計畫編號：SWCB-107-226

應用易損性分析發展震後山區災害潛勢評估模式之研究

Development of Potential Assessment Model by Using Earthquake-induced Fragility Analysis for Mountain District

執 行 單 位：逢甲大學

執 行 期 間：107 年 02 月 09 日至 107 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研究副教授

共同主持人：逢甲大學土木工程學系李秉乾教授

逢甲大學土木工程學系林正紋教授

研 究 助 理：許羽忻、洪誌勵

行政院農業委員會水土保持局　編印

中華民國 107 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）

應用易損性分析發展震後山區災害潛勢評估模式之研究

摘　要

目前對於地震仍難以準確預測，因此震後之建物受震倒塌、坡地崩塌以及道路的破壞，造成山區聚落嚴重的生命財產損失。基於易損性分析的地震早期損失評估可進行震後山區聚落危害評估。本研究以易損性曲線表達強地動因子下災害發生之機率，可應用在震後初期進行災害潛勢評估。研究中針對山區聚落發展地震引致崩塌之坡地易損性曲線，以及建物倒塌之易損性曲線，並建立災害潛勢早期評估模式。評估模式包含：(1)地震誘發崩塌之聚落影響評估；(2)地震誘發崩塌之山區道路阻斷評估；(3)地震直接引致之建物倒塌災損評估等三部分。研究中以二個地震事件模擬地震早期評估中的 8 個情境項目。研究成果顯示本模式可在震後快速進行災害損失評估，亦可應用於災前減災規劃及防救管理。

關鍵字：地震、崩塌、坡地易損性曲線、建物易損性曲線、地震早期損失評估

Development of Potential Assessment Model by Using Earthquake-induced Fragility Analysis for Mountain District

Abstract

In present, an earthquake is difficult to accurately predict that cause serious loss of life and property due to building damage, slope landslide and roads destruction at the mountain district. The early losses estimation after an earthquake is a good tool to estimate possible hazards in the mountain district base on fragility analysis. The fragility curves express the probability of a hazard, as a function of specific earthquake measures as peak ground acceleration (PGA), which are employed to estimate hazard potential in the earthquake early. In the study, the earthquake-induced landslide fragility curves and building fragility curves were developed, and the potential assessment model of earthquake early were construct for the mountain district. The assessment model included: (1) impact assessment of earthquake-induced landslide; (2) road-block assessment of earthquake-induced landslide; (3) losses assessment of earthquake-induced building damage. In the study, the two earthquake events were used to simulate the eight scenario projects for the earthquake early estimation. The study results show that the model can be used for quick assessment of losses after earthquake and can be used for disaster prevention and mitigation planning in the pre earthquake management.

Keywords: earthquake, landslide, landslide fragility curves, building fragility curves, earthquake early losses estimation

目　次

摘　要 ..... **I**

Abstract ..... **II**

目　次 ..... **III**

表　次 ..... **V**

圖　次 ..... **IX**

第一章　前言 **1**

第一節　計畫緣起與目的 1

第二節　工作項目與內容 3

第三節　計畫執行流程 5

第二章　基本資料蒐集調查與易損性分析理論 **7**

第一節　921 地震誘發之崩塌 7

第二節　921 地震引致的建物倒塌 10

第三節　示範區基本資料蒐集 14

第四節　示範區環境因子資料處理 22

第五節　易損性分析理論 30

第三章　地震誘發崩塌之坡地易損性分析 **39**

第一節　坡地易損性曲線的建立流程 39

第二節　崩塌地判識與淬取 41

第三節　崩塌資料庫建置 45

第四節　強地動因子空間推估 48

第五節　坡面單元圈繪 55

第六節　坡地易損性曲線 67

第四章　地震引致建物倒塌之建物易損性分析 **71**

第一節　建築物資料庫蒐集範圍 71

第二節　建築物類型與分類.....72
第三節　建築物震損資料庫建置 74
第四節　建築物易損性曲線.....84
第五章　山區災害潛勢早期評估模式建立與應用 89
第一節　示範區聚落基本資料調查蒐集 90
第二節　示範區聚落影響坡面分析 101
第三節　震後山區災害潛勢早期評估模式建立 108
第四節　地震早期評估境況模擬－921 地震事件 114
第五節　地震早期評估境況模擬－彰化斷層事件 135
第六章　結論與建議 157
參考文獻.....159

附錄一　期初審查會議委員意見回復
附錄二　期中報告書審查意見回復
附錄三　期末聯合審查會議審查意見回復

表　次

表 2-1　中央氣象局地震分級表 9
表 2-2　921 地震各縣市建築物損害棟數統計 11
表 2-3　不同建築物構造類別 11
表 2-4　內政部建築研究所統計之 921 地震各縣市建築物損害戶數 12
表 2-5　環境資料庫之類型和檔案格式 15
表 2-6　研究區域周邊 921 測站點資料 20
表 2-7　李錫堤教授提出之台灣地區地質分類 23
表 3-1　研究地區裸露地統計 42
表 3-2　研究地區新增崩塌地統計 44
表 3-3　不同地質因子之崩塌統計 45
表 3-4　不同坡向因子之崩塌統計 46
表 3-5　不同坡度因子之崩塌統計 47
表 3-6　Wu 衰減率所得之殘差分量套配半變異數模式之參數結果 .52
表 3-7　地質分類統計 58
表 3-8　坡向敏感分類統計 60
表 3-9　坡度分類統計 61
表 3-10　坡地易損性參數 67
表 4-1　採用之構造系別 72
表 4-2　建築物分類 73
表 4-3　財政部財稅資料中心提供之稅籍資料編碼規則 74
表 4-4　各構造系別建築物原始資料及各類別建築物棟數資料統計 79
表 4-5　各類建築物震災統計 82
表 4-6　建築物易損性參數 84

表 5-1　示範聚落建物統計 100
表 5-2　平林里影響坡面統計 103
表 5-3　福龜村影響坡面統計 104
表 5-4　大石村影響坡面統計 104
表 5-5　平林里與福龜村間之道路影響坡面統計 106
表 5-6　福龜村與大石村間道路影響坡面統計 107
表 5-7　平林里至福龜村各之坡面屬性與路段阻斷之易損性參數..112
表 5-8　福龜村至大石村各之坡面屬性與路段阻斷之易損性參數..113
表 5-9　平林里坡面易崩指標(事件一) 118
表 5-10　福龜村坡面易崩指標(事件一) 120
表 5-11　大石村坡面易崩指標(事件一) 123
表 5-12　平林里與福龜村間道路坡面易崩指標(事件一) 127
表 5-13　平林里與福龜村間路段阻斷之危害潛勢值(事件一) 128
表 5-14　福龜村與大石村間道路坡面易崩指標(事件一) 130
表 5-15　福龜村與大石村間路段阻斷之危害潛勢值(事件一) 131
表 5-16　平林里建物全半倒評估(事件一) 133
表 5-17　福龜村建物全半倒評估(事件一) 134
表 5-18　大石村建物全半倒評估(事件一) 134
表 5-19　平林里坡面易崩指標(事件二) 139
表 5-20　福龜村坡面易崩指標(事件二) 141
表 5-21　大石村坡面易崩指標(事件二) 144
表 5-22　平林里與福龜村間道路坡面易崩指標(事件二) 148
表 5-23　平林里與福龜村間路段阻斷之危害潛勢值(事件二) 149
表 5-24　福龜村與大石村間道路坡面易崩指標(事件二) 151
表 5-25　福龜村與大石村間路段阻斷之危害潛勢值(事件二) 152

表 5-26　平林里建物全半倒評估(事件二) 154
表 5-27　福龜村建物全半倒評估(事件二) 155
表 5-28　大石村建物全半倒評估(事件二) 155

圖　次

圖 1-1　計畫工作流程圖 5
圖 2-1　台中、南投於 921 地震中誘發崩塌變異點 8
圖 2-2　921 地震引發之崩塌類型統計 8
圖 2-3　研究區域 14
圖 2-4　921 地震前後期衛星影像 17
圖 2-5　烏溪流域附近地震地震觀測台網 19
圖 2-6　年代圖 22
圖 2-7　地層圖 22
圖 2-8　岩性圖 22
圖 2-9　李錫堤教授分類之地質圖 24
圖 2-10　研究區高程圖 25
圖 2-11　研究區坡向圖 26
圖 2-12　研究區坡度圖 27
圖 2-13　研究區濾除範圍 28
圖 2-14　研究地區順向坡分布圖 29
圖 2-15　不同損害狀態之易損性曲線交錯現象 38
圖 3-1　坡地易損性模式建立步驟 40
圖 3-2　前後期影像判識 41
圖 3-3　九二一地震前後期裸露地分布 42
圖 3-4　崩塌地變遷及分類示意 43
圖 3-5　坡面資料套疊網格示意圖 44
圖 3-6　921 新增崩塌地 44
圖 3-7　區域趨勢值與空間中隨機變動值之關係 51
圖 3-8　最佳半變異圖(指數模式) 52

圖 3-9　強地動測站實測值及 Wu 衰減率之推估值比較 54
圖 3-10　Wu 衰減率推估之全域尖峰地表加速度分布 54
圖 3-11　坡面單元示意圖 55
圖 3-12　集水區重疊法示意圖 55
圖 3-13　坡面單元繪製流程 56
圖 3-14　烏溪集水區之坡面單元 57
圖 3-15　坡面單元地質分類 58
圖 3-16　坡面方位角和震波方位角的關係 59
圖 3-17　坡向敏感因子定義 60
圖 3-18　坡面單元坡向分類 60
圖 3-19　坡面單元坡度分類 61
圖 3-20　烏溪流域集水區坡面單元 PGA 震度分布 62
圖 3-21　崩塌地坡度與深度分佈 63
圖 3-22　崩塌塊體斜面與投影面關係示意圖 64
圖 3-23　烏溪流域集水區崩塌坡面分佈 66
圖 3-24　G1A1S1 類易損性曲線 68
圖 3-25　G1A1S2 類易損性曲線 68
圖 3-26　G1A1S3 類易損性曲線 68
圖 3-27　G1A2S1 類易損性曲線 68
圖 3-28　G1A2S2 類易損性曲線 68
圖 3-29　G1A2S3 類易損性曲線 68
圖 3-30　G2A1S1 類易損性曲線 69
圖 3-31　G2A1S2 類易損性曲線 69
圖 3-32　G2A1S3 類易損性曲線 69
圖 3-33　G2A2S1 類易損性曲線 69

圖 3-34　G2A2S2 類易損性曲線.....69
圖 3-35　G2A2S3 類易損性曲線.....69
圖 4-1　建築物損害資料庫蒐集區域.....71
圖 4-2　建築物震損資料庫鏈結程序.....76
圖 4-3　建築物棟號編碼及屬性資料欄位.....76
圖 4-4　各構造系別建築物比例.....79
圖 4-5　損害建築物比例.....80
圖 4-6　各類建築物損害比例.....81
圖 4-7　研究區各類建築物全、半倒比例.....83
圖 4-8　低樓層鋼筋混凝土造之易損性曲線.....85
圖 4-9　中樓層鋼筋混凝土造之易損性曲線.....85
圖 4-10　高樓層鋼筋混凝土造之易損性曲線.....86
圖 4-11　加強磚造及磚石造之易損性曲線.....86
圖 4-12　鋼構造之易損性曲線.....87
圖 4-13　鐵皮屋之易損性曲線.....87
圖 4-14　木造之易損性曲線.....87
圖 4-15　純土造之易損性曲線.....87
圖 5-1　地震後的主要山區災害潛勢.....89
圖 5-2　示範聚落.....90
圖 5-3　平林里地理位置.....91
圖 5-4　福龜村地理位置.....92
圖 5-5　大石村地理位置.....93
圖 5-6　台 14 線地理位置與示範聚落關係.....94
圖 5-7　平林里路網.....95
圖 5-8　福龜村路網.....95

圖 5-9　大石村路網 95
圖 5-10　示範聚落之地質分類圖 96
圖 5-11　示範聚落高程圖 97
圖 5-12　示範聚落坡度圖 98
圖 5-13　示範聚落坡向圖 99
圖 5-14　烏溪流域坡面單元 101
圖 5-15　聚落影響坡面關係 102
圖 5-16　聚落影響坡面選定 102
圖 5-17　平林里之影響坡面 103
圖 5-18　福龜村之影響坡面 103
圖 5-19　大石村之影響坡面 104
圖 5-20　示範區道路里程 105
圖 5-21　平林里與福龜村間之道路影響坡面(30K+500 至 34k+000)
.....106
圖 5-22　福龜村與大石村間道路影響坡面(37K+000 至 42K+000).106
圖 5-23　聚落與道路影響坡面 107
圖 5-24　震後早期損失評估模式 108
圖 5-25　道路受坡面崩塌影響示意圖 111
圖 5-26　921 地震車籠埔斷層地理位置 114
圖 5-27　921 地震 PGA 分布圖 115
圖 5-28　烏溪集水區中各子集水區崩塌量評估(事件一) 116
圖 5-29　平林里坡面崩塌機率(事件一) 117
圖 5-30　福龜村坡面崩塌機率(事件一) 119
圖 5-31　大石村坡面崩塌機率(事件一) 122
圖 5-32　平林里與福龜村間道路坡面崩塌機率(事件一) 128

圖 5-33　平林里與福龜村間路段阻斷之危害潛勢分級(事件一).....129
圖 5-34　福龜村與大石村間道路坡面崩塌機率(事件一).....131
圖 5-35　福龜村與大石村間路段阻斷之危害潛勢分級(事件一).....132
圖 5-36　彰化斷層事件地理位置.....135
圖 5-37　彰化斷層事件 PGA 分布圖.....136
圖 5-38　烏溪集水區中各子集水區崩塌量評估(事件二).....137
圖 5-39　平林里坡面崩塌機率(事件二).....138
圖 5-40　福龜村坡面崩塌機率(事件二).....140
圖 5-41　大石村坡面崩塌機率(事件二).....143
圖 5-42　平林里與福龜村間道路坡面崩塌機率(事件二).....149
圖 5-43　平林里與福龜村間路段阻斷之危害潛勢分級(事件二).....150
圖 5-44　福龜村與大石村間路段坡面崩塌機率(事件二).....152
圖 5-45　福龜村與大石村間路段阻斷之危害潛勢分級(事件二).....153

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，除易引起山區之建物受震倒塌，若在震後即遭受颱風、豪雨的侵襲，極易引起山區道路破壞、崩塌、土石流等災害的發生，對位處菲律賓板塊和太平洋板塊交接處的臺灣，未來恐造成嚴重的山區災害威脅。而地震本身的不可預測性導致地震誘發及引起的災害難以評估，因此過去相關研究中多以統計方式發展以崩塌為主的潛勢評估，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，而較少針對山區建物、震後二次災害以及山區聚落的影響進行評估。

由於現今科技發展對於地震仍難以準確預測，前述災害潛勢中又以地震直接引致之災害最難預測。例如 1999 年發生的 921 大地震，引發車籠埔斷層與雙冬斷層發生劇烈錯動，造成極為嚴重的建物及崩塌災害，甚至讓原已脆弱的地質更不穩定，在往後的數年間每逢大雨則土石流、崩塌頻傳。這也意味著，對於地震誘發之災害潛勢，無法如颱風或豪雨造成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地震早期損失評估(Early Seismic Loss Estimation)來解決。

在地震災害評估上，地震早期損失評估的防災觀念可以利用地震易損性分析的理論來實踐。地震易損性分析(Seismic Fragility Analysis)的概念最早被地震工程專家應用於描述地震中橋梁或建物之損害可能性評估，而且易損性模式應用在地震災害評估在國內外已有成效，所發展的地震災害早期評估方法多建構在易損性理論上。以崩塌為例，所謂易崩與不易崩的分界是模糊的，在同樣條件的尖峰地表加速度與

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，將可有效地應用於地震早期損失評估。

地震對於山區災害潛勢的影響相當廣泛，除了崩塌造成的災害風險，對於山區建物倒塌、震後二次災害以及山區聚落的影響亦須有效地進行評估。本團隊在先期的研究中已建立地震引致崩塌的坡地易損性模式，進一步地，本研究將針對山區聚落中建物受震倒塌的易損性進行模式建立及分析。山區坡地崩塌及建物倒塌，將造成震後可能的山區聯外道路阻斷使得山區聚落形成孤島狀態，這些災害潛勢將對於震後山區聚落的災害防救課題造成極大的影響，而應用易損性分析發展震後山區災害潛勢評估模式，將可在震後快速進行災害損失評估，了解可能受災範圍、規模及影響，亦可應用於災前的減災規劃及作為防救策略的依據，此即本研究主要解決的課題。

第二節　工作項目與內容

一、示範區基本資料蒐集與山區聚落調查

921 集集地震為本研究用以分析地震事件造成建物損害及坡地崩塌的主要依據，計畫除蒐集示範區(車籠埔斷層鄰近的烏溪集水區鄰近區域)的基本資料以及進行聚落調查。在建物方面，將蒐集 921 地震後建物倒塌資料庫用於進行建物易損性分析，在崩塌方面則蒐集中部地區的 921 崩塌地進行先期研究的驗證。在聚落調查方面則以聚落地點人口住宅建物密集、鄰近有崩塌地或曾有崩塌災害發生、屬於崩塌威脅或建物脆弱區域、聚落地點為水保局或其他單位列為重點保護對象為原則。

二、地震誘發崩塌之坡地易損性分析

坡地易損性曲線分析是對於震度因子 x(例如尖峰地表加速度)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。中位數和標準差可藉由參數估計(parameter estimation)決定，本研究發展結合網格分析及集群分析的方法進行求解，能夠藉由廣域型災害資料發展坡地易損性曲線。

三、地震引致建物倒塌之建物易損性分析

建物易損性分析是對於震度因子(例如尖峰地表加速度)導致建物發生倒塌的機率分布函數，必須藉由建物全半倒資料庫來發展。本研究將針對 921 地震中建物全半倒資料進行蒐集判讀，建立建物致災資料。再利用自中央氣象局取得之 921 地震強地動測站之場址 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。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，可藉由克利金系統方程式進行推估。藉由建物損害資料庫和對應的尖峰地表加速度資料將可進行建物易損性分析。

四、山區災害潛勢早期評估模式建立與應用

易損性曲線的建立提供一個對於地震引致山區災害潛勢影響課題的解決方向，地震早期評估模式的建立可應用建物易損性及坡地易損性分析的結果發展。由於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，本研究將藉由示範區的實作應用，其中包括坡面單元資料庫建置、評估尺度標準化、地震速報資料接收模式、建物倒塌機率計算、坡面單元崩塌率計算、集水區崩塌潛勢評估、聚落風險評估、道路阻斷可能性、災害潛勢分級等，進而建立山區災害潛勢早期評估與應用模式。

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基本資料蒐集與山區聚落調查、坡地及建物易損性模式建立、山區災害潛勢早期評估模式建立與試作，整體流程如圖 1-1 所示。

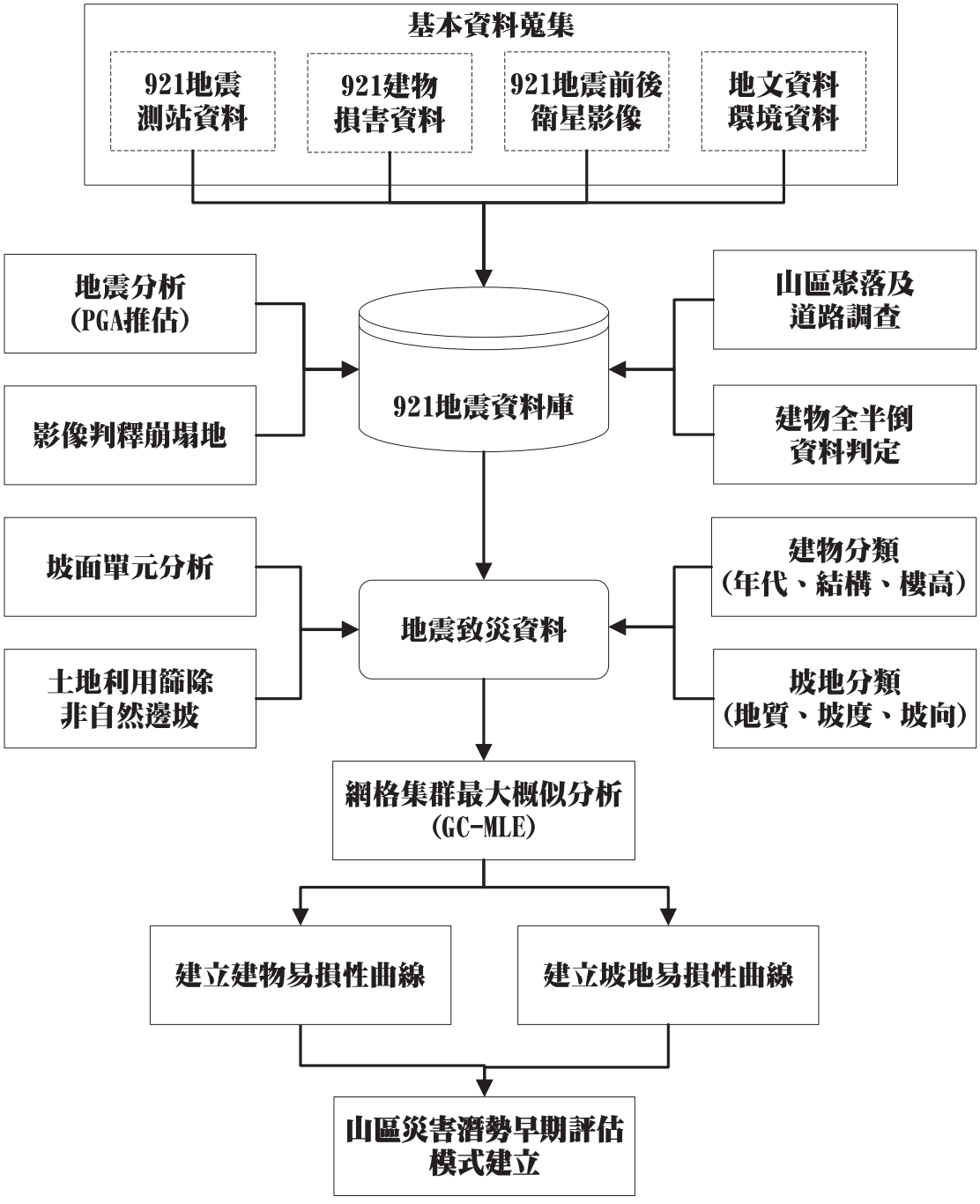


圖 1-1　計畫工作流程圖

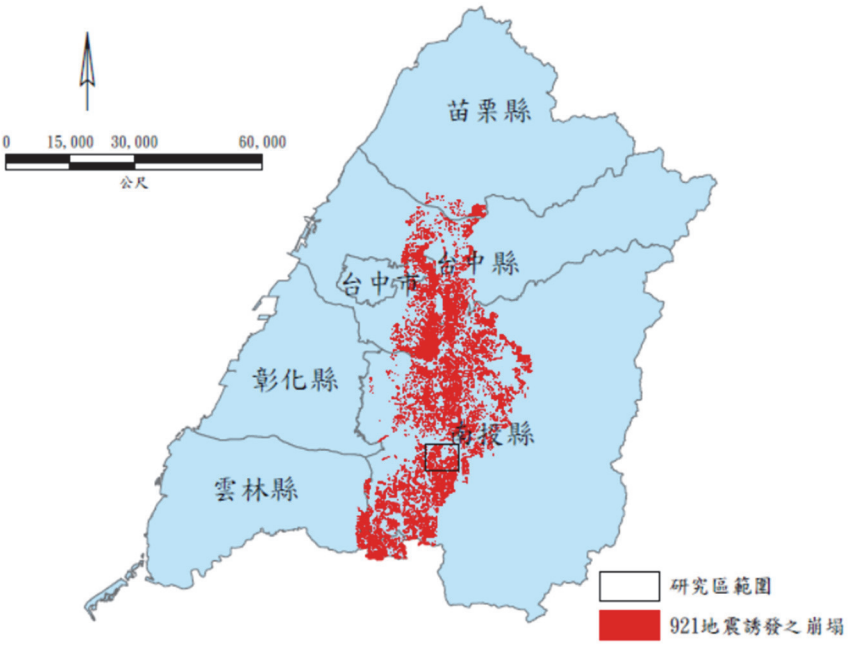
第二章　基本資料蒐集調查與易損性分析理論

第一節　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 2-1 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)：

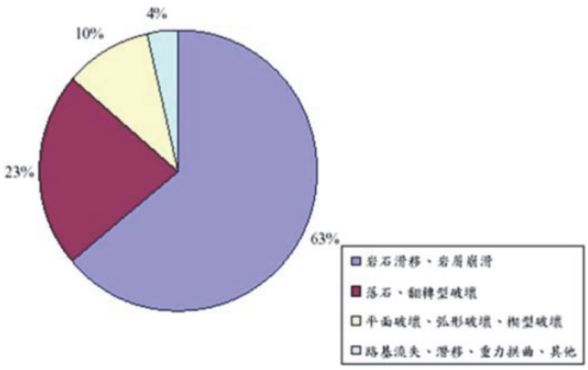
1. 崩塌地主要分佈在雙冬斷層至梨山斷層間的西部上衝斷層山地與雪山山脈；雙冬斷層以西與車籠埔斷層間，除了由頭嵙山層構成的九九峰表面崩塌外，地震崩塌並不多
2. 崩塌地特徵：
   (1) 大多為小規模或表層崩塌
   (2) 多發生在坡頂或陡崖邊緣
   (3) 多發生在節理發達之砂岩、礫岩與台地堆積等地區
3. 發生崩塌之坡度以 30°~60°最多，面積則以 15°~30°間所佔面積最大，其次為 30°~45°。
4. 地震崩塌地大多發生於坡頂。



資料來源：工研院(2000)

圖 2-1　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 2-2 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 2-2　921 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 gal(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 2-1 所示。

著名学者 Keefer(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)。因此，就我國目前之震度分級範圍，可能發生震後崩塌的震度會發生在烈震以上地區，但就防災觀點此震度分級涵蓋震度值範圍太大，將造成震後防災應用的困難。建議應仿效美日等國，將震度分級再進一步細分。

表 2-1　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

第二節　921 地震引致的建物倒塌

大規模震災後的建築物損害調查是瞭解震害程度及結構物損害情形最直接有效的方式，內政部建築研究所在 921 地震後，隨即協同國家地震工程研究中心動員國內大專院校土木、營建相關科系師生及專家學者技師投入災區進行現地建築物震害調查工作，完成初步的建築物損害調查並發表「九二一集集大地震全面勘災報告-建築物震害調查」(蕭江碧等人，1999)，是災後全面且系統性的調查報告。表 2-2 所示為該報告中各縣市統計結果，顯示 921 地震中以南投縣災情最為嚴重，其受損建築物達 4,637 棟，佔全國受損建築物約 52.86 %；其次為臺中市受損建築物超過 2,925 棟(包含臺中縣及臺中市合計)，佔全國 33.34 %。而以所定義之構造物類別分析(蕭江碧等人，1999)，亦指出鋼筋混凝土構造損害達 4,456 棟，磚造損害達 2,046 棟，純土造損害達 1,113 棟，其餘損害之構造類別尚包括鋼構造(49 棟)、木造(124 棟)、鋼骨鋼筋混凝土造(21 棟)、鐵皮屋(67 棟)及其它構造類別不同程度之破壞。除行政區及構造物類別損害統計外，該報告中亦針對損害程度、樓層別、建造年代、使用用途、平面形狀及立面形狀進行災損之統計。

在建物分類方面，內政部建築研究所於 921 地震調查中僅將構造物分 7 類。事實上，依財政部房屋稅籍資料中之房屋構造類別，構造物可達 18 類，其中除冷氣機及升降機本研究不予討論外，其餘如表 2-3 左側所示，其目的即做為不同構造房屋課稅之依據。表中右側為國家地震工程研究中心所研發之「臺灣地震損失評估系統(TELES)」(葉錦勳，2003)內所定義之 8 類構造，由於建築物資料庫係基於財政部房屋稅籍資料所建置，因此大致與其相同。由此可見構造物分類依其使用目的不同可粗可細，但調查分類過細並不必要。

表 2-2　921 地震各縣市建築物損害棟數統計

縣市別	損害建築物棟數	比例(%)	備註
南投縣	4,637	52.86 %	
臺中縣	2,815	32.09 %	為今臺中市
苗栗縣	348	3.97 %	
臺北縣	337	3.84 %	為今新北市
臺北市	157	1.79 %	
雲林縣	156	1.78 %	
彰化縣	152	1.73 %	
臺中市	110	1.25 %	為今臺中市
新竹市	24	0.27 %	
新竹縣	15	0.17 %	
桃園縣	13	0.15 %	
嘉義縣	7	0.08 %	
嘉義市	2	0.02 %	
總計	8,773	100.00 %	

資料來源：蕭江碧等人(1999)

表 2-3　不同建築物構造類別

<table>
<tr><th colspan="2">財政部房屋構造分類</th><th>臺灣地震損失評估系統</th></tr>
<tr><td colspan="2">鋼骨造(P)</td><td rowspan="2">鋼構造</td></tr>
<tr><td colspan="2">鋼骨混凝土造(A)</td></tr>
<tr><td colspan="2">鋼骨鋼筋混凝土造(S)</td><td>鋼骨鋼筋混凝土造</td></tr>
<tr><td colspan="2">鋼筋混凝土造(B)</td><td>鋼筋混凝土造</td></tr>
<tr><td colspan="2">預鑄混凝土造(T)</td><td>預鑄混凝土造</td></tr>
<tr><td colspan="2">加強磚造(C)</td><td>加強磚造</td></tr>
<tr><td colspan="2">鋼鐵造(U：H 型鋼為樑柱)</td><td rowspan="2">輕鋼構造(鐵皮屋)</td></tr>
<tr><td colspan="2">鋼鐵造(Ｊ：C 型鋼等組成之桁架式架構)</td></tr>
<tr><td rowspan="5">木石磚造</td><td>硓𥑮石造(G)</td><td rowspan="4">木造</td></tr>
<tr><td>卵石混凝土造(H)</td></tr>
<tr><td>雜木以外(D)</td></tr>
<tr><td>雜木(E)</td></tr>
<tr><td>磚石造(F)</td><td rowspan="4">未加勁磚石造</td></tr>
<tr><td rowspan="3">土竹造</td><td>竹造(L)</td></tr>
<tr><td>土磚混合造(K)</td></tr>
<tr><td>純土造(R)</td></tr>
</table>

資料來源：本研究整理；括號內英文字母為稅籍資料編碼代號。

921 地震建築物損害調查由於時間匆促僅針對震害明顯者予以調查，造成欠缺母數資料而無法進行震害特性分析及統計。為進一步了解地震中建築物損害特性及補足建築物母數，內政部建築研究所即以受災戶慰問金印領清冊(以下簡稱受災戶慰問金清冊)連結各縣市房屋稅籍資料相互比對建置「921 建物毀損資料庫」(蕭江碧、李秉乾與周天穎，2001)。該資料庫有別於前述 921 地震建築物損害調查資料，係以「戶」為基礎單位之資料庫，主因在於震後受災戶之慰問金係以「戶」為發放對象，並以內政部營建署(1999)頒佈之「九二一大地震受災區建築物危險分級評估作業規定」定義建築物全、半倒分級標準。由於該資料庫採用受災戶慰問金清冊所統計建築物全、半倒資料，提供了災後唯一完整及較可靠之建築物震害資訊，如表 2-4 所示，該資料庫係將受災戶慰問金清冊依住址得到唯一的門牌數做為統計量。

表 2-4　內政部建築研究所統計之 921 地震各縣市建築物損害戶數

縣市	門牌數	比例(%)	全倒	比例(%)	半倒	比例(%)	備註
南投縣	44,880	53.267 %	23,760	57.115 %	21,120	49.514 %	
臺中縣	29,494	35.006 %	13,799	33.171 %	15,695	36.795 %	今臺中市
臺中市	5,656	6.713 %	2,218	5.332 %	3,438	8.060 %	今臺中市
彰化縣	1,062	1.260 %	417	1.002 %	645	1.512 %	
臺北縣	976	1.158 %	238	0.572 %	738	1.730 %	今新北市
雲林縣	958	1.137 %	513	1.233 %	445	1.043 %	
苗栗縣	720	0.855 %	361	0.868 %	359	0.842 %	
臺北市	160	0.190 %	103	0.248 %	57	0.134 %	
嘉義縣	148	0.176 %	27	0.065 %	121	0.284 %	
桃園縣	130	0.154 %	130	0.313 %	0	0.000 %	
嘉義市	46	0.055 %	25	0.060 %	21	0.049 %	
新竹縣	18	0.021 %	6	0.014 %	12	0.028 %	
臺南縣	5	0.006 %	2	0.005 %	3	0.007 %	
基隆市	2	0.002 %	1	0.002 %	1	0.002 %	
總計	84,255	100.00 %	41,600	100.00 %	42,655	100.00 %	

資料來源：蕭江碧、李秉乾與周天穎(2001)

前述建築物損害調查及統計資料在後續易損性分析上尚難以直接應用。為了解決此一問題，李秉乾等人(2005a)將內政部建築研究所建置之 921 地震建築物損害資料庫以房屋稅籍資料為基礎，進一步利用建築物面積屬性轉換而建立以「樓地板面積」為單位之 921 地震建築物損害資料庫。該資料庫結合「建築物資料庫」及「建築物損害資料庫」，明確統計出各縣市及各類結構物之建築物損害百分比。

第三節　示範區基本資料蒐集

壹、研究地區說明

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 2-3 所示。

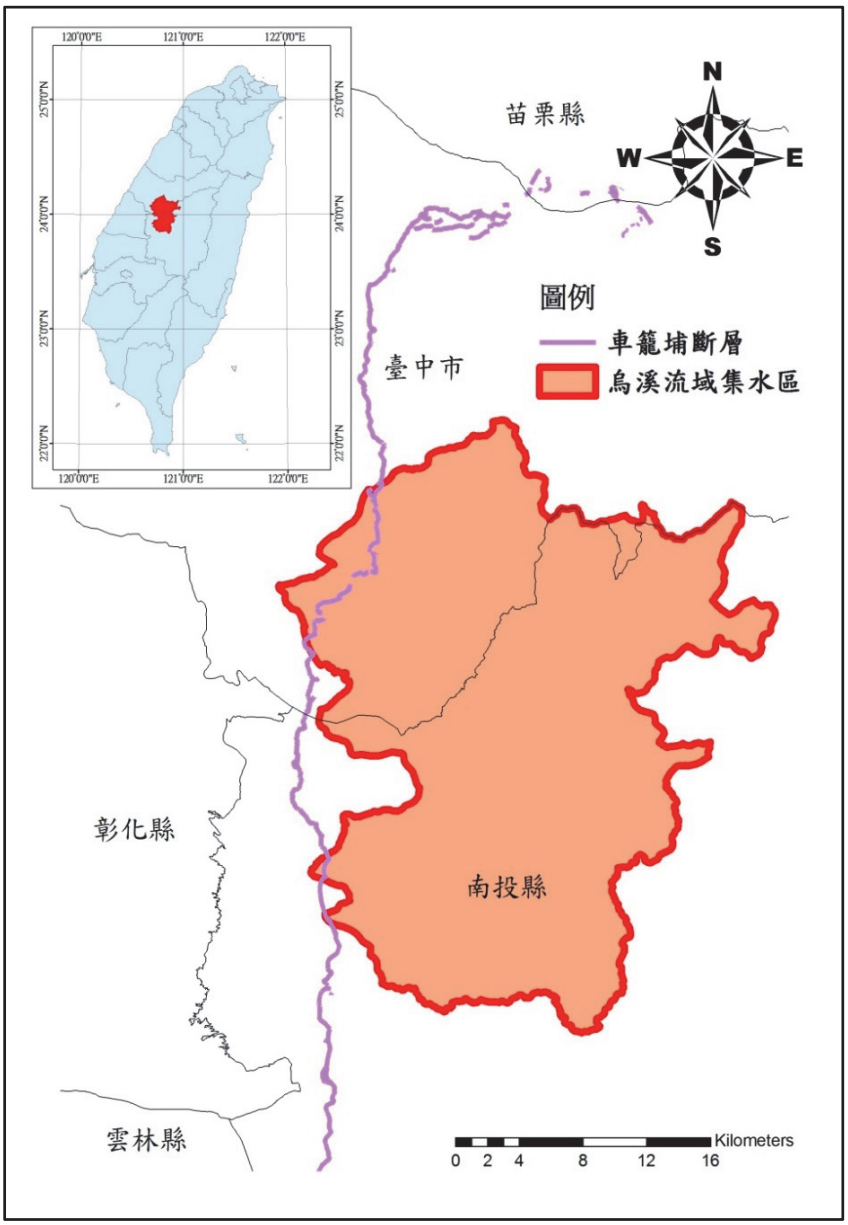


圖 2-3　研究區域

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 2-5 所示。

表 2-5　環境資料庫之類型和檔案格式

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

貳、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：

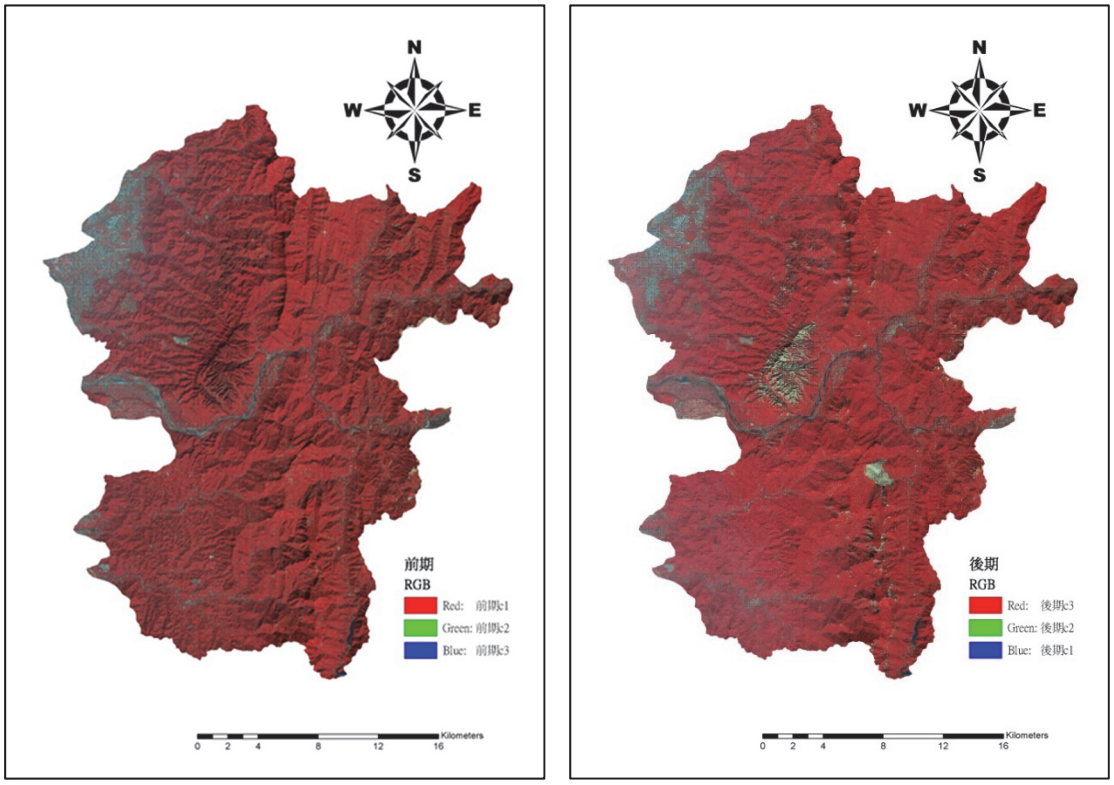
1. 環境因子：坡度、坡向、地質；
2. 致災因子：最大地表加速度(PGA)；
3. 崩塌資料：地震前後期崩塌面積；
4. 篩選資料：排除不必要因素如衛星影像之人為開發地、河道、陰影區等。

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(Digltal 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

本研究所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 2-4 所示。



拍攝時間：1999/01/28　　拍攝時間：1999/10/31

圖 2-4　921 地震前後期衛星影像

三、地震測站資料蒐集

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±2g(1g＝981 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。大幅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。本研究自 TSMIP 中蒐集經中央氣象局校正且可信度較高之 48 個烏溪集水區及其附近的強地動測站資料，如圖 2-5 所示。各測站之站碼、經緯度、XY、高程、三軸向 PGA 等資料如表 2-6 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)。

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，對於地震引致的災害主要係水平向地震力所造成，因此某測站之場址 PGA 值對於坡地崩塌或建物倒塌多以較為重要之雙軸水平向 PGA 進行探討。過去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，本研究採用幾何平均值定義之，可表示如下：

$$S_{site} = \sqrt{S_x S_y} \tag{2-1}$$

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 2-6 所示。

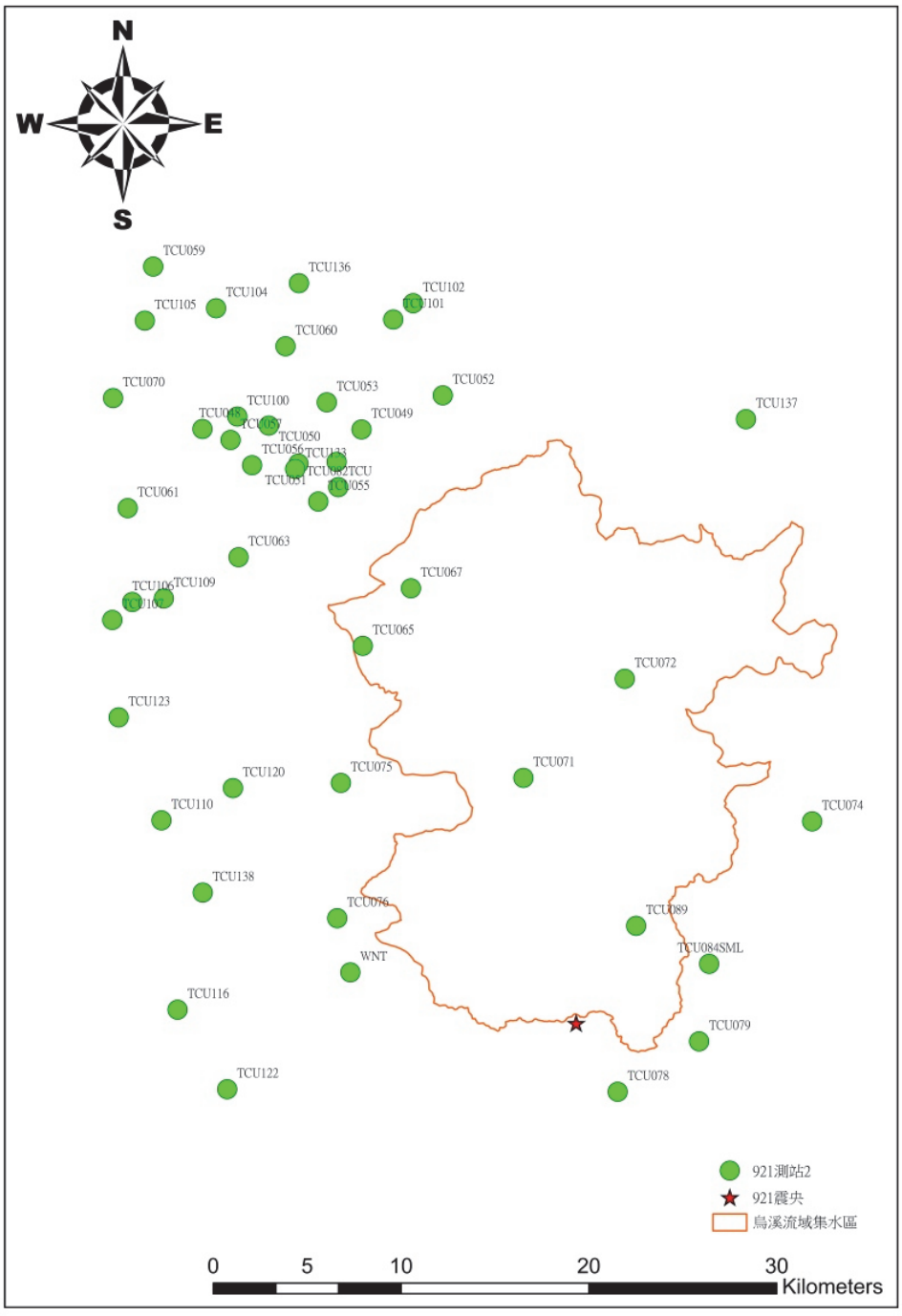


圖 2-5　烏溪流域附近地震地震觀測台網

表 2-6　研究區域周邊 921 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： $PGA = \sqrt{PGA_N \times PGA_E}$ ，單位為 gal=cm/sec^2

第四節　示範區環境因子資料處理

壹、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 2-6 至圖 2-8 所示。

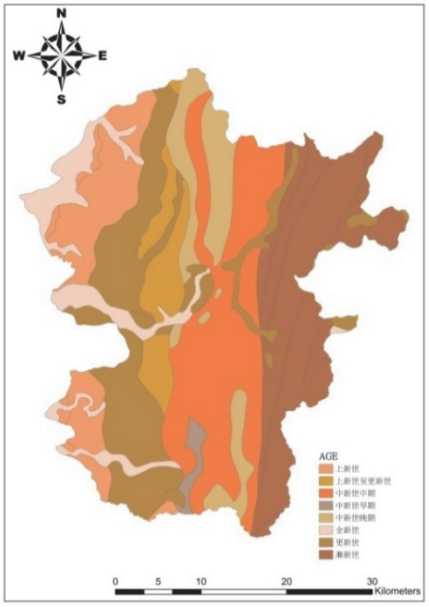


圖 2-6　年代圖

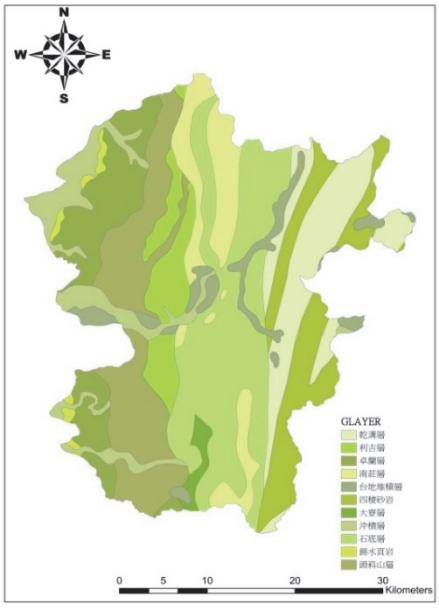


圖 2-7　地層圖

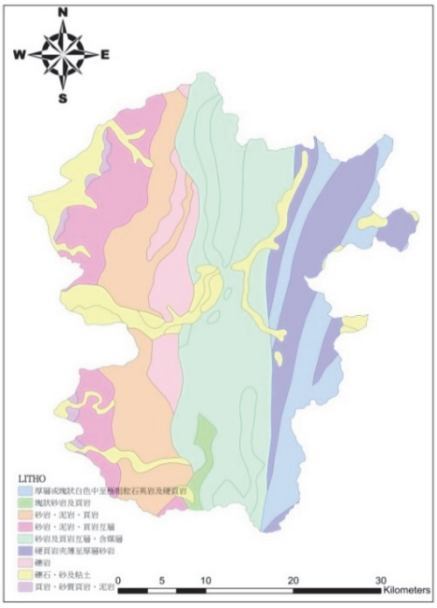


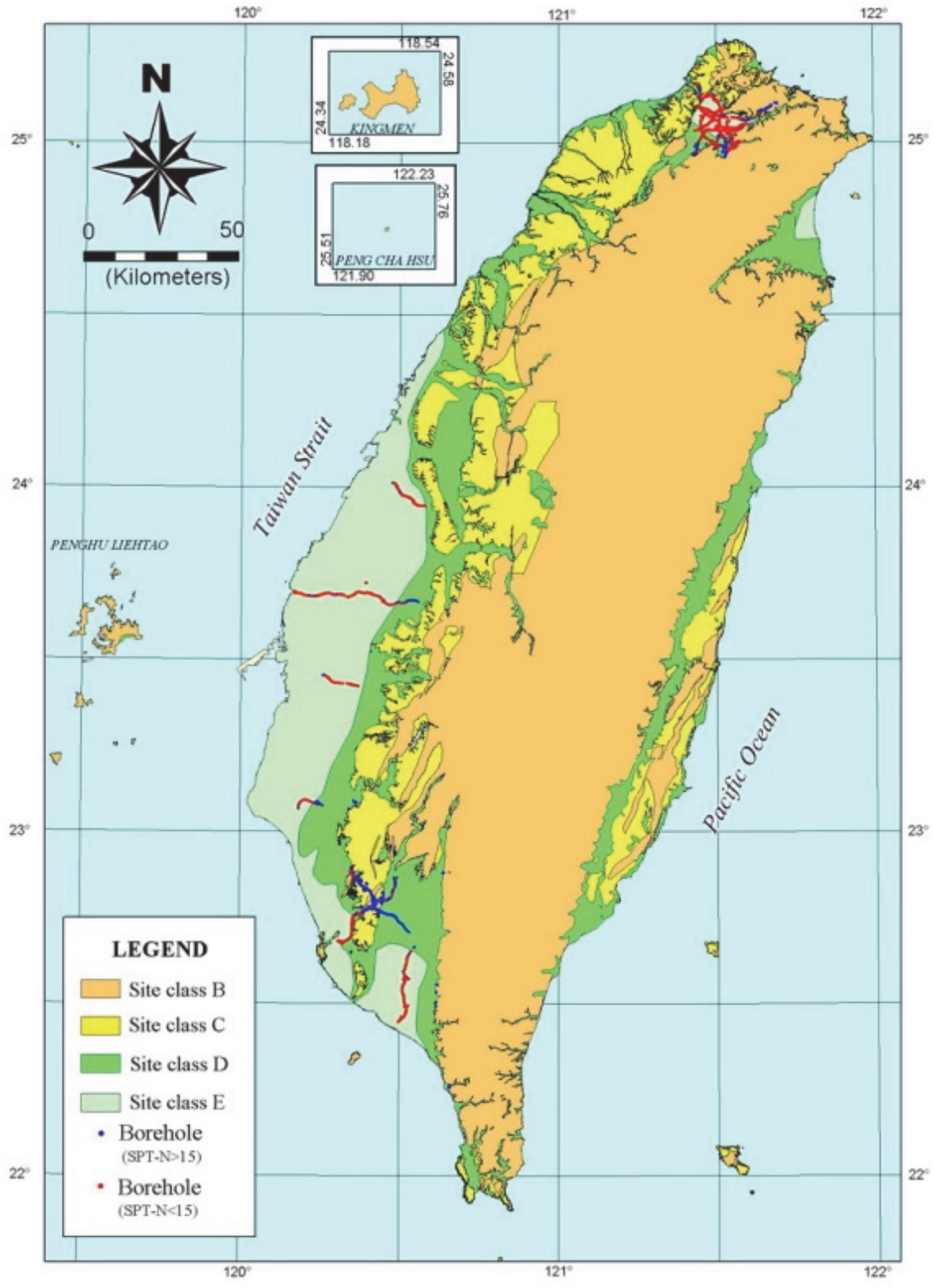
圖 2-8　岩性圖

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 2-7 及圖 2-9 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 2-7　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 us ≧2000 psf (us≧100 kPa) or N≧ 50 blows/ft	上新世及更新世地層，包含礫石層、 火山角礫岩、火山碎屑岩…等，以及紅土台地
D	Stiff soils, shear velocity is from 180 to 360 m/s, Stiff soil with undrained shear strength 1000 psf≦us≦2000 psf (50 kpa≦us≦ 100 kPa), or 15≦N≦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 undarined shear strength us < 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 2-9　李錫堤教授分類之地質圖

貳、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 2-10 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)。

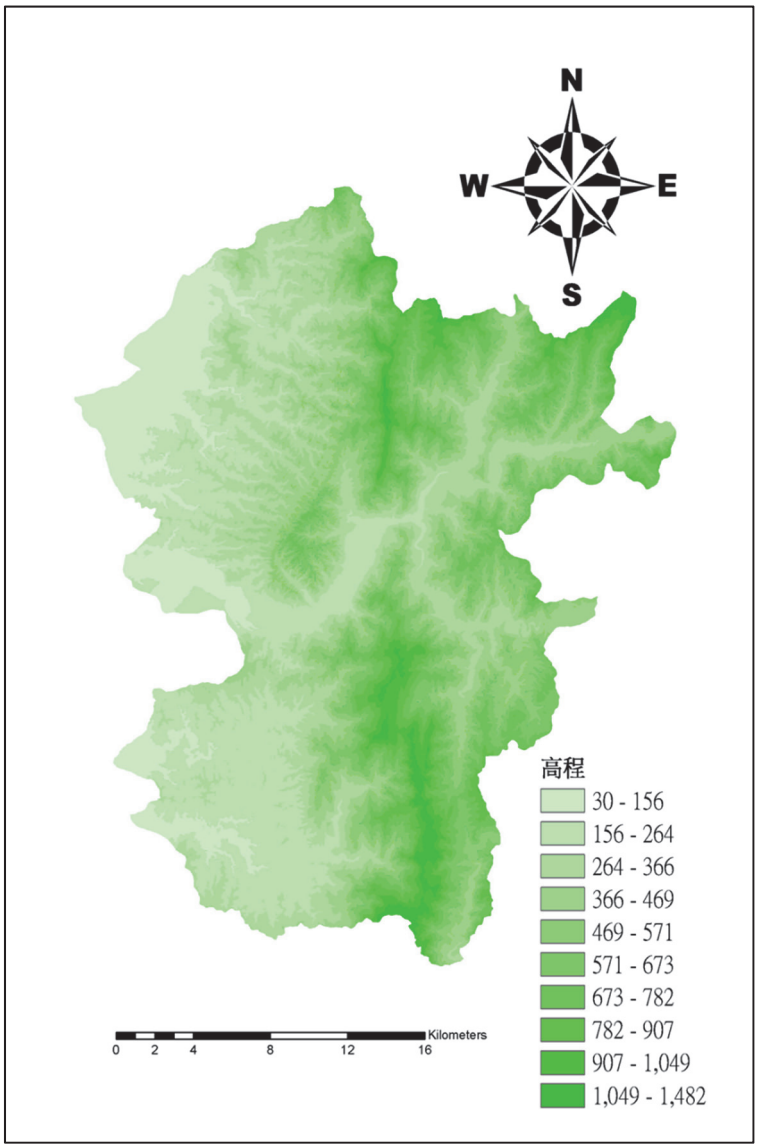


圖 2-10　研究區高程圖

參、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。坡向可以烏溪流域 DEM 之資料計算各網格坡向，如圖 2-11 所示。

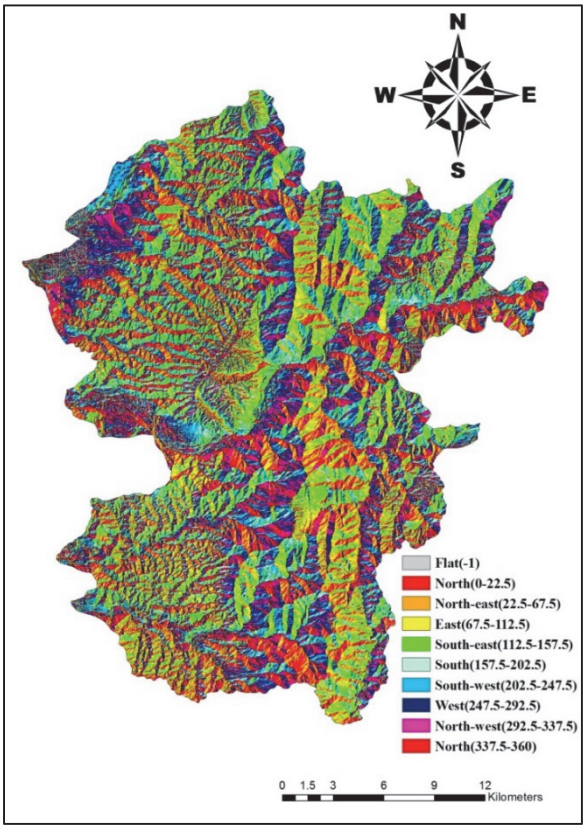


圖 2-11　研究區坡向圖

肆、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 2-12 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(°)或是百分比型式(%)。

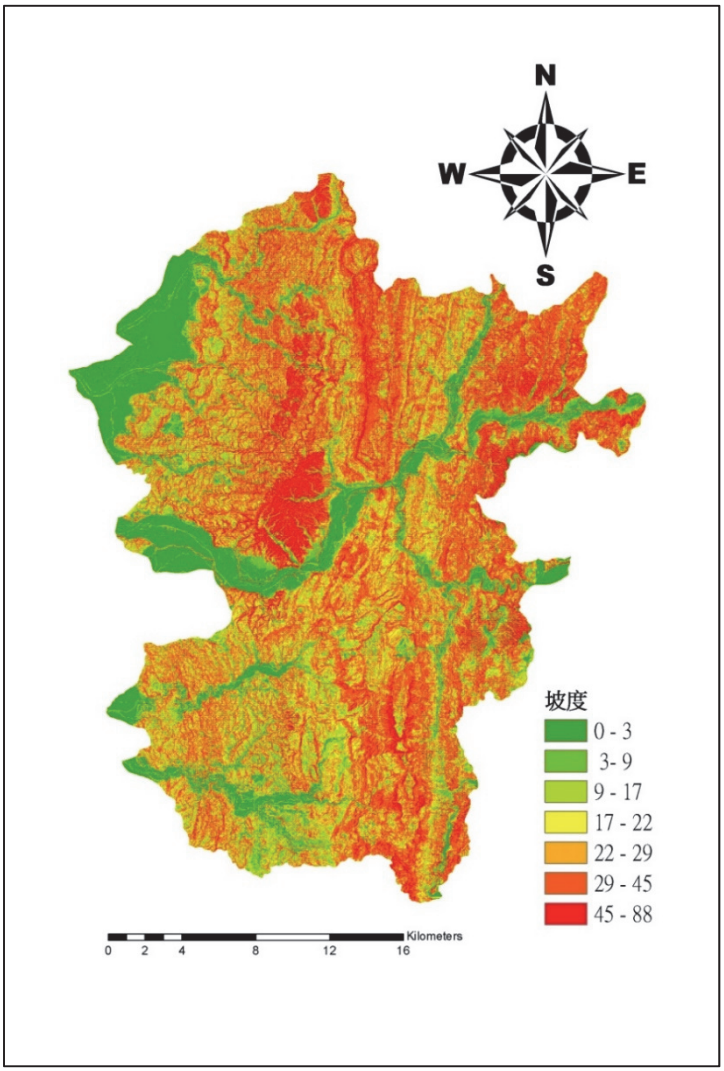


圖 2-12　研究區坡度圖

伍、土地利用資料

為探討集水區流域內坡地潛在之自然崩塌，須刪除無崩塌潛勢區域或經人為擾動之非自然崩塌區域；前者如河流、河道、湖泊等，後者如建物、農地、利用地等。尤其是後者區域於崩塌地判釋時，在崩塌地、河谷、建地的光譜值會相當接近，造成影像判釋上容易混淆與誤判。本研究採用內政部國土測繪中心所繪製 95 年土地利用調查圖資，濾除無崩塌潛勢或非自然崩塌區域，如圖 2-13 所示。

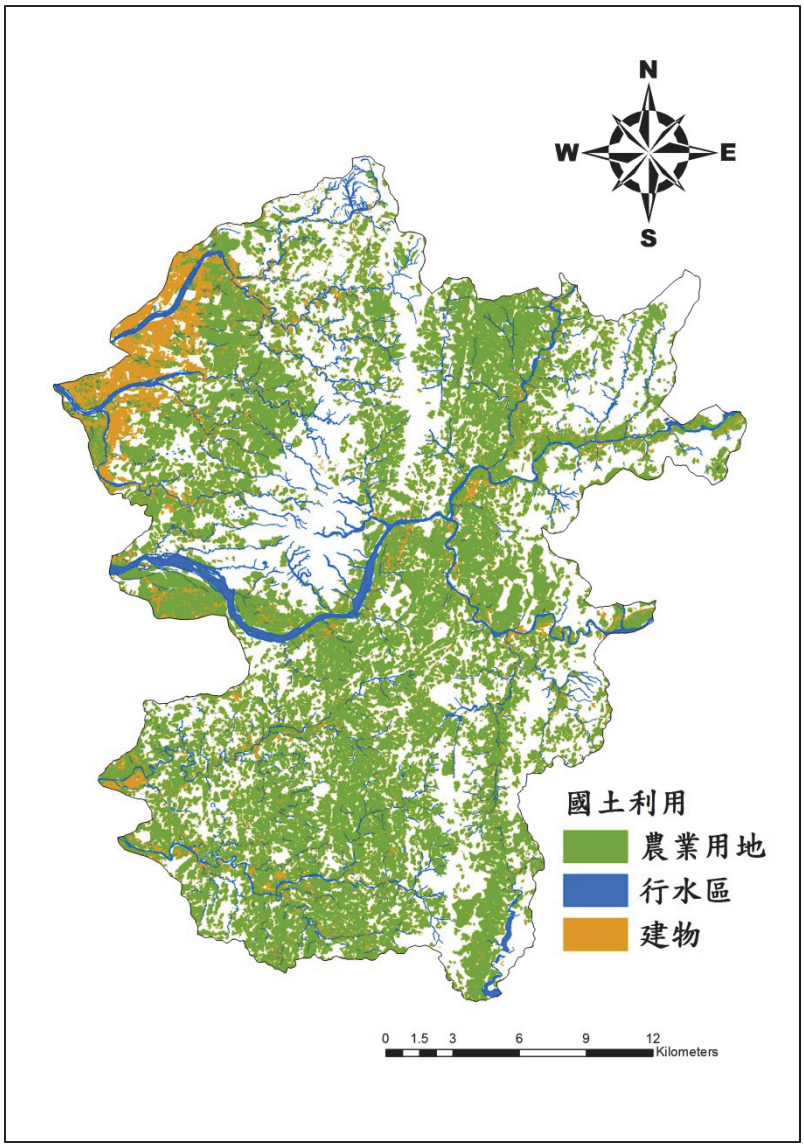


圖 2-13　研究區濾除範圍

陸、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，作為本研究坡向敏感因子資料選取的參考依據，研究區的順向坡分布如圖 2-14 所示。

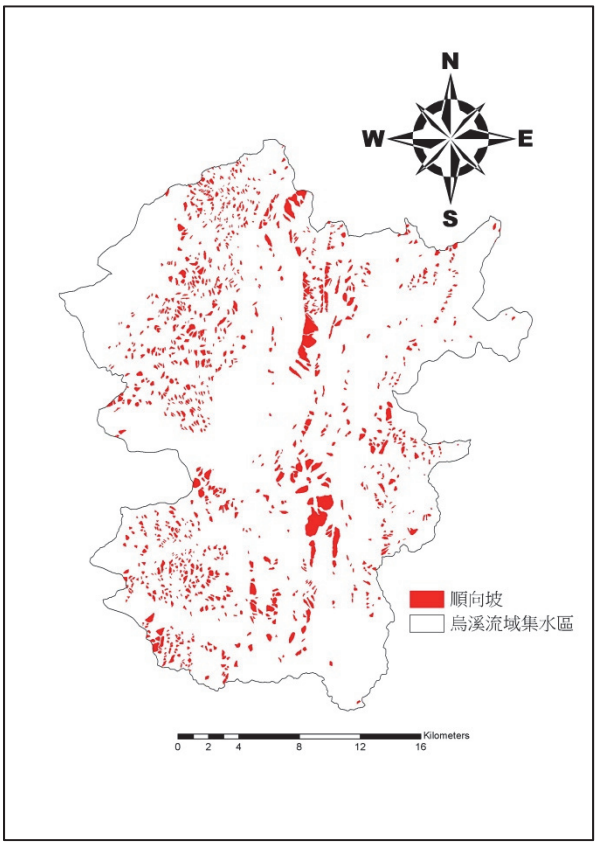


圖 2-14　研究地區順向坡分布圖

第五節　易損性分析理論

壹、易損性模式的發展方法

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，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。在地震領域發展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，即藉由過去發生之災害事件資料取得致災資料，再假定機率分布配合統計推論來決定模式。

經驗分析法係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，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，基於有限損害資料還需要進行適當的分類或分級。

事件發生可能性(例如本研究探討之崩塌與建物倒塌)與地震因子之關係，可藉由易損性分析原理建立特定地震因子下某類坡地對於致災因子可能引致崩塌發生之機率，或是特定地震因子下某類建物對

於致災因子可能引致倒塌發生之機率。這個關係建立在有良好致災資料所建置之災損資料庫。對於廣域崩塌評估即可依據不同之地文分類及驅動力指標建立不同類別之坡地易損性曲線。以坡地崩塌而言，可用來進行坡地分類之地文因子例如地質、坡度、坡向、斷層距...等。而以建物倒塌而言，可用來進行建物分類之地文因子例如結構類型、建造年代、樓層高度...等。

貳、經驗易損性分析模式

在經驗分析法中損害調查紀錄的可用性是影響易損性分析可靠度的重要關鍵。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模式，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模式。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，例如「地域單元法」和「完全調查樣本法」。

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(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)。最大概似估計法是將每個調查樣本可能存在的損害分級是「發生」或「沒有發生」的紀錄納入易損性分析中，因此不會有樣本空間尺度變異的問題。某損害程度之伯努利試驗概似函數可表示如式(2-1)所示：

$$L_j(c_j,\zeta_j)=\prod_{i=1}^{N}[F_j]^{n_i}[1-F_j]^{1-n_i} \tag{2-1}$$

上式中，N 為調查之受災本體總數；c_j 和 ζ_j 分別為第 j 類損害程度之中位數及標準差；n_i 為伯努利隨機變數指標(Bernoulli random variable)，表示在致災因子下，若第 n 個受災本體達到第 j 類損害程度，$n_i=1$；否則，$n_i=0$。對於對數常態分布之之中位數及標準差，可經由求取式(2-1)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(2-2)所示：

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

其中，f_j 為對數常態分布之機率密度函數；c_j 為中位數(median)；ζ_j 為

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：

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

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

$$erf\left(x\right)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-t^2}dt \tag{2-4}$$

當其中雙估計參數決定後，即可利用「標準常態累積分布函數」推求損害機率與累積分布函數，也就是第 j 類損害程度之易損性曲線(fragility curve)。中位數和標準差之決定可透過最大概似法進行求解。傳統的最大概似估計法將具隨機特性的每次事件發生(樣本)的概似值皆納入分析之中，進而得到事件發生與否的概似函數。以最大概似估計法評估對數常態累積分布之雙估計參數可依致災資料之事件分布型態建立其概似函數。然而，因探勘資料型態的不一致性及隨機特性，亦可結合集群分析(clustering analysis)得到一致性之致災資料。所謂一致性即包含空間影響及權重大小的一致性，這類一致性的致災資料可透過網格分析結合集群分析來達到並得以進行最大概似估計，此即網格集群最大概似法(謝孟勳，2013)，而若無資料集群的需求，則可直接以樣本致災資料求取。此外，依據易損性曲線分析原理，亦可發展多種損害狀態之易損性曲線，以下分別以網格集群最大概似法介紹二項分布型以及多項分布型的原理。

一、二項分布型

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

$$f_{kj}(X) \equiv \binom{X}{x_k} [F_j]^{x_k} [1-F_j]^{X-x_k} \tag{2-5}$$

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

$$L_j^B(c_j,\zeta_j) = \prod_{k=1}^{K_g} \binom{X}{x_k} [F_j]^{x_k} [1-F_j]^{X-x_k} \tag{2-6}$$

上式中，K_g 為致災資料數量；X 為每個致災資料的坡地總面積，x_k 為第 k 個資料點之崩塌面積。式(2-6)中，二項函式分別代表發生(左項)與未發生(右項)之崩塌機率。因此，對於崩塌易損性曲線之中位數和標準差，式(2-6)可經由求取概似函數之最大值進行估計。藉由取對數後一階偏導函數求解雙估計參數，聯立方程表示如下：

$$\frac{\partial \ln L_j^B(c_j,\zeta_j)}{\partial c_j} = \frac{\partial \ln L_j^B(c_j,\zeta_j)}{\partial \zeta_j} = 0 \tag{2-7}$$

上式之推導須引入標準化參數 λ_{kj} ，即

$$\lambda_{kj} = ln(x/c_j)/\zeta_j \tag{2-8}$$

即可導出第 j 個損害分級之非線性聯立方程式如下：

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{K_g} R_{kj} \left\{ \dfrac{-e^{-\frac{1}{2}\lambda_{kj}^2}}{1+erf\left(\dfrac{\lambda_{kj}}{\sqrt{2}}\right)} \right\} + \sum_{k=1}^{K_g} (1-R_{kj}) \left\{ \dfrac{e^{-\frac{1}{2}\lambda_{kj}^2}}{1-erf\left(\dfrac{\lambda_{kj}}{\sqrt{2}}\right)} \right\} = 0 \\ \sum_{k=1}^{K_g} R_{kj} \left\{ \dfrac{-\lambda_{kj} e^{-\frac{1}{2}\lambda_{kj}^2}}{1+erf\left(\dfrac{\lambda_{kj}}{\sqrt{2}}\right)} \right\} + \sum_{k=1}^{K_g} (1-R_{kj}) \left\{ \dfrac{\lambda_{kj} e^{-\frac{1}{2}\lambda_{kj}^2}}{1-erf\left(\dfrac{\lambda_{kj}}{\sqrt{2}}\right)} \right\} = 0 \end{cases} \tag{2-9}$$

其中；

$$R_{kj} = x_{kj} / X_k \tag{2-10}$$

上式中，x_{kj} 表示第 k 個群組中第 j 個損害分級之崩塌面積；X_k 表示第 k 個群組之總面積。式(2-10)即為以第 k 個集群內之崩塌率表示之最大概似估計聯立方程。若每個集群之致災資料可得到，包含集群之 PGA 值和崩塌率或建物倒塌率，則易損性曲線之 c_j 和 ζ_j 即可以求解。另一方面，由式(2-10)亦可知，當資料不需要進行集群分析時，直接消除方程式中每個集群總數 X_k 求解即可。

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

二、多項分布型

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

$$f_k\left(X;P_0,P_1,\cdots,P_j\right)\equiv\binom{X}{x_{k0},x_{k1},\cdots,x_{kJ}}\prod_{j=0}^{J}\left[P_j\right]^{x_{kj}} \tag{2-11}$$

其中；

$$\sum_{j=0}^{J}x_{kj}=X \tag{2-12}$$

式(2-11)中，P_j 為第 j 個損害程度至第 j+1 個損害程度的區間機率，即：

$$P_j=F_j\left(x;c_j,\zeta_j\right)-F_{j+1}\left(x;c_{j+1},\zeta_{j+1}\right) \tag{2-13}$$

且；

$$\sum_{j=0}^{J}P_j=1 \tag{2-14}$$

其中 F_0=1 且 F_{J+1}=0。對於 X 次試驗中所有損害程度之聯合機率分布，可以式(2-11)之聯合機率質量函數來表達。因此，概似函數 L^M 則可表示為：

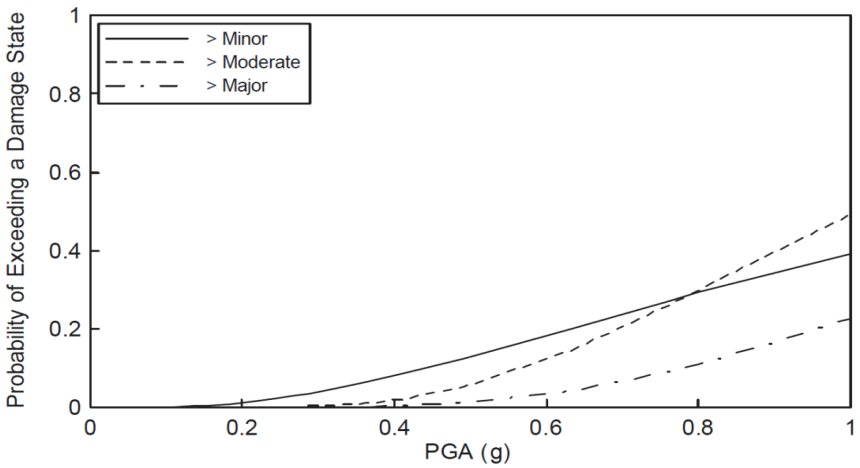
$$L^M\left(c_1,c_2,\cdots,c_j,\zeta_1,\zeta_2,\cdots,\zeta_j\right)=\prod_{k=1}^{K}\left(\begin{matrix}X\\x_{k0},x_{k1},\cdots,x_{kj}\end{matrix}\right)\prod_{j=0}^{J}\left[P_j\right]^{x_{kj}} \quad (2\text{-}15)$$

其中 K 為資料數量。對於不同損害狀態易損性曲線之 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：

$$\frac{\partial \ln L^M\left(c_1,c_2,\cdots,c_j,\zeta_1,\zeta_2,\cdots,\zeta_j\right)}{\partial c_j}=\frac{\partial \ln L^M\left(c_1,c_2,\cdots,c_j,\zeta_1,\zeta_2,\cdots,\zeta_j\right)}{\partial \zeta_j}=0 \quad (2\text{-}16)$$

以建築物倒塌為例，本研究中建築物損害程度分為三類，即 $J=3$，包含事件未發生($j=0$)、發生半倒($j=1$)及發生全倒($j=2$)。若每個集群之致災資料可得到，包含集群之 PGA 值和崩塌率或建物倒塌率，則易損性曲線之 c_j 和 ζ_j 即可用式(2-16)求其數值解。與二項分布型相同，當資料不需要進行集群分析時，直接消除方程式中每個集群總數 X_k 求解即可。當參數決定後，即可繪製依據強地動因子之事件發生機率密度函數的累積機率分布函數。

前述曾說明二項分布型的特徵，而多項分布型的特徵是：損害狀態 j 之間具關連性，因此適用於受災本體具不同程度且連續的損害狀態，例如建築物受震後的損害過程，常是以連續位移的多寡來定義損害狀態。因此，理論上不同損害狀態之易損性曲線是不可能會發生互相交錯的情形，如圖 2-15，若發生交錯則表示致災資料庫中二者的統計樣本發生了精密度不同而產生的誤差，而使得曲線不合理。這也表示每次事件的結果是多個可能性中取一時，為使其精密度相同且避免交錯的不合理現象，其標準差則需定義為相同，即 $\zeta=\zeta_j$。



（出處：Shinozuka *et al.*, 2003）

圖 2-15　不同損害狀態之易損性曲線交錯現象

本研究將致災因子與事件發生的關係假設為對數常態分佈，其隨機變量即為 PGA 指標。對於坡地易損性分析利用二項分布型建立坡地受地震引致崩塌之概似函數。對於建物易損性分析則利用多項分布型建立建物受地震引致倒塌之概似函數。對於某個受災事件，二項分布型表達在致災因子作用下僅有二個可能的損害結果，即發生與不發生的二元模式，且每次試驗皆是獨立且互斥的，所表達之涵義為某 PGA 下災害發生有多少可能性。因此對於崩塌機率評估之結果，指的是某個坡面單元在某 PGA 下有多少機率可能會發生崩塌。多項分布型則表達在致災因子作用下坡地有多個可能的損害結果，但僅會發生其中一個，所描述建築物損害機率之意義，係指建築物在某 PGA 下達到或超越某種損害狀態的機率。上述兩種模式，所有的事件資料皆可利用網格分析來定義致災資料的崩塌或建物倒塌。以資料取樣觀點，所有致災資料被災害發生與不發生所定義，由此兩元素來推論事件分布情形。因此致災資料也可用連續型或不連續型資料表示，連續型資料可用發生率(例如崩塌率或倒塌率)表示，不連續型則可用 0/1 定義是否發生；前者即可用網格法推求崩塌率，後者可用坡面法評估是否發生崩塌。

第三章　地震誘發崩塌之坡地易損性分析

第一節　坡地易損性曲線的建立流程

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。

在進行坡地易損性分析中，必須要考量的另一特性即是坡地崩塌的幾何特性。對於網格崩塌資訊，目前已可藉由高精度衛星影像判釋得到，但此資訊未必完全符合地形特性，同時具有一定的不確定性。因此，本研究考量地形特徵單元與評估合理性以坡面單元(slope unit)分析，坡面單元因具有符合地形特徵之特點，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影響範圍及機率評估。

坡地易損性曲線建立流程如圖 3-1 所示，除研究區域基本資料蒐集外，本研究基於九二一地震事件，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、事件前後期衛星影像等。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。藉由坡面單元的崩塌定義，可將各類坡地分類資料以坡面法進行坡地易損性分析，即可求取易損性曲線。

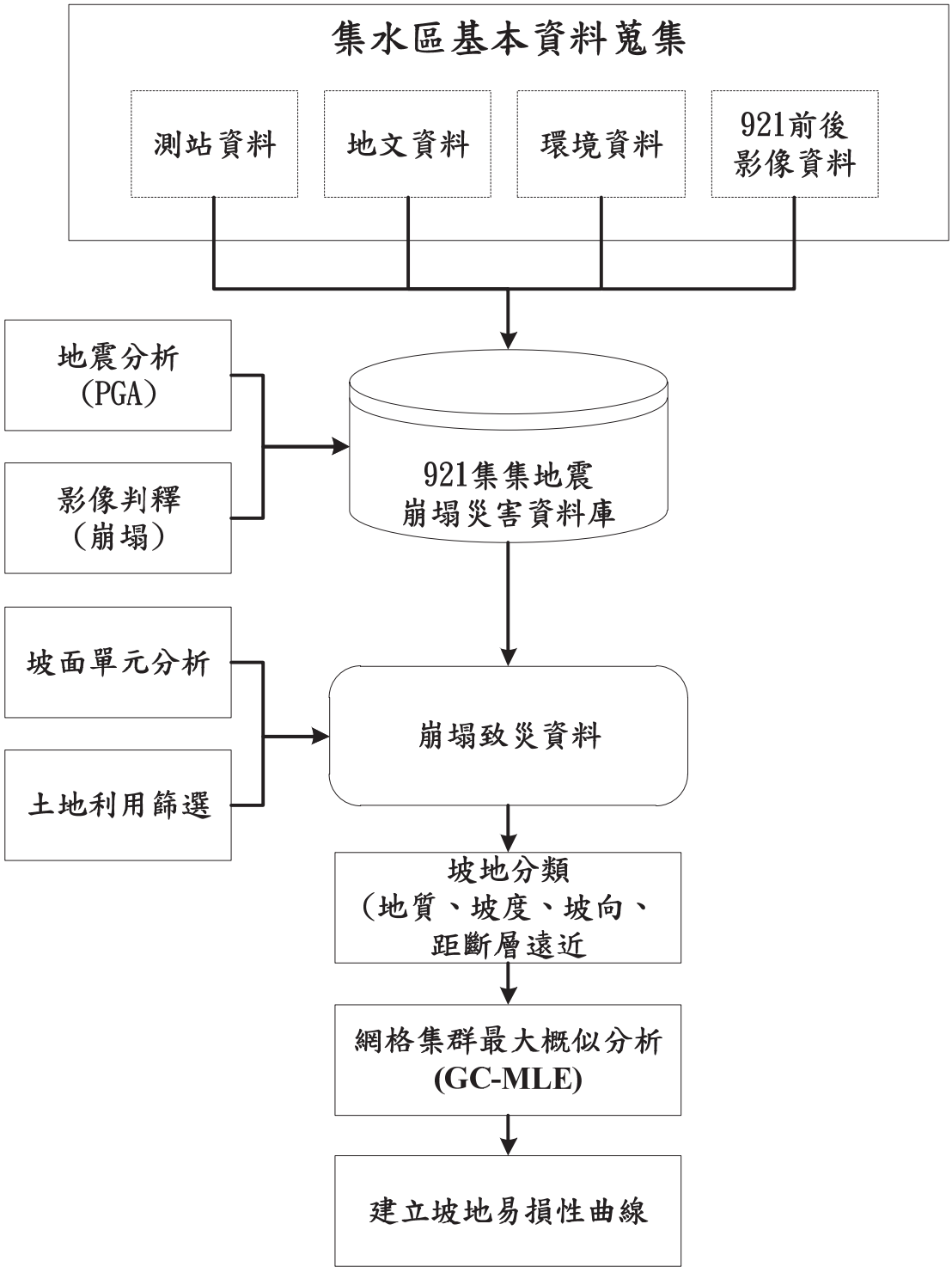
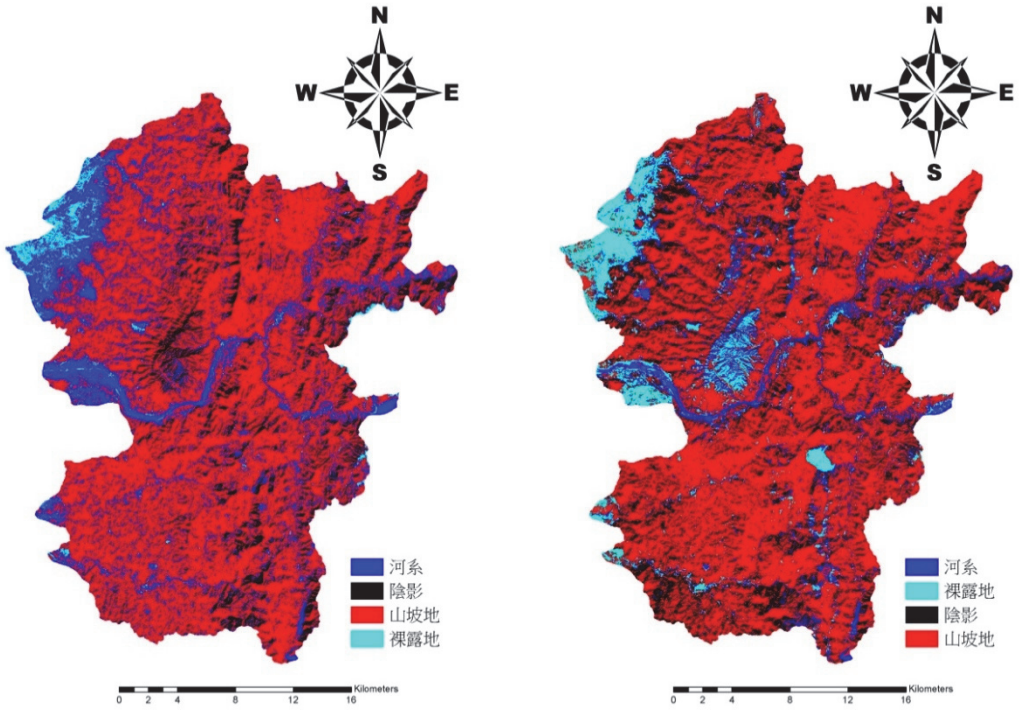


圖 3-1　坡地易損性模式建立步驟

第二節　崩塌地判識與淬取

壹、影像判釋

本研究利用 SPOT-2 衛星影像進行崩塌地判釋，使用九二一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 3-2 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。



(a)前期影像　　(b)後期影像

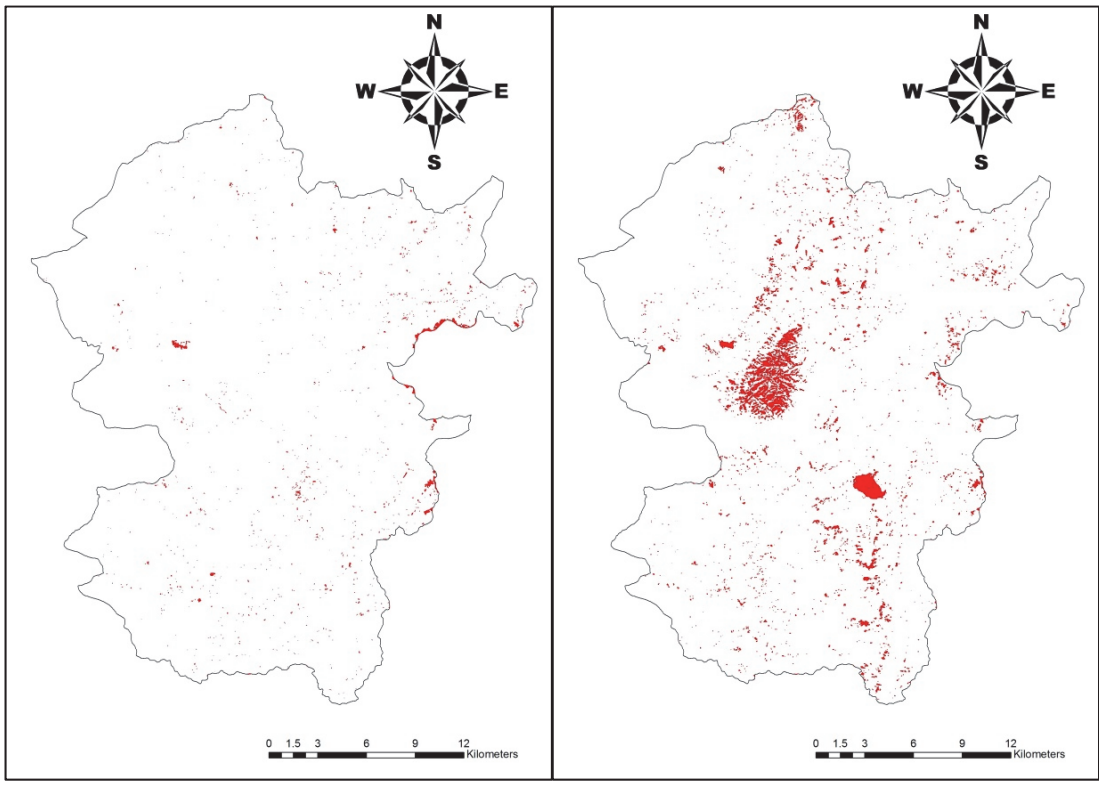
圖 3-2　前後期影像判識

貳、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 3-3 所示。裸露地面積統計如表 3-1。

表 3-1　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 3-3　九二一地震前後期裸露地分布

參、新增崩塌地

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

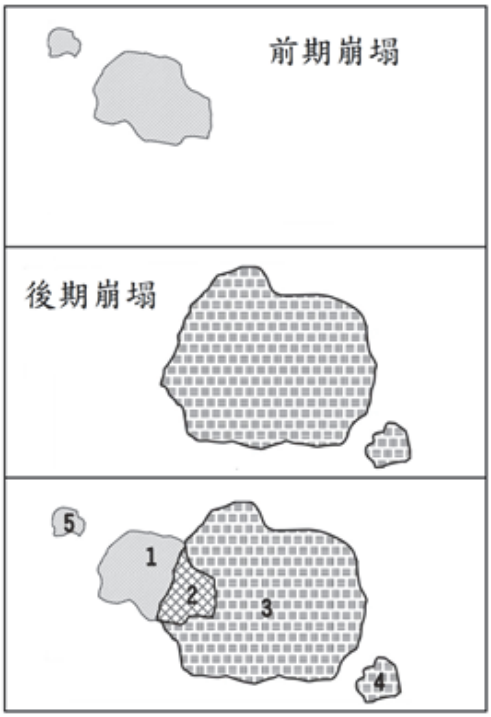
(一)崩塌復育：(1)與(5)

(二)舊有崩塌地：(2)

(三)舊有崩塌地擴大：(3)

(四)新生崩塌地：(4)

而其定義「新增崩塌地」，則為「舊有崩塌地擴大」加上「新生崩塌地」的部分，即(3)與(4)。上述之分類方法，對於前後期崩塌地變遷情形，在技術層面上具有清晰的定義，可由此判定某區塊是否確實發生崩塌。然而，雖然在大部份的情形下，舊有崩塌地地的擴大確實與事件相關，但並無法確切知道舊有崩塌地也在該次事件產生崩塌。尤其擴大有時並非只是往外擴增，也可能有內部加深之情形；然而此狀況並不能以空間區位判別而獲得，且其內部是否真的發生加深情形，須進行現地勘查才可能得知。根據上述崩塌地之分類，本研究將各颱風事件前後時期之崩塌地圖資進行套疊，由此獲得崩塌地變遷資訊。



資料來源：修改自賴志強(2007)；陳俞旭(2008)

圖 3-4　崩塌地變遷及分類示意

新增崩塌地關聯性查詢可直接針對裸露地進行網格套疊，即可顯示出崩塌地相對應位置的集水區網格，再將顯示出崩塌地之網格標記成數字 1，表示該網格發生崩塌，未發生崩塌之網格則標記為數字 0，如圖 3-5 所示，藉由前後期裸露地得到之崩塌地，即為 921 地震後所造成之崩塌，如表 3-2 及圖 3-6 所示。

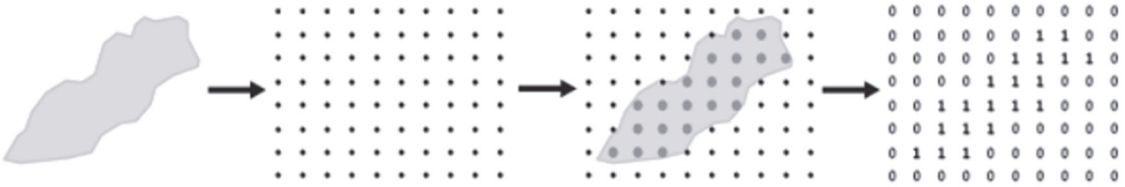


圖 3-5　坡面資料套疊網格示意圖

表 3-2　研究地區新增崩塌地統計

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

資料來源：本研究整理

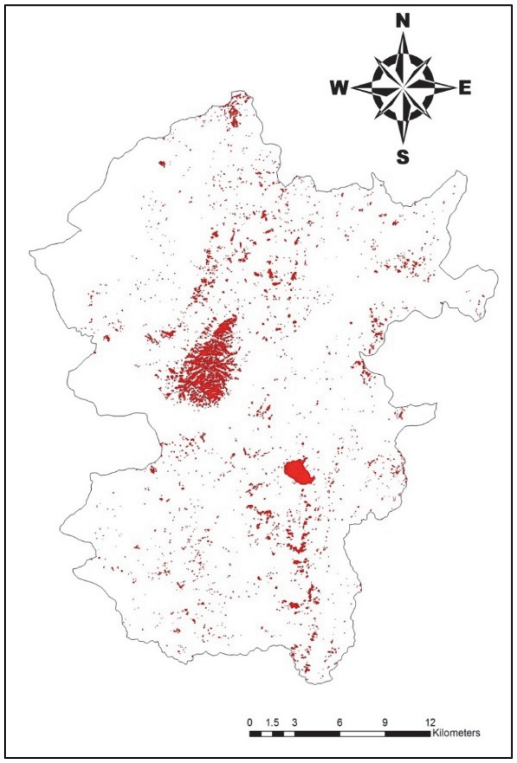


圖 3-6　921 新增崩塌地

第三節　崩塌資料庫建置

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。

壹、地質因子

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，所亦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 side 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 3-3 所示。

表 3-3　不同地質因子之崩塌統計

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

貳、坡向因子

本研究以 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 3-4 所示。

表 3-4　不同坡向因子之崩塌統計

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

參、坡度因子

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，因此坡度是崩塌的重要因子。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，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 3-5 所示。顯示崩塌率大

致隨坡度越高而提高。

表 3-5　不同坡度因子之崩塌統計

分級	坡度(˚)	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

第四節　強地動因子空間推估

壹、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：

$$\log_{10}(S_h) = 0.00215 + 0.581M_w - \log_{10}(R + 0.00871\times 10^{0.5M_w}) - 0.00414R \tag{3-1}$$

式(3-1)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：

$$min\Delta = \sum_{m=1}^{M} \left| (S_m)_T - \alpha (S_m)_E \right| \tag{3-2}$$

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。

貳、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)：

$$Z(x)=M(x)+R(x) \tag{3-3}$$

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：

$$M(x)=E\left[Z(x)\right] \tag{3-4}$$

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

$$E\left[R(x)\right]=0 \tag{3-5}$$

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 3-7 所示，完成隨機變動值的推估後再將任意 x 處之區域趨勢值與推估結果相加，即為空間全域推估。

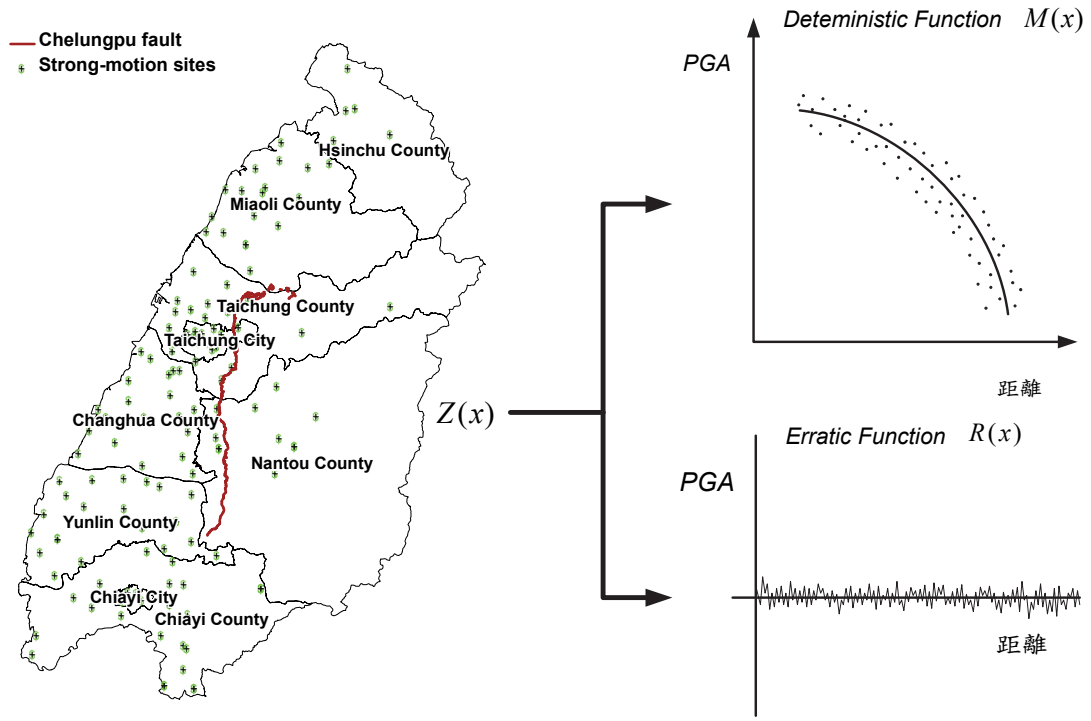


圖 3-7　區域趨勢值與空間中隨機變動值之關係

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 3-6 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，如圖 3-8 所示即為指數模式套配之克利金半變異圖。

表 3-6　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。

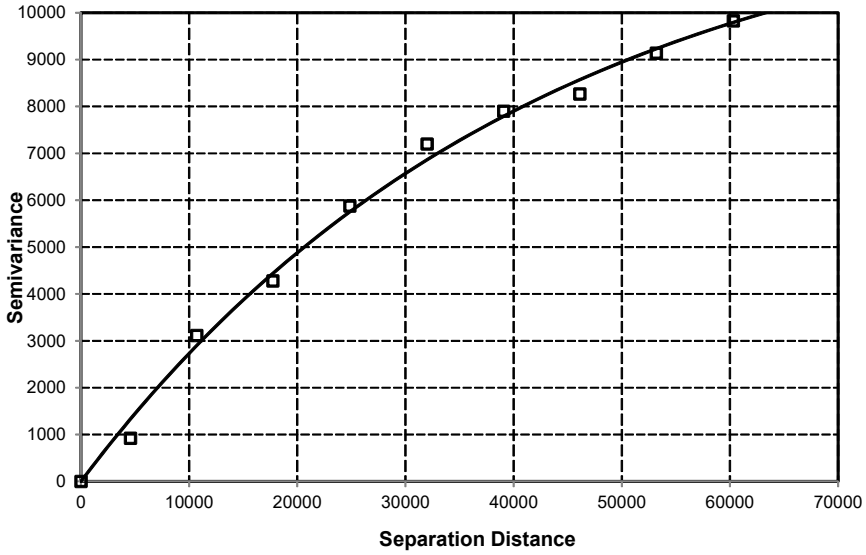


圖 3-8　最佳半變異圖(指數模式)

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(2-3)，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 3-9 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 之空間推估結果如所示，由圖 3-10 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。顯示 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。

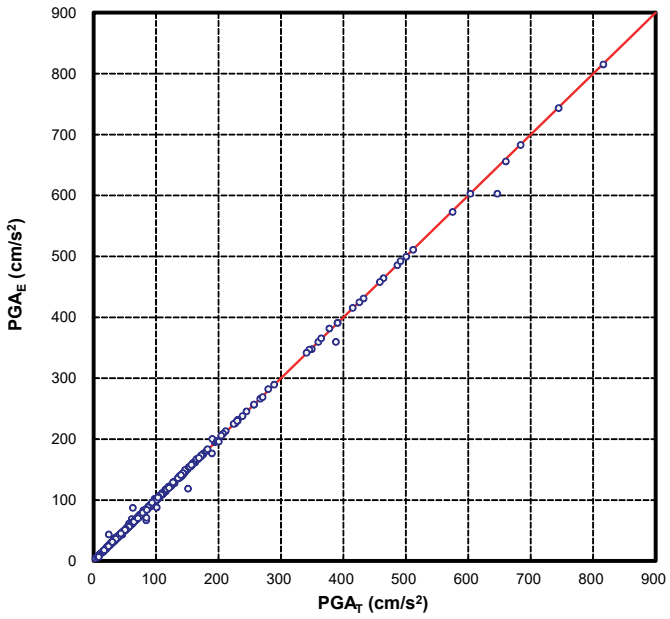


圖 3-9　強地動測站實測值及 Wu 衰減率之推估值比較

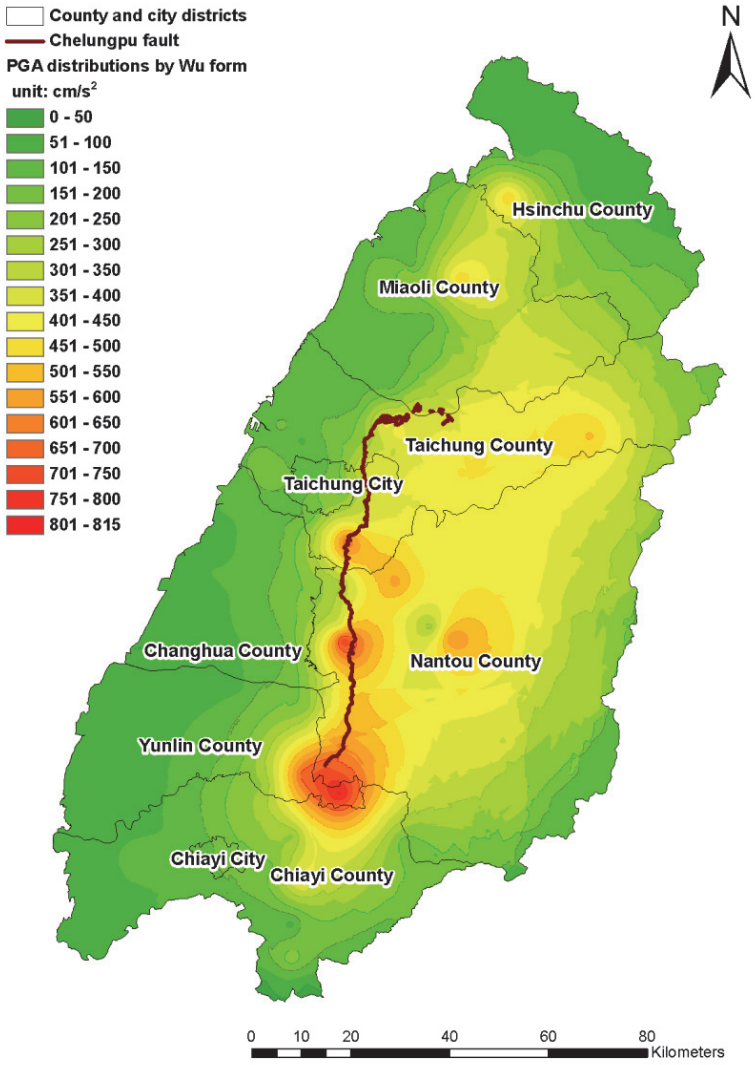


圖 3-10　Wu 衰減率推估之全域尖峰地表加速度分布

第五節　坡面單元圈繪

壹、坡面單元

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 3-11 所示。本研究使用的坡面單元劃分方法為集水區重疊法，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 3-12 所示。圖中顯示編號 1 之集水區係藉由數值高程模型之集水區分析得到，編號 2 和編號 3 則係利用反轉 DEM 得到。

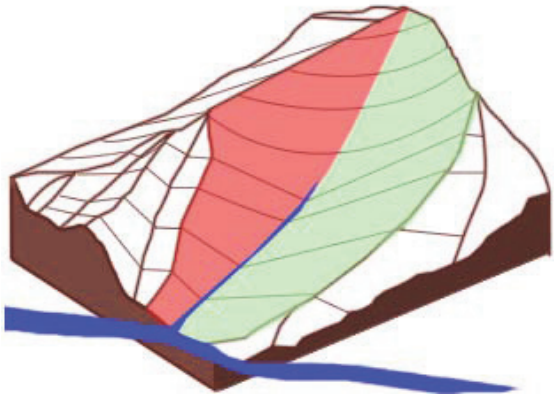


圖 3-11　坡面單元示意圖

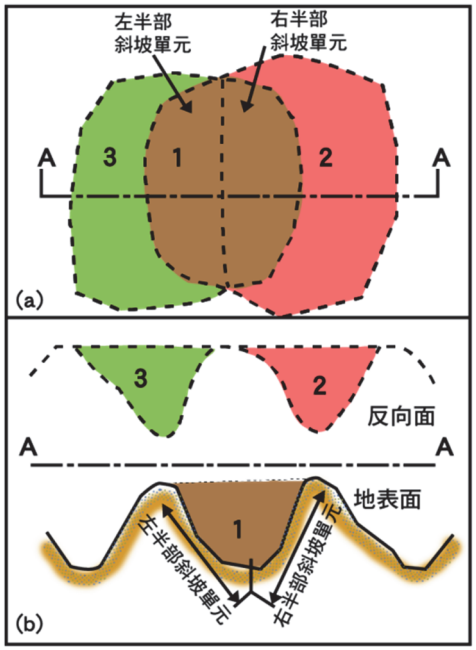


圖 3-12　集水區重疊法示意圖

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 3-13 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。

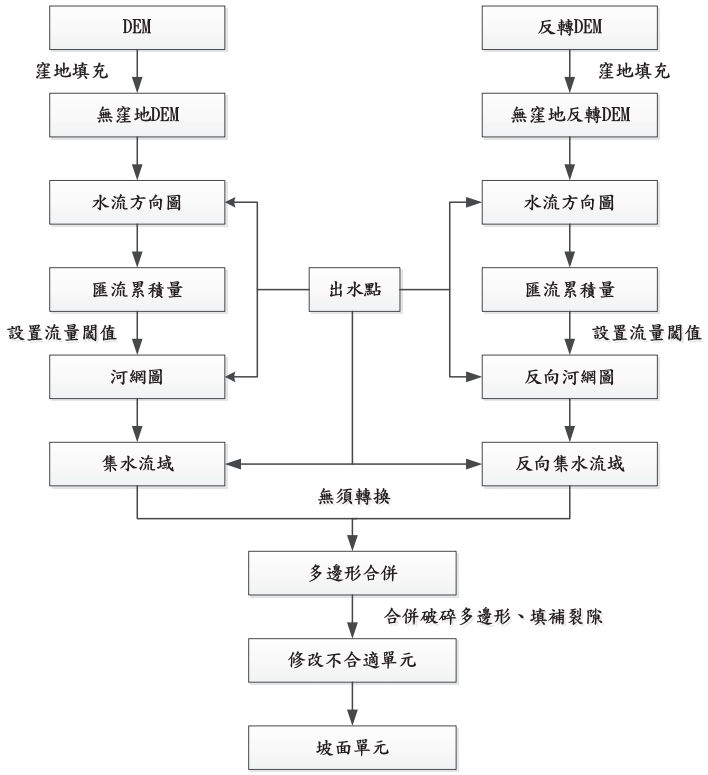


圖 3-13　坡面單元繪製流程

本研究以 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。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。

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 3-14 所示，總計有 6,333 個坡面單元。

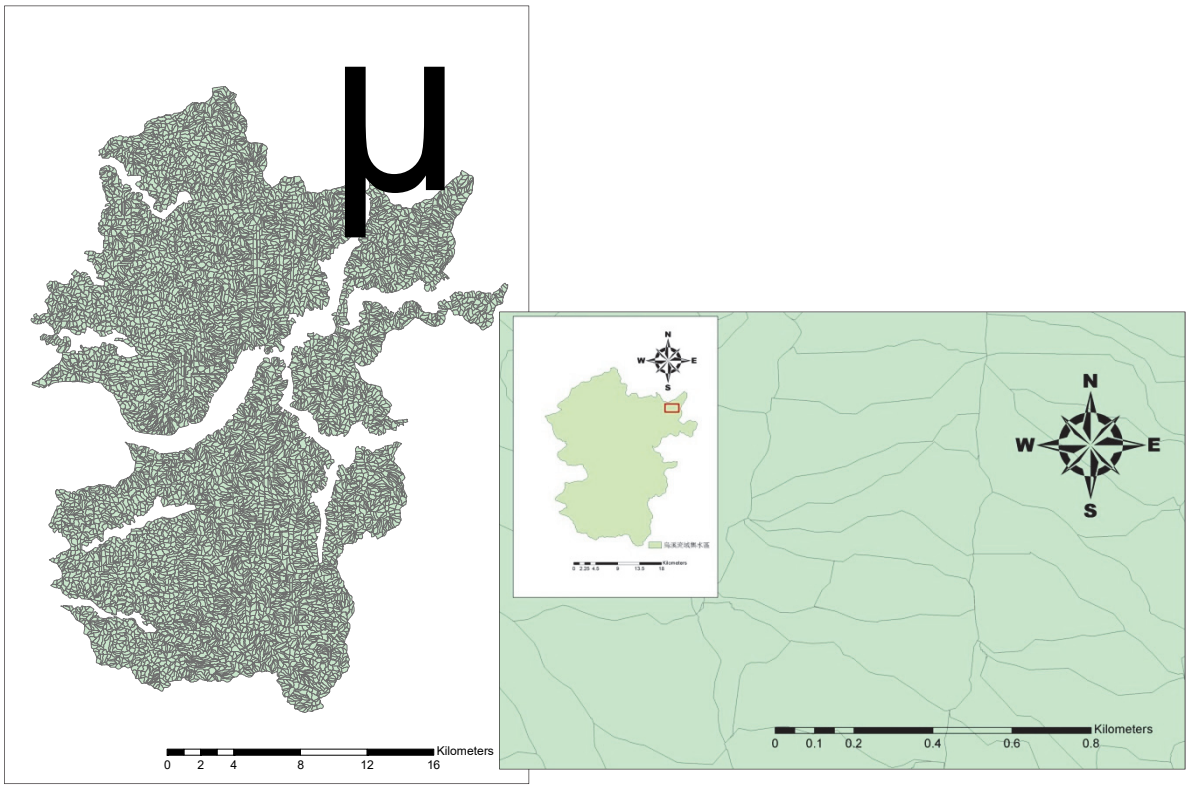


圖 3-14　烏溪集水區之坡面單元

貳、坡面單元分類

一、坡面之地質分類(G)

地質因子採用李錫堤教授之分類，依照網格法計算以佔較多面積的分類為依據分出兩種類別，site class B 為堅硬且脆性的岩石為地質分級一、site class C 為密集的土壤和軟岩為地質分級二。烏溪集水區劃分完成之坡面單元地質分類統計如表 3-7 和圖 3-15 所示。

表 3-7　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%

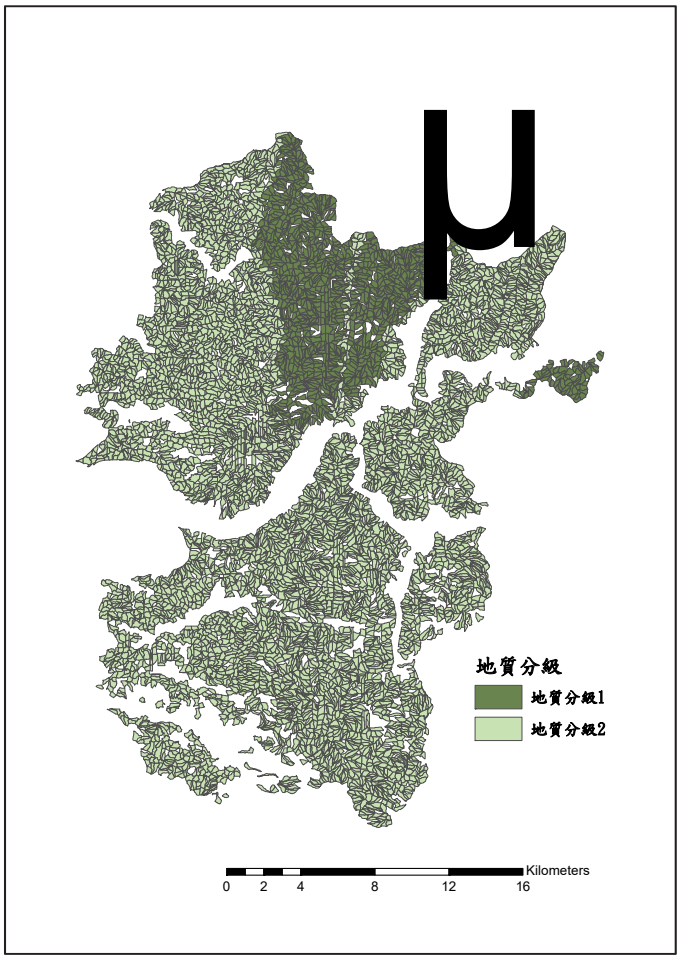


圖 3-15　坡面單元地質分類

二、坡面之坡向敏感因子(A)

由於坡面崩塌受地震波方向的影響極大，震波衝擊的方向是否與坡面呈正向或平行關係影響是否容易崩塌，因此本研究考慮坡面法線方向與地震波方向的關係，如圖 3-16，將坡向分為強面與弱面兩類。強面表示該坡面法線方向與震波方向垂直或接近垂直的不利崩塌的狀態，弱面表示該坡面法線方向與震波方向平行或接近平行利於崩塌狀態，此即坡向敏感因子。

為簡化分析過程，本研究假定地震發生為線斷層模式，即任一處之地震波係沿著斷層線任一點切線向外傳遞，因此地震發生後任一個坡面單元受衝擊的震波方向，即可定義為坡面形心距斷層線的最短距離所指的方向，稱之為震波方位角。其次，再以坡面單元最高點至最低點的反函數計算出坡面方位角，此坡面方位角和震波方位角所夾的角度越小則越有利於崩塌，也就是傾向於弱面的情況。如圖 3-17 所示，本研究以 30°為強面與弱面之分界評估某坡面單元之坡向敏感分類，也就是當所夾角度為-30°~30°以及 150°~210°時定義為弱面。此外，本研究考慮順向坡的影響，當坡面為順向坡時則取保守情況直接定義為弱面，劃分完成之坡面單元坡向敏感分類如表 3-8 和圖 3-18 所示。

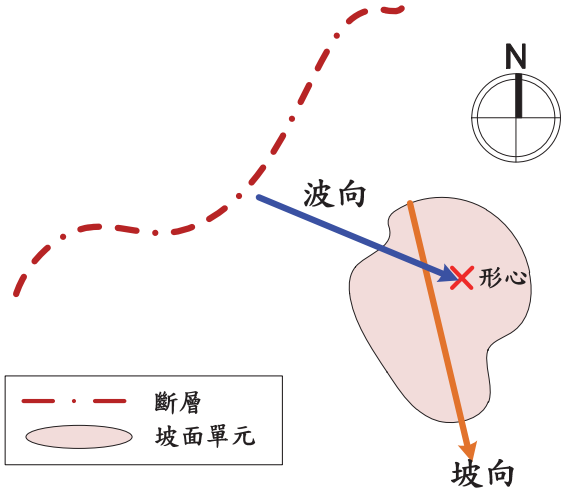


圖 3-16　坡面方位角和震波方位角的關係

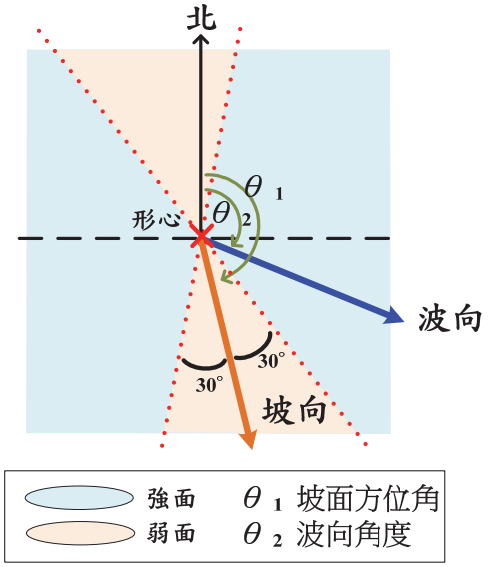


圖 3-17　坡向敏感因子定義

表 3-8　坡向敏感分類統計

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%

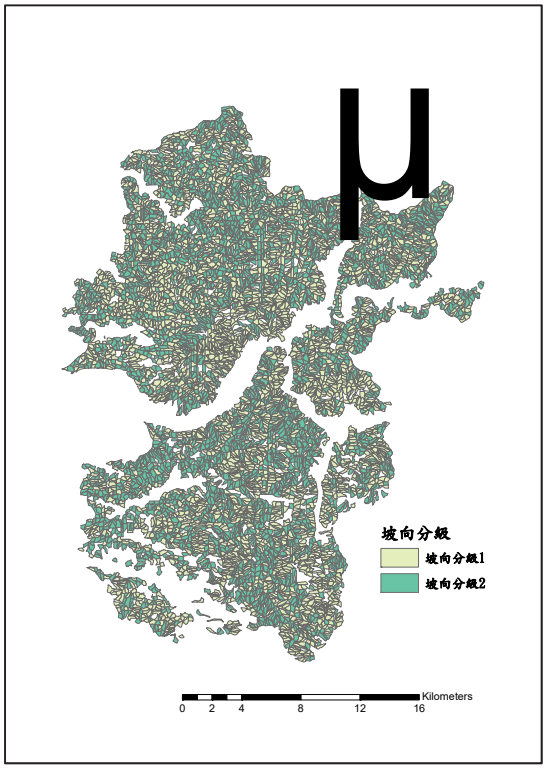


圖 3-18　坡面單元坡向分類

三、坡面之坡度分級(S)

坡面單元的坡度分級方面，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 3-9 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。烏溪集水區劃分完成之坡面單元坡度分類如圖 3-19 所示。

表 3-9　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%

註：一、二級坡在網格資料庫中已刪除，但坡面單元計算仍可能有三級坡度值。

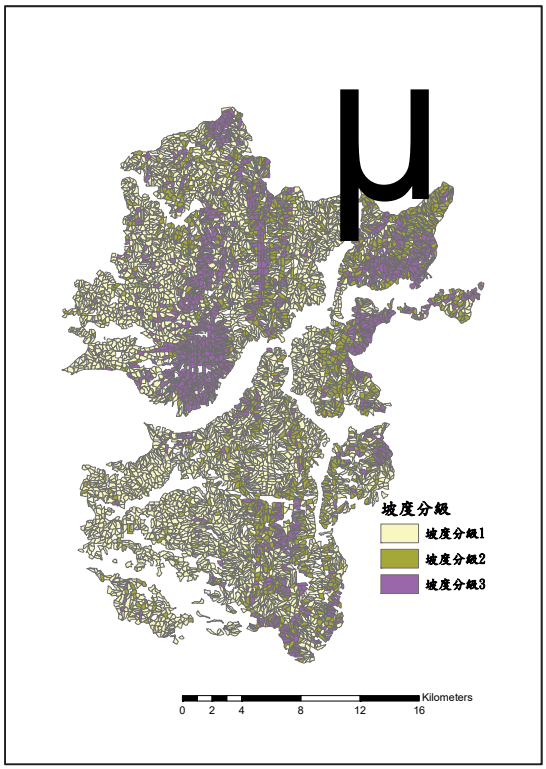


圖 3-19　坡面單元坡度分類

參、坡面所受震度

前述第五節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，將有較多高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 3-20 所示。

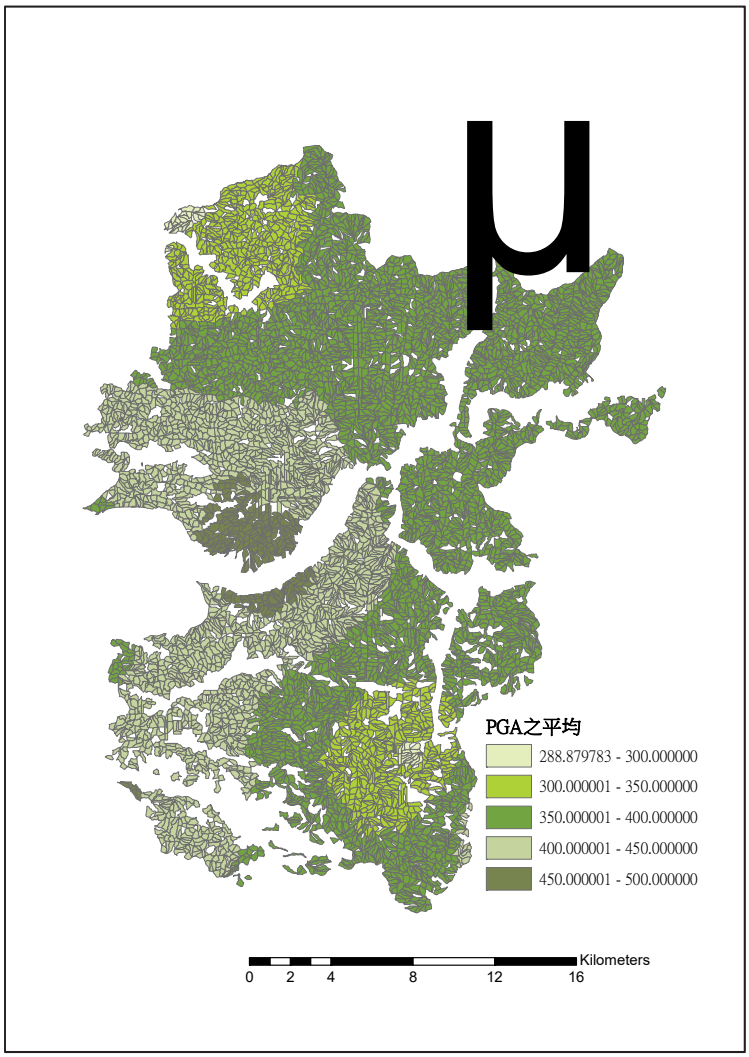
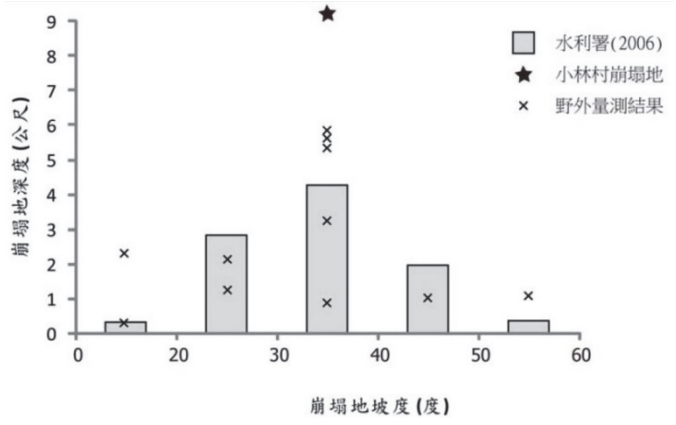


圖 3-20　烏溪流域集水區坡面單元 PGA 震度分布

肆、坡面單元崩塌定義與程度

坡地易損性曲線係描述單一坡面單元在某震度下之崩塌機率，換句話說，就是不論坡面單元的實際大小，以崩塌機率的方式表達某坡面單元的崩塌可能性，因此首先必須探討此可能性所表示的物理意涵。以統計而言，崩塌機率所描述的是某個崩塌狀態發生的可能性，也就是必須針對坡面定義某種崩塌狀態是否發生，再根據這個定義進行機率分析，通常對崩塌現象而言最簡單直接的作法，即是以訂定崩塌門檻值作為某種崩塌狀態，因此採取合理的崩塌定義與程度即相當重要。

首先要考慮的是，以衛星影像判釋崩塌地實際上並不能考慮地形地勢與崩塌深度的影響，因此有必要考慮崩塌量體和崩塌表面積的相關性，並將判釋所得的崩塌水平投影與實際崩塌量體之關係量化修正。這個修正概念在過去已有許多研究者針對崩塌斜面積、體積與深度的關係作過相關研究(例如 Evans and DeGraff, 2002; Imaizumi *et al*., 2008; Guzzettiet *et al*., 2009; 經濟部水利署，2006, 2010, 2011)。本研究以經濟部水利署(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，該研究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 3-21 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 3-21　崩塌地坡度與深度分佈

此外，過去研究結果顯示，理論上崩塌深度與坡度具有一定相關性，因此崩塌地斜面積、崩塌體積與深度亦有關係，如圖 3-22，理論上若崩塌體積與斜面積關係式成立，就可以進一步利用崩塌體積推算不同坡度下之崩塌斜面積，再計算崩塌水平投影面積，這也就是影像判釋所得之近似崩塌面積。也就是說，同樣可經由推估的方法，由崩塌水平投影面積及坡度進一步推估可能的斜面積與體積。然而，由於地層條件的不穩定性，要藉由崩塌深度推估適於任意坡地的關係式是相當困難的，這也是崩塌現象具有高度不確定性的原因。因此，通常的作法是藉由過去的經驗以較定性的方式建立坡度與深度相關性(例如 Khazai and Sitar, 2000、國家災害防救科技中心)。

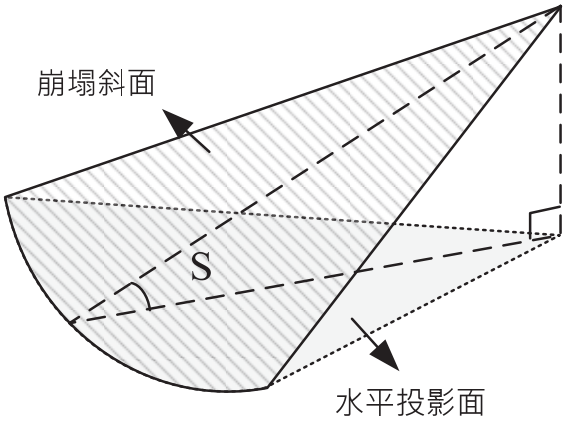


圖 3-22　崩塌塊體斜面與投影面關係示意圖

根據上述，本研究針對坡面單元之崩塌定義，參考水利署曾於 2010 至 2011 年間執行之「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，由於是經驗公式，因此並將深度因子消除，得到：

$$V = 0.2 \times A^{1.3} \tag{3-6}$$

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

本研究利用式(3-6)推估崩塌體積期望值下產生之崩塌斜面積，再由已知坡度計算可能的崩塌水平投影面積。因此將坡面單元的崩塌狀態，參考該計畫所調查崩塌地中，屬中高程度崩塌的六處崩塌地之平均崩塌體積約 V=5,692 立方公尺來估算(例如小林村崩塌深度有疑慮即剔除)，將崩塌體積期望值概取整數為 V=6,000 立方公尺，藉由式(3-6)可反推崩塌斜面積並估計不同坡度分類下的崩塌水平投影面積門檻。在 S1~S3 的坡度分類下，各類坡度取平均值計算可能的崩塌水平投影面積，並結合崩塌率(崩塌水平投影面積/坡面單元水平投影面積)和判識所得之崩塌水平投影面積以試誤法得到較佳門檻值組合：

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

上述崩塌率 5%門檻值的設定，主要是考量當坡面單元過小時，僅考慮崩塌水平投影面積可能無法定義崩塌坡面的情形，例如當坡面單元 3ha 時，5%的崩塌率約僅 4 個網格。經反覆計算，本研究採用的坡面單元崩塌定義與狀態具有較佳的分析結果，也能夠合理地修正影像判釋為水平投影面積的不足。最後，本研究示範集水區所得到之各坡面單元崩塌評估結果如圖 3-23 所示。

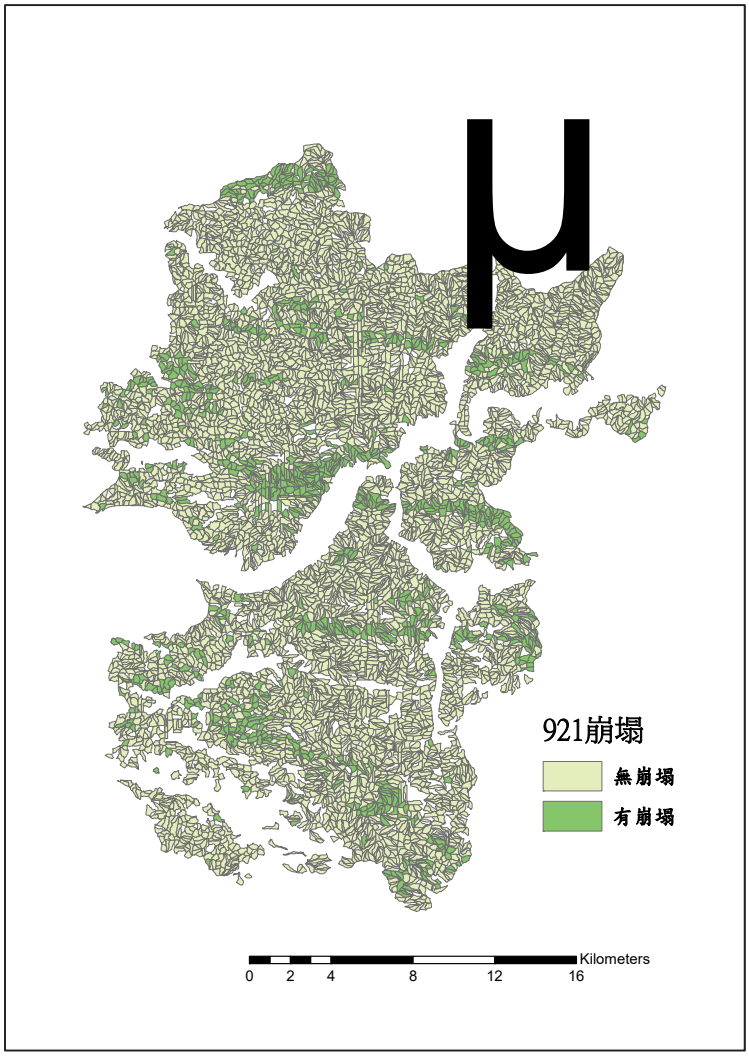


圖 3-23　烏溪流域集水區崩塌坡面分佈

第六節　坡地易損性曲線

本研究針對所定義之 12 類坡面，利用 921 地震崩塌資料庫以第二章第五節所介紹之易損性分析方法-二項分布型坡面法建立各類型坡地之建築物易損性曲線。坡地易損性曲線係根據前述各種環境因子所定義之分類，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)、S(坡度)之編號順序組合，其中包括地質二類、坡向二類以及坡度三類，共計 12 種組合，即是有 12 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。

12 類坡地易損性曲線的環境因子考慮地質、坡向與坡度，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 3-10 所示，各類坡地易損性曲線和致災資料點共繪如圖 3-24 至圖 3-35 所示。

表 3-10　坡地易損性參數

分類編號	數量	中位數($981cm/s^2$)	標準差
G1A1S1	261	0.50	0.13
G1A1S2	156	0.52	0.13
G1A1S3	126	0.52	0.11
G1A2S1	286	0.52	0.19
G1A2S2	114	0.47	0.05
G1A2S3	96	0.52	0.16
G2A1S1	1524	0.95	0.70
G2A1S2	562	0.77	0.58
G2A1S3	559	0.70	0.52
G2A2S1	1534	1.06	0.78
G2A2S2	568	0.86	0.65
G2A2S3	547	0.80	0.61

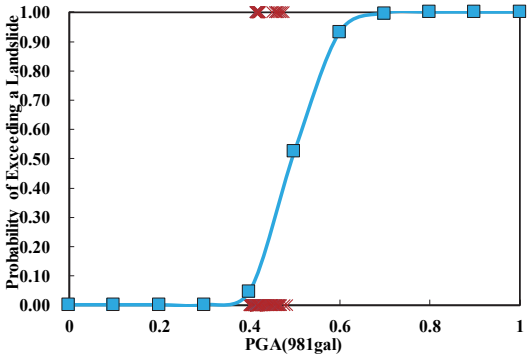


圖 3-24　G1A1S1 類易損性曲線

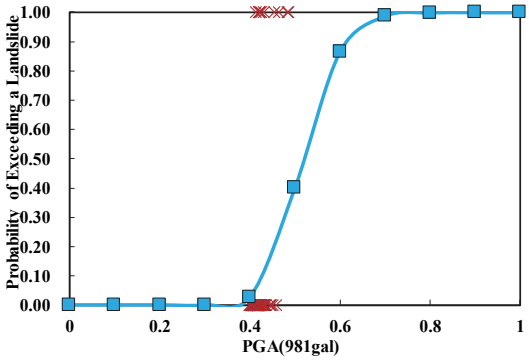


圖 3-25　G1A1S2 類易損性曲線

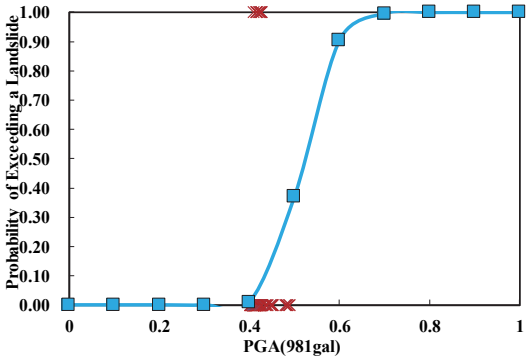


圖 3-26　G1A1S3 類易損性曲線

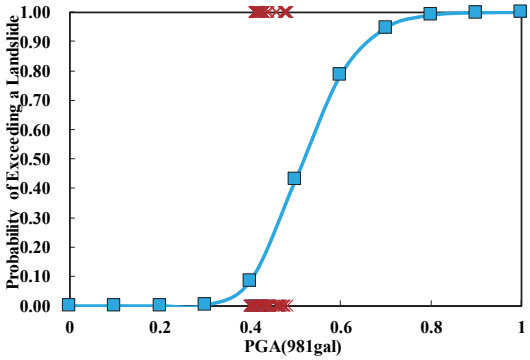


圖 3-27　G1A2S1 類易損性曲線

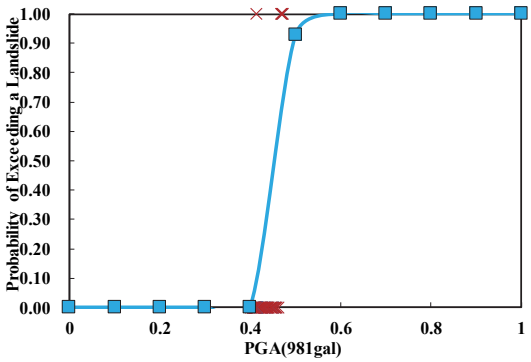


圖 3-28　G1A2S2 類易損性曲線

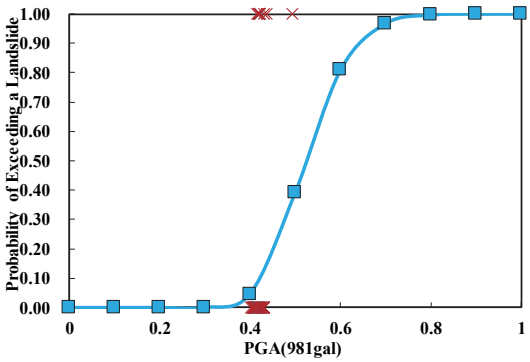


圖 3-29　G1A2S3 類易損性曲線

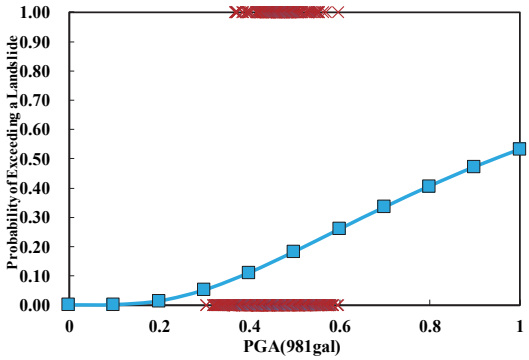


圖 3-30　G2A1S1 類易損性曲線

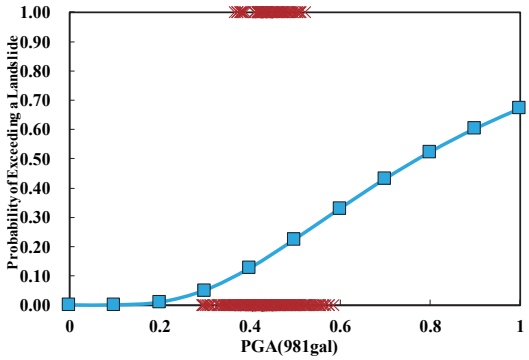


圖 3-31　G2A1S2 類易損性曲線

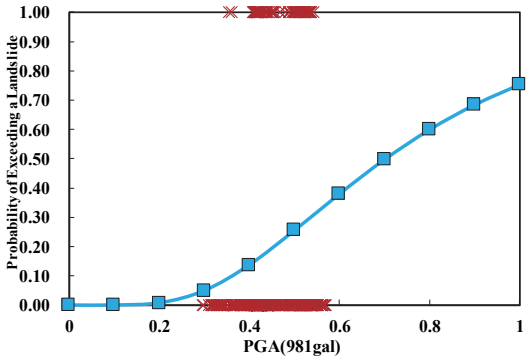


圖 3-32　G2A1S3 類易損性曲線

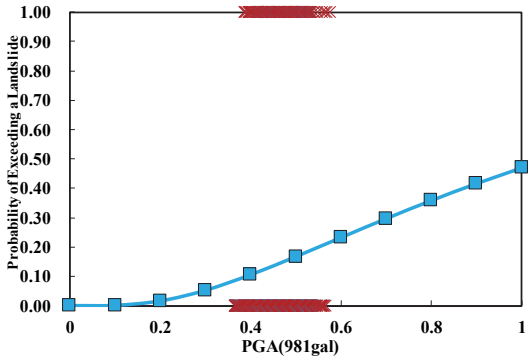


圖 3-33　G2A2S1 類易損性曲線

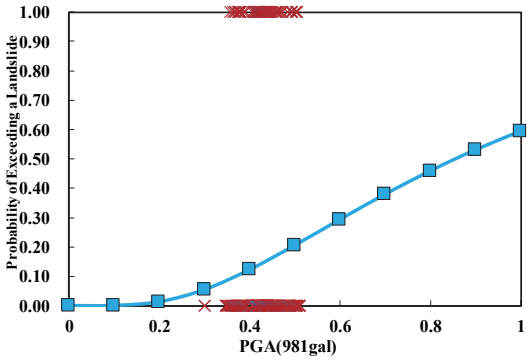


圖 3-34　G2A2S2 類易損性曲線

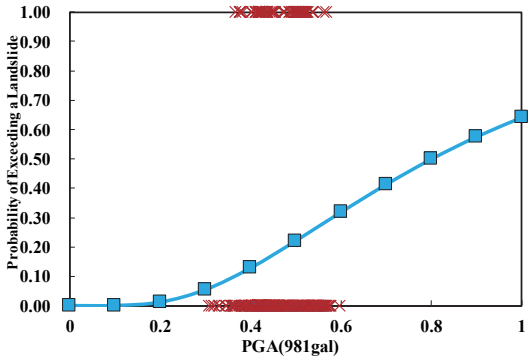


圖 3-35　G2A2S3 類易損性曲線

第四章　地震引致建物倒塌之建物易損性分析

第一節　建築物資料庫蒐集範圍

921 地震是近百年餘年來在臺灣發生的最嚴重地震事件（北緯 23.85 度，東經 120.82 度，震源深度 8.0 km），其震源機制主要是由車籠埔斷層的破裂所造成，並造成臺灣中部地區鄰近車籠埔斷層帶沿線之建築物相當大的損害。針對 921 地震建築物震災資料庫之建置，在過去的研究中已有基於以「棟」為單位之無母數調查，以及基於「戶」或者「樓地板面積」為單位之完全調查。為了探究 921 地震時強地動對於建築物的影響，本研究建築物資料係藉由臺灣財政部財稅資料中心所提供之 1999 年房屋稅籍資料庫以及內政部建築研究所提供之受災戶慰問金清冊，基於財稅編碼規則及資料庫處理技術逐步篩選並進一步建置以「棟」為單位之完全調查資料庫。建築物資料蒐集範圍涵蓋臺灣中部受災之九縣市區域，包含新竹縣、苗栗縣、臺中縣市(今臺中市)、彰化縣、南投縣、雲林縣及嘉義縣市等地區，如圖 4-1 所示。

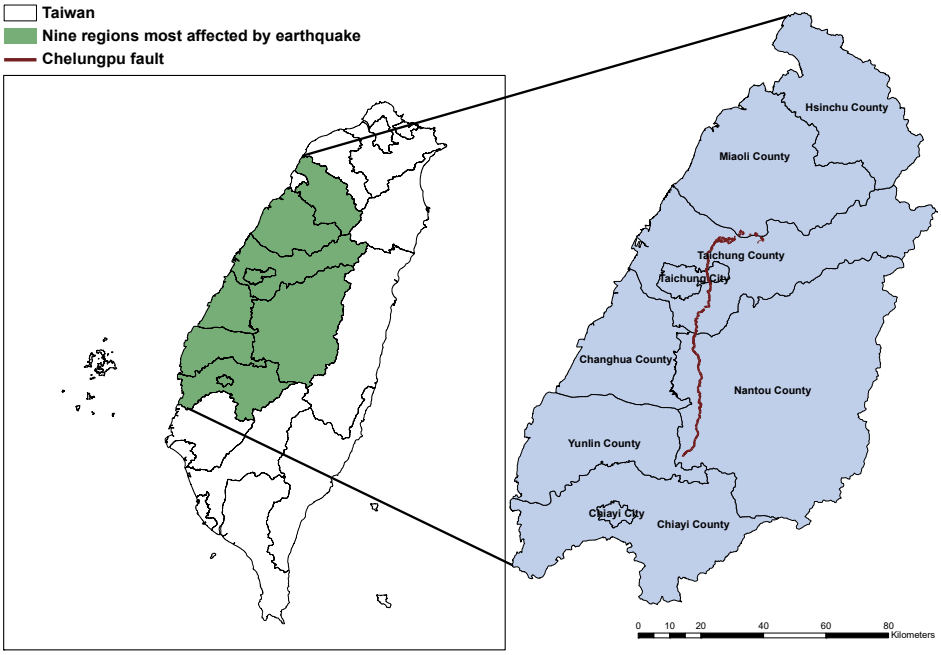


圖 4-1　建築物損害資料庫蒐集區域

第二節　建築物類型與分類

建築物震災資料庫首先需具備清楚的建築物分類。每一種建築物分類係指該類建築物預期將有類似的耐震行為和性能水平。以建築物之結構特性而言，構造材料、樓層高度和設計規範即是三個影響易損性曲線的關鍵因子。在構造材料方面，本研究依據財政部財稅資料中心之房屋稅籍資料編碼規則進行分類，其第 18 碼之構造類別如表 2-3 所示。由於房屋稅籍資料所定義之構造系別係為課稅用途因此相當詳細，然而過細之分類並不完全適用於經驗法發展易損性曲線。因此，本研究考量各類構造之結構特性、資料是否充足及其重要性，針對較普遍及具意義的構造系別分成 7 類構造，如表 4-1 所示，包括鋼構造、鋼筋混凝土造、加強磚造、磚石造、鐵皮屋、木造及純土造。各類構造對映房屋稅籍資料所定義之構造系別如表 2-3 右側欄位所示，而對於其它未包含之構造系別則不納入本研究範圍，如預鑄混凝土造、鋼鐵造(以 C 型鋼等組成之桁架式架構)、硓𥑮石造及卵石混凝土造等。

表 4-1　採用之構造系別

代號	本研究之構造系別	房屋稅籍資料定義之構造系別
RC	鋼筋混凝土造	鋼筋混凝土造
RM	加強磚造	加強磚造
GM	磚石造	磚石造、土磚混合造
SS	鋼構造	鋼骨造、鋼骨混凝土造、鋼骨鋼筋混凝土
ST	鐵皮屋	鋼鐵造(以 H 型鋼為樑柱)
WC	木造	雜木以外、雜木、竹造
MC	純土造	純土造

資料來源：本研究整理。

由於不同之樓層高度表達了結構之自然振動頻率特性，因此在樓層高度方面除磚石造、木構造及純土造皆為低樓層不分類外，鋼筋混凝土造及加強磚造由於具有較高樓層即需加以分類。本研究將鋼筋混凝土造分為低(1－3 層)、中(4－7 層)及高(8 層以上)樓層三類，而加強磚造依建築技術規則(詹氏書局，2013)不得超過 4 層樓，則分為低(1－3 層)及中(4 層以上)樓層二類。不同時期之設計規範描述了該類建築物所採用之耐震設計水準，係依據我國耐震設計規範修訂之年代來定義耐震設計水準的提升，可分為三時期，包括早期(1982 以前)、中期(1983－1989)及近期(1990－1999)。基於以上因子，建築物震災資料庫細分為 16 類，如表 4-2 所示。

表 4-2　建築物分類

構造	代號	樓層	年代
鋼筋混凝土造	RCL1	1－3	1982 以前
	RCL2		1983－1989
	RCL3		1990－1999
	RCM1	4－7	1982 以前
	RCM2		1983－1989
	RCM3		1990－1999
	RCH1	8 以上	1982 以前
	RCH2		1983－1989
	RCH3		1990－1999
加強磚造	RML	1－3	－
	RMM	4 以上	－
磚石造	GM	－	－
鋼構造	SS	－	－
鐵皮屋	ST	－	－
木構造	WC	－	－
純土造	MC	－	－

資料來源：本研究整理。

第三節　建築物震損資料庫建置

壹、建物稅籍資料庫

要取得完整及明確的建築物母數資料是建築物損害調查中最困難的工作。主要原因有二：其一為缺乏建築物普查方法及程序，其二為明確地定義或分類建築物損害相當困難。因此本研究利用具有詳細建築物資訊的房屋稅籍資料庫進行建築物棟數資料庫之建置。房屋稅籍資料庫是臺灣財政部財稅資料中心每年針對全國每戶課稅之憑證。在房屋稅籍資料庫中，每一筆資料皆係由 100 碼的數字及英文字母所混合編碼組成，隱涵了該筆建築物資料之所有資訊，包含了該建築物之行政區位、結構類別、建造年代、建築樓層、樓層高度、樓地板面積及地址等多元資訊。本研究由財政部財稅資料中心取得 46 碼資料數值及文字資料(地址)；其中數值資料編碼規則及意涵如表 4-3 所示，而文字資料則具備該筆房屋稅籍編碼與對應之地址，由此構成完整之建築物屬性與地址資料庫(以下簡稱建築物資料庫)。

表 4-3　財政部財稅資料中心提供之稅籍資料編碼規則

01 碼：縣市	17 碼：主建物的建物類別
02－03 碼：鄉鎮區碼	18 碼：構造別
04－05 碼：村里碼	19－20 碼：本棟總樓層數
06－07 碼：冊號	21－22 碼：折舊年數
08－09 碼：頁號(6-9 號又稱為棟號)	23－28 碼: 營業面積
10－12 碼：分號(戶號)	29－34 碼: 營業減半面積
13－14 碼：樓層	35－40 碼: 住家面積
15 碼:卡序第一欄	41－46 碼: 非住非宅面積
16 碼:卡序第二欄	

資料來源：本研究整理。

貳、建築物損害分級與全、半倒評定

921 地震之後，為了能夠及早了解震災損失以利於政府投入救助階段及復原重建工作，內政部動員相當多之學者、專家及技師進行全面的建築物之災損調查及危險分級評估。災區之建築物危險分級評估係針對遭受損害之建築物進行半倒或全倒判定以製作受災戶慰問金清冊。受災戶慰問金清冊則是以「戶」為單位，作為建築物受損之災民申請慰助金發放的依據，同時也是受損建築物房屋稅免減徵的証明。受災戶慰問金清冊中具備該受災戶之地址以及建築物全倒或半倒損害資訊，因此可進一步鏈結前述房屋稅籍資料中的文字資料並萃取損害建築物之屬性，進而建置 921 地震建築物損害資料庫(以下簡稱建築物損害資料庫)。在受災戶慰問金清冊中建築物之損害定義，係依據內政部營建署(1999)頒佈之「921 大地震受災區建築物危險分級評估作業規定」，將建築物損害分級以全倒與半倒兩種方式評定。其中建築物全倒之定義為：

一、受災戶住屋裂痕深重或傾斜過甚，非經拆除或重建不能居住者。

二、受災戶住屋因遭砂石掩埋或積砂泥，以致不能修復者。

而半倒的定義為：

一、受災戶住屋屋頂瓦片連同椽木塌毀面積超過三分之一；或鋼筋混凝土造成住屋屋頂之樓板、橫樑因災龜裂毀損，非經修建不能居住者；或住屋修建費用為重建費用之百分之五十以上者。

二、受災戶住屋因遭砂石掩埋或積砂泥，其面積及深度達簷高二分之一以上者。

事實上，即使具備上述之損害定義及專業之調查人員，對於震後詳細且一致性之建築物損害評估實際上仍具有不確定性。主要原因在於震後損害評估依賴各專家的主觀經驗及判斷，且僅能由外觀加以認定。

參、震損資料庫建置流程

本研究採用之建築物震損資料庫包含前述建築物資料庫及建築物損害資料庫兩部分。建築物資料庫係依據房屋稅籍資料之編碼規則，將房屋稅籍資料整併成以棟數為單位之數值資料及文字資料。建築物損害資料庫係依據受災戶慰問金清冊所建置之損害建築物地址以及全倒或半倒屬性資料。如圖 4-2 所示，兩者經由地址屬性即可鏈結為建築物震損資料庫。其中，建築物棟號編碼與建築物屬性資料係經由房屋稅籍資料之編碼規則而得。如圖 4-3 所示，本研究採用房屋稅籍編碼中之 17 碼欄位資訊，包括「縣市」、「鄉鎮」、「村里」、「棟號」、「樓層」、「類別」、「構造別」、「總樓層」、「折舊年」等欄位，利用資料庫處理技術進行數值鏈結及資料庫建置程序。資料庫建置程序中經過嚴密校對並刪除無需之資料，完成九縣市以棟數為單位之建築物震災資料庫。

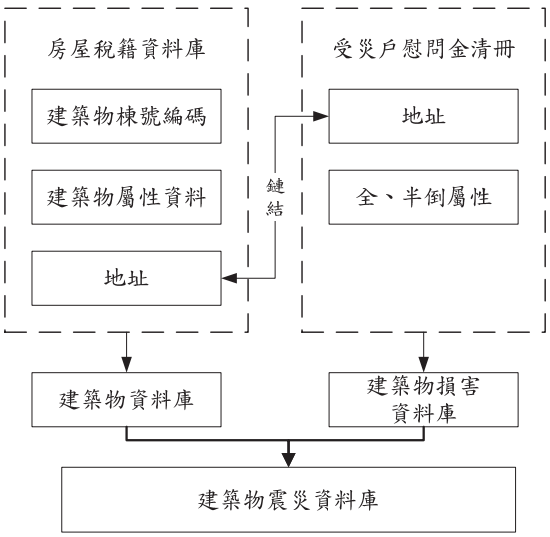


圖 4-2　建築物震損資料庫鏈結程序

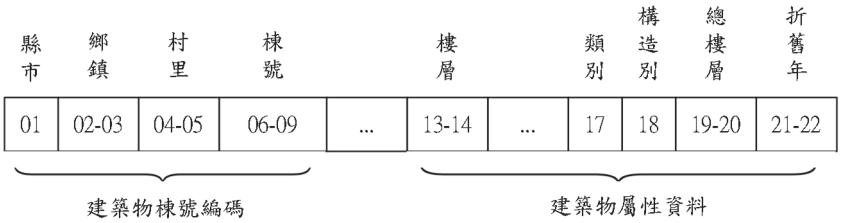


圖 4-3　建築物棟號編碼及屬性資料欄位

建置以棟數為單位之建築物震損資料庫的主要目的在於希望直接表達 921 地震對於各類型建築物的影響，而無須透過戶或樓地板面積不確定地描述建築物的損害程度。本研究提出之建築物資料庫建置程序係基於房屋稅籍資料建置之規則。每一課稅戶籍（門牌）原則是由一筆以上之稅籍資料所組成，而每一棟建築物則是由一戶以上所組成。本研究即利用此原則以建築物地基作為棟數整併的基礎。前述之編碼規則尚不能完全處理所有的房屋稅籍資料，對於此類建築物，本研究則以人工檢覈的方式逐步進行整併。另一種需要人工檢覈的情形，即是複合式結構之處理。由於臺灣地區中低樓層建築物常見頂層加蓋或改建，造成一棟建築物可能是由鋼筋混凝土造、磚石造、加磚造或鐵皮屋等兩種以上的構造所構成。此類建築物則以其主建物類別(第 17 碼)或以其一樓之構造別為其建築物構造別基準，並仍計算其上所有樓層數為該建築物樓層及判斷最大之折舊年數視為其建造年代。

受災戶慰問金清冊亦可經由相同之程序予以整併，再經由地址欄位鏈結至房屋稅籍資料庫中，此即建築物損害資料庫。建築物損害資料庫與建築物資料庫鏈結所得到之建築物震災資料庫即包括了研究區域內建築物之構造別、建造年代及是否損害之屬性資訊。上述之建築物震災資料庫鏈結程序由於房屋稅籍資料庫數量龐大，需花費相當時間與人力進行處理及校對工作。本研究建置之建築物震災資料庫可完整呈現 921 地震時期建築物之棟數資料，將有利於建築物易損性分析研究。完成上述建築物震損資料庫後，即可透過第二章第五節所述的易損性分析方法，分析其建築物易損性，並建立各類建築物易損性曲線。

肆、921 地震建築物震損資料庫

一、建築物統計

本研究所取得財政部財稅資料中心之房屋稅籍原始資料中，九縣市之資料總計 7,604,511 筆，並包含 2,510,512 戶之門牌地址。此龐大資料庫之資料鏈結及整併過程係應用資料庫處理軟體(例如 Microsoft Access)輔助，再經由人工檢覈不合理資料及校對資料後，依據建築物類型進行分類。依據研究區 1,030 個村里所建置完成之建築物資料庫與前述建築物損害資料庫鏈結後即為建築物震災資料庫。建置完成之建築物震災資料庫中各構造系別及各類建築物統計結果如表 4-4 所示，研究區內所探討之 7 種構造之房屋稅籍原始資料共計 4,114,829 筆，以臺灣最普遍的加強磚造及鋼筋混凝土構造數量最多，皆達百萬筆以上。資料庫經分類後建築物總數為 649,813 棟，以各構造系別統計，其中鋼筋混凝土造 132,790 棟(佔全部建築物 20.44%)、加強磚造 258,696 棟(佔全部建築物 39.81%)、磚石造 145,994 棟(佔全部建築物 22.47%)、鋼構造 2,840 棟(佔全部建築物 0.44%)、鐵皮屋 4,683 棟(佔全部建築物 0.72%)、木構造 64,302 棟(佔全部建築物 9.90%)和純土造 40,508 棟(佔全部建築物 6.23%)。

圖 4-4 顯示研究區內各構造系別及各類建築物之數量及比例，可瞭解 921 地震時期研究區內各類構造之數量及建築物使用特性。符合預期地，加強磚造為數量最多之傳統建築物，磚石造次之，鋼筋混凝土造再次之，其它構造皆低於 10.00%。

表 4-4　各構造系別建築物原始資料及各類別建築物棟數資料統計

構造	代號	原始資料	建築物總數	建築物比例
鋼筋混凝土造	RCL1	1,325,829	27,639	4.25 %
	RCL2		27,201	4.19 %
	RCL3		27,075	4.17 %
	RCM1		16,267	2.50 %
	RCM2		10,973	1.69 %
	RCM3		19,980	3.07 %
	RCH1		340	0.05 %
	RCH2		497	0.08 %
	RCH3		2,818	0.43 %
鋼筋混凝土造小計			132,790	20.44 %
加強磚造	RML	1,634,896	247,620	38.11 %
	RMM		11,076	1.70 %
加強磚造小計			258,696	39.81 %
磚石造	GM	677,238	145,994	22.47 %
鋼構造	SS	25,686	2,840	0.44 %
鐵皮屋	ST	28,318	4,683	0.72 %
木構造	WC	296,138	64,302	9.90 %
純土造	MC	126,724	40,508	6.23 %
總計		4,114,829	649,813	—

資料來源：本研究分析、整理。

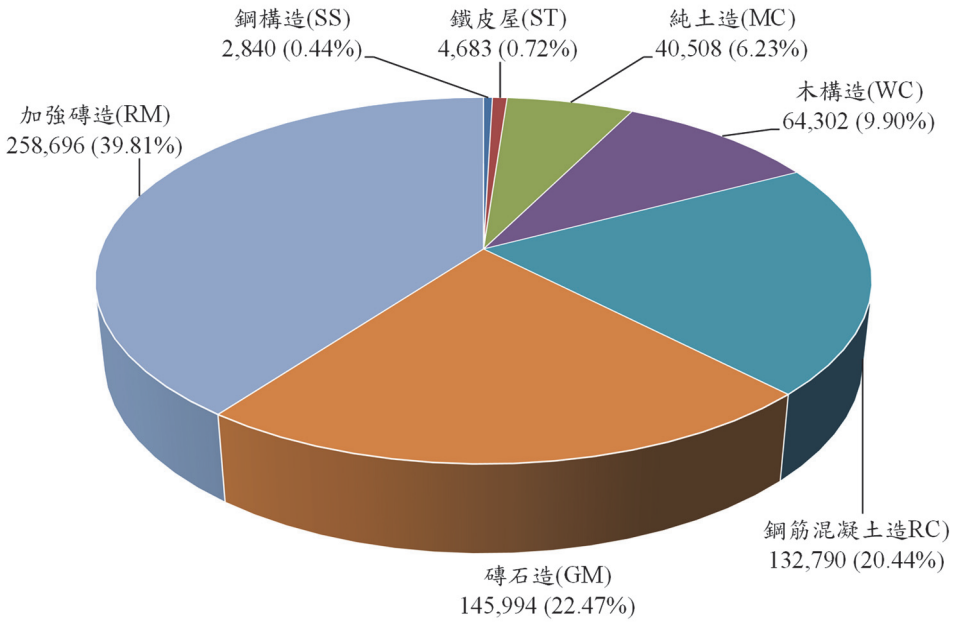


圖 4-4　各構造系別建築物比例

二、研究區建築物震損統計

(一)不分構造系別之建築物震損統計

藉由鏈結各構造系別之建築物資料庫及建築物損害資料庫，可以得到研究區建築物震損情形。以全部損害建築物統計，如圖 4-5 所示，研究區內損害之各類建築物共計 52,922 棟，佔全部建築物之 8.15%；其中全倒共計 24,272 棟(佔全部建築物 3.74%)，半倒共計 28,650 棟(佔全部建築物 4.41%)。

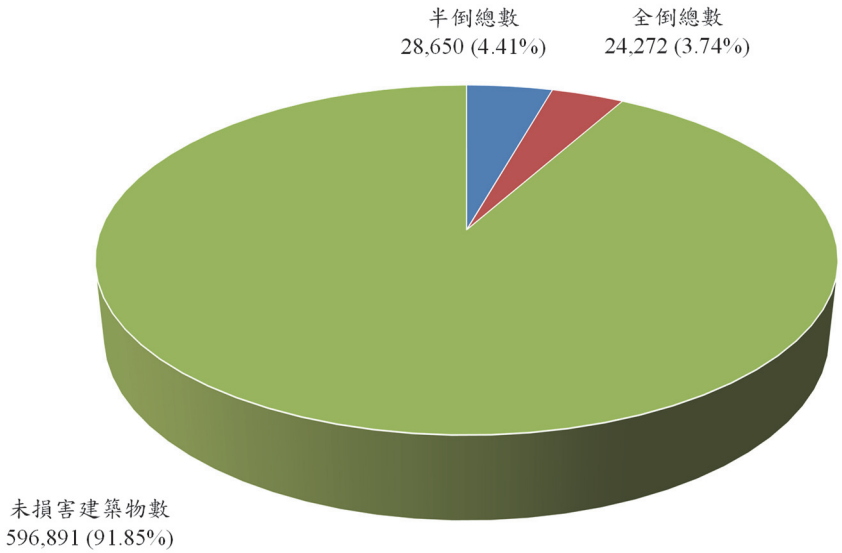


圖 4-5　損害建築物比例

(二)各類損害建築物之統計

如圖 4-6 所示，以各類建築物統計其中早期規範低樓層鋼筋混凝土造 1,931 棟(RCL1；佔全部損害建築物 3.65%)、中期規範低樓層鋼筋混凝土造 1,963 棟(RCL2；佔全部損害建築物 3.71%)、近期規範低樓層鋼筋混凝土造 1,860 棟(RCL3；佔全部損害建築物 3.51%)、早期規範中樓層鋼筋混凝土造 1,021 棟(RCM1；佔全部損害建築物 1.93%)、中期規範中樓層鋼筋混凝土造 630 棟(RCM2；佔全部損害建築物 1.19%)、近期規範中樓層鋼筋混凝土造 1,333 棟(RCM3；佔全部損害建築物 2.52%)、早期規範高樓層鋼筋混凝土造 16 棟(RCH1；佔全部

損害建築物 0.03%)、中期規範高樓層鋼筋混凝土造 12 棟(RCH2；佔全部損害建築物0.02%)、近期規範高樓層鋼筋混凝土造427棟(RCH3；佔全部損害建築物 0.81%)、低樓層加強磚造 16,324 棟(ML；佔全部損害建築物 30.85%)、中樓層加強磚造 1,101 棟(RMM；佔全部損害建築物 2.08%)、磚石造 13,621 棟(GM；佔全部損害建築物 25.74%)、鋼構造 118 棟(SS；佔全部損害建築物 0.22%)、鐵皮屋 260 棟(ST；佔全部損害建築物 0.49%)、木構造 4,089 棟(WC；佔全部損害建築物 7.73%)和純土造 8,216 棟(MC；佔全部損害建築物 15.52%)。

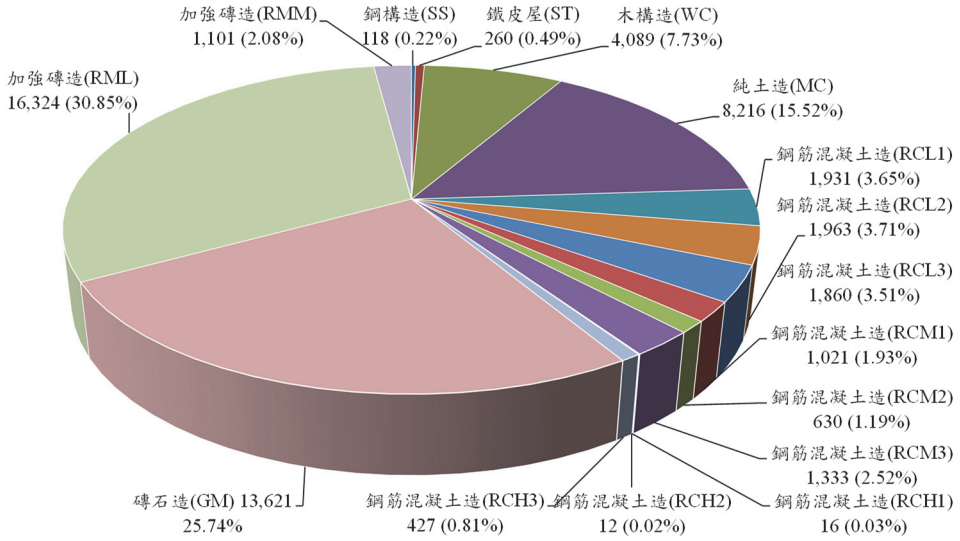


圖 4-6　各類建築物損害比例

由圖 4-6 中顯示 58.67 %之損害建築物為磚造建築物(包含加強磚造及磚石造)，其次為鋼筋混凝土造建築物(17.37%)，再次依序為純土造、木構造、鐵皮屋及鋼構造。以鋼筋混凝土而言，三個規範時期之建築物損害皆以低樓層最高、中樓次之、高樓層再次之。然而由於未包含未損害建築物統計，無法據此比較其耐震能力高低，僅呈現研究區各類損害建築物之所佔比例。

(三)各類建築物震災統計

對於研究區內各類建築物在 921 地震中之震災統計，可將各類建築物震損情形分別以其全倒、半倒及無損害建築物統計。如表 4-5 所

示，鋼筋混凝土造全倒共計 2,972 棟(佔全部鋼筋混凝土造 2.24%)半倒共計 6,221 棟(全部鋼筋混凝土造 4.68%)加強磚造全倒共計 6,487 棟(全部加強磚造 2.51%）半倒共計 10,938 棟(全部加強磚造 4.23%)磚石造全倒共計 6,724 棟(全部磚石造 4.61%)，半倒共計 6,897 棟(佔全部磚石造 4.72%)；鋼構造全倒共計 39 棟(佔全部鋼構造 1.37%)，半倒共計 79 棟(佔全部鋼構造 2.78%)；鐵皮屋全倒共計 105 棟(佔全部鐵皮屋 2.24%)，半倒共計 155 棟(佔全部鐵皮屋 3.31%)；木構造全倒共計 2,179 棟(佔全部木構造 3.39%)，半倒共計 1,910 棟(佔全部木構造 2.97%)；純土造全倒共計 5,766 棟(佔全部純土造 14.23%)，半倒共計 2,450 棟(佔全部純土造 6.05%)。

表 4-5　各類建築物震災統計

構造	代號	建築物總數	半倒總數	半倒比例	全倒總數	全倒比例
鋼筋混凝土造	RCL1	27,639	1,209	4.37 %	722	2.61 %
	RCL2	27,201	1,500	5.51 %	463	1.70 %
	RCL3	27,075	1,178	4.35 %	682	2.52 %
	RCM1	16,267	631	3.88 %	390	2.40 %
	RCM2	10,973	424	3.86 %	206	1.88 %
	RCM3	19,980	1,009	5.05 %	324	1.62 %
	RCH1	340	10	2.94 %	6	1.76 %
	RCH2	497	10	2.01 %	2	0.40 %
	RCH3	2818	250	8.87 %	177	6.28 %
鋼筋混凝土造小計		132,790	6,221	4.68 %	2,972	2.24 %
加強磚造	RML	247,620	10,207	4.12 %	6,117	2.47 %
	RMM	11,076	731	6.60 %	370	3.34 %
加強磚造小計		258,696	10,938	4.23 %	6,487	2.51 %
磚石造	GM	145,994	6,897	4.72 %	6,724	4.61 %
鋼構造	SS	2,840	79	2.78 %	39	1.37 %
鐵皮屋	ST	4,683	155	3.31 %	105	2.24 %
木構造	WC	64,302	1,910	2.97 %	2,179	3.39 %
純土造	MC	40,508	2,450	6.05 %	5,766	14.23 %
總計		649,813	28,650	4.41 %	24,272	3.74 %

資料來源：本研究分析、整理。

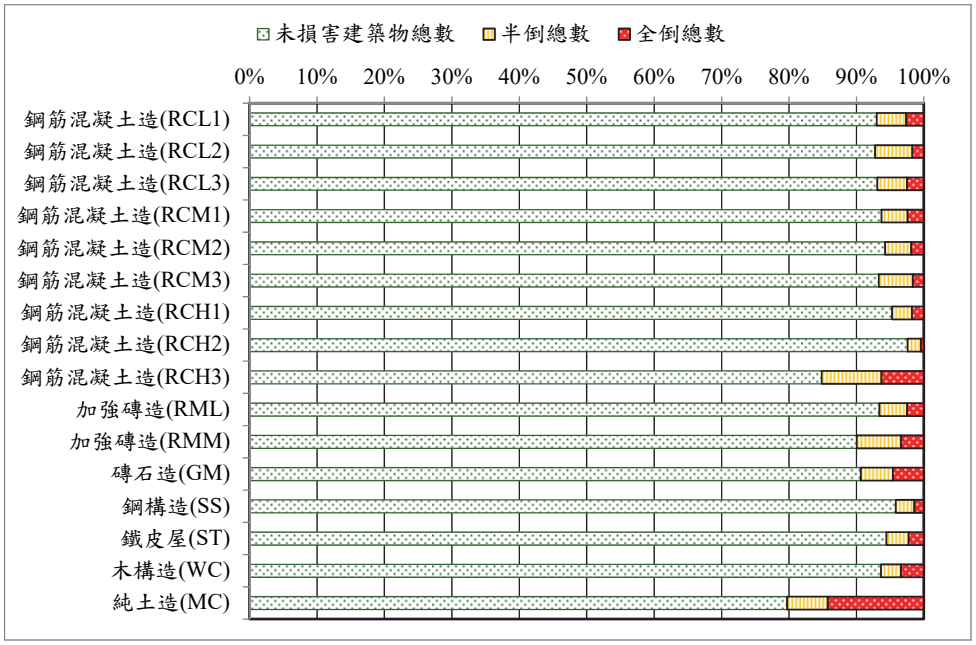


圖 4-7　研究區各類建築物全、半倒比例

圖 3.9 以長條圖表示各類建築物之全、半倒比例，可清楚地顯示以純土造損害之建築物比例最高，在研究區中超過 20%之純土造建築物損害，中樓層加強磚造建築物及磚石造建築物則有接近 10%之損害為最多。此反應出此三類建築物之構造特性皆具有較弱之耐震能力。

第四節　建築物易損性曲線

本研究針對所定義之 16 類建築物，利用 921 地震之建築物震損資料庫以第二章第五節所介紹之易損性分析方法-多項分布型網格法建立建築物易損性曲線。本研究對於網格法是以村里為單元進行分析，經由前節的建物資料庫進一步整合為村里致災資料，計算其震度與損壞率，再進行易損性分析，建築物易損性曲線係根據前述可能影響建物倒塌破壞因子所定義之分類，如表 4-2 所示共計 16 種組合，各類建築物能夠利用建築物易損性曲線所對應的 PGA 關係，估計某震度下的倒塌機率，進而描述任一震度下之全半倒塌可能性。研究分析所得之坡地易損性參數分析結果如表 4-6 所示，各類建築物全、半倒易損性曲線和致災資料點共繪如圖 4-8 至圖 4-15 所示。

表 4-6　建築物易損性參數

代號	定義	半倒中位數 ($981cm/s^2$)	全倒中位數 ($981cm/s^2$)	標準差
RCL1	早期低樓層鋼筋混凝土造	0.58	0.72	0.37
RCL2	中期低樓層鋼筋混凝土造	0.62	0.85	0.38
RCL3	近期低樓層鋼筋混凝土造	0.77	1.02	0.52
RCM1	早期中樓層鋼筋混凝土造	0.49	0.60	0.31
RCM2	中期中樓層鋼筋混凝土造	0.52	0.66	0.31
RCM3	近期中樓層鋼筋混凝土造	0.65	0.91	0.43
RCH1	早期高樓層鋼筋混凝土造	0.52	0.65	0.41
RCH2	中期高樓層鋼筋混凝土造	0.72	1.06	0.53
RCH3	近期高樓層鋼筋混凝土造	0.62	0.83	0.39
RML	低樓層加強磚造	0.70	0.91	0.47
RMM	中樓層加強磚造	0.65	0.89	0.50
GM	磚石造	0.66	0.81	0.48
SS	鋼構造	0.77	1.02	0.50
ST	鐵皮屋	0.80	1.04	0.55
WC	木造	0.76	0.91	0.50
MC	純土造	0.56	0.65	0.50

資料來源：本研究分析、整理

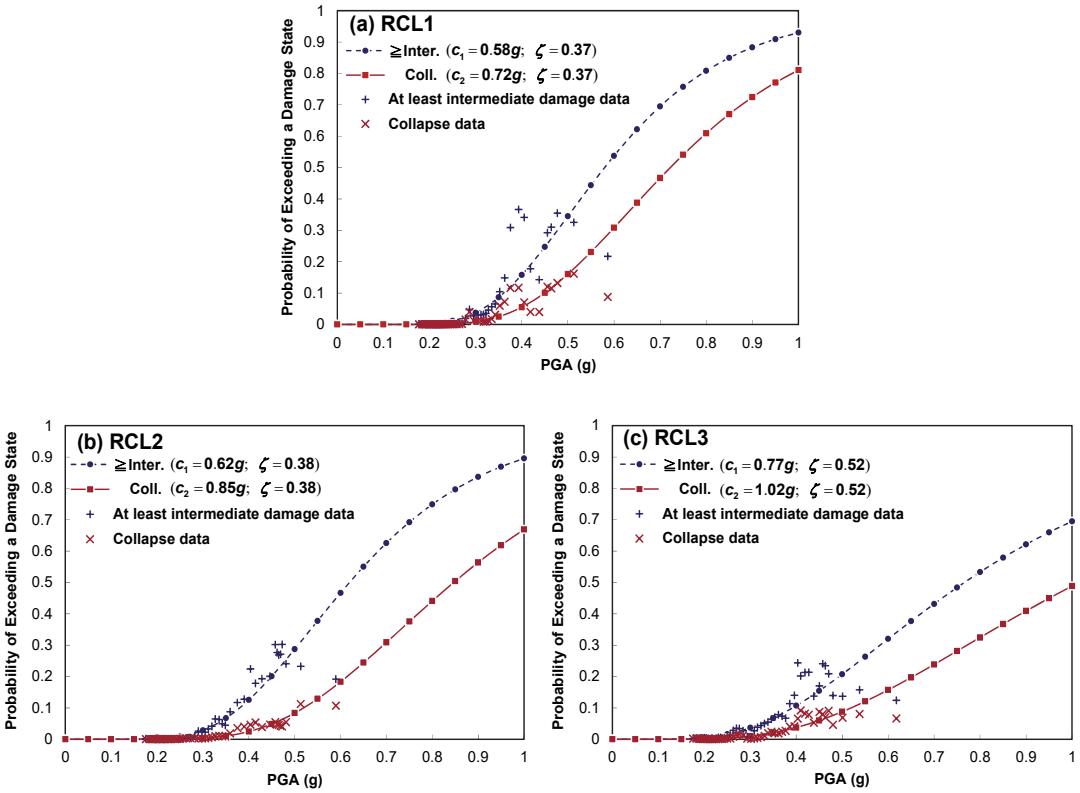


圖 4-8　低樓層鋼筋混凝土造之易損性曲線

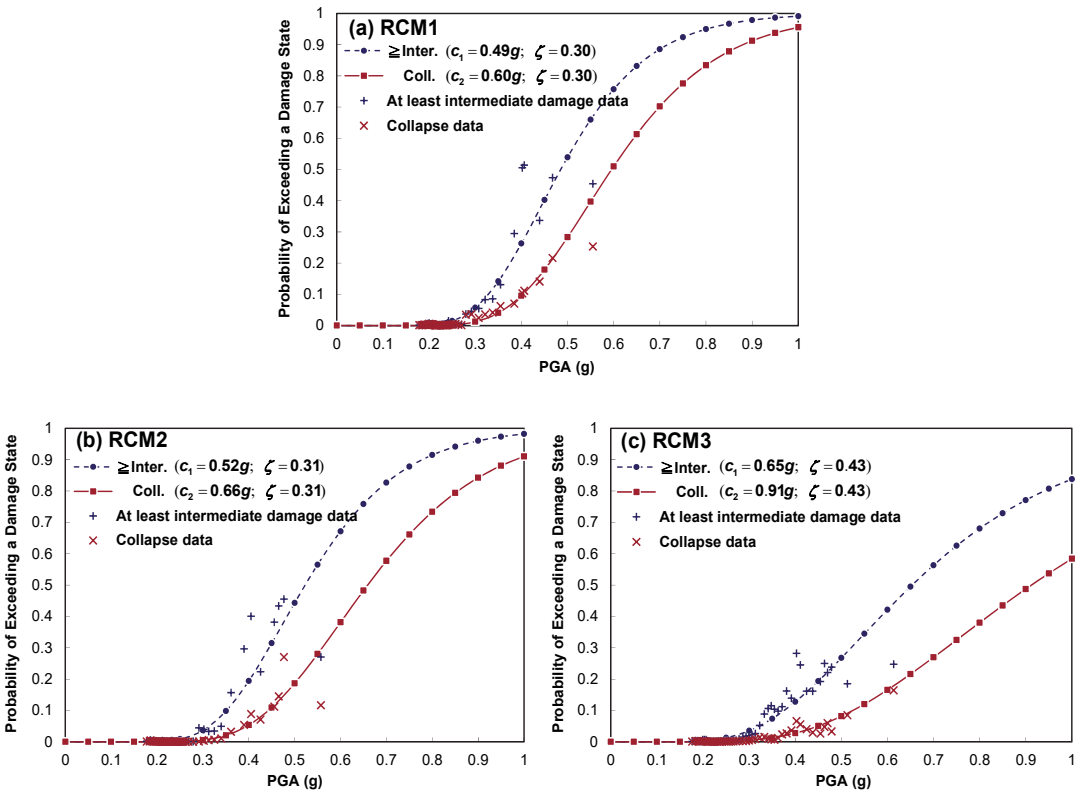


圖 4-9　中樓層鋼筋混凝土造之易損性曲線

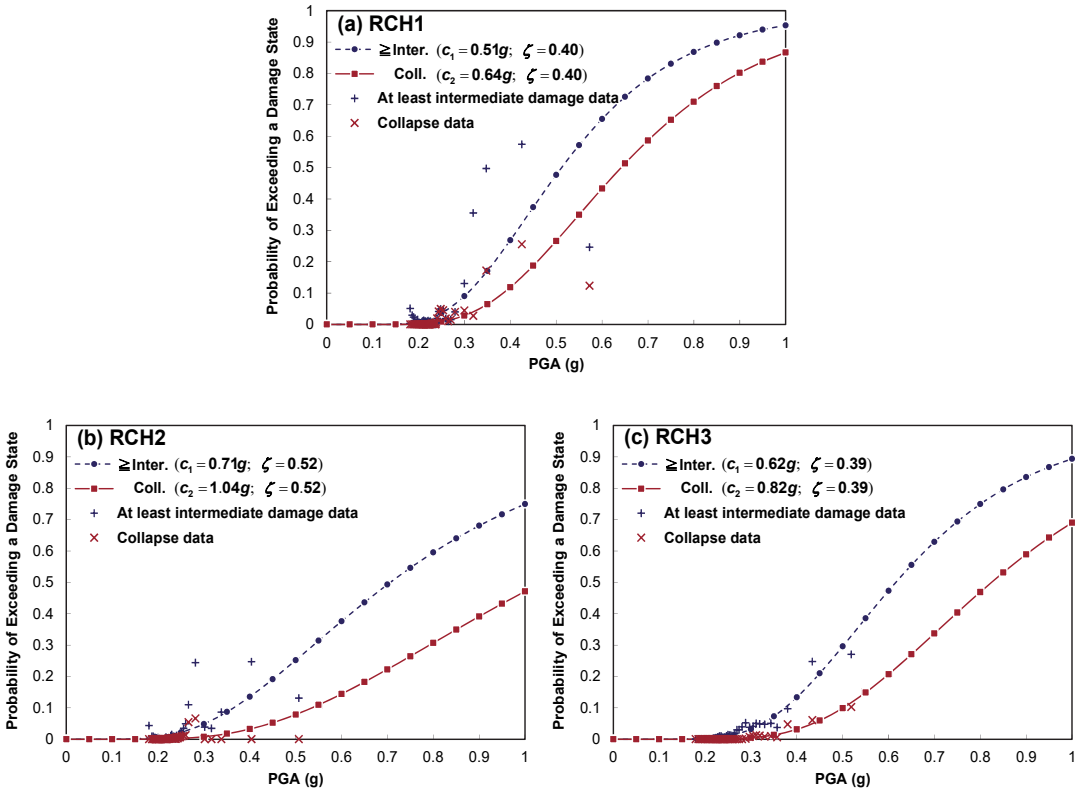


圖 4-10　高樓層鋼筋混凝土造之易損性曲線

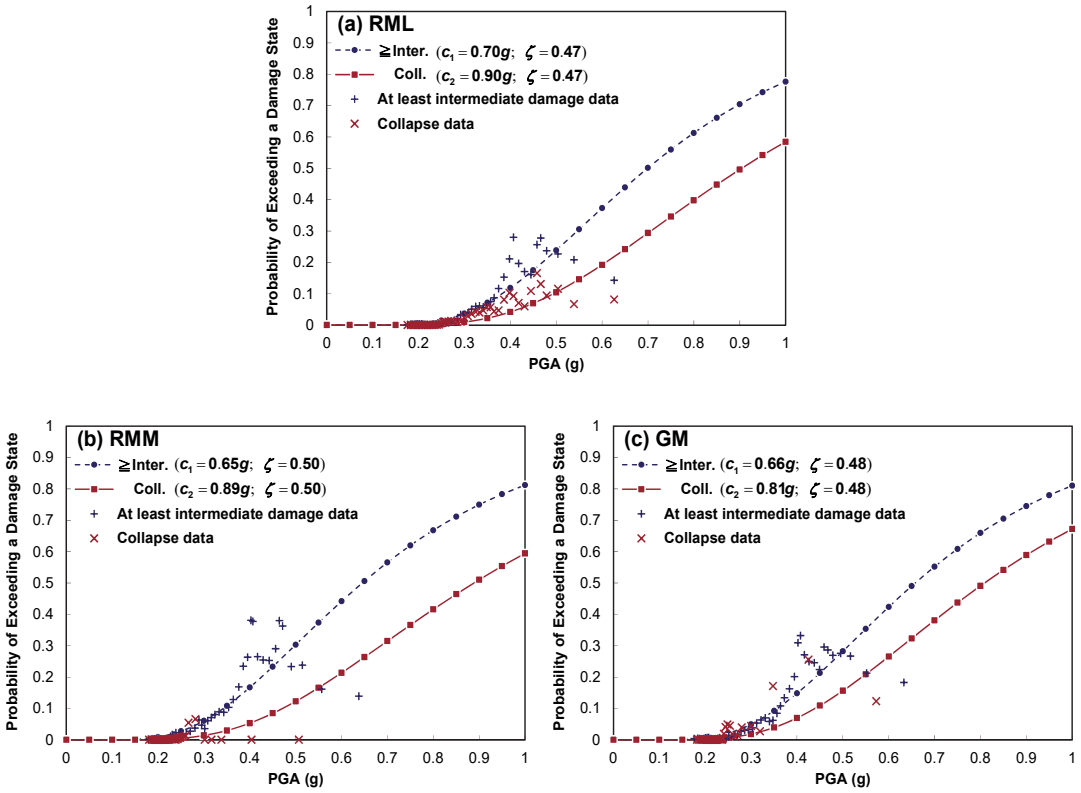


圖 4-11　加強磚造及磚石造之易損性曲線

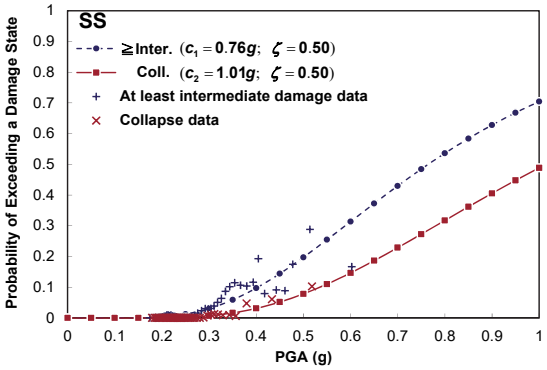


圖 4-12　鋼構造之易損性曲線

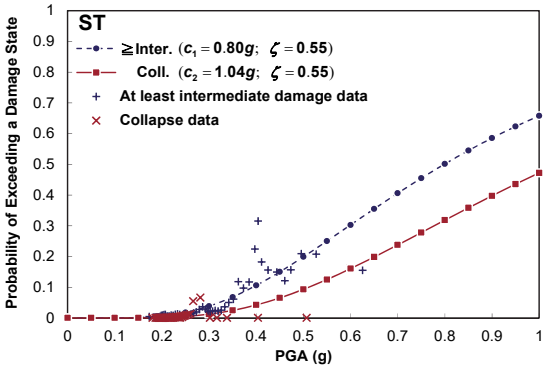


圖 4-13　鐵皮屋之易損性曲線

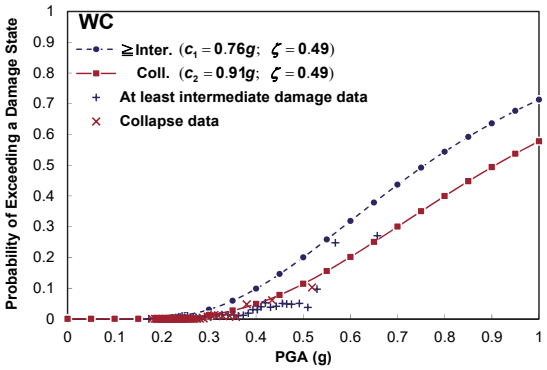


圖 4-14　木造之易損性曲線

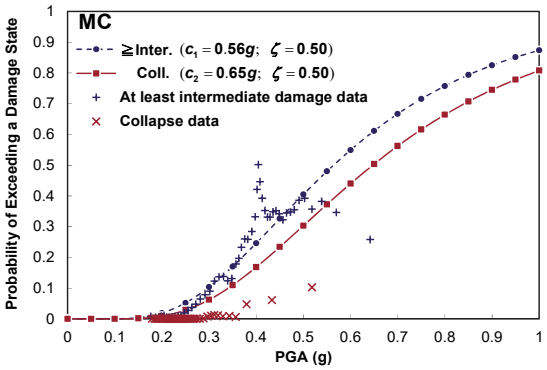


圖 4-15　純土造之易損性曲線

第五章　山區災害潛勢早期評估模式建立與應用

台灣位處於菲律賓海和歐亞大陸板塊之間，是地震非常頻發的地區，本島和鄰近海域平均每 2.5 年就發生一次規模達到 7 以上的地震，地震的危害度非常高，例如 921 地震就造成非常嚴重的災情，除了建物損害，崩塌也是地震可能造成的現象。因此對於坡地佔 74%的台灣，坡地災害的管理就不能不重視震後山區災害的潛勢，例如建物倒塌、坡地崩塌、道路阻斷等。本研究將地震過後，山區災害潛勢的樣態分為幾個重要的部分，如圖 5-1 所示，包括地震誘發聚落鄰近坡面的崩塌、山區道路兩側坡面崩塌造成的道路阻斷、以及地震直接造成建築物的倒塌等，這些災害的後果就可能發生建物及橋梁損害、人員財產損失和孤島效應導致的救災困難。對於致災誘因，地震和降雨的差別是，對於降雨而言，因為事件發生距災害發生還有一段時間，我們可以比較早知道、甚至預測降雨的規模和雨量，也就可以及時進行警戒、撤離等應變作為。但是對於目前仍無法預測的地震，地震發生相當突然因此難以應變，如果可在地震發生初期就能有早期評估的工具，對於震後的坡地防災就有相當大的幫助。

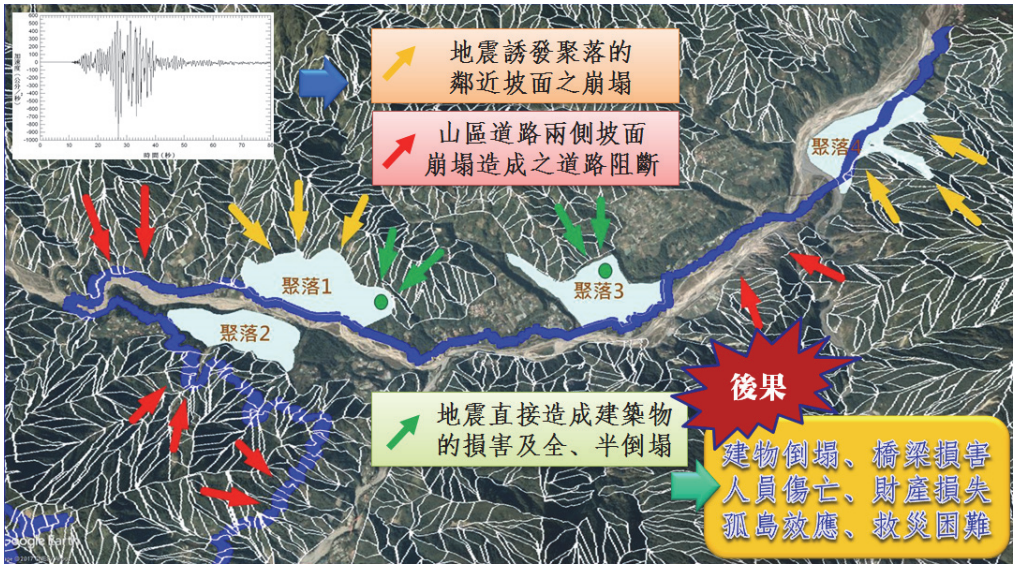


圖 5-1　地震後的主要山區災害潛勢

第一節　示範區聚落基本資料調查蒐集

壹、示範聚落選定

本研究主要針對地震衝擊的災害風險，包括山區聚落影響、道路阻斷、建物倒塌等問題。發展易損性評估模式在災前可進行潛勢評估與分析、災中做作為地震早期評估的工具。針對地震後的山區災害早期評估工作，主要包含以下三個部分

(一)地震誘發崩塌之聚落影響評估。

(二)地震誘發崩塌之山區道路阻斷評估。

(三)地震直接引致之建物倒塌災損評估。

上述三項風險評估藉由易損性模式可進行災前及災中的模擬分析，即包括災前的地震誘發山區災害之潛勢評估與分析，與災中的地震誘發山區災害之地震早期評估。因此在示範山區聚落選擇上，選取研究範圍內具有相關特性的區域。

本研究以台 14 線沿線聚落為對象，首先針對聚落進行危險坡面和建築物調查，如圖 5-2，包括平林里、福龜村和大石村等地，具有連貫和共同連絡道路，在防災上可視為一整體防災生活圈，行政區域皆隸屬於南投縣，總面積約 24.3 平方公里，總戶數約 1,480 戶，總人口約 4,292 人(南投縣政府民政局網站，2018)。



圖 5-2　示範聚落

一、平林里

平林里位於南投縣草屯鎮九九峰下，其地理位置如圖 5-3 所示，草屯鎮位於臺灣本島中部，南投縣的西北方，主要公路有台 14 線、台 3 線、台 76 線、中投公路、國道三號以及國道六號，是全縣人口第二多的鄉鎮，其中平林里總面積約 9.6 平方公里，總戶數約 398 戶，總人口約 1,273 人。



圖 5-3　平林里地理位置

二、福龜村

福龜村位於南投縣國姓鄉，其地理位置如圖 5-4 所示，國姓鄉主要公路經國道 6 號、台 14 線、台 21 線，於縣道 133 號連接台 14 線與台 21 線，其它行政區包含長福村、長豐村、長流村、北港村、大旗村、大石村等，其中大石村為另一示範區聚落，福龜村總面積約 5.7 平方公里，總戶數約 142 戶，總人口約 765 人。

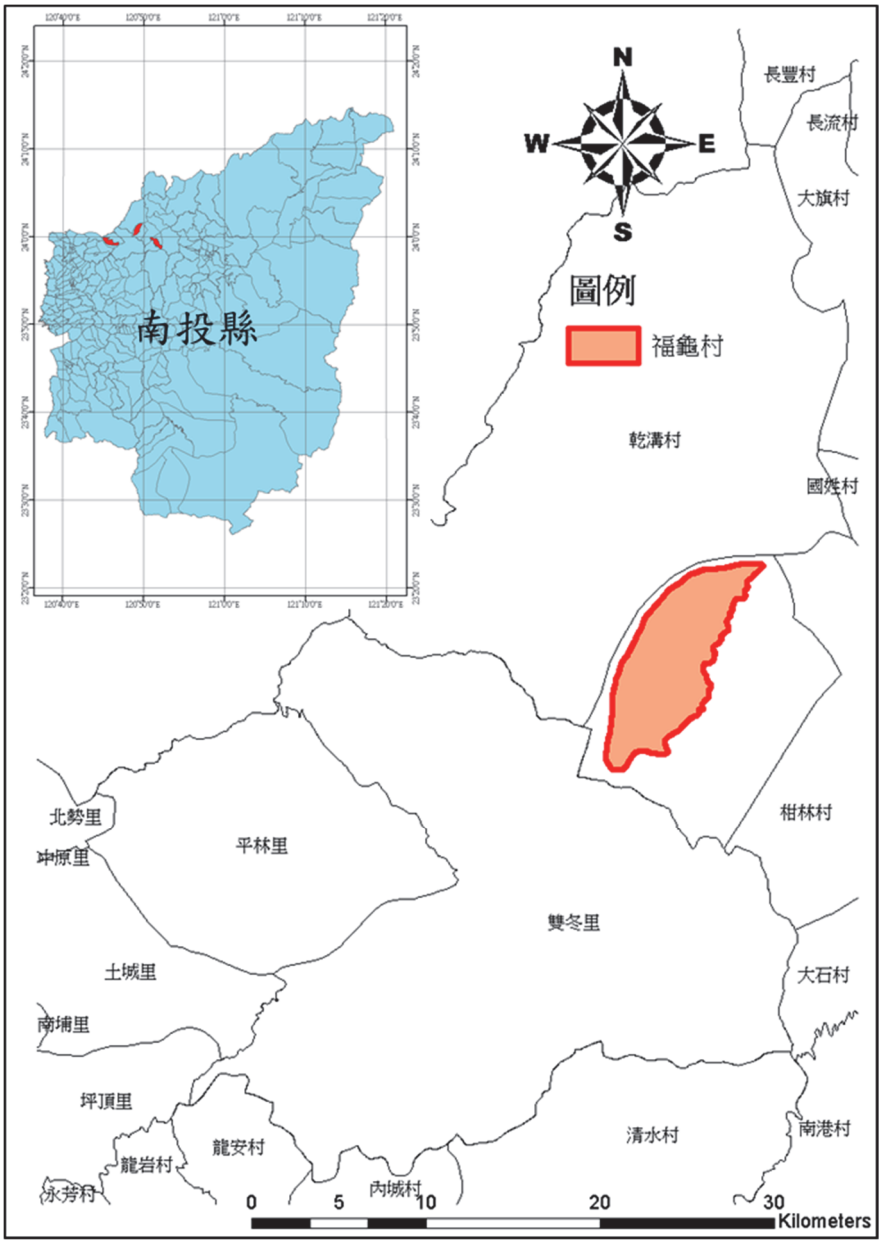


圖 5-4　福龜村地理位置

三、大石村

大石村位於南投縣國姓鄉，其地理位置如圖 5-5 所示，國姓鄉主要公路經國道 6 號、台 14 線、台 21 線，於縣道 133 號連接台 14 線與台 21 線，其它行政區包含長福村、長豐村、長流村、北港村、大旗村、福龜村等，其中福龜村為另一示範區聚落，大石村總面積約 9 平方公里，總戶數約 317 戶，總人口約 877 人。



圖 5-5　大石村地理位置

貳、路網分布

本研究主要以台 14 線作為研究對象，為經大石村、福龜村、平林里之道路，並緊鄰烏溪流域。台 14 線為省道，起自彰化市，結束於南投縣仁愛鄉，全長 99.021 公里，台 3 線的臺中市至草屯，接台 14 線草屯至埔里段與台 21 線的埔里至日月潭，這 3 段合稱中潭公路，其地理位置如圖 5-6 所示。



圖 5-6　台 14 線地理位置與示範聚落關係

本研究以台 14 線作為防災路線的聯絡主幹道，在台 14 線的基礎下，各聚落規劃以大於 8 米之一般道路作為防災道路，各示範聚落之路網如圖 5-7 至圖 5-9 所示。

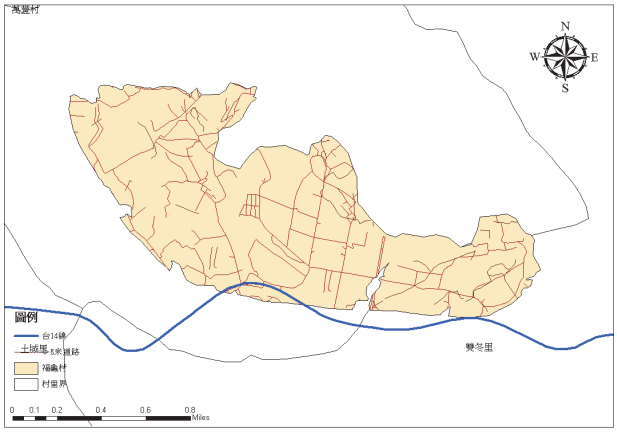


圖 5-7　平林里路網

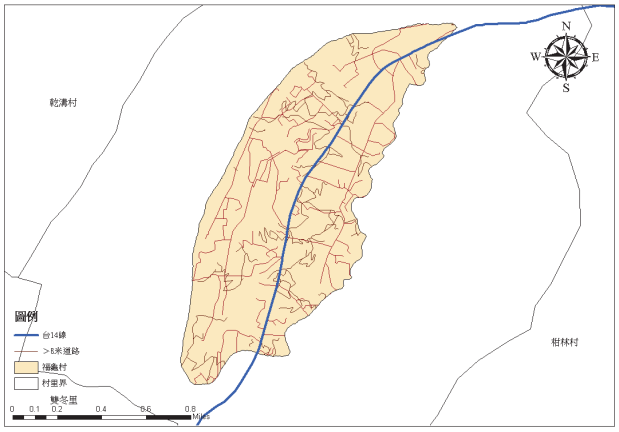


圖 5-8　福龜村路網

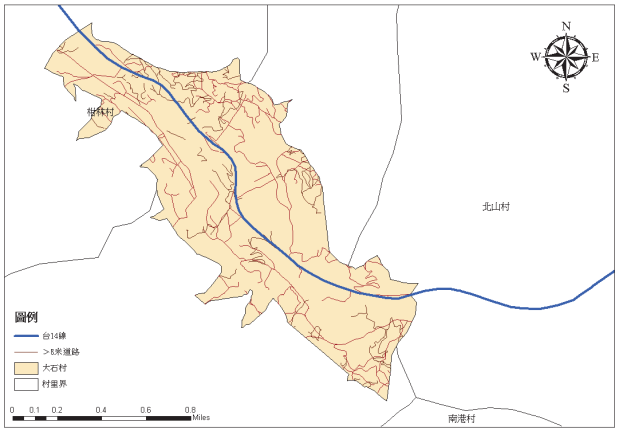


圖 5-9　大石村路網

參、地質

本研究以第二章所述李錫堤等人(Lee *et al.*, 2001)之地質分類作為示範聚落地質之依據，於平林里中主要為 C 類及 D 類，其中 C 類占 67%、D 類占 33%，福龜村和大石村則全部為 C 類，各聚落周遭之坡面略有不同，但大部分地質以 C 類為主。

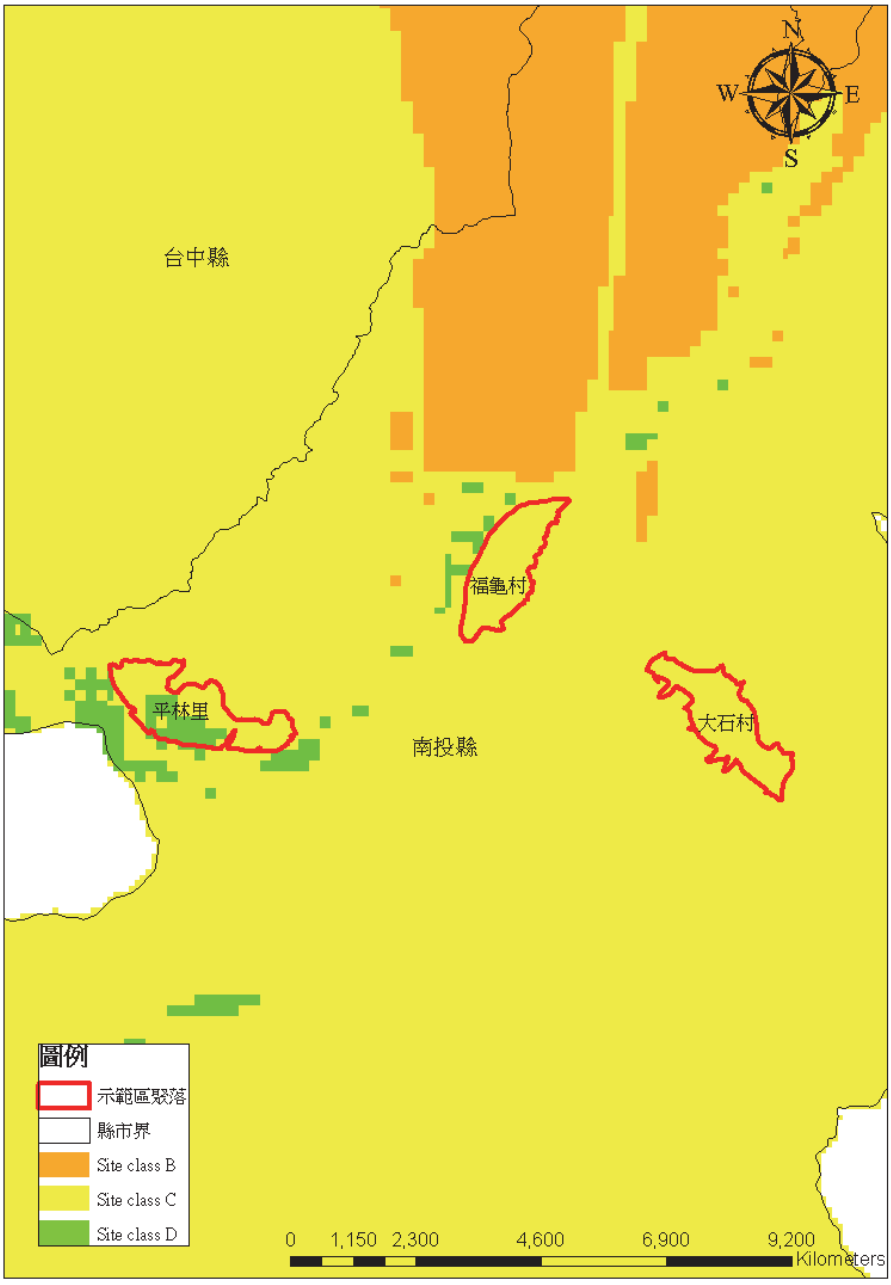


圖 5-10　示範聚落之地質分類圖

肆、高程

高程因子可由數值高程模型(DEM)中直接套取出來，本研究將示範聚落高程因子依高度分成 10 組，如圖 5-11 所示。烏溪流域高程範圍落在 30m~1,482m，而示範聚落平林里周圍高程平均為 54m~482m，福龜村周圍高程平均為 162m~527m，大石村周圍高程為 202m~711m。

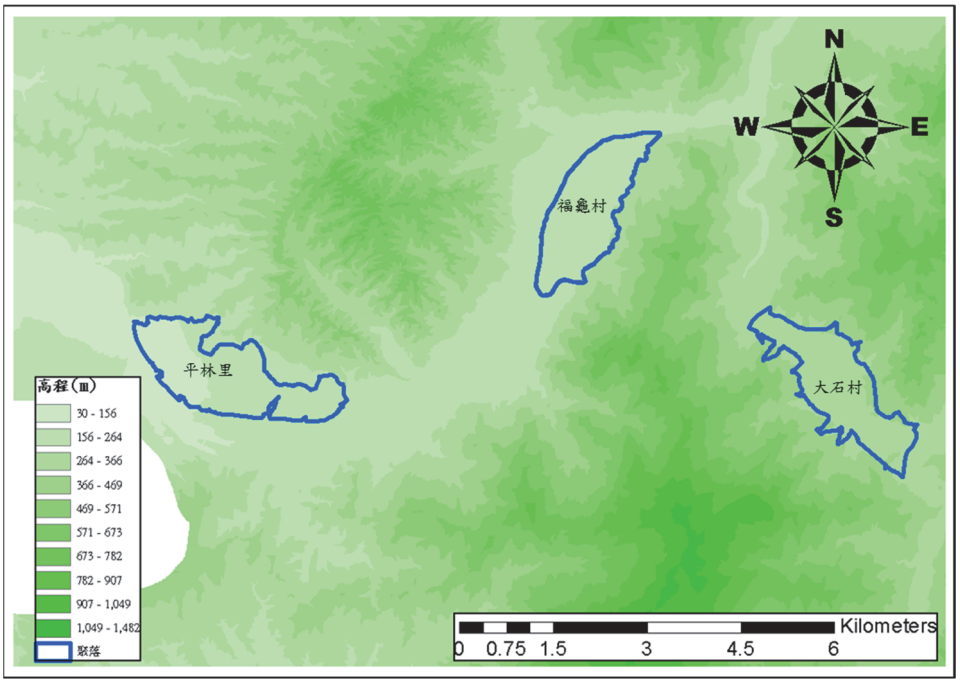


圖 5-11　示範聚落高程圖

伍、坡度

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)，亦可以百分比表示，即高程增量除以水平增量再乘以 100%。如圖 5-12 所示，烏溪集水區坡度範圍為 0 度~41 度，而示範聚落平林里周遭坡度平均為 29 度，福龜村周遭坡度平均為 23 度，大石村周遭坡度平均為 24 度。

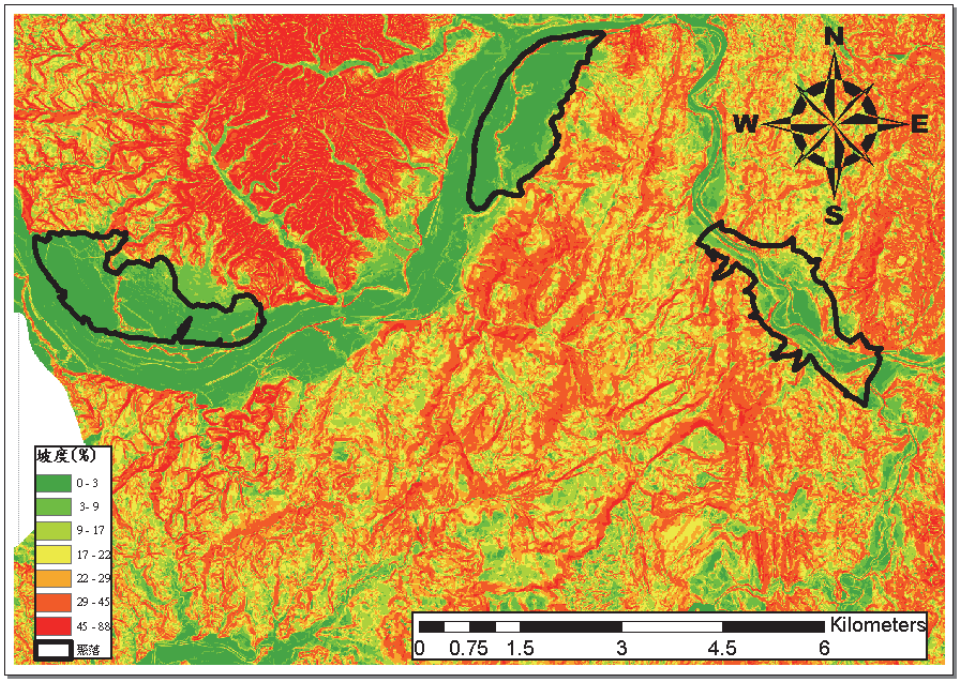


圖 5-12　示範聚落坡度圖

陸、坡向

坡向的計算是以角度為單位按逆時針方向從 0 度(正北方向)至 360 度來度量其方位角，並分為 9 個方向，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。在烏溪流域中平坡較少，而示範區聚落坡向大多為東南向、西北向，如圖 5-13 所示。

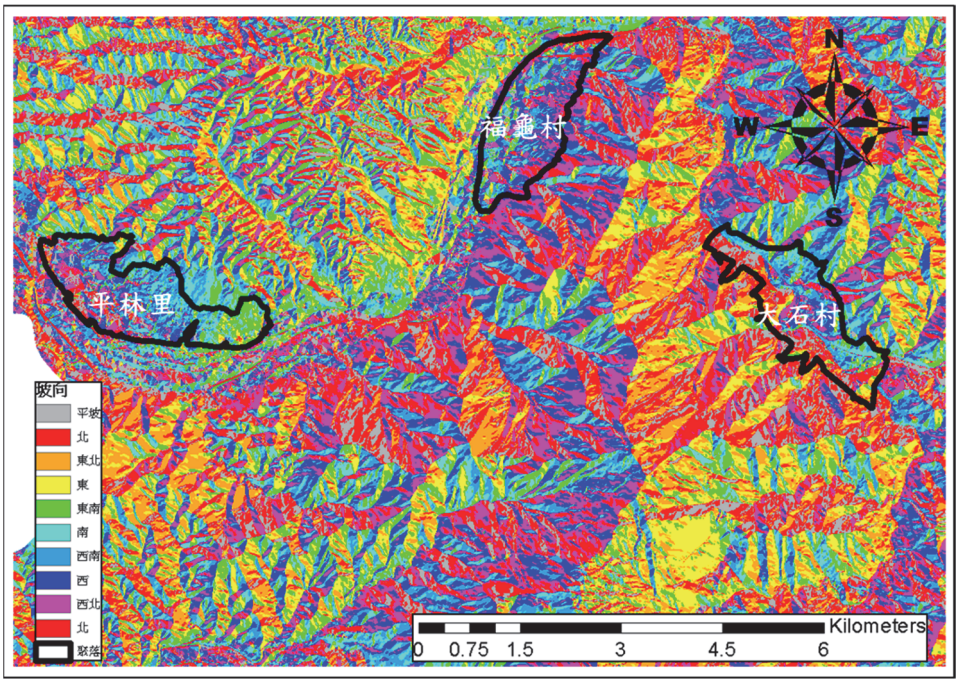


圖 5-13　示範聚落坡向圖

柒、建築物

本研究藉由臺灣財政部財稅資料中心提供之房屋稅籍資料庫，利用房屋稅籍資料整併三村里之建築物資料屬性，得到各類建築物之統計資料，如表 5-1 所示。由於三村里位屬山區，因此房屋屬性多為中低樓層房屋，且多屬抗震能力較弱的結構。由建物統計資料中發現，三村里皆無高層結構，且以加強磚造為最多、其次為磚石造、再次為純土造，此三類結構屬性佔 80%以上，其它類型結構較少。總棟數分別為平林里 306 棟，福龜村 799 棟，大石村 261 棟。以土地使用比例而言建物密度及密集度皆低，早期鋼筋混凝土造較少，自上世紀 80 年代後始有鋼筋混凝土造建物出現，顯示三村里建物及經濟環境特性。

表 5-1　示範聚落建物統計

代號	定義	平林里		福龜村		大石村	
RCL1	早期低樓層鋼筋混凝土造	3	0.98%	3	0.38%	1	0.38%
RCL2	中期低樓層鋼筋混凝土造	3	0.98%	25	3.13%	1	0.38%
RCL3	近期低樓層鋼筋混凝土造	10	3.27%	16	2.00%	1	0.38%
RCM1	早期中樓層鋼筋混凝土造	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%
RCM2	中期中樓層鋼筋混凝土造	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%
RCM3	近期中樓層鋼筋混凝土造	1	0.33%	1	0.13%	0	0.00%
RCH1	早期高樓層鋼筋混凝土造	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%
RCH2	中期高樓層鋼筋混凝土造	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%
RCH3	近期高樓層鋼筋混凝土造	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%
RML	低樓層加強磚造	137	44.77%	304	38.05%	82	31.42%
RMM	中樓層加強磚造	3	0.98%	10	1.25%	1	0.38%
GM	磚石造	71	23.20%	237	29.66%	72	27.59%
SS	鋼構造	1	0.33%	1	0.13%	0	0.00%
ST	鐵皮屋	4	1.31%	3	0.38%	0	0.00%
WC	木造	8	2.61%	44	5.51%	37	14.18%
MC	純土造	65	21.24%	155	19.40%	66	25.29%
合計		306	100.0%	799	100.0%	261	100.0%

資料來源：本研究整理。

第二節　示範區聚落影響坡面分析

壹、聚落之影響坡面

烏溪流域所劃定之坡面單元總數為 6,333 個坡面單元，總面積為 45,439.4ha，本研究針對示範聚落平林里、福龜村、大石村等周遭可能對聚落有危害之坡面劃定為影響坡面，示範聚落鄰近完整的坡面分布如圖 5-14 所示。

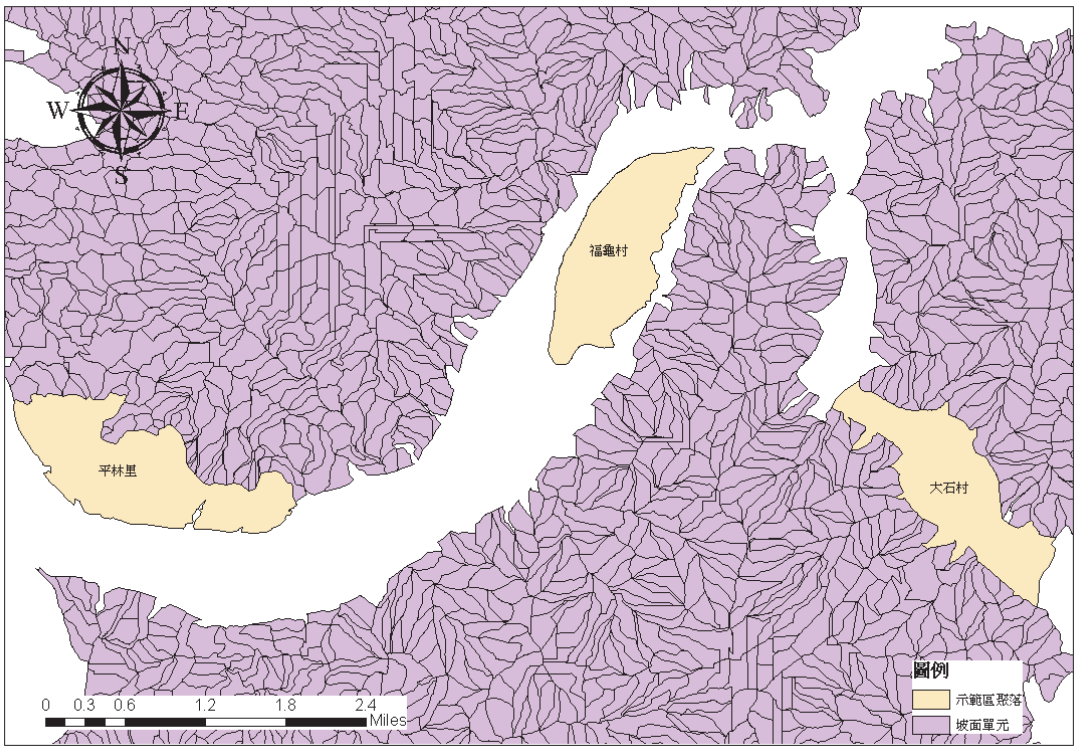


圖 5-14　烏溪流域坡面單元

鄰近坡面單元不一定就具有危險，本研究使用 ArcGIS 軟體及 Google Earth，以人工選取及比對的方式進行影響坡面單元之劃定，如圖 5-15 所示，除考慮是否影響聚落，並透過實際山稜線切割，選取崩塌後可能會影響聚落之坡面單元，如圖 5-16 所示。根據上述劃定之影響坡面，平林里、福龜村、大石村之影響坡面如圖 5-17 至圖 5-19 所示。影響坡面單元經統計後，總坡面單元數為 235 個，總面積為 1570.36ha，其中平林里坡面單元 43 個，占示範區總坡面單元 18.30%，

坡面單元之總面積為 283.51ha，占示範區總坡面面積 18.05%，各坡面分類之統計如表 5-2 所示；福龜村坡面單元 49 個，占示範區總坡面單元 20.85%，坡面單元之總面積為 339.83ha，占示範區總坡面面積 21.64%，各坡面分類之統計如表 5-3 所示；大石村坡面單元 143 個，占示範區總坡面單元 60.85%，坡面單元之總面積為 947.02ha，占示範區總坡面面積 60.31%，大石村各坡面分類之統計如表 5-4 所示。上述可知三村里之坡面數量百分比與面積百分比大致接近，具權重一致性，因此可合理地採用坡面單元作為分析單元。

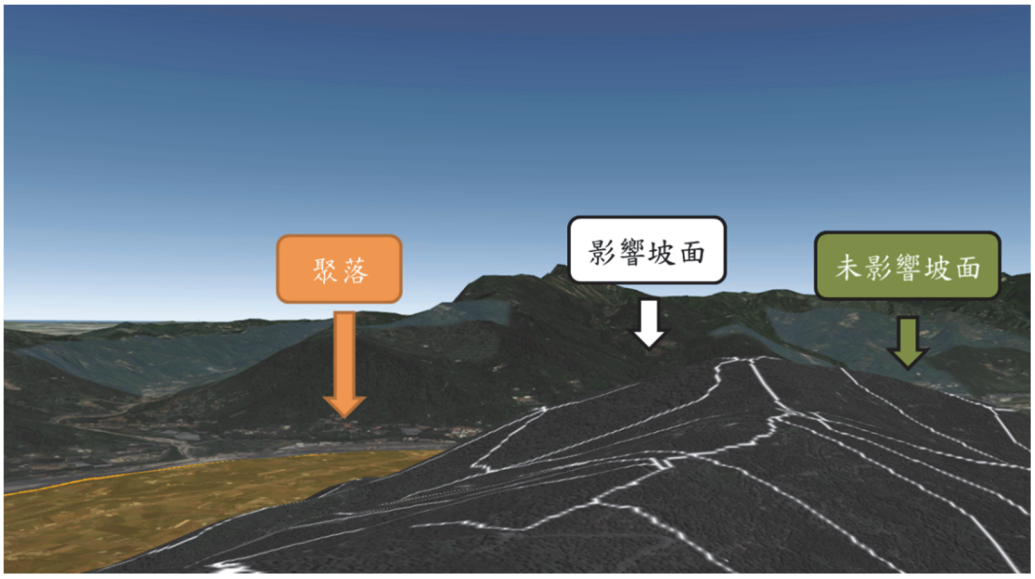


圖 5-15　聚落影響坡面關係

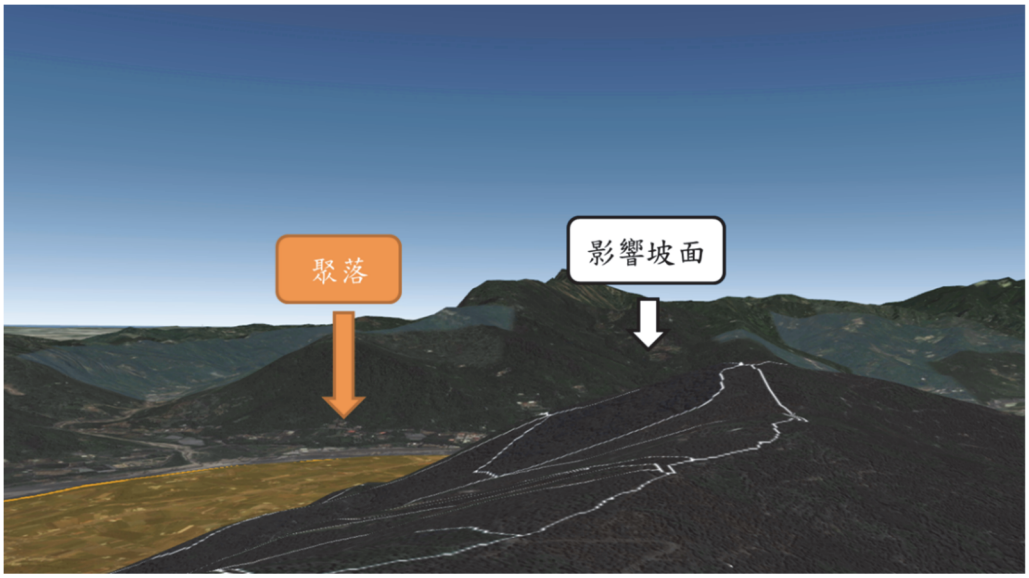


圖 5-16　聚落影響坡面選定

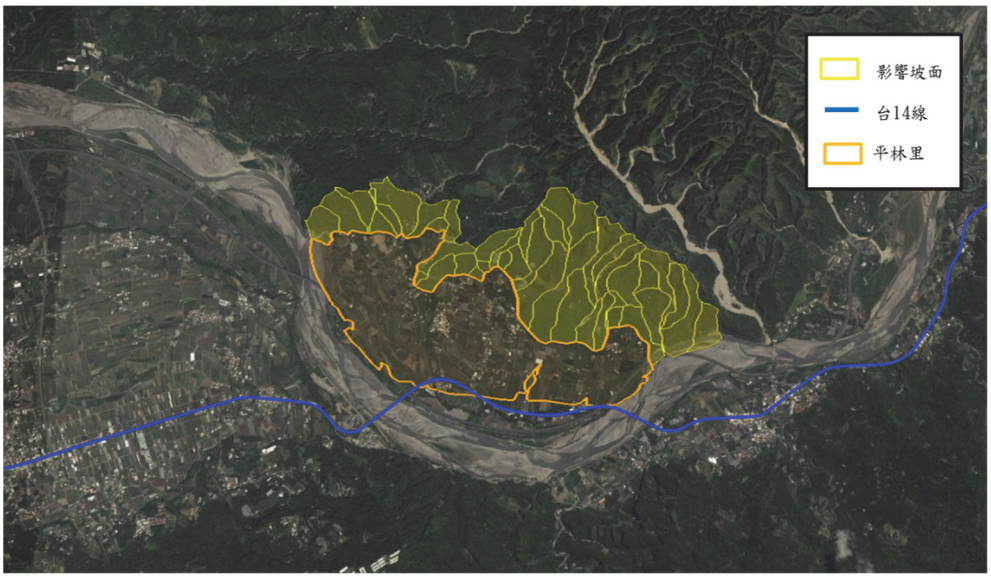


圖 5-17　平林里之影響坡面

表 5-2　平林里影響坡面統計

坡面分類	坡面數量	坡面百分比	面積(ha)	面積百分比
G2A1S1	4	9.30%	21.08	7.44%
G2A1S2	3	6.98%	14.54	5.13%
G2A1S3	4	9.30%	21.33	7.52%
G2A2S1	16	37.21%	83.94	29.61%
G2A2S2	2	4.65%	20.93	7.38%
G2A2S3	14	32.56%	121.69	42.92%
總計	43	100.00%	283.51	100.00%

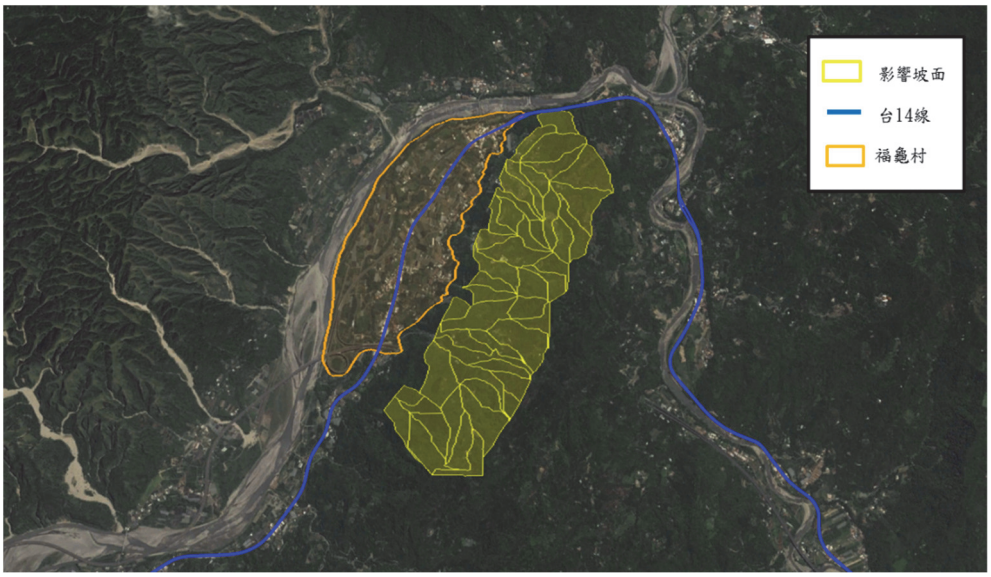


圖 5-18　福龜村之影響坡面

表 5-3　福龜村影響坡面統計

坡面分類	坡面數量	坡面百分比	面積(ha)	面積百分比
G2A1S1	22	44.90%	137.22	40.38%
G2A1S2	5	10.20%	28.16	8.29%
G2A1S3	3	6.12%	11.45	3.37%
G2A2S1	14	28.57%	117.56	34.59%
G2A2S2	4	8.16%	33.83	9.95%
G2A2S3	1	2.04%	11.61	3.42%
總計	49	100.00%	339.83	100.00%

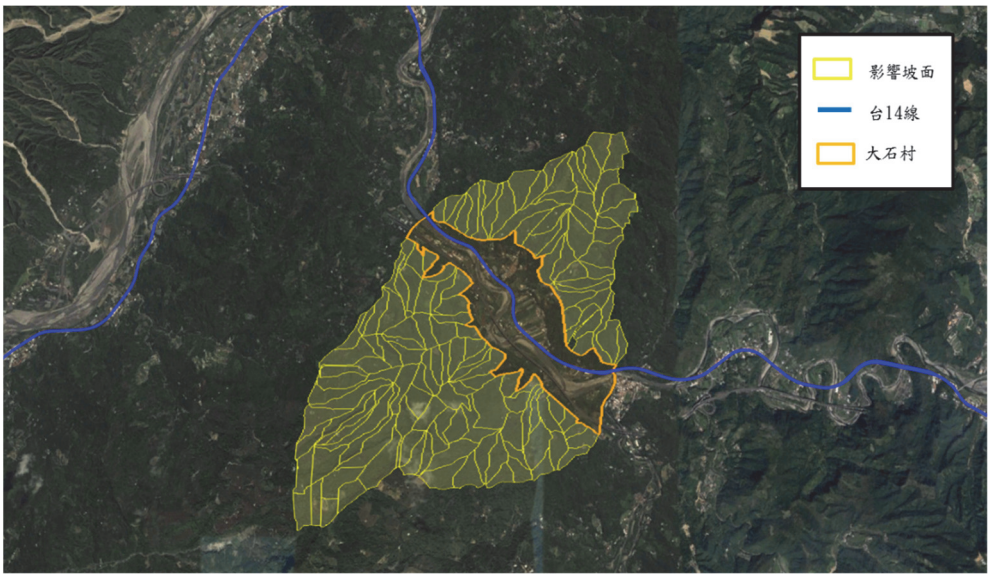


圖 5-19　大石村之影響坡面

表 5-4　大石村影響坡面統計

坡面分類	坡面數量	坡面百分比	面積(ha)	面積百分比
G2A1S1	36	25.17%	236.56	24.98%
G2A1S2	14	9.79%	96.51	10.19%
G2A1S3	5	3.50%	27.41	2.89%
G2A2S1	59	41.26%	408.40	43.12%
G2A2S2	22	15.38%	135.84	14.34%
G2A2S3	7	4.90%	42.30	4.47%
總計	143	100.00%	947.02	100.00%

貳、道路之影響坡面

本研究以台 14 線做為示範道路，為進一步分析其影響坡面，需先將總長 99 公里的台 14 線進行道路分段，並以每 500m 之里程進行分段，其中平林里與福龜村間之里程為 30k+500 至 34k+000 間，福龜村與大石村之間里程為 37k+000 至 42k+000 間，如圖 5-20 所示。

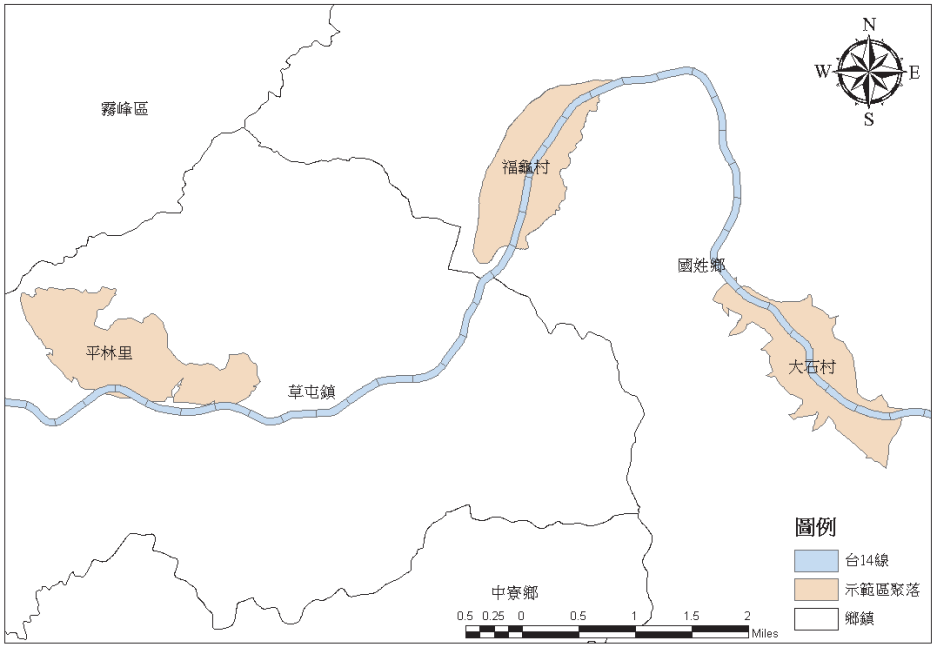


圖 5-20　示範區道路里程

針對台 14 線之道路影響坡面劃定方法，與前述劃定聚落影響坡面方法類似，除考慮是否直接影響道路，並透過實際山稜線切割，選取崩塌後可能會影響道路之坡面單元，針對台 14 線道路沿線二側範圍進行影響坡面劃定，如圖 5-21 至圖 5-22 所示，總坡面單元數為 58 個，總面積為 377.81ha，其中平林里與福龜村間之影響坡面單元數為 31 個，占示範區總坡面單元 53.45%，坡面單元總面積為 210.07ha，占示範區總坡面面積 55.60%，各坡面分類之統計如表 5-5 所示；福龜村與大石村之間影響坡面單元數為 27 個，占示範區總坡面單元 46.55%，坡面單元總面積為 167.74ha，占示範區總坡面面積 44.40%，各坡面分類之統計如表 5-6 所示。



圖 5-21　平林里與福龜村間之道路影響坡面(30K+500 至 34k+000)

表 5-5　平林里與福龜村間之道路影響坡面統計

分類編號	數量	坡面百分比	面積(ha)	面積百分比
G2A1S1	3	9.68%	18.83	8.96%
G2A1S2	1	3.23%	8.04	3.83%
G2A1S3	4	12.90%	30.20	14.38%
G2A2S1	19	61.29%	127.38	60.64%
G2A2S2	2	6.45%	9.45	4.50%
G2A2S3	2	6.45%	16.17	7.70%
總數	31	100.00%	210.07	100.00%

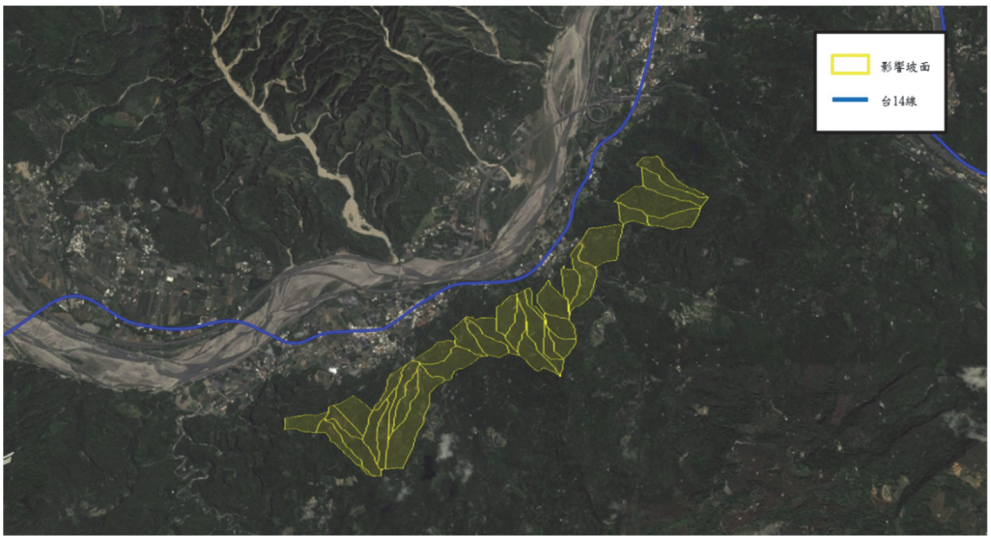


圖 5-22　福龜村與大石村間道路影響坡面(37K+000 至 42K+000)

表 5-6　福龜村與大石村間道路影響坡面統計

分類編號	數量	坡面百分比	面積(ha)	面積百分比
G1A1S1	1	3.70%	4.31	2.57%
G2A1S1	9	33.33%	65.41	38.99%
G2A2S1	15	55.56%	88.71	52.89%
G2A2S2	2	7.41%	9.31	5.55%
總數	27	100.00%	167.74	100.00%

三個示範聚落及道路整體影響坡面如圖 5-23 所示，顯示聚落與道路可能影響之坡面單元分布情形，影響坡面單元總數量為 294 個，影響坡面單元總面積 1,948.17ha。

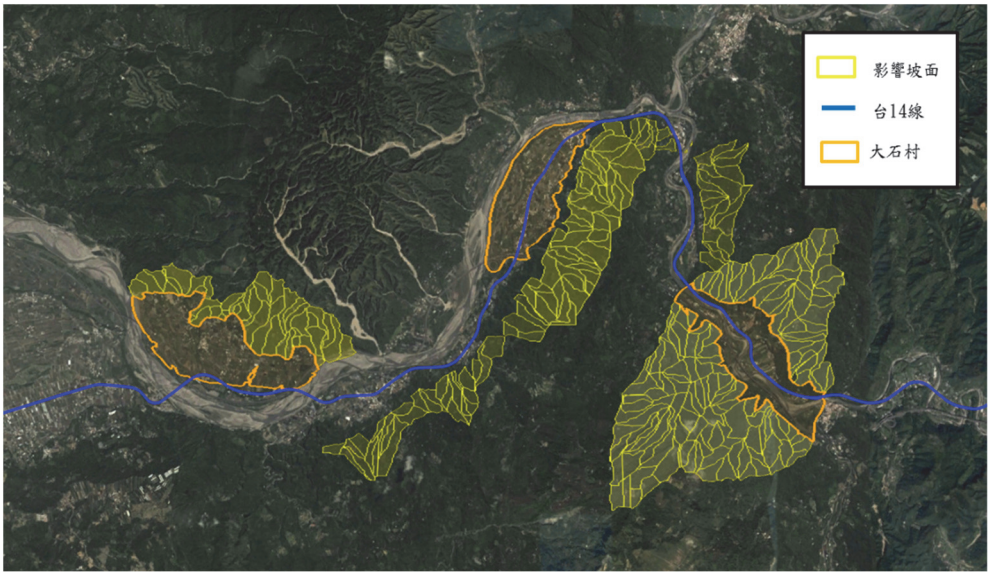


圖 5-23　聚落與道路影響坡面

第三節　震後山區災害潛勢早期評估模式建立

易損性曲線提供一個對於地震可能誘發山區災害潛勢影響課題的解決方向，地震早期評估模式的建立可應用於坡地易損性分析及建物易損性的結果。由於易損性分析屬於災害機率化評估，因此可應用於災損評估、風險危害等分析，本研究藉由示範聚落的實作，逐步發展震後山區災害潛勢之早期評估模式。如圖 5-24 所示，在地震發生後，早期損失評估模式主要包括強地動因子推估、坡面單元崩塌率計算、建物倒塌機率計算、集水區崩塌潛勢評估、道路阻斷可能性等。當然除了評估模式，對於防護對象的基礎資料建置也相當重要，例如評估地區的建物基本資料蒐集和可能影響的坡面單元資料劃定，以利於示範區災害之模擬分析。在實務應用上更須建置可靠的地震速報接收系統，當地震發生後，能夠讓中央氣象局的地震速報資料可在 3~5 分鐘內接收、評估完成並發送速報簡訊，而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、各項評估結果等訊息。這些訊息中對於建築物倒塌及坡地崩塌直接相關的即是震度資訊。藉由中央氣象局的地震即時簡訊及資訊提供服務，可快速獲得震度資料。



圖 5-24　震後早期損失評估模式

一、模擬事件選取

模擬事件主要定義了地震參數，地震規模設定通常為線震源模式(若對於已知斷層已有詳實開挖調查，可以採用面震源模式)，因此地震參數包括了震源深度、芮氏規模、震央位置等，本研究根據過去歷史最大事件，第一個事件以鄰近車籠埔斷層曾發生的 921 地震事件(規模 7.3)進行模擬。第二個事件則以鄰近的彰化斷層選定人工事件作為比較，並假定其地震規模 7.5，地震深度 10 公里。

二、地表加速度分布推估

根據模擬之斷層事件、地震深度、地震規模、震央位置，可藉由水平地表震度衰減率公式推估地表加速度分布，得到各地震度值，推估尺度為 100 m× 100 m 之網格作空間尺度，並進一步計算坡面單元和村里單元的代表震度值，本研究以各單元內網格的平均震度作為代表震度值。

三、坡面單元崩塌率計算

利用坡面單元的代表震度值，可在各類坡面的坡地易損性曲線上，根據 PGA 對應之曲線機率值，計算得到每個坡面單元的崩塌機率。

四、建物倒塌機率計算

利用村里的平均震度值，可在各類建物的建築物易損性曲線上，根據 PGA 對應之曲線機率值，計算得到村里中每類建物的倒塌機率。

五、集水區崩塌潛勢評估

基於坡面單元的崩塌機率，可直接利用坡面單元資料庫中的有效面積求出其崩塌量，該崩塌量的物理意義為某一程度以上的崩塌潛勢。將子集水區中各坡面單元的崩塌量加總累計，即為該集水區的可能崩塌總量，可快速了解各子集水區可能之崩塌。

六、聚落坡面崩塌危害評估

前述第二節所建置之聚落影響坡面資料庫，可利用此資料庫藉由各個影響坡面的有效面積和其崩塌量期望值，進一步利用崩塌門檻定義來評估是否為可能的危害坡面。其計算過程為：

(一)評估是否超過本研究坡面單元之崩塌定義(第三章第五節所述，但不考慮崩塌率5%的門檻值設定)，稱之為易崩指標，表示是否具崩塌的傾向，是為1，否則為0；

(二)計算聚落的崩塌危害潛勢值I：

坡地易損性曲線為統計機率下的廣域崩塌評估方法，因此前述易崩指標為 1 的坡面並不表示該聚落一定受其影響，而需要針對整個聚落的狀況來評估，由於聚落中易崩指標為 1 的坡面越多表示越可能發生崩塌。因此，本研究對於聚落的崩塌危害評估以聚落之崩塌危害潛勢值來估計，其定義如下：

$$I = \frac{N_l}{N_0} \tag{5-1}$$

其中 I 為聚落崩塌危害潛勢值，該值越高發生崩塌的可能性越大；N_0 為全部的聚落影響坡面單元數量；N_l 為易崩指標為 1 的坡面單元數量。此外，由於大量數據的均化效果，且崩塌定義已相當保守，因此當 PGA 值不大時，利用易損性參數計算單一坡面單元的崩塌機率也不高，其在實際事件中並不會發生崩塌，但卻很容易被視為是易崩指標為 1 的坡面，這現象在地震事件規模不大時越明顯。因此當地震不大又震度為唯一指標值時，崩塌潛勢值是相對保守的，對偶發性崩塌具有保護作用。也就是說，I 越接近 1.0 越危險，而 I 值可進一步作為不同震級下坡面崩塌評估的標準。

七、道路之坡地崩塌阻斷評估

(一)道路屬性資料庫

道路是連結聚落間與對外重要道路，在地震發生時，路段各處皆有被阻斷可能，因此必須以路段為評估對象，進而了解整體道路的阻斷可能性。此外，影響某路段的坡面單元並非一處，而是一對多的關係，因此本研究藉由前節所建立之示範聚落路段資料，根據每個路段可能的影響坡面，建立各路段之道路屬性資料庫。建立方法是以路段兩側 500m 為評估範圍，劃定可能影響各路段之坡面單元，如圖 5-25 所示。

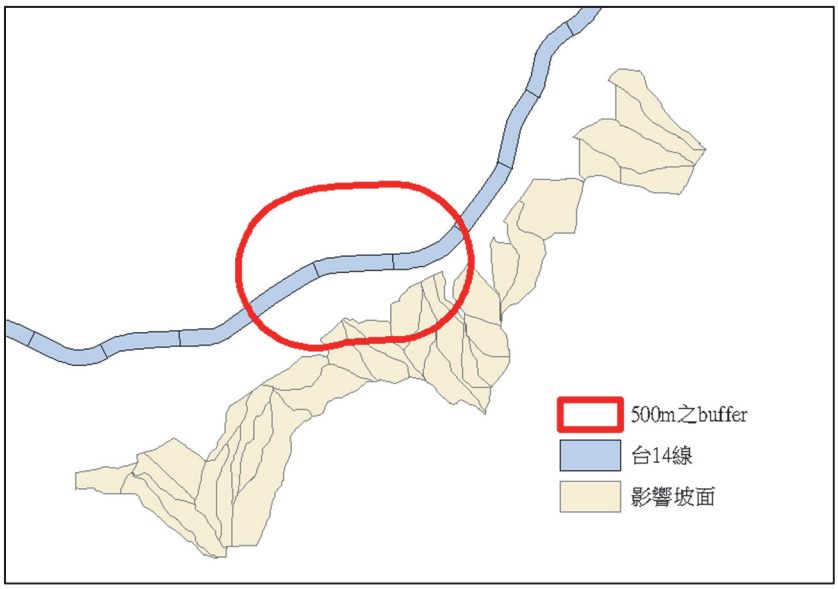


圖 5-25　道路受坡面崩塌影響示意圖

(二)路段阻斷之易損性參數

路段阻斷之易損性表示地震後某路段受鄰近周遭坡面崩塌而造成道路阻斷的可能性。在道路之影響坡面資料庫的基礎下，藉由各類坡地易損性參數，可進行路段阻斷之易損性分析。本研究以常用的面積權重法計算各路段阻斷之易損性參數c_{rj}及ζ_{rj}，面積權重法是以各影響坡面面積所占比例乘上對應之各類坡地易損性參數，即可得路段阻斷之易損性參數，其公式如下：

$$c_{rj} = \sum_{j=1}^{n} \beta_j \times c_j \tag{5-2}$$

$$\zeta_{rj} = \sum_{j=1}^{n} \beta_j \times \zeta_j \tag{5-3}$$

$$\beta_j = \frac{a_j}{A} \tag{5-4}$$

其中，c_{rj} 為路段阻斷之易損性中位數；ζ_{rj} 為路段阻斷之易損性標準差；n 表示坡地分類數量，可取 12；β_j 為路段中第 j 類坡地之面積權重值；a_j 為該類坡地的總面積；A 為路段中影響坡地之總面積。

平林里與福龜村間之路段里程為 30K+500 至 34K+000，經分析各路段之坡面屬性與路段阻斷之易損性參數如表 5-7 所示，福龜村至大石村間之路段里程為 37K+000 至 42K+000，經分析各路段之坡面屬性與路段易損性參數如表 5-8 所示。坡面單元對應各路段是一對多的關係，因此單一坡面單元可能會影響多個路段，因此各路段坡面屬性為獨立的，坡面單元一對多的關係不影響路段阻斷的易損性參數計算。

表 5-7　平林里至福龜村各之坡面屬性與路段阻斷之易損性參數

路段	坡面數量	坡面百分比	坡面總面積(ha)	面積百分比	中位數	標準差
30K+500	6	10%	42.0	11%	1.02	0.77
31K+000	6	10%	31.1	8%	1.04	0.80
31K+500	9	15%	55.4	15%	1.04	0.81
32K+000	12	20%	74.0	19%	1.00	0.75
32K+500	10	17%	68.2	18%	0.91	0.63
33K+000	6	10%	43.4	11%	0.78	0.46
33K+500	4	7%	32.3	8%	0.72	0.38
34K+000	3	5%	15.3	4%	0.74	0.41

表 5-8　福龜村至大石村各之坡面屬性與路段阻斷之易損性參數

路段	坡面數量	坡面百分比	坡面總面積(ha)	面積百分比	中位數	標準差
37K+000	1	2%	5.4	1%	0.86	0.56
37K+500	5	8%	23.7	6%	0.98	0.72
38K+000	21	35%	27.8	7%	0.99	0.73
38K+500	7	12%	33.5	9%	1.00	0.75
39K+000	9	15%	53.1	14%	0.99	0.73
39K+500	8	13%	46.8	12%	0.99	0.73
40K+000	10	17%	65.7	17%	1.01	0.76
40K+500	12	20%	75.0	20%	1.01	0.75
41K+000	5	8%	27.8	7%	0.95	0.67
41K+500	1	2%	7.4	2%	0.95	0.67
42K+000	1	2%	7.4	2%	0.95	0.67

(三)路段阻斷之危害潛勢值

路段阻斷之易損性直接表達了地震後道路受周遭坡面崩塌而致阻斷的機率，因此若已知路段之 PGA，可直接計算出所對應之機率值，該機率值即為路段受崩塌阻斷之危害潛勢值。以防災角度言，任一路段有發生崩塌危險整條道路即須封路警戒，本研究對分析所得之路段阻斷危害潛勢值以自然間斷點分類法(natural break)，將其分為中潛勢、中高潛勢、高潛勢等三級，供後續參考。

八、建物全半倒塌評估

示範聚落之建物倒塌評估可透過示範聚落之建物資料庫，以及建築物全、半倒易損性曲線求取，在聚落的建築物全半倒評估上，可藉由前述建築物全半倒塌機率值，直接以 7 類建築物資料庫中之建物數量，求取各類型建築物全、半倒塌數量，進而評估聚落建築物的破壞情形。

第四節　地震早期評估境況模擬－921 地震事件

一、事件規模

本研究首先以 921 地震事件作為早期評估模式事件，921 地震是近百年餘年來在臺灣發生的最嚴重地震事件（地震規模 7.3，北緯 23.85 度，東經 120.82 度，震源深度 8.0km），其震源機制主要是由車籠埔斷層的破裂所造成，車籠埔斷層位於臺灣西部，為一條南北走向的東傾逆衝斷層，與示範區相對地理位置如圖 5-26 所示。

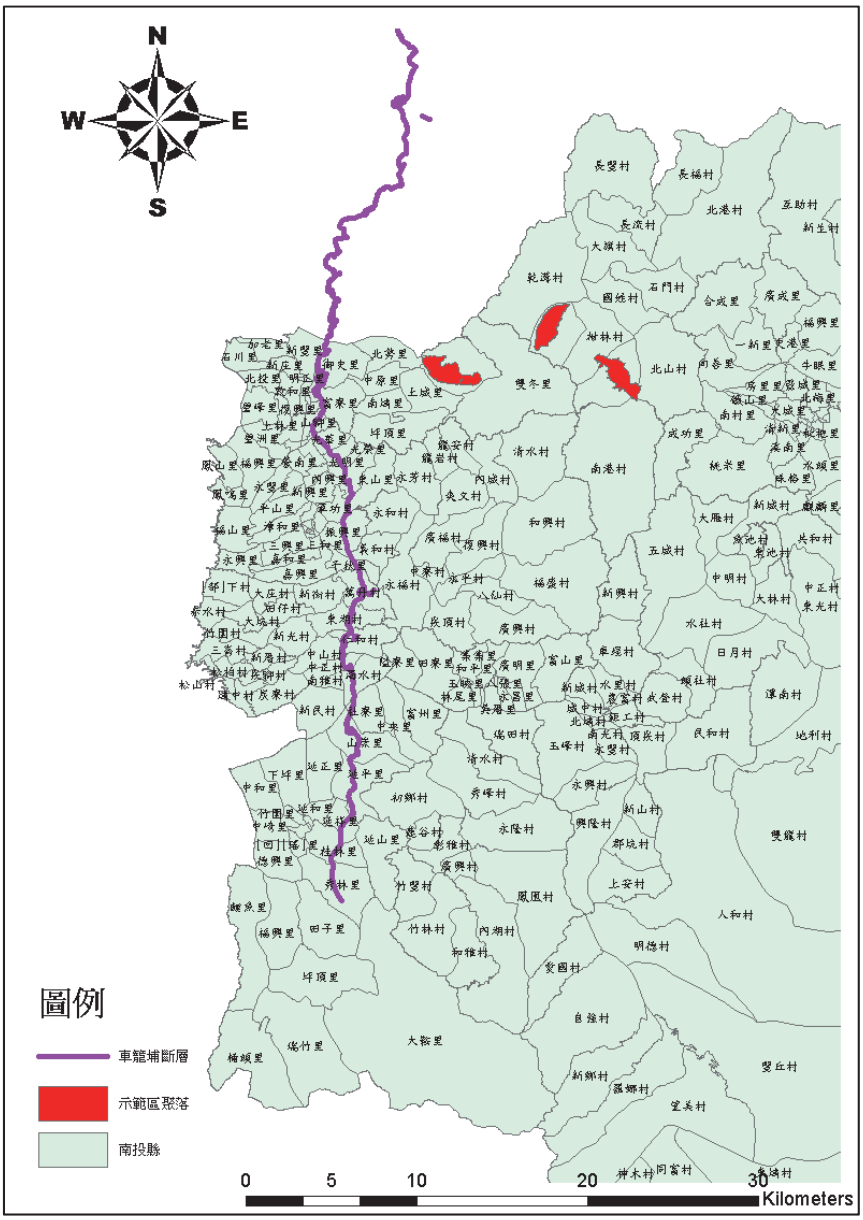


圖 5-26　921 地震車籠埔斷層地理位置

二、地表震度分布

地震事件發生後，早期評估首先需要取得 PGA 震度推估資料，由於 921 地震事件為已知的歷史災害事件，具有可靠的震度分布資料，因此本模擬以 921 地震強地動推估套疊得示範聚落之震度範圍，參考圖 3-10 所示。在示範區聚落中，平林里震度範圍為 509.64 ~563.67 cm/s^2，福龜村震度範圍為 449.76~492.44 cm/s^2，大石村震度範圍為 430.17~459.62 cm/s^2，三村里皆屬中央氣象局地震震度分級的 7 級劇震，震度推估分布如圖 5-27 所示。

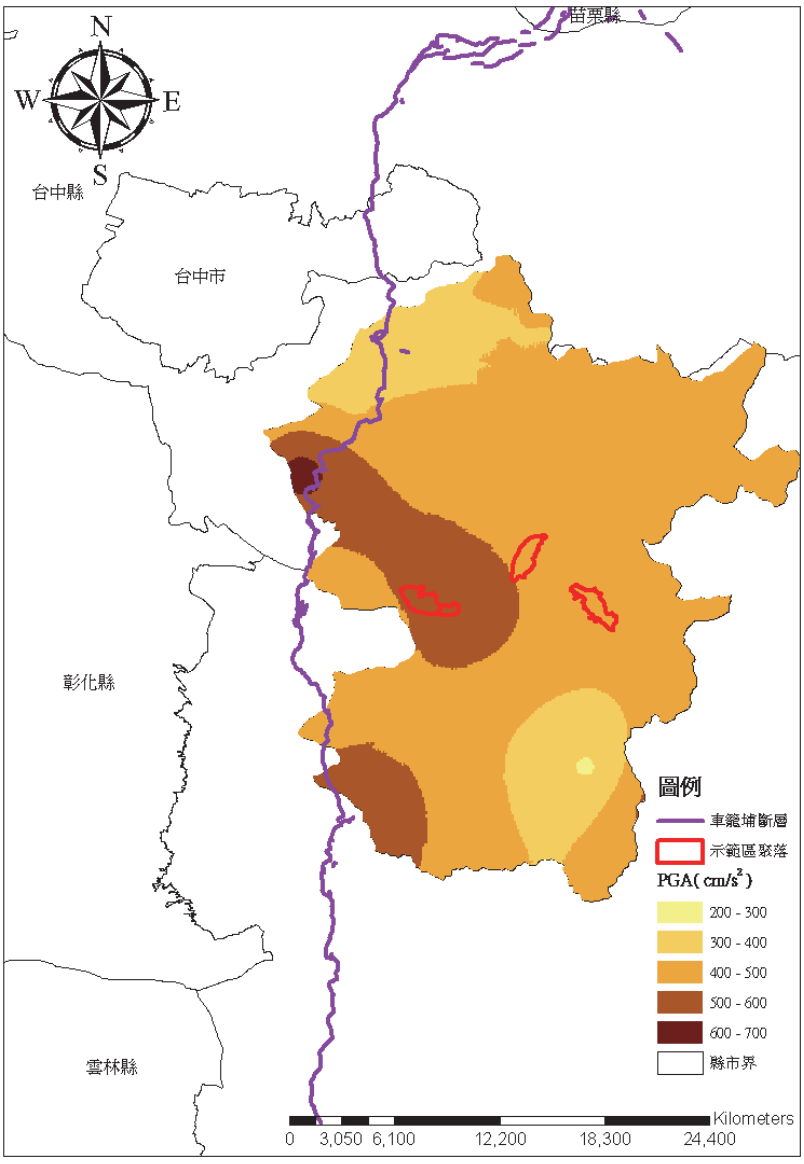


圖 5-27　921 地震 PGA 分布圖

三、集水區崩塌評估

早期評估的第一階段即藉由坡地易損性參數以及各子集水區之平均 PGA 值，計算各類坡面的崩塌機率。此崩塌機率乘上各坡面單元之面積即為崩塌量，再累積各子集水區中坡面單元之崩塌量，即為子集水區之崩塌量期望值。在本模擬中，首先對烏溪集水區進行子集水區之崩塌量快速評估，可快速了解各子集水區可能崩塌量體。本模擬中各子集水區崩塌量如圖 5-28 所示，各子集水區之崩塌量範圍為 38.78~710.15ha，藉以快速了解集水區崩塌潛勢的高低。

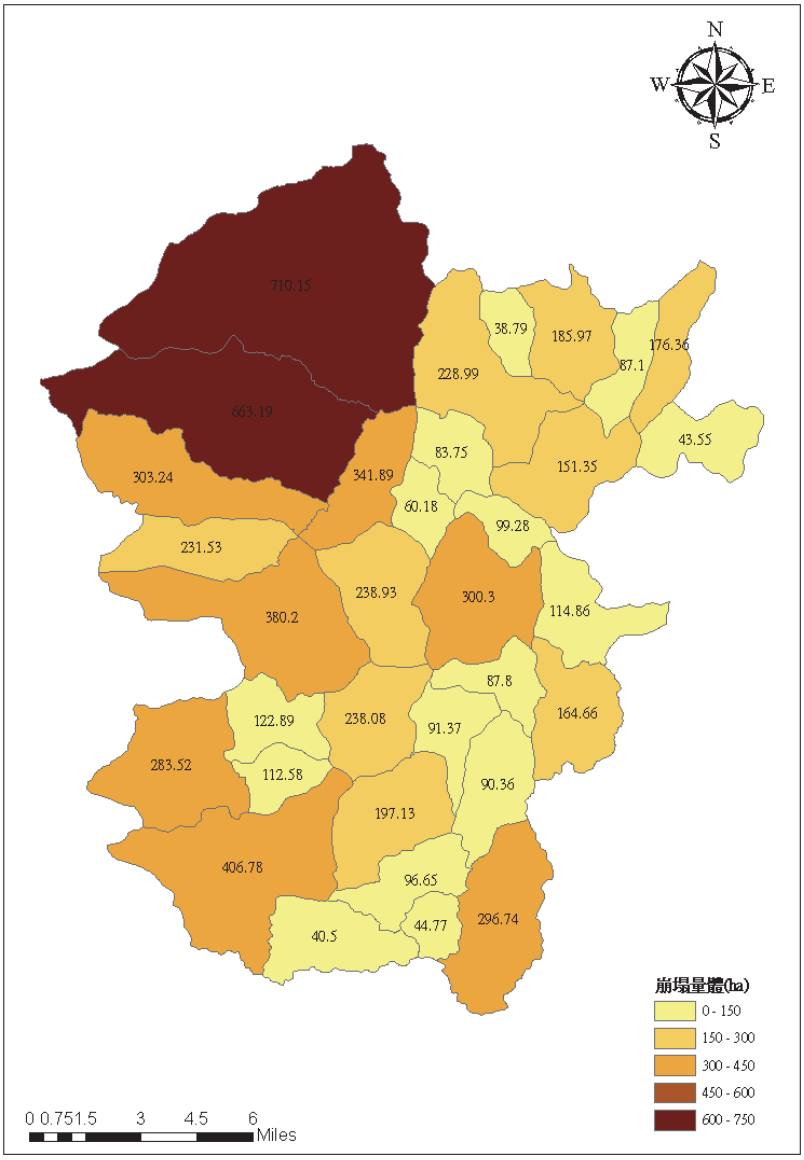


圖 5-28　烏溪集水區中各子集水區崩塌量評估(事件一)

四、聚落之坡面崩塌危害評估

(一)平林里

聚落之坡面崩塌危害評估主要是利用周遭之影響坡面進行易崩指標值分析，再計算其崩塌危害潛勢值。首先利用易損性曲線可得到每一影響坡面之崩塌機率，平林里各影響坡面之崩塌機率範圍為0.180~0.341，如圖 5-29 所示。再依據各影響坡面單元面積評估其崩塌期望值，並計算各影響坡面單元之易崩指標值，各影響坡面單元之崩塌期望值範圍落於 0.008~5.292ha，如表 5-9 所示。最後計算平林里之崩塌危害潛勢值為 0.907 (N_0=43，N_1=39)。

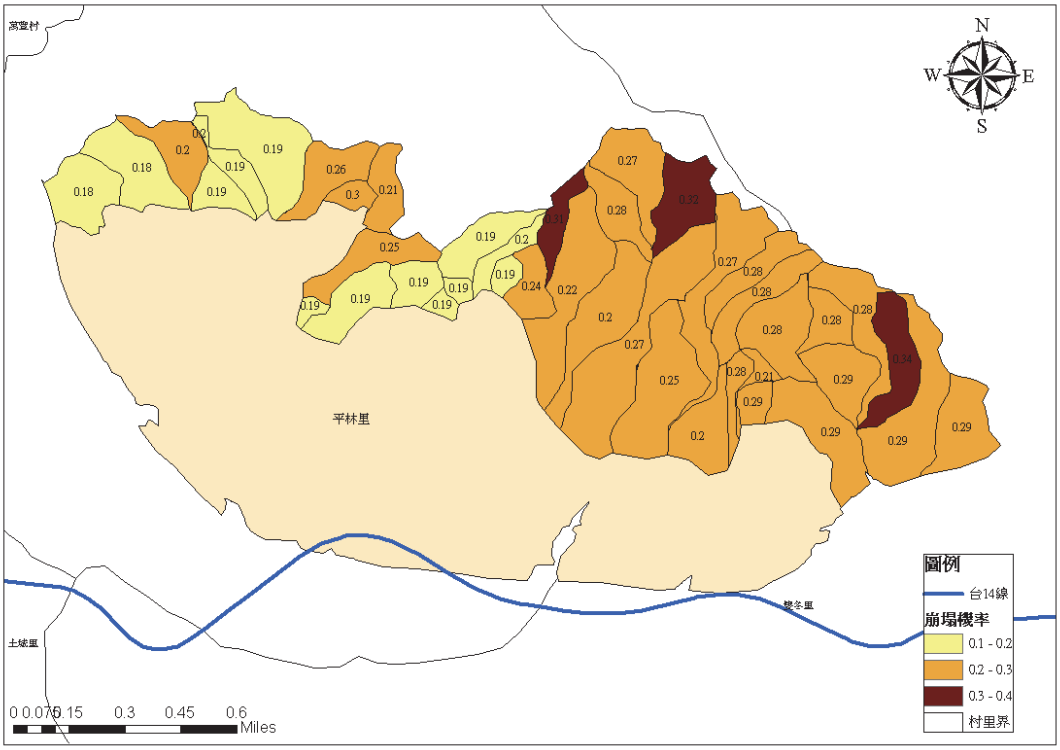


圖 5-29　平林里坡面崩塌機率(事件一)

表 5-9　平林里坡面易崩指標(事件一)

坡面編號	坡面類型	有效面積(ha)	震度(981gal)	崩塌機率	崩塌期望(ha)	易崩指標
2320	G2A1S1	0.03880	0.525	0.201	0.008	0
2361	G2A2S3	8.22348	0.548	0.268	2.201	1
2370	G2A1S3	3.78566	0.544	0.310	1.175	1
2387	G2A2S1	13.06723	0.531	0.188	2.450	1
2388	G2A2S1	3.66397	0.528	0.186	0.681	1
2409	G2A2S3	9.81340	0.555	0.275	2.698	1
2410	G2A2S3	5.25687	0.557	0.277	1.457	1
2431	G2A2S3	9.04757	0.562	0.282	2.547	1
2432	G2A2S3	6.37678	0.559	0.279	1.777	1
2452	G2A2S3	6.75682	0.535	0.255	1.722	1
2454	G2A2S1	6.08987	0.541	0.194	1.183	1
2458	G2A2S1	3.74410	0.534	0.189	0.709	1
2462	G2A2S3	7.77557	0.564	0.284	2.207	1
2463	G2A2S3	4.07837	0.564	0.283	1.156	1
2484	G2A2S3	19.34538	0.554	0.274	5.292	1
2516	G2A2S1	2.80628	0.543	0.195	0.547	1
2535	G2A1S2	2.38574	0.565	0.293	0.698	1
2537	G2A2S1	1.56355	0.563	0.208	0.326	1
2552	G2A1S3	7.70953	0.568	0.341	2.629	1
2586	G2A2S1	5.30198	0.557	0.205	1.085	1
6038	G2A1S3	7.84376	0.551	0.320	2.510	1
6044	G2A2S1	3.52073	0.527	0.185	0.651	1
6046	G2A1S1	6.09698	0.527	0.203	1.235	1
6047	G2A2S1	9.15891	0.523	0.182	1.670	1
6048	G2A2S1	7.87232	0.520	0.180	1.417	1
6050	G2A1S2	6.76714	0.533	0.260	1.759	1
6054	G2A1S1	4.63673	0.536	0.210	0.973	1
6056	G2A1S3	1.98781	0.535	0.299	0.595	1
6118	G2A2S1	1.14545	0.540	0.193	0.221	0
6119	G2A2S1	1.21252	0.538	0.192	0.233	0
6120	G2A2S1	6.75611	0.534	0.189	1.279	1
6121	G2A2S1	1.04590	0.530	0.187	0.196	0
6122	G2A2S3	9.69777	0.567	0.287	2.780	1
6136	G2A2S2	15.82005	0.556	0.255	4.030	1
6149	G2A2S3	8.27982	0.575	0.294	2.434	1
6155	G2A2S1	1.74239	0.542	0.195	0.340	1
6156	G2A2S2	5.10962	0.544	0.245	1.251	1
6165	G2A1S1	10.31032	0.547	0.218	2.251	1
6166	G2A1S2	5.39124	0.548	0.276	1.486	1
6167	G2A2S1	15.24924	0.551	0.200	3.055	1
6172	G2A2S3	7.99874	0.568	0.288	2.301	1
6173	G2A2S3	5.13650	0.562	0.281	1.445	1
6184	G2A2S3	13.90758	0.572	0.291	4.050	1

(二)福龜村

利用易損性曲線可得到每一影響坡面之崩塌機率，福龜村各影響坡面之崩塌機率範圍為 0.142~0.258，如圖 5-30 所示。再依據各影響坡面單元面積評估其崩塌期望值，並計算各影響坡面單元之易崩指標值，各影響坡面單元之崩塌期望值範圍落於 0.001~2.444ha，如表 5-10 所示。最後計算福龜村之崩塌危害潛勢值為 0.980 (N_0=49，N_1=48)。

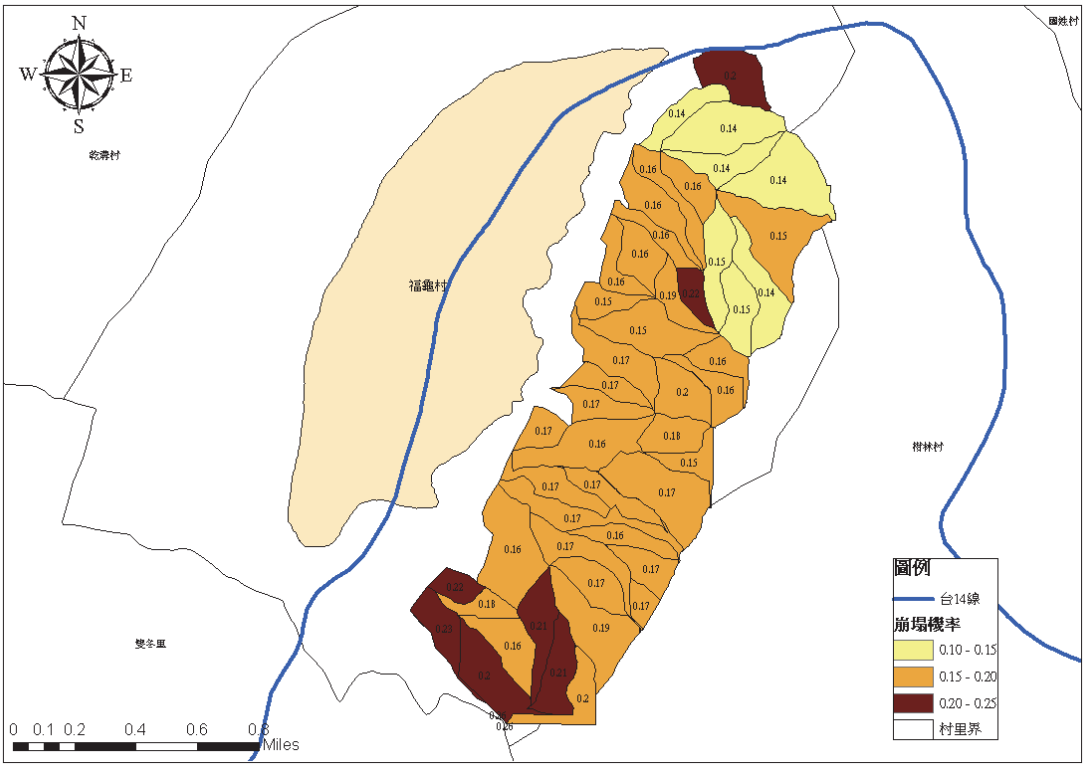


圖 5-30　福龜村坡面崩塌機率(事件一)

表 5-10　福龜村坡面易崩指標(事件一)

坡面編號	坡面類型	有效面積(ha)	震度(981gal)	崩塌機率	崩塌期望(ha)	易崩指標
2149	G2A2S1	5.179	0.464	0.144	0.747	1
2150	G2A2S1	6.504	0.463	0.144	0.936	1
2189	G2A1S3	3.378	0.469	0.217	0.733	1
2190	G2A1S1	3.866	0.471	0.161	0.622	1
2191	G2A1S1	4.991	0.467	0.158	0.788	1
2192	G2A1S1	5.566	0.469	0.159	0.886	1
2193	G2A2S1	7.468	0.467	0.146	1.093	1
2194	G2A1S1	7.052	0.470	0.160	1.130	1
2226	G2A1S1	4.466	0.479	0.167	0.745	1
2227	G2A1S1	8.371	0.477	0.165	1.384	1
2230	G2A2S1	6.546	0.466	0.146	0.954	1
2231	G2A1S1	4.738	0.469	0.160	0.756	1
2280	G2A2S1	12.142	0.482	0.156	1.895	1
2295	G2A1S1	5.391	0.470	0.160	0.865	1
2297	G2A1S2	7.188	0.473	0.197	1.416	1
2298	G2A2S2	5.848	0.475	0.184	1.077	1
2299	G2A2S1	4.079	0.475	0.151	0.616	1
2398	G2A2S1	14.056	0.492	0.162	2.281	1
2400	G2A1S2	6.078	0.501	0.226	1.371	1
2401	G2A1S3	0.003	0.502	0.258	0.001	0
2414	G2A2S2	6.095	0.489	0.196	1.193	1
2415	G2A1S1	6.088	0.486	0.172	1.048	1
2416	G2A1S1	5.153	0.482	0.169	0.870	1
2417	G2A1S1	8.582	0.485	0.171	1.469	1
2418	G2A1S1	7.441	0.485	0.172	1.277	1
2419	G2A1S1	6.386	0.485	0.171	1.093	1
2434	G2A2S2	11.992	0.487	0.194	2.331	1
5833	G2A1S3	8.070	0.458	0.205	1.651	1
5838	G2A2S1	11.926	0.462	0.143	1.707	1
5839	G2A2S1	14.102	0.460	0.142	1.999	1
5906	G2A1S1	13.240	0.462	0.154	2.045	1
5907	G2A2S1	8.303	0.464	0.145	1.201	1
5912	G2A1S1	6.142	0.472	0.162	0.994	1
5913	G2A1S1	4.628	0.474	0.163	0.755	1
5914	G2A1S2	4.444	0.470	0.194	0.864	1
5915	G2A2S1	4.256	0.476	0.152	0.646	1
5916	G2A2S1	11.106	0.473	0.150	1.671	1
5975	G2A1S1	5.261	0.480	0.168	0.882	1
5976	G2A1S1	3.951	0.486	0.172	0.680	1
6058	G2A1S2	3.301	0.498	0.223	0.736	1
6059	G2A1S1	3.585	0.496	0.180	0.644	1
6060	G2A2S1	7.319	0.494	0.164	1.198	1
6061	G2A2S2	9.900	0.496	0.202	2.001	1
6062	G2A1S2	7.152	0.490	0.215	1.537	1
6064	G2A2S3	7.138	0.490	0.211	1.507	1

6083	G2A1S1	14.740	0.478	0.166	2.444	1
6087	G2A2S1	4.576	0.481	0.155	0.712	1
6088	G2A1S1	5.089	0.480	0.168	0.853	1
6089	G2A1S1	2.490	0.479	0.167	0.415	1

(三)大石村

利用易損性曲線可得到每一影響坡面之崩塌機率，大石村各影響坡面之崩塌機率範圍為 0.129~0.211，如圖 5-31 所示。再依據各影響坡面單元面積評估其崩塌期望值，並計算各影響坡面單元之易崩指標值，各影響坡面單元之崩塌期望值範圍落於 0.001~2.716ha，如表 5-11 所示。最後計算大石村之崩塌危害潛勢值為 0.986 (N_0=143，N_1=141)。

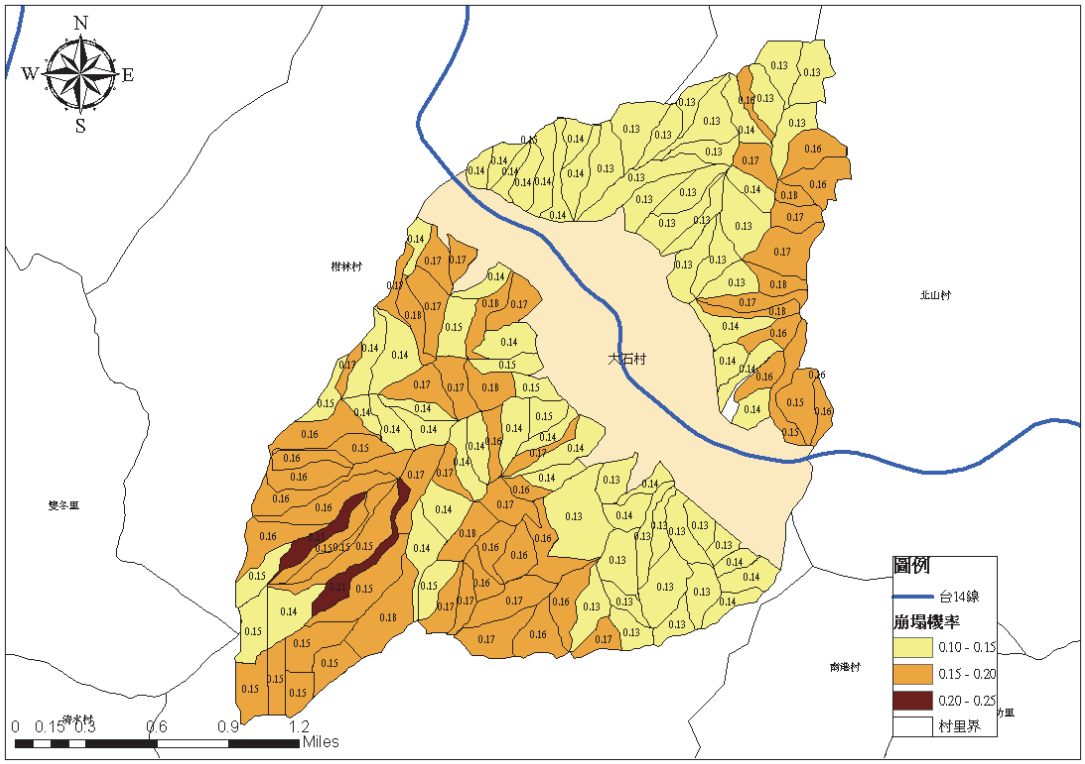


圖 5-31　大石村坡面崩塌機率(事件一)

表 5-11　大石村坡面易崩指標(事件一)

坡面編號	坡面類型	有效面積(ha)	震度(981gal)	崩塌機率	崩塌期望(ha)	易崩指標
2323	G2A2S1	8.25507	0.440	0.130	1.071	1
2353	G2A2S1	8.76496	0.440	0.129	1.134	1
2354	G2A2S1	7.51536	0.441	0.130	0.978	1
2355	G2A2S3	8.15667	0.441	0.165	1.345	1
2377	G2A2S1	4.03828	0.450	0.135	0.547	1
2378	G2A2S1	6.82656	0.449	0.135	0.924	1
2379	G2A2S1	10.07793	0.448	0.135	1.356	1
2390	G2A1S1	0.00747	0.453	0.148	0.001	0
2391	G2A2S1	5.67546	0.451	0.136	0.772	1
2392	G2A2S1	3.29004	0.455	0.139	0.457	1
2393	G2A2S1	3.97286	0.454	0.138	0.549	1
2394	G2A2S1	5.51636	0.452	0.137	0.757	1
2395	G2A2S1	3.35023	0.453	0.138	0.461	1
2411	G2A1S2	8.53351	0.441	0.165	1.407	1
2424	G2A2S1	5.34694	0.444	0.132	0.707	1
2425	G2A1S1	4.96310	0.443	0.140	0.697	1
2426	G2A2S1	6.83019	0.444	0.132	0.900	1
2435	G2A2S1	11.55663	0.446	0.133	1.540	1
2437	G2A2S1	7.68595	0.446	0.133	1.025	1
2464	G2A1S3	4.86688	0.442	0.185	0.899	1
2465	G2A2S1	6.34197	0.443	0.131	0.832	1
2466	G2A1S2	6.02582	0.442	0.166	1.001	1
2479	G2A1S2	6.14859	0.454	0.178	1.095	1
2480	G2A2S2	6.92400	0.453	0.165	1.145	1
2529	G2A1S1	4.97871	0.452	0.147	0.731	1
2540	G2A1S3	4.37269	0.442	0.185	0.809	1
2541	G2A1S1	7.30183	0.442	0.140	1.022	1
2566	G2A1S1	4.94441	0.440	0.139	0.685	1
2567	G2A2S2	7.90480	0.440	0.154	1.221	1
2573	G2A2S2	3.70723	0.461	0.172	0.638	1
2574	G2A2S1	7.45721	0.463	0.144	1.072	1
2575	G2A2S2	2.27786	0.464	0.175	0.398	1
2576	G2A2S1	4.67568	0.466	0.146	0.681	1
2578	G2A2S2	8.21454	0.458	0.170	1.396	1
2579	G2A2S2	7.08517	0.455	0.167	1.186	1
2580	G2A2S1	4.03846	0.458	0.141	0.569	1
2581	G2A2S1	5.85813	0.457	0.140	0.822	1
2582	G2A2S1	3.30664	0.463	0.144	0.475	1
2583	G2A2S1	5.80807	0.460	0.142	0.825	1
2584	G2A1S1	8.08982	0.467	0.158	1.279	1
2610	G2A2S1	3.44171	0.440	0.129	0.445	1
2611	G2A2S1	7.24148	0.441	0.130	0.944	1
2612	G2A2S1	7.19266	0.439	0.129	0.929	1

2613	G2A1S1	4.47895	0.439	0.137	0.615	1
2618	G2A1S2	4.05730	0.449	0.173	0.703	1
2619	G2A1S1	8.08617	0.448	0.144	1.163	1
2620	G2A1S1	3.74207	0.449	0.145	0.542	1
2621	G2A1S1	3.21624	0.443	0.141	0.453	1
2663	G2A1S1	9.30609	0.469	0.159	1.481	1
2706	G2A2S2	8.22435	0.444	0.158	1.298	1
2707	G2A2S1	7.92789	0.443	0.131	1.041	1
2708	G2A2S2	8.52737	0.444	0.158	1.346	1
2709	G2A1S2	4.67268	0.441	0.165	0.773	1
2710	G2A1S2	9.72726	0.446	0.170	1.655	1
2800	G2A1S3	8.42595	0.459	0.205	1.731	1
2828	G2A1S1	6.67071	0.456	0.150	1.001	1
2849	G2A1S1	5.75015	0.463	0.155	0.891	1
2850	G2A1S3	6.70757	0.464	0.211	1.418	1
2851	G2A1S1	6.69790	0.462	0.154	1.032	1
2852	G2A2S1	9.98634	0.464	0.144	1.440	1
2853	G2A1S1	5.77762	0.460	0.153	0.883	1
2969	G2A2S1	6.23405	0.468	0.147	0.916	1
2970	G2A2S1	7.82213	0.465	0.145	1.136	1
2971	G2A1S1	8.62959	0.462	0.154	1.329	1
6000	G2A2S1	6.59781	0.441	0.130	0.860	1
6001	G2A2S2	3.56968	0.442	0.156	0.557	1
6022	G2A2S1	10.30420	0.443	0.132	1.356	1
6023	G2A2S1	5.41725	0.444	0.132	0.714	1
6024	G2A1S2	6.27837	0.442	0.166	1.045	1
6025	G2A1S1	5.85388	0.442	0.140	0.819	1
6034	G2A2S1	4.15597	0.444	0.132	0.548	1
6035	G2A2S1	10.69027	0.446	0.133	1.426	1
6036	G2A2S1	5.55157	0.445	0.133	0.737	1
6057	G2A2S1	7.16935	0.451	0.136	0.978	1
6078	G2A2S3	11.61081	0.442	0.166	1.924	1
6079	G2A1S3	3.03269	0.442	0.185	0.560	1
6080	G2A2S3	5.59955	0.441	0.165	0.926	1
6100	G2A2S1	8.23958	0.445	0.133	1.094	1
6101	G2A2S1	7.15957	0.444	0.132	0.947	1
6102	G2A2S1	10.97571	0.443	0.131	1.441	1
6103	G2A2S1	7.96566	0.444	0.132	1.054	1
6124	G2A2S1	4.02740	0.455	0.139	0.558	1
6125	G2A1S1	7.87556	0.456	0.150	1.181	1
6126	G2A2S2	5.63978	0.458	0.170	0.958	1
6127	G2A2S2	8.75813	0.458	0.170	1.487	1
6130	G2A2S1	7.63946	0.452	0.137	1.047	1
6163	G2A1S1	4.26609	0.450	0.146	0.622	1
6164	G2A2S3	7.28846	0.453	0.176	1.285	1
6176	G2A2S2	5.17605	0.441	0.155	0.804	1

6177	G2A1S1	4.90575	0.441	0.139	0.684	1
6187	G2A1S2	0.00030	0.439	0.163	0.000	0
6188	G2A2S2	9.11669	0.439	0.154	1.404	1
6189	G2A2S3	3.71584	0.439	0.163	0.606	1
6199	G2A1S2	5.08696	0.440	0.165	0.838	1
6200	G2A1S1	4.93227	0.441	0.139	0.686	1
6203	G2A2S1	3.67276	0.460	0.142	0.520	1
6204	G2A1S2	5.62898	0.459	0.183	1.033	1
6205	G2A2S1	11.17112	0.461	0.142	1.592	1
6207	G2A1S1	11.13284	0.467	0.158	1.757	1
6208	G2A1S1	5.06128	0.468	0.158	0.802	1
6209	G2A1S1	6.22127	0.463	0.155	0.963	1
6236	G2A2S1	4.41805	0.441	0.130	0.575	1
6237	G2A1S1	3.12748	0.439	0.138	0.431	1
6238	G2A1S1	6.32592	0.439	0.137	0.869	1
6243	G2A1S1	5.14976	0.449	0.145	0.747	1
6244	G2A2S1	7.39018	0.451	0.136	1.008	1
6245	G2A2S2	4.58531	0.452	0.165	0.756	1
6246	G2A2S1	5.71976	0.453	0.138	0.788	1
6247	G2A2S1	5.98798	0.454	0.138	0.828	1
6248	G2A1S1	4.57627	0.448	0.144	0.659	1
6249	G2A2S2	3.05281	0.450	0.163	0.497	1
6250	G2A1S2	7.27129	0.450	0.174	1.268	1
6251	G2A1S2	7.38638	0.452	0.176	1.299	1
6252	G2A1S1	6.25720	0.452	0.147	0.921	1
6253	G2A2S3	6.02833	0.451	0.174	1.048	1
6254	G2A2S2	4.42198	0.455	0.167	0.739	1
6255	G2A2S1	5.84573	0.445	0.133	0.775	1
6256	G2A2S2	7.32111	0.448	0.162	1.182	1
6257	G2A2S2	5.47346	0.450	0.163	0.892	1
6258	G2A2S2	4.42193	0.449	0.163	0.719	1
6259	G2A2S3	4.37745	0.449	0.173	0.757	1
6260	G2A1S1	5.55489	0.444	0.141	0.784	1
6261	G2A2S1	20.32903	0.446	0.133	2.707	1
6262	G2A2S2	9.05727	0.447	0.160	1.451	1
6263	G2A1S2	10.47242	0.447	0.171	1.792	1
6264	G2A2S1	4.46603	0.442	0.131	0.584	1
6265	G2A2S1	4.47770	0.439	0.129	0.577	1
6266	G2A2S1	12.02340	0.441	0.130	1.564	1
6268	G2A2S1	9.39705	0.443	0.131	1.234	1
6269	G2A2S1	5.70418	0.442	0.131	0.747	1
6270	G2A2S1	3.70394	0.442	0.130	0.483	1
6271	G2A2S1	5.35757	0.440	0.130	0.696	1
6329	G2A1S1	12.01847	0.466	0.157	1.885	1
6332	G2A1S1	10.92867	0.464	0.156	1.704	1
6340	G2A1S2	15.22105	0.454	0.178	2.716	1

6378	G2A2S2	8.68058	0.457	0.169	1.468	1
6379	G2A1S1	13.18885	0.458	0.151	1.993	1
6396	G2A1S1	9.58817	0.460	0.153	1.464	1
6397	G2A1S1	5.02431	0.457	0.151	0.757	1
6415	G2A1S1	11.92701	0.460	0.153	1.824	1
7711	G2A2S2	3.69822	0.456	0.168	0.622	1
7758	G2A2S1	8.22564	0.455	0.139	1.140	1
7808	G2A2S1	8.57900	0.455	0.139	1.189	1

五、道路之坡地崩塌阻斷評估

(一)平林里與福龜村間道路(30K+500~34K+000)

在進行道路之坡地崩塌阻斷評估前，同樣可先利用易損性曲線可得到每一影響坡面之崩塌機率，平林里與福龜村間道路各影響坡面之崩塌機率範圍為 0.181~0.268，再依據各影響坡面單元面積評估其崩塌期望值，並計算各影響坡面單元之易崩指標值，各影響坡面單元之崩塌期望值範圍落於 0.661~3.649ha，如表 5-12 及圖 5-32 所示。

表 5-12　平林里與福龜村間道路坡面易崩指標(事件一)

坡面編號	坡面類型	有效面積(ha)	震度(981gal)	崩塌機率	崩塌期望(ha)	易崩指標
2401	213	7.23019	0.502	0.258	1.866	1
2421	212	8.04188	0.502	0.227	1.828	1
2590	221	5.01139	0.525	0.184	0.921	1
2591	222	4.43182	0.529	0.231	1.025	1
2592	223	3.49064	0.524	0.244	0.853	1
2593	221	8.84679	0.531	0.187	1.657	1
2594	221	9.00629	0.521	0.181	1.629	1
2600	211	5.34726	0.554	0.224	1.195	1
2601	211	8.68270	0.549	0.220	1.908	1
2602	221	6.42647	0.530	0.187	1.200	1
2625	221	3.22775	0.558	0.205	0.661	1
2626	221	5.52707	0.554	0.203	1.120	1
2627	221	4.06678	0.554	0.202	0.823	1
2628	221	7.37853	0.547	0.198	1.458	1
2631	211	4.80043	0.554	0.224	1.074	1
2636	221	5.14327	0.550	0.199	1.026	1
6090	213	12.60291	0.505	0.262	3.305	1
6146	213	4.42297	0.510	0.268	1.183	1
6147	213	5.94317	0.502	0.258	1.532	1
6148	223	12.67621	0.517	0.237	3.006	1
6211	221	5.27105	0.542	0.195	1.026	1
6212	221	6.05684	0.539	0.193	1.168	1
6213	221	5.17444	0.536	0.191	0.986	1
6216	222	5.01525	0.524	0.227	1.138	1
6217	221	7.54889	0.528	0.186	1.401	1
6222	221	5.59236	0.548	0.198	1.110	1
6223	221	6.06608	0.542	0.195	1.182	1
6279	221	5.66645	0.548	0.199	1.125	1
6280	221	5.56373	0.550	0.200	1.110	1
6281	221	18.41046	0.548	0.198	3.649	1
6282	221	7.39721	0.555	0.203	1.503	1

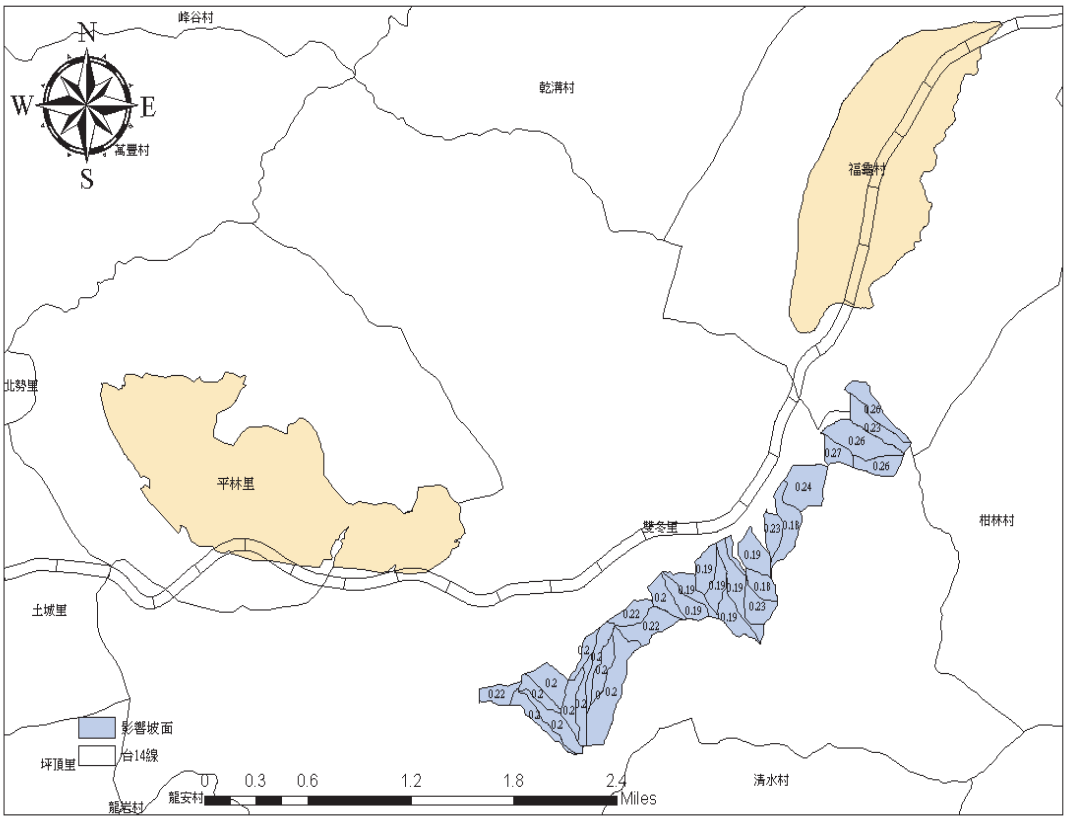


圖 5-32　平林里與福龜村間道路坡面崩塌機率(事件一)

在路段阻斷之危害潛勢值評估方面，則利用各路段的平均震度值以及前節計算所得路段阻斷易損性參數，評估得各路段受崩塌影響的易損性，所得即為各路段阻斷危害潛勢值，如表 5-13 所示，再以自然間斷點分類法進行中、中高、高潛勢路段分級，在平林里與福龜村間路段阻斷潛勢值為 0.175~0.225，危害潛勢分級如圖 5-33 所示。

表 5-13　平林里與福龜村間路段阻斷之危害潛勢值(事件一)

路段	坡面數量	有效面積(ha)	震度(981gal)	崩塌期望(ha)	危害潛勢
30K+500	6	42.02987	0.570	1.988	0.225
31K+000	6	31.12282	0.559	1.305	0.218
31K+500	9	55.41474	0.545	2.243	0.210
32K+000	12	73.95712	0.536	3.201	0.202
32K+500	10	68.20801	0.527	2.760	0.194
33K+000	6	43.37942	0.521	1.677	0.192
33K+500	4	32.29795	0.515	0.925	0.191
34K+000	3	15.27207	0.505	0.442	0.175

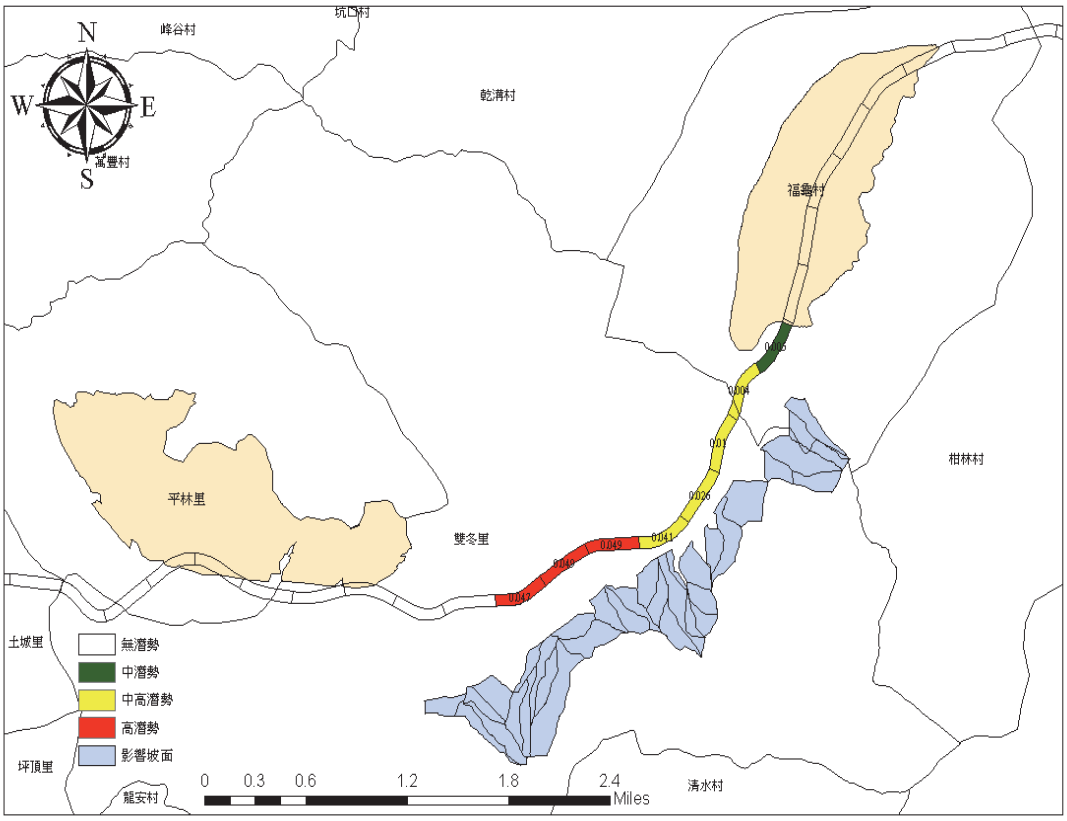


圖 5-33　平林里與福龜村間路段阻斷之危害潛勢分級(事件一)

(二)福龜村與大石村間道路(34K+000~37K+000)

同樣可先利用易損性曲線可得到每一影響坡面之崩塌機率，福龜村與大石村間道路各影響坡面之崩塌機率範圍為 0.130~0.223，再依據各影響坡面單元面積評估其崩塌期望值，並計算各影響坡面單元之易崩指標值，各影響坡面單元之崩塌期望值範圍落於 0.563~2.305ha，如表 5-14 及圖 5-34 所示。

表 5-14　福龜村與大石村間道路坡面易崩指標(事件一)

坡面編號	坡面類型	有效面積(ha)	震度(981gal)	崩塌機率	崩塌期望(ha)	易崩指標
2144	221	5.71207	0.442	0.131	0.746	1
2145	221	5.40034	0.445	0.133	0.717	1
2147	221	5.02894	0.441	0.130	0.654	1
2148	221	7.35080	0.442	0.131	0.962	1
2156	221	4.17328	0.449	0.135	0.563	1
2157	222	4.23791	0.450	0.163	0.692	1
2158	221	5.68719	0.455	0.139	0.791	1
2176	211	4.69527	0.446	0.143	0.670	1
2186	211	6.18683	0.448	0.144	0.891	1
2187	221	5.24810	0.448	0.135	0.707	1
2229	221	5.70998	0.448	0.135	0.769	1
2233	221	9.74054	0.446	0.133	1.299	1
2234	221	7.65645	0.448	0.135	1.030	1
2293	211	8.08622	0.451	0.146	1.184	1
2294	211	4.42771	0.452	0.147	0.650	1
2389	211	3.97189	0.452	0.147	0.583	1
2390	211	7.43364	0.453	0.148	1.098	1
5834	222	5.07499	0.455	0.167	0.846	1
5835	221	4.32435	0.453	0.138	0.595	1
5836	221	5.86730	0.453	0.138	0.807	1
5837	221	4.15392	0.453	0.138	0.572	1
5847	111	4.30643	0.450	0.223	0.960	1
5879	211	10.53249	0.443	0.141	1.483	1
5880	211	16.16187	0.446	0.143	2.305	1
5939	221	4.46912	0.449	0.135	0.604	1
5940	211	3.91533	0.450	0.146	0.571	1
5988	221	8.18281	0.450	0.136	1.109	1

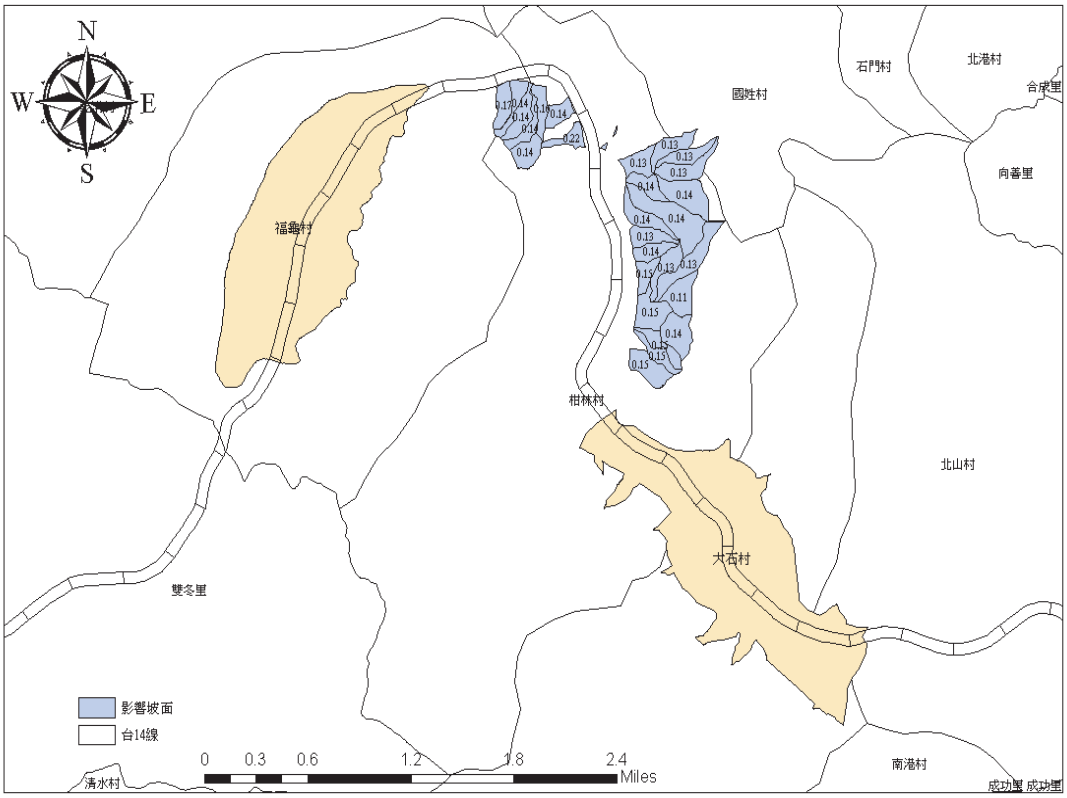


圖 5-34　福龜村與大石村間道路坡面崩塌機率(事件一)

在路段阻斷之危害潛勢值評估方面，利用各路段的平均震度值以及前節計算所得路段阻斷易損性參數，評估得各路段受崩塌影響的易損性，所得即為各路段阻斷危害潛勢值，如表 5-15 所示，再以自然間斷點分類法進行中、中高、高潛勢路段分級，在福龜村與大石村間路段阻斷潛勢值為 0.136~0.146，危害潛勢分級如圖 5-33 所示。

表 5-15　福龜村與大石村間路段阻斷之危害潛勢值(事件一)

路段	坡面數量	有效面積(ha)	震度(981gal)	崩塌期望(ha)	危害潛勢
37K+000	1	5.37132	0.464	0.143	0.137
37K+500	5	23.65847	0.456	0.691	0.144
38K+000	21	27.83175	0.449	0.813	0.141
38K+500	7	33.51894	0.445	0.985	0.140
39K+000	9	53.07262	0.448	1.551	0.139
39K+500	8	46.75884	0.451	1.338	0.140
40K+000	10	65.69254	0.452	1.862	0.144
40K+500	12	75.02862	0.455	2.035	0.146
41K+000	5	27.83479	0.458	0.723	0.138
41K+500	1	7.43364	0.456	0.195	0.136
42K+000	1	7.43364	0.453	0.195	0.134

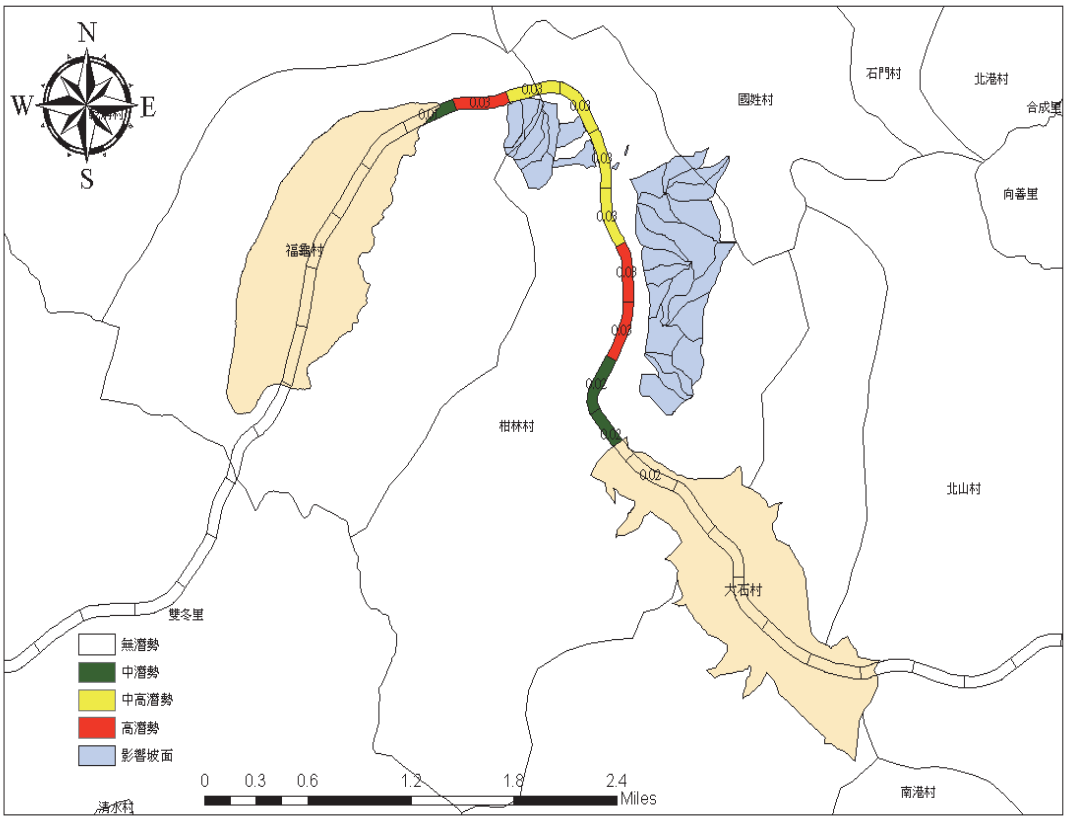


圖 5-35　福龜村與大石村間路段阻斷之危害潛勢分級(事件一)

六、建物全半倒塌評估

在建築物全半倒評估方面，由於建物損害對震度大小並不敏感，因此可直接以村里聚落為單元進行估計，依據地表震度分布推估結果，套疊該聚落之網格震度值，再取聚落之平均 PGA 做為評估依據即可。在示範區聚落中，平林里震度範圍為 509.64 ~563.67 cm/s^2，平均值為 536.69 cm/s^2；福龜村震度範圍為 449.76~492.44 cm/s^2，平均值為 468.86 cm/s^2；大石村震度範圍為 430.17~459.62 cm/s^2，平均值為 441.40 cm/s^2。得到三聚落之平均震度值後，可直接帶入易損性曲線求取全半倒機率值，再乘上各類建築物總棟數，即可得到全半倒評估結果，各聚落推估結果如表 5-16~表 5-18 所示。平林里全半倒數 106 棟、全倒數 61 棟，福龜村全半倒數 202 棟、全倒數 108 棟，大石村全半倒數 56 棟、全倒數 31 棟，顯示 921 地震嚴重的災情。

表 5-16　平林里建物全半倒評估(事件一)

代號	建物類型	總棟數	全半倒機率	全半倒數	全倒機率	全倒數
RCL1	早期低樓層 RC 造	3	0.437	1	0.229	1
RCL2	中期低樓層 RC 造	3	0.371	1	0.123	0
RCL3	近期低樓層 RC 造	10	0.255	3	0.115	1
RCM1	早期中樓層 RC 造	0	0.639	0	0.383	0
RCM2	中期中樓層 RC 造	0	0.565	0	0.272	0
RCM3	近期中樓層 RC 造	1	0.344	0	0.118	0
RCH1	早期高樓層 RC 造	0	0.549	0	0.337	0
RCH2	中期高樓層 RC 造	0	0.302	0	0.106	0
RCH3	近期高樓層 RC 造	0	0.374	0	0.143	0
RML	低樓層加強磚造	137	0.300	41	0.139	19
RMM	中樓層加強磚造	3	0.365	1	0.165	0
GM	磚石造	71	0.348	25	0.207	15
SS	鋼構造	1	0.247	0	0.106	0
ST	鐵皮屋	4	0.245	1	0.121	0
WC	木造	8	0.255	2	0.154	1
MC	純土造	65	0.481	31	0.365	24
合計(棟)		306	—	106	—	61

資料來源：本研究分析、整理，棟數無條件進位取整數。

表 5-17　福龜村建物全半倒評估(事件一)

代號	建物類型	總棟數	全半倒機率	全半倒數	全倒機率	全倒數
RCL1	早期低樓層 RC 造	3	0.300	1	0.134	0
RCL2	中期低樓層 RC 造	25	0.247	6	0.065	2
RCL3	近期低樓層 RC 造	16	0.180	3	0.072	1
RCM1	早期中樓層 RC 造	0	0.468	0	0.232	0
RCM2	中期中樓層 RC 造	0	0.393	0	0.149	0
RCM3	近期中樓層 RC 造	1	0.237	0	0.067	0
RCH1	早期高樓層 RC 造	0	0.419	0	0.227	0
RCH2	中期高樓層 RC 造	0	0.220	0	0.066	0
RCH3	近期高樓層 RC 造	0	0.252	0	0.079	0
RML	低樓層加強磚造	304	0.208	63	0.085	26
RMM	中樓層加強磚造	10	0.269	3	0.107	1
GM	磚石造	237	0.251	59	0.136	32
SS	鋼構造	1	0.170	0	0.065	0
ST	鐵皮屋	3	0.174	1	0.079	0
WC	木造	44	0.177	8	0.099	4
MC	純土造	155	0.376	58	0.269	42
合計(棟)		799	—	202	—	108

表 5-18　大石村建物全半倒評估(事件一)

代號	建物類型	總棟數	全半倒機率	全半倒數	全倒機率	全倒數
RCL1	早期低樓層 RC 造	1	0.246	0	0.102	0
RCL2	中期低樓層 RC 造	1	0.199	0	0.047	0
RCL3	近期低樓層 RC 造	1	0.151	0	0.058	0
RCM1	早期中樓層 RC 造	0	0.392	0	0.177	0
RCM2	中期中樓層 RC 造	0	0.320	0	0.108	0
RCM3	近期中樓層 RC 造	0	0.196	0	0.051	0
RCH1	早期高樓層 RC 造	0	0.362	0	0.185	0
RCH2	中期高樓層 RC 造	0	0.188	0	0.053	0
RCH3	近期高樓層 RC 造	0	0.206	0	0.058	0
RML	低樓層加強磚造	82	0.174	14	0.067	
RMM	中樓層加強磚造	1	0.231	0	0.086	0
GM	磚石造	72	0.212	15	0.110	8
SS	鋼構造	0	0.141	0	0.051	0
ST	鐵皮屋	0	0.148	0	0.064	0
WC	木造	37	0.147	5	0.079	3
MC	純土造	66	0.331	22	0.231	15
合計(棟)		261	—	56	—	31

第五節　地震早期評估境況模擬－彰化斷層事件

一、事件規模

第二個事件為假定示範聚落周遭之彰化斷層發生規模 7.5，震源深度 15km 之地震進行模擬，彰化斷層是逆斷層，位於彰化縣東境，緊鄰八卦台地的山腳而行，介於大肚溪與濁水溪之間，沿八卦台地西緣，由彰化附近的北北西走向，至員林以南約呈南北走向，大致位置在彰化平原與八卦台地交界上，全長約 32 公里，是現今相當受矚目的高潛勢斷層。與示範聚落相對地理位置如圖 5-36 所示。

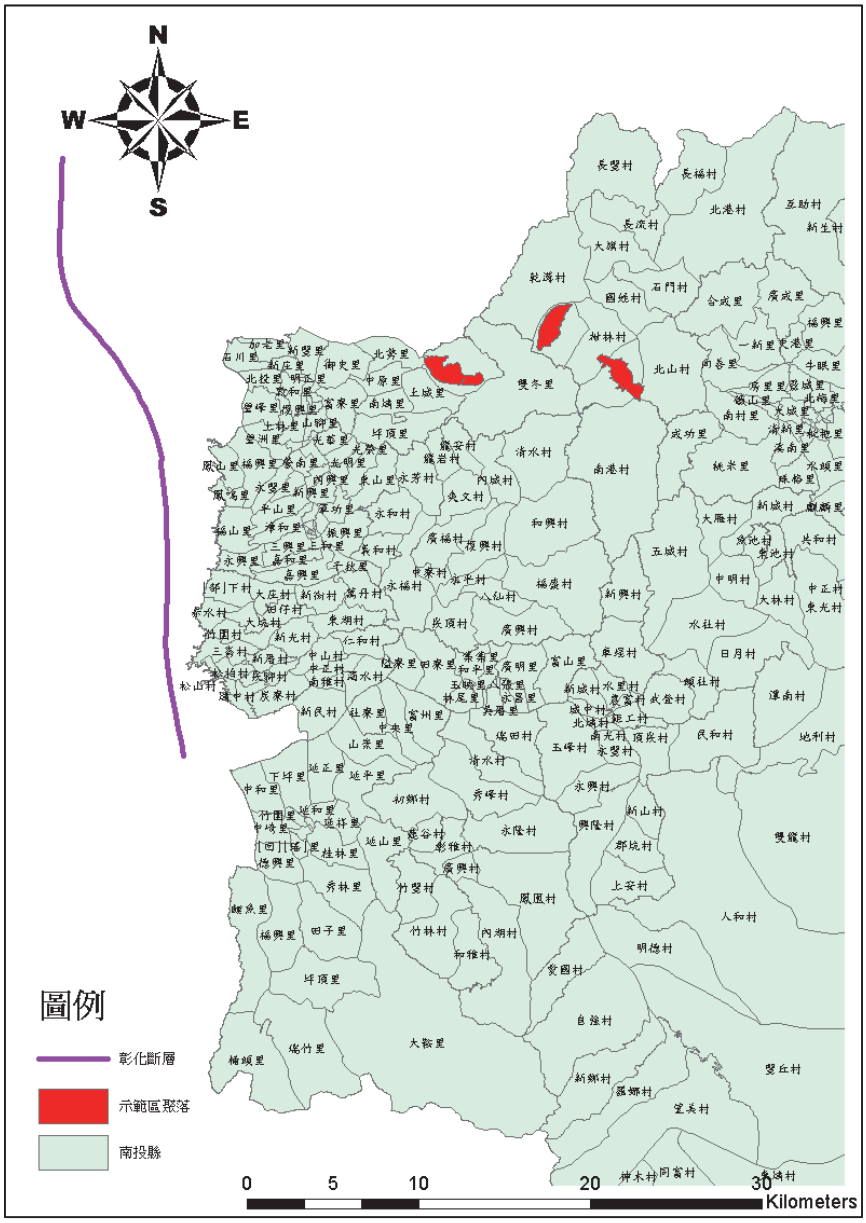


圖 5-36　彰化斷層事件地理位置

二、地表震度分布

在早期評估首先進行的 PGA 震度推估中，對於模擬事件可直接將震源參數帶入震度衰減率公式中，即可簡易地計算出各地震度值。本模擬以彰化斷層事件進行強地動推估得震度範圍如圖 5-37 所示，在示範區聚落中，平林里震度範圍為 277.51~301.71 cm/s^2，福龜村震度範圍為 242.24~256.16 cm/s^2，大石村震度範圍 226.23~250.56 cm/s^2，三村里落在中央氣象局地震震度分級的 5 級強震至 6 級烈震間，震度推估分布如圖 5-37 所示。

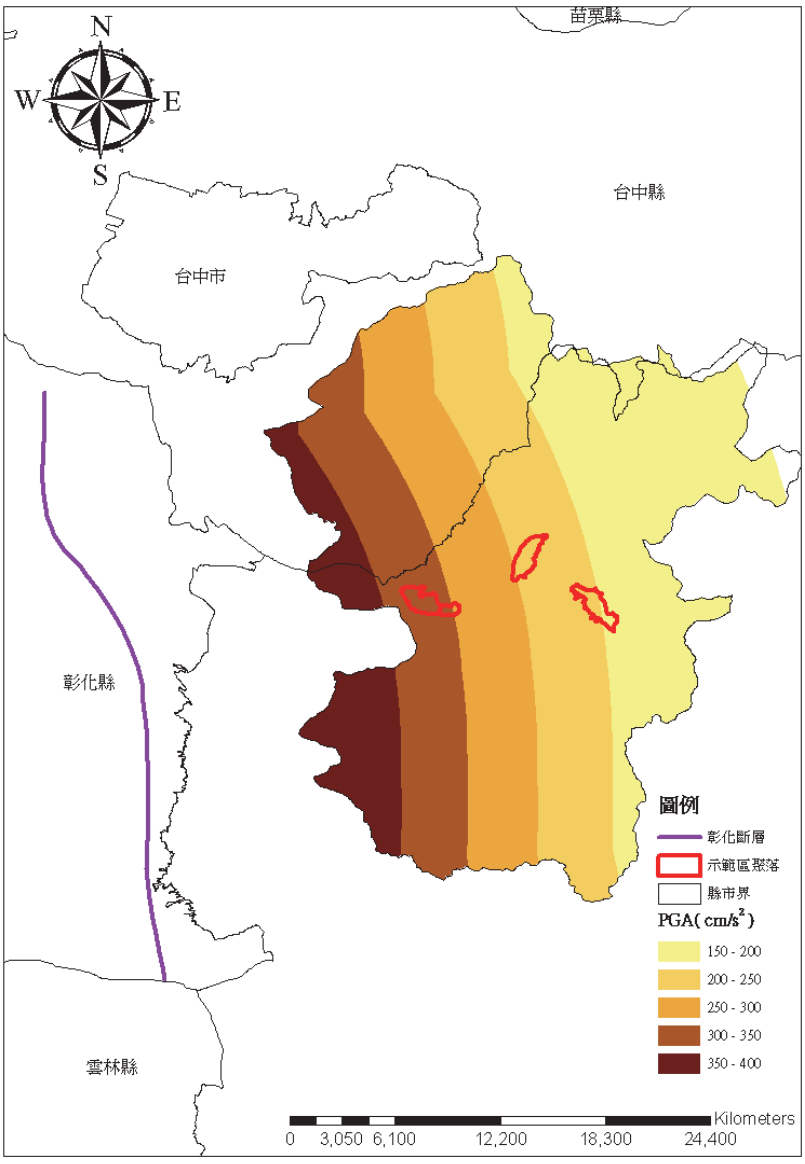


圖 5-37　彰化斷層事件 PGA 分布圖

三、集水區崩塌評估

早期評估的第一階段即藉由坡地易損性參數以及各子集水區之平均 PGA 值，計算各類坡面的崩塌機率。此崩塌機率乘上各坡面單元之面積即為崩塌量，再累積各子集水區中坡面單元之崩塌量，即為子集水區之崩塌量期望值。在本模擬中各子集水區崩塌量如如圖 5-38 所示，各子集水區之崩塌量範圍為 0.12~153.50ha，可發現與事件之崩塌量體有相當差異，雖然設定之震源參數較大，但斷層也較遠，因此震度低了許多，導致崩塌量體相對於 921 地震少了許多。

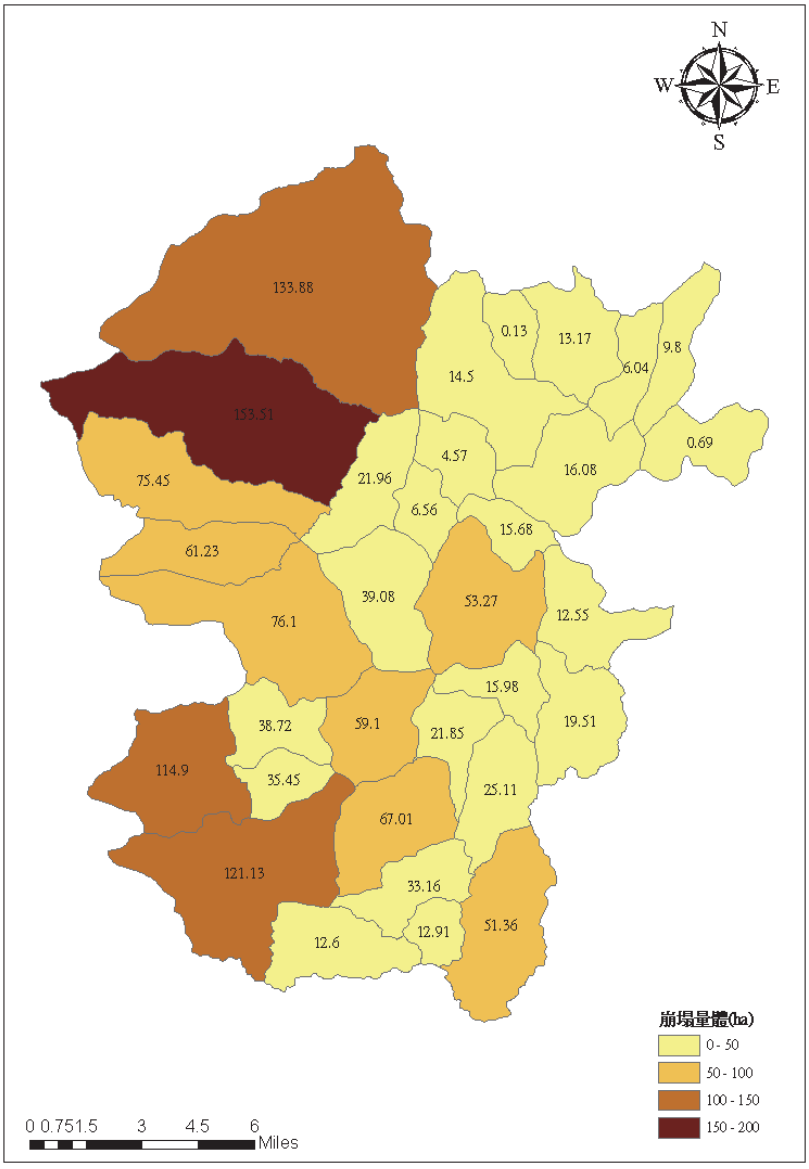


圖 5-38　烏溪集水區中各子集水區崩塌量評估(事件二)

四、聚落之坡面崩塌危害評估

(一)平林里

聚落之坡面崩塌危害評估主要是利用周遭之影響坡面進行易崩指標值分析，再計算其崩塌危害潛勢值。首先利用易損性曲線可得到每一影響坡面之崩塌機率，平林里各影響坡面之崩塌機率範圍為0.040~0.056，如圖 5-39 所示。再依據各影響坡面單元面積評估其崩塌期望值，並計算各影響坡面單元之易崩指標值，各影響坡面單元之崩塌期望值範圍落於 0.002~0.939ha，如表 5-19 所示。最後計算平林里之崩塌危害潛勢值為 0.628 (N_0=43，N_1=27)。

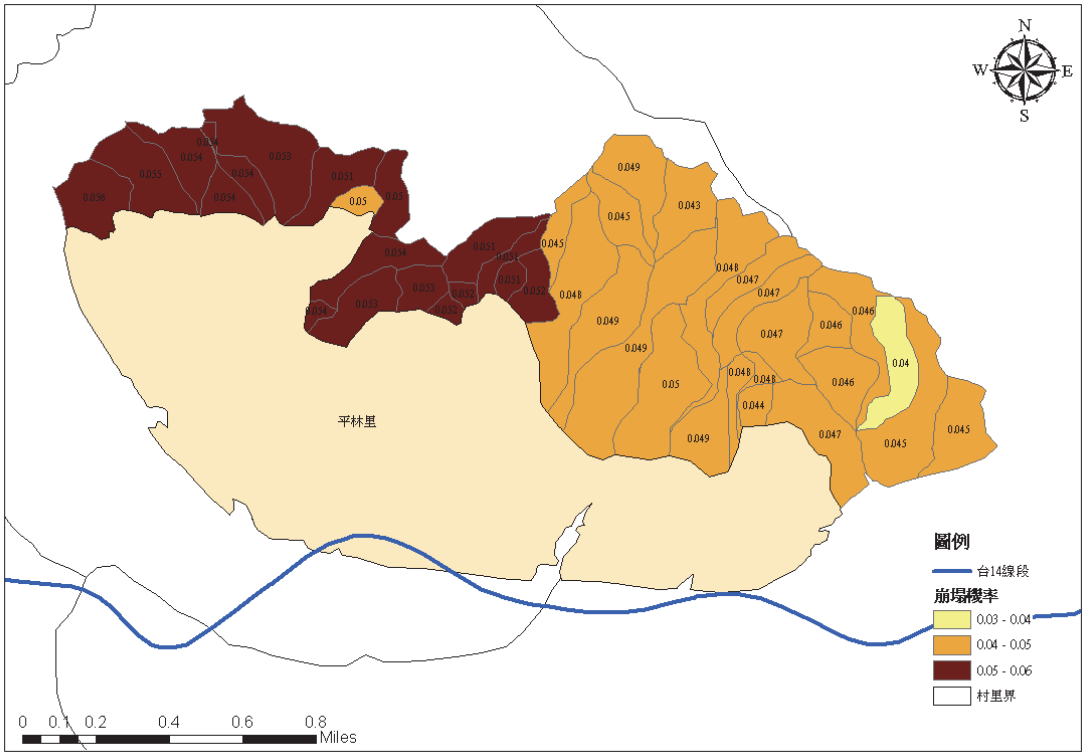


圖 5-39　平林里坡面崩塌機率(事件二)

表 5-19　平林里坡面易崩指標(事件二)

坡面編號	坡面類型	有效面積(ha)	震度(981gal)	崩塌機率	崩塌期望(ha)	易崩指標
2320	G2A1S1	0.03880	0.305	0.054	0.002	0
2361	G2A2S3	8.22348	0.291	0.049	0.402	1
2370	G2A1S3	3.78566	0.293	0.045	0.172	0
2387	G2A2S1	13.06723	0.302	0.053	0.698	1
2388	G2A2S1	3.66397	0.303	0.054	0.198	0
2409	G2A2S3	9.81340	0.288	0.048	0.468	1
2410	G2A2S3	5.25687	0.288	0.047	0.249	1
2431	G2A2S3	9.04757	0.287	0.047	0.427	1
2432	G2A2S3	6.37678	0.288	0.047	0.302	1
2452	G2A2S3	6.75682	0.300	0.054	0.368	1
2454	G2A2S1	6.08987	0.296	0.051	0.309	1
2458	G2A2S1	3.74410	0.300	0.053	0.197	0
2462	G2A2S3	7.77557	0.285	0.046	0.357	1
2463	G2A2S3	4.07837	0.286	0.046	0.189	0
2484	G2A2S3	19.34538	0.290	0.049	0.939	1
2516	G2A2S1	2.80628	0.296	0.051	0.142	0
2535	G2A1S2	2.38574	0.289	0.044	0.105	0
2537	G2A2S1	1.56355	0.289	0.048	0.075	0
2552	G2A1S3	7.70953	0.284	0.040	0.308	1
2586	G2A2S1	5.30198	0.292	0.049	0.259	0
6038	G2A1S3	7.84376	0.289	0.043	0.336	1
6044	G2A2S1	3.52073	0.304	0.054	0.192	0
6046	G2A1S1	6.09698	0.304	0.054	0.326	1
6047	G2A2S1	9.15891	0.306	0.055	0.507	1
6048	G2A2S1	7.87232	0.308	0.056	0.442	1
6050	G2A1S2	6.76714	0.301	0.051	0.344	1
6054	G2A1S1	4.63673	0.298	0.050	0.234	0
6056	G2A1S3	1.98781	0.300	0.050	0.098	0
6118	G2A2S1	1.14545	0.298	0.052	0.059	0
6119	G2A2S1	1.21252	0.298	0.052	0.063	0
6120	G2A2S1	6.75611	0.300	0.053	0.357	1
6121	G2A2S1	1.04590	0.303	0.054	0.056	0
6122	G2A2S3	9.69777	0.286	0.046	0.450	1
6136	G2A2S2	15.82005	0.291	0.050	0.785	1
6149	G2A2S3	8.27982	0.283	0.045	0.370	1
6155	G2A2S1	1.74239	0.296	0.051	0.089	0
6156	G2A2S2	5.10962	0.295	0.052	0.265	1
6165	G2A1S1	10.31032	0.293	0.048	0.496	1
6166	G2A1S2	5.39124	0.291	0.045	0.245	1
6167	G2A2S1	15.24924	0.292	0.049	0.750	1
6172	G2A2S3	7.99874	0.287	0.047	0.377	1
6173	G2A2S3	5.13650	0.290	0.048	0.249	1
6184	G2A2S3	13.90758	0.284	0.045	0.632	1

(二)福龜村

利用易損性曲線可得到每一影響坡面之崩塌機率，福龜村各影響坡面之崩塌機率範圍為 0.022~0.035，如圖 5-40 所示。再依據各影響坡面單元面積評估其崩塌期望值，並計算各影響坡面單元之易崩指標值，各影響坡面單元之崩塌期望值範圍落於 0.001~0.491ha，如表 5-20 所示。最後計算福龜村之崩塌危害潛勢值為 0.204 (N_0=49，N_1=10)

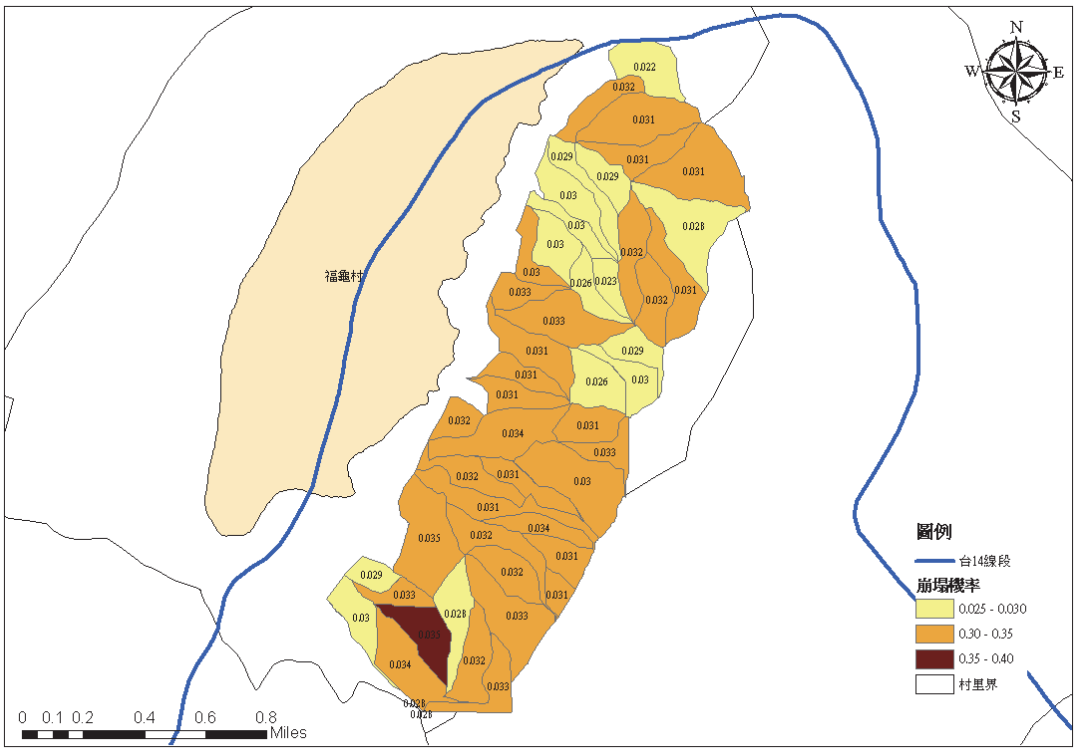


圖 5-40　福龜村坡面崩塌機率(事件二)

表 5-20　福龜村坡面易崩指標(事件二)

坡面編號	坡面類型	有效面積(ha)	震度(981gal)	崩塌機率	崩塌期望(ha)	易崩指標
2149	坡面類型	5.179	0.249	0.032	0.164	0
2150	G2A2S1	6.504	0.248	0.031	0.204	0
2189	G2A2S1	3.378	0.251	0.023	0.077	0
2190	G2A1S3	3.866	0.251	0.030	0.115	0
2191	G2A1S1	4.991	0.250	0.029	0.146	0
2192	G2A1S1	5.566	0.250	0.029	0.164	0
2193	G2A1S1	7.468	0.250	0.032	0.237	0
2194	G2A2S1	7.052	0.251	0.030	0.209	0
2226	G2A1S1	4.466	0.254	0.031	0.137	0
2227	G2A1S1	8.371	0.253	0.031	0.256	0
2230	G2A1S1	6.546	0.249	0.032	0.207	0
2231	G2A2S1	4.738	0.250	0.029	0.139	0
2280	G2A1S1	12.142	0.255	0.034	0.409	1
2295	G2A2S1	5.391	0.251	0.030	0.159	0
2297	G2A1S1	7.188	0.252	0.026	0.186	0
2298	G2A1S2	5.848	0.252	0.031	0.180	0
2299	G2A2S2	4.079	0.252	0.033	0.133	0
2398	G2A2S1	14.056	0.258	0.035	0.491	1
2400	G2A2S1	6.078	0.261	0.030	0.181	0
2401	G2A1S2	0.003	0.261	0.028	0.000	0
2414	G2A1S3	6.095	0.257	0.033	0.201	0
2415	G2A2S2	6.088	0.256	0.032	0.193	0
2416	G2A1S1	5.153	0.254	0.031	0.160	0
2417	G2A1S1	8.582	0.256	0.031	0.270	0
2418	G2A1S1	7.441	0.256	0.032	0.235	0
2419	G2A1S1	6.386	0.256	0.032	0.201	0
2434	G2A1S1	11.992	0.257	0.033	0.393	1
5833	G2A2S2	8.070	0.248	0.022	0.175	0
5838	G2A1S3	11.926	0.248	0.031	0.373	1
5839	G2A2S1	14.102	0.247	0.031	0.434	1
5906	G2A2S1	13.240	0.248	0.028	0.377	1
5907	G2A1S1	8.303	0.249	0.031	0.261	0
5912	G2A2S1	6.142	0.252	0.030	0.184	0
5913	G2A1S1	4.628	0.253	0.030	0.140	0
5914	G2A1S1	4.444	0.251	0.026	0.114	0
5915	G2A1S2	4.256	0.253	0.033	0.141	0
5916	G2A2S1	11.106	0.252	0.033	0.363	1
5975	G2A2S1	5.261	0.254	0.031	0.163	0
5976	G2A1S1	3.951	0.256	0.032	0.125	0
6058	G2A1S1	3.301	0.260	0.029	0.097	0
6059	G2A1S2	3.585	0.259	0.033	0.118	0
6060	G2A1S1	7.319	0.259	0.035	0.258	0
6061	G2A2S1	9.900	0.259	0.034	0.336	1
6062	G2A2S2	7.152	0.258	0.028	0.203	0
6064	G2A1S2	7.138	0.257	0.032	0.228	1

6083	G2A2S3	14.740	0.253	0.030	0.449	1
6087	G2A1S1	4.576	0.254	0.034	0.153	0
6088	G2A2S1	5.089	0.254	0.031	0.157	0
6089	G2A1S1	2.490	0.254	0.031	0.076	0

(三)大石村

利用易損性曲線可得到每一影響坡面之崩塌機率，大石村各影響坡面之崩塌機率範圍為 0.016~0.034，如圖 5-31 所示。再依據各影響坡面單元面積評估其崩塌期望值，並計算各影響坡面單元之易崩指標值，各影響坡面單元之崩塌期望值範圍落於 0.001~0.590ha，如表 5-21 所示。最後計算大石村之崩塌危害潛勢值為 0.147 (N_0=143，N_1=21)。

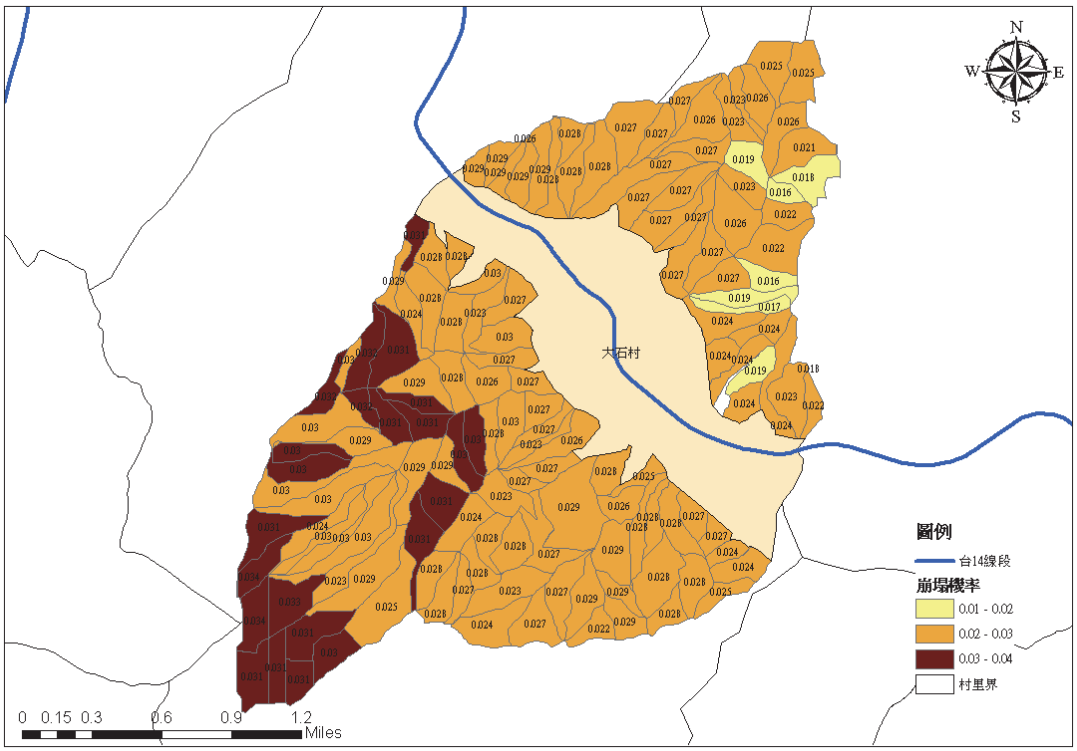


圖 5-41　大石村坡面崩塌機率(事件二)

表 5-21　大石村坡面易崩指標(事件二)

坡面編號	坡面類型	有效面積(ha)	震度(981gal)	崩塌機率	崩塌期望(ha)	易崩指標
2323	G2A2S1	8.25507	0.232	0.025	0.210	0
2353	G2A2S1	8.76496	0.231	0.025	0.221	0
2354	G2A2S1	7.51536	0.232	0.026	0.192	0
2355	G2A2S3	8.15667	0.231	0.021	0.174	0
2377	G2A2S1	4.03828	0.239	0.028	0.114	0
2378	G2A2S1	6.82656	0.240	0.028	0.193	0
2379	G2A2S1	10.07793	0.239	0.028	0.281	1
2390	G2A1S1	0.00747	0.242	0.026	0.000	0
2391	G2A2S1	5.67546	0.240	0.028	0.162	0
2392	G2A2S1	3.29004	0.243	0.029	0.097	0
2393	G2A2S1	3.97286	0.242	0.029	0.116	0
2394	G2A2S1	5.51636	0.242	0.029	0.159	0
2395	G2A2S1	3.35023	0.242	0.029	0.097	0
2411	G2A1S2	8.53351	0.231	0.018	0.156	0
2424	G2A2S1	5.34694	0.236	0.027	0.144	0
2425	G2A1S1	4.96310	0.234	0.023	0.116	0
2426	G2A2S1	6.83019	0.235	0.027	0.183	0
2435	G2A2S1	11.55663	0.237	0.027	0.316	1
2437	G2A2S1	7.68595	0.237	0.027	0.211	0
2464	G2A1S3	4.86688	0.233	0.016	0.080	0
2465	G2A2S1	6.34197	0.235	0.027	0.169	0
2466	G2A1S2	6.02582	0.234	0.019	0.116	0
2479	G2A1S2	6.14859	0.244	0.023	0.141	0
2480	G2A2S2	6.92400	0.243	0.027	0.188	0
2529	G2A1S1	4.97871	0.244	0.027	0.134	0
2540	G2A1S3	4.37269	0.234	0.017	0.073	0
2541	G2A1S1	7.30183	0.235	0.024	0.175	0
2566	G2A1S1	4.94441	0.235	0.024	0.118	0
2567	G2A2S2	7.90480	0.234	0.024	0.186	0
2573	G2A2S2	3.70723	0.247	0.029	0.107	0
2574	G2A2S1	7.45721	0.249	0.032	0.235	0
2575	G2A2S2	2.27786	0.249	0.030	0.068	0
2576	G2A2S1	4.67568	0.250	0.032	0.150	0
2578	G2A2S2	8.21454	0.247	0.029	0.236	0
2579	G2A2S2	7.08517	0.246	0.028	0.200	0
2580	G2A2S1	4.03846	0.247	0.031	0.125	0
2581	G2A2S1	5.85813	0.247	0.031	0.181	0
2582	G2A2S1	3.30664	0.249	0.032	0.105	0
2583	G2A2S1	5.80807	0.248	0.031	0.182	0
2584	G2A1S1	8.08982	0.252	0.030	0.244	0
2610	G2A2S1	3.44171	0.237	0.027	0.094	0
2611	G2A2S1	7.24148	0.238	0.028	0.201	0
2612	G2A2S1	7.19266	0.238	0.028	0.198	0

2613	G2A1S1	4.47895	0.237	0.025	0.110	0
2618	G2A1S2	4.05730	0.243	0.023	0.091	0
2619	G2A1S1	8.08617	0.242	0.026	0.213	0
2620	G2A1S1	3.74207	0.243	0.027	0.099	0
2621	G2A1S1	3.21624	0.239	0.025	0.082	0
2663	G2A1S1	9.30609	0.254	0.031	0.287	1
2706	G2A2S2	8.22435	0.243	0.027	0.222	0
2707	G2A2S1	7.92789	0.242	0.029	0.230	0
2708	G2A2S2	8.52737	0.244	0.027	0.234	0
2709	G2A1S2	4.67268	0.242	0.022	0.103	0
2710	G2A1S2	9.72726	0.246	0.024	0.229	0
2800	G2A1S3	8.42595	0.251	0.023	0.193	0
2828	G2A1S1	6.67071	0.252	0.030	0.201	0
2849	G2A1S1	5.75015	0.252	0.030	0.172	0
2850	G2A1S3	6.70757	0.252	0.024	0.158	0
2851	G2A1S1	6.69790	0.251	0.030	0.199	0
2852	G2A2S1	9.98634	0.254	0.033	0.333	1
2853	G2A1S1	5.77762	0.254	0.031	0.179	0
2969	G2A2S1	6.23405	0.255	0.034	0.209	0
2970	G2A2S1	7.82213	0.255	0.034	0.264	0
2971	G2A1S1	8.62959	0.255	0.031	0.271	0
6000	G2A2S1	6.59781	0.232	0.026	0.170	0
6001	G2A2S2	3.56968	0.233	0.023	0.083	0
6022	G2A2S1	10.30420	0.235	0.026	0.273	0
6023	G2A2S1	5.41725	0.235	0.027	0.144	0
6024	G2A1S2	6.27837	0.233	0.019	0.119	0
6025	G2A1S1	5.85388	0.233	0.023	0.137	0
6034	G2A2S1	4.15597	0.235	0.027	0.111	0
6035	G2A2S1	10.69027	0.237	0.027	0.293	1
6036	G2A2S1	5.55157	0.236	0.027	0.150	0
6057	G2A2S1	7.16935	0.241	0.029	0.205	0
6078	G2A2S3	11.61081	0.233	0.022	0.254	1
6079	G2A1S3	3.03269	0.232	0.016	0.049	0
6080	G2A2S3	5.59955	0.232	0.022	0.121	0
6100	G2A2S1	8.23958	0.237	0.027	0.224	0
6101	G2A2S1	7.15957	0.236	0.027	0.193	0
6102	G2A2S1	10.97571	0.234	0.026	0.289	1
6103	G2A2S1	7.96566	0.236	0.027	0.216	0
6124	G2A2S1	4.02740	0.244	0.030	0.120	0
6125	G2A1S1	7.87556	0.245	0.028	0.217	0
6126	G2A2S2	5.63978	0.246	0.028	0.159	0
6127	G2A2S2	8.75813	0.246	0.028	0.249	1
6130	G2A2S1	7.63946	0.244	0.030	0.226	0
6163	G2A1S1	4.26609	0.243	0.027	0.114	0
6164	G2A2S3	7.28846	0.245	0.026	0.192	0
6176	G2A2S2	5.17605	0.234	0.024	0.122	0

6177	G2A1S1	4.90575	0.236	0.024	0.118	0
6187	G2A1S2	0.00030	0.232	0.018	0.000	0
6188	G2A2S2	9.11669	0.233	0.023	0.214	0
6189	G2A2S3	3.71584	0.233	0.022	0.081	0
6199	G2A1S2	5.08696	0.235	0.019	0.099	0
6200	G2A1S1	4.93227	0.235	0.024	0.118	0
6203	G2A2S1	3.67276	0.246	0.031	0.112	0
6204	G2A1S2	5.62898	0.247	0.024	0.135	0
6205	G2A2S1	11.17112	0.248	0.031	0.349	1
6207	G2A1S1	11.13284	0.251	0.030	0.332	1
6208	G2A1S1	5.06128	0.252	0.030	0.152	0
6209	G2A1S1	6.22127	0.250	0.029	0.182	0
6236	G2A2S1	4.41805	0.238	0.027	0.121	0
6237	G2A1S1	3.12748	0.236	0.024	0.076	0
6238	G2A1S1	6.32592	0.236	0.024	0.153	0
6243	G2A1S1	5.14976	0.243	0.027	0.137	0
6244	G2A2S1	7.39018	0.244	0.030	0.220	0
6245	G2A2S2	4.58531	0.245	0.028	0.127	0
6246	G2A2S1	5.71976	0.245	0.030	0.173	0
6247	G2A2S1	5.98798	0.246	0.030	0.182	0
6248	G2A1S1	4.57627	0.243	0.027	0.122	0
6249	G2A2S2	3.05281	0.244	0.027	0.084	0
6250	G2A1S2	7.27129	0.245	0.023	0.168	0
6251	G2A1S2	7.38638	0.246	0.024	0.175	0
6252	G2A1S1	6.25720	0.248	0.028	0.178	0
6253	G2A2S3	6.02833	0.247	0.028	0.166	0
6254	G2A2S2	4.42198	0.247	0.029	0.126	0
6255	G2A2S1	5.84573	0.240	0.028	0.167	0
6256	G2A2S2	7.32111	0.244	0.028	0.203	0
6257	G2A2S2	5.47346	0.245	0.028	0.153	0
6258	G2A2S2	4.42193	0.246	0.028	0.125	0
6259	G2A2S3	4.37745	0.247	0.027	0.119	0
6260	G2A1S1	5.55489	0.240	0.026	0.143	0
6261	G2A2S1	20.32903	0.242	0.029	0.590	1
6262	G2A2S2	9.05727	0.243	0.027	0.246	1
6263	G2A1S2	10.47242	0.245	0.023	0.243	1
6264	G2A2S1	4.46603	0.239	0.028	0.125	0
6265	G2A2S1	4.47770	0.239	0.028	0.125	0
6266	G2A2S1	12.02340	0.239	0.028	0.338	1
6268	G2A2S1	9.39705	0.241	0.029	0.268	0
6269	G2A2S1	5.70418	0.240	0.028	0.161	0
6270	G2A2S1	3.70394	0.241	0.029	0.106	0
6271	G2A2S1	5.35757	0.241	0.029	0.153	0
6329	G2A1S1	12.01847	0.252	0.030	0.359	1
6332	G2A1S1	10.92867	0.251	0.030	0.326	1
6340	G2A1S2	15.22105	0.250	0.025	0.383	1

6378	G2A2S2	8.68058	0.248	0.029	0.252	1
6379	G2A1S1	13.18885	0.250	0.029	0.389	1
6396	G2A1S1	9.58817	0.253	0.031	0.293	1
6397	G2A1S1	5.02431	0.254	0.031	0.154	0
6415	G2A1S1	11.92701	0.251	0.030	0.352	1
7711	G2A2S2	3.69822	0.245	0.028	0.103	0
7758	G2A2S1	8.22564	0.247	0.031	0.253	0
7808	G2A2S1	8.57900	0.248	0.031	0.268	0

五、道路之坡地崩塌阻斷評估

(一)平林里與福龜村間道路(30K+500~34K+000)

在進行道路之坡地崩塌阻斷評估前，同樣可先利用易損性曲線可得到每一影響坡面之崩塌機率，平林里與福龜村間道路各影響坡面之崩塌機率範圍為 0.028~0.046，再依據各影響坡面單元面積評估其崩塌期望值，並計算各影響坡面單元之易崩指標值，各影響坡面單元之崩塌期望值範圍落於 0.128~0.801ha，如表 5-12 及圖 5-42 所示。

表 5-22　平林里與福龜村間道路坡面易崩指標(事件二)

坡面編號	坡面類型	有效面積(ha)	震度(981gal)	崩塌機率	崩塌期望(ha)	易崩指標
2401	213	7.23019	0.261	0.028	0.200	0
2421	212	8.04188	0.261	0.030	0.242	1
2590	221	5.01139	0.269	0.039	0.198	0
2591	222	4.43182	0.271	0.039	0.173	0
2592	223	3.49064	0.270	0.038	0.132	0
2593	221	8.84679	0.271	0.040	0.354	1
2594	221	9.00628	0.268	0.039	0.349	1
2600	211	5.34726	0.278	0.041	0.218	0
2601	211	8.68270	0.277	0.040	0.350	1
2602	221	6.42647	0.271	0.040	0.259	0
2625	221	3.22775	0.281	0.044	0.142	0
2626	221	5.52707	0.280	0.044	0.242	0
2627	221	4.06678	0.284	0.046	0.185	0
2628	221	7.37853	0.283	0.045	0.334	1
2631	211	4.80043	0.287	0.045	0.216	0
2636	221	5.14327	0.285	0.046	0.235	0
6090	213	12.60291	0.262	0.028	0.355	1
6146	213	4.42297	0.264	0.029	0.128	0
6147	213	5.94317	0.261	0.028	0.165	0
6148	223	12.67621	0.266	0.036	0.455	1
6211	221	5.27105	0.274	0.041	0.217	0
6212	221	6.05684	0.273	0.041	0.247	0
6213	221	5.17444	0.272	0.041	0.210	0
6216	222	5.01525	0.268	0.038	0.191	0
6217	221	7.54889	0.270	0.039	0.298	1
6222	221	5.59236	0.275	0.042	0.234	0
6223	221	6.06608	0.274	0.041	0.251	0
6279	221	5.66645	0.281	0.044	0.252	0
6280	221	5.56373	0.282	0.045	0.249	0
6281	221	18.41046	0.279	0.043	0.801	1
6282	221	7.39721	0.283	0.045	0.335	1

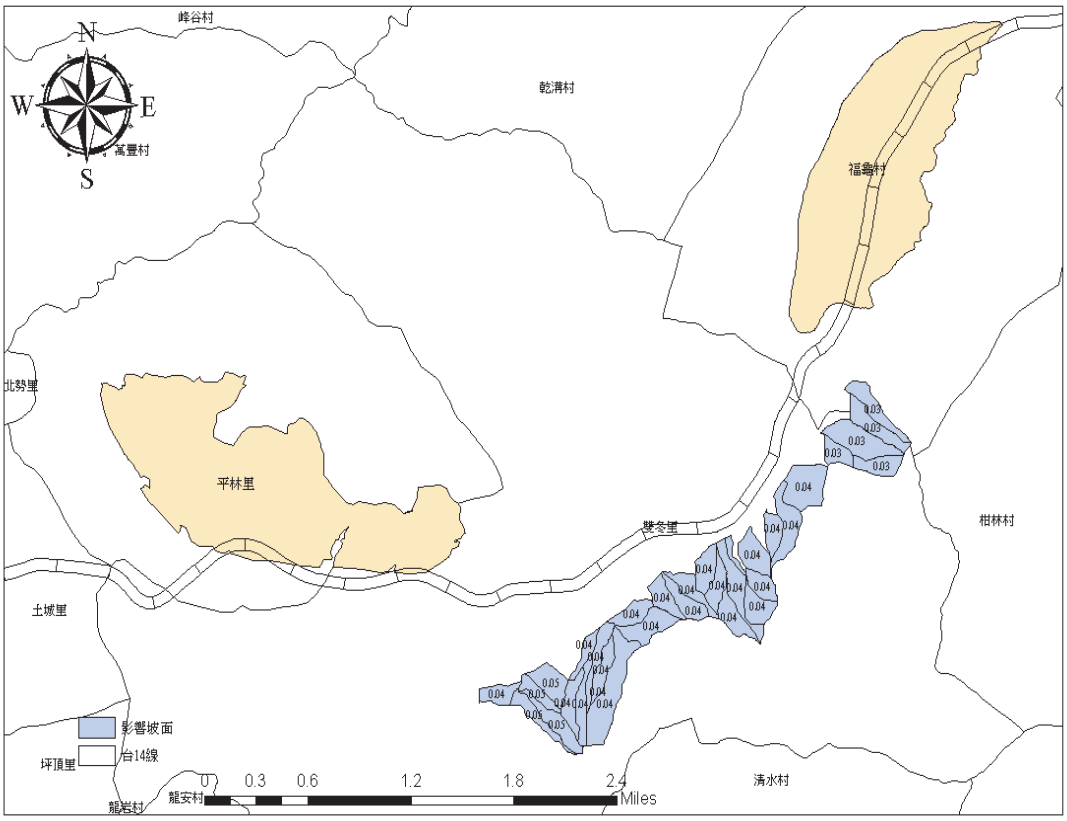


圖 5-42　平林里與福龜村間道路坡面崩塌機率(事件二)

在路段阻斷之危害潛勢值評估方面，則利用各路段的平均震度值以及前節計算所得路段阻斷易損性參數，評估得各路段受崩塌影響的易損性，所得即為各路段阻斷危害潛勢值，如表 5-23 所示，再以自然間斷點分類法進行中、中高、高潛勢路段分級，在平林里與福龜村間路段阻斷潛勢值為 0.004~0.049，危害潛勢分級如圖 5-43 所示。

表 5-23　平林里與福龜村間路段阻斷之危害潛勢值(事件二)

路段	坡面數量	有效面積(ha)	震度(981gal)	崩塌期望(ha)	危害潛勢
30K+500	6	42.02987	0.281	1.988	0.047
31K+000	6	31.12282	0.278	1.305	0.049
31K+500	9	55.41474	0.275	2.243	0.049
32K+000	12	73.95712	0.271	3.201	0.041
32K+500	10	68.20801	0.268	2.760	0.026
33K+000	6	43.37942	0.266	1.677	0.010
33K+500	4	32.29795	0.265	0.925	0.004
34K+000	3	15.27207	0.262	0.442	0.005

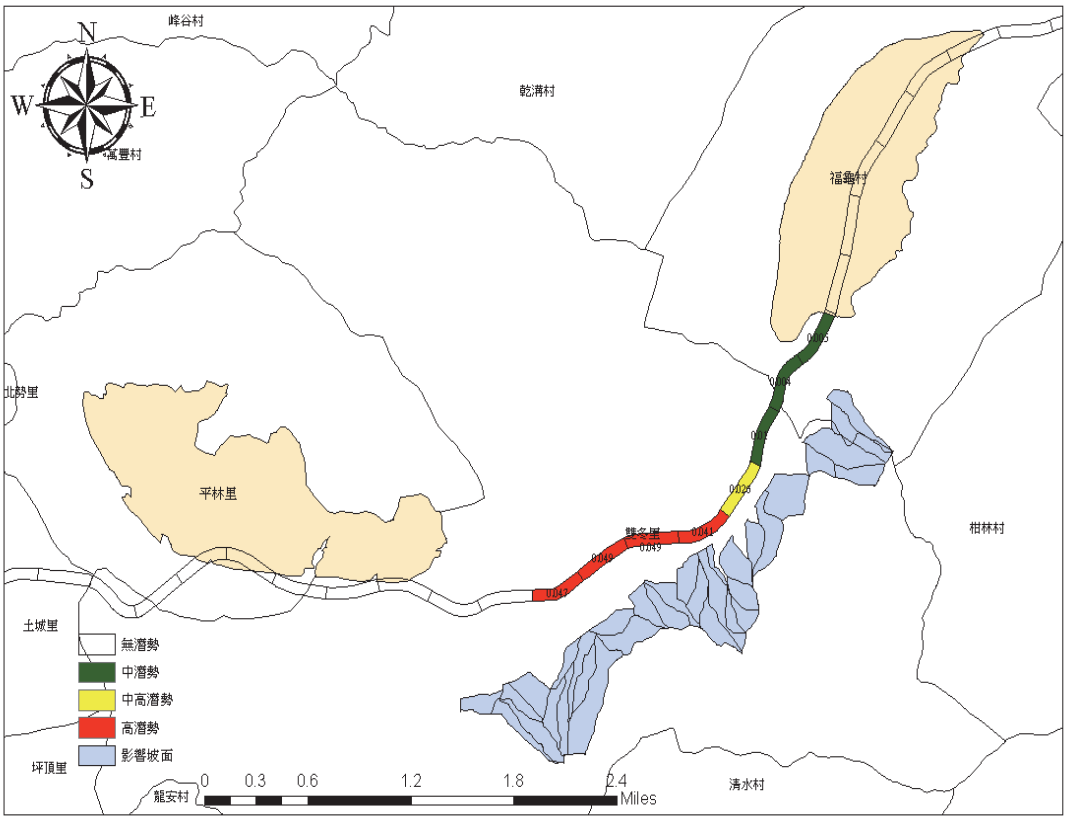


圖 5-43　平林里與福龜村間路段阻斷之危害潛勢分級(事件二)

(二)福龜村與大石村間道路(34K+000~37K+000)

同樣可先利用易損性曲線可得到每一影響坡面之崩塌機率，福龜村與大石村間道路各影響坡面之崩塌機率範圍為 0.025~0.030，再依據各影響坡面單元面積評估其崩塌期望值，並計算各影響坡面單元之易崩指標值，各影響坡面單元之崩塌期望值範圍落於 0.101~0.408ha，如表 5-24 及圖 5-44 所示。

表 5-24　福龜村與大石村間道路坡面易崩指標(事件二)

坡面編號	坡面類型	有效面積(ha)	震度(981gal)	崩塌機率	崩塌期望(ha)	易崩指標
2144	221	5.71207	0.238	0.028	0.158	0
2145	221	5.40034	0.240	0.028	0.152	0
2147	221	5.02894	0.237	0.027	0.138	0
2148	221	7.35080	0.237	0.027	0.202	0
2156	221	4.17328	0.243	0.029	0.123	0
2157	222	4.23791	0.244	0.027	0.116	0
2158	221	5.68719	0.245	0.030	0.171	0
2176	211	4.69527	0.240	0.025	0.120	0
2186	211	6.18683	0.240	0.026	0.159	0
2187	221	5.24810	0.240	0.028	0.149	0
2229	221	5.70998	0.240	0.028	0.161	0
2233	221	9.74054	0.238	0.028	0.270	0
2234	221	7.65645	0.239	0.028	0.215	0
2293	211	8.08622	0.241	0.026	0.210	0
2294	211	4.42771	0.241	0.026	0.115	0
2389	211	3.97189	0.241	0.026	0.103	0
2390	211	7.43364	0.242	0.026	0.195	0
5834	222	5.07499	0.246	0.028	0.143	0
5835	221	4.32435	0.245	0.030	0.130	0
5836	221	5.86730	0.245	0.030	0.176	0
5837	221	4.15392	0.245	0.030	0.125	0
5847	111	4.30643	0.243	0.000	0.000	0
5879	211	10.53249	0.238	0.025	0.261	0
5880	211	16.16187	0.239	0.025	0.408	1
5939	221	4.46912	0.240	0.028	0.127	0
5940	211	3.91533	0.241	0.026	0.101	0
5988	221	8.18281	0.240	0.028	0.231	0

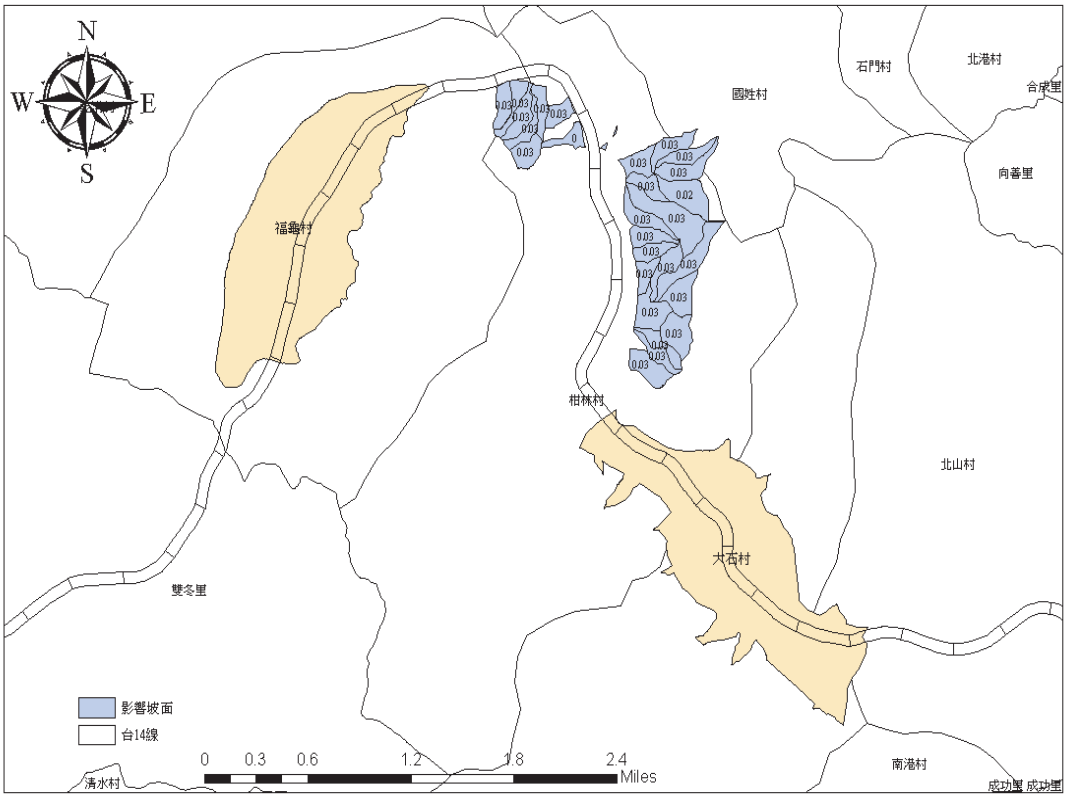


圖 5-44　福龜村與大石村間路段坡面崩塌機率(事件二)

在路段阻斷之危害潛勢值評估方面，利用各路段的平均震度值以及前節計算所得路段阻斷易損性參數，評估得各路段受崩塌影響的易損性，所得即為各路段阻斷危害潛勢值，如表 5-25 所示，再以自然間斷點分類法進行中、中高、高潛勢路段分級，在福龜村與大石村間路段阻斷潛勢值為 0.014~0.030，危害潛勢分級如圖 5-45 所示。

表 5-25　福龜村與大石村間路段阻斷之危害潛勢值(事件二)

路段	坡面數量	有效面積(ha)	震度(981gal)	崩塌期望(ha)	危害潛勢
37K+000	1	5.37132	0.250	0.143	0.014
37K+500	5	23.65847	0.247	0.691	0.028
38K+000	21	27.83175	0.244	0.813	0.028
38K+500	7	33.51894	0.242	0.985	0.029
39K+000	9	53.07262	0.242	1.551	0.027
39K+500	8	46.75884	0.242	1.338	0.027
40K+000	10	65.69254	0.242	1.862	0.030
40K+500	12	75.02862	0.243	2.035	0.029
41K+000	5	27.83479	0.245	0.723	0.021
41K+500	1	7.43364	0.244	0.195	0.021
42K+000	1	7.43364	0.243	0.195	0.020

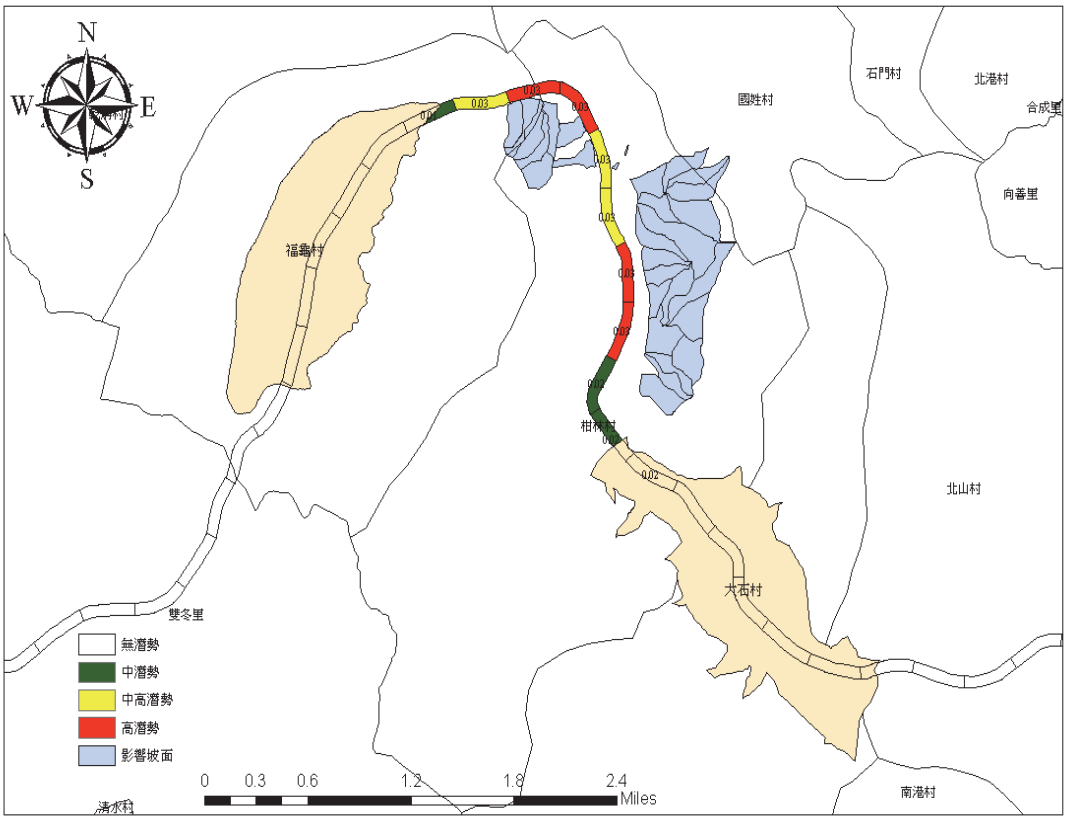


圖 5-45　福龜村與大石村間路段阻斷之危害潛勢分級(事件二)

六、建物全半倒塌評估

在建築物全半倒評估方面，直接以村里聚落為單元進行估計，依據地表震度分布推估結果，套疊該聚落之網格震度值，再取聚落之平均 PGA 做為評估依據即可。在示範區聚落中，平林里震度範圍為 277.51~301.71 cm/s^2，平均值為 288.60 cm/s^2；福龜村震度範圍為 242.24~256.16 cm/s^2，平均值為 248.58 cm/s^2；大石村震度範圍為 226.23~250.56 cm/s^2，平均值為 237.58 cm/s^2。得到三聚落之平均震度值後，可直接帶入易損性曲線求取全半倒機率值，再乘上各類建築物總棟數，即可得到全半倒評估結果，各聚落推估結果如表 5-16~表 5-18 所示。平林里全半倒數 13 棟、全倒數 6 棟，福龜村全半倒數 20 棟、全倒數 8 棟，大石村全半倒數 5 棟、全倒數 2 棟，顯示事件二震度雖較 921 小，但強烈震區已可造成許多建物損害。

表 5-26　平林里建物全半倒評估(事件二)

代號	建物類型	總棟數	全半倒機率	全半倒數	全倒機率	全倒數
RCL1	早期低樓層 RC 造	3	0.033	0	0.008	0
RCL2	中期低樓層 RC 造	3	0.025	0	0.003	0
RCL3	近期低樓層 RC 造	10	0.032	0	0.008	0
RCM1	早期中樓層 RC 造	0	0.050	0	0.011	0
RCM2	中期中樓層 RC 造	0	0.033	0	0.005	0
RCM3	近期中樓層 RC 造	1	0.033	0	0.004	0
RCH1	早期高樓層 RC 造	0	0.082	0	0.027	0
RCH2	中期高樓層 RC 造	0	0.046	0	0.008	0
RCH3	近期高樓層 RC 造	0	0.028	0	0.004	0
RML	低樓層加強磚造	137	0.033	4	0.008	1
RMM	中樓層加強磚造	3	0.056	0	0.013	0
GM	磚石造	71	0.046	3	0.017	1
SS	鋼構造	1	0.027	0	0.006	0
ST	鐵皮屋	4	0.034	0	0.011	0
WC	木造	8	0.029	0	0.012	0
MC	純土造	65	0.099	6	0.056	4
合計(棟)		306	—	13	—	6

資料來源：本研究分析、整理，棟數四捨五入取整數。

表 5-27　福龜村建物全半倒評估(事件二)

代號	建物類型	總棟數	全半倒機率	全半倒數	全倒機率	全倒數
RCL1	早期低樓層 RC 造	3	0.013	0	0.002	0
RCL2	中期低樓層 RC 造	25	0.009	0	0.001	0
RCL3	近期低樓層 RC 造	16	0.016	0	0.004	0
RCM1	早期中樓層 RC 造	0	0.017	0	0.003	0
RCM2	中期中樓層 RC 造	0	0.010	0	0.001	0
RCM3	近期中樓層 RC 造	1	0.014	0	0.001	0
RCH1	早期高樓層 RC 造	0	0.040	0	0.011	0
RCH2	中期高樓層 RC 造	0	0.024	0	0.003	0
RCH3	近期高樓層 RC 造	0	0.011	0	0.001	0
RML	低樓層加強磚造	304	0.015	5	0.003	1
RMM	中樓層加強磚造	10	0.030	0	0.006	0
GM	磚石造	237	0.023	5	0.008	2
SS	鋼構造	1	0.013	0	0.003	0
ST	鐵皮屋	3	0.018	0	0.005	0
WC	木造	44	0.014	1	0.005	0
MC	純土造	155	0.056	9	0.030	5
合計(棟)		799	—	20	—	8

表 5-28　大石村建物全半倒評估(事件二)

代號	建物類型	總棟數	全半倒機率	全半倒數	全倒機率	全倒數
RCL1	早期低樓層 RC 造	1	0.009	0	0.002	0
RCL2	中期低樓層 RC 造	1	0.007	0	0.000	0
RCL3	近期低樓層 RC 造	1	0.013	0	0.003	0.
RCM1	早期中樓層 RC 造	0	0.012	0	0.002	0
RCM2	中期中樓層 RC 造	0	0.007	0	0.001	0
RCM3	近期中樓層 RC 造	0	0.011	0	0.001	0
RCH1	早期高樓層 RC 造	0	0.031	0	0.008	0
RCH2	中期高樓層 RC 造	0	0.020	0	0.003	0
RCH3	近期高樓層 RC 造	0	0.008	0	0.001	0
RML	低樓層加強磚造	82	0.012	1	0.002	0
RMM	中樓層加強磚造	1	0.024	0	0.005	0
GM	磚石造	72	0.018	1	0.006	0
SS	鋼構造	0	0.010	0	0.002	0
ST	鐵皮屋	0	0.015	0	0.004	0
WC	木造	37	0.011	0	0.004	0
MC	純土造	66	0.047	3	0.024	2
合計(棟)		261	—	5	—	2

第六章　結論與建議

(一)在易損性曲線建立方面，已完成地震誘發坡地崩塌之12類坡地易損性曲線以及地震引致建物倒塌之16類易損性曲線分析，並繪製各類易損性曲線。

(二)在早期評估資料建立方面，已完成早期評估所需之三個研究示範聚落相關資料庫建置，包括地文資料、環境資料、坡面單元、建物基礎資料、建物屬性分析等。

(三)示範聚落早期評估模式建立與應用方面，分別以921地震以及彰化斷層模擬事件進行情境模擬，包括集水區崩塌評估、示範聚落之坡面崩塌危害評估、道路之坡地崩塌阻斷評估、建物全半倒塌評估等分析。

(四)對於二個事件的評估結果，921地震事件能夠掌握到聚落的高崩塌危害潛勢(三村里之危害潛勢值皆為0.45以上)以及路段受崩塌阻斷的可能性；彰化斷層事件雖規模較大，但其離示範區較遠震度普遍較低，崩塌危害潛勢值(0.073~0.314間)與道路阻斷危害潛勢值與921地震事件相較皆低很多。顯見劇震區(400gal以上)與強震區(80~250gal)、烈震區(250~400gal)的崩塌危害明顯的差異，此現象亦與前人文獻結論相符(王文能、尹承遠等人，2000)。

(五)921地震事件之早期評估結果中建物全半倒塌評估具有實際資料，比對真實與評估結果如下：

1. 建物全半倒方面：平林里真實129棟，評估106棟，誤差17.8%；福龜村真實337棟，評估202棟，誤差40.1%；大石村真實48棟，評估56棟，誤差-16.7%。三村里總誤差29.2%。

2. 建物全倒方面：平林里真實58棟，評估61棟，誤差-5.2%；福龜村真實122棟，評估108棟，誤差11.5%；大石村真實20棟，評估31棟，誤差-55.0%。三村里總誤差0.0%。

評估結果顯示，災損評估係屬風險評估性質，具有一定的不確定誤差，以易損性評估性質屬於廣域評估，一般而言數量越多範圍越大則會越準確，對於全倒之評估亦較全半倒評估準確。

(六)本研究以模擬事件的方式進行早期評估應用，但以人工地震進行事件模擬有其有限性，建議未來可結合地震危害度分析進行易損性曲線的應用，可於災前就先了解山區聚落在不同震級下的可能危害，降低人工地震的不確定性，災中也可直接利用於災害潛勢評估資料的比對，可縮短地震早期評估的時間。

(七)地震早期評估可快速了解可能災害損失，便於快速掌握高災害潛勢地區，然而除了易損性曲線的建立，山區聚落的基礎資料建立是關鍵要解決的問題，建議未來應逐步建立山區危險聚落之相關基礎資料，地震早期評估模式方能有效應用。

(八)本研究發展的地震早期評估方法，其原理涉及資料庫的運算過程，當需評估之範圍很大時，即有必要朝網路自動接收中央氣象局資料以及系統化運算的方向發展，才能夠有效地應用在真實地震事件中。

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。

吳俊鋐、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。

李伯薔(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蹋與土石流之影響/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。

馮梓琁(2007)。九分二崩塌塌地變遷之研究。

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。

簡瑋延(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 JI, 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-fidelitydigital 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.

Fernadez T, Irigaray C, EL Hamdouni R, Chacon J(2003).Methodology for landslidesusceptibility 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.

行政院農業委員會水土保持局
應用易損性分析發展震後山區災害潛勢評估模式之研究
期初審查會議委員意見回復

壹、時間：107 年 5 月 11 日(星期五)上午 9 時 10 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：陳副總工程司振宇

記錄：陳國威

肆、委員意見：

委員意見	意見回復
1. 地震引發崩塌特性與降雨促崩，宜有所說明。P2-17 係降雨促崩條件，是否可用於地震促崩。	感謝委員指教，本研究係考量地震引致的坡地表層崩塌，與降雨促崩之致災誘因不同，所考慮的潛因也有所差異。
2. 地震促崩的影響範圍如何確定?	感謝委員指教，本研究係以地震引致的廣域崩塌現象為目標，根據前人研究，促崩的影響範圍約在 400gal 以上，單一地震事件中此範圍以上的地區可適用本研究成果。
3. 坡面單元係以地形進行劃分，這與地震促崩的關係為何?	感謝委員指教，坡面單元在本研究中的用途主要是建立分析單元，其係由 DEM 所產製，主要隨著高程地形變異而不同，雖表面地形不一定會與地震促崩有直接關係，但仍可表達區域的促崩條件，在無法全盤瞭解地質地層狀態下，是目前一般較適合且成熟的分析方法。
4. 降雨情況、地下水位高度及土壤飽和度可能使本研究之結果有所不同，宜探討。	感謝委員指教，本研究目標主要係以地震直接誘發的廣域表層崩塌為主，研究中不考慮降雨、地下水位高度及土壤飽和度等局部因子。降雨促崩可參考水保局相關研究案。
5. PGA 之運動方向和坡向(或順向坡坡向及坡度)之相互關係，可能會影響本研究之結果，建議加以探討。	遵照辦理，在地震引致的坡地崩塌方面，本研究中已有考慮 PGA 之運動方向(坡向因子中考慮)、順向坡(屬篩選因子，詳見報告書第 29、59 頁)。

6. 道路及建物之維護補強程度，也可能會影響研究之結果，建議加以探討。	感謝委員指教，道路及建物維護補強程度的影響可從二方面說明。在道路部分，本研究主要探討道路周遭坡面崩塌對於道路阻斷的可能性，而不考慮道路本身受震的破壞；在建物部分，經維護補強後的建物會對其易損性有所影響，然而本研究範圍屬山區，具備維護補強條件的建物仍屬少數，且補強工法眾多，不確定因素大，因此本研究不考慮建物之補強狀況。
7. 目前呈現的建物易損性曲線成果，是屬於山區或平地建物之成果，山區之建物因為地震的損壞，是因為被崩塌掩埋，還是結構被震壞，分析中是否有區隔?	感謝委員指教，建物易損性曲線係以九二一地震中九縣市的建物資料庫進行分析，涵蓋山區或平地建物。建物的損害係根據九二一災後調查資料所得，其中亦包含了崩塌或直接受震損害。
8. 地震對山區建物道路或坡地的影響，可能為直接在地震過程中的損壞，及地震事件之後因大雨事件而造成坡地道路及建物之損壞，如何區分處理?	感謝委員指教，本研究目的係針對地震後直接對建物的損害，以及震後直接的坡地崩塌對道路的阻斷影響進行分析，而未考慮地震後進一步降雨引致的災害。
9. 本研究宜按原計畫題目，將研究重點著重於地震後山區災害潛勢評估。	遵照辦理，本研究將依原計畫題目，將研究重點著重於地震後山區聚落的災害潛勢評估。
10. 震後易損性，如何以 PGA 評估災區潛勢的時間效應？比如 921 災後與現在同一山區地點之災害潛勢值有何差異？	感謝委員指教，潛勢的時間效應有賴於充分的時間變異資料，目前台灣地區有紀錄較可靠的地震事件僅九二一地震，若有可靠的另一場地震事件資料，即可得到災害潛勢值的差異。
11. 坡地或建築物受PGA方向性(水平、垂直)或局部地形產生之加速度放大效應為何？	感謝委員指教，根據前人研究，不論是坡地或建物受 PGA 的影響主要是雙向水平地震力為主，而地形效應則會直接體現於 PGA 的大小，可在震度衰減率中考慮。
12. P9 易損性曲線中，崩塌機率量化之標準為何？為何採用對數常態分布？是否有通過律定?	感謝委員指教，取得事件致災資料後經過易損性分析即可量化崩塌機率，根據前人研究，自然災害事件(例

	如地震、降雨)常是以對數常態分布呈現，本研究在前期計畫中已通過律定。
13. 921 後水保局曾針對治山防災構造物進行體檢，建議可納入治山防災構造物體檢結果進行分析，而山區建築物安全非水保局職責所在，對本局較無實益。	感謝委員指教，治山防災構造物體檢若為九二一地震後所調查，亦可進行易損性分析，了解受震的影響，本團隊取得檢視該資料後，發現治山防災構造物種類繁多，不易於本研究中分類，且整體穩害資料不確定度甚高，建議未來另案辦理。
14. 建議本計畫的研究可與另一案「以降雨所引致的崩塌之易損性曲線」結合，較具防災效益。	感謝委員指教，地震與降雨雖災因不同，但皆可建立易損性曲線，分析原理也一致，建議未來可嘗試建立基於易損性分析之坡地崩塌防災警戒機制，提升防災效益。
15. 第 23 頁中所提到之土地利用資料，是否能申請到更接近 921 災害前後的資料，俾減少隨著時間都市開發而導致的誤差。	感謝委員指教，本研究中該土地利用圖資為 2000 年版本，應可接受接近九二一災害前後時期的狀況。
16. 針對地震導致坡面崩塌之機率如何應用，對應到所設定之情境，建議更具體描述。	感謝委員指教，情境模擬之應用成果詳見報告書第五章。
17. 針對建築物之易損性曲線計算包含因子，建議表列相關因子，並與過去所收集之地形因子納入一同比較。	感謝委員指教，建築物考量受震倒塌的原因係在於建築力學特性，因此易損性曲線的分類因子主要係結構類型、建造年代與樓層高度，而地形因子主要影響 PGA 值的大小，可反映在衰減率曲線上。

行政院農業委員會水土保持局
應用易損性分析發展震後山區災害潛勢評估模式之研究
期中報告書審查意見回復

委員意見	意見回復
1. 圖 3.22~3.31 之 PGA 單位為(gal)，其範圍為 0~1.0，似有誤，請查核。	遵照辦理，該處單位應為 981gal，已修正，詳見報告 P.68 圖 3.24~圖 3.35。
2. 坡面坡向之效應與地震之震央位置有關，也與加速度值及方向有關，宜補充說明。	遵照辦理，本研究將坡面方向與震波方向間的效應定義為坡向敏感因子，相關說明已補充，詳見報告 P.59~P.60 說明。
3. 崩塌門檻採坡面單元崩塌率達 5%(P.62)，其根據為何？此一崩塌率與加速度(PGA)之關係為何？(參照圖 3.20~3.31)。即崩塌率與坡面易損性之量化關係為何？請補充說明。	遵照辦理，崩塌率 5%門檻值的設定，主要是考量當坡面單元過小時，僅考慮崩塌水平投影面積可能無法定義崩塌坡面的情形，例如當坡面單元 3ha 時，5%的崩塌率約僅 4 個網格。此一崩塌率設定與 PGA 和易損性無直接量化關聯，係針對坡面定義某種崩塌狀態是否發生的門檻值，詳見報告 P.65 說明。
4. 請以實例說明崩塌機率與崩塌危害潛勢值之對應關係。(如 P.111 平林里之實例、P.113 福龜里之案例等)	遵照辦理，相關資料已增補，詳見報告 P.117~相關圖表之說明。
5. 潛勢危害值分類為低、中、中高、高與 F 值之對應關係宜加強說明。	感謝委員指教，危害潛勢分為崩塌危害潛勢值與道路阻斷危害潛勢值二類。崩塌危害潛勢值 *I* 無分級，係由各個坡面單元的易崩指標計算而得(F 為崩塌機率值)；道路阻斷危害潛勢值係由路段阻斷之易損性參數計算而得，並以自然間斷點分類法分為中潛勢、中高潛勢、高潛勢等三級。
6. P.8 的 921 地震引發之崩塌類型統計圖不清楚，建議自行繪製。	感謝委員指教，圖 2-1 係工研院研究報告所示，經本團隊掌握的 921 地震崩塌地圖資與該圖比對後發現有所

	落差，為詳實呈現該份文獻結論，建議仍以該份報告的原始分布圖呈現。
7. 建築物的易損性曲線分為全倒與半倒兩種，請說明這兩種情況有各自的中位數值，但是為何標準差只有一個值，並非針對兩種有各自的統計結果。	遵照辦理，建築物易損性曲線與坡地易損性曲線不同，具有全、半倒二種損害狀態，因此在易損性分析上採用多項分布型進行分析，而在易損性分析中當損害狀態以二種以上損害狀態來描述時，也就是每次事件的結果是多個可能性中取一時，為使其精密度相同，其標準差則需定義為相同，詳見報告 P.37 說明。
8. 請補充 P98~P102 表 5-1~5-5 當中分類編號所代表的意義，是用先前所定義的坡度、坡向、高程多少來代表的?	遵照辦理，表 5-2~5-6 所示的分類編號為該聚落影響坡面中，各類坡面統計的結果，依序表示地質(G)、坡向(A)、坡度(S)，已修正表達方式，詳見報告 P.103 說明。
9. 在第五章的模式建立與試作當中，三個里的崩塌指標請列出所有的斜坡單元所計算的崩塌面積、崩塌機率與崩塌指標，在表中突然出現 slopecode 欄位也沒有其他圖示說明這些代號對應的斜坡單元位置，請補充說明。	遵照辦理，相關資料已增補，詳見報告 P.117~相關圖表之說明。
10. 在 921 事件中，三個里的斜坡單元崩塌指標皆為表示崩塌，請補充斜坡單元面積與崩塌率來佐證相關結果。	遵照辦理，由於 921 地震屬劇震事件，因此 PGA 值推估結果相當高，依據本研究崩塌定義，大部分坡面單元之易崩指標如預期為 1，這也顯示如 921 地震事件，坡面必具備高崩塌危害潛勢值。相關資料已增補，詳見報告 P.117~相關圖表之說明。
11. 文中所提到的崩塌危害潛勢值中，針對崩塌機率前 50%的坡面單元進行計算，代表崩塌危害潛勢值最大不會超過 0.5，在這樣的情況下如何去定義危害的高低請補充說明。	遵照辦理，由於當 PGA 值不大時，利用易損性參數計算單一坡面單元的崩塌機率也不高，在實際事件中並不會發生崩塌，但由於易損性均化的效果，卻很容易被視為是易崩指標為 1 的坡面，這現象在地震事件規模不大時就會顯得較不合理。為避免震度不大但崩塌危害潛勢值可能很大的

	情況，因此本研究在期中報告時對於 N_l 僅取崩塌機率值前 50%的坡面單元數量來計算。然經研究團隊深入討論後，認為當地震不大又震度為唯一指標值時，將易崩坡面單元全部納入崩塌潛勢值是相對保守的，對偶發性崩塌具有保護作用，因此期末報告已修正崩塌危害潛勢值計算方式。詳見報告 P.110 說明。
12. 針對道路阻斷危害潛勢值之三個等級是如何定義，針對不同區域該如何區分？	遵照辦理，道路阻斷評估是以潛勢值的概念估計，可作為不同路段間相互比較危險程度，進而了解整體道路的阻斷可能性，路段阻斷危害潛勢值是以自然間斷點分類法(natural break)，將其分為中潛勢、中高潛勢、高潛勢等三級。
13. 請再訂正文中的語句，如 P.108 頁第一句：本研究首先以以 921 地震….，誤植一次”以” 。	遵照辦理，已修正。

行政院農業委員會水土保持局
應用易損性分析發展震後山區災害潛勢評估模式之研究
期末聯合審查會議審查意見回復

委員意見	意見回復
1. 地震輸入資料僅考慮 PGA，建議再考量歷時及能量的效應。	感謝委員建議，地震危害度分析是直接反映地震致災危害的因子，PGA 本身即反映地震產生的能量引致地表的最大反應，對於坡地崩塌和建物倒塌的損失評估，PGA 即是最直接有效的因子，此外，亦可以 AI (Arias Intensity)因子進行分析，該因子能夠反應能量累積效應，建議未來可另案辦理。另，地震歷時反映的是動態分析的影響，本研究屬靜力分析範圍，因此未考慮地震歷時的效應。
2. 本計畫地震事件評估結果，與事件中建築物倒塌、和其他災害損失紀錄正確率為何?	感謝委員建議，災損評估結果中僅 921 事件之建築物損失具有實際資料，坡地崩塌則無資料，經統計 921 事件評估結果如下： (1) 建築物全半倒平林里實際 129 棟，評估 106 棟，誤差 17.8%；福龜村實際 337 棟，評估 202 棟，誤差 40.1%；大石村實際 48 棟，評估 56 棟，誤差-16.7%。總誤差 29.2%。 (2) 建築物全倒平林里實際 58 棟，評估 61 棟，誤差-5.2%；福龜村實際 122 棟，評估 108 棟，誤差 11.5%；大石村實際 20 棟，評估 31 棟，誤差-55.0%。總誤差 0.0%。 評估結果顯示，災損評估係屬風險評估性質，具有一定的不確定誤差，以 TELES 為例，誤差達 150-200%間，本研究模擬結果已屬相當良好。易損性評估性質屬於廣域評估，一般而言數量越多範圍越大則會越準確，對於全倒之評估亦較全半倒評估準確。

3. 易損性分析似乎可以進一步應用在防災保險上分析。	感謝委員指教，在災害保險領域中的風險評估的確是以易損性表示災損機率，易損性分析可應用在防災保險分析。
4. 地震強度在模式中權重並非最大或較大，用九份二山模擬是否合適?	感謝委員指教，坡地崩塌和建物倒塌都是在一定地震強度後才會發生，也就是說足夠大的地震才會產生災害，本研究所選取的範圍位於南投九份二山，此區域在 921 地震中屬重災區，具有足夠的震災事件和樣本資料，其統計具意義，屬合適範範圍。
5. 在地質因子外，是否考慮到水文相關因子(如離河道距離)?	感謝委員建議，本研究初期在因子分析階段，發現水文河道因子對易損性有些影響，但統計的顯著性不高，表示在地震影響下河道遠近難以做為分類因子(有時崩有時不崩，無顯著性)，因此在後期易損性分類中已將此因子剃除。
6. 本評估模式是否可應用在大尺度的集水區？	感謝委員指教，本研究發展之易損性分析採用坡面單元做為評估單元，成果適用在聚落、村里、鄉鎮、集水區，在地震早期評估模擬中，也有子集水區的評估項目，因此在更大集水區的範圍，仍可適用。