
集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號
監測研究

The study project of ground motion signals
induced by mass movement in the
watershed scale

執行單位：國立成功大學

執行期間：109年1月1日至109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 109 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)

集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究

摘要

塊體運動是常見的地表地質作用，不僅會改變地形，還可能對鄰近的人民生活造成災害，其中大規模崩塌更可能對社會、經濟帶來重大傷害。大規模崩塌產生的地表振動有機會被鄰近的地震儀接收並記錄，因此地動訊號分析能被廣泛應用於邊坡塊體滑動的偵測，而使用機器學習建立地動訊號分類器能夠加速且客觀的辨識具有崩塌特徵的地動訊號。

本計畫針對高屏溪流域內或鄰近地震站，統整 2009 年莫拉克颱風及 2015 年蘇迪勒颱風影響期間具有崩塌特徵之地動訊號共 251 筆，搭配相同數量之地震事件及噪訊作為訓練樣本，以隨機森林演算法建立適用於不同地震儀之地動訊號自動分類器。利用自動分類器對 10 場颱風影響期間的地動紀錄進行地動事件偵測及分類，成功找出 79 起具有崩塌特徵之地動事件，定位結果位於高屏溪流域內之崩塌事件數為 15 起，再加上於前期計畫中獲得的 37 起發生於高屏溪流域內之崩塌，共 52 起崩塌事件可用於進行促崩水文條件分析。促崩降雨門檻分析結果顯示相較於全台灣，高屏溪流域的降雨門檻較低，說明該流域在相同的降雨條件下有較高的潛勢誘發崩塌。此外，長降雨延時、高有效累積降雨以及第三桶水對觸發大規模崩塌有較顯著的影響，運用上述 3 項水文參數應有助於大規模崩塌警戒值的設計。

關鍵字：大規模崩塌、地動訊號、機器學習、高屏溪流域、促崩降雨門檻

The study project of ground motion signals induced by mass movement in the watershed scale

Abstract

A mass movement can change the landform and may result in the disaster for the people living around. Large-scale landslide is one of the most severe mass movement. Nearby seismometers can record ground motions generated by the large-scale landslide. Therefore, the analysis of ground motion signals is widely applied to monitor slope failure. A machine learning classifier of ground-motion signals can be used to identify signals with landslide features more efficiently and objectively.

This project collects 251 signal samples with landslide features from seismometers located in or nearby the Kaoping watershed recorded during 2009 Typhoon Morakot and 2015 Typhoon Soudelor. The project creates classifiers for different types of seismometers in the Kaoping watershed using the same amount of signals of landslide, earthquake, and noise. By detecting and classifying event using the ground motion signals recorded during 10 typhoon events from 2012 to 2015, 79 ground motion signals with landslide features are found successfully. Located results of 15 events are in the Kaoping watershed. 37 landslides occurred in the Kaoping watershed recorded in the previous project are added in this project. By using 52 landslides events, statistics of the triggering rainfall parameters and analysis of soil water index were obtained. The results reflect that the triggering rainfall thresholds for the Kaoping watershed are lower than that for the Taiwan.

During the same rainfall condition, the Kaoping watershed has the higher potential in occurrence. In addition, long duration, large effective cumulation, and the third water depth in the soil water index have significant influence in occurrence of large-scale landslide. These parameters can be used to design the triggering rainfall threshold of large-scale slope failure in the future.

Keywords: Large-scale landslide, Ground motion signal, Machine learning, Kaoping river, Triggering rainfall threshold

目次

摘要	I
Abstract	II
目次	IV
表次	VI
圖次	VIII
第一章 前言	1-1
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 前期研究及相關文獻回顧	1-3
第二章 研究方法	2-1
第一節 高屏河流域描述	2-1
第二節 地動訊號來源與地震測站分布	2-1
第三節 地動事件偵測	2-5
第四節 分類器訓練樣本及訊號特徵值	2-7
第五節 自動分類器建立	2-24
第六節 崩塌地動訊號定位	2-30
第七節 促崩降雨統計與分析方法	2-32
第八節 桶狀模式參數擬合	2-36
第三章 地動訊號自動分類器成果	3-1
第一節 演算法測試結果	3-1
第二節 分類器正確度	3-3

第三節 自動分類器測試結果.....	3-6
第四節 特徵值分類效能比較.....	3-15
第五節 崩塌地動訊號偵測及定位配對結果.....	3-19
第四章 高屏河流域鄰近地震測站分布.....	4-1
第一節 高屏河流域地震測站分布及架站成本.....	4-1
第二節 大規模崩塌潛勢區地動訊號觀測規劃.....	4-8
第五章 崩塌警戒水文因子.....	5-1
第一節 雨量分析結果.....	5-1
第二節 雨量因子間相關性分析.....	5-8
第三節 土壤水分指數分析結果.....	5-15
第四節 河川水位與崩塌發生時間的關聯性.....	5-19
第五節 鄰近高潛勢大規模崩塌邊坡之歷史案例的水文條件分析 ...	5-23
第六章 結論及建議.....	6-1
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附錄-1
附錄一、地動訊號自動分類器之崩塌事件訓練樣本目錄.....	附錄-1
附錄二、地動訊號自動分類器之地震事件訓練樣本目錄.....	附錄-9
附錄三、15處高屏河流域內崩塌地動訊號圖.....	附錄-15
附錄四、52處高屏河流域崩塌目錄.....	附錄-30
附錄五、期中審查意見回覆.....	附錄-34
附錄六、期末審查意見回覆.....	附錄-40
附錄七、公文.....	附錄-48
附錄八、研究紀錄.....	附錄-71

表次

表 1.1	地動訊號自動分類器相關研究.....	1-6
表 1.2	本計畫與 Lin et al., 2020a 研究內容之比較.....	1-8
表 1.3	促崩降雨分析前人研究.....	1-11
表 2.1	本計畫使用 27 座地震站資訊.....	2-2
表 2.2	寬頻地震儀 24 項訊號特徵值.....	2-17
表 2.3	短週期地震儀 18 項訊號特徵值.....	2-18
表 2.4	寬頻地震儀訓練樣本之 24 項特徵值平均數值.....	2-18
表 2.5	短週期地震儀訓練樣本之 18 項特徵值平均數值.....	2-20
表 2.6	混淆矩陣.....	2-28
表 2.7	日本氣象廳使用之土壤水分指數計算參數.....	2-39
表 2.8	各集水區桶狀模式參數.....	2-45
表 3.1	寬頻地震儀 22 種演算法測試結果.....	3-1
表 3.2	短週期地震儀 22 種演算法測試結果.....	3-2
表 3.3	寬頻地震儀自動分類器混淆矩陣.....	3-4
表 3.4	短週期地震儀自動分類器混淆矩陣.....	3-5
表 3.5	颱風事件目錄.....	3-6
表 4.1	高屏河流域鄰近寬頻地震網地震站目錄.....	4-3
表 4.2	高屏河流域鄰近井下地震網目錄.....	4-5
表 4.3	高屏河流域鄰近 Smart24 地震網目錄.....	4-7
表 4.4	大規模崩塌潛勢區地動訊號監測站目錄.....	4-9
表 5.1	52 處崩塌基本資訊表.....	5-1
表 5.2	設計降雨模擬結果.....	5-12

表 5.3 鄰近河道崩塌發生時之流量與水位紀錄.....	5-20
表 5.4 鄰近高潛勢大規模崩塌歷史案例促崩水文資料.....	5-26

圖次

圖 1.1 地震事件地動訊號圖	1-4
圖 1.2 雪崩事件時頻圖	1-4
圖 1.3 山崩事件時頻圖	1-5
圖 2.1 高屏河流域內及鄰近地震站分布	2-4
圖 2.2 MASB 測站 STA/LTA 小林村崩塌事件偵測	2-6
圖 2.3 SGSB 測站 STA/LTA 小林村崩塌事件偵測	2-7
圖 2.4 不同類型地動事件之移動平均及閃爍指數波形	2-10
圖 2.5 不同類型地動事件平均頻譜圖	2-13
圖 2.6 地動事件能量分布之劃定	2-15
圖 2.7 地動訊號處理流程	2-16
圖 2.8 地動事件特徵值分布	2-22
圖 2.9 短週期地震儀訓練樣本特徵值分布	2-23
圖 2.10 決策樹演算法架構示意圖	2-25
圖 2.11 隨機森林演算法架構示意圖	2-26
圖 2.12 5-fold Cross Validation 示意圖	2-27
圖 2.13 地動訊號分類器建置與應用	2-30
圖 2.14 CrazyTremor 執行崩塌地動訊號定位之操作介面	2-32
圖 2.15 雨場切割與降雨參數計算示意圖	2-33
圖 2.16 常見的雙參數雨量門檻曲線	2-35
圖 2.17 桶狀模式概念	2-38
圖 2.18 桶狀模式參數	2-38
圖 2.19 高屏河流域之流量站與雨量站分布圖	2-40

圖 2.20 桶狀模式之計算與參數擬合程式.....	2-41
圖 2.21 旗山溪 2010 年至 2018 年觀測流深與桶狀模式預測流深	2-43
圖 2.22 荖濃溪、濁口溪及隘寮溪觀測流深與桶狀模式預測流深	2-44
圖 2.23 2019 年各集水區域測流深與觀測流深.....	2-46
圖 2.24 荖濃溪參數與日本參數預測流深的比較.....	2-47
圖 3.1 WTP 短週期地震儀測站成功分類之崩塌事件 1	3-7
圖 3.2 ALS 短週期地震儀測站成功分類之崩塌事件 1.....	3-8
圖 3.3 MASB 寬頻地震儀測站成功分類之崩塌事件 2.....	3-9
圖 3.4 SLG 寬頻地震儀測站成功分類之崩塌事件 2.....	3-10
圖 3.5 TPUB 寬頻地震儀測站成功分類之崩塌事件 3.....	3-11
圖 3.6 ELD 寬頻地震儀測站成功分類之崩塌事件 3	3-12
圖 3.7 ELD 短週期地震儀測站成功分類之崩塌事件 3	3-13
圖 3.8 ALS 短週期地震儀測站錯誤分類之崩塌事件 1.....	3-14
圖 3.9 CHN5 短週期地震儀測站錯誤分類之崩塌事件 1.....	3-15
圖 3.10 寬頻地震儀 24 項特徵值分類效能比較.....	3-17
圖 3.11 寬頻地震儀特徵值分類效能疊加分析.....	3-17
圖 3.12 短週期地震儀 18 項特徵值分類效能比較.....	3-18
圖 3.13 短週期地震儀特徵值分類效能疊加分析.....	3-18
圖 3.14 具崩塌特徵地動訊號偵測及配對成功範例.....	3-20
圖 3.15 79 起配對成功之具有崩塌特徵地動事件定位結果.....	3-21
圖 4.1 高屏河流域鄰近寬頻地震網分布.....	4-2
圖 4.2 高屏河流域鄰近井下地震網分布.....	4-4
圖 4.3 高屏河流域鄰近 Smart24 地震網分布	4-6
圖 4.4 高屏河流域高潛勢大規模崩塌優先辦理分布.....	4-10

圖 5.1	52 處流域內崩塌分布圖	5-4
圖 5.2	崩塌事件之降雨延時統計	5-5
圖 5.3	崩塌事件之累積雨量統計	5-7
圖 5.4	崩塌事件之降雨強度統計	5-8
圖 5.5	I-D 降雨門檻	5-10
圖 5.6	小林崩塌數值分析剖面	5-10
圖 5.7	數值模擬帶入之設計雨型	5-11
圖 5.8	R_e -D 降雨門檻	5-14
圖 5.9	I- R_e 降雨門檻	5-15
圖 5.10	引發大規模崩塌之土壤水分指數及三桶水深的數量統計	5-17
圖 5.11	土壤雨量指數與各桶水深深度之分布	5-18
圖 5.12	旗山溪流域內 2009 年崩塌發生時間與水位變化紀錄的關係	5-21
圖 5.13	荖濃溪流域內 2015 年崩塌發生時間與水位變化紀錄的關係	5-22
圖 5.14	隘寮溪流域內 2009 年崩塌發生時間與水位變化紀錄的關係	5-23
圖 5.15	高屏溪流域崩塌分布圖	5-25
圖 5.16	歷史崩塌案例雨量組體圖	5-26
圖 A.1	KP201201 崩塌地動訊號	附錄-15
圖 A.2	KP201302 崩塌地動訊號	附錄-16
圖 A.3	KP201303 崩塌地動訊號	附錄-17
圖 A.4	KP201304 崩塌地動訊號	附錄-18
圖 A.5	KP201305 崩塌地動訊號	附錄-19
圖 A.6	KP201406 崩塌地動訊號	附錄-20
圖 A.7	KP201407 崩塌地動訊號	附錄-21
圖 A.8	KP201408 崩塌地動訊號	附錄-22

圖 A.9 KP201409 崩塌地動訊號	附錄-23
圖 A.10 KP201410 崩塌地動訊號	附錄-24
圖 A.11 KP201511 崩塌地動訊號	附錄-25
圖 A.12 KP201512 崩塌地動訊號	附錄-26
圖 A.13 KP201513 崩塌地動訊號	附錄-27
圖 A.14 KP201514 崩塌地動訊號	附錄-28
圖 A.15 KP201515 崩塌地動訊號	附錄-29

第一章 前言

第一節 背景說明

崩塌為一種常見的地質災害，當坡地上不穩定的地質材料受到如降雨事件、地震事件或人為開發活動影響時，便容易誘發坡地塊體崩塌(Chang et al., 2007; Huang et al., 2012; Liu et al., 2018)。臺灣位於副熱帶季風氣候區，每年平均約有 4 至 5 個颱風侵襲並帶來豐沛的降雨，使臺灣丘陵地及山區的崩塌事件頻繁(Wu and Kuo, 1999; Shieh, 2000)。崩塌發生時常因難以快速得知發生時間與地點，而難以救援或發生後續災害(Chen et al., 2017; Hung et al., 2019)。

崩塌發生的確切時間點是一項相當重要但不容易獲取的資訊，近年來的研究已經指出地震儀能夠記錄下大規模塊體運動產生的地表振動(Suriñach et al., 2005; Dammeier et al., 2011; Kuo et al., 2018; Lin et al., 2020a)。透過機器學習技術分析地震儀所記錄的地動訊號，能夠自動地分類不同類型的地動事件，在前期研究中已經成功運用全國尺度的寬頻地震網建立臺灣的崩塌地動訊號自動分類器(Lin et al., 2020b)，不僅可以獲得較客觀的崩塌發生時間資訊，也能進一步運用於分析促崩降雨條件。然而受限於地震站的密度，全國尺度的觀測網難以觀察到規模較小的崩塌，且振動來源的定位也常不易收斂獲得可靠的振源位置。因此，本年度計畫開始嘗試運用更多類型之現有地震站，規劃集水區尺度觀測網，以及建立其崩塌地動訊號自動分類器，並將歷史崩塌地動訊號偵測結果應用於分析區域型促崩降雨門檻。

第二節 計畫目的

前期計畫著重於全國尺度的崩塌地動訊號觀測，以及崩塌發生時間的獲取，而未針對特定區域規劃崩塌地動訊號觀測網絡並分析區域尺度的促崩雨量。由前期計畫中建立之全國尺度崩塌地動訊號自動分類器的經驗可知，僅依賴現有寬頻地震網可能受到地震站密度及分布狀況的限制，而不易偵測獲得更多的崩塌地動訊號。同時，在前期計畫中所分析之大規模崩塌促崩降雨條件已能作為大規模崩塌警戒值設立之參考，但若期望能運用於特定區域，更大量的歷史崩塌發生時間資訊就更加重要。因此，本年度計畫針對高屏流域內及鄰近的各類型地震站建立自動化崩塌地動訊號分類器，並應用分類器所辨識出的歷史崩塌資訊分析促崩降雨門檻，以建立區域尺度大規模崩塌之降雨基準值。計畫整體目標如下：

- 一、綜整高屏流域內及鄰近之地震站，歸納出集水區尺度之地震觀測網。
- 二、建置區域尺度崩塌地動訊號自動分類器，並進行自動分類器驗證。收集各尺度地表振動觀測網紀錄，進行崩塌地動訊號專家訓練，建立機器學習分類器，並驗證自動分類器之可靠度。
- 三、利用現有雨量及地表流量觀測記錄，搭配崩塌發生時間，分析區域尺度促崩水文條件。

第三節 期末檢核點

於期末階段，本計畫已完成預定進度之期末檢核點：

- 一、建置區域尺度適用於不同類型地震儀之崩塌地動訊號自動分類器。

二、將崩塌地動訊號自動分類器應用於 2012 年至 2015 年共 10 場颱風期間中央氣象局觀測之連續地動訊號紀錄，從中偵測疑似為崩塌產生之地動訊號，並將偵測結果配對及定位。

三、區域尺度崩塌促崩水文條件分析。

第四節 前期研究及相關文獻回顧

一、地震事件及崩塌事件產生的地動訊號特徵

Burtin et al. (2016)討論了不同類型事件於地動訊號紀錄上的差異，地質構造產生的天然地震具有以下特徵(圖 1.1)：(1)時間域波形上有明顯的 P 波及 S 波的區分，甚至能夠觀察到體波及表面波的差異；(2)地動訊號的頻率帶較寬，同時具有高頻訊號及低頻訊號；(3)時頻圖上能量分佈成直角三角形，高頻率能量由於頻散而快速衰減。

崩塌塊體在邊坡上的運動過程中會產生地表振動，並且能夠被周遭鄰近的地震測站有效記錄，因此地動訊號的分析已被廣泛應用於邊坡塊體運動的研究。Suriñach et al. (2005)將雪崩事件的地動訊號繪製成時頻圖後，發現其時頻圖中能夠觀察到三角形的高能量區塊(圖 1.2)；而 Dammeier et al. (2011)在山崩事件的時頻圖也觀察到類似的三角形特徵(圖 1.3)。經過許多前人研究的經驗整合，山崩事件產生的地動訊號可被歸納具有下列特徵：(1)無明顯 P 波及 S 波的區分；(2)波形呈現雪茄型(Suriñach et al., 2005; Dammeier et al., 2011; Lin et al., 2020b)。

對於崩塌訊號在不同頻率段的能量來源，Huang et al. (2007)及 Schneider et al. (2010)認為崩塌塊體內部顆粒的撞擊或摩擦會產生頻率數赫茲到數十赫茲的較高頻震波，而 Kanamori and Given (1982)及 Eissler and Kanamori (1987)認為崩塌塊體在坡面上加速及減速的過程，會產生週期數十到數百秒

的長週期震波。在 2009 年莫拉克颱風過後，Lin et al. (2010)使用全臺的寬頻測站資料，以週期 20~50 秒的長週期訊號，成功判釋並定位出 52 處位於陸上的崩塌地；Kao et al. (2012)則是使用 0.5~5 Hz 做為判釋崩塌的主要頻帶。Lin et al. (2020a)以 1~5 Hz 做為判釋崩塌的主要頻帶，從臺灣寬頻地震網紀錄中偵測出 89 處大規模崩塌。

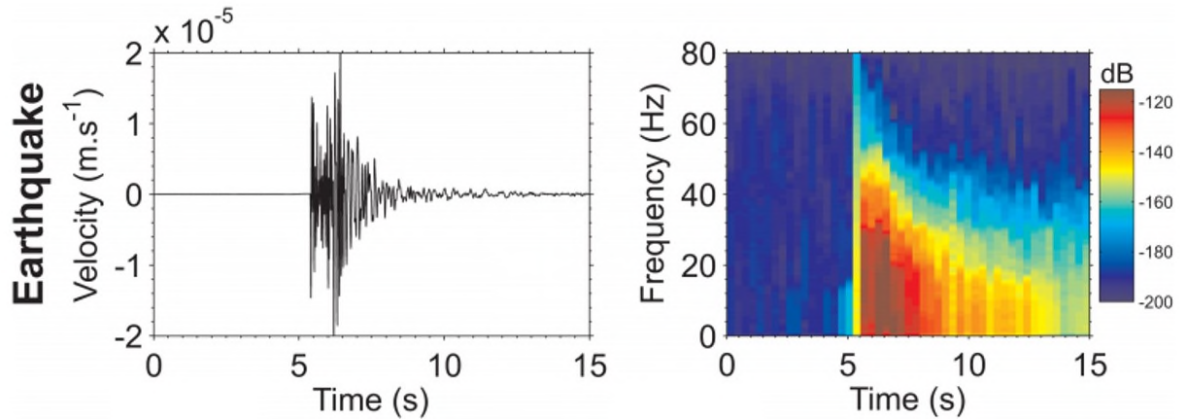


圖 1.1 地震事件地動訊號圖(Burtin et al., 2016)

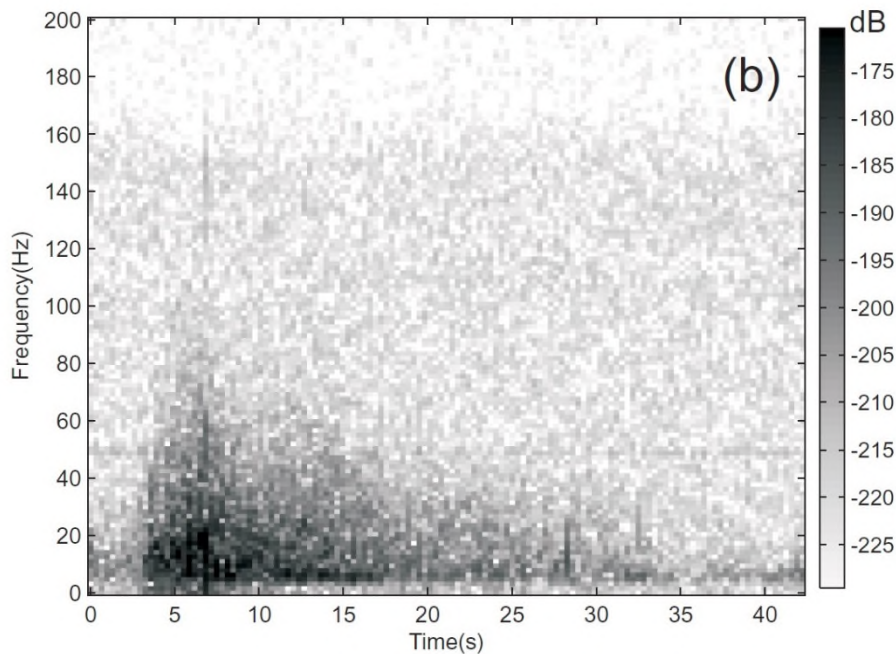


圖 1.2 雪崩事件時頻圖(Suriñach et al., 2005)

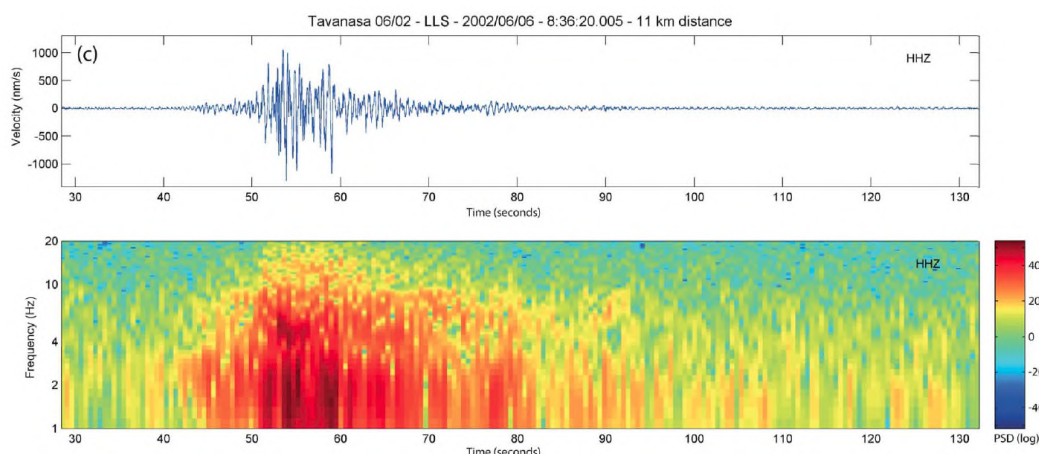


圖 1.3 山崩事件時頻圖(Dammeier et al., 2011)

二、機器學習演算法在地動訊號分析上的應用

對於崩塌、火山活動及人為爆破等地動事件的監測，地表振動觀測是一種非常有利的工具。但由於地動事件及噪訊的種類繁多，在建立可靠的自動分類器前，事件的偵測多仰賴人工判釋的方式，往往需要耗費大量的時間，且判釋結果受制於判釋者的經驗及主觀判斷。利用機器學習技術建立地動訊號的自動分類器能夠有效減少人工判釋的不確定性及工作量，對於崩塌地動事件的偵測提供了應用價值。然而，若要將機器學習技術應用於即時監測，過大的訊號特徵值運算量會使計算時間過長，因此常採用降維度的方法找出具有較佳辨識度的特徵值，以減少分類器的運算量。地動訊號自動分類器的相關研究彙整如表 1.1。

表 1.1 地動訊號自動分類器相關研究(依年度排序)

作者	年份	事件類型	演算法	正確度
Tian and Wang	2002	兩種軍事車輛	k-NN	90%
Del Pezzo et al.	2003	火山活動、 水下爆破	Neural Networks	91%
Scarpetta et al.	2005	火山構造地震、 水下爆破、 石灰岩礦場爆破、火 山岩屑礦場爆破、 閃電	Neural Networks	94%
Esposito et al.	2006	火山活動、崩塌、 微震	Neural Networks	97%
Benítez et al.	2007	長週期事件、 火山構造地震、 火山微震、 綜合型事件、噪訊	HMM	90%
Kortström et al.	2016	地震、礦場爆破	SVM	94%
Provost et al.	2017	邊坡內部破裂、 落石、地震、 人為噪訊	Random Forest	93%
Parihar et al.	2018	地震、噪訊	k-NN ML SVM	87% 86% 99%

作者	年份	事件類型	演算法	正確度
			ANN	88%
吳昱杰	2018	崩塌、地震、噪訊	SVM	98.1%
Lin et al.	2020	崩塌、地震、噪訊	Random Forest	91.3%

三、與前期計畫之崩塌地動訊號分類器的比較

前期計畫建立機器學習於地動訊號分類應用之範例流程，其使用隨機森林(Random Forest)演算法作為分類器的基礎，運用分類器對崩塌、地震及噪訊等三種類別的地動訊號加以分類。計畫成果已經發表於 Applied Sciences 學術期刊(SCI)(Lin et al., 2020a)。

在前期計畫中採用了 9 種時間域特徵值，分別為 MA 之平均值、MA 之標準差、MA 最大值與平均值之比值、MA 標準差與平均值之比值、SI 之平均值、SI 之標準差、SI 最大值與平均值之比值、SI 標準差與平均值之比值及地動訊號本身之平均振幅，9 種時間域特徵值分類效果良好，因此本年度計畫沿用所有時間域特徵值。

頻率域特徵值的部分，前期計畫使用了 15 種頻率域特徵值，分別計算了 7 個不同頻帶上的功率譜密度(Power Spectral Density, PSD)、5 組不同頻帶的 PSD 比值(Ratio of Power Spectral Density, RPSD)及能量集中頻率等共 15 種特徵值。由於前期計畫中僅使用臺灣寬頻地震網(Broadband Array in Taiwan for Seismology, BATS)提供之連續地動訊號紀錄，而本年度計畫有使用中央氣象局 Smart24 地震網(CWB_SMT)及中央氣象局井下地震網(CWB_BH)提供之連續地動訊號紀錄。考慮各個地震網使用的是不同的儀器，因此本年度針對寬頻地震儀計算了 3 個不同頻帶的 PSD，分別為 0.01-0.1 赫

茲、0.1-1 赫茲及 1-8 赫茲，並分別計算不同頻率段之間的 RPSD，還加以考慮線性及對數兩種不同的情況，針對短週期地震儀計算了 2 個不同頻段的 PSD，分別為 1-5 赫茲及 5-8 赫茲，同樣也計算了不同頻率段之間的 RPSD 及分別考慮線性及對數的情況，兩種儀器皆沿用前期計畫採用的能量集中頻率，最後本年度計畫使用於寬頻地震儀及短週期地震儀的頻率域特徵值數目分別為 15 種及 9 種。

在前期計畫中，藉由連續計算每 5 分鐘時間窗格內的特徵值，再輸入到分類器中獲得分類結果。本年度計畫則重新規劃事件的偵測流程，採用傳統的短窗格平均與長窗格平均之比值先偵測地動事件訊號的開始與結束，接著定義涵蓋地動事件訊號的 5 分鐘偵測時間窗格，後續計算偵測窗格內的特徵值並輸入分類器獲得分類結果。兩期研究的整體差異如表 1.2 所示。

表 1.2 本計畫與 Lin et al., 2020a 研究內容之比較

		本計畫	Lin et al., 2020a
訓練樣本種類		崩塌、地震及噪訊	
地動訊號來源		BATS、CWB-BH、 CWB-SMT	BATS
研究區域		高屏溪流域	台灣本島
訓練樣本數	寬頻	崩塌：215 地震：215 噪訊：215	崩塌：214 地震：214 噪訊：214
	短週期	崩塌：251 地震：251 噪訊：251	

		本計畫	Lin et al., 2020a
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	依照固定時間間隔劃分 5 分鐘偵測時間窗格
演算法		Random Forest	
特徵值	時間域	MA、SI 及平均振幅等共 9 種	
	頻率域	線性及對數各頻帶之 PSD、RPSD 及能量集中頻旅等 寬頻地震儀：15 種 短週期地震儀：9 種	各頻帶之 PSD、RPSD 及能量集中頻率等共 15 種
分類器正確度		寬頻地震儀：98.29% 短週期地震儀：97.21%	91.3%

四、促崩雨量分析

崩塌降雨因子統計分析是現今最常被應用於探討促崩條件之方法。Caine (1980)首次針對世界上 73 處山崩資料進行促崩降雨分析，其探討了降雨強度(I)及降雨延時(D)兩個因子得到 $I-D$ 關係曲線($I = 14.82 D^{-0.39}$)，並將此曲線應於山崩發生的降雨門檻。Keefner et al. (1987)參考 Caine 的方法，額外加入累積雨量(R)因子，建立適用於舊金山灣區崩塌雨量預警系統，並且成功地預警了幾次山崩事件。Saito et al. (2010)使用了 $I-D$ 法分析日本地區 2006 年至 2008 年間發生的崩塌事件，得出降雨門檻公式為 $I = 2.18 D^{-0.26}$ ，此外該文獻還使用了年平均降雨量(MAP)對降雨量進行常態化來與世界上其他區域做比較，結果顯示日本地區的地質條件較其他地區易發生坡地災害。Chen et al. (2015)使用 2006 年至 2012 年發生於台灣地區 263 處坡地災害事件進行降雨門檻分析，得到的 $I-D$ 降雨門檻公式為 $I =$

$18.10D^{-0.17}$ ，此門檻高於世界上其他地區之門檻值，若以年平均降雨量進行常態化，台灣地區之門檻值亦是高於其他地區，該結果與台灣地區雨量充沛有關。此外在喜馬拉雅山區，Dahal & Hasegawa (2008)使用 55 年的長期紀錄，分析結果顯示本區域崩塌多發生於長時間($D > 100$ hours)的累積降雨，僅少數事件發生於短延時($D < 10$ hours)的強降雨($I > 12$ mm/hr)條件下。余姿瑩(2019)使用 2001 年至 2016 年發生於台灣地區之大規模崩塌案例，進行促崩降雨分析，除了常使用的時序列雨量法，該研究還提出無因次雨量法進行分析，基於邊坡穩定分析的安全係數衍伸無因次雨量(R/D)及無因次坡度(Φ/Θ)兩項參數來說明邊坡材料之條件，得到之單一新生崩塌臨界發生雨量公式為 $R = (0.16956 \frac{\Phi}{\Theta} - 0.0394)D$ ，應用於歷史大規模崩塌案例具有良好成效。水土保持局「潛在大規模崩塌區影響範圍調查劃設及堰塞湖災害潛勢技術評估」便嘗試採用無因次雨量法作為建置大規模崩塌警戒值之方法。

除上述崩塌雨量統計法之外，菅原正巳(1972)提出桶狀模式，利用多層桶模擬雨水經歷入滲、滲透及出滲成為地表逕流的水文過程，使用 3 桶水的變化來推估河川的逕流模式。在桶狀模式中，殘留於桶內的雨量總和可以視作儲存於土壤內的雨水，並將此定義為土壤雨量指數(SWI)。岡田憲治(2002)分析不同土壤參數對於桶狀雨量模型的影響，發現不同成因之土壤的桶狀雨量模型差異不顯著，說明地質條件對於降雨和地表逕流間的關聯影響不大。陳樹群等人(2013)嘗試以桶狀模式來探討土壤雨量指數是否適合應用於台灣的邊坡土砂災害，並探討筒狀模式中各桶水運用於建立警戒門檻之可行性。上述有關促崩降雨分析之文獻整理於表 1.3。

表 1.3 促崩降雨分析前人研究(依年度排序)

作者	年度	相關研究
菅原正巳	1972	提出桶狀雨量模式推估河川逕流模式
Caine	1980	首位使用降雨強度(I)和降雨延時(D)建立山崩發生降雨門檻值。
Keefer et al.	1987	沿用 Caine 的方法並加入累積雨量(R)因子，建立適用於舊金山灣區之崩塌預警系統。
岡田憲治	2002	分析不同土質對土壤雨量指數的影響，發現不同地質條件對地表逕流影響不顯著。
Dahal & Hasegawa	2008	統計喜馬拉雅山區崩塌雨量資料，發現崩塌多發生於長時間降雨($D > 100$ hr)的狀況。
Saito et al.	2010	以 I - D 法分析 2006 年至 2008 年發生於日本地區的山崩事件，並考慮年平均降雨量對雨量值進行常態化。
陳樹群等人	2013	將桶狀雨量模型用以探討邊坡災害和土壤雨量指數的關係。
Chen et al.	2015	沿用 H. Saito 的方法分析台灣地區的崩塌事件，發現台灣地區的門檻值高於世界其他地區。
余姿瑩	2019	基於邊坡穩定分析的安全係數衍伸無因次雨量(R/D)及無因次坡度(Φ/θ)兩項參數來建立大規模崩塌無因次降雨崩塌門檻。

第二章 研究方法

第一節 高屏河流域描述

高屏河流域位於臺灣西南部，發源於中央山脈玉山附近，流經高雄市及屏東縣，為臺灣南部主要河川之一，全長約為 171 公里，集水面積約為 3,257 平方公里，主要支流涵蓋荖濃溪、旗山溪、濁口溪及隘寮溪等。高屏河流域乾濕季分明，平均年降雨量達到 2,454 毫米，雨季為每年 5 月至 10 月，梅雨及夏季颱風的豪大雨為主要的水源。由於降雨之時空分布及不平均，使高屏河流域內流量差異顯著，年平均日流量約為每秒 234 立方公尺，而年逕流量約為 74.08 億立方公尺。流域地勢由東北向西南傾斜遞減，最大高程及平均高程分別為 3,845 及 1,044 公尺，流域內平均坡度約為 20 度，流域內主要地層為潮州層、畢祿山層、長枝坑層及現代沖積層等，岩性則多為破碎的板岩及砂頁岩互層。

第二節 地動訊號來源與地震測站分布

為了利用現有地震站規劃高屏河流域之崩塌地動訊號觀測網絡，本計畫依地理位置選擇位於流域內及鄰近之地震站。現有可使用之地震站數量為 27 站，其所屬地震網分別為臺灣寬頻地震網(BATS)、中央氣象局井下地震網(CWB_BH)及 Smart24 地震網(CWB_SMT)。測站基本資訊整理於表 2.1，地震站分布狀況如圖 2.1 所示。

表 2.1 本計畫使用 27 座地震站資訊

測站名稱	地震網	管理單位	經度	緯度
ALS	BATS	CWB	120.8134	23.5083
ELD	BATS	CWB	121.0250	23.1871
SCZ	BATS	CWB	120.6282	22.3703
MASB	BATS	IES	120.6327	22.6119
TPUB	BATS	IES	120.6296	23.3005
TWGB	BATS	IES	121.0799	22.8176
ECL	CWB_BH	CWB	120.9617	22.5958
LONT	CWB_BH	CWB	121.1299	22.9064
SCS	CWB_BH	CWB	120.4938	22.8856
SLG	CWB_BH	CWB	120.6463	22.9934
SMG	CWB_BH	CWB	120.6448	22.7054
SSP	CWB_BH	CWB	120.5681	22.4835
ALS	CWB_SMT	CWB	120.8134	23.5083
CHN1	CWB_SMT	CWB	120.5285	23.1850
CHN5	CWB_SMT	CWB	120.6776	23.5973
EAS	CWB_SMT	CWB	120.8564	22.3820
ECL	CWB_SMT	CWB	120.9617	22.5958
ELD	CWB_SMT	CWB	121.0250	23.1871
SCZ	CWB_SMT	CWB	120.6282	22.3703
SGS	CWB_SMT	CWB	120.5908	23.0804
SSD	CWB_SMT	CWB	120.6402	22.7443
STY	CWB_SMT	CWB	120.7655	23.1608

測站名稱	地震網	管理單位	經度	緯度
TWG	CWB_SMT	CWB	121.0799	22.8177
TWL	CWB_SMT	CWB	120.4999	23.2648
TWM1	CWB_SMT	CWB	120.4306	22.8214
WTP	CWB_SMT	CWB	120.6223	23.2438
YUS	CWB_SMT	CWB	120.9500	23.4833

註：IES 表示為中央研究院地球科學所，CWB 表示為中央氣象局。

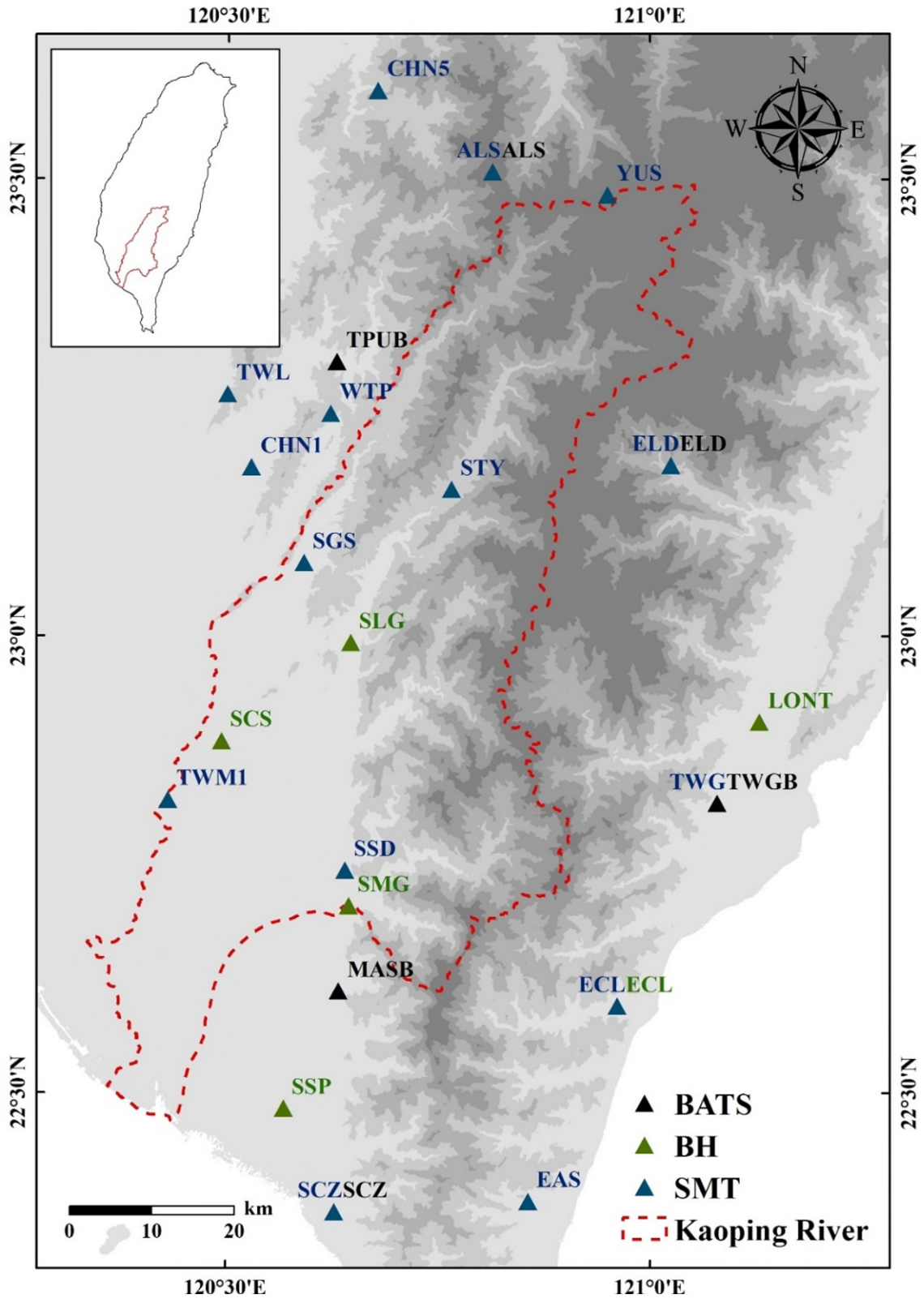


圖 2.1 高屏河流域內及鄰近地震站分布

第三節 地動事件偵測

本計畫在地動事件偵測方面採用被廣泛使用的短窗格平均與長窗格平均之比值(Short Time Average over Long Time Average, STA/LTA)做基準。由於台灣地區背景噪訊較為複雜，因此本計畫使用之 STA/LTA 事件訊號偵測包含時間域及頻率域 2 階段偵測。第一階段為時間域地動訊號偵測，短窗格與長窗格分別為 3 秒及 10 秒，事件開始之定義為連續 5 秒 STA/LTA 值大於 1.25，而事件結束定義為連續 3 秒之 STA/LTA 值小於 1，地動事件的持續時間限制於 10 至 240 秒。第二階段針對頻率域地動訊號偵測，能量計算頻率段為 1-5 赫茲，短窗格與長窗格同為 3 秒及 10 秒，事件開始之定義為連續 1 秒 STA/LTA 值大於 1.75，而事件結束定義為連續 3 秒 STA/LTA 值小於 1，地動事件的持續時間限制同為 10 至 240 秒。本計畫使用時間域及頻率域二階段之偵測方法能夠有效辨識出於時間域及頻率域皆有訊號特徵之地動事件訊號，能夠減少後續大量計算訊號特徵值所花費的時間。圖 2.2 及圖 2.3 為本計畫於 MASB 測站及 SGSB 測站成功偵測小林村崩塌事件地動訊號之範例。

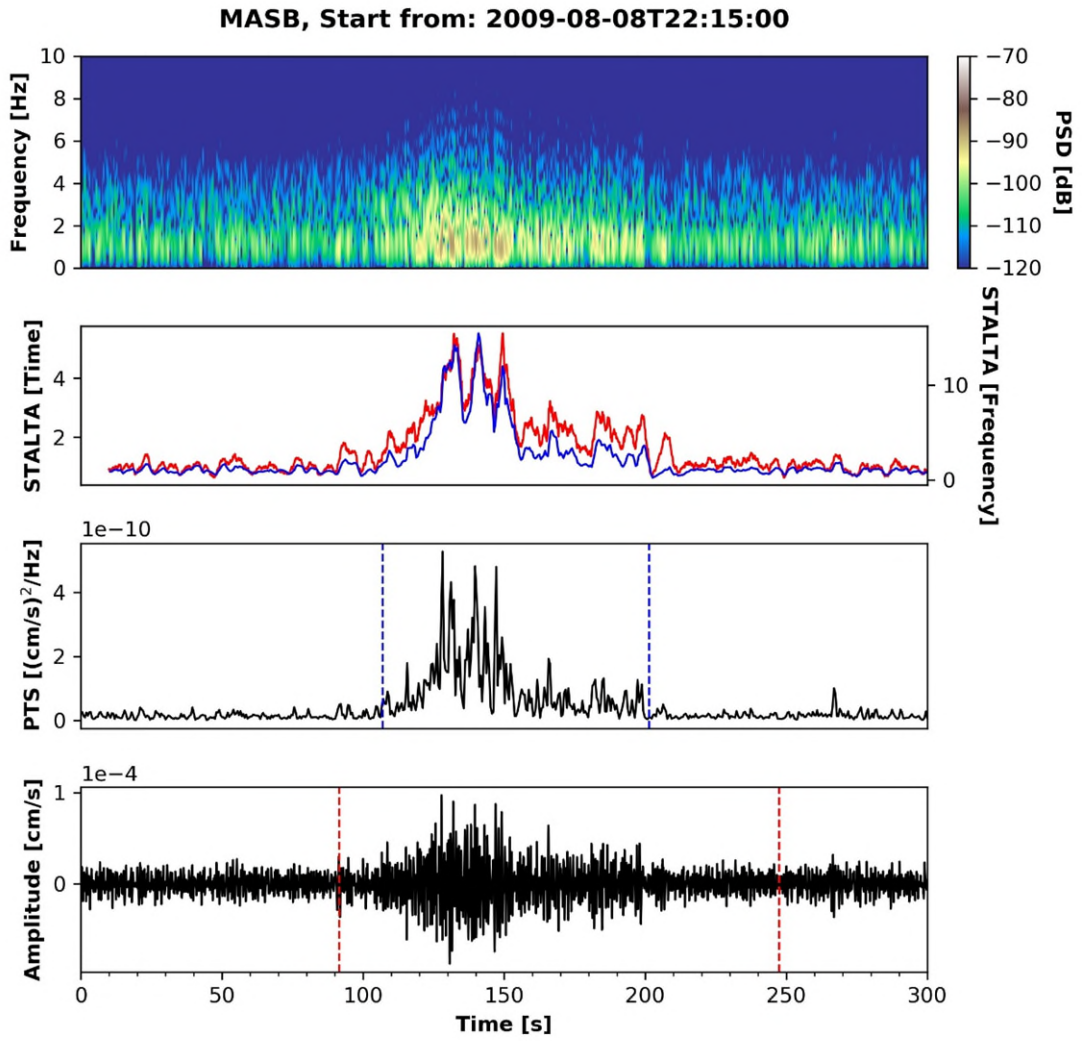


圖 2.2 MASB 測站 STA/LTA 小林村崩塌事件偵測

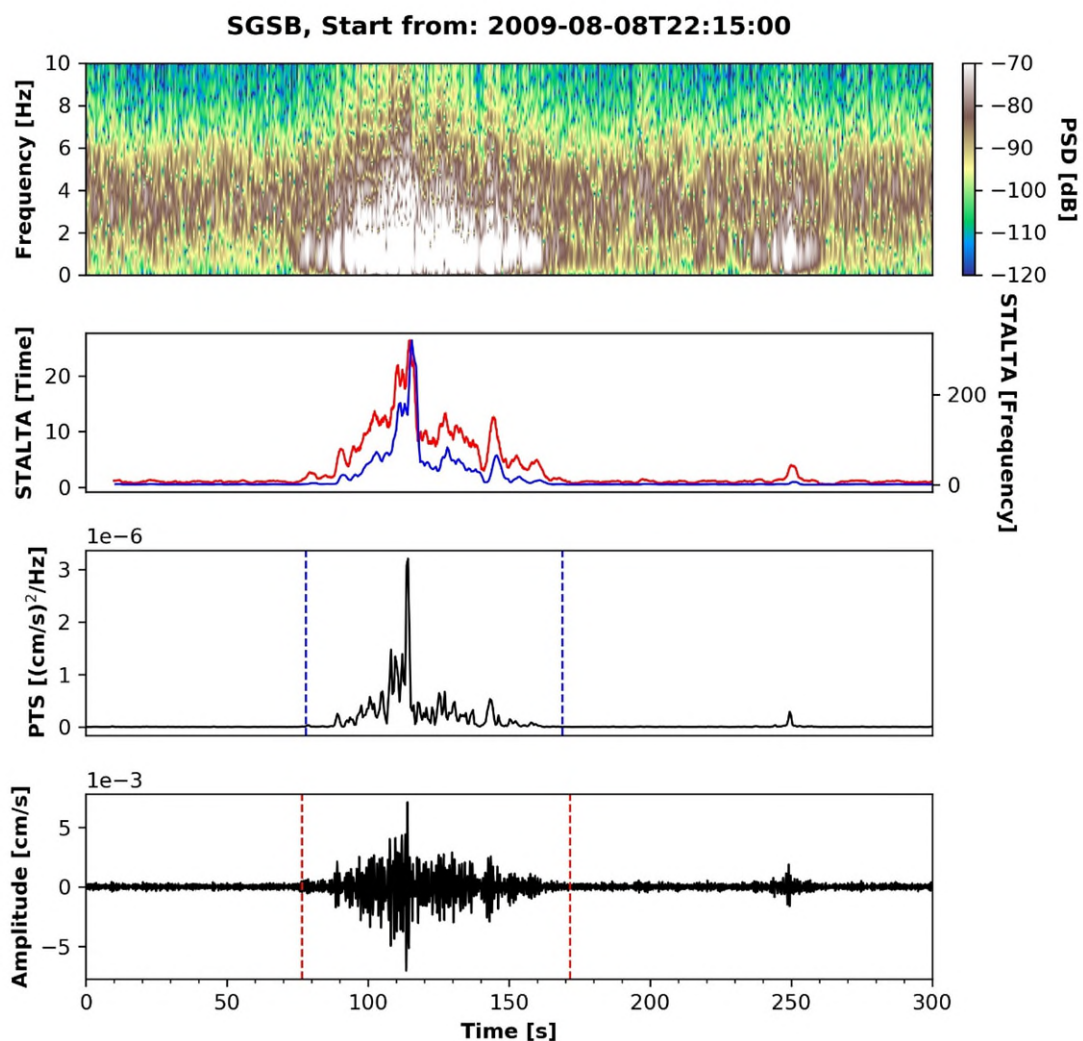


圖 2.3 SGSB 測站 STA/LTA 小林村崩塌事件偵測

第四節 分類器訓練樣本及訊號特徵值

一、分類器訓練樣本

建構自動分類器需要有足夠數量且具代表性的地動事件來做為訓練樣本，因此本計畫先蒐集整理具有代表性的地動事件樣本。近年對臺灣南部山區坡地產生較大影響的颱風事件主要為 2009 年莫拉克颱風，以及 2015 年蘇迪勒颱風。因此，本研究針對這兩次颱風期間的連續地動記錄先進行地動事件的 STA/LTA 偵測，再透過人工判釋尋找訓練樣本。最終挑選出 251 筆

具有崩塌地動訊號特徵之 5 分鐘地動紀錄作為崩塌事件的訓練樣本，其中有 36 筆樣本來自短週期地震儀。考慮儀器對於低頻訊號敏感度的差異，將訓練樣本分為二資料集，一為扣除短週期地震儀之樣本，僅使用 215 筆樣本來製作適用於寬頻地震儀之地動訊號分類器，一為使用全部 251 筆樣本來製作適用於短週期地震儀之地動訊號分類器，相關資訊整理於附錄一。

為了公平反映分類器對不同類型地動事件的分類效果，在製作分類器的過程中需要使用數量相近的不同類型訓練樣本，因此參考中央氣象局公布的區域地震時間點，從兩場颱風影響期間挑選出 215 筆及 36 筆分別來自寬頻地震儀及短週期地震儀之地震地動訊號作為地震訓練樣本，相關資訊整理於附錄二。此外，背景噪訊樣本為人工隨機挑選分別來自寬頻地震儀 215 筆及短週期地震儀 36 筆。最終使用 3 種不同類型地動事件共 645 筆訓練樣本來製作適用於寬頻地震儀之分類器，而適用於短週期地震儀之分類器共使用 753 筆 3 種不同類型之地動事件樣本。每筆訓練樣本的訊號長度均為 5 分鐘，所有地動訊號訓練樣本在計算特徵值前皆會先進行移除平均、移除趨勢及去儀器響應等訊號前處理，接著分別計算時間域及頻率域的特徵值。Kao et al. (2006)指出頻率段 1-5 赫茲能夠較清楚的觀察到崩塌事件產生的地動訊號，因此本計畫時間域之特徵值在計算前會採用四階巴特沃斯帶通濾波器進行 1-5 赫茲濾波。

二、時間域特徵值

Kao et al. (2007)使用移動平均(Moving Average, MA)及閃爍指數(Scintillation Index, SI)兩種時間域特徵值來量化地動訊號波形隨時間的變化，並成功對週期性微震及滑坡事件(Episodic Tremor and Slip, ETS)進行自動監測。

1. 移動平均(MA)

移動平均的目的是對地動訊號進行平滑化，使其能夠反映訊號整體隨時間的變化趨勢。該項特徵值雖無法反映出地動事件之物理量規模，卻能反映地動事件隨時間的振動能量演變。在計算移動平均前，先將地動訊號之振幅取絕對值，接著除以 5 分鐘時間窗格內前 8 個最大值的平均值作標準化，然後再放大 10 倍。標準化的目的在於減少訊號內異常值造成的影響。本計畫計算每一時間窗格內訊號振幅絕對值的平均值，作為計算窗格中央時間點之數值。移動平均的計算方式如下：

$$i\mu_{|y|} = \left(\sum_{j=i-\frac{N-1}{2}}^{j=i+\frac{N-1}{2}} |y(j)| \right) / N \quad \text{式(2.1)}$$

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。一般來說，時間窗格的長度必須能夠完整反映出波形的變化趨勢，因此本計畫使用的計算窗格長度為 60 秒，而訊號採樣率為 20 赫茲，即每個計算窗格內有 1200 個資料點。

地震、崩塌及噪訊等三種類型地動事件之移動平均範例計算如圖 2.4 所示，噪訊本身的地動訊號由於起伏不明顯，因此整段訊號的移動平均數值較大；而在地震及崩塌地動訊號的部分，由於有明顯的事件訊號段，因此除了事件本身的波段，其餘背景噪訊段的移動平均數值皆會被壓低。

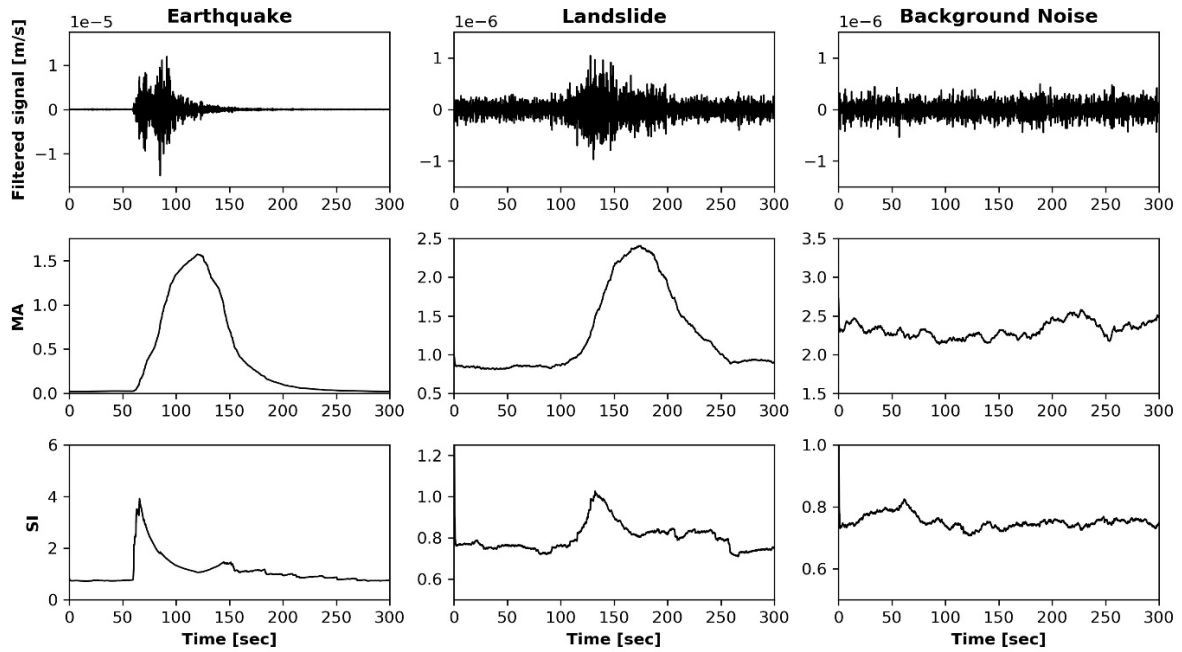


圖 2.4 不同類型地動事件之移動平均及閃爍指數波形

將地動訊號轉換為移動平均的時間函數後，Kao et al. (2007)指出有 4 項統計指標能夠有效反映出訊號整體的變化趨勢，即是表現出在 5 分鐘地動紀錄中振動能量的分布狀況，分別為平均值(μMA)、標準差(σMA)、移動平均比(Moving Average Ration, MAR)及標準差平均值比值($\sigma MA/\mu MA$)。其計算方式如下：

$$\mu MA = \left(\sum_{i=1}^K i \mu_{|y|} \right) / K \quad \text{式(2.2)}$$

$$\sigma MA = \sqrt{\sum_{i=1}^K (|y(i)| - \mu MA)^2 / K} \quad \text{式(2.3)}$$

$$MAR = MA_{max} / \mu MA \quad \text{式(2.4)}$$

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。

2.閃爍指數(SI)

Yeh and Liu (1982)提出閃爍指數並將其用來計算電離層無線電波強度變化之指標，其後 Kao et al. (2007)將閃爍指數應用於地動訊號分析，同樣能觀察到地動訊號強度的變化。閃爍指數之數值即是訊號強度標準化變異數的平方根，當時間窗格內偵測到訊號強度改變(地動事件發生)時，閃爍指數值便會驟然上升，便能反映出突發振動的時間點與相對強度。其計算方式如下：

$$SI_i = \sqrt{[(i\mu_{|y|}^2 - i\mu_{|y|}^2) / i\mu_{|y|}^2]} \quad \text{式(2.5)}$$

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。

將地動訊號轉換為閃爍指數的時間函數後，沿用描述移動平均的 4 項統計指標於描述閃爍指數，分別為平均值(μSI)、標準差(σSI)、閃爍指數比(Scintillation Index Ration, SIR)及標準差平均值比值($\sigma SI / \mu SI$)。其計算方式參考移動平均所延伸的 4 種指標。

圖 2.4 亦呈現三種類型地動事件之閃爍指數，相較於地震及崩塌，背景噪訊本身訊號沒有明顯的波動，因此計算出來的移動平均及閃爍指數的數值沒有隨著時間產生顯著的變化，導致統計指標中的標準差及移動平均比(閃爍指數比)數值偏低。

在移動平均值的部份，因為對 5 分鐘地動紀錄進行標準化， μMA 的數值會呈現 $\mu MA_{\text{噪訊}} > \mu MA_{\text{崩塌}} > \mu MA_{\text{地震}}$ 的大小關係，但在 μSI 的數值上，由於 SI 反應的是訊號強度的變化，因此會呈現 $\mu SI_{\text{地震}} > \mu SI_{\text{崩塌}} > \mu SI_{\text{噪訊}}$ 。

3. 平均振幅

除了移動平均及閃爍指數，地動訊號本身的平均振幅亦能夠反映不同事件之間能量大小的差異，因此也納入作為時間域的特徵值。

三、頻率域特徵值

除了時間域上的差異，Lin et al. (2020a)觀察到不同類型地動事件的訊號能量在不同頻率段上的分布也有差異。圖 2.5 顯示本計畫使用全部訓練樣本計算得到的 3 種不同類型地動事件的平均頻譜，從中能夠觀察到在高頻段(>1Hz)及低頻段(<0.1Hz)，地震事件的能量明顯大於崩塌事件，而在頻率段 0.1-1 Hz 之間，崩塌事件的能量有高於地震事件的現象。因此，可以透過計算單一事件在不同頻段的能量，來反映該事件之訊號能量在不同頻率段的分布，作為頻率域上的特徵值。由於本計畫所使用的地震儀取自不同的地震網，考慮不同地震網的儀器差異，最終針對寬頻地震儀及短週期地震儀計算頻率域特徵值選用的頻率段為 0.01-8 Hz 及 1-8 Hz。

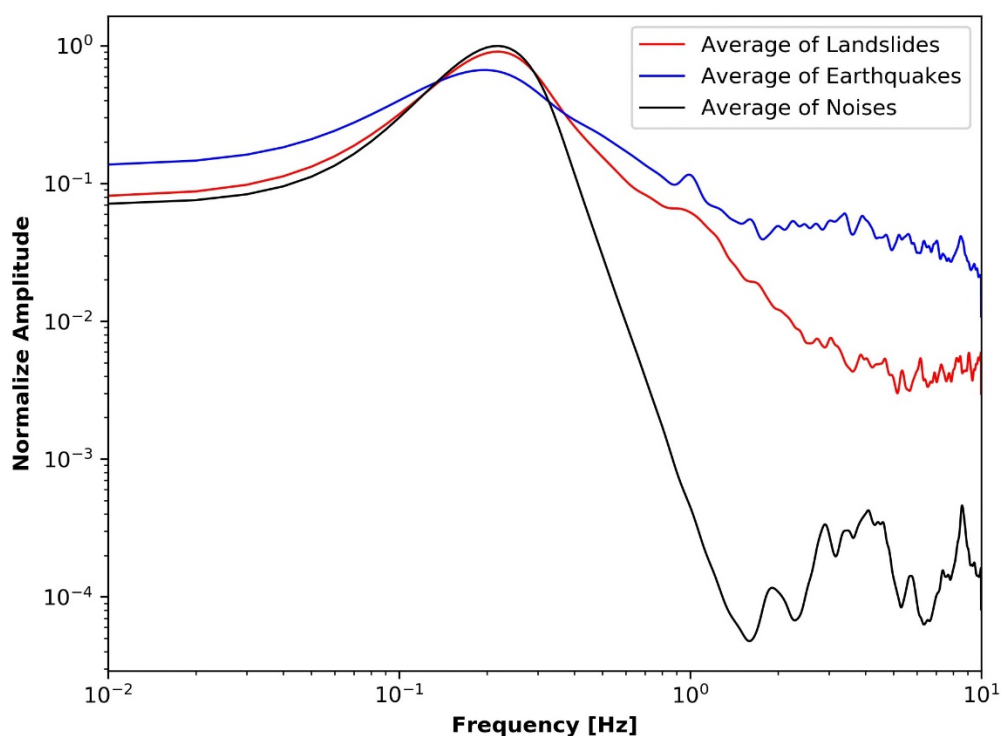


圖 2.5 不同類型地動事件平均頻譜圖

1. 功率譜密度(Power Spectral Density, PSD)

Welch (1967)提出功率譜密度，其使用快速傅立葉轉換於功率譜(Power Spectral)的計算，得到一段時間內地動記錄在頻率域上的能量分布。藉由不同類型地動事件在不同頻率段上具有能量分布的差異，便可以計算不同頻率段之功率譜密度，用來區分不同類型之地動事件。本計畫計算功率譜密度之頻率解析度為 0.01 Hz，時間窗格為 5 秒、窗格間的重疊率為 50%。為了減少事件規模大小及事件與測站間距離產生功率譜密度計算上絕對數值的差異，在計算功率譜密度後會除以最大值做標準化，因此最終得到之功率譜密度之數值為各頻率段能量相較於最大能量的比例。

本計畫分別針對寬頻地震儀及短週期地震儀計算了 3 組及 2 組頻段的功率譜密度，還加以考慮線性數值及對數數值兩種不同的條件，最終分別得到 6 組及 4 組功率譜密度，分別如下：

- (1) 0.01-0.1 Hz (線性) [寬頻地震儀]
- (2) 0.1-1 Hz (線性) [寬頻地震儀]
- (3) 1-8 Hz (線性) [寬頻地震儀]
- (4) 0.01-0.1 Hz (對數) [寬頻地震儀]
- (5) 0.1-1 Hz (對數) [寬頻地震儀]
- (6) 1-8 Hz (對數) [寬頻地震儀]
- (7) 1-5 Hz (線性) [短週期地震儀]
- (8) 5-8 Hz (線性) [短週期地震儀]
- (9) 1-5 Hz (對數) [短週期地震儀]
- (10) 5-8 Hz (對數) [短週期地震儀]

2. 功率譜密度比值(Ratio of Power Spectral Density, RPSD)

計算完各個頻段之功率譜密度後，接著計算各個頻段間功率譜密度比值作為頻率域特徵值，分別考慮儀器的不同、線性數值及對數數值兩種條件，最後分別得到 6 組及 2 組功率譜密度比值，分別如下：

- (1) 0.01-0.1 Hz (線性) / 0.1-1 Hz (線性) [寬頻地震儀]
- (2) 0.01-0.1 Hz (線性) / 1-8 Hz (線性) [寬頻地震儀]
- (3) 0.1-1 Hz (線性) / 1-8 Hz (線性) [寬頻地震儀]
- (4) 0.01-0.1 Hz (對數) / 0.1-1 Hz (對數) [寬頻地震儀]
- (5) 0.01-0.1 Hz (對數) / 1-8 Hz (對數) [寬頻地震儀]
- (6) 0.1-1 Hz (對數) / 1-8 Hz (對數) [寬頻地震儀]
- (7) 1-5 Hz (線性) / 5-8 Hz (線性) [短週期地震儀]

(8) 1-5 Hz (對數) / 5-8 Hz (對數) [短週期地震儀]

3. 能量集中範圍

Provost et al. (2018)對地動事件類型的研究中，將地動事件能量集中的頻率範圍作為判斷事件類型的參考，包含最高能頻率(F_{max})、最高頻率(F_{high})及最低頻率(F_{low})。將一段事件地動訊號進行傅立葉轉換繪製頻譜圖如圖 2.6 所示，振幅最大值對應到的頻率位置即為該事件能量最高的頻率，再由該振幅值取 0.2 倍後的數值做為門檻值(紅線)，該門檻值與頻譜圖相交的 2 個頻率位置即為該事件能量集中的最高頻率及最低頻率。其計算方式如下：

$$F_{high} = \max_F(PSD(F) < 0.2 \times \max(PSD)) \quad \text{式(2.6)}$$

$$F_{low} = \min_F(PSD(F) < 0.2 \times \max(PSD)) \quad \text{式(2.7)}$$

式中 $PSD(F)$ 代表對應到頻率 F 的功率譜密度值。

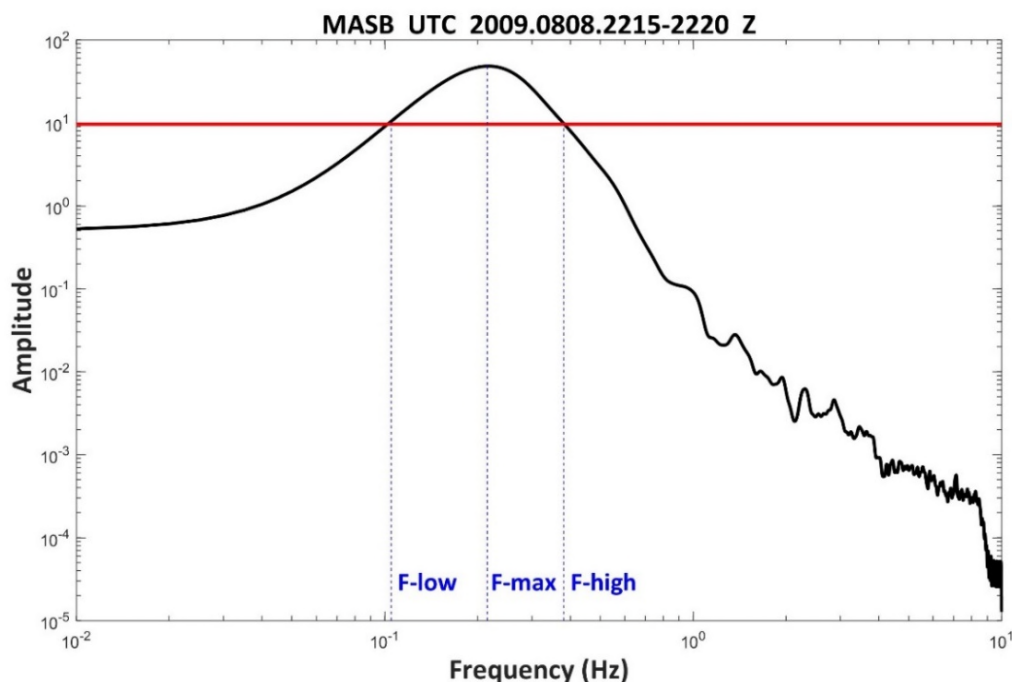


圖 2.6 地動事件能量分布之劃定

最終本計畫針對寬頻地震儀及短週期地震儀在時間域及頻率域分別使用 24 項及 18 項特徵值來描述每一個地動事件的訊號特徵(表 2.2 及表 2.3)，地動訊號處理流程如圖 2.7 所示。分別將 645 筆及 753 筆訓練樣本的 24 項及 18 項特徵值計算完後，本計畫統計了 3 種類型地動事件各項特徵值的平均值(表 2.4 及表 2.5)，並將各個特徵值分別對其最大值做標準化後觀察不同類型事件各個特徵值的分布情況(圖 2.8 及圖 2.9)，結果顯示沒有任何 1 項特徵值能夠完美區分不同地動事件，但 3 種事件的特徵值盒狀圖顯示，不同類型之事件在各個特徵值還是有一定的分布差異，透過結合多個特徵值來建立自動分類器，能夠達到更佳的分類效果。

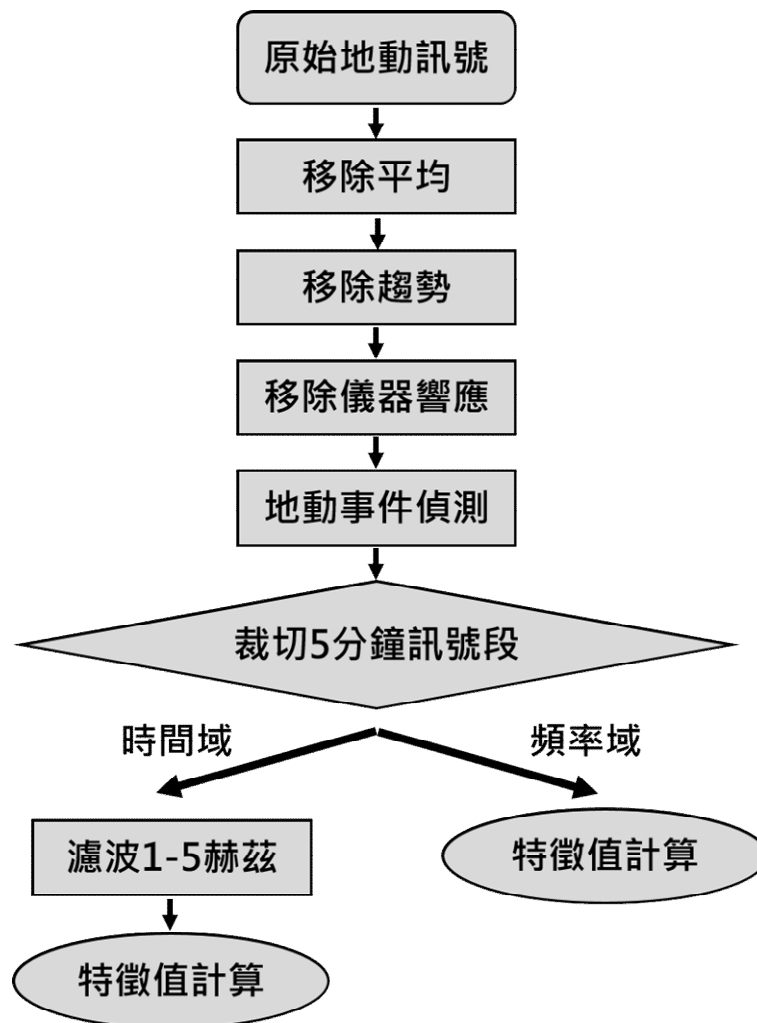


圖 2.7 地動訊號處理流程

表 2.2 寬頻地震儀 24 項訊號特徵值

時間域	頻率域
1. μ MA	10. 0.01-0.1 Hz PSD(線性)
2. σ MA	11. 0.1-1 Hz PSD(線性)
3. MAR	12. 1-8 Hz PSD(線性)
4. σ MA/ μ MA	13. 0.01-0.1 Hz / 0.1-1 Hz RPSD(線性)
5. μ SI	14. 0.01-0.1 Hz / 1-8 Hz RPSD(線性)
6. σ SI	15. 0.1-1 Hz / 1-8 Hz RPSD(線性)
7. SIR	16. 0.01-0.1 Hz PSD(對數)
8. σ SI/ μ SI	17. 0.1-1 Hz PSD(對數)
9. 平均振幅	18. 1-8 Hz PSD(對數)
	19. 0.01-0.1 Hz / 0.1-1 Hz RPSD(對數)
	20. 0.01-0.1 Hz / 1-8 Hz RPSD(對數)
	21. 0.1-1 Hz / 1-8 Hz RPSD(對數)
	22. F_max
	23. F_high
	24. F_low

表 2.3 短週期地震儀 18 項訊號特徵值

時間域	頻率域
1. μ MA	10. 1-5 Hz PSD(線性)
2. σ MA	11. 5-8 Hz PSD(線性)
3. MAR	12. 1-5 Hz / 5-8 Hz RPSD(線性)
4. σ MA/ μ MA	13. 1-5 Hz PSD(對數)
5. μ SI	14. 5-8 Hz PSD(對數)
6. σ SI	15. 1-5 Hz / 5-8 Hz RPSD(對數)
7. SIR	16. F_max
8. σ SI/ μ SI	17. F_high
9. 平均振幅	18. F_low

表 2.4 寬頻地震儀訓練樣本之 24 項特徵值平均數值

編號	特徵值	地震訓練樣本 特徵值平均值	崩塌訓練樣本 特徵值平均值	噪訊訓練樣本 特徵值平均值
1	μ MA	0.73	1.12	1.86
2	σ MA	0.27	0.35	0.20
3	MAR	2.27	1.91	1.26
4	σ MA/ μ MA	0.55	0.40	0.12
5	μ SI	0.94	0.85	0.82
6	σ SI	0.29	0.14	0.05
7	SIR	2.02	1.46	1.24
8	σ SI/ μ SI	0.28	0.15	0.06
9	平均振幅	0.07	0.11	0.18

編號	特徵值	地震訓練樣本 特徵值平均值	崩塌訓練樣本 特徵值平均值	噪訊訓練樣本 特徵值平均值
10	PSD(線性) 0.01-0.1 Hz	0.32	0.10	0.07
11	PSD(線性) 0.1-1 Hz	0.18	0.40	0.32
12	PSD(線性) 1-8 Hz	0.04	0.03	0.05
13	RPSD(線性) 0.01-0.1 / 0.1-1	1.85	0.40	0.29
14	RPSD(線性) 0.01-0.1 / 1-8	4928.70	2989.26	678.76
15	RPSD(線性) 0.1-1 / 1-8	2117.31	1733.36	1785.22
16	PSD(對數) 0.01-0.1 Hz	-0.71	-1.18	-1.26
17	PSD(對數) 0.1-1 Hz	-0.80	-0.44	-0.54
18	PSD(對數) 1-8 Hz	-3.05	-2.33	-2.89
19	RPSD(對數) 0.01-0.1 / 0.1-1	0.89	3.69	2.93
20	RPSD(對數) 0.01-0.1 / 1-8	0.56	0.71	0.81

編號	特徵值	地震訓練樣本 特徵值平均值	崩塌訓練樣本 特徵值平均值	噪訊訓練樣本 特徵值平均值
21	RPSD(對數) 0.1-1 / 1-8	0.46	0.20	0.23
22	F_max	0.18	0.22	0.22
23	F_high	0.38	0.43	0.36
24	F_low	0.05	0.08	0.08

表 2.5 短週期地震儀訓練樣本之 18 項特徵值平均數值

編號	特徵值	地震訓練樣本 特徵值平均值	崩塌訓練樣本 特徵值平均值	噪訊訓練樣本 特徵值平均值
1	μ MA	0.74	1.14	1.93
2	σ MA	0.27	0.35	0.19
3	MAR	2.24	1.87	1.24
4	σ MA/ μ MA	0.54	0.38	0.11
5	μ SI	0.94	0.85	0.81
6	σ SI	0.28	0.13	0.05
7	SIR	1.97	1.45	1.21
8	σ SI/ μ SI	0.27	0.15	0.05
9	平均振幅	0.07	0.11	0.19
10	PSD(線性) 1-5 Hz	0.06	0.04	0.09
11	PSD(線性)	0.05	0.01	0.01

編號	特徵值	地震訓練樣本 特徵值平均值	崩塌訓練樣本 特徵值平均值	噪訊訓練樣本 特徵值平均值
	5-8 Hz			
12	RPSD(線性) 1-5 / 5-8 Hz	7.48	19.32	13.52
13	PSD(對數) 1-5 Hz	-2.70	-2.07	-2.44
14	PSD(對數) 5-8 Hz	-3.07	-2.98	-3.33
15	RPSD(對數) 1-5 / 5-8	0.91	0.69	0.64
16	F_max	3.01	1.42	2.15
17	F_high	5.80	2.85	3.90
18	F_low	1.38	1.03	1.10

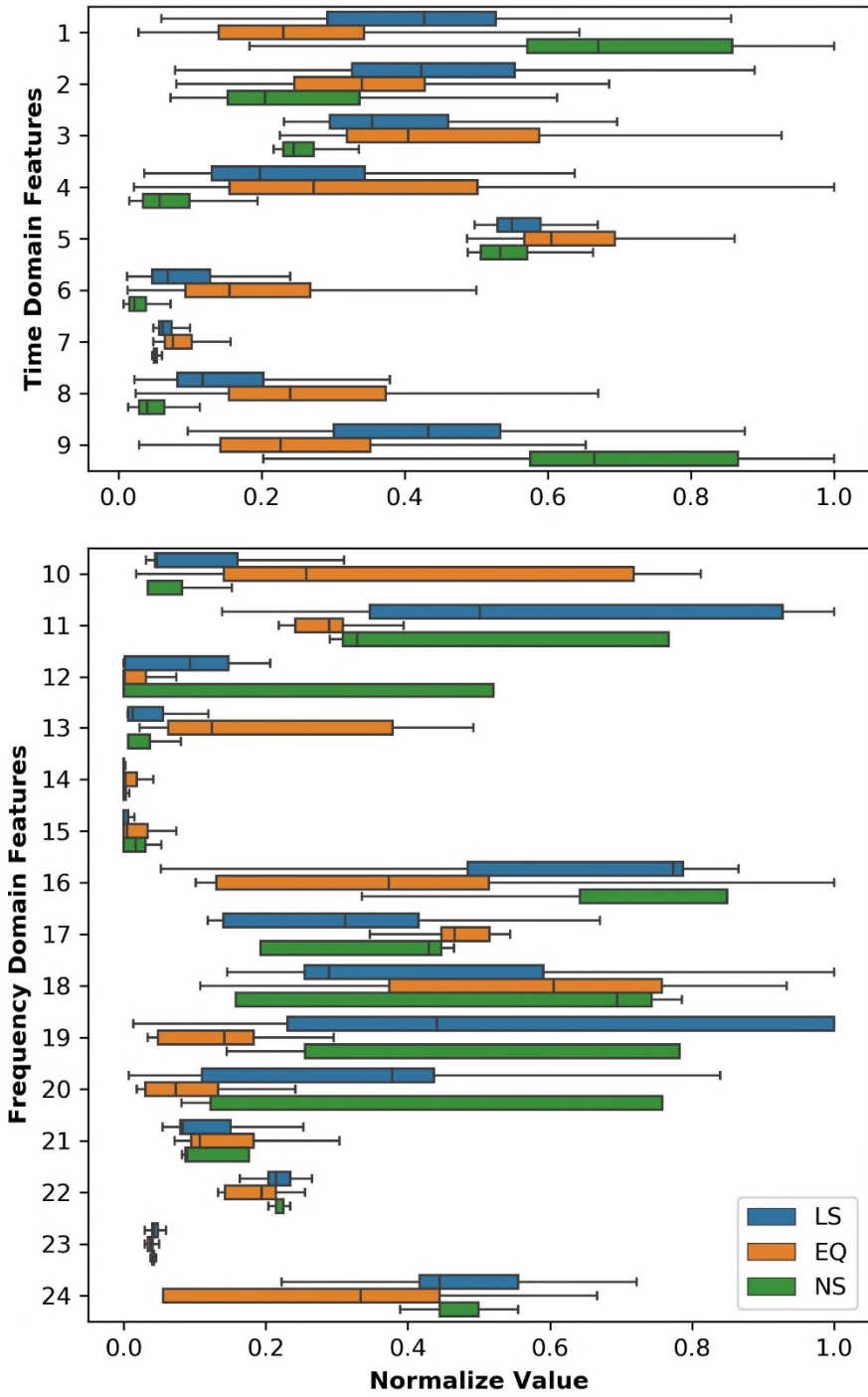


圖 2.8 地動事件特徵值分布

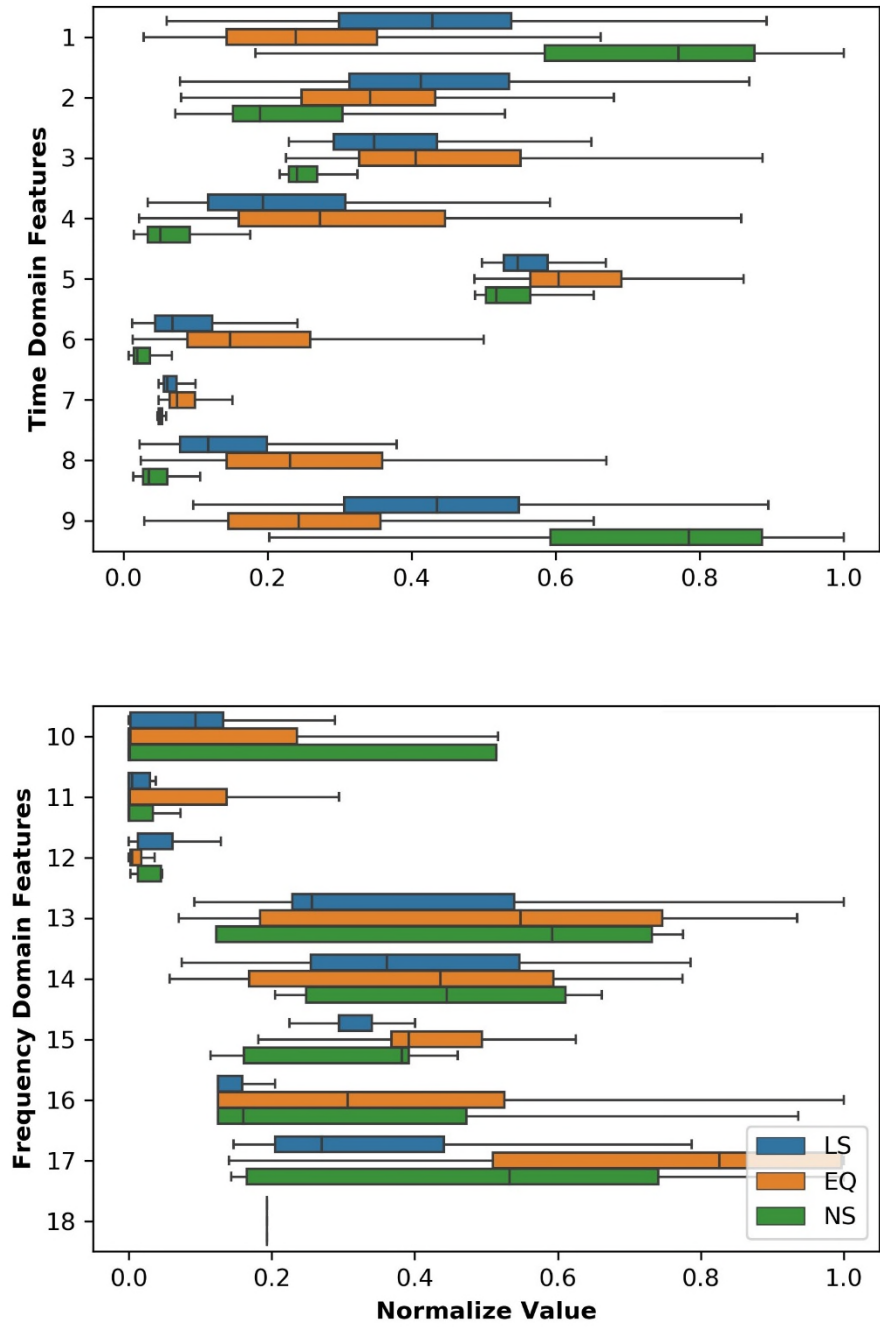


圖 2.9 短週期地震儀訓練樣本特徵值分布

第五節 自動分類器建立

一、隨機森林演算法(Random Forest)

決策樹(Decision Trees)為一種樹狀結構的監督式機器學習演算法，適用於各種分類問題(Quinlan, 1986)。決策樹會列出一系列的決策問題，將資料庫內的樣本依次分群，通過將大量資料有目的地分類，從中找到在各類樣本間最具有鑑別性的資訊。依照給定訓練樣本的各项特徵值，決策樹會遞迴地對訓練樣本進行劃分，選擇最佳的特徵值及分類門檻，使該節點延伸出的子節點內資料類別有最高的同質性。通常在決策樹架構內，位在最上層的特徵值具有最高的鑑別度，如圖 2.10 的 Feature B。通常在以下三種情況下，決策樹便不再進行分支：(1)子節點內的每筆資料都屬於同一類別、(2)子節點內只包含 1 筆資料、(3)繼續進行分支對於資料庫內同質性的改善有限，即節點內雖然有不同類別的樣本，但在各项特徵值的數據上無太大的差異。在一層一層的將訓練資料庫內的樣本做分類之後，最終目的是讓每個子集的資料全屬於同一類別或某一類占壓倒性的多數。決策樹的優點是決策階段明確且易於視覺化(圖 2.10)，缺點則是若沒有對分支層數做限制或進行後續的剪枝，很容易產生過度擬合的情況(Quinlan, 1987)。一個分類器只要夠複雜，即使資料品質不佳也能達到百分之百的分類正確度，但卻無法應用到未來資料的預測，如此便是所謂的過度擬合。

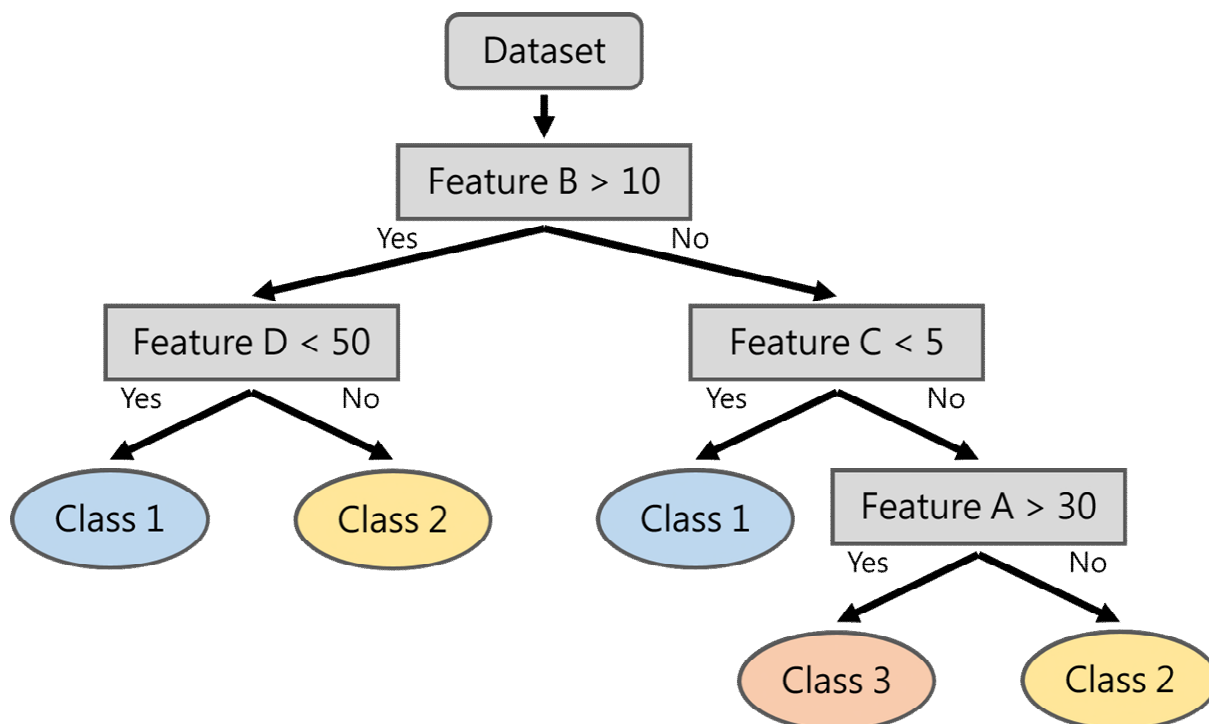


圖 2.10 決策樹演算法架構示意圖

隨機森林演算法的概念便是將多棵決策樹結合(圖 2.11)，以達到更穩定的分類效果(Breiman, 2001)。在訓練過程中，會先將訓練樣本隨機取樣，產生 k 個訓練子集，每個子集再各自訓練，產生 k 棵決策樹。建構子集的過程為依次隨機抽選，每一次抽到的樣本都會放回，因此有機會在一個子集內抽選到重複的樣本，同時某些樣本是沒有被抽到的。若原始資料庫內含有 N 筆資料，則每個訓練子集也會重複抽選放回直到含有 N 筆訓練樣本，這種方法稱為 Bagging (Breiman, 1996)，不僅使每個子集內的樣本具有差異性，也確保每一棵決策樹使用的都不是全部的訓練樣本。除了訓練樣本，每棵決策樹使用的特徵值也是隨機取樣，從 M 個特徵值中，選擇 m 個($m < M$)做為分類依據。透過對訓練樣本及特徵值的隨機取樣，每棵決策樹皆是使用不同的訓練樣本及訊號特徵值建構分類器，因此訓練出來的決策樹皆是互相獨立的。實際運算時，每棵決策樹都會得出各自的分類結果，而最終分類結

果則是由這 k 棵決策樹進行投票決定，以所有決策樹中相對多數的初步判釋結果為最終結果。隨機森林演算法在訓練分類器時，會根據各項特徵值的分類效果優劣進行權重分配，本研究讓演算法自動調整各特徵值的權重，因人為調整權重易產生主觀判定，便喪失了使用機器學習演算法時的客觀性。

而透過隨機森林產生的決策樹也沒有必要進行剪枝，因為在訓練樣本及特徵值取樣的過程中已經確保了隨機性，雖然單棵樹的架構可能是複雜且有過度擬合的情況，但在多棵決策樹的運作下，只要一開始的抽樣具有足夠的隨機性，便能避免整體演算法過度擬合的情形發生(Breiman, 2001)。若隨機森林演算法產生過度擬合的情況，除了可能是抽樣時的隨機性不夠高，另一個原因便是演算法內所包含的決策樹棵數不夠多，無法有效反映大數法則(Bernoulli, 1713; Breiman, 2001)。本計畫最終使用之隨機森林演算法內包含了 100 棵決策樹。

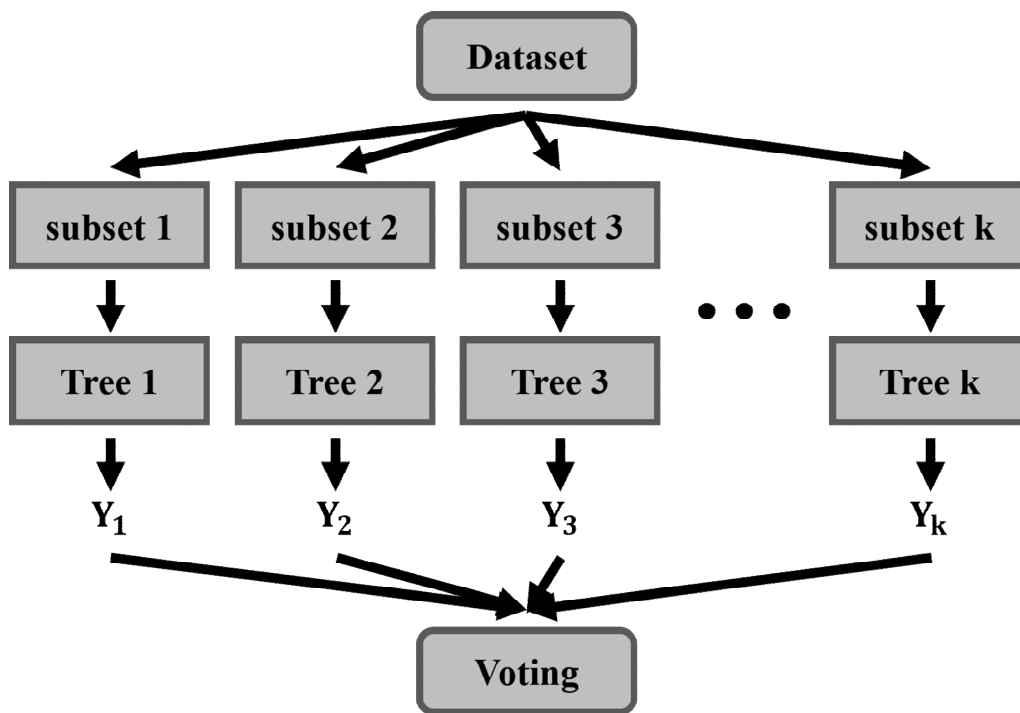


圖 2.11 隨機森林演算法架構示意圖

二、分類器建構

本計畫在建立分類器時採用 K-fold Cross Validation 來評估訓練樣本的分類效果。K-fold 是先將資料庫平均分成 K 個子集，每個子集中各種類的資料會有相近的比例，然後每次使用其中 1 個子集做為測試集，剩下(K-1) 個子集則做為訓練集，反覆執行 K 次，每一次的測試都會得到 1 個分類正確度，再將 K 次的結果平均後得到最終的分類效果(Schneider, 1997)，本計畫最終採用的 K 數值為 5，圖 2.12 為 5-fold Cross Validation 的示意圖。

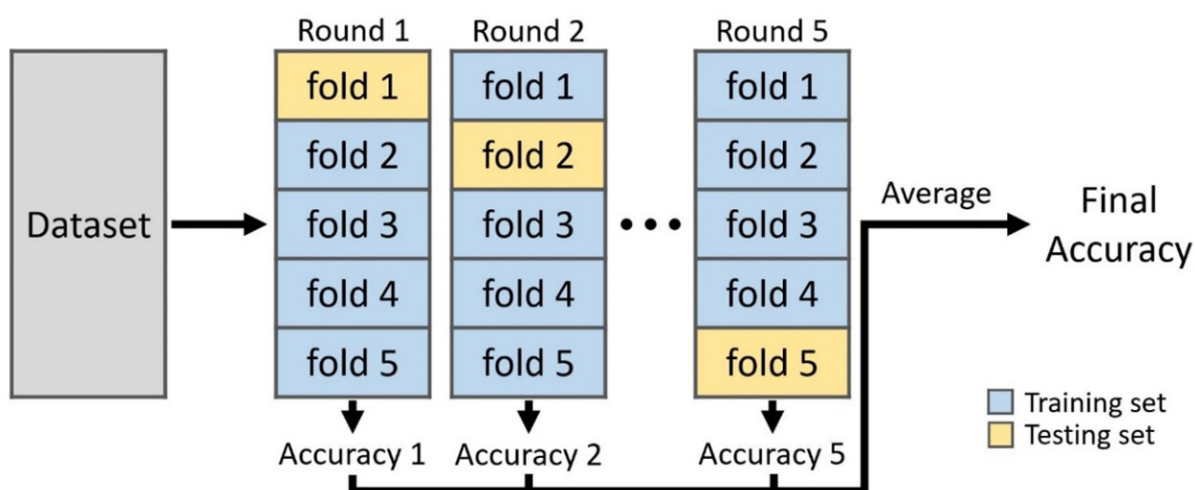


圖 2.12 5-fold Cross Validation 示意圖

三、混淆矩陣

混淆矩陣是最常被用來呈現監督式機器學習演算法效能的工具，它能夠有效且清楚的表示分類器的正確度及對於各種類事件的敏感度(Kohavi and Provost, 1998)。在混淆矩陣中(表 2.6)，True Positive (TP)代表實際屬於 A 類的樣本，演算法也判定為 A 類的數量；False Negative (FN)代表實際屬於 A 類的樣本，卻被演算法判定為 B 類的數量；False Positive (FP)代表實

際屬於 B 類的樣本，卻被演算法判定為 A 類的數量；True Negative (TN)代表實際不屬於 A 類的樣本，演算法也判定不為 A 類的數量。橫列代表的是實際屬於該類別的樣本，即 TP 和 FN 的數量和即為 A 類事件實際數量；直欄代表的是被演算法判釋為該類事件的樣本，即 TP 和 FP 的數量和即為被判釋為 A 的樣本數。

表 2.6 混淆矩陣

		Predicted	
		A	B
Actual	A	True Positive	False Negative
	B	False Positive	True Negative

在混淆矩陣中，True Positive (真陽性)表示為預測為正，實際也為正；False Positive (假陽性)表示為預測為正，實際為負；False Negative (假陰性)表示為預測為負、實際為正；True Negative (真陰性)表示為預測為負、實際也為負。而混淆矩陣中時常使用以下三項指標評估演算法效能：

(一) 正確度(Accuracy)：

代表所有被正確分類的樣本佔總體樣本數量的比例。其計算方式如下：

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad \text{式(2.8)}$$

(二) 敏感度(Sensitivity)

代表某一類別的樣本中，被正確分類的樣本的比例，又稱為召回率(Recall)。其計算方式如下：

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP + FN} \quad \text{式(2.9)}$$

(三) 準確度(Precision)

代表所有被分類為某一類的樣本中，實際屬於該類別的樣本的比例。其計算方式如下：

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad \text{式(2.10)}$$

(四) 協調分數(F1-score)

為敏感度和準確度的調和平均數，用以衡量分類器精確度的一種指標，最大值是 1，最小值是 0。計算方式如下：

$$F1 = \frac{2}{\frac{1}{Precision} + \frac{1}{Sensitivity}} \quad \text{式(2.11)}$$

四、分類器運作過程

本計畫地動訊號分類器建置與應用流程如圖 2.13 所示，先蒐集欲自動分類之地動事件訓練樣本，將訊號做基本前處理後計算時間域及頻率域之訊號特徵值，由於時間域特徵值對於噪訊有較高的分辨率，因此僅使用時間域特徵值搭配隨機森林演算法製作時間域分類模型(圖 2.13 分類模型一)，接著加入頻率域特徵值，運用隨機森林演算法製作混合分類模型(圖 2.13 分類模型二)，本計畫採用二階段分類，大幅提高分類之可信度，之後便可對連續地動訊號做地動事件偵測，偵測地動事件後計算偵測窗格之特徵值並

輸入分類器內，快速得到各測站紀錄內疑似崩塌事件地動訊號的發生時間，再做進一步的驗證。

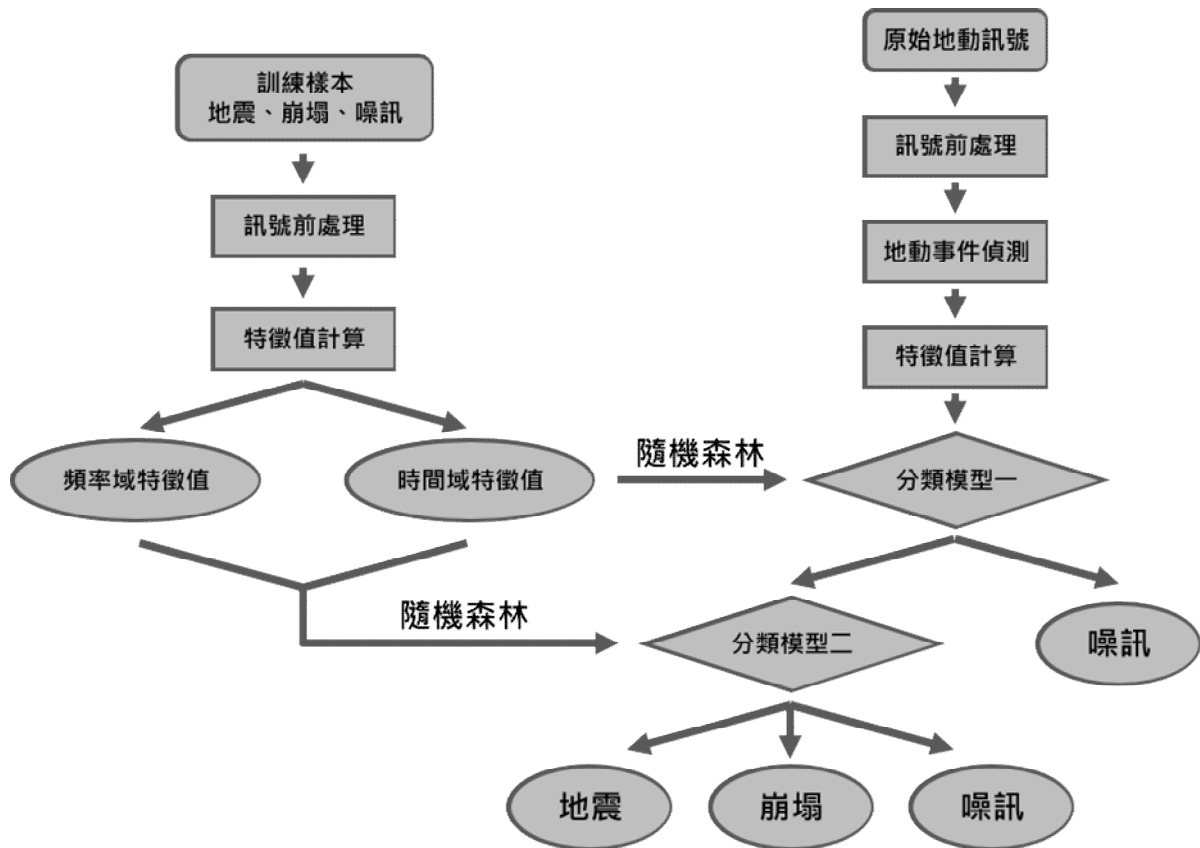


圖 2.13 地動訊號分類器建置與應用

第六節 崩塌地動訊號定位

計畫中採用的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 (Peng and Chao, 2008; Peng et al., 2009; 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)的最小均方根公式如下：

$$\begin{aligned}
rms_{(x,y,z)} &= \sqrt{\sum_{i=1,j=2}^n (\Delta T_{i,j})^2 / n} = \sqrt{\sum_{i=1,j=2}^n (\Delta t_{i,j}^{theo} - \Delta t_{i,j}^{obs})^2 / n} \\
&= \sqrt{\frac{(\Delta t_{1,2}^{theo} - \Delta t_{1,2}^{obs})^2 + (\Delta t_{1,3}^{theo} - \Delta t_{1,3}^{obs})^2 + \dots + (\Delta t_{2,3}^{theo} - \Delta t_{2,3}^{obs})^2 + \dots + (\Delta t_{N-1,N}^{theo} - \Delta t_{N-1,N}^{obs})^2}{n}}
\end{aligned} \tag{2.12}$$

其中 $\Delta t_{i,j}^{theo}$ 和 $\Delta t_{i,j}^{obs}$ 分別代表理論到時差和觀測到時差， $\Delta T_{i,j}$ 則為兩者間的差值。對於每個站對間的理論傳播時間差 $\Delta t_{i,j}^{theo}$ 是根據一維速度模型，從共同振源到不同地震站 i 和 j 的傳波時間計算得出的。觀測到時差 $\Delta t_{i,j}^{obs}$ 是對於可觀察到崩塌地動訊號的地震站紀錄，計算低通濾波 10 Hz 後波形的包絡線函數，同時比對時頻圖中崩塌地動能量開始時間點，於包絡線函數標定事件到時，再計算共同振源到不同地震站的時間差。

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° 的水平網格空間中進行最小均方根的搜索。在本計畫中採用 Chao and Yu (2018) 撰寫於 matlab 程式語言中的開源程式 CrazyTremor，進行上述之崩塌地動定位(圖 2.14)。

崩塌定位至少需要三地震測站於相近時間偵測到崩塌地動訊號及確實被分類器判別為崩塌事件才能進行，地動訊號的分類與震源事件規模大小、震波傳播路徑等有密切影響，現行方法於分類時仍有極限。震波傳播特性仍為地球物理領域的熱門研究議題，考慮其複雜性，對於訊號特徵不明確的地動事件，分類器仍無法達成 100% 的分類正確度，必定會有特徵值的模糊導致分類誤判的發生；本計畫運用上述定位條件篩選三測站以上分類為崩塌事件之地動訊號進行定位，同時結合遙測影像與定位結果進行崩塌配對，減少分類器誤判之影響，並有效提升分類器對於訊號特徵明確事件分類結果的可信度。

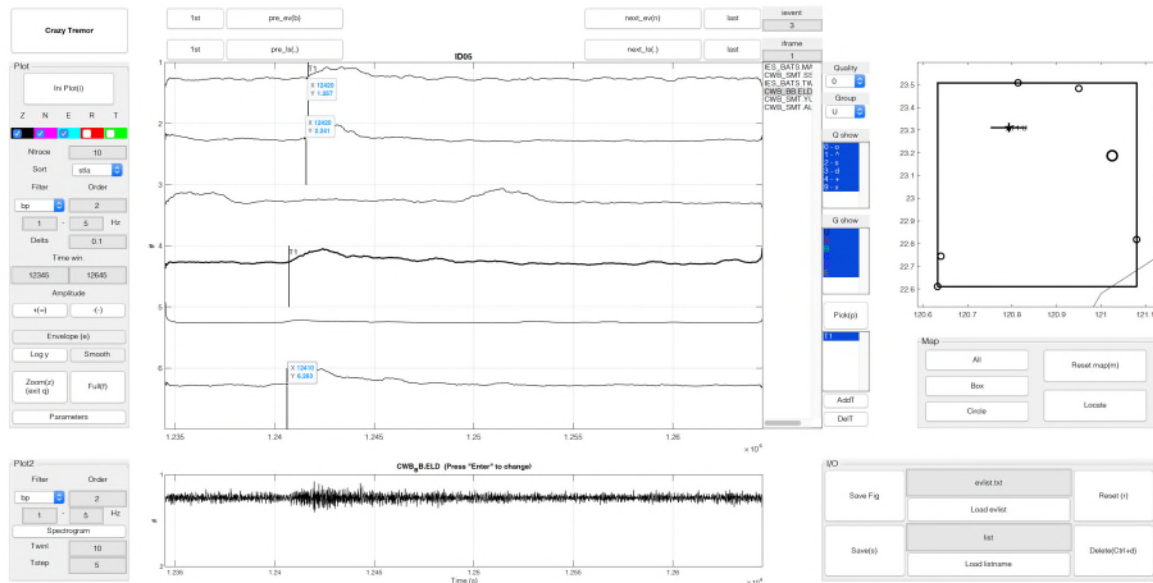


圖 2.14 CrazyTremor 執行崩塌地動訊號定位之操作介面

第七節 促崩降雨統計與分析方法

山崩產生的地動訊號完整記錄了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。本計畫採用中央氣象局所架設的地面雨量站，崩塌警戒雨量分析所用之雨量資料以直線距離崩塌地 3 公里內的雨量測站紀錄為原則，並且和崩塌地坐落於同一集水區。

本計畫中所指的雨場是一次豪雨事件的開始與結束的時間，將雨場開始的標準設定為當每小時降雨大於 4 mm 時；而當連續 6 小時時雨量開始小於 4 mm 時，視為降雨事件結束(圖 2.15)。然而，因為本計畫研究的豪雨事件多由颱風所造成，由颱風引致的降雨事件常可能在上述的雨場切割標準下被切割為 2 個以上不同的降雨事件，導致降雨延時的統計出現低估的狀況。因此，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。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，本計畫根據前期經驗，同時將前期的降雨量 R_a 納入計算。本研究也加入有效累積雨量 R_e 進行分析，採用詹錢登(2002)提出的有效累積雨量模式：

$$R_e = R_a + R_c \quad \text{式(2.13)}$$

上式中 R_e 為有效累積雨量， R_c 為統計至崩塌發生時的累積降雨量。前期降雨為雨場開始前七日，每日累積雨量以 0.7 指數衰減($R_a = \sum_{i=1}^7 0.7^i R_i$, i 為雨場開始前的日數)。

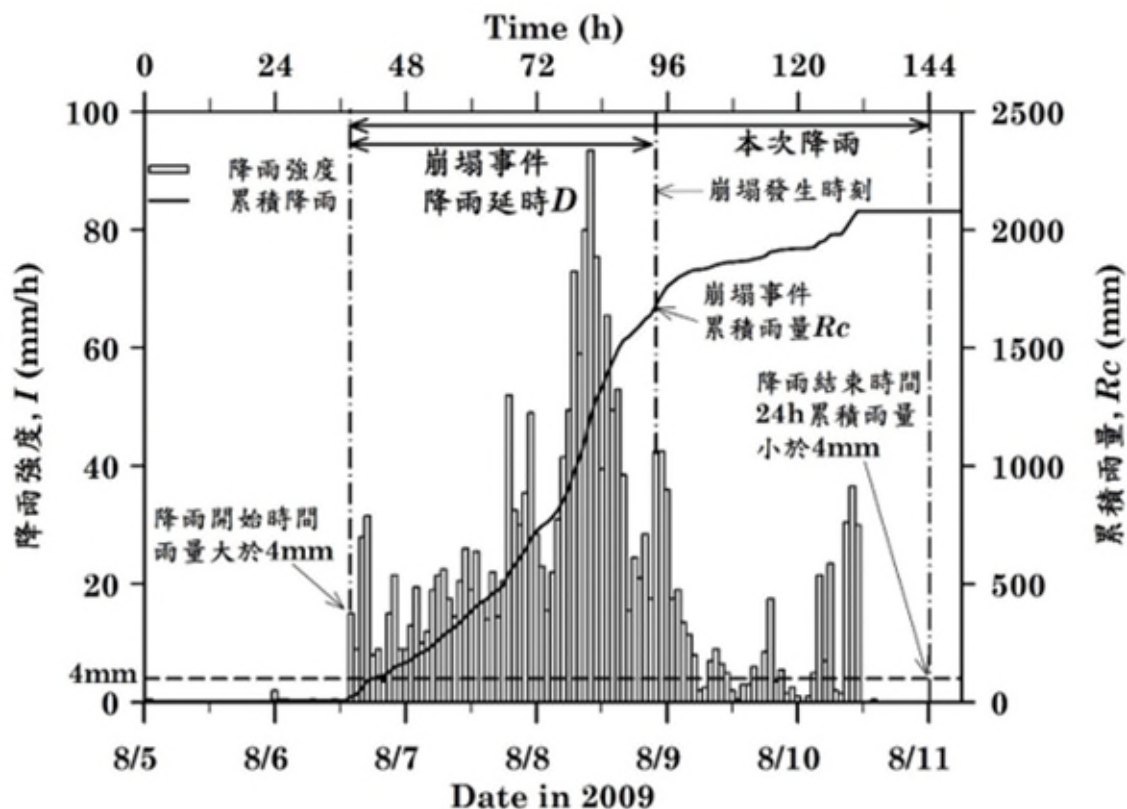


圖 2.15 雨場切割與降雨參數計算示意圖

大規模崩塌門檻值降雨因子統計將依據不同的降雨參數選擇，會產生不同的雨量關係式。本計畫分別分析了以下三種雨量關係式：

一、 $I-D$ 法

此方法以降雨強度 I 及降雨延時 D 作為雨量指標(Caine, 1980; Keefer et al., 1987; Arattano & Marchi, 2000)， $I-D$ 法目前是最廣泛被討論及應用之促崩降雨門檻分析方法。此方法主要利用引發該次崩塌的降雨事件，並未將前期降雨所造成的影響納入考慮。將各山崩事件的 I 及 D 以對數座標作圖後，所有資料點的下緣切線即為雨量門檻值曲線(圖 2.16a)，該曲線一般常用的公式形式為： $I=aD^{-b}$ 。為了有一致的 $I-D$ 門檻值計算方式，本計畫採用涵蓋資料數 5% 之曲線做為門檻曲線。採用之累積機率模型為高斯機率函數，以乘冪回歸分析所得之曲線斜率為門檻曲線斜率，藉此獲得資料累積機率為 5% 時之曲線公式，作為整體資料點之下緣曲線公式。

二、 $I-R_e$ 法

此方法使用降雨強度 I 及有效累積雨量 R_e 為雨量指標(圖 2.16c)，藉此界定出山崩發生的臨界降雨線(謝正倫，2001；詹錢登，2004)。 $I-R_e$ 法將崩塌發生的平均降雨強度 I 和有效累積雨量 R_e 作圖，以韋伯法取累積雨量機率為 5% 的值記為 R_e-I_5 。相對於 $I-D$ 法取累積機率 5% 時之曲線公式為臨界門檻， $I-R_e$ 法同樣也以 R_e-I_5 作為 $I-R_e$ 法之門檻值。

三、 R_e-D 法

此方法使用有效累積雨量 R_e 和降雨延時 D 作為雨量指標(圖 2.16b) (青木佑久，1980；范正成等人，1999，2002)。 R_e-D 關係式的分析方法和 $I-R_e$ 法雷同。在報告中將代表累積機率 5% 之 D 與 R_e 乘積值表示為 R_e-D_5 。參考 $I-D$ 法之門檻值計算方法，以 R_e-D_5 作為 R_e-D 法之門檻值。

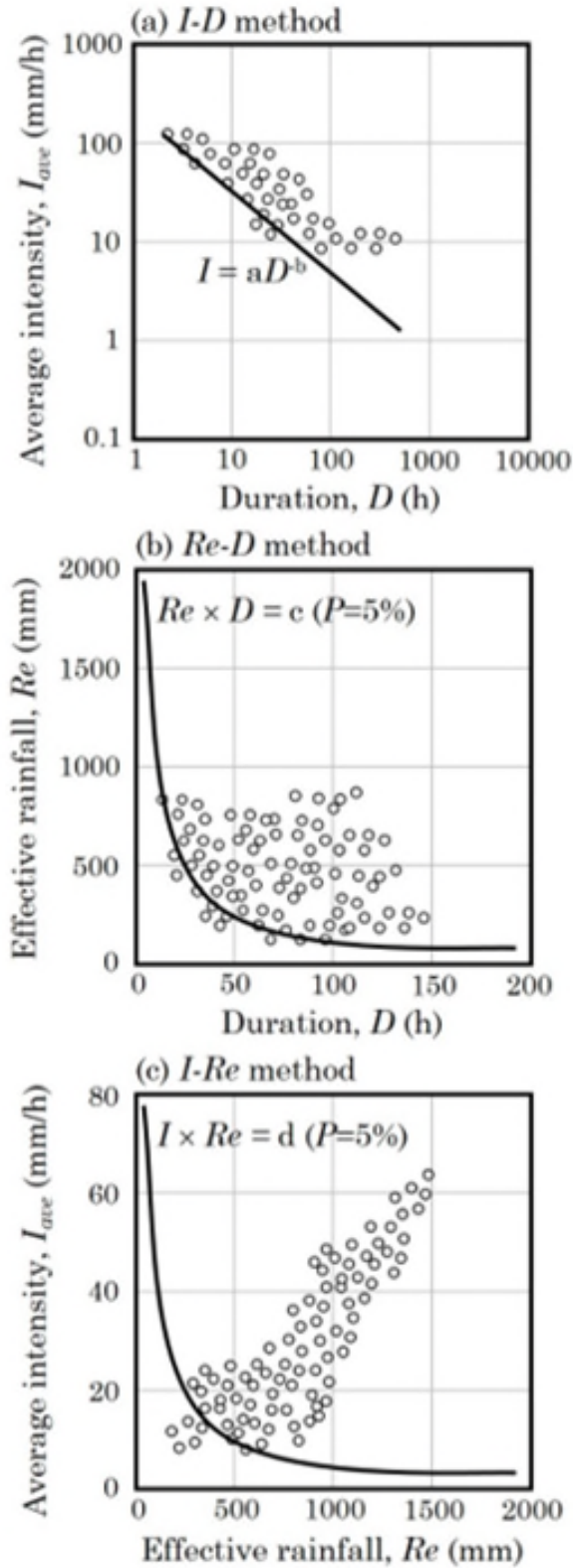


圖 2.16 常見的雙參數雨量門檻曲線

第八節 桶狀模式參數擬合

桶狀模式是以數層概念水桶內的入流水與流出水來模擬雨水進入淺層土壤，再入滲至深處地質材料的過程，最終可計算儲積於地層中的總水量(圖 2.17)(Sugawara, 2009)。日本氣象廳便是採用三層桶狀模型來計算地層中的含水狀況，又稱為土壤水分指數(Soil Water Index, SWI)(岡田憲治，2002；陳樹群等人，2013; Lin et al., 2020b)。其計算過程為假設降雨量為 R (mm)，蒸發散量為 ET (mm)，第 i 桶內的水深為 S_i (mm)。第 i 桶內第 j 個管口水流出的必要水深為 L_{ij} (mm)，其流出水比為 a_{ij} ，而流出量為 Q_{ij} (mm)。 Z_i (mm) 為第 i 桶水往下層水桶的入滲量，其入滲比為 b_{ij} 。以上所有參數中， i 表示為第 i 桶， j 表示為桶中第 j 個流出水管。

每桶中管口的流出量 Q_{ij} 即為桶內水深 S_i 扣除出流水深 L_{ij} ，乘上出流比 a_{ij} 。在三桶水中，只有第一桶水含有兩個流出量 Q_{11} 、 Q_{12} ，分別為第一流出量和第二流出量，第一出水量可視為側向伏流(lateral subsurface flow)，第二流出水量則為無法進入土壤層的漫地流(overland flow)， Z_1 則是由第一桶水流入第二桶水的總量； Q_{21} 是第二桶水的流出量，可視為中間流(interflow)； Q_{31} 是第三桶水的出水量，可視為地下水滲出之基流(baseflow)(圖 2.18)。第一桶水深 S_1 為土壤水，第二桶水深 S_2 為中間帶滲流水，而第三桶水深 S_3 為地下水。三桶水深的總和便為土壤水分指數 SWI ($SWI = S_1 + S_2 + S_3$ ，單位為 mm)，而三桶水流出水量的總和便是會進入河川中之逕流，以單位集水面積之流深表示。

桶狀模式發展於單一坡面之地表逕流與地下水流的模擬，然受限於不易廣設地表及地下水觀測儀器，近年來陸續有國外研究將其運用於流域尺度之河川逕流模擬，目的即在於獲得流域整體之平均計算參數。本計畫運用流域尺度觀測資料推估地下含水狀況，確難考慮降雨、河川流量、地下含水

狀況的時空分佈，因此所得之桶狀模式計算參數應為整體流域之平均參數。有鑑於過去計算土壤水分指數多採用日本氣象廳公告之日本參數(表 2.7)，難以評估是否確實適用於臺灣山區。本計畫利用 2010 年至 2018 年的河川流量、雨量及蒸發散量的觀測資料，分別擬合出旗山溪、荖濃溪、濁口溪及隘寮溪集水區之桶狀模式計算參數(圖 2.19)。其中蒸發散量的計算採用 Penman-Monteith 法(Monteith, 1965; Howell and Evett, 2004)，氣象觀測資料取用自鄰近高屏溪流域之玉山、阿里山及高雄氣象站，其資料包括氣壓、溫度、相對溼度、日照時數、風速及蒸發皿蒸發量等。各集水區之降雨量則是以徐昇法求得每一雨量站在集水區內的代表面積，再以代表面積占有比例為權重求得集水區之代表雨量。河川流量採用經濟部水利署流量站紀錄，並且除以流域面積求得單位流深。桶狀模式計算參數的擬合則利用 Matlab 內建 Simulink 功能，編寫單位流深及土壤水分指數計算程式(圖 2.20)，並以非線性最小平方法進行參數評估(Coleman and Li, 1996)，待觀測流深與預測流深間有最小均方根誤差時，獲得最佳參數組解。本計畫針對旗山溪、荖濃溪、濁口溪及隘寮溪進行桶狀模式計算參數的擬合，並以 2019 年各集水區觀測流深對計算參數進行驗證。後續將運用各集水區之桶狀模式參數來計算土壤水分指數，作為崩塌警戒雨量分析之水文參數。

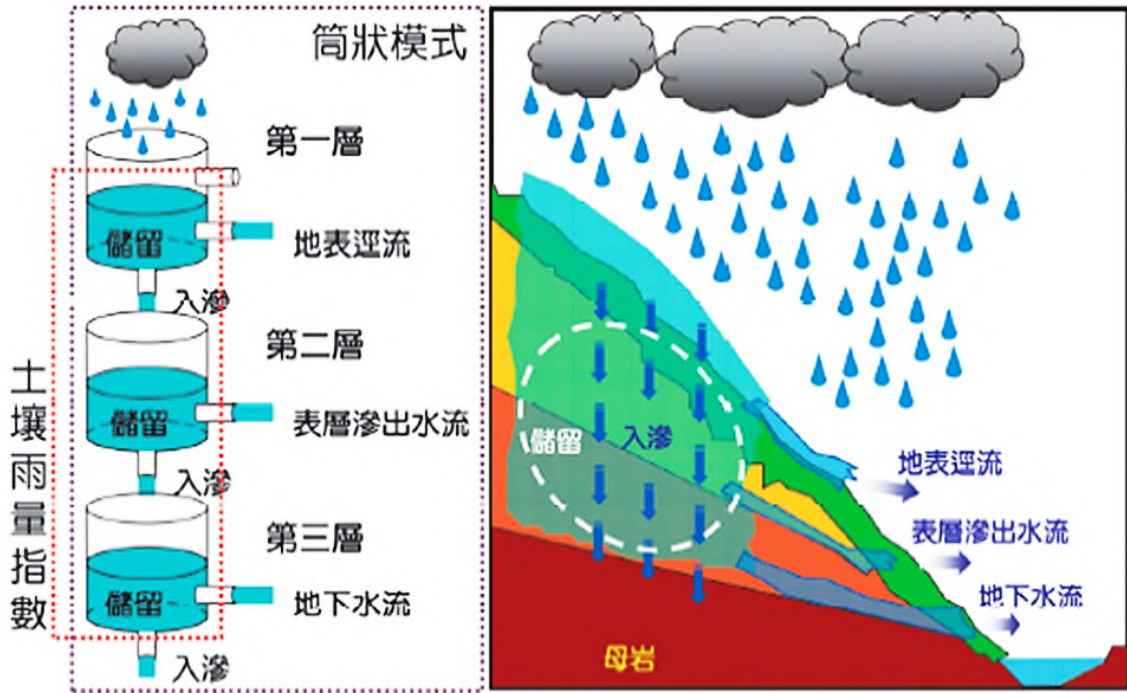


圖 2.17 桶狀模式概念 (岡田憲治, 2002)

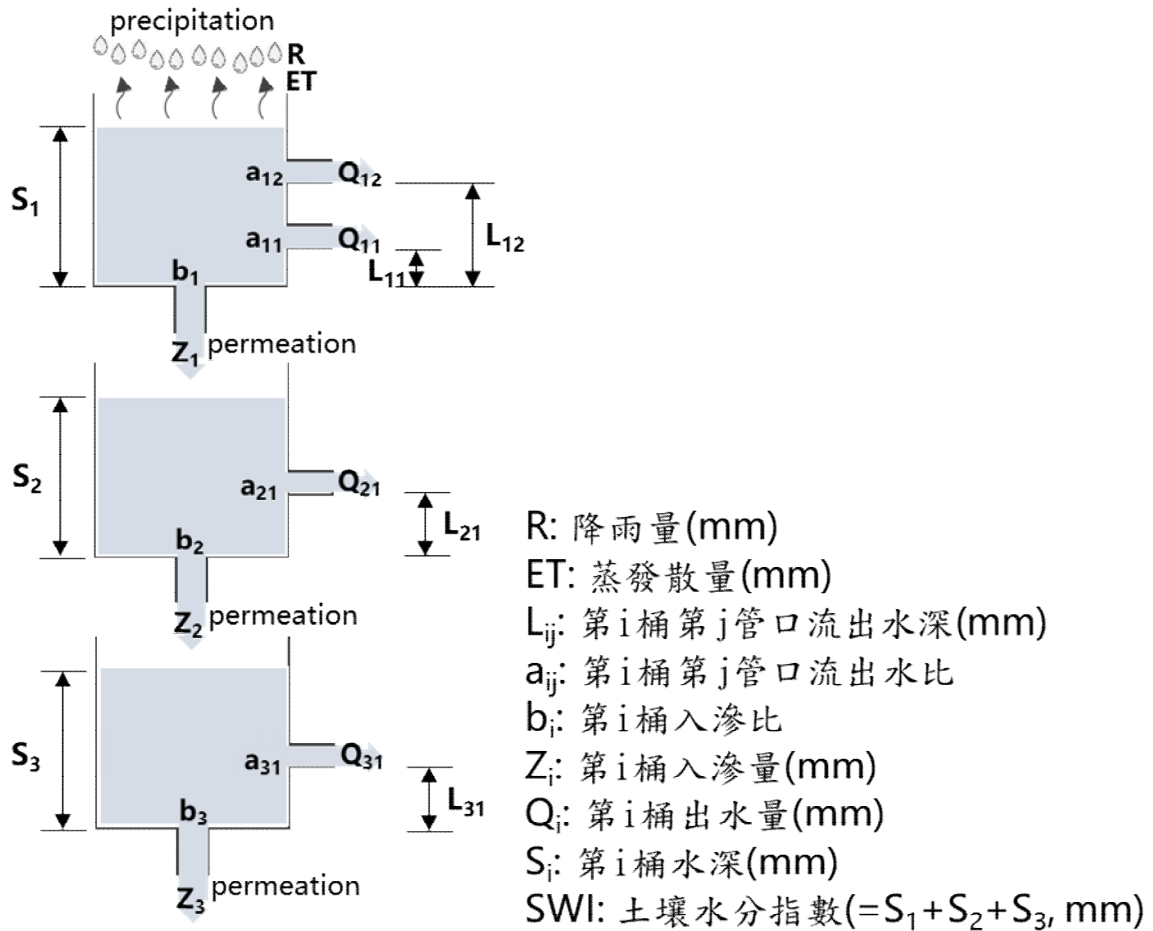


圖 2.18 桶狀模式參數

表 2.7 日本氣象廳使用之土壤水分指數計算參數

參數	數值
a_{11}	0.10
a_{12}	0.15
a_{21}	0.05
a_{31}	0.01
b_1	0.12
b_2	0.05
b_3	0.01
L_{11}	15
L_{12}	60
L_{21}	15
L_{31}	15

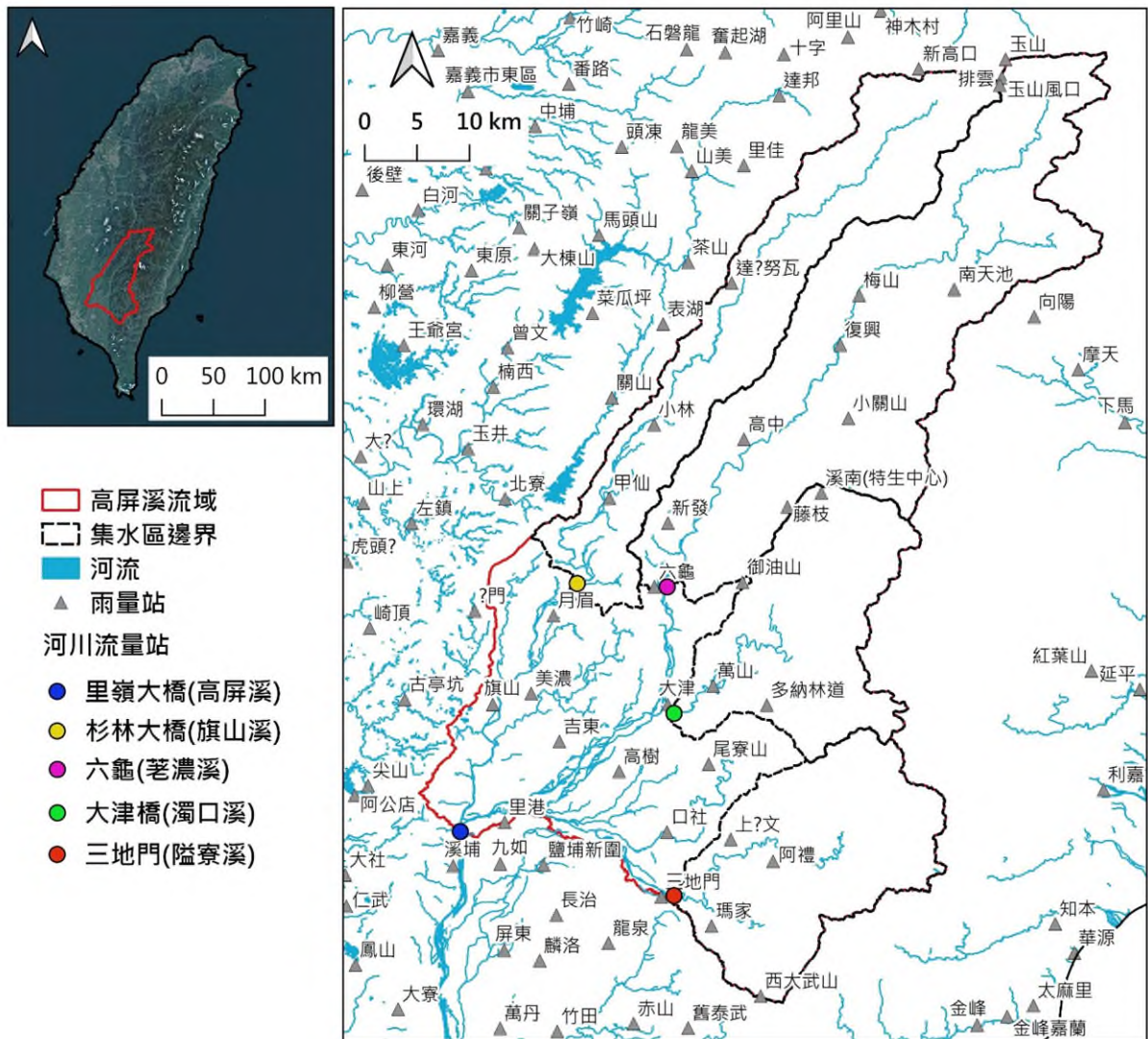


圖 2.19 高屏溪流域之流量站與雨量站分布圖

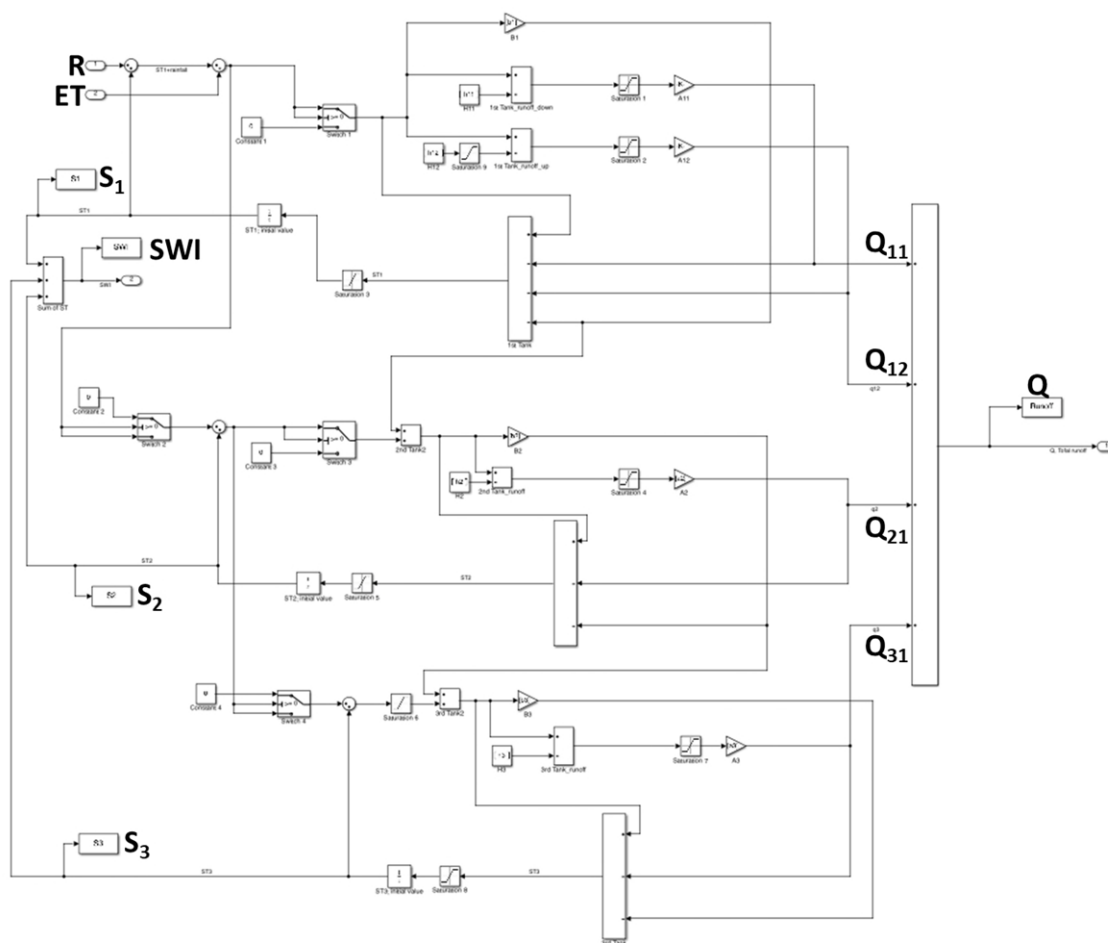


圖 2.20 桶狀模式之計算與參數擬合程式

本研究藉由擬合集水區之降雨及觀測流量(圖 2.21 及圖 2.22)，得出四個集水區之桶狀模式參數(表 2.8)。比較擬合所得之參數與日本參數可以發現，第一桶水的相關參數(a_{11} 、 a_{12} 、 b_1 、 L_{11} 、 L_{12})與日本參數差異較大，第二桶水及第三桶水的相關參數則與日本參數大致相同。該結果可以推論，第一桶水代表的最表層物質在不同集水區有較顯著的水力傳輸特性差異，然而相對深處的土壤層及岩層在受到掩埋的條件下，水力傳輸特性差異便較小。

將 2019 年的觀測雨量代入桶狀模式，並採用擬合所得之計算參數可得到預測流深。比較預測流深及觀測流深可以發現預測值的變化起伏與實際

觀測值幾乎同步，顯示該方法可以適切的計算出尖峰流量的時間點，以及地表逕流的變化趨勢(圖 2.23)。相對地，該方法便能應用於評估地下含水狀態的變化，有助於作為一項崩塌警戒水文參數。比較本計畫求得之計算參數與日本參數所預測之流深(圖 2.24)，可以發現日本參數計算的流深預測值高於觀測值(平均誤差為正值)，相對地，便可能低估地下含水量。本計畫求得之參數所計算之預測值則相對低於觀測值(平均誤差為負值)，但於尖峰流量時的預測效果較日本參數良好，可推論對於地下含水狀況的預測效果也會較佳。因此，雖然本計畫所求得之桶狀模式參數與日本參數整體差異並不明顯，但若能夠針對目標集水區求得其最佳參數，仍會優於沿用日本參數。

為了考量地下含水狀況的時空變化，本計畫中計算桶狀模式之雨量值僅用距離崩塌最近的三處雨量站內插之雨量，而非整體流域之平均雨量值，因此較能代表特定邊坡之雨量變化，再代入桶狀模式計算中計算各桶水深。

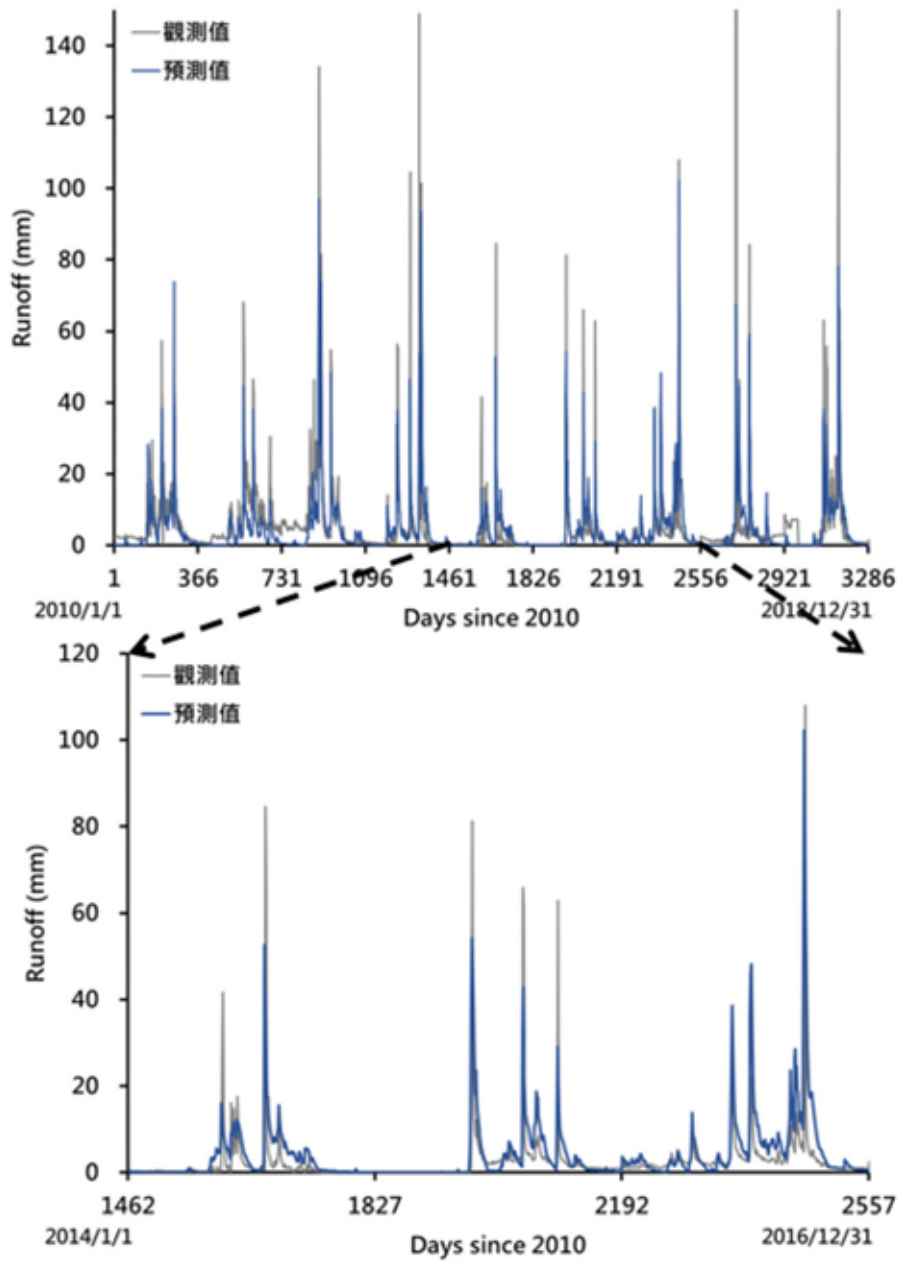


圖 2.21 旗山溪 2010 年至 2018 年觀測流深與桶狀模式預測流深

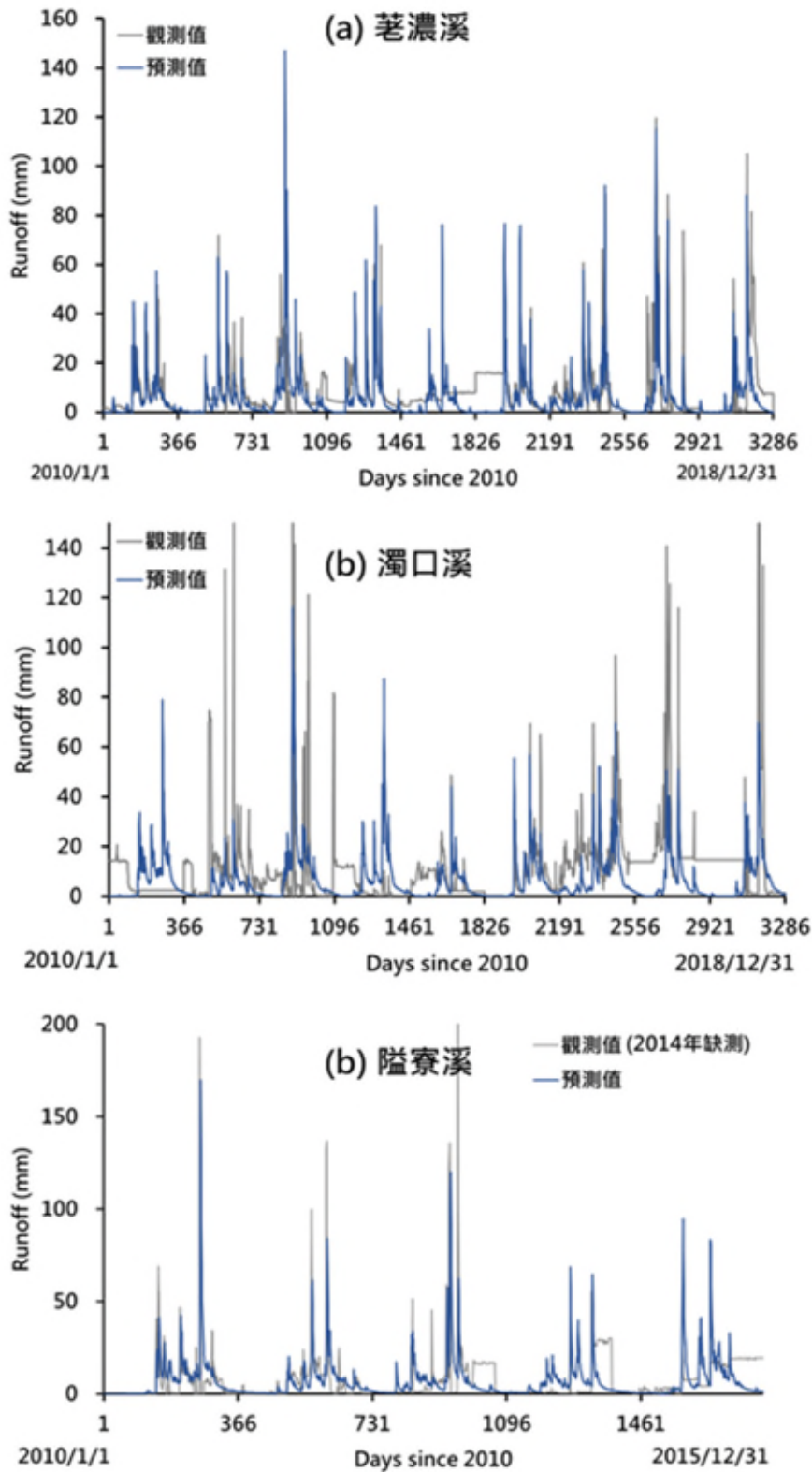


圖 2.22 荖濃溪、濁口溪及隘寮溪觀測流深與桶狀模式預測流深

表 2.8 各集水區桶狀模式參數

參數	日本	旗山溪	荖濃溪	濁口溪	隘寮溪
a ₁₁	0.10	0.04	0.08	0.10	0.10
a ₁₂	0.15	0.09	0.08	0.10	0.10
a ₂₁	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04
a ₃₁	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
b ₁	0.12	0.07	0.13	0.13	0.13
b ₂	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05
b ₃	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
L ₁₁	15	14	15	15	15
L ₁₂	60	104	98	79	89
L ₂₁	15	13	14	15	15
L ₃₁	15	15	15	15	15
平均誤差	0.2*	-0.3	-2.3	-4.3	-0.3

*：以荖濃溪觀測降雨及流量作為誤差驗證

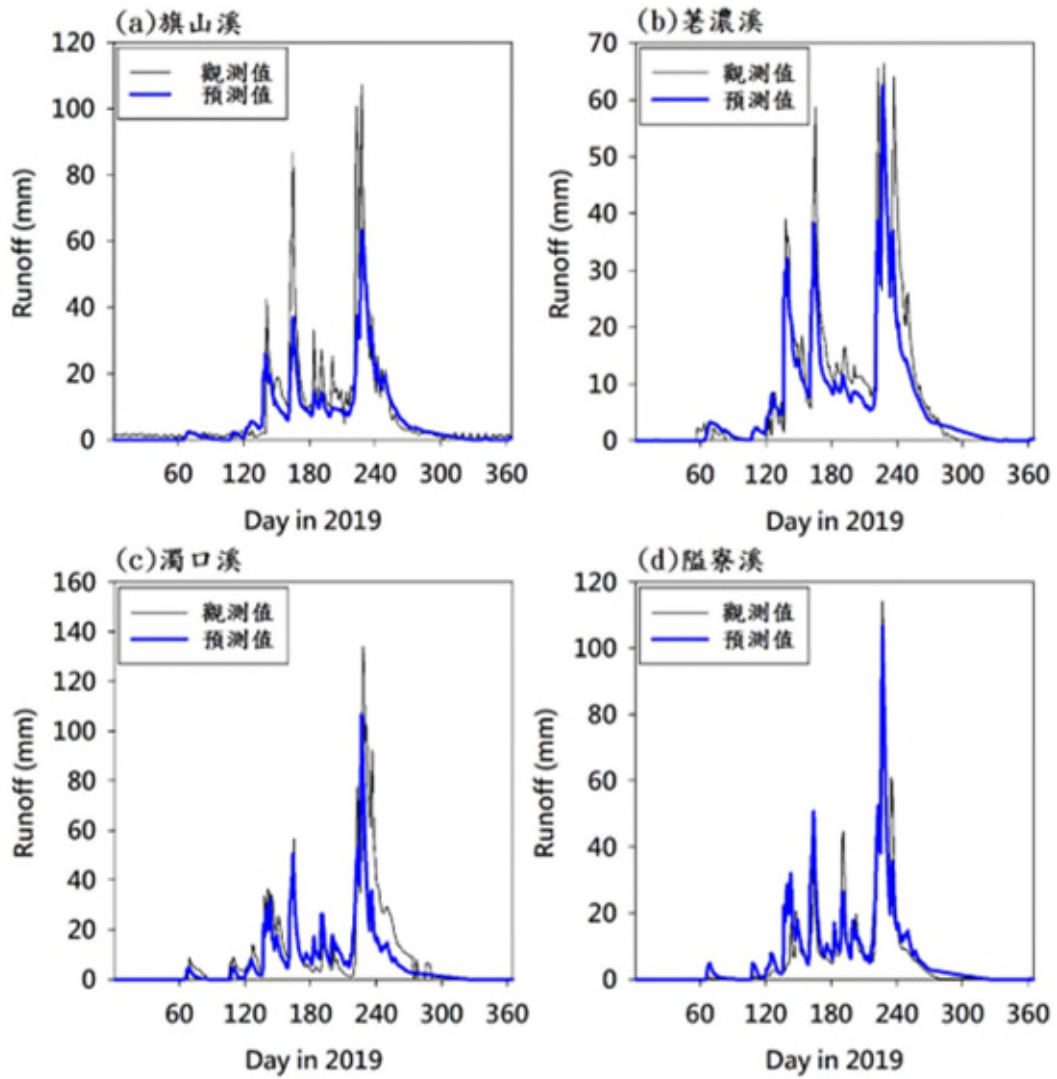


圖 2.23 2019 年各集水區預測流深與觀測流深

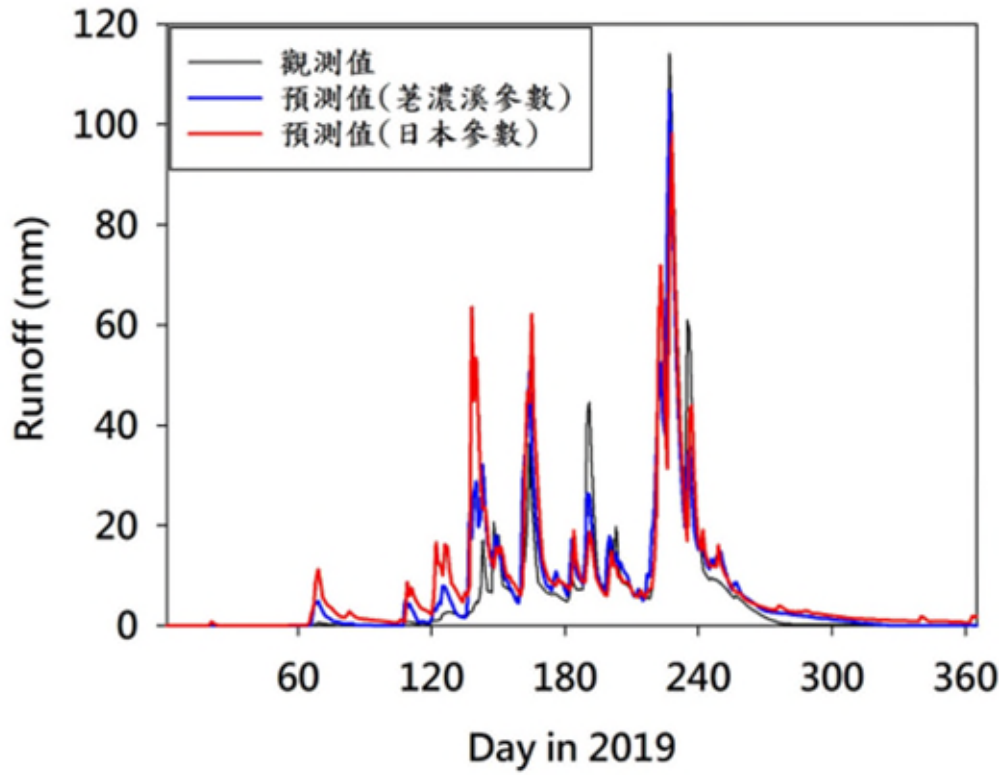


圖 2.24 荖濃溪參數與日本參數預測流深的比較

第三章 地動訊號自動分類器成果

第一節 演算法測試結果

本計畫使用相同的地動訊號樣本測試 22 種不同的機器學習演算法，寬頻地震儀及短週期地震儀之結果分別整理於表 3.1 及表 3.2。其中可以觀察到隨機森林演算法(Random Forest)於兩組資料集對崩塌皆有較佳的表現，針對寬頻地震儀崩塌訓練樣本之正確度、敏感度及準確度分別為 93.9%、88.8%及 94.8%，而短週期地震儀崩塌樣本之正確度、敏感度及準確度分別為 89.2%、87.4%及 86.8%，因此本計畫最終採用隨機森林演算法建立適用於高屏河流域之地動訊號自動分類器。

表 3.1 寬頻地震儀 22 種演算法測試結果

編號	演算法	正確度 (%)	崩塌 敏感度 (%)	崩塌 準確度 (%)	崩塌 協調 分數
1	Complex Tree	87.0	81.0	87.0	83.9
2	Medium Tree	87.3	79.0	89.0	83.7
3	Simple Tree	78.9	71.0	77.0	73.9
4	Linear Discriminant	91.0	88.0	90.0	89.0
5	Quadratic Discriminant	92.7	91.0	91.0	91.0
6	Linear SVM	91.9	90.0	88.8	89.4
7	Quadratic SVM	93.7	90.2	93.6	91.9
8	Cubic SVM	93.8	90.6	94.0	92.3
9	Fine Gaussian SVM	90.4	83.0	91.0	86.8
10	Medium Gaussian SVM	93.0	91.0	92.0	91.5
11	Coarse Gaussian SVM	84.8	81.0	78.0	79.5

編號	演算法	正確度 (%)	崩塌 敏感度 (%)	崩塌 準確度 (%)	崩塌 協調 分數
12	Fine KNN	91.8	88.0	92.0	90.0
13	Medium KNN	91.6	85.0	93.0	88.8
14	Coarse KNN	77.8	73.0	75.0	74.0
15	Cosine KNN	91.9	84.0	94.0	88.7
16	Cubic KNN	91.5	84.0	93.0	88.3
17	Weighted KNN	93.2	88.0	94.0	90.9
18	Boosted Trees	91.0	85.0	91.0	87.9
19	Random Forest	93.9	88.8	94.8	91.7
20	Subspace Discriminant	89.5	86.8	86.2	86.5
21	Subspace KNN	86.0	81.4	85.6	83.4
22	RUSBoosted Trees	87.3	80.0	87.0	83.4

表 3.2 短週期地震儀 22 種演算法測試結果

編號	演算法	正確度 (%)	崩塌 敏感度 (%)	崩塌 準確度 (%)	崩塌 協調 分數
1	Complex Tree	80.2	77.0	78.0	77.5
2	Medium Tree	80.9	80.0	76.0	77.95
3	Simple Tree	75.3	69.0	74.0	71.41
4	Linear Discriminant	85.4	85.0	81.0	82.95
5	Quadratic Discriminant	83.8	88.0	72.0	79.20
6	Linear SVM	86.2	86.0	81.8	83.85
7	Quadratic SVM	87.4	85.8	82.2	83.96
8	Cubic SVM	86.9	84.2	81.2	82.67
9	Fine Gaussian SVM	84.9	73.0	89.0	80.21
10	Medium Gaussian SVM	88.3	88.0	84.0	85.95

編號	演算法	正確度 (%)	崩塌 敏感度 (%)	崩塌 準確度 (%)	崩塌 協調 分數
11	Coarse Gaussian SVM	82.7	83.0	76.0	79.35
12	Fine KNN	88.3	84.0	85.0	84.50
13	Medium KNN	87.0	86.0	84.0	84.99
14	Coarse KNN	79.9	82.0	76.0	78.89
15	Cosine KNN	87.4	81.0	86.0	83.43
16	Cubic KNN	86.6	85.0	84.0	84.50
17	Weighted KNN	89.2	89.0	86.0	87.47
18	Boosted Trees	86.3	82.0	83.0	82.50
19	Random Forest	89.2	87.4	86.8	87.10
20	Subspace Discriminant	83.7	79.8	79.4	79.60
21	Subspace KNN	88.1	85.2	83.8	84.49
22	RUSBoosted Trees	81.3	80.0	74.6	77.21

第二節 分類器正確度

本計畫使用混淆矩陣呈現自動分類器之效果，表 3.3 與表 3.4 分別為適用於寬頻地震儀及短週期地震儀之自動分類器的混淆矩陣。如表 3.3 所示，215 筆崩塌訓練樣本中，有 209 筆被正確分類，以及 6 筆被分類為噪訊，對於崩塌地動訊號的敏感度為 97.2%；215 筆地震訓練樣本中，有 210 筆被正確分類，以及 5 筆被分類為噪訊，對於地震地動訊號的敏感度為 97.7%；215 筆噪訊訓練樣本全數被正確分類，分類器對於噪訊地動訊號之敏感度為 100%。

而被分類器歸類為崩塌地動訊號的 209 筆樣本，全數確實為崩塌事件之地動訊號，分類器對於崩塌地動訊號的精確度為 100%，協調分數為 98.6%；

210 筆被分類為地震事件的訊號也全數確實為地震事件產生的地動訊號，分類器對於地震地動訊號的精確度同樣為 100%，協調分數為 98.8%；226 筆被分類為噪訊事件的訓練樣本內，有 215 筆確實屬於噪訊地動訊號，其於實際為崩塌事件及地震事件的地動訊號分別為 6 筆及 5 筆，分類器對於噪訊的準確度為 95.1%，協調分數為 98.3%。本計畫針對高屏河流域之寬頻地震儀建立之地動訊號分類器對 645 筆 5 分鐘長度地動訊號，整體分類正確度達到 98.3%，對於三種不同類型地動事件的敏感度、準確度及協調分數均達到 90%以上，說明該分類器能夠成功辨別出訓練樣本內大多數地動事件的差異。

表 3.3 寬頻地震儀自動分類器混淆矩陣

		分類結果			敏感度
		崩塌	地震	噪訊	
實際 結果	崩塌	209	0	6	97.2%
	地震	0	210	5	97.7%
	噪訊	0	0	215	100%
準確度		100%	100%	95.1%	98.3%

表 3.4 為短週期地震儀自動分類器混淆矩陣，251 筆崩塌訓練樣本中，有 242 筆成功分類、2 筆被分類為地震，以及 7 筆被分類為噪訊，對於崩塌地動訊號的敏感度為 96.4%；251 筆地震訓練樣本中，成功分類的數量為 239 筆，而被錯誤分類為崩塌及噪訊的樣本數分別為 7 筆及 5 筆，對於地

震地動訊號的敏感度為 95.2%；而 251 筆噪訊訓練樣本全數被分類器正確分類，對於噪訊地動訊號的敏感度為 100%。

249 筆被分類器歸類為崩塌地動訊號的樣本中，有 242 筆確實為崩塌事件地動訊號，另外有 2 筆及 7 筆實際上為地震及噪訊的地動訊號，分類器對於崩塌地動訊號的準確度為 97.2%，協調分數為 96.8%；而 241 筆被分類為地震的地動訊號中，有 239 筆確實為地震事件地動訊號，另有 2 筆錯誤分類實際為崩塌事件的地動訊號，分類器對於地震事件地動訊號的準確度及協調分數分別為 99.2%及 97.2%；263 筆被分類為噪訊的訓練樣本內，有 251 筆實際屬於噪訊地動訊號，其餘實際為崩塌事件及地震事件卻被錯誤分類為噪訊之樣本數分別為 7 筆及 5 筆，分類器對於噪訊的準確度為 95.4%，協調分數為 97.7%。與寬頻地震儀地動訊號分類器成果相似，短週期地動訊號分類器對 753 筆 5 分鐘長度地動訊號，整體分類正確度達到 97.2%，對於三種類型地動事件的敏感度、準確度及協調分數也均達到 90% 以上，說明本計畫建立之分類器能夠有效辨別訓練樣本內絕大部分地動事件訊號上的差異。

表 3.4 短週期地震儀自動分類器混淆矩陣

		分類結果			敏感度
		崩塌	地震	噪訊	
實際 結果	崩塌	242	2	7	96.4%
	地震	7	239	5	95.2%
	噪訊	0	0	251	100%
準確度		97.2%	99.2%	95.4%	97.2%

第三節 自動分類器測試結果

本計畫成功建立適用於高屏溪流域寬頻地震儀及短週期地震儀之地動訊號自動分類器，並且探討自動分類器對長時間連續地動紀錄的分類能力。使用 2012 年至 2015 年間共 10 場不同颱風事件期間的連續地動訊號紀錄進行崩塌地動訊號的辨識，颱風目錄整理於表 3.5。

表 3.5 颱風事件目錄

颱風名稱	影響時間(台灣時間)	颱風名稱	影響時間(台灣時間)
泰利	2012.06.19-2012.06.21	康芮	2013.08.27-2013.08.29
蘇拉	2012.07.30-2012.08.04	麥德姆	2014.07.20-2014.07.23
天秤	2012.08.21-2012.08.23	鳳凰	2014.09.19-2014.09.22
蘇力	2013.07.11-2013.07.13	蘇迪勒	2015.08.06-2015.08.10
潭美	2013.08.20-2013.08.22	杜鵑	2015.09.27-2015.09.30

一、具有崩塌特徵且辨識成功之地動訊號

圖 3.1 及圖 3.2 為 WTP 測站及 ALS 測站成功偵測同一起具有崩塌特徵之地動訊號，由時間域波形、頻率域波形及時頻圖皆可觀察到明顯的地動訊號特徵。WTP 測站及 ALS 測站使用的儀器均為短週期地震儀，顯示本計畫建立適用於短週期地震儀之地動訊號自動分類器能夠成功分辨具有崩塌特徵之地動訊號。圖 3.3 及圖 3.4 為 MASB 測站及 SLG 測站成功偵測另外 1 筆具有崩塌特徵之地動訊號範例，同樣於時間域波形、頻率域波形及時頻圖均能夠觀察到疑似為崩塌事件產生之地動訊號特徵，而 MASB 測站及 SLG 測站使用的儀器均為寬頻地震儀，實例說明本計畫建立之地動訊號自

動分類器於寬頻地震儀上也能夠良好的運作，並成功分辨時間域及頻率域皆有明顯崩塌特徵之地動訊號。圖 3.5、圖 3.6 及圖 3.7 亦為成功偵測之崩塌地動訊號，其中圖 3.6 及圖 3.7 為設置於 ELD 測站的寬頻地震儀及短週期地震儀成功偵測到的同一筆具有崩塌特徵之地動訊號，顯示本計畫建立分別適用於寬頻地震儀及短週期地震儀之地動訊號自動分類器能夠有效地運作，而圖 3.5 為 TPUB 測站偵測到同一筆地動訊號的時頻圖，說明該地動訊號並非僅有 ELD 測站紀錄到的特例訊號。

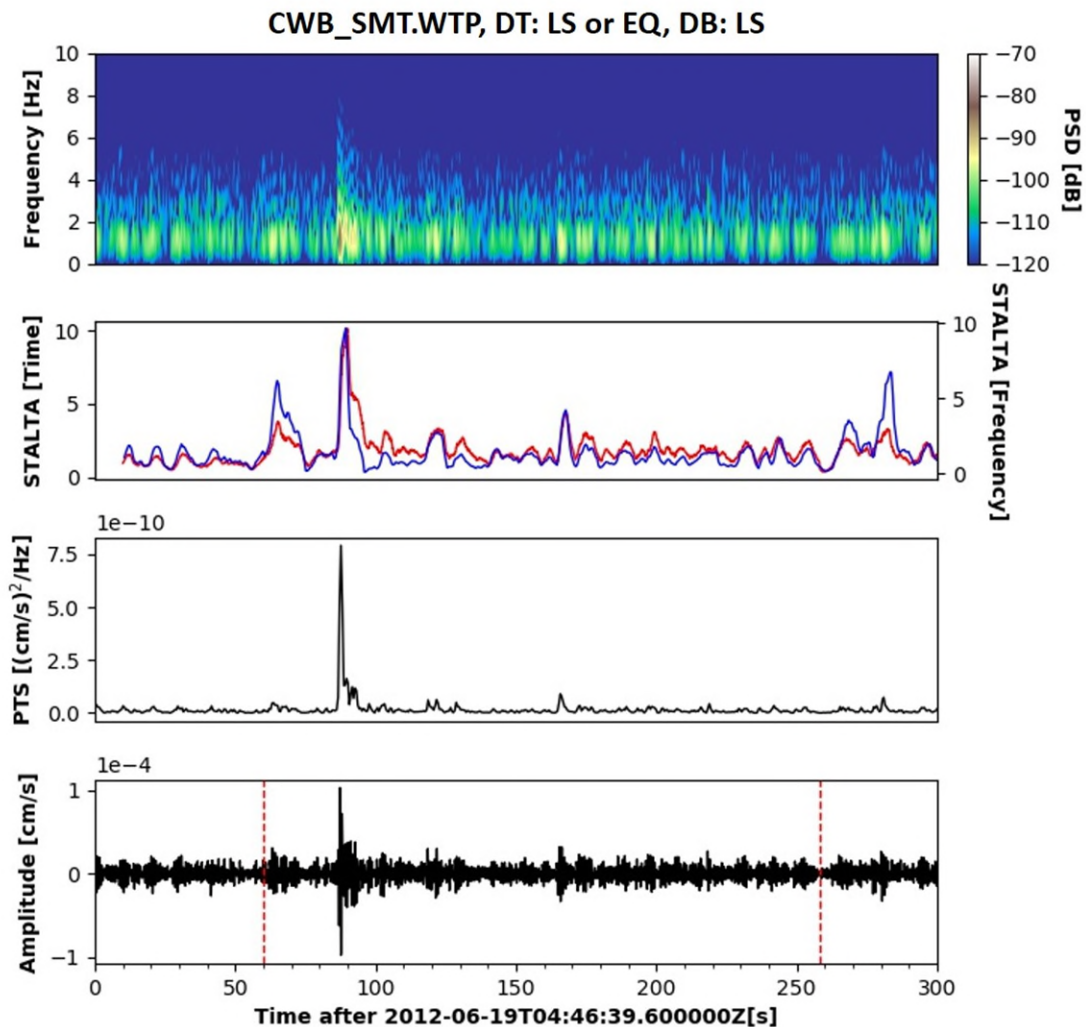


圖 3.1 WTP 短週期地震儀測站成功分類之崩塌事件 1

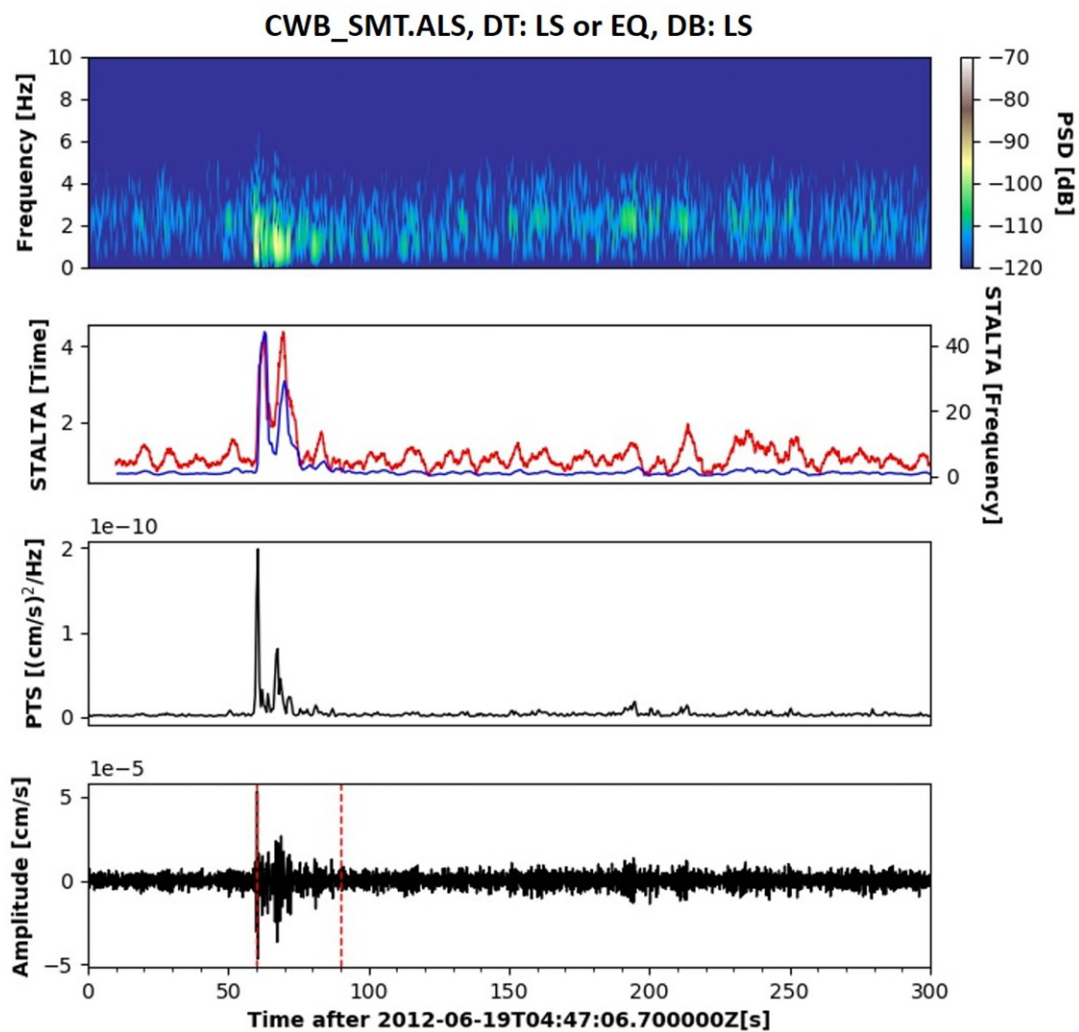


圖 3.2 ALS 短週期地震儀測站成功分類之崩塌事件 1

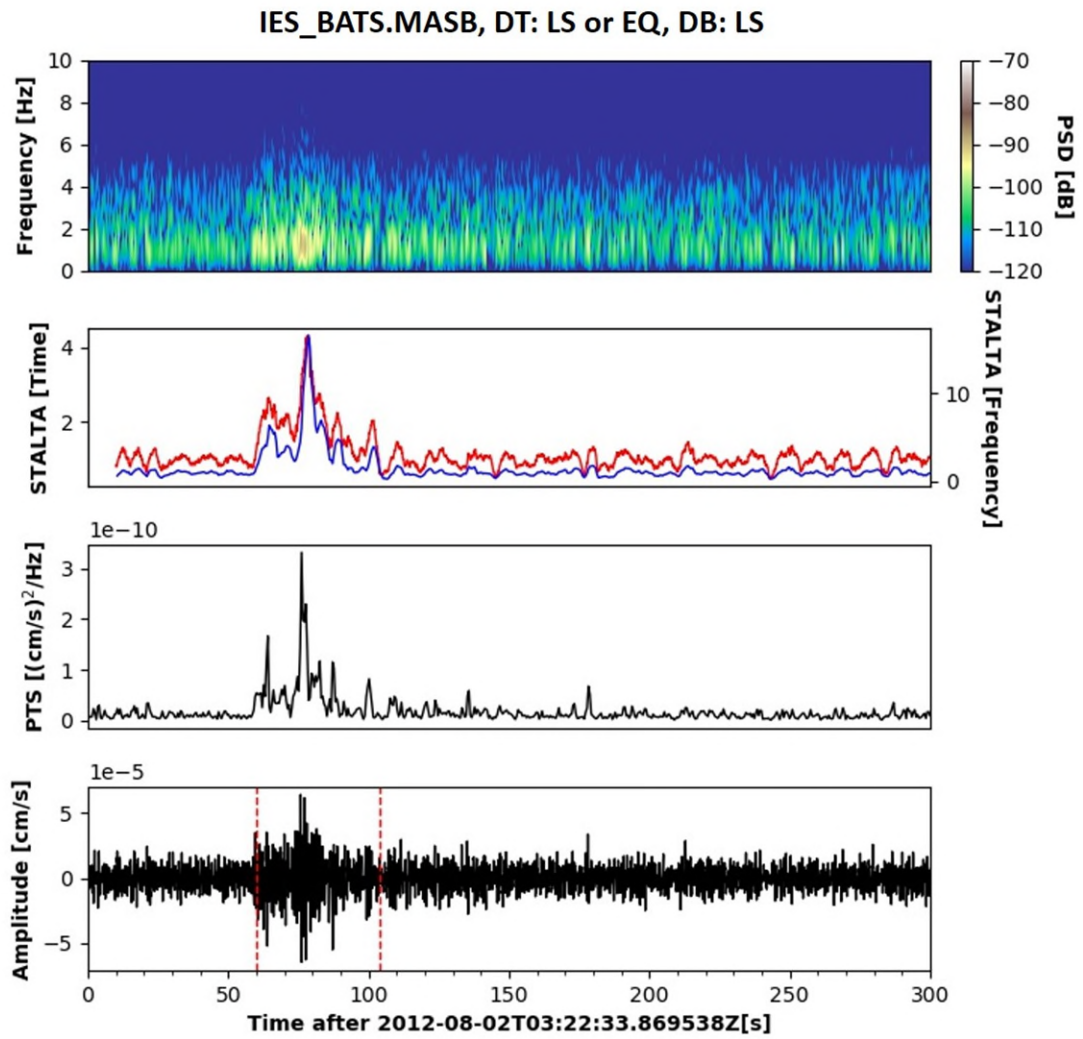


圖 3.3 MASB 寬頻地震儀測站成功分類之崩塌事件 2

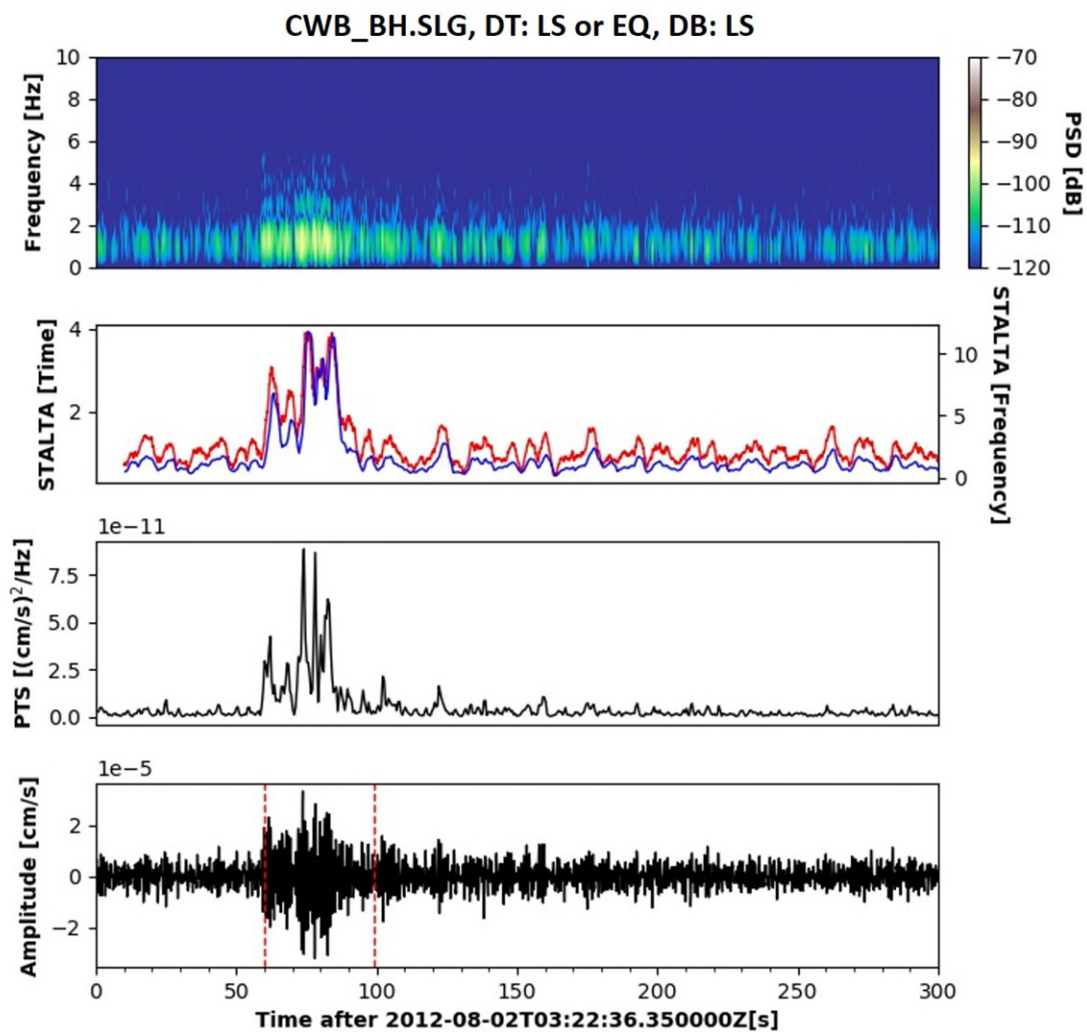


圖 3.4 SLG 寬頻地震儀測站成功分類之崩塌事件 2

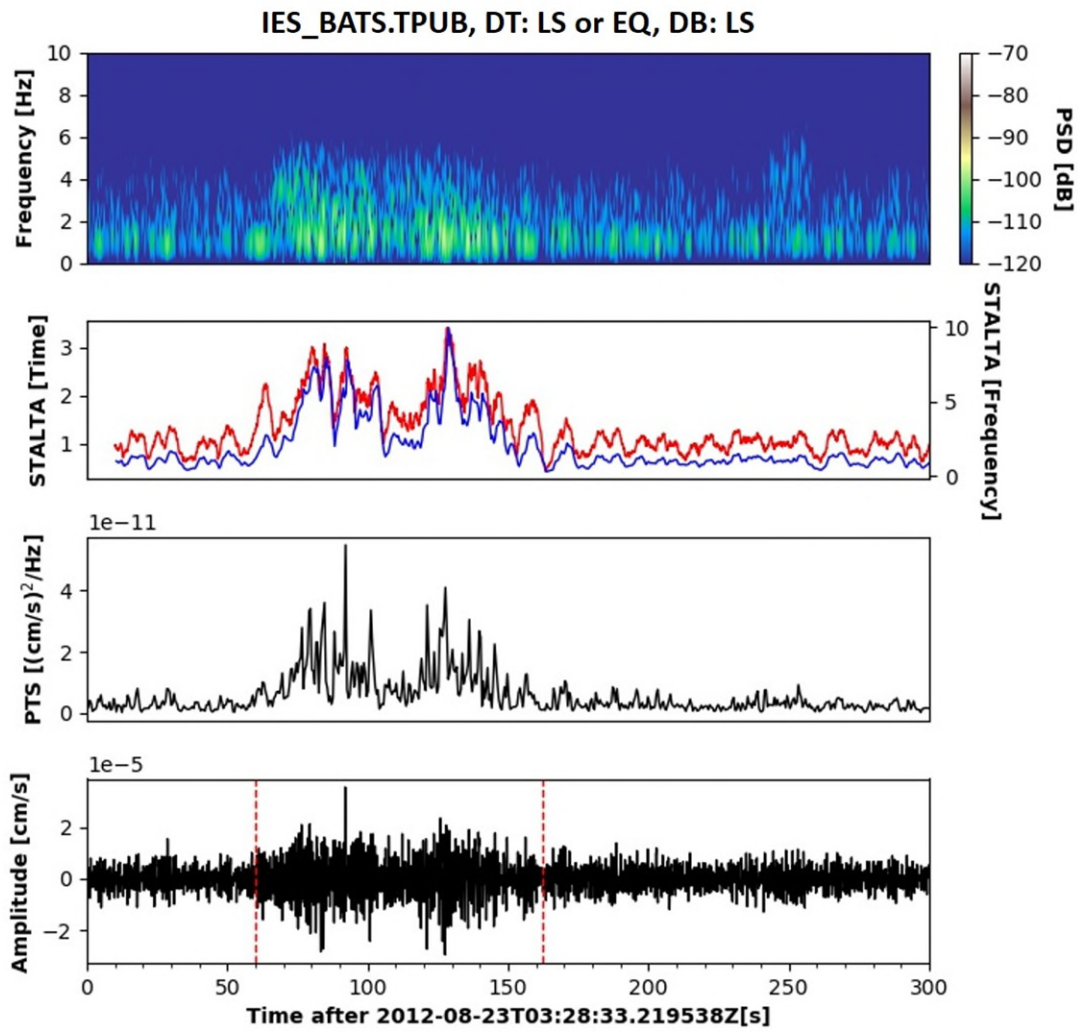


圖 3.5 TPUB 寬頻地震儀測站成功分類之崩塌事件 3

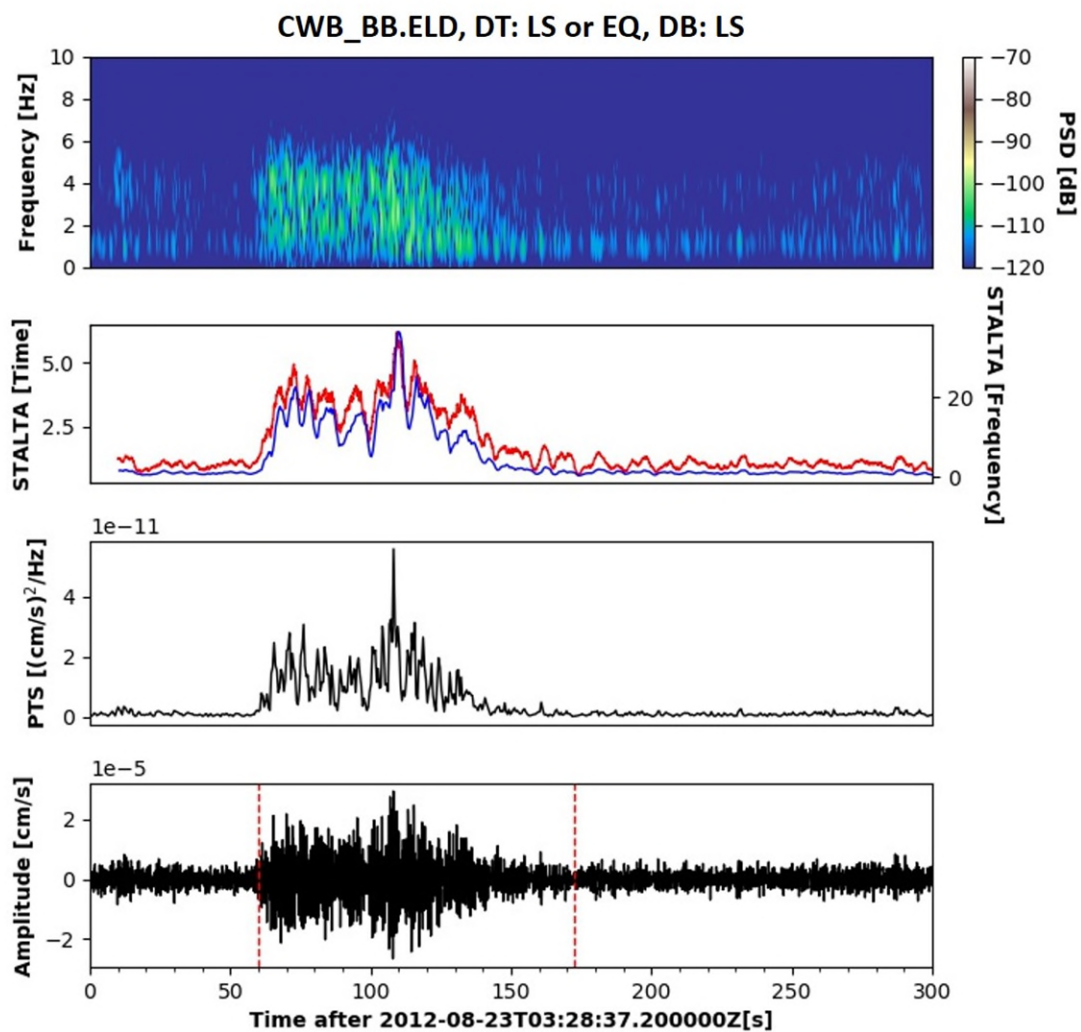


圖 3.6 ELD 寬頻地震儀測站成功分類之崩塌事件 3

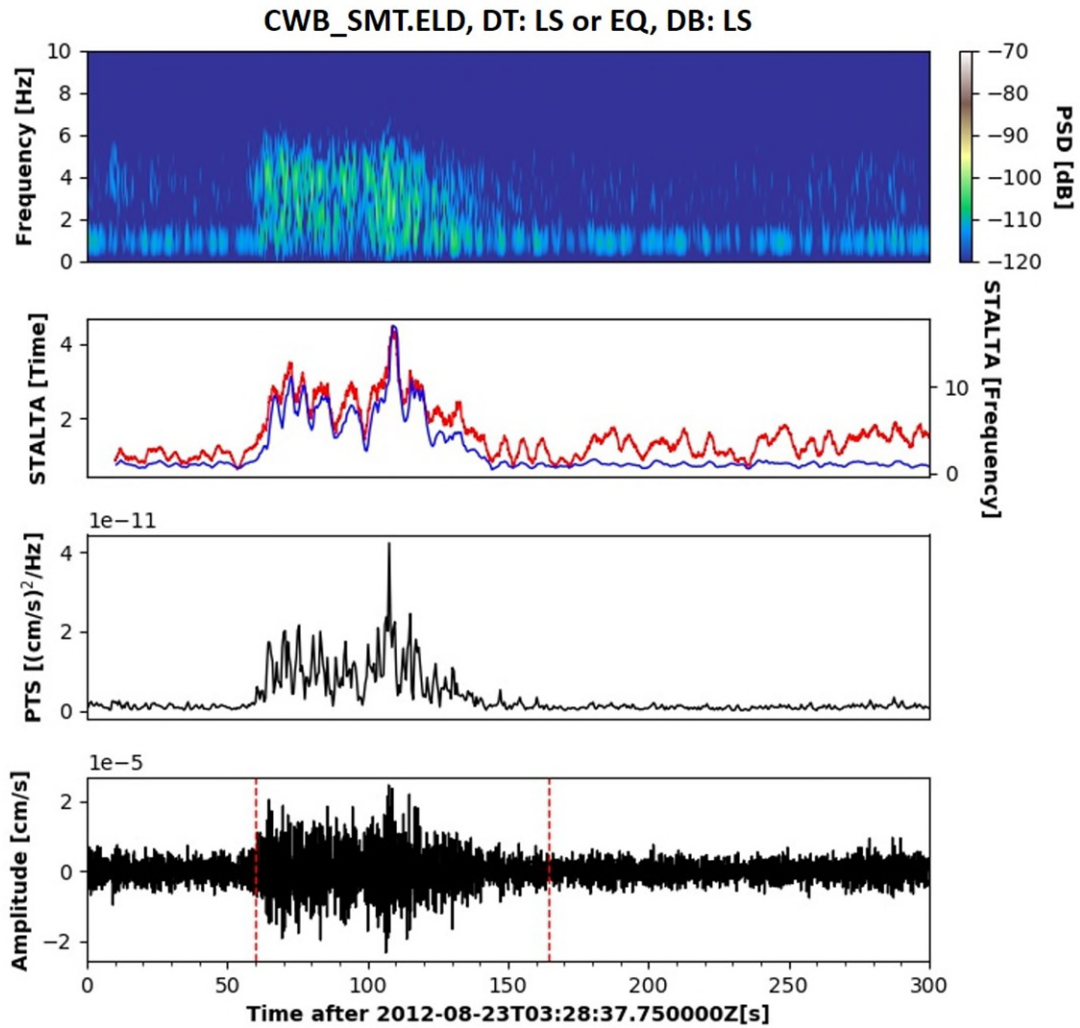


圖 3.7 ELD 短週期地震儀測站成功分類之崩塌事件 3

二、具有崩塌特徵但辨識失敗之地動訊號

圖 3.8 及圖 3.9 分別展示 ALS 測站及 CHN5 測站對同筆具有崩塌特徵地動訊號之錯誤分類，ALS 測站之分類結果為地震事件，由圖 2.8 及圖 2.9 所示，崩塌訓練樣本及地震訓練樣本之特徵值分布皆有重疊的部分，因此儘管圖 3.8 中時間域波形、頻率域波形及時頻圖具有崩塌地動訊號之特徵，仍有機會被錯誤分類為地震事件。由圖 3.9 中時間域波形可以觀察到，地動事件的訊號強度與背景噪訊差異不大，因此在第一階段運用時間域特徵值之分類結果將其分類為噪訊，但仍可在時間域波形、頻率域波形及時頻圖

觀察到崩塌地動訊號之特徵。受制於分類器中崩塌及地震之訓練樣本特徵值有重疊的部分，因此分類器有機會將特徵模糊之地震事件分類為崩塌事件，並且不論何種儀器類型，上述錯誤分類之範例皆說明本計畫建立之地動訊號分類器對於特徵不明顯的地動事件會有錯誤分類的可能。

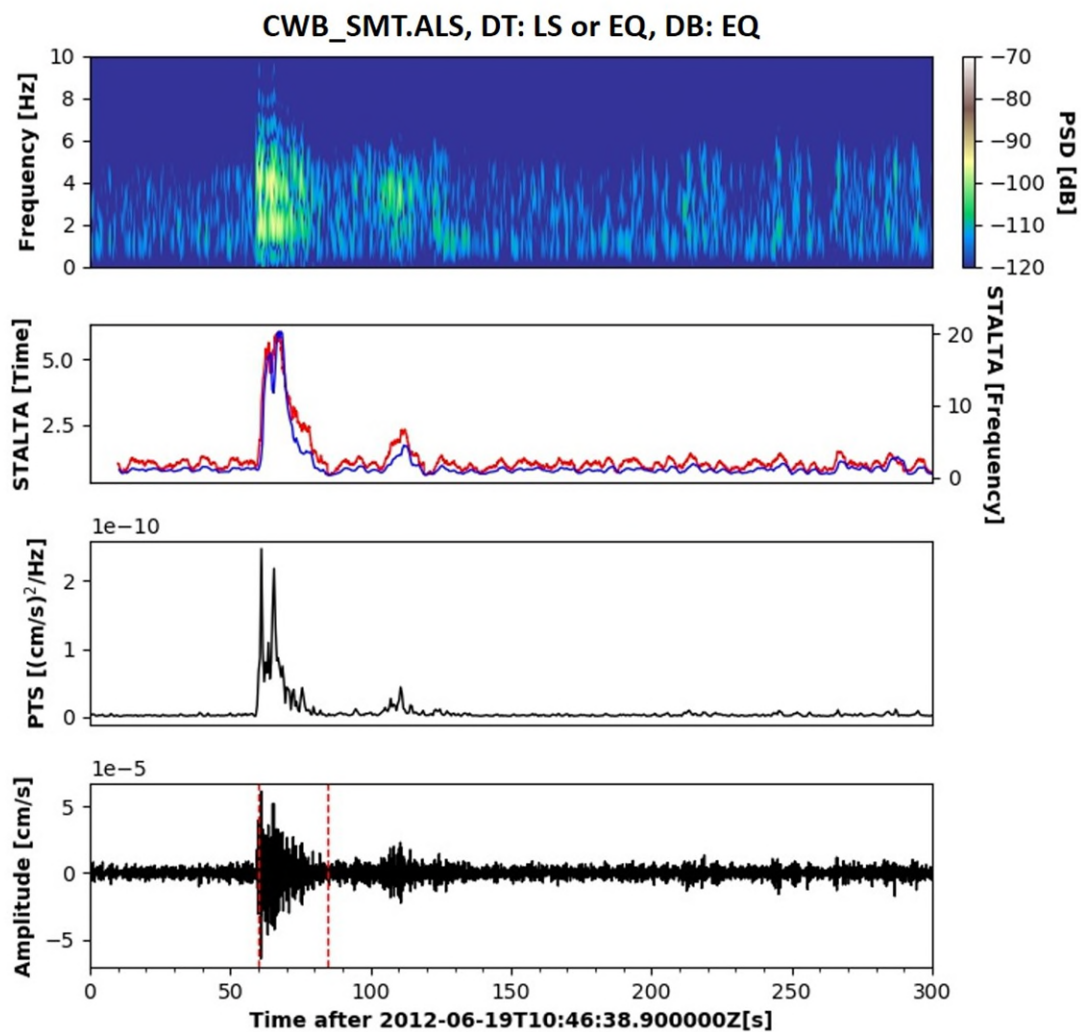


圖 3.8 ALS 短週期地震儀測站錯誤分類之崩塌事件 1

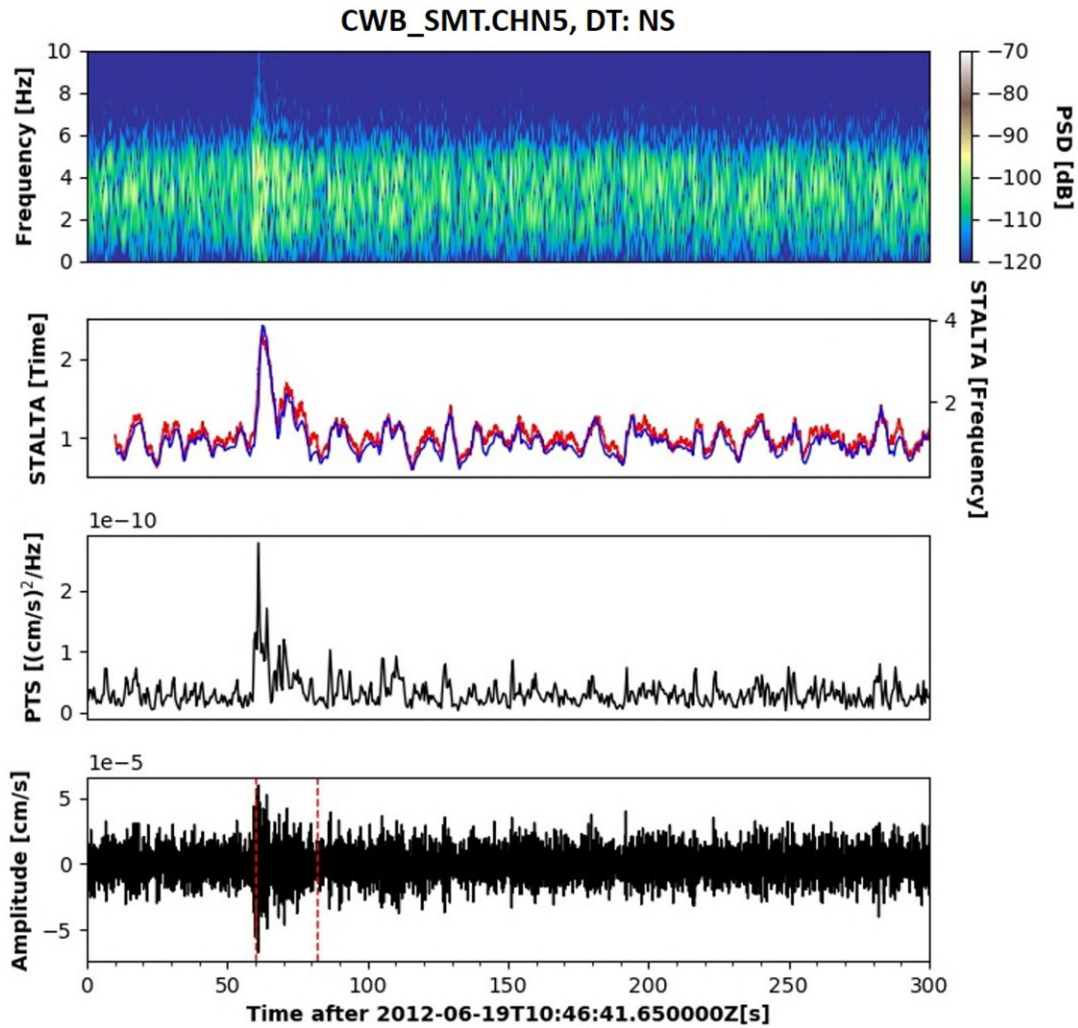


圖 3.9 CHN5 短週期地震儀測站錯誤分類之崩塌事件 1

第四節 特徵值分類效能比較

本計畫分別使用 24 項及 18 項特徵值建立適用於寬頻地震儀及短週期地震儀之地動訊號分類器，其中並非每項特徵值都能夠同時有效地區分崩塌、地震及噪訊等 3 種地動事件。因此，針對兩種分類器進行兩項測試，分別討論每項特徵值的分類效能。

圖 3.10 及圖 3.12 分別為寬頻地震儀及短週期地震儀地動訊號分類器各項特徵值分類效能之比較，編號 1-9 為時間域特徵值，其餘為頻率域特徵值。圖中的黑線代表使用全部特徵值之分類效能，兩種分類器的正確度分

別達到 93.98%及 89.2%；藍線顯示將其中一項特徵值刪去，使用剩餘特徵值之分類效能，目的在於討論缺少某一項特徵值後分類器正確度的變化；紅線則表示僅使用單一特徵值時分類器的分類效能，用於討論單一特徵值的分類效果。

由紅線的變化能夠觀察到，兩儀器分類器中所使用特徵值的分類效能有相當程度的落差，如圖 3.10 所示，寬頻地震儀分類器中分類效果最佳的特徵值為編號 20(0.01-0.1 Hz / 1-8 Hz RPSD[對數])，而分類效果最差的特徵值為編號 2(移動平均標準差， σ_{MA})，分類效能分別為 80.38%及 49.4%。藍線的數值約為 94%，雖然缺少任何 1 項特徵值對整體分類效能沒有顯著的差異，但由圖 2.8 能夠說明不同特徵值分類對於分類效果能夠相輔相成，使分類效果達到最佳化，因此每項特徵值皆有應用的價值。圖 3.11 顯示短週期地震儀分類器中分類效果最佳的特徵值為編號 13(1-5 Hz PSD)，分類效果最差的特徵值為編號 18(最低能頻率， F_{min})，分類效能分別為 75.7%及 39.8%。藍線的數值約為 90%，同樣說明任何 1 項特徵值的缺失並不會對分類器的整體分類效能有顯著的影響，但同樣由圖 2.9 特徵值對不同類型地動事件的分布差異，特徵值使用數量的增加仍能夠有效提升整體分類效果。

圖 3.11 及圖 3.13 各別為寬頻地震儀及短週期地震儀使用特徵值數量對分類器分類效果影響的評估，特徵值添加的順序依照單一特徵值的分類效能優劣由最佳至最差，由藍線的變化趨勢可以觀察使用特徵值數量的增加，分類器的正確度也隨之提升。隨著特徵值使用數量的增加，分類正確度的提升幅度也逐漸變小，但對分類器整體的正確度仍有正面的影響，說明儘管單一特徵值或許不能有效區分不同類型的地動事件，但不同地動訊號特徵值的分布差異仍能相互比較使用，達到更加的分類效果。

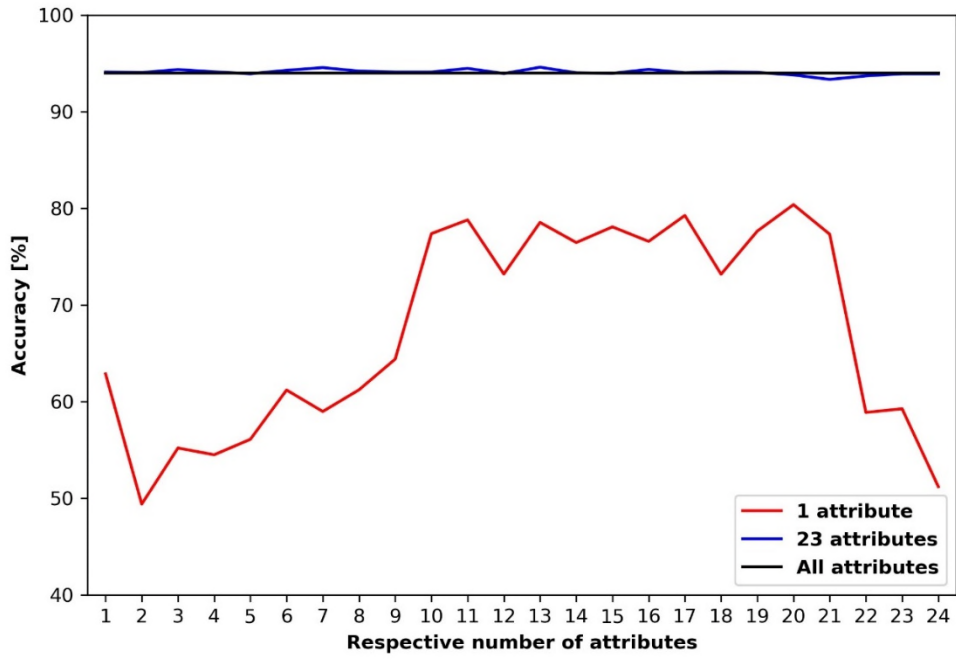


圖 3.10 寬頻地震儀 24 項特徵值分類效能比較

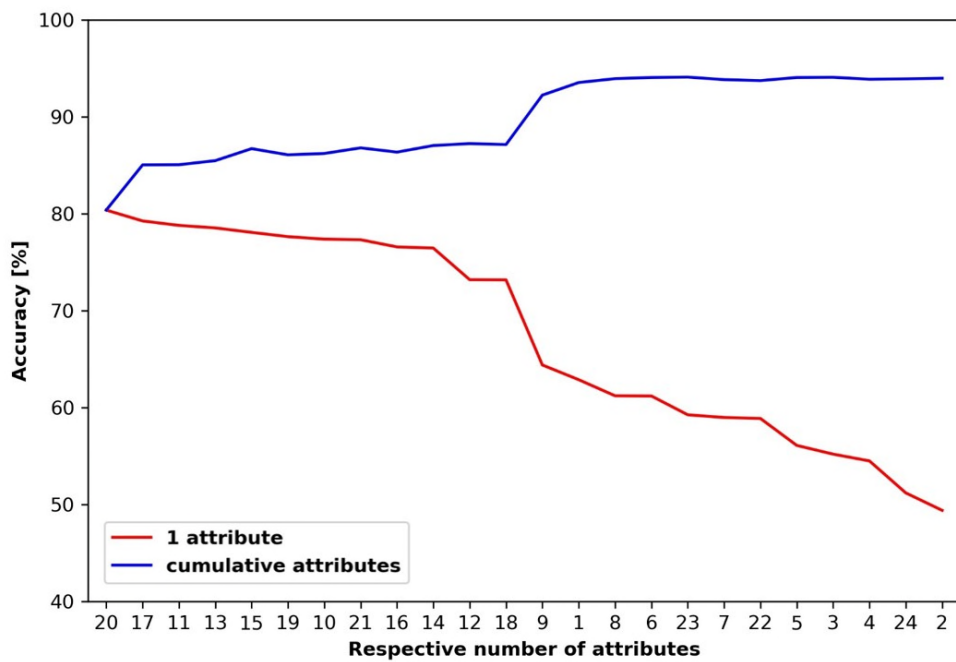


圖 3.11 寬頻地震儀特徵值分類效能疊加分析

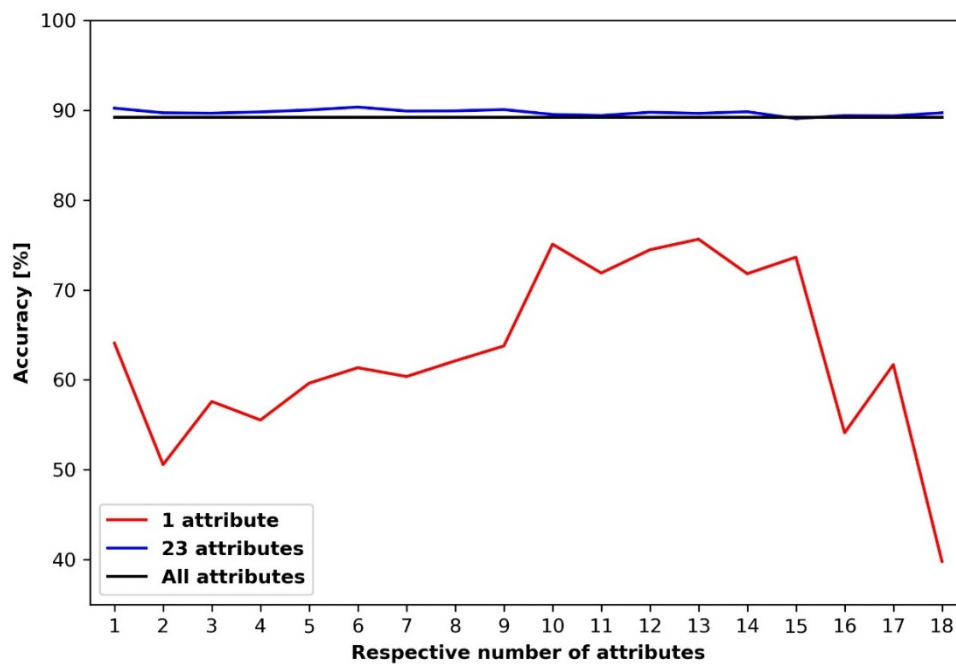


圖 3.12 短週期地震儀 18 項特徵值分類效能比較

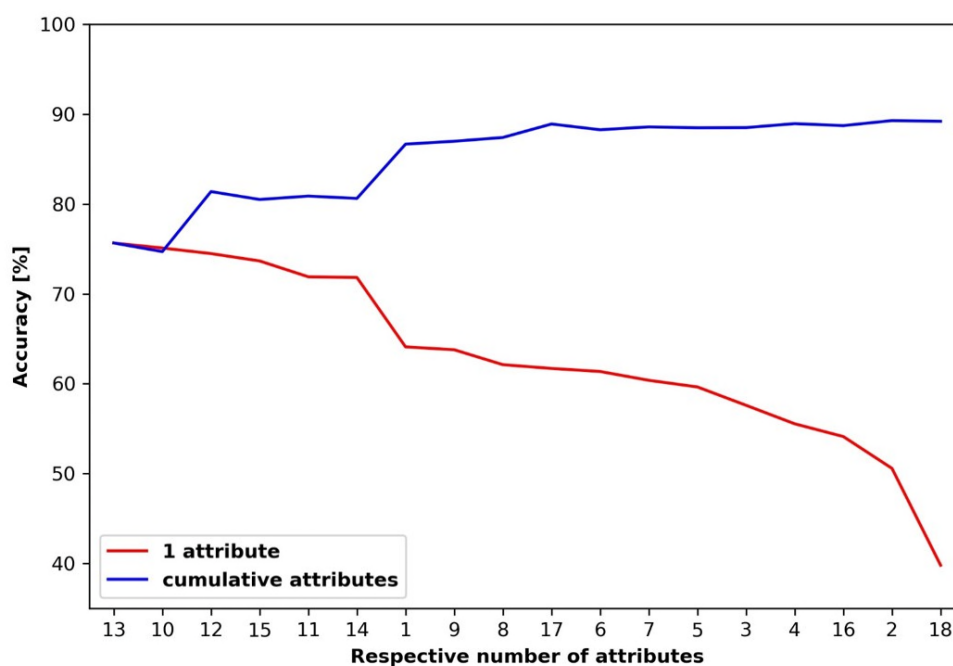


圖 3.13 短週期地震儀特徵值分類效能疊加分析

第五節 崩塌地動訊號偵測及定位配對結果

本計畫將適用於高屏溪流域寬頻地震儀及短週期地震儀之地動訊號自動分類器使用於 10 場颱風事件期間之連續地動訊號紀錄，經自動辨識及後續人工輔助檢查後，總共找出 16024 筆具有崩塌特徵之地動訊號。透過訊號時間的比對後，共有 79 起具有崩塌特徵之地動事件被 3 個以上之地震測站偵測到，並可用於後續的崩塌振動源定位，另有 315 起具有崩塌特徵之地動事件被 2 地震測站偵測到。圖 3.14 為其中一起被 3 個以上地震站記錄之崩塌地動事件案例之時頻圖，79 起崩塌地動訊號之定位結果如圖 3.15 所示。其中有 15 起地動事件之定位結果於高屏溪流域內，另有 24 起地動事件之定位結果位於海上，其餘 40 起地動事件之定位結果位於台灣本島。15 起流域內事件之原始地動訊號及時頻圖彙整於附錄三。相較於前期計畫，本計畫加入中央氣象局 Smart24 地震觀測網及井下地震觀測網，能夠有效增加地震站之密度，使定位結果能夠更加收斂於台灣本島上，而定位結果位於高屏溪流域內之崩塌將會於後續進行崩塌警戒水文因子分析。

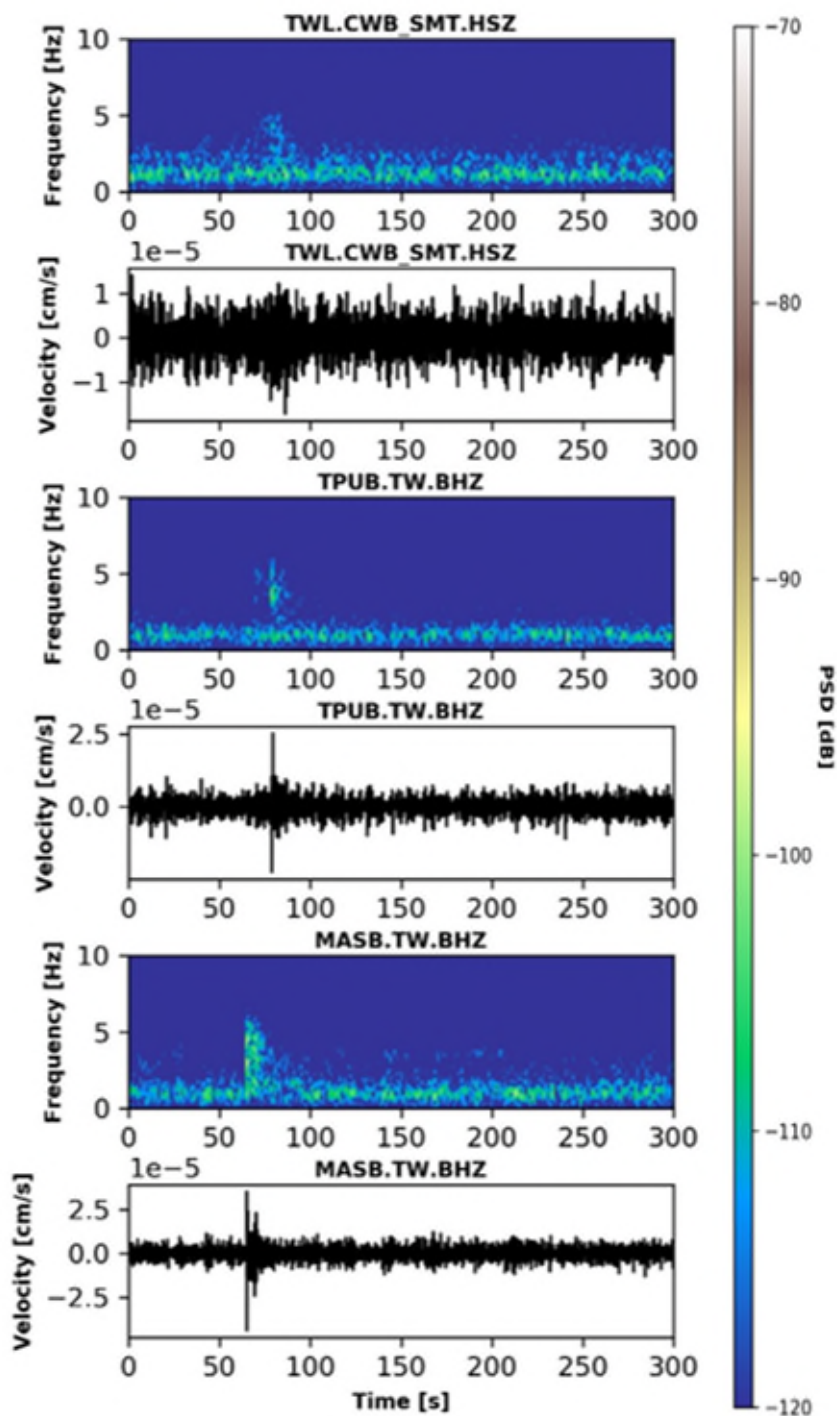


圖 3.14 具崩塌特徵地動訊號偵測及配對成功範例

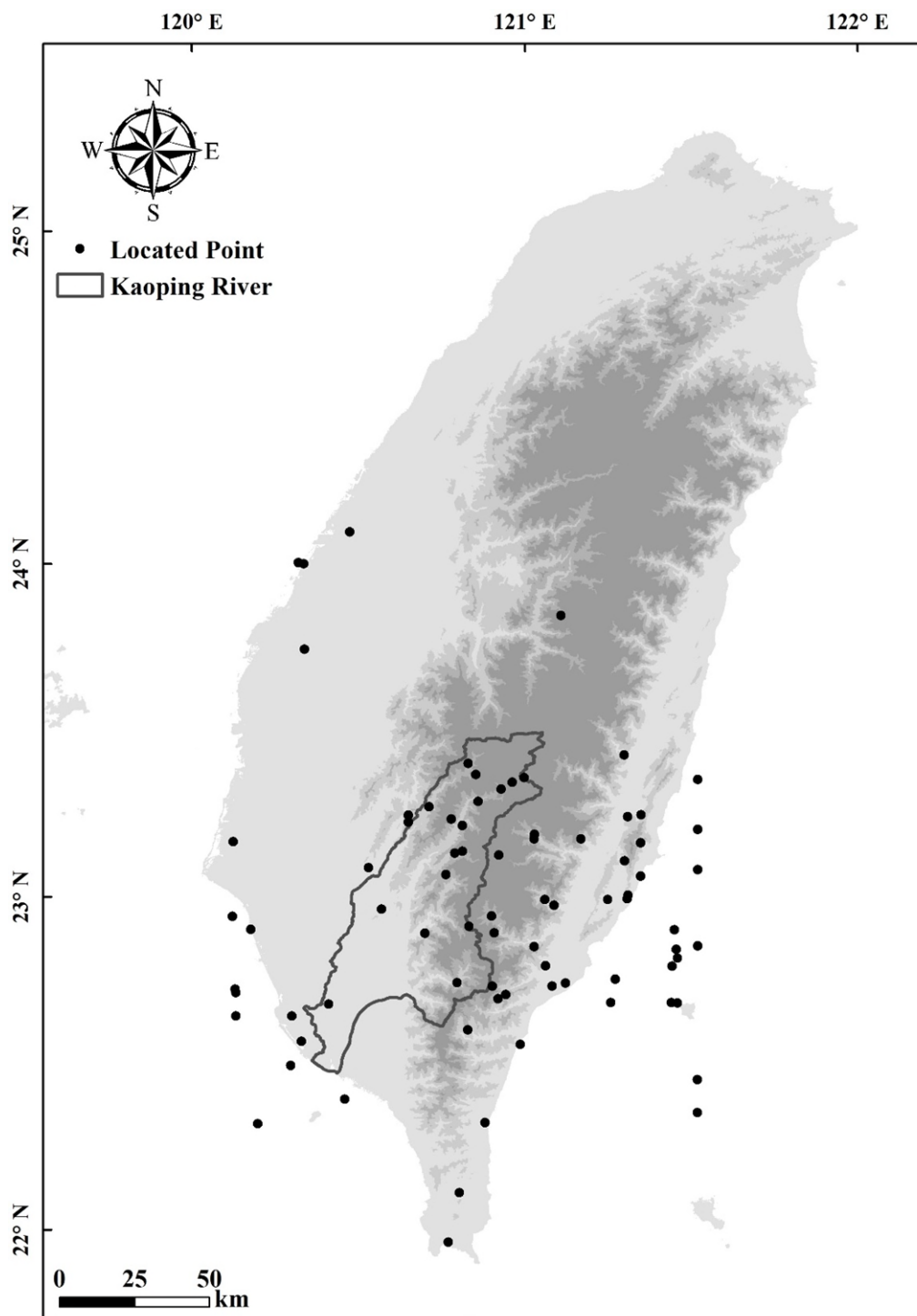


圖 3.15 79 起配對成功之具有崩塌特徵地動事件定位結果

第四章 高屏溪流域鄰近地震測站分布

第一節 高屏溪流域地震測站分布及架站成本

統計至 2020 年 2 月 25 日，本計畫挑選應用於高屏溪流域地動訊號自動分類之地震測站總數為 43 站，涵蓋之地震網為臺灣寬頻地震網(BATS)、中央氣象局井下地震網(CWB_BH)及 Smart24 地震網(CWB_SMT)。

一、臺灣寬頻地震網(BATS)

目前位於高屏溪流域內及鄰近地區之臺灣寬頻地震網測站數量為 11 站，測站基本資訊及分布狀況如表 4.1 及圖 4.1 所示。另外，也會有單一點架設不只一部寬頻地震儀，但設定不同的記錄敏感度，目的在於蒐集不同類型地動事件產生的地動訊號。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，以及其感應器較靈敏之特性，能夠記錄到資訊豐富的地動訊號。因為其儀器敏感度較高，儀器的成本也相對昂貴。以現行 Nanometrics 公司發行的 Trillium Compact 寬頻地震儀為例，地震儀本體的售價約 700,000 元新臺幣，紀錄器則以 DiGOS 公司發行的 DATA-CUBE 及 CCUBE 設備為例，售價約 100,000 元新臺幣。除地震儀本體、記錄及傳輸設備之外，完整的寬頻地震站架設成本也包含儀器架設、管線配置及設備控制站建設等費用，約 50,000 元新臺幣。因此，建置一個完整的寬頻地震站之成本約 850,000 元新臺幣。

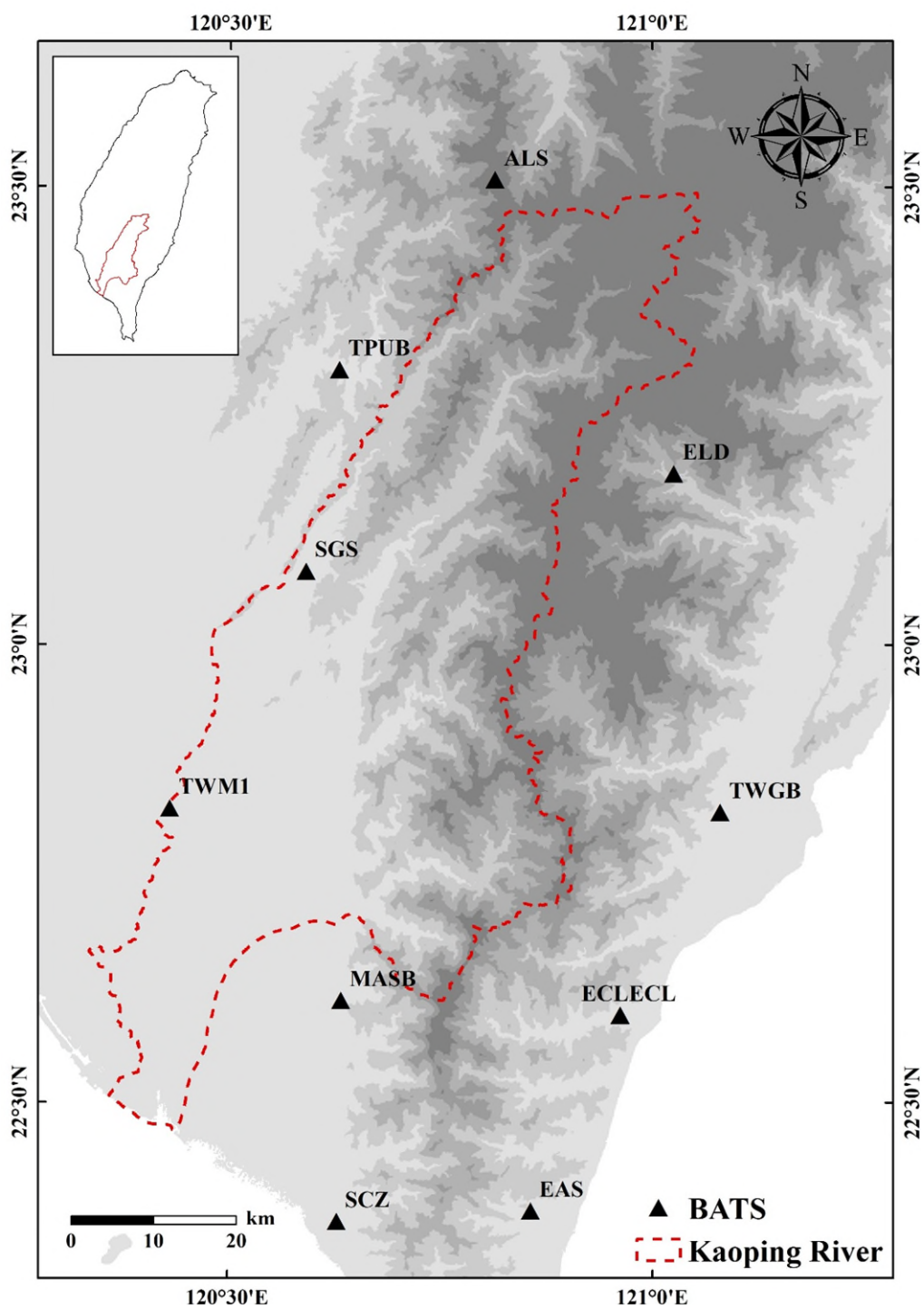


圖 4.1 高屏河流域鄰近寬頻地震網分布

表 4.1 高屏溪流域鄰近寬頻地震網地震站目錄

測站名稱	地震網	管理單位	經度	緯度
MASB	BATS	IES	120.6328	22.6119
TPUB	BATS	IES	120.6296	23.3005
TWGB	BATS	IES	121.0799	22.8176
ALS	BATS	CWB	120.8134	23.5083
EAS	BATS	CWB	120.8564	22.3820
ECL	BATS	CWB	120.9617	22.5958
ECL	BATS	CWB	120.9620	22.5960
ELD	BATS	CWB	121.0250	23.1871
SCZ	BATS	CWB	120.6282	22.3703
SGS	BATS	CWB	120.5908	23.0804
TWM1	BATS	CWB	120.4306	22.8214

二、中央氣象局井下地震網(CWB_BH)

高屏溪流域內及鄰近地區的井下地震站數目為 13 站，測站基本資訊及分布位置如表 4.2 及圖 4.2 所示。13 處地震站所使用之感應器為寬頻地震儀，與寬頻地震網之差異在於井下地震網將地震儀設置於地表下的觀測井內，因此設站成本需考量觀測井的鑽井費用。其優勢在於訊號紀錄受到人為活動等環境噪訊的干擾較小。架設完整井下地震站之成本為寬頻地震站成本加上鑽井的費用。

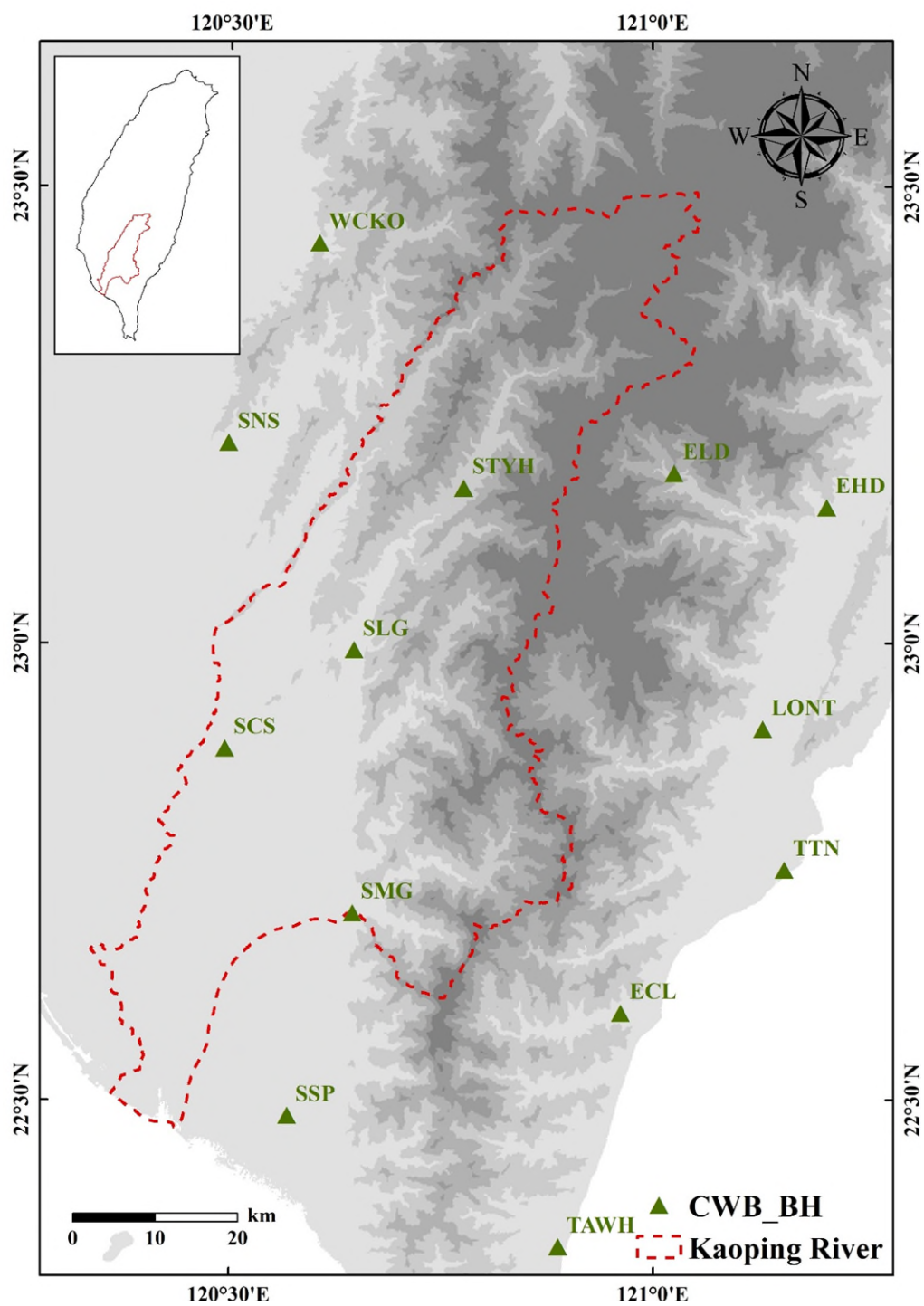


圖 4.2 高屏河流域鄰近井下地震網分布

表 4.2 高屏溪流域鄰近井下地震網目錄

測站名稱	地震網	管理單位	經度	緯度
ECL	CWB_BH	CWB	120.9617	22.5958
EHD	CWB_BH	CWB	121.2061	23.1488
ELD	CWB_BH	CWB	121.0250	23.1864
LONT	CWB_BH	CWB	121.1299	22.9064
SCS	CWB_BH	CWB	120.4938	22.8856
SLG	CWB_BH	CWB	120.6463	22.9934
SMG	CWB_BH	CWB	120.6448	22.7054
SNS	CWB_BH	CWB	120.4973	23.2198
SSP	CWB_BH	CWB	120.5681	22.4835
STYH	CWB_BH	CWB	120.7757	23.1704
TAWH	CWB_BH	CWB	120.8879	22.3398
TTN	CWB_BH	CWB	121.1549	22.7524
WCKO	CWB_BH	CWB	120.6047	23.4385

三、Smart24 地震網(CWB_SMT)

高屏溪流域內及鄰近地區之 Smart24 地震網地震站數量為 19 站，Smart24 地震網目前整合短週期地震觀測網及加速度型地震觀測網，本計畫內所稱作 Smart24 地震網之地震站皆為短週期地震觀測站，使用之感應器為短週期地震儀 S-13。目前中央氣象局架設之短週期地震站使用之感應器為 3 分量地聲計，購買費用約 10,000 元新臺幣，搭配儀器架設、管線配置、建造控制站等，設站成本約為 160,000 元新臺幣。

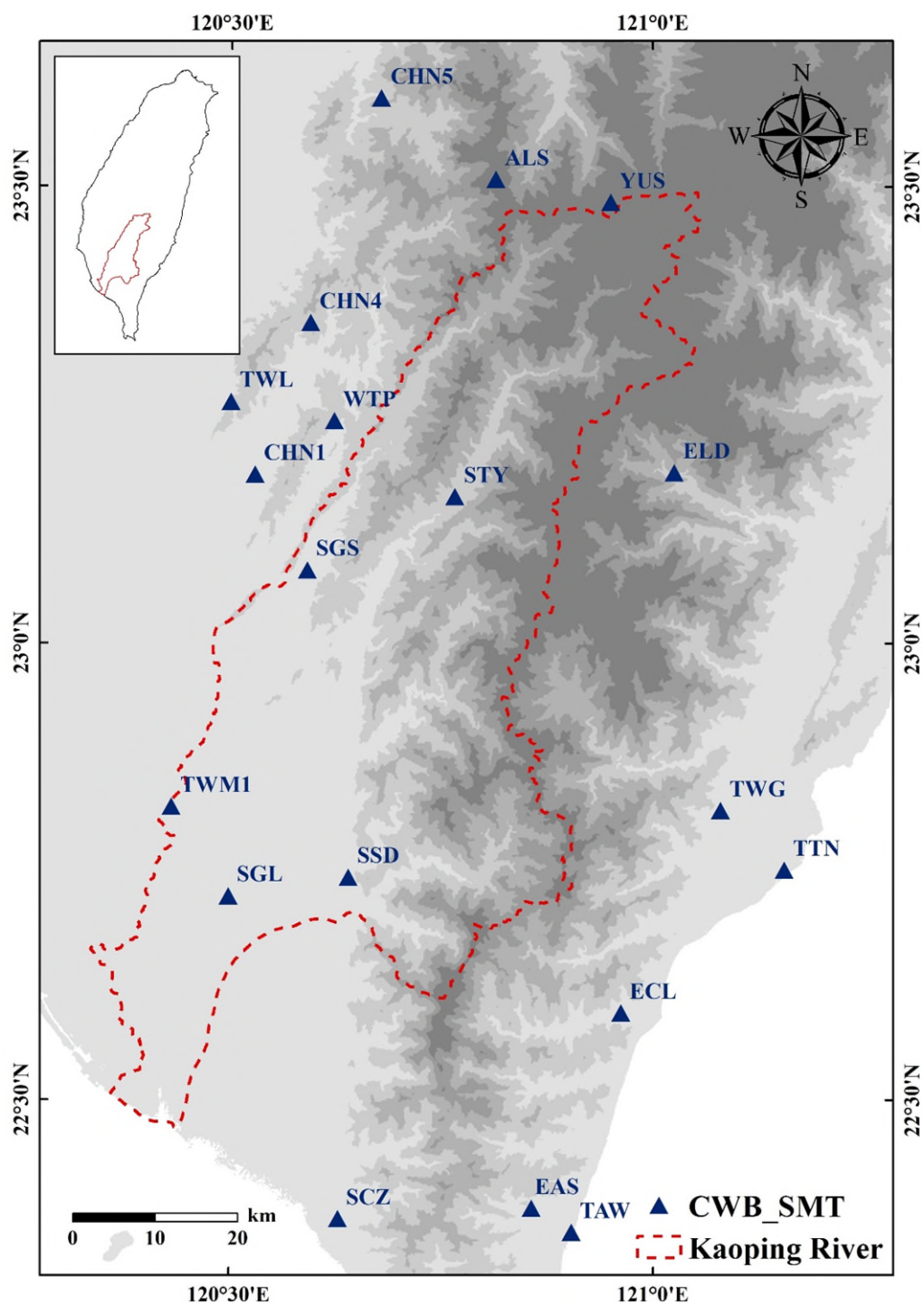


圖 4.3 高屏河流域鄰近 Smart24 地震網分布

表 4.3 高屏溪流域鄰近 Smart24 地震網目錄

測站名稱	地震網	管理單位	經度	緯度
ALS	CWB_SMT	CWB	120.8134	23.5083
CHN1	CWB_SMT	CWB	120.5285	23.1850
CHN4	CWB_SMT	CWB	120.5940	23.3513
CHN5	CWB_SMT	CWB	120.6776	23.5973
EAS	CWB_SMT	CWB	120.8564	22.3820
ECL	CWB_SMT	CWB	120.9620	22.5960
ELD	CWB_SMT	CWB	121.0250	23.1871
SCZ	CWB_SMT	CWB	120.6282	22.3703
SGL	CWB_SMT	CWB	120.4985	22.7237
SGS	CWB_SMT	CWB	120.5908	23.0804
SSD	CWB_SMT	CWB	120.6402	22.7443
STY	CWB_SMT	CWB	120.7655	23.1608
TAW	CWB_SMT	CWB	120.9036	22.3558
TTN	CWB_SMT	CWB	121.1549	22.7524
TWG	CWB_SMT	CWB	121.0799	22.8177
TWL	CWB_SMT	CWB	120.4999	23.2648
TWM1	CWB_SMT	CWB	120.4306	22.8214
WTP	CWB_SMT	CWB	120.6223	23.2438
YUS	CWB_SMT	CWB	120.9500	23.4833

第二節 大規模崩塌潛勢區地動訊號觀測規劃

高屏溪流域內有 5 處水土保持局劃設之高潛勢大規模崩塌優先辦理區，分別為編號 20(新庄)、編號 21(萬山)、編號 22(寶山)、編號 23(光明巷)及編號 24(阿禮)，其分布位置如圖 4.4 所示。本計畫分別針對各大規模崩塌潛勢區選擇 3 座鄰近地震站，使其對潛勢邊坡呈三角包覆，作為崩塌地動訊號監測應用。針對各潛勢崩塌邊坡規劃的 3 座地震測站整理於表 4.4，表中測站顏色對應不同觀測網(黑色：BATS、深綠色：CWB_BH 及深藍色：CWB_SMT)，距離代表各測站至潛勢區之距離，單位為公里。目前所挑選之地震站僅考量與大規模崩塌潛勢區之距離，後續仍需要針對測站地動訊號之紀錄品質及周遭噪訊之影響來評估是否適合。

前一節中所提及不同類型地震儀的架設成本及儀器特性，寬頻地震儀能夠觀察到低頻訊號且靈敏度較高，但成本過於昂貴，依觀測目的的不同應選擇合適的地震儀。目前針對崩塌的地動訊號研究有二個方向：(1)崩塌地動訊號偵測；(2)崩塌地下速度變化監測。

崩塌地動訊號偵測為本計畫之主要目標，目前成果顯示寬頻地震儀及短週期地震儀皆能使用機器學習分類技術完成崩塌地動訊號的偵測，於後續定位後提供崩塌發生時間及相關水文參數分析等資訊。提高地震測站的密度則能夠有效增加流域內崩塌地動訊號偵測的完整度，若需要大量佈設地震站，採用低成本短週期地震儀即可達到不錯的效果。

而崩塌地下速度變化監測及崩塌地下速度構造反演主要是針對個案進行分析，Mainsant et al. (2012)成功使用地動訊號噪訊分析預測淺層崩塌的發生，該研究設置二個短週期地震儀於目標案例的兩側形成地震站對，再藉由震波傳遞的速度變化探討邊坡下材料性質的改變。如表 4.4 所示，若要針對流域內 5 處高潛勢大規模崩塌進行類似的地下傳波速度監測，現已架

設之地震測站皆距離太遠而無法實施，需要額外架設地震站並鄰近於崩塌地形成地震站對。該類型觀測網至少需要架設 2 個地震測站構成地震站對橫跨監測目標，地震站對的架設與擺放需要考慮目標邊坡的形狀、破壞的滑動方向、及破壞深度等資訊。例如邊坡寬度過大，是否要考慮於預估破壞區域內架設低成本的短週期地震儀，而破壞深度較深是否要採用能記錄低頻訊號的寬頻地震儀，不同案例皆需要考慮地震儀的使用以達到最佳的監測效果。

現今高屏溪流域內及鄰近地震站分布如圖 4.4 所示，可以明顯觀察到 5 處高潛勢大規模崩塌周遭之地震測站皆有些許距離，尤其以東部地震測站分布較稀疏，根據前文所述若要對其進行崩塌監測，或許可以於崩塌地周遭加設成本較低的短週期地震儀。若要額外增設成本較高的寬頻地震儀，也可以選擇架設於高潛勢大規模崩塌的東側以達到良好的包覆度作崩塌地動訊號的偵測。

表 4.4 大規模崩塌潛勢區地動訊號監測站目錄

編號	名稱	測站 1(距離)	測站 2(距離)	測站 3(距離)
20	新庄	SLG(7.76)	SGS(11.02)	SCS(13.36)
21	萬山	SLG(9.94)	SCS(19.16)	TWGB(42.38)
22	寶山	SLG(8.37)	STYH(15.92)	ELD(36.05)
23	光明巷	SSD(8.54)	SMG(10.17)	TWGB(37.37)
24	阿禮	SMG(12.09)	MASB(18.23)	TWGB(34.34)

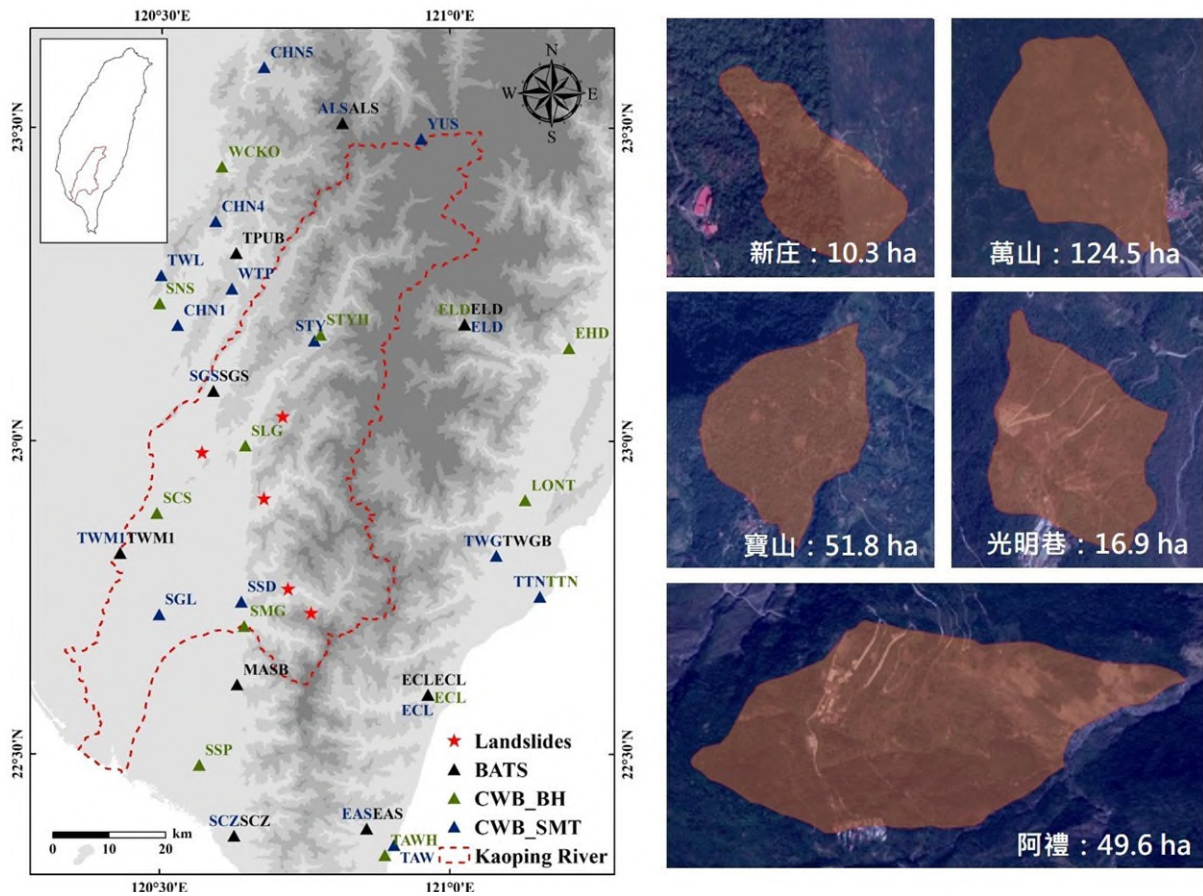


圖 4.4 高屏河流域高潛勢大規模崩塌優先辦理分布

第五章 崩塌警戒水文因子

第一節 雨量分析結果

本計畫將建立之高屏溪流域地動訊號自動分類器應用於 10 場颱風期間之連續地動紀錄，最終再搭配人工檢查，共獲得 79 起地動事件可同時由 3 個以上地震站觀測到具有崩塌之地動訊號特徵。經過崩塌振動源的定位後，有 15 起成功定位於高屏溪流域內。此外，本計畫也加入前期計畫成功偵測並定位於高屏溪流域之 37 處崩塌事件，進行共 52 處崩塌事件之促崩降雨分析，崩塌分布如圖 5.1 所示。表 5.1 整理共 52 處流域內崩塌之時間及位置資訊，崩塌詳細地形、地理及地質資訊則整理於附錄四。

表 5.1 52 處崩塌基本資訊表

崩塌編號	發生時間(臺灣時間)	X 座標(97TM2)	Y 座標(97TM2)
2003_015	2003.0804.1218	246564.61	2591784.23
2005_003	2005.0719.0342	223032.69	2522166.21
2005_004	2005.0721.0215	224553.67	2515741.09
2005_001	2005.0721.0555	231268.90	2531158.44
2005_002	2005.0721.1433	221036.68	2527652.31
2008_006	2008.0719.0755	215190.79	2560571.92
2009_076	2009.0808.1127	241020.00	2580697.00
2009_163	2009.0808.1155	224785.93	2553368.84
2009_172	2009.0808.1425	232057.05	2551219.84
2009_194	2009.0808.1428	216279.71	2545219.62
2009_193	2009.0808.1515	219651.78	2545620.65

集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究

崩塌編號	發生時間(臺灣時間)	X 座標(97TM2)	Y 座標(97TM2)
2009_295	2009.0808.1535	219471.58	2517090.09
2009_197	2009.0808.1610	230823.98	2543927.69
2009_074	2009.0808.1620	230823.98	2543927.69
2009_280	2009.0808.1840	235456.92	2521785.28
2009_077	2009.0808.1935	244820.49	2580493.50
2009_214	2009.0808.2156	215277.66	2539852.51
2009_125	2009.0809.0015	237769.25	2564220.14
2009_308	2009.0809.0219	220784.00	2511106.00
2009_216	2009.0809.0228	214704.64	2538569.48
2009_311	2009.0809.0319	220452.54	2508145.92
2009_065	2009.0809.0427	241755.49	2589015.65
2009_064	2009.0809.0511	239662.48	2594844.75
2009_132	2009.0809.0616	214803.80	2562670.96
2009_181	2009.0809.0702	209362.60	2548148.64
2009_091	2009.0809.0714	224794.08	2576716.30
2009_108	2009.0809.0834	226183.05	2568170.14
2009_102	2009.0809.1052	226174.06	2569914.17
2009_271	2009.0809.1900	226583.77	2523926.27
2009_097	2009.0810.1154	229446.14	2571676.23
2009_086	2009.0810.1222	225301.10	2578509.34
2009_135	2009.0810.1906	235344.00	2561715.00
2009_267	2009.0811.0242	225582.00	2524697.00
2010_045	2010.0920.0724	222083.70	2527664.31

崩塌編號	發生時間(臺灣時間)	X 座標(97TM2)	Y 座標(97TM2)
2011_014	2011.0831.1731	247561.54	2580912.53
KP201201	2012.0731.0003	219211.40	2532233.72
KP201302	2013.0711.2325	235668.56	2575960.36
KP201303	2013.0712.0032	235012.64	2584941.63
KP201304	2013.0820.1538	229089.01	2515728.85
KP201305	2013.0827.2123	220596.90	2574310.44
2013_019	2013.0830.0348	232012.00	2529054.00
KP201406	2014.0721.0003	242688.26	2580096.81
KP201407	2014.0721.0052	190265.25	2508518.03
KP201408	2014.0919.1105	205897.40	2540295.00
KP201409	2014.0921.1049	232614.65	2588676.37
KP201410	2014.0923.0747	246145.04	2582354.33
KP201511	2015.0806.1731	230788.70	2567926.37
2015_029	2015.0809.0300	227034.00	2567900.00
KP201512	2015.0809.0309	227476.09	2570145.75
KP201513	2015.0928.0319	225757.35	2551611.25
KP201514	2015.0928.0701	230777.81	2559477.00
KP201515	2015.0928.1128	228452.32	2558782.77

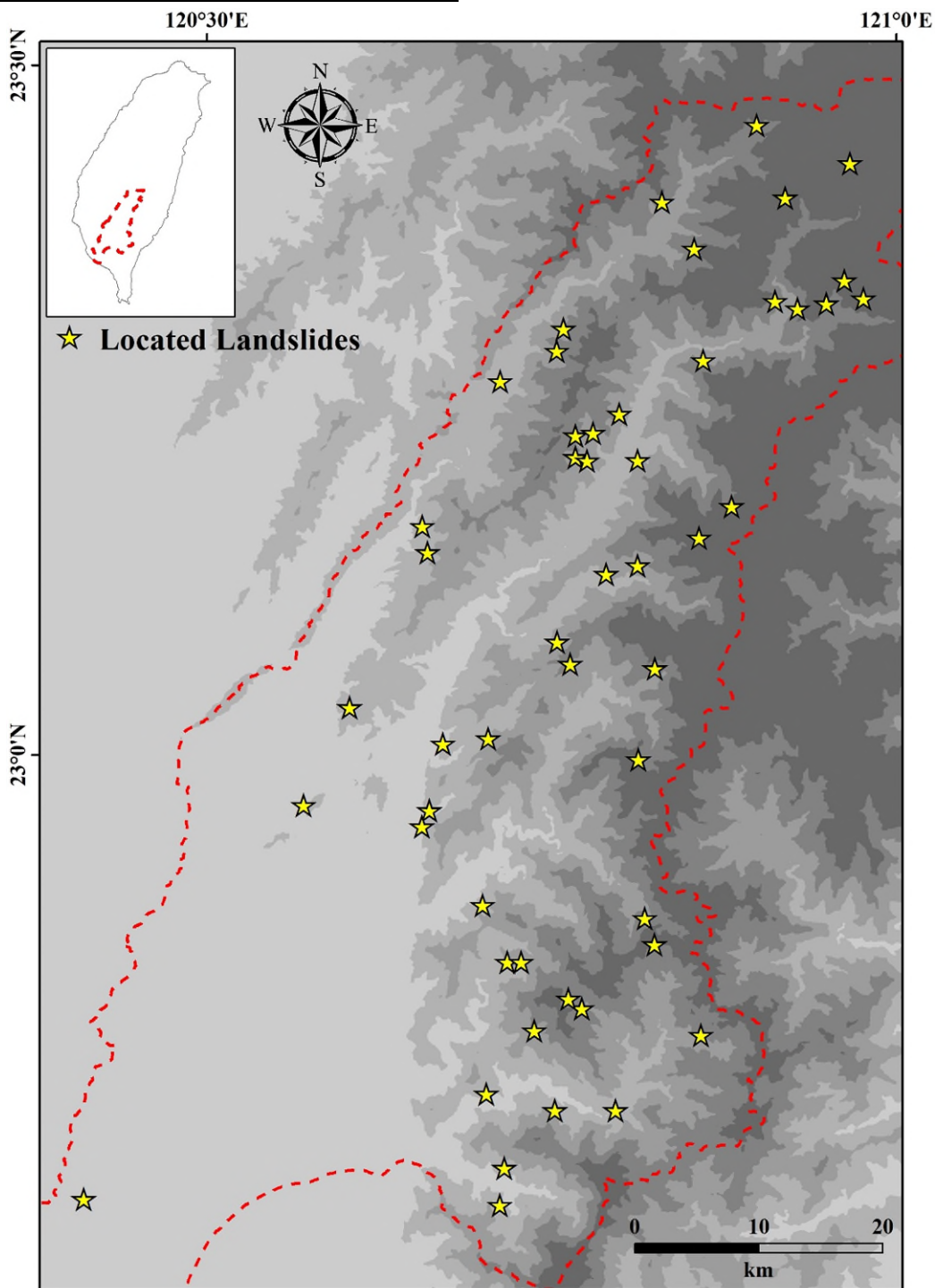


圖 5.1 52 處流域內崩塌分布圖

由於本計畫的主要目標為降雨誘發之大規模崩塌，因此用於雨量分析之案例僅使用明顯發生於豪雨期間之崩塌事件。促崩降雨分析案例的篩選條件為崩塌發生時有效累積雨量大於 350 mm 或降雨延時大於 24 小時，滿

足上述兩點條件其中之一的崩塌事件即納入降雨分析統計。另外，本計畫之崩塌降雨分析也考慮了前期降雨的影響，將颱風事件影響前 7 日的日雨量資料作為前期降雨(R_a)。位於高屏溪流域中的 52 處崩塌中，符合降雨分析條件的崩塌為 48 處，後續將使用 48 處崩塌事件之降雨資料進行各種降雨條件分析。採用有效累積雨量大於 350 mm 或降雨延時大於 24 小時為篩選事件標準乃參考自中央氣象局目前大豪雨之定義標準，其定義為 24 小時累積雨量達 350 mm 以上。雖然本研究使用之標準不完全與氣象局大豪雨之標準一致，但雨量計算標準類似將有助於後續應用者參考及使用。

圖 5.2 展示崩塌事件降雨延時的統計結果，由圖中能夠觀察到多數的崩塌事件發生於降雨延時大於 48 小時的情況，降雨延時短於 48 小時就發生的崩塌事件數目為 10 起。藉由颱風前後衛星影像的比對發現，此類短延時降雨便發生之崩塌均為舊有崩塌地再擴大或重複發生的事件。多數崩塌事件發生時的降雨延時超過 48 小時，顯示長時間的持續降雨是誘發大規模崩塌的重要因子之一。

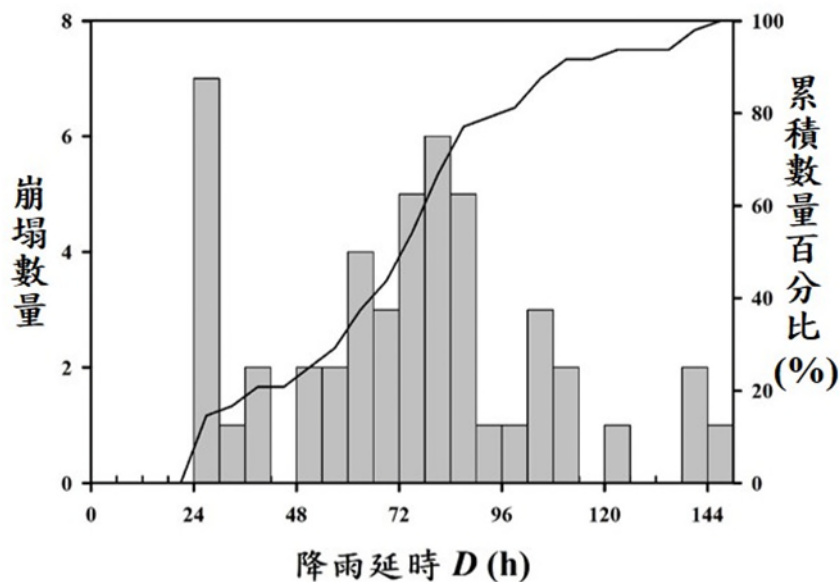


圖 5.2 崩塌事件之降雨延時統計

48 處崩塌事件之累積雨量統計如圖 5.3 所示，其中半數以上崩塌事件發生時的累積雨量超過 1,000 mm，說明大量的累積降雨可能是誘發大規模崩塌的重要因素。累積雨量未達 500 mm 之崩塌事件數目為 12 處，這些事件多發生於降雨初期，而降雨延時剛好符合本計畫設計之降雨延時超過 24 小時的案例篩選條件。根據颱風前後之衛星影像的比對結果，這些事件也均為舊有崩塌地再擴大或重複發生的崩塌類型，因此崩塌發生時的累積雨量相對低於新發生的崩塌事件。此外，前期雨量的統計中可以發現 R_a 最大值为 68.73 mm，僅占該崩塌事件有效雨量的 11%。48 處崩塌事件之前期降雨也平均僅占有有效降雨量的 11%，顯示前期降雨對有效降雨量的影響可能相當有限。因為本計畫採用的前期降雨計算方式，以及雨場分割方法均可能使得前期降雨的效應被弱化，未來可針對前期降雨的計算方式另作探討，以了解前期降雨對觸發大規模崩塌是否存在更顯著地影響。

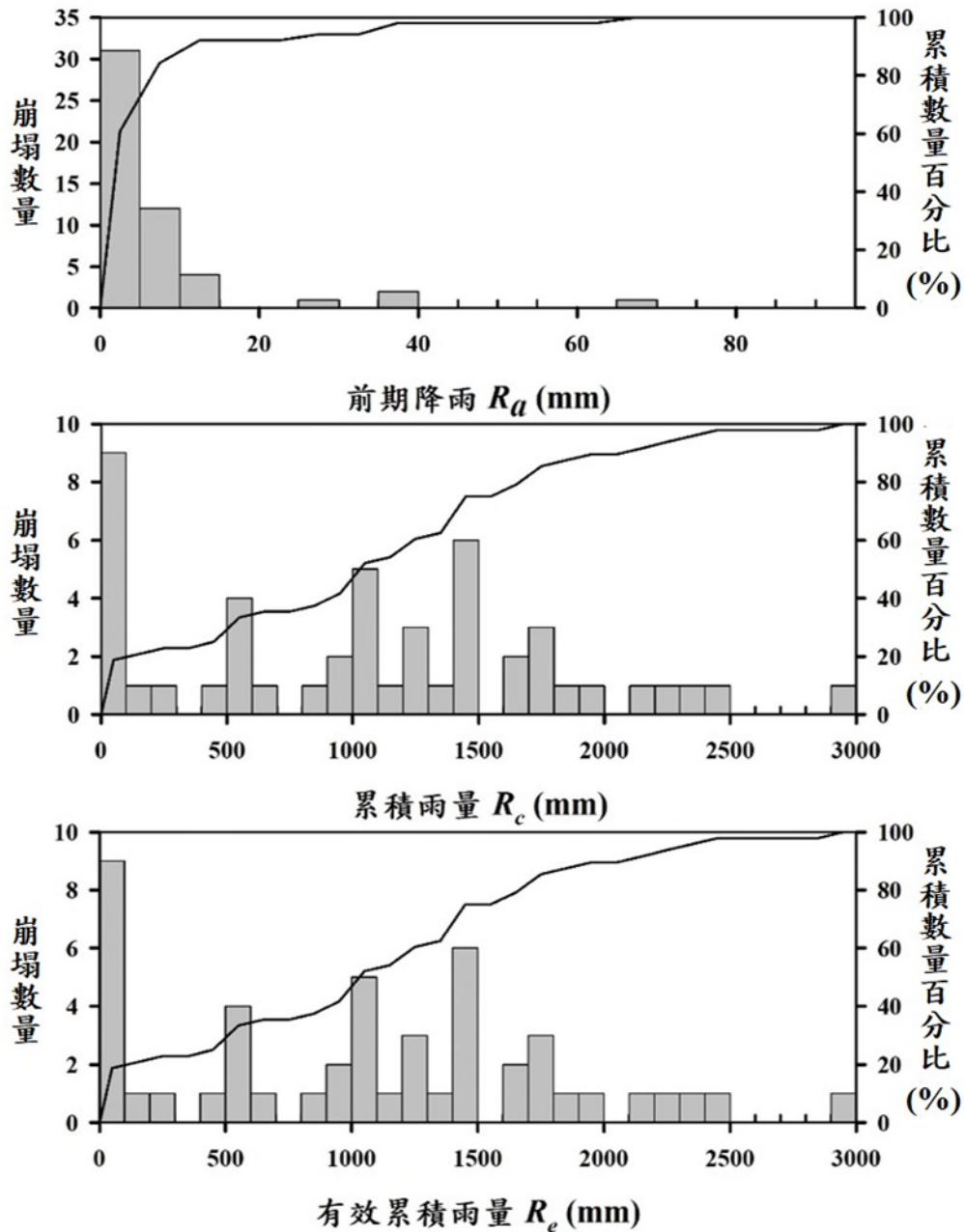


圖 5.3 崩塌事件之累積雨量統計

統計前述兩個雨量因子的結果說明，引發大規模崩塌的雨量條件可能與長降雨延時以及高累積降雨量有較顯著的關聯性，而在降雨強度因子分析之中，本計畫分別分析了崩塌發生時的平均降雨強度(I_{ave})、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)、九小時降雨強度(I_9)以及十二小時降雨強度(I_{12})，統計結果展示於圖 5.4。觀察圖 5.4 能夠發現只有少

數崩塌事件的 I_1 、 I_3 、 I_6 、 I_9 、 I_{12} 有明顯的極端高值(>60 mm/h)，而多數崩塌事件發生時的降雨強度都低於 20 mm/h，說明大規模崩塌的發生與數小時內的降雨強度可能沒有明顯的關聯性。此外，由於崩塌多數發生於降雨延時較長的條件下，平均降雨強度便沒有顯著的極端高值，甚至多數事件發生時之平均降雨強度低於 5 mm/h。

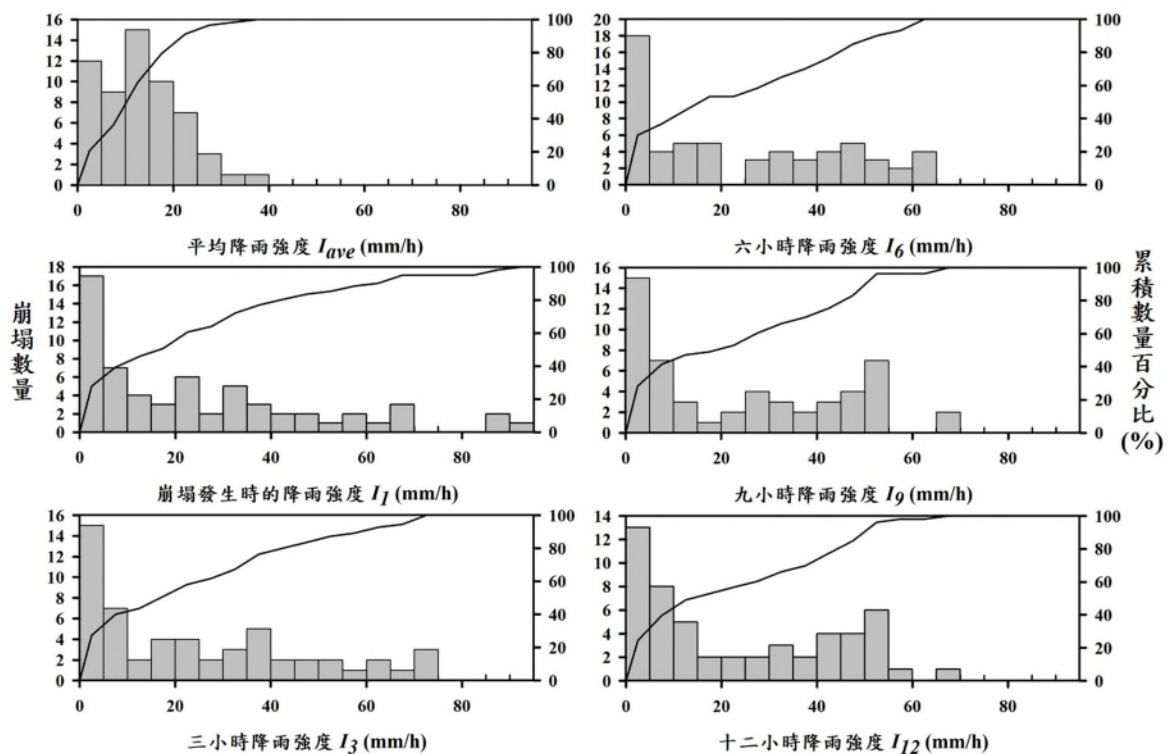


圖 5.4 崩塌事件之降雨強度統計

第二節 雨量因子間相關性分析

一、平均降雨強度(I_{ave})與降雨延時(D)之關係

本計畫利用 48 處位於高屏溪流域且降於延時大於 24 小時或有效累積雨量大於 350 mm 之崩塌事件發生時之平均降雨強度與降雨延時，所計算出之高屏溪流域大規模崩塌的 I - D 降雨門檻公式為 $I = 6.526 D^{-0.116}$ ，如圖

5.5 所示，此一曲線下方涵蓋 5% 的資料。圖 5.5 中黑點所標示崩塌事件雖符合本計畫之大豪雨定義，但這些崩塌事件之平均降雨強度皆小於 2 mm/h，並且降雨延時皆小於 36 小時，即表示降雨並非主控這些崩塌發生的主因，因此計算 $I-D$ 降雨門檻不考慮這些崩塌事件。本計畫也將前期計畫使用全台灣 93 處大規模崩塌之 $I-D$ 降雨門檻繪於圖 5.5 中，前期計畫之降雨門檻公式為 $I = 25.75 D^{-0.43}$ ，可以發現誘發大規模崩塌所需要的單位時間內之平均降雨強度於全台灣及高屏溪流域分別為 25.75 mm/h 及 6.526 mm/h，高屏溪流域的平均降雨強度值較低，說明高屏溪流域相對於台灣其他區域具有相對較高之潛勢發生大規模崩塌。另外，觀察 $I-D$ 降雨門檻斜率可以發現高屏溪流域的門檻斜率比較平緩，隨著降雨延時增加，誘發崩塌所需要的平均降雨強度沒有顯著的下降，說明高屏溪流域降雨誘發崩塌的主要條件可能是較長的降雨延時，能夠推論長延時的降雨型態是高屏溪流域內發生大規模崩塌的可能重要條件之一。

另外，本計畫也以小林崩塌前後之地形為依據(圖 5.6)，建置數值分析模型，並以該崩塌之發生時間與甲仙雨量站於莫拉克颱風期間之降雨紀錄進行有限元素模擬，最終獲得合理之地質材料參數(內聚力、摩擦角，以及滲透係數)。再利用最佳模擬結果之地質材料參數，帶入各類型設計降雨(圖 5.7)，藉此獲得更多崩塌發生之降雨條件數據(表 5.2)。將數值模擬獲得之促崩降雨數據加入圖 5.5 中，可以發現與高屏溪實際案例之統計降雨數據分布一致，顯示數值模擬方式可作為另一種提供促崩降雨分析數據的方法，並且利用高屏溪實際案例所求出之 $I-D$ 降雨門檻確實可以有效的警戒數值模擬之案例。

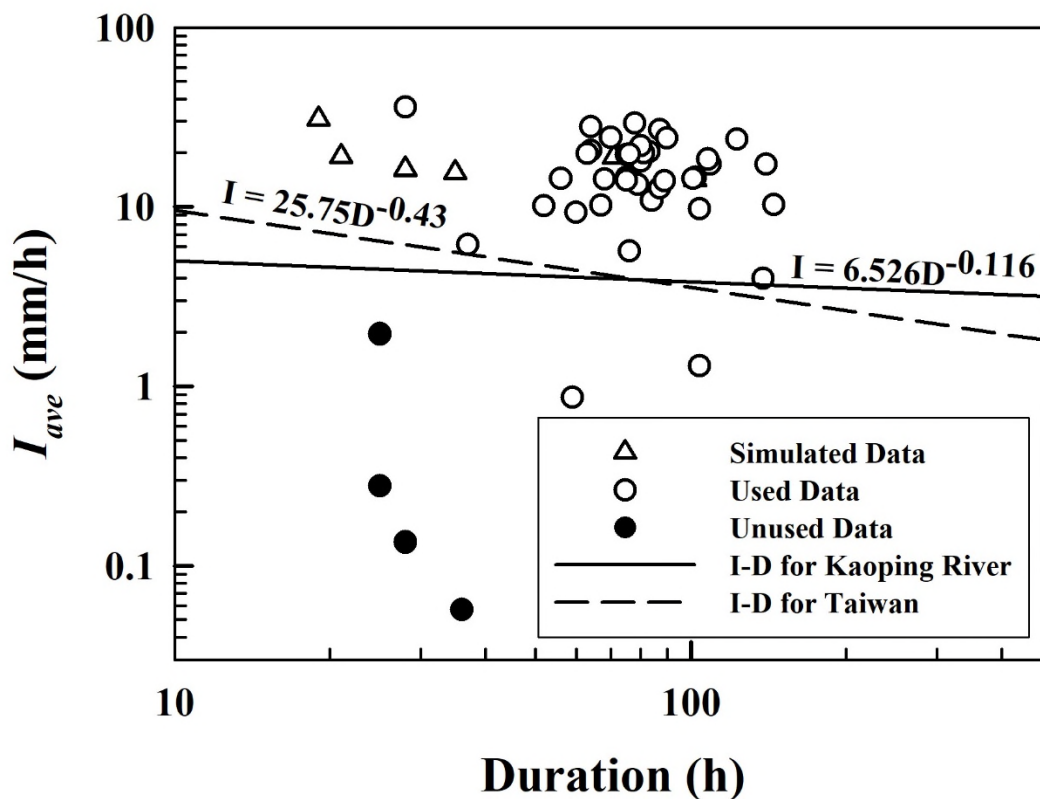


圖 5.5 I-D 降雨門檻

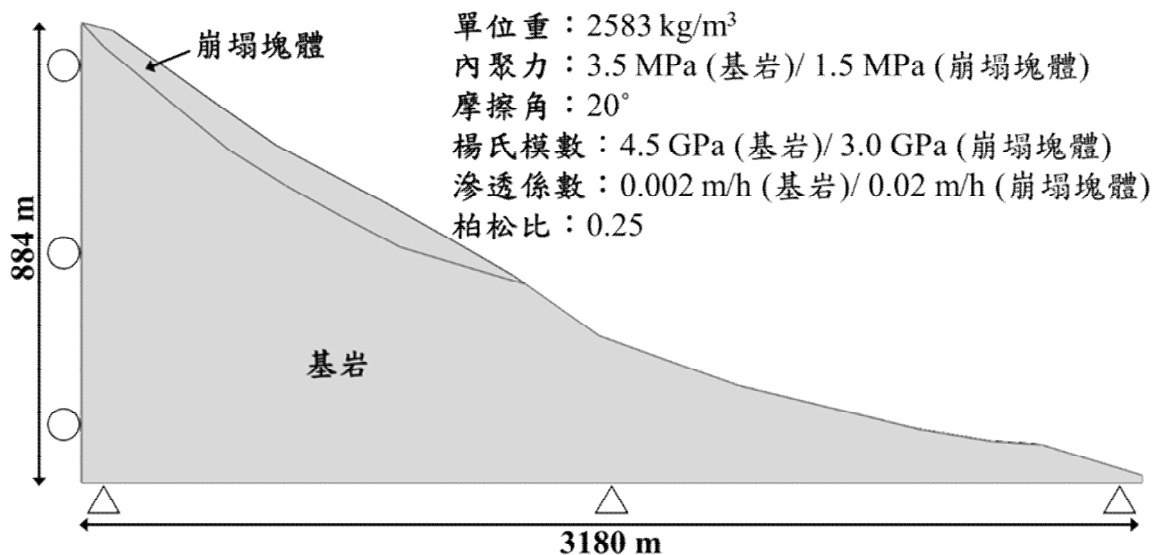


圖 5.6 小林崩塌數值分析剖面(修改自陳樹群及吳俊銘，2009)

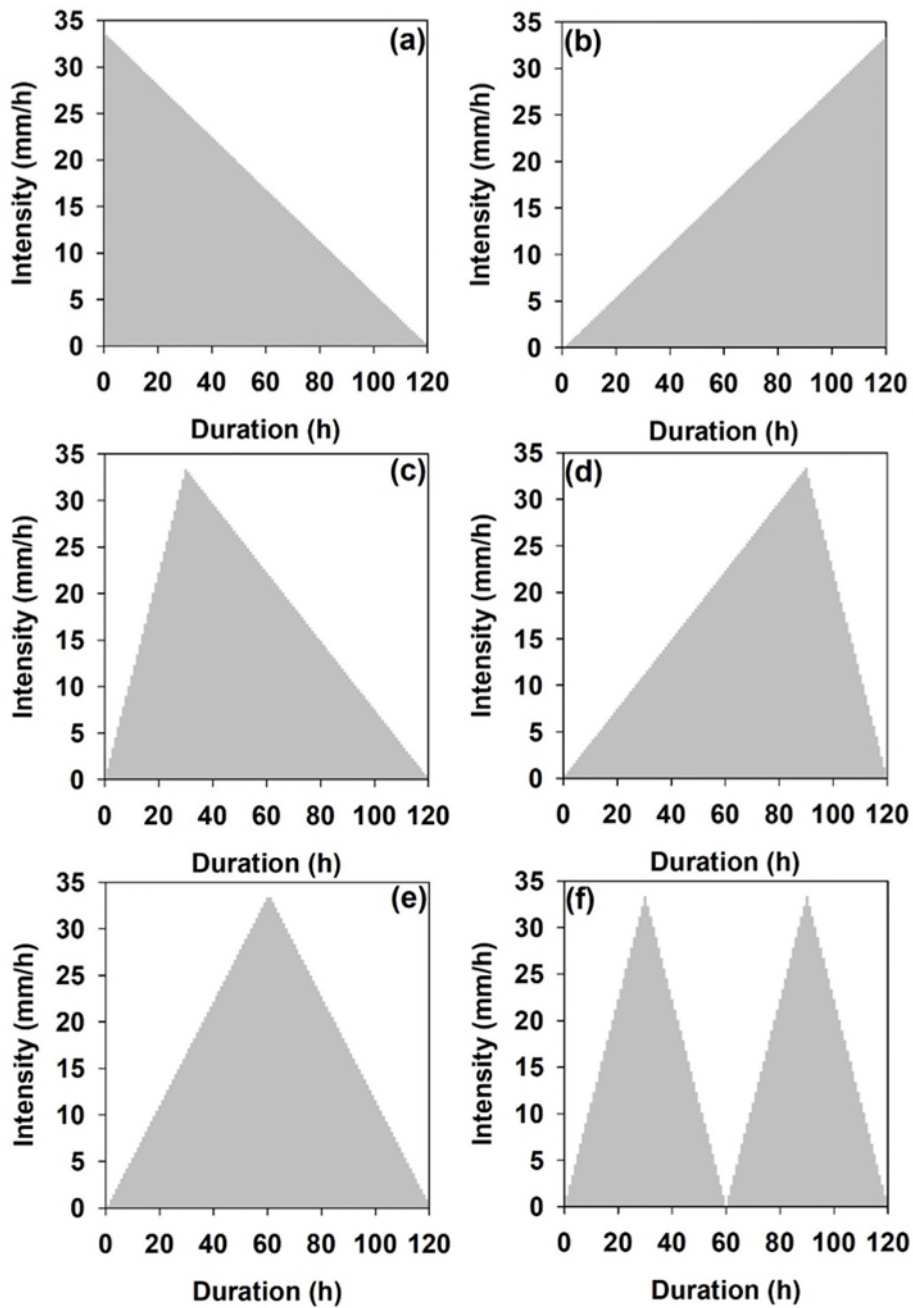


圖 5.7 數值模擬帶入之設計雨型(參考自石棟鑫, 1989)。(a)前峰式降雨、
 (b)後峰式降雨、(c)最大降雨發生於 1/4 延時、(d)最大降雨發生於
 3/4 延時、(e)最大降雨發生於 1/2 延時、(f)雙峰式降雨

表 5.2 設計降雨模擬結果

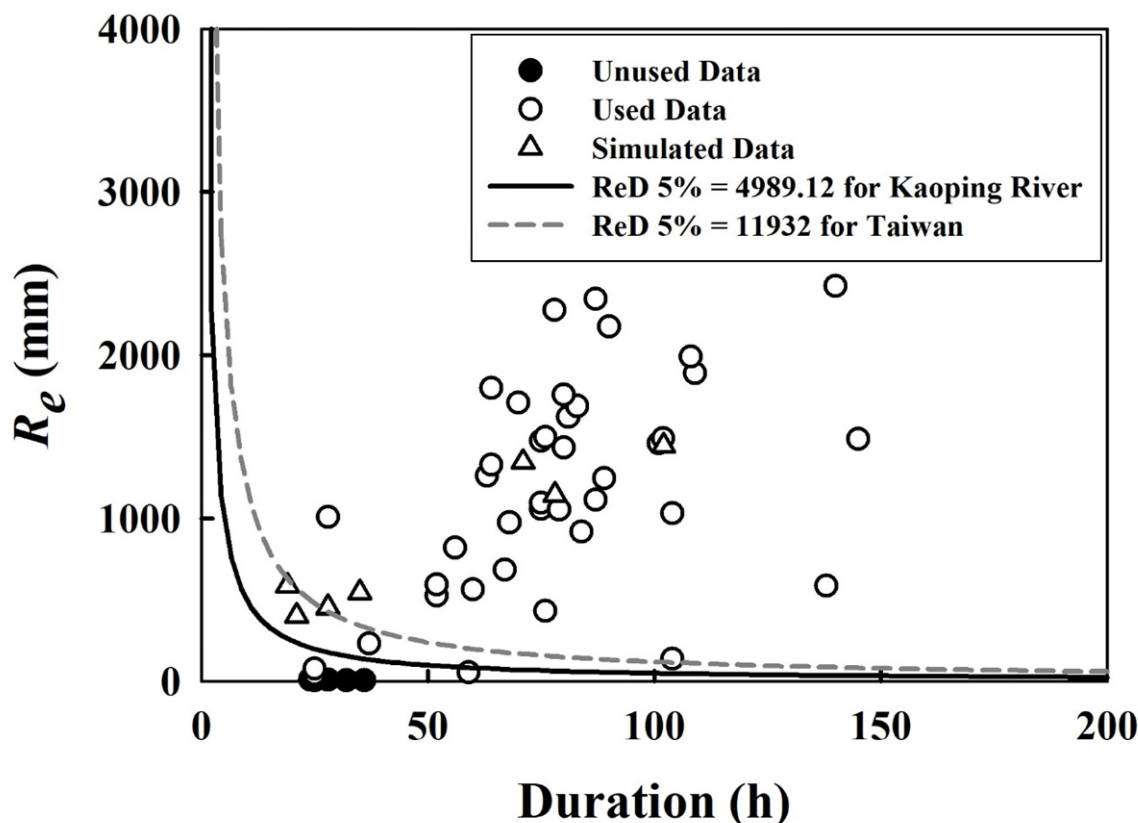
雨型	I_1	I_3	I_6	I_9	I_{12}	I_{ave}	D
	R_c	R_a	R_e	S_1	S_2	S_3	SWI
5d_2000mm_a	28.3	28.6	28.3	29.4	29.8	30.8	19.0
	585.4	0	585.4	193.0	116.0	40.3	349.3
5d_2000mm_b	28.3	28.0	28.3	27.2	26.8	14.1	102.0
	1443.0	0	1443.0	185.4	139.3	168.3	493.0
5d_2000mm_c	31.1	30.0	31.1	26.7	25.0	16.1	28.0
	451.5	0	451.5	181.5	92.8	34.2	308.5
5d_2000mm_d	28.9	28.5	28.9	27.4	26.9	14.6	78.0
	1141.9	0	1141.9	186.6	135.9	136.5	459.1
5d_2000mm_e	27.7	28.3	27.7	30.0	30.8	18.9	71.0
	1344.1	0	1344.1	197.3	157.7	151.5	506.5
5d_2000mm_f	31.1	30.0	31.1	26.7	25.0	16.1	28.0
	451.5	0	451.5	181.5	92.8	34.2	308.5
2d_1000mm_b	30.4	29.5	30.4	26.9	25.6	15.6	35.0
	544.9	0	544.9	183.5	105.8	49.1	338.4
2d_1000mm_d	31.5	30.4	31.5	27.0	25.3	16.2	28.0
	454.9	0	454.9	183.1	93.3	34.2	310.6
2d_1000mm_d	36.5	34.7	36.5	29.5	26.9	19.1	21.0
	400.1	0	400.1	193.9	81.4	22.2	297.5

備註：(1)僅採用降雨參數符合有效累積降雨大於 350 mm 或降雨延時大於 24 小時之模擬結果。(2)雨型編號最後英文字母代表不同類型之降雨歷時分布，對應圖 5.7 中各類型降雨。

二、有效累積雨量(R_e)與降雨延時(D)之關係

對 48 處發生於高屏溪流域的大規模崩塌進行 R_e - D 降雨門檻分析，其中有少數崩塌事件雖符合本計畫之大豪雨定義，但其有效累積降雨量皆小於 40 mm，表示導致崩塌發生的原因並非大量降雨，因此 R_e - D 降雨門檻的計算不考慮這些崩塌事件，計算結果如圖 5.8 所示。高屏溪流域涵蓋資料百分比為 5%之 R_e 與 D 之乘積值為 4989.12 mm×h，表示當降雨延時超過 24 小時的時候，涵蓋資料百分比為 5%的有效累積降雨量為 208 mm；也能夠說，當有效累積降雨超過 208 mm 的時候，涵蓋資料百分比為 5%的降雨延時為 24 小時。同樣將數值模擬方式所獲得之促崩降雨數據加入至圖 5.8 中，可以發現門檻線落在模擬降雨之數據點下方，表示利用高屏溪實際案例所求出之 R_e - D 降雨門檻確實可以有效的警戒數值模擬之案例。

本計畫也將前期計畫針對全台灣 93 起大規模崩塌事件計算的 R_e - D 降雨門檻繪於圖 5.8 中進行比較，全台灣涵蓋資料百分比為 5%的 R_e 與 D 之乘積值為 11932 mm×h，當降雨延時超過 24 小時的時候，涵蓋資料百分比 5%之有效累積降雨量為 500 mm。相同的降雨延時，高屏溪流域的有效累積雨量數值較低，說明相較於台灣其他地區，高屏溪流域在有效累積雨量較低的情況下就有較高的機會可能誘發崩塌。

圖 5.8 R_e -D 降雨門檻

三、平均降雨強度(I_{ave})與有效累積雨量(R_e)之關係

分析 48 處位於高屏溪流域的大規模崩塌其平均降雨強度與有效累積雨量之間的相關性，其中同樣有少數崩塌事件的發生並非由降雨主控，因此不納入降雨門檻的計算。同樣計算涵蓋資料百分比為 5% 時的 I_{ave} 與 R_e 的乘積值，計算結果如圖 5.9 所示， I_{ave} 與 R_e 的乘積值為 $684.97 \text{ mm}^2/\text{h}$ 。表示當累積雨量達到 500 mm 時，誘發崩塌之平均降雨強度為 1.4 mm/h。換句話說，當平均降雨強度超過 10 mm/h 時，涵蓋資料百分比 5% 之有效累積雨量為 68.4 mm。將數值模擬方式所獲得之促崩降雨數據加入至圖 5.9 中，可以發現模擬降雨與實際案例之數據點分布明顯不同，但門檻線仍落在模擬降雨之數據點下方，表示利用高屏溪實際案例所求出之 I_{ave} - R_e 降雨門檻仍

可有效的警戒數值模擬之案例。同樣加入前期計畫計算之 $I_{ave}-R_e$ 門檻值做討論，亦可發現相較於台灣其他區域，高屏溪流域在相同的平均降雨強度條件下，誘發崩塌所需的有效累積降雨量是較低的，說明高屏溪流域可能有較高的機率由降雨誘發大規模崩塌。

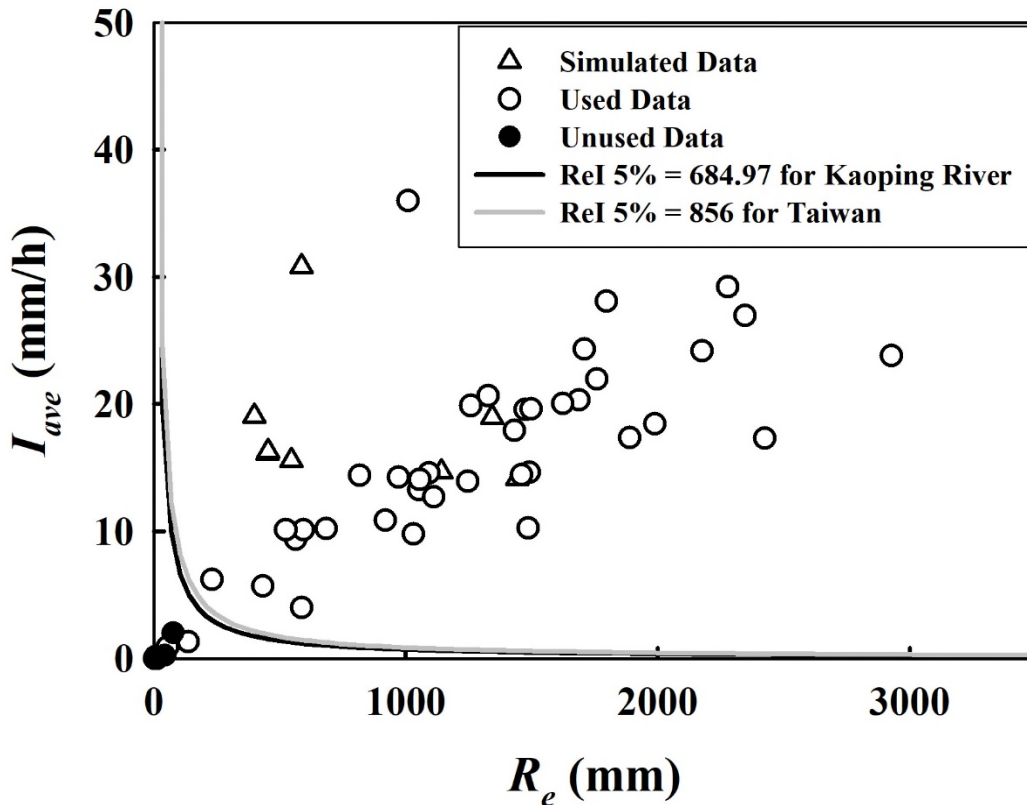


圖 5.9 I-Re 降雨門檻

第三節 土壤水分指數分析結果

本計畫以台灣參數計算 48 處位於高屏溪流域崩塌事件的土壤水分指數，統計結果如圖 5.10 所示， SWI 值包含了降雨事件期間的降雨資訊，以及降雨事件發生前 7 天的前期降雨。崩塌發生時的 SWI 值平均為 261.75 mm，最大值和最小值分別為 523.53 mm 及 8.34 mm；崩塌事件發生時對應

的各桶平均水深如下，第一桶平均水深(S_1)為 67.49 mm，第二桶平均水深(S_2)為 86.30 mm，第三桶平均水深(S_3)為 107.97 mm。 SWI 的計算中，三桶不同深度的水深分別代表了三個不同深度的模擬土壤層中的含水量。 SWI 值雖然無法直接表示為深層岩層中的實際含水量，但是在傳統的雨量分析中，所使用的降雨強度及累積降雨量同樣無法代表岩層中的實際含水量，且上述的兩個雨量因子忽略了入滲及排水等水文地質因素。反之在 SWI 的計算中，入滲以及排水被假設並納入考慮，能夠推定在深層土壤中之含水量和岩層中之含水量的關係相較於累積雨量是更具代表性的。因此，本計畫認為以 SWI 數值(涵蓋 S_1 、 S_2 、 S_3)取代累積雨量因子來建立崩塌發生的降雨門檻亦是一種可行的方法。

比較 48 起事件的 S_1 及 S_3 數值，其中 34 起事件發生時的 S_3 數值高於 S_1 ，且在 SWI 值相對較高的情況下。 S_3 值大於 S_1 值代表更多的水停留在較深處的地層中，而不是停留在淺處的土壤層或風化層中。此外，崩塌發生時， S_3 和 SWI 的比值接近 50%，而 S_2 及 S_1 和 SWI 的比值分別為 30% 及 20%，由於 S_3 表示更深處地層中的含水狀態，這樣的結果說明深部地層的含水量與大規模崩塌的發生可能具有較高的關聯性。

本計畫嘗試以土壤水分指數及各桶水深的深度來設計適用於高屏溪流流域的不同降雨門檻，分別得到之降雨門檻公式如圖 5.11 所示，涵蓋資料累積百分比 10% 之 SWI 分別與 I_1 、 S_1 、 S_2 及 S_3 之乘積值為 691 mm^2 、 $2,335 \text{ mm}^2$ 、 $3,045 \text{ mm}^2$ 以及 $7,968 \text{ mm}^2$ 。本計畫也於圖 5.11 加入陳樹群等人(2013)針對土石流、面積小於 1 公頃及面積大於 1 公頃之崩塌的 SWI 門檻曲線。相較於陳樹群等人(2013)所研究的崩塌案例，本計畫於高屏流域選擇之崩塌事件多為面積大於 10 公頃之大規模崩塌。於 I_1 與 SWI 之關係圖可以觀察到本計畫之降雨門檻高於陳樹群等人(2013)的降雨門檻，說明崩塌規模愈

大所需要的降雨量也隨著增加。此外， S_1 及 S_2 與 SWI 之關係圖中可以觀察到本計畫之降雨門檻低於陳樹群等人(2013)的降雨門檻，而 S_3 與 SWI 之關係圖中則相反。這個現象也反映崩塌案例規模的影響，而且大規模崩塌的誘發需要雨水入滲至較深的地層或岩層，而淺層崩塌的發生多與淺層地下水有關。圖 5.11 充分說明不同崩塌規模之促崩降雨條件的差異，也更加確認相較於 S_1 及 S_2 與 SWI 之降雨門檻， S_3 與 SWI 之降雨門檻可能更適合用於大規模崩塌之預警。

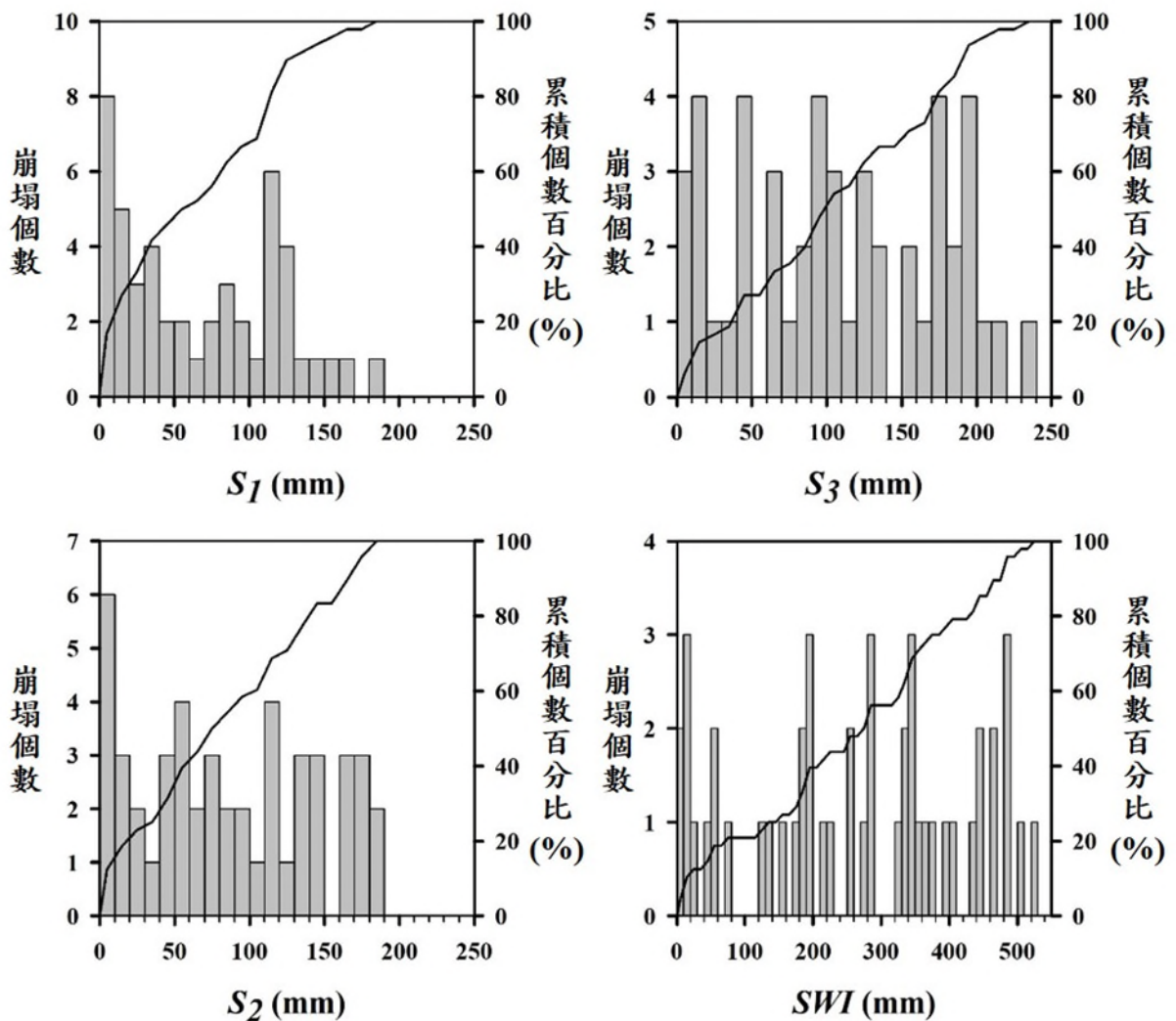


圖 5.10 引發大規模崩塌之土壤水分指數及三桶水深的數量統計

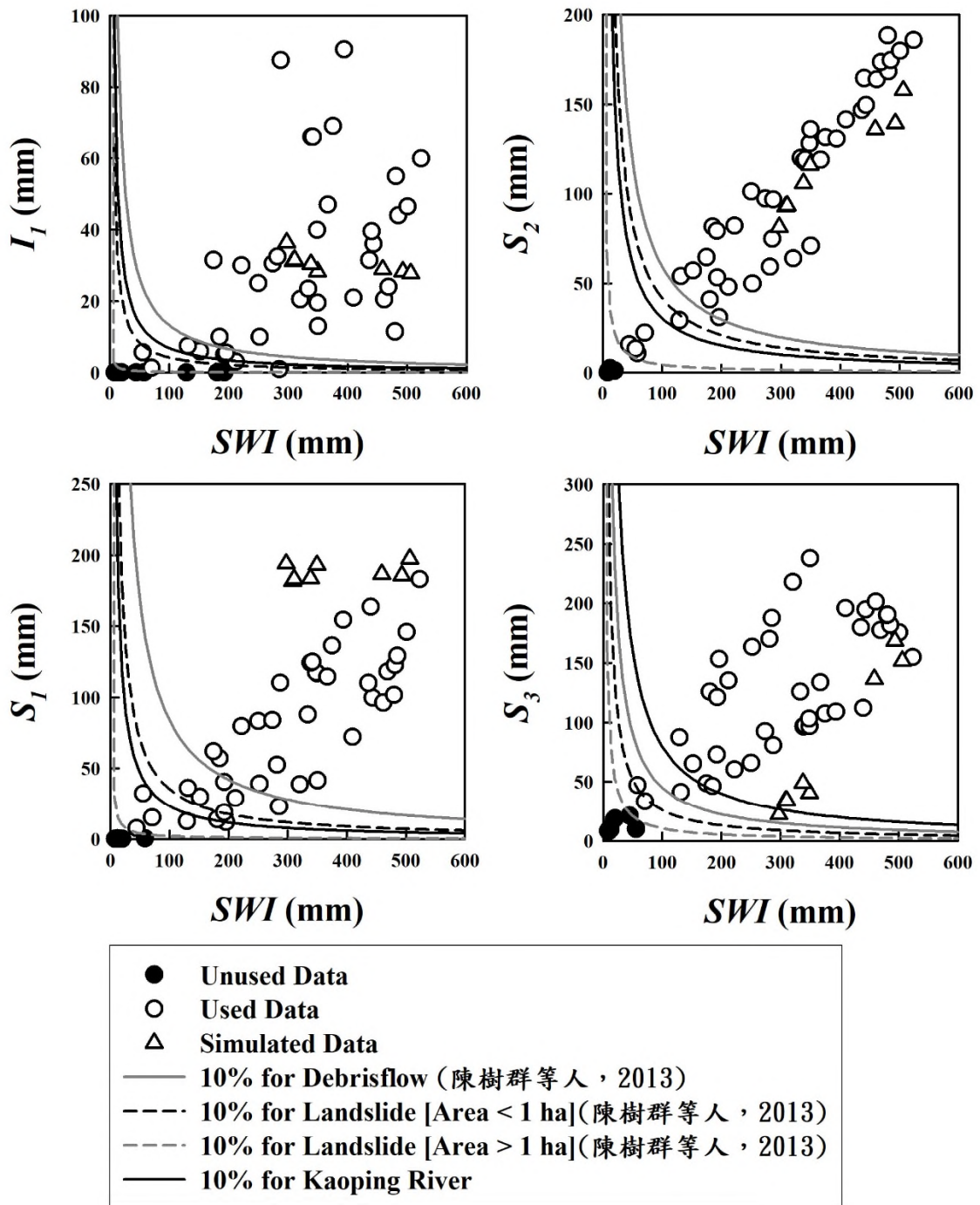


圖 5.11 土壤雨量指數與各桶水深深度之分布

第四節 河川水位與崩塌發生時間的關聯性

本研究收集高屏溪流域內 4 條主要河流之水文站紀錄，包括小時水位(m)與小時流量(m^3/s)。由於荖濃溪及濁口溪水文站於莫拉克颱風降雨期間遭到洪水毀壞，因此沒有留下水位及流量紀錄。在 52 處崩塌中，36 處發生時有河川水文紀錄。其中 15 處崩塌邊坡下即為主河道，較適合用於討論河川水位與流量變化是否可對應大規模崩塌的發生時間(表 5.3)。其中僅有 4 處崩塌發生在尖峰流量到達之前，且全數為舊崩塌再復發或擴大之事件，顯示該類型崩塌在水文條件達到降雨事件期間最大值之前便可能發生。相對地，有 11 處崩塌發生在尖峰流量時，或尖峰流量過後，而其中更有 6 處是發生於 2009 年莫拉克颱風降雨期間的新崩塌事件。

崩塌發生後產生的堰塞湖對於河川水位的變化有顯著的影響，說明河川水位能夠應用於堰塞湖的相關研究，而邊坡的水文條件對於崩塌的發生與否有直接的關聯，河川水位的變化或許能夠反映邊坡水文條件的改變。本計畫針對緊鄰河道的崩塌事件進行河川水位與崩塌發生時間之初步分析及討論，或許能夠提供另一項邊坡水文條件的評估方式，若有顯著成果，期望未來能夠提供更多相關資訊於應用層面。

從圖 5.12 至圖 5.14 中可以發現，發生大規模崩塌之降雨事件有導致河川水位驟升的現象，即說明降雨事件之小時降雨強度大，而導致降雨快速反應至河川水流。Weidner 等人(2019)針對美國 Ontonagon River 流域研究其河岸崩塌發生條件，便提出流量可作為崩塌發生的水文指標之一。雖然目前可用於探討崩塌發生之河川水文條件的事件數不多，仍難以明確界定流量或水位門檻，但從現有的案例可知，全新的大規模崩塌幾乎都發生於流量出現驟升的降雨事件，且發生時間多在尖峰流量時，或尖峰流量過後。

表 5.3 鄰近河道崩塌發生時之流量與水位紀錄

崩塌編號	時間 (台灣時間)	子集水區	流量 (m ³ /s)	水位 (m)	流量歷時類型
KP201302	2013.0711.2325	荖濃溪	46.3	227.7	B
KP201406	2014.0721.0003	荖濃溪	44.7	227.4	B
KP201410	2014.0923.0747	荖濃溪	70.6	228.3	A
KP201511	2015.0806.1731	荖濃溪	30.0	227.4	B
KP201512	2015.0809.0309	荖濃溪	662.5	230.6	A
2005_002	2005.0721.1433	隘寮溪	686.1	106.3	A
2009_295	2009.0808.1535	隘寮溪	4792.4	111.1	T
2009_308	2009.0809.0219	隘寮溪	2616.9	109.7	A
2010_045	2010.0920.0724	隘寮溪	576.0	106.9	A
KP201304	2013.0820.1538	隘寮溪	46.6	106.1	B
2009_064	2009.0809.0511	旗山溪	1122.4	121.1	T
2009_086	2009.0810.1222	旗山溪	332.2	119.2	A
2009_091	2009.0809.0714	旗山溪	670.6	119.6	T
2009_132	2009.0809.0616	旗山溪	1135.7	121.1	T
KP201305	2013.0827.2123	旗山溪	46.9	117.1	A

備註：流量歷時類型說明崩塌發生於尖峰流量前 (B)，尖峰流量(T)，尖峰流量後(A)

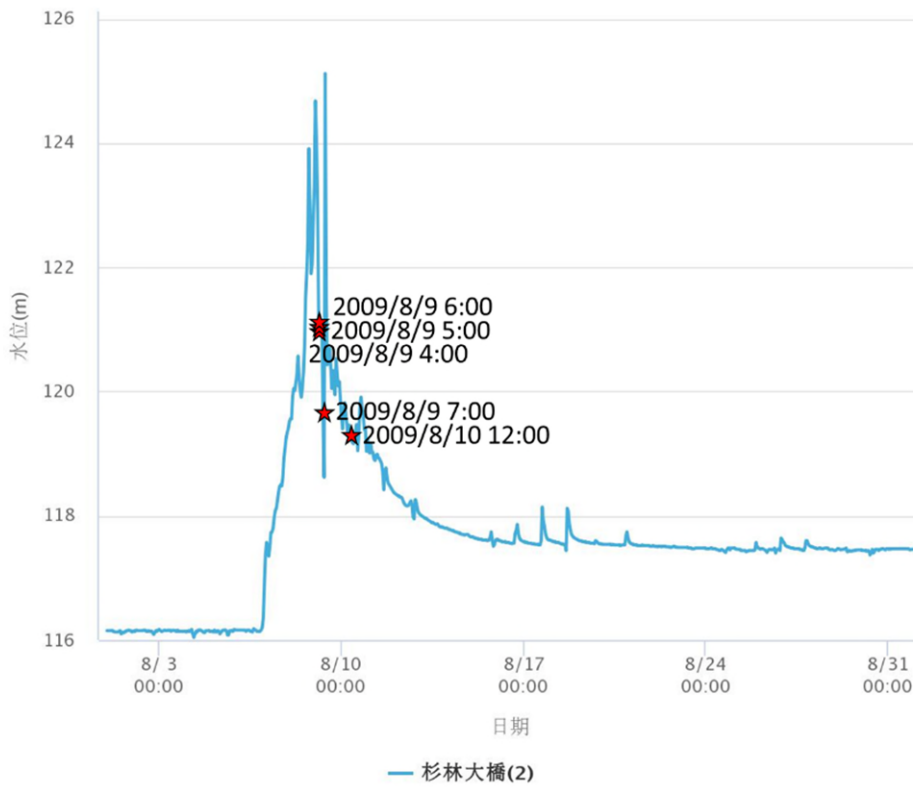


圖 5.12 旗山溪流域內 2009 年崩塌發生時間與水位變化紀錄的關係

(水文紀錄取自水利署水文資訊網

<https://gweb.wra.gov.tw/Hydroinfo/?id=Index>)

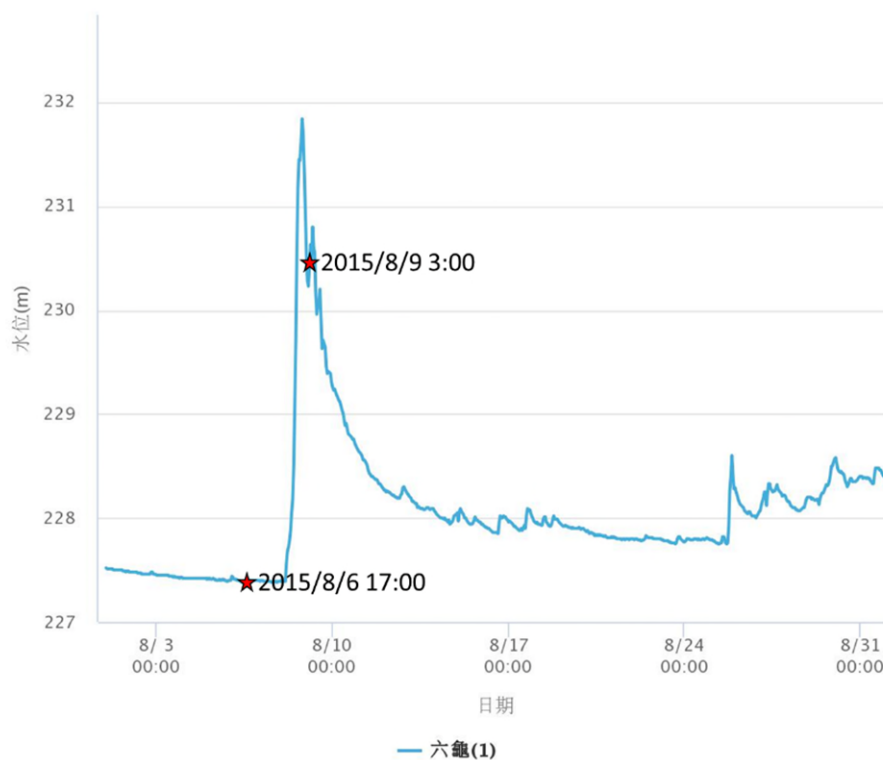


圖 5.13 荖濃河流域內 2015 年崩塌發生時間與水位變化紀錄的關係

(水文紀錄取自水利署水文資訊網

<https://gweb.wra.gov.tw/Hydroinfo/?id=Index>)

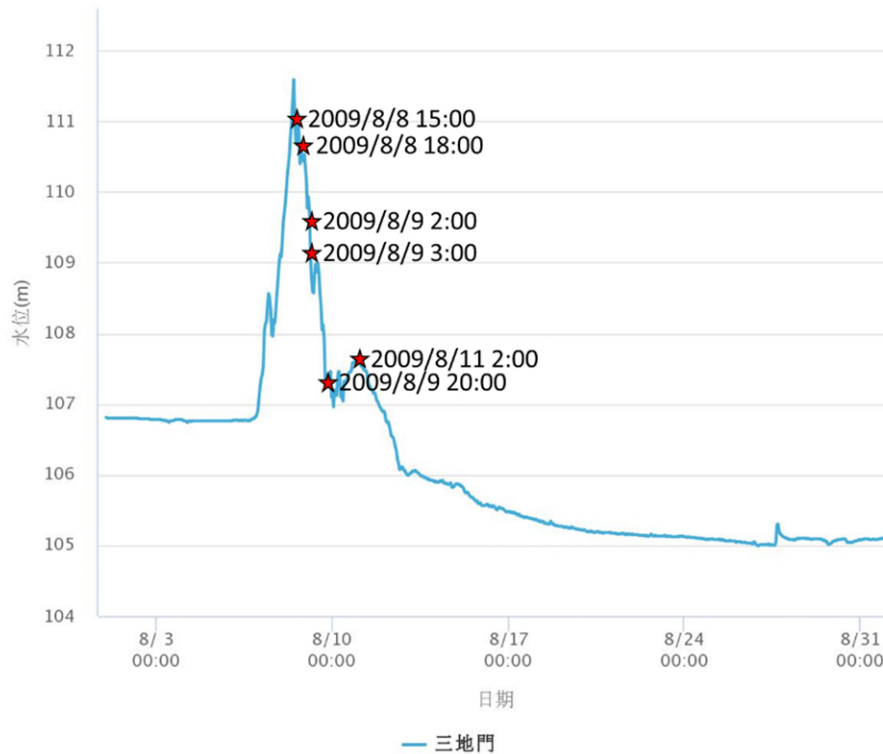


圖 5.14 隘寮河流域內 2009 年崩塌發生時間與水位變化紀錄的關係

(水文紀錄取自水利署水文資訊網

<https://gweb.wra.gov.tw/Hydroinfo/?id=Index>)

第五節 鄰近高潛勢大規模崩塌邊坡之歷史案例的水文條件分析

高屏河流域內有 5 處高潛勢大規模崩塌優先辦理區，分別為新庄、萬山、寶山、光明巷以及阿禮，本節將彙整 5 處鄰近優先辦理區之歷史崩塌案例(圖 5.15)。由於優先辦理區與歷史案例相距不遠，地質及地形條件可能非常相似，因此分析鄰近歷史崩塌案例之降雨條件有助於建立 5 處優先辦理區的警戒標準。本計畫將優先選擇距離最近之歷史崩塌事件，並確認其崩塌誘發是否受降雨主控，以此討論其發生時之水文條件，結果整理於表 5.4。如表 5.4 所示，5 處高潛勢大規模崩塌之鄰近歷史案例多發生於 2009 年莫拉克颱風期間，僅有 1 處崩塌發生於 2005 年海棠颱風期間。由於大規

模崩塌的發生可能與長降雨延時及高累積有效降雨有較顯著的關聯性，而歷史崩塌案例的降雨延時均超過 60 小時，且有效累積雨量達到 1000 mm 以上，並且 5 起歷史崩塌事件 S_3 與 SWI 之平均比值約為 0.4，這些都說明了大規模崩塌的發生可能需要有長時間的降雨、高數值的有效累積降雨，以及足夠的時間讓降雨入滲至深部地層，上述條件或許可以做為高屏溪流域內 5 處高潛勢大規模崩塌之促崩降雨警戒設置的參考。此外，5 起歷史崩塌案例之雨量組體圖展示於圖 5.16，可以觀察到 2009 年莫拉克颱風期間的崩塌多發生於累積降雨達到 50% 之後，這些事件之降雨延時未達到 50%，而 2005 年之崩塌事件發生於累積降雨及降雨延時均大於 80%。雨量組體圖也可以說明 2009 年莫拉克颱風及 2005 年海棠颱風之降雨類型有所不同，莫拉克颱風有 50% 的累積雨量集中在雨場前半段，而海棠颱風有 50% 的累積雨量集中於雨場後半段，說明颱風事件的雨場型態也會影響大規模崩塌發生的時機。

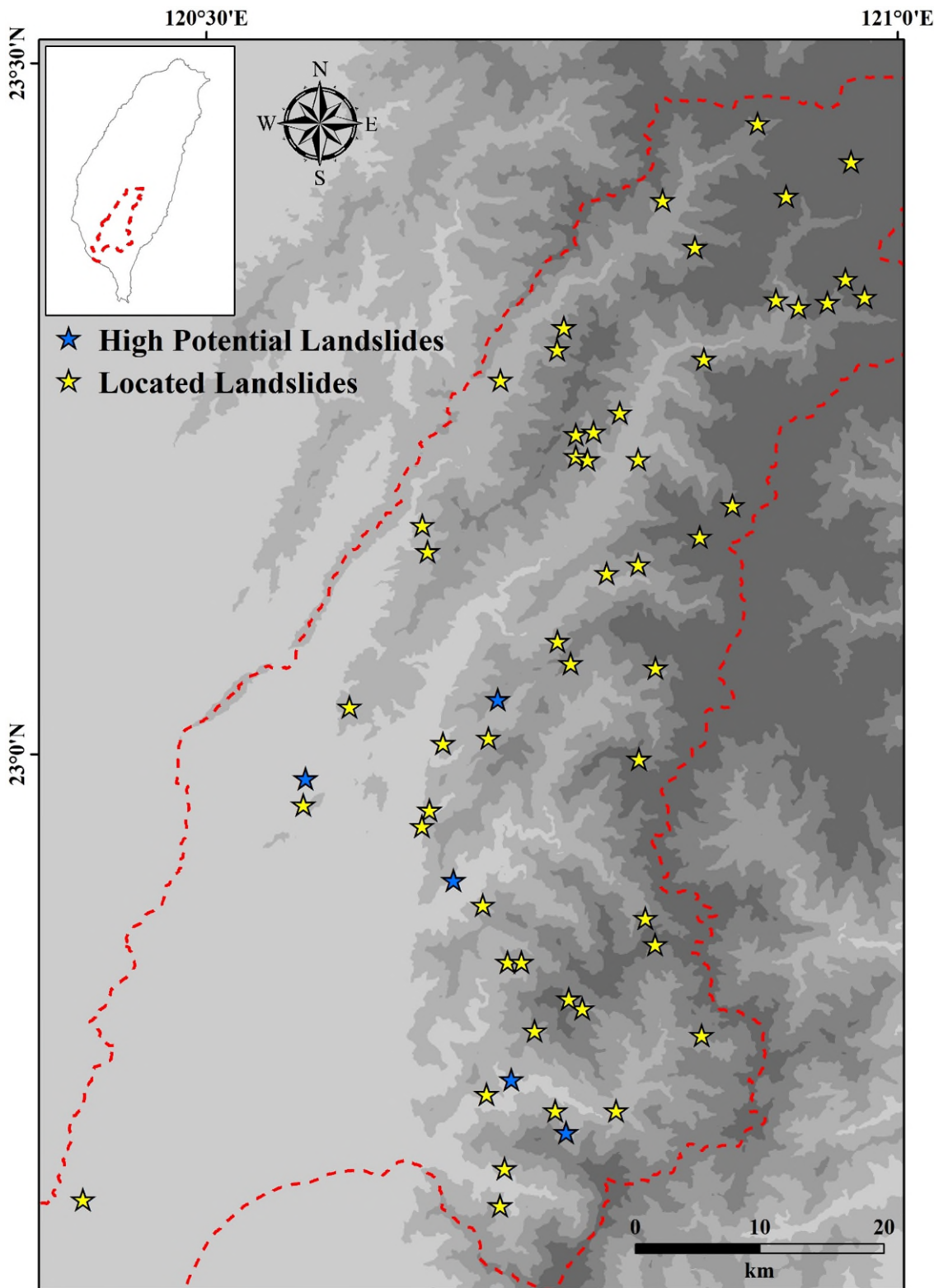


圖 5.15 高屏河流域崩塌分布圖

表 5.4 鄰近高潛勢大規模崩塌歷史案例促崩水文資料

名稱	案例年度	I_1	I_3	I_6	I_9	I_{12}	I_{ave}	D
		R_c	R_a	R_e	S_1	S_2	S_3	SWI
新庄	2009.0809	36	40.3	31.3	29.6	36.2	22	80
		1756	2.1	1758.1	99.7	149.4	194.8	443.8
萬山	2009.0809	11.5	9	19.9	25.6	27.4	14.1	75
		1055	0.8	1055.8	101.8	188.3	190.0	480.1
寶山	2009.0808	69	71.8	55.3	53.3	53	20.6	64
		1320	6.8	1326.8	136.3	131.5	107.5	375.4
光明巷	2009.0808	19.5	49.8	41.8	50.7	48.7	28.1	64
		1796	1.6	1797.6	116.9	136	96.8	349.7
阿禮	2005.0721	5	8.2	4.3	3.1	8.5	14.6	75
		1091.5	1.4	1092.9	18.7	53.2	121	192.8

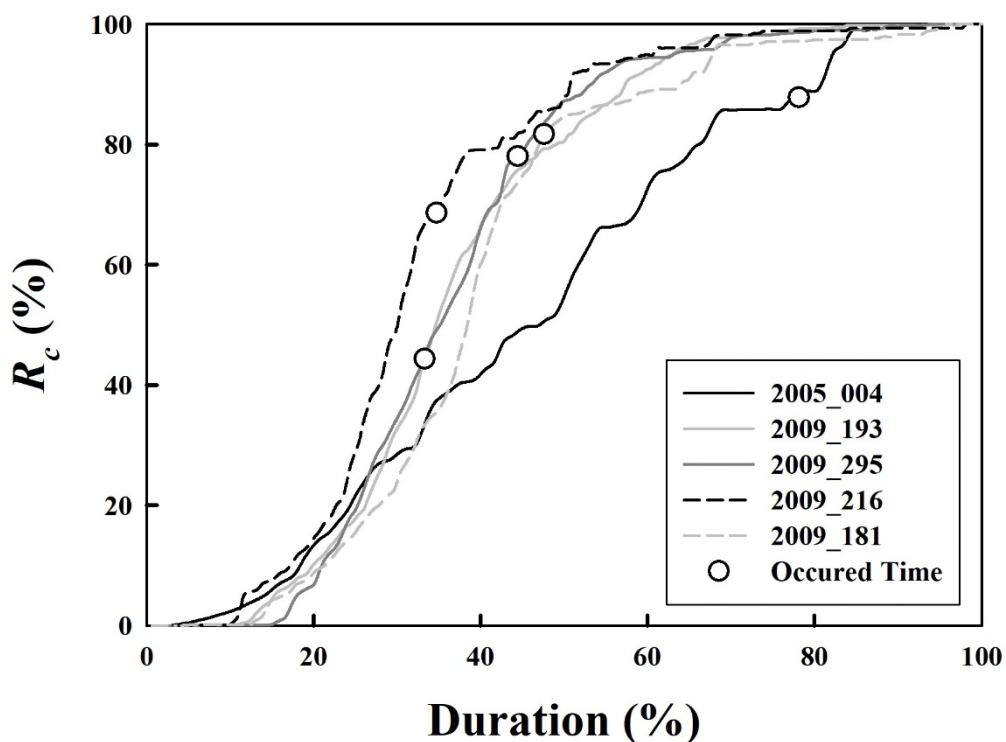


圖 5.16 歷史崩塌案例雨量組體圖

第六章 結論及建議

本計畫於高屏河流域進行集水區尺度坡地土砂運動之地表震動訊號監測研究，綜整研究結果與建議如下：

- 一、本計畫使用 2009 年莫拉克颱風及 2015 年蘇迪勒颱風影響期間高屏河流域鄰近地震站之連續地動訊號進行人工判釋，從中成功找出 251 筆具有崩塌特徵之地動訊號，並使用同等數量之地震事件及噪訊搭配隨機森林演算法成功製作適用於高屏河流域寬頻地震站及短週期地震站之地動訊號自動分類器，寬頻地震儀及短週期地震儀地動訊號分類器之正確度分別為 98.29%及 97.21%。
- 二、本計畫將寬頻地震儀及短週期地震儀地動訊號自動分類器應用於 2012 年至 2015 年共 10 場颱風影響期間高屏河流域鄰近地震站之連續地動訊號紀錄，再搭配人工判釋檢查，共找出 16024 筆具有崩塌特徵之地動訊號。經訊號時間比對後，可由 2 個地震站紀錄中觀測到崩塌地動訊號的事件數量為 315 筆，而可由 3 個以上地震站紀錄中觀測到的事件數量為 79 筆。後續進行 79 筆具崩塌地動特徵之振動源定位，最終共 15 起事件之定位結果位於高屏河流域內。
- 三、本計畫使用成功定位於高屏河流域內之 15 起崩塌事件，加上前期計畫定位於高屏河流域內之崩塌事件 37 起，再根據前期計畫之大豪雨定義，最終使用 48 起崩塌事件進行促崩降雨門檻分析，各項涵蓋 5%資料之降雨門檻如下：

(一) I - D 法： $I = 6.526 D^{-0.116}$

(二) R_e - D 法： $R_e D = 4989.12 \text{ mm} \times h$

(三) R_e - I 法： $R_e I = 684.97 \text{ mm}^2/\text{h}$

四、高屏溪流域的降雨門檻較前期計畫針對全台的降雨門檻低，說明相同降雨條件下，高屏溪流域可能有較高的潛勢發生大規模崩塌。此外，促崩降雨條件及土壤雨量指數分析後得出大規模崩塌的誘發，普遍需要較長的降雨延時(D)及數值較高的有效累積降雨(R_e)。相較於 S_1 及 S_2 代表的淺層地下水， S_3 指示的深層地下水與大規模崩塌有較顯著的關聯性。未來高潛勢大規模崩塌之促崩降雨門檻可參考歷史崩塌案例之降雨延時、有效累積降雨及第三桶水深進行分析與建置。

五、本計畫提供降雨強度、降雨延時、有效累積雨量、土壤水分指數及水位與崩塌發生時間之關聯性，加上前期計畫雨量分析之結果，以降雨延時、有效累積降雨及土壤水分指數的第三桶水與大規模崩塌的發生可能有顯著的關聯性，因此本計畫建議後續大規模崩塌降雨門檻的設置可以著重於上述三項降雨因子，因此 R_e - D 分析法可能有較高的機會發展為大規模崩塌防災應用之警戒雨量方法。

六、建議：

(一) 本計畫彙整高屏溪流域內及鄰近地震站發現，流域東側及南側地震站的數量及密度明顯較少，適當增設地震站能夠增加崩塌地動訊號成功觀測的數量，並且有效提升崩塌地動訊號之定位結果。

(二) 比較本計畫及前期計畫成果發現，高屏溪流域發生大規模崩塌之降雨門檻較低，說明相同降雨條件下，高屏溪流域有較高的可能性發生大規模崩塌。考慮不同區域之地質、地形、土地利用情況等條件上的差異，針對各別區域設計不同降雨門檻能提供實際應用上更高的參考價值。

(三) 本計畫成功建立適用於高屏溪流域之地動訊號自動分類器，雖然已有良好的分類結果，但仍有不足之處。考慮地動訊號本身的複雜性以及大量人為活動產生的影響，如何找到更具分類效果之特徵值為後續仍須努力之方向。

參考文獻

1. 水利署水文資訊網 <http://gweb.wra.gov.tw/Hydroinfo/?id=index>
2. 石棟鑫 (1989) 台灣地區颱風雨降雨型態之分析研究，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，桃園市。
3. 吳昱杰 (2018) 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。
4. 余姿瑩 (2019) 大規模崩塌發生雨量之研究，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文，台南市。
5. 青木佑久 (1980) 土石流等の災害をもたらす"危険雨量"，防災科学技術，38，第 22-26 頁。
6. 范正成、吳明峰、彭光宗 (1999) 豐丘土石流發生臨界降雨線之研究，地工技術，74，第 39-46 頁。
7. 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後之修正，中華水土保持學報，33(1)，第 31-38 頁。
8. 岡田憲治 (2002) 土壤雨量指數，測候時報，69(5)，第 67-97 頁。
9. 菅原正巳 (1972) 流出解析手法，共立出版。
10. 詹錢登 (2002) 土石流發生降雨警戒值模式之研究，行政院農委會水土保持局科技計畫。
11. 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，台灣。
12. 陳樹群、吳俊鎰 (2009) 高雄縣小林村獻肚山巨型深層崩塌引致之地形變遷特性，中華水土保持學報，40(4)，第 359-376 頁。

13. 陳樹群、蔡喬文、陳振宇、陳美珍 (2013) 筒狀模式之土壤雨量指數應用於土石流防災警戒，中華水土保持學報，44(2)，第 131-143 頁。
14. 謝正倫 (2001) 桃芝颱風土石流災害發生基準初步研究，土石流災害及其防治對策研討會論文集，第 83-102 頁。
15. 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.
16. Benítez, M. C., Ramírez, J., Segura, J. C., Ibanez, J. M., Almendros, J., García-Yeguas, A., and Cortes, G. (2007). Continuous HMM-based seismic-event classification at Deception Island, Antarctica. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(1), 138-146.
17. Bernoulli, J. (1713). *Ars conjectandi. Impensis Thurnisiorum, Fratrum.*
18. Breiman, L. (1996). Bagging predictors. *Machine Learning*, 24(2), 123-140.
19. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32.
20. Burtin, A., Hovius, N., and Turowski, J. M. (2016). Seismic monitoring of torrential and fluvial processes. *Earth Surface Dynamics*, 4(2), 285-307.
21. Caine, N., (1980). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, 62, 23-27.
22. 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.

23. 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.
24. Chen, C. W., Saito, H., and Oguchi, T. (2015). Rainfall intensity–duration conditions for mass movements in Taiwan. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2(1), 1-13. doi:10.1186/s40645-015-0049-2.
25. Chen, C. W., Saito, H., and Oguchi, T. (2017). Analyzing rainfall-induced mass movements in Taiwan using the soil water index. *Landslides*, 14(3), 1031-1041.
26. Coleman, T. F., and Li, Y. (1996). An interior trust region approach for nonlinear minimization subject to bounds. *SIAM Journal on optimization*, 6(2), 418-445.
27. Dahal, R. K., and Hasegawa, S. (2008). Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya. *Geomorphology*, 100(3-4), 429-443.
28. 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
29. Del Pezzo, E., Esposito, A., Giudicepietro, F., Marinaro, M., Martini, M., and Scarpetta, S. (2003). Discrimination of earthquakes and underwater explosions using neural networks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(1), 215-223.

30. 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.
31. Esposito, A., Giudicepietro, F., Scarpetta, S., D'Auria, L., Marinaro, M., and Martini, M. (2006). Automatic discrimination among landslide, explosion-quake, and microtremor seismic signals at Stromboli volcano using neural networks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4A), 1230-1240.
32. Howell, T. A., and Evett, S. R. (2004). The Penman-Monteith method. Available online:<http://www.cprl.ars.usda.gov/wmru/pdfs/PM%20COLO%20Bar%202004%20cor-rected%209apr04.pdf>.
33. 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).
34. 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
35. 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.

36. IES (1996). Broadband Array in Taiwan for Seismology. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taiwan. Other/Seismic Network. doi:10.7914/SN/TW
37. 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.
38. Kao, H., Shan, S. J., Dragert, H., Rogers, G., Cassidy, J. F., Wang, K., James T. S., and Ramachandran, K. (2006). Spatial-temporal patterns of seismic tremors in northern Cascadia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B3).
39. 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).
40. Kao, H., Shan, S. J., Bent, A., Woodgold, C., Rogers, G., Cassidy, J. F., and Ristau, J. (2012). Regional centroid-moment-tensor analysis for earthquakes in Canada and adjacent regions: An update. *Seismological Research Letters*, 83(3), 505-515.
41. Keefer, D. K., Wilson, R. C., Mark, R. K., Brabb, E. E., Brown III, W. M., Ellen, S. D., Harp, E. L., Wiczorek, G. F., Alger, C. S., and Zatzkin, R. S. (1987). Real-time landslide warning during heavy rainfall. *Science*, 238, 921-925.
42. Kohavi, R., and Provost, F. (1998). Confusion matrix. *Machine Learning*, 30(2-3), 271-274.

43. Kortström, J., Uski, M., and Tiira, T. (2016). Automatic classification of seismic events within a regional seismograph network. *Computers and Geosciences*, 87, 22-30.
44. 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>.
45. Lin, C. H., Kumagai, H., Ando, M. and Shin, T. C. (2010). Detection of landslides and submarine slumps using broadband seismic networks. *Geophysical Research Letter*, 37, L22309.
46. 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.
47. 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.
48. 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
49. Mainsant, G., Larose, E., Brönnimann, C., Jongmans, D., Michoud, C., and Jaboyedoff, M. (2012). Ambient seismic noise monitoring of a clay landslide:

- Toward failure prediction. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F1).
50. Monteith, J. L. (1965). The state and movement of water in living organisms. In 19th Symposia of the Society for Experimental Biology. Cambridge University Press, London, 1965 (pp. 205-234).
 51. Parihar, D., Ghosh, R., Akula, A., Kumar, S., and Sardana, H. (2018). Machine learning based comparative analysis for the classification of earthquake signals. Paper presented at the Proceedings of the International Conference on Computing and Communication Systems.
 52. Peng, Z., and Chao, K. (2008). Non-volcanic tremor beneath the Central Range in Taiwan triggered by the 2001 Mw 7.8 Kunlun earthquake. *Geophysical Journal International*, 175(2), 825-829.
 53. 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).
 54. Provost, F., Hibert, C., and Malet, J. P. (2017). Automatic classification of endogenous landslide seismicity using the Random Forest supervised classifier. *Geophysical Research Letters*, 44(1), 113-120.
 55. Provost, F., Malet, J. P., Hibert, C., Abanco Martínez de Arenzana, C., and Hurlimann Ziegler, M. (2018). Towards a standard typology of endogenous landslide seismic sources. *Earth Surface Dynamics*, 6(4), 1059-1088.
 56. Quinlan, J. R. (1986). Induction of decision trees. *Machine learning*, 1(1), 81-106.

57. Quinlan, J. R. (1987). Simplifying decision trees. *International Journal of Man-machine Studies*, 27(3), 221-234.
58. Saito, H., Nakayama, D., Matsuyama, H. (2010). Relationship between the initiation of a shallow landslide and rainfall intensity—duration thresholds in Japan. *Geomorphology*, 118(1), 167-175.
59. Scarpetta, S., Giudicepietro, F., Ezin, E. C., Petrosino, S., Del Pezzo, E., Martini, M., and Marinaro, M. (2005). Automatic classification of seismic signals at Mt. Vesuvius volcano, Italy, using neural networks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(1), 185-196.
60. Schneider, J. (1997). Cross validation. *A Locally Weighted Learning Tutorial Using Vizier*, 1.
61. 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).
62. Shieh, S. L. (2000). User's guide for typhoon forecasting in the Taiwan area (VIII). Central Weather Bureau, Taipei.
63. Sugawara, M. (2009). Automatic calibration of the tank model. *Hydrological Sciences Journal*, 24:3, 375-388, DOI: 10.1080/02626667909491876
64. 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.

65. Tian, Y., Qi, H., and Wang, X. (2002). Target detection and classification using seismic signal processing in unattended ground sensor systems. Paper presented at the IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing.
66. Weidner, L., DePrekel, K., Oommen, T., and Vitton, S. (2019). Investigating large landslides along a river valley using combined physical, statistical, and hydrologic modeling. *Engineering Geology*, 259, 1-12. <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105169>
67. Welch, P. (1967). The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15(2), 70-73.
68. Wu, C. C., and Kuo, Y. H. (1999). Typhoons affecting Taiwan: Current understanding and future challenges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(1), 67-80.
69. 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、地動訊號自動分類器之崩塌事件訓練樣本目錄

編號	發生時間(UTC)	地震站
1	2009.0806.120811	TWGB.BHZ
2	2009.0806.144606	TWGB.BHZ
3	2009.0806.164656	EAS.HHZ, SCZ.HHZ, SGS.HHZ, ELD.HHZ, ALS.HHZ
4	2009.0806.213143	ALS.HHZ
5	2009.0807.011809	ALS.HHZ
6	2009.0807.100832	MASB.BHZ
7	2009.0807.133742	ALS.HHZ
8	2009.0807.144059	MASB.BHZ
9	2009.0807.172941	MASB.BHZ
10	2009.0807.194939	ALS.HHZ
11	2009.0807.200035	MASB.BHZ
12	2009.0807.203504	TWGB.BHZ
13	2009.0807.222951	EAS.HHZ, MASB.BHZ, SCZ.HHZ, TWM1.HHZ
14	2009.0807.232410	MASB.BHZ
15	2009.0807.234306	MASB.BHZ
16	2009.0808.000457	MASB.BHZ, SCZ.HHZ, TWGB.BHZ, TWM1.HHZ
17	2009.0808.001312	MASB.BHZ, TWGB.BHZ,

集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究

編號	發生時間(UTC)	地震站
		SCZ.HHZ
18	2009.0808.010552	MASB.BHZ
19	2009.0808.012016	MASB.BHZ
20	2009.0808.012802	SCZ.HHZ
21	2009.0808.013439	MASB.BHZ
22	2009.0808.014624	SCZ.HHZ
23	2009.0808.014705	MASB.BHZ
24	2009.0808.020347	MASB.BHZ
25	2009.0808.024452	MASB.BHZ
26	2009.0808.032602	TWM1.HHZ
27	2009.0808.032801	MASB.BHZ
28	2009.0808.034529	MASB.BHZ
29	2009.0808.035743	MASB.BHZ
30	2009.0808.041856	MASB.BHZ
31	2009.0808.050409	MASB.BHZ
32	2009.0808.052549	MASB.BHZ
33	2009.0808.054855	TWGB.BHZ
34	2009.0808.065642	MASB.BHZ
35	2009.0808.065944	MASB.BHZ, SCZ.HHZ, TWM1.HHZ
36	2009.0808.072212	MASB.BHZ
37	2009.0808.073402	SCZ.HHZ, MASB.BHZ, TWM1.HHZ

編號	發生時間(UTC)	地震站
38	2009.0808.082137	MASB.BHZ
39	2009.0808.090000	MASB.BHZ, SCZ.HHZ, TWM1.HHZ
40	2009.0808.092458	MASB.BHZ
41	2009.0808.094200	MASB.BHZ
42	2009.0808.094340	TPUB.BHZ
43	2009.0808.094407	ALS.HHZ
44	2009.0808.101521	MASB.BHZ
45	2009.0808.101547	MASB.BHZ
46	2009.0808.104004	MASB.BHZ, SCZ.HHZ
47	2009.0808.121515	MASB.BHZ
48	2009.0808.123409	MASB.BHZ
49	2009.0808.124852	MASB.BHZ
50	2009.0808.130006	MASB.BHZ, SCZ.HHZ, TWM1.HHZ
51	2009.0808.131245	SCZ.HHZ
52	2009.0808.142510	MASB.BHZ
53	2009.0808.145359	MASB.BHZ, TWGB.BHZ, SCZ.HHZ, TWM1.HHZ
54	2009.0808.160041	MASB.BHZ, TWM1.HHZ, SCZ.HHZ
55	2009.0808.161438	TWGB.BHZ, TWM1.HHZ
56	2009.0808.163631	MASB.BHZ

編號	發生時間(UTC)	地震站
57	2009.0808.163915	SCZ.HHZ, MASB.BHZ
58	2009.0808.165949	SCZ.HHZ
59	2009.0808.174331	MASB.BHZ
60	2009.0808.175053	MASB.BHZ, SCZ.HHZ
61	2009.0808.181923	MASB.BHZ, TWM1.HHZ, TWGB.BHZ, SCZ.HHZ, ECL.HHZ
62	2009.0808.184042	SCZ.HHZ
63	2009.0808.190844	MASB.BHZ, SCZ.HHZ
64	2009..0808.191238	MASB.BHZ
65	2009.0808.191916	MASB.BHZ, TWM1.HHZ, TWGB.BHZ
66	2009.0808.194435	MASB.BHZ, TWM1.HHZ, TWGB.BHZ, SCZ. HHZ
67	2009.0808.201612	MASB.BHZ, SCZ.HHZ, TWM1.HHZ
68	2009.0808.202715	TPUB.BHZ
69	2009.0808.220336	ALS.HHZ
70	2009.0808.220517	SCZ.HHZ
71	2009.0808.221616	SGS.HHZ, TPUB.BHZ, MASB.BHZ, TWM1.HHZ, TWGB.BHZ, ALS.HHZ
72	2009.0808.223451	MASB.BHZ
73	2009.0808.230411	MASB.BHZ

編號	發生時間(UTC)	地震站
74	2009.0808.231442	TPUB.BHZ, TWM1.HHZ, ALS.HHZ
75	2009.0808.232614	ALS.HHZ
76	2009.0808.233056	TWGB.BHZ, TWM1.HHZ
77	2009.0809.000519	ALS.HHZ
78	2009.0809.000754	ALS.HHZ, TPUB.BHZ, TWGB.BHZ
79	2009.0809.001634	ALS.HHZ
80	2009.0809.005153	MASB.BHZ
81	2009.0809.010536	MASB.BHZ
82	2009.0809.021014	ELD.HHZ, TWGB.BHZ
83	2009.0809.021541	TPUB.BHZ
84	2009.0809.034817	MASB.BHZ, SCZ.HHZ
85	2009.0809.035523	MASB.BHZ, TWM1.HHZ, SCZ.HHZ, ECL.HHZ
86	2009.0809.042511	ELD.HHZ
87	2009.0809.044252	MASB.BHZ
88	2009.0809.055533	ELD.HHZ
89	2009.0809.072514	MASB.BHZ, TWM1.HHZ
90	2009.0809.093153	MASB.BHZ, SCZ.HHZ, ECL.HHZ, TWGB.BHZ, TWM1.HHZ
91	2009.0809.095246	MASB.BHZ
92	2009.0809.095323	TWM1.HHZ
93	2009.0809.102523	SCZ.HHZ, MASB.BHZ, ECL.HHZ, TWM1.HHZ

編號	發生時間(UTC)	地震站
94	2009.0809.110305	TPUB.BHZ
95	2009.0809.110701	TWM1.HHZ, ECL.HHZ, MASB.BHZ
96	2009.0809.111056	MASB.BHZ, ECL.HHZ
97	2009.0809.122350	ALS.HHZ
98	2009.0809.130933	TWGB.BHZ
99	2009.0809.131259	TWGB.BHZ
100	2009.0809.134416	TPUB.BHZ
101	2009.0809.144149	ALS.HHZ
102	2009.0809.151417	ALS.HHZ
103	2009.0809.153009	TPUB.BHZ
104	2009.0809.155036	ALS.HHZ
105	2009.0809.155722	ALS.HHZ
106	2009.0809.163147	SCZ.HHZ, TWM1.HHZ
107	2009.0809.211545	SCZ.HHZ
108	2009.0810.035343	MASB.BHZ
109	2009.0810.035437	TPUB.BHZ, ELD.HHZ
110	2009.0810.041607	MASB.BHZ
111	2009.0810.103931	ALS.HHZ
112	2009.0810.110603	ELD.HHZ
113	2009.0810.110707	ELD.HHZ, TPUB.BHZ
114	2009.0810.133858	ELD.HHZ, ALS.HHZ, TWGB.BHZ
115	2009.0810.144011	ALS.HHZ

編號	發生時間(UTC)	地震站
116	2009.0810.150221	ELD.HHZ
117	2009.0810.151642	TWGB.BHZ
118	2009.0810.184212	TPUB.BHZ, ALS.HHZ, ELD.HHZ
119	2009.0810.220044	TWGB.BHZ
120	2009.0810.220125	TWGB.BHZ
121	2009.0810.220328	MASB.BHZ, TWGB.BHZ
122	2015.0806.013652	TWGB.BHZ
123	2015.0806.051219	CHN1.HSZ, ELD.HSZ
124	2015.0806.070138	EAS.HSZ
125	2015.0806.152918	CHN1.HSZ
126	2015.0806.170509	EAS.HSZ
127	2015.0806.172151	ALS.HSZ
128	2015.0806.231713	ALS.HSZ, WTP.HSZ
129	2015.0807.071845	TWG.HSZ, TWGB.BHZ
130	2015.0807.072500	TPUB.BHZ
131	2015.0807.081604	ELD.HHZ
132	2015.0807.101942	ALS.HSZ
133	2015.0807.160513	ALS.HSZ, SCZ.HSZ, WTP.HSZ, MASB.BHZ, STY.HSZ, TWL.HSZ
134	2015.0807.194610	WTP.HSZ
135	2015.0807.211030	ECL.HSZ
136	2015.0807.225653	EAS.HSZ
137	2015.0807.233758	EAS.HSZ

編號	發生時間(UTC)	地震站
138	2015.0808.010944	ALS.HSZ
139	2015.0808.024238	SLG.HHZ
140	2015.0808.042132	ALS.HSZ
141	2015.0808.044938	CHN5.HSZ
142	2015.0808.045359	ALS.HHZ, ALS.HSZ
143	2015.0808.054428	SLG.HHZ
144	2015.0808.054511	SLG.HHZ
145	2015.0808.092239	ALS.HSZ
146	2015.0808.100458	ALS.HSZ
147	2015.0808.154230	EAS.HSZ
148	2015.0808.173417	TWMA1.HSZ
149	2015.0808.173632	MASB.BHZ
150	2015.0808.183054	TWG.HSZ
151	2015.0808.190934	TWL.HSZ
152	2015.0808.191450	TWGB.BHZ
153	2015.0808.202123	ALS.HSZ
154	2015.0809.004942	TWGB.BHZ
155	2015.0809.053803	SSD.HSZ, MASB.BHZ, STY.HSZ, SLG.HHZ, CHN1.HSZ, TWL.HSZ, TPUB.BHZ, ELD.HSZ
156	2015.0809.131506	TWGB.BHZ
157	2015.0809.223039	EAS.HSZ

附錄二、地動訊號自動分類器之地震事件訓練樣本目錄

編號	發生時間(UTC)	地震站
1	2009.0806.021743	ELD.HHZ, TWGB.BHZ, ALS.HHZ, TPUB.BHZ, MASB.BHZ
2	2009.0806.033554	ALS.HHZ, ELD.HHZ, SGS.HHZ, TPUB.BHZ, TWM1.HHZ
3	2009.0806.033813	EAS.HHZ, ECL.HHZ
4	2009.0806.040319	ELD.HHZ, TPUB.BHZ, ECL.HHZ
5	2009.0806.062108	ELD.HHZ, TPUB.BHZ, TWGB.BHZ, ALS.HHZ, MASB.BHZ, ECL.HHZ
6	2009.0806.063447	ALS.HHZ, ELD.HHZ, SCZ.HHZ, TPUB.BHZ, EAS.HHZ, SGS.HHZ, TWGB.BHZ, ECL.HHZ, MASB.BHZ, TWM1.HHZ
7	2009.0806.080354	ALS.HHZ, ELD.HHZ
8	2009.0806.083301	ALS.HHZ
9	2009.0806.094153	MASB.BHZ, ECL.HHZ, TWGB.BHZ, TWM1.HHZ, ELD.HHZ, TPUB.BHZ
10	2009.0806.102325	ALS.HHZ, TPUB.BHZ
11	2009.0806.105058	TWGB.BHZ, TPUB.BHZ

編號	發生時間(UTC)	地震站
12	2009.0806.110117	ALS.HHZ, ELD.HHZ, TPUB.BHZ, TWGB.BHZ, SGS.HHZ, MASB.BHZ
13	2009.0806.121851	TPUB.BHZ, SGS.HHZ, TWM1.HHZ, ECL.HHZ, MASB.BHZ, SCZ.HHZ, ELD.HHZ, ALS.HHZ, TWGB.BHZ, EAS.HHZ
14	2009.0806.123618	SGS.HHZ
15	2009.0806.123726	TPUB.BHZ
16	2009.0806.131127	TWM1.HHZ, TPUB.BHZ, SGS.HHZ, MASB.BHZ, ELD.HHZ, ECL.HHZ
17	2009.0806.132350	ALS.HHZ, ELD.HHZ
18	2009.0806.155525	ELD.HHZ
19	2009.0806.181215	SGS.HHZ
20	2009.0806.190551	EAS.HHZ
21	2009.0807.003120	ALS.HHZ
22	2009.0807.003737	ELD.HHZ, ALS.HHZ, TWGB.BHZ, SGS.HHZ, MASB.BHZ
23	2009.0807.004934	ELD.HHZ
24	2009.0807.010800	ALS.HHZ
25	2009.0807.012445	ELD.HHZ
26	2009.0807.021810	ELD.HHZ

編號	發生時間(UTC)	地震站
27	2009.0807.060606	ELD.HHZ
28	2009.0807.075127	TWGB.BHZ, ELD.HHZ
29	2009.0807.101037	ELD.HHZ
30	2009.0807.112033	TWGB.BHZ, ELD.HHZ, MASB.BHZ, SGS.HHZ, ALS.HHZ, TPUB.BHZ, SCZ.HHZ, TWM1.HHZ
31	2009.0807.114738	SCZ.HHZ, MASB.BHZ, TWGB.BHZ, ELD.HHZ, ALS.HHZ
32	2009.0807.184615	EAS.HHZ, TWGB.BHZ, ELD.HHZ, MASB.BHZ, SGS.HHZ, TPUB.BHZ, ALS.HHZ, TWM1.HHZ, SCZ.HHZ
33	2009.0807.185609	ELD.HHZ, TWGB.BHZ, ALS.HHZ
34	2015.0806.010709	SLG.HHZ
35	2015.0806.013846	CHN1.HSZ
36	2015.0806.031752	ALS.HHZ, EAS.HSZ, SCZ.HHZ, SCZ.HSZ, MASB.BHZ, TWG.HSZ, TWGB.BHZ, LONT.HHZ, SSD.HSZ, ELD.HHZ, ELD.HSZ, SMG.HHZ, SGS.HSZ, STY.HSZ, TPUB.BHZ, WTP.HSZ, ALS.HSZ, CHN1.HSZ, TWL.HSZ
37	2015.0806.033927	TWGB.BHZ, ELD.HHZ
38	2015.0806.043016	LONT.HHZ

編號	發生時間(UTC)	地震站
39	2015.0806.061558	ELD.HHZ, ELD.HSZ
40	2015.0806.062504	ELD.HHZ, ELD,HSZ
41	2015.0806.074234	SCZ.HHZ, SCZ.HSZ
42	2015.0806.091958	ALS.HHZ, ALS.HSZ, ELD.HSZ, TPUB.BHZ, WTP.HSZ, TWL.HSZ, WTY.HSZ
43	2015.0806.092712	TPUB.BHZ
44	2015.0806.093305	ELD.HHZ, ELD.HSZ, STY.HSZ, TWGB.BHZ, TWL.HSZ, WTP.HSZ, TPUB.BHZ, ALS.HSZ
45	2015.0806.094503	ALS.HSZ
46	2015.0806.095432	MASB.BHZ, CHN1.HSZ, WTP.HSZ, TWL.HSZ
47	2015.0806.100303	CHN1.HSZ
48	2015.0806.102951	CHN1.HSZ
49	2015.0806.103718	EAS.HSZ, WTP.HSZ, LONT.HHZ, SSP.HHZ, SCZ.HHZ, SCZ.HSZ, ELD.HHZ, ELD.HSZ, MASB.BHZ, SMG.HHZ
50	2015.0806.110432	SSP.HHZ
51	2015.0806.110630	LONT.HHZ, TWGB.BHZ, ALS.HHZ, ALS.HSZ, ELD.HHZ, MASB.BHZ, SMG.HHZ, TPUB.BHZ

編號	發生時間(UTC)	地震站
52	2015.0806.113633	ELD.HHZ
53	2015.0806.115812	TPUB.BHZ, ALS.HHZ
54	2015.0806.123328	SMG.HHZ
55	2015.0806.123401	ELD.HHZ, ALS.HHZ, TPUB.BHZ
56	2015.0806.162533	TPUB.BHZ
57	2015.0806.163804	MASB.BHZ
58	2015.0806.164712	ALS.HHZ, ELD.HHZ
59	2015.0806.165222	ALS.HHZ, TPUB.BHZ, SCS.HHZ, MASB.BHZ, ELD.HHZ, LONT.HHZ
60	2015.0806.181137	TPUB.BHZ
61	2015.0806.182817	SCZ.HHZ, MASB.BHZ, SMG.HHZ
62	2015.0806.191856	SCZ.HHZ
63	2015.0806.192603	ELD.HHZ
64	2015.0806.193546	ALS.HHZ, ELD.HHZ
65	2015.0806.194448	TPUB.BHZ
66	2015.0806.215159	ALS.HHZ, ELD.HHZ
67	2015.0806.220213	LONT.HHZ
68	2015.0806.221645	ELD.HHZ
69	2015.0806.224812	MASB.BHZ, ELD.HHZ
70	2015.0807.000606	ALS.HHZ, ELD.HHZ
71	2015.0807.005038	ELD.HHZ, LONT.HHZ, ALS.HHZ
72	2015.0807.005915	ELD.HHZ

編號	發生時間(UTC)	地震站
73	2015.0807.040925	ELD.HHZ
74	2015.0807.042459	ELD.HHZ
75	2015.0807.042500	LONT.HHZ, ALS.HHZ
76	2015.0807.070426	ALS.HHZ, ELD.HHZ
77	2015.0807.081016	LONT.HHZ
78	2015.0807.081119	ELD.HHZ
79	2015.0807.084132	ALS.HHZ, ELD.HHZ
80	2015.0807.090440	ALS.HHZ, ELD.HHZ
81	2015.0807.095515	ALS.HHZ, ELD.HHZ
82	2015.0807.103855	ELD.HHZ, ALS.HHZ
83	2015.0807.131814	ELD.HHZ, ALS.HHZ
84	2015.0807.133200	ALS.HHZ
85	2015.0807.155101	ELD.HHZ
86	2015.0807.162127	ALS.HHZ, ELD.HHZ
87	2015.0807.191307	ELD.HHZ
88	2015.0807.204203	ELD.HHZ, ALS.HHZ
89	2015.0807.225914	ALS.HHZ, ELD.HHZ
90	2015.0807.231310	ELD.HHZ, ALS.HHZ

附錄三、15 處高屏溪流域內崩塌地動訊號圖

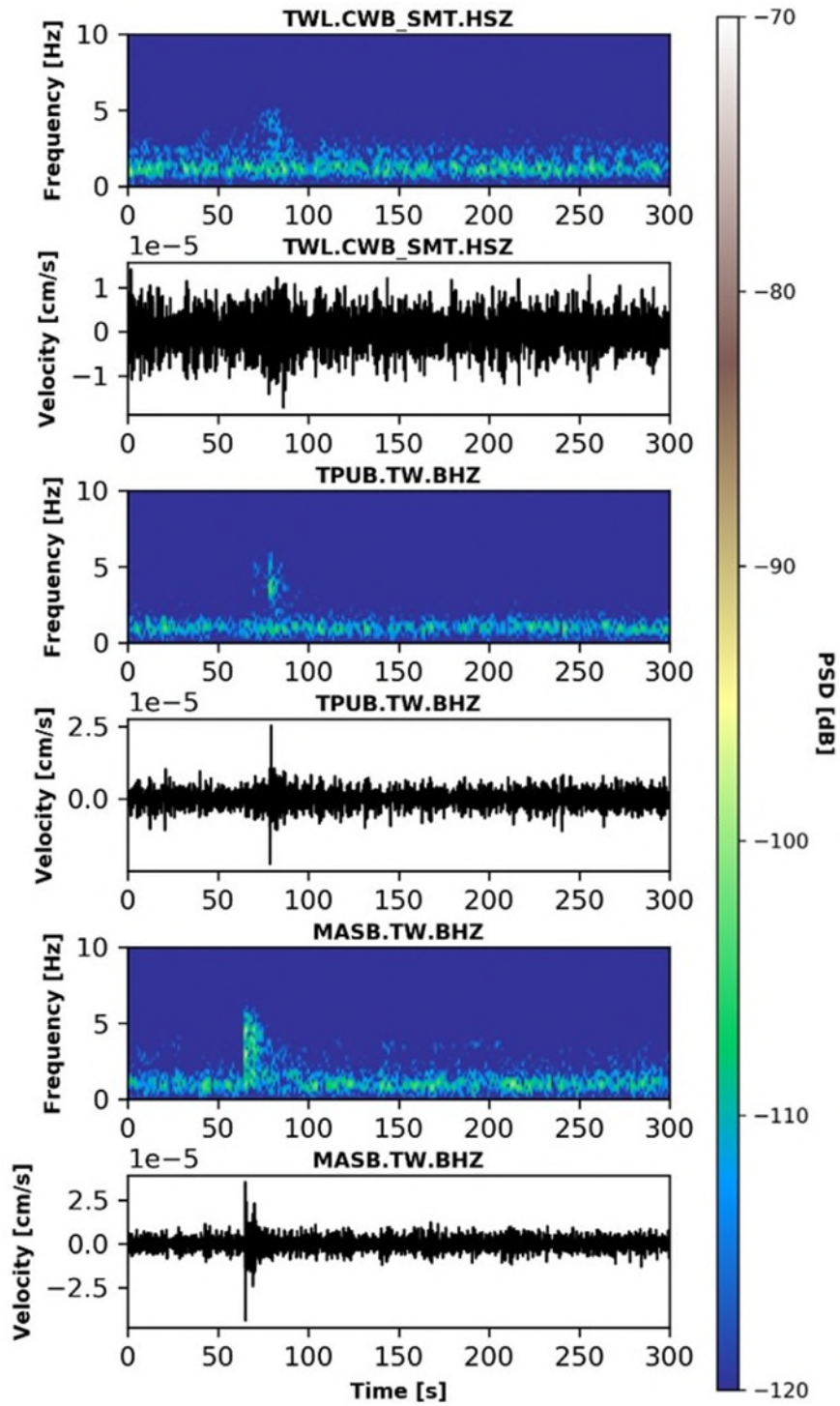


圖 A.1 KP201201 崩塌地動訊號

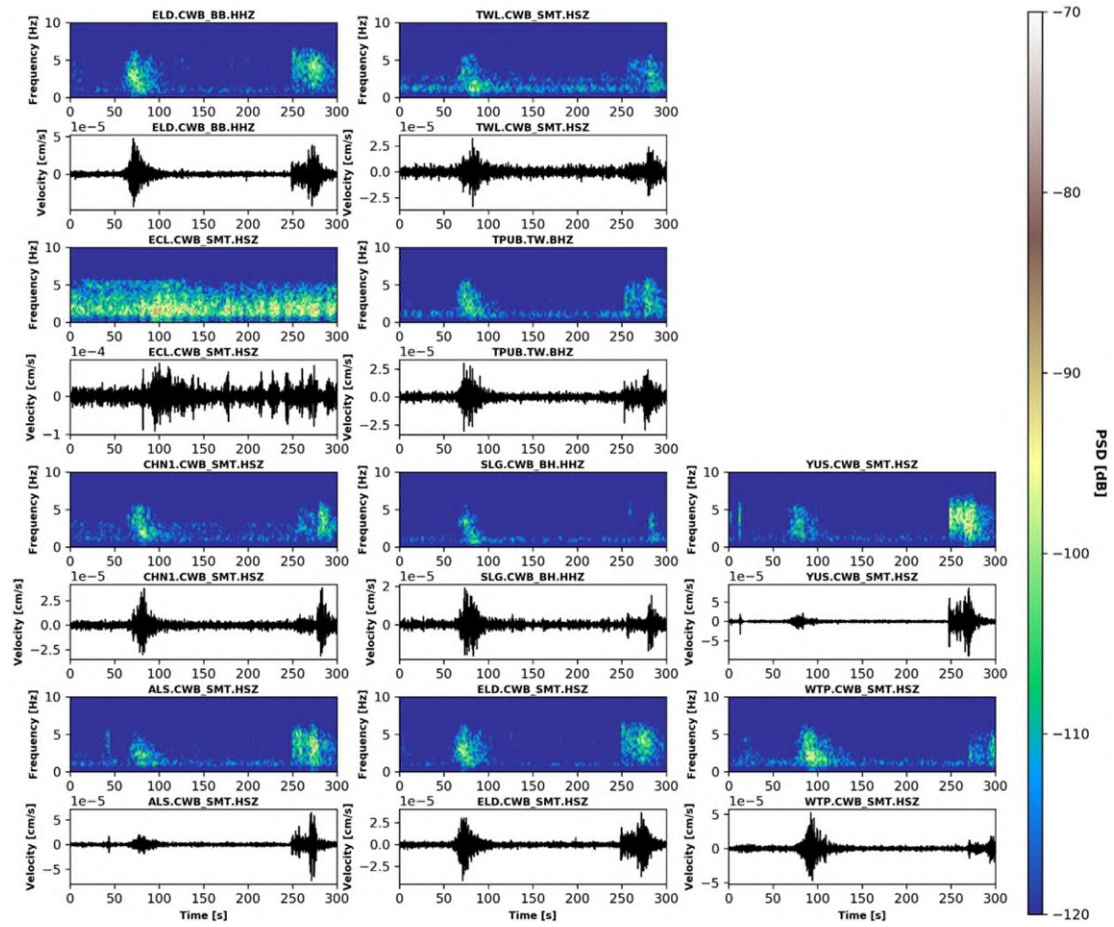


圖 A.2 KP201302 崩塌地動訊號

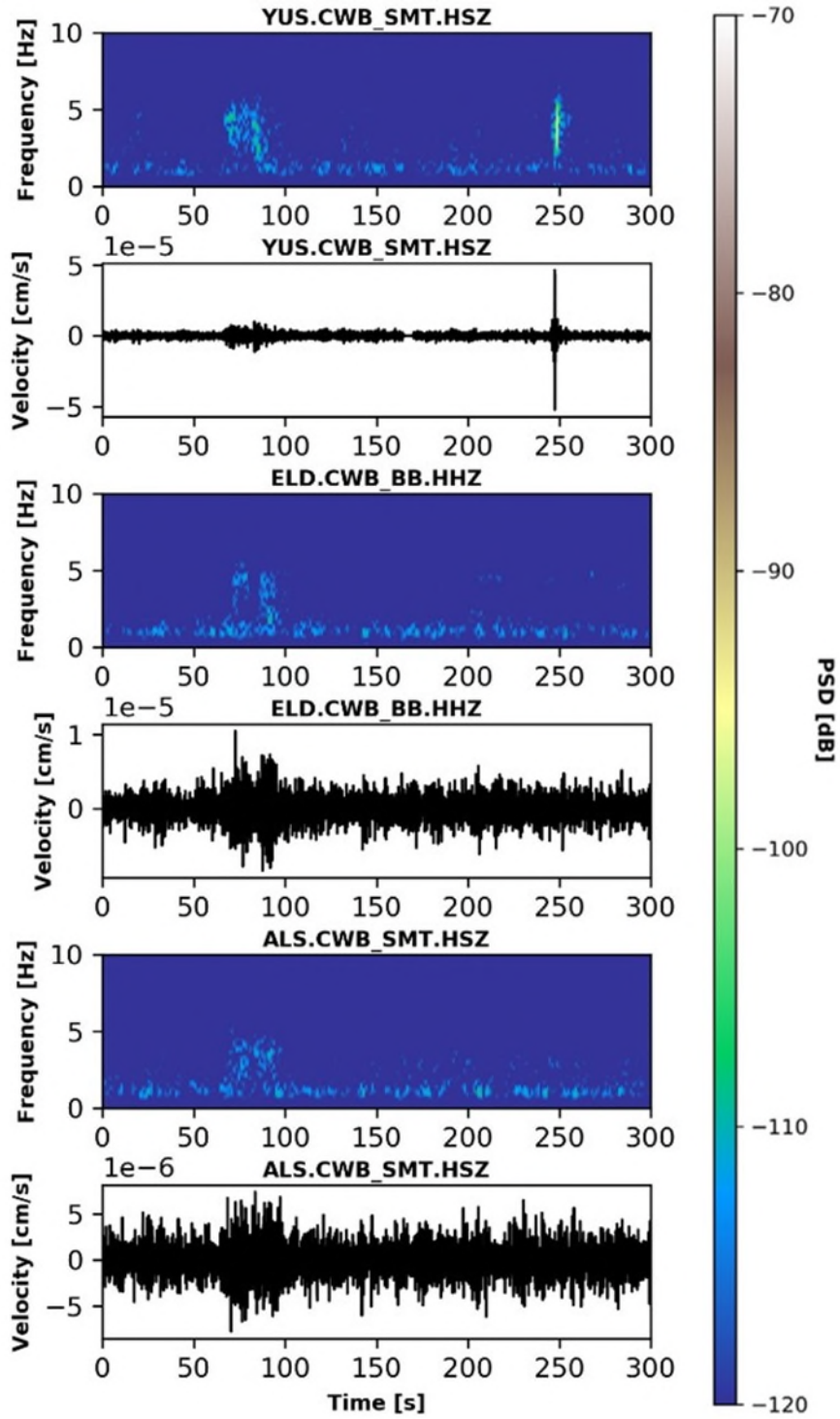


圖 A.3 KP201303 崩塌地動訊號

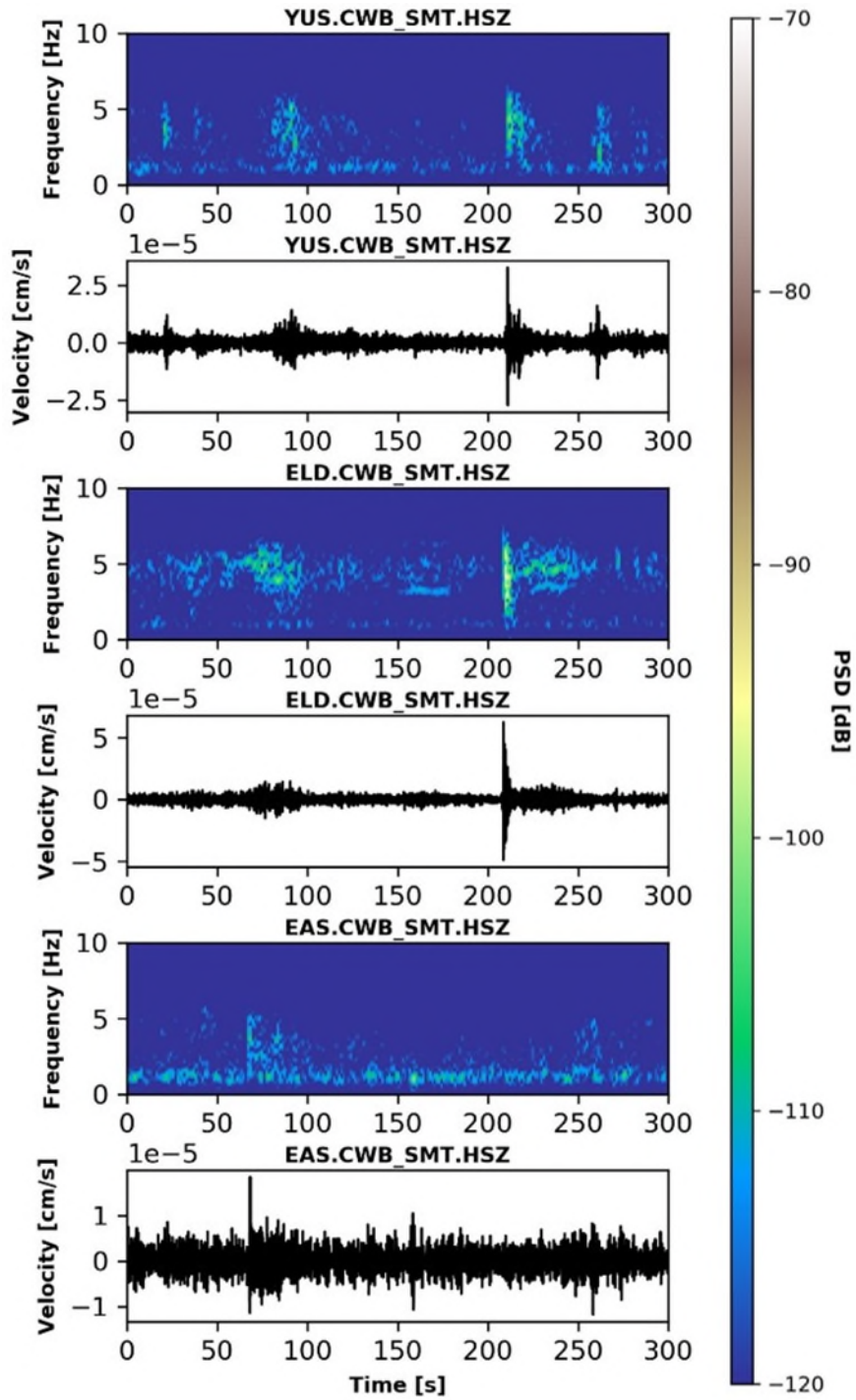


圖 A.4 KP201304 崩塌地動訊號

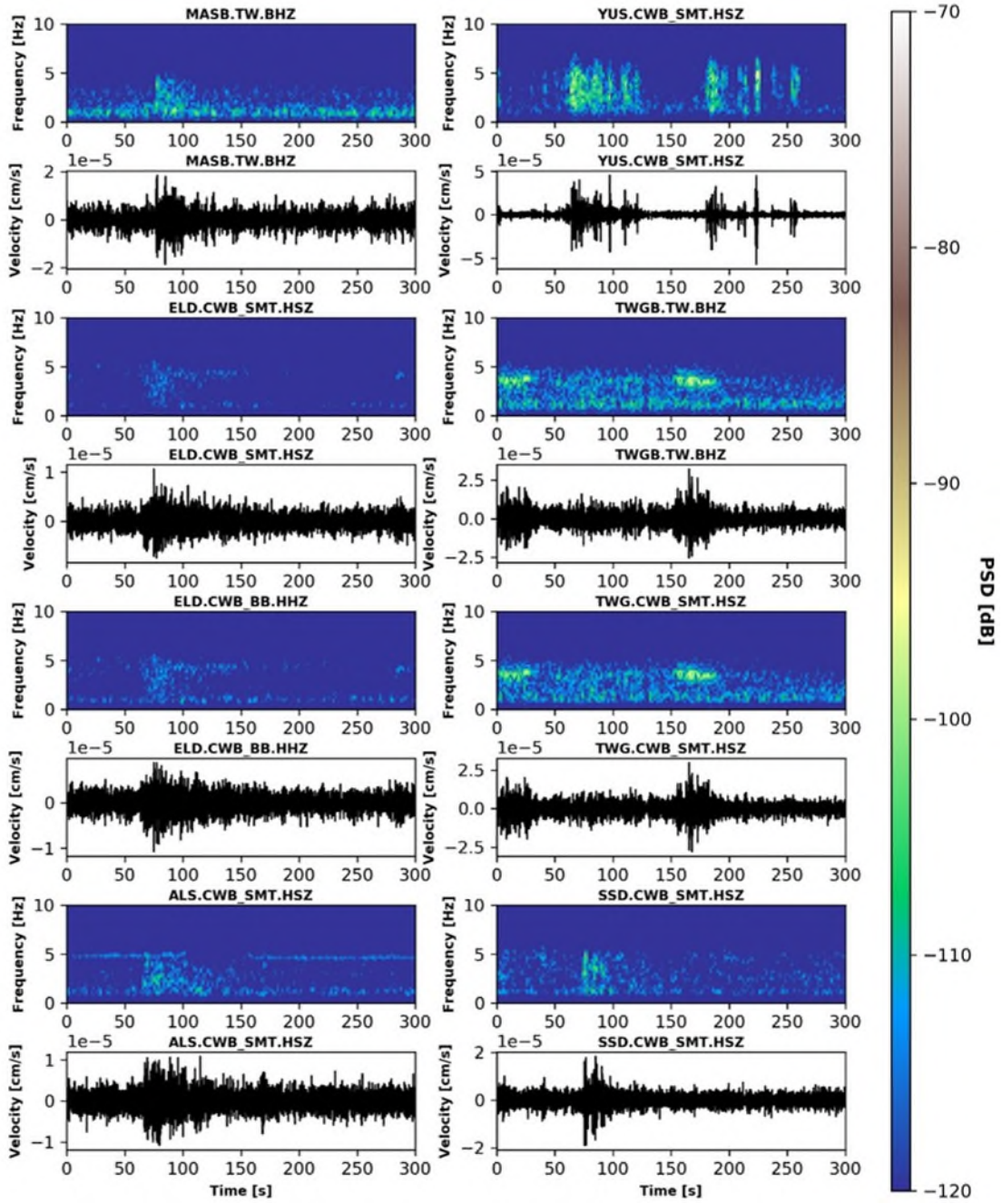


圖 A.5 KP201305 崩塌地動訊號

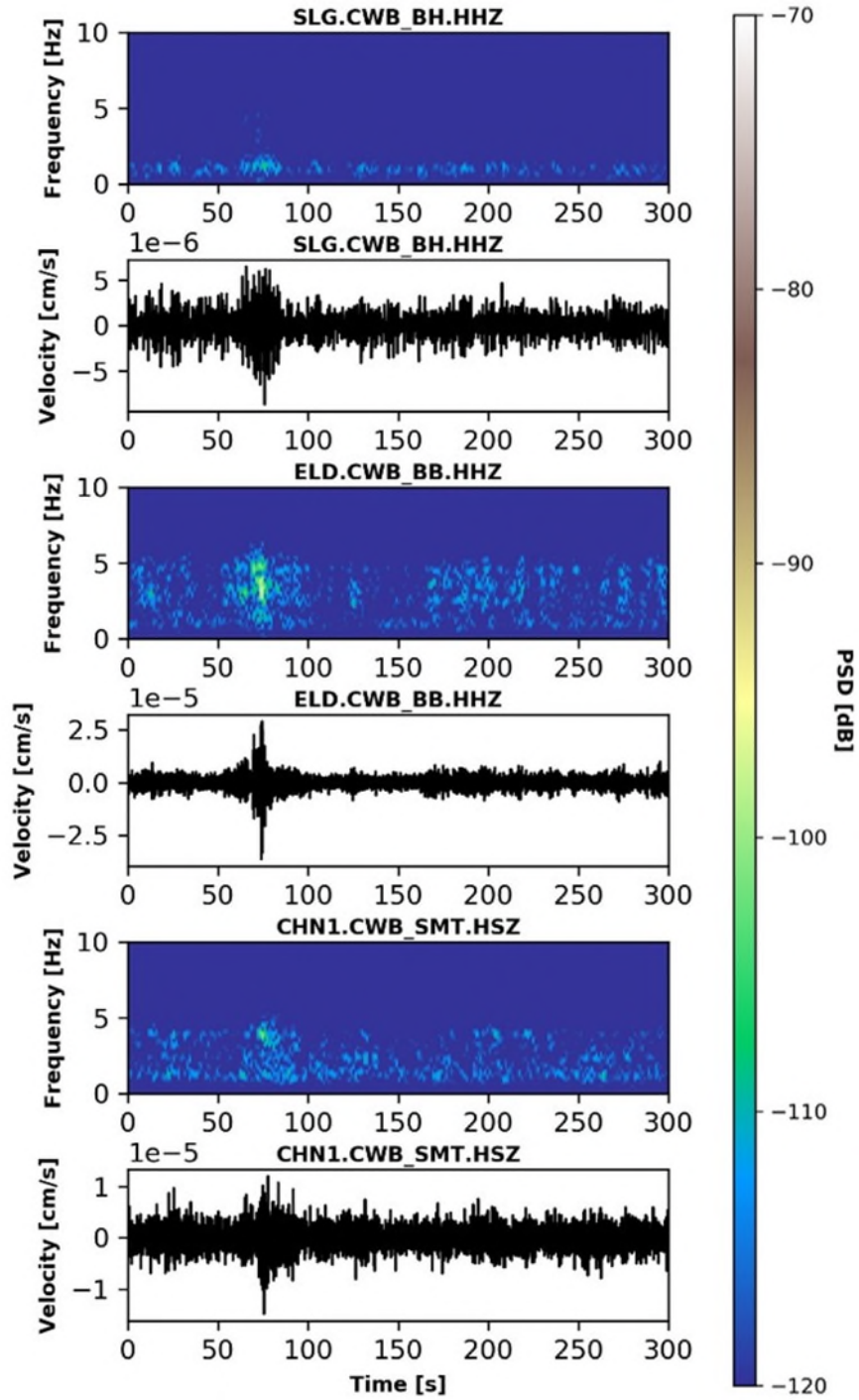


圖 A.6 KP201406 崩塌地動訊號

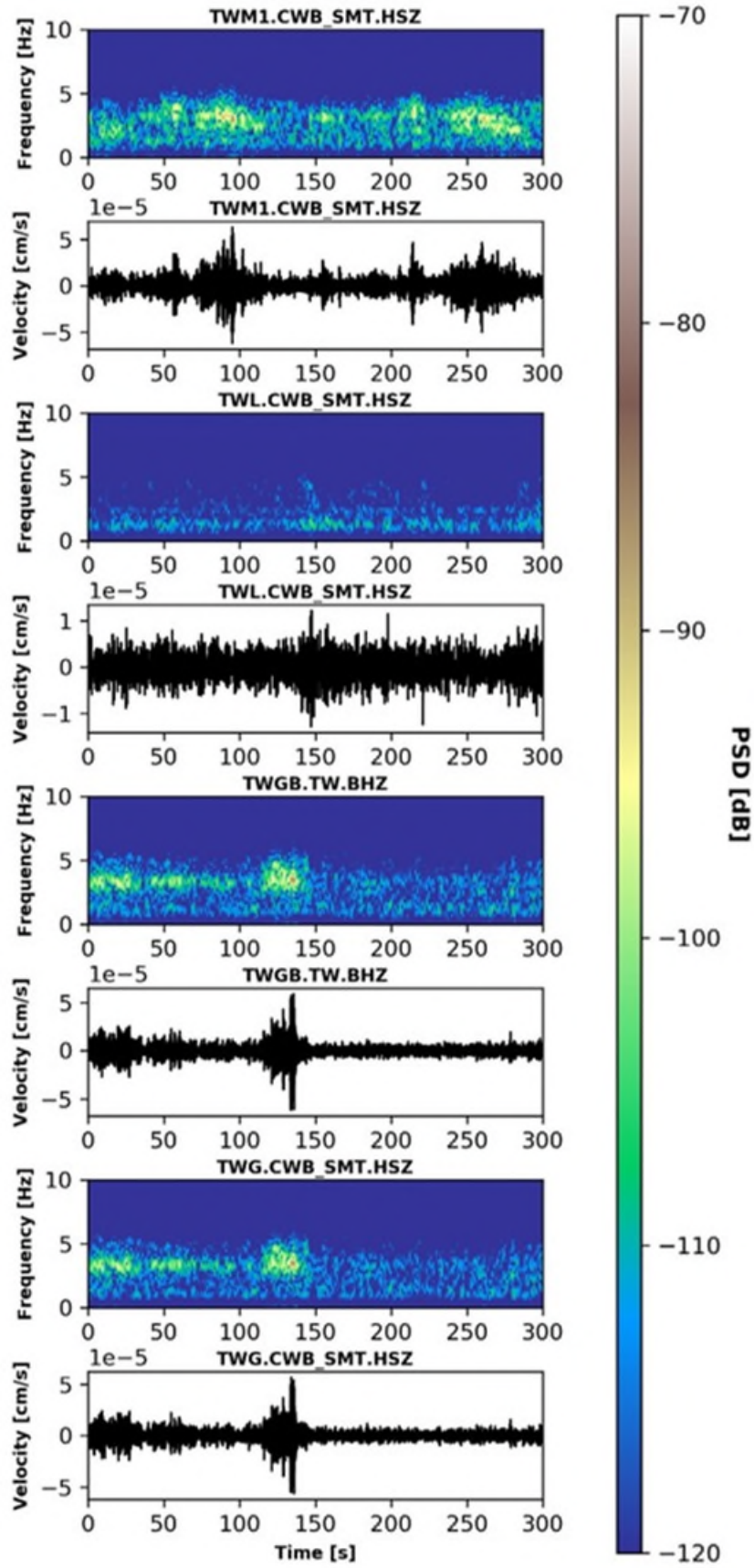


圖 A.7 KP201407 崩塌地動訊號

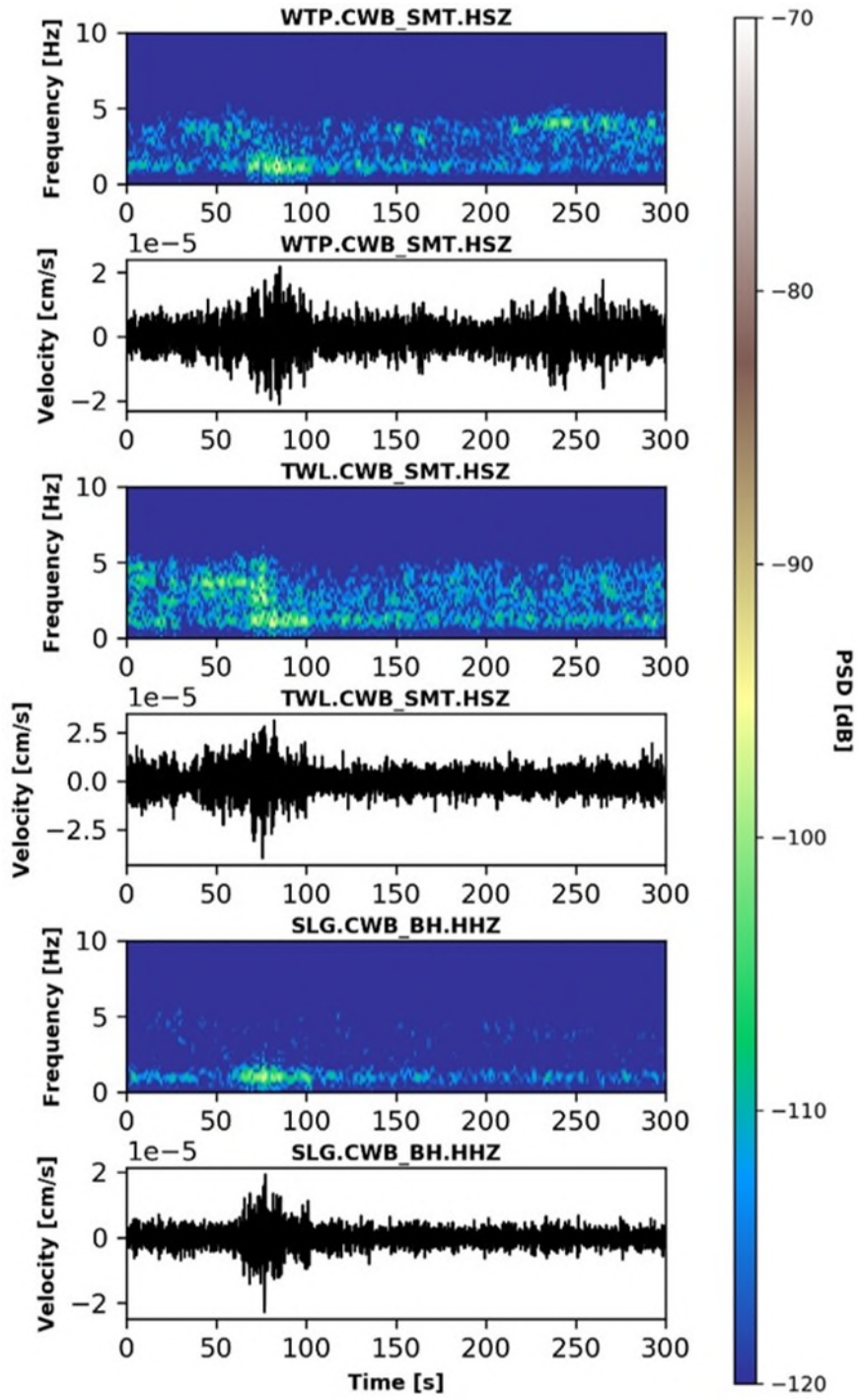


圖 A.8 KP201408 崩塌地動訊號

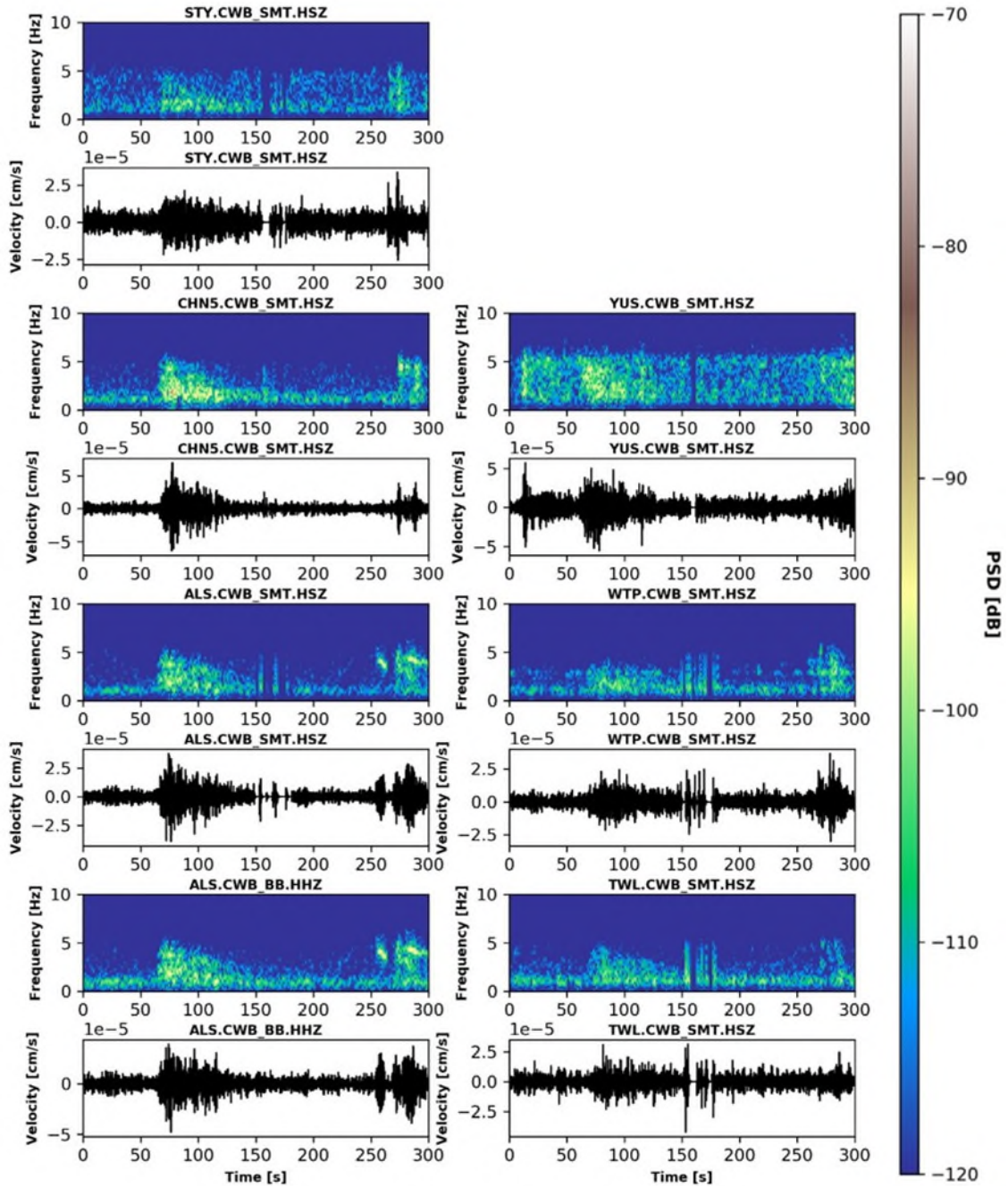


圖 A.9 KP201409 崩塌地動訊號

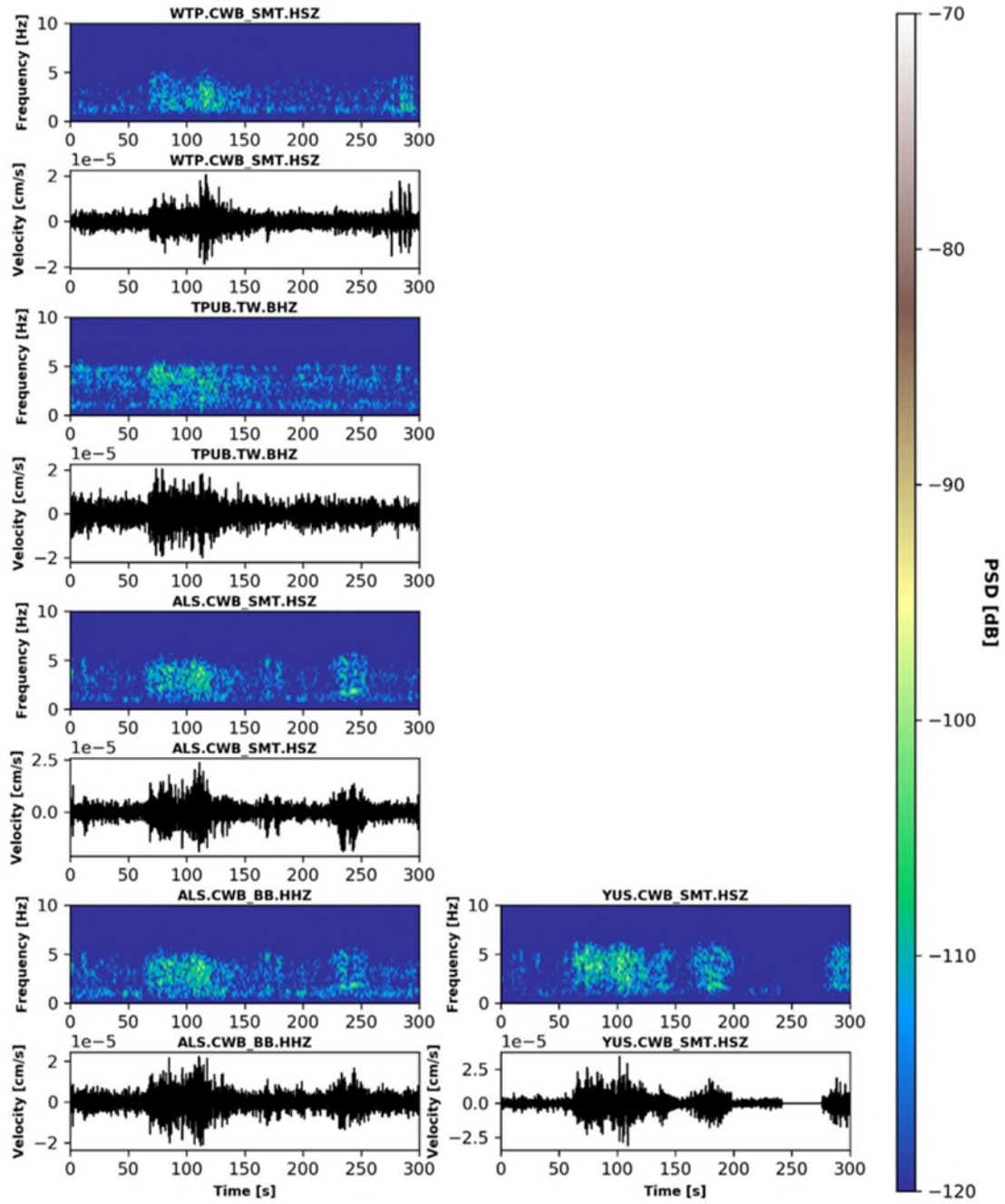


圖 A.10 KP201410 崩塌地動訊號

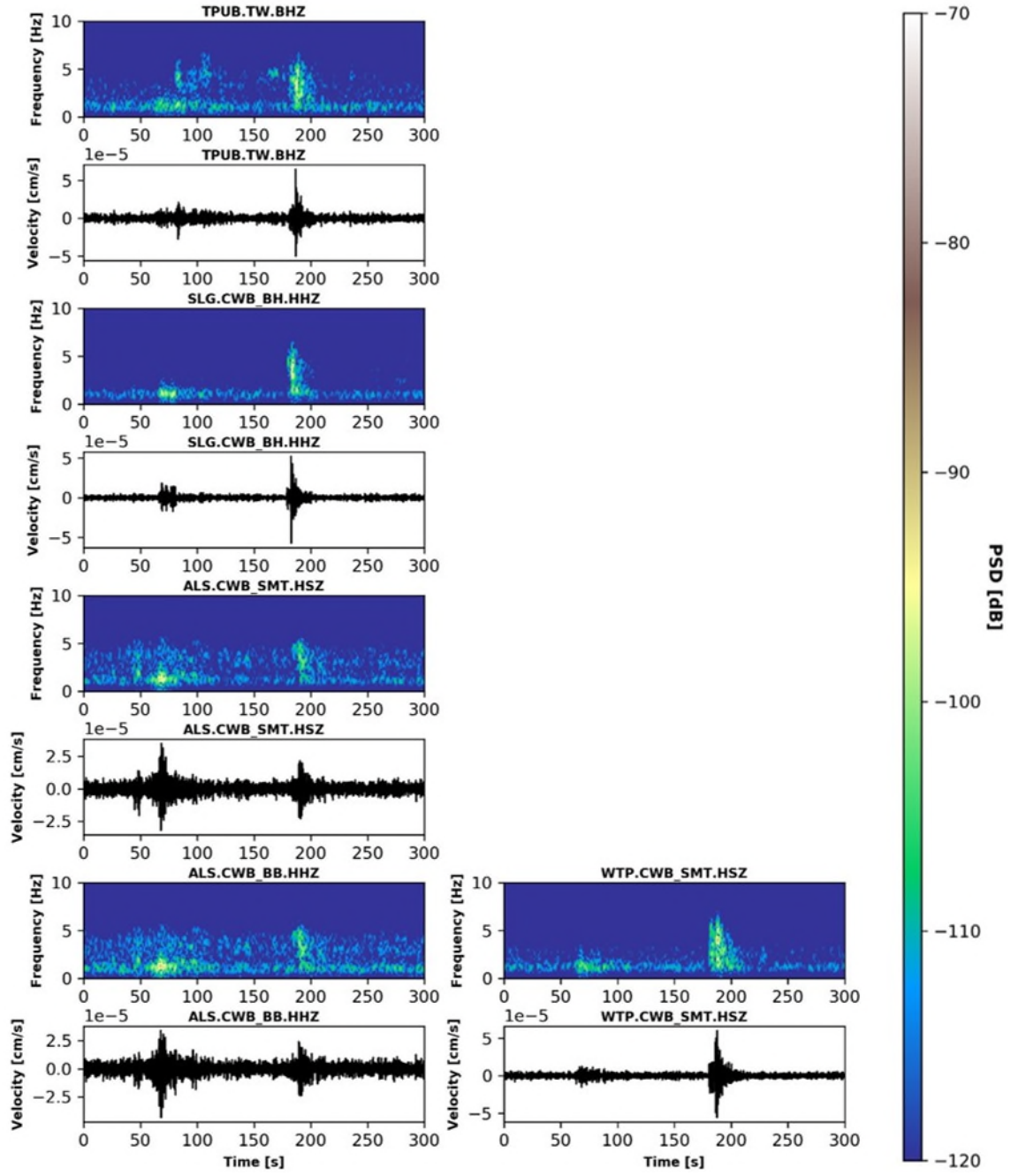


圖 A.11 KP201511 崩塌地動訊號

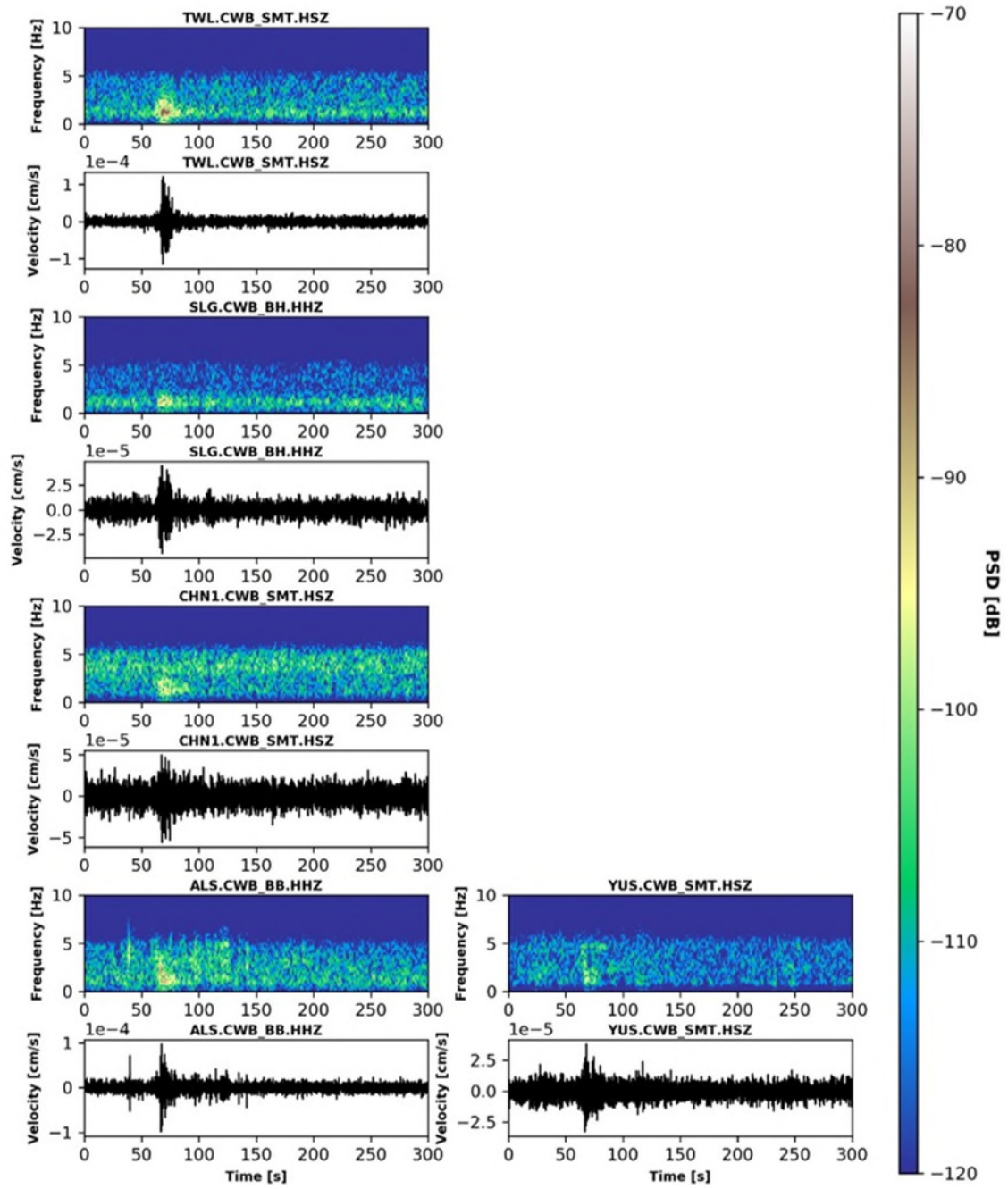


圖 A.12 KP201512 崩塌地動訊號

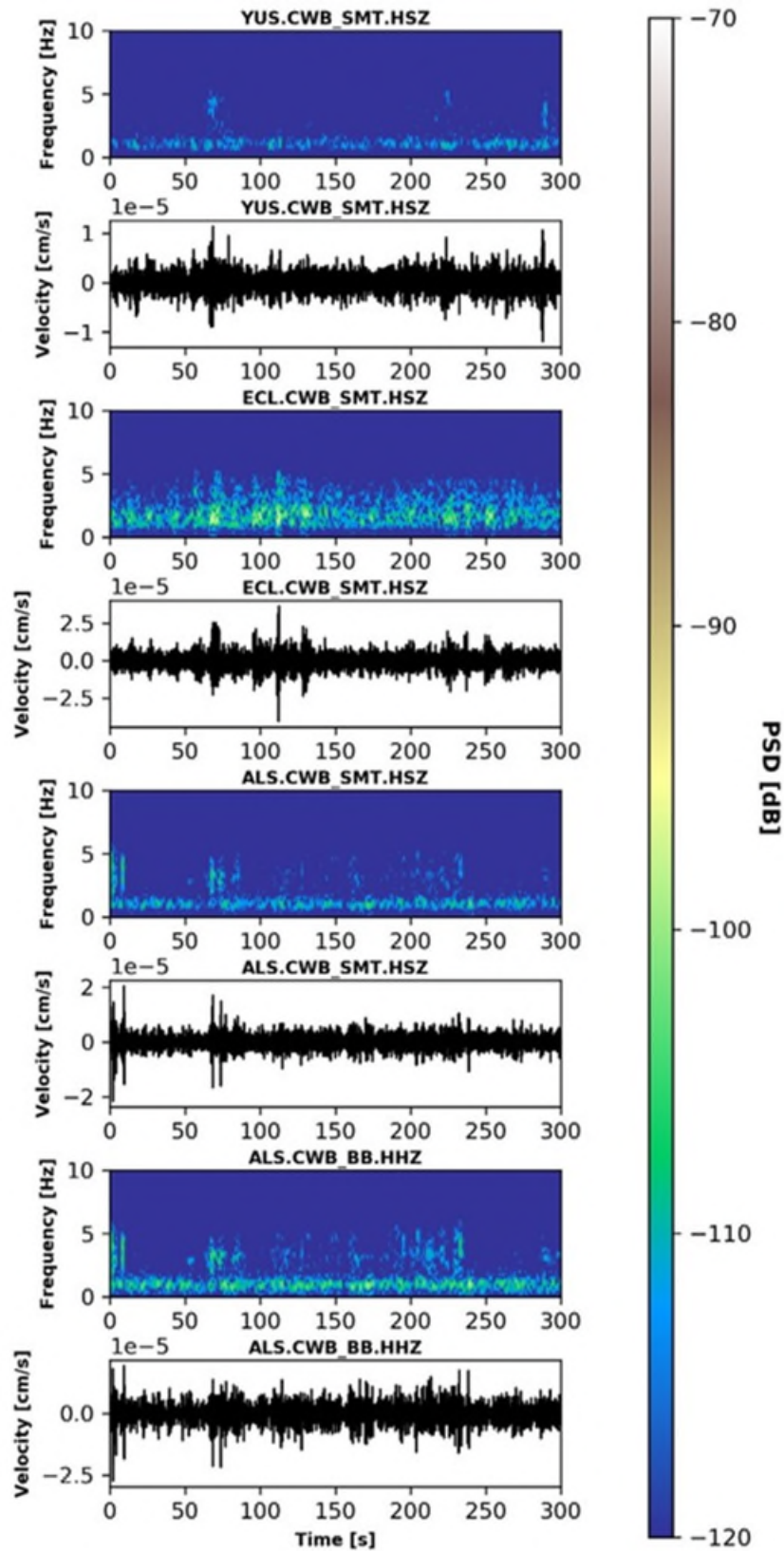


圖 A.13 KP201513 崩塌地動訊號

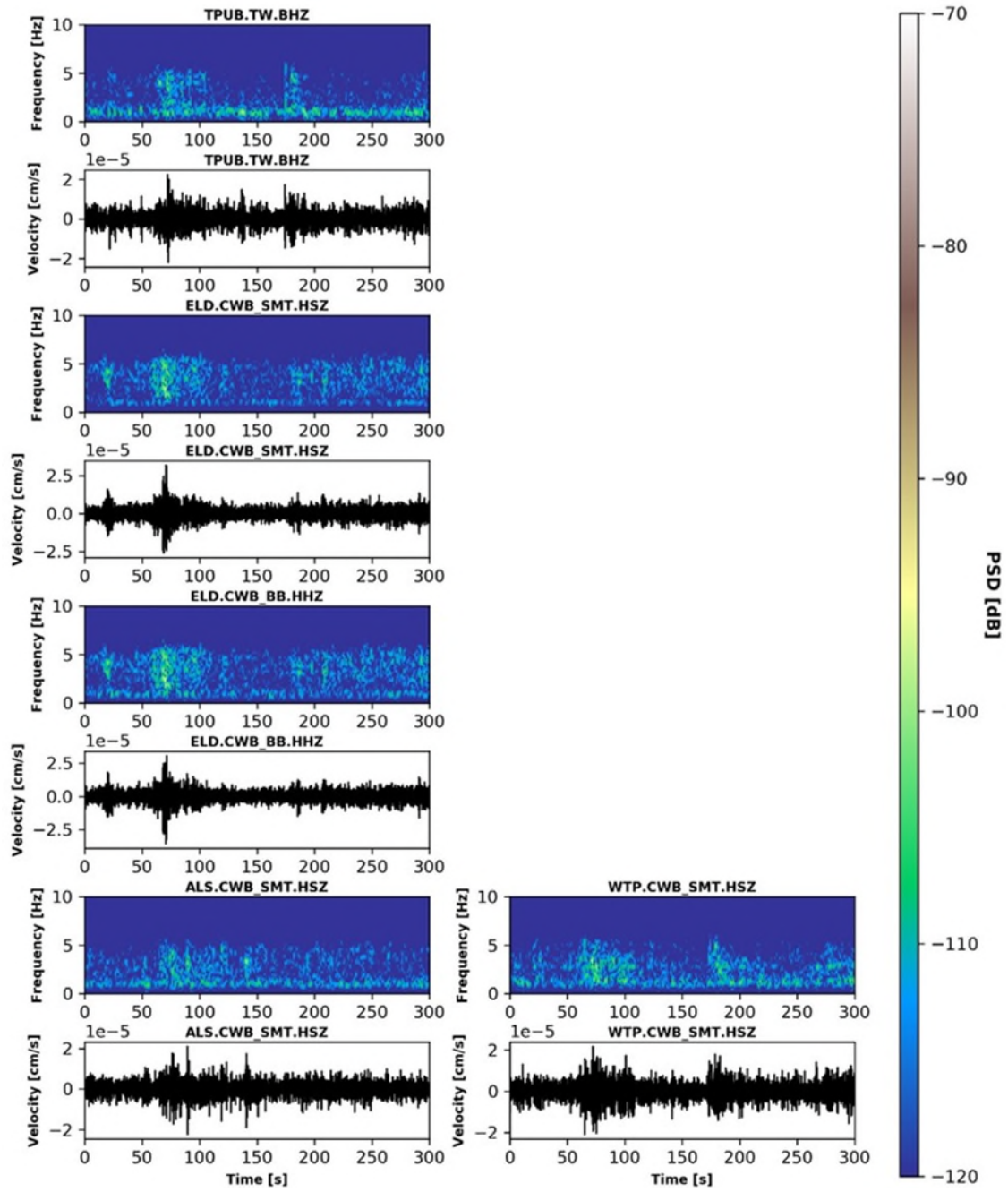


圖 A.14 KP201514 崩塌地動訊號

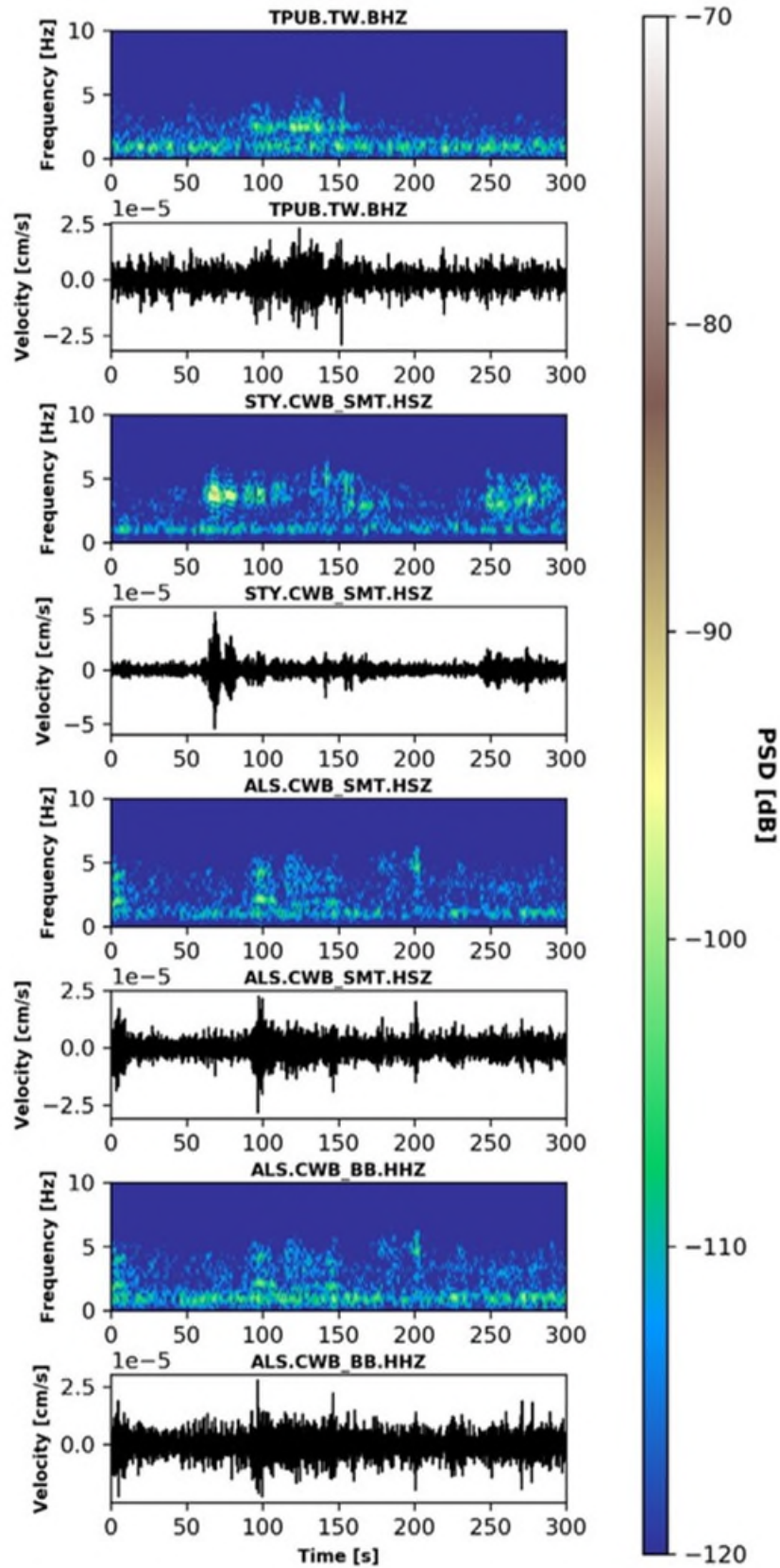


圖 A.15 KP201515 崩塌地動訊號

附錄四、52 處高屏溪流域崩塌目錄

編號	時間 (臺灣時間)	X 座標 (97TM2)	Y 座標 (97TM2)	面積 (公頃)	岩性	高程分布 (公尺)	坡度 (°)	坡向 (°)
2003-015	2003.0804.1218	246564.61	2591784.23	13.10	變質砂岩	2,979-3,347	32	141
2005-003	2005.0719.0342	223032.69	2522166.21	13.32	砂頁岩互層	1,202-1,536	28	170
2005-004	2005.0721.0215	224553.67	2515741.09	12.61	板岩	479-1,143	24	73
2005-001	2005.0721.0555	231268.90	2531158.44	11.52	變質砂岩	1,344-1,759	27	134
2005-002	2005.0721.1433	221036.68	2527652.31	17.66	板岩	682-1,179	25	193
2008-006	2008.0719.0755	215190.79	2560571.92	12.42	片岩	614-889	20	254
2009-076	2009.0808.1127	241020.00	2580697.00	40.00	板岩	1,284-2,203	31	127
2009-163	2009.0808.1155	224785.93	2553368.84	32.59	板岩	740-1,475	28	243
2009-172	2009.0808.1425	232057.05	2551219.84	39.19	片岩	1,230-2,240	32	183
2009-194	2009.0808.1428	216279.71	2545219.62	14.64	板岩	317-700	30	316
2009-193	2009.0808.1515	219651.78	2545620.65	23.29	板岩	565-1,330	30	279
2009-295	2009.0808.1535	219471.58	2517090.09	48.86	片岩	246-942	21	160
2009-197	2009.0808.1610	230823.98	2543927.69	18.72	板岩	1,584-2,373	29	82

編號	時間 (臺灣時間)	X 座標 (97TM2)	Y 座標 (97TM2)	面積 (公頃)	岩性	高程分布 (公尺)	坡度 (°)	坡向 (°)
2009-074	2009.0808.1620	230823.98	2543927.69	40.74	板岩	1,380-2,059	34	83
2009-280	2009.0808.1840	235456.92	2521785.28	16.11	板岩	1,167-1,883	33	230
2009-077	2009.0808.1935	244820.49	2580493.50	21.69	板岩	1,677-2,318	30	104
2009-214	2009.0808.2156	215277.66	2539852.51	11.12	片岩	296-552	28	164
2009-125	2009.0809.0015	237769.25	2564220.14	14.00	板岩	1,971-2,398	37	269
2009-308	2009.0809.0219	220784.00	2511106.00	56.05	板岩	252-1,359	22	168
2009-216	2009.0809.0228	214704.64	2538569.48	12.07	片岩	292-761	30	248
2009-311	2009.0809.0319	220452.54	2508145.92	64.40	片岩	300-1,067	27	78
2009-065	2009.0809.0427	241755.49	2589015.65	12.24	砂頁岩互層	2,126-2,512	24	76
2009-064	2009.0809.0511	239662.48	2594844.75	14.97	片岩	1,746-2,150	22	163
2009-132	2009.0809.0616	214803.80	2562670.96	249.94	板岩	367-1,267	20	261
2009-181	2009.0809.0702	209362.60	2548148.64	13.21	片岩	595-858	25	211
2009-091	2009.0809.0714	224794.08	2576716.30	55.87	板岩	1,014-1,986	33	264
2009-108	2009.0809.0834	226183.05	2568170.14	224.02	片岩	843-2,131	26	152
2009-102	2009.0809.1052	226174.06	2569914.17	80.98	板岩	1,001-2,084	25	98

編號	時間 (臺灣時間)	X 座標 (97TM2)	Y 座標 (97TM2)	面積 (公頃)	岩性	高程分布 (公尺)	坡度 (°)	坡向 (°)
2009-271	2009.0809.1900	226583.77	2523926.27	13.31	片岩	1,393-1,934	28	55
2009-097	2009.0810.1154	229446.14	2571676.23	20.06	板岩	962-1,567	33	39
2009-086	2009.0810.1222	225301.10	2578509.34	151.65	片岩	779-2,098	28	222
2009-135	2009.0810.1906	235344.00	2561715.00	34.00	板岩	2,105-2,695	23	200
2009-267	2009.0811.0242	225582.00	2524697.00	55.40	板岩	1,526-2,264	24	103
2010-045	2010.0920.0724	222083.70	2527664.31	15.00	片岩	884-1,315	31	220
2011-014	2011.0831.1731	247561.54	2580912.53	11.00	片岩	2,493-3,044	35	190
KP201201	2012.0731.0003	219211.40	2532233.72	3.29	硬頁岩	443-715	31	138
KP201302	2013.0711.2325	235668.56	2575960.36	1.93	板岩	931-1,067	34	247
KP201303	2013.0712.0032	235012.64	2584941.63	19.74	板岩	1,356-1,838	29	198
KP201304	2013.0820.1538	229089.01	2515728.85	2.57	板岩	597-803	43	150
KP201305	2013.0827.2123	220596.90	2574310.44	8.81	砂頁岩互層	902-1,285	40	188
2013-019	2013.0830.0348	232012.00	2529054.00	21.00	板岩	1,824-2,295	28	175
KP201406	2014.0721.0003	242688.26	2580096.81	55.14	板岩	1,365-2,050	33	170
KP201407	2014.0721.0052	190265.25	2508518.03					

編號	時間 (臺灣時間)	X 座標 (97TM2)	Y 座標 (97TM2)	面積 (公頃)	岩性	高程分布 (公尺)	坡度 (°)	坡向 (°)
KP201408	2014.0919.1105	205897.40	2540295.00					
KP201409	2014.0921.1049	232614.65	2588676.37	41.42	板岩	1,259-1,894	28	166
KP201410	2014.0923.0747	246145.04	2582354.33	48.34	板岩	1,686-2,494	34	192
KP201511	2015.0806.1731	230788.70	2567926.37	12.14	硬頁岩	700-973	35	151
2015-029	2015.0809.0300	227034.00	2567900.00	20.99	砂頁岩互層	973-1,272	25	192
KP201512	2015.0809.0309	227476.09	2570145.75	19.42	砂頁岩互層	940-1,337	32	188
KP201513	2015.0928.0319	225757.35	2551611.25	12.14	硬頁岩	1,142-1,501	27	162
KP201514	2015.0928.0701	230777.81	2559477.00	9.53	板岩	862-1,148	38	170
KP201515	2015.0928.1128	228452.32	2558782.77	5.67	硬頁岩	945-1,174	33	209

附錄五、期中審查意見回覆

編號	委員意見	執行單位回覆
1	自動分類器的評估與開發初步驗證結果不錯，應屬可行，可持續發展。	感謝委員肯定。
2	對於三種不同類型地動事件之分類敏感度，準確度均達80%以上，值得肯定，但是三種地動事件同時出現時，又如何分離之？實務上操作能否確實掌握？	本計畫地動事件偵測使用時間域及頻率域 STA/LTA，假使地動事件訊號並無重疊，能夠將事件訊號分離，但訊號若有重疊，則無法分辨。本計畫偵測事件後將會提取地動訊號，假使訊號有明顯差異，能夠透過人工方式分離，反之若訊號相似，則無法區別。
3	對於崩塌之地動事件，在判釋上可達80%以上，是否應註明其可能誤差，以避免過度之信任。	感謝建議，機器學習之分類結果雖可達到80%之正確度，但確實仍有誤判之可能。以此本研究仍建議在自動辨識後需要以人工方式輔助辨識，減少誤判發生的機會。在第三章第六節中，訊號辨識結果的定位便提及需要人工輔助辨識。

4	<p>特徵值 σMA (Moving Average)之排序，能否作合理解釋，與μSI 何以不一致？</p>	<p>移動平均是經過標準化後，計算振動事件與振動噪訊的振幅移動變化趨勢。地震與崩塌之訊號振幅會顯著大於環境噪訊，因此在經過標準化後，會大幅降低整體振幅數值，因此σMA 的排序為噪訊>崩塌>地震。反之，閃爍指數是計算事件訊號與環境噪訊的差異程度，因此μSI的排序為地震噪訊>崩塌>噪訊。</p>
5	<p>訊號特徵值之選用有無交感效應之影響，各特徵值是否屬獨立參數？</p>	<p>本計畫使用之特徵值根據計算方式皆為獨立參數，儘管單一特徵值分類效果不佳，但透過個別事件整體特徵值分布的差異，還是能有較佳的分類效果，因此仍會使用分類效果不佳的特徵值。</p>
6	<p>建議檢核移動平均 (Moving Average)之時域窗(簡報 P.12)以提升時間域特徵值之正確性。</p>	<p>本計畫移動平均的計算值反映計算窗格的末端值，因此計算移動平均的原始訊號為6分鐘，而計算過後的訊號為5分鐘。</p>
7	<p>請問地震導致的崩塌可以區分出來嗎?若未來希望自動偵</p>	<p>目前地震產生之崩塌於本計畫的事件偵測環節無法區分個別</p>

	<p>測判釋,是否可能利用中央氣象局地震報告刪除此一情況,只掌握降雨造成之崩塌。</p>	<p>事件的訊號,因此無法辨識;若未來實施自動偵測判釋會參考中央氣象局發布之地震報告,來排除實際為地震訊號之錯誤警報。</p>
8	<p>報告書第 3-1 頁表 3.1「22 種演算法測試結果」建議詳列各演算法之計算數值,或於表下方加註採用計算方法。</p>	<p>本計畫 22 種演算法測試結果為 5 次個別訓練驗證的平均結果。</p>
9	<p>自動分類器測試結果,ELD 跟 SCZ 測站偵測出的崩塌訊號數量有明顯的差距,原因為何?</p>	<p>根據測站分布位置討論,ELD 測站位於山區,而 SCZ 測站位於平原帶,且 ELD 測站位置較接近南北中心,而 SCZ 測站位於最南方,由於地理位置的差異,使 ELD 測站能夠接收到較多小規模具有崩塌特徵之地動訊號。</p>
10	<p>報告書第四章評估地震測站對可能需要新增的部份,可以考量 125Hz 的振動,使用寬頻地震儀的成本太高,應有替代方案。</p>	<p>感謝委員建議,本年度計畫與前期計畫之區別即為增加強地動地震儀。計畫成果顯示,強地動地震儀亦可用於偵測崩塌地動訊號。然而,除緊鄰崩塌之地震站之外,多數地震站紀錄所觀察到之崩塌地動能量主要集</p>

		中於 10 Hz 以下之頻段。因此地震儀之紀錄應可不需達到 100 Hz 以上。
11	請標示高屏河流域崩塌訊號來自那些測站(可就附錄資料分析)與實際發生位置，以提升監測站使用之有效性。	本計畫已於期末報告將使用之崩塌樣本及觀察到的測站整理於附錄，有些樣本並無實際崩塌配對，因此無法全面分析測站與崩塌之距離。
12	應用桶狀模式推測應注意單一坡面與整體集水區的概念不同，如其中的水深、土壤水分指數均會有區域時空變化，需注意其運用。	感謝委員建議。受限於流域內水文站之數量，目前許多國外研究多以整體集水區之概念運用筒狀模式。該方法參考自 Song 等人(2017)。
13	促崩水文條件分析並非只有桶狀模式可應用，有何較為實務之構想否？	感謝委員建議，除筒狀模式之外，本計畫所進行之促崩水文條件分析亦包含常用之雨量參數門檻分析方法。請參見報告第五章。
14	筒狀模式做為預測降雨引誘山崩之判定模式中，建議以土壤水分指數而非流深來代表。	本計畫已於期末報告討論桶狀模式各桶流深以及土壤水分指數與降雨誘發崩塌之關聯性。
15	本案集水區尺度之範圍多大？有無明確之有效範圍？	本計畫之集水區選擇為高屏河流域，流域面積約為 3257 平方公里，整體流域以東北西南方

		向延展，所規劃之地動訊號監測網涵蓋整個台灣南部。
16	本計畫有參考崩塌目錄找出實際崩塌之事件做為訓練樣本，建議能應敘述此地震訊號可以偵測之規模及限制。	本計畫於附錄四呈現成功定位於高屏河流域內崩塌之基本資訊。從整理之崩塌幾何特徵、岩性、地形，可知目前能成功辨識並定位配對成功之崩塌事件面積須大於 1 公頃，坡度大於 20 度。
17	報告書第 2-15 頁圖 2.7 及第 2-26 頁圖 2.12 均有研究之流程，建議經本年度研究後應加以律定最佳流程，並簡單說明各階段採用方式。	感謝委員建議，本計畫已於期末報告針對內容做些調整，並於內文有說明各項流程，請見期末報告圖 2.13。
18	本案利用地震儀的紀錄，分析山崩土石流造成的振動，很有發展潛力，將來可作為大規模崩塌的防災預警評估的方式之一，並可逐步進行不同災害類型與規模的判釋。	感謝委員肯定。
19	振動之差異重點在頻率，太高頻的部份可能傳遞不遠，長週期或低頻的部份與崩塌的關	感謝委員建議，本計畫考慮不同地震儀的使用，最終選取 1-20 赫茲作為分析頻率段，並成

	聯性可能較高，適合作本案的標的。	功區別部分不同類型地動事件於頻率域特徵上的差異。
20	地動事件為崩塌後測得，與預測的概念不同，重點應在判釋，供後續研究使用。	感謝委員建議。計畫成果簡報時會注意說明方式，減少誤解。
21	請檢核崩塌地動訊號之振幅值 (m/s) (簡報第 10 頁)。	已檢核確實為誤標，該圖單位為 $\mu m/s$ 。
22	土石流是否也可以利用本系統獲知發生時間並進行定位。	以振波理論來說，土石流事件的持續時間較長，亦會產生較長事件訊號，若調整相對應的分類特徵值參數，應能夠利用本計畫使用之方法獲知發生時間並進行定位。
23	有關大規模崩塌之雨量警戒值，水保局現階段有「潛在大規模崩塌區影響範圍劃設檢討與雨量警戒推動規劃」案正行研究，建議可多了解並於期末報告提出與本案研究之差異。	感謝委員建議。報告中第一章第四節前期研究及相關文獻回顧中，已新增其他相關研究之成果討論，如余姿瑩(2019)及陳樹群等人(2013)之雨量警戒值制定方法。

附錄六、期末審查意見回覆

編號	委員意見	執行單位回覆
1	<p>今年度分析採用莫拉克與蘇迪勒兩次颱風的紀錄做分析，後續可持續增加更多的記錄來做比較，從而分辨崩與不崩的差異，加上可能崩塌的發生時間，可以更完整的掌握崩塌地的特性。</p>	<p>感謝委員建議，本研究使用2009年莫拉克颱風及2015年蘇迪勒颱風期間地動訊號製作分類器，並成功使用分類器於2012年至2015年颱風事件找出可能的崩塌事件時間，未來會持續針對其他年度進行崩塌地動訊號分類，提供更多有助於後續區域內崩塌重複發生可能性研究之基本資訊。</p>
2	<p>運用桶狀模式需注意三層桶狀通常是模擬一個坡面的三段進入流域在空間上有其差異性，與河道的水深不一定會一致。</p>	<p>感謝委員建議與指正。桶狀模式確實發展於單一坡面之地表逕流與地下水流的模擬，然受限於不易廣設地表及地下水觀測儀器，近年來陸續有國外研究將其運用於流域尺度之河川逕流模擬，目的即在於獲得流域整體之平均計算參數。本計畫運用流域尺度觀測資料推估地下含水狀況，確難考慮降雨、河川流量、地下含水狀況的時</p>

		<p>空分佈，因此所得之桶狀模式計算參數應為整體流域之平均參數。為避免桶狀模式評估之三桶水深數值被過度解釋或應用，已於成果報告中補充，說明三桶水深數值為地下含水狀態的變化趨勢，無法直接代換為實際含水量或地下水位。此外，本計畫擬合所得之桶狀模式計算參數與日本參數差異不顯著，四個集水區之參數差異也不大，顯示桶狀模式有運用於不同大小集水區之可能性。本計畫中計算桶狀模式之雨量值僅用距離崩塌最近的三處雨量站內插之雨量，而非整體流域之平均值，因此較能代表特定邊坡之雨量變化，再代入桶狀模式計算中，故有考慮三桶水深的時空變化。</p>
3	<p>崩塌發生時間與水位變化記錄在理論上沒有太多明確的關聯，只有在堰塞湖潰堤可能</p>	<p>感謝委員建議，邊坡破壞與河道水位變化之關聯性確實仍需更多數據做討論與說明，並且考慮流量與水位時空變化。本</p>

	<p>較明確，對一般崩塌及水位分析中相關性可再深入研究。</p>	<p>計畫目前僅使用緊鄰河道之崩塌案例進行初步分析及討論，若有近一步成果，期望未來能夠提供更多相關資訊。相關補充說明請見 5-19 頁。</p>
<p>4</p>	<p>簡報第 11 頁，MA 及 SI 之區間都有提前的現象，請補充說明。</p>	<p>感謝委員指教，MA 及 SI 的計算結果提前的現象是由於計算 MA 及 SI 的過程採用計算窗格的影響，但本計畫會先將偵測疑似事件的訊號裁切 5 分鐘長度，因此 MA 及 SI 提前的現象不會影響到分類結果，僅是圖形呈現上產生之誤會。成果報告中已經修正 MA 及 SI 計算過程中，平均值將置於計算窗格最末端，圖形呈現便不會再有事件提前之現象。相關修正請見 2-10 頁。</p>
<p>5</p>	<p>簡報第 9 頁有描述地動訊號特性，請於報告書內補充不同地動訊號特徵值。</p>	<p>感謝委員建議，崩塌地動訊號之特徵已撰寫於第一章第四節前期研究及相關文獻回顧，地震地動訊號之特徵則補充於同一章節。</p>

6	<p>振動訊號的分類可能受來源事件規模的大小與傳遞訊號的路徑距離的影響，用隨機演算類似統計的結果其正確性易偏高，應有預測準確性的驗證。</p>	<p>感謝委員指教，振動訊號的分類確實與震源事件規模大小、傳播路徑等有密切影響，對於振動能量的傳播特性仍為相關領域的熱門研究議題。機器學習分類器不可能達成 100% 完美分類，必定有誤判之可能。因此本計畫所配對之崩塌事件為結合遙測影像與定位解之結果，排除無法定位及配對之事件後，應能減少分類器誤判之影響。已於成果報告中定位方法段落補充說明，請見 2-31 頁。</p>
7	<p>頻率域之上下限(以最大值之 0.2 倍)是否依不同地動訊號而有所差異？</p>	<p>感謝委員指教，本計畫所採用之門檻為最大能量之 0.2 倍，為參考前人研究的使用，目前沒有針對不同事件做不同倍率的測試。</p>
8	<p>由報告書第 3-4 頁表 3.3 可見崩塌及地震均有少量誤判為噪訊，其原因是否可能為判釋的極限，可探討做為自動偵測分類之限制條件。</p>	<p>感謝委員指教，不同震源事件產生的訊號與震源規模及能量傳播路徑等皆有密切影響，確實目前成果的誤判有可能是自動分類器的判釋極限，未來會針對此種情況加以研究及討</p>

		論。已於成果報告中定位方法段落補充說明，請見 2-31 頁。
9	地震儀除了記錄地震和崩塌的振動訊號之外還可能會記錄到其他來源的地表震動，是否有考慮過這些其他震源的干擾？	感謝委員指教，地震儀確實能夠記錄到其他本計畫未討論之地動訊號，其中以人為活動數量較多，但本計畫著重於颱風期間由降雨引發之崩塌事件，而颱風期間人為干擾產生的地動訊號亦相對較少，若後續有需要對非颱風期間之崩塌訊號做偵測，會額外考慮是否有其他人為震源之可能性。
10	崩塌受地質、地形等因素影響多，機器學習是否可加入環境因素給機器去學習？	感謝委員建議，目前機器學習需要定義明確的問題，確實崩塌的發生與當地的地質、地形等條件有密切關係，但加入這些變因會使問題變得過於複雜，並且這些條件是需要進行崩塌定位後才能得到，於地動訊號分類過程並無幫助，若是針對單一邊坡案例去討論，或許能夠像數值模擬去討論環境因素是否會誘發崩塌。

11	<p>報告中將兩種類型地震儀分別製作分類器，是否可以結合？分成兩種分類器對於辨識地動訊號的效率會不會有影響？是否建議何種地震儀較適合運用於崩塌的地動訊號監測？</p>	<p>感謝委員指教，不同的儀器基於設計，對不同的地動訊號會有些許差異，因此要結合使用的話需要考慮特徵值的適用性，若特徵值選取適當，可以製作適用於不同類型地震儀之分類器；以近即時偵測的角度來說，現今的科技水平對於地動訊號的辨識效率影響非常小，都能夠做到近即時的事件偵測及分類；地震儀的增設需要考慮目的性，若對於低頻訊號有需求，是必須要架設寬頻地震儀，僅針對崩塌地動訊號的偵測，本計畫成果顯示低成本的短週期地震儀也能有不錯的成果。相關補充請見 4-8 頁。</p>
12	<p>由高屏溪流域及小林村模擬分析中有很多假設，建議不宜做過多的結論。</p>	<p>感謝委員建議，本計畫會調整內文之用字及措辭。相關修正請見第五章。</p>
13	<p>SWI 與 S1,S2,S3 之關係圖中垂直分界線為何？(SWI ≠ 70mm)請補充說明。</p>	<p>感謝委員指教，該條線為 10% 累積百分比之門檻，並非垂直分界線，類似垂直分界線的原因是由於作圖方式的影響，本</p>

		計畫會加以調整。相關修正請見圖 5.11。
14	本計畫結論提及大規模崩塌與水桶模式中第三桶水有較大關係，建議可再朝此方面研究，提供大規模崩塌雨量指數之警戒門檻應用。	感謝委員建議。
15	除了河川水位外，請再分類不同因素與崩塌發生時間的關聯性。	感謝委員建議。本年度計畫提供降雨強度、延時、有效累積雨量、土壤水分指數及水位與崩塌發生時間之關聯性，未來研究會持續探討可用之環境因子與大規模崩塌發生時間之關聯性。相關說明請見結論 6-2 頁。
16	本案提出多種雨量分析方式，針對本局防災應用上是否可評估哪個方法比較適切？	根據雨量分析結果，綜合前期計畫成果，降雨延時 D 與累積雨量 Re 是較為關鍵之警戒因子，因此 Re-D 應較有機會發展為大規模崩塌防災應用之警戒雨量方法。同時，本計畫採用之土壤水分指數中的第三桶水深亦可考慮深入研究是否可作為大規模崩塌防災應用之警戒因

		子之一。相關說明請見結論 6-2 頁。
17	本案研究地表振動訊號推測坡地土砂運動很有持續發展之空間，尤其可以各種訊號特性做分離，將來可運用作大規模崩塌之預警研究。	感謝委員對本研究之肯定。
18	本計畫在自動偵測分類之研究值得肯定，就初步成果是否可能未來協助本局進行災後（如颱風或地震）做崩塌的緊急判釋工作。	感謝委員肯定，提供水保局相關防救災資訊為本計畫目的之一。目前研究成果再透過與局內實務操作配合後，會逐步發展近即時辨識及速報系統，期望未來能提供有用之防災功能。
19	部分文獻內容有誤，請更正（如石棟鑫(1989)）。	感謝委員提醒，本計畫會重新檢查是否有其他參考文獻有誤，並予以修正。
20	地震站分布、建置及維護之成本與資料精度及有效性，請綜合評估。	感謝委員建議，於成果報告中增加現有不同地震網採用的儀器說明，以及綜合評估。相關補充說明於 4-8 頁。

附錄七、公文

檔 號：

保存年限：

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：林冠璋
聯絡電話：06-2757575#65424
電子信箱：guantor@gmail.com

受文者：林冠璋副教授

發文日期：中華民國109年2月12日
發文字號：成大理院字第1092200199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璋副教授辦理「集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究計畫」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璋副教授



裝
訂
線



檔 號：

保存年限：

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：林冠璋
聯絡電話：06-2757575#65424
電子信箱：quantor@gmail.com

受文者：地球科學系林冠璋副教授

發文日期：中華民國109年2月20日
發文字號：成大理院字第1092200268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璋副教授執行之「集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究計畫」（計畫編號：109農科-10.7.1-保-S1），第1期經費新臺幣 42萬元整收據(成大收字第1179號)1紙，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璋副教授



裝
訂
線



檔 號：

保存年限：

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：林冠璋
聯絡電話：06-2757575#65424
電子信箱：quantor@gmail.com

受文者：地球科學系林冠璋助理教授

發文日期：中華民國109年6月29日
發文字號：成大理院字第1092201103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璋副教授辦理貴局109年度科技計畫「集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究計畫」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璋副教授



裝
訂
線



檔 號：

保存年限：

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：地球科學系 林冠瑋副教授

發文日期：中華民國109年7月22日

發文字號：成大理院字第1092201259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「集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究計畫」（計畫編號：109農科-10.7.1-保-S1），第2期經費新臺幣56萬元整收據（成大收字第5819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、主計室第三組（含附件）



檔 號：

保存年限：

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：林冠璋
聯絡電話：06-2757575#65424
電子信箱：quantor@gmail.com

受文者：地球科學系林冠璋助理教授

發文日期：中華民國109年11月5日

發文字號：成大理院字第1092201861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璋副教授辦理貴局109年度科技計畫「集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究」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璋副教授



裝

訂

線



檔 號：

保存年限：

行政院農業委員會水土保持局 函

機關地址：54044南投市中興新村光華路
6號

承辦人：李憲昆

電話：049-2347518

傳真：049-2394209

電子信箱：agrikuen99@mail.swcb.gov.tw

受文者：國立成功大學(地球科學系林副教授冠璋)

發文日期：中華民國109年2月25日

發文字號：水保防字第1091830944號

速別：普通件

密等及解密條件或保密期限：

附件：無

主旨：撥付本局補助貴校辦理「集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究計畫」科技計畫第1期款新臺幣42萬元整，款由財政部國庫署逕匯貴校指定帳戶，請查收。

說明：

- 一、依據貴校109年2月20日成大理院字第1092200268號函辦理。
- 二、依據旨案契約書第4條第1款，契約生效後撥付第1期款（計畫總金額30%），後續工作仍請依契約書規定辦理。

正本：國立成功大學(地球科學系林副教授冠璋)

副本：本局主計室、本局綜合企劃組、本局土石流防災中心



檔 號：

保存年限：

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(地球科學系林副教授冠璋)(僅含議程)

發文日期：中華民國109年7月2日

發文字號：水保防字第1091833813號

速別：普通件

密等及解密條件或保密期限：

附件：本案期中報告書、期中摘要報告、會議議程與發言單1份(ATTCH1 期中審查會議議程.pdf、ATTCH2 期中審查會議發言單.pdf)

開會事由：召開「集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究」案期中審查會議

開會時間：109年7月10日(星期五)上午10時

開會地點：本局A區第二會議室(南投市中興新村光華路6號)

主持人：鐘副總工程司兼主任啟榮

聯絡人及電話：李憲昆049-2347518

出席者：游委員繁結、蘇委員苗彬、周委員憲德、陳委員天健、林委員仕修、黃委員效禹、國立成功大學(地球科學系林副教授冠璋)(僅含議程)

列席者：

副本：本局局長室、本局總工程司室、本局秘書室、本局土石流防災中心

備註：

- 一、檢附本案期中報告書、期中摘要報告、會議議程與發言單1份，請攜帶與會。
- 二、請國立成功大學準備電腦及簡報資料，並針對所提供期中報告書進行20分鐘簡報。
- 三、如有呼吸道症狀且發燒者，請來電告知請假。
- 四、為響應紙杯減量，請自備環保杯。

F09/07/02
17:27:25



「集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究」案期中
審查會議議程

壹、會議時間：109 年 07 月 10 日(星期五)上午 10 時

貳、會議地點：本局第二會議室

參、主持人：鐘副總工程司兼主任啟榮

肆、出(列)席單位人員：

伍、主席致詞：

陸、報告事項：

案由：「集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究」案
期中報告書，報請公鑒。

說明：

- 一、依據契約書第 4 條規定辦理。
- 二、本科技計畫案依契約書所提，應辦事項如下：
 - (一)地動訊號自動化辨識指標計算及篩選。
 - (二)訊號分類機器學習模型測試。
 - (三)訊號分類結果應用於崩塌振動源定位。
 - (四)大規模崩塌促崩降雨門檻修正。
 - (五)以數值模擬方法評估促崩降雨條件。
- 三、查本科技計畫案廠商於本階段審查時須完成工作為：
 - (一)綜整旗山溪及荖濃溪集水區內之地震站，歸納出集水區尺度之地震觀測網。
 - (二)建置旗山溪及荖濃溪集水區尺度崩塌地動訊號自動分類器。
 - (三)旗山溪及荖濃溪崩塌地動訊號自動分類器驗證。

決定：

柒、受委託單位簡報：

捌、委員審查：

玖、臨時動議：

拾、散會：



檔 號：

保存年限：

行政院農業委員會水土保持局 函

機關地址：54044南投市中興新村光華路
6號

承辦人：李憲昆

電話：049-2347518

傳真：049-2394209

電子信箱：agrikuen99@mail.swcb.gov.tw

受文者：國立成功大學(地球科學系林副教授冠璋)

發文日期：中華民國109年7月13日

發文字號：水保防字第1091866847號


速別：普通件

密等及解密條件或保密期限：

附件：如主旨(ATTCH1 地表振動訊號期中審查會議紀錄.pdf、ATTCH2 地表振動訊號期中審查簽到表.pdf)

主旨：檢送本局109年7月10日「集水區尺度坡地土砂運動之地表震動訊號監測研究」案期中審查會議紀錄1份，請查照。

正本：游委員繁結、蘇委員苗彬、周委員憲德、陳委員天健、鐘委員啟榮、林委員仕修、黃委員效禹、國立成功大學(地球科學系林副教授冠璋)

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
「集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究」案期
中審查會議紀錄

壹、時間：109 年 7 月 10 日(星期五)上午 10 時

貳、地點：本局 A 區第二會議室

參、主持人：鐘副總工程司兼主任啟榮（林簡任技正任修代）

紀錄：李憲昆

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：如後附件。

柒、結論：

一、請國立成功大學參照與會人員相關意見辦理。

二、國立成功大學所提期中報告書與期中摘要報告，經審查通過，同意依
契約書規定撥付第 2 期款。

三、請國立成功大學依契約書規定於 109 年 11 月 6 日以前提出期末報告書，
俾利召開期末審查會議。


捌、臨時動議：無

玖、散會：12 時 10 分




「集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究」案期中審查 會議與會人員綜合意見

一、地動訊號自動分類器成果：

- 
- (一) 自動分類器的評估與開發初步驗證結果不錯，應屬可行，可持續發展。
 - (二) 對於三種不同類型地動事件之分類敏感度，準確度均達 80% 以上，值得肯定，但是三種地動事件同時出現時，又如何分離之？實務上操作能否確實掌握？
 - (三) 對於崩塌之地動事件，在判釋上可達 80% 以上，是否應註明其可能誤差，以避免過度之信任。
 - (四) 特徵值 σ MA (Moving Average) 之排序，能否作合理解釋，與 μ SI 何以不一致？
 - (五) 訊號特徵值之選用有無交感效應之影響，各特徵值是否屬獨立參數？
 - (六) 建議檢核移動平均 (Moving Average) 之時域窗(簡報第 12 頁) 以提升時間域特徵值之正確性。
 - (七) 請問地震導致的崩塌可以區分出來嗎？若未來希望自動偵測判釋，是否可能利用中央氣象局地震報告刪除此一情況，只掌握降雨造成之崩塌。
 - (八) 報告書第 3-1 頁表 3.1 「22 種演算法測試結果」建議詳列各演算法之計算數值，或於表下方加註採用計算方法。
 - (九) 自動分類器測試結果，ELD 跟 SCZ 測站偵測出的崩塌訊號數量有明顯的差距，原因為何？

二、高屏河流域鄰近地震測站分布：

- 
- (一) 報告書第四章評估地震測站對可能需要新增的部份，可以考量 125Hz 的振動。使用寬頻地震儀的成本高昂，應有替代方案。
 - (二) 請標示高屏河流域崩塌訊號來自那些測站 (可就附錄資料分析) 與實際發生位置，以提升監測站使用之有效性。

三、崩塌警戒水文因子：

- (一) 應用桶狀模式推測應注意單一坡面與整體集水區的概念不同，如其中的水深、土壤水分指數均會有區域時空變化，需注意其運用。
- (二) 促崩水文條件分析並非只有桶狀模式可應用，有何較為實務之構想否？
- (三) 筒狀模式做為預測降雨引誘山崩之判定模式中，建議以土壤水分指數而非流深來代表。

四、綜合建議：

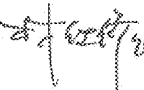
- (一) 本案集水區尺度之範圍多大？有無明確之有效範圍？
- (二) 本計畫有參考崩塌目錄找出實際崩塌之事件做為訓練樣本，建議能應敘述此地震訊號可以偵測之規模及限制。
- (三) 報告書第 2-15 頁圖 2.7 及第 2-26 頁圖 2.12 均有研究之流程，建議經本年度研究後應加以律定最佳流程，並簡單說明各階段採用方式。
- (四) 本案利用地震儀的紀錄，分析山崩土石流造成的振動，很有發展潛力，將來可作為大規模崩塌的防災預警評估的方式之一，並可逐步進行不同災害類型與規模的判釋。
- (五) 振動之差異重點在頻率，太高頻的部份可能傳遞不遠，長週期或低頻的部份與崩塌的關聯性可能較高，適合作本案的標的。
- (六) 地動事件為崩塌後測得，與預測的概念不同，重點應在判釋，供後續研究使用。
- (七) 請檢核崩塌地動訊號之振幅值 (m/s) (簡報第 10 頁)。
- (八) 土石流是否也可以利用本系統獲知發生時間並進行定位。
- (九) 有關大規模崩塌之雨量警戒值，水保局現階段有「潛在大規模崩塌區影響範圍劃設檢討與雨量警戒推動規劃」案正進行研究，建議可多了解並於期末報告提出與本研究之差異。




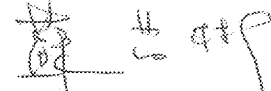

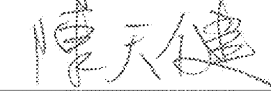
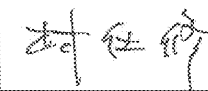
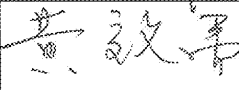

「集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究」案期中
審查會議簽到單

壹、開會時間：109年7月10日（星期五）上午10時


貳、開會地點：本局A區第二會議室

參、主持人：鐘副總工程司兼主任啟榮  紀錄：李憲昆

肆、出席（列）席單位及人員：

出席委員			簽名處	
單位(機關)	職稱	姓名	職稱	姓名
國立中興大學	委員	游繁結	委員	
國立中興大學	委員	蘇苗彬	委員	
國立中央大學	委員	周憲德	委員	
國立屏東科技大學	委員	陳天健	委員	
水土保持局	副總工程司兼主任	鐘啟榮	副總工程司兼主任	請假
水土保持局	簡任正工程司	林仕修	簡任正工程司	
水土保持局	科長	黃效禹	科長	
列席單位及人員	簽名處			
	職稱	姓名	職稱	姓名
主辦單位(土石流防災中心)				



				柯可怡
				陳育成
				黃世富
		張麗惠		曾名貴
		許家祥		周有媽
 國立成功大學	副教授	林冠璋		
	研究助理	張珈銘		

伍、散會： 時 分

檔 號：

保存年限：

行政院農業委員會水土保持局 函

機關地址：54044南投市中興新村光華路
6號

承辦人：李憲昆

電話：049-2347518

傳真：049-2394209

電子信箱：agrikuen99@mail.swcb.gov.tw

受文者：國立成功大學(地球科學系林副教授冠璋)

發文日期：中華民國109年7月28日

發文字號：水保防字第1091834299號

速別：普通件

密等及解密條件或保密期限：

附件：無

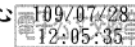
主旨：撥付本局補助貴校辦理「集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究」科技計畫第2期款新臺幣56萬元整，款由財政部國庫署逕匯貴校指定帳戶，請查收。

說明：

- 一、依據貴校109年7月22日成大理院字第1092201259號函辦理。
- 二、依據旨案契約書第4條第1款，經期中評核通過、繳交期中摘要報告，且前期撥付款執行數超過60%，撥付本案第2期款（計畫總金額40%），後續工作仍請依契約書規定辦理。

正本：國立成功大學(地球科學系林副教授冠璋)

副本：本局主計室、本局綜合企劃組、本局土石流防災中心



檔 號：

保存年限：

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(地球科學系林副教授冠瑋)(僅含議程)

發文日期：中華民國109年11月12日

發文字號：水保防字第1091836577號

速別：普通件

密等及解密條件或保密期限：

附件：本案期末報告書、期末暨成果效益報告、會議議程與發言單1份(ATTCH1 地表震動訊號期末審查會議議程.pdf、ATTCH2 發言單.pdf)

開會事由：召開「集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究」案期末審查會議

開會時間：109年11月18日(星期三)上午10時

開會地點：本局A區第二會議室(南投市中興新村光華路6號)

主持人：鐘副總工程司兼主任啟榮

聯絡人及電話：李憲昆049-2347518

出席者：周委員憲德、蘇委員苗彬、陳委員天健、張委員志新、林委員仕修、黃委員效禹、國立成功大學(地球科學系林副教授冠瑋)(僅含議程)

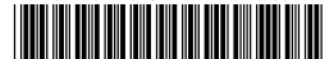
列席者：

副本：本局局長室、本局總工程司室、本局秘書室、本局土石流防災中心

備註：

- 一、檢附本案期末報告書、期末暨成果效益報告、會議議程與發言單1份，請攜帶與會。
- 二、請國立成功大學準備電腦及簡報資料，並針對所提供期末報告書進行20分鐘簡報。
- 三、如有呼吸道症狀且發燒者，請來電告知請假。
- 四、為響應紙杯減量，請自備環保杯。

109/11/12
12:28:53



「集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究」案期末
審查會議議程

壹、會議時間：109 年 11 月 18 日(星期三)上午 10 時

貳、會議地點：本局 A 區第二會議室

參、主持人：鐘副總工程司兼主任啟榮

肆、出(列)席單位人員：

伍、主席致詞：

陸、報告事項：

案由：「集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究」案
期末報告書，報請公鑒。

說明：

一、依據契約書第 4 條規定辦理。

二、本科技計畫案依契約書所提，應辦事項如下：

(一)地動訊號自動化辨識指標計算及篩選。

(二)訊號分類機器學習模型測試。

(三)訊號分類結果應用於崩塌振動源定位。

(四)大規模崩塌促崩降雨門檻修正。

(五)以數值模擬方法評估促崩降雨條件。

三、查本科技計畫案廠商於本階段審查時須完成工作為：

(一)利用現有雨量及地表流量觀測記錄，搭配崩塌發生時間，建立集水區尺度促崩雨量及水文門檻。

(二)以數值模擬方法增加促崩雨量分析資料，並驗證促崩雨量門檻。

決定：

柒、受委託單位簡報：

捌、委員審查：

玖、臨時動議：

拾、散會：



保存年限：

行政院農業委員會水土保持局 函

機關地址：54044南投市中興新村光華路
6號
承辦人：李憲昆
電話：049-2347518
傳真：049-2394209
電子信箱：agrikuen99@mail.swcb.gov.tw

受文者：國立成功大學(地球科學系林副教授冠璋)

發文日期：中華民國109年11月20日
發文字號：水保防字第1091867087號
速別：普通件
密等及解密條件或保密期限：
附件：如主旨(ATTCH1 地表振動訊號監測期末審查會議紀錄.pdf、ATTCH2 期末簽到單.pdf)

主旨：檢送本局109年11月18日「集水區尺度坡地土砂運動之地表震動訊號監測研究」案期末審查會議紀錄1份，請查照。

正本：周委員憲德、蘇委員苗彬、陳委員天健、張委員志新、鐘委員啟榮、林委員仕修、黃委員效禹、國立成功大學(地球科學系林副教授冠璋)
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
「集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究」案
期末審查會議紀錄

壹、時間：109 年 11 月 18 日(星期三)上午 10 時

貳、地點：本局 A 區第二會議室

參、主持人：鐘副總工程司兼主任啟榮

紀錄：李憲昆

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：如後附件。

柒、結論：

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末報告書，經審查通過，請於 109 年 12 月 11 日以前提交成果報告書初稿 2 份，俟繳交正式成果報告書、期末暨成果效益報告後再行撥付第 3 期款。

三、請依本案契約書第 11 條規定，於成果報告書初稿納入本案研究紀錄(以分月大事紀方式呈現)。

捌、臨時動議：無

玖、散會：11 時 30 分



「集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究」案期末審查 會議與會人員綜合意見

一、地表振動訊號監測研究方法：

- (一) 今年度分析採用莫拉克與蘇迪勒兩次颱風的記錄做分析，後續可持續增加更多的記錄來做比較，從而分辨崩與不崩的差異，加上可能崩塌的發生時間，可以更完整的掌握崩塌地的特性。
- (二) 運用桶狀模式需注意三層桶狀通常是模擬一個坡面的三段進入流域在空間上有其差異性，與河道的水深不一定會一致。
- (三) 崩塌發生時間與水位變化記錄在理論上沒有太多明確的關聯，只有在堰塞湖潰堤可能較明確，對一般崩塌及水位分析中相關性可再深入研究。
- (四) 簡報第 11 頁，MA 及 SI 之區間都有提前的現象，請補充說明。
- (五) 簡報第 9 頁有描述地動訊號特性，請於報告書內補充不同地動訊號特徵值。

二、地動訊號自動分類器成果：

- (一) 振動訊號的分類可能受來源事件規模的大小與傳遞訊號的路徑距離的影響，用隨機演算類似統計的結果其正確性易偏高，應有預測準確性的驗證。
- (二) 頻率域之上下限（以最大値之 0.2 倍）是否依不同地動訊號而有所差異？
- (三) 由報告書第 3-4 頁表 3.3 可見崩塌及地震均有少量誤判為噪訊，其原因是否可能為判釋的極限，可探討做為自動偵測分類之限制條件。
- (四) 地震儀除了記錄地震和崩塌的振動訊號之外，還可能會記錄到其他來源的地表震動，是否有考慮過這些其他震源的干擾？
- (五) 崩塌受地質、地形等因素影響多，機器學習是否可加入環境因素給機器去學習？
- (六) 報告中將兩種類型地震儀分別製作分類器，是否可以結合？分成兩種分類器對於辨識地動訊號的效率會不會有影響？是否建議何種地震儀較適合運用於崩塌的地動訊號監測？

三、高屏河流域鄰近地震測站分布：

- (一) 由高屏河流域及小林村模擬分析中有很多假設，建議不宜做過多的結論。

四、崩塌警戒水文因子：

- (一) SWI 與 S1,S2,S3 之關係圖中垂直分界線為何？(SWI \neq 70mm) 請補充說明。
- (二) 本計畫結論提及大規模崩塌與水桶模式中第三桶水有較大關係，建議可再朝此方面研究，提供大規模崩塌雨量指數之警戒門檻應用。
- (三) 除了河川水位外，請再分類不同因素與崩塌發生時間的關聯性。
- (四) 本案提出多種雨量分析方式，針對本局防災應用上是否可評估哪個方法比較適切？

五、綜合建議：

- (一) 本案研究地表振動訊號推測坡地土砂運動很有持續發展之空間，尤其可以各種訊號特性做分離，將來可運用作大規模崩塌之預警研究。
- (二) 本計畫在自動偵測分類之研究值得肯定，就初步成果是否可能未來協助本局進行災後（如颱風或地震）做崩塌的緊急判釋工作。
- (三) 部分文獻內容有誤，請更正（如石棟鑫（1989））。
- (四) 地震站分布、建置及維護之成本與資料精度及有效性，請綜合評估。



「集水區尺度坡地土砂運動之地表振動訊號監測研究」
案期末審查會議簽到單

壹、開會時間：109年11月18日(星期三)上午10時


貳、開會地點：本局A區第二會議室

參、主持人：鐘副總工程司兼主任啟榮 鐘啟榮、紀錄：李憲昆 李憲昆

肆、出席(列)席單位及人員：

出席委員			簽名處	
單位(機關)	職稱	姓名	職稱	姓名
國立中央大學	委員	周憲德	委員	周憲德
國立中興大學	委員	蘇苗彬	委員	蘇苗彬
國立屏東科技大學	委員	陳天健	委員	請假
國家災害防救科技中心	委員	張志新	委員	請假
水土保持局	副總工程司兼主任	鐘啟榮	副總工程司兼主任	鐘啟榮
水土保持局	簡任正工程司	林仕修	簡任正工程司	請假
水土保持局	科長	黃效禹	科長	黃效禹
列席單位及人員	簽名處			
	職稱	姓名	職稱	姓名
主辦單位(土石流防災中心)				李憲昆



				孫國威
		木可怡		
		陳栢成		張麗惠
				許易祥
				周郁騰
 立成功大學	副教授	林冠瑋		
	研究助理	張加銘		

伍、散會： 時 分

附錄八、研究紀錄

計劃編號 (Project No.) : _____

題目 (Title) : _____

地動訊號分類器建立流程	
1. 建立測站目錄	
2. 測站資料抓取	
3. 人工判釋地動事件樣本	
4. 訓練檔製作	
5. 測試結果	
船震事件選取	
2009年莫拉丸 0806 ~ 0810	
2015年蘇迪勒 0806 ~ 0810	
樣本製作流程	<pre>graph TD A[slice data] --> B[signal preprocessing] B --> C[artificial interpretation] C --> D["train file (LS, EQ, NS)"] D --> E[test]</pre>
記錄人 (Recorder) :	證明人 (Witness) :
日期 (Date) :	日期 (Date) :

計劃編號 (Project No.) : _____

題 目 (Title) : _____

Signal pre processing

5 min time window

detrend, demean

spectrogram

先切後畫

地震測站整理

2009 莫拉瓦, 氣象局 30 站, 中研院 11 站

2015 蘇迪勒, 氣象局 11 站, 中研院 21 站

地震站觀測網及使用儀器比較

CWB-SMT

CWB-BB

CWB-BH

HLZ: FBA

HLZ: BB

HLZ: BB

HSZ: SP

HLZ: FBA

HLZ: FBA

FBA: force balance accelerometer

BB: Broadband

SP: Short-period

記錄人 (Recorder):

證明人 (Witness):

日期 (Date):

日期 (Date):

計劃編號 (Project No.): _____

題目 (Title): _____

SAC 訊號長度原史 7 min. 計算 MA. SI 後為 5 min

Moving average 計算表示窗格中心. 窗格為 6 秒

樣本分類於不同資料夾. 整理於 Excel 包含所有資訊

整合不同事件 (LS, EQ, NS) 於一檔案.

input excel to matlab. type choose table

input attribute values. name feature

input event type. choose string array. name result.

code. result = categorical(result);

feature, result = result;

Building train data (APP: classification learner)

記錄人 (Recorder):

日期 (Date):

證明人 (Witness):

日期 (Date):

計劃編號 (Project No.) : _____

題目 (Title) : _____

高屏溪流域各地震網地震站數量
其餘流域測站數量

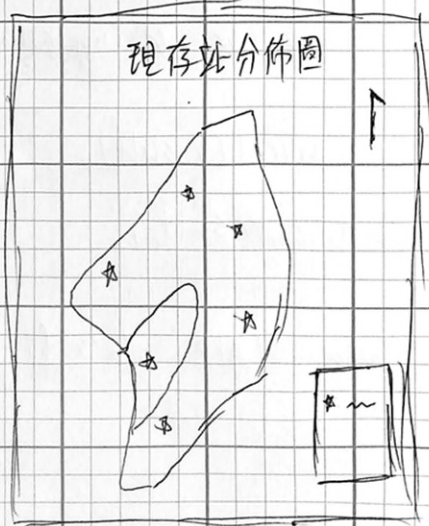
CWB-BB ~~~~~ ~~~~~

CWB-BH ~~~~~ ~~~~~

IES. ~~~~~ ~~~~~

CWB-SMIT ~~~~~ ~~~~~

製圖格式



記錄人 (Recorder) :

證明人 (Witness) :

日期 (Date) :

日期 (Date) :

計劃編號 (Project No.) : _____

題目 (Title) : _____

訓練樣本統計整理.			
	IES	CWB_BB	CWB_BH
2009 莫拉克	~~~~~	~~~~~	~~~~~
2015 蘇迪勒	~~~~~	~~~~~	~~~~~
<p>依儀器不同分別建立分類器. 或統一製作為一分類器</p> <p>高屏溪流域內 34 處大規模崩塌優先辦理與鄰近地震站整理. 最近 3~5 站.</p> <p>討論自行架設地震站之成本. (儀器的不同及儀器箱)</p> <p>1. Broad band 2. Geophone 3. 樹梅派</p> <p>Data-CUBE + G-CUBE (12~15 w)</p> <p>broad band (65 w/台)</p> <p>樹梅派 (5 w/組)</p>			
記錄人 (Recorder):		證明人 (Witness):	
日期 (Date):		日期 (Date):	

計劃編號 (Project No.) : _____

題目 (Title) : _____

Kaoping River watershed

station name, SCS, SGL, SGS, SLG, SMG, SPT, SSD, STY

TuMI

2015 蘇曲勒 地震站 統計

觀測網內 63 站

流域內 20 站 (含 CWB-BH: 9 站, CWB-SMT 1 站)

2009 草坵坑 地震站 統計

觀測網內 8 站

流域內 4 站

崩塌樣本數 106 筆

氣象局現存站 統計

觀測網內 92 站

流域內 25 站

記錄人 (Recorder) :

日期 (Date) :

證明人 (Witness) :

日期 (Date) :

計劃編號 (Project No.) : _____

題目 (Title) : _____

高屏溪流域內 5 處大規模崩塌監測站整理				
寶山	STY.HSZ.	SGS.HSZ.	SLG.HHZ.	ELD.HHZ
新庄	SCS.HHZ.	SGS.HSZ.	SLG.HHZ.	
萬山	SCS.HHZ.	SLG.HHZ.	SSD.HSZ	TwG.HSZ
光明巷	SSD.HSZ.	SMG.HHZ.	TwGBPHZ (MASB.BHZ)	LONT.HHZ
阿禮	SSD.HSZ.	SMG.HHZ.	TwGBPHZ (MASB.BHZ)	TTN.HSZ
特徵值的重要性及其物理含義				
雨量或流量由水文年報獲取，測試自無預警可行性。				
時間域之特徵值分類效果。(二階段分類?)				
確認 A 類效果，崩塌樣本確認。				

記錄人 (Recorder) :

證明人 (Witness) :

日期 (Date) :

日期 (Date) :

計劃編號 (Project No.): _____

題目 (Title): _____

CWB-SMT 使用短周期地震儀

自然頻率為 1 Hz.

時間域特徵值不動, 頻率域特徵值重覆

frequency domain

1 ~ 5 Hz, 5 ~ 10 Hz, 10 ~ 20 Hz, 20 ~ 50 Hz.

是否將原始訊號重採樣至上限 20 Hz

IES 測站 MSB, TPUB, TWGB 使用前期樣本?

演算法比較表格樣式

	Accuracy	PPV	sensitivity
1. ~~~~~			
2. ~~~~~			
3. ~~~~~			
4. ~~~~~			
⋮			
20. ~~~~~			
21. ~~~~~			
22. ~~~~~			

記錄人 (Recorder): _____

日期 (Date): _____

證明人 (Witness): _____

日期 (Date): _____

計劃編號 (Project No.) : _____

題目 (Title) : _____

<p>PSD 頻率段選擇</p> <p>0.02 ~ 0.05 , 0.05 ~ 0.1 0.1 ~ 1 1 ~ 5 5 ~ 8</p>	<p>地震檔整理</p> <p>2009 CWB mseed 30 IES sac 18</p>	
<p>演算法效果評估.</p> <p>① STACK ② MEAN</p>	<p>2015 CWB sac 11 IES sac 21</p> <p>SMT or BB</p>	
<p>0.1 ~ 1 Hz 寬頻地震儀不同事件無差異,故不使用 Broad band 1 Hz 以上使用對數, 0.1 Hz 以下使用線性. 0.01 ~ 0.1 Hz, 1 ~ 10 Hz, 10 ~ 45 Hz.</p>		
<p>SMT 全頻率段均採用線性. 0.01 ~ 0.1 0.1 ~ 1 1 ~ 10 10 ~ 45 時間域特徵值與頻率域特徵值分開訓練比較差異 Spectrum 加入標準差比較.</p>		
<p>EQ 事件 PPV 及 sensitivity 數值比較 年度混合 (2009 + 2015) 測試</p> <p>記錄人 (Recorder) : _____ 證明人 (Witness) : _____ 日期 (Date) : _____ 日期 (Date) : _____</p>		

計劃編號 (Project No.) : _____

題目 (Title) : _____

崩塌地動訊號圖重新檢索

較好的分類演算法

① weighted KNN

② Boosted tree

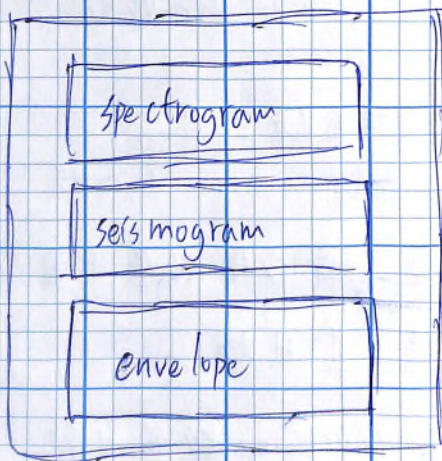
③ Bagged tree

PSD 繪製有無標準化

偵測事件長度 \rightarrow 定位 \rightarrow 算規模 (不同方法)

PSD 可能包含太多雜訊, 試切事件主訊號出來計算

繪圖格式



記錄人 (Recorder) :


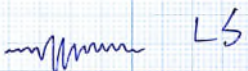
證明人 (Witness) :

日期 (Date) :

日期 (Date) :

計劃編號 (Project No.) : _____

題目 (Title) : _____

 EQ  LS		判別標準. 能量集中於 10 Hz 之下 事件延時長於 20 秒									
樣本整理	<table border="0"> <tr> <td>2015</td> <td>SMT</td> <td>145</td> </tr> <tr> <td></td> <td>BB</td> <td>105</td> </tr> <tr> <td>2009</td> <td>BB</td> <td>106</td> </tr> </table>	2015	SMT	145		BB	105	2009	BB	106	
2015	SMT	145									
	BB	105									
2009	BB	106									
2009 年加入 IES 資料 (MASB, TPU B, TWGB) 頻率域特徵值至線性至對數. 加前期資料. 比較佳續算法 事件結束如何定義											
最終樣本	<table border="0"> <tr> <td></td> <td>2009</td> <td>2015</td> </tr> <tr> <td>IES</td> <td>36</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>BB</td> <td>17</td> <td>41</td> </tr> </table>		2009	2015	IES	36	3	BB	17	41	
	2009	2015									
IES	36	3									
BB	17	41									
	SMT	66									
記錄人 (Recorder) : 日期 (Date) :		證明人 (Witness) : 日期 (Date) :									

計劃編號 (Project No.) : _____

題目 (Title) : _____

Chen et al. (2013)

STA/LTA 參數

事件開始 STA/LTA = 3

事件結束 < 0.05 PGA, 持續 5 秒 (正常條件)

< 0.2 PGA 持續 5 秒 (Low SNR, SNR < 6)

短的間窗格 0.5 秒, 長的間窗格 10 秒.

Event table 設計

start	End	station

STA/LTA 參數設計

S - window : 0.5 sec

gap : 1 sec

L - window : 10 sec

duration 20 sec

On 1.5 → 2.25

Off 0.5 → 1.5

記錄人 (Recorder) :

證明人 (Witness) :

日期 (Date) :

日期 (Date) :

計劃編號 (Project No.) : _____

題目 (Title) : _____

事件設計



STA/LTA 參數測試

	On	Off	off dur	dur	ondur
V1	2.25	1.5	5	10	
V2	2.25	2	5	10	
V3	2.25	1.5	5	10	0.1
V4	2.25	2	5	10	0.1

2009.2015 IIS CWB 檢查. 樣本偵測 ^{↗ event duration} 重新製作分類器
 ↓
 加強分類器的能力. 09~15 挑站測試
 事件偵測 (事件長度限制 240 sec)

記錄人 (Recorder) :

日期 (Date) :

證明人 (Witness) :

日期 (Date) :

計劃編號 (Project No.) : _____

題目 (Title) : _____

範圍事件整理	
2009.0619 ~ 2009.0622	DB測站
2009.0806 ~ 2009.0810	ALS, ELD, LONT, SCS.
2010.0831 ~ 2010.0902	SCZ, SLG, SMG, SSP
2010.0917 ~ 2010.0920	
2010.1020 ~ 2010.1023	SMT測站
2011.0827 ~ 2011.0901	ALS, CHNI, CHNS, EAS
2012.0619 ~ 2012.0621	ELL, ELD, SCZ, SGS, SSD
2012.0730 ~ 2012.0804	STY, TwG, TwL, TwM1
2012.0821 ~ 2012.0823	WTP, YUS.
2013.0711 ~ 2013.0713	
2013.0820 ~ 2013.0822	IES測站
2013.0827 ~ 2013.0829	MASB, TPUB, TwGB
2014.0720 ~ 2014.0723	
2014.0919 ~ 2014.0922	
2015.0806 ~ 2015.0810	
2015.0927 ~ 2015.0930	

記錄人 (Recorder) :

日期 (Date) :

證明人 (Witness) :

日期 (Date) :

計劃編號 (Project No.) : _____

題 目 (Title) : _____

A類測試結果 (2009 ~ 2016)				
MASB	IES. PAB	predict 2000	correct 230	(09~16)
ELD	CWB. BB	958	171	(12~16)
SGZ	CWB. SMT	4582	43	(12~16)
SLG	CWB. BH	1040	28	(12~16)
頻率域 STA/LTA 設計				
一. 文獻回顧. 和前期比較				
二. 分析. 高屏溪介紹. 資料來源 測站分佈 模型修正只留 K-fold				
三. 分析結果 各種算法測試結果 分類器的正確度				
分類器結果				
四. 現場比分析及成本.				
五. 地下水				
時間域與頻率域分類效果最佳及最差之特徵值				
架站設置項目需寫詳細				
記錄人 (Recorder) :			證明人 (Witness) :	
日期 (Date) :			日期 (Date) :	

計劃編號 (Project No.) : _____

題目 (Title) : _____

頻率域特徵值频段選擇

Short Period 頻窄段 1~5 Hz, 5~8 Hz.

Broad band 沿用 0.01~0.1 Hz, 0.1~1 Hz, 1~8 Hz

STA/LTA 參數重新調整

長時間連續地動訊號偵測及分類, 將結果統整及定位

特徵值蓋狀圖編流調整, 現存測站分布

崩塌樣本整理

BB : 215

SP : 36

製作分類器樣本數

BB : EQ 215, LS 215, NS 215

SP : EQ 251, LS 251, NS 251

頻率域 STA/LTA 偵測

1~5 Hz 能量隨時間變化 1 sample/sec

記錄人 (Recorder) :

證明人 (Witness) :

日期 (Date) :

日期 (Date) :

計劃編號 (Project No.): _____

題目 (Title): _____

事件偵測分二階段

1. Time domain STA/LTA

2. Frequency domain STA/LTA

(分開運作 or 同時運作)

最終先時間域偵測, 後頻率域偵測

STA/LTA 參數調整

偵測數	短窗格(s)	長窗格(s)	on	off	on-dur	off-dur	dur	limit
232/251	3	10	1.25	1	3	3	20	240
23/251	3	10	2	1	3	3	20	240
125/251	3	10	1.5	1	3	3	20	240
220/251	3	10	1.25	1	5	3	20	240
153/251	3	10	1.5	1	1	3	20	240

事件偵測測試

	Time domain	Frequency domain	Time and Frequency
MASB	15/297	250/297	240/297
SCZ	22/500	464/500	286/500

記錄人 (Recorder):

證明人 (Witness):

日期 (Date):

日期 (Date):

計劃編號 (Project No.) : _____

題目 (Title) : _____

		Time domain	Frequency domain	Time and Frequency
Broad band		77%	88.2%	94.1%
Short Period		78.5%	86.9%	90.2%
Landslide detect				
		Time domain	Frequency domain	Time and Frequency
Broad band		69/72	83/88	91/92
Short Period		71/72	88/86	89/87
Earthquake detect				
		Time domain	Frequency domain	Time and Frequency
Broad band		72/75	89/86	94/93
Short Period		73/75	80/86	86/91
Noise detect				
		Time domain	Frequency domain	Time and Frequency
Broad band		92/85	93/91	97/97
Short Period		91/88	92/89	96/93

記錄人 (Recorder) :

日期 (Date) :

證明人 (Witness) :

日期 (Date) :

計劃編號 (Project No.): _____

題目 (Title): _____

<p>MASB (Freq and Time)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>EQ</th> <th>LS</th> <th>NS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>EQ</th> <td>56</td> <td>19</td> <td>2</td> </tr> <tr> <th>LS</th> <td>11</td> <td>8</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>NS</th> <td>12</td> <td>8</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>				EQ	LS	NS	EQ	56	19	2	LS	11	8	0	NS	12	8	0	<p>SCZ (Freq and Time)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>EQ</th> <th>LS</th> <th>NS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>EQ</th> <td>11</td> <td>37</td> <td>3</td> </tr> <tr> <th>LS</th> <td>0</td> <td>11</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>NS</th> <td>0</td> <td>17</td> <td>40</td> </tr> </tbody> </table>				EQ	LS	NS	EQ	11	37	3	LS	0	11	0	NS	0	17	40
	EQ	LS	NS																																		
EQ	56	19	2																																		
LS	11	8	0																																		
NS	12	8	0																																		
	EQ	LS	NS																																		
EQ	11	37	3																																		
LS	0	11	0																																		
NS	0	17	40																																		
<p>MASB (Time)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>EQ</th> <th>LS</th> <th>NS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>EQ</th> <td>56</td> <td>27</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>LS</th> <td>5</td> <td>14</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>NS</th> <td>9</td> <td>11</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>				EQ	LS	NS	EQ	56	27	0	LS	5	14	0	NS	9	11	0	<p>SCZ (Time)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>EQ</th> <th>LS</th> <th>NS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>EQ</th> <td>26</td> <td>25</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>LS</th> <td>0</td> <td>7</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>NS</th> <td>33</td> <td>24</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>				EQ	LS	NS	EQ	26	25	0	LS	0	7	0	NS	33	24	0
	EQ	LS	NS																																		
EQ	56	27	0																																		
LS	5	14	0																																		
NS	9	11	0																																		
	EQ	LS	NS																																		
EQ	26	25	0																																		
LS	0	7	0																																		
NS	33	24	0																																		
<p>Frequency domain STA/LTA 截止沒事件的數量</p>																																					
<p>SLG 762</p>																																					
<p>SGS SP: 363. BB: 20</p>																																					
<p>SCS 316</p>																																					
<p>on = 2 129 detect.</p>																																					
<p>on = 1.75 184 detect</p>																																					
<p>on = 1.75. on_dur = 1 205 detect</p>																																					
<p>on = 1.75. on_dur = 1 duration = 15 224 detect</p>																																					
<p>No detect Time Freq Time and Freq</p>																																					
<p>31/251 26/251 40/251</p>																																					
<p>記錄人 (Recorder):</p>			<p>證明人 (Witness):</p>																																		
<p>日期 (Date):</p>			<p>日期 (Date):</p>																																		

計劃編號 (Project No.) : _____

題目 (Title) : _____

MASB (Time)				MASB (Time and Freq)			
EQ	LS	NS		EQ	LS	NS	
EQ	21	17	3	EQ	34	9	0
LS	5	11	1	LS	9	7	0
NS	2	1	185	NS	2	1	0

SCZ (Time)				SCZ (Time and Freq)			
EQ	LS	NS		EQ	LS	NS	
EQ	12	13	1	EQ	5	19	1
LS	0	4	0	LS	0	4	0
NS	12	7	568	NS	0	5	14

最終 STA/LTA 參數								
Time	S-win	L-win	on	off	on/dur	off/dur	dur	limit
Time	3	10	1.25	1	5	3	20	240
Frequency	3	10	1.75	1	1	3	15	240

記錄人 (Recorder) :

證明人 (Witness) :

日期 (Date) :

日期 (Date) :

計劃編號 (Project No.):

題目 (Title): SWI 系統指令合準備資料

<p>1. 測站.</p> <ul style="list-style-type: none"> • 枋林大橋 120.55335, 22.99028 • 文龜 120.63833, 22.99554 • 大津橋 120.64802, 22.87971 • 三地門 120.64764, 22.71194 	
<p>2. 河川</p> <ul style="list-style-type: none"> • 旗山溪 → 枋林大橋 2008-2019 2010-2018 • 荖藁溪 → 六通 2011-2019 東溪大橋 2010 • 濁口溪 → 興農橋 2006-2010 大津橋 2010-2019 • 隘寮溪 → 三地門. 	
<p>3. Matlab:</p> <p>Simulink → APPS → Get Add-Ons 中 Add-on Explorer 搜尋並安裝 Control System toolbox.</p>	
<p>記錄人 (Recorder):</p> <p>日期 (Date):</p>	<p>證明人 (Witness):</p> <p>日期 (Date):</p>

計劃編號 (Project No.) :

題目 (Title) : 期末效益報告使用圖 .

圖 2.1			
圖 2.2			
圖 2.4			
圖 2.9			
圖 2.13			
圖 2.19			
圖 2.23			
表 3.3			
圖 3.5			
圖 5.1			
圖 5.8			
圖 5.11			
圖 5.12			
記錄人 (Recorder) :		證明人 (Witness) :	
日期 (Date) :		日期 (Date) :	

計劃編號 (Project No.):

題目 (Title): 討論多站辨識的問題

* 根據 SNR 及距離給予权重, 去重新計算特徵值

ex: Sta 01 SNR=3.0 $\omega=0.7$

Sta 02 SNR=6.0 $\omega=1.5$

Sta 03 SNR=1.0 $\omega=2.0$

$$\frac{\sum \text{特徵值} \times \text{权重}}{\sum \text{权重}} = \text{修正後特徵值}$$

(加权平均)

→ 可以省略多站的問題

⇒ 但一樣要設門檻

* 為了將 p 和 s 分開, 而且高频能量沒有下降太多

⇒ 距離 15-270 km

記錄人 (Recorder):

日期 (Date):

證明人 (Witness):

日期 (Date):

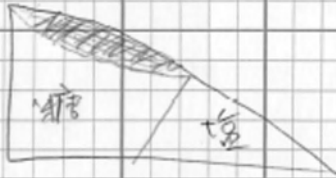
計劃編號 (Project No.): 水保局科研計畫 2020
 題目 (Title): 期末報告撰寫內容大綱討論

1. 前言			
(1) 背景			
(2) 目的			
(3) 檢核點			
(4) 文獻回顧			
2. 研究方法			
(1) 高屏溪			
(2) Material			
(3) Detecting			
(4) Classifier xxx samples			
(5) Build the classifier			
(6) Locating			
(7) Rainfall threshold (including SWI parameters)			
3. Results			
4. Budgets			
5. Hydrological factors			
(1) 雨量分析結果 ($I_{ave}, I_3, I_6, I_9, K, R_e, R_a, D$)			
(2) 相似性分析 ($S_1, S_2, S_3, SWI, \text{Water discharge, numerical simulation}$)			
(3) 鄰近高風險的事件			
(4) 比較全國 (including 無因次)			
(5) 其他討論 (dd, mt, river, valley, geology, landform)			
6. 結論			
記錄人 (Recorder): 林冠璋	證明人 (Witness):		
日期 (Date): 2020, 10, 8	日期 (Date):		

計劃編號 (Project No.):

題目 (Title): 討論有限元素分析用於增加雨量分析數據

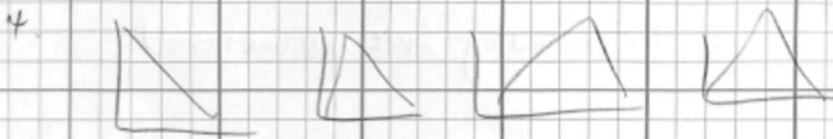
1. 小林



2. 莫拉瓦 (Mulla)

2/9 : 6:16

3. 參數 $c, \phi, k,$



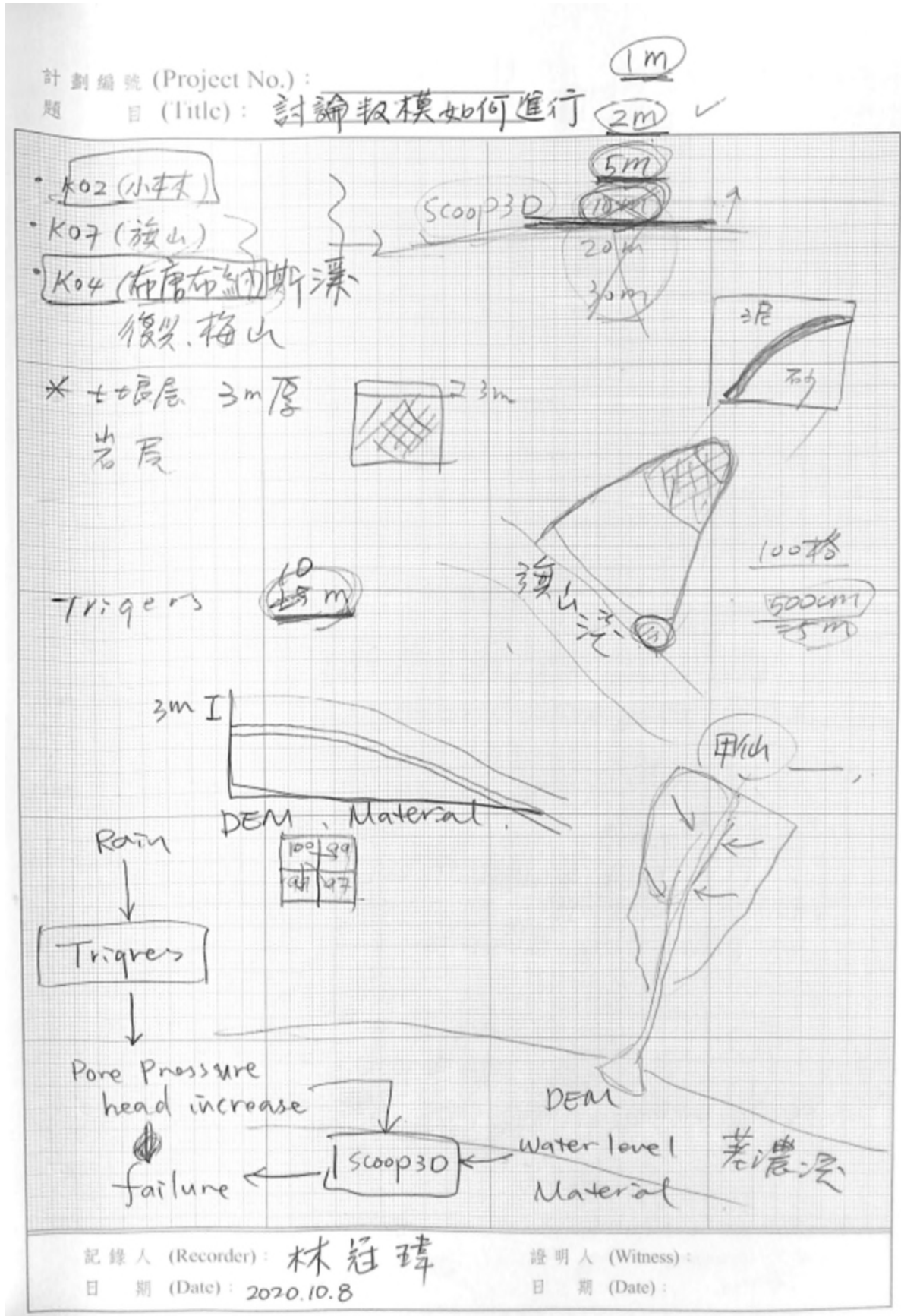
Abagus 建模 (小林)

記錄人 (Recorder):

日期 (Date): 2020.10.8 / 10.14

證明人 (Witness):

日期 (Date):



計劃編號 (Project No.):

題目 (Title): 期末審查意見記錄

<p>將樣本數拓展其他年度, 時間不一定是唯一考量。 崩塌地的風化侵蝕等其餘因子會影響發生頻率。 桶狀模式通常適用於單一邊坡, 是否合適用於子集水區尺度, 空間的 差異是否有, 崩塌與河流因子是否有直接關係, 通常用於掩護湖</p>	
<p>地動訊號與震源, 傳播路徑及測站位置有關, 正確度需要驗證。 數值模擬, 與前人研究有基本假設, 不宜強下太多結論。 引用自誤, (石標鑫), 年份差異 SL及MA計算提前, 時間差校正, 0.2倍最高能量的選擇</p>	
<p>5% 門檻線需多說明 (垂直線部份) 地震儀 綜合評估 定位結果 (海底崩塌可能) 地震站類別需額外說明清楚, 混合儀器。 地動訊號分類技術的實際應用性</p>	
<p>系統分類的極限, 是否有更小規模的地震或崩塌 無因次水文參數是否能與第三補水作結合。 地動訊號分類 是否首其他震源 二階段分類器 是否與效率有關</p>	
<p>能否加入地形因子於机器学习器 水文促崩方法 是否有較佳。 時頻特徵與崩塌規模, 高潛勢崩塌地的車站規劃。</p>	<p>河川水文為多分類說明 翠站後的, 維護成本。</p>

記錄人 (Recorder):

日期 (Date): 2020.11.18 10:00am

證明人 (Witness):

日期 (Date):