

目次

摘要	I
Abstract.....	III
目次.....	V
表次.....	VII
圖次.....	IX
第一章 前言	1-1
第一節 計畫緣起與目的	1-1
第三節 工作項目與內容	1-4
第二章 崩塌事件資料庫擴增.....	2-1
第一節 研究地區崩塌資料庫	2-5
第二節 降雨誘發資料庫	2-26
第三節 崩塌資料萃取	2-34
第三章 坡地崩塌風險評估模型建立.....	3-1
第一節 崩塌降雨危害評估模型建立	3-4
第二節 自適性坡地崩塌評估模型建立	3-17
第三節 坡地崩塌風險評估指標警戒值訂定機制	3-41
第四章 自主防災崩塌警戒發布管理流程設計.....	4-1
第一節 行政區/社區警戒發布機制研析	4-1
第二節 系統化崩塌警戒機制於自主防災評估	4-8
第三節 崩塌風險警戒機制以及自主防災管理推播模式實測	4-16
第五章 結論與建議.....	5-1
第一節 結論	5-1
第二節 後續建議方向	5-2

參考文獻.....	參 1
附錄一 各類資料庫資訊明細表.....	附錄 1
附錄二 各年度速報資料詳表.....	附錄 3
附錄三 新開部落社區於盧碧颱風暨 0806 水災降雨歷程風險警戒階段說明.....	附錄 11
附錄四 期初計畫審查委員意見與回復.....	附錄 19
附錄五 期中計畫審查委員意見與回復.....	附錄 21
附錄六 期末計畫審查委員意見與回復.....	附錄 27
附錄七 成果報告書初稿審查委員意見與回復.....	附錄 33
附錄八 研究發表成果.....	附錄 35
附錄九 期末成果效益報告.....	附錄 37
附錄十 公文往返.....	附錄 39

表次

表 2-1	崩塌種類定義.....	2-1
表 2-2	環境資料庫之類型和檔案格式	2-4
表 2-3	I_1-R_{te} 之降雨因子定義	2-28
表 2-4	93 年度至 110 年重大颱風豪雨事件詳表	2-30
表 2-5	97 年度至 98 年度間各類變異崩塌地類型面積統計表	2-35
表 2-6	98 年度至 99 年度間各類變異崩塌地類型面積統計表	2-36
表 2-7	99 年度至 100 年度間各類變異崩塌地類型面積統計表	2-37
表 2-8	100 年度至 101 年度間各類變異崩塌地類型面積統計表	2-38
表 2-9	101 年度至 102 年度間各類變異崩塌地類型面積統計表	2-39
表 2-10	102 年度至 103 年度間各類變異崩塌地類型面積統計表	2-40
表 2-11	103 年度至 104 年度間各類變異崩塌地類型面積統計表	2-41
表 2-12	104 年度至 105 年度間各類變異崩塌地類型面積統計表	2-42
表 2-13	颱風豪雨崩塌事件新增崩塌地詳表	2-44
表 3-1	簡化的風險矩陣.....	3-2
表 3-2	南部集水區 15 處重點聚落對應之鄰近雨量站表	3-5
表 3-3	I_1-R_{te} 之降雨因子定義	3-6
表 3-4	本計畫模型訓練資料集欄位說明	3-29
表 3-5	逐時降雨的降雨強度(I)範例表格(mm/hr).....	3-33
表 3-6	混淆矩陣表.....	3-39
表 3-7	GAN 模型測試資料驗證精度表.....	3-40
表 3-8	13 處南部集水區重點聚落村里崩塌與降雨警戒機率表(110 年度)	3-44
表 4-1	新開部落社區於 0731 豪雨降雨歷程風險警戒階段說明	4-18

圖次

圖 2-1	陳有蘭溪地理位置圖.....	2-5
圖 2-2	荖濃溪地理位置圖.....	2-6
圖 2-3	旗山溪地理位置圖.....	2-7
圖 2-4	陳有蘭溪集水區地質圖	2-8
圖 2-5	荖濃溪集水區地質圖.....	2-9
圖 2-6	旗山溪集水區地質圖.....	2-9
圖 2-7	陳有蘭溪集水區數值高程模型	2-10
圖 2-8	荖濃溪集水區數值高程模型	2-10
圖 2-9	旗山溪集水區數值高程模型	2-10
圖 2-10	陳有蘭溪集水區坡度影像	2-11
圖 2-11	荖濃溪集水區坡度影像.....	2-11
圖 2-12	旗山溪集水區坡度影像	2-11
圖 2-13	陳有蘭溪集水區坡向圖	2-12
圖 2-14	荖濃溪集水區坡向圖.....	2-12
圖 2-15	旗山溪集水區坡向圖.....	2-12
圖 2-16	各集水區剖面曲率圖.....	2-13
圖 2-17	各集水區平面曲率圖.....	2-14
圖 2-18	各集水區坡度變率圖.....	2-15
圖 2-19	各集水區坡向變率圖.....	2-16
圖 2-20	各集水區地形起伏度分析圖	2-17
圖 2-21	各集水區地表切割深度分析圖	2-18
圖 2-22	各集水區地表粗糙度分析圖	2-19
圖 2-23	各集水區高程變異係數分析圖	2-20
圖 2-24	陳有蘭溪集水區土壤分布圖	2-22

圖 2- 25	荖濃溪集水區土壤分布圖	2-22
圖 2- 26	旗山溪集水區土壤分布圖	2-23
圖 2- 27	各集水區 2021 年汛期前影像	2-25
圖 2- 28	各集水區 2021 年汛期前植生現況分析	2-26
圖 2- 28	本計畫蒐集之雨量測站分布	2-27
圖 2- 29	本計畫之雨場分割定義	2-28
圖 2- 30	97 年度至 98 年度各事件颱風豪雨雨量推估	2-31
圖 2- 31	98 年度至 99 年度各事件颱風豪雨雨量推估	2-31
圖 2- 32	99 年度至 100 年度各事件颱風豪雨雨量推估	2-31
圖 2- 33	100 年度至 101 年度各事件颱風豪雨雨量推估	2-32
圖 2- 34	101 年度至 102 年度各事件颱風豪雨雨量推估	2-32
圖 2- 35	102 年度至 103 年度各事件颱風豪雨雨量推估	2-32
圖 2- 36	103 年度至 104 年度各事件颱風豪雨雨量推估	2-32
圖 2- 37	104 年度至 105 年度各事件颱風豪雨雨量推估	2-33
圖 2- 38	崩塌地分類示意圖.....	2-34
圖 2- 39	97 年度至 98 年度間崩塌變異類型分布圖	2-35
圖 2- 40	98 年度至 99 年度間崩塌變異類型分布圖	2-36
圖 2- 41	99 年度至 100 年度間崩塌變異類型分布圖	2-37
圖 2- 42	100 年度至 101 年度間崩塌變異類型分布圖	2-38
圖 2- 43	101 年度至 102 年度間崩塌變異類型分布圖	2-39
圖 2- 44	102 年度至 103 年度間崩塌變異類型分布圖	2-40
圖 2- 45	103 年度至 104 年度間崩塌變異類型分布圖	2-41
圖 2- 46	104 年度至 105 年度間崩塌變異類型分布圖	2-42
圖 2- 47	新增崩塌地分布圖(98 年度崩塌地圖-97 年度崩塌地圖)	2-45
圖 2- 48	新增崩塌地分布圖(99 年度崩塌地圖-98 年度崩塌地圖).....	2-45

圖 2- 49	新增崩塌地分布圖(100 年度崩塌地圖-99 年度崩塌地圖).....	2-45
圖 2- 50	新增崩塌地分布圖(101 年度崩塌地圖-100 年度崩塌地圖).....	2-45
圖 2- 51	新增崩塌地分布圖(102 年度崩塌地圖-101 年度崩塌地圖).....	2-46
圖 2- 52	新增崩塌地分布圖(103 年度崩塌地圖-102 年度崩塌地圖).....	2-46
圖 2- 53	新增崩塌地分布圖(104 年度崩塌地圖-103 年度崩塌地圖).....	2-46
圖 2- 54	新增崩塌地分布圖(105 年度崩塌地圖-104 年度崩塌地圖).....	2-46
圖 2- 55	新增崩塌地分布圖(106 年度崩塌地圖-105 年度崩塌地圖).....	2-47
圖 2- 56	陳有蘭溪集水區之坡面單元	2-49
圖 2- 57	荖濃溪集水區之坡面單元	2-50
圖 2- 58	旗山溪集水區之坡面單元	2-51
圖 2- 59	陳有蘭溪坡面單元辛樂克颱風雨量分布($I_1 - R_{te}$).....	2-52
圖 2- 60	荖濃溪坡面單元辛樂克颱風雨量分布($I_1 - R_{te}$).....	2-53
圖 2- 61	旗山溪坡面單元辛樂克颱風雨量分布($I_1 - R_{te}$).....	2-53
圖 2- 62	陳有蘭溪坡面單元莫拉克颱風雨量分布($I_1 - R_{te}$).....	2-54
圖 2- 63	荖濃溪坡面單元莫拉克颱風雨量分布($I_1 - R_{te}$).....	2-54
圖 2- 64	旗山溪坡面單元莫拉克颱風雨量分布($I_1 - R_{te}$).....	2-55
圖 2- 65	崩塌地坡度與深度分佈	2-56
圖 2- 66	崩塌塊體斜面與投影面關係示意圖	2-56
圖 2- 67	97 年度至 98 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈	2-58
圖 2- 68	98 年度至 99 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈	2-58
圖 2- 69	99 年度至 100 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈	2-58
圖 2- 70	100 年度至 101 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈	2-58
圖 2- 71	101 年度至 102 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈	2-59
圖 2- 72	102 年度至 103 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈	2-59
圖 2- 73	103 年度至 104 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈	2-59

圖 2- 74	104 年度至 105 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈	2-59
圖 3- 1	坡地崩塌警戒模式評估指標建立流程	3-3
圖 3- 2	崩塌風險警戒機制示意圖	3-3
圖 3- 3	本計畫採用之雨場分割方法示意圖	3-6
圖 3- 4	自然對數 $\ln(x)$ 的函數圖像.....	3-8
圖 3- 5	屈尺雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面.....	3-12
圖 3- 6	桶後雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面.....	3-13
圖 3- 7	高中雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面.....	3-13
圖 3- 8	御油山雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面.....	3-13
圖 3- 9	梅山雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面.....	3-14
圖 3- 10	神木村雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面.....	3-14
圖 3- 11	豐丘雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面.....	3-14
圖 3- 12	那瑪夏國中雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面.....	3-15
圖 3- 13	達卡努瓦(民生)雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面.....	3-15
圖 3- 14	新發雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面.....	3-15
圖 3- 15	上德文雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面.....	3-16
圖 3- 16	瑪家雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面.....	3-16
圖 3- 17	模型樣本之誘發降雨因子分布圖	3-19
圖 3- 18	集水區圖像特徵定義示意圖	3-21
圖 3- 19	GCN 定義圖像之矩陣示意圖	3-21
圖 3- 20	坡面單元鄰接矩陣示意圖	3-22
圖 3- 21	坡面單元度矩陣示意圖	3-22
圖 3- 22	坡面單元權重矩陣示意圖	3-23
圖 3- 23	各年度[崩塌]單元與降雨規模關聯統計.....	3-24
圖 3- 24	降雨誘發時序特徵模式建立示意圖	3-25

圖 3- 25	單層 RNN 模型	3-26
圖 3- 26	單層 RNN 模型序列展開	3-27
圖 3- 27	LSTM CELL 結構.....	3-28
圖 3- 28	本計畫各年度間資料分組示意圖	3-31
圖 3- 29	崩塌顯著雨量門檻假設公式示意圖	3-34
圖 3- 30	生成對抗網路架構圖 (https://reurl.cc/EKMbRv).....	3-36
圖 3- 31	本研究對抗生成網路架構設計	3-37
圖 3- 32	降雨危害評估模型應用示意圖	3-41
圖 3- 33	自適性坡地崩塌潛勢評估模型應用示意圖	3-42
圖 3- 34	警戒曲線訂定示意圖.....	3-43
圖 3- 35	崩塌風險警戒機制示意圖	3-46
圖 4- 1	複合型土砂災害行政區警戒發布模式	4-2
圖 4- 2	多尺度崩塌風險資訊與精準防災策略研擬	4-4
圖 4- 3	警戒資訊呈現示意圖.....	4-4
圖 4- 4	崩塌警戒發佈流程 (考量 H 及 F 指標)	4-5
圖 4- 5	最小累積降雨警戒值訂定示意圖	4-5
圖 4- 6	自主防災警戒推播流程規劃示意圖	4-7
圖 4- 7	系統化流程圖.....	4-9
圖 4- 8	崩塌警戒展示模組介接 FEMA 雨量資料	4-9
圖 4- 9	崩塌紅黃警戒值及圖台展示	4-10
圖 4- 10	以行政區發布崩塌警戒展示	4-10
圖 4- 11	崩塌警戒展示模組首頁.....	4-11
圖 4- 12	圖層套疊功能展示.....	4-12
圖 4- 13	崩塌警戒展示模組--豐丘聚落坡面單元.....	4-12
圖 4- 14	17 處重點聚落崩塌警戒清單展示	4-13

圖 4- 15	達警戒聚落詳細資訊.....	4-13
圖 4- 16	達警戒坡面單元及屬性展示	4-14
圖 4- 17	崩塌災害自主防災資訊管理架構設計	4-15
圖 4- 18	豐丘聚落地文崩塌潛勢分布與保全對象空間套疊圖	4-16
圖 4- 19	豐丘聚落地文崩塌潛勢分布與疏散道路評估圖	4-16
圖 4- 20	應變災害管理單元關注對象說明圖	4-17
圖 4- 21	新開部落社區於 0731 豪雨降雨歷程於 H 指標以及 F 指標歷時趨勢線	4-22
圖 4- 22	新開部落社區於盧碧颱風暨 0806 水災降雨歷程於崩塌風險警戒機制歷程	4-24
圖 4- 23	新開部落社區於盧碧颱風暨 0806 水災降雨歷程於 H 指標以及 F 指標歷時趨勢線	4-24
圖 4- 24	新開部落社區於盧碧颱風暨 0806 水災降雨歷時對應坡面單元崩塌潛勢分布圖	4-25
圖 4- 25	新開部落社區於盧碧颱風暨 0806 水災降雨速報資料對應坡面單元崩塌潛勢分布圖	4-26
圖 4- 26	盧碧颱風暨 0806 水災於 2021/08/07 12:00 之速報資料	4-27
圖 4- 27	盧碧颱風暨 0806 水災於 2021/08/07 13:00 之速報資料	4-28

。

第一章 前言

第一節 計畫緣起與目的

由於全球氣候變遷與溫室效應的影響，導致極端降雨事件頻傳，民國 98 年莫拉克颱風即為強降雨事件的明顯案例，造成臺灣中南部山區遭受嚴重災情，此一事件亦突顯大規模崩塌所造成之災害，未來恐對臺灣山坡地聚落造成嚴重災害威脅。因此，為預防未來豪大雨或颱風來襲時可能造成之災害，有必要針對山坡地的易崩特性、崩塌風險及警戒機制等課題進行更深入的研析。

而過去本計畫已於相關計畫發展崩塌風險警戒機制模式，透過崩塌風險的三項因子(危害度、易損性以及暴露量)整合於崩塌風險評估模式，其可有效掌握到個別因子的影響性，即降雨時序特徵對地面環境的影響性(危害度)、地面環境對於降雨的承受能力(易損性)以及保全對象所在的位置(暴露度)；在地面環境對於降雨的承受能力(易損性)之研究中，仍有幾個研究問題有待解決: 1. 當不易變動之因子(地文潛勢)資料建立完畢後，對於較易變動之降雨因子資料庫於模式之角色就相當重要，我們認為崩塌災事件的發生有次序性關係，也就是當降雨發生後，其規模由小到大，當降雨規模達到一定程度後(誘因條件滿足)，再加上不同集水區的環境條件的組合關係(潛因條件滿足)後，就會發生崩塌事件。2. 本研究主要是基於單一坡面單元之數據組成並透過統計分析模式所建立之分析模型，這可能存在忽略坡面單元間之空間相關性的問題，因此難以探索整個集水區之坡面單元間之整體崩塌變化且對於崩塌變異不明顯之坡面單元亦可能於分析模型過程中被忽略，這可能引起一些潛在之威脅未被預測到或是單一坡面間之數值組成之同質性較高，而產生過多崩塌發生之不合理誤判產生。

綜觀上述問題解析，本計畫將透過時序特徵深度學習以及建構集水區坡面單元圖像之空間關聯性去進行崩塌潛勢評估模型的優化，以增加模型在

災害應變時之適配性，並將此模型更新於本計畫發展之崩塌風險警戒機制模式之後，下一個階段則是設定崩塌警戒門檻。在崩塌防災的課題中，設定崩塌警戒是未來發展的趨勢，但在決定崩塌警戒模式的研究中，仍有許多因素有待克服。目前眾多研究中，仍以降雨促使崩塌為主要的研究對象，普遍採用歷史事件之速報資料來評估崩塌雨量警戒值，因此其對於無速報資料之行政區無法有效之訂定警戒值，且因近年來受極端氣候常態化影響其不確定性增加，作為減災策略擬定之依據尚有許多不足之處，因此本計畫初步透過雙參數因子的條件下(I_{max} 與 R_{ie})分別取得崩塌危害度以及坡地易損性之評估指標，對評估崩塌風險警戒具有較全面的考量，而其必須考慮不同指標及其對崩塌之影響性，這些指標門檻的決定(量化)及資料蒐集，亦是本計畫研究過中要解決的難題。

最後，完成了崩塌潛勢評估模型之優化、更新崩塌風險警戒機制以及訂定一套崩塌風險指標警戒門檻後，為了能夠有效地應用於災害應變管理，本計畫將崩塌災害警戒管理落實於自主防災為主要目的，將進行自主防災崩塌警戒發布管理流程設計並嘗試落實坡地崩塌評估模式於社區自主災害警戒應用於高風險潛勢社區，並規劃相關避難路線及崩塌風險地圖等，進而達社區自主避災、防災及減災的目標。

因此，本(110)年度研究具體目標及效益如下：

- 一、 **強化災害潛勢分析技術與資料庫建置:**崩塌災害之相關資料以及完整，攸關後續分析以及研判之準確性，因此根據本計畫過去所建立之崩塌災害基礎資料以及影響因子關聯性資料庫，須能持續釐清崩塌發生機制以及更新與擴充相關資料庫，透過時序特徵以及圖像深度學習演算法針對崩塌關聯資料庫強化崩塌潛勢評估之精準度以及精進坡地崩塌潛勢評估模式在氣候變遷下警戒標準調整的適配性。

- 二、 **建立崩塌風險警戒機制模式發布機制:**為了能夠在合宜的時機發布準確之警戒資訊，以及利於相關執行機關之操作以及決策，本研究將根據崩塌警戒標準以及配合配合水保局之強降雨警戒值以及警戒發布機制，檢討崩塌風險警戒機制模式的警戒預報發布機制，以完善崩塌災害之應變管理。
- 三、 **建立崩塌災害自主防災管理模式:**在有限的人力、物力、經費的前提下，如何針對高風險的地區，進行相關的因應措施，就有賴於有效的危害程度與活動性的評估。可先針對高風險社區的歷年降雨觀測，評估其危害的程度，配合高風險崩塌坡面的規模、保全對象的重要性等，評估重點聚落的風險大小，並依據颱風豪雨之降雨歷時對於保全對象的綜合影響，以及藉由歷史災害案例的分析歸納，可概略的評估出各社區影響範圍或尺度較廣的危害程度。
- 四、 **自主防災推播系統開發設計:**觀(監)測的即時資訊與預警模式設計，透過系統化的模組，進行即時的資料蒐集、儲存、運算及展示，如此可將複雜的資訊，轉化為可供研判的即時資訊。可進一步規劃災害警戒等級之顏色及燈號所表示之意涵，供各級防災單位發布警戒或社區民眾參照使用，俾利防災人員操作及民眾之自主防災認知提升。

第三節 工作項目與內容

一、 坡地崩塌因子資料庫擴增及更新

本計畫期於今年度計畫中將盤點歷年(2008-2020)全台重大颱風豪雨事件，經資料探索，初探各事件於陳有蘭溪、荖濃溪以及旗山溪集水區過去不同型態之降雨事件的雨量範圍，並針對雨量範圍決定事件規模，以挑選具有各規模代表性之事件的衛星影像進行環境資料(地文資料)、降雨逐時資料的萃取，以擴增崩塌事件資料庫，進而取得更多事件樣本於後續進行人工智慧演算法之模式訓練。

二、 崩塌風險評估模型精進

本計畫透過以自然災害(降雨)引致崩塌為問題的切入角度，並整合危害度(Hazard)、易損性(Vulnerability)以及暴露量(Exposure)三項因子作為坡地崩塌風險問題表述的核心項目，進而發展出一套適合國內崩塌風險機率推估的評估方法。

(一)崩塌降雨危害評估模型建立

為分析單一聚落發生崩塌可能性的臨界降雨基準值，以近 10 年間降雨資料作為建立雨量等比率曲線模式之基礎，並分析十年間各雨場之最大小時降雨強度($I_{max} : mm/hr$)，以及總有效累積降雨($R_{te} : mm$)，綜合評估建立降雨危害臨界曲線。

(二)資料庫因子環境資訊更新

本計畫研究範圍包括已建置完成崩塌資料庫之陳有蘭溪、旗山溪以及荖濃溪集水區，並透過 110 年度汛期影像之現況植生分析，以更新研究區坡面單元之坡面類別屬性，以利後續模型適用於現況環境資料。

(三)坡地崩塌潛勢評估模型優化

本年度計畫將透過持續擴增之崩塌事件關聯資料庫，同時檢討降雨規模、雨量時序特徵等相關誘發因子與崩塌地的關聯性，並投入各坡面單元之空

間連結因子以及時序特徵與圖像深度學習演算模型進行崩塌潛勢評估模型之精進，其設計目的乃是探索全域變動因子對於坡地崩塌災害的影響性，並透過機率模型建立與歷年事件之實測驗證，進行警戒訂定之問題研究，進而透過科學統計分析之概念建立一套全國可用的崩塌災害防災預警與警戒模式。

三、 建立崩塌災害自主防災管理模式

本計畫將崩塌災害警戒管理落實於自主防災為主要目的，將進行自主防災崩塌警戒發布管理流程設計，由於各村里之地文環境條件不盡相同，自主防災社區推動之標準也不盡相同，為使各層級主管機關後續推動能有系統化的策略，需有耐災能力分級資料做為參考。本計畫認為應該盤點普查轄內土石流災害潛勢村里現況並整合本團隊在崩塌潛勢評估之結果，對高風險潛勢之社區進行耐災能力評估，建立崩塌自主防災管理機制。

四、 自主防災推播系統雛形開發

本計畫為了將本模式應用於能夠即時掌握邊坡風險警示狀況，提供系統化、科學化的防災管理資訊，設計坡地社區邊坡崩塌自主防災推播系統雛形，以提前因應可能發生之災害，協助民眾自主避難警戒操作參考，並篩選自主防災示範山坡地社區，並以高風險社區內之坡面單元作為警戒推播系統推播應用之示範場域，透過此場域降雨監測成果達成邊坡即時監測及警示，提高智慧自主防災操作至社區局部邊坡尺度。

第二章 崩塌事件資料庫擴增

回顧學者之研究，各學者對於崩塌的定義有著不同的解釋，Varnes(1958)認為崩塌是指山坡上的物質，受到重力作用影響後，產生向下、向外的運動如表 2-1；坡地中部分坡面，因土塊受重力作用，向下或向側面移動的現象，皆以崩塌稱之；李三畏(1986)則表示崩塌是指山坡面上之土壤，受到外力影響而失去平衡，所產生向外、向下的移動現象。由此可以發現，崩塌的發生是因受到外力之引響下，導致坡地之組成結構性不穩不足以支撐本身之重量，而引致坡地上岩土層脫落本體之現象。

表 2-1 崩塌種類定義

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

資料來源: Varnes (1958)

其他學者的研究也顯示出相似的論點，藉著整理這些不同研究的觀點，廣義之坡地崩塌泛指經過風化作用後地表上破碎支岩屑與土壤，受到重力作用的影響之下，順著坡面向下或向外側之運動現象，在此尚不考慮風化物

質受到風、流水以冰等介質之搬運作用。這些介質於下坡運動所產生的現象，只是降低風化物質內部之摩擦力，或是增加風化物質之重量，致使風化物質往下運動更加容易而已（陳信雄，1995）。蘇苗彬（2009）也指出崩塌為土石移動現象，包括崩（collapse）、坍（clump）、塌（slump）、滑（sliding）、陷（caving）、落（falling）等，常見分為山崩、潛移、地滑、沖蝕及土石流等類型。

雖我國與日、美等國對於崩塌之定義有些微差異，但同樣的是大規模崩塌破壞面深入岩盤、滑動面較為深層、滑動速度快速、地下水之影響大、崩塌量體大、影響之範圍廣、易造成重大災損。對於發生崩塌之因素，國內外學者皆認為其造成原因非常複雜，而且很少是由單一因子所引發。致使崩塌災害發生之影響因子一般分為潛在因子(略稱為潛因)與誘發因子(略稱為誘因)（李三畏，1984，1986；張石角，1987）。

潛因與誘因造成坡地崩塌的力學機制，可從塊體受力之分析探討坡地是否穩定或可能發生滑動問題。目前國內外學者普遍認為影響塊體可能滑動之力有滑動力與抵抗力(吳俊鉉，2005)，若兩力達到平衡時，則塊體穩定不動。以坡地而言，若有其他因素促使滑動面下滑力大於抗剪強度時，則塊體開始發生滑動或崩塌等現象。由上可知，對於影響邊坡穩定的因素，即是足以影響剪應力及抗剪強度之因素。Fookes *et al.*(1985)認為大地構造環境、地質、地形及氣候等因素足以影響坡地穩定。張石角(1987)則認為坡地崩塌的主要致災因子為雨水和地震，且涉及之相關因子可能有八項：坡度、岩質、高差、地質構造與坡向之關係、土壤、不連續面之傾角、動態地形作用及水。張石角(1988)也提出由於坡地的地質與地形條件組合有利於邊坡運動，才使得在降雨或地震事件發生時，常造成崩塌現象發生。Koukis & Ziourkas(1991)提出可能影響邊坡崩塌的因子有 64 個之多，包括動態的致災因子及潛在的環境因子。溫振宇(2005)整理 1996 年~2005 年 43 篇與崩塌製圖相關文獻，

指出在前人研究中，崩塌因子選取次數的多寡依次為為坡度、岩性、坡向、高程、土地利用、與水系相關(包括距離、密度等)、植生相關(包括種類、密度、年齡等)、與地文相關(包括距離、種類、構造單元等)、土壤相關(包括種類、厚度、組織等)、坡形、曲率相關(包括水平、垂直等)、降雨相關(包括累積雨量、降雨強度等)等。

本研究認為潛因是坡地本身所具備之環境條件所構成之破壞因素，包含地質、地形、岩石特性、地表植生狀況、節理方向等。誘因為直接導致坡地崩塌發生之變動因素，如地震、地下水、降雨、河水滔蝕等，因此進行坡地易損性分析前須建立集水區各類環境因子資料，集水區資料蒐集自林務局農林航測所繪製之陳有蘭溪集水區、荖濃溪集水區以及旗山溪集水區之相關地文、水文地理資訊圖資以及水土保持局全國集水區圖層，採用圖層範圍包括主、次、子集水區範圍圖、河系圖等地理資訊基本圖資。

在集水區環境因子方面，本計畫藉由網格資料庫建置各類環境因子屬性、植生變異因子、驅動因子及崩塌事件等資訊。而本計畫將以環境資料庫以 20m×20m 之網格尺度使不同集水區範圍內所有屬性因子鏈結，環境資料庫細分為四個部分：一、環境潛勢因子；二、前期擾動誘發因子；三、降雨驅動因子及四、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(水土保持局提供)、各年度汛前衛星影像(購自中央大學太遙中心)、數值高程模型(內政部地政司衛星測量中心提供)、二十五萬分之一地質圖(中央地質調查所提供)、土地利用圖(內政部國土測繪中心提供)、降雨資料(土石流防災應變系統(FEMA)歷史氣象資料)以及全島崩塌地圖(林務局)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、距河道遠近、植生、高程、雨量因子、崩塌地資訊等，如表 2-2 所示。

表 2-2 環境資料庫之類型和檔案格式

類型	資料名稱	檔案形式
環境潛勢因子	地質	向量檔案(Vector (Shapfile)，類型：Ploygon)
	高程	影像檔案(Raster，解析度：5m)
	坡度	影像檔案(Raster，解析度：5m)
	坡向	影像檔案(Raster，解析度：5m)
	土壤	向量檔案(Vector (Shapfile)，類型：Ploygon)
	距河道遠近	向量檔案(Vector (Shapfile)，類型：Ploygon)
	差異化植生指標	影像檔案(Raster，解析度：20m)
前期擾動誘發因子	前期崩塌	向量檔案(Vector (Shapfile)，類型：Ploygon)
	前期降雨強度	影像檔案(Raster，解析度：20m)
	前期總有效累積降雨	影像檔案(Raster，解析度：20m)
	前期降雨延時	資料庫檔案
降雨驅動因子	降雨強度 I_{max}	影像檔案(Raster，解析度：20m)
	總有效累積降雨 R_{te}	影像檔案(Raster，解析度：20m)
	前期逐時降雨	資料庫檔案
崩塌資訊	各年度全島崩塌地判釋地圖	向量檔案(Vector (Shapfile)，類型：Ploygon)

第一節 研究地區崩塌資料庫

一、研究地區說明

本計畫研究地區包含陳有蘭溪集水區、荖濃溪集水區、旗山溪集水區等 3 集水區，以下分述研究地區基本環境。

陳有蘭溪集水區位於南投縣信義鄉山區境內，其地理位置圖如圖 2-1 所示。主流陳有蘭溪係濁水溪重要支流之一，全長約 42.4 公里，發源於玉山北峰之八通關(標高 3,910 公尺)，自南向北流經山區，於東埔附近匯入沙里仙溪，並於和社附近匯入和社溪後，蜿蜒流經信義、鹿谷鄉境，於下游水里鄉新山、永興村匯入濁水溪。集水區東與花蓮溪及秀姑巒溪接壤，西側為清水溪，南臨旗山溪、荖濃溪。陳有蘭溪地形之特色為高差大、坡降陡為典型急流河川，集水區面積約 448.13km²，平均坡度超過 55%。

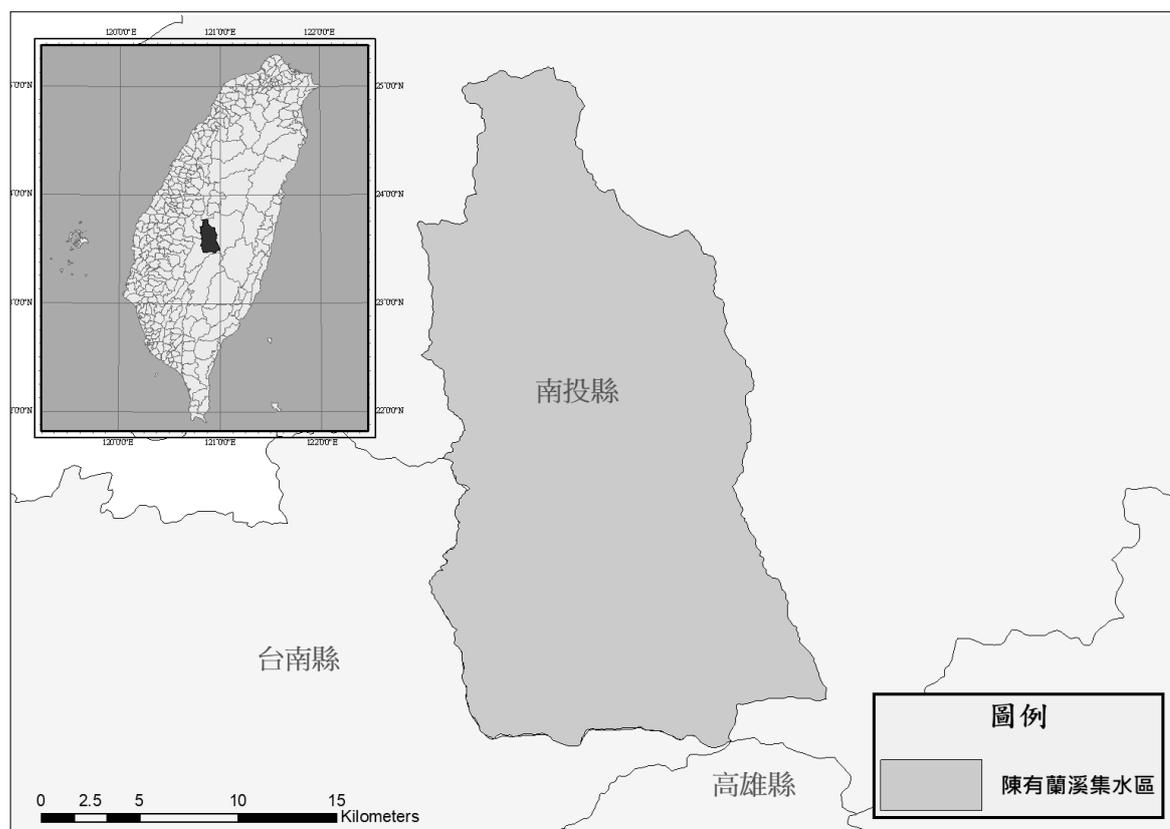


圖 2-1 陳有蘭溪地理位置圖

荖濃溪集水區大部分位於高雄市桃源區、茂林區、六龜區，其地理位置圖如圖 2-2 所示。主流荖濃溪為高屏溪的流域的第一大支流，全長約 137 公里，發源於中央山脈玉山主峰東北坡，先向東北流，至八通關轉向東南，匯集分別源自秀姑巒山西南坡及大水窟山西坡的支流後，轉向南南西進入高雄縣境內，流經梅山、桃源、寶來、六龜，轉向南流至大津，期間並有南部橫貫公路(台 20)沿溪谷而行，納東側流入之濁口溪後，轉向西南流至里港，納東南方流入之隘寮溪，續流至嶺口與來自北方之旗山溪合流後，最終流入高屏溪。集水區東側為新武呂溪、卑南溪，北與陳有蘭溪、郡大溪、秀姑巒溪接壤，西臨旗山溪、南接隘寮溪。荖濃溪地形之特色為河谷地形，並在下游突然寬闊為土砂堆積區，且集水區範圍大，面積約 1,408.71km²，平均坡度則超過 65%。

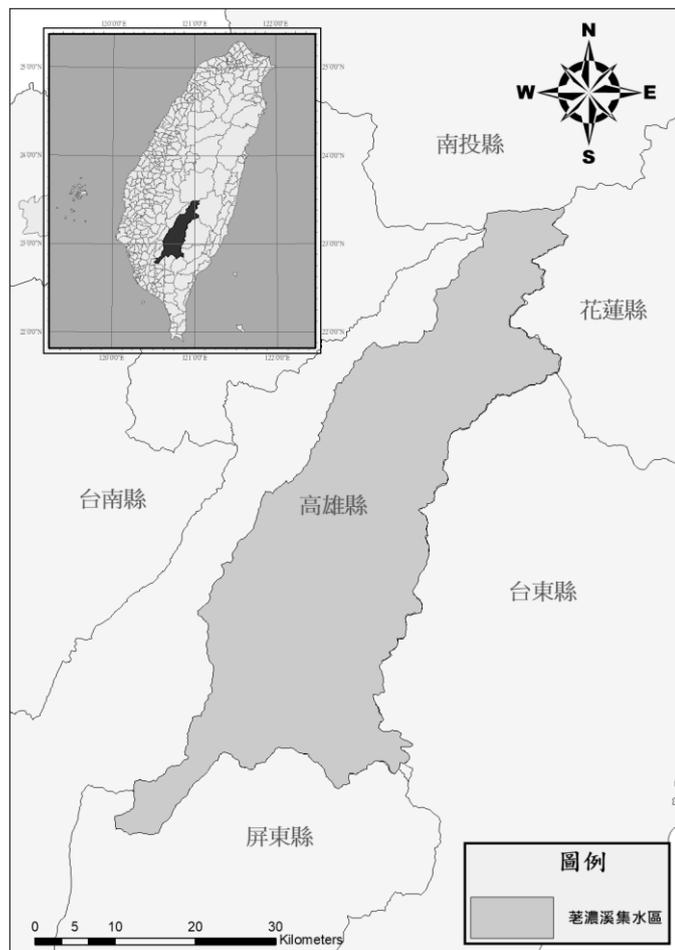


圖 2-2 荖濃溪地理位置圖

旗山溪集水區位於高雄市甲仙區、那瑪夏區、桃源區及嘉義縣阿里山鄉，其地理位置圖如圖 2-3 所示。主流旗山溪為高屏溪之支流，全長約 117 公里，原名楠梓仙溪，發源於中央山脈玉山之西南麓，集水區內高山聳立，懸崖峭壁，溪流坡陡湍急。旗山溪由發源地向西南流至小林，再向南流至甲仙後河道漸寬，復向西南流至旗山後進入平原區，本溪再向南流至嶺口附近與荖濃溪匯合後進入高屏溪。集水區東鄰荖濃溪，北鄰陳有蘭溪，西邊與曾文溪相接，南邊則接阿公店溪及東港溪。旗山溪地形之特色為屬於河階地縱谷地形，河道蜿蜒遷徙不定，並在下游突然寬闊為土砂堆積區，且集水區範圍大，面積約 750.79km²，平均坡度則超過 55%。

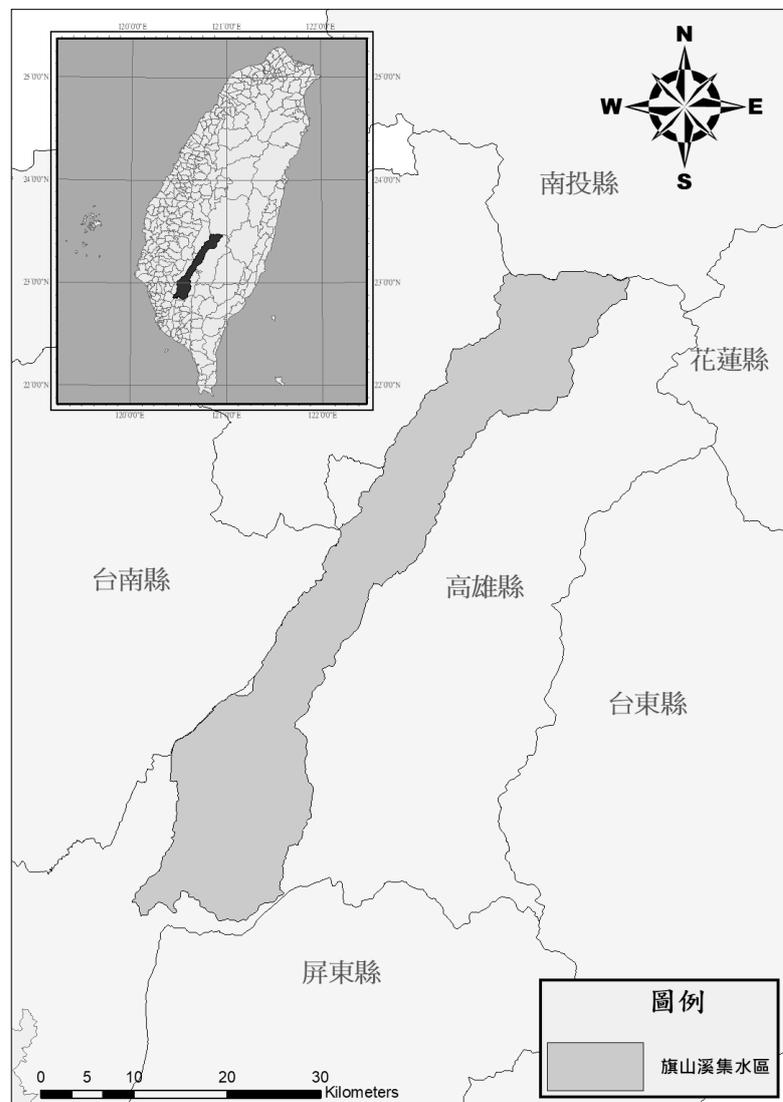
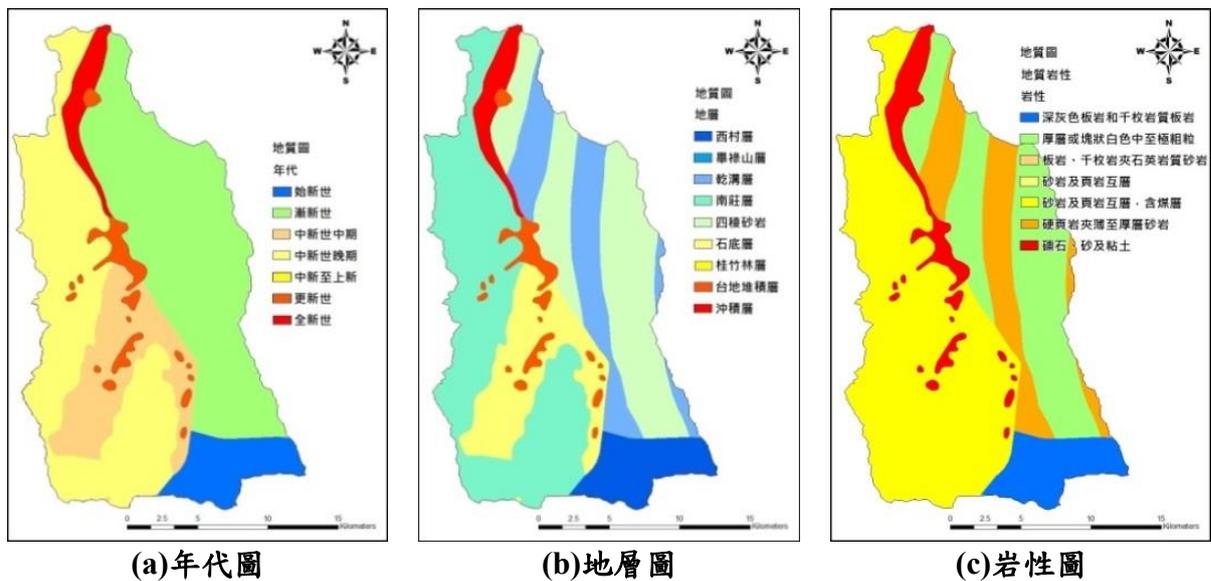


圖 2-3 旗山溪地理位置圖

而為了後續本計畫發展之模式可適配於全台各流域，因此對於環境潛勢因子將同時針對全台環境進行廣域之 20 米網格環境因子資料庫建置，以利於後續試作與延伸應用之用。

二、地質資料

地質資料方面，本計畫採用中央地質調查所產製之二十五萬分之一地質圖，詳細繪出地質之年代、地層及岩性分類，三集水區之地質分布如圖 2-4 至圖 2-6。



資料來源:中央地質調查

圖 2-4 陳有蘭溪集水區地質圖

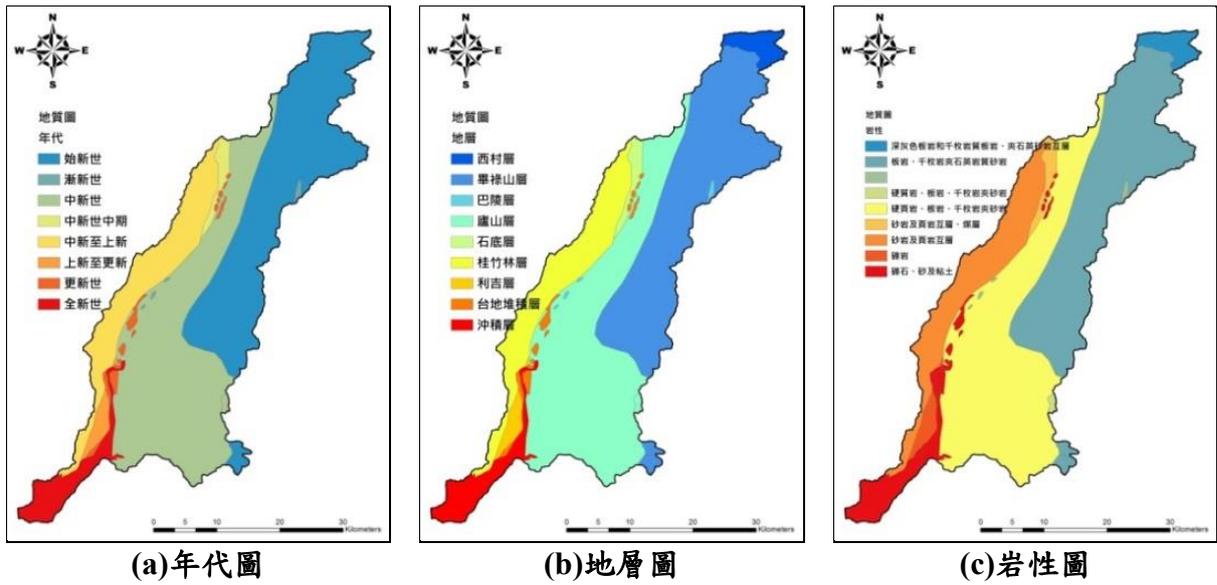


圖 2-5 荖濃溪集水區地質圖

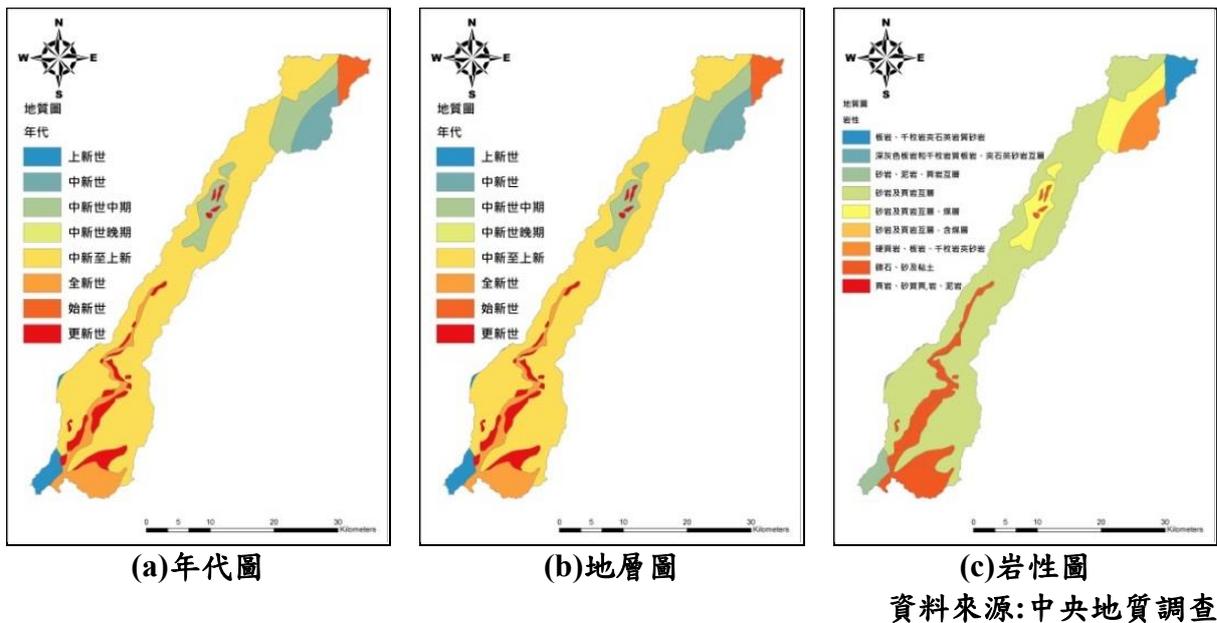


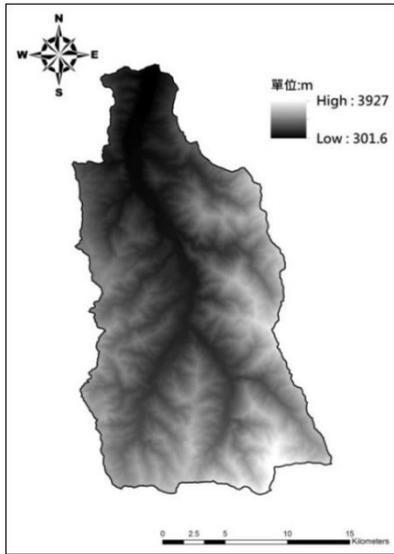
圖 2-6 旗山溪集水區地質圖

三、數值高程資料

數值高程模型(digital elevation model; DEM)是指所有關於地形表面的數值表現及描述(Carter, 1988；Miller and Leflamme, 1985)，可視為地表的替代模式。本研究蒐集內政部地政司所製作，解析度為 5m × 5m 網格式度之數值高程模型，如圖 2-7 至圖 2-9 所示。

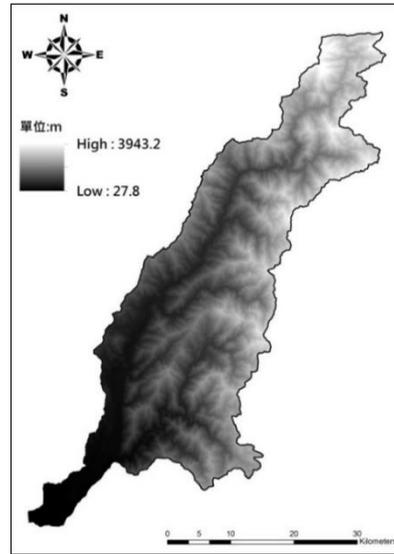
此資料提供計畫區域空間位置之高程資訊，並應用於計算相關地形參

數，例如高程、坡度、坡向以及坡面單元劃定等基礎資料，以下為各地面因子之特徵萃取說明與結果。



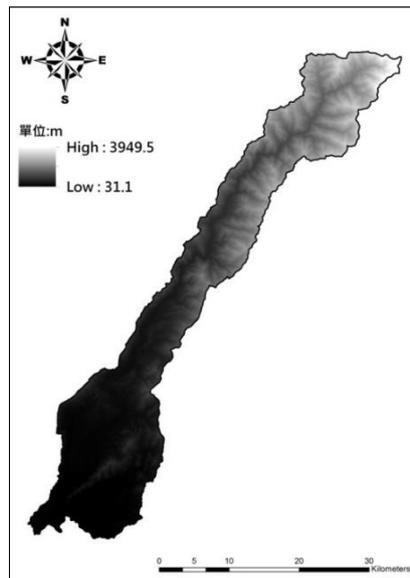
資料來源:內政部地政司

圖 2-7 陳有蘭溪集水區數值高程模型



資料來源:內政部地政司

圖 2-8 荖濃溪集水區數值高程模型



資料來源:內政部地政司

圖 2-9 旗山溪集水區數值高程模型

(一) 坡度資料

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」。本計畫坡度亦以此定義，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 2-10 至圖 2-12 所示，各集水區以水土保持技術規範之坡級為坡度值級距，所得數值為度數($^{\circ}$)。

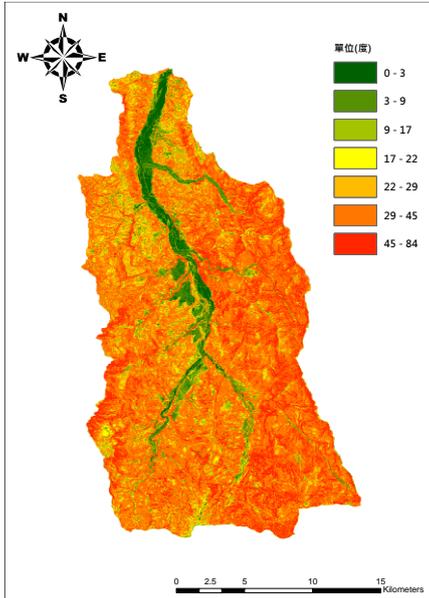


圖 2-10 陳有蘭溪集水區坡度影像

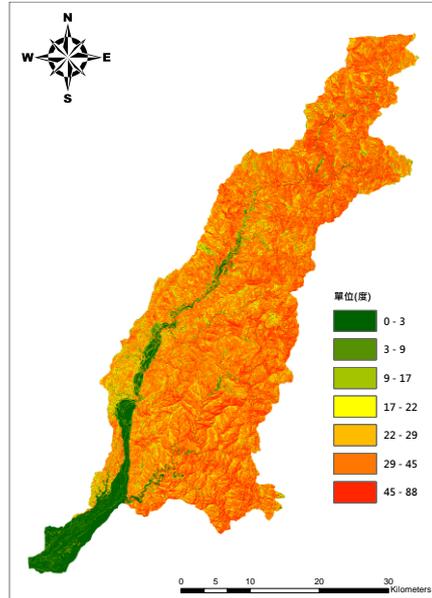


圖 2-11 荖濃溪集水區坡度影像

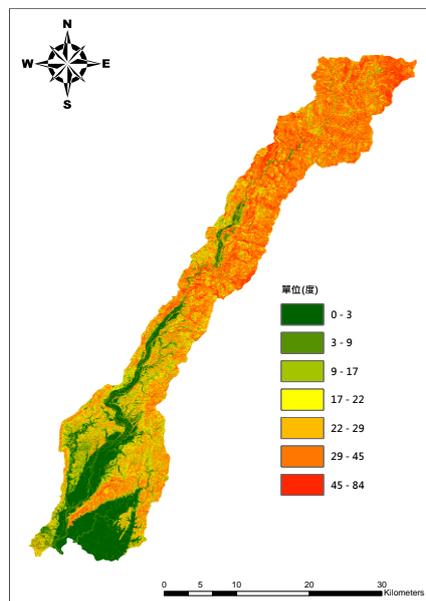


圖 2-12 旗山溪集水區坡度影像

(二) 坡向資料

過去文獻顯示崩塌與坡向有關(Sidle, Percea and O'loughlin, 1985)，由於降雨的雨量多寡與該區域的氣流、地形、迎背風向相關，使得區域某一坡向常具有較易崩塌的潛勢。坡向是指坡面的朝向，它表示表面某處最陡的傾斜

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。坡向圖中的每個網格單元的值表示此網格單元所在的坡面方向。水平的坡沒有面向，均被賦予-1 值。三個集水區之坡向如圖 2- 13 至圖 2- 15 所示。

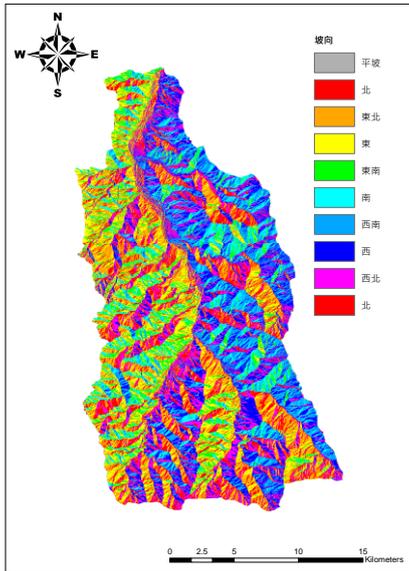


圖 2- 13 陳有蘭溪集水區坡向圖

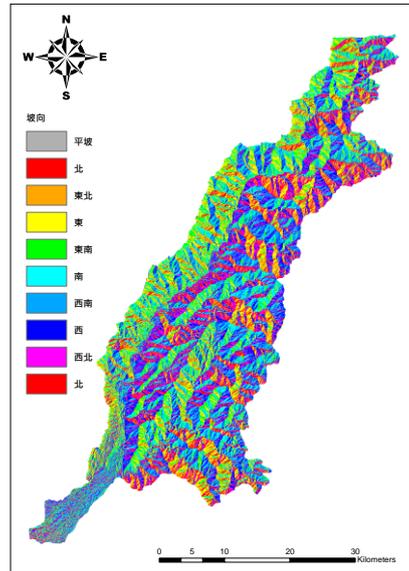


圖 2- 14 荖濃溪集水區坡向圖

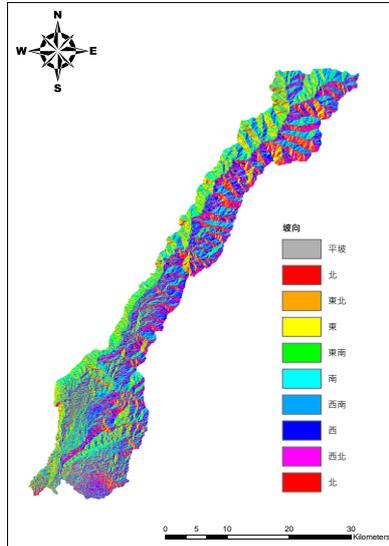


圖 2- 15 旗山溪集水區坡向圖

(三) 地面曲率因子

地面曲率是對地形表面點的扭曲變化程度的度量因子，而其又分為剖面曲率，即對地面坡度的沿最大坡降方向地面高程變化率的度量，以及平面曲率，即過地形表面上某點得水平面沿水平方向切地形表面所得的曲線在

該點的曲率值，即該點所在的地面等高線的彎曲程度，下圖 2- 16 為研究實證範圍之剖面曲率圖，下圖 2- 17 為研究實證範圍之平面曲率圖。

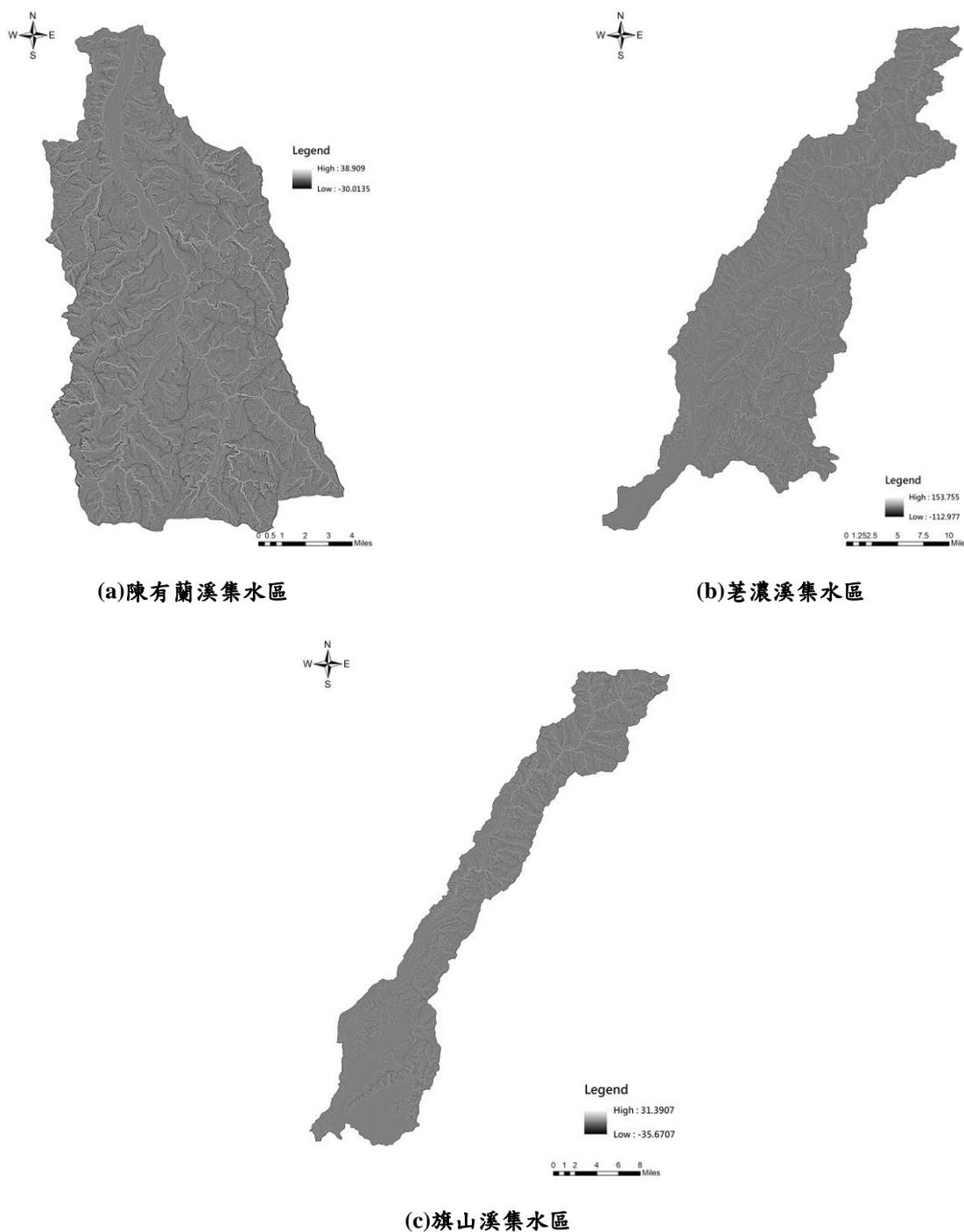
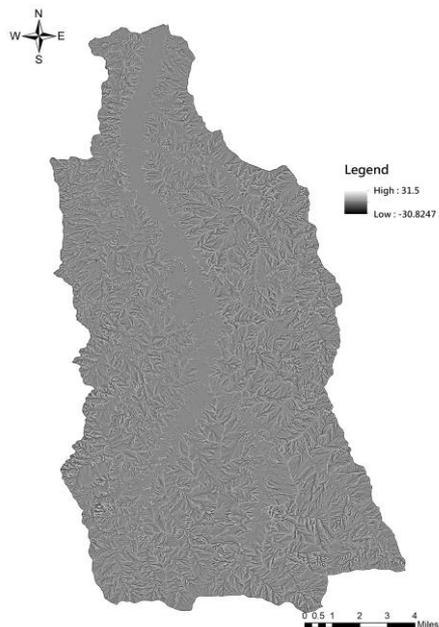
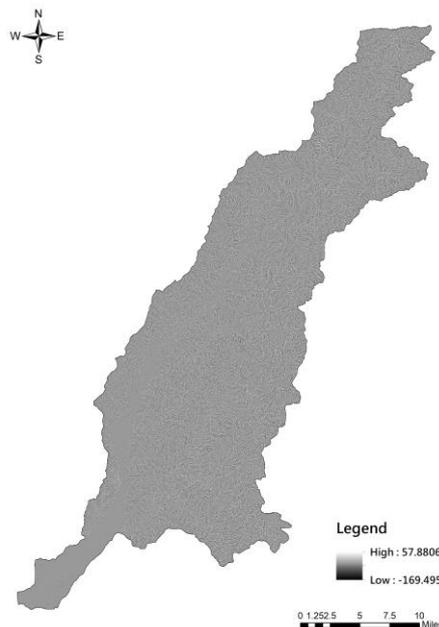


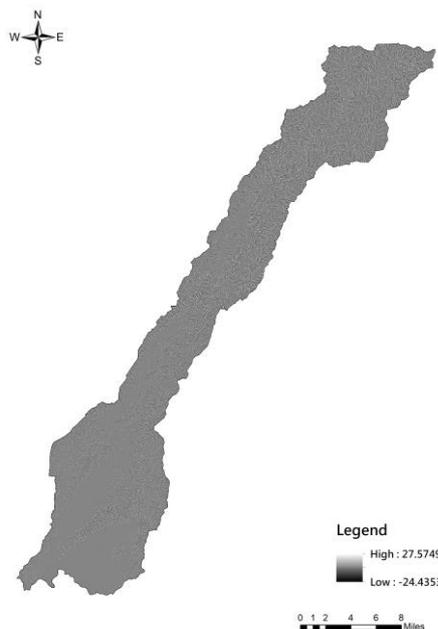
圖 2- 16 各集水區剖面曲率圖



(a) 陳有蘭溪集水區

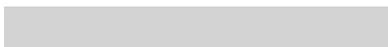


(b) 老濃溪集水區



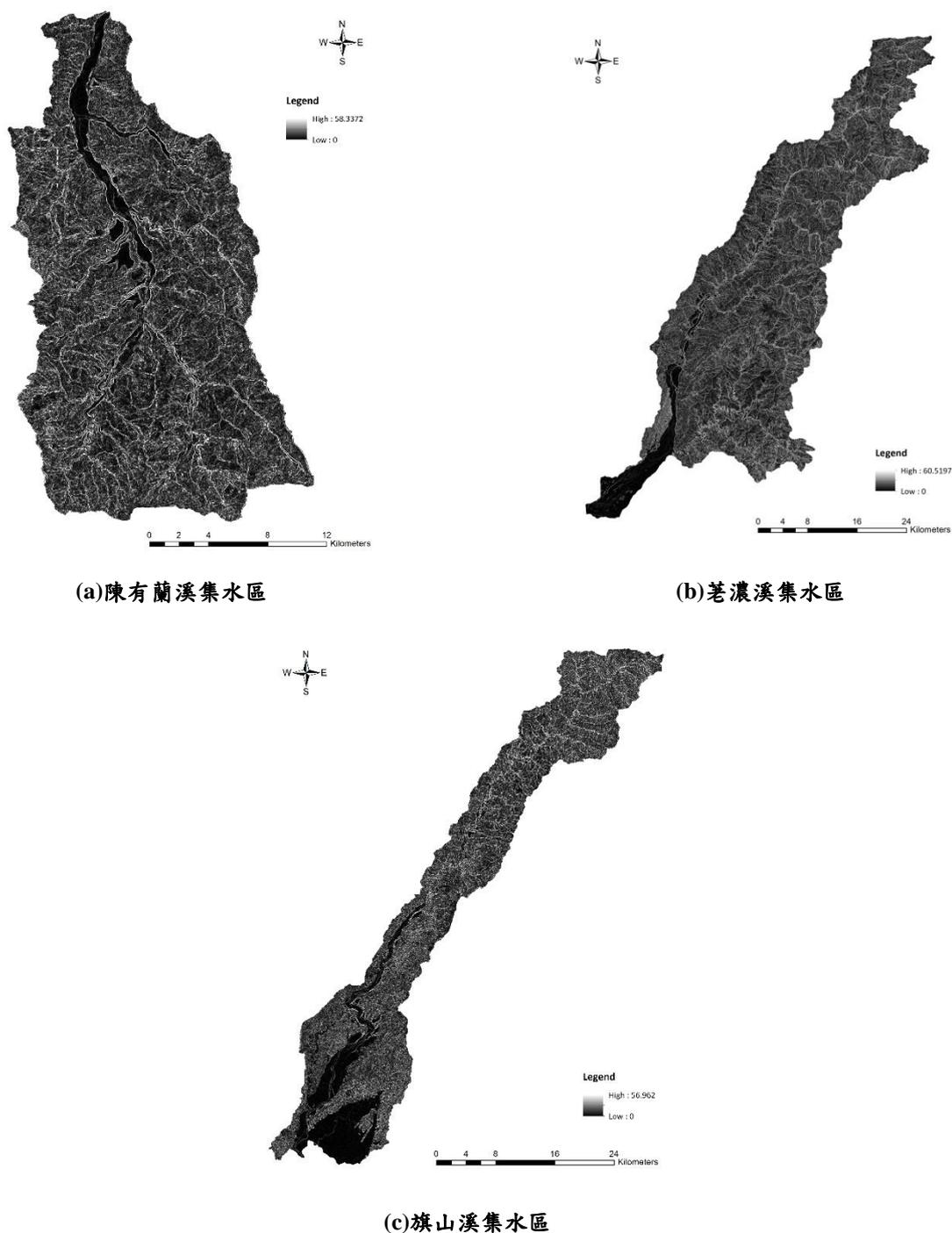
(c) 旗山溪集水區

圖 2-17 各集水區平面曲率圖



(四) 坡度變率

即地面坡度的變化，反映地面有沒有一個陡坎，有變化的地方才出現大值，下圖 2- 18 為研究實證範圍之坡度變率圖。



(a) 陳有蘭溪集水區
(b) 荖濃溪集水區
(c) 旗山溪集水區
圖 2- 18 各集水區坡度變率圖

(五) 坡向變率

即地面坡向的坡度，可以很好地反映等高線的彎曲程度，下圖 2-19 為研究實證範圍之坡向變率圖。

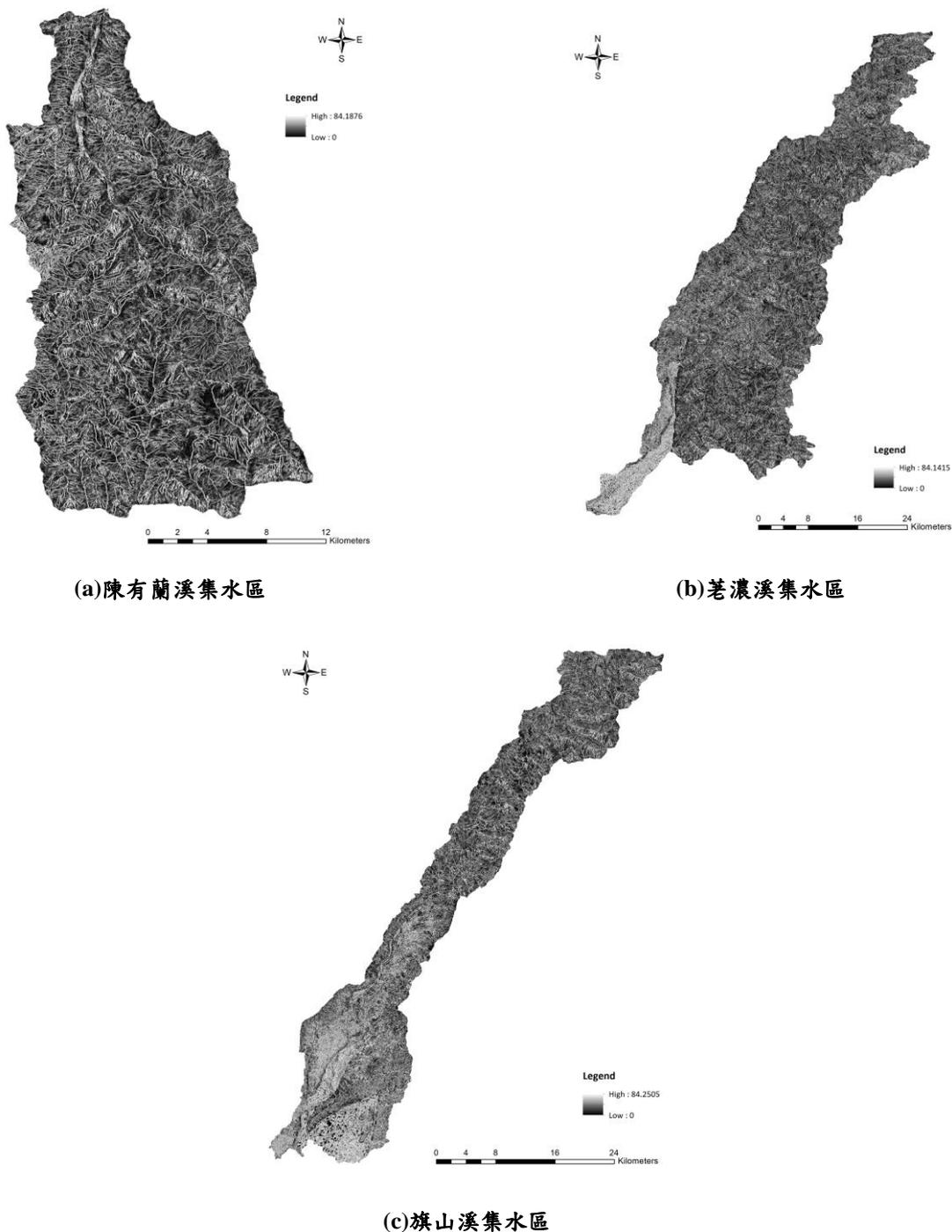


圖 2-19 各集水區坡向變率圖

(六) 地形起伏度

本計畫以地理資訊系統之鄰域分析中焦點統計工具，計算預設 5*5 像元大小之指定範圍內最高海拔點和最低海拔點的差值，下圖 2- 20 為研究實證範圍之地形起伏度圖。

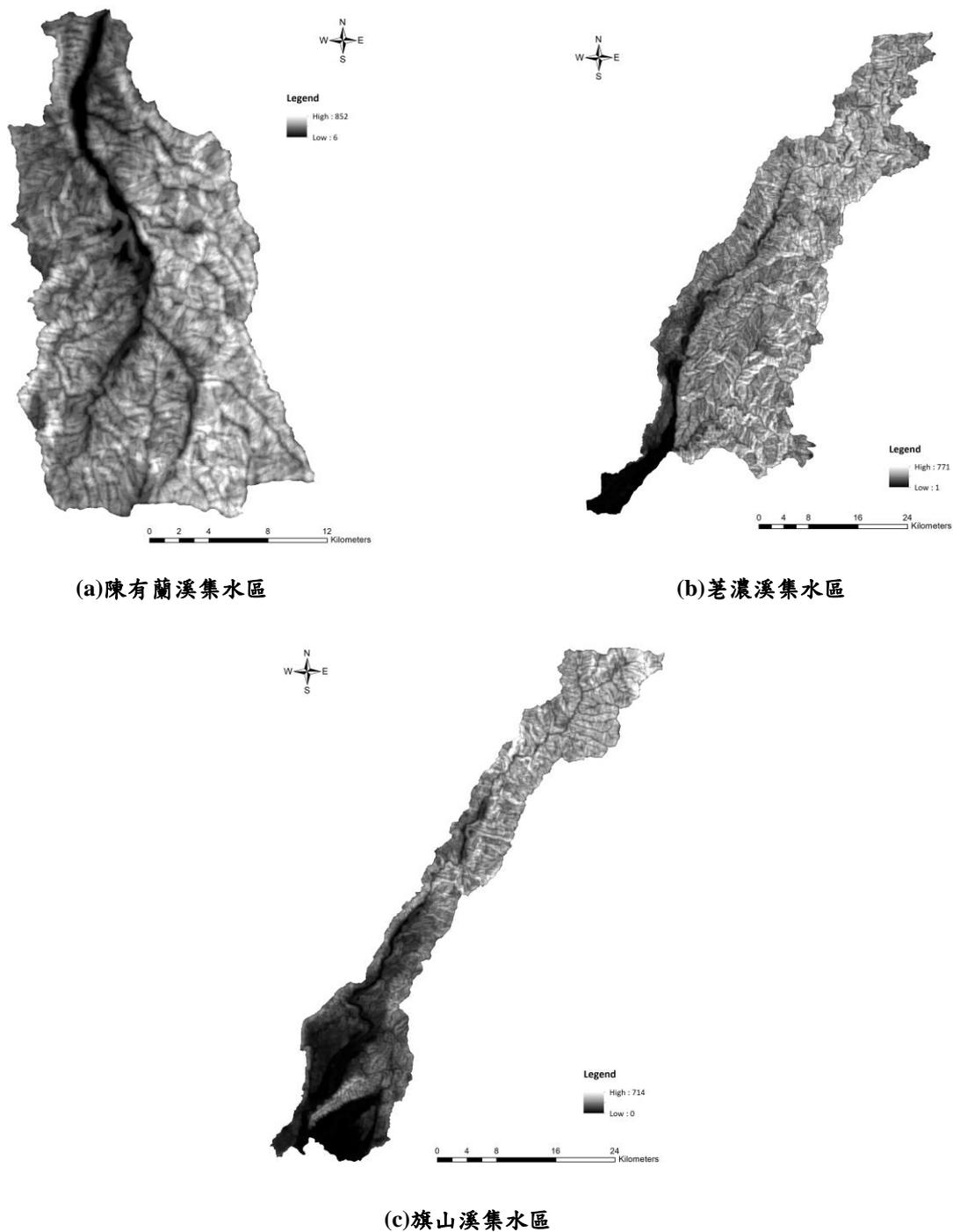
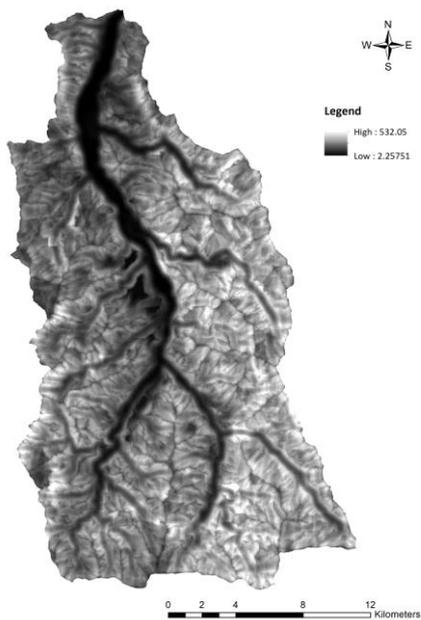


圖 2-20 各集水區地形起伏度分析圖

(七) 地表切割深度

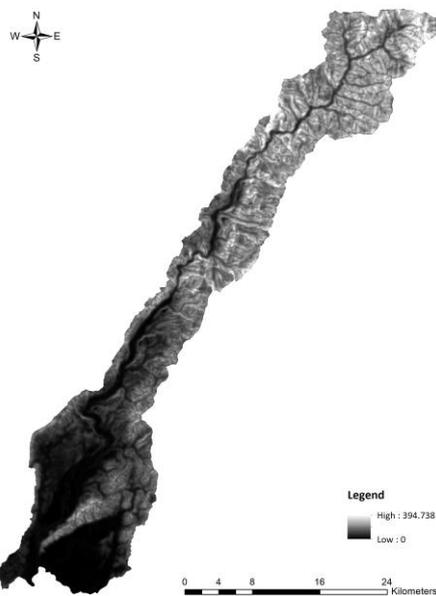
地面某點的單元格網的平均高程與該單元格網內的最小高程的差值,反映地表被侵蝕切割的情況,下圖 2-21 為研究實證範圍之地表切割深度圖。



(a) 陳有蘭溪集水區



(b) 荖濃溪集水區



(c) 旗山溪集水區

圖 2-21 各集水區地表切割深度分析圖

(八) 地表粗糙度

反映地表的起伏變化和侵蝕程度的指標，一般定義為地表單元的曲面面積與其在水平面上的投影面積之比，下圖 2- 22 為研究實證範圍之地表粗糙度圖。

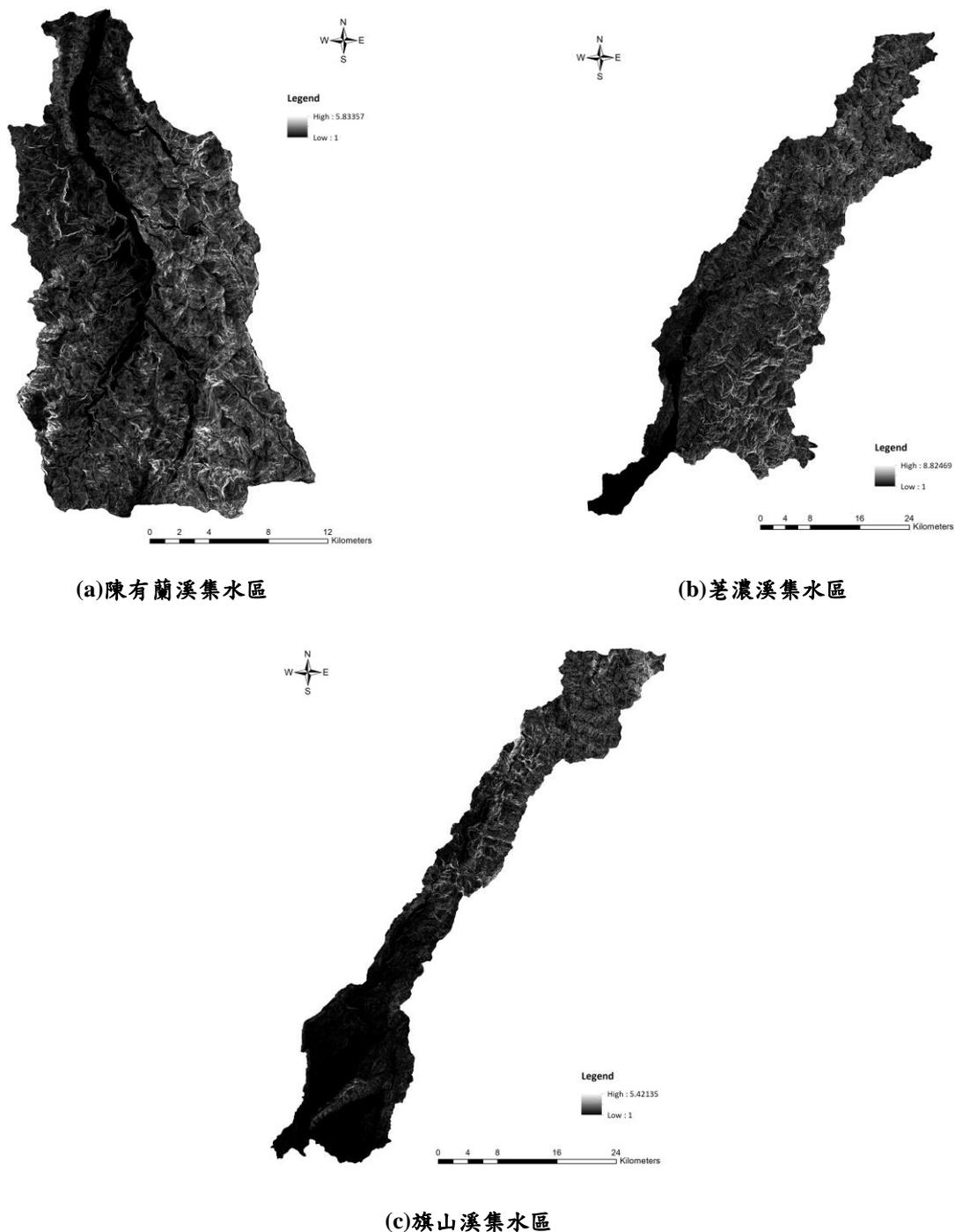


圖 2- 22 各集水區地表粗糙度分析圖

(九) 高程變異係數

反映分析區域內地表單元格網各頂點高程變化的指標,其以格網單元頂點的標準差與平均高程的比值來表示,如下圖 2- 23 所示。

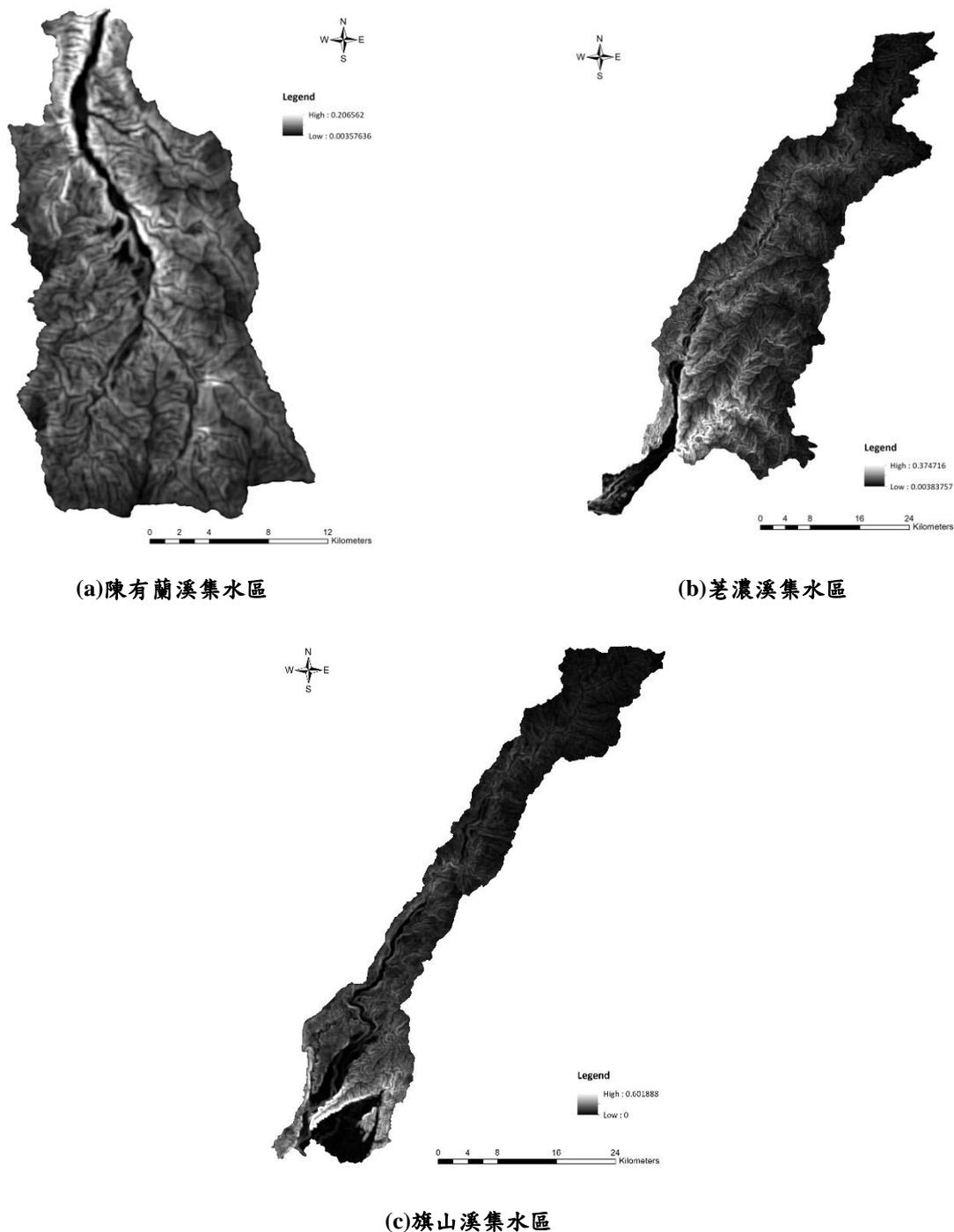


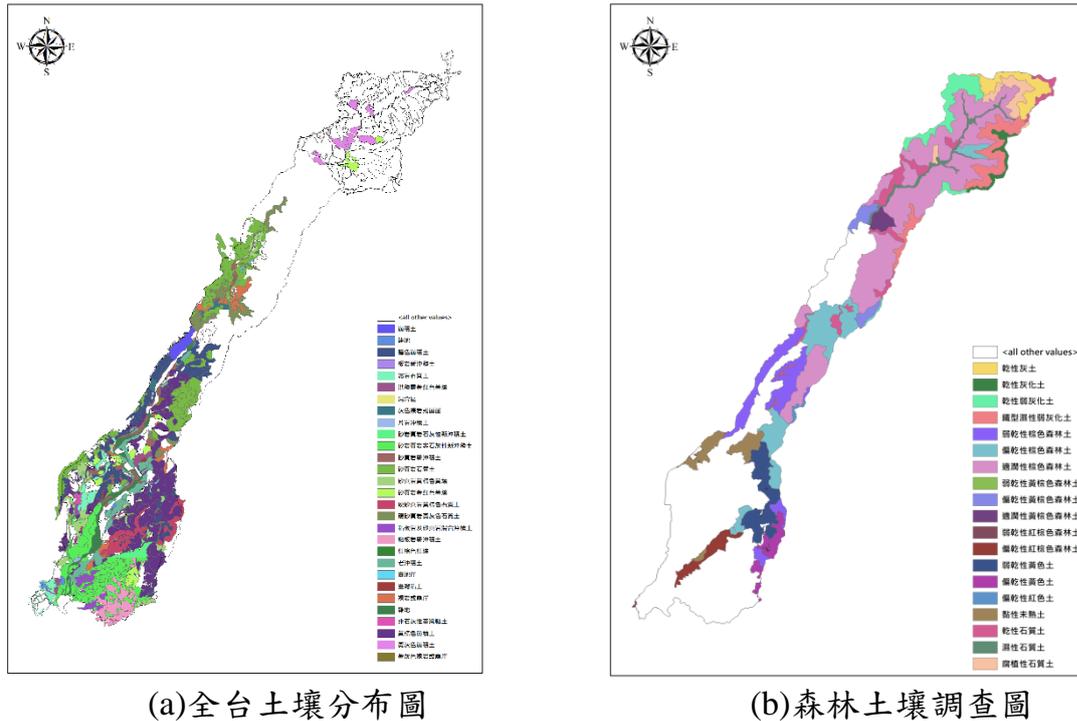
圖 2- 23 各集水區高程變異係數分析圖

四、水文因子資料

由於降雨在坡面形成地表逕流，對地表產生侵蝕並形成河道。通常在坡面上，隨著流程的增加，地表逕流將逐漸累積。當流量增加到一定程度，在當地坡度及糙度的情況下，使得地表逕流的沖刷能力超過當地土壤或裸岩所能承受的抗沖蝕力時，則坡面便開始發生沖蝕；而為輔助建立地表逕流模型的地理處理分析工具，本團隊運用數值高程模型處理分析工具，運用數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)，即可分析獲取地表逕流模型之水流方向、匯流累積量、水流長度、河流網路 河網分級、流域及集水區分割等資訊，而其中水流長度、匯流累積量則是可作為流域集水區之特徵環境因子。

五、土壤資料

降雨所引發之崩塌大多以淺層土壤滑動及土砂混合形態之土石流為主，發生原因則可能為土壤孔隙水壓增加所造成之抗剪強度降低，因此對於土壤類別相關資料之取得上，本計畫透過以行政院農業委員會農業試驗所維護管理之『土壤資料庫』GIS 圖形資料內容為主。該資料庫涵蓋層面廣泛，涵蓋各項土壤相關應用資料，資料的生產提供單位分別為農田土壤資料提供單位為行政院農業委員會農業試驗所，坡地土壤資料提供單位為行政院農業委員會水利保持局，森林土壤資料提供單位為行政院農業委員會林業試驗所，下圖 2- 24(a)至圖 2- 26(a)分別為陳有蘭溪集水區、荖濃溪集水區以及旗山溪集水區之全台平地與坡地土壤分布圖，而圖 2- 24(b)至圖 2- 26(b)則為森林土壤調查圖。



資料來源:行政院農業委員會農業試驗所

圖 2-26 旗山溪集水區土壤分布圖

六、植生樣態資料

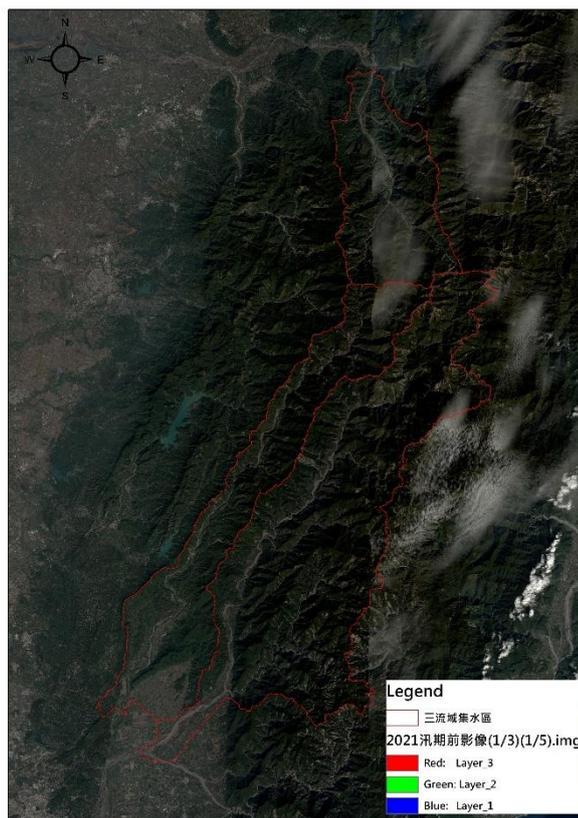
前述提及之各項因子資料，皆屬短期間不易變動、更新週期較長或者變動幅度不大者，因此可視其為不變之環境因子；另一類環境因子，則為具易變異之環境因子，在較短期間內必須考慮其變異特徵，因此應視其為變動之環境因子，例如坡地之植生、崩塌狀況等。這些因子可藉由定期拍攝之衛星遙測影像加以分析，進而瞭解環境變遷、變異，以及更新、擴充崩塌資料庫。

在環境因子中，植生狀況變異可利用常態化差異植生指標(Normalised Difference Vegetation Index, NDVI)來解釋地表的植生狀況。NDVI 是數值指標，主要用於分析衛星所得訊息，利用衛星影像的近紅外光波段，評估目標地區綠色植被的生長狀況。計算方式是利用紅光與近紅外光的反射，顯示出植物生長、生態系的資訊，其值介於-1~1 之間，數值愈大表示綠色植物生長愈多，公式如下：

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (2-1)$$

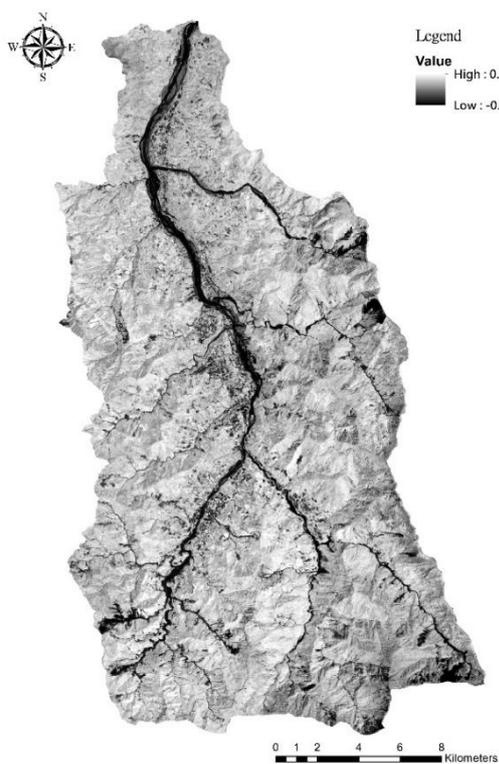
上式中，NIR 為近紅外光反射；RED 為紅光反射。當 RED=0 時，有最大值 1；反之，當 NIR=0 時，有最小值-1。由式(3-1)中，利用(NIR-RED)即能偵測植物生長量之特性，使其再除以(NIR+RED)之目的在於使其正規化，正規化的用途是防止除以零的數值誤差，並使比值能限於+1 與-1 之間以方便做比較。此外，小於零的 NDVI 值，通常屬於非植生之雲層、水域、道路和建物、裸露地等，故指數愈大時，代表綠色植物量之增加，NDVI 為綠色植物探勘最常用之指標，綠色植物生長愈旺盛，其吸收之紅光愈多，紅外光之反射愈強，故其間差異愈大之原理，以二者波段相差與和的比例而成。

崩塌資料庫中對於各事件之植生狀況，以事件前期之衛星影像資料利用 ERDAS Imagine 計算不同影像時期的 NDVI 值並使資料網格化。而本計畫建立之崩塌事件資料庫及環境因子資料庫中，對於現地環境條件和植生現況等變動因子需定期予以更新至最新環境資料，因此，為掌握本年度計畫重點聚落之坡地植生環境狀況作為崩塌評估模式之修正參考，必須針對研究區域蒐集本年度汛期前可取得之衛星影像並分析其植生現況。新的植生分析結果會使聚落坡面單元之崩塌植生因子產生變化。因此，屬變動因子的植生現況分析係本計畫重要工作，目前已自太空遙測中心取得本年度 (2021 年 01 月 03 日以及 2021 年 01 月 05 日之 SPOT7 衛星影像)(圖 2- 27)並完成 110 年度研究區之植生分析所示。本計畫中屬變動之崩塌植生因子並已同步更新，且重新定義了各集水區坡面單元之坡面類別屬性，以利於後續模型訓練參數之更新，下圖 2-28 為各集水區之 110 年度汛期前衛星影像植生特徵分析圖。

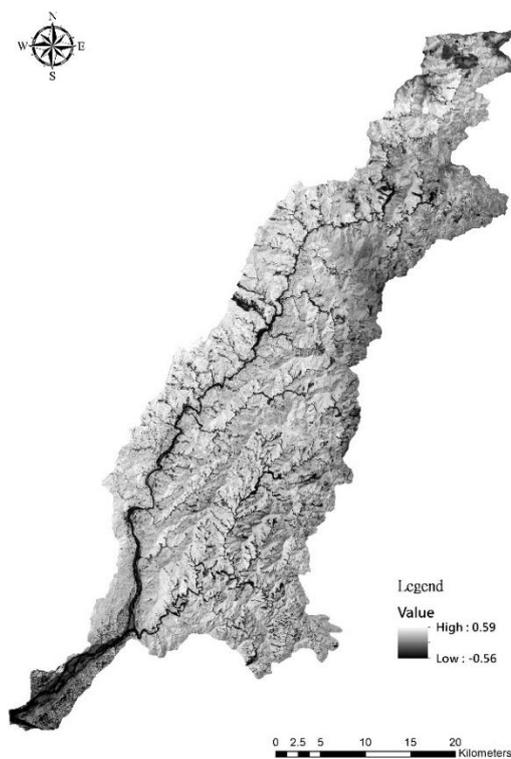


資料來源：太空遙測中心

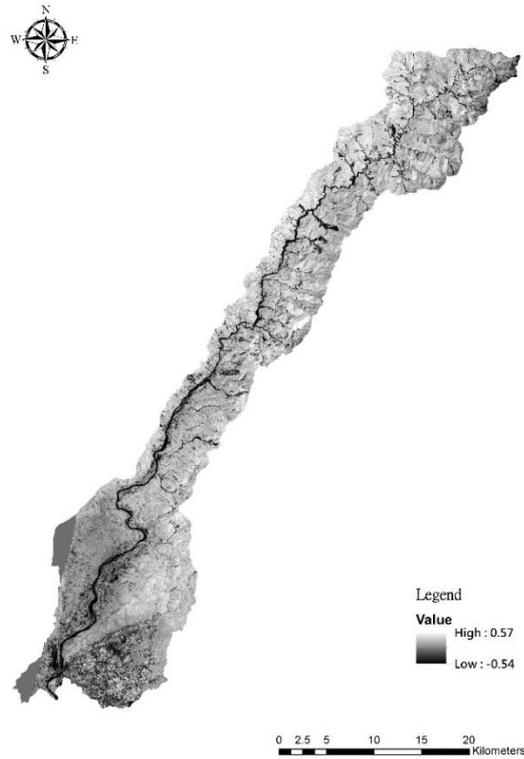
圖 2-27 各集水區 2021 年汛期前影像



(a)陳有蘭溪集水區



(b)荖濃溪集水區



(c)旗山溪集水區

圖 2- 28 各集水區 2021 年汛期前植生現況分析

第二節 降雨誘發資料庫

崩塌資料庫中還包括事件之降雨誘發因子資料，颱風事件雨量資料來源主要為中央氣象局之全國各雨量測站資料。統計全國共計自動氣象站 103 站，全自動雨量站 259 站。本計畫目前已蒐集 98 年度至 109 年度重大颱風事件中央氣象局之各雨量測站資料，依據中央氣象局公布的颱風侵台時間、經濟部水利署的颱風事件以及水保局土石流警戒發布時間為準。研究中集水區用以分析之雨量測站圖 2-29 所示。各雨量站蒐集之資料內容主要為小時降雨歷時紀錄，並利用小時降雨量資料計算事件之各降雨因子，作為後續空間雨量推估及分析之依據。

在相同的降雨時間序列中，各類雨場分割方法計算所得的降雨因子可能會有不同的結果。由於降雨引致崩塌發生之致災因素極為複雜，除量的多寡(雨下多大)還有時間的因素(雨下多久)，此即降雨型態的因素；因此單一

觀察任何一種雨量因子對崩塌發生並不是非常的敏感，微小的差異並不會對崩塌是否發生造成極大的影響，這也是崩塌臨界降雨門檻值難以訂定的原因。因此，本計畫採用目前水土保持局針對土石流潛勢溪流警戒管理相同之定義，即：「一場連續降雨過程，以時雨量大於 4mm 處視為有效降雨時間之開始，以時雨量連續 6 小時總累積雨量不超出 24mm，且其中任 1 小時之降雨量不超過 10mm 時視為降雨結束。」此有效降雨開始至降雨結束區間，即為一場有效連續降雨事件，如圖 2-30 所示。在後續警戒應變中亦採用相同事件定義。

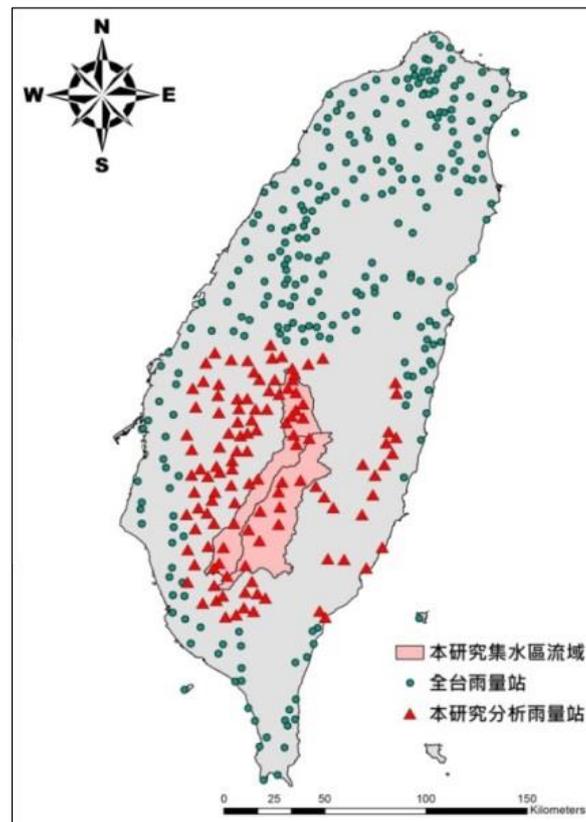


圖 2-29 本計畫蒐集之雨量測站分布

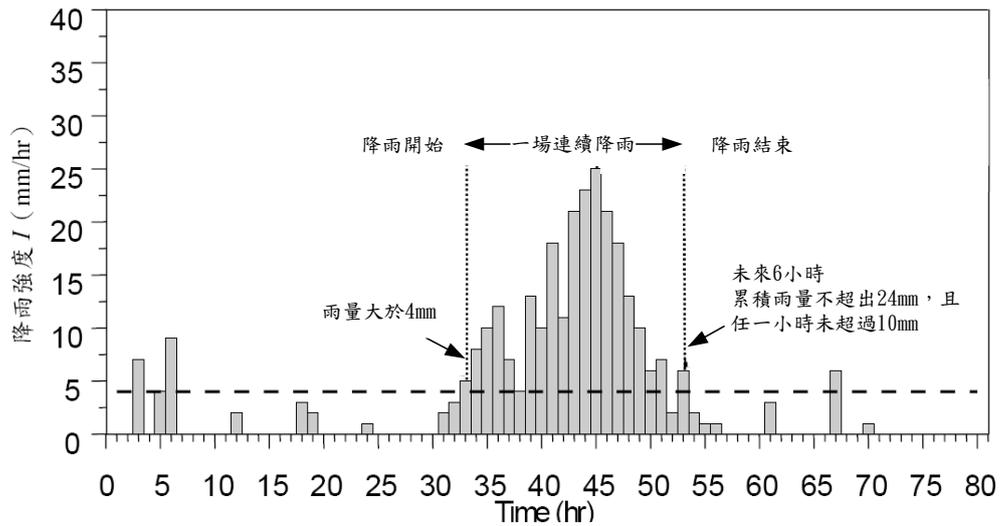


圖 2-30 本計畫之雨場分割定義

崩塌、土石流相關之降雨強度與有效累積雨量因子具有許多不同定義，不同的降雨因子定義在不同研究背景和應用層次有所不同，但並非其中某一種雨量因子即能概括崩塌、土石流，通常需要綜合多個因子共同考量。本研究探討之雙變量雨量因子，在團隊過去的研究已經建立 I_1-R_{te} 模式，即採用 1 小時降雨強度定義為最大小時降雨強度(I_1 : mm)；而對應的累積雨量定義為總有效累積降雨(R_{te} : mm)，如表 2-3 所示。

表 2-3 I_1-R_{te} 之降雨因子定義

降雨因子名稱	代號	定義
最大小時降雨強度	I_{max}	本次降雨開始時刻後之最大小時降雨強度
對應 I_1 之總有效累積降雨	R_{te}	本次降雨開始時刻前七天的加權降雨量(註 1)與開始時刻至最大小時降雨強度前一時刻之累積雨量之和

註 1：加權雨量係前七天降雨量每日折減 0.7，即每日(每 24 小時之總和)折減；例如前 3 日之降雨應折減權重為 0.7^3 ，前 2 日之降雨應折減權重為 0.7^2 。

因此，本計畫依據中央氣象局公布的 94 年度至 110 年度颱風侵台時間、經濟部水利署的颱風事件以及農委會水土保持局過去於各颱風豪雨事件啟動應變小組之時間作為各事件影響目標集水區之時間，各年度重大颱風豪

雨事件詳表如下表 2-4 所示，其中上述所考量之颱風豪雨事件期間，本計畫針對研究中集水區內篩選資料有問題及無紀錄測站後，共計 54 個雨量測站蒐集小時降雨以及前期累積降雨之歷時紀錄，根據本計畫定義之雨場事件，計算各場颱風事件雨量站之降雨因子，包括 I_{max} 及 R_{te} ，以及針對各颱風豪雨事件之雨場起始雨量至雨場結束後之逐時降雨(I_i 及 R_i)，利用地理資訊系統軟體內的空間分析工具，該工具之克利金空間內插模組來進行降雨空間分布推估。對於 $I_{max}-R_{te}$ ，各集水區內颱風事件之最大小時降雨強度及總有效累積雨量之空間分布如圖 2-31 至圖 2-38。

表 2-4 93 年度至 110 年重大颱風豪雨事件詳表

土石流災害緊急應變小組開設紀錄						土石流災害緊急應變小組開設紀錄					
年度	開設時間	解除時間	事件編號	災害名稱	年度	開設時間	解除時間	事件編號	災害名稱		
110年度	110/06/03 16:00	110/06/07 06:32	110B	彩雲颱風暨0605豪雨	103年度	103/05/20 21:30	103/05/22 08:02	103A	0520豪雨		
	110/06/21 12:00	110/06/23 07:33	110D	0621豪雨		103/06/06 21:00	103/06/07 08:01	103B	0606豪雨		
	110/07/21 20:30	110/07/24 20:02	110F	烟花颱風		103/06/14 23:30	103/06/15 17:47	103C	哈吉貝颱風		
	110/07/31 14:00	110/08/03 06:53	110H	0731豪雨		103/07/21 17:40	103/07/24 08:12	103D	泰博姆颱風		
	110/08/04 14:30	110/08/09 17:43	110J	盧碧颱風暨0806水災		103/09/19 08:30	103/09/22 09:39	103E	鳳凰颱風		
109年度	109/05/16 11:00	109/05/17 08:43	109A	黃蜂颱風	102年度	102/05/17 8:30	102/05/22 16:06	102B	0517豪雨		
	109/05/21 14:00	109/05/23 18:51	109B	0522豪雨		102/07/11 8:30	102/07/13 23:38	102D	蘇力颱風		
	109/05/28 11:30	109/05/28 21:11	109C	0528豪雨		102/08/20 8:00	102/08/22 22:52	102F	潭美颱風		
	109/08/02 09:00	109/08/03 23:29	109D	哈格比颱風		102/08/27 11:30	102/09/01 15:58	102G	康芮颱風		
	109/08/10 10:30	109/08/11 14:37	109E	米克拉颱風		102/09/19 23:30	102/09/22 18:29	102H	天兔颱風		
	109/08/22 10:00	109/08/22 23:37	109F	巴威颱風		101/05/04 14:00	101/05/04 21:09	101A	0504豪雨		
	109/10/16 13:30	109/10/19 12:32	109G	1016豪雨		101/05/20 8:46	101/05/20 19:56	101C	0520豪雨		
	109/11/05 08:30	109/11/07 14:39	109H	閃電颱風		101/06/10 9:26	101/06/16 19:56	101D	0610豪雨		
108年度	108/01/01 06:00	108/01/04 06:55	108A	0101豪雨	101年度	101/07/30 20:30	101/08/03 17:32	101G	蘇拉颱風		
	108/04/27 23:30	108/04/28 18:02	108B	0427豪雨		101/08/06 11:30	101/08/07 18:02	101H	海棠颱風		
	108/05/18 09:00	108/05/21 06:38	108C	0520豪雨		101/08/21 14:30	101/08/25 17:10	101J	天祥颱風		
	108/06/11 14:00	108/06/14 21:36	108D	0611豪雨		101/08/26 11:30	101/08/28 23:58	101K	天祥颱風		
	108/07/17 08:00	108/07/20 07:41	108E	丹娜絲颱風暨0719低壓帶豪雨		100/05/09 8:00	100/05/10 17:54	100A	艾利颱風		
	108/08/07 18:30	108/08/13 16:27	108F	利奇馬颱風		100/07/19 8:30	100/07/20 22:15	100D	0719豪雨		
	108/08/15 10:00	108/08/18 18:25	108G	0815豪雨		100/08/04 17:30	100/08/06 11:53	100E	梅花颱風		
	108/08/23 08:00	108/08/25 15:16	108H	白鹿颱風		100/08/27 9:00	100/08/31 20:25	100F	南瑪都颱風		
107年度	107/06/13 20:00	107/06/15 18:14	107A	0613豪雨	100年度	100/10/02 8:00	100/10/04 14:51	100G	1001豪雨		
	107/06/19 14:00	107/06/21 10:04	107B	0619豪雨		99/7/27 07:00	99/7/29 08:07	099D	0726豪雨		
	107/07/02 14:00	107/07/04 20:04	107C	0702豪雨		99/9/17 23:30	99/9/21 18:13	099G	凡那比颱風		
	107/07/09 14:30	107/07/11 15:22	107D	瑪莉亞颱風		99/10/17 21:00	99/10/24 00:17	099J	1017豪雨-梅姬颱風		
	107/08/23 08:00	107/08/30 20:01	107E	0823熱帶低壓		98/8/5 20:30	98/8/31 19:23	098C	莫拉克颱風		
	107/09/09 08:00	107/09/11 08:25	107F	0909豪雨		97/7/16 14:30	97/7/23 21:14	097A	卡玖基颱風		
	107/09/14 11:30	107/09/16 18:30	107G	山竹颱風		97/9/11 08:40	97/9/19 18:32	097D	辛樂克颱風		
	107/11/10 05:00	107/11/10 15:41	107H	1110豪雨		97/9/26 23:30	97/9/30 18:09	097F	蕃蜜颱風		
106年度	106/06/02 08:00	106/06/05 00:30	106A	0601豪雨	96年度	96/6/7 16:30	96/6/11 18:22	096A	0604豪雨		
	106/06/13 18:00	106/06/19 06:29	106B	0613豪雨		96/8/6 23:00	96/8/10 08:32	096B	帕布颱風暨梧槽颱風		
	106/07/28 08:30	106/07/31 21:34	106C	尼莎暨海棠颱風		96/8/13 08:30	96/8/15 11:33	096C	0809豪雨		
	106/08/01 15:43	106/08/02 20:12	106D	0801豪雨		96/8/16 08:50	96/8/21 12:20	096D	聖帕颱風		
	106/08/21 08:00	106/08/23 07:18	106E	天鵝颱風		96/11/26 08:10	96/11/27 15:15	096G	米塔颱風		
	106/09/06 11:30	106/09/07 06:37	106F	谷超颱風		95/6/9 07:40	95/6/15 09:26	095C	0609豪雨		
	106/09/12 14:30	106/09/14 20:25	106G	泰利颱風		95/7/12 08:30	95/7/16 15:59	095F	碧利斯颱風		
	106/10/12 13:30	106/10/16 14:35	106H	1011豪雨		94/5/12 17:30	94/5/16 20:31	094A	0512豪雨		
105年度	105/06/11 02:11	105/06/14 19:52	105A	0611豪雨	94年度	94/6/2 10:50	94/6/4 07:36	094D	0602豪雨		
	105/06/30 00:21	105/06/30 06:59	105B	0629豪雨		94/6/12 07:40	94/6/18 21:08	094E	0612豪雨		
	105/07/06 14:30	105/07/09 17:17	105C	厄伯特颱風		94/8/3 09:00	94/8/7 08:18	094H	馬莎颱風		
	105/07/10 01:09	105/07/12 17:03	105D	0710豪雨		94/8/11 17:00	94/8/13 20:35	094I	珊瑚颱風		
	105/09/13 08:30	105/09/15 20:26	105E	莫蘭蒂颱風		94/8/30 16:00	94/9/2 08:16	094J	泰利颱風		
	105/09/16 08:30	105/09/20 11:01	105F	馬勒卡颱風		93/6/8 11:30	93/6/9 21:03	093A	康森颱風		
	105/09/26 08:26	105/09/29 14:50	105G	梅姬颱風		93/6/29 23:40	93/7/14 11:35	093B	歐督利颱風		
	105/10/05 19:00	105/10/11 06:43	105H	艾利颱風		93/7/14 11:35	93/8/8 13:11	093C	康伯斯颱風		
104年度	104/05/10 08:30	104/05/11 20:38	104A	紅鸞颱風	93年度	93/8/11 11:40	93/8/12 22:47	093D	蘭寧颱風		
	104/05/23 16:00	104/05/27 08:14	104B	0520豪雨		93/8/23 14:40	93/9/9 23:59	093E	艾利颱風		
	104/07/06 08:30	104/07/11 11:36	104C	蓮花暨昌鴻颱風		93/9/10 00:00	93/9/20 17:17	093F	0910水災暨海馬颱風		
	104/08/06 11:30	104/08/11 19:03	104D	蘇迪勒颱風		93/10/24 08:00	93/10/27 19:25	093G	納坦颱風		
	104/08/20 17:30	104/08/23 20:33	104E	天鵝颱風		93/12/3 14:50	93/12/6 08:34	093H	南瑪都颱風		
	104/09/27 08:30	104/09/29 17:30	104F	杜鵑颱風							

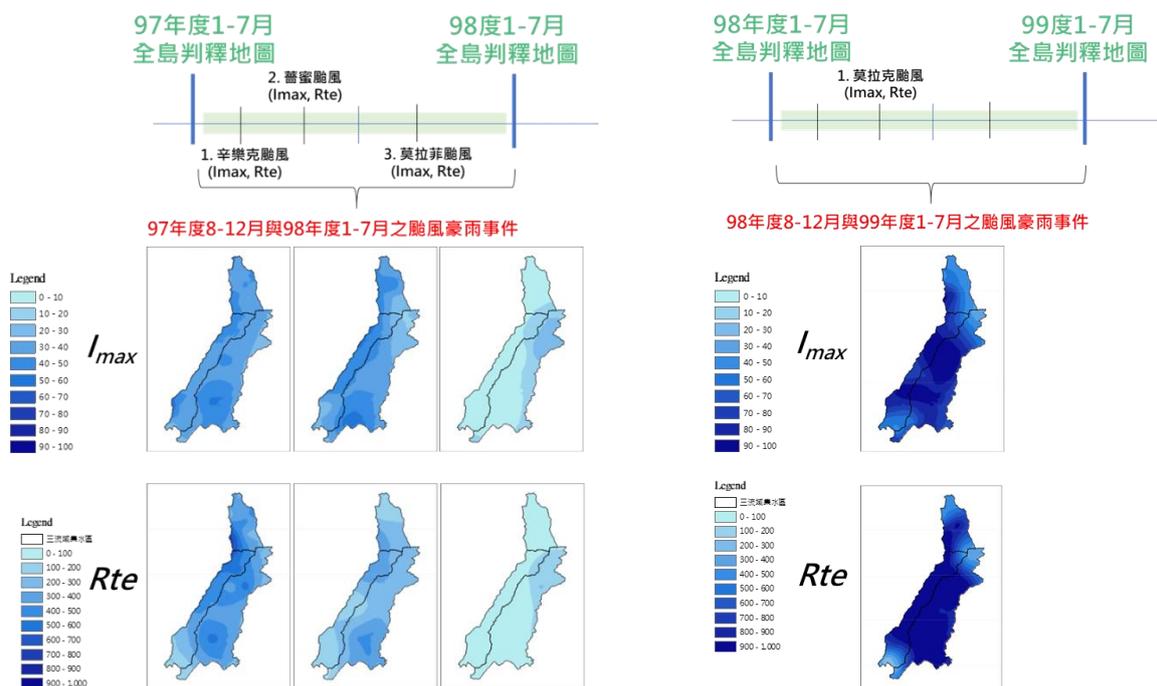


圖 2-31 97 年度至 98 年度各事件颱風豪雨雨量推估

圖 2-32 98 年度至 99 年度各事件颱風豪雨雨量推估

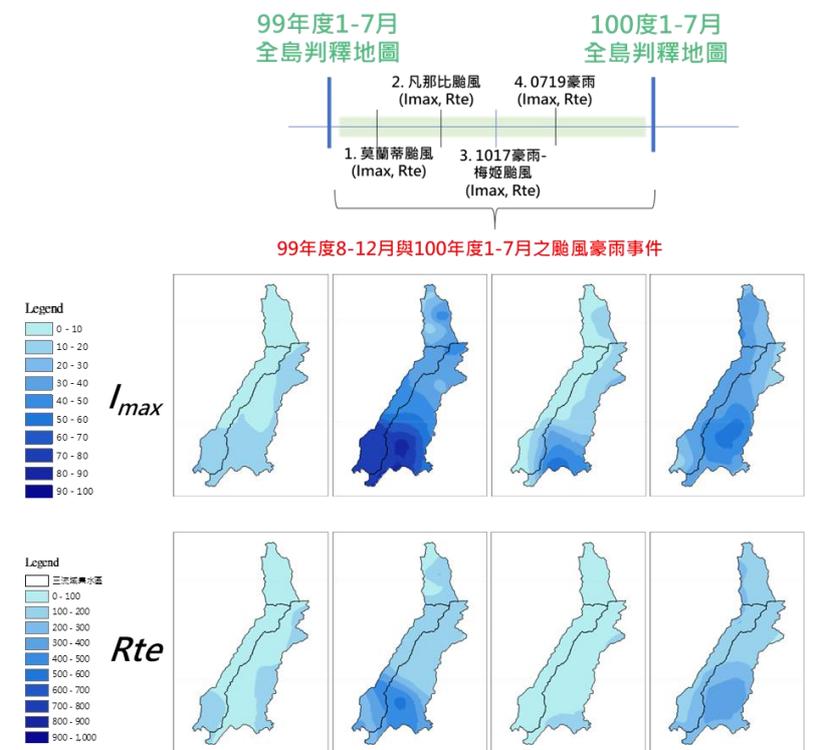
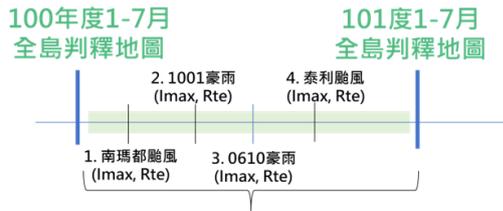


圖 2-33 99 年度至 100 年度各事件颱風豪雨雨量推估



100年度8-12月與101年度1-7月之颱風豪雨事件

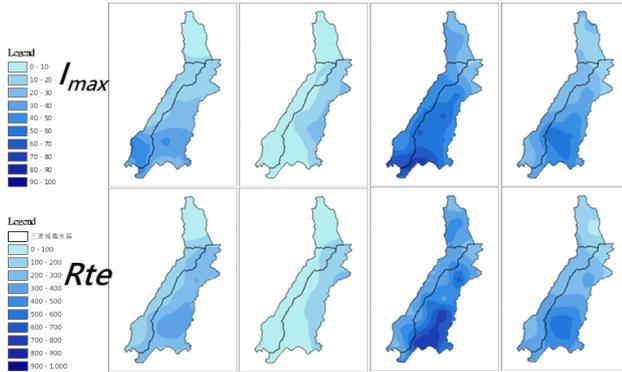


圖 2-34 100 年度至 101 年度各事件颱風豪雨雨量推估



101年度8-12月與102年度1-7月之颱風豪雨事件

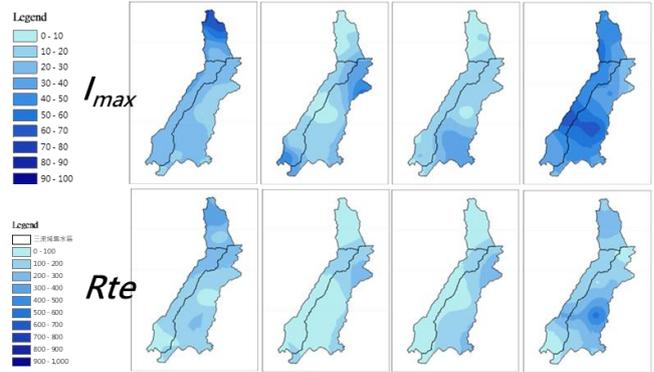


圖 2-35 101 年度至 102 年度各事件颱風豪雨雨量推估



102年度8-12月與103年度1-7月之颱風豪雨事件

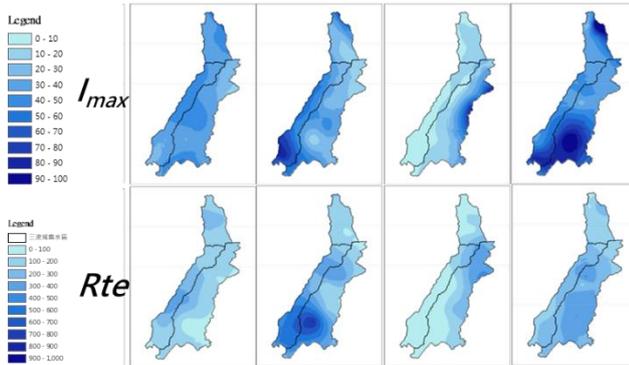


圖 2-36 102 年度至 103 年度各事件颱風豪雨雨量推估



103年度8-12月與104年度1-7月之颱風豪雨事件

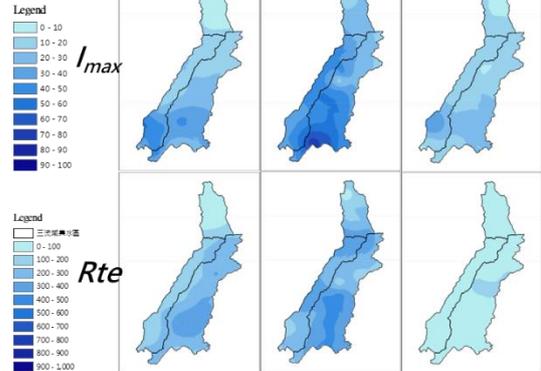


圖 2-37 103 年度至 104 年度各事件颱風豪雨雨量推估

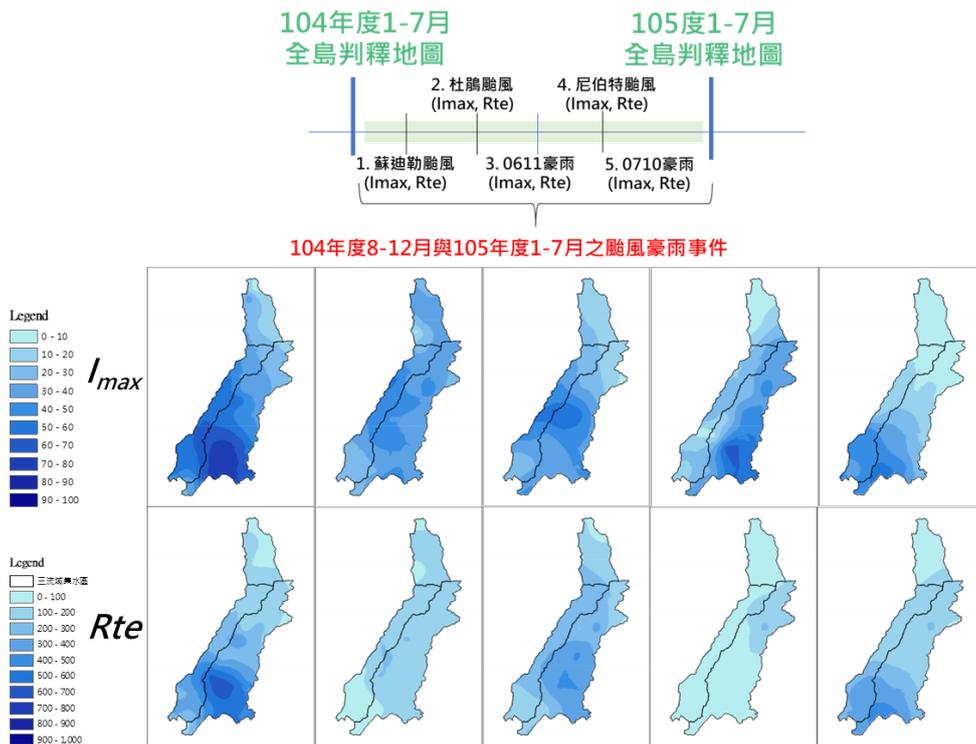


圖 2-38 104 年度至 105 年度各事件颱風豪雨雨量推估

第三節 崩塌資料萃取

對於各年度事件之崩塌地可藉由前後時期之裸露地變異情形獲得。本計畫將崩塌地分類為四類。如圖 2-39 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具有清楚的定義，可由此判定某區塊

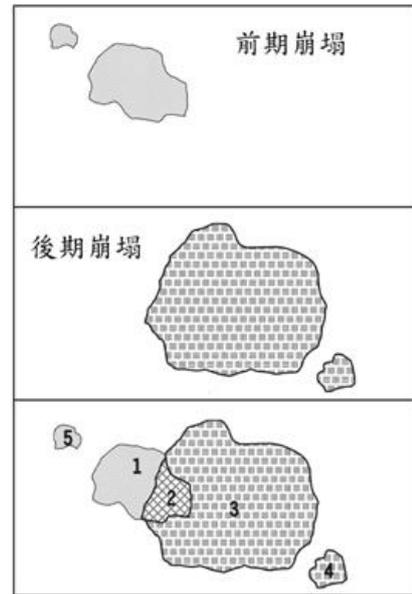


圖 2-39 崩塌地分類示意圖

是否確實發生崩塌。然而，雖然在大部份的情形下，舊有崩塌地的擴大確實與事件相關，但無法確切知道舊有崩塌地也在該次事件產生崩塌。尤其擴大有時並非只是往外擴增，也可能有內部加深之情形；然而此狀況並不能以平面空間區位判別而獲得，且其內部是否真的發生加深情形，須進行現地勘查才可能得知，因此根據上述崩塌變異分類資料萃取上，本計畫透過政府開放資料平台取得由林務局委託成功大學，其是以各年度 1~7 月全島鑲嵌福衛二號衛星影像建立自動判釋崩塌地作業標準，繪製全島崩塌地判釋成果，並取得 98 年度至 106 年度(107 年度、108 年度尚未上網)之衛星判釋全島崩塌地圖，對各年度颱風事件前後時期之崩塌地圖資進行套疊，將各崩塌地之變異類型特徵化，由此獲得各類變異崩塌地類型與坡面單元間之變遷資訊，以提高資料中崩塌地與坡面單元間之空間鏈結，而下圖 2-40 至圖 2-47 以及表 2-5 至表 2-12 為 97 年度至 106 年度間各前後期崩塌套疊結果，最後將前後期崩塌套疊結果中之舊有崩塌地擴大以及新增崩塌地相加，彙整於表

2-13。

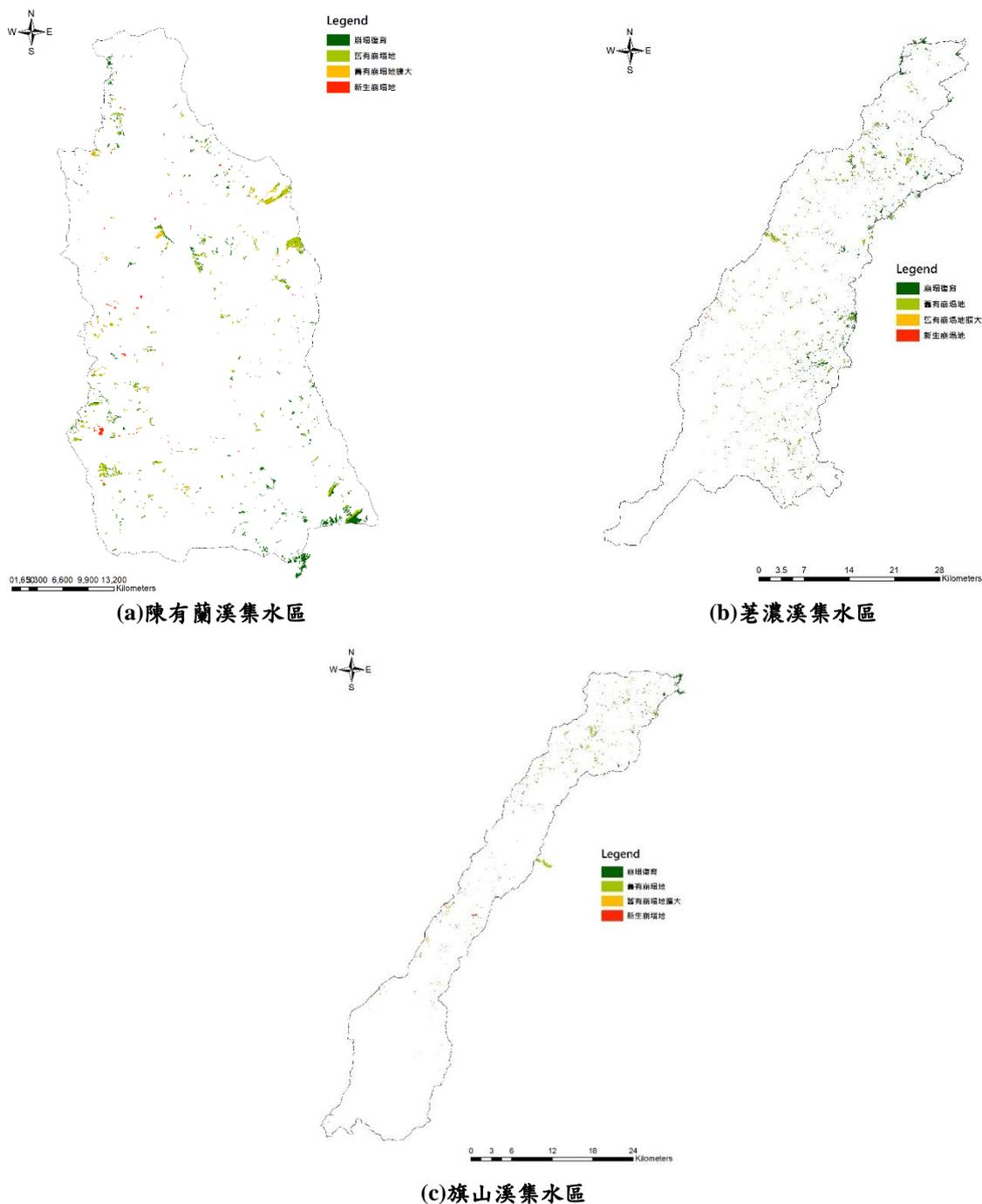


圖 2-40 97 年度至 98 年度間崩塌變異類型分布圖

表 2-5 97 年度至 98 年度間各類變異崩塌地類型面積統計表

類型	面積(HA)
崩塌復育	2652.24
舊有崩塌地	1767.20
舊有崩塌地擴大	383.47
新生崩塌地	272.60

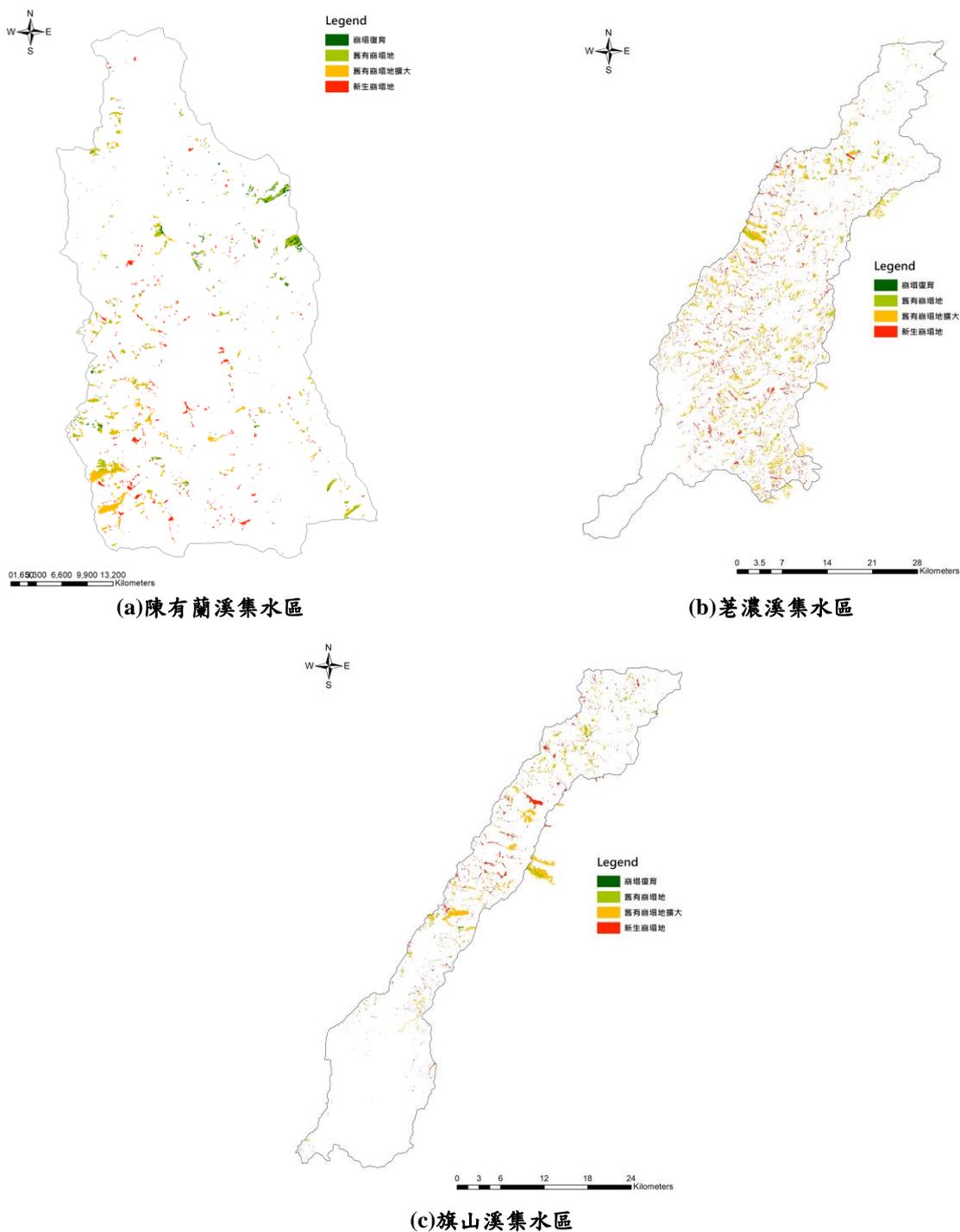


圖 2-41 98 年度至 99 年度間崩塌變異類型分布圖

表 2-6 98 年度至 99 年度間各類變異崩塌地類型面積統計表

類型	面積(HA)
崩塌復育	499.08
舊有崩塌地	1932.89
舊有崩塌地擴大	7670.08
新生崩塌地	5225.89

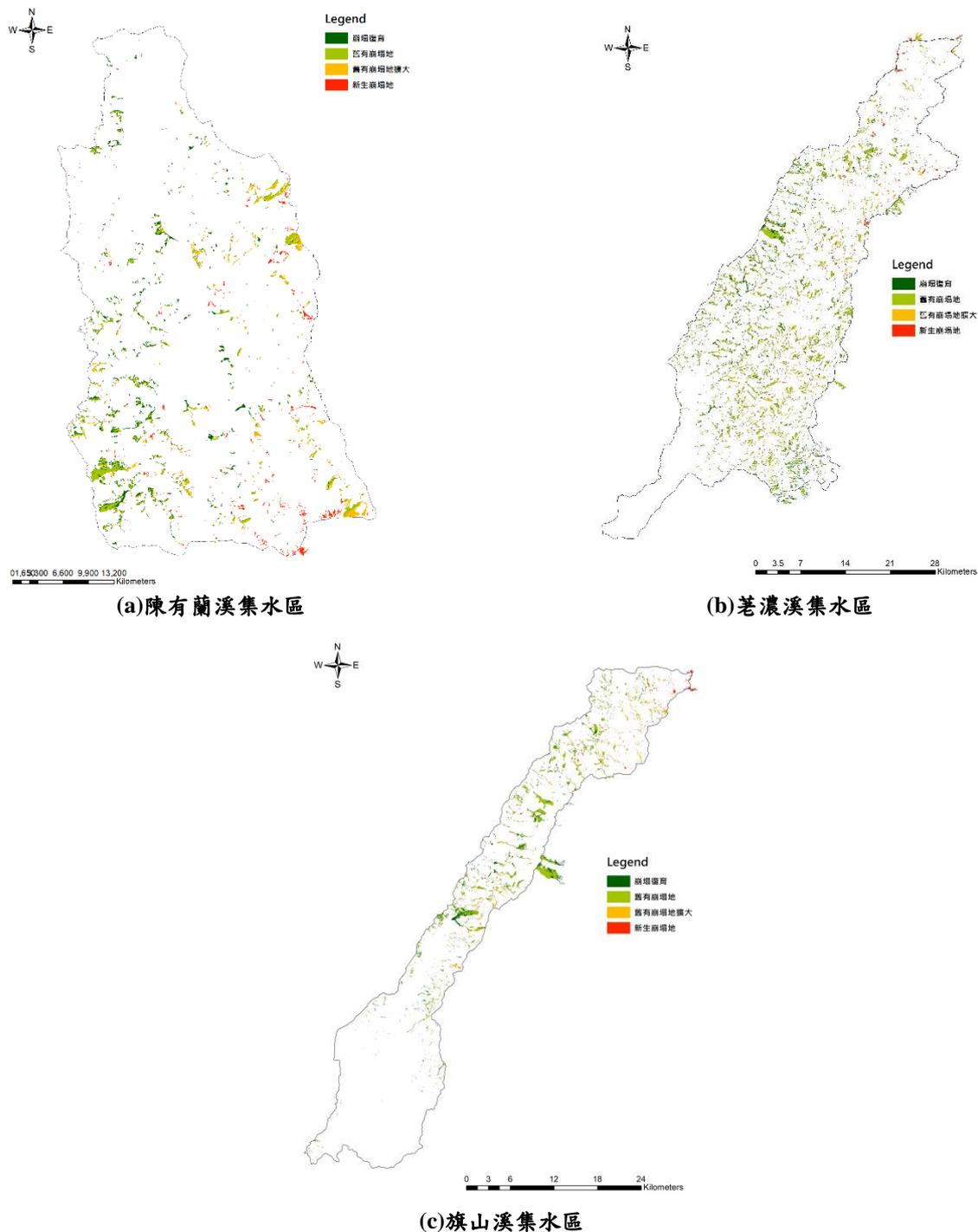


圖 2-42 99 年度至 100 年度間崩塌變異類型分布圖

表 2-7 99 年度至 100 年度間各類變異崩塌地類型面積統計表

類型	面積(HA)
崩塌復育	6021.12
舊有崩塌地	8603.46
舊有崩塌地擴大	3125.98
新生崩塌地	1505.55

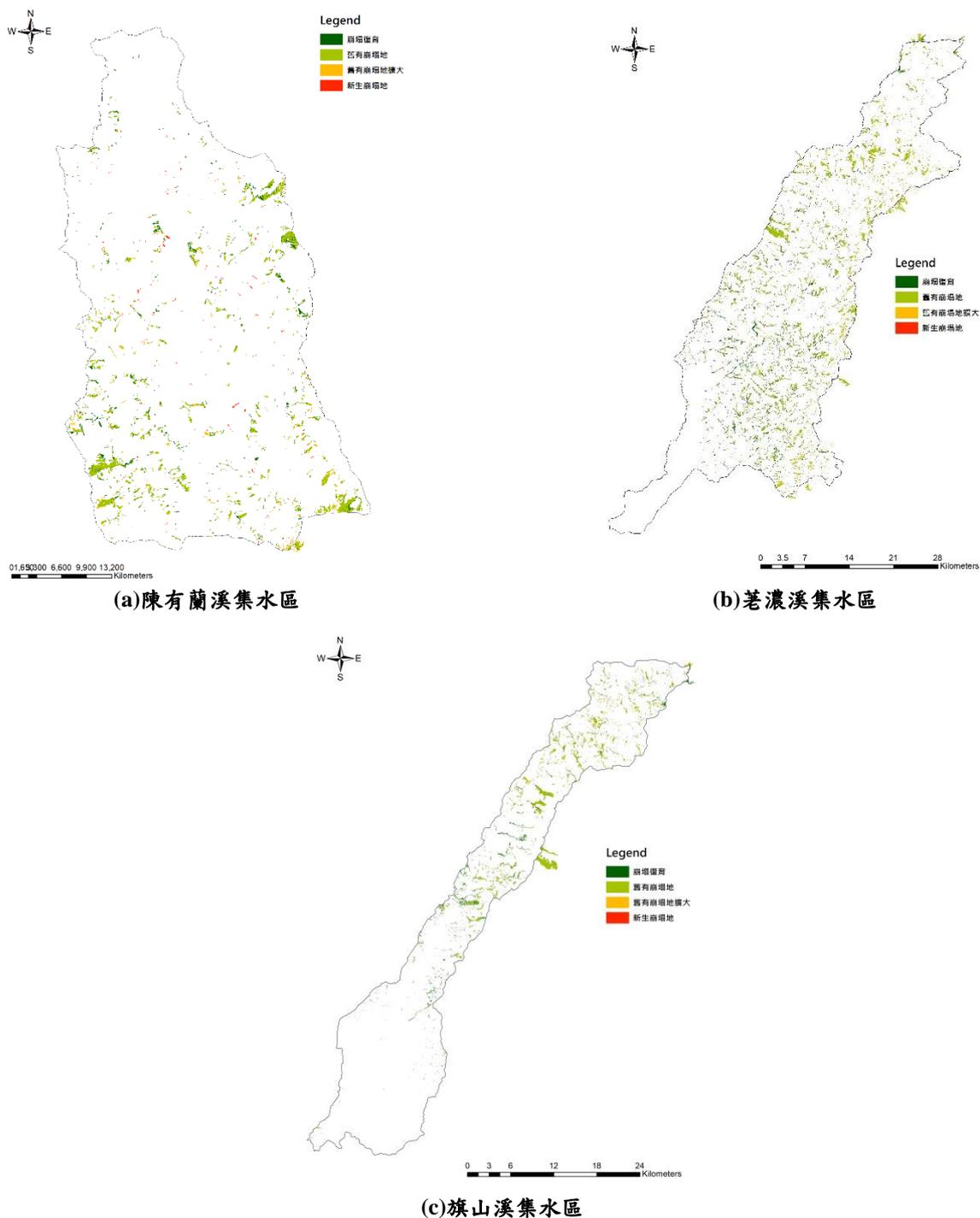


圖 2-43 100 年度至 101 年度間崩塌變異類型分布圖

表 2-8 100 年度至 101 年度間各類變異崩塌地類型面積統計表

類型	面積(HA)
崩塌復育	4517.74
舊有崩塌地	8697.53
舊有崩塌地擴大	1943.32
新生崩塌地	326.72



圖 2-44 101 年度至 102 年度間崩塌變異類型分布圖

表 2-9 101 年度至 102 年度間各類變異崩塌地類型面積統計表

類型	面積(HA)
崩塌復育	3567.05
舊有崩塌地	7460.27
舊有崩塌地擴大	1659.96
新生崩塌地	383.17

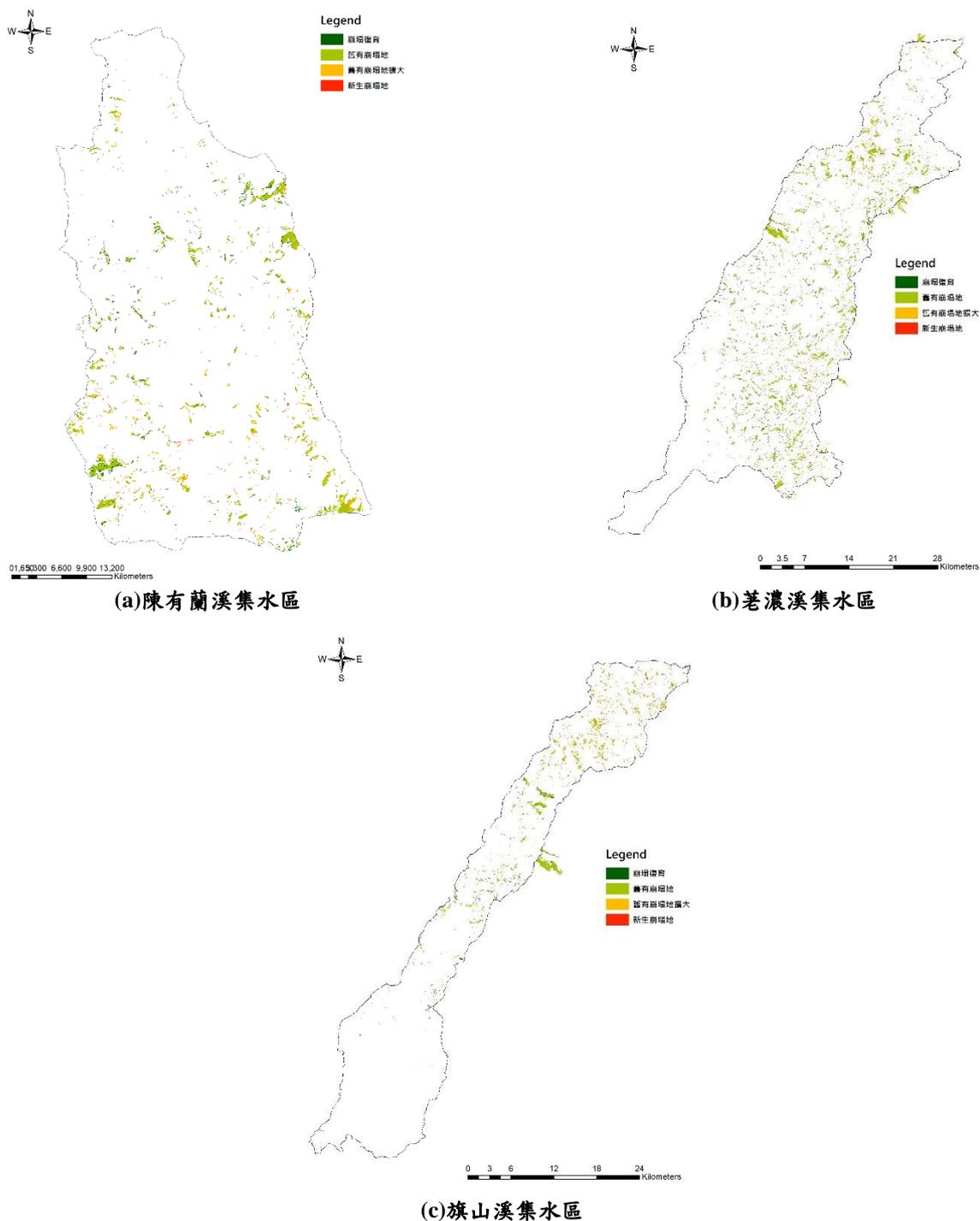


圖 2-45 102 年度至 103 年度間崩塌變異類型分布圖

表 2-10 102 年度至 103 年度間各類變異崩塌地類型面積統計表

類型	面積(HA)
崩塌復育	2129.30
舊有崩塌地	7362.65
舊有崩塌地擴大	2207.48
新生崩塌地	472.78

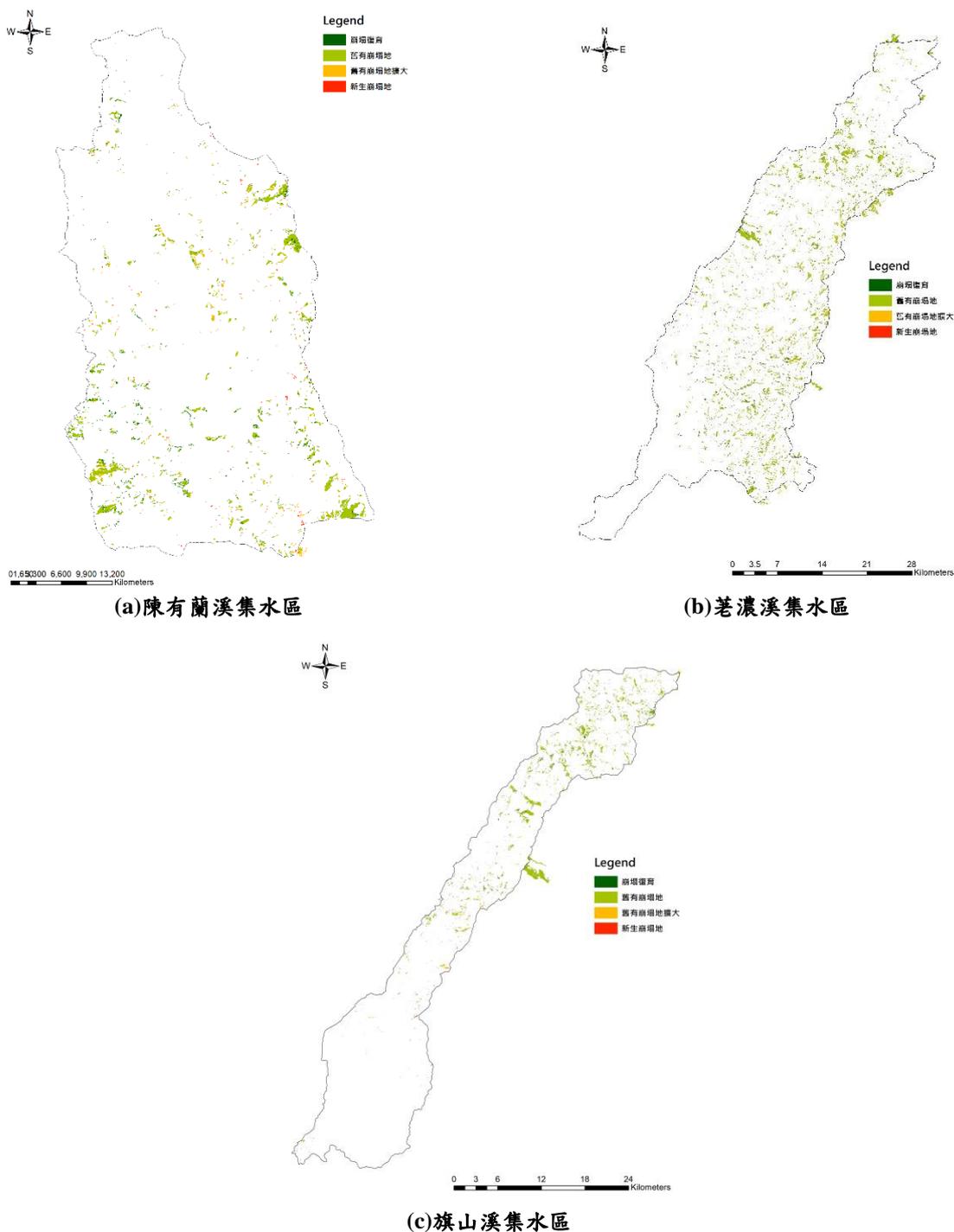


圖 2-46 103 年度至 104 年度間崩塌變異類型分布圖

表 2-11 103 年度至 104 年度間各類變異崩塌地類型面積統計表

類型	面積(HA)
崩塌復育	1912.71
舊有崩塌地	8202.75
舊有崩塌地擴大	1802.94
新生崩塌地	296.60

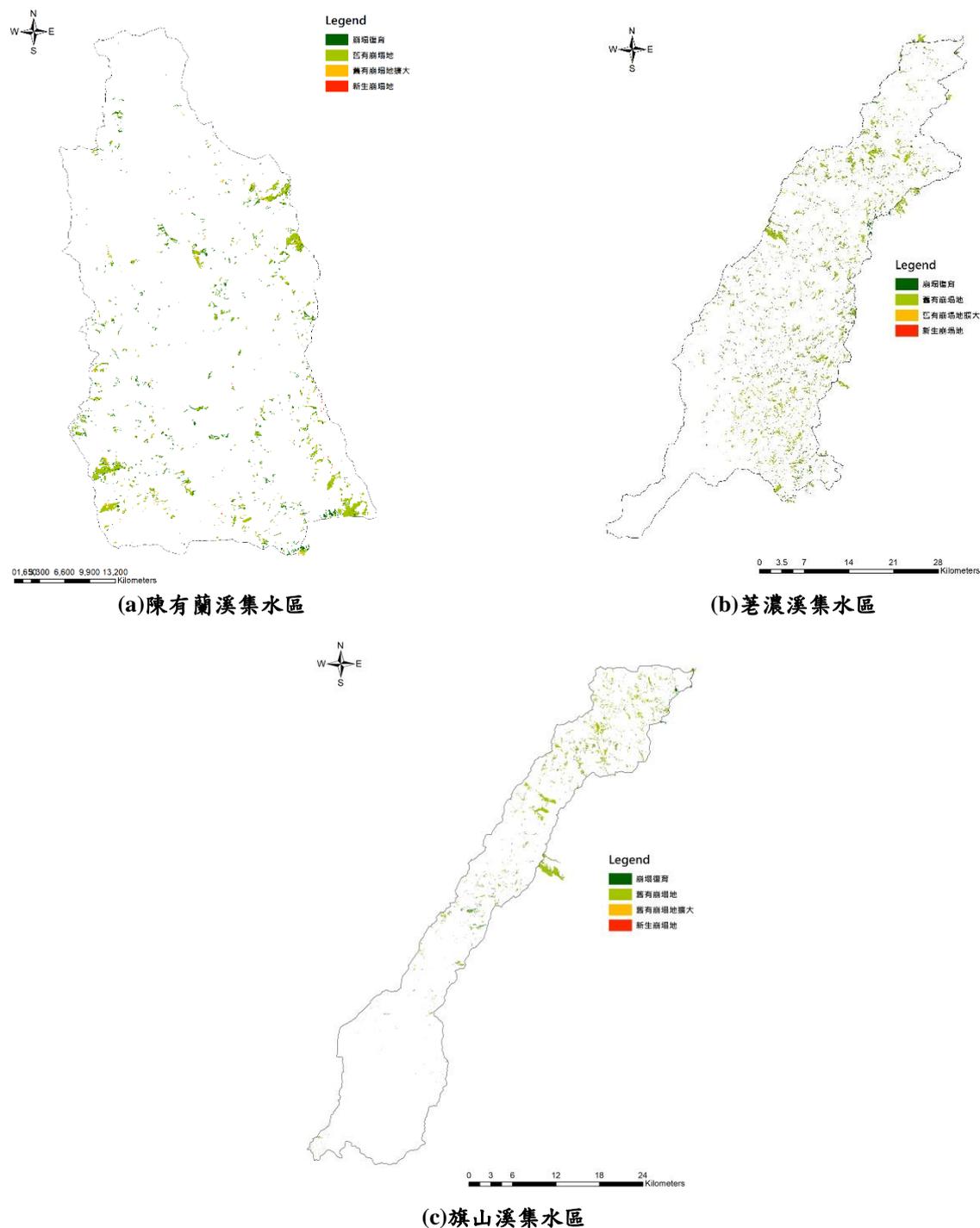


圖 2-47 104 年度至 105 年度間崩塌變異類型分布圖

表 2-12 104 年度至 105 年度間各類變異崩塌地類型面積統計表

類型	面積(HA)
崩塌復育	3446.60
舊有崩塌地	6828.19
舊有崩塌地擴大	963.30
新生崩塌地	98.15

分別統計統計各年度所新增的崩塌地分布，詳細統計表如表 2-13 所示，其中 98 年度與 97 年度間崩塌地圖所萃取出之新增崩塌地分布圖中荖濃溪新增之崩塌地共 284.15 公頃(0.20%)，陳有蘭溪新增之崩塌地共 183.79 公頃(0.41%)，旗山溪新增之崩塌地共 104.32 公頃(0.14%)，如下圖 2-48 所示，99 年度與 98 年度間崩塌地圖所萃取出之新增崩塌地分布圖中荖濃溪新增之崩塌地共 8,446.72 公頃(5.99%)，陳有蘭溪新增之崩塌地共 888.87 公頃(1.98%)，旗山溪新增之崩塌地共 3,027.11 公頃(4.03%)，如下圖 2-49 所示，100 年度與 99 年度間崩塌地圖所萃取出之新增崩塌地分布圖中荖濃溪新增之崩塌地共 1311.03 公頃(0.93%)，陳有蘭溪新增之崩塌地共 409.31 公頃(0.91%)，旗山溪新增之崩塌地共 493.63 公頃(0.66%)，如下圖 2-50 所示，101 年度與 100 年度間崩塌地圖所萃取出之新增崩塌地分布圖中，荖濃溪新增之崩塌地共 1,796.45 公頃(1.28%)，陳有蘭溪新增之崩塌地共 329.73 公頃(0.74%)，旗山溪新增之崩塌地共 389.44 公頃(0.74%)，如下圖 2-51 所示；102 年度崩塌地圖減去 101 年度崩塌地圖所萃取出之崩塌地分布圖中，荖濃溪新增之崩塌地共 1,371.89 公頃(0.97%)，陳有蘭溪新增之崩塌地共 325.98 公頃(0.73%)，旗山溪新增之崩塌地共 358.97 公頃(0.48%)，如下圖 2-52 所示，103 年度崩塌地圖減去 102 年度崩塌地圖所萃取出之崩塌地分布圖中，荖濃溪新增之崩塌地共 488.74 公頃(0.35%)，陳有蘭溪新增之崩塌地共 133.93 公頃(0.30%)，旗山溪新增之崩塌地共 216.04 公頃(0.29%)，如下圖 2-53 所示，104 年度崩塌地圖減去 103 年度崩塌地圖所萃取出之崩塌地分布圖中，荖濃溪新增之崩塌地共 378.72 公頃(0.27%)，陳有蘭溪新增之崩塌地共 101.15 公頃(0.23%)，旗山溪新增之崩塌地共 148.27 公頃(0.20%)，如下圖 2-54 所示，105 年度崩塌地圖減去 104 年度崩塌地圖所萃取出之崩塌地分布圖中，荖濃溪新增之崩塌地共 514.47 公頃(0.37%)，陳有蘭溪新增之崩塌地共 134.76 公頃(0.30%)，旗山溪新增之崩塌地共 178.55 公頃(0.24%)，

如下圖 2- 55 所示，106 年度崩塌地圖減去 105 年度崩塌地圖所萃取出之崩塌地分布圖中，荖濃溪新增之崩塌地共 1716.29 公頃(1.22%)，陳有蘭溪新增之崩塌地共 200.32 公頃(0.45%)，旗山溪新增之崩塌地共 393.76 公頃(0.52%)，如下圖 2- 56 所示。

表 2- 13 颱風豪雨崩塌事件新增崩塌地詳表

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

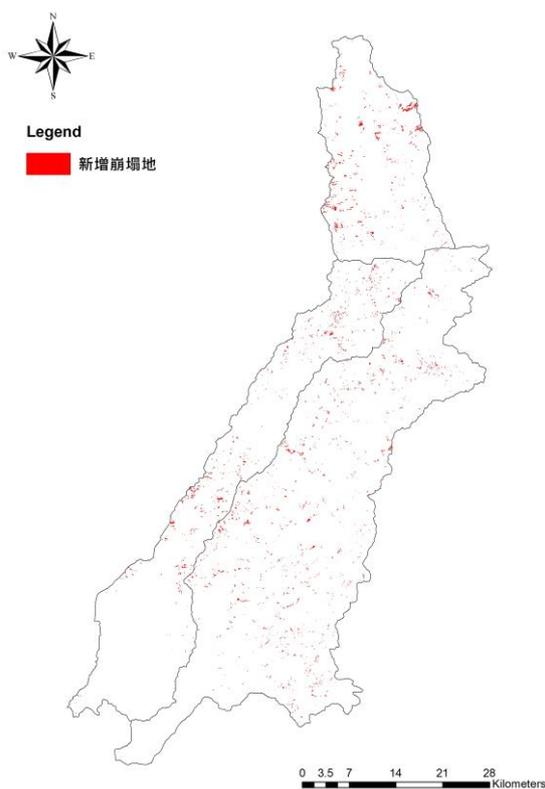


圖 2- 48 新增崩塌地分布圖(98 年度崩塌地圖-97 年度崩塌地圖)

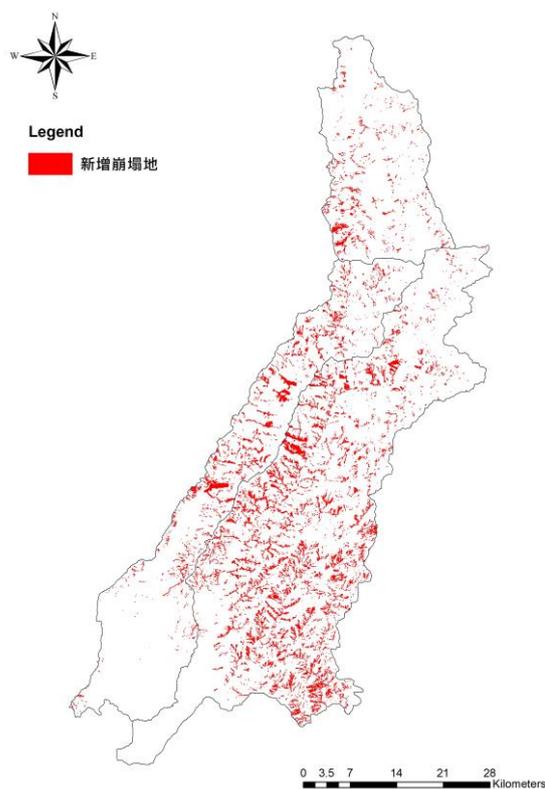


圖 2- 49 新增崩塌地分布圖(99 年度崩塌地圖-98 年度崩塌地圖)

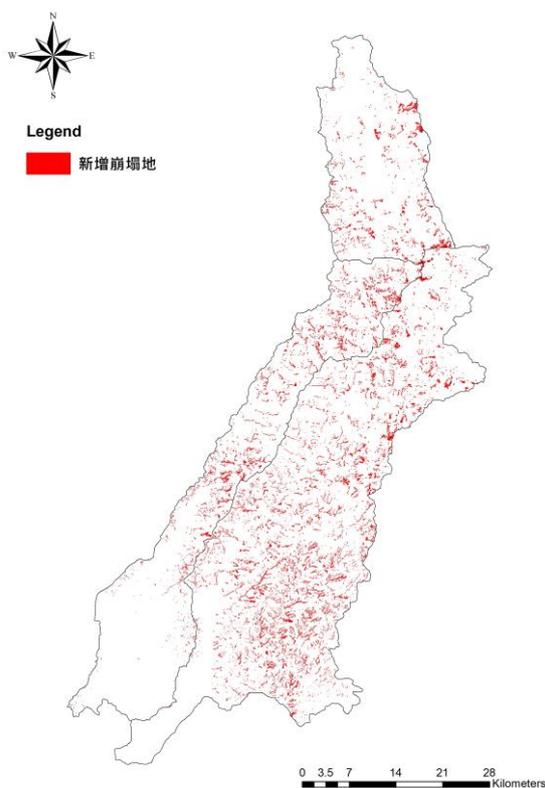


圖 2- 50 新增崩塌地分布圖(100 年度崩塌地圖-99 年度崩塌地圖)

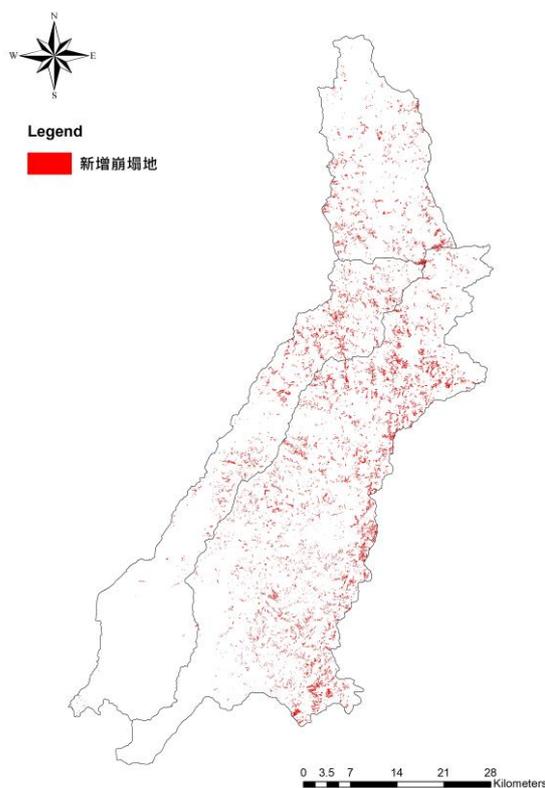


圖 2- 51 新增崩塌地分布圖(101 年度崩塌地圖-100 年度崩塌地圖)

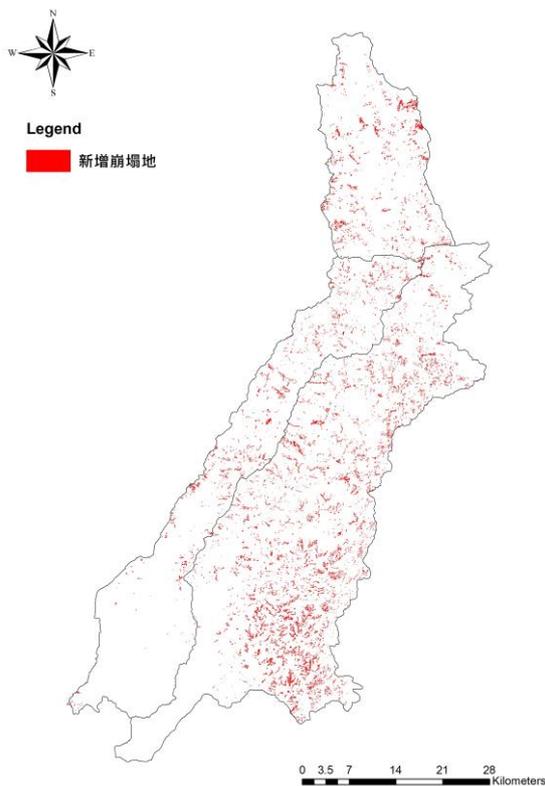


圖 2- 52 新增崩塌地分布圖(102 年度崩塌地圖-101 年度崩塌地圖)

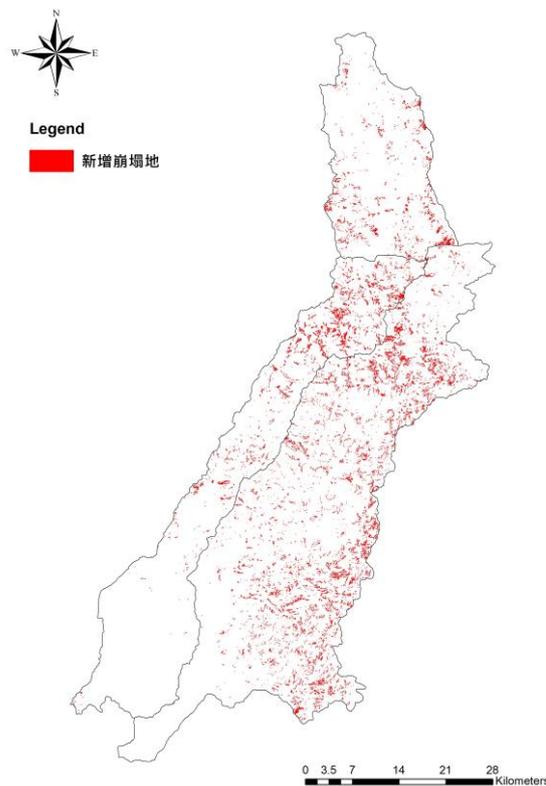


圖 2- 53 新增崩塌地分布圖(103 年度崩塌地圖-102 年度崩塌地圖)

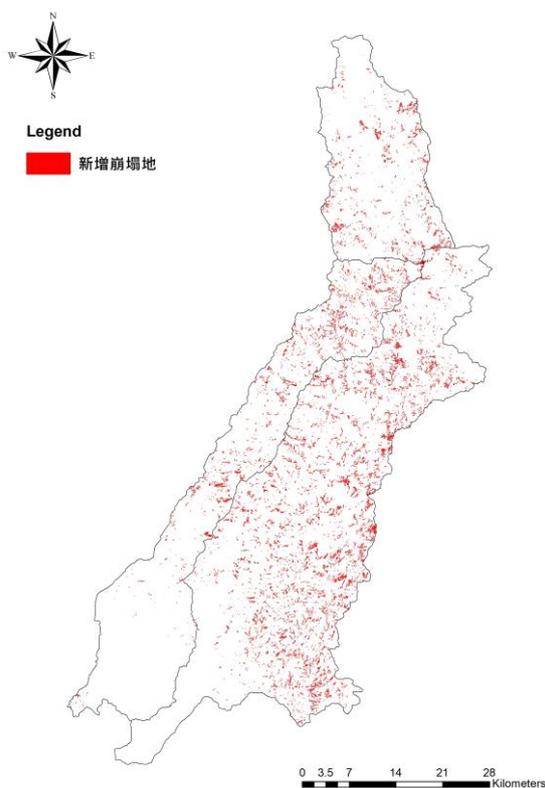


圖 2- 54 新增崩塌地分布圖(104 年度崩塌地圖-103 年度崩塌地圖)

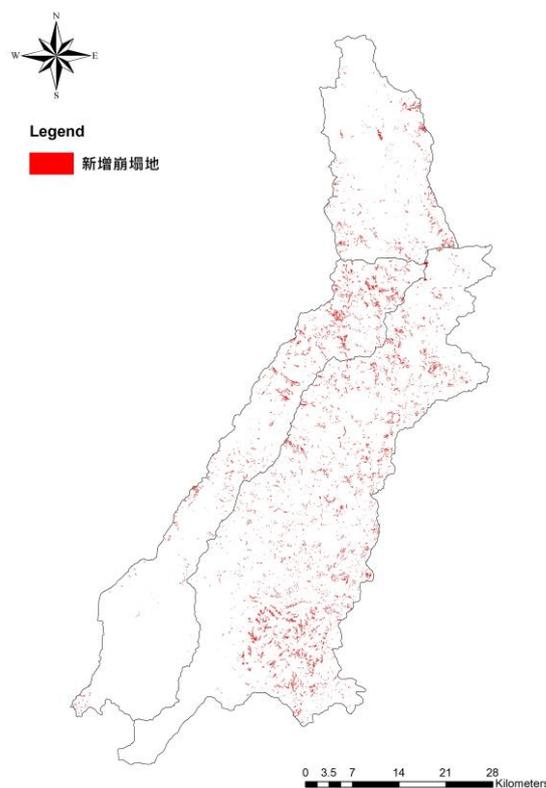


圖 2- 55 新增崩塌地分布圖(105 年度崩塌地圖-104 年度崩塌地圖)

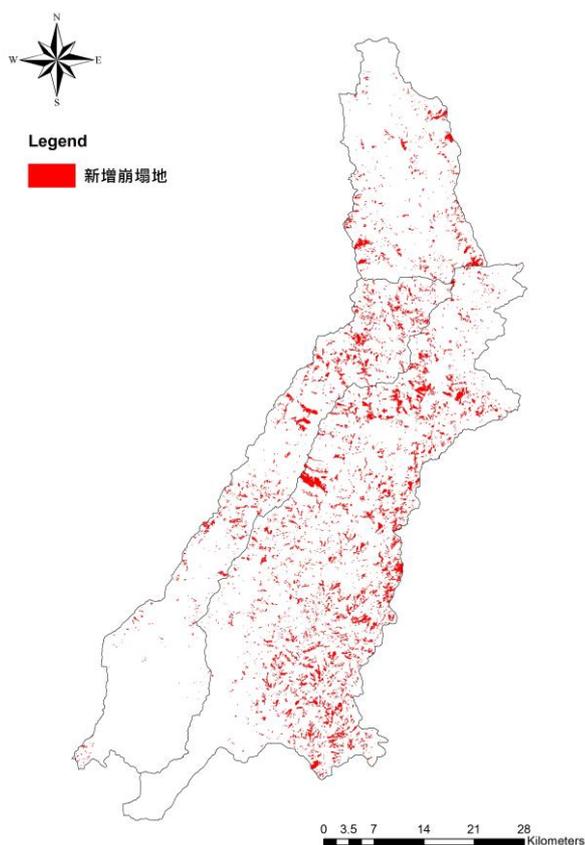


圖 2- 56 新增崩塌地分布圖(106 年度崩塌地圖-105 年度崩塌地圖)

本計畫在上述進行新增之颱風豪雨事件進行相關崩塌特徵資料庫之擴增後，後續可以擴增後之崩塌事件資料庫進行坡地崩塌風險評估模型之建立，以探索更全域之最佳解。

第四節 坡面單元繪製與坡面分類定義

由於坡面單元具地形之特徵，能呈現邊坡特性，特別適合用來做崩塌潛勢分析(Guzzetti, 2006)。本計畫使用地理資訊系統軟體 ArcGIS 10.0 之水文及地形工具進行坡面單元分析。藉由 DEM 分析得到之集水區，多邊形的輪廓線就是山脊線；而山谷線則使用反轉之 DEM 資料，藉由 DEM 網格分析互換其高低值，原山谷線即能反轉為山脊線，同樣地亦可得到反轉之山谷線。繪製原則為二：1. 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；2. 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。

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 10 公頃之坡面單元，則會獨立處理使之小於 10 公頃。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 10 公頃。對於小於 3 公頃之坡面單元，編修時須再與 Google Earth 三維立體地圖比對，小於 3 公頃之坡面單元則與鄰近之坡面單元合併處理。

依據前述劃設及篩選程序，陳有蘭溪集水區劃分完成之坡面單元如圖 2-57 所示，總計有 6,651 個坡面單元。荖濃溪集水區劃分完成之坡面單元如圖 2-58，總計有 21,279 個坡面單元。旗山溪集水區劃分完成坡面單元如圖 2-59 所示，總計有 10,985 個坡面單元。

完成坡面單元劃分後，即可瞭解整體集水區之坡面總數量以及納入監控管理之坡面數量，接下來即可藉由環境因子資料庫進行每個坡面之平均統計轉換，由於環境因子資料庫皆為 20m×20m 之網格尺度，必須轉化為坡面尺度之定義。

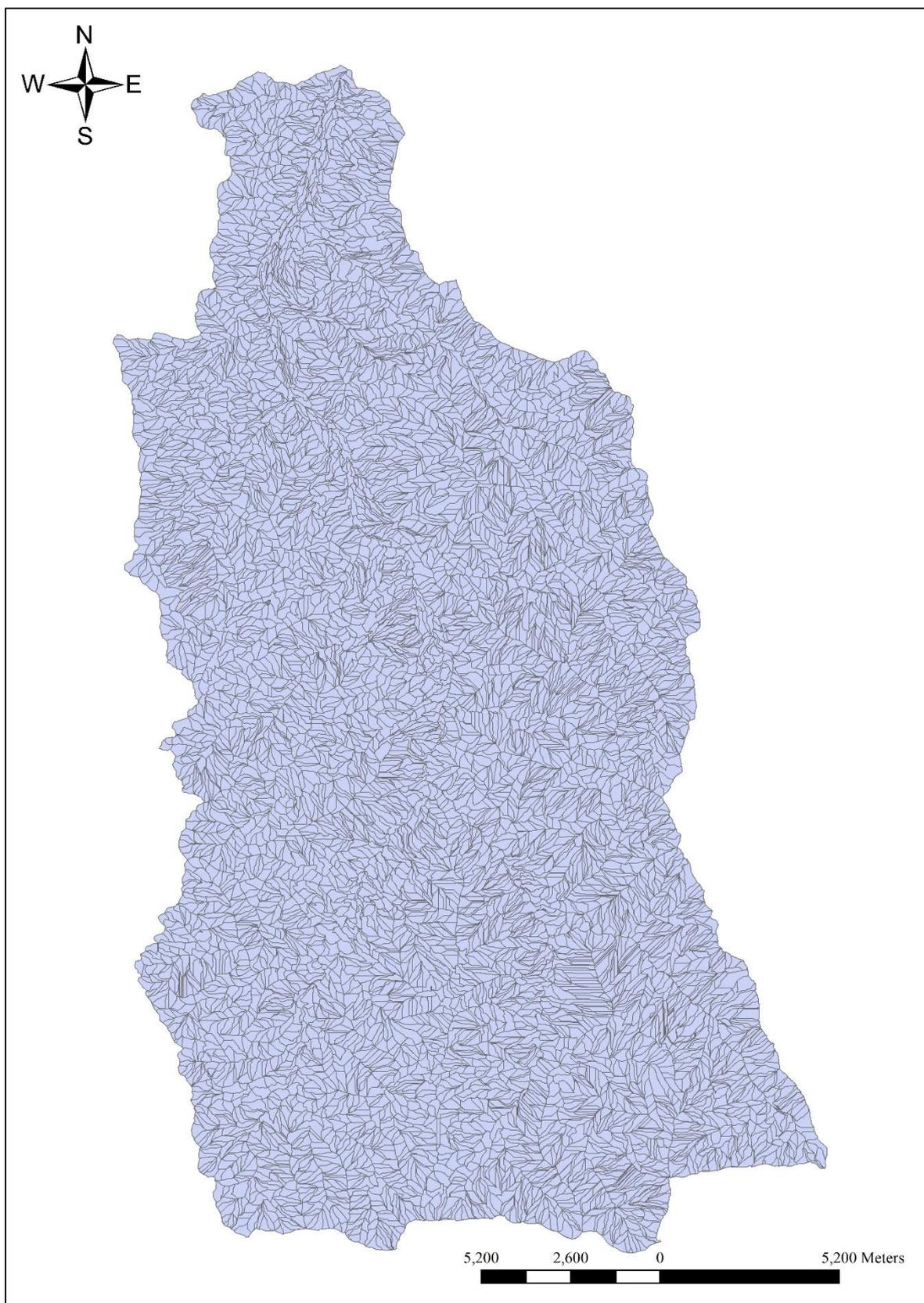


圖 2-57 陳有蘭溪集水區之坡面單元

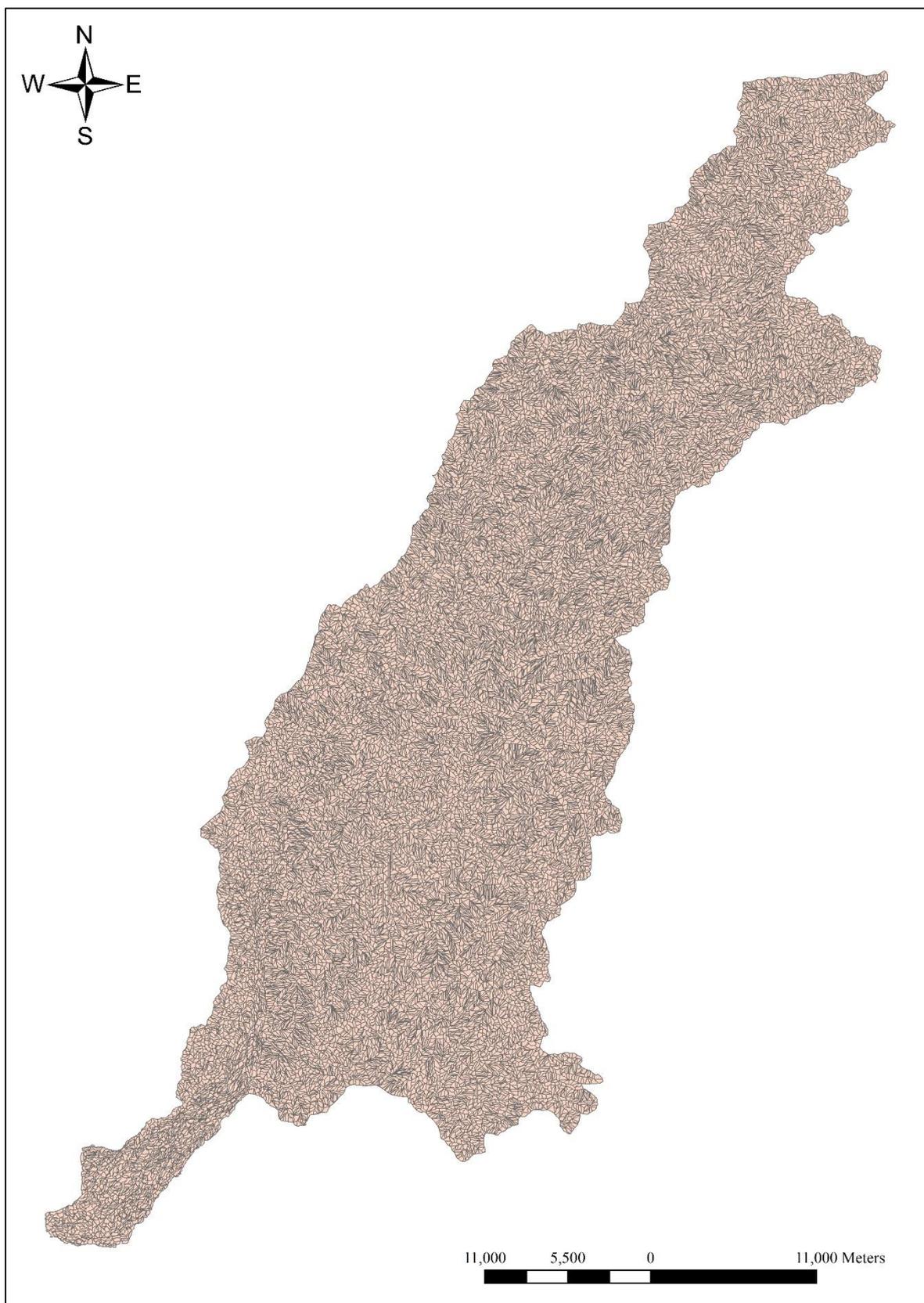


圖 2- 58 荖濃溪集水區之坡面單元

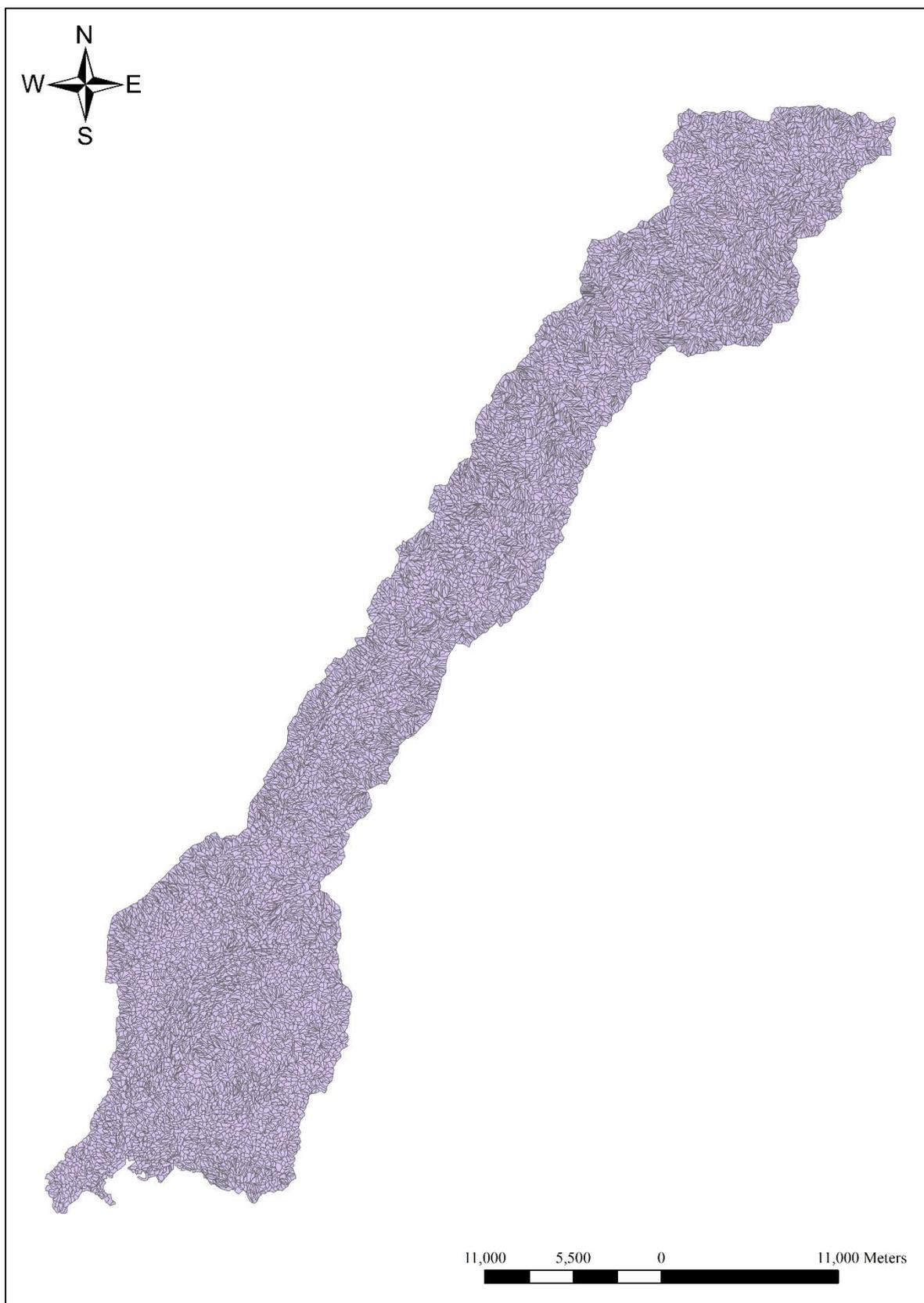


圖 2- 59 旗山溪集水區之坡面單元

一、坡面之雨量定義

前述已說明雨量因子的推估，本研究對於坡面單元之雨量因子，採用坡面單元內之平均雨量。使用平均雨量是因為若採用坡面單元內最大雨量值，會放大坡面單元的雨量值，會有較多高降雨低崩塌之事件產生；若採用最小雨量值，則易產生低降雨高崩塌之事件。

對於 $I_1 - R_{te}$ 雨量推估，以辛樂克颱風在陳有蘭溪、荖濃溪和旗山溪集水區中之坡面單元雨量分布為例，其雨量推估分布圖如圖 2- 60 至圖 2- 62 所示。而莫拉克颱風在陳有蘭溪、荖濃溪和旗山溪集水區中之坡面單元雨量分布如圖 2- 63 至圖 2- 65 所示。

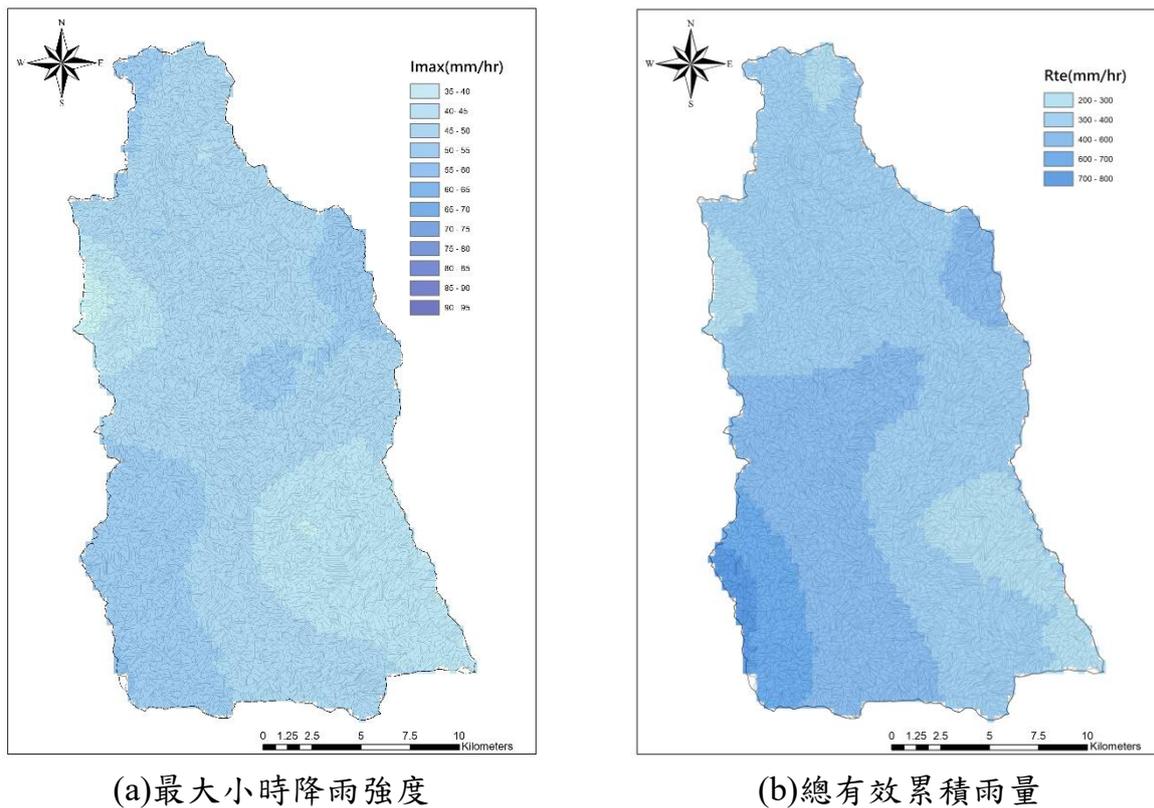
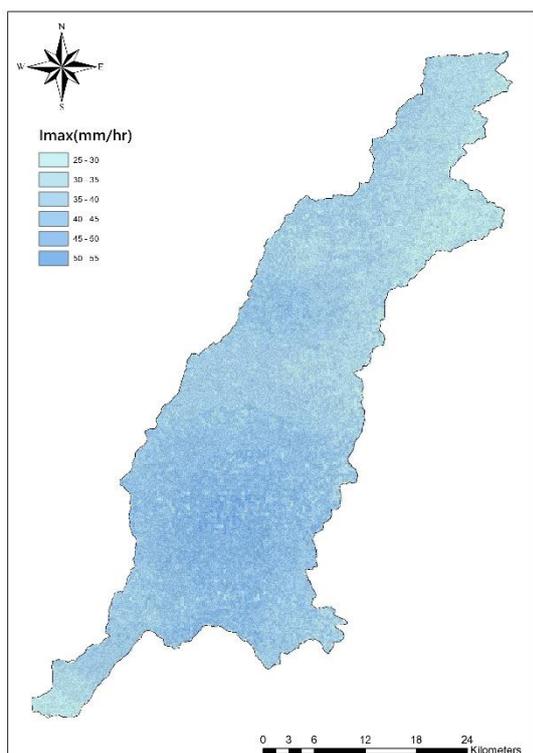
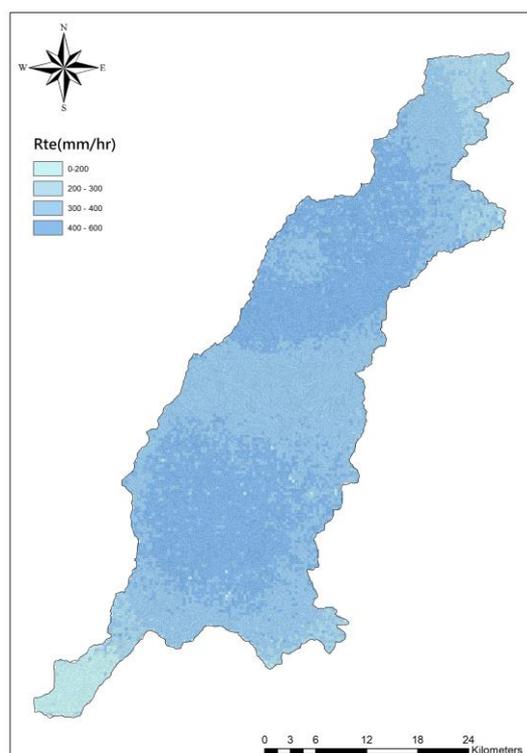


圖 2- 60 陳有蘭溪坡面單元辛樂克颱風雨量分布($I_1 - R_{te}$)

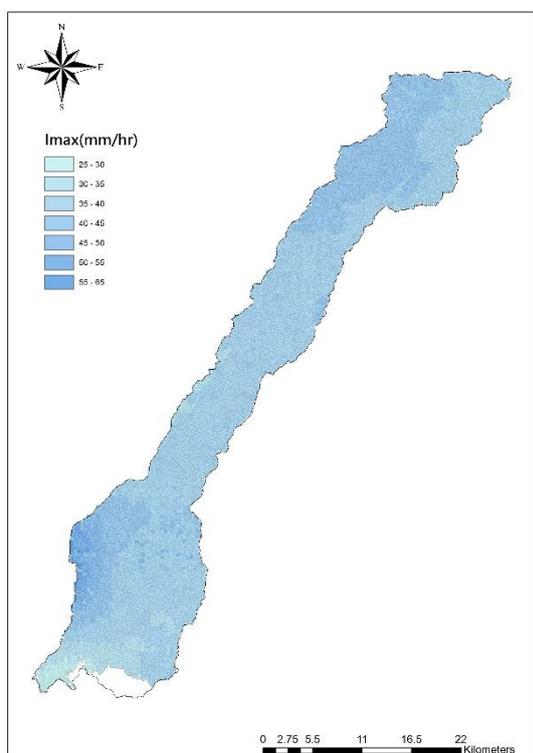


(a)最大小時降雨強度

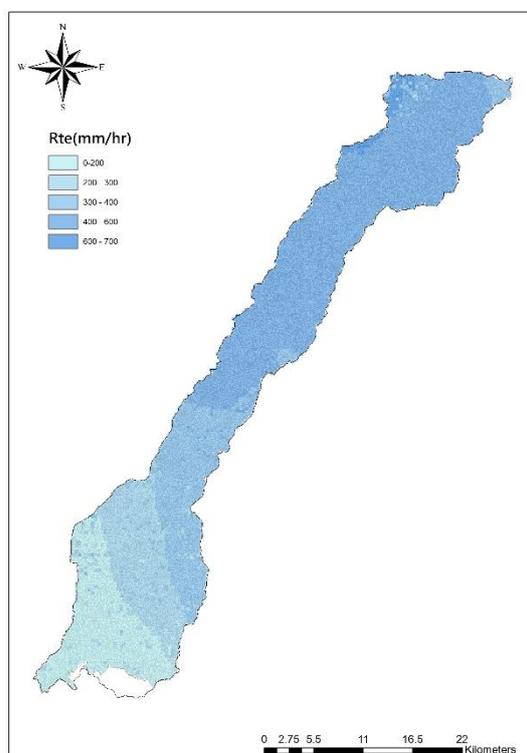


(b)總有效累積雨量

圖 2- 61 荖濃溪坡面單元辛樂克颱風雨量分布(I_1-R_{te})

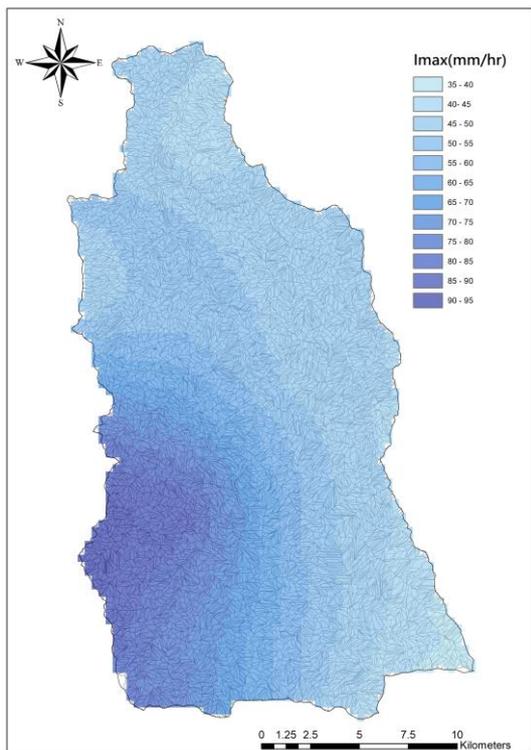


(a)最大小時降雨強度

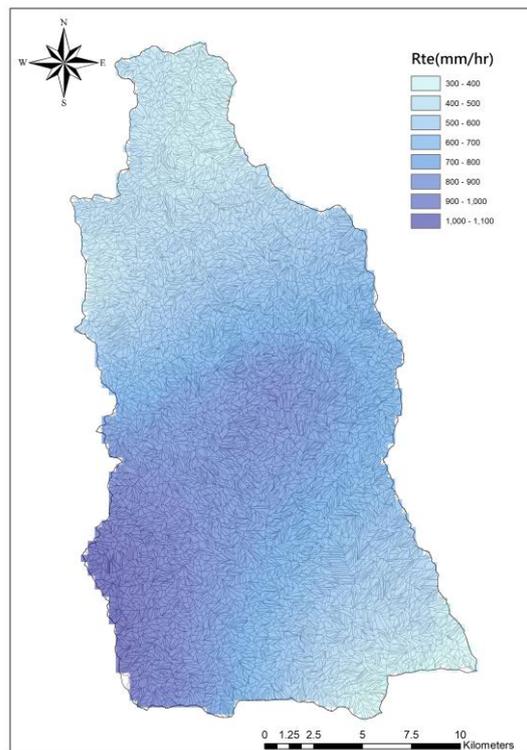


(b)總有效累積雨量

圖 2- 62 旗山溪坡面單元辛樂克颱風雨量分布(I_1-R_{te})

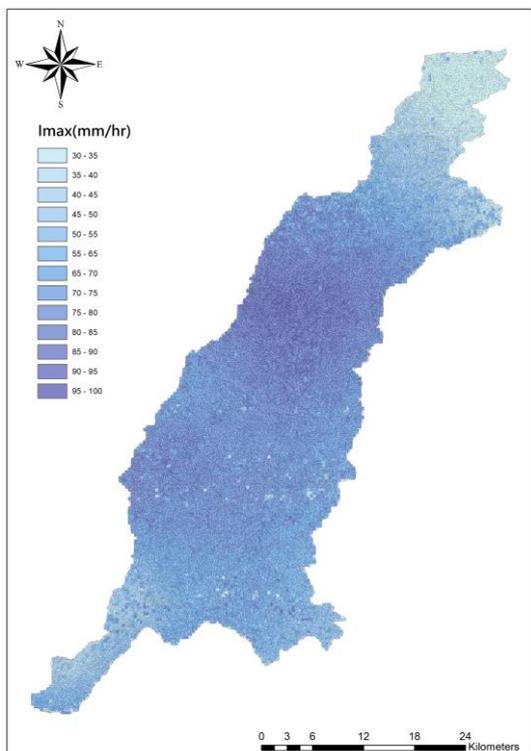


(a)最大小時降雨強度

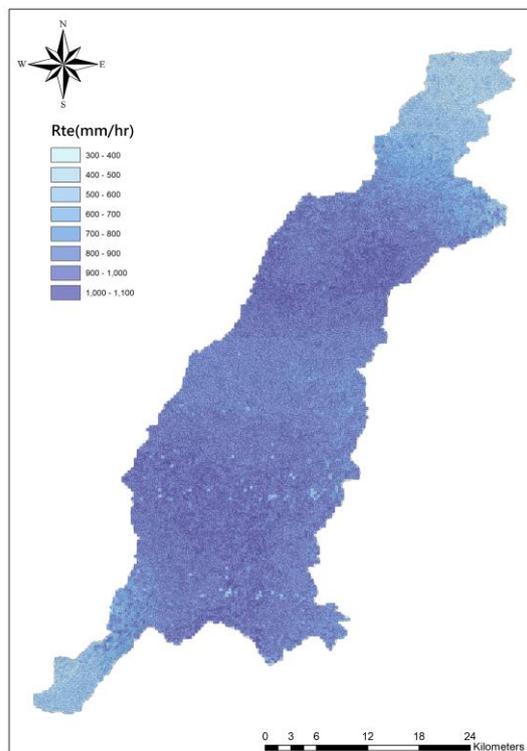


(b)總有效累積雨量

圖 2- 63 陳有蘭溪坡面單元莫拉克颱風雨量分布(I_1-R_{te})

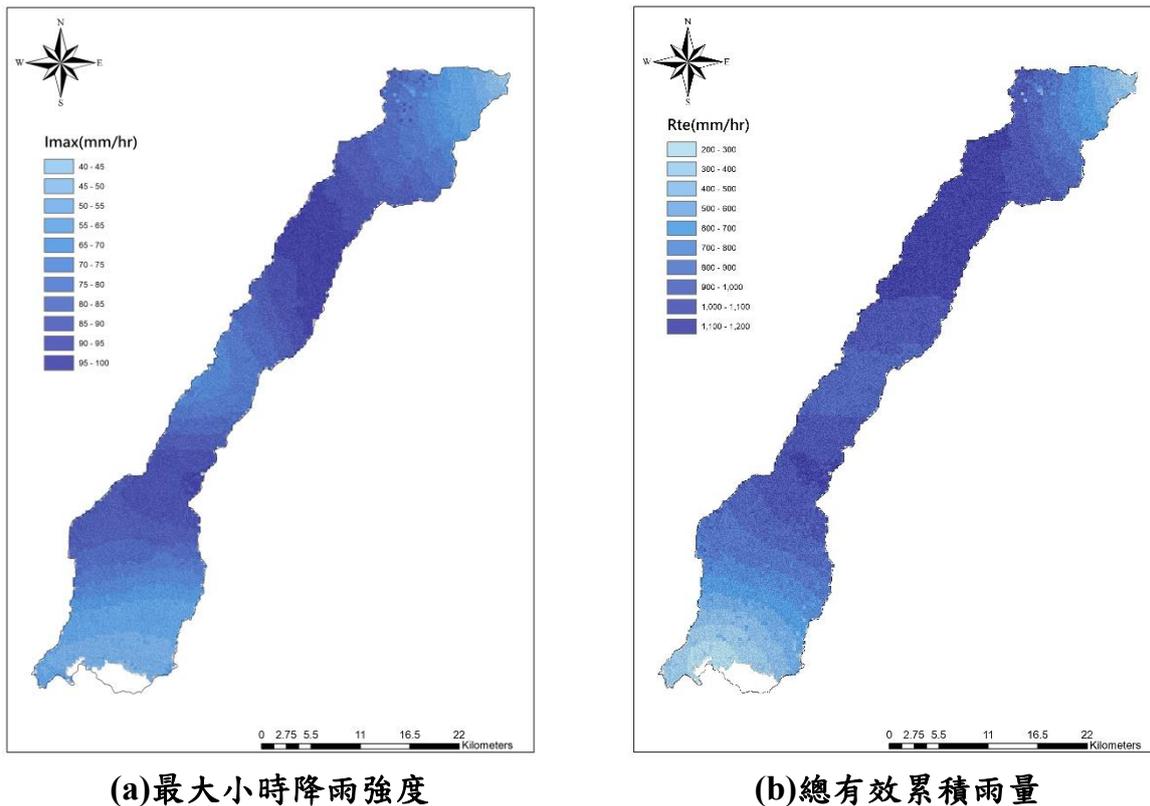


(a)最大小時降雨強度



(b)總有效累積雨量

圖 2- 64 荖濃溪坡面單元莫拉克颱風雨量分布(I_1-R_{te})

圖 2- 65 旗山溪坡面單元莫拉克颱風雨量分布(I_1-R_{te})

二、坡面單元崩塌定義

坡面單元必須針對坡面崩塌情形予以定義是否發生崩塌。由於崩塌是否發生必須以門檻值來決定，而門檻值又與崩塌體積和崩塌斜面積是相關的，因此必須將衛星影像判釋所得的平面投影崩塌面積與空間量體之崩塌體積的轉換關係予以考量。也就是說，衛星影像判釋並不能夠考慮地形地勢與崩塌深度(通常指最大深度的垂直距離)的影響，因此有必要予以修正。這個修正概念在過去已有許多研究者針對坡地崩塌斜面積、體積與深度的關係作過相關研究(例如 Evans and DeGraff, 2002; Imaizumi *et al.*, 2008; Guzzettiet *et al.*, 2009; 經濟部水利署, 2006, 2010, 2011)。以經濟部水利署(2006, 2010, 2011)針對石門水庫集水區與高屏溪集水區崩塌地深度與坡度相關研究為範例，藉由野外量測結果發現崩塌地深度與坡度呈現鐘型曲線，坡度在 30-40 度之間崩塌深度最大，且在相同的坡度間距內深度變異相當大，如圖 2- 66 所示。

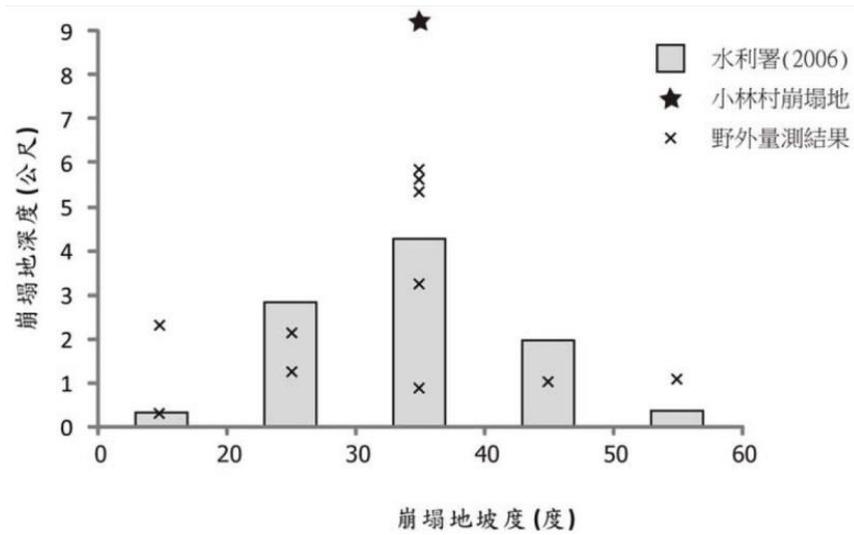


圖 2-66 崩塌地坡度與深度分佈

(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)

過去研究結果顯示崩塌地深度與坡度具有一定相關性，通常坡度越大崩塌深度有越大的趨勢、崩塌體積亦越大。因此崩塌體積、斜面積與崩塌深度是有一定關係的，如圖 2-67 所示，若可獲得崩塌體積與斜面積關係式，即可進一步以崩塌體積估算不同坡度下之崩塌斜面積，進而估計出可能的崩塌面積(水平投影面積)，這個崩塌投影面積也就是影像判釋所得之崩塌面積。

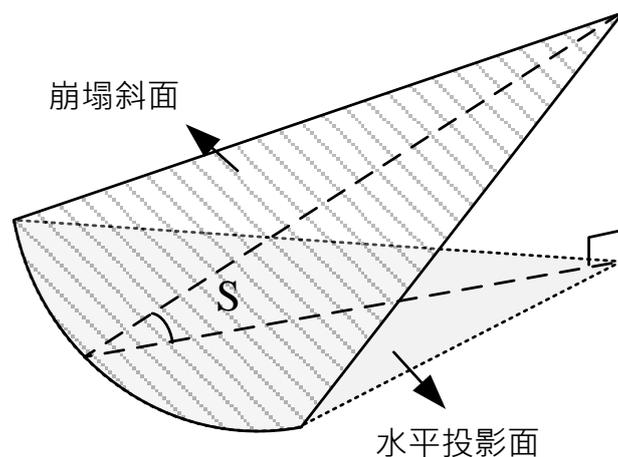


圖 2-67 崩塌塊體斜面與投影面關係示意圖

據此，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崩塌斜面積關係式，由於是經驗公式，因此並未考慮深度因子：

$$V = 0.2 \times A^{1.3} \quad (2-2)$$

式中， V 為崩塌體積(立方公尺)； A 為崩塌斜面積(平方公尺)；相關係數為 0.84。此公式可藉由崩塌斜面積推估大約的崩塌體積，亦可藉由崩塌體積反算可能崩塌斜面積，再由已知的坡度估計崩塌面積。本年度計畫中對坡面單元是否崩塌之定義，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)，將崩塌體積期望值取整數定為 $V=6,000$ 立方公尺，藉由式(2-2)計算得到崩塌斜面積並由坡度估計崩塌面積，結合崩塌率(崩塌面積/斜坡單元的水平投影面積)和判釋所得之崩塌面積以試誤法得到最佳門檻值組合：

- (一) S1類坡度：坡面單元崩塌率達5%，或崩塌投影面積達0.28公頃者判定坡面單元為崩塌；其餘為未發生崩塌。
- (二) S2類坡度：坡面單元崩塌率達5%，或崩塌投影面積達0.24公頃者定坡面單元為崩塌；其餘為未發生崩塌。
- (三) S3類坡度：坡面單元崩塌率達5%，或崩塌投影面積達0.22公頃者判定坡面單元為崩塌；其餘為未發生崩塌。

所得各集水區在 97-105 年度間之颱風豪雨事件下坡面單元崩塌分級如圖 2-68 至圖 2-75 所示。

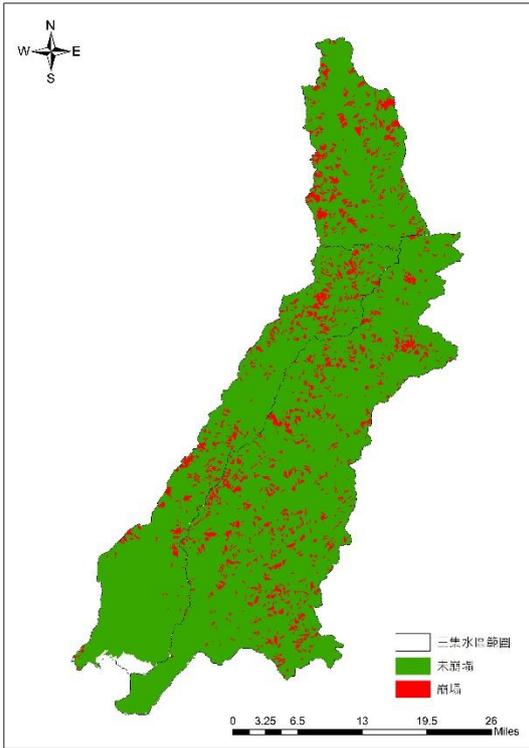


圖 2-68 97 年度至 98 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈

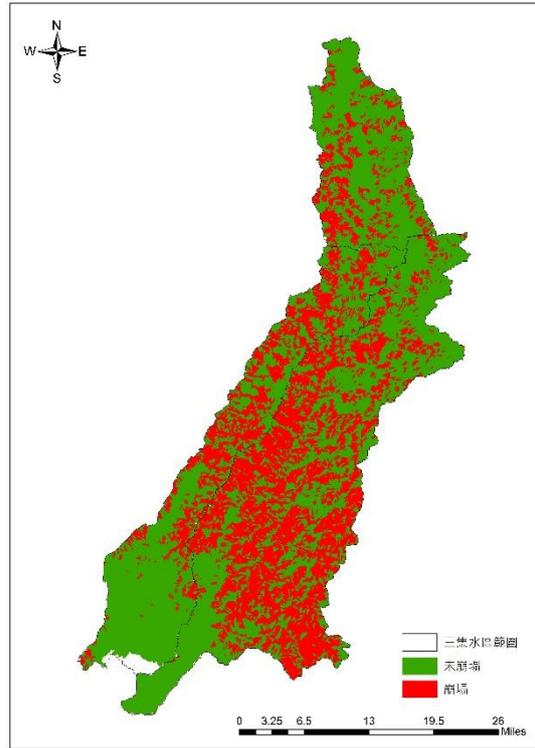


圖 2-69 98 年度至 99 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈

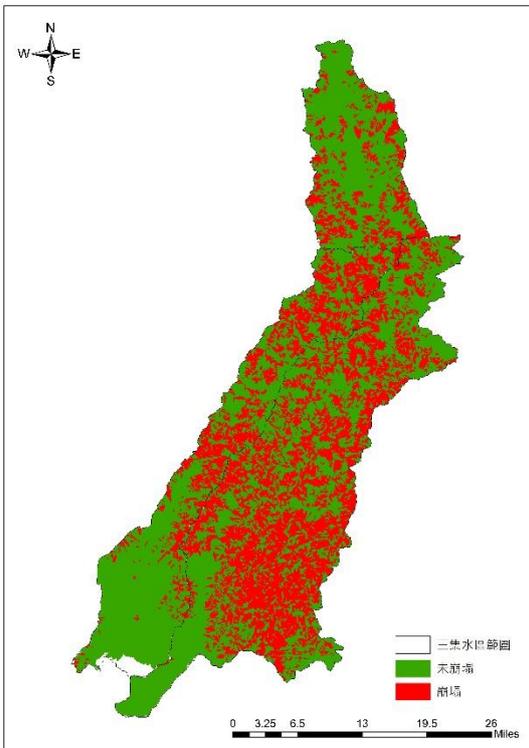


圖 2-70 99 年度至 100 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈

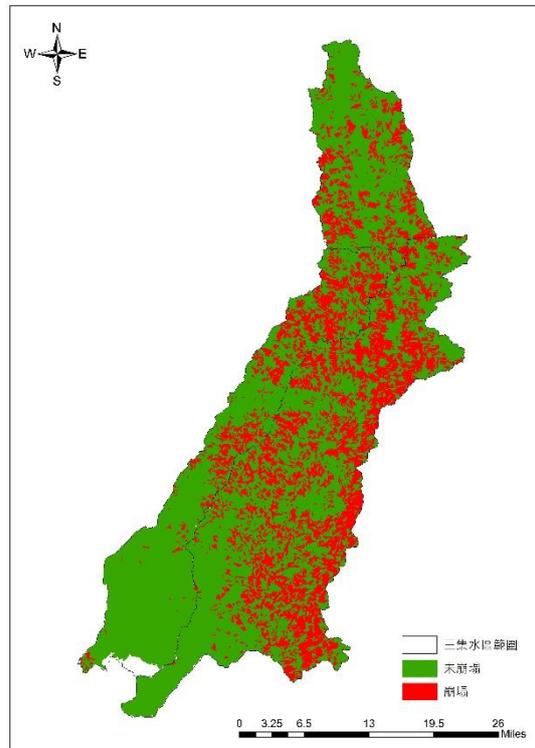


圖 2-71 100 年度至 101 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈

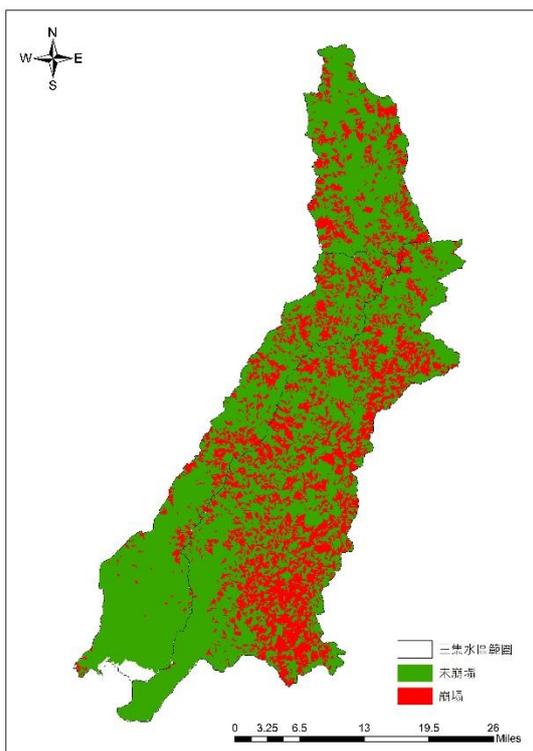


圖 2-72 101 年度至 102 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈

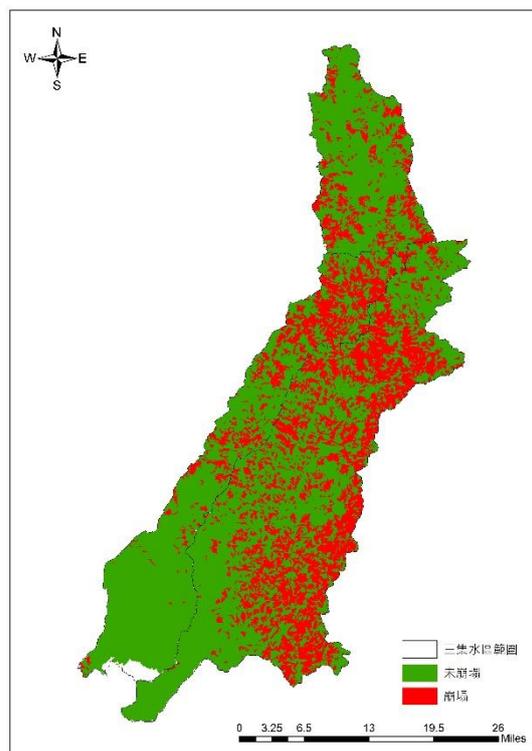


圖 2-73 102 年度至 103 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈

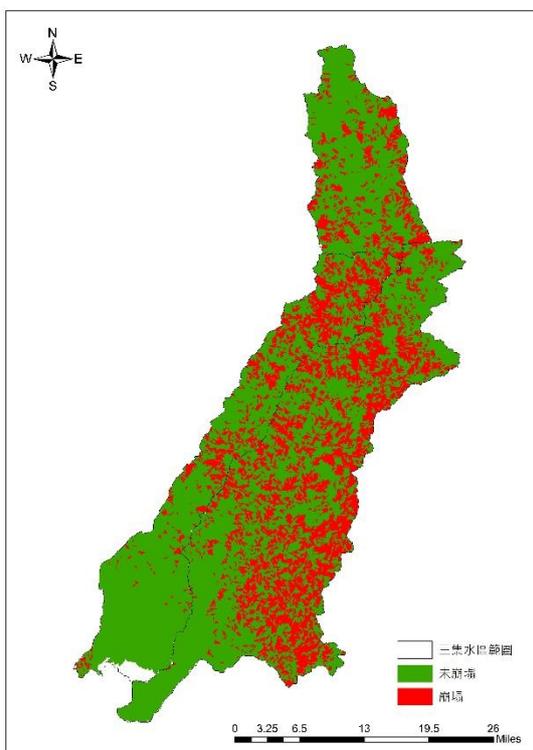


圖 2-74 103 年度至 104 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈

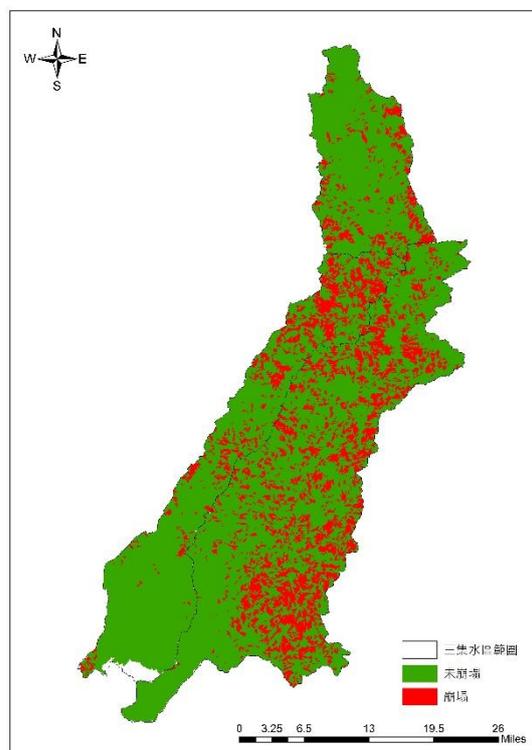


圖 2-75 104 年度至 105 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈

第三章 坡地崩塌風險評估模型建立

基本上坡地災害警戒範圍的訂定規劃內容不外乎掌握災害的時間範圍與空間範圍兩個方向，通常時間範圍的推求可說是警戒管理基準值訂定問題，也就是當降雨量在逐步增加到某種階段時，人們應當進行某種的處置作為；而空間範圍的推求就更為直接，也就是當雨量逐步增加到某一種階段時，何處是空間上的危險範圍，且在危險範圍內有多少人應當進行某些的處置作為，因此本節的核心目的則是如何建立重點聚落崩塌風險評估模式？而這個崩塌風險評估模式未來可供重點聚落警戒與預警之用。

所謂的災害風險就是指遭受損失的可能性，國內近年來亦嘗試把風險的概念導入災害或安全管理範疇中，林新皓(2006)以土石流潛勢溪流集水區中所產生之土砂量，計算土石流淹沒範圍，及土石流淹沒範圍內所造成的災害損失，進行風險值之評估，陳樹群、王价巨等(2006)提出以土石流危害度評估、易致災性分析及承受度評估等三部份作為土石流風險評估，以作為風險管理決策之參考。陳振宇(2007)亦提出風險管理於土石流減災工程效益評估之具體明確之作法，並提出於土石流疏散避難決策之應用。冀樹勇等(2008)亦將風險管理之理念導入天然災害之管理上，陳天健等(2009)亦嘗試將風險管理與風險分析之方法應用於坡地災害管理上。

過去的研究顯示藉由危害度分析結果與易損性分析結果的結合，可決定出風險值的高低，而一個風險估算可以設計成矩陣表的形式(施鴻志，2002)(如表 3-1)之形式。陳亮全等(2003)依據不同之地震危險潛勢、災感度與風險分布，透過風險-效益分析的方式，估計不同土地使用方案轉變，以及潛藏效益變動之風險。周士雄(2004)以權重值調整實證地區之土壤液化災害發生機率，及暴露於此災害機率下的社經傷害程度大小，運用多準則分析(MCDA)方法利用排序、評點與加權的方法得到完整的風險分數，提出具有各風險效益優勢的土地使用組合方案，並評估以民眾所能接受之風險減緩

措施後，決定不同之管理決策。

表 3-1 簡化的風險矩陣

易損性機率	危害程度		
	高	中	低
高	非常高風險	高風險	一般風險
中	高風險	一般風險	低風險
低	一般風險	低風險	非常低風險

資料來源:Brookes, A.,2001

因此本研究對於崩塌風險警戒機制模式設計上，同樣也是採取建立所謂的風險矩陣的概念來建立崩塌風險評估模式，也就是所謂的崩塌風險管理圖(Landslide Risk Management Diagram, LRMD)的概念來建立崩塌警戒模式，以下將說明如何建立的各雨量站之崩塌降雨**危害評估模型(H)**以及坡地崩塌**潛勢評估模型(F)**後，並用於建立崩塌風險警戒機制評估指標上(如下圖 3-1 所示)，初步配合真實致災紀錄作為最小致災門檻臨界值，在此研究稱為降雨**危害度最小致災門檻值(H_c)**以及坡地崩塌**潛勢最小致災門檻值(F_c)**，就可繪製其一崩塌風險警戒機制圖，其中 X 軸所指的是降雨危害值(範圍從 0 到 1)，Y 軸所指的是坡地崩塌潛勢機率值(範圍從 0 到 1)，在這崩塌風險警戒機制圖中，透過降雨危害警戒曲線(HCL)及崩塌易損評估曲線(FCL)的劃定，其可分為安全、紅一警戒以及紅二警戒，關於各評估指標警戒門檻訂定機制以及發布流程與說明將於第三節進行討論。

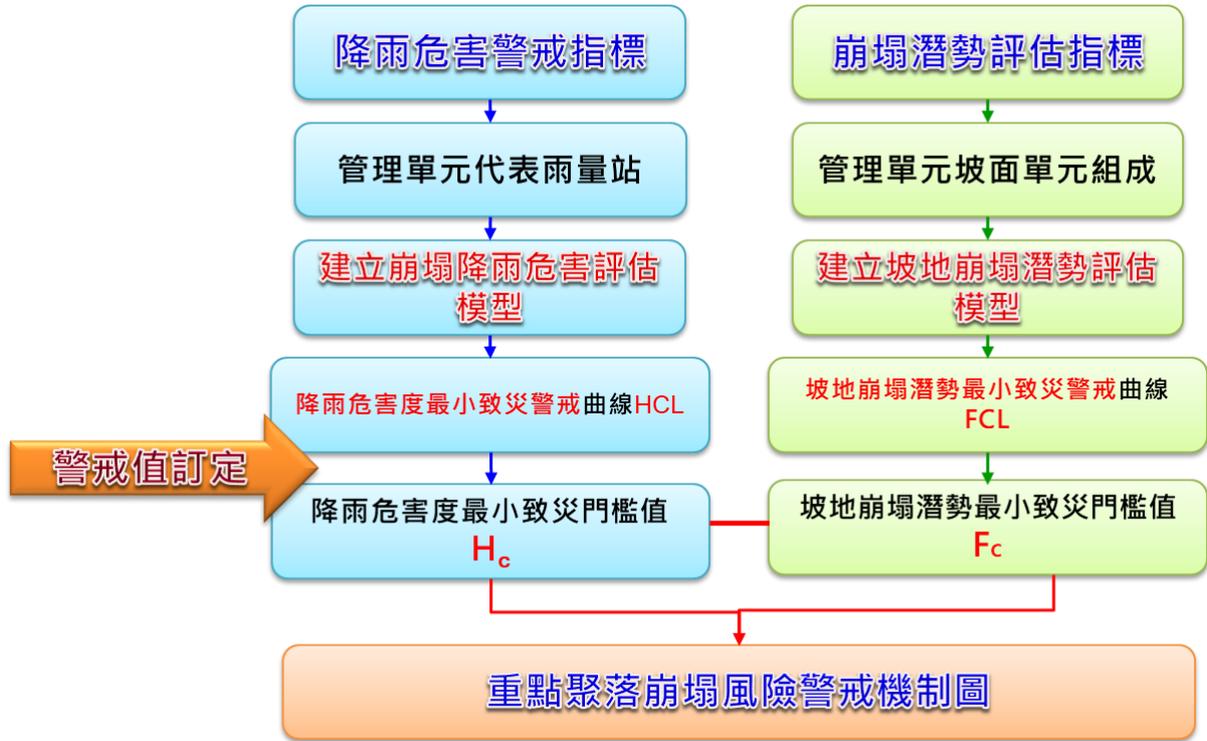


圖 3-1 坡地崩塌警戒模式評估指標建立流程

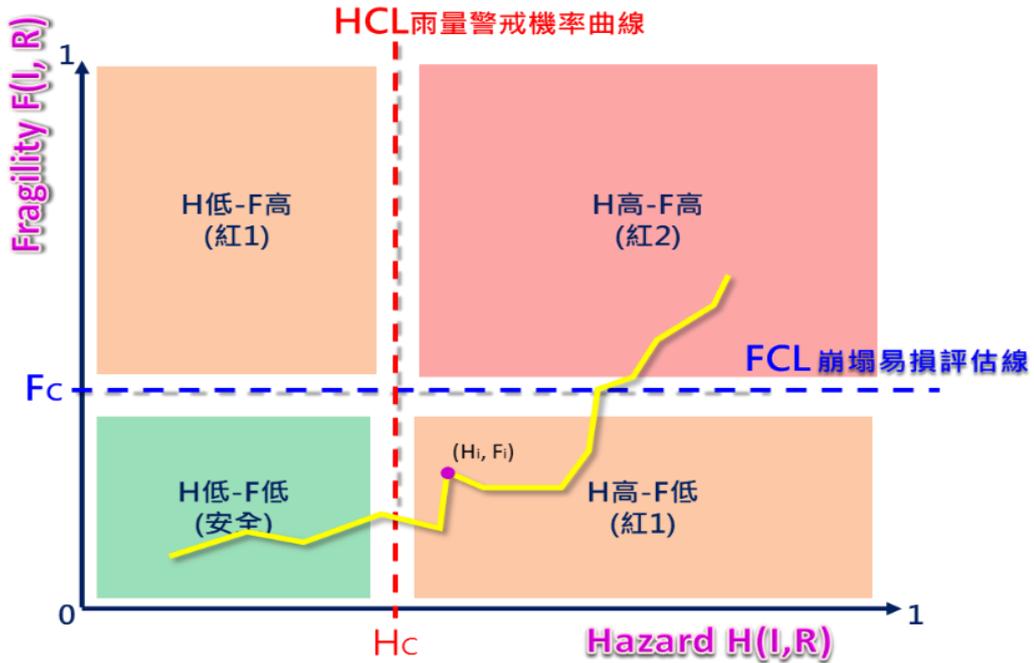


圖 3-2 崩塌風險警戒機制示意圖

第一節 崩塌降雨危害評估模型建立

由於土石流潛勢溪流都在山區，要實際量測土石流發生前溪流溝床內土體的孔隙水壓及地下伏流水狀況困難度很高，而降雨資料的取得又比孔隙水壓及地下伏流水資料來的容易。因此，在過去的研究中，大部份的研究人員都藉由土石流發生之前的降雨量（前期降雨）來間接說明土體的含水狀況（即孔隙水壓），直接探討降雨條件與土石流發生之關係，並利用降雨條件建立土石流發生降雨警戒關係式。因此本計畫團隊同理在分析崩塌災害發生降雨特性時，通常需考量崩塌發生當時的直接誘發雨量（包括降雨強度）及間接激發雨量（如前期降雨），並蒐集歷史 10 年間所有雨場之資料累積排序，透過聯合機率質量函數建立歷史雨量雙參數下之分布密度函數。

而此章以降雨資料及統計方法，分析單一聚落發生崩塌可能性的臨界降雨基準值，其中以 10 年間降雨資料作為建立雨量等比率曲線模式之基礎，歷史雨量資料庫依新年度持續更新，以反映近年氣候變化。

本計畫團隊針對南部集水區 13 處重點聚落管理單元最鄰近之雨量站（如下表 3- 2 所示）進行蒐集其民國 99 至民國 109 年間之時雨量及有效累積雨量資料，進行每小時降雨雨量處理，以及過去崩塌事件發生之時間資料作為本研究之基礎，雨量資料先進行雨場分割，建立各雨場之 $(\ln R, \ln I)$ 雨型組數據，並建立各重點聚落中歷史雨場之時雨量及有效累積雨量之聯合機率質量函數，以下將先分述本計畫雨量資料處理方法：

表 3-2 南部集水區 13 處重點聚落對應之鄰近雨量站表

重點聚落			對應雨量站
鄉(鎮、區)	村(里)	聚落	
桃源區	寶來里	竹林(16、17 鄰)	高中 C1V231
桃源區	寶山里	新藤枝	御油山 C1V300
桃源區	寶山里	舊藤枝	御油山 C1V300
桃源區	梅山里	梅山口	梅山 C1V200
桃源區	寶山里	寶山	御油山 C1V300
信義鄉	神木村	神木	神木村 C0H9A0
信義鄉	豐丘村	豐丘(信義)	豐丘 C1H290
那瑪夏區	瑪雅里	瑪雅	那瑪夏國中 81V830
那瑪夏區	達卡努瓦里	達卡努瓦	達卡努瓦(民生)C1V160
那瑪夏區	南沙魯里	南沙魯	那瑪夏國中 81V830
甲仙區	東安里	白雲巷	新發 C1V590
六龜區	新發里	新發部落山邊	新發 C1V590
六龜區	興龍里	新開部落(26 鄰)	新發 C1V590

一、雨場分割方法

降雨事件是由大大小小不連續的時間序列所組成，在分析雨量資料之前，需先選定一種雨場分割方法作為一場連續降雨的定義，才能進一步計算影響土石流發生之各種降雨因子。而本研究將一降雨時間序列中以時雨量大於 4mm 為本次降雨開始時刻，再以時雨量連續六小時均小於 4mm 為該雨場結束時刻，降雨開始時刻至降雨結束時刻為本次之降雨延時，定義為一次雨場。此方式亦為目前水土保持局分割雨場之方法，如下圖 3-3 所示。

本計畫採用之雨量站經雨場分割後結果，在 99 年至 109 年雨量資料中屈尺雨量站共分割為 812 個雨型組，桶後雨量站共分割為 804 個雨型組，高中雨量站共分割為 632 個雨型組，御油山雨量站共分割為 808 個雨型組，梅山雨量站共分割為 605 個雨型組，神木村雨量站共分割為 756 個雨型組，豐丘雨量站共分割為 577 個雨型組，民生雨量站共分割為 543 個雨型組，表湖雨量站共分割為 513 個雨型組，新發雨量站共分割為 678 個雨型組，

上德文雨量站共分割為 692 個雨型組以及瑪家雨量站共分割為 565 個雨型組。

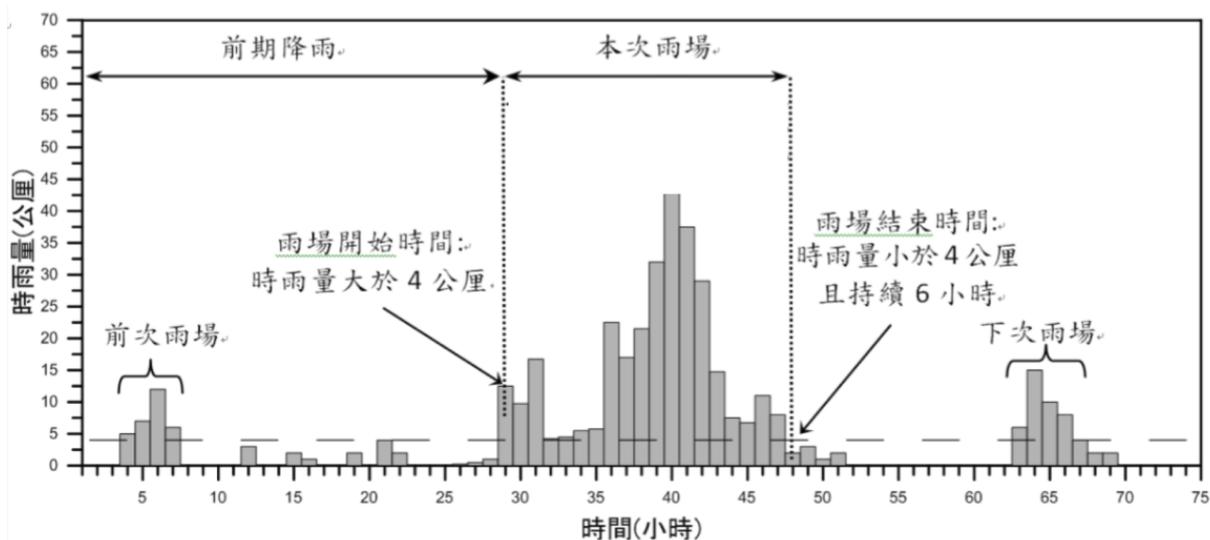


圖 3-3 本計畫採用之雨場分割方法示意圖

資料來源：李明熹（2006）

二、雨量資料處理方法

本計畫團隊所使用之降雨資料包含長期降雨指標（有效累積雨量）及短期降雨指標（時雨量，降雨強度），並透過雨場分割之方式，求取各雨場之最大小時降雨強度與其對應總有效累積降雨(I_l, R_{te})，定義如下表 3-3 所示，其資料處理方法說明如下。

表 3-3 I_l-R_{te} 之降雨因子定義

降雨因子名稱	代號	定義
最大小時降雨強度	I_l	本次降雨開始時刻後之最大小時降雨強度
對應 I_{max} 之總有效累積降雨	R_{te}	本次降雨開始時刻前七天的加權降雨量(註 1)與開始時刻至最大小時降雨強度前一時刻之累積雨量之和

註 1：加權雨量係前七天降雨量每日折減 0.7，即每日(每 24 小時之總和)折減；例如前 3 日之降雨應折減權重為 0.7^3 ，前 2 日之降雨應折減權重為 0.7^2 。

(一) 時雨量

本研究之降雨指標之一為降雨強度，一般而言均採用時雨量代表降雨強度，本研究將其定義為 (I)，本研究之時雨量資料為向水土保持局申請，

取自土石流防災應變系統介接中央氣象局之時雨量資料，其資料單位為公釐（mm）。

(二) 有效累積雨量

根據前人研究，除了崩塌發生時刻的短歷時直接激發雨量外，本次降雨開始時刻前七天的加權降雨量與開始時刻至最大小時降雨強度前一時刻之累積雨量之和，是本次降雨事件中對崩塌發生有直接貢獻之長期降雨指標，其降雨量稱為本次前段降雨累積雨量。本次降雨開始時刻之前的降雨（本次降雨的前期降雨），會影響土體的含水程度，而土壤中含水量的多寡有助於土體的滲透速率，產生較高的孔隙水壓，降低土體的抗剪強度。因此，如果沒有足夠的前期降雨量就不會發生崩塌。由此可知，前期降雨對崩塌的發生也有相當程度的影響，而且越接近本次降雨事件的前期降雨，對激發本次崩塌所需的降雨強度影響越大。反之，越遠離本次降雨事件的前期降雨對激發本次崩塌所需的降雨強度影響越小。而大多數的研究者會以一衰減係數 α 乘上土石流發生時刻前 7 日至 20 日不等之日降雨量，累加後代表影響此場崩塌發生的前期降雨。

水土保持局以有效累積雨量作為發佈土石流警戒之依據，本研究亦以水土保持局之有效累積雨量計算方式進行計算，而非單一雨場之累積雨量，標註為 (R_t) ，有效累積雨量其公式如下：

$$R_t = \sum_{i=0}^7 \alpha^i R_{t_i} \quad (3-1)$$

其中， R_0 為該時刻之前 0-24 小時之累積雨量， R_1 為該時刻之前 25-48 小時之累積雨量，其餘以此類推， α 為加權係數 $\alpha=0.7$ ，本研究之有效累計雨量係根據前述取得之時雨量資料依據 (3-1) 式進行計算。

(三) 降雨資料標準化

本研究將各雨場之降雨強度(最大小時降雨強度(I_{\max} : mm/hr)與有效累積

降雨在一個二維坐標軸上展現，而由於時雨量與有效累積降雨之數值範圍差異頗大，時雨量資料範圍在 0mm 到 80mm 之間，有效累積降雨資料範圍在 0mm 到 2,200mm 之間，如直接使用資料進行分析會造成有效累積降雨之影響遠大於時雨量，失去雙因子分析之意義，為避免此狀況發生應進行資料標準化 (Normalization)。然而，一般的資料標準化需計算整個雨場之時雨量及有效累積降雨個別之平均數及標準差，亦即需雨場結束後才能進行分析，而本研究建立崩塌預警臨界線之意義在於能在應變期間雨場尚未結束前能作為預警之用。因此，一般的資料標準化不適用於本研究。本研究為解決此問題，將時雨量及有效累積降雨取自然對數後之數值作為降雨指標。

常用對數 (以 10 為底) 主要是用於日常生活、工程、乘除、乘方和開方的計算，對數的好處是可以把數字縮小，也可以把比較複雜的乘法、除法變成比較簡單的加法、減法。自然對數 (Natural Logarithm) 主要是用於數學 (例如微積分)、自然科學和生物學的計算。

自然對數是以 e 為底數 (e 等於 2.71828...) 的對數函數，自然對數的一般表示方法為 $\ln x$ 或 $\log_e(x)$ ，其函數圖像如圖 3-4 (a)，其逆函數是指數函數 e^x 。 $\ln(a)$ 正式定義為積分 (圖 3-4 (b))。

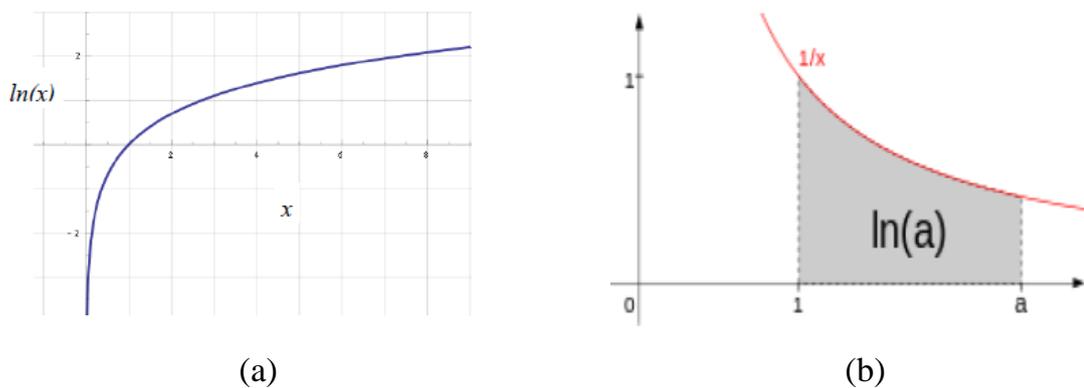


圖 3-4 自然對數 $\ln(x)$ 的函數圖像

本研究將時雨量代入 (3-2) 式取自然對數後之原始數值定義為 ($\ln I_o$)，以及有效累積降雨取自然對數後之原始數值定義為 ($\ln R_{t_o}$)，可將雨量

資料之定義域縮限於 0 到 10 之間。

$$\ln(a) = \int_1^a \frac{1}{x} dx \quad (3-2)$$

(四) 降雨資料分組方法

為簡化研究之複雜度，並利於後續建立聯合機率質量函數及聯合累積分布函數，本研究將前述產生之 $\ln R_{t_0}$ 及 $\ln I_0$ 原始數據進行分組，將資料的定義域設定為 0 至 10 之間，並以 0.1 為間距， $\ln R$ 設為 X 軸， $\ln I$ 設為 Y 軸，並將原始雨量資料中各組 ($\ln R_{t_0}$, $\ln I_0$) 資料利用 (3-3) 式計算並對應到距離最短之分組點，並以該分組點之數值代替原有之 $\ln R_{t_0}$, $\ln I_0$ ，並稱將分組後之成對 ($\ln R_t$, $\ln I_t$) 資料為「雨型組」。

$$dIR_{t_{ij}} = \sqrt{(\ln R_{t_0} - \ln R_{t_i})^2 + (\ln I_0 - \ln I_j)^2} \quad i, j = 1 \text{ to } 2 \quad (3-3)$$

$$\text{MinIR}_{t_{ij}} = \text{Min}\{dIR_{t_{ij}}\}$$

當 dRt 最小時，將原數值更新為 ($\ln R_{t_i}$, $\ln I_j$) 雨型組。為方便後續表述，本研究以大寫 LR , LI 代表對數化分組後有效累積及對數化分組後時雨量兩變數，以小寫 ($\ln R$, $\ln I$) 代表數值。

三、聯合機率質量函數及聯合累積分布函數

時雨量及有效累積雨量資料分別取對數並分組後即轉換為成對的離散隨機變數，本研究稱之為雨型組，本研究主要針對十年間雨場之雨型組進行分析，求得各降雨型態（雨型組）之分布機率，因此需計算雨型組之聯合機率質量函數及聯合累積分布函數。

聯合機率質量函數 (Joint Probability Mass Function, jpmf) 為能直接描述兩個或多個離散隨機變數之共同特性之函數。讓 X 與 Y 為二維離散隨機變數 (在本研究即為 LR 與 LI 兩變數)，並假設其數值 (x_i, y_j) 為可數無窮多個 (在本研究即為 ($\ln R_{t_i}, \ln I_j$))，即 $i, j = 1, 2, \dots$ ，且所對應的機率均不為零。則對

所有的*i,j*而言，X 與 Y 的聯合機率質量函數定義為：

$$p_{xy}(x, y) = p(X = x \cap Y = y) \quad (3-4)$$

(2-4)式只有在點(*x_i,y_j*),*i,j=1,2,...* 才有值，且等同於聯合機率 $P(X=x \cap Y=y)$ 。其他定義如下：

$$\begin{aligned} 0 < p_{XX}(x, y) &\leq 1 \\ \sum_i \sum_j p_{XY}(x_i, y_j) &= 1 \\ \sum_i p_{XY}(x_i, y) &= p_Y(y) \\ \sum_j p_{XY}(x, y_j) &= p_X(x) \end{aligned} \quad (3-5)$$

其中(3-5)式的最後兩個關係式，即 $p_Y(y)$ 與 $p_X(x)$ ，又稱為邊界機率質量函數 (marginal probability mass function)。至此，可推得：

$$F_{XY}(x, y) = \sum_{i=1}^{i:x_i \leq x} \sum_{j=1}^{j:y_j \leq y} p_{XY}(x_i, y_j) \quad (3-6)$$

(3-6) 式即為聯合累積分布函數 (Joint Cumulative Distribution Function, JCDF)，聯合累積分布函數性質：

1. 聯合累積分布函數皆為非負值

$$F_{XY}(x, y) \geq 0, \forall x \in R, y \in R$$

2. 聯合累積分布函數的上限為 1

$$F_{XY}(x, y) \leq 1, \forall x \in R, y \in R$$

3. 聯合累積分布函數為單調遞增函數

$$F_{XY}(x_1, y_1) \leq F_{XY}(x_2, y_2), \forall x_1 \leq x_2, y_1 \leq y_2$$

4. 聯合累積分布函數為右連續函數

$$\lim_{x \rightarrow a^+} F(x, y) = F(a, y)$$

$$\lim_{y \rightarrow b^+} F(x, y) = F(x, b)$$

5. 聯合累積分布函數的極限值為 1 或 0

$$\lim_{\substack{x \rightarrow \infty \\ y \rightarrow \infty}} F_{XY}(x, y) = F(\infty, \infty) = 1$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x, y) = F(-\infty, y) = 0$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x, y) = F(x, -\infty) = 0$$

四、聯合機率質量函數及聯合累積分布函數

前述雙因子可建立三維空間聯合累積分布曲面，其三維空間圖形為從座標原點像右上方逐漸凹陷之曲線，X 軸為 $\ln Rt$ ，Y 軸為 $\ln I$ ，Z 軸為機率值，而定義某一機率值，可在曲面上找出與該機率值相同之點，進而繪出等高線（等機率線），其定義如下：

$$\{(\ln Rt, \ln I) | S_{LR, LI}(\ln Rt, \ln I) = k\} \quad (3-7)$$

其中 k 為在 $S(\ln Rt, \ln I)$ 值域中的數值。

從三維空間聯合累積分布曲面之等高線可映射到二維空間。每一條機率曲線本研究定義為此線上所對應之 $\ln I$ 以及 $\ln R$ 為歷史降雨規模百分比，換句話說當 $\ln I$ 以及 $\ln R$ 越大，則曲線百分比則會越大，即為該 $\ln I$ 以及 $\ln R$ 為出現在過去雨場規模位的第 x 百分比。因此，映射到二維空間之機率曲線即可作為崩塌預警臨界曲線設定之基礎。

經上述建立雨量等機率曲線模式架構後，以下為各重點聚落之雨量等機率曲線建立成果。將各雨量站民國 99 至民國 109 年間之資料進行標準化等處理後，並基於全部歷史雨場之雨型組 $(\ln Rt_i, \ln I_j)$ 之聯合累積分布函數定義如下：

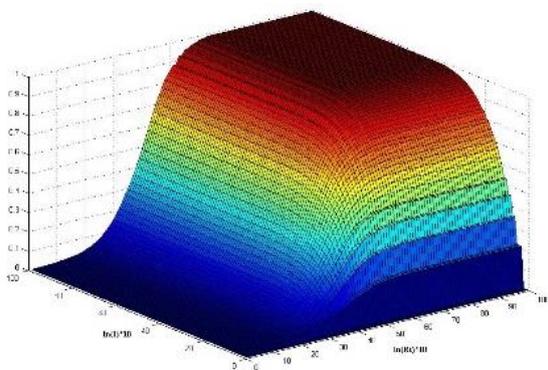
$$F_{\ln Rt, \ln I}(\ln Rt, \ln I) = \sum_{i=1}^{i: \ln Rt_i \leq \ln Rt} \sum_{j=1}^{j: \ln I_j \leq \ln I} p_{\ln Rt, \ln I}(\ln Rt_i, \ln I_j) \quad (3-8)$$

歷史雨場聯合累積分布函數分析成果實際上為 100×100 大小的矩陣。為方便運用，任一雨型組 $(\ln Rt_i, \ln I_j)$ 乘以 10 後對應到該矩陣之位置，即可求得對應的歷史降雨規模分布百分比。

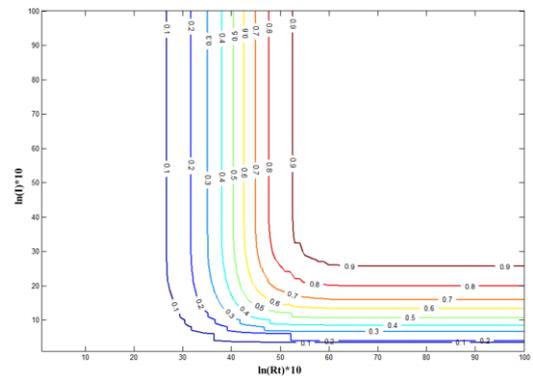
(3-8)式即為歷史雨場之聯合累積分布函數，本研究針基於 10 年雨量資料雨場之雨型組 $\ln R_t$ 與 $\ln I(\ln I_3)$ 聯合機率質量函數計算成果代入(3-8)式進行計算，建立 $FLR, LI(\ln R, \ln I)$ ，透過各雨量站 10 年間雨量資料建立之三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖，並將其三維空間映射至二維空間，以建立各聚落鄰近雨量站之歷史雨場等機率曲線圖。

五、各雨量站 $I_1 - R_{te}$ 歷史雨量等比率曲線建立

本計劃針基於 10 年雨量資料雨場之雨型組 $\ln R_t$ 與 $\ln I$ 聯合機率質量函數計算成果代入(3-8)式進行計算，建立 $FLR, LI(\ln R, \ln I)$ ，透過各雨量站 10 年間雨量資料建立之三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖，並將其三維空間映射至二維空間，以建立各聚落鄰近雨量站之歷史雨場($I_1 - R_{te}$)等比率曲線圖，本計劃針對南部 13 處重點聚落管理單元最鄰近之雨量站繪製各歷史雨場($I_1 - R_{te}$)等比率曲線圖如下所示：

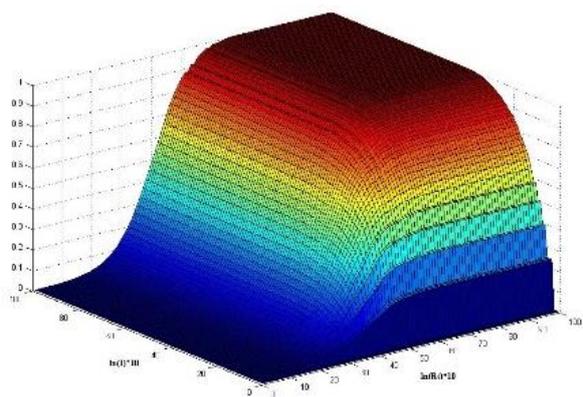


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

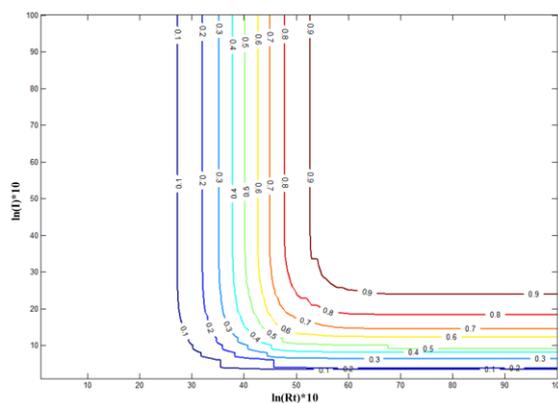


(b) 雨量等機率線

圖 3-5 屈尺雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面

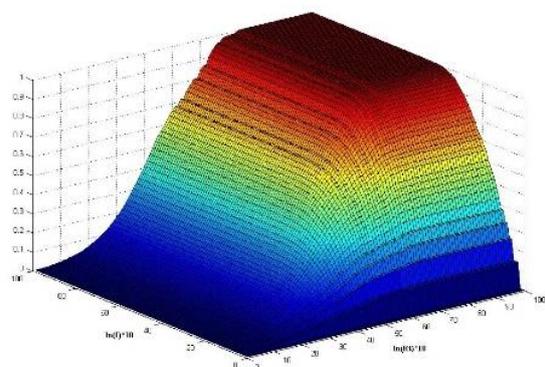


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

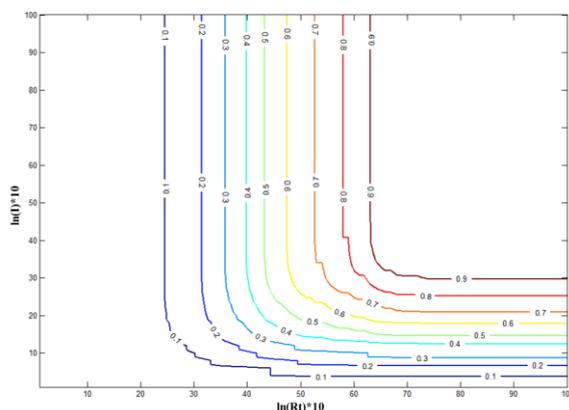


(b) 雨量等機率線

圖 3-6 桶後雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面

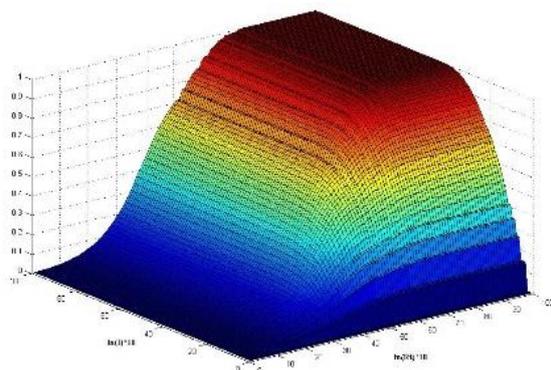


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

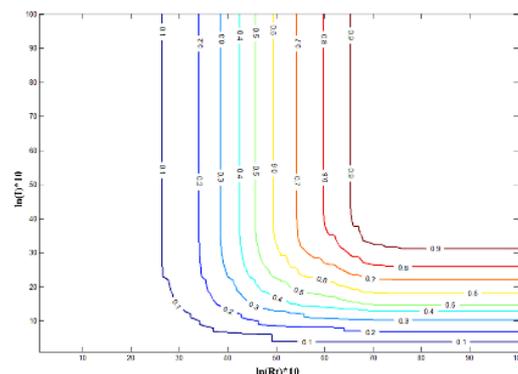


(b) 雨量等機率線

圖 3-7 高中雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面

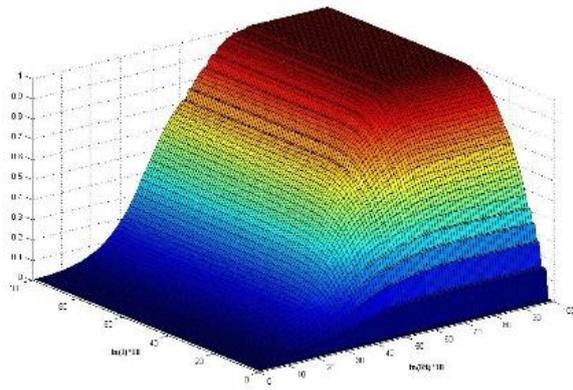


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

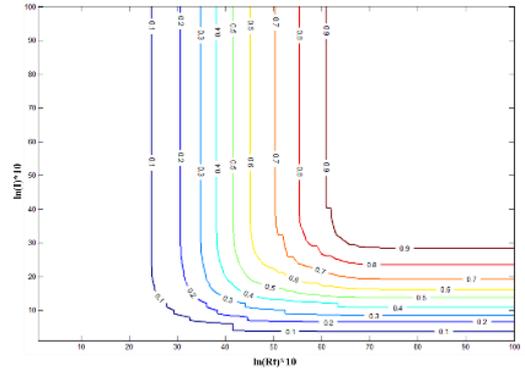


(b) 雨量等機率線

圖 3-8 御油山雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面

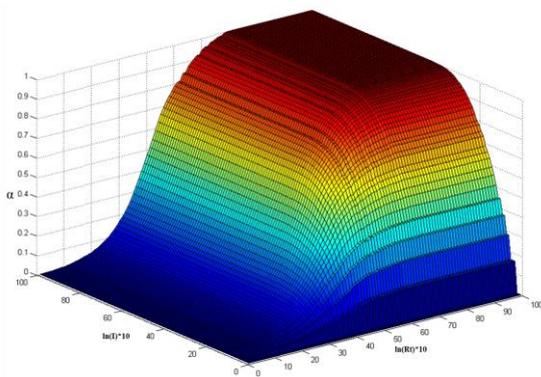


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

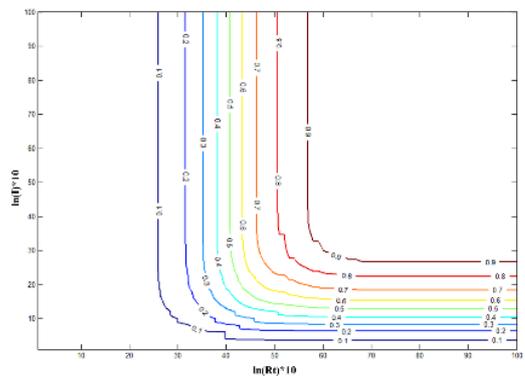


(b) 雨量等機率線

圖 3-9 梅山雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面

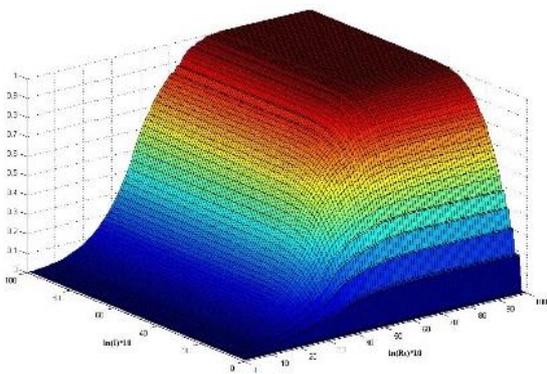


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

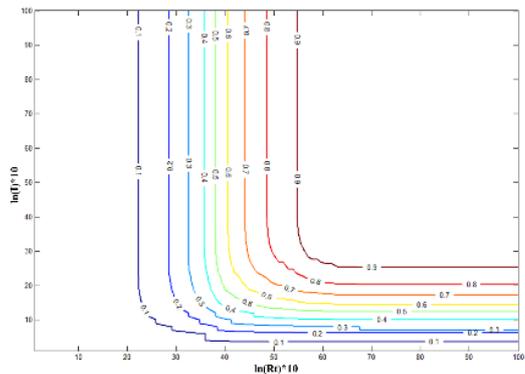


(b) 雨量等機率線

圖 3-10 神木村雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面

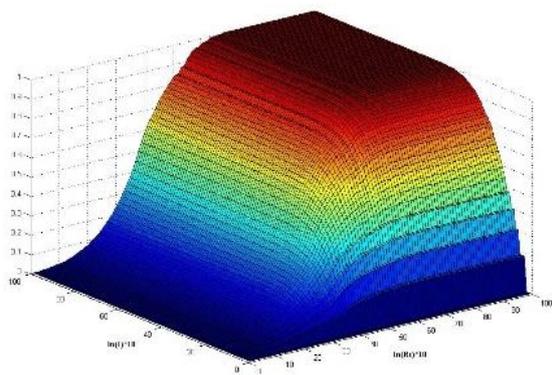


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

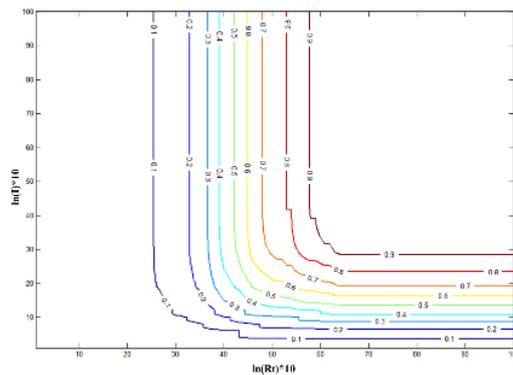


(b) 雨量等機率線

圖 3-11 豐丘雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面

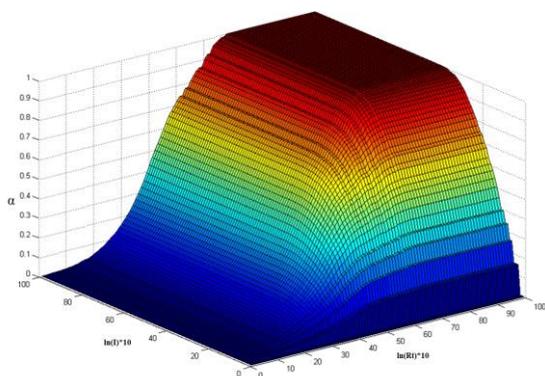


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

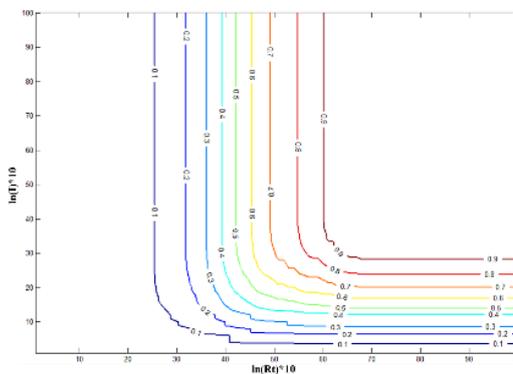


(b) 雨量等機率線

圖 3-12 那瑪夏國中雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面

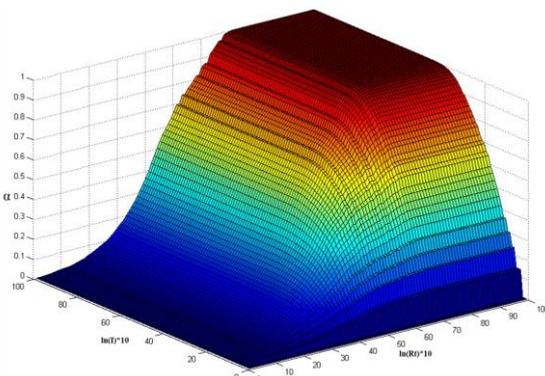


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

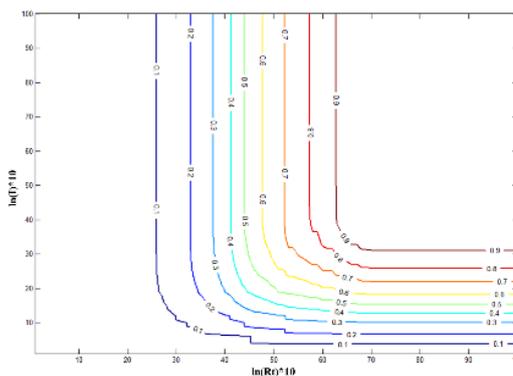


(b) 雨量等機率線

圖 3-13 達卡努瓦(民生)雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面

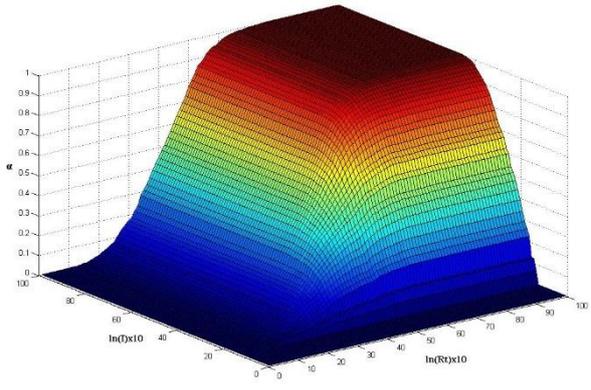


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

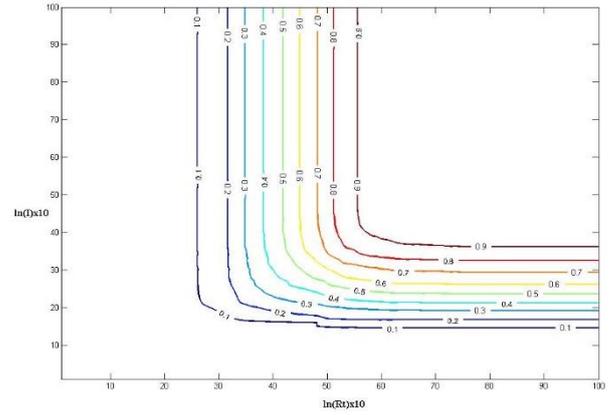


(b) 雨量等機率線

圖 3-14 新發雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面

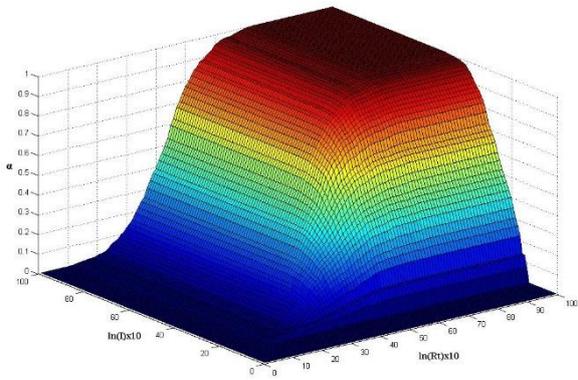


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

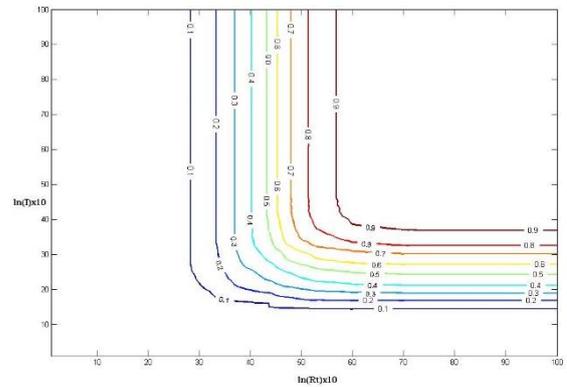


(b) 雨量等機率線

圖 3-15 上德文雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面



(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖



(b) 雨量等機率線

圖 3-16 瑪家雨量站歷史雨量($I_{max} - R_{te}$)等機率曲面

第二節 自適性坡地崩塌評估模型建立

崩塌潛勢評估通常表示為特定時間段以及目標區域內的崩塌發生的可能性 (Varnes, 1984) (Van Westen et al., 2006)。換句話說，崩塌潛勢的評估通常需要使用易感因素對其“發生地點”進行空間概率定義，以及考慮觸發因素的“何時”或發生頻率的時間成分定義。雖然假設地文潛勢因素不隨時間演變，而是在空間上可變，但降雨誘發因素則是在時間和空間上變化。

由於本計劃認為廣域崩塌災害事件是一個多項誘因與潛因相互交錯的複雜系統問題，是由多個不穩定因素相互作用所引起的，然而大多數的推估模式多僅考慮不穩定因素的當前數值(Yao, Zeng, Lian, & Tang, 2015)，而忽略相關因子隨時間的演變特徵，更進一步來說降雨發生上的最大值在時間與空間上的發生不會一致，而這些混淆資訊往往造成模式訓練上的不確定性，我們認為這也是過往模式對於雨量敏捷性效果不好的主因；換句話說，過去本計劃在以假設年間崩塌災害事件發生在當年度最大降雨事件前提上，建立的崩塌模型似乎還有一些問題討論的空間，本計劃過去在雨量特徵萃上，主要是針對年間當中單一重大颱風豪雨事件之最大小時降雨與有效累積降雨作為基準值，然後在這重大事件之前期事件作為前期時間擾動因子，我們同時取出這些前期事件(多筆)當中之最大小時降雨與有效累積降雨之因子作為時序特徵因子當成模型輸入因子，這是一個目前不得爾的研究假設，但是這樣的操作做法，會讓模型在取樣的樣本中，不論是崩塌(年間最大事件)以及未崩塌(年間最大事件前之多筆前期擾動事件)之降雨誘發因子均是處於一個較大降雨特徵範圍之區間內，也就是說，目前訓練完之模型僅適配於規模為小時降雨大於 30mm 且累積降雨大於 300mm 之降雨事件(如下圖 3-17 之紅色範圍區間)當中，事實上我們從數據分析案例中，透過一個未知雨場之發生，可以發現許多崩塌大多未到此門檻就已經發生。另一方面，I 或 R 的相互變動牽制，過去在模型中很難被考量其中，例如很小的 I 但很

大的 R(梅雨季節)會發生崩塌，或是很大的 I(短延時強降雨)很小的 R 也會發生崩塌，由於這些因子的互相牽制關係，也會影響到崩塌發生與否的預測，這些變因的總和結果，就會導致過去所發展之模型所推估之崩塌警戒值在到達 I 或 R 之警戒門檻前無太大的變動(圖 25 之藍線)，這樣的這也導致模式對較小數值降雨特徵之因子反應的不敏感(如下圖 25 之綠色範圍區間)。

為能有效解決上述對於過去模型問題的檢視，本計劃會嘗試兩件事，首先是增加降雨事件的特徵性；並利用 LSTM 模型來串連它們。基本上長短期記憶(Long short-term memory, LSTM)模型是一種時間循環神經網路(RNN)重要的應用，LSTM 適合於處理和預測時間序列中間隔和延遲非常長的重要事件。而 LSTM 是一種含有 LSTM 區塊(blocks)或其他的一種類神經網路，因為它可以記憶不定時間長度的數值，區塊中有一個 gate 能夠決定 input 是否重要到能被記住及能不能被輸出 output，由於崩塌是屬於事件型特徵，並沒有一般固定時間特徵下所對應之災害關係，透過 LSTM 模型的引入，我們希望改善後續模型對於降雨引致的崩塌潛勢於未知的降雨雨場中，萃取出關鍵之降雨誘發牽動關係，增加模型對於雙參數雨量因子之敏感性，使模式本身的預測能力可以再提高。

另外，過去模式建立主要是基於單一坡面單元之數據組成並透過統計分析模式所建立之分析模型，這可能存在忽略坡面單元間之空間相關性的問題，因此難以探索整個集水區之坡面單元間之整體崩塌變化且對於崩塌變異不明顯之坡面單元亦可能於分析模型過程中被忽略，這可能引起一些潛在之威脅未被預測到或是單一坡面間之數值組成之同質性較高，而產生過多崩塌發生之不合理誤判產生，因此，本計劃為視集水區之坡面單元組成為一圖像，而圖像定義為結點(Node)以及邊線(edge)所組成，透過連接所有實證集水區內之坡面單元，以建構一個完整之圖像，其中每個坡面單為及為該圖上之一個節點，並且每個不同的坡面單元通過單一之邊線相連，並通過聚

類方法計算每個節點之邊線權重(即這些坡面單元之間之相似性)，以獲得加權鄰接矩陣，並透過構造圖像結構網絡來進行圖神經網絡(Graph Neural Networks, GNN)之崩塌預測模型之建置。

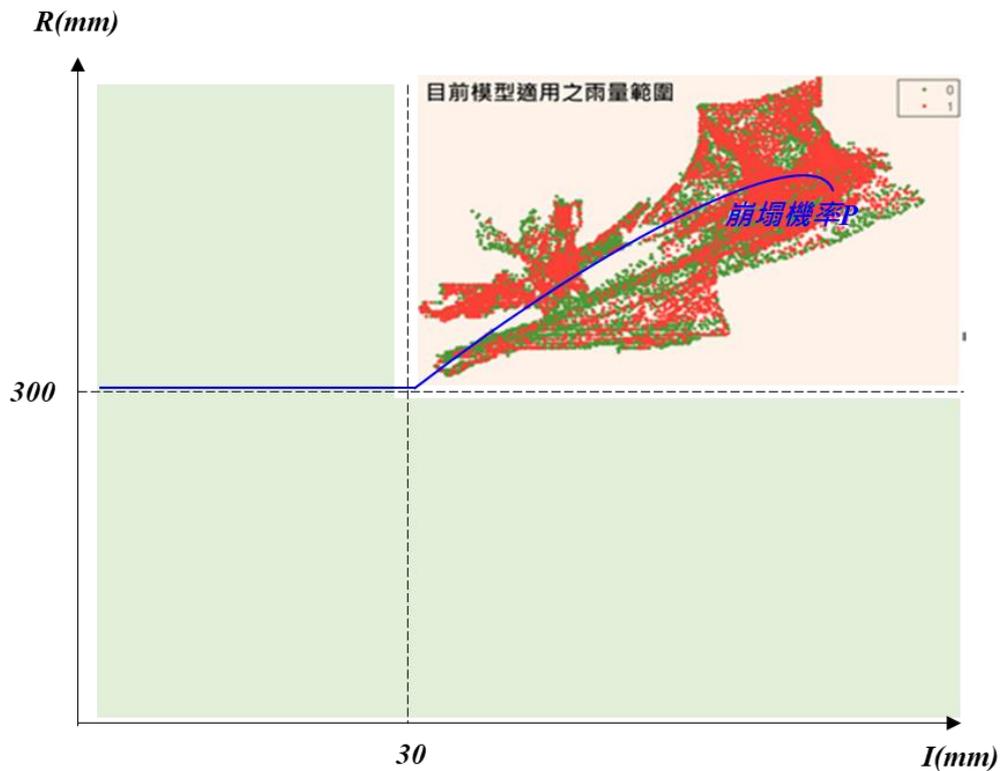


圖 3-17 模型樣本之誘發降雨因子分布圖

以下為各階段執行流程說明：

一、年度間颱風豪雨事件逐時雨量空間內插

由於本計畫目標是要探討降雨時序與崩塌之間的敏感度分析，且降雨誘發因素是可以反映在時間和空間上之變化，因此對於進行連續降雨於崩塌空間預測上，就必須建立具有足夠的空間和連續時間解析度之樣本，然而目前雨量站之稀缺性，對於連續降雨之空間變異性特徵很難被解決。

對於空間尺度之變異預測，其樣本之資訊量以及變異性就相當重要；而過去空間預測是通過純粹的數學方法進行的，這些方法只考慮系統性或確定性變化，但實際上，空間尺度之評估結果需從空間連續資訊中獲取樣本

(Oliver and Webster., 2014)。而地理統計之空間推估，即克里金法，是克服大多數缺點的典型推估模式 (Webster and Oliver., 2001)。地理統計之空間推估明確旨在正確描繪空間變化 (Srivastava., 2013)，或者更準確地說，克利金基於包含自相關 (即，測量點之間的統計關係) 的統計模型，並可提供最佳線性無偏預測(BLUP)的幾種最小二乘法的模式，其中表現最佳為採用最小方差(Oliver and Webster., 2014)。大氣或任何其他環境特徵是各種物理、化學或生物相互作用的總和。儘管物理上已確定，但由於尚未完全了解其複雜的相互作用，它們仍然或多或少是一個黑匣子，從而使變化看起來是隨機的 (Oliver and Webster., 2014)。因此，許多環境變量(例如降雨量)，亦被視為是空間隨機變量。

因此本計劃將針對歷年重大颱風豪雨事件中，挑選對於本計畫研究範圍內影響較大之事件雨場，透過克利金法，對各事件雨場之起始至雨場結束之每一個小時(I_i)以及有效累積降雨(R_i)進行空間內插之處理，並透過坡面單元尺度進行各坡面單元內之降雨量平均統計，以建立各坡面單元之颱風豪雨事件雨場逐時降雨資料庫。

二、 空間關聯特徵矩陣建立

然而過去有許多學習圖形之數據模型，而圖形數據在不同元素間具有豐富之特徵資訊，如社交網路建構、學習分子指紋、蛋白質網路以及對疾病進行分類等議題都可透構圖像關係建構進而作為輸入進行學習，而本計劃嘗試視集水區之坡面單元組成為一圖像，而圖像定義為結點(Node)以及邊線(edge)所組成，透過連接所有實證集水區內之坡面單元，以建構一個完整之圖像，其中每個坡面單為及為該圖上之一個節點，並且每個不同的坡面單元通過單一之邊線相連，如下圖 3- 18 所示，因此本計畫將考慮整個集水區中之坡面單元之間的空間關聯性，以及增加各節點間之空間異質性，更能明確之捕捉可能發生崩塌之環境特徵，因此本計畫透過建立目標範圍之空間關

聯矩陣特徵，其空間關聯特徵建立後，亦可作為後續圖像深度學習優化之基礎資料特徵，計畫將參考圖卷積網絡(Graph Convolutional Networks, GCN)定義圖像之矩陣類型，其中包含圖像的拉普拉斯矩陣 (Laplacian matrix)，也叫做導納矩陣、基爾霍夫矩陣或離散拉普拉斯算子(林恆陞，2020)，主要應用在圖論中，作為一個圖的矩陣表示，而其屬於對陣矩陣，可以進行特徵分解。對於圖像 $G = (V, E)$ ，其 Laplacian 矩陣的定義為 $L=DA$ ，其中 L 是 Laplacian 矩陣， $D=diag(d)$ 是頂點的度矩陣（對角矩陣）， $d=rowSum(A)$ ，對角線上元素依次為各個頂點的度， A 是圖的鄰接矩陣，如下圖 3-19。

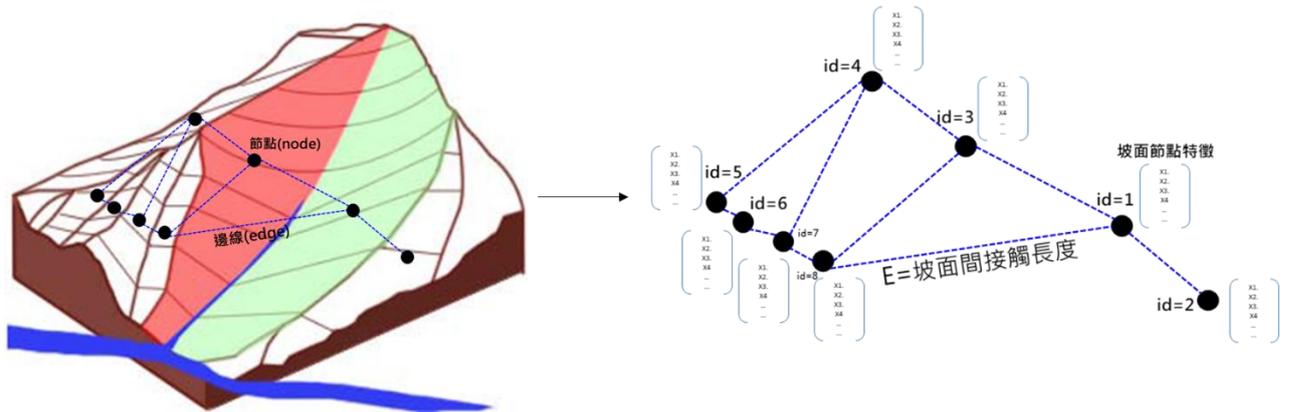


圖 3-18 集水區圖像特徵定義示意圖

Labeled graph	Degree matrix	Adjacency matrix	Laplacian matrix
	$\begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 3 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 3 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 0 & -1 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

圖 3-19 GCN 定義圖像之矩陣示意圖

下圖 3-20 至圖 3-22 為本計畫透過地理資訊系統建立坡面單元間之空間鄰接關係，並經過資訊轉置取得鄰接矩陣(A)、度矩陣(D)以及權重矩陣，其中權重矩陣(W)採用各坡面單元間之接觸長度，並以作為後續模型建立之地文潛勢特徵輸入。

Slopecode	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
0		1				1		1	1																	
1	1				1	1	1																			
2				1																						
3			1		1																	1				
4		1		1			1																			
5	1	1					1		1																	
6		1			1	1		1														1				
7	1							1	1		1	1														
8	1					1	1	1		1												1				
9							1	1					1	1												
10												1														
11							1			1		1														
12							1		1		1		1		1											
13									1				1													
14																	1									
15																		1								
16														1								1	1			
17															1								1			
18																					1					
19																					1					
20				1			1	1																		
21																1	1	1						1	1	
22																	1					1	1		1	1
23																						1	1		1	
24																							1	1		
25																								1	1	

圖 3-20 坡面單元鄰接矩陣示意圖

Slopecode	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
0	6																										
1		5																									
2			2																								
3				8																							
4					6																						
5						4																					
6							7																				
7								6																			
8									8																		
9										5																	
10											3																
11												9															
12													9														
13														7													
14															3												
15																3											
16																	5										
17																		6									
18																			3								
19																				5							
20																					6						
21																						8					
22																							5				
23																								5			
24																									7		
25																										7	

圖 3-21 坡面單元度矩陣示意圖

Grid Index	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
0		129 31				470 46		3.14	132 09															
1	129 31				46.8 5	431 5	06	5.06																
2				417 02																				
3			417 02	473 48																	74.5 1			
4	46.8 5		473 48		313 84																			
5	470 45	831 06				246 76		122 34																
6		5.06		313 84	246 76			709 47														218 83		
7	3.14							13.0 94	08				233 77	17.9 1										
8	132 09				122 34	709 47	13.0 1	857 24														117 2		
9						894 08	857 24						425 84	143 02										
10												276 11												
11								233 77			276 11	47.7 5												
12							17.9 1	425 84		47.7 5		246 4												
13								143 02				246 4												
14																	189 7							
15																	516 46					93.8 3		
16														189 7								2.5 96.6		
17														516 46								18.6 7		
18																						6.07		
19																						6.07		
20					74.5 1		218 83	117 2																
21															93.8 3	2.5 7	18.6 7					254 02	322 24	
22																96.6						254 02	198 98	
23																						322 24	198 98	
24																							359 21	255 18

圖 3-22 坡面單元權重矩陣示意圖

三、長短期記憶(Long short-term memory, LSTM)模型

在完成前述各項潛勢因子以及誘發因子與崩塌樣本之空間對應關聯資料庫後，然而過去僅將事件雨場之單一時間點之雨量資訊值($I_{max} - R_{te}$)，作為崩塌在該時間點之雨量資訊上發生之假設，然後空間化(內插)雨量站資訊作為模式輸入的依據，看似處理空間化問題，但我們並沒有表現雨量誘因「強時間化與強規模化」的特徵，例如我們多經常使用 I_{max} 所發生位置與其對應下的 R_{te} 值，但這是屬於一種問題的假設，通常這樣假設往往高估問題，事實上我們從數據分析案例中可以發現許多崩塌大多未到此門檻就已經發生，這樣的假設效應會使模式對因子反應的不敏感；其次是各雨量站所發生 I_{max} 與 R_{te} 在時空上變化很大，絕對不是在同時發生最大值，這意味模式在訓練問題時，很容易被人類主觀判斷資訊混淆問題；最後關於事件規模之問題，以莫拉克颱風為例，該事件屬於當年度最大規模之降雨事件，而且是一個極端事件，若欲將該事件之降雨誘發指標($I_{max} - R_{te}$)作為潛勢模式的訓練，則可能造成模型僅適用於該規模的降雨，則忽略了該事件之崩塌極有可能

於莫拉克颱風雨場之($I_{max} - R_{te}$)之前就已經發生之問題。

如下圖 3-23，過去在假設年間崩塌災害事件發生在當年度最大降雨事件當中的 I_{max} 與 R_{te} 上，導致崩塌以及降雨規模關聯上，多屬於短延時強降雨導致崩塌的現象，最大小時降雨多大於 40mm 而有效累積降雨則落於 200-600mm。

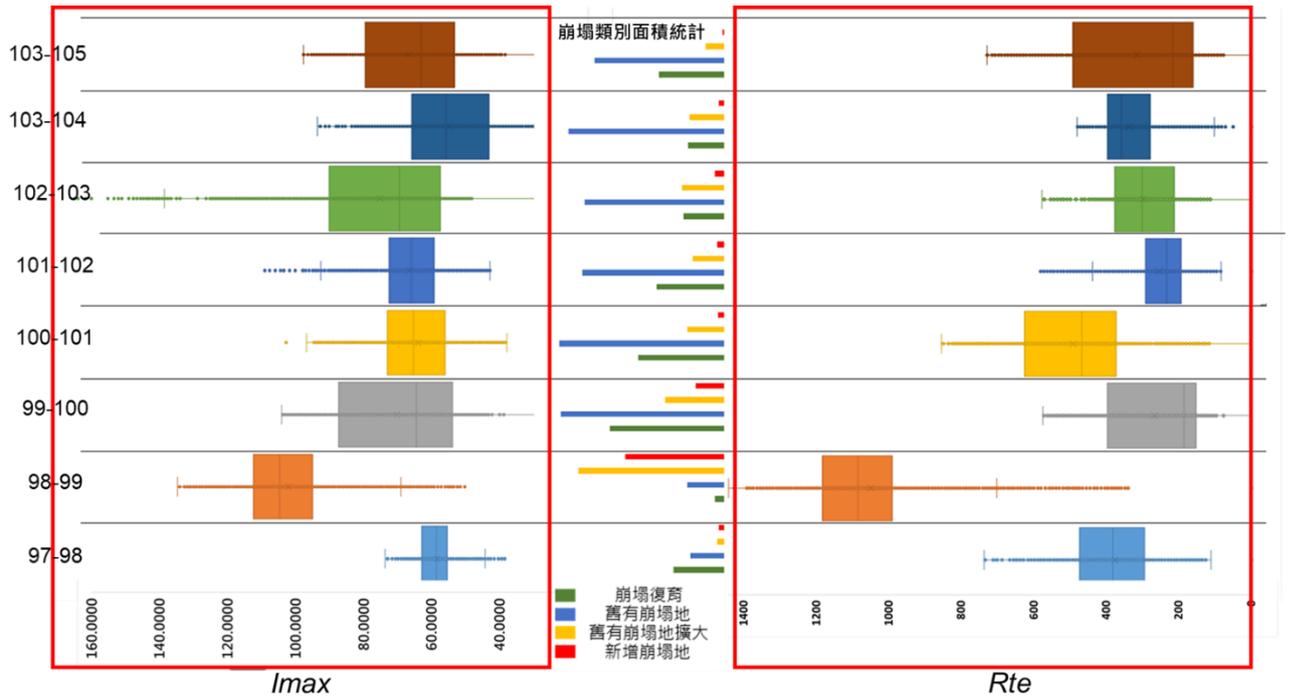


圖 3-23 各年度[崩塌]單元與降雨規模關聯統計

因此，本計劃要解決時間相關(次序相關)問題，就是當下的答案(崩塌事件新增)會受過去的答案(過去降雨歷程)影響，這個影響是降雨歷程規模的變化情形，而且這種變化模式也會影響未來的答案的一種情況。本研究將考慮各事件之逐時降雨以及當下之降雨特徵資訊做為模型之輸入，以產生具有時序特徵之崩塌潛勢機率(如圖 3-24)，而為模擬多特徵綜合下之生成結果，本計劃使用遞迴神經網路(Recurrent Neural Network, RNN)以及長短期記憶模型(Long Short-Term Memory, LSTM)，其是藉由反向傳遞演算法來訓練，其中動態層具有回授的機制，它可以預測具有次序性資料，簡單來說，遞迴類神經是依靠時間序列具有記憶功能的——輸出，除了考慮這一刻的

輸入外，還有一部分是來自上一刻的輸出記憶，同時這一刻的輸出也會有一部分做為“記憶”傳給下一刻，因此它的預測準確度高，可以利用過去資料預測現在及未來。

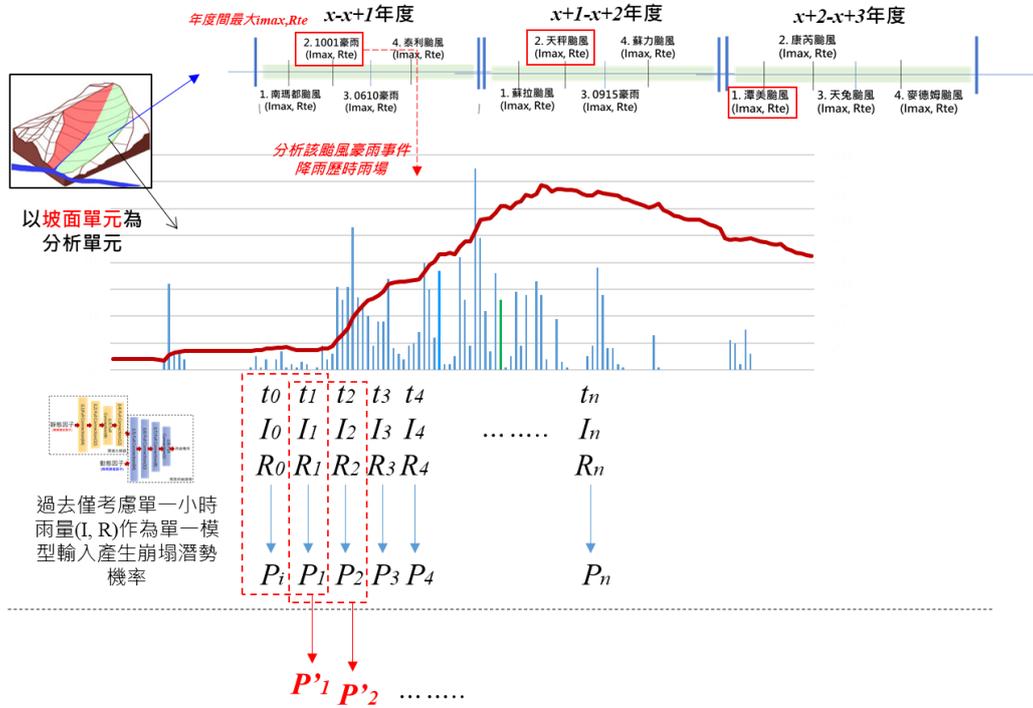


圖 3-24 降雨誘發時序特徵模式建立示意圖

1. 遞迴神經網路(Recurrent Neural Network, RNN)

遞迴類神經網路(Recursive Neural Network, RNN)，它是循環神經網路，藉由反向傳遞演算法來訓練，其中動態層具有回授的機制，它可以預測具有時序性資料，簡單來說，遞迴類神經是依靠時間序列具有記憶功能的——輸出，除了考慮這一刻的輸入外，還有一部分是來自上一刻的輸出記憶，同時這一刻的輸出也會有一部分做為“記憶”傳給下一刻，因此它的預測準確度高，可以例用過去資料預測現在及未來。而 RNN 為類神經的其中一種，其概念與其他時間序列模型類似，希望由前數次的資料預測出下一筆數值，因此在架構上採用了遞迴的概念，除了原本類神經的運作方式，神經元輸出的結果會自回饋至同一階層，與下一筆資料一起作為 input。這個類神經包含有 1 個輸入層、1 個動態層以及 1 個輸出層，輸入層中每次輸入 p 筆資料，動態

層中有 q 個神經元，並加入非線性激活函式(tangent sigmoid)並且具有自回饋的特性，輸出層中包含 1 個線性輸出。輸入層 net_i ：共有 p 個輸入，分別是 x_1, x_2, \dots, x_t ，為一時間序列中之一段連續資料，正規化為-1~1 之間的數值，以 $x(t)$ 表示。而單一個樣本如圖 3-25 所示，而當然模型也可展開成也可以按照時間維度，展開隱藏節點(圖 3-26)和單節點的表示一樣，每個方向上的權值參數 W 是等價共用的。

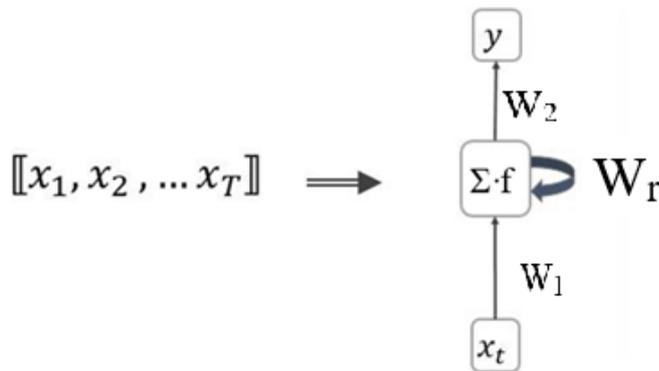
$$net_i = x_1, x_2, x_3, \dots, x_t$$

動態層 net_j ：共 t 個神經元，每個神經元中除了做加總之外還有一個激活函式(tangent sigmoid)，將輸入乘上權重 W_1 加總後加上權值 b ，為 $op(t)$ ，再加上前一次動態層的輸出 $fp(t-1)$ 乘上 W_r ，最後通過激活函式之後的結果為 $fp(t)$ 。

$$net_j = fp_j(t) = f [W_1(i, j) * \sum x_i(t) + b_j + W_r * fp(t-1)]$$

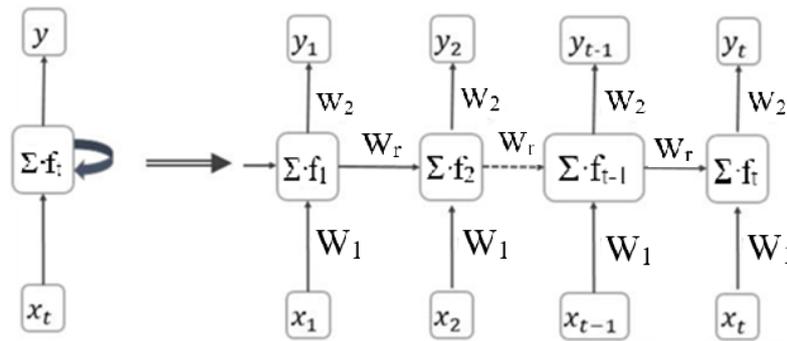
輸出層 net_k ：共 1 個輸出，不使用激活函式以及偏移量，將動態層的輸出乘上 W_2 後加總，直接作為最後的結果。

$$net_k = W_2(j) * \sum fp_j(t)$$



參考文獻 <https://reurl.cc/Gr7NOW>

圖 3-25 單層 RNN 模型



參考文獻 <https://reurl.cc/Gr7NOW>

圖 3-26 單層 RNN 模型序列展開

2. 長短期記憶(Long short-term memory, LSTM)

上述伴隨著降雨時間序列長度的增加，會導致 RNN 出現梯度爆炸以及消失問題，使得訓練學習出現局部最優等問題，導致 RNN 的輸出精度降低。為此，長短期記憶人工神經網絡(LSTM)法有效避免了梯度消失缺點，提升了在時間序列較長影響下的訓練處理能力。

而 LSTM 整體工作流程與 RNN 非常相似，但不同之處在於 LSTM 使用記憶來加強當前的決策，利用三個控制閥(Gate)來決定記憶的儲存與使用；即除了預測的輸出外，增加一個記憶分支，隨著時間更新，將當前記憶以 C_t 符號表示，透過「遺忘閥」(Forget Gate)及「輸入閥」(Input Gate)，來決定是否更新記憶。

- (1) 遺忘閥(Forget Gate，以 f_t 表示)，如果當前的字句是新主題或以前面字句相反的詞，那麼，之前的字句就會被此閥門過濾掉；反之，可能就會被繼續保留到記憶中，這個閥通常是 Sigmoid 函數，因為它是二元分類的函數，表示過往的資訊是否被遺忘或記憶。

$$f_t = \varphi_s([Z_{t-1}, X_t] \cdot W_f)$$

- (2) 輸入閥(Input Gate，以 it 表示)：決定當前的輸入(Input)及新產生的記憶單元(Memory Cell Candidate)是否加入長期記憶(Long Term Memory)中，這個閥是 Sigmoid 函數，表示要加入與否。

$$i_t = \varphi_s([Z_{t-1}, X_t] \cdot W_i)$$

(3) 輸出閥(Output Gate, 以 o_t 表示): 決定當前的字句是否加到輸出(Output), 這個閥是 Sigmoid 函數, 表示要加入與否。

$$o_t = \varphi_s([Z_{t-1}, X_t] \cdot W_o)$$

最後針對長期記憶是否加到輸出(Output), 通常使用 tanh 函數, 數值會落在 $[-1, 1]$ 之間, -1 表移除長期記憶。

上式中, φ_s 是 sigmoid function 使 Gate 輸出值介於 $[-1, 1]$ 之間, Z_{t-1} 為前次各 cell 輸出值組成之向量, X_t 為本次輸入層組成之向量, W_f 、 W_i 、 W_o 為權重向量, 經向量內積及 sigmoid function 後 f_t 、 i_t 、 o_t 為介於 0-1 之間之值。另有一個 cell status:

$$\text{Candidate cell status: } \tilde{c}_t = \varphi_t([Z_{t-1}, X_t] \cdot W_c)$$

其中 φ_t 是 tanh function, Z_{t-1} 為前次各 cell 輸出值組成之向量, X_t 為本次輸入層組成之向量, 經向量內積及 tanh function 後, \tilde{c}_t 為介於 $-1 \sim 1$ 之間的值。 \tilde{c}_t 仍不是真正的 cell status, 真正的 cell status 為:

$$c_t = f_t \times c_{t-1} + i_t \times \tilde{c}_t$$

其中 f_t 為 Forget Gate 的值, c_{t-1} 為前次的 cell status, i_t 為 Input Gate 的值, \tilde{c}_t 為 Candidate cell status。

最後 Cell 的輸出值為:

$$z_t = o_t \times \varphi_t(c_t)$$

o_t 為 Output Gate 的值, φ_t 為 tanh function, c_t 為本次的 cell status。

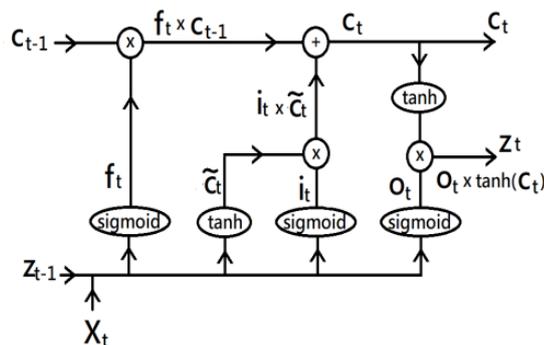


圖 3-27 LSTM CELL 結構

在本次模式建立中，除了基礎的環境潛勢因子資料庫做為模式之變數外，本計畫亦將前章節所建立之坡面單元空間關聯特徵作為模型之輸入。以及針對各坡面單元中探索歷年的最大事件降雨擾動，以及其崩塌頻率與崩塌變異與當年度之降雨誘發造成之崩塌間之關聯性分析，因此在模式建立之資料庫上，將串聯坡面單元空間關聯特徵、環境潛勢因子資料庫以及歷五年間之降雨以及崩塌特徵時序資料，作為模式建立之輸入變數，而我們所使用的資料集欄位如下表 3- 4 所示，其中可以看出，在本資料集中，我們可將分為因素分為兩大種類，分別為環境因子及事件因子，環境因子代表的是該坡面之環境相關因素，包含其坡面單元之空間關聯特徵、地質分類、坡度、距離河道遠近及植生等，但由表中我們可以看出，前項變數者皆為靜態環境因子，而植生則是動態環境因子，其本身會受到當年之氣候、環境等影響，而會有不同的數值，屬於變動性較大之時間序列資訊，因此其屬於動態環境因子。而前期降雨擾動因子以及當年度降雨誘發因子，則是代表該欄位是由該事件之年度開始的前五年所造成之相關降雨以及崩塌變異數值，如 93 年度與 94 年度間至 97 年度與 98 年度間之各年度颱風豪雨之最大降雨數值以及崩塌變異特徵等，其數值表示代表的是各年度中颱風豪雨事件間之最大時雨量及其對應之累積雨量以及各類崩塌變異類型之面積百分比，根據上述之崩塌時序特徵資料庫之串連與建立，本研究共建立 8 組之資料庫，其各組資料庫之年度時序索引如下所圖 3- 28 示。

表 3- 4 本計畫模型訓練資料集欄位說明

編號	名稱	因素分類
A、D、W	空間關聯矩陣	靜態環境因子
G	地質	靜態環境因子
Soiltype	土壤類別	靜態環境因子
H	高程	靜態環境因子
Slope	坡度	靜態環境因子
Aspect	坡向	靜態環境因子

curvature	曲率	靜態環境因子
c_section	剖面曲率	靜態環境因子
c_surface	平面曲率	靜態環境因子
sos	坡向變率	靜態環境因子
soa	坡度變率	靜態環境因子
elev_var	地表起伏度	靜態環境因子
cut_depth	地表切割深度	靜態環境因子
roughth	地表粗糙度	靜態環境因子
acc	匯流累積量	靜態環境因子
flowLength	水流長度	靜態環境因子
upstream_L	上坡長度	靜態環境因子
downstream_L	下坡長度	靜態環境因子
River_d	河道遠近	靜態環境因子
E_d	斷層遠近	靜態環境因子
N	植生	動態環境因子
y1_imax	前五年度間事件最大時雨量	動態環境因子(Y1-Y5)
y1_R(imax)	前五年度間事件最大時雨量對應累積雨量	動態環境因子(Y1-Y5)
y1_code1_area	前五年度間崩塌復育面積	動態環境因子(Y1-Y5)
y1_code1_rati	前五年度間崩塌復育面積比例	動態環境因子(Y1-Y5)
y1_code2_area	前五年度間舊有崩塌地面積	動態環境因子(Y1-Y5)
y1_code2_rati	前五年度間舊有崩塌地面積比例	動態環境因子(Y1-Y5)
y1_code3_area	前五年度間舊有崩塌地擴大面積	動態環境因子(Y1-Y5)
y1_code3_rati	前五年度間舊有崩塌地面積擴大比例	動態環境因子(Y1-Y5)
y1_code4_area	前五年度間新生崩塌地面積	動態環境因子(Y1-Y5)
y1_code4_rati	前五年度間新生崩塌地面積比例	動態環境因子(Y1-Y5)
y1_code5_area	前五年度間崩塌復育面積	動態環境因子(Y1-Y5)
y1_code5_rati	前五年度間崩塌復育面積比例	動態環境因子(Y1-Y5)
Y6_add3+4_area	當年度新增崩塌地面積	動態事件因子(Y6)
Y6_add3+4_rati	當年度新增崩塌地比例	動態事件因子(Y6)
Y6_add3+4	當年度有崩(1)/未崩(0)	動態事件因子(Y6)
Imax	當年度事件最大時雨量	動態事件因子(Y6)
Rte	當年度事件最大時雨量對應累積雨量	動態事件因子(Y6)

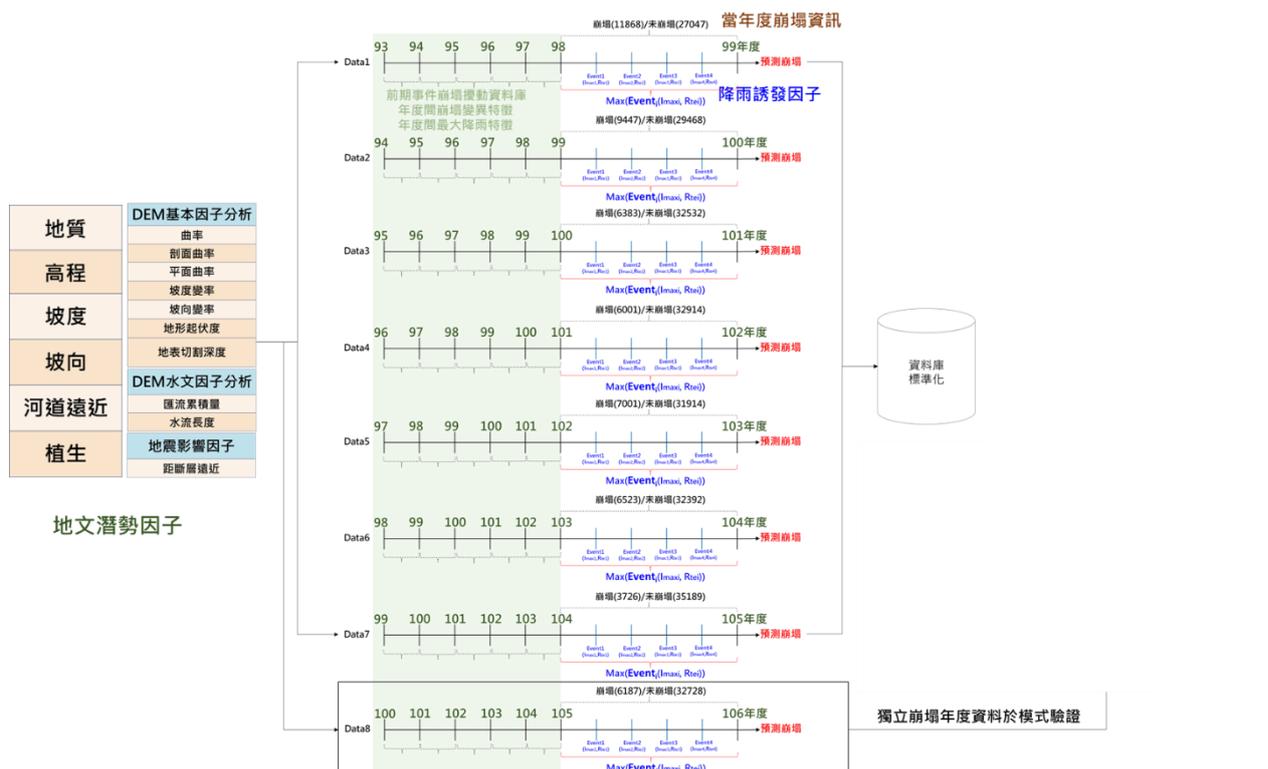


圖 3-28 本計畫各年度間資料分組示意圖

四、數據前處理

而在進行模型建立之前，為減少輸入特徵間之差異過大導致結果無法收斂，故須將輸入資料及目標值進行正規化(Data Normalization)處理，同時亦可加快模型之收斂，使輸入特徵皆於 0 至 1 之間，其正規化公式如下(3-9)所示：

$$Data = \frac{X - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (3-9)$$

其中： $Data$ ：正規化後數據， X ：原始數據樣本， x_{max} ：原始數據樣本中最大值， x_{min} ：原始數據樣本中最小值。

五、崩塌潛勢評估模型架構設計

局部降雨模式在一個地區降雨誘發滑坡的機制中起著重要作用。而為了評估降雨誘發的崩塌潛勢，重要的是了解歷史滑坡事件與降雨條件之間

的關係(Wieczorek et al., 2005)，在這些絕對降雨變量中，累積事件降雨和小時降雨強度是基本降雨變量(Guzzetti et al., 2007)；每小時降雨強度 (I_{60} 即 60 分鐘累積降雨量) 和土壤水分指數 (SWI) 被用於日本之崩塌災害的預警系統(Osanai et al., 2010)；而 Muhammad 等人(2015)以馬來西亞烏魯巴生 15 個崩塌監測為例，利用累積前期降雨量 (即 72 小時)、降雨強度 ($I_{1.5}$ 即 1.5 小時累積降雨量) 和土壤水分指數 (SWI) 分析斜坡對降雨誘發滑坡的敏感性；Kirschbaum 等人(2012)提供了一個包含 2003、2007 和 2008 年發生的全球 1130 次崩塌事件的資料庫，透過該資料庫，他們強調了極端降雨與滑坡之間的相關性；Saito 等人(2014)研究了日本 2001 年至 2011 年間發生的 4744 次崩塌，以更清楚掌握哪些降雨特性控制了崩塌發生規模；而 Montoya-Domínguez 等人(2016)則討論了在高強度降雨之前低強度降雨事件的影響，以降雨強度範圍為 25 至 50mm/小時，持續時間為 19 至 152 分鐘建構實驗模型；Lun-Wei 等人(2018)則利用收集到的 941 個崩塌案例的降雨規律分析，說明出 3 小時平均降雨強度 (I_3) 是降雨量的關鍵降雨指數，代表持續時間短但強度高，而 24 小時累積降雨量(R_{24})則是降雨持續時間長但強度低，因此該研究透過 I_3 - R_{24} 降雨指數用於建立降雨閾值之模型訓練。這些先前的研究表明，隨著累積前期降雨量、每小時降雨強度和前期累積降雨的增加，崩塌更容易發生。此外有別於所謂的颱風事件，「短延時強降雨」又是在台灣另一種會造成坡地災害的主要來源(吳俊傑，1997；陳樹群等人，2013)，因此在降雨機制下使用何種因子來分析崩塌因素的合適性要被仔細檢討與驗證。

對於本研究所考量到之坡面單元之資料，我們可以簡易將其分為降雨相關之時序資料以及該坡面單元之地文資料。其中由於地文資料為坡地單元之數值，如地質、高程、坡度、坡向以及河道遠近等坡面地文等不易發生變動之特徵。而降雨相關之時序資料則是屬於變動性較高之數值，其詳細資

料格式則如表 3- 5 所示，從該表中我們可以看到，假設今天有四個坡地單元分別為 A、B、C 及 D，其中表 3-5 紀錄著各小時各坡地單元之逐時降雨的降雨強度數值(I)，舉例說明如第一個行資料即表示坡地單元 A 在 0:00~6:00 之 I 的數值。

表 3- 5 逐時降雨的降雨強度(I)範例表格(mm/hr)

坡地單元	0:00~1:00	1:00~2:00	2:00~3:00	3:00~4:00	4:00~5:00	5:00~6:00
A	0	0.1	0.3	0.4	1.2	0.9
B	0	0	0	0	0.8	0.77
C	0	0	0.08	0.11	0	0
D	0.1	0.05	0	0	0.2	0.3

至此，從上述描述我們可以得知，對於坡面單元進行崩塌預測時所使用的資料，可以分為較「不會變動之地文特徵」以及較「容易產生變化的降雨相關指標(或是混淆問題的特徵)」，相較於過去相關研究僅取該事件雨場之最大小時降雨(I_{max})以及前期累積降雨(R_{te})，透過各事件雨場中之逐時降雨資料中，本計劃設計以各事件之「逐時降雨透過移動視窗法」，繁衍各小時(I, I_3)等時序特徵作雨量資料特性或分布，我們對於這樣問題操作的理由如下：由於雨量站站數相對於集水區崩塌問題來說還是數量稀少，過去這部分通常都是以數據內插(多使用 Kriging)法來解決問題，但內插後的空間數據是否已完全解決崩塌需求，仍然有討論與研究空間，此外山區降雨變異很大，這部分也是造成數據解釋能力下降的問題。因此我們在這個研究當中，參考相關文獻並透過增加特徵的方式，增加模式學習效能(吳俊傑，1997; Guzzetti et al., 2007; Osanai et al., 2010; Kirschbaum et al., 2012; 陳樹群等人，2013; Lun-Wei et al., 2018)。

本計畫嘗試通過分析各颱風降雨事件雨場之時間序列數據以捕捉長時間降雨之相關性，採用 3 小時降雨(I_3)作為時序窗格移動，並以第 4 小時之(I, r)作為輸入預測崩塌，讓模式能讓歷時之降雨具有順序步進機制，以允

許降雨歷時間之變化特徵逐步傳遞，然而對於實際崩塌之關鍵時機點目前仍沒有一個確定之答案，過去我們團隊處理這部分問題時，僅將事件雨場之單一時間點之雨量資訊值(I_{max}, R_{te})，作為崩塌在該時間點之雨量資訊上發生之假設，但這樣的假設往往高估問題，事實上我們從數據分析案例中可以發現許多崩塌大多未到此門檻就已經發生，這樣的假設效應會使模式對因子反應的不敏感，但我們可以知道的是當(I, r)之關係達到一定規模，所造成崩塌之機率必定顯著且敏感，因此本研究仍必須設定一個門檻公式作為引致崩塌敏感之降雨關鍵門檻之假設(式 3-10)，即坡面單元有崩塌之條件為 $\varphi \geq z$ 且年度間有新增崩塌(1)，其餘為無崩塌(0)，因此，比對過去採用年度間最大颱風豪雨事件之雨量資訊值(I_{max}, R_{te})作為基準，當 3 小時降雨(I_3)作為時序窗格移動，並以第 4 小時之(I, r)作為輸入之值大於年度間最大颱風豪雨事件之雨量資訊值(I_{max}, R_{te})之 7 成(式 3-11)，且對應該年度是否有發生崩塌作為崩塌顯著性之關聯假設(如下圖 3- 29 所示)。

$$\varphi = \left(m \times \frac{I_i}{I_{\max_year}} + n \times \frac{R_i}{R_{\max_year}} \right) \geq z \quad (3-10)$$

$$\varphi = \left(0.5 \times \frac{I_i}{I_{\max_year}} + 0.5 \times \frac{R_i}{R_{\max_year}} \right) \geq 0.7 \quad (3-11)$$

每一筆降雨時序輸入的崩塌(目標)假設

年度間單一颱風豪雨事件之逐時(I, R)

A	B	C	D	E	F	G	H	I
lopecode	h0005E	h0005E	h0005E	h0005E	h0005E	h0005E	h0005E	h0005E
1	0	0	0	0	0.124987	0	0	0
2	0	0	0	0	0.124977	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0.125029	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0.124971	0	0	0
9	0	0	0	0	0.124976	0	0	0
10	0	0	0	0	0.092214	0	0	0
11	0	0	0	0	0.000688	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0

年度間最大颱風豪雨事件之(I_{max}, R_{te})

AP	AQ	AR
imax	index	R(imax)
61.7088	106A	485.9633
62.2290	106A	486.8332
62.8670	106A	492.1518
62.9099	106A	494.2723

$$\varphi = \left(m \times \frac{I_i}{I_{\max_year}} + n \times \frac{R_i}{R_{\max_year}} \right) \geq z$$

BD
add_3_4
0.0000
0.0000
0.0000
0.0000

And(&)
Hypothetical collapse

年度間崩塌與否
新增崩塌(1)
未崩塌(0)

圖 3- 29 崩塌顯著雨量門檻假設公式示意圖

六、建立自適性坡地崩塌潛勢評估模型

這部分是本研究之核心，我們希望崩塌潛勢推估模式能走向強人工智慧，並且滿足充分學習(sufficient learning)、合理速度(reasonable speed)、回想(recall)、無監督(unsupervised)、推理(inference)、感知(perception)甚至自主(autonomous)的學習等能力等。過去我們對於崩塌學習都是以監督式的概念進行問題學習，但是崩塌發生的資料稀少，收集事件特徵的代價非常龐大，一方面資料多元，另一方面資料都要進行空間化、時序化，雖然上述特徵工程可以透過人類智慧與工作達成，但是一旦累積這麼大量的時空數據因子後，要找出合適模式與其所對應關鍵因子，進而達成我們對於崩塌所謂的「確定性因果關係」，就不是人力能夠所及之問題。2014年 Ian J. Goodfellow 等人發表了所謂的「生成對抗網路(Generative Adversarial Network, GAN)」，所謂生成對抗網路是一種半監督式學習的分類器(training semi-supervised classifiers)，而生成對抗網路是由兩個模型組合而成，其分別為生成網路(Generator)和判別模型(Discriminator)，經由兩個模型以博弈的方式學習，其中生成模型的輸入為從潛在空間(latent space)中隨機取樣作為輸入，其輸出結果需要盡量模仿訓練集中的真實樣本(又稱生成數據)。而判別模型的輸入即為真實樣本又或者是生成數據，其工作為要能夠判別真假資料集並產生回饋給生成模型，生成模型會再根據這個回饋生成可以欺騙判別模型的數據，其中生成網路則要盡可能地欺騙判別網路。透過這兩種模型互相競爭、調整模型參數直到判別模型無法分辨輸入的資料為真實的還是生成數據時即為完成訓練且能夠模擬真實數據的分析(Goodfellow et al., 2014)，其架構如下圖 3-30 所示。

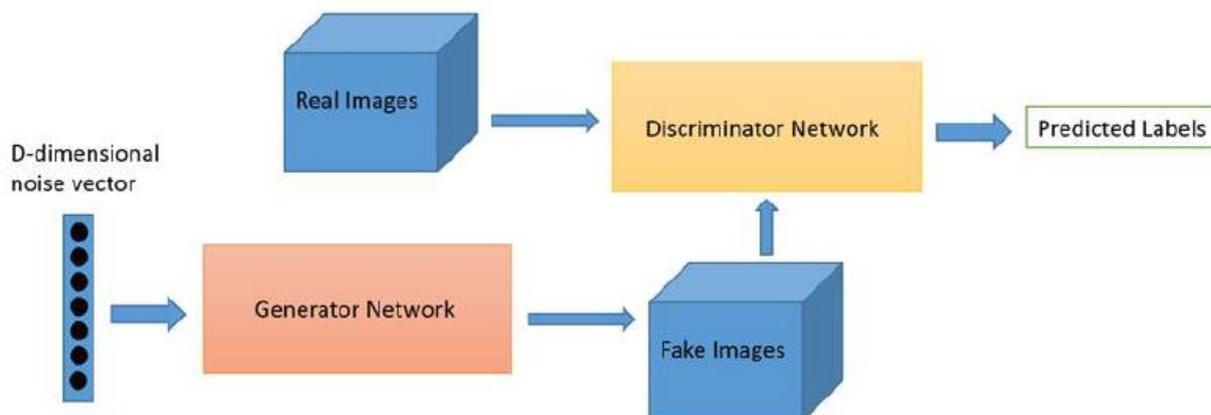


圖 3- 30 生成對抗網路架構圖 (<https://reurl.cc/EKMbRv>)

由於崩塌的形成以及發生是一個複雜之演化過程，是由多個不穩定因素相互作用所引起的，然而，大多數的推估模式多僅考慮不穩定因素的當前值，而忽略相關因子隨時間的演變特徵，因此根據上述在 GAN 生成對抗網路之架構原理，本計劃為解決崩塌資訊同時在空間以及時間上的發生表現問題，將透過下圖 3- 31 對抗生成網路 GAN 的設計，將真實之樣本以及特徵(空間以及時序特徵)資訊提供給判別模型(D)進行預測，而其預測之結果以及特徵資訊將回饋至生成模型(G)進行模仿，因此當具有時序的逐時降雨資訊作為輸入特徵於生成模型進行多時序的崩塌潛勢評估結果，而其是具有較多雜訊之評估結果，將會回到判別模型進行判別，將錯誤雜訊之判別結果於以剔除，產生一個最終且同時具有時序以及空間特徵合理分佈之崩塌潛勢圖，而這結果亦會分別回饋至判別模型以及生成模型，進行更多的循環訓練，使生成模型在進行逐時雨量特徵之輸入所得到之結果趨近於合理以及真實。

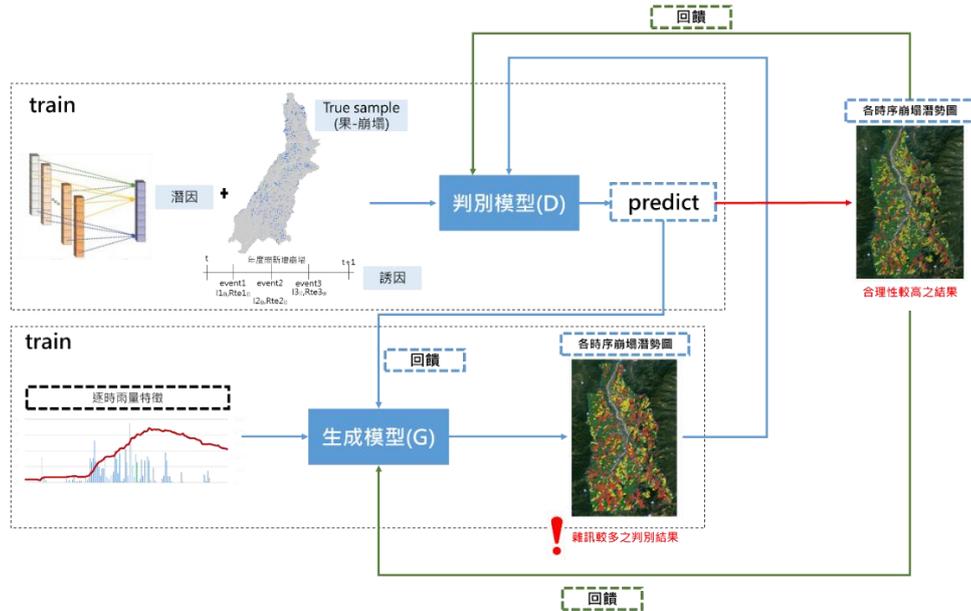


圖 3-31 本研究對抗生成網路架構設計

本計劃為解決崩塌資訊同時在空間以及時間上的發生表現問題，將透過對抗生成網路 GAN 的設計，將真實之樣本以及特徵(空間以及時序特徵)資訊提供給判別模型(D)進行預測，而其預測之結果以及特徵資訊將回饋至生成模型(G)進行模仿，因此當具有時序的逐時降雨資訊作為輸入特徵於生成模型進行多時序的崩塌潛勢評估結果後(其是具有較多雜訊之評估結果)，將會回到判別模型進行判別，將錯誤雜訊之判別結果於以剔除，產生一個最終且同時具有時序以及空間特徵合理分佈之崩塌潛勢圖，而這結果亦會分別回饋至判別模型以及生成模型，進行更多的循環訓練，使生成模型在進行逐時雨量特徵之輸入所得到之結果趨近於合理以及真實。

本計劃今年使用的最基礎 GAN 模型，其中這個模型會包含一個生成模型與一個辨識模型，訓練準則則示使用極小極大博弈問題(Minimax game)，並會使用下面三大公式(式(3-12)至式(3-14))完成訓練。

$$\max_D V(D, G) = E_{x \sim p(x)}(\ln D(X)) + E_{z \sim p(z)}(\ln(1 - D)(G(Z))) \quad (3-12)$$

$$\max_G V(D, G) = E_{z \sim p(z)}(\ln(1 - D)(G(Z))) \quad (3-13)$$

$$\max_D \max_G V(D, G) = E_{x \sim p(x)}(\ln D(X)) + E_{z \sim p(z)}(\ln(1 - D)(G(Z))) \quad (3-14)$$

其中這三個公式分別代表三階段過程。首先公式(3-12)代表固定的辨識模型(D)與訓練生成模型(G)的關係，其中 D(X)代表輸入真實數據到 D 之後的輸出。若輸出接近 1，則代表越接近預測期望值，反之亦然。接著公式(3-13)代表著固定 G，訓練 D。當我們把隨機變量 Z 輸入生成模型 G 後，我們可獲得生成模型的輸出 G(Z)，而 G(Z)則會緊接著輸入 D 中，並獲得 D(G(Z))。最後公式(3-14)代表合併 G 和 D 一起訓練，並期望生成樣本的預測結果 D(G(Z))越大越好且 1-D(G(Z))越小越好，代表 G 所產生的假資料能有效騙過 D，並成為幾以亂真的假資料。

根據上述模型架構設計，本計劃設計之 RNN-LSTM+GAN 模型中，需將時間序列資料依給定之時間滯後階數，分割為一筆筆相對之變數數列及目標值，例如本計畫在崩塌降雨時序給定之時間滯後階數為 3，則將資料第 1 至第 4 小時之逐時降雨列為第 1 個變數序列，第 4 小時之雨量變數門檻對應於崩塌地圖則為此變數序之目標值；第 2 至第 5 小時之逐時降雨列為第 2 個變數序列，第 5 小時之雨量變數門檻對應於崩塌地圖則為此變數序之目標值，以此類推至全部資料編列完成。

而將資料分為訓練、驗證以及測試資料，其中以 101 年度至 106 年度間之資料進行模型之訓練驗證，其中各年度各逐時降雨區間隨機抽樣採一百萬筆資料作為模型的樣本，並以 101 至 102 年度區間至 104 至 105 年度各逐時降雨區間之抽樣樣本(共 400 萬筆，其中未崩塌共 2,033,174 筆，崩塌共 1,966,826 筆)進行訓練，而 105 至 106 年度區間之抽樣樣本(共 100 萬筆，其中未崩塌共 794,552 筆，崩塌共 205,448 筆)進行驗證，並設定參數 epochs 為 200，表示將進行 200 次的重複訓練過程；batch_size 為 51200，表示每次輸入模組訓練之資料為 51,200 筆；learning_rate 為 0.001，表示每次訓練所得之 gradient 將成以 0.001 後，修正 LSTM 內每個 Cell 內的參數權重；num_size 為 16，定義 LSTM 將有 16 個 Cell。而在計算模組之輸出值與實

際值之 loss function 則採用 BinaryCrossEntropy；最後，LSTM 的 activation 方式是 relu，最佳化方式則使用 Adam，其是一種改良式的 gradient descent。

七、自適性坡地崩塌潛勢評估模型驗證

本研究為明確表明生成對抗網路模型(RNN-LSTM⁺GAN)於坡地崩塌風險評估之預測能力，於模式建立之過程中，將前述之設定完成後，即開始進行訓練。並以測試數據來評估網路學習成果的效能以及神經網路輸出之預測準確率，其為在驗證之前總是希望能控制所有會影響誤判的因素，但造成坡面崩塌的因素非常複雜，且崩塌災害是屬於隨機發生的事件，因此本計畫將針對不同的崩塌因素組合進行模式之建立比較，詳表如下表 3-6，藉由坡地易損性分析亦可得到預測(評估)之崩塌與非崩塌地，而驗證可分為三種情形，包括正判、漏判、誤判，而準確率計算方式如下式：

$$A: \text{未發生準確率} = \frac{\text{正判(未崩)}}{\text{正判(未崩)} + \text{誤判}}$$

$$B: \text{誤判率} = \frac{\text{漏判}}{\text{正判(未崩)} + \text{誤判}}$$

$$C: \text{漏判率} = \frac{\text{誤判}}{\text{正判(已崩)} + \text{漏判}}$$

$$D: \text{已發生準確率} = \frac{\text{正判(已崩)}}{\text{正判(已崩)} + \text{漏判}}$$

$$E: \text{總體準確率} = \frac{\text{正判(未崩)} + \text{正判(已崩)}}{\text{正判(未崩)} + \text{誤判} + \text{正判(已崩)} + \text{漏判}}$$

表 3-6 混淆矩陣表

實際資料\預測資料		崩塌與否	
		否	是
崩塌與否	否	True Negative(TN)	False Positive (FP)
	是	False Negative(FN)	True Positive (TP)

而本計劃在一個分類任務的數據集中來自不同類別的樣本數目相差懸殊時，我們通常稱該數據集為「類別不平衡」。為了處理不平衡的類別，建議閾值移動作為處理不平衡的替代方法，因此本計畫參考實際資料以及預測資料之驗證成果中，透過 g-mean 計算類別決策閾值，而其亦可作為後續警戒值訂定之依據。因此，本計劃在坡地崩塌潛勢評估模型驗證 105-106 年度間資料即之分類精度概述如下表 3-7 所式，透過 GAN 中生成模型以及識別模型間之反覆訓練得到之整體準確率(ACC)為 84.89%，其中取得崩塌類別之切割閾值為 0.78。

表 3-7 GAN 模型測試資料驗證精度表

		分類結果		總計	使用者精度
		崩塌	未崩塌		
地真資料	崩塌	655483	139,069	794552	82.50%
	未崩塌	12065	193,383	205448	94.13%
總計		667548	332452	1000000	
生產者精度		98.19%	58.17%		84.89%

第三節 坡地崩塌風險評估指標警戒值訂定機制

在完成上述降雨危害評估模型之更新以及自適性坡地崩塌潛勢評估模型之優化後，在實際逐時降雨之應用上，由於兩者間考量之空間尺度不同，管理單元尺度中以鄰近之雨量站所建立之降雨危害評估模型作為降雨危害評估指標之參考，以下圖 3-32 為例，一個事件之逐時降雨(I_i , R_i)於降雨危害評估模型將會產生逐時之降雨危害評估值(H_i)，圖 3-32 之綠色趨勢線所示，而自適性坡地崩塌潛勢評估指標則以管理尺度單元內之坡面單元經過數值統計作為該單元之潛勢值依據，以下圖 3-33 為例，一個事件之逐時降雨(I_i , R_i)於自適性坡地崩塌潛勢評估模型將會於各坡面單元產生逐時之自適性坡地崩塌潛勢評估值(F_i)，但基於管理單元需一個崩塌潛勢代表值，本計畫初步先以該管理單元下之坡面單元的逐時潛勢值進行算術平均數作為該管理單元之坡地崩塌潛勢評估值(F_i)，如圖 3-33 之綠色趨勢線所示。

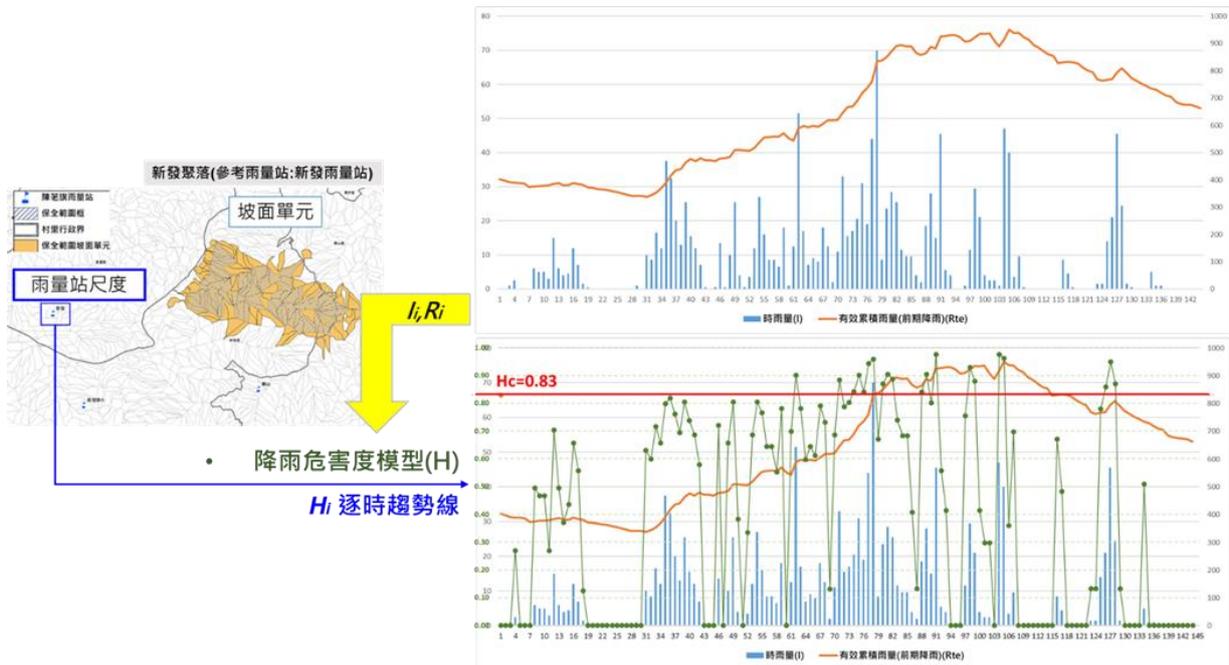


圖 3-32 降雨危害評估模型應用示意圖

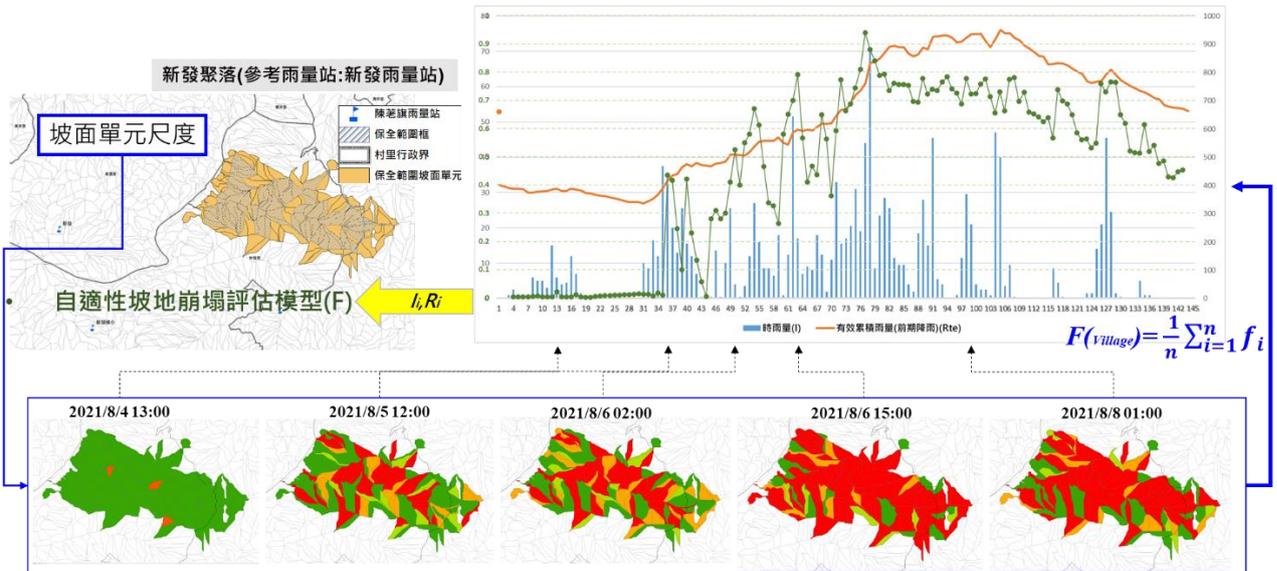


圖 3-33 自適性坡地崩塌潛勢評估模型應用示意圖

一、降雨危害及崩塌潛勢最小致災警戒線訂定

在界定各聚落所位在之村里降雨危害度最小致災門檻值(H_C)，則採用位於該聚落之行政區界(鄉鎮界)速報資料，其提供著該重點聚落實際發生崩塌災害之時間點以及雨量資料，附錄二為 95-110 年度間速報資料詳表，本計劃用速報資料所記錄時機點之雨量資料於歷史降雨比率曲線(H)，即可在圖面上點繪出最小致災門檻曲線，以訂定降雨危害警戒值(H_C)，以下圖 3-34(1)等比率曲線示意圖為例，其中將行政區內之速報資料(圖中藍點)繪製上去，以最小致災雨量之比率作為警戒曲線，即為警戒值等於 0.29 之曲線，如下圖 3-34(2)，而當某一時刻之雨量資料對應到等比率曲線中，若其對應之比率值大於本計畫團隊所訂定之警戒值，則可即代表該時段之時雨量及有效累積雨量達到警戒狀態，其具有客觀評估不同聚落警戒曲線之差異，以及具一致性的行政區警戒值訂定的優點。

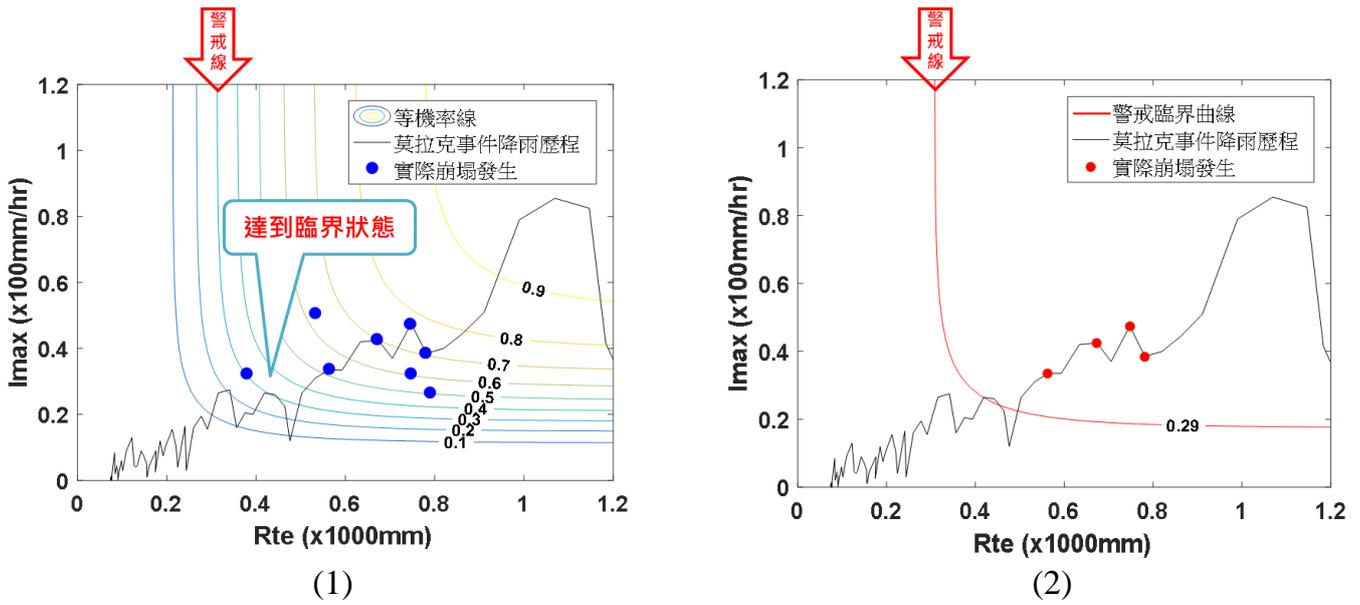


圖 3-34 警戒曲線訂定示意圖

而在崩塌潛勢機率最小致災門檻值(F_C)，本計畫針對各尺度管理單元所訂定之崩塌評估指標警戒值邏輯設計，而如同土石流潛勢溪流訂定的標準，以有保全對象之溪流去進行潛勢評估，本計畫將參考 110 年度 1726 條土石流影響範圍圖，以針對保全聚落周邊 2 公里內之坡面單元，並以當年度以及前五年度之全島崩塌地圖進行崩塌紀錄比對，其可於每年滾動性檢討，將各管理單元內前五年崩塌資料庫於崩塌潛勢評估模型(F)進行測試，並求取最佳崩塌分類切割閥值(g-mean)作為管理單元之崩塌潛勢最小致災警戒值(F_C)，其具有考量模式分類崩塌以及實際崩塌資訊最合宜之崩塌切割值，具有大數據崩塌雨量數據對警戒管理內容進行警戒值訂定模型之參考依據。

根據上述對本團隊已針對計畫南部集水區之 13 處具崩塌潛勢重點聚落進行降雨危害度最小致災警戒值(H_C)以及崩塌潛勢最小致災警戒值(F_C)訂定，並持續於各年度透過雨量資料庫的擴增更新以及現況植生更新，進而更新降雨危害度最小致災警戒值(H_C)以及崩塌潛勢機率最小致災警戒值(F_C)，如下表 3-8 所示，以後續應用於行政區警戒發布機制研析。

表 3-8 13 處南部集水區重點聚落村里崩塌與降雨警戒機率表(110 年度)

縣市	鄉(鎮、區)	村(里)	聚落	代表雨量站	min RH (mm)	警戒曲線(I1-Rte1)	
						H _c	F _c
南投縣	信義鄉	神木村	神木	神木村	320.5	0.82	0.62
		豐丘村	豐丘(信義)	豐丘	308	0.84	0.64
高雄市	桃源區	寶山里	新藤枝	御油山	555.6	0.81	0.72
			舊藤枝	御油山	555.6	0.81	0.61
			寶山	御油山	555.6	0.81	0.65
		梅山里	梅山口	梅山	601.8	0.95	0.71
	那瑪夏區	瑪雅里	瑪雅	表湖	445.9	0.92	0.68
		達卡努瓦里	達卡努瓦	民生	445.9	0.92	0.66
		南沙魯里	南沙魯	表湖	445.9	0.92	0.67
	甲仙區	東安里	白雲巷	新發	365	0.92	0.66
	六龜區	新發里	新發部落山邊	新發	308	0.83	0.66
		新發里	新開部落(26 鄰)	新發	308	0.83	0.66
		寶來里	竹林(16、17 鄰)	高中	595.9	0.81	0.57

二、崩塌風險警戒機制圖繪製

在前述訂定完本計畫試辦之 13 處南部重點聚落的降雨危害度最小致災警戒值(H_C)以及崩塌潛勢最小致災警戒值(F_C)，即可對各重點聚落繪製其崩塌風險警戒機制圖(如下圖 3- 35)，透過歷史降雨最小致災警戒曲線(H_{CL})及崩塌潛勢評估最小致災警戒曲線(F_{CL})分別劃定該崩塌風險警戒機制圖之 X 軸以及 Y 軸，當中的 X 軸所指的是降雨危害值(範圍從 0 到 1)，Y 軸所指的是崩塌潛勢機率值(範圍從 0 到 1)，並其可分為成四個次空間，是 H 低-F 低的範圍，乃屬安全性高的空間；而是 H 低-F 高的範圍以及 H 高-F 低的範圍，乃屬中高風險的空間，已存在崩塌風險的不確定性區域；而是 H 高-F 高的範圍，則屬於高風險的空間，當雨量紀錄累積至此，重點聚落則存在高度崩塌風險，應當要積極的進行預警或警戒作為。而當一降雨時段的雨量資訊(雨場開始至該時段間之最大降雨量以及有效累積雨量)分別於歷史降雨等比線曲線以及崩塌潛勢評估模型中之對應比率，並將其點(H_i, F_i)繪製於崩塌風險警戒機制圖，當該點碰觸到歷史降雨最小致災警戒曲線(H_{CL})則代表已達到高崩塌的情況，若降雨歷時點在延伸碰觸到崩塌易損度最小致災警戒曲線(F_{CL})，則應當積極進行疏散的狀態，並可細緻化的對坡面單元進行崩塌潛勢評估，可明確呈現高風險之坡面單元的位置，掌握何處發生崩塌的潛勢以及可能性較高，以進行相對應之警戒模式，更重要的一點則是不同的重點聚落則會存在不同的最小致災警戒值，這個概念融合了保全對象的暴露度精神在其中。

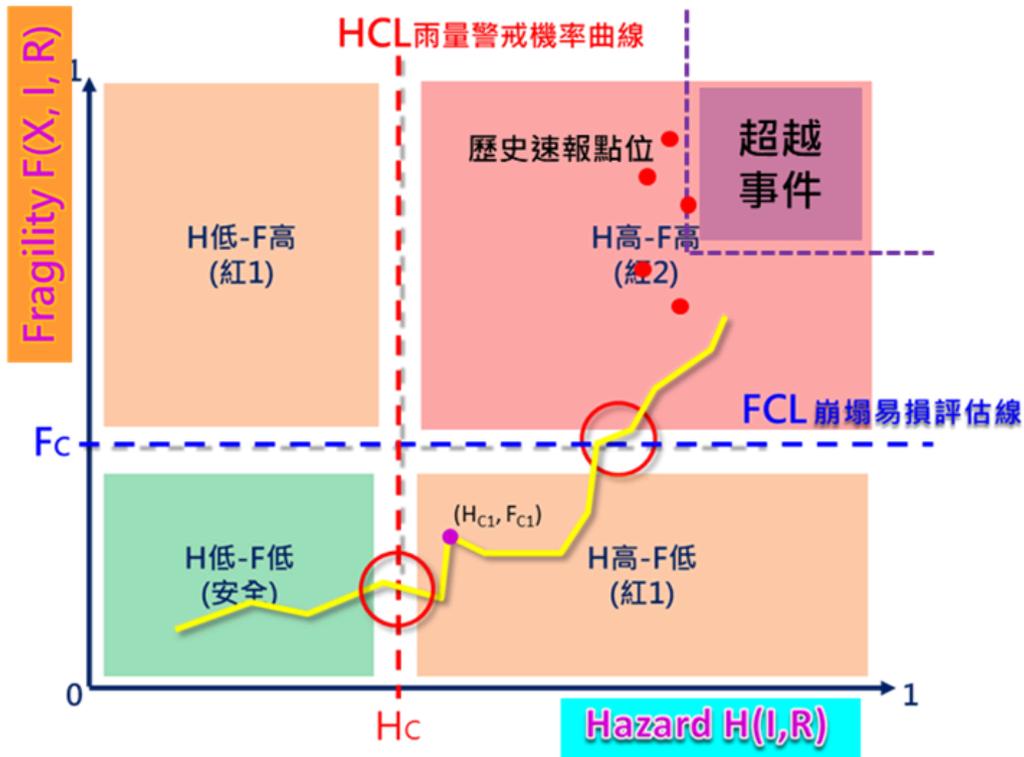


圖 3-35 崩塌風險警戒機制示意圖

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

第四章 自主防災崩塌警戒發布管理流程設計

第一節 行政區/社區警戒發布機制研析

本項工作主要目的為研析崩塌及土石流之複合型土砂災害警戒之行政區發布機制以及社區自主警戒管理發布機制，並自本研究計畫範圍內選擇豐丘聚落模擬崩塌及土石流之複合型土砂災害警戒發布歷程。

依據前期計畫計畫成果，崩塌警戒模式考量保全對象及管理單元大小，優先針對保全聚落定義警戒發布範圍，之後納入防災應變實務操作之需求，擴大警戒發布範圍，將聚落位置包含在村里等大小之行政區，改以行政區概念作為崩塌警戒發布範圍。本計畫以前期計畫成果，配合系統化崩塌風險評估流程，藉由警戒範圍內所包含之鄉鎮、村里、及保全聚落等的位置，視防災應變需求，逐一聚焦至不同尺度對象（縣市→鄉鎮→村里→社區），最終呈現出保全聚落的坡面單元分布，決定該保全聚落的崩塌雨量警戒值，作為發布警戒之判斷標準(如圖 4-1)。前述的崩塌警戒值的訂定，係利用崩塌潛勢評估模式、坡面單元及保全聚落管理單元，訂定崩塌雨量警戒值，作為警戒發布標準。

在今年的研究成果中，警戒發布對象為保全聚落管理單元，其行政區以村里為單位，針對具有高崩塌潛勢的聚落，訂定崩塌警戒值。本期計畫則進一步應用相同的警戒發布方式，擴大發布對象為以鄉(鎮、區)為基礎的行政區界範圍，做為崩塌警戒發布對象。如此能配合水保局目前土石流應變警戒發布至鄉(鎮、區)的做法，亦保留對重點保全聚落發布崩塌警戒的彈性，使崩塌警戒發布能因情況提供細緻資訊，供做情資研判。



圖 4-1 複合型土砂災害行政區警戒發布模式

本計畫所研擬之崩塌警戒發布機制，除以行政區為警戒發布範圍外，在發布條件及操作上，同時考慮土石流及崩塌二種坡地災害，引入複合型土砂災害的概念，以相同的警戒因子（例如雨量）作為警戒發布標準，訂定相同的警戒等級（例如紅黃警戒），使水保局在崩塌警戒操作上，與現行土石流警戒發布有相同模式，以利整合至現行防災應變體制內。

由於土石流及崩塌警戒都與雨量有關，且現行土石流防災警戒機制係以預報累積雨量為黃色警戒基準，實際累積雨量為紅色警戒基準，因此本計畫所擬行政區警戒發布機制將同樣以雨量做為發布參考，配合本計畫研究成果，利用 H 及 F 指標來判斷是否有達到崩塌警戒，並分別考慮土石流雨量警戒值及崩塌雨量警戒值，據以建議一致之警戒發布流程及機制。

一、 多尺度警戒發布流程如圖 4-2 所示，說明如下：

坡地崩塌及土石流聚落單元—決定行政區範圍以重點聚落所在村里為基礎，考量位在同一鄉（鎮、區）行政區內的崩塌警戒重點保全聚落，彙整為統一警戒發布對象，即以鄉（鎮、區）為警戒研判的基礎。

在應變過程中，崩塌警戒發布流程先以大尺度的縣、市範圍為判斷對象，

一旦縣、市範圍內的各鄉、鎮、區有任何一處雨量達到崩塌警戒值，則會對該縣、市發出警戒。若對崩塌警戒位置有進一步了解之需求，則可以聚焦至鄉、鎮、區尺度，以顯示達崩塌警戒所在之村里及聚落。本計畫研擬之崩塌警戒流程可細緻到聚落尺度，達到顯示各坡面單元之精細度，提供災害應變主管機關掌握崩塌風險資訊。

二、崩塌警戒發布條件—決定崩塌評估指標警戒值

本計畫所訂定之崩塌評估指標警戒值，訂定各別重點聚落的崩塌風險評估指標警戒值，如圖 4-2；其中崩塌最小致災警戒值考量 H 及 F 二種指標，此二種指標各別最小之 $minH_C$ 以及 $minF_C$ 來代表達到臨界狀況 (H_C 及 F_C)，完成鄉（鎮、區）警戒值訂定之後，再將行政區內所有重點保全聚落一起考量，亦即挑選行政區內，各重點聚落之崩塌降雨及崩塌警戒機率值中最小者為此行政區警戒值。

三、預警發布判斷機制—考量土石流警戒及崩塌警戒

警戒發布以雨量值為判斷依據，配合水保局現行土石流紅黃警戒的做法，分別以預報雨量值（黃色值）及實際雨量值（紅色警戒）來判斷該行政區是否有到達警戒發布標準。實務上的警戒流程中，由於土石流及崩塌二者的警戒值不同，在發布時間點上，預期會有先後之關係。本計畫以崩塌分析為主，因此以崩塌警戒為優先判斷，當達到崩塌警戒時，可列出該行政區土石流警戒發布的狀況（有無達土石流警戒），相互參考。

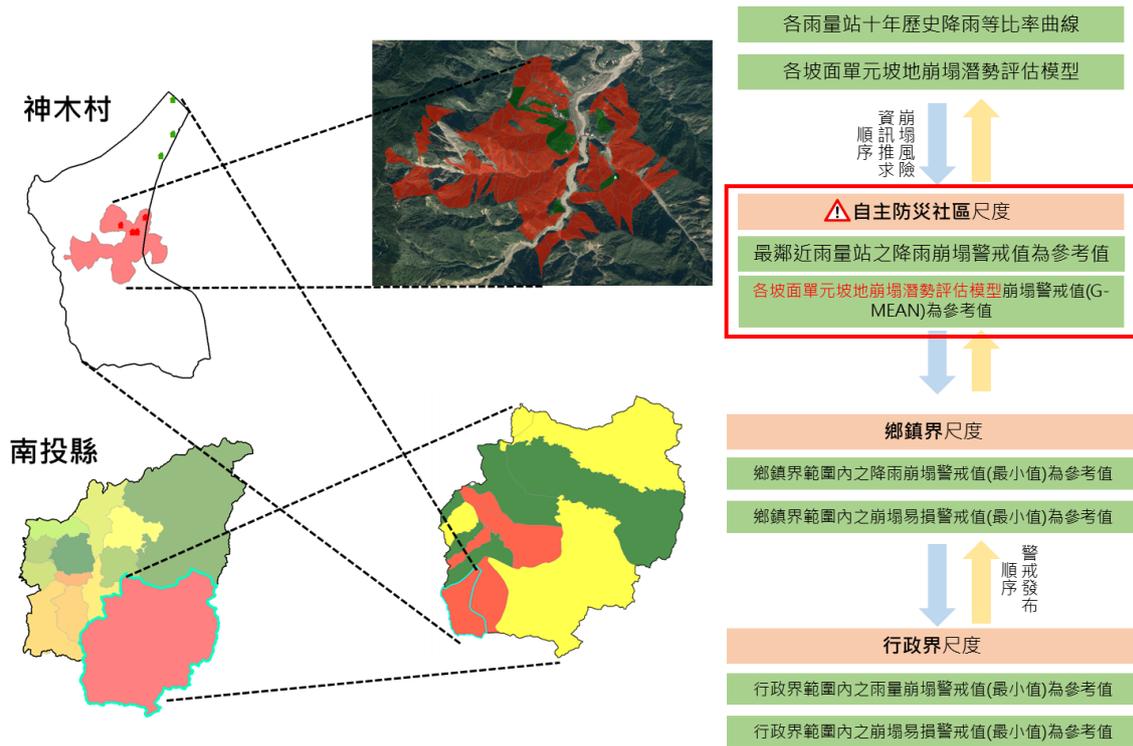


圖 4-2 多尺度崩塌風險資訊與精準防災策略研擬

在崩塌警發布流程研擬中，本計畫利用雙參數評估模式及降雨因子，同時考量 H 及 F 指標，並採 12 小時窗格之最大值警戒指標 ($Max(Hi)_{12hr}$; $Max(Fi)_{12hr}$) 作為警戒資訊呈現(圖 4-3)，其崩塌警戒發佈流程調整如圖 4-4。崩塌警戒發佈流程包含黃色、紅色及解除警戒 3 階段，說明如下。

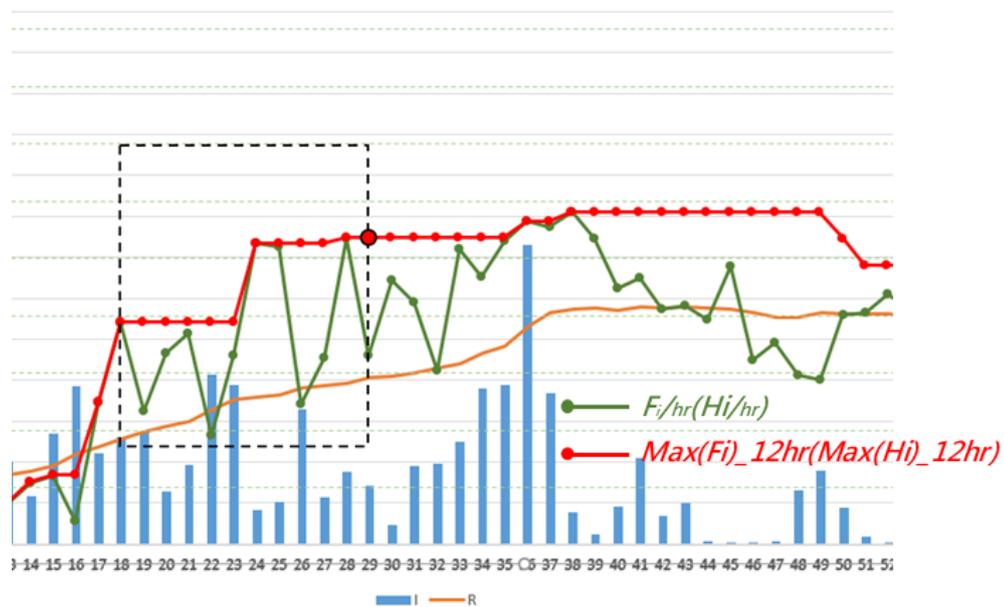


圖 4-3 警戒資訊呈現示意圖

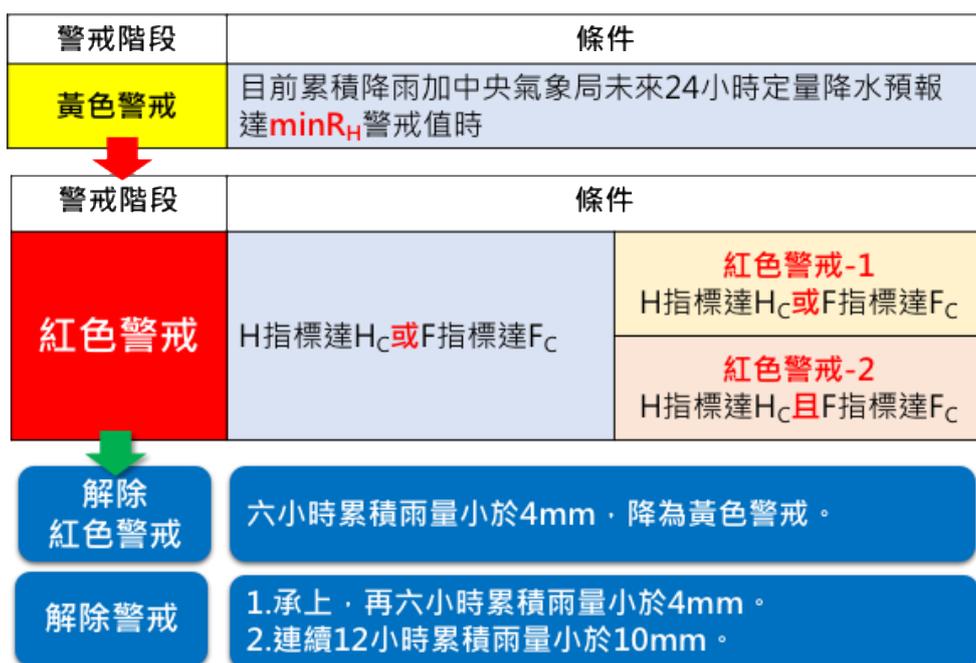


圖 4-4 崩塌警戒發佈流程 (考量 H 及 F 指標)

一、黃色警戒

目前累積降雨加上中央氣象局未來 24 小時定量降水預報達 $\min R_H$ 時，而求取雨量警戒曲線(H_{CL})的最小累積降雨值，如下圖 4-5 所示，即 $\min R_H$ ，此門檻值即可作為黃色警戒之依據。

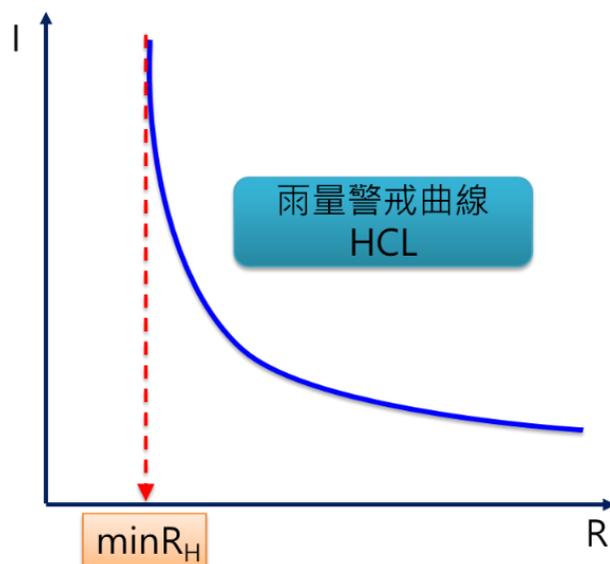


圖 4-5 最小累積降雨警戒值訂定示意圖

二、紅色警戒

紅色警戒判斷依據為 H 指標($Max(H_i)_{12hr}$)及 F 指標($Max(F_i)_{12hr}$)是否達到警戒值。若 H 指標或 F 指標其中一項達到警戒值，則發佈紅色警戒。而紅色警戒中，本計畫依據 H 指標或 F 指標是否同時達到警戒值，再細分為二個等級：紅色警戒 1 及紅色警戒 2，提供防災業務上之額外參考資料。若是達到 H 指標或 F 指標其中一項警戒值，則為紅色警戒 1；若二者皆達到警戒值，則定義紅色警戒 2。紅色警戒 1 及紅色警戒 2 有危險程度上的不同，紅色警戒 2 危險程度較高。

臺灣歷經多起重大天然災害，廣域防救災技術已達世界水準，然多數防災架構多以中央主管機關委託研發及應用，各類災害潛勢圖資、降雨預報及災害預警，僅能達到鄉鎮層級或村里層級，社區層級或邊坡層級等局部區域大比例尺的防災預警成果仍相當缺乏，致使地方政府難以聚焦於易致災。因此本計畫將建議社區自主防災需考量到社區管理層須優先接收到崩塌警戒之預警推播，若等到歷時雨量達到 H 指標或 F 指標，在進行防災應變決策恐怕因災害規模已達依訂標準，而導致防災決策難以執行，因此本計畫建議針對 H 指標或 F 指標下修一個標準差，作為社區警戒推播之標準，而其標準後續可再依據實測過程以及防災需求進行調整，而下圖以新開部落社區為例，新開部落社區在前章節訂定之 H_C 以及 F_C 分別為 0.8 與 0.66，而分別下修一個標準差為 H_C' 以及 F_C' 分別為 0.73 與 0.54，作為新開部落社區之社區警戒推播之標準，並依照崩塌風險警戒機制圖之不同階段建議不同對象之接收警戒推播，以提高民眾之風險警戒意識，因此本案設計社區自主防災警戒推播流程規劃如下圖 4-6 所示，當災害規模($I(i)$, $R(i)$)達一定標準觸碰到(F_C' , H_C')即下圖 4-6 之黃色區塊則建議社區管理層級提前接收警戒推播，而當($I(i)$, $R(i)$) 達一定標準觸碰到 F_C 或 H_C ，即下圖 4-6 之橘色(即紅 1)區塊則社區保全對象主動接收警戒推播，並建議當($I(i)$, $R(i)$)達一定標準觸碰

到 F_c 且 H_c ，即下圖 4-6 之紅色(即紅 2)區塊則建議社區以完成全面性疏散，並以此為基礎以作為未來進行推播系統雛型之參考。

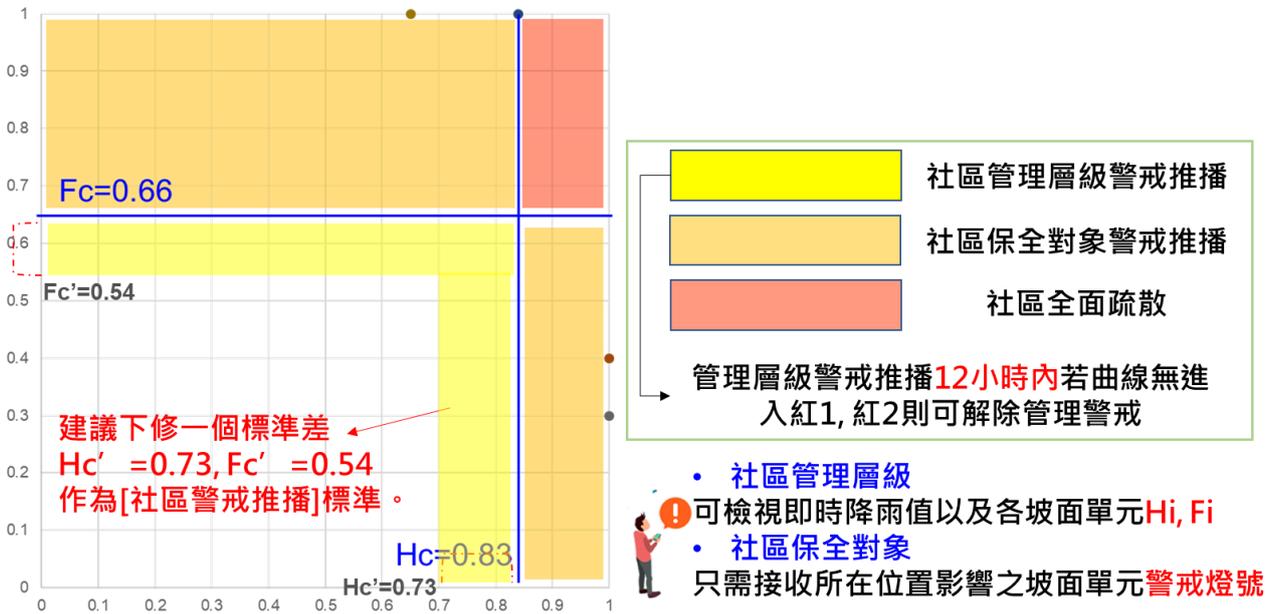


圖 4-6 自主防災警戒推播流程規劃示意圖

三、解除警戒

解除時機為雨場結束後，連續 12 小時內，時雨量都小於 4 mm 或累積雨量小於 10 mm 時外，透過崩塌風險警戒機制圖的逐時之雙評估曲線(H_i , F_i)離開紅 1, 紅 2 則可解除管理警戒，考量雨量對引發崩塌可能有時間延遲性，因此應變中心解除應變後，需要觀察一段時間(例如 12 小時)，再發佈解除崩塌警戒，而此設計在試作案例結果中是可行的，考量崩塌發生的延遲特性，建議未來可以試行 24 小時或 48 小時的觀察期，用以評估崩塌警戒解除條件。

第二節 系統化崩塌警戒機制於自主防災評估

為能應用本計畫多尺度崩塌警戒發布機制，針對不同區域（行政區）空間尺度提出警戒流程，經前節說明，本計畫研擬之作法可行。為能利於未來在業務上合併崩塌警戒預報及土石流警戒預報，本計畫規劃並開發崩塌警戒展示模組，將多尺度崩塌警戒發布流程系統化，並試作擷取中央氣象局的雨量資訊，透過系統化（線上操作）的方式提供崩塌警戒分析結果，並將崩塌警戒資料提供給水保局防災應變系統，結合土石流防災資訊網來呈現颱風、豪雨事件時，土石流警戒及崩塌警戒的即時資訊，資料提供及交換流程概念如圖 4-7。

本計畫嘗試介接土石流防災應變系統(FEMA)雨量資訊於崩塌警戒展示模組中，已完成相關程式碼（圖 4-8）開發及試作介接，即時接收中央氣象局雨量資料。崩塌警戒展示模組為線上操作環境，可以 24 小時不間斷運作，未來當颱風、豪雨來襲時，可立即呈現各行政區崩塌紅黃警戒狀態。

為因應每年崩塌警戒機率值調整作業，崩塌警戒展示模組可輸入或整批資料匯入每個行政區的降雨危害度最小致災警戒值(H_C)及崩塌易損度最小致災警戒值(F_C)，於颱風、豪雨事件發生時，可透過中央氣象局雨量資訊判斷該行政區是否達崩塌紅黃警戒，如圖 4-9 所示，圖中以那魯灣聚落為例，可顯示聚落中每一塊邊坡單元是否達紅黃警戒的狀態，並提供崩塌警戒分析速報。

本計畫開發之崩塌警戒展示模組已完成以縣（市）、鄉（鎮、區）為基礎的行政區界警戒發布範圍，圖 4-10 所示為以烏來區為警戒發布範圍，雨量達到崩塌警戒值時，系統將呈現紅色表示該區達到紅色警戒，以提醒使用者及業管單位注意。



圖 4-7 系統化流程圖

```

Search by name or XPath

<DataSet xmlns="http://tempuri.org/"
  <xs:schema xmlns="" xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema" xmlns:msdata="urn:schemas-microsoft-com:xml-msdata" id="NewDataSet"
    <xss:element name="NewDataSet" msdata:IsDataSet="true" msdata:UseCurrentLocale="true" />
  </xs:schema>
  <diffgr:diffgram xmlns:msdata="urn:schemas-microsoft-com:xml-msdata" xmlns:diffgr="urn:schemas-microsoft-com:xml-diffgram-v1"
    <NewDataSet xmlns=""
      <Table1 diffgr:id="Table11" msdata:rowOrder="0" diffgr:hasChanges="Inserted" />
      <Table1 diffgr:id="Table12" msdata:rowOrder="1" diffgr:hasChanges="Inserted" />
      <Table1 diffgr:id="Table13" msdata:rowOrder="2" diffgr:hasChanges="Inserted"
        <DEBRISNO> 桃市DF001 </DEBRISNO>
        <COUNTY> 桃園市 </COUNTY>
        <TOWN> 龜山區 </TOWN>
        <VILL> 免坑里 </VILL>
        <KML>
          121.378219268451,24.9842314201839,0 121.37797823983,24.9844438555354,0 121.377899531089,24.9845414795537,0
          121.37751336685,24.9847869982696,0 121.377533567645,24.9848277841423,0 121.37731874582,24.9850131189931,0
          121.377018679341,24.9852595417780,0 121.376944527119,24.9853275382338,0 121.376749423869,24.9854593383627,0
          121.376536681403,24.9857097798592,0 121.37640014478,24.9858678638643,0 121.376247182329,24.9860249968692,0
          121.376084952745,24.9861440486759,0 121.375844670883,24.9862996870885,0
        </KML>
        <lat> 24.9825726 </lat>
        <lon> 121.376678 </lon>
        <stationid_major> 1207 </stationid_major>
        <stationid_minor> 10244 </stationid_minor>
        <name> 山佳 </name>
        <County1> 新北市 </County1>
        <Town1> 樹林區 </Town1>
        <alert_value> 550 </alert_value>
        <RT> 3.37340474 </RT>
        <QPF6> 8.512551 </QPF6>
        <QPF12> 12.3774452 </QPF12>
        <QPF18> 13.3801937 </QPF18>
        <QPF24> 13.3801937 </QPF24>
        <QPFTime> 2017-11-08 14:00:00 </QPFTime>
        <QPF6Time> 2017-11-08 14:00:00-2017-11-08 20:00:00 </QPF6Time>
        <QPF12Time> 2017-11-08 20:00:00-2017-11-09 02:00:00 </QPF12Time>
        <QPF18Time> 2017-11-09 02:00:00-2017-11-09 08:00:00 </QPF18Time>
        <QPF24Time> 2017-11-09 08:00:00-2017-11-09 14:00:00 </QPF24Time>
      </Table1>
    </NewDataSet>
  </diffgr:diffgram>
  <Table1 diffgr:id="Table14" msdata:rowOrder="3" diffgr:hasChanges="Inserted" />

```

圖 4-8 崩塌警戒展示模組介接 FEMA 雨量資料

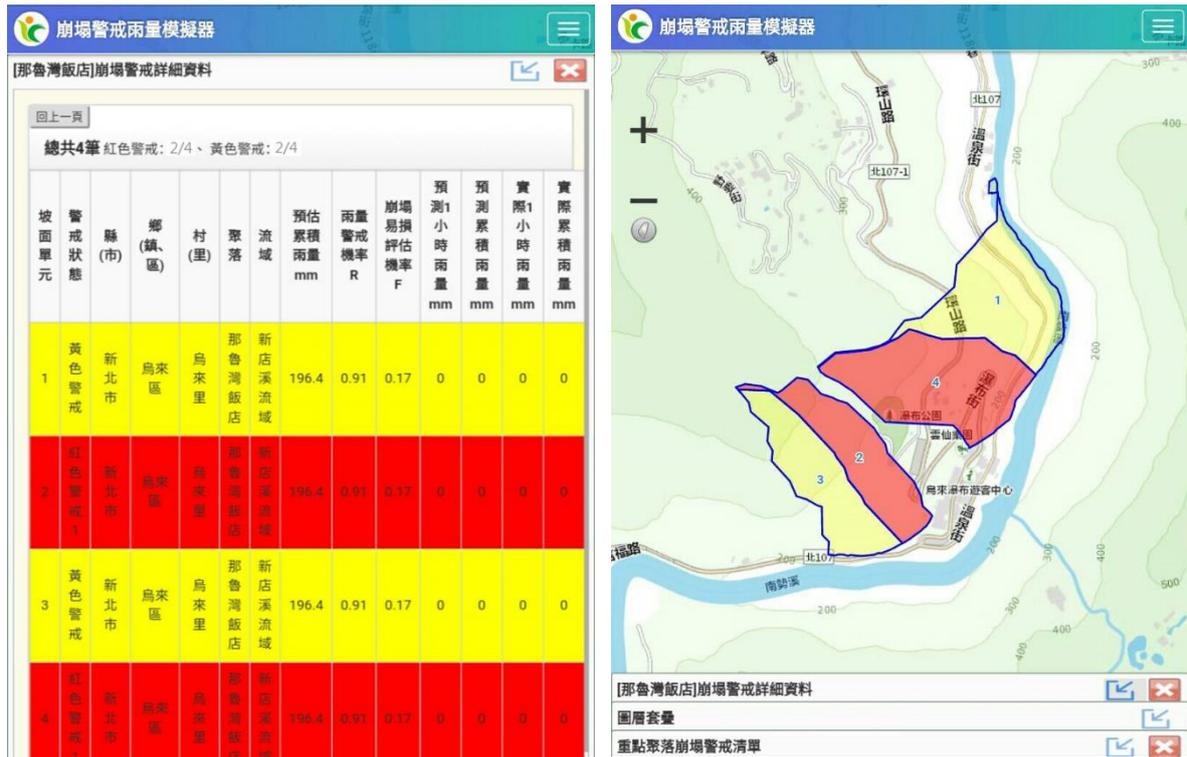


圖 4-9 崩塌紅黃警戒值及圖台展示



圖 4-10 以行政區發布崩塌警戒展示

本計畫以 109 年度 0522 豪雨為例，展示崩塌警戒模組詳細操作流程如下所述：

- 一、 開啟崩塌警戒展示模組後（圖 4- 11），於首頁點選下方圖層套疊功能，可顯示 18 處重點聚落清單（圖 4- 12），以豐丘聚落為例，勾選後，系統則跳至豐丘聚落範圍並展示其坡面單元，如圖 4- 13 所示。
- 二、 於首頁點選右上角按鈕，可顯示 18 處重點聚落警戒清單（圖 4- 14），此清單可看出聚落的警戒狀態，也可匯出及匯入降雨危害度最小致災警戒值(H_c)及崩塌易損度最小致災警戒值(F_c)。
- 三、 以 106 年 0601 豪雨事件為例，點選黃框處詳細資料，系統依據介接 FEMA 的雨量資訊，可呈現達紅、黃警戒時的狀態及每個坡面單元中紅、黃警戒值 (F_c 值及 H_c 值) 及實際雨量值，如圖 4- 15 所示；點選地圖可呈現每一塊坡面單元的警戒狀態及屬性資料，如圖 4- 16 所示。

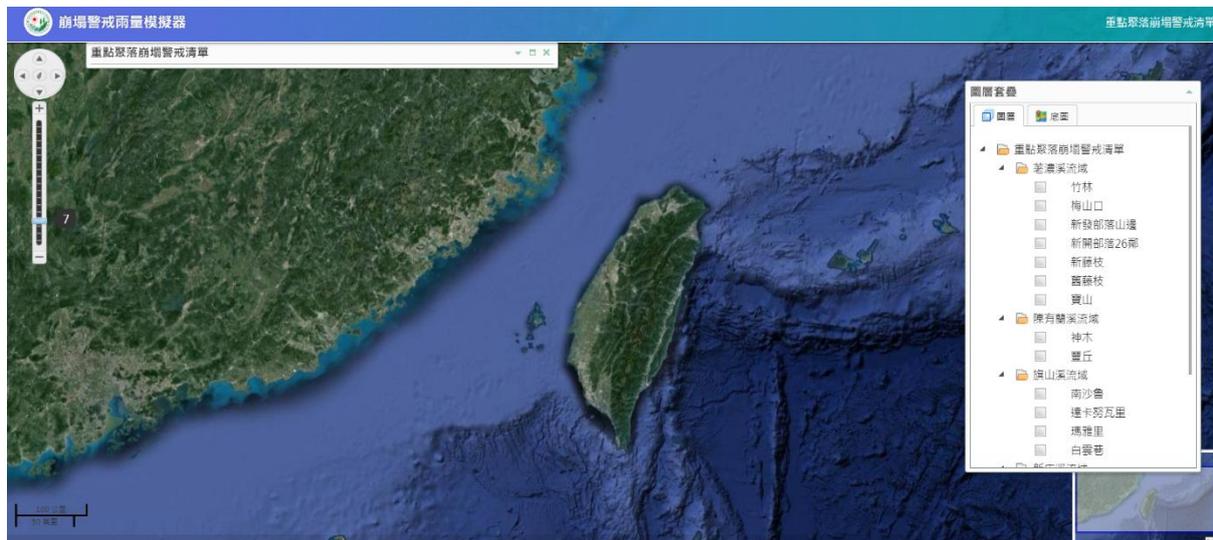


圖 4- 11 崩塌警戒展示模組首頁

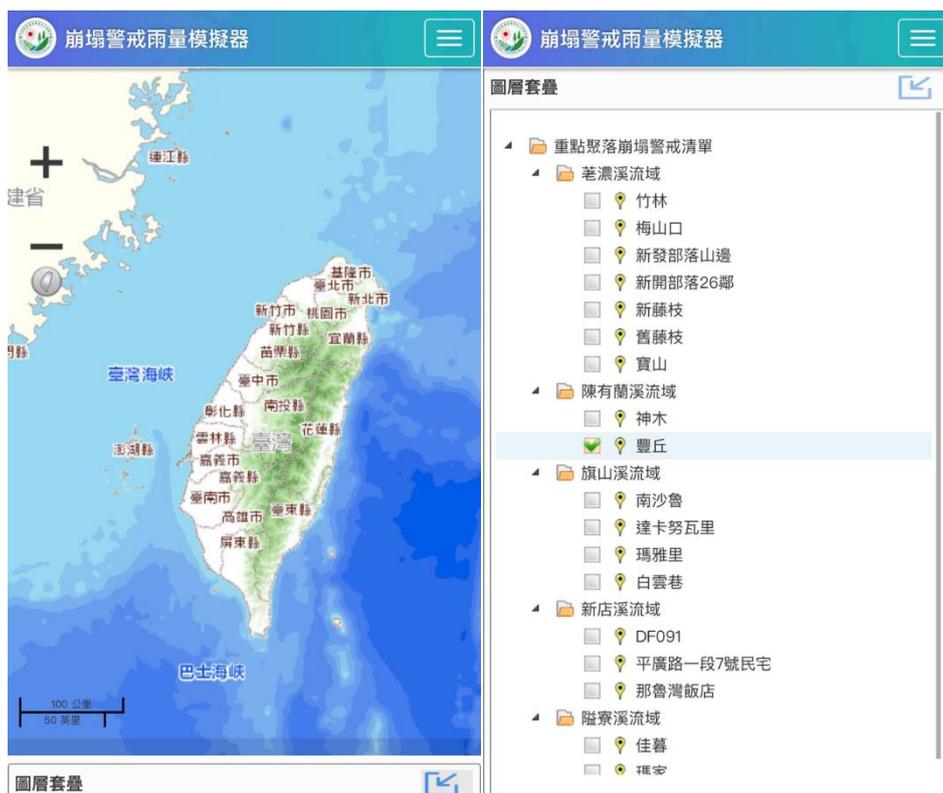


圖 4-12 圖層套疊功能展示



圖 4-13 崩塌警戒展示模組--豐丘聚落坡面單元



圖 4-14 17 處重點聚落崩塌警戒清單展示



圖 4-15 達警戒聚落詳細資訊

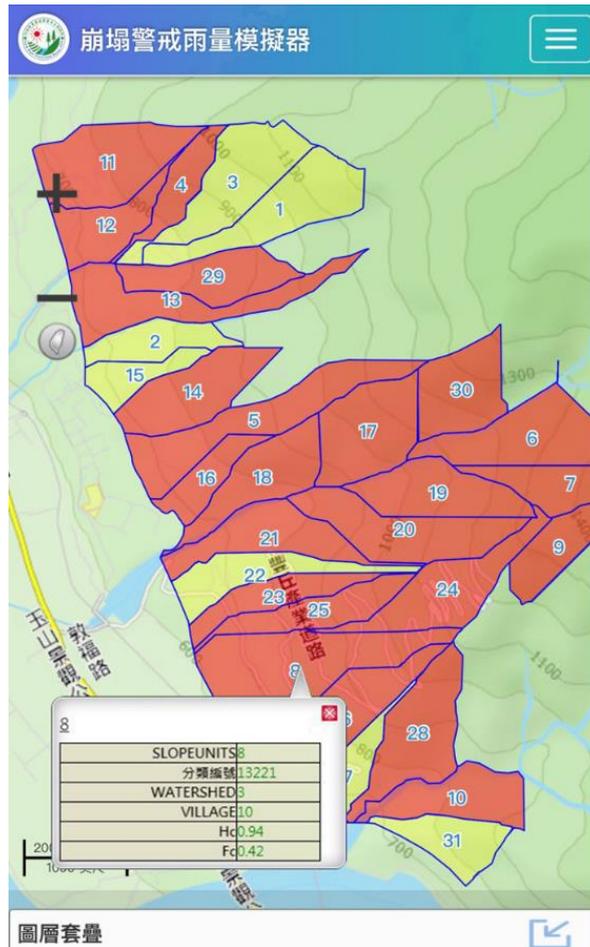


圖 4-16 達警戒坡面單元及屬性展示

本計畫所開發崩塌警戒展示模組經由試作成果，展示利用系統化操作方式協助自主防災崩塌警戒發布之可行性，同時該警戒模組已納入不同尺度行政區以及社區警戒範圍，故可於災害應變期間，配合各級政府單位以及社區管理層級提供崩塌警戒資訊(圖 4-17)。未來可經由增加境內受崩塌潛勢影響的保全聚落數目，進一步了解各行政區內的「崩塌熱區」，同時突顯本研究計畫所規劃多尺度崩塌警戒流程的實用性，達到「精準防災」的目標。

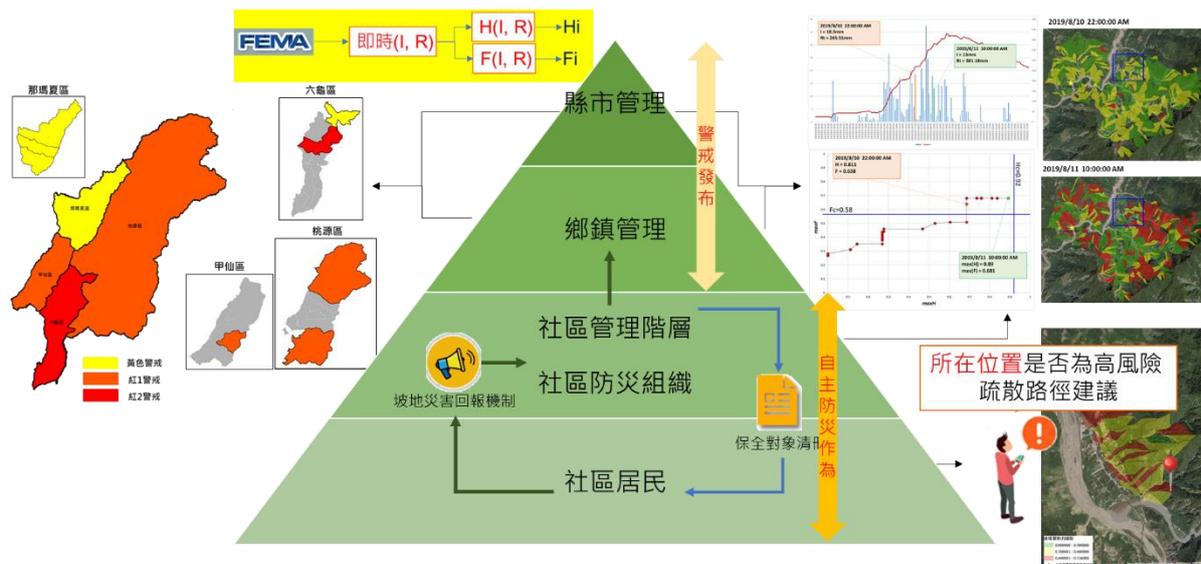


圖 4-17 崩塌災害自主防災資訊管理架構設計

第三節 崩塌風險警戒機制以及自主防災管理推播模式實測

本計畫過去亦於水保局土石流防災中心應變小組開設期間，協助提供 103-109 年度已完成之 13 處南部重點聚落崩塌紅黃警戒發布，並於後續根據本年度實測結果並檢討 103-110 年度之速報資料並修正管理值，進而在今年度於水保局土石流防災中心應變小組開設期間，完成模擬南部集水區之 15 處重點聚落崩塌紅黃警戒發布，其中包含彩雲颱風暨 0605 豪雨、0621 豪雨、烟花颱風、0731 豪雨以及盧碧颱風暨 0806 水災等等。此外，在降雨雨場開始以前，根據自適性崩塌潛勢評估模型中，可提供崩塌潛勢圖並套疊保全對象之位置圖資(如下圖 4- 18)以及周邊道路圖(如下圖 4- 19)，其可讓管理層級能夠於災害發生前掌握全面之保全對象資訊，以及擬定合宜之疏散路線，進行風險評估，以作為社區災前應變之整備參考。

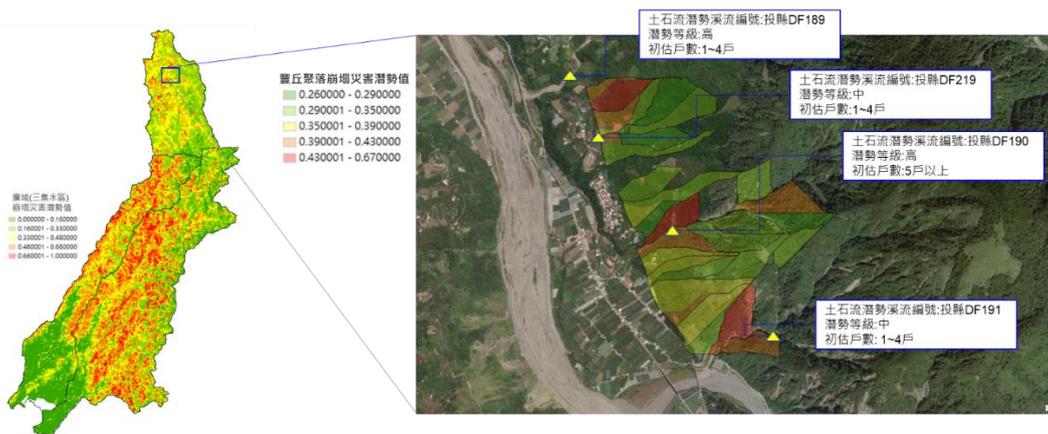


圖 4- 18 豐丘聚落地文崩塌潛勢分布與保全對象空間套疊圖

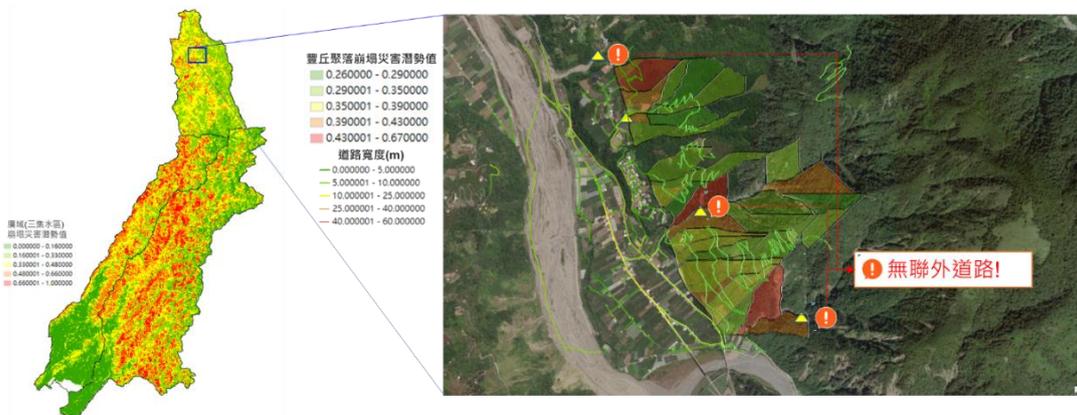


圖 4- 19 豐丘聚落地文崩塌潛勢分布與疏散道路評估圖

在颱風豪雨事件逐時實測模擬中，本計畫團隊利用前期計畫所挑選南部集水區之 1 處重點聚落，作為自主防災社區管理可行性評估之對象，以下以新開部落社區為例，並實測模擬今年度(110)之 0731 豪雨以及盧碧颱風暨 0806 水災的逐時降雨的社區自主防災管理推播試作，在雨場開始前，所需關注之對象為 1. 新開部落社區鄰近之雨量站，為新發雨量站，2. 新開部落社區範圍內所有之坡面單元，3. 新開部落社區之崩塌風險警戒機制圖，如下圖 4- 20 所示，以下分別針對 0731 豪雨以及盧碧颱風暨 0806 水災的逐時降雨的社區自主防災管理推播試作進行說明：

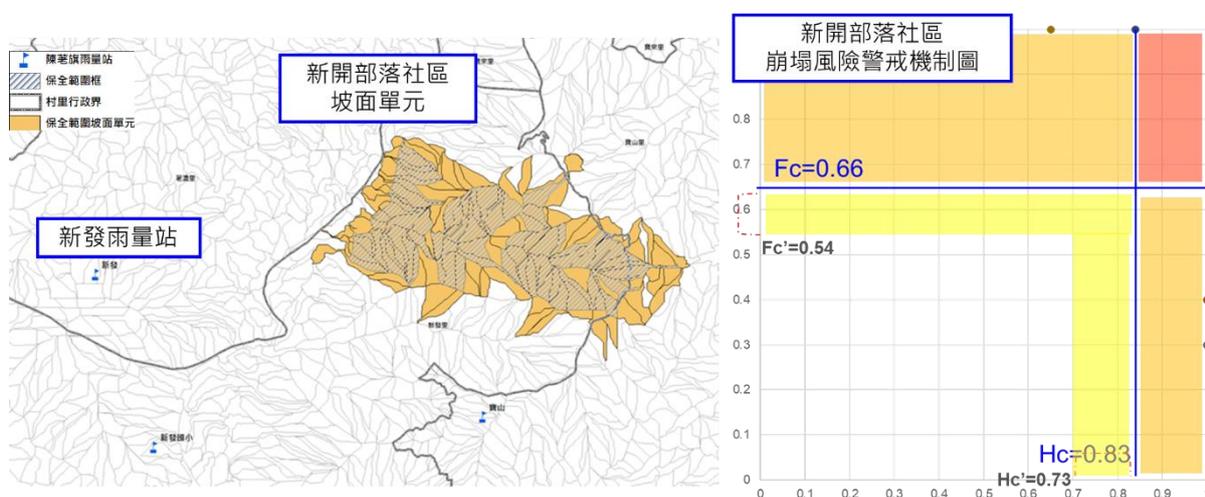


圖 4- 20 應變災害管理單元關注對象說明圖

1. 0731 豪雨試作

在災時應變時，本計畫以新發雨量站模擬 2021/7/31 14:00 至 2021/8/3 07:00 區間之降雨歷時，評估各降雨逐時於本模式之推播階段程序，2021/08/01 00:00 時，當降雨規模($I(i)$, $R(i)$)達 31mm 以及 247.53mm 時， H 指標($Max(Hi)_{12hr}$)及 F 指標($Max(Fi)_{12hr}$)為(0.74, 0.00)， H 指標以達到社區防災警戒推播階段($Max(Hi)_{12hr}>0.73$)，而當降雨經歷 14 小時於 2021/08/01 13:00 時，降雨規模($I(i)$, $R(i)$)為 21mm 以及 423.77mm 時， H 指標($Max(Hi)_{12hr}$)及 F 指標($Max(Fi)_{12hr}$)為(0.82, 0.70)， F 指標以達到紅 1 警戒推播階段($Max(Fi)_{12hr}>0.66$)，並於 2 小時候於 2021/08/01 15:00 時，

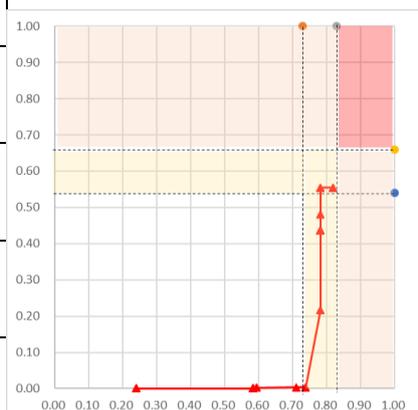
降雨規模($I(i)$, $R(i)$)為 42mm 以及 478.72mm 時， H 指標($Max(Hi)_{12hr}$)及 F 指標($Max(Fi)_{12hr}$)為(0.85, 0.70)， H 指標以及 F 指標同時達到紅 2 警戒推播階段($Max(Hi)_{12hr}>0.83$ & $Max(Fi)_{12hr}>0.66$)，此時同為水保局土石流應變階段之紅色警戒，當降雨歷程持續 15 小時後，於 2021/08/02 05:00 時， H 指標($Max(Hi)_{12hr}$)及 F 指標($Max(Fi)_{12hr}$)為(0.66, 0.69)，此時 H 指標($Max(Hi)_{12hr}$)已小於 $H_c(0.83)$ ，但 F 指標($Max(Fi)_{12hr}$)仍大於 $F_c(0.66)$ ，因此維持紅 1 警戒，歷經 4 小時持續之降雨，於 2021/08/02 08:00 時， H 指標($Max(Hi)_{12hr}$)及 F 指標($Max(Fi)_{12hr}$)為(0.7817, 0.6562)，該階段處於解除紅色警戒，但仍維持社區警戒階段，降雨持續經歷 11 小時，水保局土石流應變階段已由紅色降為黃色警戒，而本團隊模式則是於社區警戒階段維持 22 小時後解除管理警戒階段，下表 4- 1 及圖 4- 21 為各降雨歷程風險警戒階段說明詳表。

而整體在 0731 豪雨雨場中，應變期間達 67 小時，其中共 19 小時為紅色警戒階段，包含 15 小時紅 2 警戒，屬於最高風險階段。

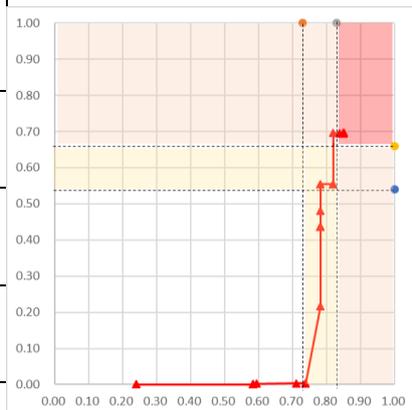
表 4-1 新開部落社區於 0731 豪雨降雨歷程風險警戒階段說明

時間	時雨量	有效累積雨量 (前期降雨)	Max(Hi)_12h r	Max(Fi)_12h r	水保局應變 階段	本模式風險警戒階段
2021/7/31 14:00	2.5	159.51	0.2391	0.0000		
2021/7/31 15:00	11.5	167.13	0.2391	0.0000		
2021/7/31 16:00	5	172.67	0.5842	0.0000		
2021/7/31 17:00	1	172.64	0.5842	0.0000	水保局(黃)	
2021/7/31 18:00	0.5	172.69	0.5842	0.0000		
2021/7/31 19:00	0	172.65	0.5842	0.0004		

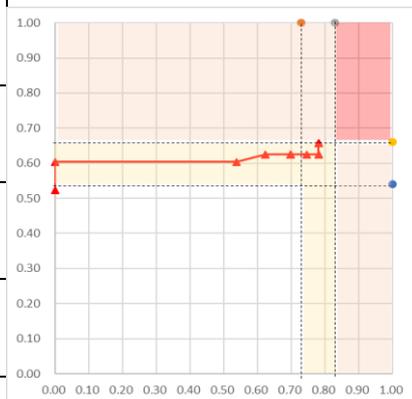
2021/7/31 20:00	2	173.21	0.5842	0.0004	
2021/7/31 21:00	6	180.14	0.5842	0.0026	
2021/7/31 22:00	13	190.7	0.5938	0.0029	
2021/7/31 23:00	27.5	214.62	0.7106	0.0029	
2021/8/1 00:00	31	247.53	0.7385	0.0036	社區警戒(Hi>Hc')
2021/8/1 01:00	18	265.45	0.7385	0.2174	
2021/8/1 02:00	41.5	306.45	0.7822	0.4368	
2021/8/1 03:00	13.5	322.32	0.7822	0.4368	
2021/8/1 04:00	6.5	328.07	0.7822	0.4368	
2021/8/1 05:00	25	344.56	0.7822	0.4368	
2021/8/1 06:00	20	366.37	0.7822	0.4368	
2021/8/1 07:00	7.5	372.78	0.7822	0.4800	
2021/8/1 08:00	11	381.95	0.7822	0.5539	
2021/8/1 09:00	6.5	386.23	0.7822	0.5539	
2021/8/1 10:00	10	395.34	0.7822	0.5539	
2021/8/1 11:00	31.5	407.54	0.8190	0.5539	
2021/8/1 12:00	25.5	423.77	0.8190	0.5539	
2021/8/1 13:00	21	447.33	0.8190	0.6958	紅 1(Fi>Fc)
2021/8/1 14:00	4.5	449.09	0.8190	0.6958	



2021/8/1 15:00	42	478.72	0.8507	0.6958	水保局(紅)	紅 2(Hi>Hc)
2021/8/1 16:00	21	504.78	0.8507	0.6958		
2021/8/1 17:00	35	532.59	0.8507	0.6958		
2021/8/1 18:00	8	545.74	0.8507	0.6958		
2021/8/1 19:00	9	555.74	0.8507	0.6958		
2021/8/1 20:00	2	557.68	0.8507	0.6958		
2021/8/1 21:00	0.5	556.34	0.8507	0.6958		
2021/8/1 22:00	0	554.12	0.8507	0.6958		
2021/8/1 23:00	0	549.32	0.8507	0.6958		
2021/8/2 00:00	0.5	538.45	0.8507	0.6958		
2021/8/2 01:00	10	540.8	0.8507	0.6935		紅 2 降紅 1(Hi<Hc)
2021/8/2 02:00	6	534.85	0.8507	0.6935		
2021/8/2 03:00	4	531.86	0.8377	0.6935		
2021/8/2 04:00	5.5	533.79	0.8377	0.6935		
2021/8/2 05:00	3	537.39	0.6560	0.6935		
2021/8/2 06:00	22	544.1	0.7817	0.6935		解除紅(Fi>Fc)，維持社區警戒
2021/8/2 07:00	14	551.16	0.7817	0.6935		
2021/8/2 08:00	2	551.4	0.7817	0.6562		
2021/8/2 09:00	1	548.9	0.7817	0.6562		



2021/8/2 10:00	4	547.6	0.7817	0.6562	
2021/8/2 11:00	0.5	531.09	0.7817	0.6562	
2021/8/2 12:00	1.5	522.05	0.7817	0.6562	
2021/8/2 13:00	13	519.67	0.7817	0.6562	
2021/8/2 14:00	7	524.82	0.7817	0.6562	
2021/8/2 15:00	9	526	0.7817	0.6243	
2021/8/2 16:00	6.5	517.21	0.7817	0.6243	
2021/8/2 17:00	0.5	511.49	0.7817	0.6243	
2021/8/2 18:00	0	503.26	0.7461	0.6243	水保局 (紅降黃)
2021/8/2 19:00	0.5	500.06	0.6985	0.6243	
2021/8/2 20:00	0.5	501.59	0.6985	0.6243	
2021/8/2 21:00	0	498.07	0.6985	0.6243	
2021/8/2 22:00	0	496.49	0.6985	0.6243	
2021/8/2 23:00	0	493.05	0.6985	0.6243	
2021/8/3 00:00	0	484.91	0.6985	0.6243	
2021/8/3 01:00	0	477.34	0.6238	0.6243	
2021/8/3 02:00	0	467.15	0.6238	0.6243	
2021/8/3 03:00	0	460.15	0.5385	0.6039	
2021/8/3 04:00	0	459.4	0.0000	0.6039	



2021/8/3 05:00	0	455.76	0.0000	0.5235		解除警戒
2021/8/3 06:00	0	437.61	0.0000	0.4670		
2021/8/3 07:00	1	432.32	0.0000	0.4394		

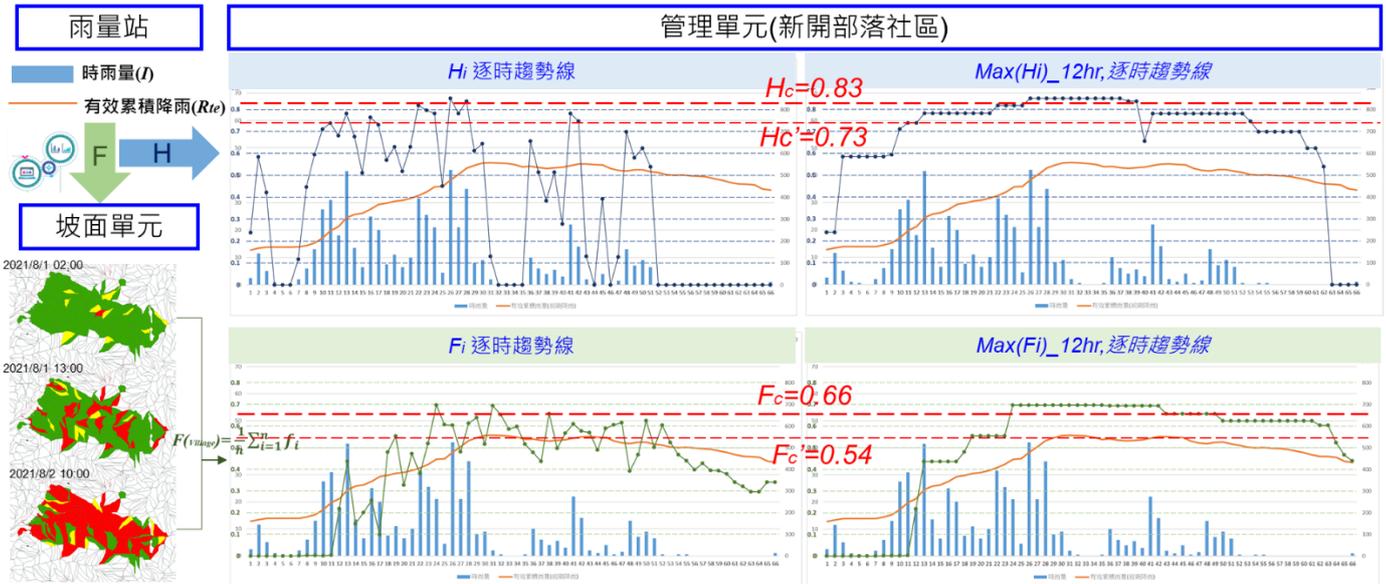


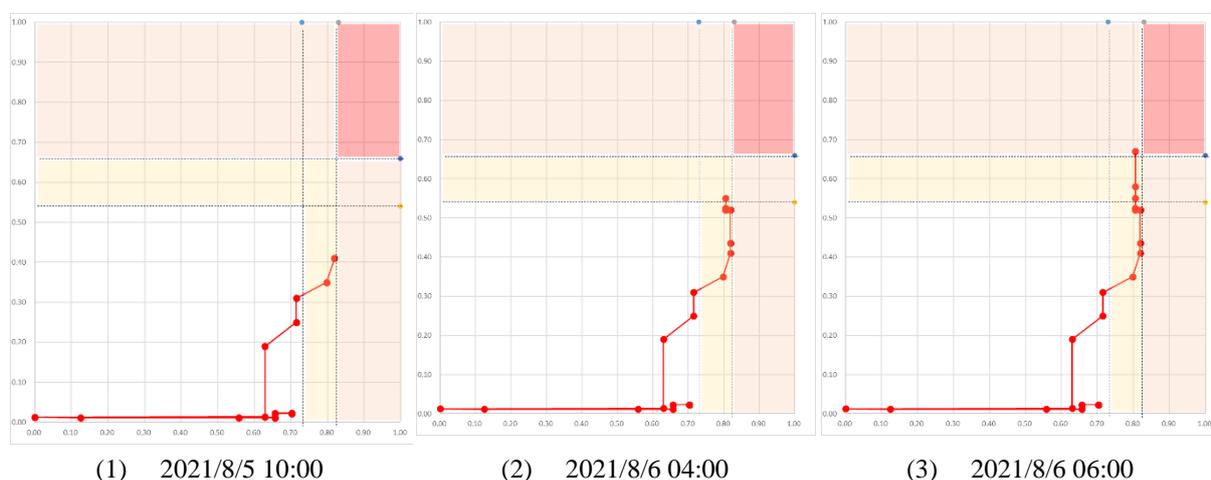
圖 4-21 新開部落社區於 0731 豪雨降雨歷程於 H 指標以及 F 指標歷時趨勢線

2. 盧碧颱風暨 0806 水災試作

在災時應變時，本計畫以新發雨量站模擬 2021/8/4 00:00 至 2021/8/9 00:00 區間之降雨歷時，評估各降雨逐時於本模式之推播階段程序，該事件雨場中，2021/08/05 10:00 時，降雨規模($I(i)$, $R(i)$)達 37.5mm 以及 391.04mm，H 指標($Max(Hi)_{12hr}$)及 F 指標($Max(Fi)_{12hr}$)為(0.80, 0.35)，H 指標以達到社區防災警戒推播階段($Max(Hi)_{12hr} > 0.73$)，圖 4- 22(1)。而於下 1 小時，於 2021/08/05 11:00 為水保局土石流應變達紅色警戒階段；當降雨歷時 21 小時，於 2021/08/06 06:00 時，降雨規模($I(i)$, $R(i)$)達 16mm 以及 554.73mm，H 指標($Max(Hi)_{12hr}$)及 F 指標($Max(Fi)_{12hr}$)為(0.81, 0.67)，F 指標以達到紅 1 警戒推播階段($Max(Fi)_{12hr} > 0.54$)，圖 4- 22(3)。而紅 1 警戒維持 8 小時，於 2021/08/06 13:00，降雨規模($I(i)$, $R(i)$)達 51.5mm 以及 588.56mm，

H 指標($Max(Hi)_{12hr}$)及 F 指標($Max(Fi)_{12hr}$)為(0.90, 0.67)，H 指標以及 F 指標同時達到紅 2 警戒推播階段($Max(Hi)_{12hr} > 0.83$ & $Max(Fi)_{12hr} > 0.66$)，圖 4-22(4)。

而在紅 2 維持 56 小時後，於 2021/08/08 20:00 時，降雨規模($I(i), R(i)$)為 4.5mm 以及 832.32mm，H 指標($Max(Hi)_{12hr}$)及 F 指標($Max(Fi)_{12hr}$)為(0.70, 0.78)，即代表 12 小時內($Max(Hi)_{12hr}$)值已下降，等於 12 小時間降雨趨勢逐漸趨緩，而 F 指標($Max(Fi)_{12hr}$)仍可能因為累積雨量持續增加，且該區域之坡面單元承受該降雨規模之脆弱程度仍屬於高風險狀態，因此該警戒階段由紅 2 警戒降為紅 1 警戒，圖 4-22(6)。而水保局土石流應變中心於 2021/08/09 03:00 時，於該區域由紅降黃色警戒，而本模式仍維持紅 1 警戒，而在兩小時後，於 2021/08/09 05:00 時，降雨規模($I(i), R(i)$)為 21mm 以及 769.68mm，H 指標($Max(Hi)_{12hr}$)及 F 指標($Max(Fi)_{12hr}$)為(0.86, 0.74)，由於小時降雨突然之增加，因此導致本模式由紅 1 警戒提升至紅 2 警戒，圖 4-22(7)。並維持 15 小時後，於 2021/08/09 19:00 時，因為降雨逐漸趨緩，本模式警戒階段由紅 2 警戒降為紅 1 警戒，圖 4-22(8)。持續歷時 2 小時後，於 2021/08/09 21:00 時，解除紅 1 警戒，但由於崩塌風險警戒仍於社區警戒區間，因此維持社區警戒，圖 4-22(9)。持續於 2021/08/10 08:00 時解除警戒管理階段。而此事件之降雨歷程風險警戒階段說明詳表詳見附錄三，上述歷時推播歷時過程中 H 指標以及 F 指標之逐時趨勢圖如下圖 4-23 所示。



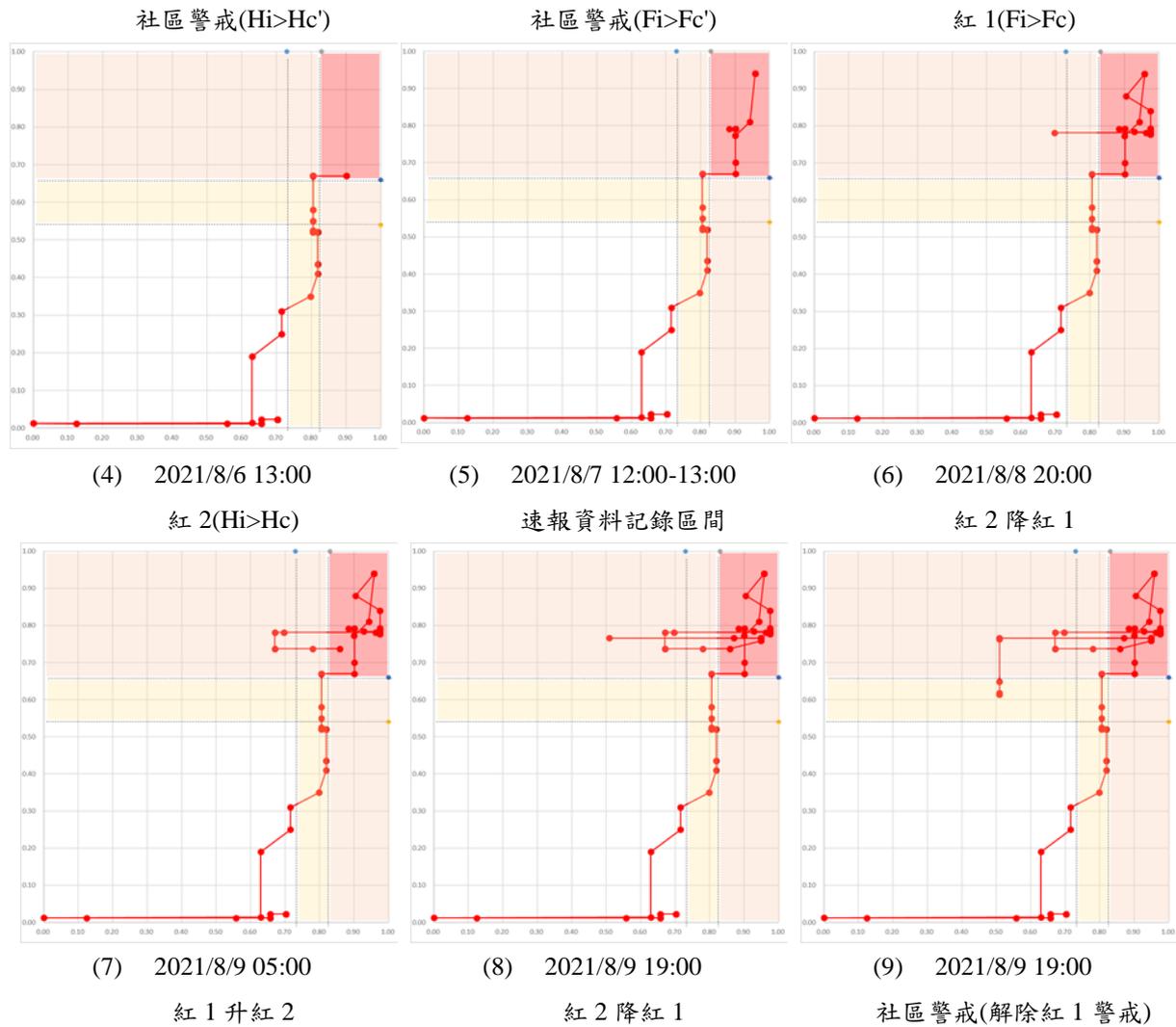


圖 4-22 新開部落社區於盧碧颱風暨 0806 水災降雨歷程於崩塌風險警戒機制歷程

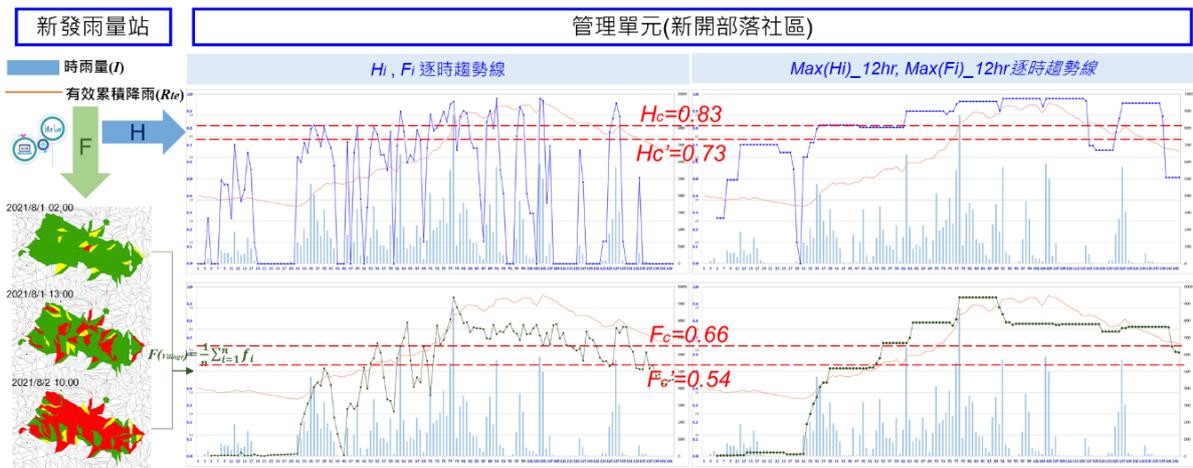


圖 4-23 新開部落社區於盧碧颱風暨 0806 水災降雨歷程於 H 指標以及 F 指標歷時趨勢線

而透過崩塌風險警戒機制圖之趨勢線變化，可以更直覺地對於不同警戒階段進行對應應變措施，並可於不同時間點針對該時段之降雨規模精準評估該區域之坡面單元警戒分布狀態，如圖 4- 24，並以視覺化之警戒分布圖進行檢視，以達到精準防災之價值。

盧碧颱風暨 0806 水災之自主防災警戒發布模擬中，本模式於該社區階段警戒發布中，共維持 97 小時社區警戒以及紅色警戒，其中 55 小時紅 2 警戒，屬於最高風險階段，並於紅 2 警戒期間，於 2021/08/07 12:00 至 13:00 間，比對新開部落 2 處速報資料(圖 4- 26 及圖 4- 27)記錄土石流以及崩塌發生之位置(如下圖 4- 25 中星號處所示)，其與本模式在該時段降雨於坡面單元崩塌潛勢評估達紅色警戒之位置是吻合的，因此初步透過本自主防災管理模式之設計、階段性警戒解除設計，與社區警戒值之訂定以及推播流程，是能夠於重大颱風豪雨事件前於合宜時機發布警戒，以提供解除預警之參考以及達到提前預警之成效。

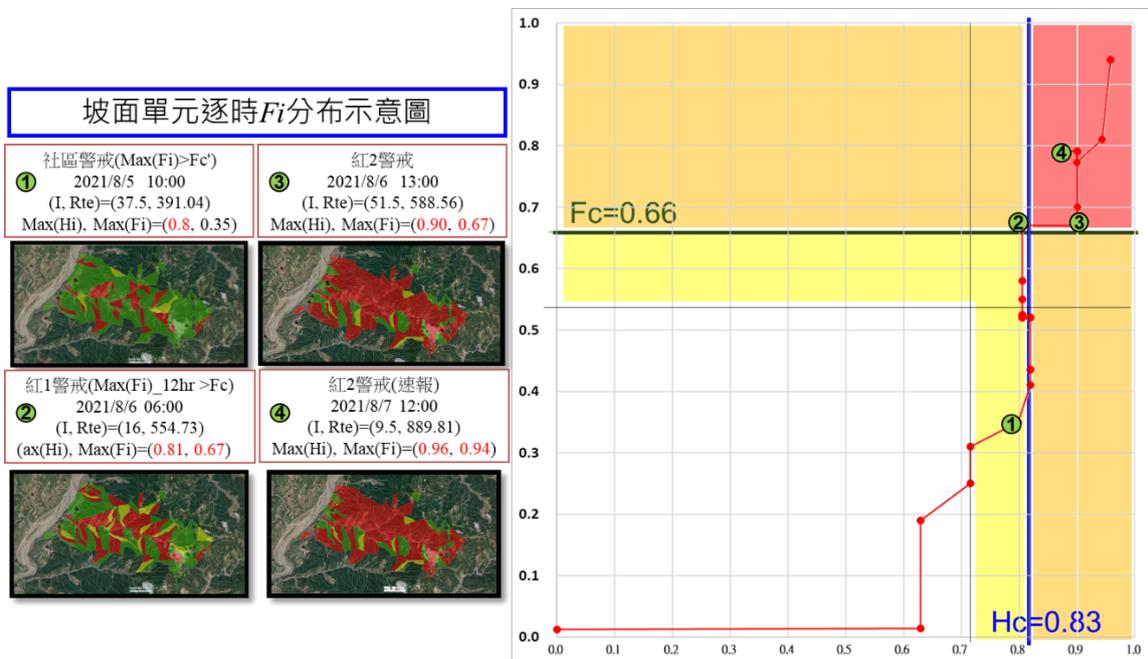


圖 4- 24 新開部落社區於盧碧颱風暨 0806 水災降雨歷時對應坡面單元崩塌潛勢分布圖

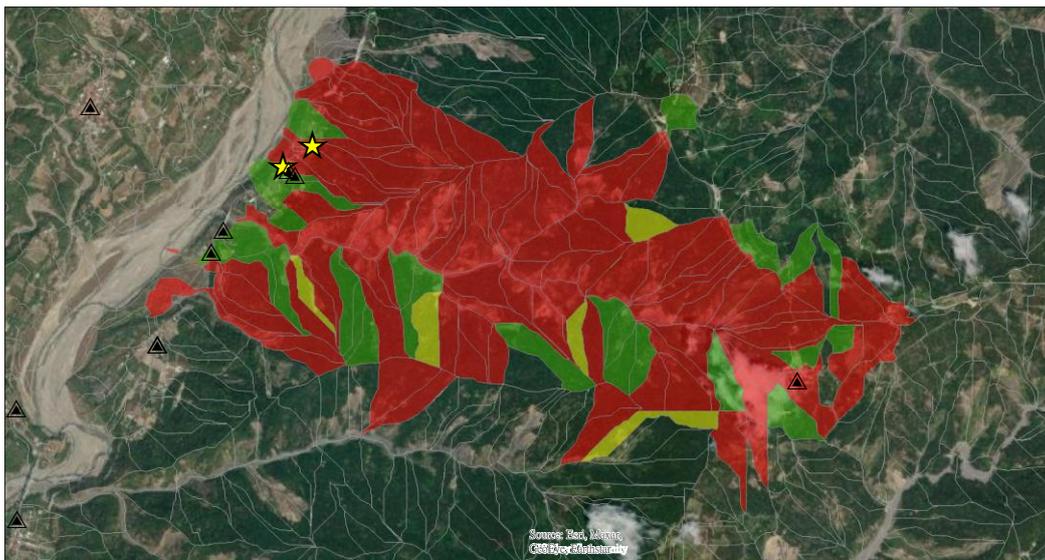


圖 4-25 新開部落社區於盧碧颱風暨 0806 水災降雨速報資料對應坡面單元崩塌
潛勢分布圖

110.08.09 版 (初步資料尚未經委員審查,僅供參考)

110 年盧碧颱風暨 0806 水災重大土砂災例最速報

高雄市一六龜區新發里

110 年盧碧颱風暨
0806 水災



110 年盧碧颱風暨 0806 水災-高雄六龜-001

- ◆災害發生位置：美崙山溫泉渡假山莊
- ◆災害發生時間：8月7日 12時 00分
- ◆災害類型：崩塌、土石流
- ◆累積雨量：889mm

註1：降雨量圖資料來源—本局土石流防災應變系統
註2：拍攝方位角係以磁北方向0度順時針方向測至目標物之水平角。
註3：發生時間為推估時間。

◆災情描述與統計：

- ✓災情描述：本案崩塌地位於美崙山溫泉渡假山莊，推測原因可能為颱風引進西南氣流所帶來之強降雨，使美崙山兩條野溪沖刷河床引發土石流，並堆積於民房造成嚴重災情。
- ✓災害規模：野溪上游並無明顯崩塌，堆積區對長的90公尺，寬約30公尺，堆積面積約2,700平方公尺，平均堆積深度約1公尺，堆積量約2,700立方公尺。
- ✓災情統計：受災民宅約10戶。



優質、效率、團隊

行政院農業委員會水土保持局

圖 4-26 盧碧颱風暨 0806 水災於 2021/08/07 12:00 之速報資料











優質、效率、團隊

行政院農業委員會水土保持局

圖 4-27 盧碧颱風暨 0806 水災於 2021/08/07 13:00 之速報資料

第五章 結論與建議

第一節 結論

- 一、 本計畫已完成針對研究區內陳有蘭溪集水區、荖濃溪集水區、旗山溪集水區之多元地文環境因子以及空間關聯特徵矩陣之擴增。
- 二、 本計畫已完成針對研究區內陳有蘭溪集水區、荖濃溪集水區、旗山溪集水區之崩塌事件資料庫擴增以萃取更多事件之逐時降雨之坡面單元空間向量化以及降雨引致崩塌之敏感門檻假設樣本，而以擴增後之崩塌事件資料庫進行深度學習技術(RNN-LSTM+GAN)之生成對抗網路模式訓練，並以 105-106 年度間之驗證資料進行驗證，取得整體精度 84.89%之表現，以達到探索全域降雨逐時之變動因子(雨量驅動因子: I_i, R_i)對於坡地崩塌災害的影響性
- 三、 本計畫完成自主防災風險警戒管理發布試作，其中各雨量站資訊透過本計畫所建立之崩塌風險警戒機制模式後，經降雨危害 H 以及崩塌潛勢 F 之推估比率後，取得各時段之警戒狀態，其說明了本計畫所發展之風險警戒模式之適用性，並於坡面風險地圖進行空間視覺化展示，可提供後續自主防災應用之重要參考。
- 四、 本計畫發展之崩塌風險警戒機制模式並可細緻化的對坡面單元進行崩塌易損評估，可明確呈現高風險之坡面單元的位置，掌握何處發生崩塌的潛勢以及可能性較高，以進行相對應之警戒模式。
- 五、 本計畫以崩塌災害警戒管理落實於自主防災為主要目的，並完成進行社區自主防災崩塌警戒發布管理流程設計，提供豐丘專屬之崩塌警戒值、專屬社區空間崩塌風險潛勢圖，以協助社區自主防災應變決策，並規劃相關避難路線及崩塌風險地圖等，進而達社區自主避災、防災及減災的目標。

第二節 後續建議方向

- 一、 過去在綜合潛勢因子以及誘發因子的關聯性分析中，往往忽略了各因子在空間上之連結性，並將各坡面單元視為各自獨立之單元，這往往在分析評估結果中，產生過多之雜訊，如一定的降雨規模下，可能產生多處的崩塌警戒，因此本研究認為崩塌應該是具有「強空間化、強時間化與強規模化」的特徵結果，這是毫無疑義的，如何透過圖像化深度學習技術以優化本計畫之崩塌關聯資料庫以及災害潛勢評估模型亦是本計畫後續要探討之課題之一。
- 二、 本計畫旨在藉由空間資料搭配序列颱風挾帶豪雨導致的已知崩塌事件和範圍，以不確定型和優化型的空間資料探勘技術萃取崩塌潛勢條件，進行風險預警應變之應用，後續將持續透過構建更複雜的深度網絡，在能夠在獲取到新的資料後再次調整自身參數，以保持良好的推估模式及精準度。
- 三、 當在獲得崩塌風險模式推估模式之後，下一個階段則是設定崩塌警戒的模型。在崩塌防災的課題中，設定崩塌警戒是未來發展的趨勢，但在決定崩塌警戒模式的研究中，本計畫也後續將嘗試納入科學演算之方法來表達類別歸屬問題以進行警戒訂定之問題，進而透過科學統計分析之概念建立一套社區尺度可用的崩塌災害自主防災預警與警戒模式。
- 四、 本計畫模式未來將嘗試研析在社區自主防災的兵棋推演或實作演練時提供社區防災組織啟動的時機，以及探討疏散避難路線與避難處所的安全性，如根據不同降雨規模引致的坡面單元潛勢分布，以即時動態之提供合宜之疏散避難路線。

參考文獻

1. 吳俊傑(1997)。台灣地區之氣象災害。土木工程技術，1(2)，47-66。
2. 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。
3. 林恩如、劉正千、張智華、鄭依凡、柯明勳 (2013)。運用福衛二號高時空分辨率多光譜影像於臺灣全島崩塌地判釋與災害分析。航測及遙測學刊 17(1): 31-51。
4. 林榮章(1999)。都會區多解像力遙測影像之紋理分析，國立中興大學土木工程學系碩士論文。
5. 洪如江、林美聆、陳天健、王國隆 (2000)。921 集集大地震相關的坡地災害，坡地破壞特性，與案例分析。土工技術，81：17~32。
6. 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。
7. 張石角(1998)。雪霸國家公園地質災害敏感地區之調查與防範研究(大雪山地區)。國家公園學報，8(2)，100-121。
8. 莊永忠、廖學誠、詹進發(2011)。反演法於邊坡穩定參數之推導-以蓮華池集水區為例。地理學報 第六十二期：127-153 (2011)。
9. 陳紫娥(1993)，台灣山坡地工程與環境地質調查與評估法之比較研究。「工程環境會刊」第 13 期，第 26-46 頁。
10. 陳樹群、蔡喬文、陳振宇、陳美珍 (2013)，「筒狀模式之土壤雨量指數應用於土石流防災警戒」，中華水土保持學報，44(2)，131-143。
11. 黃臺豐(1999)。瑞里地震誘發之山崩。國立中央大學應用地質研究所，碩士論文。
12. 溫振宇(2005)。結合地震與颱風因子之山崩模式分析。國立成功大學地球科學系博士論文。
13. 廖軒吾(2000)，集集地震誘發之山崩，國立中央大學地球物理研究所碩士論文。
14. 蕭芝昀(2008)。壽豐溪集水區崩塌地變遷及特性之研究，國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文。
15. 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。
16. A. Tibaldi, L. Ferrari, G. Pasquare. (1995). Landslides triggered by earthquakes and their relations with faults and mountain slope geometry: an example from Ecuador. *Geomorphology*, 11 (1995), pp. 215-226.
17. Atluri, G., Karpatne, A. and Kumar. V., 2018, Spatio-Temporal Data Mining: A Survey of Problems and Methods, *ACM Computing Surveys*, vol. 51, no. 4, Article 83.
18. Armanious, Karim, (2019). MedGAN: Medical image translation using GANs. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 101684.
19. Arora, M. K., Das Gupta, A. S. and Gupta, R. P., (2004), An artificial neural network approach for landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) valley, Himalayas, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25(3), pp. 559-572.
20. Baeza, C. and Corominas, J., (2001), Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 26, pp. 1251-1263.
21. Baret, F., Jacquemoud, S., & Hanocq, J. (1993). The soil line concept in remote sensing. *Remote Sensing Reviews*, 7(1), 65-82.
22. Campbell, R. H. 1975. Soil slips, debris flows and rainstorms in the Santa Monica

- Mountains and vicinity, Southern California. U. S. Geological Survey Professional Paper 851: 51.
23. Carrara A, Guzzetti F, Cardinali M, Reichenbach P (1999) Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. *Nat Hazards*, 20:117-135.
 24. Carrara, A. (1988). Drainage and divide networks derived from high-fidelity digital terrain models. NATO ASI series. Series C, Mathematical and Physical Sciences, 223: 581-597.
 25. 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.
 26. Chang, K.T., Wan, S., Lei, T.C. (2010). Development of a spatial decision support system for monitoring earthquake-induced landslides based on aerial photographs and the finite element method. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, 448-456.
 27. Chang, T.C. and Chao, R.J. (2006). Application of back-propagation networks in debris flow prediction. *Engineering Geology*, Vol. (85), pp. 270-280.
 28. Chou, W.C., W.T. Lin*, C.Y. Lin, (2007), Application of fuzzy theory and PROMETHEE technique to evaluate suitable ecotechnology method: A case study in Shihmen Reservoir Watershed, Taiwan, *Ecological Engineering*, Vol. 31, pp. 269-280.
 29. Chung, C. F. and Fabbri, A. G., (1993), The representation of geoscience information for data integration, *Nonrenewable Resources*, Vol. 2(3), pp. 122-139.
 30. Crozier, M. J., and T. Glade. (1999). Frequency and magnitude of landsliding: Fundamental research issues. *Zeitschrift für Geomorphologie N. F.* 115: 141-55.
 31. Chen, Y. C. and Lee, C., 2018, An Efficient Mechanism for Compensating Vague Pattern Identification in Support of a Multi-Criteria Recommendation System, *Journal of Information Science and Engineering*, vol. 34, no. 6, pp. 1633-1653.
 32. Chen, Y. C. and Lee, Chiang. 2016. Skyline Path Queries with Aggregate Attributes. *IEEE Access*. vol. 4, pp. 4690-4706. (SCI, Q1)
 33. Chen Y. C. and Li D. C. 2020. Selection of key features for PM2.5 prediction using a wavelet model and RBF-LSTM. Accepted by *Applied Intelligence*.
 34. Dong, J., Burnham, J. G., Boots, B., Rains, G. and Dellaert, F., 2017, 4d crop monitoring: Spatio-temporal reconstruction for agriculture," *Proceeding on IEEE. Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3878-3885.
 35. Douzas, G., Bacao, F. and Lasta, F., 2018, Improving imbalanced learning through a heuristic oversampling method based on k-means and SMOTE, *Information Sciences*, vol. 465, pp. 1-20.
 36. Einstein, H. H., (1988), Landslide risk assessment procedure, *International Symposium on Landslide*, Lausanne 2(1), pp. 75-90.
 37. Elanayar, S. V. T. and Shin, Y. C. 1994. Radial basis function neural network for approximation and estimation of nonlinear stochastic dynamic systems. *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 5, no 4, pp. 594-603.
 38. Ermimi, L., Catani, F. and Casagli, N., (2005), Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment, *Geomorphology*, Vol. 66, pp. 327-343.
 39. Ferna`ndez-Steeger, T. M., Rohn, J. and Czurda, K., (2002), Identification of landslide areas with neural nets for hazard analysis, *Proceedings of IECL*, Balkema, Netherland, pp. 163-168.
 40. 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.
 41. Fernandez, A., Garcia, S., Herrera, F. and Chawla, N. V., 2018, SMOTE for learning from imbalanced data: progress and challenges, marking the 15-year anniversary, *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 61.

42. Gunturk, B., Batur, A., Altunbasak, Y., Hayes, M. H. I. and Mersereau, R., 2003, Eigenface-domain super resolution for face recognition, *IEEE Trans. on Image Process*, vol. 12, no. 5, pp. 597-606.
43. Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A., Bengio, Y., (2014), Generative adversarial nets. Arxiv:1406.2661.
44. Guzzetti, F., S. Peruccacci, M. Rossi, and C. Stark. 2007: Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteor. Atmos. Phys*: 98: 239–267. doi:10.1007/s00703-007-0262-7.
45. Guzzetti, F., S. Peruccacci, M. Rossi, and C. P. Stark. 2008. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: An update. *Landslides* 5: 3-17.
46. Guo, Z., Wan, Y. and Ye, H., 2019, A data imputation method for multivariate time series based on generative adversarial network, *Neurocomputing*, vol. 360, pp. 185-197.
47. Hansen, A., (1984), Landslide hazard analysis, in *Slope Instability* (Brunsdon, D. and Prior, D.B. eds.), John Wiley and Sons, New York, pp.523-602.
48. Hsieh, M.H., Lee*, B.J., Lei, T.C. and Lin, J.Y., (2013). Development of medium and low-rise RC building fragility curves based on the Chi-Chi Earthquake data. *Natural Hazards*, DOI: 10.1007/s11069-013-0733-8. (In press).
49. Hsu, C. C., Lee, C. Y., & Zhuang, Y. X. (2018). Learning to Detect Fake Face Images in the Wild. In *2018 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)* (pp. 388-391). IEEE.
50. He, Y., Song, K., Dong, H. and Yan, Y., 2019, Semi-supervised defect classification of steel surface based on multi-training and generative adversarial network," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 122, pp. 294-302.
51. Ishibuchi, H., Kwon, K., and Tanaka, H. 1995. A learning algorithm of fuzzy neural networks with triangular fuzzy weights. *Fuzzy Sets and Systems*. vol. 71, no. 3, pp. 277-293.
52. Jang, J. S. R. and Sun, C. T. 1993. Functional equivalence between radial basis function networks and fuzzy inference systems. *IEEE Transactions on Neural Networks*. vol. 4, no. 1, pp. 156-159.
53. Jiang, W., Hong, Y., Zhou, B., He, X. and Cheng, C., 2019, A GAN-based anomaly detection approach for imbalanced industrial time series, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 143608-143619.
54. Joo, D., Kim, D., & Kim, J. (2018). Generating a Fusion Image: One's Identity and Another's Shape. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 1635-1643).
55. Kanungo, D. P., Arora, M. K., Sarkar, S. and Gupta, R. P., (2006), A comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation in Darjeeling Himalayas, *Engineering Geology*, Vol. 85, pp. 347-366.
56. Karacan, L., Akata, Z., Erdem, A., & Erdem, E. (2016). Learning to generate images of outdoor scenes from attributes and semantic layouts. arXiv preprint arXiv:1612.00215.
57. Keefer, D. K., (2000), Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution - the 1989 Loma Prieta, California event, *Engineering Geology*, Vol. 58, pp. 231-249.
58. Keefer, D.K. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin* 95(4): 406–421.
59. Koukis, G., Ziourkas, C. (1991). Slope Instability Phenomena in Greece: A Statistical Analysis. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, 47-60.
60. Lee, C. H. and Teng, C. C. 2000. Identification and control of dynamic systems using recurrent fuzzy neural networks. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. vol. 8, no. 4, pp. 349-366.

61. Li, M., Wang, L., Yan, J., Zhang, H., Zhang, L., Zhang, L., 2018, The Study of Traffic Flow Information Completion Based on GAN Algorithm, Proceeding on IEEE Int. Conf. on Data Driven Control and Learning Systems.
62. L. Xiao, Y. Zhang, G. Peng, (2018). Landslide susceptibility assessment using integrated deep learning algorithm along the China-nepal highway. *Sensors*, 18 (12) (2018), p. 4436.
63. Lambe, T. W. and Whitman, R. V., (1979), *Soil mechanics*, Wiley, New York, pp. 553.
64. Lee, S. and Sambath, T., (2006), Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models, *Environmental Geology*, Vol. 50, pp. 847-855.
65. Lei, T. C., Wan, S., Chou, T. Y., and Pai, H. C., (2011). The Knowledge Expression on Debris Flow Potential Analysis through PCA+LDA and Rough Sets Theory- A Case Study of Chen-Yu-Lan Watershed, Nantou, Taiwan. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 63(5), pp. 981-997.
66. Lei, T.C., Huang, Y.M., Lee, B.J., Hsieh, M.H. and Lin, K.T., (2014). Development of an empirical model for rainfall-induced hillside vulnerability assessment: a case study on Chen-Yu-Lan Watershed, Nantou, Taiwan, *Natural Hazards*. 74, 341-373. (SCI/IF= 1.639 /Ranking=73/172=42%)
67. Liu, X., Yue, Z.Q., Tham, L.G. and Lee, C.F., (2002), Empirical assessment of debris flow risk on a regional scale in Yunnan Province, southwestern China, *Environmental Management*, Vol. 30(2), pp. 249–264.
68. Lun-Wei Wei, Chuen-Ming Huang, Hongey Chen, Chyi-Tyi Lee, Chun-Chi Chi, and Chen-Lung Chiu. 2018. Adopting the I3–R24 rainfall index and landslide susceptibility for the establishment of an early warning model for rainfall-induced shallow landslides. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 18, 1717–1733, <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1717-2018>.
69. Muhammad Mukhlisin, Siti Jahara Matlan, Mohamad Jaykhan Ahlan, Mohd Raihan Taha. 2014. Analysis of Rainfall Effect to Slope Stability in Ulu Klang, Malaysia. *Jurnal Teknologi*. 72:3(2015) 15–21.
70. Montoya-Domínguez, J. D., García-Aristizábal, E. F. & Vega-Posada, C. A. 2016. Effect of rainfall infiltration on the hydraulic response and failure mechanisms of sandy slope models. *Revista Facultad de Ingeniería*. 25 (43), 97-109. DOI: 10.19053/01211129.v25.n43.2016.5302
71. MAO, Xudong; LI, Qing; XIE, Haoran. (2017). Aligngan: Learning to align cross-domain images with conditional generative adversarial networks. arXiv preprint arXiv:1707.01400.
72. Mezaal M.R., Pradhan B., Sameen M.I., Mohd Shafri H.Z., Yusoff Z.M. (2017). Optimized Neural Architecture for Automatic Landslide Detection from High-Resolution Airborne Laser Scanning Data. *Appl. Sci.* 2017;7:730. doi: 10.3390/app7070730.
73. Mohammad, Y., MaTsumoto, K., and Hoashi, K. 2018. Deep feature learning and selection for activity recognition. *Proceedings on Annual ACM Symposium on Applied Computing*, 2018.
74. Montgomery, D. R., and W. E. Dietrich. (1994), A physically-based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resource Research* 30 (4): 1153-71.
75. Nel Caine. (1980). The Rainfall Intensity - Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, Volume 62, P23-27.
76. Newmark, N. M., (1965), Effects of earthquakes on dams and embankments, *Geotechnique*, Vol. 15, pp. 139-160.
77. Nguyen, K. T., Dinh, D. T., Do, M. N. and Tran, M. T., 2020, Anomaly Detection in Traffic Surveillance Videos with GAN-based Future Frame Prediction, *Proceedings on Int. Conf. on Multimedia Retrieval*, pp. 457-463.
78. Odena, A., Olah, C., & Shlens, J. (2017, August). Conditional image synthesis with auxiliary classifier gans. In *Proceedings of the 34th International Conference on Machine*

- Learning-Volume 70 (pp. 2642-2651). JMLR. Org.
79. O'Loughlin, E. M. (1986), Prediction of surface saturation zone in watural catchments by topographic analysis. *Water Resources Research* 22 (5): 794-804.
 80. Osanai, N., T. Shimizu, K. Kuramoto, S. Kojima, and T. Noro.2010. Japanese early-warning for debris flows and slope failures using rainfall indices with Radial Basis Function Network. *Landslides*.7: 1–14.doi:10.1007/s10346-010-0229-5.
 81. Pradel, D. & Raad, G. 1993. Effect of Permeability on Surficial Stability of Homogeneous Slopes. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*. 119(2): 315–332.
 82. Panizzo, A., Bellotti, G. and Girolamo, P. D., (2002), Application of wavelet transform analysis to landslide generated waves, *Coastal Engineering*, Vol. 44(4), pp. 321–338.
 83. Pareschia, M. T., Santacroceb, R., Sulpiziob, R. and Zanchetta, G., (2002), Volcaniclastic debris flows in the Clanio Valley (Campania, Italy): insights for the assessment of hazard potential, *Geomorphol*, Vol. 43, pp. 3-4.
 84. Polemio, M. and Sdao, F., (1999), The role of rainfall in the landslide hazard: the case of the Avigliano urban area (Southern Apennines, Italy), *Engineering Geology*, Vol. 53(3-4), pp. 297-309.
 85. Pradhan, B. and Lee, S., (2009b), Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models, *Environmental Erath Science* Vol. 60(5), pp. 1037-1054.
 86. Pradhan, B., (2011), Use of GIS-based fuzzy logic relations and its cross application to produce landslide susceptibility maps in three test areas in Malaysia, *Environmental earth sciences*, Vol. 63 (2), pp. 329-349.
 87. Reed, S. E., Akata, Z., Mohan, S., Tenka, S., Schiele, B., & Lee, H. (2016). Learning what and where to draw. In *Advances in Neural Information Processing Systems* (pp. 217-225).
 88. Rupke, J., Cammeraat, E., Seijmonsbergen, A. C. and Van, W. C. J., (1988), Engineering geomorphology of the widentobel catchment, appenzell and sankt gallen, switzerland. A geomorphological inventory system applied to geotechnical appraisal of slope stability, *Engineering Geology*, Vol. 26(1), pp. 33-68.
 89. Rahardjo, H., Li X. W., Toll D. G. and Leong E. C. 2001. The Effect of Antecedent Rainfall on Slope Stability. *J. Geotech and Geological Eng. Netherlands*.19:371-399.
 90. Santacana, N., De P. A., Baeza, B., Corominas, J. and Marturi, J., (2003), A GIS based multivariate statistical analysis for shallow landslide susceptibility mapping in La pobla de Lillet area (Eastern Pyrenees, Spain). *Natural Hazards*, Vol. 30, pp. 281-295.
 91. Stevenson, P.C., (1977), An empirical method for the evaluation of relative landslide risk, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, Vol. 16, pp. 69–72.
 92. Sani, S., Wiratunga, N., Massie, S.2017. Learning deep features for knn based human activity recognition. *Proceedings of the International Conference on Case-Based Reasoning Workshops*, pp. 95-103.
 93. Trigo R. M., Ze^zere J.L., Rodriguez M.L., Trigo I.F. 2005. The influence of the north Atlantic oscillation on rainfall triggering of landslides near Lisbon. *Nat Hazards* 36:331–353.
 94. Tsaparas, I., Rahardjo, H., Toll, D.G., and Leong, E.C. 2002. Controlling parameters for rainfall-induced landslides. *Comput. Geotech*. 29: 1–27.
 95. Tsaparas, I., Rahardjo, H., Toll, D.G.and Leong E.C. 2003. Infiltration Characteristics of Two Instrumented Residual Soil Slopes. *Can. Geotech J*. 40: 1012–1032.
 96. T. Schlegl, P. Seeböck, S.M. Waldstein, U. Schmidt-Erfurth, G. Langs. (2017). Unsupervised anomaly detection with generative adversarial networks to guide marker discovery. *International Conference on Information Processing in Medical Imaging*, Springer (2017), pp. 146-157
 97. Tan, W. R., Chan, C. S., Aguirre, H. E., & Tanaka, K. (2017). ArtGAN: Artwork synthesis

- with conditional categorical GANs. In 2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) (pp. 3760-3764). IEEE.
98. Takahashi, S., Chen, Y. and Tanaka-Ishii, K., 2019, Modeling financial time-series with generative adversarial networks, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 527, Article 121261.
 99. Tibaldi, A., (1995), Morphology of pyroclastic cones and tectonics. *Journal of Geophysical Research*, v. 100, no. B12, p.24521-24535, doi:10.1029/95JB02250.
 100. Varnes, D.J., (1984) *Landslide Hazard Zonation: A review of Principles and Practice*, UNESCO Press, Paris, pp.63.
 101. Wieczorek, G., and T. Glade.2005. Climatic factors influencing occurrence of debris flows. Jakob, M. and Hunger, O., Eds. *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. 325–362.
 102. Wan, S., Lei, T.C., and Chou, T.Y., (2010), A Novel Data Mining Technique of Analysis and Classification for Landslide Problems. *Natural Hazards*, 52, 211–230.
 103. Wan, S., Lei, T.C., and Chou, T.Y., (2012), A landslide expert system: image classification through integration of data mining approaches for multicategory analysis. *International Journal of Geographical Information Science*, 26, 747-770.
 104. Wang, H. B. and Sassa, K., (2005), Comparative evaluation of landslides susceptibility in Minamata area, Japan, *Environmental Geology*, Vol. 47, pp. 956-966.
 105. Wieczorek, G. F. 1987. Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in Central Santa Cruz Mountains, California. *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology* 7: 93-104.
 106. Wu, Q., Wang, P., Shen, C., Reid, I., & van den Hengel, A. (2018). Are you talking to me? reasoned visual dialog generation through adversarial learning. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 6106-6115).
 107. Xiao, J., and A. Moody. 2004b. Photosynthetic activity of US biomes: responses to the spatial variability and seasonality of precipitation and temperature. *Global Change Biology* 10:437–451.
 108. Xu, D., Wei, C., Peng, P., Xuan, Q., Guo, H., 2020, GE-GAN: A novel deep learning framework for road traffic state estimation, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 117, Article 102635.
 - 109.
 110. Yesilnacar, E. and Topal, T., (2005), Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey), *Engineering Geology*, Vol. 79, pp. 251-266.
 111. Yin K. L. and Yan, T. Z., (1988), Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks, *Proceedings of the International Symposium on Landslides*, Vol. 5, pp. 1269-1272.

附錄一 各類資料庫資訊明細表

資料庫名稱	欄位名稱	年份	資料來源
環境因子	地質	102	中央地質調查所二十五萬分之一臺灣區域地質圖 數值檔
	坡度	105	全台數值高程模型
	坡向		全台數值高程模型
	高程		全台數值高程模型
	距河道遠近	105	國土利用調查圖
	山坡地土壤圖	70	水土保持局
	森林資源調查森林土壤 級圖	105	行政院農業委員會
	差異化植生指標	97	97/02/21、97/01/11 以及 97/11/28 之 spot4 影像
		98	98/01/15 以及 98/01/17 之 spot4 影像
		101	101/03/17 spot5 影像
		102	102/06/03 spot5 影像
		108	107/12/01 spot7 影像
		109	2020/01/14 之 SPOT7 衛星影像
110		2021/01/03 以及 2021/01/05 之 SPOT7 衛星影像	
崩塌資料庫	新增崩塌地	93- 106	林務局衛星影像判釋全島地圖
降雨資料	卡玫基颱風雨量歷時	97	土石流防災應變系統(FEMA)歷史氣象資料
	鳳凰颱風雨量歷時	97	土石流防災應變系統(FEMA)歷史氣象資料
	辛樂克颱風雨量歷時	97	土石流防災應變系統(FEMA)歷史氣象資料
	薔蜜颱風雨量歷時	97	土石流防災應變系統(FEMA)歷史氣象資料
	莫拉克颱風雨量歷時	98	土石流防災應變系統(FEMA)歷史氣象資料
	南瑪都颱風雨量歷時	100	土石流防災應變系統(FEMA)歷史氣象資料
	0610 豪雨雨量歷時	101	土石流防災應變系統(FEMA)歷史氣象資料
	泰利颱風雨量歷時	101	土石流防災應變系統(FEMA)歷史氣象資料
	天秤颱風雨量歷時	101	土石流防災應變系統(FEMA)歷史氣象資料
	蘇拉颱風雨量歷時	102	土石流防災應變系統(FEMA)歷史氣象資料

附錄二 各年度速報資料詳表

年度	災害事件名稱	縣市	鄉鎮	村里	災害事件類型	災害發生時間	I	R	Longitude_twd97	Latitude_twd97
95	0609 豪雨	南投縣	水里鄉	上安村	土石流	2006/06/10 12:00	3.5	401.6	236220	2625277
95	0609 豪雨	南投縣	仁愛鄉	大同村	沖蝕	2006/06/09 15:00	9	529.4	263297	2657263
95	0609 豪雨	南投縣	信義鄉	人和村	沖蝕	2006/06/09 05:00	13.5	71.3	239331	2630325
95	0609 豪雨	南投縣	仁愛鄉	翠華村	沖蝕	2006/06/09 05:00	25.5	436.4	271789	2676723
96	聖帕颱風	南投縣	中寮鄉	龍岩村	地滑	2007/08/19 17:00	14	182.4	225171	2648545
96	0809 豪雨	南投縣	埔里鎮	蜈蚣里	沖蝕	2007/08/13 07:00	43.5	195.3	249570	2650111
96	0809 豪雨	南投縣	鹿谷鄉	清水村	沖蝕	2007/08/10 16:00	6	60.7	226620	2643064
96	0604 豪雨	南投縣	仁愛鄉	大同村	沖蝕	2007/06/09 04:00	11.5	371.7	263297	2657263
96	0604 豪雨	南投縣	國姓鄉	乾溝村	地滑	2007/06/08 15:00	10.5	326	231561	2662086
96	0604 豪雨	南投縣	國姓鄉	乾溝村	沖蝕	2007/06/08 16:00	9.5	337.3	230811	2658992
96	0604 豪雨	南投縣	國姓鄉	南港村	沖蝕	2007/06/07 16:00	26.5	232.1	234203	2650392
96	0604 豪雨	南投縣	水里鄉	車埕村	地滑	2007/06/07 16:00	30	155.7	235738	2637144
96	0604 豪雨	南投縣	仁愛鄉	互助村	沖蝕	2007/06/04 00:00	3.5	47.8	245438	2661943
97	辛樂克颱風	南投縣	仁愛鄉	南豐村	土石流	2008/09/15 08:00	55.5	917.8	258755	2655417
97	辛樂克颱風	南投縣	仁愛鄉	南豐村	土石流	2008/09/15 05:00	44.5	737.4	259547	2655719
97	辛樂克颱風	南投縣	仁愛鄉	精英村	沖蝕	2008/09/15 11:00	47	938.2	269023	2657543
97	辛樂克颱風	南投縣	信義鄉	豐丘村	土石流	2008/09/15 17:00	2.5	552.5	236685	2619331
97	辛樂克颱風	南投縣	水里鄉	郡坑村	沖蝕	2008/09/14 10:00	29.5	301.2	236032	2625810

應用坡地易損性模式於整合式重點聚落崩塌風險與警戒機制研析

97	辛樂克颱風	南投縣	信義鄉	明德村	崩塌	2008/09/14 07:00	38	347.6	235018	2622737
97	鳳凰颱風	南投縣	中寮鄉	清水村	地滑	2008/07/28 17:00	34.5	120.8	230627	2650928
97	卡玫基颱風	南投縣	草屯鎮	雙冬里	崩塌	2008/07/19 07:00	6	371.3	230866	2654886
97	卡玫基颱風	南投縣	魚池鄉	日月村	崩塌	2008/07/18 03:00	83.5	360.4	243109	2638063
97	卡玫基颱風	南投縣	中寮鄉	清水村	地滑	2008/07/18 02:00	97.5	261.6	230627	2650928
97	卡玫基颱風	南投縣	中寮鄉	福盛村	沖蝕	2008/07/18 05:00	30.5	217.7	233831	2642366
97	卡玫基颱風	南投縣	仁愛鄉	法治村	土石流	2008/07/18 02:00	40.5	198.4	252972	2645176
97	卡玫基颱風	南投縣	仁愛鄉	翠華村	地滑	2008/07/18 06:00	33	158	271862	2674511
97	卡玫基颱風	南投縣	水里鄉	民和村	崩塌	2008/07/18 04:00	46	276.8	242415	2633079
97	卡玫基颱風	南投縣	信義鄉	潭南村	土石流	2008/07/18 02:00	109	272.6	244118	2635950
97	卡玫基颱風	南投縣	埔里鎮	麒麟里	土石流	2008/07/18 03:30	97	415.8	248620	2645429
97	卡玫基颱風	南投縣	埔里鎮	麒麟里	土石流	2008/07/18 04:00	97	415.8	250829	2645283
97	其他	南投縣	國姓鄉	大旗村	地滑	2008/07/13 16:00	0	74	236584	2661237
97	其他	南投縣	鹿谷鄉	鳳凰村	地滑	2008/06/13 13:00	0	21.8	231798	2622701
98	莫拉克颱風	南投縣	水里鄉	玉峰村	土石流	2009/08/18 17:00	9	45.8	233115	2633038
98	莫拉克颱風	南投縣	鹿谷鄉	和雅村	沖蝕	2009/08/09 10:00	57	928	227354	2620524
98	莫拉克颱風	南投縣	信義鄉	同富村	土石流	2009/08/09 02:00	89	1087.9	236875	2607220
98	莫拉克颱風	南投縣	信義鄉	望美村	土石流	2009/08/09 02:00	51.5	695.1	238682	2614084
98	莫拉克颱風	南投縣	國姓鄉	南港村	沖蝕	2009/08/09 05:00	38	531.9	235984	2649957
98	莫拉克颱風	南投縣	水里鄉	玉峰村	沖蝕	2009/08/09 02:00	31.5	433	232615	2630956
98	莫拉克颱風	南投縣	信義鄉	神木村	沖蝕	2009/08/08 20:00	46.5	753.4	237189	2608592

98	莫拉克颱風	南投縣	信義鄉	神木村	土石流	2009/08/08 18:00	38.5	677.5	236923	2607262
98	莫拉克颱風	南投縣	信義鄉	神木村	土石流	2009/08/08 15:00	34	567.1	235152	2602755
98	莫拉克颱風	南投縣	信義鄉	神木村	沖蝕	2009/08/08 08:00	21.5	397.9	235770	2603457
98	莫拉克颱風	南投縣	信義鄉	神木村	土石流	2009/08/08 21:00	38	786.9	236309	2604535
100	0719 豪雨	南投縣	信義鄉	神木村	土石流	2011/07/18 23:00	14	97.6	235152	2602755
101	0610 豪雨	南投縣	信義鄉	神木村	土石流	2012/06/11 19:00	18.5	434.8	236873	2607205
101	0610 豪雨	南投縣	國姓鄉	南港村	沖蝕	2012/06/12 11:00	69	535.3	235926	2645592
101	0610 豪雨	南投縣	國姓鄉	大旗村	地滑	2012/06/11 12:00	1	359.3	236869	2661402
101	0610 豪雨	南投縣	仁愛鄉	合作村	沖蝕	2012/06/10 22:00	16.5	259.4	270809	2663222
101	0610 豪雨	南投縣	仁愛鄉	萬豐村	土石流	2012/06/10 18:00	44.5	247.1	258340	2649545
101	0504 豪雨	南投縣	信義鄉	豐丘村	土石流	2012/05/03 16:00	38.5	121.4	237257	2618139
102	蘇力颱風	南投縣	魚池鄉	日月村	土石流	2013/07/13 07:00	73.5	194	243396	2637726
102	0517 豪雨	南投縣	信義鄉	明德村	沖蝕	2013/05/20 01:00	0	225.5	237469	2622644
104	其他	南投縣	仁愛鄉	精英村	沖蝕	2015/08/01 05:00	0	0	269832	2660999
106	尼莎暨海棠颱風	南投縣	信義鄉	同富村	崩塌	2017/07/30 07:50	0	150	239004	2607456
106	0613 豪雨	南投縣	國姓鄉	石門村	崩塌	2017/06/15 15:00	7.5	275	237850	2659013
106	0601 豪雨	南投縣	信義鄉	明德村	崩塌	2017/06/03 15:00	17	430	235029	2622652
106	0601 豪雨	南投縣	鹿谷鄉	竹林村	崩塌	2017/06/03 23:00	47	605	224659	2623034
106	0601 豪雨	南投縣	埔里鎮	蜈蚣里	土石流,崩塌	2017/06/03 08:00	23	290	251512	2653137
106	0601 豪雨	南投縣	水里鄉	新山村	崩塌	2017/06/03 08:00	43	270	236472	2628694
106	0601 豪雨	南投縣	仁愛鄉	春陽村	沖蝕,崩塌	2017/06/03 06:00	16	300	266760	2658382

應用坡地易損性模式於整合式重點聚落崩塌風險與警戒機制研析

106	0601 豪雨	南投縣	仁愛鄉	榮興村	崩塌	2017/06/02 17:00	20	240	278921	2680009
108	0815 豪雨	南投縣	仁愛鄉	萬豐村	崩塌	2019/08/17 07:00	9	154	256557	2645703
108	0815 豪雨	南投縣	名間鄉	仁和村	土石流,崩塌	2019/08/16 05:40	10	225	220551	2639424
108	0815 豪雨	南投縣	國姓鄉	長豐村	崩塌	2019/08/16 03:00	18	258	237463	2664047
108	0611 豪雨	南投縣	國姓鄉	大旗村	崩塌	2019/06/11 10:00	45	114	234973	2661094
108	0611 豪雨	南投縣	國姓鄉	長豐村	崩塌	2019/06/11 09:00	36	60	236327	2663834
109	0522 豪雨	南投縣	仁愛鄉	發祥村	崩塌	2020/05/22 00:30	14	112	268890	2670383
110	其他	南投縣	集集鎮	富山里	崩塌	2021/08/14 03:00	0	72	231563	2635442
110	盧碧颱風	南投縣	仁愛鄉	萬豐村	崩塌	2021/08/07 20:00	3	294	235062	2540445
110	彩雲颱風暨 0605 豪雨	南投縣	仁愛鄉	大同村	崩塌	2021/06/04 17:00	0	134	266488	2663532
110	彩雲颱風暨 0605 豪雨	南投縣	仁愛鄉	力行村	崩塌	2021/05/30 23:00	3	144	271252	2673935
110	彩雲颱風暨 0605 豪雨	南投縣	仁愛鄉	力行村	崩塌	2021/06/04 15:00	11	75	271252	2673935
95	0609 豪雨	高雄市	六龜區	大津里	土石流	2006/06/10 06:00	48.5	431.6	213974	2533635
95	0609 豪雨	高雄市	六龜區	大津里	土石流	2006/06/09 18:00	14.4	336.4	214028	2533858
95	聖帕颱風	高雄市	六龜區	寶來里	土石流	2007/08/20 12:00	33	943.8	218919	2556196
96	聖帕颱風	高雄市	甲仙區	東安里	土石流	2007/08/19 02:00	90.5	539.8	212422	2552869
97	卡玫基颱風	高雄市	六龜區	中興里	土石流	2008/07/18 02:00	17	420.9	214016	2542265
97	卡玫基颱風	高雄市	六龜區	寶來里	地滑	2008/07/18 03:00	33	710.1	217329	2555466
97	卡玫基颱風	高雄市	那瑪夏區	瑪雅里	崩塌	2008/07/18 01:00	92.5	443	219023	2570976
97	卡玫基颱風	高雄市	桃源區	建山里	土石流	2008/07/18 02:00	34.5	677.1	217351	2556059
97	卡玫基颱風	高雄市	桃源區	建山里	土石流	2008/07/18 03:00	33	710.1	218572	2556137

97	卡玫基颱風	高雄市	六龜區	中興里	沖蝕	2008/07/17 23:00	47.5	371	214131	2538224
97	卡玫基颱風	高雄市	六龜區	寶來里	沖蝕	2008/07/17 23:00	144.5	454.2	218553	2556005
97	卡玫基颱風	高雄市	六龜區	寶來里	土石流	2008/07/17 23:00	144.5	454.2	218800	2556185
97	卡玫基颱風	高雄市	六龜區	寶來里	洪水,沖蝕	2008/07/17 22:00	109.5	310.4	218035	2554603
97	卡玫基颱風	高雄市	甲仙區	東安里	土石流,洪水	2008/07/17 23:00	139	538.9	210442	2554980
97	卡玫基颱風	高雄市	甲仙區	大田里	崩塌	2008/07/17 22:00	130	382.5	203841	2550331
97	卡玫基颱風	高雄市	甲仙區	東安里	洪水沖蝕	2008/07/17 22:00	130	382.5	211807	2552654
97	卡玫基颱風	高雄市	甲仙區	東安里	沖蝕	2008/07/17 23:00	139	538	211288	2551312
97	卡玫基颱風	高雄市	杉林區	木梓里	土石流	2008/07/17 23:00	66	413.9	202968	2548835
98	莫拉克颱風	高雄市	那瑪夏區	南沙魯里	土石流,沖蝕	2009/08/09 17:00	9.5	1409.9	218648	2568618
98	莫拉克颱風	高雄市	那瑪夏區	南沙魯里	沖蝕	2009/08/09 09:00	30.5	1403.3	214750	2568189
98	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	小林里	洪水,沖蝕	2009/08/09 06:00	43	1545.1	213479	2562097
98	莫拉克颱風	高雄市	杉林區	集來里	土石流	2009/08/09 05:00	37	1030.8	206646	2545692
98	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	東安里	洪水,沖蝕	2009/08/09 05:00	22.5	1506.9	211780	2552632
98	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	興龍里	沖蝕	2009/08/09 04:00	27	1525	216088	2545472
98	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	寶來里	沖蝕	2009/08/09 06:00	35.5	1,585.60	221973	2555585
98	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	新發里	土石流	2009/08/09 06:00	35.5	1,585.60	215812	2547379
98	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	新發里	沖蝕	2009/08/09 06:00	35.5	1,585.60	215816	2547873
98	莫拉克颱風	高雄市	茂林區	萬山里	沖蝕	2009/08/09 04:00	25	993.9	217161	2534363
98	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	興龍里	洪水,沖蝕	2009/08/08 15:00	95.5	920.8	215792	2545885
98	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	寶來里	土石流,沖蝕	2009/08/08 17:00	71	1,046.10	217200	2554780

應用坡地易損性模式於整合式重點聚落崩塌風險與警戒機制研析

98	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	新發里	土石流,沖蝕	2009/08/08 21:00	63.5	1,330.70	217010	2550443
98	莫拉克颱風	高雄市	桃源區	建山里	土石流	2009/08/08 17:00	86.5	732.60	218240	2555745
98	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	大田里	土石流,洪水	2009/08/08 22:00	42.5	1,328.50	203840	2550328
98	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	大津里	土石流	2009/08/09 09:00	32.5	534.5	214010	2533640
98	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	新發里	土石流,沖蝕	2009/08/08 20:00	56	1,271.60	218120	2552950
98	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	新發里	土石流,沖蝕	2009/08/08 21:00	63.5	1,330.70	217292	2551284
98	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	中興里	土石流,洪水	2009/08/08 20:00	56	1,271.60	214000	2542255
98	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	西安里	土石流,沖蝕	2009/08/08 20:00	42.5	1,257.10	208242	2551287
98	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	西安里	沖蝕	2009/08/08 23:00	54.5	1,411.20	208755	2552247
98	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	東安里	土石流	2009/08/08 20:00	42.5	1257.1	210455	2554959
98	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	六龜里	沖蝕	2009/08/08 17:00	71	1,046.10	213813	2546466
98	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	小林里	洪水,沖蝕	2009/08/08 19:00	70	1285.5	210309	2558594
98	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	關山里	土石流,洪水	2009/08/08 20:00	42.5	1328	209757	2556474
98	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	東安里	土石流	2009/08/08 21:00	67.5	1395.51	210209	2552665
98	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	小林里	沖蝕	2009/08/08 20:00	42.5	1257.1	211501	2558913
98	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	興龍里	沖蝕	2009/08/08 17:00	71	1046	214968	2544224
98	莫拉克颱風	高雄市	桃源區	寶山里	地滑	2009/08/08 22:00	88.5	1048.7	224124	2551583
98	莫拉克颱風	高雄市	桃源區	寶山里	地滑	2009/08/08 17:00	86.5	732.6	220139	2548369
98	莫拉克颱風	高雄市	桃源區	寶山里	地滑	2009/08/08 22:00	88.5	1048.7	221506	2550485
98	莫拉克颱風	高雄市	桃源區	寶山里	地滑	2009/08/08 22:00	88.5	1048.7	224914	2551728
98	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	小林里	洪水,沖蝕	2009/08/08 06:00	42.5	625.9	211503	558844

98	莫拉克颱風	高雄市	桃源區	梅山里	沖蝕	2009/08/08 16:00	74	647.4	232221	2573545
98	莫拉克颱風	高雄市	桃源區	拉芙蘭里	土石流	2009/08/08 16:00	74	647.4	231588	2572274
98	莫拉克颱風	高雄市	那瑪夏區	瑪雅里	土石流	2009/08/08 16:00	89	712.6	219053	2571064
98	莫拉克颱風	高雄市	那瑪夏區	瑪雅里	土石流	2009/08/08 16:00	89	712.6	219088	2570763
98	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	寶來里	土石流	2009/08/07 21:00	18.5	308.9	217520	2555428
98	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	中興里	土石流	2009/08/07 20:00	15.5	290.1	213302	2538429
98	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	寶來里	土石流	2009/08/07 21:00	18.5	308.9	217318	2555478
99	凡那比颱風	高雄市	六龜區	大津里	土石流	2010/09/19 21:00	22	482.5	214010	2533640
99	凡那比颱風	高雄市	六龜區	荖濃里	洪水,沖蝕	2010/09/19 21:00	26.5	443	217155	2553855
99	凡那比颱風	高雄市	六龜區	文武里	土石流,洪水	2010/09/19 21:00	26.5	443	212130	2533582
99	凡那比颱風	高雄市	六龜區	大津里	土石流,洪水	2010/09/19 20:00	63	460.5	212968	2532827
99	凡那比颱風	高雄市	六龜區	大津里	土石流	2010/09/19 18:00	45	322	213963	2534790
100	0719 豪雨	南投縣	信義鄉	神木村	土石流	2011/07/18 23:00	14	97.6	235152	2602755
101	0610 豪雨	高雄市	六龜區	新發里	土石流,洪水	2012/06/10 16:00	26	358.6	215578	2547965
101	0610 豪雨	高雄市	六龜區	興龍里	土石流	2012/06/10 14:00	13.6	312.6	216247	2545577
103	麥德姆颱風	高雄市	杉林區	月眉里	沖蝕	2014/07/23 14:00	60	225	203536	2539087
105	梅姬颱風	高雄市	燕巢區	東燕里	沖蝕,崩塌	2016/09/28 11:00	0	474	186260	2521060
105	梅姬颱風	高雄市	旗山區	新光里	崩塌	2016/09/28 03:00	51.5	368	194630	2525785
107	0823 熱帶低壓	高雄市	桃源區	寶山里	崩塌	2018/08/25 00:00	5	550	223985	2551542
108	0815 豪雨	高雄市	六龜區	寶來里	崩塌	2019/08/15 15:00	23	326	222044	2556452
108	利奇馬颱風	高雄市	那瑪夏區	南沙魯里	沖蝕,崩塌	2019/08/11 10:00	12	337	215845	2567533

應用坡地易損性模式於整合式重點聚落崩塌風險與警戒機制研析

108	108 其他	高雄市	茂林區	茂林里	崩塌	2019/06/27 05:00	0	63	216305	2529540
110	其他	高雄市	桃源區	寶山里	崩塌	2021/08/11 19:00	10	242	266207	2556288
110	其他	高雄市	旗山區	南勝里	崩塌	2021/08/08 14:00	24	438	193645	2520213
110	盧碧颱風	高雄市	桃源區	勤和里	土石流,崩塌	2021/08/07 14:00	7	817	228344	2565172
110	盧碧颱風	高雄市	六龜區	新發里	土石流	2021/08/07 13:00	9	889	217832	2551883
110	盧碧颱風	高雄市	六龜區	新發里	土石流,崩塌	2021/08/07 12:00	9	889	218042	2552030
110	盧碧颱風	高雄市	桃源區	拉芙蘭里	崩塌	2021/08/07 05:00	56	528	230617	2569868
110	盧碧颱風	高雄市	六龜區	興龍里	崩塌	2021/08/07 03:00	49	543	260920	2546954
110	0731 豪雨	高雄市	六龜區	中興里	土石流,崩塌	2021/08/02 09:00	2	581	214241	2541341

附錄三 新開部落社區於盧碧颱風暨 0806 水災降雨歷程風險警戒階段說明

時間	時雨量	有效累積雨量(前期降雨)	Max(Hi)_12hr	Max(Fi)_12hr	水保局應變階段	本模式風險警戒階段
2021/8/4 00:00	0	402.98				
2021/8/4 01:00	0	397.74				
2021/8/4 02:00	1	391.1				
2021/8/4 03:00	2.5	389.29				
2021/8/4 04:00	0	388.74	0.27	0.00		
2021/8/4 05:00	0	386.85	0.27	0.00		
2021/8/4 06:00	0	374.29	0.27	0.00		
2021/8/4 07:00	6	375.25	0.49	0.00		
2021/8/4 08:00	5	377.8	0.49	0.00		
2021/8/4 09:00	5	378.88	0.49	0.01		
2021/8/4 10:00	3	380.3	0.49	0.01		
2021/8/4 11:00	15	385.29	0.70	0.01		
2021/8/4 12:00	6	388.6	0.70	0.01		
2021/8/4 13:00	4	381.16	0.70	0.02		
2021/8/4 14:00	4.5	381.02	0.70	0.02		
2021/8/4 15:00	12	388.92	0.70	0.02		
2021/8/4 16:00	7	385.09	0.70	0.02	雨場結束	
2021/8/4 17:00	1.5	381.92	0.70	0.02		

應用坡地易損性模式於整合式重點聚落崩塌風險與警戒機制研析

2021/8/4 18:00	0.5	372.7	0.70	0.02		
2021/8/4 19:00	0	371.28	0.70	0.02		
2021/8/4 20:00	0	366.98	0.70	0.02		
2021/8/4 21:00	0	363.99	0.70	0.02		
2021/8/4 22:00	0	362.68	0.70	0.02		
2021/8/4 23:00	0	358.5	0.66	0.02		
2021/8/5 00:00	0	354.55	0.66	0.02		
2021/8/5 01:00	0	350.89	0.66	0.01		
2021/8/5 02:00	0	346.09	0.66	0.01		
2021/8/5 03:00	0	341.33	0.56	0.01		
2021/8/5 04:00	1	341.44	0.12	0.01		
2021/8/5 05:00	0	340.62	0.00	0.01		
2021/8/5 06:00	10	337.33	0.63	0.01		
2021/8/5 07:00	8.5	344.7	0.63	0.19		
2021/8/5 08:00	16.5	353.29	0.72	0.25		
2021/8/5 09:00	12	368.95	0.72	0.31		
2021/8/5 10:00	37.5	391.04	0.80	0.35		社區警戒(Hi>Hc')
2021/8/5 11:00	32.5	417.23	0.82	0.41	水保局(黃升紅)	
2021/8/5 12:00	20	436.35	0.82	0.44		
2021/8/5 13:00	13	440.14	0.82	0.44		
2021/8/5 14:00	25.5	464.41	0.82	0.52		

2021/8/5 15:00	15.5	475.94	0.82	0.52		
2021/8/5 16:00	12	468.71	0.82	0.52		
2021/8/5 17:00	7	479.49	0.82	0.52		
2021/8/5 18:00	0.5	472.18	0.82	0.52		
2021/8/5 19:00	0	471.19	0.82	0.52		
2021/8/5 20:00	0.5	468.18	0.82	0.52		
2021/8/5 21:00	13.5	477.56	0.82	0.52		
2021/8/5 22:00	0.5	479.65	0.82	0.52		
2021/8/5 23:00	10	485.22	0.81	0.52		
2021/8/6 00:00	25.5	509.46	0.81	0.52		
2021/8/6 01:00	4	508.99	0.81	0.52		
2021/8/6 02:00	0.5	507.57	0.81	0.52		
2021/8/6 03:00	3.5	505.88	0.81	0.52		
2021/8/6 04:00	12	518.31	0.81	0.55		社區警戒(Fi>Fc')
2021/8/6 05:00	27	537.89	0.81	0.58		
2021/8/6 06:00	16	554.73	0.81	0.67		紅 1(Fi>Fc)
2021/8/6 07:00	8.5	557.59	0.81	0.67		
2021/8/6 08:00	8.5	558.47	0.81	0.67		
2021/8/6 09:00	6.5	558.22	0.81	0.67		
2021/8/6 10:00	18	570.68	0.81	0.67		
2021/8/6 11:00	1	552.07	0.81	0.67		

應用坡地易損性模式於整合式重點聚落崩塌風險與警戒機制研析

2021/8/6 12:00	12.5	543.91	0.81	0.67		
2021/8/6 13:00	51.5	588.56	0.90	0.67		紅 2(Hi>Hc)
2021/8/6 14:00	17	597.55	0.90	0.70		
2021/8/6 15:00	7	593.87	0.90	0.79		
2021/8/6 16:00	9	598.06	0.90	0.79		
2021/8/6 17:00	8	594.36	0.90	0.79		
2021/8/6 18:00	18	606.24	0.90	0.79		
2021/8/6 19:00	12.5	618.55	0.90	0.79		
2021/8/6 20:00	2	618.29	0.90	0.79		
2021/8/6 21:00	11	620.78	0.90	0.79		
2021/8/6 22:00	33	646	0.90	0.79		
2021/8/6 23:00	15.5	667.45	0.90	0.79		
2021/8/7 00:00	17	668.86	0.90	0.79		
2021/8/7 01:00	20.5	689.49	0.88	0.79		
2021/8/7 02:00	31	719.98	0.90	0.79		
2021/8/7 03:00	19	736.72	0.90	0.77		
2021/8/7 04:00	44	760.6	0.94	0.81		
2021/8/7 05:00	70	834	0.96	0.94		
2021/8/7 06:00	8.5	837.44	0.96	0.94		
2021/8/7 07:00	23.5	849.92	0.96	0.94		
2021/8/7 08:00	28.5	870.14	0.96	0.94		

2021/8/7 09:00	25.5	891.15	0.96	0.94		
2021/8/7 10:00	11.5	894.22	0.96	0.94		
2021/8/7 11:00	9.5	889.15	0.96	0.94		
2021/8/7 12:00	9.5	889.81	0.96	0.94		速報資料
2021/8/7 13:00	4	866.68	0.96	0.94		速報資料
2021/8/7 14:00	2	857.84	0.96	0.94		
2021/8/7 15:00	18.5	863.98	0.96	0.94		
2021/8/7 16:00	28	887.26	0.96	0.94		
2021/8/7 17:00	15	882.32	0.90	0.88		
2021/8/7 18:00	45.5	926.49	0.98	0.84		
2021/8/7 19:00	5.5	927.75	0.98	0.79		
2021/8/7 20:00	4	930.92	0.98	0.79		
2021/8/7 21:00	0	930.66	0.98	0.78		
2021/8/7 22:00	0	922.96	0.98	0.78		
2021/8/7 23:00	1	906.83	0.98	0.78		
2021/8/8 00:00	11.5	909.97	0.98	0.78		
2021/8/8 01:00	29.5	922.36	0.98	0.78		
2021/8/8 02:00	21	935.22	0.98	0.78		
2021/8/8 03:00	4	934.64	0.98	0.78		
2021/8/8 04:00	2.5	937.56	0.98	0.78		
2021/8/8 05:00	2.5	910.27	0.98	0.78		

應用坡地易損性模式於整合式重點聚落崩塌風險與警戒機制研析

2021/8/8 06:00	1	888.92	0.93	0.78	
2021/8/8 07:00	47	916.24	0.98	0.78	
2021/8/8 08:00	40	951.02	0.98	0.78	
2021/8/8 09:00	3.5	938.54	0.98	0.78	
2021/8/8 10:00	9.5	937.78	0.98	0.78	
2021/8/8 11:00	0.5	922.26	0.98	0.78	
2021/8/8 12:00	0	914.04	0.98	0.78	
2021/8/8 13:00	0	895.07	0.98	0.78	
2021/8/8 14:00	0	885.36	0.98	0.78	
2021/8/8 15:00	0	872.31	0.98	0.78	
2021/8/8 16:00	0	859.46	0.98	0.78	
2021/8/8 17:00	0	855.4	0.98	0.78	
2021/8/8 18:00	0	828.04	0.98	0.78	
2021/8/8 19:00	8.5	830.57	0.96	0.78	
2021/8/8 20:00	4.5	832.32	0.70	0.78	紅 2 降紅 1
2021/8/8 21:00	0.5	831.95	0.70	0.78	
2021/8/8 22:00	0	825.81	0.67	0.78	
2021/8/8 23:00	0	812.78	0.67	0.78	
2021/8/9 00:00	0	801.69	0.67	0.74	
2021/8/9 01:00	0	794.28	0.67	0.74	
2021/8/9 02:00	1.5	768.67	0.67	0.74	

2021/8/9 03:00	1.5	763.28	0.67	0.74	水保局(紅降黃)	
2021/8/9 04:00	14	767.1	0.78	0.74		
2021/8/9 05:00	21	769.68	0.86	0.74		紅 1 升紅 2
2021/8/9 06:00	45.5	793.39	0.95	0.76		
2021/8/9 07:00	24.5	809.89	0.95	0.76		
2021/8/9 08:00	1.5	792.5	0.95	0.77		
2021/8/9 09:00	0.5	773.08	0.95	0.77		
2021/8/9 10:00	0	762.72	0.95	0.77		
2021/8/9 11:00	0	751.67	0.95	0.77		
2021/8/9 12:00	0	744.88	0.95	0.77		
2021/8/9 13:00	5	734.59	0.95	0.77		
2021/8/9 14:00	1	729.68	0.95	0.77		
2021/8/9 15:00	1	719.7	0.95	0.77		
2021/8/9 16:00	0	709.84	0.95	0.77		
2021/8/9 17:00	0	705.07	0.95	0.77		
2021/8/9 18:00	0	685.48	0.87	0.77		
2021/8/9 19:00	0	679.09	0.51	0.77		紅 2 降紅 1
2021/8/9 20:00	0	675.73	0.51	0.76		
2021/8/9 21:00	0	674.49	0.51	0.65		社區警戒(解除紅 1 警戒)
2021/8/9 22:00	0	670.83	0.51	0.62		
2021/8/9 23:00	0	663.09	0.51	0.61		

附錄四 期初計畫審查委員意見與回復

委員意見	團隊回復
1. 可強化實際應用，並分析既有模式的適用性	感謝委員意見，本年度工作將強化本模式於不同規模降雨之應用性，以分析既有模式的適用性。
2. 自主防災推播系統內函請強化說明。	感謝委員意見，遵照辦理。
3. 歷年相關研究成果之實用性如何?宜有具體說明。	感謝委員意見，本團隊所發展之崩塌風險警戒機制模式以於過去年度計畫針對當年度之重大颱風豪雨事件進行實測應用，並配合水土保持局應變開設期間同步進行保全聚落崩塌警戒分析，以提供管理單位進行決策參考。
4. 崩塌潛勢因子機率模型可以廣域評估，但到了實際應以個案為主。	感謝委員意見，本團隊所發展之崩塌潛勢評估模型是以廣域之資料建置以及串連進行評估，並針對各高風險社區進行實際應用以及颱風豪雨之實測分析，後續將嘗試放大個案分析之成果，以綜合評估模型於個案應用之成效。
5. 災害歷史資料庫可以再加強。	遵照辦理，本案將於後續對於各年度之崩塌之致災颱風豪雨事件進行盤點，並於報告中加強條列以及說明。
6. 高崩塌潛勢評估擬採整體的地面單元之空間連結因子後續調整，此節應有可供實用指標。	感謝委員意見，本計畫將後續條論以調整，嘗試歸納可供實用之指標。
7. 實施方法、解決問題及預期成果，建議再做檢視，避免不一致情況。	遵照辦理。
8. 本計畫仍以坡面單元為對象，不易區分誘因之差異性，而使得警戒對象擴向；且如何連接潛在崩塌之環境，宜有檢討。	感謝委員意見，本計畫以坡面單元為對象主要是研究成果利於後續管理應用之合理性，而誘因之差異性中資料分析尺度僅能透過雨量站所萃取，並透過克利金內插的方式進行廣域之空間推估，進行降雨分布之空間差異性分析，進而連接坡面單元尺度之崩塌潛勢環境。
9. 整合軟體、數據、運算功能為一般分析之流程，惟本	感謝委員意見，本案將於今年度具體盤點

<p>案仍未有具體之可行性軟體開發或數據可靠性之擷取。</p>	<p>開發自主防災推播系統雛形之相關軟體需求以及即時降雨數據之擷取評估。</p>
<p>10. 訓練樣本之抽樣應符合隨機性，以免誤導。</p>	<p>感謝委員意見，本案在模式建立過程中之訓練以及驗證樣本皆採隨機平衡抽樣，並透過多組抽樣結果進行模型的整合，以達到模型訓練過程之樣本公平性。</p>
<p>11. 重要工作項目及實施方法乙節多屬原則敘述，宜有論述完整可行方法以為檢核。</p>	<p>感謝委員意見，本案已補充說明工作項目之具體可行方法。</p>
<p>12. 多元尺度崩塌潛勢評估地圖之範圍與國土計畫復育促進地區若有關聯，宜有審酌。</p>	<p>感謝委員意見，本案將嘗試於今年度評估結果中與國土計畫復育促進地區相關圖資進行套疊，檢視相關問題。</p>

附錄五 期中計畫審查委員意見與回復

委員意見	團隊回復
第一章 前言	
建議列表說明($I_{max} - R_{te}$)之實際案例與崩塌之規模，請補充說明	感謝委員，本案將目前參考的相關事件之速報資料進行彙整於附錄二。
P1-1，第二段第七行，研究「過」去...，文字請確認修正。	感謝委員意見，已修正。
第二章 崩塌事件資料庫擴增	
1. 建議可彙整重點聚落村里之重要災害敏感地點，未來可供聚落防救災避難參考。	感謝委員意見，遵照辦理。
2. P2-5，最後一行之上標，文字請確認修正。	感謝委員意見，已修正。
3. P2-6，第一段，荖濃溪集水區...「源自秀姑巒溪南坡....」，內容是否有誤，請確認修正。	感謝委員意見，已修正。
4. 各種資料解析度不一，如何統一及最後計算解析度，如下疑問，請確認說明： (1)坡度資料雖使用 5 公尺解析度數值地形製作，然計算於 ArcGIS 是使用 3*3 個 5 公尺網格。 (2) P2-24 中，NDVI 計算使資料網格化之解析度。 (3) P2-47 中，環境因子為 20 公尺解析度。	感謝委員意見，本計畫針對實證範圍建立標準 20m 網格，並透過空間套疊於不同解析度資料，以進行數值平均標準化之作業，讓資訊能夠統一彙整於標準網格，而在針對坡面單元計算網格面積比例，數值依照面積比例匯入坡面單元，作為個特徵資料之代表數值。
5. P2-12，「變化程度的度量化度量因子」，文字請確認修正。	感謝委員意見，已修正。
6. P2-15 及 P2-16 坡度變率英文宜考慮改寫，如 Slope of Slope of DEM? 請確認修正。	感謝委員意見，已修正。
7. P2-17，地形起伏度為「指定區域內....」，使用的指定區域宜定義，另 P2-18 地表切割深度之「鄰域範圍」及	感謝委員意見，遵照辦理，以於內文統一相同定義之名詞。

<p>P2-20 高程變異係數中「單元網格」亦同。</p>	
<p>8. P2-21, 收集資料宜羅列製作年份, 如土壤資料, 請確認修正。</p>	<p>感謝委員意見, 本計畫相關資料明細資訊詳見附錄一。</p>
<p>9. P2-33, 自動崩塌地判釋結果雖為林務局製作, 應可行文取得最新資料, 不需透過政府開放資料平台。</p>	<p>感謝委員意見, 本計畫後續將嘗試透過此方式取得穩定之全島崩塌地圖, 以利模型之數據更新。</p>
<p>10. P2-47, 第一段第二行”本本計畫...”, 文字請確認修正。</p>	<p>感謝委員意見, 已修正。</p>
<p>11. P2-52, 圖 2-60(a)最大小時降雨強度製作等高線時是否有錯誤? 請確認修正。</p>	<p>版謝委員意見, 在最大小時降雨強度所繪製之降雨分布是通過各雨量站統計最大小時降雨數值, 並以地理資訊空間分析技術之空間內插方式進行數值內插, 而非透過製作等高線圖之方式取得降雨之空間數值。</p>
<p>12. P2-59, 「卷積何」、「卷積核」, 文字請確認修正。</p>	<p>感謝委員意見, 已修正。</p>
<p>第三章 坡地崩塌風險評估模型建立</p>	
<p>1. 請說明表 3-9 中, H_c 介於 0.81-0.95, 而 F_c 介於 0.23-0.69, 其差異的原因為何?F_c 之變化關係為崩塌規模或發生機率?請補充說明。</p>	<p>感謝委員意見, 由於 H_c 以及 F_c 兩者之模型建立標準不同, 降雨危害度(H)主要分析崩塌災害發生降雨特性時, 通常需考量崩塌發生當時的直接誘發雨量(包括降雨強度)及間接激發雨量(如前期降雨), 並蒐集歷史 10 年間所有雨場之資料累積排序, 透過聯合機率質量函數建立歷史雨量雙參數下之分布密度函數, 因此當雨量越大於 H 所代表的數值則代表該雨量為歷史降雨規模之百分比, 而崩塌潛勢評估(F)則為綜合地文潛勢因子以及降雨誘發因</p>

	子之間的組合關係，所造成崩塌的可能性，而非規模。
2. P3-8，（一）之後多一空格，文字請確認修正。	感謝委員意見，已修正。
3. P3-16，動態環境因子使用「前五年度間事件」指的是分析開始前五年或計畫往前五年，因計畫內文載明「過去五年」，宜說明清楚。	感謝委員意見，前期降雨擾動因子以及當年度降雨誘發因子，則是代表該欄位是由該事件之年度開始的前五年所造成之相關降雨以及崩塌變異數值。
4. P3-23，「坡度單元空間關連」似乎為本計畫重要工作項目，對照第二章第四節似乎尚未完成？另外參考文獻缺林恆陞（2020），此部份與第三章中「圖像深度學習崩塌推估模式設計」是否重複，請確認說明。	感謝委員意見，本計畫在期中階段後，持續針對空間關聯性於崩塌潛勢評估模型之邏輯設計討論中，仍須優先解決降雨時序於空間變異之討論，因此先透過 LSTM 以及空間坡面關聯性矩陣特徵作為輸入變數進行模式之建立，期後續能夠持續導入圖像神經網路以優化模式之合理性以及適配性。
5. P3-23，第一段第一行錯字，文字請確認修正。	感謝委員意見，已修正。
6. P.2，為何同一場降雨過程中，降雨改變時，有時只改變 H_c ，有時只改變 F_c ，有時兩者都改變，請確認說明。	感謝委員意見，如上述第三章第一題的意見回復，H 和 F 之間的透過雙參數降雨指標進行模式建立，模型代表之涵義亦不同，因此降雨變異間之敏感機制亦不同，因此有時只改變 H_c ，有時只改變 F_c ，有時兩者都改變。
7. 現有模式權重矩陣為何，是否有其他參數可使用，請補充說明。	感謝委員意見，對於模式現有的模式參數設定詳見第三章第二節說明。
8. $H \rightarrow H_c$ (降雨)及 $F \rightarrow F_c$ (坡面)紅色警戒兩者警戒屬不同方式警戒，可有驗證其效果，請補充說明。	感謝委員意見，在降雨危害以及崩塌潛勢兩者之警戒方式其實都是通過降雨雙參數(I, R)作為應變時之唯一輸入變數，並透過本計畫發展之

	<p>崩塌風險警戒機制圖，其中 X 軸所指的是降雨危害值(範圍從 0 到 1)，Y 軸所指的是坡地崩塌潛勢機率值(範圍從 0 到 1)，在這一套崩塌風險警戒機制圖中，透過降雨危害警戒曲線(HCL)及崩塌易損評估曲線(FCL)的劃定，其可分為安全、紅一警戒以及紅二警戒。</p>
<p>9. 有關警戒值訂定是否有何參考依據?能否由歷史事件去確認其效果或準確率，請補充說明。</p>	<p>感謝委員意見，用位於該聚落之行政區界(鄉鎮界)速報資料，其提供著該重點聚落實際發生崩塌災害之時間點以及雨量資料，附錄二為 95-110 年度間速報資料詳表，本計畫用速報資料所記錄時機點之雨量資料於歷史降雨比率曲線以及崩塌潛勢模型中，即可在圖面上點繪出最小致災門檻曲線，以訂定降雨危害警戒值(HC)及崩塌潛勢警戒值(FC)</p>
<p>10. 建議用歷史事件來驗證模式之準確率，請補充說明。</p>	<p>感謝委員意見，本計畫以於第四章第三節進行崩塌風險警戒機制實測。</p>
<p>11. Hc 及 Fc 標準差是無因次，所以 1 是 100% 發生的定義否，請補充說明。</p>	<p>感謝委員意見，本計畫所發展之坡地崩塌風險評估指標(H 以及 F)所代表之百分比數值主要代表相對於其他坡面單元，對於雙參數降雨變樹下可能是崩塌之比率。</p>
<p>第四章 自主防災崩塌警戒發布管理流程設計</p>	
<p>1. 崩塌警戒展示時仍以坡面單元為主，後續是否考慮前敘「坡度單元空間關連」操作，請補充說明。</p>	<p>感謝委員意見，目前在崩塌警戒展示仍主要以坡面單元管理為主，而「坡度單元空間關連」之操作仍是以坡面單元為主，只是透過深度學習演算模型去將坡面單元空間關聯作為模式之輸入，以使崩塌發生之空間關聯敏感性提高。</p>

<p>2. 崩塌風險警戒發布方法是否有進行正確性機率評估，請補充說明。</p>	<p>感謝委員意見，目前對於崩塌風險警戒之發布時機點主要以比對水保局土石流應變開設時機做為參考，以及若有速報資料，則會進行空間準確性評估，對於整體空間之正確性機率評估，由於無法掌握整個空間環境之崩塌時機點，因此在正確性機率評估上較有難度。</p>
---	---

附錄六 期末計畫審查委員意見與回復

委員意見	團隊回復
第一章 前言	
13. 報告書中有多項遺漏，如工作內容中有歷年事件的盤點(2008~2020)於報告書中有缺，P1-4 中有 110 年度汛期影像也沒有，請確認是否符合合約項目，請確認修正。	感謝委員意見，本計畫在 110 年度訊期影像分析之說明於第二章第一節，並補充 2021 年 01 月 03 日以及 2021 年 01 月 05 日之 SPOT7 衛星影像圖與圖 2-27，。
14. 摘要英文關鍵字， slope unit，請確認修正。	遵照辦理。
15. 參考文獻如沒有出現建議可刪除，另多個報告中引用之文獻未列入參考文獻，請補充說明。	遵照辦理。
第二章 崩塌事件資料庫擴增	
1. 研究以坡面單元針對危害度、易損性及暴露量整合崩塌險評估，理論上可行，但建立之模式應透過驗證的過程來評定其可行性。	感謝委員意見，本計畫於今年度模擬兩場颱風豪雨事件(0731 豪雨以及盧碧颱風暨 0806 水災)逐時降雨之警戒發布試作驗證，以新開部落為例，盧碧颱風暨 0806 水災之自主防災警戒發布模擬中，本模式於該社區階段警戒發布中，共維持 97 小時社區警戒，89 小時紅色警戒，其中 55 小時紅 2 警戒，屬於最高風險階段，並於紅 2 警戒期間，比對新開部落 2 處速報資料之位置，與本模式達紅色警戒之位置是吻合的，因此初步透過本自主防災管理模式之設計、階段性警戒解除設計，與社區警戒值之訂定以及推播流程，是能夠於重大颱風豪雨事件前於合宜時機發布警戒，以提供解除預警之參考以及達到提前預警之成效。
2. 表 2-1，應有出處標示，另表 2-2” 向量檔案” 英文有誤，請確認修正。	遵照辦理

<p>3. 圖 2-5 等，應有出處，很多圖為前期報告資料，請確認修正。</p>	<p>遵照辦理</p>
<p>4. P2-28，內文資料為 93~110 年，與表 2-4 圖說及內容不符；另 P2-32 只到 105 年亦不符，請確認修正。</p>	<p>遵照辦理</p>
<p>5. P2-33，崩塌事件萃取只有到 106 年度，而非自行分析，與 P1-4 工作項目所述不符；P2-34 內文之圖 2-39，看不出意義，非自行調查分析則應有引用之處，請補充說明。</p>	<p>感謝委員意見，本計畫在崩塌地圖是引用政府開放資料平台取得由林務局委託成功大學以各年度 1~7 月全島鑲嵌福衛二號衛星影像建立自動判釋崩塌地作業標準，繪製全島崩塌地判釋成果，而本團隊在取得各年度之全島崩塌地判釋成果，將各年度颱風事件前後時期之崩塌地圖資進行套疊，並進行空間變異特徵之分析，以取得年度間崩塌變異分布圖。</p>
<p>6. 崩塌地資料來源於 P2-33 顯示為林務局委託成大製作，但同時亦應有水保局委託同一團隊製作，請確認書明。</p>	<p>感謝委員意見，本團隊後續將了解水保局是否有相關計畫有此計畫之相關資料。</p>
<p>7. GNN 為何可以提高準確率，請確認說明。</p>	<p>感謝委員意見，過去模式建立主要是基於單一坡面單元之數據組成並透過統計分析模式所建立之分析模型，這可能存在忽略坡面單元間之空間相關性的問題，因此難以探索整個集水區之坡面單元間之整體崩塌變化且對於崩塌變異不明顯之坡面單元亦可能於分析模型過程中被忽略，這可能引起一些潛在之威脅未被預測到或是單一坡面間之數值組成之同質性較高，而產生過多崩塌發生之不合理誤判產生，因此本計畫透過建構集水區坡面單元圖像之空間關聯性於 GNN 模型，以優化模型在災害應變時分析單元潛勢值(Fi)之空間適配性。補充說明於第三章第二節。</p>

<p>8. 因為崩塌尺度有大小，是否有機會將災害分類，例如大規模崩與小尺度崩塌以提高準確度，請補充說明。</p>	<p>感謝委員意見，目前在崩塌規模主要假設於颱風豪雨事件規模引致之崩塌規模是有正向關係，而實際颱風豪雨與當下崩塌之規模目前資料整理後，僅能透過崩塌面積去進行分類。</p>
<p>9. 現地有許多監測設備，是否有辦法納入討論，請補充說明。</p>	<p>感謝委員意見，對於廣域崩塌資料之評析，主要是透過實證範圍內，共同範圍標準之資訊以建立其關聯性，而監測設備的問題除了在時間解析度上較不足外，空間尺度之資訊較為不足代表廣域之空間特徵，但在相關高風險區域則可透過監測設備於崩塌時機點以驗證本模式警戒資訊發布之準確性。</p>
<p>10. 資料來源是否有做前處理，把一些例外資料刪除，請確認修正。</p>	<p>感謝委員意見，目前計畫取得長時間的各雨量站之降雨資料，基本上除了無資料紀錄之時序以進行資料刪除外，其他降雨時序資料都是代表各颱風豪雨事件之變異特徵資訊來源，因此皆擴充於模式資料進行分析。</p>
<p>11. 圖 2-56 (P2-48) 中陳有蘭溪右下之坡面單元似有不合理情形，但於後續圖面(如圖 2-59)消失，兩者是否應該一致更新，請補充說明。</p>	<p>感謝委員意見，本計畫以更新坡面單元資料，詳見報告書圖 2-59 至圖 2-64。</p>
<p>12. 圖 2-60 (P2-52)，最大小時降雨強度使用之等高線法左右兩側無法接合？請確認修正。</p>	<p>感謝委員意見，本計畫以更新坡面單元之辛樂克颱風降雨分布，詳見報告書圖 2-60。</p>
<p>第三章 坡地崩塌風險評估模型建立</p>	
<p>1. P3-24，第四行，應為「降雨」，請確認修正。</p>	<p>遵照辦理</p>

<p>2. P3-25，使用降雨誘發時序特徵模式（或稱長短期記憶模型），是否有考慮依據此一方法修改雨場模式？請確認說明。</p>	<p>感謝委員意見，本計劃在雨場分割之依據是採用目前水土保持局針對土石流潛勢溪流警戒管理相同之定義，而降雨誘發時序特徵模式則是討論雨場延時之降雨變異特徵，兩者關係較不同。</p>
<p>3. 圖 3.33，H_c-F_c之路徑變化先達到 F_c 或先達到 H_c 對於防災之意義有何不同，請補充說明。</p>	<p>感謝委員意見，由於 H 以及 F 兩者之模型建立標準不同，對於 H 的意義代表歷史降雨規模之百分比，而 F 則為綜合地文潛勢因子以及降雨誘發因子之間的組合關係，所造成崩塌的可能性，當 F 越大代表某降雨下在該坡面單元愈易崩；因此，路徑變化先達到 F_c，在防災角度上代表該區坡面單元較易崩，而先達到 H_c 則代表該區坡面單元可能在該降雨規模下可能較不易崩（較強韌），但降雨規模已達到歷史降雨規模較前大之規模範圍，因此在防災意義上仍須保持警戒狀態。</p>
<p>4. 各社區對應之坡面單元對應之 H_c 與 F_c 所代表之物理或統計意義，請補充說明；如表 3-7 中即那瑪夏區之 H_c 皆為 0.92，但 F_c 卻 0.23~0.69，請確認說明。</p>	<p>感謝委員意見，如上題的意見回復，H 和 F 之間的透過雙參數降雨指標進行模式建立，模型代表之涵義亦不同，如 H_c 為過去歷史速報資料中，最小致災颱風豪雨事件對應 H 模型之值，即代表該最小致災颱風豪雨事件之規模排序百分比，F_c 則為該坡面單元的地文組成下，承受不同降雨時序特徵之崩塌潛勢，因此降雨變異間之敏感機制亦不同。且 H 之評估單元為雨量站，F 之評估單元為坡面單元，因此 F_c 在不同區域之訂定評估則是考量該社區對應之坡面單元警戒值，這則表示不同區愈範圍內，H 以及 F 參考之單元是不同的，這也是違和一個區域範圍內之警戒訂定標準亦是不同。</p>

	<p>而本計畫已根據本年度更新之模型以及訂定警戒值之規則更新表 3-7。</p>
<p>5. P3-42 之崩塌風險警戒機制，是以坡面單元或集水區為管理單位？後續第四章應用時係採用潛勢溪流，請確認說明。</p>	<p>感謝委員意見，本計劃在模式評估尺度為坡面單元，而在崩塌風險警戒機制中是以坡面單元為基礎管理單元，而其可根據不同管理推播單位，以提供不同尺度之警戒資訊，而第四章應用採用潛勢溪流僅是參考實證範圍內之保全對象資料，作為自主社區優選對象之依據。</p>
<p>6. 如何評估崩塌致災規模？(以 H_c-F_c 值而言說明)，請補充說明。</p>	<p>感謝委員意見，H_c 為過去歷史速報資料中，最小致災颱風豪雨事件對應 H 模型之值，即代表該最小致災颱風豪雨事件之規模排序百分比，而 F_c 則為該坡面單元的地文組成下，承受不同降雨時序特徵之崩塌潛勢，其 F_c 則為模式在驗證過程中，對應歷年崩塌地圖之標籤 (Labeling)，訂定最佳分類(崩塌以及未崩塌)之類別機率值，而模式之建立則考量了地文組成以及歷年降雨時序特徵，因此達到 F_c 則代表降雨條件需達該坡面單元之空間組成以及歷年事件規模條件。</p>

<p>7. H->降雨因子，F->崩塌評估，兩者相加可以得到完整構想，但是是否有極端事件，例如有H，但F可能未達到，請補充說明。</p>	<p>感謝委員意見，承第3題回覆，如有達到H，但F可能未達到。則代表該區坡面單元在該規模下是尚未達到崩塌警戒階段，但降雨規模已達到過去降雨兩場規模之極端階段，因此在崩塌風險警戒之角度上，H和F兩者間仍可提供相對應之警戒資訊。</p>
<p>8. 本研究成果可否加入現地大規模崩塌監測之監測數據一同分析或驗證，請補充說明。</p>	<p>感謝委員意見，對於加入大規模崩塌監測之監測數據則是能夠於後續對於崩塌發生之[時機]與本模式發佈警戒之時機點進行驗證分析，以作為調整警戒值得參考依據。</p>
<p>第四章 自主防災崩塌警戒發布管理流程設計</p>	
<p>1. P4-1，前述(110年)的研究成果有誤，請確認修正。</p>	<p>感謝委員意見，已修正。</p>
<p>2. P4-3 中本計畫將參考 110 年度崩塌紀錄比對等，內容中執行成果說明不明，請補充說明。</p>	<p>感謝委員意見，已更新 110 年度 0731 豪雨以及盧碧颱風暨 0806 水災兩場颱風豪雨事件的自主防災警戒推播流程執行成果內容於報告書。</p>
<p>3. 後續建議方向最後一點，請增加論述「探討疏散避難路線與避難處所的安全性」與本計畫相關性</p>	<p>感謝委員意見，遵照辦理。</p>
<p>第五章 結論</p>	
<p>1. 請提供”建議”說明。</p>	<p>感謝委員意見，遵照辦理。</p>
<p>其他</p>	
<p>1. 本計畫為科技補助計畫，建議將年度發表論文及期刊等研究發表成果一併納入。</p>	<p>遵照辦理</p>
<p>2. 請將農業科技計畫管理系統中期末成果效益報告等資料一併納入。</p>	<p>遵照辦理</p>

附錄七 成果報告書初稿審查委員意見與回復

委員意見	團隊回復
1. P2-53~2-55，報告內容圖列過小不清楚，請確認修正。	感謝委員意見，以調整圖示標示大小，並以全彩列印以便於檢視。
2. P3-5，表 3-2 為呈現集水區 15 處重點聚落內容，對比 P3-44，表 3-8，為僅呈現 13 處重點聚落，請確認修正。	感謝委員意見，遵照修正。
3. P3-41 等，報告內容敘述為以顏色說明圖示內容，本報告書以黑白影印，無法進行內容判讀，請確認修正。	感謝委員意見，成果報告書將以全彩列印，以利內容判讀。
4. 本計畫為科技補助計畫，請將年度期刊、論文等成果發表數量及內容等，於成果報告書中補充說明。	感謝委員意見，年度發表數量詳見附錄九。
5. 上述意見請於成果報告書中做統一意見回復(格式同本案期末審查報告回復格式)。	感謝委員意見，遵照辦理，詳見報告書附錄七。
6. 本案統一編號為: SWCB-110-231，請補印於成果報告書，另成果報告書請全彩影印。	感謝委員意見，遵照辦理。

附錄八 研究發表成果

附錄九 期末成果效益報告

附錄十 公文往返