

---

利用深度學習精進坡地社區自主防災之崩塌  
風險評估模式

Applying deep learning to improve the landslide  
risk assessment model for disaster resistant  
communities

---

執行單位:逢甲大學

執行期間:111年1月1日至111年12月31日

計畫主持人 :逢甲大學土木工程學系李秉乾教授

共同主持人 :逢甲大學都市計畫與空間資訊學系雷祖強教授

協同主持人 :逢甲大學營建及防災中心謝孟勳研究助理教授

逢甲大學土木工程學系黃亦敏助理教授

逢甲大學GIS研究中心方耀民研究副教授

逢甲大學土地管理學系周天穎教授

行政院農業委員會水土保持局委託研究

中華民國 111 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)



## 摘要

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. 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。2. 當不易變動之因子(空間關聯特徵、地文潛勢)資料建立完畢後，對於具有時空變異特性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。因此本計畫將導入時序性深度學習以及圖像深度學習以改善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時空因子之敏感性，使模式本身的預測能力可以再提高。

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。

**關鍵字:** 坡面單元、崩塌、深度學習、警戒管理、自主防災

## **Abstract**

Due to the impact of global climate change and the greenhouse effect, extreme rainfall events are frequent in recent years. Typhoon Morakot in 1998 was an example of heavy rainfall events, which caused severe disasters in the mountain areas of central and southern Taiwan. This event also highlighted the large-scale landslide and its serious impacts. Therefore, to prevent future disasters that may be caused by heavy rains or typhoons, it is necessary to conduct a more in-depth study and analysis on the potential and risk of landslides, and early warning systems.

In the past, the research team has developed a landslide risk evaluation and warning model in related projects. The three factors of landslide risk (hazard, vulnerability, and exposure) are integrated into the landslide risk assessment model, which can effectively understand the individual factors, such as the impact of the temporal characteristics of rainfall on the local environment (hazard), the local environment's ability to withstand rainfalls (vulnerability), and the location of the protected objects (exposure). In the research of vulnerability, there are still several research problems to be solved: 1. The previous research model was mainly based on the data composition of a single slope unit. This may have the problem of ignoring the spatial correlation between slope units, so it is difficult to explore overall variation of the entire catchment area. The variation between slope units may also be ignored in the analysis, which may cause some potential threats to be unpredicted, or the numerical composition of slope units is relatively homogeneous, resulting in unreasonable landslide potential estimation. 2. After the data of stable factors (i.e., spatial correlation characteristics and geological potential) are established, the role of the rainfall database with spatiotemporal variation characteristics in the model is very important. It is assumed that the occurrence of collapse events is in sequential relationship, that is, when the

rainfall occurs and the scale of rainfall reaches a certain level (triggering conditions), with the environmental vulnerability (potential conditions), there will be a landslide. Therefore, this project will introduce time-series and image deep learning methods to improve the model's performance for rainfall-induced landslide in the unknown rainfall field, and to extract the key influence relationship. The improved sensitivity of factors can further improve model's ability of landslide prediction.

Finally, after completing the optimization of the landslide potential assessment model, updating the landslide warning mechanism, and setting landslide risk indicator thresholds, this plan will implement the landslide disaster management and design the warning issuing process for disaster resistant communities. The proposed landslide potential model will be introduced to the communities with high-risk of landslide disasters, and the evacuation maps and landslide potential maps will also be prepared. The goal of disaster avoidance, prevention, and mitigation for a community will be achieved in the end.

**Keyword: slope unit, landslide, deep learning, warning system, disaster resistant**

摘 要 .....	I
Abstract.....	III
目 次.....	V
表 次.....	VII
圖 次.....	IX
<b>第一章 前言 .....</b>	<b>1-9</b>
第一節 計畫緣起與目的 .....	1-9
第二節 工作項目與內容 .....	1-11
第三節 歷年計畫重要成果說明 .....	1-12
<b>第二章 崩塌事件資料庫擴增.....</b>	<b>2-1</b>
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
<b>第三章 坡地崩塌風險評估模型建立.....</b>	<b>3-1</b>
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 .....	3-18
第三節 坡地崩塌風險評估指標警戒值訂定機制 .....	3-42
第四節 高時間解析度之崩塌序列特徵模型 .....	3-48
<b>第四章 智慧防災物聯網初步規劃.....</b>	<b>4-1</b>
第一節 坡地社區崩塌警戒發布管理流程設計 .....	4-1
第二節 整合大規模崩塌監測資訊 .....	4-9
第三節 坡地社區崩塌風險警戒發布以及大規模崩塌監測研析 .....	4-15
第四節 智慧防災物聯網初步規劃 .....	4-29

第五章 結論與建議.....	5-1
參考文獻.....	1
附錄一 各類資料庫資訊明細表.....	1
附錄二 各年度速報資料詳表.....	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.....	11
附錄四 符號表.....	19
附錄五 期初計畫審查委員意見與回覆.....	20
附錄六 期中報告書審查委員意見與回覆.....	22
附錄七 期末報告書審查委員意見與回覆.....	29
附錄八 成果報告書初稿審查委員意見與回覆.....	34
附錄九 研究發表成果.....	36
附錄十 期末成果效益報告.....	38
附錄十一 公文往返.....	40

## 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(單位：HA) .....	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(單位：HA)	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 13 處重點聚落及 3 處大規模崩塌影響範圍之鄰近雨量站表....	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 .....	3-30
表 3-5	逐時降雨的降雨強度(I)範例表格(mm/hr).....	3-34
表 3-6	混淆矩陣表.....	3-40
表 3-7	GAN 模型測試資料驗證精度表 .....	3-41
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(111 年度).....	3-45
表 3-9	FS-2 衛星圖資一覽表.....	3-49

表 3-10	FS-2 衛星圖資一覽表.....	3-56
表 3-11	模型混淆矩陣.....	3-59
表 3-12	不同閾值下的模型表現.....	3-60

## 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 2022 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- 29	本計畫蒐集之雨量測站分布 .....	2-27
圖 2- 30	本計畫之雨場分割定義 .....	2-28
圖 2- 31	97 年度至 98 年度各事件颱風豪雨雨量推估 .....	2-31
圖 2- 32	98 年度至 99 年度各事件颱風豪雨雨量推估 .....	2-31
圖 2- 33	99 年度至 100 年度各事件颱風豪雨雨量推估 .....	2-31
圖 2- 34	100 年度至 101 年度各事件颱風豪雨雨量推估 .....	2-32
圖 2- 35	101 年度至 102 年度各事件颱風豪雨雨量推估 .....	2-32
圖 2- 36	102 年度至 103 年度各事件颱風豪雨雨量推估 .....	2-32
圖 2- 37	103 年度至 104 年度各事件颱風豪雨雨量推估 .....	2-32
圖 2- 38	104 年度至 105 年度各事件颱風豪雨雨量推估 .....	2-33
圖 2- 39	崩塌地分類示意圖 .....	2-34
圖 2- 40	97 年度至 98 年度間崩塌變異類型分布圖 .....	2-35
圖 2- 41	98 年度至 99 年度間崩塌變異類型分布圖 .....	2-36
圖 2- 42	99 年度至 100 年度間崩塌變異類型分布圖 .....	2-37
圖 2- 43	100 年度至 101 年度間崩塌變異類型分布圖 .....	2-38
圖 2- 44	101 年度至 102 年度間崩塌變異類型分布圖 .....	2-39
圖 2- 45	102 年度至 103 年度間崩塌變異類型分布圖 .....	2-40
圖 2- 46	103 年度至 104 年度間崩塌變異類型分布圖 .....	2-41
圖 2- 47	104 年度至 105 年度間崩塌變異類型分布圖 .....	2-42
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) .....	2-45
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) .....	2-45

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).....	2-45
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).....	2-45
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).....	2-46
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).....	2-46
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).....	2-46
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).....	2-46
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).....	2-47
圖 2- 57	陳有蘭溪集水區之坡面單元 .....	2-49
圖 2- 58	荖濃溪集水區之坡面單元 .....	2-50
圖 2- 59	旗山溪集水區之坡面單元 .....	2-51
圖 2- 60	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- 61	荖濃溪坡面單元辛樂克颱風雨量分布( $I_1-R_{te}$ ) .....	2-53
圖 2- 62	旗山溪坡面單元辛樂克颱風雨量分布( $I_1-R_{te}$ ) .....	2-53
圖 2- 63	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- 64	荖濃溪坡面單元莫拉克颱風雨量分布( $I_1-R_{te}$ ) .....	2-54
圖 2- 65	旗山溪坡面單元莫拉克颱風雨量分布( $I_1-R_{te}$ ) .....	2-55
圖 2- 66	崩塌地坡度與深度分佈 .....	2-56
圖 2- 67	崩塌塊體斜面與投影面關係示意圖 .....	2-56
圖 2- 68	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- 69	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- 70	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- 71	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- 72	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- 73	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- 74	103 年度至 104 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈 .....	2-59

<b>圖 2- 75</b>	<b>104 年度至 105 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈</b> .....	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 .....	3-9
圖 3- 5	屈尺雨量站歷史雨量( $I_{max} - R_{te}$ )等機率曲面 .....	3-13
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 .....	3-14
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 .....	3-15
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 .....	3-16
圖 3- 15	萬山雨量站歷史雨量( $I_{max} - R_{te}$ )等機率曲面 .....	3-16
圖 3- 16	寶山雨量站歷史雨量( $I_{max} - R_{te}$ )等機率曲面 .....	3-16
圖 3- 17	龍泉寺雨量站歷史雨量( $I_{max} - R_{te}$ )等機率曲面 .....	3-17
圖 3- 18	模型樣本之誘發降雨因子分布圖 .....	3-20
<b>圖 3- 19</b>	<b>集水區圖像特徵定義示意圖</b> .....	3-22
<b>圖 3- 20</b>	<b>GCN 定義圖像之矩陣示意圖</b> .....	3-22
<b>圖 3- 21</b>	<b>坡面單元鄰接矩陣示意圖</b> .....	3-23
<b>圖 3- 22</b>	<b>坡面單元度矩陣示意圖</b> .....	3-23
<b>圖 3- 23</b>	<b>坡面單元權重矩陣示意圖</b> .....	3-24
圖 3- 24	各年度[崩塌]單元與降雨規模關聯統計 .....	3-25

圖 3- 25	降雨誘發時序特徵模式建立示意圖 .....	3-26
圖 3- 26	單層 RNN 模型 .....	3-27
圖 3- 27	單層 RNN 模型序列展開 .....	3-28
圖 3- 28	LSTM CELL 結構 .....	3-29
圖 3- 29	本計畫各年度間資料分組示意圖 .....	3-32
圖 3- 30	崩塌顯著雨量門檻假設公式示意圖 .....	3-35
圖 3- 31	生成對抗網路架構圖 ( <a href="https://reurl.cc/EKMbRv">https://reurl.cc/EKMbRv</a> ) .....	3-37
圖 3- 32	本研究對抗生成網路架構設計 .....	3-38
圖 3- 33	降雨危害評估模型應用示意圖 .....	3-42
圖 3- 34	自適性坡地崩塌潛勢評估模型應用示意圖 .....	3-43
圖 3- 35	警戒曲線訂定示意圖 .....	3-44
圖 3- 36	崩塌風險警戒機制示意圖 .....	3-47
圖 3- 37	衛星影像深度學習判釋分析於擴增崩塌時序特徵樣本 .....	3-48
圖 3- 38	衛星資料圖原圖 .....	3-50
圖 3- 39	衛星資料圖上涵蓋所觀察 .....	3-50
圖 3- 40	原始衛星影像 .....	3-51
圖 3- 41	2014 年崩塌區域 .....	3-51
圖 3- 42	2015 年崩塌區域 .....	3-51
圖 3- 43	坡面單元劃分 .....	3-51
圖 3- 44	2014+2015 .....	3-51
圖 3- 45	崩塌區域及 .....	3-51
圖 3- 46	原始衛星影像坡面單元劃分 .....	3-52
圖 3- 47	2014 - 2015 的崩塌地資訊 .....	3-52
圖 3- 48	衛星航帶格點區分圖幅 .....	3-53
圖 3- 49	網格編號與對應位置 .....	3-53

圖 3- 50 2014 年 12 月.....	3-54
圖 3- 51 2015 年 10 月.....	3-54
圖 3- 52 2015 年 12 月.....	3-54
圖 3- 53 2016 年 2 月.....	3-54
圖 3- 54 G050 修補前 .....	3-55
圖 3- 55 G050 修補後 .....	3-55
圖 3- 56 U-Net 原始網路架構圖 ssSS.....	3-57
圖 3- 57 邊坡崩塌偵測網路架構圖 .....	3-58
圖 3- 58 上/下採樣與 ResBlock 模型描述 .....	3-59
圖 3- 59 崩塌辨識模型預測崩塌 .....	3-61
圖 3- 60 陰影辨識模型預測為陰影 .....	3-61
圖 3- 61 單元圖塊真實崩塌標記 .....	3-62
圖 3- 62 預測為崩塌地區去除陰影 .....	3-62
圖 3- 63 G050 圖塊單元衛星影像原圖 .....	3-62
圖 3- 64 G050 崩塌模型預測崩塌範圍 .....	3-62
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.....	4-5
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 .....	4-6
圖 4- 6 自主防災警戒推播流程規劃示意圖 .....	4-7
圖 4- 7 大規模崩塌監測研究樣區 .....	4-11
圖 4- 8 D382(寶山)大規模崩塌監測資料.....	4-12
圖 4- 9 D021(新庄)大規模崩塌監測資料.....	4-13
圖 4- 10 D048(萬山)大規模崩塌監測資料.....	4-14

圖 4- 11	新發聚落災害管理單元關注對象說明圖 .....	4-15
圖 4- 12	寶山聚落災害管理單元關注對象說明圖 .....	4-16
圖 4- 13	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 .....	4-18
圖 4- 14	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 .....	4-18
圖 4- 15	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 .....	4-19
圖 4- 16	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 .....	4-19
圖 4- 17	盧碧颱風暨 0806 水災於 2021/08/07 12:00 之速報資料 .....	4-20
圖 4- 18	盧碧颱風暨 0806 水災於 2021/08/07 13:00 之速報資料 .....	4-21
圖 4- 19	寶山聚落測站位置分布圖 .....	4-23
圖 4- 20	0731 豪雨至盧碧颱風暨 0806 水災期間 DS011_01 測站之綜合監 測圖 .....	4-23
圖 4- 21	0731 豪雨至盧碧颱風暨 0806 水災期間 DS011_02 測站之綜合監 測圖 .....	4-24
圖 4- 22	0731 豪雨至盧碧颱風暨 0806 水災期間 DS011_03 測站之綜合監 測圖 .....	4-24
圖 4- 23	0731 豪雨至盧碧颱風暨 0806 水災期間 DS011_04 測站之綜合監 測圖 .....	4-25
圖 4- 24	寶山聚落於盧碧颱風暨 0806 水災降雨歷程之 H 指標、F 指標及 對應坡面單元崩塌潛勢分布圖 .....	4-26
圖 4- 25	寶山聚落於盧碧颱風暨 0806 水災之雨量站差異 .....	4-27
圖 4- 26	即時監測資料展示介面示意圖 .....	4-31

圖 4-27 崩塌災害自主防災資訊管理架構設計 .....4-31

## 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，並已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  $R_{te}$ )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，本計畫將整合大規模崩塌監測資訊，其中將配合農委會水保局「氣候變遷下大規模崩塌防減災計畫」於 2020 年完成全臺 36 處大規模崩塌高風險區研究調查，建立防減災監測、預警系統及示範區，而共三處大規模崩塌影響範圍於本計畫研究區域(陳有蘭溪、荖濃溪以及旗山溪集水區)內，並針對各大規模崩塌高風險區所建置簡易觀測系統數據，掌握大規模崩塌潛勢區，如下圖 1-1，根據影響範圍劃定、細部監測區位及觀測儀器之監測資料，與本計劃模型之颱風豪雨實測警戒趨勢進行比較，研析崩塌發生的誘發機制，供作為應變機制修正參考，以提高模型預警啟動機制的準確度。

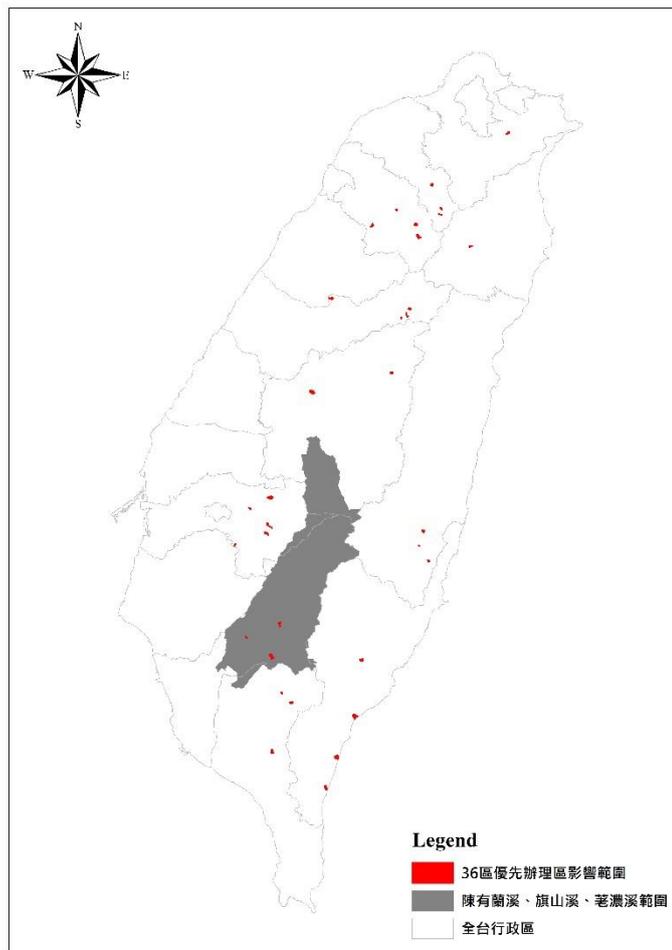


圖 1-1 大規模崩塌影響範圍分布圖

## 第二節 工作項目與內容

本(111)年度計畫具體目標及工作內容如下：

- 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，本計畫將與國家太空中心合作，嘗試蒐集歷年度重大颱風豪雨區間之衛星影像，透過衛星影像深度學習判釋技術，並已過所建立之模型進行整合串聯，期能夠透過崩塌以及降雨規模關聯特徵樣本的擴增，以建立高時間解析度之崩塌序列特徵模型。
- 二、**訂定多尺度管理單元之崩塌警戒指標門檻值:**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基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、**整合大規模崩塌監測資訊，建構智慧防災網絡:**掌握「氣候變遷下大規模崩塌防減災計畫」，大規模崩塌潛勢區影響範圍劃定、細部監測區位及觀測儀器之監測資料，並研析實證區域內之大規模崩塌潛勢區範圍(高雄市-茂林區-D048、杉林區-D021 以及桃源區-D382)及崩塌誘發機制。
- 四、**山坡地社區智慧崩塌防災網絡設計規劃:**解析目前相關單位投入之坡地災害技術發展研究技術，供山坡地社區智慧崩塌防災網絡初步規劃之參考，並討論技術以及資訊整合應用之可行性。未來若配合智慧行動裝置，應可達成區域型災害通報，完善山坡地社區自主防災與智慧防災機制。

### 第三節 歷年計畫重要成果說明

以下針對歷年計畫之各項重要成果進行說明：

#### 一、應用人工智慧技術發展坡地崩塌風險評估模式(108 年度)

- (一)本團隊過去在水保局)相關計畫中，已透過建立易損性模式，針對陳有蘭溪、旗山溪、荖濃溪集水區等示範區進行相關資料蒐集彙整，完成雙變量坡地易損性分析，針對不同類型之坡面導出不同雨量觸發因子(最大小時降雨和總有效累積雨量)及崩塌地文因子(地質、坡度、坡向、河道遠近、植生、歷史崩塌)之易損性曲線，並與降雨危害曲線整合為一套崩塌風險警戒機制模式。
- (二)本計畫精進雙變量坡地易損性曲面模式，盤點 2008-2018 全台重大颱風豪雨事件，並針對雨量範圍決定事件規模，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)的萃取，擴增崩塌事件資料庫。
- (三)本計畫將利用人工智慧類神經網路建立崩塌比率評估模型，並將坡面單元環境因子組成，並加入為易損性分析模型之變數，進行訓練已取得全域環境下適用之模型，並投入兩種雨量參數，分別為各年度颱風豪雨( $I_{max}(i)$ ,  $R_{te}(i)$ )之最大之  $I_{max}(i)$  及其對應之  $R_{te}(i)$  與最大之  $R_{te}(i')$  及其對應之  $I_{max}(i')$  )，分別得到 70.56% 以及 72.22% 之準確率，間接評估崩塌發生之雨量誘因未必為  $I_{max}(i)$ ,  $R_{te}(i)$ ，其可能之降雨誘發因子需進一步探索。
- (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。

#### 二、自適性坡地崩塌評估模式於崩塌災害警戒管理之研究(109 年度)

- (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

溪集水區之崩塌事件資料庫擴增以取得更多事件(98 年度至 106 年度)崩塌樣本，而以擴增後之崩塌事件資料庫進行人工智慧演算法之模式訓練，進而探索全域變動因子(雨量驅動因子:  $(I_{max}, R_{te})$  以及  $(R_{max}, I_1)$ )對於坡地崩塌災害的影響性。

- (二) 本計畫完成建立基礎類神經坡地風險評估模型，並將坡面單元環境因子組成以及歷年的最大事件降雨擾動因子之崩塌時序特徵資料庫，加入為崩塌潛勢評估分析模型之變數，進行訓練已取得全域環境下適用之模型，並投入兩種雨量參數，分別為各年度颱風豪雨雨場中之最大之  $I_{max}(i)$  及其對應之  $R_{te}(i)$ ，於驗證樣本中得到 77.64% 之準確率，其中輸入降雨參數為  $(I_{max}, R_{te})$  之未發生準確率為 70.84%(誤判率為 0.29)，已發生準確率為 84.48%(漏判率為 0.16)。
- (三) 在模式建立後，將目標判釋年度為 105 年度至 106 年度之資料庫進行崩塌潛勢評估模式之獨立驗證，經過模式的驗證結果，其整體精度為 82.92%，其中未發生準確率為 82.66%(誤判率為 0.17)，已發生準確率為 84.27%(漏判率為 0.15)，其說明對於單一坡面單元於過去崩塌發生頻率以及變異狀況是有可能擾動坡面的結構進而影響該坡面發生崩塌的可能性。
- (四) 本計畫完成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。

### 三、 利用深度學習精進坡地社區自主防災之崩塌風險評估模式(110 年度)

- (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，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。





## 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

移動型式之型態 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	土石墜落 Debris Fall	土砂墜落 Earth Fall
翻倒 Topples		岩石翻倒 Rock Topple	土石翻倒 Debris Topple	土砂翻倒 Earth Topple
滑動 Slides	旋轉型 Rotational	岩石陷落 Rock Slump	土石陷落 Debris Slump	土砂陷落 Earth Slump
	平移型 Translational	岩塊滑動 Rock Block slide(Glide) 岩石滑動 Rock Slide	土石塊滑動 Debris Block Slide 土石滑動 Debris Slide	土砂塊滑動 Earth Block Slide(Glide) 土砂滑動 Earth Slide
側向潰散 Lateral Spreads		岩石側潰 Rock Spread	土石側潰 Debris Spread	土砂側潰 Earth Spread
流動 Flows		岩石流 Rock Flow(深層潛移 Deep Creep)	土石流動 Debris Flow 土砂流動 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 (1978)

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 448.13km<sup>2</sup>，平均坡度超過 55%。

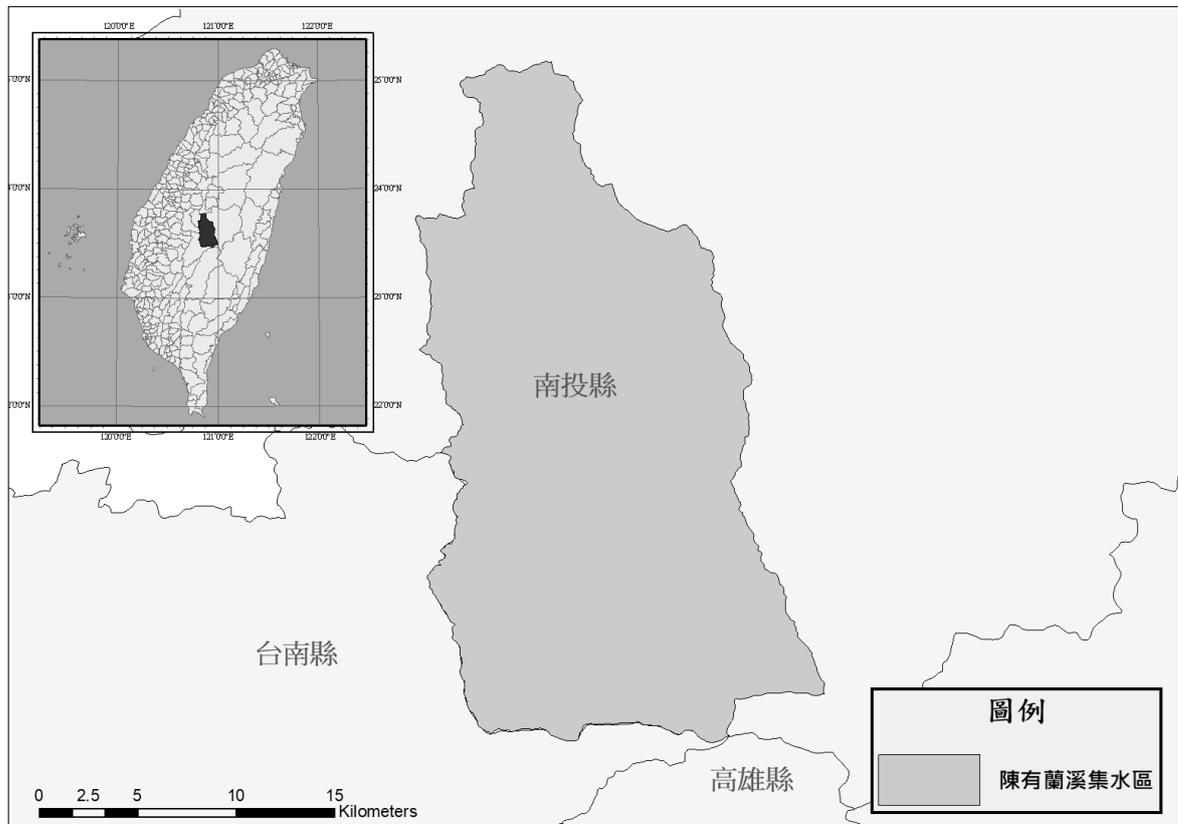


圖 2-1 陳有蘭溪地理位置圖

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 1,408.71km<sup>2</sup>，平均坡度則超過 65%。

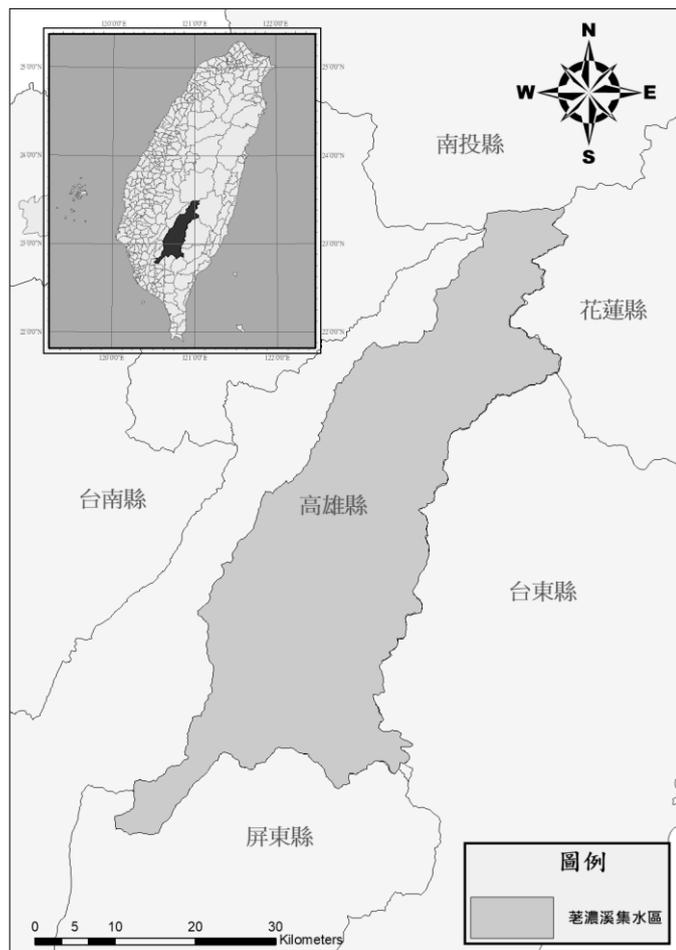


圖 2-2 荖濃溪地理位置圖

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 750.79km<sup>2</sup>，平均坡度則超過 55%。

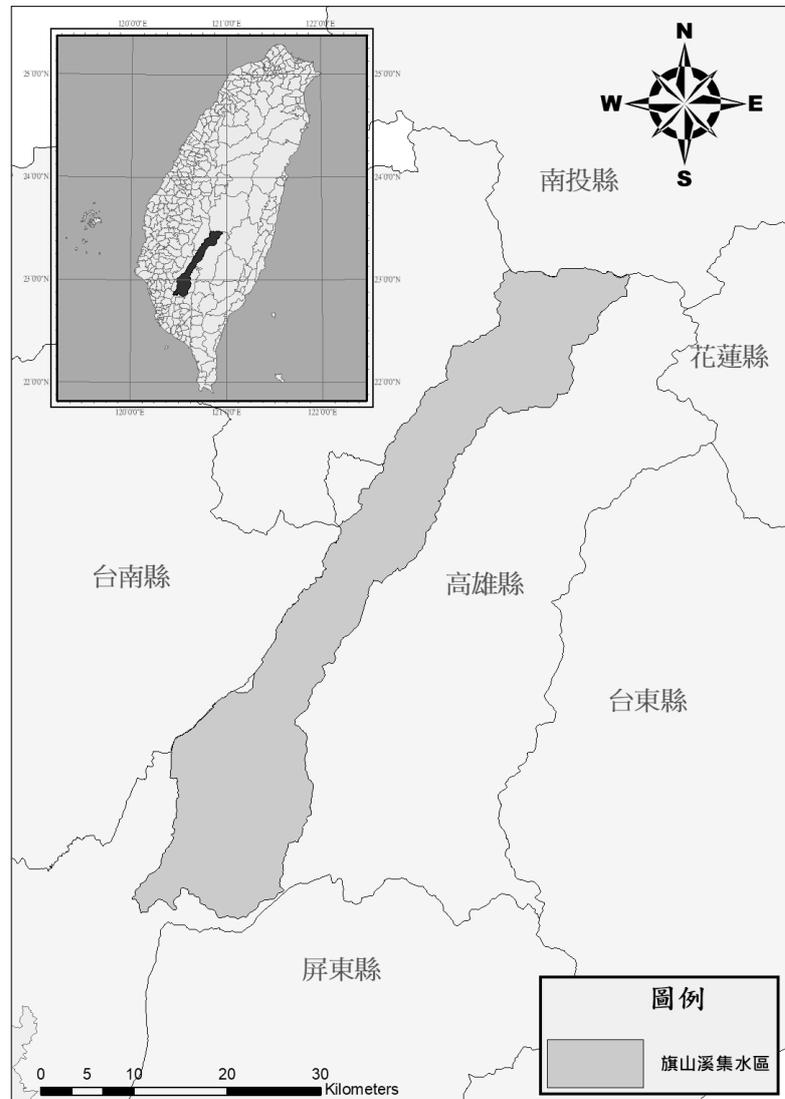


圖 2-3 旗山溪地理位置圖

而為了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，以利於模式建立與延伸應用之用。

## 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。

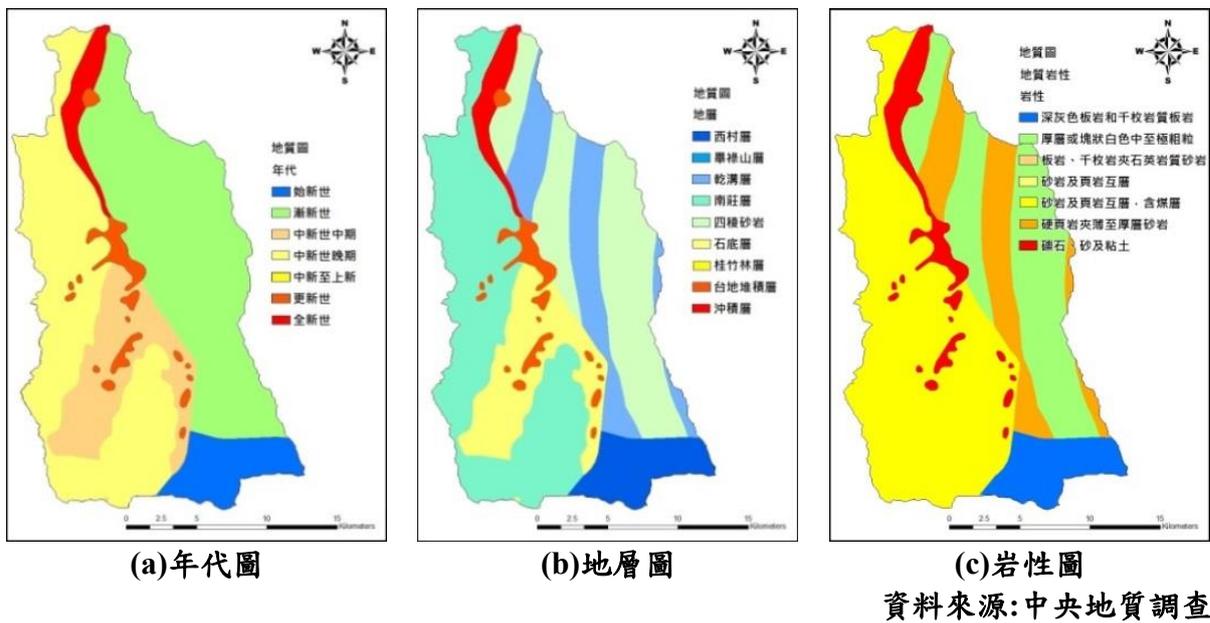


圖 2-4 陳有蘭溪集水區地質圖

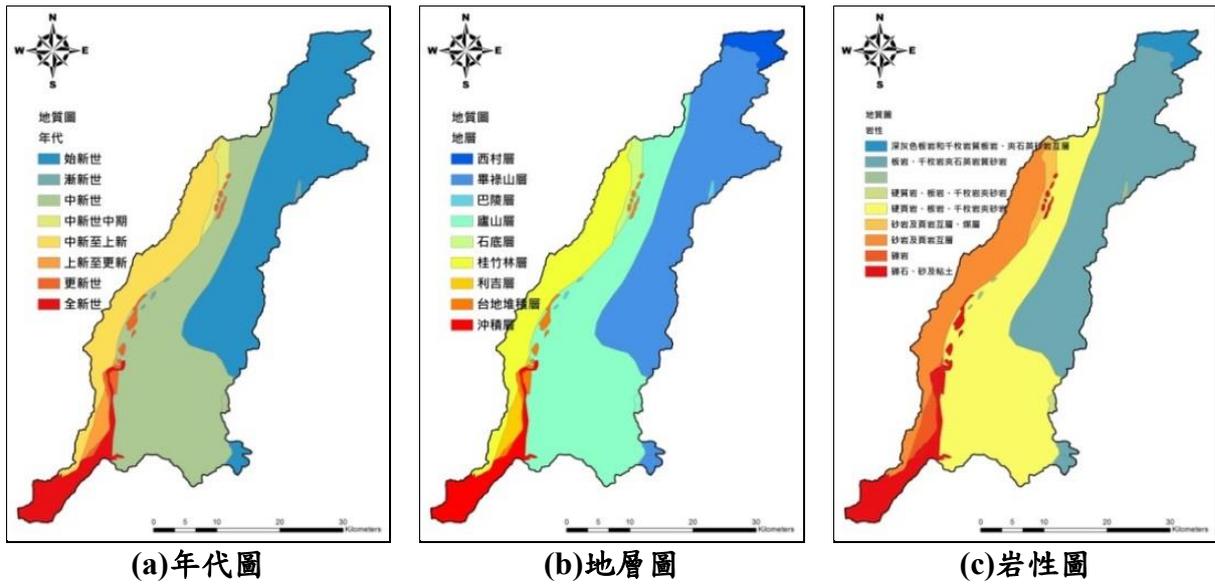


圖 2-5 荖濃溪集水區地質圖

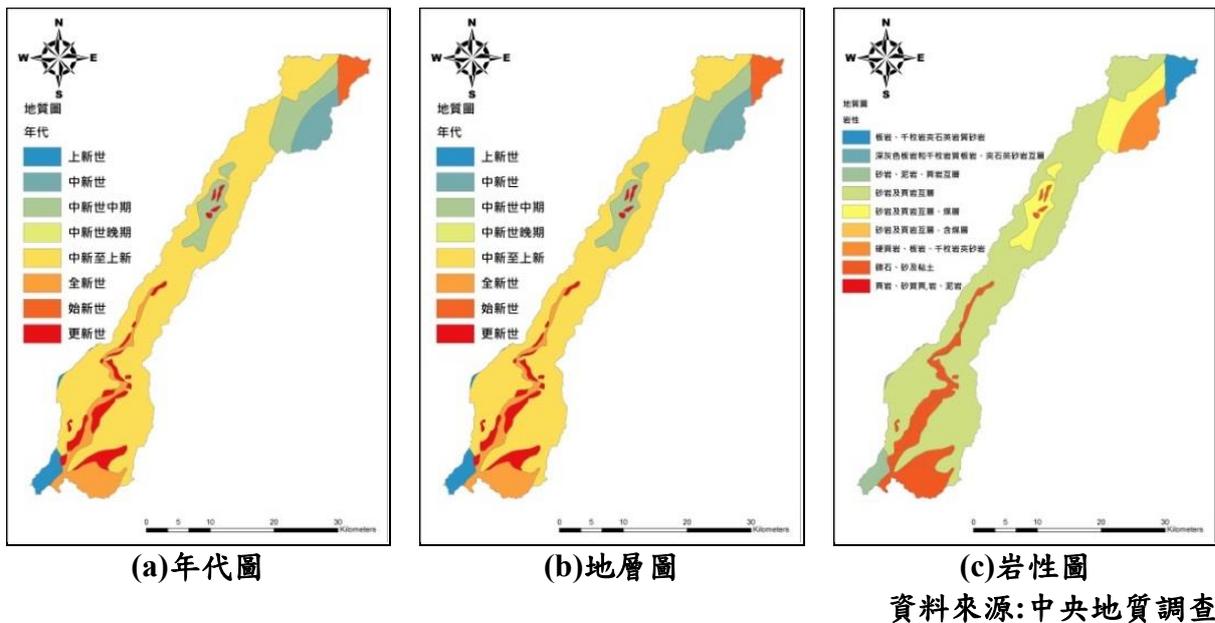


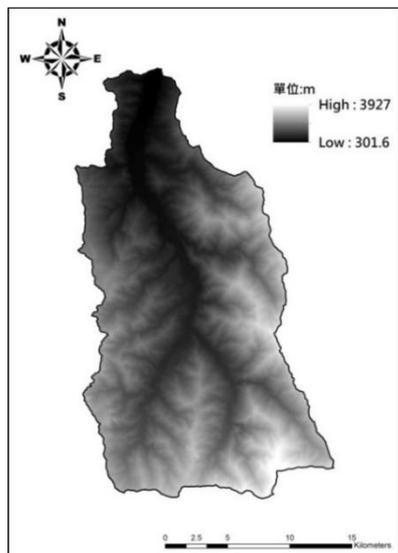
圖 2-6 旗山溪集水區地質圖

### 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。

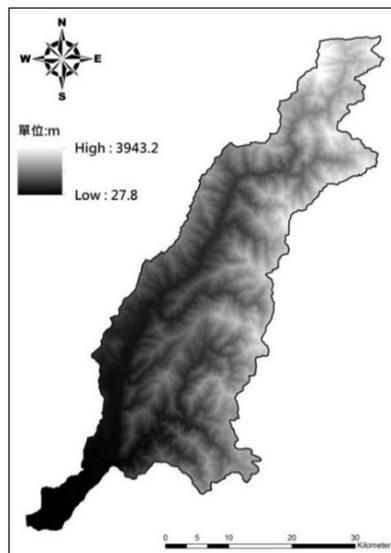
此資料提供計畫區域空間位置之高程資訊，並應用於計算相關地形參

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。



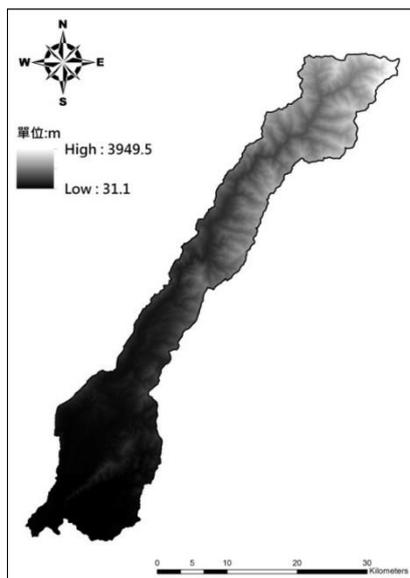
資料來源:內政部地政司

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( $^{\circ}$ )。

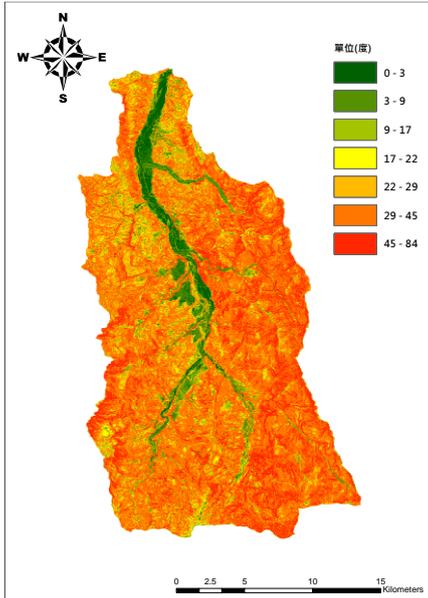


圖 2-10 陳有蘭溪集水區坡度影像

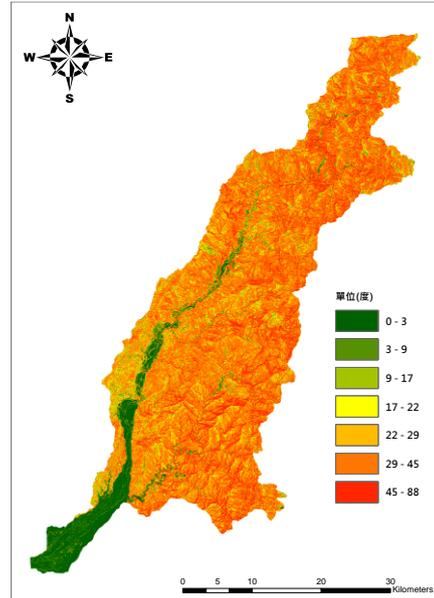


圖 2-11 荖濃溪集水區坡度影像

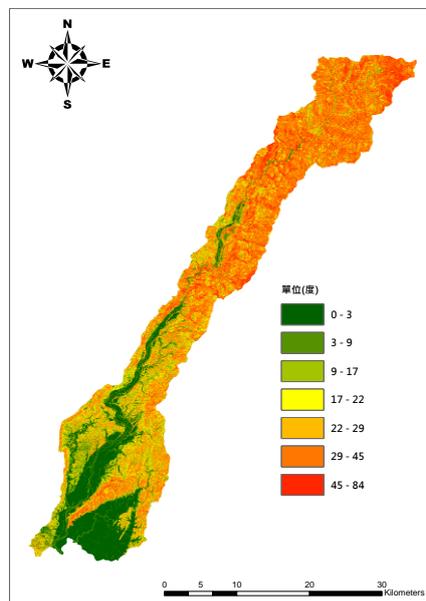


圖 2-12 旗山溪集水區坡度影像

## (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。

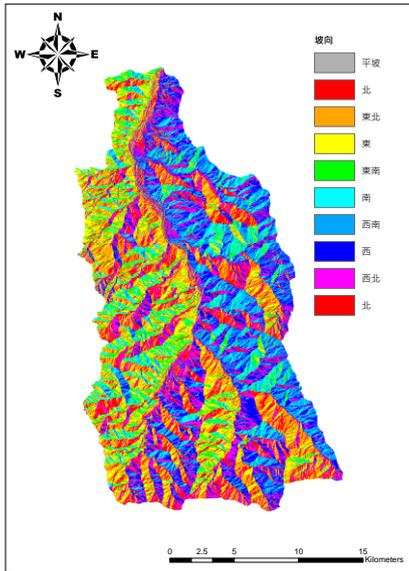


圖 2- 13 陳有蘭溪集水區坡向圖

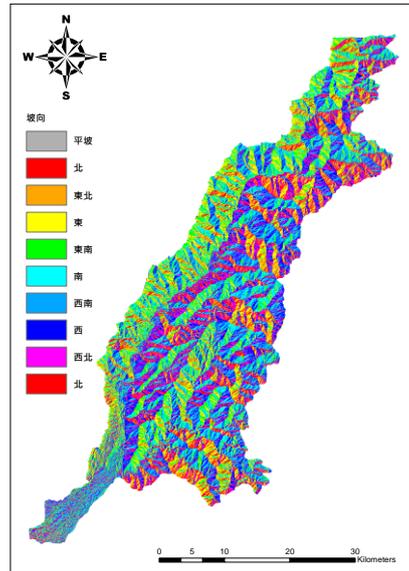


圖 2- 14 荖濃溪集水區坡向圖

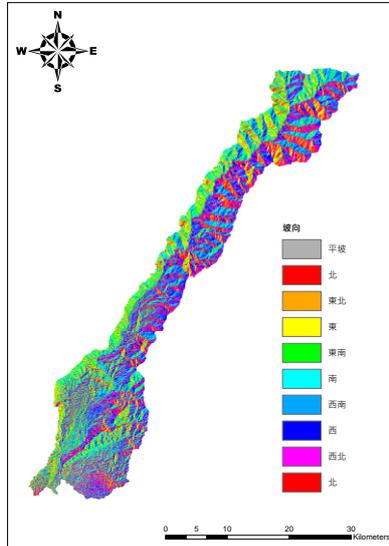
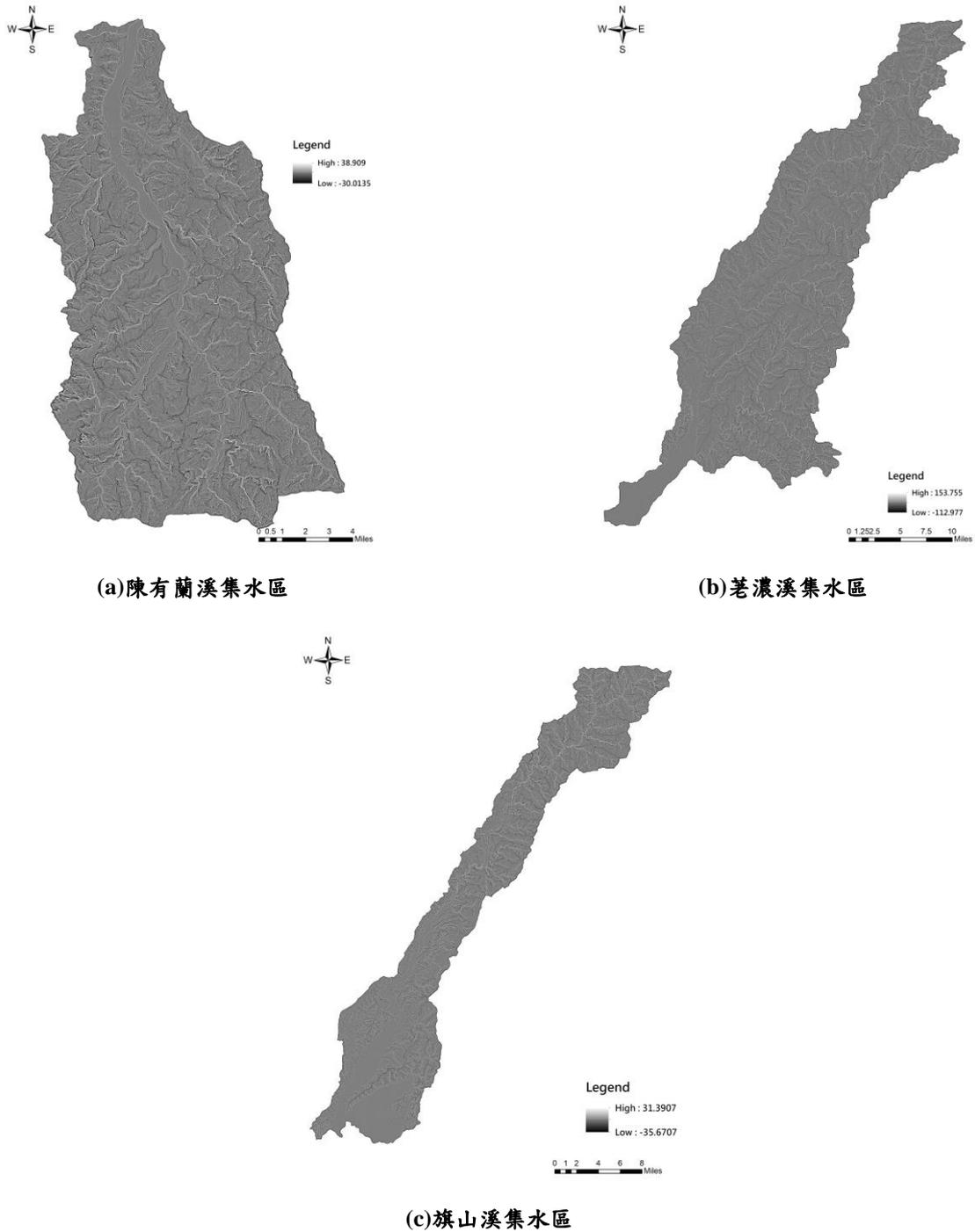


圖 2- 15 旗山溪集水區坡向圖

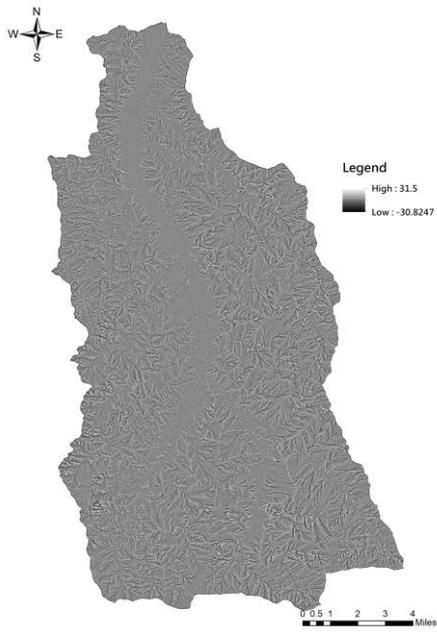
### (三) 地面曲率因子

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

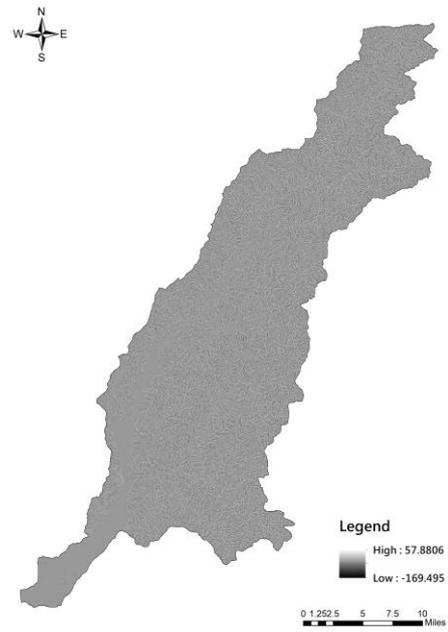
該點的曲率值，即該點所在的地面等高線的彎曲程度，下圖 2-16 為研究實證範圍之剖面曲率圖，下圖 2-17 為研究實證範圍之平面曲率圖。



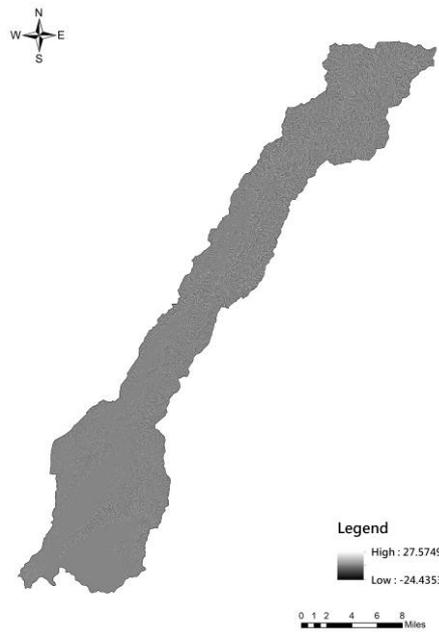
(a) 陳有蘭溪集水區  
(b) 荖濃溪集水區  
(c) 旗山溪集水區  
圖 2-16 各集水區剖面曲率圖



(a) 陳有蘭溪集水區

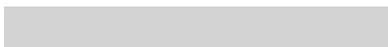


(b) 老濃溪集水區



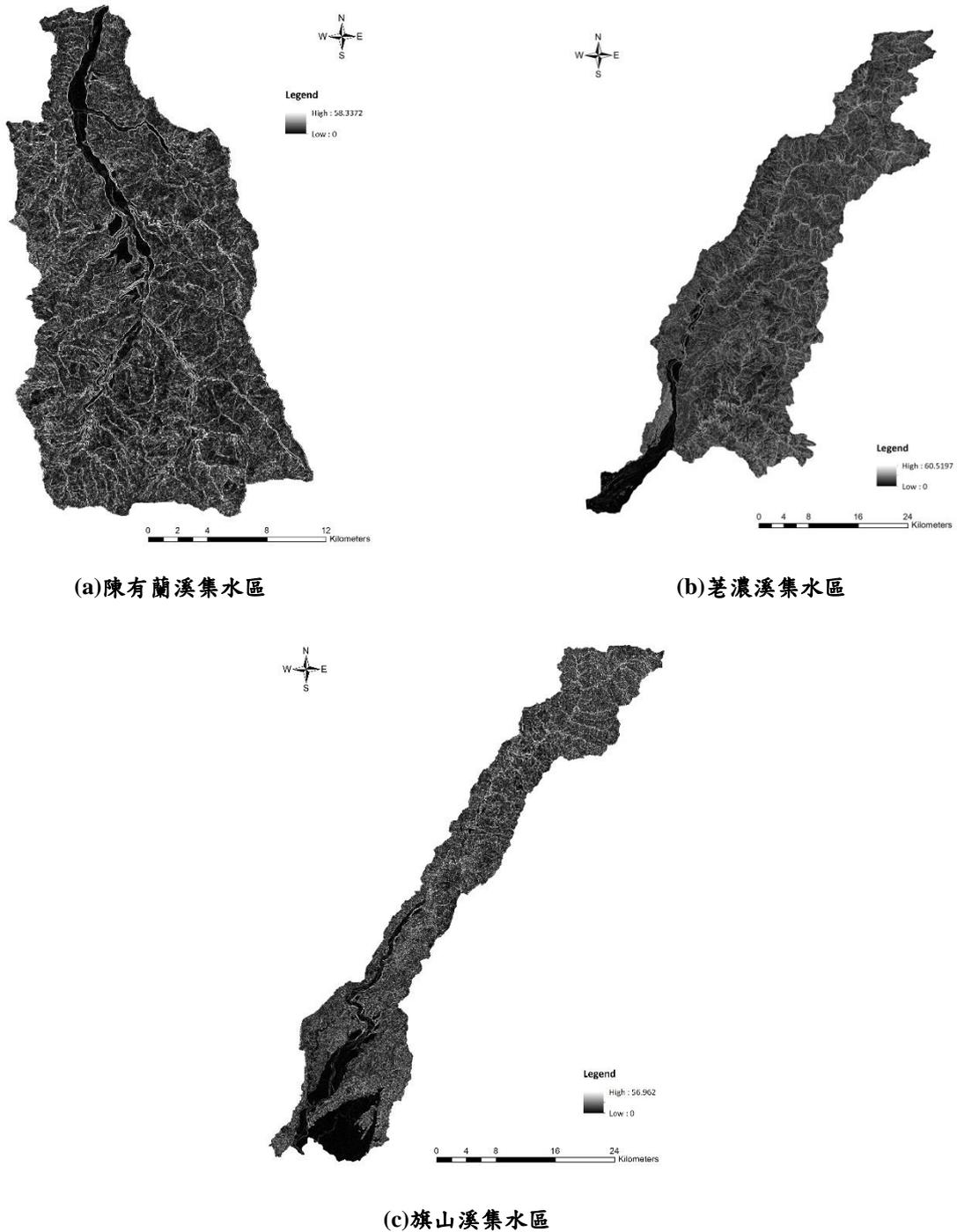
(c) 旗山溪集水區

圖 2-17 各集水區平面曲率圖



(四) 坡度變率

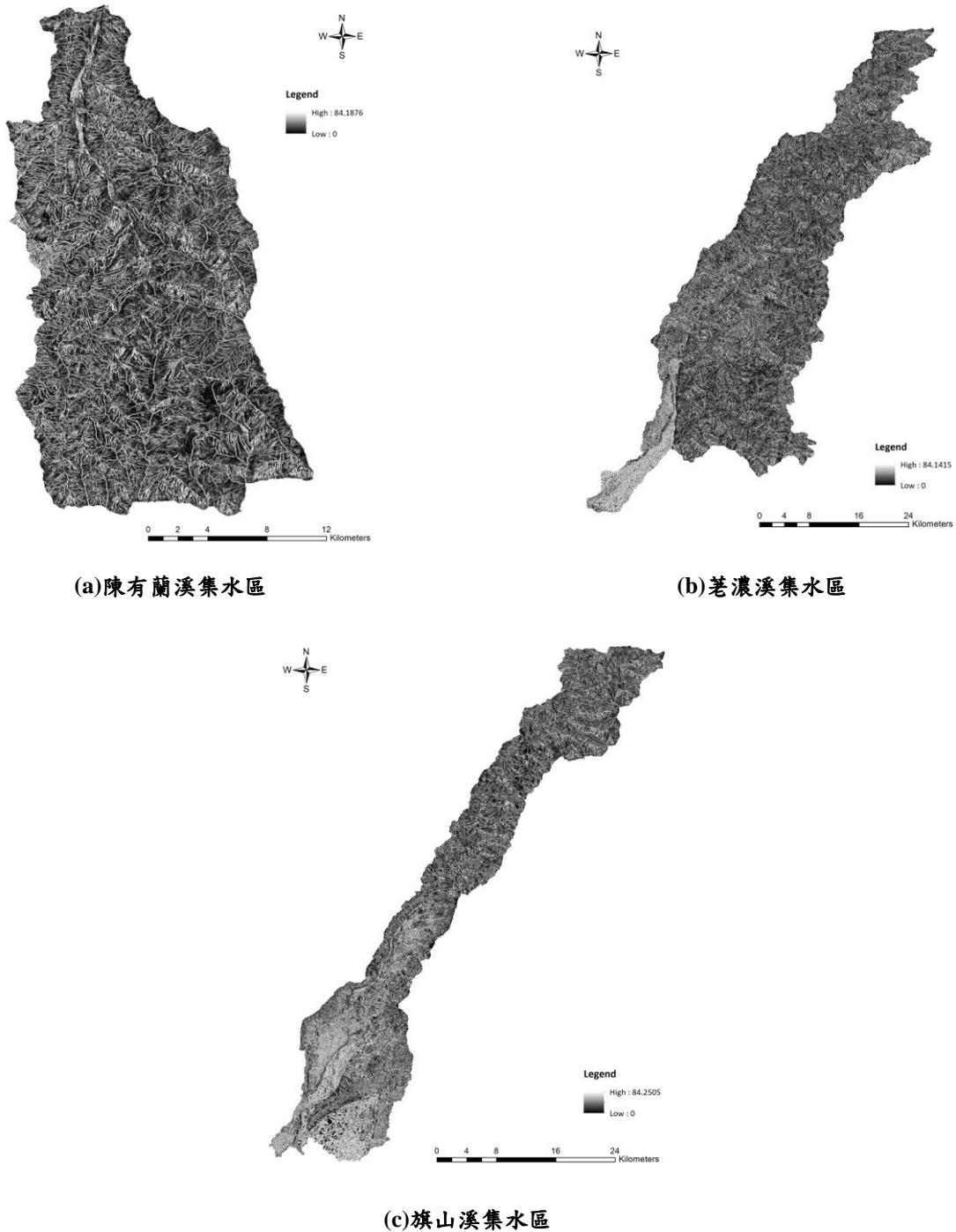
即地面坡度的變化，反映地面有沒有一個陡坎，有變化的地方才出現大值，下圖 2- 18 為研究實證範圍之坡度變率圖。



(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

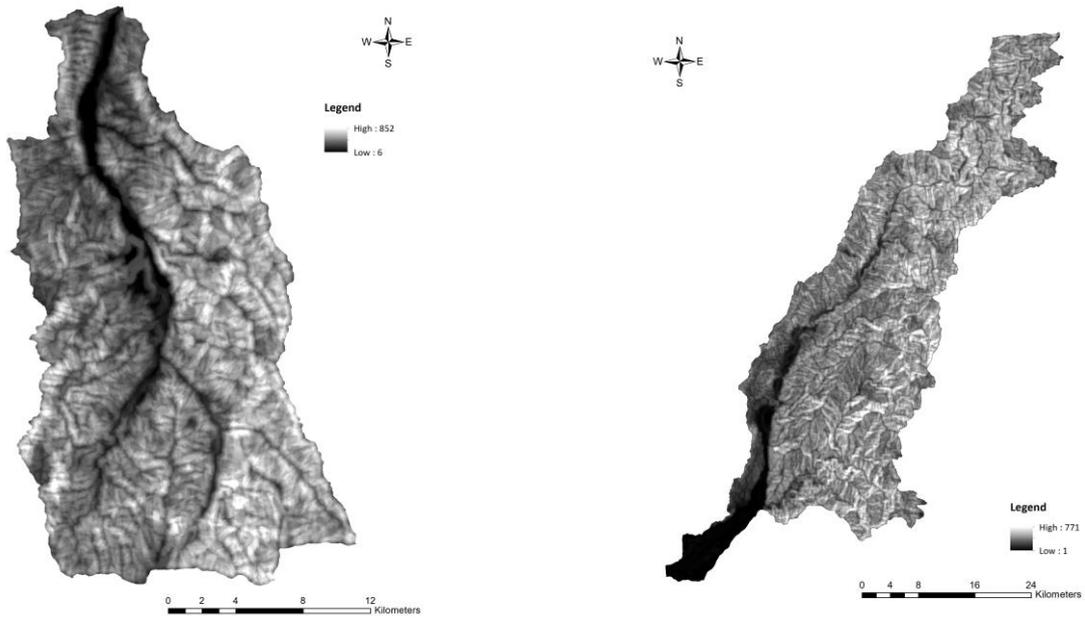
即地面坡向的坡度，可以很好地反映等高線的彎曲程度，下圖 2-19 為研究實證範圍之坡向變率圖。



(a) 陳有蘭溪集水區  
(b) 荖濃溪集水區  
(c) 旗山溪集水區  
圖 2-19 各集水區坡向變率圖

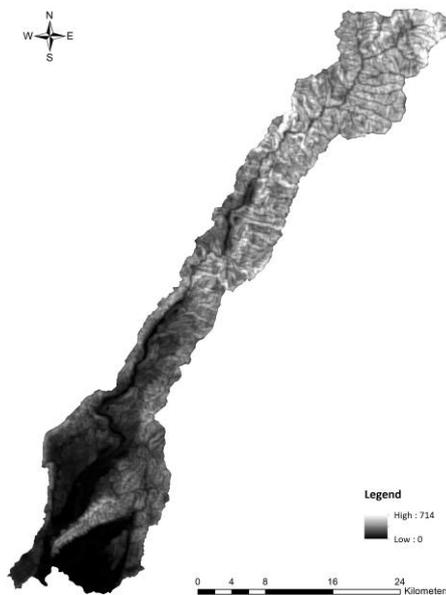
(六) 地形起伏度

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。



(a)陳有蘭溪集水區

(b)老濃溪集水區



(c)旗山溪集水區

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。

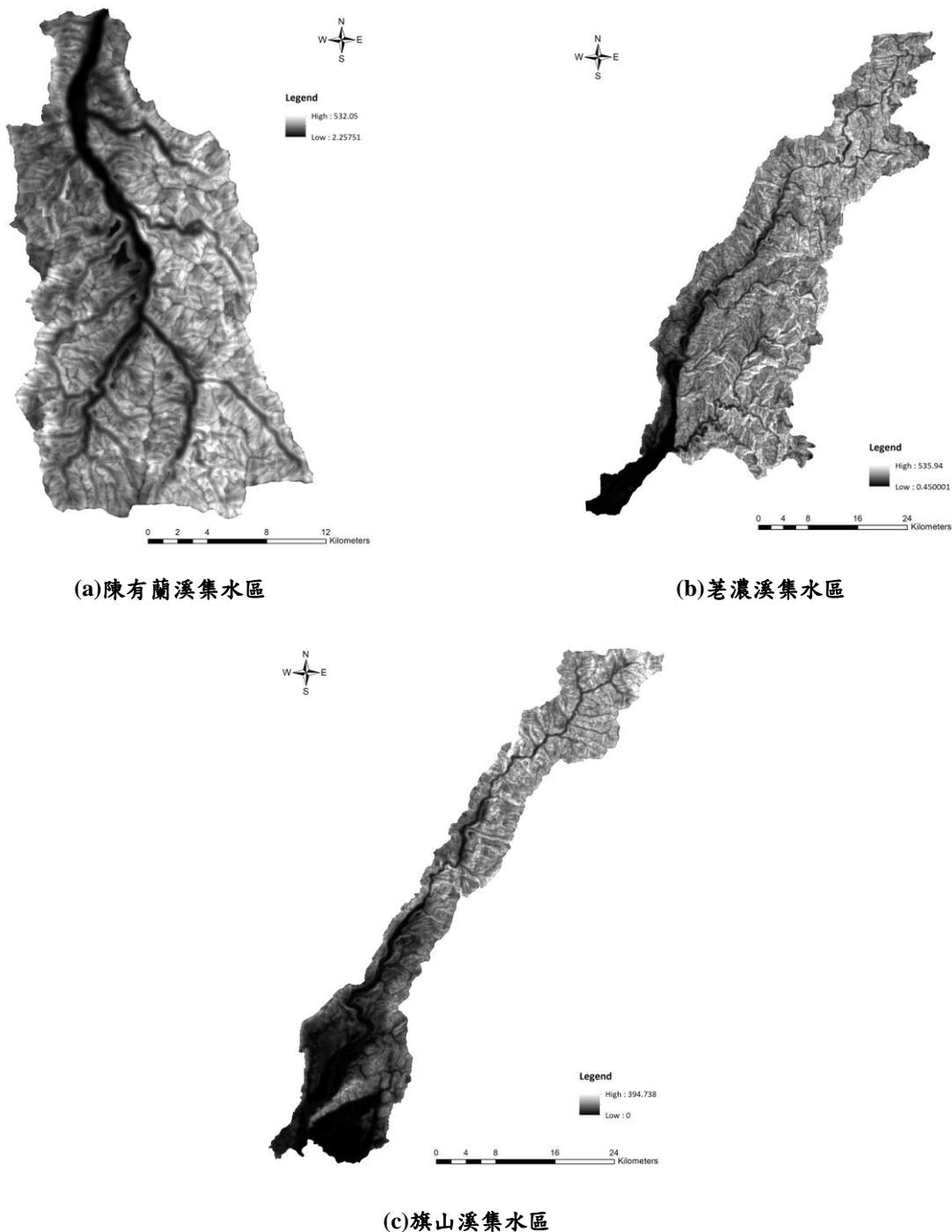
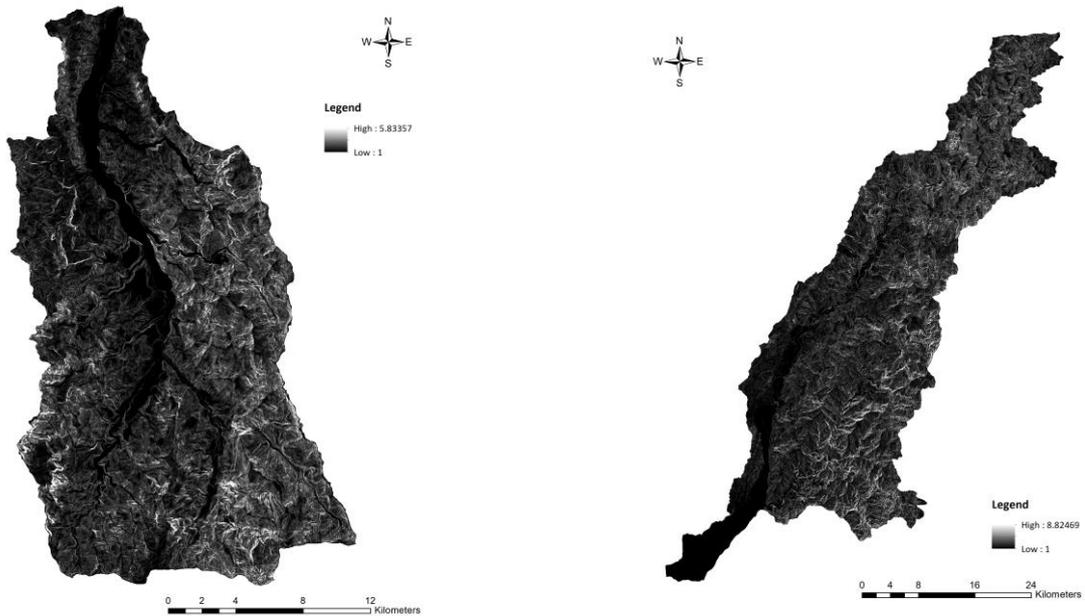


圖 2-21 各集水區地表切割深度分析圖

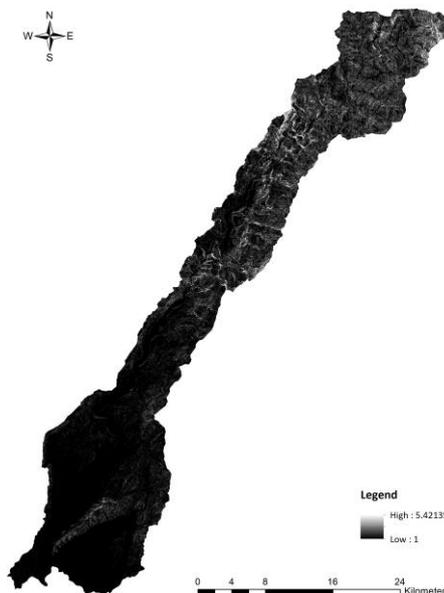
## (八) 地表粗糙度

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。



(a) 陳有蘭溪集水區

(b) 荖濃溪集水區



(c) 旗山溪集水區

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。

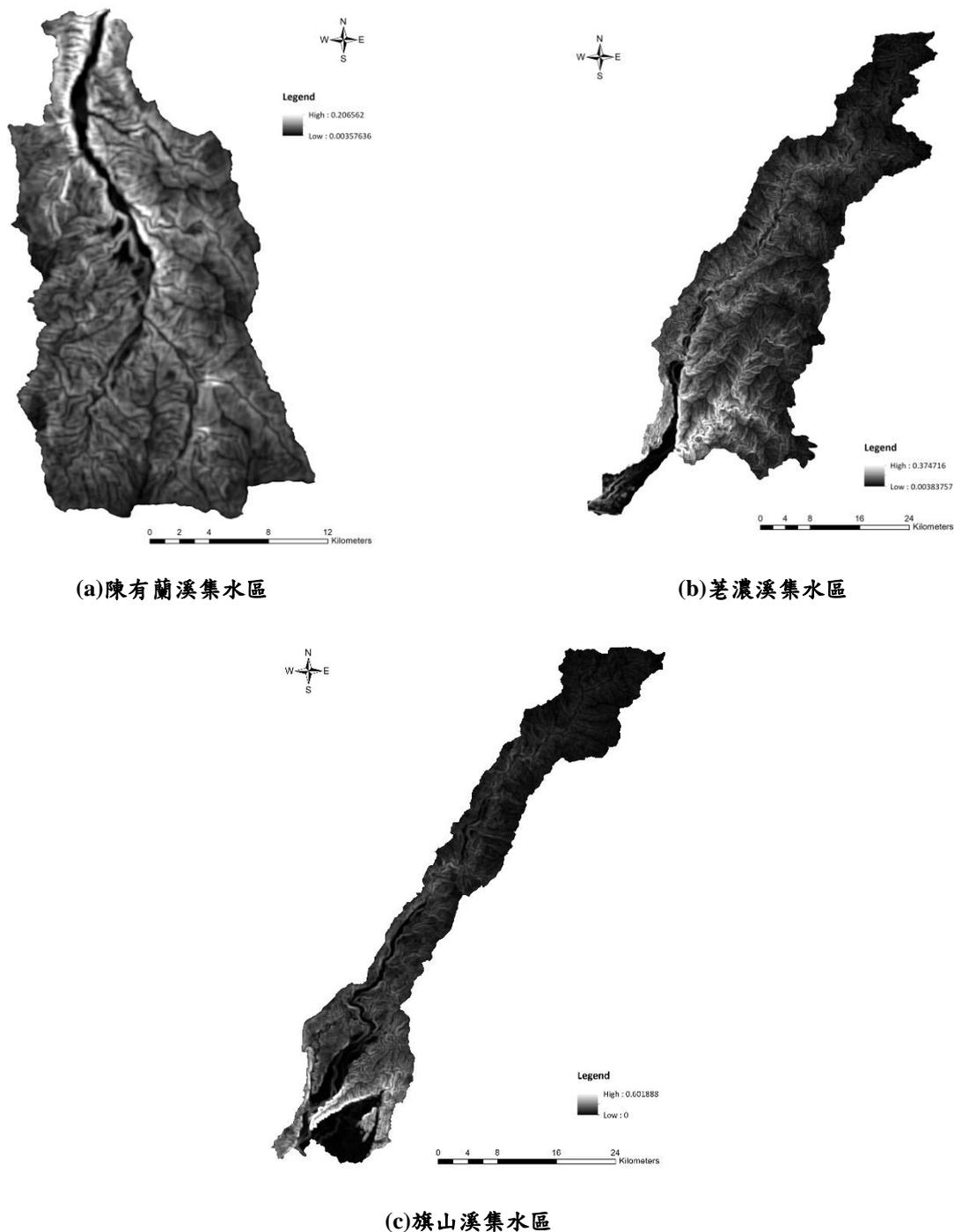


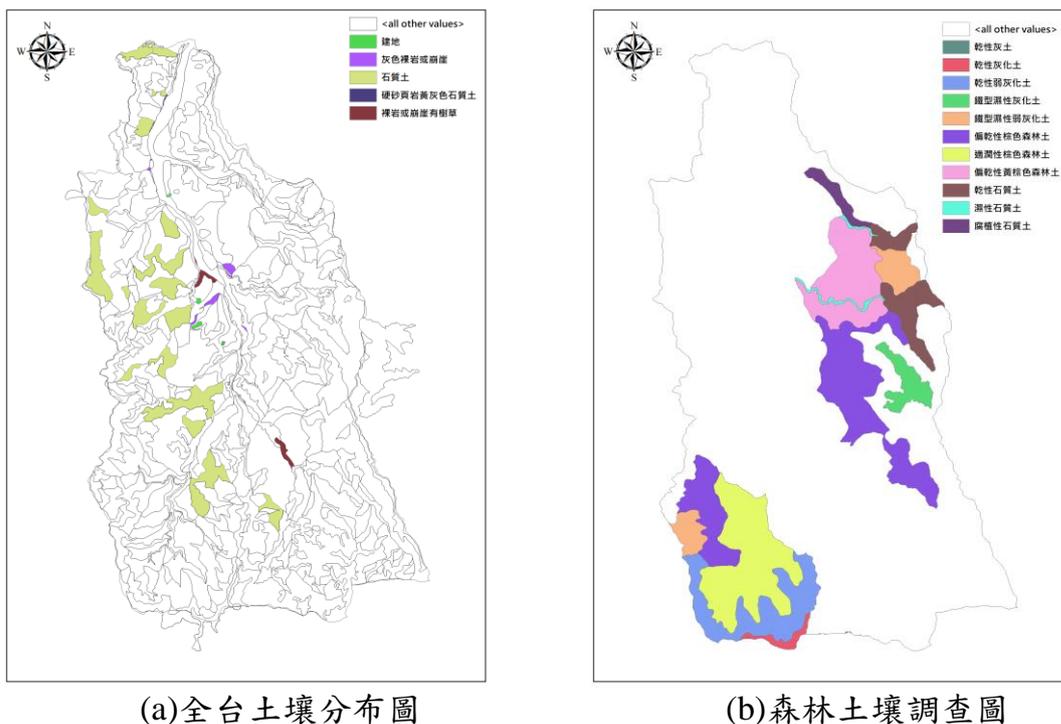
圖 2- 23 各集水區高程變異係數分析圖

#### 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。

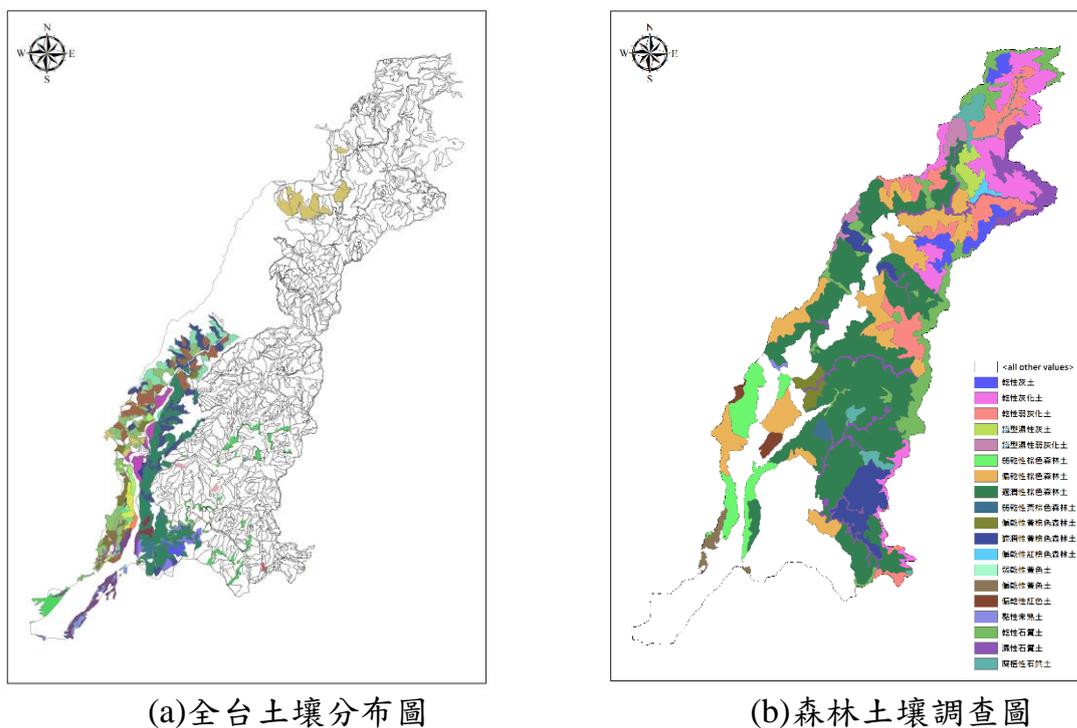
#### 五、土壤資料

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土保持局，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。



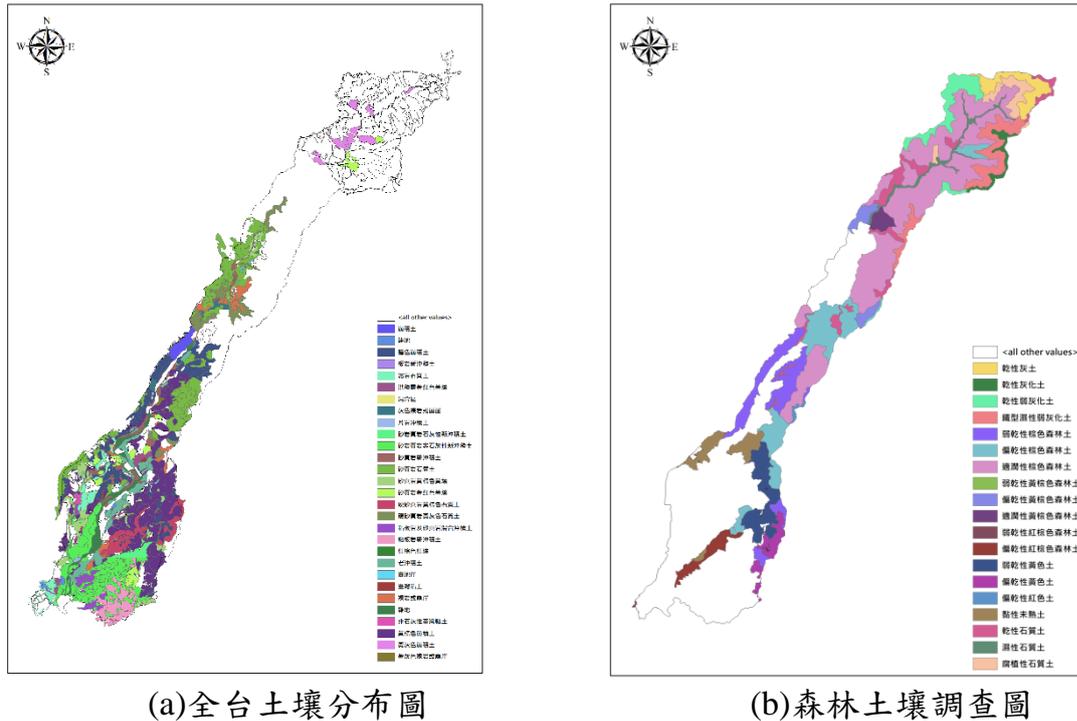
資料來源:行政院農業委員會農業試驗所

圖 2-24 陳有蘭溪集水區土壤分布圖



資料來源:行政院農業委員會農業試驗所

圖 2-25 荖濃溪集水區土壤分布圖



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

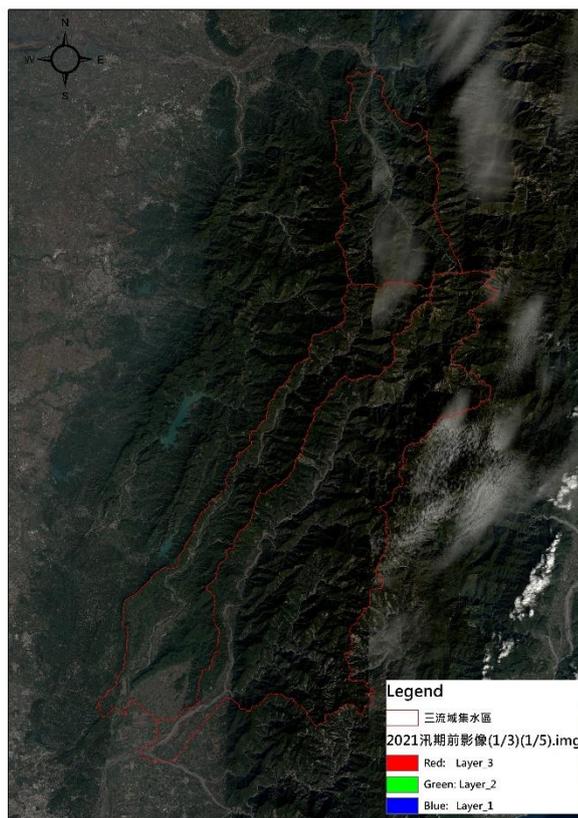
前述提及之各項因子資料，皆屬短期間不易變動、更新週期較長或者變動幅度不大者，因此可視其為不變之環境因子；另一類環境因子，則為具易變異之環境因子，在較短期間內必須考慮其變異特徵，因此應視其為變動之環境因子，例如坡地之植生、崩塌狀況等。這些因子可藉由定期拍攝之衛星遙測影像加以分析，進而瞭解環境變遷、變異，以及更新、擴充崩塌資料庫。

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：

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

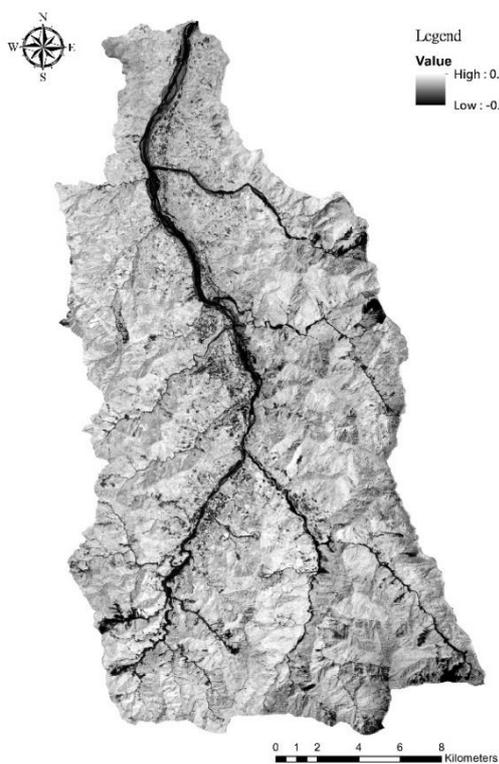
上式中，NIR 為近紅外光反射；RED 為紅光反射。當 RED=0 時，有最大值 1；反之，當 NIR=0 時，有最小值-1。由式(3-1)中，利用(NIR-RED)即能偵測植物生長量之特性，使其再除以(NIR+RED)之目的在於使其正規化，正規化的用途是防止除以零的數值誤差，並使比值能限於+1 與-1 之間以方便做比較。此外，小於零的 NDVI 值，通常屬於非植生之雲層、水域、道路和建物、裸露地等，故指數愈大時，代表綠色植物量之增加，NDVI 為綠色植物探勘最常用之指標，綠色植物生長愈旺盛，其吸收之紅光愈多，紅外光之反射愈強，故其間差異愈大之原理，以二者波段相差與和的比例而成。

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 (2022 年 01 月 16 日以及 2022 年 3 月 15 日之 SPOT7 衛星影像)(圖 2- 27)並完成 111 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，以利於模型訓練參數之更新，下圖 2-28 為各集水區之 111 年度汛期前衛星影像植生特徵分析圖。

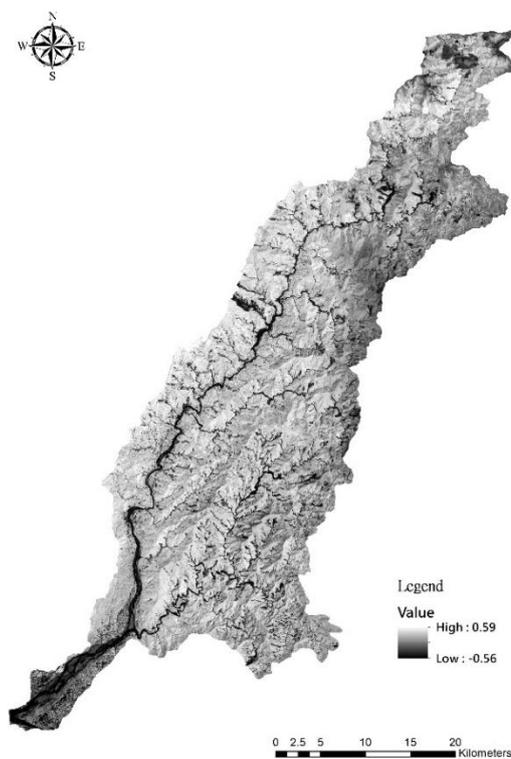


資料來源：太空遙測中心

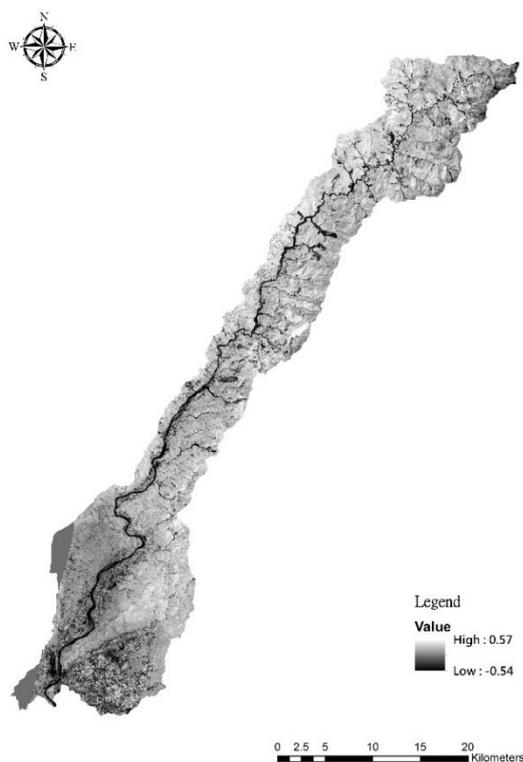
圖 2-27 各集水區 2022 年汛期前影像



(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。

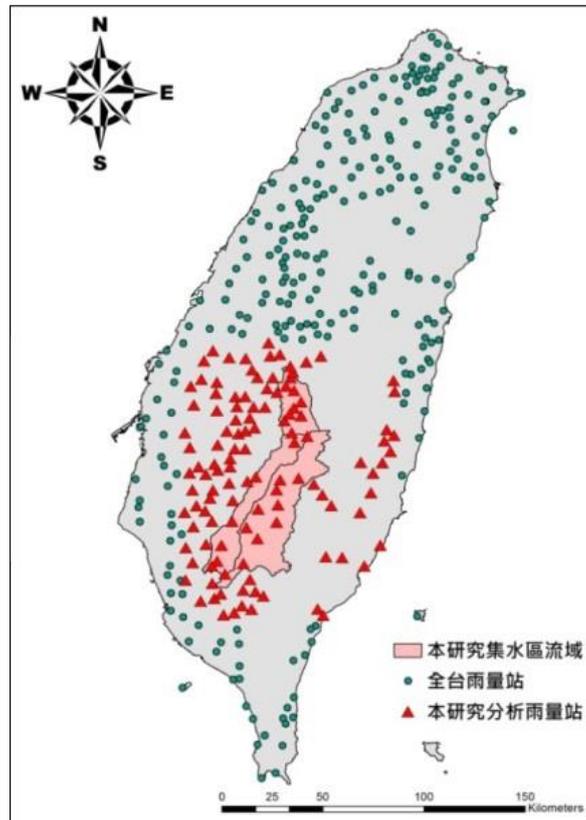


圖 2-29 本計畫蒐集之雨量測站分布

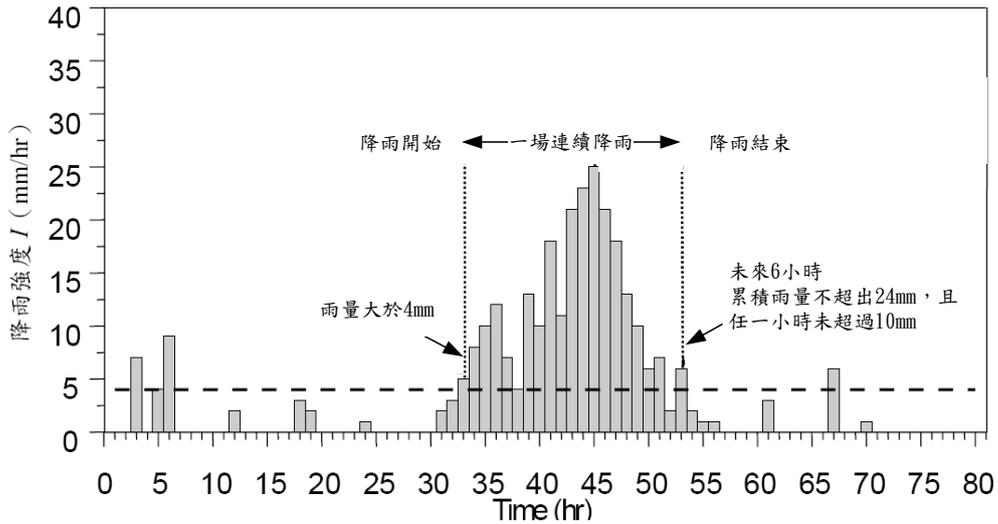


圖 2-30 本計畫之雨場分割定義

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  $I_1-R_{tc}$  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( $R_{tc}$ : mm)，如表 2-3 所示。

表 2-3  $I_1-R_{tc}$  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	$R_{tc}$	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	麥德姆颱風		
	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	蕃薯颱風		
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 10:00	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							

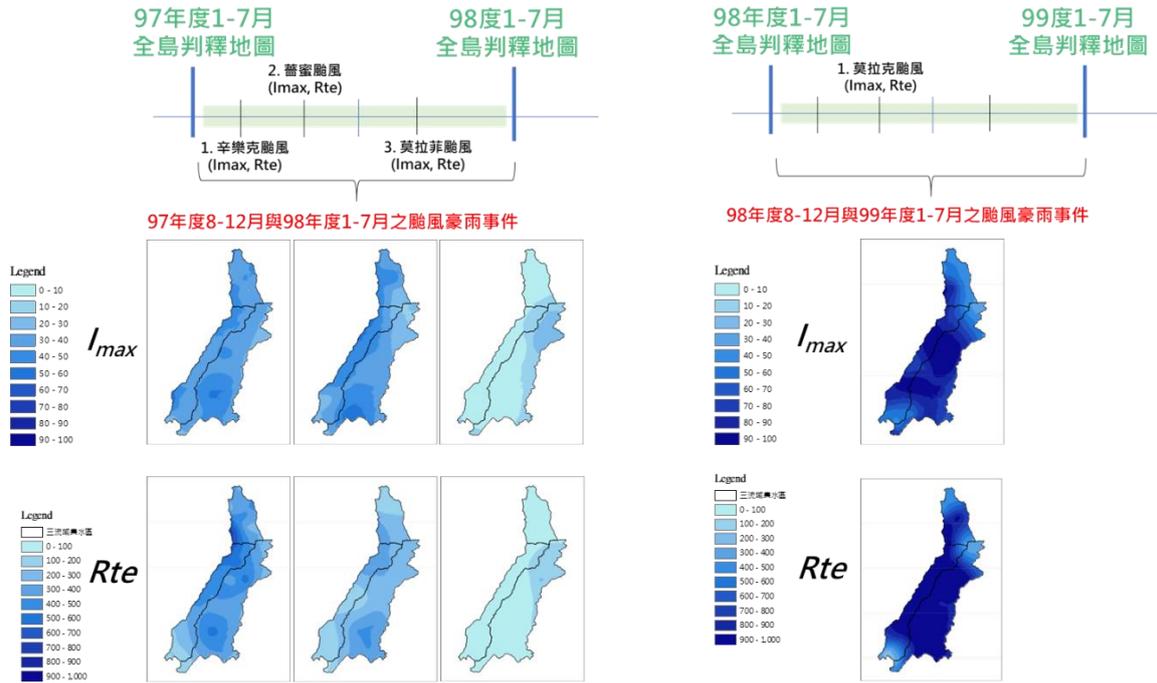


圖 2-31 97 年度至 98 年度各事件颱風豪雨雨量推估

圖 2-32 98 年度至 99 年度各事件颱風豪雨雨量推估

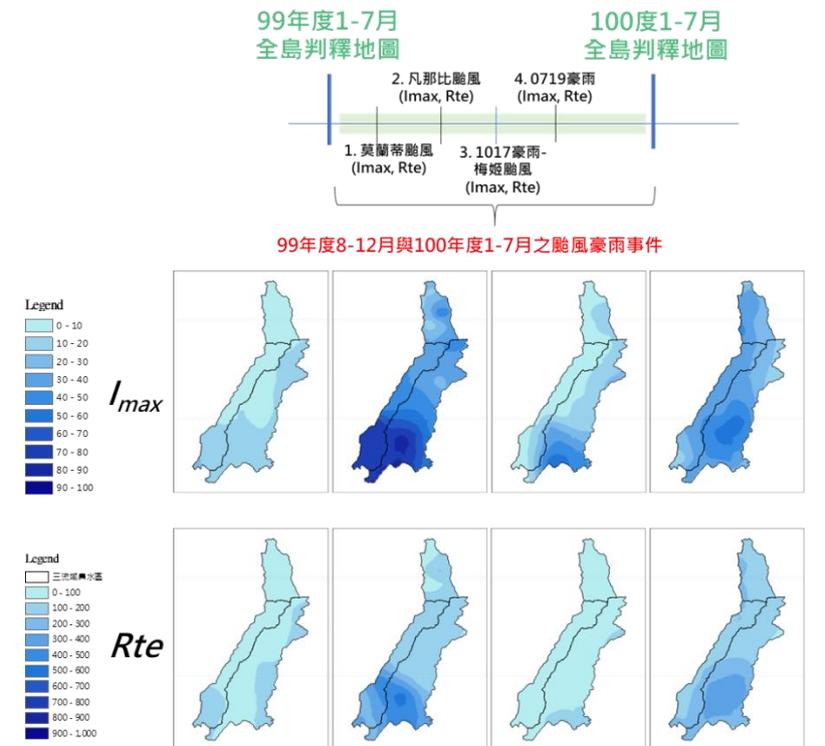
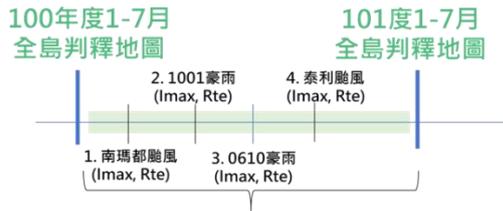


圖 2-33 99 年度至 100 年度各事件颱風豪雨雨量推估



100年度8-12月與101年度1-7月之颱風豪雨事件

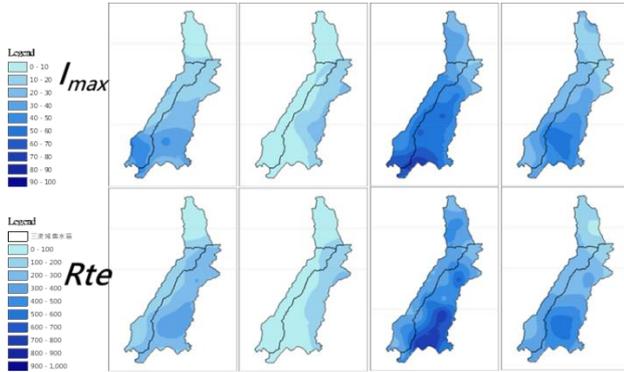


圖 2-34 100 年度至 101 年度各事件颱風豪雨雨量推估



101年度8-12月與102年度1-7月之颱風豪雨事件

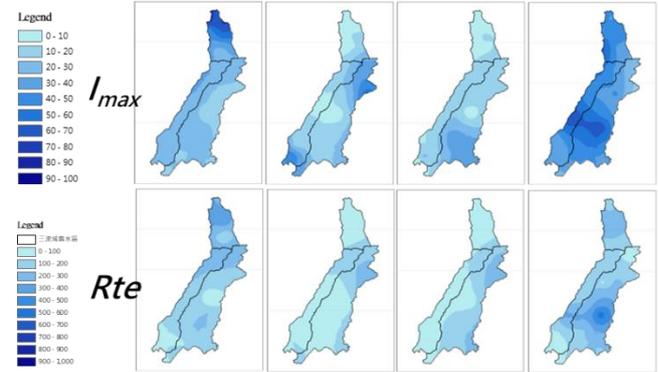


圖 2-35 101 年度至 102 年度各事件颱風豪雨雨量推估



102年度8-12月與103年度1-7月之颱風豪雨事件

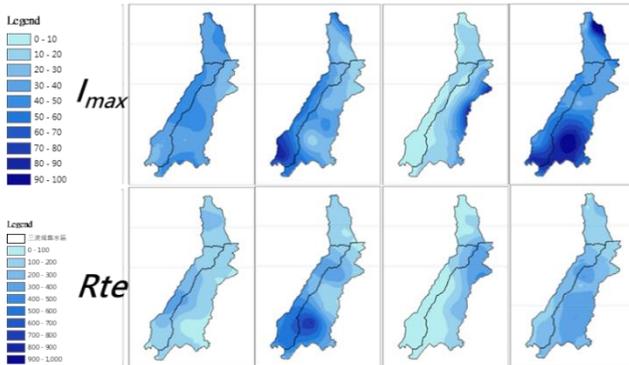
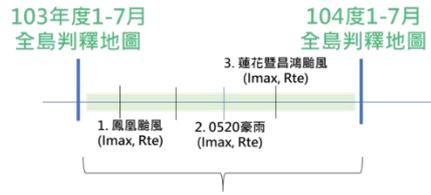


圖 2-36 102 年度至 103 年度各事件颱風豪雨雨量推估



103年度8-12月與104年度1-7月之颱風豪雨事件

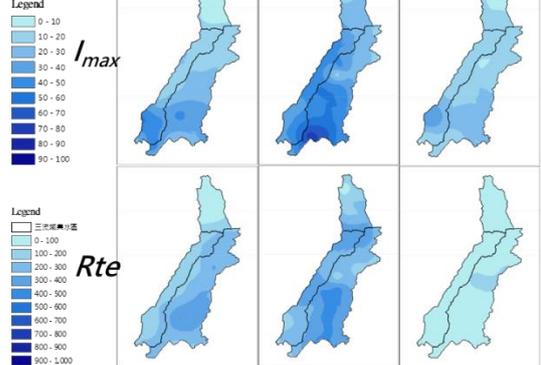


圖 2-37 103 年度至 104 年度各事件颱風豪雨雨量推估

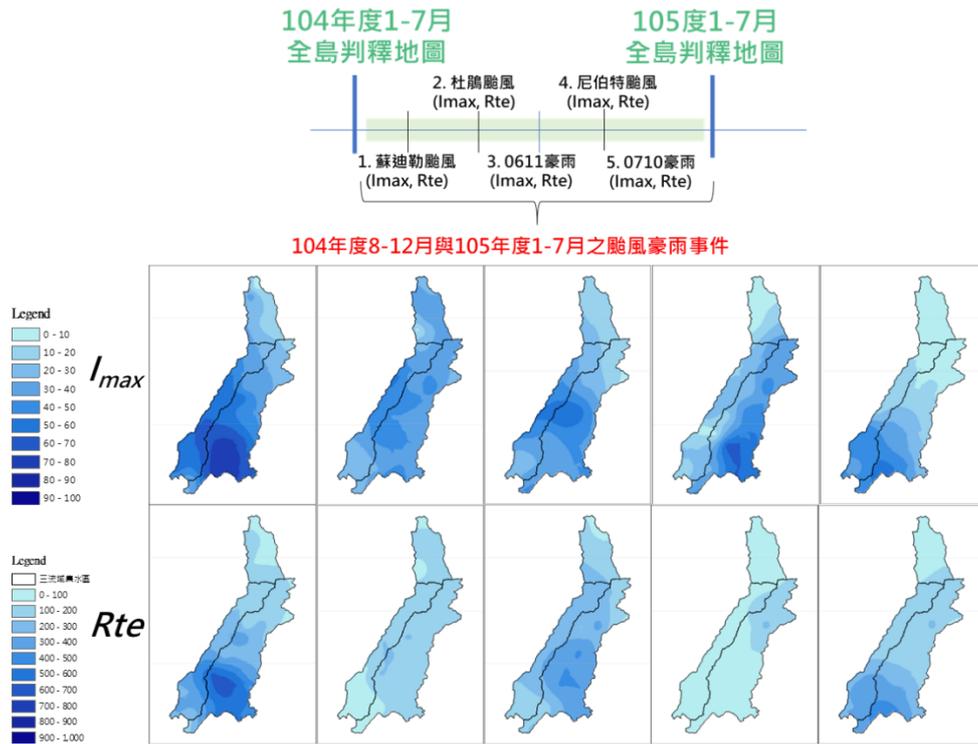


圖 2-38 104 年度至 105 年度各事件颱風豪雨雨量推估

### 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

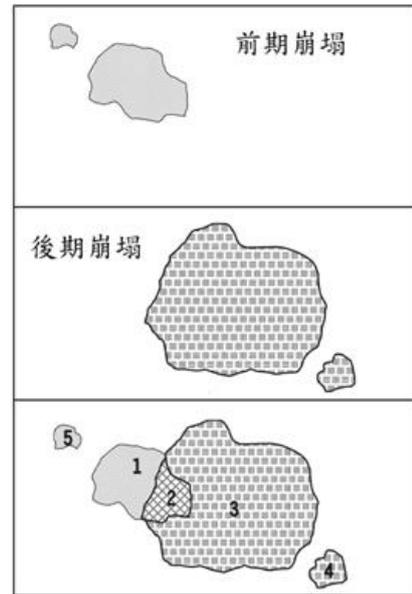


圖 2-39 崩塌地分類示意圖

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。

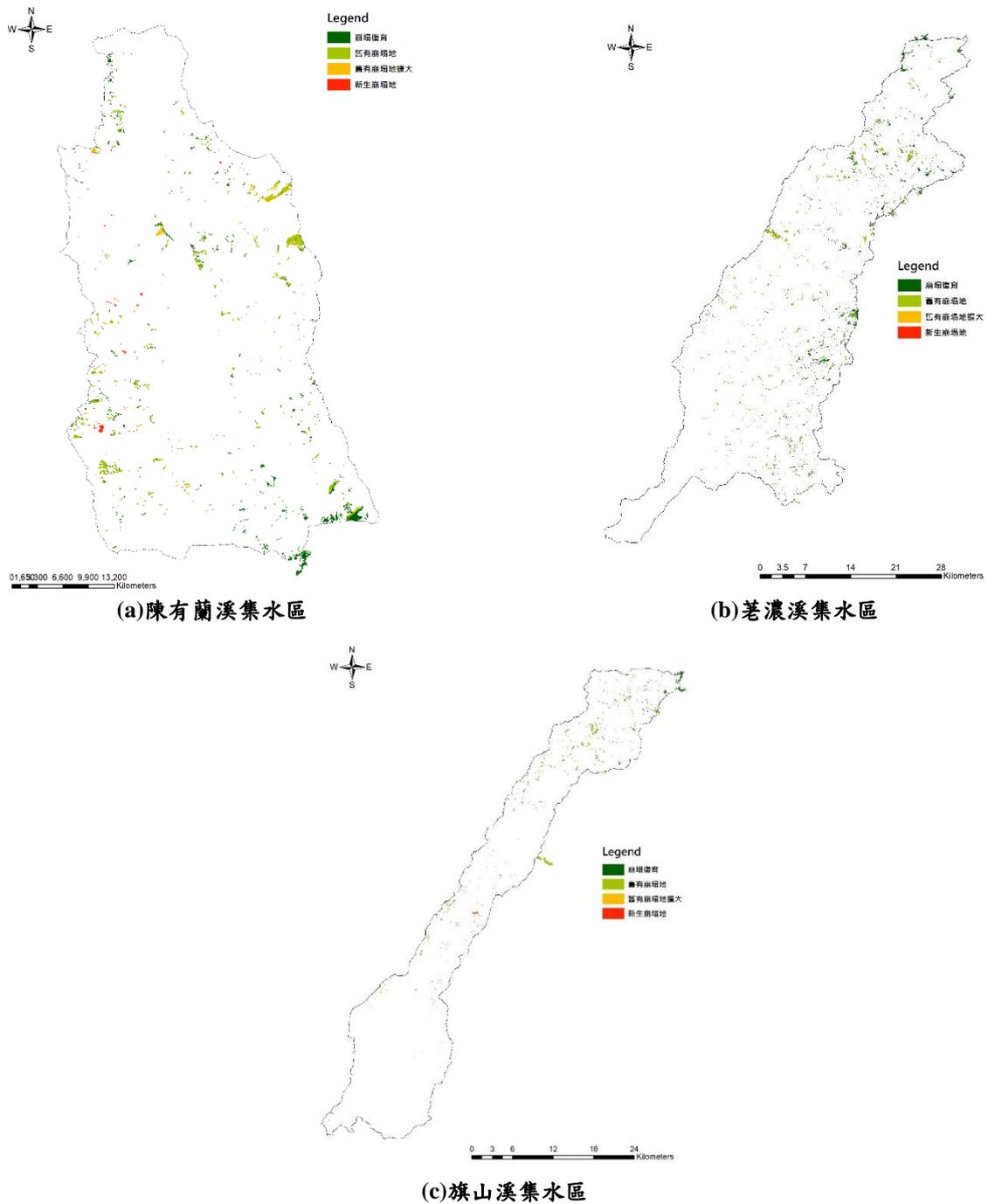


圖 2-40 97 年度至 98 年度間崩塌變異類型分布圖

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(單位：HA)

類型	陳有蘭溪	荖濃溪	旗山溪	總面積
崩塌復育	414.64	1617.58	303.05	2335.27
舊有崩塌地	360.52	982.22	283.08	1625.82
舊有崩塌地擴大	123.06	181.29	66.17	370.52
新生崩塌地	60.72	102.71	108.38	271.81

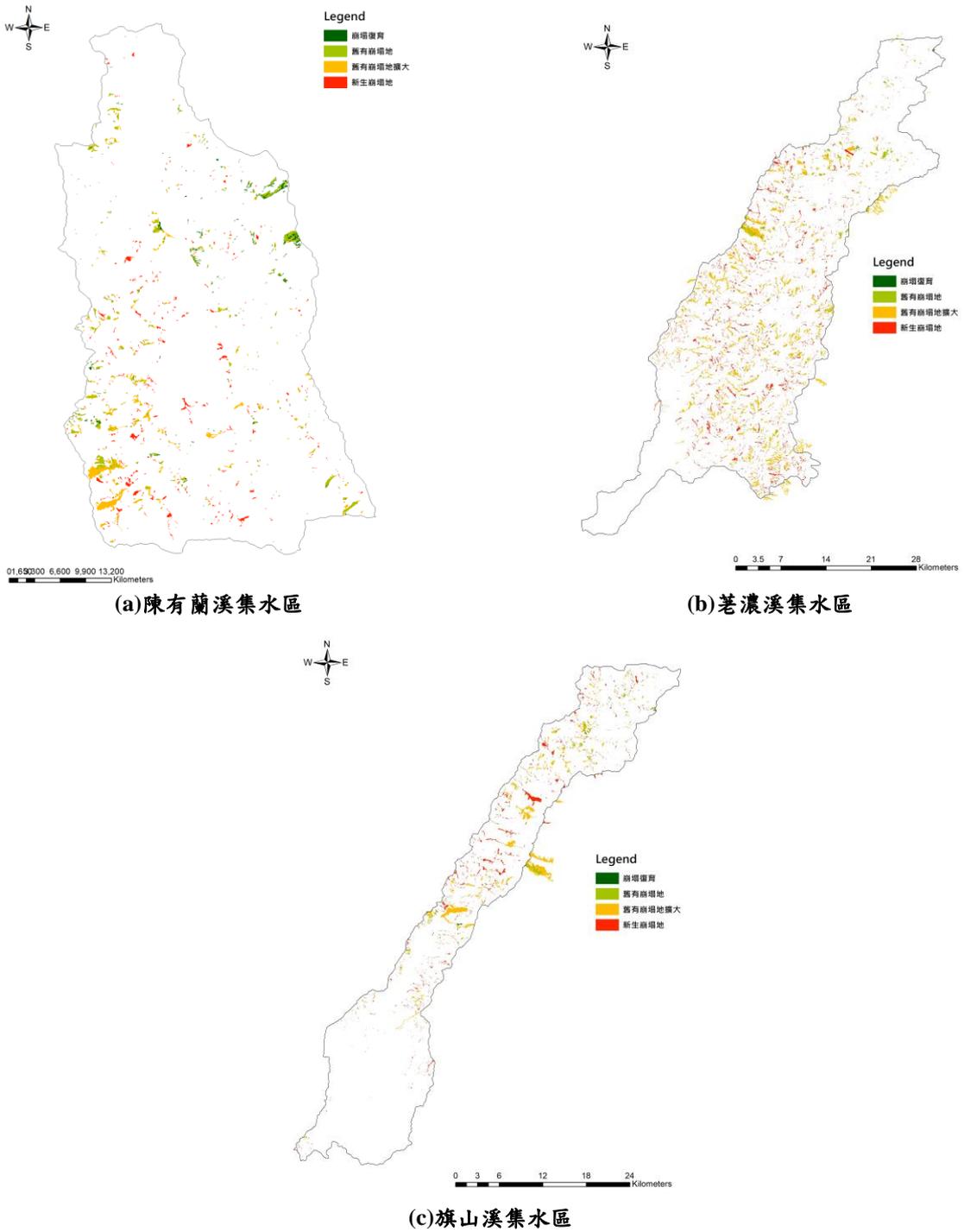


圖 2-41 98 年度至 99 年度間崩塌變異類型分布圖

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(單位：HA)

類型	陳有蘭溪	荖濃溪	旗山溪	總面積
崩塌復育	176.14	164.78	148.5	489.42
舊有崩塌地	368.15	1101.45	309.13	1778.73
舊有崩塌地擴大	552.49	4742.64	1370.99	6666.12
新生崩塌地	335.98	3626.42	1198.43	5160.83

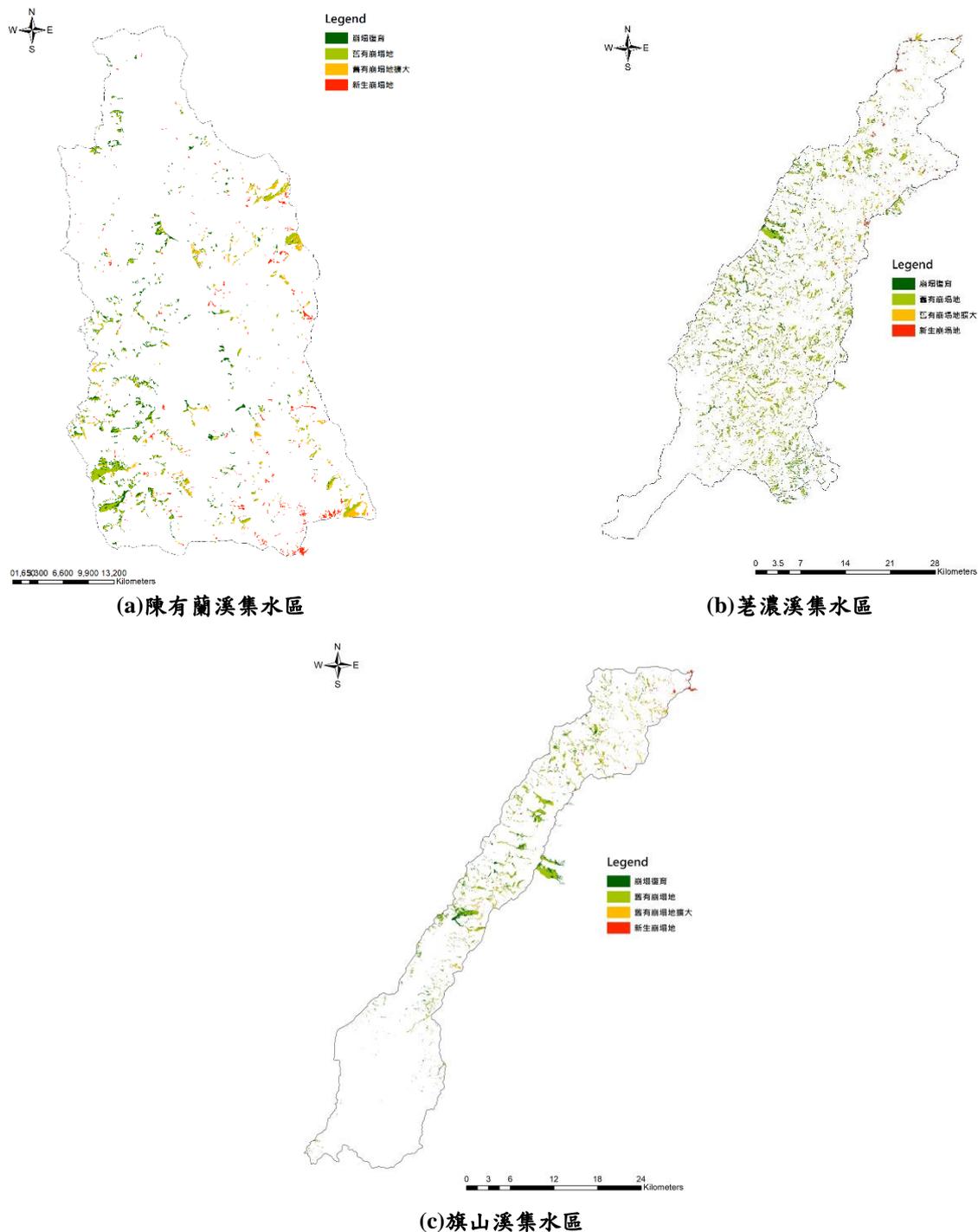


圖 2-42 99 年度至 100 年度間崩塌變異類型分布圖

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	陳有蘭溪	荖濃溪	旗山溪	總面積
崩塌復育	605.95	3736.42	1258.25	5600.63
舊有崩塌地	650.68	5734.08	1620.29	8005.05
舊有崩塌地擴大	454.47	1887.93	690.58	3032.97
新生崩塌地	253.7	842.07	302.13	1397.9

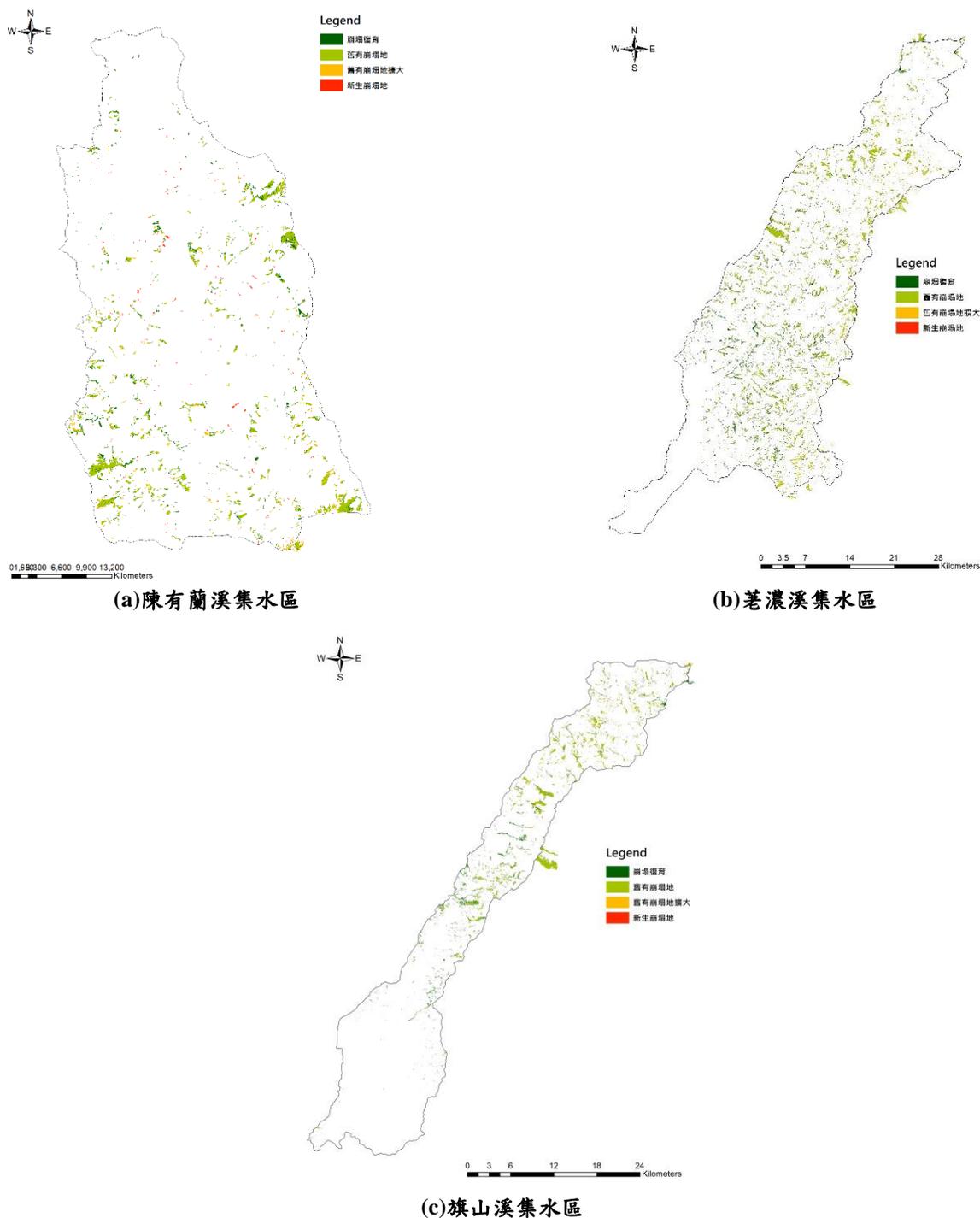


圖 2-43 100 年度至 101 年度間崩塌變異類型分布圖

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	陳有蘭溪	荖濃溪	旗山溪	總面積
崩塌復育	418.31	2932.11	1075.35	4425.77
舊有崩塌地	940.53	5531.98	1537.66	8010.17
舊有崩塌地擴大	240.11	1224.48	303.48	1768.07
新生崩塌地	79.33	188.2	57.31	324.85

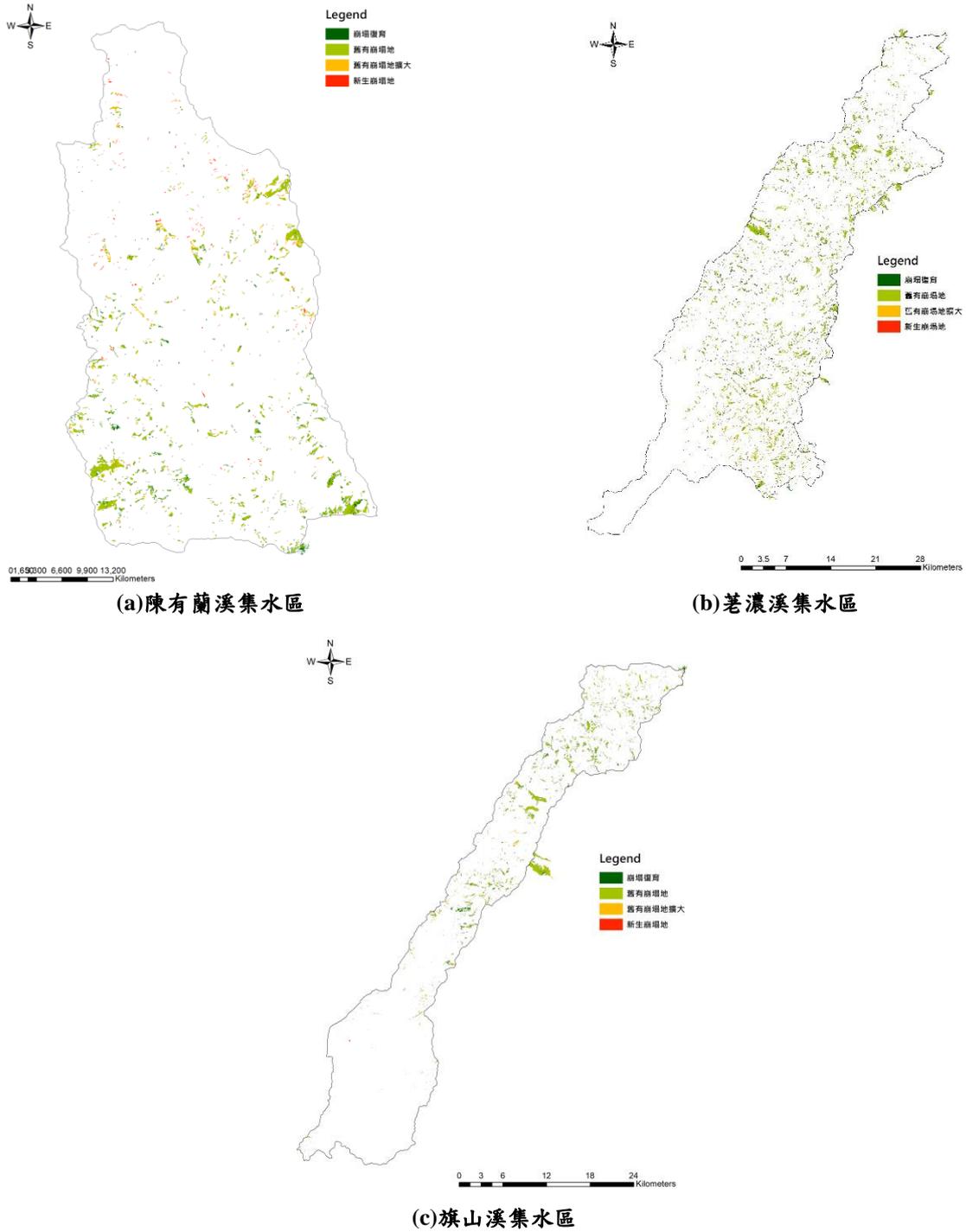


圖 2-44 101 年度至 102 年度間崩塌變異類型分布圖

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	陳有蘭溪	荖濃溪	旗山溪	總面積
崩塌復育	380.41	2205.31	747.22	3332.94
舊有崩塌地	879.57	4739.35	1151.23	6770.15
舊有崩塌地擴大	235.59	1117.49	240.31	1593.4
新生崩塌地	88.96	210.76	81.74	381.46

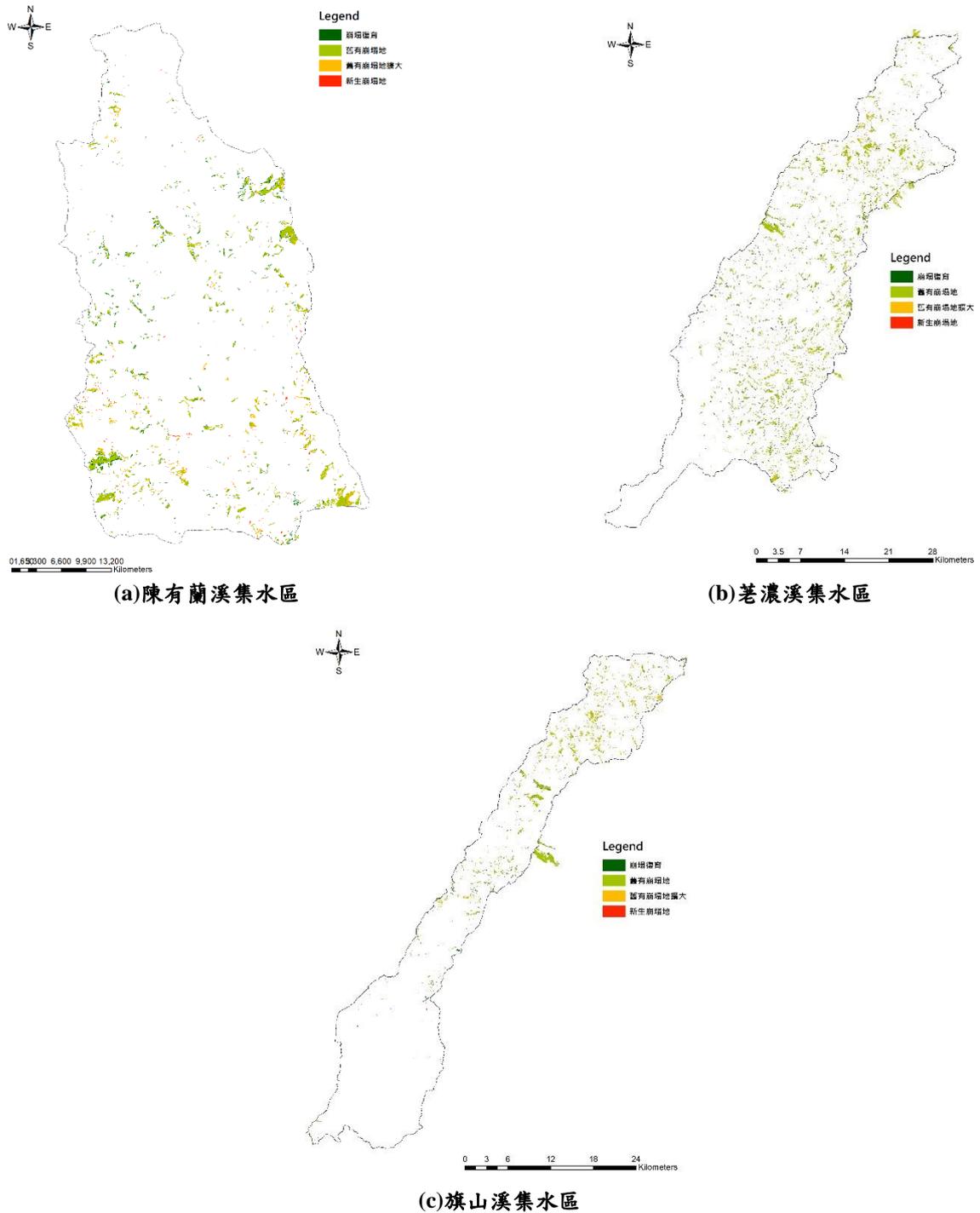


圖 2- 45 102 年度至 103 年度間崩塌變異類型分布圖

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	陳有蘭溪	荖濃溪	旗山溪	總面積
崩塌復育	372.42	1330.79	355.87	2059.07
舊有崩塌地	831.7	4736.82	1117.41	6685.93
舊有崩塌地擴大	314.69	1145.5	590.91	2051.1
新生崩塌地	54.54	293.98	122.69	471.2

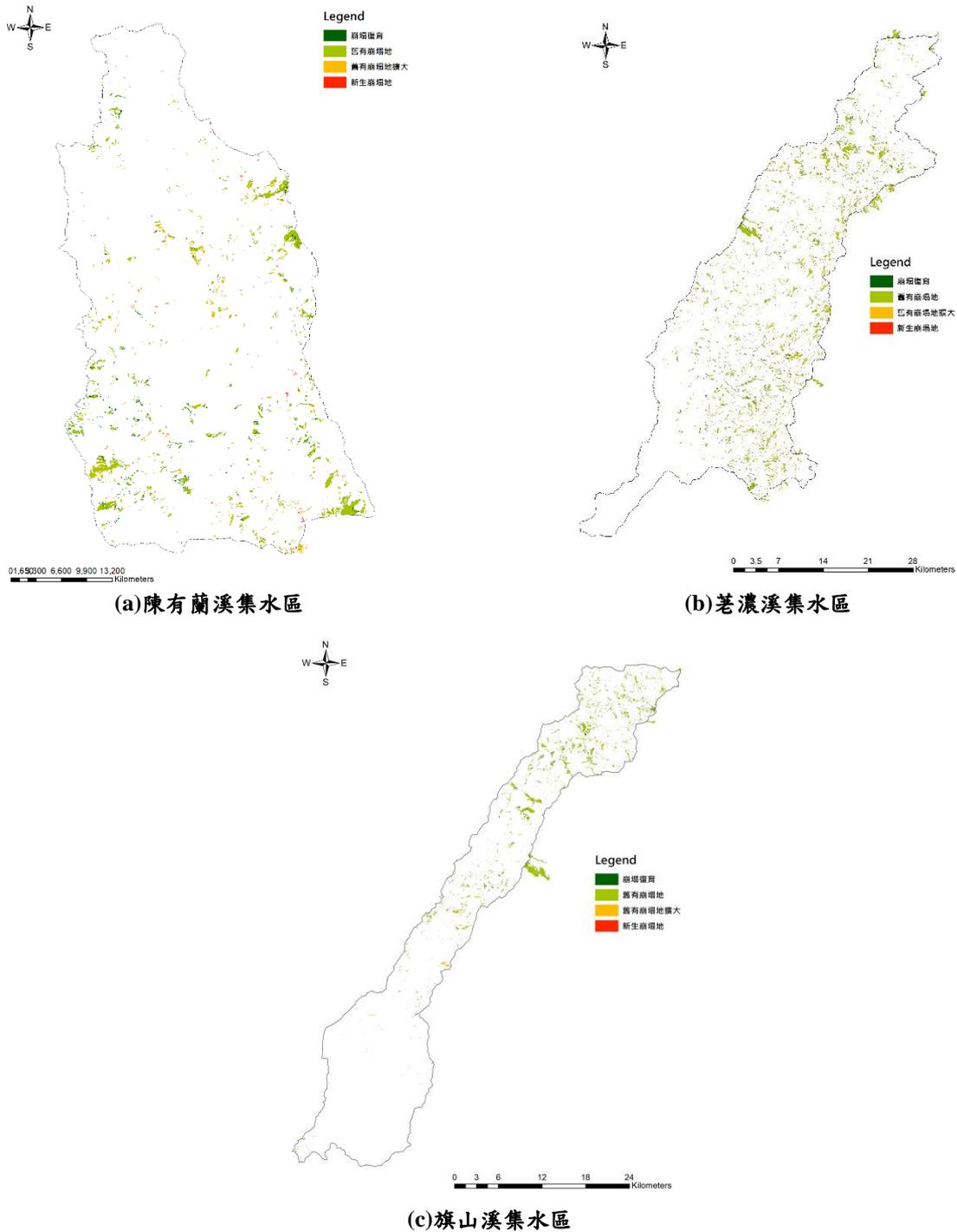


圖 2-46 103 年度至 104 年度間崩塌變異類型分布圖

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	陳有蘭溪	荖濃溪	旗山溪	總面積
崩塌復育	276.37	1138.2	421.14	1835.71
舊有崩塌地	924.55	5038.1	1409.86	7372.51
舊有崩塌地擴大	220.16	1151.75	313.54	1685.44
新生崩塌地	48.05	159.61	86.83	294.48

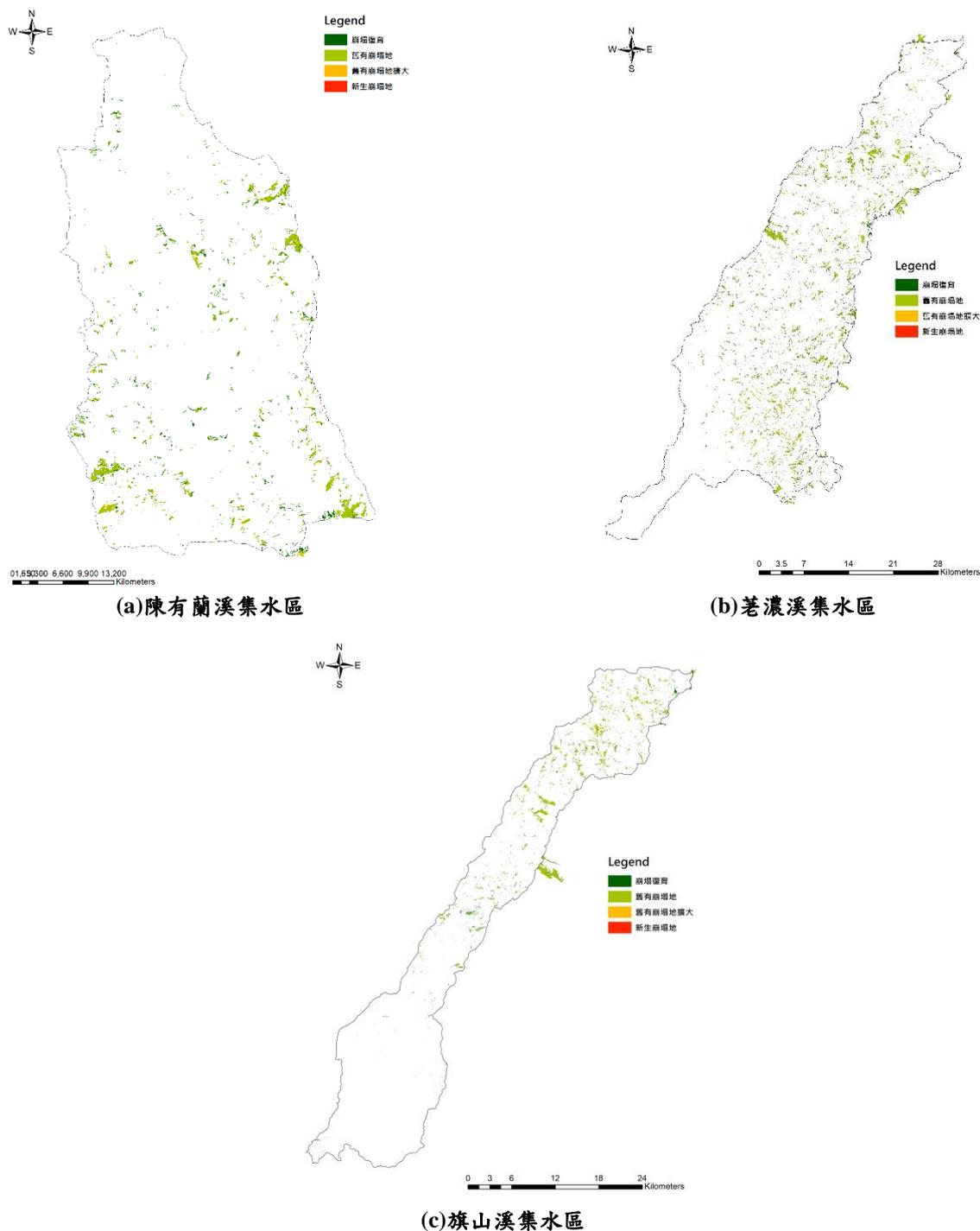


圖 2-47 104 年度至 105 年度間崩塌變異類型分布圖

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	陳有蘭溪	荖濃溪	旗山溪	總面積
崩塌復育	473.66	2171.39	576.16	3221.21
舊有崩塌地	719.09	4178.07	1234.07	6131.24
舊有崩塌地擴大	110.16	548.94	245.29	904.4
新生崩塌地	10.04	56.3	31.8	98.14

分別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 公頃(0.20%)，陳有蘭溪新增之崩塌地共 183.78 公頃(0.41%)，旗山溪新增之崩塌地共 174.55 公頃(0.24%)，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 8,369.06 公頃(5.95%)，陳有蘭溪新增之崩塌地共 888.47 公頃(1.99%)，旗山溪新增之崩塌地共 3,027.11 公頃(3.50%)，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 2730 公頃(1.94%)，陳有蘭溪新增之崩塌地共 708.17 公頃(1.59%)，旗山溪新增之崩塌地共 992.71 公頃(1.35%)，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 1,412.68 公頃(1.00%)，陳有蘭溪新增之崩塌地共 319.44 公頃(0.71%)，旗山溪新增之崩塌地共 360.79 公頃(0.49%)，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 1,328.25 公頃(0.94%)，陳有蘭溪新增之崩塌地共 324.55 公頃(0.73%)，旗山溪新增之崩塌地共 322.06 公頃(0.44%)，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 1,439.48 公頃(1.02%)，陳有蘭溪新增之崩塌地共 369.23 公頃(0.82%)，旗山溪新增之崩塌地共 713.6 公頃(0.97%)，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 1311.35 公頃(0.93%)，陳有蘭溪新增之崩塌地共 268.21 公頃(0.6%)，旗山溪新增之崩塌地共 400.37 公頃(0.54%)，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 605.24 公頃(0.43%)，陳有蘭溪新增之崩塌地共 120.2 公頃(0.27%)，旗山溪新增之崩塌地共 277.09 公頃(0.38%)，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 1,712.4 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 393.24 公頃(0.54%)，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	284ha	卡孜基颱風/鳳凰颱風/辛樂克颱風/蕃蜜颱風
	陳有蘭溪	183.78ha	
	旗山溪	174.55ha	
99-98	荖濃溪	8,369.06ha	莫拉克事件
	陳有蘭溪	888.47ha	
	旗山溪	2,569.42ha	
100-99	荖濃溪	2730ha	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	708.17ha	
	旗山溪	992.71ha	
101-100	荖濃溪	1,412.68ha	南瑪都颱風/0610 豪雨/泰利颱風
	陳有蘭溪	319.44ha	
	旗山溪	360.79ha	
102-101	荖濃溪	1,328.25ha	天秤颱風/蘇拉颱風
	陳有蘭溪	324.55ha	
	旗山溪	322.06ha	
103-102	荖濃溪	1,439.48ha	潭美颱風/康芮颱風/天兔颱風/0520 豪雨/0606 豪雨
	陳有蘭溪	369.23ha	
	旗山溪	713.6ha	
104-103	荖濃溪	1,311.35ha	鳳凰颱風/0520 豪雨/蓮花暨昌鴻颱風
	陳有蘭溪	268.21ha	
	旗山溪	400.37ha	
105-104	荖濃溪	605.24ha	蘇迪勒颱風/杜鵑颱風/0611 豪雨/尼伯特颱風/0710 豪雨
	陳有蘭溪	120.02ha	
	旗山溪	277.09ha	
106-105	荖濃溪	1712.4ha	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	393.24ha	

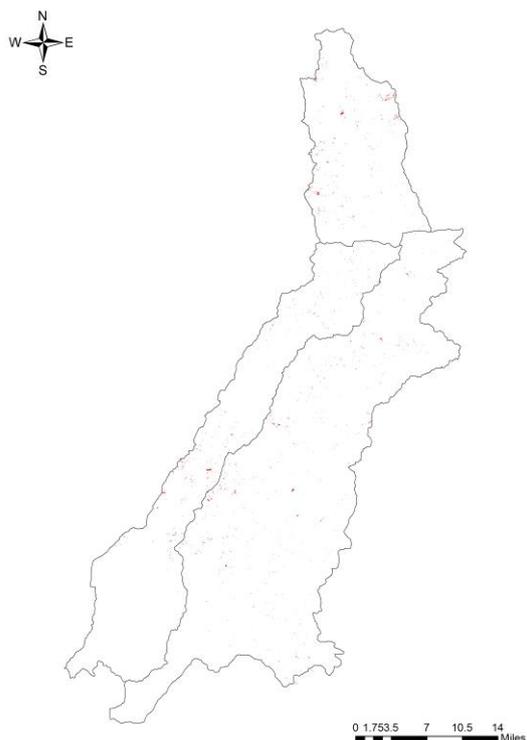


圖 2- 48 新增崩塌地分布圖(98 年度崩塌地圖-97 年度崩塌地圖)

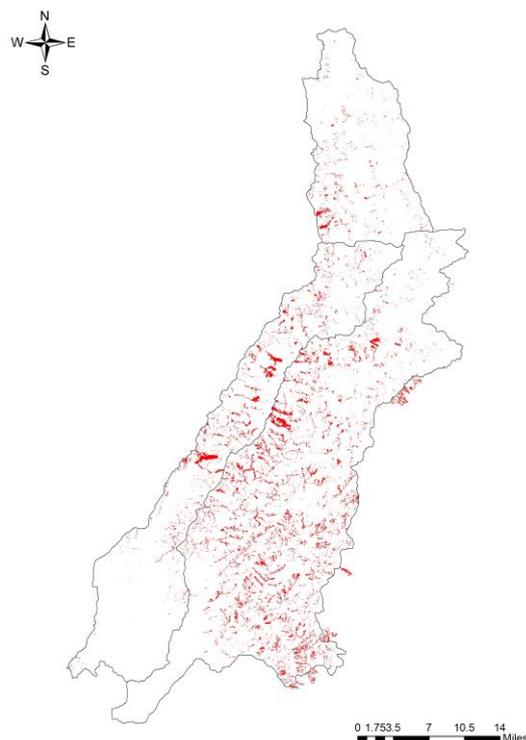


圖 2- 49 新增崩塌地分布圖(99 年度崩塌地圖-98 年度崩塌地圖)

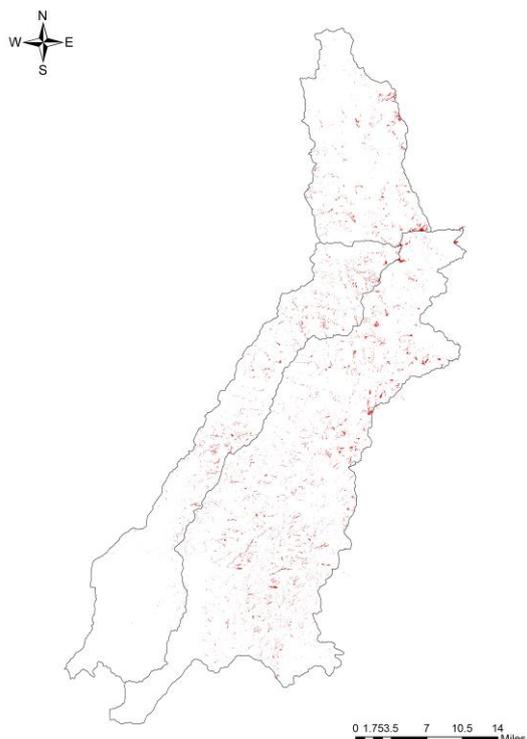


圖 2- 50 新增崩塌地分布圖(100 年度崩塌地圖-99 年度崩塌地圖)

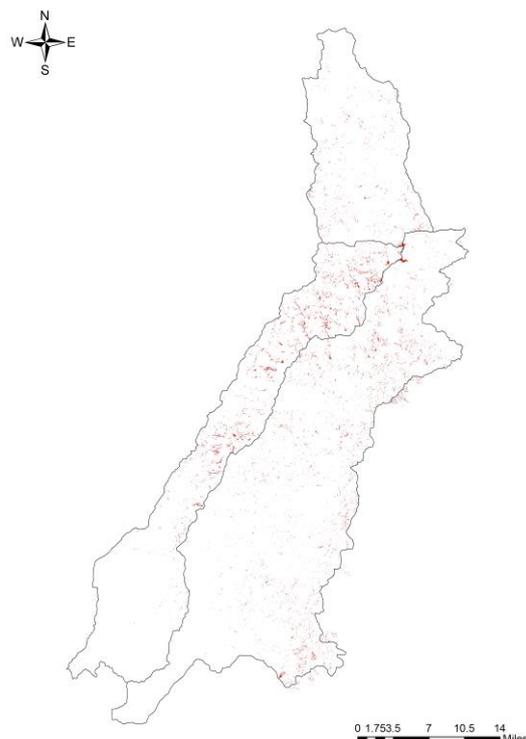


圖 2- 51 新增崩塌地分布圖(101 年度崩塌地圖-100 年度崩塌地圖)

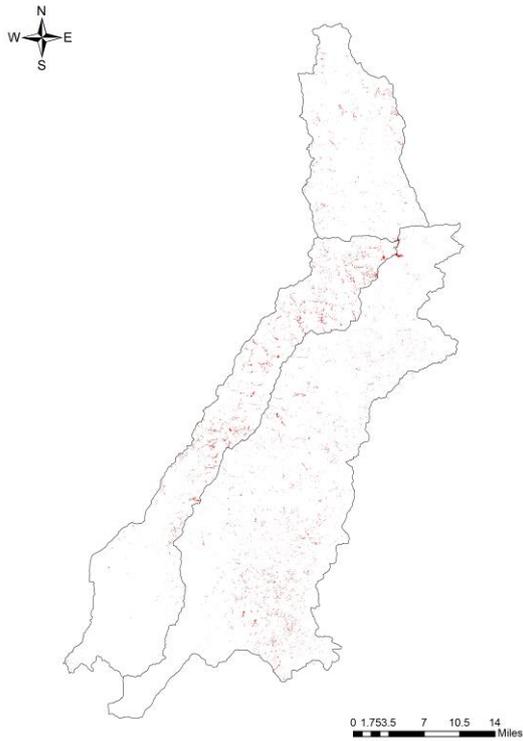


圖 2- 52 新增崩塌地分布圖(102 年度崩塌地圖-101 年度崩塌地圖)

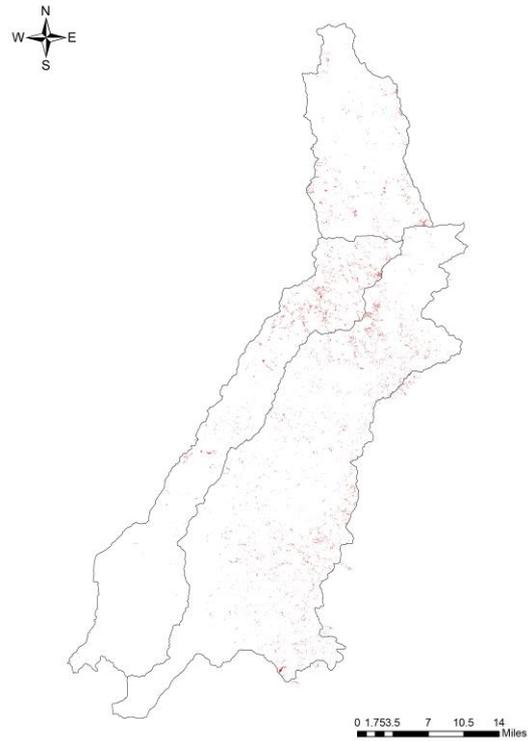


圖 2- 53 新增崩塌地分布圖(103 年度崩塌地圖-102 年度崩塌地圖)

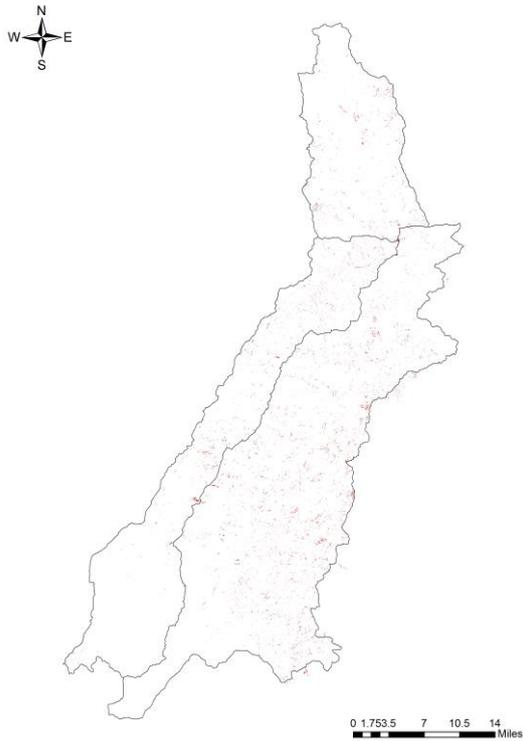


圖 2- 54 新增崩塌地分布圖(104 年度崩塌地圖-103 年度崩塌地圖)

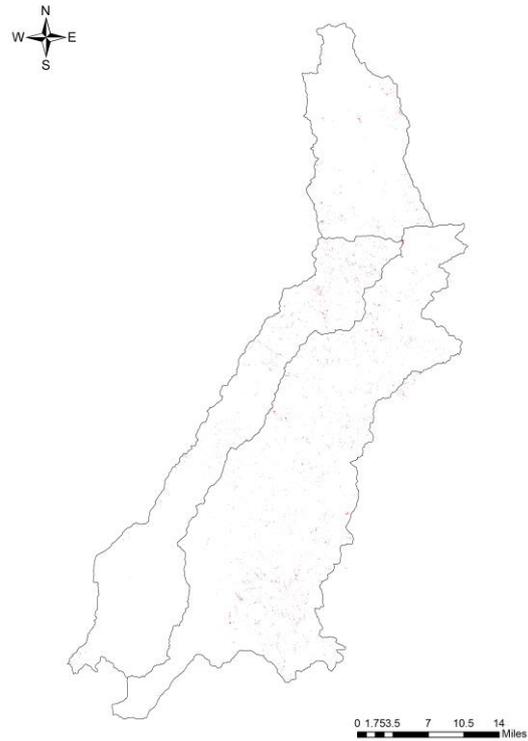


圖 2- 55 新增崩塌地分布圖(105 年度崩塌地圖-104 年度崩塌地圖)

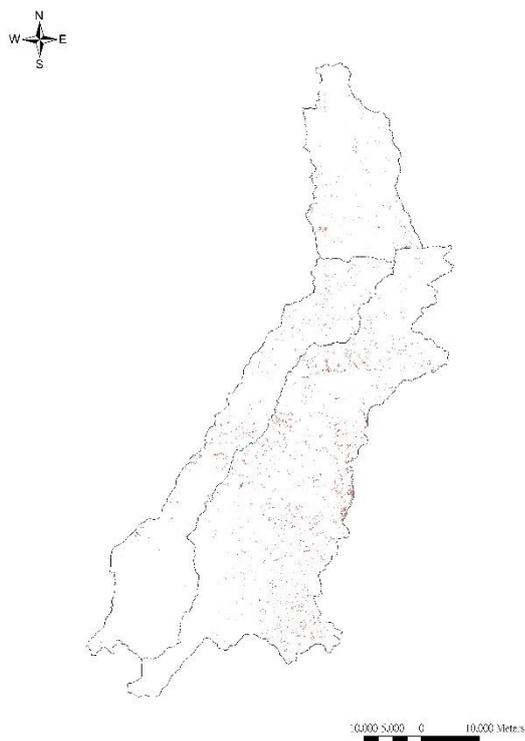


圖 2-56 新增崩塌地分布圖(106 年度崩塌地圖-105 年度崩塌地圖)

本計畫於上述進行新增之颱風豪雨事件與崩塌特徵資料庫之擴增後，即可針對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。

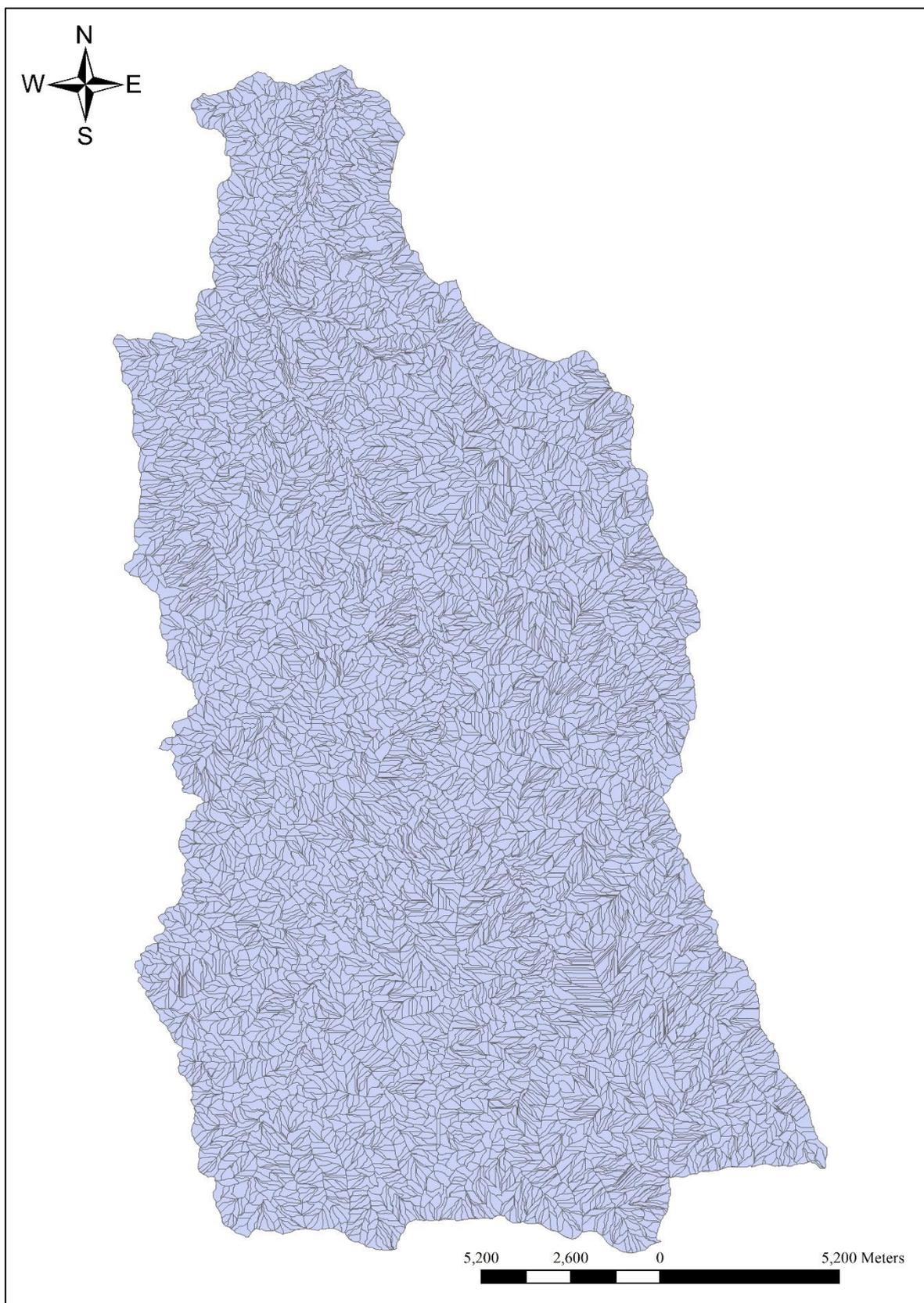


圖 2-57 陳有蘭溪集水區之坡面單元



圖 2- 58 荖濃溪集水區之坡面單元

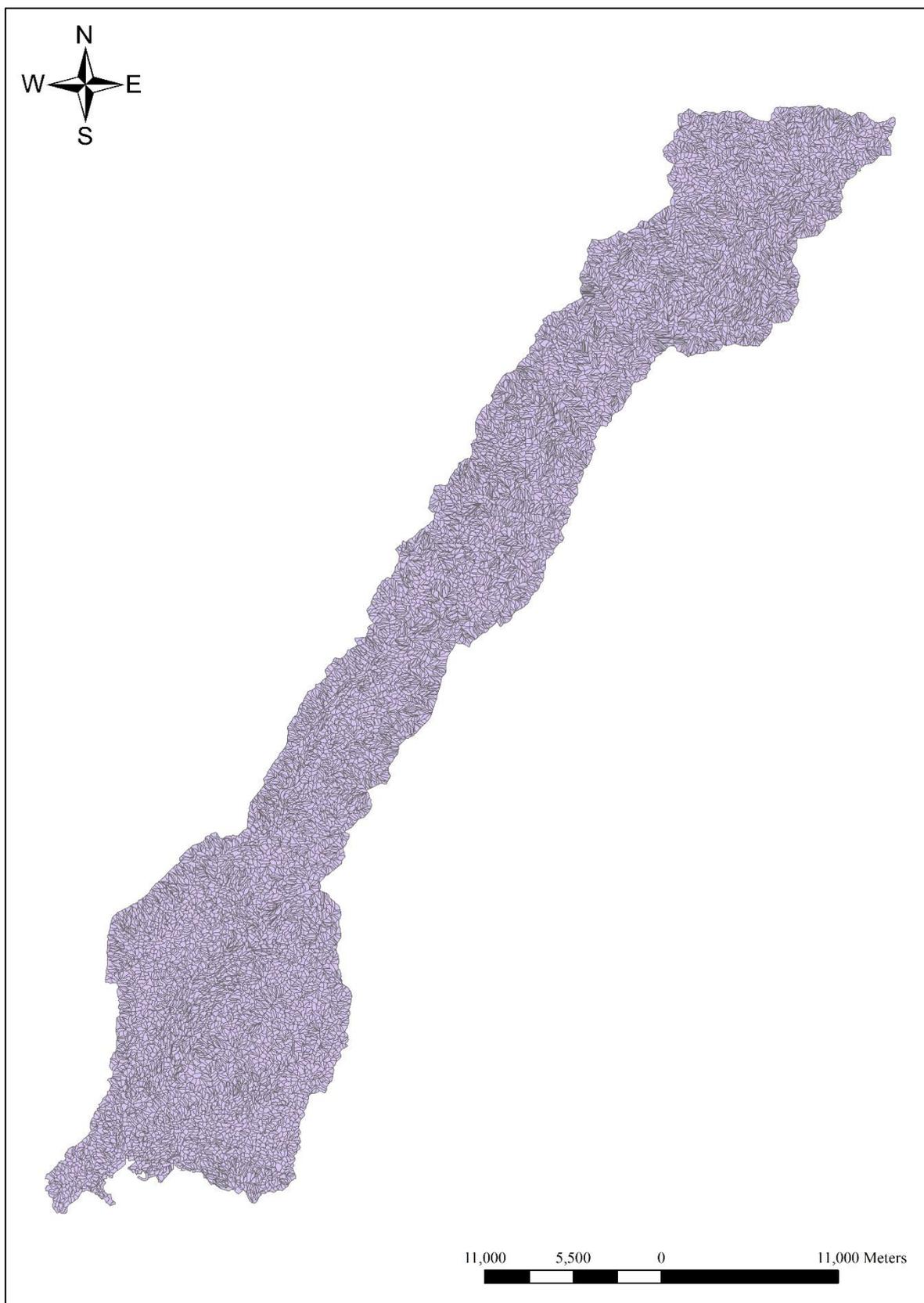
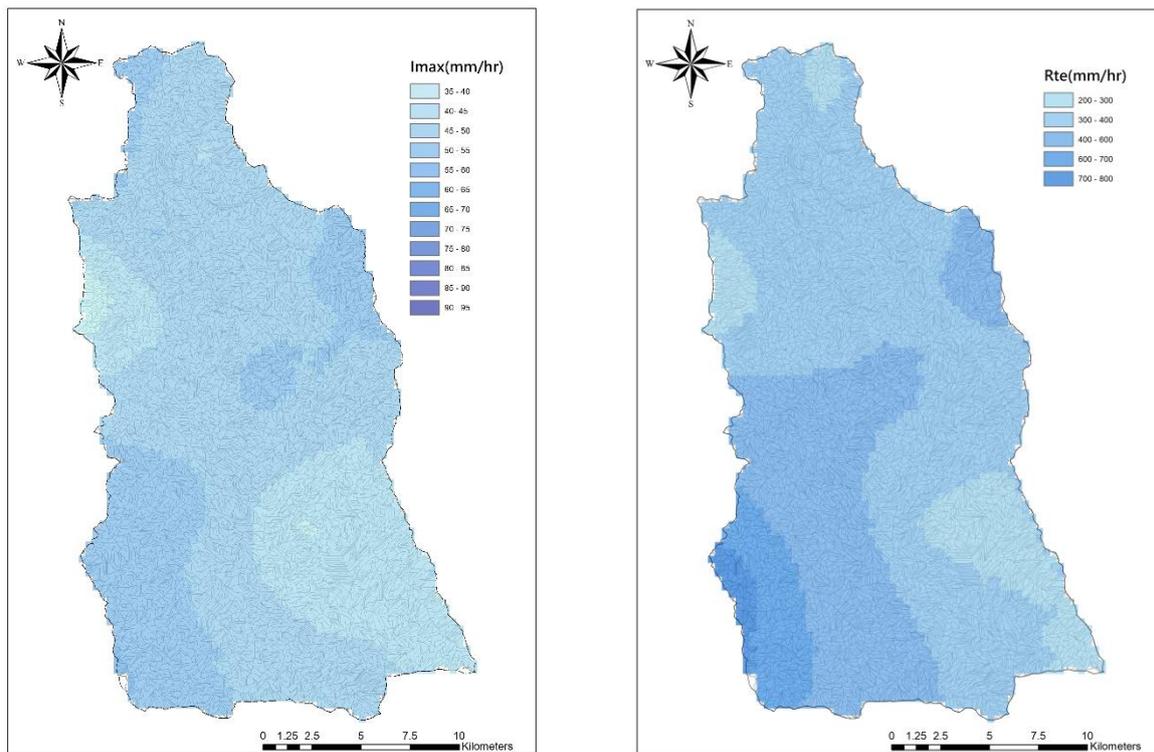


圖 2-59 旗山溪集水區之坡面單元

### 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。

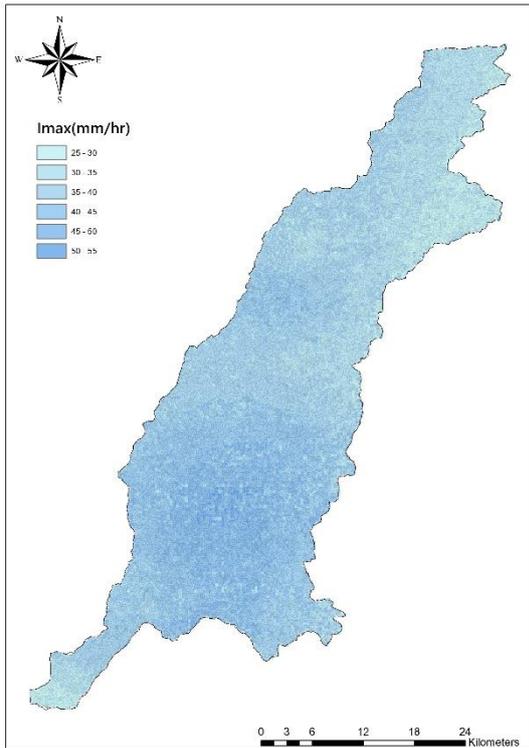
對於  $I_1 - R_{tc}$  雨量推估，以辛樂克颱風在陳有蘭溪、荖濃溪和旗山溪集水區中之坡面單元雨量分布為例，其雨量推估分布圖如圖 2- 60 至圖 2- 62 所示。而莫拉克颱風在陳有蘭溪、荖濃溪和旗山溪集水區中之坡面單元雨量分布如圖 2- 63 至圖 2- 65 所示。



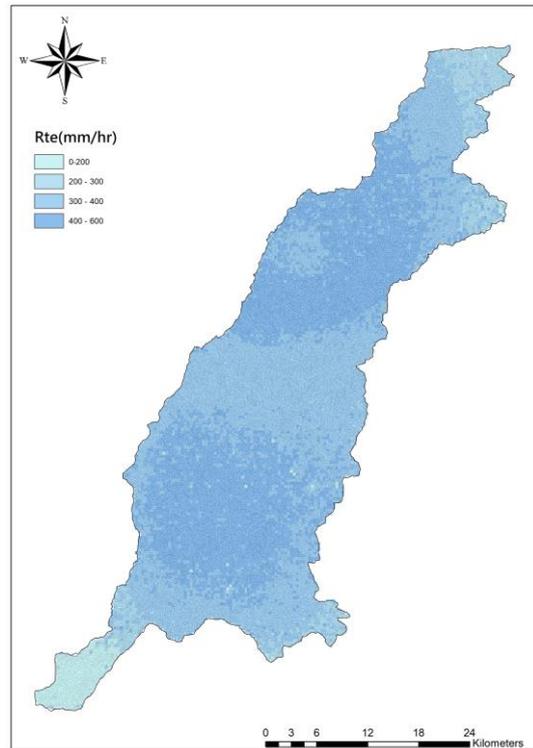
(a)最大小時降雨強度

(b)總有效累積雨量

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

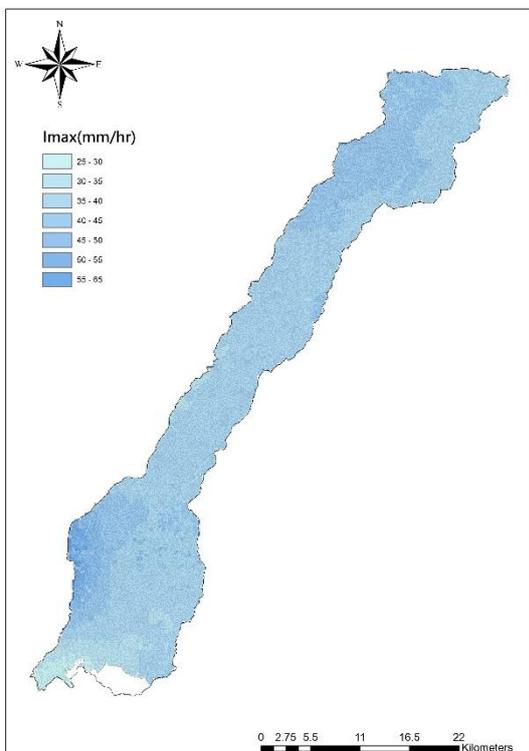


(a)最大小時降雨強度

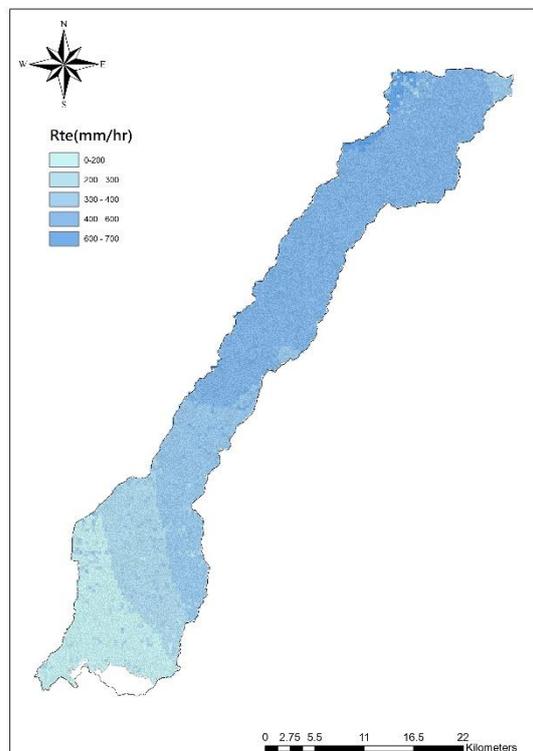


(b)總有效累積雨量

圖 2- 61 荖濃溪坡面單元辛樂克颱風雨量分布( $I_1-R_{te}$ )

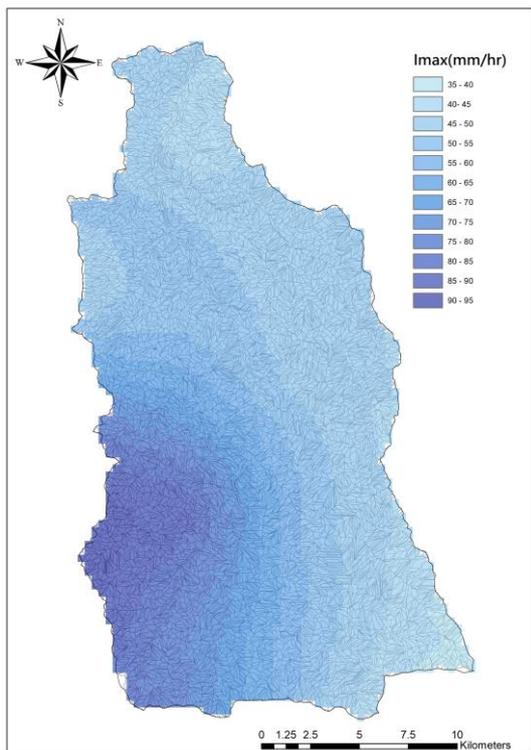


(a)最大小時降雨強度

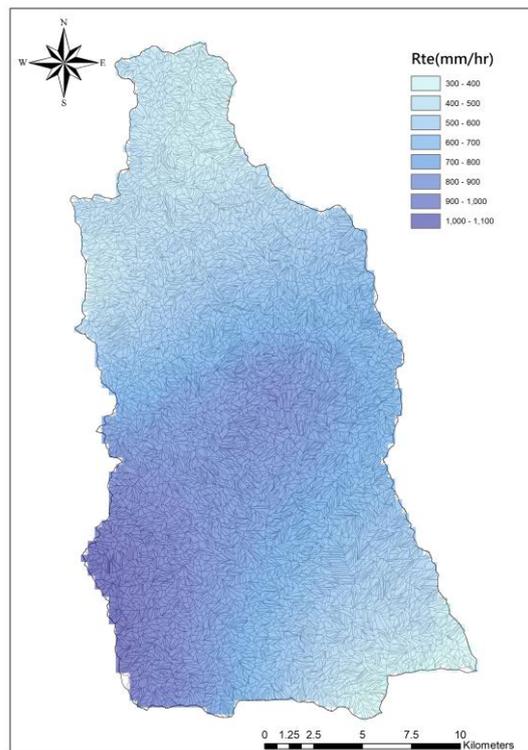


(b)總有效累積雨量

圖 2- 62 旗山溪坡面單元辛樂克颱風雨量分布( $I_1-R_{te}$ )

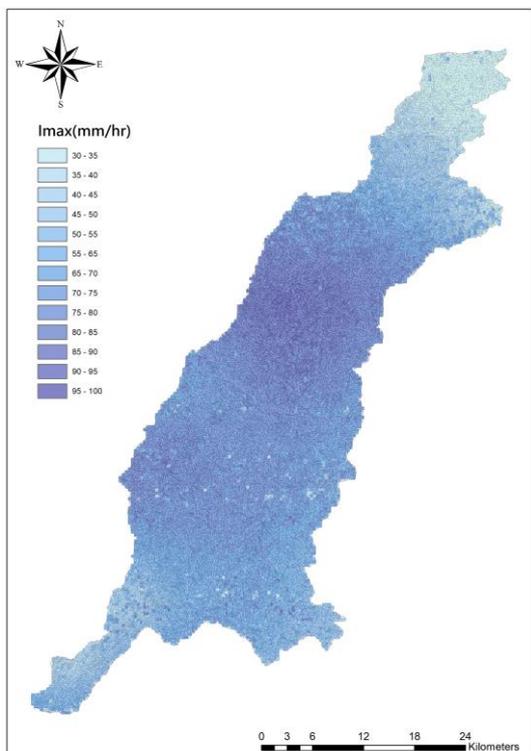


(a)最大小時降雨強度

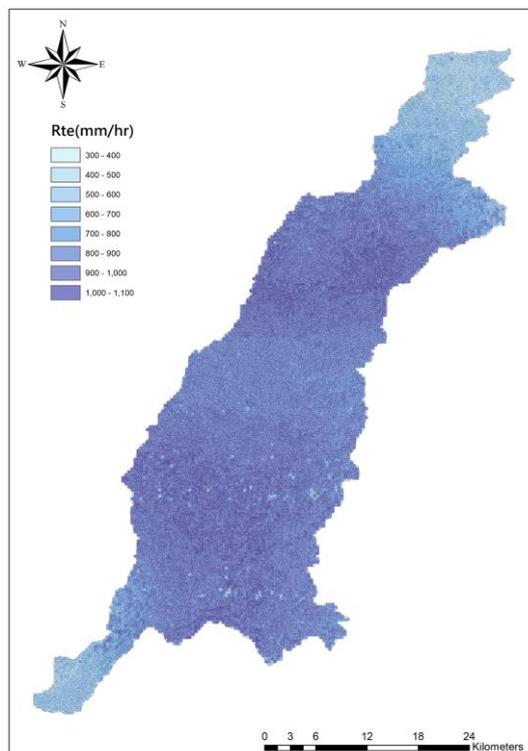


(b)總有效累積雨量

圖 2- 63 陳有蘭溪坡面單元莫拉克颱風雨量分布( $I_1-R_{te}$ )

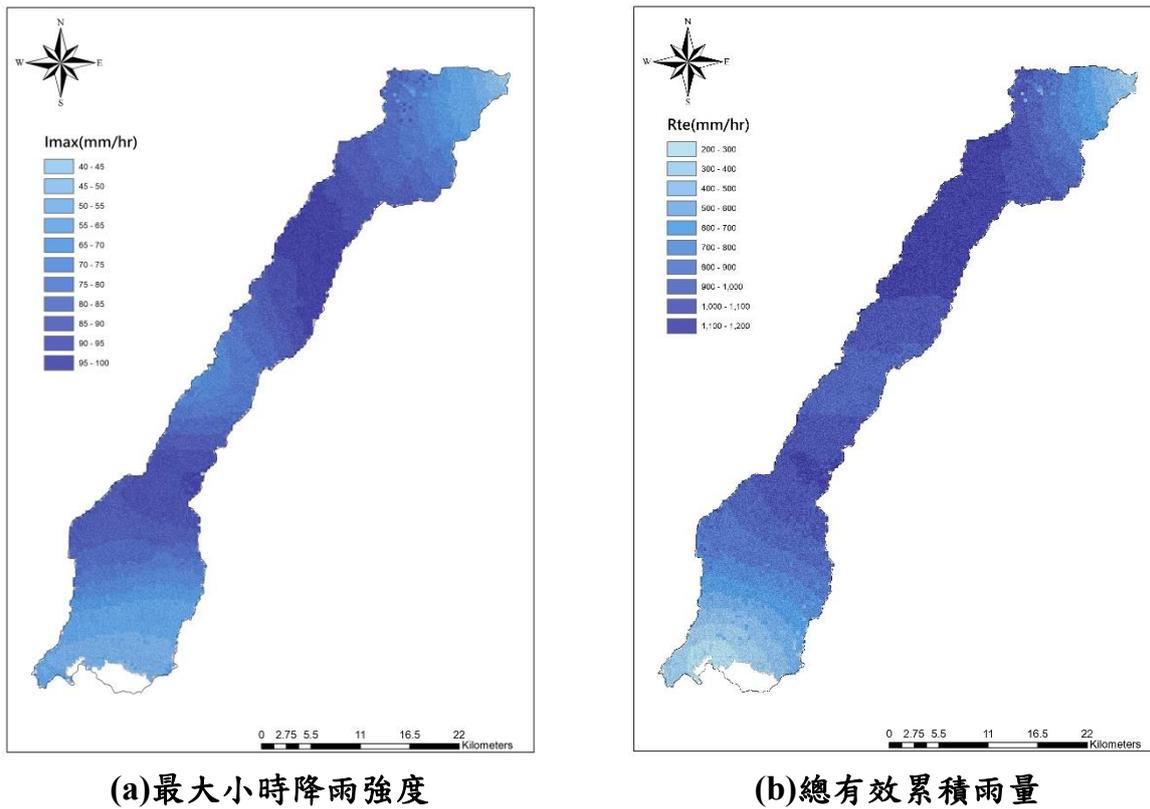


(a)最大小時降雨強度



(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。

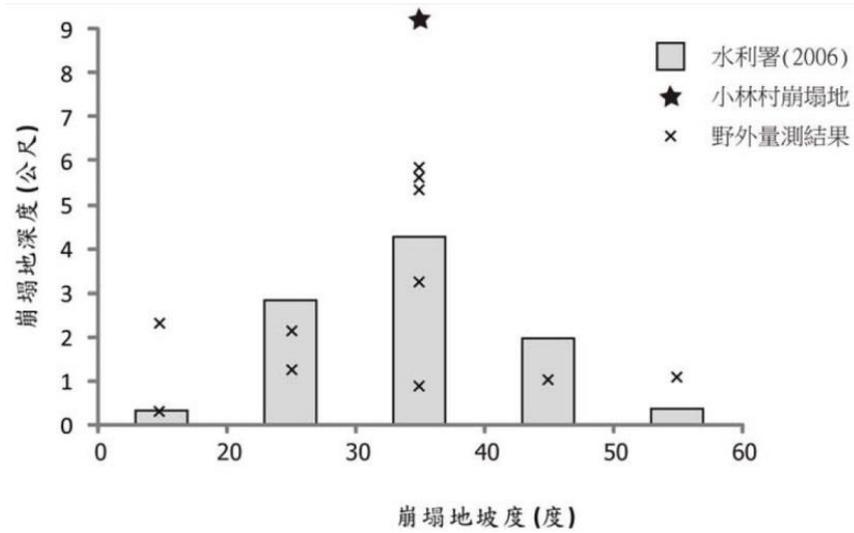


圖 2-66 崩塌地坡度與深度分佈

(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。

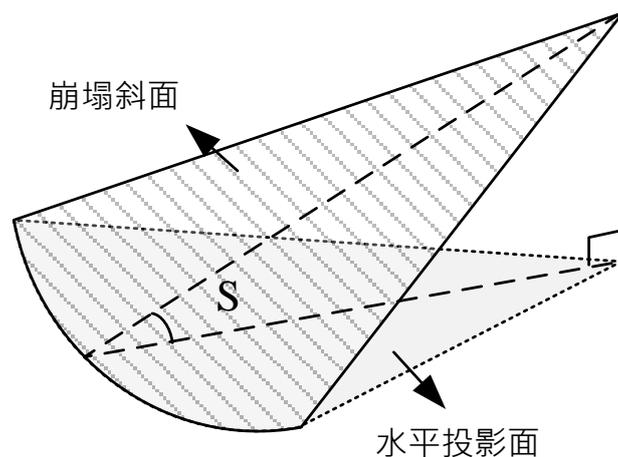


圖 2-67 崩塌塊體斜面與投影面關係示意圖

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。

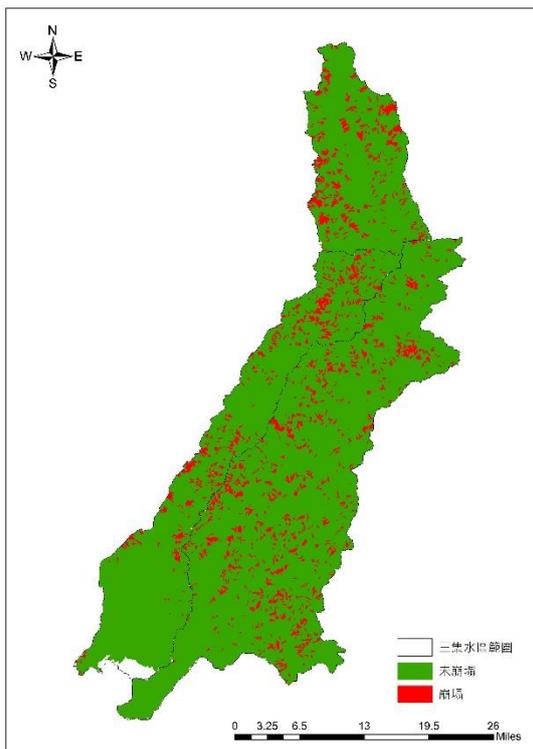


圖 2-68 97 年度至 98 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈

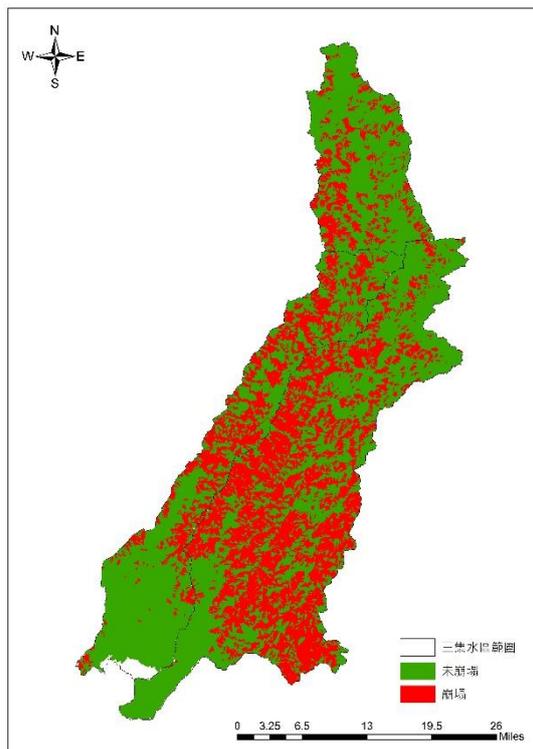


圖 2-69 98 年度至 99 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈

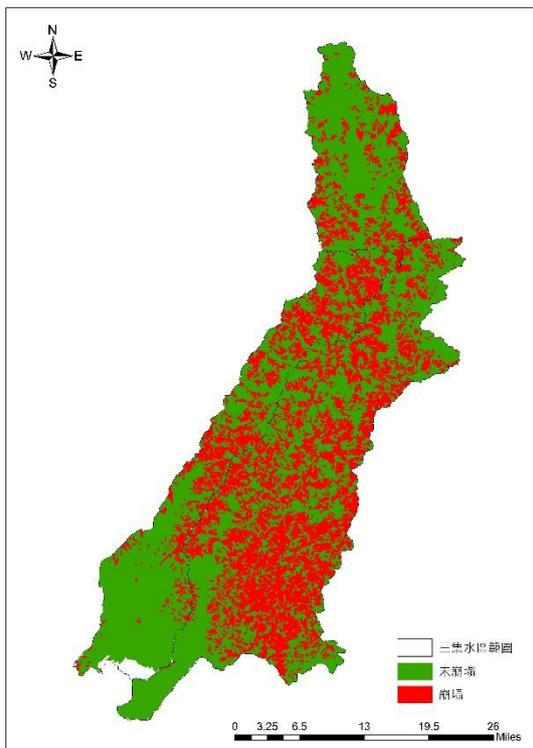


圖 2-70 99 年度至 100 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈

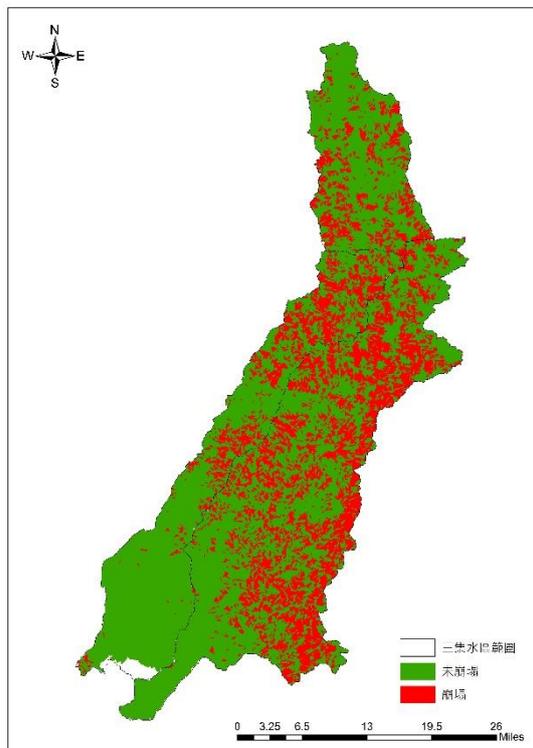


圖 2-71 100 年度至 101 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈

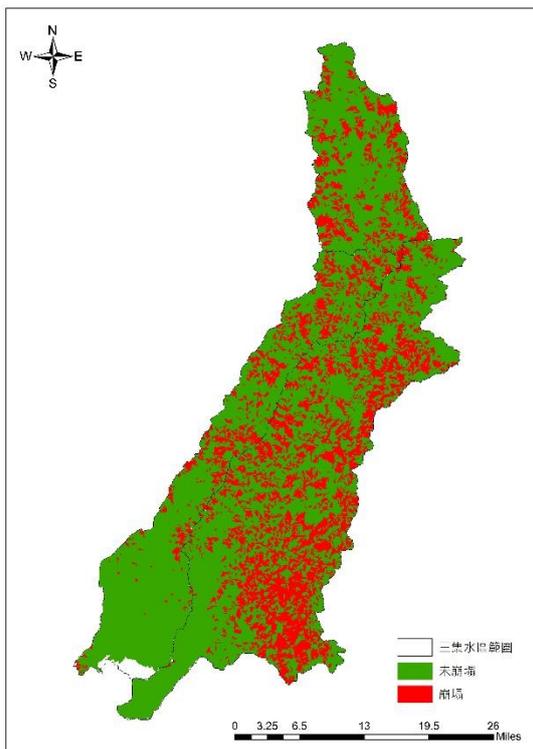


圖 2-72 101 年度至 102 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈

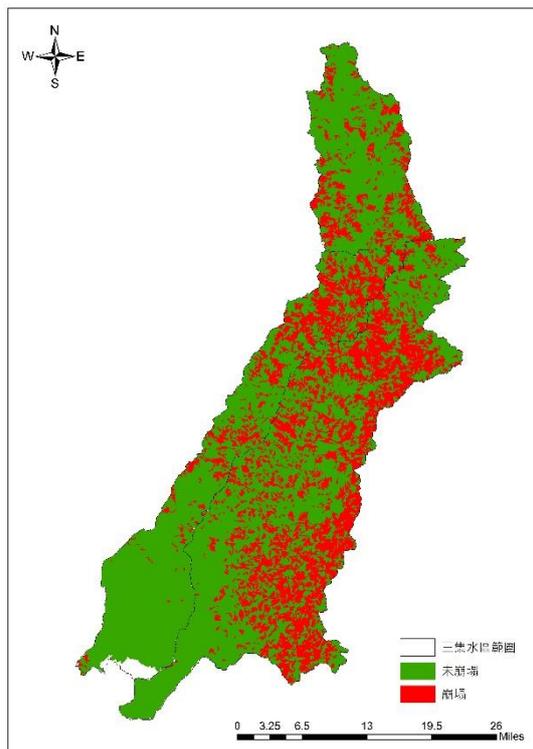


圖 2-73 102 年度至 103 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈

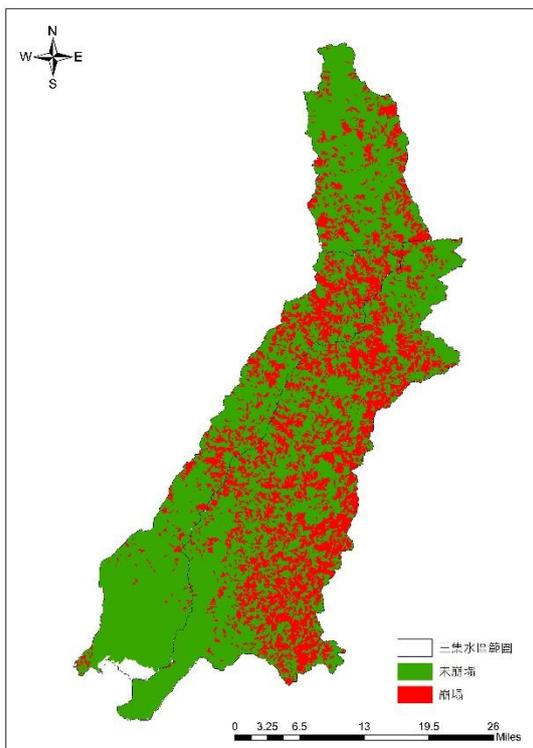


圖 2-74 103 年度至 104 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈

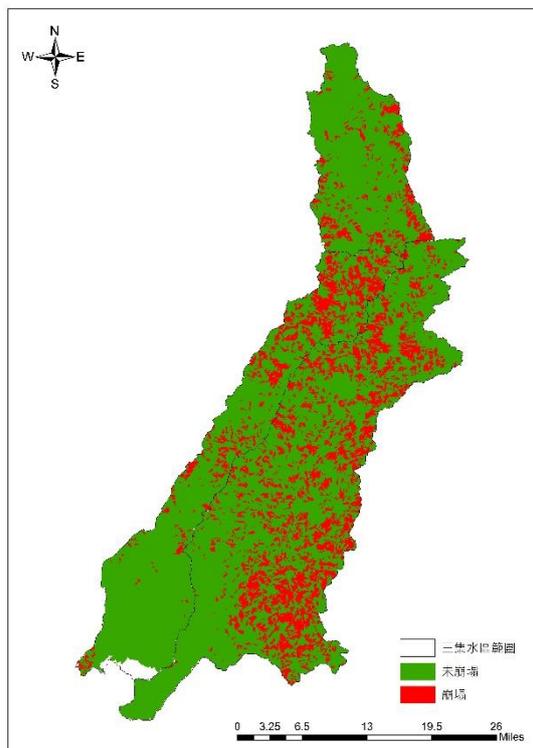


圖 2-75 104 年度至 105 年度間颱風豪雨造成之崩塌坡面分佈



### 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<sub>c</sub>)**以及坡地崩塌**潛勢最小致災門檻值(F<sub>c</sub>)**，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。

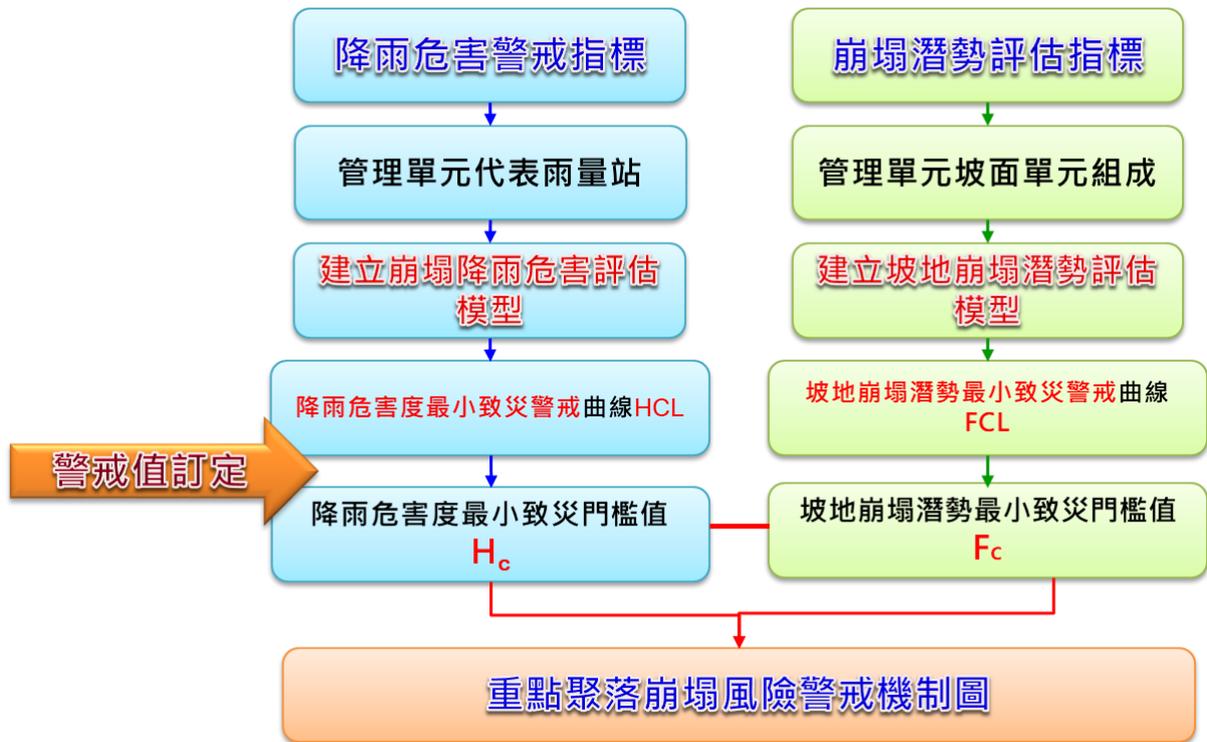


圖 3-1 坡地崩塌警戒模式評估指標建立流程

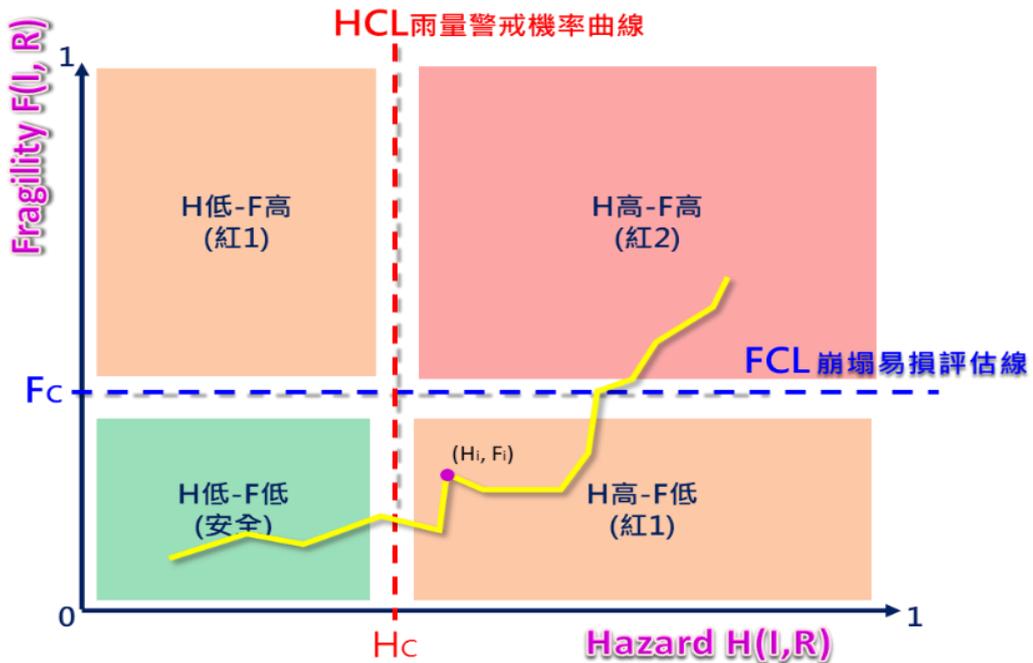


圖 3-2 崩塌風險警戒機制示意圖

## 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以及本年度納入大規模崩塌影響聚落之最鄰近之雨量站(如下表 3-2 所示)進行蒐集其民國 100 至民國 110 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 處重點聚落及 3 處大規模崩塌影響範圍之鄰近雨量站表

重點聚落			對應雨量站	大規模崩塌優先辦理潛勢區
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	
桃源區	寶山里	萬山里 1 鄰萬山巷	寶山 O1V510	v
茂林區	萬山里	新庄里司馬路	萬山 C0V790	v
杉林區	新庄里	寶山里 2 鄰寶山巷	龍泉寺 81V870	v
信義鄉	神木村	神木	神木村 C0H9A0	
信義鄉	豐丘村	豐丘(信義)	豐丘 C1I290	
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，在民國 100 至 110 年間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。

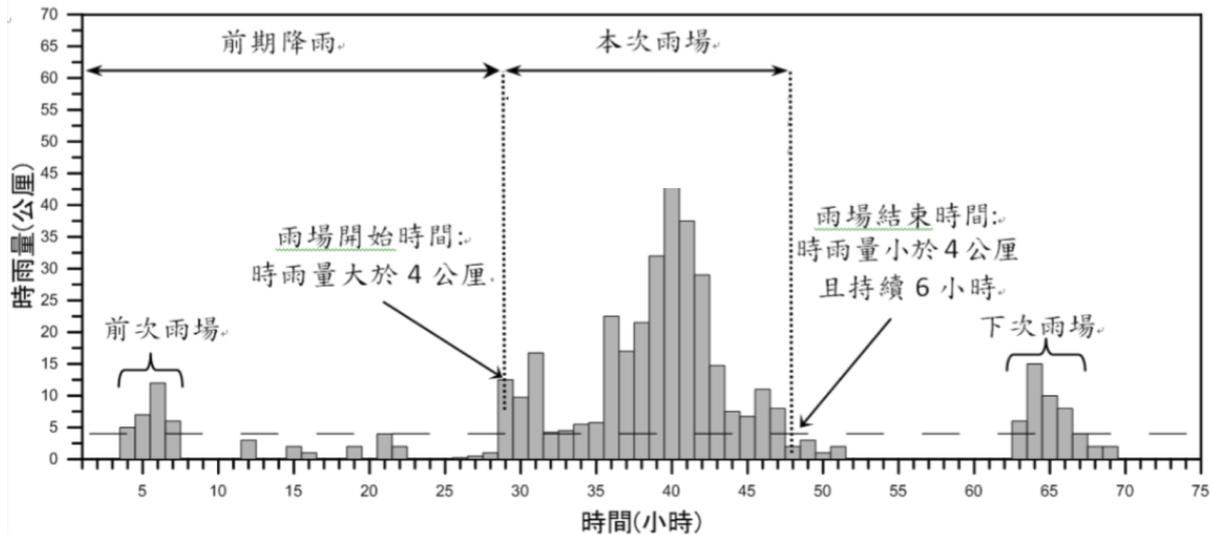


圖 3-3 本計畫採用之雨場分割方法示意圖

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  $\alpha$  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， $\alpha$  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  $ex$ 。 $\ln(a)$  正式定義為積分 (圖 3- 4 (b))。

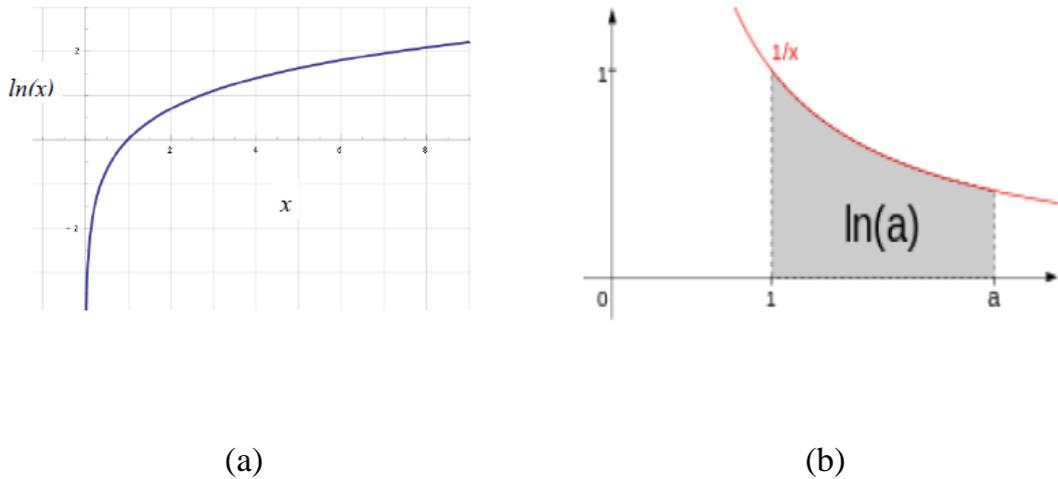


圖 3-4 自然對數  $\ln(x)$  的函數圖像

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 ( $\ln I_0$ )，以及有效累積降雨取自然對數後之原始數值定義為 ( $\ln Rt_0$ )，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  $\ln Rt_0$  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 ( $\ln Rt_0, \ln I_0$ ) 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  $\ln Rt_0, \ln I_0$ ，並稱將分組後之成對 ( $\ln Rt, \ln I$ ) 資料為「雨型組」。

$$dIRt_{ij} = \sqrt{(\ln Rt_0 - \ln Rt_i)^2 + (\ln I_0 - \ln I_j)^2} \quad i, j = 1 \text{ to } 2 \quad (3-3)$$

$$\text{MinIRt}_{ij} = \text{Min}\{dIRt_{ij}\}$$

當  $dRt$  最小時，將原數值更新為 ( $\ln Rt_i, \ln I_j$ ) 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  $(\ln R_{ti}, \ln I_j)$ ），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  $(x_i, y_j), i, j = 1, 2, \dots$  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

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

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

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 100 至民國 110 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  $(\ln R_{t_i}, \ln I_j)$  之聯合累積分布函數定義如下：

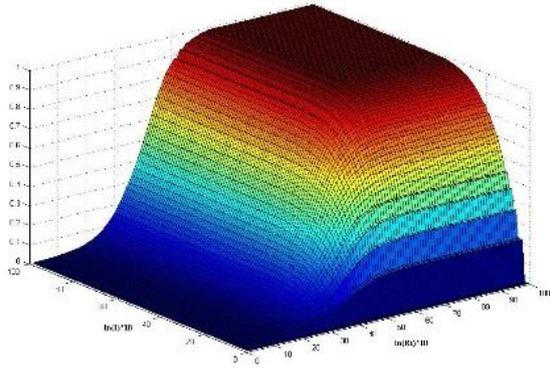
$$F_{\ln R_t, \ln I}(\ln R_t, \ln I) = \sum_{i=1}^{i: \ln R_{t_i} \leq \ln R_t} \sum_{j=1}^{j: \ln I_j \leq \ln I} p_{\ln R_t, \ln I}(\ln R_{t_i}, \ln I_j) \quad (3-8)$$

歷史雨場聯合累積分布函數分析成果實際上為  $100 \times 100$  大小的矩陣。為方便運用，任一雨型組  $(\ln R_{t_i}, \ln I_j)$  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。

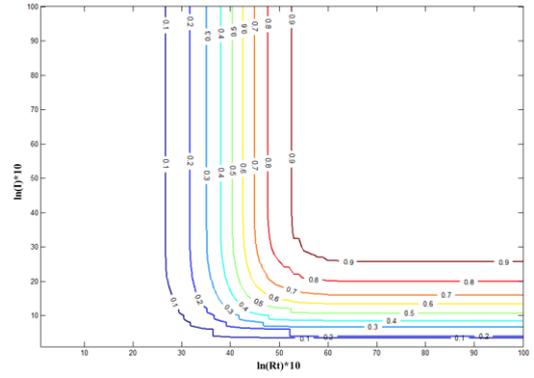
(3-8)式即為歷史雨場之聯合累積分布函數，本研究針基於 10 年雨量資料雨場之雨型組  $\ln R_t$  與  $\ln I$  聯合機率質量函數計算成果代入(3-8)式進行計算，建立  $FLR, LI(\ln R, \ln I)$ ，透過各雨量站 10 年間雨量資料建立之三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖，並將其三維空間映射至二維空間，以建立各聚落鄰近雨量站之歷史雨場等機率曲線圖。

## 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，本計劃針對南部集水區 13 處重點聚落及 3 處大規模崩塌影響範圍之鄰近雨量站繪製各歷史雨場  $(I_1 - R_{te})$  等比率曲線圖如下所示：

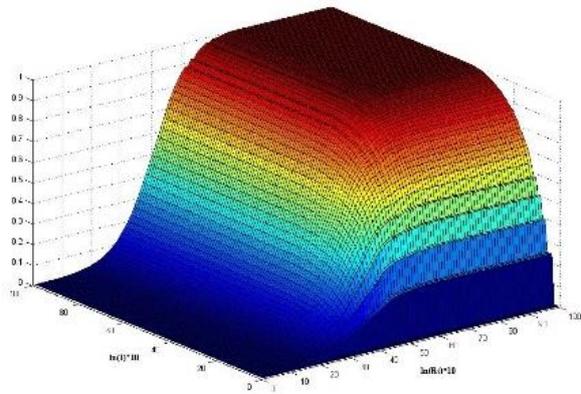


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

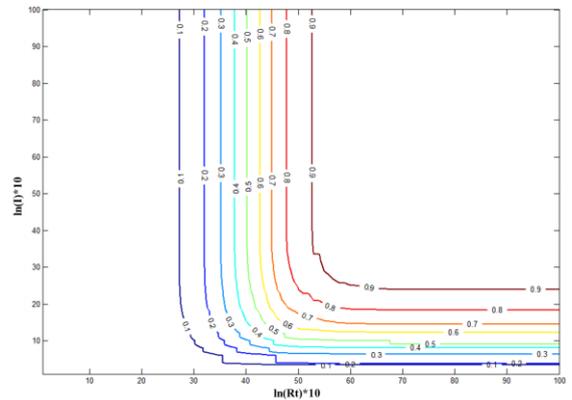


(b) 雨量等機率線

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

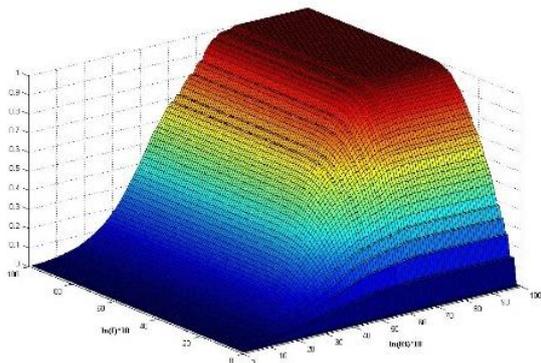


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

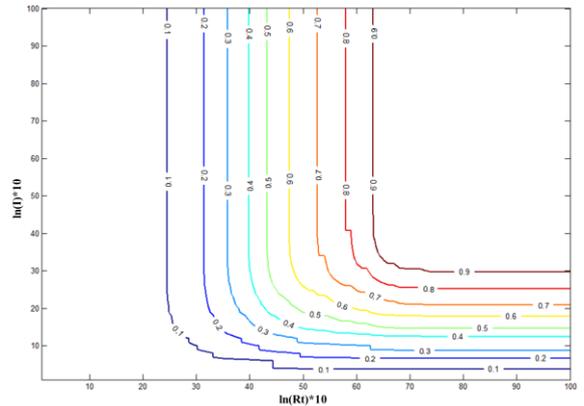


(b) 雨量等機率線

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

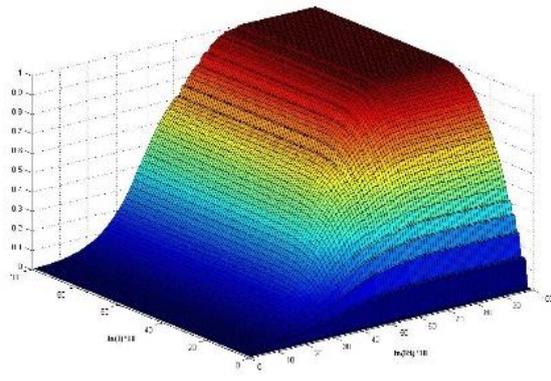


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

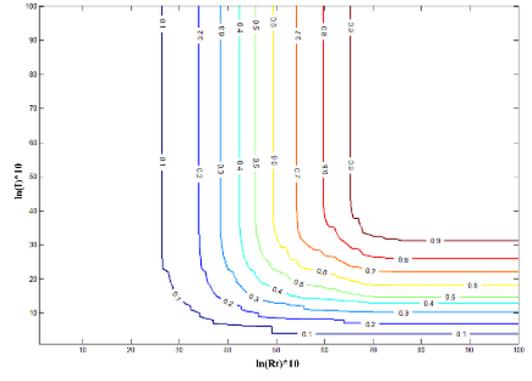


(b) 雨量等機率線

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

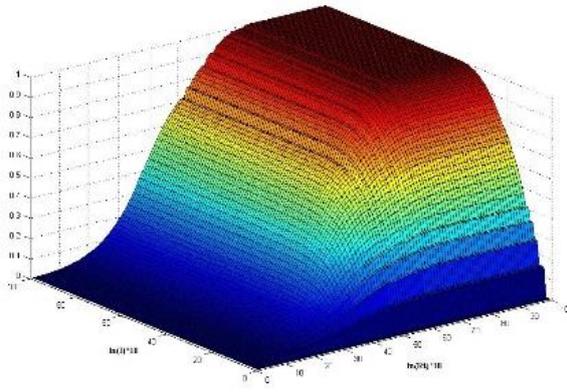


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

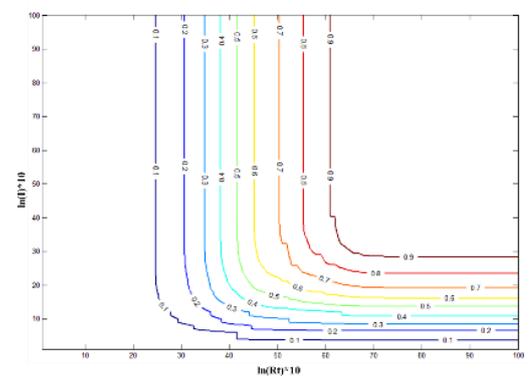


(b) 雨量等機率線

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

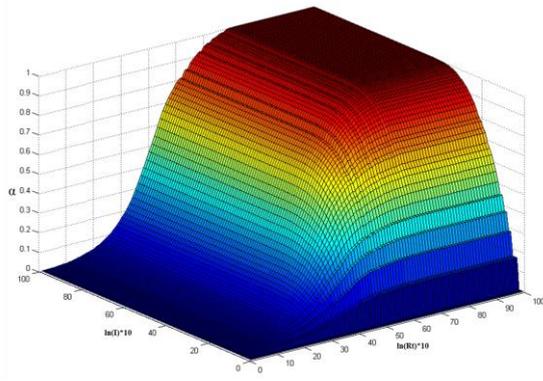


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

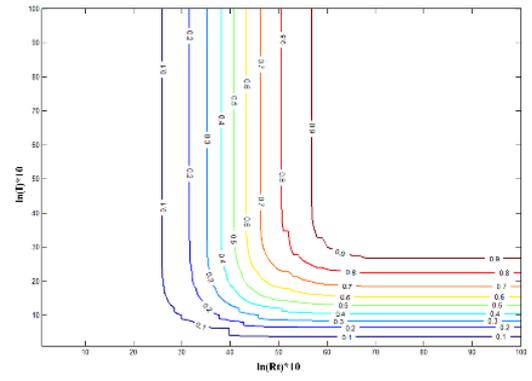


(b) 雨量等機率線

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

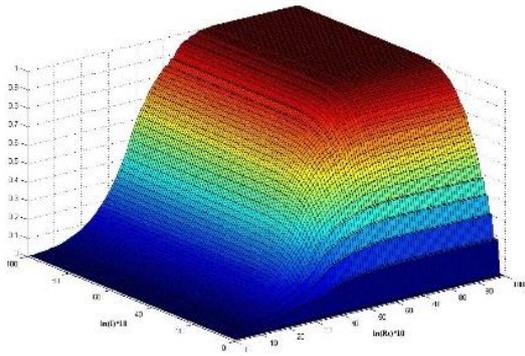


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

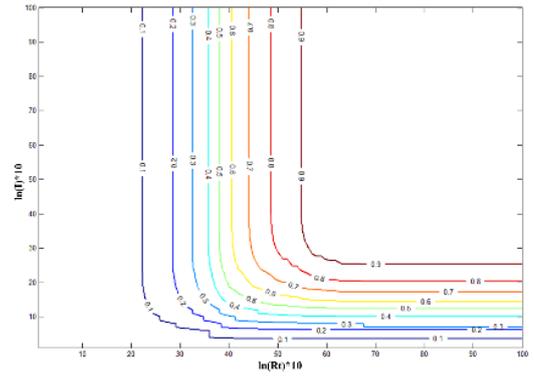


(b) 雨量等機率線

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

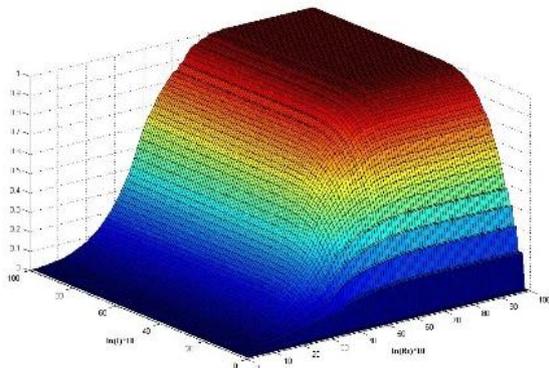


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

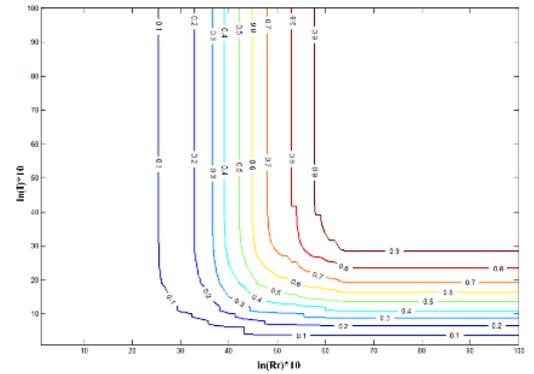


(b) 雨量等機率線

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

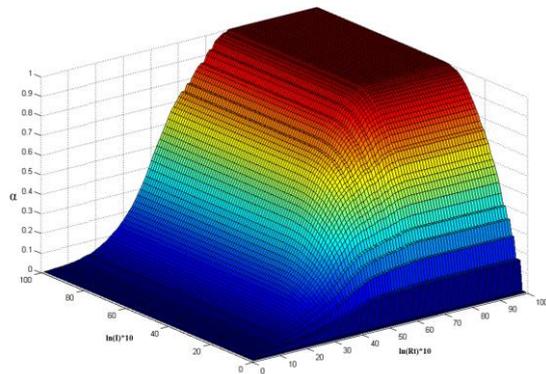


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

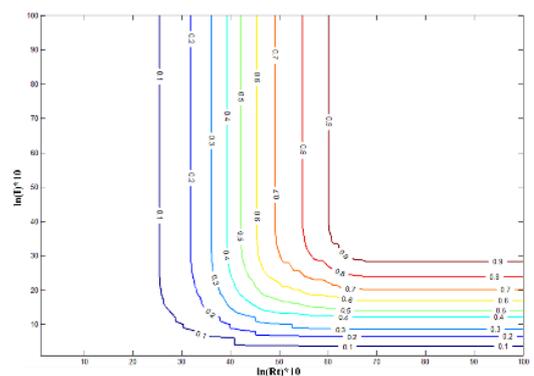


(b) 雨量等機率線

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

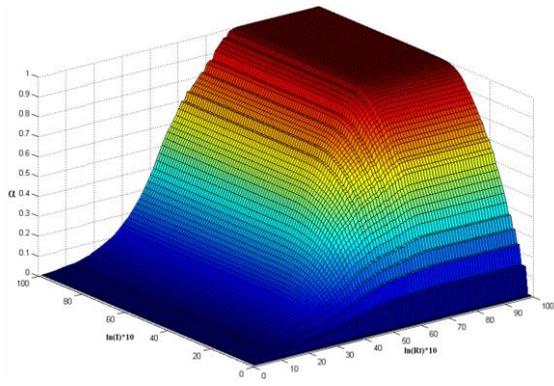


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

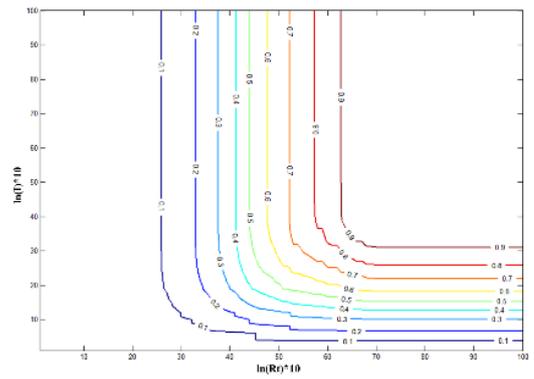


(b) 雨量等機率線

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

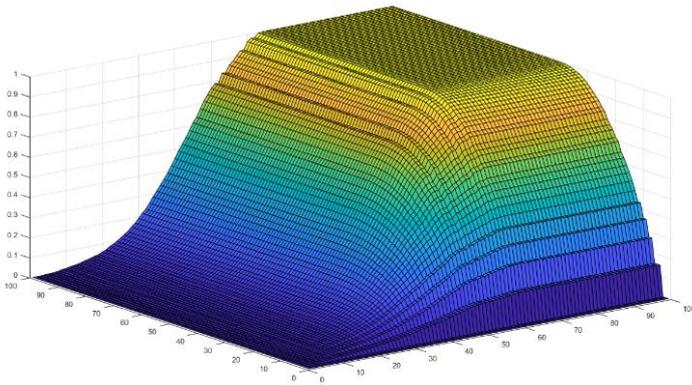


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

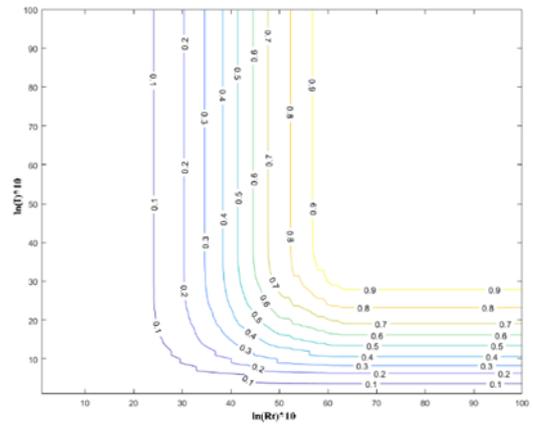


(b) 雨量等機率線

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

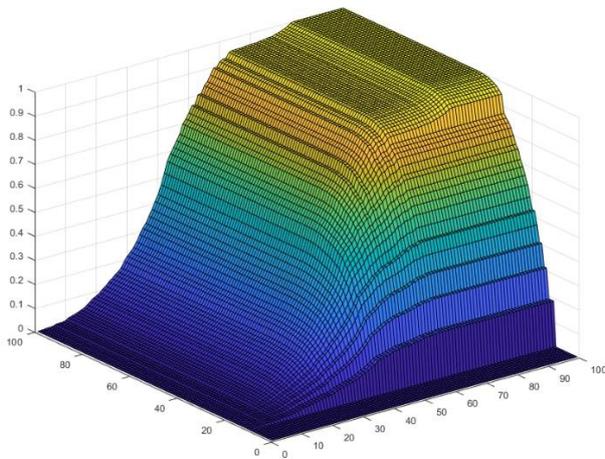


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

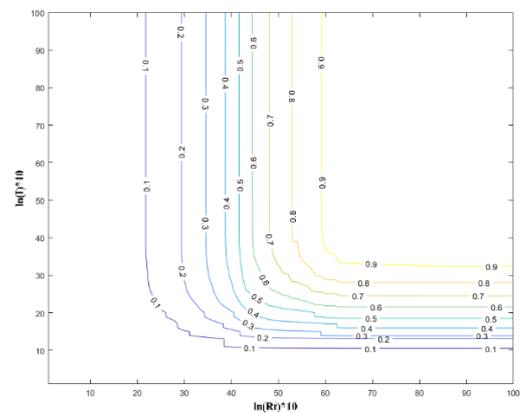


(b) 雨量等機率線

圖 3-15 萬山雨量站歷史雨量( $I_{max} - R_{te}$ )等機率曲面

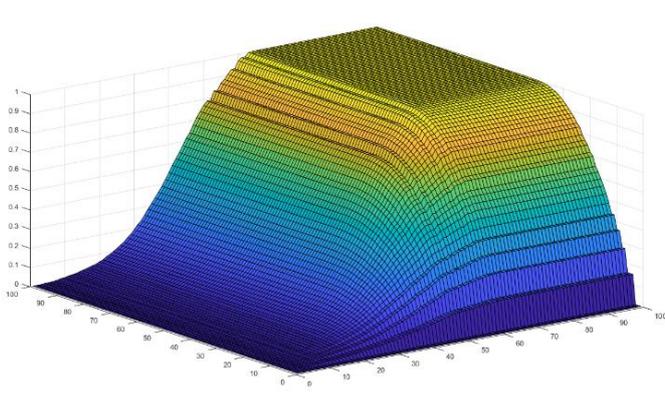


(a) 三維空間歷史雨場聯合累積分布函數圖

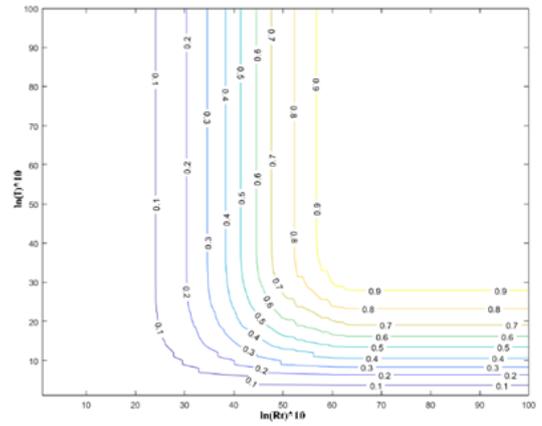


(b) 雨量等機率線

圖 3-16 寶山雨量站歷史雨量( $I_{max} - R_{te}$ )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 3-17 龍泉寺雨量站歷史雨量( $I_{max} - R_{te}$ )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 3-18 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。

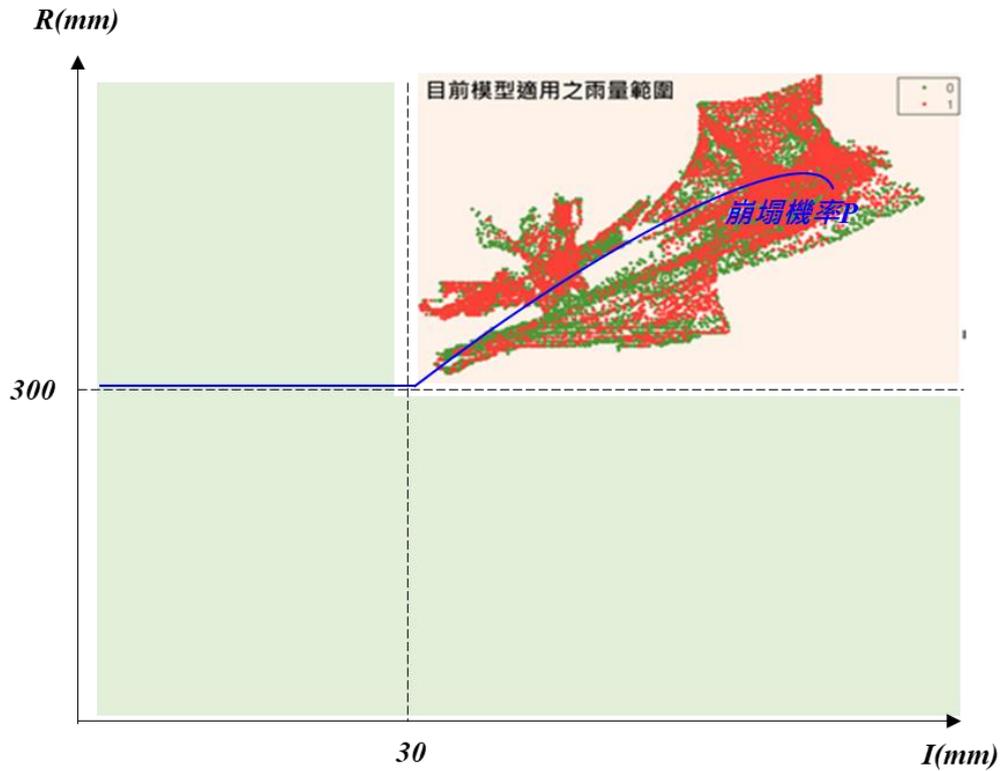


圖 3-18 模型樣本之誘發降雨因子分布圖

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 3-19 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- 20。

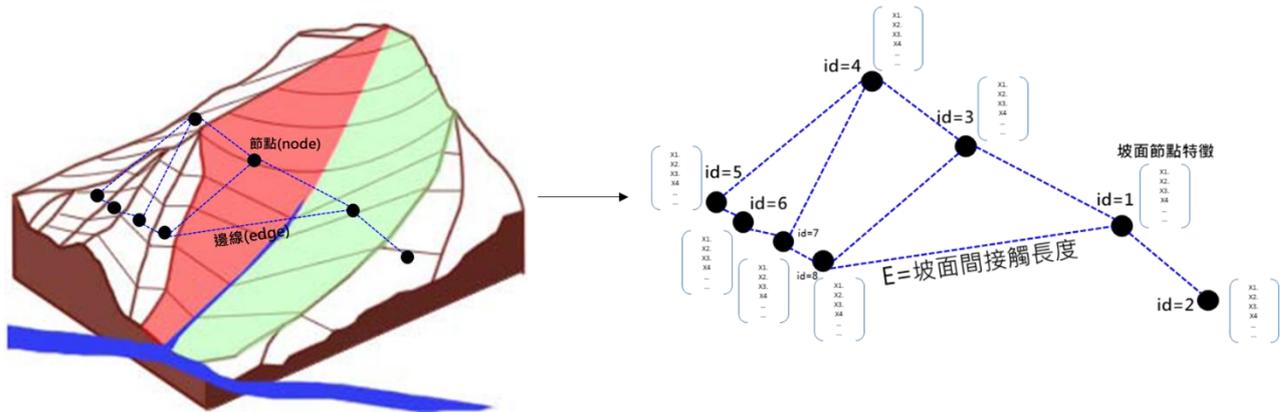


圖 3-19 集水區圖像特徵定義示意圖

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 3-20 GCN 定義圖像之矩陣示意圖

下圖 3-21 至圖 3-23 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												
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 3-21 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 3-22 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					46.6 5	431 06	5.06																		
2					417 02																				
3					417 02	473 48															74.5 1				
4					46.6 5	473 46		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 08	594 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 88	143 02										
10													276 11												
11									233 77		278 11		47.7 5												
12								17.9 1		425 84		47.7 5		245 4											
13										143 02			245 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																									
21						74.5 1		218 83		117 2														254 02	322 24
22																								254 02	198 98
23																								322 24	198 98
24																								359 21	255 18

圖 3-23 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，然而過去僅將事件兩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 3-24，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。

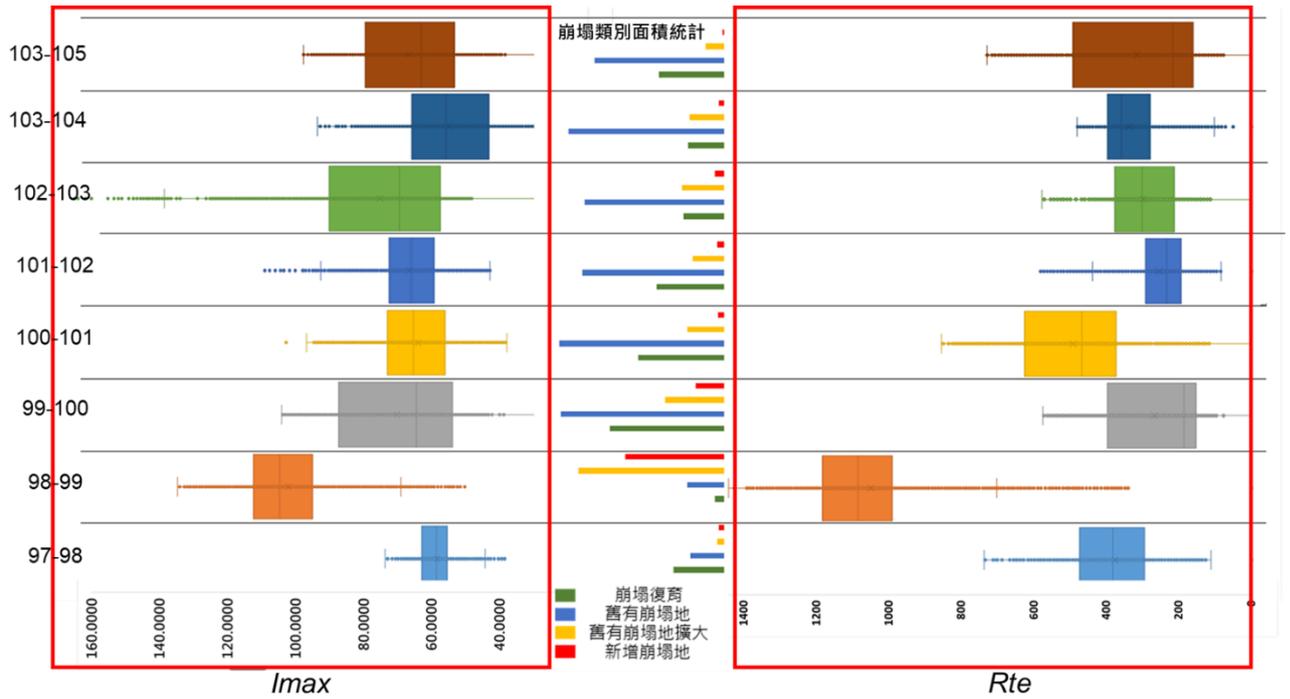


圖 3-24 各年度[崩塌]單元與降雨規模關聯統計

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 3-25)，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。

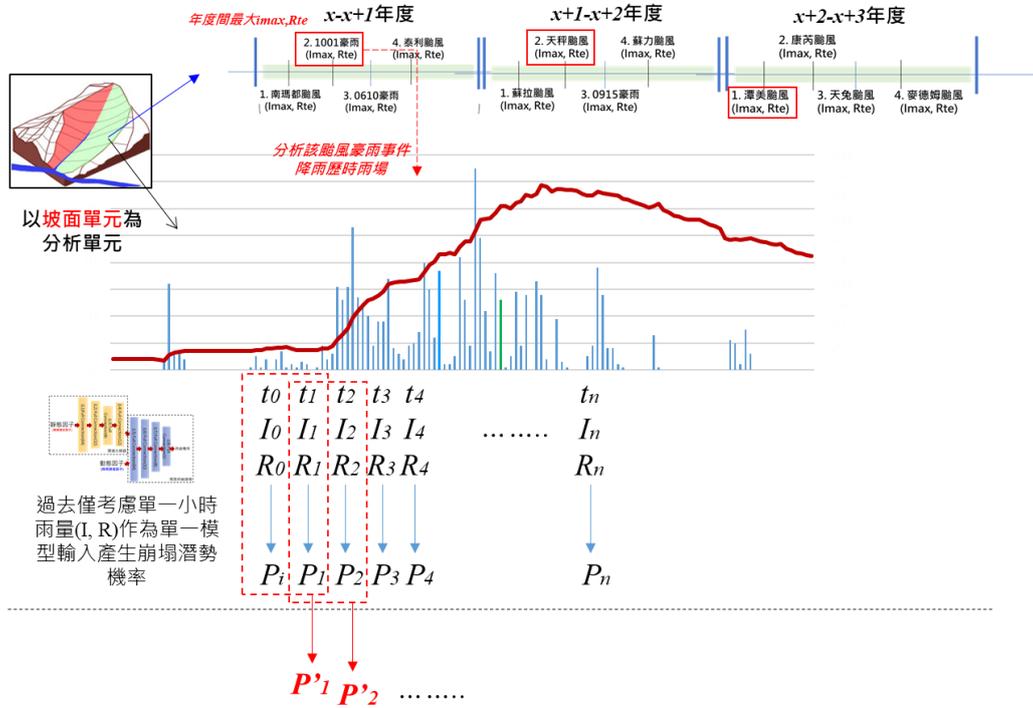


圖 3-25 降雨誘發時序特徵模式建立示意圖

### 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 3-26 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 3-27)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。

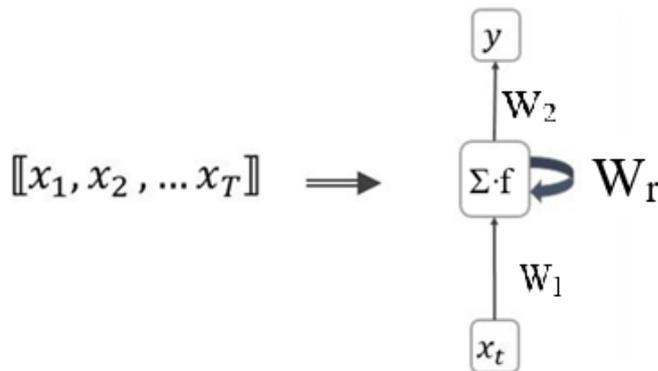
$$net_i = x_1, x_2, x_3, \dots, x_t$$

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  $fp(t)$ 。

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

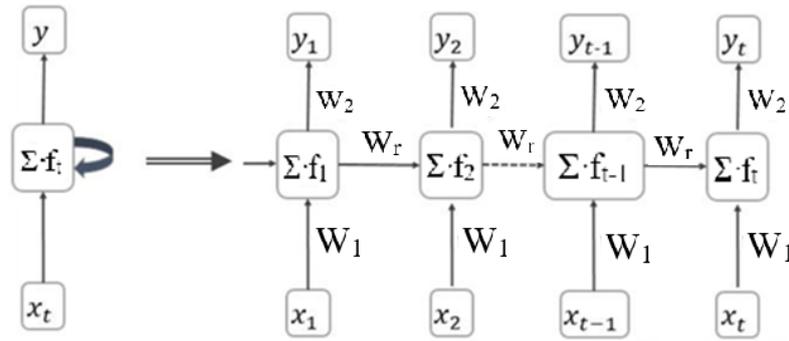
輸出層  $net_k$ ：共 1 個輸出，不使用激活函式以及偏移量，將動態層的輸出乘上  $W_2$  後加總，直接作為最後的結果。

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



參考文獻 <https://reurl.cc/Gr7NOW>

圖 3-26 單層 RNN 模型



參考文獻 <https://reurl.cc/Gr7NOW>

圖 3-27 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,  $\varphi_s$  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  $\varphi_t$  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,  $\varphi_t$  為 tanh function,  $c_t$  為本次的 cell status。

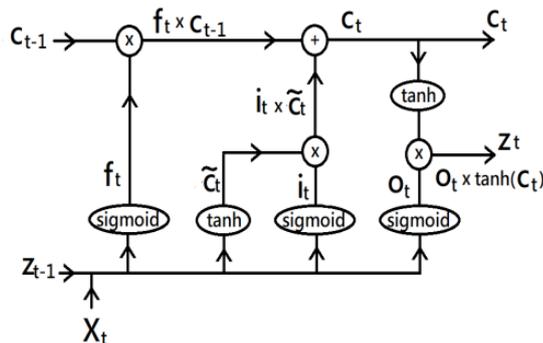


圖 3-28 LSTM CELL 結構

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- 29 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)

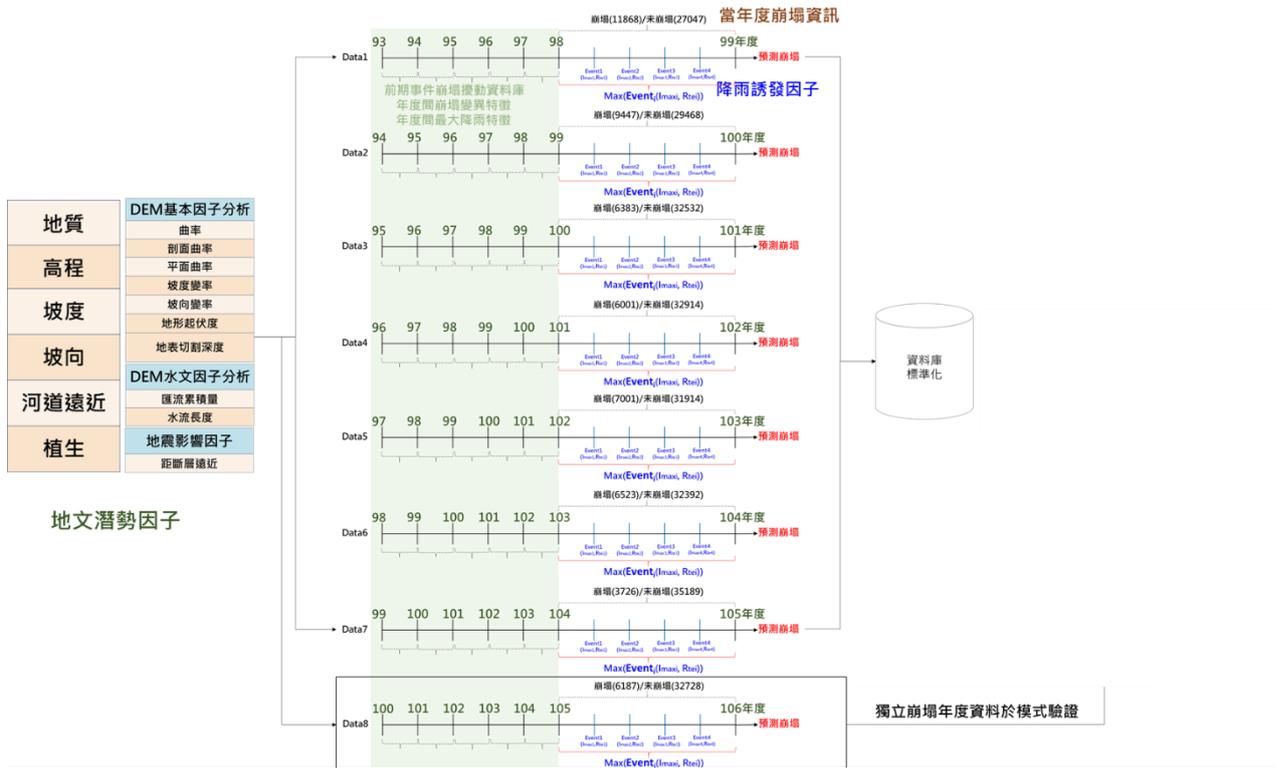


圖 3-29 本計畫各年度間資料分組示意圖

#### 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，Xmax：原始數據樣本中最大值，Xmin：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- 30 所示)。

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

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

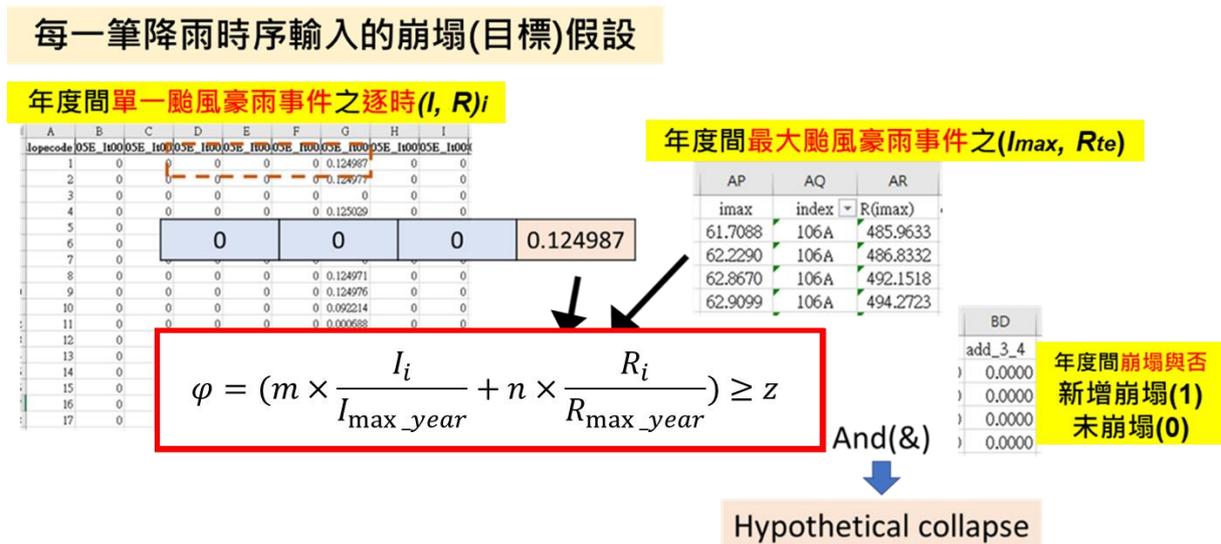


圖 3- 30 崩塌顯著雨量門檻假設公式示意圖

## 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 3-31 所示。

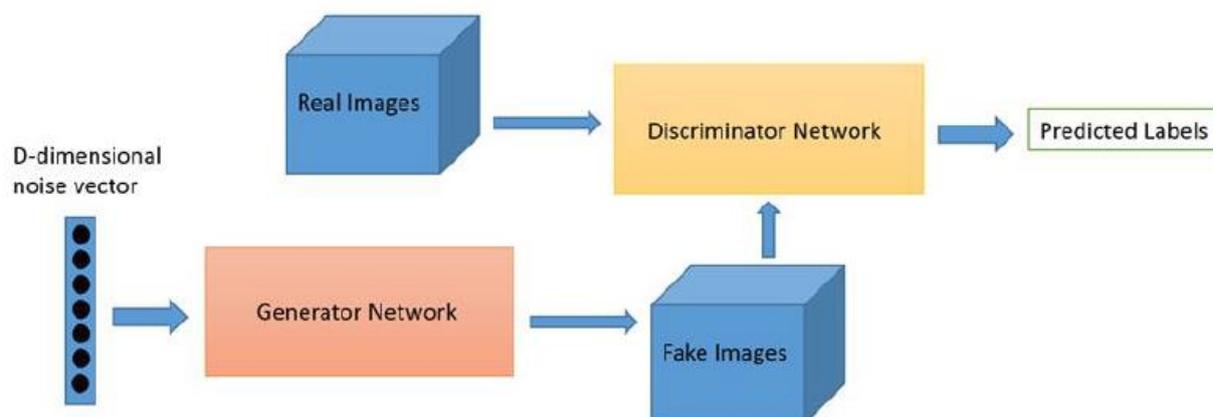


圖 3-31 生成對抗網路架構圖 (<https://reurl.cc/EKMbRv>)

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，本研究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 3-32 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。

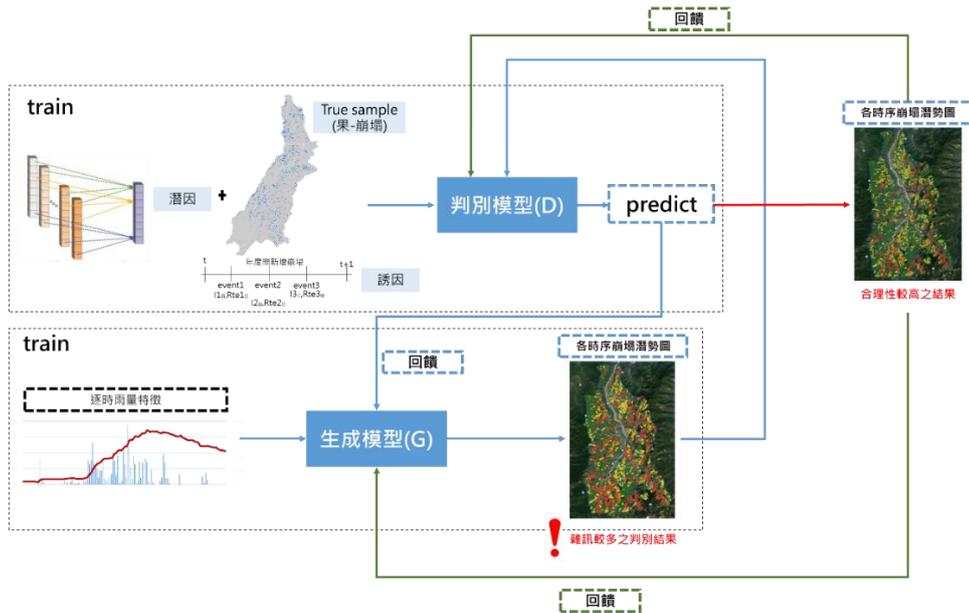


圖 3-32 本研究對抗生成網路架構設計

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 將乘以 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<sup>+</sup>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%		<b>84.89%</b>

### 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 3-33 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 3-33 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 3-34 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 3-34 之綠色趨勢線所示。

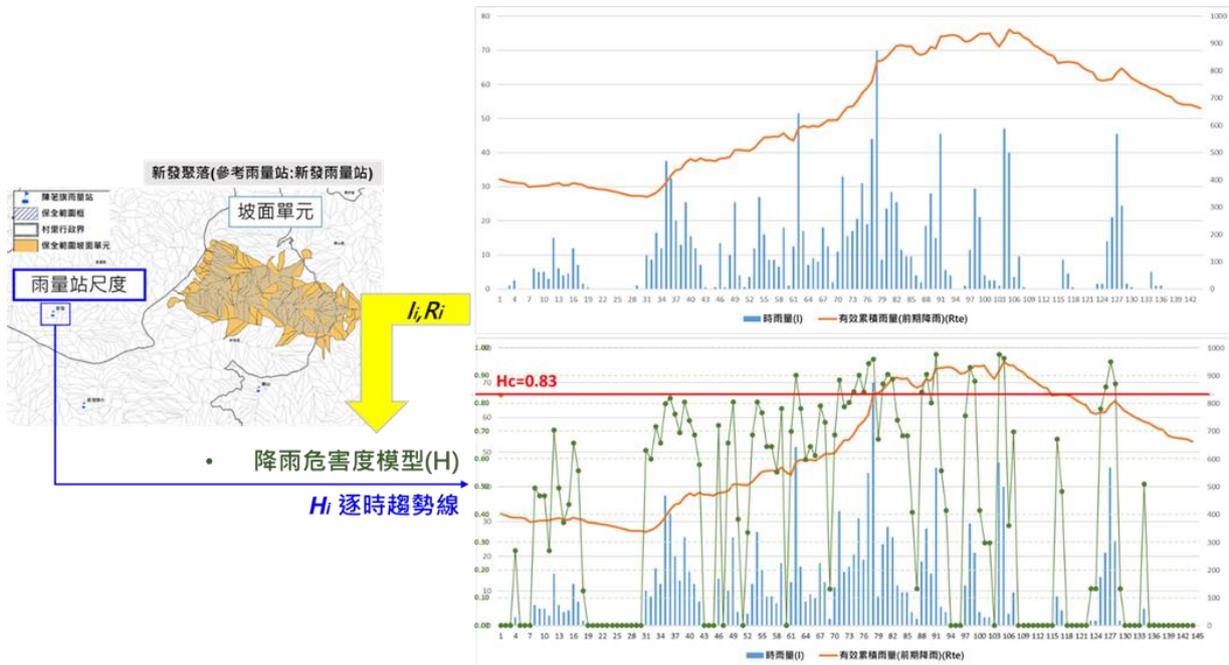


圖 3-33 降雨危害評估模型應用示意圖

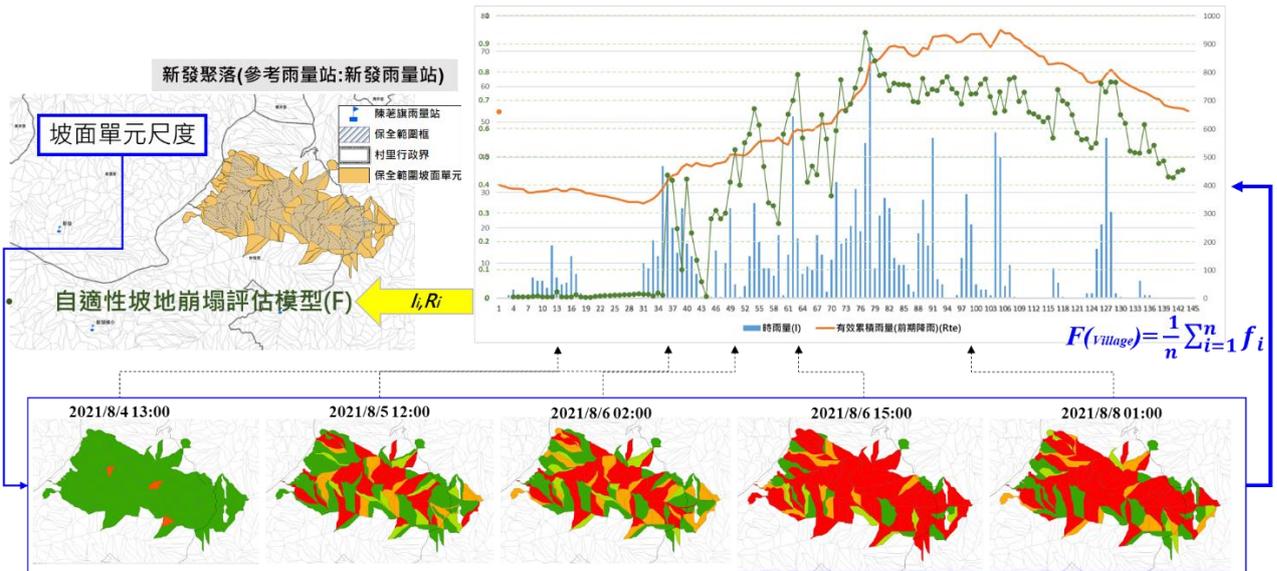


圖 3-34 自適性坡地崩塌潛勢評估模型應用示意圖

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(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 3-35(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 3-35(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。

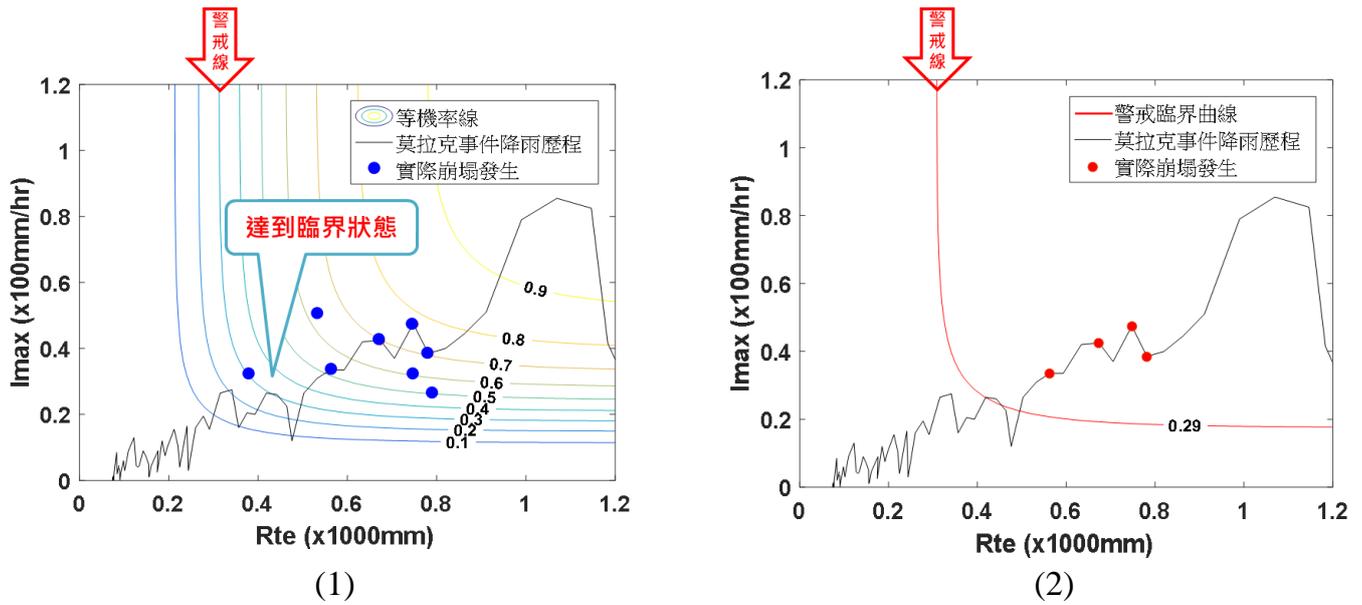


圖 3-35 警戒曲線訂定示意圖

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(111 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 <sub>c</sub>	F <sub>c</sub>
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 15 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- 36)，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。

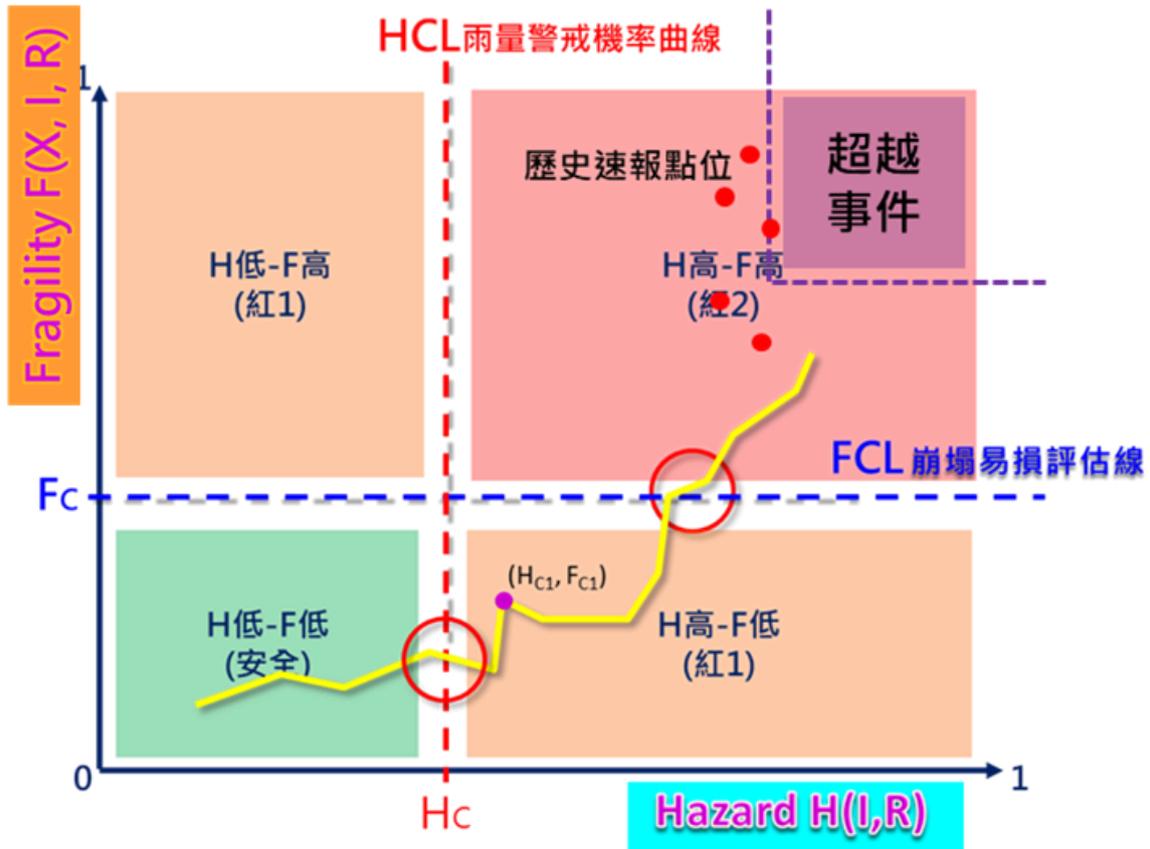


圖 3-36 崩塌風險警戒機制示意圖

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。

## 第四節 高時間解析度之崩塌序列特徵模型

過去研究在建立崩塌評估模型過程中，面臨分析對象資料集的資料量不足的問題，如模擬崩塌敏感性的早期方法是基於實地調查，而此類技術成本高昂且因場地而異，並且在很大程度上涉及地質學和地貌學方面的廣泛專業知識(Husam and Biswajeet, 2020)，因此在崩塌樣本難以取得的情況下，相關崩塌潛勢評估之數據統計研究都有數據不平衡之問題，而崩塌數據集包含兩類（崩塌存在(負類)或崩塌不存在(正類)），在大多數情況下，負類和正類中的觀察分佈是不平衡的，而大多數典型的機器學習模型假設/期望類別平衡的分佈下會使模型偏向正類來影響機器學習的預測性能(Husam 等人，2021)。

另外，在目前所能取得的全島崩塌地圖之崩塌資料的時間尺度(以年為單位)上也往往難以與實際降雨資料的時間尺度做為比對以及驗證，這也在模型對於實際的崩塌發生時間點基本上是無法詳細得知，近而無法探索坡面單元的時序特徵變化。為此本計畫與國家太空中心合作，取得年度間的衛星影像，並透過深度學習技術進行崩塌地判釋，進而擴增年度間的崩塌特徵時序特徵(如下圖 3-37 所示)，並串接目前以完成的模型架構，以提高模型的適配性。

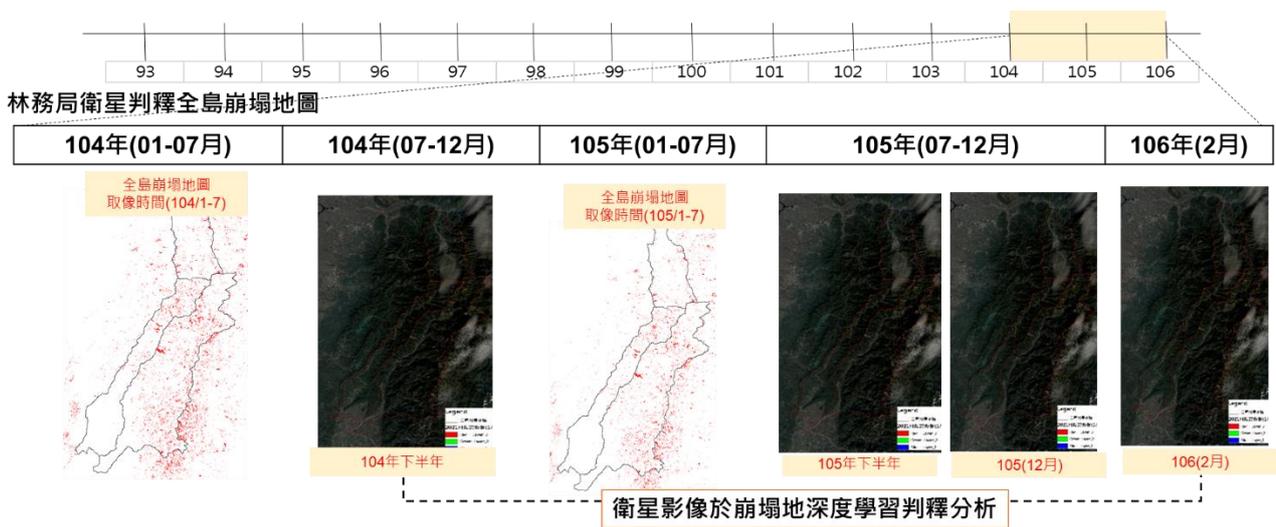


圖 3-37 衛星影像深度學習判釋分析於擴增崩塌時序特徵樣本

### 一、 衛星影像蒐集狀況

本次計劃與國家太空中心合作，目前取得陳有蘭溪集水區、荖濃溪集水區、旗山溪集水區這三個觀察區域，每年一次的衛星影像檔案。衛星影像來源於福爾摩沙衛星二號(FORMOSAT-2)，三個集水區共需取得 13 個網格區塊的衛星影像資料影像包含四個波段，分別為紅、藍、綠與近紅外波段，影像類型包含 multispectral(MS)、panchromatic (PAN)、Pansharpend Multispectral (PMS)等。目前已取得 2014~2016 的衛星影像圖資，共有四份，清單如表 3-9，圖 3-38 為 2014 年的衛星資料圖，圖 3-39 呈現漸層色的部分為本次觀察的所有集水區。

清晰的衛星影像不容易取得，必需特別挑選天候狀況佳且無/低雲覆時拍攝之圖資，可用資料會有日期不一致的情況，此為正常現象。從表 3-9 圖資清單可以看出，2014 年的各個圖塊的取得時間來自於 12/1、12/30、12/31 等三個不同日期，視為同一個的資料集，2015 年的 10/16~11/18、12/13~12/31 歸為兩個不同資料集。2016 年歸為第四個資料集。

表 3-9 FS-2 衛星圖資一覽表

年份	2014 年			2015 年						2016 年			數量 總計
日期 區塊	12/1	12/30	12/31	10/16	11/7	11/18	12/13	12/19	12/31	2/1	2/9	2/23	
G033	1			1					1		1		4
G034	1			1					1		1		4
G046			1		1			1		1			4
G047			1		1			1		1			4
G048			1		1			1		1			4
G049			1		1			1		1			4
G050			1		1			1		1			4
G051			1		1			1		1			4
G064		1				1	1					1	4
G065		1				1	1					1	4
G066		1				1	1					1	4
G067		1				1	1					1	4
G068		1				1	1					1	4

總計	2	5	6	2	6	5	5	6	2	6	2	5	52
----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----



圖 3-38 衛星資料圖原圖



圖 3-39 衛星資料圖上涵蓋所觀察之陳荖旗集水區

目前收到的衛星影像可觀察到兩點，其一，透過 2014 年度與 2015 年度崩塌地範圍來看，可看出崩塌地通常沿著舊崩塌地的區域增長，由此可以推測，崩塌的坡面單元可能具有地質環境的相似性，從衛星影像中很容易以肉眼看出這些崩塌地與其他未崩塌地的差異之處。

圖 3-40 可以清晰看出來淺綠色的部份為崩塌坡面，圖 3-41 藍色區塊為 2014 年崩塌地，圖 3-42 中黃色為 2015 年崩塌地，可看出崩塌地沿著過往曾經崩塌過的區域增長，當衛星影像品質良好時，可以清楚辨識出崩塌地。

圖 3-43 上的白色細線為坡面單元劃分，圖 3-44 為 2014 及 2015 年崩塌地域相疊的情況，圖 3-45 為 2014、2015 年崩塌地相疊反映在坡面單元

上的情況。



圖 3-40 原始衛星影像



圖 3-41 2014 年崩塌區域

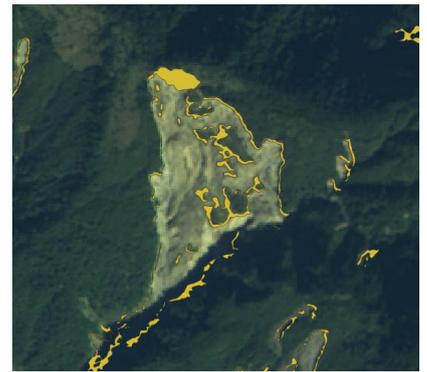


圖 3-42 2015 年崩塌區域



圖 3-43 坡面單元劃分

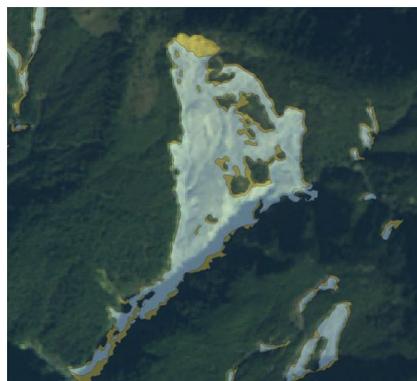


圖 3-44 2014+2015  
崩塌區域

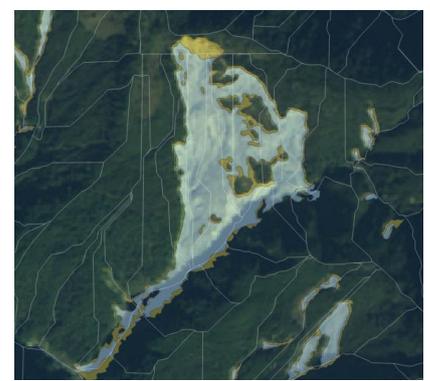


圖 3-45 崩塌區域及  
坡面單元劃分

其二，衛星影像因衛星拍攝的時間點，會因日照影響進而產生陰影，陰影區在圖面顯示上接近黑色，數值趨近於零，可視為一種無效資料，若將出現在陰影區的崩塌地資料放進模型訓練，會誤導模型將陰影區塊判定為崩塌。因此，模型需要有能力可以辨別影像資料是否為有效資訊，若為無效資料需被區分出來，從衛星影像資料內去除。圖 3-46 為衛星影像中的陰影區塊，可以看出幾乎為深綠趨近黑色，無法反映崩塌地資訊，圖 3-47 為 2014 及 2015 年的崩塌範圍，藍色為 2014 年，黃色為 2015 年，可以看出大部分的面積都位於陰影上，此類崩塌坡面無法從衛星影像取得有效判定資訊。

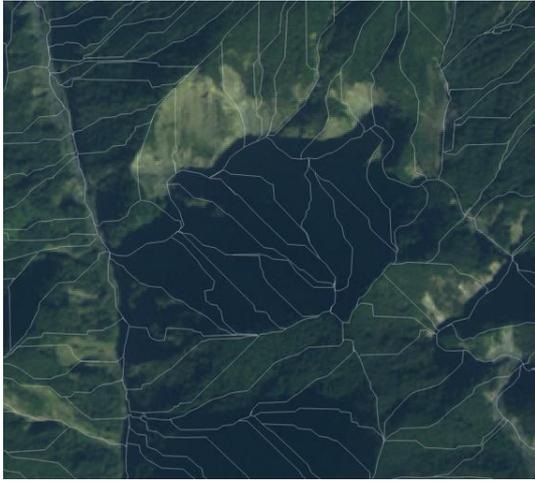


圖 3-46 原始衛星影像坡面單元劃分

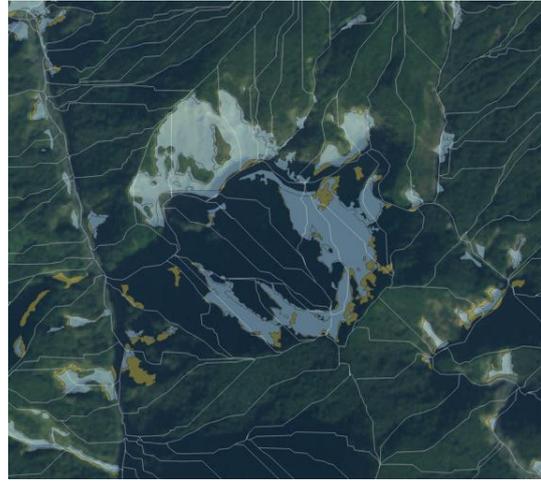


圖 3-47 2014 - 2015 的崩塌地資訊

## 二、影像資料處理流程

影像處理的第一步是資料前處理，此步驟有兩個目的，對衛星影像進行數值正規化以及產生如 NDVI 之類的輔助判讀資訊。取得的衛星影像可能為因天氣或人為處理在顯示產生些許色差，在送入模型之前須先進行校正。

接著，利用衛星影像的四個不同影像通道 (channel) 產出可輔助模型判斷的有效資訊，根據本計畫第一章所提及之植生樣態資料，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，指數愈大時，代表綠色植物量之增加 (參公式 2-1)。NDVI 是從衛星影像中提取 NIR 與 RED 兩個 Channel 的數值可反應地表的植被狀態；其中，NIR 為近紅外光反射，RED 為紅光反射。當有坡地狀態因崩塌而發生改變時，NDVI 可以作為一個輔助判定的指標，這類資訊即可作為模型訓練時的輔助輸入。接著，利用統計的方式決定衛星影像的切分尺寸，在此需計算所有坡面單元後，再決定切分的最佳尺寸，依此原則將衛星影像分塊。

### (一)衛星影像資料狀況說明

本次共取得衛星影像資料共 52 筆，其中皆含有 PMS 格式的影像，資料涵蓋時間自 2014 年 12 月至 2016 年 2 月，福衛二於 2016 年 8 月除役，因此未具有 2016 年 12 月的影像。其中，包含陳有蘭溪集水區、荖濃溪集水區、旗

山溪集水區共橫跨 13 個網格區塊，其地理位置與圖資標號如圖 3-48、圖 3-49，圖 3-48 為福衛二號的衛星航帶格點區分圖幅，共有 106 格點，本次取得 G033-034、G046-051、G064-068 共 13 個網格的衛星影像圖資。

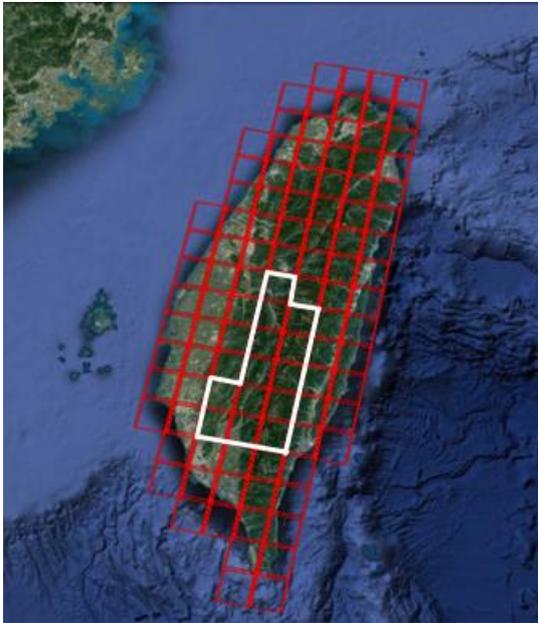


圖 3-48 衛星航帶格點區分圖幅



圖 3-49 網格編號與對應位置

於 2014 至 2015 衛星影像分別如圖 3-50~3-53，其中可看出，每個網格有些微的色差，大致可分為偏藍、偏綠兩種，由圖可知網格 G033、G034 顏色偏藍，其他顏色偏綠。圖 3-50~3-53 中以黃色框選者，為雲覆比例較高的網格；以紅色框選的網格為圖塊形狀不一致的部分，由圖可知，圖 3-50、3-51 中的 G033-034 與圖 3-52、3-53 中的同編號網格，其梯形的形狀不一致；同時，該網格顏色也偏藍，與其他圖塊有明顯差異，以上狀況需處理後才再送入模型。

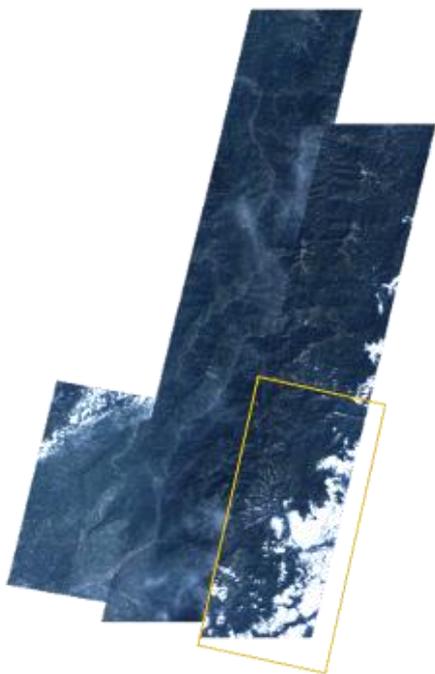


圖 3- 50 2014 年 12 月

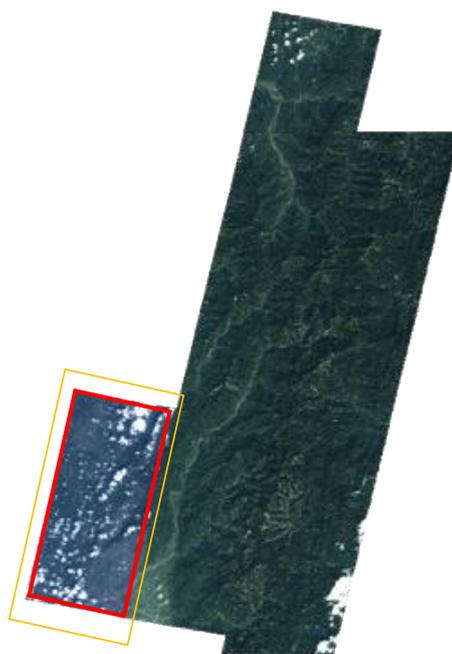


圖 3- 51 2015 年 10 月



圖 3- 52 2015 年 12 月

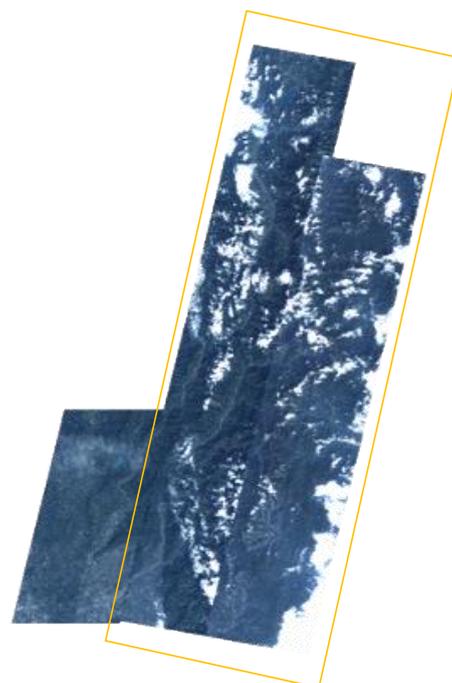


圖 3- 53 2016 年 2 月

## (二) 衛星影像資料處理

從取得的網格資料中，可看出網格內有資料的部分為梯形形狀，邊緣的部分為無資料的黑色區塊。為了避免資料處理時取出沒有數值的資料，每個衛星影像網格須先進行遺漏值填補 (Missing Value Imputation, MVI)，以現有資料的網格為其進行填補遺漏值。以 G050 為例，將其鄰近的 G033、G067 等圖塊進行缺漏修補。



圖 3-54 G050 修補前

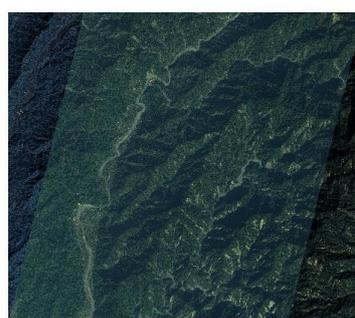


圖 3-55 G050 修補後

接著，利用影像處理套件(GDAL)將 2014 及 2015 的崩塌標示繪製於圖塊上，在網格資料上切出一個 256x256 pixel 的大小影像單元，每塊移動 64 pixel。程式會檢查影像單元中的數值是否為全黑(無資料)，這類資料無法作為訓練及驗證用。

每個切分出的影像單元會依照原本的圖塊中心進行區分，例如，G050 這張修補的圖中含有 G033、G049、G051、G067 等圖塊資料，使用這些資料補齊的影像單元，會計算其最接近 G033、G049、G051、G067 中哪一個圖塊中心點，在之後切分資料集時作為歸類的依據。目前以 2015 年 12 月的衛星影像作為訓練與測試用圖資，共可以切分出 147,998 個圖塊單元。

## (三) 資料集及其標籤準備

在模型訓練時有兩個準備，第一，我們期待模型從影像數值中，直接辨識真正的為崩塌區塊，因此，訓練用與測試用的影像會取自不同網格，確保模型沒有學習過該網格的資料。因此，在同一時期的衛星影像中，會切分為概念上南、北兩個資料集，交替作為訓練集進行訓練。目前使用的網格資料如表 3-10，G033、G034 因顏色偏差過大資料崩塌標籤極少，未採用於本次訓練中，G046、G064 兩

個網格內未涵蓋崩塌標記資料，因此也不採用於本次訓練中。訓練用資料集每 256x256 取出一圖塊，每塊移動 64 pixel，測試用資料集每 256x256 大小的圖塊，每塊移動 256 pixel，資料數量詳列於表 3-10 中。

表 3-10 FS-2 衛星圖資一覽表

資料及類型	圖資時間	網格編號	圖塊單元數量
訓練集	2015 年 12 月 19 日	G047	13,500
訓練集	2015 年 12 月 19 日	G048	23,227
訓練集	2015 年 12 月 19 日	G049	27,920
訓練集	2015 年 12 月 13 日	G065	12,949
測試集	2015 年 12 月 19 日	G050	2,064
測試集	2015 年 12 月 19 日	G051	547
測試集	2015 年 12 月 13 日	G066	707
測試集	2015 年 12 月 13 日	G067	464
測試集	2015 年 12 月 13 日	G068	347
未採用	2015 年 12 月 31 日	G033	
未採用	2015 年 12 月 31 日	G034	
未採用	2015 年 12 月 19 日	G046	
未採用	2015 年 12 月 13 日	G064	

第二，針對可能是復原地、或可能是陰影的部分進行標籤平滑化(label smoothing)。觀察資料時，人眼可見衛星影像中的崩塌地與正常地的顏色數值，顏色上都偏綠，差異在樹的密度在不一樣，因此，對於目前已有崩塌標記的圖塊單元，為避免訓練時可能會發生的過擬和狀況，目前的衛星影像共有四個通道(channel)，分別為紅(R)、綠(G)、藍(B)、以及 NIR，在此預先做了兩個判定，當 G 通道數值大於 R 通道 1.5 倍時，該地可能為已經開始復原的地區，原本標示為崩塌的地方會由數值 1 降為 0.8。當整體數值量偏低時 G、R、B 三個通道相加數值小於 150 時，該地有可能是陰影，原本標示為崩塌的地方會由數值 1 降為 0.6。

### 三、 衛星影像深度崩塌判釋模型架構設計

本次建立訓練模型達成兩個目標，第一，辨識出衛星影像中的陰影區域，若坡面單元位於陰影中，並需在事後由其鄰近坡面單元判斷是否有崩塌風險，本次使用 D. Liu et al. 在 2021 年所提出的 MSASDNet 並使用 AISD 資料集重新訓練陰影辨識模型，用於本次辨識衛星影像中的陰影區塊；第二，辨識出衛星影像中的崩塌區域，並去除陰影部分之判斷結果；第三，辨識出衛星影像中，未來可能會發生崩塌的區域，並核對這些區域所包含的坡面單元。

為達成辨識出有效衛星影像中的崩塌坡面單元目標，在初本計畫使用 U-NET 網路進行對影像進行語義分割(semantic segmentation)，U-Net 是一種卷積神經網絡(CNN)，由 Olaf Ronneberger、Phillip Fischer 和 Thomas Brox 於 2015 年首次提出，該架構有能力可以在分割生物醫學圖像取得較佳結果，因此常被用於遙感影像或者腫瘤檢測等應用中。U-Net 網路模型如圖 3- 56，U-Net 藉由建立網路間的連結，將深度網路從前段萃取的資訊，也可以有效傳遞到網路的末端，完成利用此深度神經網路架構從衛星影像中分割出崩塌的坡面單元。

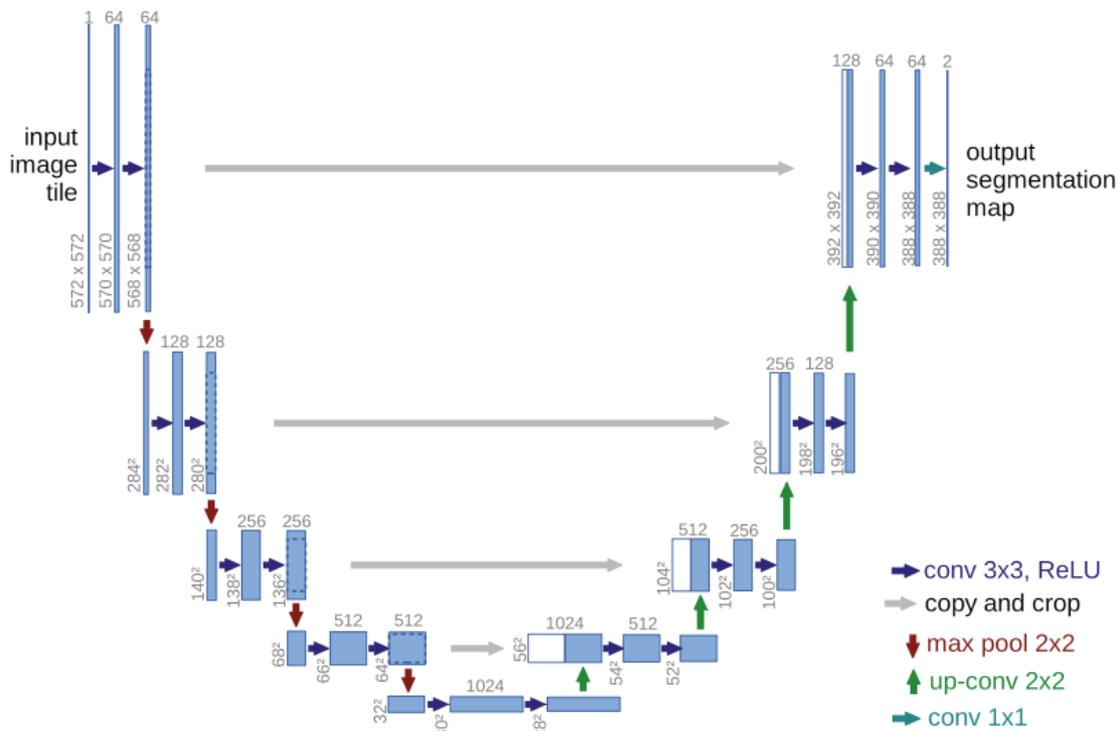


圖 3- 56 U-Net 原始網路架構圖 ssSS

(一)模型網路設計

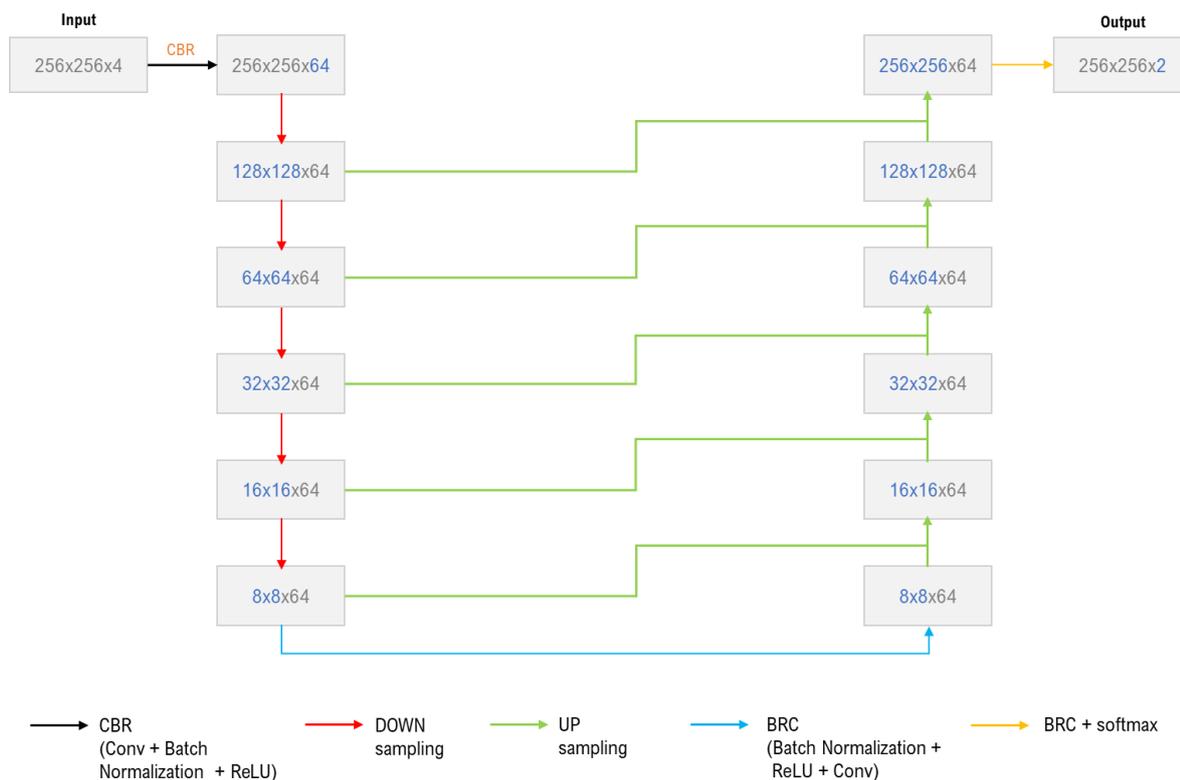


圖 3- 57 邊坡崩塌偵測網路架構圖

本次使用以 U-Net 為基礎修改的網路結構，如圖 3-57 所示，模型輸入為 256x256x4 pixel 大小的單元圖塊，輸出為 256x256x2 的辨識結果，模型對輸入影像進行下採樣(down sampling)與上採樣(up sampling)，逐步萃取出影像特徵，下採樣主要使用 5x5x64 的卷積，下採樣後的影像特徵，會將其送至上採樣後同樣大小的輸入，再次執行上採樣。下/上採樣與其中所使用到的 ResBlock 如圖 3-58。

模型在訓練時會對資料進行資料增強(Data augmentation)，隨機在每個通道乘上 0.9~1.1 不等的數值，對顏色進行一定程度的偏差；同時，在每個資料點隨機加上 ±2.55 之間的數值，數值範圍限制在 0-255，正規化至 0-1 後送入模型。

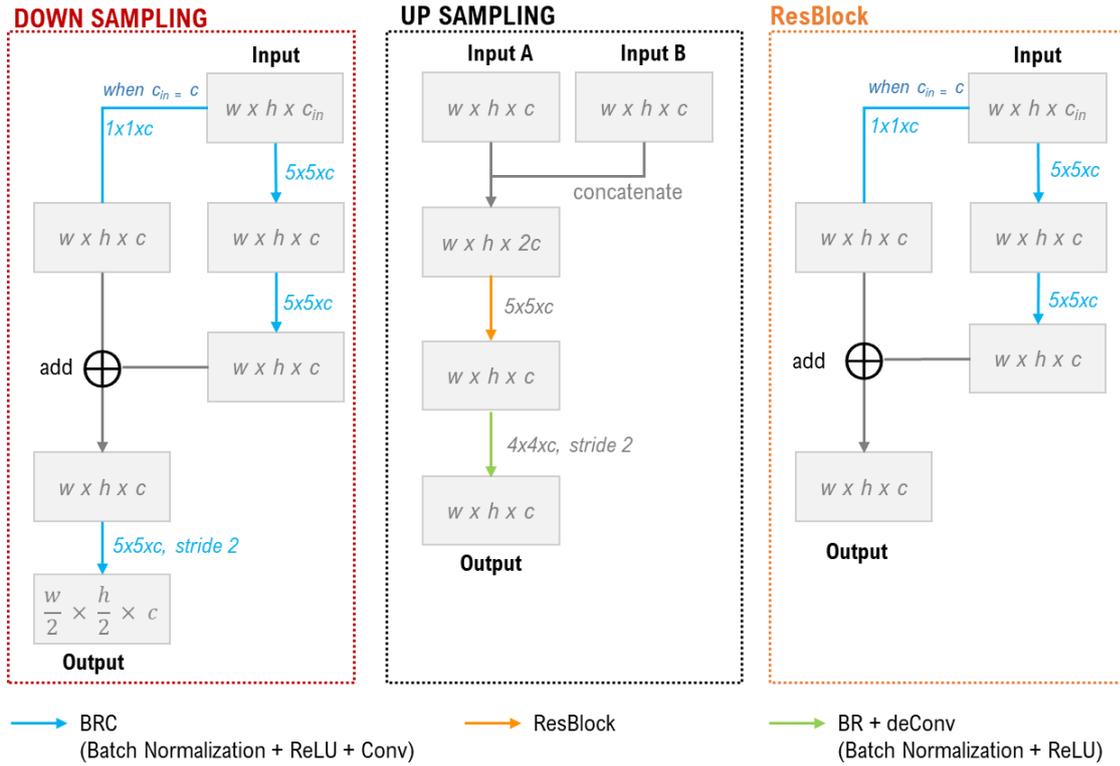


圖 3- 58 上/下採樣與 ResBlock 模型描述

(二)模型辨識結果

模型使用 RTX Titan 圖形處理器進行訓練，訓練時採用 Adam 作為優化器 (optimizer)，學習率 (Learning rate) 設定為 1e-3，Batch size 設定為 64，訓練 20 個 Epochs。每個 Epoch 會產出一個權重檔，從其中選出在測試集中 **precision 最高的**的模型進行驗證。針對模型給出的機率值，嘗試使用不同門檻值判斷其是否為崩塌地，觀察模型在不同門檻值上的表現，混淆矩陣定義如表 3-11，模型結果如表 3-12，表中五個指標的意義說明如下：

表 3- 11 模型混淆矩陣

	真實	崩塌地	正常
預測			
崩塌地		TP	FP
正常		FN	TN

1. F1-Score：用於表示模型整體的表現，同時考慮 precision 和 recall 兩個指標，平衡地評估該模型的效能，當數值越趨近於 1，表示 precision 和 recall

都有很高的值，模型效能越佳。

$$F1 - score = 2 \times \frac{precision \times recall}{precision + recall}$$

2. IoU(Intersection-Over-Union)，是一個用於量化真實框與預測框之間的重疊程度，如圖。在 AI 領域中常用於評估 object detection 和 segmentation 的正確程度，IoU 表示真的崩塌區域和模型預測崩塌區域的重疊比例。

$$IoU = TP / (TP + FP + FN)$$

3. 準確率(Accuary)：用於評估模型正確判斷崩塌地以及正確判斷為正常地佔所有數量的比例。

$$Accuary = (TP + TN) / (TP + TN + FP + FN)$$

4. 精確率(Precision)：用於表示模型判斷為崩塌地的區域中，正確判定崩塌地的比例。

$$Precision = TP / (TP + FP)$$

5. 召回率(Recall)：用於表示真實為崩塌地中，模型判定為崩塌地的比例。

$$Recall = TP / (TP + FN)$$

表 3-12 不同閾值下的模型表現

閾值	F1-Score	IoU	準確率	精確率	召回率
0.99	0.329	0.197	0.928	0.847	0.204
0.98	0.419	0.265	0.933	0.844	0.279
0.97	0.471	0.308	0.937	0.837	0.327
0.96	0.505	0.338	0.939	0.829	0.363
0.95	0.529	0.360	0.940	0.822	0.390
0.94	0.549	0.378	0.941	0.815	0.413
0.93	0.564	0.393	0.942	0.809	0.433
0.92	0.577	0.405	0.943	0.802	0.450
0.91	0.588	0.416	0.944	0.796	0.466
0.90	0.597	0.425	0.944	0.791	0.479
0.80	0.646	0.477	0.946	0.743	0.571
0.70	0.664	0.497	0.945	0.708	0.625
0.60	0.672	0.506	0.944	0.678	0.665
0.50	0.674	0.508	0.942	0.650	0.700
0.40	0.672	0.506	0.938	0.621	0.733

0.30	0.666	0.499	0.934	0.588	0.768
0.20	0.650	0.482	0.925	0.543	0.811
0.10	0.610	0.439	0.904	0.469	0.871

在崩塌模型門檻值挑選上，一般使用 F1 數值最高者，然而，根據表 3-13，若挑選 F1 最高的門檻植 0.50，模型可信度為 65%，約可涵蓋 70% 已標記崩塌地，其中，與標記崩塌地的面積涵蓋率約為 50%。這表示模型挑選出許多面積廣大的崩塌地區，以作為自動產出崩塌標記的訓練目標來說，誤判的比例太高、面積太大。

若挑選精確率最高的門檻植 0.99，模型可信度為 84%，可涵蓋 20% 已標記崩塌地，其中，與標記崩塌地的面積涵蓋率約為 19%。這表示模型雖然挑選出的區域可信度很高，但卻減少了許多真正可能為崩塌地的區塊，不適合作為自動產出崩塌地標記資訊使用。

因此，改為挑選門檻值為 0.92 最為模型產出判定結果，該結果表示模型所判定崩塌地的部分有 80% 是可信的，約可涵蓋所有崩塌地中的 45%，其中，與崩塌地的面積涵蓋率約為 40%。若觀察所有門檻值的 IoU，本模型最高值為 50%，挑選此門檻值可達模型最佳表現的八成。



圖 3-59 崩塌辨識模型預測崩塌

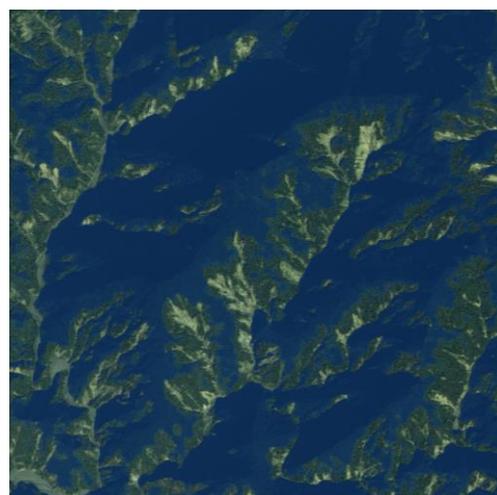


圖 3-60 陰影辨識模型預測為陰影

圖 3-59 顯示出崩塌辨識模型判定 G050 圖像單元效果，由圖中可見，模型將大部分的陰影視為崩塌地，圖 3-60 是陰影模型辨識的效果，可看出模型能夠識別大部分崩塌地的影像，圖 3-61 為真實的崩塌地的標記資料，圖 3-62 中的紅

色部分為去除陰影後模型辨識崩塌區塊，黃色為真實的崩塌標記，由圖可見，模型的辨識效果已經分貼近標記資料。

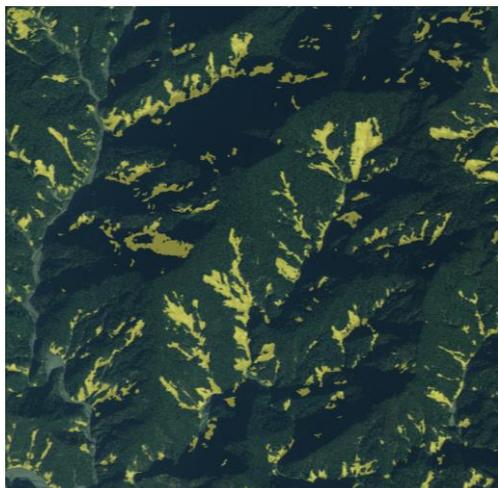


圖 3- 61 單元圖塊真實崩塌標記

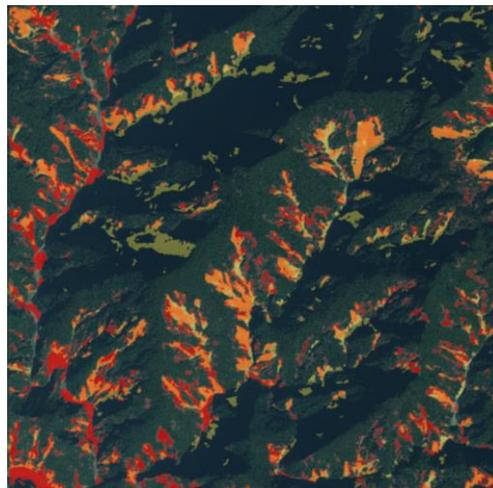


圖 3- 62 預測為崩塌地區去除陰影

崩塌辨識模型目前尚有河床與城鎮部分無法準確判斷，如圖 3-63 為衛星影像原圖，圖 3-64 紅色部分為崩塌模型辨識為崩塌的區塊，河床的衛星影像顏色與崩塌地極為類似，導致模型誤判；而城鎮的部分皆未包含崩塌標記，因此在模型訓練時已將此類資料挪出資料集，故無法識別該類特徵是否為真正的崩塌地，以上兩類情況，未來可提供額外的城鎮、河流流域的地理位置標記，即可從辨識模型中排除。



圖 3- 63 G050 圖塊單元衛星影像原圖

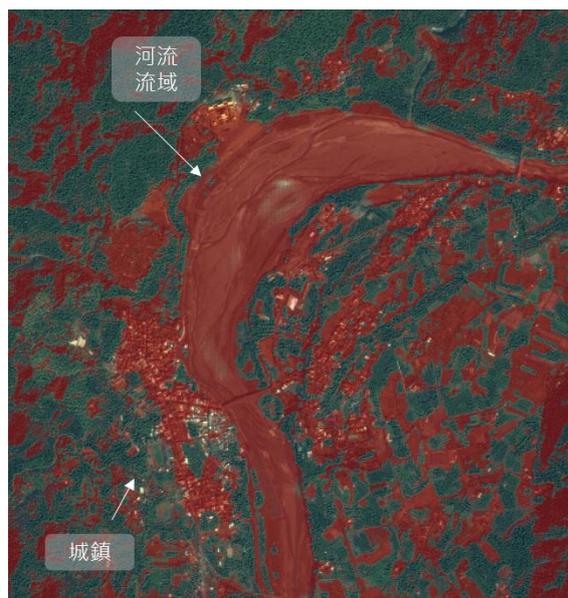


圖 3- 64 G050 崩塌模型預測崩塌範圍

本次使用衛星影像訓練模型取出圖中可能為崩塌的區塊，由辨識結果可見，模型辨識結果可達一定準確程度，可快速地提供研究人員在取得衛星影像後的崩塌地標記，在未來亦可納入其他不同的衛星影像資料，作為風災後快速評估各流域崩塌之情況。



## 第四章 智慧防災物聯網初步規劃

在坡地社區的智慧崩塌防災網絡上，本團隊將嘗試透過現場監測數據、資料傳輸及雲端運算等提出物聯網之整合架構，並設計區域型通報機制以達成智慧化的社區自主防災模式。

在防災物聯網的監測上，目前水土保持局已於過去幾期計畫開始建構大規模崩塌的監測，如：「103 年莫拉克中部及東部災區潛在大規模崩塌地區危險度評估與簡易觀測系統建置」、「104 年非莫拉克災區潛在大規模崩塌地區危險度評估與簡易觀測系統建置」、「110 年度萬山、寶山、來義等五處大規模崩塌地區監測計畫」等。透過這些即時的監測，可快速掌握現場最新的變化狀況，若能結合現場不同位置或不同物理量的監測狀況，並進一步將資料傳輸至在地的雲端伺服器進行加值運算，將能把監測數據轉變為邊坡風險的警示，並提供系統化且科學化的大範圍防災管理資訊，建構山坡地社區邊坡崩塌智慧防災系統，以提前因應可能發生之災害，協助防救災資源調度、避難警戒操作參考。

待上述的結合物聯網概念的監測管理機制可成熟運行時，本團隊將繼續規劃以智慧行動裝置為基礎的區域型通報機制，使坡地社區範圍內的所有智慧行動裝置皆可即時顯示風險警告等資訊，完善山坡地社區自主防災與智慧防災的通報疏散概念。

### 第一節 坡地社區崩塌警戒發布管理流程設計

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。

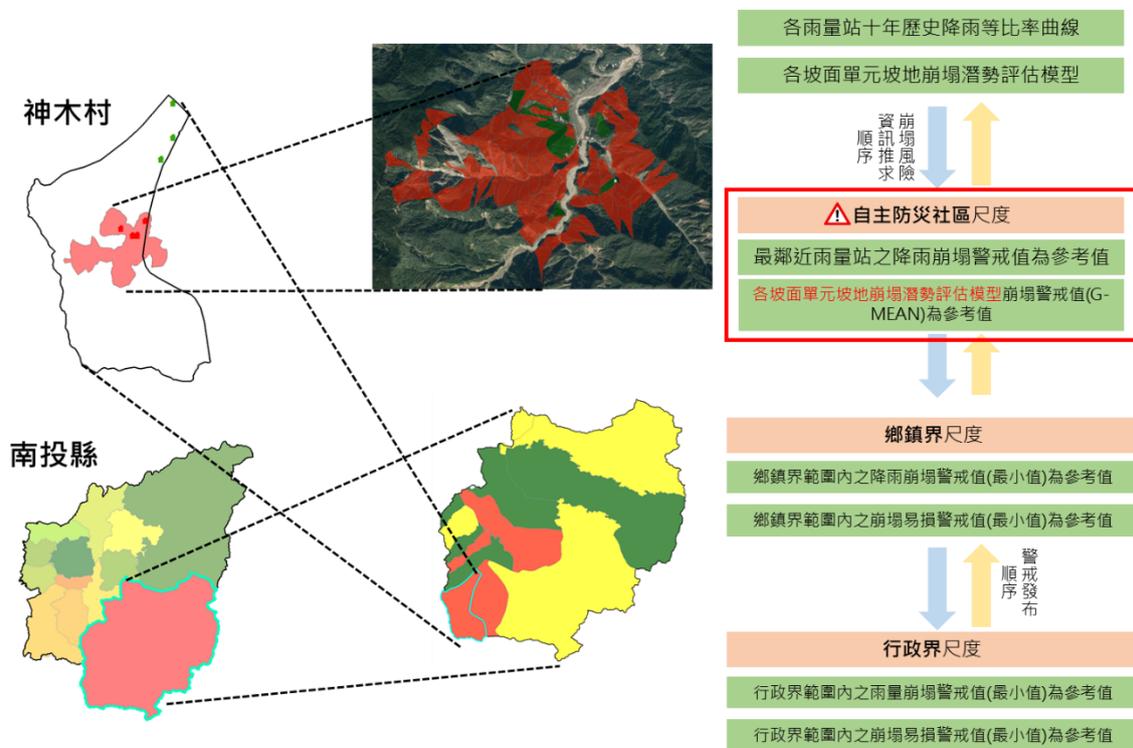


圖 4-2 多尺度崩塌風險資訊與精準防災策略研擬

在崩塌警戒發布流程研擬中，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。

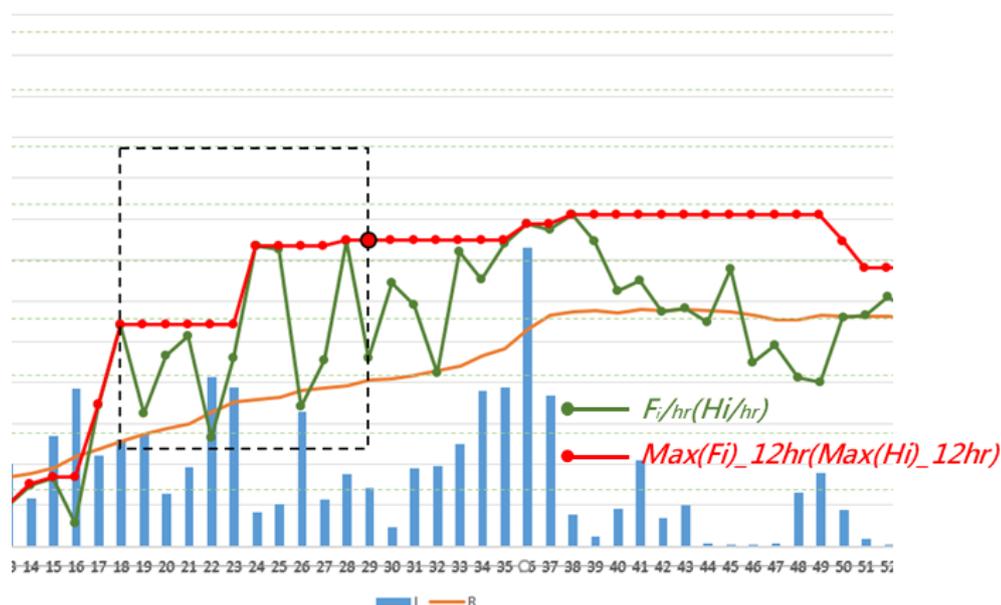


圖 4-3 警戒資訊呈現示意圖



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。

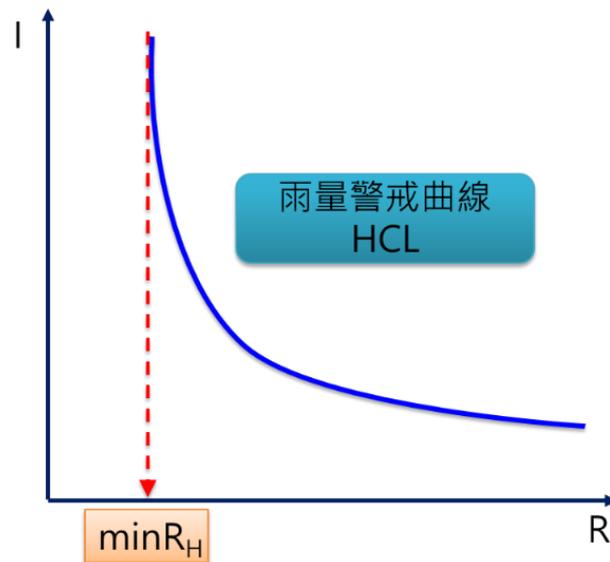


圖 4-5 最小累積降雨警戒值訂定示意圖

## 二、紅色警戒

紅色警戒判斷依據為  $H$  指標( $Max(Hi)_{12hr}$ )及  $F$  指標( $Max(Fi)_{12hr}$ )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)區塊則建議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。

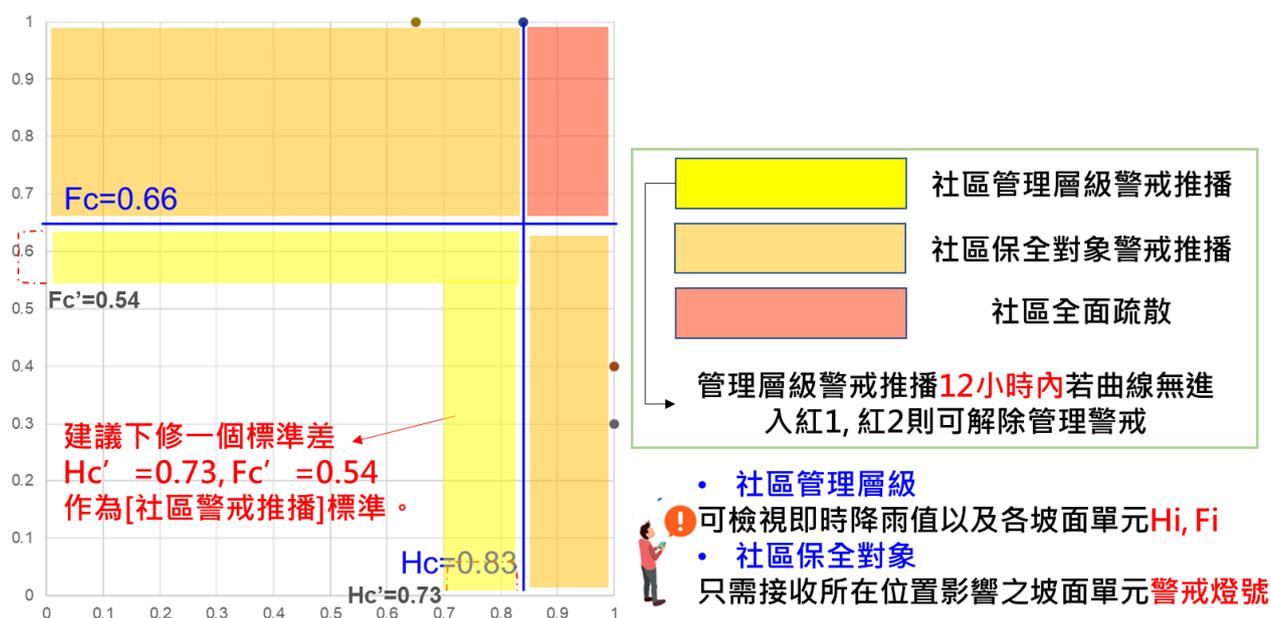


圖 4-6 自主防災警戒推播流程規劃示意圖

### 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  $(H_i, F_i)$

*Fi*)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 整合大規模崩塌監測資訊

為了整合本計畫的崩塌風險警戒模式與水保局其他監測計畫的成果，本團隊將於今年計畫中比對大規模崩塌監測資訊與本計畫預警模式的關聯性，透過大規模崩塌監測資訊探討崩塌誘發機制，並嘗試應用於調整或修正本計畫所提出之崩塌風險警戒模式。

以下將先從本計畫的研究地區選擇三處大規模崩塌樣區進行探討，並以事件測試分析。

### 一、大規模崩塌監測測試樣區

由於本計畫之研究區域集中於陳有蘭溪集水區、荖濃溪集水區以及旗山溪集水區，因此本計畫先於研究區域內選擇三處大規模崩塌監測點位做為整合監測於坡地物聯網的先期研究標的，包含：編號 D382(寶山)、編號 D021(新庄)、編號 D048(萬山)。

各監測站的基本調查資料、地質狀況、歷史災情詳如下所述。

#### (一)高雄市-桃源區-D382(寶山)：

編號 D382 大規模崩塌潛勢地區位於高雄市桃源區寶山里，見圖 4-7(a)，潛勢面積約 51.8 公頃，影響聚落為寶山聚落，保全住戶計有 48 戶，本潛勢範圍未與土石流潛勢溪流影響範圍重合，屬於第二型大規模崩塌潛勢區，但依堆積型態則可歸類為土石流型崩塌。

此潛勢區屬於中央山脈板岩系的潮州層。岩層顯的異常破碎。此處的岩性以硬頁岩及板岩為主，未風化的新鮮岩盤呈暗黑色且具發達的劈理及節理，導致岩盤遭分割而極易產生崩塌滑落。與其他坡度陡峭的地區相同，除了因溪流帶來的河階堆積物外，其餘地區的表面土壤大多是由岩盤風化產生或呈現暫穩態的崩積土。

此地區曾在 2018 年 0823 熱帶低壓期間於荖濃溪林道 18 到 19K 處發生崩塌，造成交通中斷。另曾於 2009 年莫拉克颱風期間造成寶山新藤枝

區域之聚落發生大規模區域地滑，造成多棟房屋傾倒，多數民宅也因地滑導致牆面及地面龜裂。

### (二) 高雄市-杉林區-D021(新庄)：

編號 D021 大規模崩塌潛勢地區位於高雄市杉林區新庄里，見圖 4-7(b)，由台 29 線前往杉林區的司馬路 24 巷可抵達潛勢區，潛勢區位處新庄里境內獅子山周緣，高屏溪上游支流旗山溪左岸邊坡，距坡趾之保全住戶僅 230 公尺潛勢面積約 10.3 公頃，影響聚落為新庄聚落部分住戶，保全住戶計有 20 戶，本潛勢範圍未與土石流潛勢溪流影響範圍重疊，屬於第二型大規模崩塌潛勢區，依其堆積型態則可歸類為重力堆積型崩塌。

此潛勢區之地質層以長枝坑層為主，岩性主要為黑色頁岩與砂頁岩薄互層，在岩性上與六龜礫岩明顯有別。在近斷層時長枝坑層呈高角度的傾斜，有時幾乎鉛直，甚或倒轉，長枝坑層內之岩層明顯受剪動。潛勢區頂部內英斷層通過。

此區至今尚未發生崩塌事件。

### (三) 高雄市-茂林區-D048(萬山)：

編號 D048 大規模崩塌潛勢地區位於高雄市茂林區萬山里，如圖 4-7(c)，潛勢面積約 124.5 公頃，影響聚落為萬山聚落，保全住戶計有 81 戶(110 年統計)，交通上可由台 27 線往高 132 縣道往茂林區萬山部落，本潛勢範圍與高市 DF081 土石流潛勢溪流影響範圍重合，屬於第一型大規模崩塌潛勢區，依其堆積型態則可歸類為堰塞湖型堆積。

潛勢區內岩性以黑色板岩為主，有發育良好的劈理，局部夾灰白或黃色的變質砂岩。坡面表層屬於角礫狀的風化土壤與岩屑。本潛勢區位處濁口溪，河谷地形受岸壁沖蝕而產生山腳基部被切斷的環流丘地形，由於河流的下切作用力強，本地區呈現許多峽谷地形，加上有荖濃斷層和潮州斷層通過，

使得附近區域擁有許多瀑布及斷崖景觀。而本潛勢區域即位於河道右岸（凸岸）之攻擊角。

此地區曾於 2009 年莫拉克颱風期間發生兩處崩塌，造成道路損毀與萬山巷 11 號民宅受損，所幸未造成人員傷亡。

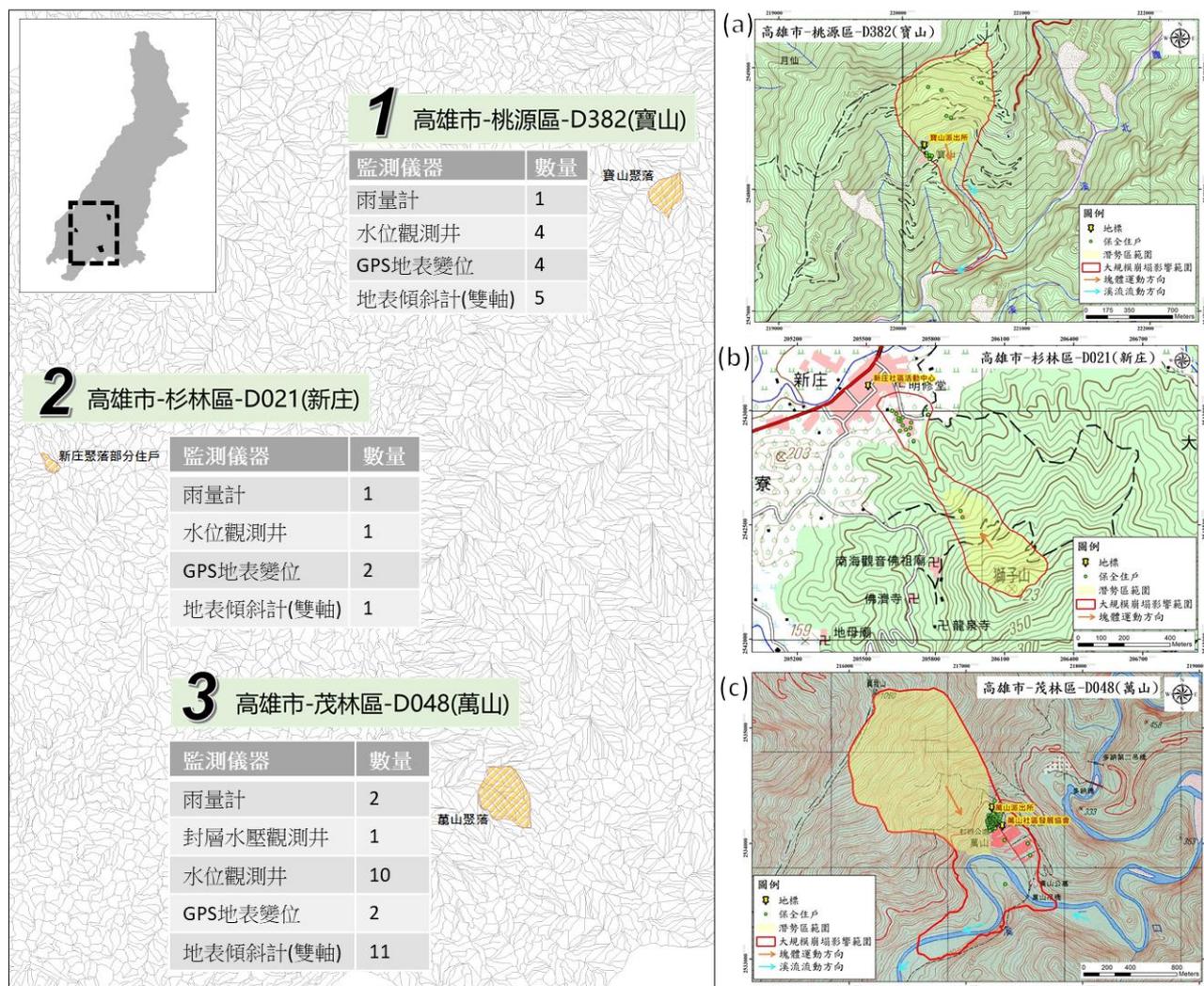


圖 4-7 大規模崩塌監測研究樣區

## 二、 監測資訊

在此三個測站中皆包含 4 種物理量的監測資訊：雨量、地下水位、地表傾斜變位、GPS 地表變位，根據其監測的物理量，我們可將監測物理量與坡面滑動之關係進行分類。

在雨量與地下水位的部分，這兩種物理量皆為主要影響坡面是否穩定的外在影響因素，因此較適合用於早期預警使用，如本計畫使用的雨量指標

等。而坡地地下水位若在降雨時無法有效排出，其地下水位將會不斷上升，針對地下水位的變化對坡面的影響，傳統上則可透過邊坡穩定模擬分析 (slope stability analysis)，模擬坡面的安全係數(factor of safety)，並以安全係數做為崩塌預警的指標，但由於過去現場監測資料較難取得，因此此類預警方法較少使用。

反之，地表傾斜變位與 GPS 地表變位則用於感測坡面是否已發生滑動，並可用於判斷當下是否正處於移動的狀態，因此較適合用於建立緊急疏散的指標，當坡面已在滑動且有持續加速的跡象時，即使其他早期預警如降雨及地下水所建立的指標未達到警戒(如非降雨造成的崩滑)也必須盡速撤離。

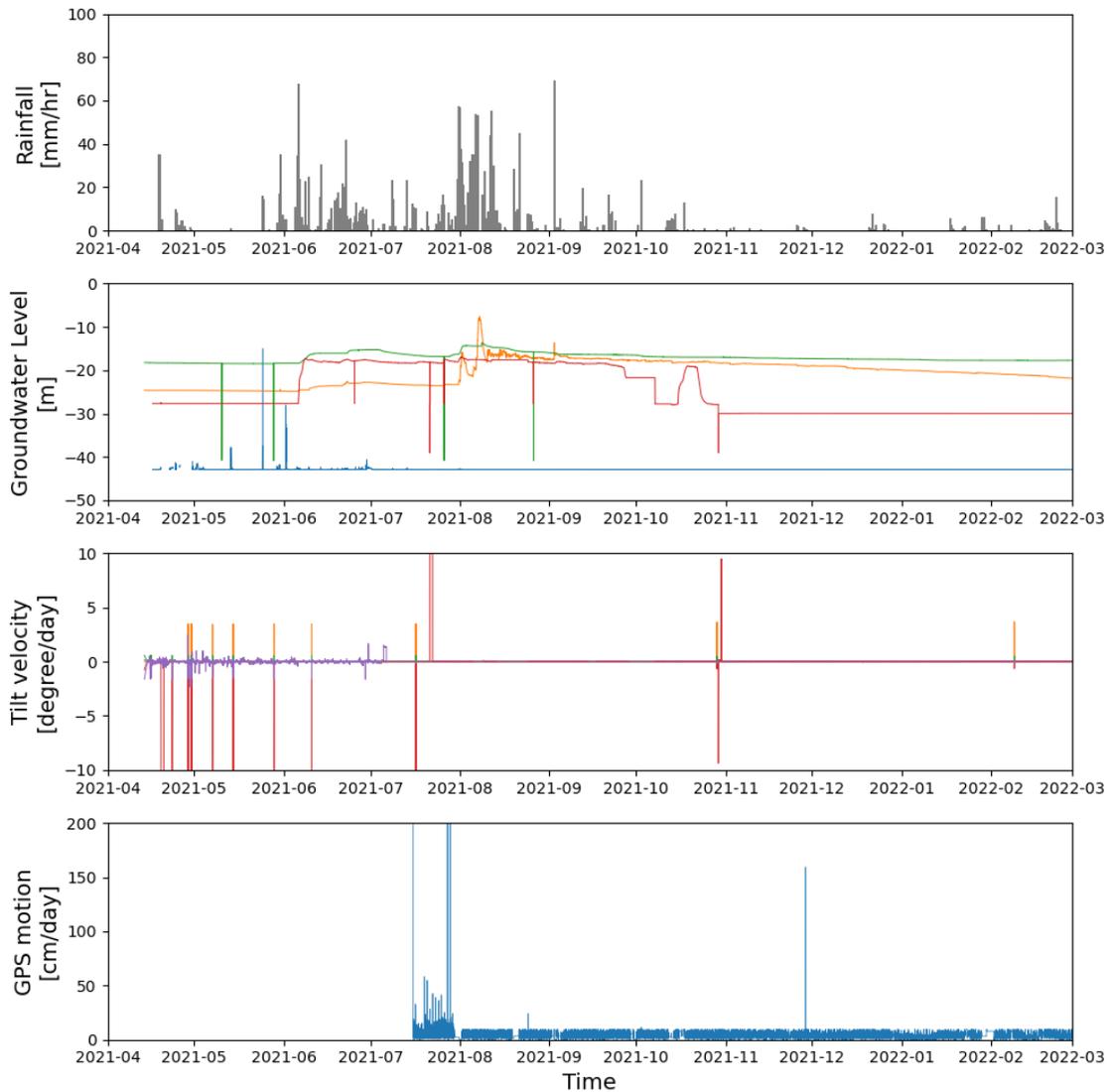


圖 4-8 D382(寶山)大規模崩塌監測資料

在進一步分析前，本團隊先將蒐集之原始資料繪製如圖 4-8~圖 4-10。由於測站建置監測設備始於 110 年，故部分監測資料，如：地下水位、地表傾斜變位始於 110 年 4 月中後，而 GPS 地表變位則皆始於 110 年 7 月中。

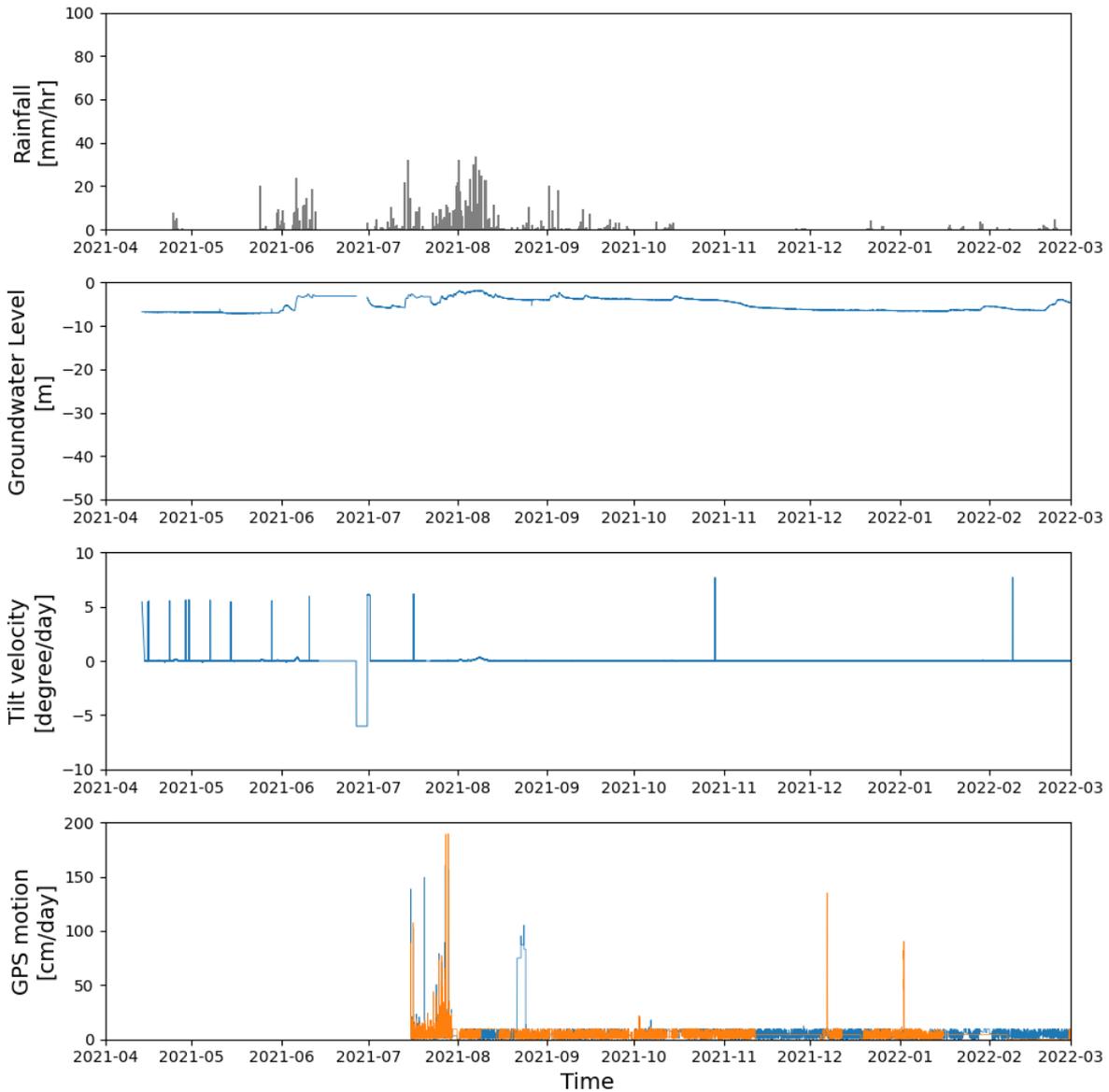


圖 4-9 D021(新庄)大規模崩塌監測資料

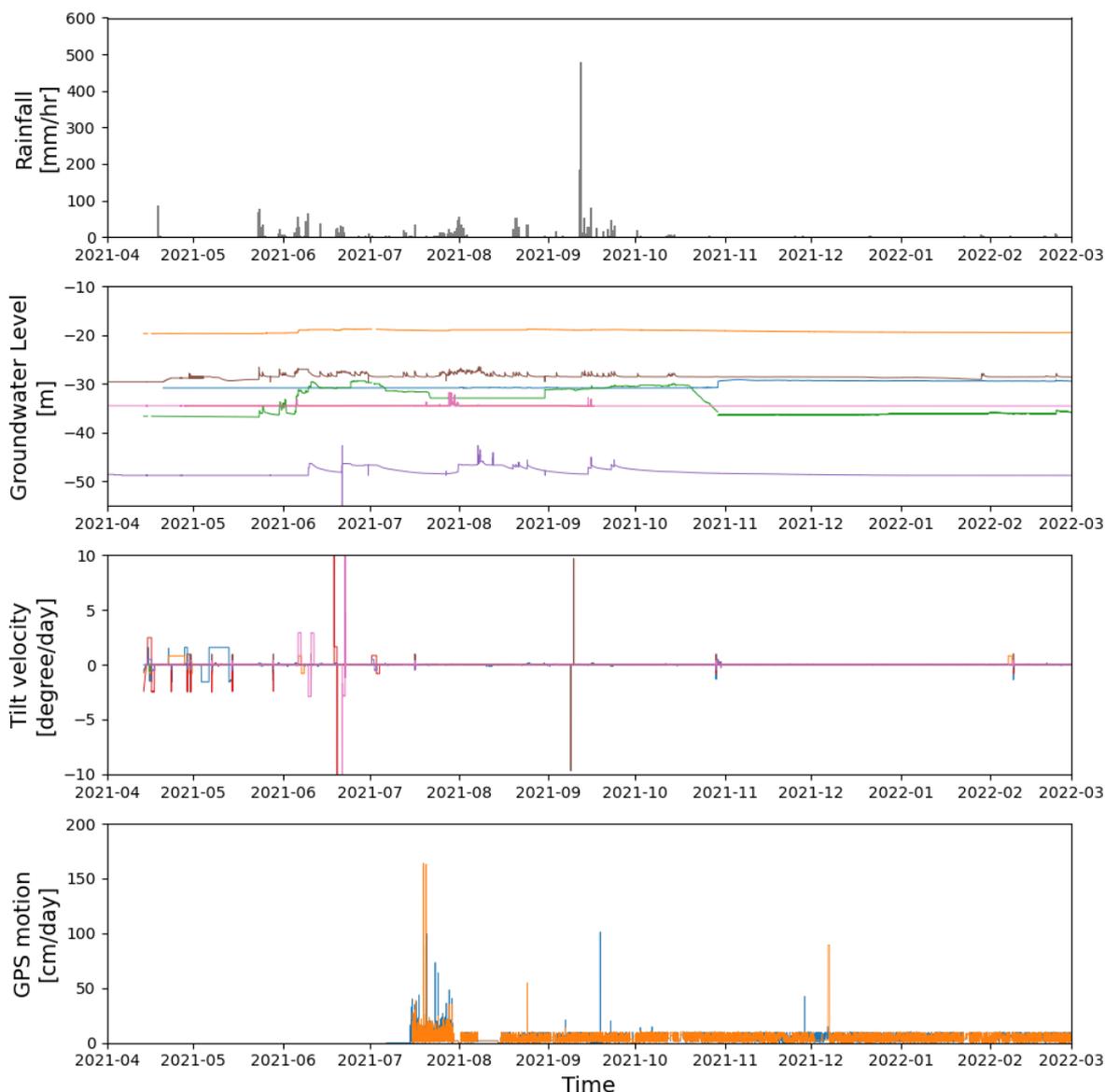


圖 4-10 D048(萬山)大規模崩塌監測資料

從圖 4- 8~圖 4- 10 可發現，地下水水位與雨量有較大的關聯性，但不同位置地下水位的對於降雨反應的敏感度不盡相同，因此本團隊將接續調查地下水位於坡面的相對位置，由上邊坡至下邊坡重新排序分析其變化，嘗試分析邊坡滑動風險的誘發機制。

針對地表傾斜變位與 GPS 地表變位雖然於「110 年度萬山、寶山、來義等五處大規模崩塌地區監測計畫」有嘗試訂定警戒管理值，但尚處於測試階段，因此本團隊將先從原始數據來分析是否已有滑動跡象。

### 第三節 坡地社區崩塌風險警戒發布以及大規模崩塌監測研析

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 處重點聚落以及 1 處大規模崩塌潛勢區域，作為崩塌防災社區管理可行性評估之對象，分別為新開聚落以及寶山聚落，並實測模擬去年度(110)之盧碧颱風暨 0806 水災的逐時降雨的社區崩塌風險警戒發布管理推播試作，在雨場開始前，所需關注之對象為 1. 重點社區鄰近之雨量站，2. 重點社區範圍內所有之坡面單元，3. 重點聚落之崩塌風險警戒機制圖，如下圖 4-11 及圖 4-12 所示：

其中在大規模崩塌潛勢範圍之寶山聚落亦將研析其與大規模崩塌監測數據與本計畫評估地崩塌風險趨勢線進行研析比對，並探討後續大規模崩塌監測數據調整該區域警戒門檻機制以及整合管理的可行性。

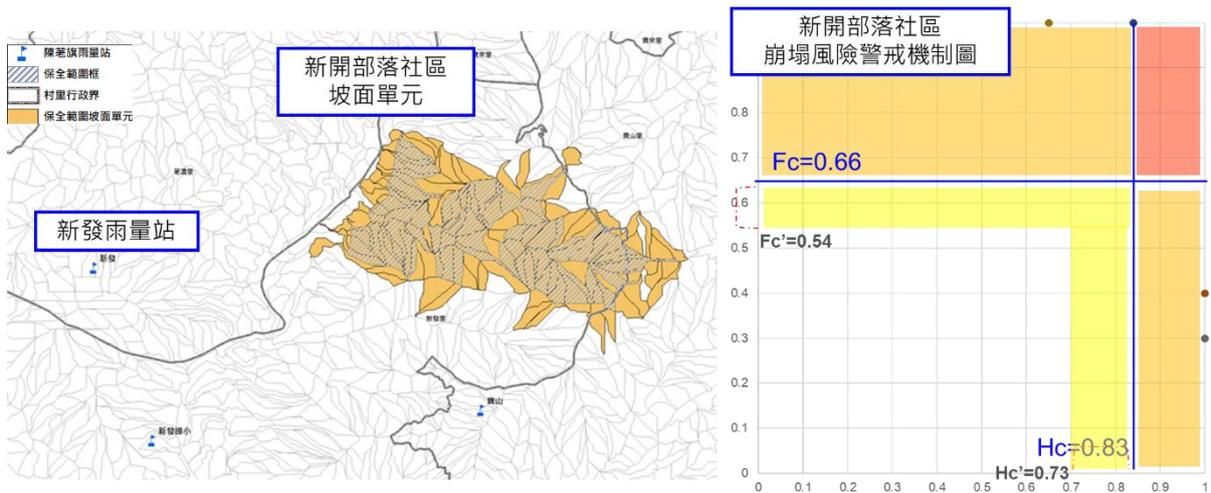


圖 4-11 新發聚落災害管理單元關注對象說明圖

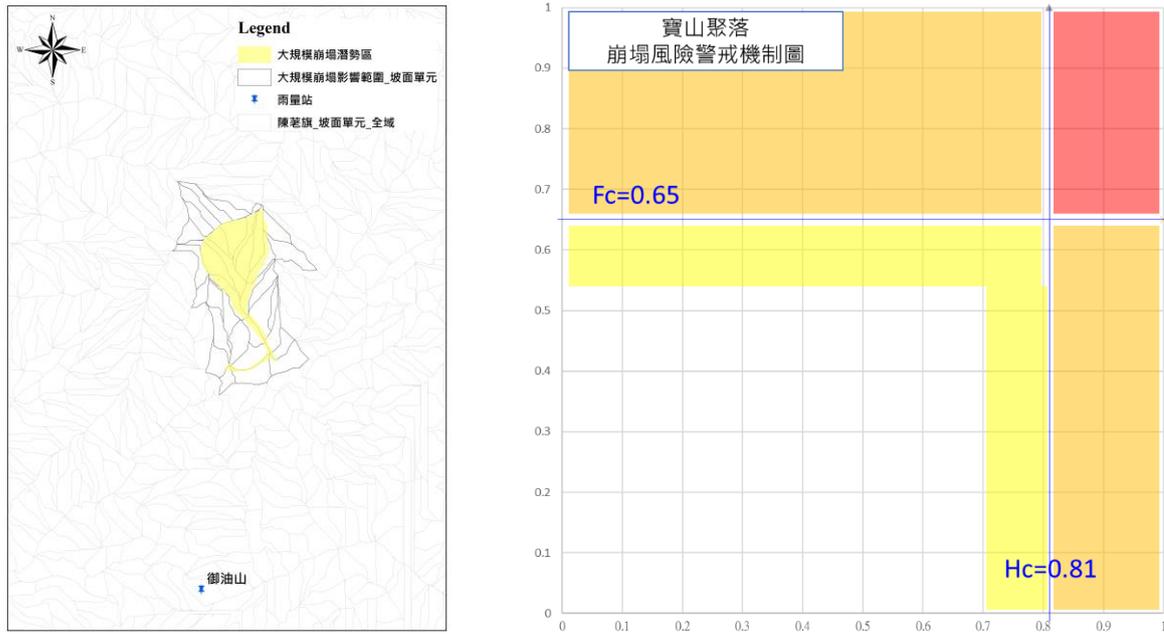
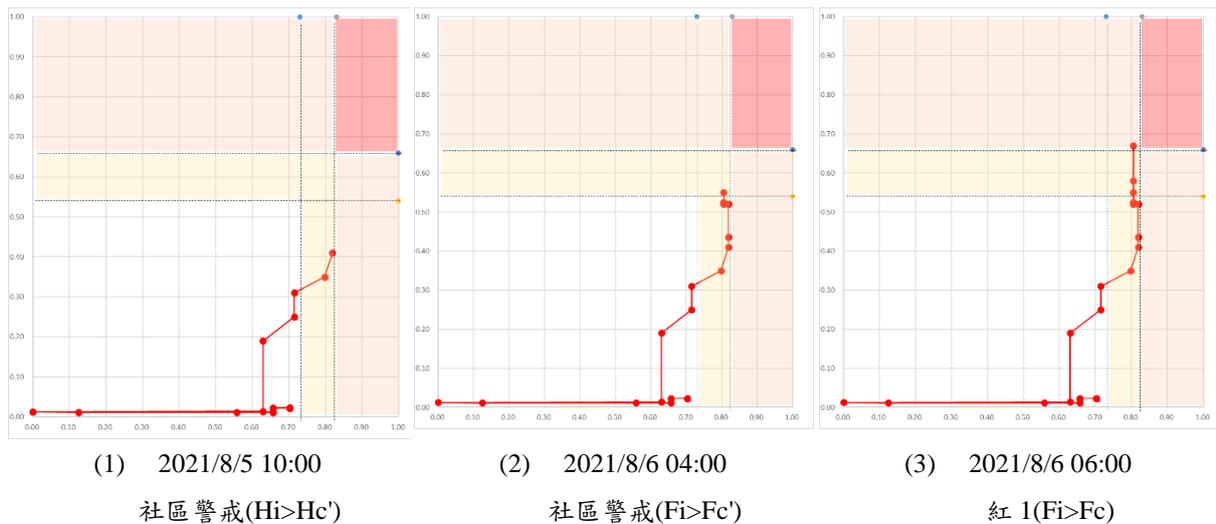


圖 4-12 寶山聚落災害管理單元關注對象說明圖

一、新發聚落於盧碧颱風暨 0806 水災分析

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- 13(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 小時後，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- 13(3)。而紅 1 警戒維持 8 小時後，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- 13(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 4-13(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 4-13(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 4-13(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 4-13(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 4-14 所示。



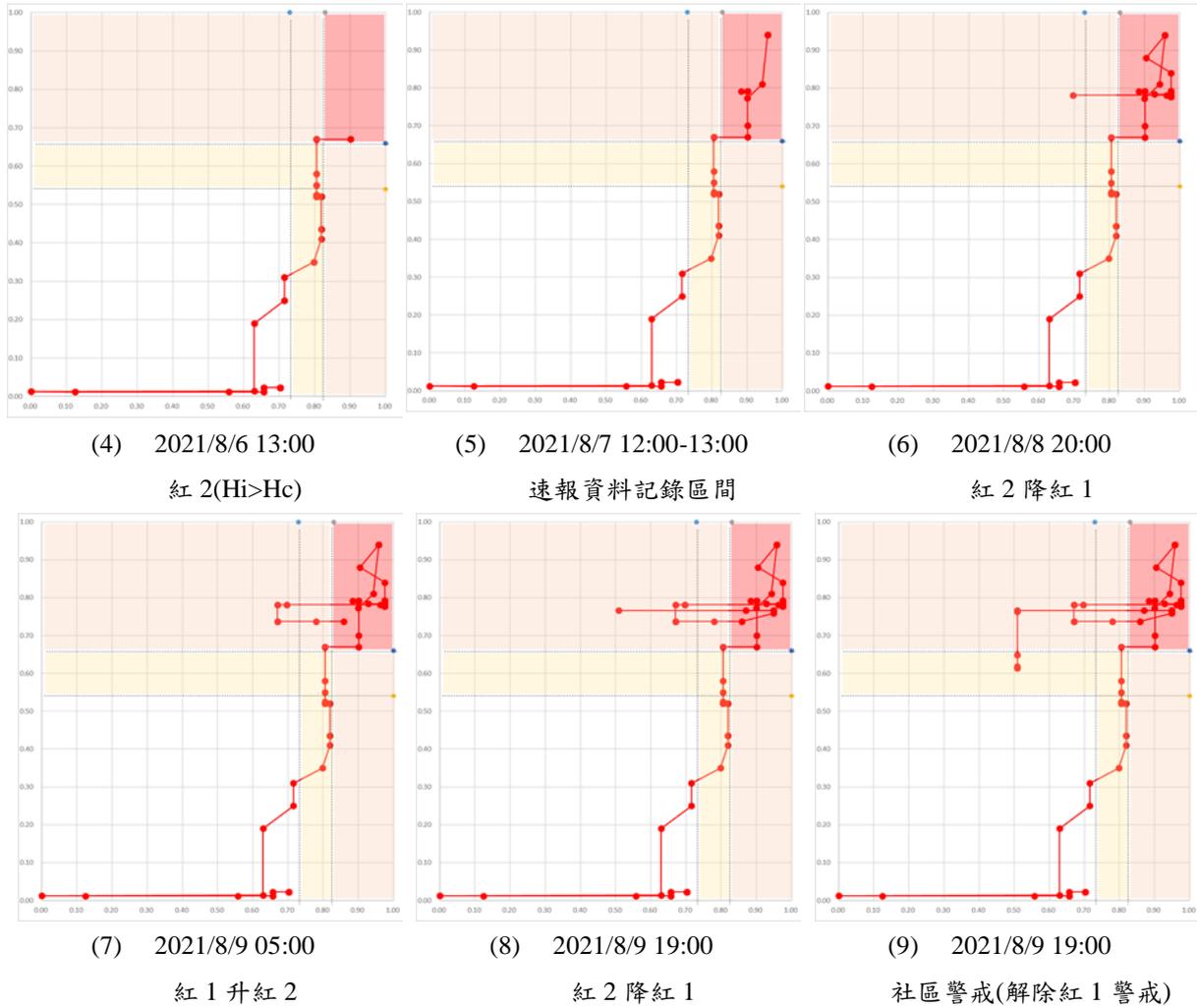


圖 4-13 新開部落社區於盧碧颱風暨 0806 水災降雨歷程於崩塌風險警戒機制歷程

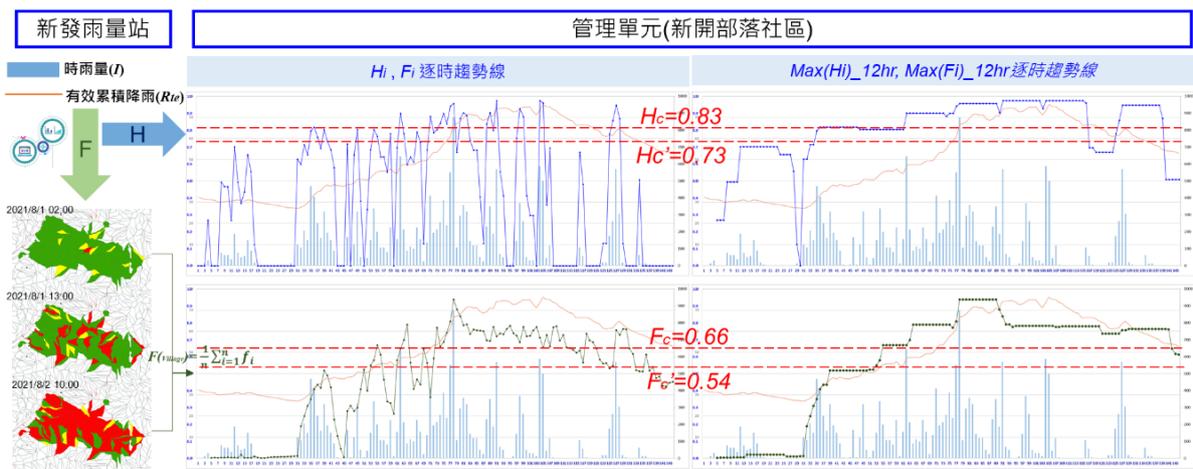


圖 4-14 新開部落社區於盧碧颱風暨 0806 水災降雨歷程於 H 指標以及 F 指標歷時趨勢線

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- 15，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。

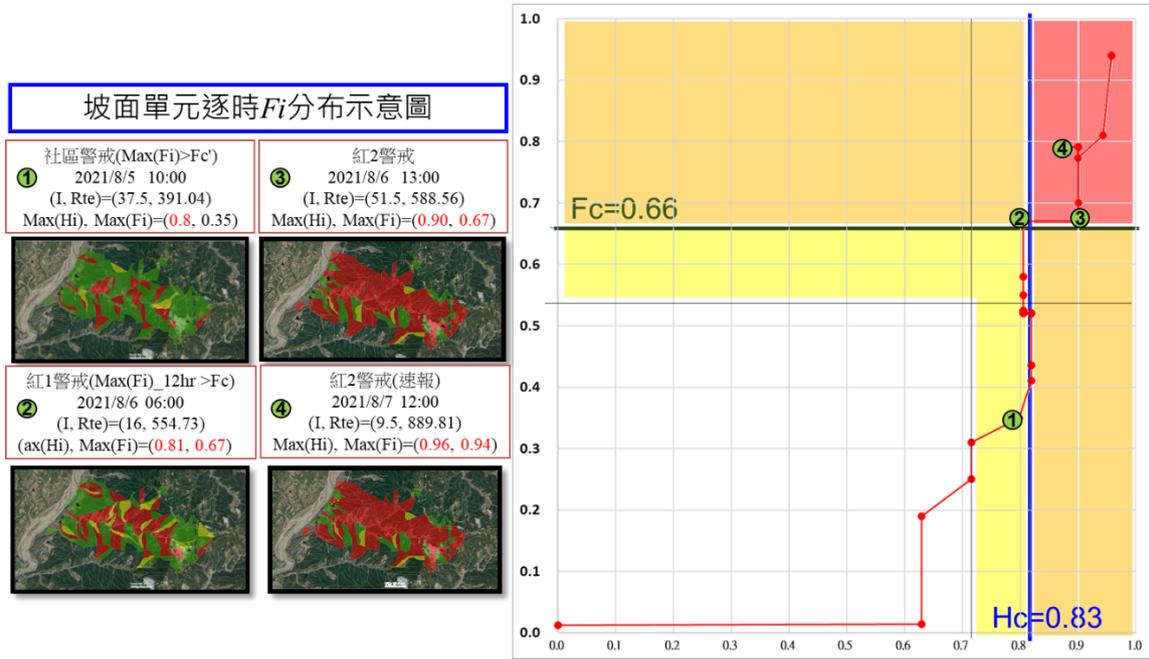


圖 4- 15 新開部落社區於盧碧颱風暨 0806 水災降雨歷時對應坡面單元崩塌潛勢分布圖

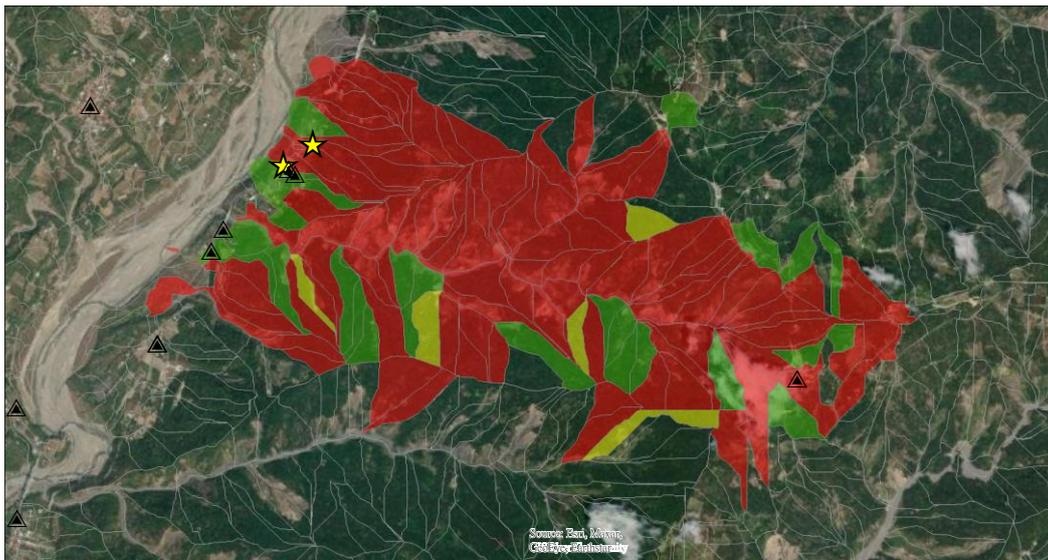


圖 4- 16 新開部落社區於盧碧颱風暨 0806 水災降雨速報資料對應坡面單元崩塌潛勢分布圖



圖 4-17 盧碧颱風暨 0806 水災於 2021/08/07 12:00 之速報資料

110.06.10版 (初步資料尚未經委員審查, 僅供參考)

# 110年盧碧颱風暨0806水災重大土石災例最速報

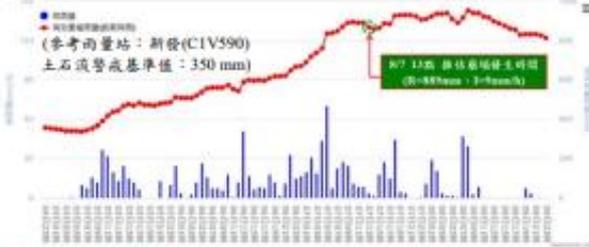
110年盧碧颱風暨  
0806水災

## 高雄市一六龜區新發里

110年盧碧颱風暨0806水災-高雄六龜-002

- ◆災害發生位置：高133鄉道橫園渡山莊旁野溪
- ◆災害發生時間：08月07日13時00分
- ◆災害類型：土石流
- ◆累積雨量：889mm

- 註1：降雨紅體圖資料來源—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：高133鄉道橫園渡山莊旁無名野溪發生土石流，推測發生原因為08月05日至08月07日之長時間陣雨，造成河岸邊坡土壤含水量上升而崩塌。且於高133鄉道旁溪流中心呈90度轉彎，致使河埔內大量土石淤不及排出，造成溢流，土石於河埔下游開始堆積直至高133鄉道路二側。
- ◆災害規模：崩塌範圍約有二處，一處長約30公尺、寬約40公尺；另一處長約15公尺、寬約40公尺，平均崩塌厚度約0.8公尺，崩塌土方約1,440立方公尺。堆積範圍(扇狀)長約100公尺、寬約50公尺，面積約2,880平方公尺，平均堆積厚度約0.5公尺，堆積量約1,440立方公尺。
- ◆災損統計：掩埋道路約50公尺。



優質、效率、團隊

行政院農業委員會水土保持局

圖 4-18 盧碧颱風暨 0806 水災於 2021/08/07 13:00 之速報資料

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 4-17 及圖 4-18)記錄土石流以及崩塌發生之位置(如下圖 4-16 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。

## 二、寶山聚落於盧碧颱風暨 0806 水災分析

寶山聚落的監測點位共有四處，每處皆設有地下水位觀測井與傾斜儀，而在其中編號 01、02、03 則有設置 GPS 座標變位監測，雨量計則僅設在編號 01 的測站，詳細位置與儀器設置分布如圖 4-19。在測試的事件中，其寶山聚落參考雨量站寶山測站於 0731 豪雨事件之最大有效累積雨量約達 531 毫米，於盧碧颱風及 0806 水災事件之最大有效累積雨量約達 875 毫米，兩次事件期間最大之時雨量約達 70 毫米，降雨組體圖可參圖 4-20 所示。

為了瞭解各監測點位的實際變化狀況，因此本團隊將相同位置但不同類型的資料，如：坡面的代表雨量、地下水位變化與地表傾度變位皆繪製於同一圖中，如：圖 4-20~圖 4-23。由代表雨量與地下水位判斷坡面排水的狀況，並根據地表傾度變位確認坡面是否有滑動的跡象。

在圖 4-20~圖 4-23 中，編號 01 位置(寶山派出所旁)的地下水位變化量最小，近乎不受雨量的影響，應是地表排水、路面截水設施及非透過性鋪面較多，使得雨水入滲的效應較少，而同一位置的傾度變位也都遠小於 100 秒，若依「110 年度萬山、寶山、來義等五處大規模崩塌地區監測計畫」建議之 600 秒作為滑動的門檻值，此處於降雨期間皆屬穩定範圍。

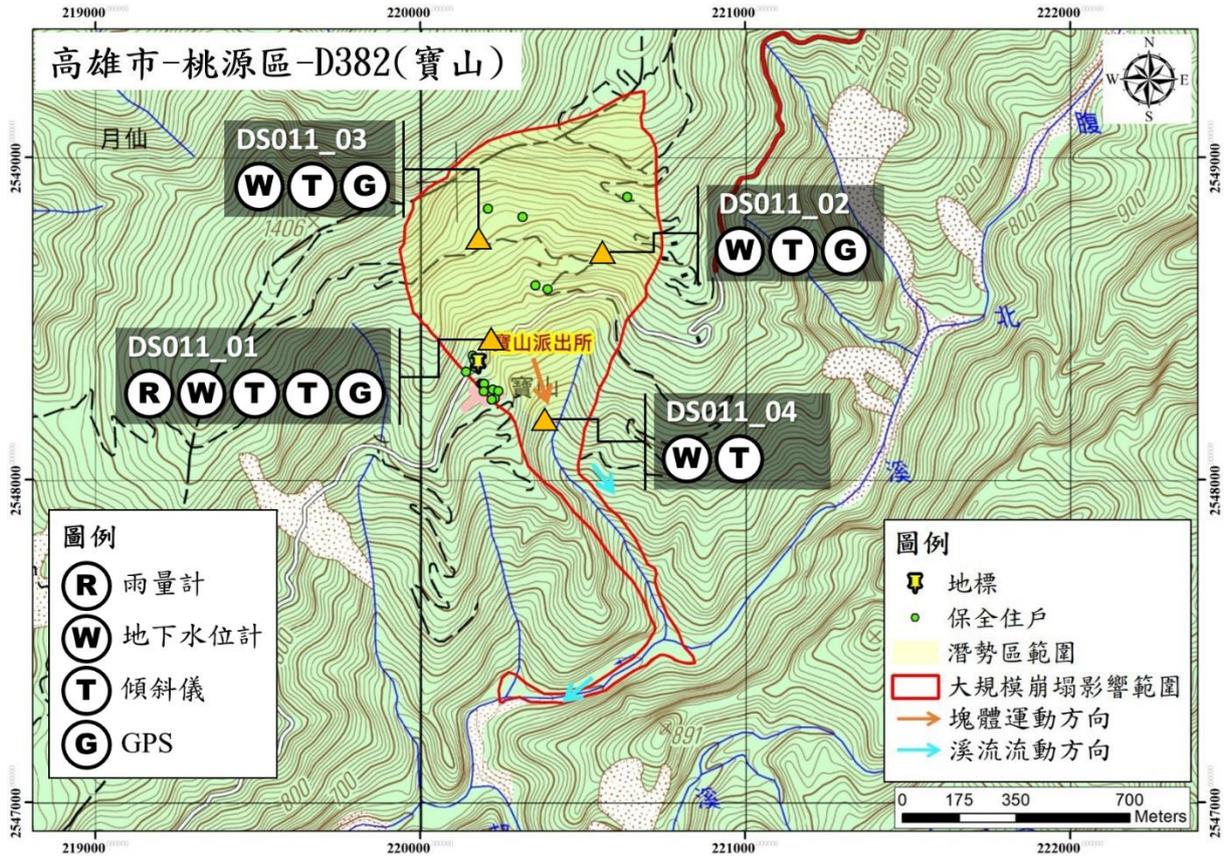


圖 4-19 寶山聚落測站位置分布圖

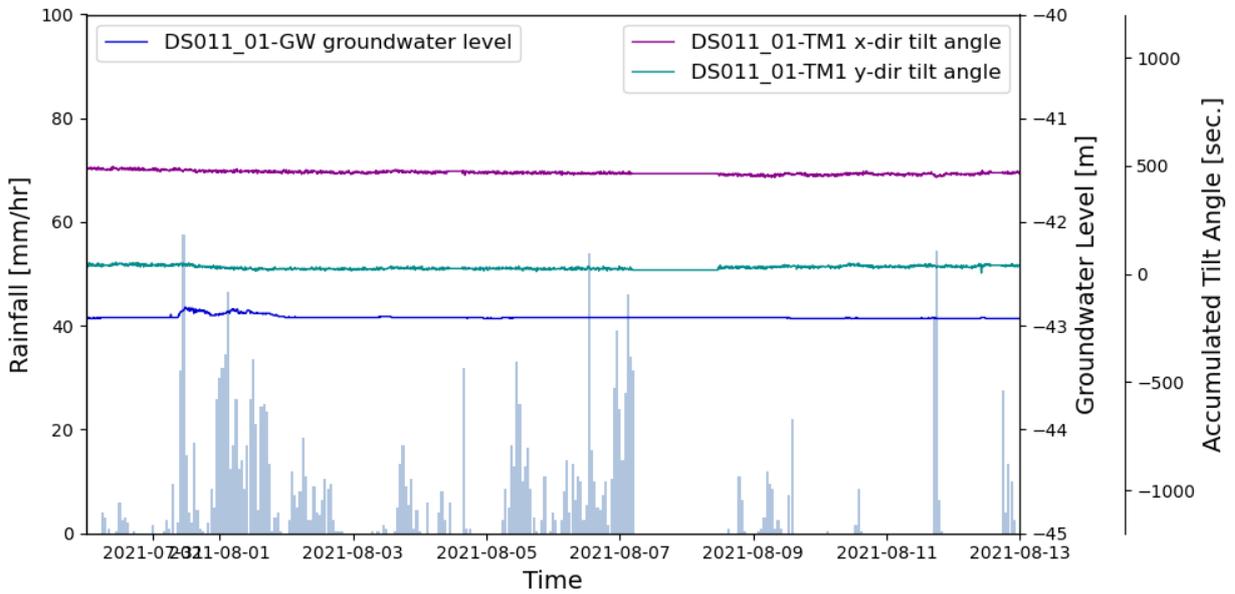


圖 4-20 0731 豪雨至盧碧颱風暨 0806 水災期間 DS011\_01 測站之綜合監測圖

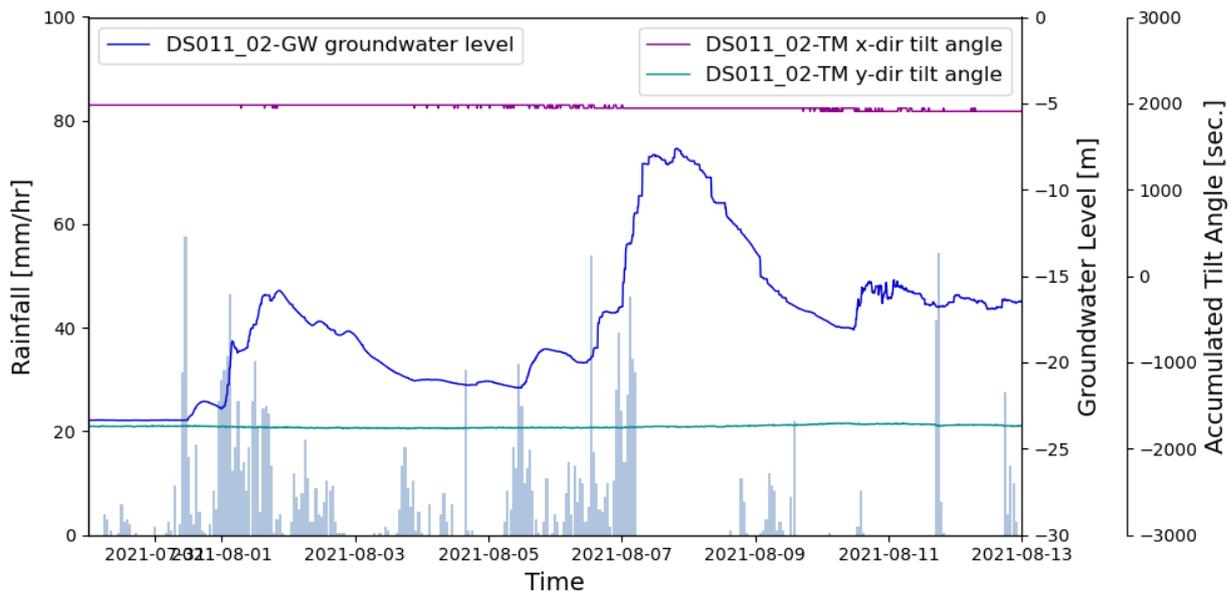


圖 4-21 0731 豪雨至盧碧颱風暨 0806 水災期間 DS011\_02 測站之綜合監測圖

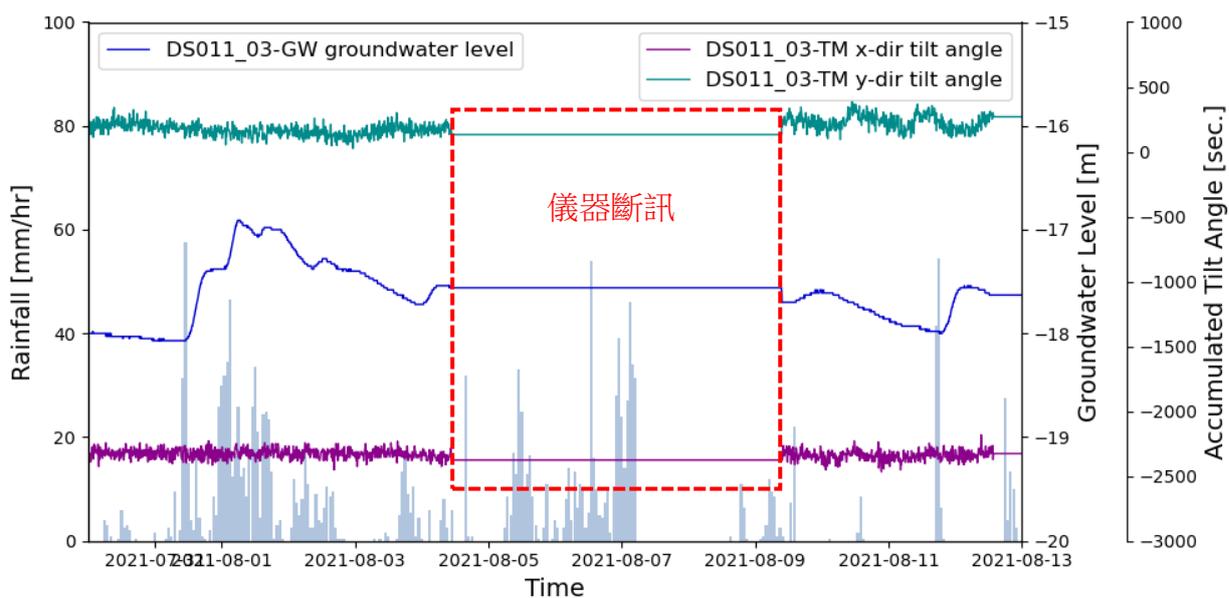


圖 4-22 0731 豪雨至盧碧颱風暨 0806 水災期間 DS011\_03 測站之綜合監測圖

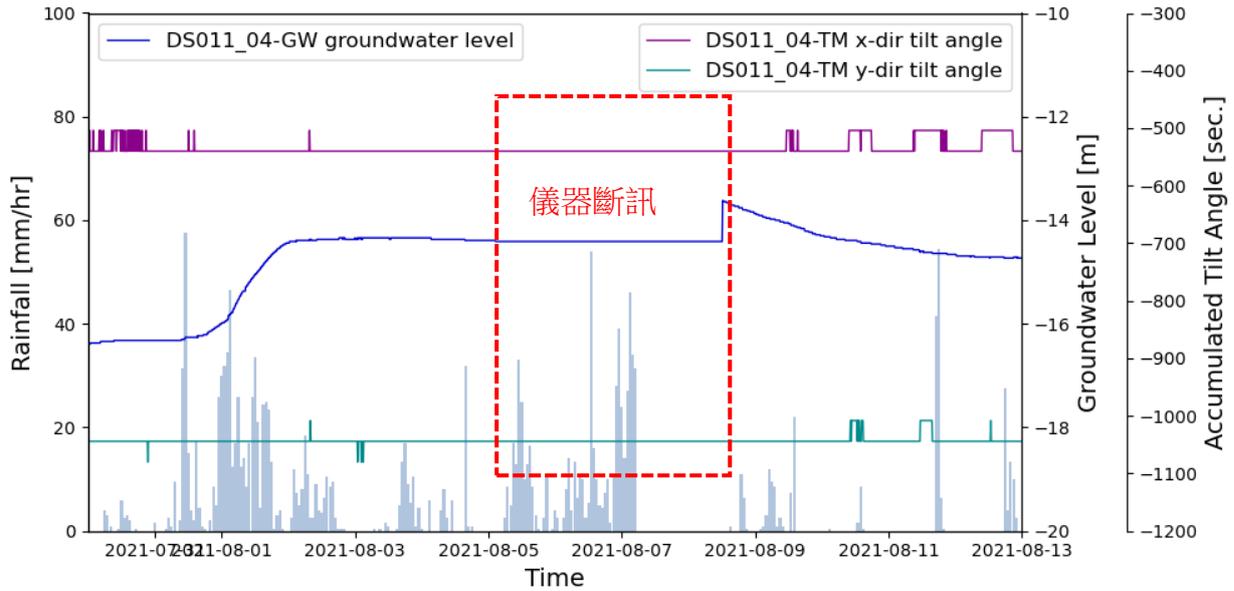


圖 4-23 0731 豪雨至盧碧颱風暨 0806 水災期間 DS011\_04 測站之綜合監測圖

而編號 02、03 分別位於坡面上游處，而編號 04 則位於坡址處，因為這三處皆沒有架設雨量站，因此將以編號 01 雨量站的雨量作為整個坡面的代表雨量並繪製於圖 4-21~圖 4-23 中。在這三處監測點位，其地下水位的變化都較為明顯，編號 02 位置的地下水位變化最劇烈，上升高度達 15 公尺，編號 03 與編號 04 位置(坡址處)的地下水位變化則估計約在 2~5 公尺之間(因部分時間斷訊，因此僅為概估)。這三處的傾度變位也都遠小於 100 秒，因此由監測數據可判斷此坡面於降雨期間並未有滑動跡象。

針對盧碧颱風暨 0806 水災降雨歷程，本計畫也透過 H 指標 ( $Max(Hi)_{12hr}$ )及 F 指標 ( $Max(Fi)_{12hr}$ )進行模擬，並將對應坡面單元崩塌潛勢分布圖繪製如圖 4-24。根據寶山聚落的速報資料中，崩塌位置位在寶來溪，非本計劃範圍，因此透過大規模崩塌資料也間接驗證風險評估的準確性。

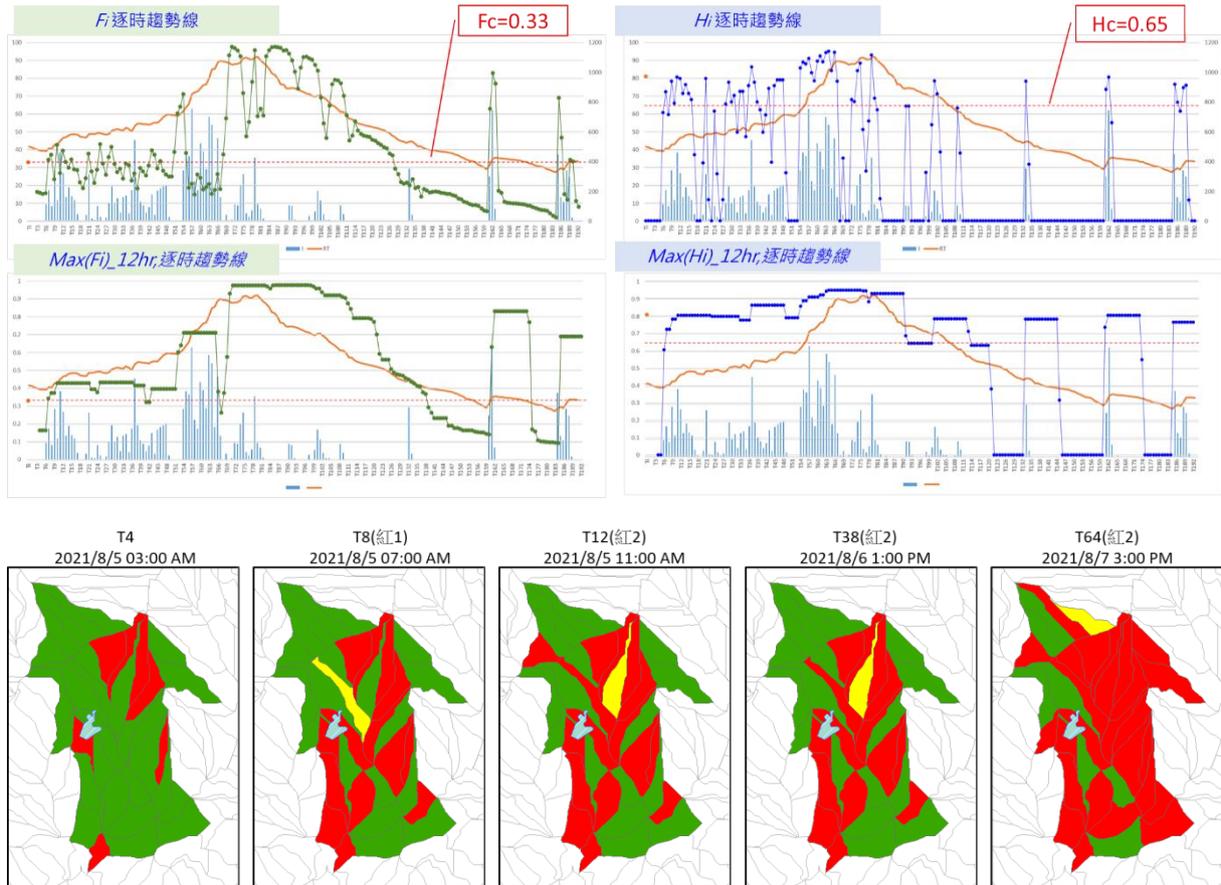


圖 4-24 寶山聚落於盧碧颱風暨 0806 水災降雨歷程之 H 指標、F 指標及對應坡面單元崩塌潛勢分布圖

### 三、 小結

本計畫以盧碧颱風暨 0806 水災為例，以樣區內大規模崩塌測站資訊內容與現行崩塌模式和土石流防災速報進行綜合比較。目前大規模測站中，僅雨量計資訊可進行相關模式之輔助與應用。而針對大規模測站之雨量計與臨近氣象站之雨量計進行崩塌潛勢分析比較中，若採用大規模崩塌測站，可提前四小時進入紅-2 警戒，且警戒結束時間與氣象站結果相同(如：圖 4-25 所示)，顯示可提前提供預警資訊供業務單位進行疏散參考。

由於本計畫之研究區域集中於陳荖旗集水區內，而樣區內選擇大規模崩塌監測點位目前僅包含：編號 D382(寶山)、編號 D021(新庄)、編號 D048(萬山)等三處相關測站，且資料起始時間為 109 年度，故目前資料仍不足夠。建議後續研究可擴大實驗樣區(如：臺南分局)，結合各項大規模崩塌資訊，

進行綜合評估

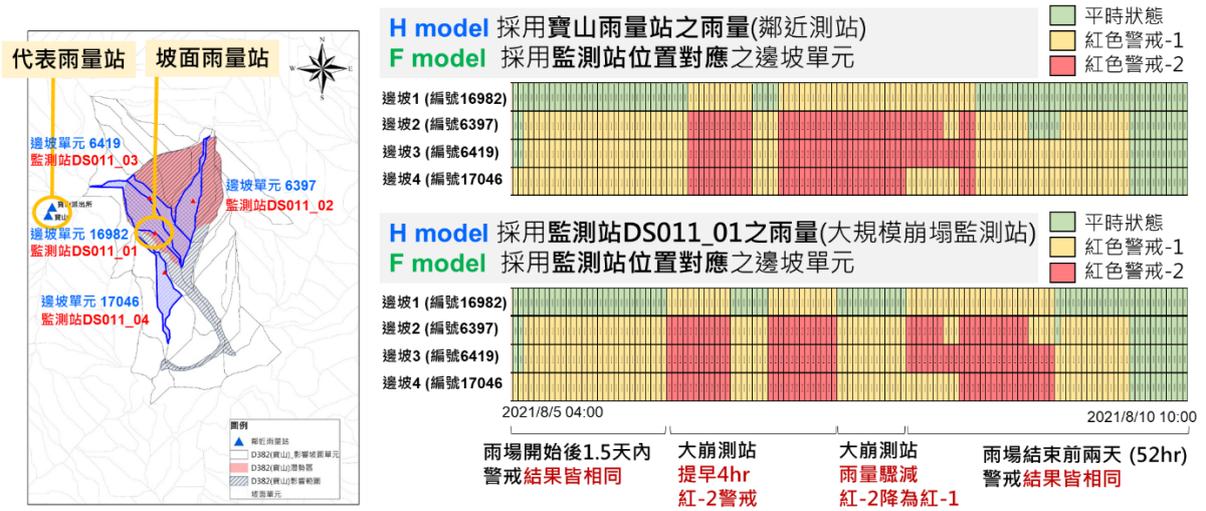


圖 4-25 寶山聚落於盧碧颱風暨 0806 水災之雨量站差異



## 第四節 智慧防災物聯網初步規劃

「智慧防災」並沒有一個正式的定義，但通常指稱包含自動監測、遠距傳輸、具備遠端監控等功能的防災監測應變系統，可協助決策者或權責單位提昇災害預防、應變及搶救復建之機能的一套系統或平台。基本上「智慧防災」的「智慧」要能體現判斷及預警自動化，並進一步能預測災害的發生。但這通常並不容易實現，經常受限於硬體建置成本及軟體功能開發等諸多因素。但隨著新技術、新科技的發展，例如無人載具（UAV）普及，政府資料開放平台（Open Data，例如 LiDAR、衛星影像等），更好用的軟體工具（GIS，協作平台等），智慧防災的實現已經指日可待(黃亦敏，2020)。

根據蘇文瑞等人(2015)，我國展智慧防災的方向可歸納為三重點：(1) 結合物聯網技術，強化防災監測網路；(2) 建立政府與民間的共享與協作機制；(3) 災害巨量資料分析與應用。其中第一項就提到物聯網（IoT）技術，這也是智慧防災的基礎，要藉由 IoT 來建構更強大、更廣泛的防災監測網路。

綜觀上述以及本計畫歷年主辦多項關於坡地社區坡地崩塌風險評估模型之研發，以及相關警戒管理值之訂定，並以重點聚落/社區進行驗證實測工作。本計劃初擬能夠整合本計畫研究能量以及相關政府之監測數據資料，初擬山坡地社區智慧防災物聯網架構，內容分為(1) 監控感測器、(2) 巨量資料、(3) 雲端運算以及(4) 區域通報機制等，以提供使用者整合的場域即時監測資料以及簡潔且具有防災意義性的場域資訊，以下說明：

1. **監控感測器**-整合山坡社區大崩塌潛勢區域之監測設備數值，輔為崩塌警戒狀態的參考依據，並滾動調整崩塌風險警戒發布之時機。
2. **巨量資料**-山坡社區坡面單元管理資料庫以及統整各公私部門 Open data 資料，以及長期環境觀測(地質、天氣等)，加強圖資生產精度與流通速度，運用高解析度遙測影像，發展智慧萃取基礎圖資技術，結合基礎圖資與環境監測資料，快速提供重要地形地標及道路等現

況資料。

3. **雲端運算**-建構符合雲端分析架構之防災網絡，透過現地無線感測器監測數值、降雨即時數值、坡面單元資料於坡地崩塌風險評估模型(降雨危害評估模型(H)以及坡面易損評估模型(F))的即時運算，達到即時達成防災警戒值率定更新、崩塌風險區域劃設等實務防災成果，使防災更智慧化與即時性。主要目標係整合資通訊技術、物聯網及巨量資料成果，結合政府與民間力量，來提高防災、抗災與救災的能力，也提昇對災害應變的能量。
4. **區域通報機制**-透過坡地社區崩塌警戒發布機制的設計，期待能夠在可能災害發生前(社區警戒階段、紅 1 警戒等)，把警報通知傳送給民眾，落實災害發生的緊急應變時，不同資料間的快速串通、防救災資訊傳遞與通報機制，使災情降至最低，實為智慧防災整合最為重要的一環。並可規劃山坡地社區串聯資料平台與發佈管道，連結物業保全監控系統，設置社區管委會電子公布欄(跑馬燈)，或以網站、APP 與社區廣播輔助發布災情通報訊息，整合各項系統元件與發布平台，建置完成山坡地社區智慧防災物聯網系統與服務。

其可藉由資通訊技術、邊坡即時監測與大數據分析平台，可於遠端與網路架構下即時掌握邊坡動態與警戒資訊，並進行即時大數據分析、坡面崩塌風險評估與結果視覺化呈現，以提供系統化、科學化的防災管理資訊，建構山坡地社區邊坡崩塌智慧防災物聯網雛形(如下圖 4- 26 所示)，此外透過整合多元崩塌資訊來源，能夠提供使用者端更多元的服務，亦介接防救災相關公開資料，如氣象局即時雨量以及國家災害防救科技中心公開示警訊息，提前因應可能發生之災害，協助防救災資源調度、避難警戒操作參考。

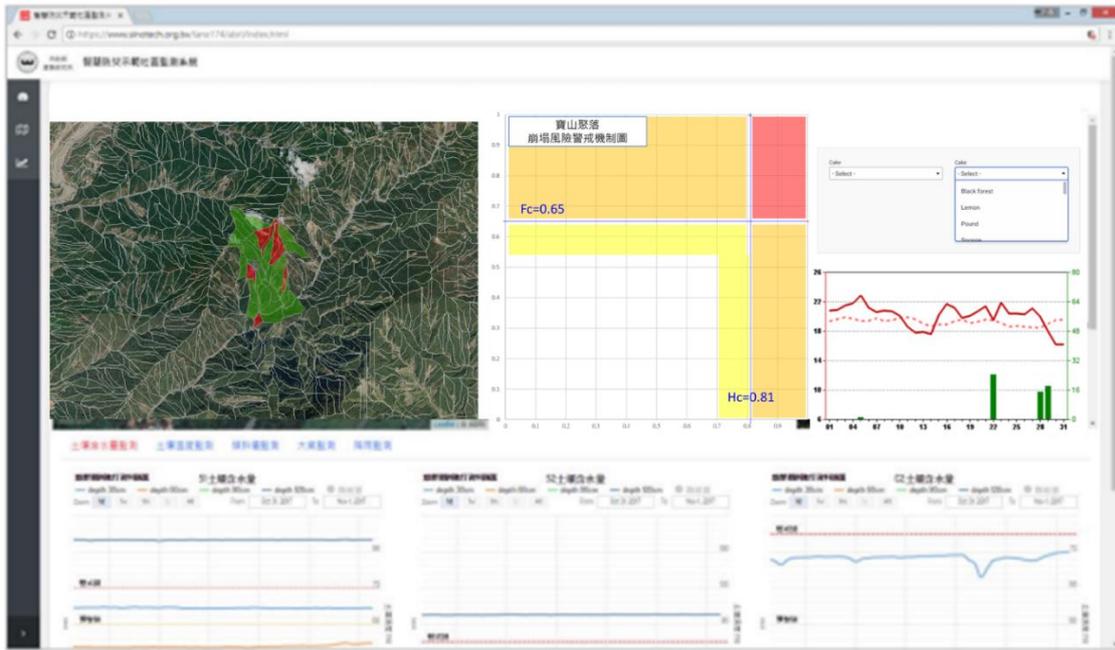


圖 4-26 即時監測資料展示介面示意圖

本計畫在初擬崩塌警戒物聯網資訊平台之架構，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 4-27)。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。

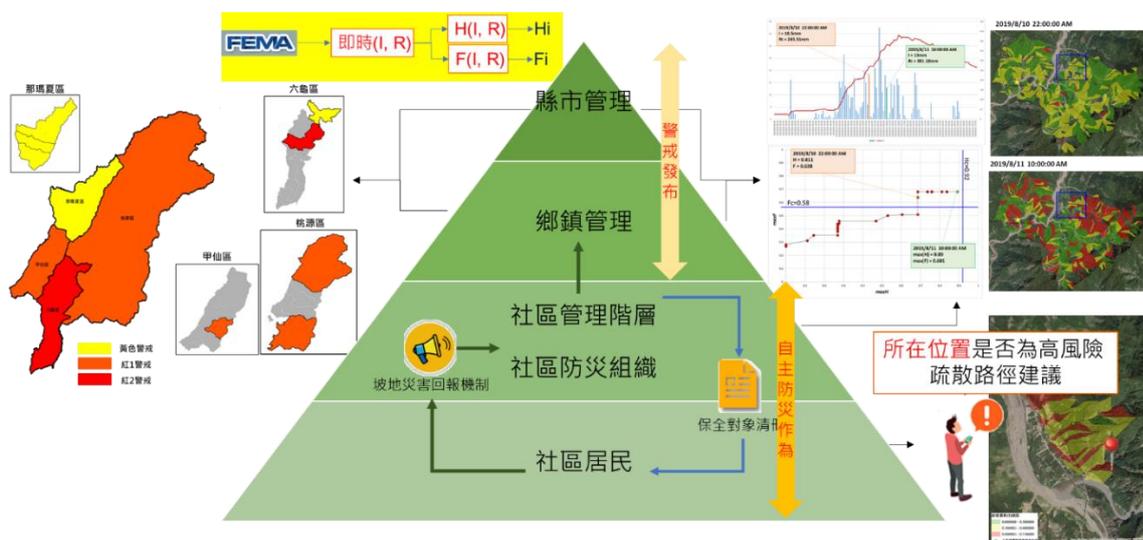


圖 4-27 崩塌災害自主防災資訊管理架構設計



## 第五章 結論與建議

- 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、旗山溪集水區之三處大規模崩塌潛勢區之模型更新(降雨危害評估模型(H))以及 2022 年度植生更新於坡面崩塌評估模型(F)。
- 二、本計畫已完成與國家太空中心之 103 年 12 月、104 年 10-12 月與 105 年 2 月衛星影像蒐集，三個集水區共需取得 13 個區塊的衛星影像資料影像包含四個波段，分別為紅、藍、綠與近紅外波段，影像類型包含 multispectral (MS)、panchromatic (PAN)、Pansharpend Multispectral (PMS)等，並已完成衛星影像深度學習之崩塌判釋模型架構設計，並透過模式分析，可快速取得崩塌地位置。並考量於後續研究中，納入崩塌潛勢區評模型中進行整合運用。
- 三、本計畫完成樣區內 13 處重點聚落社區崩塌風險指標警戒值訂定與分析。經由案例 110 年盧碧颱風暨 0806 豪雨事件進行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，可提供後續崩塌防災應用之重要參考。
- 四、本計畫完成整合大規模崩塌監測資訊，結合自主防災風險警戒模式，整合智慧防災網路，透過視覺化呈現之方式，呈現大規模崩塌各項測站監測資訊與自主防災風險警戒模式中各項數值之關聯與變化。目前以雨量計資訊有正相關之關係。由於今年樣區內並致災雨量事件發生，以致各項監測資訊皆穩定，無法有效看出其差別，團隊將於後續擴大樣區範圍，持續蒐集大規模崩塌數據進行後續觀察與應用。
- 五、本計畫完成智慧防災物聯網初步規劃，透過監控感測器、巨量資料、

雲端運算、區域通報機制四大資料之整合，提供使用者整合的場域即時監測資料以及簡潔且具有防災意義性的場域資訊。

- 六、由於本年度計畫樣區內並無重大颱風豪雨事件發生，故採用 110 年盧碧颱風暨 0806 豪雨事件進行各項驗證與資訊比較案例。
- 七、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。
- 八、在崩塌防災的課題中，設定崩塌警戒是未來發展的趨勢，本計畫也將納入大規模崩塌監測資訊作為類別歸屬問題以進行警戒訂定之調整，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防災預警與警戒模式。





## 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, C., 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. Ermini, L., Catani, F. and Casagli, N., (2005), Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment, *Geomorphology*, Vol. 66, pp. 327-343.
  39. Fernandez-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. Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. In: Navab, N., Hornegger, J., Wells, W., Frangi, A. (eds) *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015*. MICCAI 2015. *Lecture Notes in Computer Science()*, vol 9351. Springer, Cham.
  89. 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.
  90. 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.
  91. Szegedy, Christian, et al. "Rethinking the inception architecture for computer vision." *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2016.
  92. 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.
  93. 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.
  94. 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.
  95. 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.
  96. Tsaparas, I., Rahardjo, H., Toll, D.G., and Leong, E.C. 2002. Controlling parameters for rainfall–induced landslides. *Comput. Geotech*. 29: 1–27.
  97. 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.
98. 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
  99. 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.
  100. 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.
  101. Tibaldi, A., (1995), Morphology of pyroclastic cones and tectonics. *Journal of Geophysical Research*, v. 100, no. B12, p.24521-24535, doi:10.1029/95JB02250.
  102. Varnes, D.J., (1984) *Landslide Hazard Zonation: A review of Principles and Practice*, UNESCO Press, Paris, pp.63.
  103. 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.
  104. 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.
  105. 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.
  106. Wang, H. B. and Sassa, K., (2005), Comparative evaluation of landslides susceptibility in Minamata area, Japan, *Environmental Geology*, Vol. 47, pp. 956-966.
  107. 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.
  108. 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).
  109. 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.
  110. 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.
  111. 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.
  112. 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	
111		2022/01/16 以及 2022/03/15 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	卡孜基颱風雨量歷時	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
	蕃蜜颱風雨量歷時	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	信義鄉	人和村	沖蝕	2006/6/9 05:00	13.5	71.3	239331	2630325
95	0609 豪雨	南投縣	仁愛鄉	翠華村	沖蝕	2006/6/9 05:00	25.5	436.4	271789	2676723
95	0609 豪雨	南投縣	仁愛鄉	大同村	沖蝕	2006/6/9 15:00	9	529.4	263297	2657263
95	0609 豪雨	高雄市	六龜區	大津里	土石流	2006/6/9 18:00	14.4	336.4	214028	2533858
96	0609 豪雨	高雄市	六龜區	大津里	土石流	2006/6/10 06:00	48.5	431.6	213974	2533635
96	0609 豪雨	南投縣	水里鄉	上安村	土石流	2006/6/10 12:00	3.5	401.6	236220	2625277
96	0604 豪雨	南投縣	仁愛鄉	互助村	沖蝕	2007/6/4 00:00	3.5	47.8	245438	2661943
96	0604 豪雨	南投縣	國姓鄉	南港村	沖蝕	2007/6/7 16:00	26.5	232.1	234203	2650392
96	0604 豪雨	南投縣	水里鄉	車埕村	地滑	2007/6/7 16:00	30	155.7	235738	2637144
96	0604 豪雨	南投縣	國姓鄉	乾溝村	地滑	2007/6/8 15:00	10.5	326	231561	2662086
96	0604 豪雨	南投縣	國姓鄉	乾溝村	沖蝕	2007/6/8 16:00	9.5	337.3	230811	2658992
96	0604 豪雨	南投縣	仁愛鄉	大同村	沖蝕	2007/6/9 04:00	11.5	371.7	263297	2657263
96	0809 豪雨	南投縣	鹿谷鄉	清水村	沖蝕	2007/8/10 16:00	6	60.7	226620	2643064
97	0809 豪雨	南投縣	埔里鎮	蜈蚣里	沖蝕	2007/8/13 07:00	43.5	195.3	249570	2650111
97	聖帕颱風	高雄市	甲仙區	東安里	土石流	2007/8/19 02:00	90.5	539.8	212422	2552869
97	聖帕颱風	南投縣	中寮鄉	龍岩村	地滑	2007/8/19 17:00	14	182.4	225171	2648545
97	聖帕颱風	高雄市	六龜區	寶來里	土石流	2007/8/20 12:00	33	943.8	218919	2556196
97	其他	南投縣	鹿谷鄉	鳳凰村	地滑	2008/6/13 13:00	0	21.8	231798	2622701

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	其他	南投縣	國姓鄉	大旗村	地滑	2008/7/13 16:00	0	74	236584	2661237
97	卡玫基颱風	高雄市	六龜區	寶來里	洪水,沖蝕	2008/7/17 22:00	109.5	310.4	218035	2554603
97	卡玫基颱風	高雄市	甲仙區	大田里	崩塌	2008/7/17 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	2008/7/17 22:00	130	382.5	211807	2552654
97	卡玫基颱風	高雄市	六龜區	中興里	沖蝕	2008/7/17 23:00	47.5	371	214131	2538224
97	卡玫基颱風	高雄市	六龜區	寶來里	沖蝕	2008/7/17 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	2008/7/17 23:00	144.5	454.2	218800	2556185
97	卡玫基颱風	高雄市	甲仙區	東安里	土石流,洪水	2008/7/17 23:00	139	538.9	210442	2554980
97	卡玫基颱風	高雄市	甲仙區	東安里	沖蝕	2008/7/17 23:00	139	538	211288	2551312
97	卡玫基颱風	高雄市	杉林區	木梓里	土石流	2008/7/17 23:00	66	413.9	202968	2548835
97	卡玫基颱風	高雄市	那瑪夏區	瑪雅里	崩塌	2008/7/18 01:00	92.5	443	219023	2570976
97	卡玫基颱風	南投縣	中寮鄉	清水村	地滑	2008/7/18 02:00	97.5	261.6	230627	2650928
97	卡玫基颱風	南投縣	仁愛鄉	法治村	土石流	2008/7/18 02:00	40.5	198.4	252972	2645176
97	卡玫基颱風	南投縣	信義鄉	潭南村	土石流	2008/7/18 02:00	109	272.6	244118	2635950
98	卡玫基颱風	高雄市	六龜區	中興里	土石流	2008/7/18 02:00	17	420.9	214016	2542265
98	卡玫基颱風	高雄市	桃源區	建山里	土石流	2008/7/18 02:00	34.5	677.1	217351	2556059
98	卡玫基颱風	南投縣	魚池鄉	日月村	崩塌	2008/7/18 03:00	83.5	360.4	243109	2638063
98	卡玫基颱風	高雄市	六龜區	寶來里	地滑	2008/7/18 03:00	33	710.1	217329	2555466
98	卡玫基颱風	高雄市	桃源區	建山里	土石流	2008/7/18 03:00	33	710.1	218572	2556137
98	卡玫基颱風	南投縣	埔里鎮	麒麟里	土石流	2008/7/18 03:30	97	415.8	248620	2645429
98	卡玫基颱風	南投縣	水里鄉	民和村	崩塌	2008/7/18 04:00	46	276.8	242415	2633079

98	卡玫基颱風	南投縣	埔里鎮	麒麟里	土石流	2008/7/18 04:00	97	415.8	250829	2645283
98	卡玫基颱風	南投縣	中寮鄉	福盛村	沖蝕	2008/7/18 05:00	30.5	217.7	233831	2642366
98	卡玫基颱風	南投縣	仁愛鄉	翠華村	地滑	2008/7/18 06:00	33	158	271862	2674511
98	卡玫基颱風	南投縣	草屯鎮	雙冬里	崩塌	2008/7/19 07:00	6	371.3	230866	2654886
100	鳳凰颱風	南投縣	中寮鄉	清水村	地滑	2008/7/28 17:00	34.5	120.8	230627	2650928
101	辛樂克颱風	南投縣	信義鄉	明德村	崩塌	2008/9/14 07:00	38	347.6	235018	2622737
101	辛樂克颱風	南投縣	水里鄉	郡坑村	沖蝕	2008/9/14 10:00	29.5	301.2	236032	2625810
101	辛樂克颱風	南投縣	仁愛鄉	南豐村	土石流	2008/9/15 05:00	44.5	737.4	259547	2655719
101	辛樂克颱風	南投縣	仁愛鄉	南豐村	土石流	2008/9/15 08:00	55.5	917.8	258755	2655417
101	辛樂克颱風	南投縣	仁愛鄉	精英村	沖蝕	2008/9/15 11:00	47	938.2	269023	2657543
101	辛樂克颱風	南投縣	信義鄉	豐丘村	土石流	2008/9/15 17:00	2.5	552.5	236685	2619331
102	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	中興里	土石流	2009/8/7 20:00	15.5	290.1	213302	2538429
102	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	寶來里	土石流	2009/8/7 21:00	18.5	308.9	217520	2555428
104	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	寶來里	土石流	2009/8/7 21:00	18.5	308.9	217318	2555478
106	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	小林里	洪水,沖蝕	2009/8/8 06:00	42.5	625.9	211503	558844
106	莫拉克颱風	南投縣	信義鄉	神木村	沖蝕	2009/8/8 08:00	21.5	397.9	235770	2603457
106	莫拉克颱風	南投縣	信義鄉	神木村	土石流	2009/8/8 15:00	34	567.1	235152	2602755
106	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	興龍里	洪水,沖蝕	2009/8/8 15:00	95.5	920.8	215792	2545885
106	莫拉克颱風	高雄市	桃源區	梅山里	沖蝕	2009/8/8 16:00	74	647.4	232221	2573545
106	莫拉克颱風	高雄市	桃源區	拉芙蘭里	土石流	2009/8/8 16:00	74	647.4	231588	2572274
106	莫拉克颱風	高雄市	那瑪夏區	瑪雅里	土石流	2009/8/8 16:00	89	712.6	219053	2571064

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	莫拉克颱風	高雄市	那瑪夏區	瑪雅里	土石流	2009/8/8 16:00	89	712.6	219088	2570763
108	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	寶來里	土石流,沖蝕	2009/8/8 17:00	71	1,046.10	217200	2554780
108	莫拉克颱風	高雄市	桃源區	建山里	土石流	2009/8/8 17:00	86.5	732.6	218240	2555745
108	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	六龜里	沖蝕	2009/8/8 17:00	71	1,046.10	213813	2546466
108	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	興龍里	沖蝕	2009/8/8 17:00	71	1046	214968	2544224
108	莫拉克颱風	高雄市	桃源區	寶山里	地滑	2009/8/8 17:00	86.5	732.6	220139	2548369
109	莫拉克颱風	南投縣	信義鄉	神木村	土石流	2009/8/8 18:00	38.5	677.5	236923	2607262
110	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	小林里	洪水,沖蝕	2009/8/8 19:00	70	1285.5	210309	2558594
110	莫拉克颱風	南投縣	信義鄉	神木村	沖蝕	2009/8/8 20:00	46.5	753.4	237189	2608592
110	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	新發里	土石流,沖蝕	2009/8/8 20:00	56	1,271.60	218120	2552950
110	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	中興里	土石流,洪水	2009/8/8 20:00	56	1,271.60	214000	2542255
110	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	西安里	土石流,沖蝕	2009/8/8 20:00	42.5	1,257.10	208242	2551287
95	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	東安里	土石流	2009/8/8 20:00	42.5	1257.1	210455	2554959
95	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	關山里	土石流,洪水	2009/8/8 20:00	42.5	1328	209757	2556474
95	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	小林里	沖蝕	2009/8/8 20:00	42.5	1257.1	211501	2558913
96	莫拉克颱風	南投縣	信義鄉	神木村	土石流	2009/8/8 21:00	38	786.9	236309	2604535
97	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	新發里	土石流,沖蝕	2009/8/8 21:00	63.5	1,330.70	217010	2550443
97	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	新發里	土石流,沖蝕	2009/8/8 21:00	63.5	1,330.70	217292	2551284
97	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	東安里	土石流	2009/8/8 21:00	67.5	1395.51	210209	2552665
97	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	大田里	土石流,洪水	2009/8/8 22:00	42.5	1,328.50	203840	2550328
97	莫拉克颱風	高雄市	桃源區	寶山里	地滑	2009/8/8 22:00	88.5	1048.7	224124	2551583

97	莫拉克颱風	高雄市	桃源區	寶山里	地滑	2009/8/8 22:00	88.5	1048.7	221506	2550485
97	莫拉克颱風	高雄市	桃源區	寶山里	地滑	2009/8/8 22:00	88.5	1048.7	224914	2551728
97	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	西安里	沖蝕	2009/8/8 23:00	54.5	1,411.20	208755	2552247
97	莫拉克颱風	南投縣	信義鄉	同富村	土石流	2009/8/9 02:00	89	1087.9	236875	2607220
97	莫拉克颱風	南投縣	信義鄉	望美村	土石流	2009/8/9 02:00	51.5	695.1	238682	2614084
97	莫拉克颱風	南投縣	水里鄉	玉峰村	沖蝕	2009/8/9 02:00	31.5	433	232615	2630956
97	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	興龍里	沖蝕	2009/8/9 04:00	27	1525	216088	2545472
97	莫拉克颱風	高雄市	茂林區	萬山里	沖蝕	2009/8/9 04:00	25	993.9	217161	2534363
97	莫拉克颱風	南投縣	國姓鄉	南港村	沖蝕	2009/8/9 05:00	38	531.9	235984	2649957
98	莫拉克颱風	高雄市	杉林區	集來里	土石流	2009/8/9 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	2009/8/9 05:00	22.5	1506.9	211780	2552632
98	莫拉克颱風	高雄市	甲仙區	小林里	洪水,沖蝕	2009/8/9 06:00	43	1545.1	213479	2562097
98	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	寶來里	沖蝕	2009/8/9 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	2009/8/9 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	2009/8/9 06:00	35.5	1,585.60	215816	2547873
98	莫拉克颱風	高雄市	那瑪夏區	南沙魯里	沖蝕	2009/8/9 09:00	30.5	1403.3	214750	2568189
98	莫拉克颱風	高雄市	六龜區	大津里	土石流	2009/8/9 09:00	32.5	534.5	214010	2533640
98	莫拉克颱風	南投縣	鹿谷鄉	和雅村	沖蝕	2009/8/9 10:00	57	928	227354	2620524
98	莫拉克颱風	高雄市	那瑪夏區	南沙魯里	土石流,沖蝕	2009/8/9 17:00	9.5	1409.9	218648	2568618
98	莫拉克颱風	南投縣	水里鄉	玉峰村	土石流	2009/8/18 17:00	9	45.8	233115	2633038
98	凡那比颱風	高雄市	六龜區	大津里	土石流	2010/9/19 18:00	45	322	213963	2534790

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	凡那比颱風	高雄市	六龜區	大津里	土石流,洪水	2010/9/19 20:00	63	460.5	212968	2532827
98	凡那比颱風	高雄市	六龜區	大津里	土石流	2010/9/19 21:00	22	482.5	214010	2533640
98	凡那比颱風	高雄市	六龜區	荖濃里	洪水,沖蝕	2010/9/19 21:00	26.5	443	217155	2553855
98	凡那比颱風	高雄市	六龜區	文武里	土石流,洪水	2010/9/19 21:00	26.5	443	212130	2533582
98	0719 豪雨	南投縣	信義鄉	神木村	土石流	2011/7/18 23:00	14	97.6	235152	2602755
98	0719 豪雨	南投縣	信義鄉	神木村	土石流	2011/7/18 23:00	14	97.6	235152	2602755
98	0504 豪雨	南投縣	信義鄉	豐丘村	土石流	2012/5/3 16:00	38.5	121.4	237257	2618139
98	0610 豪雨	高雄市	六龜區	興龍里	土石流	2012/6/10 14:00	13.6	312.6	216247	2545577
98	0610 豪雨	高雄市	六龜區	新發里	土石流,洪水	2012/6/10 16:00	26	358.6	215578	2547965
98	0610 豪雨	南投縣	仁愛鄉	萬豐村	土石流	2012/6/10 18:00	44.5	247.1	258340	2649545
98	0610 豪雨	南投縣	仁愛鄉	合作村	沖蝕	2012/6/10 22:00	16.5	259.4	270809	2663222
98	0610 豪雨	南投縣	國姓鄉	大旗村	地滑	2012/6/11 12:00	1	359.3	236869	2661402
98	0610 豪雨	南投縣	信義鄉	神木村	土石流	2012/6/11 19:00	18.5	434.8	236873	2607205
98	0610 豪雨	南投縣	國姓鄉	南港村	沖蝕	2012/6/12 11:00	69	535.3	235926	2645592
98	0517 豪雨	南投縣	信義鄉	明德村	沖蝕	2013/5/20 01:00	0	225.5	237469	2622644
98	蘇力颱風	南投縣	魚池鄉	日月村	土石流	2013/7/13 07:00	73.5	194	243396	2637726
98	麥德姆颱風	高雄市	杉林區	月眉里	沖蝕	2014/7/23 14:00	60	225	203536	2539087
98	其他	南投縣	仁愛鄉	精英村	沖蝕	2015/8/1 05:00	0	0	269832	2660999
98	梅姬颱風	高雄市	旗山區	新光里	崩塌	2016/9/28 03:00	51.5	368	194630	2525785
98	梅姬颱風	高雄市	燕巢區	東燕里	沖蝕,崩塌	2016/9/28 11:00	0	474	186260	2521060
98	0601 豪雨	南投縣	仁愛鄉	榮興村	崩塌	2017/6/2 17:00	20	240	278921	2680009

98	0601 豪雨	南投縣	仁愛鄉	春陽村	沖蝕,崩塌	2017/6/3 06:00	16	300	266760	2658382
98	0601 豪雨	南投縣	埔里鎮	蜈蚣里	土石流,崩塌	2017/6/3 08:00	23	290	251512	2653137
98	0601 豪雨	南投縣	水里鄉	新山村	崩塌	2017/6/3 08:00	43	270	236472	2628694
98	0601 豪雨	南投縣	信義鄉	明德村	崩塌	2017/6/3 15:00	17	430	235029	2622652
98	0601 豪雨	南投縣	鹿谷鄉	竹林村	崩塌	2017/6/3 23:00	47	605	224659	2623034
98	0613 豪雨	南投縣	國姓鄉	石門村	崩塌	2017/6/15 15:00	7.5	275	237850	2659013
98	尼莎暨海棠颱風	南投縣	信義鄉	同富村	崩塌	2017/7/30 07:50	0	150	239004	2607456
99	0823 熱帶低壓	高雄市	桃源區	寶山里	崩塌	2018/8/25 00:00	5	550	223985	2551542
99	0611 豪雨	南投縣	國姓鄉	長豐村	崩塌	2019/6/11 09:00	36	60	236327	2663834
99	0611 豪雨	南投縣	國姓鄉	大旗村	崩塌	2019/6/11 10:00	45	114	234973	2661094
99	108 其他	高雄市	茂林區	茂林里	崩塌	2019/6/27 05:00	0	63	216305	2529540
99	利奇馬颱風	高雄市	那瑪夏區	南沙魯里	沖蝕,崩塌	2019/8/11 10:00	12	337	215845	2567533
100	0815 豪雨	高雄市	六龜區	寶來里	崩塌	2019/8/15 15:00	23	326	222044	2556452
101	0815 豪雨	南投縣	國姓鄉	長豐村	崩塌	2019/8/16 03:00	18	258	237463	2664047
101	0815 豪雨	南投縣	名間鄉	仁和村	土石流,崩塌	2019/8/16 05:40	10	225	220551	2639424
103	0815 豪雨	南投縣	仁愛鄉	萬豐村	崩塌	2019/8/17 07:00	9	154	256557	2645703
105	0522 豪雨	南投縣	仁愛鄉	發祥村	崩塌	2020/5/22 00:30	14	112	268890	2670383
105	彩雲颱風暨 0605 豪雨	南投縣	仁愛鄉	力行村	崩塌	2021/5/30 23:00	3	144	271252	2673935
107	彩雲颱風暨 0605 豪雨	南投縣	仁愛鄉	力行村	崩塌	2021/6/4 15:00	11	75	271252	2673935
108	彩雲颱風暨 0605 豪雨	南投縣	仁愛鄉	大同村	崩塌	2021/6/4 17:00	0	134	266488	2663532
108	0731 豪雨	高雄市	六龜區	中興里	土石流,崩塌	2021/8/2 09:00	2	581	214241	2541341

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	盧碧颱風	高雄市	六龜區	興龍里	崩塌	2021/8/7 03:00	49	543	260920	2546954
110	盧碧颱風	高雄市	桃源區	拉芙蘭里	崩塌	2021/8/7 05:00	56	528	230617	2569868
110	盧碧颱風	高雄市	六龜區	新發里	土石流,崩塌	2021/8/7 12:00	9	889	218042	2552030
110	盧碧颱風	高雄市	六龜區	新發里	土石流	2021/8/7 13:00	9	889	217832	2551883
110	盧碧颱風	高雄市	桃源區	勤和里	土石流,崩塌	2021/8/7 14:00	7	817	228344	2565172
110	盧碧颱風	南投縣	仁愛鄉	萬豐村	崩塌	2021/8/7 20:00	3	294	235062	2540445
110	其他	高雄市	旗山區	南勝里	崩塌	2021/8/8 14:00	24	438	193645	2520213
110	其他	高雄市	桃源區	寶山里	崩塌	2021/8/11 19:00	10	242	266207	2556288
110	其他	南投縣	集集鎮	富山里	崩塌	2021/8/14 03:00	0	72	231563	2635442

### 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( $F_i > F_c'$ )
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( $F_i > F_c$ )
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 符號表

$A$	崩塌斜面積
$\alpha$	衰減係數
$F_c$	坡地崩塌潛勢最小致災門檻值
$F_i$	坡地崩塌潛勢評估值
$H$	歷史降雨比率曲線
$H_c$	降雨危害度最小致災門檻值
$I_1$	1 小時降雨強度
$I_3$	3 小時平均降雨強度
$I_i$	逐時降雨
$I_{max}$	最大小時雨量
LI	對數化分組後時雨量 ( $= \ln I$ )
LR	對數化分組後有效累積雨量 ( $= \ln R$ )
$R_{24}$	24 小時累積降雨量
$R_i$	逐時累積雨量
$R_t$	有效累積雨量 $R_t = \sum_{i=0}^7 \alpha^i R_i$ (水保局定義, $\alpha=0.7$ )
$R_{te}$	總有效累積雨量, 計算至最大小時雨量發生之時間點。
DEM	數值高程模型 (Digital Elevation Model)
$V$	崩塌體積

## 附錄五 期初計畫審查委員意見與回覆

委員意見	團隊回復
崩塌與精準防災試作可與現行土石流大崩塌發布作業相互驗證	感謝委員意見，本計畫將於今年採用大規模崩塌進行時序變異交叉比對，掌握大規模崩塌潛勢區範圍及誘發機制，以作為崩塌警戒作業修正的依據。
深度學習的方法是否需要這麼多因子才能決定潛勢？	感謝委員意見，深度學習是機器學習(Machine learning)的一個分支，希望把資料透過多個處理層(layer)中的線性或非線性轉換(linear or non-linear transform)，自動抽取出足以代表資料特性的特徵(feature)，也就是說深度學習也被視為是一種特徵學習 (Feature Learning, representation learning)，可以取代專家的特徵工程所花費的時間。 因此在此前提下，本計畫蒐集了相關與崩塌具有關聯性之因子，並透過整合標準化因子之輸入，由深度學習方法進行崩塌潛勢模型之建立。
P.8 多尺度管理的指標門檻值請多著墨。	感謝委員意見，本計畫今年期透過大規模崩塌之相關監測資料進行警戒機制上之指標門檻值修正以及檢討。
H 與 F 兩個指標如何結合得到風險評估模式？	感謝委員意見，說明詳見於報告書第三章。
計畫已執行多年，請說明近年發表的論文	感謝委員意見，本計畫去年已完成針對本計畫相關議題研究，並投稿一篇國際期刊，並以刊登於 Yi-Min Huang 、 Shao-Wei Lu. 2021. The Effect of Temporal Characteristics on Developing a Practical Rainfall-Induced Landslide Potential Evaluation Model Using Random Forest Method Water 2021, 13(23), 3348; <a href="https://doi.org/10.3390/w13233348">https://doi.org/10.3390/w13233348</a> .

<p>採用之雨量站可能對崩塌單元不具有代表性(如兩者距離遠),建議釐清。</p>	<p>感謝委員意見,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。</p> <p>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(Ii)以及有效累積降雨(Ri)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。</p>
<p>前期 KPI 達成效果不佳。</p>	<p>感謝委員意見,本計畫將每年以各階段計畫研究成果發表於國際期刊為目標。並更新 KPI 指標。</p>

## 附錄六 期中報告書審查委員意見與回覆

委員意見	團隊回復
P1-3 文中 12 行之警戒標準一詞，宜改為警戒基準，以避免欠缺法源依據。	感謝委員建議，已進行修正。
附圖均以黑白色調呈現，難以判釋其地文特徵，如:P2-8~20，2-22~26 亦是，請確認說明。	感謝委員建議，於期末報告提供時，附圖則會以彩色影印方式，以利閱讀。
P2-35~42 之表 2-5~表 2-12，將三個互不相聯集水區，進行統計崩塌類型，似乎不具意義，建議可分別列示。	感謝委員建議，已針對各表進行補充修正。
P2-47，該段文意不順，請潤飾。	感謝委員提醒，已針對誤植等相關問題進行修正。
崩塌體積與崩塌斜面積之關係式引用自水利署之文件，該式與水保局之推估公式有何落差？另以斜面積計算，如何在圖面之投影面積換算為斜面積？相對的，如何取得斜面積而換算為投影面積，請補充說明。	水保局之推估公式目前僅搜尋到「中華水土保持學報, 42(2): 150-159 (2011)」文中，作者有提出簡易土方量推估公式。 $V = -0.0004A^2 + 0.4547A \quad (R^2 = 0/97)$ 於運算成果中，優於水利署現行之推估公式。團隊將於未來嘗試用於試算與改進。圖面換算面積公式說明：斜面積 = 平面面積 / $\cos \alpha$ = 投影長度 × 投影面積 / $\cos \alpha$ ，其中 $\alpha$ 為斜度角資訊。設平面面積為 $s_{平}$ ，坡的斜度為 $e$ （度），斜坡的面積為 $s_{斜}$ ， $s_{斜} = s_{平} \div \cos \alpha$ 。
P2-57，崩塌門檻之分類，用意為何，請說明。	由於坡地的資料是連續型資料，這個計畫當中必須經過主觀判定讓某些合適或不合適的資料進過分類，方能建立坡地崩塌資料庫，而上述的資料分級就是本團隊作為判定資崩塌之定義，上述定義的驗證與分析已於 108 年度計畫完成。
雨量數據轉換為對數函數有何物理意義，另外把雨量資料指數化，	由於時雨量資料的變異程度頗大，基本上將資料透過對數函數的轉換是要降低

<p>只有大雨量部分壓縮在一小區段分布內，能否呈現差異變化之顯著性，請說明。</p>	<p>變異，上述的做法是將資料正規化的一種手段，但由於我們所取出來的資料均是較大雨量事件資料，而驗證上也能反映雨量時變資料的敏感性，因此目前仍採取上述方式處理雨量資料。</p>
<p>P3-35，門檻公式以年度有無崩塌作為假設，似乎把崩塌事件用年度予以分別，似有不妥，請補充說明。</p>	<p>本計畫欲解決廣域崩塌的推估方式，但國家目前所能提供的崩塌目錄只有來自林務局委託成功大學於某一年度所製作的年間資料，因此過去的做法仍是以年間資料帶當成當年度事件資料的總和。有鑑於此，本團隊於今年的計畫則是結合衛星影像來改善上述問題之缺失，透過事件影像與雨量資料的萃取，我們可以掌握每一場事件所造成的災害面積變異量，而其總和就是年間資料。我們同時將事件資料的雨量變化、空間變化與時間歷程特徵(多場事件)，帶入到深度學習技術模型當中，期望上述資訊的擴充，能夠預測坡地崩塌災害之能力。</p>
<p>深度學習之分析方法雖是一門方法論，惟學習內容只從”果”來判斷，而未深入瞭解”因”，則可能有誤導之情形，如何選擇學習對象之深度內涵，建議應先有其合理之評估方法，請說明。</p>	<p>由於成因的因素分析永遠是模式推估上最為重要的因素，而過去的研究受限到因素上的不足而亟需改善，因此本計畫則是結合衛星影像來改善上述問題之缺失，透過事件影像與雨量資料的萃取，我們可以掌握每一場事件所造成的災害面積變異量，而其總和就是年間資料。我們同時將事件資料的雨量變化、空間變化與時間歷程特徵(多場事件)，帶入到深度學習技術模型當中，期望上述資訊的擴充，能夠預測坡地崩塌災害之能力。</p>
<p>陳荖旗三流域之崩塌風險評估，本研究利用坡地單元影像圖塊之聯結，在空間分佈上有何具體優點?請舉例補充說明。</p>	<p>陳荖旗三大大流域，過去在莫拉克、桃芝、納莉等事件當中有極為嚴重的坡地災害發生，因此本研究選擇這三大流域作為問題分析的主軸。為了有效因應水</p>

	保局之業務管理，未來計畫區會逐步與水保局所轄之業務管理空間整合一致。
崩塌風險之影響範圍(如:崩塌之堆積區或崩塌轉化為土石流之流動及堆積扇)如何與保全聚落連結，請補充說明。	由於本計畫已將實證區的空間單元劃定成坡地單元，因此每一個具保全對象之自主社區都有固定已劃定好的坡地單元，而上述坡地單元對社區的危險程度，則是透過坡度、坡向的數值來進行決定，上述的資料可從地文可視化環境中顯示，之後透過 GIS 的空間分析就可劃定出某一自主社區與對其有所影響的坡地單元。而分析時則透過與雨量變異與推估模式的計算，將空間中的坡地單元之危險變異程度呈現出來，進而達成防災預警之目的。
能否建立集水區 H、F 兩個參數與 (I,R)之量化關係，並分析與地質、崩塌量、地形、集水區面積之關係，以供其他集水區參考，請補充說明。	本計畫已於 108 與 109 年計畫完整討論 I 與 R 模型對於 H 與 F 之變異程度，當年也找尋過不同單位量之雨量因子(例如 I3)來做為模式精進的方向之一。同時在地文因子部分也充分討論過可用因子的內容，地文因子的數量也從當時約 20 多類簡化成目前的類別，然地質因子則受限於國家資料提供的精度，然整體而言本計畫則是針對廣域空間的坡地崩塌災害進行預測與評估，這項目標已逐漸落實當中。
表 2-1，崩塌型式定義，請參酌與會意見進行修正。	已針對會議意見進行相關修正。
P2-26，降雨誘發崩塌事件，應考慮前期降雨及入滲率。	感謝委員提供寶貴意見，未來計畫則會考慮加入前降雨因素。
P2-21，錯字，水”利”保持局，請更正。	感謝委員建議，已進行修正。
P2-24，衛星影像之分析項目應整合水保局衛星變異點計畫之分析結果，進行彙整或比較。	感謝委員提供寶貴意見，建議後續執行時考慮與局內衛星變異點計畫之成果加以整合。

<p>“地文”因子應考慮地質條件，目前大都僅納入地形(由 DEM 而得)，其在地質方面如何考量，請說明。</p>	<p>由於開放資料中，地質資料來自中央地調所所提供之相關資料，在國家未能提供其他形式的地質資料之前，本團隊還是沿用國家已發布的資料作為模式建立之依據。</p>
<p>廣域尺度層級以類神經、統計來分析表現不錯，地面單元或社區層級應再併入物理模型或當地的監測物理量分析，警戒發布才會較準確。</p>	<p>感謝委員的寶貴意見，目前本研究團隊所收集的資料還是以大數據為精神的推估模型，尺度上還是屬於小比例到中比例尺的數據資料。若是要進一步與物理模型機制整合，就需收集一些大比例尺的資料(例如地下水位等)，這些資料昂貴但缺稀，但這樣的操作又會與廣域崩塌的預警目標不完全相同。但本計畫預計在未來年度會擴大與大規模崩塌所收集的資料相接合，也是逐年逐步呼應委員的意見。</p>
<p>報告內容應考慮降雨後，地下水位需要一些時間才會上升，另外除了雨量為主要的警戒指標，應再進一步納入新重要指標。</p>	<p>感謝委員意見，由於目前樣區內地下水位資料建立僅於 109 年開始蒐集，故相關資料內容仍不足，且今年度無相關颱風豪雨事件發生。建議後續研究可依照相關地下水位變化資訊，納入模式分析應用。。</p>
<p>目前用 2 維度指標(H、F)，是否可能再加入一個重要指標成為三維或更進一步到四維以上等，請補充說明。</p>	<p>目前綜觀全國能夠提供全面且即時的資料只有雨量資料，因此目前模式發展方向則是考量雨量為主的因子所發展出來的預警模式，未來最有可考量的因子則是地震災害的 PGA 因子，這會是團隊下一個階段要考量的發展方向。</p>
<p>以上集水區單元是否太小，如此進行預警是否可行，請說明。</p>	<p>本模式所切割出來的坡地單單元，最小有 1 公頃、最大約為 10 公頃，經驗上要針對社區防災預警，其空間單元不宜過大，因此目前提供上述資料尺度。然坡面單元都已經編號化與結構化，也可以針對不同環境進行整合，因此上述問題之</p>

	影響已降至最低。
建議加入前幾年計畫執行重要成果並說明其差異性。	遵照辦理。
請將重要圖說以彩色呈現，以利判讀。	遵照辦理。
表 2-2 中請增加資料年限及資料來源等欄位。	遵照辦理，並補充於附錄一「各類資料庫明細表」。
請補充說明崩塌資料庫更新或擴充那些資料。	更新雨量事件(致災雨量)、植生因子擴增、崩塌地事件擴增。
請加強說明為何用克利金方法進行降雨空間分布推估。	目前做法則是收集雨量站資料後，經過整理後(遺失、謬誤)
P.2-35 至 2-40 崩塌地類型面積統計表，請分別列出 3 個研究集水區。另 107 年至 111 年資料如何補充？	遵照辦理。已針對各項資訊進行修正補充。107 年至 111 年之崩塌地資料，需待林務局提供「衛星判釋全島崩塌地圖」後，方可進行相關補充。
表 2-7(p.2-37) 舊有崩塌地從 1932.89ha 增加至 8603.46ha 請檢視資料正確性。	已針對各項資訊進行確認。由於 98 年至 99 年有莫拉克颱風事件，大幅增加崩塌地，故於 99 年至 100 年中，舊有崩塌地增長幅度較高。請詳報告書表 2- 13(P2-44)。
崩塌風險評估模型(p.3-1)中，團隊建立之模式與前人模式之優劣為何？	本模式之優點可歸納如下，雨量因子為主要變因，目前本團隊可收集及時雨預估雨量，因此可進行災害事件評估與預報；模式具備一定程度的共用性，目前本研究所採用的因素可適用於全國各集水區，其收集因子的代價不高，但由於各地的災害規模反應不會相同，因此還需參數微調；在參數微調的部分，本模式採用深度學習的類神經網路，其架構與參數則是可快速學習與調整，這會是本模式具備一定程度泛用性的一個優點。
崩塌時刻如何確定，其 I1 及 Rte 如何計算？	崩塌時刻主要採用水保局重大土砂災例報資料，依照速報資料內之雨場雨量與致災時間點。I1 及 Rte 請檢視報告書 P2-

	28 頁表 2-3 之定義。
自適性坡地崩塌評估模型使用 37 個因子(p.3-31)進行模型訓練，實務操作時是否可以簡化應用。	由於本計畫之目標是針對上述因子進行半自動化因子萃取與收集整理之程序，目前是以操作手冊的方式進行辦理，緯來則將會採取高度自動化流程辦理。
表 3-7(p.3-41)GAN 模型測試驗證精度及表 3-8(P.3-45)重點聚落崩塌與降雨警戒機率表，請補充說明計算過程。	遵照辦理。GAN 請檢示報告書 P3-39-P3-40 頁說明。重點聚落請檢示報告書 P3-43-P3-44 頁。
多元尺度單元崩塌警戒應用如何驗證其準確性？	目前採用水保局重大土砂災例報資料，依照速報資料內之雨場雨量與致災時間點資訊與模式進行套疊應用比較。
崩塌資料除林務局外，水保局亦有執行 107-109 年度崩塌判釋及事件型崩塌資料，建議一併蒐集利用。	感謝委員建議，團隊已將相關資訊進行蒐集，並建議於明年度計畫商討執行可行性。
有關崩塌警戒發布(P4-5)，黃色警戒類似目前雨量警戒方式，但紅色警戒又有紅色警戒-1 及紅色警戒-2 兩層級，可考量防災操作，以達任一指標 Hc 或 Fc 即發布紅色警戒，亦或是 Hc 或 Fc 均達到才發布。	本團隊未來會採取委員意見，將上述防災程序進一步簡化，以利局內統合發布。
另紅色警戒降為黃色，完全採用雨場分割方式(同土石流)，是否有考量採 Hc 或 Fc 降至門檻值以下。	由於模式產生後主要是透過 Imax (最大小時降雨強度)和 Rte (對應 II 之總有效累積降雨)之數值，決定目前警戒值域狀況，當降雨數值減少時，警戒層級即會自動更動，達到降警戒之成效。
有關探討 3 處已公開大規模崩塌潛勢區，其均已有雨量警戒值，建議比較其與現行機制發布差異供參考。	感謝委員建議，團隊在後續研究中，會再與現行機制進行比較分析。
有關本案有列入大規模崩塌潛勢區-高雄市茂林區萬山里，其屬本	目前團隊針對樣區內大規模崩塌之監測歷史資料進行確認，目前能取得最新資

<p>局第一類型大規模崩塌潛勢區(即與現地土石流潛勢區重疊，雨量警戒值為相同)，且現地已於 104 年執行崩塌監測，建議本案相關操作模型，可納入其相關歷史資料進行驗證。</p>	<p>訊為 108 年 11 月 4 日。團隊會依照現況資料持續進行資料蒐集，並於後續納入驗證。</p>
--	--

## 附錄七 期末報告書審查委員意見與回覆

委員意見	團隊回復
<p>本計畫就崩塌與降雨因子之風險評估模式提出尚有研究問題待解決之見解，值得肯定!惟就本計畫所建立之評估模式究竟是適用在台灣所有山坡地之坡面，亦或只適用已崩塌之坡面，適宜有明確之說明，以利應用之有效性。</p>	<p>感謝委員意見，本計畫以陳荖旗三集水區為研究區域，崩塌潛勢評估模式之建立方式及成果，本質上可用在其他地區之坡面；若針對特定區域有其他考量，可針對特定區域以實際案例驗證，加以微調模式，以獲得較佳模型表現，更能符合現地之環境，並透過 110 年盧碧颱風暨 0806 水災試作，說明模式應用有效性之情境。相關說明請參閱報告書 P4-15。</p>
<p>表 2-4 列至 110 年之颱風豪雨事件，何以圖 2-38 只示出至 105 年之雨量推估？同樣，圖 2-47 亦只示出至 105 年之崩塌地類型？圖 2-56 與圖 2-75 亦是。</p>	<p>由於林務局崩塌地地圖目前僅更新至 106 年度故目前可取得之最新崩塌地範圍為致災範圍為 105 年度(106 年崩塌地減 105 年崩塌地)，故目前最新雨量推估與崩塌地類型僅至 105 年。</p>
<p>P3-39，文中所謂之抽樣筆數係以何種方式區分一筆之單位量？</p>	<p>主要透過各坡面單元所做為計量單元，依照各地文與雨量因子資訊，進行資料庫整合運算。</p>
<p>P3-39，倒數第二行「將成以 0.001 後」是否有誤植？</p>	<p>已修正於 P3-39 頁「將乘以 0.001 後」</p>
<p>P3-41，表 3-7 有缺失，另 6 行之文意不明？</p>	<p>已修正於 P3-41 「表 3-7」內容資訊。</p>
<p>P4-9 整合大規模崩塌監測資訊一節，似只在說明所選三處樣區，但並未說明整合之細節與成果？</p>	<p>已修正於 P4-26 頁</p>
<p>報告中圖、表、文字若引用，請清楚標註資料來源。另文中所提文獻請於參考文獻檢核。</p>	<p>遵照辦理。</p>
<p>補充符號表並檢查上下標符號。補充歷年工作重要成果說明或精進成果。</p>	<p>感謝委員意見，遵照辦理，符號表請見報告書附錄四，歷年工作重要成果說明請見報告書 P1-11。</p>
<p>表 2-2 資料名稱請與內文統一，另</p>	<p>遵照辦理，並補充各項使用資料資訊於</p>

<p>補充資料年份及解析度(比例尺)等欄位。</p>	<p>附錄一、附錄二中。</p>
<p>P2-13 至 P2-20 圖示不清，請用彩色圖層。</p>	<p>由於此圖層主要呈現各集水區之坡向、坡度等地形起伏狀況進行呈現，故透過單一色階進行圖形之差別。</p>
<p>NDVI(P2-24)只以 2022 年 SPOT7 影像分析，是否有其他時期資料？</p>	<p>NDVI 主要以汛期前之影像資訊進行執行，並於汛期後再次進行模式修正與更新，而今年度無颱風豪雨事件。故僅採用 1/16 至 3/1 號之影像資訊。</p>
<p>請補充說明研究成果如何具體提供防災中心進行崩塌風險評估決策。</p>	<p>可參照警戒流程如圖 4-4 所示，主要借鏡現行土石流警戒機制，當氣象局未來 24 小時定量降雨預報達警戒值時，則進入黃色警戒，<math>H_c</math> 與 <math>F_c</math> 達到警戒門檻值，則進入紅色警戒，若六小時累積雨量小於 4mm 時或連續 12 小時累積雨量小於 10mm 時，則解除警戒。</p>
<p>圖 2-60 至圖 2-65 請增加等值線圖。</p>	<p>斟酌辦理。</p>
<p>圖 2-68 至圖 2-75 是否依據 P2-57 分成 S1、S2 及 S3 呈現。</p>	<p>斟酌辦理。</p>
<p>表 3-4 中模型有 37 個因子，因子間是否有相依性或重覆權重計算，是否可簡化其模式內容？</p>	<p>感謝委員意見，本計畫建議於後續研究分析中，先針對各項因子進行權重之計算，簡化現有模組所需因子，提升模式效率。</p>
<p>模型已 101~102 年及 104~105 年資料進行訓練，以 105~106 年資料驗證是否合理</p>	<p>由於災害事件稀缺性，故模式主要採用 101 至 105 年間所發生之災害事件進行資訊訓練，並以 106 年度進行模式事件之驗證，若後續林務局全島崩塌地資訊有更新年度之更新資訊，模式會再增加新增年度之資訊做為模式建立與驗證。</p>
<p>請補充說明為何選用此 13 處重點聚落，缺陳有蘭溪流域。</p>	<p>由於今年並無相關災害事件。故主要以去年有發生相關災害事件之南部集水之 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(HC)以及崩塌潛勢最</p>

	小致災警戒值(FC)訂定，
圖 3-14~3-17 缺 X、Y 座標名稱。	遵照辦理，已補充修正圖 3-14~圖 3-17。
P3-43 警戒值以 0.29 曲線請說明；另實際崩塌發生時間如何確定，圖 3-35 中雨量值如何計算。	警戒值主要對應水保局速報資訊做為參考，依照速報資料中所記錄之崩塌時間進行計算。而雨量值則以 95-110 年中依照速報資訊，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建立。
第四章智慧防災物聯網初步規劃盡可能因地制宜撰寫其具體可行性。	感謝委員意見，目前計畫採用團隊建立之坡地社區崩塌風險警戒資訊，結合臨近雨量站資料，進行各聚落警戒模式規劃。
P4-16~P4-22 無新庄及萬山聚落試作內容。	由於今年並無颱風豪雨事件，依照最近一期之事件中(盧碧颱風暨 0806 豪雨事件)，主要影響範圍於寶山聚落中。
坡地單元是否由水保局統一製定，各不同單位執行的計畫皆統一用一致的坡地單元圖層。	感謝委員意見，目前水保局並未提供統一製定之坡面單元，建議後續可陸續建立，並供業務單位使用。
思考一下如何以本計畫複雜的模式與深度學習的結果，落實到「社區自主防災」之實務操作上。	感謝委員意見，本計畫之模式及其成果，可以直接與現行的防災應變業務對接，直接統由水保局進行分析後發布結果給社區，不需要社區自行進行操作，社區僅需接收預警結果，並依潛勢程式採行相對應措施。
此計畫所提之方法，對於莫拉克事件中崩塌的警戒或預測能力為何？應增加此一模式驗證的步驟。	由於目前各項地文因子資訊，包含中央地質調查所地質資訊(102 年)、數值高程模型(105 年)等，皆於莫拉克颱風事件後所建立，故本計畫採用該年度颱風事件進行模式執行，並於現行土石流防災警戒模式進行對比驗證。如計畫書 P.4-16 頁盧碧颱風 0806 水災試作。
評估模式內尚未考慮地質材料的強度參數，使得崩塌潛勢評估的準確性不易提升。	感謝委員意見，本計畫之評估模型尺度採全集水區規模，嘗試以空間上崩塌位置區位進行分析；而地質材料強度參數

	較適用於小尺度之分析對象，且地質材料強度參數並不易取得，因此本計畫之模型未將其納入。
僅用雨量、累積雨量做為「崩塌預警」現今已經不足。	感謝委員意見，僅靠雨量因子確實有崩塌預警上的不足，建議後續崩塌相關防災應變可以參考本計畫成果，納入前期崩塌影響，加強崩塌風險之評估能力。
模型很複雜，參數也很多，應避免各參數間的累計誤差與誤差傳播。	感謝委員意見，本計畫之模型為建立合理評估模式，將各項合理因子納入，而各納入參數於模型中均已考慮其不確定性，反應在模型的預測結果上。
影像判釋時請注意堆積區與下陷區之區別。	感謝委員意見，並建議後續研究納入分析與比較。
本計畫主要為輔助性質研究計畫，建議應思考相關研究內容如何成熟加值於實務上的操作運用。	感謝委員意見，目前團隊以水保局土石流警戒模式做為參考，建立一套以雨量為告警模式供實務進行使用。建議未來以分局做為示範區域，進行大範圍之實務比對。
P3-30 表 3-4 本計畫已蒐集很多且完整資料，建議再加強最新資料年份、精度(尺度)，未來更新頻率等。	遵照辦理。
報告書表 3-7 聯結錯誤請修正。	已修正於 P3-41 頁。
本計畫於高時間解析度之崩塌序列特徵模型研究，目前利用福衛二號 104 至 106 年資料，但如需近期無福衛二號影像則可利用何種影像之相關規劃請補充。	目前已於太空遙測中心進行相關 MOU 簽署，未來若無福衛二號影像時，則可利用 SPOT6/7(解析度 1.5 公尺)，來進行後續研究使用。
P4-5 崩塌警戒發佈流程，於黃色警戒及解析則僅透過雨量決定，是否依據近年研究經驗，採本計畫建立模型訂定相關門檻，可進一步探討指標之可行性。	感謝委員意見，本計畫建議之崩塌警戒發佈流程，為配合業務單位應變流程，以雨量為主要參考依據，適用於行政區域的警戒發佈。配合本計畫研究成果，建議未來可以將本計畫推演之模型及分析成果，擇取雨量門檻值，做為防災應變實務

	上，警戒發布之參考依據。
本計畫自主防災崩塌警戒發布流程管理，建議下修一個標準差做為社區警戒推播之標準，惟未說明社區對應之作為為何？另推播系統所指為何？	感謝委員意見，針對崩塌警戒發布後，社區應對作為主要為依循防救災措施，儘速撤離至避難處所或安全地點；而推播系統係指水保局之警戒發布系統，相關說明及更正請參閱報告書第四章。第四節。
有關簡報 P48 以寶山大規模崩塌潛勢區之試作，建議再納入水保局實際發布紅、黃警戒之時間點，了解實務操作之精進參考。	感謝委員意見，遵照辦理，修正內容請參閱報告書附錄三。
目前警戒模式主要透過雨量等因素進行發布，其流程是否有彈性機制，請提供相關流程說明。	警戒流程如圖 4-4 所示，主要借鏡現行土石流警戒機制，當氣象局未來 24 小時定量降雨預報達警戒值時，則進入黃色警戒， $H_c$ 與 $F_c$ 達到警戒門檻值，則進入紅色警戒，若六小時累積雨量小於 4mm 時或連續 12 小時累積雨量小於 10mm 時，則解除警戒。
委員回覆與計劃執行狀況，應以完成式進行說明，請確認各回覆狀況與內容。	遵照辦理。
目前案例說明僅以 110 年盧碧颱風進行案例呈現，建議增加其他年度之案例情況，以利進行模式驗證與探討。	由於本年度無相關致災颱風事件，故僅以 110 年之颱風事件進行案例呈現。

## 附錄八 成果報告書初稿審查委員意見與回覆

委員意見	團隊回復
第五章章節名稱，請更正為「結論與建議」。	感謝委員意見，遵照修正。
期末報告書審查委員意見與回覆中，缺少對「李明熹」及「林仕修」委員之意見回覆，請補充說明。	感謝委員意見，遵照修正。
期末暨成果效益報告請同步更新於報告書中。	感謝委員意見，遵照修正，詳見報告書附錄十。
今年度本計畫發表之期刊或論文資訊，請於報告書中摘錄說明。	感謝委員意見，年度發表研討會資訊詳見附錄九，成果效益報告中。
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，詳見報告書附錄八。
.本案統一編號為: SWCB-110-240，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。



## 附錄九 研究發表成果



## 附錄十 期末成果效益報告



## 附錄十一 公文往返

