
地震引致崩塌之坡地易損性曲線建立
— 以 921 地震為例

**Development of Earthquake-induced
Landslide Fragility Curves
– A Study of Chi-Chi Earthquake**

執行單位：逢甲大學

執行期間：106 年 02 月 20 日至 104 年 12 月 31 日

計畫主持人：逢甲大學營建及防災研究中心謝孟勳博士

共同主持人：逢甲大學土木工程學系李秉乾博士

逢甲大學土木工程學系林正紋博士

研究助理：陳酉昌

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 106 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

地震引致崩塌之坡地易損性曲線建立—以 921 地震為例

摘 要

台灣山坡地大約占總面積的 73%以上，這些地區常因大規模的地震或降雨造成坡地崩塌。本研究的目的，即在於發展地震引致崩塌的坡地易損性分析，以建立台灣山坡地的崩塌機率評估方法。坡地易損性曲線表達坡地在某地表震度(尖峰地表加速度，PGA)下引致崩塌發生之機率。研究中針對台灣中部九二一地震的嚴重災區，採用 SPOT 衛星影像進行崩塌地判釋並計算崩塌率，並以 5-m DEM 進行地形分析以及坡面單元分析，最後根據地質、坡度、坡向等環境因子將坡地分為 12 個類型。利用本研究提出的網格集群最大概似法(GC-MLE)估計易損性參數並發展坡地易損性曲線。研究結果顯示本研究發展的經驗分析方法可合理地應用於坡地易損性分析，並可進一步應用於地震引致崩塌災害潛勢之量化評估。

關鍵字：崩塌、坡地易損性曲線、地震、經驗分析法、九二一地震

Development of Earthquake-induced Landslide Fragility Curves – A Study of Chi-Chi Earthquake

Abstract

In Taiwan, the hillside is about over 73% of total area. The landslide disasters usually occur at these areas due to magnitude earthquake and rainfall. In the study, an earthquake-induced landslide fragility analysis is proposed to construct estimate method of landslide probability at Taiwan. Landslide Fragility Curves (LFCs) express the probability of a landslide, as a function of specific earthquake measures as peak ground acceleration (PGA). The remote sensing data from SPOT images are applied to analyze the landslide ratio and physiographic conditions at the severely affected areas in central Taiwan. The slope units are classified into different typologies according to geology, slope gradient and aspect, based on the landslide database at the 1999 Chi-Chi Earthquake in Taiwan. The Grid-based Clustering Maximum Likelihood Estimate (GC-MLE) is conducted to determine the fragility parameters and to develop the fragility curves. The study results demonstrate that the proposed method can reasonably be used on the fragility analysis and can be used for assessing earthquake-induced landslide quantification estimate.

Keywords: landslide, landslide fragility curve, earthquake, empirical statistical, Chi-Chi earthquake

目次

摘要	I
Abstract	II
目次	III
表次	V
圖次	VII
 第一章 前言	 1
第一節 計畫緣起與目的	1
第二節 工作項目、內容與時程	2
第三節 計畫執行流程	4
第二章 國內外地震誘發崩塌相關文獻回顧	5
第一節 崩塌現象與分類	5
第二節 921 地震誘發之崩塌	10
第三節 崩塌災害潛勢評估	13
第四節 崩塌分析單元	21
第五節 崩塌潛因與誘因	25
第三章 九二一地震崩塌資料庫蒐集建置	41
第一節 研究地區說明	41
第二節 研究資料收集	43
第三節 環境因子資料處理	48
第四節 崩塌地判識與萃取	56
第五節 崩塌網格資料庫建置	60
第四章 921 地震強地動因子推估	63
第一節 中央氣象局強地動測站資料蒐集	63

第二節 地表震度衰減率	65
第三節 強地動因子空間推估	67
第五章 地震誘發崩塌可能性之坡地易損性模式建立.....	73
第一節 易損性曲線的求取方法	74
第二節 經驗易損性曲線之分析模式	76
第三節 坡地易損性分析模式	79
第四節 坡面單元	87
第六章 坡地易損性曲線分析成果.....	101
第一節 24 類坡地易損性曲線	101
第二節 12 類坡地易損性曲線	110
第三節 坡地易損性曲線驗證	115
第七章 結論與建議.....	121
參考文獻.....	127
 附錄一 期中審查會議委員意見回復	
附錄二 期末審查會議委員意見回復	
附錄三 2017 中華水土保持研討會投稿全文	

表 次

表 2-1	崩塌分類法則.....	7
表 2-2	常見之崩塌分類.....	8
表 2-3	國內目前採用之崩塌及土石流分類	9
表 2-4	中央氣象局地震分級表	12
表 2-5	不同測繪單元優缺點比較	22
表 2-6	坡面單元分割方式比較表	24
表 2-7	1985~2013 年文獻選取因子	27
表 2-8	影響崩塌災害之潛因和誘因	29
表 3-1	環境資料庫之類型和檔案格式	42
表 3-2	研究區域周邊九二一測站點資料	46
表 3-3	李錫堤教授提出之台灣地區地質分類	49
表 3-4	研究地區裸露地統計.....	57
表 3-5	研究地區新增崩塌地統計	59
表 3-6	地質崩塌統計.....	60
表 3-7	坡向崩塌統計.....	61
表 3-8	高程崩塌統計.....	62
表 3-9	坡度崩塌統計.....	62
表 4-1	Wu 衰減率所得之殘差分量套配半變異數模式之參數結果.....	69
表 5-1	易損性曲線常見之機率分布函數	76
表 5-2	易損性曲線其它常見之分布函數	77
表 5-3	本研究地質分類統計.....	92
表 5-4	本研究坡向分類統計.....	93
表 5-5	本研究高程分類統計.....	94
表 5-6	本研究坡度分級.....	95

表 5-7	本研究坡度分類統計.....	95
表 6-1	烏溪流域之坡地易損性參數表(24 類).....	101
表 6-2	24 類易損性曲線因子合理性比較	105
表 6-3	烏溪流域之坡地易損性參數表(12 類).....	110
表 6-4	各子集水區之崩塌評估結果	119

圖 次

圖 1-1	計畫工作流程圖.....	4
圖 2-1	坡地崩塌現象及其衍生災害示意圖	7
圖 2-2	台中、南投於 921 地震中誘發崩塌變異點	11
圖 2-3	921 地震引發之崩塌類型統計	11
圖 2-4	動態崩塌潛勢線性疊加模式	20
圖 2-5	坡面單元示意圖.....	24
圖 2-6	1985 年~2013 年與崩塌製圖相關之文獻選取因子統計圖	26
圖 3-1	研究區域.....	41
圖 3-2	921 地震前後期衛星影像	44
圖 3-3	烏溪流域附近地震地震觀測台網	45
圖 3-4	年代圖.....	48
圖 3-5	地層圖.....	48
圖 3-6	岩性圖.....	48
圖 3-7	李錫堤教授分類之地質圖	50
圖 3-8	研究區高程圖.....	51
圖 3-9	研究區坡向圖.....	52
圖 3-10	研究區坡度圖.....	53
圖 3-11	研究區濾除範圍.....	54
圖 3-12	研究區順向坡分布圖.....	55
圖 3-13	前後期影像判識.....	56
圖 3-14	九二一地震前後期裸露地分布	57
圖 3-15	崩塌地變遷及分類示意	58
圖 3-16	坡面資料套疊網格示意圖	59
圖 3-17	九二一新增崩塌地.....	59

圖 4-1	自由場強地動測觀測網(TSMIP)測站分布	64
圖 4-2	各測站實測尖峰地表加速度與修正之 Wu 衰減率共繪	66
圖 4-3	區域趨勢值與空間中隨機變動值之關係	68
圖 4-4	最佳半變異圖(指數模式).....	69
圖 4-5	強地動測站實測值及 Wu 衰減率之推估值比較	71
圖 4-6	Wu 衰減率推估之全域尖峰地表加速度分布	72
圖 5-1	不同損害分級之易損性曲線關係	73
圖 5-2	坡地易損性模式建立步驟	80
圖 5-3	坡面單元示意圖	87
圖 5-4	集水區重疊法示意圖	87
圖 5-5	坡面單元繪製流程	88
圖 5-6	坡面單元碎塊編修示意圖	89
圖 5-7	Google Earth 人工編修示意圖	89
圖 5-8	烏溪集水區之坡面單元	90
圖 5-9	坡面單元局部放大圖	91
圖 5-10	坡面單元地質分類	92
圖 5-11	坡面單元坡向分類	93
圖 5-12	坡面單元高程分類	94
圖 5-13	坡面單元坡度分類	96
圖 5-14	烏溪流域集水區坡面單元 PGA 震度分布	97
圖 5-15	崩塌地坡度與深度分佈	98
圖 5-16	崩塌塊體斜面與投影面關係示意圖	99
圖 5-17	烏溪流域集水區崩塌坡面分佈	100
圖 6-1	G1A1E1S1 類易損性曲線	102
圖 6-2	G1A1E1S2 類易損性曲線	102

圖 6-3	G1A1E1S3 類易損性曲線	102
圖 6-4	G1A1E2S1 類易損性曲線	102
圖 6-5	G1A1E2S2 類易損性曲線	102
圖 6-6	G1A1E2S3 類易損性曲線	102
圖 6-7	G1A2E1S1 類易損性曲線	102
圖 6-8	G1A2E1S2 類易損性曲線	102
圖 6-9	G1A2E1S3 類易損性曲線	103
圖 6-10	G1A2E2S1 類易損性曲線	103
圖 6-11	G1A2E2S2 類易損性曲線	103
圖 6-12	G1A2E2S3 類易損性曲線	103
圖 6-13	G2A1E1S1 類易損性曲線	103
圖 6-14	G2A1E1S2 類易損性曲線	103
圖 6-15	G2A1E1S3 類易損性曲線	103
圖 6-16	G2A1E2S1 類易損性曲線	103
圖 6-17	G2A1E2S2 類易損性曲線	104
圖 6-18	G2A1E2S3 類易損性曲線	104
圖 6-19	G2A2E1S1 類易損性曲線	104
圖 6-20	G2A2E1S2 類易損性曲線	104
圖 6-21	G2A2E1S3 類易損性曲線	104
圖 6-22	G2A2E2S1 類易損性曲線	104
圖 6-23	G2A2E2S2 類易損性曲線	104
圖 6-24	G2A2E2S3 類易損性曲線	104
圖 6-25	G1E1S1 類坡向因子比較	106
圖 6-26	G1E1S2 類坡向因子比較	106
圖 6-27	G1E1S3 類坡向因子比較	106

圖 6-28	G1E2S1 類坡向因子比較	106
圖 6-29	G1E2S2 類坡向因子比較	106
圖 6-30	G1E2S3 類坡向因子比較	106
圖 6-31	G2E1S1 類坡向因子比較	106
圖 6-32	G2E1S2 類坡向因子比較	106
圖 6-33	G2E1S3 類坡向因子比較	107
圖 6-34	G2E2S1 類坡向因子比較	107
圖 6-35	G2E2S2 類坡向因子比較	107
圖 6-36	G2E2S3 類坡向因子比較	107
圖 6-37	G1A1S1 類高程因子比較	107
圖 6-38	G1A1S2 類高程因子比較	107
圖 6-39	G1A1S3 類高程因子比較	107
圖 6-40	G1A2S1 類高程因子比較	107
圖 6-41	G1A2S2 類高程因子比較	108
圖 6-42	G1A2S3 類高程因子比較	108
圖 6-43	G2A1S1 類高程因子比較	108
圖 6-44	G2A1S2 類高程因子比較	108
圖 6-45	G2A1S3 類高程因子比較	108
圖 6-46	G2A2S1 類高程因子比較	108
圖 6-47	G2A2S2 類高程因子比較	108
圖 6-48	G2A2S3 類高程因子比較	108
圖 6-49	G1A1E1 類坡度因子比較	109
圖 6-50	G1A1E2 類坡度因子比較	109
圖 6-51	G1A2E1 類坡度因子比較	109
圖 6-52	G1A2E2 類坡度因子比較	109

圖 6-53	G2A1E1 類坡度因子比較	109
圖 6-54	G2A1E2 類坡度因子比較	109
圖 6-55	G2A2E1 類坡度因子比較	109
圖 6-56	G2A2E2 類坡度因子比較	109
圖 6-57	G1A1S1 類易損性曲線	110
圖 6-58	G1A1S2 類易損性曲線	110
圖 6-59	G1A1S3 類易損性曲線	111
圖 6-60	G1A2S1 類易損性曲線	111
圖 6-61	G1A2S2 類易損性曲線	111
圖 6-62	G1A2S3 類易損性曲線	111
圖 6-63	G2A1S1 類易損性曲線	111
圖 6-64	G2A1S2 類易損性曲線	111
圖 6-65	G2A1S3 類易損性曲線	111
圖 6-66	G2A2S1 類易損性曲線	111
圖 6-67	G2A2S2 類易損性曲線	112
圖 6-68	G2A2S3 類易損性曲線	112
圖 6-69	G1S1 類坡向因子比較	113
圖 6-70	G1S2 類坡向因子比較	113
圖 6-71	G1S3 類坡向因子比較	113
圖 6-72	G2S1 類坡向因子比較	113
圖 6-73	G2S2 類坡向因子比較	113
圖 6-74	G2S3 類坡向因子比較	113
圖 6-75	G1A1 類坡度因子比較.....	114
圖 6-76	G1A2 類坡度因子比較.....	114
圖 6-77	G2A1 類坡度因子比較.....	114

圖 6-78	G2A2 類坡度因子比較.....	114
圖 6-79	研究地區子集水區範圍	115
圖 6-80	921 地震崩塌危險程度	116
圖 6-81	921 地震崩塌危險評估	116
圖 6-82	崩塌之超越機率.....	117
圖 6-83	崩塌危險程度驗證方式	118
圖 7-1	中央氣象局地震速報.....	123
圖 7-2	地震速報資料之震度資訊	124
圖 7-3	子集水區之崩塌總量評估	125
圖 7-4	子集水區之災害潛勢評估	125

第一章 前言

第一節 計畫緣起與目的

台灣位處於環太平洋地震帶上，經常性的地殼變動造成土質鬆軟且不穩定，若再遭受颱風、豪雨的侵襲，極易引起土石流、崩塌等坡地災害的發生，其中又以地震直接引致之坡地崩塌最難預測及評估。例如 1999 年發生的九二一大地震，引發車籠埔斷層與雙冬斷層發生劇烈錯動，造成極為嚴重的崩塌災害，甚至讓原已脆弱的地質更不穩定，在往後的數年間土石流、崩塌頻傳。此一事件突顯現今科學仍不可預測的地震所造成的崩塌災害，未來恐對位處菲律賓板塊和太平洋板塊交接處的臺灣，造成嚴重的坡地災害威脅。

地震本身的不可預測性導致地震誘發的崩塌災害難以評估，因此過去相關研究中多以統計方式發展崩塌潛勢評估為主，蒐集崩塌案例及地震重要觀測紀錄再輔以現地地文條件進行分析。這也意味著，對於地震誘發之崩塌災害，無法如颱風或豪雨造成崩塌之模式利用即時監測系統進行災害預警(pre-disaster prevention)，而是需要依靠地震速報資料發展其早期評估(early warning estimate)。在地震災害評估上，這個防災觀念可以利用易損性模式的理論來實踐。易損性模式應用在地震災害評估在國內外已卓有成效，易損性曲線的概念(fragility curves)最早被地震工程專家應用於描述地震中橋梁或建築物損失等問題，國內外所發展的早期評估方法多建構在易損性理論上。在實際的崩塌案例裡，所謂易崩與不易崩的分界是模糊的，在同樣條件的降雨與坡地環境下，有可能具有迥異的結果。因此過去的研究發現不同的情境條件下，所得到的崩塌評估模式也不同，因此對於崩塌評估更適合以崩塌機率評估的模型來描述崩塌的可能性。而用易損性曲線表達在某一強地動因子下的破壞機率，可有效地應用於地震早期災損評估及減災規劃，此即本研究主要解決的課題。

第二節 工作項目、內容與時程

一、崩塌資料庫建置

九二一集集地震事件為本研究用以分析地震事件造成崩塌地變遷的主要事件，亦將其它事件納入參考，計畫將以 1998 及 2002 年衛星影像針對中部地區進行崩塌地判釋。藉由衛星影像資料可進行裸露地判釋，以初步了解可能崩塌地位置。完成崩塌地判釋後，即可建置以網格資料為基礎之崩塌資料庫，進行坡地易損性曲線分析。

二、尖峰地表加速度(PGA)推估

利用自中央氣象局取得九二一地震 444 個強地動測站之場址 PGA 值，採用克利金系統方程式推估未設測站之全域 PGA 空間分布，並以 100m×100m 之網格做為空間全域推估之尺度。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，即所謂空間中之隨機變數。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，可藉由克利金系統方程式進行推估

三、坡面單元萃取

目前對於崩塌評估模式的基本單元可分為網格單元及坡面單元(Slope Unit)，此二種方法各有其優缺點。坡面單元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剔除不適用區域再進行統計迴歸。本研究結合網格單元及坡面單元應用於發展坡地易損性曲線，基於衛星影像判釋之網格以坡面單元進行篩選、分類以確立崩塌之範圍並汰除不合理區域，依據坡面分類進行坡地易損性分析。這個方法可建立以坡面單元及坡地分類為基礎的崩塌事件資料，有助於建立合理可靠的坡地易損性曲線。

四、坡地易損性分析

坡地易損性曲線模式中，對於震度指標(如尖峰地表加速度)導致崩塌發生之隨機分布函數 $F(x)$ ，通常採用對數常態分布以表示發生之頻率分布。所謂隨機變數即為震度指標因子的機率分配數學方程式，而此機率分配數學方程式由中位數及對數標準差決定。此雙估計參數之機率分配數學方程式即為坡地隨震度因子變化而引致崩塌發生之機率密度函數，其累積分布即為坡地易損性曲線。中位數和對數標準差可藉由參數估計(parameter estimation)決定，本研究結合網格分析及集群分析進行概似函數之求解，能夠藉由廣域型災害資料發展坡地易損性曲線。

五、工作時程

工作項目	預定進度	106 年			
		1-3 月	4-6 月	7-9 月	10-12 月
國內外地震誘發崩塌 相關文獻回顧	工作量	30	50	20	0
	累計百分比	30	80	100	100
九二一地震崩塌資料 庫蒐集建置	工作量	20	50	30	0
	累計百分比	20	70	100	100
地震誘發崩塌可能性 坡地易損性模式建立	工作量	10	30	40	20
	累計百分比	10	40	80	100
坡地易損性曲線分析 成果	工作量	0	30	40	30
	累計百分比	0	30	70	100
累計總進度百分比		13	54	86	100

第三節 計畫執行流程

依研究工作項目及內容，本研究整體工作執行架構包括文獻蒐集、崩塌資料庫建置、坡地易損性模式建立、坡地易損性曲線分析以及坡地易損性曲線驗證與應用，整體流程如圖 1-1 所示。

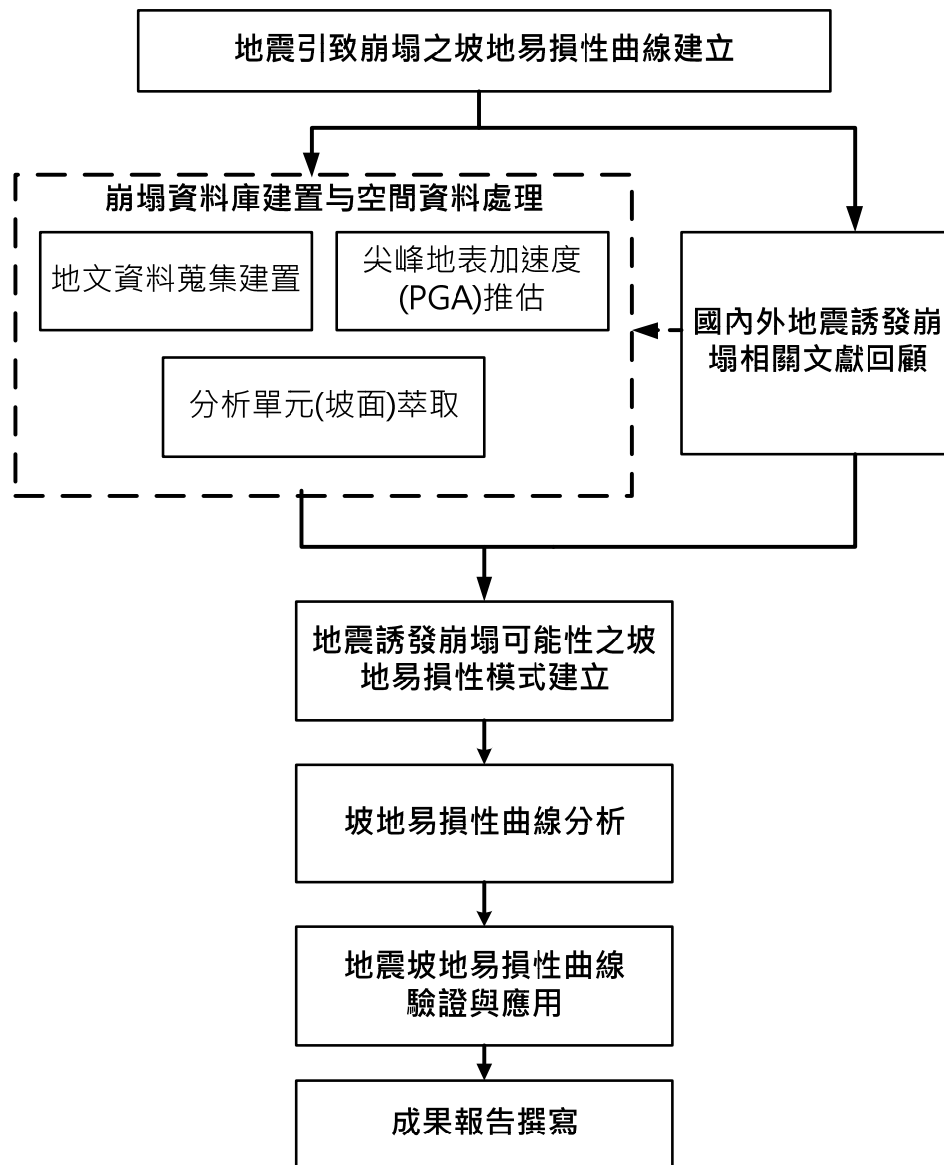


圖 1-1 計畫工作流程圖

第二章 國內外地震誘發崩塌相關文獻回顧

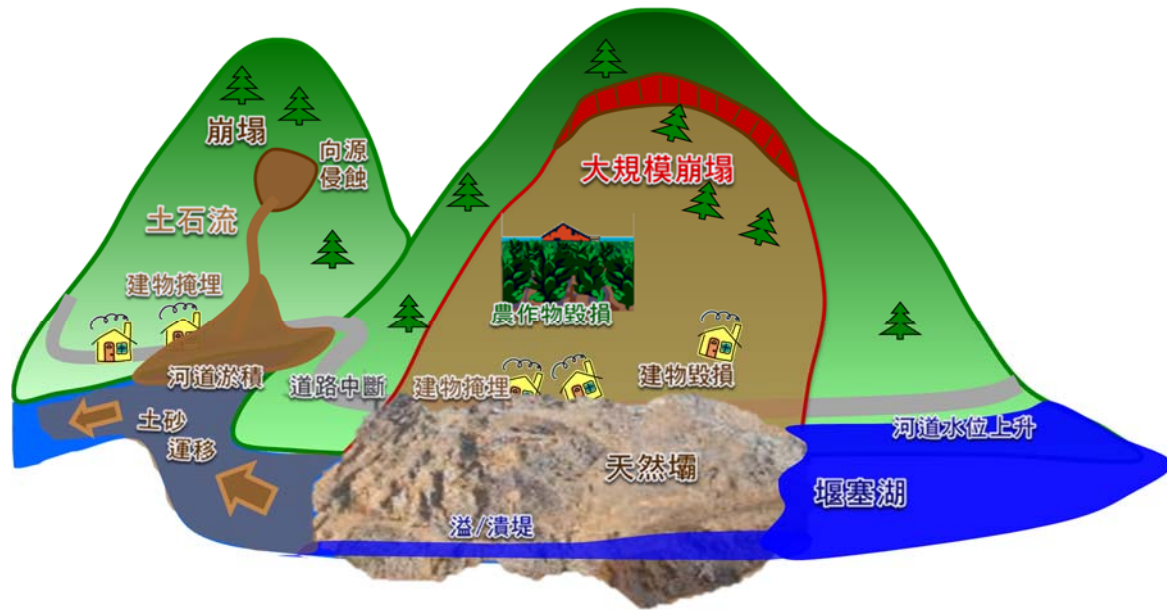
第一節 崩塌現象與分類

崩塌是臺灣山坡地主要的坡地災害之一，倘若鄰近開發地區，經常引起人員傷亡與財產損失，例如農田、房舍、交通、維生管線、水利設施等損壞。更甚者發生毀滅性的災害，例如八八風災小林村滅村事件即為一例。除了上述直接災害外，崩塌也是最常形成土石流災害的主因，當崩塌造成鬆散土石累積在坡面形成固體料源，若再發生夾帶大量降水之颱風或暴雨，極容易促使土石流發生。另一種常被討論的現象，即是崩塌亦會阻斷河道，致使山區水流阻塞而形成堰塞湖(例如921地震引發走山造成草嶺堰塞湖)，因其土方不穩定極易潰決而造成洪水引發下游之災害。回顧國內外學者之研究，對於崩塌地定義有許多相似的見解。Varnes(1958, 1978)認為崩塌是指原屬於山坡上的物質，受到重力作用後，產生向下、向外的運動；李三畏(1986)則認為崩塌是指山坡面上之土壤，受到外力影響而失去平衡，所產生向外、向下的移動現象；楊智堯(1999)指出崩塌是指在重力作用下，坡面上的土石材料受到下滑力作用而使土石向坡腳方向移動的現象；何春蓀(1999)指出坡地中部分坡面，由於土塊受重力作用，向下或側面移動的現象，皆可稱之為崩塌。由此可見，崩塌基本上是部分山坡地質之結構穩定性不足以抵抗重力或外力作用之影響而呈現脫離本體的運動現象，因此也稱為坡面運動(slope movement)或塊體運動(mass movement)。因此，廣義的崩塌是泛指地表經風化作用而破碎的岩屑及土壤，在重力影響下，沿坡面向下或向外的各種運動作用，其中不包括風化物質受風、冰及流水等介質的搬運作用，冰、雪、流水等在下坡運動中參與的是增加地面風化物的重量，或減低風化物內部的摩擦力，使它們更容易往下坡移動(陳信雄，1995)。蘇苗彬(2009)也指出崩塌為土石移動現象，包括崩(collapse)、坍(clump)、塌(slump)、滑(sliding)、陷(caving)、落(falling)等，常見分為崩塌、地滑、潛移、土石流

及沖蝕等類型。而崩塌誘發之原因，可歸納為地質構造、逕流沖刷，岩層界面滑動及岩層軟化等，其中以地質因素和逕流沖刷二者居多。另外當鬆散的土層充滿飽和水時，也易引發崩塌發生。崩塌成因為當土層受到雨水入滲影響而重力增加，或孔隙水壓來不及消散，亦或土層中的黏土遇水後發生膨脹或軟化，使崩塌體沿著張力弱面向下崩落。

一般而言，坡地崩塌體的體積不大，其寬度常在數公尺至一、二十公尺之間，崩塌體平均厚度很少超過 5 公尺(潘國樑, 2007)，因此通常泛稱為淺層崩塌。不過近十年來因莫拉克颱風所導致小林村災變後，大規模崩塌(或日本近年來所稱的「深層崩壞」)形成一種更嚴重及更受重視的土砂災害型態。陳樹群等人(2007)曾歸納國內、外大規模崩塌災害定義，雖然我國和美、日等國的定義有些微的差異，但相同的是大規模崩塌破壞面深入岩盤、地下水影響大、滑動面較深、崩塌體積大、滑動速度快、影響範圍大、會造成重大災損。在崩塌體積量化方面，可根據日本土木研究所(2009)定義土方量超過 10 萬立方公尺以上者為大規模土砂災害，即大約面積 1 公頃且平均滑動深度超過 10 公尺的崩塌地可視為大規模崩塌。伴隨著大規模崩塌的發生，立即會產生：(1)地表破壞造成農作物毀損；(2)建物毀損(龜裂或遭土石掩埋等)；(3)道路、橋梁、維生管線因崩塌位移中斷；(4)崩塌土石阻塞河道形成堰塞湖等災害。並隨著時空推移，造成一系列的衍生性災害，如進一步的堰塞湖水位上升、溢/潰堤引致山洪暴發淹水、河道淤積或改道等等。所示圖 2-1 為上述坡地崩塌及其衍生災害示意圖。

在崩塌分類方面，Varnes(1958, 1978)分類法是較常見的崩塌分類方式，如表 2-1 中，其考量物質種類及依照運動種類將崩塌分類為墜落、傾覆、滑動、側滑、流動及複合運動等類別。回顧國外分類方式，由於崩塌發生條件與機制都有不同定義，國內外依據崩塌的運動種類、物質的性質，崩塌的原因、力學機制或大地地質等考量而有不同的分類方式，如表 2-2 所示。



資料來源：中興社(2014)

圖 2-1 坡地崩塌現象及其衍生災害示意圖

表 2-1 崩塌分類法則

物質運動之型態 Type of Movement		塊體移動物質種類Type of Material	
		基岩 Bedrock	工程土壤Engineering Soils
			粗粒為主 細粒為主
墜落 Falls		岩石墜落 Rock Fall	岩屑墜落 Debris Fall 土體墜落 Earth Fall
傾覆 Topples		岩石傾覆 Rock Topple	岩屑傾覆 Debris Topple 土體墜落 Earth Fall
滑動 Slides	轉動 Rotational	岩石崩移 Rock Slump	岩屑崩移 Debris Slump 土體崩移 Earth Slump
	移動 Translational	岩塊滑動 Rock Block slide(Glide) 岩石滑動 Rock Slide	岩屑塊滑動 Debris Block Slide 岩屑滑動 Debris Slide 土體滑動 Earth Slide
側滑 Lateral Spreads		岩石側滑 Rock Spread	岩屑側滑 Debris Spread 土體側滑 Earth Spread
流動 Flows		岩石流動 Rock Flow (深層潛移Deep Creep)	岩屑流動 Debris Flow 土體流動 Earth Flow 土體潛移 Earth Creep
複合運動Complex		複合兩種或兩種以上之運動方式	

資料來源：修改自 Varnes(1958, 1978)

表 2-2 常見之崩塌分類

學者或國家	分類方式	分類情形
Sharp(1938)	運動的性質與速度	流動、滑動
Crozier(1973)	流動特性與流動方式	流體流、黏滯性流、滑動流、平面滑動與旋轉滑動
Varnes(1978)	運動種類與物質種類	墜落、傾覆、滑動、側滑、流動、複合運動等
Chowdhury(1978)	位移速率或力學機制	平面破壞、傾倒破壞、落石、旋轉破壞、流動破壞
小出(1979)	地質構造的觀點	(1)第三紀地層(2)破碎帶地層及(3)溫泉帶地層
藤原(1979)	常見舊崩塌地之地形	凸狀尾根型、凸狀台地型，凹狀單丘型、凹狀多丘型
中村(1979)	地質條件	(1)第三紀地層滑動(2)中生代地層滑動(3)古生代地層滑動(4)變質岩地區地層滑動(5)火成岩地區地層滑動
陳、黃(1979)	滑動時機	(1)繼續型(2)間歇型(3)突發型
Fookes (1985)	大地工程的觀點	塊體運動以及表面水蝕作用，塊體運動包括墜落、滑動及流動；滑動可分為旋轉滑動及平面或移動型滑動
臺灣	水土保持手冊	(1)崩塌(2)地滑(3)土石流(4)沖蝕(5)潛移
	中央地質調查所	(1)落石(2)岩體滑動(3)岩屑崩滑(4)土石流(5)向源侵蝕、河岸侵蝕(6)潛移

資料來源：修改自賴志強(2007)

國內目前在研究上多參考 Varnes 之崩塌分類為主，以運動型態與材料性質作為分類，但治理上則以運動型態為主要分類。中央地質調查研究所及水土保持局針對崩塌之分類各有其不同定義費立沅(2009)。如表 2-3 之比較，根據行政院農委會水土保持手冊(2005)，將坡地災害分為崩塌、地滑、土石流、沖蝕、潛移等五分類，此分法較接近 Varnes 之分類法中崩移(Slump)的定義。崩塌型之移動塊體移動過程中，其塊體之破壞程度大，呈分崩離析狀態；地滑型之滑動塊體滑動過程中，其塊體之破壞程度不大，並大致

保持與未滑動塊體之原來關係；潛移型之滑動塊體移動速度極緩，且滑動面不明顯；土石流型是泥、砂、及巨石等固態物質與水之混和物受重力作用後產生之流動現象，其流動之速度極快；沖蝕型為坡面沖蝕溝刷深並與兩側崩塌作用交互進行。本研究所發展之坡地易損性模式，由於其致災資料係藉由衛星影像之崩塌地判釋而來，僅能評估淺層或岩屑崩滑型為主地崩塌現象。然而這類崩塌是坡地最常見的災害類型，並且能破壞坡體、引發其它延生的災害，對坡地崩塌評估具有關鍵性的意義。

表 2-3 國內目前採用之崩塌及土石流分類

			地調所分類		水保局分類		
移動物質 移動或作用型態			基岩	工程土壤		(以防治災害為目的之分類，故不考慮移動物質類別)	
				岩屑	土壤		
墜落			落石	岩屑崩滑		崩塌	
傾翻						(崩落、崩塌、崩壞)	
滑動	平面型楔形		岩體滑動			地滑	
	圓弧形					(岩盤型、風化層型、崩積型)	
流動			土石流		土石流		
			(無關乎保全對象)		(潛勢溪流、有保全對象)		
風化侵蝕			向源侵蝕、河岸侵蝕		沖蝕		
			(蝕溝、指溝)		(表層沖蝕、侵蝕)		
表層緩移			潛移		潛移		
			(邊坡表層土壤或岩層之緩移)		(單指土壤)		

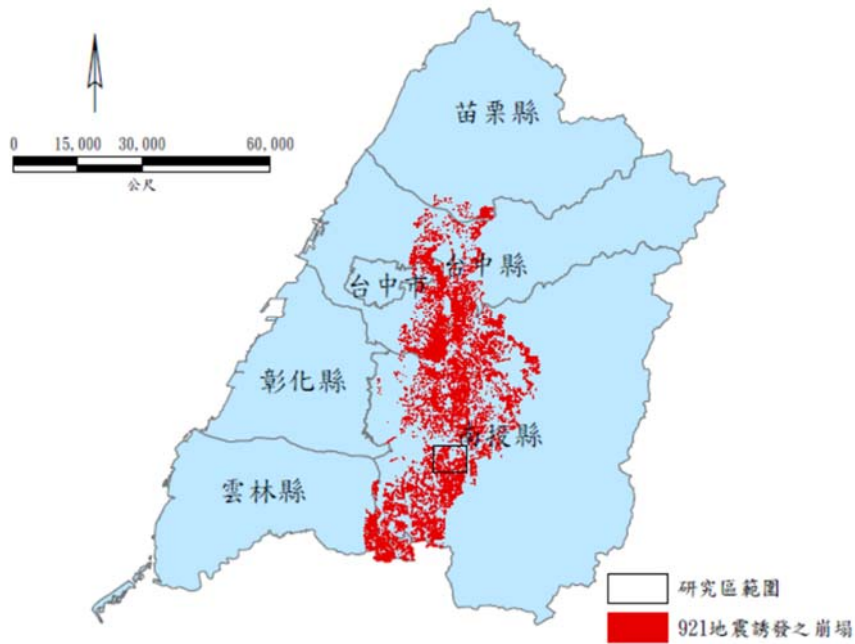
註：在水土保持法及其子法中計出現 5 類相關的坡地災害類型，但是僅崩塌與地滑 2 類與『各類之坡面運動』較相關。因此將其他 3 類另列，並分別說明各自對照之地質作用與用詞。

第二節 921 地震誘發之崩塌

1999 年 09 年 21 日上午 1 點 47 分發生於台灣中部山區的逆斷層型地震，造成台灣全島均感受到嚴重搖晃，共持續了 102 秒，震央在北緯 23.85 度、東經 120.82 度，約南投縣集集鎮，震源深度 8.0 公里，芮氏規模 7.3，該地震肇因於車籠埔斷層錯動，並在地表造成長達 85 公里的破裂帶。此地震造成了 2,415 人死亡，乃台灣自二戰後傷亡損失最大的自然災害。

本研究以集集地震事件進行分析，工業技術研究院能源與資源研究所(2000)於地震災後，比對地震前後之影像圖，根據地震前後影像圖所辨識出的變異點，提出了 21,969 處崩塌變異點的位置資料，圖 2-2 為台中、南投因 921 地震誘發崩塌的變異點資料，因 921 地震所引起之崩塌特性如下(王文能等，2000)：

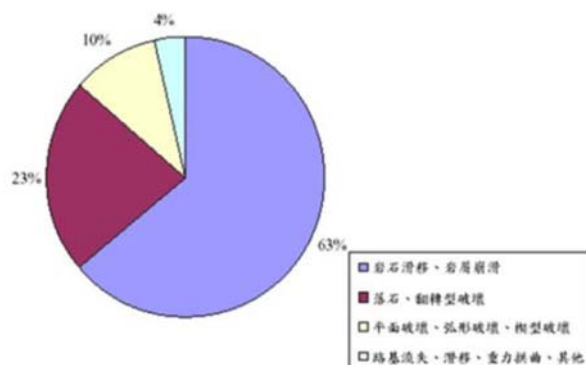
1. 崩塌地主要分佈在雙冬斷層至梨山斷層間的西部上衝斷層山地與雪山山脈；雙冬斷層以西與車籠埔斷層間，除了由頭嵙山層構成的九九峰表面崩塌外，地震崩塌並不多
2. 崩塌地特徵：
 - (1) 大多為小規模或表層崩塌
 - (2) 多發生在坡頂或陡崖邊緣
 - (3) 多發生在節理發達之砂岩、礫岩與台地堆積等地區
3. 發生崩塌之坡度以 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 最多，面積則以 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 間所佔面積最大，其次為 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 。
4. 地震崩塌地大多發生於坡頂。



資料來源：能資所(2000)

圖 2-2 台中、南投於 921 地震中誘發崩塌變異點

國家地震工程研究中心(1999)在震災發生後的大地工程震災現地調查，動員了 21 組大學教授及專家學者進行崩塌地現地調查，並確實掌握了中部山區 436 處坡地破壞的資料，調查的結果如圖 2-3 所示。統計各坡地災害破壞狀況。其共分成五大項，分別是崩塌類型，崩塌地坡度，崩塌地坡形，崩塌地地形位置，以及崩塌規模。此次地震所引起的崩塌類型，最多的是岩石滑移、岩屑崩滑佔總比率 63%其次是落石、翻轉型破壞共計 218 處佔總比率 23%，



資料來源：國家地震工程中心(1999)

圖 2-3 921 地震引發之崩塌類型統計

以地震引致的崩塌而言，通常以最大地表加速度(PGA)表示為地震在地表上對崩塌的影響，其單位為 $\text{gal}(\text{cm/s}^2)$ ，在地表上所受地表加速度越大則地表破壞越嚴重，而我國中央氣象局對震度分級之範圍如表 2-4 所示。

著名學者 Keefe(1984)將 1811 年至 1980 年由地震所引起的崩塌資料進行整理，其中共包含 40 個地震的崩塌歷史資料，研究中指出：

1. 儘管地震震度越大而崩塌地數量增加越多，但影響崩塌地主要以地質及環境為主。
2. 地震的規模越大，所影響的範圍越廣。

而在前人研究中，地震主要影響崩塌是在水平最大地表加速度 250gal 以上區域，而垂直方向的最大地表加速度對崩塌的發生則無太大關係(黃臺豐，1999；廖軒吾，2000)。由地震直接觸發的崩塌主要集中在水平最大地表加速度 400gal 以上的區域，而崩塌發生數量最多是在水平最大地表加速度 500~600gal 的地區(王文能、尹承遠等人，2000)。

表 2-4 中央氣象局地震分級表

震度分級		地表加速度範圍
0	無感	0.8gal 以下
1	微震	0.8~2.5gal
2	輕震	2.5~8.0gal
3	弱震	8~25 gal
4	中震	25~80 gal
5	強震	80~250 gal
6	烈震	250~400 gal
7	劇震	400gal 以上

第三節 崩塌災害潛勢評估

在地質學的領域上所謂崩塌潛感分析主要分為定值法與機率法兩大類(李錫堤與黃健政, 2005; 李錫堤, 2009)。定值法是以極限平衡計算的無限邊坡分析方法為基礎, 常被運用來預測及模擬地震或豪雨誘發的崩塌分布。統計法則是以統計多變量分析方法為主, 須使用長時期的崩塌目錄作為機率分析的基礎, 用來預測某一再現期的崩塌分布(Varnes, 1984; Guzzetti *et al.*, 1999; van Westen *et al.*, 2006)。統計法假設坡地的人文歷程與降雨為輸入值, 而崩塌發生則為輸出值; 其需藉由分析已發生崩塌區域各項影響因子組合, 諸如過去崩塌歷史資料與降雨特性資料, 以統計學方式推估崩塌時之臨界降雨特性。其優點在於以真實資料進行分析較為詳實可靠, 缺點在於需要大量歷史資料進行分析與趨勢預測。Bell(2000)研究指出, 崩塌發生之位置具有災害再發生之特性, 新崩塌地常發生於舊有的崩塌地範圍之內, 故對於現有崩塌地歸納發生可能性為此類評估之重點。災害事件機率分析(probabilistic hazard event analysis)已是目前天然災害相關研究的趨勢, 機率分析過程需要假設合理的機率模型與可靠的資料。然而對於高度複雜且關聯眾多因子的坡地崩塌災害分析(landslide hazard analysis)並不容易建構可涵括所有因子的機率模型, 因此過去研究多以多變量統計模式來進行, 例如多元線性迴歸(multiple regression analysis)、羅吉斯迴歸(Logistic regression)、判別分析(discriminant analysis)或不安定指數法(dangerous value method)(Mark and Ellen, 1995; 廖洪鈞等人, 2001; 胡婷雅, 2002; 張弼超, 2005; 黃仕先, 2008)。這類分析方法目前仍多被歸類為潛感分析(landslide susceptibility analysis)(李錫堤, 2009), 其主要目的在於評估廣大區域之山坡地穩定及繪製崩塌潛感圖。對於機率式坡地崩塌災害分析的實用進展仍是此類課題待努力的方向(李錫堤與黃健政, 2005; 李錫堤, 2009)。

在崩塌潛感分析方面之相關研究，已有學者將其大致分為定性法(qualitative)與定量法(quantitative)兩大類別。定性法是依其性質內容，再分為地形判釋法及專家評分法兩種，地形判釋法是由專家依照經驗直接針對地形判釋劃設崩塌潛勢區(Ives and Messerli, 1981; Varnes, 1984; Lee, 1990)。專家評分法亦是由專家依照經驗，就現場調查之崩塌情形，針對各崩塌因子作相對的排序，再賦予各因子之權重值，最後將各因子疊合，利用各因子權重計算最終之崩塌潛勢(Stevenson, 1977; Ives and Bovis, 1978; Sidle, 1985, 張石角, 1998)。然而，地形分析法及專家評分法可能存留主觀經驗，其分析結果會有因人而異的困擾存在。定量法則是運用統計方法分析已發生崩塌地之因子組合，再以定量方式針對目前尚未發生崩塌但具有相同特性之因子組合的區域進行崩塌潛勢值之預測。定量法主要包括多變量分析法、主成分法、卡方分配檢定法、費雪區別函數、不安定指數法、永久位移法、類神經網路法及模糊權重法等等(簡李濱, 1992; Kobashi and Suzuki, 1988; 蘇苗彬等人, 1998; Carrara et al. 1999; 范正成等人, 1999; 楊智堯, 1999; 謝豐隆, 2000; 范正成等人, 2002; 張弼超, 2005)。本計畫目標係發展坡地易損性曲線，為此領域之全新課題與觀念。比較過去研究方法之適宜性，可突顯本計畫之應用價值。因此以下將針對目前國內外常見之崩塌潛勢評估方法進行探討，分述如下。

一、不安定指數法

不安定指數法起源於簡李濱(1992)應用地理資訊系統建立坡地安定之評估方法，主要以模式評估因子之分類或分級類別為對象，計算所得之不安定指數可描述單一因子對所分析類型的坡地不安定程度，並利用不安定指數描述坡地之災害潛感大小。其估算流程分為以下三個主要步驟：

1. 單一因子分析：包含因子的分級及分類、各分類等級之災害密度統計及因子各分類等級安定指數之計算。

2. 因子組合分析：包含分析因子的決定、因子權重之計算及各類型災害不安定指數之計算。
3. 災害聯合分析：包含坡地不安定指數之計算及坡地發生災害類型之預測。

不安定指數估算公式如(2-1)式所示：

$$D_{Total} = D_1^{W1} \times D_2^{W2} \times D_3^{W3} \dots \times D_n^{Wn} \quad (2-1)$$

其中 D_1 、 D_2 、 $\dots$ 、 D_n 代表各評估因子之不安定指數值，如坡度因子或材料因子等，而 $W1$ 、 $W2$ 、 $W3$ 、 $\dots$ 、 Wn 則為各因子之權重值，疊加之後得到的不安定指數值介於 1-10 之間，數值所代表的意義是當數值等於 10 時，表示在所有的資料中，此坡地發生破壞的可能機率為最大者；數值等於 1 時則表示在所有資料中，此坡地發生崩壞可能機率為最小者，不安定指數值越高代表其發生崩塌的可能性越大，反之越小，而權重值以次方之指數型式出現，其代表之意義為當權重值為 0 時，則此因子的值變為 1，不影響乘積之結果，即代表因子為無效因子應予剔除，當權重值越大時，其影響不安定指數值越大，即代表著此因子越重要(蘇苗彬等人，2009)。各因子不安定指數之數值計算方法，係利用發生災害密度作衡量之基準，而災害密度值計算有兩種表達方式。其一為利用災害發生案例之崩塌個數密度及利用災害發生所佔面積之崩壞比等。一般乃將研究區域劃分為若干網格，再以崩塌發生案例的網格數除以研究區域內之總網格個數，而得該因子之不安定指數評估值，估算公式如(2-2)式。

$$D = \frac{9(X_i - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} + 1 \quad (2-2)$$

其中 D 代表該因子之不安定指數， X_i 代表崩壞比， $X_{\max}$ 代表因子分類中崩壞網格密度百分比最大值， $X_{\min}$ 代表因子分類中崩壞比最小值。而各因子

之權重 W_1 、 W_2 、 W_3 …、 W_n 則代表各因子對應之不安定指數所佔有之影響比例，各因子間比較計算之權重數值計算，其估算步驟有二。

1. 計算各因子權重比較值

因子及分類的好壞，將會直接影響因子能否敏銳描述坡地安定性問題之相關程度。因此，估算方式可利用各類等級統計而得崩壞比的變異係數，代表因子分類對發生崩壞機率的靈敏度。當因子變異係數較小時，各分類或分級發生崩壞機率相近，表示該因子之分類無法將崩壞機率高之地區決定出來；反之若變異係數較大者，則可利用此因子分類而決定出較清楚的坡地安定等級。變異係數估算公式如(2-3)式，式中之為變異係數，為標準偏差，為平均值。

$$V = \frac{\sigma}{X} + 100\% \quad (2-3)$$

2. 計算因子權重值

利用各因子間所計算出之變異係數，除以全部變異係數值之總和，即可得該因子之權重值，估算公式如(2-4)式，式中之 W_i 代表第 i 個因子之權重值， V_i 代表第 i 個因子之變異係數。

$$W_i = \frac{V_i}{V_1 + V_2 + \dots + V_n} \quad (2-4)$$

二、岩石工程系統法

岩石工程系統法起源於英國學者 Hudson 於 1992 年所提出之岩石工程系統(rock engineer system)，此法在國外有許多研究案例，但在國內尚未被廣泛使用。Jiao and Hudson(1995)曾結合模糊集觀念與岩石工程系統進行邊坡穩定評估。Yang and Zhang(1998)亦曾結合類神經網路概念與岩石工程系統用於邊坡穩定評估。Castaldini et al.(1998)利用岩石工程系統將地體構

造、地震學、地質學、水文地質學、地形學、土壤力學及岩石力學等學門之研究結合對地震誘發之地表效應進行探討，以期能表現影響岩石靜態及動態穩定狀況的各種影響因子的複雜關係。岩石工程系統可視為一種解析分析，藉由瞭解塊體之特徵再經岩石工程系統解析後，塊體之每一特徵都能被應用。這種方法應用塊體之特性，共可分為五個步驟(吳俊銘，2005)。

1. 選取影響坡地穩定的因子

以主觀方式選取可能影響坡地穩定之因子，如地震、水文、氣候、人為開發、坡地原先狀態、坡地特徵… 等因子，選取因子可能可對坡地崩塌系統有代表性之意義，且各因子間性質必須減少重複。

2. 因子矩陣編碼

將因子以對角線方式排列於矩陣上，並以給分方式決定各因子間之相互影響關係，分數值由最低 0 分(兩者無明顯之交互影響作用)至最高 4 分(兩者有明顯之交互影響作用)。當矩陣中各因子間之交互影響作用完成給分後，將各行各列之分數值累計，各列之分數值總和代表該因子對穩定系統之影響程度，亦稱為誘因值，各行之分數值總和代表坡地穩定系統對該因子之影響程度，亦稱為效果值。誘因值越高及效果值越低之因子，代表該因子對坡地穩定系統具影響性，但該因子卻不受其他因子之影響，此即為坡地穩定系統之重要因子。反之誘因值越低及效果值越高之因子，代表該因子對坡地穩定系統不具影響性，且該因子易受其他因子之影響，此即為坡地穩定系統之次要因子。

3. 決定各因子之相對重要性

將上述因子交互影響評估矩陣中之誘因值及效果值量化，即可給定各因子於坡地穩定系統評分之權重，權重值之給定如(2-5)式所示。式中之為各因子經估算後之權重值，則為各因子之誘因值，則為各因子之效

果值。此步驟檢驗各因子間之相互影響關係，考量各因子間是否獨立，可消除因子間之相依性對坡地穩定評估之影響。

$$W_i = \frac{(C + E)_i}{\sum (C + E)} \quad (2-5)$$

4. 因子細部評分分級

各因子間必須給定評分方式，以決定研究區域之坡地特性於對坡地穩定之影響，評分方式可由 0 分(與坡地穩定完全無關)至 N 分(與坡地穩定非常相關)， N 值之給定乃視該區域坡地特性決定之難易程度，一般為簡化評分流程，評分方式乃為 0 分(與坡地穩定無關)、1 分(會影響坡地穩定)及 2 分(主要影響坡地穩定)等。分級的界限主要考慮研究調查區內的各因子變異的範圍，亦考慮因子對坡地不穩定的實際意義。

5. 估算岩體不安定指數(RMII)

定義岩體不安定指數作為坡地穩定與否指標值，估算方式如(2-6)式：

$$RMII = \sum W_i \times P_{ij} \quad (2-6)$$

上式中之 $RMII$ 即為總評分之不安定指數值，則為各因子之權重，則為各因子之細部評分值。所得之 $RMII$ 值越大，則代表該坡地越不穩定。

三、統計分析法

統計分析法應用範圍極廣，廣義而言前述二種方法皆可歸類於統計分析，其他較常見的如判別分析、多評準決策、羅吉斯迴歸等(Mark and Ellen, 1995; 廖洪鈞等人, 2001; 胡婷雅, 2002; 張弼超, 2005; 黃仕先, 2008)。而近年最常見的即是羅吉斯迴歸模型(logistic regression model)，羅吉斯迴歸是對數線性模型的一種特殊形式。當對數線性模型的二元變數被當作應變數並定義為多元變數(自變數)的函數時，對數線性模型即是羅吉斯迴歸模型。

在二元變數分析中較常用的函數是羅吉斯分布。其值域在 0 與 1 之間有著 S 形狀的曲線，類似於隨機變數的累積分布曲線。其數學型式可寫為下式：

$$\ln\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = \alpha + \sum_{k=1}^k \beta_k X_{ki} \quad (2-7)$$

其中，為給定自變數時的事件應變數，由於其在 0 與 1 之間變化因此類似機率，通常可被視為崩塌潛勢值。利用蒐集調查之崩塌事件目錄所建立之自變數至構成的樣本，以及事件發生與否的判定(即 0 或 1)，即可用於描述在特定條件下事件的崩塌潛勢。

四、動態雨量崩塌潛勢模式

近年來經濟部中央地質調查投入許多人力及經費致力於發展國內崩塌潛勢模式，並自 2002-2006 年間完成為期五年之「都會區及周緣坡地整合性環境地質資料庫建置計畫」(經濟部，2006)，並建立無外部因子崩塌潛勢模式。其後自 2007-2010 年間完成為期四年之「都會區及周緣坡地崩塌潛勢評估」與「高山聚落地區地質災害基本調查計畫」(經濟部，2010)，完成都會區周緣坡地地質分區劃設、事件型崩塌目錄建置與坡面單元劃分等工作，並搭配豪雨引致崩塌事件之雨量資料，發展豪雨誘發崩塌之潛勢評估模式。自 2011 年起即針對崩塌臨界降雨量，採用定率法模式進行其臨界雨量反算，反推各坡面單元崩塌臨界雨量值。研究中並提出以「動態雨量崩塌潛勢模式—崩塌潛感值(P)」針對可能具有崩塌潛感之地質分區劃設其臨界雨量(朱晃葵等人，2012)，其模式係使用降雨前崩塌潛勢(P_0)及降雨引致崩塌潛勢評估崩塌潛勢值($W(R)$)，以坡面單元無外部因子崩塌潛勢與加權臨界雨量之線性疊加，做為動態雨量崩塌潛勢模式之基礎，如下式：

$$P = P_0 + W(R) \quad (2-8)$$

式(2-8)中 P 即為崩塌潛勢值； R 則為累積雨量值； P_0 為岩屑崩滑型崩塌潛勢值(或稱為無外部因子崩塌潛勢)，考量了 10 項地文因子，包括順向坡、

向源侵蝕、受河岸侵蝕程度、岩體強度分級、岩性、坡度、坡度均勻度、邊坡陡坡比例、坡高及坡型，再經由崩塌目錄中已發生崩塌事件經由羅吉斯迴歸求取； W 為某地質分區坡面單元受降雨影響之權重值，係經由蒐集過去崩塌發生之調查資料及崩塌時間之雨量資料，計算 $(1-P_0)$ 值與調查事件雨量值進行線性迴歸而得之權重係數。該研究將全臺劃分為 15 個地質分區進行初步設定，分別求其 P_0 及 R 值。以西部麓山帶砂頁互層區為例，其 $W=1.012 \times 10^{-3}$ ，與西部麓山帶砂頁互層區之 P_0 線性疊加後，即可求其動態崩塌潛勢，如圖 2-4 所示。於颱風豪雨時則由累積雨量之觀測判定坡面單元穩定與否。其判別式如下：

$$\begin{aligned} P &= P_0 + W(R) < 1 \quad (\text{穩定}) \\ P &= P_0 + W(R) = 1 \quad (\text{臨界}) \\ P &= P_0 + W(R) > 1 \quad (\text{不穩定}) \end{aligned} \quad (2-9)$$

動態雨量崩塌潛勢模式將崩塌潛勢值區分為無外部因子值與雨量權重值。此簡化線性模式所得並非崩塌機率值而係一無因次之潛勢值，因此是否適於實際應用仍有待驗證。

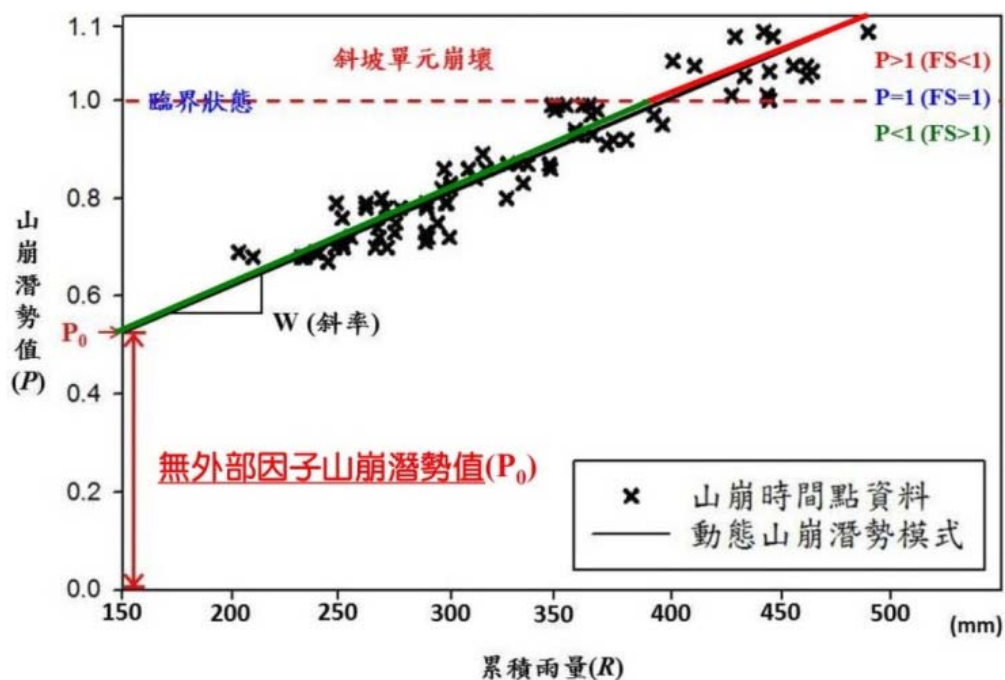


圖 2-4 動態崩塌潛勢線性疊加模式

第四節 崩塌分析單元

坡地崩塌之發生因素，可能來自於地震、降雨及坡面條件的不穩定。本計畫探討地震引致坡地崩塌可能的潛在因子及其影響，以所蒐集之實證區網格資料進行地震誘發崩塌之潛因探討與統計分析。對於不同地質、坡度、坡向及高程條件下地震誘發崩塌之關係，必須基於某個空間尺度作為後續建立坡地易損性曲線及資料選取之依據。目的在於萃取出發生潛因之空間尺度成為分析之基礎，並利用其進行崩塌發生可能性之評估。

為研究崩塌災害潛勢分析，在需要的區域中，找出最有可能發生崩塌災害之位置或其規模，此方法稱為崩塌潛感分析。而為進行崩塌評估首先步驟需選擇合適的尺度單元，各種繪製單元的方法皆曾被提出 (Meijerink, 1988; Carrara *et al.*, 1995)，可概分為下列幾種，其優缺點比較如表 2-5 所示。

1. 網格單元(Grid cells)

將一個集水區以相等的大小之網格進行切割，每個網格都被賦予各種因子數值，如地質、坡度、坡向、高程等 (Carrara, 1983; Giles and Franklin, 1998; van Westen, 2000)。

2. 地域單元(Terrain units)

觀察自然界中物質、形態、進程間之相互關係，反應地貌和地質之差異，地域單元亦是土地系統分類研究之基礎，應用於許多土地資源調查方面 (Cooke and Doornkamp, 1974; Speight, 1977; Verstappen, 1983; Burnett *et al.*, 1985; Meijerink, 1988; Hansen *et al.*, 1995)。

3. 坡面單元(Slope units)

由數值高程模型自動產製，將集水區及分水嶺間的區域切割 (Carrara, 1988; Carrara *et al.*, 1991)，為簡化過後之地形單元。根據不同類型調查(深層滑動與淺層滑動、複合型與岩屑流)，測繪單元不是與子集水區符合，就是與坡面單元(子集水區的左右兩邊坡)符合。

4. 特別條件單元(Unique-condition units)

此單元意味著將個別的邊坡因子分類成幾個有意義的類別並儲存在單一圖層。藉由連續地重疊所有圖層，同質的區域(特別條件)會被挑出，根據這些特別條件的大小、性質、數量等標準就可用來分類輸入的因子(Bonham-Carter, 1994; Chung *et al.*, 1995)。

5. 地貌單元(Topographic units)

以坡面單元進一步依照岩性劃分出水文、地形、岩性一致的地貌單元(O'Loughlin, 1986)。

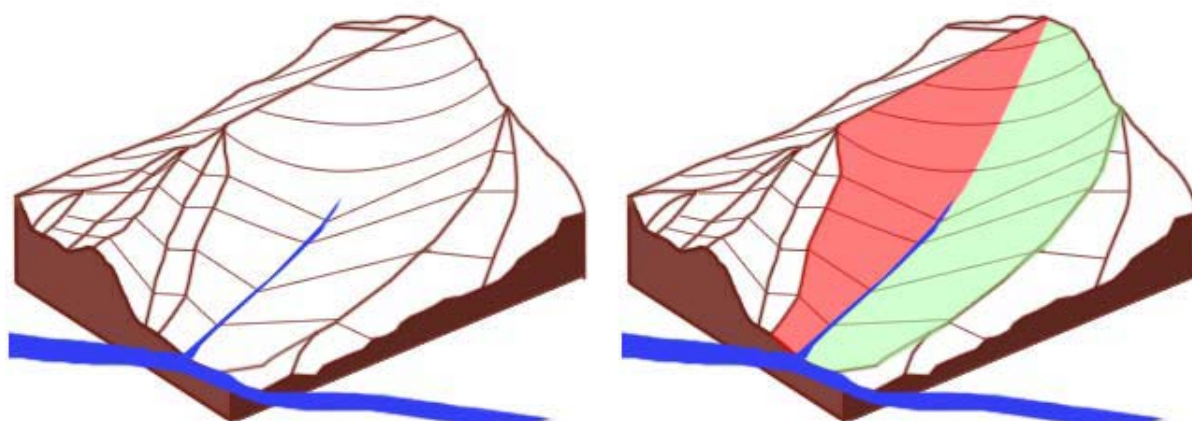
表 2-5 不同測繪單元優缺點比較

測繪單元	優點	缺點
網格單元	結構簡單，容易使用，且製作簡單快速，大小一致。可依使用者需求決定網格大小。	無法詳細呈現連續之地形面，須有足夠的記憶體和處理速度，才能處理廣域及大量的分析單元。
地域單元	土地系統劃分的基礎，曾被大量應用在土地資源的調查。	較具主觀性，較適合小比例尺有限範圍的評估。
坡面單元	所得之參數代表整個地形單元，較具地形上的連續意義，極適於崩塌潛勢的研究。	小型岩屑崩塌難以呈現，集水區界線不一定符合地貌地質或土地利用分界。
特別條件單元	單元內地形與地質特性皆相近，單元與單元間特性有所區別。	容易產生大量的製圖單元，造成分析困難。
地貌單元	單元內地形與地質特性皆相近，單元與單元間特性有所區別。	要以坡面單元進一步依照岩性劃分出水文、地形、岩性一致的地貌單元，需要大量時間與精確的地質資料，僅能針對小範圍執行。

資料來源：Guzzeti *et al.*, 1999

目前坡面單元在崩塌潛感分析上之應用中最普遍被使用的測繪單元為網格單元及坡面單元，此二種方法各有其優缺點。網格單元係將分析區域切分成較小網格再進行統計推估(吳上煜等人，2012)，其優點是符合統計的權重一致性，缺點是無法考慮地形邊界效應而導致偏估。網格單元對於整體坡地狀況(如一個邊坡)，掌握度亦不佳，較難以描述坡面的力學與物理機制。坡面單元則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剔除不適用區域再進行統計迴歸(朱晃葵等人，2012)。而義大利為最早使用坡面單元進行崩塌潛感分析的國家，Carrara(1983)將坡面單元應用在崩塌潛感分析上並利用判別分析方法成功將崩塌及非崩塌區域劃分開來，Carrara *et al.*(1991,1999)同樣使用坡面單元及判別分析法，並加入了地理資訊系統(GIS)的技術對義大利 Umbria 地區進行崩塌潛感分析與崩塌潛感圖繪製，得到含泥地層、植生覆蓋率、含水及不含水地層為當地最顯著之因子。Guzzetti(2005)在義大利的 Staffora River basin，將 275km²的研究區劃分成 2243 個坡面單元，並使用了多年期崩塌目錄，計算每個坡面單元中不同重現期距的崩塌超越機率及崩塌潛感值。以往利用坡面單元當作基本測繪單元並使用統計方法進行崩塌潛感分析時，是以每個坡面單元中山崩面積所佔的比例，取一門檻值當作山崩組與非山崩組的分類，定義此坡面單元是否崩塌，統計時應變數為類別變數，也就是坡面單元為崩塌或是非崩塌。

坡面單元有兩種不同的定義：一是指坡面縱斷面上被變坡點(slope break)分割的最小單元，另一是指侵蝕基準以上的整個坡面系統(Jackson,1997)。Xie *et al.*(2004)將坡面單元視為坡面的一部分或分為左、右部分坡面單元。本研究主要採用第二種定義作為崩塌潛勢分析之基本單元。侵蝕基準以上的整個坡面系統(Penck, 1953)。此定義較常被運用在坡地災害研究上，一個小集水區以水系為侵蝕基準，以上的左右兩側坡面各被視為一個坡面單元(Carrara *et al.*, 1991; Xie *et al.*, 2004)，如圖 2-5 所示。



資料來源：簡瑋延，2011

圖 2-5 坡面單元示意圖

以地形觀點而言，坡面單元係被集水區中山脊線(分水嶺)和山谷線(溪流線)所劃分。過去文獻顯示劃設坡面單元的方法各有不同且各有優缺點簡瑋延(2011)，如表 2-6 所述大致可以分為四種。本研究使用的坡面單元劃分方法為集水區重疊法，可利用地理資訊系統軟體之水文分析功能直接進行劃設，將原集水區分割為左右兩坡面單元。在過去的文獻中，集水區重疊法會因為反轉的 DEM 產生錯誤，導致繪製的坡面單元無法符合真實的地形。這時就需將易產生錯誤反轉 DEM 的影像部分，進行人工劃設處理以改進反轉 DEM 後集水區失真的情形。

表 2-6 坡面單元分割方式比較表

分割方法	優點	缺點
集水區重疊法	利用單一地理資訊系統(ArcGIS)之分割即可完成。	反轉後之數值高程(DEM)未必能順利得到集水區。
主流延伸法	可由良好之水系及集水區分析方法產生合理坡面單元。	手動延伸需人工為之，自動延伸值須自行開發可嵌入系統之模組。
源頭切割法	可分割出最容易發生崩坍地源頭區，有助於山崩災害之分析研究。	需自行開發撰寫合理之自動分割程式。
影像分割法	可將一小集水區案需求進行切割。	使用參數未必有一定標準。

資料來源：簡瑋延（2011）

第五節 崩塌潛因與誘因

國內外學者對於崩塌機制及發生的原因，均指出其原因極為複雜，且很少由單一因子構成。導致崩塌發生的影響因子一般被分成潛在因子(簡稱潛因)與誘發因子(簡稱誘因)(李三畏，1984，1986；張石角，1987)。本研究認為潛因是指坡地本身具備的基本環境條件造成破壞之因素，包括地質、地形、岩石強度、節理方向、植生等。另一類係非自然因素，例如人為開墾、開闢道路、社區、開墾土石礦等活動，屬人為因素造成，一般可稱之為人工邊坡。誘因則指可直接誘發坡地崩壞之變動因素，如降雨、地震、河道沖刷、地下水等。齋藤迪孝(1980)曾指出崩塌的發生可能是因為物體吸收水分，或是邊坡上方的承載量增加，因而導致剪應力增加，也可能是因為原來的邊坡工程開挖或河流切割坡腳，致使坡度增加而威脅邊坡的穩定度，本研究稱之為致災因子，此即變動因素的特性。

潛因與致災因子造成坡地崩塌的力學機制，可從塊體受力之分析探討坡地是否穩定或可能發生滑動問題。目前國內外學者普遍認為影響塊體可能滑動之力有二(吳俊鉉，2005)：

1. 滑動力：驅使塊體失去平衡的主要動力，亦稱為剪應力(shear stress)，其來源主要包括土石本身的重量以及外加的荷重或應力；
2. 抵抗力：塊體本身所提供，亦稱為抗剪強度(shear strength)，其來源則取決於材料之間的顆粒摩擦、膠結作用以及其他的內部應力。

若兩力達到平衡時，則塊體穩定不動。以坡地而言，若有其他因素促使滑動面下滑力大於抗剪強度時，則塊體開始發生滑動或崩塌等現象。由上可知，對於影響邊坡穩定的因素，即是足以影響剪應力及抗剪強度之因素。Fookes *et al.*(1985)認為大地構造環境、地質、地形及氣候等因素足以影響坡地穩定。張石角(1987)則認為坡地崩塌的主要致災因子為雨水和地震，且涉及之相關因子共有八項：坡度、岩質、高差、地質構造與坡向之關係、

土壤、不連續面之傾角、動態地形作用及水。張石角(1988)也提出由於坡地的地質與地形條件組合有利於邊坡運動，才使得在降雨或地震事件發生時，常造成崩塌現象發生。Koukis & Ziourkas(1991)提出可能影響邊坡崩塌的因子有 64 個之多，包括動態的致災因子及潛在的環境因子。溫振宇(2005)整理 1996 年~2005 年 43 篇與崩塌製圖相關文獻，指出在前人研究中，崩塌因子選取次數的多寡依次為為坡度、岩性、坡向、高程、土地利用、與水系相關(包括距離、密度等)、植生相關(包括種類、密度、年齡等)、與地文相關(包括距離、種類、構造單元等)、土壤相關(包括種類、厚度、組織等)、坡形、曲率相關(包括水平、垂直等)、降雨相關(包括累積雨量、降雨強度等)等。本研究進一步整理 1985 年~2013 年與崩塌相關文獻再加上溫振宇(2005)整理自 1996 年~2005 年與崩塌相關文獻共 72 篇，將各篇論文中之崩塌因子取出，作詳細的統計資料整理如圖 2-6 及表 2-7。

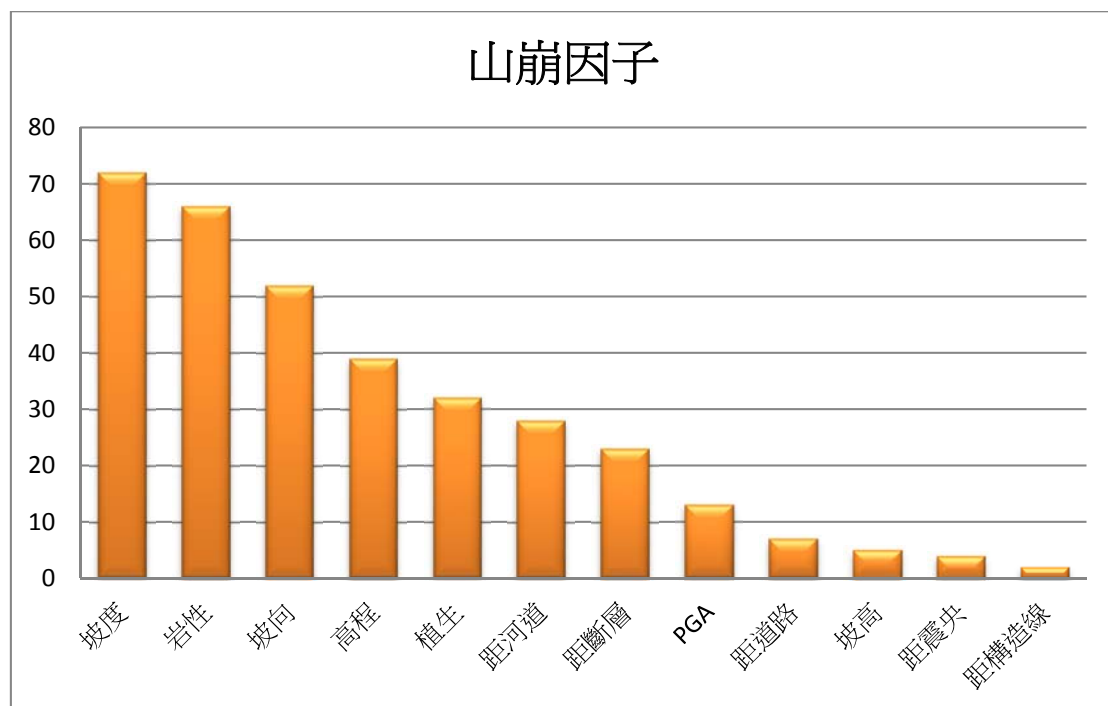


圖 2-6 1985 年~2013 年與崩塌製圖相關之文獻選取因子統計圖

表 2-7 1985~2013 年文獻選取因子

序位	作者	年份	坡度	岩性	坡向	高程	植生	距河道	距斷層	P G A	距道路	坡高	距震央	構造線
1	潘國樑	1985	○	○										
2	鄭元振	1992	○	○			○	○						
3	簡李濱	1992	○	○	○			○						
4	吳佐川	1993	○	○	○	○	○							
5	莊光澤	1994	○	○	○							○		
6	陳永寬	1994	○											
7	游中榮	1996	○	○	○	○	○	○			○			
8	黃台豐	1999	○	○	○					○			○	
9	楊智堯	1999	○	○	○		○							
10	林書毅	1999	○	○	○		○	○	○		○			
11	藍世欽	2000	○	○	○							○		
12	廖軒吾	2000	○	○	○			○	○	○	○		○	
13	呂政諭	2001	○	○	○					○		○		
14	詹永振	2001	○	○	○		○					○		
15	楊佳勳	2001		○									○	
16	王嘉燁	2002	○	○	○	○	○		○					
17	林淑媛	2003	○	○	○	○	○	○	○	○				
18	林彥享	2003	○	○	○	○	○	○	○	○		○		
19	鄭傑銘	2003	○	○			○							
20	廖啟雯	2004	○	○										
21	張哲銘	2004	○	○			○							
22	溫振宇	2005	○	○	○	○	○	○	○	○				○
23	曾聖權	2005	○			○	○							
24	高雅嫻	2005	○	○						○				
25	施俊廷	2005		○										
26	馮梓琰	2007	○	○	○	○	○							
27	彭文飛	2008	○	○										
28	陳俞旭	2008	○	○	○	○				○				
29	王美惠	2008	○	○	○	○	○	○						
30	廖啟岳	2008	○	○					○	○				
31	陳志豪	2009	○	○		○				○				
32	李馨慈	2010	○	○	○	○		○	○	○			○	○
33	劉盈劭	2013	○	○										
34	Gokceoglu <i>et al.</i>	1996	○		○	○	○	○	○					
35	Atkinson <i>et al.</i>	1997	○	○	○		○		○					
36	van Westen <i>et al.</i>	1997	○	○	○			○	○		○			
37	Fernandez <i>et al.</i>	1999	○		○		○	○	○					
38	Barredo <i>et al.</i>	2000	○	○				○						

序位	作者	年份	坡度	岩性	坡向	高程	植生	距河道	距斷層	P G A	距道路	坡高	距震央	構造線
39	Gorsecki <i>et al.</i>	2000	○		○	○		○						
40	Nagarajan <i>et al.</i>	2000	○	○	○	○	○	○						
41	Uromeihy <i>et al.</i>	2000	○	○					○					
42	Baeza <i>et al.</i>	2001	○		○	○	○							
43	Dai <i>et al.</i>	2001	○	○	○	○	○	○						
44	Lee <i>et al.</i>	2001	○	○	○	○	○	○						
45	Dai <i>et al.</i>	2002	○	○	○	○								
46	Kojima <i>et al.</i>	2002	○	○	○	○	○	○						
47	Nagarajan	2002	○	○	○	○	○		○	○				
48	Lee <i>et al.</i>	2002	○		○									
49	Cevik <i>et al.</i>	2003	○	○	○	○		○	○					
50	Dai <i>et al.</i>	2003	○	○	○	○								
51	van Westen <i>et al.</i>	2003	○	○				○	○					
52	Santacana <i>et al.</i>	2003	○	○	○	○		○						
53	Remondo <i>et al.</i>	2003	○	○	○	○	○							
54	Fernandez <i>et al.</i>	2003		○	○		○	○	○					
55	Chung <i>et al.</i>	2003	○	○	○	○	○							
56	Carrasco <i>et al.</i>	2003	○	○			○							
57	Lin <i>et al.</i>	2003	○	○	○	○			○	○				
58	Ayalew <i>et al.</i>	2004	○	○	○	○								
59	Cevik <i>et al.</i>	2004	○	○		○		○	○					
60	Ercanoglu <i>et al.</i>	2004	○	○	○	○	○	○	○		○			
61	Ercanoglu <i>et al.</i>	2004	○		○	○								
62	Lan <i>et al.</i>	2004	○	○	○	○			○					
63	Liu <i>et al.</i>	2004	○	○	○				○					
64	Zezere <i>et al.</i>	2004	○	○	○									
65	Chau <i>et al.</i>	2004	○	○	○	○								
66	Chau <i>et al.</i>	2004	○	○	○	○	○							
67	Suzen <i>et al.</i>	2004		○	○	○		○	○		○			
68	Phi <i>et al.</i>	2004	○	○	○	○	○	○						
69	Baldiviezo <i>et al.</i>	2004	○			○		○						
70	Lee <i>et al.</i>	2004	○				○							
71	Zezere <i>et al.</i>	2004	○	○	○									
72	Gomes <i>et al.</i>	2005	○	○										
73	Ayalew <i>et al.</i>	2005	○	○	○	○					○			
74	Moreiras <i>et al.</i>	2005	○	○										
75	Gomez <i>et al.</i>	2005	○	○	○	○								
76	Ermini <i>et al.</i>	2005	○	○										
	選取次數		72	66	52	39	32	28	23	13	7	5	4	2

資料來源：本研究整理

由於坡地崩塌影響層面廣泛，國內外之研究對於不同因子組合與崩塌之關聯性已經發展許多不同方法與研究，共同特性是通常選擇其關切之因子予以分析研究。本研究主要探討的是地震引致坡地崩塌的潛在因子及其影響，國外學者提出可能引起崩塌之因子高達六十四個之多，且許多是無法量化的因子。藉由過去文獻之回顧，在眾多可能影響崩塌之潛因中，大多選用坡度(地形)、坡向、高程、地質或岩性等因子、地質或岩性等因子，作為分析崩塌採用的重要變因(陳紫娥，1993；Dai and Lee, 2001；溫振宇，2005、蕭芝昀，2008)。此五類因子涵蓋在圖 2-6 所列之前五項重要因子之中。本研究亦針對這些因子予以考量，整理如表 2-8，以下分別針對影響崩塌災害潛因和致災因子予以探討。

表 2-8 影響崩塌災害之潛因和誘因

類型	分類	說明
潛因	地形因子	包括地質、岩性、坡度、坡向、高程等與坡面原始環境相關因子，其變動幅度緩、周期長，可視為不易變動之因子。
	植生因子	例如植被狀況。植生對崩塌影響是間接性的，植生佳地表排水較佳、土層緊實不易崩塌；植生差裸露地多，易沖蝕、入滲使土壤凝聚力降低而易崩塌。植生變動幅度大、周期短，集水區每年之植被狀況可能不同。
	水文因子	水系、河川、地下水位之影響。主因是河道旁坡地易受沖刷引致崩塌。理論上距河道越近易崩性越高，反之越低。
	人為開發	非自然因素，包括山區道路開發、開墾樹林成為梯田、山區別墅興建及採礦等。這些人為的開發活動擾動原有坡地的自然發展，改變環境特性。
誘因	降雨因子	過多降雨導致地表沖蝕及地表水入滲行為，促使邊坡穩定度降低，一旦塊體滑動力大於抵抗力，即會發生崩塌現象。
	地震因子	地震產生之振動和地表加速度會引致坡地塊體受到地震力而滑動或崩落；或震後土石鬆動造成易引發崩塌現象。

一、潛因

(一)地形因子(坡度、坡向、高程等)

以自然山坡地而言，影響邊坡崩塌發生之地形因子最重要的包括坡度、坡向等。探討坡度對坡地崩塌之影響，由於塊體受重力作用本身即具有崩落、崩滑之動能，因此坡度陡峭或平緩即會影響塊體脫離原本位置之滑動力及抵抗力(弱面摩擦力)。坡度陡峭之塊體因其沿坡面方向之重力分量大具有較大之滑動力，但不一定有較小之弱面摩擦力，端視弱面摩擦係數而定。然一般而言，較陡之坡地引發邊坡崩塌發生之動能較強，因此發生坡地崩塌之機率理應相對增加。反之，坡度平緩塊體具有較小之滑動力，因此引發崩塌之動能較弱，發生坡地崩塌之機率相對減少。此外，坡向對邊坡崩塌之影響，則主要與迎風面和地震動方向兩者相關。若降雨風面與坡向一致，會造成坡面直接承受大量降水蓄積；而若地震發生時與震波行徑方向一致，則易放大重力之影響，增加崩塌動能。

在一般觀念中認為坡度越陡則邊坡越不穩定，因此較容易產生崩塌災害。許多研究都曾探討坡度對坡地崩塌發生之影響及關連性。Campbell(1974)認為淺層崩塌事件多發生於坡度 $18.4^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之間。Keefe(1984)針對歷史記載 40 個著名地震引發坡地破壞之案例進行統計，彙整出引發各種不同破壞類型之最低坡度關係。李三畏(1984)提出臺灣地區坡度在 31° 至 61° 之間最容易發生崩塌。Tibaldi *et al.*(1995)針對 1987 年南美厄瓜多爾安地斯山之地震引發崩塌案例進行研究，結果顯示於地震所引發之崩塌案例中，坡度的影響並不顯著，但卻與坡向有明顯的關連性，但此結論乃為個別案例之結論。沖村孝(1996)和奧西一夫(1996)在阪神地震後之六甲地區相關研究中指出，崩塌主要集中於 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 之邊坡。游中榮(1996)以地理資訊系統對北橫地區之崩塌潛感度進行研究，發現坡度介於 30° 至 70° 之間最易引發崩塌行為，且高程位於海拔 800 公尺以下

之，發生崩塌之機率較高，坡向為北、東北、東及東南者，其崩塌機率較高。胡蘇澄(1997)利用 GIS 評估七家灣溪流域過往發生之崩塌危險區，於其研究區域中，坡度超過 45% 以上之崩塌累積面積佔全總崩塌面積的 91.6%。Crosta(1998)認為在義大利 Alpine 地區，淺層崩塌大多發生於坡度 25°~40° 之間。Rodriguez *et al.*(1999)曾彙整過往崩塌案例發現：欲引發岩石塊體墜落行為，坡度必須在 35° 以上才會發生；而欲引發岩石塊體滑移行為，坡度必須在 55° 以上才會發生。黃臺豐(1999)研究 1998 年瑞里地震所誘發之山崩，發現大部分瑞里地震之崩塌案例都位於超過 55° 以上之坡度，且不同地質破裂面活動的方向會對不同崩塌產生影響並與坡度坡向相關，崩塌之案例多分佈於北、西北、西、西南及南等五個坡向上。Mario and Randall(2000)針對 1994 年美國加州地區地震引發之崩塌案例進行研究，發現坡度介於 26° 至 30° 時具有最大之總崩塌累積面積，坡度介於 36° 至 40° 時具有最多數量的崩塌案例，而坡度介於 46° 至 50° 時之崩塌密度最高。Keefer(2000)針對美國加州地區因地震所引發的崩塌案例進行統計研究，發現坡度越大便具有越高數量之崩塌破壞。鄭錦桐(2005)由崩塌地統計結果發現，崩塌面積明顯增加的區域，坡度亦多分佈於 30°~60° 間。Rajakumar *et al.*(2007)認為坡度 25°~45° 間較易誘發崩塌，並認為坡度越高降雨停留於地表的時間越短，坡度太低不易形成誘發崩塌之條件。黃聖慈(2008)提出坡向易受季風方向、日照或降雨等影響，岩層之走向若與坡向相同極易產生崩塌。柯明淳等人(2012)認為崩塌地多分佈於 30°~50° 間，但大型崩塌則多發生於 60° 以上，且所占之崩塌百分比較高。

而針對集集地震所引發的崩塌，洪如江等人(2000)依據草嶺、九份二山、九九峰及中橫公路谷關德基段之崩塌案例資料庫分析，認為 90% 的破壞發生在大於 45° 以上之坡度。廖軒吾等人(2000)針對集集大地震所引發之崩塌案例進行研究，發現大部分都發生在坡度超過 55°(28.81°) 以上

之區域；而坡度超過 45° 時，崩塌有明顯增多之趨勢，坡向為南及西南之邊坡，其崩塌率例有明顯增加之趨勢。劉盈劭(2001)和張政亮(2005)調查震後崩塌地分布，發現其中崩塌主要集中分佈在坡度 $20^\circ \sim 60^\circ$ 的區間內。陳樹群等人(2004)探討 1999 年集集地震於南投縣九九峰地區引發之邊坡崩塌現象，發現邊坡坡度介於 $30^\circ \sim 60^\circ$ 間之崩塌案例佔總崩塌案例之 62.5%。由過去學者針對坡度所調查的結論，集集地震所誘發之崩塌，崩塌地發育個數最多者集中在坡度 $30^\circ \sim 40^\circ$ 之間，且絕大部份的崩塌地發生坡度介於 $20^\circ \sim 50^\circ$ 之間，且發現坡度越高的區域其崩壞比越大(王文能、尹承遠等人，2000；Weissel *et al.*, 2001，劉盈劭，2001；張子瑩，2002)。

由上述文獻可見，坡度對崩塌的影響並不一定越陡即崩塌量越高，還可能受其它因子的作用，例如地質條件、植生復育、降雨集中分布等。雖然這些不同的研究結論可能會受採用的研究方法、採樣方式、統計方法甚至崩塌的定義而有所差異。但可以觀察到的是，坡地發生崩塌的可能性隨坡度增加而提高，但並非嚴格遞增，而會在某高坡度後下降。這個現象可解釋為極陡坡因其多為裸露岩石，較鬆散土層已較少，因此已無一般定義之崩塌現象或可用樣本，自然無法藉由統計研究得知其崩塌特性。

(二)地質因子

地質即坡地材料的原生特質，研究者普遍認為原生岩層、強度或地質構造會影響該坡地是否易於發生崩塌；然而，地質的影響卻也是最複雜的，它包含岩性強度(rock strength)、地層結構(lithology)、土壤(soil)和風化(weathering)等特性。不同地質岩性於相同降雨或地震條件下會發生不同型式之崩塌行為，例如堅實而固結度高的岩層較不易發生崩塌，軟弱且破碎程度高的岩層則易引發崩塌或落石(Wilson and Keefer, 1985；黃臺豐，1999；廖軒吾，2000；王文能，2000；溫振宇，2005)。岩性的不同所以所形成的岩塊大小也不同，若是斷層、節理等構造通過岩體，則岩層的穩

定度就會降低，因此增加崩塌的發生機率(謝有忠，1999；林慶偉，2002)，在岩層中的地質構造、岩石強度及土壤厚度都會對於崩塌有一定程度的影響(張石角，1995；陳宏宇，1999)。此外，岩性也影響地震波的傳遞速度，越堅硬的岩層波傳速度越快，能量衰減也越慢，因此大多數地震學者皆認為岩性以及覆土層厚度，是影響地震衝擊的關鍵因素。

由於地質對崩塌具有相當程度之影響，過往許多研究都曾針對地質因子探討引發崩塌之種類、發生位置及所謂的邊坡穩定性。Keefer(1984)認為地震所誘發的山崩多發生在膠結不良或多節理面之地層；張石角(1998)以工程地質觀點將臺灣東部地區歸納為三個主要分區：硬岩區、軟岩區與沖積扇階地，各分區主要的崩塌類型，在硬岩為落石、軟岩為弧型地滑、沖積扇階地則是土石流；游中榮(1996)於北橫地區進行山崩潛感研究，發現以石底層、大寮層等沉積岩發生崩塌機率較大；Crosta(1998)認為淺層崩塌發生通常與該區土層厚度相關，且常發生於風化土層、冰河土層及沖積土層中；黃臺豐(1999)對瑞里地震所誘發的山崩分布進行研究，認為岩體強度不佳的卓蘭層及錦水頁岩具有較高的山崩率；Rodriguez *et al.*(1999)研究發現特定的地質狀況會造成特殊的山崩潛感；Keefer(2000)對美國加州地震進行研究，發現崩塌發生率與地層岩石分類的關係達到影響顯著，堅固而膠結良好的地層岩石分類有較低的山崩率；但分析其地質剪力強度與山崩率，則發現並無顯著影響關係。Keefer 認為此現象跟研究區域其他因子相關，例如坡度、地表運動等因素所干擾；洪如江等人(2000)以統計方法分析集集大地震所誘發的崩塌案例，發現超過 90%的邊坡破壞位於沉積岩及亞變質岩，但崩塌案例的分佈情形與地震所引發的地表最大加速度分布有一致的趨勢。代表在集集大地震案例中，地質對於引致崩塌有重要影響，此係震波之傳遞與衰減和地質高度相關之故；廖軒吾等人(2000)曾分析集集大地震之崩塌案例，發現地質年代最年輕的頭嵙山層最易產生

山崩，此案例代表地質年代與崩塌可能亦有關聯。Liu and Mason(2012)認為坡度越高會有較高的崩塌潛勢，但坡度越高的區位，通常其所屬岩性強度較高且岩石組成亦較堅硬，反而不易誘發崩塌；其實際進行現勘發現石灰岩多分布於坡度較陡峭處，而較脆弱的砂岩與泥岩，則分別位於中、低坡度，坡度與岩性因子彼此互相影響。

(三)植生因子

坡地表層土壤之植生狀況對崩塌影響是間接性的，通常植生被覆較佳之坡地之地表排水較佳、土層較緊實，因此復育良好的坡地較不易發生崩塌；反之，植生較差之坡地裸露地多，降雨易沖蝕、入滲使土壤含水提高而降低土壤凝聚力增加崩塌的可能性。因此植物生長情況在影響崩塌是否發生上，主要扮演降低降雨沖蝕地表及穩固土體的角色，以樹木生長茂密之森林與植生稀疏之坡地相較，植生佳之坡地由於葉冠茂密及地表可能有枯枝落葉保護，地表不易受降水直接影響。因此降水衝擊被減緩有助於增加地表滲流量及減少地表逕流量，入滲之滲流量經樹木根系吸收有助於樹木成長及根系於土壤中逐漸擴張，植物根系將可對塊體提供穩固力降低塊體降雨之影響。反之，植生差之坡地一旦遭遇強降雨或集中豪雨侵襲，地表易受降雨直接沖蝕而影響坡地塊體。降雨動能大促使地表水分不易入滲且地表逕流量大，首先影響的是促使樹木根系無法有效吸收水分及樹木生長不易，其次地表逕流量大持續沖蝕土壤地表，坡地塊體在如此作用下即可能發生崩塌。然而此影響主要係針對降水引致崩塌，對地震引致弱面破壞之崩塌則較無影響。

國內外針對植生對坡地穩定之影響亦已有許多研究成果，O'Loughlin(1974)、Ziemer(1981)、Abe and Iwamoto(1987)都曾提出砍伐森林植生將會促使坡地土體植生之根系力降低；Bishop and Stevens(1964)及 Endo and Tsuruta(1969)研究發現砍伐邊坡植生後 3 至 10 年期間，淺層崩

塌發生頻率會增加。植生減少後之根系力衰減情況及後續植生恢復時之最小根系凝聚力，皆會影響該處崩塌發生再現性；Ziemer(1981)認為邊坡塊體之植生經砍伐後，該地區約需經過 15 至 25 年植生復育，才能使該坡地之植生根系強度恢復。

(四)水文因子

水文因子係指水系、河川、地下水位對於崩塌之影響，最常見的是河道旁坡地受水流的冲刷導致坡腳掏空引致崩塌。一般所指水文因子如河川級序、距河道距離等。理論上距河道越近因水的影響崩塌潛感越高。尤其是颱風期間所挾帶大量降雨，易於坡地上游發生地表逕流而快速匯入河川導致水位暴漲，此現象極易引發坡地崩塌發生。Fourniadis *et al.*(2007)將水系分為主要、次要以及最小支流等三個等級，並認為不同水系等級具有不同的影響範圍，稱之為緩衝區，緩衝區內應有較高之崩塌潛勢。Quinn(2010)曾針對加拿大東部地區建立崩塌潛勢地圖，認為大量崩塌區域鄰近地表溝渠並與流量大小有關。Liu and Mason(2012)指出鄰近河道之坡地本身地形較為陡峭，同時受到地表逕流或降雨沖蝕作用影響，易造成附近地表土壤含水量較高而增加崩塌發生可能性。

(五)人為開發(非自然因素)

臺灣地小人稠，山坡地土地開發是不得不然的經濟活動。正因如此，山坡地由於經濟發展或人類活動等因素而開發，若開發過後無考慮之保護措施，將導致崩塌事件頻率增加且危及住民之生命財產安全。臺灣地區山坡地人為開發現象包括山區道路開發、開墾樹林成為梯田、山區別墅興建及採礦等行為，此類行為都代表者經濟逐漸成長及都會的發展；但亦代表人類活動正不斷入侵自然界。以臺灣屬海島地形且平地面積不及總面積的三分之一，人為開發行為隨著經濟發展必定會進入山區。這個現象由民國 70 年代間的經濟起飛到民國 80 年代中期的土砂災害出現可見此變遷。時

至今日水土保持的觀念演進，可看出人為開發引發坡地崩塌現象的關連(吳俊銘，2005)。以常見的公路建設為例，由於交通聯絡需要，台灣有許多主要公路位處地勢高陡的山區或緊鄰水流湍急的溪谷。此外，坡地開發造成土地利用度增加，建物、農地、水利用地等都會擾動原有坡地的自然發展。李三畏(1984)認為大量的改變山坡地原有型態及土地利用現況容易引發崩塌，且認為因人為開發因素而導致坡地崩塌現象，跟四項原因相關，包括選擇地點不當、設計施工技術不良、缺乏臨時保護措施及缺乏緩衝及保護區；張石角(1987)認為山坡地開發為社區、道路或其他土地利用，常會削弱邊坡穩定度而發崩塌，進一步將導致開發地區本身或其下鄰近地區的災害。

二、誘因(致災因子)

(一)地震因子

臺灣位於菲律賓海板塊和歐亞大陸板塊之間，地震活動相當頻繁。地震所產生之地表震動和地表加速度會引致坡地塊體滑動或崩落，最著名的案例為九二一集集地震時，南投縣國姓鄉南港村九份二山地區及南投縣草屯鎮九九峰地區山坡地的大量崩塌。過往以地震角度探討崩塌之研究相當多，亦屬土木及大地工程研究的一環。Keefer(1984)在 1984 年對歷史上有記載的 40 個地震誘發的崩塌進行研究，繪製地震強度及地震規模可能引發崩塌之最遠距離關係圖，其認為芮氏地震規模需大於 4.0 方能引發崩塌之最小震度；Tibaldi *et al.*(1995)對南美厄瓜多爾安地斯於 1987 年 3 月發生的地震進行研究，研究指出：該地震所誘發的崩塌主要受地表震動行為所影響，崩塌分佈與等震度線所形成之橢圓趨勢相近；黃臺豐(1999)以衛星影像輔助探討 1998 年臺灣嘉義瑞里地區地震所誘發的崩塌分佈進行研究，其認為發生區域皆位於水平最大地表加速度超過 250gal 以上之區域，且多位於震央距離 15 公里以內；洪如江等人(2000)針對 1999 年集集地震

所誘發的崩塌進行統計分析，認為當垂直向地表最大加速度大於 200gal 且水平向地表最大加速度大於 150 gal 的地震即可誘發崩塌；廖軒吾等人 (2000) 針對 1999 年集集地震進行研究，認為地表加速度超過 250gal 之區域，崩壞比明顯地大於其他地區。由上述可知地震對引發坡地崩塌之影響。本研究主要係針對發展地震引致之坡地易損性曲線，將進一步深入討論。

(二) 降雨因子

降雨對邊坡穩定之影響主要在於過多的降雨導致地表沖蝕及地表水入滲行為，影響層面包括：(1) 坡地塊體因吸收水分而使土壤達飽和，致塊體質量增加滑動力提升；(2) 降雨過大造成表層土壤的沖蝕，致土層逐漸有向源、向下或側向之侵蝕現象；(3) 土壤或破碎岩體內水分增加，導致膠結作用降低及顆粒摩擦係數降低，土壤孔隙水壓提高。前述三種現象皆促使邊坡穩定度降低，一旦塊體滑動力大於抵抗力時，即會發生崩塌現象。這類崩塌現象與降雨型態亦相關，集中型豪雨由易引發山崩，持續性降雨因地下水位上升易引發地滑。進一步探討，可分成降雨量及降雨型態對崩塌之不同影響。

由於崩塌之影響因素廣泛，降雨量對崩塌之影響，有時很小的降雨即會引發崩塌，有時極高的降雨也沒有崩塌產生。因此，降雨指標的選取常因研究者的認知和觀察有所差異，常見的如降雨強度、降雨延時及累積降雨等，亦有採用綜合指標來描述，例如現行土石流警戒以總有效累積雨量及降雨強度之乘積為降雨驅動指標 RTI 值。然而，不論何種因子，目前研究者多先關注於引發邊坡崩塌「臨界降雨量」(rainfall threshold) 到底是多少，也是政府防災部門極關切的課題。臨界降雨量的大小與研究區位和其環境因子高度相關，因此不同地區、環境條件之崩塌臨界雨量必定不同。另一類研究的方向，即如前述曾提及的潛感分析方法，利用多變量統計模式將雨量視為某說明變量，最常見即羅吉斯回歸分析建立崩塌模型。此外，

理論分析亦常用於崩塌穩定分析，常見則是以無限邊坡理論計算邊坡崩塌之安全係數，但此類方法屬於局部的邊坡穩定分析，需要詳細的地質調查及鑽探資料，不適用於廣域崩塌評估。降雨型態對於崩塌之影響，較著名的研究是池谷浩(1980)將引致崩塌之降雨型態分為三類。第一類為集中型且強度大之降雨，其短時降雨強度為關鍵因子。由於雨水對表層土壤產生沖刷作用，此類降雨主要形成淺層崩塌現象；第二類則為降雨延時長但強度不大之降雨，其長延時降雨量為關鍵因子。此類降雨會促使塊體吸收過多水分，進而易產生地滑現象；第三類則介於上述降雨類型之間，此類降雨關鍵因子可能受短時降雨和長延時降雨共同作用而產生崩塌現象。

降雨因子對崩塌影響之相關研究甚多，例如 Leopold(1945)以年平均降雨量與年平均溫度繪製可能誘發崩塌之區域圖，並訂定可能引發塊體移動之區域。Lumb(1975)以香港地區邊坡崩塌案例進行研究，發現當日雨量超過 100mm 或十五日累積雨量超過 350mm 時，即可能發生崩塌。高申錡(1994)以阿里山公路沿線山區為例，當累積雨量超過 150mm 時即可能引發崩塌。謝正倫(1995)及范正成(1999)皆曾以引發邊坡崩塌之降雨量值進一步訂定土石流發生之臨界降雨量值。Polemio and Sdao(1999)利用重現週期之或然率歸納降雨量與邊坡崩塌之關係。Bell and Maud(2000)利用南非 Natal 地區單一均質砂岩區於 1970-1991 年間的崩塌資料，研究降雨因子與崩塌間之關係，發現當兩小時降雨量超過 100mm 或 15 天累積雨量達 450mm 時，皆會產生崩塌行為。Glade *et al.*(2000)以降雨造成之崩塌為研究對象，以每日降雨量與 10 日的前期降雨量作為指標。該研究成果指出引發崩塌的降雨特性在各地區皆不同，除了崩塌樣本的完整性差異外，也會因環境條件不同而造成影響；此外，研究發現降雨量越高，所需之前期降雨就越小，也就是引致崩塌所需的兩者間似乎成反比趨勢。陳紫娥(2000)研究花蓮溪及秀姑巒溪兩流域河谷沖積扇的土砂災害性質，結果發

現在日雨量超過年雨量 1/7 或 300 公釐的降雨條件時，土砂災害發生率分別為 94%及 88%；另外，當三日累積雨量達平均日雨量的 24 至 30 倍時，致災率分別為 62%及 80%。Dai and Lee(2001)採用香港地區 1984-1996 年間之崩塌資料，利用降雨量及崩塌面積進行統計分析，發現不同規模之崩塌行為與累積降雨量相關。Lee *et al.*(2008)採用事件型崩塌目錄及崩塌潛在因子，利用最大時雨量作為誘發因子以多變量分析建置崩塌潛勢模式。Rossi *et al.*(2010)蒐集 1951-2002 年間義大利之崩塌事件並繪製地區型崩塌目錄，以每日崩塌數量及每場事件崩塌數量和每日降雨量作為指標進行分析，研究結果指出前期降雨越長則崩塌與降雨強度越相關。

第三章 九二一地震崩塌資料庫蒐集建置

第一節 研究地區說明

為發展易損性曲線，研究實證區優選於具高潛勢危害地區，也就是選擇車籠埔斷層鄰近範圍。同時，由於 921 地震的逆衝斷層效應，上盤(斷層右側)遠比下盤(斷層左側)嚴重,地表加速度和災損相對較高。因此，本研究實證區選擇烏溪流域集水區，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，集水區面積 658.34 平方公里，如圖 3-1 所示。

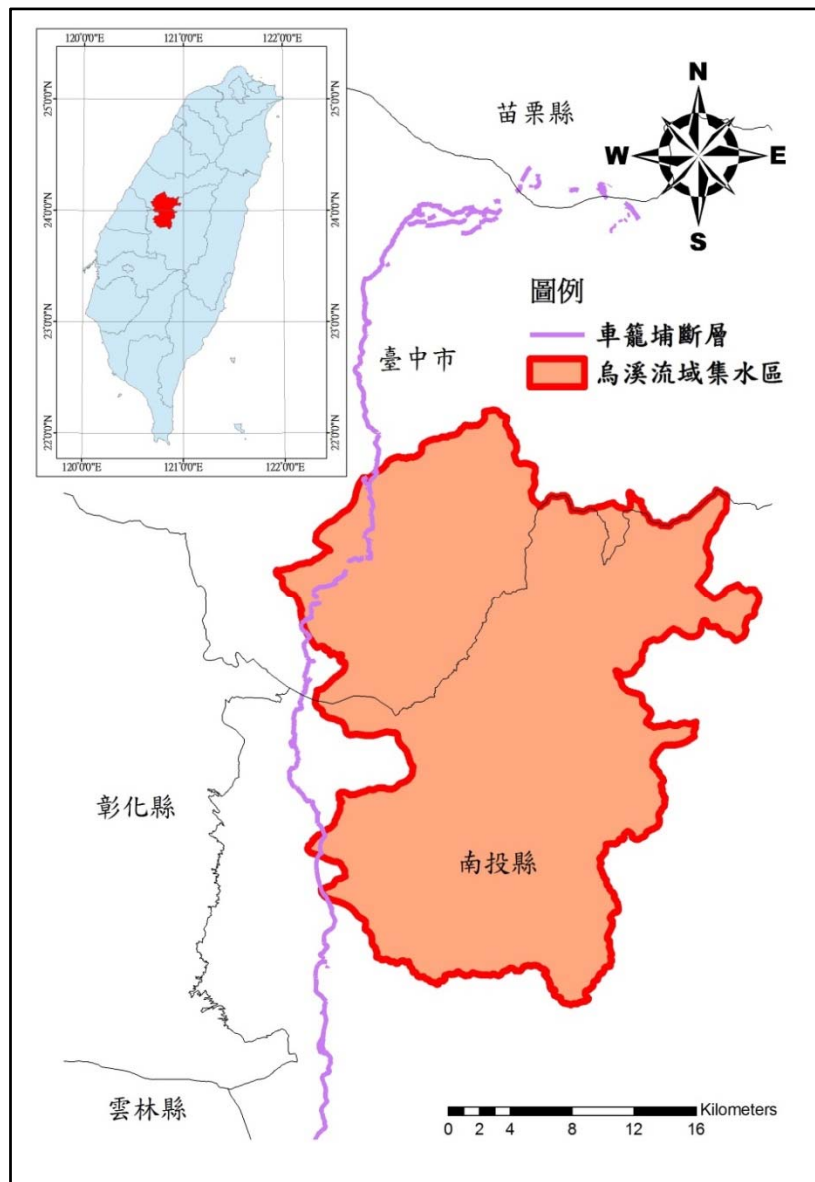


圖 3-1 研究區域

本研究進行坡地易損性分析前須建立集水區各類環境因子資料，集水區資料蒐集自林務局農林航測所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，採用圖層範圍包括主、次、子集水區範圍圖、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、驅動因子及崩塌事件等資訊。環境資料庫以 20m×20m 之網格尺度將不同集水區範圍內所有屬性因子鏈結，資料庫細分為四個部分：(1)地文因子；(2)驅動因子；(3)篩選因子及(4)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、二十五萬分之一地質圖、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 3-1 所示。

表 3-1 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)
	高程(1500 以下)	影像檔案 (Raster，解析度：5m)
	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)
驅動因子	尖峰地表加速度 PGA	影像檔案(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

第二節 研究資料收集

為了建立坡地易損性曲線，首先需要建立完整的資料庫，坡面單元所需要之材料須利用烏溪流域的相關資料，如地形因子、環境因子、崩塌資料，其資料庫內容包含網格資料(RASTER)。

坡面單元資料分為四大類：

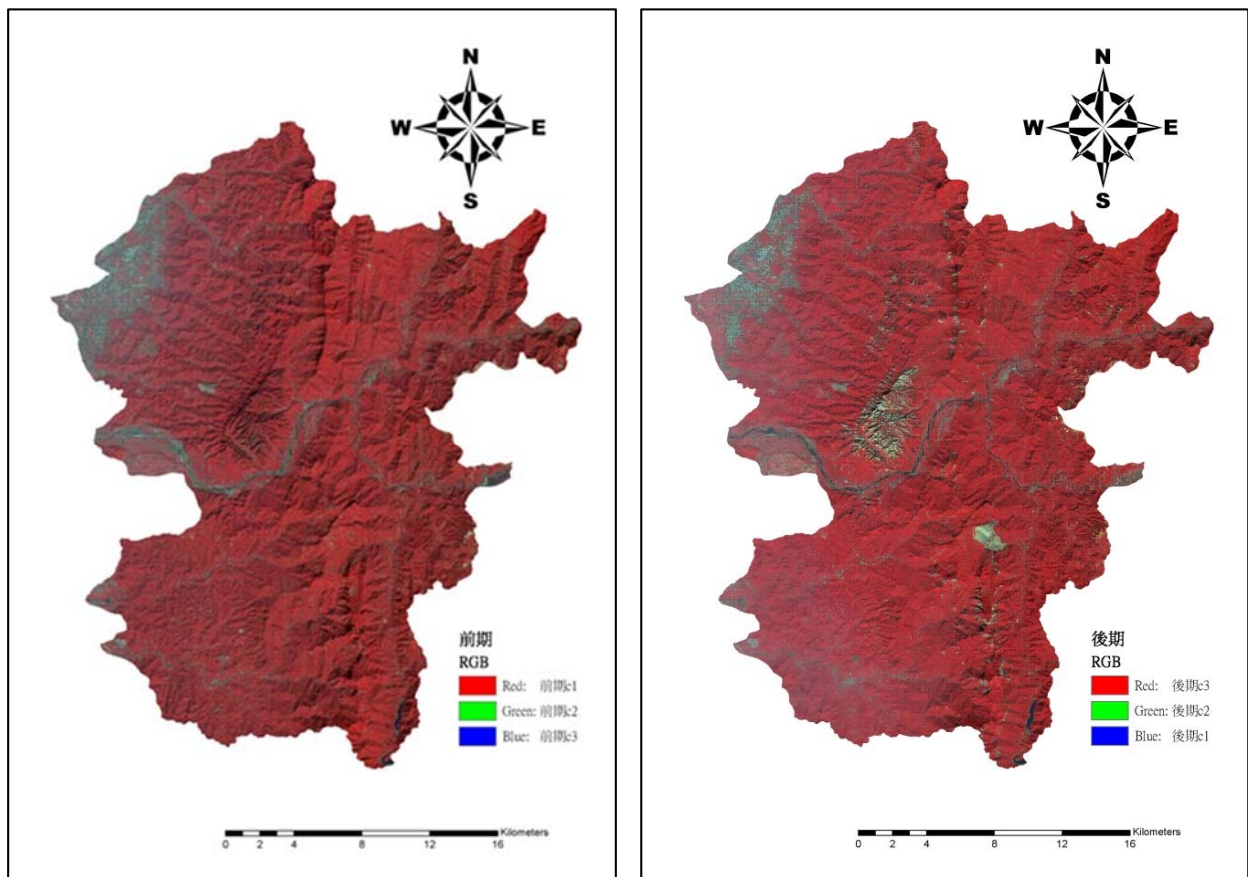
1. 環境因子：坡度、坡向、地質；
2. 致災因子：最大地表加速度(PGA)；
3. 崩塌資料：地震前後期崩塌面積；
4. 篩選資料：排除不必要因素如衛星影像之人為開發地、河道、陰影區等。

一、數值地形模型

數值地形模型(Digital Terrian Model; DTM)泛指任何以數值化(digital)的方式來展現 3D 空間地形起伏變化的狀況。其應用範圍相當廣泛，在地形分析上可用來進行坡度坡向計算、等高線製作，土木工程方面用來做挖填方計算、坡地或道路開挖，災害評估方面可用在災害崩塌體積計算，其他常見可用來做三度空間展示等等，DSM(Digital Surface Model)則指的是地表上所有地物，包含人工構造物或自然森林或人工作物覆蓋地面的高程；數值高程模型(Digital Elevation Model; DEM)是指所有關於地形表面的數值表現及描述(Carter, 1988；Miller and Leflamme, 1985)，可視為地表的替代模式。DEM 首見於 1970 年代美國地質調查署以二維矩陣方式儲存高程資料的資料格式，為有利於未來應用及發展，本研究蒐集內政部所製作，解析度為 5m×5m 矩形網格結構之數值高程模型，此資料將提供計畫區域空間位置之高程資訊，並用於計算相關地形參數，例如坡度、高程、坡向以及坡面單元劃定等基礎資料。

二、衛星影像資料

本研究使用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-2 衛星多波段(XS)影像資料，影像等級為 LEVEL3。各幅衛星影像皆經過相對輻射校正及影像幾何、正射校正等程序，像元大小為 12.5m×12.5m，如圖 3-2 所示。



拍攝時間：1999/01/28

拍攝時間：1999/10/31

圖 3-2 921 地震前後期衛星影像

三、地震測站

921地震後，中央氣象局已成功地藉由臺灣自由場強地動觀測網(Taiwan Strong Motion Instrumentation Program; TSMIP)完整紀錄全國各地之三軸加速度歷時記錄(包括東西向、南北向以及垂直向)。在涵蓋 650 個強地動測站之 TSMIP 中，分布於全臺灣之強地動測站以不超過 5km 之密度布建在九個都會區。每個測站皆具備三軸加速度計、數位紀錄器、電池和 GPS 校時系

統。自由場強地動觀測網之數位信號被以每秒 200 筆或更高之頻率擷取，具備 16 bit 以上的解析度同時具有震前 20 秒之啟動紀錄。大部份之數位加速度計具備 $\pm 2g$ ($1g=981\text{ cm/s}^2$)之全尺度三軸測量能力(Tsai and Lee, 2005)。

中央氣象局的台灣地震監測網所使用的地震儀為三向量的地震儀。大大的提升台灣地區的地震測報功能及精確度。即時地震觀測網每日二十四小時連續監測台灣地區地震活動，除例行地震定位工作外，並發佈有感地震消息。本計畫研究地區烏溪集水區及其附近的地震測站共 48 個，如圖 3-3 所示。各測站之站碼、經緯度、XY、高程、三軸向 PGA 等資料如表 3-2 所示。

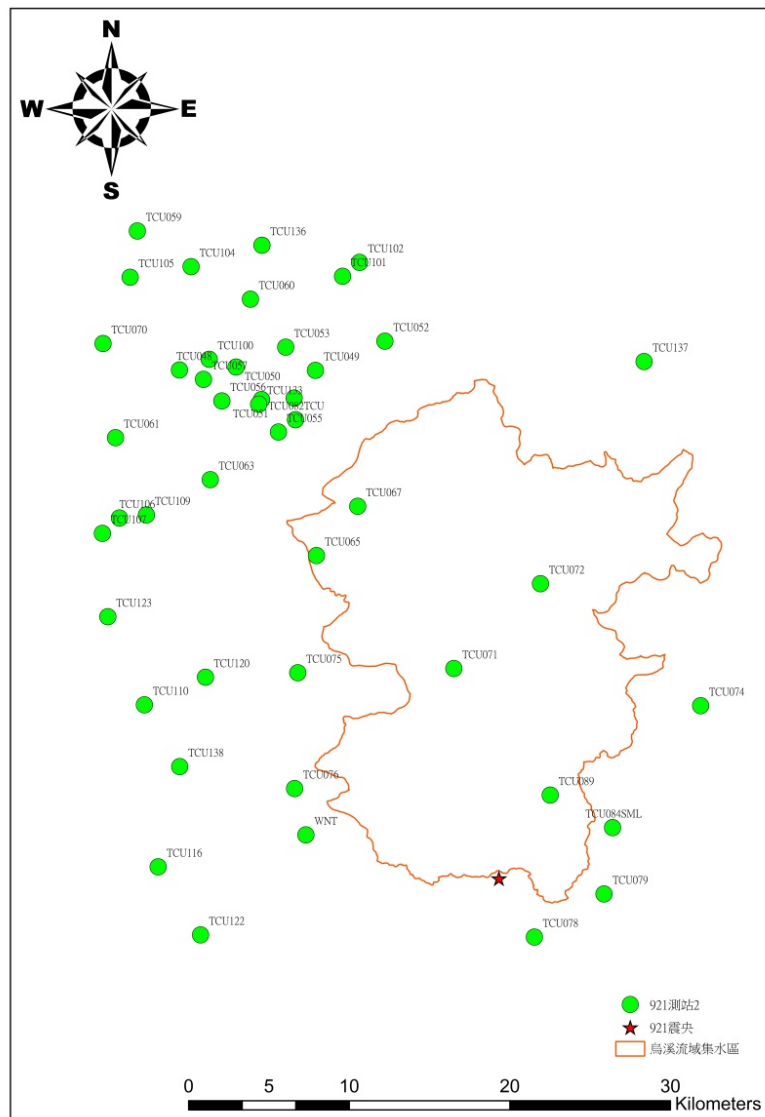


圖 3-3 烏溪流域附近地震地震觀測台網

表 3-2 研究區域周邊九二一測站點資料

站碼	經度	緯度	高程(m)	PGA_U	PGA_N	PGA_E	x	y	PGA
SML	120.9	23.883	1015	318.69	381.38	955.60	239816.7	2642069	603.69
TCU	120.676	24.147	84	118.67	187.10	201.46	217073.2	2671341	194.14
TCU048	120.594	24.179	160	97.32	175.62	116.94	208750	2674907	143.30
TCU049	120.69	24.179	123	178.01	241.95	273.41	218503.8	2674882	257.20
TCU050	120.634	24.181	89	86.79	128.12	142.72	212814.7	2675117	135.22
TCU051	120.652	24.16	68	109.70	230.70	156.83	214637.7	2672787	190.22
TCU052	120.739	24.198	170	193.98	438.68	348.66	223486.2	2676976	391.09
TCU053	120.669	24.194	127	120.89	132.07	224.78	216374.1	2676548	172.30
TCU054	120.675	24.161	97	132.97	190.39	143.14	216975.1	2672892	165.08
TCU055	120.664	24.139	90	153.30	208.15	256.90	215851.5	2670458	231.25
TCU056	120.624	24.159	62	116.88	140.33	153.90	211792.1	2672683	146.96
TCU057	120.611	24.173	49	81.47	100.13	111.32	210475.4	2674238	105.57
TCU059	120.564	24.269	7	64.48	161.92	156.65	205733.1	2684884	159.26
TCU060	120.644	24.225	138	86.31	101.09	196.85	213843.1	2679988	141.06
TCU061	120.549	24.135	30	86.13	154.08	133.21	204162.2	2670048	143.26
TCU063	120.616	24.108	39	132.97	129.98	179.44	210963.7	2667037	152.72
TCU065	120.691	24.059	48	257.80	563.21	774.42	218576.1	2661592	660.43
TCU067	120.72	24.091	73	230.59	312.65	488.86	221532.3	2665130	390.95
TCU070	120.54	24.196	5	76.20	157.37	248.59	203269.7	2676807	197.79
TCU071	120.788	23.986	187	415.53	639.00	517.81	228428.4	2653489	575.22
TCU072	120.849	24.041	363	274.67	370.49	465.30	234641.9	2659572	415.20
TCU074	120.962	23.962	450	270.18	368.40	585.94	246132.7	2650815	464.61
TCU075	120.678	23.983	96	223.89	257.32	325.33	217234.8	2653178	289.34
TCU076	120.676	23.908	103	275.39	420.02	340.11	217012.2	2644872	377.95

站碼	經度	緯度	高程(m)	PGA_U	PGA_N	PGA_E	x	y	PGA
TCU078	120.845	23.812	272	171.01	302.48	439.70	234207.2	2634212	364.69
TCU079	120.894	23.84	681	383.83	416.97	579.78	239202.1	2637308	491.68
TCU082	120.676	24.147	84	129.26	182.49	221.07	217073.2	2671341	200.86
TCU084	120.9	23.883	1015	311.75	422.83	989.21	239816.7	2642069	646.73
TCU088	121.176	24.253	1510	224.07	515.36	508.90	267871.4	2683054	512.12
TCU089	120.856	23.904	20	190.21	225.32	347.82	235338.4	2644399	279.95
TCU100	120.615	24.186	100	83.80	111.38	107.97	210885.8	2675676	109.66
TCU101	120.709	24.24	200	164.01	253.55	207.80	220448.3	2681634	229.54
TCU102	120.721	24.249	188	173.28	168.98	298.35	221668.9	2682628	224.53
TCU104	120.602	24.246	213	90.32	86.91	101.39	209584	2682325	93.87
TCU105	120.559	24.239	20	61.13	124.29	111.26	205214.9	2681563	117.59
TCU106	120.552	24.083	17	115.86	122.26	157.37	204448.7	2664288	138.71
TCU107	120.54	24.073	14	94.51	143.85	127.76	203225	2663184	135.57
TCU109	120.571	24.085	23	132.97	159.17	149.00	206381.3	2664503	154.00
TCU110	120.57	23.962	25	116.28	187.52	178.25	206238	2650881	182.82
TCU116	120.58	23.857	49	119.03	132.79	185.31	207221.2	2639250	156.86
TCU120	120.613	23.98	228	166.52	193.50	222.99	210619.7	2652862	207.72
TCU122	120.61	23.813	75	236.03	255.65	207.44	210263.4	2634368	230.28
TCU123	120.544	24.019	16	85.54	131.95	149.00	203612.3	2657202	140.22
TCU133	120.65	24.157	70	240.28	260.43	281.97	214433.6	2672455	270.98
TCU136	120.652	24.26	173	111.67	170.83	166.82	214665.3	2683862	168.81
TCU137	120.922	24.185	620	324.37	403.57	521.64	242075.5	2675514	458.82
TCU138	120.595	23.922	34	110.36	207.44	202.23	208769.6	2646444	204.82
WNT	120.684	23.878	110	311.04	602.45	921.14	217819.3	2641548	744.95

註：PGA = $\sqrt{\text{PGA}_N \times \text{PGA}_E}$ ，單位為 gal=cm/sec²

第三節 環境因子資料處理

一、地質資料

一般崩塌研究所採用的地質資料，多是以中央地質調查所繪製的二十五萬分之一地質圖層做為參考，其中包括詳實的台灣地質屬性，如年代、岩性、地層等。本研究區域地質分布圖及組成如圖 3-4 至圖 3-6 所示。

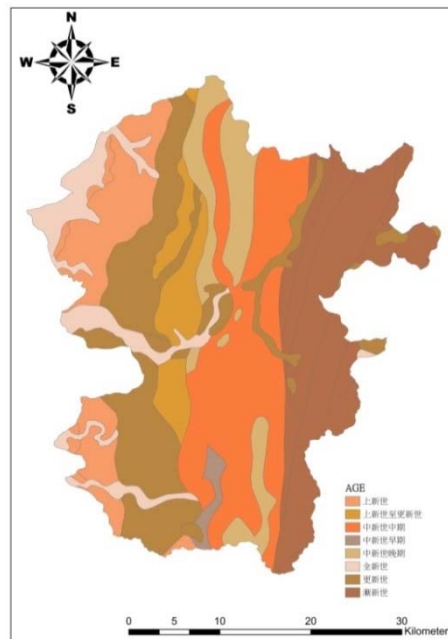


圖 3-4 年代圖

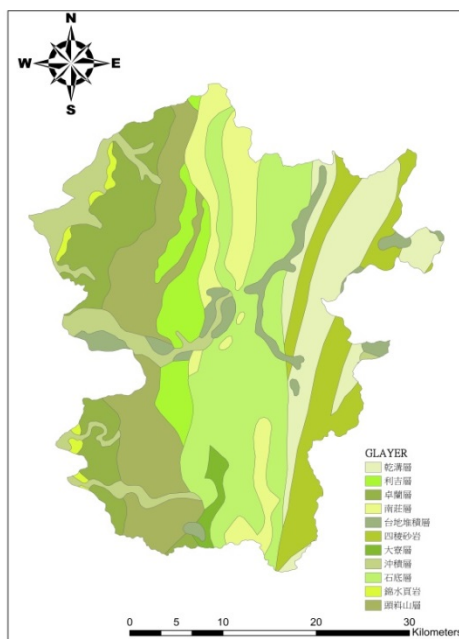


圖 3-5 地層圖

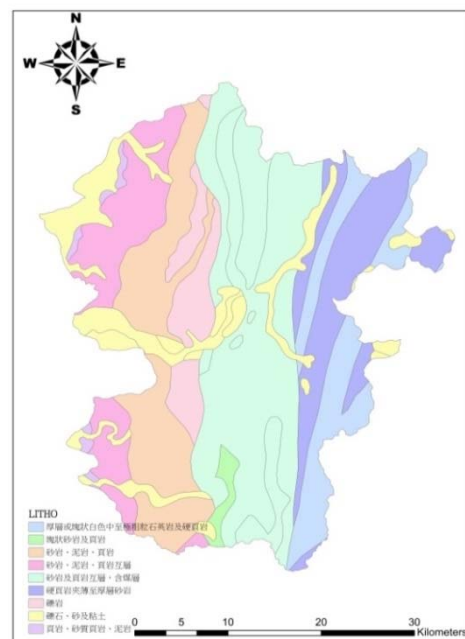


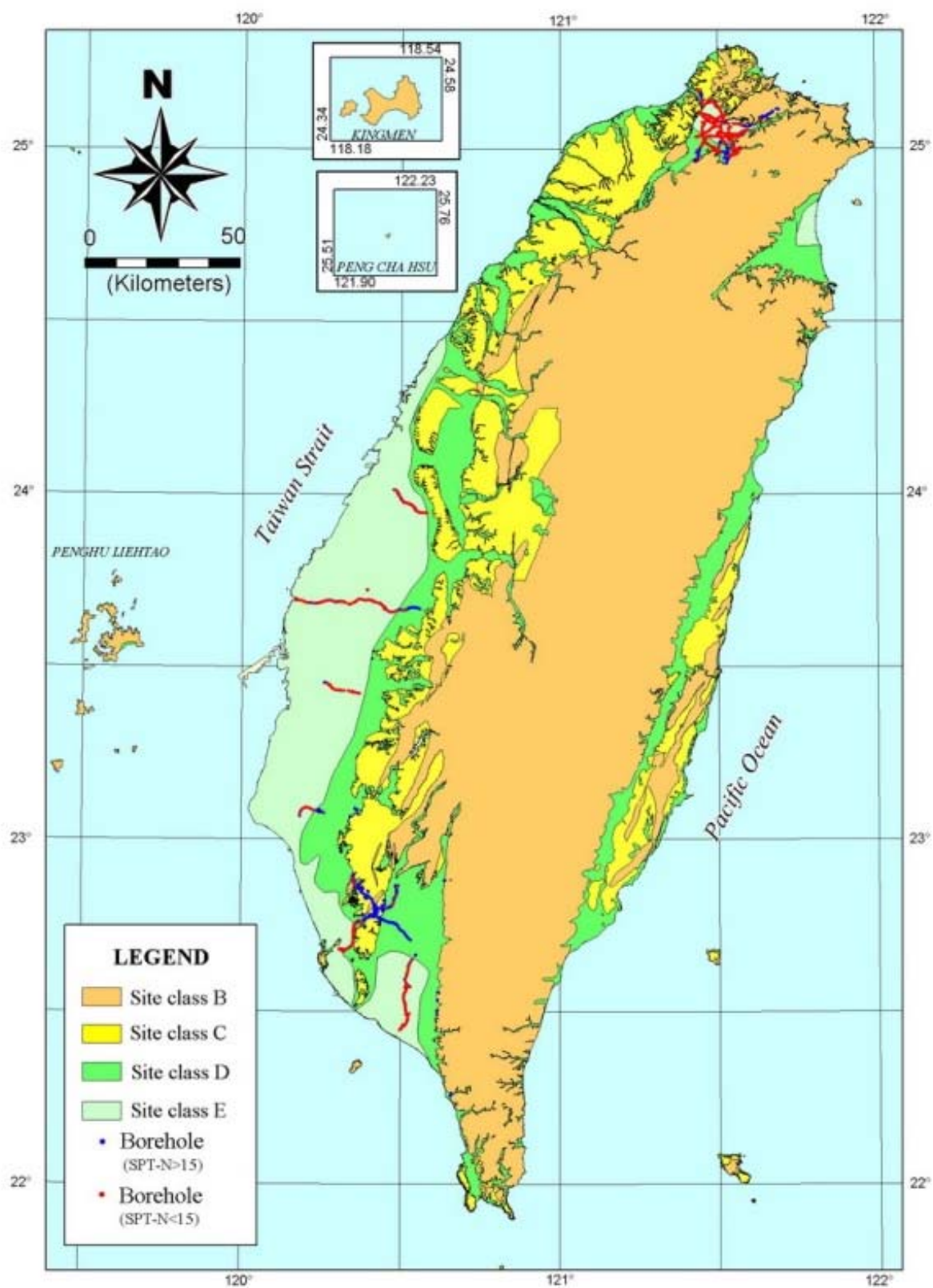
圖 3-6 岩性圖

然而，根據過去研究，地震引致的崩塌無法與所謂的年代、岩性、地層直接相關，而與地震引致的震動、加速度與波速更為相關。在地震工程學的角度，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 3-3 及圖 3-7 所示，而本研究依據李錫堤等人之分類將地質圖資套疊至集水區網格內。此分類模式將更合適作為地震引致崩塌的地質因子參數。

表 3-3 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 $u_s < 1000$ 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 3-7 李錫堤教授分類之地質圖

二、高程資料

高程因子可由數值高程模型(DEM)中直接套取出來，本研究將高程因子依高度分成十組，如圖 3-8 所示。分類之主要目的為探討崩塌於垂直方向分佈之特性，並探討作為本研究崩塌因子的適宜性。因為就地震波而言，震波的變化和地形之間的關係為地形所產生的震動擴大效應。一般而言，山頂處震波的擴大效應比山底大，但山頂處的擴大效應有時不一定存在(張子瑩，2002)。

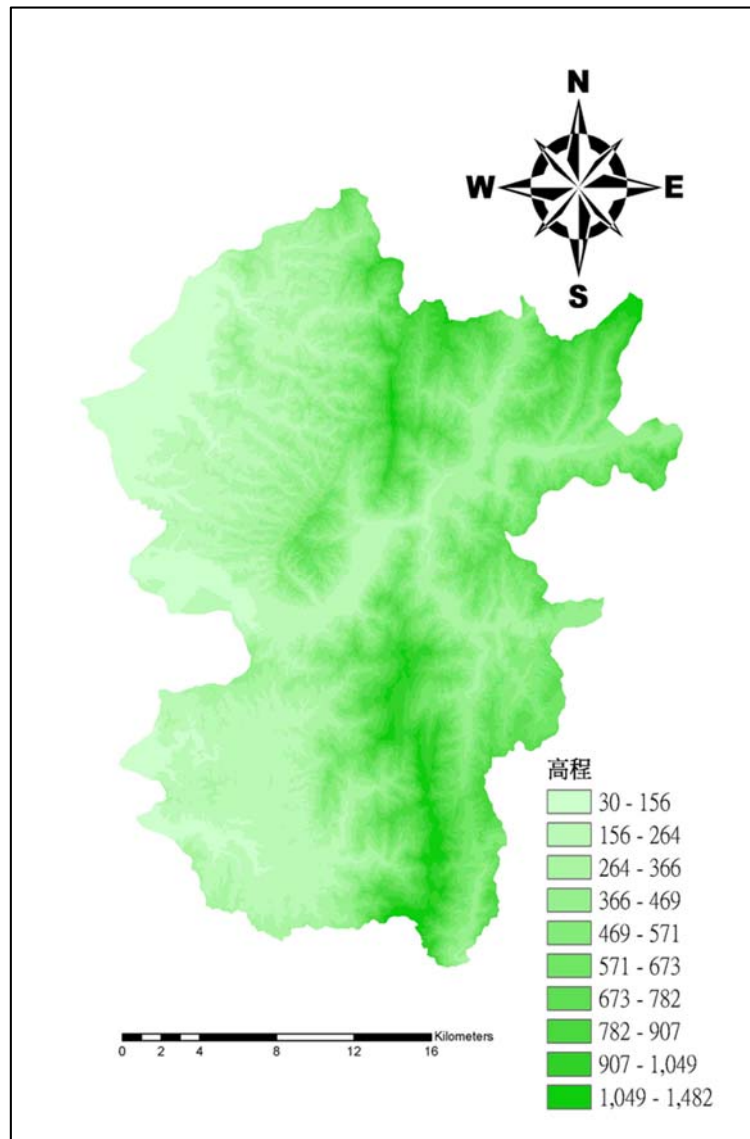


圖 3-8 研究區高程圖

三、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(Pearce and O'loughlin, 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。坡向因子可以烏溪流域 DEM 之資料計算各網格坡向，如圖 3-9 所示。

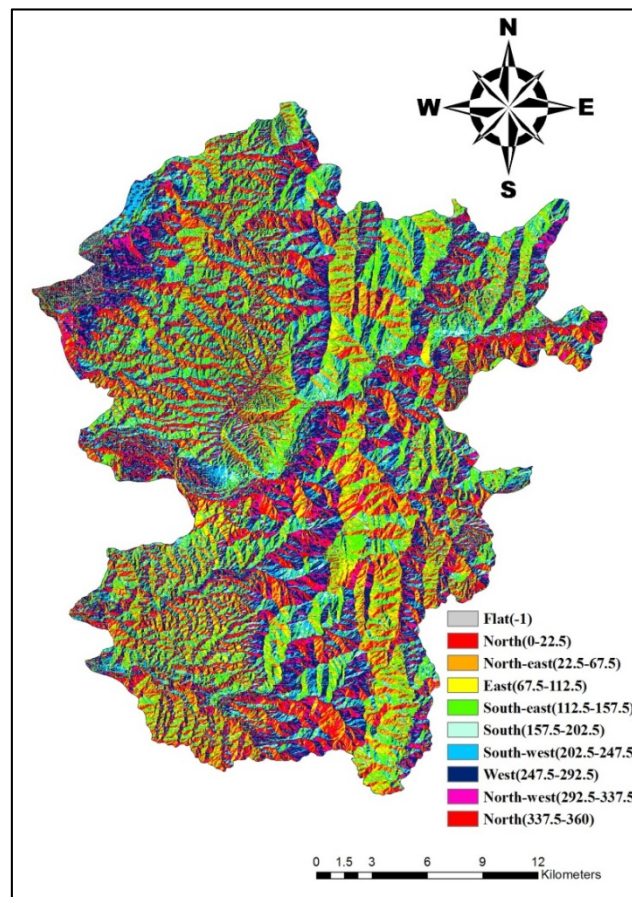


圖 3-9 研究區坡向圖

四、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(2012)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內二種容許方法之一(另一為等高線法)。如圖 3-10 所示，研究區以 10° 為級距分析各網格之坡度值，所得數值可為度數($^\circ$)或是百分比型式(%)。

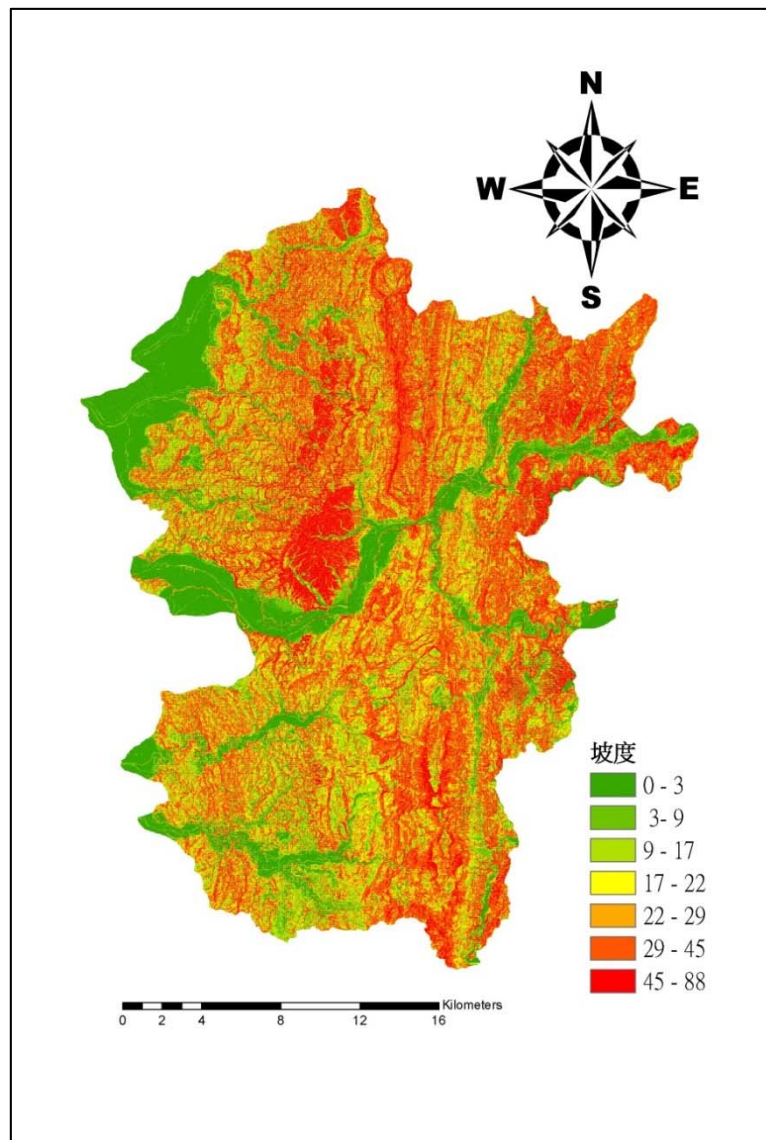


圖 3-10 研究區坡度圖

五、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。本計畫採用內政部國土測繪中心所繪製 95 年土地利用調查圖資，濾除無崩塌潛勢或非自然崩塌區域，如圖 3-11 所示。

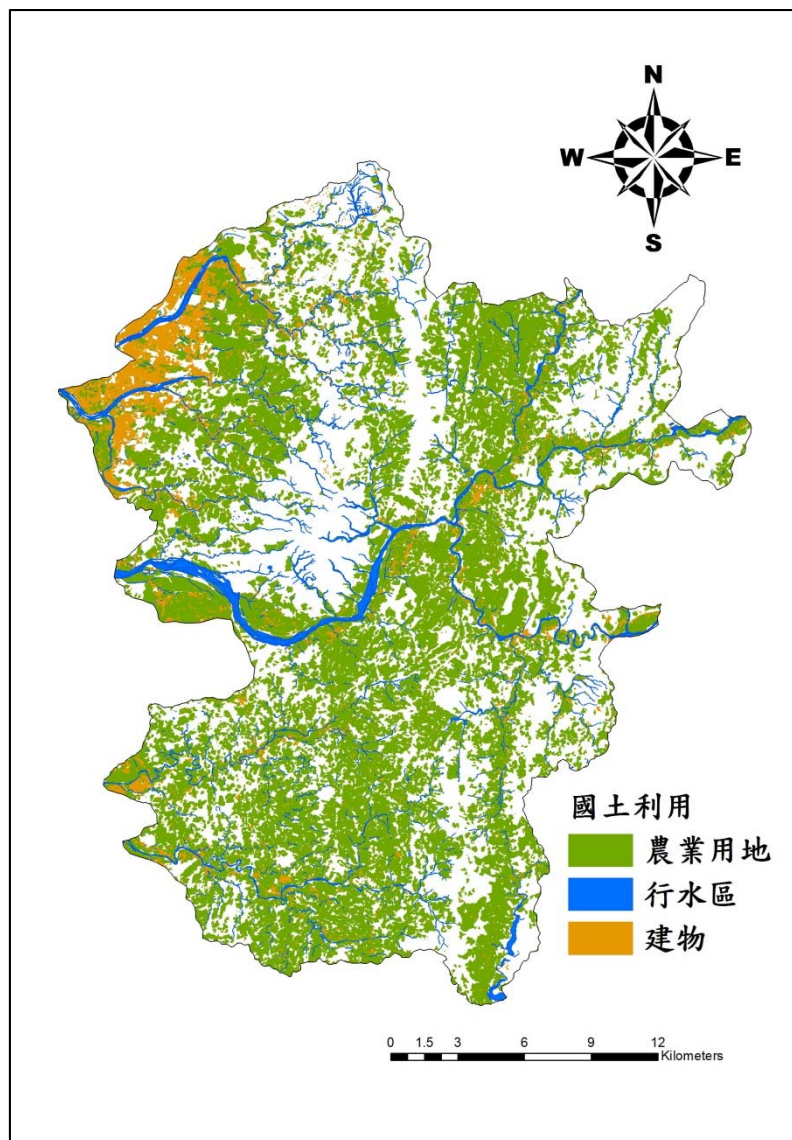


圖 3-11 研究區濾除範圍

六、順向坡資料

順向坡又稱為傾坡面、傾向坡，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，因此對於降雨、地震而言，順向坡地勢更容易產生崩塌，同時也更複雜，主因在於順向坡地勢因地質條件的不同，有些非常容易崩塌，輕微的降雨或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，蒐集了中央地質調查所已公布的順向坡調查資料，作為本研究坡向因子資料選取的參考依據，研究區的順向坡分布如圖 3-12 研究區順向坡分布圖圖 3-12 所示。

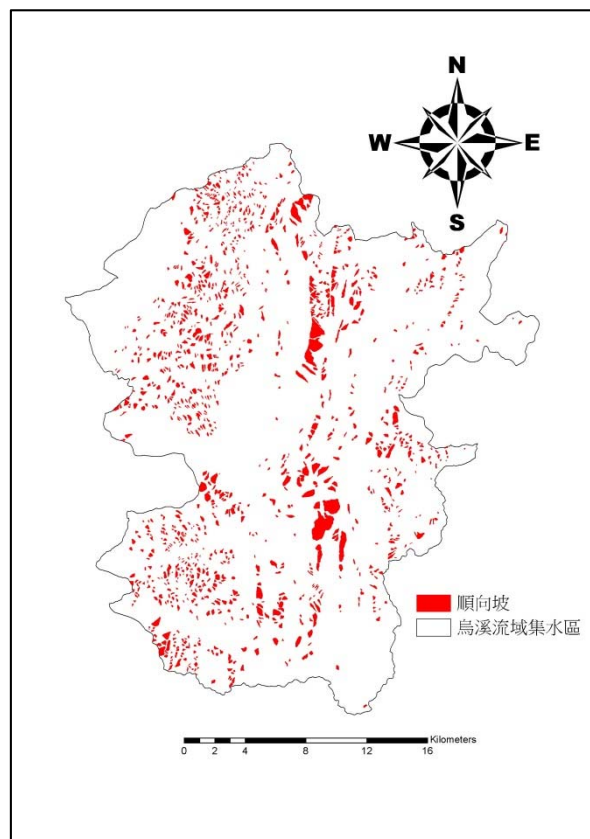


圖 3-12 研究區順向坡分布圖

第四節 崩塌地判識與萃取

一、影像判識

本研究利用 SPOT-2 衛星影像進行崩塌地判釋，使用 921 地震前後期衛星影像以及影像處理系統 ERDAS IMAGINE 進行衛星影像人工判釋，如圖 3-13 所示為前後期影像判釋成果，圖中可見影像判釋可分為四個種類，包括河系為藍色、陰影為黑色、山坡地為紅色、裸露地為淡藍色。其中河系與陰影無法利用，山坡地即為未崩塌的區域，而該次事件崩塌地之變遷狀況，則可藉由前後時期之裸露地分布情形獲得。藉由數化圖資以地理資訊系統進行套疊比對，即可得各種崩塌地變遷狀況。

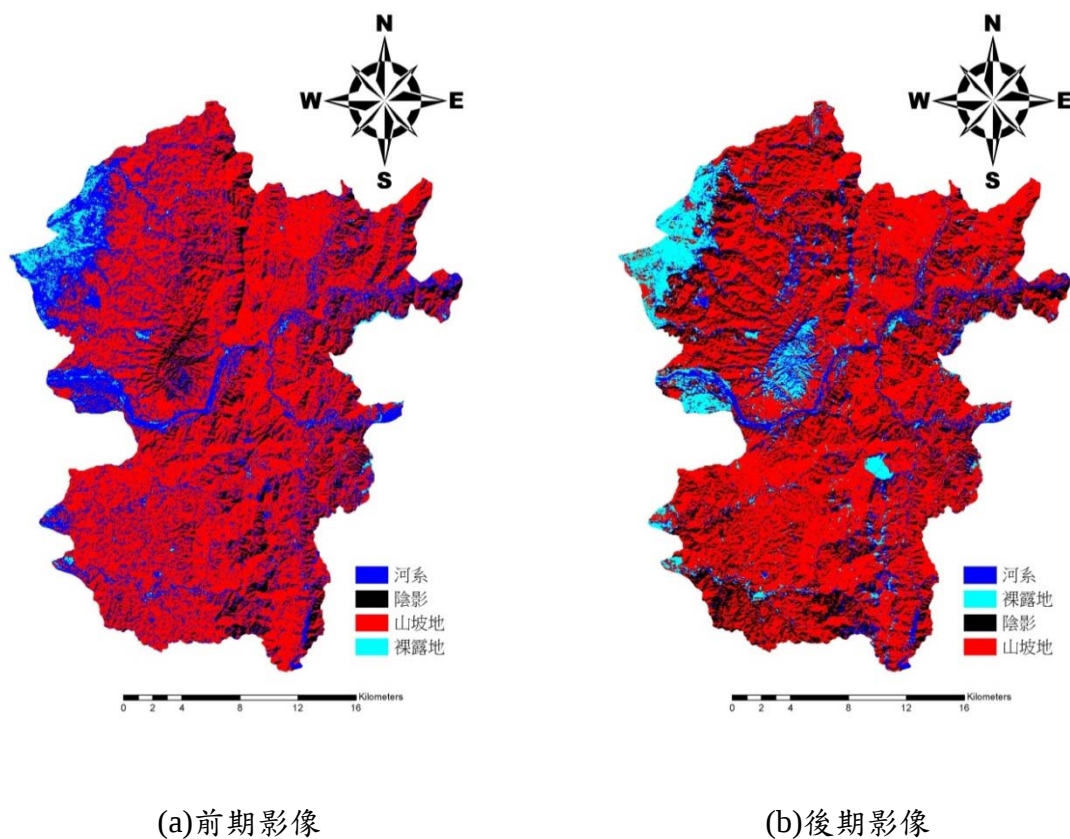


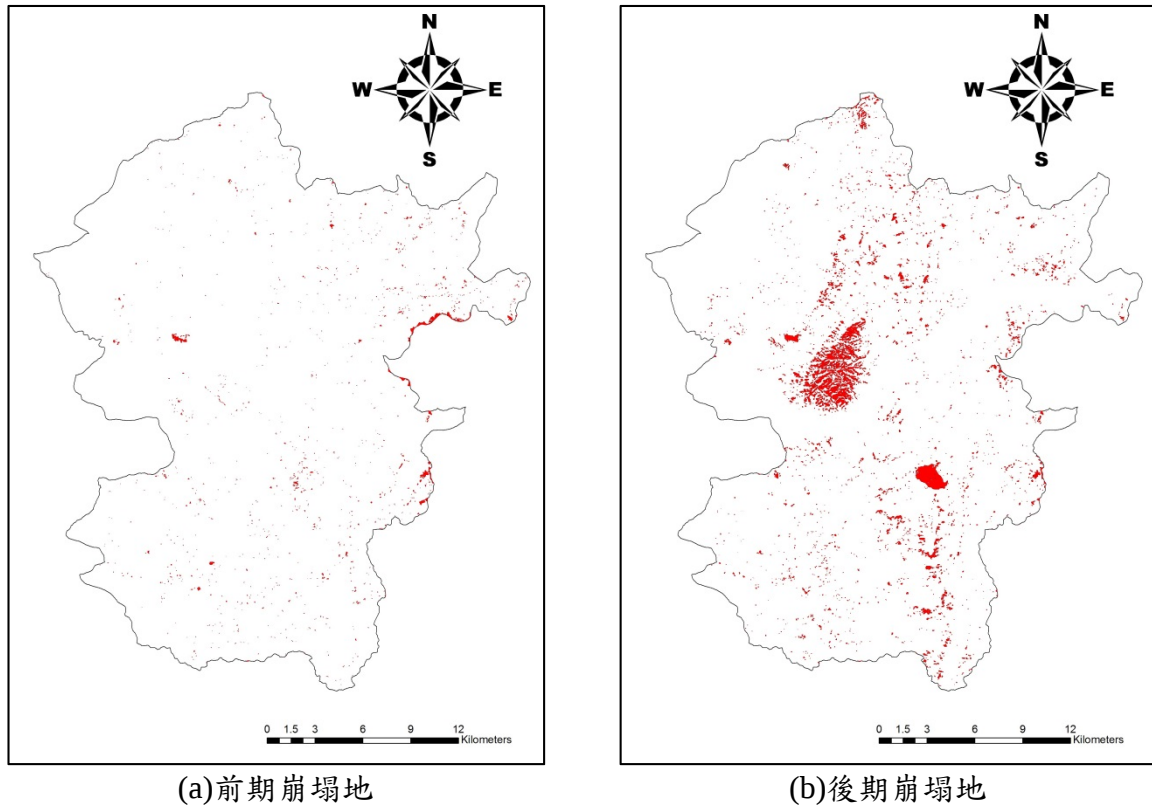
圖 3-13 前後期影像判識

二、事件前後期裸露地

本研究以各期事件衛星影像首先可進行裸露地判釋，初步瞭解可能崩塌地位置。前後期裸露地之狀況如圖 3-14 所示。裸露地面積統計如表 3-4。

表 3-4 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%



(a)前期崩塌地

(b)後期崩塌地

圖 3-14 九二一地震前後期裸露地分布

三、新增崩塌地

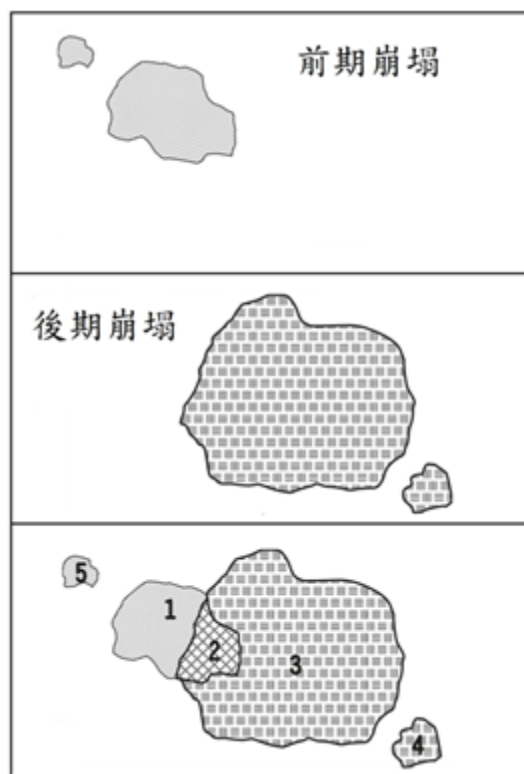
事件崩塌地之變遷狀況，可藉由前後時期之裸露地變異情形獲得。賴志強(2007)、陳俞旭(2008)等人對於地震及降雨引致之崩塌地分類，考慮植被復育之影響，將崩塌地分類為四類。如圖 3-15 所示，包括：

- (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。

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，圖 3-16。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 3-5 及圖 3-17 所示。



資料來源：修改自賴志強(2007)；陳俞旭(2008)

圖 3-15 崩塌地變遷及分類示意

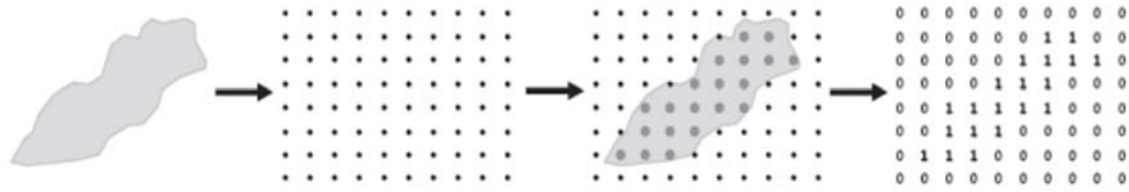


圖 3-16 坡面資料套疊網格示意圖

表 3-5 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

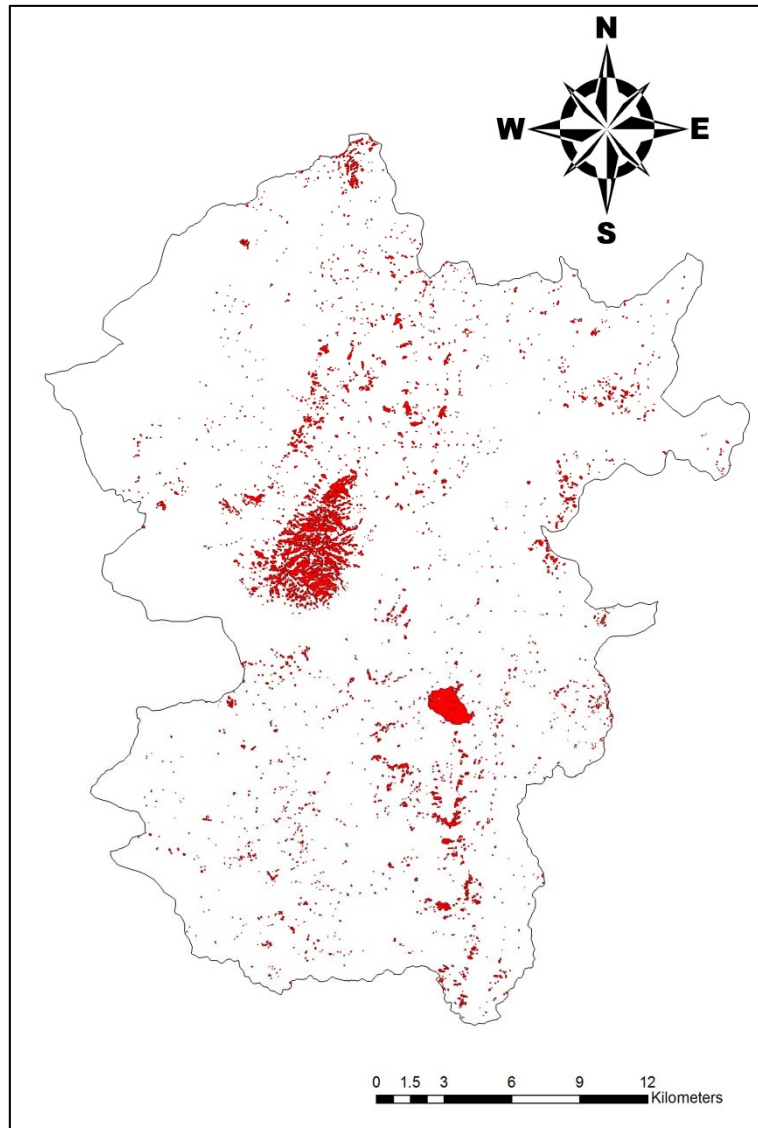


圖 3-17 九二一新增崩塌地

第五節 崩塌網格資料庫建置

完成九二一新增崩塌地處理後，對於環境因子與新增崩塌地的關係需進行環境因子與崩塌地之間的關聯性鏈接，藉由各因子資料間的共通索引值，使用 ArcGIS 軟體建立研究地區集水區網格資料庫。本研究將研究區建置為大小 20m×20m 的網格向量檔，所有網格給予固定編碼(Gridcode)，總網格數為 961,150 個，編輯完成之網格編碼，其資訊皆會記錄於.dbf 的資料庫中，可再藉由其它資料庫軟體進行處理。建立完成之網格編碼將不再變動，為了後續進行坡面單元的屬性分類，需了解崩塌地與各環境因子的關係，本研究將各類因子進行關聯統計，以下說明各類因子統計結果。

一、地質分類

地層或岩性因子是崩塌現象的明顯相關因子，砂岩及頁岩等相關岩層對於淺層崩塌極具影響。但本研究對於地質的考量，主要來自於受震後的反應與震波傳遞狀況，所以以地質岩性的軟硬為主要考量，越堅硬的岩層波速傳地越快。因此本研究是以李錫堤等人(Lee *et al.*, 2001)的研究，將地質分為 4 類(site class B~E)。經過地質的套疊分析，本研究地區大多為 site class B 及 site class C 的地質，參見表 3-3，因此本研究取此二類地質，將 site class B 分為地質分級一，site class C 分為地質分級二，並統計其崩塌比，所得結果如表 3-6 所示。

表 3-6 地質崩塌統計

分級	地質	面積(ha)	崩塌地		非崩塌地		崩塌比
			面積(ha)	%	面積(ha)	%	
1	site classB	32,000.04	818.04	84.70%	31,182.00	83%	2.56%
2	site classC	6,445.96	147.80	15.30%	6,298.16	17%	2.29%
總和		38,446.00	965.84	100.00%	37,480.16	100.00%	2.51%

資料來源：本研究整理

二、坡向分類

本計畫以 ArcGIS 估算每一網格單元之平均坡向，除平坡不計外包含八方向。根據過去地震引致崩塌的文獻調查，坡向因子對於崩塌的影響東南向的發生機率較高，而本研究依照坡向分類進行崩塌統計，東南向的崩塌程度的確明顯高於西北向。本研究將坡向資訊套疊至集水區網格內並統計崩塌比，所得結果如表 3-7 所示。

表 3-7 坡向崩塌統計

分級	坡向	面積(ha)	崩塌地		非崩塌地		崩塌比
			面積(ha)	%	面積(ha)	%	
1	北	4,582.00	17.24	1.78%	4,169.80	11.13%	0.38%
2	東北	4,073.24	37.96	3.93%	4,392.28	11.72%	0.93%
3	東	5,018.08	119.52	12.37%	4,930.28	13.15%	2.38%
4	東南	4,716.96	322.64	33.41%	4,310.08	11.50%	6.84%
5	南	4,687.04	231.60	23.98%	4,626.84	12.34%	4.94%
6	西南	5,016.08	164.60	17.04%	5,123.64	13.67%	3.28%
7	西	5,422.32	38.56	3.99%	5,160.12	13.77%	0.71%
8	西北	4,930.28	33.72	3.49%	4,767.12	12.72%	0.68%
總和		38,446.00	965.84	100.00%	37,480.16	100.00%	2.51%

資料來源：本研究整理

三、高程分類

高程資料可直接以數值高程模型 DEM 計算出每個網格內的高程值，由過去文獻發現，高程可能是崩塌發生的因子。本研究區高程最低為 30 公尺，最高為 1,481 公尺，本計畫採取自 750 公尺起以每 250 公尺為間距將高程分為 4 級，將高程資訊套疊至集水區網格內並進行崩塌統計，所得結果如表 3-8 所示。顯示崩塌大多發生在高程較低處，但崩塌比大致隨高程越高而增加，1,250 公尺後崩塌則較少，只有零星的崩塌發生，不到 1 公頃。

表 3-8 高程崩塌統計

分級	高程(m)	面積(ha)	崩塌地		非崩塌地		崩塌比
			面積(ha)	%	面積(ha)	%	
1	<750	32,504.44	767.56	79.47%	31,596.72	84.30%	2.36%
2	750-1000	4,809.60	143.48	14.86%	4,660.08	12.43%	2.98%
3	1000-1250	1,081.44	54.16	5.61%	1,025.52	2.74%	5.01%
4	1250-1500	50.52	0.64	0.07%	49.80	0.13%	1.27%
總和		38,446.00	965.84	100.00%	37,480.16	100.00%	2.51%

資料來源：本研究整理

四、坡度分類

大部分崩塌類型通常隨著坡度越高越易發生，也就是坡度越高，引發崩塌的機率越高，也因此坡度係崩塌評估的重要因子。然而對於地震而言，坡度的影響局限於中高坡度一定的範圍內，太大的坡度反而不易崩塌，反而是落石居多。此外，低坡度的裸露地由於人為開發通常非常多，但受限於影像判釋無法有效分辨此類低坡度裸露地。陳樹群(2013)曾以坡度 20° 為界將以下之坡地視為不具降雨崩塌潛勢的區域，認為此類裸露地不易認定是否為崩塌。雖實際上偶有崩塌現象發生，但其成因複雜難以完全歸咎其成因。因此，本研究將 20° 以上之坡度進行統計，所得結果如表 3-9 所示。顯示崩塌率大致隨坡度越高而提高。

表 3-9 坡度崩塌統計

分級	坡度($^\circ$)	面積(ha)	崩塌地		非崩塌地		崩塌比
			面積(ha)	%	面積(ha)	%	
1	20-25	7,929.40	46.16	4.78%	7,883.24	21.03%	0.58%
2	25-30	8,062.72	61.68	6.39%	8,001.04	21.35%	0.77%
3	30-35	7,094.52	90.64	9.38%	7,003.88	18.69%	1.28%
4	35-40	5,670.52	116.28	12.04%	5,554.24	14.82%	2.05%
5	40-45	4,169.48	136.56	14.14%	4,032.92	10.76%	3.28%
6	45-60	4,912.56	396.76	41.08%	4,515.80	12.05%	8.08%
7	60-90	606.80	117.76	12.19%	489.04	1.30%	19.41%
總和		38,446.00	965.84	100.00%	37,480.16	100.00%	2.51%

資料來源：本研究整理

第四章 921 地震強地動因子推估

第一節 中央氣象局強地動測站資料蒐集

為了進行地表震度之空間分布，本研究自 TSMIP 中蒐集經中央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 4-1 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)。這些紀錄中排除了在 921 地震中資料不完整之測站及離島之 4 個測站。

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加速度歷時記錄，分別取歷時記錄中最大值做為該測站之場址三軸向 PGA 值。然而，對於地震引致建築物損害主要係水平向地震力所造成，因此某測站之場址 PGA 值多以較為重要之雙軸水平向 PGA 進行探討。過去許多研究曾採用雙軸水平向 PGA 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 PGA 值，本研究則採用其中的幾何平均值定義之，可表示如下：

$$S_{site} = \sqrt{S_x S_y} \quad (4-1)$$

上式中， S_{site} 為某測站之場址 PGA 值； S_x 及 S_y 分別為測站之東西向及南北向 PGA 值。此測站之場址 PGA 值可作為未設測站場址推估 PGA 空間分布之基準值，各測站之場址 PGA 值如表 3-2 所示。

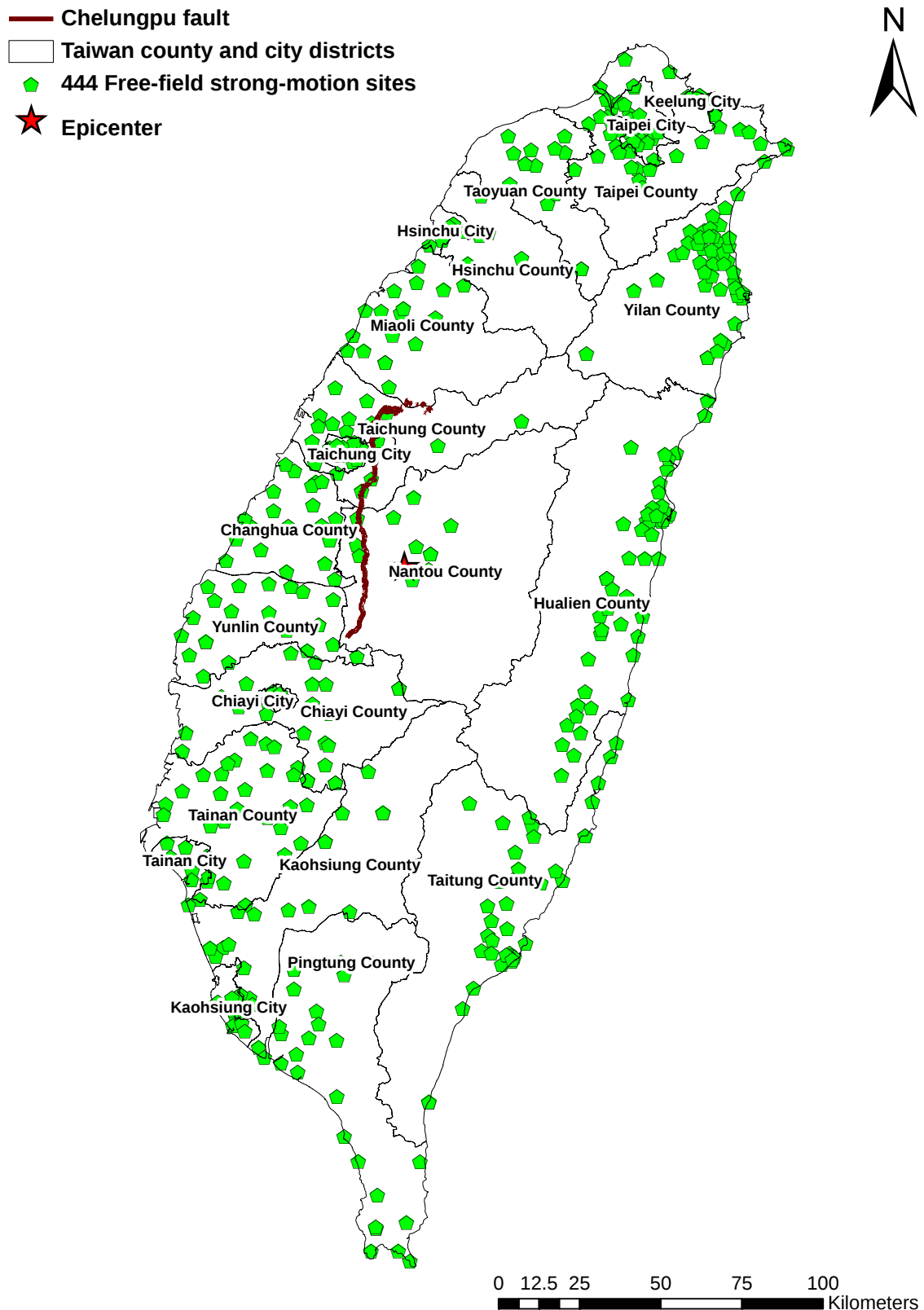


圖 4-1 自由場強地動測觀測網(TSMIP)測站分布

第二節 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(1977)、Boore and Joyner(1997)、Sadigh *et al.*(1997)等人所提出之地表震度衰減公式。對於本研究採用之致災因子—PGA，地表震度之衰減關係則分別採用近期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 PGA 衰減率表示為：

$$\log_{10}(S_h) = 0.00215 + 0.581M_w - \log_{10}(R + 0.00871 \times 10^{0.5M_w}) - 0.00414R \quad (4-2)$$

式(4-2)中， S_h 為雙軸水平向 PGA 之幾何平均值，單位為 cm/s^2 ； 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的最短距離。

地表震度衰減率是國內外學者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 PGA 之推估值後再乘上一修正係數，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：

$$\min \Delta = \sum_{m=1}^M |(S_m)_T - \alpha(S_m)_E| \quad (4-3)$$

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 PGA 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，對於 Wu 衰減率所得到之修正係數為 0.568。修正之衰減率與 921 地震強地動測站之實測 PGA 共繪如圖 4-2 所示。

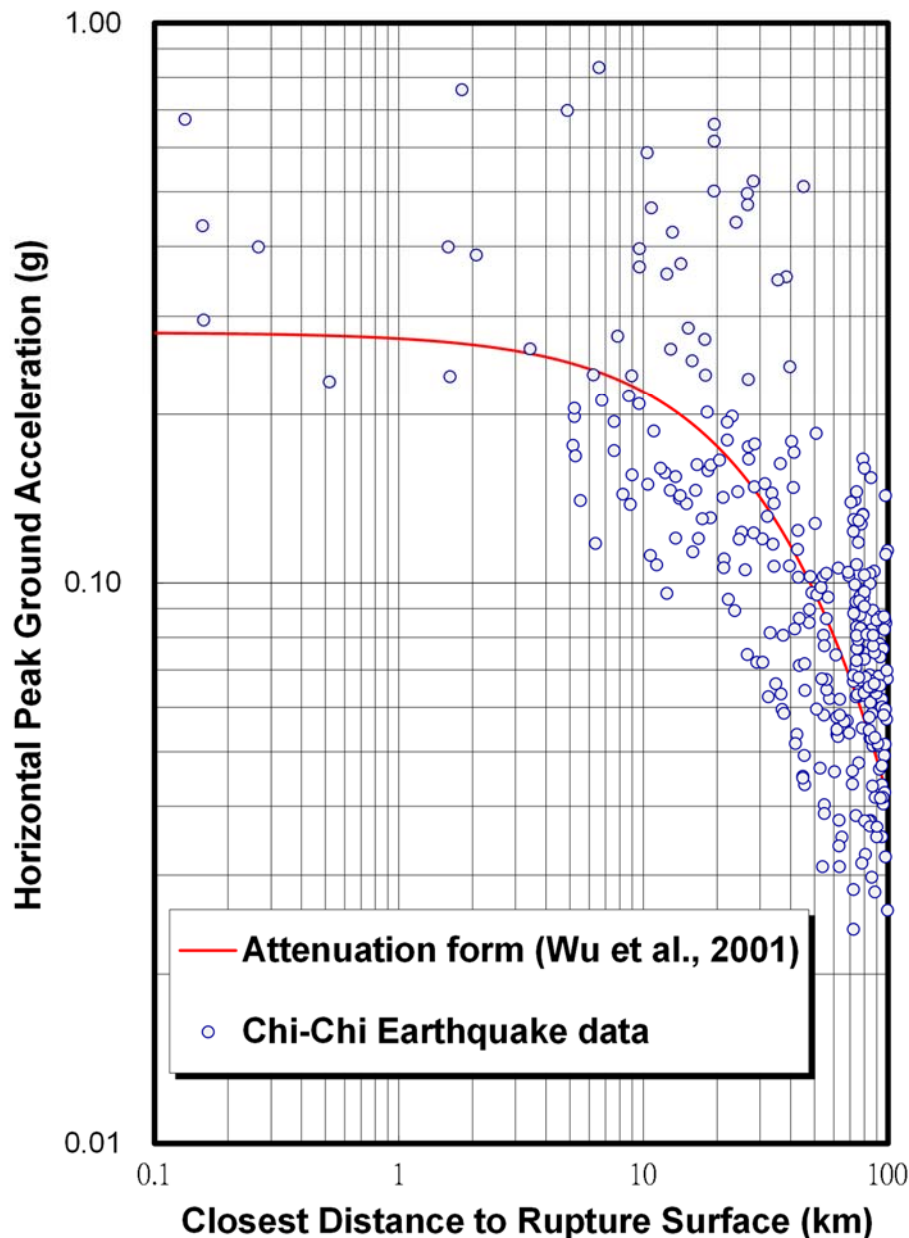


圖 4-2 各測站實測尖峰地表加速度與修正之 Wu 衰減率共繪

第三節 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可視為隨機變域的表現，例如降雨量、溫度等。由於在空間中不同區域之各隨機變數並不非完全獨立，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)。區域化變數理論近年來已被廣泛應用於氣象、土壤物理、地下水、礦冶、地震、環境監測及水文等領域當中。

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，確定性資料即所謂的地表震度衰減率，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)：

$$Z(x) = M(x) + R(x) \quad (4-4)$$

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)，即所謂的地表震度衰減率，其值等於 $Z(x)$ 在 x 處之期望值，滿足：

$$M(x) = E[Z(x)] \quad (4-5)$$

$R(x)$ 為殘差分量，即為空間中隨機變動值(erratic fluctuations)，期望值為零，滿足：

$$E[R(x)] = 0 \quad (4-6)$$

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, Onishi & Tayama, 1999; Yamazaki, Motomura & Hamada, 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 4-3 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。

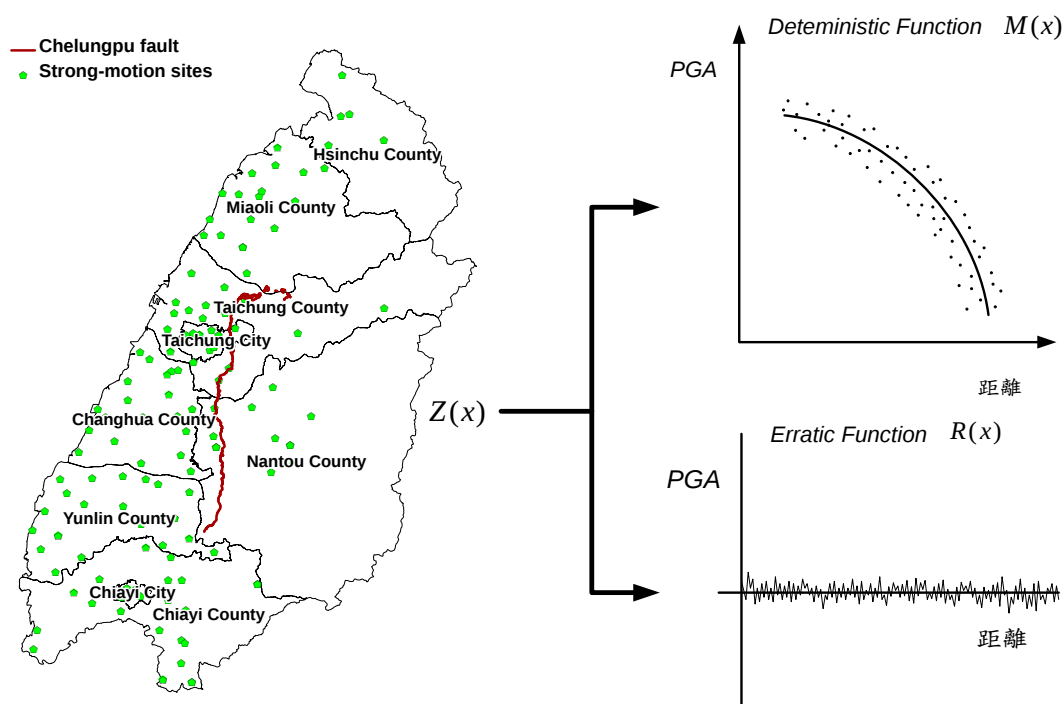


圖 4-3 區域趨勢值與空間中隨機變動值之關係

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。本研究針對 Wu 衰減率所得之殘差分量進行半變異數套配。如表 4-1 所示，地表震度空間變異最佳之半變異數套配模式可藉由比較其相關係數 $\hat{R}^2$ 得知。對於 Wu 衰減率，以指數模式最佳(表中以「○」表示)而線性模式最差(表中以「×」表示)，表示以指數模式套配之空間結構較佳，其參數之相關係數達 0.995，圖 4-4 所示即為指數模式套配之克利金半變異圖。

表 4-1 Wu 衰減率所得之殘差分量套配半變異數模式之參數結果

套配模式	C_0	$C_0 + C$	b	$\hat{R}^2$	模式選定
線性模式	1,682.26	11,154.73	67503.14	0.942	×
球體模式	460.00	9,980.00	66,300.00	0.987	
指數模式	10.00	12,810.00	41,700.00	0.995	○
高斯模式	1,510.00	9,750.00	30,000.00	0.974	

資料來源：本研究分析、整理。

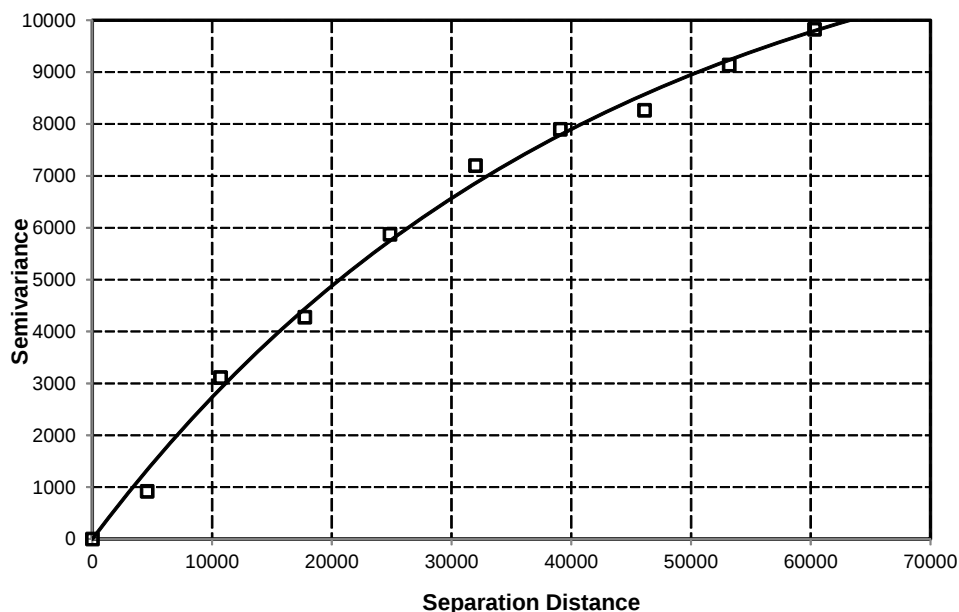


圖 4-4 最佳半變異圖(指數模式)

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 & 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 & Glass, 1984; Maruyama *et al.*, 2010; Shabestari *et al.*, 2004; Wu, Hsiao & Teng, 2004; Yamazaki, Onishi & Tayama, 1999; Yamazaki, Motomura & Hamada, 2000)。

本研究利用 921 地震 444 個強地動測站之場址 PGA 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 PGA 空間分布，並以 100 m×100 m 之網格做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，本研究利用地理資訊系統軟體 Arc GIS 內建之空間分析克立金內插模組推估空間中之隨機變動值。如式(4-4)，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 $Z(x)$ 。

Wu 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。如圖 4-5 所示為各測站之實測值(PGA_T)與推估值(PGA_E)之比較結果，圖中顯示 444 個測站中大部分之推估值皆相當良好，其平均絕對誤差(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 之空間推估結果如圖 4-6 所示，由圖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 ，此一結果相當符合 921 地震之地表震度在中部區域之表現，亦顯示在車籠埔斷層帶沿線具有相當合理的推估能力。此外，對於震波傳遞之盆地放大效應(basin effect)，如圖中右側數值較高之埔里盆地，空間描述能力亦相當良好。因此，Wu 衰減率模式之 PGA 空間推估結果可做為發展坡地易損性曲線的有效地表震度資料。

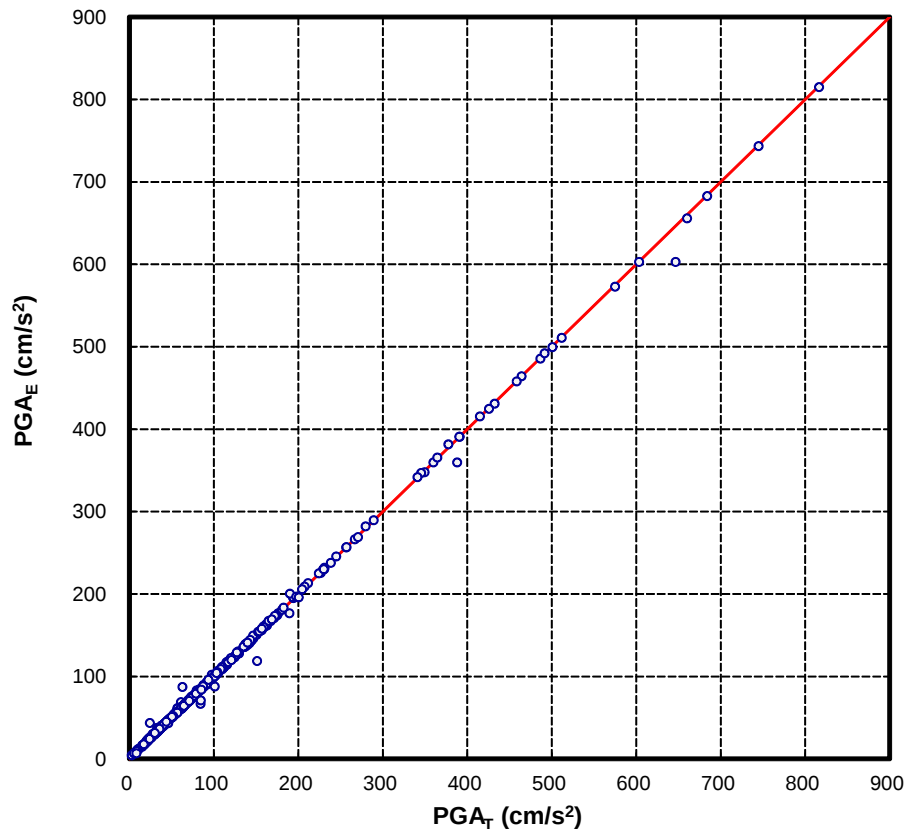


圖 4-5 強地動測站實測值及 Wu 衰減率之推估值比較

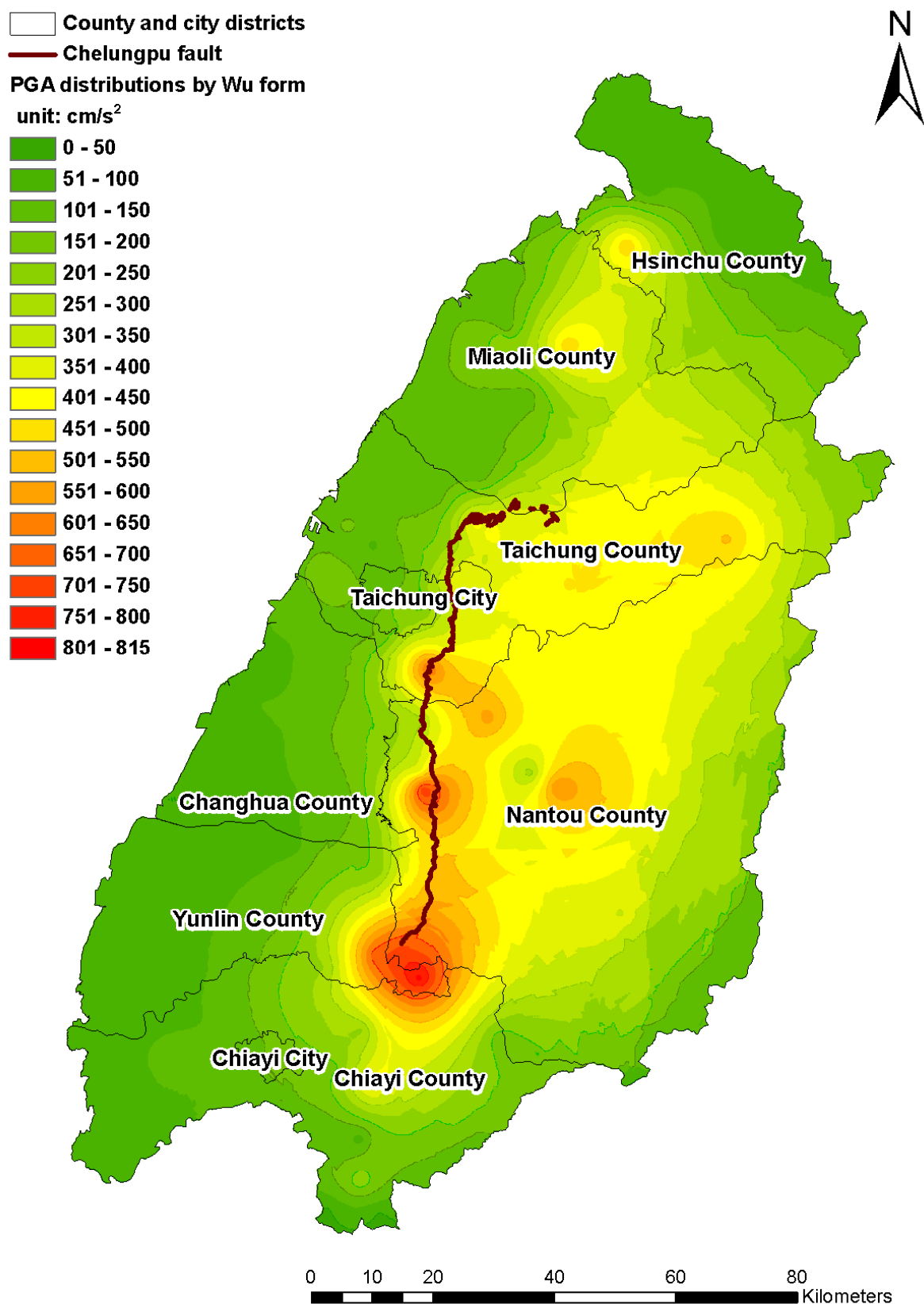


圖 4-6 Wu 衰減率推估之全域尖峰地表加速度分布

第五章 地震誘發崩塌可能性之坡地易損性模式建立

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(Ang and Tang, 1975; Rossetto and Elnashai, 2003; Rota *et al.*, 2008; Shinozuka *et al.*, 2000; 李秉乾等, 2005)。在探討地震導致結構物破壞之問題上，可利用結構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即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 5-1 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。

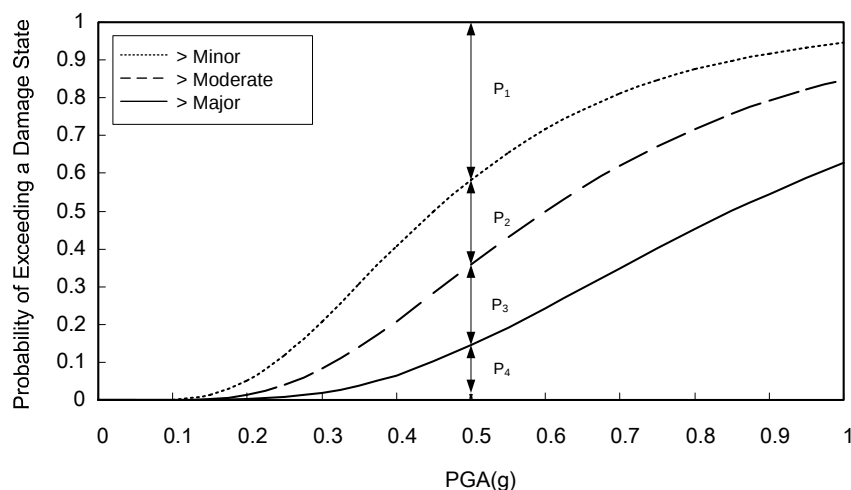


圖 5-1 不同損害分級之易損性曲線關係

第一節 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的領域，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，其它方法亦是建立於專家判斷法的基礎上而發展。而一般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

基於專家們主觀的經驗及判斷，建立對於損害紀錄的損害等級、致災因子和機率分布的專家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，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

不同之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。或是再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：

(一)第 1 類：基於單一地區單一事件之損害紀錄，本研究所採用。

(二)第 2 類：基於不同地區多個事件之損害紀錄。

(三)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, Kappos and Stylianidis, 2003; Kappos *et al.*, 2006; Kappos and Panagopoulos, 2010)。

第二節 經驗易損性曲線之分析模式

易損性曲線表達致災因子對於發生之災害達到或超越某個程度的機率，即所謂的超越機率。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(parameter estimates)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 β 分布(Beta distribution)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。相關的論證如 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 5-1。

表 5-1 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	$f(x) = \frac{1}{\zeta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-c)^2}{2\zeta^2}} \quad (5-1)$
對數常態分布	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta x} e^{-\frac{(\log x - c)^2}{2\zeta^2}} \quad (5-2)$
β 分布	$f(x) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} \quad (5-3)$

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 5-1 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 5-2，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 5-2 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	$F(x) = ae^{bx}$ (5-4)
對數式	$F(x) = e^{a \log x + b}$ (5-5)
擬羅吉斯	$F(x) = \frac{100}{1 + (x/a)^{-b}}$ (5-6)

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。本計畫將這些方法分為三大類，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為核心所發展。最大概似估計法之原理是使觀測的樣本發生機率為最大以評估機率分布函數的估計參數。所謂樣本發生機率即概似函數(L : likelihood function)，係可觀察的隨機變量之聯合機率密度函數(joint probability density function; JPDF)。利用最大概似估計法求取易損性曲線的相關研究雖不多，但已成功地應用於建立橋梁易損性曲線。例如 Shinozuka(1998)和 Shinozuka *et al.*(2000, 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。最大概似估計法的完整理論說明詳見下節。

第三節 坡地易損性分析模式

一、地震誘發崩塌之坡地易損性

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，即可建立所謂的坡地易損性曲線。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驅動力指標建立不同類別之坡地易損性曲線，可用來進行坡地分類之地文因子例如坡度、地質、坡向...等，而引致崩塌之驅動力指標則可採用地震之 PGA，建立與崩塌與否的易崩特性，進一步建構基於機率理論方法的崩塌評估。

經驗分析法是基於過去某個災害性事件或是數個事件後的真實損害資料，利用統計推論發展易損性曲線。利用災害性事件後由專家及學者進行之損害調查資料，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損害機率。所以經驗分析法的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。對於利用經驗分析法建立易損性曲線的相關研究相較理論分析法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，基於有限資料還需要進行適當分類或分級。

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未來評估合理性引入坡面單(slope unit)分析，坡面單元因具有符合地形特徵之特點，此特點利於未來進一步之分析及坡面評估，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機率評估。

本研究坡地易損性曲線建立流程如

圖 5-2 所示，除研究區域基本資料蒐集外，尚須進行事件資料選定。本計畫以九二一地震為例，蒐集集水區範圍相關資料，包括主、次、子集水區範圍、5m 數值高程模型、河川、水系、地質、岩性等；以及事件資料，包括地表加速度、多時期衛星影像等。藉由 PGA 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。藉由網格分析資訊，可將各類坡地分類資料進行網格集群最大概似法，即可求取易損性曲線。

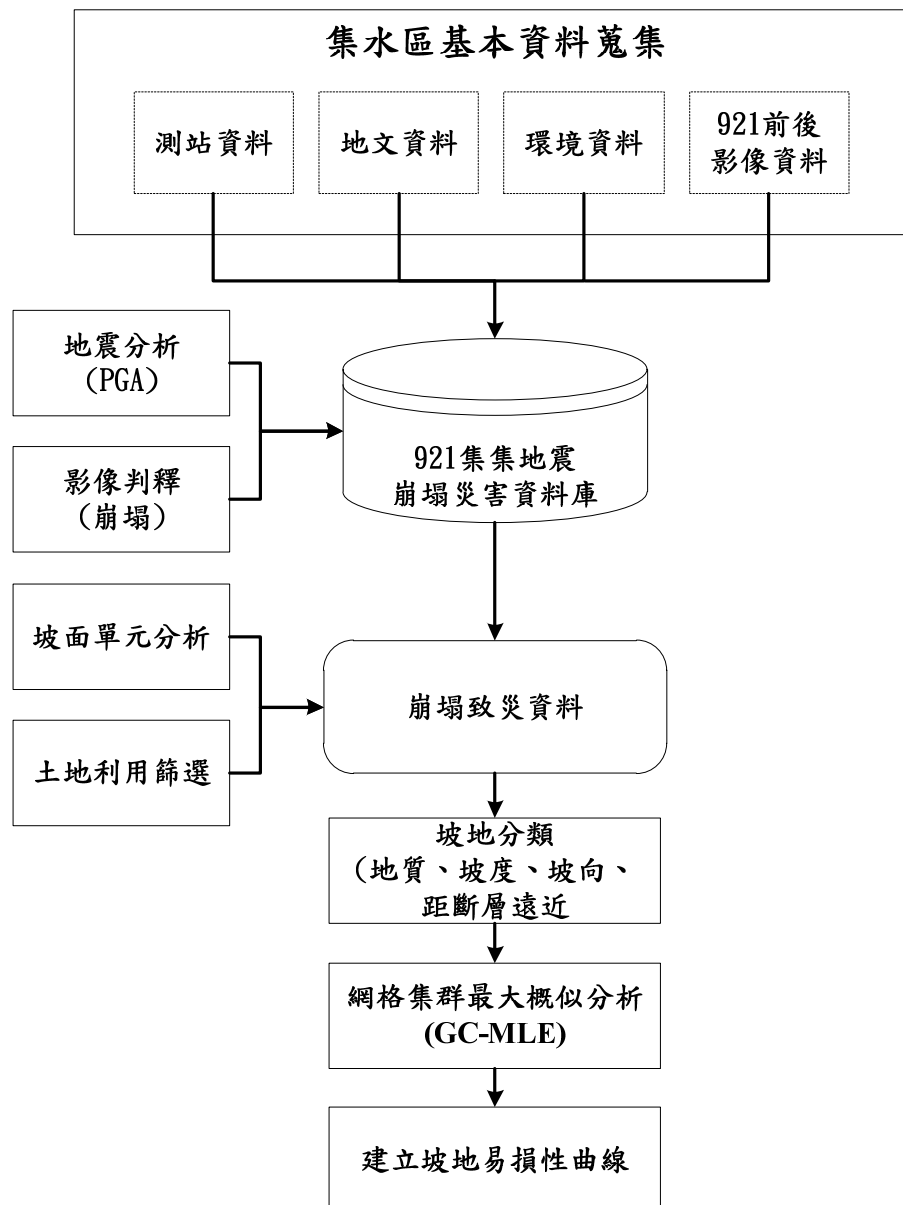


圖 5-2 坡地易損性模式建立步驟

二、易損性分析理論

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。所謂樣本發生機率即概似函數(Likelihood function)，係可觀察的隨機變量之聯合機率密度函數(joint probability density function; JPDF)。最大概似估計法係將每個調查樣本可能存在的損害分級「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(5-7)所示：

$$L_j(c_j, \zeta_j) = \prod_{i=1}^N [F_j]^{n_i} [1 - F_j]^{1-n_i} \quad (5-7)$$

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對數標準差； 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對數標準差，可經由求取式(5-7)概似函數之最大值而得。

易損性分析表達致災因子對於發生之災害達到或超越某個程度的機率，即所謂的超越機率。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推估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(maximum likelihood estimation; MLE)。既有的易損性分析相關研究在機率密度函數上常見採用常態分布、對數常態分布或 β 分布來描述致災因子與災害發生之關係。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，

通常可採用對數常態分布表達發生之頻率分布。所謂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對數標準差決定(Shinozuka *et al.*, 2000；李秉乾等人，2005；謝孟勳，2013)，稱為雙估計參數。如式(5-8)所示：

$$f_j(x; c_j, \zeta_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_j x} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(x/c_j)}{\zeta_j}\right]^2} \quad (5-8)$$

其中， f_j 為對數常態分布之機率密度函數； c_j 為中位數(median)； ζ_j 為對數標準差(log-standard deviation)； 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：

$$F_j(x; c_j, \zeta_j) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(x/c_j)}{\zeta_j \sqrt{2}} \right] \quad (5-9)$$

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：

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (5-10)$$

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(fragility curve)。中位數和對數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)。依據易損性曲線分析原理，此法可發展兩種模式之易損性曲線，說明如下。

(一)網格法

對於第 k 個集群內有 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)可用典型的二項分布定義如下：

$$f_{kj}(X) \equiv \binom{X}{x_k} [F_j]^{x_k} [1-F_j]^{X-x_k} \quad (5-11)$$

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：

$$L_j^B(c_j, \zeta_j) = \prod_{k=1}^{K_g} \binom{X}{x_k} [F_j]^{x_k} [1-F_j]^{X-x_k} \quad (5-12)$$

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(5-12)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對數標準差，式(5-12)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，其聯立方程式表示如下：

$$\frac{\partial \ln L_j^B(c_j, \zeta_j)}{\partial c_j} = \frac{\partial \ln L_j^B(c_j, \zeta_j)}{\partial \zeta_j} = 0 \quad (5-13)$$

上式之推導須引入標準化參數 λ_{kj} ，即

$$\lambda_{kj} = \ln(x / c_j) / \zeta_j \quad (5-14)$$

即可導出第 j 個損害分級之非線性聯立方程式如下：

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{K_g} R_{kj} \left\{ \frac{-e^{-\frac{1}{2}\lambda_{kj}^2}}{1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\lambda_{kj}}{\sqrt{2}}\right)} \right\} + \sum_{k=1}^{K_g} (1 - R_{kj}) \left\{ \frac{e^{-\frac{1}{2}\lambda_{kj}^2}}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\lambda_{kj}}{\sqrt{2}}\right)} \right\} = 0 \\ \sum_{k=1}^{K_g} R_{kj} \left\{ \frac{-\lambda_{kj} e^{-\frac{1}{2}\lambda_{kj}^2}}{1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\lambda_{kj}}{\sqrt{2}}\right)} \right\} + \sum_{k=1}^{K_g} (1 - R_{kj}) \left\{ \frac{\lambda_{kj} e^{-\frac{1}{2}\lambda_{kj}^2}}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\lambda_{kj}}{\sqrt{2}}\right)} \right\} = 0 \end{cases} \quad (5-15)$$

其中；

$$R_{kj} = x_{kj} / X_k \quad (5-16)$$

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(5-16)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 PGA 值和崩塌率，則易損性曲線之 c_j 和 ζ_j 即可以求解。

(二)坡面法

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：

$$f_k(X; P_0, P_1, \dots, P_J) \equiv \binom{X}{x_{k0}, x_{k1}, \dots, x_{kJ}} \prod_{j=0}^J [P_j]^{x_{kj}} \quad (5-17)$$

其中；

$$\sum_{j=0}^J x_{kj} = X \quad (5-18)$$

式(5-17)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：

$$P_j = F_j(x; c_j, \zeta_j) - F_{j+1}(x; c_{j+1}, \zeta_{j+1}) \quad (5-19)$$

且；

$$\sum_{j=0}^J P_j = 1 \quad (5-20)$$

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(5-17)之聯合機率質量函數來表達。因此，概似函數 L^M 則可表示為：

$$L^M(c_1, c_2, \dots, c_J, \zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_J) = \prod_{k=1}^K \binom{X}{x_{k0}, x_{k1}, \dots, x_{kJ}} \prod_{j=0}^J [P_j]^{x_{kj}} \quad (5-21)$$

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：

$$\frac{\partial \ln L^M(c_1, c_2, \dots, c_j, \zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_j)}{\partial c_j} = \frac{\partial \ln L^M(c_1, c_2, \dots, c_j, \zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_j)}{\partial \zeta_j} = 0 \quad (5-22)$$

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 PGA 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(5-22)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。若每個樣本中坡地崩塌之致災資料可以得到，包含樣本之地震因子和崩塌資訊(即 0/1 型態資料)，則坡地易損性曲線參數值即可求取。

本計畫將致災因子與崩塌關係假設為對數常態分佈，其隨機變量即為 PGA 指標。已知 PGA 藉由易損性曲線即可得到地震引致崩塌的機率。對於易損性分析則利用坡面法建立坡地受降雨引致崩塌之概似函數。對於某類坡地發生之崩塌事件，二項分布型之網格法表達在致災因子作用下坡地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，所表達之坡面崩塌為某 PGA 下某類型坡地有多少百分比會發生崩塌。多項分布型之坡面法則表達在致災因子作用下坡地有多個可能的損害程度，所描述坡面崩塌機率之物理意義，係指集水區中某類型坡地在某地震條件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，所有的坡地崩塌資料皆可利用網格分析定義致災資料的坡地崩塌資訊。以資料取樣觀點，致災資料被兩個元素定義，即事件崩塌地與非崩塌地，並由此兩元素定義是否崩塌。因此致災資料可以連續型或不連續型資料表示，連續型資料可用崩塌率(或稱崩塌比)表示，不連續型則可用 0/1 定義是否崩塌；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。若坡地受地震引致崩塌之致災資料可以得到，則雙參數值即可求取並繪製其易損性曲線。

第四節 坡面單元

一、坡面單元繪製

目前對於廣域崩塌評估模式的基本單元可分為網格單元及坡面單元，此二種方法各有其優缺點。網格單元係將分析區域切分成較小網格再進行統計推估，其優點是符合統計的權重一致性，缺點是無法考慮地形邊界效應而導致統計上的偏估。網格單元對於整體坡地狀況(如一個邊坡)掌握度亦不佳，較難描述坡面的力學與物理機制。坡面單元則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剔除不適用區域再進行統計迴歸，如圖 5-3 所示。本研究使用的坡面單元劃分方法為集水區重疊法，可利用地理資訊系統軟體之水文分析功能直接進行劃設。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，利用地理資訊系統之分割功能，將原集水區分割為左右兩坡面單元，如圖 5-4 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 之集水區則係利用反轉 DEM 得到。

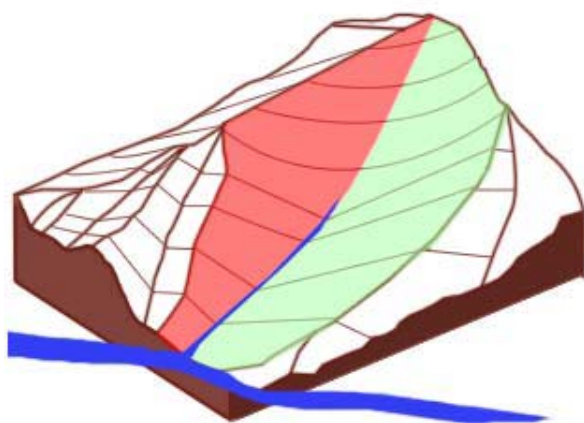


圖 5-3 坡面單元示意圖

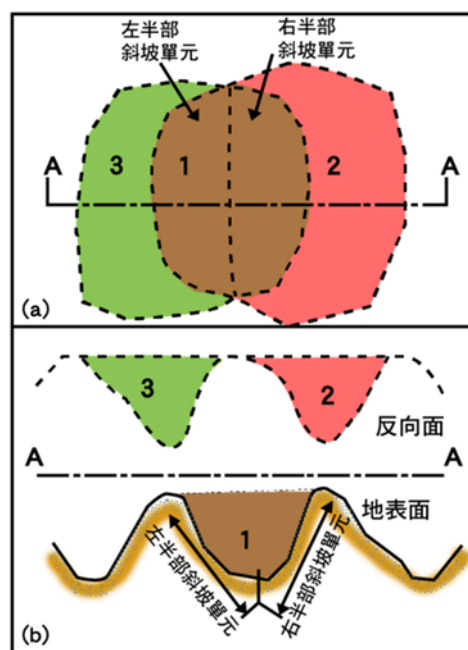


圖 5-4 集水區重疊法示意圖

本研究使用地理資訊系統軟體 ArcGIS 10.0 之水文及地形工具進行坡面單元分析。藉由 DEM 分析得到之集水區，多邊形的輪廓線就是山脊線；而山谷線則使用反轉之 DEM 資料，藉由 DEM 網格分析互換其高低值，原山谷線即能反轉為山脊線，同樣地亦可得到反轉之山谷線。坡面單元主要繪製流程如圖 5-5 所示，繪製原則如下：

- (一)坡面單元須符合地形特徵，其邊界不可跨越地形邊界，例如稜線、河谷。
- (二)為避免聚落管理單元面積過小，坡面單元控制在約3至10公頃為原則。

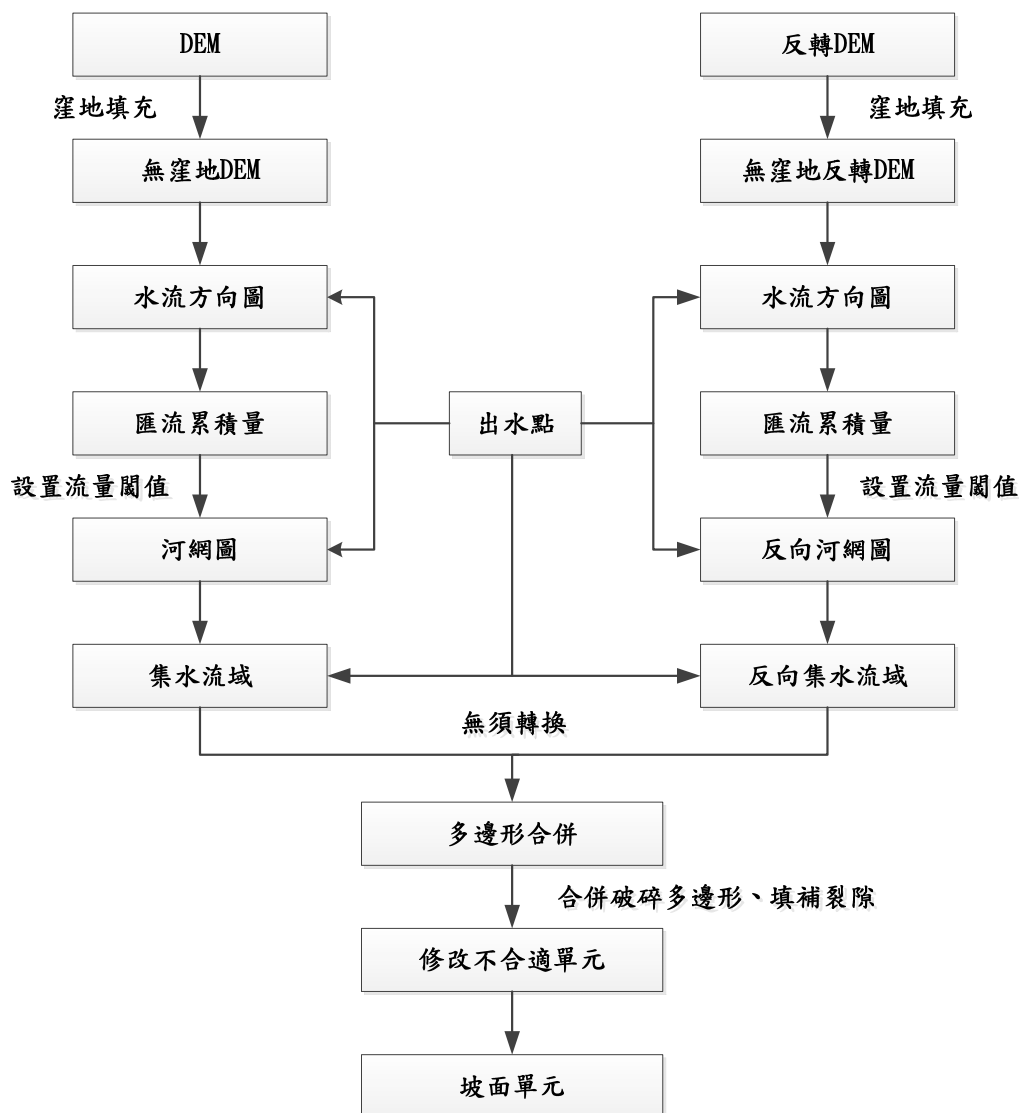


圖 5-5 坡面單元繪製流程

本計畫以 ArcGIS 軟體進行坡面單元的自動繪製，可以降低人為主觀劃分坡面單元之變異性，但現實之地表起伏相當複雜，而數值高程模型的影像資料精細度有限，使得電腦自動繪製流程並無法完全根據地形做出劃分，會產生出細小破碎的網格，如圖 5-6 所示。因此，以電腦自動繪製坡面單元後仍需進行人工編修透過山影圖及坡向圖的輔助確認及編修，才能將坡面單元應用於崩塌分析。為了使所建立之地震引致崩塌之坡地易損性曲線更可靠，所繪製之坡面單元必須考量是否崩塌的可能性及納入分析合理性。因此，除不考慮沖積層、平坦地以及平坡之區域外。亦不考慮(1)河道區域；(2)非自然邊坡；(3)低坡度之坡面單元。此步驟係將坡面單元匯入 Google Earth，將不納入考慮之研究因子進行切除，包括河系、河道、農業用地、水利用地、聚落、建物等，圖 5-7。

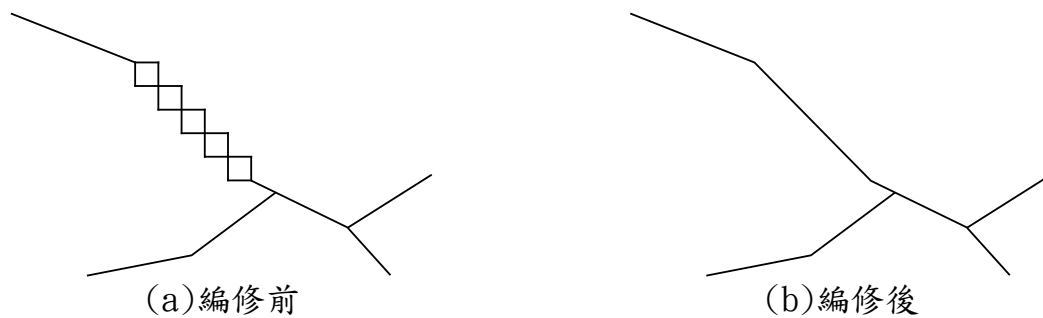


圖 5-6 坡面單元碎塊編修示意圖



圖 5-7 Google Earth 人工編修示意圖

在實際繪製過程中，雖坡面單元希望控制在 10 公頃以內，但坡面單元分析時若有大於 10ha 之坡面單元，則會獨立處理使之小於 10ha。此外，部分坡面單元若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 10ha。對於小於 3ha 之坡面單元，編修時須再與 Google Earth 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。

藉由上述步驟，即可劃分及篩選出集水區之坡面單元，本研究劃分完成之坡面單元如圖 5-8~圖 5-9 所示，總計有 6,333 個坡面單元。

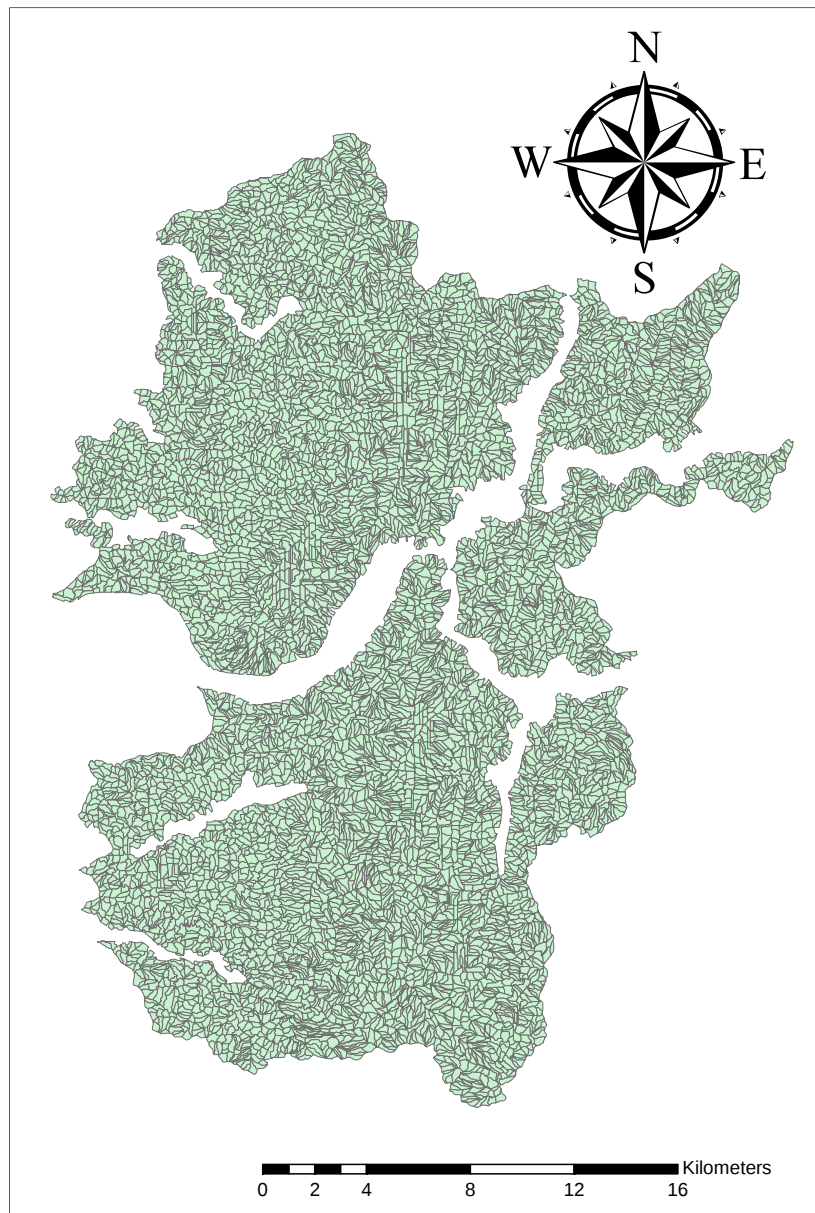


圖 5-8 烏溪集水區之坡面單元

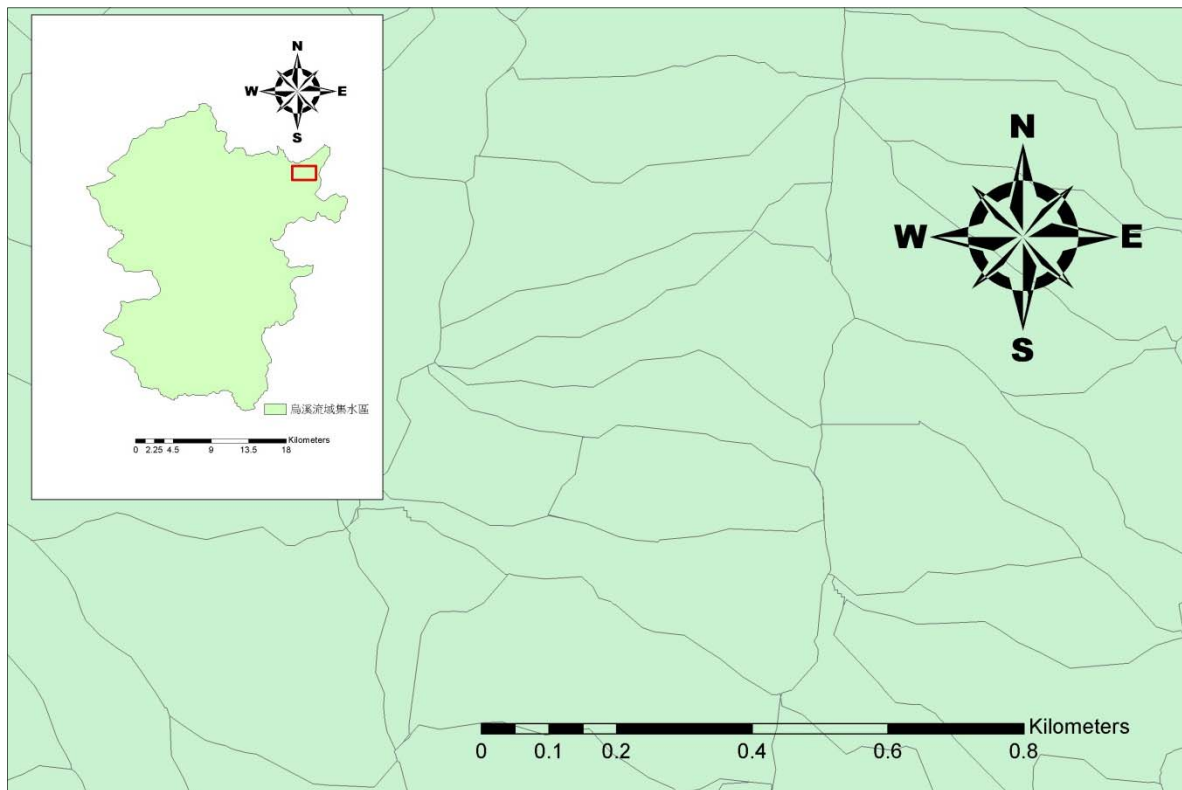


圖 5-9 坡面單元局部放大圖

二、坡面單元分類

完成坡面單元劃分後，即可瞭解整體集水區之坡面總數量以及納入分析之坡面數量。接下來即可藉由環境因子資料庫進行每個坡面之分類，由於環境因子資料庫皆為 $20\text{m} \times 20\text{m}$ 之網格尺度，必須轉化為坡面尺度之定義。本研究藉由坡面之物理特徵與坡面分級尺度進行最佳的分類，分類因子包括：「地質岩性分類」；「坡向敏感因子」；「高程分級」以及「坡度分級」。以下分述之。

1. 坡面之地質分類(G)

地質因子採用李錫堤教授之分類，依照網格法計算以較多的分類為依據分出兩種類別，site classB 為堅硬且脆性的岩石為地質分級一、site classC 為密集的土壤和軟岩為地質分級二。烏溪集水區劃分完成之坡面單元地質分類統計如表 5-3 和圖 5-10 所示。

表 5-3 本研究地質分類統計

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%

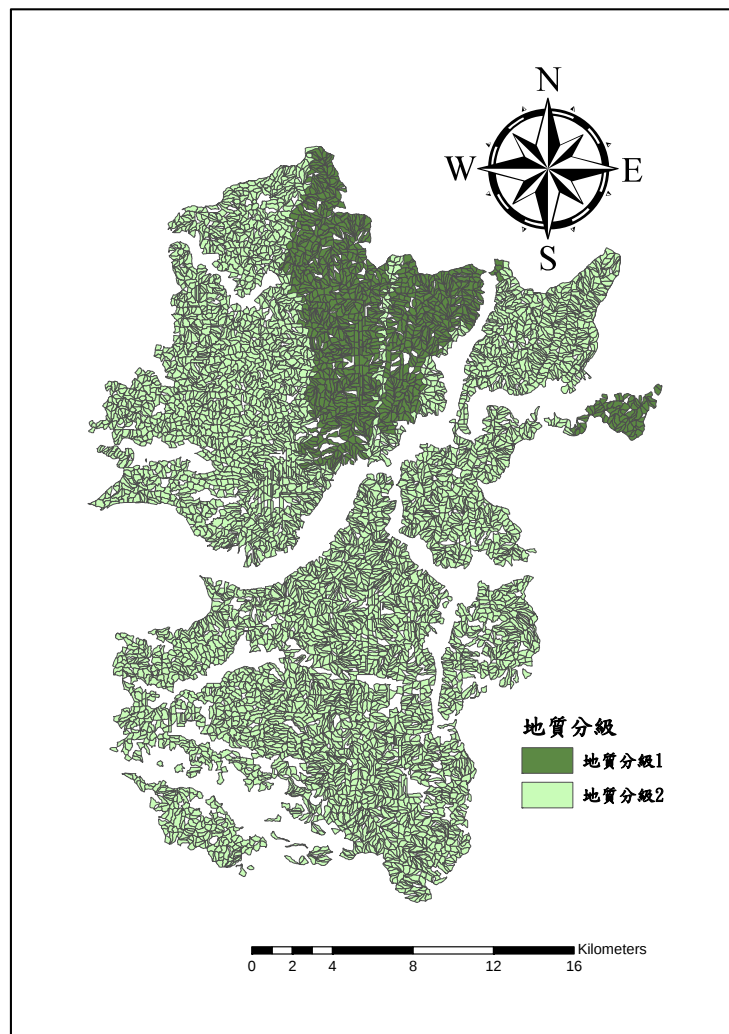


圖 5-10 坡面單元地質分類

2. 坡面之坡向因子(A)

由於坡面受地震波方向的影響極大，本研究考慮坡面方向與地震波方向的關係，將坡向分為強面與弱面兩類。首先計算出坡面單元反函數最高點減最低點算出的坡面方位角，再以坡面單元形心計算出與斷層點的坡向方位角，利用坡面方位角和坡向角度以 30° 為分界評估強面及弱面。劃分完成之坡面單元坡向分類如表 5-4 和圖 5-11 所示。

表 5-4 本研究坡向分類統計

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%

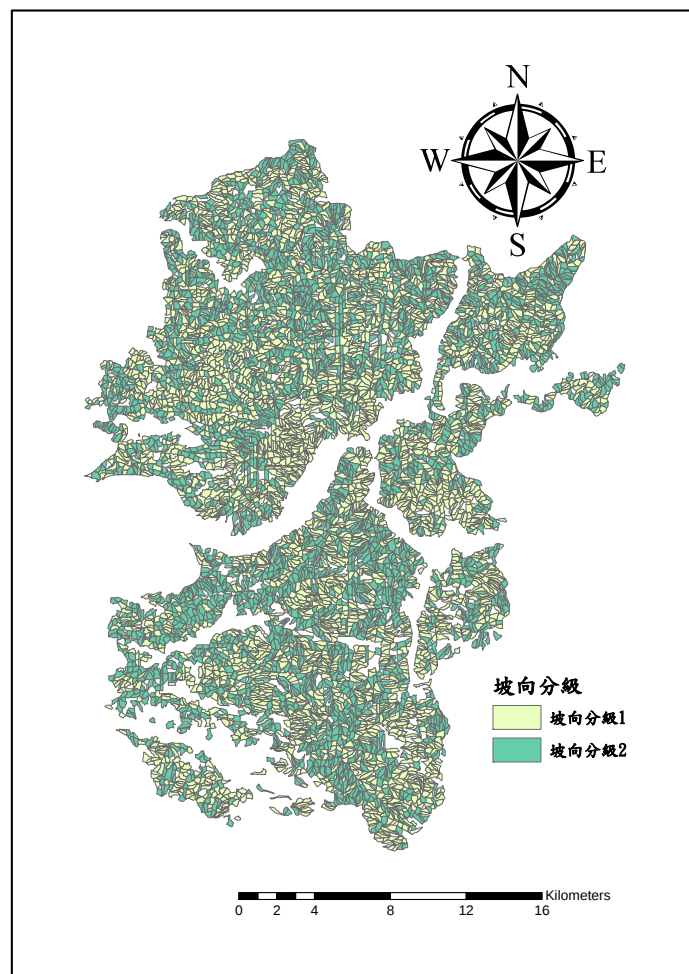


圖 5-11 坡面單元坡向分類

3. 坡面之高程分級(E)

坡面單元的高程資料取自每個坡面單元之形心，本研究以 500m 為分界線將高程分為兩類，低於 500m 為 E1，高於 500m 為高程分類 E2。如表 5-5 所示，烏溪集水區劃分完成之坡面單元坡向分類如圖 5-12 所示。

表 5-5 本研究高程分類統計

級序	高程(m)	坡面數	崩塌地		非崩塌地		崩塌比
			個數	%	個數	%	
E1	500 以下	3,510	619	60.63%	2,891	54.42%	17.64%
E2	500 以上	2,823	402	39.37%	2,421	45.58%	14.24%
總和		6,333	1,021	100.00%	5,312	100.00%	16.12%

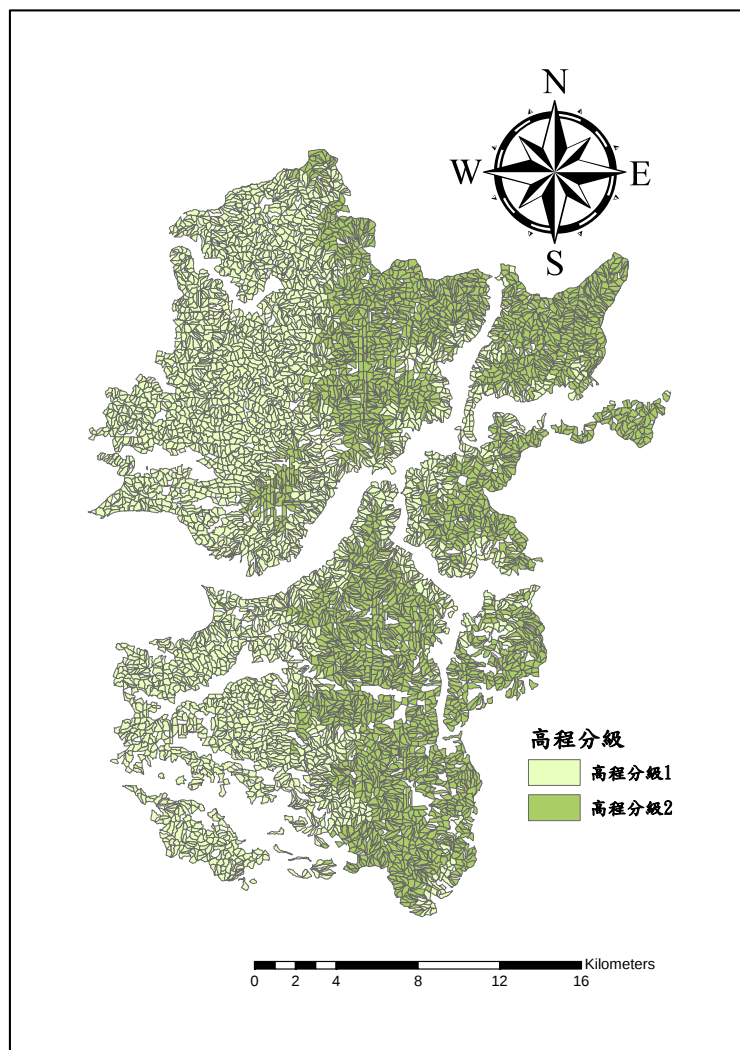


圖 5-12 坡面單元高程分類

4. 坡面之坡度分級(S)

坡面單元坡度分級方面，本研究考量以水土保持技術規範(2013)坡度分級定義為依據，將坡度自五級坡之上下界分三個分級，定義為S1(緩坡)、S2(中坡)以及S3(陡坡)，如表5-6所示。再採用坡面斜率法來計算坡面單元坡度，計算方式是將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。採用坡面斜率法不僅結果較佳，也具有其物理意義存在，烏溪集水區劃分完成之坡面單元坡度分類如圖5-13所示。

表 5-6 本研究坡度分級

編碼	規範分級	水土保持技術規範	
		坡度(S)分級範圍	坡度(°)
S1	三級坡	$15\% < S \leq 30\%$	$8.53 < S \leq 16.70$
	四級坡	$30\% < S \leq 40\%$	$16.70 < S \leq 21.80$
S2	五級坡	$40\% < S \leq 55\%$	$21.80 < S \leq 28.81$
S3	六級坡	$55\% < S \leq 100\%$	$28.81 < S \leq 45.00$
	七級坡	$S > 100\%$	$S > 45.00$

註：一、二級坡在網格資料庫中已刪除，但以坡面單元計算仍可能有三級坡之坡度值。

表 5-7 本研究坡度分類統計

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%

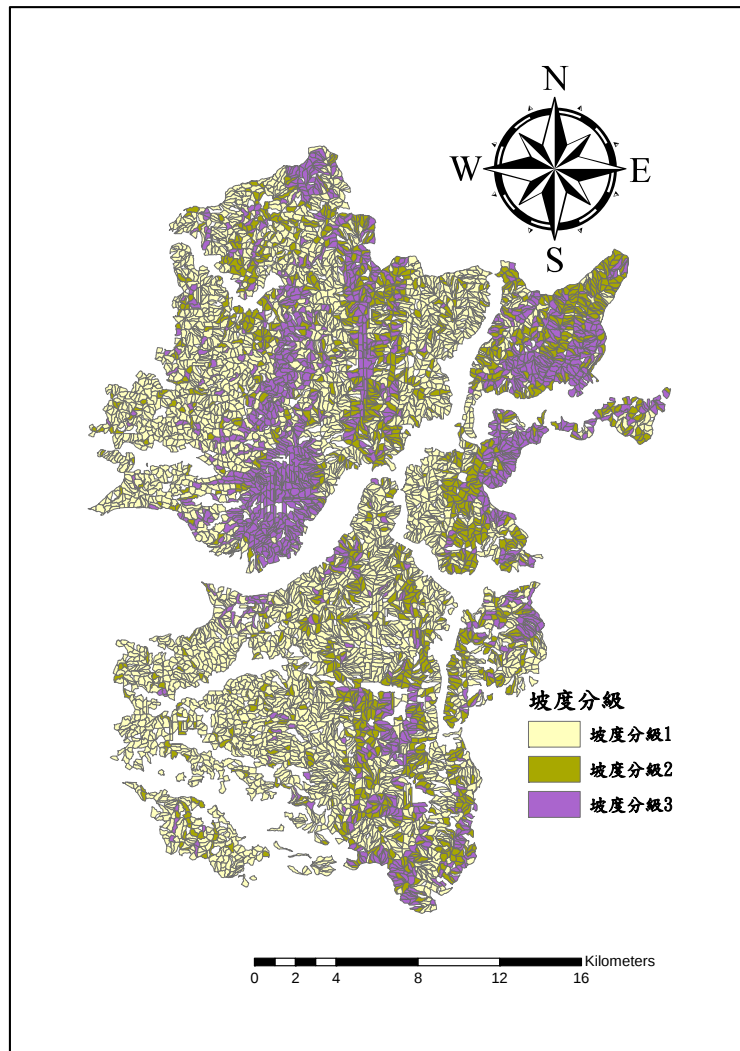


圖 5-13 坡面單元坡度分類

三、坡面所受震度

前述第四章中已說明尖峰地表加速度(PGA)之全域推估，得到精度 20m×20m 的地表加速度推估值。本研究對於坡面單元之震度因子，採用坡面單元內之平均震度值。使用平均震度值是因為若採用坡面單元內最大平均震度值，會放大坡面單元的平均震度值，將有較高平均震度低崩塌之事件產生；若採用最小平均震度值，則易產生低震度高崩塌之事件。烏溪集水區以坡面單元計算之震度分布如圖 5-14 所示。

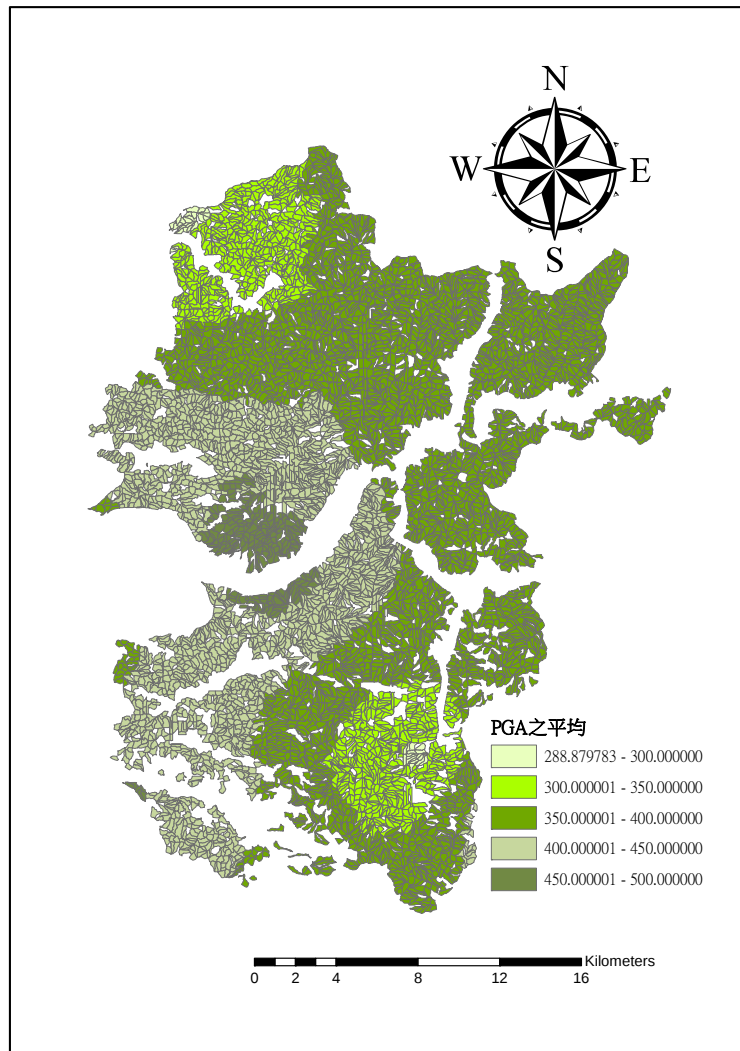
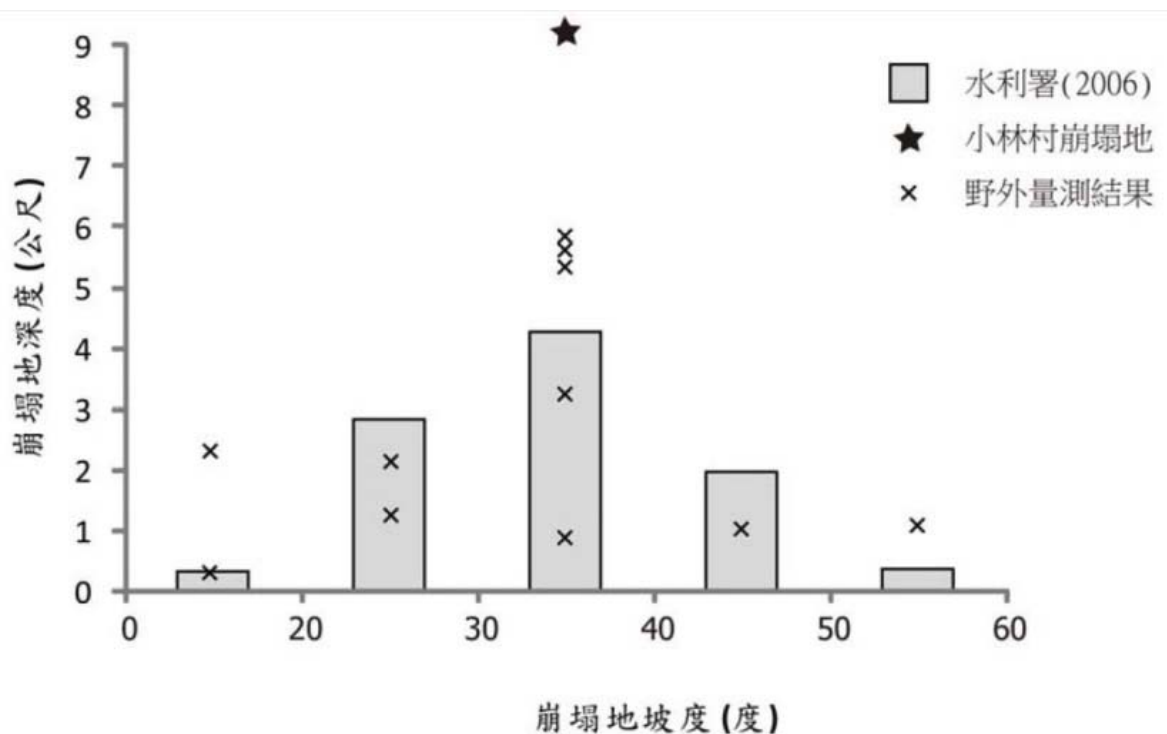


圖 5-14 烏溪流域集水區坡面單元 PGA 震度分布

四、坡面崩塌程度

坡面單元必須針對坡面崩塌情形予以定義是否發生崩塌。由於崩塌發生與否與崩塌量體和崩塌面積是相關的，因此必須將衛星影像判釋所得的平面投影與空間量體之關係予以考量，也就是說衛星影像判釋並不能夠考慮地形地勢與崩塌深度的影響，因此有必要予以修正。這個修正概念在過去已有許多研究者針對坡地崩塌斜面積、體積與深度的關係作過相關研究(例如 Evans and DeGraff, 2002; Imaizumi *et al.*, 2008; Guzzettiet *et al.*, 2009; 經濟部水利署, 2006, 2010, 2011)。以經濟部水利署(2006, 2010, 2011)針對石門水庫集水區與高屏溪集水區崩塌地深度與坡度相關研究為例，藉由野

外量測結果發現崩塌地深度與坡度呈現鐘型曲線，坡度在 30-40 度之間崩塌深度最大，且在相同的坡度間距內深度變異相當大，如圖 5-15 所示。



資料來源：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，經濟部水利署，2010

圖 5-15 崩塌地坡度與深度分佈

過去研究結果顯示崩塌地深度與坡度具有一定相關性，且崩塌體積、斜面積與深度亦有關係，如圖 5-16 所示，若可獲得體積與斜面積關係式，即可進一步以崩塌體積推算不同坡度下之崩塌斜面積，得到崩塌水平投影面積，也就是影像判釋所得之近似崩塌面積。依據上述，本研究針對坡面單元之崩塌定義，參考水利署曾於 2010 至 2011 年間執行之「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：

$$V = 0.2 \times A^{1.3} \quad (5-23)$$

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。此公式即可藉由崩塌體積推算崩塌斜面積，再由不同坡度計算崩塌水平投影面積。本研究將坡面單元是否崩塌之定義，參考該計畫調查六處崩塌地

之平均崩塌體積約 5,692 立方公尺估算，將崩塌體積取整數定義為 6,000 立方公尺，再藉由式(5-23)計算得到崩塌斜面積並由坡度計算崩塌水平投影面積，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得到較佳門檻值定義：

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

此種分類方式具有較佳的分析結果，也能夠修正影像判釋的不足，最終本研究集水區得到之坡面單元崩塌評估結果如圖 5-17 所示。

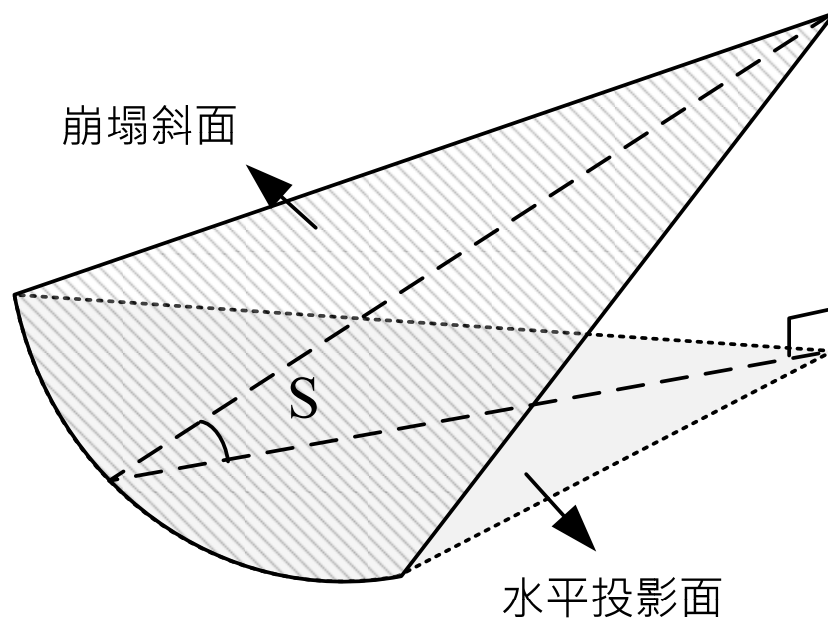


圖 5-16 崩塌塊體斜面與投影面關係示意圖

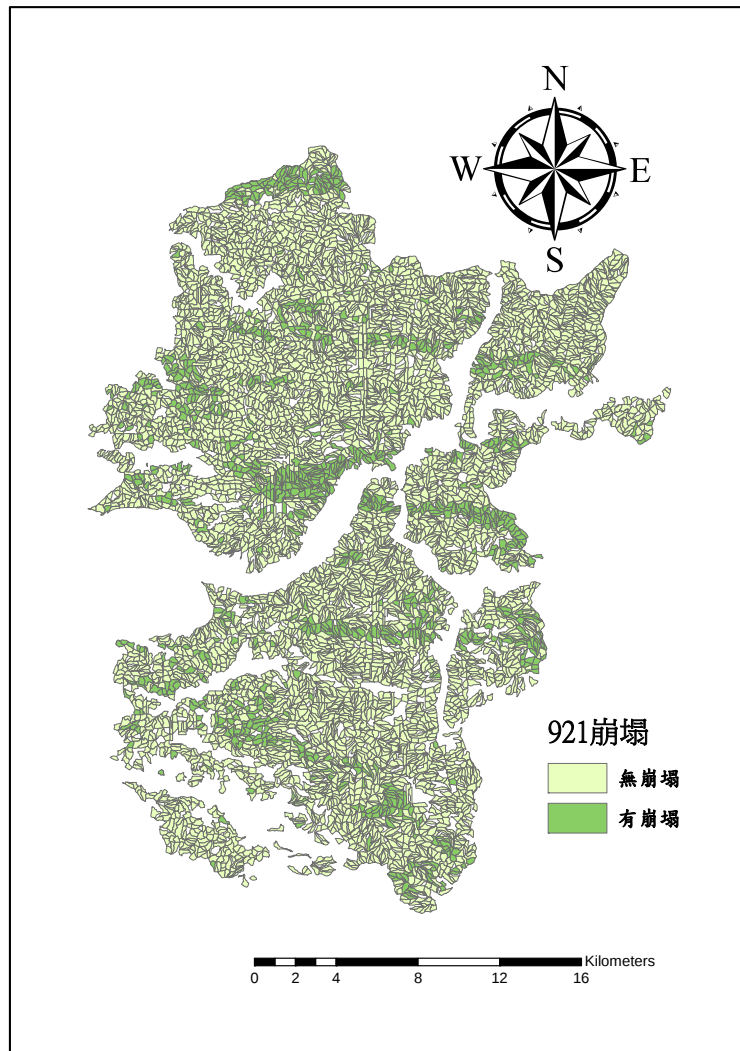


圖 5-17 烏溪流域集水區崩塌坡面分佈

本研究之坡地易損性曲線係基於所定義之坡面分類求取，根據前述各種環境因子所定義之分類，利用本研究建置之 921 地震崩塌資料庫針對各類型坡地分析其坡地易損性曲線。總結前述各坡面環境因子之分類屬性，坡面單元賦予固定編碼以顯示其環境特徵，賦予 G(地質)、A(坡向)、E(高程)、S(坡度)之編號順序組合，其中包括地質二類、坡向二類、高程二類以及坡度三類，共計 24 種組合，即是有 24 種類型的坡地，各類坡地能夠利用坡地易損性曲線所對應的 PGA 關係，估計某 PGA 震度下的崩塌機率，進而描述任一震度下之崩塌可能性。

第六章 坡地易損性曲線分析成果

第一節 24 類坡地易損性曲線

根據崩塌事件資料庫與地震因子推估結果，利用最大概似法進行致災資料分析，亦即將 24 類坡面進行坡地易損性分析，用來描述地震引致坡地之崩塌機率。

一、24 類坡地易損性曲線雙參數

易損性分析模式變量被定義為 PGA，同時將某事件下之所有坡面單元之致災資料(包括 PGA 因子與該坡面是否發生崩塌)輸入分析模式中，即可求解兩個易損性參數，若資料數量過少則無法分析，因此會將相近之分類進行合併求解。所得之易損性參數分析結果如表 6-1 所示，各類坡地易損性曲線如圖 6-1 至圖 6-24 所示。

表 6-1 烏河流域之坡地易損性參數表(24 類)

分類編號	數量	合併	合併後數量	崩塌中位數	標準差
G1A1E1S1	1148		1148	0.701	0.576
G1A1E1S2	228	G2A1E1S2	254	0.742	0.879
G1A1E1S3	302	G2A1E1S3	328	0.685	0.607
G1A1E2S1	462		462	0.591	0.371
G1A1E2S2	323	G2A1E2S2	440	0.57	0.328
G1A1E2S3	344	G2A1E2S3	427	0.496	0.286
G1A2E1S1	1046		1046	1.119	1.049
G1A2E1S2	250	G2A2E1S2	274	0.579	0.433
G1A2E1S3	269	G2A2E1S3	269	0.752	0.555
G1A2E2S1	402		402	1.711	1.639
G1A2E2S2	329	G2A2E2S2	432	1.087	0.945
G1A2E2S3	219	G2A2E2S3	304	0.467	0.202
G2A1E1S1	102		102	0.43	0.132
G2A1E1S2	26		254	0.742	0.879
G2A1E1S3	26		328	0.685	0.607
G2A1E2S1	176		176	0.509	0.198
G2A1E2S2	117		440	0.57	0.328
G2A1E2S3	83		427	0.496	0.286
G2A2E1S1	89		89	0.432	0.175
G2A2E1S2	274		274	0.579	0.433
G2A2E1S3	24		269	0.752	0.555
G2A2E2S1	180		180	1.019	0.573
G2A2E2S2	103		432	1.087	0.945
G2A2E2S3	85		304	0.467	0.202

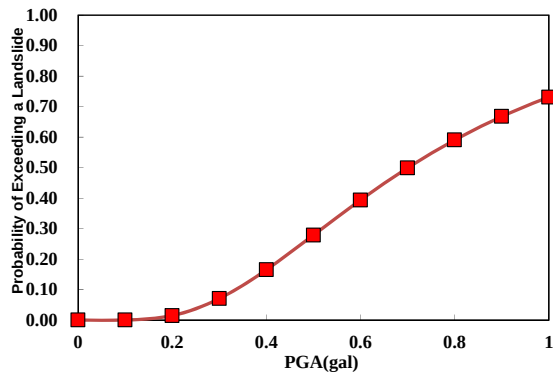


圖 6-1 G1A1E1S1 類易損性曲線

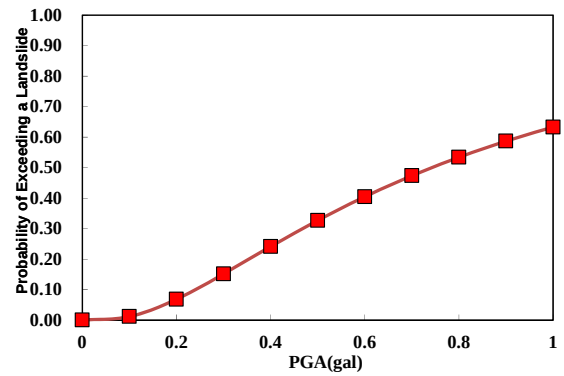


圖 6-2 G1A1E1S2 類易損性曲線

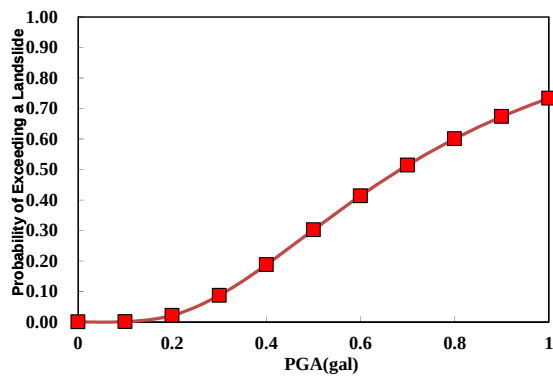


圖 6-3 G1A1E1S3 類易損性曲線

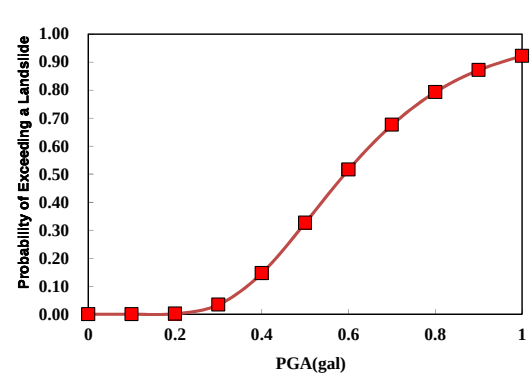


圖 6-4 G1A1E2S1 類易損性曲線

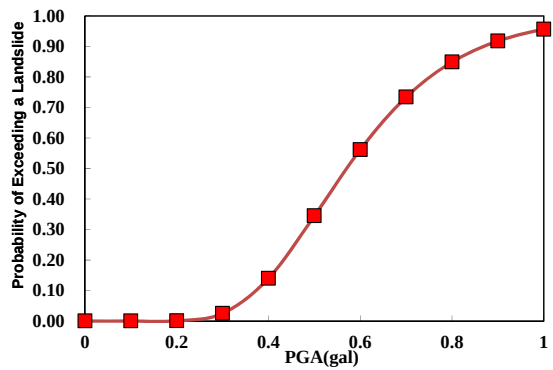


圖 6-5 G1A1E2S2 類易損性曲線

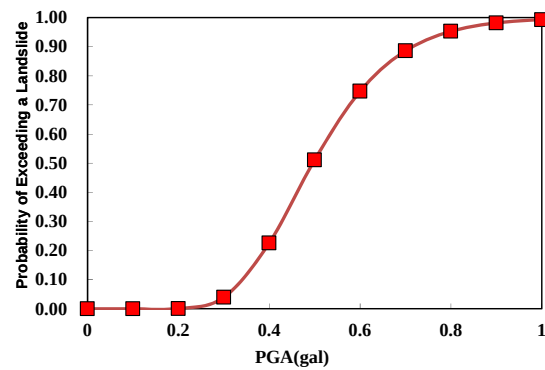


圖 6-6 G1A1E2S3 類易損性曲線

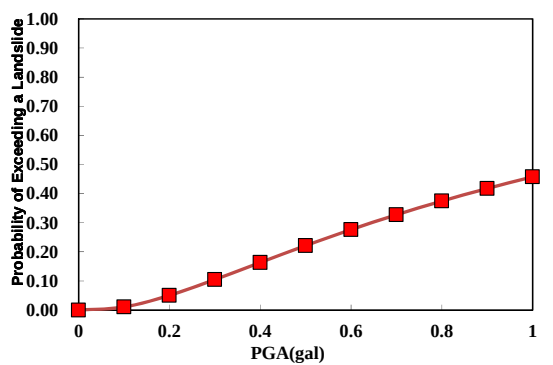


圖 6-7 G1A2E1S1 類易損性曲線

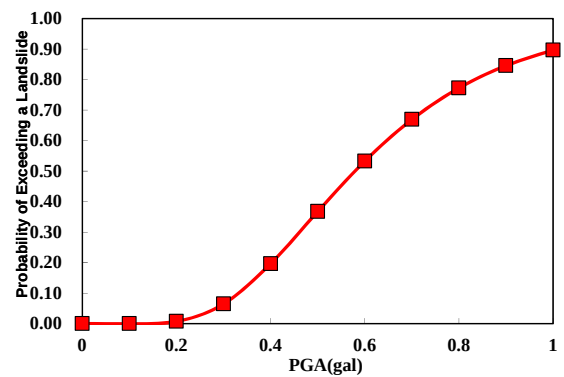


圖 6-8 G1A2E1S2 類易損性曲線

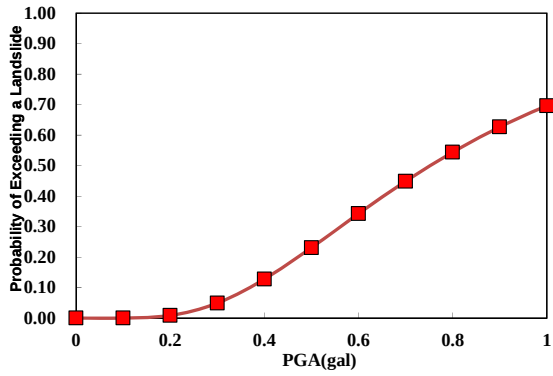


圖 6-9 G1A2E1S3 類易損性曲線

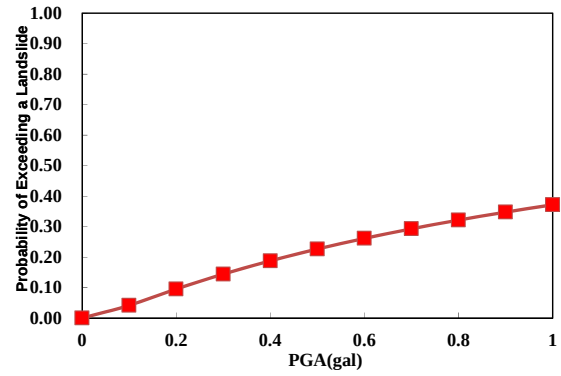


圖 6-10 G1A2E2S1 類易損性曲線

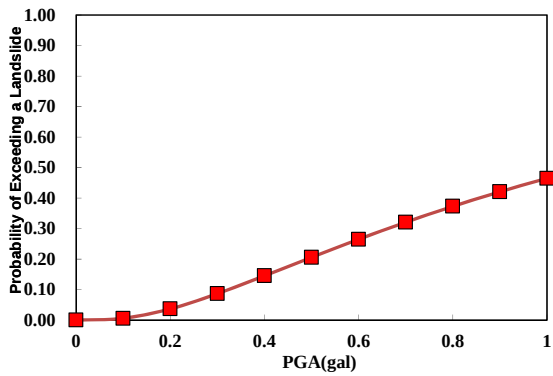


圖 6-11 G1A2E2S2 類易損性曲線

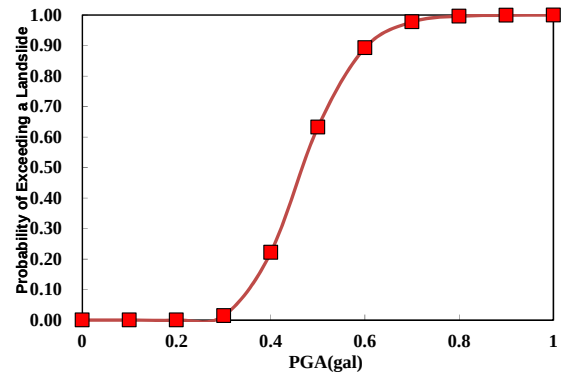


圖 6-12 G1A2E2S3 類易損性曲線

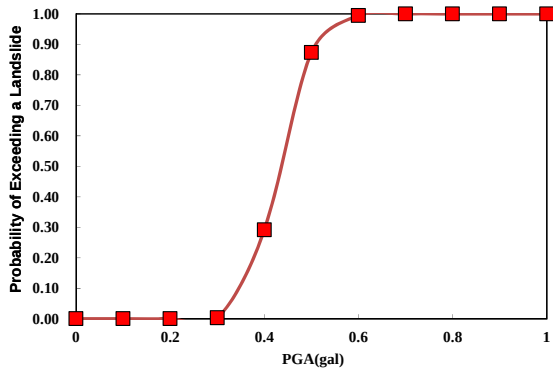


圖 6-13 G2A1E1S1 類易損性曲線

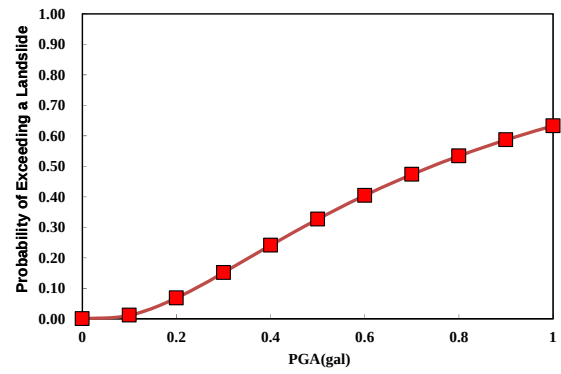


圖 6-14 G2A1E1S2 類易損性曲線

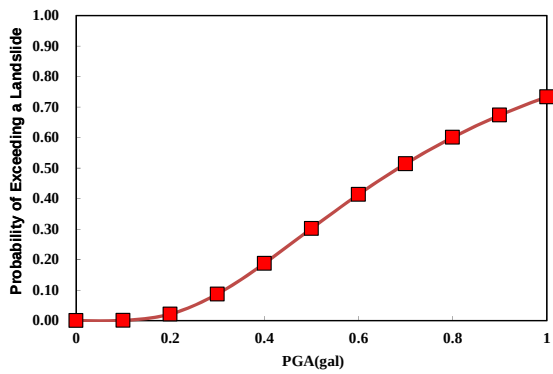


圖 6-15 G2A1E1S3 類易損性曲線

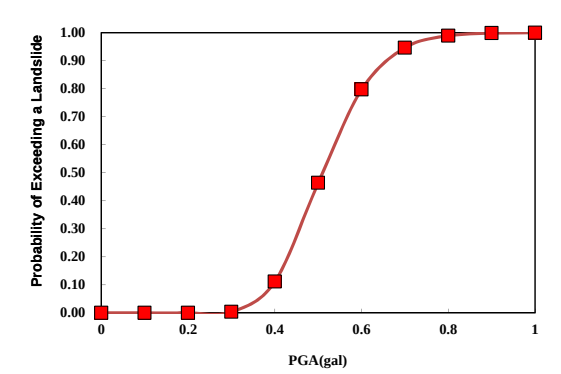


圖 6-16 G2A1E2S1 類易損性曲線

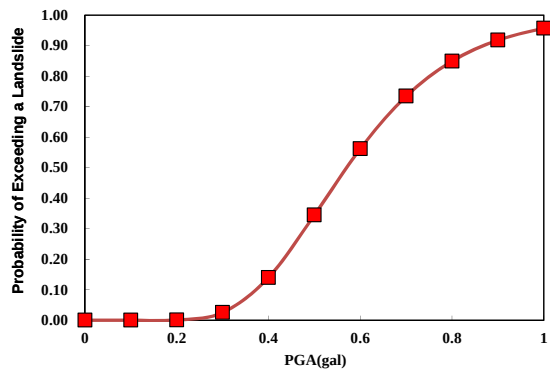


圖 6-17 G2A1E2S2 類易損性曲線

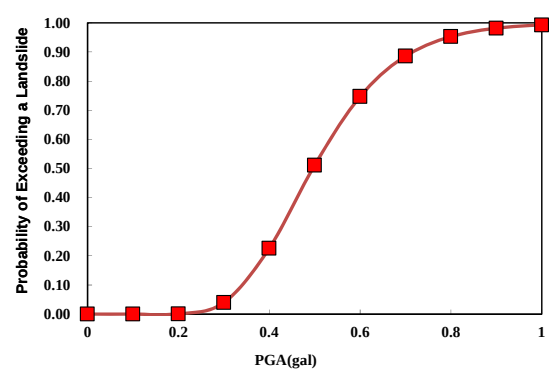


圖 6-18 G2A1E2S3 類易損性曲線

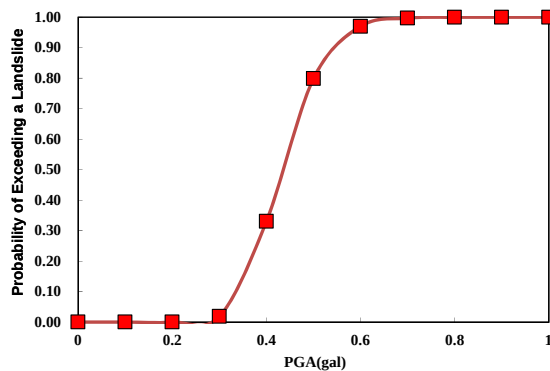


圖 6-19 G2A2E1S1 類易損性曲線

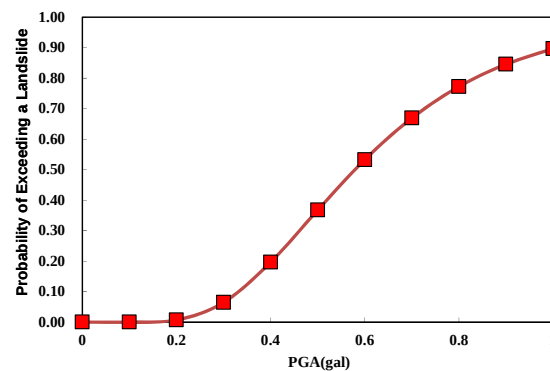


圖 6-20 G2A2E1S2 類易損性曲線

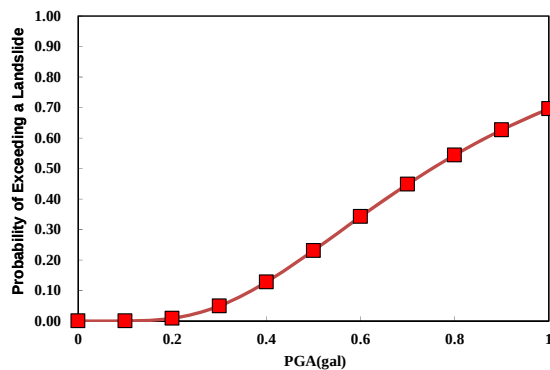


圖 6-21 G2A2E1S3 類易損性曲線

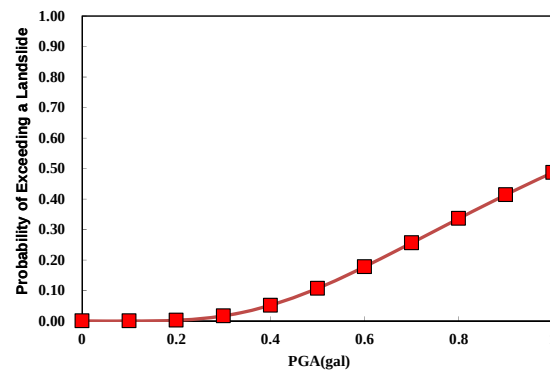


圖 6-22 G2A2E2S1 類易損性曲線

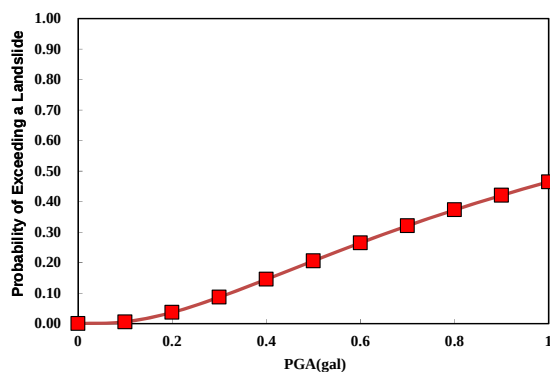


圖 6-23 G2A2E2S2 類易損性曲線

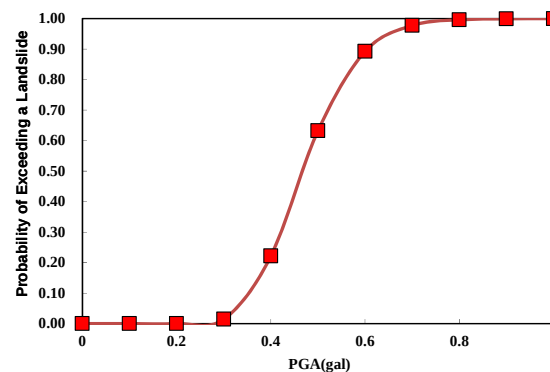


圖 6-24 G2A2E2S3 類易損性曲線

二、坡地易損性曲線各類因子比較

本研究對於易損性曲線所採納的因子，坡度、坡向、高程等作為環境因子，皆有其易損特性，例如坡向方面 A1 為易崩，A2 為不易崩；又如坡度方面 S1 理應較 S2、S3 更不易崩塌。因此，如若 A2 高於 A1 之曲線、或交錯過於嚴重之易損性曲線則為較不佳之易損性。

如圖 6-25 至圖 6-36 為各類坡地易損性曲線坡向因子的比較結果，圖 6-37 至圖 6-48 為各類坡地易損性曲線高程因子的比較結果，圖 6-49 至圖 6-56 為各類坡地易損性曲線坡度因子的比較結果。觀察其中趨勢並將其歸納如表 6-2 所示，○代表分析結果較合理，×代表分析結果較不合理。可發現高程因子多為結果不好之易損性曲線，不易看出易損性關係；坡向因子方面，E1S2 和 E2S3 這兩類較不佳；坡度因子方面，則是 E1 類皆不佳。

從比較分析結果得知，在坡向方面，可能是 E1S2 和 E2S3 這兩類皆屬數量過少而合併的群組，因此分析結果不理想。在高程方面，本研究認為其因在尖峰地表加速度(PGA)的推估中，各強地動測站的位址實已涵蓋了高程的影響，因此不宜再納入為分類因子。在坡度方面，本研究認為高程過低的坡面通常其坡度較低，崩塌特性不明顯。綜上所述，本研究歸納高程因子並不適宜作為坡地易損性曲線的分類因子，因此予以剔除。

表 6-2 24 類易損性曲線因子合理性比較

坡向比較	易損性曲線分析	高程比較	易損性曲線分析	坡度比較	易損性曲線分析
G1E1S1	O	G1A1S1	X	G1A1E1	X
G1E1S2	X	G1A1S2	X	G1A1E2	O
G1E1S3	O	G1A1S3	X		
G1E2S1	O	G1A2S1	X	G1A2E1	X
G1E2S2	O	G1A2S2	O	G1A2E2	O
G1E2S3	X	G1A2S3	X		
G2E1S1	O	G2A1S1	O	G2A1E1	X
G2E1S2	X	G2A1S2	X	G2A1E2	O
G2E1S3	O	G2A1S3	X		
G2E2S1	O	G2A2S1	O	G2A2E1	X
G2E2S2	O	G2A2S2	O	G2A2E2	O
G2E2S3	X	G2A2S3	X		

(一)坡向因子比較

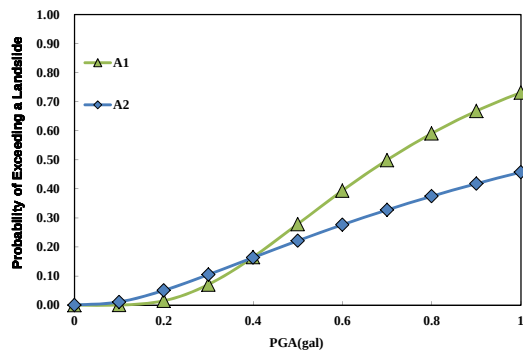


圖 6-25 G1E1S1 類坡向因子比較

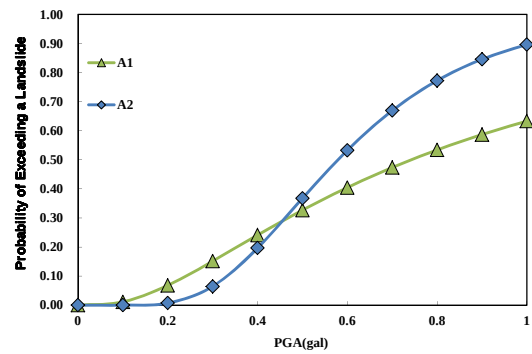


圖 6-26 G1E1S2 類坡向因子比較

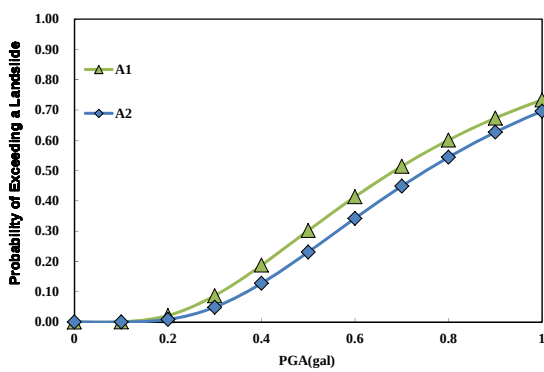


圖 6-27 G1E1S3 類坡向因子比較

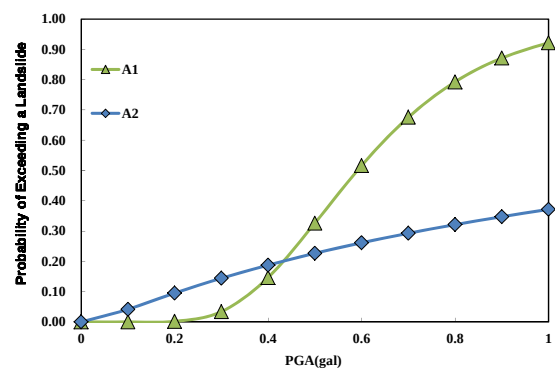


圖 6-28 G1E2S1 類坡向因子比較

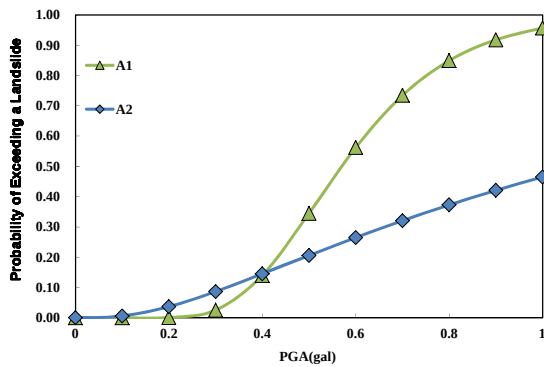


圖 6-29 G1E2S2 類坡向因子比較

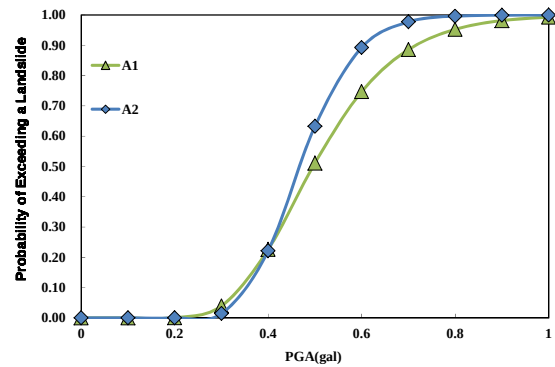


圖 6-30 G1E2S3 類坡向因子比較

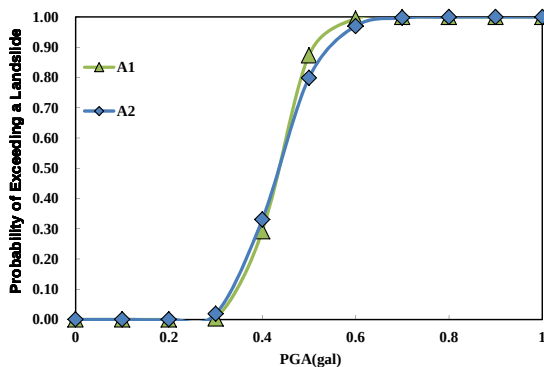


圖 6-31 G2E1S1 類坡向因子比較

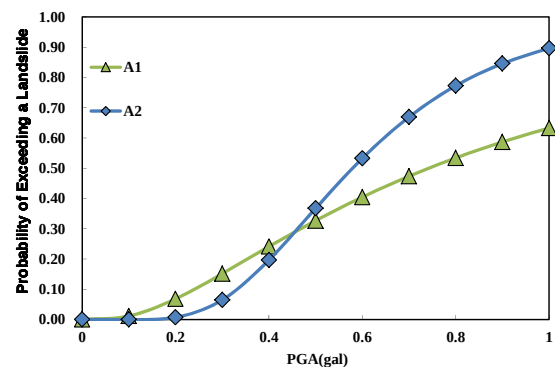


圖 6-32 G2E1S2 類坡向因子比較

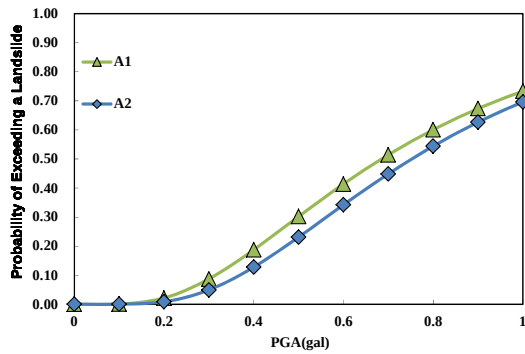


圖 6-33 G2E1S3 類坡向因子比較

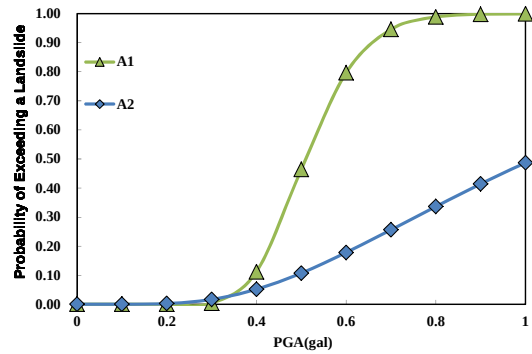


圖 6-34 G2E2S1 類坡向因子比較

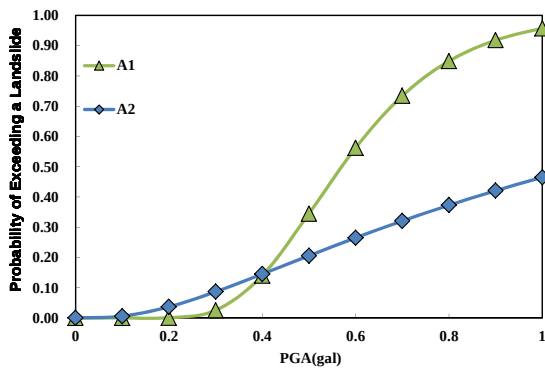


圖 6-35 G2E2S2 類坡向因子比較

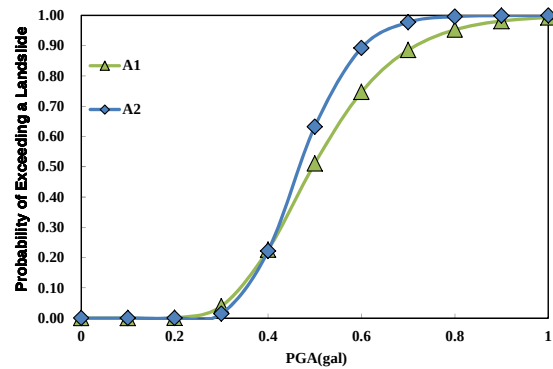


圖 6-36 G2E2S3 類坡向因子比較

(二) 高程因子比較

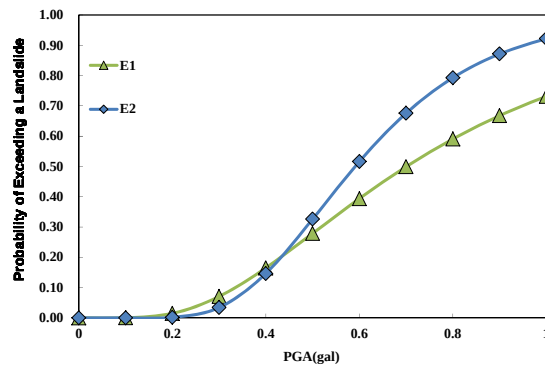


圖 6-37 G1A1S1 類高程因子比較

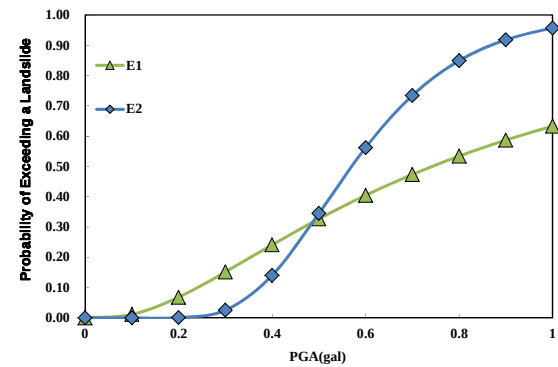


圖 6-38 G1A1S2 類高程因子比較

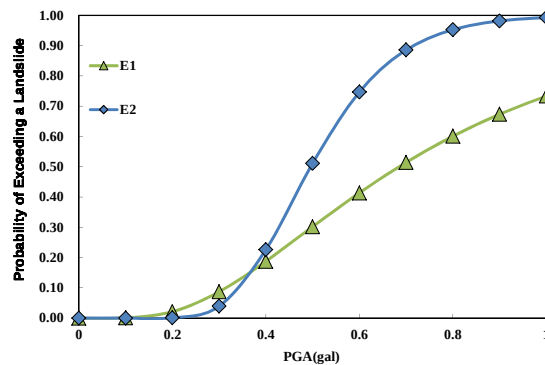


圖 6-39 G1A1S3 類高程因子比較

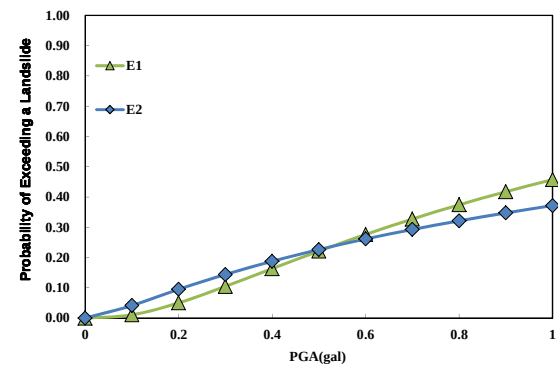


圖 6-40 G1A2S1 類高程因子比較

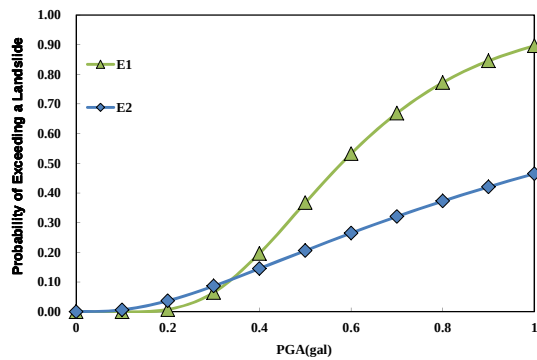


圖 6-41 G1A2S2 類高程因子比較

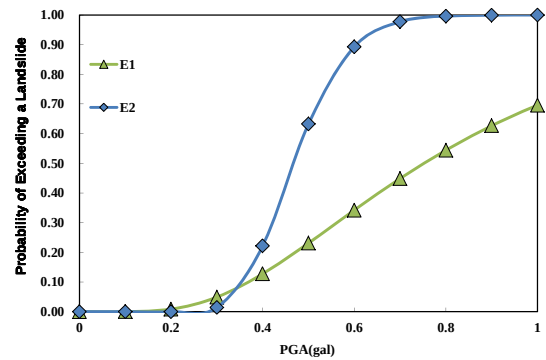


圖 6-42 G1A2S3 類高程因子比較

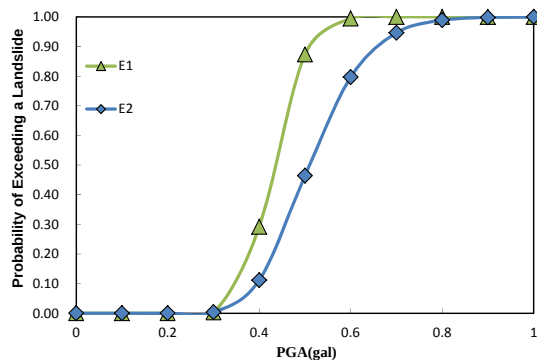


圖 6-43 G2A1S1 類高程因子比較

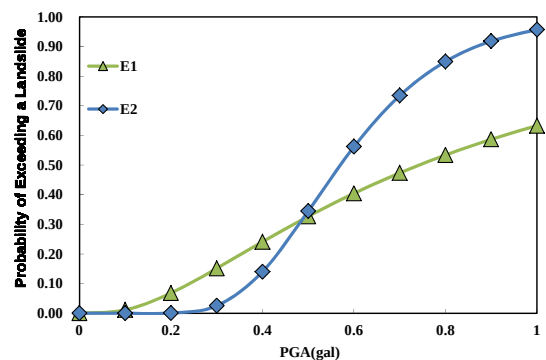


圖 6-44 G2A1S2 類高程因子比較

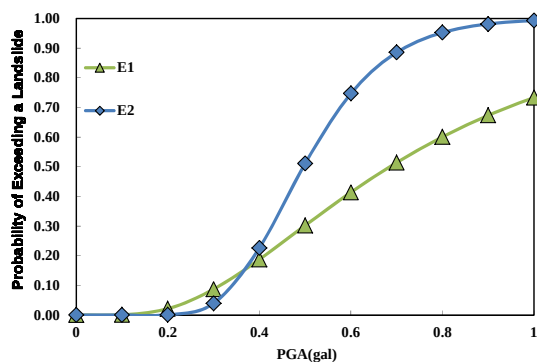


圖 6-45 G2A1S3 類高程因子比較

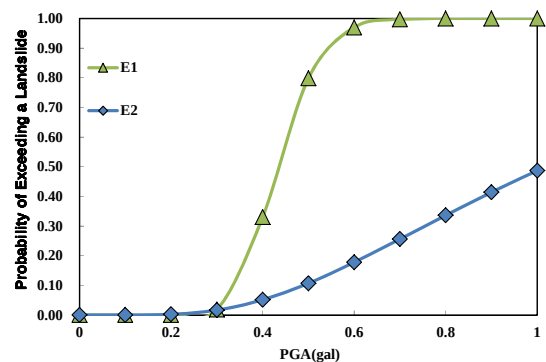


圖 6-46 G2A2S1 類高程因子比較

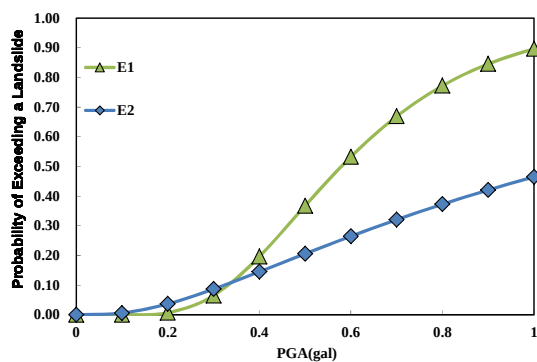


圖 6-47 G2A2S2 類高程因子比較

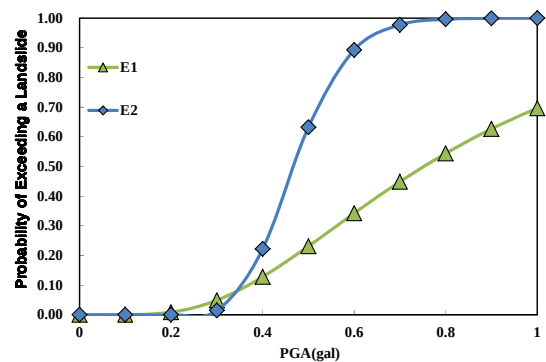


圖 6-48 G2A2S3 類高程因子比較

(三) 坡度因子比較

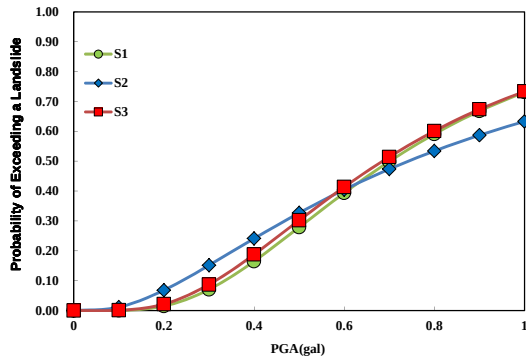


圖 6-49 G1A1E1 類坡度因子比較

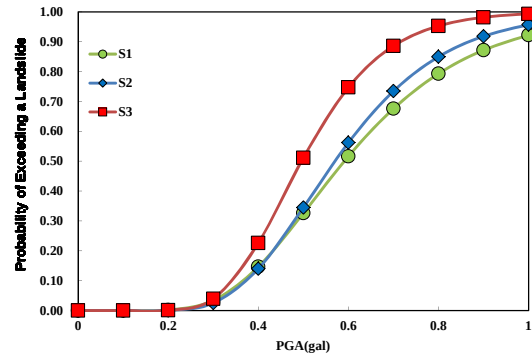


圖 6-50 G1A1E2 類坡度因子比較

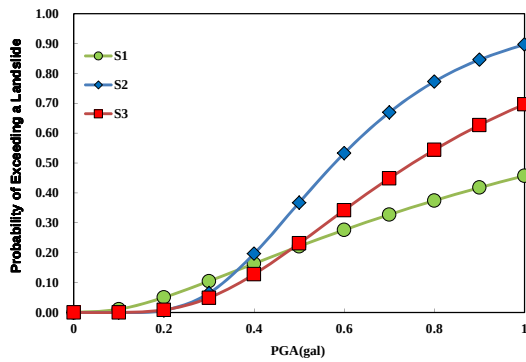


圖 6-51 G1A2E1 類坡度因子比較

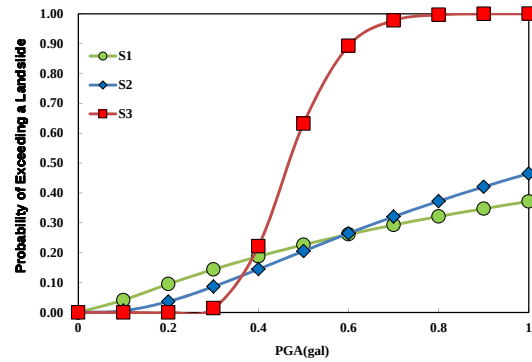


圖 6-52 G1A2E2 類坡度因子比較

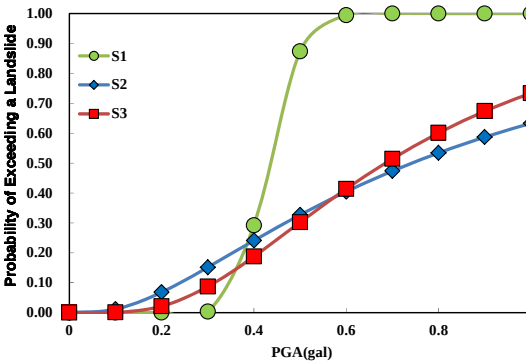


圖 6-53 G2A1E1 類坡度因子比較

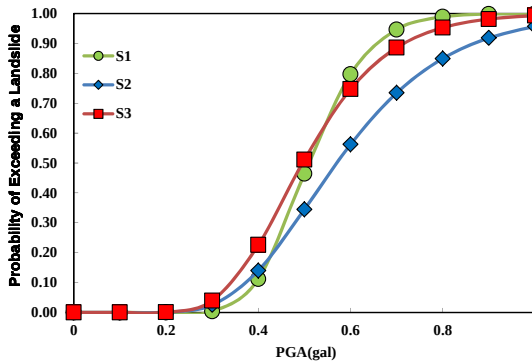


圖 6-54 G2A1E2 類坡度因子比較

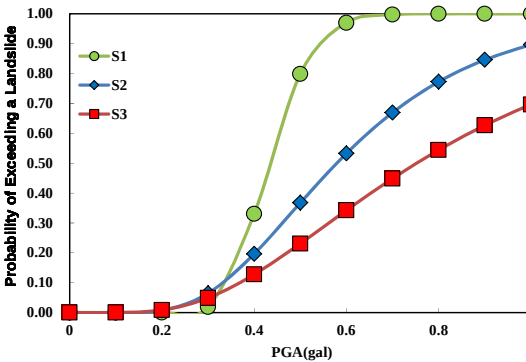


圖 6-55 G2A2E1 類坡度因子比較

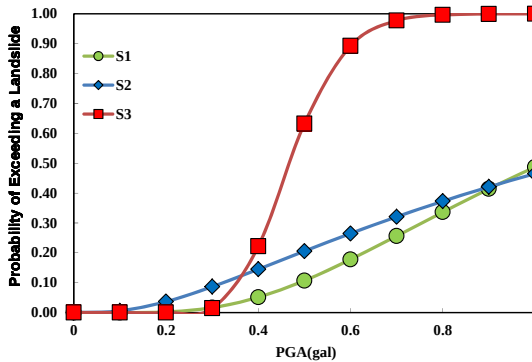


圖 6-56 G2A2E2 類坡度因子比較

第二節 12 類坡地易損性曲線

根據崩塌事件資料庫與地震因子推估結果，利用最大概似法進行致災資料分析，亦即將 12 類坡面進行坡地易損性分析，12 類坡面包括地質、坡向與坡度因子，用來描述地震引致坡地之崩塌機率。

一、12 類坡地易損性曲線雙參數

12 類坡地易損性曲線的環境因子僅考慮地質、坡向與坡度，不採納高程因子後的崩塌資料庫統計量足夠，因此不需要再進行合併分析，可直接求取易損性參數。研究分析所得之坡地易損性參數分析結果如表 6-3 所示，各類坡地易損性曲線和致災資料點共繪如圖 6-57 至圖 6-68 所示。

表 6-3 烏河流域之坡地易損性參數表(12 類)

分類編號	數量	崩塌中位數	標準差
G1A1S1	261	0.496	0.128
G1A1S2	156	0.517	0.134
G1A1S3	126	0.518	0.111
G1A2S1	286	0.517	0.187
G1A2S2	114	0.466	0.049
G1A2S3	96	0.522	0.159
G2A1S1	1524	0.946	0.704
G2A1S2	562	0.774	0.578
G2A1S3	559	0.702	0.516
G2A2S1	1534	1.061	0.780
G2A2S2	568	0.855	0.654
G2A2S3	547	0.801	0.612

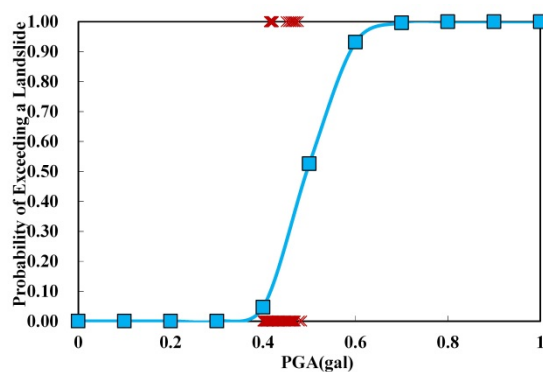


圖 6-57 G1A1S1 類易損性曲線

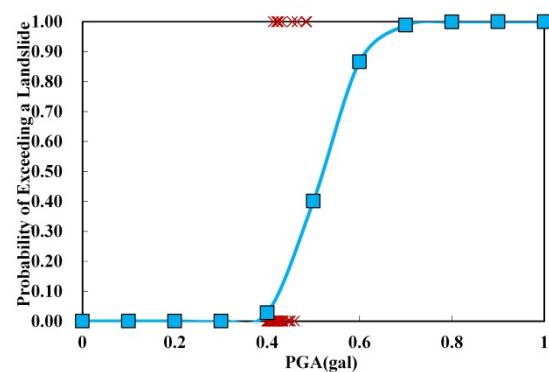


圖 6-58 G1A1S2 類易損性曲線

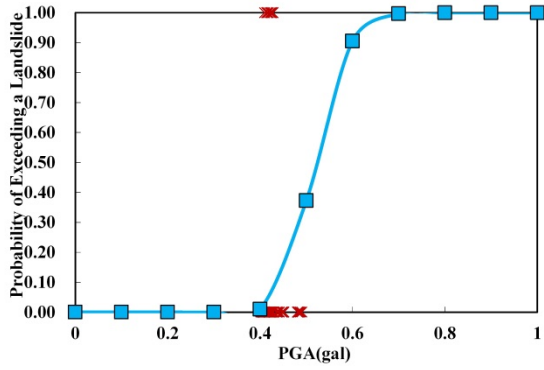


圖 6-59 G1A1S3 類易損性曲線

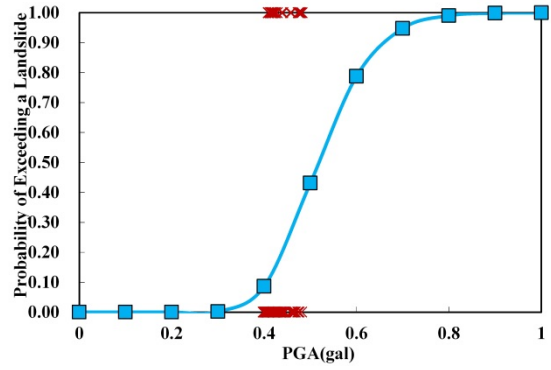


圖 6-60 G1A2S1 類易損性曲線

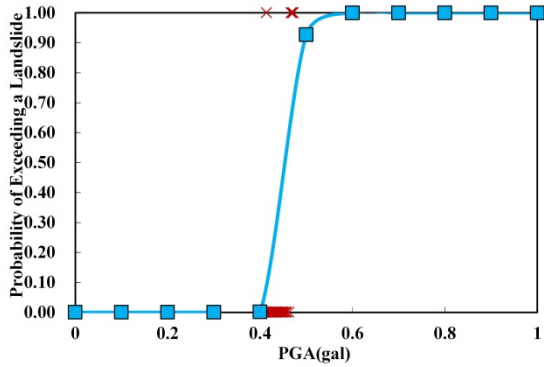


圖 6-61 G1A2S2 類易損性曲線

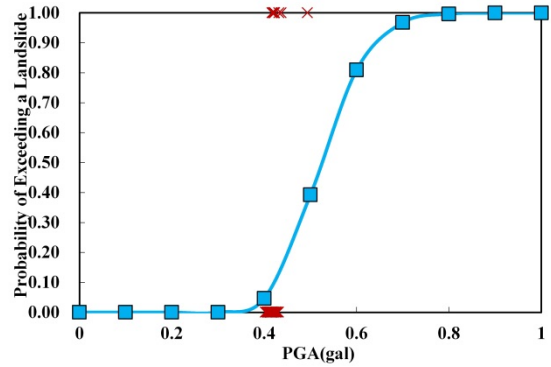


圖 6-62 G1A2S3 類易損性曲線

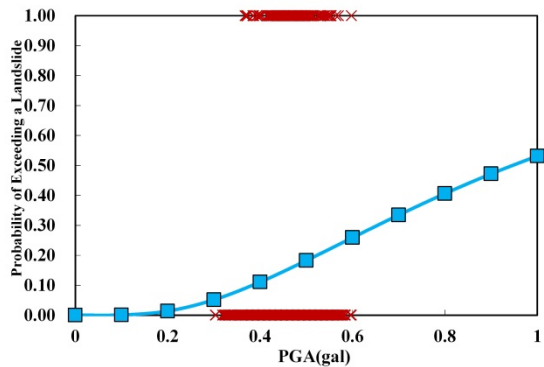


圖 6-63 G2A1S1 類易損性曲線

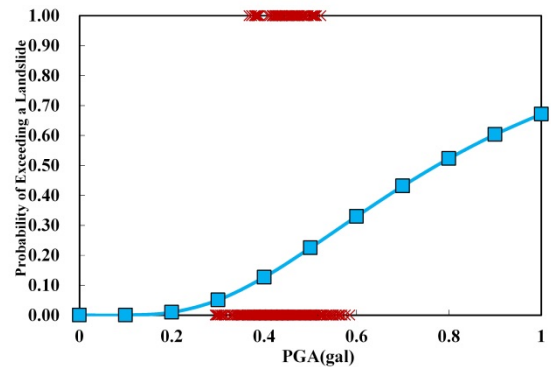


圖 6-64 G2A1S2 類易損性曲線

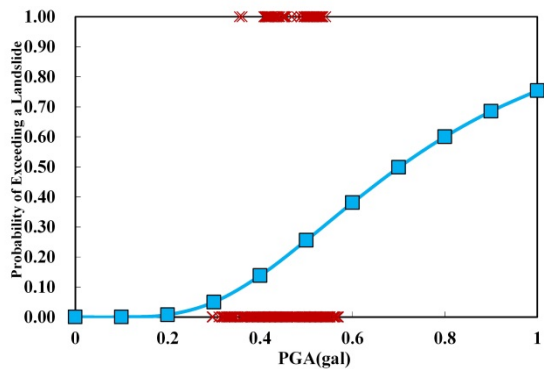


圖 6-65 G2A1S3 類易損性曲線

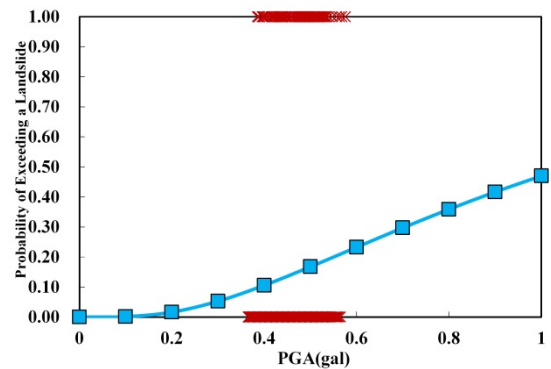


圖 6-66 G2A2S1 類易損性曲線

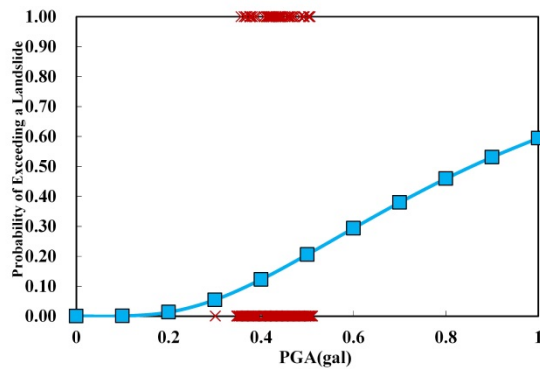


圖 6-67 G2A2S2 類易損性曲線

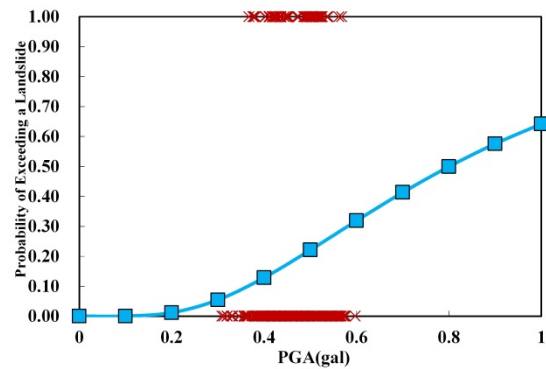


圖 6-68 G2A2S3 類易損性曲線

二、坡地易損性曲線各類因子比較

在 12 類坡地方面，如圖 6-69 至圖 6-74 為各類坡地易損性曲線坡向因子的比較結果，圖 6-75 至圖 6-78 為各類坡地易損性曲線坡度因子的比較結果。觀察其中趨勢，發現 12 類坡地易損性分析結果已大幅改善 24 類坡面分析結果不合理的地方，在坡向與坡地因子的比較上整體分析結果符合本研究的預期。

在地質因子方面，我們從各比較圖中可發現 G1 類與 G2 類的坡地易損性曲線有相當大的差異，G1 類的易損性曲線普遍較 G2 類的易損性曲線陡峭，也就表示更易崩塌。G1 類地質的崩塌機率明顯在某 PGA 臨界過後急遽升高，而 G2 類則是較為平緩的提升。這個現象表示兩種地質崩塌特性的不同，也反應在致災資料上，G1 類的崩塌資料分界較為清楚，而 G2 類則有較多可能性，在相似條件的環境因子下，G2 類崩塌的不確定性更高。

(一)坡向因子比較

各類因子比較普遍皆合理，除了 G1S2 的類別外，如圖 6-70 所示，A1(弱面)的曲線是在 A2(強面)之下，與本研究假定有落差。此一現象可能的原因是，G1A2S2 的原始致災資料不夠充足也較特殊的原因，如圖 6-61 所示，其發生崩塌的致災資料點僅有 5 筆資料，此 5 筆資料不僅震度接近且無更高 PGA 的崩塌資料，又與未發生崩塌的致災資料相差不大，在這個資料特性的情況下，曲線勢必很早就開始提升，以符合資料點特性。比較 G1A1S2

的致災資料點，如圖 6-60，就可以很明顯的看出其差異，這也顯示致災資料充足與否和資料品質的重要性。

本研究考慮地震波向與坡面坡向的關係定義坡向的強、弱面，研究結果顯示，在低震度的情況下差異並不大，在中高震度的 PGA 下，坡向因子的差異約在 5~10% 間，隨著震度越高差異越大，顯示本研究假定的合理性。

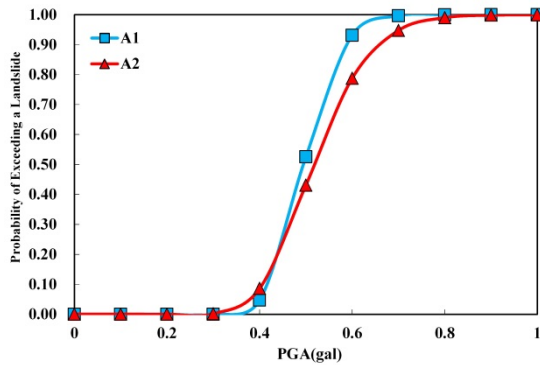


圖 6-69 G1S1 類坡向因子比較

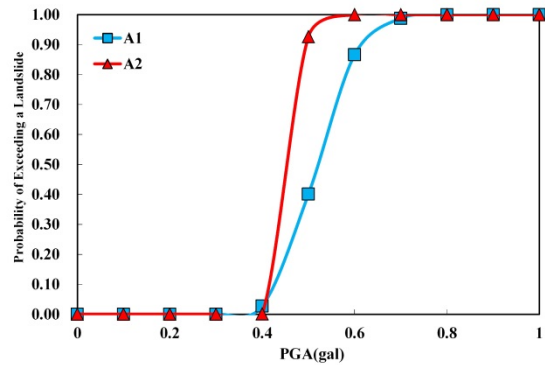


圖 6-70 G1S2 類坡向因子比較

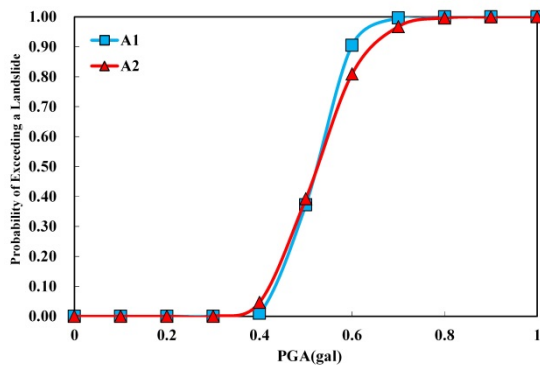


圖 6-71 G1S3 類坡向因子比較

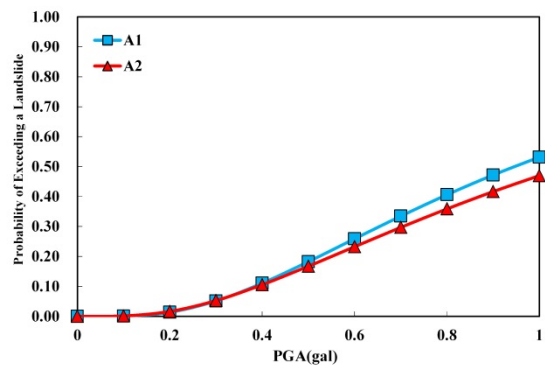


圖 6-72 G2S1 類坡向因子比較

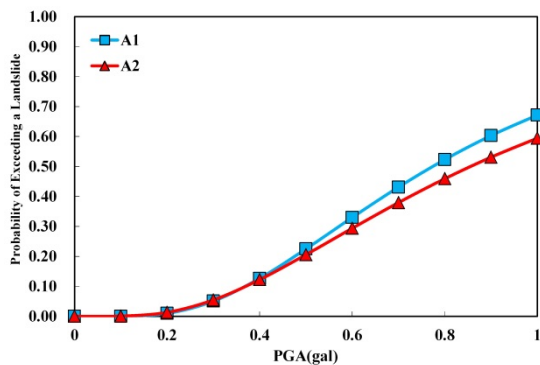


圖 6-73 G2S2 類坡向因子比較

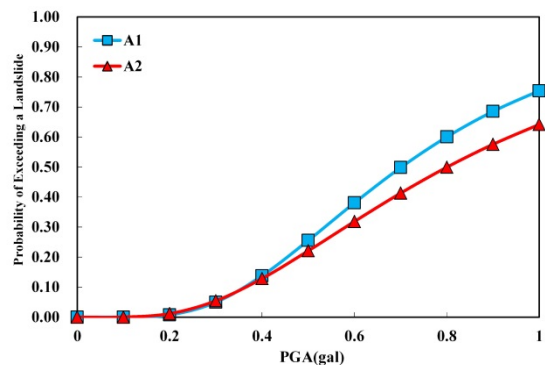


圖 6-74 G2S3 類坡向因子比較

(二)坡度因子比較

本研究對於坡度的考量是 S3 為陡坡、S2 為中坡、S1 為緩坡，根據易損性曲線的發展，如圖 6-75 和圖 6-76 所示，除了較特殊的 G1A2S2 外(前文已討論其資料點特性)，G1 類的坡度因子對於坡地易損性曲線並不敏感，大致上的易損特性接近。

對於 G2 類的坡地易損性曲線，坡度的差異就可以很明顯的看出來，隨著坡度越大，坡地易損性越高，也就表示越易崩塌。而這個現象在 A1 類更為明顯，中高震度相差可達 10%以上，但隨震度提高崩塌機率並無拉大的現象。A2 類中的陡坡和中坡則差異較低，大約 5%左右。上述結果顯示本研究坡地易損性分析合理，可合理表達坡地受地震後的崩塌易損特性。

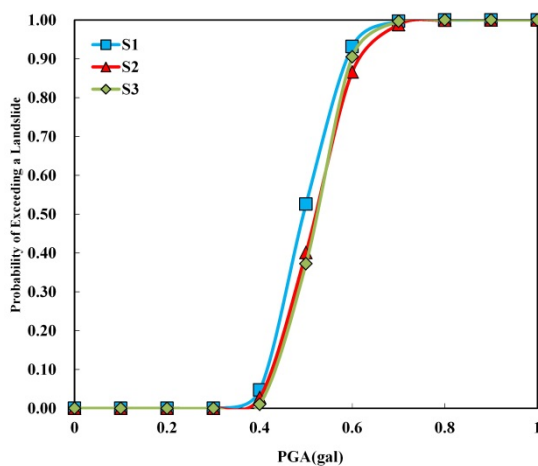


圖 6-75 G1A1 類坡度因子比較

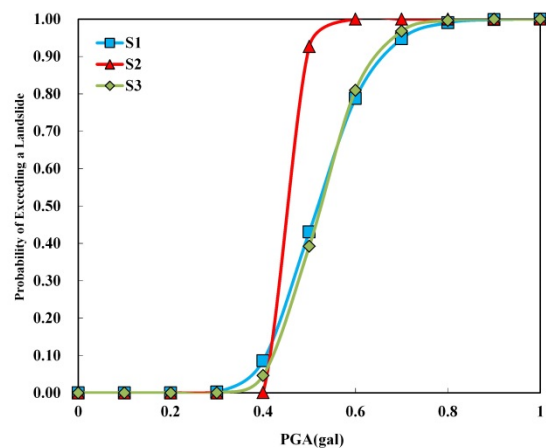


圖 6-76 G1A2 類坡度因子比較

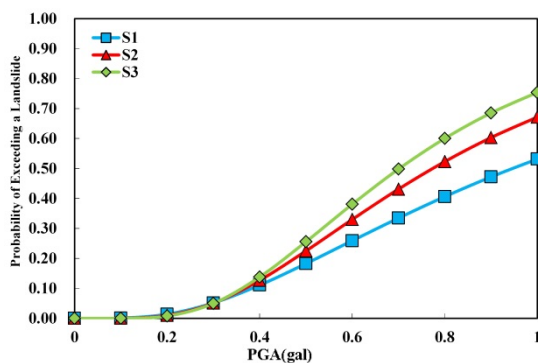


圖 6-77 G2A1 類坡度因子比較

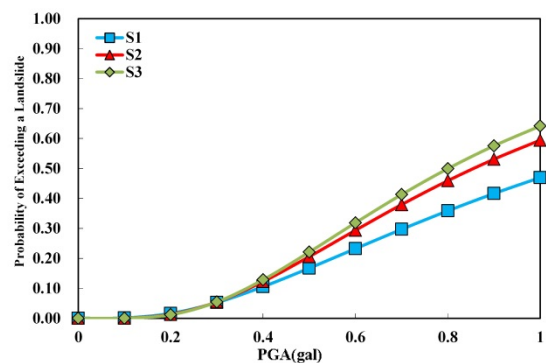


圖 6-78 G2A2 類坡度因子比較

第三節 坡地易損性曲線驗證

本節針對前述發展的 12 類坡地易損性曲線進行驗證，驗證方式說明如下。在驗證尺度方面，由於坡地易損性曲線表達致災誘因對於某類型坡地的崩塌機率，其為量化的無因次評估，對於評估尺度即有相當的重要性，通常適於廣域的淺層崩塌問題。因此，統計機率上量體越大越多其空間中隨機的平均誤差越穩定，也就是其期望值將越接近為零，也就越可靠；反之，量體越小則不確定性大因此不適合作為評估單元。例如，若以坡面單元作為評估尺度，則會因坡面單元過小，使得不同的坡面單元間變異性大，造成平均誤差越不穩定。因此，本研究選擇以較大的子集水區作為評估單元，以本研究地區範圍內的子集水區作為驗證對象。

如圖 6-79 所示，本研究地區範圍內包含 33 個子集水區，各集水區在九二一地震中的真實崩塌狀況以本研究所建立之崩塌資料庫為依據，並計算其有效面積、崩塌面積和崩塌比，作為驗證的樣本。

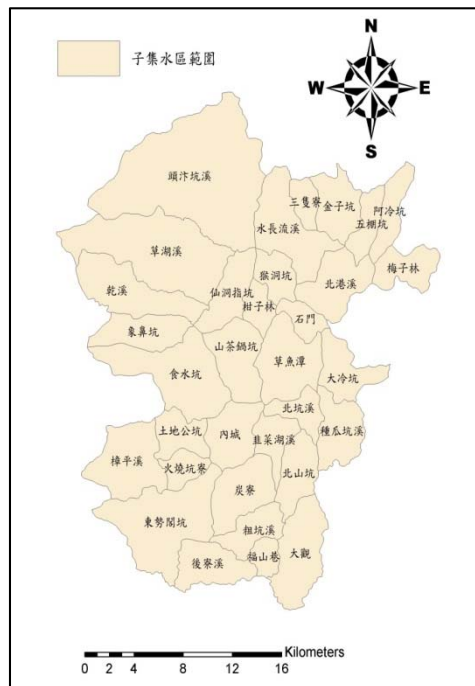


圖 6-79 研究地區子集水區範圍

在驗證指標方面，由於崩塌機率值其主要物理意義在於了解崩塌發生的相對可能性，難以直接作為指標進行驗證，因此本研究將其轉換為各子

集水區的相對崩塌危險程度作為崩塌驗證的評估指標。本研究採用的崩塌危險程度即將子集水區的崩塌狀況分為三種危險程度，即中危險、中高危險以及高危險。

在九二一地震中研究地區的真實崩塌危險程度的評估方法，是先將九二一地震中各子集水區的真實崩塌比計算出來，再直接採用自然間斷點分類法(Natural Break)進行自動化分類，如圖 6-80 所示。採用此法的原因是本研究工作內容未涉及崩塌危險的定性化研究，因此暫不宜針對中危險、中高危險以及高危險的物理性質進行定義，而直接採用自然間斷點分類法進行統計上的分類。根據此法的原理，可根據統計樣本原本的自然分組，可對其辨識相似值進行分組，並可使各個類別(即三種危險程度)之間的差異最大化的類別得出間斷點。由於崩塌自然狀態的因素，理論上被分類為高危險的樣本會越少，而較普遍的中危險會越多，此結果符合一般對危險程度的認知。危險程度分類結果如圖 6-80 所示，中危險有 20 個子集水區(崩塌率 0.1%~1.86%)，中高危險有 9 個子集水區(崩塌率 1.86%~5.54%)，而高危險有 4 個子集水區(崩塌率 5.54%~12.55%)。

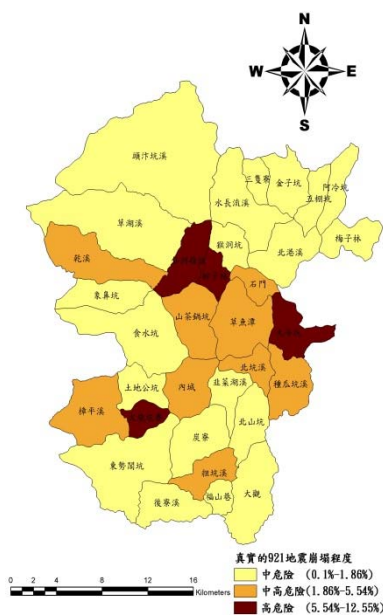


圖 6-80 921 地震崩塌危險程度

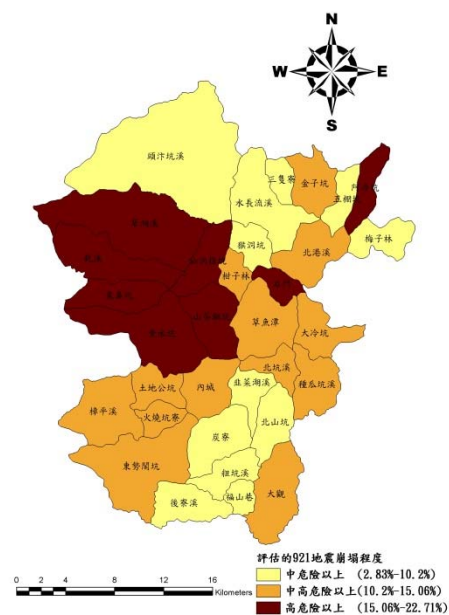


圖 6-81 921 地震崩塌危險評估

在評估的子集水區崩塌危險程度方面，由於各子集水區中具有不同的坡面單元組成，也就是一個集水區是由各種不同的坡面類型所組合而成，無法以單一曲線代表一個子集水區，因此對於評估的崩塌危險程度必須先進行坡面單元的崩塌量評估。其計算方式是先估計子集水區中每個崩面單元的震度，再以 12 類坡地易損性曲線估計每個坡面單元震度對應的崩塌機率，此機率乘以坡面單元有效面積即為該坡面單元的期望崩塌面積。最後，將該子集水區中所有的崩塌面積加總起來，即此子集水區評估的崩塌面積。依據此評估的崩塌面積，可得到子集水區的評估崩塌比，再同樣以自然間斷點分類法進行自動化分類，即可得到評估的崩塌危險程度。如圖 6-81 所示，中危險以上有 12 個子集水區(崩塌率 2.83%~10.2%)，中高危險以上有 13 個子集水區(崩塌率 10.2%~15.06%)，而高危險以上有 8 個子集水區(崩塌率 15.06%~22.71%)。必須特別說明的是，由於坡地易損性曲線的崩塌可能性評估表達的是崩塌的超越機率，如圖 6-82，也就是達到某種危險程度以上的機率值，因此其評估的崩塌量表達的是某個量體以上的值，亦即表示某個崩塌危險程度以上的狀態。

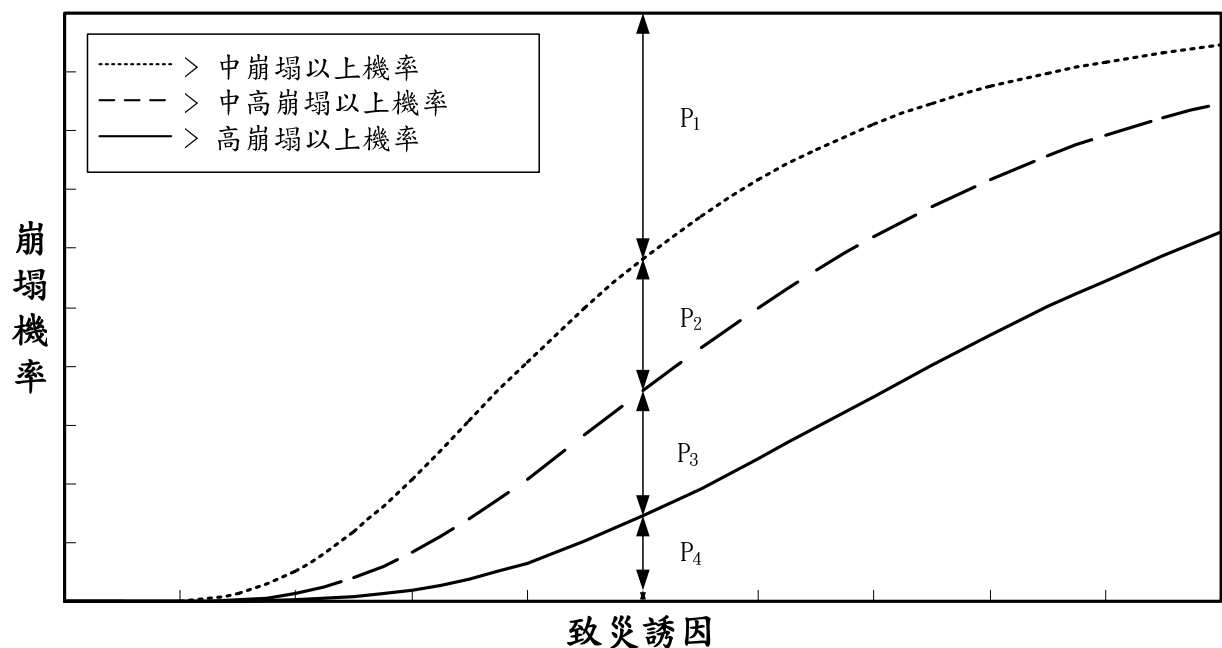


圖 6-82 崩塌之超越機率

對於真實的崩塌危險程度與評估的崩塌危險程度之驗證方面，由於評估的崩塌量表達的是某個量體以上的值，因此評估的崩塌危險程度其實是包括該崩塌程度以上的範圍。如圖 6-83 所示，假定 A、B、C 三點分別是真實的中、中高、高危險集水區，若 A、B、C 點評估結果皆落在高危險以上區域，則皆是成功準確評估的結果；若評估結果落在中高危險以上區域，則 A、B 點皆是成功的評估結果，C 則為失敗的評估結果；若評估結果落在中危險以上區域，則 A 點是成功的評估結果，B、C 則為失敗的評估結果。

此驗證模式是基於正確且保守的評估方法，各集水區評估結果如表 6-1 所示。表中呈現各子集水區有效面積、崩塌面積、崩塌率以及崩塌危險程度分類結果，合格者「正確」，不合格者「失敗」(即低估者)，最終所得驗證結果正確率達 87.88%。驗證失敗的 4 個子集水區中，中高危險程度的子集水區 1 個，高危險程度的子集水區 3 個，其可能原因為：利用自然間斷點分類法所得高危險的分類較少，不易評估精確的危險程度分級，但對於應用層面，中高危險程度崩塌的準確性足以防災應用；此外，坡面單元劃設的精確度也是相當重要的關鍵，可能影響評估結果的分類。總的來說，驗證結果顯示崩塌危險程度評估結果合理，未來可進一步應用於地震引致崩塌災害潛勢之量化評估。

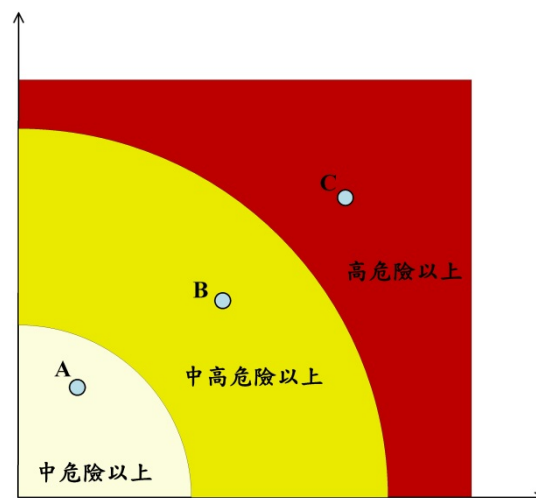


圖 6-83 崩塌危險程度驗證方式

表 6-4 各子集水區之崩塌評估結果

子集水區	有效面積	真實			評估			驗證
		崩塌面積	崩塌率	危險程度	崩塌面積	崩塌率	危險程度	
山茶鍋坑	1,069.40	27.80	2.60%	中高	194.41	18.18%	高以上	正確
內城	1,076.48	41.48	3.85%	中高	154.73	14.37%	中高以上	正確
北坑溪	506.16	15.48	3.06%	中高	65.78	13.00%	中高以上	正確
石門	484.60	26.84	5.54%	中高	76.33	15.75%	高以上	正確
草魚潭	1,541.80	38.40	2.49%	中高	232.32	15.07%	中高以上	正確
乾溪	1,074.28	24.92	2.32%	中高	188.80	17.57%	高以上	正確
粗坑溪	898.32	31.12	3.46%	中高	75.63	8.42%	中以上	失敗
種瓜坑溪	1,016.12	24.56	2.42%	中高	111.62	10.99%	中高以上	正確
樟平溪	1,377.80	36.80	2.67%	中高	191.84	13.92%	中高以上	正確
大冷坑	742.24	62.24	8.39%	高	91.26	12.29%	中高以上	失敗
火燒坑寮	417.80	28.52	6.83%	高	62.80	15.03%	中高以上	失敗
仙洞指坑	1,141.28	143.28	12.55%	高	259.17	22.71%	高以上	正確
柑子林	404.32	40.12	9.92%	高	46.61	11.53%	中高以上	失敗
三隻寮	463.12	1.92	0.41%	中	28.26	6.10%	中以上	正確
土地公坑	548.08	8.68	1.58%	中	70.99	12.95%	中高以上	正確
大觀	1,781.80	32.84	1.84%	中	224.02	12.57%	中高以上	正確
五棚坑	779.04	4.20	0.54%	中	77.21	9.91%	中以上	正確
水長流溪	1,860.76	18.88	1.01%	中	178.25	9.58%	中以上	正確
北山坑	1,058.96	3.36	0.32%	中	74.66	7.05%	中以上	正確
北港溪	1,042.08	13.96	1.34%	中	121.64	11.67%	中高以上	正確
東勢閣坑	2,086.20	29.52	1.42%	中	243.41	11.67%	中高以上	正確
金子坑	1,024.84	17.32	1.69%	中	147.39	14.38%	中高以上	正確
阿冷坑	903.68	5.36	0.59%	中	152.52	16.88%	高以上	正確
後寮溪	682.88	0.72	0.11%	中	19.34	2.83%	中以上	正確
炭寮	1,337.64	18.92	1.41%	中	128.45	9.60%	中以上	正確
韭菜湖溪	682.32	7.44	1.09%	中	65.95	9.67%	中以上	正確
食水坑	1,396.92	13.32	0.95%	中	272.97	19.54%	高以上	正確
草湖溪	2,814.00	52.56	1.87%	中	483.41	17.18%	高以上	正確
梅子林	615.84	3.36	0.55%	中	33.26	5.40%	中以上	正確
猴洞坑	653.04	11.24	1.72%	中	66.60	10.20%	中以上	正確
象鼻坑	927.36	11.64	1.26%	中	160.93	17.35%	高以上	正確
福山巷	461.20	5.60	1.21%	中	36.27	7.86%	中以上	正確
頭汴坑溪	5,575.64	84.56	1.52%	中	519.87	9.32%	中以上	正確
正確率								87.88%

第七章 結論與建議

一、 結論

- (一)本研究針對烏溪流域集水區完成1999年九二一地震中崩塌資料庫建置，內容包括九二一事件前後期衛星影像判釋、崩塌地萃取、事件尖峰地表加速度(PGA)推估、集水區地文因子分析等。研究分析發現研究示範區內的崩塌事件與PGA震度相符，PGA較高的地方崩塌集中，較低的地方則多為零星崩塌。
- (二)本研究初步考量的地質、坡度、坡向和高程因子中，分析結果顯示高程因子已考量在尖峰地表加速度之中，其坡地易損性曲線的比較不合理，不易顯示出各因子坡地易損性曲線的差異，因此歸納高程因子不適宜作為坡地易損性曲線的分類因子，不採納作為坡地易損性分析中的坡面分類因子。
- (三)本研究已完成針對烏溪流域集水區之坡地易損性分析，以尖峰地表加速度(PGA)為誘發因子，和以地質、坡度和坡向為分類因子的12類坡地易損性曲線分析。透過易損性分析模式，可考慮PGA的大小對應在坡地易損性曲線上求取崩塌機率。總體而言，顯示坡地易損性分析合理，可合理表達坡地受地震後的崩塌易損特性。
- (四)在地質因子方面，G1類的易損性曲線較易崩塌，G2類則是較為平緩的提升。這個現象表示兩種地質崩塌特性的不同，也反應在致災資料上，G1類的崩塌資料分界較為清楚，G2類崩塌的不確定性更高。
- (五)在坡向因子方面，G1A2S2的曲線較不佳，其原因是致災資料的不充足，這個特殊性顯示致災資料充足與否和資料品質的重要性。
- (六)本研究所定義坡向的強、弱面向，研究結果顯示，在低震度的情況下差異並不大，在中高震度的PGA下，坡向因子的差異約在5~10%間，隨著震度越高差異越大。

- (七)在坡度因子方面，G2類中坡度的差異可以很明顯的看出來，隨著坡度越大，坡地易損性越高，也就表示越易崩塌。這個現象在A1類更為明顯，中高震度相差可達10%以上，但隨震度提高崩塌機率並無擴大的現象。A2類中的陡坡和中坡則差異較低，大約5%左右。
- (八)本研究由九二一地震資料的真實崩塌進行不同崩塌危險程度的驗證，較客觀地評價了評估的崩塌危險程度評估的成功率。驗證結果顯示，對於崩塌危險程度評估的正確率達到87.88%，高危險程度評估的正確率較不理想，但已可作為震後崩塌防災評估的良好依據。

二、建議

- (一)崩塌機率的大小表示崩塌發生的可能性，在應用面可以利用此基於歷史資料而發展的易損性曲線，做為未來坡地抗震減災規劃的重要參考依據。
- (二)坡地易損性曲線所求取的崩塌機率，可直接評估某坡面單元的崩塌可能性，機率化評估除了是一個無因次的量化方法，也可直接用作崩塌比計算的基準。
- (三)坡地易損性所求得的崩塌機率可直接納入風險值計算使用，對於坡地集水區的受震崩塌風險評估，進行高風險區域的劃定。
- (四)坡面單元是一個有效且合理的地形單元，但亦可採用網格法發展坡地易損性曲線，甚至進一步發展多維度和多尺度誘發因子的坡地易損性曲線。
- (五)本研究團隊因時程有限，未取得921地震後之崩塌相關圖資，因此以購自中央大學太遙中心的衛星圖資進行崩塌判釋，若能取得921地震時期的崩塌資料互為校驗，應有更為良好可靠的成果。

三、應用

坡地易損性曲線的建立提供一個對於地震引致崩塌潛勢影響課題的解決方向，由於坡地易損性分析屬於災害機率化評估，因此其應用方向非常廣泛，可作為災害分析、風險評估、平時減災規劃及災前早期評估的重要參考。本節即以坡地易損性曲線應用於地震對崩塌災害潛勢之量化評估為例，提出地震引致崩塌早期評估的方法、流程及步驟，作為未來應用之參考。

(一)坡面單元資料庫建置

藉由第五章所述方法，首先建置全國坡面單元資料庫，建置單位應由資料主管機關建立、校驗、公告，例如中央地質調查所公告，並提供水保局使用。

(二)評估尺度標準化

由於坡地易損性曲線適於廣域崩塌評估，本計畫建議評估尺度可以子集水區為對象，並建置子集水區坡面單元屬性資料庫，並定期更新環境因子狀況。

(三)地震速報資料接收

當某一地震發生後，中央氣象局的地震速報資料可在3~5分鐘內完成，並發送簡訊至用戶端，而其速報資料包括地震時間、地震深度、地震規模、震央位置、各地震度等訊息，如圖7-1所示。

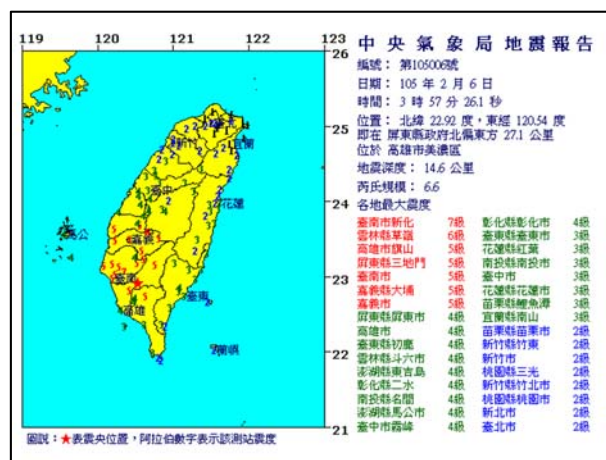


圖 7-1 中央氣象局地震速報

這些訊息中對於坡地崩塌最直接相關的即是震度資訊，可直接代表某地區的震度大小，如圖7-2所示。

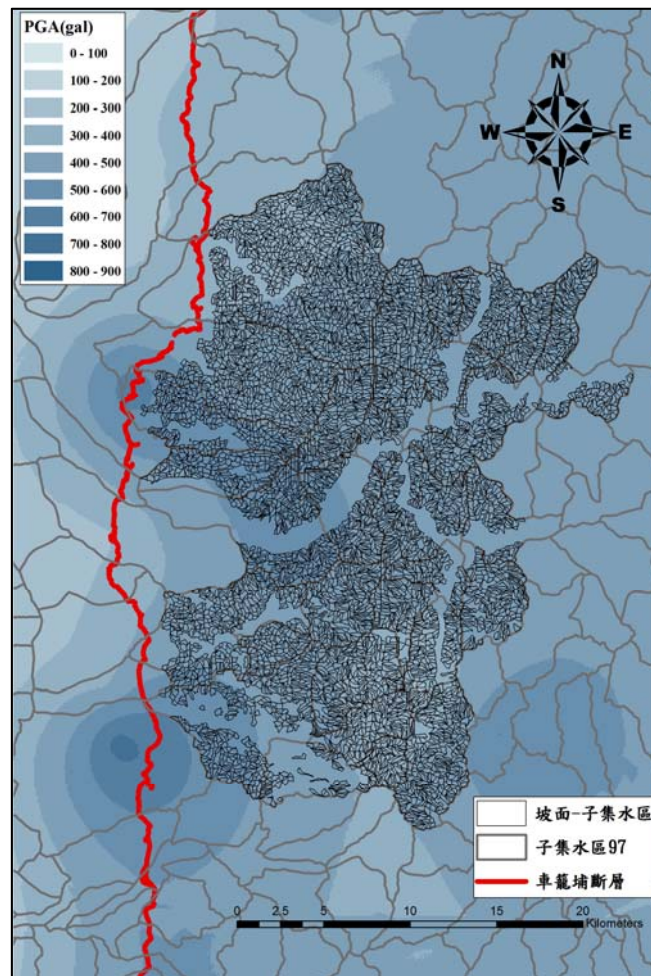


圖 7-2 地震速報資料之震度資訊

(四)坡面單元崩塌率計算

利用速報資料的震度值，可快速評估各集水區內各類坡面單元的震度，再根據坡地易損性曲線，即可計算每個坡面單元的崩塌機率，該機率評估藉由後端資料庫自動分析，可快速完成。

(五)子集水區崩塌潛勢評估

有了各坡面單元的崩塌機率，再利用坡面單元資料庫中的有效面積屬性求出其崩塌量，該崩塌量的物理意義即為某一程度以上的崩塌可能性，也就是崩塌潛勢。將各子集水區中坡面單元的崩塌量加總累計，即為各子集水區的可能崩塌總量，如圖7-3所示。

(六)崩塌災害潛勢分級

上述崩塌總量評估，可快速計算了解各子集水區可能崩塌量體，進一步可針對各集水區進行高、中高、中潛勢的分級評估，如圖7-4。評估結果可作為地震後初期快速了解各集水區可能崩塌狀況，規劃投入相應的防災手段及資源，降低生命財產損失。

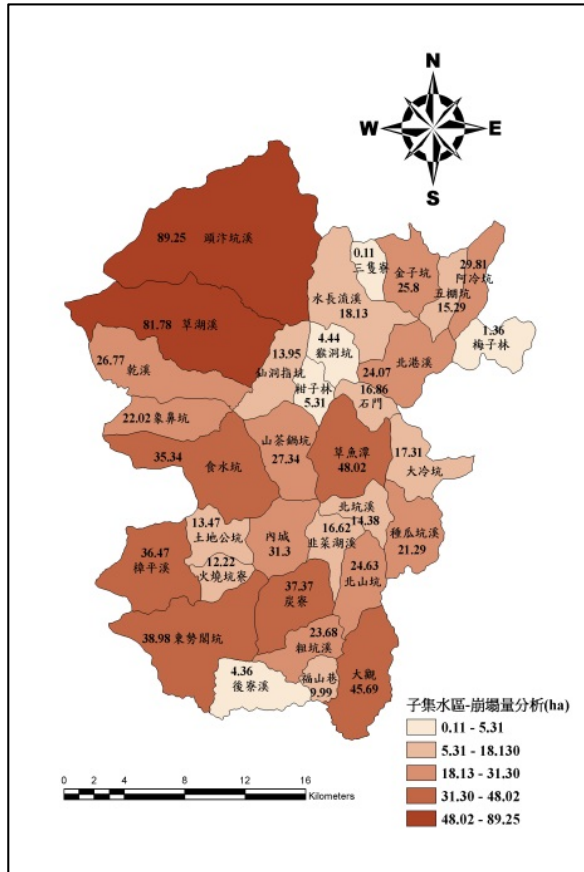


圖 7-3 子集水區之崩塌總量評估

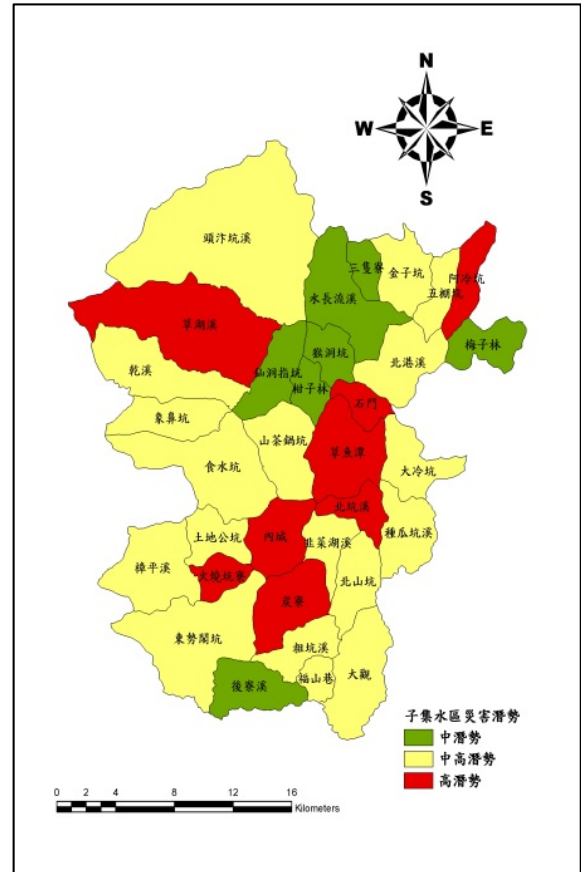


圖 7-4 子集水區之災害潛勢評估

上述地震對崩塌災害潛勢之量化評估流程，可針對地震後的初期快速評估各子集水區之潛勢及量化崩塌量，此即地震災害的早期評估。地震引致崩塌與降雨致災崩塌不同，具有事件的不可預測性，因此早期評估相當重要，本研究所發展的地震引致崩塌易損性，可作為震後崩塌早期評估的依據，並可進一步作為地震崩塌相關減災策略的基礎資料及參據。

參考文獻

- 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。
- 王美惠(2008)。應用 SPOT 衛星影像及 GIS 於崩塌地潛感分析之研究—以稍來溪為例。
- 王嘉燁(2002)。GPS/GIS 應用於南橫公路邊坡崩塌災害調查與潛感危險路段之劃定研究。
- 行政院農業委員會(2012)。水土保持技術規範。農水保字第 1011862646 號公告修正。
- 何春蓀(1999)。普通地質學。國立編譯館(修訂第三版)
- 吳佐川(1993)。台灣地區崩塌地區域性之研究。
- 吳俊銘、陳樹群(2004)。崩塌潛勢預測方法於台灣適用性之初探。
- 呂政諭(2001)。地震與颱風作用下阿里山地區公路邊坡崩壞特性之研究。
- 李三畏(1984)。台灣崩塌地問題探討。地工技術 7：43-49。
- 李三畏(1986)。台灣的崩塌地。水土保持文獻專輯。
- 李伯薈(2015)。應用坡面單元於崩塌易損性曲線。
- 李秉乾、周天穎、雷祖強、林哲彥、黃碧慧、吳政庭(2005)。利用集集大地震資料建立建築震害危險度評估模式 I-地震建築損害資料庫建立。中國土木水利工程學刊。17(1)：121-131。
- 李秉乾、周天穎、雷祖強、林哲彥、吳政庭(2005)。利用集集大地震資料建立建築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。

李秉乾、雷祖強、謝孟勳、黃亦敏、方耀民、周天穎、連惠邦(2015)。104

年應用坡地易損性模式於崩塌風險評估與警戒模式研析。行政院農業委員會水土保持局，委託計畫成果報告。

李秉乾、劉純之、雷祖強、謝孟勳、黃亦敏、方耀民、周天穎、連惠邦(2014)。

易損性曲線於坡地崩塌警戒模式應用與坡地巨災保險研析。行政院農業委員會水土保持局，委託計畫成果報告。

李馨慈(2010)。重大地震地表擾動衰減特性於震後高強度降雨之崩塌潛勢分析。

沖村孝(1996)。六甲山地山腹斜面的崩壞，兵庫縣南部地震地形災害，pp.110-126，古今書院。

林彥享(2003)。運用類神經網路進行地震誘發崩塌之潛感分析。

林書毅(1999)。區域性山坡穩定評估方法探討-以林口台地為例。

林淑媛(2003)。地形地質均質區之劃分與崩塌因子探討。

林慶偉，謝正倫，王文能(2002)。集集地震對中部災區崩塌與土石流之影響，集集地震對中部災區崩塌與土石流之影響/臺灣之活動斷層與地震災害研討會，124-134 頁。

林慶偉、謝正倫(2001)。桃芝風災土石流災害初步調查成果，土石流災害及防治對策研討會 2001 年論文集，57-69。

施俊廷(2005)。台灣中部山區道路邊坡崩塌特性之數值模式建置研究。

高雅嫻(2005)。應用崩塌密度及累積位移法於地震引起之崩塌潛感分析。

國立中興大學(2006)。水庫集水區崩塌地潛勢分析及崩塌土方量估算之研究。經濟部水利署。

張子瑩(2002)。降雨與地震對形成崩塌區位之比較研究，國立台灣大學地理環境資源學所碩士論文。

- 張石角(1987)。山坡地潛在危險之預測及其在環境影響評估之應用。中華水土保持學報，18(2)：41-48。
- 張石角(1995)。台灣東部之環境地質分區與崩塌類型，工程環境月刊，第14期，59-85頁。
- 張政亮，張瑞津，紀宗吉(2005)。遙測與地理資訊系統應用於大甲溪流域之崩塌災害的調查與分析，地理研究第43期，101-122頁。
- 張哲銘(2004)。21地震後大甲溪流域全方位治理之研究。
- 張碩芬(2013)。利用坡面單元進行崩塌潛感分析。
- 莊光澤(1994)。阿里山地區道路邊坡穩定性因子之探討。
- 陳永寬(1994)。數值地形模型應用於潛在崩塌地之預測。
- 陳宏宇(1999)。地質災害與山坡地開發，地工技術第73期，31-44頁。
- 陳志豪(2009)。集集地震後荖濃溪流域崩塌發生特性分析。
- 陳俞旭(2008)。地震對崩塌與土石流發生影響之研究。成功大學水利及海洋工程學系碩士論文，臺南。
- 陳信雄(1995)。崩塌地調查與分析。渤海堂出版社，臺北。
- 彭文飛(2008)。地震引起崩塌之潛勢圖製作-考慮地形放大效應與土體滑動堆積行為。
- 曾聖權(2005)。SPOT衛星影像應用於陳有蘭溪流域崩塌調查之研究。
- 游中榮(1996)。應用地理資訊系統於北橫地區崩塌潛感之研究。
- 費立沅(2009)。臺灣坡地災害與地質敏感區的關係。地質，28(1)：16-22。
- 馮梓璇(2007)。九分二崩塌地變遷之研究。
- 黃臺豐(1999)。瑞里地震誘發之崩塌，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
- 奧西一夫(1996)。六甲山地的斜面崩壞災害特徵，兵庫縣南部地震地形災害，pp.127-142，古今書院。

楊佳勳(2001)。地震對控制邊坡破壞之內在因子的影響之研究。

楊智堯(1999)。類神經網路於邊坡破壞潛能分析之應用研究。國立成功大學土木工程研究所碩士論文。

溫振宇(2005)。結合地震與颱風因子之崩塌模式分析。

葉錦勳(2003)。台灣地震損失評估系統—TELES。國家地震工程研究中心報告(報告編號：NCREE-03-002)，臺北市：國家地震工程研究中心。

詹永振(2001)。台 14 線公路邊坡崩塌影響因子之探討。

廖軒吾(2000)。集集地震誘發之崩塌，國立中央大學地球物理研究所碩士論文。

廖啟岳(2008)。大漢溪流域崩塌地發生特性分析。

廖啟雯(2004)。機率式地震誘發崩塌危害度分析—以國姓地區為例。

劉盈劭(2001)。地形敏感性的比較研究—以陳有蘭溪北段小支流為例，國立臺灣師範大學地理研究所碩士論文，138 頁。

劉盈劭(2013)。陳有蘭溪源流區之崩塌與土石流發生特性與空間差異：以和社溪流域為例。

潘國樑(1985)。台灣省重要都會區環境地質資料庫。

潘國樑(2007)。山坡地的地質分析與有效防災。科技圖書股份有限公司。

鄭元振(1992)。地理資訊系統在區域邊坡穩定分析之應用——中橫公路天祥至太魯閣段。

鄭傑銘(2003)。應用 GIS 進行豪雨及地震引致崩塌之潛感性分析。

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。

謝有忠(1999)。陳有蘭溪流域土石流發育之地質控制，國立成功大學地球科學研究所碩士論文，120 頁。

- 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。
- 謝昂泰(2014)。應用坡面單元在崩塌易損性曲線之研究，逢甲大學土木工程學系碩士論文。
- 齋藤迪孝(1980)。斜面崩壞予測。土と基礎，29(5)，72-81。
- 簡李濱(1992)。應用地理資訊系統建立坡地安定評估之計量方法。
- 簡瑋廷(2011)。應用物件導向分類方法自動產製坡面單元，國立中央大學應用地質學系碩士論文。
- 藍世欽(2000)。工程地質因子對道路邊坡穩定性之影響。
- 蘇苗彬(2009)。坡地防災預警技術(二)－坡地災害的分類。水保技術，2(4)：144-150。
- Alfredo H-S. Ang and Wilson H. Tang. (1975). Probability Concepts in Engineering Planning and Design Vol 1, Basic Principles. John Wiley & Sons, New York.
- Atkinson PM, Massari R(1997). Generalised linear modeling of susceptibility to landslide in the central Apennines, Italy，Computer & Geosciences，Vol.24 No.4，P.373-385.
- Barredo JJ, Benavides A, Hervas J, van Westen CJ(2000). Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain，JAG，Vol.2，Issue1，P.9-23.
- Bonham-Carter, G. F. (1994). Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS, Pergamon, Ottawa, 398 p. :305.
- Burnett, A.D., Brand, E.W., Styles, K.A. (1985). Terrain classification mapping for a landslide inventory in Hong Kong, 4th International Conference and Field Workshop on Landslides, Tokyo, 63-68.
- Carrara, A. (1983). Multivariate models for landslide hazard evaluation.

- Carrara, A. (1988). Drainage and divide networks derived from high-fidelity digital terrain models. NATO ASI series. Series C, Mathematical and Physical Sciences, 223: 581-597.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., Reichenbach, P. (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard, Earth Surface Processes and Landforms, 16, 5, 427-445.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P. (1995). GIS Technology in Mapping Landslide Hazard. Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 135–176.
- Carrara, A., Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P. (1999). Use of GIS Technology in The Prediction and Monitoring of Landslide Hazard. Natural Hazards, 20: 117–135.
- Carter, J.R. (1988). Digital Representations of Topographic Surfaces. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54: 1577–1580.
- Cooke, R. U., Doornkamp, J. C. (1974). Geomorphology in environmental management, Clarendon press, Oxford, 410.
- Crichton, D. (1999). The Risk Triangle. In Journal Ingleton, ed., Natural Disaster.
- Fernandez T, Irigaray C, EL Hamdouni R, Chacon J(2003). Methodology for landslides susceptibility mapping by means of a GIS. Application to the Contraviesa area Granada, Spain , Natural Hazards , Vol.30 , P.297-308.
- Fookes, P.G., Sweeney, M., Manby, C.N.D., Martin, R.P. (1985). Geological and Geotechnical Engineering Aspects of Low-cost Roads in Mountainous Terrain. Engineering Geology, 21: 1–152.
- Giles, P.T., Franklin, S.E. (1998). An Automated Approach to the Classification of the Slope Units Using Digital Data. Geomorphology, 21(3-4): 251–264.
- Gokceoglu C, Aksoy H(1996). Landslide susceptibility mapping of the slope in the residual soils of the Mengen region Turkey by deterministic stability

- analyses and image processing techniques , Engineering Geology , Vol.44 , P.147-161.
- Gorsevski PV, Gessler P, Foltz RB(2000).GIS in the Rockies 2000 Conference and Workshop.
- 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.
- Hansen, A. (1984) .Landslide hazard analysis, In: Brunsden, D. and Prior, D.B.(eds.), *Slope instability*, Wiley & Sons, New York, 523-602.
- Hansen, A., Franks, C.A.M., Kirk, P.A., Brimicombe, A.J., Tung, F. (1995) .Application of GIS to hazard assessment, with particular reference to landslides in Hong Kong, *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 135-175.
- Jackson, J.A.(1997). *Glossary of geology* (4th ed.). American Geological Institute.
- Keefer, D. K.(1984). “Landslides caused by earthquakes”, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, Vol. 95, pp 406-421.
- Lump, P. (1975). Slope failures in Hong Kong. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 8: 31–65.
- Mathematical Geology*, 15(3): 403-426.
- Meijerink, A. (1988) Data acquisition and data capture through terrain mappingunits, *ITC-Journal* (Netherlands), 1, 23-44.
- Miller, C.L., Laflamme, R.A. (1985). The Digital Terrain Model-theory and Application. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 24(3): 433–443.
- O’Loughlin, E. M., (1986) Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis, *Water Resources Research*, 22, 5,794-804.

- Penck, W. (1953).Morphological Analysis of Landforms.
London,MacMillan,429 .
- 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.
- Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J. andNaganuma,T. (2000). Statistical analysis of fragility curves. ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 126(7): 769-777.
- Sidle, R.C., Percea, A.J., O'loughlin, C.L. (1985). Hillslope Stability and Land Use. American Geophysical Union, Washington, D.C: 19–20.
- Speight, J. G. (1977). Landform pattern description from aerial photographsm,Photogrammetria, 32, 5, 161-182.
- van Westen CJ, Rengers N, Terlien MTJ, Soeters R(1997).Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation , Geol Rundsch , Vol.86 , P.404-414.
- Van Westen, C. J., Soeters, R., Sijmons, K. (2000). Digital geomorphological landslide hazard mapping of the Alpago area, Italy. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2(1): 51-60.
- Van Westen, C.J., van Asch, T.W.J., Soeters, R. (2006). Landslide Hazard and Risk Zonation : Why Is It Still So Difficult? Bulletin of Engineering Geology and Environment, 65: 167–184.
- Varnes, D.J.(1958). Landslide Types and Process. in E.B. Eckel (ed.). Special Report 29: Landslides and Engineering Practice (Washington, DC: HRB, National Research Council), 20–47.

- Varnes, D.J. (1978). Slope Movements and Type and Processes, in: Landslide Analysis and Control. Transportation Research Board Nat. Ac. Sci. Washington Spec. Rep.
- Verstappen, H.T. (1983). Applied geomorphology: Geomorphological survey forenvironmental development. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam.
- Weissel, K.W., Stark, C.P., and Hovius, N.(2001). “Landslides triggeredby the 1999 Mw7.6 Chi-Chi earthquake in Taiwan and theirrelationship to topography”, IEEE.
- Wu, C.H., Chen, S.C., and Chou, H.T. (2011). ìGeomorphologic Characteristics of Catastrophic Landslides during Typhoon Morakot in the Kaoping Watershed, Taiwan.î Engineering Geology, 123, 13-21.
- Xie, M., Esaki, T., Zhou, G. (2004). GIS-Based Probabilistic Mapping of Landslide Hazard Using a Three-dimensional Deterministic Model. Natural Hazards, 33: 265–282.

附錄一 期中審查會議委員意見回復

行政院農業委員會水土保持局
地震引致崩塌之坡地易損性曲線建立—以 921 地震為例
期中審查會議委員意見回復

壹、時間：105 年 8 月 1 日(星期二)下午 1 時 30 分

貳、地點：行政院農業委員會水土保持局第三會議室

參、主席：林簡任正工程司仕修代

記錄：高百毅

肆、委員意見：

委員意見	意見回復
1. 本計畫進行坡地易損性之分析，用來描述地震引致坡地之崩塌機率，如何驗證分析結果。	感謝委員指教，由於具重大災情之歷史震害資料不多，本研究由 921 地震資料庫進行不同程度崩塌驗證，較客觀地評估崩塌機率的可靠度，詳見第六章第三節內容。
2. P.19~P.20 表 2-7 的文獻選取因子資料表，建議可再深入回顧並比較，以作為本計畫後續「因子」之選取與比較。	遵照辦理，因子的選取分析詳見第三章第四節內容。
3. 地震引致崩塌與一般崩塌潛勢因子，其因子的重要性並不一定相同，應與強降雨作區隔。	遵照辦理，本研究已針對地震與降雨所引致崩塌的潛勢因子作區隔，例如在地震引致崩塌中，考量地質、坡度、坡向、斷層遠近等因子，而未考慮與降雨較相關的植生、河道遠近等因子。
4. 表 2-1 崩塌分類引用 Varnes(1958) 請查明年份是否正確，一般引用 Varnes(1978)。	遵照辦理，Varnes 於 1958 和 1978 皆有相關文獻論述，已補充這兩篇參考文獻，詳參考文獻列表。
5. P.17 中坡度是影響崩塌地的因子，坡度越陡則越不穩定，坡度超過 55° 為主，觀念上可能不太正確。	感謝委員指教，其中內容是指坡度 55%，約 29°。
6. P.57 的坡面單元，看不出任何資料，後續應修正。	感謝委員指正，已修正該圖示，呈現坡面單元劃設成果，詳第 91 頁圖 5-9。
7. 最後所得的各種類的曲線要如何應用，應補充說明。	感謝委員指教，坡地易損性曲線的應用方式已補充說明於第七章結論建議。
8. P.14 斜坡單元和 P.15 表 2-6 坡面單	感謝委員指正，已修正專有名詞，統一

元宜一致。	使用「坡面單元」。
9. P.20 表 2-7，宜列序位。	感謝委員指正，已補充序位。
10. P.59 高程缺單位(m)。	感謝委員指正，已補充單位。
11. P.67 圖 5-13、圖 5-68 圖例宜一致。	感謝委員指正，已修正圖例。

附錄二 期末審查會議委員意見回復

行政院農業委員會水土保持局
地震引致崩塌之坡地易損性曲線建立—以 921 地震為例
期末審查會議委員意見回復

壹、時間：105 年 12 月 4 日(星期二)下午 2 時 00 分

貳、地點：行政院農業委員會水土保持局第五會議室

參、主席：柯總工程司燦堂

記錄：高百毅

肆、委員意見：

委員意見	意見回復
1. 簡報所提實際案例應用部分，其操作方式、流程、步驟、使用條件或注意事項等，建議補充於報告詳述。	遵照辦理，已補充實際應用時的案例說明，詳見報告書第 122 頁。
2. P.117~P.118 表 6.4，驗證結果之說明，建議加強。	遵照辦理，已補充驗證結果之說明，詳見報告書第六章第三節。
3. P.117，有關第六章第三節之驗證，可否說明未通過驗證(約 12%)之可能原因為何？	遵照辦理，已補充驗證結果之說明，詳見報告書第六章第三節。
4. 921 地震後之崩塌地分佈已有相關之圖層資料，為何還需再做判釋。	感謝委員提問，本研究團隊因時程有限，未取得 921 地震後之崩塌相關圖資，因此以購自中央大學太遙中心的衛星圖資進行崩塌判釋，若能取得 921 時期的崩塌資料互為驗校驗，應有更為良好可靠的成果。
5. 921 地震後 2 年發生桃芝颱風侵襲，造成崩塌地面積擴大，建議參考納入分析。	感謝委員建議，本研究的目的是在於針對地震後的崩塌可能性進行推估，桃芝颱風侵襲所造成的崩塌地其誘因不同。此課題屬於震後坡地環境因子改變弱化，在降雨的誘發因子下坡地崩塌的問題，建議後續計畫辦理。
6. 是否有用 921 地震實際已崩塌的地區所對應的指標參數值以類神經網路訓練出可收斂的參數，再測試其它已知崩塌地的崩塌機率是否合理。	感謝委員提問，本研究方法屬於機率式評估，利用數理統計的觀念發展坡地易損性曲線。類神經網路求解模糊問題上有很好的收斂結果，然而本研究採用最大概似法即可直接求取機率密度函數的精確解，而有更好的成果。

7. 請增列摘要。	遵照辦理，已增列摘要。
8. 目錄第二章第三節重複，圖 5-7 重複。	遵照辦理，已修正誤植。
9. P.26 圖 2-6 和表 2-7 排序宜一致，表 2-7 文字宜修正。	遵照辦理，已修正。
10. P.46 表 3-2，增列單位。	遵照辦理，已修正。
11. P.54、P.55，排序宜修正。	遵照辦理，已修正。
12. P.93，”波向”修正為”坡向”。	遵照辦理，已修正。
13. 缺工作時程表。	遵照辦理，已增補工作時程表，詳見第 3 頁。
14. 檢核工作項目和內容是否符契約規定。	遵照辦理，本案工作項目和內容與契約相符。

附錄三 2017 中華水土保持研討會投稿全文

以經驗分析法發展地震引致崩塌之坡地易損性曲線

謝孟勳^{[1]*} 林正紋^[2] 李秉乾^[2] 李佑任^[2] 陳酉昌^[2]

摘 要 台灣山坡地大約占總面積的 73% 以上，這些地區常因大規模的地震或降雨造成坡地崩塌。本研究的目的，即在於發展地震引致崩塌的坡地易損性分析，以建立台灣山坡地的崩塌機率評估方法。坡地易損性曲線表達坡地在某地表震度(尖峰地表加速度，PGA)下引致崩塌發生之機率。研究中針對台灣中部九二一地震的嚴重災區，採用 SPOT 衛星影像進行崩塌地判釋並計算崩塌率，並以 5-m DEM 進行地形分析以及坡面單元分析，最後根據地質、坡度、坡向等環境因子將坡地分為 12 個類型。利用本研究提出的網格集群最大概似法估計易損性參數並發展坡地易損性曲線。研究結果顯示本研究發展的經驗分析方法可合理地應用於坡地易損性分析，未來可進一步應用於地震引致崩塌風險的評估。

關鍵詞：崩塌、坡地易損性曲線、地震、經驗分析法、九二一地震

Development of Earthquake-induced Landslide Fragility Curves Using Empirical Statistical Method

Meng-Hsun Hsieh^{[1]*} Jeng-Wen Lin^[2] Bing-Jean Lee^[2] You-Ren Lee^[2]
Yu-Chang Chen^[2]

ABSTRACT In Taiwan, the hillside is about over 73% of total area. The landslide disasters usually occur at these areas due to magnitude earthquake and rainfall. In the study, an earthquake-induced landslide fragility analysis is proposed to construct estimate method of landslide probability at Taiwan. Landslide Fragility Curves (LFCs) express the probability of a landslide, as a function of specific earthquake measures as peak ground acceleration (PGA). The remote sensing data from SPOT images are applied to analyze the landslide ratio and physiographic conditions at the severely affected areas in central Taiwan. The slope units are classified into different typologies according to geology, slope gradient and aspect, based on the landslide database at the 1999 Chi-Chi Earthquake in Taiwan. The Grid-based Clustering Maximum Likelihood Estimate (GC-MLE) is conducted to determine the fragility parameters and to develop the fragility curves. The study results demonstrate that the proposed method can reasonably be used on the fragility analysis and can be used for assessing earthquake-induced landslide risk in the future.

Key Words: Landslide, landslide fragility curve, earthquake, empirical statistical, Chi-Chi earthquake

一、前言

由於坡地災害發生的不確定因素相當複雜，使得廣域崩塌事件極難進行災前評估及警戒。地震本身的不可預測性導致地震誘發的崩塌災害難以評估，因此過去相關研究中多以統計方式發展崩塌潛勢評估為主，蒐集崩塌案例及地震重要觀測紀錄再輔以現地地文條件進行分析。

[1] 逢甲大學營建及防災研究中心

Construction and Disaster Prevention Research Center, Feng Chia University, Taichung 407, Taiwan

[2] 逢甲大學土木工程學系

Department of Civil Engineering, Feng Chia University, Taichung 407, Taiwan

* Corresponding Author. E-mail: hsiehmh@fcu.edu.tw

這也意味著，對於地震誘發之崩塌災害，無法如颱風或豪雨造成崩塌之模式利用即時監測系統進行災害預警(pre-disaster prevention)，而是需要依靠地震速報資料發展其早期評估(early warning estimate)。在地震災害評估上，這個防災觀念可以利用易損性模式的理論來實踐。易損性模式應用在地震災害評估在國內外已卓有成效，易損性曲線的概念(fragility curves)最早被地震工程專家應用於描述地震中橋梁或建築物損失等問題，國內外所發展的早期評估方法多建構在易損性理論上。在實際的崩塌案例裡，所謂易崩與不易崩的分界是模糊的，在同樣條件的最大地表加速度與坡地環境下，可能有著不同的結果。因此過去的研究發現不同的情境條件下，所得到的崩塌評估模式也不同，因此對於崩塌評估更適合以崩塌機率評估的模型來描述崩塌的可能性。而用易損性曲線表達在某一強地動因子下的破壞機率，可有效地應用於地震早期災損評估及減災規劃，此即本研究主要解決的課題。

本研究之目的，即透過易損性曲線，參考民國 88 年 921 大地震之災害資料，建立坡地易損性曲線(Landslide Vulnerability Curves)。針對坡地崩塌的問題，分析環境因子與致災因子，採網格及集群分析災害資料，並使用最大概似法求解不同屬性之坡地易損性參數，以利研究地震對於坡地災害之影響。因此，本研究考量環境因子地質、坡度、坡向、順向坡等，建立不同屬性之坡地分類，分析各分類與致災因子最大地表加速度之相關性。研究成果將有助於臺灣山坡地集水區流域之災害評估、脆弱性及風險模式相關研究之發展，並可廣泛作為坡地規劃、防救災規劃、國土利用、水土保持與集水區治理等之參考。

二、研究方法

1. 經驗易損性曲線

跟去以往發生的災害事件或數個事件的真實資料，以統計推論法發展易損性曲線。其中，易損性曲線即是以超越機率表示致災因子對於災害的發生或是超越某個危害程度的機率，為了合理的表現致災因子與災害事件的關係，因此需要假設事件機率密度函數。既有之易損性分析於機率密度函數上常見為常態分佈、對數常態或 β 分佈，基於假定崩塌發生之分佈模式，通常選用對數常態分佈來表達發生頻率的分佈，以利建立崩塌發生之隨機變量 x 的分佈函數 $F(x)$ 模型，也就是致災因子對於事件的機率分配數學方程式，而這方程式是由中位數及對數標準差決定(Shinozuka et al., 2000；李秉乾等人，2005；謝孟勳，2013)，稱為雙估計參數，如(式 1)所示：

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

其中 f_j 是對數常態分佈的機率密度函數； c_j 為中位數(median)； ζ_j 為對數標準差(log-standard deviation)； x 為隨機變量。此方程式即為表達隨致災因子的變化對應受災本體所發生災害的機率密度函數，其所累積的分佈極為易損性曲線。對數常態累積分佈函數解析式如(式 2)所示：

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

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。本研究利用最大概似法求解中位數及標準差，當其雙估計參數決定後，即可使用「標準常態累積分布函數」求取累積分布函數即損害機率，也就是第 j 類損害程度之易損性曲線(fragility curve)。

2. 921 強地動因子

坡地易損性曲線之定義為特定致災因子條件下發生崩塌之機率。因此，本研究考量蒐集資料之可靠性與可用性選取最大地表加速度作為致災因子。參考中央氣象局之臺灣自由場強地動觀測網

(Taiwan Strong Motion Instrumentation Program; TSMIP)，每個測站使用具有三向量之地震儀、數位記錄器、電池及 GPS 校時系統，以數位信號每秒 200 筆或更大之頻率擷取，具備 16bit 以上之解析度及陣前 20 秒之啟動紀錄，每日 24 小時不斷監測台灣的地區活動，並發佈有感地震消息，使台灣的地震測報功能及金準度獲得大幅的提升。

921 地震發生時，中央氣象局之 TSMIP，記錄下完整全國各地之三軸加速度歷時紀錄(含垂直向、東西向及南北向)，在分佈於全國九大都會區、分布密度不超過 5km 的 650 個強地動測站中，本研究選用研究地區烏溪流域周遭共有 48 個測站資料。

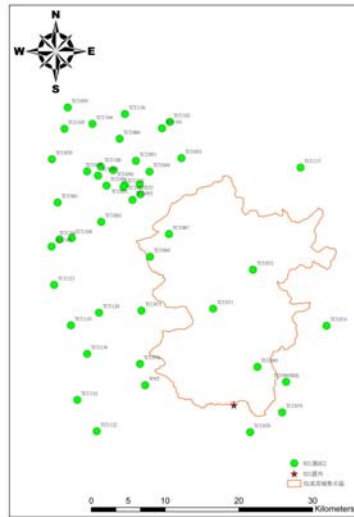


圖 1 烏溪流域附近地震觀測台網

3. 坡面單元

目前有兩種基本單元用以評估廣域之崩塌評估模式，分別為網格單元及坡面單元，此二種方法各有其優缺點。網格單元係將分析區域切分成較小網格再進行統計推估，其優點是符合統計的權重一致性，缺點是無法考慮地形邊界效應而導致統計上的偏估，且對於整體坡地狀況(如一個邊坡)掌握度亦不佳，較難描述坡面的力學與物理機制。坡面單元則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剔除不適用區域再進行統計迴歸(朱晃葵等人，2012)。坡面單元的優點是對於地形邊界掌握度較佳，但由於坡面單元面積大小不一致將可能造成統計模式的不適用性。

本研究結合網格單元及坡面單元(第二種定義)的優點應用於發展坡地易損性曲線，基於衛星影像判釋之網格以坡面單元進行篩選、分類以確立崩塌之範圍並汰除不合理區域，依據坡面分類進行坡地易損性分析。這個方法可建立以坡面單元及坡地分類為基礎的崩塌事件資料，有助於建立合理可靠的坡地易損性曲線。本研究使用地理資訊系統軟體 ArcGIS 10.0 之水文及地形工具進行坡面單元分析。藉由 DEM 分析得到之集水區，多邊形的輪廓線就是山脊線；而山谷線則使用反轉之 DEM 資料，藉由 DEM 網格分析互換其高低值，原山谷線即能反轉為山脊線，同樣地亦可得到反轉之山谷線。繪製原則如下：

- (1)坡面單元須符合地形特徵，故其邊界不可跨越地形邊界，例如山稜線、河谷系。
- (2)為避免後續坡面單元組成之聚落管理單元面積過小，影響警戒機制發布的合理性，坡面單元之面積控制在約 3 至 15 公頃為原則。

藉由上述步驟，即可劃分及篩選出集水區之坡面單元，本研究劃分完成之坡面單元如圖 2 及圖 3 所示，總計有 6,333 個坡面單元。

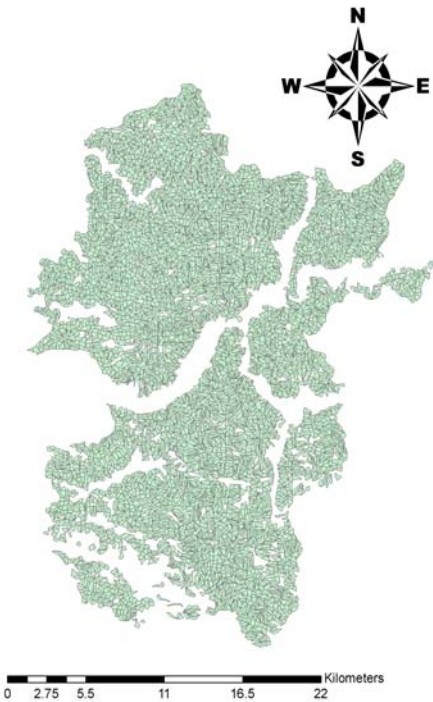


圖 2 烏溪集水區之有效坡面單元

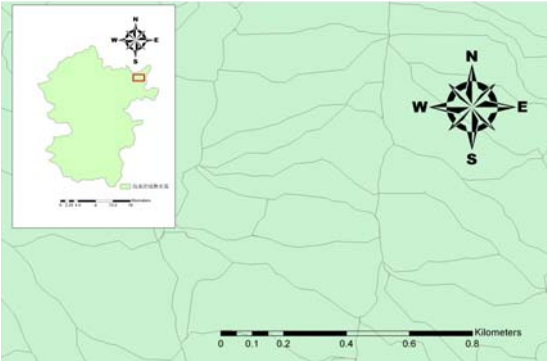


圖 3 坡面單元局部放大圖

4. 坡面單元分類

坡面單元劃分完成後，即可得知集水區整體之坡面數量，因地文特性與崩塌具有高度相關，藉由環境因子資料庫，依據「地質」、「坡度」和「坡向」為每個坡面進行分類，以描述其地文特性。在地質方面，依據李錫堤教授之研究(Lee *et al.*, 2001)，如圖 4 所示，site classB 為堅硬且脆性的岩石為地質分級 G1、site classC 為密集的土壤和軟岩為地質分級 G2；在坡度方面，依據「水土保持技術規範」（行政院農委會水土保持局，2012）所定義之 2－7 級坡（1 級坡不採用），將其分為 S1、S2 和 S3 三級如所示；在坡向方面，先求出坡面單元反函數最高點剪最地點的坡面方位角，在求出斷層點與坡面單元行心之波向方位角，利用坡面方位角與波向方位角以 30°為分界評估強面及弱面。根據上述因子，組合成 24 分類坡地類型。

表 1 本研究採用之坡度分類代號

編碼	坡度(S)分級範圍	坡度(°)
S1	5% < S ≤ 15%	2.86 < S ≤ 8.53
	15% < S ≤ 30%	8.53 < S ≤ 16.70
	30% < S ≤ 40%	16.70 < S ≤ 21.80
S2	40% < S ≤ 55%	21.80 < S ≤ 28.81
	55% < S ≤ 100%	28.81 < S ≤ 45.00
S3	S > 100%	S > 45.00



資料來源：Lee et al., 2001

圖 4 李錫堤教授分類之地質圖

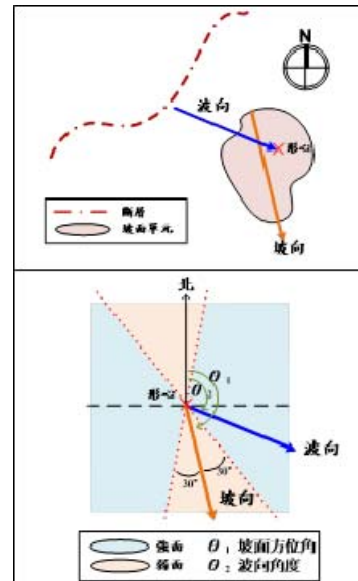


圖 5 坡向強弱面示意圖

5. 分析流程

本研究分析流程如圖 6 所示，除前述之分析理論外，針對蒐集調查之 921 地震測站資料、衛星影像、地文環境等資料，尚須進行 PGA 分布推估、崩塌地判識。對於建置之網格式崩塌災害資料庫，除需進行坡面單元分析，尚須進行土地利用篩選去除已受相當開發之區域，如此方能得到可靠之崩塌致災資料進行坡地易損性分析。

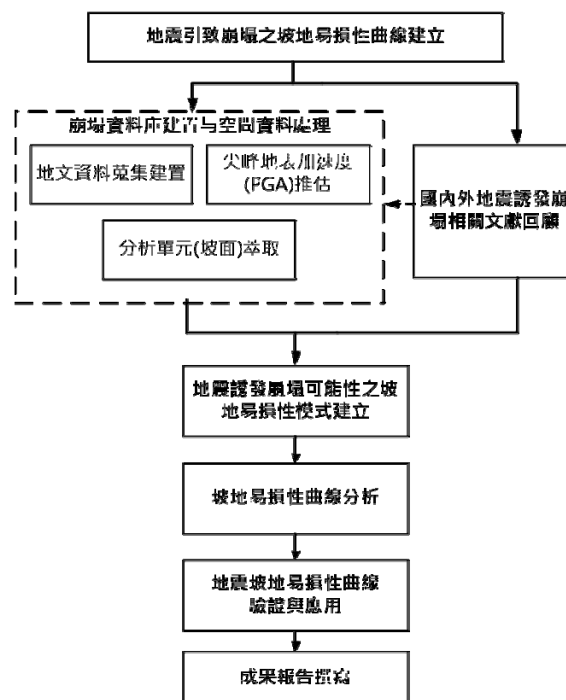


圖 6 本研究工作流程圖

三、研究材料概述

1. 實證區介紹

本研究為發展易損性曲線，優先選擇高潛勢危害地區，也就是 921 地震時，低表加速度及災損較為嚴重之地區，因此，本研究實證區選擇鄰近車籠埔斷層之烏溪流域集水區，如圖 7 所示。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，集水區面積 658.34 平方公里。並根據 921 地震時，氣象局地震測站所監測之數據，作為本研究之基礎材料。



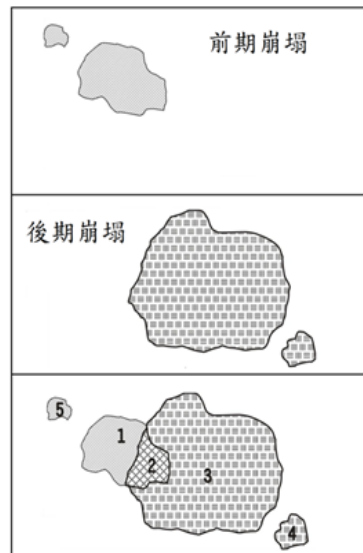
圖 7 實證區域

2. 影像判釋崩塌地、坡面單元與資料庫建置

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 8 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。本研究利用 SPOT-2 衛星影像進行崩塌地判釋，使用 921 地震前後期衛星影像，如圖 9 及圖 10 所示，以及影像處理系統 ERDAS IMAGINE 進行衛星影像人工判釋，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，所得結果如圖 11 所示。



資料來源：修改自賴志強(2007)；陳俞旭(2008)

圖 8 崩塌地變遷及分類示意

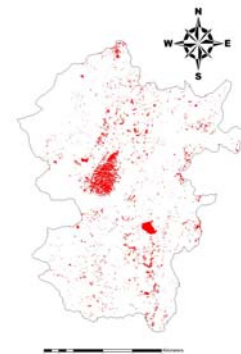
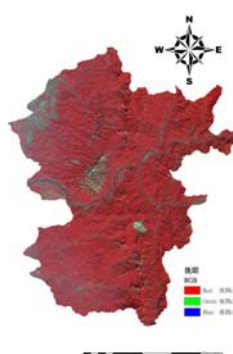
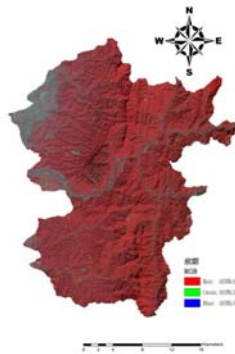


圖 9 1999/01/28 衛星影像 圖 10 1999/10/31 衛星影像 圖 11 九二一新增崩塌地

3. PGA 分布推估

在 PGA 分布推估方面，本研究蒐集 921 地震時 444 個強地動測站之場址 PGA 資料，使用 Wu 衰減率來作為定率函數，以一般克利金系統方程式來推估未設測站之全域 PGA 空間分布，並以 100 m×100 m 網格做為空間全域推估之尺度。計算之結果是利用地理資訊系統軟體(Arc GIS)內建之空間分析克里金內插模組推估空間中之隨機變動值。空間推估之隨機變動值再與區域趨勢值相加，即可完成地表震度之全域推估。PGA 之空間推估結果如所示，由圖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/s²，此一結果相當符合 921 地震之地表震度在中部區域之表現，亦顯示在車籠埔斷層帶沿線具有相當合理的推估能力。

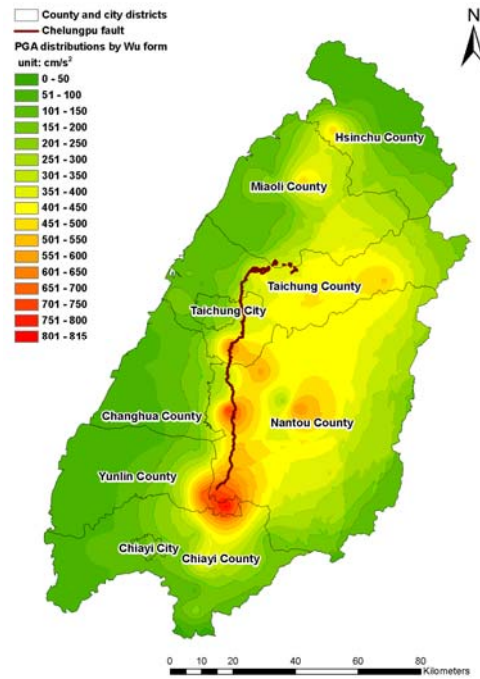


圖 12 Wu 衰減率推估之全域尖峰地表加速度分布

四、坡地易損性曲線分析結果

1. 12 類坡地易損性曲線

根據崩塌資料庫與致災因子的統計，利用最大概似法進行致災資料進行分析，其結果即為 12 類坡面的易損性曲線參數。12 類坡面分類包含地質、坡度、坡向因子，用來描述坡地之崩塌於地震災害中的機率。本研究分析所得之各類坡地易損性參數如表 2 所示。

表 2 烏溪流域之坡地易損性參數表

編碼	數量	中位數	標準差	編碼	數量	中位數	標準差
G1A1S1	261	0.496	0.128	G2A1S1	1524	0.946	0.704
G1A1S2	156	0.517	0.134	G2A1S2	562	0.774	0.578
G1A1S3	126	0.518	0.111	G2A1S3	559	0.702	0.516
G1A2S1	286	0.517	0.187	G2A2S1	1534	1.061	0.780
G1A2S2	114	0.466	0.049	G2A2S2	568	0.855	0.654
G1A2S3	96	0.522	0.159	G2A2S3	547	0.801	0.612

2. 坡向因子比較

本研究將坡向分為 A1(弱面)與 A2(強面)，除 G1S2 類之外，如圖 13(b)所示，其餘 A1 曲線皆為 A2 之下。在低震度的情況下，此表現較不明顯，隨震度提升，其表現的差異也就越大，合理的表現本研究之假設。針對 G1S2 類之現象，可能原因為 G1S2A2 之原始致災資料點過少僅有五筆，此五筆不僅震度相近又與未崩塌之參考資料差異不大，在這條件下，易損性曲線很早就開始提升，以符合資料點特性，這也就顯示資料充足與品質之重要性。

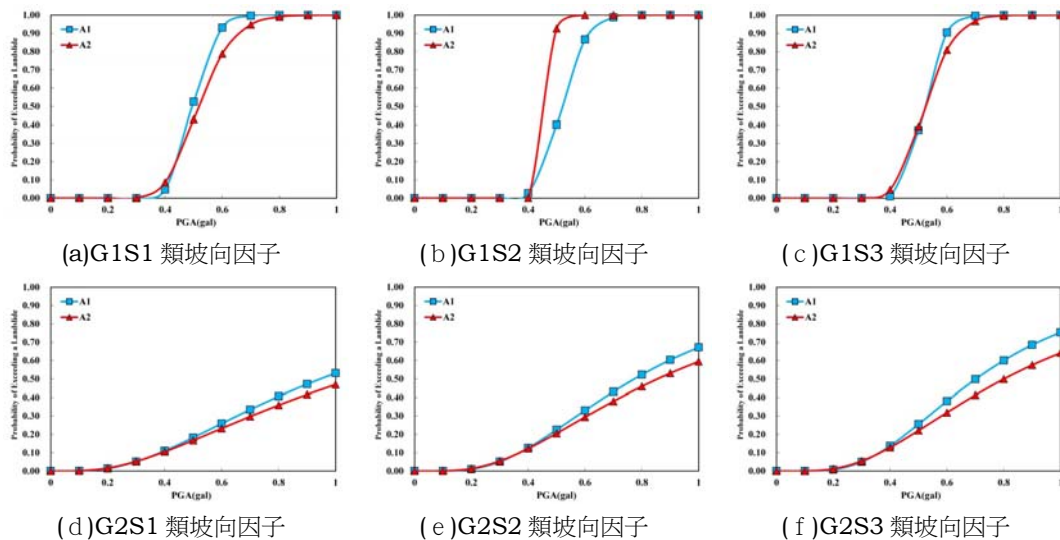


圖 13 坡向因子比較

3. 坡度因子比較

本研究將坡度因子分為三類：S3(陡坡)、S2(中坡)、S1(緩坡)。除 G1A2S2 外(前文已探討該分類資料點特性)，藉由易損性曲線可觀察到 G1 類之坡度因子對易損性曲線較不敏感，而 G2 類之差異即較為明顯，隨著坡度越大，易損性曲線越大，此現象在 A1 類更加明顯。且隨著震度越大，S3、S2 即 S3 之坡地易損性曲線差異也越大，充分表現本研究之假設，也顯示本研究之合理性。

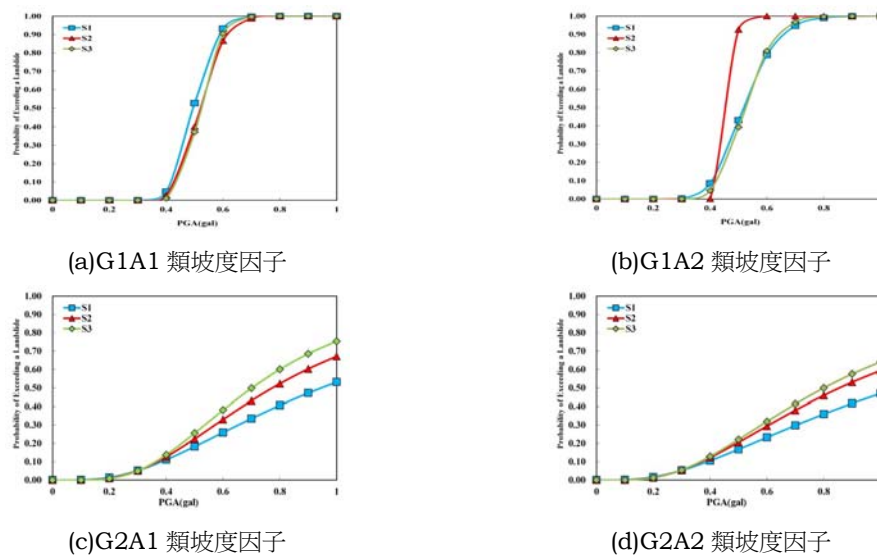


圖 14 坡度因子比較

4. 坡地易損性曲線驗證

由於坡地易損性曲線為致災因子對某類型坡地之崩塌機率，其為量化的無因次評估，適用於廣域的崩塌評估，理論上評估量體越大其空間隨機誤差越小，也就越準確，因此本研究以子集水區做為評估單元，以本研究地區範圍之子集水區作為驗證對象，計算各子集水區有效面積、崩塌面積和崩塌

比，並考量其崩塌程度作為驗證評估指標。所謂崩塌程度及分為中高險、中高危險及高危險。本研究經由計算各子集水區之崩塌比，以自然間斷點分類法(Natural break)進行自動化分類，其中真實崩塌率之輕度有 20 個子集水區，中度有 9 個子集水區，而重度有 4 個子集水區，如圖 15 所示；評估崩塌率輕度以上有 12 個子集水區，中度以上有 13 個子集水區，而重度以上有 8 個子集水區，如圖 16 所示。此兩者的驗證，合格者「正確」，不合格者「錯誤」(即低估者)，最終所得驗證結果合格率達 87.88%，顯示結果合理，可依此作為崩塌評估的參考依據。



圖 15 921 地震崩塌程度分類



圖 16 921 地震崩塌程度評估

伍、結論與建議

- (1)透過易損性分析模式，可考慮 PGA 的大小對應在坡地易損性曲線上求取崩塌機率，可合理表達坡地受地震後的崩塌易損特性。
- (2)在地質因子方面，G1 類的易損性曲線較易崩塌，G2 類則是較為平緩的提升。兩種地質崩塌特性也反應在致災資料上，G1 類的崩塌資料分界較為清楚，G2 類崩塌的不確定性更高。
- (3)隨著坡度越大，坡地易損性越高，表示越易崩塌。A1 類更明顯中高震度相差可達 10%以上，但隨震度提高崩塌機率並無拉大的現象。A2 類中的陡坡和中坡則差異較低，大約 5%左右。
- (4)坡向的強、弱面，結果顯示在低震度的情況下差異並不大，在中高震度的 PGA 下，坡向因子的差異約在 5~10%間，隨著震度越高差異越大。
- (5)由 921 地震資料進行崩塌驗證，客觀地評估崩塌機率的正確率，對於坡地崩塌程度的驗證正確率達 87.88%，可作為崩塌評估的良好工具。

謝誌

本文承行政院農業委員會水土保持局「地震引致崩塌之坡地易損性曲線建立—以 921 地震為例」計畫之支持，致使本研究得以順利完成，作者在此表達謝意。

參考文獻

1. 行政院農委會水土保持局(2012),「水土保持技術規範」。
2. 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。李秉乾、周天穎、雷祖強、林哲彥、吳政庭(2005),「利用集集大地震資料建立建築震害危險度評估模式 II-易損曲線與風險評估分析」,中國土木水利工程學刊,17(2),293-300。
3. 王美惠(2008)。應用 SPOT 衛星影像及 GIS 於崩塌地潛感分析之研究—以稍來溪為例。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。
4. 謝昂泰(2014)。應用坡面單元在崩塌易損性曲線之研究,逢甲大學土木工程學系碩士論文。賴志強(2007),「台灣地區降雨及地震誘發崩塌之特性研究」,國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文,臺南。
5. 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。
6. 謝孟勳、雷祖強、李秉乾、林冠廷、謝昂泰、王子杰(2013),「坡地脆弱性曲線在廣域崩塌評估之應用」,2013 年中華水土保持學會年會及學術研討會論文集,臺中。
7. Ang, A.H., and W.H. Tang(1975), "*Probability concepts in engineering planning and design*," John Wiley & Sons, Inc.
8. Jackson, J.A.(1997), "*Glossary of geology* (4th ed.)," American Geological Institute.
9. Rossetto, T., and A. Elnashai(2003), "Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data," *Engineering Structures*, 25(10): 1241-1263.
10. Rota, M., A. Penna, and C.L. Strobbia(2008), "Processing Italian damage data to derive typological fragility curves," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28: 933-947.
11. Shinozuka, M., M.Q. Feng, J. Lee, and T. Naganuma(2000), "Statistical analysis of fragility curves," *Journal of Engineering Mechanics*, 126(12): 1224-1231.
12. Xie, M., T. Esaki, and G. Zhou(2004), "GIS-Based probabilistic mapping of landslide hazard using a three-dimensional deterministic model," *Natural Hazards*, 33: 265-282.

