
**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**

**Applying Landslide Fragility Analysis in
the BigGIS System to Develop the
Postearthquake Landslide Quick
Estimation on High Risk Area**

(初稿)

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 112 年 11 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)

目 次

目 次	I
表 次	III
圖 次	V
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 計畫執行流程與預期成果	6
第二章 國內外相關文獻回顧	7
第一節 災害風險分析	7
第二節 地震易損性分析	9
第三章 高震度區之坡地易損性曲線	15
第一節 地震易損性模式之發展	15
第二節 高震度區坡地易損性曲線建立及適用範圍	22
第三節 921 地震資料庫建立	26
第四節 環境因子資料庫	38
第五節 崩塌評估坡面之分類	44
第六節 雙指標坡地易損性曲線	50
第四章 BigGIS 系統之地震早期評估精進	55
第一節 地震早期評估模式	55
第二節 基於地震速報之防護斷層模式	57
第三節 基於防護斷層模式之震源分區	58
第四節 基於防護斷層模式之坡面單元評估資料庫	64

第五節 BigGIS 系統之地震早期評估	126
第五章 雙指標管理機制實作與驗證	137
第一節 2022 年震度 6 弱以上地震概述	137
第二節 第 111 號地震 (地震規模 6.8，最大震度 6 強)	139
第三節 集水區震後崩塌風險等級評估	152
第四節 第 111 號地震分析結果與討論	155
第五節 不同地震規模之坡地易損性影響分析	159
第六章 高風險聚落震後快速評估	163
第一節 高風險聚落選定	163
第二節 高風險聚落鄰近坡面單元研析	169
第三節 高風險聚落震後快速評估	172
第四節 評估結果比較與討論	179
第七章 結論與建議	181
參考文獻	183
附錄一 計畫書審查意見回復	189
附錄二 期中書面審查意見回復	190

表 次

表 1-1	研究工作執行進度表.....	6
表 2-1	易損性曲線常見之機率分布函數	12
表 2-2	易損性曲線其它常見之分布函數	13
表 3-1	氣象局地震震度分級對照表 (2020 年新制).....	23
表 3-2	研究地區裸露地統計.....	27
表 3-3	研究地區新增崩塌地統計	29
表 3-4	斷層種類參數.....	32
表 3-5	環境資料庫之類型和檔案格式	38
表 3-6	李錫堤教授提出之台灣地區地質分類	39
表 3-7	地質分類統計 (以研究區域為例).....	44
表 3-8	坡向分類統計 (以研究區域為例).....	46
表 3-9	坡度分類統計(以研究區域為例).....	47
表 3-10	以 PGA 為致災因子之 12 類坡地易損性參數表	50
表 3-11	以 PGV 為致災因子之 12 類坡地易損性參數表	52
表 4-1	防護斷層危害因子.....	62
表 4-2	全國各河川流域坡面單元劃定基礎資料	65
表 4-3	坡面單元編碼.....	71
表 4-4	各河川流域坡面單元地質分類之數量統計	73
表 4-5	各河川流域坡面單元坡向因子之數量統計	79
表 4-6	各河川流域坡面單元方位角之數量統計 (防護斷層模式).....	84
表 4-7	各河川流域坡面單元夾角之數量統計 (防護斷層模式).....	89
表 4-8	各河川流域坡面單元順向坡之數量統計	95
表 4-9	各河川流域坡面單元坡向敏感因子之數量統計 (防護斷層模式).....	100
表 4-10	各河川流域坡面單元坡度分類之數量統計	106

表 4-11	各河川流域坡面單元有效數量統計.....	112
表 4-12	防護斷層模式各河川流域坡面單元類型之數量統計-G1 類.....	115
表 4-13	防護斷層模式各河川流域坡面單元類型之數量統計--G2 類.....	120
表 4-14	快速評估與詳細評估特性比較	128
表 5-1	2022 年震度 6 弱以上地震列表	137
表 5-2	各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序 (PGA 快速評估)	141
表 5-3	各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序 (PGV 快速評估)	144
表 5-4	各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序 (PGA 詳細評估)	147
表 5-5	各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序 (PGV 詳細評估)	150
表 5-6	雙指標坡地易損風險管理模式	153
表 5-7	第 111 號地震集水區風險等級評估 (快速評估).....	154
表 5-8	第 111 號地震集水區風險等級評估 (詳細評估).....	154
表 5-9	衛星影像判釋 45 處崩塌地統計	156
表 5-10	震後崩塌快速評估和詳細評估結果比較	157
表 5-11	2022 關山/池上地震事件新生崩塌與集水區風險等級評估比較	158
表 5-12	不同地震規模下以 PGA 為因子之分析結果	160
表 5-13	不同地震規模下以 PGV 為因子之分析結果	161
表 6-1	112 年 48 處大規模崩塌優先辦理潛勢區 (警戒發布區).....	163
表 6-2	花蓮縣 5 處大規模崩塌潛勢區	164
表 6-3	四集水區之震後崩塌快速評估 (原始坡面單元).....	179
表 6-4	四集水區之震後崩塌快速評估 (細化後坡面單元).....	179

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	9
圖 3-1	坡地易損性分析流程.....	25
圖 3-2	研究區域.....	26
圖 3-3	九二一地震前後期裸露地分布	27
圖 3-4	崩塌地變遷及分類示意.....	28
圖 3-5	坡面資料套疊網格示意圖	29
圖 3-6	921 地震新增崩塌地.....	29
圖 3-7	自由場強地動測觀測網 (TSMIP) 測站分布	31
圖 3-8	區域趨勢值與空間中隨機變動值之關係	35
圖 3-9	尖峰地表加速度 PGA 分布	37
圖 3-10	尖峰地表速度 PGV 分布	37
圖 3-11	李錫堤教授分類之地質圖.....	40
圖 3-12	坡向圖(以研究區域為例).....	41
圖 3-13	坡度圖(以研究區域為例).....	42
圖 3-14	順向坡分布圖 (以研究區域為例).....	43
圖 3-15	坡面單元地質分類 (以研究區域為例).....	44
圖 3-16	坡面方位角和震波方位角的關係	45
圖 3-17	坡向敏感因子定義.....	46
圖 3-18	坡面單元坡向分類 (以研究區域為例).....	46
圖 3-19	坡面單元坡度分類 (以研究區域為例).....	47
圖 3-20	G1A1S1 易損性曲線(PGA).....	51
圖 3-21	G1A1S2 易損性曲線(PGA).....	51
圖 3-22	G1A1S3 易損性曲線(PGA).....	51

圖 3-23	G1A2S1 易損性曲線(PGA).....	51
圖 3-24	G1A2S2 易損性曲線(PGA).....	51
圖 3-25	G1A2S3 易損性曲線(PGA).....	51
圖 3-26	G2A1S1 易損性曲線(PGA).....	51
圖 3-27	G2A1S2 易損性曲線(PGA).....	51
圖 3-28	G2A1S3 易損性曲線(PGA).....	52
圖 3-29	G2A2S1 易損性曲線(PGA).....	52
圖 3-30	G2A2S2 易損性曲線(PGA).....	52
圖 3-31	G2A2S3 易損性曲線(PGA).....	52
圖 3-32	G1A1S1 易損性曲線 (PGV).....	53
圖 3-33	G1A1S2 易損性曲線 (PGV).....	53
圖 3-34	G1A1S3 易損性曲線 (PGV).....	53
圖 3-35	G1A2S1 易損性曲線 (PGV).....	53
圖 3-36	G1A2S2 易損性曲線 (PGV).....	54
圖 3-37	G1A2S3 易損性曲線 (PGV).....	54
圖 3-38	G2A1S1 易損性曲線 (PGV).....	54
圖 3-39	G2A1S2 易損性曲線 (PGV).....	54
圖 3-40	G2A1S3 易損性曲線 (PGV).....	54
圖 3-41	G2A2S1 易損性曲線 (PGV).....	54
圖 3-42	G2A2S2 易損性曲線 (PGV).....	54
圖 3-43	G2A2S3 易損性曲線 (PGV).....	54
圖 4-1	地震評估模式.....	55
圖 4-2	基於防護斷層之坡地崩塌評估模式	57
圖 4-3	台灣活動斷層分布 (2021 年版).....	59
圖 4-4	未來 50 年台灣孕震構造發震機率 (TEM 2021).....	60

圖 4-5	防護斷層模式之震源分區	63
圖 4-6	地調所繪製之全臺各集水區坡面單元分布	70
圖 4-7	全臺順向坡分布圖.....	94
圖 4-8	淡水河流域之山腳斷層坡面單元分類	125
圖 4-9	烏溪流域之山腳斷層坡面單元分類	125
圖 4-10	濁水溪流域之山腳斷層坡面單元分類	125
圖 4-11	高屏溪流域之山腳斷層坡面單元分類	125
圖 4-12	農村水保署巨量空間資訊系統 (BigGIS)	126
圖 4-13	BigGIS 災害事件速報及崩塌地判釋查詢	126
圖 4-14	BigGIS 災害事件震度資料套疊	127
圖 4-15	BigGIS 災害事件震度資料套疊	127
圖 4-16	地震早期詳細評估接收測站資料及震度修正分析流程	129
圖 4-17	震後坡地崩塌評估模式整體分析架構	130
圖 5-1	第 111019 號地震崩塌地位置.....	137
圖 5-2	關山地震和池上地震震源與斷層相對位置	138
圖 5-3	第 111 號地震中央氣象局地震報告.....	139
圖 5-4	全台最大地動加速度分布	139
圖 5-5	全台最大地動速度分布.....	139
圖 5-6	高震度區地表加速度分布	140
圖 5-7	高震度區崩塌機率分布 (PGA).....	140
圖 5-8	最小崩塌面積估計 (PGA).....	140
圖 5-9	可能最大崩塌面積估計 (PGA).....	140
圖 5-10	高震度區地表速度分布	143
圖 5-11	高震度區崩塌機率分布 (PGV).....	143
圖 5-12	最小崩塌面積估計 (PGV)	143

圖 5-13	可能最大崩塌面積估計 (PGV)	143
圖 5-14	高震度區地表加速度分布	146
圖 5-15	高震度區崩塌機率分布 (PGA).....	146
圖 5-16	最小崩塌面積估計 (PGA).....	146
圖 5-17	可能最大崩塌面積估計 (PGA).....	146
圖 5-18	高震度區地表速度分布	149
圖 5-19	高震度區崩塌機率分布 (PGV).....	149
圖 5-20	最小崩塌面積估計 (PGV).....	149
圖 5-21	可能最大崩塌面積估計 (PGV).....	149
圖 5-22	2022 關山/池上地震事件衛星影像判釋成果 (BiGIS)	155
圖 5-23	2022 關山/池上地震事件崩塌所屬坡面單元	156
圖 5-24	不同規模最小崩塌量(PGA).....	160
圖 5-25	不同規模最大崩塌量(PGA).....	160
圖 5-26	不同規模最小崩塌量(PGV).....	161
圖 5-27	不同規模最大崩塌量(PGV).....	161
圖 6-1	池上斷層鄰近五處大規模崩塌潛勢區	164
圖 6-2	崙山集水區之卓溪鄉太平村與瑞穗鄉舞鶴村潛勢區	165
圖 6-3	卓溪集水區之卓溪鄉卓溪村潛勢區	166
圖 6-4	安通集水區之玉里鎮樂合里潛勢區	167
圖 6-5	敖溪集水區之富里鄉富南村潛勢區	168
圖 6-6	坡面單元示意圖.....	171
圖 6-7	集水區重疊法示意圖.....	171
圖 6-8	坡面單元細化示意圖.....	171
圖 6-9	崙山集水區之震度分布.....	173
圖 6-10	卓溪集水區之震度分布	173

圖 6-11	安通集水區之震度分布	173
圖 6-12	鰲溪集水區之震度分布	173
圖 6-13	崙山集水區之崩塌機率	174
圖 6-14	卓溪集水區之崩塌機率	174
圖 6-15	安通集水區之崩塌機率	174
圖 6-16	鰲溪集水區之崩塌機率	174
圖 6-17	崙山集水區坡面單元細化前之最小崩塌面積	175
圖 6-18	卓溪集水區坡面單元細化前之最小崩塌面積	175
圖 6-19	安通集水區坡面單元細化前之最小崩塌面積	175
圖 6-20	鰲溪集水區坡面單元細化前之最小崩塌面積	175
圖 6-21	崙山集水區坡面單元細化後之最小崩塌面積	176
圖 6-22	卓溪集水區坡面單元細化後之最小崩塌面積	176
圖 6-23	安通集水區坡面單元細化後之最小崩塌面積	176
圖 6-24	鰲溪集水區坡面單元細化後之最小崩塌面積	176
圖 6-25	崙山集水區坡面單元細化前之可能最大崩塌面積	177
圖 6-26	卓溪集水區坡面單元細化前之可能最大崩塌面積	177
圖 6-27	安通集水區坡面單元細化前之可能最大崩塌面積	177
圖 6-28	鰲溪集水區坡面單元細化前之可能最大崩塌面積	177
圖 6-29	崙山集水區坡面單元細化後之可能最大崩塌面積	178
圖 6-30	卓溪集水區坡面單元細化後之可能最大崩塌面積	178
圖 6-31	安通集水區坡面單元細化後之可能最大崩塌面積	178
圖 6-32	鰲溪集水區坡面單元細化後之可能最大崩塌面積	178

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，震後坡地崩塌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，例如震後崩塌可能造成的生命財產損失、震後崩塌造成山區道路的阻斷等。此外，震後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。例如 1999 年發生規模 7.3 的 921 大地震，引發車籠埔斷層與雙冬斷層發生劇烈錯動，造成極為嚴重的建物倒塌、崩塌災害以及往後數年間的土石流災害。2018 年 9 月 6 日日本北海道胆振東部發生地震，規模 6.7 的地震引發大規模崩塌災害等，皆是這類災害的重要案例。台灣本島近年雖未發生規模 7 以上的地震，但孕藏積累的地震能量與不確定性更需重視，例如 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更引起學界廣泛討論，因此對於地震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，憑藉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、大數據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。

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，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，對於震後坡地崩塌快速評估模式建構良好的基礎。回顧過去重要研究成果，已分別完成尖峰地表加速度 (PGA)、尖峰地表速度 (PGV) 為致災因子之坡地易損性曲線、全台防護斷層選定及其坡面單元資料庫建立、雙指標坡地易損管理機制、基於區域震源和防護斷層之地震早期評估方法等。對於持續精進 BigGIS 系統化雙指標崩塌評估並發展高風險聚落之震後快速評估的工作，本計畫將解決二個具體應用問題。

首要問題是目前 BigGIS 系統地震早期評估模組主要是以防護斷層模式 (快速評估) 為優先發展對象，然而對於地震後期階段之震源模式 (詳細評估) 尚未完備，例如目前即時地震之網格化等震度資料係介接國家災害防救科技中心 (NCDR) 之 $2.5 \times 2.5 \text{ km}^2$ 網格，影響坡地崩塌評估之結果甚大，因此在詳細評估階段如何提升其解析度將是模組要解決的問題。此外，前期計畫中初步建立之雙指標管理機制尚未經實作驗證其效益，尤其是對於此管理機制是否適合於集水區和高風險聚落之風險評估，因此需針對不同斷

層情境和地震規模下之影響程度進行分析評估，了解其效果和實用性。

第二個問題是，目前發展之 BigGIS 系統地震早期評估方法係以集水區做為評估對象，尚無法確切針對重要地區或聚落進行警戒管理（例如重要保全聚落），因此在坡地防災的實用性及參考性上仍有不足。因此本計畫擬以重要保全聚落為對象之發展震後快速評估，即在震後集水區崩塌評估的基礎上，針對高風險聚落建立更細緻化之快速評估方法。此外，坡面單元之幾何特性對崩塌評估結果影響甚鉅，然而坡面單元雖具地形特徵，但其劃定並無一定標準方法。本計畫雖採用的是中央地質調查所產製之坡面單元，然而其面積大小在 0.11 ~ 524.78 ha 之間，如此之差異有必要針對重要保全聚落進行較詳細之檢視比對，甚至針對坡面單元進行二次合併或細化，以增進坡地崩塌評估之精度。

本年度計畫之研究目的，係精進 BigGIS 系統之地震崩塌早期評估模組，應用坡地易損性分析發展高風險聚落之震後快速評估，完善震前進行地震引致崩塌模擬評估，地震早期能即時掌握高風險聚落可能的坡地災害以及震後能夠有效地進行坡地崩塌詳細評估，以輔助平時減災、災時應變策略之擬定，進而降低災害造成的損失。主要的計畫目標有二：

1. 精進 BigGIS 系統地震早期評估模組，針對不同斷層情境和地震規模下之影響程度進行模擬，評估雙指標坡地易損管理模式的有效性和實用性。
2. 針對高風險聚落建立細緻化之早期評估方法，增進坡地崩塌評估之精度，建立即時有效之快速評估方法及管理模式。

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應變用途的震後坡地崩塌評估方法、模式和系統的目的，作為未來坡地災害減災管理以及應變對策擬定的依據。

第二節 工作項目與內容

本計畫除了將持續依新發生之地震崩塌事件調整更新坡地易損性參數，前節所述之研究流程如圖 1-1 所示。主要工作項目分述如下：

一、BigGIS 系統之地震早期評估精進

在 BigGIS 系統目前之防護斷層模式之上，研析震源模式之系統化坡地崩塌詳細評估方法，考慮系統效率主要將解決詳細評估中震度資料之解析度問題，提出地震早期詳細評估接收測站資料及震度修正分析流程。

二、雙指標管理機制實作與驗證

針對本研究修正之雙指標管理機制進行實作，並以即時和既有地震紀錄(111 年第 111 號地震)為基礎進行驗證，評估修正後管理機制之效果和實用性，以及提出改善建議。

三、不同地震規模之坡地易損性影響分析

以不同地震規模事件探討震後崩塌變化及增加程度，以及管理模式對地震規模增量之敏感性分析，並選定 5 條斷層評估全台之崩塌期望值，進一步探討管理機制之合理性、PGA 和 PGV 因子對崩塌增量之影響關係。

四、高風險聚落震後快速評估

以台灣東部具地震誘發崩塌危害之高風險聚落為示範，並考量防護斷層、大規模崩塌地、土石流潛勢溪流區位等因子為優選示範地區，針對高風險聚落之坡面單元檢討其合理性，並進行必要之細化評估。

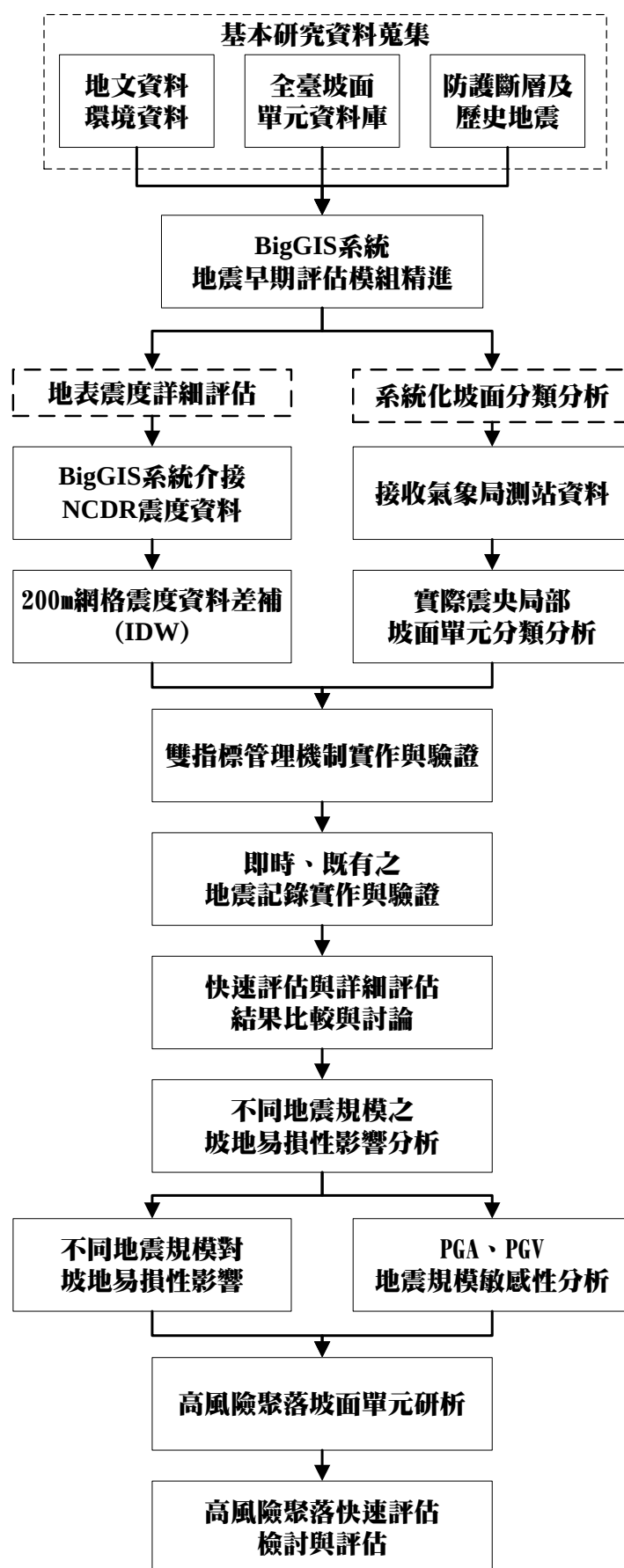


圖 1-1 研究流程圖

第三節 計畫執行流程與預期成果

依研究工作項目及內容，本研究整體工作執行流程如圖 1-1 所示，研究工作執行進度如表 1-1 所示。

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 系統之地震早期評估模組精進		■	■	■	■	■	■	■	■	■	
雙指標管理機制實作與驗證				■	■	■	■	■			
不同地震規模之坡地易損性影響分析						■	■	■	■		
高風險聚落坡面單元研析							■	■	■	■	
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 災害風險分析

風險管理最早應用於 19 世紀末經濟課題探討，近代已廣泛應用於不同領域中。風險評鑑係風險管理中最為重要的一環，決定了面對可能風險時之指導、管制、計畫與政策。風險評鑑包含風險鑑別、風險分析和風險評估三個過程。根據中華民國國家標準（2012）「風險管理一詞彙」（CNS 14889, Z 4066）所述，本研究以災害管理的觀點將此三個過程分別說明如下：

一、風險鑑別

係發現、認知及描述災害風險之過程，包括風險緣由、事件、大小、其原因及潛在結果（後果）之鑑別，可經由歷史數據、理論分析、已知現象與專家判斷描述災害風險之需求。災害風險鑑別之目的即為瞭解致災環境可能的危害因子，並鑑別災害風險可能造成的衝擊及影響。

二、風險分析

係理解災害風險的本質並決定風險等級之過程，包括頻率分析、脆弱度分析、暴露分析及後果分析。頻率分析即災害事件發生之可能性或週期。脆弱度分析即風險緣由的致災性，表示導致危害後果的本質。暴露分析為針對曝險對象估計或評價其涉入災害風險之程度，描述災害風險實質的危害程度，所以視評價之對象又常稱為暴露度或暴露量。後果分析則為估計災害風險可能造成的損失大小，作為風險對策的成本及效益的基準，例如損失金額或其它損失量。前二者為風險分析中最為關鍵的工作。

三、風險評估

係將風險分析之結果與風險準則相比較，以決定災害風險及／或其後果是否可接受或可容忍的過程。風險準則係依評估災害風險之顯著性所定義。風險準則可定義自標準作業程序、防救災計畫、防救災對策或其它需求。

在上述三個過程中，風險鑑別即是所謂的災害潛勢分析，可藉由災害特性、過去發生事件、理論分析來描述；通常也和風險分析過程中的災害頻率分析共同討論，而形成所謂的危害度分析，例如地震災害的 PGA 推估、水災的淹水深度模擬等。共通特性就是風險鑑別必須基於某個災害規模的想定，作為後續風險管理的基準，一般稱之為災害規模設定或災害防護規模 (defense magnitude)。第二個過程－風險分析，涵蓋的數理層次極廣，可應用的元素包括機率 (probability)、頻率 (frequency)、脆弱度 (vulnerability)、易損性 (fragility)、風險矩陣 (risk matrix)、風險等級 (level of risk) 等。因此不同類型的災害延生出許多不同的分析方法。一般而言，風險分析皆以危險事件發生的機率與其後果的組合來描述，並根據問題的清楚描述 (即災害頻率分析、脆弱度分析、暴露分析及後果分析) 建立複雜問題的分析模式。United Nations Disaster Relief Organization (UNDRO) (1979) 曾針對風險問題中的災害風險分析提出一個定量的風險計算模式，表示如下：

$$\text{Risk} = \text{Hazard} \times \text{Vulnerability} \times \text{Exposure} \quad (2-1)$$

上式中的 R 代表風險； H 為危害度，包含災害潛勢的頻率或規模，係風險鑑別和頻率分析的結果； V 為脆弱度或易損性，表示在災害潛勢的頻率或規模下風險問題發生的性質、程度或機率； E 為暴露度或暴露量，表示曝險對象 (保全對象) 涉入風險問題之程度 (損失)。式(2-1) 表現災害風險分析的定義和組合特性，因此廣為研究者所採用，亦適於作為災害風險管理課題的基礎。因此亦被許多學者稱為風險三要素 (risk triangle, Crichton, 1999)。

對於第三個過程－風險評估，則係依據風險分析之結果與定義自標準作業程序、防救災計畫、防救災對策或其它防救災需求之準則比較。藉以界定災害風險後果是否超過可接受或可容忍的範圍，其中包括防救災物資、機具、人力、資源等需求評估，並據以改進及改善防救災對策。在風險評估過程使用的元素，則包括風險之對策、度量、裕度、迴避、彙整及接受。

第二節 地震易損性分析

工程上易損性曲線 (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)。在探討地震導致結構物破壞之問題上, 可利用結構力學分析的方式來進行目標結構的耐震分析, 不論利用靜力分析或動力分析, 皆可輕易得到所設計結構的耐震評估結果, 但事實上土木工程未必能夠完全依照結構設計的期望來建造理想的建築物, 肇因於工程上具有相當多的不確定性因子, 諸如施工技術、品質管理、材料品質變異、地質條件、設計規範等等。因此就巨觀而言, 對於建築物遭致地震侵襲時的破壞, 就可被描述成一個高度複雜因子的統計問題。而針對這樣的問題, 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 (Whitman, *et al.* 1997; Yamazaki, 2001; Shibata, 2006)。而所謂建築物易損性曲線, 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) 建築物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 (功能性與經濟性) 及修復所需的成本 (金錢與時間), 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、災後緊急動員參考、耐震需求分析與工程參數研究之用。

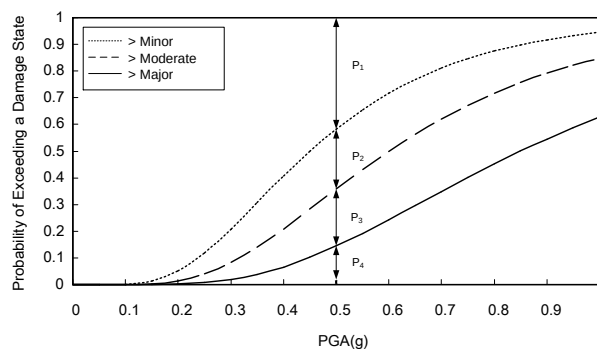


圖 2-1 不同損害分級之易損性曲線關係

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。以下分述之：

(一) 專家判斷法

基於專業主觀的經驗及判斷，建立對於損害紀錄的損害等級、致災因子和機率分布的專業共識發展易損性曲線。早期對於易損性評價模式尚未完全瞭解前，對於災害紀錄須借助工程專家專業地評價受災本體的損害情形，進而了解受災本體對於災害的損害特性。專家判斷法係基於專家團隊主觀的經驗及判斷，並建立對於調查紀錄的損害分級、致災因子大小和機率分布的專家共識來發展易損性曲線。

(二) 理論分析法

不同自然災害事件可發展不同之理論分析方法。例如建築物可發展靜力或動力分析理論。經由建立結構分析模型及定義損害分級，再以設計規範之靜力分析及選定的設計地震力發展易損性曲線。或是在基於地震結構反應譜之動態數值模擬及選定的模擬地震發展易損性曲線。

(三) 經驗分析法

基於過去某個災害性事件或是數個事件後的真實損害事件資料，利用統計推論法發展易損性曲線。利用災害性事件後由專家及學者進行損害調查資料，將所調查之資料予以分類再利用統計方法或其它資料訓練方法建立易損性曲線。經驗分析法的發展在於自然災害的可能因素複雜具不確定性，理論分析法不全然能驗證真實的損害機率。其優點在於實際的損害紀錄可真實地表現許多不確定因素對於損害的影響。經驗分析法建立易損性曲線受限於資料不易取得。因此，經驗分析法的缺點在於必須取得足夠的樣本資料才足以掌握受災本體的損害特性，有時還需要進行適當的分類或分級。經驗分析法可利用某個災害地震或是數個地震後的真實損害資料庫進行分析。可將其歸納為三類損害資料庫：

1. 第 1 類：基於單一地區單一事件之損害紀錄。
2. 第 2 類：基於不同地區多個事件之損害紀錄。
3. 第 3 類：基於單一地區多個事件之損害紀錄。

(四)混合法

混合法的原理係結合經驗法和理論法的優點，將經驗資料混合其它方法（例如專家判斷法或理論分析法）的修正結果來提升易損性曲線的可靠度，試圖彌補經驗調查資料的不足、專家判斷法的主觀性和理論分析法的模型缺陷（例如 Penelis *et al.*, 2003; Kappos *et al.*, 2006; Kappos and Panagopoulos, 2010）。

二、經驗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 (normal distribution)、對數常態分布 (lognormal distribution) 或 Beta 分布 (Beta distribution) 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。本研究將過去文獻使用之機率密度函數列表整理於表 2-1，其中 x 為隨機變數，式(2-2) 和式(2-3) 中之 c 為中位數， ζ 為標準差，式(2-4) 中之 α 、 β 為 Beta 分布之母數，二者皆係大於 0 之參數。

表 2-1 易損性曲線常見之機率分布函數

機率分布	機率密度函數
常態分布	$f(x) = \frac{1}{\zeta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-c)^2}{2\zeta^2}} \quad (2-2)$
對數常態分布	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta x} e^{-\frac{(\log x - c)^2}{2\zeta^2}} \quad (2-3)$
Beta 分布	$f(x) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} \quad (2-4)$

資料來源：本研究整理

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。就定義而言，表 2-1 所述之機率分布亦可以此類方法求取其累積分布函數。過去文獻曾使用之其它分布函數整理於表 2-2，其中 x 為隨機變數，式中之 a 、 b 為待擬合之係數，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。

表 2-2 易損性曲線其它常見之分布函數

概述	分布函數型式
指數式	$F(x) = ae^{bx}$ (2-5)
對數式	$F(x) = e^{a \log x + b}$ (2-6)
擬羅吉斯	$F(x) = \frac{100}{1 + (x/a)^{-b}}$ (2-7)

資料來源：本研究整理

在經驗分析法中損害調查紀錄的可用性是影響易損性曲線可靠度的重要關鍵。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，為了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，即可經由參數推估方法建立易損性曲線。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。本研究將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其概念和原理。

(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 (maximum likelihood estimation; MLE) 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; JPDP)。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。

第三章 高震度區之坡地易損性曲線

第一節 地震易損性模式之發展

事件發生可能性（例如本研究探討之崩塌）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。例如地震引致之坡地崩塌，可用來進行坡地分類之地文因子包括地質、坡度、坡向、斷層距...等。

本研究主要以完全調查樣本法來發展坡地易損性模式，完全調查樣本法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。最大概似估計法是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，再利用統計學的分析方法進行參數估計進而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：

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

當其中雙估計參數決定後，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 (clustering analysis) 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來達到並得以進行最大概似估計，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：

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

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：

$$L^M(c_1, c_2, \dots, c_j, \zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_j) = \prod_{k=1}^K \left(\sum_{j=0}^J P_j^{x_{kj}} \right) \quad (3-15)$$

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以得到，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機率密度函數的累積機率分布函數。需要說明的是，當 $J=2$ 時式(3-16) 之解析解與二項式相同，其表示的是在此情況下僅有一條曲線，因此無需考慮易損性曲線的交錯。

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，二項分布型表達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，所表達之涵義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，其物理意義係指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地震下有多少機率可能會發生崩塌，進而推估集水區之崩塌情形。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 以下依原分級標準不改動以 PGA 定義，震級 5 以上則改以 PGV 定義，並給予新的分級標準。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。

震級實際評估的過程是，當地震測站測量到地震歷時後，首先將計算各測站之 PGA 和 PGV，再經由空間內插推估（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 15 cm/s 以上（震級 5 弱）以 PGV 定義，PGV 在 15 cm/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 值則做為參考。如此細化之震級劃分有利於防災實務運用，不致因震級的震度值範圍過大而產生應用上的不便。

表 3-1 氣象局地震震度分級對照表 (2020 年新制)

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。這個關係建立在有良好致災資料所建置之崩塌資料庫或崩塌目錄。對於廣域崩塌評估可依據不同之地文分類及誘發指標建立不同類別之坡地易損性曲線，而可用來進行坡地分類之地文因子例如坡度、地質、坡向…等，而引致崩塌之誘發指標則可採用地震之 PGA、PGV、SI…等，建立與坡地崩塌的易崩特性關係。

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 地震中高震度地區為例，除針對研究地區的基本資料蒐集外，亦蒐集其範圍內的相關資料，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；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。

在進行坡地易損性分析中，必須要考量的另一特性即是坡地崩塌的幾何特性。對於網格崩塌資訊，目前已可藉由高精度衛星影像判釋得到，但此資訊未必完全符合地形特性，同時具有一定的不確定性。因此，本研究考量地形特徵單元與評估合理性引入坡面單元分析，坡面單元因具有符合地形特徵之特點，此特點有利於未來進一步的坡面評估分析，相較網格單元更可靠及合理可行，將有助於釐清空間上坡地之影響範圍及應用評估。

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。

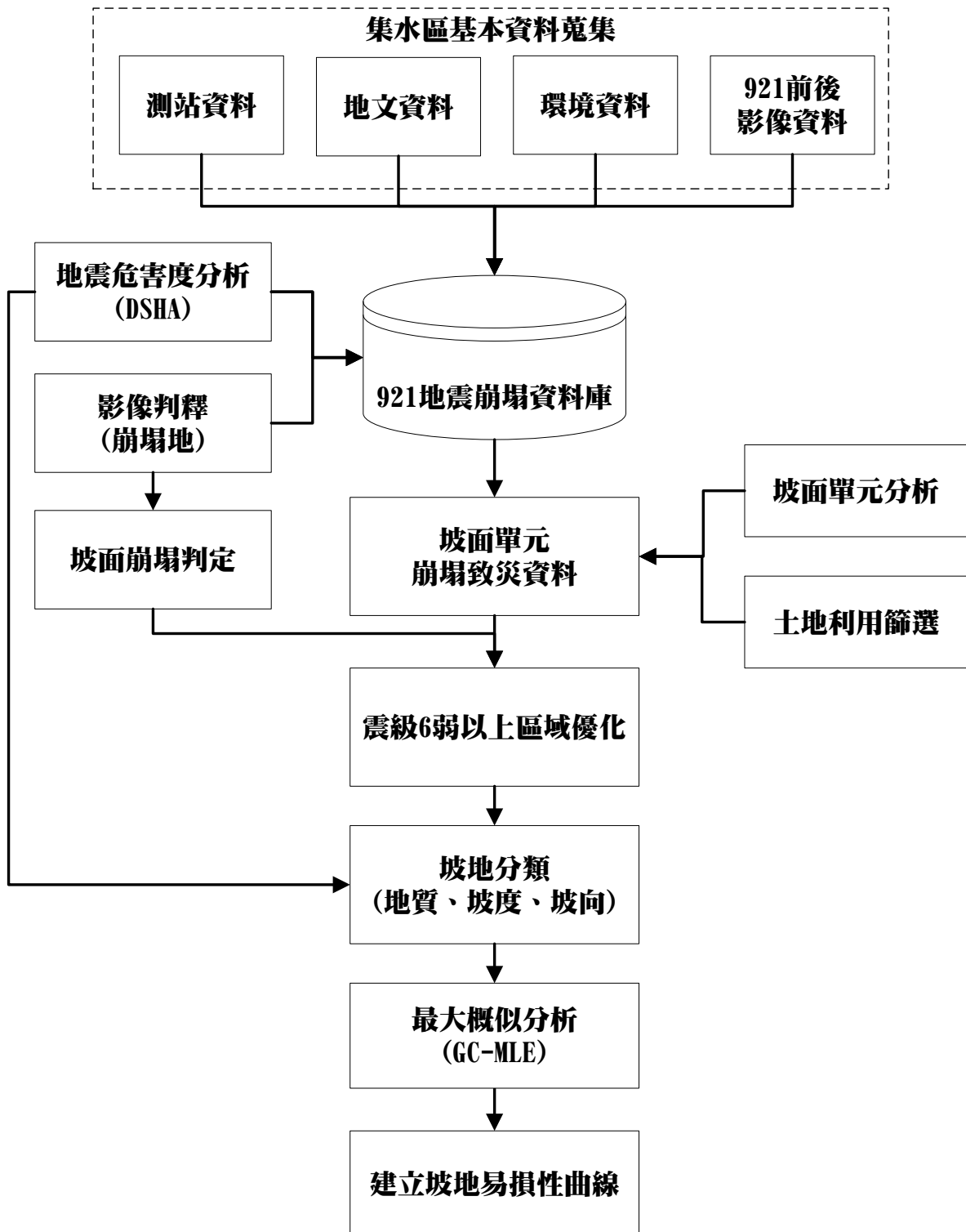


圖 3-1 坡地易損性分析流程

第三節 921 地震資料庫建立

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。

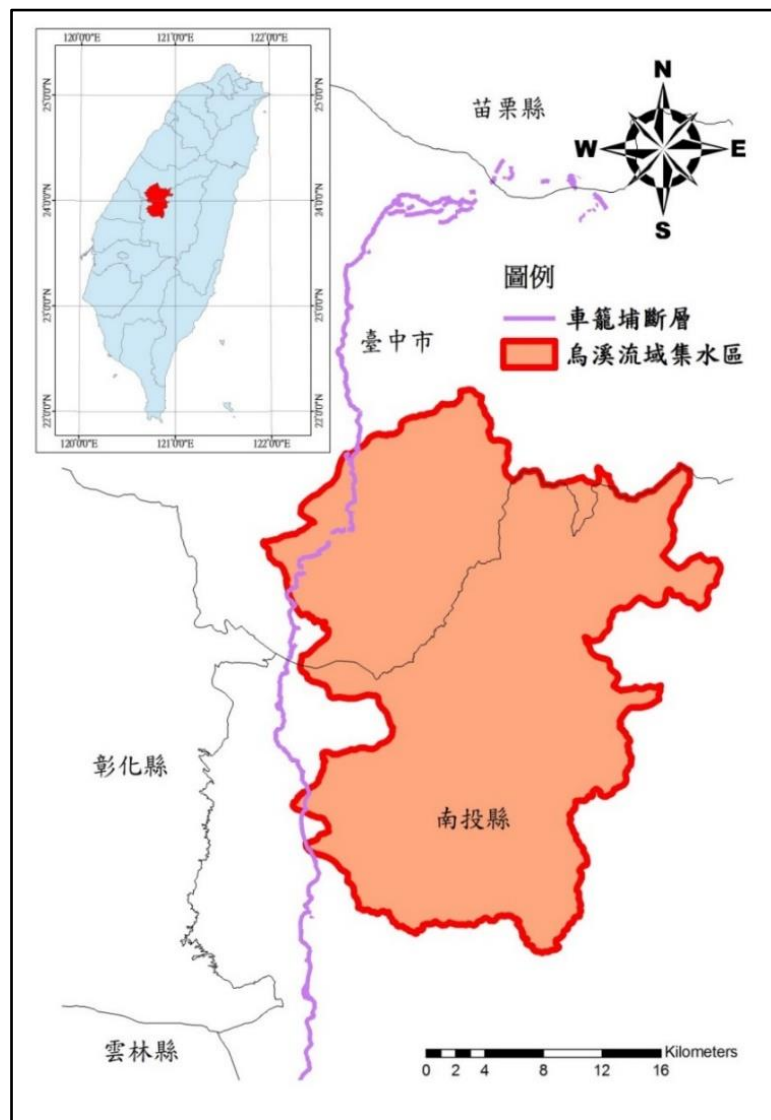


圖 3-2 研究區域

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%

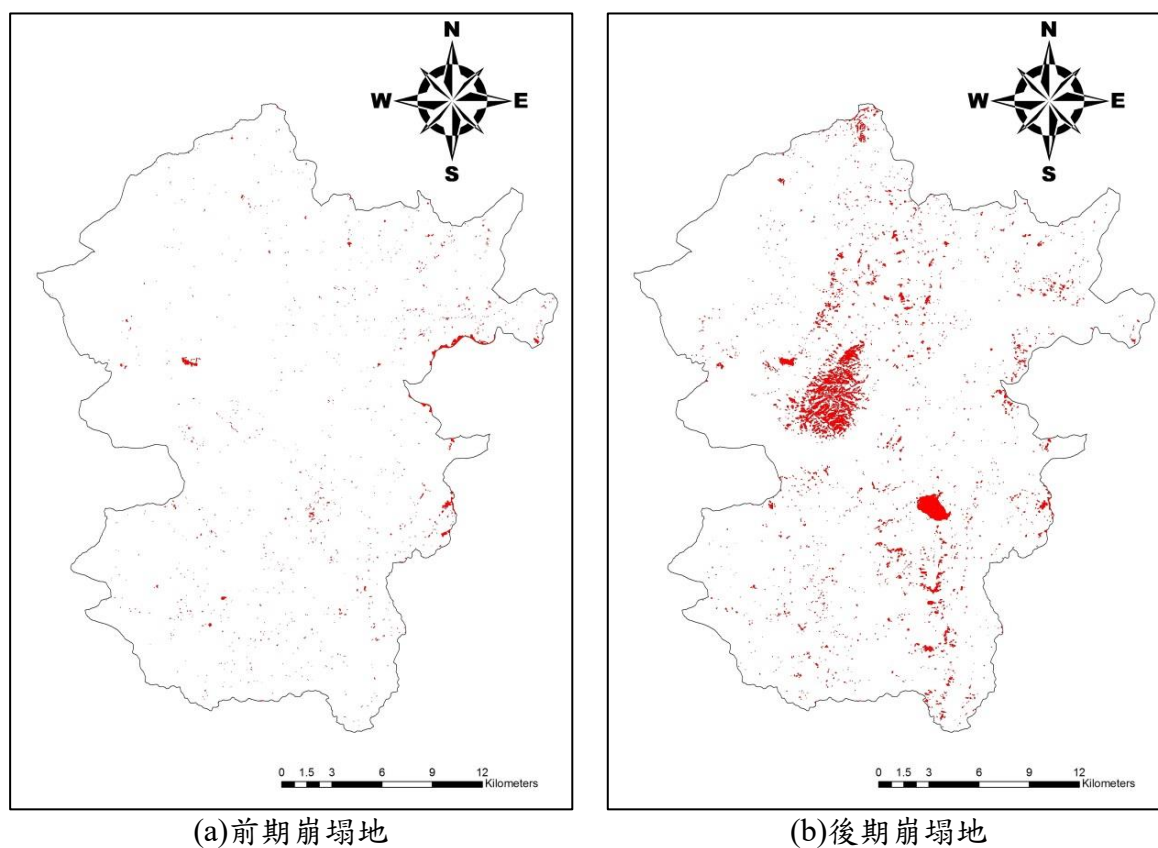


圖 3-3 九二一地震前後期裸露地分布

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：

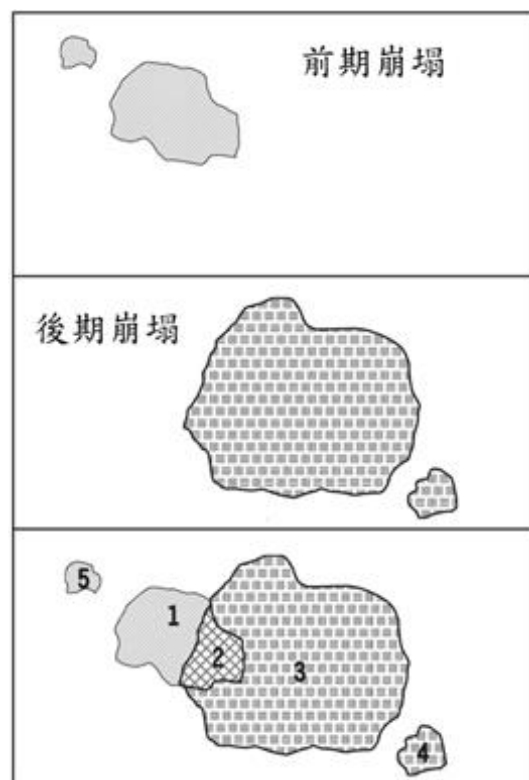
(一) 崩塌復育：(1) 與 (5)

(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，在技術層面上具有清晰的定義，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；然而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，須進行現地勘查才可能得知。根據上述崩塌地之分類，本研究將各颱風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

新增崩塌地關聯性查詢可直接針對裸露地進行網格套疊，即可顯示出崩塌地相對應位置的集水區網格，再將顯示出崩塌地之網格標記成數字 1，表示該網格發生崩塌，未發生崩塌之網格則標記為數字 0，如圖 3-5 所示，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 3-6 所示。

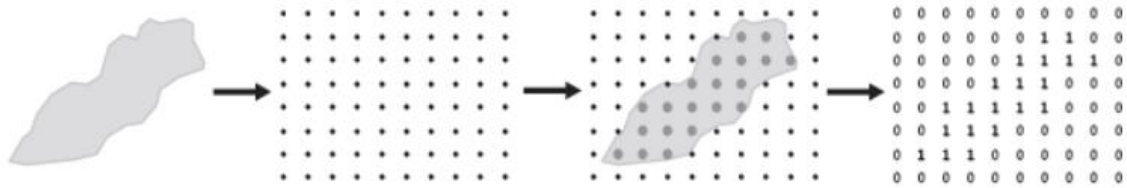


圖 3-5 坡面資料套疊網格示意圖

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

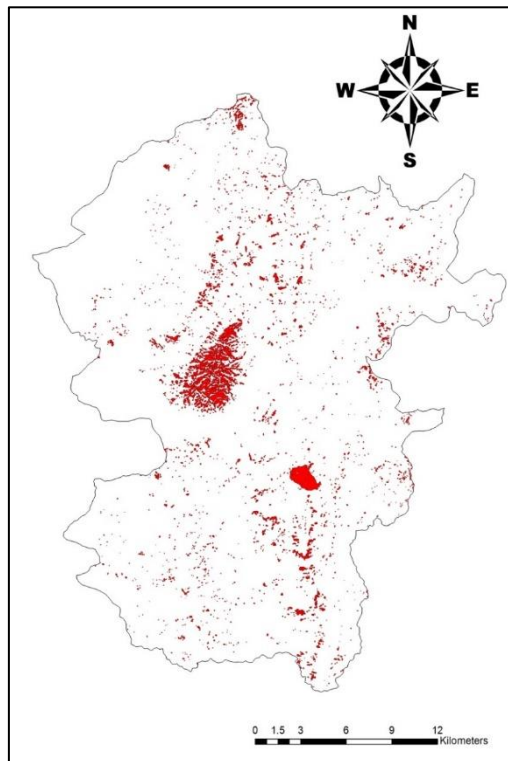


圖 3-6 921 地震新增崩塌地

四、地震誘發崩塌之地表震度

地震災害潛勢分析之目的在於瞭解地震發生後可能造成區域潛在威脅之程度，通常可利用尖峰地表加速度 (Peak Ground Acceleration, PGA) 或尖峰地表速度 (Peak Ground Velocity, PGV) 表達潛勢分析的物理量 (即震度)。地震潛勢分析可經由區域鄰近之活動斷層分布，考量適合之震源參數 (包括活斷層帶、地震規模及深度) 及震度衰減率來推估尖峰地表震度值，此種方法亦稱為定量地震危害度分析 (Deterministic Seismic Hazard Analysis, DSHA)。

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，測站分布與車籠埔斷層帶之關係如圖 3-7 所示，其中有十數筆的資料是位於近斷層處，將有利於描述斷層特性 (溫國樑與柴駿甫，1999)。

本研究以上述 444 個強地動測站所得 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之，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。此測站之場址震度值可作為未設測站場址推估震度空間分布之基準值。

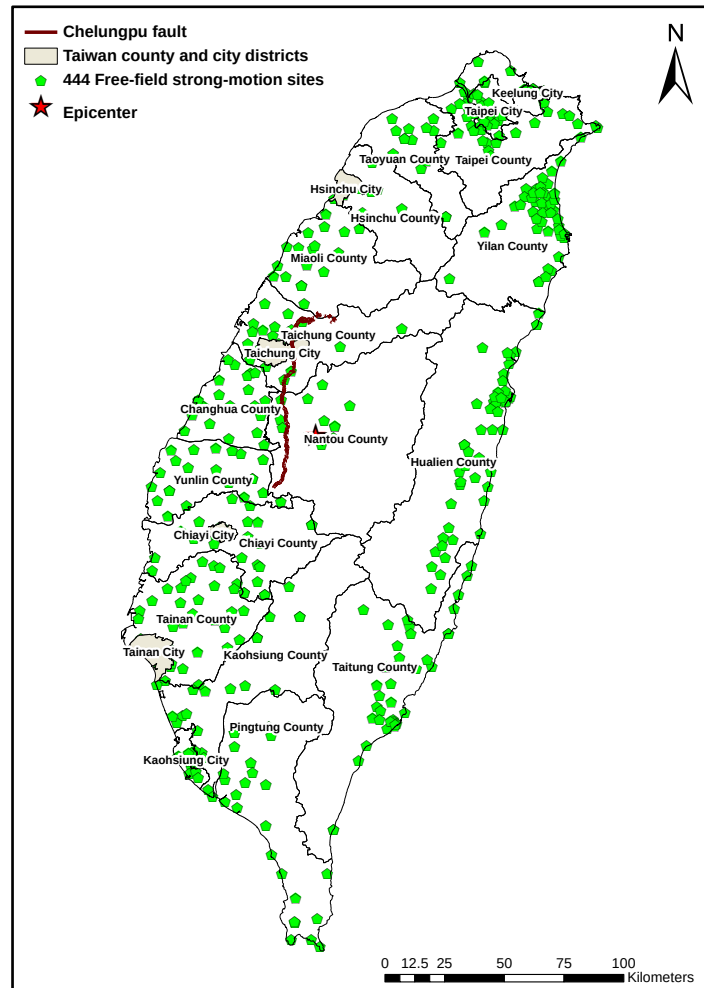


圖 3-7 自由場強地動測觀測網 (TSMIP) 測站分布

(一) 地表震度衰減率

根據以往地震學家對於地震的觀察，場址地表震度的大小與斷層之距離呈負相關。地表震度衰減率被用以描述場址隨著震源距離遠近導致地表震度衰減之關係。全世界對於 PGA 及 PGV 之地表震度衰減率之研究相當多，主要是以歷史地震資料為基礎，依據不同的地質條件，提出許多不同型式之衰減公式，再透過統計回歸的方式求得。早期較為著名的學者有 Campell (1997)、Boore and Joyner (1997)、Sadigh *et al.* (1997) 等人所提出之地表震度衰減公式，地表震度衰減率根據選擇和蒐集的地震紀錄不同而有不同的適用特性，以 Campell (1997) 為例，其蒐集 1957—1993 年之世界 49 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：

$$\begin{aligned} \ln(S_h) = & -3.512 + 0.904M_w \\ & -1.328\ln\sqrt{R^2 + [0.149\text{Exp}(0.647M_w)]^2} \\ & + [1.125 - 0.112\ln R - 0.0957M_w]F_{\text{fault}} \\ & + [0.440 - 0.171\ln R]S_{\text{SR}} + \varepsilon \end{aligned} \quad (3-18)$$

$$\begin{aligned} \ln(V_h) = & \ln(S_h) + 0.26 + 0.29M_w \\ & -1.44\ln[R + 0.0203\text{Exp}(0.958M_w)] \\ & + 1.89\ln[R + 0.361\text{Exp}(0.576M_w)] \\ & + (0.0001 - 0.000565M_w)R - 0.12F_{\text{fault}} \\ & - 0.15S_{\text{SR}} - 0.30S_{\text{SR}} + \varepsilon \end{aligned} \quad (3-19)$$

式(3-18)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； ε 為一平均值為 0 之隨機誤差 (random error)； F_{fault} 為斷層種類參數，其值如表 3-4 所示，以 921 地震為例，震源機制係車籠埔斷層破裂所造成，其主要破裂面約為南北走向，傾角向東約為 26 度，此幾乎純逆斷層之震源機制即屬第三類斷層； S_{SR} 及為現地條件參數，沖積土層或硬土層為 0，軟岩為 1，可經由土壤分布圖求得場址之該條件參數。

表 3-4 斷層種類參數

	第一類	第二類	第三類
	走向滑移斷層	正斷層	逆衝、逆斜等斷層
F_{fault}	0	0.5	1

資料來源：Campell (1997)

地表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分別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：

$$\log_{10}(S_h) = 0.00215 + 0.581M_w - \log_{10}(R + 0.00871 \times 10^{0.5M_w}) - 0.00414R \quad (3-20)$$

$$\log_{10}(V_h) = -2.49 + 0.810M_w - \log_{10}(R + 0.00871 \times 10^{0.5M_w}) - 0.00268R \quad (3-21)$$

地表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：

$$\min \Delta = \sum_{m=1}^M |(S_m)_T - \alpha(S_m)_E| \quad (3-22)$$

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

由於自然界中的諸多現象多具有時間或空間上之變異，因此對於散佈在空間中的自然變量，經常利用地理統計之區域化變數理論表現其性質。區域化變數理論為學者 Matheron (1971) 所提出，其理論之基礎係假定散佈在空間結構中之自然變量存在一定的分布特性。若這些現象僅針對時間或空間上的不連續點表述，則這些物理量之變異則可用隨機變數描述，而不同時間或空間不連續點上之隨機變數未必相同，因此在空間中之隨機變數即形成一個隨機變域。區域化變數通常被以 $Z(x)$ 表示，其中 x 代表空間中的位置向量。區域化變數理論之核心即在於如何分析及建構 $Z(x)$ 之空間隨機變域模

型，並利用此空間隨機變域模型進行空間資料之推估。自然界的許多現象均具有隨機變域的表現，例如震度、降雨量、溫度等。由於在空間中不同區域之各隨機變數並非完全獨立，而是可能具有不同程度的相關性，隨機變域之表現值即被稱為區域化變數 (regionalized variable)。

散佈在空間中的自然變量若存在明確的空間結構特性即可稱之為區域化 (regionalization)，而所謂區域化變數通常包含能夠明確以數學關係式表示的確定性資料與具隨機特性的非確定性資料，也稱之為非統計問題和統計問題這兩種類別。對於地震所引致之地表震度分布問題而言，確定性資料即地表震度衰減率，代表由任意震源引發的地表震度在空間中之分布模式；但對於非確定性資料，則係時間與空間之不同而產生之隨機變異，由於無法使用明確的數學關係式來表達，而且每次觀測的結果也可能不同。因此，基於地理統計理論之觀點，空間中任意區域之地表震度 $Z(x)$ 即具有隨機變域的特性，其係由區域化趨勢值 $M(x)$ 和殘差分量 $R(x)$ 所組成。對於空間中之地表震度，震度分布即可滿足下式 (Journel, 1983)：

$$Z(x) = M(x) + R(x) \quad (3-23)$$

上式中 $Z(x)$ 為位於 x 處之地表震度之區域化隨機變數值； $M(x)$ 為區域趨勢值，可表示為在 x 處的一個緩慢變化的定率函數 (deterministic function)，即地表震度衰減率，其值等於 $Z(x)$ 在 x 處之期望值，滿足：

$$M(x) = E[Z(x)] \quad (3-24)$$

$R(x)$ 為殘差分量，即為空間中隨機變動值 (erratic fluctuations)，期望值為 0，滿足：

$$E[R(x)] = 0 \quad (3-25)$$

殘差分量定義為在 x 處之地表震度值與對應區域趨勢值之差，其表達隨機變

數的空間變異 (Yamazaki *et al.*, 1999; Yamazaki and Murao, 2000)。因此，此殘差分量即符合區域化變數理論之假設，可應用克利金方法進行空間中隨機變動值推估。如圖 3-8 所示，完成隨機變動值的推估後再將任意 x 處之區域趨勢值與推估結果相加，即為空間全域推估。

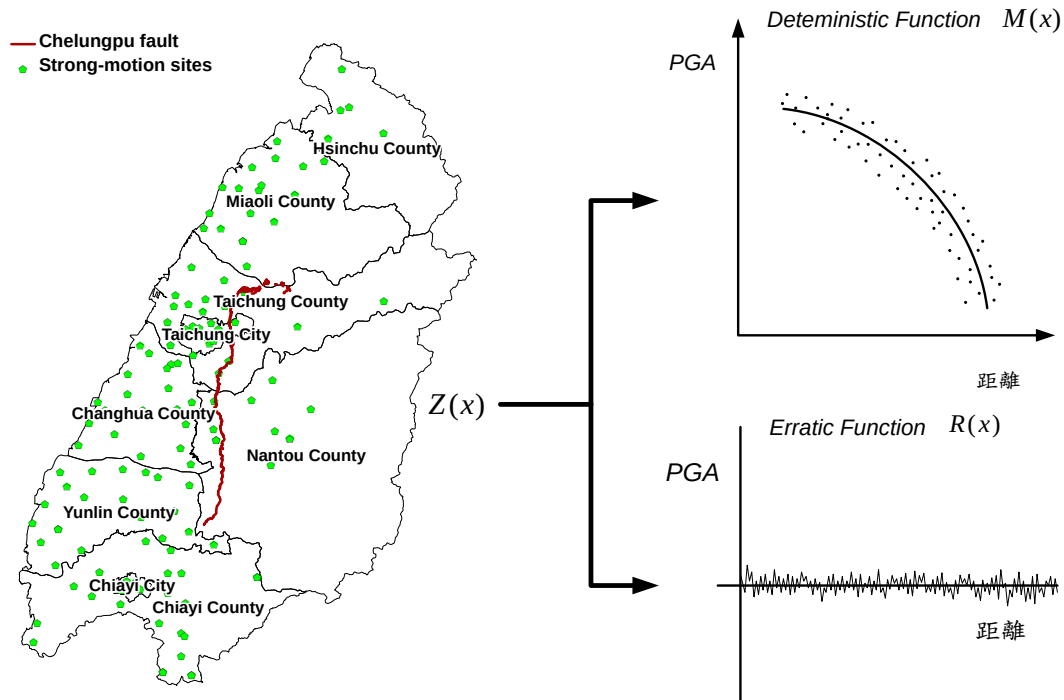


圖 3-8 區域趨勢值與空間中隨機變動值之關係

進行空間中隨機變動值推估前必須對空間資料進行空間結構分析，而以克利金空間內插方法進行地表震度之空間結構分析，其核心即須進行所謂的半變異數分析 (semivariogram analysis)。半變異數代表觀測資料之空間變異，係描述區域變數 (regionalized variable) 沿著某一特定方向的變化率值，以此估計已知觀測資料的空間變異度。

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 (variogram model) 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 (covariance model) 的估計變異為最小 (Journel, 1983)。過去已有許多研究已成功地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 (例如 Carr, 1983; Carr and Glass, 1984; Maruyama *et al.*, 2010; Shabestari *et al.*, 2004; Wu, Hsiao & Teng, 2004; Yamazaki *et al.*, 1999; Yamazaki and Murao, 2000)。

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 m×100 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，利用地理資訊系統軟體 Arc GIS 內建之克立金空間分析內插模組推估空間中之隨機變動值。根據式(3-21)，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 $Z(x)$ 。

震度衰減率所得之殘差分量套配之最佳半變異數模式為指數模式，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 (mean absolute error) 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 3-9 和圖 3-10，由圖 3-9 中顯示在車籠埔斷層帶沿線之推估結果較高，最大 PGA 值為 815.07 cm/s^2 ，由圖 3-10 中顯示最大 PGV 值為 130 cm/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。這也表示若以新舊制地震震級定義劃設震級區，會有完全不同的結果，921 地震之最高震級若以舊制定義為 7 級，而若以新制定義則為 6 強級。

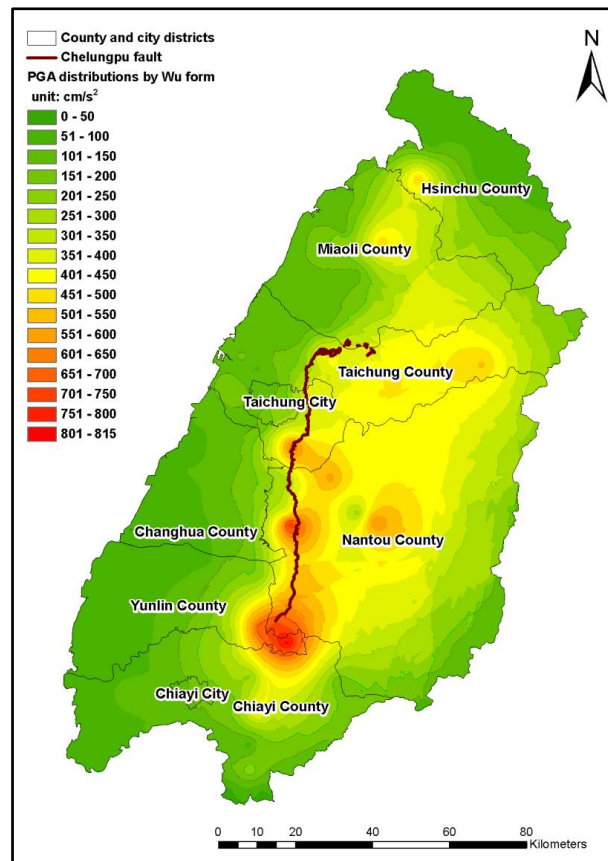


圖 3-9 尖峰地表加速度 PGA 分布

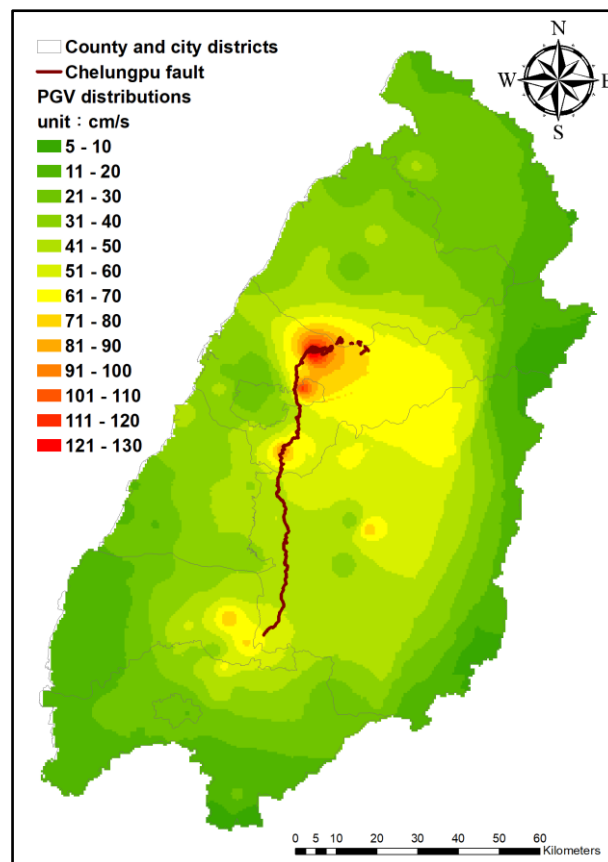


圖 3-10 尖峰地表速度 PGV 分布

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，資料庫細分為三個部分：(1) 地文因子；(2) 篩選因子及 (3) 崩塌資訊。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。環境資料庫之類型和檔案格式如表 3-5 所示。

表 3-5 環境資料庫之類型和檔案格式

類型	資料名稱	檔案形式
地文因子	地質	向量檔案(Shapfile，類型：Ploygon)
	坡度	影像檔案(Raster，解析度：5m)
	坡向	影像檔案(Raster，解析度：5m)
	順向坡	向量檔案(Shapfile，類型：Ploygon)
	距斷層遠近	向量檔案(Shapfile，類型：Ploygon)
篩選因子	高程(1500 以上)	影像檔案(Raster，解析度：5m)
	河系圖	向量檔案(Shapfile，類型：Ploygon)
	國土利用	向量檔案(Shapfile，類型：Ploygon)
	921 地震後期陰影	向量檔案(Raster，解析度：20m)
崩塌資訊	921 地震前期裸露地	影像檔案(Raster，解析度：20m)
	921 地震後期裸露地	影像檔案(Raster，解析度：20m)

資料來源：本研究整理

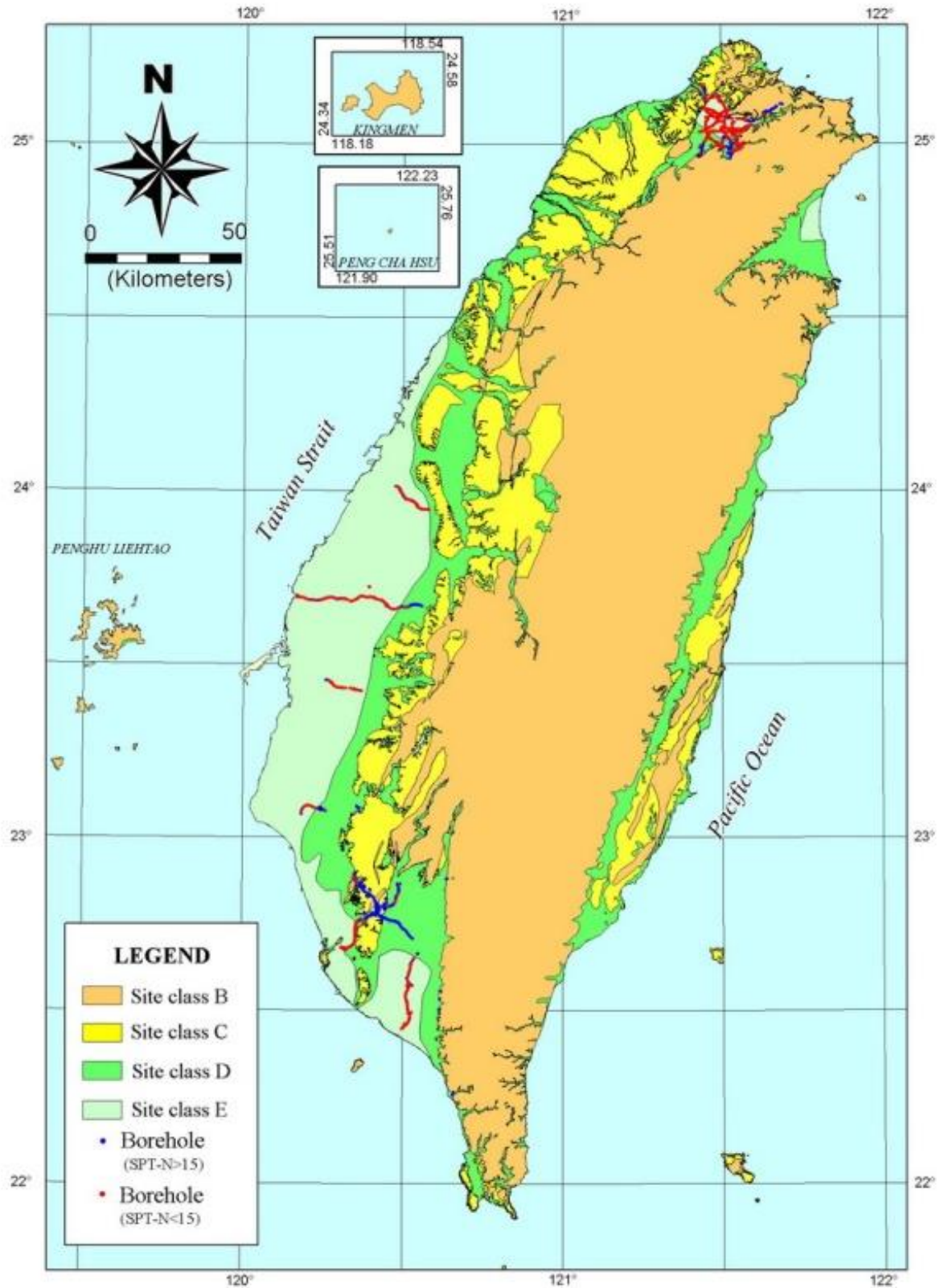
一、地質資料

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 3-6 及圖 3-11 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 3-6 李錫堤教授提出之台灣地區地質分類

分類	1997 UBC 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 $u_s \geq 2000$ psf ($u_s \geq 100$ 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 $1000 \text{ psf} \leq u_s \leq 2000 \text{ psf}$ ($50 \text{ kPa} \leq u_s \leq 100 \text{ kPa}$), 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 SPT N 值 ≥ 15
E	Soft soils, Profile with more than 10ft (3m) of soft clay defined as soil with plasticity index $PI > 20$, moisture content $w > 40\%$ and undrained shear strength $u_s < 1000 \text{ psf}$ (50kPa), or $N < 15$ blows/ft	全新世沈積物及回填物等，平均地表 30m 內 SPT N 值 < 15

資料來源：Lee *et al.*, 2001



資料來源：Lee *et al.*, 2001

圖 3-11 李錫堤教授分類之地質圖

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 3-12 所示。

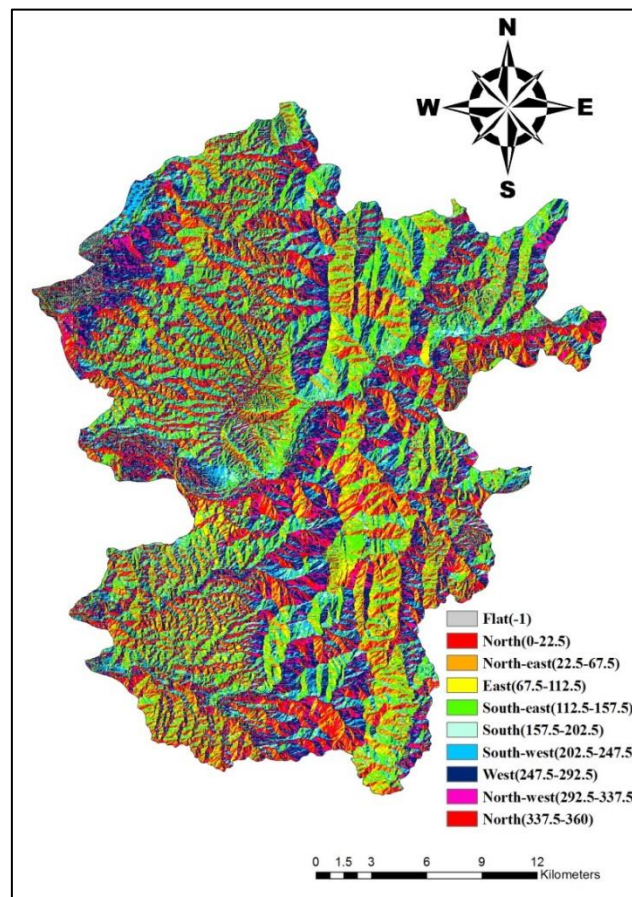


圖 3-12 坡向圖(以研究區域為例)

三、坡度資料

某地形的斜度即為坡度，常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 (2020) 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」，為水土保持技術規範 (2020) 內容許方法之一 (另一為等高線法)。如圖 3-13 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(%)。

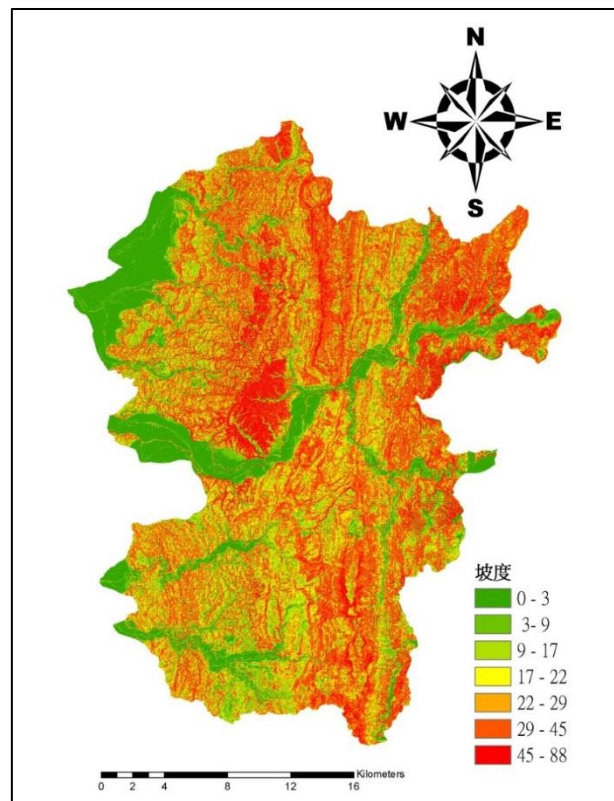


圖 3-13 坡度圖(以研究區域為例)

四、土地利用資料

為探討集水區流域內坡地潛在之自然崩塌，須刪除無崩塌潛勢區域或經人為擾動之非自然崩塌區域；前者如河流、河道、湖泊等，後者如建物、農地、利用地等。尤其是後者區域於崩塌地判釋時，在崩塌地、河谷、建地

的光譜值會相當接近，造成影像判釋上容易混淆與誤判。本研究採用內政部國土測繪中心所繪製 95 年土地利用調查圖資，濾除 921 地震時期無崩塌潛勢或非自然崩塌區域。

五、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，蒐集中央地質調查所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 3-14 所示。

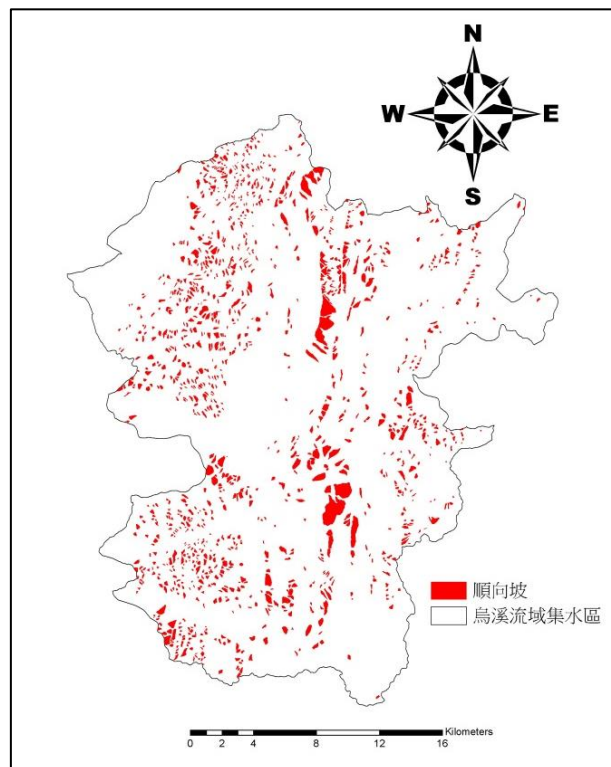


圖 3-14 順向坡分布圖 (以研究區域為例)

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，site class B 為堅硬且脆性的岩石為地質分級一、site class C 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 3-7 和圖 3-15 所示。

表 3-7 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	Site B	1,039	125	12.03%	914	88%	12.03%
G2	Site C	5,294	896	16.92%	4,398	83%	16.92%
總和		6,333	1,021	100.00%	5,312	100.00%	16.12%

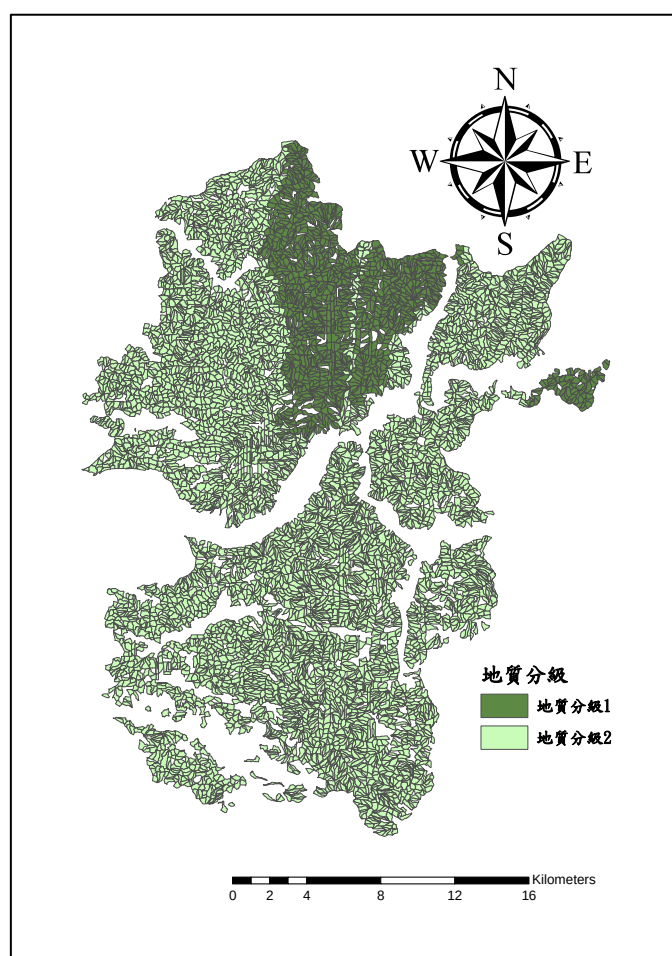


圖 3-15 坡面單元地質分類 (以研究區域為例)

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 3-16，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 3-17 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 3-8 和圖 3-18 所示。

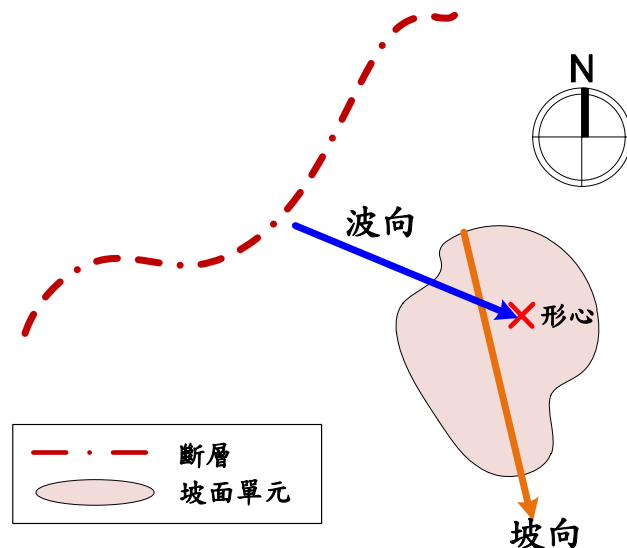


圖 3-16 坡面方位角和震波方位角的關係

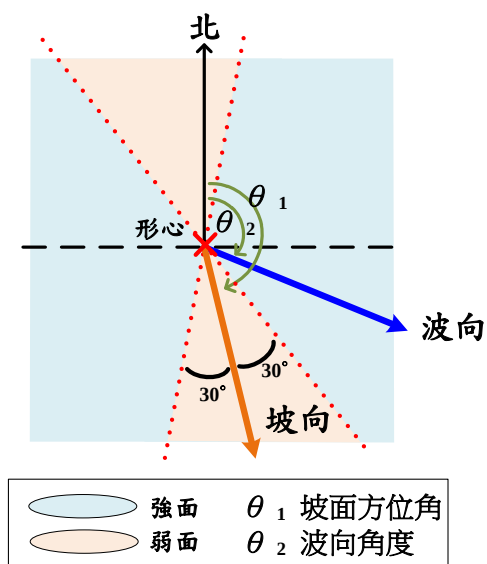


圖 3-17 坡向敏感因子定義

表 3-8 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%

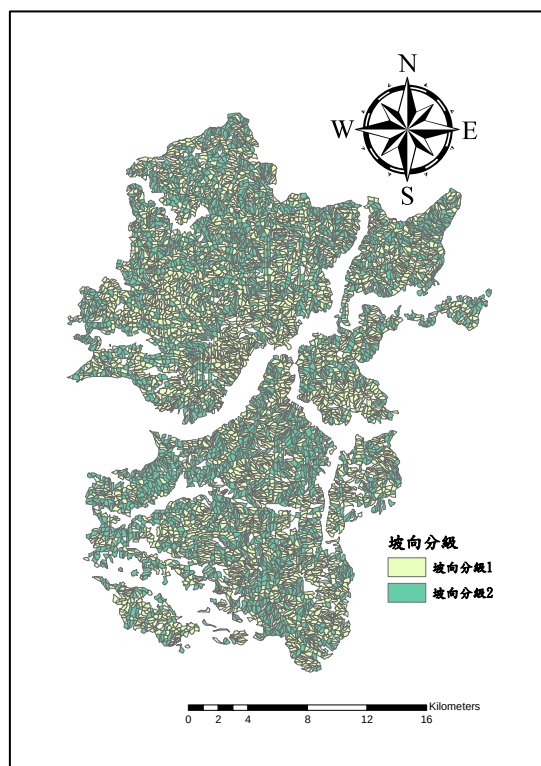


圖 3-18 坡面單元坡向分類 (以研究區域為例)

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 (2020) 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 3-9 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 3-19 所示。

表 3-9 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。

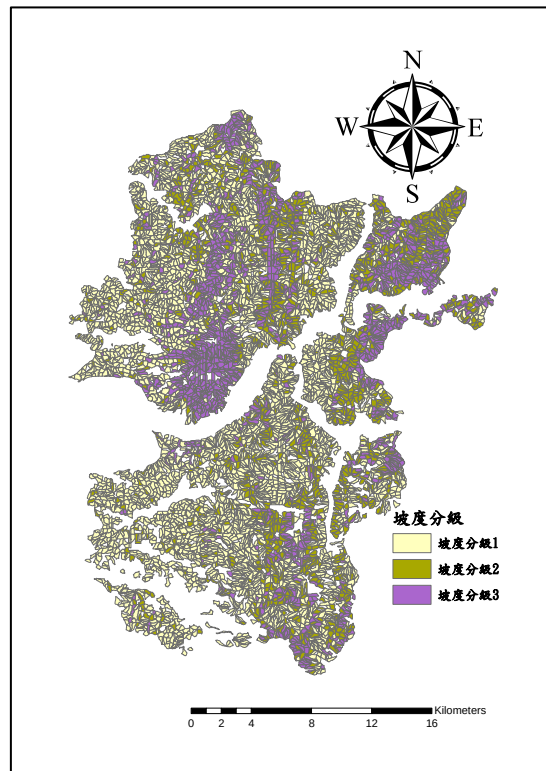


圖 3-19 坡面單元坡度分類 (以研究區域為例)

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，換句話說，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，因此首先必須探討此可能性所表示的物理意涵。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，通常對崩塌現象而言最簡單直接的作法，是以訂定崩塌門檻值作為某種崩塌狀態，因此採取合理的崩塌定義與程度即相當重要。此外，以衛星影像判釋崩塌地實際上並不能考慮地形與深度的影響，因此必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)。

過去研究結果顯示，理論上崩塌深度與坡度具有一定相關性，因此崩塌地斜面積、崩塌體積與深度亦有關係，理論上若崩塌體積與斜面積關係式成立，就可以進一步利用崩塌體積推算不同坡度下之崩塌斜面積，再計算崩塌水平投影面積，這也就是影像判釋所得之近似崩塌面積。也就是說，同樣可經由推估的方法，由崩塌水平投影面積及坡度進一步推估可能的斜面積與體積。然而，由於地層條件的不穩定性，要藉由崩塌深度推估適於任意坡地的關係式是相當困難的，這也是崩塌現象具有高度不確定性的原因。因此，通常的作法是藉由過去的經驗以相對定性的方式建立坡度與深度相關性(例如 Khazai and Sitar, 2000、國家災害防救科技中心，2004)。

根據上述，本研究針對坡面單元之崩塌定義，參考水利署曾於 2010 至 2011 年間發表之「氣候變遷下台灣南部河川流域土砂處理對策研究-以高屏溪為例」，該計畫針對高屏溪流域以野外量測之崩塌地斜面積與產砂量迴歸崩塌體積與斜面積關係式，由於是經驗公式，因此將深度因子消除，得到：

$$V = 0.2 \times A^{1.3} \quad (3-26)$$

式中 V 為崩塌體積 (立方公尺)； A 為崩塌斜面積 (平方公尺)；相關係數為 0.84。

本研究利用式(3-26) 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。因此將坡面單元的崩塌狀態，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，將崩塌體積期望值概取整數為 $V=6,000$ 立方公尺，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 $S1 \sim S3$ 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 0.28 ha 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 0.24 ha 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 0.22 ha 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。經反覆試算，本研究採用的坡面單元崩塌定義與狀態具有較佳的分析結果，也能夠合理地修正影像判釋為水平投影面積的不足。

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 3-10 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 3-10 所示。各類坡地易損性曲線如圖 3-20 至圖 3-31 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 3-10 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

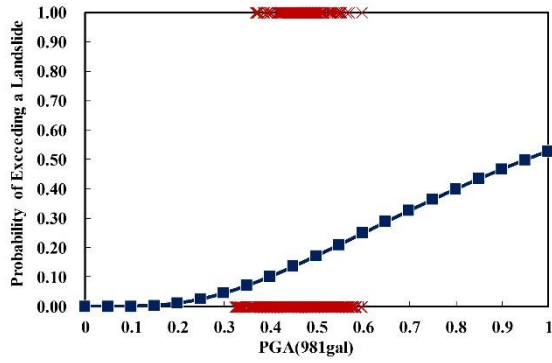


圖 3-20 G1A1S1 易損性曲線(PGA)

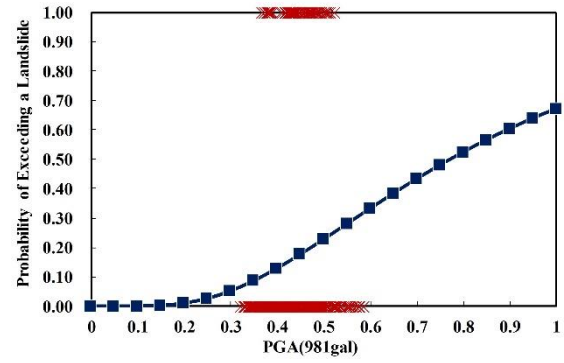


圖 3-21 G1A1S2 易損性曲線(PGA)

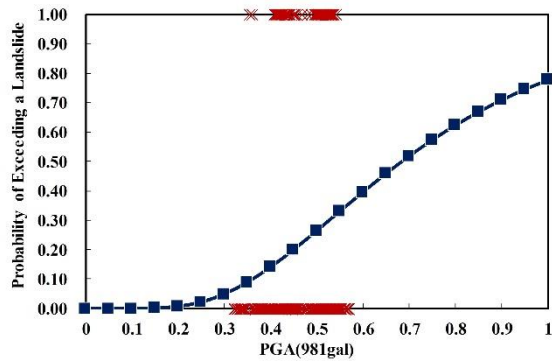


圖 3-22 G1A1S3 易損性曲線(PGA)

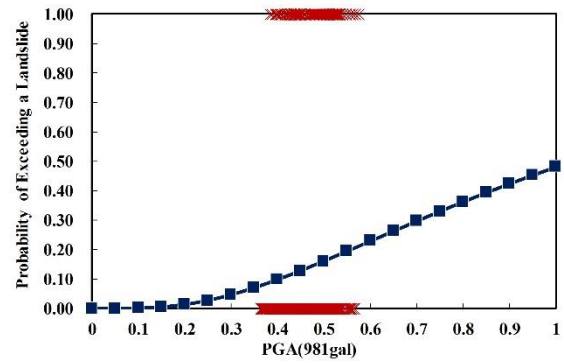


圖 3-23 G1A2S1 易損性曲線(PGA)

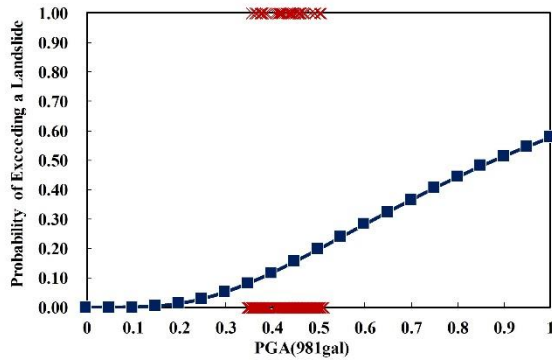


圖 3-24 G1A2S2 易損性曲線(PGA)

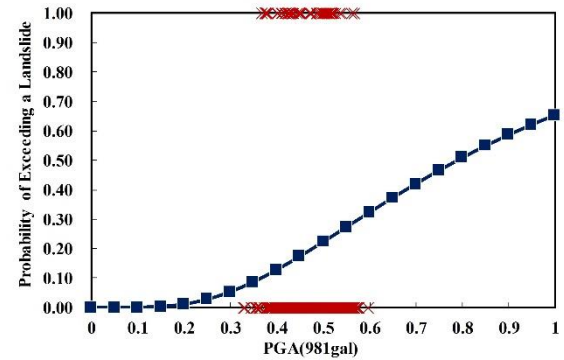


圖 3-25 G1A2S3 易損性曲線(PGA)

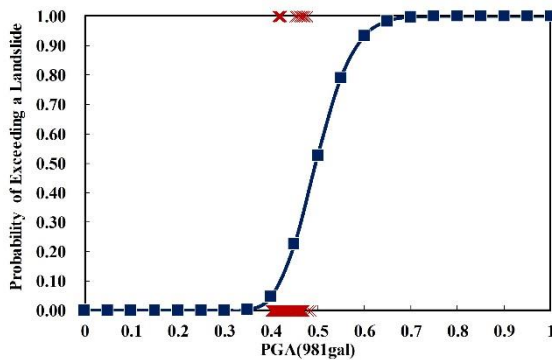


圖 3-26 G2A1S1 易損性曲線(PGA)

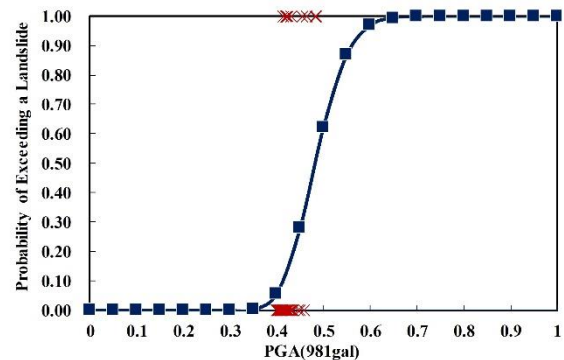


圖 3-27 G2A1S2 易損性曲線(PGA)

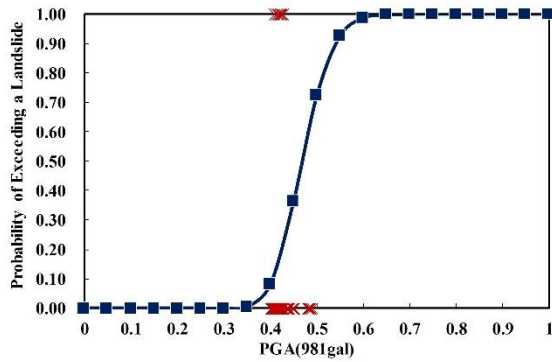


圖 3-28 G2A1S3 易損性曲線(PGA)

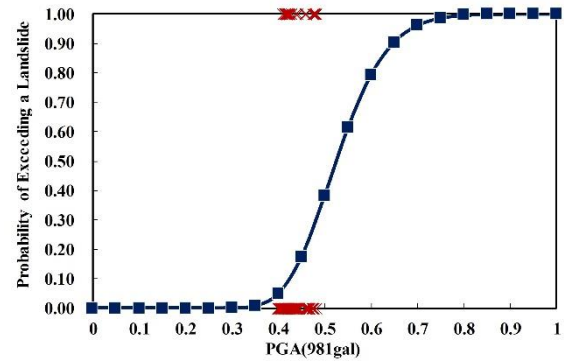


圖 3-29 G2A2S1 易損性曲線(PGA)

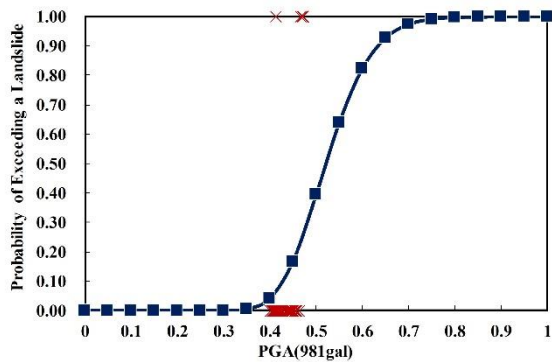


圖 3-30 G2A2S2 易損性曲線(PGA)

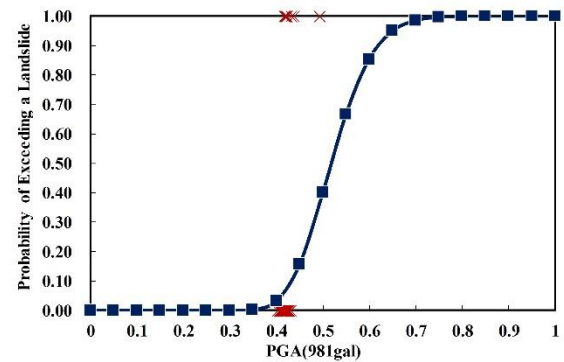


圖 3-31 G2A2S3 易損性曲線(PGA)

表 3-11 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 3-11 所示。各類坡地易損性曲線如圖 3-32 至圖 3-43 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。

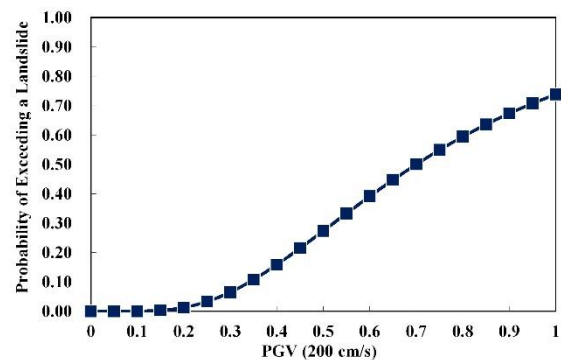
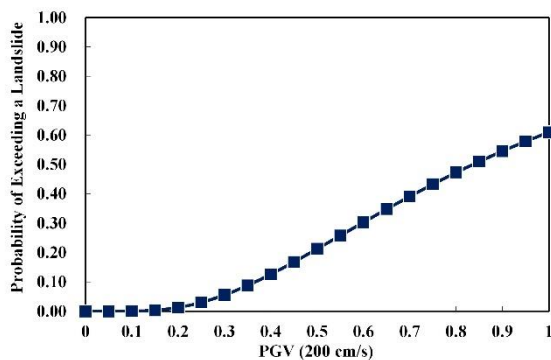


圖 3-32 G1A1S1 易損性曲線 (PGV) 圖 3-33 G1A1S2 易損性曲線 (PGV)

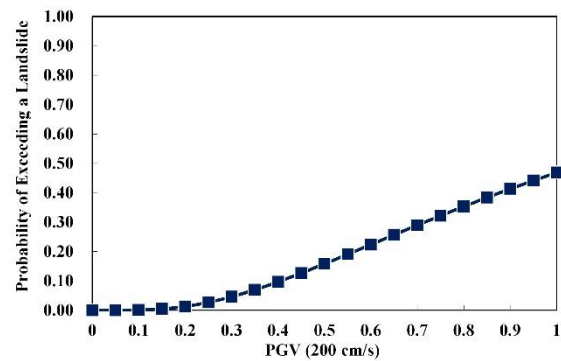
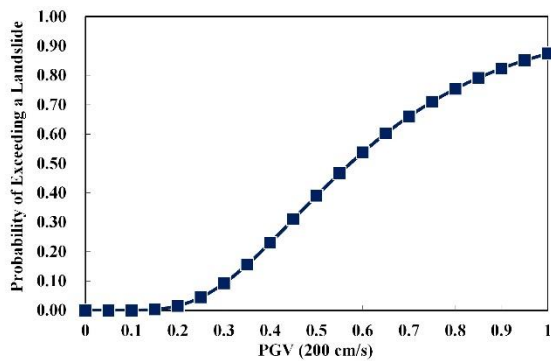


圖 3-34 G1A1S3 易損性曲線 (PGV) 圖 3-35 G1A2S1 易損性曲線 (PGV)

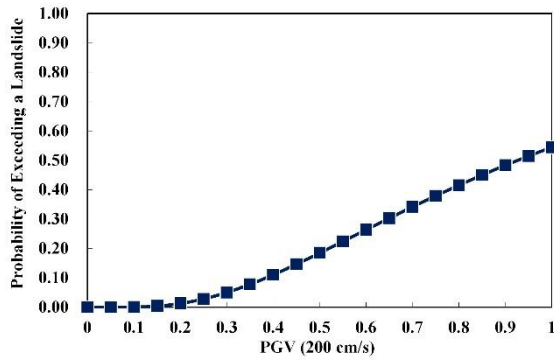


圖 3-36 G1A2S2 易損性曲線 (PGV)

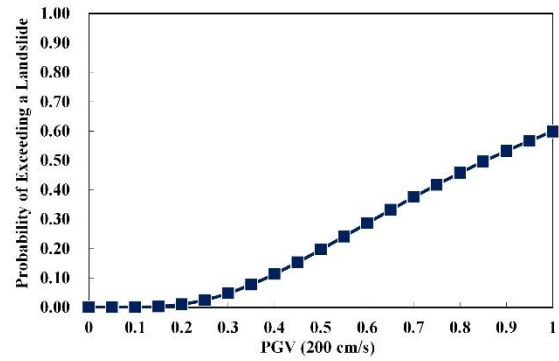


圖 3-37 G1A2S3 易損性曲線 (PGV)

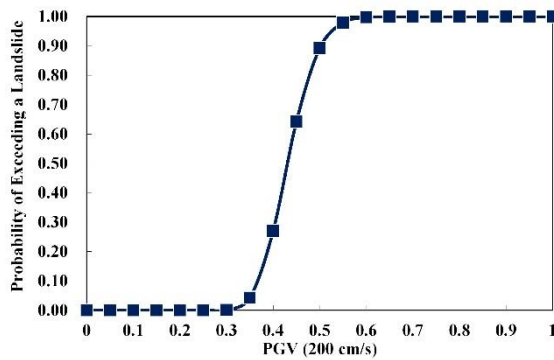


圖 3-38 G2A1S1 易損性曲線 (PGV)

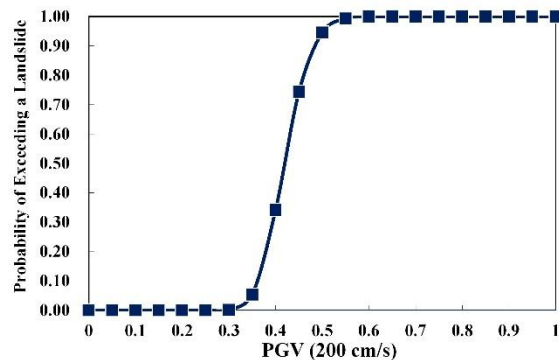


圖 3-39 G2A1S2 易損性曲線 (PGV)

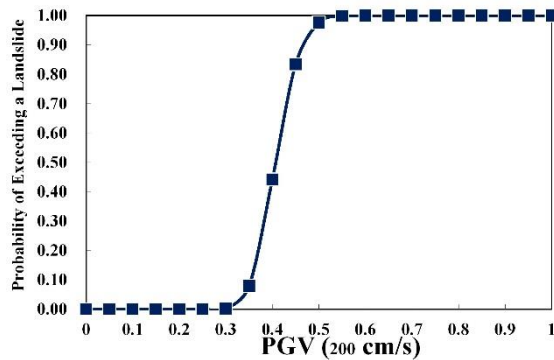


圖 3-40 G2A1S3 易損性曲線 (PGV)

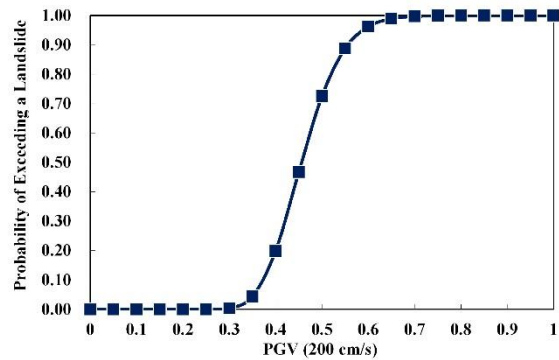


圖 3-41 G2A2S1 易損性曲線 (PGV)

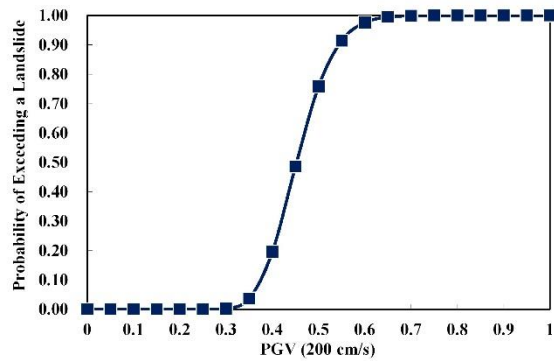


圖 3-42 G2A2S2 易損性曲線 (PGV)

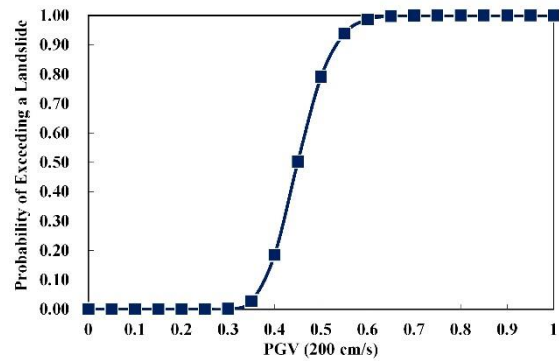


圖 3-43 G2A2S3 易損性曲線 (PGV)

第四章 BigGIS 系統之地震早期評估精進

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。

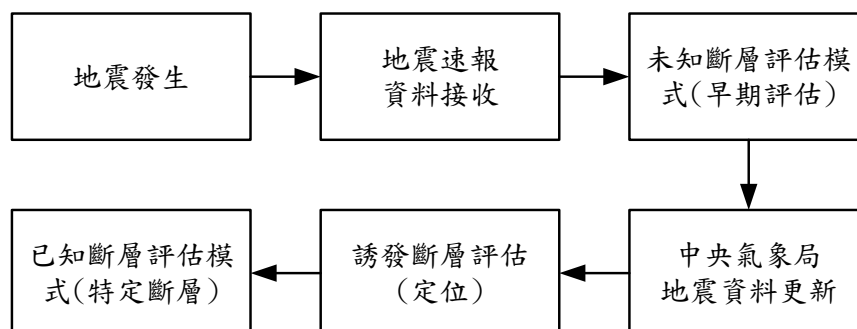


圖 4-1 地震評估模式

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，對應不同目標斷層時坡面類型可能不同，也將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了變動條件，進行震後崩塌評估時不同震源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。

對於此一問題，本計畫分別發展了區域震源模式 (Regional Model) 和防護斷層模式 (Defence Fault Model)。然而對於 BigGIS 系統地震早期評估模組，後者能夠將分析評估流程更為簡化，這有利於系統開發時程與快速評估，實際應用時可直接以氣象局之震度資料進行坡地崩塌評估。

第二節 基於地震速報之防護斷層模式

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。

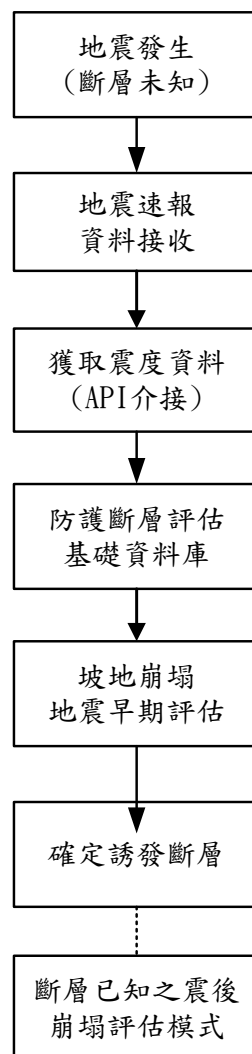


圖 4-2 基於防護斷層之坡地崩塌評估模式

第三節 基於防護斷層模式之震源分區

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，目前中央地質調查所公布之 36 條活動斷層分布 (2021 版)，如圖 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。

此外，目前台灣地震模型團隊 (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，如圖 4-4 所示，而非中央地質調查所公布之 36 條活斷層帶，地震危害度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。

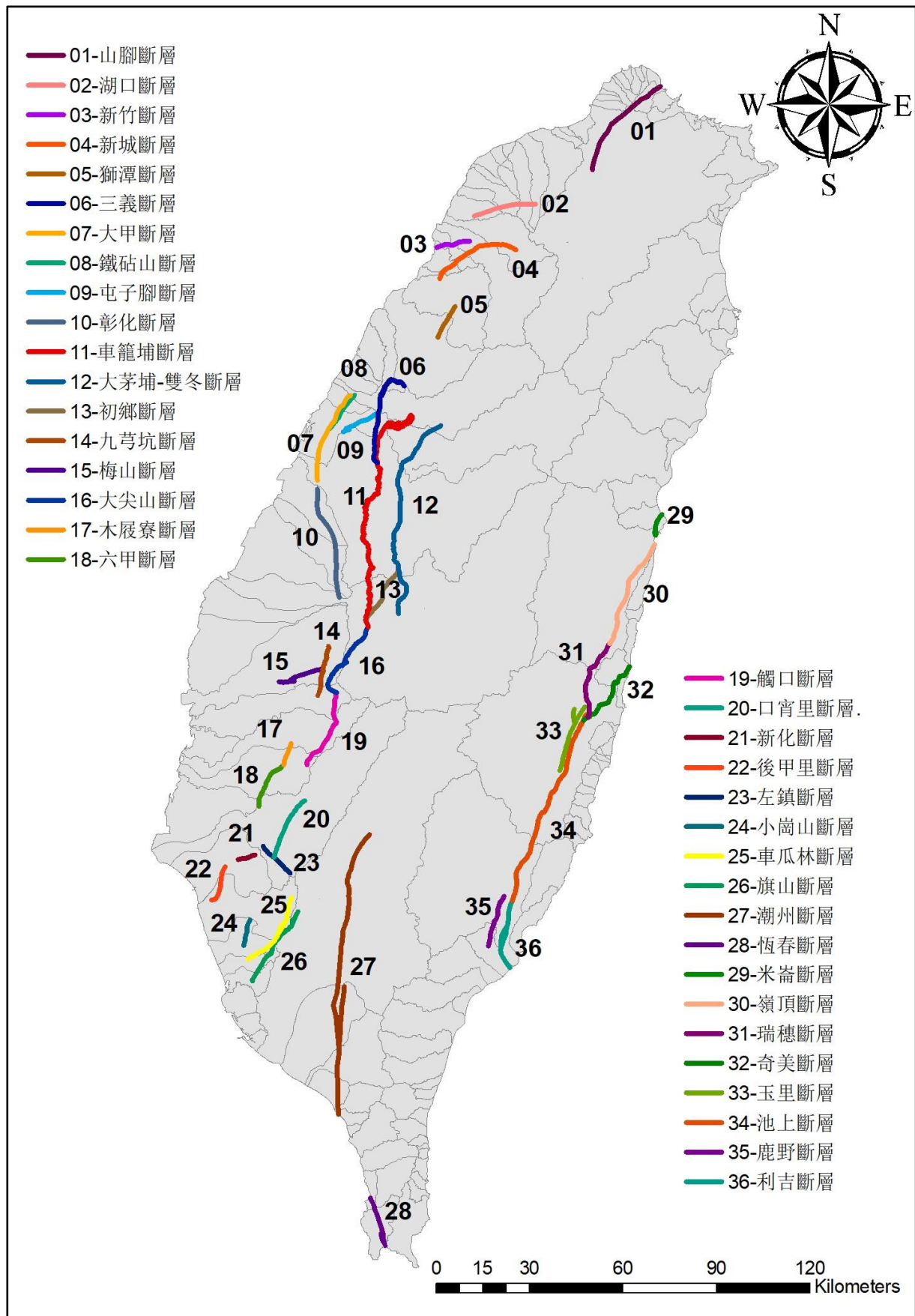


圖 4-3 台灣活動斷層分布 (2021 年版)



資料來源：國立中央大學地震災害鍊風險評估與管理研究中心 (2021)

圖 4-4 未來 50 年台灣孕震構造發震機率 (TEM 2021)

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中央地調所公布之活動斷層帶為主，而當中央地調所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，如表 4-1 所示。

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 4-5 所示即為細化之震源分區。

表 4-1 防護斷層危害因子

編號	因子	評分級	權重
A	集水區與斷層距離 (km)	集水區內	35
		0 ~ 5	25
		5 ~ 15	15
		15 ~ 30	5
		30 以上	0
B	斷層走向	逆斷層	15
		正斷層	10
		平移斷層	10
C	長度 (km)	50 以上	12
		30 ~ 50	8
		30 以下	4
D	最大可能規模 (依 CGS 公布)	7.0 以上	12
		6.5 ~ 7.0	8
		6.5 以下	4
E	未來 50 年發生規模 6.5 以上機率(%)	40 以上	10
		10 ~ 40	6
		1 ~ 10	3
		小於 1	0
F	未來 50 年台灣孕震構造之發震機率(%)	40 以上	10
		10 ~ 40	6
		1 ~ 10	3
		小於 1	0
G	未來 50 年地表震度 PGA 分布(gal)	800 以上	6
		440 ~ 800	4
		250 ~ 440	2
		250 以下	0

資料來源：本研究整理

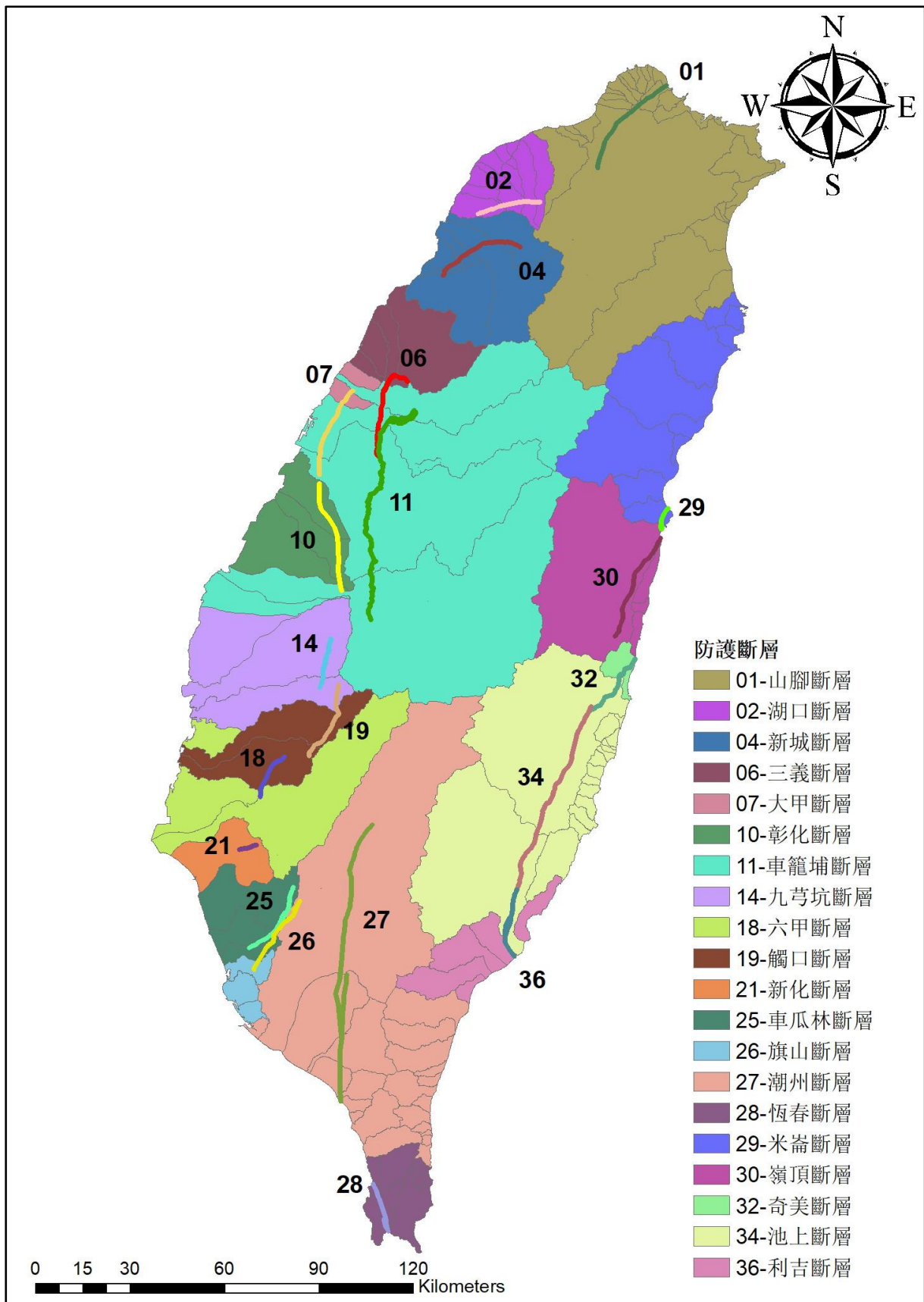


圖 4-5 防護斷層模式之震源分區

第四節 基於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。本研究採用中央地質調查所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。本計畫以中央地質調查所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 4-6 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 4-2 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 4-2 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 4-2 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 4-2 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 4-2 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 4-2 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

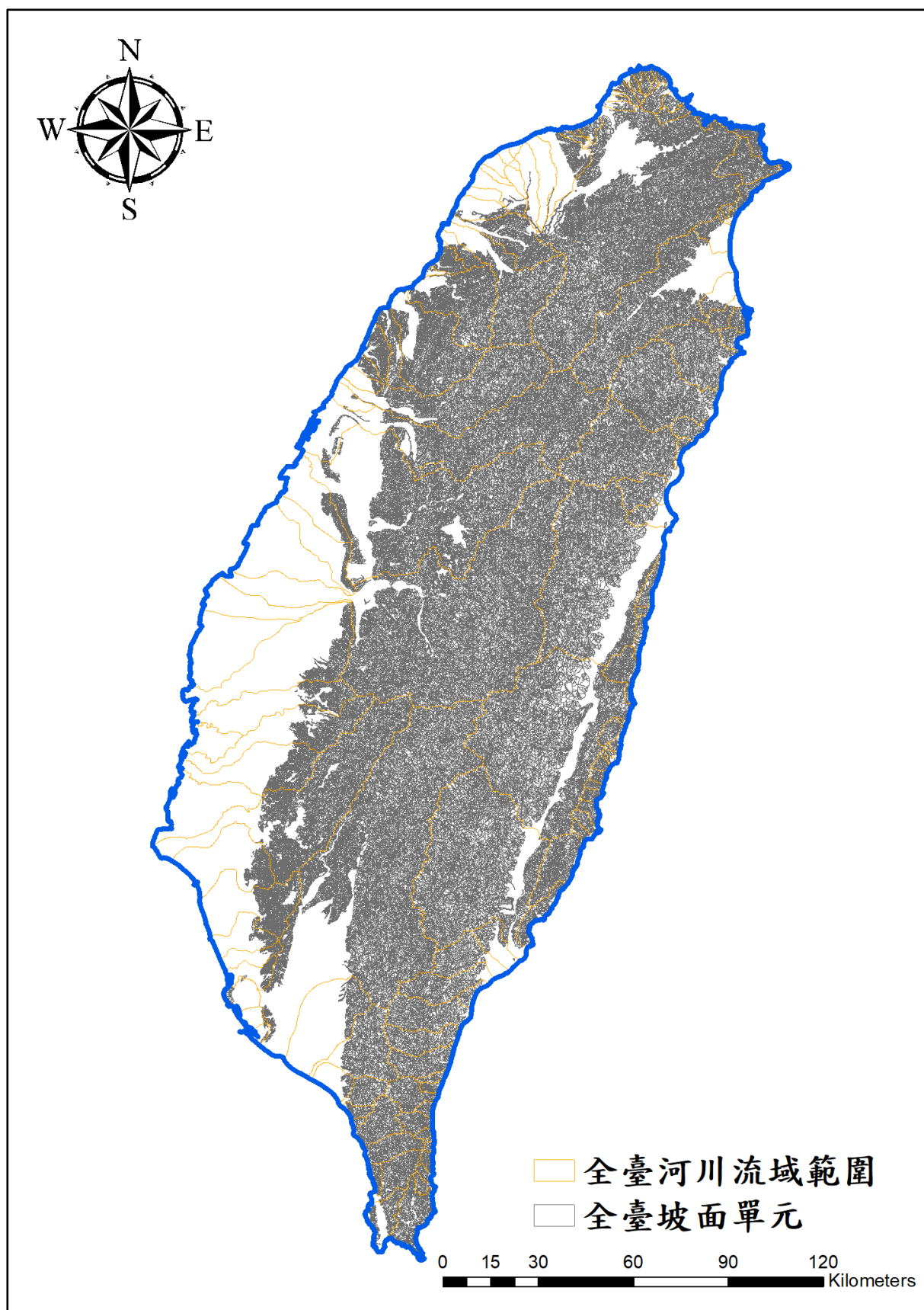


圖 4-6 地調所繪製之全臺各集水區坡面單元分布

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 4-3 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】+【子集水區】+【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 4-3 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】	子集水區代碼 7 碼(河川代碼 4 碼+子集水區 3 碼)
【WS_NAME】	子集水區名稱
【SLOPE ID】	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，各河川流域坡面單元地質分類如表 4-4 所示，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。在後續分析中將不作評估。由表 4-4 所中可知，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。

表 4-4 各河川流域坡面單元地質分類之數量統計

編號	主流名稱	坡面單元總數	G1	G2	N/A
1	磺溪	162	77	84	1
2	小坑溪	49	5	44	0
3	乾華溪	37	5	32	0
4	石門溪	31	0	31	0
5	老梅溪	84	43	41	0
6	楓林溪	44	18	26	0
7	埔坪溪	47	36	11	0
8	八蓮溪	44	30	12	2
9	大屯溪	93	24	65	4
10	後州溪	6	0	6	0
11	興仁溪	21	4	17	0
12	林子溪	50	18	32	0
13	淡水河	14907	13500	1307	100
14	水仙溪	132	3	120	9
15	寶斗溪	48	0	36	12
16	林口溪	62	0	41	21
17	南崁溪	463	4	424	35
18	埔心溪	1	0	1	0
19	老街溪	31	0	31	0
20	富林溪	-	-	-	-
21	大堀溪	-	-	-	-
22	觀音溪	-	-	-	-
23	新屋溪	-	-	-	-
24	社子溪	77	0	77	0
25	福興溪排水	-	-	-	-
26	新豐溪	115	0	115	0
27	鳳山溪	1358	493	827	38
28	頭前溪	2250	1732	493	25

表 4-4 各河川流域坡面單元地質分類之數量統計

編號	主流名稱	坡面單元總數	G1	G2	N/A
29	客雅溪排水	347	0	347	0
30	鹽港溪排水	510	0	504	6
31	新港溪	27	0	27	0
32	中港溪	2660	1073	1543	44
33	後龍溪	3111	1907	1135	69
34	西湖溪	704	115	543	46
35	通霄溪	584	0	577	7
36	苑裡溪	230	0	203	27
37	房裡溪	91	0	91	0
38	大安溪	3458	2808	627	23
39	溫寮溪	23	0	23	0
40	大甲溪	6552	5307	1224	21
41	烏溪	9001	3489	5306	206
42	洋仔厝溪	440	0	437	3
43	員林大排水	214	0	214	0
44	萬興排水幹線	-	-	-	-
45	濁水溪	15773	13558	2109	106
46	新虎尾溪	-	-	-	-
47	舊虎尾溪	-	-	-	-
48	北港溪	1178	128	1044	6
49	朴子溪	1171	295	851	25
50	龍宮溪	-	-	-	-
51	八掌溪	1937	843	1014	80
52	急水溪	1845	332	1491	22
53	將軍溪排水	8	0	8	0
54	曾文溪	8473	3509	4891	73
55	鹽水溪	1103	0	1095	8
56	二仁溪	2317	137	2175	5

表 4-4 各河川流域坡面單元地質分類之數量統計

編號	主流名稱	坡面單元總數	G1	G2	N/A
57	阿公店溪	409	44	362	3
58	典寶溪排水	221	7	206	8
59	後勁溪	381	0	381	0
60	愛河	55	1	54	0
61	前鎮河	42	0	42	0
62	鹽水港溪	27	0	27	0
63	高屏溪	14788	12823	1707	258
64	東港溪	465	428	22	15
65	林邊溪	1048	1019	29	0
66	北勢溪	84	63	21	0
67	率芒溪	400	394	6	0
68	南湖溪	158	158	0	0
69	十里溪	52	51	1	0
70	枋山溪	681	638	41	2
71	楓港溪	606	522	80	4
72	石盤溪	162	143	17	2
73	四重溪	721	586	128	7
74	保力溪	498	183	276	39
75	港口溪	898	507	372	19
76	九棚溪	131	119	12	0
77	巷子溪	102	82	16	4
78	旭海溪	180	147	33	0
79	乾溪	52	36	16	0
80	塔瓦溪	27	23	4	0
81	達仁溪	105	86	19	0
82	安朔溪	328	255	72	1
83	朝庸溪	101	63	38	0
84	大武溪	533	473	59	1

表 4-4 各河川流域坡面單元地質分類之數量統計

編號	主流名稱	坡面單元總數	G1	G2	N/A
85	烏萬溪	116	103	13	0
86	津林溪	92	84	8	0
87	大竹溪	591	539	51	1
88	金崙溪	559	543	10	6
89	太麻里溪	844	823	16	5
90	文里溪	72	60	7	5
91	知本溪	748	729	13	6
92	利嘉溪	550	542	6	2
93	太平溪	197	111	74	12
94	卑南溪	5717	4995	618	104
95	都蘭溪	404	86	287	31
96	馬武溪	1070	218	789	63
97	成功溪	111	32	53	26
98	富家溪	147	56	77	14
99	都威溪	147	68	78	1
100	沙灣溪	165	17	143	5
101	寧埔溪	91	6	84	1
102	竹湖溪	108	0	108	0
103	大德溪	114	9	100	5
104	長濱溪	41	5	34	2
105	城埔溪	26	4	10	12
106	馬海溪	21	5	12	4
107	山間溪	53	4	39	10
108	水母溪	192	101	91	0
109	三富溪	21	2	19	0
110	秀姑巒溪	5891	4768	994	129
111	豐濱溪	607	70	537	0
112	加蘭溪	118	8	110	0

表 4-4 各河川流域坡面單元地質分類之數量統計

編號	主流名稱	坡面單元總數	G1	G2	N/A
113	蕃寮溪	77	7	70	0
114	水璉溪	227	3	224	0
115	花蓮溪	4947	4428	460	59
116	美崙溪	154	135	9	10
117	三棧溪	467	456	7	4
118	立霧溪	2722	2703	7	12
119	石公溪	70	39	30	1
120	大清水溪	240	205	34	1
121	和平溪	2256	2210	41	5
122	南澳溪	1138	1032	103	3
123	東澳溪	144	98	43	3
124	蘇澳溪	231	125	106	0
125	新城溪	303	261	38	4
126	冬山河	151	82	52	17
127	蘭陽溪	4063	3539	386	138
128	得子口溪	237	177	31	29
129	金面溪	43	35	3	5
130	福德溪	57	54	2	1
131	頭城溪	53	27	26	0
132	大溪川	343	244	99	0
133	雙溪	1024	845	171	8
134	尖山腳溪	487	278	208	1
135	瑪鍊溪	357	201	156	0
136	員潭溪	91	32	59	0
合計		143819	99548	42139	2132

資料來源：本研究整理

(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，各河川流域坡面單元坡向如表 4-5 所示；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，各河川流域坡面單元斷層方位角如表 4-6 所示；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，表達坡面方位角和震波方位角之關係，各河川流域坡面單元各防護斷層夾角計算如表 4-7 所示。

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，如圖 4-7 所示。坡面單元屬順向坡則被歸類為 A1 類弱面，套疊結果如表 4-8 所示，共計 28864 個面，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，各河川流域坡面單元坡向敏感度如表 4-9 所示，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)，在後續分析中將不作評估。由表 4-9 中可知，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。

表 4-5 各河川流域坡面單元坡向因子之數量統計

編號	主流名稱	北	東北	東	東南	南	西南	西	西北	平坡
1	磺溪	11	4	1	10	31	44	29	32	0
2	小坑溪	3	0	1	13	20	6	4	2	0
3	乾華溪	1	0	0	6	16	11	2	1	0
4	石門溪	0	0	0	7	24	0	0	0	0
5	老梅溪	0	2	2	30	36	11	1	2	0
6	楓林溪	2	0	2	14	21	5	0	0	0
7	埔坪溪	0	0	5	32	9	1	0	0	0
8	八蓮溪	0	1	10	21	11	1	0	0	0
9	大屯溪	0	2	14	62	12	2	1	0	0
10	後州溪	0	0	1	5	0	0	0	0	0
11	興仁溪	0	0	9	8	1	2	1	0	0
12	林子溪	2	3	12	22	9	0	0	2	0
13	淡水河	1895	1765	1238	2489	2649	1886	1146	1839	0
14	水仙溪	4	10	10	52	29	18	5	4	0
15	寶斗溪	0	0	4	17	15	10	2	0	0
16	林口溪	6	3	11	16	18	5	2	1	0
17	南崁溪	85	102	86	93	34	9	15	39	0
18	埔心溪	0	0	0	0	1	0	0	0	0
19	老街溪	1	0	0	2	9	9	5	5	0
20	富林溪	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	大堀溪	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	觀音溪	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	新屋溪	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	社子溪	1	4	8	26	26	9	1	2	0
25	福興溪排水	-	-	-	-	-	-	-	-	
26	新豐溪	3	24	15	34	19	14	3	3	0
27	鳳山溪	213	249	153	229	227	100	61	126	0
28	頭前溪	222	315	277	458	405	333	123	117	0

表 4-5 各河川流域坡面單元坡向因子之數量統計

編號	主流名稱	北	東北	東	東南	南	西南	西	西北	平坡
29	客雅溪排水	40	30	42	79	59	60	22	15	0
30	鹽港溪排水	65	88	46	89	115	60	13	34	0
31	新港溪	7	6	4	3	3	1	2	1	0
32	中港溪	253	326	319	676	486	295	121	184	0
33	後龍溪	242	433	440	743	464	343	241	205	0
34	西湖溪	41	95	93	153	120	132	47	23	0
35	通霄溪	57	92	96	181	97	32	11	18	0
36	苑裡溪	8	53	38	82	38	5	4	2	0
37	房裡溪	4	8	20	49	6	1	3	0	0
38	大安溪	441	564	489	725	527	303	149	260	0
39	溫寮溪	1	9	3	5	2	0	3	0	0
40	大甲溪	864	971	832	1009	743	724	562	847	0
41	烏溪	1237	1467	1099	1411	948	1138	653	1044	4
42	洋仔厝溪	42	132	125	99	22	2	8	10	0
43	員林大排水	11	67	97	34	2	0	3	0	0
44	萬興排水幹線	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45	濁水溪	1369	2060	1914	2718	2211	2304	1548	1647	2
46	新虎尾溪	-	-	-	-	-	-	-	-	-
47	舊虎尾溪	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	北港溪	72	191	251	398	149	64	24	29	0
49	朴子溪	121	326	205	217	105	70	36	91	0
50	龍宮溪	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	八掌溪	187	375	324	447	270	159	83	92	0
52	急水溪	148	319	380	437	223	150	99	89	0
53	將軍溪排水	2	2	3	0	0	0	1	0	0
54	曾文溪	1079	1490	1297	1532	861	657	589	967	1
55	鹽水溪	107	226	221	211	110	84	55	89	0
56	二仁溪	323	492	347	356	256	131	145	267	0

表 4-5 各河川流域坡面單元坡向因子之數量統計

編號	主流名稱	北	東北	東	東南	南	西南	西	西北	平坡
57	阿公店溪	41	89	55	81	52	39	21	31	0
58	典寶溪排水	48	51	24	28	23	12	8	27	0
59	後勁溪	62	84	60	63	38	18	15	41	0
60	愛河	7	9	4	2	5	16	7	5	0
61	前鎮河	2	14	12	8	3	0	3	0	0
62	鹽水港溪	4	2	2	9	8	0	1	1	0
63	高屏溪	2264	2453	1872	2188	1598	1219	1068	2126	0
64	東港溪	70	98	69	88	89	16	9	26	0
65	林邊溪	174	200	132	193	172	49	26	102	0
66	北勢溪	3	38	27	9	5	0	1	1	0
67	率芒溪	60	70	43	79	58	29	11	50	0
68	南湖溪	27	51	33	27	12	2	1	5	0
69	十里溪	11	19	6	10	3	1	0	2	0
70	枋山溪	118	108	83	95	98	35	31	113	0
71	楓港溪	85	99	51	116	99	38	20	98	0
72	石盤溪	14	63	54	18	6	0	7	0	0
73	四重溪	129	99	73	102	67	33	81	137	0
74	保力溪	77	78	66	67	62	70	38	40	0
75	港口溪	196	102	49	64	79	94	110	204	0
76	九棚溪	19	10	2	14	23	25	19	19	0
77	港子溪	19	5	4	1	6	24	19	24	0
78	旭海溪	22	4	9	5	23	35	32	50	0
79	乾溪	5	2	1	1	3	12	16	12	0
80	塔瓦溪	0	0	0	1	6	8	7	5	0
81	達仁溪	12	2	3	10	18	22	22	16	0
82	安朔溪	40	19	7	21	47	71	38	85	0
83	朝庸溪	9	2	1	1	17	22	28	21	0
84	大武溪	89	33	11	24	67	106	67	136	0

表 4-5 各河川流域坡面單元坡向因子之數量統計

編號	主流名稱	北	東北	東	東南	南	西南	西	西北	平坡
85	烏萬溪	19	4	2	2	3	28	22	36	0
86	津林溪	10	2	0	2	5	16	20	37	0
87	大竹溪	113	51	13	24	81	106	73	130	0
88	金崙溪	108	46	15	41	57	107	74	111	0
89	太麻里溪	120	99	54	62	65	115	125	204	0
90	文里溪	11	4	1	0	1	9	14	32	0
91	知本溪	107	110	34	76	84	99	92	146	0
92	利嘉溪	100	65	23	48	61	79	64	110	0
93	太平溪	34	30	12	6	4	18	38	55	0
94	卑南溪	814	742	448	634	632	705	614	1128	0
95	都蘭溪	84	16	7	5	15	52	55	170	0
96	馬武溪	162	104	75	90	80	145	174	240	0
97	成功溪	14	3	3	0	4	9	22	56	0
98	富家溪	30	9	2	1	2	27	27	49	0
99	都威溪	14	0	1	5	12	41	27	47	0
100	沙灣溪	29	3	1	1	6	32	40	53	0
101	寧埔溪	9	2	2	0	1	11	25	41	0
102	竹湖溪	15	4	1	0	3	22	35	28	0
103	大德溪	18	2	4	1	4	13	30	42	0
104	長濱溪	11	1	1	0	1	5	7	15	0
105	城埔溪	5	0	0	0	1	1	5	14	0
106	馬海溪	6	0	0	0	1	3	5	6	0
107	山間溪	7	0	0	0	1	7	14	24	0
108	水母溪	20	14	4	13	27	39	29	46	0
109	三富溪	2	0	0	0	1	1	7	10	0
110	秀姑巒溪	751	776	562	774	775	771	606	876	0
111	豐濱溪	86	23	16	44	86	117	83	152	0
112	加蘭溪	15	3	1	0	5	20	36	38	0

表 4-5 各河川流域坡面單元坡向因子之數量統計

編號	主流名稱	北	東北	東	東南	南	西南	西	西北	平坡
113	蕃寮溪	8	5	4	0	7	16	14	23	0
114	水璉溪	39	12	1	11	19	52	29	64	0
115	花蓮溪	624	639	405	662	631	684	505	797	0
116	美崙溪	31	17	2	4	13	28	22	37	0
117	三棧溪	84	37	14	37	90	76	55	74	0
118	立霧溪	412	364	220	334	326	385	257	424	0
119	石公溪	21	13	1	0	1	6	5	23	0
120	大清水溪	39	35	7	10	32	47	34	36	0
121	和平溪	345	270	144	239	360	373	193	332	0
122	南澳溪	197	127	70	111	187	183	87	176	0
123	東澳溪	35	11	2	1	15	26	23	31	0
124	蘇澳溪	18	14	10	30	51	53	31	24	0
125	新城溪	28	13	16	52	59	75	29	31	0
126	冬山河	2	3	6	44	32	31	8	25	0
127	蘭陽溪	563	322	275	528	596	649	425	705	0
128	得子口溪	54	10	2	1	19	27	29	95	0
129	金面溪	17	2	0	0	1	6	7	10	0
130	福德溪	6	7	3	2	1	1	6	31	0
131	頭城溪	12	3	1	1	3	1	8	24	0
132	大溪川	60	26	8	17	42	51	31	108	0
133	雙溪	116	87	79	157	177	158	92	158	0
134	尖山腳溪	43	11	17	65	115	105	56	75	0
135	瑪鍊溪	40	21	14	39	74	53	54	62	0
136	員潭溪	2	5	2	9	17	39	13	4	0
合計		18287	20277	15882	22808	19012	16910	11905	18731	7

資料來源：本研究整理

表 4-6 各河川流域坡面單元方位角之數量統計 (防護斷層模式)

編號	主流名稱	北	東北	東	東南	南	西南	西	西北
1	磺溪	1	0	0	120	5	0	0	36
2	小坑溪	12	1	0	0	0	0	0	36
3	乾華溪	0	0	0	0	0	0	0	37
4	石門溪	0	0	0	0	0	0	0	31
5	老梅溪	4	0	0	0	0	0	0	80
6	楓林溪	0	0	0	0	0	0	0	44
7	埔坪溪	0	0	0	0	0	0	0	47
8	八蓮溪	0	0	0	0	0	0	0	44
9	大屯溪	0	0	0	0	0	0	0	93
10	後州溪	0	0	0	0	0	0	0	6
11	興仁溪	0	0	0	0	0	0	0	21
12	林子溪	0	0	0	2	0	0	0	48
13	淡水河	3	0	1266	7549	4733	1020	173	163
14	水仙溪	0	0	0	0	0	0	17	115
15	寶斗溪	0	0	0	0	0	0	43	5
16	林口溪	0	0	0	0	0	0	62	0
17	南崁溪	6	0	0	0	0	6	347	104
18	埔心溪	0	1	0	0	0	0	0	0
19	老街溪	7	0	0	0	24	0	0	0
20	富林溪	-	-	-	-	-	-	-	-
21	大堀溪	-	-	-	-	-	-	-	-
22	觀音溪	-	-	-	-	-	-	-	-
23	新屋溪	-	-	-	-	-	-	-	-
24	社子溪	21	0	0	0	56	0	0	0
25	福興溪排水	-	-	-	-	-	-	-	-
26	新豐溪	1	0	0	7	61	0	42	4
27	鳳山溪	513	193	238	168	194	44	0	8
28	頭前溪	25	0	50	728	1305	131	0	11

表 4-6 各河川流域坡面單元方位角之數量統計 (防護斷層模式)

編號	主流名稱	北	東北	東	東南	南	西南	西	西北
29	客雅溪排水	0	0	0	206	0	0	0	141
30	鹽港溪排水	4	0	0	126	3	0	0	377
31	新港溪	0	0	0	0	0	0	10	17
32	中港溪	0	0	0	1815	606	237	2	0
33	後龍溪	924	1590	519	72	3	3	0	0
34	西湖溪	553	5	7	45	35	38	0	21
35	通霄溪	169	0	0	0	0	0	0	415
36	苑裡溪	0	0	0	0	0	0	0	230
37	房裡溪	0	37	54	0	0	0	0	0
38	大安溪	524	2013	595	71	18	14	22	201
39	溫寮溪	0	0	2	16	5	0	0	0
40	大甲溪	54	46	4451	1015	638	135	120	93
41	烏溪	5	282	5127	2697	278	43	485	84
42	洋仔厝溪	0	208	232	0	0	0	0	0
43	員林大排水	0	0	214	0	0	0	0	0
44	萬興排水幹線	-	-	-	-	-	-	-	-
45	濁水溪	8	24	9676	5204	581	34	148	98
46	新虎尾溪	-	-	-	-	-	-	-	-
47	舊虎尾溪	-	-	-	-	-	-	-	-
48	北港溪	6	238	538	93	0	0	295	8
49	朴子溪	0	0	379	322	79	64	322	5
50	龍宮溪	-	-	-	-	-	-	-	-
51	八掌溪	40	44	437	243	10	6	262	895
52	急水溪	0	0	10	40	120	951	505	219
53	將軍溪排水	0	0	8	0	0	0	0	0
54	曾文溪	0	649	2982	3581	1261	0	0	0
55	鹽水溪	5	6	23	443	626	0	0	0
56	二仁溪	119	15	105	93	0	0	1090	895

表 4-6 各河川流域坡面單元方位角之數量統計 (防護斷層模式)

編號	主流名稱	北	東北	東	東南	南	西南	西	西北
57	阿公店溪	12	0	0	91	3	0	4	299
58	典寶溪排水	0	0	0	211	10	0	0	0
59	後勁溪	0	0	27	349	0	0	5	0
60	愛河	0	0	0	0	0	53	2	0
61	前鎮河	0	0	0	0	42	0	0	0
62	鹽水港溪	0	0	0	0	0	0	27	0
63	高屏溪	1169	3452	5036	1061	0	20	3125	925
64	東港溪	0	1	453	0	0	0	11	0
65	林邊溪	0	0	1048	0	0	0	0	0
66	北勢溪	0	0	84	0	0	0	0	0
67	率芒溪	0	0	400	0	0	0	0	0
68	南湖溪	0	0	129	29	0	0	0	0
69	十里溪	0	0	0	52	0	0	0	0
70	枋山溪	0	0	352	329	0	0	0	0
71	楓港溪	0	0	16	590	0	0	0	0
72	石盤溪	118	38	6	0	0	0	0	0
73	四重溪	25	643	53	0	0	0	0	0
74	保力溪	0	18	279	0	0	41	160	0
75	港口溪	0	61	792	39	0	3	3	0
76	九棚溪	0	39	92	0	0	0	0	0
77	巷子溪	0	80	22	0	0	0	0	0
78	旭海溪	0	0	0	180	0	0	0	0
79	乾溪	0	0	11	41	0	0	0	0
80	塔瓦溪	0	0	23	4	0	0	0	0
81	達仁溪	0	0	102	3	0	0	0	0
82	安朔溪	0	0	328	0	0	0	0	0
83	朝庸溪	0	0	101	0	0	0	0	0
84	大武溪	0	0	533	0	0	0	0	0

表 4-6 各河川流域坡面單元方位角之數量統計 (防護斷層模式)

編號	主流名稱	北	東北	東	東南	南	西南	西	西北
85	烏萬溪	0	0	116	0	0	0	0	0
86	津林溪	0	0	92	0	0	0	0	0
87	大竹溪	0	0	591	0	0	0	0	0
88	金崙溪	0	0	559	0	0	0	0	0
89	太麻里溪	0	0	844	0	0	0	0	0
90	文里溪	0	0	0	0	0	72	0	0
91	知本溪	0	0	0	0	0	578	170	0
92	利嘉溪	0	0	0	0	0	47	503	0
93	太平溪	0	0	0	0	0	3	173	21
94	卑南溪	0	1	212	188	194	550	3473	1099
95	都蘭溪	0	7	352	45	0	0	0	0
96	馬武溪	0	0	608	462	0	0	0	0
97	成功溪	0	0	58	53	0	0	0	0
98	富家溪	0	0	8	139	0	0	0	0
99	都威溪	0	0	75	72	0	0	0	0
100	沙灣溪	0	0	39	126	0	0	0	0
101	寧埔溪	0	0	0	91	0	0	0	0
102	竹湖溪	0	0	68	40	0	0	0	0
103	大德溪	0	0	114	0	0	0	0	0
104	長濱溪	0	0	41	0	0	0	0	0
105	城埔溪	0	0	26	0	0	0	0	0
106	馬海溪	0	0	9	12	0	0	0	0
107	山間溪	0	0	0	53	0	0	0	0
108	水母溪	0	0	17	175	0	0	0	0
109	三富溪	0	0	11	10	0	0	0	0
110	秀姑巒溪	185	203	880	611	4	0	1428	2580
111	豐濱溪	34	0	40	35	8	0	93	397
112	加蘭溪	0	0	79	39	0	0	0	0

表 4-6 各河川流域坡面單元方位角之數量統計 (防護斷層模式)

編號	主流名稱	北	東北	東	東南	南	西南	西	西北
113	蕃寮溪	0	0	6	71	0	0	0	0
114	水璉溪	0	0	89	138	0	0	0	0
115	花蓮溪	0	0	255	255	47	72	1660	2658
116	美崙溪	3	0	2	0	0	0	92	57
117	三棧溪	39	0	0	0	0	0	18	410
118	立霧溪	709	0	0	0	0	0	0	2013
119	石公溪	70	0	0	0	0	0	0	0
120	大清水溪	226	14	0	0	0	0	0	0
121	和平溪	2175	12	0	0	0	0	0	69
122	南澳溪	1120	18	0	0	0	0	0	0
123	東澳溪	121	23	0	0	0	0	0	0
124	蘇澳溪	224	7	0	0	0	0	0	0
125	新城溪	303	0	0	0	0	0	0	0
126	冬山河	0	0	0	151	0	0	0	0
127	蘭陽溪	0	0	0	1886	2177	0	0	0
128	得子口溪	0	0	1	236	0	0	0	0
129	金面溪	0	0	39	4	0	0	0	0
130	福德溪	0	0	35	22	0	0	0	0
131	頭城溪	0	0	14	39	0	0	0	0
132	大溪川	0	0	0	343	0	0	0	0
133	雙溪	0	0	0	1024	0	0	0	0
134	尖山腳溪	0	0	1	486	0	0	0	0
135	瑪鍊溪	0	0	0	357	0	0	0	0
136	員潭溪	0	0	0	91	0	0	0	0
合計		9537	9969	42081	34889	13126	4165	14892	15160

資料來源：本研究整理

表 4-7 各河川流域坡面單元夾角之數量統計 (防護斷層模式)

編號	主流名稱	-30°~30°	30°~150°	150°~210°	210°~330°
1	磺溪	26	30	27	79
2	小坑溪	2	28	16	3
3	乾華溪	1	19	16	1
4	石門溪	0	12	19	0
5	老梅溪	2	27	48	7
6	楓林溪	2	7	34	1
7	埔坪溪	0	4	38	5
8	八蓮溪	0	5	29	10
9	大屯溪	0	6	69	18
10	後州溪	0	0	4	2
11	興仁溪	0	4	10	7
12	林子溪	3	10	24	13
13	淡水河	3283	4775	2204	4645
14	水仙溪	3	60	52	17
15	寶斗溪	2	31	15	0
16	林口溪	3	31	18	10
17	南崁溪	25	83	123	232
18	埔心溪	0	0	0	1
19	老街溪	8	2	5	16
20	富林溪	0	0	0	0
21	大堀溪	0	0	0	0
22	觀音溪	0	0	0	0
23	新屋溪	0	0	0	0
24	社子溪	37	18	4	18
25	福興溪排水	0	0	0	0
26	新豐溪	27	51	7	30
27	鳳山溪	442	313	91	512
28	頭前溪	568	814	278	590

表 4-7 各河川流域坡面單元夾角之數量統計 (防護斷層模式)

編號	主流名稱	-30°~30°	30°~150°	150°~210°	210°~330°
29	客雅溪排水	68	117	56	106
30	鹽港溪排水	93	148	109	160
31	新港溪	2	7	3	15
32	中港溪	833	973	278	576
33	後龍溪	545	704	436	1426
34	西湖溪	92	214	111	287
35	通霄溪	44	98	222	220
36	苑裡溪	3	54	91	82
37	房裡溪	17	6	3	65
38	大安溪	733	803	337	1585
39	溫寮溪	4	12	1	6
40	大甲溪	1085	2620	944	1903
41	烏溪	1774	3417	1126	2684
42	洋仔厝溪	206	81	5	148
43	員林大排水	137	43	3	31
44	萬興排水幹線	0	0	0	0
45	濁水溪	3062	4796	2018	5897
46	新虎尾溪	0	0	0	0
47	舊虎尾溪	0	0	0	0
48	北港溪	337	265	87	489
49	朴子溪	258	513	74	326
50	龍宮溪	0	0	0	0
51	八掌溪	283	605	423	626
52	急水溪	199	839	407	400
53	將軍溪排水	4	3	1	0
54	曾文溪	2008	3325	981	2159
55	鹽水溪	211	547	140	205
56	二仁溪	374	588	387	968

表 4-7 各河川流域坡面單元夾角之數量統計 (防護斷層模式)

編號	主流名稱	-30°~30°	30°~150°	150°~210°	210°~330°
57	阿公店溪	71	117	72	149
58	典寶溪排水	33	107	47	34
59	後勁溪	83	182	43	73
60	愛河	18	10	9	18
61	前鎮河	6	32	1	3
62	鹽水港溪	1	17	2	7
63	高屏溪	2868	4844	1611	5465
64	東港溪	92	179	16	178
65	林邊溪	179	450	41	378
66	北勢溪	43	29	1	11
67	率芒溪	63	163	16	158
68	南湖溪	46	83	2	27
69	十里溪	11	35	3	3
70	枋山溪	128	315	86	152
71	楓港溪	131	238	102	135
72	石盤溪	41	13	5	103
73	四重溪	131	330	39	221
74	保力溪	157	130	15	196
75	港口溪	79	496	125	198
76	九棚溪	9	48	29	45
77	港子溪	6	50	33	13
78	旭海溪	8	36	62	74
79	乾溪	2	12	17	21
80	塔瓦溪	1	1	9	16
81	達仁溪	5	23	26	51
82	安朔溪	7	112	63	146
83	朝庸溪	2	25	37	37
84	大武溪	14	247	98	174

表 4-7 各河川流域坡面單元夾角之數量統計 (防護斷層模式)

編號	主流名稱	-30°~30°	30°~150°	150°~210°	210°~330°
85	烏萬溪	2	56	30	28
86	津林溪	0	49	22	21
87	大竹溪	15	267	119	190
88	金崙溪	22	240	108	189
89	太麻里溪	64	348	206	226
90	文里溪	15	2	4	51
91	知本溪	140	190	98	320
92	利嘉溪	96	160	32	262
93	太平溪	62	20	13	102
94	卑南溪	1212	1807	543	2155
95	都蘭溪	11	207	115	71
96	馬武溪	103	370	283	314
97	成功溪	2	32	58	19
98	富家溪	0	49	52	46
99	都威溪	3	23	53	68
100	沙灣溪	1	47	60	57
101	寧埔溪	0	13	56	22
102	竹湖溪	1	33	31	43
103	大德溪	5	49	42	18
104	長濱溪	0	23	12	6
105	城埔溪	0	10	13	3
106	馬海溪	0	9	5	7
107	山間溪	0	12	29	12
108	水母溪	13	40	57	82
109	三富溪	0	4	14	3
110	秀姑巒溪	1524	1895	452	2020
111	豐濱溪	158	234	65	150
112	加蘭溪	1	32	43	42

表 4-7 各河川流域坡面單元夾角之數量統計 (防護斷層模式)

編號	主流名稱	-30°~30°	30°~150°	150°~210°	210°~330°
113	蕃寮溪	4	16	25	32
114	水璉溪	9	64	67	87
115	花蓮溪	1105	1754	430	1658
116	美崙溪	37	48	5	64
117	三棧溪	110	208	41	108
118	立霧溪	604	869	390	859
119	石公溪	27	33	3	7
120	大清水溪	59	98	53	30
121	和平溪	496	762	423	575
122	南澳溪	260	373	256	249
123	東澳溪	29	79	23	13
124	蘇澳溪	20	77	71	63
125	新城溪	32	99	80	92
126	冬山河	56	9	26	60
127	蘭陽溪	743	1069	820	1431
128	得子口溪	3	81	95	58
129	金面溪	0	26	9	8
130	福德溪	3	20	29	5
131	頭城溪	1	13	28	11
132	大溪川	24	74	128	117
133	雙溪	204	246	192	382
134	尖山腳溪	51	64	97	275
135	瑪鍊溪	66	58	75	158
136	員潭溪	14	9	6	62
合計		28448	47802	19971	47598

資料來源：本研究整理

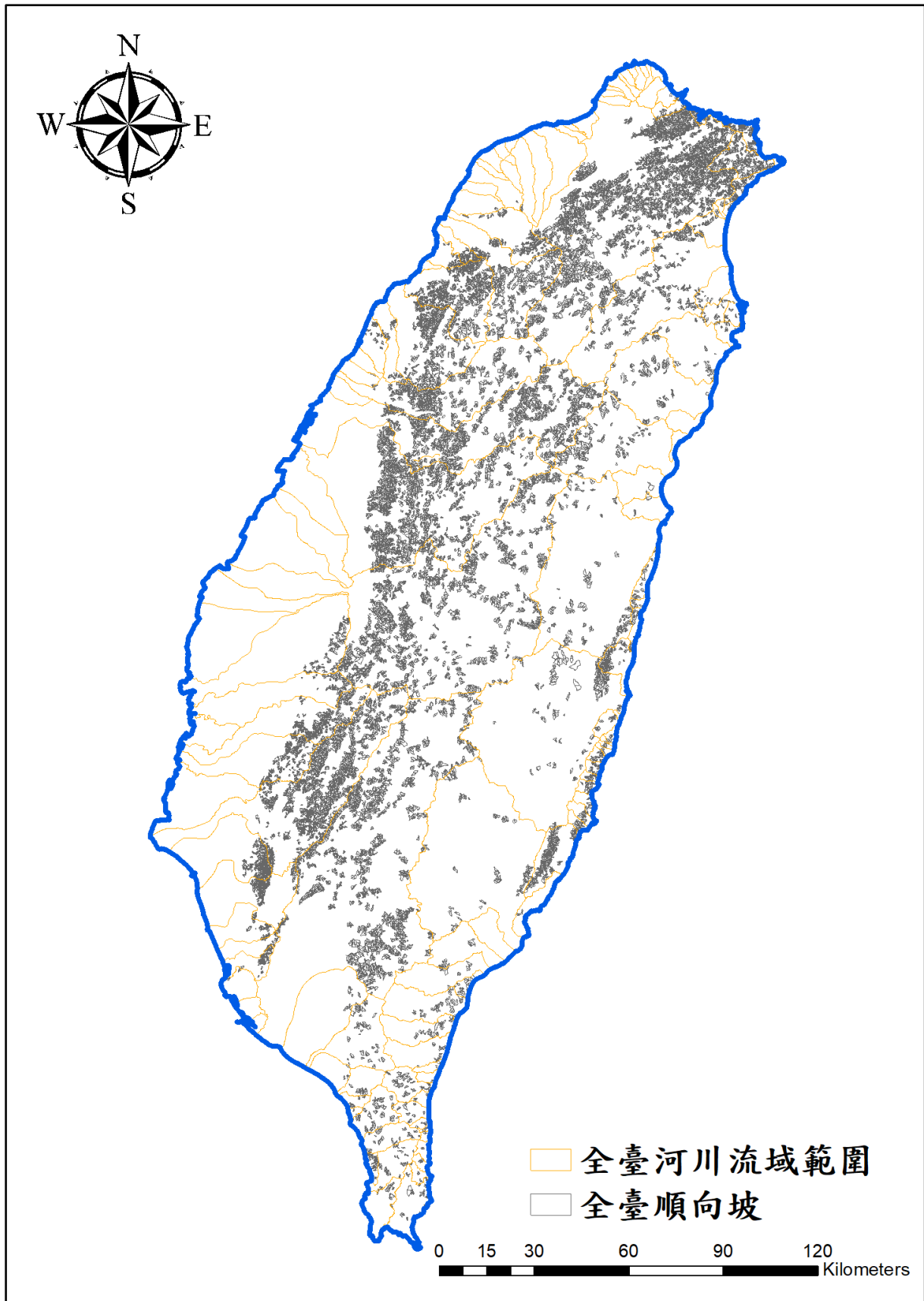


圖 4-7 全臺順向坡分布圖

表 4-8 各河川流域坡面單元順向坡之數量統計

編號	主流名稱	坡面單元總數	非順向坡	順向坡	百分比
1	磺溪	162	160	2	1.23%
2	小坑溪	49	49	0	0.00%
3	乾華溪	37	37	0	0.00%
4	石門溪	31	29	2	6.45%
5	老梅溪	84	84	0	0.00%
6	楓林溪	44	44	0	0.00%
7	埔坪溪	47	47	0	0.00%
8	八蓮溪	44	39	5	11.36%
9	大屯溪	93	84	9	9.68%
10	後州溪	6	6	0	0.00%
11	興仁溪	21	21	0	0.00%
12	林子溪	50	46	4	8.00%
13	淡水河	14907	10996	3911	26.24%
14	水仙溪	132	64	68	51.52%
15	寶斗溪	48	18	30	62.50%
16	林口溪	62	23	39	62.90%
17	南崁溪	463	191	272	58.75%
18	埔心溪	1	1	0	0.00%
19	老街溪	31	25	6	19.35%
20	富林溪	-	-	-	-
21	大堀溪	-	-	-	-
22	觀音溪	-	-	-	-
23	新屋溪	-	-	-	-
24	社子溪	77	34	43	55.84%
25	福興溪排水	-	-	-	-
26	新豐溪	115	26	89	77.39%
27	鳳山溪	1358	618	740	54.49%
28	頭前溪	2250	1345	905	40.22%

表 4-8 各河川流域坡面單元順向坡之數量統計

編號	主流名稱	坡面單元總數	非順向坡	順向坡	百分比
29	客雅溪排水	347	194	153	44.09%
30	鹽港溪排水	510	478	32	6.27%
31	新港溪	27	27	0	0.00%
32	中港溪	2660	2011	649	24.40%
33	後龍溪	3111	1902	1209	38.86%
34	西湖溪	704	616	88	12.50%
35	通霄溪	584	462	122	20.89%
36	苑裡溪	230	144	86	37.39%
37	房裡溪	91	83	8	8.79%
38	大安溪	3458	2611	847	24.49%
39	溫寮溪	23	22	1	4.35%
40	大甲溪	6552	4563	1989	30.36%
41	烏溪	9001	6202	2799	31.10%
42	洋仔厝溪	440	236	204	46.36%
43	員林大排水	214	178	36	16.82%
44	萬興排水幹線	-	-	-	-
45	濁水溪	15773	12990	2783	17.64%
46	新虎尾溪	-	-	-	-
47	舊虎尾溪	-	-	-	-
48	北港溪	1178	967	211	17.91%
49	朴子溪	1171	1011	160	13.66%
50	龍宮溪	-	-	-	-
51	八掌溪	1937	1320	617	31.85%
52	急水溪	1845	1299	546	29.59%
53	將軍溪排水	8	7	1	12.50%
54	曾文溪	8473	5833	2640	31.16%
55	鹽水溪	1103	591	512	46.42%
56	二仁溪	2317	1958	359	15.49%

表 4-8 各河川流域坡面單元順向坡之數量統計

編號	主流名稱	坡面單元總數	非順向坡	順向坡	百分比
57	阿公店溪	409	285	124	30.32%
58	典寶溪排水	221	179	42	19.00%
59	後勁溪	381	338	43	11.29%
60	愛河	55	50	5	9.09%
61	前鎮河	42	42	0	0.00%
62	鹽水港溪	27	25	2	7.41%
63	高屏溪	14788	12412	2376	16.07%
64	東港溪	465	434	31	6.67%
65	林邊溪	1048	1038	10	0.95%
66	北勢溪	84	83	1	1.19%
67	率芒溪	400	389	11	2.75%
68	南湖溪	158	158	0	0.00%
69	十里溪	52	52	0	0.00%
70	枋山溪	681	667	14	2.06%
71	楓港溪	606	562	44	7.26%
72	石盤溪	162	149	13	8.02%
73	四重溪	721	699	22	3.05%
74	保力溪	498	484	14	2.81%
75	港口溪	898	893	5	0.56%
76	九棚溪	131	130	1	0.76%
77	港子溪	102	102	0	0.00%
78	旭海溪	180	171	9	5.00%
79	乾溪	52	52	0	0.00%
80	塔瓦溪	27	27	0	0.00%
81	達仁溪	105	105	0	0.00%
82	安朔溪	328	319	9	2.74%
83	朝庸溪	101	101	0	0.00%
84	大武溪	533	524	9	1.69%

表 4-8 各河川流域坡面單元順向坡之數量統計

編號	主流名稱	坡面單元總數	非順向坡	順向坡	百分比
85	烏萬溪	116	115	1	0.86%
86	津林溪	92	89	3	3.26%
87	大竹溪	591	571	20	3.38%
88	金崙溪	559	475	84	15.03%
89	太麻里溪	844	834	10	1.18%
90	文里溪	72	72	0	0.00%
91	知本溪	748	742	6	0.80%
92	利嘉溪	550	545	5	0.91%
93	太平溪	197	186	11	5.58%
94	卑南溪	5717	5364	353	6.17%
95	都蘭溪	404	398	6	1.49%
96	馬武溪	1070	984	86	8.04%
97	成功溪	111	100	11	9.91%
98	富家溪	147	135	12	8.16%
99	都威溪	147	130	17	11.56%
100	沙灣溪	165	152	13	7.88%
101	寧埔溪	91	91	0	0.00%
102	竹湖溪	108	108	0	0.00%
103	大德溪	114	114	0	0.00%
104	長濱溪	41	41	0	0.00%
105	城埔溪	26	26	0	0.00%
106	馬海溪	21	21	0	0.00%
107	山間溪	53	53	0	0.00%
108	水母溪	192	179	13	6.77%
109	三富溪	21	20	1	4.76%
110	秀姑巒溪	5891	4858	1033	17.54%
111	豐濱溪	607	534	73	12.03%
112	加蘭溪	118	107	11	9.32%

表 4-8 各河川流域坡面單元順向坡之數量統計

編號	主流名稱	坡面單元總數	非順向坡	順向坡	百分比
113	蕃寮溪	77	72	5	6.49%
114	水璉溪	227	221	6	2.64%
115	花蓮溪	4947	4440	507	10.25%
116	美崙溪	154	142	12	7.79%
117	三棧溪	467	448	19	4.07%
118	立霧溪	2722	2603	119	4.37%
119	石公溪	70	62	8	11.43%
120	大清水溪	240	234	6	2.50%
121	和平溪	2256	2108	148	6.56%
122	南澳溪	1138	1022	116	10.19%
123	東澳溪	144	104	40	27.78%
124	蘇澳溪	231	175	56	24.24%
125	新城溪	303	259	44	14.52%
126	冬山河	151	115	36	23.84%
127	蘭陽溪	4063	3393	670	16.49%
128	得子口溪	237	221	16	6.75%
129	金面溪	43	42	1	2.33%
130	福德溪	57	49	8	14.04%
131	頭城溪	53	48	5	9.43%
132	大溪川	343	315	28	8.16%
133	雙溪	1024	921	103	10.06%
134	尖山腳溪	487	391	96	19.71%
135	瑪鍊溪	357	278	79	22.13%
136	員潭溪	91	86	5	5.49%
合計		143819	114955	28864	20.07%

資料來源：本研究整理

表 4-9 各河川流域坡面單元坡向敏感因子之數量統計 (防護斷層模式)

編號	主流名稱	坡面單元總數	A1	A2	N/A
1	磺溪	162	53	109	0
2	小坑溪	49	18	31	0
3	乾華溪	37	17	20	0
4	石門溪	31	19	12	0
5	老梅溪	84	50	34	0
6	楓林溪	44	36	8	0
7	埔坪溪	47	38	9	0
8	八蓮溪	44	29	15	0
9	大屯溪	93	69	24	0
10	後州溪	6	4	2	0
11	興仁溪	21	10	11	0
12	林子溪	50	27	23	0
13	淡水河	14907	5487	9420	0
14	水仙溪	132	55	77	0
15	寶斗溪	48	17	31	0
16	林口溪	62	21	41	0
17	南崁溪	463	148	315	0
18	埔心溪	1	0	1	0
19	老街溪	31	17	14	0
20	富林溪	-	-	-	-
21	大堀溪	-	-	-	-
22	觀音溪	-	-	-	-
23	新屋溪	-	-	-	-
24	社子溪	77	57	20	0
25	福興溪排水	-	-	-	-
26	新豐溪	115	96	19	0
27	鳳山溪	1358	978	380	0
28	頭前溪	2250	1406	844	0

表 4-9 各河川流域坡面單元坡向敏感因子之數量統計 (防護斷層模式)

編號	主流名稱	坡面單元總數	A1	A2	N/A
29	客雅溪排水	347	220	127	0
30	鹽港溪排水	510	223	287	0
31	新港溪	27	5	22	0
32	中港溪	2660	1499	1161	0
33	後龍溪	3111	1794	1317	0
34	西湖溪	704	273	431	0
35	通霄溪	584	342	242	0
36	苑裡溪	230	145	85	0
37	房裡溪	91	24	67	0
38	大安溪	3458	1668	1790	0
39	溫寮溪	23	6	17	0
40	大甲溪	6552	3381	3171	0
41	烏溪	9001	4792	4205	4
42	洋仔厝溪	440	315	125	0
43	員林大排水	214	149	65	0
44	萬興排水幹線	-	-	-	-
45	濁水溪	15773	6957	8814	2
46	新虎尾溪	-	-	-	-
47	舊虎尾溪	-	-	-	-
48	北港溪	1178	559	619	0
49	朴子溪	1171	440	731	0
50	龍宮溪	-	-	-	-
51	八掌溪	1937	1103	834	0
52	急水溪	1845	957	888	0
53	將軍溪排水	8	5	3	0
54	曾文溪	8473	4675	3797	1
55	鹽水溪	1103	702	401	0
56	二仁溪	2317	977	1340	0

表 4-9 各河川流域坡面單元坡向敏感因子之數量統計 (防護斷層模式)

編號	主流名稱	坡面單元總數	A1	A2	N/A
57	阿公店溪	409	228	181	0
58	典寶溪排水	221	103	118	0
59	後勁溪	381	156	225	0
60	愛河	55	32	23	0
61	前鎮河	42	7	35	0
62	鹽水港溪	27	4	23	0
63	高屏溪	14788	6146	8642	0
64	東港溪	465	135	330	0
65	林邊溪	1048	228	820	0
66	北勢溪	84	45	39	0
67	率芒溪	400	88	312	0
68	南湖溪	158	48	110	0
69	十里溪	52	14	38	0
70	枋山溪	681	222	459	0
71	楓港溪	606	257	349	0
72	石盤溪	162	55	107	0
73	四重溪	721	188	533	0
74	保力溪	498	182	316	0
75	港口溪	898	209	689	0
76	九棚溪	131	39	92	0
77	巷子溪	102	39	63	0
78	旭海溪	180	78	102	0
79	乾溪	52	19	33	0
80	塔瓦溪	27	10	17	0
81	達仁溪	105	31	74	0
82	安朔溪	328	75	253	0
83	朝庸溪	101	39	62	0
84	大武溪	533	119	414	0

表 4-9 各河川流域坡面單元坡向敏感因子之數量統計 (防護斷層模式)

編號	主流名稱	坡面單元總數	A1	A2	N/A
85	烏萬溪	116	33	83	0
86	津林溪	92	24	68	0
87	大竹溪	591	148	443	0
88	金崙溪	559	198	361	0
89	太麻里溪	844	275	569	0
90	文里溪	72	19	53	0
91	知本溪	748	243	505	0
92	利嘉溪	550	132	418	0
93	太平溪	197	83	114	0
94	卑南溪	5717	1989	3728	0
95	都蘭溪	404	130	274	0
96	馬武溪	1070	445	625	0
97	成功溪	111	66	45	0
98	富家溪	147	61	86	0
99	都威溪	147	66	81	0
100	沙灣溪	165	68	97	0
101	寧埔溪	91	56	35	0
102	竹湖溪	108	32	76	0
103	大德溪	114	47	67	0
104	長濱溪	41	12	29	0
105	城埔溪	26	13	13	0
106	馬海溪	21	5	16	0
107	山間溪	53	29	24	0
108	水母溪	192	80	112	0
109	三富溪	21	14	7	0
110	秀姑巒溪	5891	2715	3176	0
111	豐濱溪	607	269	338	0
112	加蘭溪	118	52	66	0

表 4-9 各河川流域坡面單元坡向敏感因子之數量統計 (防護斷層模式)

編號	主流名稱	坡面單元總數	A1	A2	N/A
113	蕃寮溪	77	34	43	0
114	水璉溪	227	81	146	0
115	花蓮溪	4947	1867	3080	0
116	美崙溪	154	49	105	0
117	三棧溪	467	162	305	0
118	立霧溪	2722	1065	1657	0
119	石公溪	70	33	37	0
120	大清水溪	240	113	127	0
121	和平溪	2256	1013	1243	0
122	南澳溪	1138	582	556	0
123	東澳溪	144	76	68	0
124	蘇澳溪	231	122	109	0
125	新城溪	303	141	162	0
126	冬山河	151	93	58	0
127	蘭陽溪	4063	1874	2189	0
128	得子口溪	237	98	139	0
129	金面溪	43	9	34	0
130	福德溪	57	32	25	0
131	頭城溪	53	29	24	0
132	大溪川	343	152	191	0
133	雙溪	1024	396	628	0
134	尖山腳溪	487	148	339	0
135	瑪鍊溪	357	141	216	0
136	員潭溪	91	20	71	0
合計		143819	64293	79519	7

資料來源：本研究整理

(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 (2020) 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，各河川流域坡面單元坡度分類如表 4-10 所示，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水土保持技術規範 (2020) 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。由表 4-10 中可知，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%。

表 4-10 各河川流域坡面單元坡度分類之數量統計

編號	主流名稱	坡面單元總數	S1	S2	S3	N/A
1	磺溪	162	100	40	12	10
2	小坑溪	49	27	0	0	22
3	乾華溪	37	23	2	0	12
4	石門溪	31	8	0	0	23
5	老梅溪	84	47	11	2	24
6	楓林溪	44	9	0	0	35
7	埔坪溪	47	15	0	0	32
8	八蓮溪	44	22	7	0	15
9	大屯溪	93	22	12	2	57
10	後州溪	6	0	0	0	6
11	興仁溪	21	7	0	0	14
12	林子溪	50	23	13	2	12
13	淡水河	14907	7218	4348	2819	522
14	水仙溪	132	95	5	0	32
15	寶斗溪	48	33	1	0	14
16	林口溪	62	32	0	0	30
17	南崁溪	463	222	6	1	234
18	埔心溪	1	0	0	0	1
19	老街溪	31	16	0	0	15
20	富林溪	-	-	-	-	-
21	大堀溪	-	-	-	-	-
22	觀音溪	-	-	-	-	-
23	新屋溪	-	-	-	-	-
24	社子溪	77	26	1	0	50
25	福興溪排水	-	-	-	-	-
26	新豐溪	115	61	1	0	53
27	鳳山溪	1358	909	99	26	324
28	頭前溪	2250	759	770	596	125

表 4-10 各河川流域坡面單元坡度分類之數量統計

編號	主流名稱	坡面單元總數	S1	S2	S3	N/A
29	客雅溪排水	347	201	9	0	137
30	鹽港溪排水	510	200	6	1	303
31	新港溪	27	6	0	0	21
32	中港溪	2660	1560	399	211	490
33	後龍溪	3111	1789	653	361	308
34	西湖溪	704	383	33	5	283
35	通霄溪	584	294	6	1	283
36	苑裡溪	230	88	1	0	141
37	房裡溪	91	73	3	1	14
38	大安溪	3458	970	804	1617	67
39	溫寮溪	23	18	2	0	3
40	大甲溪	6552	1175	1548	3637	192
41	烏溪	9001	4154	1918	2052	877
42	洋仔厝溪	440	216	4	2	218
43	員林大排水	214	202	3	1	8
44	萬興排水幹線	-	-	-	-	-
45	濁水溪	15773	3349	4364	7736	324
46	新虎尾溪	-	-	-	-	-
47	舊虎尾溪	-	-	-	-	-
48	北港溪	1178	804	67	42	265
49	朴子溪	1171	708	119	104	240
50	龍宮溪	-	-	-	-	-
51	八掌溪	1937	1051	403	229	254
52	急水溪	1845	1293	184	67	301
53	將軍溪排水	8	5	0	0	3
54	曾文溪	8473	4478	1841	981	1173
55	鹽水溪	1103	520	27	9	547
56	二仁溪	2317	1358	149	19	791

表 4-10 各河川流域坡面單元坡度分類之數量統計

編號	主流名稱	坡面單元總數	S1	S2	S3	N/A
57	阿公店溪	409	231	21	5	152
58	典寶溪排水	221	149	11	0	61
59	後勁溪	381	231	20	5	125
60	愛河	55	38	2	0	15
61	前鎮河	42	12	0	0	30
62	鹽水港溪	27	13	1	0	13
63	高屏溪	14788	3772	3991	6113	912
64	東港溪	465	176	169	94	26
65	林邊溪	1048	219	382	421	26
66	北勢溪	84	58	7	1	18
67	率芒溪	400	105	152	141	2
68	南湖溪	158	72	59	24	3
69	十里溪	52	35	15	2	0
70	枋山溪	681	260	303	109	9
71	楓港溪	606	413	143	29	21
72	石盤溪	162	101	39	11	11
73	四重溪	721	558	108	23	32
74	保力溪	498	262	19	0	217
75	港口溪	898	623	41	3	231
76	九棚溪	131	115	11	0	5
77	港子溪	102	84	5	1	12
78	旭海溪	180	155	12	2	11
79	乾溪	52	38	6	3	5
80	塔瓦溪	27	21	5	1	0
81	達仁溪	105	91	12	1	1
82	安朔溪	328	256	57	9	6
83	朝庸溪	101	86	6	0	9
84	大武溪	533	209	214	102	8

表 4-10 各河川流域坡面單元坡度分類之數量統計

編號	主流名稱	坡面單元總數	S1	S2	S3	N/A
85	烏萬溪	116	96	15	2	3
86	津林溪	92	54	33	5	0
87	大竹溪	591	178	260	151	2
88	金崙溪	559	110	212	236	1
89	太麻里溪	844	171	337	333	3
90	文里溪	72	39	26	5	2
91	知本溪	748	179	323	241	5
92	利嘉溪	550	83	193	269	5
93	太平溪	197	95	67	19	16
94	卑南溪	5717	1193	1844	2575	105
95	都蘭溪	404	156	41	114	93
96	馬武溪	1070	592	249	152	77
97	成功溪	111	56	17	31	7
98	富家溪	147	68	28	43	8
99	都威溪	147	62	39	43	3
100	沙灣溪	165	106	7	45	7
101	寧埔溪	91	55	8	17	11
102	竹湖溪	108	70	22	8	8
103	大德溪	114	72	12	24	6
104	長濱溪	41	14	1	13	13
105	城埔溪	26	9	3	6	8
106	馬海溪	21	6	1	7	7
107	山間溪	53	20	8	16	9
108	水母溪	192	72	58	58	4
109	三富溪	21	16	3	1	1
110	秀姑巒溪	5891	1493	1657	2573	168
111	豐濱溪	607	366	155	81	5
112	加蘭溪	118	85	21	7	5

表 4-10 各河川流域坡面單元坡度分類之數量統計

編號	主流名稱	坡面單元總數	S1	S2	S3	N/A
113	蕃寮溪	77	65	5	4	3
114	水璉溪	227	133	48	38	8
115	花蓮溪	4947	876	1311	2710	50
116	美崙溪	154	12	33	107	2
117	三棧溪	467	14	86	367	0
118	立霧溪	2722	178	676	1865	3
119	石公溪	70	0	3	67	0
120	大清水溪	240	1	14	224	1
121	和平溪	2256	346	787	1118	5
122	南澳溪	1138	234	466	436	2
123	東澳溪	144	18	43	81	2
124	蘇澳溪	231	92	92	41	6
125	新城溪	303	78	129	96	0
126	冬山河	151	80	49	19	3
127	蘭陽溪	4063	1191	1507	1335	30
128	得子口溪	237	139	71	22	5
129	金面溪	43	24	15	4	0
130	福德溪	57	23	24	10	0
131	頭城溪	53	45	7	1	0
132	大溪川	343	168	127	40	8
133	雙溪	1024	733	177	53	61
134	尖山腳溪	487	333	86	36	32
135	瑪鍊溪	357	297	39	2	19
136	員潭溪	91	71	6	0	14
合計		143819	53619	35111	43387	11702

資料來源：本研究整理

(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 4-11 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 4-12 及表 4-13 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。

全台坡面單元涵蓋 127 個河川流域，篇幅有限無法全部呈現分類結果，以下選取較具代表性之淡水河流域 (編號 13)、烏溪流域 (編號 41)、濁水溪流域 (編號 45)、高屏溪流域 (編號 63) 為範例，示範各集水區坡地崩塌評估基礎資料庫，如圖 4-8 ~ 圖 4-11 所示。

表 4-11 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 4-11 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 4-11 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 4-12 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 4-12 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 4-12 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	港子溪	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 4-12 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 4-12 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 4-13 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 4-13 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 4-13 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 4-13 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 4-13 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

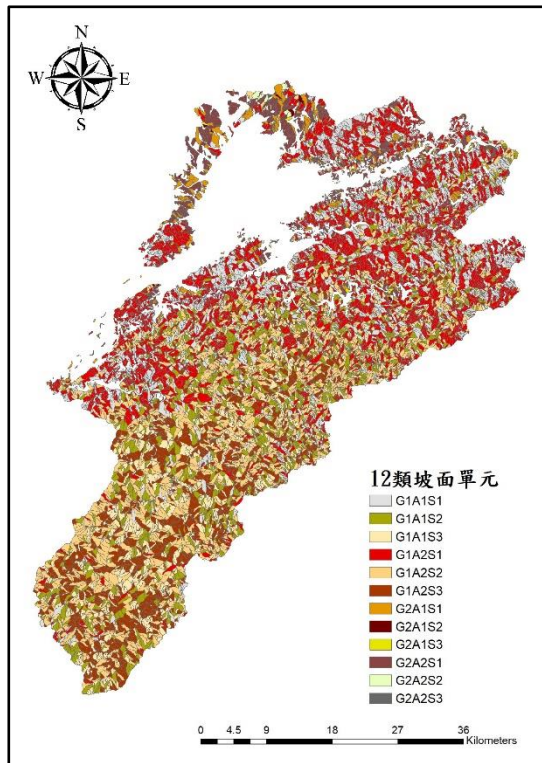


圖 4-8 淡水河流域之山腳斷層坡面單元分類

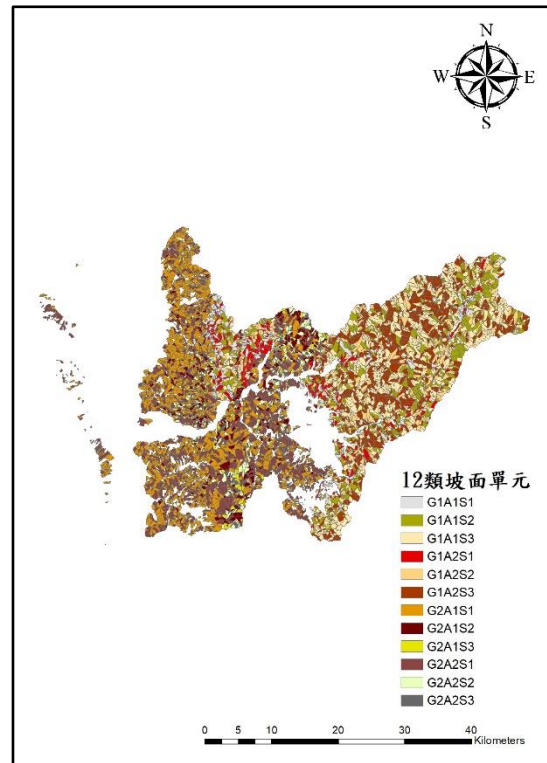


圖 4-9 烏溪流域之山腳斷層坡面單元分類

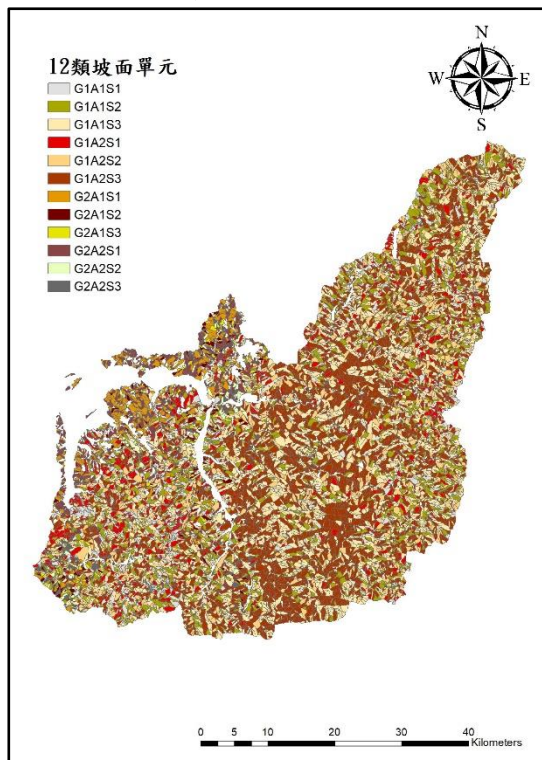


圖 4-10 濁水溪流域之山腳斷層坡面單元分類

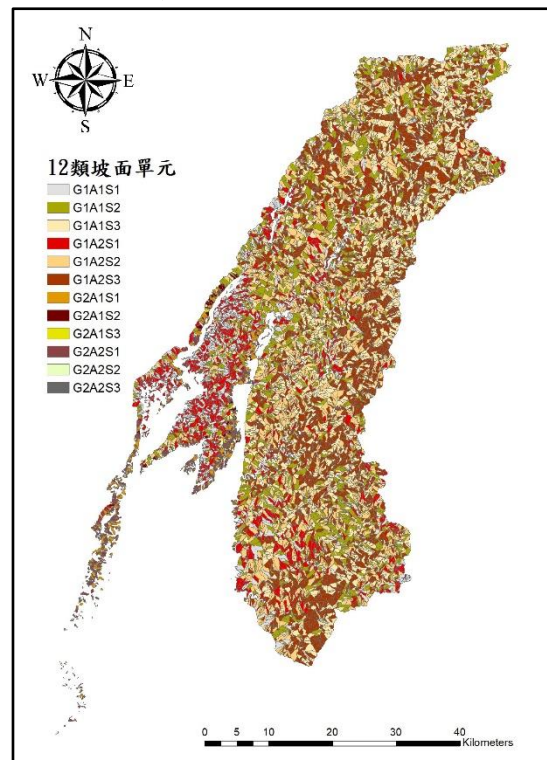


圖 4-11 高屏溪流域之山腳斷層坡面單元分類

第五節 BigGIS 系統之地震早期評估

一、震後快速評估模組

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，如圖 4-12 所示，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，如圖 4-13 所示。



圖 4-12 農村水保署巨量空間資訊系統 (BigGIS)

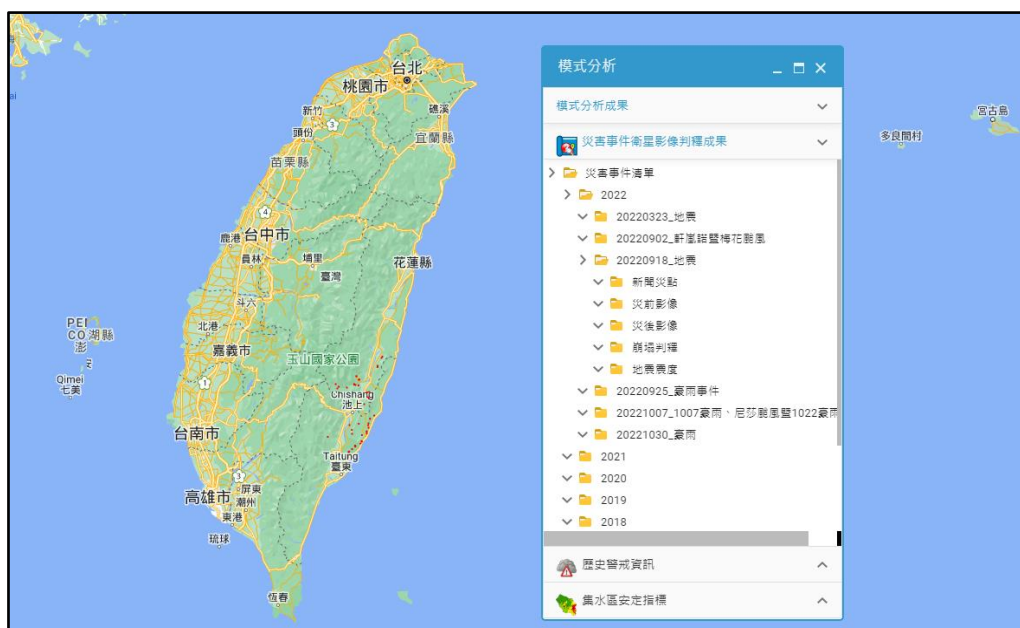


圖 4-13 BigGIS 災害事件速報及崩塌地判釋查詢

目前 BigGIS 可針對重大強震事件之地震震度資料進行套疊，如圖 4-14 所示，而對於即時地震之網格化等震度資料則是介接國家災害防救科技中心 (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 4-15 所示。

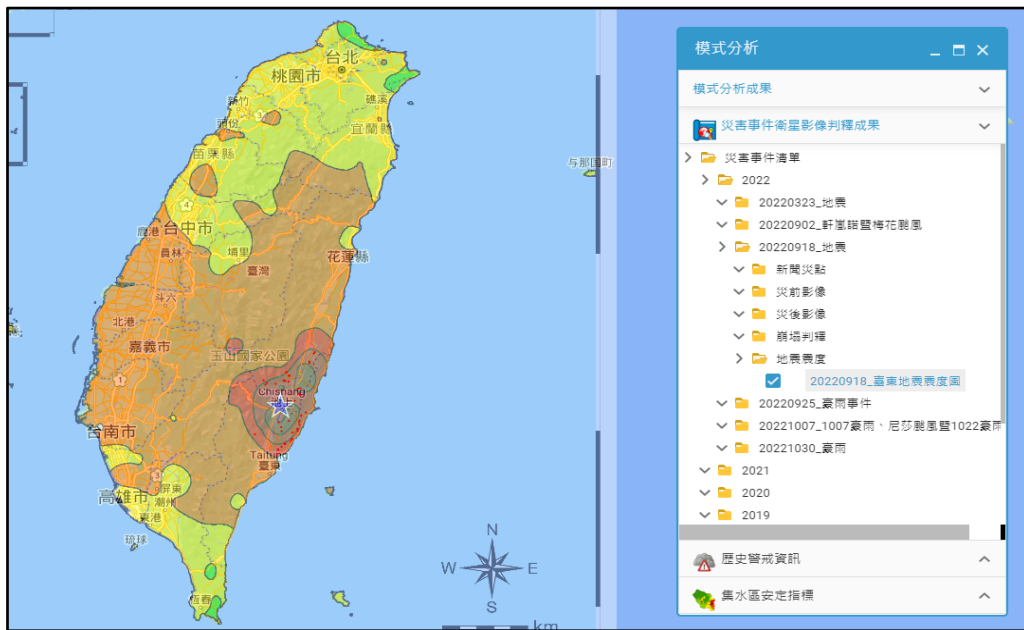


圖 4-14 BigGIS 災害事件震度資料套疊

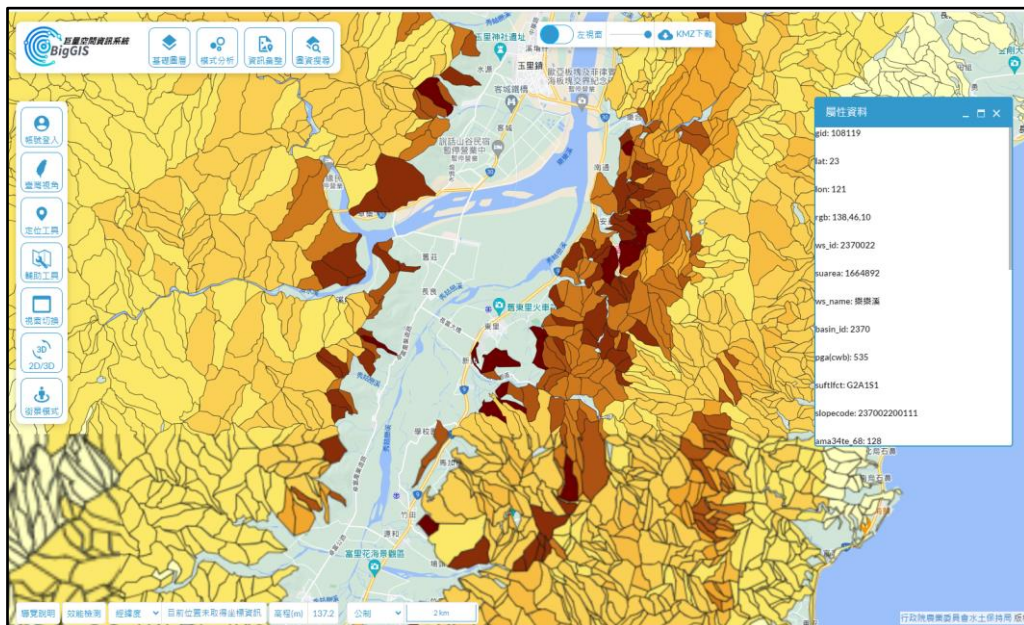


圖 4-15 BigGIS 災害事件震度資料套疊

二、快速評估之優點與限制

前述之快速評估是根據介接之 NCDR 地震網格化等震度即時資料，因此快速評估並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，主要應包括接收網格化等震度資料、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 地震網格化等震度資料之解析度為 $2.5 \times 2.5 \text{ km}^2$ ，與本研究震度推估所採用之 $200 \times 200 \text{ m}^2$ 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修正模型，就地表震度推估而言仍具有較好的可靠度。此外，全台坡面單元面積大小在 0.11 ha 至 524.78 ha 之間，因此若要進行較詳細的坡面單元評估，的確需要有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 4-14 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。而詳細評估由於坡面單元資料庫分析牽涉到多種地理資訊運算，未來若開發時程許可，亦可嘗試進行詳細評估之 BigGIS 系統化之規劃。

表 4-14 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，但應可實現全自動，詳細評估則需手動分析。

資料來源：本研究整理

三、震後詳細評估模組

快速評估是直接以 $2.5 \times 2.5 \text{ km}^2$ 之網格化等震度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形心，而進行震後詳細評估時，震度資料之處理流程如圖 4-16 所示，主要是接收氣象局全國測站資料 (.txt) 和等震度網格資料後，進行 PGA、PGV 之 $200 \times 200 \text{ m}^2$ 網格 IDW 空間內插分析。由於等震度網格資料在測站附近會有震度飽和現象必須修正（通常也就是 6 弱以上高震度區），因此需要適當地修正 $200 \times 200 \text{ m}^2$ 網格資料。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，即可進行後續坡地崩塌評估。

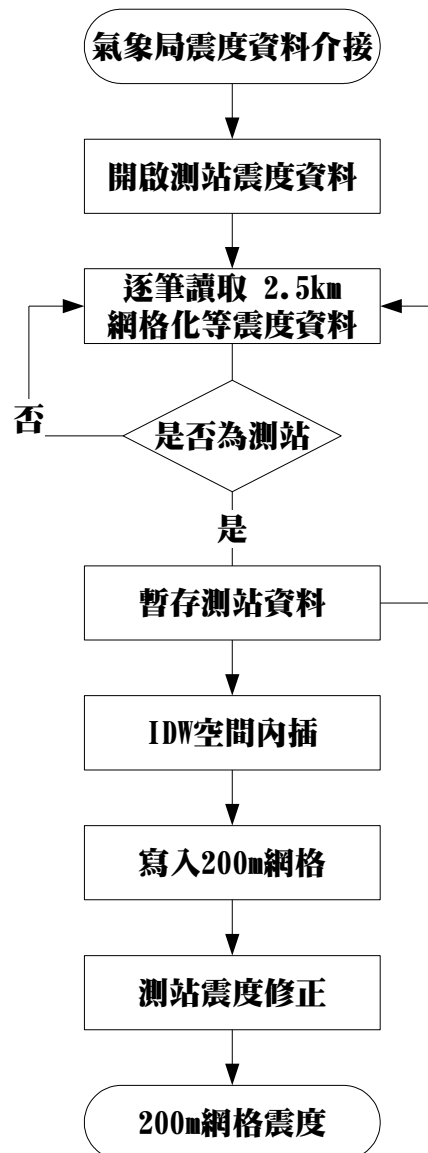


圖 4-16 地震早期詳細評估接收測站資料及震度修正分析流程

四、崩塌易損評估模式整體分析架構

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，評估過程與時效如前述有所差異。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」、「坡面單元分析」、「崩塌率計算」、「集水區崩塌評估」五個主要子流程，如圖 4-17 所示。以下說明其所需之主要資料及詳細分析過程：

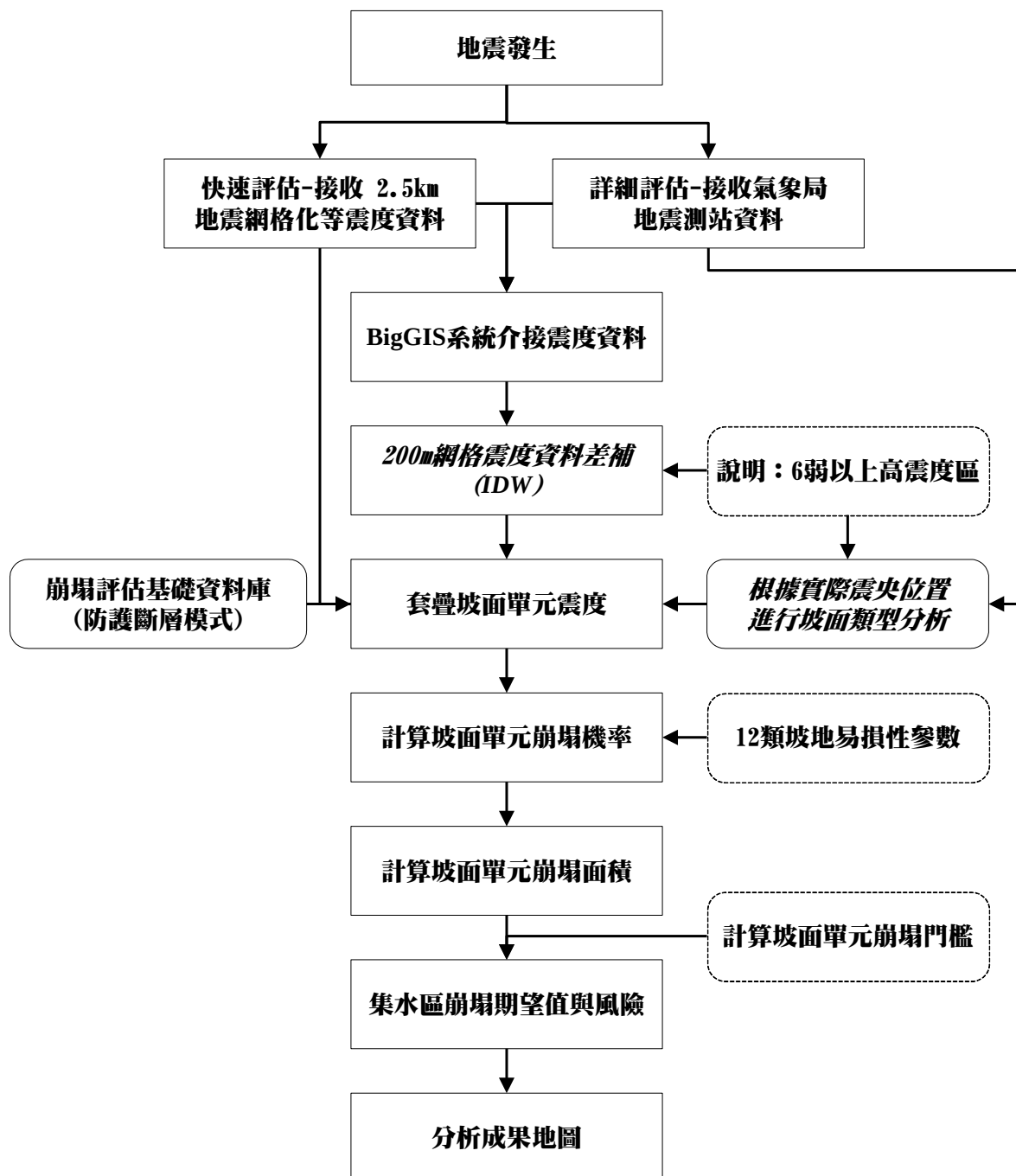


圖 4-17 震後坡地崩塌評估模式整體分析架構

1. 坡面單元震度值

即以測站資料推估全台加速度 (PGA) 與速度 (PGV) 分布，根據新版震度分級，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或是 NCDR 網格化等震度資料獲取。本計畫建議之快速評估和詳細評估說明如下：

以 200 m 網格內插較為精確的震度值。本計畫建議：

- (1) 快速評估：介接 NCDR 網格化等震度資料 (2.5 km 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 200 m 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：評估可自動化。

2. 坡面單元資料庫

即第四節所述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

坡面類型經由坡面之地質、坡向敏感性和坡度進行分類，與震原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，無須於震央實際位置，因此無須震後進行坡面分類。
- (2) 詳細評估：根據實際確定之震央位置和誘發斷層，進行坡地分類分析，並建立崩塌評估基礎資料庫。
- (3) 系統開發：快速評估可自動化；詳細評估可半自動化。

4. 坡地易損性參數

即雙指標坡地易損性曲線，如表 3-10 和表 3-11 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：

$$AL_{su,min} = 0.05 \times F(x) \times A_{su} \quad (4-1)$$

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 (4-1) 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：

$$AL_{su,max} = F(x) \times A_{su} \quad (4-2)$$

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； $AL_{su,max} \geq 0.28$ ha 存在，否則為 0。

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

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

式 (4-2) 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：

$$AL_{su,pa} = \frac{1}{2} \times (AL_{su,min} + AL_{su,max}) \quad (4-3)$$

(4) 集水區最小和最大可能崩塌面積

根據式 (4-2) 和式 (4-3)，某集水區之最小和可能最大崩塌範圍 (AL_{ws}) 估計，可寫為：

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

$$AL_{ws,max} = \sum AL_{su,pa} \quad (4-5)$$

而某集水區最小和最大崩塌率 (RL)，則可寫為：

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

$$RL_{ws,max} = \frac{AL_{ws,max}}{\sum A_{su}} \quad (4-7)$$

經由上述過程，研究團隊估計震後之快速評估可於 6 小時內完成，震後之詳細評估則在取得相關資料後可於 24~48 小時內完成。

五、評估圖形及報表

各類評估結果需依一定之出圖規範和報表展示，以下分述之：

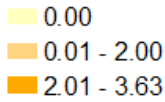
1. 加速度及速度分布圖示例：

加速度分布	色階說明
地表加速度分布 單位: gal 10 - 50 51 - 100 101 - 150 151 - 200 201 - 250 251 - 300 301 - 350 351 - 400 401 - 450 451 - 500 501 - 550 551 - 585	取坡面單元 PGA 最大最小值， 每 50 gal 為一階。
速度分布	色階說明
地表速度分布 單位: cm/s 6 - 10 11 - 20 21 - 30 31 - 40 41 - 50 51 - 60 61 - 70 71 - 80 81 - 90 91 - 100 101 - 108	取坡面單元 PGV 最大最小值， 每 10 cm/s 為一階。

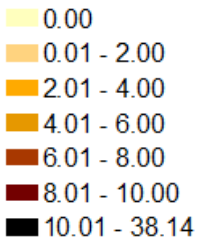
2. 坡面單元崩塌機率分布地圖示例：

崩塌機率	說明
坡面單元崩塌機率 0.000 - 0.100 0.101 - 0.200 0.201 - 0.300 0.301 - 0.400 0.401 - 0.500 0.501 - 0.600 0.601 - 0.700 0.701 - 0.800 0.801 - 0.923	取坡面單元崩塌機率最大最小值， 每 0.1 為一個色階

3. 坡面單元最小崩塌面積估計地圖示例：

最小崩塌面積	說明
集水區最小崩塌面積估計 單位：ha 	取坡面單元最小崩塌面積最大最小值，固定 7 級色階： <u>0</u> 、 <u>0.01~2</u> 、 <u>2~4</u> 、 <u>4~6</u> 、 <u>6~8</u> 、 <u>8~10</u> 、 <u>超過 10 以上</u>

4. 坡面單元可能最大崩塌面積估計地圖示例：

可能最大崩塌面積	說明
集水區最大崩塌面積估計 單位：ha 	取坡面單元可能最大崩塌面積最大最小值，固定 7 級色階： <u>0</u> 、 <u>0.01~2</u> 、 <u>2~4</u> 、 <u>4~6</u> 、 <u>6~8</u> 、 <u>8~10</u> 、 <u>超過 10 以上</u>

5. 「各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序表」報表：

(1) PGA 報表

排序	河川/集水區	PGA _{max} (gal)	PGA _{min} (gal)	坡面單元 RL _{max}	坡面單元 RL _{min}	集水區崩塌面 積估計值(ha)	集水區 RL _{max}	集水區 RL _{min}

(2) PGV 報表

排序	河川/集水區	PGV _{max} (cm/s)	PGV _{min} (cm/s)	坡面單元 RL _{max}	坡面單元 RL _{min}	集水區崩塌面 積估計值(ha)	集水區 RL _{max}	集水區 RL _{min}

(3) 報表欄位說明

欄位	說明
排序	根據集水區崩塌面積最大估計值排序
河川/集水區	河川集水區合併名稱
PGA_{max}	集水區內坡面單元 PGA 最大值
PGA_{min}	集水區內坡面單元 PGA 最小值
PGV_{max}	集水區內坡面單元 PGV 最大值
PGV_{min}	集水區內坡面單元 PGV 最小值
坡面單元 RL_{max}	集水區內坡面單元崩塌機率最大值
坡面單元 RL_{min}	集水區內坡面單元崩塌機率最小值
集水區崩塌面積估計值(ha)	最小值：該集水區內所有坡面單元最小崩塌面積之合計。 最大值：該集水區內所有坡面單元可能最大崩塌面積之合計。
集水區 RL_{max}	$\frac{\text{集水區崩塌面積估計值(最大值)}}{\text{集水區面積}}$
集水區 RL_{min}	$\frac{\text{集水區崩塌面積估計值(最小值)}}{\text{集水區面積}}$

第五章 雙指標管理機制實作與驗證

由於 2023 年度無達震度 6 弱以上地震，以下以 2022 年地震事件說明。

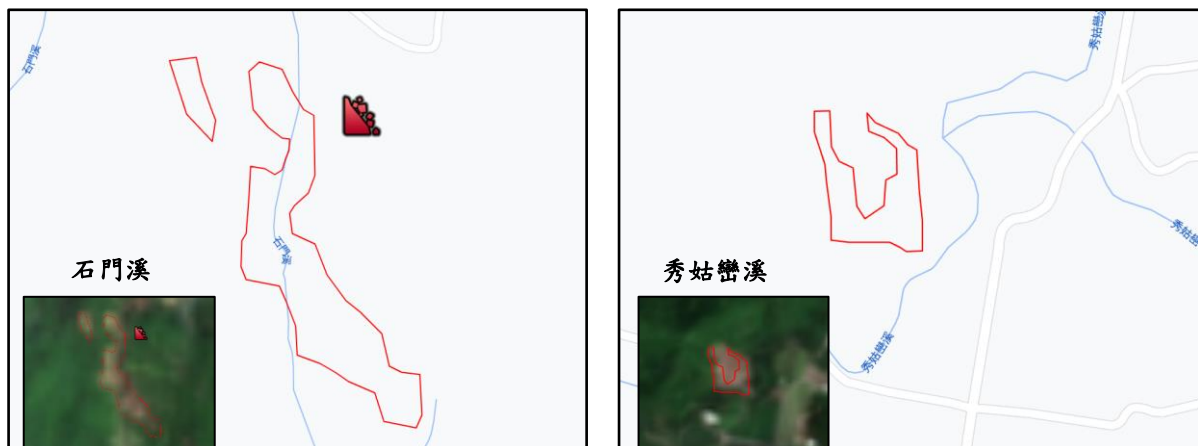
第一節 2022 年震度 6 弱以上地震概述

根據氣象局網站資料，2022 年共計有三次規模 6 弱以上之地震報告，如表 5-1 所示，分別為第 111019 號、第 111086 號和第 111111 號地震，其中第 019 號地震發生於花東外海，其最大震度為 6 弱級，最大 PGV 為 53.65 cm/s，雖達崩塌評估啟動門檻，但僅發生在非常小之範圍，震後之衛星影像判釋結果顯示，僅有三處零星之崩塌，如圖 5-1 所示，總面積約為 1611.14 m²，而震後崩塌評估之集水區總崩塌面積為 0~1.34 ha，可知其崩塌風險程度較低。

表 5-1 2022 年震度 6 弱以上地震列表

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 019 號	3 月 23 日	N 23.4 / E121.61 (台灣東部海域)	規模 6.7 深度 25.7	6 弱(台東長濱)	花蓮外海
第 086 號	9 月 17 日	N 23.08 / E121.16 (台東縣關山鎮)	規模 6.6 深度 8.6	6 強(台東池上)	盲斷層系統 (近池上、玉里斷層)
第 111 號	9 月 18 日	N 23.14 / E121.2 (台東縣池上鄉)	規模 6.8 深度 7.8	6 強(台東池上) 6 弱(花蓮玉里)	

資料來源：中央氣象局 (2023)、國家地震工程研究中心 (2022)，本計畫整理。



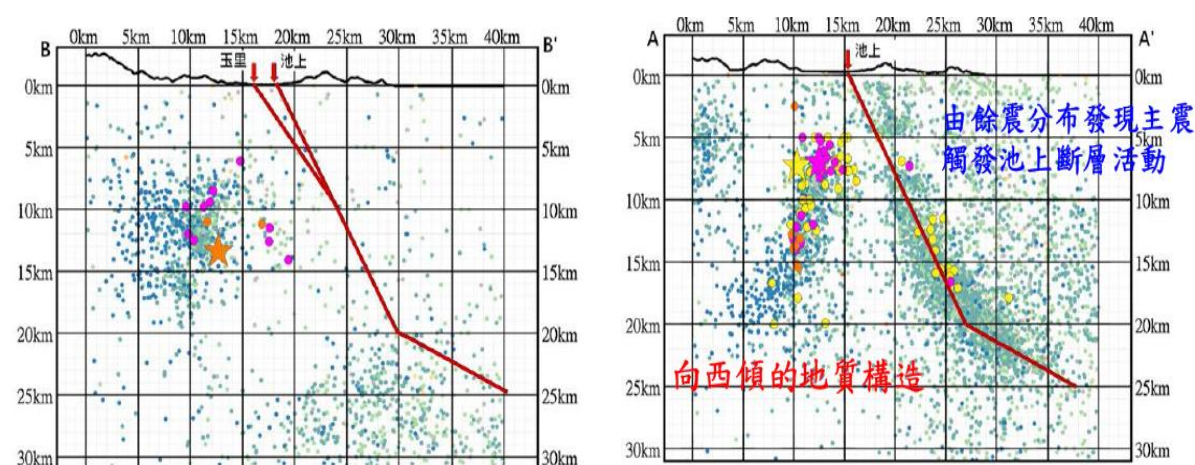
資料來源：BigGIS 巨量空間資訊系統 (2023)。

圖 5-1 第 111019 號地震崩塌地位置

第 086 號地震（又名關山地震）和第 111 號地震（又名池上地震）是台灣歷史上較為少見之特殊有感地震，依據氣象局及中研院地球科學研究所之解算資料，關山地震與池上地震之震源破裂面都呈現以左移之走向滑移斷層為主，所引發之地震序列活動往北延伸至池上及玉里一帶，此地區地表有多條活動斷層跡線，屬於臺灣地震活動頻繁的地區之一。經專家學者綜合研判，此次地震活動應為東北-西南走向並向西傾之斷層破裂面，與花東縱谷之板塊縫合帶之碰撞特性相符，是由花東縱谷南段西側之中央山脈斷層活動所引致，並引起鄰近活斷層（池上斷層及玉里斷層等）之活動，如圖 5-2 所示。

此次序列地震中，第 086 號地震係第 111 號地震之前震，而第 111 號地震之震央在中央山脈下，全台最大震度達到 6 強級，引致花東地區部分建築物和橋梁倒塌等災情。第 086 號地震之最大 PGA 為 564.74 gal，最大 PGV 為 88.2 cm/s，第 111 號地震之最大 PGA 為 566.21 gal，最大 PGV 為 104 cm/s，接達崩塌評估啟動門檻。

由於本次序列地震較為複雜，除了主震受前震之影響，氣象局亦多次修正各測站震度、深度和規模，因此不易評估二次地震中地震崩塌之相互關聯性，基於本模式之研究假設，本計畫以第 111 號池上地震視為獨立地震進行震後崩塌評估，並以 BigGIS 系統於震後之衛星影像判釋結果進行比較，序列地震對於雙指標坡地易損管理模式無顯著影響。



資料來源：國家地震工程研究中心 (2022)

圖 5-2 關山地震和池上地震震源與斷層相對位置

第二節 第 111 號地震 (地震規模 6.8，最大震度 6 強)

本次地震係第 086 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分別說明。

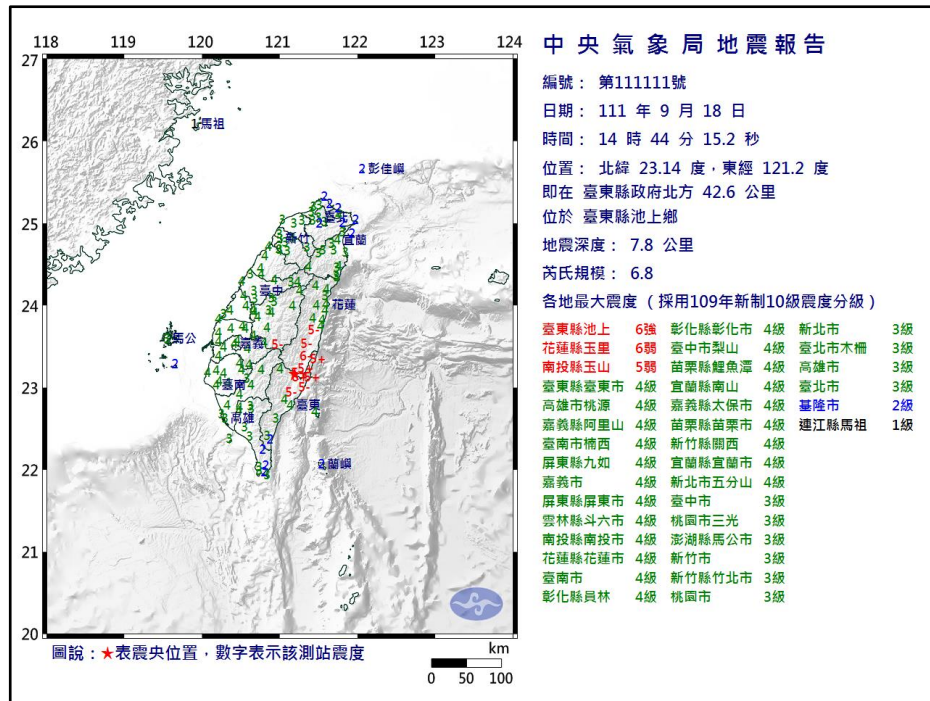


圖 5-3 第 111 號地震中央氣象局地震報告

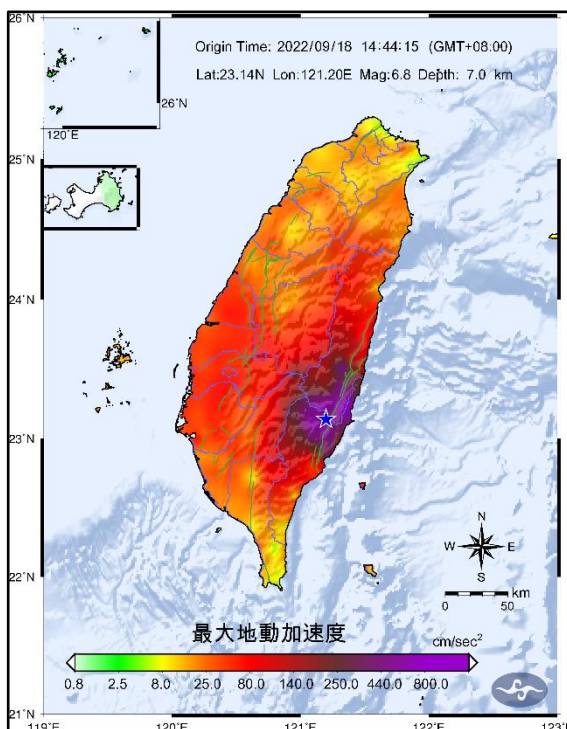


圖 5-4 全台最大地動加速度分布

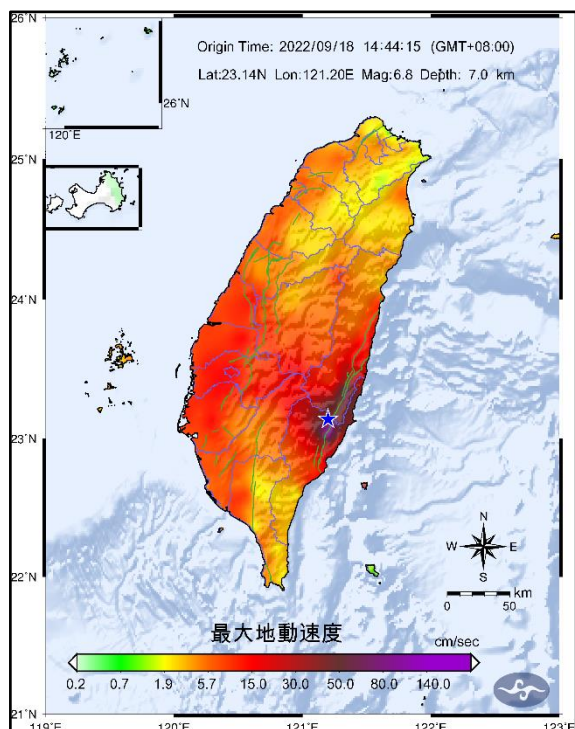


圖 5-5 全台最大地動速度分布

一、震後崩塌快速評估

1. 以 PGA 為致災因子

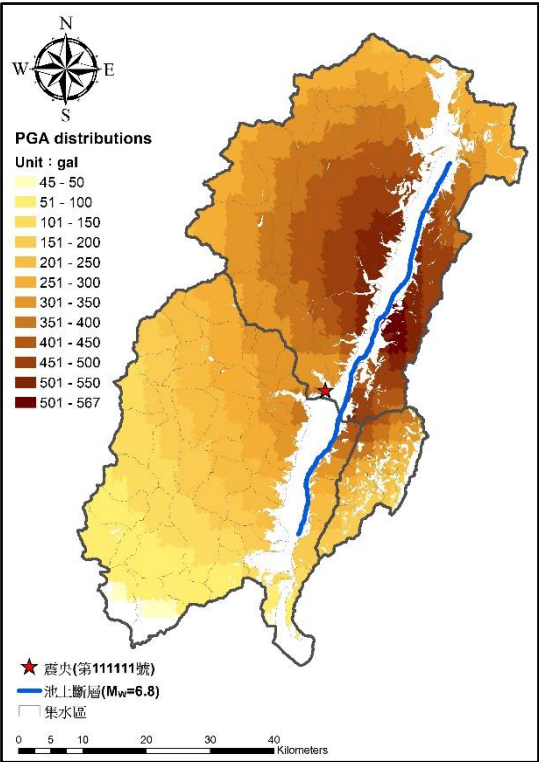


圖 5-6 高震度區地表加速度分布

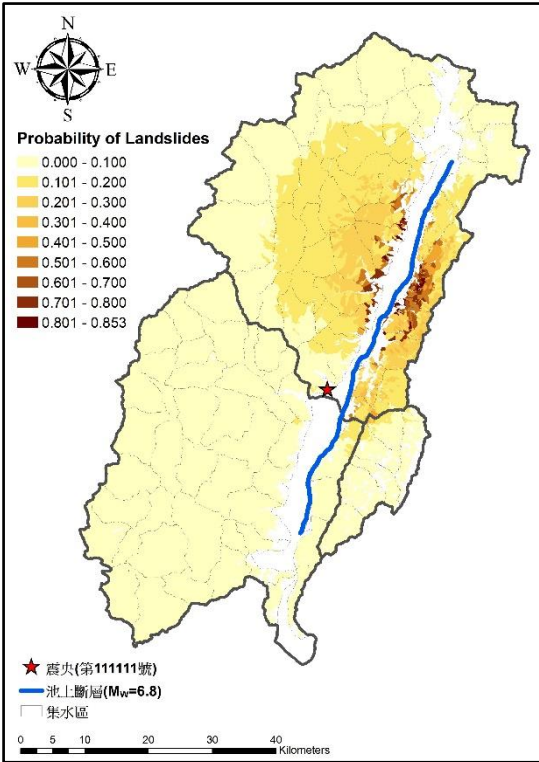


圖 5-7 高震度區崩塌機率分布 (PGA)

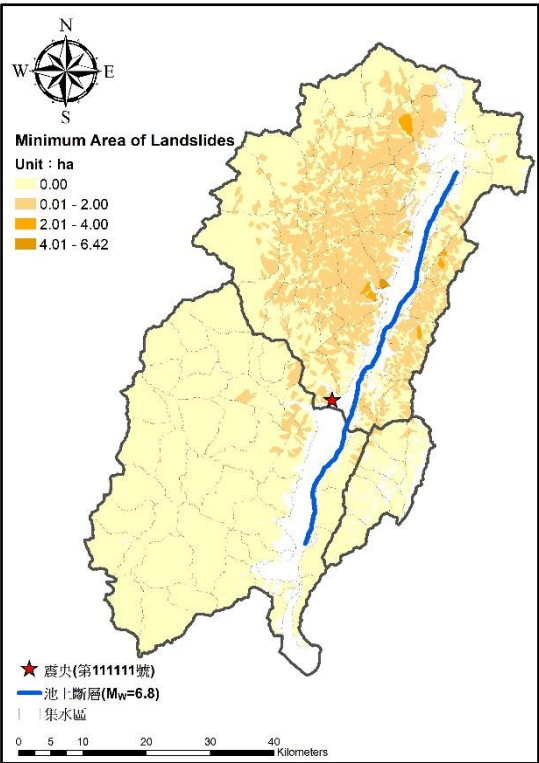


圖 5-8 最小崩塌面積估計 (PGA)

資料來源：本計畫製作。

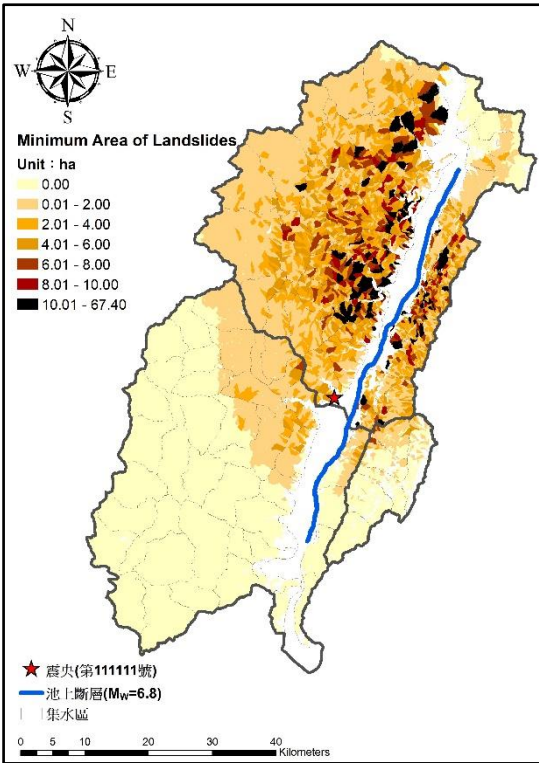


圖 5-9 可能最大崩塌面積估計 (PGA)

表 5-2 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序 (PGA 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	秀姑巒溪/安通溪	453	552	0.143	0.768	59.77 ~ 719.64	0.021	0.256
2	秀姑巒溪/樂樂溪	450	535	0.171	0.771	59.12 ~ 672.66	0.013	0.144
3	秀姑巒溪/卓溪	473	543	0.165	0.733	44.88 ~ 550.65	0.014	0.169
4	秀姑巒溪/阿眉溪	492	566	0.165	0.853	34.00 ~ 464.95	0.013	0.183
5	秀姑巒溪/崙山	409	524	0.075	0.538	33.86 ~ 434.34	0.010	0.131
6	秀姑巒溪/樂合溪	389	533	0.027	0.827	32.71 ~ 472.31	0.009	0.134
7	秀姑巒溪/柏南山	387	489	0.109	0.248	31.52 ~ 453.64	0.006	0.088
8	秀姑巒溪/九岸溪	449	566	0.157	0.833	28.40 ~ 423.50	0.010	0.146
9	秀姑巒溪/和留山	427	494	0.119	0.435	15.09 ~ 205.42	0.007	0.101
10	秀姑巒溪/石厝溝	390	466	0.094	0.407	11.86 ~ 272.04	0.004	0.089
11	寧埔溪/寧埔溪	400	496	0.061	0.660	9.83 ~ 155.29	0.008	0.131
12	秀姑巒溪/高寮溪	422	543	0.116	0.656	9.77 ~ 243.63	0.004	0.095
13	秀姑巒溪/大坡	455	501	0.140	0.589	7.53 ~ 115.46	0.009	0.130
14	秀姑巒溪/鯨溪	377	497	0.017	0.330	7.06 ~ 167.29	0.005	0.113
15	富家溪/三仙溪	288	485	0.000	0.258	7.03 ~ 139.25	0.003	0.054
16	秀姑巒溪/龍泉	340	376	0.006	0.115	5.18 ~ 143.59	0.002	0.044
17	大德溪/竹湖沿海	338	452	0.002	0.349	4.37 ~ 86.64	0.002	0.049
18	卑南溪/下馬	250	329	0.024	0.076	2.97 ~ 107.98	0.001	0.026
19	成功溪/新港溪	283	442	0.000	0.225	2.85 ~ 62.14	0.002	0.040
20	馬武溪/德高老	293	460	0.000	0.407	2.83 ~ 82.70	0.001	0.032
21	卑南溪/海端	328	357	0.005	0.103	2.42 ~ 79.04	0.001	0.038
22	卑南溪/泥水溪	274	501	0.000	0.432	1.75 ~ 104.39	0.001	0.033

表 5-2 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序 (PGA 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	卑南溪/炭頂溪	265	357	0.000	0.103	1.60 ~ 68.60	0.001	0.028
24	秀姑巒溪/苓雅溪	323	422	0.000	0.177	0.81 ~ 121.87	<0.000	0.045
25	卑南溪/大崙溪	197	328	0.000	0.073	0.80 ~ 92.33	<0.000	0.016
26	馬武溪/東河農場	234	415	0.000	0.151	0.68 ~ 35.78	<0.000	0.016
27	馬武溪/都歷沿海	113	390	0.000	0.127	0.67 ~ 23.66	<0.000	0.009
28	馬武溪/美蘭	113	371	0.000	0.051	0.00 ~ 3.01	0.000	0.002
29	馬武溪/馬武溪	155	312	0.000	0.064	0.00 ~ 2.05	0.000	0.001
	合計					419.36 ~ 6503.85		

資料來源：本計畫製作。

2. 以 PGV 為致災因子

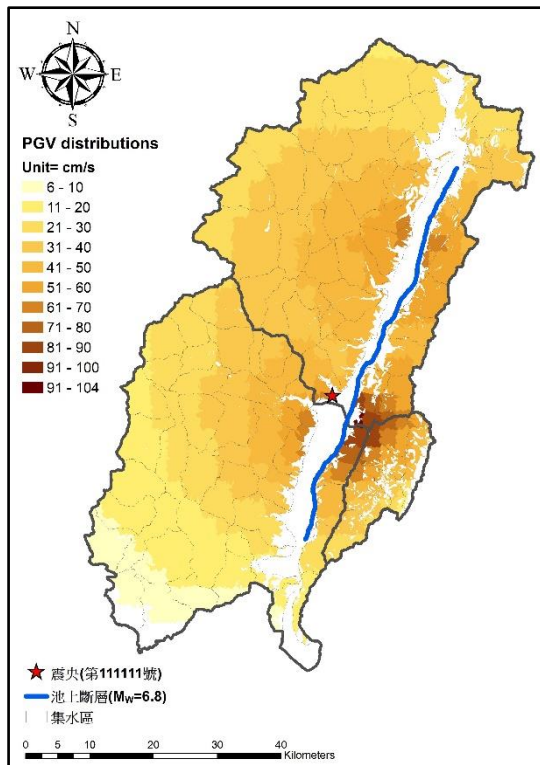


圖 5-10 高震度區地表速度分布

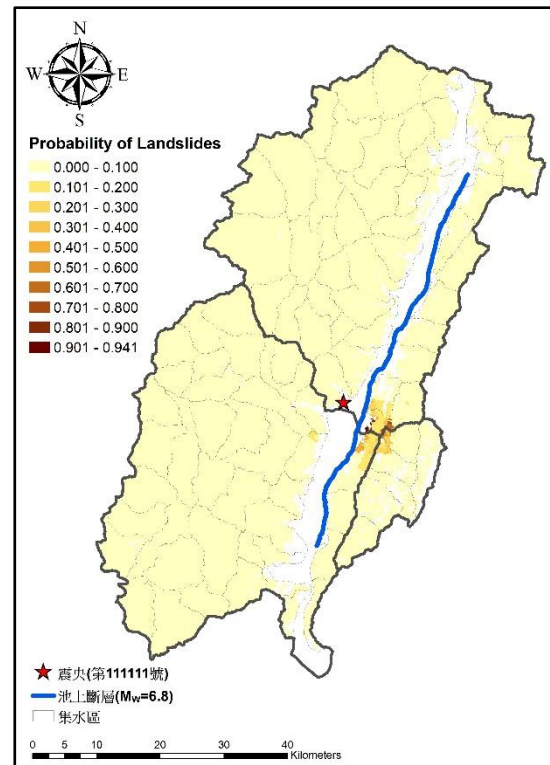


圖 5-11 高震度區崩塌機率分布 (PGV)

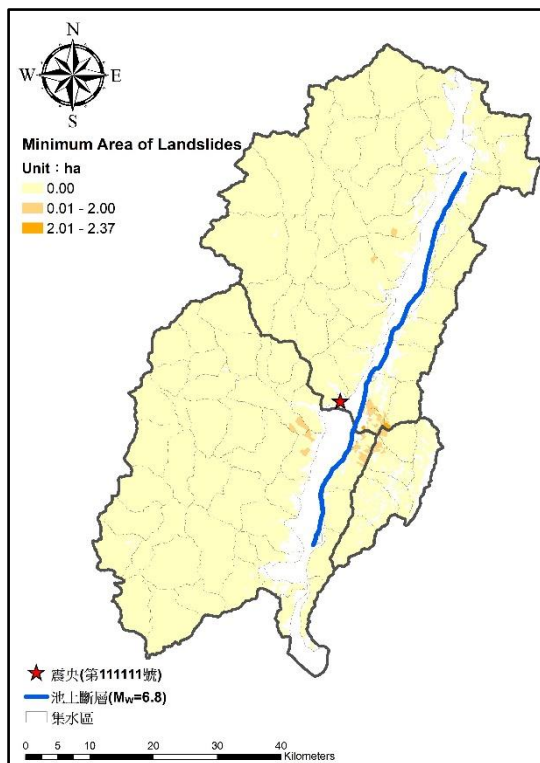


圖 5-12 最小崩塌面積估計 (PGV)

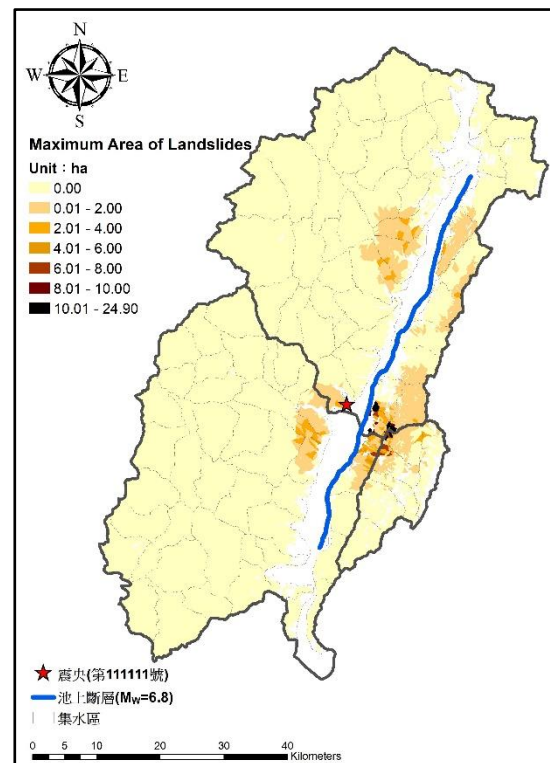


圖 5-13 可能最大崩塌面積估計 (PGV)

資料來源：本計畫製作。

表 5-3 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序 (PGV 快速評估)

排序	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	秀姑巒溪/大坡	77	104	0.114	0.941	11.11 ~ 146.95	0.013	0.166
2	卑南溪/泥水溪	49	104	0.000	0.803	6.94 ~ 172.86	0.002	0.054
3	馬武溪/德高老	50	87	0.000	0.640	4.05 ~ 88.50	0.002	0.035
4	秀姑巒溪/石厝溝	51	87	0.001	0.744	3.99 ~ 116.26	0.001	0.038
5	馬武溪/東河農場	41	81	0.000	0.384	2.75 ~ 69.79	0.001	0.031
6	秀姑巒溪/鯢溪	37	76	0.000	0.394	2.29 ~ 60.51	0.002	0.041
7	卑南溪/崁頂溪	43	64	0.000	0.116	1.01 ~ 43.32	<0.000	0.018
8	卑南溪/下馬	33	55	0.000	0.049	0.79 ~ 18.11	<0.000	0.004
9	秀姑巒溪/崙山	33	51	0.000	0.077	0.26 ~ 42.83	<0.000	0.013
10	秀姑巒溪/樂樂溪	45	55	0.000	0.063	0.24 ~ 29.71	<0.000	0.006
11	秀姑巒溪/卓溪	39	54	0.000	0.082	0.00 ~ 58.68	0.000	0.018
12	秀姑巒溪/高寮溪	50	68	0.000	0.101	0.00 ~ 52.35	0.000	0.020
13	卑南溪/海端	48	64	0.000	0.113	0.00 ~ 32.50	0.000	0.016
14	秀姑巒溪/龍泉	38	65	0.000	0.085	0.00 ~ 21.76	0.000	0.007
15	秀姑巒溪/九岸溪	45	59	0.000	0.085	0.00 ~ 18.37	0.000	0.006
16	秀姑巒溪/安通溪	51	55	0.000	0.057	0.00 ~ 17.87	0.000	0.006
17	秀姑巒溪/樂合溪	48	63	0.000	0.064	0.00 ~ 15.55	0.000	0.004
18	成功溪/新港溪	41	52	0.000	0.052	0.00 ~ 12.05	0.000	0.008
19	秀姑巒溪/柏南山	37	53	0.000	0.044	0.00 ~ 9.15	0.000	0.002
20	富家溪/三仙溪	37	55	0.000	0.047	0.00 ~ 8.42	0.000	0.003
21	馬武溪/都歷沿海	18	61	0.000	0.067	0.00 ~ 7.04	0.000	0.003
22	秀姑巒溪/和留山	42	56	0.000	0.057	0.00 ~ 6.39	0.000	0.003

表 5-3 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序 (PGV 快速評估)

排序	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	卑南溪/大崙溪	29	56	0.000	0.050	0.00 ~ 6.25	0.000	0.001
24	秀姑巒溪/阿眉溪	47	51	0.000	0.036	0.00 ~ 5.86	0.000	0.002
25	秀姑巒溪/苓雅溪	34	50	0.000	0.044	0.00 ~ 3.06	0.000	0.001
26	馬武溪/美蘭	18	74	0.000	0.086	0.00 ~ 2.68	0.000	0.002
27	寧埔溪/寧埔溪	44	50	0.000	0.045	0.00 ~ 2.20	0.000	0.002
28	大德溪/竹湖沿海	44	55	0.000	0.055	0.00 1.82	0.000	0.001
29	馬武溪/馬武溪	27	60	0.000	0.069	0.00 1.23	0.000	<0.000
	合計					33.43 ~ 1072.07		

資料來源：本計畫製作。

二、震後崩塌詳細評估

1. 以 PGA 為致災因子

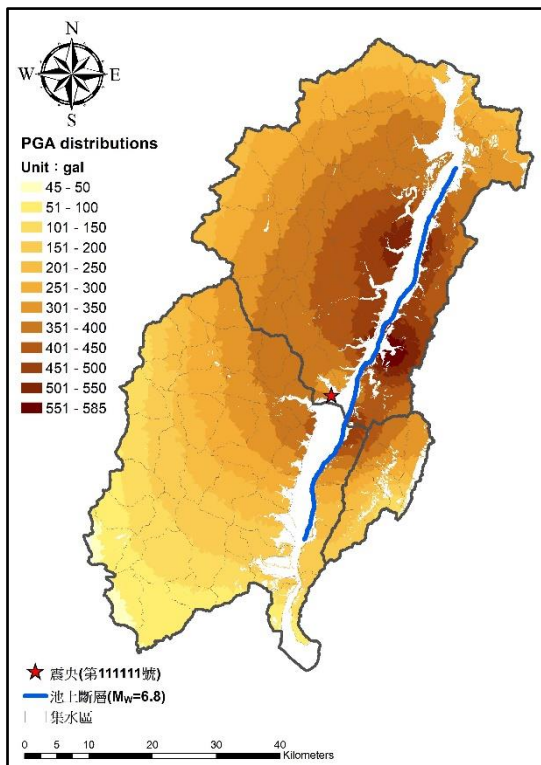


圖 5-14 高震度區地表加速度分布

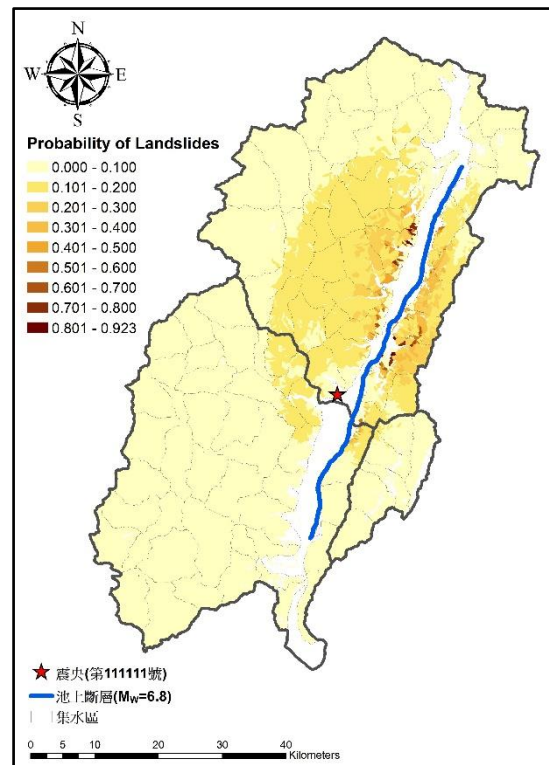


圖 5-15 高震度區崩塌機率分布 (PGA)

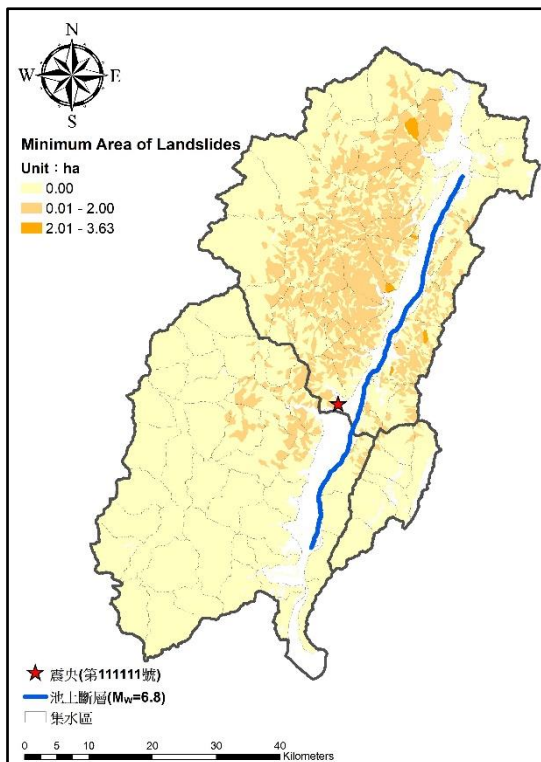


圖 5-16 最小崩塌面積估計 (PGA)

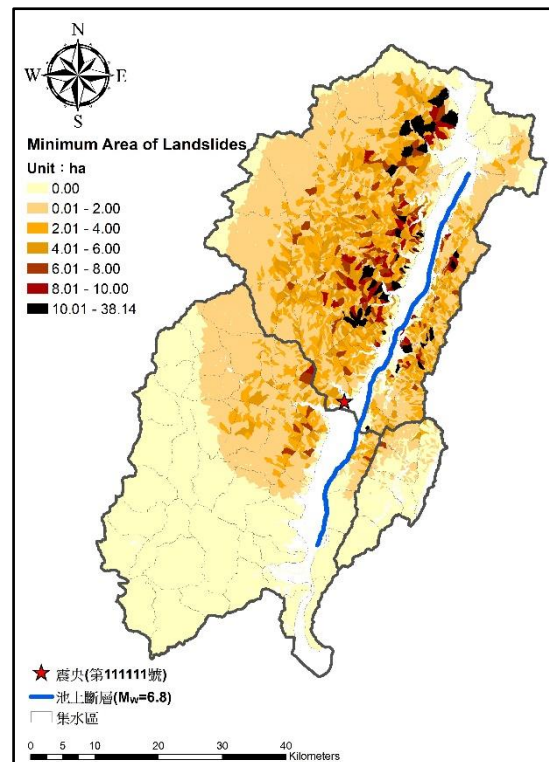


圖 5-17 可能最大崩塌面積估計 (PGA)

資料來源：本計畫製作。

表 5-4 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序 (PGA 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	秀姑巒溪/樂樂溪	416	480	0.137	0.465	41.79 ~ 493.06	0.009	0.105
2	秀姑巒溪/卓溪	446	545	0.160	0.814	37.50 ~ 489.63	0.012	0.151
3	秀姑巒溪/馬西桑	407	469	0.113	0.441	25.31 ~ 325.20	0.007	0.093
4	秀姑巒溪/崙山	369	517	0.016	0.438	23.33 ~ 306.58	0.007	0.092
5	秀姑巒溪/柏南山	352	444	0.067	0.175	17.69 ~ 326.91	0.003	0.064
6	秀姑巒溪/秀姑巒溪 上游	417	514	0.138	0.667	17.52 ~ 252.87	0.008	0.118
7	秀姑巒溪/安通溪	404	479	0.104	0.452	16.01 ~ 329.61	0.006	0.117
8	秀姑巒溪/塔洛木溪	368	441	0.107	0.190	14.59 ~ 237.20	0.004	0.071
9	秀姑巒溪/斯巴夫南	388	428	0.115	0.163	13.33 ~ 185.23	0.005	0.073
10	秀姑巒溪/樂合溪	331	500	0.018	0.582	11.25 ~ 255.45	0.003	0.072
11	秀姑巒溪/龍泉	315	383	0.001	0.130	7.77 ~ 162.87	0.002	0.050
12	秀姑巒溪/高寮溪	389	525	0.065	0.521	7.06 ~ 212.11	0.003	0.082
13	秀姑巒溪/和留山	372	455	0.051	0.192	7.03 ~ 127.71	0.003	0.063
14	秀姑巒溪/石厝溝	361	492	0.038	0.228	6.76 ~ 197.05	0.002	0.065
15	卑南溪/下馬	295	383	0.053	0.120	6.62 ~ 180.67	0.002	0.044
16	卑南溪/海端	364	414	0.031	0.143	6.02 ~ 113.17	0.003	0.054
17	卑南溪/泥水溪	294	495	0.000	0.538	5.25 ~ 166.06	0.002	0.052
18	卑南溪/蝦末	355	374	0.086	0.115	4.93 ~ 95.91	0.003	0.052
19	卑南溪/崁頂溪	296	401	0.001	0.143	3.61 ~ 101.07	0.001	0.042
20	秀姑巒溪/大坡	411	495	0.094	0.552	3.41 ~ 80.19	0.004	0.091
21	卑南溪/大崙溪	250	362	0.028	0.098	3.32 ~ 185.75	0.001	0.032
22	秀姑巒溪/鯊溪	385	508	0.038	0.447	2.52 ~ 104.90	0.002	0.071

表 5-4 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序 (PGA 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	卑南溪/佟闊尼	354	374	0.076	0.117	1.77 ~ 139.61	0.001	0.053
24	馬武溪/德高老	313	436	0.000	0.193	1.05 ~ 48.19	<0.000	0.019
25	卑南溪/宏可	347	360	0.072	0.106	0.89 ~ 66.28	0.001	0.047
26	馬武溪/東河農場	236	447	0.000	0.175	0.71 ~ 39.93	<0.000	0.018
27	馬武溪/美蘭	111	352	0.000	0.057	0.00 ~ 1.93	0.000	0.001
	合計					287.04 ~ 5225.14		

資料來源：本計畫製作。

2. 以 PGV 為致災因子

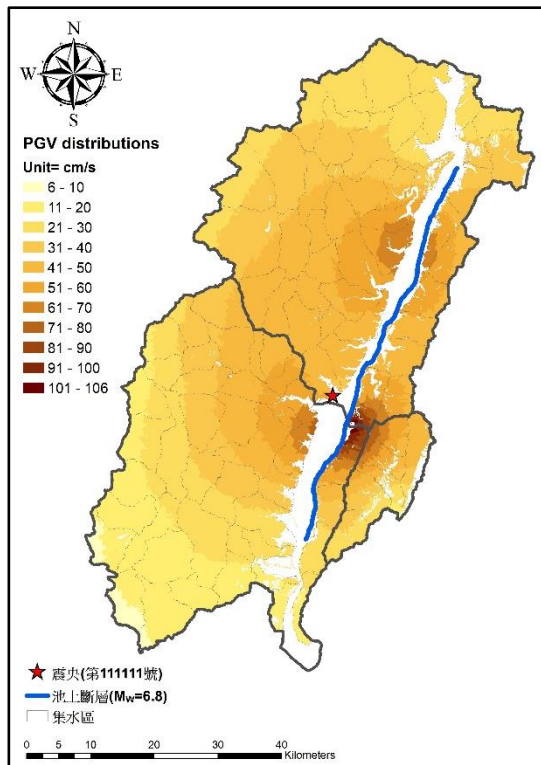


圖 5-18 高震度區地表速度分布

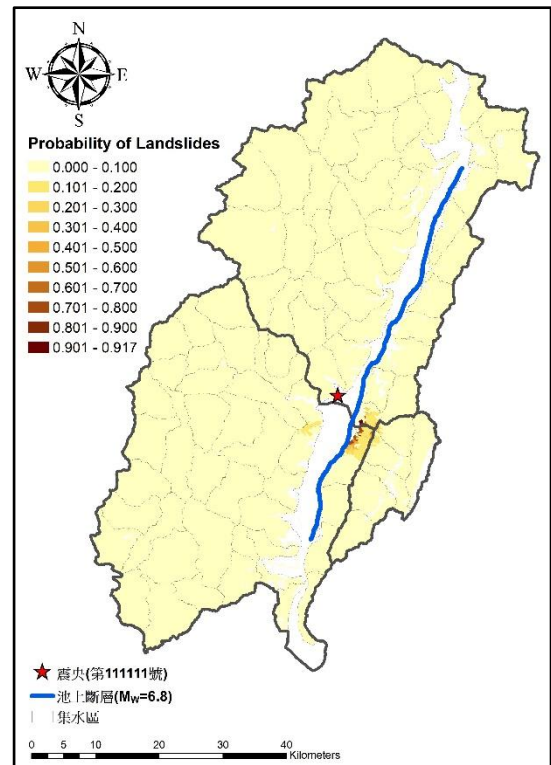


圖 5-19 高震度區崩塌機率分布 (PGV)

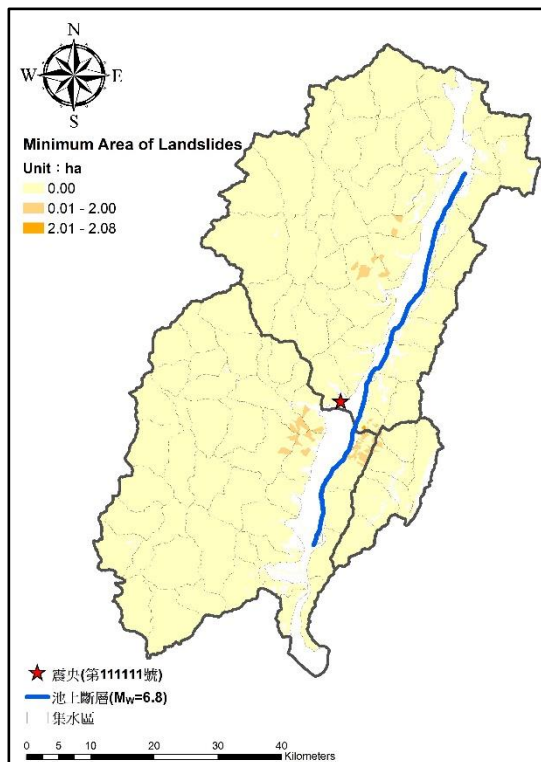


圖 5-20 最小崩塌面積估計 (PGV)

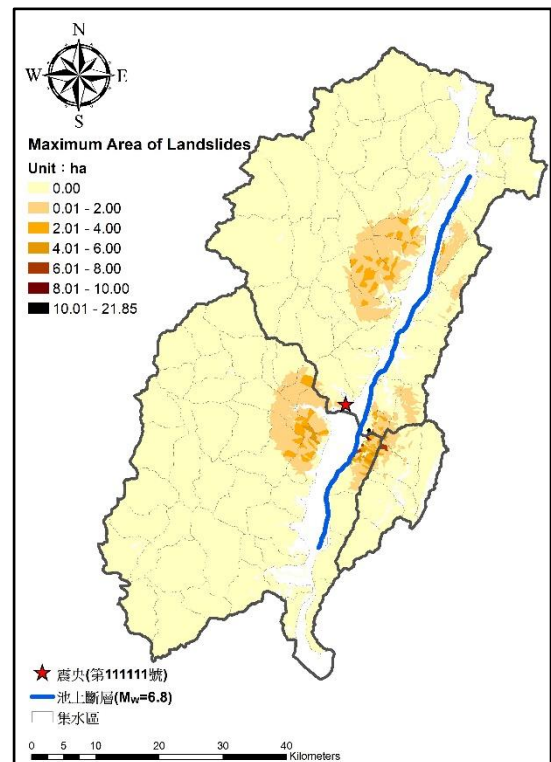


圖 5-21 可能最大崩塌面積估計 (PGV)

資料來源：本計畫製作。

表 5-5 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序 (PGV 詳細評估)

排序	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	卑南溪/泥水溪	47	102	0.000	0.910	13.36 ~ 221.00	0.004	0.070
2	秀姑巒溪/大坡	68	102	0.026	0.917	4.52 ~ 86.82	0.005	0.098
3	秀姑巒溪/樂樂溪	49	58	0.000	0.075	1.43 ~ 86.08	<0.000	0.018
4	卑南溪/崁頂溪	53	69	0.000	0.135	1.40 ~ 54.87	0.001	0.023
5	卑南溪/下馬	46	63	0.000	0.078	1.31 ~ 44.89	<0.000	0.011
6	馬武溪/東河農場	52	84	0.000	0.287	0.90 ~ 25.92	<0.000	0.011
7	卑南溪/海端	31	73	0.003	0.131	0.83 ~ 49.64	<0.000	0.024
8	秀姑巒溪/卓溪	41	69	0.001	0.095	0.57 ~ 77.60	<0.000	0.024
9	卑南溪/大崙溪	36	58	0.000	0.061	0.56 ~ 44.49	<0.000	0.008
10	秀姑巒溪/崙山	46	64	0.000	0.077	0.56 ~ 49.00	<0.000	0.015
11	馬武溪/德高老	49	79	0.000	0.249	0.52 ~ 20.98	<0.000	0.008
12	秀姑巒溪/高寮溪	49	66	0.000	0.111	0.00 ~ 40.04	0.000	0.016
13	秀姑巒溪/馬西桑	36	53	0.000	0.052	0.00 ~ 37.04	0.000	0.011
14	卑南溪/暇末	48	54	0.000	0.061	0.00 ~ 26.86	0.000	0.015
15	秀姑巒溪/石厝溝	47	71	0.000	0.069	0.00 ~ 22.67	0.000	0.007
16	秀姑巒溪/龍泉	37	57	0.000	0.048	0.00 ~ 8.02	0.000	0.002
17	秀姑巒溪/塔洛木溪	41	52	0.000	0.049	0.00 ~ 7.11	0.000	0.002
18	卑南溪/佟闊尼	47	51	0.000	0.048	0.00 ~ 6.17	0.000	0.002
19	秀姑巒溪/樂合溪	43	62	0.000	0.055	0.00 ~ 5.82	0.000	0.002
20	秀姑巒溪/鯢溪	49	69	0.000	0.068	0.00 ~ 5.11	0.000	0.003
21	秀姑巒溪/安通溪	49	58	0.000	0.036	0.00 ~ 4.36	0.000	0.002
22	秀姑巒溪/和留山	33	54	0.000	0.035	0.00 ~ 4.07	0.000	0.002

表 5-5 各河川集水區地震誘發崩塌危害評估排序 (PGV 詳細評估)

排序	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	秀姑巒溪/斯巴夫南	46	51	0.000	0.034	0.00 ~ 3.92	0.000	0.002
24	秀姑巒溪/柏南山	32	52	0.000	0.033	0.00 ~ 2.48	0.000	<0.000
25	卑南溪/宏可	46	50	0.000	0.046	0.00 ~ 1.30	0.000	0.001
26	秀姑巒溪/秀姑巒溪 上游	49	53	0.000	0.047	0.00 ~ 0.85	0.000	<0.000
27	馬武溪/美蘭	18	61	0.000	0.038	0.00 ~ 0.68	0.000	<0.000
	合計					25.96 ~ 937.79		

資料來源：本計畫製作。

第三節 集水區震後崩塌風險等級評估

一、雙指標坡地易損管理模式

建立雙指標坡地易損管理模式目的，是冀望在震後除了分別針對 PGA 和 PGV 之致災因子進行崩塌評估外，也能夠對這二指標進行綜合評價以利於災害管理。根據前期研究，總結雙指標坡地易損性曲線之特性：

- (一) 對於 PGA 因子，由於震度值較易達到啟動門檻 250 cm/s^2 ，因此在地震規模 7.1~7.8 的分析中，較小地震規模時崩塌量較 PGV 為高；且隨著地震規模增加，崩塌量增幅較平緩而近線性，沒有急遽增加的表現。
- (二) 對於 PGV 因子，由於震度值較不易達到啟動門檻 50 cm/s ，因在地震規模 7.1~7.8 的分析中，較大地震規模時崩塌量較 PGA 為高；且隨著地震規模增加，崩塌量增幅較為急遽。
- (三) 在地震規模 7.1~7.8 的分析中，PGA 與 PGV 因子之崩塌量在地震規模約 7.6 時發生交錯，PGV 因子提升顯著，表示此時 PGV 因子更為重要。
- (四) 由真實地震和實際評估結果發現，PGA 之評估結果相較 PGV 更為保守，PGV 因子在地震規模 7.5 之前崩塌量體增加幅度較緩，而越大的地震規模則引致更高的崩塌量，與新制震度分級表較為相符。

據此，PGA 與 PGV 因子各有其特性，根據目前有限的地震紀錄，PGV 因子之評估結果應與實際崩塌較為相符，適合作為主要管理指標，而 PGA 因子在較小地震規模時則較為保守，適合做為較低地震規模時之先行輔助指標。而地震規模的大小則可做為管理模式中不同指標準則變換的門檻值，例如地震規模 7.6 之後雙指標之特性不同，因此根據不同地震規模，可設定相應的管理模式和基準。本計畫建議以風險分級模式建立雙指標坡地易損管理模式，目的在於能夠快速評估坡面單元和集水區之崩塌可能性，且能夠針對高震度區域之河川集水區進行高中低風險排序，以利於震後之策略擬定。

對於雙指標坡地易損風險管理模式，如表 5-6 所示：

1. 地震發生後最大震級達 6 弱以上啟動評估。
2. 分別針對 PGA 和 PGV 進行坡地崩塌分析，得到 PGA 和 PGV 之各河川集水區地震誘發崩塌危害評估。
3. 地震規模 7.5 以下時 (包含 7.5)，集水區：
 - 3.1 高風險區：PGV 指標集水區最小崩塌面積達 1 ha 以上時。
 - 3.2 中風險區：PGA 指標集水區最小崩塌面積達 10 ha 以上時，或 PGV 指標集水區可能最大崩塌面積達 1 ha 以上時。
 - 3.3 其它達啟動門檻之集水區為低風險區。
 - 3.4 根據高中低風險結果以可能最大崩塌面積進行綜合排序。
4. 地震規模 7.6 以上時 (包含 7.6)，集水區：
 - 4.1 高風險區：PGV 指標集水區可能最大崩塌面積達 10 ha 以上時。
 - 4.2 中風險區：PGA 指標集水區最小崩塌面積達 10 ha 以上時，或 PGV 指標集水區可能最大崩塌面積達 1 ha 以上時。
 - 4.3 其它達啟動門檻之集水區為低風險區。
 - 4.4 根據高中低風險結果以可能最大崩塌面積進行綜合排序。

表 5-6 雙指標坡地易損風險管理模式

啟動	地震發生後最大震級達 6 弱以上	
高風險	規模 7.5 以下	PGV 指標之集水區最小崩塌面積達 1 ha 以上時。
	規模 7.6 以上	PGV 指標之集水區可能最大崩塌面積達 10 ha 以上時。
中風險	以下條件其一成立： 1. PGA 指標之集水區最小崩塌面積達 10 ha 以上時。 2. PGV 指標之集水區可能最大崩塌面積達 1 ha 以上時	
低風險	其它達啟動門檻之集水區。	

資料來源：本計畫整理。

二、第 111 號地震集水區風險等級評估結果

以第 111 號地震為例風險等級評估結果如表 5-7 和表 5-8 所示。

表 5-7 第 111 號地震集水區風險等級評估 (快速評估)

排序	河川集水區	風險	排序	河川集水區	風險	排序	河川集水區	風險
1	秀姑巒溪/大坡	高	11	秀姑巒溪/卓溪	中	21	馬武溪/都歷沿海	中
2	卑南溪/泥水溪	高	12	秀姑巒溪/高寮溪	中	22	秀姑巒溪/和留山	中
3	馬武溪/德高老	高	13	卑南溪/海端	中	23	卑南溪/大崙溪	中
4	秀姑巒溪/石厝溝	高	14	秀姑巒溪/龍泉	中	24	秀姑巒溪/阿眉溪	中
5	馬武溪/東河農場	高	15	秀姑巒溪/九岸溪	中	25	秀姑巒溪/苓雅溪	中
6	秀姑巒溪/鯨溪	高	16	秀姑巒溪/安通溪	中	26	馬武溪/美蘭	中
7	卑南溪/崁頂溪	高	17	秀姑巒溪/樂合溪	中	27	寧埔溪/寧埔溪	中
8	卑南溪/下馬	中	18	成功溪/新港溪	中	28	大德溪/竹湖沿海	中
9	秀姑巒溪/崙山	中	19	秀姑巒溪/柏南山	中	29	馬武溪/馬武溪	中
10	秀姑巒溪/樂樂溪	中	20	富家溪/三仙溪				

資料來源：本計畫製作

表 5-8 第 111 號地震集水區風險等級評估 (詳細評估)

排序	河川集水區	風險	排序	河川集水區	風險	排序	河川集水區	風險
1	卑南溪/泥水溪	高	10	卑南溪/大崙溪	中	19	秀姑巒溪/馬西桑	中
2	秀姑巒溪/大坡	高	11	秀姑巒溪/崙山	中	20	秀姑巒溪/柏南山	中
3	秀姑巒溪/樂樂溪	高	12	馬武溪/德高老	中	21	秀姑巒溪/鯨溪	中
4	卑南溪/崁頂溪	高	13	卑南溪/宏可	中	22	秀姑巒溪/石厝溝	中
5	卑南溪/下馬	高	14	卑南溪/佟闊尼	中	23	秀姑巒溪/和留山	中
6	秀姑巒溪/秀姑巒溪上游	中	15	卑南溪/暇末	中	24	秀姑巒溪/安通溪	中
7	馬武溪/東河農場	中	16	秀姑巒溪/龍泉	中	25	秀姑巒溪/高寮溪	中
8	卑南溪/海端	中	17	秀姑巒溪/斯巴夫南	中	26	秀姑巒溪/樂合溪	中
9	秀姑巒溪/卓溪	中	18	秀姑巒溪/塔洛木溪	中	27	馬武溪/美蘭	低

資料來源：本計畫製作

第四節 第 111 號地震分析結果與討論

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 5-22 所示。根據該判釋成果，顯示共計有 45 處新生崩塌地，總面積約為 1.76 ha，如表 5-9 所示。

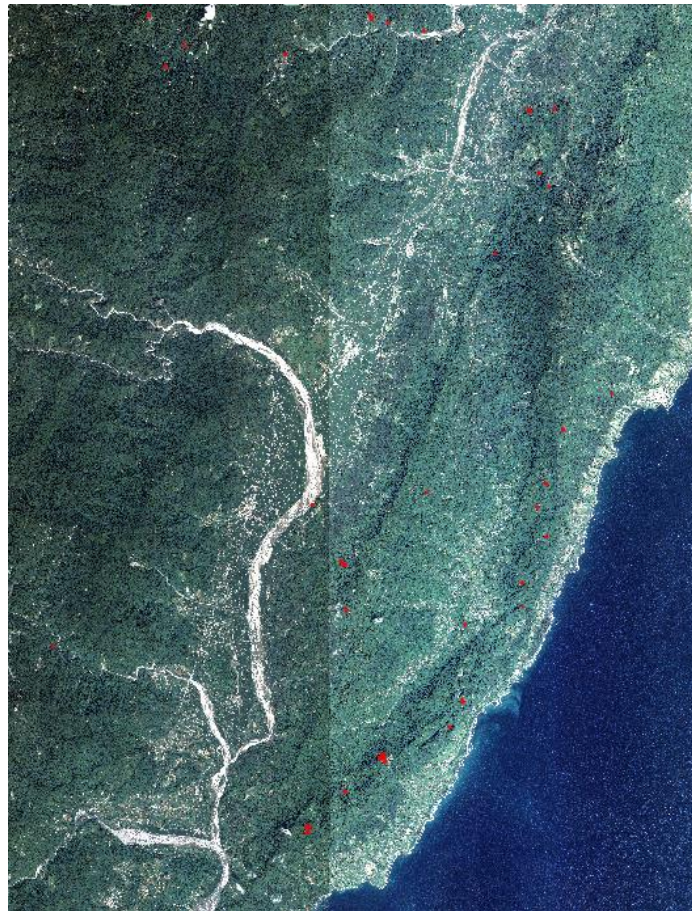


圖 5-22 2022 關山/池上地震事件衛星影像判釋成果 (BiGIS)

由表中可知新生崩塌地面積皆相當小，僅 1 處達 0.1 ha，其餘皆為零星崩塌。由於本研究崩塌之定義為坡面單元崩塌率達 5%，即表示一個 10 ha 之坡面單元至少有 0.5 ha 的崩塌，且最小崩塌面積為 0.22 ha (S3 級坡)，而坡面單元大多在數十至數百公頃之間，因此計算結果必定很難會有較大的崩塌面積估計值，如表 5-9 所示，實際上 45 處崩塌地無任何崩塌面積達到 0.22 ha，因此第 111 號地震事件不足以比對評估結果。

表 5-9 衛星影像判釋 45 處崩塌地統計

編號	崩塌面積	編號	崩塌面積	編號	崩塌面積	編號	崩塌面積
1	424.64	13	294.29	25	264.10	37	613.89
2	182.85	14	727.55	26	394.13	38	382.24
3	632.41	15	238.91	27	225.31	39	306.56
4	263.23	16	434.72	28	469.71	40	459.62
5	411.85	17	176.60	29	217.43	41	330.80
6	283.63	18	763.97	30	155.87	42	419.19
7	352.51	19	544.60	31	168.88	43	379.40
8	290.33	20	393.25	32	1112.04	44	418.01
9	273.55	21	289.80	33	490.79	45	936.10
10	347.13	22	250.45	34	185.60	合計	17567.97
11	294.73	23	389.85	35	373.71	單位：平方公尺	
12	165.44	24	445.46	36	392.85		

資料來源：BiGIS 系統。

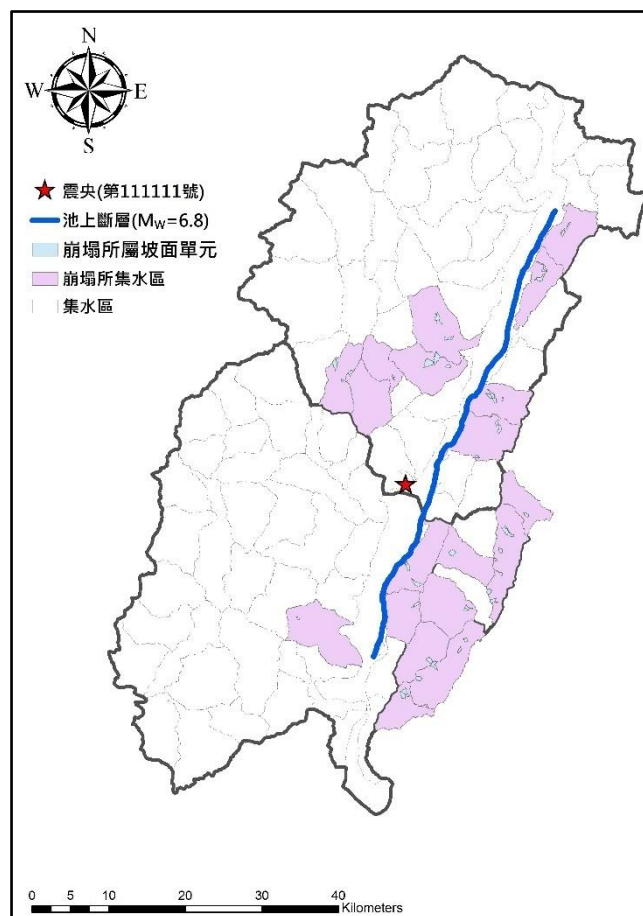


圖 5-23 2022 關山/池上地震事件崩塌所屬坡面單元

上述原因仍在於目前採用之坡面單元面積過大，經崩塌機率計算後容易得到很高之崩塌期望值。以第 111 號地震而言，規模 6.8 的能量對於實際要引致廣域崩塌仍有困難，因此本計畫以崩塌地所在坡面單元和集水區位置進一步分析比較，如圖 5-23 所示，可發現新生崩塌地所屬坡面單元的確仍在高震度區範圍內，雖然單一崩塌地面積比例相當小，但仍可發現崩塌地集中於池上斷層帶二側，且東側較西側多。

二、分析結果與討論

前節所述之震後崩塌快速評估和詳細評估結果，比較如表 5-10 所示。由表中可知以第 111 號地震進行分析，以 PGA 為因子之誤差達 19.7 ~ 31.6 %，而較具代表性之 PGV 為因子之誤差達 12.57 ~ 22.3 %，由此可知雖二個方法不同，但快速評估係簡化流程之方法，而詳細評估則解析度較高。前章曾說明二個方法之優缺點（表 4-14），但就發展 BigGIS 系統早期評估模組而言，快速評估有防災所需之時效性，而詳細評估亦有必要於災後進行。

表 5-10 震後崩塌快速評估和詳細評估結果比較

因子	崩塌面積	快速評估	詳細評估	誤差百分比
PGA	最小崩塌面積	419.36	287.04	31.6%
	可能最大崩塌面積	6503.85	5225.14	19.7%
PGV	最小崩塌面積	33.43	25.96	22.3%
	可能最大崩塌面積	1072.07	937.79	12.5%

資料來源：本計畫整理。

對於實際地震之驗證，本計畫進一步比對 BigGIS 衛星影像判釋成果和集水區風險等級評估結果。如表 5-11 所示，新生崩塌所在河川流域包含成功溪流域、卑南溪流域、秀姑巒溪流域和馬武溪流域等四流域，並涵蓋 17 個集水區，其中泥水溪、樂樂溪和東河農場等三處被評估為高風險區，鹿寮

溪、電光、舞樂山、巴瓦薩庫、帕郎薩克和七塊厝等八處由於未達啟動門檻，因此未被列為風險區，其它皆為中度風險區。整體而言，本計畫建議之震後崩塌風險等級評估方法尚可接受。

表 5-11 2022 關山/池上地震事件新生崩塌與集水區風險等級評估比較

河川流域	新生崩塌地所屬集水區 (風險等級評估)
成功溪流域	新港溪 (中度)
卑南溪流域	泥水溪 (高度)、鹿寮溪 (無)、電光 (無)
秀姑巒溪流域	樂樂溪 (高度)、馬西桑 (中度)、九岸溪 (中度)、阿眉溪 (中度)、高寮溪 (中度)、苓雅溪 (中度)、舞樂山 (無)、巴瓦薩庫 (無)、帕郎薩克 (無)
馬武溪流域	東河農場 (高度)、馬武溪 (中度)、都歷沿海 (中度)、七塊厝 (無)

資料來源：本研究整理。

總結前述分析及比較，崩塌評估的可靠度主要取決於震度推估是否準確，由於資料處理耗時耗力，在可接受的情況下提供防災資訊給相關業務單位具一定效益。此外，以風險等級管理將有利於未來農村水保署進行震後崩塌評估和進一步的減災策略擬定實務應用面參考，例如大規模震災後早期無人載具空拍對於高風險地區的派遣選擇、土石流潛勢溪流或大規模崩塌潛勢區降雨警戒值調降、集水區複合型土砂災害減災因應策略等之參考。

第五節 不同地震規模之坡地易損性影響分析

本計畫以不同地震規模探討震後崩塌變化及影響，並選定 5 條斷層評估全台之崩塌量體，分別為山腳斷層、車籠埔斷層、潮州斷層、池上斷層與觸口斷層，此五條斷層位置布於全台，基本能夠代表各區域斷層地質特性。由於地震誘發坡地崩塌之規模需一定程度以上，因此選定以規模 7.1 ~ 7.8 之地震進行模擬。以 PGA 為因子之崩塌評估結果如表 5-12 所示，崩塌量變化如圖 5-24~ 圖 5-25 所示，以 PGV 為因子之崩塌評估結果如表 5-13 所示，崩塌量變化如圖 5-26 ~ 圖 5-27 所示。

由表中可知，以 PGA 為因子之崩塌量較高，而以 PGV 為因子之崩塌量較低。以 PGA 為因子，在規模 7.1 時最小崩塌量約在百公頃以下，最大崩塌量可在數千公頃，在規模 7.8 時最小崩塌量約在百餘公頃，最大崩塌量接近二萬公頃。整體而言崩塌量體隨規模增大而提高，且增加幅度較 PGV 因子緩，尤其最大崩塌量增加幅度近似線性，雖各斷層之崩塌特性稍有不同，但大致具有相似的增量幅度與趨勢。

而以 PGV 為因子，在規模 7.1 時最小崩塌量幾乎為零，最大崩塌量可在千公頃以下，在規模 7.8 時最小崩塌量將近五百公頃，最大崩塌量接近三萬七千公頃。崩塌量體隨規模增大之增加幅度較陡而接近指數型，此處突顯 PGV 因子與 PGA 不同之處。同樣地，雖各斷層之崩塌特性稍有不同，但大致具有相似的幅度與趨勢。

此外，以 PGV 為因子，在地震規模 7.5 之前崩塌量體增加幅度較緩，而越大的地震規模則引致更高的崩塌量，這呼應新制震度分級表在高震度區以 PGV 定義的合理性，高震度區採用 PGV 作為震度指標將更能體現震級劃分和實際災害的嚴重程度的高相關性。須注意的是圖表中也顯示出較小地震規模時 PGA 之崩塌量體較 PGV 為高，而在較大地震規模時則反之。

表 5-12 不同地震規模下以 PGA 為因子之分析結果

斷層	山腳斷層		車籠埔斷層		潮州斷層		池上斷層		觸口斷層	
規模	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大
7.1	23	1486	14	3612	54	6260	82	4388	13	2604
7.2	34	1857	22	4623	74	7542	112	5444	19	3161
7.3	50	2335	35	5915	102	8996	155	6718	27	3844
7.4	72	2947	67	7550	143	10682	217	8255	38	4705
7.5	102	3700	110	9602	196	12630	299	10129	53	5753
7.6	135	4610	181	12103	257	14876	409	12383	76	7017
7.7	176	5703	277	15119	338	17375	540	15048	110	8520
7.8	223	6927	410	18703	440	20190	708	18154	153	10257

資料來源：本研究整理。單位：ha

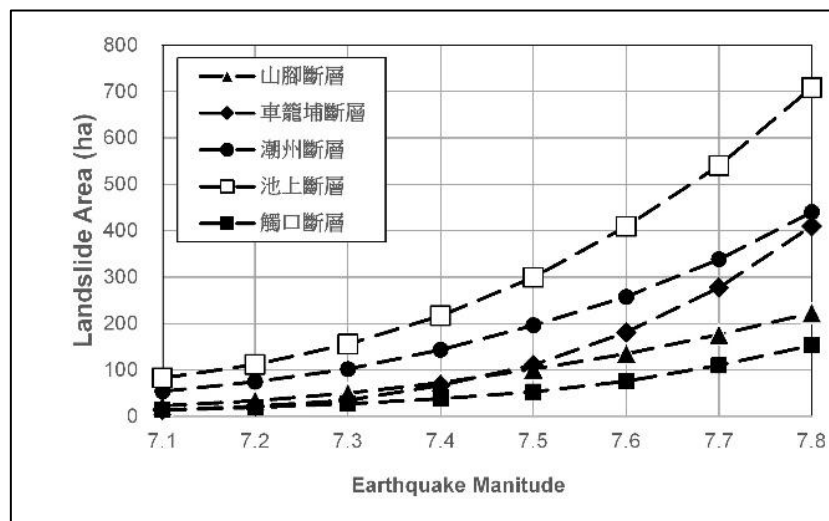


圖 5-24 不同規模最小崩塌量(PGA)

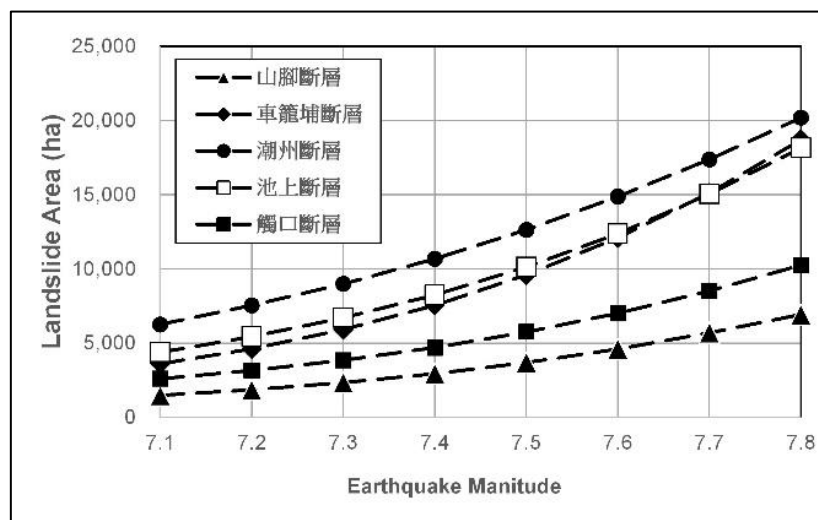


圖 5-25 不同規模最大崩塌量(PGA)

表 5-13 不同地震規模下以 PGV 為因子之分析結果

斷層	山腳斷層		車籠埔斷層		潮州斷層		池上斷層		觸口斷層	
規模	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大
7.1	0	259	0	337	0	768	0	389	0	472
7.2	1	351	0	640	1	1588	1	955	0	759
7.3	2	588	1	1299	11	2858	17	1931	2	1222
7.4	6	1067	6	2664	26	4814	47	3473	7	2023
7.5	34	2052	24	5492	70	7827	120	6146	19	3524
7.6	123	3996	169	11227	175	12171	342	10940	67	6272
7.7	282	7155	648	21347	380	18400	825	18899	223	10909
7.8	497	11436	1628	36799	734	26861	1632	30703	521	17944

資料來源：本研究整理。

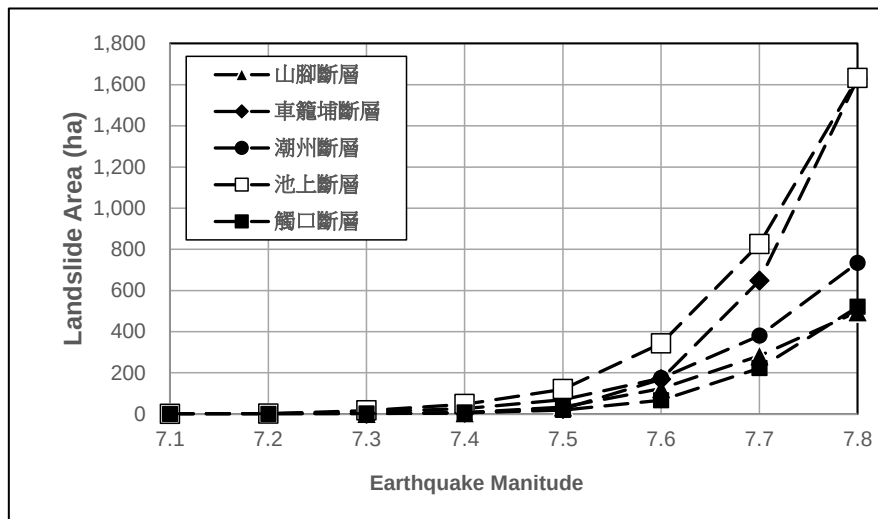


圖 5-26 不同規模最小崩塌量(PGV)

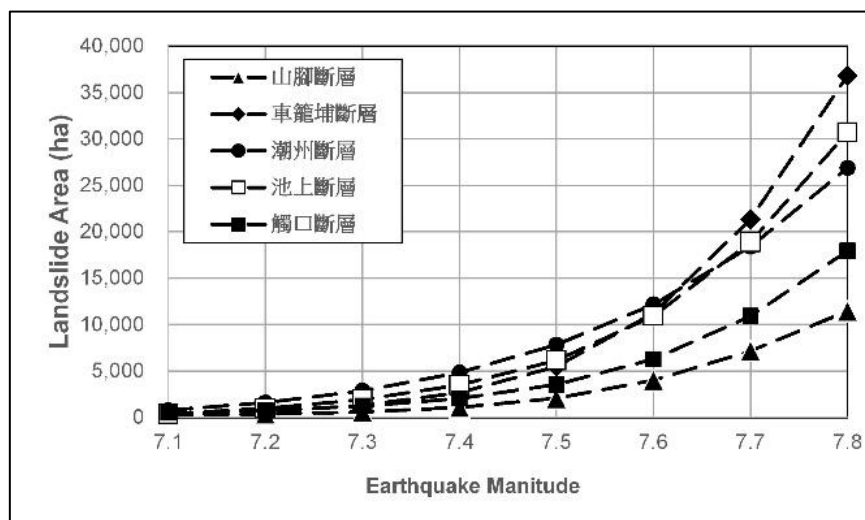


圖 5-27 不同規模最大崩塌量(PGV)

根據以上結果與討論，針對不同地震規模之影響分析可總結以下三點：

1. 以不同地震規模引致的崩塌風險而言，由於 PGA 因子評估結果近似線性，因此相較 PGV 較不敏感，這表示在相同震源下，對於不同地震規模之坡地崩塌風險並不會有太大差別。反之，PGV 則較敏感，不同規模地震對於坡地崩塌風險將會不同。
2. 根據 PGV 之數據所示，可以將地震規模以 7.6 為界分為二部分，前段為近似線性段，後段為陡增段，並以各斷層評估結果之平均值進行多項式擬合：

(1) 最小崩塌量：(正規化)

$$y = 9.2546x^4 - 267.28x^3 + 2894.6x^2 - 13931x + 25142 \quad R^2 = 0.99$$

(2) 最大崩塌量：(正規化)

$$y = 4.0523x^3 - 87.636x^2 + 631.94x - 1519.4 \quad R^2 = 0.99$$

最小崩塌量為 4 次曲線，相較最大崩塌量又更敏感。這顯示完全符合崩塌定義的最小崩塌量是具有敏感性的，不同的坡面單元分類鑑別度明顯，而最大崩塌量是屬於最悲觀估計，考慮的是坡面完全崩塌的情況，但這實際上是非常保守的估計。

3. 由 PGV 之分析結果可知，地震規模增加產生的能量釋放（依每增加 0.2 能量增加一倍），對於崩塌期望值急遽增加的結果，相較 PGA 則無此現象，因此以 PGV 為指標應為合理且符合防災需求。

第六章 高風險聚落震後快速評估

第一節 高風險聚落選定

本計畫以東部花蓮地區之池上斷層為研究對象，以 112 年公布之 48 處大規模崩塌優先辦理潛勢區為選定聚落，如表 6-1 所示，其中花蓮縣共有五處，分別為卓溪鄉太平村 (D007)、卓溪鄉卓溪村 (D010)、玉里鎮樂合里 (D018)、瑞穗鄉舞鶴村 (D024) 以及富里鄉富南村 (T004)，如表 6-2 所示。

表 6-1 112 年 48 處大規模崩塌優先辦理潛勢區（警戒發布區）

序號	編號	縣市鄉鎮	序號	編號	縣市鄉鎮
1	T002	宜蘭縣大同鄉太平	25	D003	新北市汐止區東山
2	D018	花蓮縣玉里鎮樂合	26	D024	新竹縣五峰鄉大隘
3	D007	花蓮縣卓溪鄉太平	27	D052	新竹縣尖石鄉秀巒
4	D010	花蓮縣卓溪鄉卓溪	28	D077	新竹縣尖石鄉秀巒
5	T004	花蓮縣富里鄉富南	29	D097	新竹縣尖石鄉秀巒
6	D024	花蓮縣瑞穗鄉舞鶴	30	T001	新竹縣尖石鄉梅花
7	D066	南投縣仁愛鄉精英	31	T002	嘉義縣中埔鄉東興
8	T002	南投縣國姓鄉南港	32	T002	嘉義縣竹崎鄉文峰
9	D006	南投縣鹿谷鄉和雅	33	T003	嘉義縣竹崎鄉白杞
10	T001	屏東縣來義鄉來義	34	D098	嘉義縣阿里山鄉山
11	D038	屏東縣霧臺鄉佳暮	35	D187	嘉義縣阿里山鄉香
12	T002	屏東縣霧臺鄉阿禮	36	T001	嘉義縣梅山鄉瑞里
13	D026	苗栗縣泰安鄉中興	37	D004	嘉義縣番路鄉公田
14	D021	桃園市復興區華陵	38	D016	臺中市和平區梨山
15	D052	桃園市復興區華陵	39	D036	臺中市和平區梨山
16	T002	桃園市復興區羅浮	40	D052	臺中市和平區梨山
17	D015	高雄市六龜區新發	41	T003	臺中市和平區達觀
18	T001	高雄市六龜區興龍	42	D021	臺東縣大武鄉大鳥
19	D044	高雄市甲仙區大田	43	D022	臺東縣大武鄉大鳥
20	D047	高雄市甲仙區和安	44	D003	臺東縣太麻里鄉三
21	D021	高雄市杉林區新庄	45	D029	臺東縣太麻里鄉多
22	D048	高雄市茂林區萬山	46	T001	臺東縣延平鄉紅葉
23	D382	高雄市桃源區寶山	47	T002	臺東縣延平鄉紅葉
24	T001	新北市石碇區豐田	48	D002	臺東縣金峰鄉新興

資料來源：農業部農村發展及水土保持署 (2023)。

表 6-2 花蓮縣 5 處大規模崩塌潛勢區

序號	編號	縣市鄉鎮村里	面積(ha)	風險	保全戶
1	D007	花蓮縣卓溪鄉太平村	43.1	高	50 戶以上
2	D010	花蓮縣卓溪鄉卓溪村	4.8	中	20 ~ 49 戶
3	D018	花蓮縣玉里鎮樂合里	26.6	中	20 ~ 49 戶
4	D024	花蓮縣瑞穗鄉舞鶴村	37.0	中	10 戶以下
5	T004	花蓮縣富里鄉富南村	58.2	中	10 ~ 19 戶

資料來源：農業部農村發展及水土保持署。

由表中可知，五處大規模崩塌潛勢區之面積在 4.8~58.2 ha 之間，並具備一定保全對象，與池上斷層之相關位置如圖 6-1 所示，五處皆與池上斷層鄰近，其中卓溪鄉卓溪村 (D010)、富里鄉富南村 (T004) 同時鄰近土石流潛勢溪流，分別為花縣 DF049 和花縣 DF055，適合作為本計畫之優選地區。

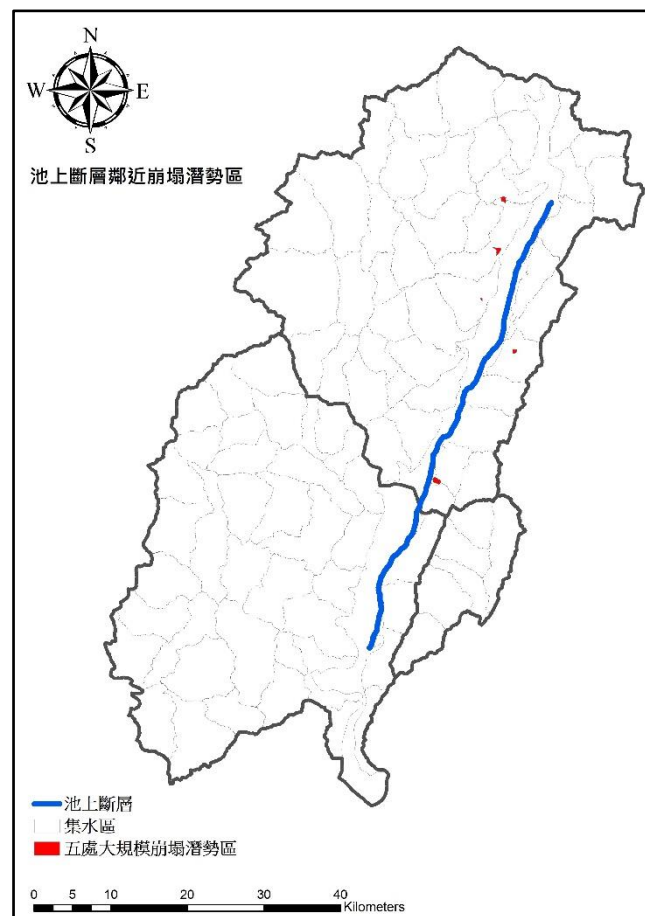


圖 6-1 池上斷層鄰近五處大規模崩塌潛勢區

卓溪鄉太平村 (D007) 與瑞穗鄉舞鶴村 (D024)，皆位於崙山集水區內，圖 6-2 所示。崙山集水區總面積 4705.2 ha，共有 146 個坡面單元，坡面單元面積分布為 1.7~186.2 ha 之間，主要為 S1 及 S2 級坡。

卓溪鄉太平村之大規模崩塌地面積為 43.1 ha，影響範圍 79.0 ha，距離池上斷層為 2.87 km，具 50 戶以上保全戶，被列為高風險潛勢區。

瑞穗鄉舞鶴村之大規模崩塌地面積為 37 ha，影響範圍 26.4 ha，距離池上斷層為 5.30 km，具 10 戶以下保全戶，被列為中風險潛勢區。



圖 6-2 崙山集水區之卓溪鄉太平村與瑞穗鄉舞鶴村潛勢區

卓溪鄉卓溪村 (D010) 位於崙山集水區內，如圖 6-3 所示。崙山集水區總面積 3987.6 ha，共有 159 個坡面單元，坡面單元面積分布為 3.4~91.5 ha 之間，各級坡分布較均勻。

卓溪鄉卓溪村之大規模崩塌地面積僅 4.8 ha，影響範圍 8.4 ha，距離池上斷層為 3.40 km，具 20~49 戶保全戶，被列為中風險潛勢區。

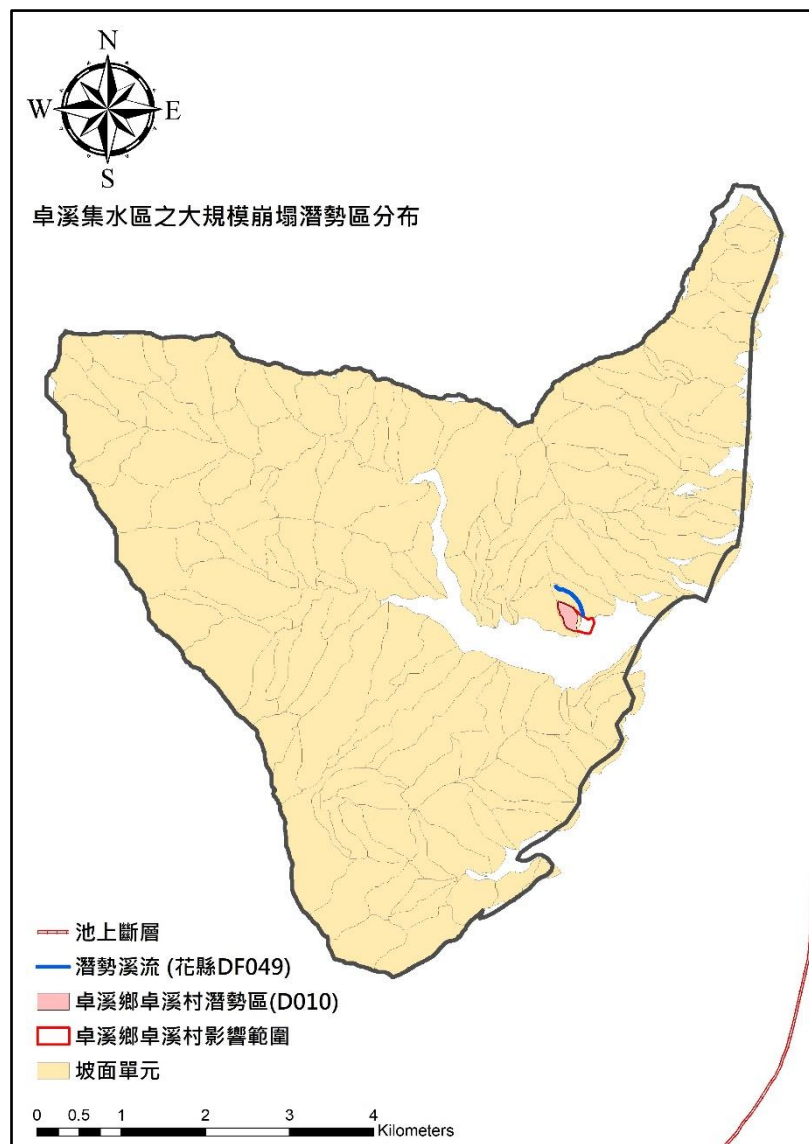


圖 6-3 卓溪集水區之卓溪鄉卓溪村潛勢區

玉里鎮樂合里 (D018) 位於安通溪集水區內，如圖 6-4 所示。安通溪集水區總面積 3046.0 ha，共有 160 個坡面單元，坡面單元面積分布為 2.0 ~ 82.0 ha 之間，各級坡分布較均勻。

玉里鎮樂合里之大規模崩塌地面積僅 26.6 ha，影響範圍 40.1 ha，距離池上斷層為 1.9 km，具 20 ~ 49 戶保全戶，被列為中風險潛勢區。

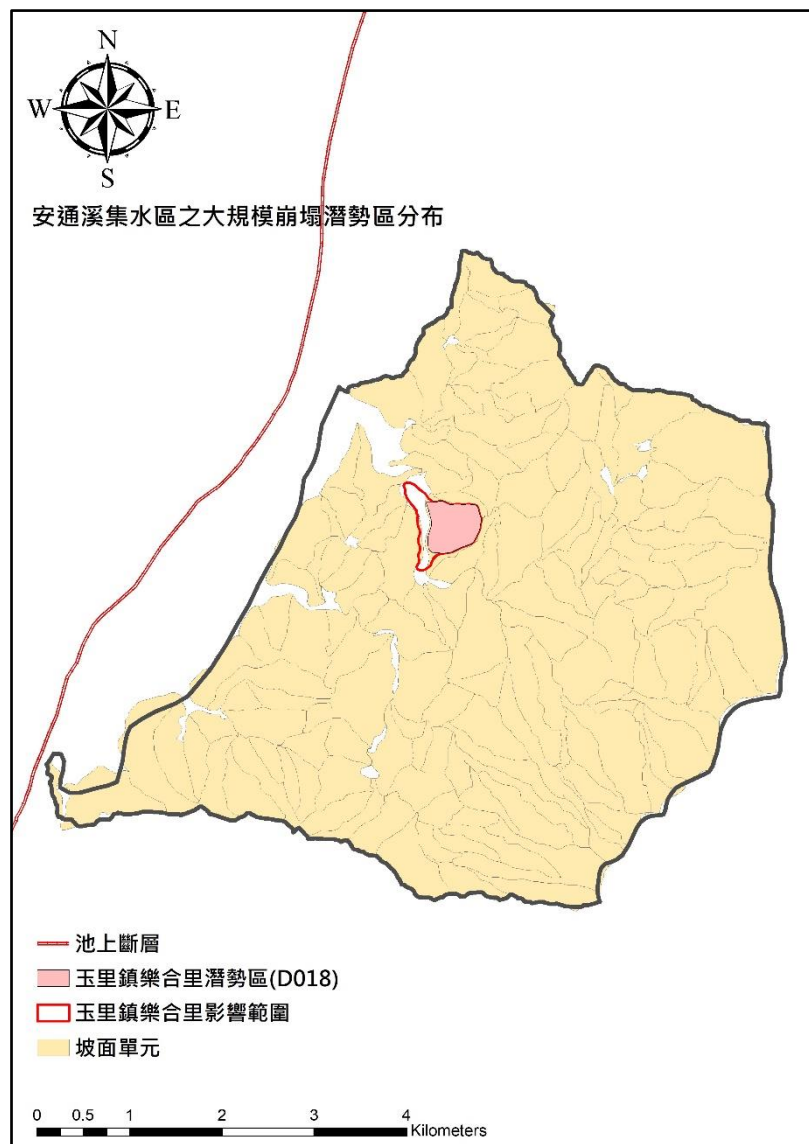


圖 6-4 安通集水區之玉里鎮樂合里潛勢區

富里鄉富南村 (T004) 位於敖溪集水區內，如圖 6-5 所示。敖溪集水區總面積 222.3 ha，共有 118 個坡面單元，坡面單元面積分布為 1.6~128.0 ha 之間，主要為 S1 級坡，少數 S2、S3 級坡。

富里鄉富南村之大規模崩塌地面積僅 58.2 ha，影響範圍 67.2 ha，距離池上斷層為 472 m，具 10~19 戶保全戶，被列為中風險潛勢區。

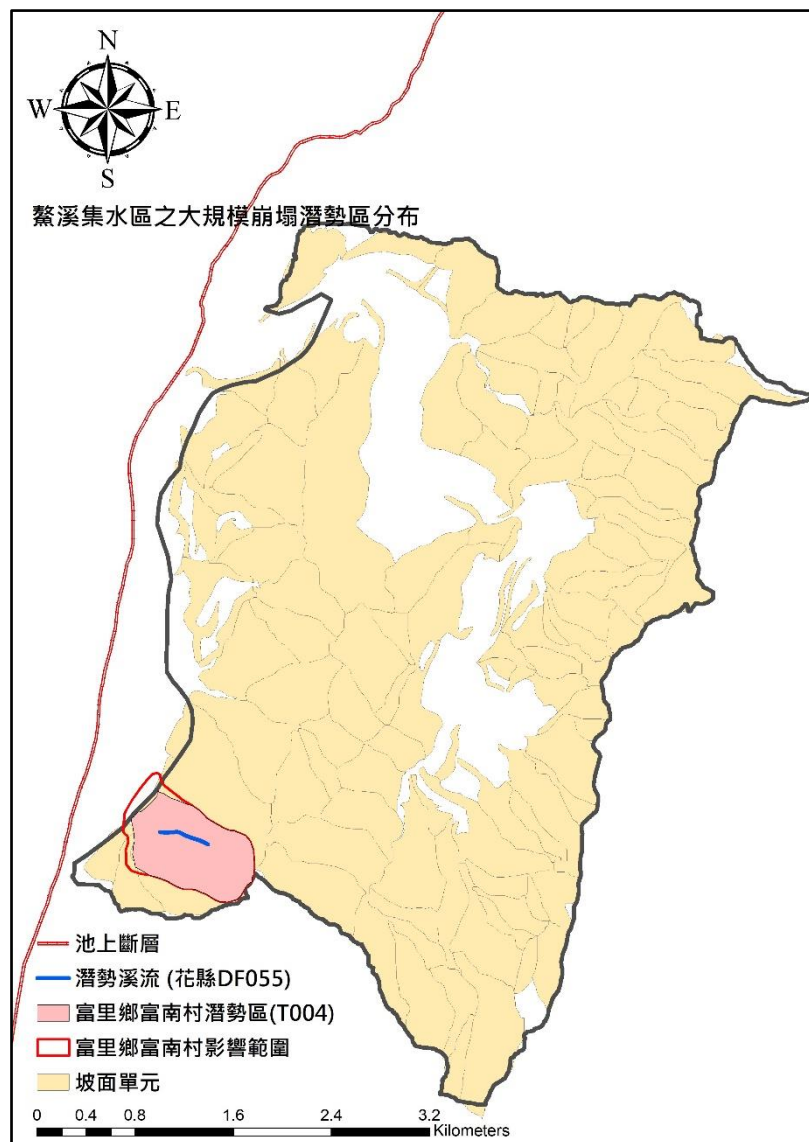


圖 6-5 敖溪集水區之富里鄉富南村潛勢區

第二節 高風險聚落鄰近坡面單元研析

本計畫採用之坡面單元圖資係中央地質調查所於 108 年根據 20m-DEM 所產製，其面積大小在 0.11 ha 至 524.78 ha 之間，這個空間尺度的差異對於以統計機率為基礎的評估來說，樣本權重的差異對於結果將產生一定的誤差，因此有必要針對評估單元的大小進行研析和進一步討論其合適性。

對於較小之坡面單元，由於本研究所定義一個坡面單元之崩塌最小崩塌面積為 0.22 ha (S3 級坡)，因此以 S3 級坡為例，如式 4-2 所示，評估過程中根據坡面單元原始面積計算所得之崩塌期望值若小於 0.22 ha 則表示未崩塌，這也表示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，坡面單元崩塌要達到數十甚或數百公頃已屬大規模崩塌之範疇，已非本研究廣域淺層崩塌的研究範圍，這也是評估結果傾向高估或是相當保守的原因之一，因此有必要檢討坡面單元大小的適合度。

本研究為使估計易損性參數時樣本保持一致性，建立坡地易損性曲線時於研究區自行劃分之坡面單元樣本，已限制坡面單元之大小為 3~10 ha；然而在實際應用於震後坡地易損性評估時，採用的是中央地質調查所產製之全國坡面單元，主要原因係自行產製較小之全國坡面單元耗時費力而不切實際。基於此，建議針對未來評估模式的精進作為，可採取三個策略：

- 一、對於坡地崩塌易損評估模式，修正優先以高風險聚落為對象細化這些地區之坡面單元，例如以大規模崩塌地、土石流潛勢溪流、地質敏感地、保全聚落等地區為評估管理目標，減輕產製全國坡面單元之資源負擔。
- 二、規劃自行分年產製適合作為坡地崩塌評估之全國坡面單元。探討目前坡面單元劃分方法之優劣，律定坡面單元劃設方法，建立適

於作為坡地管理之管理單元之標準，逐步分區分年建置集水區坡面單元資料庫。

三、發展網格式評估單元亦是可以選擇的方式之一，網格單元雖較無地形物理特性，但其樣本均一因此無面積大小不確定因素的影響。實際上，網格也可以組成任意坡面形狀，因此對於坡面評估也是相當彈性的。

上述第一項中，既有之高風險聚落與坡面單元之大小關係可參考本章第一節所述，可知的確有細化之必要，本計畫即以第一節所選定之五處高風險聚落為示範，針對大規模崩塌地周邊之坡面單元、以及集水區中較大之坡面單元進行部分之細化評估以利檢討快速評估的成效。

一般國內常見的坡面單元劃分方法為集水區重疊法，係先將分析區域之坡地劃分出來，考量單一坡地致災可能性之後可剔除不適用區域，如圖 6-6 所示。集水區重疊法首先以原始數值高程模型進行集水區分析，再將數值高程模型高低值反轉，山稜線會反轉為河谷線；接著同樣進行集水區分析，將兩次分析所得到的集水區結合，利用 GIS 之分割功能，將原集水區分割為左右兩坡面單元，如圖 6-7 所示。圖中顯示編號 1 之集水區係藉由數值高程模型之集水區分析得到，編號 2 和編號 3 則係利用反轉 DEM 得到。

而本研究為使後續成效比較上有一致性，採用之方法首先是維持既有之坡面單元範圍，且不再細化大規模崩塌潛勢區之坡面單元，而因原始坡面單元已破壞原本集水區地形規則，因此要以一般之坡面單元劃分方法即無法使用，而是以 GIS 工具半自動的方式調整坡面單元。

在實際細化過程中，坡面單元是以人工方式調整，主要控制在 25 公頃以內，但某些坡面單元繪製時若以此規則細化其地形起伏不合理。因此，部分坡面單元藉由坡向與山影圖檢視，並無明顯的地形起伏，則無須再編修，因此會有部分坡面單元大於 25ha。對於小於 3ha 之坡面單元，再與三維立

體地圖比對，小於 3ha 之坡面單元則會與鄰近之坡面單元合併。

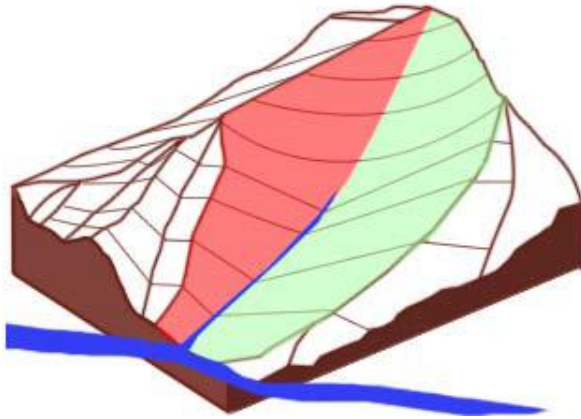


圖 6-6 坡面單元示意圖

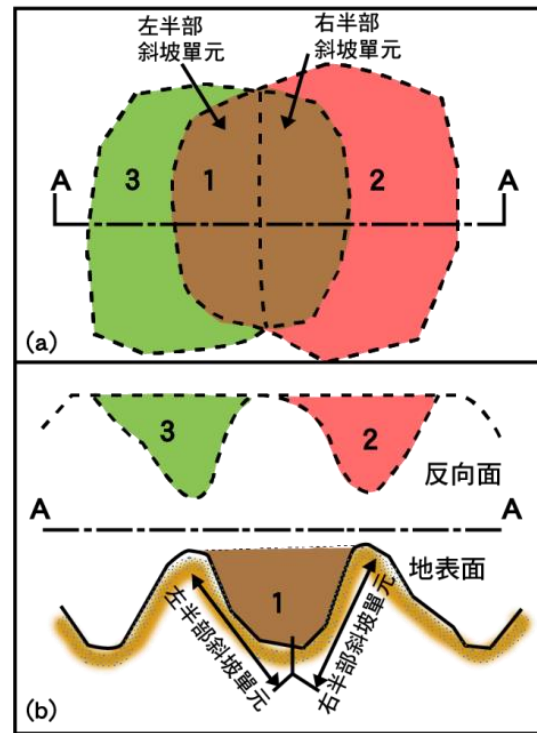


圖 6-7 集水區重疊法示意圖

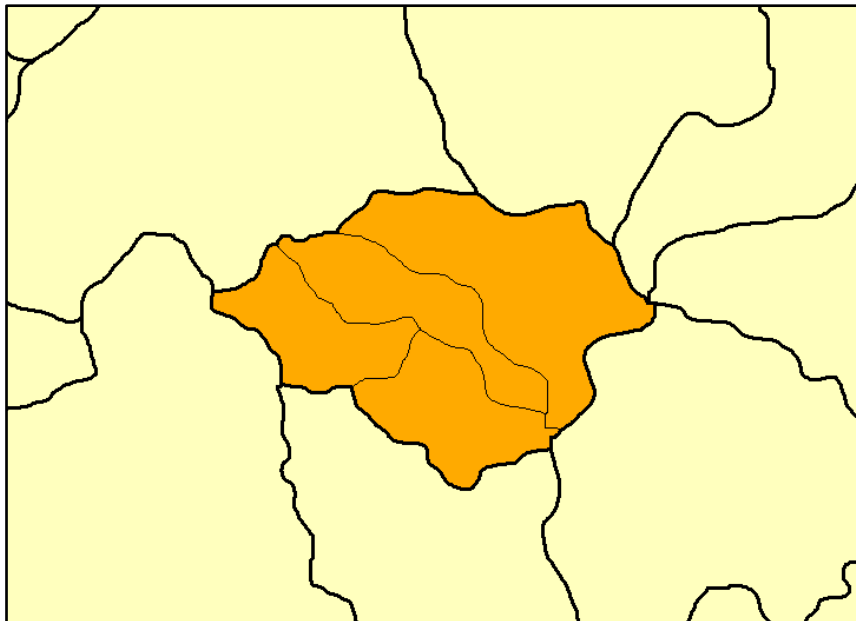


圖 6-8 坡面單元細化示意圖

第三節 高風險聚落震後快速評估

本節將以第一節所述之五個大規模崩塌潛勢區所包含之四個集水區為例，進行高風險聚落之震後快速評估。由於過往實際地震之規模皆不足以校驗坡面單元細化之效果，因此以模擬地震情境的方式針對細化前後之坡面單元進行崩塌易損評估比較。選定之地震參數以池上斷層誘發規模 7.2 之地震，採線震源分布使足以啟動地震情境模擬，以式 (3-9) 分析地表速度分布，再根據第四章所述之評估流程進行分析。

各集水區評估之地表速度分布如圖 6-9 ~ 圖 6-12 所示，再經由坡地易損性曲線，即可得到各坡面單元之崩塌機率，如圖 6-13 ~ 圖 6-16 所示。需說明的是，坡面單元細化不會大幅影響地表速度分布和崩塌機率值，因此坡面單元細化前後之地表速度分布和崩塌機率值皆假定相同，且坡面分類亦相同，以利於後續針對坡面單元幾何之面積大小進行討論。

在最小崩塌面積方面，坡面單元細化前、後之評估結果分別如圖 6-17 ~ 圖 6-20 和圖 6-21 ~ 圖 6-24 所示，分析結果顯示坡面單元細化後之最小崩塌面積大幅減小，崙山集水區之崩塌範圍在 0.00 ~ 0.26 ha 之間；鰲溪集水區之崩塌範圍在 0.00 ~ 1.75 ha 之間；卓溪和安通溪則無崩塌。

在可能最大崩塌面積方面，坡面單元細化前、後之評估結果分別如圖 6-25 ~ 圖 6-28 和圖 6-29 ~ 圖 6-32 所示，同樣地在分析結果顯示坡面單元細化後之可能最大崩塌面積亦大幅減小，崙山集水區之崩塌範圍在 0.00 ~ 2.68 ha 之間；卓溪集水區之崩塌範圍在 0.00 ~ 2.02 ha 之間；安通溪集水區之崩塌範圍在 0.00 ~ 2.12 ha 之間；鰲溪集水區之崩塌範圍在 0.00 ~ 18.34 ha 之間，皆與未細化前差異極大。且鰲溪集水區具有較高崩塌期望值之坡面單元，即是富里鄉富南村之大規模崩塌潛勢區。

一、集水區之震度分布

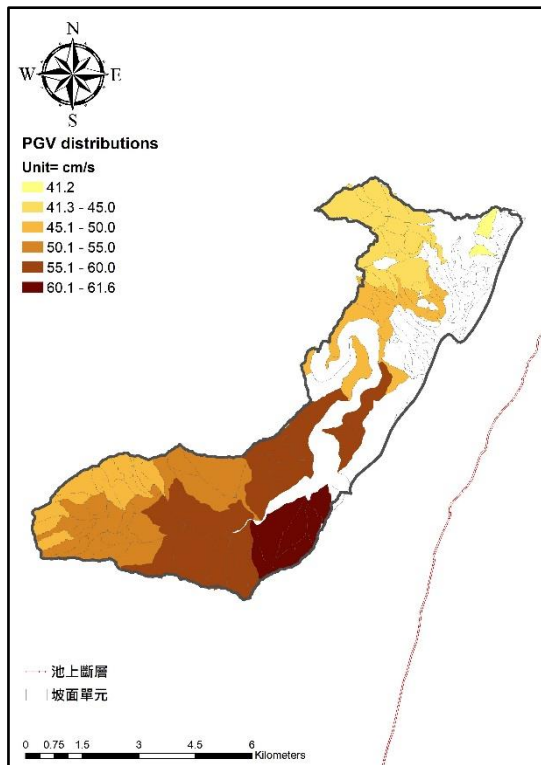


圖 6-9 崙山集水區之震度分布

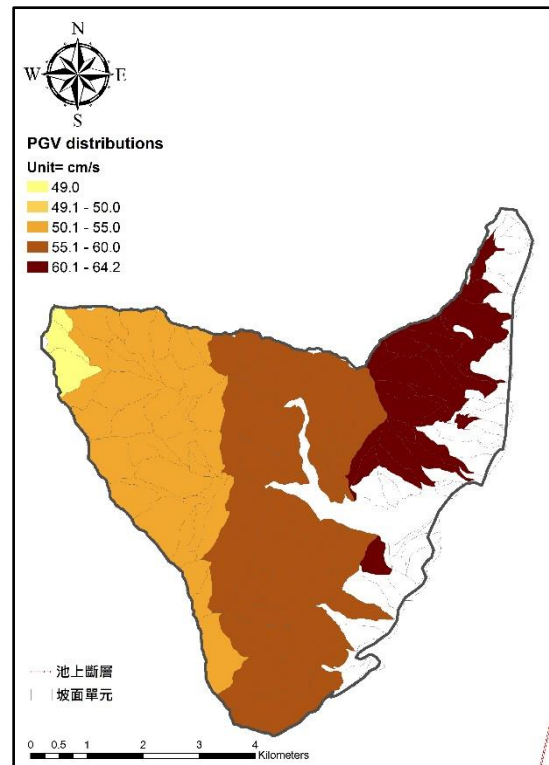


圖 6-10 卓溪集水區之震度分布

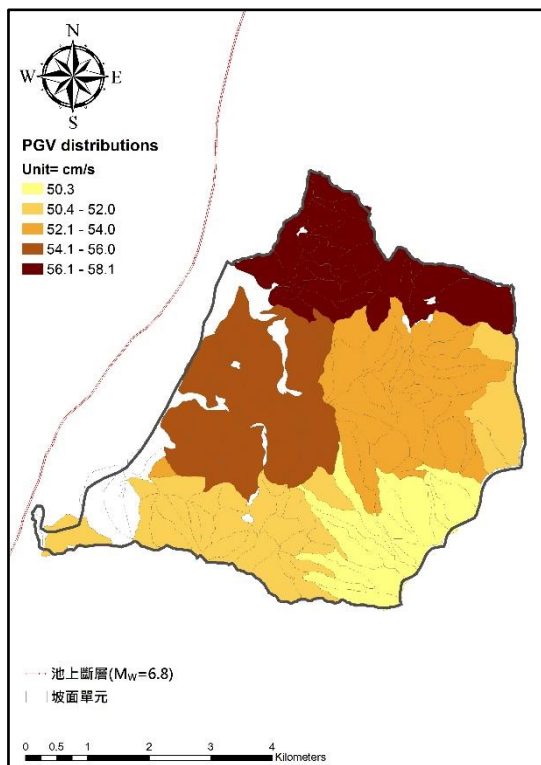


圖 6-11 安通集水區之震度分布

資料來源：本計畫製作。

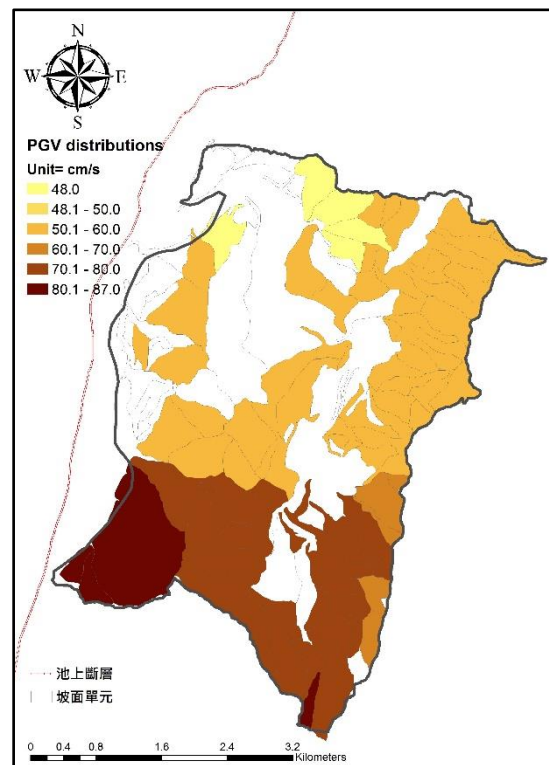


圖 6-12 鰲溪集水區之震度分布

二、集水區之崩塌機率

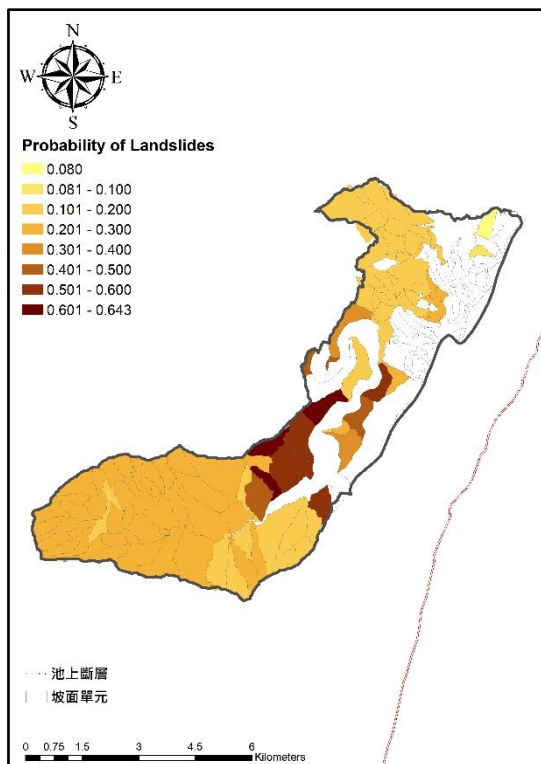


圖 6-13 崙山集水區之崩塌機率

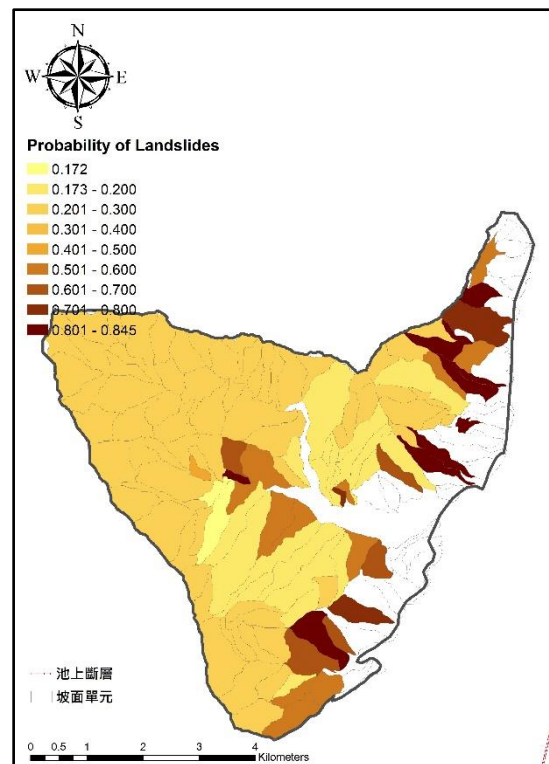


圖 6-14 卓溪集水區之崩塌機率

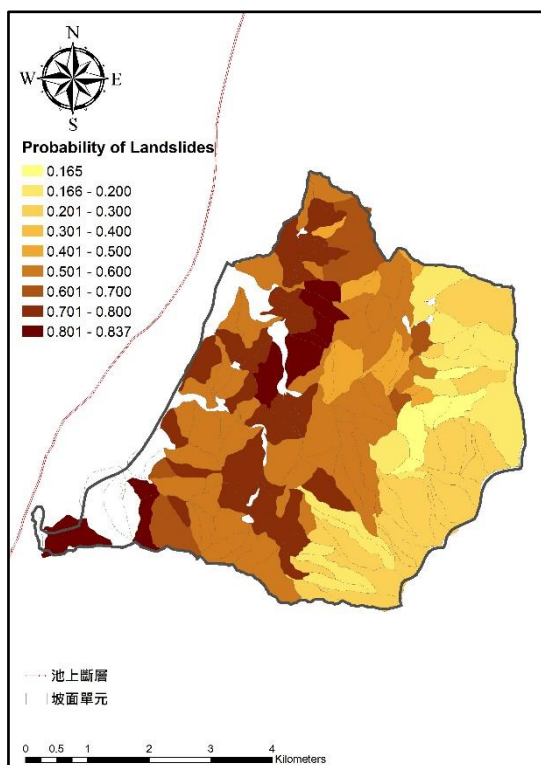


圖 6-15 安通集水區之崩塌機率

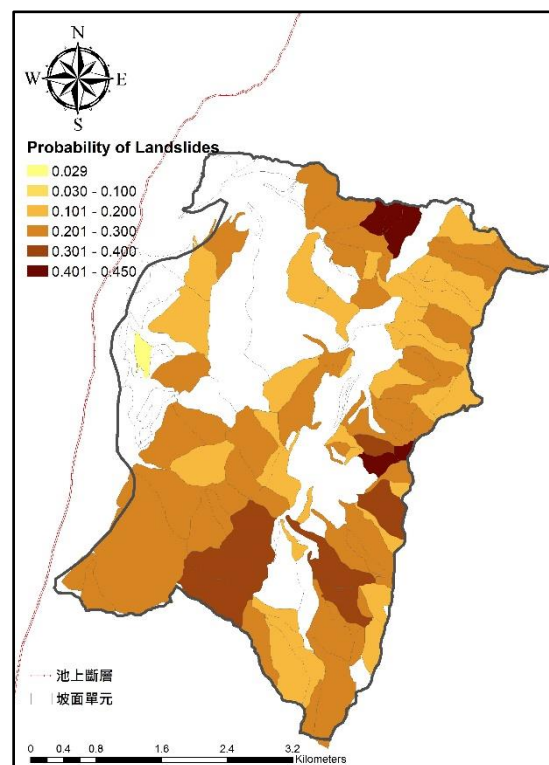


圖 6-16 鰲溪集水區之崩塌機率

資料來源：本計畫製作。

三、坡面單元細化前之最小崩塌面積

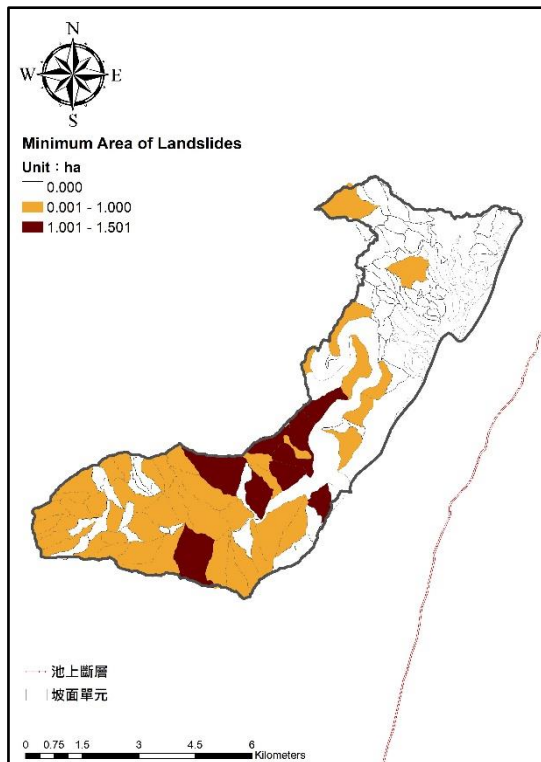


圖 6-17 崙山集水區坡面單元細化前之最小崩塌面積

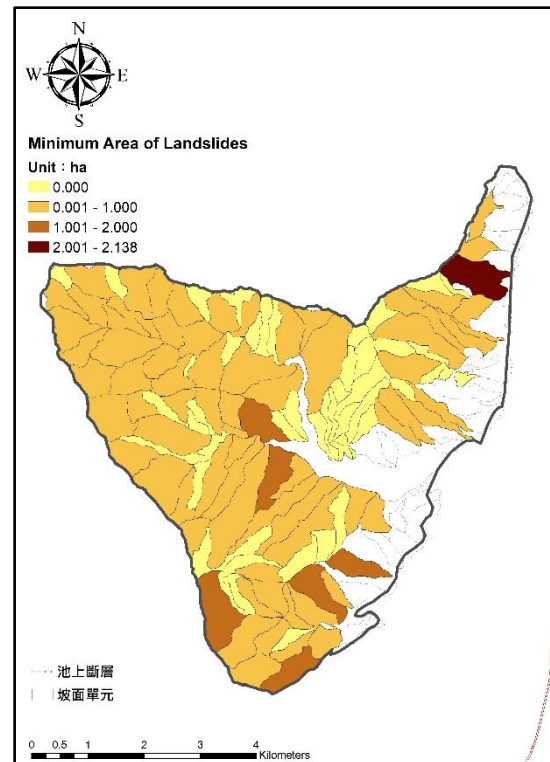


圖 6-18 卓溪集水區坡面單元細化前之最小崩塌面積

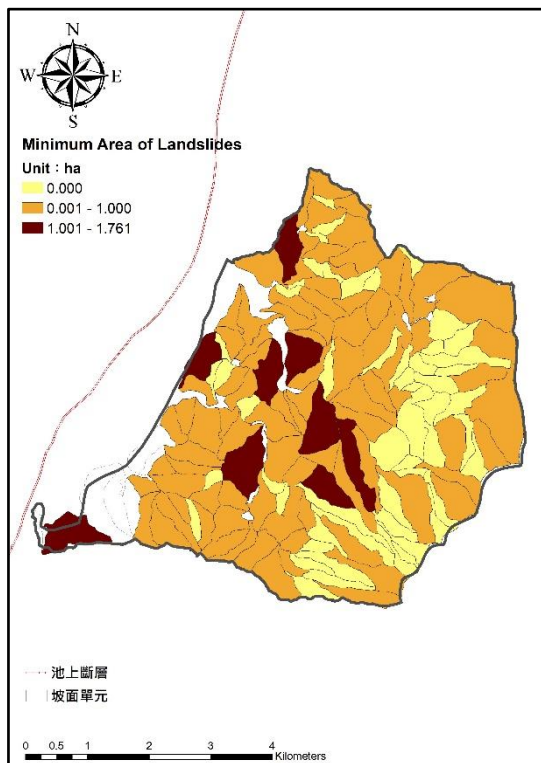


圖 6-19 安通集水區坡面單元細化前之最小崩塌面積

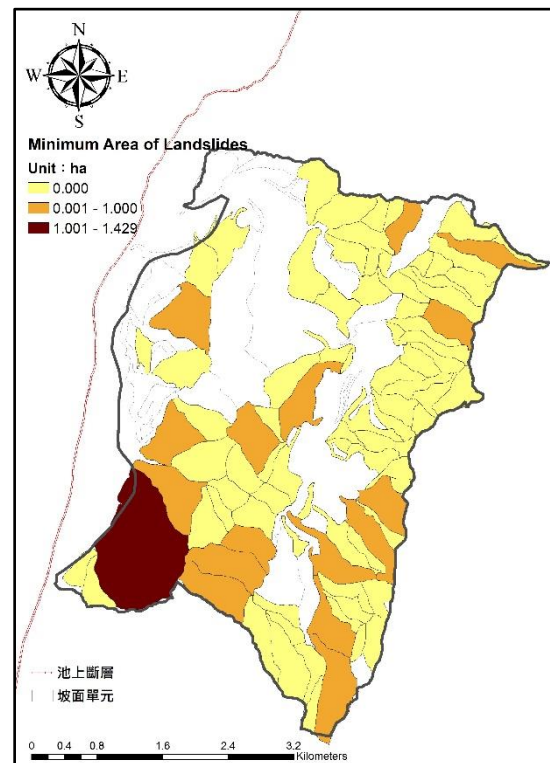


圖 6-20 鰲溪集水區坡面單元細化前之最小崩塌面積

資料來源：本計畫製作。

四、坡面單元細化後之最小崩塌面積

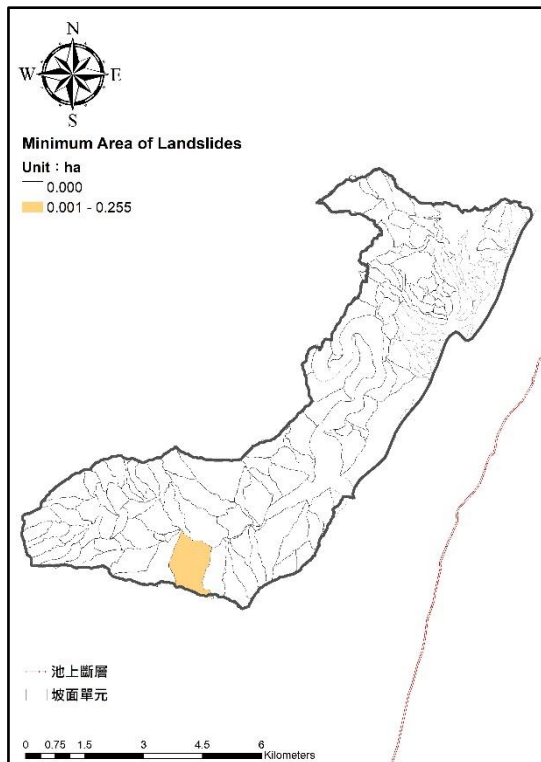


圖 6-21 崙山集水區坡面單元細化後之最小崩塌面積

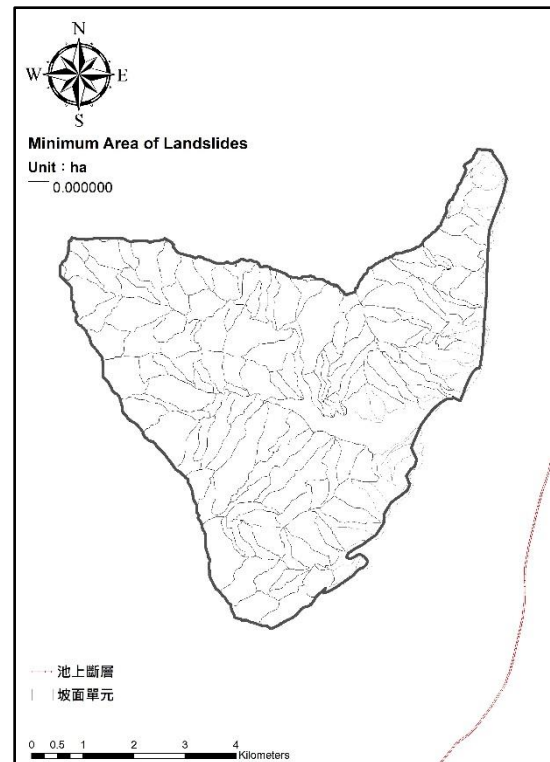


圖 6-22 卓溪集水區坡面單元細化後之最小崩塌面積

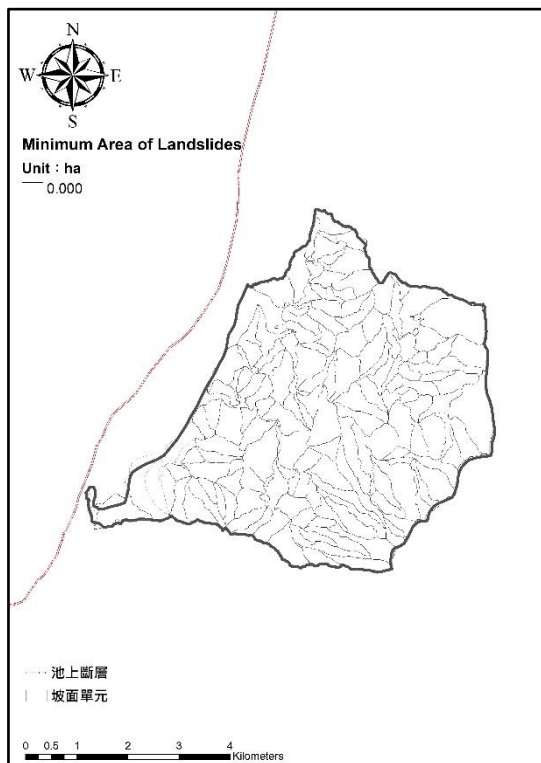


圖 6-23 安通集水區坡面單元細化後之最小崩塌面積

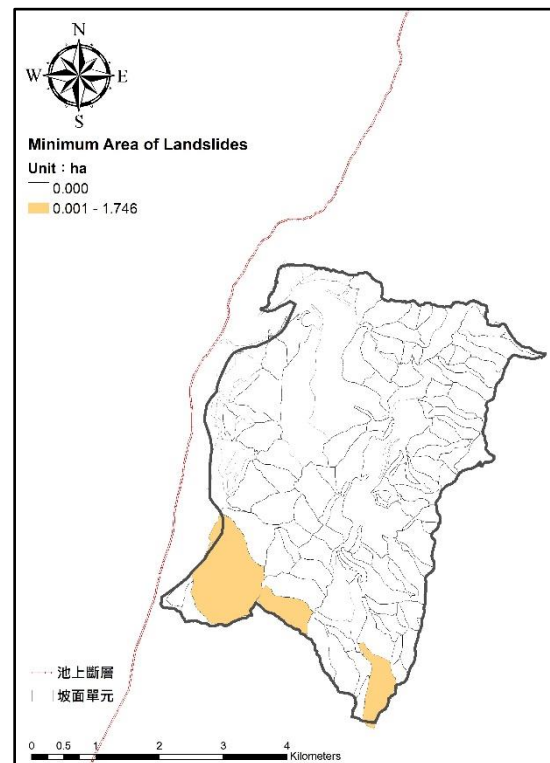


圖 6-24 鰲溪集水區坡面單元細化後之最小崩塌面積

資料來源：本計畫製作。

五、坡面單元細化前之可能最大崩塌面積

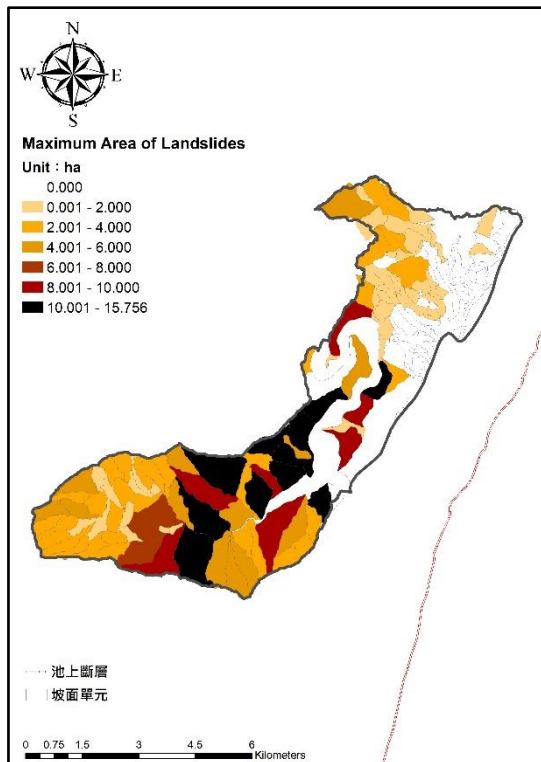


圖 6-25 崙山集水區坡面單元細化前之可能最大崩塌面積

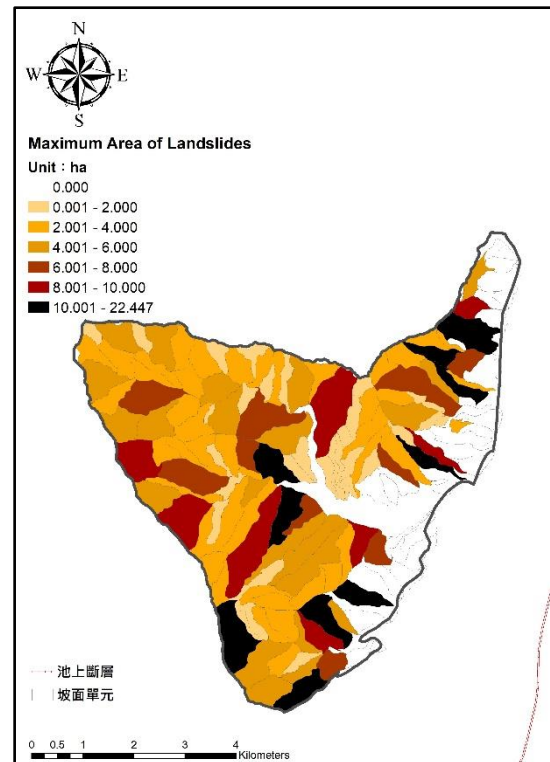


圖 6-26 卓溪集水區坡面單元細化前之可能最大崩塌面積

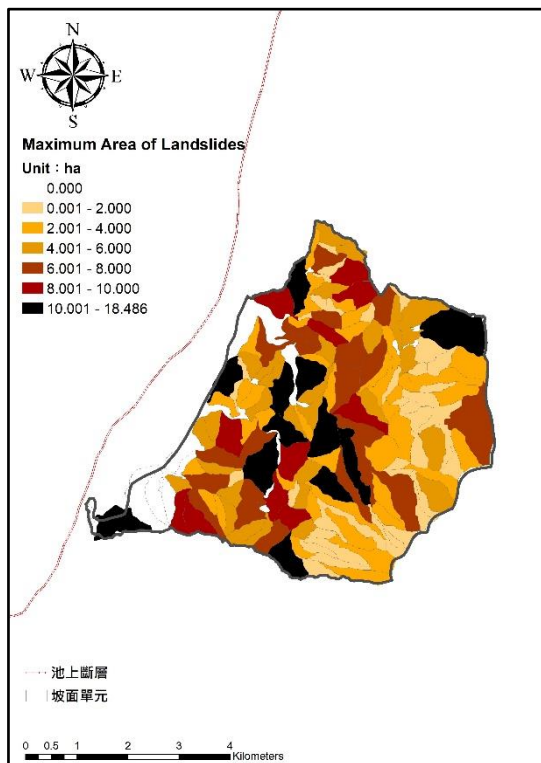


圖 6-27 安通集水區坡面單元細化前之可能最大崩塌面積

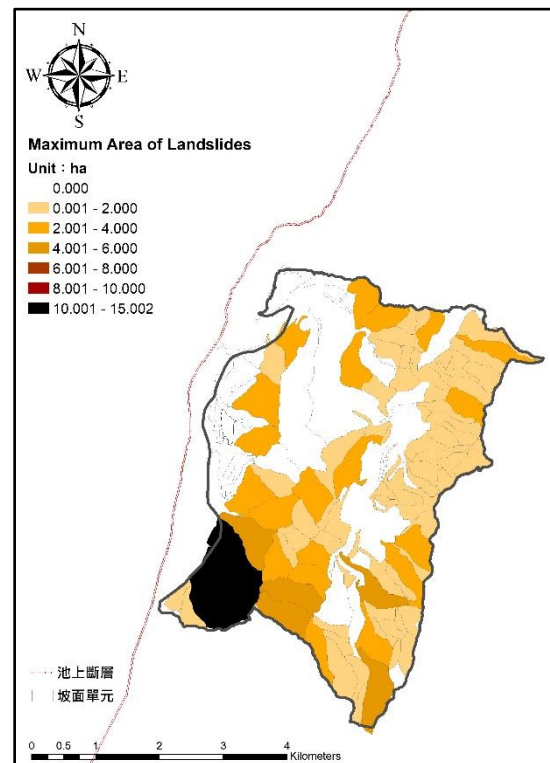


圖 6-28 鰲溪集水區坡面單元細化前之可能最大崩塌面積

資料來源：本計畫製作。

六、坡面單元細化後之可能最大崩塌面積

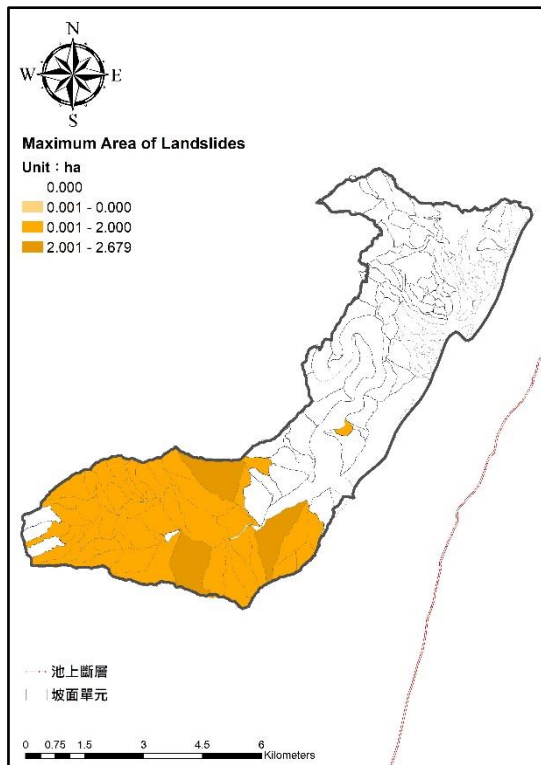


圖 6-29 崙山集水區坡面單元細化後之可能最大崩塌面積

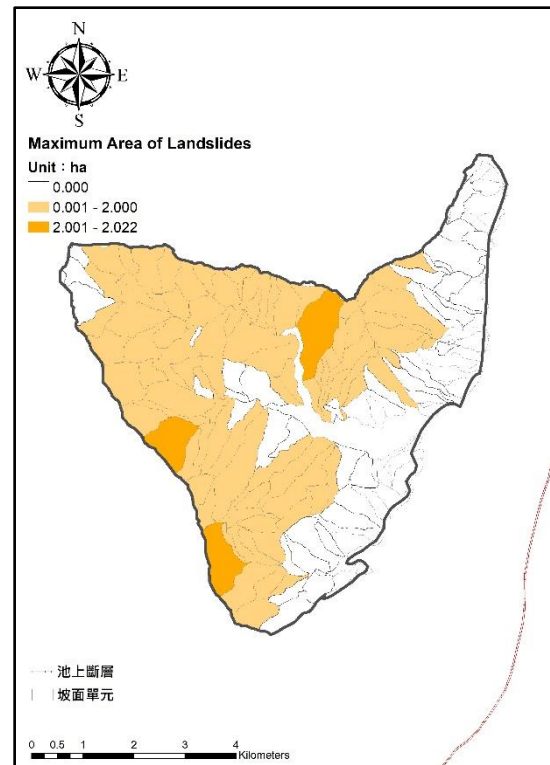


圖 6-30 卓溪集水區坡面單元細化後之可能最大崩塌面積

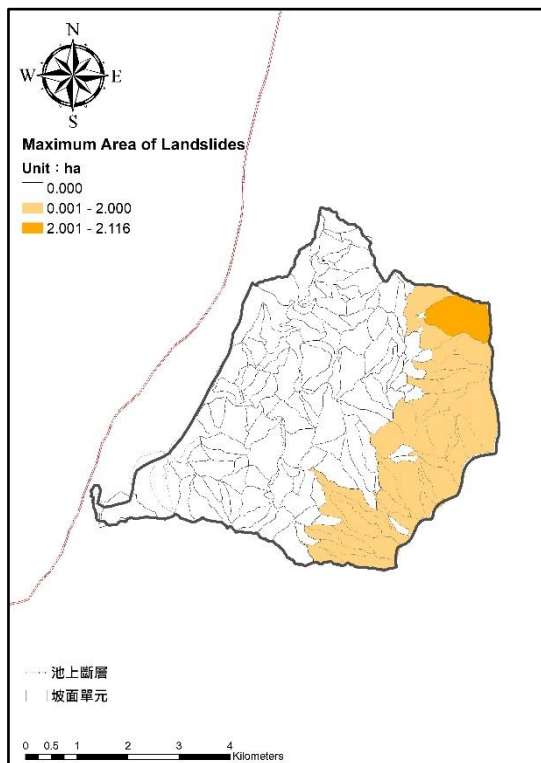


圖 6-31 安通集水區坡面單元細化後之可能最大崩塌面積

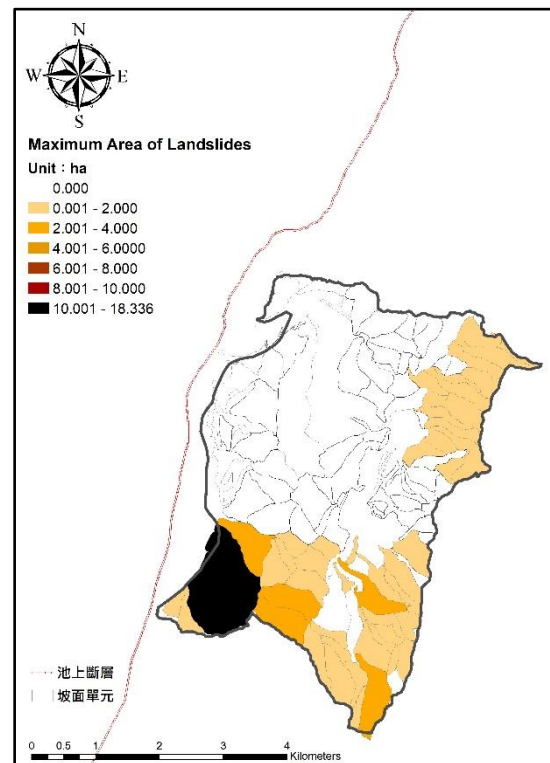


圖 6-32 鰲溪集水區坡面單元細化後之可能最大崩塌面積

資料來源：本計畫製作。

第四節 評估結果比較與討論

本研究根據前節分析結果，比較在坡面單元細化前後之崩塌期望值，繪製如表 6-3 和表 6-4 所示。表中顯示細化後之崩塌期望值減少，主要原因在於原始計算之面積大幅減少，使得許多坡面單元未達本研究定義之崩塌計算門檻而被排除，這也表示坡面單元的大小確實會影響崩塌評估結果，有必要在未來地震評估應用時再予檢討。

另一方面，本計畫為了解坡面單元大小的影響，並未將四個集水區之坡面單元精確地細化，因此僅控制在 3~25 ha 左右，若是以坡地易損性曲線所假定的 3~10 ha，預期分析評估之崩塌期望值將會更低，也更符合模式應用之需求。因此，考量經濟和成本效益，對於未來基礎資料和模式之發展，建議可優先針對全台高風險聚落進行坡面單元重新檢討，以提升本模式應用於 BigGIS 系統地震早期評估之效益。

表 6-3 四集水區之震後崩塌快速評估 (原始坡面單元)

集水區	PGV _{min} (cm/s)	PGV _{max} (cm/s)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	最小崩塌面積 估計值(ha)	最大可能崩塌面 積估計值(ha)
崙山集水區	41	62	0.080	0.643	0.000 ~ 1.501	0.276 ~ 15.756
卓溪集水區	49	64	0.172	0.845	0.000 ~ 2.138	0.367 ~ 22.447
安通集水區	50	58	0.165	0.837	0.000 ~ 1.761	0.457 ~ 18.486
鰲溪集水區	48	87	0.029	0.450	0.000 ~ 1.429	0.000 ~ 15.002

資料來源：本計畫製作。

表 6-4 四集水區之震後崩塌快速評估 (細化後坡面單元)

集水區	PGV _{min} (cm/s)	PGV _{max} (cm/s)	坡面單元 RL _{min}	坡面單元 RL _{max}	最小崩塌面積 估計值(ha)	最大可能崩塌面 積估計值(ha)
崙山集水區	41	62	0.080	0.643	0.000 ~ 0.255	0.000 ~ 2.679
卓溪集水區	49	64	0.172	0.845	0.000 ~ 0.000	0.000 ~ 2.022
安通集水區	50	58	0.165	0.837	0.000 ~ 0.000	0.000 ~ 2.116
鰲溪集水區	48	87	0.029	0.450	0.000 ~ 1.746	0.000 ~ 18.336

資料來源：本計畫製作。

第七章 結論與建議

- 一、震後坡地崩塌評估模式流程主要有二部分，分別是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，分析流程能夠滿足地震早期之快速評估需求，以及震後詳細評估的能力。對於震後坡地崩塌評估模式之時效，預期 BigGIS 系統快速評估在取得 NCDR 網格化等震度資料後可於 6 小時內完成，詳細評估則在取得測站資料後可於 24 ~ 48 小時內完成。
- 二、本研究目前已針對 BigGIS 系統之地震早期評估程序提出評估模式整體分析架構，並持續與 BigGIS 研發團隊溝通與協調開發時程，了解其系統架構和性能並持續修正系統分析流程，以達成本計畫之研究目標，惟囿於本年度開發時程有限，目前已確定將易損性評估模組開發納入「113 年巨量空間地理資訊平台維運計畫」項目之中，研究團隊將持續追蹤並校驗測試結果。
- 三、對於不同地震規模之坡地易損性影響分析，PGA 因子相較 PGV 較不敏感，表示在相同震源下對於不同地震規模之坡地崩塌風險並不會有太大差別。反之，PGV 則較敏感，不同地震規模對於坡地崩塌風險將會不同。並且能夠反映地震規模增加產生的能量釋放，對於崩塌期望值將急遽增加的結果，因此以 PGV 為指標應為合理且符合防災需求。
- 四、本研究以池上斷層鄰近高風險聚落為對象，針對較大之坡面單元細化後進行防護斷層模式之快速評估，分析結果顯示細化後之坡面單元崩塌期望值顯著降低，對於高風險聚落以細化後之坡面單元進行估計，更能夠合理地估計其崩塌期望值，對於未來模式之發展建議可針對全台高風險聚落進行坡面單元重新檢討及建立資料庫，以提升 BigGIS 系統之地震早期評估之效益。

五、本研究以風險等級管理將有利於未來農村水保署進行震後崩塌評估和進一步的減災策略擬定實務應用面參考，例如大規模震災後早期無人載具空拍對於高風險地區的派遣選擇、土石流潛勢溪流或大規模崩塌潛勢區降雨警戒值調降、集水區複合型土砂災害減災因應策略等之參考。

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/1081218earthquakepress.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/>

中華民國國家標準 (2012)。風險管理—詞彙。經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準，CNS 14889, Z 4066。

中興大學水土保持學系 (2006)。水庫集水區崩塌地潛勢分析及崩塌土方量估算之研究。經濟部水利署，委辦計畫成果報告。

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。

行政院農業委員會 (2020)。水土保持技術規範。農水保字第 1091864512 號公告修正。

李秉乾、周天穎、雷祖強、林哲彥、黃碧慧、吳政庭 (2005a)。利用集集大地震資料建立建築震害危險度評估模式 I-地震建築損害資料庫建立。中國土木水利工程學刊。17(1)：121–131。

李秉乾、周天穎、雷祖強、林哲彥、吳政庭 (2005b)。利用集集大地震資料建立建築物地震危險度評估模式 II. 易損曲線與風險評估分析。中國土木水利工程學刊，17(2)，293–300。

京華工程顧問股份有限公司 (2010)。氣候變遷下台灣南部河川流域土砂處理對策研究—以高屏溪為例 (1/2)。經濟部水利署水利規劃試驗所，委辦計畫成果報告。

- 京華工程顧問股份有限公司 (2011)。氣候變遷下台灣南部河川流域土砂處理對策研究—以高屏溪為例 (2/2)。經濟部水利署水利規劃試驗所，委辦計畫成果報告。
- 國家災害防救科技中心 (2004)。石門水庫淤積及上游集水區崩塌分析評估報告。
- 國家災害防救科技中心 (2022)。地震網格化等震度即時資料。網址：
<https://datahub.ncdr.nat.gov.tw/dataset/detail?pid=9d34d402-2d81-4a8e-a2f7-c5c6f26d8b83>
- 國家地震工程研究中心 (2022)。20220918 台東地震彙整簡報。網址：
[https://www.ncree.narl.org.tw/assets/file/20220918_%E5%8F%B0%E6%9D%B1%E5%9C%B0%E9%9C%87%E5%BD%99%E6%95%B4%E7%B0%A1%E5%A0%B1_V3.0\(%E4%B8%AD%E6%96%87%E7%89%88\).pdf](https://www.ncree.narl.org.tw/assets/file/20220918_%E5%8F%B0%E6%9D%B1%E5%9C%B0%E9%9C%87%E5%BD%99%E6%95%B4%E7%B0%A1%E5%A0%B1_V3.0(%E4%B8%AD%E6%96%87%E7%89%88).pdf)
- 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。
- 賴志強 (2007)。台灣地區降雨及地震誘發崩塌之特性研究。國立成功大學水及海洋工程學系碩士論文，臺南。
- 溫國樑、柴駿甫 (1999)。強地動特性與耐震設計規範修正建議。國家地震工程研究中心簡訊，32，3－6。
- 謝孟勳 (2013)。以網格集群最大概似法建立建築物易損性曲線及其用於震災緊急運送路徑之選擇。逢甲大學土木及水利工程博士學位學程博士論文，臺中。
- 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.
- Campell, K. W. (1997). Empirical Near-Source Attenuation Relationships for Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Pseudo-Absolute Acceleration Response Spectra. *Seismological Research Letters*, 68(1) : 154 – 178.
- 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)
- Shinozuka, M., Feng, M. Q., Kim, H. K., Kim, S. H. (2000a). Nonlinear Static Procedure for Fragility Curve Development. *Journal of Engineering Mechanics*, 126(12): 1287 – 1295.
- Shinozuka, M., Feng, M. Q., Lee, J., Naganuma, T. (2000b). Statistical Analysis of Fragility Curves. *Journal of Engineering Mechanics*, 126(12): 1224 – 1231.
- Shinozuka, M., Feng, M. Q., Kim, H., Uzawa, T., Ueda, T. (2003). Statistical Analysis of Fragility Curves (Technical Report MCEER DTFH61-92-C-00106), New York: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- Sarabandi, P., Pachakis, D., King, S., Kiremidjian, A. (2004). Empirical Fragility Functions From Recent Earthquake. The 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, paper No.1211.
- Shabestari, K. T., Yamazaki, F., Saita, J., Matsuoka, M. (2004). Estimation of the Spatial Distribution of Ground Motion Parameters for two Recent Earthquakes in Japan. *Tectonophysics*, 390, 193 – 204.

- Sidle, R.C., Perce, A.J., O'loughlin, C.L. (1985). Hillslope Stability and Land Use, Volume 11. American Geophysical Union, Washington, D.C: 19 – 20.
- United Nations Disaster Relief Organization (1979). Natural Disasters and Vulnerability Analysis. Office of the United Nations Disaster Relief Organization (UNDRO), Report of Expert Group Meeting.
- Wu, Y. M., Hsiao, N. C., Teng, T. L. (2004). Relationships between Strong Ground Motion Peak Values and Seismic Loss During the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake. *Natural Hazards*, 32, 357 – 373.
- Wu, Y. M., Shin T. C., Chang, C. H. (2001). Near Real-time Mapping of Peak Ground Acceleration and Peak Ground Velocity Following a Strong Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(5): 1218 – 1228.
- Whitman, R. V., Anagnos, T., Kircher C. A., Lagorio, H. J., Lawson, R. S., Schneider P. (1997). Development of a National Earthquake Loss Estimation Methodology. *Earthquake Spectra*, 13(4): 643 – 661.
- Yamazaki, F. (2001). Seismic Monitoring and Early Damage Assessment Ssystems in Japan. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 3, 66 – 75.
- Yamazaki, F., Murao, O. (2000). Vulnerability Functions for Japanese Buildings Based on Damage Data Due to the 1995 Kobe Earthquake. *Implications of Recent Earthquakes on Seismic Risk*, 2, 91 – 102.
- Yamazaki, F., Onishi, J., Tayama, S. (1999, February). Earthquake Damage Assessment of Expressway Structure in Japan. *Proceeding of the Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and Its Applications* (p. 205–214), Taipei, Taiwan, R. O. C.

附錄一 計畫書審查意見回復

委員意見	意見回復
1. 易損性曲線是否已定期依新發生之地震-崩塌事件，調整更新其內容？	感謝委員提問，本計畫持續依新發生之地震崩塌事件調整更新易損性參數，惟近三年無重大顯著影響坡地崩塌之地震事件，因此易損性參數無變化。
2. 本模式於 111 年的多次地震之驗證成果如何？	遵照辦理，詳如第五章第三~四節所述。
3. 計畫僅一頁描述實施方法與步驟，概念性介紹欲分析之工作，並未有詳細步驟之描述及驗證區域之構想。流程圖簡要介紹執行步驟，但流程圖中多為一般易損性分析流程，建議應標示精進之重點步驟。	遵照辦理，已更新計畫書之流程圖，詳如第一章第二節所述。
4. 計畫成果為與農村水保署 BigGIS 系統整合，建立系統化、資訊化的震後坡地崩塌評估管理模式，建請詳細撰寫計畫說明書，以明確列出要介接的資料？如何與現有的資料整合？進行哪些計算？最後如何在系統上提供服務？有哪些工作可以自行完成？有哪些工作需要 BigGIS 團隊來協助開發？應先完整規劃。	遵照辦理，已更新計畫書之內容，詳如第四章第五節所述。另本團隊亦將持續與 BigGIS 團隊溝通，了解其系統開發架構與實際能夠協助本計畫之工作。

附錄二 期中書面審查意見回復

委員意見	意見回復
(一)坡地易損性分析是重大災害發生後農村水保署關注的重點，特別是聚落安全性的評估，本計畫將此分析工作與 BigGIS 結合，讓使用者可以透過 BigGIS 快速進行評估，完成後預期可以擴展 BigGIS 的應用。建議在期末結案前，能將成果在 BigGIS 實現，讓農村水保署同仁可以實際操作，並提供回饋意見，以做為未來可以再精進的參考。以下提供兩點建議：	感謝委員建議，本研究團隊積極配與 BigGIS 團隊接洽。惟囿於本年度開發時程有限，目前已確定將易損性評估模組開發納入「113 年巨量空間地理資訊平台維運計畫」項目之中。
1. P-129 提到震度資料需要透過 BigGIS 後台進一步運算，得到坡面單元震度資料後，才能進行坡地崩塌評估。請問這部份的運算功能是現有的還是需要另外開發？如果有現有的程式可以達成，請先交給 BigGIS 團隊進行轉換，確保未來對接不會有問題。	感謝委員建議，在快速評估中，坡面單元的震度資料係以空間資料套疊而得，目前的開發規劃係於 BigGIS 中開發功能模組完成這部分流程。
2. 建議將報告書所使用過去的地震實例資料，提供給 BigGIS 團隊進行評估，看看未來移植到 BigGIS 上進行線上服務，還有哪些需要克服的問題。並在期末報告書中提供完整分析與詳細討論。	遵照辦理，詳如第四章所述。
(二)有關本計畫成果整合於 BigGIS 平台，請主動推動相關進程，希冀於期末成果發表時能看到實機成果展示	感謝委員建議，本研究團隊積極配與 BigGIS 團隊接洽。惟囿於本年度開發時程有限，目前已確定將易損性評估模組開發納入「113 年巨量空間地理資訊平台維運計畫」項目之中。

(三)由於地震造成之崩塌未必第一時間能於衛星影像看到，故建議針對 112 年於東部降下豪雨的杜蘇芮颱風之新生崩塌地，比對是否與 111 年第 111 號地震易損性評估之高風險地區有關連性？	感謝委員建議。降雨之新生崩塌地與地震崩塌之機理不同，但確實有關聯性，本研究已將此議題納入明年度震後不安定土砂潛勢分析計畫中探討。
(四)P-128，研究建議採用之震度資料解析度為 $200 \times 200 \text{ m}^2$ (4ha)，利用氣象局震度推估模式下震度資料之評估結果解析度可達多少？	感謝委員提問。本研究對於震度評估精度，在快速評估中因考量運算時間，採用的是 NCDR 題供之 $2.5 \times 2.5 \text{ km}^2$ 網格資料，詳細評估則採用 $200 \times 200 \text{ m}^2$ 網格資料。
(五)P-135，各河川集水區地震誘發崩塌危害排序表，其排序依據是哪一項因子？	感謝委員提問。集水區地震誘發崩塌危害排序表是以可能最大崩塌面積進行綜合排序。
(六)P-155，有關崩塌結果比對，為何第 111 號地震事件不足比對評估結果？各集水區有崩塌面積估計值 (表 5-4)，BigGIS 衛星影像崩塌判釋結果雖不大，但有實際崩塌範圍、地點，應可以得到各集水區之崩塌面積，似可進一步比對各集水區之評估結果。另，Big GIS 判釋實際崩塌面積 1.76 ha，研究評估最小崩塌面積估計值 25.96 ha~937.79 ha，兩者結果差異仍大。	感謝委員提問。由於本研究崩塌之定義為坡面單元崩塌率達 5%，即表示一個 10 ha 之坡面單元至少有 0.5 ha 的崩塌，且最小崩塌面積為 0.22 ha (S3 級坡)，而坡面單元大多在數十至數百公頃之間，因此計算結果必定很難會有較大的崩塌面積估計值，以第 111 號地震為例，實際上 45 處崩塌地無任何崩塌面積達到 0.22 ha，因此第 111 號地震事件不足以比對評估結果。上述原因仍在於目前採用之坡面單元面積過大，經崩塌機率計算後容易得到很高之崩塌期望值。
(七)為因應機關組織改造，機關名稱修正為「農業部農村發展及水土保持署」，報告書封面及內文等請依本署最新範本格式撰寫，相關範本檔案請至本署電子圖書管理中心下載 (https://elibrary.ardswc.gov.tw/)。	遵照辦理。