計畫編號：**SWCB-110-031**

近即時震波式同震山崩潛感圖(2)
Near real-time seismological susceptibility map of coseismic landslide (2)
（成果報告）

執 行 單 位：國立聯合大學

執 行 期 間：110 年 1 月 27 日至 110 年 12 月 31 日

計畫主持人 ：楊哲銘 助理教授

共同主持人 ：趙韋安 副教授

行政院農業委員會水土保持局　編印

中華民國 110 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）

近即時震波式同震山崩潛感圖(2)

摘要

臺灣島位於地質構造活躍區，不乏地震災害紀錄，島內山地面積占有三分之二，大規模地震誘發山崩常形成天然壩，造成高風險、高衝擊之二次災害，且災害影響範圍甚大。臺灣地質分區之西部麓山帶包含砂岩與砂頁互層為主之順向坡，屬於有利於發生同震誘發平面型破壞之區域，故地震誘發之平面型破壞實為臺灣防災領域重要課題。本計畫(109 年度)初步建置潛在平面型破壞之山崩目錄與 Newmark 輸入參數檔，利用速度位移相依摩擦律之 Newmark 位移分析與氣象局即時地動加速度站，計算潛在平面型破壞之位移；並以集集地震誘發之草嶺與九份二山案例測試，並歸納測試結果設定尖峰地動加速度門檻、測站距山崩之距離與特定滑移量作為自動化程序執行的重要判斷準則之依據。此外，同年度再以 2013 年兩起南投地震之同震山崩案例測試，探討分析程序之結果。當前述階段分析結果符合依據判斷可能發生同震平面型破壞後，進入地動訊號分析階段，首先藉由震源輻射能量(R^{SV})定性斷層錯動對於該測站影響程度大小，再者考慮地動訊號分析評估出山崩地動訊號之時間窗口，並透過窗口內的山崩地動訊號進行震波追跡法(amplitude tracking method, ATM)決定山崩運動方向，篩選出高潛勢同震平面型破壞。綜合上述成果，成功開發近即時

Newmark-ICOL 自動化分析程序，規劃近即時同震山崩潛感圖資訊展示網頁平台 CSS-Web。

今年度(110)已針對 1990 年至 2020 年期間 116 起規模大於 6 的地震事件，取得氣象局即時強震站之地震連續波形資料進行系統離線測試，以提升系統運作之可行性並提供更加可信的資料分析成果；另針對一高潛勢與高活動性之瑞穗鄉舞鶴崩塌地，於場址現場裝設地動加速度計，收集滑動體邊坡之加速度數據探討其地動響應。根據強地動資料與 Newmark 位移分析成果，本計畫優先選取 8 個歷史地震進行影像判釋，用以釐清目標邊坡或其臨近邊坡是否受到地震影響，結合震波分析資料(屬性資訊)與判釋類別標籤(受地震影響:YES、非受地震影響: No)作為模型訓練集，已成功建置同震山崩辨識模型，其中模型包含全臺型及區域型(中、南部地區)，其中區域型中部地區模型準確率可達 95.8%。舞鶴實驗場址加速度記錄資料分析成果顯示崩塌地區相較於場址外測站具有顯著的地動振幅放大效應，此放大倍率介於 1.6~2.0。最終本計畫利用 0206 美濃地震強地動紀錄進行測試，繪製同震山崩潛感圖並完成建置資訊展示平台。

關鍵詞：同震平面型破壞、速度位移相依摩擦律之 Newmark 位移法、同震山崩辨識模型、地動振幅放大效應、同震山崩潛感資訊展示平台

Near real-time seismological susceptibility map of coseismic landslide (2)

Abstract

Taiwan island located at active tectonic area with frequent seismicity and related disasters. Moreover, high relief mountainous area covers two thirds area of Taiwan island. Large-scale coseismic landslides usually induced natural dam which could induce secondary disaster with high risk. Western Foothills in Taiwan consists of sedimentary rocks with bedding planes and earthquake faults in the fold-and thrust belt, which is apt to occur coseismic planar failures. Therefore, the coseismic planar failure is the important issue of disaster prevention in Taiwan. The 1999 Chi-chi earthquake triggered two famous coseismic planar failures, Tsaoling and Jiufengershan cases. There are numerous potential planar failure slopes with similar geologic structural setting. Therefore, earthquake-induced planar failure is a critical issue of disaster prevention in Taiwan. This project adopts LiDAR (Light Detection And Ranging) DEM (Digital Elevation Model) of Taiwan and literature review to establish the landslide inventory of potential large-scale planar failure and parameters for Newmark displacement analysis incorporating velocity-displacement dependent friction law. Based on high density stations of Taiwan Strong-Motion Instrument Program, the coseismic sliding displacement of potential large-scale planar failure within landslide inventory could be calculated by specific historical earthquake events (Two earthquakes in Nantou). Besides, the results of coseismic landslide signal analysis could

be used to evaluate the landslide magnitude, location and related properties. Besides, the amplitude tracking method (ATM) is adopted to determine the moving direction of landslide and to filter the high potential coseismic planar failure. Then, seismological susceptibility map of coseismic landslide would be proposed. This project develops the automatic analytic procedure of Near-real time Newmark-ICOL. The CoSeismic Susceptibility map - Webpage display system (CSS-Web) is established to display the information of coseismic planar failure and import the record of each event.

In this year, the continuous seismic records of earthquakes with local magnitude > 6 from the CWB are collected. A series of offline testing based on the available seismic data was conducted and would be very helpful to improve the feasibility of under-developed system and to provide more reliable results. On the other hand, we deployed several accelerometers in the Wuhe landslide, Hualien, to obtain the observed data for deeply discussing seismic response on hillslope. Based on the aforementioned seismic analysis of strong-motion records and Newmark analysis, this study collected satellite images before and after earthquake occurrence (8 historical events), and mapped possible hillslope affected by earthquake shacking. With available training data including seismic parameters and labels of YES and NO, identification models of coseismic landslide for regional and entire Taiwan island have been built. The maximum accuracy of models can reach to 95.8%. At experiment site of Wuhe landslide, a seismic amplification factor of 1.6 ~ 2.0 can be observed at seismic station located at landslide site compared to the stations outside the landslide. Finally, using the numerous strong-motion

records of 0206 Meinong earthquakes, this study carefully to describe how to draw the coseismic landslide susceptibility map, and the CSS-Web has been successfully built.

Keywords: Coseismic planar failure, velocity-displacement dependent friction law, Newmark displacement analysis, Coseismic landslide identification model, Seismic amplification effect, CoSeismic Susceptibility map – Webpage display system

目次

摘要.....I

Abstract..... III

目次.....VI

表次..... VIII

圖次.....IX

第一章　緒論 1-1

第一節　計畫目標 1-3

第二章　工作執行方法與步驟 2-1

第一節　工作執行方法 2-1

第二節　工作執行步驟 2-8

第三節　全臺型同震山崩模型建置 2-25

第四節　區域型同震山崩模型建置 2-28

第五節　近即時 Newmark 分析方法檢驗與應用 2-34

第六節　即時同震山崩潛感圖資訊展示網頁平台建置.....2-38

第三章　工作進度與交付項目 3-1

第一節　計畫甘特圖 3-1

第二節　計畫交付項目 3-2

第四章　結論及建議 4-1

第一節　結論 4-1

第二節　建議 4-1

參考文獻.....參-1

附錄一、計畫書與期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形.....1

附錄二、第一次期中審查意見暨回覆辦理情形 1
附錄三、潛在大規模平面型破壞山崩目錄（完整目
錄於期末報告電子檔呈現） 1

表次

表 2-1 舞鶴崩塌地之地動加速度計位置說明表 2-8
表 2-2 CART 及 C5.0 模型混淆矩陣 2-27
表 2-3 中部及南部地區之 CART 及 C5.0 模型混淆矩陣
.....2-31

圖次

圖 1-1　近即時 NEWMARK-ICOL 分析程序.....1-6
圖 2-1 ICOL 分析流程圖.....2-3
圖 2-2 TSMIP 及 PALERT 測站分布圖.....2-5
圖 2-3 舞鶴崩塌地之地動加速度計佈置圖。.....2-7
圖 2-4 潛在大規模平面型破壞山崩(ID033，臺中市-和平區-D321).....2-10
圖 2-5 潛在大規模平面型破壞山崩(ID037，嘉義縣-阿里山鄉-D187).....2-11
圖 2-6 潛在大規模平面型破壞山崩(ID055，高雄市-那瑪夏區-D108).....2-12
圖 2-7 歷史地震分佈情形.....2-15
圖 2-8 歷史地震分析成果.....2-18
圖 2-9 歷史地震山崩目錄檢核畫面截圖(SLOPE ID: 064)，右半為震前影像(2010/01/10)，左半為震後影像(2010/03/06).....2-19
圖 2-10 歷史地震山崩目錄檢核畫面截圖(SLOPE ID: 053)，右半為震前影像(1999SPOT 衛星影像)，左半為震後影像(2001/10/17).....2-20
圖 2-11 模型訓練參數分析流程圖.....2-22
圖 2-12 歷史地震事件分布、震源機制解與具有破壞跡象的邊坡分佈.....2-24
圖 2-13 盒鬚圖分析成果.....2-26
圖 2-14 CART 決策樹模型.....2-27
圖 2-15 C5.0 決策樹模型.....2-28

圖 2-16 北部區域樣本盒鬚圖分析成果.....2-29
圖 2-17 東部區域樣本盒鬚圖分析成果.....2-29
圖 2-18 中部區域樣本盒鬚圖分析成果.....2-30
圖 2-19 中部區域 CART 決策樹模型 2-30
圖 2-20 中部區域 C5.0 決策樹模型 2-31
圖 2-21 南部區域樣本盒鬚圖分析成果.....2-32
圖 2-22 南部區域 CART 決策樹模型 2-33
圖 2-23 南部區域 C5.0 決策樹模型 2-33
圖 2-24 110 年 4 月 18 日第 025 號與第 026 號地震 2-35
圖 2-25 以第 026 號地震為例(規模 6.2，瑞穗震度 4 級)
與採用測站位置分布。水璉站(SHUL)、紅葉
站(EHY)、舞鶴崩塌地內(PALERT+03)之加速度
歷時.....2-35
圖 2- 26 110 年 4 月 18 日第 025 號與第 026 號地震之
NEWMARK 分析結果 2-36
圖 2- 27 地震分佈與震源機制解，數字代表氣象局地震
編號.....2-37
圖 2-28 PGA 回歸分析.....2-38
圖 2-29 CSS-WEB 首頁選單展示範例 2-40
圖 2-30 CSS-WEB 目標邊坡分析參數展示範例 2-40
圖 2-31 CSS-WEB 目標邊坡剖面圖資範例 2-41
圖 2-32 同震山崩潛感圖範例(CSSMAP).....2-42
圖 2-33 CSS-WEB 即時資訊展示範例.....2-43

第一章　緒論

地震誘發大規模崩塌具有大量體與快速位移之特性，並於山區發生時由於堆積體積巨大且容易形成天然壩，對於山區居民生命財產安全具有嚴重威脅。臺灣在地體構造上處於歐亞大陸板塊及菲律賓海板塊之聚合隱沒帶，有相當高的地殼抬升速度及地震活動，根據 2012 年版活動斷層分布圖中島內包括地表斷層長度超過 5 公里的斷層共 33 條。深部的板塊運動與淺部的斷層錯動所產生之地表地動加速度，皆對於山坡地穩定為一重大威脅。臺灣亦因位處於西太平洋中低緯度之地理位置，氣候條件為高年平均降雨量與頻繁的颱風侵襲，使得地形侵蝕旺盛而有高陡坡與蝕溝遍布的現象。如此極端的氣候環境，將以持續性和突發性的作用造成臺灣的山崩災害，其中順向坡與高陡坡等皆為潛在崩塌區域，其影響範圍可能包含山坡地開發、居住、道路與重要設施的保全對象。

臺灣的地震誘發山崩歷史災害，最為有名的為 1999 年集集大地震所誘發的草嶺山崩與九份二山山崩，兩案例皆為順向坡地形的平面型破壞，崩積量體分別高達 125 Mm^3 和 36 Mm^3，不僅有大量土砂運移，並且皆形成堰塞湖威脅上下游區民之生命財產安全 (Hung, 2000; Shou and Wang, 2003)。由文獻所述，草嶺崩塌地共有三次地震和兩次降雨觸發之平面型破壞，其中地震誘發事件皆有較大的滑動量體運移(李錫堤，2011)。除了草嶺與九份二山之外，集集地震誘發了 9,272 個山崩，其中九九峰與中橫谷關至德基段發生密集的崩塌事件，可見地震所誘發的山崩為臺灣山崩災害不可忽視的課題。Yang et al. (2014) 研究集集地震誘發草嶺山崩之運動分析，藉由剪動帶材料的旋剪實驗

建立速度-位移摩擦律，並結合 Newmark 位移法重現草嶺平面型破壞受地震力啟動、加速、滑移、撞擊河谷的過程，說明透過地震站所蒐集的地動加速度配合掌握剪動材料之摩擦行為，能夠作為評估大規模平面型破壞啟動和運移分析的方法。

過去文獻研究成果顯示山崩事件發生時產生之地表震動訊號將有幫助於了解其滑動機制與特性(Brodsky et al., 2003; Chao et al., 2016; Yamada et al., 2013)。Lin et al. (2010)為首次利用臺灣寬頻地震網(Broadband Array in Taiwan for Seismology, BATS)研究小林村山崩事件之長週期(10-120 秒)地動訊號，探討山崩事件之動態滑移過程。Chen et al. (2013)則持續利用 BATS 網紀錄自動判識 12 起大規模崩塌事件，並建立震波參數與崩塌事件大小之關係式。自 2015 年，臺灣即時山崩監測系統(real-time landquake monitoring system, RLAMS)已正式運作，該系統透過自動化程序約於事件發生後 7 分鐘，決定事件發生位置、大小及判斷是否形成堰塞湖。詳見系統作業之即時網頁平台展示(CoLLab, http://collab.cv.nctu.edu.tw/main.html)。然而，上述震波式監測技術將不適用於同震山崩。以小林村事件為例，Chao et al. (2017)研究指出，小林村事件對應之地震規模為 3.4。一般具有同震山崩災害的地震事件規模如集集地震為 M_L=7.3，地震事件產生的地動訊號能量將會覆蓋掉同震山崩造成的震動訊號。因此，如何有效的判識同震山崩之地動訊號將是利用震波式技術研究同震山崩的重要課題。

以地質條件與地震分布，具有原生弱面-層面之西部麓山帶沉積岩地區與褶皺逆衝帶地體構造的逆斷層活動影響範圍，為受到地震誘發平面型破壞威脅的區域。而臺灣目前已有全島光達數值高程模型以

及密集的即時地震觀測網，倘若能在地震發生後快速評估潛在大規模平面型破壞發生的可能性，便可近即時發布同震山崩潛感圖。此外，地震發生同時由地動訊號自動分析系統進行判釋並提供地震誘發山崩資訊，用以提供災害位置、量體與堰塞湖形成與否之評估，將可以有效降低災害風險與生命財產損失。

本計畫預計利用臺灣強地動觀測網(Taiwan Strong-Motion Instrument Program, TSMIP)取得地動加速度、以光達產製數位高程模型獲得地形資訊與透過文獻蒐集剪動材料強度。以特定歷史中大(芮氏規模 $M_L > 6.0$)地震為例，針對潛在大規模崩塌區鄰近之 TSMIP 地動加速度紀錄模擬近即時同震山崩位移，透過特定門檻值判識鄰近 TSMIP 測站是否具有同震山崩事件，針對單一目標崩塌區計算其觸發測站比值(觸發測站數量除以總代表測站數量)，經各測站計算成果彙整並可提供同震山崩潛感圖。進一步，透過本計畫開發的震波式同震山崩分析地動訊號方法，判斷潛在大規模崩塌可能發生位置與其相關資訊，則可進行目標崩塌區之二次檢核(僅當崩塌量體大於 1 百萬立方米才進行二次檢核)。最終，建置近即時同震山崩資訊平台，並將每次事件匯入歷史紀錄，長期記錄潛在大規模崩塌潛勢區累積位移，提供防減災策略作為參考。

第一節　計畫目標

一、全程目標：

本計畫為延續前期計畫，去年度(109 年)計畫執行為「軟體防災對策」領域，今年度(110 年)配合水土保持局創新研究計畫要求之「基礎試驗研究」領域，期能以臺灣研究區域為案例，預計於中大規模(芮

氏規模大於 6.0)之島內地震發生後數分鐘，蒐集 TSMIP 地動加速度紀錄(目前有 502 站為即時測站，經查證後僅用 471 站正常運作，以上為 2021 年 7 月份中央氣象局資料運作狀況)，藉由速度-位移摩擦律結合 Newmark 分析，提供可能發生同震山崩的潛勢區域；並透過震波式同震山崩訊號分析方法自動取得山崩事件發生之位置及滑動方向。最終，繪製同震山崩潛感圖並綜合研判以利於後續相關災害之防減災等應變工作進行。進而作為國內相關單位災前防患整備、災中預警應變、災後機制調查之參考準則。本創新研究計畫預期達成之總體目標如下：

1.製作具平面型破壞之潛在大規模山崩目錄，建立同震位移分析所需參數資料庫，包含地形因子與地質材料摩擦特性，並繪製沿可能滑動方向之地形剖面；

2.建立近即時Newmark位移分析方法，並利用歷史事件之分析結果作為方法檢驗，探討山區即時地震站監測具平面型破壞之潛在大規模山崩之合適程度；

3.開發震波式同震山崩之分析方法流程與案例分析，獲得同震山崩位置及移動方向等相關資訊；

4.整合近即時Newmark位移分析方法與震波式同震山崩監測系統，建置近即時(同震山崩資訊)震波資料平台，快速發布分析資訊，加速未來因應相關災害之減災與應變作業。

二、本年度目標：

根據上年度(109年)計畫執行成果，開發近即時Newmark-ICOL自動化程序，已可偵測同震崩塌與決定其位置。然而，受限於：(1) 本

計畫並未直接獲取中央氣象局即時強震站的連續資料、(2) 上年度(109)並未發生島內中大規模地震事件，無法確實提供本計畫規劃近即時同震山崩潛感圖資訊展示網頁平台(CSS-Web)，實際執行之問題項目(如：正確率為何?誰應該要收到速報資訊?速報資訊如何傳遞給不同層級的使用者?)等。

建置近即時自動化分析程序有以下幾項重要關鍵，經由目前研究結果歸納必要的同震山崩判識準則有：(1) 測站之尖峰地動加速度(Peak Ground Acceleration, PGA) > 196 gal、(2) 臨界坡角(Critical slope angle, θ_c)為滿足快速長位移運動狀態下的最小坡角，或稱快速長位移之臨界坡角，對應之滑動塊體之尖峰加速度值後10秒位移量(d10)須介於10 cm ~ 254 m，且θ_c須介於崩塌前地形平均坡角θ減8°至θ、(3) 剪力波震源輻射能量值(R^{SV})之絕對值須小於0.15；事前需準備的資料庫包含，(1) Newmark 輸入參數檔(event.txt)及(2) 理論時間差之資料表(Time_Table.txt)；即時運作系統時相關地震參數的介接(圖1-1)。

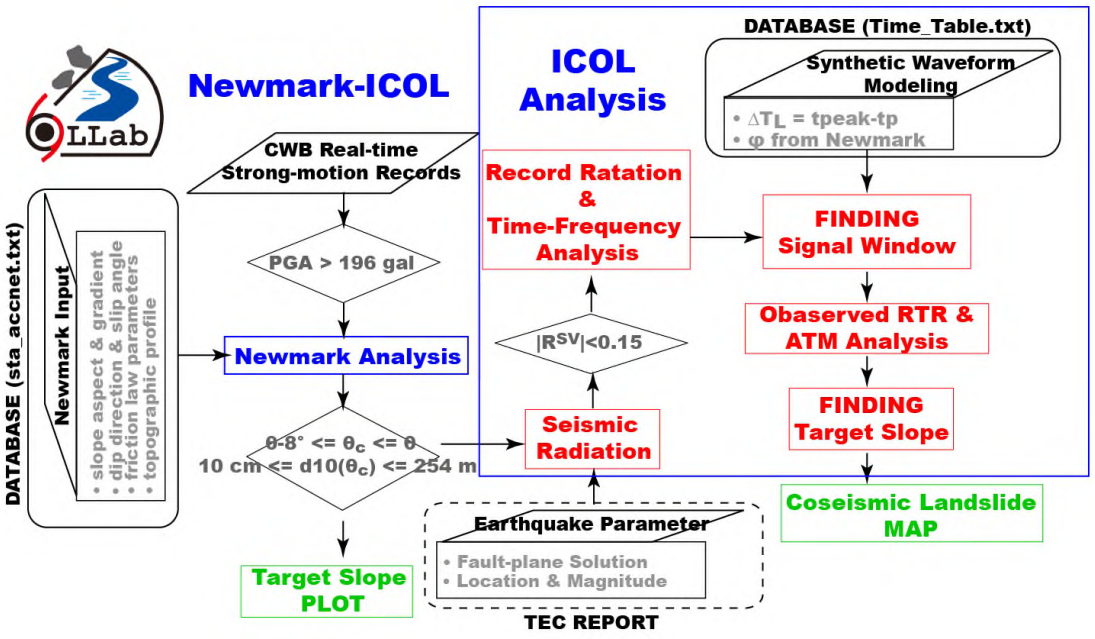


圖 1-1　近即時 Newmark-ICOL 分析程序

參考現存的即時強震站分佈與面積大於10公頃、岩性為砂岩及砂頁互層的順向坡作為目標邊坡(Target slope, TS)，目前共計175處目標邊坡皆至少有一個代表即時測站進行監測管理，因此本計畫將優先聚焦於上述175處目標邊坡進行相關分析工作。然而，測站地動加速度紀錄可能會受到地形幾何效應、場址效應、震源特性等因素而導致加速度紀錄會有所差異，進而影響Newmark-ICOL分析程序的可信度。本計畫亦提出幾項重要的建議，期許在未來的延續性多年期計畫或相關的延續工作能夠陸續完成，並優化系統運作能力。

因此，本年度預期達成之目標如下：

1.臺灣過去有數起中大規模的地震事件(109計畫執行年度分析1999年集集地震與2013年南投地震之案例)，若可以配合各個歷史事件對應之同震山崩目錄與強地動紀錄，再進一步對Newmark-ICOL近即時自動化分析程序進行離線測試，便可

提升系統運作之可行性並提供更加可信的資料分析成果。

2.對於地形幾何效應將如何影響強震站加速度紀錄等定性分析成果，建議應選定一個具有高潛勢崩塌區域且地表位移活動性顯著的場址，進行小區域強地動測站安裝，將可以系統性的比較各測站地動記錄受到測站地形起伏變化的影響。

3.與中央氣象局地震中心進行協議及釐清資料使用相關目的，預計可以順利取得即時測站資料的使用權，讓即時資料能夠被本計畫建立之Newmark-ICOL近即時自動分析程序應用。

第二章　工作執行方法與步驟

第一節　工作執行方法

一、地震誘發平面型破壞之運動分析 (Newmark Analysis)

計畫預計蒐集已公開之歷史山崩目錄、順向坡目錄、山崩與地滑地質敏感區、地層位態、地質構造與地質圖等圖層，初步篩選具有潛在平面型破壞條件的山坡地，藉由光達數值高程地形取得地形因子與判釋地形特徵，決定進行計算同震位移之平面型破壞之大規模山崩目錄。建置平面型破壞之大規模山崩目錄後，分析其可能滑動面之傾向、傾角與摩擦特性，當地震發生時 TSMIP 地震站記錄之地動加速度輸入考慮速度-位移相依摩擦律之 Newmark 位移分析，獲得可能滑動塊體隨地震歷時之加速度、速度、位移。透過數值高程模型所得之地形剖面，可用於簡易評估平面型破壞發生長距快速滑動後可能的運動過程，程序流程圖彙整如圖 2- 1。

二、同震山崩地動訊號分析方法 (ICOL)

本計畫上年度利用震源反演程序(General Source Inversion, GSI; Brown et al., 2015; Chao et al., 2011; Chao et al., 2016)將全地震矩張量(full moment tensor)分解為五個基礎斷層面解、爆炸源及三分量(東西、南北、垂直)的單點作用力源。因此，GSI 程序將可以有效模擬斷層錯動(地震)與崩塌滑動(單點作用力)的合成理論震波訊號。對於判斷地動訊號的震源類型是相當重要的分析工具。本計畫將同震山崩地動訊號分析方法分成主要三大步驟: (a) 當地震發生後數分鐘，中研院地球所 RMT 系統

(http://rmt.earth.sinica.edu.tw/)與臺灣地震中心 TEC 系統(http://tecdc.earth.sinica.edu.tw/FM/)可提供相關地震參數，例如地震位置、規模大小、斷層面解(走向、傾角、滑移角)。透過上述地震參數可以快速計算各 TSMIP 測站對於體波之震源輻射能量大小(seismic radiation pattern, R)，本計畫將利用剪力波的震源輻射能量(R^{SV})定性斷層錯動對於該測站影響程度大小、(b) 上述程序可提供受地震力影響相對小的測站，並透過 Newmark 分析法篩選高潛勢的山崩位置，進行地震及山崩合成理論震波模擬。模擬震波訊號可以提供理論 P 波及 S 波到達各測站走時時間、理論地震地動訊號的最大訊號值與 P 波之時間差(ΔT_E)、理論山崩地動訊號的最大值與 P 波之時間差(ΔT_L)。實際地震發生時，在各測站觀測地動訊號中應可清楚判斷 P 波初達位置，並且透過假設地震造成的最大地動振幅值之時間點為觸發山崩時間(T_{L0}；注意此時間點可以依經驗進行動態調整)，根據 T_{L0}；時間加上ΔT_L即為理論山崩訊號最大值出現的時間位置。透過該程序配合訊號時頻分析成果，可以評估各測站可能的山崩地動訊號之時間窗口範圍、(c) 透過窗口內的山崩訊號進行震波追跡法(amplitude tracking method, ATM; 吳奕翰，2019)分析。ATM 分析法主要透過移動式時間窗口之水平向最大振幅比(radial-to-transverse ratio, RTR)，透過測站-事件位置方位角與 RTR 的比值分佈特性，決定崩塌事件滑動方向。若此滑動方向與高潛勢山崩事件位置的判釋之滑動方向呈現一致時，則判斷該山崩為同震觸發事件。詳細步驟彙整於圖 2- 1。

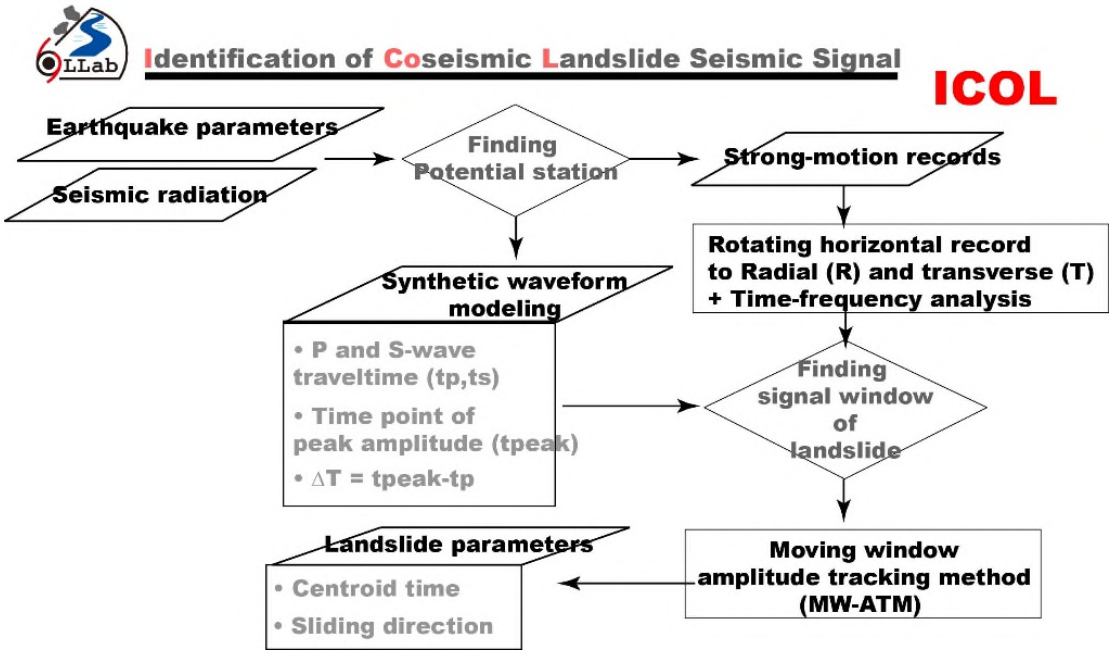


圖 2- 1 ICOL 分析流程圖

三、近即時同震山崩潛感圖資訊展示網頁平台 (CSS-Web)

本計畫預計透過先進技術整合分析法 Newmark-ICOL，目標於中大規模(M_L > 6.0)地震發生後數分鐘提供近即時同震山崩潛感圖，成果導向以網頁平台界面進行資訊揭露，本計畫稱該系統平台為(CoSeismic Susceptibility map-Webpage display system; CSS-Web)。

由於本計畫目的為進行近即時的提供同震山崩事件點位，因此，本計畫的關鍵輸入資料之一為即時地表地動加速度資料。依中央氣象局 TSMIP 觀測網雖分佈範圍廣泛，截止至 2021 年 7 月共計有 471 部測站具有即時資料傳輸功能，本計畫共同計畫主持人趙韋安副教授已取得中央氣象局即時強震資料的使用權，並規劃在規模大於 6 且為島內地震事件做為觸發準則，由氣象局地震觀測課自動發送波形資料進入於陽明交通大學土木系地表地動侵蝕研究室(CoLLab, http://collab.cv.nctu.edu.tw:main.html)。近年

來，臺灣大學吳逸民教授研究團隊已於臺灣地區架設 700 多部微機電地動感震器，該系統稱為 Palert，並具有資料即時傳輸功能。本計畫目前亦將 Palert 觀測網的資料即時備份於陽明交通大學土木系地表地動侵蝕研究室 (CoLLab, http://collab.cv.nctu.edu.tw:main.html)，詳細測站分佈如圖 2- 2。

計畫研究內容中的歷史地震事件將使用 TSMIP 資料進行測試及修正 Newmark-ICOL 方法；本計畫優先檢核 1990 年以後且地震規模大於 6 的地震事件，將可以透過 TSMIP 觀測網提供的歷史震波資料，進行系統性交叉檢驗；若有必要性於 2012 年以後的地震事件將可以納入 Palert 觀測網波形資料。計畫研究範圍將應用於全臺特定山區，區域應為潛在平面型破壞區域及順向坡(沈積岩之層理、板岩之劈理或平整且延續性極佳之不連續面)並具有見光(daylight)之可能。以集集地震同震山崩目錄為例，數目多、分布廣。

然而，現有地質圖中並非所有同震山崩鄰近區域皆有位態記錄，且並非所有山區皆有含位態紀錄及可參考地質圖。因此，計畫執行中分析此類之歷史山崩目錄時，若同時有保全對象或其他值得探討之原因(例如可判識之破壞特徵)，則列為特定崩塌區，在經費預算允許的範圍內，進一步於計畫執行期間進行補充地質調查工作。若透過地質、地形特徵判釋特定高潛勢崩塌區，且屬易受到地震活動度影響坡地穩定性，本計畫預計更進一步在經費允許的範圍下，將進行場址現地調查，其中調查工作項目將包含微地動訊號分析、CampaignGPS 測量、空拍機擷取空間資訊等。

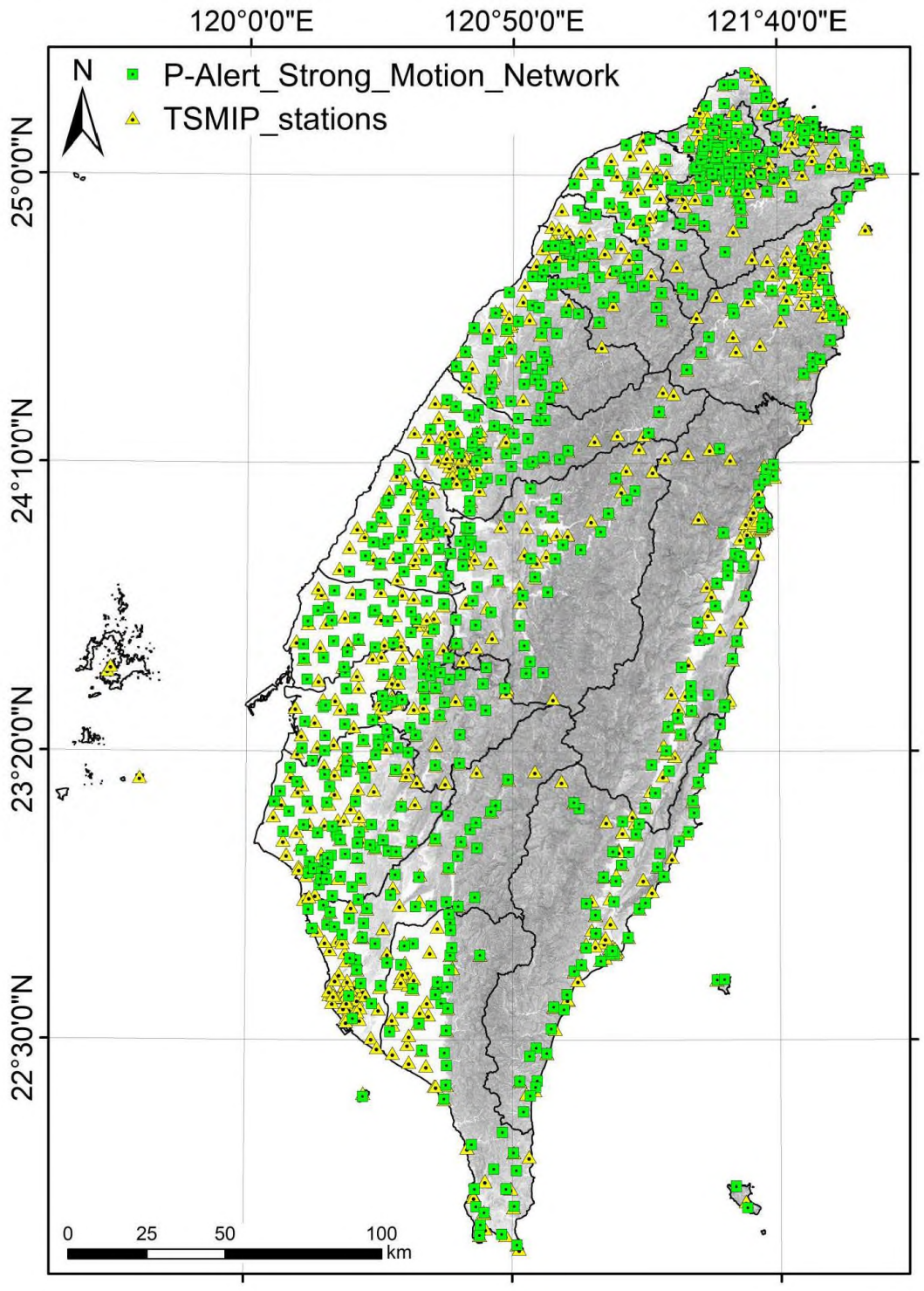


圖 2- 2 TSMIP 及 Palert 測站分布圖

四、真實案例分析與近即時監測系統之成果評估

上年度(109)已針對花蓮縣-瑞穗鄉-D024 內崩塌(舞鶴崩塌地)進行地動加速度計安裝(圖 2- 3)，安裝流程(1)首先需先以人工方式在選定位置向下挖掘深度達 70~100 cm (盡可能移除掉表土層)、(2)於洞的底部與周圍填入水泥、(3)置入含有水泥底座平台的圓桶，並將圓桶底座與洞底的水泥進行壓密接合，步驟(1)~(3)主要目的是確保儀器圓桶與洞底材料穩固接合，當地震造成地表振動時，儀器圓桶與洞底之間無相對運動；接著(4)置入加速度儀器並確認指北與調整至水平狀態(儀器底座採 3 點式水平調整)、(5)連接儀器電源線與網路線(本儀器是透過內網方式進行收取資料)至地表電源設備箱、(6)完成架設太陽能板(共計 100 W)，並將電瓶(80~100 Ah)電源線連接電源控制器，再接上太陽能輸出電源端至控制器、(7)收納儀器相關線材並利用防水接頭與矽利康完成水密處理、(8)測試資料存取狀態。目前崩塌地內外共裝設 4 處加速度計及 1 處地聲計(Geophone)(表 2- 1)，並於測站 BH4-Palert^{+}安裝即時資料傳輸模組。依據現地監測與遙測分析之活動證據佈設地動加速度計，並與其他地表和地下監測設備共站蒐集活動數據。

舞鶴崩塌地位於舞鶴台地西側山坡，為秀姑巒溪左岸坡地且鄰近舞鶴山，坡向大略朝東南，坡面平均坡度約 27 度，岩盤地層屬於玉里層之紅葉片岩，岩盤露頭以砂質片岩與泥質片岩為主。由地表地質調查、鑽探岩心、邊坡監測、遙測判釋皆顯示此崩塌地為高潛勢且活動性高之坡體，自 2017 年 1011 豪雨事件發生大幅度變位後，至現今仍約有平均每日 5mm 至 15mm 之地表

位移；此外，本崩塌地由無人機空拍產製正射影像與數值地表模型，顯示滑動體面積約 10.5 公頃，且有整體以相近方向與位移量之下滑趨勢，再由鑽探岩心與地表地質調查等資料綜合推估此滑動體之滑動面深度約為 35m，且含有一層剪裂泥弱帶介於滑動體與基盤之間(楊哲銘等人，2020)。因此，舞鶴崩塌地場址包含高活動性、存在滑動面、位於東部地震帶等有利於進行研究之特性。本年度預計蒐集此場址內地動加速度之數據，並利用地表位移監測結果與地震發生造成之影響進行比較與分析，因此需要維護設備以確保蒐集有用之數據。

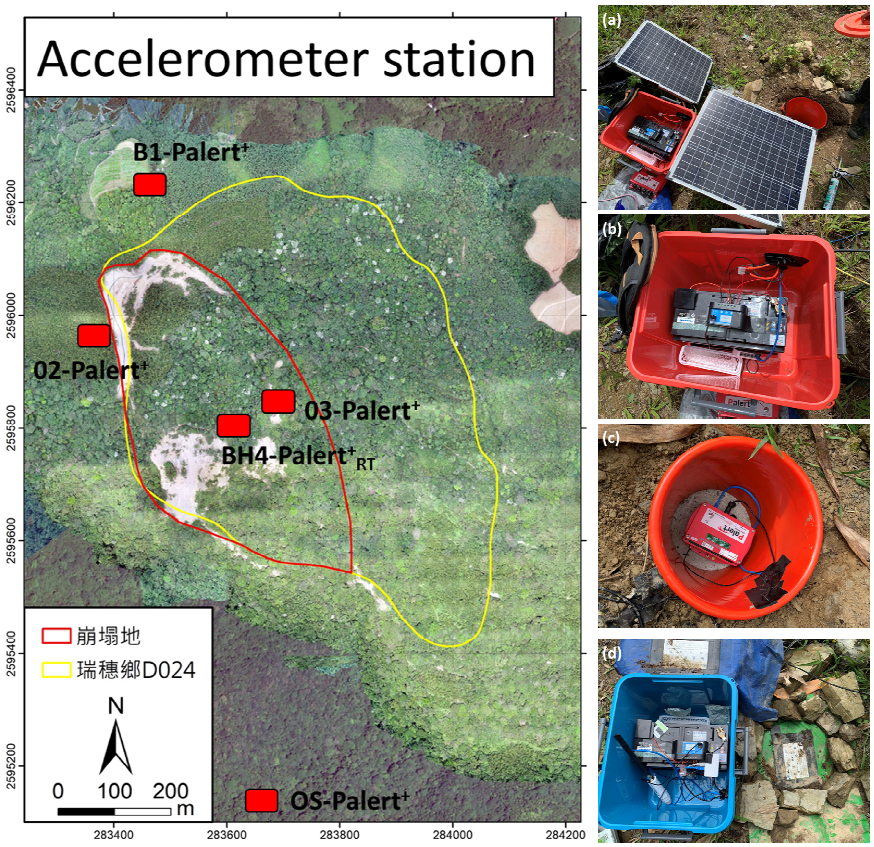


圖 2- 3 舞鶴崩塌地之地動加速度計佈置圖。地動加速度計安裝設備：(a)太陽能板、設備箱、加速度計儀器桶(至於地表下)，(b)設備箱內部近照(蓄電池、電源控制器、除濕盒)，(c)加速度計於桶內近照，(d)即時站設備箱內部近照，另有傳輸天線。

表 2- 1 舞鶴崩塌地之地動加速度計位置說明表

編號	安裝位置說明
B1	設於崩塌地外之北坡坡頂，與 GNSS 站共站
02	設於崩崖右翼之崩塌地外側
03	設於坡腹平台
BH4	設於鑽探孔號 BH4，與 GNSS 站、測傾管、時域反射儀(TDR)共站
OS	設於崩塌地外之對岸坡面林道旁

第二節　工作執行步驟

一、潛在大規模平面型破壞之山崩目錄與 Newmark 分析參數

由前述章節中圖 1-1 與圖 2- 1 流程圖已呈現工作執行步驟與相關內容，以下為工作執行重點說明：

首先，根據 175 處目標邊坡(潛在大規模平面型破壞山崩)進行地形參數與剖面建立資料庫，由於此山崩目錄為潛在大規模崩塌目錄與順向坡目錄之交集，且岩性為砂岩為主或砂頁岩互層之邊坡，故本計畫建立山崩目錄並獲取代表坡度與坡向提供分析計算使用，坡度採用潛在大規模崩塌目錄內屬性表所提供之數值，坡向則由垂直主要等高線方位作為代表，並參考鄰近地質構造(如：褶皺軸、岩層三角面等)；每一處分別取縱與橫剖面，以展示數值地形模型之起伏以及後續評估平面型破壞之位置與路徑，以下利用三處展示之圖版內容進行說明(圖 2- 4 至圖 2- 6)。

圖版包含平面地質圖、縱剖面(LL')與橫剖面(TT')，平面地質圖原則以 1/10,000 之比例尺作為展示範圍，使用圖層分別有潛在大規模平面型破壞山崩(編號 ID 001 至 ID 175、並對應大規模

崩塌潛勢區編號)、地形坡度圖、間距 100 m 之等高線、水系、縱剖面線、橫剖面線、褶皺、斷層、地層、層面位態與劈理位態。此外，Newmark 分析中所使用的坡度值使用大規模崩塌潛勢區圖層之坡度值作為代表，而走向方位角定義為坡向或傾向之方位角逆時針減 90 度之方位角(方位角定義以北為 0 度，順時針旋轉增加)，例如：坡向或傾向之方位角為 135 度，則走向方位角為 45 度，或是坡向為 45 度，方位角則為 335 度。另外，由於本計畫選定之 175 處目標邊坡的岩性與草嶺同震山崩事件相似，故關於目標邊坡的位移速度相依的摩擦參數如 $\mu_{SS|v=0}$ (殘餘值)、$\mu_{SS|v=\infty}$ (穩態值)、μ_p (尖峰值)、d_W (臨界位移) 及 V_c (臨界滑移速率)直接採用 Yang et al. (2014)透過野外滑動帶材料及力學試驗求得的摩擦參數值，本文彙整的 Newmark 輸入參數檔(event.txt)將涵蓋以下資訊: 目標邊坡 ID、邊坡中心經緯度坐標、平均坡度(dip)、走向(str)、$\mu_{SS|v=0}$、$\mu_{SS|v=\infty}$、μ_p、d_W 及 V_c。

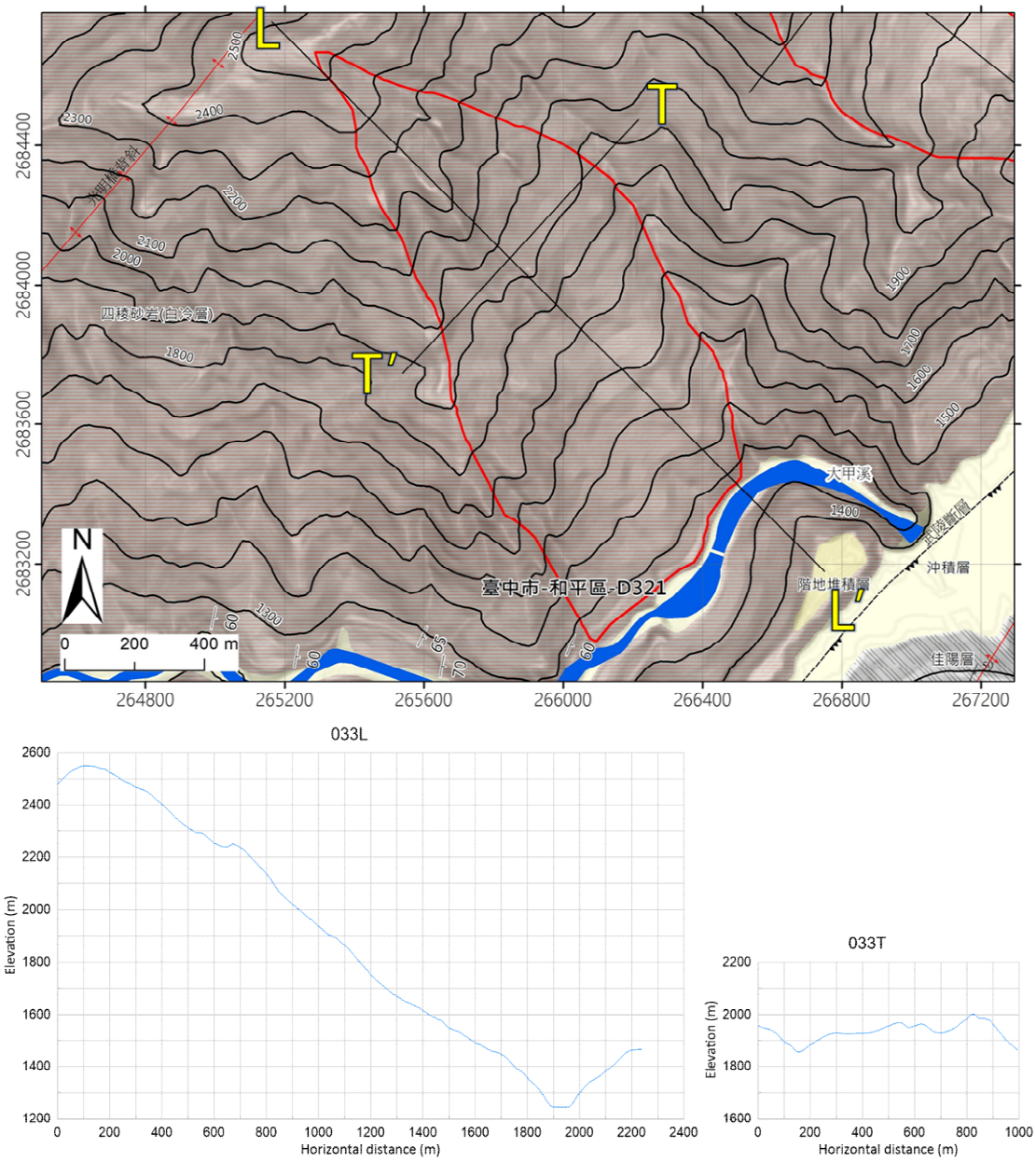


圖 2- 4 潛在大規模平面型破壞山崩(ID033，臺中市-和平區-D321)

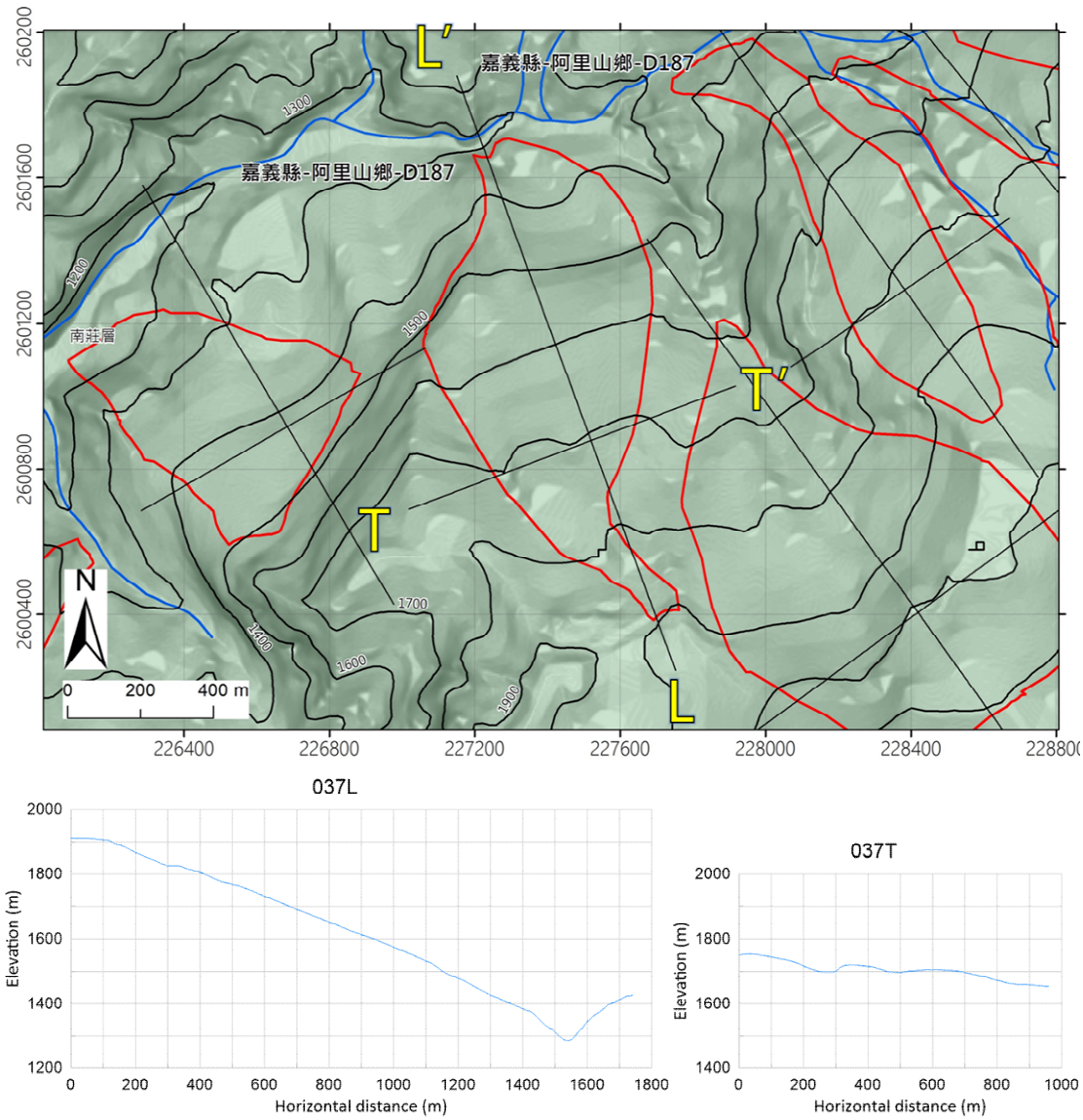


圖 2- 5 潛在大規模平面型破壞山崩(ID037，嘉義縣-阿里山鄉-D187)

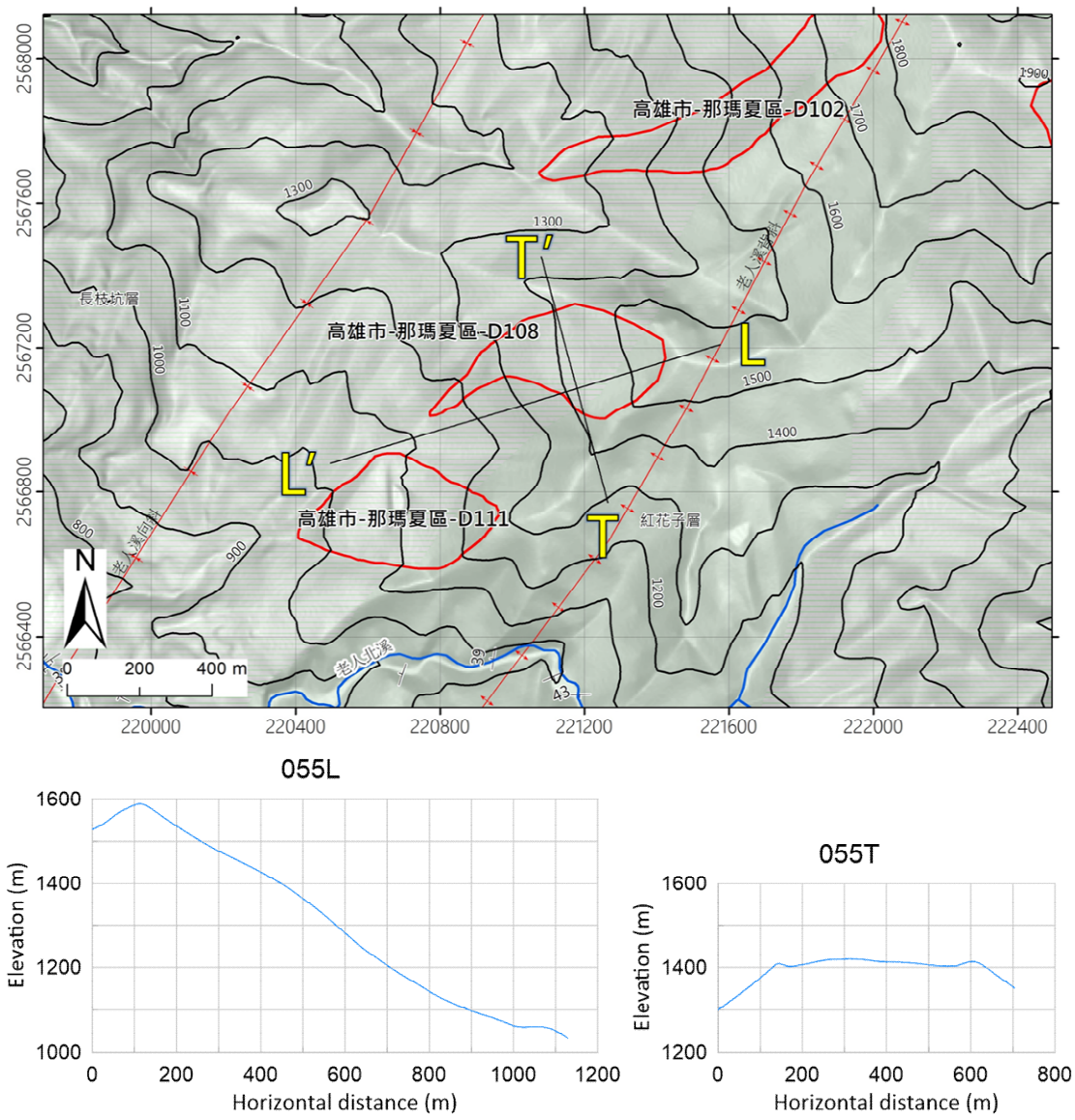


圖 2- 6 潛在大規模平面型破壞山崩(ID055，高雄市-那瑪夏區-D108)

二、 同震山崩地動訊號分析方法(ICOL)

建立潛在大規模平面型破壞山崩後，蒐集過去地震規模大於 6 的強地動紀錄(此處測試測站為全臺可使用的強地動站，包含即時與非即時)，並檢視尖峰地動加速度分布圖，篩選出 PGA 大於 196 gal 的測站，接著以各符合前述條件之測站為中心，以半徑 15 公里範圍搜尋目標邊坡，再以測站之加速度歷時記錄對目標邊坡進行 Newmark 位移分析(需 event.txt 作為輸入參數檔)。當 Newmark 位移分析計算結果顯示具有長位移時(目前採用過去經驗準則，加速度峰值後 10 秒的累積位移稱為 d10，當 d10 > 10 cm 即代表具有長位移現象)，則利用歷史影像與資料檢視該目標邊坡是否有破壞跡象，同時針對各目標邊坡計算其觸發代表測站(Representative Rating)比值，最終分析破壞跡象的與否及比值之間的相關性，理論上，具有破壞跡象的目標邊坡應有相對高的比值。然而，上述分析成果將仰賴初步關鍵門檻值：PGA > 196gal、代表測站與目標邊坡距離(本計畫稱之為 ss_dis，representative station to target slope distance)小於 15 km、d10 > 10 cm。因此，本計畫將透過第一階段判釋具有破壞跡象的邊坡為重點分析目標，重新整合相關數值資訊：PGA、PGV、d10，及空間幾何、邊坡及測站相關參數：地震至測站距離(epi)與方位角(azi)、代表測站與目標邊坡距離(ss_dis)、目標邊坡走向(str)與地震至目標邊坡的方位角(ez_azi)之夾角(Δθ)、地震與目標邊坡之距離(es_dis)、測站高程(elv)、目標邊坡滑動傾角與平均坡度(dip)的差異(Δφ; 通常邊坡發生破壞以後的滑動角會小於破壞前的平均坡度 dip 值，109 年計畫執行年度成果顯示此角度差異最大可達

8°)，預計透過統計分析歸納以上具有破壞跡象邊坡之數值資訊及空間幾何、邊坡及測站相關參數，重新篩選關鍵參數資料以進行同震山崩辨識模型之訓練。

目前已啟動強地動資料蒐集(已與氣象局地球物理資料管理系統提出申請)，取得 1990 年至 2020 年期間地震規模大於 6 的地震事件強地動紀錄，共計有 116 起地震事件(圖 2- 7)，其中僅有 100 起地震事件具有完整強地動紀錄可以進行後續分析工作。透過第一階段資料篩選門檻值：PGA 大於 196 gal、代表測站至目標邊坡距離(ss_dis)小於 15 km、快速位移 d10 大於 10 cm，可以篩選出約 30 起地震事件(不含集集地震之主餘震序列)具有觀測波形資料滿足上述第一階段資料篩選門檻值。對於上述 30 起地震事件，收集地震發生前後期的衛星影像，並檢核觸發之代表測站對應之目標邊坡是否有受到地震影響及相關之破壞跡象；另外亦判斷目標邊坡臨近位置是否有其他發生破壞跡象的邊坡(非本計畫的 175 處目標邊坡)，最終本計畫彙整具有破壞跡象邊坡對應之相關物理、邊坡與測站相關參數進而回饋至本計畫之同震山崩自動化判識系統，動態修正系統觸發相關門檻值。

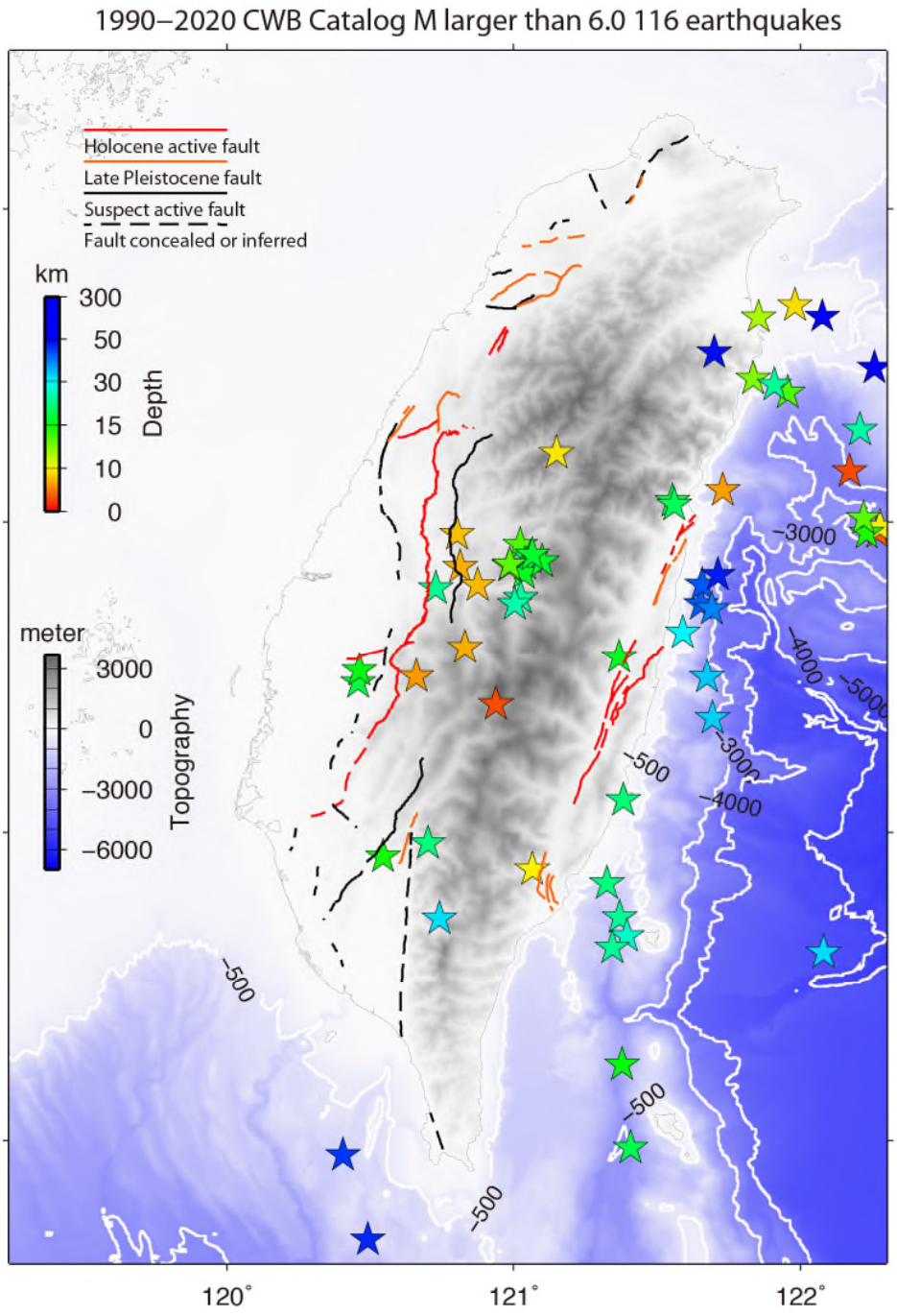


圖 2- 7 歷史地震分佈情形

圖 2- 8 顯示 10 起地震事件分別為 1995 年宜蘭地震、1999 年梅山地震、2003 年成功地震、2006 年屏東外海地震、2010 年甲仙地震、2012 年霧台地震、2013 年兩起南投地震、2016 年美濃地震代表測站與目標邊坡分析成果，其中倒三角形符號為代表

測站的 PGA 滿足 196 gal，且以測站為中心且半徑 15 km 搜尋目標邊坡，利用邊坡材料的摩擦參數、幾何參數(str、dip)與代表測站的強震紀錄進行 Newmark 分析計算求得 d10 亦滿足大於 10 cm 的門檻值，則該目標邊坡為觸發邊坡(圖 2- 8 中紅色圓圈)，而通過 PGA > 196 gal 的代表測站及觸發的目標邊坡臨近範圍內，則會進行山崩目錄判釋。

除了 1999 年集集地震有相關研究提出同震山崩目錄，其他重要歷史地震皆缺乏同震山崩目錄，故本計畫利用上述重要歷史地震中優先選擇 8 場歷史地震事件(1994 年 0605、1995 年宜蘭地震、2000 年 0610、2009 年 1105、2009 年 1219、2010 年甲仙地震、2013 年 0327 南投地震、2013 年 0602 南投地震)，進行地震前後之影像判釋，確認地震對潛在大規模平面型破壞山崩目錄之影響。由於 Newmark 分析可知明確地震發生時間，因此本計畫使用行政院農委會水土保持局 BigGIS 巨量空間資訊系統，利用圖資搜尋功能指定篩選條件(主要條件為起始時間、範圍與圖資類型)，查詢歷史影像(包含衛星影像與航空照片)，由搜尋結果選擇最接近歷史地震發生時間前與後之影像，並使用雙視窗或視窗滑動功能有利於前後比對，目標邊坡為通過 Newmark 分析篩選門檻之潛在大規模平面型破壞山崩目錄。

以下由案例說明，如圖 2- 9 所示，歷史地震為 2010/03/04 甲仙地震，目標邊坡為潛在大規模平面型破壞山崩 Slope ID 064，分析結果顯示共有兩個地震站(MTN154 與 CHY062)的地動加速度歷時由 Newmark 分析出此潛在大規模平面型破壞山崩之 d10 大於 10cm，由 2010/01/10 與 2010/03/06 地震前後中影像上

皆可判釋出接近山頂斜面有一處明顯的平面型破壞，震前由2009 莫拉克風災所誘發，震後影像仍可見崩塌來源區明顯裸露，崩積材料仍殘留於坡上且鄰近有房舍，判釋為受地震影響並須持續關注。另一案例為 Slope ID 053(地震站為 TCU080)，2000 年 06 月 10 日歷史地震，震前影像鄰近區域雖已有局部破壞跡象，但震後有新增崩塌單元(發生於順向坡地形)，故判釋此目標邊坡與鄰近相似構造之邊坡受地震影響，且確實有發生局部平面型破壞(圖 2- 10)。

由於臺灣颱風、豪雨以及地震事件頻繁，因此邊坡長期以來受到不同誘發因子引致破壞，導致進行同震山崩目錄判釋時，可能已有先前事件造成的崩塌存在，並且先前誘發事件種類、崩塌破壞機制、崩塌深度、面積、量體與發生破壞後多久、震前後影像日期與地震時間之間是否包含其他可能造成崩塌之事件存在等因素影響。歸納本計畫針對歷史地震之崩塌目錄判釋經驗，其準則描述如下：(1)地震事件後影像上是否存在崩塌裸露地，若存在則判釋為受地震誘發影響，雖可能為先前事件所誘發之崩塌，但本計畫目標邊坡皆為順向坡地形，故平面型破壞機制仍可於地震時產生位移，且既有崩塌地相較無崩塌跡象邊坡更不穩定；(2)目標邊坡鄰近相似構造邊坡發生破壞，亦判釋為受地震影響；(3)目標邊坡內部或邊界發生蝕溝侵蝕破壞，判釋為受地震影響；(4)地震前後無明顯變化且皆無崩塌裸露地，判釋為不受地震影響。

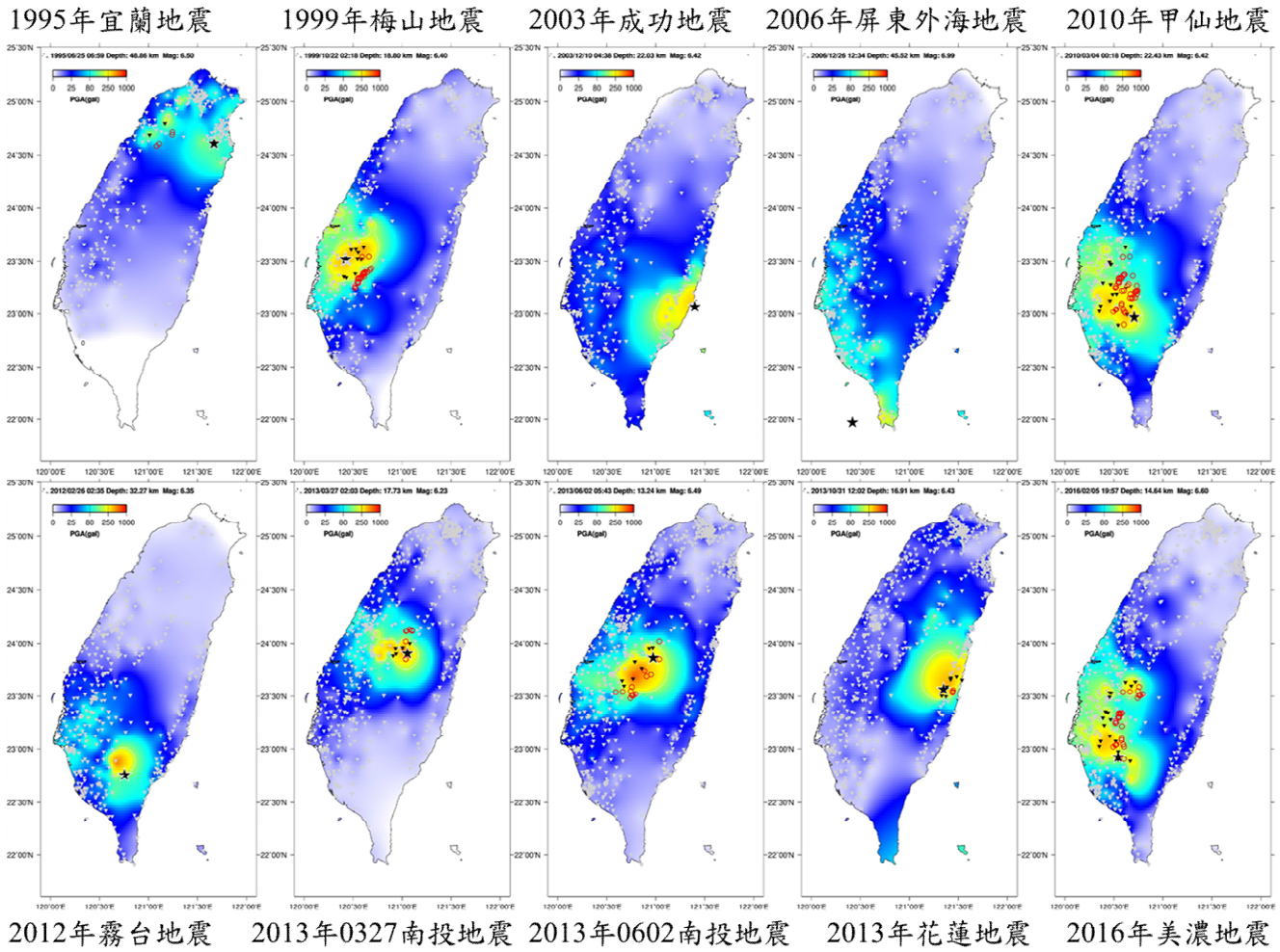


圖 2-8 歷史地震分析成果

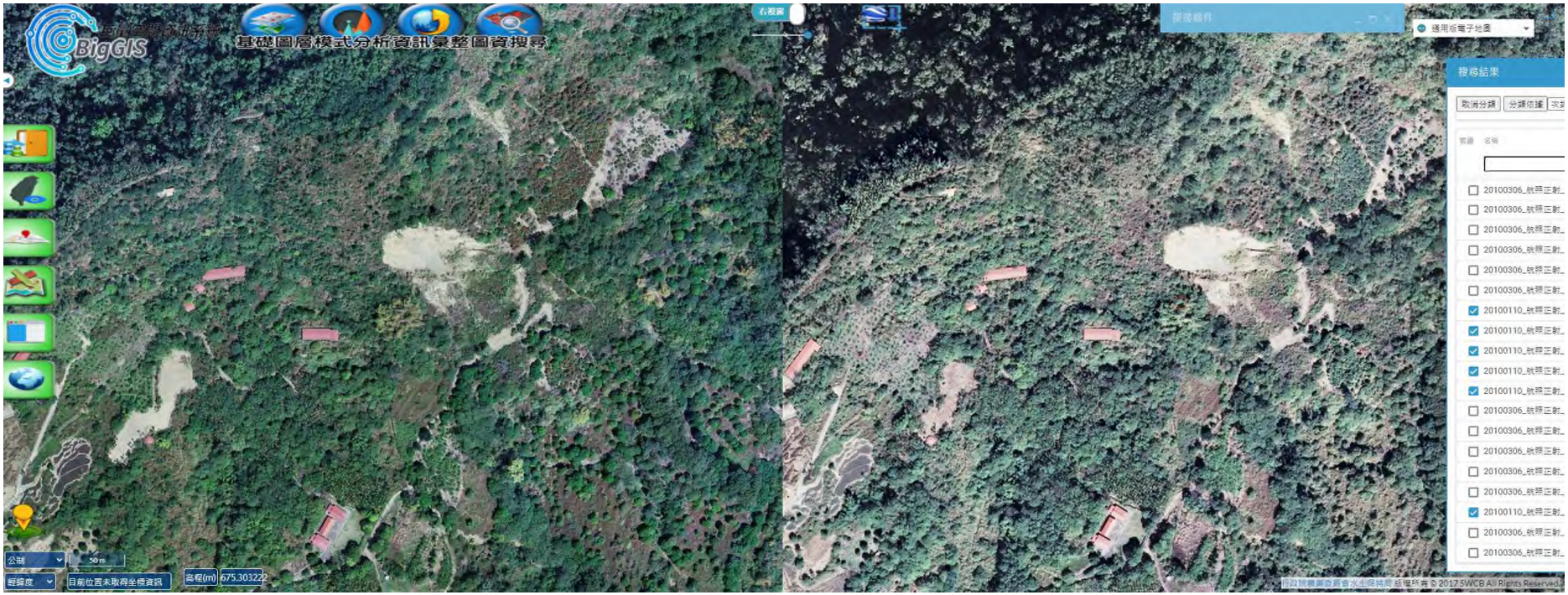


圖 2- 9 歷史地震山崩目錄檢核畫面截圖(Slope ID: 064)，右半為震前影像(2010/01/10)，左半為震後影像(2010/03/06)

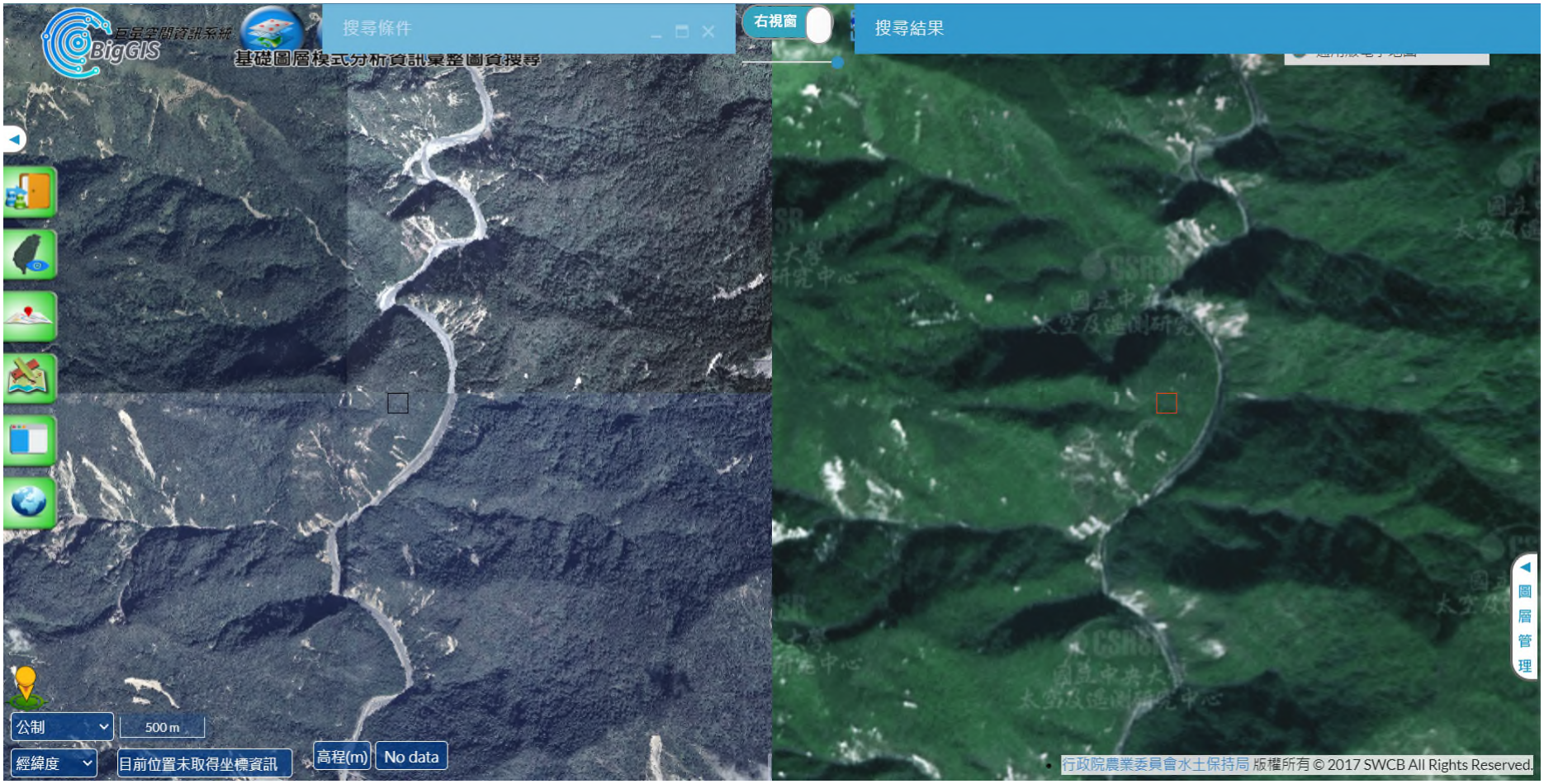


圖 2- 10 歷史地震山崩目錄檢核畫面截圖(Slope ID: 053)，右半為震前影像(1999SPOT 衛星影像)，左半為震後影像(2001/10/17)

三、Newmark-ICOL 分析相關參數之統計成果

本計畫預計採用的模型訓練方法為機器學習法-二元化決策樹，此為有極高的可解釋性「interpretability」的分類器，透過一系列問題進行分割參與訓練的特徵值並依此作出決策，且不需特徵正規化之前處理。然而實際運作可能產生很深的決策樹，導致高度合適 (over fitting) 的現象，故本計畫嘗試不同決策樹演算法來討論高度合適的問題，並以模型訓練輸入資料數量為依據，由人為決定訓練集(training)與測試集(testing)之資料數量，其中資料選取採用隨機抽樣。應用在同震山崩上的發生與否的情況則可標籤化同震山崩發生為「YES」，未發生則為「NO」，但在進行模式學習訓練之前，訓練輸入參數的選擇及資料品質的控制是影響模式訓練結果的兩項關鍵課題。目前本計畫選定影響同震山崩的物理參數為 PGA、PGV 與 d10，其相關初步門檻值設定分別為 196 gal (等同於震度 5 強)、10 cm/s (等同於震度 4) 與 10 cm；空間幾何、邊坡及測站相關參數有地震-測站之距離 (epi) 與方位角 (azi)、TS 邊坡-RS 測站之距離 (sdis)、TS 邊坡-RS 測站之方位角(sazi)、TS 走向(strike)與傾角(dip)、測站高程(elv)、TS 邊坡滑動頃角與平均坡度的差異($\Delta\varphi$; 通常邊坡發生破壞以後的滑動角會小於破壞前的平均坡度 dip 值)、目標邊坡走向(strike)與地震至目標邊坡的方位角(ez_azi)之夾角($\Delta\theta$)，關於以上參數之 sdis、$\Delta\varphi$ 初步評估對應的門檻值分別為 15 km、介於 0~8°。本計畫優先採用物理、幾何、邊坡與測站相關參數，如 PGA、PGV、d10、sdis、sazi、elv、epi、azi 與對應之類別標籤 label: YES/NO 作為訓練參數資料庫之參考 (圖 2- 11)。本計畫將根據上述參數資料進行盒鬚圖統計分析，初探足以區分標籤類別 YES 及 NO 的關鍵參數資料後，進一步利用上述關鍵

參數資料庫進行機器學習決策樹模式訓練，從決策樹分支規則可以得知不同的參數特徵值對於同震山崩判識的重要性(權重)，亦可以自動決定上述關鍵參數之門檻值。實際上，單一重要關注邊坡 TS 將有數個代表測站 RS 資料可輸入決策樹模型，同時可辨別目標邊坡是否發生破壞，本計畫針對單一邊坡計算其模式判識結果為同震山崩發生之數量除以總代表測站之數量，即代表該重要關注邊坡之發生同震山崩的可能性，將此可能性(數量比值)命名為 *prop* (詳見第六節、即時同震山崩潛感圖資訊展示網頁平台建置)。

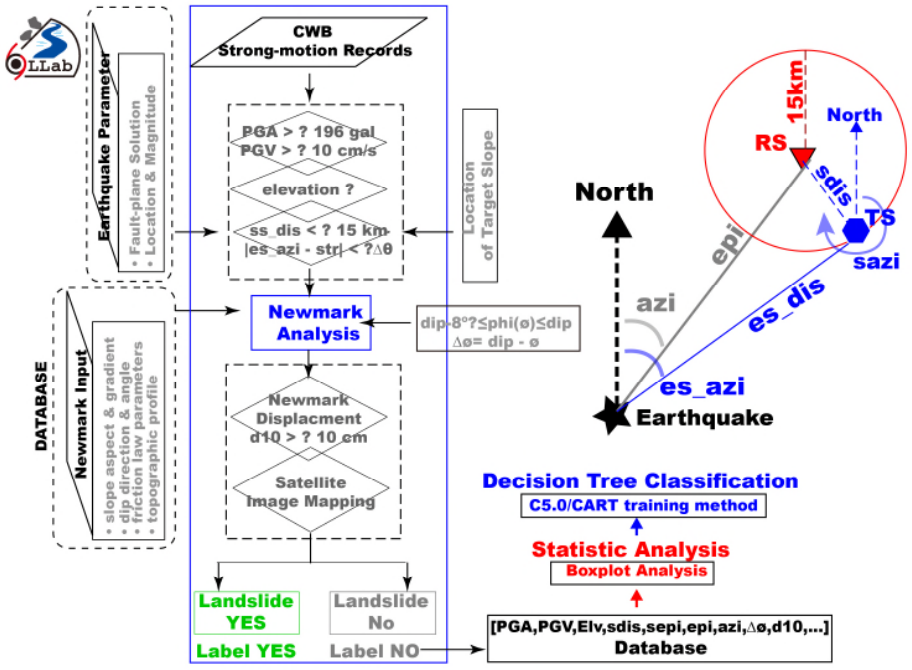


圖 2- 11 模型訓練參數分析流程圖

本計畫採用的決策樹方法分為兩種，分別為 CART (Classification and Regression Trees; Breiman et al., 1984)與 C5.0 (Quinlan, 1986)，利用訓練集(training)用來生成模型(model)，並將模型應用於測試集(testing)從而得到預測結果，將預測值與真實值進行比較，完成模型的驗證與評估。CART 方法主要利用節點(node)的吉尼指數(Gini index;

G)決定決策樹模型的最佳化分割數量，在某節點 node 完美分類所有類別的情況下則 G 為 0，若 G 值越大代表在該節點的標籤類別的分類效率不好。某節點 node 的 G 值定義如下:

$$G(node) = 1 - \sum_{i}^{N} [p(i \mid node)]^2 \quad (1)$$

其中 $p(i|\text{node})$是在節點 node 位置任意樣本屬於 i 類別標籤的機率，N 為類別標籤的總數量，本計畫為 N=2。當一個父節點被分成 j 個子節點時，此時該分割的情境下之 G 值可以表示為 Eq. (2):

$$G_{split} = \sum_{j=1}^{M} \frac{n_j}{n} G(j) \quad (2)$$

n_j 為第 j 個子節點內的樣本數，n 為父節點的樣本數，M 為最後的子節點數量，最佳模型會選擇 G_{split} 值最小的分割方式。C5.0 方法與 CART 的最大差異是在當樣本數量較少或存在大量輸入欄位資訊等問題時，其模型訓練成果會相較穩定，而且通常不需要很長的模型訓練時間。C5.0 模型最佳化的依據為 Entropy (E)，其代表數據資訊的混亂程度,若能確實將完美資料分至某類別則代表此情境下 E 值為 0 (completely homogeneous)。根據屬性資料樣本 A 歸屬在類別 i 的 E 值可以定義如下:

$$E(A) = -\sum_{i=1}^{N} p(i \mid A) \log_2 p(i \mid A) \quad (3)$$

其中 N 為類別標籤總數量，$p(i|\text{A})$代表在樣本 A 數量當中(n_A)，正確歸屬於在類別 i 的數量(n_i)的比值(n_i/n_A)，當某屬性數值資料 X 加入產生子分節點，形成屬性資料樣本 B，則 X 數值資料的加入對於標籤類別辨識的訊息增益(information gain, *InfoG*)可定義為：

$$InfoG(X) = E(A) - E(B) \quad (4)$$

C5.0 決策樹的最佳化分割準則為優先選擇具有最大訊息增益的

X 數值資料，並決定其最佳子節點數量。

臺灣地區除了 1999 年集集地震具有完整的同震山崩目錄以外，其他地震規模 M>6.0 的歷史事件皆缺乏同震山崩目錄。受限於時序衛星影像品質、大量人為判釋需求，本計畫優先選取 8 起地震事件：1994 年與 1995 年宜蘭地震、2000 年南投地震、2009 年南投地震、2010 年甲仙地震、2013 年 0327 及 0602 南投地震，進行地震前後之衛星影像判釋，了解該地震對於 175 處目標邊坡及臨近區域邊坡之影響，8 起歷史地震中有 7 起為逆衝斷層帶有走滑分量，僅有 1995 年宜蘭地震為正斷層(圖 2- 12)。

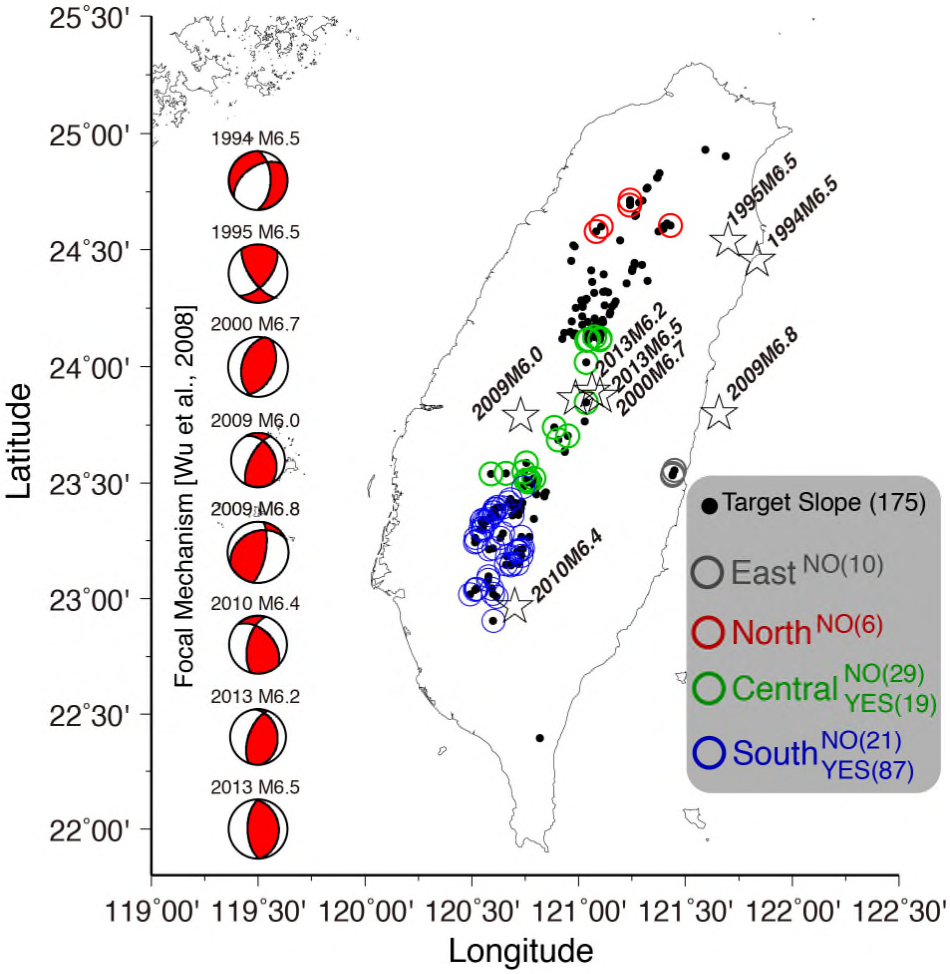


圖 2- 12 歷史地震事件分布、震源機制解與具有破壞跡象的邊坡分佈

本計畫已針對 172 筆分析數據成果(目標邊坡-代表測站之資料對)進行影像判釋，其中為不受地震影響共計 66 筆(類別標籤 NO)及受地震影響類別標籤為 106 筆(類別標籤 YES)，當中 10 筆資料在東部(NO:10)、6 筆資料在北部(NO:6)、48 筆資料在中部(NO:29、YES:19)、108 筆資料在南部(NO:21、YES:87) (圖 2- 12)。

第三節　全臺型同震山崩模型建置

在進行機器學習法模型訓練的輸入資料品質將會嚴重影響模型預估的準確率，本計畫的類別標籤總數量 N=2：YES(有受到地震影響)、NO(無受到地震影響)，資料樣本數量為 172 筆，單筆樣本資料具有 12 個數值型屬性資料。本計畫首先初探其中 10 個屬性資料: PGA、PGV、ss_dis、sazi、strike、dip、elevation、epi、azi 及 d10，透過盒鬚圖繪製釐清 2 種類別標籤在屬性資料上的差異特性，並聚焦於說明上四分位、下四分位、中位數及四分位距，圖 2- 13 為盒鬚圖分析成果。透過盒鬚圖分析本計畫發現其中 5 個屬性資料：PGA、PGV、strike、epi、azi 在 2 個標籤類別中具有較顯著的差異存在，標籤 YES 的 PGA 中位數為 282.8 gal 且四分位距為 58.1 gal，標籤 NO 的 PGA 中位數 256.4 gal 且四分位距為 57.1 gal，其中下四分位數剛好等於標籤 YES 的 PGA 中位數；標籤 YES 的 PGV 中位數為 22.7 cm/s 且四分位距為 10.6 cm/s，標籤 NO 的 PGV 中位數為 15 cm/s 且四分位距為 11.7 cm/s；標籤 YES 的 epi 中位數為 30.5 km 與標籤 NO 的 epi 中位數為 31.6 km 的距離相似，但是其在上四分位數分別為 32.6 km 及 42.1 km，表示代表測站(RS)須離地震距離較近其對應之目標邊坡(TS)易容易受到地震影響。若聚焦於標籤類別 YES 來說明 strike 與

azi 屬性資料特性，本計畫發現 strike 中位數為 N35°E(邊坡傾向為 125°)，其傾向近乎平行於地震至代表測站之方位角中位數為 323°，此現象與 Rault et al. (2020)成果相吻合，主要原因為當邊坡傾向平行於地震波入射方位則在該邊坡場址會有地動振幅放大的效應。

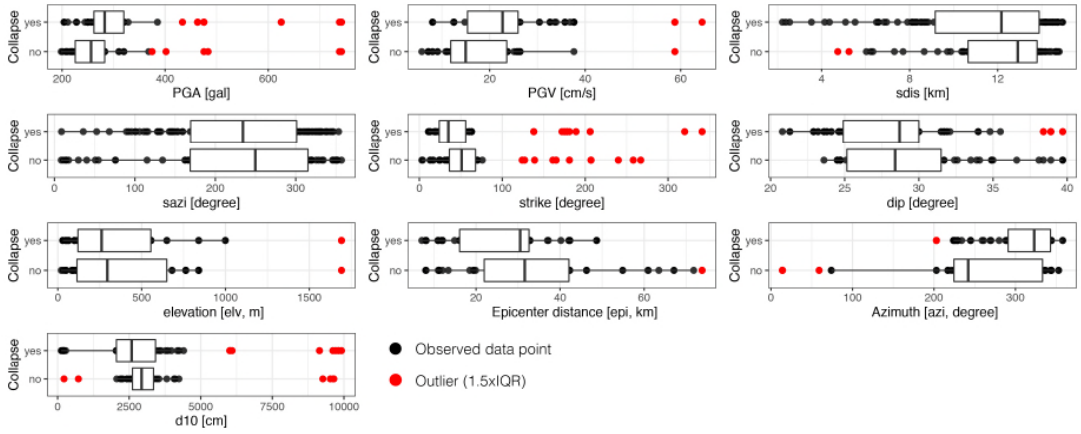


圖 2- 13 盒鬚圖分析成果

根據盒鬚圖分析成果本計畫後續僅使用 5 個屬性資料：PGA、PGV、strike、epi、azi 來進行決策樹模型訓練。由於標籤類別 YES 樣本數量為 106 且類別 NO 樣本數量為 66，故本計畫將於 2 個類別中隨機抽樣 50 個樣本資料，共計 100 個樣本數來作為訓練集，剩餘 72 樣本數量作為測試集。CART 模型成果顯示為第一節點為 PGA 且門檻值為 259 gal、第二節點為 PGV 且門檻值為 19 cm/s、第三節點為 strike 且門檻值為 47°(圖 2- 14)，上述節點門檻值皆可以與盒鬚圖分析成果互相呼應(圖 2- 13)。表 2- 2 顯示為 CART 模型訓練集及測試集混淆矩陣結果，其測試集與訓練集的準確率(矩陣對角線數量總和除以總樣本數量)分別為 75%及 72%。進一步再使用 C5.0 法與相同的訓練集樣本進行模型訓練，其模型準確率可以提高至 85%，但是在測試集樣本資料的準確率表現僅有 68%，代表 C5.0 模型在模型訓練上有過度擬合現象(over fitting)，表 2- 2 顯示為 C5.0 模型訓練集及測試集

混淆矩陣結果，圖 2- 15 顯示過度擬和之 C5.0 決策樹模型。因此，本計畫建議使用 CART 決策樹模型成果作為全臺型同震山崩模型。

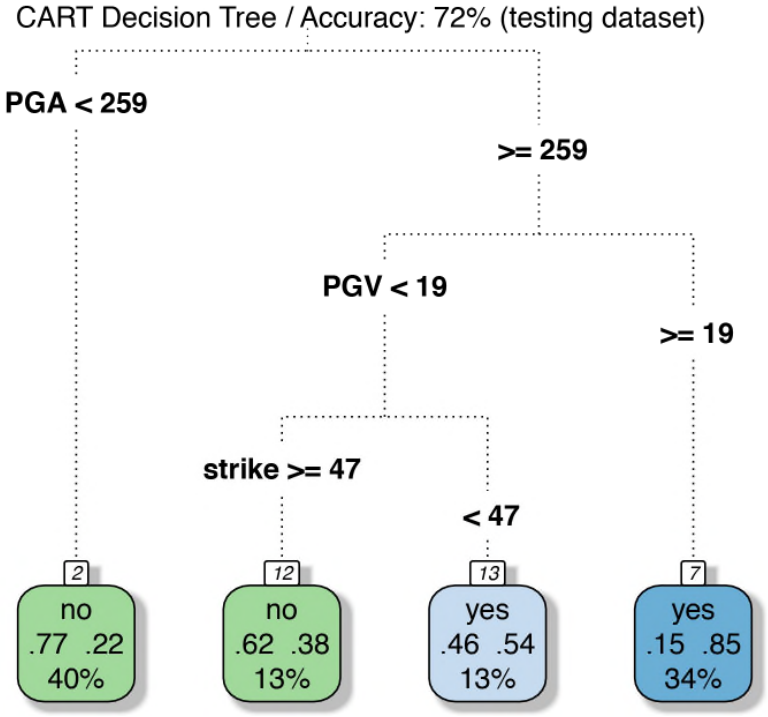


圖 2- 14 CART 決策樹模型

表 2- 2 CART 及 C5.0 模型混淆矩陣

CART Training

		Predicted NO	Predicted YES
Observed	NO	***39***	11
	YES	14	***36***

CART Testing

		Predicted NO	Predicted YES
Observed	NO	***12***	04
	YES	16	***40***

C5.0 Training

		Predicted NO	Predicted YES
Observed	NO	***47***	03
	YES	12	***38***

C5.0 Testing

		Predicted NO	Predicted YES
Observed	NO	***13***	03
	YES	20	***36***

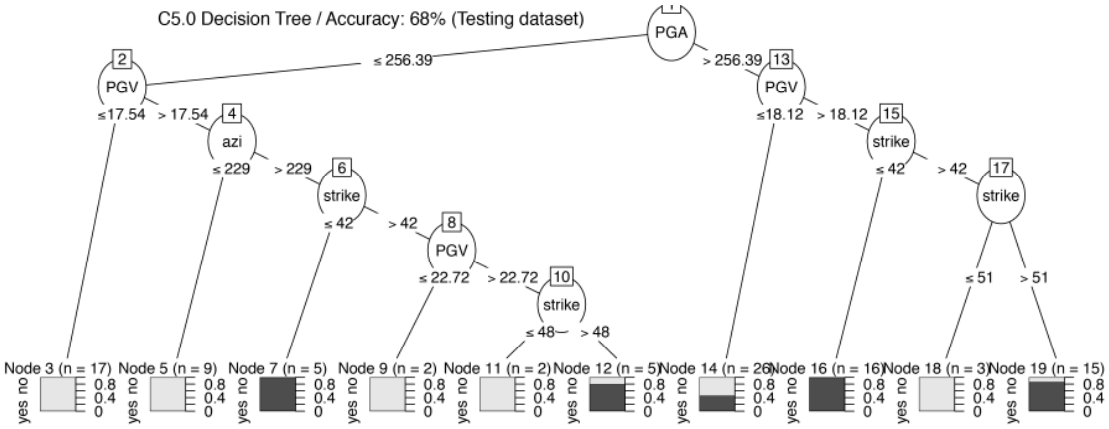


圖 2- 15 C5.0 決策樹模型

第四節 區域型同震山崩模型建置

由於本計畫 172 筆樣本數量分別受控於不同芮氏規模、震源機制、震源位置的歷史地震事件之影響，可能導致全臺型同震山崩模型的準確率無法達到 80%以上，因此本小節將採用臺灣分區樣本進行模型建置，如圖 2- 12 所示，共計可以分區為臺灣北、中、南、東，其中由於北部及東部樣本資料的標籤類別中僅有 NO 標籤，因此針對北部及東部本計畫僅進行盒鬚圖分析來說明未受地震影響的樣本數據之統計量特徵；對於南部及北部樣本資料除了進行盒鬚圖分析以外，同時亦建置中部及南部的決策樹模型，受限於可訓練的樣本數量有限，在此將所有樣本資料作為訓練集來建置模型使用。

北部區域樣本數量僅有 6 筆(標籤類別皆為 NO)，盒鬚圖分析(圖 2- 16)結果顯示 PGA 上下四分位數分別為 226.2 gal 及 208.6 gal 皆小於全臺型 CART 決策樹模型第一節點 PGA 的門檻值(259 gal；圖 2- 14)。相較於北區區域，東部地區的樣本數量為 10 筆(標籤類別皆為 YES)，其 PGA 上下四分位數分別為 282.6 gal 及 232.7 gal、PGV 上下四分位數分別為 23.74 cm/s 及 15.86 cm/s 皆具有相當高的樣本比例滿足全臺型 CART 決策樹模型的門檻值(圖 2- 17)，但其實際上 10 筆

樣本資料之標籤類別皆為不受地震影響。上述現象代表同震山崩辨識模型應該要進行分區建置與管理，才能提升模型的適用性與符合防災之應用需求。

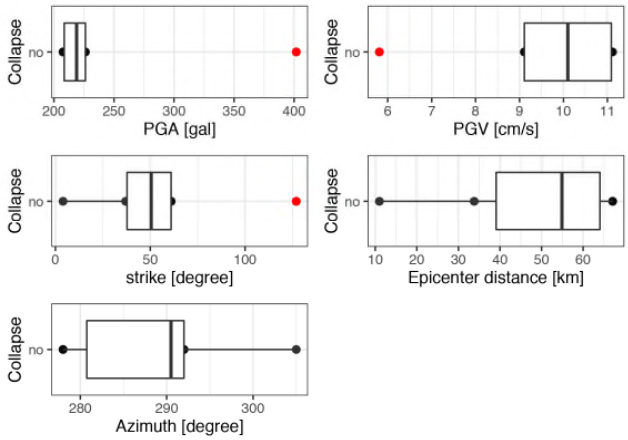


圖 2- 16 北部區域樣本盒鬚圖分析成果

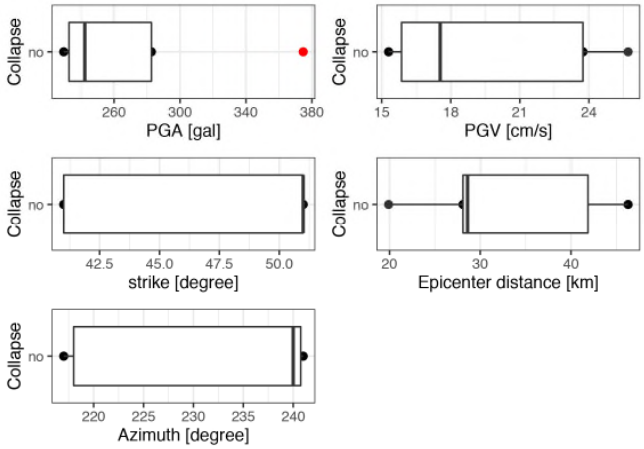


圖 2- 17 東部區域樣本盒鬚圖分析成果

中部地區樣本數量為 48 筆，其中標籤類別 YES 為 19 筆、NO 的為 29 筆。在盒鬚圖分析成果中比較特殊的地方是其兩個標籤類別在 PGA 之上下四分位數之間無任何的重疊部分，其餘屬性資料 PGV、strike 與 azi 在 2 個標籤類別中亦有相當高的差異性存在(圖 2- 18)。本計畫優先使用 CART 法進行模型訓練，結果顯示決策樹僅需要 PGA 屬性參數(單一節點)即可達到模型準確率 81.25%(圖 2- 19)，表 2- 3 為 CART 模型評估之混淆矩陣。再者，使用 C5.0 法進行模型訓練，

結果顯示各節點使用之屬性資料分別為 PGV、azi、strike 及 PGA(分類權重由高至低)，獲得屬性資料主要門檻值為 PGV=26.4 cm/s、azi=74°、strike=25°/43°及 PGA=433.7 gal，模型準確度高達 95.8%(圖 2- 20)，表 2- 3 為 C5.0 模型評估之混淆矩陣。本計畫建議臺灣中部地區同震山崩模型將採用 C5.0 決策樹模型。

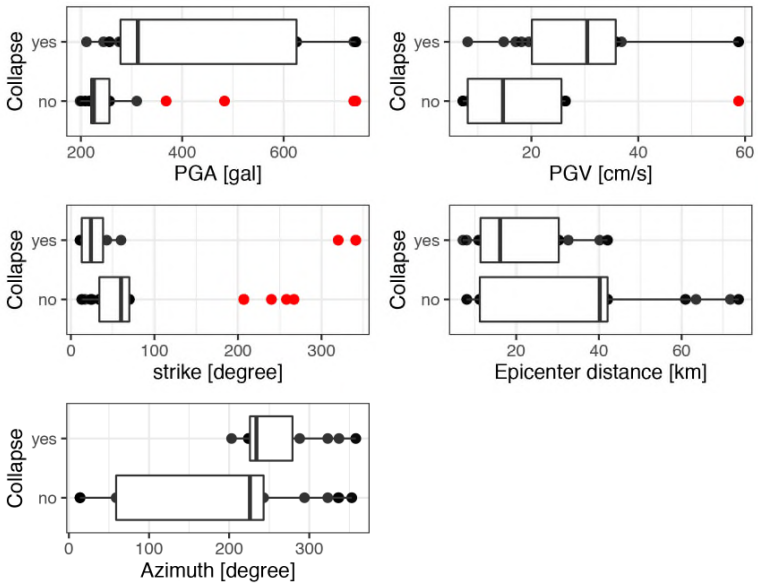


圖 2- 18 中部區域樣本盒鬚圖分析成果

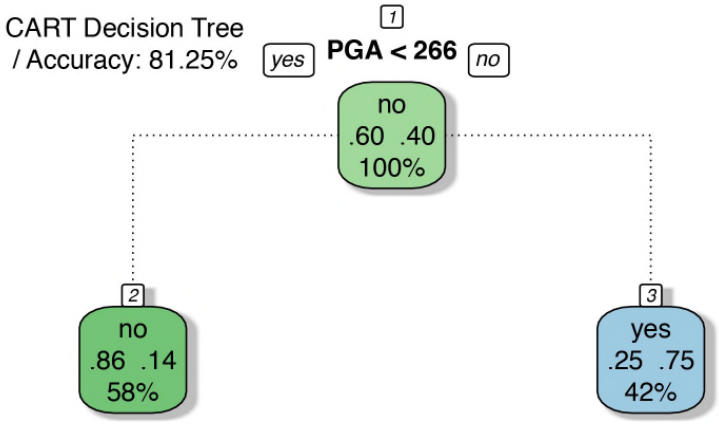


圖 2- 19 中部區域 CART 決策樹模型

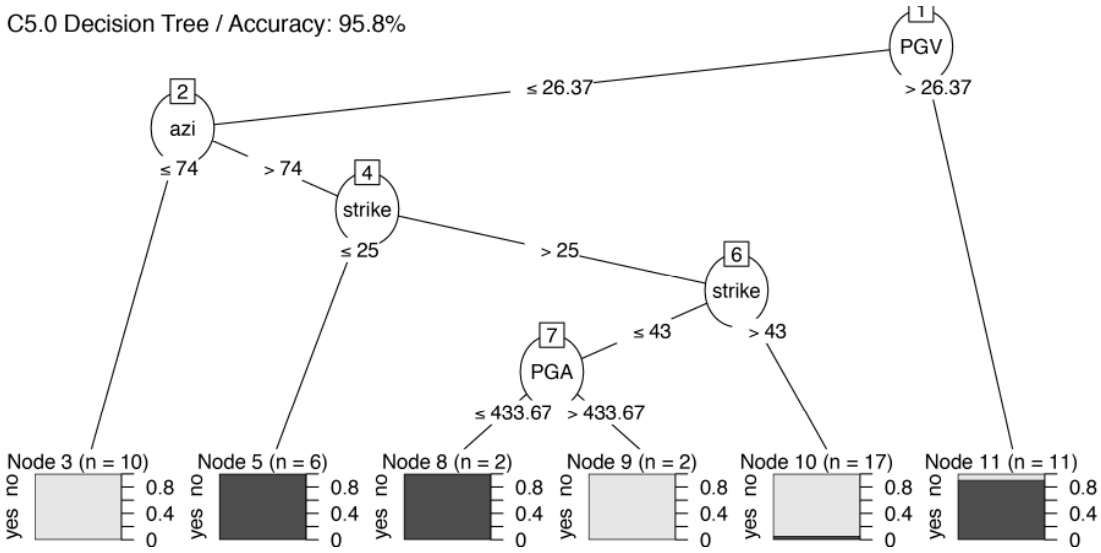


圖 2- 20 中部區域 C5.0 決策樹模型

表 2- 3 中部及南部地區之 CART 及 C5.0 模型混淆矩陣

Central

CART		Predicted	
		NO	YES
Observed	NO	***24***	05
	YES	04	***15***

C5.0		Predicted	
		NO	YES
Observed	NO	***28***	01
	YES	01	***18***

South

CART		Predicted	
		NO	YES
Observed	NO	***06***	15
	YES	02	***85***

C5.0		Predicted	
		NO	YES
Observed	NO	***06***	15
	YES	00	***87***

南部地區樣本數量為 108 筆，其中標籤類別 YES 為 87 筆、NO 的為 21 筆。在盒鬚圖分析成果中比較特殊的地方是僅有在 strike 屬性資料有顯著的差異(圖 2- 21)。在此與中部地區模型訓練順序相同，優先使用 CART 法進行模型訓練，結果顯示決策樹僅需要 strike 屬性參數(雙節點)即可達到模型準確率 84%，表 2- 3 為 CART 模型評估之

混淆矩陣。再者，使用 C5.0 法進行模型訓練，結果亦顯示 strike 屬性參數亦可達模型準確率 86.1%，表 2- 3 為 C5.0 模型評估之混淆矩陣。CART 及 C5.0 決策樹模型所使用的 strike 屬性資料門檻值分別為 44°/54°及 43°/48°，代表 2 種訓練方法皆可得到穩定收斂的結果(圖 2- 22 與圖 2- 23)。南部決策樹模型與其他本計畫訓練的模型最大差異在模型不仰賴 PGA 及 PGV 相關地動參數來進行標籤類別歸屬判斷，本計畫認為主要的原因為本計畫使用的南部地區之樣本資料受到 2009 年莫拉克颱風的影響甚大，未來應持續蒐集近年來的同震山崩目錄，並重新訓練非受控於莫拉克颱風影響之南部地區的同震山崩模型。本計畫建議臺灣南部地區暫時使用 C5.0 決策樹模型成果，從混淆矩陣可以看出 C5.0 決策樹主要改善 CART 決策樹將 2 個類別為 YES 的樣本歸屬於類別 NO，上述狀況是在防災應變上相對不容許犯的錯誤，代表有邊坡受到地震影響而發生破壞跡象，但是模型卻判斷為該邊坡不受地震影響。

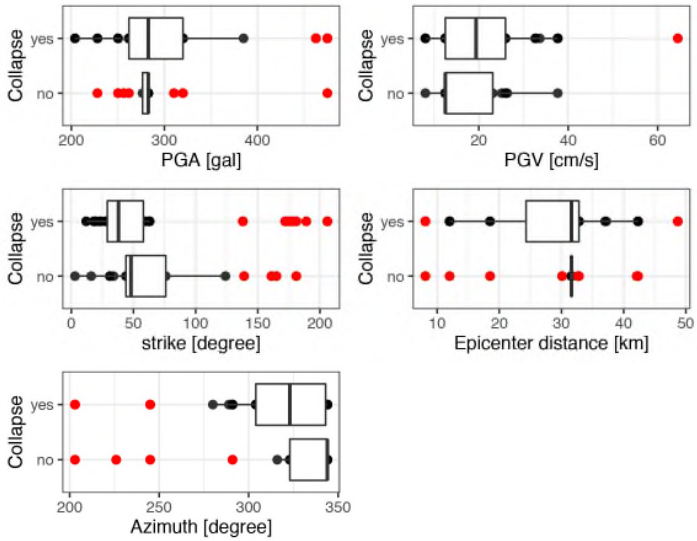


圖 2- 21 南部區域樣本盒鬚圖分析成果

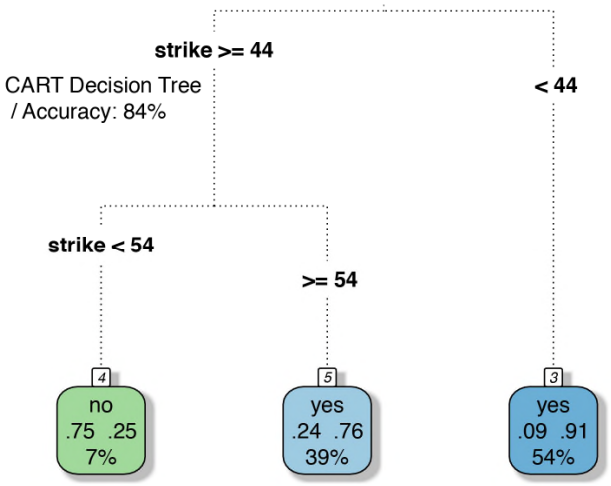


圖 2- 22 南部區域 CART 決策樹模型

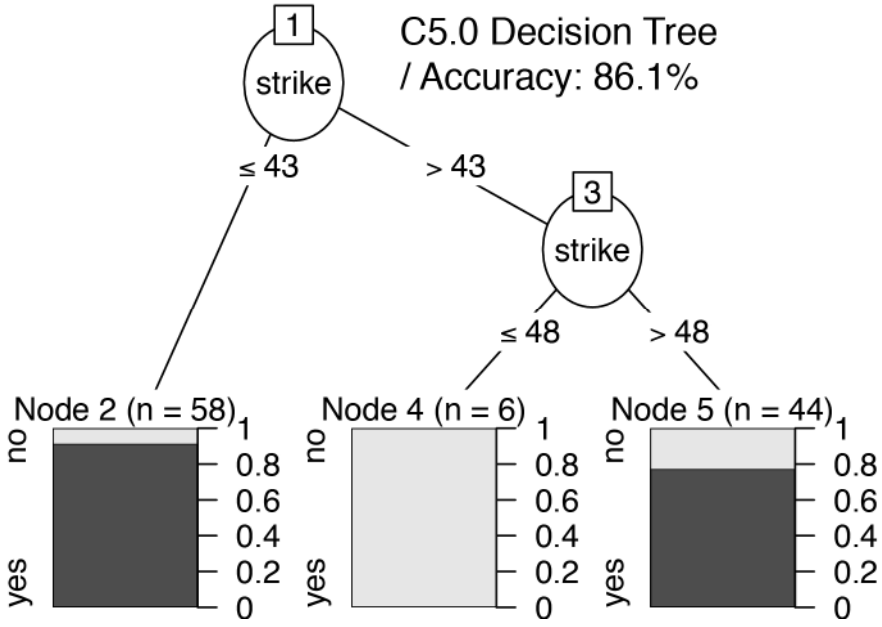


圖 2- 23 南部區域 C5.0 決策樹模型

本計畫成功訓練同震山崩決策樹模型，其中可以分為全臺型同震山崩模型: CART 決策樹模型(準確率=72%)、中部地區同震山崩模型: C5.0 決策樹模型(準確率=95.8%)及南部地區同震山崩模型: C5.0 決策樹模型(準確率=86.1%)。

第五節　近即時 Newmark 分析方法檢驗與應用

今年度(110) 4 月 18 日第 025 號與第 026 號地震(圖 2- 24)，本計畫利用已安裝架速度計之花蓮縣-瑞穗鄉-D024 內崩塌(舞鶴崩塌地)，蒐集之地動加速度測試本計畫之近即時 Newmark 分析方法，分析選擇使用共三站的數據，分別為鄰近地震震央的水璉站(SHUL)、鄰近舞鶴崩塌地的紅葉站(EHY)以及舞鶴崩塌地內安裝的加速度計(Palert^{+}03)的地震加速度歷時(圖 2- 25)。

Newmark 分析結果於圖 2- 26 顯示不同地震使用不同測站數據所分析出的塊體下滑加速度(黑線)、滑移速度(綠線)、永久位移(藍線)和摩擦係數(紅線)，於第 025 號地震(EQ#25)以 SHUL 站和 Palert^{+}03 站之加速度歷時僅產生約 2 至 4 公分的永久位移，而 EHY 站之加速度歷時則未產生永久位移。於第 026 號地震(EQ#26)以 SHUL 站和 Palert^{+}03 站之加速度歷時僅產生約 18 至 53 公分的永久位移，而 EHY 站之加速度歷時仍未產生永久位移，以上為初步測試結果。由觀測加速度紀錄值的比較可以觀察到雖然紅葉強震站(EHY)與 Palert^{+}03 站皆距離震央 40 km 以上，但是 Palert^{+}03 站的加速度資料明顯大於紅葉站，造成以上的差異可能為(1)崩塌區域內的淺部崩積層材料造成的振幅放大作用(場址效應)、抑或(2)地形幾何效應所致，本計畫將透過場址不同點位測站的加速度紀錄來進一步探討可能的場址與地形效應，並提出相關的修正方案。因為上述效應將對於利用強地動紀錄研究同震山崩發生與否具有重大的影響力。

第025號
4月18日22時11分 規模 5.8 花蓮縣政府西南方 19.2 公里 (位於花蓮縣壽豐鄉)

第026號
4月18日22時14分 規模 6.2 花蓮縣政府西南方 20.2 公里 (位於花蓮縣壽豐鄉)

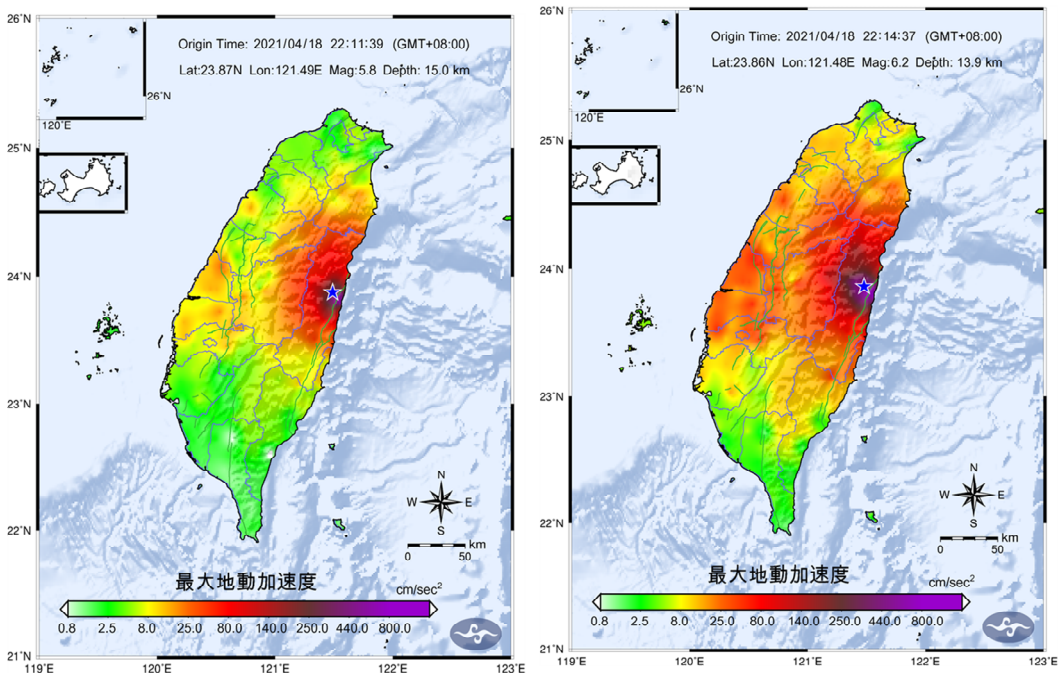


圖 2- 24 110 年 4 月 18 日第 025 號與第 026 號地震

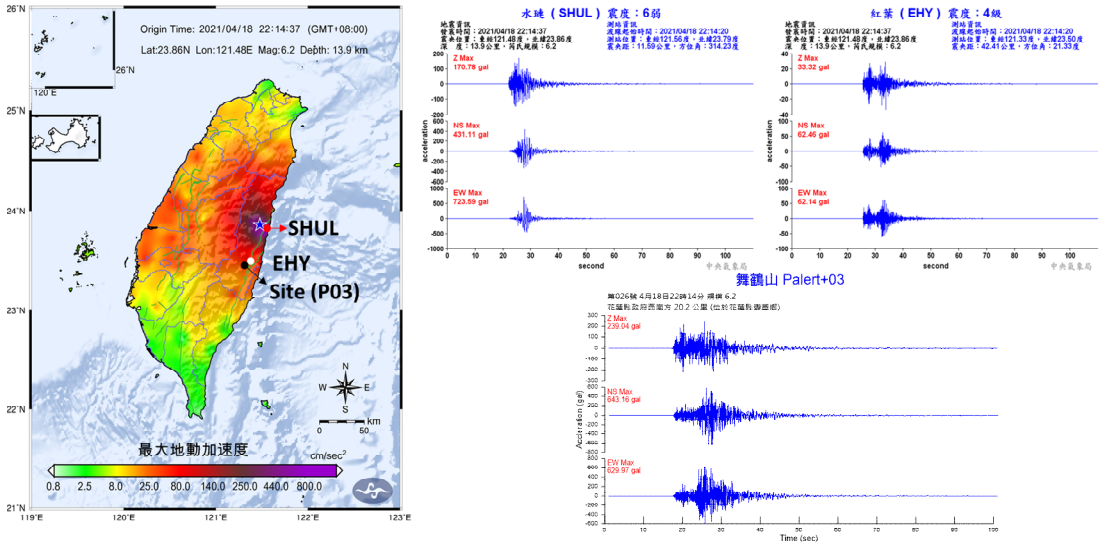


圖 2- 25 以第 026 號地震為例(規模 6.2，瑞穗震度 4 級)與採用測站位置分布。水璉站(SHUL)、紅葉站(EHY)、舞鶴崩塌地內(Palert+03)之加速度歷時

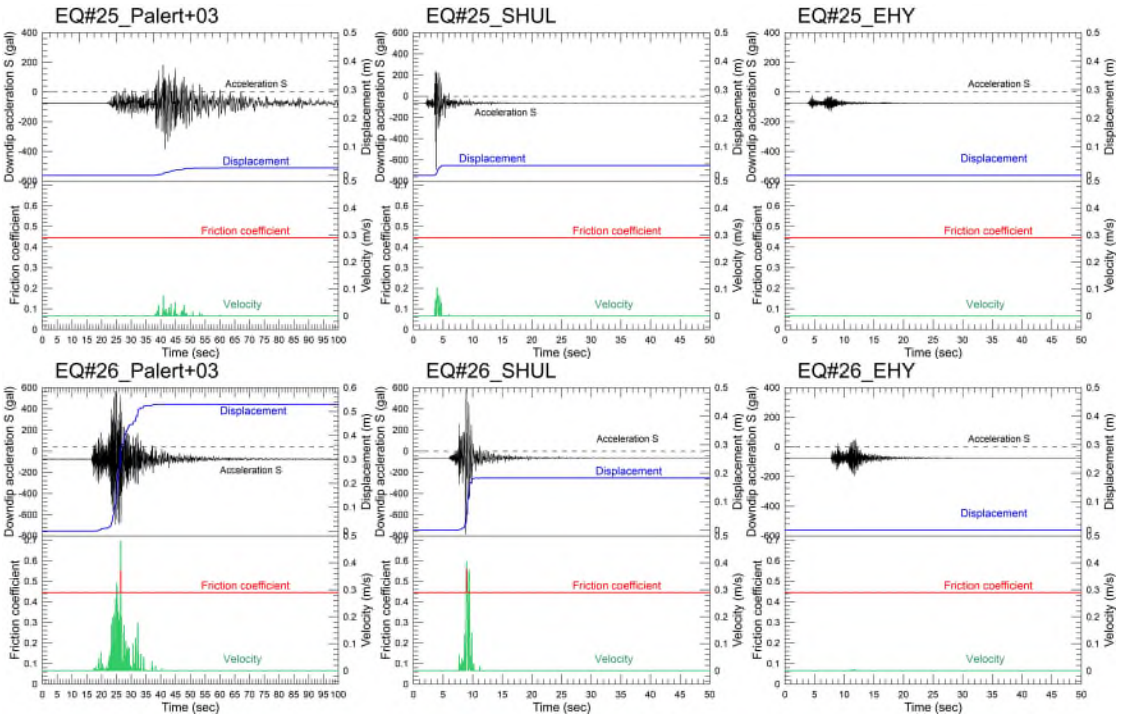


圖 2- 26 110 年 4 月 18 日第 025 號與第 026 號地震之 Newmark 分析結果

為了探討在崩塌區域內部的加速度測站可能的地動振幅放大倍率，本計畫選了 6 筆地震規模大於等於 5.5 的地震事件(圖 2- 27)，並分別計算於舞鶴場址內部測站(03-Palert+、BH4-Palert+)、場址外北坡坡頂(B1-Palert+)及場址對岸林道(OS-Palert+)之三軸向 PGA 的平方和後開根號，選定 B1 測站為參考站(水平軸變數資料)分別與其他測站 PGA 資料(垂直軸變數資料)進行線型回歸分析，結果顯示 03、BH4 及 OS 測站資料的斜率分別為 1.6302、1.6252 及 0.8361(圖 2- 28)，代表場址內的測站資料相較於場址外山頂有約 1.6 倍的振幅放大倍率，亦呼應為何 03 測站的加速度振幅值會大於紅葉測站(EHY)。值得注意的是，OS 對岸測站的地動振幅趨勢上會小於場址外山頂站(斜率小於 1)，造成上述的振幅差異可能是受到地形幾何效應影響。然

而，線型回歸分析成果當中在 OS-B1 的資料點擬合程度相對較差，可能的原因為地震波入射至測站方位與崩塌場址的坡向之關係亦會影響地動振幅值，然而測站 OS 位置將不受上述效應影響。

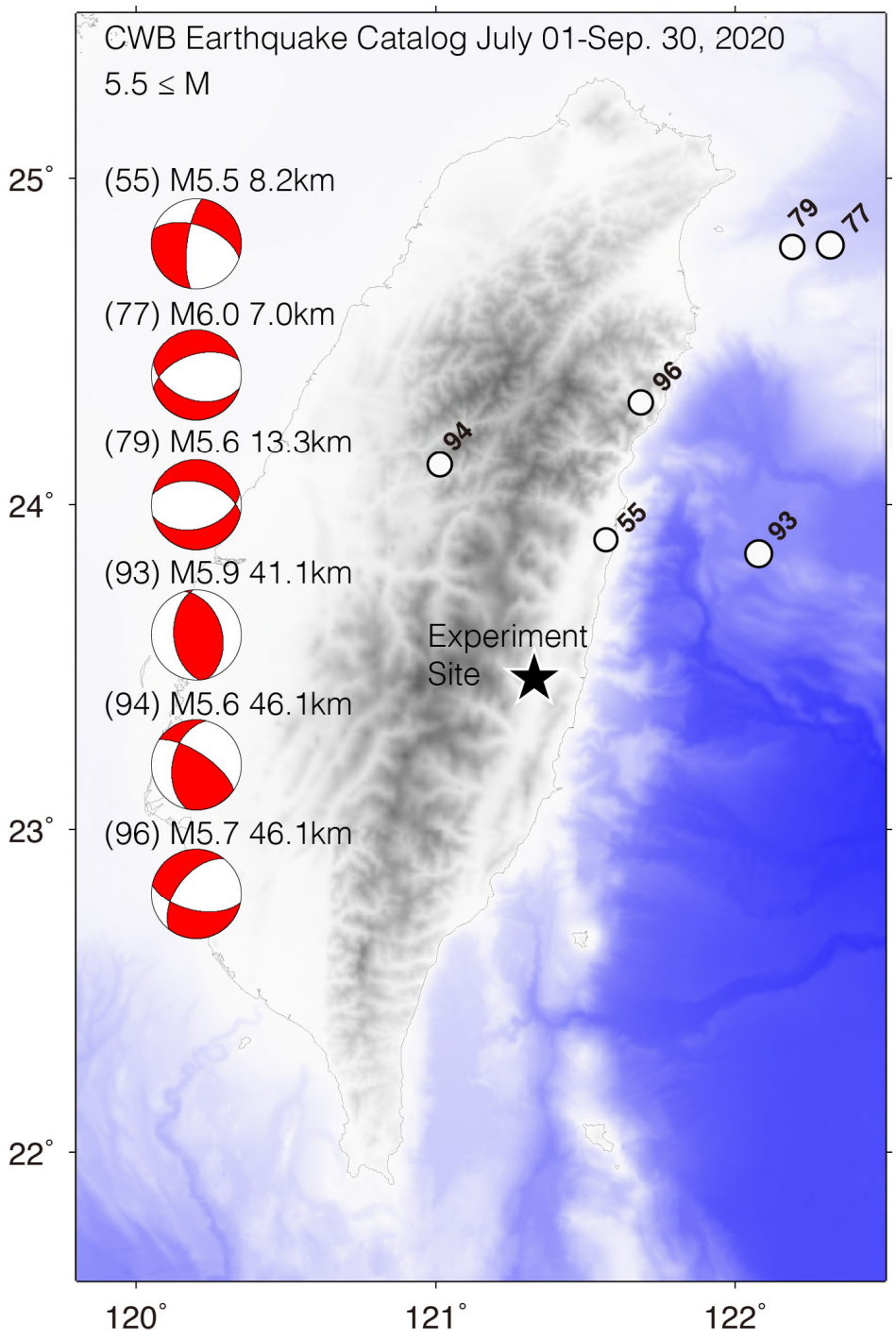


圖 2- 27 地震分佈與震源機制解，數字代表氣象局地震編號

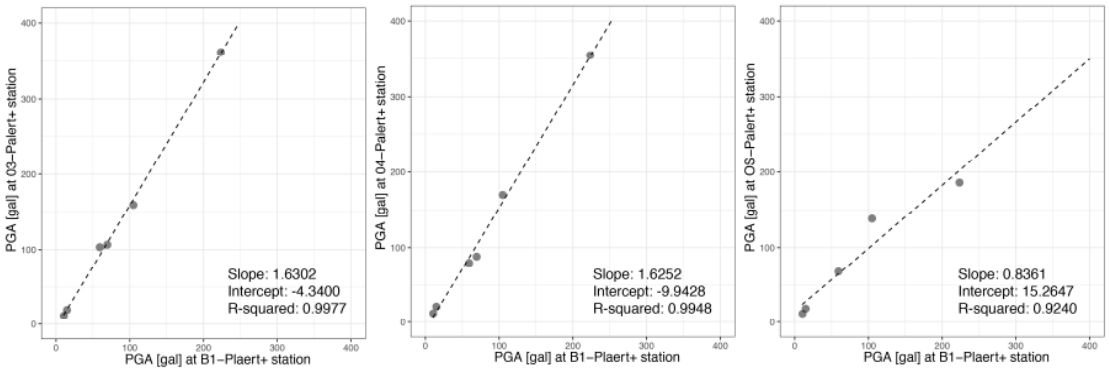


圖 2- 28 PGA 回歸分析

第六節　即時同震山崩潛感圖資訊展示網頁平台建置

本計畫已完成「即時同震山崩潛感圖資訊展示網頁平台(CoSeismic Susceptibility map Webpage, CSS-Web)」前台資訊呈現及初步後台資料庫管理系統之建置，前台資訊可以分為(1)首頁、(2)歷史地震事件及(3)即時資訊展示。首頁將展示 TSMIP(臺灣強地動觀測網)、即時 TSMIP 測站及代表測站(representative station, RS)之分佈位置與測站資訊(圖 2- 29)，另外亦呈現目標邊坡(target slope, TS)分佈情形與其相關資訊包含 Newmark 分析輸入參數與邊坡剖面圖資(圖 2- 30 與圖 2- 31)；歷史地震事件將以本計畫已完成統計分析與模型訓練的 8 起歷史地震事件為主(1994 年 0605、1995 年宜蘭地震、2000 年 0610、2009 年 1105、2009 年 1219、2010 年甲仙地震、2013 年 0327 南投地震、2013 年 0602 南投地震)，頁面呈現上為 8 起地震事件分布情形且需涵蓋地震名稱、發生時間、規模大小及地震位置與深度，若選取某歷史地震事件後將呈現目標邊坡(TS)分佈情形，該目標邊坡皆須滿足至少一個邊坡對應之代表測站(RS)時序強地動資料滿足

PGA>196 gal、d10>10 cm，因此當網頁使用者持續點選任一處 TS 時則會顯示該 TS 對應之所有個 RS 測站，此時顯示之 RS 測站將會有以下三種不同測站分析結果:

1.未滿足 PGA>196 gal 或 d10>10 cm

2.滿足 PGA>196 gal、d10>10 cm 且同震山崩模型判別標籤類別為 NO

3.滿足 PGA>196 gal、d10>10 cm 且同震山崩模型判別標籤類別為 YES

若滿足上述項目 2 的測站數量為 N、項目 3 的測站數量為 M，本計畫可以計算數量比例(proportional, prop)為 M/(N+M)，將其 *prop* 等分四個區間 0≤prop<0.25(綠色)、0.25≤prop<0.5(黃色)、0.5≤prop<0.75(橙色)及 0.75≤prop<1(紅色)，以紅橙黃綠燈號作為同震山崩的潛勢等級，依序為高中低及一般情況。當 M+N 數量小於等於 2 時且 M 大於等於 1 時，則判別為高危險等級(紅燈)，其他狀況則為一般等級(綠燈)；若 M+N 數量等於 3 時，M 大於等於 2 時則為高危險等級(紅燈)，其他狀況則為一般等級(綠燈)。



圖 2- 29 CSS-Web 首頁選單展示範例



圖 2- 30 CSS-Web 目標邊坡分析參數展示範例

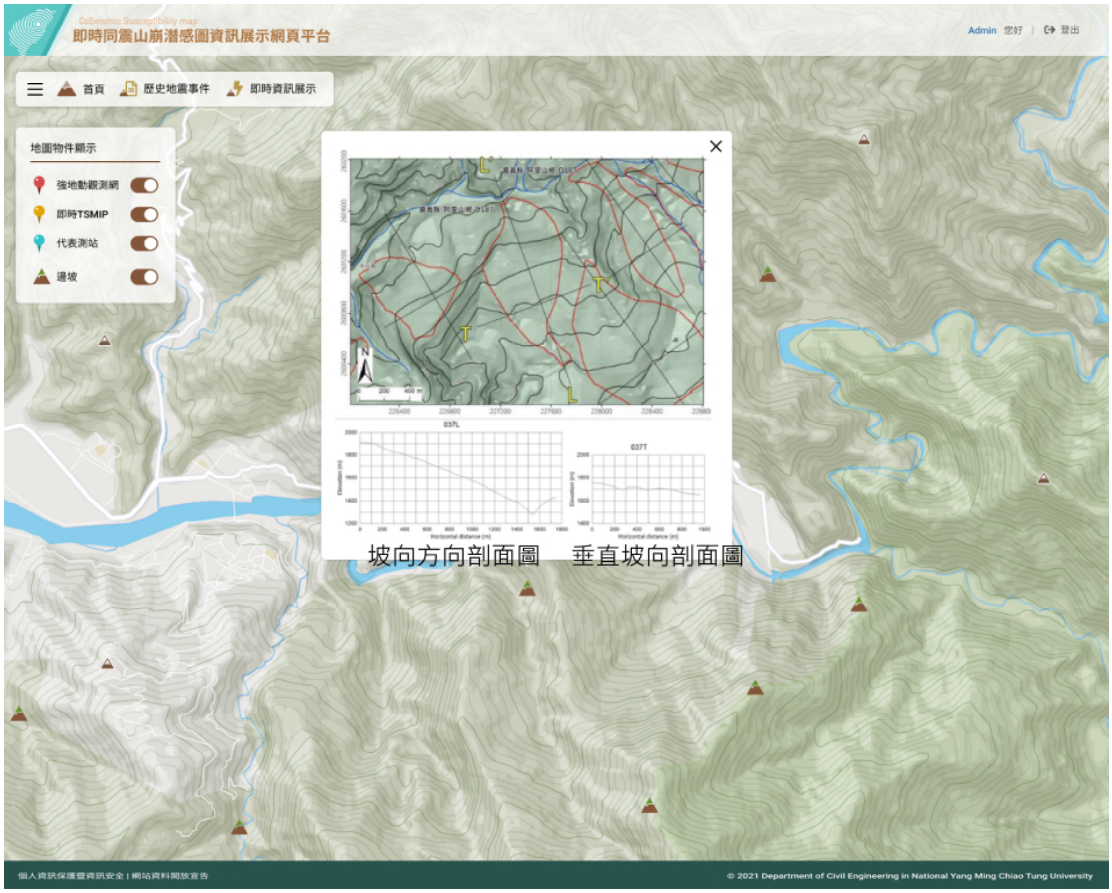


圖 2- 31 CSS-Web 目標邊坡剖面圖資範例

以 2016 年 0206 美濃地震為案例進行說明如何繪製同震山崩潛感圖(CSSMap、圖 2- 32)，全臺共計 630 個 TSMIP 測站受到美濃地震觸發，其中強地動資料分析程序篩選出滿足 PGA>196 gal 之測站，並以測站為中心半徑 15 km 進行搜尋鄰近之目標邊坡 TS，共計有 90 筆代表測站-目標邊坡資料對(RS-TS pair)，針對每個 RS-TS 資料對進行 Newmark 分析並以 d10>10 cm 進行分析結果篩選，最終僅有 80 筆 RS-TS 資料對滿足 d10 門檻值條件。本計畫將此80 筆資料對作為同震山崩模型(由於地震發生位置屬於臺灣南部地區，目前本計畫南部地區之 C5.0 決策樹模型為受到莫拉克颱風影響，在此使用全臺型 CART 決策樹模型成果進

行辨識)之輸入數據集(使用資料屬性為 PGA、PGV、epi、azi、strike)即可獲得每組資料對之類別標籤判別成果。結果顯示透過 18 個 RS 測站資料模型辨識 30 處目標邊坡中有 15 處為一般情況、14 處為高度危險、1 處為中度危險。以目標邊坡 Slope ID 113 為例，其中模型判斷 N=2 (KAU020、KAU068)、M=4 (CHY061、CHY062、CHY063、CHY089)，故 *prop*=0.67 可以辨別為中度危險等級。

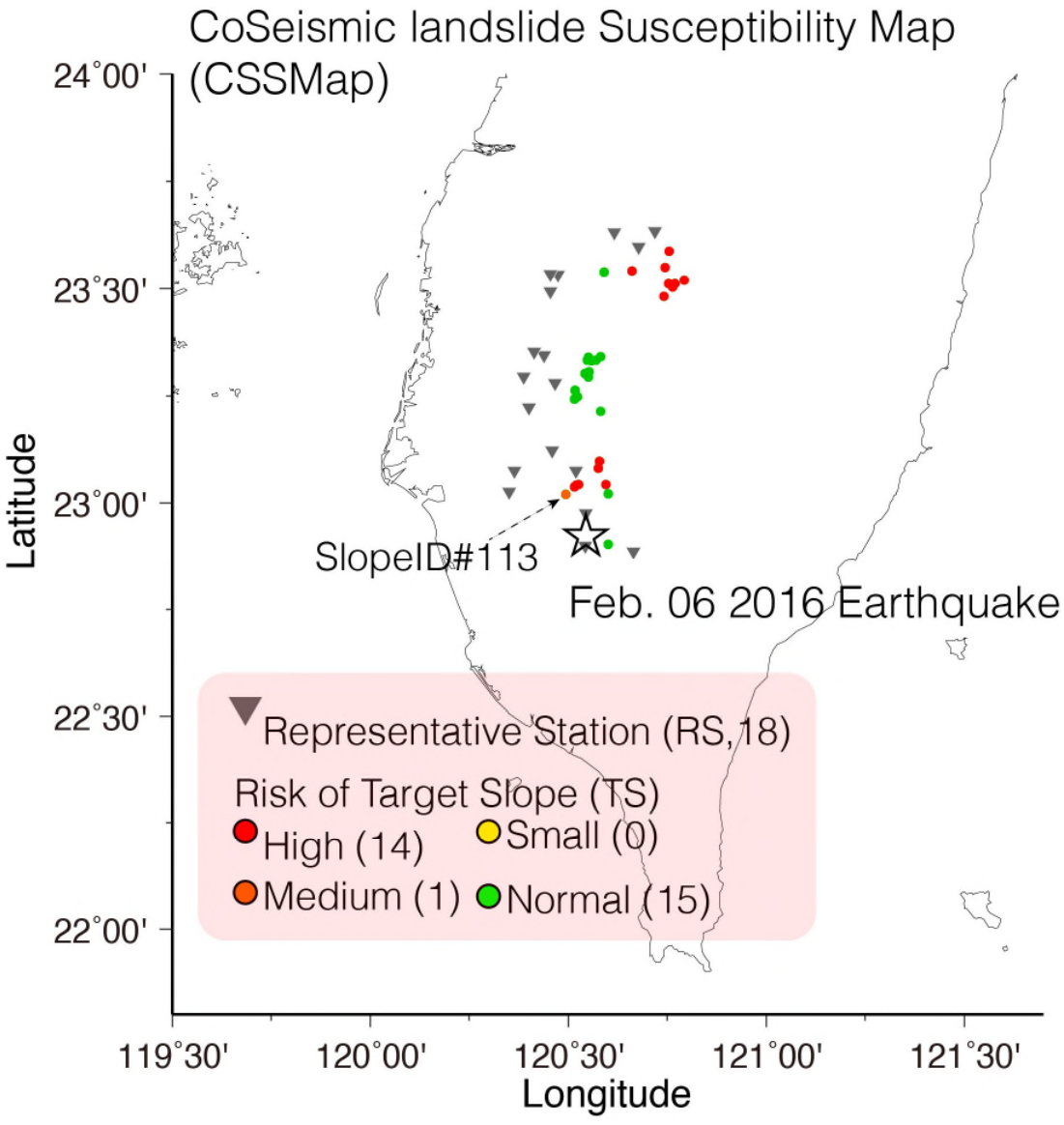


圖 2- 32 同震山崩潛感圖範例(CSSMap)

在即時網頁頁面中將展示目前最新地震事件之分析成果，包含地震位置(動畫閃爍、圖 2- 33)、同震山崩潛感分佈(觸發的目標邊坡將以紅橙黃綠顏色來呈現危險度等級)，經網頁使用者同意，將會顯示使用者目前的地理位置。即時頁面亦會呈現各即時強地動測站資料(以代表測站為優先)之妥善狀況，以顏色區分資料傳輸是否正常或異常。

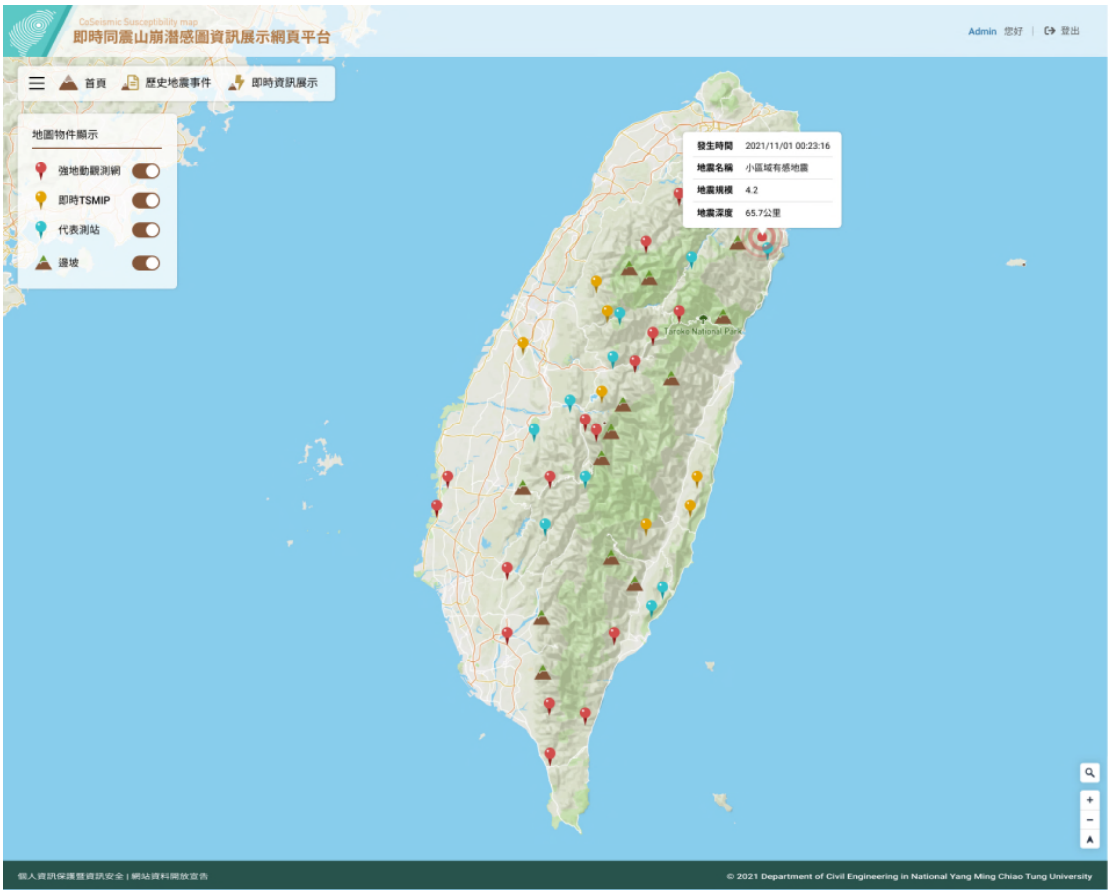


圖 2- 33 CSS-Web 即時資訊展示範例

第三章　工作進度與交付項目

第一節　計畫甘特圖

工作項目 \ 月份		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
蒐集剪動材料強度之相關資料	文獻蒐集與回顧		■	■									
	更新資料庫				■	■	■						
	資料庫內容檢核							■	■	■			
	計畫成果報告撰寫										■	■	■
建置潛在大規模崩塌目錄與其相關坡地單元之參數(如坡度、坡向)	挑選具平面型破壞之大規模崩塌目錄		■	■									
	更新與建置崩塌目錄參數資料庫				■	■	■						
	資料庫內容檢核							■	■	■			
	計畫成果報告撰寫										■	■	■
近即時Newmark位移分析方法之建立	方法流程檢驗		■	■									
	方法流程應用				■	■	■						
	成果驗證							■	■	■			
	計畫成果報告撰寫										■	■	■
震波式同震山崩之分析方法流程與案例分析(ICOL)發展與測試	方法流程檢驗		■	■									
	方法流程應用				■	■	■						
	成果驗證與案例分析							■	■	■			
	計畫成果報告撰寫										■	■	■
模擬近即時同震山崩潛感圖之製作	製作方法建立		■	■									
	潛感圖製作				■	■	■	■	■	■			
	計畫成果報告撰寫										■	■	■
發展同震山崩潛感圖之展示網頁平台(CSS-Web)	展示網頁平台發展		■	■									
	展示網頁平台測試				■	■	■	■	■	■			
	計畫成果報告撰寫										■	■	■
真實案例分析與近即時監測系統之成果評估	評估近即時監測系統和真實案例							■	■	■			
	計畫成果報告撰寫										■	■	■
崩塌區現地之補充調查工作	現地調查工作							■	■	■			
	計畫成果報告撰寫										■	■	■
報告書	工作執行計畫書				●								
	期中報告書							●					
	期末報告書											●	
	成果報告及會計報告												●
請款進度／查核點					●			●					
預定進度累積百分比(%)		0	13	25	35	45	56	68	80	93	95	97	100
實際進度累積百分比(%)		0	13	25	35	45	50	60	70	80	95	97	

第二節　計畫交付項目

本計畫透過各項地質地形分析、塊體位移運動分析、地動訊號處理、分析與模擬之研究發展，將可針對潛在大規模平面型破壞山崩目錄為對象提供同震山崩潛感圖，由歷史地震事件驗證方法，依據臺灣強地動地震網即時地動數據進行即時解算，透過網頁平台界面發布近即時分析成果。本計畫期末階段具體產出及成果如下：

●同震山崩地動訊號分析方法(ICOL)

●模擬近即時同震山崩潛感圖之製作

●近即時同震山崩潛感圖資訊展示網頁平台建置 (CSS-Web)

●真實案例分析與近即時監測系統之成果評估

表 3- 1 計畫重要檢核點管制表

檢核點	預計日期	交付項目	數量
1	04 月 12 日(一)	工作執行計畫書	10 份
2	07 月 19 日(一)	期中報告書	5 份
3	11 月 15 日(一)	期末報告書	5 份
4	12 月 10 日(五)	期末審查報告	-
5	12 月 30 日(四)	成果報告書	5 份

第四章　結論及建議

第一節　結論

本計畫於期中階段持續進行近即時 Newmark-ICOL 發展，已完成檢核潛在大規模平面型破壞之山崩目錄(包含平面地質圖、縱與橫剖面)，建立 Newmark 分析所需參數檔，初步完成 10 場歷史地震測試(後續將由影像進行比對是否有崩塌跡象)。於現地案例舞鶴崩塌地進行調查、安裝監測設備，並利用今年 4 月 18 日地震事件進行測試分析。

期末階段已完成同震山崩辨識模型訓練，其中可以分為全臺型同震山崩模型: CART 決策樹模型(準確率=72%)、中部地區同震山崩模型: C5.0 決策樹模型(準確率=95.8%)及南部地區同震山崩模型: C5.0 決策樹模型(準確率=86.1%)、完成同震山崩潛感圖之製作、同震山崩潛感圖資訊展示網頁平台建置 (CSS-Web)、真實案例分析與近即時監測系統之成果評估、方法之限制性調查評估。

第二節　建議

建議內容待將分項陳述如下：

(1) 受限於影像資料與人力資源限制，本計畫僅完成 8 起歷史地震事件之影像判釋，但已足夠作為同震山崩模型之訓練集。建議未來可持續針對其餘歷史地震事件進行同震山崩判釋工作，建立更加完整

的同震山崩目錄。

(2) 目前模型訓練集使用的歷史地震事件受到莫拉克颱風影響甚大，因此本計畫成果區域型南部地區的決策樹模型可能有部分適用性的問題，應待同震山崩目錄更新至近代，再加以使用近代資料重新進行模型訓練。

(3) 地表上強地動觀測站的加速度紀錄可能受到地形效應、場址效應及震波傳遞方向與地形幾何之關聯性影響，建議加速度資料應予以修正後才能進行演算分析使用。

(4) 當同震山崩目錄完整時，可以嘗試建置以單一目標邊坡為單元之同震山崩辨識模型。

(5) 目前 CSS-Web 為初步版本，因持續透過多起有感地震事件來進行回饋分析並滾動修正系統，包含前台展示及後台資料庫管理。

參考文獻

1. 李錫堤，2011，草嶺大崩山之地質與地形演變，中華水土保持學報，42(4): 325-335。
2. 楊哲銘、翁孟嘉、魏殷哲、李國維、傅鈺堯、林志平、張智安、羅佳明，2020，深層片岩坡體滑動之活動性調查、監測、破壞機制與地質模型探討，中華民國地球物理學會與中華民國地質學會 109 年年會暨學術研討會，台北。
3. Breiman, L., J. Friedman, C. J. Ston and R. A. Olshen (1984) Classification and Regression Trees, ISBN:9780412048418, pp.368.
4. Brodsky, E. E., Gordeev, E. and Kanamori, H. (2003) Landslide basal friction as measured by seismic waves, Geophys. Res. Lett. 30(24).
5. Brown, D, Wu, Y. M., Feng, K. F., Chao, W. A. and Huang, H. H. (2015) Imaging high-pressure rock exhumation. Geology, 43(7), 651-654.
6. Chao, W. A., Zhao, L. and Wu, Y. M. (2011) Centroid fault-plane inversion in three-dimensional velocity structure using strong-motion records. Bull. Seism. Soc. Am., 101, 1330-1340.
7. Chao, W. A., Wu, Y. M., Zhao, L., Tsai, V. C. and Chen, C. H. (2015) Seismologically determined bedload flux during the typhoon season, Sci. Rep. 5:8261, doi: 10.1038/srep08261.
8. Chao, W. A., Zhao, L., Chen, S. C., Wu, Y. M., Chen, C. H. and Huang, H. H. (2016) Seismology-based early identification of

dam-formation landquake events, Sci. Rep. 5, 19259; doi: 10.1038/srep19259.

9. Chao, W. A., Wu, Y. M., Zhao, L., Chen, H., Chen, Y. G., Chang, J. M. and Lin, C. M. (2017) A first online real-time seismology-based landquake monitoring system, Sci. Rep. 7: 43510; doi: 10.1038/srep43510.
10. Chen, C. H., Chao, W. A., Wu, Y. M., Zhao, L., Chen, Y. G., Ho, W. Y. T., Lin, L., Kuo, K. H. and Zhang, R. M. (2013) A seismological study of landquakes using a real-time broadband seismic network, Geophys. J. Int. 194, 885-898, doi: 10.1785/0120100245.
11. Cundall, P. A., and Strack, O. D. (1979) A discrete numerical model for granular assemblies. Geotechnique, 29(1), 47-65.
12. Ekström, G. and Stark, C. P. (2013) Simple scaling of catastrophic landslide dynamics, Science, 339, 1416-1419.
13. Ermini, L., and Casagli, N. (2003) Prediction of the behaviour of landslide dams using a geomorphological dimensionless index. Earth Surface Processes and Landforms, 28(1), 31-47.
14. Deparis, J., Jongmans, D., Cotton, F., Baillet, L., Thouvenot, F. and Hantz, D. (2008) Analysis of rock-fall and rock-fall avalanche seismograms in the French Alps, Bull. Seismol. Soc. Am. 98, 1781-1796.
15. Hermanns, R. L., Folguera, A., Gonzáles Diaz, F. E., and Fauque, L. (2006) Landslide dams in the Central Andes of Argentina – showing the need of revising the established landslide dam classification. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 55-60.

16. Hsu, L., Finnegan, N. J., and Brodsky, E. E. (2011) A seismic signature of river bedload transport during storm events, Geophys. Res. Lett. 38, L13407.
17. Hung, J. J. (2000) Chi-Chi Earthquake Induced Landslides in Taiwan. Earthuake Engineering and Engineering Seismilogy, 2(2), 25-33.
18. Kikuchi, M and Kanamori, H. (1991) Inversion of complex body waves-III, Bull. Seismol. Soc. Am. 81, 2335-2350.
19. Lee, S. J., Liang, W. T., Cheng, H. W., Tu, F. S., Ma, K. F., Tsuruoka, H., Kawakatsu, H., Huang, B. S., and Liu, C. C. (2013) Towards real-time regional earthquake simulation I: real-time moment tensor monitoring (RMT) for regional events in Taiwan, Geophys. J. Int. doi: 10.1093/gji/ggt371.
20. Lee, C. T. (2014) Statistical seismic landslide hazard analysis: An example from Taiwan, Engineering Geology, 182, 201-212, http://dx.doi.org.10.1016/j.enggeo.2014.07.023.
21. Lin, C.H., Kumagai, H., Ando, M. and Shin, T.C. (2010) Detection of land- slides and submarine slumps using broadband seismic networks, *Geophys. Res. Lett.*, **37,** L22309, doi:10.1029/2010GL044685.
22. Quinlan, J. R. (1986) Introduction of Decision Trees, Machine Learning, 1:81-106.
23. Suriñach, E., Vilajosana, I., Khazaradze, G., Biescas, B., Furdada, G. and Vilaplana, J. M. (2005) Seismic detection and characterization of landslides and other mass movements, Nat. Hazards Earth Syst.

Sci., 5, 791-789.

24. Shou, K. J. and Wang, C. F. (2003) Analysis of the Chiufengershan landslide triggered by the1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan. Engineering Geology 68, 237-250.
25. Wu, Y. M., Shyu, J. B. H., Chang, C. H., Zhao, L., Nakamura, M. and Hsu, S. K. (2009) Improved seismic tomography offshore northeastern Taiwan: implication for subduction and collision processes between Taiwan and the southernmost Ryukyu, Geophys. J. Int. 178, 1042-1054.
26. Yamada, M., Kumagai, H., Matsushi, Y. and Matsuzawa, T. (2013) Dynamic landslide processes revealed by broadband seismic records, *Geophys. Res. Lett.*, 40(12), 2998–3002.
27. Yang, C. M., Yu, W. L., Dong, J. J., Kuo, C. Y., Shimamoto, T., Lee, C. T., Togo, T., and Miyamoto, Y. (2014) Initiation, movement, and run-out of the giant Tsaoling landslide—What can we learn from a simple rigid block model and a velocity–displacement dependent friction law? Engineering geology 182, 158-181.
28. Zhu, L. and Rivera, L. A. (2002) A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media, Geophys. J. Int. 148, 619-627.
29. 林務局，國有林大規模崩塌潛勢區判釋及危險度評估，2018。

附錄一、計畫書與期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

計畫書審查意見與回覆

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	有關計畫書格式及經費審查部分： 1.本計畫請以補助經747仟元調整編列。 2.本年度執行期限請修正為自110年1月27日至110年12月31日。(11.1個月)。薪俸、保險、退休離職儲金、主持人費、兼任研究助理，請以計畫執行期限11.1個月內編列。年終獎金亦配合計畫期限比例調整。 3.健保補充保險費費率為2.11%。 4.物品明細合計金額有誤。	一、有關計畫書格式及經費審查部分：將依據審查意見修正。
2	為配合本局業務需求，計畫內容建議調整(或納入後續執行評估參考)部分： 1.計畫擬針對平面型滑動(順向坡)之同震山崩進行分析及潛感建立，但迄未有順向坡之圖資及目錄建立。 2.擬採用之速度-位移擦律，並未考量各場址之可能放大效應與材料參數差異。	1.前期期末報告中第二章第一節中提供大規模平面型破壞目錄(包含台灣各類岩性)、並以砂岩與砂頁岩互層為主要對象。 2.速度-位移相依摩擦律以草嶺案例(為砂岩與砂頁岩互層分布之沉積岩地區)材料所建立，與本計畫是主要對象相符，如有新增不同岩性案例或需求，將由已蒐集之不同岩性

項次	審查意見	回覆辦理情形
	3.真實案例之舞鶴崩塌非屬計畫所列之平面滑動類型。 4.計畫目標開發震波式同震山崩分析地動訊號方法，判斷潛在大規模崩塌可能發生位置及相關資訊，純就分析方法之開發，有其技術面之開創意義，惟其產製成果，在前期計畫謂無大規模地震事件，而無從驗證，相當可惜！惟今109年12月中旬連續出現地震規模5以上之地震，是否有掌握到山崩潛勢圖加以驗證？ 5.地震後再去判斷山崩，對於救災或許有些助益，但對防災似無所貢獻，且震後若是有山崩災 害發生，災害通報系統即可立即通報，以利救災，有無必要做事後判斷，似可再斟酌。	材料進行分析。 3.舞鶴崩塌雖非典型砂岩或砂頁岩互層之平面型破壞，然而依據現有監測資訊研判，將其以大規模平面型破壞進行分析，應不致造成有顯著差異，如有進一步調查結果將滾動式修正分析方式。 4.即時地震站網與山崩偵測系統持續運作中，109 年 12 月中旬連續地震未見誘發大規模平面型破壞案例。但此意見所提之內容亦涉及本計畫目標，將持續進行分析與成果展示。 5.地震誘發大規模平面型破壞為遽變式破壞，屬於同震災害，而地動訊號偵測與分析結果可提供崩塌位置、量體與滑移方向和傾角，亦有機會判斷是否形成堰塞湖，且即使崩塌位於人煙未達之上游地區，仍有機會偵測，優於一般設立於道路或特定場所之災害通報系統。因此，相當有其發展價值。

期初審查會議意見與回覆

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	地形是地質的表現，地震造成山崩之影響度，建議加重地質因子之運用。	謝謝委員建議，本計畫於各目標邊坡考慮地層位態、構造線方向、地形等高線用以決定代表坡度與坡向，提供後續分析。
2	地震強度、歷程造成崩塌之臨界值，建議併入研究分析。	謝謝委員建議，本計畫利用地震加速度歷時紀錄等進行分析計算。
3	4 月中旬左右之地震規模應屬中大規模，該等地震之運用情形如何?驗證成效如何?	請委員參考相關初步成果，描述於第二章第三節。
4	地震造成多處山崩之訊號是否可分離出來?	通常地震誘發山崩發生的地震規模皆大於 7.0，然而山崩引發之地動訊號幾乎是會被地震造成之地動訊號所覆蓋，僅在特殊的測站條件之下才有機會辨識出山崩造成的地動訊號，詳見本報告書提出的同震山崩地動訊號分析方法(ICOL)說明、圖 2-1。
5	潛移性之地滑運動滑動速度甚慢之情況下，加速度計可否感測出來?	力平衡三軸向加速度計(force-balance accelerometer)設計上僅敏感於強地動訊號，且可以監測的訊號頻率皆大於 0.05 Hz，因此可適用於強震時造成同震位移的情形(永久變形，Chao et al. (2010))，潛移為長期慢速滑移，適合以 GNSS 測站、孔

項次	審查意見	回覆辦理情形
		內變位監測系統、地表伸張儀等設備。若想用地動訊號研究邊坡潛移作用，建議可以使用高敏感度高頻地震儀。另外，本計畫所採用的加速度計為微機電感測器，其自我背景雜訊高於一般力平衡三軸向加速度計，約自我噪訊值為 0.1 gal。 Chao et al. (2010), An automatic scheme for baseline correction of strong-motion records in coseismic deformation determination, J. Seismol, 14:495-504.
6	位移 d 達 11m，摩擦係數才降至殘餘值，其合理性如何?	傳統 Newmark 分析判定邊坡是否破壞，以 5cm 至 15cm 為門檻值，然此門檻值並非固定，其受到邊坡組成材料、結構與水文地質狀態等因素影響，因此需由累積案例經驗滾動修正。
7	今年 2 月初臺東卑南大南溪上游崩塌形成堰塞湖，可測試是否能偵測此事件；另光華大崩塌亦同。	針對大南溪事件，目前計畫團隊已完成地動訊號檢核(已能確認可能的主要事件發生時間點)，初步研判此事件在主要崩塌發生後亦持續崩塌現象，持續關注中。
8	建議列表整理本計畫以成功驗證偵測之歷史案例，並可供本局其他計畫參考。	謝謝委員建議，將於期末結果呈現相關內容。

項次	審查意見	回覆辦理情形
9	目前 p2-3 所提之 CSS-WEB，似尚未見於 CoLLab 網站上?	感謝委員提問。受限於中央氣象局即時強震資料使用權的限制(此為系統關鍵資料)，目前皆屬於規劃階段，預計於期末階段完成系統前台展示部分。
10	報告書內容請針對研究方法及地動加速計安裝等加強補充。	謝謝委員建議，已補充相關描述與照片。
11	簡報照片所示，地動加速計安裝方式是置於水桶中，是否合宜?	桶內底部以水泥製作平面與提供重量，並於現地置入地下且確實水平和對北妥善安置，此安裝方式亦使用於寬頻地震儀安裝。
12	透過特定門檻值判釋鄰近 TSMIP(臺灣強地動觀測網)測站是否具有同震山崩事件，門檻值如何定訂?(p2-3)	於第二章第二節之圖 2-7描述後續流程
13	圖 1-1 近即時 Newmark-ICOL 分析程序，判斷式若不符條件之後續流程為何?請補標示。(p2-5)	於第二章第二節之圖 2-7 描述後續流程
14	舞鶴崩塌地地動加速度計安裝五處，若設備失效或毀損之因應方式為何?資料蒐集方式(定時回傳或至現地取回)及頻率為何(p2-6)	考量舞鶴崩塌地具有高活動性且高潛勢崩塌之疑慮，本計畫規劃於高度活動區 BH4-Plaert^{+}設有即時資料傳輸模組，其餘離線測站將以人工方式 1-2 個月進行現地資料下載，若遇特殊狀況(如單日累積降雨大於 400 mm 或震度為 5 弱以上)，將亦前往現場進行資料下載。

項次	審查意見	回覆辦理情形
15	報告書錯誤部分請更正。 (1)第一章右上角標示錯誤、頁碼錯誤。 (2)p2-5 圖 4 應為圖 2-3。表 1 為表 2-1。	謝謝委員指正，錯誤已更正。

附錄二、期中與期末審查意見暨回覆辦理情形

期中審查會議意見與回覆

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	期中各項研究雖仍持續進行，報告內容請著重於今年度進行之項目、過程及初步成果，去年度成果及期初報告請予概述，比重、篇幅勿過高。	以下為期中報告修訂稿中之重點說明： (1)本計畫年度(110)已聚焦10 起歷史地震事件(非集集地震序列)進行方法檢核與模型參數訓練，其中重要模型參數為「PGA」、「ss_dis」、「d10」、速度位移相依之摩擦係數、目標邊坡的「str」及「dip」，報告書修訂稿中圖 2-7 顯示上述參數將於檢核過程中進行動態修訂。其中檢核分析主要是透過光學影像(地震前後)進行崩塌判釋(以目標邊坡為中心，鄰近邊坡若有發生顯著變化為主)，分類為標籤 0 (無崩塌)及標籤 1(有崩塌)，建立上述標籤對應之模型訓練參數資料庫。-修訂稿第二章第二節 (2)真實案例則以舞鶴崩塌地加速度計陣列為主，預計透過數起有感地震(震度達 4 級以上)之加速度紀錄，釐清不同測站點位之加速度資料是否對於崩塌破壞位移分析有

項次	審查意見	回覆辦理情形
		一定的代表性，以供未來相關應用規劃之參考依據。-修訂稿第二章第三節 (3)山崩目錄、位移破壞分析輸入參數表、歷史地震檢核分析成果範例-附錄三
2	期初審查意見第7點之回覆，大南溪崩塌時間點為何?未見於期中報告書?	根據臺東林管處與新聞媒體報導，大南溪崩塌日期為 2 月 4 日。另由地動訊號分析技術可釐清崩塌發生時間為 22 點 19 分。由於本計畫團隊針對大南溪案例(崩塌至形成堰塞湖、最終至 8 月份部分潰決)已有完整的研究成果(純屬團隊內部研究成果，並非執行相關計畫工項)，若貴局對於此個案有興趣，本團隊非常樂意進行分享討論，特別是在潰決預警等相關議題。
3	期初審查意見第 12、13 點之回覆，圖 2-8 內容與實際不符，請確認。	謝謝委員指正，此處為誤植，修正為圖 2-7。
4	P3-2 期中階段應產生之山崩目錄、參數蒐集與更新、參數檔等成果，均未見於期中報告書，建議相關成果應呈現於附錄。	感謝委員建議，山崩目錄與參數檔已補充於附錄三(總計 196 頁)。本計畫原先預計建置資料庫伺服器(SQL，Structure Query Language)並利用網頁伺服器來進行資料呈現，以提升資料可視化及可讀性，若貴局同意，本團隊建議期末計畫書將以網頁

項次	審查意見	回覆辦理情形
		呈現方式取代附錄三，並不再以紙本資料的方式進行呈現。
5	圖 2-9 紅色圓圈所圈繪之觸發邊坡，疑有陣前震後相關光學影像等作為佐證。	此工作項目陸續進行中，成果將於期末報告呈現。
6	第二章偶數頁頁碼全部錯誤。	謝謝委員指正，已修正。
7	期初委員意見及回應辦理情形未表列。	原於附錄一表列計畫書與期初報告意見與回應辦理情形，請委員參考。
8	計畫甘特圖除預定進度，請補充實際進度。	遵照辦理，已補充進度。
9	第四章結論及建議，請綜整說明其中階段執行成果及後續辦理事項。	遵照辦理。
10	報告書封面編號請修正為 SWCB-110-031	已修正。
11	請於報告書中呈現已完成之平面型破壞之大規模崩塌目錄。	已於附錄三列 175 處潛在大規模平面型破壞之山崩目錄。
12	計畫中拍攝舞鶴崩塌地並產製正射影像與數值地表模型，建議本局UAV空拍成果平台上傳。	舞鶴崩塌地產製正射影像與數值地表模型為花蓮林管處計畫之工作項目成果(陽明交通大學翁孟嘉教授為計畫主持人，目前計畫執行中)，建議應由貴局向花蓮處提出申請，案由說明可提供本案計畫書。若貴局需要本計畫提供舞鶴加速度陣列之紀錄資料，實屬為本案執行之工項，團隊可直接提供。
13	圖 2-9 歷史地震分析成果圖，	謝謝委員建議，已標示於圖

項次	審查意見	回覆辦理情形
	請於各成果圖標示分別為是哪一個地震事件的分析成果。	2-9。

期末審查會議意見與回覆

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	針對1990年至2020年間歷史性的地震相關資料，進行地震相關分析。分析結果如何扣連到實際決策過程，值得多加著墨。	如圖 2-32 所示，以近即時同震山崩潛感圖呈現，亦可利用 CSS-Web 平台動態查詢歷史地震結果與最新地震結果，有利於評估是否發生大規模平面型破壞。
2	震後當下未必能馬上產生崩塌，而是產生裂縫或解壓，當餘震發生時才產生崩塌，此種條件是否能進行評估?	目前 Newmark-ICOL 分析程序是當地震滿足資料篩選門檻時便啟動，未考慮主餘震或群震序列，是以每次地震作為一次輸入計算分析，然而，歷次地震之分析結果列入該目標邊坡之歷史資料，作為長期數據資料。(詳見第二章第二節之二、同震山崩地動訊號分析方法(ICOL))
3	高，中，低等等的4個等級劃分如何選定?有無相關依據可參考?如何驗證評估結果?	關於紅橙黃綠燈號評估方式，詳見第二章第六節(P2-39)。歷史地震分析結果以正射影像進行影像判釋驗證。
4	即時震波式同震山崩潛勢評估目前僅針對特定坡面進行潛勢分析，是否能應用到其	由於使用 Newmark 分析作為運動分析基礎，目前本研究之對象設定為潛在大規模之平

項次	審查意見	回覆辦理情形
	他坡面。另外，山崩潛勢等級顯示時建議能同時顯示震度分布。	面型破壞山崩區域，故不適用於其他非平面型破壞之類型。而震度分度圖需套繪自氣象局圖資。
5	本研究方法能否判斷山崩的規模或大小?，或是如何區分小規模崩塌但很近的情況?	本研究方法主要發展於評估平面式破壞之觸發條件與潛勢，如需判斷崩塌之大小需進一步偵測崩塌訊號以及分析訊號特徵等資訊。

附錄三、潛在大規模平面型破壞山崩目錄（完整目錄於期末報告電子檔呈現）

平面圖包含潛在大規模平面型破壞山崩、流域地質圖(地層、地質構造、水系)、內政部全臺二十米數值高程模型產製坡度圖、一百米間距等高線、LL’為縱剖面線、TT’為橫剖面線

