

---

**臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸  
應用研究**

**The study on observation and extended  
application of ground motions for  
landslides in Central Taiwan**

---

執行單位：國立成功大學

執行期間：111年1月1日至111年12月31日

計畫主持人：林冠瑋 副教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

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)

# 臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究

## 摘要

在臺灣山區常因為強降雨導致大規模崩塌，而此種災害類型常造成居民與聚落財產上的危害，為此大規模崩塌的防減災策略已進入區域尺度或坡地尺度，針對高風險地區或邊坡持續加強各項的觀測工作，並制定雨量警戒基準。地震站紀錄可以獲得崩塌地動訊號並進行定位，有助於加速瞭解災害發生時間與地點等資訊，並運用於分析促崩雨量條件。

本年度計畫整理了中部區域(臺中、南投、彰化、雲林)一帶地震站，找出具有崩塌特徵之地動訊號資料集，再以卷積神經網路分類法建立地動訊號時頻圖的分類模型，其崩塌分類的召回率超過 97%。將時頻圖的分類模型應用於 2012 年至 2020 年的連續地動訊號紀錄，最終共有 36 個時間點可於至少 2 個以上的地震站紀錄中同時偵測到崩塌地動訊號。後續進行崩塌地動之振動源定位、檢查與配對，最終共 6 起崩塌事件之定位結果位於中部地區範圍內。計畫亦於梨山及清境架設地震站，並利用分類模型偵測 2022 年 10 月 16 日豪雨期間之地動紀錄。崩塌之降雨門檻分析顯示，以涵蓋 50% 資料的雨量門檻曲線來看，研究區內大規模崩塌多數發生於累積降雨量大於 547 mm、降雨延時 79 小時以上的降雨條件之下，綜合各項降雨基準可做為制定大規模崩塌的警戒標準之基礎。同時，本計畫更新崩塌訊號自動辨識測試系統，新增崩塌面積與體積推估值，經由研究人員判讀後再發佈於展示網頁。

**關鍵字：**大規模崩塌；崩塌地動訊號；深度學習；機器學習

# **The study on observation and extended application of ground motions for landslides in Central Taiwan**

## **Abstract**

Disaster prevention and mitigation strategies for large-scale landslides have turned to focus on the regional scale or slope scale. Strengthening various observations for high-risk areas or slopes and revising the rainfall thresholds will be continued. The seismic records can provide landslide-induced ground motion signals and be used to locate the landslide, which helps to obtain the time and location of the disaster, and it is used to analyze the rainfall conditions. This project collated existing seismic stations in the central region and used continuous seismic records to find ground motion signals with landslide characteristics. A classification model for the ground motion spectrogram is built by the convolutional neural network, and its recall rate for landslide signals is over 90%. The classification model is applied to the seismic records from 2012 to 2020. Finally, 36 landslides were detected simultaneously at at least 2 seismic stations. A total of six landslide events were located in the central region. Two seismic stations were set up in Lishan and Qingjing, and the classification model were applied to detect the ground motion record during the heavy rainfall on October 16, 2022. The rainfall threshold about the large-scale landslides located in the study area reveals the critical rainfall for triggering large scale landslide which includes  $>547$  mm of accumulative rainfall and  $>79$  hours of rainfall duration. These basic information about critical rainfall for large scale landslide will be

useful for preparing the operation of disaster prevention. The project has updated the test system to provide the information of event area and volume after detecting the landslide signal, and automatically send a brief report, which will be read by the researcher before being released on the webpage.

**Keywords: large-scale landslide, landslide quake, deep learning, machine learning**

# 目次

摘要 .....	I
Abstract .....	II
目次 .....	IV
表次 .....	VI
圖次 .....	VII
<b>第一章 前言 .....</b>	<b>1-1</b>
第一節 背景說明 .....	1-1
第二節 計畫目的 .....	1-2
第三節 期末檢核點 .....	1-2
第四節 前期計畫方法回顧 .....	1-3
<b>第二章 工作計畫與研究方法 .....</b>	<b>2-1</b>
第一節 研究區域 .....	2-1
第二節 地表振動紀錄來源 .....	2-3
第三節 崩塌引致地表振動的時頻特徵 .....	2-6
第四節 地動事件偵測與訊號前處理 .....	2-6
第五節 崩塌地動訊號分群與自動辨識方法及流程 .....	2-10
第六節 地動訊號定位方法 .....	2-16
第七節 促崩降雨分析方法 .....	2-20
<b>第三章 崩塌地表振動觀測站挑選與條件討論 .....</b>	<b>3-1</b>
第一節 計畫採用之地表振動觀測站分布 .....	3-1
第二節 中部大規模崩塌優先辦理區地動觀測站選擇 .....	3-2
<b>第四章 計畫成果 .....</b>	<b>4-1</b>

第一節 分類訓練樣本集群分析結果與豪雨期間地動紀錄.....	4-1
第二節 卷積神經網路分類模型與驗證.....	4-8
第三節 地動訊號分類模型的應用.....	4-10
第四節 崩塌地動訊號的特徵值.....	4-13
第五節 崩塌地動訊號源定位與配對結果.....	4-17
第六節 增設清境以及梨山臨時地震站.....	4-21
第七節 促崩降雨條件分析.....	4-33
第八節 崩塌地動訊號自動判釋測試網頁.....	4-43
<b>第五章 結論與建議.....</b>	<b>5-1</b>
第一節 結論.....	5-1
第二節 建議.....	5-2
<b>參考文獻.....</b>	<b>參-1</b>
<b>附錄.....</b>	<b>附錄-1</b>
附錄一、期中審查意見回覆.....	附錄-1
附錄二、期末審查意見回覆.....	附錄-12
附錄三、來往公文.....	附錄-20
附錄四、學術著作及研討會論文.....	附錄-51
附錄五、期末暨成果效益報告.....	附錄-73

## 表次

表 1.1 前期計畫研究方法.....	1-4
表 2.1 臺灣中部地區 41 座連續地表振動觀測站資訊(Lai et al., 2016).....	2-3
表 2.2 混淆矩陣.....	2-15
表 3.1 鄰近高風險大規模崩塌潛勢區之地震站.....	3-3
表 4.1 2012 年至 2020 年間的豪雨事件.....	4-1
表 4.2 卷積神經網路分類模型的混淆矩陣.....	4-9
表 4.3 同時 2 個以上的地震站偵測到崩塌地動訊號之時間目錄(UTC) ..	4-11
表 4.4 崩塌與地震訊號的時間域特徵值統計結果.....	4-16
表 4.5 中部 6 起事件詳細資料-1 .....	4-19
表 4.6 中部 6 起事件詳細資料-2 .....	4-20
表 4.7 架站位置資訊.....	4-21
表 4.8 本計畫 6 處崩塌定位座標與配對座標.....	4-33
表 4.9 17 起前期計畫成功定位事件.....	4-33
表 4.10 本計畫 6 處崩塌使用之降雨測站-1 .....	4-35
表 4.11 本計畫 6 處崩塌使用之降雨測站-2 .....	4-36
表 4.12 本計畫 6 處崩塌發生時之雨量參數-1 .....	4-36
表 4.13 本計畫 6 處崩塌發生時之雨量參數-2 .....	4-37
表 4.14 先前計畫 17 處崩塌發生時之雨量參數-1 .....	4-37
表 4.15 先前計畫 17 處崩塌發生時之雨量參數-2 .....	4-38

## 圖次

圖 1.1 計畫步驟流程圖 .....	1-2
圖 1.2 地動訊號分類流程(水土保持局，2021).....	1-3
圖 2.1 臺灣中部地區大規模崩塌優先辦理區分布圖.....	2-2
圖 2.2 計畫中採用之中部地區 41 座地震站分布圖.....	2-5
圖 2.3 山崩地動訊號時頻圖(Dammeier et al., 2011).....	2-6
圖 2.4 偵測 WUSB 測站 2019 年 8 月 11 日(UTC)連續地動紀錄之結果 ..	2-8
圖 2.5 WUSB 測站 2019 年 8 月 12 日 1 點 55 分 48 秒(UTC+8) .....	2-9
圖 2.6 K-means 集群分析示意圖(MacKay, 2003).....	2-11
圖 2.7 卷積運算示意圖(Yeh, 2017) .....	2-12
圖 2.8 卷積神經網路示意圖 .....	2-13
圖 2.9 分類模型建構流程圖 .....	2-14
圖 2.10 使用卷積神經網路演算法模型進行崩塌定位流程圖 .....	2-18
圖 2.11 (左)2012 年蘇拉與 2015 年蘇迪勒颱風造成崩塌之反向投影解...2-19	
圖 2.12 中央氣象局觀測資訊查詢網站.....	2-20
圖 2.13 雨場切割與降雨參數計算示意圖(水土保持局，2020).....	2-21
圖 2.14 三種常見雙雨量參數門檻曲線(水土保持局，2020).....	2-23
圖 3.1 松茂 1、梨山、新佳陽大規模崩塌優先辦理區與鄰近地震站 .....	3-4
圖 3.2 廬山大規模崩塌優先辦理區與鄰近地震站.....	3-5
圖 3.3 達觀大規模崩塌優先辦理區與鄰近地震站.....	3-6
圖 3.4 九份二山大規模崩塌優先辦理區與鄰近地震站.....	3-7
圖 4.1 儀器記錄故障狀況下的時頻圖.....	4-3
圖 4.2 環境噪訊中小突波的時頻圖.....	4-3



圖 4.3 環境噪訊中(a)車輛及(b)施工的時頻圖 .....	4-4
圖 4.4 寬頻地震站紀錄的 K-means 集群分析結果 .....	4-5
圖 4.5 短週期地震站紀錄的 K-means 集群分析結果 .....	4-6
圖 4.6 容易被分類模型誤判為崩塌訊號的環境噪訊時頻圖 .....	4-9
圖 4.7 地動訊號分類模型應用流程圖 .....	4-10
圖 4.8 2017 年 6 月 2 日 22:32 (UTC)崩塌地動訊號 .....	4-12
圖 4.9 不同類型地動事件之移動平均及閃爍指數波形.....	4-14
圖 4.10 發生於 2017 年 6 月 2 日 22:32 (UTC)的崩塌地動事件 .....	4-17
圖 4.11 具有崩塌特徵之地動事件的定位結果.....	4-18
圖 4.12 清境站架站位置 .....	4-22
圖 4.13 梨山站架站位置 .....	4-22
圖 4.14 清境站架站設備 .....	4-23
圖 4.15 清境站架站配置 .....	4-23
圖 4.16 梨山站架站設備 .....	4-24
圖 4.17 梨山站架站配置 .....	4-24
圖 4.18 清境站 2022/10/01 (UTC)時頻圖 .....	4-25
圖 4.19 清境站 2022/10/16 (UTC)時頻圖 .....	4-25
圖 4.20 梨山站 2022/10/01 (UTC)時頻圖 .....	4-26
圖 4.21 梨山站 2022/10/16 (UTC)時頻圖 .....	4-26
圖 4.22 清境站 2022/10/16 (UTC)突波偵測結果 .....	4-27
圖 4.23 清境站 2022/10/17 (UTC)突波偵測結果 .....	4-28
圖 4.24 清境站 2022/10/18 (UTC)突波偵測結果 .....	4-29
圖 4.25 梨山站 2022/10/16 (UTC)突波偵測結果 .....	4-30
圖 4.26 梨山站 2022/10/17 (UTC)突波偵測結果 .....	4-31

圖 4.27	梨山站 2022/10/18 (UTC)突波偵測結果 .....	4-32
圖 4.28	配對成功崩塌事件分布圖 .....	4-34
圖 4.29	$I_a$ - $D$ 降雨門檻 .....	4-40
圖 4.30	$R_e$ - $D$ 降雨門檻 .....	4-41
圖 4.31	$I_a$ - $R_e$ 降雨門檻 .....	4-42
圖 4.32	崩塌振動訊號辨識清單展示頁面 .....	4-43
圖 4.33	自動產生之崩塌事件報告 .....	4-44
圖 4.34	自動寄送崩塌事件報告 .....	4-45



## 第一章 前言

### 第一節 背景說明

臺灣位於副熱帶季風氣候區，年平均雨量豐沛，加上活躍板塊構造作用導致臺灣的地質條件破碎(Shieh, 2000; Chang et al., 2007)，因此邊坡崩塌成為臺灣山區常見的地質災害(Huang et al., 2012; Liu et al., 2018)。經過大規模崩塌防減災第一期計畫以水土保持技術及土石流防減災工作經驗為基礎，已經初步完成大區域尺度以雨量為參考指標之警戒基準。在現階段，大規模崩塌的防減災策略已進入區域尺度或坡地尺度，針對高風險地區或邊坡持續各項的觀測工作，並修正雨量警戒基準。透過地表振動紀錄獲取更多大規模崩塌的確實發生時間，將可作為分析雨量參考指標的基礎資料(Hung et al., 2019; Lin et al., 2020a)。除此之外，崩塌地動訊號的快速辨識技術，將有助於快速得知崩塌發生時間與地點，甚至可望發展為區域型災害警示系統(Chao et al., 2017; Kuo et al., 2018)。前期計畫中已經成功以區域型地震網絡建立高屏地區及嘉南地區的地動訊號自動分類器，結果顯示區域型地震站有助於發現規模較小的崩塌，且能獲得較多可靠的振動源定位結果。

臺灣中部地區在 1999 年集集大地震後數年內，坡地土砂災害頻繁，有助於蒐集 AI 分類器所需之訓練樣本。本年度將彙整臺灣中部地區現有地表振動觀測網，並採用從地震站紀錄中辨識出崩塌作用引致之地動訊號，透過機器學習及深度學習技術建立該區域之大規模崩塌地動訊號自動分類器，並且提供警戒值研究之基礎數據，建立區域尺度大規模崩塌之雨量警戒值。本年度計畫同時將呈現地動訊號辨識結果之資訊報告於即時辨識測試平台，提供延伸應用功能。

## 第二節 計畫目的

本年度計畫使用臺灣中部地區的地表振動紀錄建立崩塌地動訊號分類器，並應用分類器辨識歷史崩塌資訊，計畫整體目標如下(圖 1.1)：

- 一、歸納出臺中、南投、彰化、雲林一帶及週邊地區區域尺度之地震觀測網。
- 二、收集豪雨期間土砂運動引致之地表振動紀錄，並計算訊號辨識指標。
- 三、建置中部地區崩塌地動訊號自動分類器並驗證分類器之可靠度。
- 四、崩塌訊號源定位及配對。
- 五、增設臨時地震站，探討區域型或坡地型觀測網改善策略。
- 六、搭配崩塌發生時間，分析集水區尺度促崩雨量條件。
- 七、精進現有崩塌地動訊號近即時辨識測試平台。

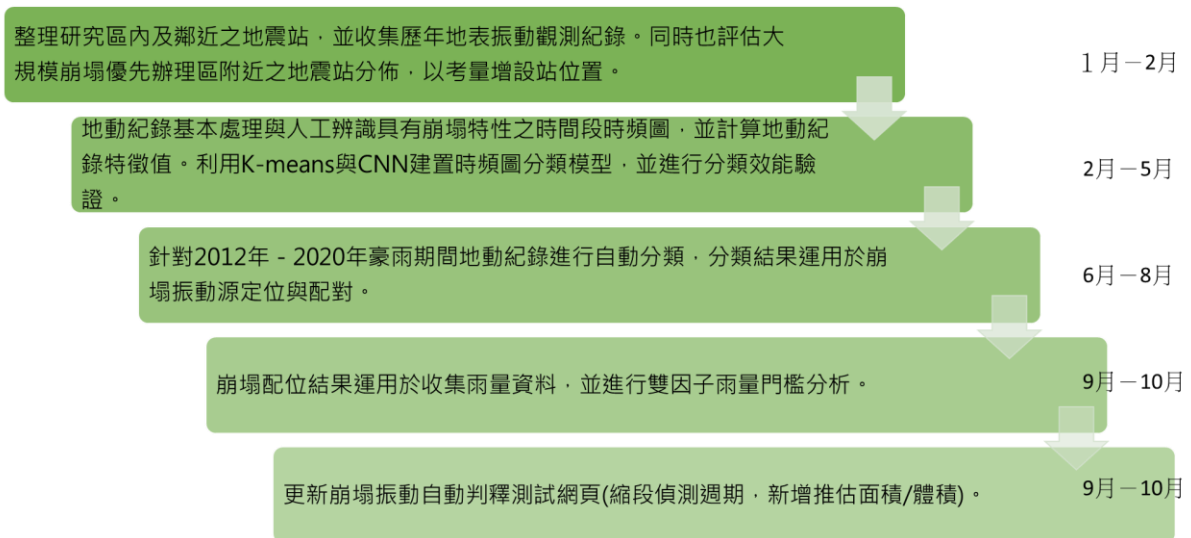


圖 1.1 計畫步驟流程圖

## 第三節 期末檢核點

截至期末報告撰寫階段，本計畫已完成預定進度之檢核點如下所列：

- 一、增設臨時地震站，探討改善現有觀測網之策略。

- 二、搭配雨量觀測紀錄及崩塌發生時間，分區區域尺度促崩雨量條件。
- 三、更新崩塌地動訊號近即時辨識測試平台，提升辨識效率及提供更多元資訊。

### 第四節 前期計畫方法回顧

前幾期計畫(108 至 110 年度)皆使用監督式學習建置分類器(圖 1.2、表 1.1)，先以人工方式辨別地震、崩塌、噪訊事件的訊號特徵，而後賦予具有不同訊號特徵的波型不同分類類別，以此作為建置演算法所需之訓練樣本。使用隨機森林演算法作為建置訊號分類器的基礎，再採用時間域與頻率域特徵值進行分類，將可考慮振動訊號的物理意義以及統計上的特徵。

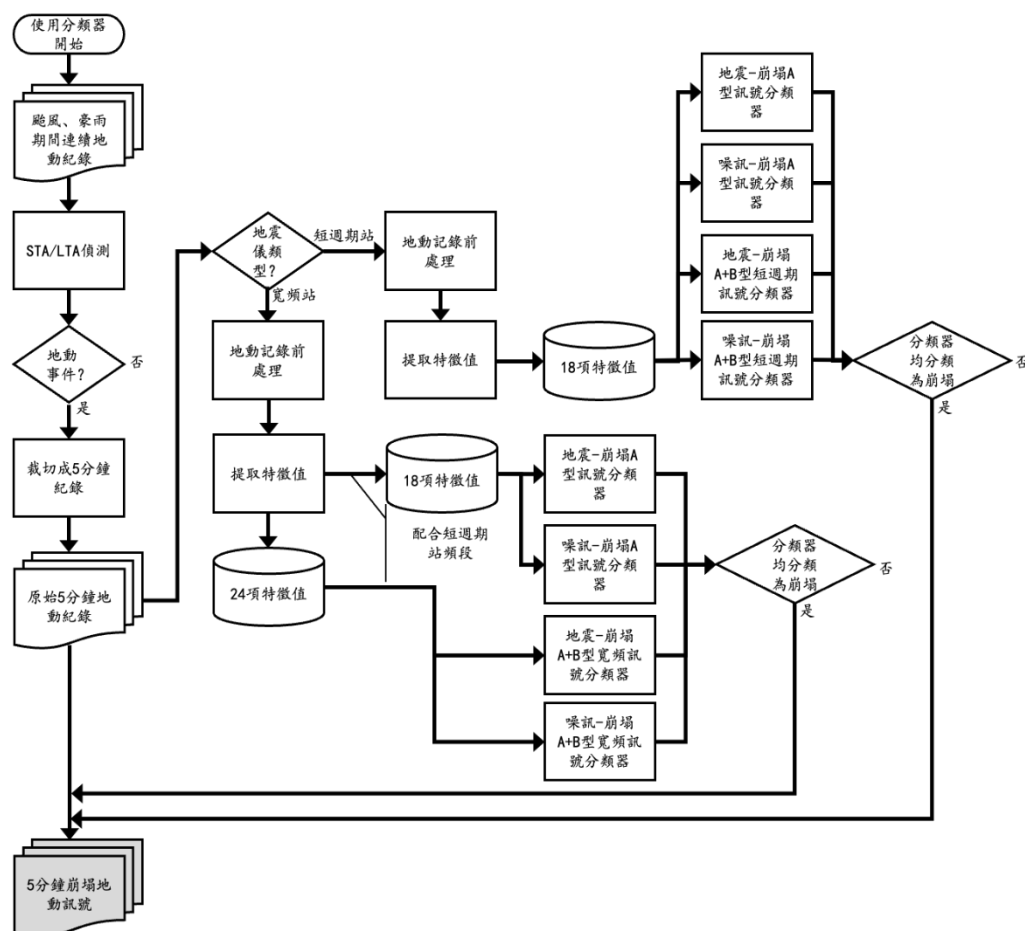


圖 1.2 地動訊號分類流程(水土保持局，2021)

本年度計畫採用前期計畫累積的崩塌振動訊號之訓練樣本，進行時頻圖的繪製，再使用卷積神經網路深度學習演算法進行振動訊號時頻圖的自動分類，建置時頻圖的分類模型。崩塌地動訊號產生之時頻圖與地震時頻圖存在明顯差異，且不同地震儀繪製出崩塌地動訊號的時頻圖上有相似特徵，故本計畫建立之 AI 分類器可適用在不同地震儀器的振動紀錄上。

表 1.1 前期計畫研究方法

計畫年度		110 年計畫	109 年計畫	108 年計畫
訓練樣本種類		崩塌、地震及噪訊 (二元分類)	崩塌、地震及噪訊	
地動訊號來源		台灣寬頻地震網、氣象局井下地震站、氣象局短週期地震站 (共 27 站)	台灣寬頻地震網、氣象局井下地震站、氣象局短週期地震站(共 27 站)	台灣寬頻地震網
研究區域		雲嘉南地區	高屏溪流域	台灣本島
訓練樣本數	寬頻	崩塌：38 地震：38 噪訊：38	崩塌：215 地震：215 噪訊：215	崩塌：214 地震：214 噪訊：214
	短週期	崩塌：99 地震：99 噪訊：99	崩塌：251 地震：251 噪訊：251	
偵測時間窗格定義		偵測地動事件的開始與結束，定義動態 5 分鐘偵測時間窗格		固定每 5 分鐘時間窗格
演算法		隨機森林演算法		
特徵值	時間域	移動平均值、閃爍指數及平均振幅等共 9 種		
	頻率域	各頻帶之功率譜密度及能量集中頻率等。 寬頻地震儀：15 種 短週期地震儀：9 種	各頻帶之功率譜密度及能量集中頻率等共 15 種	
分類器準確度		地震-崩塌：92.7% 噪訊-崩塌：90.2%	寬頻：98.29% 短週期：97.21%	91.3%

## 第二章 工作計畫與研究方法

### 第一節 研究區域

本計畫中所稱臺灣中部地區涵蓋臺中市、南投縣、彰化縣、雲林縣，區域內西側地形以平原、台地為主，東側為山地，地勢大致呈東高西低。中部山區坡地地形陡峭、地質破碎，地質由西向東岩性從沉積岩轉變為輕度變質岩。區域內共有 6 處大規模崩塌優先辦理區，分別為 D036(松茂 1)、D016(達觀)、T003(新佳陽)、D052(梨山)、T002(九份二山)，以及 D066(廬山)(圖 2.1)。其中，松茂 1、梨山、新佳陽，以及廬山所在地層屬於廬山層，岩性為輕度變質板岩，邊坡容易受到板岩劈理與發達破裂不連續面影響而不穩定。達觀及九份二山所在地層屬於南港層相關地層，岩性主要為頁岩夾砂岩，沉積岩層理及節理組成不穩定邊坡塊體。

中部地區內共有 154 處中央氣象局之雨量觀測站，長期降雨觀測紀錄顯示該區域氣候乾濕季分明，雨季為每年 5 月至 10 月，梅雨及夏季颱風為主要的雨量來源(中央氣象局觀測資料查詢系統)。區域內近 20 年來主要導致坡地災害之降雨事件包括 2004 年敏督利颱風、2005 年海棠颱風、2009 年莫拉克颱風、2012 年蘇拉颱風、2015 年 0520 豪雨、2017 年 6 月豪雨等，造成中部山區發生多起崩塌、土石流災害。



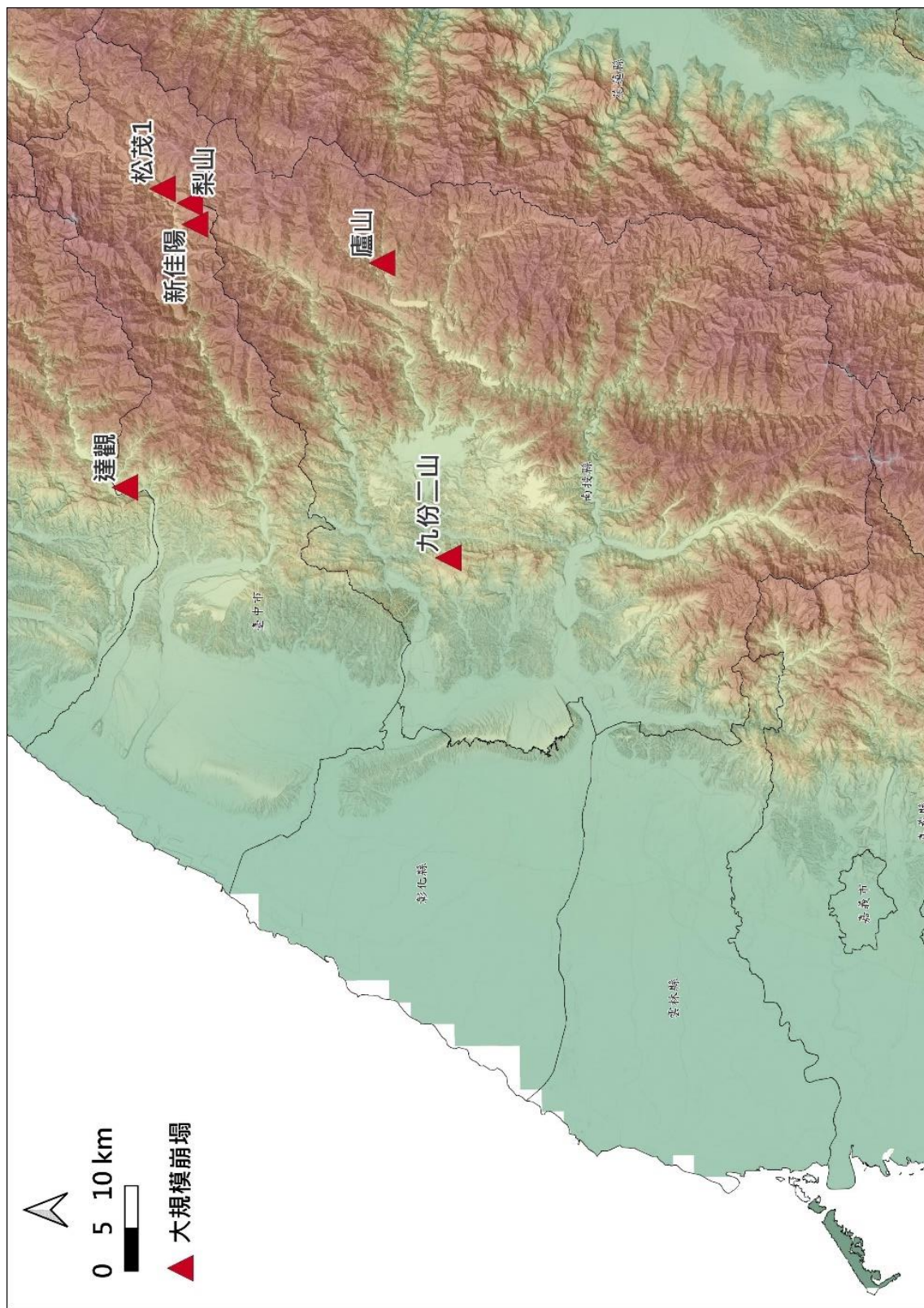


圖 2.1 臺灣中部地區大規模崩塌優先辦理區分布圖

## 第二節 地表振動紀錄來源

本計畫依臺中、彰化、南投、雲林之地理位置選擇位於研究區內及鄰近之地震站，可用之觀測站數量為 41 站，欲建立臺灣中度地區區域尺度之地震觀測網。其中，加速度型強震儀有 8 站，速度型寬頻地震儀有 23 站，速度型短週期地震儀有 10 站，所有地表振動紀錄之採樣率均為 100 Hz。測站基本資訊整理於表 2.1，地震站分布狀況如圖 2.2 所示。強震儀主要分布於平原區，寬頻地震儀與短週期地震儀則於平原區及山區均有分布，因此可預期寬頻地震儀與短週期地震儀有較高的機會有效記錄下山區邊坡塊體運動產生之振動。在本計畫執行期間，三種類型之地震儀紀錄均有進行人工辨識，觀察發現加速度型強震儀較不適合運用於崩塌地動訊號的辨識，因大部分加速度型強震儀坐落於市區，且靈敏度差訊號不清楚，因此後續討論便不考慮加速度型強震儀。

**表 2.1 臺灣中部地區 41 座連續地表振動觀測站資訊(Lai et al., 2016)**

測站名稱	經度	緯度	儀器類型	管理單位	井下/地面站	高程(m)
CHGB	121.174	24.0602	HH	中央研究院	地面站	1815
CHN5	120.6769	23.5972	EH	中央氣象局	地面站	736
DPDB	120.9264	24.0334	HH	中央氣象局	地面站	587
FUSS	121.2438	24.2476	HH	中央氣象局	井下站	2208
LXIB	121.4133	24.0211	HH	中央研究院	地面站	1468
NNSB	121.3828	24.4284	HH	中央研究院	地面站	1156
OWD	121.1759	23.9545	HH	中央氣象局	井下站	1296
RLNB	120.3594	23.8911	HH	中央研究院	井下站	9
SML	120.9082	23.8813	EH	中央氣象局	地面站	802
SSLB	120.954	23.7875	HH	中央研究院	地面站	505
TCU	120.6841	24.1457	EH	中央氣象局	地面站	85
TDCB	121.1583	24.252	HH	中央研究院	地面站	1235
TWT	121.1618	24.2495	EH	中央氣象局	地面站	1544

臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究

TYC	120.8698	23.905	EH	中央氣象局	地面站	631
VWDT	121.1412	23.7537	HH	中央氣象局	地面站	2254
WARB	121.3862	23.7178	HH	中央氣象局	地面站	187
WCH1	120.5469	24.0718	HL	中央氣象局	地面站	16
WCHH	120.5583	24.0794	HH	中央氣象局	井下站	21
WCS	120.9116	24.0566	HH	中央氣象局	井下站	408
WDJ	120.6403	24.3478	HH	中央氣象局	井下站	78
WDL	120.5385	23.7149	HL	中央氣象局	地面站	46
WDLH	120.5381	23.6888	HH	中央氣象局	井下站	53
WGK	120.5703	23.6844	HH	中央氣象局	地面站	72
WHF	121.2725	24.1434	EH	中央氣象局	地面站	3114
WHP	120.9458	24.2777	HH	中央氣象局	井下站	765
WHY	120.8532	23.6961	HH	中央氣象局	井下站	554
WJS	120.7278	23.8218	HH	中央氣象局	井下站	174
WML	120.2232	23.8044	HL	中央氣象局	地面站	3
WNT	120.6925	23.8766	EH	中央氣象局	地面站	210
WNT1	120.6803	23.9071	HL	中央氣象局	地面站	140
WPL	120.9573	24.0124	HL	中央氣象局	地面站	455
WRL	120.3781	23.9026	HH	中央氣象局	井下站	12
WSF	120.2298	23.6363	EH	中央氣象局	地面站	6
WSL	120.2279	23.5227	HH	中央氣象局	井下站	3
WTC	120.2892	23.8617	EH	中央氣象局	地面站	3
WTK	120.3886	23.6876	HH	中央氣象局	井下站	17
WUSB	121.1175	23.9919	HH	中央研究院	地面站	1357
WWC	120.5232	24.2563	HL	中央氣象局	地面站	5
WWF	120.6981	24.0424	HL	中央氣象局	地面站	114
WYL	120.5798	23.9605	HL	中央氣象局	地面站	35
YUS	120.9591	23.4875	EH	中央氣象局	地面站	3414

註：HH：寬頻地震儀、HL：強震儀、EH：短週期地震儀



### 第三節 崩塌引致地表振動的時頻特徵

許多國內外的研究都探討了土石崩落過程所產生的振動現象(Suriñach et al., 2005; Dammeier et al., 2011; Lin et al., 2020b)，Dammeier 等人(2011)在山崩事件的時頻圖也觀察到類似金字塔形狀的高能量分布特徵(圖 2.3)。由於崩塌發生時，滑動面脫離產生的解壓作用會產生較為低頻訊號(Kanamori and Given, 1982; Eissler and Kanamori, 1987)，因此在遠離崩塌地點的地震站紀錄中，低頻訊號會先到達。後續向下崩落過程產生的破碎及顆粒撞擊與摩擦所產生的高頻訊號較晚(Huang et al., 2007; Schneider et al., 2010; Chang et al., 2021)，且高頻訊號在震波傳遞過程因頻散而快速衰減，所以導致時頻圖中的能量分布常呈現類似等腰三角形的金字塔型態，此型態為崩塌引致地表振動訊號的辨識指標。

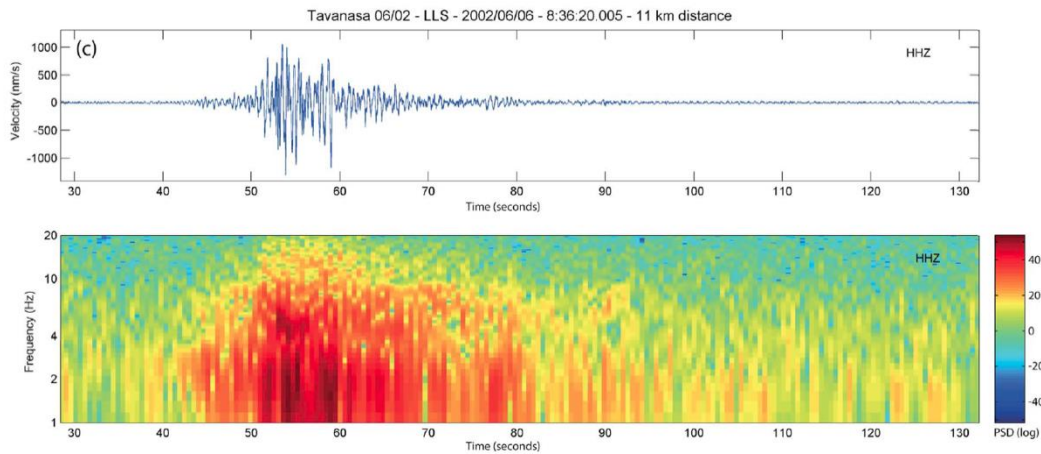


圖 2.3 山崩地動訊號時頻圖(Dammeier et al., 2011)

### 第四節 地動事件偵測與訊號前處理

為了提高地動事件分類的效率，減少針對一般環境噪訊進行辨識的狀況，應於訊號分類前先進行地動事件偵測，初步排除無振動事件出現的地

震儀紀錄。本計畫中所指之振動事件包括地震、崩塌事件，以及其他未知的振動源(潮汐、地下水變化、人為活動等)。本計畫利用短窗格平均與長窗格平均之比值法(STA/LTA)進行振動事件偵測，如圖 2.4 及圖 2.5 為 2019 年 8 月 11 日連續地動紀錄之結果。

計算 STA/LTA 的短窗格與長窗格分別為 10 秒及 30 秒，當 STA/LTA 連續 10 秒大於 2.0 時，定義為事件開始，而 STA/LTA 小於 1.5 時，定義為事件結束，並限制地動事件的持續時間需至少達到 30 秒。用於偵測之地動紀錄為垂直向地動紀錄，並經過 1~5 Hz 帶通濾波後之波形。使用短窗格平均與長窗格平均之比值法(STA/LTA)偵測能夠有效辨識出具有事件訊號之地動紀錄，有助於大幅度減少後續大量計算訊號特徵值及投入機器學習分類器進行分類所需之運算時間，提高分類效率。

本計畫在使用地震儀紀錄建立自動分類模型前，必須對地震儀紀錄進行一系列基本前處理來繪製時頻圖。首先運用 STA/LTA 比值法偵測地動事件，再將偵測出來之地動紀錄切割為 5 分鐘訊號，並進行平均值移除、移除趨勢，以及移除儀器響應等步驟。時頻分析的時間窗格為 500 個、窗格間的重疊率為 50%。

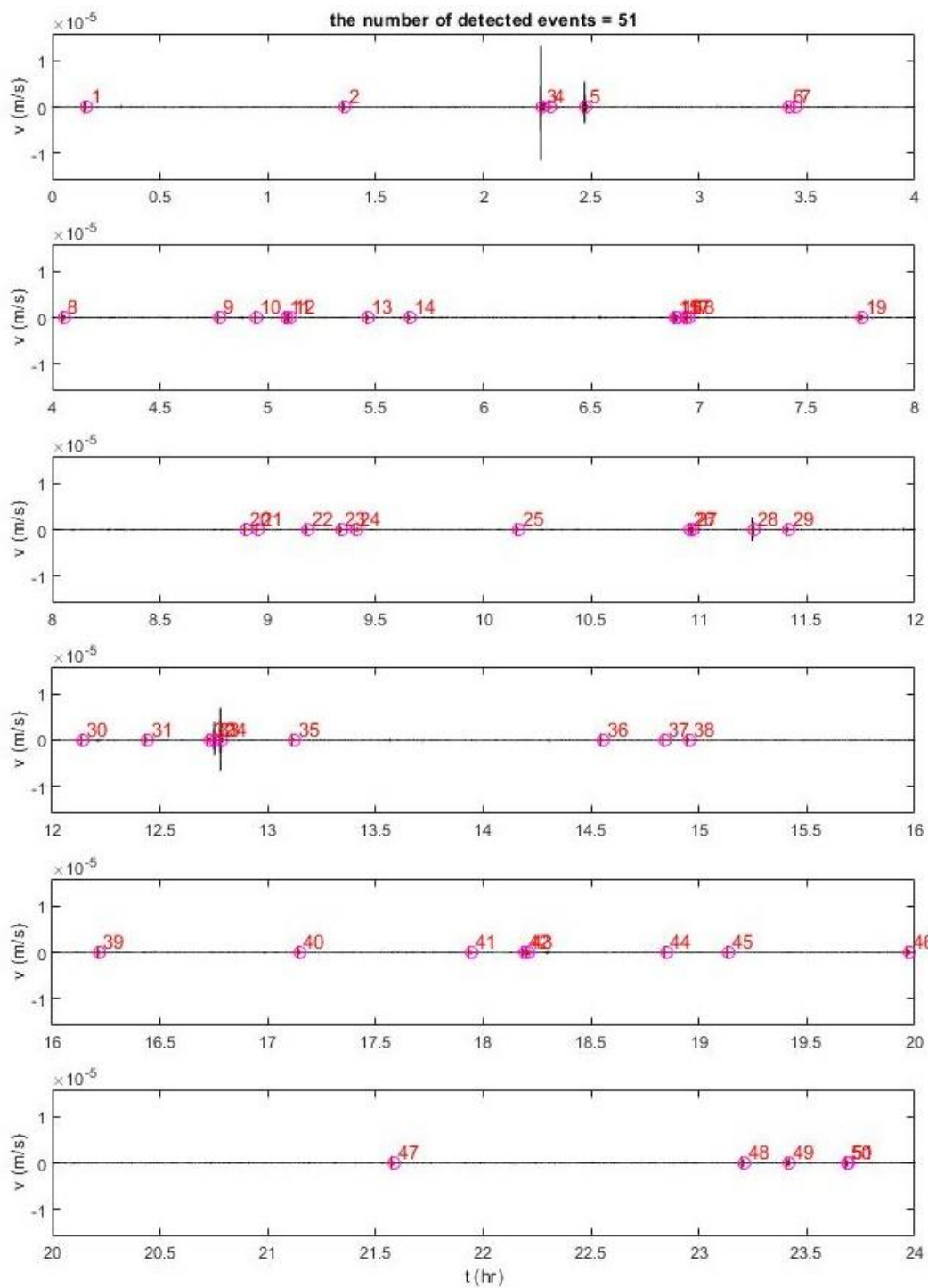


圖 2.4 偵測 WUSB 測站 2019 年 8 月 11 日(UTC)連續地動紀錄之結果

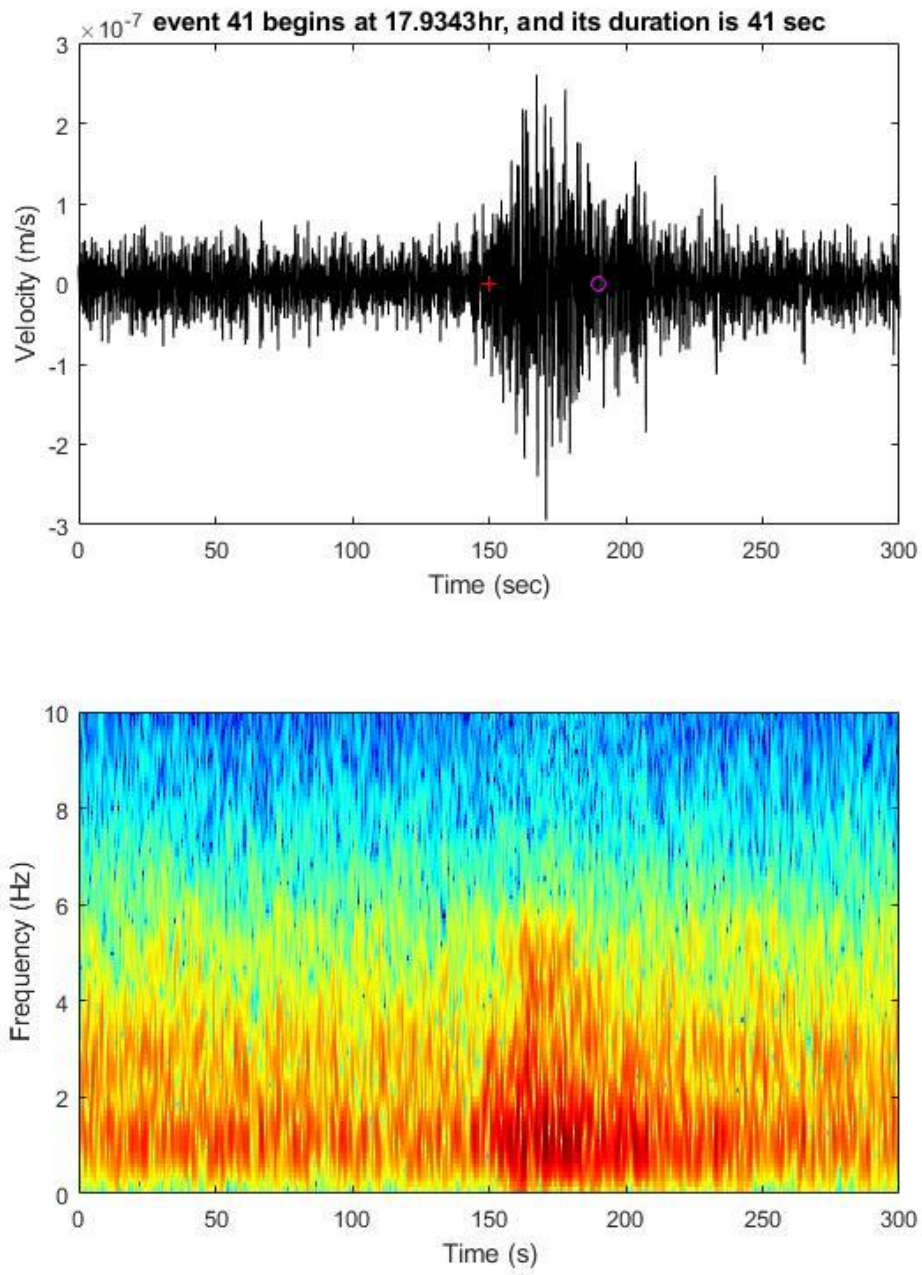


圖 2.5 WUSB 測站 2019 年 8 月 12 日 1 點 55 分 48 秒(UTC+8)開始的地動訊號



## 第五節 崩塌地動訊號分群與自動辨識方法及流程

### 一、機器學習演算法 K-means 集群分析

有鑑於前期計畫採用自定義特徵值進行機器學習時，雖能考慮到地動訊號的物理或統計意義，但需考量不同地震儀基本條件不同的問題，而需要分別製作分類器，或捨棄部分無法共用之特徵值。因此，若欲採用研究區中所有類型之地震儀紀錄，便可能需要產生多組分類器，亦難以評估是否可將分類器運用於研究區以外的其他地表振動紀錄儀器。由於崩塌地動訊號與地震地動訊號之時頻圖存在顯著差異，故本年度計畫選擇採用圖片辨識技術進行地動訊號時頻圖的自動辨識。目前最被廣泛應用的人工智慧圖片辨識技術即為卷積神經網路深度學習演算法，然而深度學習演算法往往需要非常大量的訓練樣本，因此準備充足的訓練樣本是建立卷積神經網路分類模型的基礎。受惠於前期計畫已透過人工辨識以及隨機森林分類器獲取數百筆崩塌地動訊號，本計畫可採用機器學習的集群分析於中部地區地震儀紀錄，快速且大量地找出與崩塌地動訊號具有相似時頻圖特徵的地動訊號，作為後續建立卷積神經網路分類模型的訓練樣本。

K-means 集群分析屬於非監督式機器學習，分析時不提供資料的標準答案(ground truth)，其概念即為物以類聚。K-means 集群分析開始時，需要先設定預計要將資料分成多少(k)群，再於資料的特徵空間中隨機給 k 個群心。隨後計算每一筆資料與 k 個群心的歐基理德距離，並將每筆資料的分群結果判給距離最近的那個群心，便完成第一次的集群分析。第二次集群分析則根據第一次集群分析的結果，進行群心位置的更新。待獲得更新後的群心，便再次計算每一筆資料與 k 個群心的歐基理德距離，並將每筆資料的分群結果判給距離最近的那個群心，便完成第二次的集群分析。後續

則不斷重複集群分析，直到群心的位置不再有太大的變動，即可視為收斂，K-means 集群分析結束(圖 2.6)。

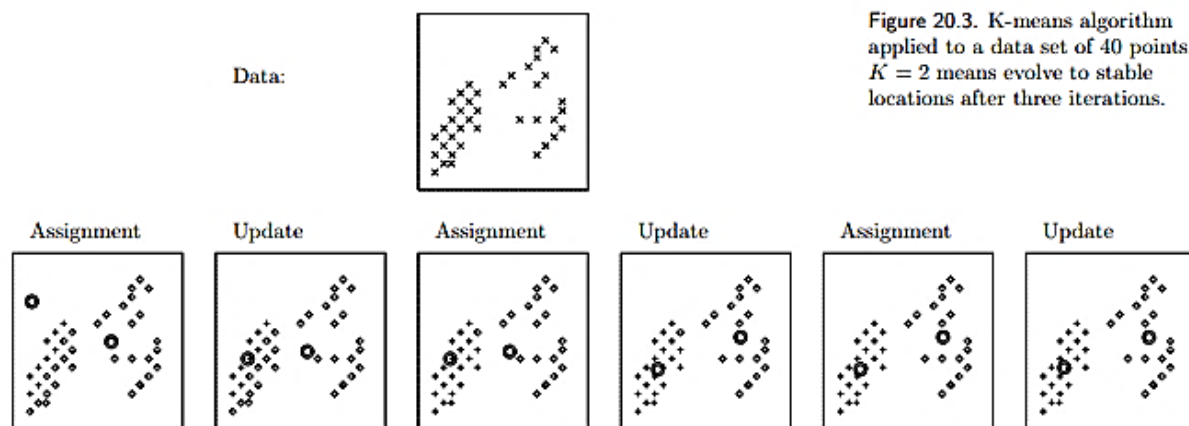


圖 2.6 K-means 集群分析示意圖(MacKay, 2003)

由於沒有提供每筆資料的標準答案，所以非監督式學習的效果一般會比監督式學習來的差，所以在本計畫中採用了前期計畫所獲得之崩塌地動訊號作為集群分析後快速辨別各分群中資料屬性的參考依據。其做法便是在大量未知類型的地動事件資料中，混入已知事件類型的地動資料，再觀察已知事件類型之地動資料後續被歸類於那些分群中，便可初步獲知未知類型的地動資料可能屬於何種類型的地動事件。

由於 K-means 集群分析僅用於資料的聚類分析，無法直接產生分類器，因此本計畫僅將其使用於地動事件資料的分群，後續則採用深度學習技術中的卷積神經網路(CNN)演算法製作分類模型。

## 二、卷積神經網路(Convolutional Neural Networks, CNN)

卷積神經網路為一種深度學習演算法，一般被認為是目前深度神經網路(deep neural network)領域的主力演算法，運用於圖片辨別時甚至可以比

人類還精準。CNN 透過解析圖片裡的各個局部特徵，藉由在兩張不同圖片中比對相似位置上的大略特徵，便能分辨是否為相同的圖片。因此，不管圖片是否受到平移、縮小、旋轉或變形等情況，CNN 都能進行正確判斷。當 CNN 對一張新圖片進行分辨時，由於不知道可進行比對的特徵在何處，所以會比對圖片中的任何地方。

在卷積神經網路演算法中，為了對圖片中任何局部位置都進行比對，與 Feature Detector 進行卷積計算，其中 Feature Detector 矩陣能提取物體邊界，透過與圖形窗格相乘後相加，獲得圖片中每個像素與某一局部特徵的卷積值(圖 2.7)。過程中 Feature Detector (Filter)會隨機產出多種的矩陣。當卷積值越接近 1，表示該像素和局部特徵越相似，而卷積值越接近-1 則表示差異越大。每一次的卷積計算在卷積神經網路都被視為一個卷積層。

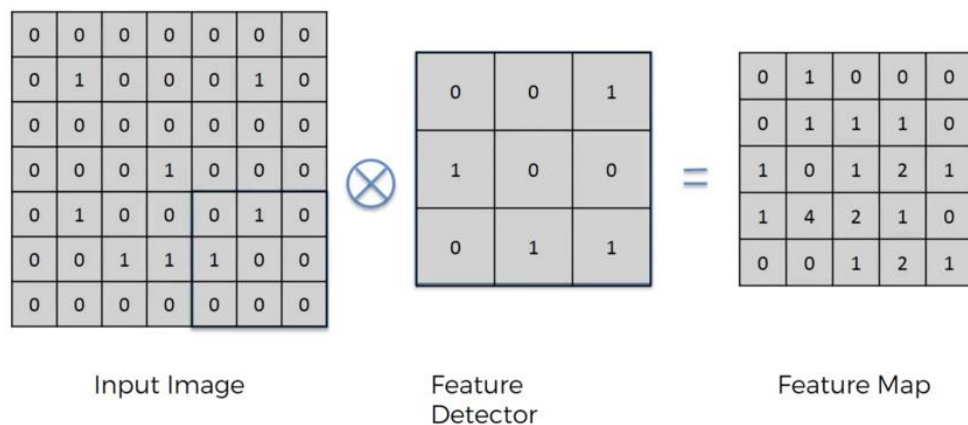


圖 2.7 卷積運算示意圖(Yeh, 2017)

另外，卷積神經網路為了解決大量像素的問題，所以必須壓縮圖片並保留重要資訊，這個步驟稱為池化(pooling)。池化會在圖片上選取不同窗格，並在這個窗口範圍中保留下最大卷積值。原圖片經過池化以後，其所包含的像素數量會降為原本的四分之一，但還是保留了每個範圍和各個特徵的

相符程度。池化後的資訊更專注於圖片中是否存在相符的特徵，而非圖片中何處存在這些特徵，同時也可以減少圖片中的雜訊。每一次的池化在卷積神經網路都被視為一個池化層。除了卷積和池化，為了避免卷積神經網路的計算結果趨近 0 或無限大，必須在其中加入線性整流單元(Rectified Linear Unit, ReLU)，將圖片上的所有負數轉為 0。最後，卷積神經網路演算法會透過全連結層(fully connected layers)集合經過多層卷積層與池化層篩選過的圖片特徵資訊轉化為票數，擁有最高票數的選項將成為這張圖片的類別。

在本計畫中將採用  $256 \times 256 \times 3$  的彩色時頻圖進行卷積神經網路分析，建立時頻圖自動分類模型。其中包含兩層卷積層、兩層池化層，以及兩層全連結層，卷積神經網路模型如圖 2.8。以此方式建立臺灣中部地區崩塌地動訊號自動分類器(圖 2.9)。

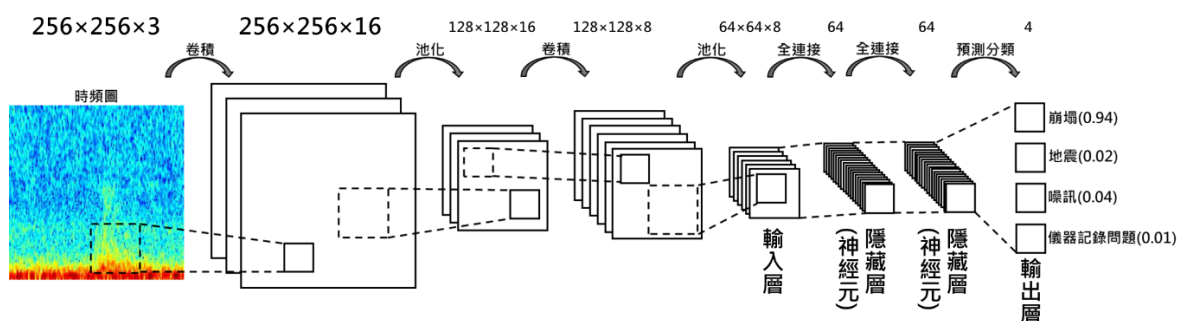


圖 2.8 卷積神經網路示意圖

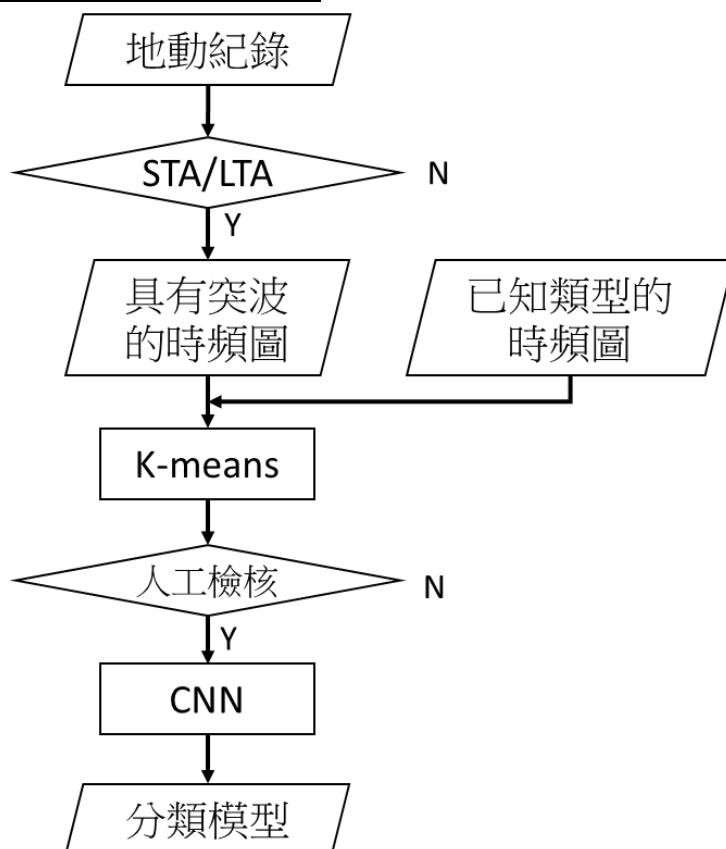


圖 2.9 分類模型建構流程圖

### 三、驗證分類器之可靠度

在機器學習分類應用中，常用混淆矩陣來衡量分類模型的表現，所用指標包括精確率(Accuracy)、召回率(Recall)、準確率(Precision)，以及 F1-score (Kohavi and Provost, 1998)。本計畫中同樣使用混淆矩陣表現卷積神經網路的分類模型之召回率。混淆矩陣常以  $2 \times 2$  矩陣形式呈現出 4 種分類結果，包括真陽性(True Positive, TP)、偽陰性(False Negative, FN)、偽陽性(False Positive, FP)，以及真陰性(True Negative, TN)。再利用這 4 種分類結果便可計算得到精確率、召回率、準確率，以及 F1-score。

表 2.2 混淆矩陣

		實際類別	
		A	B
分類 結果	A	真陽性(TP)	偽陽性(FP)
	B	偽陰性(FN)	真陰性(TN)

## (一) 精確率(Accuracy)：

代表所有被正確分類的樣本佔樣本數的比例。其計算方式如下：

$$\text{精確率} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad \text{式(2.1)}$$

## (二) 召回率(Recall)

代表某一類別樣本被正確分類的比例，可以反映出分類模型對某一類型樣本的敏感度。針對災害事件進行分類時，一般希望事件不會被分類模型遺漏，所以本計畫將召回率作為判斷分類模型表現優劣的最主要依據。

其計算方式如下：

$$\text{召回率} = \frac{TP}{TP + FN} \quad \text{式(2.2)}$$

## (三) 準確率(Precision)

代表被分類為某一類別的樣本中，實際屬於該類別的比例。其計算方式如下：

$$\text{準確率} = \frac{TP}{TP + FP} \quad \text{式(2.3)}$$

#### (四) F1-score

為召回率和準確率的調和平均數，用以衡量分類器精確度的另一種指標，最大值是 1，最小值是 0。計算方式如下：

$$F1 = \frac{2}{\frac{1}{Precision} + \frac{1}{Sensitivity}} \quad \text{式(2.4)}$$

### 第六節 地動訊號定位方法

本計畫採用 Kao and Shan (2004)及 Kao and Shan (2007)提出的震源掃描演算法(SSA)進行崩塌振動源的定位，其程式為 Lee et al. (2019)所製作的反向投影法(back projection method)程式。首先，需將寬頻地震站與短週期地震站的地動紀錄進行前處理，包括訊號裁切、移除平均、移除趨勢、1~3Hz 巴特沃斯帶通濾波、10 秒窗格移動平均、振幅標準化，以及計算包絡線函數，接著再使用震源掃描演算法進行定位。

本計畫所使用之震源掃描演算法定位程式由 Lee et al. (2019)所製作，用於定位振動源座標。若地動事件由 N 個地震站所記錄，將每個地震站的標準化振幅用於計算空間中每一個位置(x)在特定時間(t)的亮度(brightness)。透過搜尋所有位置和時間的亮度函數的局部最大值，可以有效重建振動源的空間和時間分佈。亮度函數的計算公式如下：

$$br(x, t) = \int_{\tau_0}^{\tau_1} \frac{\sum_{i=1}^N (W_i E_i \tau + t_i(x, t))}{\sum_{i=1}^N W_i} d\tau \quad \text{式(2.5)}$$

其中 $E_i$ 是地震站 $i$ 的標準化包絡線； $t$ 是預測到時； $x$ 為崩塌訊號發生位置； $t_i$ 是從崩塌位置到地震站 $i$ 的時間； $W_i$ 是每個地震站的權重因子； $N$ 是用到的測站總數。反向投影法的概念來自時間偏移，計算包絡函數後轉換至時空座標，並在每個時間點計算各站加權值最大的座標位置 $(x, t)$ ，並將其定義為崩塌發生位置與時間，計算時所用到的理論走時為 $S$ 波。

初步定位使用3公里大小的空間網格，在臺灣島海拔10公尺以上的範圍進行搜索，並使用臺灣的三維速度模型(Huang et al., 2014)與三維波線追跡軟體 simulPS12 (Thurber, 1983)計算振波的到時。第二階段以噪訊較低的一地震站為參考站( $n=1$ )，以其地表振動紀錄計算最大振幅的到達時間( $t_{ar}$ )，然後計算所有能夠滿足 $t_{ar} = t + t_{x1}$ 條件的亮度函數，並獲得具有最大亮度函數的 $(x_{max}, t_{max})$ 。第二階段以1公里網格進行定位， $br(x, t)$ 的計算只需要針對以 $x_{max}$ 和 $t_{max}$ 為中心的子網格空間，和時間窗格進行即可(圖2.10)。圖2.11為Lee et al. (2019)使用上述方法定位2012年蘇拉颱風以及2015年蘇迪勒颱風期間發生之崩塌事件，透過搜尋出亮度最大的座標位置 $(x, t)$ ，將其定義為崩塌發生位置與時間。



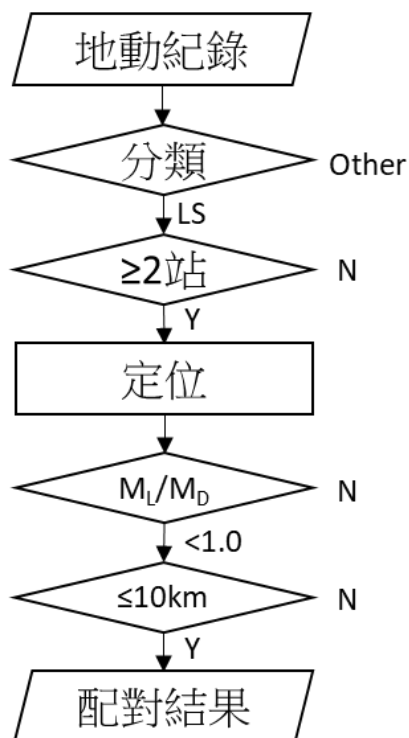


圖 2.10 使用卷積神經網路演算法模型進行崩塌定位流程圖

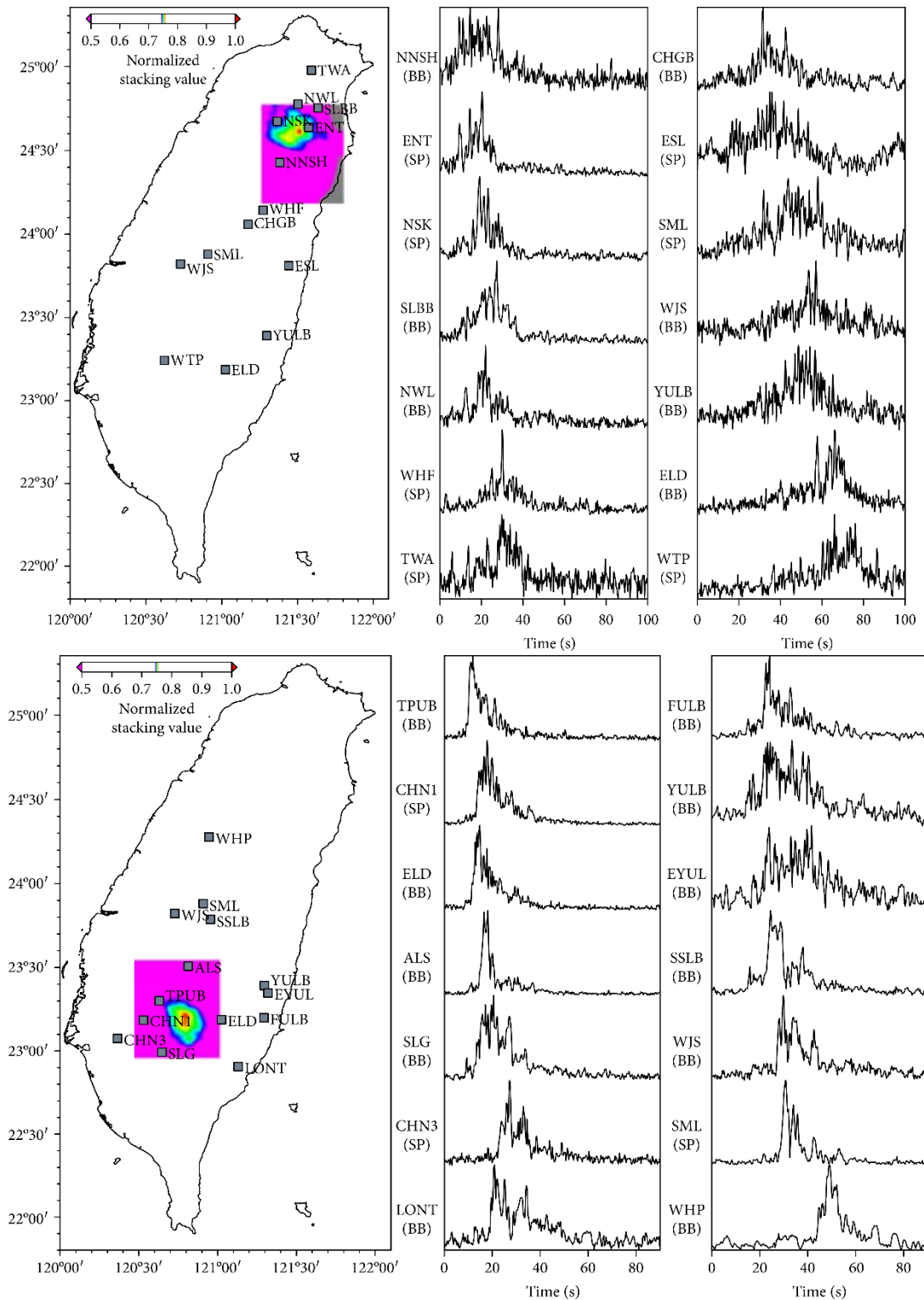


圖 2.11 (左)2012 年蘇拉與 2015 年蘇迪勒颱風造成崩塌之反向投影解；  
(中、右)反向投影法使用到之地表振動紀錄(Lee et al., 2019)。

## 第七節 促崩降雨分析方法

### 一、雨量資料來源

本計畫使用中央氣象局觀測資訊查詢網站(CWB Observation Data Inquire System, CODiS)查詢鄰近崩塌區域的降雨資訊(圖 2.12)，用於分析的降雨資料則是使用距離反比權重內插法(Inverse Distance Weight, IDW)計算出代表崩塌地所在位置的雨量值。



圖 2.12 中央氣象局觀測資訊查詢網站(CWB Observation Data Inquire System, CODiS)

### 二、雨量統計方法

崩塌產生的振動訊號完整記錄大規模崩塌發生的起始時間，經過判釋與配對驗證後，得以藉由振動訊號的時間記錄計算出崩塌發生時當下的雨

量資料。雨場指的是一場豪雨事件的開始至結束，由先前計畫計算崩塌雨場條件的結果來看，長延時降雨是引發大規模崩塌的重要原因之一。在前期計畫內，設定雨場開始時間為每小時降雨大於 4 毫米時，雨場結束時間點訂在連續六小時雨量小於 4 毫米時(圖 2.13)。

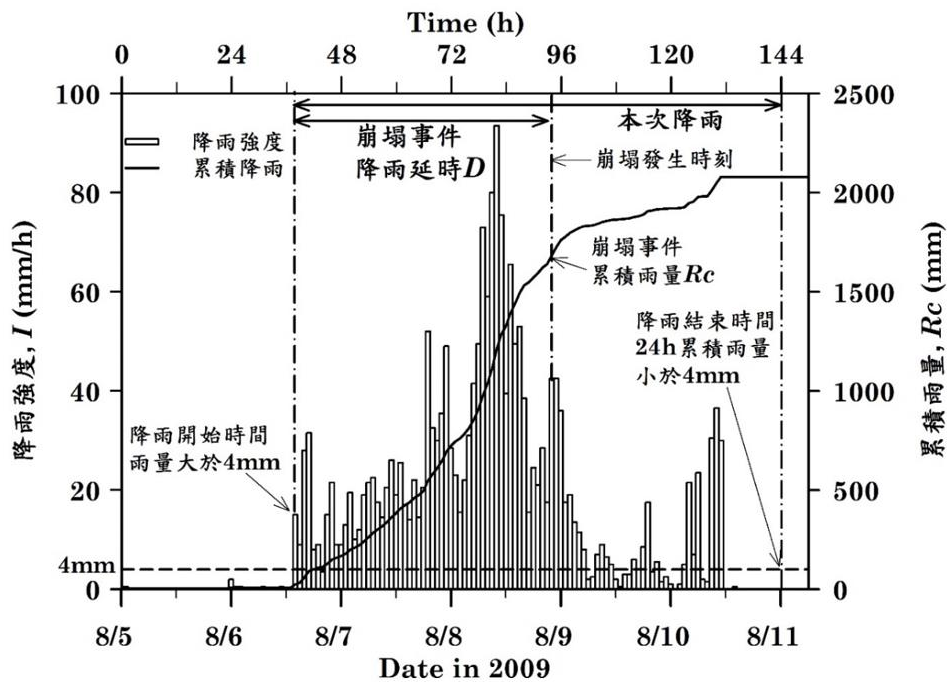


圖 2.13 雨場切割與降雨參數計算示意圖(水土保持局，2020)

統計降雨強度、累積雨量、降雨延時等參數作為引發崩塌的降雨門檻因子分析，累積雨量( $R_c$ )，單位為毫米(mm)；平均降雨強度( $I_a$ )，單位為 mm/h。本計畫為了完整分析促崩雨量與大規模崩塌事件的關係，除了累積雨量外，也加入前期降雨量( $R_a$ )進行促崩雨量條件分析。前人研究對於累積雨量與雨場的定義會因研究不同的邊坡災害而有所差異：網干壽夫(1972)使用當日雨量與事件發生前 14 日的累積雨量，建立土石流的降雨臨界值界線；吳積善等人(1990)在觀測土石流的研究內，使用十分鐘降雨量與前期降雨量建立土石流發生的判別式與受災判別式，而本研究使用前期計畫(水土保持局，

2021)提出的有效累積雨量模式，其中包括有效累積雨量( $R_e$ )、統計至事件前的累積降雨量( $R_c$ )、前期累積雨量( $R_a$ )。其中前期累積雨量以 0.7 指數衰減計算， $R_e$  與  $R_a$  及  $R_c$  的關係則可表示為

$$R_e = R_a + R_c \quad \text{式(2.6)}$$

本計畫選擇三種雨量關係式來進行大規模崩塌促崩雨量門檻降雨條件的討論，分別為  $I_a$ - $D$  法、 $I_a$ - $R_e$  法與  $R_e$ - $D$  法：

(一)  $I_a$ - $D$  法：此方法是目前應用最廣泛的促崩降雨門檻的計算方法，以降雨強度( $I_a$ )與降雨延時( $D$ )作為計算雨量的指標(Caine, 1980; Arattano & Marchi, 2000)，但此方法未將前期降雨加入計算，僅用引發該次事件的降雨資料。將山崩事件之降雨強度與降雨延時以對數座標做圖，利用所有資料點的下緣進行切線，其切線為雨量門檻值曲線(圖 2.14a)，公式為： $I_a = aD^{-b}$ 。為了使  $I_a$ - $D$  法的計算方式一致，本計畫採用 5% 的涵蓋資料數繪成的曲線，並採用高斯機率函數作為累積機率模型，再以利用乘冪回歸分析得到的曲線斜率作為降雨門檻曲線斜率，藉此得到累積機率為 5% 時的資料曲線公式，作為下緣曲線公式。

(二)  $I_a$ - $R_e$  法：使用平均降雨強度( $I_a$ )與有效累積雨量( $R_e$ )作為雨量指標(圖 2.14c)，訂出崩塌事件發生的臨界降雨線(詹錢登，2004)。此法將崩塌事件發生的平均降雨強度與累積雨量作圖，利用韋伯法計算在累積機率 5% 時的兩者乘積，將此乘積值作為降雨臨界門檻值，而  $I_a$ - $D$  法則是取用累積機率 5% 時的曲線公式設定為降雨臨界門檻。

(三)  $R_e$ - $D$  法：使用累積雨量( $R_e$ )與降雨延時( $D$ )作為計算雨量的指標(圖 2.14b) (范正成等人, 2002)。其方法與  $I_a$ - $R_e$  法相似，但是取用的參數不同，皆是以韋伯法計算在累積機率 5% 時的兩者乘積作為門檻值。

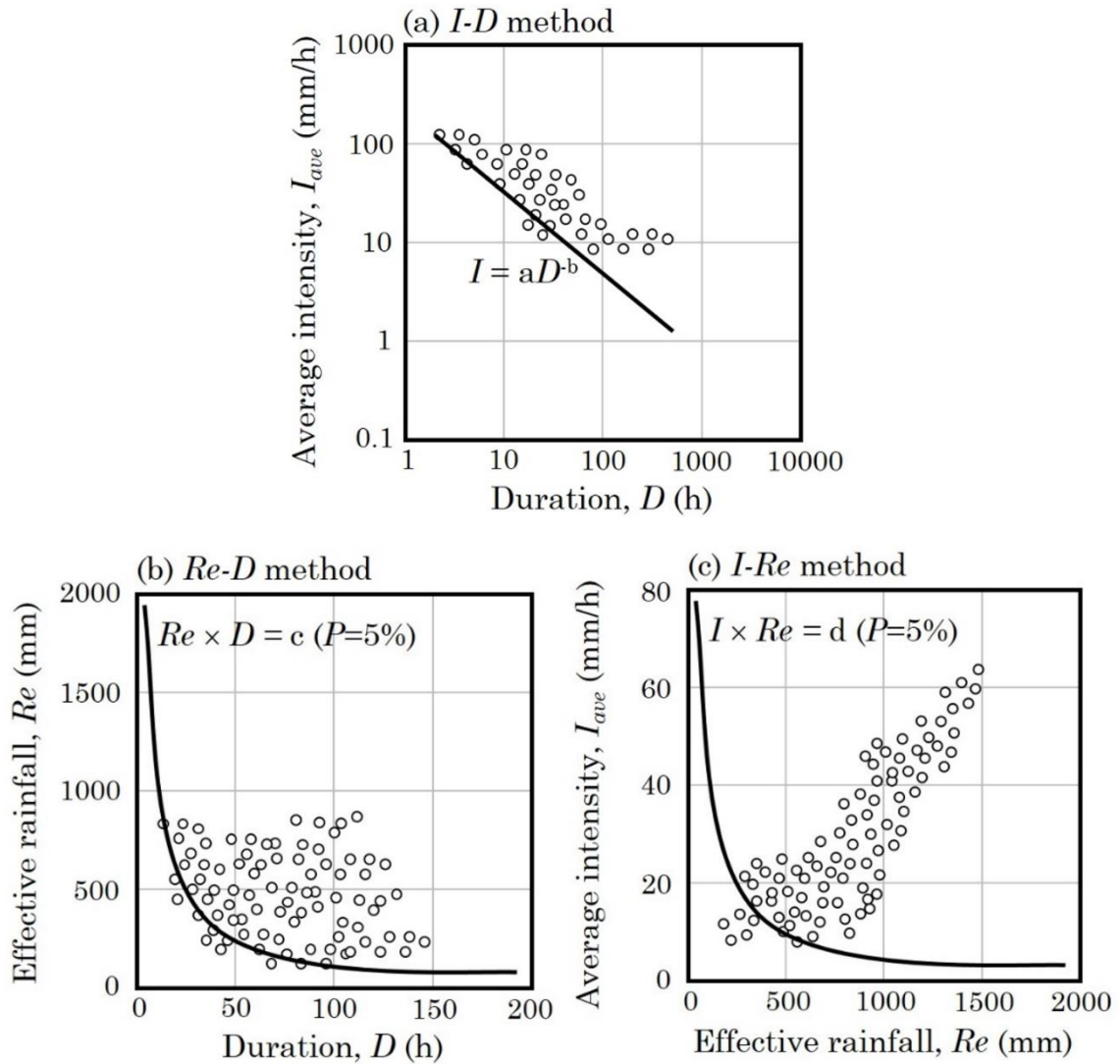


圖 2.14 三種常見雙雨量參數門檻曲線(水土保持局, 2020)



## 第三章 崩塌地表振動觀測站挑選與條件討論

### 第一節 計畫採用之地表振動觀測站分布

臺灣本島設有數百處地震站，維護及資料收集耗費巨大，本計畫目前挑選位於中部地區及鄰近地區 41 處地震站進行崩塌地動訊號觀察使用，使用到的資料時間段為 2012 至 2021 年的地動訊號資料。地震站分布圖請見第二章圖 2.2，以下討論地震站於研究區域內分布狀況，以及針對中部山區大規模崩塌優先辦理區之觀測地震站規劃。

#### 一、地震站分布狀況討論

本計畫所採用的寬頻地震站位於中部地區西側平原、台地及東側山區，分布範圍較短週期地震站廣。寬頻地震站之紀錄的可用頻段為 0.0083 Hz 至 50 Hz。寬頻地震儀之優勢為能夠記錄地動訊號的頻率範圍較為寬廣，以及其感測器較靈敏，能夠記錄到資訊豐富的地動訊號，且寬頻地震儀敏感度高。短週期地震站主要為 S-13 地震儀，自然頻率為 1 Hz。考量短週期地震儀的自然頻率約 1 Hz，其採樣率為每秒 100 點，短週期地震站紀錄的可用頻段為 1 Hz 至 50 Hz。強震儀屬於加速度型地震儀，自然頻率為 50 Hz，紀錄的可用頻段為 DC 至 50 Hz。

地震站多設置於戶外空間，受到設站周邊環境、儀器穩定性等因素影響，必然存在停電、故障、記錄失敗等運作不正常現象。2011 年的中部地區自由場強震網資料收集報告甚至提及多達 1/3 儀器有報修的記錄(王乾盈等人，2011)，顯示地震儀本身的穩定性是非常值得注意的問題。另外，若地震儀非屬於即時地震站，記錄異常問題便得等待現地資料收集時才會發現，而無法立即處置導致可能錯失事件的記錄，亦難以運用於即時防災資訊收集。



例如，2022 年 10 月 16 日發生於台 7 線 86.5K 的崩塌地，附近即有一處短週期地震站距離崩塌地僅約 800 公尺，但地表振動觀測資料並無正常回傳資料中心。考量地震站分布狀況、地震儀特性、運作狀態等條件，若欲收集現有地震站紀錄，建議可優先使用記錄較穩定的寬頻地震站，再考量觀測站包覆不足的問題，挑選其他地震站以滿足崩塌地動定位的需求。理論上增加地震站數量將有助於增加可用於地動訊號辨識的紀錄數量，以及提高振動源定位時的完整包覆度。考量中部山區現有地震站分布狀況，可以明顯發現研究區內高山區域廣，不易設站也不易維護，因此高山地區地震站數量較少，尤其以研究區東南側玉山山脈的地震站密度最低。若考量研究區東南側高山地區的土砂災害保全對象較少，地震站數量較少的狀況應仍在可接受的程度。若需要大量增設地震站，較建議採用地聲計，並優先針對具有保全對象且活動性較大的邊坡周邊增設地動觀測站，雖靈敏度無寬頻地震儀高，但對於針對邊坡尺度的監測與後續分析來說已經足夠。

## 第二節 中部大規模崩塌優先辦理區地動觀測站選擇

中部山區範圍內有 6 處水土保持局劃設之大規模崩塌優先辦理區，分別為編號 D036(松茂 1)、D016(達觀)、T003(新佳陽)、D052(梨山)、T002(九份二山)，以及 D066(廬山)，其分布位置如第二章圖 2.1 所示。本計畫分別針對各個大規模崩塌優先辦理選擇 3 座鄰近地震站，使其對潛勢邊坡形成三角包覆，將有利於後續崩塌地動訊號監測及相關應用。針對各潛勢崩塌邊坡規劃的 3 座地震測站整理於表 3.1，目前所挑選之地震站優先選擇寬頻地震儀，以及測站紀錄品質，再考量與崩塌潛勢邊坡間之距離。

本計畫的主要目標為崩塌地動訊號的辨識，目前現有地震儀紀錄皆能運用於製作時頻圖或計算特徵，以用於後續製作崩塌地動訊號的分類模型。

再經過振動源的定位後，便能提供崩塌發生時間及位置等重要資訊。現今中部地區大規模崩塌優先辦理區及鄰近地震站的距離如表 3.1 所示，可以發現到其中 2 處大規模崩塌優先辦理區與最近之地震站的距離不到 2 公里，分別為新佳陽與梨山大規模崩塌潛勢區(圖 3.1)。FUSS 地震站的觀測紀錄便可以用於監測這兩處大規模崩塌潛勢區的塊體運動，同時 FUSS 地震站也可以做為松茂 1 大規模崩塌潛勢區的相關地震站。由於松茂 1、梨山、新佳陽大規模崩塌潛勢區位置相近，也可都採用 TDCB 地震站作為崩塌振動的監測站。然而，這三處大規模崩塌潛勢區的第三處地震站便與邊坡距離較遠。本計畫目前建議可選用 WHF 和 NNSB 地震站，但若欲增設地震站，建議可優先考量於松茂 1 及梨山之間設置地震站，便能在最少設站成本的條件下，同時對松茂 1、梨山、新佳陽大規模崩塌潛勢區進行崩塌振動訊號監測，並用於區分三處崩塌之訊號。本計畫於松茂 1 及梨山之間架設 1 處臨時地震站(梨山站)。

表 3.1 鄰近高風險大規模崩塌潛勢區之地震站

名稱	測站 1(距離 km)	測站 2(距離 km)	測站 3(距離 km)
松茂 1	FUSS (4.73)	TDCB (11.73)	NNSB (13.06)
梨山	FUSS (0.98)	TDCB (9.52)	WHF (12.24)
新佳陽	FUSS (1.65)	TDCB (7.06)	WHF (12.30)
廬山	清境站 (3.14)	WUSB (7.99)	OWD (8.59)
達觀	WHP (5.84)	SANB (9.97)	NSY (18.52)
九份二山	TYC (6.18)	DPDB (11.99)	WNT (17.77)

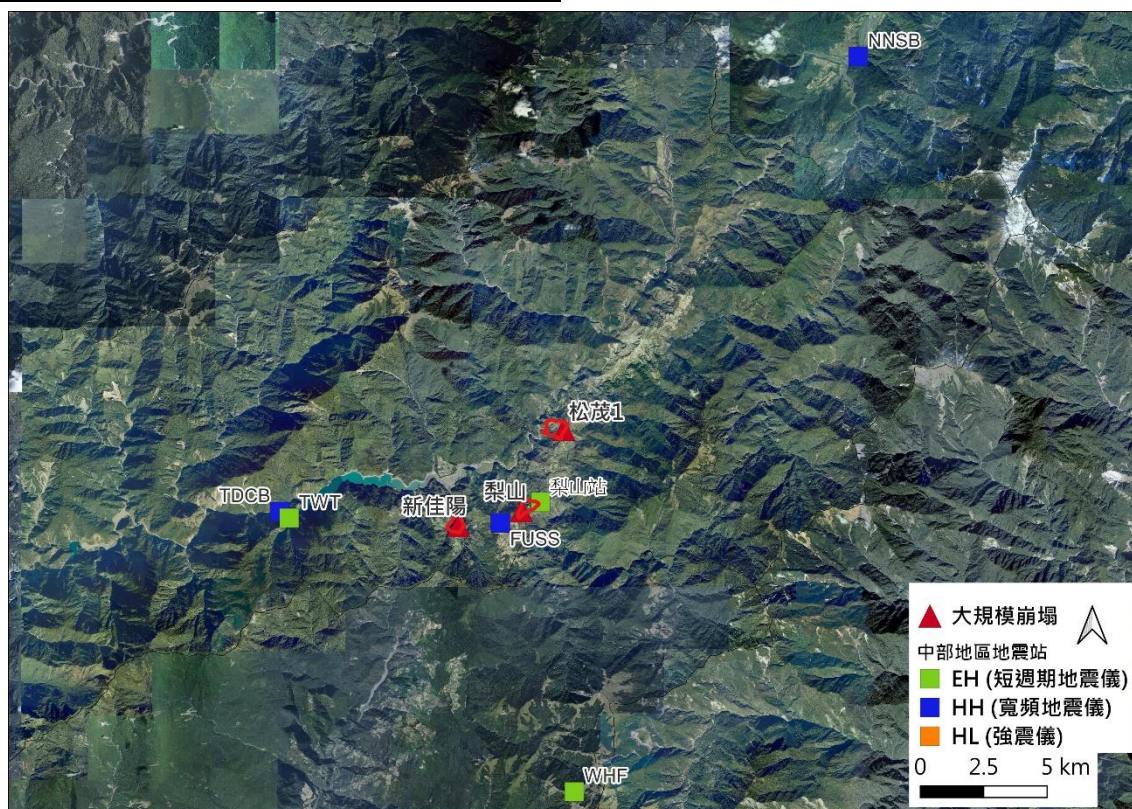


圖 3.1 松茂 1、梨山、新佳陽大規模崩塌優先辦理區與鄰近地震站

廬山大規模崩塌潛勢區是中部地區 6 處高潛勢大規模崩塌邊坡中，周邊鄰近 3 處地震站分布條件最佳的 (圖 3.2)。最近的 CHGB 地震站與廬山邊坡距離為 3.28 公里，另外 2 處地震站與邊坡的距離也不超過 10 公里，且三處均為寬頻地震站。然而，CHGB 地震站現已停用，為彌補 CHGB 地震站，本計畫於鄰近 CHGB 地震站區域架設 1 處臨時地震站(清境站)。

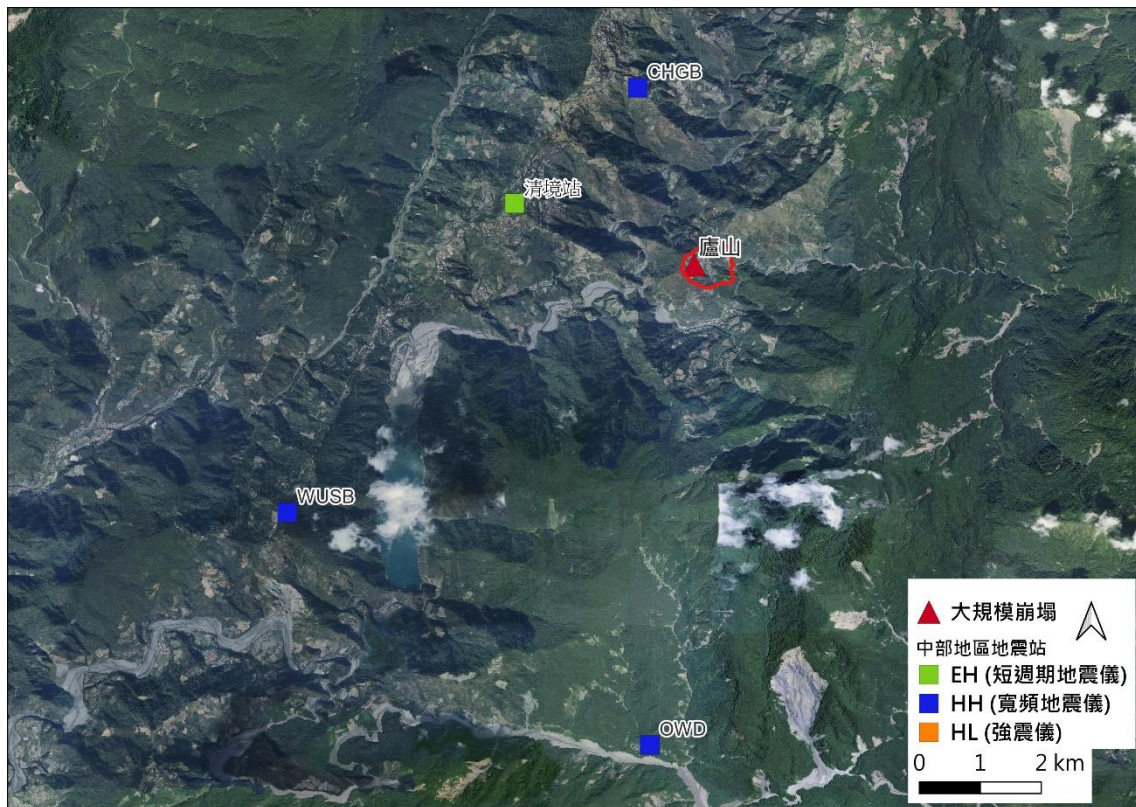


圖 3.2 廬山大規模崩塌優先辦理區與鄰近地震站

達觀大規模崩塌潛勢區周邊最近之地震站為 WHP 地震站(圖 3.3)，與邊坡距離 5.84 公里，其次則為位於苗栗縣內的 SANB 地震站。但位於邊坡西方的 NSY 地震站與達觀邊坡之間的距離達 18 公里，且已鄰近人為活動稠密地區，地表振動觀測紀錄可能受到更複雜的環境條件影響。

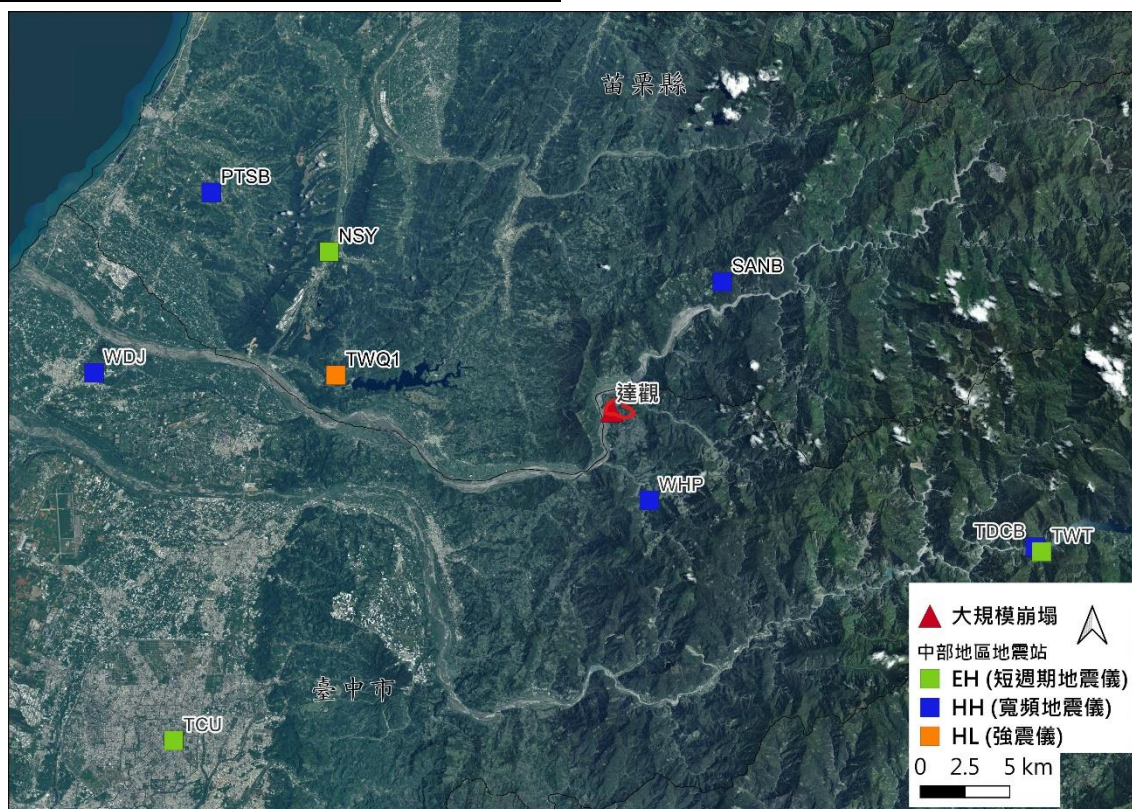


圖 3.3 達觀大規模崩塌優先辦理區與鄰近地震站

九份二山大規模崩塌潛勢區周邊最近之地震站為 TYC 地震站(圖 3.4)，與邊坡距離 6.18 公里，但其他兩處地震站與邊坡的距離便超過 10 公里。本計畫目前建議選擇的三處地震站中僅 DPDB 為寬頻地震站，其他兩處為短週期地震儀。若欲增設地震站，建議可考量於九份二山大規模崩塌潛勢區西南側設置地震站。

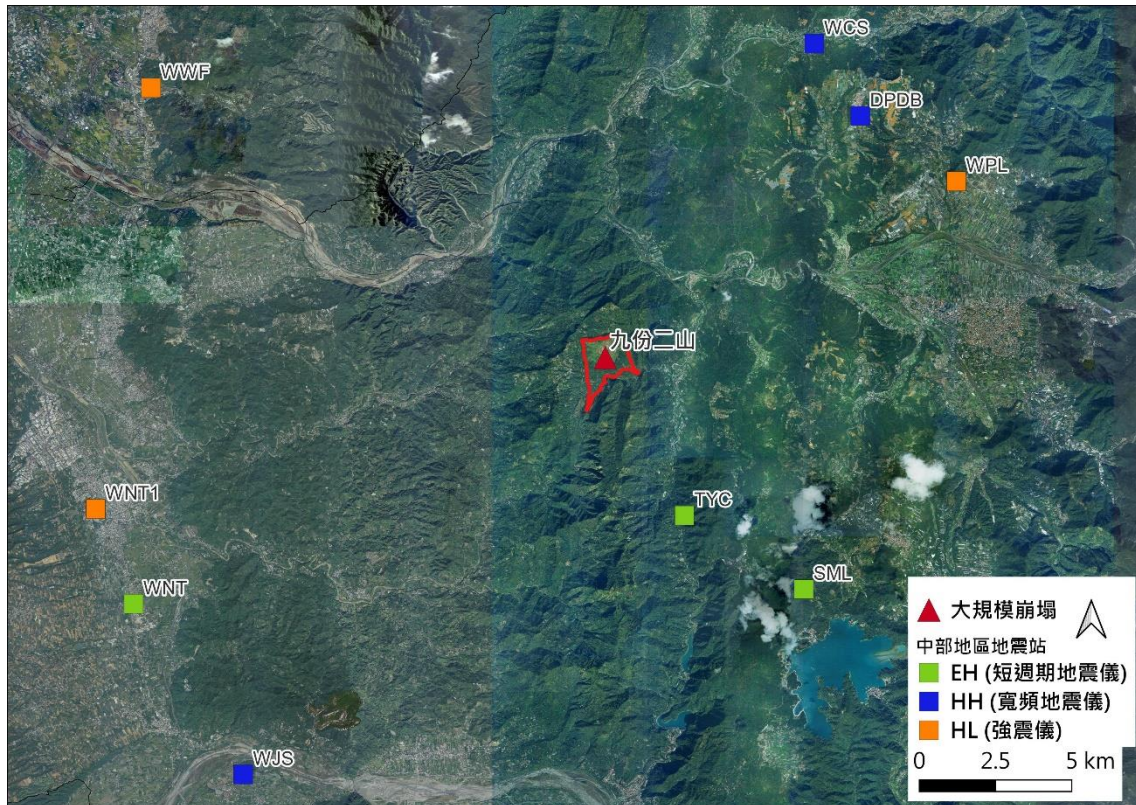


圖 3.4 九份二山大規模崩塌優先辦理區與鄰近地震站



## 第四章 計畫成果

### 第一節 分類訓練樣本集群分析結果與豪雨期間地動紀錄

足夠數量的崩塌地動訊號樣本是建構機器學習分類器的基礎，且訊號樣本必須具備典型之崩塌地動特徵，才能對分類器的訓練造成較正面的影響。因此，本計畫建構中部地區之自動分類模型的首要工作便是以 K-means 集群分析方法對大量具有突波的振動訊號進行快速分群，再比對已知類別的振動訊號的分群位置，獲取大量的地震、崩塌，以及其他環境噪訊的地動訊號，作為後續進行機器學習演算法訓練的基礎樣本。為了更有效率在特定時間段的連續地震儀紀錄中挑選出大量的崩塌地動訊號，便以 2012 年後，中部地區(台中市和平區德基雨量站)累積降雨量超過 300 mm 或日降雨量超過 100 mm 的降雨事件期間的地動訊號為訓練樣本收集的目標事件，事件清單如表 4.1。再加入前期計畫中，已經針對 2009 年莫拉克颱風及 2015 年蘇迪勒颱風，以人工辨識的方式所建立的崩塌地動訊號訓練樣本，做為最後辨別崩塌振動樣本所在分群的依據。因此，本計畫針對表 4.1 中所列之豪雨期間的連續地動紀錄先進行 STA/LTA 偵測，再以集群分析方法進行地動訊號分群，最後仍要以人工辨識的方式辨別分群結果中哪一個集群具有崩塌地動訊號的時頻圖特徵。

表 4.1 2012 年至 2020 年間的豪雨事件

年	月	日	降雨量(mm)	備註
2012	6	10~13	861	0610 豪雨
2012	8	2	185.5	蘇拉颱風
2013	4	5	136.5	0405 豪雨



2013	5	17~21	342.5	0519 豪雨
2013	7	13	261	蘇力颱風
2013	8	21	117	潭美颱風
2013	8	22	123.5	潭美颱風
2014	7	23	212	麥德姆颱風
2015	5	20~27	422	0520 豪雨
2015	9	28	149.5	杜鵑颱風
2016	3	10	102	0310 豪雨
2017	6	1~4	585	0601 豪雨
2017	6	14~18	529	6013 豪雨
2017	7	29	167	尼莎颱風
2018	1	9	105	0109 豪雨
2018	5	9	105	0509 豪雨
2019	5	17~18	330	0517-0520 豪雨
2019	6	11~14	299.5	0611 豪雨
2019	8	9	105.5	利奇馬颱風
2020	5	22	160.5	0522 豪雨

在進行連續地動資料偵測過程發現，因為地震儀設站條件及儀器紀錄有誤等因素影響，部分偵測結果為異常訊號，且數量眾多。最常見之儀器紀錄問題即為紀錄中斷再恢復時所產生的突波，或是長達數分鐘的紀錄中斷(圖 4.1)。正常環境噪訊亦可能存在小突波，而被偵測獲得，然而從其時頻圖中可能無法觀察到突波產生的高能量特徵，該種狀況亦非常常見(圖 4.2)。地震儀紀錄中也可能出現地震站周遭環境中穩定且頻繁出現的振動，可能是自然作用(例如:河流、風等)，或非自然作用(例如:車輛、施工)等振動作用影響，而在突波偵測時被挑選出來(圖 4.3)。

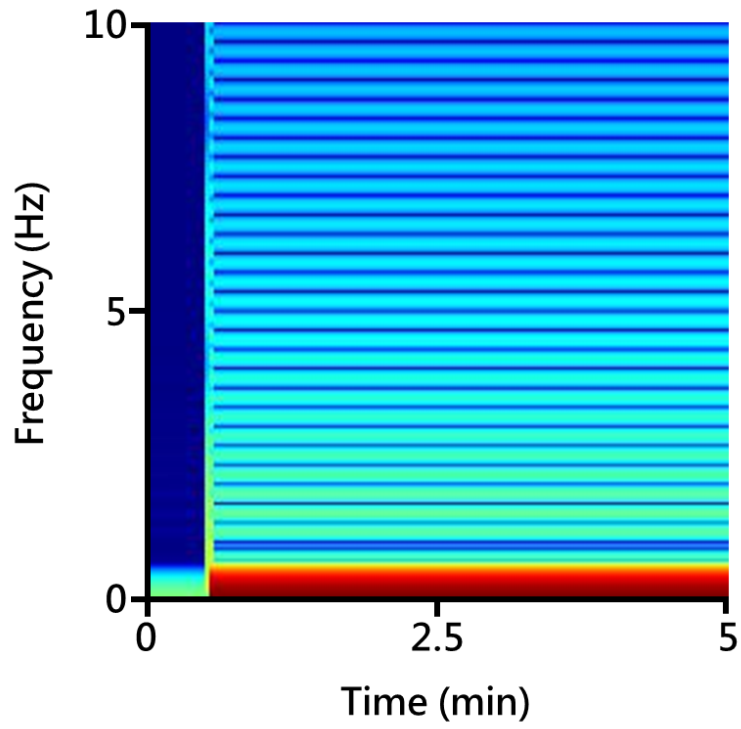


圖 4.1 儀器記錄故障狀況下的時頻圖

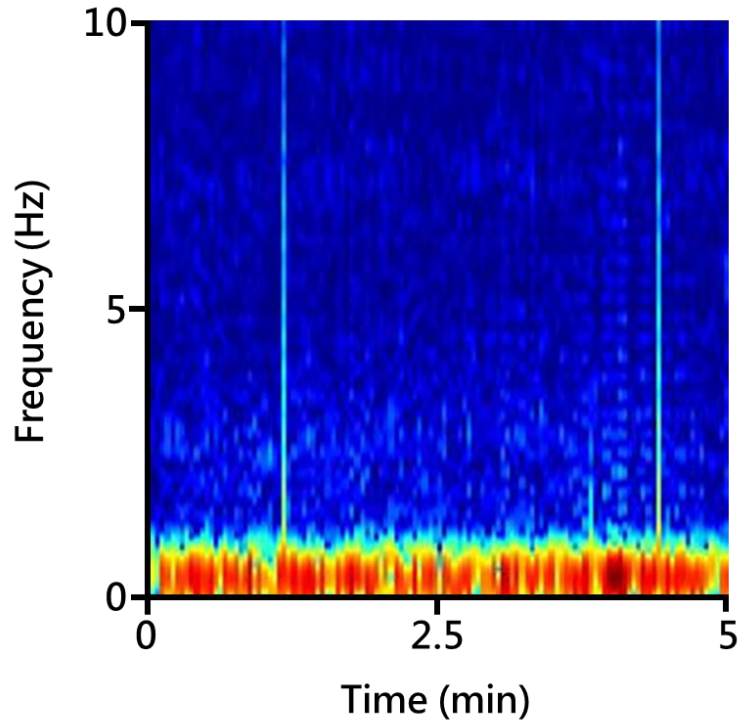


圖 4.2 環境噪訊中小突波的時頻圖

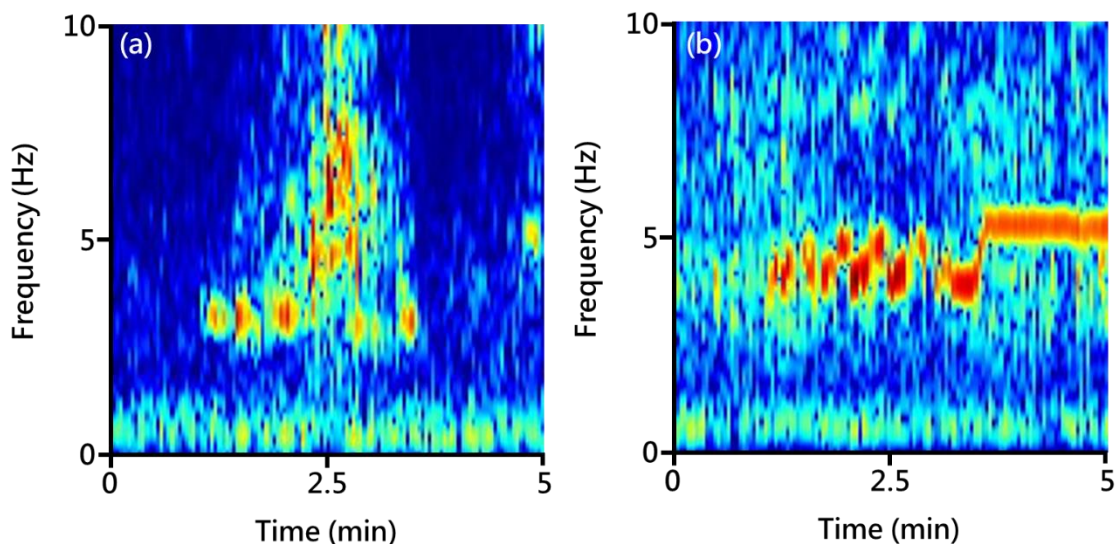


圖 4.3 環境噪訊中(a)車輛及(b)施工的時頻圖

若以人工挑選方式進行訓練樣本的挑選，必然因為大量的環境噪訊或儀器記錄有誤的狀況而曠日廢時，非監督式集群分析便能有效降低挑選所需之地震及崩塌振動訓練樣本的時間，同時也減少人工辨識時因分析人員主觀判斷造成的辨識差異。由於本計畫針對 41 處地震站紀錄進行崩塌和地震振動樣本的搜尋，經 STA/LTA 的偵測後，獲得具有突波的訊號數量超過 20 萬筆，並使用人工判釋以及豪雨事件比對挑選之後，分析在豪雨事件內的崩塌事件，若找出崩塌事件期間無豪雨事件，則後續並無分析該事件。若同時將所有突波之時頻圖同時進行 K-means 集群分析，將超過一般電腦之負荷，故本計畫仍將所有時頻圖根據地震儀類型分為兩個資料集，分別進行 K-means 集群分析。

將寬頻地震儀紀錄的 K-means 集群分析結果以 t-SNE 將高維度的資料轉換至低維度，便能繪製成 2 維圖形(圖 4.4a)，雖然其缺點是無法得知是哪兩個維度的特徵值被挑選出來製圖，也無法以物理原理解釋特徵數值所代表的涵義，但在本計畫中僅是用於繪製散佈圖呈現分群效果，並無使用 t-

SNE 的降維結果。從圖 4.4 可以發現，分群中存在 4 群應屬於儀器記錄問題或環境噪訊(圖 4.4b、圖 4.4c、圖 4.4e、圖 4.4f)，其中一群應屬於地震(圖 4.4d)，剩下的一群具有崩塌地動訊號特徵(圖 4.4g)。

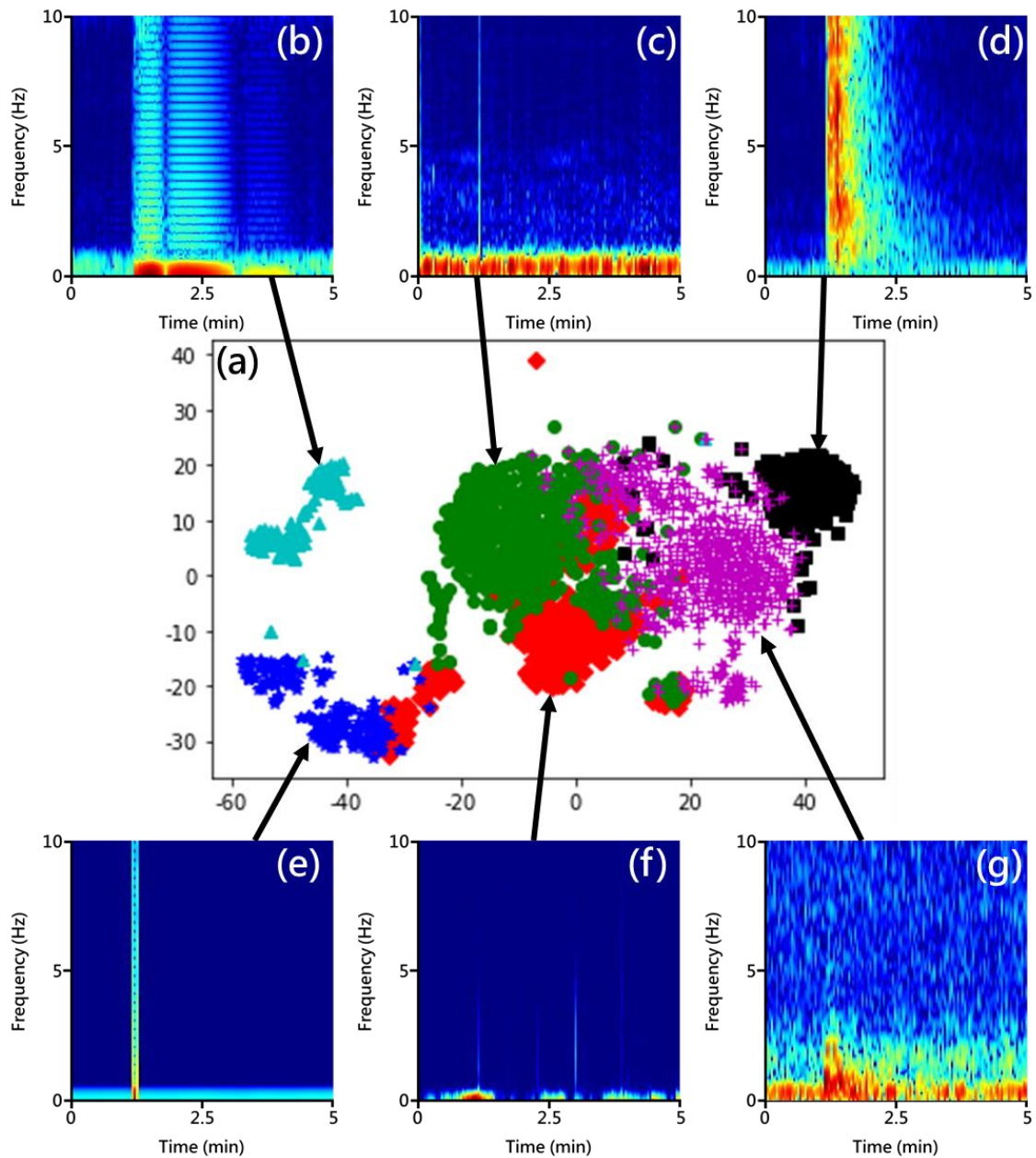


圖 4.4 寬頻地震站紀錄的 K-means 集群分析結果

同樣地，將短週期地震儀紀錄的 K-means 集群分析結果繪製成 2 維圖形可以發現(圖 4.5a)，分群中存在 4 群應屬於儀器記錄問題或環境噪訊(圖 4.5b、圖 4.5c、圖 4.5e、圖 4.5f)，其中一群應屬於地震(圖 4.5g)，剩下的一群具有崩塌地動訊號特徵(圖 4.5d)。

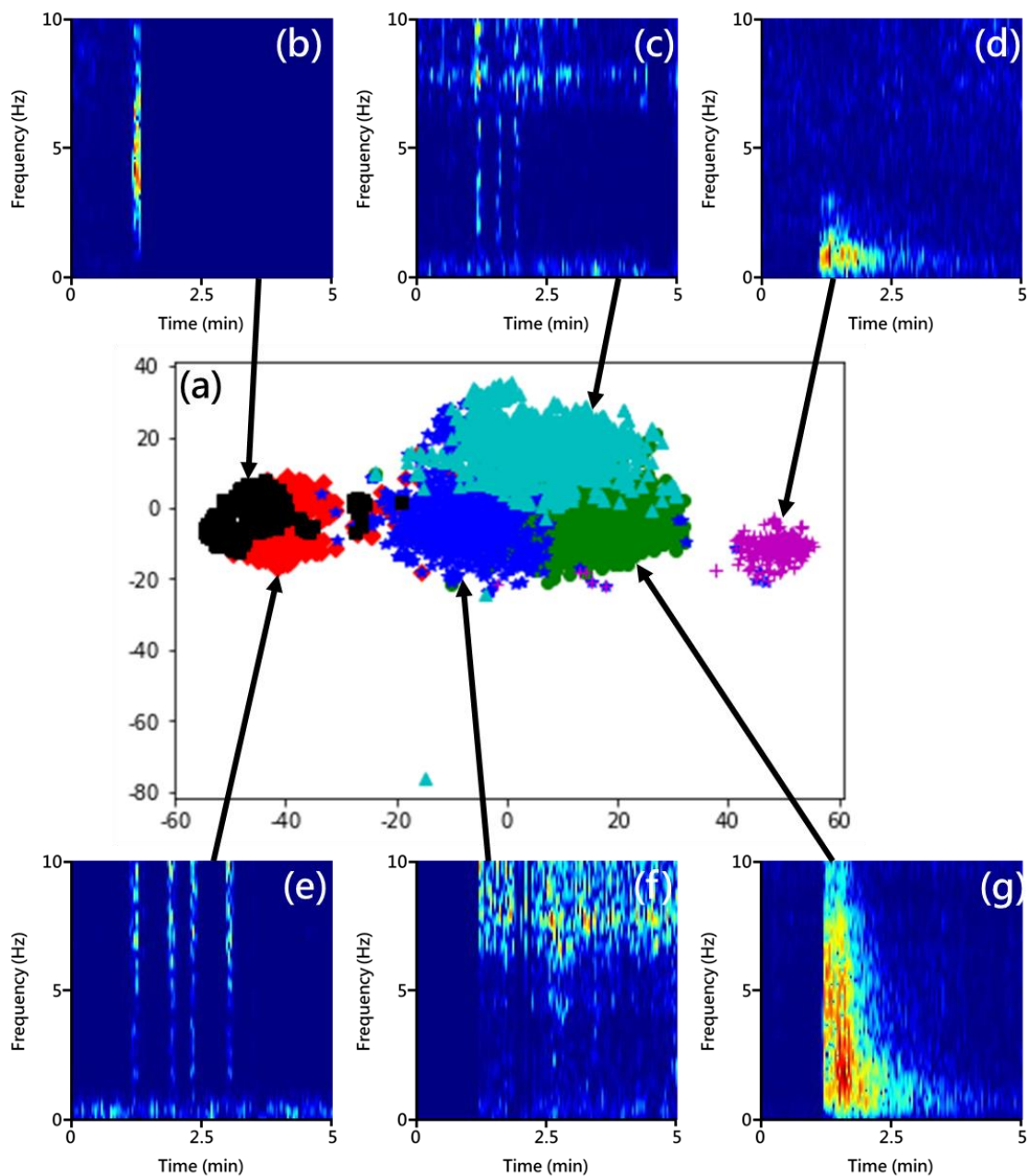


圖 4.5 短週期地震站紀錄的 K-means 集群分析結果

由於在資料集中均有摻入前期計畫所辨識獲得的地震及崩塌訊號，因此在此在集群分析後，便能很輕易就從分群結果中得知哪一群具有崩塌訊號特徵，在透過人工辨識就能快速有效地將崩塌地動訊號從大量地震紀錄中挑選出來，作為後續卷積神經網路訓練及驗證樣本使用。

## 第二節 卷積神經網路分類模型與驗證

在前期計畫中，以隨機森林演算法建立地動訊號的自動分類器，所遭遇的最主要問題即為不同地震儀具備不同的環境雜訊及儀器特性，因此利用地動紀錄直接計算特徵數值可能會存在不同的基準值。另外，在 5 分鐘的地動紀錄中通常也涵蓋了 2~4 分鐘非事件段訊號而干擾了特徵值的計算，若僅計算具有突波的資料段又因為並不包含環境噪訊段而無法凸顯事件的能量突發現象。上述因素導致須針對不同類型地震儀製作不同的訊號分類器，造成分類器的運用上較不便利，且可能需要不斷更新分類器。

本年度計畫改用深度學習卷積神經網路演算法建構地動訊號時頻圖的分類模型，由於崩塌或地震訊號不論在何種類型地震儀的記錄下，都會呈現其獨特的時頻特徵，卷積神經網路演算法也僅針對圖片中的圖案的特徵進行辨識，而非以統計數值進行分類，所以將有機會改善過去使用隨機森林演算法建置分類器所產生之問題。

本計畫採用卷積神經網路演算法訓練分類模型，其中 80% 的樣本用於訓練模型，另外 20% 用於驗證分類模型。模型驗證結果如表 4.2 所示，775 驗證樣本中，有 748 筆被正確分類，以及 9 筆被分類為噪訊，對於崩塌地動訊號的召回率為 97%；810 筆地震驗證樣本中，有 766 筆被正確分類，以及 16 筆被分類為崩塌，對於地震的召回率為 95%；786 筆噪訊驗證樣本中，有 745 筆被正確分類，對於噪訊的召回率為 95%；781 筆儀器問題訊號驗證樣本中，有 762 筆被正確分類，對於噪訊的召回率為 96%。上述結果顯示，地動訊號均能有超過 95% 的召回率。但在環境噪訊中確實可觀察到許多訊號存在類似崩塌地動訊號的時頻圖特徵，而導致分類模型的辨識失誤。如圖 4.6 的環境噪訊中，即存在類似崩塌地動訊號的時頻特性，而導致被分類為崩塌訊號。

表 4.2 卷積神經網路分類模型的混淆矩陣

		實際類別				準確率
		地震	崩塌	噪訊	儀器問題	
分類 結果	地震	766	11	9	2	0.97
	崩塌	16	748	16	8	0.95
	噪訊	25	9	745	9	0.95
	儀器問題	3	7	16	762	0.97
召回率		0.95	0.97	0.95	0.98	

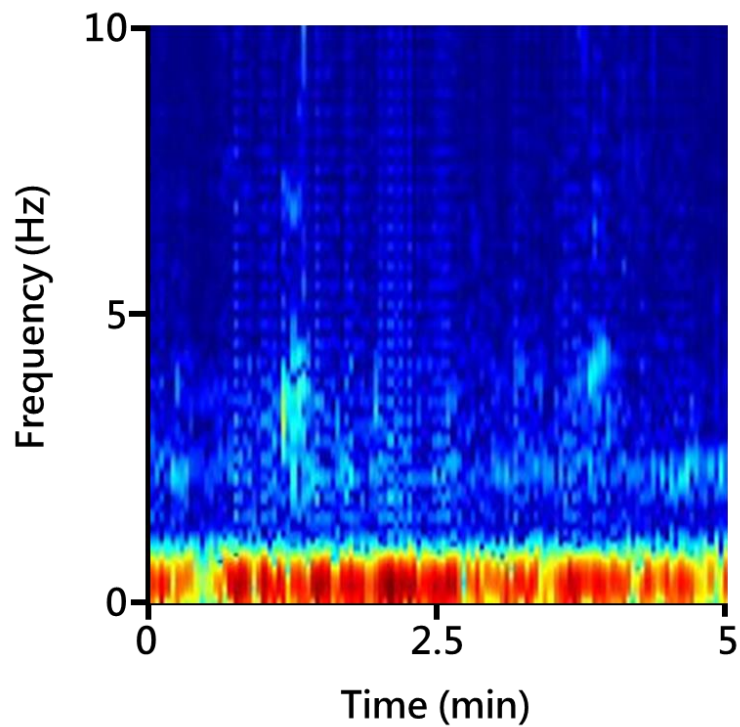


圖 4.6 容易被分類模型誤判為崩塌訊號的環境噪訊時頻圖



### 第三節 地動訊號分類模型的應用

將卷積神經網路演算法所建立的地動訊號分類模型應用於中部地區的 41 處地震站紀錄，其流程如圖 4.7。將偵測獲得的崩塌地動訊號進行時間比對後，最終共有 36 個時間點可於至少 2 個以上的地震站紀錄中同時偵測到崩塌地動訊號(表 4.3)。圖 4.8 為其中一場崩塌地動事件，包含 4 個地震站紀錄。

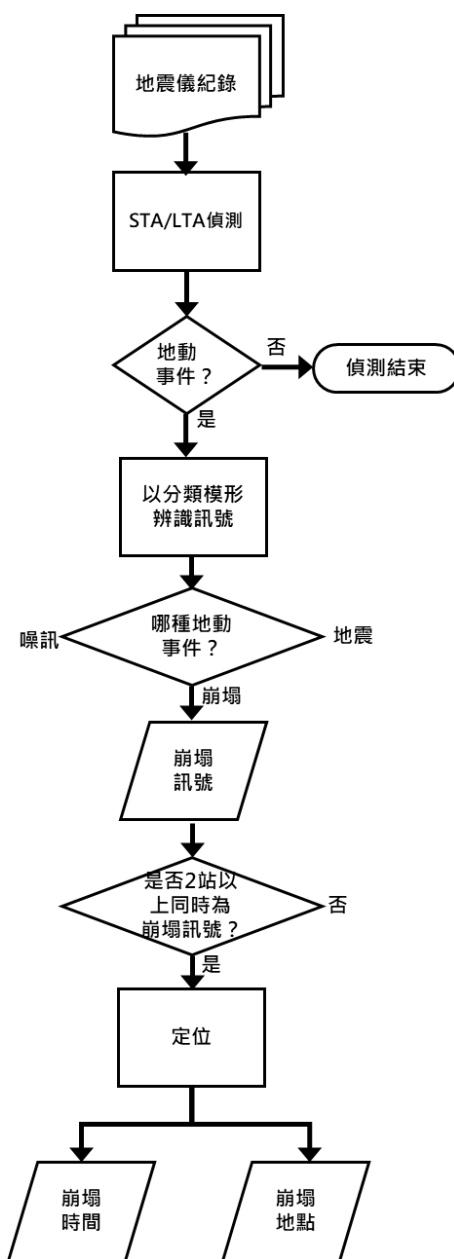


圖 4.7 地動訊號分類模型應用流程圖

表 4.3 同時 2 個以上的地震站偵測到崩塌地動訊號之時間目錄(UTC)

	年	月	日	時	分	事件備註
1	2012	04	27	05	42	0427 豪雨
2	2012	06	10	05	36	0610 豪雨
3	2012	06	10	07	28	0610 豪雨
4	2012	06	10	09	29	0610 豪雨
5	2012	06	10	12	56	0610 豪雨
6	2012	06	11	14	30	0610 豪雨
7	2012	08	02	19	03	蘇拉颱風
8	2013	05	21	03	16	0519 豪雨
9	2013	05	21	05	07	0519 豪雨
10	2013	05	21	06	14	0519 豪雨
11	2013	05	21	06	22	0519 豪雨
12	2013	05	21	08	10	0519 豪雨
13	2013	05	21	11	46	0519 豪雨
14	2013	08	21	09	39	潭美颱風
15	2013	08	22	01	49	潭美颱風
16	2014	05	21	18	20	0519 豪雨
17	2014	07	23	07	52	哈吉貝颱風
18	2015	05	26	00	24	0520 豪雨
19	2015	05	26	16	48	0520 豪雨
20	2017	06	02	22	33	0601 豪雨
21	2017	06	03	04	02	0601 豪雨
22	2017	06	04	13	23	0601 豪雨
23	2017	06	04	18	50	0601 豪雨
24	2017	06	04	20	07	0601 豪雨
25	2017	06	14	00	36	0613 豪雨
26	2017	06	16	01	51	0613 豪雨
27	2017	06	16	11	54	0613 豪雨
28	2017	06	17	14	29	0613 豪雨
29	2018	05	09	08	05	0509 豪雨
30	2018	05	09	21	32	0509 豪雨
31	2019	05	18	02	04	0517-0520 豪雨

	年	月	日	時	分	事件備註
32	2019	06	14	07	56	0611 豪雨
33	2019	06	14	08	21	0611 豪雨
34	2019	08	11	04	46	0811 豪雨
35	2019	08	11	17	56	0811 豪雨
36	2019	08	11	18	17	0811 豪雨

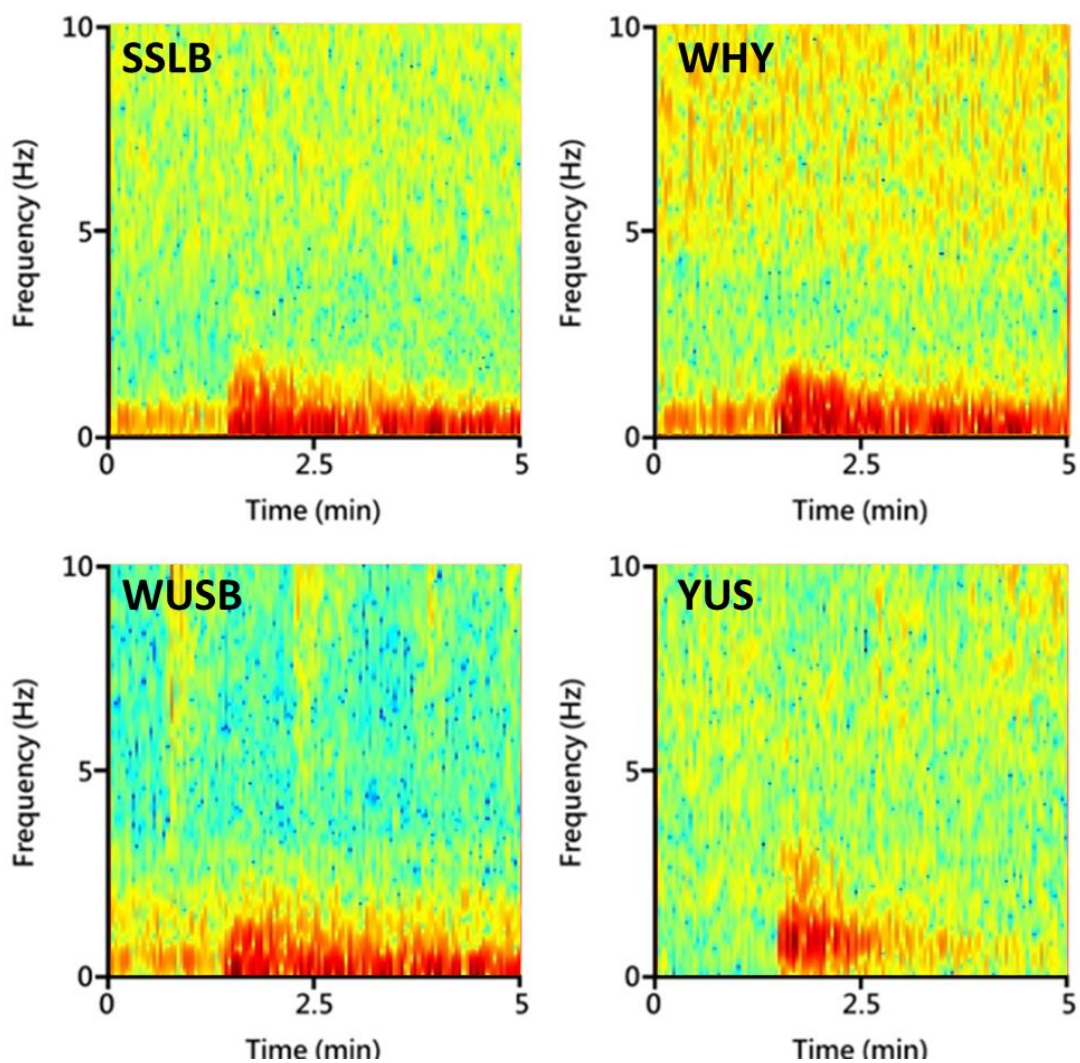


圖 4.8 2017 年 6 月 2 日 22:32 (UTC)崩塌地動訊號

#### 第四節 崩塌地動訊號的特徵值

參考 Kao 等人(2007)與前期計畫所使用的地動訊號時間域統計值，本計畫同樣分別針對崩塌與地震訊號進行了 8 項時間域特徵值的計算，包含由移動平均(Moving Average, MA)及閃爍指數(Scintillation Index, SI)兩種時間域特徵值所衍生出來的 8 項特徵值，一般被認為可以用來量化地動訊號的時間域能量隨時間的變化。

移動平均值(MA)是計算地動紀錄的移動平均值，用於反映在時間域中訊號能量隨時間的變化趨勢。其原理是對連續的每一個移動窗格內之訊號振幅絕對值計算其平均值，其計算公式如下：

$$i\mu_{|y|} = \left( \sum_{j=i-\frac{N-1}{2}}^{j=i+\frac{N-1}{2}} |y(j)| \right) / N \quad \text{式(4.1)}$$

其中  $i\mu_{|y|}$  表示為第  $i$  個計算窗格的移動平均值； $y$  為窗格內振幅值； $|y(j)|$  代表第  $j$  個數據點的振幅絕對值； $N$  代表以  $i$  為中心點的時間窗格內的資料點總數。在計算移動平均值前，會先將地動紀錄之振幅取絕對值，再以最大振幅值的平均值將地動紀錄進行標準化，再將標準化後的地動紀錄放大 10 倍，使後續計算之特徵值更具鑑別力(Kao et al., 2007)。雖然經過標準化後的移動平均值能反映地動訊號隨時間的振動能量演變趨勢，但並非地動訊號之物理規模。

在前期計畫中，對於地震、崩塌及噪訊等三種類型地動訊號範例之移動平均計算如圖 4.9 所示。由於噪訊的振幅波動不明顯，因此經過標準化後訊號的振幅絕對值較大，也產生較大的移動平均值；地震及崩塌地動訊號

有明顯的事件段高振幅，因此地動紀錄在經過標準化後，除主要事件段之振幅絕對值較大之外，其餘噪訊段的振幅絕對值會被壓低，而產生較小的移動平均值。

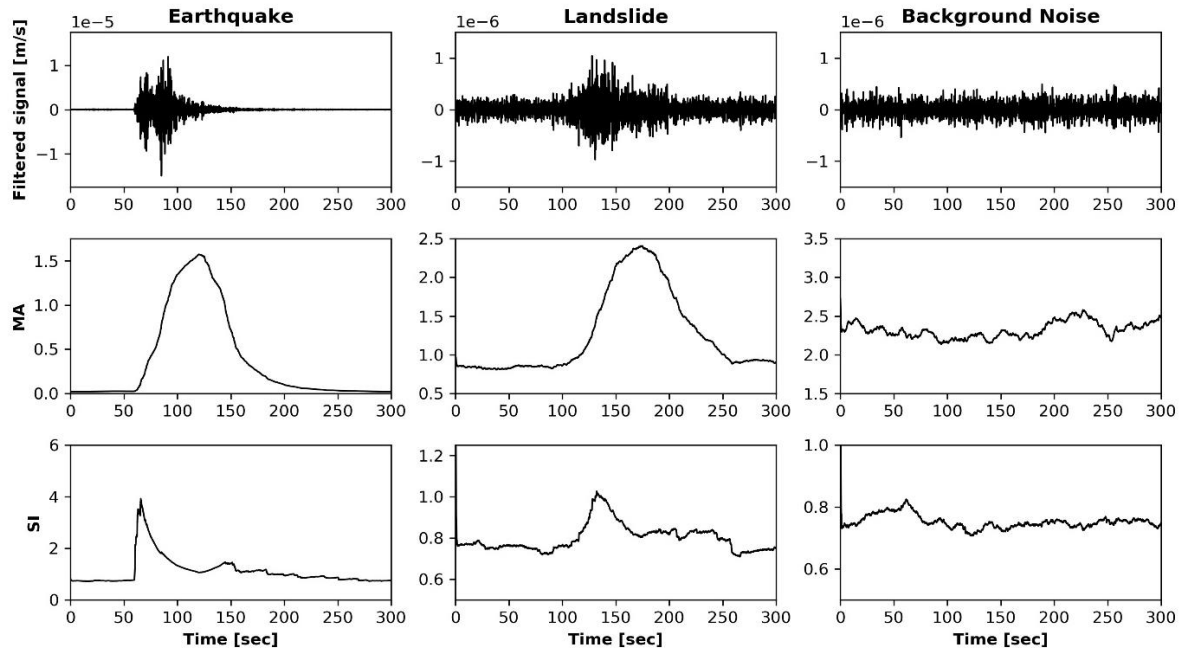


圖 4.9 不同類型地動事件之移動平均及閃爍指數波形(水土保持局，2020)

由 MA 的計算結果可以衍生出 4 項統計指標，用於反映地動訊號能量的分布狀況，分別為移動平均值的平均值( $\mu MA$ )、標準差( $\sigma MA$ )、移動平均比(Moving Average Ratio,  $MAR$ )及標準差平均值比值( $\sigma MA/\mu MA$ )。其計算公式分別如下：

$$\mu MA = \left( \sum_{i=1}^K i|\mu_{|y|} \right) / K \quad \text{式(4.2)}$$

$$\sigma MA = \sqrt{\sum_{i=1}^K (|y(i)| - \mu MA)^2 / K} \quad \text{式(4.3)}$$

$$MAR = MA_{max} / \mu MA \quad \text{式(4.4)}$$

其中 $|y(i)|$ 代表第 $i$ 個數據點的振幅絕對值； $K$ 代表訊號段內的資料總數。整體而言，在移動平均值的部份，因為對 5 分鐘地動紀錄進行標準化，崩塌地動訊號之移動平均值一般會大於地震。

閃爍指數一般是用來計算無線電波強度變化之指標(Yeh and Liu, 1982)，同樣也能用於呈現地動訊號強度的變化(Kao et al., 2007)。當地動事件發生導致訊號強度改變時，閃爍指數值便會驟然上升，反映出突發振動的相對強度。其計算公式如下：

$$SI_i = \sqrt{[(i\mu_{|y|}^2 - i\mu_{|y|}^2) / i\mu_{|y|}^2]} \quad \text{式(4.5)}$$

其中  $i\mu_{|y|}^2$  代表以 $i$ 為中心點的時間窗格內的振幅絕對值平方的移動平均值；

$i\mu_{|y|}^2$  代表以 $i$ 為中心點的時間窗格內的振幅絕對值的移動平均值的平方。由地動紀錄的閃爍指數時間函數可以衍生出 4 項統計指標，用於描述閃爍指數在地動紀錄窗格中的數值分布狀況，分別為閃爍指數的平均值( $\mu SI$ )、標準差( $\sigma SI$ )、閃爍指數比(Scintillation Index Ration,  $SIR$ )及標準差平均值比值( $\sigma SI / \mu SI$ )。相較於環境噪訊，地震及崩塌均存在明顯的振幅波動，閃爍指數與閃爍指數相關的 4 項統計指標中的標準差及移動平均比(閃爍指數比)數值都會高於環境噪訊，而平均值的大小依序為地震、崩塌、噪訊。

運用上述移動平均與閃爍指數的計算方法，計算出本計畫所獲得之崩塌地動訊號的 8 項時間域特徵值，其統計結果如表 4.4。同時，也將計畫中做為地震訊號的訓練樣本進行 8 項特徵值的計算。表 4.4 呈現了兩類訊號的各項特徵值之平均值，其統計結果顯示崩塌訊號之移動平均確實大於地震訊號，但兩者之移動平均的平均值( $\mu MA$ )差異並不明顯，而移動平均的標

準差與移動平均比才呈現較為顯著的差異。有關閃爍指數的相關特徵值統計結果則顯示出，崩塌與地震的特徵值差異非常有限。由此可知，崩塌與地震都會產生與環境噪訊顯著差異的突波，因此與閃爍指數相關的各項特徵值計算結果差異不大，表示閃爍指數應較適合用於區分崩塌與環境噪訊，而難以運用於區分崩塌與地震訊號。

參考吳昱杰(2017)及 Chang et al. (2021)利用芮氏規模與時間規模的比值 ( $M_L/M_D$ )區分崩塌地動訊號與地震訊號，吳昱杰(2017)認為當  $M_L/M_D$  大於 1.0，應為地震所產生之振動訊號，Chang et al. (2021)更進一步提出崩塌所產生的地動訊號之  $M_L/M_D$  應小於 0.85。本計畫亦在振動源定位後計算  $M_L/M_D$ ，得到 CNN 分類模型辨識為崩塌地動訊號且定位之事件的  $M_L/M_D$  全數小於 0.8，與上述兩篇前人研究之結論相符。

表 4.4 崩塌與地震訊號的時間域特徵值統計結果

特徵值	崩塌	地震
$\mu MA$	1.67	1.58
$\sigma MA$	0.65	0.28
MAR	2.27	1.73
$\sigma MA/\mu MA$	0.29	0.26
$\mu SI$	0.82	0.83
$\sigma SI$	0.15	0.15
SIR	1.92	1.80
$\sigma SI/\mu SI$	0.16	0.14
$M_L/M_D$	0.71	> 1.0

## 第五節 崩塌地動訊號源定位與配對結果

本計畫將地動訊號分類器運用於中部地區 2012 年至 2020 年的連續地動紀錄，以及後續人工再檢核後，總共找出 6 個時間點可於至少 2 個以上的地震站紀錄中同時偵測到崩塌地動訊號，並進一步進行崩塌振動源定位。圖 4.10 為其中一起被 2 個以上地震站記錄之崩塌地動事件時頻圖，崩塌地動訊號之定位結果如圖 4.11 所示。在 2012 年至 2020 年間，共有 6 起崩塌地動事件的定位結果位於中部地區內。進一步結合 109 年計畫、110 年計畫與本計畫之定位結果，共有 23 處位於中部山區之崩塌進一步進行促崩降雨條件分析。

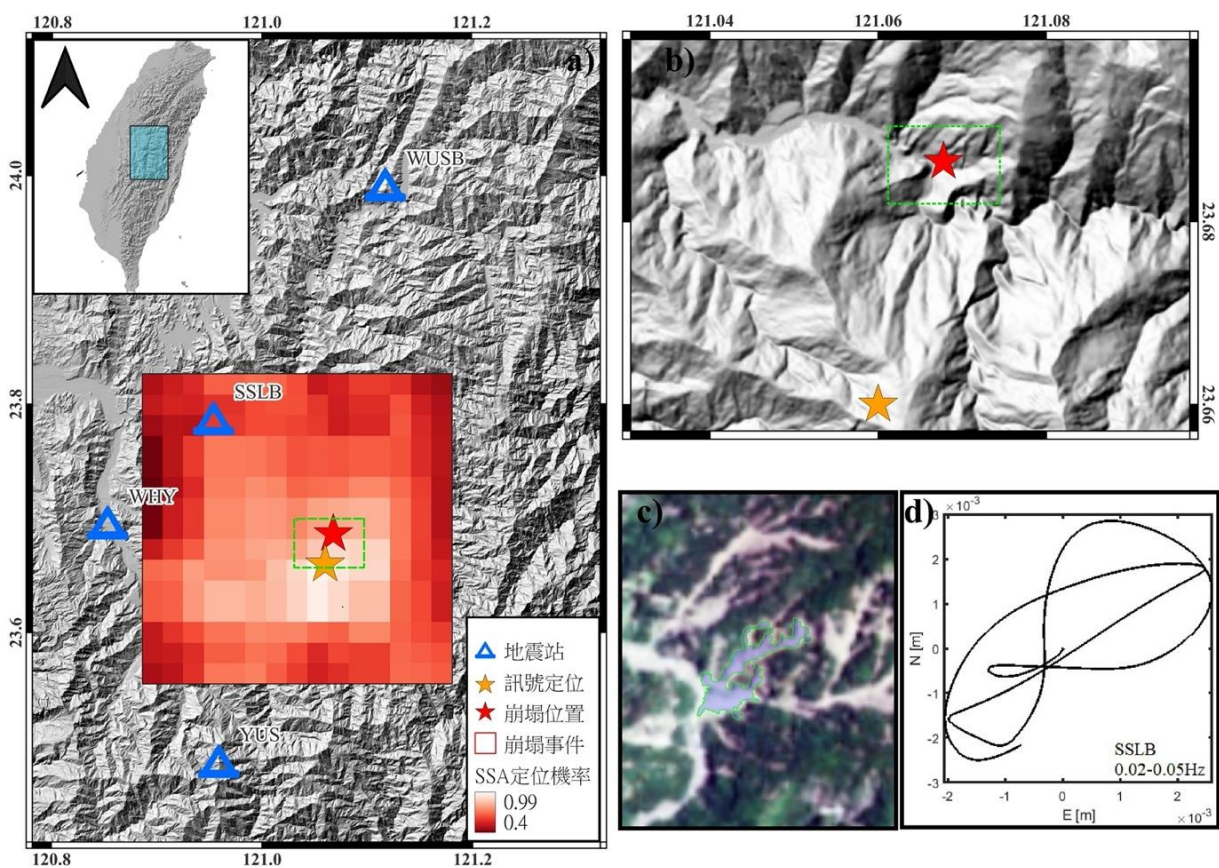


圖 4.10 發生於 2017 年 6 月 2 日 22:32 (UTC) 的崩塌地動事件，(a) 定位用測站分佈與定位結果，(b) 定位點與崩塌位置，(c) 崩塌圈繪(取自 BigGIS 中 2017 年事件型崩塌目錄)，(d) SSLB 站訊號振盪軌跡。



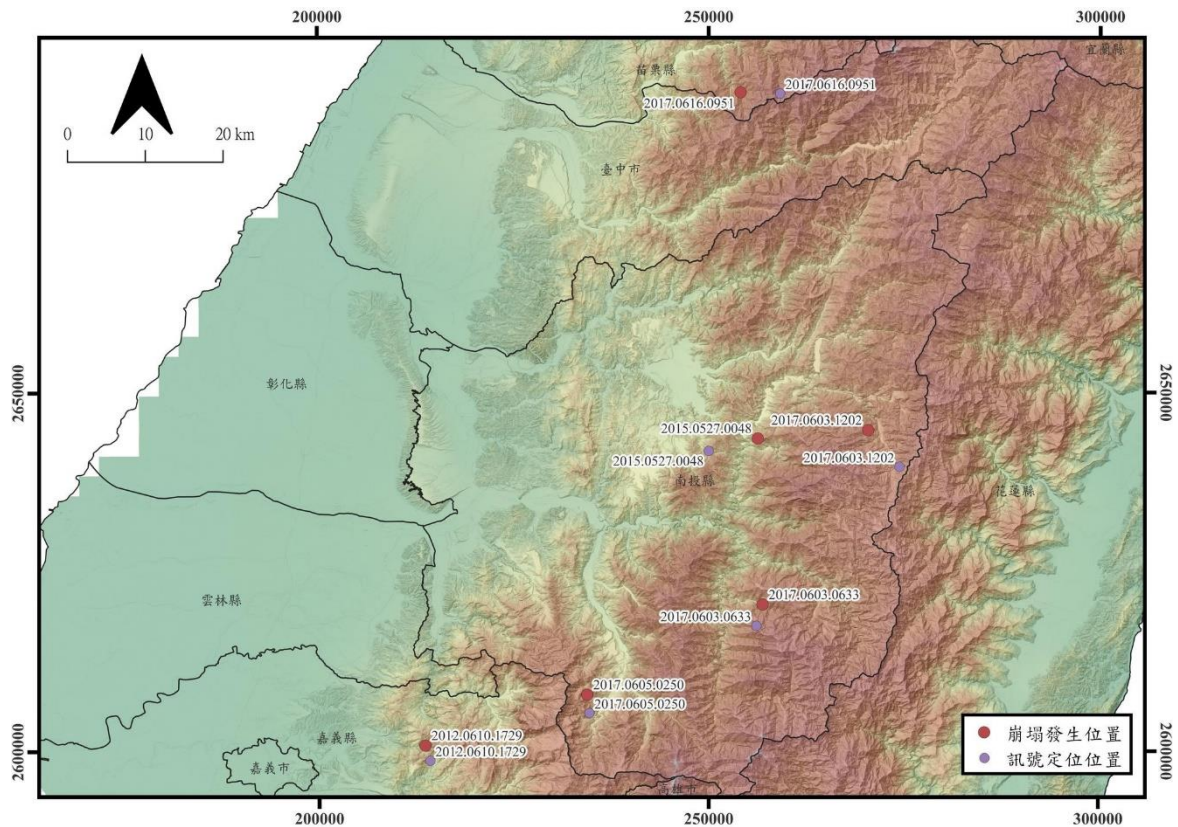


圖 4.11 具有崩塌特徵之地動事件的定位結果

本計畫在完成地動訊號定位後，先參考吳昱杰(2017)及 Chang et al. (2021)針對崩塌與地震在  $M_L/M_D$  數值的差異，確認屬於崩塌地動訊號之機率較高後，再利用水土保持局建置的巨量空間資訊系統(Big Geospatial Information System, BigGIS)之事件型崩塌目錄，進行振動源定位與實際崩塌為置的配對。BigGIS 的事件型崩塌目錄為依照降雨事件前後期影像進行判釋，該崩塌事件會有判釋的面積、降雨事件、前後期影像等資料，方便利用定位結果進行事件配對。將定位完成之事件與 BigGIS 中之事件型崩塌目錄進行配對，配對預設誤差範圍為 10 公里，亦即在定位結果附近十公里處皆可能為此定位結果之配對崩塌事件。

除了以  $M_L/M_D$  及距離為配對方式之外，若 10 公里範圍內存在 2 處以上崩塌地，本計畫亦利用最近崩塌位置之地震站的訊號繪製震盪軌跡，並且以坡向與震盪軌跡主要方向相近之崩塌地為配對結果。以上述配對條件為依據，6 起崩塌地動事件的定位結果均在 10 公里範圍內成功配對實際崩塌地(表 4.5、表 4.6)。

表 4.5 中部 6 起事件詳細資料-1

編號	崩塌時間	流域 (BigGIS 年度 編號)	崩塌座標 (TWD97_X)	崩塌座標 (TWD97_Y)	崩塌 類別
1	2012.0610.0929	嘉義牛稠溪 (693)	213620.845	2600699.161	新生
2	2015.0526.1648	南投武界保 留地(10)	256286.054	2643480.227	新生
3	2017.0602.2233	南投巒大溪 (521)	256912.785	2620314.231	再活動
4	2017.0603.0402	南投萬大南 溪(183)	270431.999	2644653.039	再活動
5	2017.0604.1850	南投神木三 號溪(579)	234403.346	2607747.877	再活動
6	2017.0616.0151	苗栗南坑溪 (376)	254076.139	2691753.028	再活動

表 4.6 中部 6 起事件詳細資料-2

編號	崩塌時間	崩塌面積 (平方公尺)	坡度(°)	坡向(°)
1	2012.0610.0929	7825.3	36.2	237.1
2	2015.0526.1648	5469.1	39.1	239.2
3	2017.0602.2233	27793.0	40.4	245.0
4	2017.0603.0402	111045.7	29.4	108.5
5	2017.0604.1850	21142.9	43.4	161.4
6	2017.0616.0151	3774.0	43.5	123.0

## 第六節 增設清境以及梨山臨時地震站

本次計畫於清境及梨山地區分別各架設了 1 處地震站(表 4.7、圖 4.12、圖 4.13)，期望能對臺灣中部具有大規模崩塌潛勢區的山坡地進行地表振動訊號的監測。本次架站的設備包含地聲計、Datacube、GPS、太陽能板、鉛蓄電池、太陽能板控制器，採樣頻率設定為 100Hz，進行全天候的訊號偵測，並將其架設完成後使用防水帆布封起。清境站於 2022/8/16 完成架設(圖 4.14 至圖 4.15)，梨山站則於 2022/8/17 完成架設(圖 4.16 至圖 4.17)。截至期末報告撰寫日，兩處臨時地震站已完成兩次資料回收作業，且目前均正常運作中。分別將一天的資料繪製成時頻圖展示如圖 4.18 至圖 4.21，其中 2022/10/1 為無降雨發生日，2022/10/16 則有降雨。

將 2022/10/16~10/18 於清境站及梨山站所記錄之地動訊號運用於突波偵測及訊號分類模型，分別偵測到 98 個與 147 個顯著的突波事件(圖 4.22 至圖 4.27)，再經過自動訊號分類後，兩站均無辨識出可能為崩塌引致之振動訊號。

表 4.7 架站位置資訊

站名	經度	緯度	海拔(公尺)	架設時間
清境	121°09'14.86"	24°02'29.94"	1757	2022/8/16
梨山	121°15'29.28"	24°15'30.92"	1904	2022/8/17

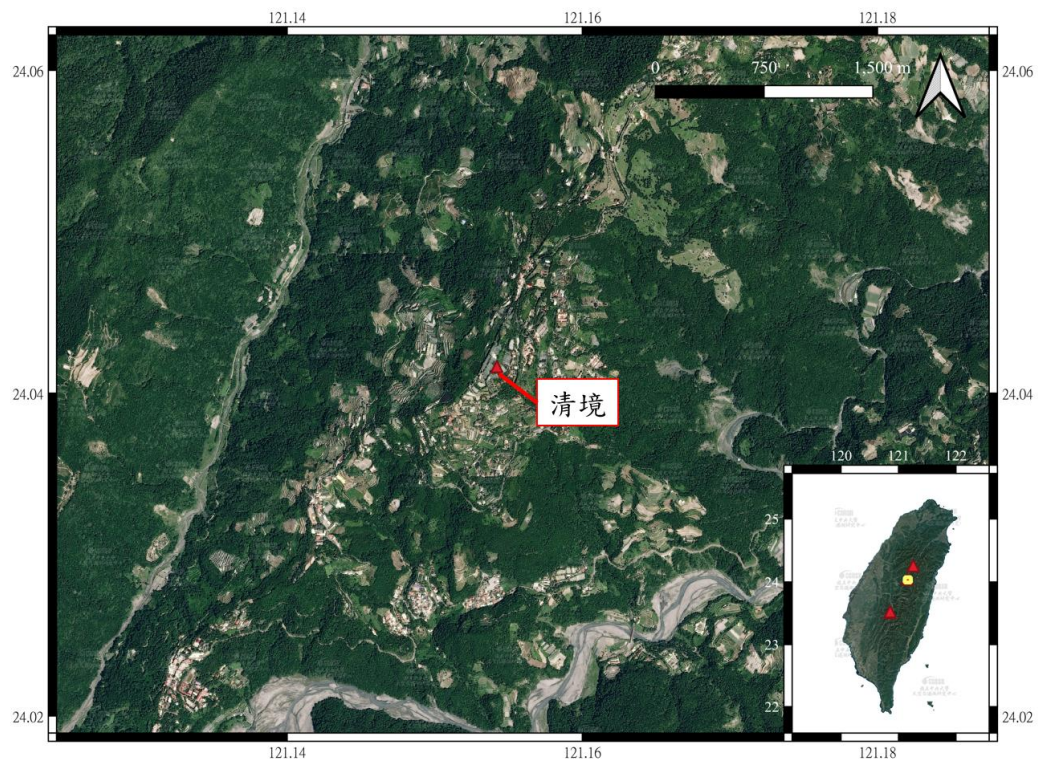


圖 4.12 清境站架站位置

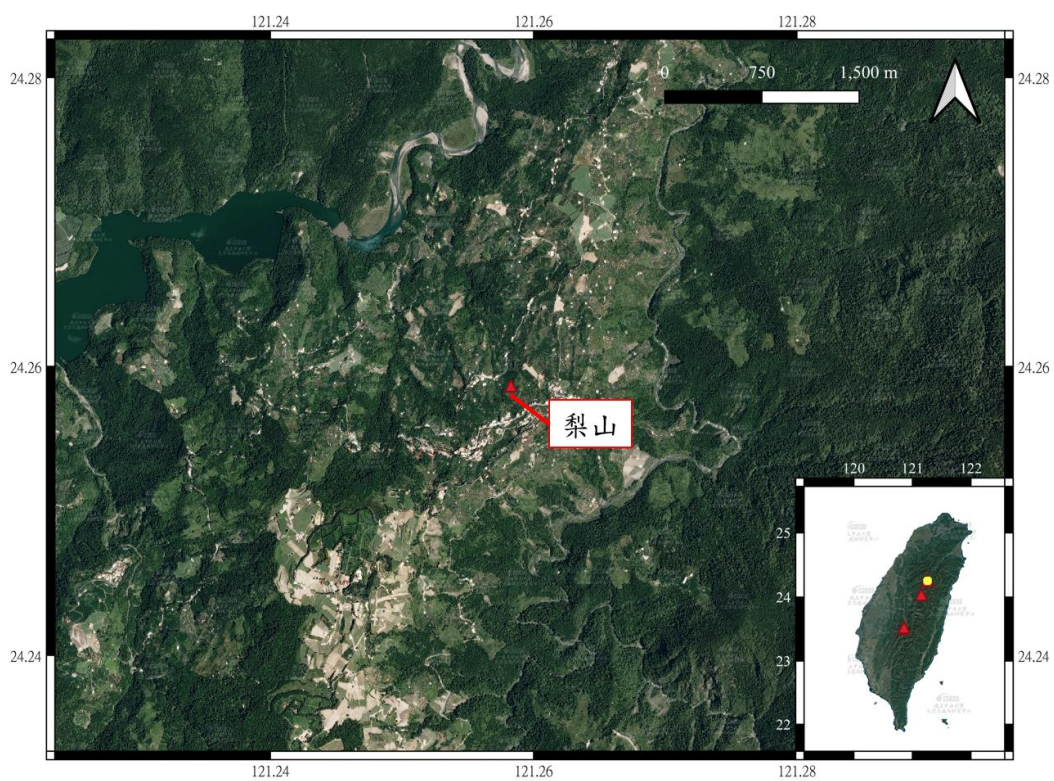


圖 4.13 梨山站架站位置



圖 4.14 清境站架站設備

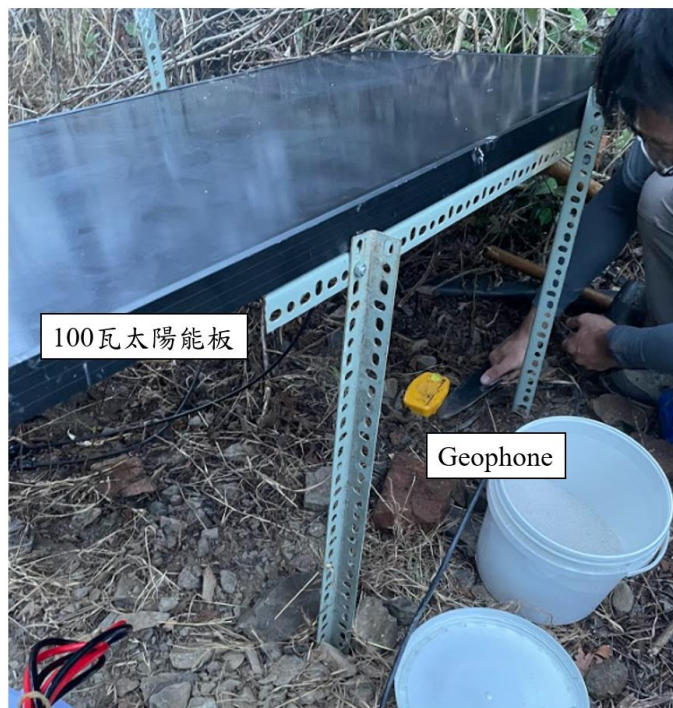


圖 4.15 清境站架站配置

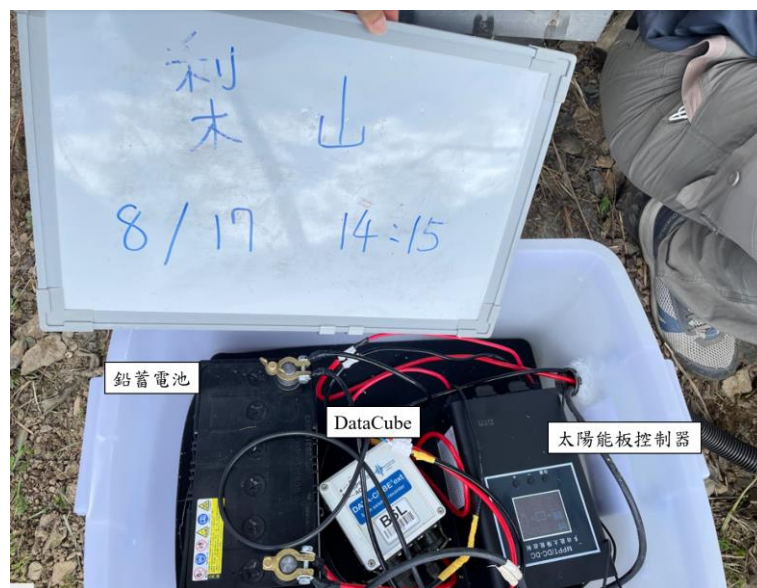


圖 4.16 梨山站架站設備

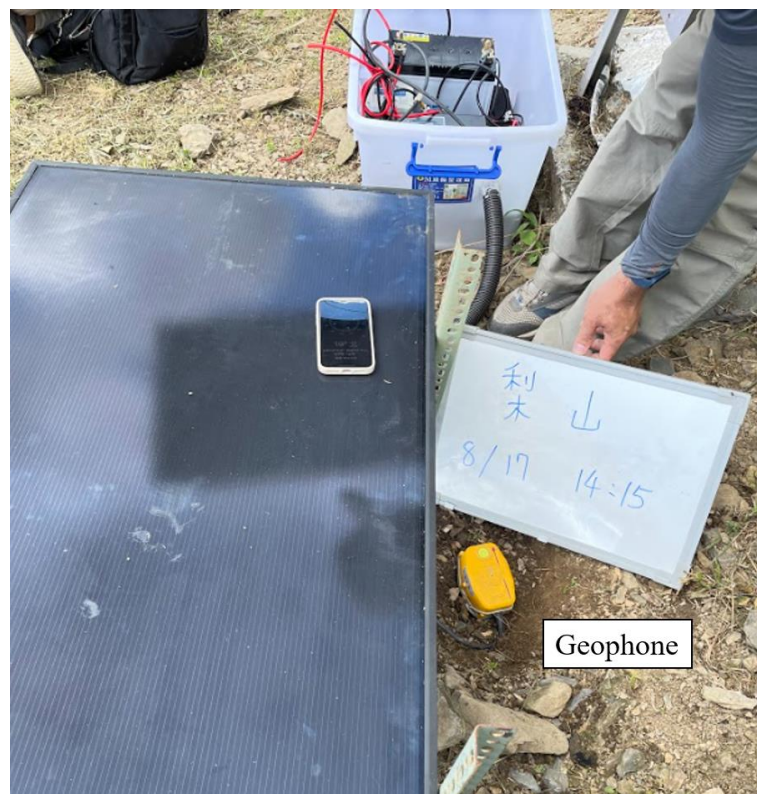


圖 4.17 梨山站架站配置

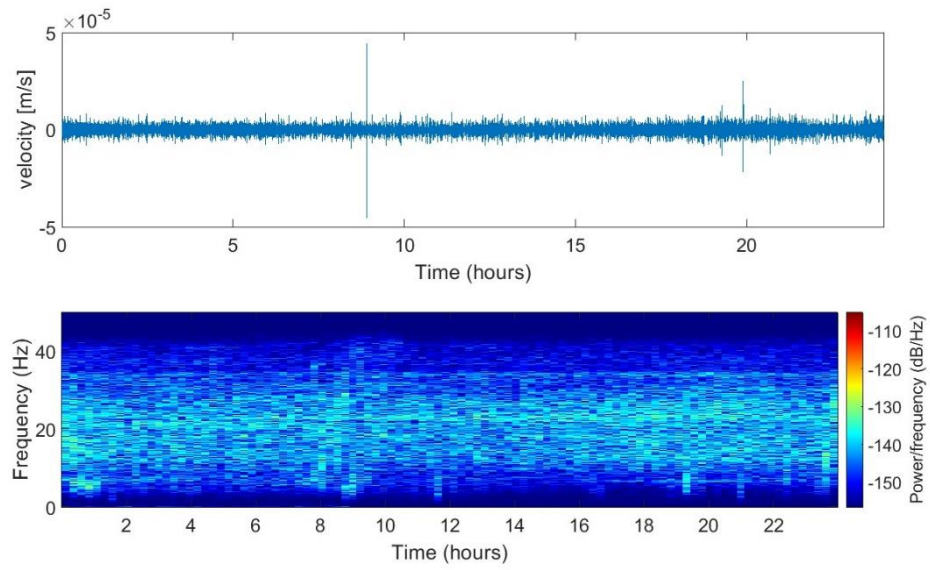


圖 4.18 清境站 2022/10/01 (UTC)時頻圖

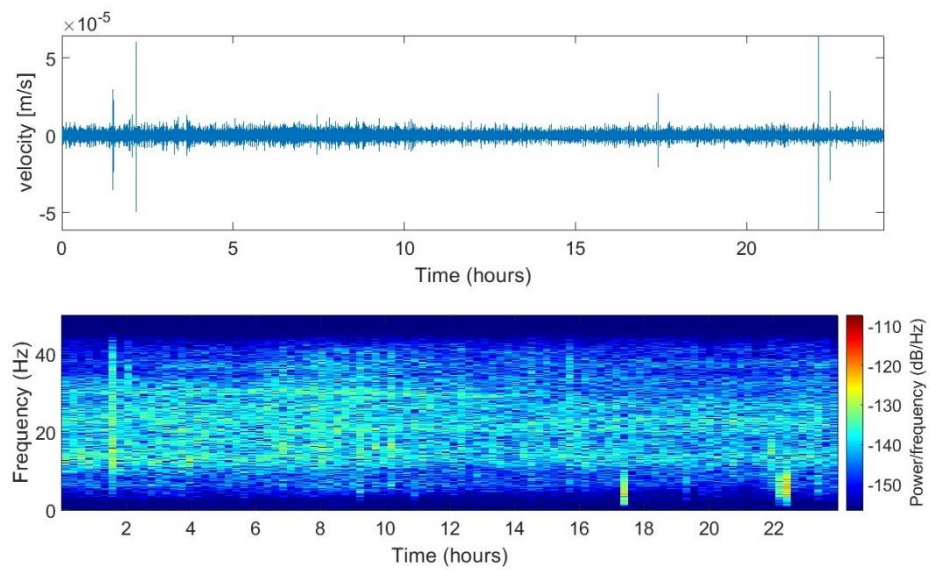


圖 4.19 清境站 2022/10/16 (UTC)時頻圖



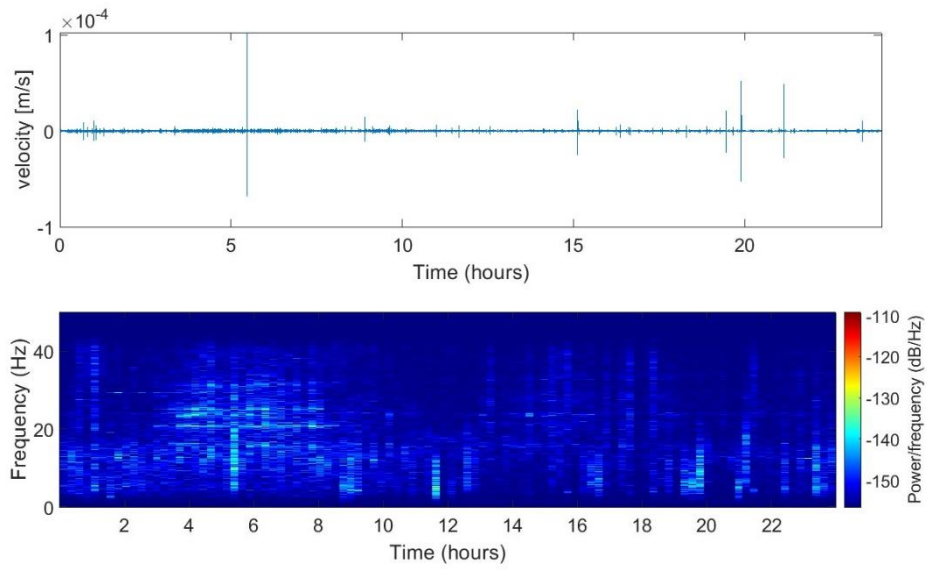


圖 4.20 梨山站 2022/10/01 (UTC)時頻圖

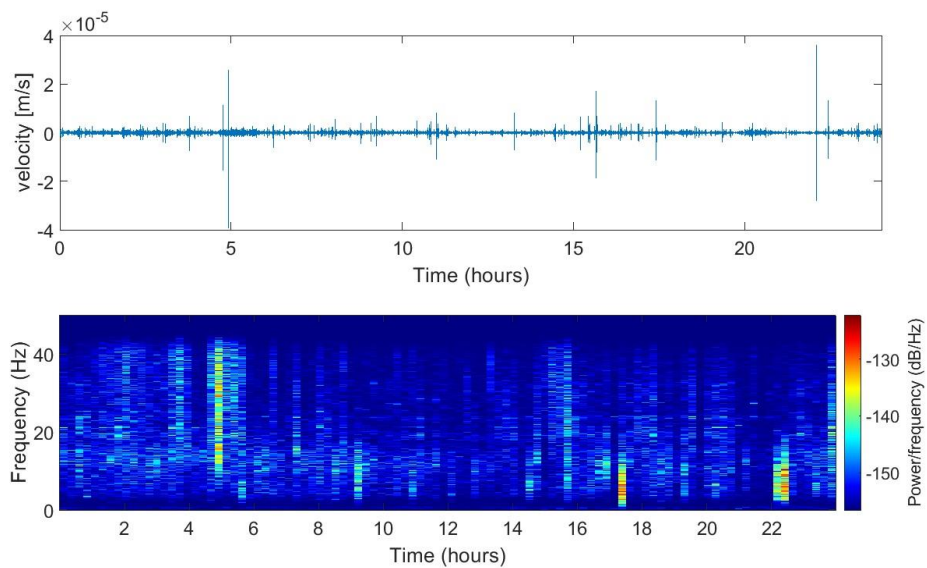


圖 4.21 梨山站 2022/10/16 (UTC)時頻圖

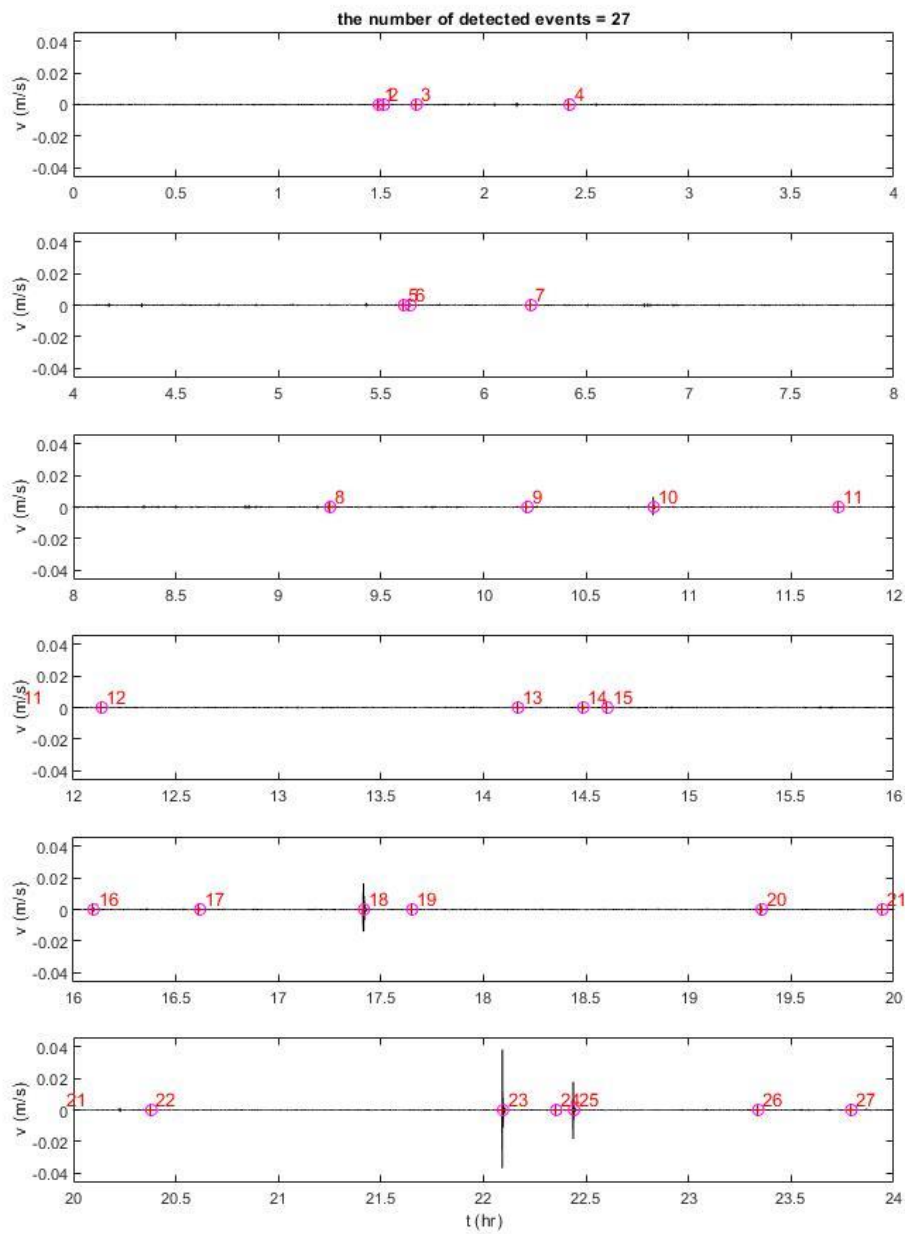


圖 4.22 清境站 2022/10/16 (UTC)突波偵測結果

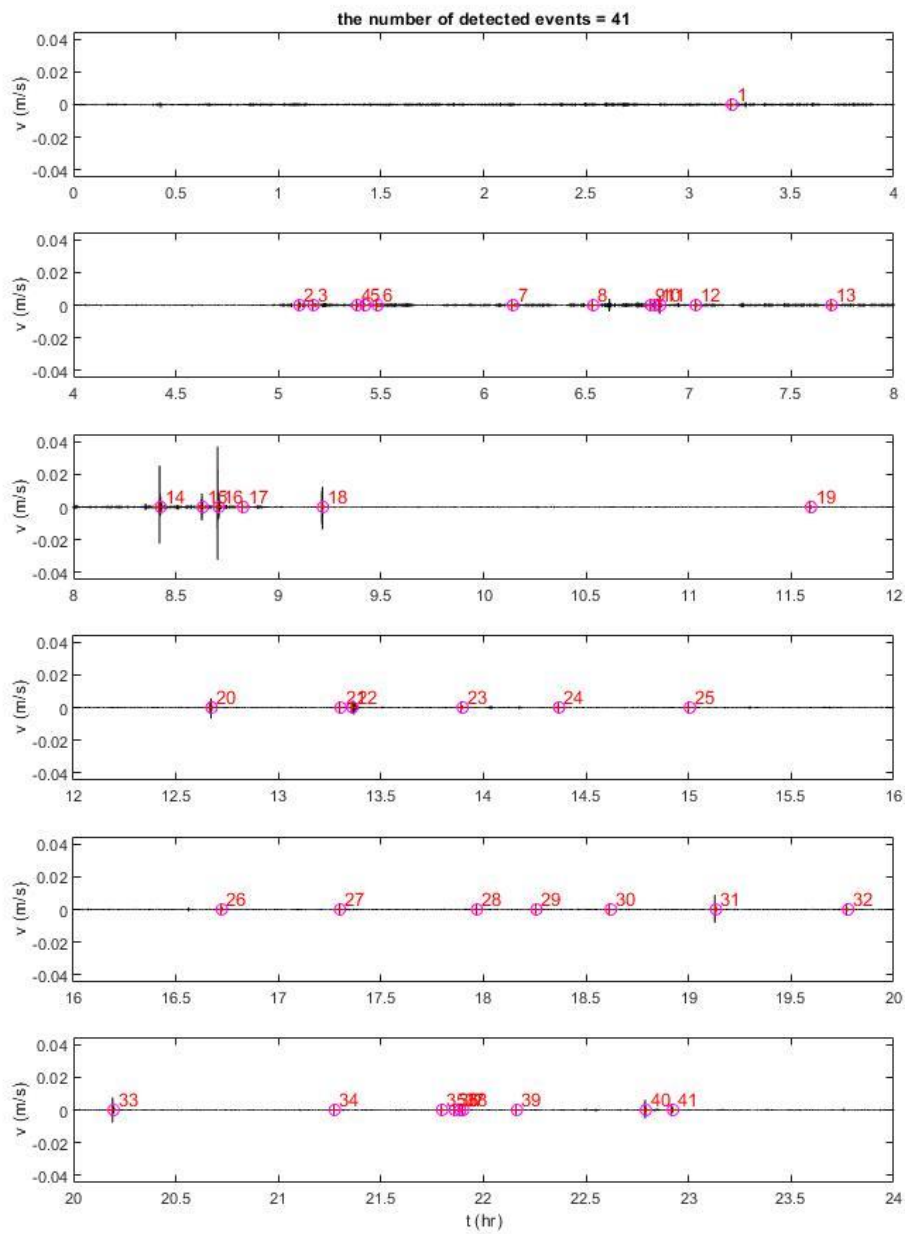


圖 4.23 清境站 2022/10/17 (UTC)突波偵測結果

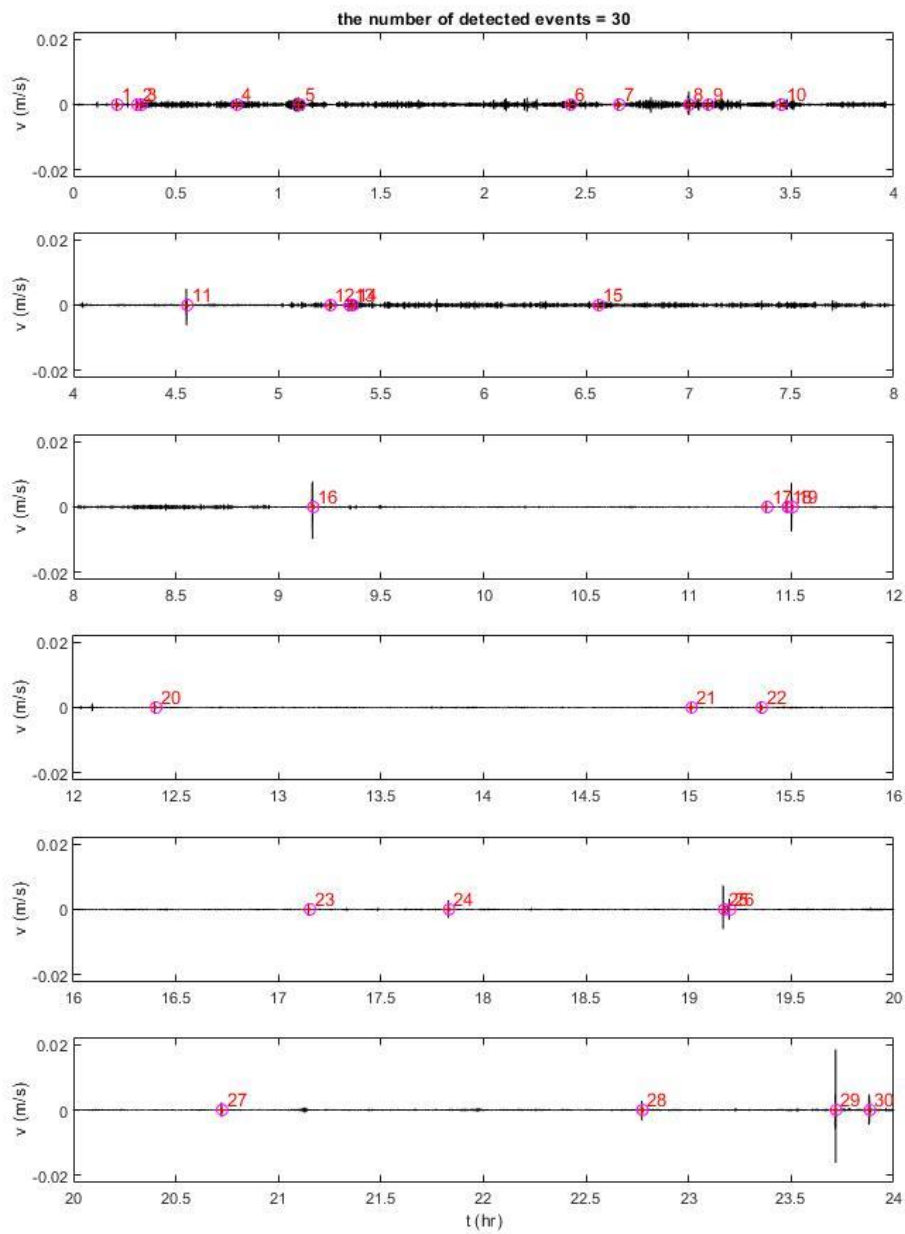


圖 4.24 清境站 2022/10/18 (UTC)突波偵測結果

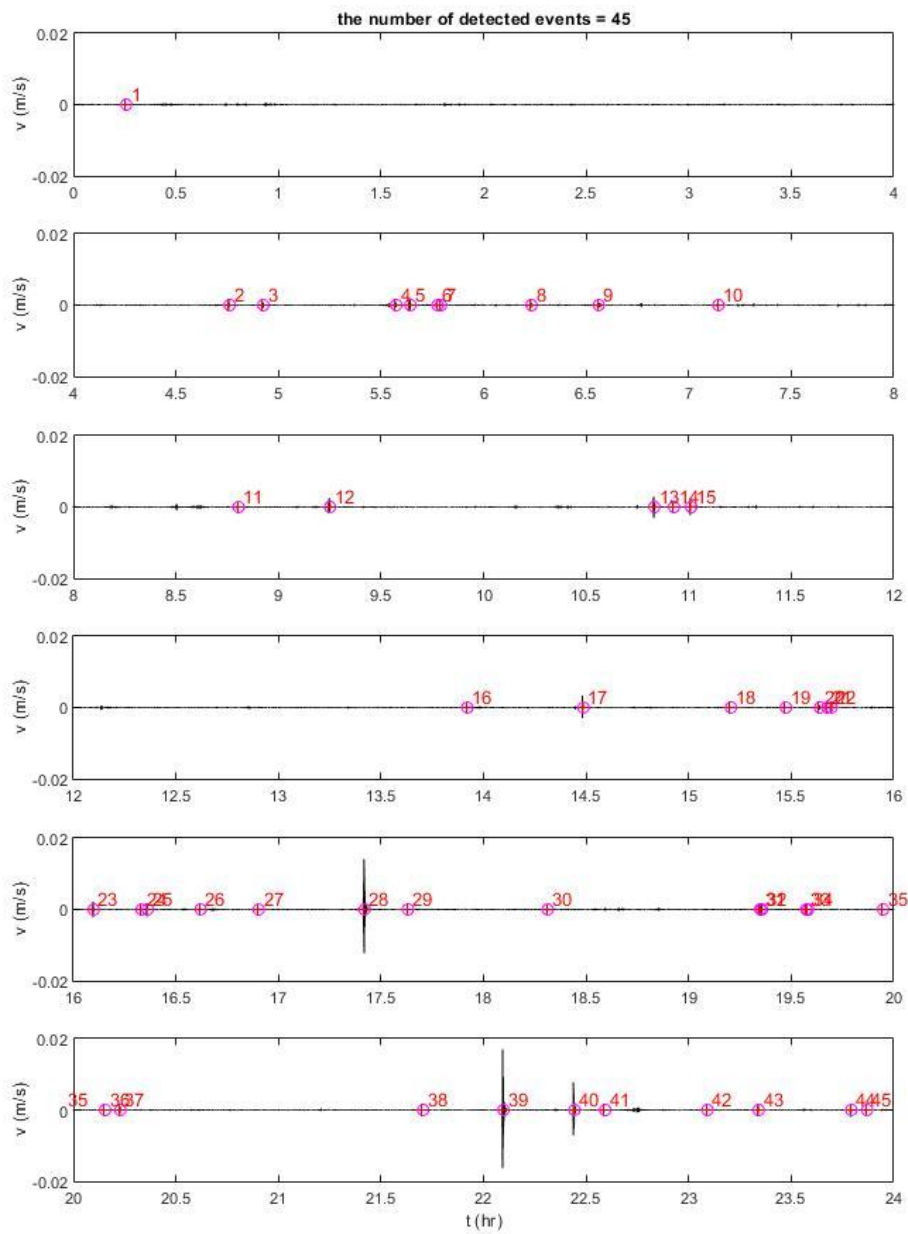


圖 4.25 梨山站 2022/10/16 (UTC) 突波偵測結果

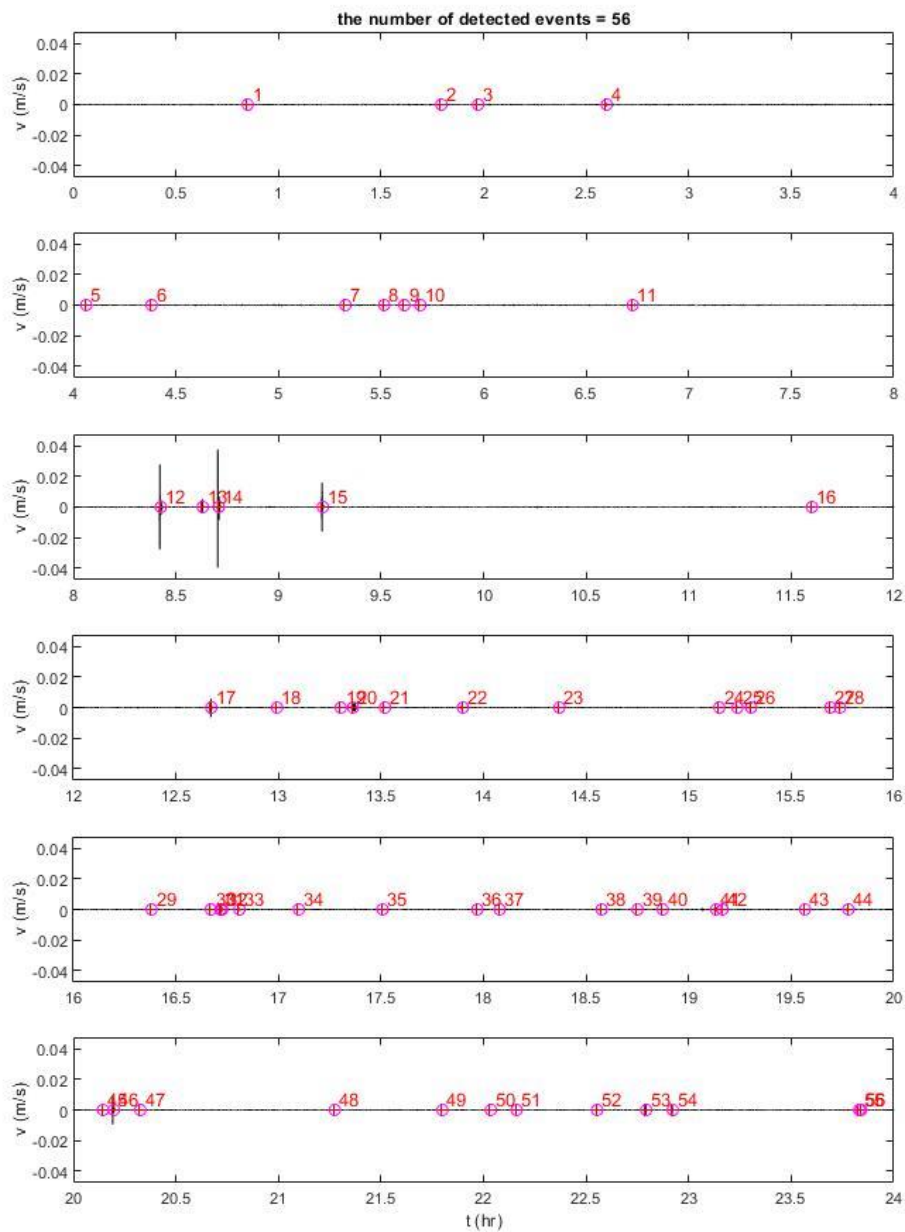


圖 4.26 梨山站 2022/10/17 (UTC)突波偵測結果

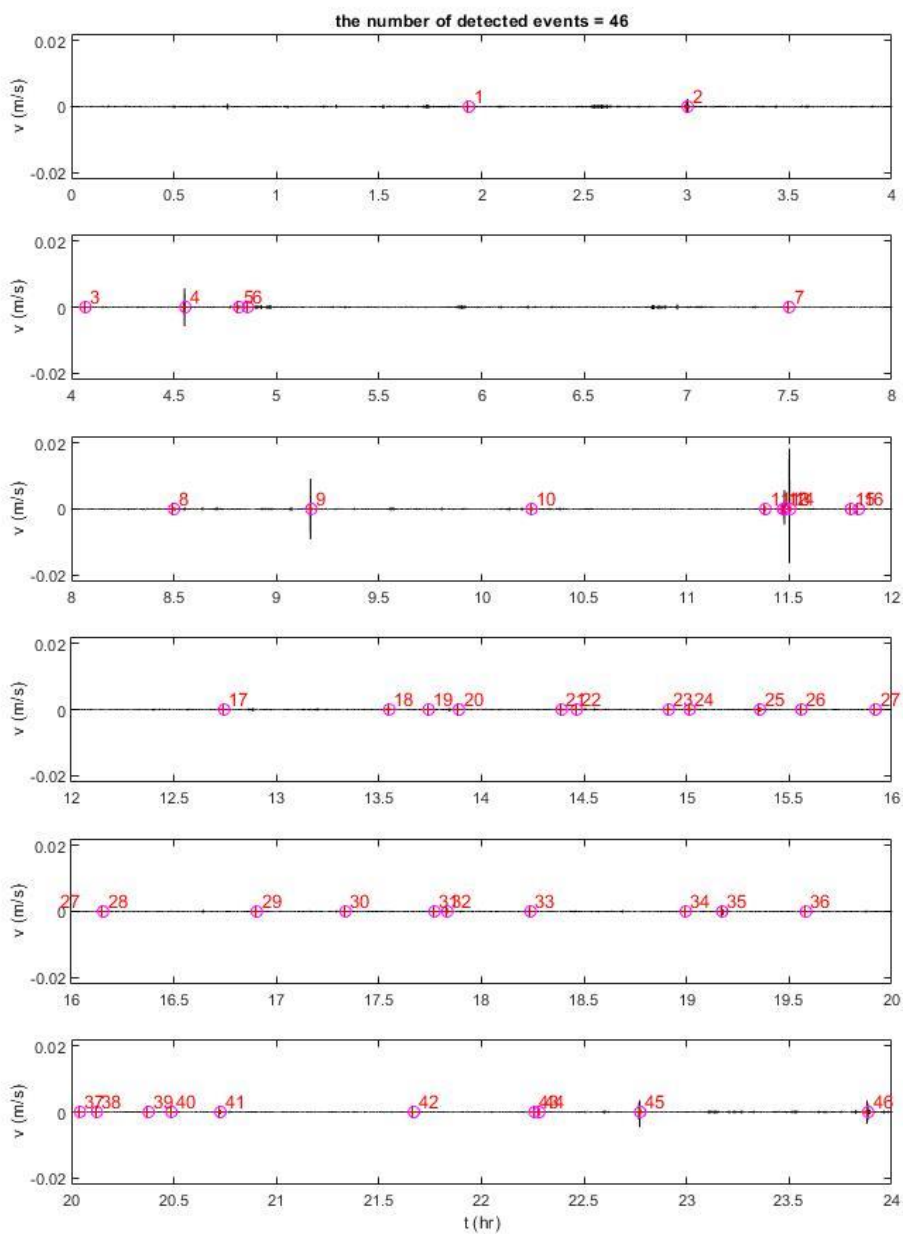


圖 4.27 梨山站 2022/10/18 (UTC)突波偵測結果

## 第七節 促崩降雨條件分析

### 一、崩塌發生時之降雨條件

本計畫建立臺灣中部地區訊號分類器於觀測期間有降雨事件的連續地動紀錄，經由人工檢查將有兩個以上地震站有觀測到崩塌訊號特徵的事件挑選出來，再進行振動源定位。本次計畫成功定位出了 6 起位於臺灣中部的崩塌事件(表 4.8)，加上先前計畫有 17 起成功定位在中部地區的事件(表 4.9)，最後將定位結果的時間地點進行降雨資料統計，全部崩塌事件定位如圖 4.28。

表 4.8 本計畫 6 處崩塌定位座標與配對座標

年	日期	時間 (UTC)	崩塌配對座標		崩塌地屬性
			經度	緯度	
2012	6 月 10 日	09:29	120.64	23.5	新增崩塌地
2015	5 月 26 日	16:48	121.06	23.89	新增崩塌地
2017	6 月 2 日	22:33	121.06	23.68	舊崩塌地
2017	6 月 3 日	04:02	121.2	23.9	舊崩塌地
2017	6 月 4 日	18:50	120.87	23.57	舊崩塌地
2017	6 月 16 日	01:51	121.01	24.33	舊崩塌地

表 4.9 17 起前期計畫成功定位事件

	年	日期	時間 (UTC)	經度	緯度
1	2004	8 月 24 日	22:54	120.763	23.5661
2	2006	6 月 10 日	00:53	121.171	24.1254
3	2008	7 月 18 日	23:29	120.829	23.544
4	2008	7 月 19 日	05:30	121.006	23.8193



5	2008	9月15日	08:59	120.990	24.120
6	2008	9月15日	10:45	121.383	24.3526
7	2008	9月18日	02:50	120.999	24.1029
8	2009	8月8日	13:35	120.832	23.5156
9	2009	8月9日	02:11	120.786	23.512
10	2009	8月9日	05:30	120.921	23.4877
11	2009	8月9日	06:52	120.901	23.5374
12	2011	8月30日	17:13	121.183	23.6854
13	2012	8月3日	03:00	120.946	23.7404
14	2012	8月3日	09:00	121.377	24.3592
15	2015	8月9日	10:00	121.199	23.9692
16	2015	8月9日	22:45	121.012	23.6849
17	2016	9月17日	07:06	121.075	23.5771

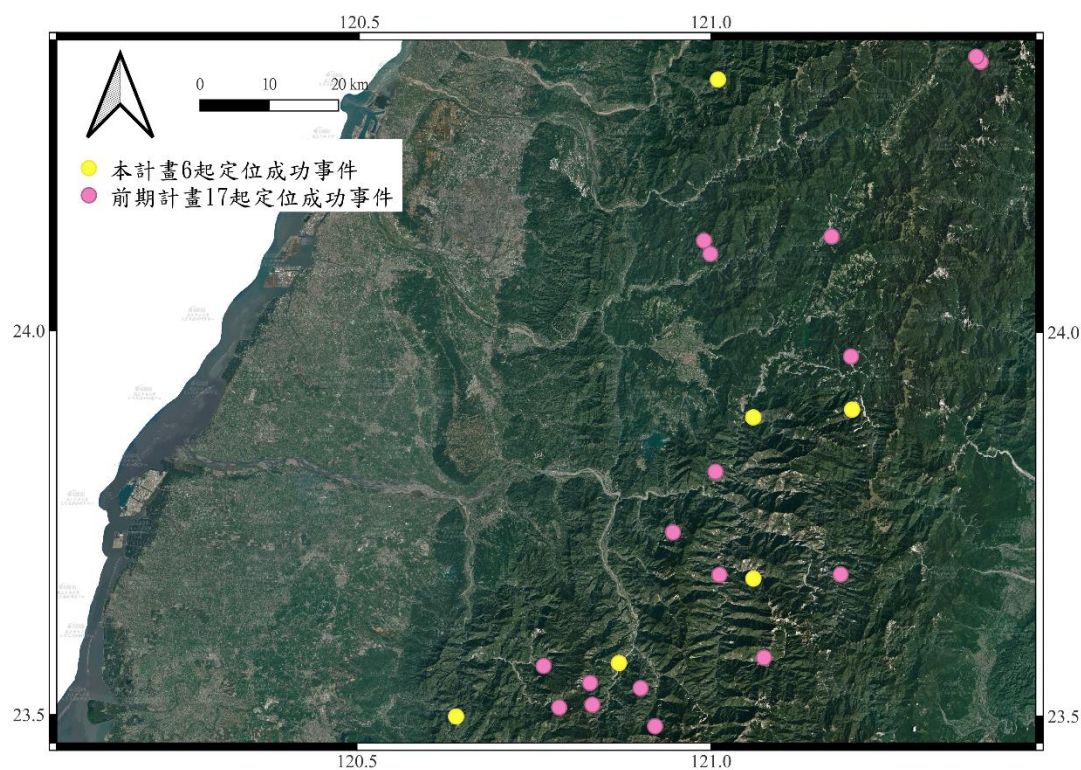


圖 4.28 配對成功崩塌事件分布圖

本計畫目標為降雨誘發之崩塌，因此進行雨量分析時僅選取發生於豪雨期間的崩塌事件。促崩降雨條件分析案例的篩選方式為崩塌發生時間時刻前有效累積雨量達到 250 mm，或降雨延時大於 24 小時，達到上述兩條件之一即可納入降雨促崩條件分析。本計畫亦考慮前期降雨的影響，將降雨事件前 7 日的降雨資料統計為前期降雨進行分析。後續將此 23 處崩塌進行各種降雨條件分析，表 4.10 至表 4.15 為促崩降雨分析參數統計結果。

在本次計畫的 6 起配對完成之崩塌事件當中，有 4 起屬於舊有崩塌地再次發生崩塌事件，2 起則是屬於新增崩塌地。降雨延時多落在 22 至 44 小時之間，有效累積降雨為 250 mm 至 550 mm 之間。23 起崩塌事件中有兩起累積降雨大於 1000 mm 事件，降雨延時各為 52.5 與 72.8 小時，長延時的高強度降雨也是引發大規模崩塌的主因之一。

由雨量統計結果可以看出前期降雨與長延時、高強度降雨的重要性，固本研究再進行降雨促崩條件因子的分析中，採用平均降雨強度( $I_a$ )、一小時降雨強度( $I_1$ )、三小時降雨強度( $I_3$ )、六小時降雨強度( $I_6$ )、前期降雨( $R_a$ )、有效累積雨量( $Re$ )進行統計與分析。

表 4.10 本計畫 6 處崩塌使用之降雨測站-1

	嘉義牛稠溪(693)	南投武界保留地(10)	南投萬大南溪(183)
年	2012	2015	2017
日期	6 月 10 日	5 月 26 日	6 月 3 日
時間(UCT)	09:29	16:48	04:02
時間(UCT+8)	17:29	00:48	12:02
測站_1	石盤龍 C1M610	武界 C1I030	奧萬大 C1I320
測站_1 距離(Km)	2.5	2.2	5.7
測站_2	獨立山 C1M480	北坑 C1I260	萬大林道 C0I490
測站_2 距離(Km)	4.8	6.4	11.5
測站_3	奮起湖 C0M530	外大坪 C1I240	萬大 C1I020
測站_3 距離(Km)	6	16.4	11

表 4.11 本計畫 6 處崩塌使用之降雨測站-2

	南投巒大溪(521)	南投神木三號溪(579)	苗栗南坑溪(376)
年	2017	2017	2017
日期	6月2日	6月4日	6月16日
時間(UCT)	22:33	18:50	01:51
時間(UCT+8)	06:33	02:50	09:51
測站_1	和社 C1I070	新興橋 C1I340	雪嶺 C1F941
測站_1 距離(Km)	21	2.65	5.88
測站_2	青雲 C1I150	合社 C1I070	松安 C1E461
測站_2 距離(Km)	17	4.65	9.1
測站_3	望鄉山 C1I450	神木村 C0H9A0	象鼻 C1E451
測站_3 距離(Km)	16.2	4.5	10.9

表 4.12 本計畫 6 處崩塌發生時之雨量參數-1

配對地點	嘉義牛稠溪	南投武界保留地	南投萬大南溪*
年	2012	2015	2017
日期	6月10日	5月27日	6月3日
時間(UCT+8)	17:29	00:48	12:02
$I_1$ (mm)	14.22	3.09	10.89
$I_3$ (mm)	6.91	5.29	11.89
$I_6$ (mm)	8.37	3.69	16.65
$I_a$ (mm/hr)	11.83	5.81	12.52
$D$ (hr)	18.27	18.38	28.26
$I_p$ (mm/hr)	28.88	22.02	42.23

Rc (mm)	215.11	116.11	355.13
R <sub>a</sub> (mm)	45.24	142.50	189.29
Re (mm)	260.35	258.61	544.42

表 4.13 本計畫 6 處崩塌發生時之雨量參數-2

配對地點	南投巒大溪*	南投神木三號溪*	苗栗南坑溪*
年	2017	2017	2017
日期	6月3日	6月5日	6月16日
時間(UCT+8)	06:33	02:50	09:51
I <sub>1</sub> (mm)	24.95	0.00	0.50
I <sub>3</sub> (mm)	21.96	0.00	0.87
I <sub>6</sub> (mm)	22.93	0.00	1.03
I <sub>a</sub> (mm/hr)	14.56	14.11	10.87
D (hr)	34.14	72.84	21.03
I <sub>p</sub> (mm/hr)	43.11	58.44	28.88
Rc (mm)	341.94	1031.03	230.82
R <sub>a</sub> (mm)	166.43	355.14	281.46
Re (mm)	508.37	1386.17	512.29

表 4.14 先前計畫 17 處崩塌發生時之雨量參數-1

事件 編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9
年	2004	2006	2008	2008	2008	2008	2008	2009	2009
日期	8/24	6/10	7/18	7/19	9/15	9/15	9/18	8/8	8/9

時間 (UTC)	22:54	00:53	23:29	05:30	08:59	10:45	02:50	13:35	02:11
I <sub>1</sub> (mm)	15.50	10.50	0.50	0.00	7.09	5.00	0.00	49.00	99.50
I <sub>3</sub> (mm)	10.17	13.50	1.33	0.00	11.12	6.33	0.00	37.33	108.50
I <sub>6</sub> (mm)	7.00	14.25	1.08	0.00	22.15	8.08	0.00	37.17	91.42
I <sub>a</sub> (mm/hr)	7.98	13.66	11.17	10.88	17.15	7.50	8.82	9.28	16.34
D (hr)	47	40	48	54	39.8	83	147	110	123
R <sub>c</sub> (mm)	375.	546.5	536.	587.5	686.48	622.5	1297.	1020.8	2009.3
R <sub>a</sub> (mm)	26.48	70.19	2.24	4.98	356.65	2.56	4.17	0.77	0.77
R <sub>e</sub> (mm)	401.48	616.69	538.24	592.48	1043.1 4	625.06	1301.1 7	1021.5 7	2010.0 7

表 4.15 先前計畫 17 處崩塌發生時之雨量參數-2

事件 編號	10	11	12	13	14	15	16	17
年	2009	2009	2011	2012	2012	2015	2015	2016
日期	8/9	8/9	8/30	8/3	8/3	8/9	8/9	9/17
時間 (UTC)	05:30	06:52	17:13	03:00	09:00	10:00	22:45	07:06
I <sub>1</sub> (mm)	20.20	21.50	0.00	0.50	0.00	0	0	10.50
I <sub>3</sub> (mm)	34.17	17.83	0.00	1.00	1.67	0.17	0	7.33
I <sub>6</sub> (mm)	41.33	28.50	0.08	1.42	3.00	0.25	0.08	7.08
I <sub>a</sub> (mm/hr)	14.90	6.51	5.57	9.09	4.83	5.22	2.92	4.54

D (hr)	102	151	114	76	106	59	71	104
R <sub>c</sub> (mm)	1519.7	982.5	634.5	690.5	512	308	207.5	472
R <sub>a</sub> (mm)	3.58	0.00	16.36	8.77	3.65	0.7	3.21	15.02
R <sub>e</sub> (mm)	1523.28	982.50	650.86	699.27	515.65	308.7	210.71	487.02

註：\*表舊崩塌地；I<sub>1</sub>：崩塌發生時之時雨量；I<sub>3</sub>：崩塌發生前3小時平均時雨量；I<sub>6</sub>：崩塌發生前6小時平均時雨量；I<sub>a</sub>：崩塌發生前平均時雨量；D：降雨延時；I<sub>p</sub>：尖峰降雨量；R<sub>c</sub>：統計至崩塌發生時刻的累積雨量；R<sub>a</sub>：前期降雨量(考慮指數衰減)；R<sub>e</sub>：有效累積雨量。

## 二、促崩降雨門檻

利用 23 處大規模崩塌發生時的平均降雨強度 I<sub>a</sub> 與降雨延時 D，可以計算出本計畫大規模崩塌的 I<sub>a</sub>-D 降雨門檻公式為： $I_a = 7.16D^{-0.19}$  (圖 4.29)。前期 110 年計畫針對雲嘉南地區的 I<sub>a</sub>-D 降雨門檻  $I_a = 21.97 D^{-0.43}$ ，109 年計畫針對高屏河流域計算之 I<sub>a</sub>-D 降雨門檻為  $I_a = 6.53 D^{-0.12}$ ，與 108 年計算全台大規模崩塌的 I<sub>a</sub>-D 降雨門檻則是  $I_a = 25.75 D^{-0.43}$ 。本計畫針對中部地區製作的 I<sub>a</sub>-D 降雨門檻曲線較先前門檻低，但由前期計畫所得之 I<sub>a</sub>-D 曲線也能作為中部的 23 處崩塌的降雨門檻。

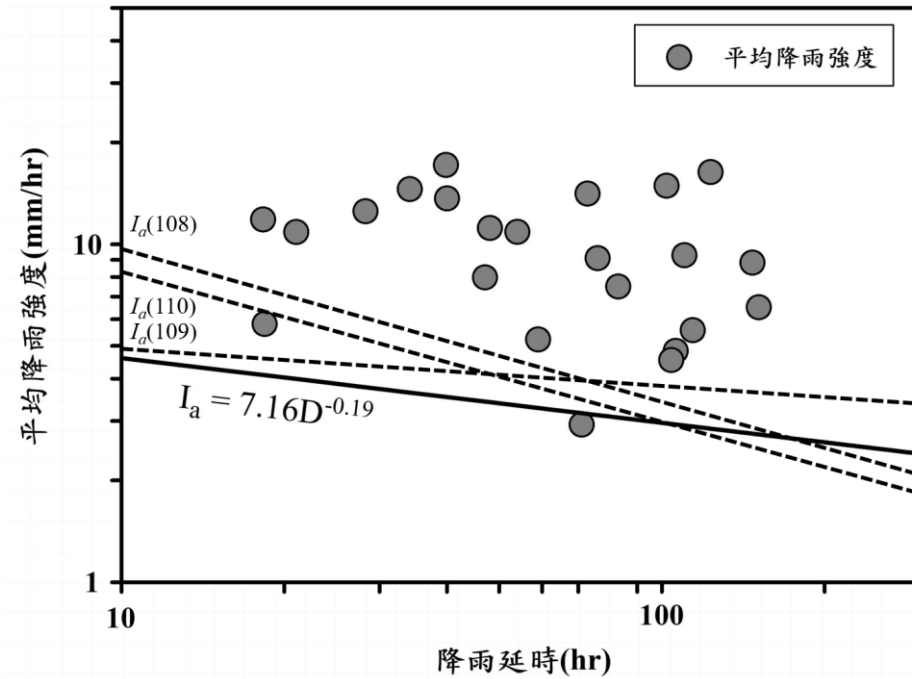
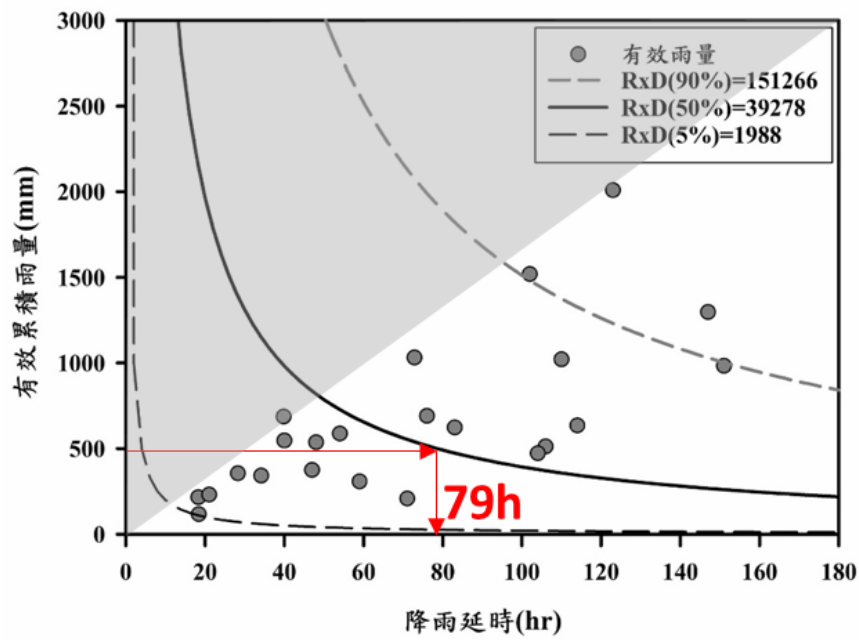


圖 4.29  $I_a$ - $D$  降雨門檻

針對 23 處崩塌進行  $R_e$ - $D$  降雨門檻分析(圖 4.30)，將結果涵蓋資料百分比為 5%時  $R_e$  與  $D$  之乘積為 1988 mmxh，百分比為 50%時為 39278 mmxh，90%時則是 151266 mmxh，表示當降雨延時超過 24 小時時，涵蓋資料百分比 50%時的有效累積降雨量為 1637 mm，同理當有效累積降雨量超過 500 mm 時，涵蓋資料百分比為 50%的降雨延時為 79 小時。本年度針對臺灣中部地區崩塌進行  $R_e$ - $D$  降雨門檻分析的結果低於 110 年度針對雲嘉南地區的降雨門檻。

圖 4.30  $R_e$ - $D$  降雨門檻

由 109 與 110 年計畫可知，在高屏流域與雲嘉地區與今年度計畫的臺灣中部地區的分析中，平均降雨強度  $I_a$  和有效累積雨量  $R_e$  門檻曲線之間十分相似。本計畫計算  $I_a$ - $R_e$  降雨門檻(圖 4.31)進行探討，當累積降雨量達到 500 mm 時，引致崩塌的降雨強度約為 11 mm/h。當平均降雨強度為 10 mm/h，涵蓋資料百分比為 50% 的有效累積雨量為 547 mm。



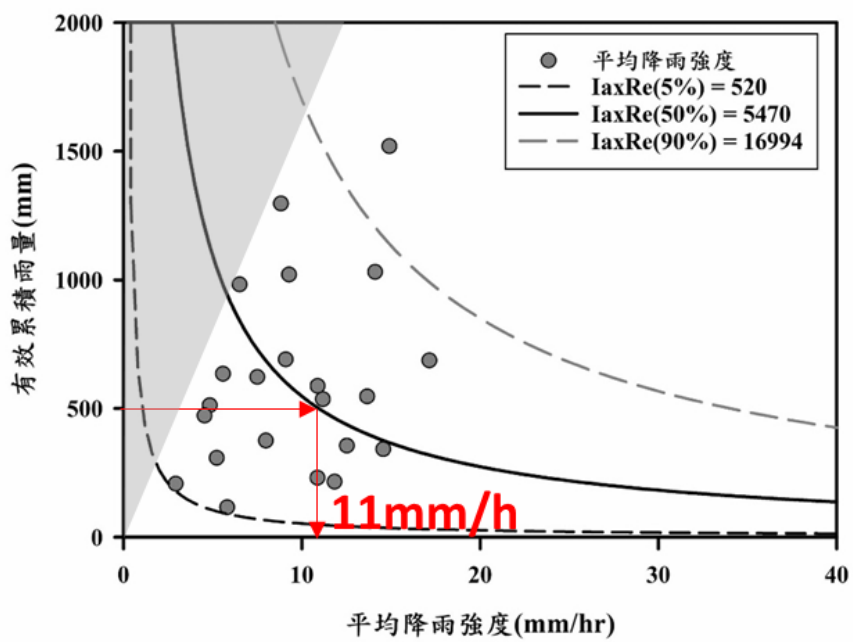


圖 4.31  $I_a-Re$  降雨門檻

## 第八節 崩塌地動訊號自動判釋測試網頁

本計畫結合地動訊號分類器，透過自動辨識與自動定位排程，建立了一套崩塌振動訊號自動判釋與定位結果展示網頁。其中，參考 Chao et al. (2017) 運用震波即時反演技術建置崩塌引致地動訊號的快速辨識，於流程中置入判斷條件，降低誤判的可能性。最後加上自動寄信通知功能，在經過人工檢查偵測報告確認無誤後，才發佈到展示頁面上進行結果呈現(圖 4.32)。若經查可能屬於偵測錯誤，則手動排除偵測報告。

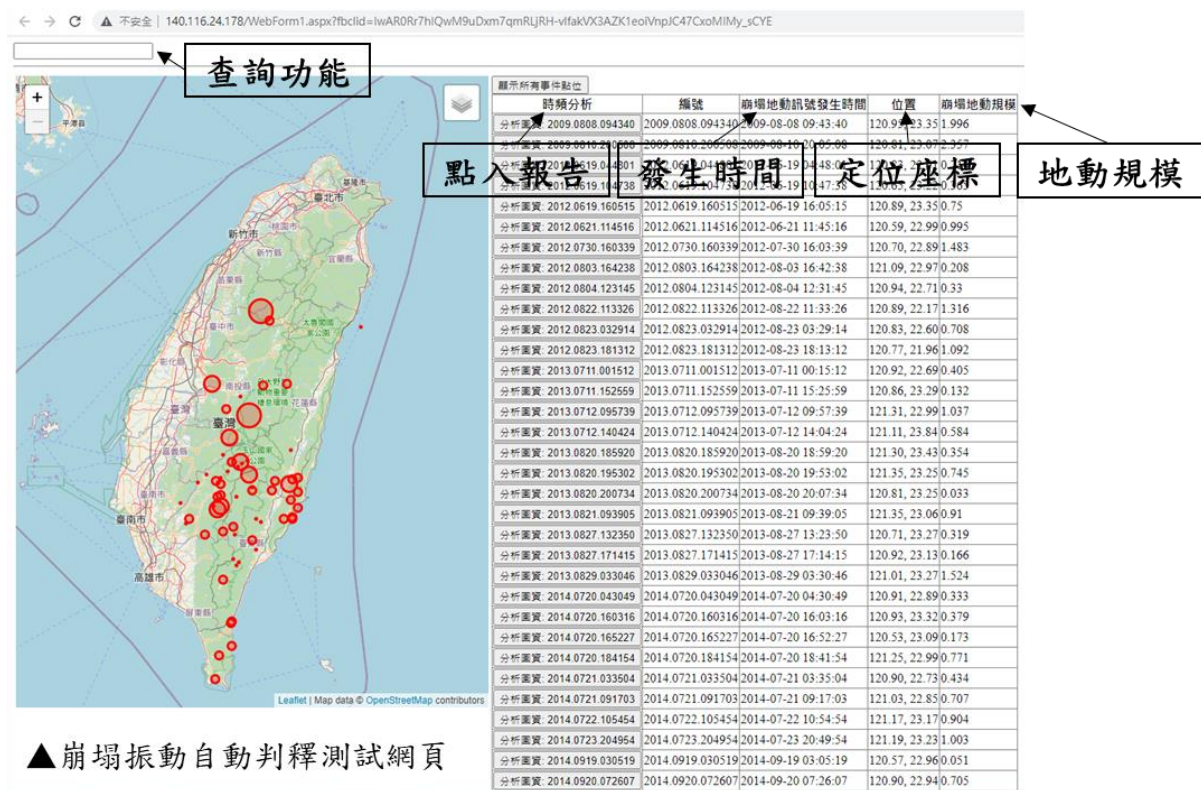


圖 4.32 崩塌振動訊號辨識清單展示頁面

### 一、執行流程

- (1) 設定每 2.5 分鐘偵測突波
- (2) 將具有地表振動紀錄之訊號裁切為 5 分鐘地動紀錄
- (3) 訊號前處理與分類特徵值計算
- (4) 使用分類器分類訊號種類

- (5) 挑選出分類為崩塌地振動訊號並進行訊號源定位，繪製定位圖
- (6) 計算崩塌訊號的規模與體積、面積、繪製時頻圖、製作崩塌事件報告
- (7) 自動將報告寄往檢查人員指定信箱
- (8) 檢查人員確認無誤後，發布辨識與定位結果於網頁  
(<http://140.116.24.178/WebForm1.aspx>)

## 二、網頁介紹

在網頁中的結果以清單方式呈現，包含事件時間、經緯度座標、崩塌訊號規模、崩塌體積、崩塌面積(圖 4.33)，其中規模使用的計算方法為： $L_M = \log(\text{PGD}) + 0.55\log(\Delta) + 2.44$ (水土保持局，2018)，其中 PGD 為崩塌訊號經過濾波的最大位移量，單位為微米， $\Delta$  為地震站與崩塌之間的距離，單位為公里。受限於部分事件並不具有顯著的 0.02 Hz~0.05 Hz 频段之訊號，計算所得之崩塌訊號規模仍需後續經人工檢查後再做修正。崩塌體積(V)則是可以使用規模-體積經驗公式計算 (水土保持局，2018)，公式為： $L_M = 1.87 \times V^{0.08}$ ，單位為百萬立方公尺。崩塌面積與體積的經驗公式為： $V = 26.14 \times A^{1.4}$  (水土保持局，2018)，單位為平方公里。除以清單方式呈現外，進入事件也可查看該崩塌事件的時頻圖、定位結果圖以及事件報告(圖 4.33)。

偵測時間：2013-05-21 23:55:06 (UTC)  
定位座標：[120.61, 24.59]  
崩塌地動規模：2.830  
崩塌體積：177.546 (百萬立方公尺)  
崩塌面積：3.929 (平方公里)  
最大振幅(m/s)：[ CHGB(1.08E-02), SSLB(2.76E-03),  
WNT(2.40E-04) ]

### 產製事件報告

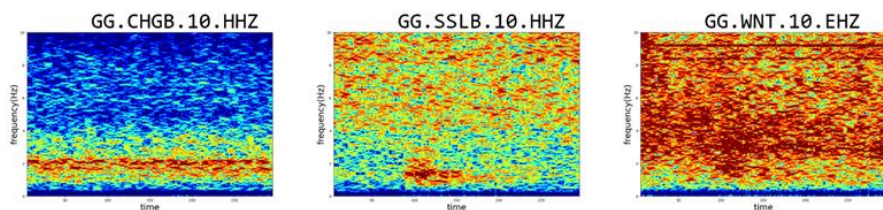


圖 4.33 自動產生之崩塌事件報告

自動判釋崩塌事件部分則會因為地震站數量影響所需要的運算時間，目前本計畫使用歷史紀錄進行測試，如欲達到自動判釋，則須採用本計畫使用之所有地震站同時進行判釋，接著定位與產生崩塌報告、寄送崩塌報告信件(圖 4.34)等流程總耗時約 1 分鐘。本次計畫與 110 年前期計畫皆有使用到此辨識流程與結果展示頁面，本年度計畫精進內容包括以下幾點：

- (1) 縮短崩塌振動訊號辨識時間，由 5 分鐘降至 2.5 分鐘
- (2) 新增崩塌體積估算
- (3) 新增崩塌面積估算
- (4) 更新報告詳細程度與內容

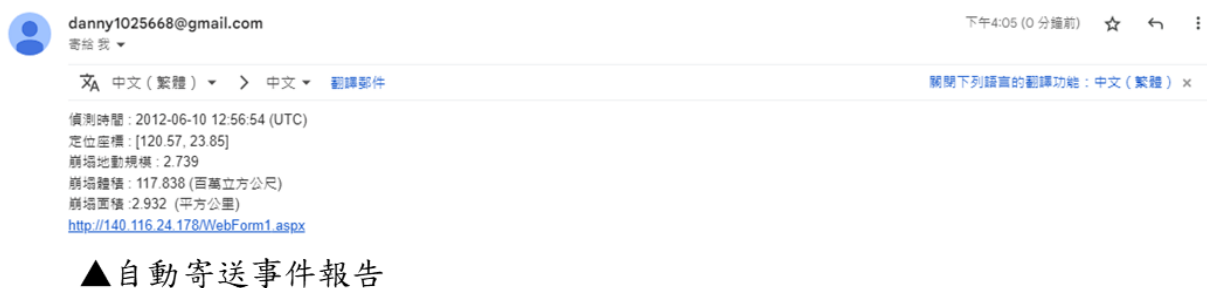


圖 4.34 自動寄送崩塌事件報告



## 第五章 結論與建議

### 第一節 結論

本計畫針對臺中、南投、彰化、雲林進行區域尺度坡地土砂運動之地表振動訊號自動分類之研究，期末階段成果與建議總結如下：

- 一、本計畫使用 2012 年至 2020 年豪雨期間之連續地動訊號進行突波偵測，以獲得具有振動事件之地動紀錄。再將具有突波的地動紀錄之時頻圖進行 K-means 集群分析，並混入前期計畫獲得的崩塌振動訊號，最後以人工進行辨識，找出具有崩塌特徵之地動訊號作為建立地動訊號自動分類模型之資料集。本年度採用深度學習卷積神經網路分類法建立地動訊號時頻圖的分類模型，以 20% 的資料集對分類模型進行驗證，其崩塌分類的召回率超過 90%。
- 二、將時頻圖的分類模型應用於 2012 年至 2020 年的連續地動訊號紀錄，最終共有 36 個時間點可於至少 2 個以上的地震站紀錄中同時偵測到崩塌地動訊號。後續進行崩塌地動之振動源定位，最終共 6 起崩塌事件之定位結果位於中部地區範圍內。
- 三、將 6 筆定位成功資料與歷年崩塌目錄進行配對之後，確定其崩塌發生時間與位置，進而蒐集雨量資料，進行促崩降雨條件分析，臺灣中部地區分析出的促崩降雨門檻為：
  - (一)  $I_a$ - $D$  降雨門檻： $I_a=7.16D^{-0.19}$
  - (二)  $Re$ - $D$  降雨門檻： $Re \times D = 39278 \text{ mm} \times \text{h}$
  - (三)  $I_a$ - $Re$  降雨門檻： $I_a \times Re = 547 \text{ mm}^2/\text{h}$
- 四、本計畫於 8 月在清境、梨山兩地區架設臨時地震站，進行長時間地表振動訊號的監測，並將取得資料進行室內分析。針對 2022 年 10 月 16

日至 18 日的豪雨期間，已進行地動紀錄的突波偵測，其中並無發現具有崩塌地動特徵之訊號。

- 五、 結合前期計畫與本計畫完成的地動訊號分類器分類成果，更新崩塌振動訊號監測網頁，系統包含每 2.5 分鐘進行一次自動辨識崩塌振動訊號，以及所有辨識過後的崩塌資訊網頁，內容包含事件時間、位置、振動規模、崩塌面積、崩塌體積等，並自動寄發報告給研究人員。

## 第二節 建議

- 一、 本計畫使用到的規模計算方式適用寬頻地震儀之低頻訊號，如要使用其他類型的資料，如短週期地震儀、地聲計等，則要改用芮氏規模或時間規模進行計算。
- 二、 與前幾期計畫統整出的地震事件資料可進行整合，建立地震目錄以便在訊號分析時進行地震振動訊號事件的去除。
- 三、 本計畫更新之網站可與水土保持局防災資訊網進行結合，使防災資訊網與本計畫架設之網站使用效能提升。
- 四、 關於崩塌面積推估的驗證，由於現有崩塌案例不足，後續會將所有崩塌相關計畫、面積推估等文獻資料蒐集好後進行面積驗證。

## 參考文獻

1. 中央氣象局觀測資料查詢系統 <https://e-service.cwb.gov.tw/HistoryDataQuery/>
2. 水土保持局 BigGIS 巨量空間資訊系統 <https://gis.swcb.gov.tw/>
3. Yeh James (2017) [資料分析&機器學習] 第 5.1 講: 卷積神經網絡介紹(Convolutional Neural Network)  
(<https://medium.com/jameslearningnote/%E8%B3%87%E6%96%99%E5%88%86%E6%9E%90-%E6%A9%9F%E5%99%A8%E5%AD%B8%E7%BF%92-%E7%AC%AC5-1%E8%AC%9B-%E5%8D%B7%E7%A9%8D%E7%A5%9E%E7%B6%93%E7%B6%B2%E7%B5%A1%E4%BB%8B%E7%B4%B9-convolutional-neural-network-4f8249d65d4f>)
4. 王乾盈、郭炫佑、呂佩玲、林金泉 (2011) 台灣中部地區自由場強震網資料收集及分析，台灣地區自由場強震網資料收集及分析技術報告(報告編號：MOTC-CWB-100-E-01)，台北市：中央氣象局。
5. 吳積善、康志成、田達權、章書成 (1990) 雲南蔣家溝土石流之觀測研究，中國大陸科學出版社。
6. 吳昱杰 (2017) 結合訊號特徵指標及機器學習技術於崩塌地動訊號辨識之研究：以 2009 年莫拉克颱風為例，國立成功大學地球科學系碩士論文，臺南市。



7. 林冠璋 (2016) 台灣地震網於坡地崩塌災害警界資訊應用之研究，行政院農業委員會水土保持局 105 年科技計畫，南投縣：水土保持局。
8. 林冠璋 (2018) 崩塌地動訊號辨識技術應用於大規模崩塌雨量警戒值分析之研究，行政院農業委員會水土保持局 107 年科技計畫，南投縣：水土保持局。
9. 林冠璋 (2019) 崩塌地動訊號自動化辨識技術精進及其應用之研究，行政院農業委員會水土保持局 108 年科技計畫，南投縣：水土保持局。
10. 林冠璋 (2020) 集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究，行政院農業委員會水土保持局 109 年科技計畫，南投縣：水土保持局。
11. 林冠璋 (2021) 嘉義、台南山區大規模崩塌之地動訊號監測網建置研究，行政院農業委員會水土保持局 110 年科技計畫，南投縣：水土保持局。
12. 范正成、劉哲欣、吳明峰 (2002) 南投地區土石流發生臨界降雨線之設定及其於集集大地震後之修正，中華水土保持學報，33(1)，第 31-38 頁。
13. 張聖偉 (2020) 利用噪訊分析監測潛在崩塌邊坡的地下速度變化，國立成功大學地球科學系碩士論文，臺南市。
14. 詹錢登 (2004) 豪雨造成的土石流，科學發展月刊，第 374 期，第 14-23 頁，臺灣。
15. 網干壽夫 (1972) 集中豪雨とっサ土斜面の崩壊，施工技術，5(11)，第 45 頁。

16. Arattano, M., and Marchi, L. (2000). Video-derived velocity distribution along a debris flow surge. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(9), 781-784.
17. Caine, N. (1980). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, 62, 23-27.
18. Chang, K. T., Chiang, S. H., and Hsu, M. L. (2007). Modeling typhoon-and earthquake-induced landslides in a mountainous watershed using logistic regression. *Geomorphology*, 89(3-4), 335-347.
19. Chang, J. M. et al. (2021). Locating rock slope failures along highways and understanding their physical processes using seismic signals. *Earth Surf. Dynam.*, 9, 505-517.
20. Chao, K., and Yu, C. (2018). A MATLAB GUI for examining triggered tremor. A case study in New Zealand. *Seismological Research Letters*, 89(6), 2362-2373.
21. Chao et al. (2017). A first near real-time seismology-based landslide monitoring system. *Scientific Reports*, 7, Article number 43510.
22. Clarke, D., Zaccarelli, L., Shapiro, N. M., & Brenguier, F. (2011). Assessment of resolution and accuracy of the Moving Window Cross Spectral technique for monitoring crustal temporal variations using ambient seismic noise. *Geophysical Journal International*, 186(2), 867-882.

23. Dammeier, F., Moore, J. R., Haslinger, F., and Loew, S. (2011). Characterization of alpine rockslides using statistical analysis of seismic signals. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(F4). doi:10.1029/2011jf002037
24. Eissler, H. K., and Kanamori, H. (1987). A single-force model for the 1975 Kalapana, Hawaii, earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B6), 4827-4836.
25. Huang, C. J., Yin, H. Y., Chen, C. Y., Yeh, C. H., and Wang, C. L. (2007). Ground vibrations produced by rock motions and debris flows. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(F2).
26. Huang, Y., Zhang, W., Xu, Q., Xie, P., and Hao, L. (2012). Run-out analysis of flow-like landslides triggered by the Ms 8.0 2008 Wenchuan earthquake using smoothed particle hydrodynamics. *Landslides*, 9(2), 275-283. doi:10.1007/s10346-011-0285-5
27. Hung, C., Lin, G. W., Leshchinsky, B., and Kuo, H. L. (2019). Extracting region-specific runout behavior and rainfall thresholds for massive landslides using seismic records: a case study in southern Taiwan. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(6), 4095-4105.
28. Huang, H. H., Wu, Y. M., Song, X., Chang, C. H., Lee, S. J., Chang, T. M., & Hsieh, H. H. (2014). Joint Vp and Vs tomography of Taiwan: Implications for subduction-collision orogeny. *Earth and Planetary Science Letters*, 392, 177-191.

29. Kanamori, H., and Given, J. W. (1982). Analysis of long-period seismic waves excited by the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens—A terrestrial monopole? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 87(B7), 5422-5432.
30. Kao, H., Thompson, P. J., Rogers, G., Dragert, H., and Spence, G. (2007). Automatic detection and characterization of seismic tremors in northern Cascadia. *Geophysical Research Letters*, 34(16).
31. Kao and Shan (2004). The Source-Scanning Algorithm: mapping the distribution of seismic sources in time and space. *Geophysical Journal International*, 157(2), 589–594.
32. Kao and Shan (2007). Rapid identification of earthquake rupture plane using Source- Scanning Algorithm. *Geophysical Journal International*, 168(3), 1011–1020.
33. Kohavi, R., and Provost, F. (1998). Confusion matrix. *Machine Learning*, 30(2-3), 271-274.
34. Kuo, H. L., Lin, G. W., Chen, C. W., Saito, H., Lin, C. W., Chen, H., and Chao, W. A. (2018). Evaluating critical rainfall conditions for large-scale landslides by detecting event times from seismic records. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 2877-2891. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2877-2018>.
35. Lai, T. S., Mittal, H., Chao, W. A., & Wu, Y. M. (2016). A study on Kappa value in Taiwan using borehole and surface seismic array. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(4), 1509-1517.

36. Lee, E. J., Liao, W. Y., Lin, G. W., Chen, P., Mu, D., & Lin, C. W. (2019). Towards automated real-time detection and location of large-scale landslides through seismic waveform back projection. *Geofluids*, 2019.
37. Lin, G. W., Hung, C., Chang Chien, Y. F., Chu, C. R., Liu, C. H., Chang, C. H., and Chen, H. (2020). Towards Automatic Landslide-Quake Identification Using a Random Forest Classifier. *Applied Sciences*, 10(11), 3670. doi:10.3390/app10113670
38. Lin, G. W., Kuo, H. L., Chen, C. W., Wei, L. W., and Zhang, J. M. (2020). Using a Tank Model to Determine Hydro-Meteorological Thresholds for Large-Scale Landslides in Taiwan. *Water*, 12(1), 253. doi:10.3390/w12010253
39. Liu, H. D., Li, D. D., and Wang, Z. F. (2018). Dynamic process of the Wenjiagou rock landslide in Sichuan Province, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(10), 233. doi:10.1007/s12517-018-3564-9
40. Mackay, J. C. D. (2003). *Information Theory, Inference and Learning Algorithms*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
41. Peng, Z., Vidale, J. E., Wech, A. G., Nadeau, R. M., and Creager, K. C. (2009). Remote triggering of tremor along the San Andreas Fault in central California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B7).
42. Poupinet, G., Ellsworth, W. L., & Frechet, J. (1984). Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: An

- application to the Calaveras Fault, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B7), 5719-5731.
43. Schneider, D., Bartelt, P., Caplan-Auerbach, J., Christen, M., Huggel, C., and McArdell, B. W. (2010). Insights into rock-ice avalanche dynamics by combined analysis of seismic recordings and a numerical avalanche model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F4).
44. Sens-Schönfelder, C., & Wegler, U. (2006). Passive image interferometry and seasonal variations of seismic velocities at Merapi Volcano, Indonesia. *Geophysical research letters*, 33(21).
45. Shieh, S. L. (2000). User's guide for typhoon forecasting in the Taiwan area (VIII). Central Weather Bureau, Taipei.
46. Suriñach, E., Vilajosana, I., Khazaradze, G., Biescas, B., Furdada, G., and Vilaplana, J. (2005). Seismic detection and characterization of landslides and other mass movements. *Natural Hazards and Earth System Science*, 5(6), 791-798.
47. Thurber, C. H. (1983). Earthquake locations and three-dimensional crustal structure in the Coyote Lake area, central California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88(B10), 8226-8236.
48. Yeh, K. C., and Liu, C. H. (1982). Radio wave scintillations in the ionosphere. *Proceedings of the IEEE*, 70(4), 324-360.



## 附錄

## 附錄一、期中審查意見回覆

第一章 前言		
編號	委員意見	執行單位回覆
1	建議補充應辦事項尚未有成果之項目之執行構想。	契約內容之工項已於期末全數完成，未來若有相關期中報告，會於期中報告中說明未完成事項之工作方金。
第二章 研究方法		
1	P2-1，區域內共有六處大崩潛勢區，描述有誤應修正。	感謝指正。 內文已修正為“區域內共有 6 處大規模崩塌優先辦理區”
2	P2-3，表名為台南嘉義雲林不符中部區域，請確認修正。	感謝指正。 表標題已修正為“臺灣中部地區現有 27 座連續地表振動觀測站資訊”
3	P2-9，時間窗格與 P2-8 的描述看不出關聯性。	已修改相關圖片，圖 2.4 及圖 2.5 為 2019 年 8 月 11 日連續地動紀錄之結果，為偵測事件範例。
4	選擇六處大規模崩塌潛勢區是否與本案能分析之崩塌訊號吻合？是否可能無法達到預期效果？本計畫預計七月前往兩處架設臨時地震站，預計架設時間、監測頻率為何？如何確認監測資料與崩塌有關宜補充說明。	本次計畫區域範圍內共有六處大規模崩優先辦理區，但本次計畫所偵測到之事件，接並無位於該六處區域，但根據地震網之密度及未來本計畫選擇之臨時測站位置，應可達到偵測這六處事件及後續分析之成果。



		<p>本計畫預計架設之測站分別為清境及梨山兩處，皆已於 8 月底架設完成，預計觀測時間 12 個月，儀器採樣頻率為 100Hz。因本次選址皆位於大規模崩塌潛勢邊坡，因此若崩塌塊體有產生活動，預期可以偵測其訊號來源。</p>
5	<p>本年度選用之崩塌分類器(期中進度)為卷積神經網路，報告中說明過於簡潔，應補充說明分析公式及計算過程。</p>	<p>已經在方法段落加強 CNN 原理說明。</p>
6	<p>P2-16 中關於定位中提及定位方法使用相關係數來定位，應補充說明相關係數採用之原始資料為何。</p>	<p>本次期末報告定位流程改以 Lee et al., 2019 所使用之 SSA 定位方法，相關說明於 3-15 頁。</p>
7	<p>使用 K-means 集群分析結果繪製散佈圖意義？是否真的沒有物理意義可以解釋？</p>	<p>因 K-means 於資料中隨機挑選參數作為分群標準，因此並無物理意義。</p>
8	<p>關於歸納區域尺度之地震觀測網工項，建議應詳細說明：</p> <p>a. 測站所屬機構單位，中央氣象局或中央研究院。</p> <p>b. 報告所列之寬頻地震站大多數皆為 CWB 井下地震站，其測站安裝於地表以下深度，未來是否適合用於監測</p>	<p>已於期末報告補述本次所使用之地震站詳細資訊，詳表 2-1。關於井下測站之使用，有相關文獻認為井下測站並不會影響監測崩塌事件之準確度。相關井下測站參考文獻已補充。</p> <p>另外，根據委員建議刪除加速度測站。</p> <p>目前本計畫仍為試驗性階段，距離未來要進行即時偵測仍有一段距離，未來若有要進行即</p>

	<p>地表崩塌事件？應予以討論。</p> <p>c. 部份測站為加速度及短週期共站安裝，應表示清楚，例如 CNN5</p> <p>d. 未來有近即時的應用目的，是否應事先考量即時資料的取得方式。</p> <p>e. 資料應含測站高程及運作期間</p> <p>f. 加速度測站的動態敏感度不高，建議直接無須納入考量。</p> <p>g. CHGB 已停止運作 (2020/02)</p> <p>h. 建議 CWB 井下地震站之參考文獻，Lai et al. (2016), doi:10.1785/012016004 ; Lai et al. (2022), doi:10.1785/02200210252</p>	<p>時資料分析，團隊會根據需求進行更改。</p>
<p>9</p>	<p>CH. 2，第三節缺乏國內完整的文獻回顧，特別是現況臺灣的即時觀測網的崩塌監測系統(Chao et al., 2017 doi:10.1038/srep43510)，區</p>	<p>感謝委員建議。 相關文獻已補充於內文。</p>

	<p>域尺度的應用文獻(Chang et al. 2021 doi:10.5194/-9-505-2021 ; Yang et al. 2022 doi:10.01007/S10346-022-01888-6)</p>	
<p>10</p>	<p>第二章相關意見如下：                  a. 第四節短時窗口長度 5 秒，對應頻率的解析度為 0.2Hz。                  b. 進行 STA/LTA 分析時，若使用原始資料將會 MISS 掉許多可能的事                  件，如果有先進行 filter，請問如何決定濾坡頻段？                  c. 圖 2.5，如何確認地動訊號為崩塌造成？測站距離崩塌多遠？崩塌面積多大？是否可進行定位？定位誤差多少？必須仔細釐清上述問題，否則難以執行查核點之“收集土砂運動引致之地表振動紀錄”，沒有正確及完善的訓練集，則更難以完成查核點 3 “自動分類器之可靠度”</p>	<p>感謝委員指正，已修正相關描述。                  本計畫在進行 STA/LTA 分析時以 1-5Hz 頻段進行率波。                  本次期中計畫進行主要為快速的判釋崩塌地動訊號，並且於偵測後有進行再次的人工檢核。之於後續的崩塌配對及相關定位誤差，於本次期末報告中呈現，詳 4-19 頁。</p>

11	Kmeans 的輸入資料為何？應詳細說明。	Kmeans 的輸入資料為 256*256 像素之時頻圖，以圖形輸入進行 K-means 集群分析
12	<p>ch2，第六節、理論走時的計算是否使用平均波速 (6.7km/s)及震央距離直接計算？如果是，這樣定位結果會有很大的問題，建議應採用射線追蹤的方式來計算理論走時，相關定位方式建議參考國內發表的文獻。Chen et al. 2013. doi:10.1093/gji/ggt121.</p> <p>Chao et al. 2013. doi:10.1093/gji/ggt082.</p> <p>Chang et al. 2021.doi:10.5194/esurf-9-505-2021.</p>	<p>感謝委員建議。</p> <p>本次定位方法以修改為 Lee et al., 2019 之 SSA 定位方法，詳 3-15 頁。</p>
13	訊號之時頻圖之訊號色塊強度，其與軟體之 dB 調整設定有關，其是否對分群結果有所影響？	CNN 模型訓練色階有進行標準化，因此顏色並不會影響。
14	本計劃有選用中部 6 處高潛勢大規模崩塌區其現地亦有設置監測儀器，一旦有崩塌訊號，亦可做相關檢視。	<p>感謝委員建議。</p> <p>若未來有偵測到地動訊號，會收集相關監測資料進行驗證比對。</p>

15	有關卷積神經網路分類模型結果，可見噪訊之準確率及召回率較差，是否後續仍有改善之方法？	於期中報告之後新增訓練資料集，重新進行分析，其中噪訊之召回率可提升至 95%。
第三章 崩塌地表振動觀測站挑選與條件討論		
1	預定在松茂與達觀設臨時地震站可與臺中分局聯絡，看現地有哪些觀測儀器，並可以提供用電、訊號等。	感謝委員建議，本次新裝設臨時地震站最後選址為梨山及清境兩處位置，並使用鉛蓄電池及太陽能板做為供電來源。
2	ch3，新增測站規劃除了考量保全對象及測站包覆性以外，最重要的應為測站可偵測的最大距離與崩塌大小及訊號頻率之間的關係，建議應從過去的歷史事件資料進行歸納後納入作為新增測站之考量因素。	感謝委員建議。 本次架站位置選擇於梨山及清境兩處，都位於大規模崩塌潛勢邊坡位置。
3	ch3，短週期地震站並非是“低成本”。	感謝委員建議。 已修正相關文字”採用短週期地震儀”
4	P3-2、“波行相關性分析邊坡地層中含水狀況的改變”須場址型的測站，與本計畫目的無關，建議刪除文字，提供相關國內文獻 Kang t al. 2021、doi:10.3390/rs13142834	感謝委員建議，以刪除無關之文字敘述。

5	<p>P3-3、應說明新增測站規劃的儀器類型？另外，廬山場址北側的 CHGB 測站已停止運作，應納入考量，重新規劃。九份二山及達觀場址應考量可能的活動塊體的量級大小來考慮新設測站的距離位置，亦可能需要 1 個以上的新增測站。本案松茂、達觀、梨山、新佳陽為水保臺中分局轄區，亦有震翔監測公司負責。九份二山及廬山亦為南投分局轄區，過去亦有成大及興土木科技基金會的監測，應納入水保局已有的邊坡活動性及國棟性塊體評估納入新增測站之考量。</p>	<p>本次新設之測站為 geophone，採樣頻率為 100Hz。 感謝委員對於選址上的建議。本次架站位置選擇於梨山及清境兩處，都位於大規模崩塌潛勢邊坡位置。 另外若於架設期間有蒐集到相關地動訊號，則會盡可能蒐集相關單位之監測資料進行比對分析。</p>
6	<p>CNN 模型訓練的 input 時頻圖的色階是否有統一？若有不同儀器類型難以統一，建議刪除加速度資料，或需做頻譜值正規化的處理。</p>	<p>CNN 模型訓練色階有進行標準化，因此顏色並不會影響。加速度資料依委員建議已刪除。</p>
<p>第四章 地動訊號自動分類器成果</p>		
1	<p>九份二山南投分局有長遠之觀測，可以了解共構，本處為集集地震引發之崩塌，因有較前之資料，表 4-1 採 2012 至 2020 年間，資料可以加長，梨山的災害也可能更早。</p>	<p>感謝委員建議，因考量相關地震站密度及資料完整性及連續性，故仍採用 2012-2020 年做為本次計畫之目標年度，更早之年度的地震資料連續紀錄並不完整，較無法提供有效的資訊。</p>

2	<p>P4-15 的不同類型地動訊號的比較極有意義，應可持續擴大資料來源做比對。</p>	<p>感謝委員建議。 本計畫中相關事件資料接有進行比對其特徵值，尚符合文獻所提出之特性，未來若有更多其他類型事件如落石、微震資料，則會納入比對。</p>
3	<p>P4-17 訊號定位結果影響成果很多，對波傳速度可以進一步探討，可能無法用一平均值來看，可否由過去資料來推算，另外水庫可能也有地震儀可用。</p>	<p>感謝委員建議，本次期末報告更新原本的定位方式，以 SSA 方法進行定位，其詳細方法如 3-15 頁。 因定位方法資料來源須符合一定特徵值，因此若水庫之地震資料符合特徵，則也可納入做為定位資料。</p>
4	<p>雖崩塌之召回率達 90%，但實際上噪訊之召回率僅 62%，亦即有 1/3 會被判定為崩塌，解決方法為何？</p>	<p>於期中報告之後新增訓練資料集，重新進行分析，其中噪訊之召回率可提升至 95%，詳細說明如表 4-2。</p>
5	<p>崩塌訊號特徵值實際使用之用途為何？</p>	<p>可利用波型特徵計算出崩塌與地震特徵值的差異，作為交互驗證的方法之一。</p>
6	<p>定位出 2012-2019 定位結果中 2014/7/23 及 2017/6/3 彰化以及 2019/8/11 埔里之定位是否異常？2012、2017、2019 中部地區有多起豪雨事件引致之山崩事件，建議與這些事件比對。</p>	<p>本次計畫為針對中部地區之山崩振動訊號進行研究，但仍可能記錄到非中部地區的事件，因此定位在非中部地區應屬正常現象。 感謝委員建議，後續進行山崩與振源配對時，會優先考慮這些豪雨所造成之事件進行比對篩選。</p>

7	CH4，將監測尺度進入至區域或場址，往往可以發現崩塌並非發生在大雨期間，本案是否應一同建立非豪雨期間的事件目錄，未來將有助於釐清其外在觸崩因子，精進崩塌預警之相關研究工作。	感謝委員建議。 未來會將此方向作為發展重點之一。
8	P4-1，以 2009 年莫拉克(南部)及 2015 年蘇迪勒(北部)做為參考訓練樣本，其與中部現況之測站條件有差異，建議應以人工判斷為主，透過定位及崩塌資訊進行二次檢核，獨立建立中部的崩塌訊號樣本。	感謝委員建議。 相關資料訓練樣本皆有進行人工檢核，因中部地區事件數量較少，因此訓練資料仍有加入其他年度或地區的樣本。
9	P4-5、建議應將契約工項(四)崩塌訊號原定位及配對提前執行，用以標定地動訊號的來源確實為崩塌事件。	感謝委員建議，以於期末報告中完成此工項。
10	表 4.2、應仔細釐清噪訊及地表誤判成崩塌的真正原因。	於期中報告之後新增訓練資料集，重新進行分析，其中噪訊之召回率可提升至 95%
11	圖 4.9、雖然為模型判斷為崩塌事件之訊號，但如何證明？真實崩塌位置？定位位置？震動訊號強度與崩塌面積之關係？	模型判斷後有進行人工再次檢核。並於後續崩塌配對上根據定位、波形軌跡方向以及面積關係公式進行驗證。



12	建議可將分群及分類易失效狀況彙整,提供後續研究之參考。	感謝委員建議。
13	圖 4.12、許多崩塌事件定位皆落在平原區,建議應先定性或定量可能的定位誤差,未來在應用上才有參考的依據。	感謝委員建議。本次期末報告更改定位方法,相關誤差驗證於 4-17 頁說明。
14	目前的報告書架構是以後續應用作業程序為主(如圖 4.8),建議應先進行崩塌與訊號的配對檢核後,才開始進行模型分類的訓練,未來透過後續的崩塌事件予以驗證,目前已監測及判識的崩塌事件的可信度低,將影響未來求得降雨門檻相關之研究。	感謝委員建議。 於後續配對作業中,已完成相關檢核並由配對成功之事件進行降雨條件分析。
15	圖 4.4 寬頻地震站紀錄之 K-means 集群分析結果,呈現集群分布有重疊之狀況,其是否會分群結果?	K-means 值分群後之重疊狀況表示在該特徵上較無法完整分類,但於整體來說並不會影響分群結果。
16	考量颱風豪雨事件後緊急判釋,往往利用衛星影像進行崩塌判釋,會因雲遮無法達到快速運用,未來本案可否災後提供可能發生區域,透過所轄單位或當地防災專員了解,供防災應用參考	本計畫內容於未來期望可達到即時監測,若有事件發生,則可迅速透過定位方法的值崩塌可能區域,提供防災單位參考。

17	有關報告書 P4-12 中時間目錄為 2012-2019 年，而 P4-2 的豪雨事件為 2012-2020 年，時間年份不相同，另外為何缺少 2021 年資料，請確認修正。	本次計畫地動訊號所判釋之年度為 2012-2021 年，因 2020 年無偵測到事件，所以於表格中無呈現 2020 年資料。 2021 年度於中部地區並無豪雨事件。
18	地動訊號可對崩塌定位，其可以對崩塌規模分類嗎？	可經由經驗公式判斷其規模與面積之關係。
第五章 增設清境以及梨山臨時地震站		
1	計畫所架設之臨時地震儀與相關單位之寬頻地震站，其資料精度上是否有落差，請確認說明。	新架設之臨時地震站資料精度並無落差，但寬頻地震站所記錄到頻帶較為廣泛。
其他		
1	參考文獻中科技計劃用南投縣：水保局，似乎不適合。	感謝指正。 已修正為 APA 引用格式。
2	部分分析過程可以考慮用附錄來說明引用資料及過程中的結果，以供參考。	感謝委員建議。 已補充分析過程於內文及附錄
3	報告中建議增加工作進度甘特圖。	感謝委員建議。 期末報告已完成全數工項，因此本次無新增甘特圖，未來若有期中報告會新增甘特圖。
4	請國立成功大學依據契約書規定，積極辦理後續工項，並請於 111 年 11 月 10 日前提出期末報告書，俾利召開期末審查議。	感謝委員提醒。 如契約內容辦理。

## 附錄二、期末審查意見回覆

### 一、蘇苗彬委員：

編號	委員意見	執行單位回覆
1	本案有關大崩計劃之地動訊觀測與應用，極有意義，唯應注意驗證工作需確實完整，整體技術成熟後有極大應用的可行性，對局方大崩計劃能有所助益。	謝謝委員肯定。 團隊會根據委員意見修正報告內容。
2	各章節的撰寫盡量圖文並列，並非圖表列於章節的最後，較易比對，計劃報告不用比照論文型式較好閱讀。	感謝委員建議，已修改報告內文圖表位置。
3	P.2-3 的表 2.1 是否需更新 2016 的資料，其中管理單位可以用中文全名，文字中三類型地震儀、加速度強震儀為何者不適用的原因等可深入檢討。	已將管理單位更改為中央研究院、中央氣象局。不適用原因補充至 2-3。
4	P.2-6、2-7 等崩塌振動的特徵很有意義，可使更深入檢討與說明以圖 2.5WUSB 測站為何處，此過程在前期計劃中驗證如何，應可以加入更多說明。	因低頻訊號較早到達地震站，來源為基盤脫離產生的振動，接著出現的高頻訊號為岩體破碎滑落、互相撞擊導致。而高頻訊號能量衰減較快，只剩下低頻訊號，造成訊號呈現三角形。
5	P.2-16、P.2-17 所提出之反向投影解很好，可以詳細描述其	反向投影解為本次計畫所採用的定位方法，其為 Lee et al.,

	相關資訊，本成果是否出現在前期的報告中，是否為本計劃研究成果。	(2019)之研究成果，本次計畫使用其方法進行相關振動源訊號的定位。
6	P2-19 的描述不太完整，建議可直接引用局 2020 年的報告而非 2002 的研究。	感謝委員建議，已將引用文獻更新，如 P2-21、P2-23。
7	P4-17 中部找到 6 起事件應列出詳細資料，供比對與確認，不見列表。	已更新於表 4.5 及表 4.6(P4-19、P4-20)
8	P6-7、6-8 等迴歸變化很大，不適合做門檻值，不急著做自動判釋，本案仍以研究驗證為首要。	感謝委員建議。本次計畫最終目的主要希望能將地動訊號偵測與崩塌預警做實際的連結，因次運用的得到的崩塌時間作為促崩雨量的計算基準，且本次計畫所提出的門檻值為回歸曲線的下緣做為參考值所定義，因此變化很大的部分並不會影響門檻值的基準。

## 二、王國隆委員：

1	報告工作項目進展豐富，然書寫時說明較少，建議整理時書寫詳細以利閱讀也容易推廣。	感謝委員指教，本次修正已加入更多簡報內容，並梳理文字順序及排版。
2	降雨分析時採用哪些氣象局測站及內插應列表或圖說，以氣象局查詢介面不易得知	感謝委員建議。 新增雨量站資訊於表 4.8 及表 4.9(P4-33~P4-34)。

	計畫使用哪些資料，也不易判斷優劣。	
3	增設清境及梨山臨時地震站宜注意保全避免儀器損失；另，監測期間兩站均無辨識出可能為崩塌引致之振動訊號，是否與當地之水保局監測系統比對？以及能辨識出可能崩塌規模為何？亦即，辨識出之崩塌、面積、土方及坡高是否可提供作為本法之合理化使用依據。	此兩站臨時站在架設時有選定較安全的位置，對於儀器的保全應屬安全無虞。 此外因本次架設期間並無偵測出崩塌引致之地動訊號，未來若有機會則可和水保局鄰近之監測資料比對，本次所架設的測站可運用本計畫所提出的方法偵測各項崩塌資訊。
4	計算促崩降雨門檻時，回推雨型是否假設為方型？設計上是否合理？	計算促崩降雨門檻使用平均降雨強度及降雨延時作為促門檻依據，因平均降雨強度為時間內總降雨量除以降雨延時，為一隨降雨時序變動的參數，以數學計算上雖呈現方型雨型的狀況，但是其實際上屬於動態的基準。
5	紙本報告最後僅結論未提供建議。	感謝委員建議，增加建議章節於5.2節。

### 三、趙韋安委員：

1	期末報告書的內容之安排與可讀性都相較於期中報告進步許多，且亦有根據期中審查	感謝委員肯定。
---	---------------------------------------	---------

	的意見進行修訂，本人給予正面的肯定。	
2	(2-3)配合圖 2.4、2.5，事件 41 的發生時間應為 2019 年 8 月 12 日 1 點 55 分 48 秒，請修正。	感謝委員提醒，已修正如 P2-9。
3	(2-5)CNN 的分類成果是以評分呈現，請說明當評分結果相近時將如何處理？是否有避免採用評分相近的分類結果？	在分類時並不會看到各類的評分，CNN 只會告知分數最高者為分類結果，也就是與樣本最相似的類別。如兩類評分相同的確會導致分類上誤差，後續將會新增篩選結果之方法，使 CNN 的分類結果更穩定。
4	(2-6)理論走時是計算 P-wave 還是 S-wave，應補充說明。	本次計畫計算時所用到的理論走時波速為 S 波。
5	(3-1)短週期地震儀的價錢並沒有比寬頻地震儀便宜，且短週期地震儀相較無法取得低頻資訊，若計畫提出的相關規模大小定量方法會使用到低頻範圍(如 0.02-0.05Hz)，則會有儀器本身的限制。請補充相關文字說明。	感謝委員指正，本次報告修正相關文字。 若因使用的儀器缺乏低頻資料，在進行規模的定量計算時，則須改用時間規模或是芮氏規模進行量化。
6	(3-2)儀器的設置優先以靠近關注崩塌地為主，但是根據震波傳遞理論，當傳遞距離有限時，則可產生的訊號最大波長	感謝委員建議。 本計畫建議在地動訊號的資料取得上，仍以寬頻地震站資料為主，若受限於測站密度及狀

	亦有限制，因此也限制了可使用的最小頻率，若相關方法有使用到低頻訊號則會有使用上的限制。	況而必須使用短週期地震站，在相關資料運用上會進行取捨及修正。
7	計畫執行新設的 Geophone 並非是短週期地震儀，其在儀器本身的敏感度 Geophone 遠低於傳統的短週期地震儀。請更改報告中相關文字的說明。	感謝委員建議，已更改相關文字說明。
8	(4-1)短週期與寬頻儀器的樣本分開訓練是非常正確的選擇。但是在圖 4.4 及圖 4.5 中的崩塌類別的訊號範例，難以確認真實性。本人認為是區域或遠震地震事件的可能性很大。若以 Kmeans 這樣的成果作為 CNN 的輸入資料，可能會影響分類器模型的訓練結果。	感謝委員提醒，此計畫未製作遠震類別，之後會加入遠震模型進行訓練，即可降低遠震導致分類錯誤的機率。 本次計畫使用 Kmeans 分類後皆有進行人工檢查。
9	(4-3)本計畫統一使用事件 2017 年 6 月 2 日 22:32(UTC) 來進行說明崩塌訊號分類、SSA 定位成果及真實崩塌配對，本人認為非常好，但唯一欠缺崩塌面積推估的驗證，建議務必在報告書中補充相關內容。	感謝委員建議。 因現有崩塌案例不足，後續會將所有相關計畫、文獻資料蒐集好之後進行面積驗證，將寫進建議以便後續計畫補充。

10	<p>由圖 4.8 的時頻圖成果，訊號的頻率皆小於 1Hz 且持續時間約 3~3.5 分鐘，除了 TUS 短週期儀器僅有 1 分鐘，本人認為此訊號是來於遠域地震訊號。配合圖 4.10(d)的低頻質點運動分析主要呈現東北-西南方位角，此遠域地震可能來自於日本，請團隊務必重新確認，並更正相關內容。</p>	<p>現有分類器未針對遠震與崩塌訊號進行區隔分類，兩類時頻圖在呈現上很相似，後續會加上延續時間等條件下去進行遠震與崩塌的分類。</p>
11	<p>(第五章) Geophone 並非是短週期地震儀，請更正相關文字說明。</p>	<p>感謝委員建議，已更改相關文字說明。</p>
12	<p>(第七章)Lin et al. (2015)並未列在參考文獻中，其中崩塌規模的決定需仰賴 0.02~0.05Hz 的最大位移值，因此短週期地震儀不適用於此方法，應補充說明上述限制；其二定位誤差亦可影響預估規模的大小，若後續要使用規模預估崩塌面積或體積應要考量定量相關的誤差範圍，在網頁發布時一併呈現。</p>	<p>感謝委員建議，已補充缺漏參考文獻。 以更新相關崩塌面積估算於 4.8 節。</p>
13	<p>(第八章)將”7”筆訂位成功，更正為”6”。</p>	<p>感謝委員建議，已更改文字。</p>



四、黃效禹委員：

1	表 4.1 的明細僅提供降雨量資料，建議應將採用雨量站予以標示，供後續引用參考。	本計畫採用台中市和平區德基雨量站。
2	本研究地動訊號自動分類器成果，找出 2 個以上地震站偵測到結果與本局 BigGIS 系統崩塌目錄比較得到現地準確性，未來探討可再以年際之事件後崩塌目錄，找出現地已崩塌而本計畫地動訊號是否有偵測到，作為精進研究。	感謝委員建議。 本計畫相關前期計畫有使用過藉由年度資料反向搜尋的方式去進行崩塌地動訊號蒐集，但是其效果並不突出，且受限於地震站密度及資料完整性，並無法有效增加事件配對數量，未來會朝提高判斷準確度以及不同性質測站選用的方向作為增加配對數量的方向。
3	本研究有朝崩塌地動訊號自動辨識功能，有利水保局未來實際應用，建議可朝結合 BigGIS 系統將結果展示，或許可補足事件發生後衛星影像尚無法取得前，掌握可能致災地點。	感謝委員肯定。 未來若有機會，將協助局內單位整合各項功能並上架。

五、土石流防災中心：

1	請補充報告書所提監測網頁之網址。	感謝委員提醒，已補充說明。
2	P4-11，表 4-3 部分事件備註為空白，請說明原因。	已將事件名稱補上。

3	本案為補助科技計畫，請將發表之期刊論文等資料，附註於成果報告中。	會附上成果效益報告，並註明發表資料。
4	請加入歷年研究成果進行比較說明。	已加入歷年成果。
5	請於結論章節補充“建議”內容。	已補充於 5.2 節。

附錄三、來往公文

國立成功大學 函

機關地址：701 臺南市東區大學路1號

聯絡人：林冠瑋

聯絡電話：06-2757575#65424

電子信箱：quantor@gmail.com

受文者：林冠瑋副教授

發文日期：中華民國111年2月11日

發文字號：成大理院字第1112200195號

速別：普通件

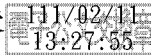
密等及解密條件或保密期限：

附件：如主旨

主旨：檢送貴局補助本校地球科學系林冠瑋副教授辦理「臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究」計畫契約書正本2份及副本7份，請簽署後寄還本校正本1份，餘請抽存，請查照惠復。

正本：行政院農業委員會水土保持局

副本：本校地球科學系林冠瑋副教授



林冠瑋副教授



1112200216 111/2/11

正本

檔號：  
保存年限：

### 行政院農業委員會水土保持局 函

地址：54044南投市中興新村光華路6號

承辦人：林建良

電話：049-2347412

傳真：0492394343

電子信箱：blueway@mail.swcb.gov.tw

701 臺南市東區大學路1號

受文者：國立成功大學

發文日期：中華民國111年2月21日

發文字號：水保防字第1111866700號

速別：普通件

密等及解密條件或保密期限：

附件：如說明三

主旨：貴校檢送111年度本局補助貴校地球科學系林冠璋副教授辦理「臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究」補助科技計畫契約書正本2份及副本7份案，復如說明，請查照。

說明：

- 一、復貴校111年2月11日成大理院字第1112200195號函。
- 二、經查貴校所提契約書案名為「臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究計畫」，與本局補助貴校科技計畫案名為「臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究」不符。
- 三、檢附本案契約書正本2份及副本7份，請貴校修正後函報本局，辦理後續簽約事宜。

正本：國立成功大學

副本：本局土石流防災中心

# 局長 李鎮洋

本校為因應行政程序法之施行自民國九十年元月一日起收發人員對以掛號送達之信件應注意郵戳之保留。承辦人員應將本件公文之信封附卷存證隨文歸檔。

國立成功大學 理學系 冠璋  
111/12/12 22:064899

第1頁 共1頁

國立成功大學 111年02月23日



1110001106

# 國立成功大學 函

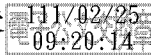
機關地址：701 臺南市東區大學路1號  
聯絡人：林冠瑋  
聯絡電話：06-2757575#65424  
電子信箱：quantor@gmail.com

受文者：林冠瑋副教授

發文日期：中華民國111年2月25日  
發文字號：成大理院字第1112200257號  
速別：普通件  
密等及解密條件或保密期限：  
附件：如主旨

主旨：檢送貴局補助本校地球科學系林冠瑋副教授辦理「臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究」計畫修正後契約書正本2份及副本7份，請簽署後寄還本校正本1份，餘請抽存，請查照惠復。

正本：行政院農業委員會水土保持局  
副本：本校地球科學系林冠瑋副教授



林冠瑋副教授



1112200269 111/2/25

正本

檔 號：  
保存年限：

### 行政院農業委員會水土保持局 函

701  
臺南市東區大學路1號

地址：54044南投市中興新村光華路6號  
承辦人：林建良  
電話：049-2347412  
傳真：0492394343  
電子信箱：blueway@mail.swcb.gov.tw

受文者：國立成功大學

發文日期：中華民國111年3月8日  
發文字號：水保防字第1111830930號  
速別：普通件  
密等及解密條件或保密期限：  
附件：如主旨

主旨：檢送「臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究」（111農科-7.3.4-保-S1）科技計畫契約書正、副本各1份，請查照。

說明：依據行政院農業委員會一般農業科技計畫補助作業要點暨貴校111年2月25日成大理院字第1112200257號函辦理。

正本：國立成功大學(地球科學系林冠璋教授)  
副本：本局綜合企劃組(契約書副本1份)、本局主計室(契約書副本1份)、本局土石流防災中心(契約書副本4份)

# 局長李鎮洋

034555  
本校為因應行政程序法之施行自民國九十年元月一日起收發人員對以掛號送達之信件應注意郵戳之保留。承辦人員應將本件公文之信封附卷存證隨文歸檔。

國立成功大學 111年03月09日



1110001483

國立成功大學 理學院 林冠璋  
111/12/12 22:14

第1頁 共1頁

# 國立成功大學 函

機關地址：701 臺南市東區大學路1號  
聯絡人：林冠瑋  
聯絡電話：06-2757575#65424  
電子信箱：quantor@gmail.com

受文者：林冠瑋副教授

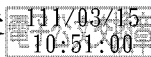
發文日期：中華民國111年3月15日  
發文字號：成大理院字第1112200381號  
速別：普通件  
密等及解密條件或保密期限：  
附件：如文

主旨：檢送貴局補助本校地球科學系林冠瑋副教授執行「臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究」（計畫編號：111農科-7.3.4-保-S1），第1期經費新臺幣45萬6,000元整收據(成大第111005529號)1紙，請查照惠撥。

說明：款項請撥入臺灣銀行臺南分行，帳號00903607114-1「國立成功大學401專戶」，統一編號69115908

正本：行政院農業委員會水土保持局

副本：本校地球科學系林冠瑋副教授



林冠瑋副教授



1112200444 111/3/15

# 國立成功大學 函

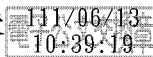
機關地址：701 臺南市東區大學路1號  
聯絡人：林冠瑋  
聯絡電話：06-2757575#65424  
電子信箱：guantor@gmail.com

受文者：林冠瑋助理教授

發文日期：中華民國111年6月13日  
發文字號：成大理院字第1112200938號  
速別：普通件  
密等及解密條件或保密期限：  
附件：如文

主旨：檢送本校地球科學系林冠瑋副教授辦理貴局111年度科技計畫「臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究」期中報告書及期中摘要報告各10份，請查照惠復。

正本：行政院農業委員會水土保持局  
副本：本校地球科學系林冠瑋副教授





## 行政院農業委員會水土保持局 開會通知單

受文者：國立成功大學(林冠瑋教授)

發文日期：中華民國111年6月22日

發文字號：水保防字第1111832926號

速別：普通件

密等及解密條件或保密期限：

附件：期中報告書、會議議程及出席費領據等各1份(ATTCH1 期中會議議程.pdf、ATTCH2 06-發言單.pdf、ATTCH3 出席領據.pdf、ATTCH4 期中審查會議QR코드2022-6-22.pdf)

開會事由：召開「臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究」案期中審查會議

開會時間：111年7月14日(星期四)下午2時30分

開會地點：本局府西辦公室第二會議室(南投市府西路71號)及視訊會議

主持人：林簡任正工程司任修

聯絡人及電話：林建良049-2347412

出席者：王委員國隆、陳委員天健、趙委員韋安、蘇委員苗彬、黃委員效禹、鄭委員宏昭

列席者：國立成功大學(林冠瑋教授)

副本：本局秘書室、本局土石流防災中心、本局技術研究發展小組(請協助視訊會議)

備註：

- 一、本次審查會議採實體及webex視訊會議併行辦理，請視訊與會人員提前安裝Webex程式，會議號碼及密碼請詳視訊會議資訊說明。
- 二、會議結束後請委員將發言單及出席費領款收據填寫簽名後，以照相或掃描方式回傳本局承辦人電子信箱(E-mail: blueway@mail.swcb.gov.tw)，俾利辦理後續相關事宜。
- 三、因應新冠肺炎疫情影響，如有呼吸道症狀及發燒者，請來電告知請假。
- 四、疫情期間請自備水杯，做好個人防疫措施。



# 「臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究」案

## 期中審查會議議程

壹、時間：111 年 7 月 14 日(星期四)下午 2 時 30 分

貳、地點：本局府西辦公室第二會議室(南投市府西路 71 號)及視訊會議

參、主持人：林簡任正工程司任修

肆、主持人致詞：

伍、報告事項：

案由一：確認出席委員人數符合「本局委託服務作業程序」第 33 點規定，報請公鑒。

說明：本次審查會議，應有委員總額二分之一以上出席，其決議應經出席委員過半數之同意行之。出席委員中之專家學者委員人數應至少二人且不得少於出席人數之三分之一。

決定：

案由二：「臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究」案期中報告書，報請公鑒。

說明：

- 一、依據契約書第 2 條規定辦理。
- 二、本項委託服務案，依委託服務契約書所提，應辦事項如下：
  - (一) 歸納出台中、南投、彰化一帶及週邊地區區域尺度之地震觀測網
  - (二) 收集豪雨期間土砂運動引致之地表振動紀錄，並計算訊號辨識指標
  - (三) 建置中部地區崩塌地動訊號自動分類器並驗證分類器之可靠度
  - (四) 崩塌訊號源定位及配對
  - (五) 增設臨時地震站，探討區域型或坡地型觀測網改善策略
  - (六) 搭配崩塌發生時間，分析集水區尺度促崩雨量條件
  - (七) 精進現有崩塌地動訊號近即時辨識測試平台



三、查本項委託服務案廠商於本階段審查時須完成工作為：

- (一) 綜整臺灣中部區域之地震站，歸納出集水區尺度之地震觀測網
- (二) 建置臺灣中部區域尺度崩塌地動訊號自動分類器
- (三) 崩塌地動訊號定位與配對

決定：

陸、受委託單位簡報：

柒、委員審查：

捌、臨時動議：

玖、散會：



會議名稱：嘉義、台南山區大規模崩塌之地動訊號監測網建置研究案期中審查會議

會議時間：111年7月14日(星期四)14時30分

雲端視訊 Webex ID:166 256 2493 密碼:0800246246

●本局同仁請由 EIP APP /OA 行動版/當日會議進行簽到



●非本局同仁請掃 QR-code 進行簽到



會議代碼：3523

# 行政院農業委員會水土保持局 書函

機關地址：54044南投市中興新村光華路6號  
承辦人：林建良  
電話：049-2347412  
傳真：0492394343  
電子信箱：blueway@mail.swcb.gov.tw

受文者：國立成功大學(林冠瑋教授)

發文日期：中華民國111年7月18日

發文字號：水保防字第1111866883號

速別：普通件

密等及解密條件或保密期限：

附件：如主旨(ATTCH1 期中會議紀錄.pdf、ATTCH2 簽到單.pdf)

主旨：檢送111年7月14日「臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究」案期中審查會議紀錄1份，請查照。

正本：林委員仕修、蘇委員苗彬、王委員國隆、趙委員韋安、陳委員天健、黃委員效禹、鄭委員宏昭、國立成功大學(林冠瑋教授)

副本：本局土石流防災中心



裝

訂

線



行政院農業委員會水土保持局  
「臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究」案  
期中審查會議紀錄

壹、時間：111 年 7 月 14(星期四)下午 2 時 30 分

貳、地點：本局府西辦公室第四會議室及視訊會議

參、主持人：林簡任正工程司任修

紀錄：林建良

肆、出(列)席單位人員：詳簽到簿。

伍、受委託單位簡報：略。

陸、審查意見：如后附件。

柒、報告事項：

案由一：確認出席委員人數符合「本局委託服務作業程序」第 33 點規定，報請公鑒。

決 定：本次會議由林簡任正工程司任修主持，出席審查會之審查委員(6 人)達其委員總數(7 人)二分之一以上，且出席委員中專家學者(4 人)超過出席委員人數三分之一，達開會標準。

案由二：「臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究」案期中報告書，報請公鑒。

決 定：

一、請國立成功大學參照與會人員相關意見辦理後續工作。

二、國立成功大學所提期中報告書，經審查通過，同意依契約書第 4 條規定撥付第 2 期款。

三、請國立成功大學於 111 年 11 月 10 日前提出期末報告書，俾利召開期末審查議。

捌、臨時動議：無

玖、散會。(下午 3 時 45 分)

行政院農業委員會水土保持局  
「臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究」案  
期中審查意見

一、蘇苗彬委員：

本案辦理中部大崩地動訊號分析，大致進行良好，以下建議：

- (一) P2-1，區域內共有六處大崩潛勢區，描述有誤應修正。
- (二) P2-3，表名為台南嘉義雲林不符中部區域，請確認修正。
- (三) P2-9，時間窗格與 P2-8 的描述看不出關聯性。
- (四) 預定在松茂與達觀設臨時地震站可與台中分局聯絡，看現地有哪些觀測儀器，並可以提供用電、訊號等。
- (五) 九份二山南投分局有長遠之觀測，可以了解共構，本處為集集地震引發之崩塌，因有較前之資料，表 4-1 採 2012 至 2020 年間，資料可以加長，梨山的災害也可能更早。
- (六) P4-15 的不同類型地動訊號的比較極有意義，應可持續擴大資料來源做比對。
- (七) P4-17 訊號定位結果影響成果很多，對波傳速度可以進一步探討，可能無法用一平均值來看，可否由過去資料來推算，另外水庫可能也有地震儀可用。
- (八) 參考文獻中科技計劃用南投縣：水保局，似乎不適合。
- (九) 部分分析過程可以考慮用附錄來說明引用資料及過程中的結果，以供參考。

二、王國隆委員：

- (一) 選擇六處大規模崩塌潛勢區是否與本案能分析之崩塌訊號吻合？是否可能無法達到預期效果？本計畫預計七月前往兩處架設臨時地震站，預計架設時間、監測頻率為何？如何確認監測資料與崩塌有關宜補充說明。
- (二) 本年度選用之崩塌分類器（期中進度）為卷積神經網路，報告中說明過於簡潔，應補充說明分析公式及計算過程。



- (三) P2-16 中關於定位中提及定位方法使用相關係數來定位，應補充說明相關係數採用之原始資料為何。
- (四) 使用 K-means 集群分析結果繪製散佈圖意義？是否真的沒有物理意義可以解釋？
- (五) 雖崩塌之召回率達 90%，但實際上噪訊之召回率僅 62%，亦即有 1/3 會被判定為崩塌，解決方法為何？
- (六) 崩塌訊號特徵值實際使用之用途為何？
- (七) 定位出 2012-2019 定位結果中 2014/7/23 及 2017/6/3 彰化以及 2019/8/11 埔里之定位是否異常？2012、2017、2019 中部地區有多起豪雨事件引致之山崩事件，建議與這些事件比對。

### 三、趙韋安委員：

- (一) 關於歸納區域尺度之地震觀測網工項，建議應詳細說明：
- 測站所屬機構單位，中央氣象局或中央研究院。
  - 報告所列之寬頻地震站大多數皆為 CWB 井下地震站、其測站安裝於地表以下深度，未來濕否適合用於監測地表崩塌事件？應予以討論。
  - 部份測站為加速度及短週期共站安裝，應表示清楚，例如 CNN5
  - 未來有近即時的應用目的，是否應事先考量即時資料的取得方式。
  - 資料應含測站高程及運作期間
  - 加速度測站的動態敏感度不高，建議直接無須納入考量。
  - CHGB 已停止運作(2020/02)
  - 建議 CWB 井下地震站之參考文獻，Lai et al.(2016), doi:10.1785/5/012016004; Lai et al. (2022), doi:10.1785/02200210252
- (二) CH. 2，第三節缺乏國內完整的文獻回顧，特別是現況台灣的即時觀測網的崩塌監測系統(Chao et al., 2017 doi:10.1038/srep43510)，區域尺度的應用文獻(Chang et al. 2021 doi:10.5194/-9-505-2021; Yang et al. 2022 doi:10.01007/S10346-022-01888-6)
- (三) 第二章相關意見如下：
- 第四節短時窗口長度 5 秒，對應頻率的解析度為 0.2Hz。



- b. 進行 STA/LTA 分析時，若使用原始資料將會 MISS 掉許多可能的事件，如果有先進行 filter，請問如何決定濾波頻段？
- c. 圖 2.5，如何確認地動訊號為崩塌造成？測站距離崩塌多遠？崩塌面積多大？是否可進行定位？定位誤差多少？必須仔細釐清上述問題，否則難以執行查核點之“收集土砂運動引致之地表振動紀錄”，沒有正確及完善的訓練集，則更難以完成查核點 3 “自動分類器之可靠度”

(四) Kmeans 的輸入資料為何？應詳細說明。

(五) ch2，第六節、理論走時的計算是否使用平均波速(6.7km/s)及震央距離直接計算？如果是，這樣定位結果會有很大的問題，建議應採用射線追蹤的方式來計算理論走時，相關定位方式建議參考國內發表的文獻。Chen et al. 2013. doi:10.1093/gji/ggt121. Chao et al. 2013. doi:10.1093/gji/ggt082. Chang et al. 2021. doi:10.5194/esurf-9-505-2021.

(六) ch3，新增測站規劃除了考量保全對象及測站包覆性以外，最重要的應為測站可偵測的最大距離與崩塌大小及訊號頻率之間的關係，建議應從過去的歷史事件資料進行歸納後納入作為新增測站之考量因素。

(七) ch3，短週期地震站並非是“低成本”。

(八) P3-2、“波行相關性分析邊坡地層中含水狀況的改變”須場址型的測站，與本計畫目的無關，建議刪除文字，提供相關國內文獻 Kang t al. 2021、doi:10.3390/rs13142834

(九) P3-3、應說明新增測站規劃的儀器類型？另外，廬山場址北側的 CHGB 測站已停止運作，應納入考量，重新規劃。九份二山及達觀場址應考量可能的活動塊體的量級大小來考慮新設測站的距離位置，亦可能需要 1 個以上的新增測站。本案松茂、達觀、梨山、新佳陽為水保台中分局轄區，亦有震翔監測公司負責。九份二山及廬山亦為南投分局轄區，過去亦有成大及興土木科技基金會的監測，應納入水保局已有的邊坡活動性及國棟性塊體評估納入新增測站之考量。

- (十) CH4，將監測尺度進入至區域或場址，往往可以發現崩塌並非發生在大雨期間，本案是否應一同建立非豪雨期間的事件目錄，未來將有助於釐清其外在觸崩因子，精進崩塌預警之相關研究工作。
- (十一) P4-1，以 2009 年莫拉克(南部)及 2015 年蘇迪勒(北部)做為參考訓練樣本，其與中部現況之測站條件有差異，建議應以人工判斷為主，透過定位及崩塌資訊進行二次檢核，獨立建立中部的崩塌訊號樣本。
- (十二) P4-5、建議應將契約工項(四)崩塌訊號原定位及配對提前執行，用以標定地動訊號的來源確實為崩塌事件。(同意見 11)
- (十三) CNN 模型訓練的 input 時頻圖的色階是否有統一？若有不同儀器類型難以統一，建議刪除加速度資料，或需做頻譜值正規化的處理。
- (十四) 表 4.2、應仔細釐清噪訊及地表誤判成崩塌的真正原因。
- (十五) 圖 4.9、雖然為模型判斷為崩塌事件之訊號，但如何證明？真實崩塌位置？定位位置？震動訊號強度與崩塌面積之關係？
- (十六) 圖 4.12、許多崩塌事件定位皆落在平原區，建議應先定性或定量可能的定位誤差，未來在應用上才有參考的依據。
- (十七) 目前的報告書架構是以後續應用作業程序為主(如圖 4.8)，建議應先進行崩塌與訊號的配對檢核後，才開始進行模型分類的訓練，未來透過後續的崩塌事件予以驗證，目前已監測及判識的崩塌事件的可信度低，將影響未來求得降雨門檻相關之研究。

#### 四、陳天健委員：

- (一) 報告中建議增加工作進度甘特圖。
- (二) 訊號之時頻圖之訊號色塊強度，其與軟體之 dB 調整設定有關，其是否對分群結果有所影響？
- (三) 圖 4.4 寬頻地震站紀錄之 K-means 集群分析結果，呈現集群分布有重疊之狀況，其是否會分群結果？
- (四) 建議可將分群及分類易失效狀況彙整，提供後續研究之參考。

#### 五、林仕修委員：

- (一) 請國立成功大學依據契約書規定，積極辦理後續工項，並請於 111 年 11 月 10 日前提出期末報告書，俾利召開期末審查議。

#### 六、黃效禹委員：

- (一) 本計劃有選用中部 6 處高潛勢大規模崩塌區其現地亦有設置監測儀器，一旦有崩塌訊號，亦可做相關檢視。
- (二) 有關卷積神經網路分類模型結果，可見噪訊之準確率及召回率較差，是否後續仍有改善之方法？
- (三) 建議補充應辦事項尚未有成果之項目之執行構想。
- (四) 考量颱風豪雨事件後緊急判釋，往往利用衛星影像進行崩塌判釋，會因雲遮無法達到快速運用，未來本案可否災後提供可能發生區域，透過所轄單位或當地防災專員了解，供防災應用參考

#### 七、土石流防災中心：

- (一) 有關報告書 P4-12 中時間目錄為 2012-2019 年，而 P4-2 的豪雨事件為 2012-2020 年，時間年份不相同，另外為何缺少 2021 年資料，請確認修正。
- (二) 地動訊號可對崩塌定位，其可以對崩塌規模分類嗎？
- (三) 計畫所架設之臨時地震儀與相關單位之寬頻地震站，其資料精度上是否有落差，請確認說明。

臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究案期中  
審查會議簽到單

壹、開會時間：111年7月14日(星期四)下午2時30分

貳、開會地點：本局府西辦公室第四會議室

參、主持人：林仕修簡任正工程司 林仕修

肆、出(列)席單位及人員

紀錄：林建良

出席委員			簽名處
單位(機關)	職稱	姓名	姓名
暨南國際大學	教授	王國隆	王國隆
屏東科技大學	教授	陳天健	陳天健
陽明交通大學	教授	趙章安	趙章安
中興大學	教授	蘇苗彬(退休)	蘇苗彬
土石流防災中心	簡任正工程司	林仕修	林仕修
土石流防災中心	科長	黃效禹	黃效禹
南投分局	正工程司兼課長	鄭宏昭	請假
出列席單位			簽名處
單位	姓名	姓名	姓名
土石流防災中心	林建良	鄭力鈞	林力鈞
	吳俊龍	蔡紹宏	董琬琦
	林怡甄	林岳浩	李思文

	許家祥	許家祥	張嘉如
國立成功大學(林冠璋教授)	副教授	林冠璋	林冠璋
國立成功大學	助理		許賢立



# 國立成功大學 函

機關地址：701 臺南市東區大學路1號  
聯絡人：林冠瑋  
聯絡電話：06-2757575#65424  
電子信箱：quantor@gmail.com

受文者：林冠瑋副教授

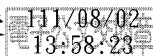
發文日期：中華民國111年8月2日  
發文字號：成大理院字第1112201299號  
速別：普通件  
密等及解密條件或保密期限：  
附件：如文

主旨：檢送貴局補助本校地球科學系林冠瑋副教授執行之「臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究」（計畫編號：111農科-7.3.4-保-S1），第2期經費新臺幣60萬8,000元整收據(成大第111030383號)1紙及會計報表1式2份，請查照惠撥。

說明：旨揭款項請撥入臺灣銀行臺南分行，帳號00903607114-1「國立成功大學401專戶」，統一編號69115908。

正本：行政院農業委員會水土保持局

副本：本校地球科學系林冠瑋副教授



# 國立成功大學 函

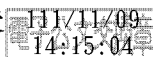
機關地址：701 臺南市東區大學路1號  
聯絡人：林冠瑋  
聯絡電話：06-2757575#65424  
電子信箱：guantor@gmail.com

受文者：林冠瑋助理教授

發文日期：中華民國111年11月9日  
發文字號：成大理院字第1112201888號  
速別：普通件  
密等及解密條件或保密期限：  
附件：

主旨：檢送本校地球科學系林冠瑋副教授辦理貴局111年度科技計畫「臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究」之期末報告書及期末暨成果效益報告各10份，請查照惠復。

正本：行政院農業委員會水土保持局  
副本：本校地球科學系林冠瑋副教授



林冠瑋助理教授



1112201907 111/11/9

## 行政院農業委員會水土保持局 開會通知單

受文者：國立成功大學(林冠瑋教授，僅含議程)

發文日期：中華民國111年11月14日

發文字號：水保防字第1111835295號

速別：普通件

密等及解密條件或保密期限：

附件：期末報告書、會議議程及出席費領據等各1份(ATTCH1 會議簽到\_QR.pdf)

開會事由：召開「臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究」案期末審查會議

開會時間：111年12月2日（星期五）上午10時30分

開會地點：本局府西辦公室第二會議室(南投市府西路71號)及視訊會議

主持人：鐘副總工程司兼主任啟榮

聯絡人及電話：林建良049-2347412

出席者：王委員國隆、陳委員天健、趙委員韋安、蘇委員苗彬、林委員仕修、黃委員效禹、鄭委員宏昭、國立成功大學(林冠瑋教授，僅含議程)

列席者：

副本：本局秘書室、本局土石流防災中心、本局技術研究發展小組(請協助視訊會議)

備註：

- 一、本次審查會議採實體及webex視訊會議併行辦理，請視訊與會人員提前安裝Webex程式，會議號碼及密碼請詳視訊會議資訊說明。
- 二、會議結束後請委員將發言單及出席費領款收據填寫簽名後，以照相或掃描方式回傳本局承辦人電子信箱(E-mail:blueway@mail.swcb.gov.tw)，俾利辦理後續相關事宜。
- 三、疫情期間請自備水杯，做好個人防疫措施。





會議名稱：臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究案期末審查會議

會議時間：111年12月2日(星期五)10時30分



雲端視訊 Webex ID:166 256 2493 密碼:0800246246

●本局同仁請由EIP APP /OA行動版/當日會議進行簽到



●非本局同仁請掃QR-code進行簽到

簽到代碼：3251



簽到網址：[https://oa.swcb.gov.tw/signature/signature.asp?a\\_id=61350&room\\_pid=0](https://oa.swcb.gov.tw/signature/signature.asp?a_id=61350&room_pid=0)

# 行政院農業委員會水土保持局 書函

機關地址：54044南投市中興新村光華路  
6號

承辦人：林建良

電話：049-2347412

傳真：0492394343

電子信箱：blueway@mail.swcb.gov.tw

受文者：國立成功大學(林冠瑋教授)

發文日期：中華民國111年12月5日

發文字號：水保防字第1111867118號

速別：普通件

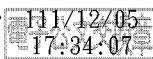
密等及解密條件或保密期限：

附件：如主旨(ATTCH1 期末審查會議紀錄\_1202\_final.pdf、ATTCH2 會議簽到2022-12-5.pdf)

主旨：檢送111年12月2日「臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究」案期末審查會議紀錄1份，請查照。

正本：鐘副總工程司兼主任啟榮、蘇委員苗彬、王委員國隆、趙委員韋安、陳委員天健、林委員仕修、黃委員效禹、鄭委員宏昭、國立成功大學(林冠瑋教授)

副本：本局土石流防災中心



行政院農業委員會水土保持局  
「臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究」案  
期末審查會議紀錄

- 壹、時間：111年12月2日(星期五)上午10時30分  
貳、地點：本局府西辦公室第二會議室及視訊會議  
參、主持人：鐘副總工程司兼主任啟榮(林簡任正工程司任修代理)

紀錄：林建良

肆、出(列)席者：(詳簽到簿)

伍、受委託單位簡報：略。

陸、審查意見：如后附件。

柒、報告事項：

案由：確認出席委員人數符合「本局委託服務作業程序」第33點規定，報請公鑒。

決定：

一、洽悉。

二、本次會議由鐘副總工程司兼主任啟榮主持，出席審查會之審查委員(5人)達其委員總數(8人)二分之一以上，且出席委員中專家學者(3人)超過出席委員人數三分之一，達開會標準。

捌、討論事項：

案由：「臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究」案期末報告書，提請討論。

決議：

一、國立成功大學所提期末報告書，經審查通過，並請參照與會人員相關意見辦理後續工作。

二、請國立成功大學於111年12月16日前提出成果報告書初稿，其內容經機關審核後，俟繳交正式成果

報告書、期末暨成果效益報告，及上傳成果於本局  
相關圖書及圖資管理系統，據以憑辦後續付款事宜。



玖、臨時動議：無

拾、散會。(上午 12 時 10 分)



行政院農業委員會水土保持局  
「臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究」案  
期末審查意見


一、蘇苗彬委員：

- 
- 
- (一) 本案有關大崩計劃之地動訊觀測與應用極有意義，唯應注意驗證工作需確實完整，整體技術成熟後有極大應用的可行性，對局大崩計劃能有所助益。
  - (二) 各章節的撰寫應儘量圖文並列，並非圖表列於章節的最後，計劃報告不用比照論文型式較好閱讀。
  - (三) P. 2-3 的表 2.1 是否需更新 2016 的資料，其中管理單位可以用中文全名，文字中三類型地震儀、加速度強震儀為何者不適用的原因等可深入檢討。
  - (四) P. 2-6、2-7 等崩塌振動的特徵很有意義，可使更深入檢討與說明，以圖 2.5WUSB 測站為何處，此過程在前期計劃中驗證如何，應可以加入更多說明。
  - (五) P. 2-16、P. 2-17 所提出之反向投影解很好，可以詳細描述其相關資訊，本成果是否出現在前期的報告中，是否為本計劃研究成果。
  - (六) P2-19 的描述不太完整，建議可直接引用局 2020 年的報告而非 2002 年的研究。
  - (七) P4-17 中部找到 6 起事件應列出詳細資料，供比對與確認，請確認列表內容。
  - (八) P6-7、6-8 等迴歸變化很大，不適合做門檻值，不急著做自動判釋，本案仍以研究驗證為首要。

二、王國隆委員：

- (一) 報告工作項目進展豐富，然書寫時說明較少，建議整理時書寫詳細以利閱讀也容易推廣。
- (二) 降雨分析時採用哪些氣象局測站及內插應列表或圖說，以氣象局查

詢介面不易得知計畫使用哪些資料，也不易判斷優劣。

- 
- (三) 增設清境及梨山臨時地震站宜注意保全避免儀器損失；另，監測期間兩站均無辨識出可能為崩塌引致之振動訊號，是否與當地之水保局監測系統比對？以及能辨識出可能崩塌規模為何？亦即，辨識出之崩塌、面積、土方及坡高是否可提供作為本法之合理化使用依據。
  - (四) 計算促崩降雨門檻時，回推雨型是否假設為方型？設計上是否合理？
  - (五) 紙本報告最後僅結論未提供建議，請補充。

### 三、趙韋安委員：

- (一) 期末報告書的內容之安排與可讀性都相較於期中報告進步許多，且亦有根據期中審查的意見進行修訂，本人給予正面的肯定。
- (二) 第二章第三節，配合圖 2.4、2.5，事件 41 的發生時間應為 2019 年 8 月 12 日 1 點 55 分 48 秒，請修正。
- (三) 第二章第五節，CNN 的分類成果是以評分呈現，請說明當評分結果相近時將如何處理？是否有避免採用評分相近的分類結果？
- (四) 第二章第六節，理論走時是計算 P-wave 還是 S-wave，應補充說明。
- (五) 第三章第一節，短週期地震儀的價錢並沒有比寬頻地震儀便宜，且短週期地震儀相較無法取得低頻資訊，若計畫提出的相關規模大小定量方法會使用到低頻範圍(如 0.02-0.05Hz)，則會有儀器本身的限制。請補充相關文字說明。
- (六) 第三章第二節，儀器的設置優先以靠近關注崩塌地為主，但是根據震波傳遞理論，當傳遞距離有限時，則可產生的訊號最大波長亦有限制，因此也限制了可使用的最小頻率，若相關方法有使用到低頻訊號則會有使用上的限制。
- (七) 計畫執行新設的 Geophone 並非是短週期地震儀，其在儀器本身的敏感度 Geophone 遠低於傳統的短週期地震儀，請更改報告中相關文字的說明。
- (八) 第四章第一節，短週期與寬頻儀器的樣本分開訓練是非常正確的選



擇。但是在圖 4.4 及圖 4.5 中的崩塌類別的訊號範例，難以確認真實性。本人認為是區域或遠震地震事件的可能性很大。若以 Kmeans 這樣的成果作為 CNN 的輸入資料，可能會影響分類器模型的訓練結果。

- (九) 第四章第三節，本計畫統一使用事件 2017 年 6 月 2 日 22:32(UTC)來進行說明崩塌訊號分類、SSA 定位成果及真實崩塌配對，本人認為非常好，但唯一欠缺崩塌面積推估的驗證，建議務必在報告書中補充相關內容。
- (十) 由圖 4.8 的時頻圖成果，訊號的頻率皆小於 1Hz 且持續時間約 3~3.5 分鐘，除了 TUS 短週期儀器僅有 1 分鐘，本人認為此訊號是來於遠域地震訊號。配合圖 4.10(d)的低頻質點運動分析主要呈現東北-西南方位角，此遠域地震可能來自於日本，請團隊務必重新確認，並更正相關內容。
- (十一) 第五章，Geophone 並非是短週期地震儀，請更正相關文字說明。
- (十二) 第七章，Lin et al. (2015)並未列在參考文獻中，其中崩塌規模的決定需仰賴 0.02~0.05Hz 的最大位移值，因此短週期地震儀不適用於此方法，應補充說明上述限制；其二定位誤差亦可影響預估規模的大小，若後續要使用規模預估崩塌面積或體積應要考量定量相關的誤差範圍，在網頁發布時一併呈現。
- (十三) 第八章，將” 7”筆訂位成功，更正為” 6”。

#### 四、黃效禹委員：

- (一) 表 4.1 的明細僅提供降雨量資料，建議應將採用雨量站予以標示，供後續引用參考。
- (二) 本研究地動訊號自動分類器成果，找出 2 個以上地震站偵測到結果與本局 BigGIS 系統崩塌目錄比較得到現地準確性，未來探討可再以年際之事件後崩塌目錄，找出現地已崩塌而本計畫地動訊號是否有偵測到，作為精進研究研究。



- (三) 本研究有朝崩塌地動訊號自動判識功能，有利水保局未來實際應用，建議可朝結合 BigGIS 系統將結果展示，或許可補足事件發生後衛星影像尚無法取得前，掌握可能致災地點。

#### 五、土石流防災中心：

- (一) 請補充報告書所提監測網頁之網址。
- (二) P4-11，表 4-3 部分事件備註為空白，請說明原因。
- (三) 本案為補助科技計畫，請將發表之期刊論文等資料，附註於成果報告中。
- (四) 請加入歷年研究成果進行比較說明。
- (五) 請於結論章節補充”建議”內容。





## 臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究案期 末審查會議簽到單

壹、開會時間：111年12月2日(星期五)上午10時30分

貳、開會地點：本局府西辦公室第二會議室

參、主持人：鐘主任啟榮

林仕修

肆、出(列)席單位及人員

紀錄：林建良



出席委員			簽名處
單位(機關)	職稱	姓名	姓 名
中興大學	教授(退休)	蘇苗彬	蘇苗彬
暨南大學	教授	王國隆	王國隆
陽明交通大學	教授	趙韋安	趙韋安
屏東科技大學	教授	陳天健	請假
土石流防災中心	副總工程司兼主任	鐘啟榮	請假
土石流防災中心	簡任正工程司	林仕修	林仕修
土石流防災中心	科長	黃效禹	黃效禹
南投分局	正工程司兼課長	鄭宏昭	請假
出列席單位			簽名處
單位	職稱	姓名	姓 名
土石流防災中心	副工程司	林建良	林建良
國立成功大學(林冠璋教授)			林冠璋
國立成功大學			

## 附錄 四、學術著作及研討會論文

(一) 培養優秀碩士人才完成碩士論文 2 篇。

1	題目	運用數位影像相關法分析土石流溪流之地表位移變遷
	作者	林亭妤
	指導老師	林冠璋副教授
2	題目	整合空載光達與合成孔徑雷達干涉技術探究紅葉崩塌之地形變遷
	作者	區雪儀
	指導老師	林冠璋副教授

(二) 鼓勵學生積極參與國內外研討會，完成 2 篇研討會論文

地區	文章名稱	研討會名稱	研討會年月	報告方式
國內	利用高精度空載光達探討紅葉大規模深層崩塌之微地形構造	地質學會與地物學會 111 年年會暨學術研討會	111 年 6 月	口頭報告
國內	整合空載光達與合成孔徑雷達干涉技術探究紅葉崩塌之地形變遷	中國鑛冶工程學會 111 年論文宣讀會，發表組別：礦業及地質組	111 年 10 月	口頭報告

國立成功大學地球科學研究所

碩士論文

運用數位影像相關法分析土石流溪流之地表位移變遷

**Using digital image correlation (DIC) for analyzing the  
evolution of surface displacement in the debris flow  
valleys**

研究生：林亭妤

**Ting-Yu Lin**

指導教授：林冠瑋 博士

**Advisor : Guan-Wei Lin, Ph.D.**

中華民國一百一十一年七月

**July, 2022**

國立成功大學

碩士論文

運用數位影像相關法分析土石流溪流之地表位移變遷  
Using digital image correlation (DIC) for analyzing the  
evolution of surface displacement in the debris flow valleys

研究生：林亭妤

本論文業經審查及口試合格特此證明

論文考試委員：陳慶文  
曾志民

指導教授：林冠霖  
單位主管：陳燕華

(單位主管是否簽署授權由各院、系(所、學位學程)自訂)

中華民國 111 年 6 月 27 日

土石流是臺灣山區常見的地質災害之一，常造成河道沿岸以及下游地區的嚴重災害。溪流集水區中存在不穩定的邊坡往往是反覆發生土石流的原因，為了能有效地監測土石流溪流並達到防減災的目的，使用廣域且快速的坡地活動性觀測技術是非常重要的。近年來數位影像相關分析法(Digital image correlation, DIC)被廣泛運用於觀測地表位移現象，例如同震變形、冰河移動、沙丘遷移、邊坡塊體位移等。本研究使用高解析度 PlanetScope 影像與數位影像相關性分析法於土石流溪流，分析集水區內邊坡的活動性以及土石流發生前源頭區的變化。本研究以荖濃溪上游布唐布那斯溪與玉穗溪為例，使用數位影像相關性分析程式 COSI-Corr 進行 2016 年 7 月至 2021 年 11 月的地表位移量分析，再利用時間序列反演進行位移數值的線性反演，得到兩集水區內的地表位移量。使用時間序列反演有效的提升了位移資料的覆蓋率，並讓分析結果的不確定性下降。根據位移量與方向進行源頭區塊體運動行為的分區分塊，發現兩集水區的源頭區處於不穩定狀態，且累積位移量在 2021 年呈現快速上升的趨勢。

玉穗溪於 2021 年 8 月 7 日發生土石流，且沖斷南橫公路上的明罷克露橋，本研究利用地表位移量計算位移速度的倒數，以進行邊坡破壞時間的預測，所預測的破壞時間與土石流的發生時間相符，顯示速度倒數法能運用於預測土石流溪流中不穩定邊坡的可能破壞時間。同時，地表位移量分析結果也在玉穗溪中下游河道兩旁觀察到多處具有顯著活動性的邊坡。本研究將數位影像相關性分析法運用於中部出水溪同樣能有效地觀察土石流溪流集水區中具有明顯位移量之邊坡，也即表示在進行土石流溪流監測時，應考慮土石流溪流沿岸的邊坡是否可能成為土石流土砂材料的供應區，並與源頭區一同監測才能達到全面性的監測效果。

關鍵字：數位影像相關性分析法、土石流、地表位移、時間序列反演、速度倒數法

## Using digital image correlation (DIC) for analyzing the evolution of surface displacement in the debris flow valleys

Author : Ting-Yu Lin

Advisor : Guan-Wei Lin, Ph.D.

Department of Earth Sciences, National Cheng Kung University

### SUMMERY

Debris flow is one of the common geohazard in Taiwan mountains. The existence of unstable slopes in the catchment area is often the reason for the repeated occurrence of debris flow. In order to effectively monitor the debris flow valleys, it is very important to use a macrozone and rapid slope activity observation technology. In the study, high-resolution PlanetScope imagery and digital image correlation analysis were used in debris flow valleys to analyze the activity of slopes in the steam and the deformation in the source area. The Putapunas River and Yusui River, the tributaries of the Laonong River, were selected as examples. The digital image correlation analysis program COSI-Corr was used to analyze the surface displacement from July 2016 to November 2021 within the two catchments. Then, the use of time series inversion effectively improves the coverage of the displacement data and reduces the uncertainty of the DIC results. According to the displacement and moving direction, the movement behavior of the source area could be divided into several blocks. A debris flow occurred in Yusui River on August 7, 2021. Using the surface displacement to calculate the inverse number of the velocity to predict the failure time of the slope. The predicted failure time coincides with the occurrence of the debris flow, showing that the inverse velocity method can be used to predict the possible failure time of unstable slopes.

**Key words:** digital image correlation, debris flow, surface displacement, time series inversion, inverse velocity

## INTRODUCTION

In Taiwan mountains, debris flow is a widespread geohazard. In the study, the Putunpunas and Yusui rivers were selected to monitor the movement of the slope in debris flow valleys using the digital image correlation method (DIC). Consequently, the time series inversion was used to improve the quality of the DIC results, and the inverse velocity method was used to predict the time of slope failure (Carlà et al., 2017; Rose and Hungr 2007; Desrues et al., 2019).

## MATERIALS AND METHODS

The digital image correlation method (DIC) is an image processing and calculating technique that has been increasingly popular in recent years for monitoring two-dimensional displacement or deformation. The calculation method of DIC is to detect the deformation of the speckle pattern between the pre-event image and the post-event image (Caporossi et al., 2018). The COSI-Corr program, which is a DIC program use in the field of earth science, was employed in this work for digital picture correlation analysis. Its operation is based on the Fourier transform in the frequency domain (Leprince et al., 2007). A total of 21 Planetscope satellite optical images with a high resolution of 3 meters from July 2016 to November 2021 were used for the digital image correlation analysis.

## RESULTS

The Putunpunas river headwaters area can be separated into five active blocks based on the results of the DIC analysis (Fig. 1). There has been a major increase in displacement in the source area since early 2021 (Fig. 2). Furthermore, the Yushi river's headwaters can be divided into five active blocks (Fig. 3). From February 2021, the overall displacement of all blocks will significantly increase (Fig. 4). To predict the failure time of the Yushi river's source area, the surface displacement is employed to calculate the inverse number of the velocity (Fig.5). The predicted failure time corresponds to the actual time of the debris flow on August 7, 2021, demonstrating that the inverse velocity approach can be used to estimate the potential failure time of unstable slopes (Fig.6).

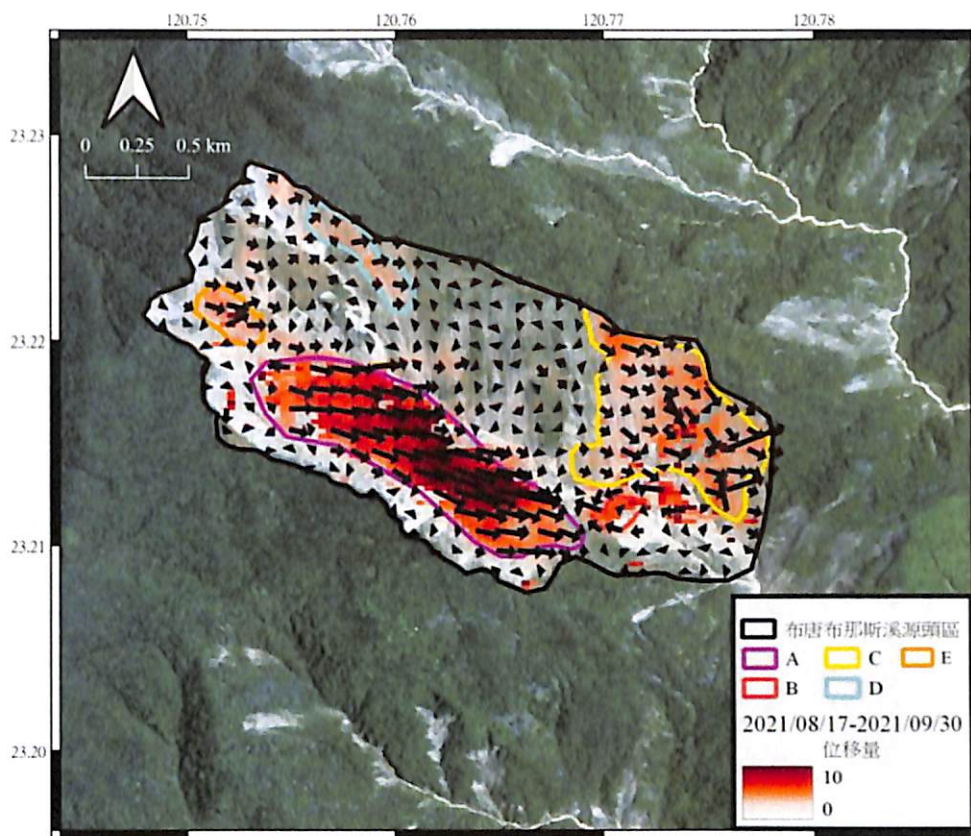


Fig. 1 Surface displacement in the source area of the Putunpunas river

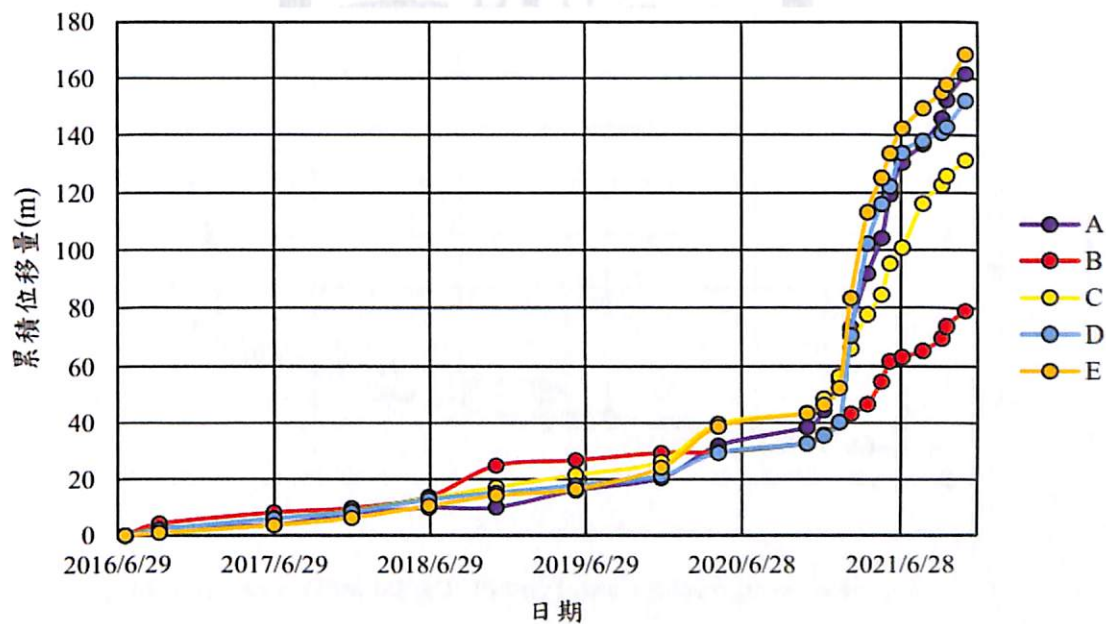


Fig. 2 Accumulated displacement in Putunpunas river's source block



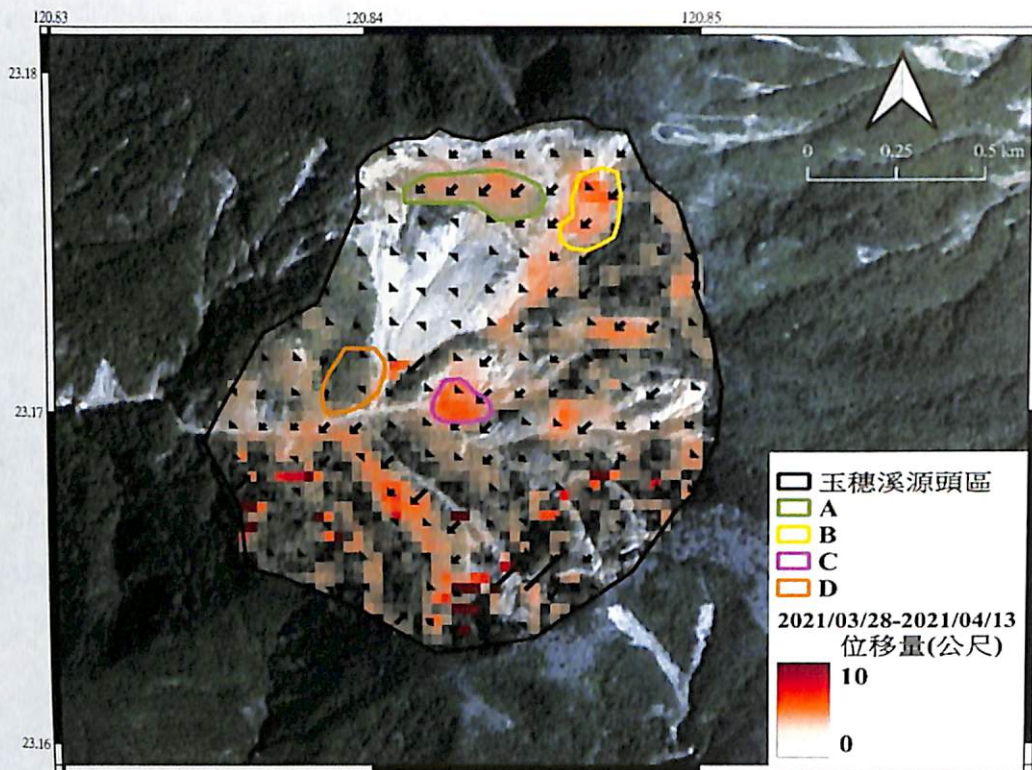


Fig. 3 Surface displacement in the source area of the Yushi river

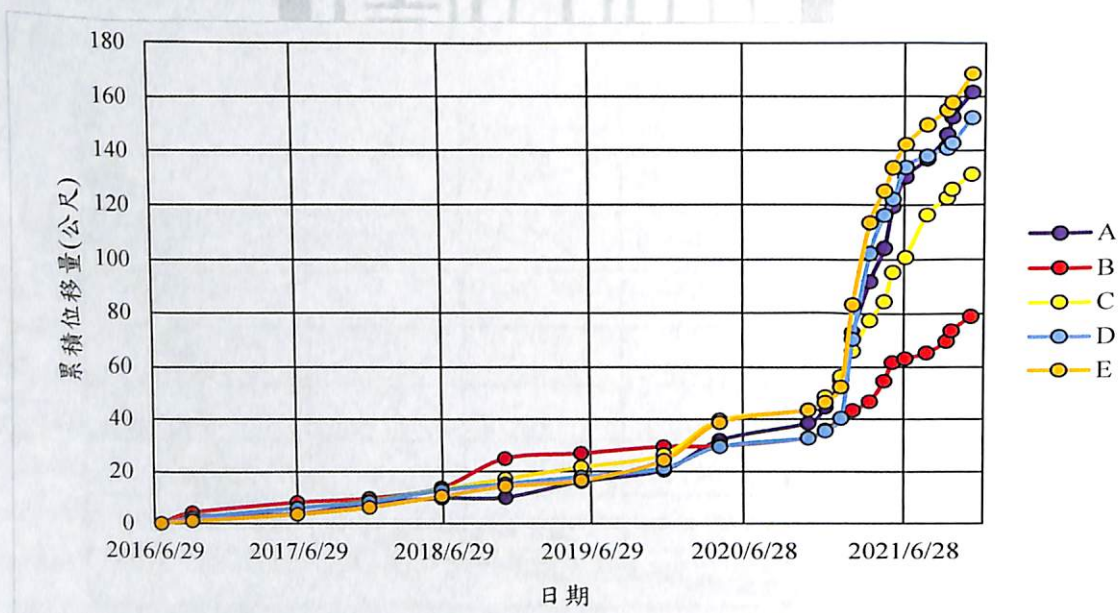


Fig. 4 Accumulated displacement in Yushi river's source block

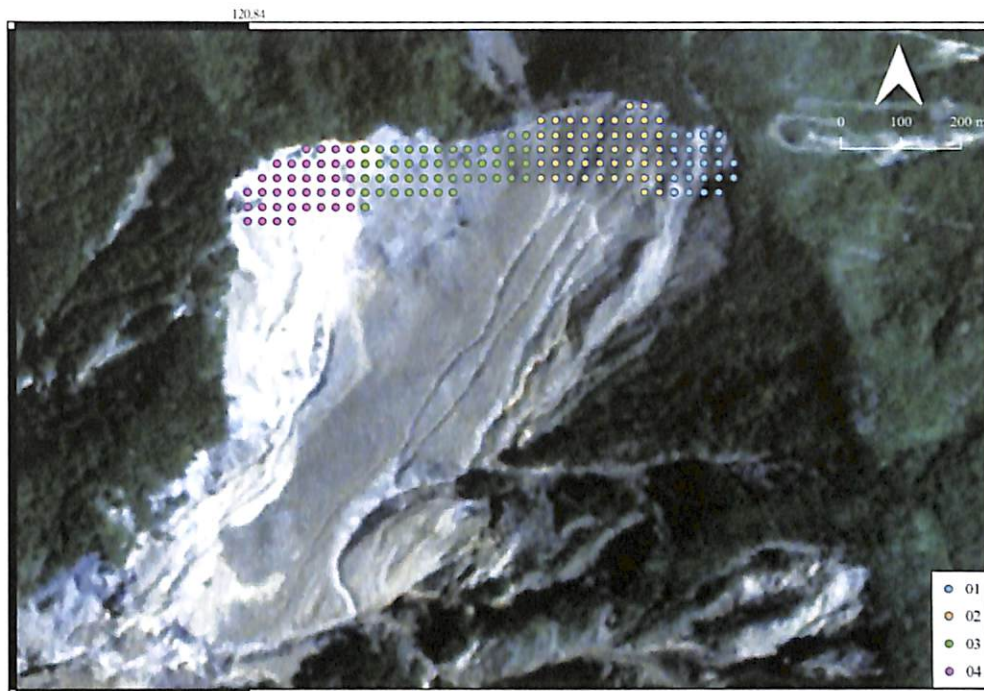


Fig. 5 Analysis points for the inverse velocity method

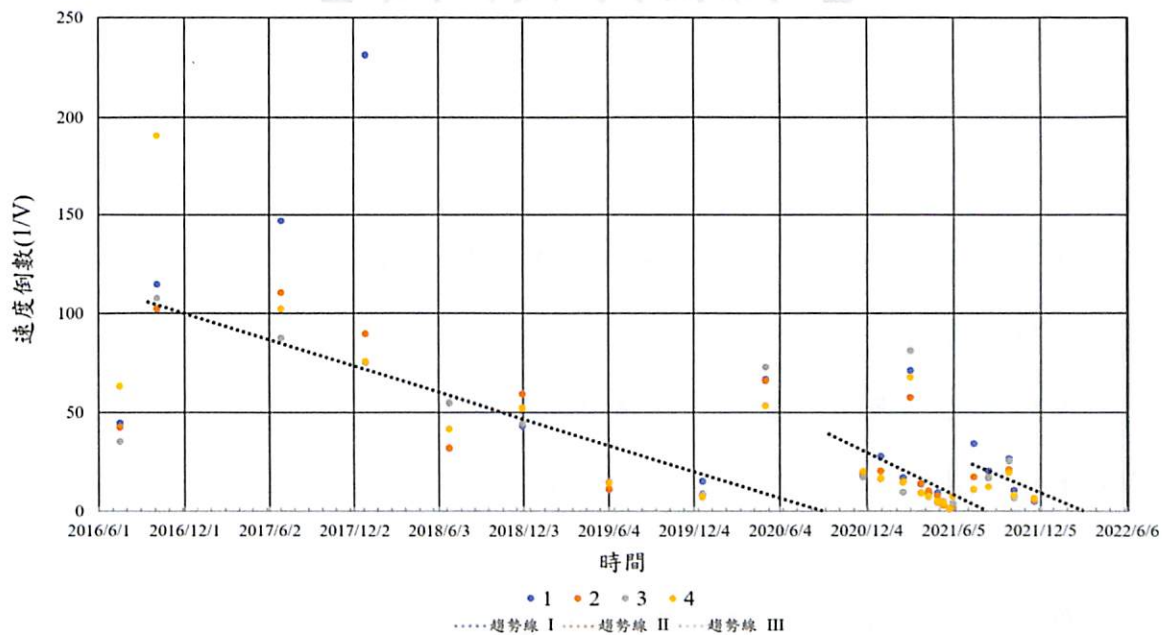


Fig. 6 The result of the inverse velocity method

## CONCLUSION

1. The purpose of this research is to evaluate the slope displacement in the source area of debris flow valleys. The combination of the digital image correlation approach and time series inversion can reduce the uncertainty of displacement estimate findings by taking into account the weight of time, and missing data pixels can be filled.
2. In this study, long-term displacement monitoring was carried out for the debris flow valleys' source area, and they were segmented based on movement behavior in the headwaters. The success of the velocity inverse method in predicting the time of a landslide also demonstrates the need of long-term surface displacement monitoring.

國立成功大學地球科學研究所

碩士論文

整合空載光達與合成孔徑雷達干涉技術

探究紅葉崩塌之地形變遷

**Integrating LiDAR and InSAR techniques to explore  
the geomorphological evolution of the Hongye landslide**

研究生：區雪儀 Suet-Yee Au (Sophie)

指導教授：林冠瑋 博士 Guan-Wei Lin, Ph.D.

共同指導教授：陳柔妃 博士 Rou-Fei Chen, Ph.D.

中華民國一百一十一年六月

June, 2022

# 國立成功大學

## 碩士論文

整合空載光達與合成孔徑雷達干涉技術探究紅葉崩塌之地形變遷

Integrating LiDAR and InSAR techniques to explore the geomorphological evolution of the Hongye landslide

研究生：區雪儀

本論業業經審查及口試合格特此證明

論文考試委員：

陳天健

陳柔妃

指導教授：林冠瑋

系(所)主管：陳燕華

(單位主管是否簽章授權由各院、系(所、學位學程)自訂)

中華民國 111 年 6 月 10 日

## 摘要

臺東縣紅葉部落西側之潛在大規模崩塌邊坡於 2016 年 9 月莫蘭蒂颱風侵襲期間，因連日降雨導致邊坡岩屑崩落破壞部落內道路與民宅，造成紅葉部落土石流掩埋事件並成為該地區近半世紀以來最嚴重的坡地土砂災害。本研究利用高精度空載光達進行崩塌特徵判釋、線性構造比對以及土方量體計算，並以多時序合成孔徑雷達干涉技術配合 2015-2020 年 ALOS-2 雷達衛星產製地表變形資訊。以瞭解該崩塌邊坡之地形變遷，最後進一步建立崩塌地的地質模型與主要破壞模式。

研究成果說明了空載光達影像解析度對圈繪判釋崩塌地形特徵的重要性，數值地形模型加值分析有效提升地形立體呈現，有助客觀地進行地形判釋，從而瞭解崩塌區域內的微地形特徵發育與地形演變。MT-InSAR 成功獲得崩塌前後期的地表變形資訊，分析結果顯示早在崩塌前 8 個月已有監測向下位移活動趨勢。此外，潛在大規模崩塌邊坡左側存在一處較活躍的區塊，在崩塌事件後仍然有持續向下位移的趨勢。最後，透過前人測量的地電阻、鑽孔岩芯以及弱面位態，成功建立二維與三維地質模型，並確認紅葉崩塌應屬順向坡破壞類型。

關鍵詞：多時序合成孔徑雷達干涉技術、高精度空載光達、大規模崩塌潛勢區位、地形計測學、微地形

**Integrating LiDAR and InSAR techniques to explore  
the geomorphological evolution of the Hongye landslide**

Author : Suet-Yee Au

Advisor : Guan-Wei Lin, Ph.D., Rou-Fei Chen, Ph.D.

Department of Earth Sciences, National Cheng Kung University

**SUMMARY**

In September 2016, a landslide occurred on the western slope of Hongye Village in Taitung County, causing rock debris to fall and damage the roads and houses there. The study used high-precision airborne LiDAR to interpret collapse features, compare linear structures, and calculate earth volume, while MT-InSAR provided surface deformation information from 2015 to 2020 using ALOS-2 radar images. Finally, in order to understand the changes in topography caused by the collapsed slope, a geological model of the collapsed area was established, along with the main failure mechanism.

It is evident from the study that airborne LiDAR resolution is essential for tracing and interpreting the topographic features of the collapse, and that DEM additive analysis can enhance the three-dimensional representation of the terrain, which helps to objectively interpret the terrain and thus to understand the development of microtopographic features and terrain evolution in the collapsed area. As early as eight months before the collapse, a downward movement of the displacement was observed. Also, there is an active block on the left side of the potential large-scale landslide slope, which continues to move downward after the collapse. The previous survey measurements helped to establish two- and three-dimensional geological models, and the Hongye landslide was confirmed to be a dip slope failure.

Keywords: MT-InSAR, High-precision Airborne LiDAR, Large-scale Landslide,  
Geomorphometry, Microtopography

## INTRODUCTION

In recent years, terrain stability has been adversely affected by extreme weather patterns. It is particularly dangerous for lives and property when landslides occur. It is critical to pay attention to the geological disasters caused by large-scale landslides (Di Martire et al., 2017; Pánek et al., 2019; Nor Diana et al., 2021). We use multi-temporal InSAR in combination with airborne LiDAR at the Hongye landslide to interpret micro-topographic features of landslides caused by Typhoon Moranti in 2016 and evaluate their activity for the first time. Finally, 2D and 3D geological models can be produced to explain the failure mode of the Hongye landslide.

## METHODS

An important analysis approach for long-term monitoring of surface deformation rate is MT-InSAR, which can provide large-scale and high-precision surface deformation data rapidly. PS-InSAR and SBAS-InSAR are common multitemporal approaches, which evaluate phase difference using time-domain correlation indicators and the two-dimensional phase solution algorithms and complete the phase unwrapping step. By using TCP-InSAR, we can avoid phase unwrapping and reduce calculation errors; produce PS and DS points from the interference pair to improve image correlation; and evaluate surface activity using only three radar image pairs (Figure 1). Thus, TCP-InSAR analysis and solution methods differ from those used for other MT-InSAR techniques.

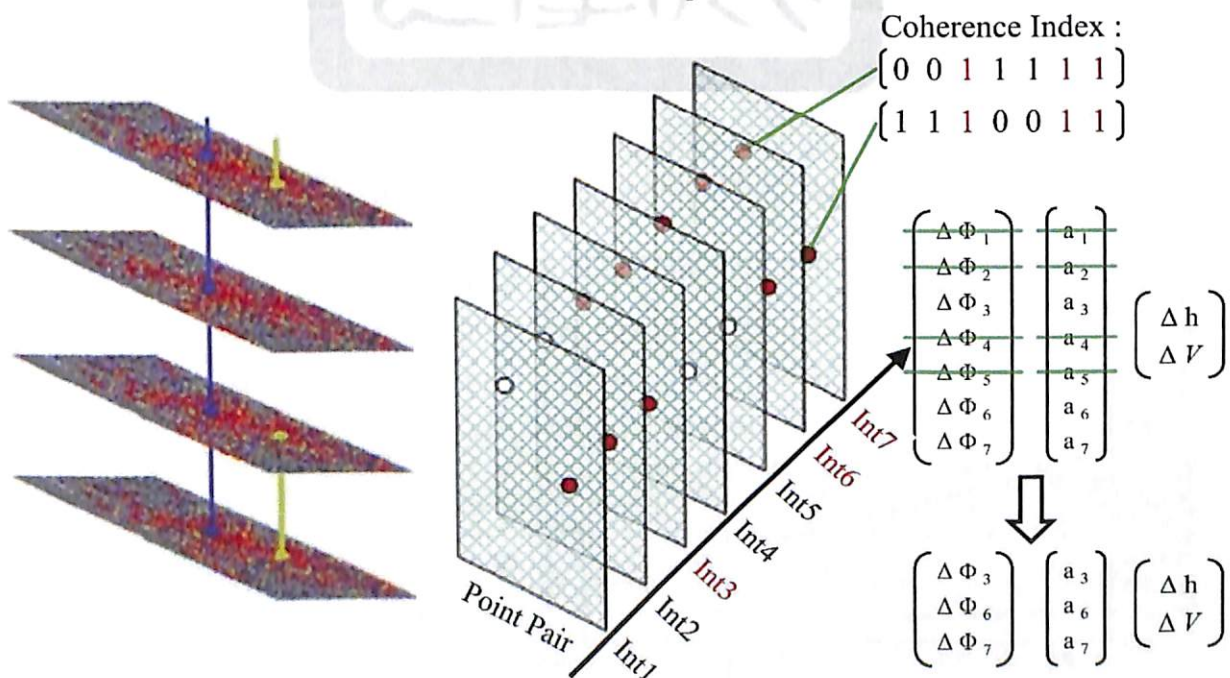


Fig. 1 Generate PS and DS points (Liu et al., 2014)



A global Delaunay triangulation was previously used in PS-InSAR, where it removed the points with phase ambiguity and caused voids to be generated, which affected the correlation between the points. TCP-InSAR uses a regional Delaunay triangulation network, but each pair of TCPs forms an Arc, which reduces the generation of voids and improves point correlation (Figure 2). TCPs with phase ambiguity are eliminated by Arc to Arc triangulation, then surface deformation rate is calculated using least squares (Figure 3).

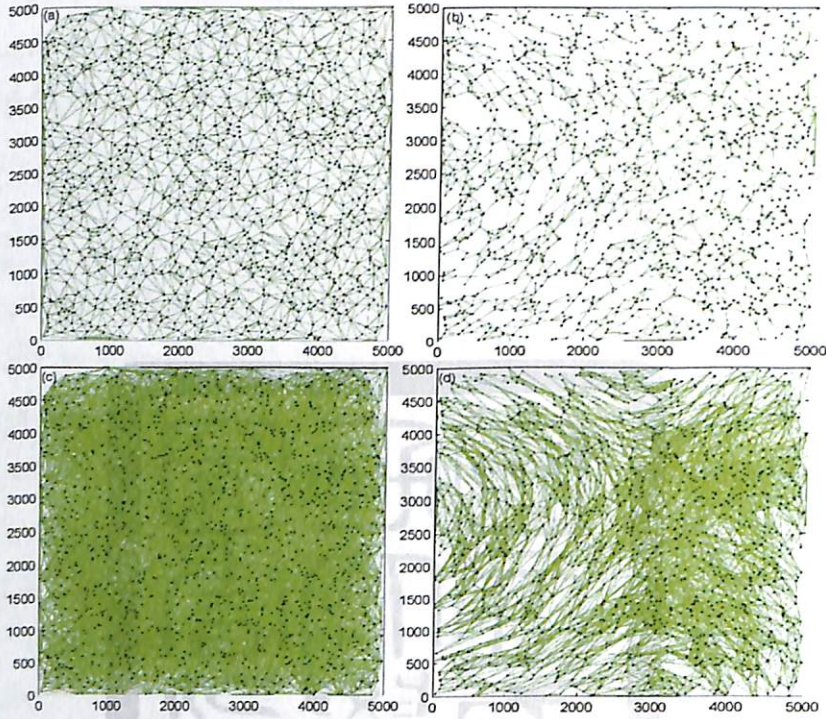


Fig. 2 Delaunay triangulation (Zhang, 2012)

- (a) Global Delaunay triangulation network of coherent points;
- (b) Network after removing arcs with phase ambiguities detected from (a)
- (c) Local Delaunay triangulation network of coherent points
- (d) Network after removing arcs with phase ambiguities detected from (c)

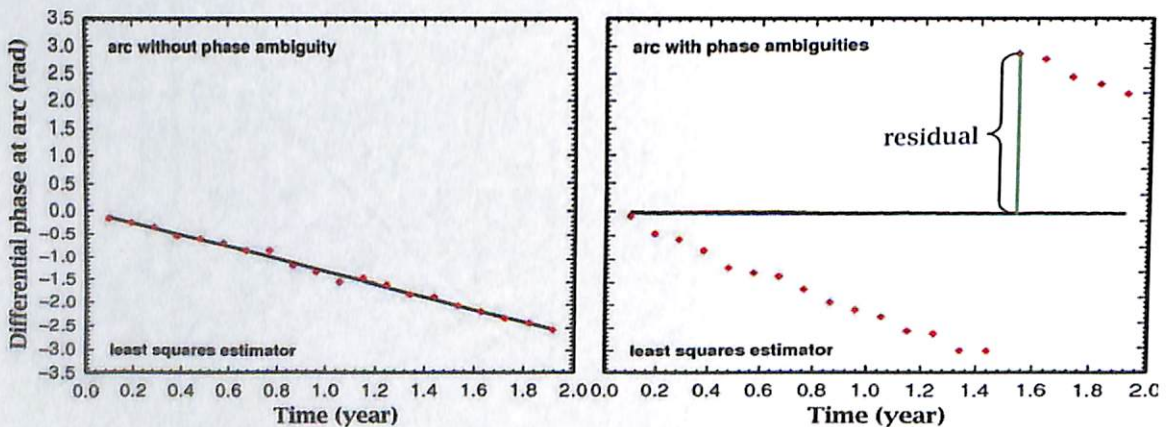


Fig. 3 Least squares calculation of phase ambiguities exist (Zhang et al., 2011)

## RESULTS AND DISCUSSION

An analysis of the post-disaster landslide area using 0.5m high-resolution LiDAR reveals varying topographical features and classifies the main structural topography, including main scarp, secondary scarp cliff, side scarp, erosion scarp, gully and sliding block (Figure 4a). On the CS map, it is possible to trace the development of the gully in 8 years. The gully was located at the belly of the slope in 2012, has now developed to a position near the top of the slope in 2020. The CS map shows that the gully is widening with a constant and ongoing process of downcutting, lateral erosion and headward erosion (Figure 4b). By subtracting the elevation values of the DEM in 2012 and 2020, the result showed that the landslide area is about 107,438 m<sup>2</sup>, which has reached the threshold of large-scale landslide (10 ha) with ongoing collapses. The colluvium occupies an area of 45,274 m<sup>2</sup> with a total volume of around 84,340 m<sup>3</sup> (Figure 4c & Table 1).

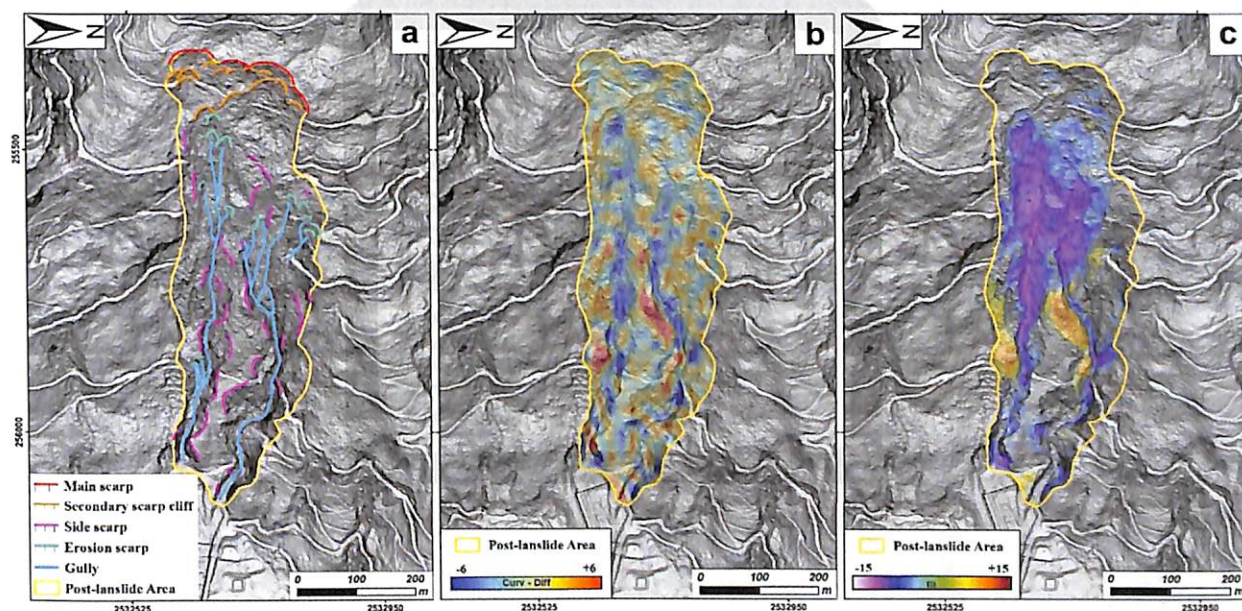


Fig. 4 Geomorphometry and terrain analysis of post-landslide area  
 (a) the micro-topographic characteristics; (b) curvature difference; (c) earthwork volume

Table 1. Landslide earthwork volume estimation

	Deposition	Conservation
Area	107,438 m <sup>2</sup> (10.74 ha)	45,274 m <sup>2</sup> (4.53 ha)
Volume	356,843 m <sup>3</sup>	84,340 m <sup>3</sup>

It was evident from the surface activity before the slide that the displacement was continuously downward (Figure 5). TCP-InSAR was observed the decline of the Hongye landslide 8 months before Typhoon Moranti in September 2016, hence it is effective to use TCP-InSAR to observe susceptibility trends in the Hongye landslide. In the aftermath of a disaster, the vertical surface deformation is mainly rising, which means accumulation is occurring. There are indications that residual colluvial deposits are gradually moving downstream (Figure 6).

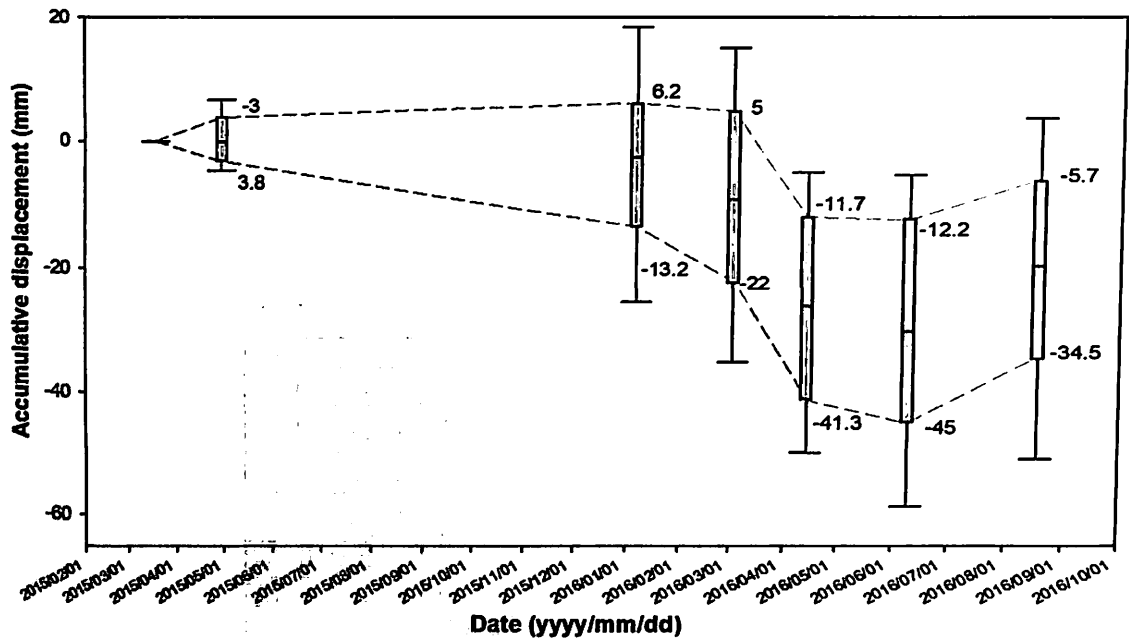


Fig. 5 Box plot of accumulation deformation before landslide

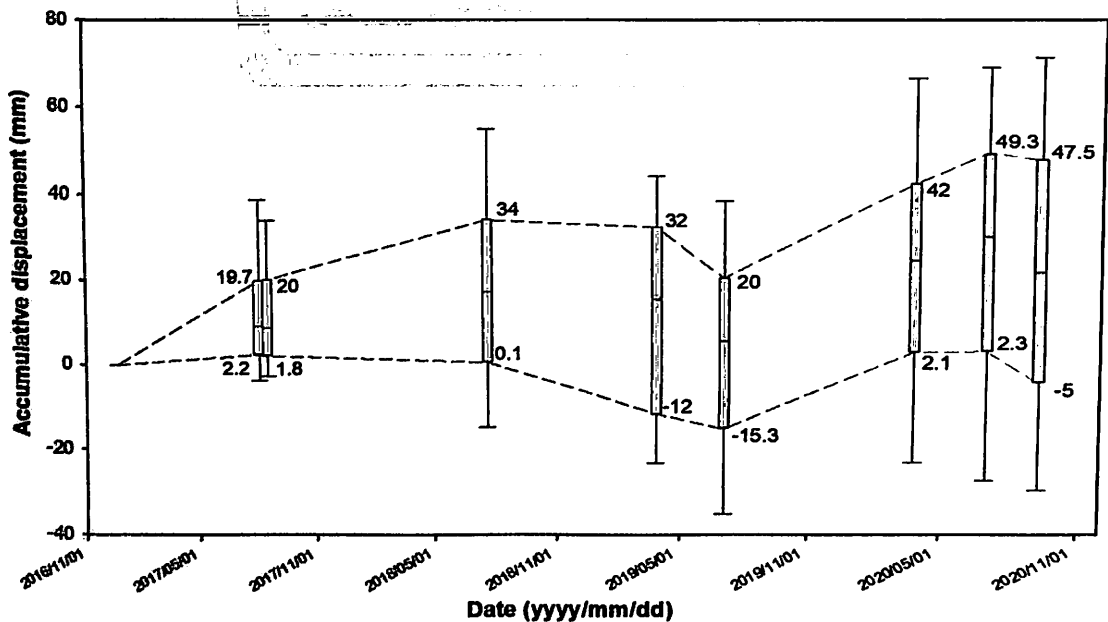


Fig. 6 Box plot of accumulation deformation after landslide

### CONCLUSION

The study results indicate that the combination of MT-InSAR and high-resolution airborne LiDAR can determine the topographic features of landslides and monitor surface activities, making it an important analysis tool for the topography of landslides. Moreover, both the attitude and the subsurface geological data are useful for understanding the failure mode of Hongye landslides. The conclusions of this research are as follows:

1. As terrain interpretation has to be done manually, terrain parameters can enhance the stereoscopic sense, topographic relief, and increase the objectivity of the terrain analysis. In the meantime, the resolution plays a crucial role in understanding terrain.
2. TCP-InSAR revealed that the slope's overall surface activity shifted vertically before the disaster, then gradually returned to stability after the disaster, and that other active blocks with potential landslides were present .
3. A nearly real geological model was created based on the previous execution of ground resistance, core hole, and attitude. The slope is further confirmed by attitude as a dip slope failure type (Figure 7).

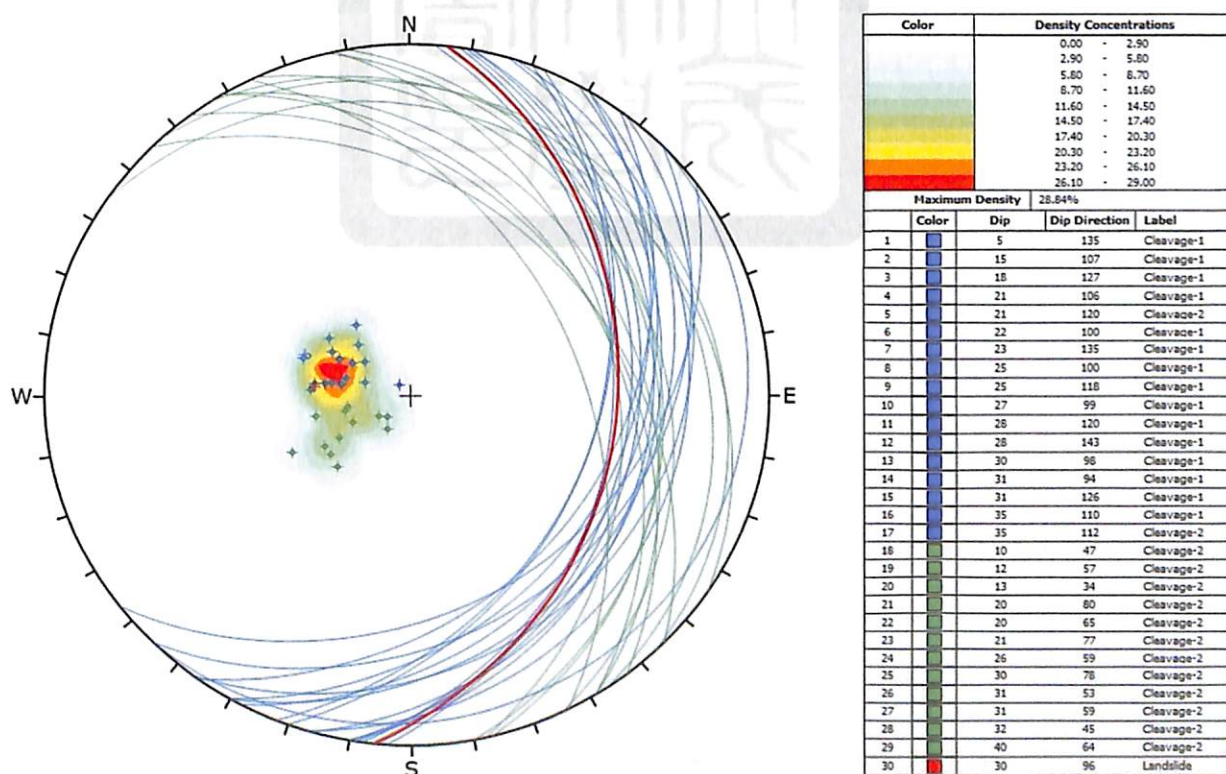


Fig. 7 The stereographic projection of cleavage

## 利用高精度空載光達探討紅葉大規模深層崩塌之微地形構造

區雪儀<sup>1</sup>、林冠璋<sup>1</sup>、林志交<sup>2</sup>、鄧嘉欣<sup>2</sup>、吳俊龍<sup>3</sup>、陳奕中<sup>4</sup>、陳柔妃<sup>4</sup>

(1)國立成功大學地球科學系、(2)中興測量有限公司光達系統室、(3)行政院農業委員會水土保持局、  
(4)國立臺北科技大學材料及資源工程系

2016年9月莫蘭蒂颱風侵襲期間，臺東縣紅葉村東側之潛在大規模崩塌(臺東縣-延平鄉-T001)，受到連日降雨導致邊坡大面積崩落，其後雨水夾雜土砂向紅葉村方向一湧而下掩埋村莊內道路與民宅，成為全臺大規模崩塌潛勢區域少數實際發生崩塌事件的案例。由於大規模深層崩塌具破壞力強、影響範圍大之特性，且通常伴生土石流等複合型災害，而為了有效擬定大規模崩塌防災策略，進行詳盡地表地質調查是最基礎的治災工作。崩塌區的地質材料受邊坡重力變形作用影響，經歷長時間應變留下許多具有崩塌潛勢的地表地質特徵，藉此從中瞭解大規模崩塌的地形發育與徵兆。

有鑑於此，本研究利用崩塌前後兩期空載光達之數值高程模型(LiDAR derived-DEM)，針對臺東縣-延平鄉-T001進行事件前後崩積物的量體分析，配合災後50公尺高精度LiDAR資料進行地形計測量分析與微地形判釋，可用於瞭解紅葉崩塌事件的破壞機制與地形演育，並揭示大規模崩塌地表地質構造特性。本研究配合地質調查資料顯示，紅葉村後方邊坡的蝕溝發育受區域構造影響，其岩體弱面主要控制崩塌面雙溝同源的因素，而莫蘭蒂颱風強降雨則是誘發大規模崩塌的外在因素，以致於造成大面積岩屑崩滑並引發土砂災害。

**中文關鍵詞：**高精度空載光達、大規模崩塌、地形計測學、微地形

- 11:50 - 12:10 **GS17-010**  
高雄市竹林地區潛在大規模崩塌調查監測  
許錕安、賴文基、蔡元融、蔡政修、劉文賢

**GS17**

**Room 402c**

**山崩與土石流災害 (GS-NH1)**

**Landslide and Debris Flow**

主持人：吳澄峰

- 15:10 - 15:30 **GS17-011**  
利用高精度空載光達探討紅葉大規模深層崩塌之微地形構造  
區雪儀、林冠璋、林志交、鄧嘉欣、吳俊龍、陳奕中、陳柔妃
- 15:30 - 15:50 **GS17-012**  
Using Pixel Offset Tracking Technique from Synthetic Aperture Radar Image for Landslide Potential Detection: A Case in Houtong  
**Yi-Keng Chen, Jen-Yu Han**
- 15:50 - 16:10 **GS17-013**  
利用密集式微地動資料探討大崙山順向坡之滑動特性  
吳澄峰、饒瑞鈞、陳英琪、曾佳漢
- 16:10 - 16:30 **GS17-014**  
Operative Seismic Monitoring for Mass Movement: Present and Future Perspectives  
**Jui-Ming Chang, Wei-An Chao**
- 16:30 - 16:50 **GS17-015**  
台灣中部廬山地區板岩坡體重力變形及地表位移之探討  
謝有忠、吳庭瑜、戴東霖、董英宏、紀宗吉

## 整合空載光達與合成孔徑雷達干涉技術探究紅葉崩塌之地形變遷

\*區雪儀<sup>1</sup> 林冠瑋<sup>2</sup> 陳柔妃<sup>3</sup><sup>1</sup> 國立臺北科技大學 材料及資源工程系 專任助理<sup>2</sup> 國立成功大學 地球科學系 副教授<sup>3</sup> 國立臺北科技大學 材料及資源工程系 助理教授

## 摘 要

臺東縣紅葉部落西側之潛在大規模崩塌邊坡於 2016 年 9 月莫蘭蒂颱風侵襲期間，因連日降雨導致邊坡岩屑崩落破壞部落內道路與民宅，造成紅葉部落土石流掩埋事件並成為該地區近半世紀以來最嚴重的坡地土砂災害。本研究利用高精度空載光達進行崩塌特徵判釋、線性構造比對以及土方量體計算，並以多時序合成孔徑雷達干涉技術配合 2015-2020 年 ALOS-2 雷達衛星產製地表變形資訊。以瞭解該崩塌邊坡之地形變遷，最後進一步建立崩塌地的地質模型與主要破壞模式。

研究成果說明了空載光達影像解析度對圈繪判釋崩塌地形特徵的重要性，數值地形模型加值分析有效提升地形立體呈現，有助客觀地進行地形判釋，從而瞭解崩塌區域內的微地形特徵發育與地形演變。MT-InSAR 成功獲得崩塌前後期的地表變形資訊，分析結果顯示早在崩塌前 8 個月已有監測向下位移活動趨勢。此外，潛在大規模崩塌邊坡左側存在一處較活躍的區塊，在崩塌事件後仍然有持續向下位移的趨勢。最後，透過前人測量的地電阻、鑽孔岩芯以及弱面位態，成功建立二維與三維地質模型，並確認紅葉崩塌應屬順向坡破壞類型。

關鍵詞：多時序合成孔徑雷達干涉技術、高精度空載光達、大規模崩塌潛勢區位、地形計測學、微地形

論文組別：口頭宣讀類

論文題目類別：(1)礦業、地質、海洋資源

聯絡人姓名：區雪儀

聯絡人電話：(02) 27712171 分機 2780

聯絡人地址：10608 臺北市 大安區 忠孝東路三段 1 號 材資館

聯絡人郵箱：asybibi@gmail.com

聯絡人姓名：林冠瑋

聯絡人電話：(06) 2757575 分機 65424

聯絡人地址：701 臺南市 東區 大學路 1 號 地球科學所

聯絡人郵箱：gwwlin.ncku@gmail.com

聯絡人姓名：陳柔妃

聯絡人電話：(02) 27712171 分機 2710

聯絡人地址：10608 臺北市 大安區 忠孝東路三段 1 號 材資館

聯絡人郵箱：roufei@mail.ntut.edu.tw



本計畫執行機關識別碼：070304S100

## 行政院農業委員會水土保持局補助研究期末暨成果 效益報告

計畫主管機關 行政院農業委員會水土保持局

計畫執行機關 國立成功大學

計畫名稱 臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究 (第1年/全程1年)

審議編號 1112101012805-070304S1

農委會  
計畫編號

111農科-7.3.4-保-S1



# 111年度行政院農業委員會水土保持局科技計畫期末暨成果 效益報告

## 臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究

### 一、基本資訊

計畫名稱：臺灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究	
計畫編號：111農科-7.3.4-保-S1	
主管機關：行政院農業委員會水土保持局	執行機關：國立成功大學
計畫主持人：林冠璋	電話：06-2757575#65424
期程： 全 程：自 111年1月1日 至 111年12月31日 本年度：自 111年1月1日 至 111年12月31日	
經費：全程：1,520 仟元；本年度：1,520 仟元	
報告頁數：153；使用語言：中文 全文處理方式：可立即對外提供參考	

### 二、執行成果中文摘要

在台灣山區常因為強降雨導致大規模崩塌，而此種災害類型常造成居民與聚落財產上的危害，為此大規模崩塌的防減災策略已進入區域尺度或坡地尺度，針對高風險地區或邊坡持續加強各項的觀測工作，並制定雨量警戒基準。地震站紀錄可以獲得崩塌地動訊號並進行定位，有助於加速瞭解災害發生時間與地點等資訊，並運用於分析促崩雨量條件。

本年度計畫整理了中部區域(台中、南投、彰化、雲林)一帶地震站，找出具有崩塌特徵之地動訊號資料集，再以卷積神經網路分類法建立地動訊號時頻圖的分類模型，其崩塌分類的召回率超過97%。將時頻圖的分類模型應用於2012年至2020年的連續地動訊號紀錄，最終共有36個時間點可於至少2個以上的地震站紀錄中同時偵測到崩塌地動訊號。後續進行崩塌地動之振動源定位、檢查與配對，最終共6起崩塌事件之定位結果位於中部地區範圍內。計畫亦於梨山及清境架設地震站，並利用分類模型偵測2022年10月16日豪雨期間之地動紀錄。崩塌之降雨門檻分析顯示，以涵蓋50%資料的雨量門檻曲線來看，研究區內大規模崩塌多數發生於累積降雨量大於547 mm、降雨延時79小時以上的降雨條件之下，綜合各項降雨基準可做為制定大規模崩塌的警戒標準之基礎。同時，本計畫更新崩塌訊號自動辨識測試系統，新增崩塌面積與體積推估值，經由研究人員判讀後再發佈於展示網頁。

### 三、執行成果英文摘要





Disaster prevention and mitigation strategies for large-scale landslides have turned to focus on the regional scale or slope scale. Strengthening various observations for high-risk areas or slopes and revising the rainfall thresholds will be continued. The seismic records can provide landslide-induced ground motion signals and be used to locate the landslide, which helps to obtain the time and location of the disaster, and it is used to analyze the rainfall conditions. This project collated existing seismic stations in the central region and used continuous seismic records to find ground motion signals with landslide characteristics. A classification model for the ground motion spectrogram is built by the convolutional neural network, and its recall rate for landslide signals is over 90%. The classification model is applied to the seismic records from 2012 to 2020. Finally, 36 landslides were detected simultaneously at at least 2 seismic stations. A total of six landslide events were located in the central region. Two seismic stations were set up in Lishan and Qingjing, and the classification model were applied to detect the ground motion record during the heavy rainfall on October 16, 2022. The rainfall threshold about the large-scale landslides located in the study area reveals the critical rainfall for triggering large scale landslide which includes >547 mm of accumulative rainfall and >79 hours of rainfall duration. These basic information about critical rainfall for large scale landslide will be useful for preparing the operation of disaster prevention. The project has updated the test system to provide the information of event area and volume after detecting the landslide signal, and automatically send a brief report, which will be read by the researcher before being released on the webpage.

#### 四、中英文關鍵詞

崩塌地動訊號； landslide quake； 大規模崩塌； large-scale landslide； 深度學習； deep learning； 機器學習； machine learning

#### 五、計畫目標

- (一) 彙整中部地區(台中、南投、彰化)一帶及週邊地區現有地表振動觀測站(含寬頻地震站與24位元短週期地震站)，呈現現有觀測站之基礎資訊，並評估是否需加強。
- (二) 收集豪雨期間土砂運動引致之地表振動紀錄，並計算訊號辨識指標。結合深度學習及監督式機器學習技術建立觀測區域內大規模崩塌之地動訊號分類器，並釐清分類器之限制或極限。



- (三) 利用觀測區中歷史崩塌事件，釐清大規模崩塌之地動訊號可能提供之災害評估資訊，擬定大規模崩塌之地動訊號辨識結果之資訊報告(含測站資訊、定位結果、可能規模及崩壞類型等資訊)。
- (四) 持續改善及精進崩塌地動訊號近即時辨識測試網頁。
- (五) 結合地動訊號資訊及水文觀測紀錄，分析中部地區之促崩雨量條件。

## 六、主要內容

### 重要工作項目

- (一) 歸納出台中、南投、彰化一帶及週邊地區區域尺度之地震觀測網。
- (二) 收集豪雨期間土砂運動引致之地表振動紀錄，並計算訊號辨識指標。
- (三) 建置中部地區崩塌地動訊號自動分類器並驗證分類器之可靠度
- (四) 崩塌訊號源定位及配對
- (五) 增設臨時地震站，探討區域型或坡地型觀測網改善策略。
- (六) 搭配崩塌發生時間，分析集水區尺度促崩雨量條件。
- (七) 精進現有崩塌地動訊號近即時辨識測試平台。

### 實施方法

#### (一) 中部地區觀測網篩選與地動訊號偵測

地表振動訊號將使用來自中央研究院及中央氣象局共同設立之臺灣寬頻地震網，以及中央氣象局設置之短週期地震站。由於並非每個測站都適合用於崩塌訊號的分析，本計畫將先利用人工辨識方式，初步檢視鄰近台中、南投、彰化一帶一帶的現有地震站是否記錄下崩塌之地表振動。

為了提升地動訊號效率，減少系統耗費時間辨識無事件之地動紀錄，本計畫將以短窗格/長窗格移動平均比值法(STA/LTA)，先偵測突發之地動訊號，後續僅針對具有突發訊號之地動紀錄進行分析。圖4為2009年莫拉克颱風期間UTC時間8月8日22時16分小林村崩塌發生時，甲仙地震站之地動紀錄的STA/LTA偵測結果。

#### (二) 結合深度學習及監督式機器學習建立訊號分類器

在累積崩塌訊號辨識經驗及案例樣本數後，本年度計畫將開始採用深度學習技術進行地動訊號的自動分群。本計畫將結合自編碼器、T-SNE以及K-means三種深度學習技術，建立地動訊號時頻圖的自動分群方法，預期將完成至少50000筆地動訊號的自動分群。該方法已經過初步測試，可有效將未知的地動訊號進行分群，並符合三種主要分類目標(崩塌、地震及其他噪訊)(圖5)。

然而自動分群技術將無法提供訊號之物理或統計意義，可能難以延伸應用於提供崩塌訊號特徵或進行崩塌特性分析。因此在經過深度學習分群後，仍會將分群結果採用監督式機器學習分類法，計算分群後樣本特徵值，建立機器學習分類器(圖6)。本計畫預計將分群後之地動訊號以前期計畫累積之已知類型之訊號作為驗證，得出每一群訊後所屬類型，便可將其視為新的訓練樣本。每筆訓練樣本均依事件發生時間切出完整包含事件的5分鐘長度訊號段，計算時間域及頻率域的特徵值(表2、圖7)。自動分類結果採用混淆矩陣法評估



正確度、敏感度，以及準確度，並將採用非訓練用的振動訊號進行驗證。

(三) 訊號分類結果應用於崩塌振動源定位

計畫中將採用之崩塌地動定位方法是由藉由對所有地震站對的理論與觀測到時差之差值( $\Delta T_{i,j}$ )的最小均方根(rms)進行網格搜索，來獲得動振源位置(Chao and Yu, 2018)。如果使用N個地震站紀錄來定位崩塌地動，則站對的總數為 $n = N(N-1)/2$ 。用於計算每個網格點(x, y, z)的最小均方根公式(表3)。崩塌地動訊號的最佳振動源位置(x, y, z)會對應於具有最小均方根的網格，由於崩塌地動訊號理論上來自淺層地震源深度，因此在本計畫中僅在 $0.01^\circ$ 的水平網格空間中進行最小均方根的搜索(圖8)。

(四) 大規模崩塌促崩降雨門檻修正

由於山崩產生的地動訊號完整了記錄大規模崩塌的發生時間，藉由成功的判釋與配對，可以運用所得到的時間記錄準確計算出山崩發生時的雨量條件。本計畫採用之雨場切割方法，修改為以日當作切割單位，當小時降雨量超過4 mm，即視為雨場開始時間；單日降雨量低於4 mm時，當日24時作為雨場結束時間。採用修改後的雨場切割標準將使得完整降雨事件不易被雨勢趨緩或是降雨短暫中止而切斷，而崩塌事件發生時的降雨延時則是統計至崩塌發生的時刻，並不會有高估雨場的狀況存在(圖9)。運用此方法為基準，統計引發各崩塌的降雨強度、累積雨量、降雨延時等參數，做為降雨門檻值分析之因子。其中，降雨延時(D)，單位為小時；累積雨量( $R_c$ )，單位為mm；降雨強度(I)，單位為mm/h。除了上述的三個因子之外，本計畫將根據前期經驗將前期的降雨量 $R_p$ 納入考量。相關降雨門檻分析方法將包括：

1. 以降雨強度I及降雨延時D為警戒指標(5%之曲線做為門檻曲線)(圖10)
2. 以降雨強度I及有效累積雨量 $R_e$ 為警戒指標(5%之曲線做為門檻曲線)
3. 以有效累積雨量 $R_e$ 及降雨延時D為警戒指標(5%之曲線做為門檻曲線)

## 七、計畫執行情形

### (一) 進度比較

	預定進度%	實際進度%	比較%
當年	100.00	100.00	0.00
全程	100.00	100.00	0.00

### (二) 資源使用情形

#### 1. 經費支用

	預定經費(仟元)	實際經費(仟元)	支用率%
當年	1,520	1,520	100.00
全程	1,520	1,520	100.00



## 2. 經費明細

單位：千元

	111年度				112年度 預算數	113年度 申請數	備註	
	預算數 (a)	初編決算數						執行率(%) (d/a)
		實支數 (b)	保留數 (c)	合計 (d=b+c)				
總計	1,520.00	1,520.00	0.00	1,520.00	100			
一、經常門小計	1,520.00	1,520.00	0.00	1,520.00	100			
(1)人事費	763.00	742.04	0.00	742.04	97.25			
(2)材料費	88.00	148.68	0.00	148.68	168.96			
(3)其他經常支出	669.00	629.28	0.00	629.28	94.06			
二、資本門小計	0.00	0.00	0.00	0.00	0			
(1)土地建築	0.00	0.00	0.00	0.00	0			
(2)儀器設備	0.00	0.00	0.00	0.00	0			
(3)其他資本支出	0.00	0.00	0.00	0.00	0			

## 與原計畫規劃差異說明：

## 3. 人力

姓名	計畫職級	投入人月數及 工作重點	學、經歷及專長	
			學歷	專長
林冠璋	副研究員級	(3.0) 指導統籌計畫所有 事務	學歷	博士
			經歷	國立成功大學地球科學系副教授
			專長	地球科學類
林琬婷	研究助理級	(12.0) 行政相關事務	學歷	學士
			經歷	國立成功大學地球科學系專任助理
			專長	社會-其他
張聖偉	研究助理級	(3.0) 執行地動訊號的半 自動判釋程式	學歷	碩士
			經歷	國立成功大學地球科學系兼任助理
			專長	地球科學類
顏心儀	助理研究員級	(3.0) 報告書彙整	學歷	碩士
			經歷	國立成功大學土木系專任助理
			專長	地球科學類
郭賢立	助理研究員級	(3.0) 執行地動訊號的半 自動判釋程式	學歷	博士班研究生
			經歷	國立成功大學地球科學系博士班研究生
			專長	地球科學類



林亭好	研究助理級	(4.0) 崩塌訊號的特徵值 計算、報告書彙整	學歷	碩士班研究生
			經歷	國立成功大學地球科學系專任助理
			專長	地球科學類
區雪儀	研究助理級	(4.0) 偵測訊號的定位與 崩塌配對	學歷	碩士班研究生
			經歷	國立成功大學地球科學系兼任助理
			專長	地球科學類
張家豪	研究助理級	(3.0) 偵測訊號的定位與 崩塌配對	學歷	學士
			經歷	國立成功大學地球科學系兼任助理
			專長	地球科學類
曾律瑗	研究助理級	(4.0) 偵測訊號的定位與 崩塌配對	學歷	碩士班研究生
			經歷	國立成功大學地球科學系兼任助理
			專長	地球科學類

## 與原計畫規劃差異說明：

## (三) 期末評核標準達成情形：

序號	期末評核標準	是否已達成	辦理情形
1	增設臨時地震站，探討改善現有觀測網之策略。	是	根據地震網之密度及未來本計畫選擇之臨時測站位置，應可達到偵測這六處事件及後續分析之成果。分別為清境及梨山兩處，皆已於8月底架設完成，預計觀測時間12個月，儀器採樣頻率為100Hz。因本次選址皆位於大規模崩塌潛勢邊坡，因此若崩塌塊體有產生活動，預期可以偵測其訊號來源。
2	搭配雨量觀測記錄及崩塌發生時間，分析區域尺度促崩雨量條件。	是	將7筆定位成功資料與歷年崩塌目錄進行配對之後，確定其崩塌發生時間與位置，進而蒐集雨量資料，進行促崩降雨條件分析，台灣中部地區分析出的促崩降雨門檻為： (一) Ia-D降雨門檻： $Ia = 7.16D^{(-0.19)}$ (二) Re-D降雨門檻： $Re \times D = 39278 \text{ mm} \times \text{h}$ (三) Ia-Re降雨門檻： $Ia \times Re = 5470 \text{ mm}^2/\text{h}$
3	更新崩塌地動訊號近即時辨識測試平台，提升辨識效率及提供更多元資訊。	是	結合前期計畫與本計畫完成的地動訊號分類器分類成果，更新崩塌振動訊號監測網頁，系統包含每2.5分鐘進行一次自動辨識崩塌振動訊號，以及所有辨識過後的崩塌資訊網頁，內容包含事件時間、位置、振動規模、崩塌面積、崩塌體積等，並自動寄發報告給研究人員。

## 八、計畫已獲得之主要成就與量化成果(output)

## 【表一】初級產出、效益及重大突破



績效指標構面：試驗研究產出構面

共通性指標項目	細項指標	預估量化值	實際量化值	效益說明	重大突破
學術著作發表	國外期刊論文	1篇	0篇	撰寫中，期待研究成果獲得國外期刊的肯定。	
	國內研討會論文	1篇	2篇	積極參與國內研討會，與優秀學者交流。	
	研究報告	1本	1本	研究成果報告順利完成	
國內外合作研發與人才培育	研發人才培育數(碩士)	1人	2人	積極培育研發人才，壯大研發能量	

研討會論文(國內、外)				
國內/國外	文章名稱	研討會名稱	研討會年月	報告方式
國內	綜整廣域InSAR與高精度LiDAR探討紅葉大規模深層崩塌之地形演變	地質年會	111年6月	口頭報告
國內	整合空載光達與合成孔径雷達干涉技術探究紅葉崩塌之地形變遷	礦冶年會	111年10月	口頭報告

學位(碩士/博士)	姓名	專長	學校系所
碩士	林亭好		
碩士	區雪儀		

研究報告					
國內/國外	專著/書籍名稱	出版機關名稱	出版年月	作者	授權金(千元)
國內	台灣中部區域之崩塌地動訊號觀測及延伸應用研究成果報告				

## 九、主要成果之價值與貢獻度

### (一)、學術成就(科技基礎研究)

本年度計畫整理了中部區域(臺中、南投、彰化、雲林)一帶地震站，找出具有崩塌特徵之地動訊號資料集，再以卷積神經網路分類法建立地動訊號時頻圖的分類模型，其崩塌分類的召回率超過 97%。將時頻圖的分類模型應用於 2012 年至 2020 年的連續地動訊號紀錄，最終共有 36 個時間點可於至少 2 個以上的地震站紀錄中同時偵測到崩塌地動訊號。後續進行崩塌地動之振動源定位、檢查與配對，最終共 6 起崩塌事件之定位結果位於中部地區範圍內。計畫亦於梨山及清境架設地震站，並利用分類模型偵測 2022 年 10 月 16 日豪雨期間之地動紀錄。崩塌之降雨門檻分析顯示，以涵蓋 50% 資料的雨量門檻曲線來看，研究區內大規模崩塌多數發生於累積降雨量大於 547 mm、降雨延時 79 小時以上的降雨條件之下，綜合各項降雨基準可做為制定大規模崩塌的警戒標準之基礎。同時，本計畫更新崩塌訊號自動辨識測試系統，新增崩塌面積與體積推估值，經由研究人員判讀後再發佈於展示網頁。

### (二)、技術創新(科技技術創新)

崩塌引致地表振動的研究，自一開始的人工判釋崩塌地動訊號，需要大量的人力與時間，進而運用 A I 人工智慧的機器演算法，發展出地動訊號的自動



分類器。

有鑑於前期計畫採用自定義特徵值進行機器學習時，雖能考慮到地動訊號的物理或統計意義，但需考量不同地震儀基本條件不同的問題，而需要分別製作分類器，或捨棄部分無法共用之特徵值。因此，若欲採用研究區中所有類型之地震儀紀錄，便可能需要產生多組分類器，亦難以評估是否可將分類器運用於研究區以外的其他地表振動紀錄儀器。由於崩塌地動訊號與地震地動訊號之時頻圖存在顯著差異，故本年度計畫選擇採用圖片辨識技術進行地動訊號時頻圖的自動辨識。目前最被廣泛應用的人工智慧圖片辨識技術即為卷積神經網路深度學習演算法，然而深度學習演算法往往需要非常大量的訓練樣本，因此準備充足的訓練樣本是建立卷積神經網路分類模型的基礎。受惠於前期計畫已透過人工辨識以及隨機森林分類器獲取數百筆崩塌地動訊號，本計畫可採用機器學習的集群分析於中部地區地震儀紀錄，快速且大量地找出與崩塌地動訊號具有相似時頻圖特徵的地動訊號，作為後續建立卷積神經網路分類模型的訓練樣本。

崩塌引致地表振動的快速辨識技術的開發，有助於未來加速土砂災害訊息的獲得及應變效率。

### (三)、 經濟效益(經濟產業促進)

地震觀測網測站原先並非針對大型坡地土砂災害防治所設置，因此設站位置大多不在潛在滑動邊坡周圍。但要針對大規模崩塌做更詳細研究，購買地震儀器與設站及維護等都需要大量成本。然而本計畫採用現有之地震觀測網測站，減少新設測站成本，以遠距方式辨識大規模崩塌，也可避免觀測站因災害發生時被破壞所蒙受的經濟損失。未來若可進一步提供坡地土砂事件即時警報，還可避免災害造成的社會經濟損失。

### (四)、 社會影響(民生社會發展、環境安全永續)

在台灣山區常因為強降雨導致大規模崩塌，而此種災害類型常造成居民與聚落財產上的危害，為此大規模崩塌的防減災策略已進入區域尺度或坡地尺度，針對高風險地區或邊坡持續加強各項的觀測工作，並制定雨量警戒基準，以地震站紀錄可以獲得崩塌地動訊號並進行定位，有助於加速瞭解災害發生時間與地點等資訊，更即時發佈更多元且快速之災害資訊，亦有助於降低災害不確定性對社會民心之影響。

### (五)、 其它效益(科技政策管理及其他)

## 十、檢討與展望

地震站多設置於戶外空間，受到設站周邊環境、儀器穩定性等因素影響，必然存在停電、故障、記錄失敗等運作不正常現象。2011 年的中部地區自由場強震網資料收集報告甚至提及多達 1/3 儀器有報修的記錄(王乾盈等人，2011)，顯示地震儀本身的穩定性是非常值得注意的問題。另外，若地震儀非屬於即時地震站，記錄異常問題便得等待現地資料收集時才會發現，而無法立即處置導致可能錯失事件的記錄，亦難以運用於即時防災資訊收集。

考量地震站分布狀況、地震儀特性、運作狀態等條件，若欲收集現有地震站紀錄，建





議可優先使用記錄較穩定的寬頻地震站，再考量觀測站包覆不足的問題，挑選其他地震站以滿足崩塌地動定位的需求。理論上增加地震站數量將有助於增加可用於地動訊號辨識的紀錄數量，以及提高振動源定位時的完整包覆度。考量中部山區現有地震站分布狀況，可以明顯發現研究區內高山區域廣，不易設站也不易維護，因此高山地區地震站數量較少，尤其以研究區東南側玉山山脈的地震站密度最低。若考量研究區東南側高山地區的土砂災害保全對象較少，地震站數量較少的狀況應仍在可接受的程度。若需要大量增設地震站，較建議採用短週期地震儀，並優先針對具有保全對象且活動性較大的邊坡周邊增設地動觀測站。本計畫已在大規模崩塌優先辦理區-松茂 1 及梨山之間架設 1 處短週期臨時地震站(梨山站)，且鄰近廬山大規模崩塌潛勢區亦架設 1 處短週期臨時地震站(清境站)。

崩塌振動訊號的定位往往受到測站分佈狀況、訊號品質、定位方法、地下速度模型等大量因素影響，定位結果常常並未與實際崩塌位置相符。受限於測站分佈狀況、訊號品質屬於難以克服的條件，選擇適當的定位方法與建立標準崩塌配對流程，可以作為未來的改進目標。

## 十一、後續工作構想之重點

- (一) 彙整現有的三套崩塌地動訊號分類器，並於非前期計畫研究區進行測試。
- (二) 針對特定地質條件之大規模崩塌，利用地震儀歷史資料分析鄰近崩塌事件的地動訊號特性，嘗試建立特定地質特性之崩塌訊號模板。
- (三) 規劃於其中兩處大規模崩塌潛勢區設置地動訊號觀測站，利用歷史崩塌振動訊號與崩塌目錄，建立崩塌規模與運動方向與地動訊號可能的關聯性，並運用於精進崩塌訊號定位與配對的流程。

## 十二、其他補充資料

### (一)、 跨部會協調或與相關計畫之配合

1. 水土保持局 BigGIS 巨量空間資訊系統 <https://gis.swcb.gov.tw/>
2. 雨量資料來源為中央氣象局觀測資料查詢系統。

### (二)、 其他補充說明

無

---

以下欄位請於期末評核(審查)後，由主辦專家至系統考評作業填寫列印，並請單位主管簽章。

主辦專家簽章

單位主管簽章

