0.122	3.96 ~ 228.66	0.001	0.038
37	花蓮溪/壽豐溪上游	327	409	0.072	0.159	9.74 ~ 215.95	0.003	0.059
38	立霧溪/丹錐山	655	917	0.390	0.729	20.15 ~ 213.35	0.026	0.273
39	南澳溪/南澳南溪	358	411	0.079	0.159	10.52 ~ 212.39	0.003	0.058
40	和平溪/飯包山	366	432	0.084	0.186	7.39 ~ 212.10	0.002	0.061
41	花蓮溪/檜溪	314	391	0.055	0.140	6.46 ~ 188.15	0.002	0.047
42	花蓮溪/荖溪	375	470	0.092	0.300	12.67 ~ 172.93	0.006	0.078
43	立霧溪/上梅園	446	516	0.137	0.268	7.98 ~ 170.24	0.005	0.105
44	花蓮溪/大清水溪上游	323	424	0.060	0.179	2.36 ~ 164.00	0.001	0.059
45	立霧溪/鍛鍊山	507	589	0.205	0.373	9.93 ~ 156.05	0.009	0.139
46	花蓮溪/山興	323	494	0.002	0.565	6.02 ~ 149.65	0.003	0.073
47	南澳溪/金洋	373	418	0.020	0.168	6.04 ~ 147.34	0.002	0.055
48	立霧溪/朝瞰山	495	551	0.167	0.320	6.87 ~ 145.95	0.006	0.122
49	蘭陽溪/米磨登溪	275	330	0.040	0.077	0.00 ~ 140.16	0.000	0.030

表 5-8 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/IDW 詳細評估)

編號	河川/集水區	PGA _{min} (gal)	PGA _{max} (gal)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
50	和平溪/澳花	352	397	0.004	0.128	6.19 ~ 138.61	0.002	0.045
51	花蓮溪/丸田溪	368	412	0.106	0.160	5.08 ~ 137.11	0.003	0.068
52	美崙溪/美侖溪	371	485	0.018	0.393	10.41 ~ 136.70	0.007	0.093
53	花蓮溪/壽豐溪	242	382	0.000	0.129	4.17 ~ 133.30	0.001	0.032
54	和平溪/和平溪	361	405	0.008	0.156	5.58 ~ 130.37	0.002	0.055
55	濁水溪/塔羅灣溪	217	358	0.000	0.104	1.39 ~ 129.58	<0.000	0.024
56	立霧溪/綠水	504	551	0.191	0.338	9.10 ~ 120.63	0.011	0.140
57	花蓮溪/吉安溪	480	494	0.157	0.641	10.97 ~ 117.79	0.014	0.151
58	立霧溪/下梅園	486	506	0.177	0.286	6.74 ~ 115.06	0.007	0.117
59	花蓮溪/安東軍山	275	330	0.041	0.073	0.00 ~ 111.82	0.000	0.028
60	蘭陽溪/夫布爾溪	265	315	0.031	0.066	0.54 ~ 108.46	<0.000	0.027
61	花蓮溪/怡堪溪	266	347	0.035	0.090	2.81 ~ 108.39	0.001	0.028
62	大甲溪/碧綠山	253	355	0.029	0.096	0.49 ~ 108.25	<0.000	0.028
63	南澳溪/金岳	233	345	0.000	0.088	1.59 ~ 105.09	<0.000	0.025
64	烏溪/梅松山	263	357	0.030	0.103	1.58 ~ 102.08	0.001	0.035
65	大甲溪/西合歡山	192	357	0.000	0.103	0.52 ~ 99.56	<0.000	0.024
66	濁水溪/北溪	213	326	0.000	0.074	0.00 ~ 98.61	0.000	0.018
67	立霧溪/天祥	489	520	0.160	0.281	6.23 ~ 95.97	0.008	0.116
68	花蓮溪/清昌溪上游	379	423	0.093	0.166	3.95 ~ 92.93	0.003	0.068
69	立霧溪/谷園	489	534	0.164	0.281	4.22 ~ 89.28	0.005	0.113
70	花蓮溪/大觀	270	297	0.036	0.052	0.30 ~ 88.73	<0.000	0.023
71	花蓮溪/翡翠谷	497	510	0.204	0.287	7.77 ~ 88.63	0.011	0.126
72	花蓮溪/白鮑溪	307	431	0.051	0.172	3.67 ~ 86.54	0.002	0.047
73	花蓮溪/清水嶺	268	301	0.033	0.057	0.54 ~ 85.84	<0.000	0.024
74	濁水溪/平靜	212	339	0.000	0.085	0.00 ~ 83.02	0.000	0.015
75	花蓮溪/大安山	298	340	0.054	0.086	1.23 ~ 82.43	<0.000	0.032
76	蘭陽溪/實谷富溪	240	316	0.000	0.067	0.24 ~ 82.33	<0.000	0.023

表 5-8 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/IDW 詳細評估)

編號	河川/集水區	PGA _{min} (gal)	PGA _{max} (gal)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
77	花蓮溪/草山	255	303	0.028	0.058	0.25 ~ 80.81	<0.000	0.023
78	南澳溪/南澳北溪	338	378	0.002	0.117	1.07 ~ 78.58	0.001	0.043
79	大甲溪/有勝溪	261	308	0.030	0.061	0.00 ~ 71.49	0.000	0.024
80	蘭陽溪/四重溪	247	321	0.000	0.070	0.00 ~ 68.83	0.000	0.023
81	濁水溪/南溪	165	317	0.000	0.065	0.00 ~ 68.65	0.000	0.007
82	蕃寮溪/蕃寮溪	201	520	0.000	0.692	4.29 ~ 66.90	0.003	0.045
83	南澳溪/水源山	188	341	0.000	0.083	0.00 ~ 63.44	0.000	0.006
84	花蓮溪/馬大鞍溪中游	214	270	0.000	0.040	0.00 ~ 57.73	0.000	0.010
85	立霧溪/立霧	489	513	0.171	0.296	3.68 ~ 54.76	0.008	0.114
86	花蓮溪/鳳林溪	243	288	0.000	0.049	0.53 ~ 53.41	<0.000	0.016
87	花蓮溪/北丹大山	221	285	0.000	0.047	0.00 ~ 51.62	0.000	0.010
88	花蓮溪/萬里橋溪	269	286	0.038	0.048	0.81 ~ 48.25	<0.000	0.022
89	南澳溪/南澳	287	387	0.000	0.108	0.84 ~ 43.47	<0.000	0.017
90	大清水溪/和中沿海	376	456	0.016	0.347	2.43 ~ 39.72	0.003	0.049
91	花蓮溪/壽山	259	431	0.000	0.159	0.99 ~ 28.97	0.001	0.027
92	花蓮溪/萬榮	258	282	0.000	0.044	0.00 ~ 27.14	0.000	0.016
93	烏溪/力行	188	324	0.000	0.072	0.00 ~ 26.46	0.000	0.011
94	東澳溪/東澳溪	200	307	0.000	0.059	0.00 ~ 26.10	0.000	0.007
95	大甲溪/七家灣溪	194	282	0.000	0.043	0.00 ~ 22.73	0.000	0.006
96	大甲溪/茶岩山	167	280	0.000	0.045	0.00 ~ 22.35	0.000	0.005
97	花蓮溪/馬大鞍溪上游	161	275	0.000	0.043	0.56 ~ 21.81	<0.000	0.003
98	和平溪/谷風	364	374	0.008	0.119	0.50 ~ 19.70	<0.000	0.016
99	濁水溪/馬海僕溪	213	311	0.000	0.064	0.00 ~ 19.29	0.000	0.009
100	花蓮溪/花蓮溪	542	583	0.212	0.921	1.34 ~ 19.02	0.016	0.230
101	淡水河/他開琴溪	135	273	0.000	0.041	0.00 ~ 18.60	0.000	0.001
102	花蓮溪/阿羅朗	237	396	0.000	0.122	0.00 ~ 18.14	0.000	0.007
103	花蓮溪/鯉魚山	473	473	0.412	0.412	1.72 ~ 18.06	0.021	0.216

表 5-8 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGA/IDW 詳細評估)

編號	河川/集水區	PGA _{min} (gal)	PGA _{max} (gal)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
104	大甲溪/五羅府山	193	274	0.000	0.042	0.00 ~ 14.08	0.000	0.004
105	花蓮溪/米棧	203	381	0.000	0.098	0.00 ~ 12.84	0.000	0.011
106	濁水溪/卡社溪	101	260	0.000	0.034	0.00 ~ 8.44	0.000	0.001
107	豐濱溪/豐濱沿海	182	293	0.000	0.041	0.00 ~ 8.26	0.000	0.004
108	花蓮溪/馬大鞍溪	240	262	0.000	0.035	0.00 ~ 7.51	0.000	0.008
109	烏溪/瑞岩溪	171	268	0.000	0.038	0.00 ~ 6.21	0.000	0.001
110	烏溪/翠巒	170	276	0.000	0.037	0.00 ~ 5.76	0.000	0.001
111	豐濱溪/溪底	261	352	0.000	0.072	0.00 ~ 5.21	0.000	0.002
112	大甲溪/四季郎溪	180	263	0.000	0.034	0.00 ~ 4.73	0.000	0.001
113	大甲溪/碧綠溪	167	262	0.000	0.032	0.00 ~ 4.60	0.000	0.002
114	蘭陽溪/加納富溪	183	258	0.000	0.032	0.00 ~ 3.73	0.000	0.001
115	豐濱溪/貓公溪	244	316	0.000	0.045	0.00 ~ 2.15	0.000	0.002
116	蘭陽溪/白嶺溪	182	265	0.000	0.033	0.00 ~ 1.17	0.000	<0.000
117	豐濱溪/豐濱溪	203	262	0.000	0.030	0.00 ~ 0.85	0.000	<0.000
	合計					1420.5 4 ~ 24815.09		

資料來源：本計畫製作。

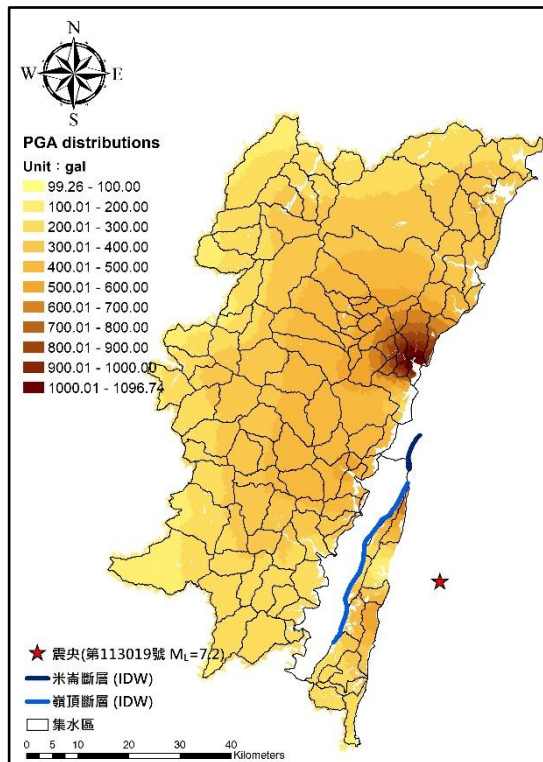


圖 5-30 PGA 分布(IDW 詳細評估)

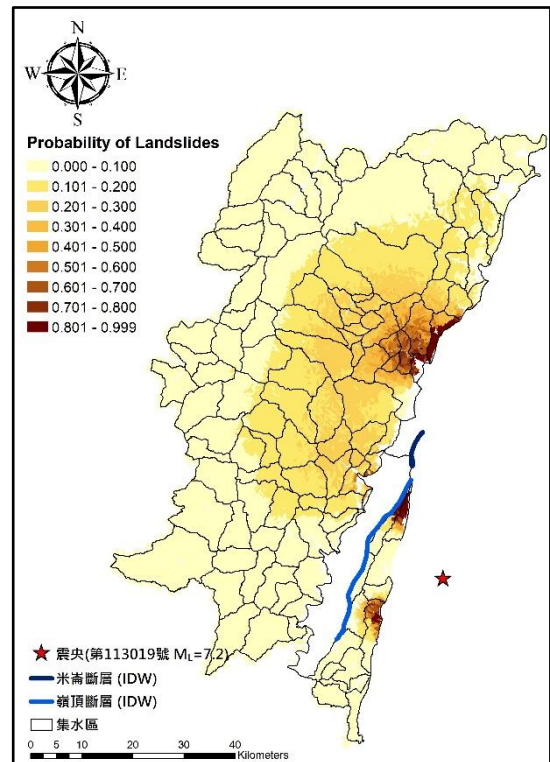


圖 5-31 PGA 崩塌機率分布(IDW 詳細評估)

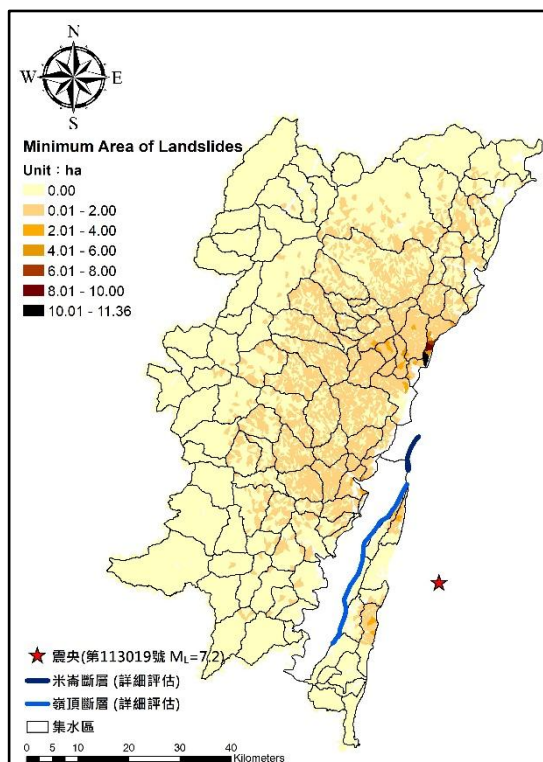


圖 5-32 PGA 最小崩塌面積估計(IDW 詳細評估)

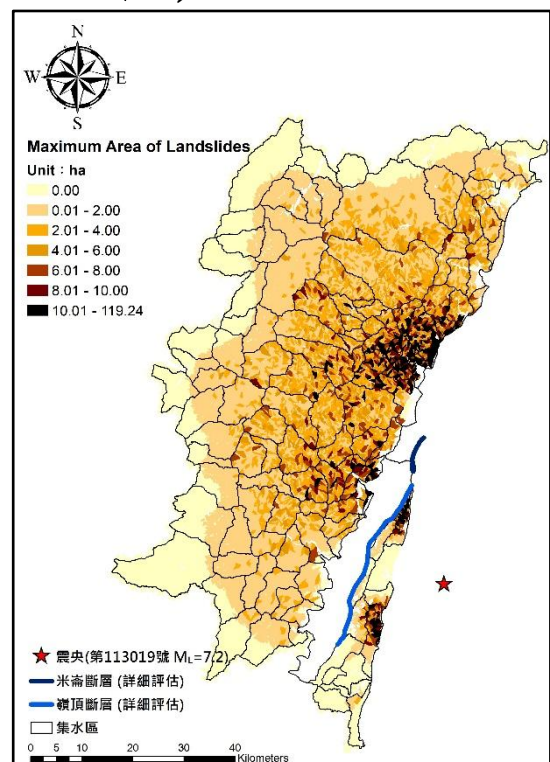


圖 5-33 PGA 可能最大崩塌面積估計 (IDW 詳細評估)

資料來源：本計畫製作。

2. 以 PGV 為致災因子

以下為 IDW 震度資料之詳細評估結果，表 5-9 為各集水區詳細評估結果，圖 5-34~圖 5-37 為各集水區崩塌機率分布和崩塌期望值：

表 5-9 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序(PGV/IDW 詳細評估)

排序	河川/集水區	PGV _{min} (cm/s)	PGV _{max} (cm/s)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	集水區崩塌面積 估計值(ha)	集水區 RL _{min}	集水區 RL _{max}
1	立霧溪/砂卡礑溪	52	59	0.029	0.089	0.00 ~ 96.22	0.000	0.023
2	和平溪/和平南溪	35	55	0.000	0.067	0.00 ~ 89.08	0.000	0.005
3	大清水溪/良里溪上游	54	61	0.033	0.097	0.58 ~ 82.73	<0.000	0.029
4	和平溪/飯包山	50	58	0.027	0.083	0.00 ~ 78.34	<0.000	0.023
5	和平溪/澳花	50	77	0.000	0.308	1.78 ~ 77.29	0.001	0.025
6	和平溪/和平溪	55	67	0.000	0.095	0.27 ~ 67.52	<0.000	0.028
7	大清水溪/良里溪	58	65	0.000	0.121	1.09 ~ 65.87	0.001	0.030
8	立霧溪/長春祠	50	60	0.026	0.079	0.36 ~ 39.75	<0.000	0.022
9	大清水溪/和中沿海	62	75	0.005	0.238	1.83 ~ 29.38	0.002	0.036
10	石公溪/小清水溪	55	58	0.000	0.077	0.28 ~ 26.83	<0.000	0.012
11	立霧溪/砂卡礑溪上游	47	53	0.000	0.057	0.00 ~ 22.63	0.000	0.012
12	立霧溪/立霧溪	53	60	0.000	0.091	0.27 ~ 18.54	<0.000	0.026
13	立霧溪/燕子口	47	55	0.000	0.064	0.00 ~ 13.78	0.000	0.011
14	和平溪/和平北溪	28	53	0.000	0.049	0.00 ~ 12.90	0.000	0.000
15	南澳溪/南澳南溪	45	53	0.000	0.046	0.00 ~ 8.66	0.000	0.002
16	立霧溪/丹錐山	47	55	0.000	0.065	0.00 ~ 8.05	0.000	0.010
17	和平溪/谷風	48	65	0.000	0.072	0.00 ~ 5.96	0.000	0.005
18	南澳溪/金洋	46	52	0.000	0.035	0.00 ~ 5.56	0.000	0.002
19	立霧溪/老西溪	38	51	0.000	0.048	0.00 ~ 2.33	0.000	0.001
20	美崙溪/美崙溪	39	52	0.000	0.046	0.00 ~ 1.41	0.000	0.001
21	三棧溪/三棧北溪	34	51	0.000	0.028	0.00 ~ 1.16	0.000	<0.000
22	立霧溪/九曲洞	40	50	0.000	0.044	0.00 ~ 0.52	0.000	<0.000
23	花蓮溪/花蓮溪	45	51	0.000	0.049	0.00 ~ 0.38	0.000	0.005
	合計					6.46 ~ 754.90		

資料來源：本計畫整理。

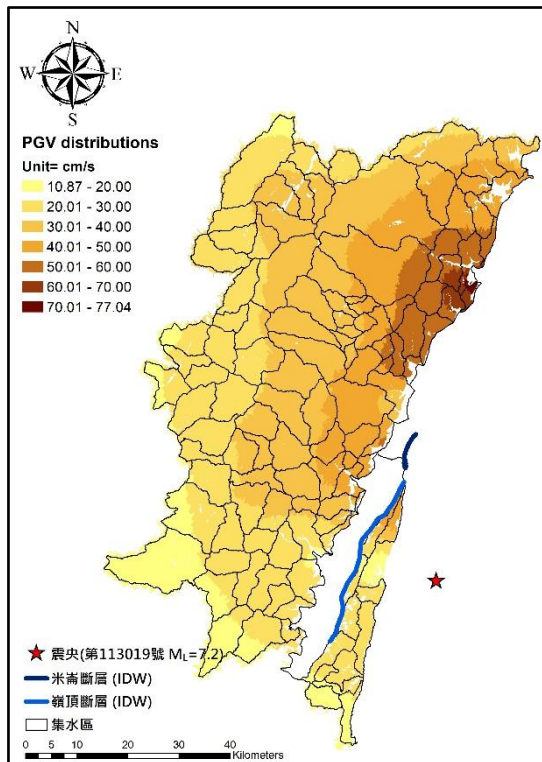


圖 5-34 PGV 分布(IDW 詳細評估)

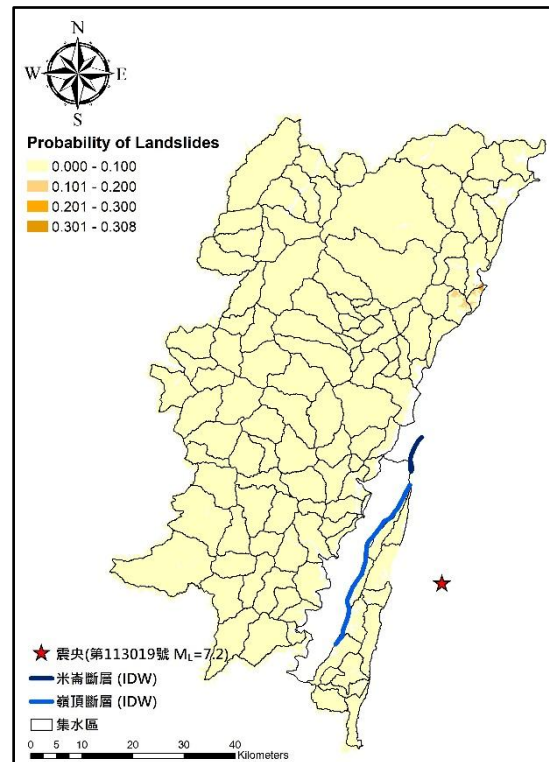


圖 5-35 PGV 崩塌機率分布(IDW 詳細評估)

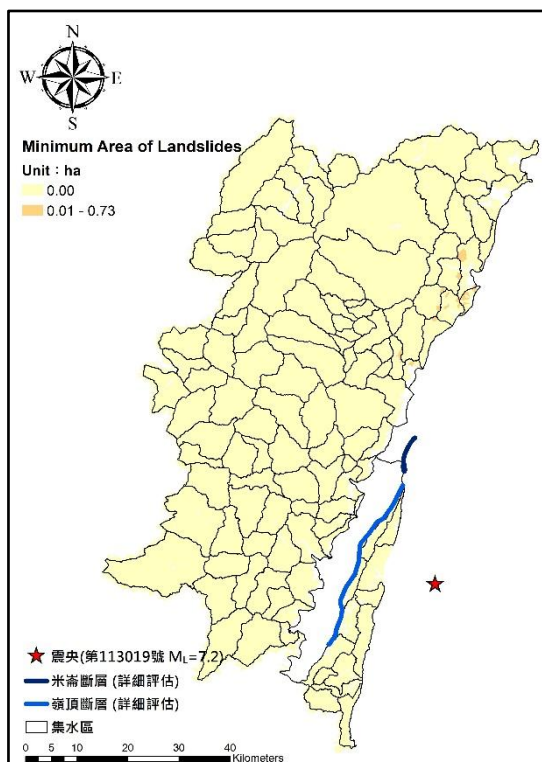


圖 5-36 PGV 最小崩塌面積估計(IDW 詳細評估)

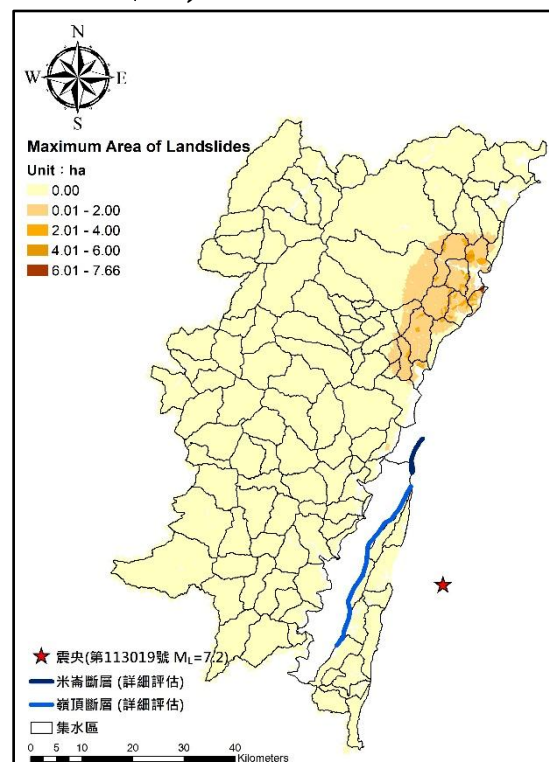


圖 5-37 PGV 可能最大崩塌面積估計 (IDW 詳細評估)

資料來源：本計畫製作。

七、集水區震後崩塌評估討論

如前分析結果所述，地表震度之 RSG 方法和 IDW 方法各有其優缺點，方法之比較如表 5-10 所示。以下針對震度推估方法 (RSG 和 IDW)、快速評估和詳細評估方法討論之。

以下由快速評估與詳細評估二者之差距進行評估模式方法比較，由表中可知在 RSG 方法和 IDW 方法，或是對於 PGA 和 PGV 皆相差甚小，其原因在於此次地震為近海地震，震源模式近似為點震源（震源面較小），且地震影響範圍不大，因此在進行詳細評估之坡面分類計算之結果，與快速評估所採用的防護斷層模式之坡面分類變動不大，因此在評估所得結果幾乎相同，也就是說若以坡面單元是否有影響而言，其崩塌期望值則幾乎無差異。整體而言集水區崩塌期望值差距未達 2% (差值比)，其中詳細評估結果會略為保守。由此可知，以簡化流程達到快速評估為目的之防護斷層模式具有相當效益，對於評估時效確有相當大的助益。

在震度評估方法方面，RSG 方法對於 PGA 之估計較保守，差距約 3%；而 IDW 方法對於 PGV 之估計較保守，差距約 15%。結果顯示震度推估的準確性對於坡地評估確實相當重要，不同方法所得結果差異較大，這也可能受精度差異的影響。然而，對於地震早期評估而言，能夠符合即時且合理有效的方法即已足夠，RSG 方法之推估精度雖較差，但其震度推估結果應更符合真實值，符合應用於即時評估之所需。

表 5-10 RSG 方法和 IDW 方法比較

震度方法	RSG	IDW	差值比	RSG	IDW	差值比
震 度	PGA	PGA		PGV	PGV	
快速評估	25582.21	24796.25	3.17%	639.97	752.84	-14.99%
詳細評估	25600.07	24815.10	3.16%	647.85	754.90	-14.18%
差值比	-0.07%	-0.08%		-1.22%	-0.27%	

註：表中數值為各模式之崩塌期望值。

資料來源：本計畫整理。

第三節 第 019 號地震分析結果討論

一、BigGIS 系統災害崩塌判釋結果

BigGIS 系統根據地震取得之災前災後衛星影像，基於前後期衛星影像判釋此次地震後之新生崩塌地情況，崩塌判釋結果可於 BigGIS 系統下載相關圖資進行進一步分析，最終崩塌判釋成果如圖 5-38 所示。根據該判釋成果，顯示共計有 1948 處新生崩塌地，總面積達 1522.59 ha。

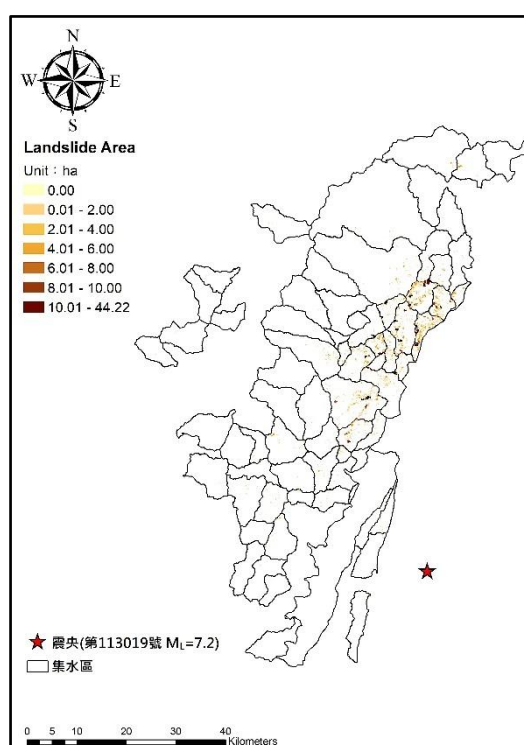


圖 5-38 2024 第 019 號地震崩塌地判釋與比較

表 5-11 2024 第 019 號地震各河川流域崩塌地統計

河川	崩塌面積 (ha)	崩塌地數量	河川	崩塌面積 (ha)	崩塌地數量
立霧溪	458.71	564	南澳溪	15.56	16
大清水溪	399.49	317	水璉溪	3.77	23
石公溪	229.96	179	蘭陽溪	1.26	4
三棧溪	221.14	394	加蘭溪	1.24	3
美崙溪	77.55	127	烏 溪	0.91	5
花蓮溪	63.65	170	大甲溪	0.47	3
和平溪	48.40	140	東澳溪	0.23	1
立霧溪	458.71	564	合計	1522.59	1948

資料來源：本研究整理。

如圖 5-38 所示，地震造成之崩塌地分布集中高震度地區，但距震央有一定距離，新生崩塌地主要分布於 15 個河川，單一新生崩塌地最大達 44.22 ha (大清水溪/良里溪上游)，各河川流域之崩塌地統計如表 5-11 所示，新生崩塌地面積較高之河川為立霧溪、大清水溪、石公溪、三棧溪等。

表 5-12 2024 第 019 號地震各集水區崩塌地和評估結果排序

河川/集水區	崩塌地數量	崩塌面積(ha)	崩塌率(%)	排序	PGA		PGV	
					RSG 排序	IDW 排序	RSG 排序	IDW 排序
石公溪/小清水溪	179	229.96	9.50	1	1	2	6	11
大清水溪/良里溪上游	180	250.92	8.53	2	9	16	3	3
立霧溪/燕子口	54	69.16	5.51	3	7	4	N/A	12
大清水溪/良里溪	114	122.35	5.21	4	6	18	2	2
立霧溪/砂卡礑溪	147	168.90	4.00	5	4	5	5	7
大清水溪/和中沿海	23	26.22	2.63	6	3	37	1	1
美崙溪/美崙溪上游	96	68.34	2.38	7	21	21	N/A	N/A
立霧溪/長春祠	79	41.77	2.32	8	5	3	11	9
立霧溪/九曲洞	85	73.48	2.23	9	12	9	N/A	18
立霧溪/砂卡礑溪上游	81	42.62	2.20	10	8	8	9	10
三棧溪/三棧溪	287	158.23	1.77	11	24	23	N/A	N/A
三棧溪/三棧北溪	107	62.91	1.34	12	18	15	N/A	17
立霧溪/立霧溪	54	13.06	1.03	13	2	1	8	5
立霧溪/綠水	13	7.21	0.84	14	13	13	N/A	N/A
立霧溪/老西溪	13	18.32	0.60	15	10	10	N/A	16
和平溪/和平溪	37	13.07	0.52	16	15	36	4	4
美崙溪/美崙溪	31	9.21	0.45	17	28	25	13	15
立霧溪/丹錐山	8	2.86	0.37	18	11	6	N/A	13
花蓮溪/翡翠谷	11	2.50	0.36	19	16	17	N/A	N/A
花蓮溪/木瓜溪	18	16.59	0.34	20	32	26	N/A	N/A
立霧溪/立霧溪上游	22	20.23	0.28	21	25	22	N/A	N/A
花蓮溪/銅門	13	9.59	0.28	22	27	20	N/A	N/A

河川/集水區	崩塌地 數量	崩塌面積 (ha)	崩塌率 (%)	排序	PGA		PGV	
					RSG 排序	IDW 排序	RSG 排序	IDW 排序
南澳溪/金岳	6	10.76	0.26	23	40	43	N/A	N/A
花蓮溪/怡堪溪	13	8.23	0.21	24	45	42	N/A	N/A
和平溪/飯包山	32	5.85	0.16	25	17	33	10	8
和平溪/和平南溪	49	26.60	0.14	26	14	28	12	14
花蓮溪/壽豐溪上游	16	4.56	0.12	27	41	34	N/A	N/A
水璉溪/水璉沿海	16	2.28	0.12	28	20	7	14	19
花蓮溪/清昌溪上游	8	1.52	0.11	29	36	32	N/A	N/A
花蓮溪/荖溪	15	2.60	0.11	30	34	30	N/A	N/A
花蓮溪/榕樹	8	2.44	0.10	31	22	14	N/A	N/A
花蓮溪/丸田溪	5	1.90	0.09	32	35	31	N/A	N/A
花蓮溪/安來溪	7	3.84	0.07	33	43	38	N/A	N/A
花蓮溪/木瓜溪中游	6	1.73	0.06	34	19	19	N/A	N/A
花蓮溪/大觀	2	1.74	0.04	35	N/A	44	N/A	N/A
南澳溪/水源山	9	4.50	0.04	36	42	46	N/A	N/A
水璉溪/水璉溪	7	1.49	0.04	37	46	49	N/A	N/A
和平溪/澳花	10	1.47	0.04	38	30	40	7	6
加蘭溪/加蘭溪	3	1.24	0.04	39	23	11	N/A	N/A
花蓮溪/檜溪	4	1.31	0.03	40	37	39	N/A	N/A
花蓮溪/朝保	12	0.55	0.03	41	31	12	N/A	N/A
蘭陽溪/米磨登溪	4	1.26	0.03	42	39	41	N/A	N/A
花蓮溪/巴托魯溪	4	1.25	0.02	43	26	24	N/A	N/A
花蓮溪/萬里橋溪	4	0.44	0.02	44	N/A	45	N/A	N/A
花蓮溪/大清水溪上游	1	0.51	0.02	45	38	35	N/A	N/A
烏溪/帖比倫溪	1	0.38	0.01	46	N/A	N/A	N/A	N/A
烏溪/翠巒	4	0.54	0.01	47	47	48	N/A	N/A
花蓮溪/大清水溪	3	0.53	0.01	48	33	27	N/A	N/A
大甲溪/碧綠溪	1	0.27	0.01	49	44	47	N/A	N/A
花蓮溪/龍溪	4	0.61	0.01	50	29	29	N/A	N/A

資料來源：本研究整理。

二、分析結果與討論

各集水區之崩塌地統計如表 5-12 所示，新生崩塌地超過 10 ha 之坡地達 20 處，崩塌率達 2 % 以上之集水區為小清水溪、良里溪上游、燕子口、良里溪、砂卡礑溪、和中沿海、美侖溪上游、長春祠、九曲洞和砂卡礑溪上游等 10 個集水區，其餘集水區崩塌地大多零散且最遠達大甲溪（碧綠溪集水區）、烏溪流域（帖比倫溪、翠巒集水區）等地。整體而言，崩塌地分布與震度分布一致。

本研究震後崩塌評估結果與較高震度地區之新生崩塌地之比較如圖 5-39 所示，顯示高風險坡地（黑色）與新生崩塌地之分布具高度關聯性，以崩塌率前十之集水區而言（如表 5-12 所示右側欄位），風險排序結果 RSG 模式成效較佳，IDW 模式成效次之，本研究針對實際坡面單元之崩塌率進一步分析比較評估成效，並針對評估模式作必要之修正。總結前述，崩塌評估的可靠度主要取決於震度推估是否準確，由於資料處理耗時，在可接受的不確定性下，震後快速評估資訊可提供相關業務單位參考使用。



圖 5-39 震後坡地評估與新生崩塌地結果比較

第四節 震後不安定土砂潛勢分析方法建立

震後不安定土砂潛勢分析方法延續既有坡地易損性分析方法，建立不安定土砂評估分析流程。首先基於前述不安定土砂坡面單元資料庫，建立每個 QPE 網格受那些坡面單元影響之資料庫。本研究發展之評估模式延續不安定土砂集水區潛勢評估方法，以利計算集水區內每個 QPE 網格之震後潛勢值。再根據震後坡地崩塌評估結果，評估崩塌後之土砂貢獻率，或是評估其脆弱度提升幅度，建立震後不安定土砂災害評估模式。

在不安定土砂潛勢分析方法方面，不安定土砂集水區潛勢值 (P) 係定義為每個 QPE 網格之土砂生產潛能與危害程度之乘積，土砂生產潛能即地文脆弱度 (F_p)，危害程度 (H_d) 為高程差/流路距離 ($\Delta H/L$)，計算公式如下：

$$P = \sum_{1}^n F_p \times H_d \quad (5-1)$$

其中， n 為集水區內 QPE 網格數。如圖 5-40 所示為地文脆弱度分布，地文脆弱度係統計 2006~2022 年間的崩塌次數及 $\ln(\text{平均新生崩塌面積})$ 之平均值及標準差，利用平均值和一倍的標準差來分級各 QPE 網格之脆弱度，以矩陣方式將地文脆弱度分為低 (1)、中 (2)、中高 (3)、高 (4) 及極高 (5) 脆弱度。危害程度則係先擷取各出流點及各網格點位置高程，計算其高程差 ΔH ；再計算各網格點至該集水區出流點之水平流路距離 L ，如圖 5-41 所示。

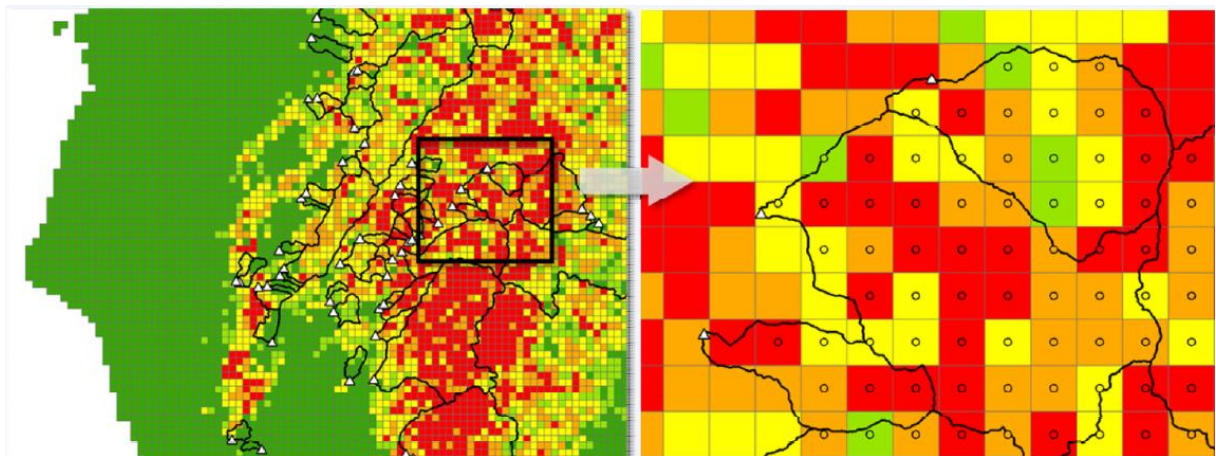


圖 5-40 QPE 網格之地文脆弱度分布情形

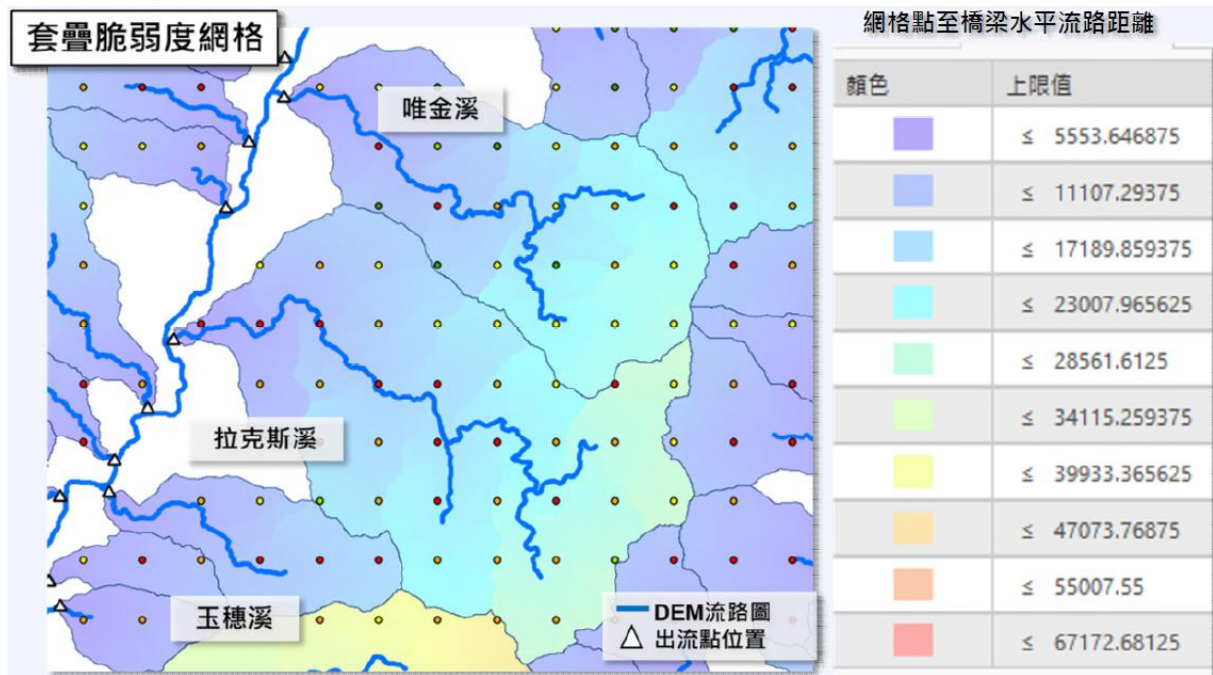


圖 5-41 QPE 網格之危害程度

由前述及式(5-1) 可知，不安定土砂集水區潛勢的評估方式基本是以累積危害程度（崩塌次數）作為基礎，主要變量是土砂生產潛能的變化，因此會因為新事件發生而變化，藉由每年新增的調薪生崩塌查、高精度影像圖資資料的累積，可定時地適當更新及重新圈繪（例如每年更新一次或重大事件後更新一次）。

本研究考慮地震後可能因坡面鬆動或直接崩塌將產生新的崩塌地及土砂生產，進一步即直接影響土砂生產潛能 (F_p)，也就是說地震後對於高震度的地方，其土砂生產潛能將可能會有所提升，這在目前的模式中尚未直接考慮到的，而會在定期的更新中視有無新生崩塌地再予以更新。然而，這對於緊急防災需求將有所不足，若能夠在震後即可進行快速評估，以利緊急應變需求，將對於近年日趨頻繁的地震事件而產生的坡地災害問題有所幫助。

因此，藉由坡地易損性的震後評估方法，可將不安定土砂生產潛能和震後崩塌引致的土砂生產可能性這二項因子適當的結合起來，進而評估震後對地文脆弱度 (F_p) 的影響。本研究基於式(5-1) 相同的概念，在不改變原本評估方法之下，在土砂生產潛能之外獨立地增加震後對土砂生產的影響，

提出震後土砂潛能促進因子 (F_e)，這個因子表達受地震影響而對地文脆弱度可能產生的促進作用，它不影響原本土砂生產潛能，而是獨立地考慮即時地震影響對於土砂生產潛能的增進，因此建議修正震後不安定土砂集水區潛勢值 (P_e)，其計算公式如下：

$$\begin{aligned} P_e &= P + \sum_1^n F_e \times H_d \\ &= \sum_1^n (F_p + F_e) \times H_d \end{aligned} \quad (5-2)$$

上式之公式原理與式(5-1) 完全相同，對於地震造成土砂生產潛能的促進作用可直接疊加在原本土砂生產潛能之上，而土砂潛能促進因子 F_e 可由坡地易損評估模式建立，並使之與土砂生產潛能具有相同之分級意涵，即低 (1)、中 (2)、中高 (3)、高 (4)及極高 (5) 脆弱度。

震後土砂潛能促進因子 (F_e) 的計算方式可應用前述坡地易損評估模式，經由震後崩塌易損評估所得之崩塌期望值計算，其中包括以下四個部分：

1. 坡面單元震後崩塌易損評估 ($\overline{AL}_{su}$)。
2. 不安定土砂潛能期望值評估 ($\overline{AL}_{ws}$)。
3. 震後不安定土砂潛能促進因子估計 (F_e)。
4. 震後不安定土砂集水區潛勢值 (P_e) 估計。

地震後對於震度之估計與本章第二節所述相同，包括 RSG 法和 IDW 法。評估模式亦能夠應用初步評估和詳細評估二種流程，這二部分之分析細節以下不再贅敘。以下僅針對分析流程中四個主要部分進行說明。

第五節 震後不安定土砂災害評估模式建立

震後不安定土砂潛勢值估計如圖 5-42 所示，以下分述之。

一、震後崩塌易損評估

震後崩塌易損評估是針對集水區內之坡面單元，應用坡地易損評估模式進行崩塌期望值評估，崩塌期望值表示坡面單元之崩塌可能性，其中包括最小崩塌面積 ($AL_{ws, min}$) 和可能最大崩塌面積估計 ($AL_{ws, max}$)，詳細計算公式可參考第六章第一節，本研究簡化震後不安定土砂集水區潛勢計算方式，取其平均值為坡面單元不安定土砂潛能期望值 ($\overline{AL}_{su}$)，即：

$$\overline{AL}_{su} = \frac{1}{2}(AL_{su, min} + AL_{su, max}) \quad (5-3)$$

須注意此平均值為三點估計中之最可能估計值，但若採集水區平均值計算結果是相同的。

二、不安定土砂潛能期望值評估

集水區土砂潛能期望值評估之方法與第四章所述方法大致相同，不同的是不安定土砂集水區之土砂潛能期望值則僅以不安定土砂潛勢集水區計算之，如圖 4-7 所示，目前不安定土砂潛勢集水區資料與 839 集水區有範圍不一致的情形，因此本研究以不安定土砂集水區範圍套疊坡面單元再重新計算之。因此，不安定土砂集水區之土砂潛能期望值 ($\overline{AL}_{ws}$)，即：

$$\overline{AL}_{ws} = \sum_{i=1}^n \overline{AL}_{su, i} \quad (5-4)$$

式中， $\overline{AL}_{su, i}$ 為該集水區第 i 個坡面單元之不安定土砂潛勢值。此外，須注意的是不安定土砂集水區是以 QPE 網格 ($1.3\text{km} \times 1.3\text{km}$) 計算，與坡面單元不同，因此需予以重新建立關聯資料庫再計算。

三、震後不安定土砂潛能促進因子估計 (F_e)

震後土砂潛能促進因子是以不安定土砂中之 QPE 網格累積計算，並以

低 (1)、中 (2)、中高 (3)、高 (4)及極高 (5) 進行脆弱度分級，本研究根據地文脆弱度 (F_p) 分級方法，將 PGA 和 PGV 分別予以相同之分級估計方式，如表 5-13 所示。最終結果之採用建議可以二者中較嚴重者考慮之。

表 5-13 土砂潛能促進因子分級

F_e	1	2	3	4	5
PGA 崩塌期望值	$0 < \overline{AL}_{ws} \leq 25$	$25 < \overline{AL}_{ws} \leq 50$	$50 < \overline{AL}_{ws} \leq 75$	$75 < \overline{AL}_{ws} \leq 100$	$100 \leq \overline{AL}_{ws}$
PGV 崩塌期望值	$0 < \overline{AL}_{ws} \leq 2.5$	$2.5 < \overline{AL}_{ws} \leq 5.0$	$5.0 < \overline{AL}_{ws} \leq 7.5$	$7.5 < \overline{AL}_{ws} \leq 10.0$	$10.0 < \overline{AL}_{ws}$

資料來源：本研究整理。

四、震後不安定土砂集水區潛勢值 (P_e) 估計

計算出土砂潛能促進因子後，即可根據式(5-2)，將 F_e 代入計算震後不安定土砂集水區潛勢值 (P_e)。最終之潛勢分級結果同樣分為低 (0 ~ 0.5)、中 (0.5 ~ 1.5)、中高 (1.5 ~ 4.0)、高 (4.0 ~ 12)、極高 (12 ~) 潛勢，以此表達震後不安定土砂集水區受到地震擾動後對於不安定潛勢提升結果。

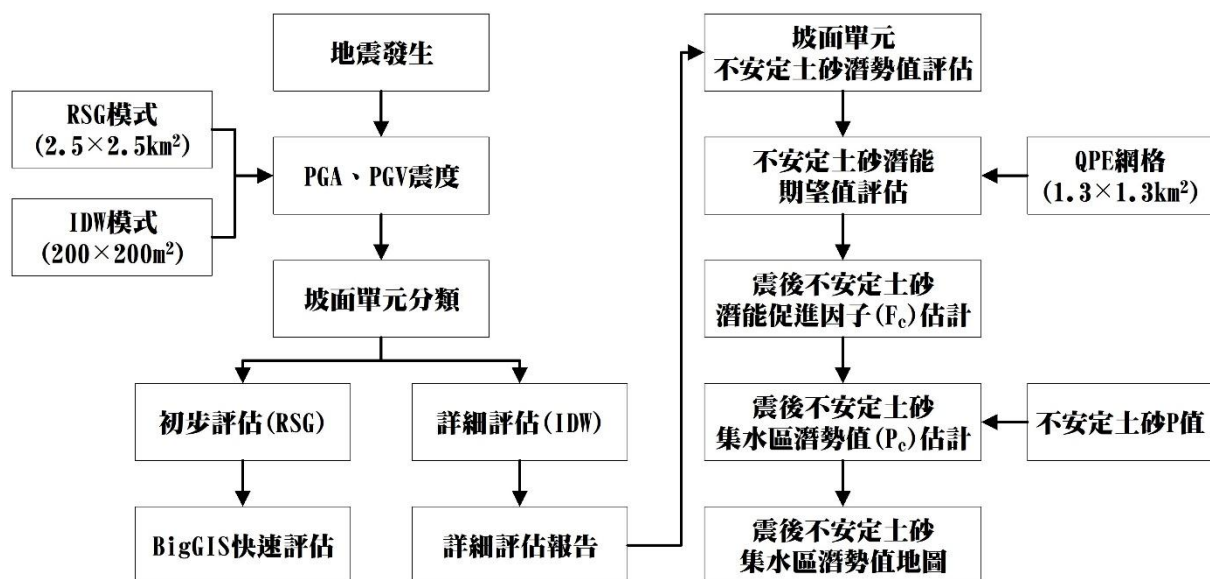


圖 5-42 震後不安定土砂潛勢分析模式

第六節 0403 花蓮地震事件震後不安定土砂潛勢分析結果

0403 地震前即具備不安定土砂潛勢地圖，因此震後之不安定土砂評估即可提供其震後影響之比較。本研究以 0403 為例，進行震後不安定土砂潛勢分析，震前之不安定土砂集水區潛勢分級如圖 5-43 所示，共有 199 個不安定土砂集水區為高潛勢地區，震後之分析結果如圖 5-44 圖 5-46 所示。

為了呈現分析模式表達地震特性的能力，首先將 PGV 計算所得結果如圖 5-44 所示，PGV 分析結果顯示對於集水區潛勢影響並不大，僅少數集水區自中高潛勢區提升至高潛勢區，主因在於 PGV 之坡地易損性特性會在更大地震規模才會更顯著，因此並不會對潛勢分級有明顯的變化。

圖 5-45 和圖 5-46 分別為以 RSG 模式和 IDW 模式之潛勢分析結果，首先比較震前之潛勢地圖，可明顯看出有更多潛勢集水區提升為高潛勢或極高潛勢集水區，如表 5-14 所示，RSG 模式由原本的 14 個極高潛勢集水區提高至 26 個；59 個高潛勢集水區提高至 86 個；74 個中高潛勢集水區提高至 56 個。IDW 模式之極高潛勢集水區則提高至 28 個；高潛勢集水區則提高至 86 個；中高潛勢集水區亦為提高至 60 個。上述結果顯示震後不安定土砂潛勢值提升的幅度與變化，此一變異的影響時間多長目前並不能由模式中考慮。尚須待未來實際之長時間土砂災害情資進一步驗證，但已可作為震後土砂治理對策和應變作為擬訂之參考。此外，RSG 模式和 IDW 模式之潛勢地圖顯示幾乎完全相同，變異數量亦相當接近，這表示所提出之分析模式未來亦可適用於快速評估。

表 5-14 0403 花蓮地震($M_w=7.4$)之震前-震後潛勢分級比較

	低潛勢	中潛勢	中高潛勢	高潛勢	極高潛勢	合計
震前	11	41	74	59	14	199
震後(RSG)	6	25	56	86	26	199
震後(IDW)	5	20	60	86	28	199

資料來源：本研究整理。

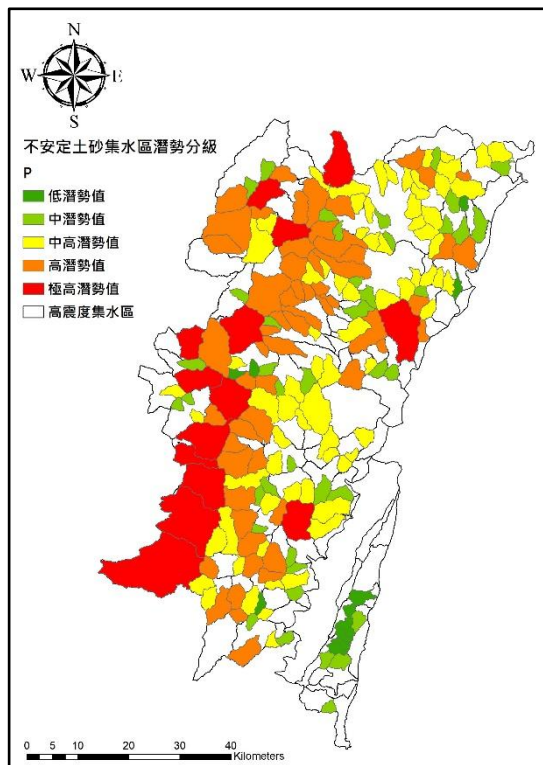


圖 5-43 0403 花蓮地震高震度地區不安定土砂潛勢分布

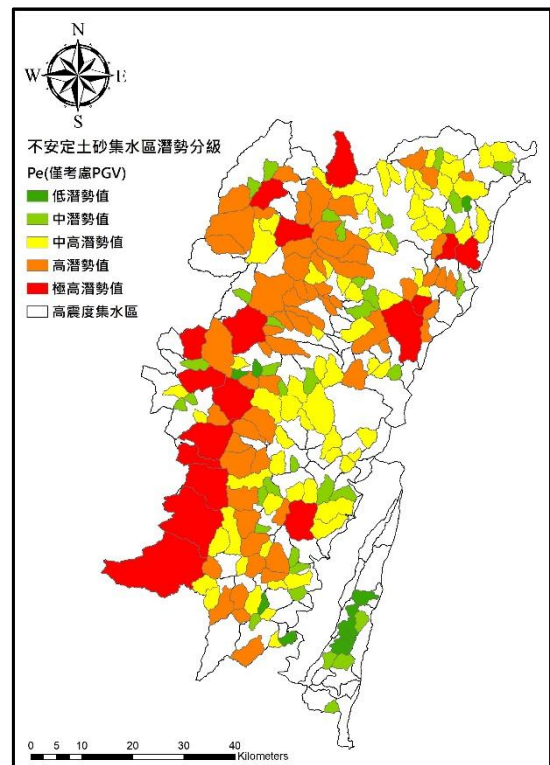


圖 5-44 0403 花蓮地震震後高震度地區不安定土砂潛勢地圖(PGV)

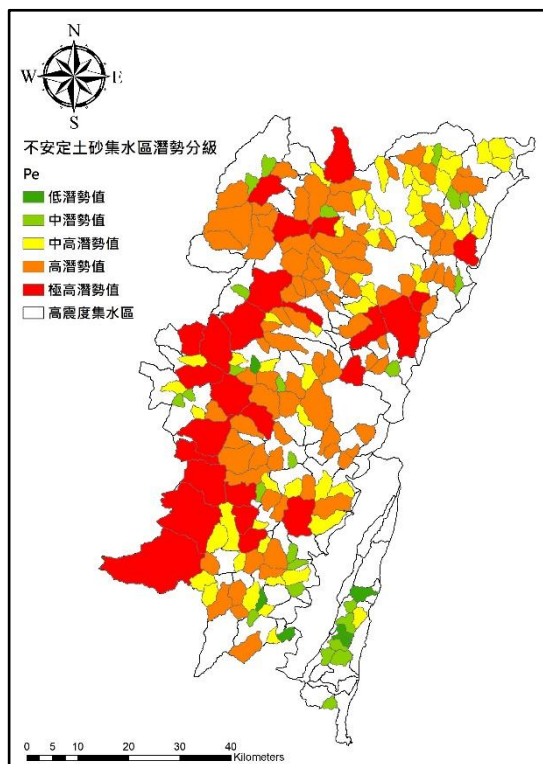


圖 5-45 0403 花蓮地震震後高震度地區不安定土砂潛勢地圖(RSG)

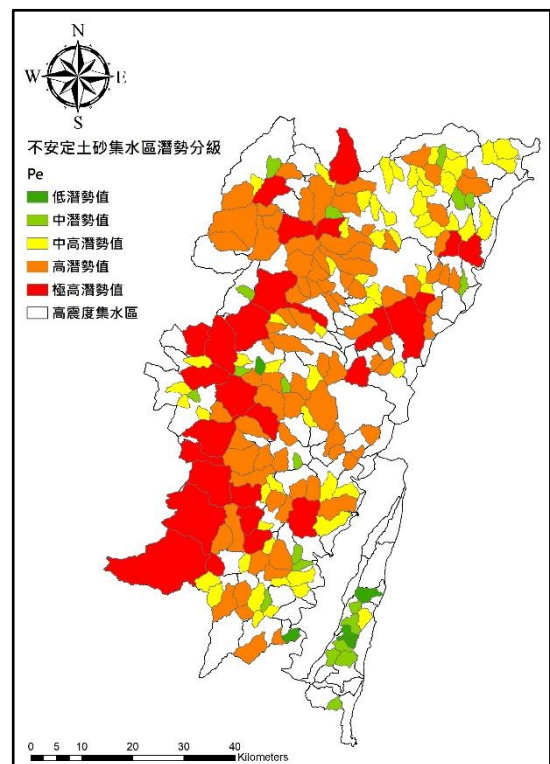


圖 5-46 0403 花蓮地震震後高震度地區不安定土砂潛勢地圖(IDW)

資料來源：本計畫製作。

第七節 不同地震規模情境之震後不安定土砂潛勢分析

0403 花蓮地震芮氏規模雖達 7.2 ($M_w=7.4$)，但由於其地震特性在高震度地區實際之震度值並不高，本研究為了解在更大地震規模下不安定土砂之震後影響，選定車籠埔斷層發生芮氏規模 7.3 ($M_w=7.6$) 之地震，模擬不同地震規模之情境之震後影響分析。

情境模擬之地表震度直接採用式(3-18) 和式(3-19)之震度衰減率，因此並無 RSG 模式和 IDW 模式之分析，係經由坡面單元形心位置，可直接計算各坡面單元之 PGA 和 PGV 震度值。

震前之不安定土砂集水區潛勢分級如圖 5-47 所示，共有 165 個不安定土砂集水區為高潛勢地區，震後之 PGV 和 PGA 分析結果分別如圖 5-48 和圖 5-49 所示，首先比較震前之潛勢地圖，如表 5-15 所示，可明顯看出有更多潛勢集水區提升為高潛勢或極高潛勢集水區，PGV 因子下由原本的 8 個極高潛勢集水區提高至 19 個；34 個高潛勢集水區提高至 47 個；中潛勢和低潛勢分別降低至 30 個和 19 個。PGA 因子下之極高潛勢集水區則提高至 16 個；高潛勢集水區則提高至 46 個；低潛勢則降低至 18 個。上述結果顯示震後不安定土砂潛勢值提升的幅度與變化。亦可顯示其結果與 0403 地震不同之處，由於模擬地震事件為線斷層模式，高震度地區之地表震度顯著，PGV 之影響即相當明顯，且實際潛勢分級結果與 PGA 幾乎相同，顯示不同地震斷層、規模下因其特性不同將具有不同之潛勢特性。

表 5-15 車籠埔斷層地震事件($M_w=7.6$)之震前-震後潛勢分級比較

	低潛勢	中潛勢	中高潛勢	高潛勢	極高潛勢	合計
震前	39	35	49	34	8	165
震後(PGV)	19	30	50	47	19	165
震後(PGA)	18	36	49	46	16	165

資料來源：本研究整理。

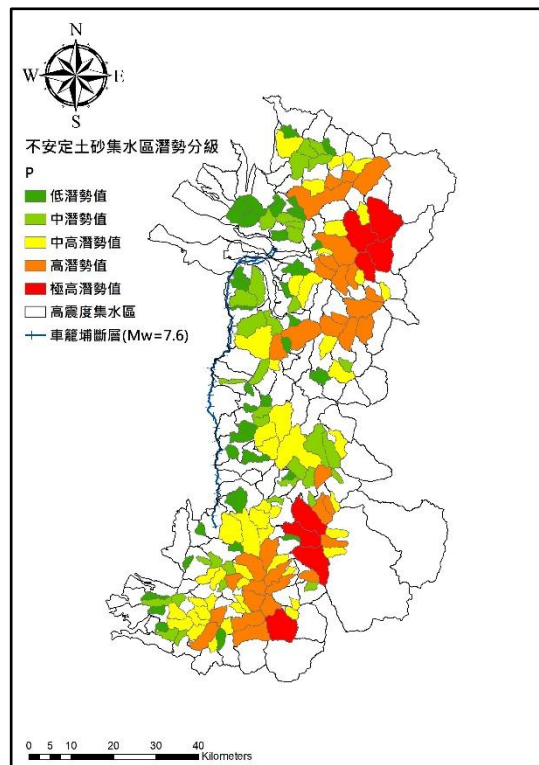


圖 5-47 車籠埔斷層事件高震度地區不安定土砂潛勢分布($M_w=7.6$)

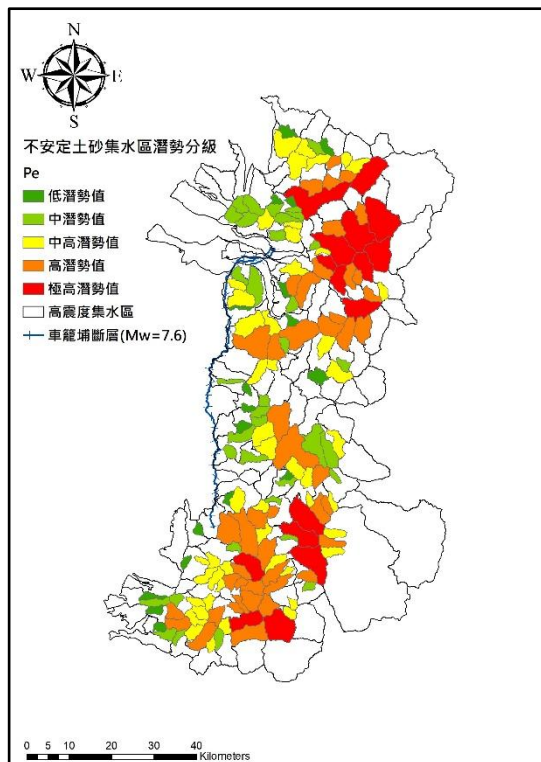


圖 5-48 車籠埔斷層事件震後高震度地區不安定土砂潛勢地圖(PGV)

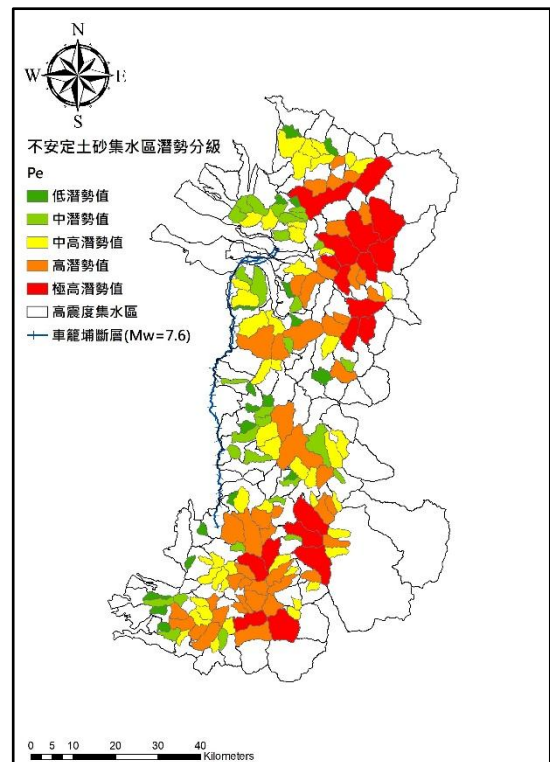


圖 5-49 車籠埔斷層事件震後高震度地區不安定土砂潛勢地圖(PGA)

資料來源：本計畫製作。

第六章 BigGIS 系統地震早期評估模組精進

第一節 震後快速評估模組精進

一、震後快速評估模組概述

巨量空間資訊系統 (BigGIS) 主要係基於地理資訊空間資料所開發之圖台系統，該圖台具有多種 GIS 資料套疊及模式分析功能，目前可介接氣象局災害事件速報資料，並可於震後供使用者下載強震事件之崩塌地判釋成果。目前 BigGIS 可針對重大強震事件之氣象局震度圖進行套疊，如圖 6-1 所示，而對於即時地震之網格化等震度資料 (以下簡稱 RSG) 則是介接 NCDR 之資料服務 API (2022)。因此，對於地震早期評估模組的開發，BigGIS 系統除須介接上述地震速報資料，當地震發生後可在數小時內完成地震早期評估並發佈向量圖磚至系統，而資料則應包括地震時間、地震深度、地震規模、震央位置、震度分布以及各項評估結果等，如圖 6-2 所示。

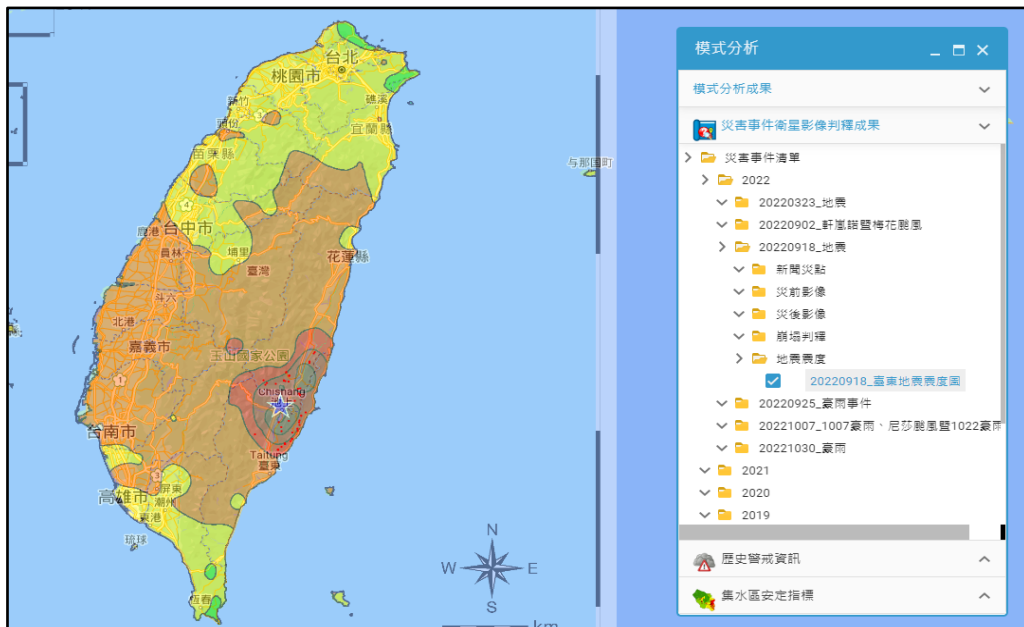


圖 6-1 BigGIS 災害事件震度資料套疊

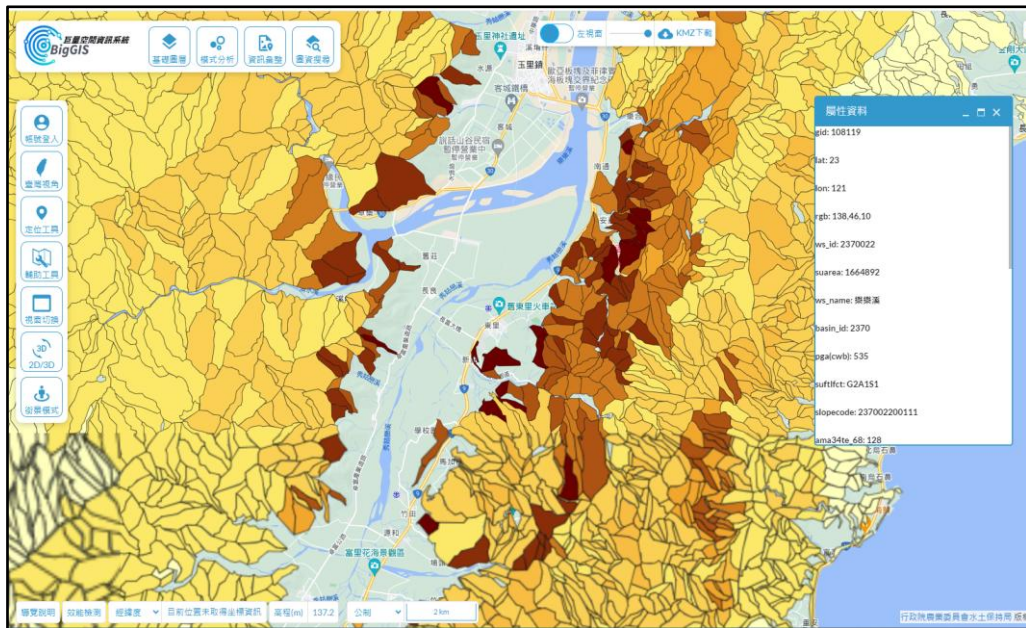


圖 6-2 BigGIS 震後崩塌評估模組資料發布

二、快速評估之優點與限制

快速評估根據介接之 NCDR 地震網格化等震度即時資料，因此快速評估不需要進行地表震度推估，BigGIS 主要程序為接收與處理震度資料之空間套疊與模式分析即可，在資料處理的介面上，主要應包括接收 RSG 資料、產生震度影像檔等功能，並直接寫入至崩塌評估資料庫進行坡面單元快速評估。然而，由於考量震度推估所需的運算時間，NCDR 地震 RSG 資料之解析度為 $2.5\text{km} \times 2.5\text{km}$ ，與本研究震度推估所採用之 $200\text{m} \times 200\text{m}$ 差距甚大，因此對於地震崩塌評估結果的精度將會有所影響，但由於氣象局採用之地表震度推估模式具全台地質模型之修正，就地表震度推估而言仍應具有較好的可靠度。此外，全台坡面單元面積大小在 0.11ha 至 524.78ha 之間，因此若要進行較詳細的坡面單元評估，需要較高精度的地表震度估計。快速評估與詳細評估二者之特性比較如表 6-1 所示，表中可知快速評估之優勢在於所需計算之資料點僅為 5760 筆，因此所需時間短，而詳細評估需要分析達 90 萬筆資料，因此所需時間較長。此外，對於詳細評估中之坡面單元資料庫分類需要於震後根據實際震央位置進行分析，在本年度中已完成此部分之初步評估系統化分析流程，將於 BigGIS 系統中更新，以下說明之。

表 6-1 快速評估與詳細評估特性比較

比較項目	快速評估	詳細評估	說明
震度精度	較差	較佳	快速評估 $2.5 \times 2.5 \text{km}^2$ 詳細評估 $200 \times 200 \text{m}^2$
震度修正	有	無	指具全台地質修正模型
所需時間	短	長	快速評估僅 5760 筆資料，詳細評估為 900,000 筆資料。
坡面單元資料庫	震前分析	震後分析	快速評估於震前完備坡面單元資料庫，詳細評估於震後根據實際震央位置進行分析。
可系統化程度	半自動	手動分析	快速評估目前為半自動，但本年度將實現全自動，詳細評估目前則需手動分析。

資料來源：本研究整理

三、精進震後詳細評估模組

快速評估是以 $2.5 \text{km} \times 2.5 \text{km}$ 之 RSG 資料進行坡面單元震度估計，透過 BigGIS 後台直接套疊坡面單元，而進行震後詳細評估時，震度資料之處理流程主要是接收氣象局全國測站資料後，進行 PGA、PGV 之 $200 \times 200 \text{m}^2$ 網格 IDW 空間內插分析。

此外，詳細評估中坡面單元需要重新計算分類，以得到實際之坡面分類結果，接著和快速評估相同，透過套疊坡面單元形心得到坡面單元震度後，即可進行震後坡地崩塌評估，本計畫已於本年度完成詳細評估中坡面單元自動化分類程序，將提供給 BigGIS 開發團隊進行系統化工作，以精進地震早期評估模組。

四、崩塌易損評估模式整體分析架構精進修正

整體分析架構將 BigGIS 地震早期評估區分為快速評估和詳細評估二種方式，評估過程與時效將有所差異。在地震發生後，震後坡地崩塌評估模式主要包括「介接震度資料」、「震度分析」、「坡面類型分析」、「崩塌率計算」、「集水區崩塌評估」五個主要子流程，如圖 6-3 所示。以下說明其

所需之主要資料及詳細分析過程：

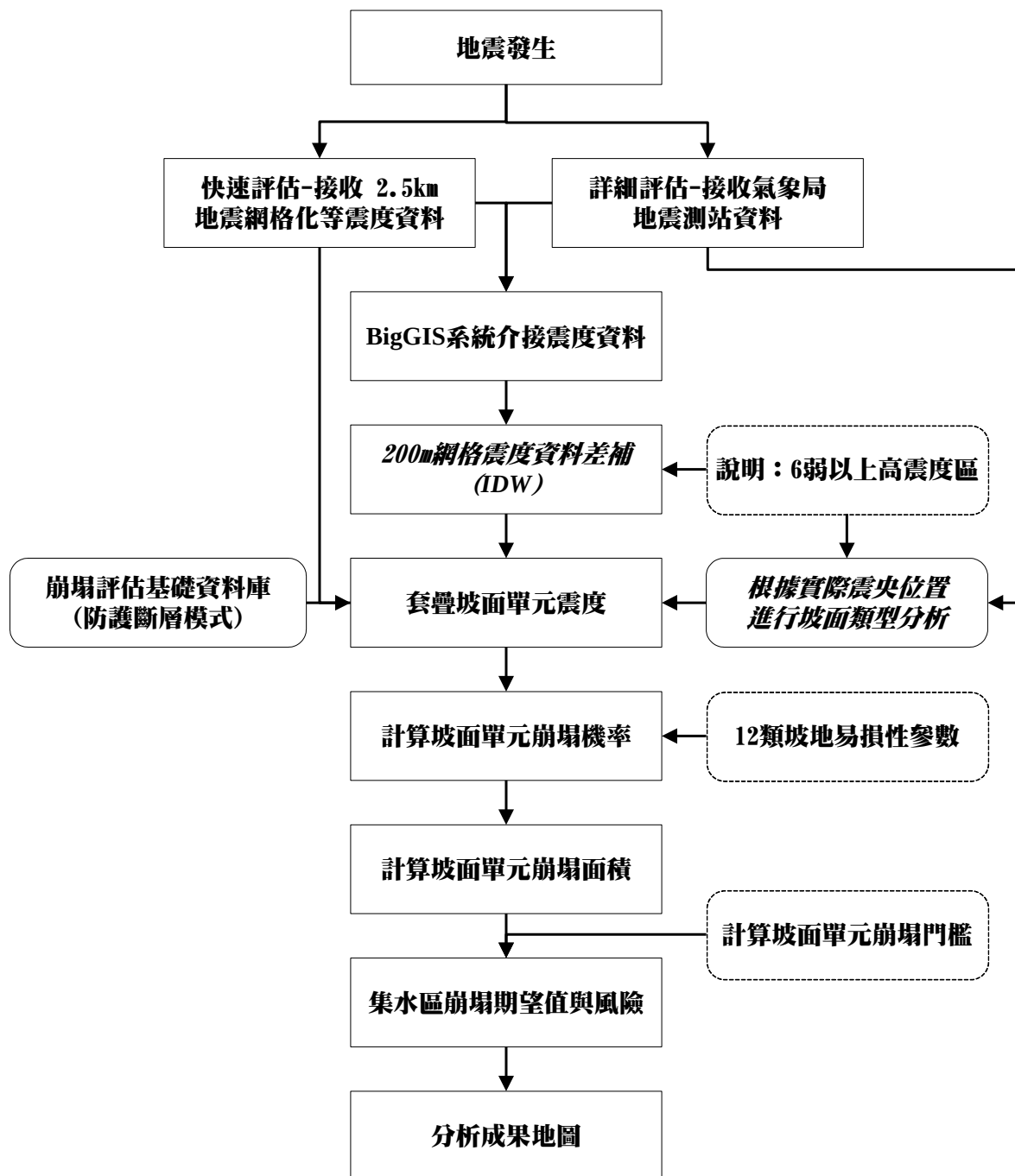


圖 6-3 震後坡地崩塌評估模式整體分析架構更新

1. 坡面單元震度值

以測站資料推估全台 PGA 與 PGV 分布，根據震度分級，該次地震中最大震度達 6 弱級以上即啟動分析。PGA 和 PGV 震度資料可由氣象局測站震度 IDW 內插或是 NCDR 地震 RSG 資料獲取。本計畫建議修正之快速評估和詳細評估說明如下：

以 200m 網格內插較為精確的震度值。本計畫建議：

- (1) 快速評估：介接 RSG 資料 (2.5km 網格資料)，再以坡面單元形心位置之震度作為該坡面單元之 PGA、PGV 值。
- (2) 詳細評估：自氣象局下載測站震度資料後，以 200m 網格進行較高精度空間內插分析，再套疊得到坡面單元之 PGA、PGV 值。
- (3) 系統開發：快速評估可自動化，詳細評估半自動化。

2. 坡面單元資料庫

即以建置完成之全台坡面單元資料庫，分為 12 種坡面類型，快速評估係基於防護斷層模式之坡面單元評估資料庫，坡面單元涵蓋全台 136 個河川流域中的 127 個主要流域，經本計畫重新定義其屬性和編碼後全部有效坡面為 130619 個。

3. 坡面類型分析精進

坡面類型經由坡面之地質、坡向敏感性和坡度進行分類分析，與震源位置相依之坡向敏感性，坡面單元之分類可能因實際地震位置改變。本計畫建議修正之快速評估和詳細評估說明如下：

- (1) 快速評估：以基於防護斷層模式之坡面單元評估資料庫進行分析，不需震央實際位置，因此無須震後進行坡面分類。
- (2) 詳細評估：根據氣象局發布確定之震央位置，進行坡地分類分析，並自動更新崩塌評估基礎資料庫。
- (3) 系統開發：快速評估可自動化；詳細評估可自動化。

4. 坡地易損性參數

即雙指標坡地易損性曲線，如表 3-8 和表 3-9 所示。

5. 坡面單元數值分析(快速評估與詳細評估皆相同)

(1) 坡面單元崩塌機率

計算某類型坡面在某震度下之崩塌機率值 $F(x)$ ，該機率值表達了崩塌的可能性。依照坡面單元之崩塌定義，即表示崩塌率達 5% 以上或崩塌達到一定的水平投影面積之超越機率（隨坡度不同面積不同），因此可將崩塌損失期望值估計在一定範圍。

(2) 坡面單元最小崩塌面積

若地表震度達門檻值($PGA \geq 250\text{cm/s}^2$; $PGV \geq 50\text{cm/s}$)，則根據崩塌定義，坡面單元最小(至少)崩塌面積($AL_{su,min}$)定義為：

$$AL_{su,min} = 0.05 \times F(x) \times A_{su} \quad (6-1)$$

上式中， F 為坡地機率值，係以地表振動強度 x 為變量之函式； A_{su} 為坡面單元之有效面積 (ha)。式(6-1)之涵義為崩塌的最樂觀估計，且根據崩塌之定義與坡度相關，因此不同的坡度其坡面單元最小崩塌面積須符合以下條件，否則不估計其崩塌，因此：

(a) 坡面單元為 S1 類時； $AL_{su,min} \geq 0.28\text{ha}$ 存在，否則為 0。

(b) 坡面單元為 S2 類時； $AL_{su,min} \geq 0.24\text{ha}$ 存在，否則為 0。

(c) 坡面單元為 S3 類時； $AL_{su,min} \geq 0.22\text{ha}$ 存在，否則為 0。

(3) 坡面單元可能最大崩塌面積

在坡面相近的條件下，坡面單元之最大崩塌面積 ($AL_{su,max}$) 可定義為：

$$AL_{su,max} = F(x) \times A_{su} \quad (6-2)$$

上式中之涵義為崩塌的最悲觀估計，同樣須符合以下坡度對應

之崩塌條件，否則不估計其崩塌，因此：

(a)坡面單元為 S1 類時； $AL_{su,max} \geq 0.28ha$ 存在，否則為 0。

(b)坡面單元為 S2 類時； $AL_{su,max} \geq 0.24ha$ 存在，否則為 0。

(c)坡面單元為 S3 類時； $AL_{su,max} \geq 0.22ha$ 存在，否則為 0。

式(6-2)中，坡面單元最大崩塌面積係以崩塌機率和坡面單元有效面積之乘積計算，此計算方式係相對較保守的期望值估計。因此本研究考慮合理的期望值估計，計算最可能之崩塌面積期望值為其平均值，定義 ($AL_{su,pa}$) 為：

$$AL_{su,pa} = \frac{1}{2} \times (AL_{su,min} + AL_{su,max}) \quad (6-3)$$

(4) 集水區最小和最大可能崩塌面積

根據式(6-2)和式(6-3)，某集水區之最小和可能最大崩塌範圍(AL_{ws})估計，可寫為：

$$AL_{ws,min} = \sum AL_{su,min} \quad (6-4)$$

$$AL_{ws,max} = \sum AL_{su,pa} \quad (6-5)$$

而某集水區最小和最大崩塌率(RL)，則可寫為：

$$RL_{ws,min} = \frac{AL_{ws,min}}{\sum A_{su}} \quad (6-6)$$

$$RL_{ws,max} = \frac{AL_{ws,max}}{\sum A_{su}} \quad (6-7)$$

由上述過程，預估震後之快速評估於取得 RSG 資料後應可於 4 小時內完成，震後之詳細評估則在取得氣象局測站震度資料後可提早於 12 小時內完成。

第二節 坡地易損性曲線更新

0403 地震屬近二十年來台灣本島最嚴重的地震，除震度達評估模式啟動門檻，也於東部地區產生了崩塌災害，因此本研究根據 0403 地震之新崩塌資料，重新分析並初步更新坡地易損性曲線參數，如表 6-2 及表 6-3 所示。

表 6-2 以 PGA 為致災因子之 12 類坡地易損性參數表更新

分類編號	數量	中位數	標準差	適用範圍 (cm/s ²)	
G1A1S1	261	0.954	0.683	250.00	474.48
G1A1S2	131	0.772	0.601	250.00	476.34
G1A1S3	116	0.683	0.498	250.00	480.94
G1A2S1	262	0.935	0.742	250.00	473.17
G1A2S2	67	0.876	0.662	250.00	462.68
G1A2S3	63	0.788	0.598	250.00	484.24
G2A1S1	1498	0.497	0.131	250.00	592.74
G2A1S2	553	0.492	0.117	250.00	573.98
G2A1S3	552	0.476	0.116	250.00	558.90
G2A2S1	1354	0.537	0.162	250.00	601.62
G2A2S2	474	0.532	0.153	250.00	595.41
G2A2S3	543	0.528	0.140	250.00	585.77

表 6-3 以 PGV 為致災因子之 12 類坡地易損性參數表更新

分類編號	數量	中位數	標準差	適用範圍 (cm/s)	
G1A1S1	261	0.846	0.654	50.00	88.75
G1A1S2	131	0.711	0.569	50.00	94.73
G1A1S3	116	0.574	0.475	50.00	101.50
G1A2S1	262	0.962	0.738	50.00	88.51
G1A2S2	67	0.933	0.675	50.00	92.02
G1A2S3	63	0.873	0.632	50.00	102.20
G2A1S1	1498	0.429	0.124	50.00	108.59
G2A1S2	553	0.402	0.118	50.00	111.87
G2A1S3	552	0.404	0.112	50.00	115.67
G2A2S1	1354	0.457	0.148	50.00	110.21
G2A2S2	474	0.452	0.143	50.00	116.04
G2A2S3	543	0.450	0.131	50.00	121.23

第七章 結論與建議

- 一、本年度 0403 花蓮地震後崩塌評估模組在第一時間即啟動震後詳細崩塌評估和快速評估，並分別於 48 小時內完成初步評估和詳細評估報告。結果顯示，快速評估與詳細評估在 RSG 方法和 IDW 方法之崩塌期望值幾無差異，集水區崩塌期望值之差值比未達 2%。由此可知，快速評估採用之防護斷層模式具相當效益，評估時效和可靠度皆達到要求。
- 二、在震後不安定土砂評估模式方面，本研究探討坡面單元、QPE 網格和不安定土砂集水區間之空間配套關係和關聯性，提出不安定土砂評估資料庫架構和建立方法。參考 0403 花蓮地震分析結果，考量坡面單元屬性和對不安定土砂之影響、坡地易損性分類與地文脆弱度之相關性，提出震後不安定土砂潛能促進因子 (F_e) 及其估計方法。
- 三、在震後不安定土砂潛勢分析方面，考慮震後引致坡面崩塌影響之土砂生產潛能，應用坡地易損性評估模式建立震後不安定土砂潛勢分析方法，並修正震後不安定土砂集水區潛勢值 (P_e)，完成震後不安定土砂評估模式之建立，並分別以 0403 花蓮地震 ($M_w=7.4$) 和車籠埔斷層事件 ($M_w=7.6$) 為例，說明震後不安定土砂潛勢分析模式之可行性，比較震前、後不安定土砂潛勢值變化，並據此產出震後不安定土砂潛勢地圖。
- 四、在 BigGIS 系統地震早期評估模組精進方面，提出並完成坡面單元自動化分類方法和流程、修正早期評估和詳細評估流程，並提供自動化分類表單予 BigGIS 團隊進行系統化參考。預期震後取得即時網格化等震度 (RSG) 資料後，可提升 BigGIS 快速評估結果之精確度，預估震後之快速評估於取得 RSG 資料後應可於 4 小時內完成，震後之詳細評估則在取得氣象局測站震度資料後可提早於 12 小時內完成，並重新分析並初步更新坡地易損性曲線參數。

五、本研究在計畫執行過程中所採用之震後不安定土砂潛勢值必要參數，如計算危害程度 (H_d) 所需之出流點、高程差和流路距離等參數，因上述資料係本研究自行計算推求，計算結果與原始值有所不同，建議於後續計畫參考農水署 113 年度不安定土砂相關計畫執行成果後再予以重新計算驗證。

參考文獻

- 中央氣象局 (2020)。交通部中央氣象局地震震度分級。網址：
<https://www.cwb.gov.tw/Data/service/Newsbb/CH/1081218earthquakepres.pdf>
- 中央氣象局 (2023)。交通部中央氣象局地震測報中心。網址：
<https://scweb.cwb.gov.tw/zh-tw/earthquake/data/>
- 內政部消防署 (2009)。歷年天然災害損失統計年報。取自內政部消防署網址 <http://www.nfa.gov.tw/Show.aspx?MID=97&UID=827&PID=97>
- 交通部中央氣象局 (1999)。921 集集地震報告。取自交通部中央氣象局網址 http://www.cwb.gov.tw/V7/earthquake/damage_eq.htm
- 王文能、尹承遠、陳志清、李木青 (2000)。九二一地震崩塌地現況與災害防治，九二一震災後中日土砂災害調查及治理研討會論文集，79–90 頁。
- 朱晃葵、勞德威、黃韋凱、黃春銘、魏倫瑋、羅佳明等人 (2012)。強化豪雨引致山崩之即時動態潛勢評估與警戒模式發展(1/4)。100 年度行政院災害防救應用科技方案成果研討會，No. 14，臺北。
- 李三畏 (1986)。台灣的崩塌地。水土保持文獻專輯。
- 李錫堤 (2009)。山崩及土石流災害分析的方法學回顧與展望」。台灣公共工程學刊，5(1)，1–29。
- 李秉乾、周天穎、雷祖強、林哲彥、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 II-易損曲線與風險評估分析。中國土木工程學刊，17(2)，293-300。
- 李祐任 (2015)。使用經驗統計模式建立地震引致崩塌之坡地易損性曲線。逢甲大學土木工程學系，碩士論文。
- 林文賜、林昭遠、黃碧慧、周文杰 (2008)。應用類神經網路及模糊理論於崩塌地萃取模式建立之研究。中華水土保持學報，39(1)：1-9。

- 林文賜 (2009)。應用 GIS 及 RS 技術於震災崩塌地監測之研究。水保技術，4(3)：165-171。
- 洪如江、李錫堤、林美聆、林銘郎、鄭富書、陳正興 (2000)。天塹可以飛渡、崩山足以斷流(草嶺順向坡滑動)。地工技術，77：5-18。
- 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。
- 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。
- 張政亮，張瑞津，紀宗吉 (2005)。遙測與地理資訊系統應用於大甲溪流域之崩塌災害的調查與分析，地理研究第 43 期，101-122 頁。
- 莊承穎、陳國威、陳振宇 (2023)。不安定土砂集水區內地文脆弱度之弟文因子分析。中華民國力學學會第 47 屆全國力學會議。雲林，虎尾。
- 莊承穎、陳振宇、詹婉妤 (2024)。應用地文脆弱度建立集水區不安定土砂潛勢分級。中華水土保持學報，55(3)，122-130。
- 黃臺豐 (1999)。瑞里地震誘發之山崩，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
- 黃仕先 (2008)。茂林國家風景區潛在崩塌災害分析與災情衝擊評估。國立臺南大學社會科教育學系，碩士論文。
- 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，碩士論文。
- 廖洪鈞、林郁欽 (2001)。鑑別分析法於社區邊坡崩塌機率之應用與評估。地工技術雜誌，87，59-72。
- 廖軒吾 (2000)。集集地震誘發之山崩，國立中央大學地球物理研究所碩士論文。

壽克堅、吳秋靜、許惠瑛(2010)。以 SPOT 衛星影像探討 1999 集集地震後之崩塌行為。航測及遙測學刊，15(1)：17-28。

陳紫娥 (1993)。台灣山坡地工程與環境地質調查與評估法之比較研究。工程環境會刊。

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。

陳振宇、劉維則、許家祥 (2017)。使用 QPESUMS 雨量資料建立崩塌災害預警模式。中華水土保持學報，48(1)，44-55。

陳振宇、陳均維、陳國威、林詠喬 (2019)。坡地降雨致災熱區警戒模式。中華水土保持學報，50(1)，1-10。

陳振宇 (2023)。集水區不安定土砂防災策略。112 年農村水保嘉年華，簡報資料。

賴志強 (2007)。台灣地區降雨及地震誘發崩塌之特性研究。國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文，臺南。

蕭芝昀 (2008)。壽豐溪集水區崩塌地變遷及特性之研究。國立東華大學資源管理研究所碩士論文。

謝孟勳、李秉乾 (2014)。以網格集群最大概似法建立建築物易損性曲線。中華防災學刊，第六卷，第二期，第 221~238 頁。

謝孟勳、李秉乾、林正紋 (2017)。地震引致崩塌之坡地易損性曲線建立——以 921 地震為例。農業委員會水土保持局，委託計畫成果報告，SWCB-106-055。

謝孟勳、李秉乾、馬國鳳 (2018)。應用崩塌機率模式評估震後坡地崩塌影響之研究。農業委員會水土保持局，委託計畫成果報告，SWCB-108-232。

謝孟勳、李秉乾、馬國鳳 (2019)。崩塌機率模式應用於地震引致崩塌危害評估之研。農業委員會水土保持局委託研究成果報告，編號：SWCB-108-232。

謝孟勳、林正紋 (2020)。應用崩塌機率模式評估震後坡地崩塌影響之研究。行政院農業委員會水土保持局委託研究成果報告，編號1：SWCB-109-263。

謝孟勳、林正紋 (2021)。基於不同情境條件之震後坡地崩塌影響評估研究。行政院農業委員會水土保持局委託研究成果報告，編號：SWCB-110-033。

謝孟勳、林正紋 (2022)。結合崩塌機率模式與 BigGIS 系統發展震後坡地崩塌之評估，編號：SWCB-111-051。

謝孟勳 (2023)。坡地易損性分析應用於 BigGIS 系統發展高風險聚落之震後快速評估，編號：SWCB-112-062。

BigGIS 巨量空間資訊系統 (2023)。行政院農委會水土保持局。網址：
<https://gis.swcb.gov.tw/map/>

Boore, D. M., Joyner, W. B., Fumal T. E. (1997). Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: A Summary of Recent Work. Seismological Research Letters, 68(1): 128 – 153.

Basöz, N. I., Kiremidjian, A. S., King, S. A., Law, K. H. (1999). Statistical Analysis of Bridge Damage Data from the 1994 Northridge, CA, Earthquake. Earthquake Spectra, 15(1): 25 – 54.

Carr, J. R. (1983). Application of the Theory of Regionalized Variables to Earthquake Parametric Estimation and Simulation. Doctoral dissertation, Department of Mining and Geological Engineering, University of Arizona, U.S.A.

- Cressie, N. (1993). *Statistics for Spatial Data*, Revised Edition. New York: John Wiley & Sons.
- Crichton, D. (1999). The Risk Triangle. In Journal Ingleton, ed., *Natural Disaster Management*, 102 – 103.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1-4): 181 – 216.
- Ezell, B. C. (2007). Infrastructure Vulnerability Assessment Model (I-VAM). *Journal of Risk Analysis*, 27(3), 571 – 583.
- Journel, A. G. (1983). Nonparametric Estimation of Spatial Distributions. *Mathematical Geology*, 15(3): 445 – 468.
- Journel, A. G., Rossi, M. (1989). When Do We Need a Trend Model in Kriging. *Mathematical Geology*, 21(7): 715 – 739.
- Khazai, B., Sitar, N. (2000). Assessment of Seismic Slope Stability Using GIS Modeling. *Geographic Information Sciences*, 6(2): 121 – 128.
- Kappos, A. J., Panagopoulos, G. (2010). Fragility Curves for Reinforced Concrete Buildings in Greece. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1–2): 39 – 53.
- Kappos, A. J., Panagopoulos, G., Panagiotopoulos, C., Penelis, Gr. (2006). A Hybrid Method for the Vulnerability Assessment of R/C and URM Buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(4): 391 – 413.
- Lee, C. T., Cheng, C. T., Liao, C. W., Tsai, Y. B. (2001). Site classification of Taiwan free-field strong-motion stations. *Bull Seismol Soc Am*, 91(5): 1283 – 1297.
- Muñoz, A., Blondet, M., Aguilar, R., Astorga, M. A. (2007). Empirical Fragility Curves for Peruvian School Buildings. *Earthquake Resistant Engineering Structures VI*, 269 – 277.
- Maruyama, Y., Yamazaki, F., Mizuno, K., Tsuchiyu, Y., Yogai, H. (2010). Fragility Curves for Expressway Embankments Based on Damage Datasets after

- Recent Earthquakes in Japan. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30(11): 1158 – 1167.
- Matheron, G. (1971). The Theory of Regionalized Variables and Its Applications. Ecole nationale supérieure des mines, Paris.
- Onose, J. I. (1982). Prediction of Damage Ratio of Reinforced Concrete Buildings Due to Earthquakes and Comparison with Actual Damage Ratio. Proceedings of the 6th Japan Earthquake Engineering Symposium: Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan, 2081 – 2088
- Penelis, Gr. G., Kappos, A. J., Stylianidis, K. C. (2003). Assessment of the Seismic Vulnerability of Unreinforced Masonry Buildings. Paper Presented at 8th International Conference on Structural Studies: Repairs and Maintenance of Heritage Architecture, Chalkidiki, Greece. WIT Press, Southampton, UK.
- Rossetto, T., Elnashai A. (2003). Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data. Engineering Structures, 25(10): 1241 – 1263.
- 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.
- Shibata, A. (2006). Estimation of Earthquake Damage to Urban Systems. Structural Control and Health Monitoring, 13, 454 – 471
- Sadigh, K., Chang, C. Y., Egan, J. A., Makdisi, F., Youngs, F. F. (1997). Attenuation Relationships for Shallow Crustal Earthquakes Based on California Strong Motion Data, Seismological Research Letters, 68(1): 180 – 189.
- Shinozuka, M. (1998). Development of Bridge Fragility Curves. Proceedings of the US–Italy Workshop on Seismic Protective Systems for Bridges, Columbia University, New York. (Technical Report MCEER-98-0015)

附錄一 計畫書審查意見回復

委員意見	意見回復
(一)本計畫僅以一次事件(即以 111 年第 111 號地震事件探討 112 年杜蘇芮颱風新生崩塌地之關係)進行驗證是否足夠?	感謝委員提問,關於探討 111 年之地震與 112 年杜蘇芮颱風新生崩塌地是否有關連,係延續前期研究成果之建議,和本年度 0403 地震關於震後降雨關聯性事件,蒐集相關資料作為研究之參考。
(二)本研究進行土砂潛勢分析及風險評估時,是否考量歷年來所有的歷史地震及歷史崩塌事件?	感謝委員提問,本研究係基於既有之不安定土砂潛勢資料(2024 年版)和坡地易損性分析成果,建立震後坡地不穩定而產生對不安定土砂潛勢影響的評估方法,與過去歷史地震無關。
(三)建議工作項目三「針後不安定土砂潛勢分析方法建立」中能以案例敘明不安定土砂風險定義及適用性。	感謝委員提問,工作項目三將以案例說明不安定土砂風險定義及適用性。
(四)建議工作項目四「不同地震規模之情境模擬與潛勢地圖」中能以不同震央為分析情境進行比較評估適用性。	感謝委員提問,工作項目四將選定不同防護斷層(不同震央)及規模事件,以不同地震規模之情境模擬震後不安定土砂潛勢值及風險分級變動情況,探討潛勢分析方法適用性。
(五)目前使用之地調所全台斜坡單元,其大小差異甚大,建議可採 20m DEM 資料重製全台斜坡單元後,再重新分類坡面類型測試能否提升測試之準確性。	感謝委員提問,本研究探討重製全台坡面單元之可行性,根據全台 DEM 資料優先以不安定土砂集水區進行測試做,並測試準確性。目前研究成果是建議根據不同之集水區特性,採 6m DEM 與 20m DEM 混合的方式進行坡面單元重製。
(六)相關模式宜整合至 BigGIS 使用。	感謝委員提問,研究成果未來將協助整合至 BigGIS 使用。
(七)本計畫之前期研究已有許多成果,在本計畫成果產出效益需再具體定義,以突顯本計畫價值。	感謝委員提問,本計畫與前期研究成果不同,係以不安定土砂為新研究方向,將有助於不安定土砂防減災計畫之效益。

附錄二 期中審查意見回復

委員意見	意見回復
(一)本期中報告已針對 BigGIS 系統地震早期評估，完成詳細評估坡面單元自動化分類程序，也測試於 2024 年 4 月 3 日之芮氏規模 M7.2 花蓮地震。期望可測驗於較近期之地震，以瞭解其即時快速評估之價值，包括輸入資料之取得即時性評估。	遵照辦理。
(二)目前研究可快速評估震後崩塌結果，但後續還需針對不安定土砂評估建立資料庫，以建立坡地易損性對地文脆弱度之影響，此部份尚未有執行步驟之流程設計，須再加緊腳步。	遵照辦理。已補充報告說明。
(三)雖然報告中有提到 2024 年花蓮地震的分析，但建議增加更多的案例研究，尤其是過去的地震事件，以展示模型的泛化能力和實際應用效果。	遵照辦理。本計畫盡力取得可供研究參考之地震事件資料，惟大規模地震周期較長，當時之地文資料有適用性問題，而中小型地震未達本模式適用條件，具有代表性資料確實不足。
(四)是否有進行模型的驗證工作？例如，如何確保坡地易損性曲線的準確性，是否有進行與實際崩塌事件的對比？	感謝委員提問，本模型於前期計畫中已完成坡地易損性模式之驗證工作。本年度計畫之震後不安定土砂模式則與 0403 地震事件進行模式比對驗證。
(五)在分析過程中，是否考慮到其他外部因素（如降雨、土地利用變化等）對崩塌風險的影響？	感謝委員提問，本研究主要係針對水保署公告之不安定土砂潛勢區進行震後之不安定土砂災害評估，以了解受震後之不安定土砂災害潛勢區之脆弱度變化程度，未考慮降雨及土地利用之影響。
(六)RSG 的解析度為 2.5km × 2.5km，這樣的解析度是否足以捕捉到地震對坡地的影響？內文中有 RSG 的詳細評估，這個	感謝委員提問，2.5km × 2.5km 的解析度確實未達到必要的精確程度，但目前於中央氣象署僅能取得此解析度的快速評估資料（或 NCDR 取得

結果是如何得出來的？	之精度亦同)，僅能於後續震後分析中再利用 200m × 200m 網格予以強化，其對震後即時評估的影響在於量體的不夠準確，不至於會捕捉不到高震度區之崩塌。另 RSG 是由 NCDR 提供之即時地震網格化等震度資料，由 NCDR 根據中央氣象署資料處理，詳細評估已補充說明，詳見第四章之說明。
------------	---

附錄三 期末審查意見回復

委員意見	意見回復
(一)本研究使用 0403 花蓮地震資料配合不同地震規模進行模擬，本模式在花蓮地震崩塌案例如何驗證模式有效性，再者，此模式如何有效評估不同地震規模的風險？	感謝委員提問，模式之有效性可透過震後之衛星影像判釋成果進行驗證。在不同地震規模之風險評估上，可直接於震前進行地震模擬推估，設定不同地震規模後，先進行震後崩塌評估，再進行不安定土砂評估，並可直接繪製震後不安定土砂潛勢地圖。
(二)報告完成度高，但創新考量的具體貢獻建議在突顯。	感謝委員認同，另具體貢獻建議已於成果報告中補充相關說明。
(三)坡面單元可能在特定地形事件後，會發生改變，可能會影響評估結果嗎？	感謝委員提問，坡面單元係根據 DEM 資料繪製，因此若地形發生大規模變異，即有可能改變坡面單元，因此也將改變其坡面分類屬性，即會影響評估結果，一般來說此類情形並非常態，普通的坡地崩塌或淺層崩塌並不會影響坡面單元及其分類，除非發生大規模崩塌以上的事件，才有可能大幅變異。
(四)坡面單元在不同空間解析度可能有所不同，可能會對評估崩塌的類型發生改變嗎？	感謝委員提問，坡面單元可以不同精度之 DEM 資料繪製，且可以根據使用者定義，繪製不同大小尺度之坡面單元，BigGIS 系統目前仍採用地礦中心產製之坡面單元進行應用，但實際上該資料仍有尺度範圍過大的缺點，例如面積大小在 0.11~524.78 ha 之間，這個問題在本模式中會導致小於這個面積大小之坡面單元在評估計算過程中不會發生崩塌。反之，對於較大之坡面單元，由於其原始面積可能即達數百公頃以上，因此計算所得之崩塌期望值即可能非常大。然而要進行全國範圍之修正仍有困難，本團隊已規劃在後續的研究中針對不安定土砂潛勢區進行修正。

