
使用差分干涉合成孔徑雷達分析之地表變形
應用於大規模崩塌事件型活躍性分類

(二)

**Event-Type Large-Scale Landslide Activity
Classification with Surface Deformation
Analysis by Differential Interferometric
Synthetic Aperture Radar (II)**

成果報告書

執行單位：國立暨南國際大學

執行期間：113年2月7日至113年12月31日

計畫主持人：王國隆 教授

共同主持人：林俊廷 博士

研究人員：李苡宣

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 113 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本署施政參考)



目次

目次	I
表次	II
圖次	III
第一章 緒論	1-1
第一節 計畫動機	1-1
第二節 計畫目的	1-1
第三節 計畫研究區域	1-2
第二章 工作執行方法與步驟	2-1
第一節 多時序合成孔徑雷達影像資料蒐集及建置	2-2
第二節 多時序判釋堆疊分析	2-10
第三節 事件辨別方式	2-23
第四節 活躍性分類	2-26
第三章 研究成果與創新性	3-1
第四章 計畫進度甘特圖	4-1
參考文獻	參-1
附錄	附錄-1
附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄-1
附錄二、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄-3

表次

表 2-1	臺灣近年使用之 SAR 分析方法及其標的	2-3
表 2-2	不同坡向及軌道方向適用性與精度探討(Wang et al., 2021)..	2-11
表 2-3	崩塌區內變位速度平均值	2-25
表 2-4	大規模崩塌潛勢分級門檻	2-29
表 2-5	南投縣 3 處大規模崩塌變形活動潛勢分級	2-29
表 4-1	計畫甘特圖	4-1
表 4-2	重要期程一覽	4-2



圖次

圖 1-1	本計畫蒐集 Sentinel-1 SAR 影像之衛星軌道.....	1-2
圖 2-1	本計畫研究流程圖	2-1
圖 2-2	永久散射體法之時空基線	2-5
圖 2-3	短基線法之時空基線	2-5
圖 2-4	南投縣-鹿谷鄉-D006 範圍地形及日照陰影圖	2-7
圖 2-5	南投縣-仁愛鄉-D066 範圍地形及日照陰影圖	2-7
圖 2-6	南投縣-國姓鄉-T002 範圍地形及日照陰影圖.....	2-8
圖 2-7	C0I090 鳳凰月降雨量（對應南投縣-鹿谷鄉-D006）	2-8
圖 2-8	C0I010 廬山月降雨量（對應南投縣-仁愛鄉-D066）	2-9
圖 2-9	C1I230 九份二山月降雨量（對應南投縣-國姓鄉-T002）	2-9
圖 2-10	2017 年 3 月至 2021 年 6 月 SBAS 產製垂直變位速度套疊 LiDAR 判釋潛在崩塌特徵(WANG ET AL., 2021)	2-10
圖 2-11	南投縣-鹿谷鄉-D006 垂直變位速度圖.....	2-12
圖 2-12	南投縣-鹿谷鄉-D006 觀察點垂直變位歷時.....	2-12
圖 2-13	南投縣-仁愛鄉-D066 垂直變位速度圖.....	2-14
圖 2-14	南投縣-仁愛鄉-D066 觀察點垂直變位歷時.....	2-14
圖 2-15	南投縣-國姓鄉-T002 垂直變位速度圖.....	2-16
圖 2-16	南投縣-國姓鄉-T002 觀察點垂直變位歷時.....	2-16
圖 2-17	花蓮縣-富里鄉-T004 垂直變位速度圖.....	2-18
圖 2-18	花蓮縣-富里鄉-T004 觀察點垂直變位歷時.....	2-18
圖 2-19	花蓮縣-卓溪鄉-D007 垂直變位速度圖.....	2-19
圖 2-20	花蓮縣-卓溪鄉-D007 觀察點垂直變位歷時.....	2-19
圖 2-21	花蓮縣-卓溪鄉-D010 垂直變位速度圖.....	2-20

圖 2-22	花蓮縣-卓溪鄉-D010 觀察點垂直變位歷時.....	2-20
圖 2-23	花蓮縣-瑞穗鄉-D024 垂直變位速度圖.....	2-21
圖 2-24	花蓮縣-瑞穗鄉-D024 觀察點垂直變位歷時.....	2-21
圖 2-25	花蓮縣-玉里鎮-D018 垂直變位速度圖.....	2-22
圖 2-26	花蓮縣-玉里鎮-D018 觀察點垂直變位歷時.....	2-22
圖 2-27	200 處潛在滑動斜坡單元滑動速度潛勢分級(王國隆，2021)	2-23
圖 2-28	篩選事件之示意圖（王國隆等人，2021）	2-24
圖 2-29	48 處平均下降變位速度與坡向之關係	2-27
圖 2-30	48 處平均下降變位速度與坡度之關係	2-27
圖 2-31	2022 年 7 月至 2023 年 9 月之平均變形速度與百分比關係	2-28
圖 2-32	單位面積平均變形速度與百分比關係	2-29
圖 2-33	平均變形速度法與中位數變形速度關係	2-31
圖 2-34	2022 年 7 月至 2024 年 10 月之平均變形速度與百分比關係	2-31
圖 2-35	不同年份與平均變形速度百分比之關係	2-32

第一章 緒論

第一節 計畫動機

臺灣的地理條件造就了高災害潛勢的環境，而坡地災害是臺灣面臨的主要災害之一，如何調查及評估災害潛勢一直是倍受關注的課題，政府的災害管理須有更深層的認識及有效的防範，而近年來因遙測技術的迅速發展，帶來研究坡地災害的另一契機，有別於傳統監測技術在預算及使用範圍的受限，遙測技術提供更全面性且低廉的觀測方式，產出更巨觀的地表資訊，提升災害的探查效率。

第二節 計畫目的

合成孔徑雷達(SAR)有不受天候干擾、廣域監測、固定再訪周期等優勢，能紀錄包含強度、極化、相位等物理訊息，現階段因 Sentinel-1 SAR 的衛星資料開放，可以取得周期短且大範圍的 C 波段影像，然其解算方法不易入門且需具備一定對山崩認識之知識，才能有效的使用分析成果，本研究擬解決問題條列如下：

- 一、坡向為導向之合成孔徑雷達地表變位模式建立。
- 二、區別重力變形或降雨導致滑移之大規模崩塌。
- 三、建立以事件為基礎之大規模崩塌活躍性分類方法。

第三節 計畫研究區域

合成孔徑雷達影像圖資拍攝的區域廣泛，臺灣全島的範圍皆在 Sentinel-1 的拍攝範圍中，可用 2 組升降軌軌道獲取全島的雷達影像資料(如圖 1-1)，為求能夠在研究期間內完成分析，本年度暫以南投縣內已經公布之大規模崩塌區為分析對象，進行研究模式之開發。

南投縣境內多山且地形陡峭而地質破碎，921 地震後更產生多處崩塌，地震後所衍生之大量土石流與淺層崩塌對境內生活造成莫大影響，為避免標的過多，本研究先以經濟部中央地質調查所圈繪之大規模崩塌且具有保全對象優先。

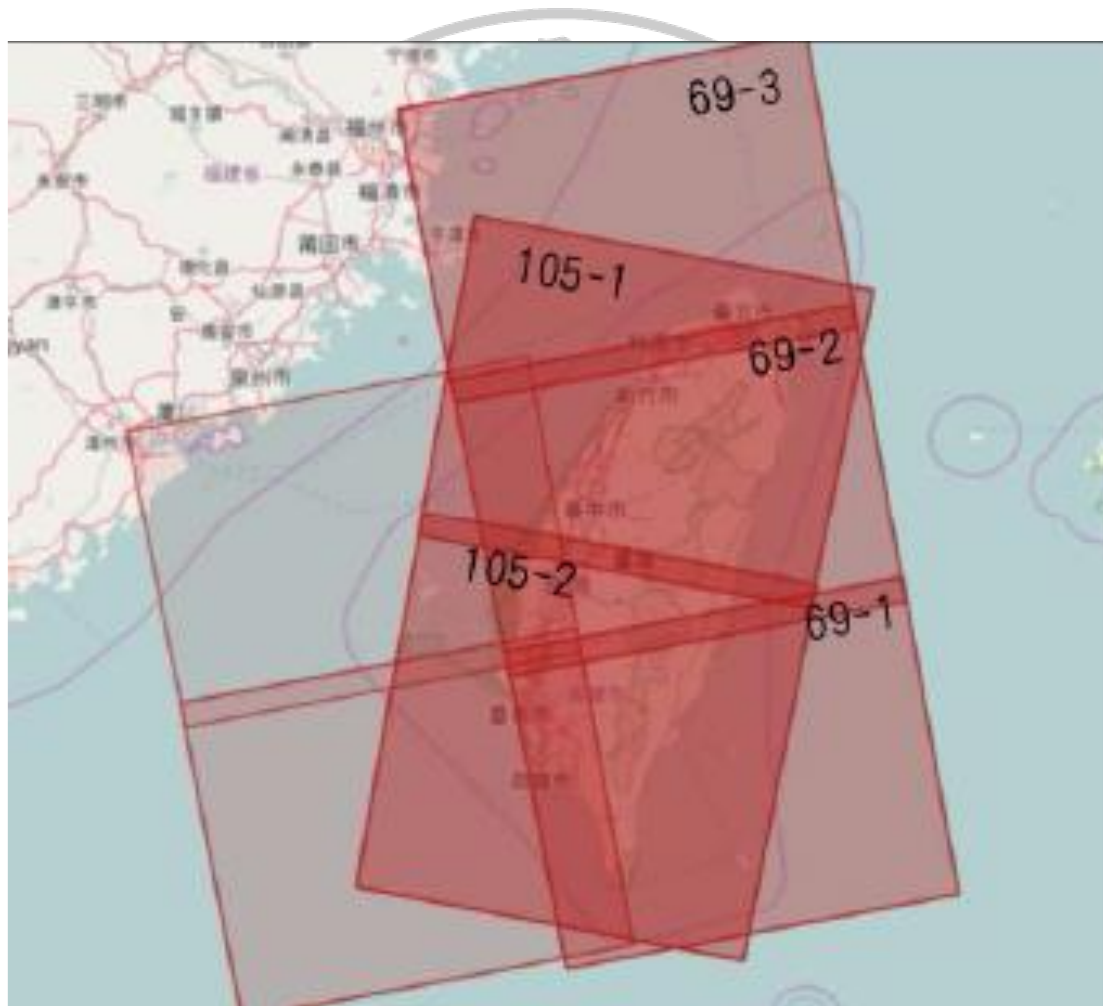


圖1-1本計畫蒐集 Sentinel-1 SAR 影像之衛星軌道

第二章 工作執行方法與步驟

本計畫重點項目，包含：一、收集至少 5 年之 SAR 分析 SLC 影像，建立研究區之 C 波段 SLC 格式影像資料庫；二、建立連續式雷達影像分析計算流程；三、建立崩塌區內解算成果辨識是否為豪雨或颱風事件之指標模式；四、建立大規模崩塌區事件類型之活躍性分類方法。本計畫研究流程如圖 2-1。



圖2-1本計畫研究流程圖

第一節 多時序合成孔徑雷達影像資料蒐集及建置

合成孔徑雷達影像(SAR)是一種主動微波觀測技術，運用衛星運行時連續發出電磁波，經由地上物散射後返回衛星由天線接收，用以量測反射強度及相位資訊，由於其波長較長，可以有優越的繞射性質，因此能穿透雲霧及植生，具有主動觀測的特性，不受到天候及夜晚的限制，且能大面積、固定週期的量測振幅、極化、相位等地上物理性質，是近年來運用廣泛的遙測技術之一。

SAR 的觀測能力及適用範圍受到其波長的長度有顯著的差異，本研究中使用之合成孔徑雷達資料主要為歐洲太空總署(European Space Agency,ESA)的 Sentinel-1 衛星，原預計使用 ALOS 系統，雖 ALOS 系列衛星波長為 L-band，在山區穿透植生的效果良好，然而在 JAXA 現行策略中，ALOS-2 在臺灣的拍攝密度較低，資料取得週期過長，對於長期監測而言資料相對匱乏，且因資料需付費購置而增加了運用成本。

Sentinel-1 衛星的 SAR 影像波長為 C-band，為歐洲太空總署哥白尼計畫中的觀測衛星之一，其合成孔徑雷達觀測系統由兩顆衛星組成(Sentinel-1A、Sentinel-1B; 已於 2021 年底故障但仍可回溯歷史資料)，單一軌道回歸週期為 6~12 天，資料目前為免費開放使用，因為穩定且高頻率的資料產出使持續監測變得可能，在此條件下使近年來 Sentinel 衛星有大量的研究及應用成果。

臺灣近年來使用 SAR 進行地表變形之研究發展相當迅速，雖常有不一分析名詞出現，如 TCP-InSAR 或 ATI-InSAR 等方法，其主要分析架構仍以 PS（永久散射體法）及 SBAS（短基線法）為區隔，綜整臺灣近年有關連續式 SAR 分析區分為 PS(永久散射體法)及 SBAS（短基線法），使用之軟體也不一，將所整理之分析結果如表 2-1。

表2-1 臺灣近年使用之 SAR 分析方法及其標的

標的	方法	論文及使用軟體
地層下陷	PS	卜艾西 (2018) 林紹弘 (2018)、陳郁琪 (2019 ; StaMPS)
	SBAS	魏祥鴻 (2021)、楊苡絜 (2018)、阮銘 (2018)、阮蔡榮長 (2021; PCI-Geomatica)、張育瑋 (2021; GMT SAR)、李恩誠 (2020; GMT SAR)
	PS, SBAS	歐司瓦 (2018 ; StaMPS)
邊坡變位	PS	王倍紋 (2020)、戴于恒 (2016)
	SBAS	謝渝棋 (2020 ; GMT SAR)、吳笙緯 (2019; ISCE/GIAnT /StaMPS)、林俊廷 (2021 ; SARscape)
	PS, SBAS	努巴迪 (2021 ; StaMPS)
地表變位	PS	楊豐毓 (2012 ; StaMPS)
	SBAS	-
	PS, SBAS	洪翊甯 (2012 ; StaMPS)
其他	PS, SBAS	盧志恒 (2018 ; StaMPS)

雖然理論上的計算式可以獲得地形上的小變形，但事實上僅有單一像對時大變形（數公分）比小變形來的可靠，如果要能偵測到可靠的小變形，需要倚靠其他方式如干涉堆疊技術或 SAR 相位時序分析等方法，其中干涉堆疊技術常用的方法包含永久散射體法（PS-InSAR 法）及短基線法（SBAS 法）兩種方法，由於兩幅解的精度品質變數較多，因此對於多時序的變化常以前述兩種方法提高解算精度，亦有其他多時序性方式，但其他方式無法取得開源計算方法，且經測試 PS-InSAR 法於山坡地反射較差區域精度較差，故本研究採用 SBAS 法為主要計算模式，SBAS 法為短基線模式，可利用少量但多重主像方式提高張數過少或反射強度不足等之精度。

PS-InSAR 法及 SBAS 法之時空基線分別如圖 2-2 及圖 2-3 所示，由圖中 PS-InSAR 法採用單一主像對應其他副像，而 SBAS 法則採用參考主像方式，於設定時空範圍內均可進行解算；於實際應用上，PS-InSAR 法適用於平地及都市變形監測、人工構造物變形偵測等，而 SBAS 適用於自然環境(如山區地形)之變形偵測。山坡地變形偵測時由於通常人工構造物不夠密集，使用 SBAS 法較能獲得較佳之變形偵測結果。由於分析像對較多且時間間隔僅 12 天，假設兩幅間之變形模式為線性其中主要提升精度項目包含高精度參考數值地形、地面控制點以及大氣修正等步驟，藉由多時序的分析可以有效提升分析精度。

基於前述 SBAS 法分析流程，過程中產生同調性分析結果及干涉分析結果，再利用參考數值地形產生差分干涉成果，利用地面控制點進行軌道精鍊，由於產生之相位差可能超過 $-\pi \sim +\pi$ ，需要就真實相位進行相位解纏，恢復真實相位變化。

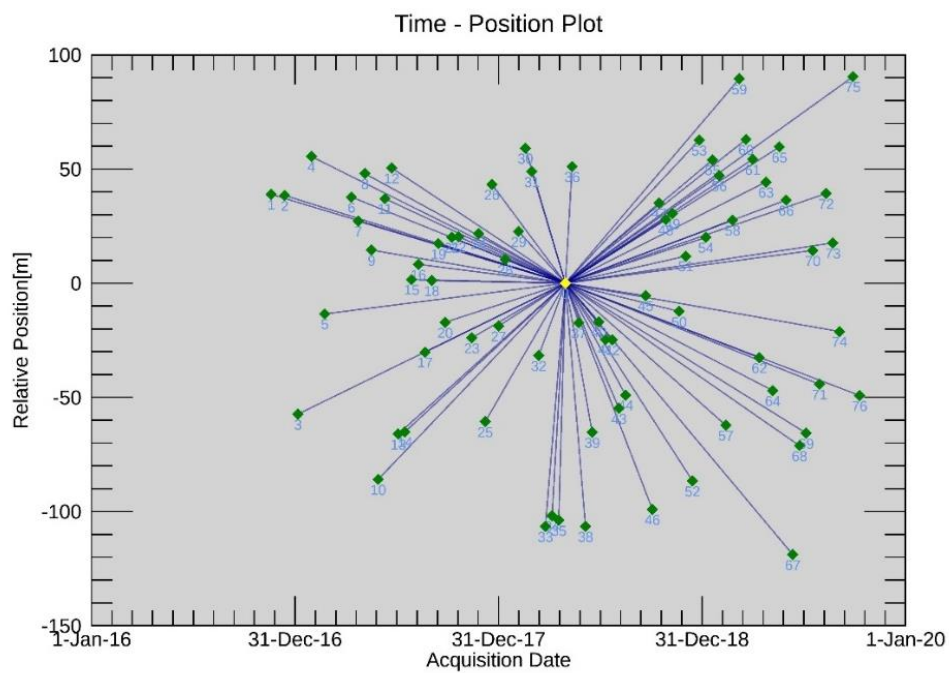


圖2-2 永久散射體法之時空基線

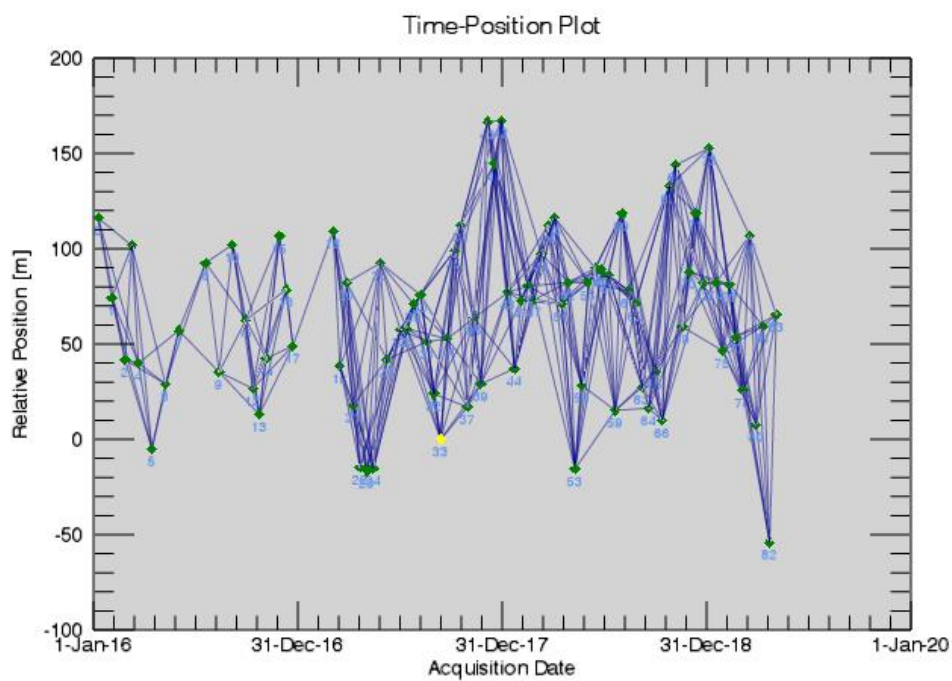


圖2-3 短基線法之時空基線

Sentinel-1 的 SAR 資料包含 Stripmap、Interferometric Wide Swath Mode、Extra Wide Swath Mode 與 Wave 四種拍攝模式，其不同處理等級的產品主由 GRD、SLC 兩種格式組成，地距影像 GRD(Ground Range Detected)格式由聚焦的 SAR 數據組成，其使用橢球體模型校正經多視投影到地面範圍，且失去了相位資料，該格式經過多視圖處理及熱噪訊校正，以降低解析度的代價減少斑剝雜訊的影響。

單觀點複數影像 SLC (Single Look Complex)格式為使用衛星的軌道和姿態數據進行地理參考的聚焦 SAR 數據，其影像每一個像素由一個複數值(I&Q)表示，SLC 影像由零多普勒幾何形狀產生，並對天線方向及距離損耗進行校正，影像生成時保留了振幅與相位資料。

前期曾選擇南投縣內三處公開大規模崩塌區進行分析，分別為南投縣-鹿谷鄉-D006、南投縣-仁愛鄉-D066 及南投縣-國姓鄉-T002，三處之地形及陰影圖分別如圖 2-4~圖 2-6 所示，此三處邊坡主要朝向均為東向偏北或南，依據 Wang et al.(2021)之研究指出適用於 Sentinel-1 上升軌資料進行分析，前期階段收集 2017/3–2023/5 超過 6 年共計 175 幅影像進行分析，經裁切各大規模崩塌區位置後進行分析。

為能先瞭解分析期間內促崩條件，先自中央氣象局網頁下載 2017 至 2022 年各月份降雨資料製圖如圖 2-7~圖 2-9 所示，各處主要較大降雨均發生於 2017 年 6 月，顯示此為共同事件且同時位於分析時間區間內。

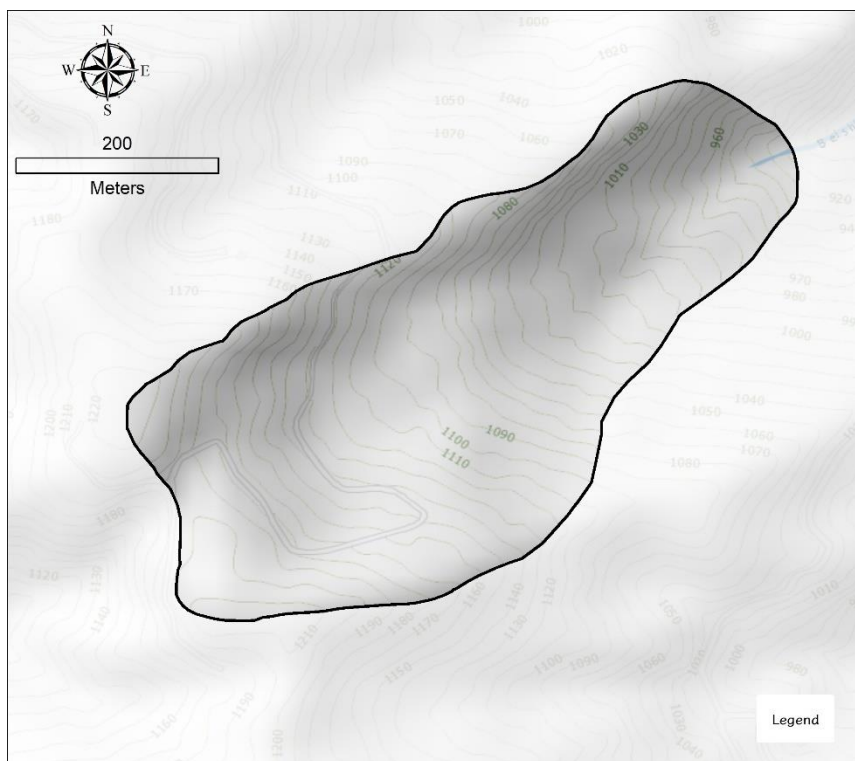


圖2-4南投縣-鹿谷鄉-D006範圍地形及日照陰影圖

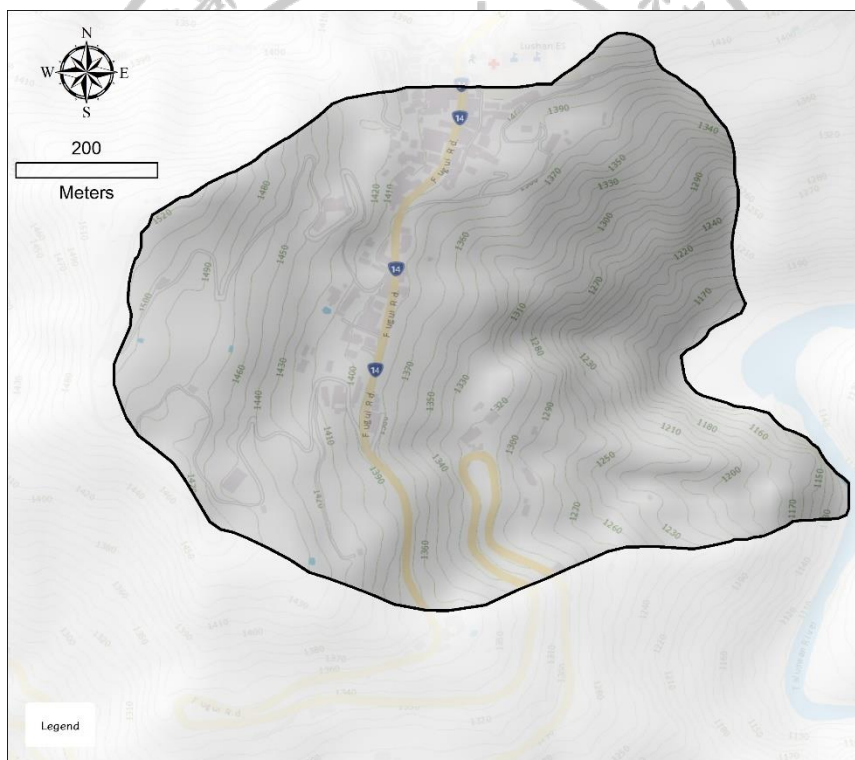


圖2-5南投縣-仁愛鄉-D066範圍地形及日照陰影圖

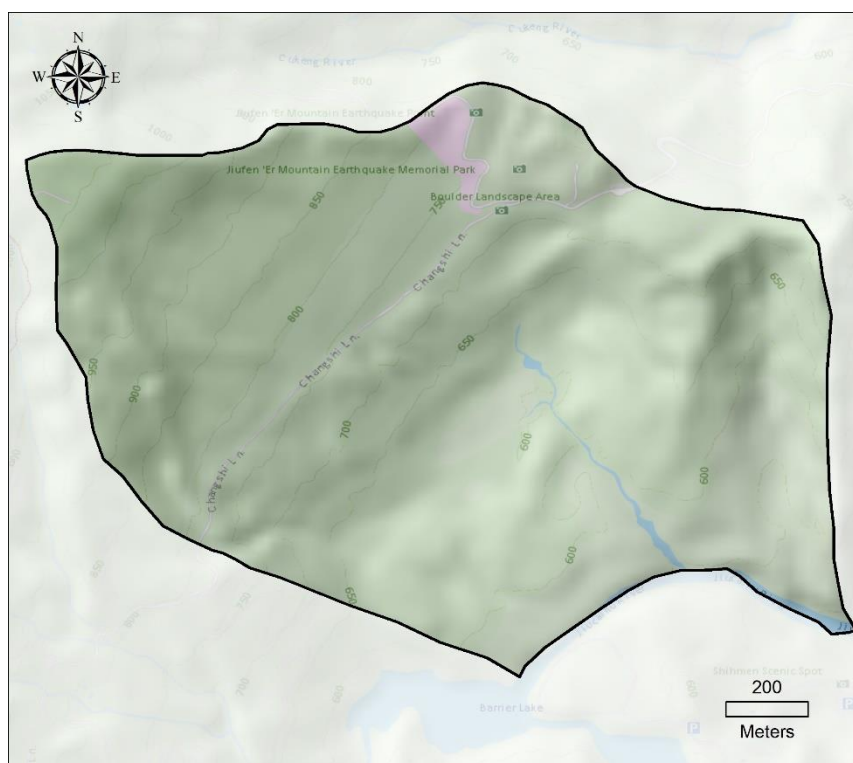


圖2-6南投縣-國姓鄉-T002範圍地形及日照陰影圖

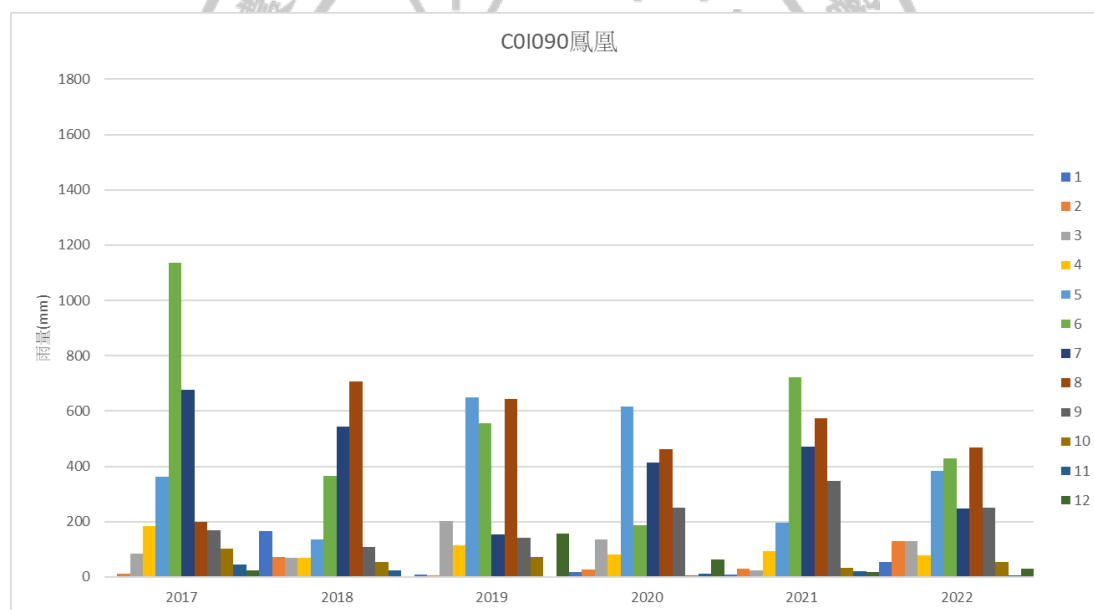


圖2-7 C0I090鳳凰月降雨量（對應南投縣-鹿谷鄉-D006）

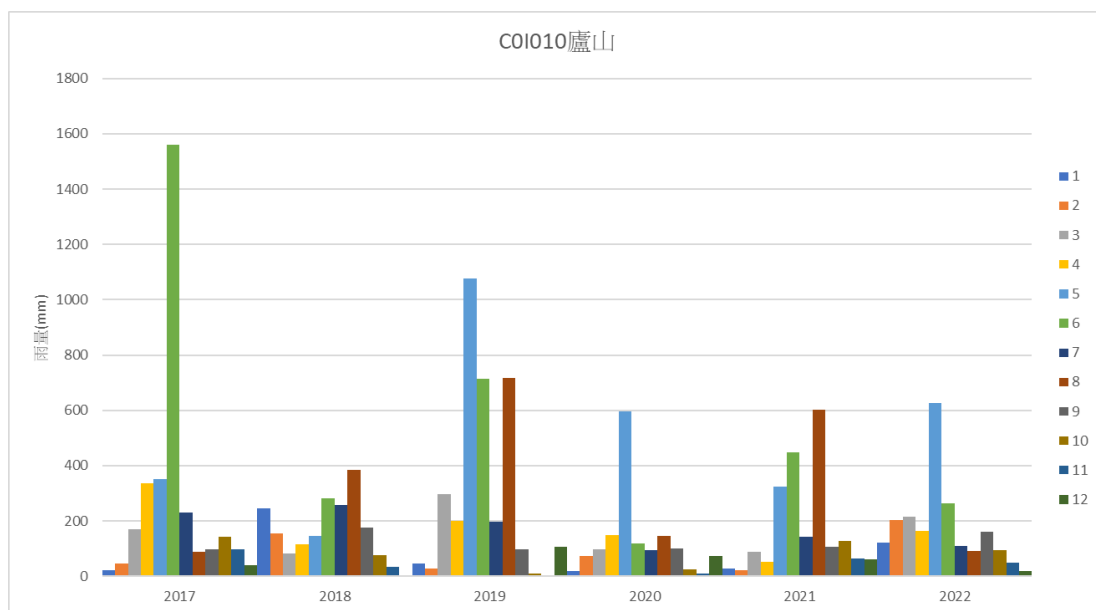


圖2-8 C0I010廬山月降雨量（對應南投縣-仁愛鄉-D066）

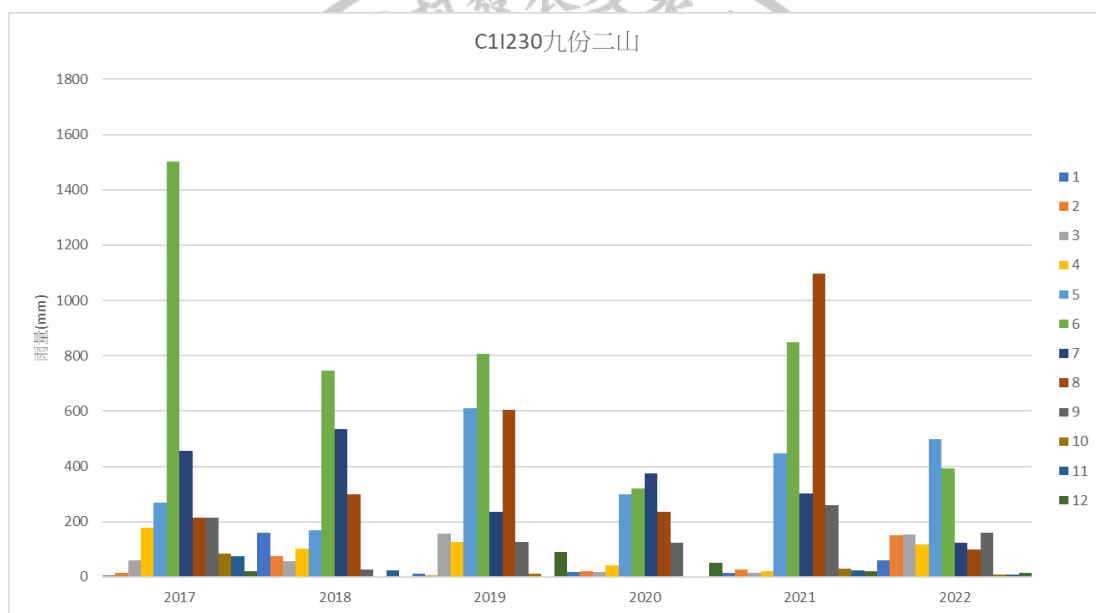


圖2-9 C1I230九份二山月降雨量（對應南投縣-國姓鄉-T002）

第二節 多時序判釋堆疊分析

本研究採用 Sentinel-1 雷達衛星資料主要因為其使用之雷達波為 C-band(波長 5.5cm)，相較於 ALOS 系列衛星的 L-band(波長 22~23cm)雷達波訊號，C-band 穿透植生獲得真實地表之反射的能力較差，對於植生密集的区域略為不利，然其資料蒐集頻率高，可利用此特點進行多重判釋以彌補波長不足增加的誤判情形。

在本研究中延伸觀測的時間基線至少達到五年觀測期，藉由長期且發生災害事件前後的交叉分析，於計算大規模崩塌坡向後，依據 Wang et al.(2021)所得之結果(圖 2-10)，取用對應正確變形模式之軌道方向分析(表 2-2)，建立適合用於災害事件的多時序判釋堆疊分析模式。

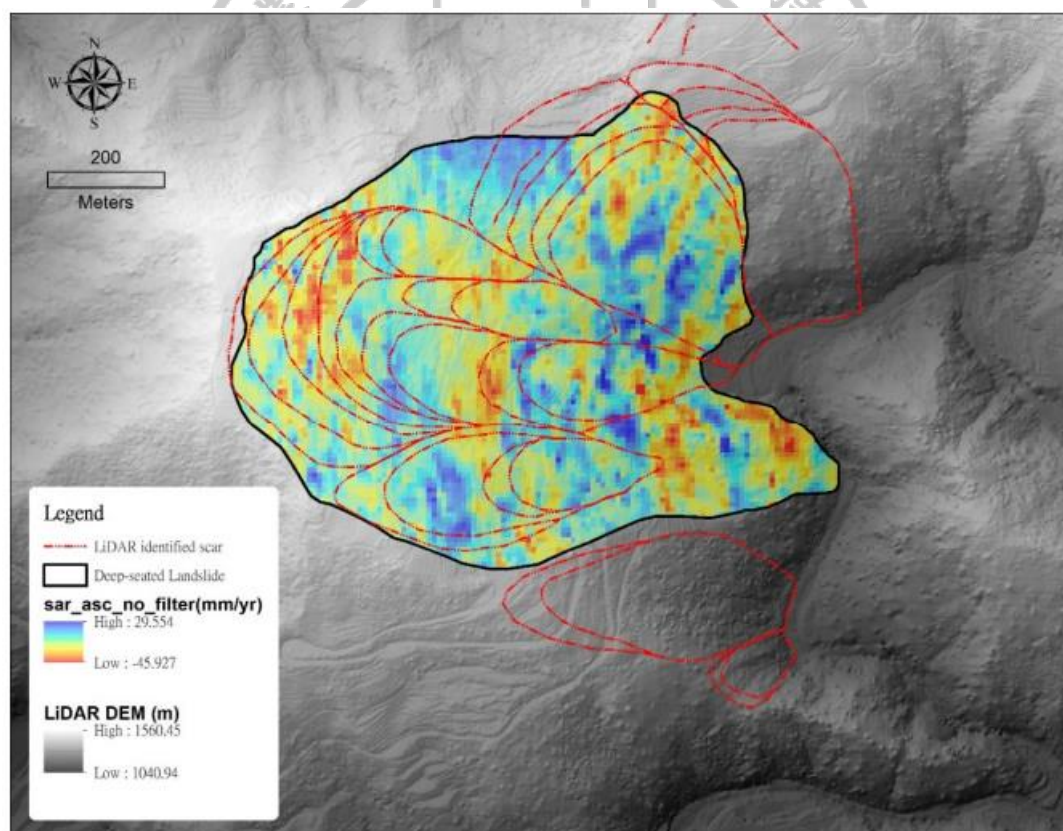


圖2-10 2017年3月至2021年6月SBAS產製垂直變位速度套疊LiDAR
判釋潛在崩塌特徵(Wang et al., 2021)

表2-2 不同坡向及軌道方向適用性與精度探討(Wang et al., 2021)

Table 1. The slope (steepness) and aspect (azimuth) of GNSS stations and related DInSAR comparison errors.

	GNSS1 Location	
	Slope (degree) 15.6 Ascending orbit	Aspect (degree) 88.9 Descending orbit
Error Mean (mm)	13.21	84.74
Error Standard Deviation (mm)	10.14	37.82
Correlation coefficient	0.95	-0.69
	GNSS2 Location	
	Slope (degree) 19.8 Ascending orbit	Aspect (degree) 169.8 Descending orbit
Error Mean (mm)	24.43	25.76
Error Standard Deviation (mm)	15.17	17.52
Correlation coefficient	0.51	-0.20

經使用 SBAS 分析方法分析後，將分析結果初步進行整理，製圖時為能將分析結果判斷是否具有大規模崩塌活動情形，除原始解算點製作暈染圖之外，亦將原始解析度暈染圖進行降解析度（濾除雜訊）處理，以下分別說明分析結果。

一、南投縣-鹿谷鄉-D006（前期成果）

分析使用資料為 ESA Sentinel-1A 從 2017 年 3 月至 2023 年 10 月，總計 188 幅上升軌影像，茲將所得垂直變位速度結果繪製如圖 2-11 所示，由圖中可知大規模崩塌潛勢區內於過去六年內確實於部份區域產生變化，在邊坡上部出現明顯高程下降情形，此一高程下降對應於高程稍低處的隆起可能為一滑動面的剪出位置；為進一步瞭解該區高程下降是否與滑動有關，將 A、B 兩點之高程變化歷時繪製如圖 2-12 所示，所得結果產生頭部下降且坡中段隆起之現象，與崩塌型態相符。值得注意的是在 B 點的位置，於 2023 年 5 月之後的高程變化加速，需注意是否為農耕作業或崩塌啟動現象。

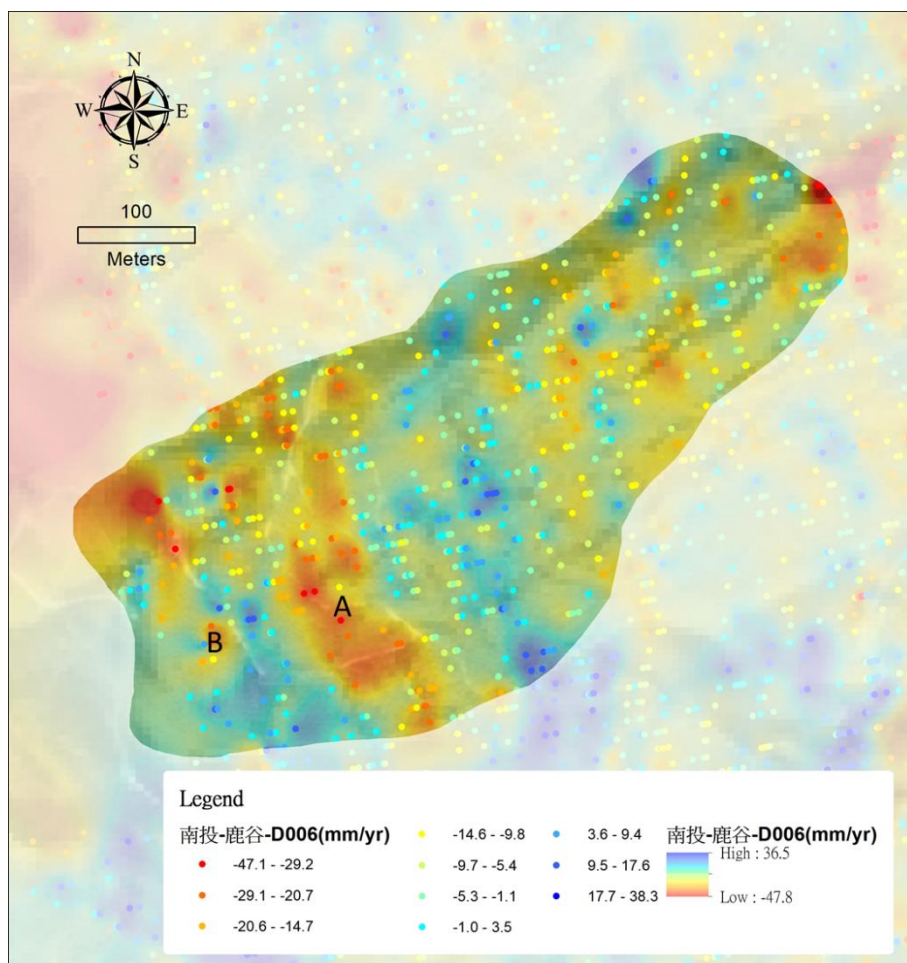


圖2-11南投縣-鹿谷鄉-D006垂直變位速度圖

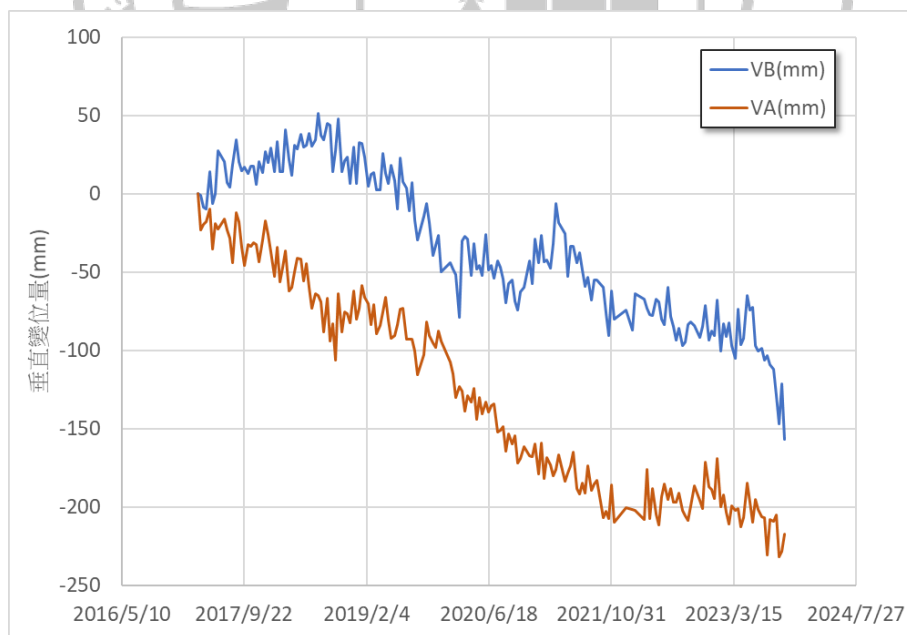


圖2-12南投縣-鹿谷鄉-D006觀察點垂直變位歷時

二、南投縣-仁愛鄉-D066（前期成果）

茲將所得垂直變位速度結果繪製如圖 2-13 所示，由圖中可知大規模崩塌潛勢區內於過去六年內崩塌區內變動相當明確，於邊坡主要方向上（A-C 方向），出現多層滑動面之徵兆，亦即部分高程下降、部分隆起，主要較為明顯下陷位置為部落所在建物往下邊坡方向；另一值得注意的位置為 B 點位置，過去六年間出現較快的滑移速度。為瞭解此三處歷年滑動情形，將高程變化歷時繪製如圖 2-14 所示，三處均呈現滑動-停止-滑動情形，推測與降雨條件有關，此外，C 點的位置滑移速度較 A 點為快，顯示以 C 點為崩塌頭部的滑動貢獻可能較 A 點為高，另，此一滑動現象顯示 A 點所在位置應為另一較淺層滑動塊體。



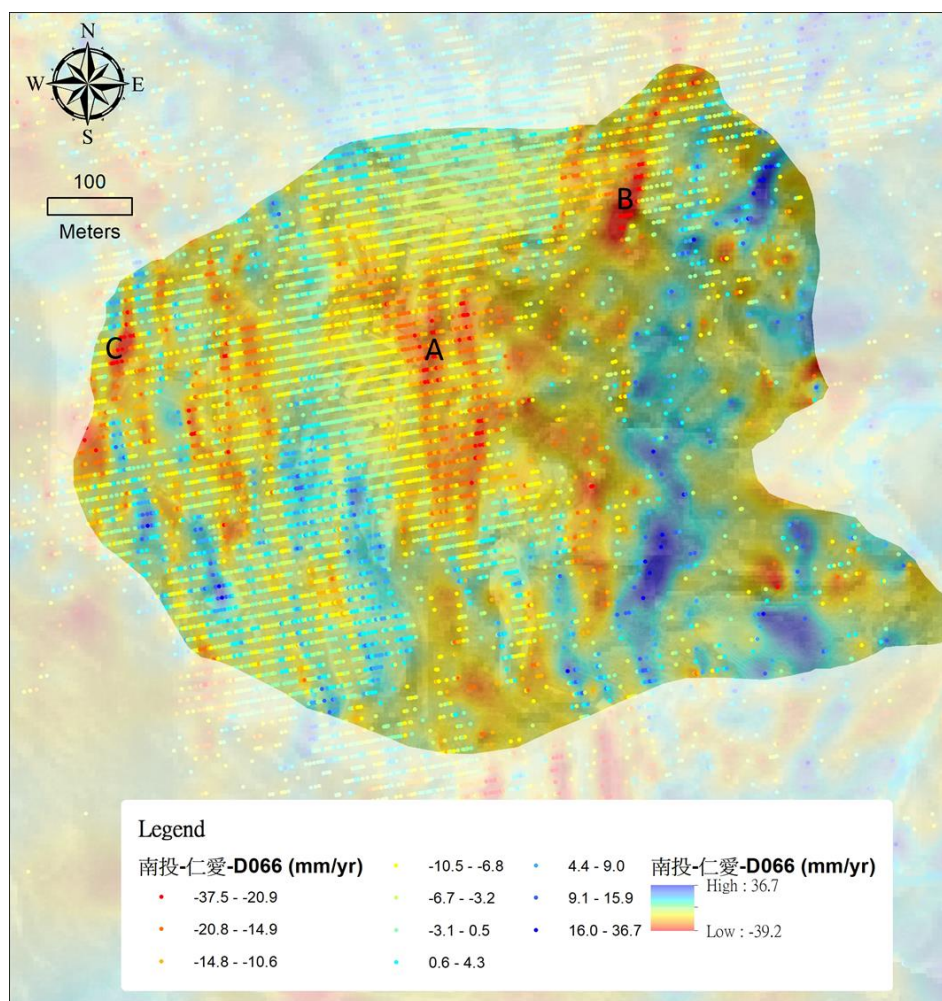


圖2-13南投縣-仁愛鄉-D066垂直變位速度圖

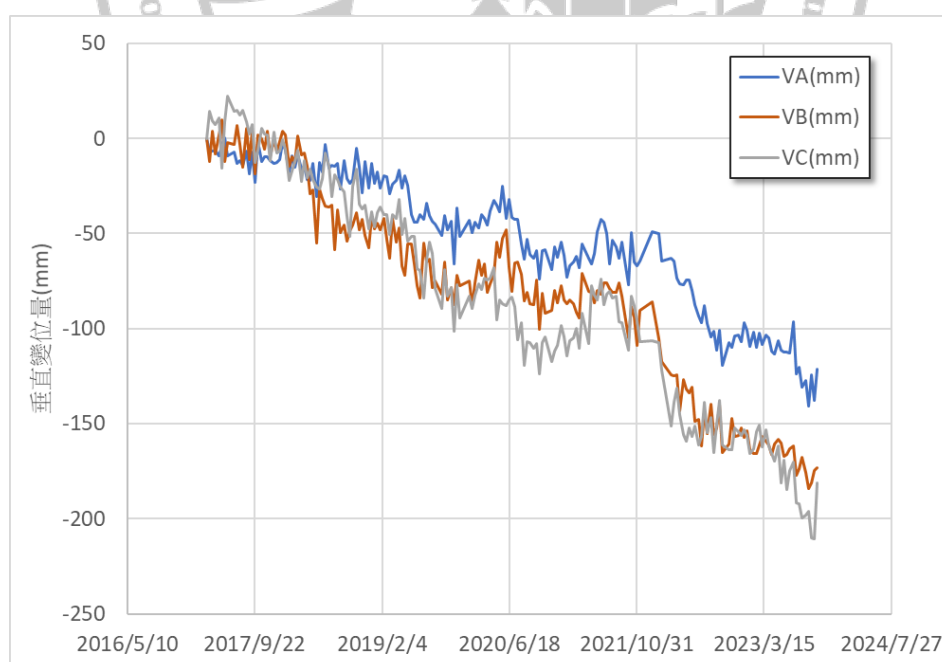


圖2-14南投縣-仁愛鄉-D066觀察點垂直變位歷時

三、南投縣-國姓鄉-T002（前期成果）

茲將所得垂直變位速度結果繪製如圖 2-15 所示，由圖中可知大規模崩塌潛勢區內於過去六年內確實於部份區域產生變化，另採用濾除雜訊方式繪製如圖 2-16 所示，所得結果產生多階下降且坡中段隆起之現象，與崩塌型態相符。

前述各大規模崩塌區之濾除雜訊方式目前採用同一標準，但可看出或有過份濾波情形，對於是否設定相同條件進行濾波，仍需視能否反應大規模崩塌塊體運動為要。



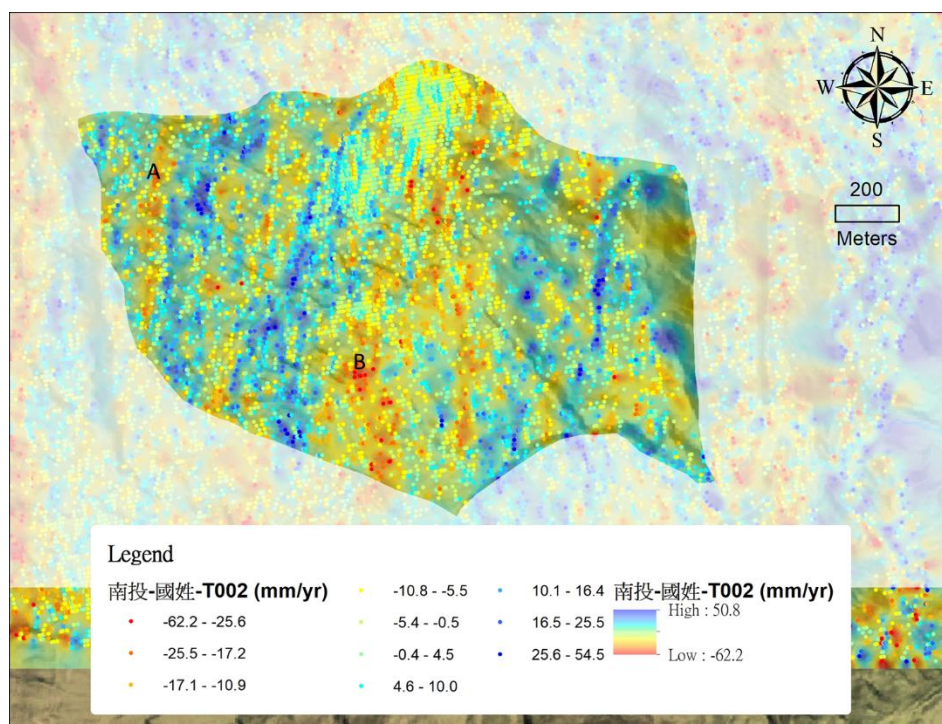


圖2-15南投縣-國姓鄉-T002垂直變位速度圖

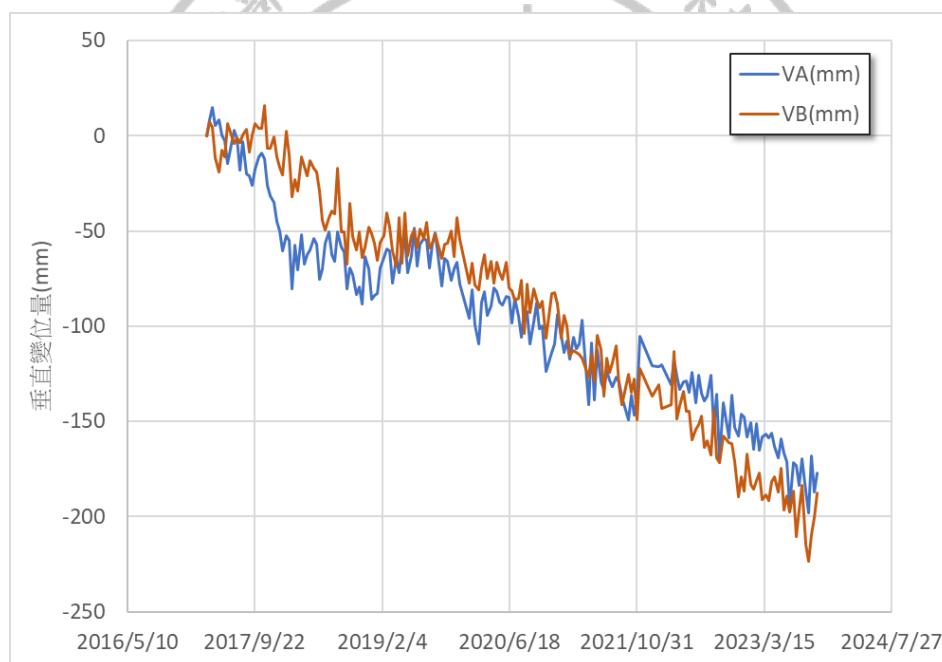


圖2-16南投縣-國姓鄉-T002觀察點垂直變位歷時

2024 年 4 月 3 日發生花蓮地震，故本期優先分析花蓮縣之大規模崩塌地五處，分析期間從 2022 年 7 月至 2024 年 7 月，以下分別說明結果。

四、花蓮縣-富里鄉-T004

茲將所得垂直變位速度結果繪製如圖 2-17 所示，由圖中可知過去兩年期間發生垂直向變位範圍，另將觀察點繪製歷時圖如圖 2-18 所示，可知 A 點在花蓮地震後產生加速，而 B 點則趨於穩定。



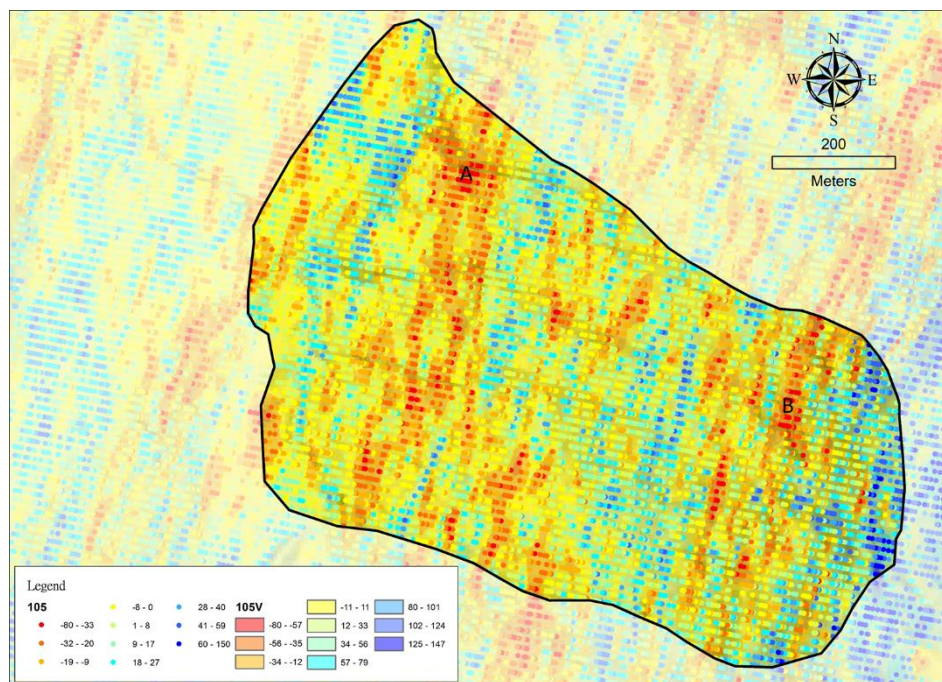


圖2-17花蓮縣-富里鄉-T004垂直變位速度圖

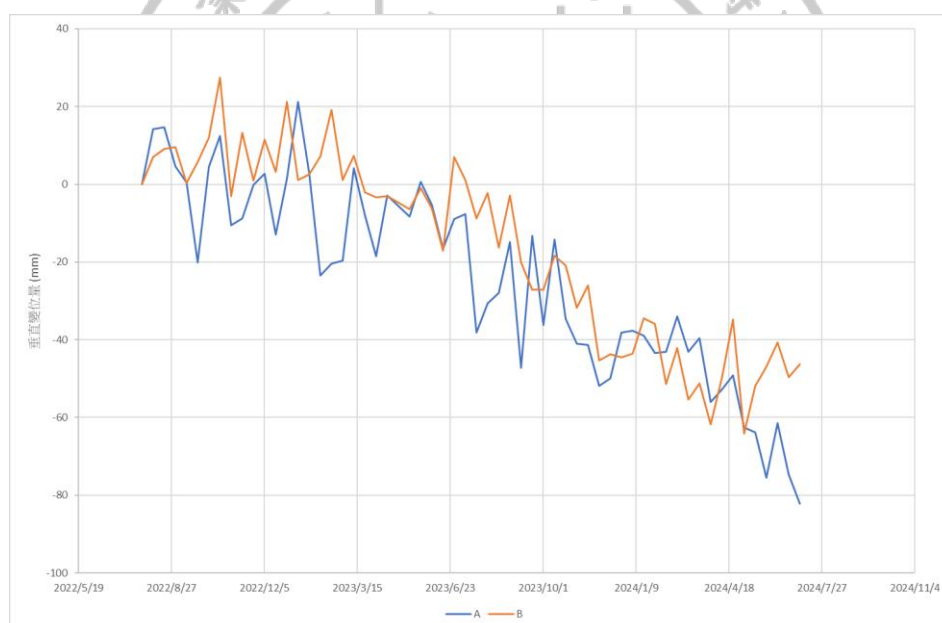


圖2-18花蓮縣-富里鄉-T004觀察點垂直變位歷時

五、花蓮縣-卓溪鄉-D007

茲將所得垂直變位速度結果繪製如圖 2-19 所示，由圖中可知過去兩年期間發生垂直向變位範圍，另將觀察點繪製歷時圖如圖 2-20 所示，可知 A 點在 2023 年 12 月之後趨於穩定。

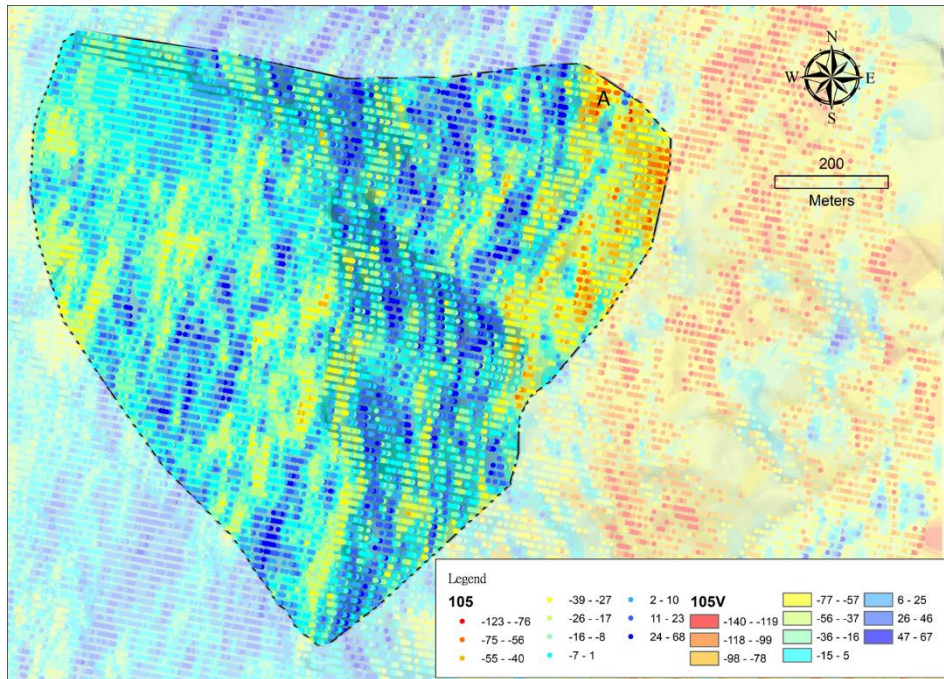


圖2-19花蓮縣-卓溪鄉-D007垂直變位速度圖

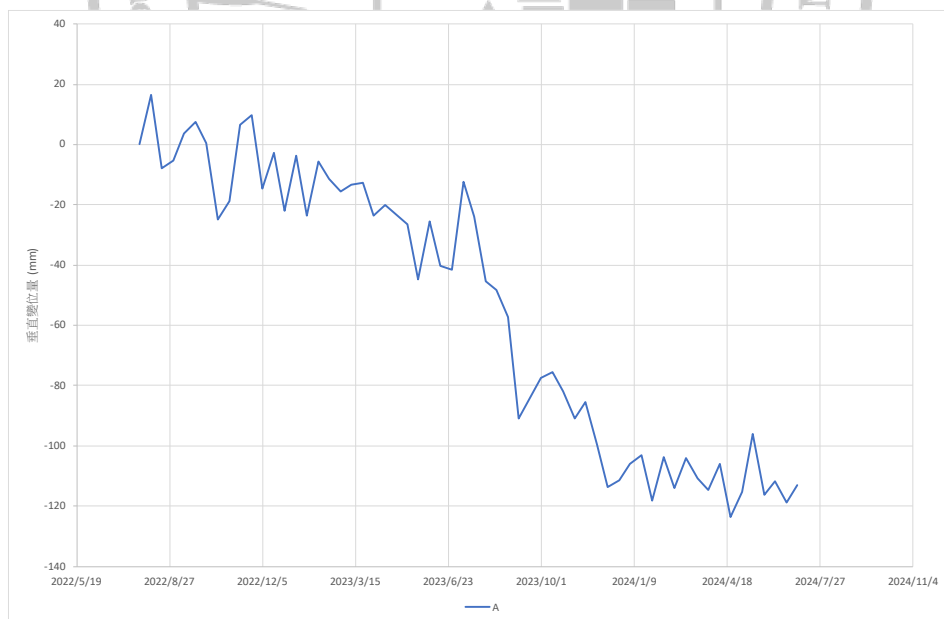


圖2-20花蓮縣-卓溪鄉-D007觀察點垂直變位歷時

六、花蓮縣-卓溪鄉-D010

茲將所得垂直變位速度結果繪製如圖 2-21 所示，由圖中可知過去兩年期間發生垂直向變位範圍，另將觀察點繪製歷時圖如圖 2-22 所示，可知 A 點趨於穩定，B 點則緩慢下滑。

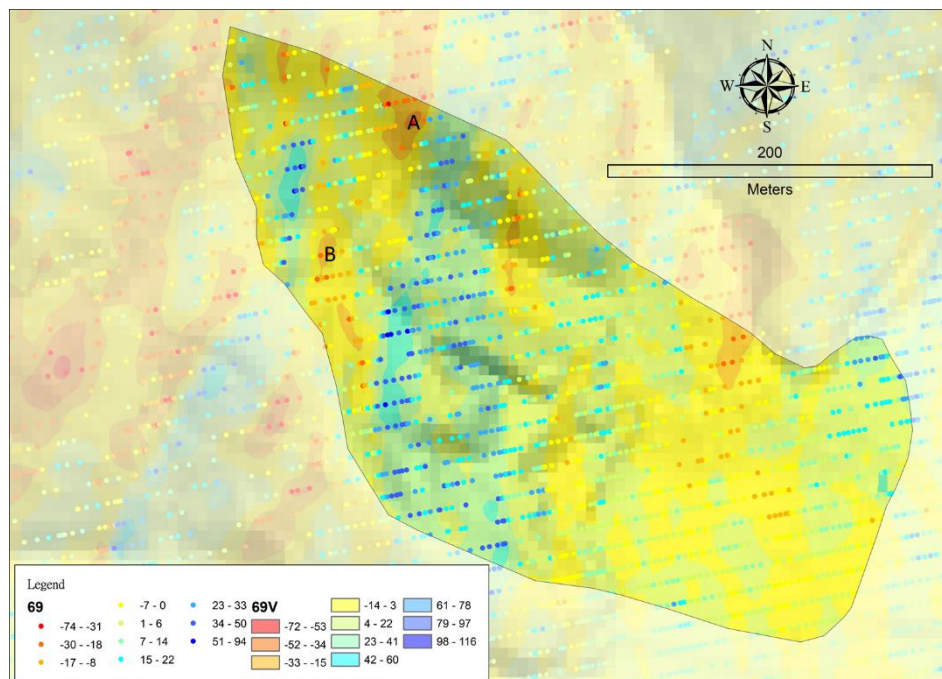


圖2-21花蓮縣-卓溪鄉-D010垂直變位速度圖

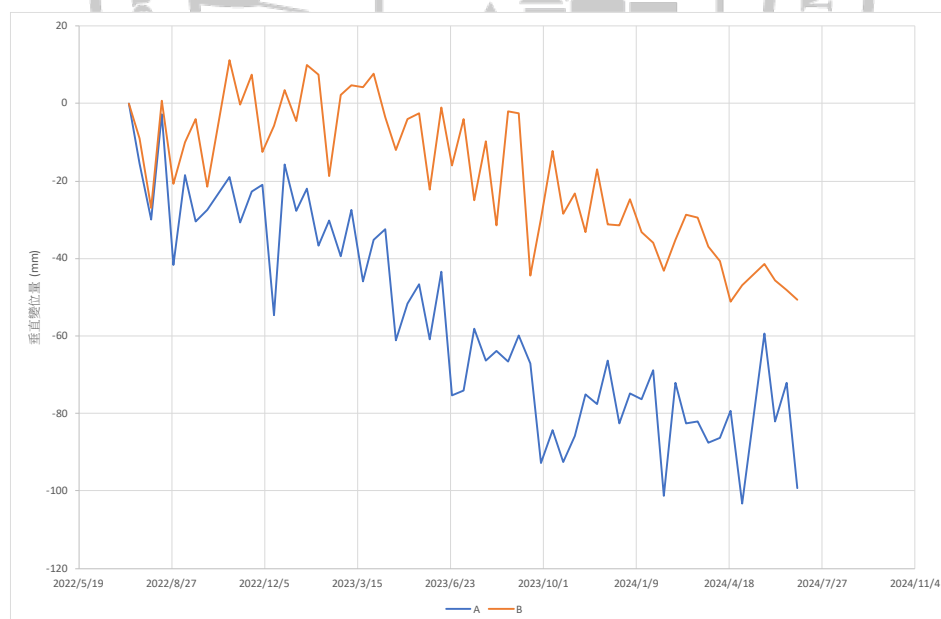


圖2-22花蓮縣-卓溪鄉-D010觀察點垂直變位歷時

七、花蓮縣-瑞穗鄉-D024

茲將所得垂直變位速度結果繪製如圖 2-23 所示，由圖中可知過去兩年期間發生垂直向變位範圍，另將觀察點繪製歷時圖如圖 2-24 所示，可知 A 點處於持續下滑的狀態。

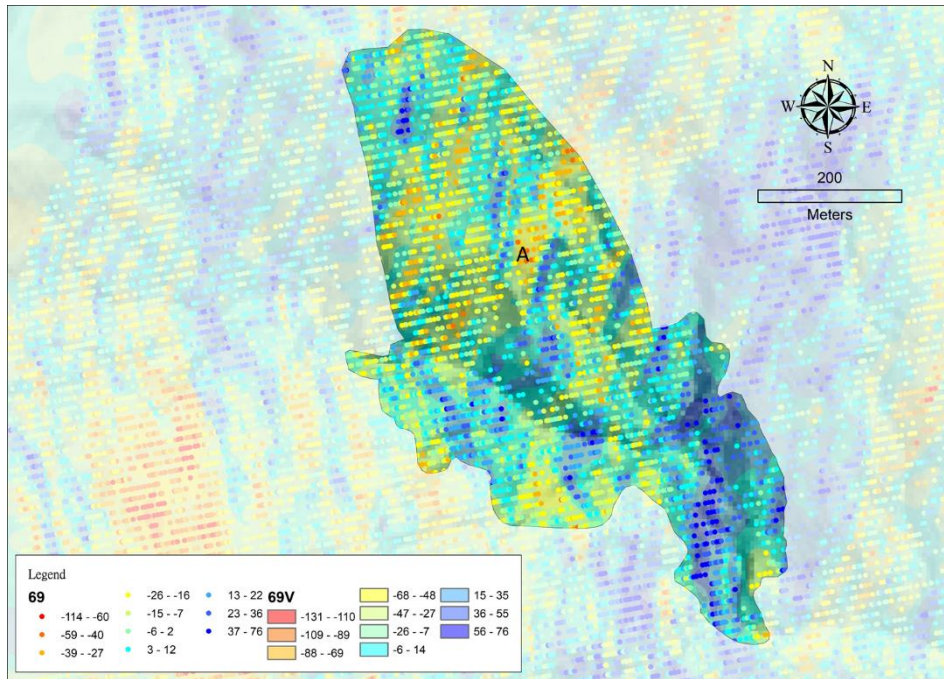


圖2-23花蓮縣-瑞穗鄉-D024垂直變位速度圖

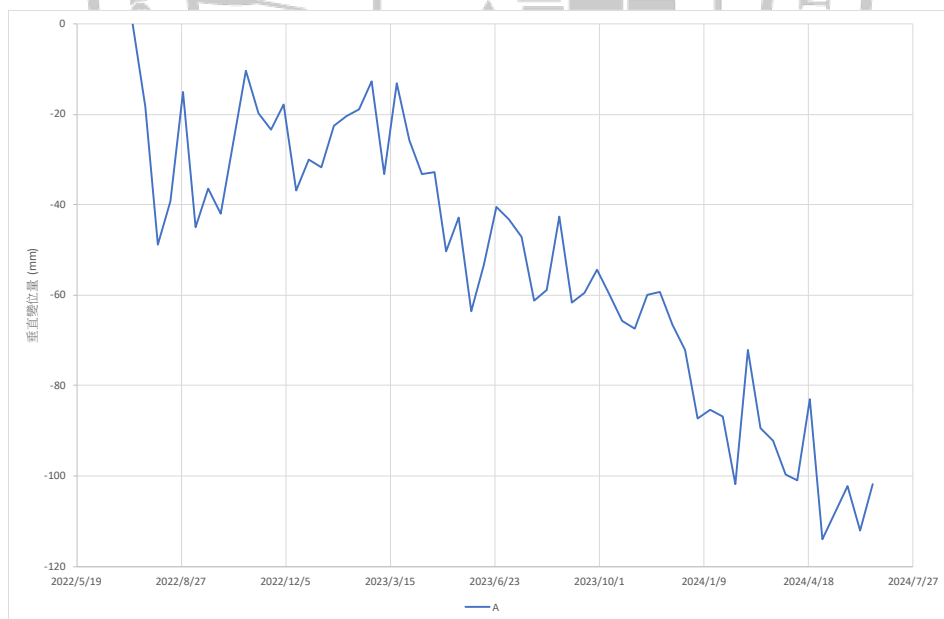


圖2-24花蓮縣-瑞穗鄉-D024觀察點垂直變位歷時

八、花蓮縣-玉里鎮-D018

茲將所得垂直變位速度結果繪製如圖 2-25 所示，由圖中可知過去兩年期間發生垂直向變位範圍，另將觀察點繪製歷時圖如圖 2-26 所示，可知兩點均處於持續下滑的狀態，且兩點於花蓮地震時均產生較大的變位，而後漸趨穩定。

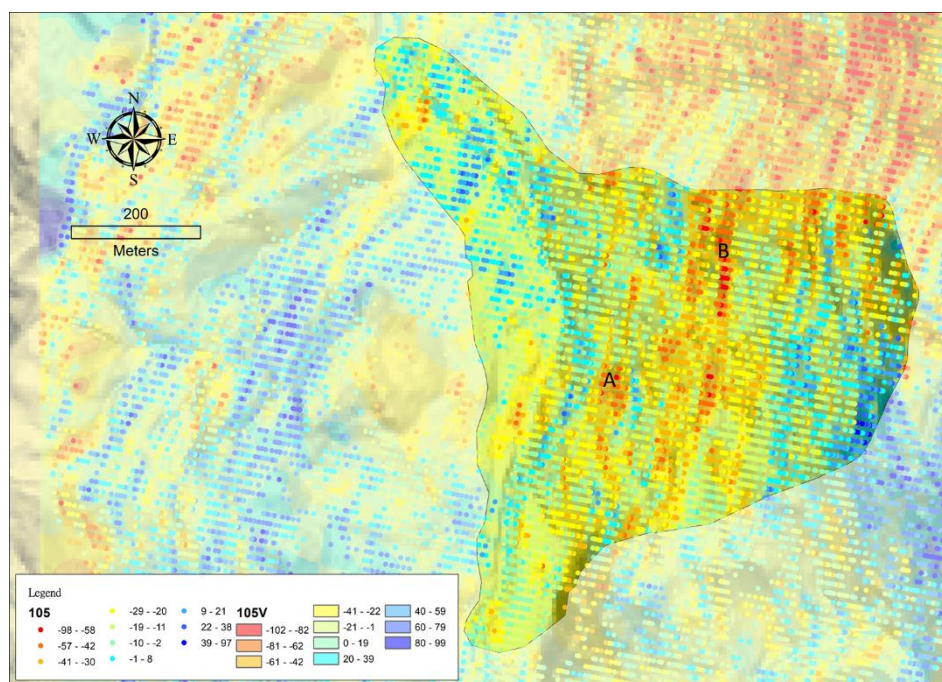


圖2-25花蓮縣-玉里鎮-D018垂直變位速度圖

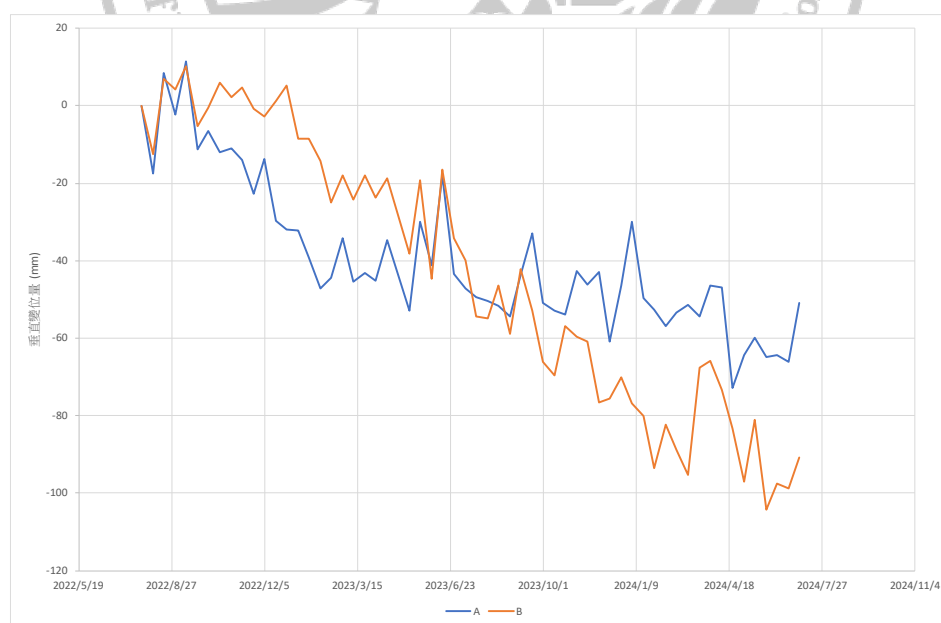


圖2-26花蓮縣-玉里鎮-D018觀察點垂直變位歷時

第三節 事件辨別方式

王國隆等人（2021）利用臺北市內湖區之坡地單元為基礎(圖 2-27)，建立了長期及短期變形速度區隔方式，在為期四年的分析結果中探討出當短期變形速度達到長期變形速度 1.1 以上時可視為事件型崩塌(如圖 2-28)，然由於前項分析所得資料為解算點，無法代表整個大規模崩塌之行為，故於下一階段之分析中，建立大規模崩塌區是否活躍之推定模式。

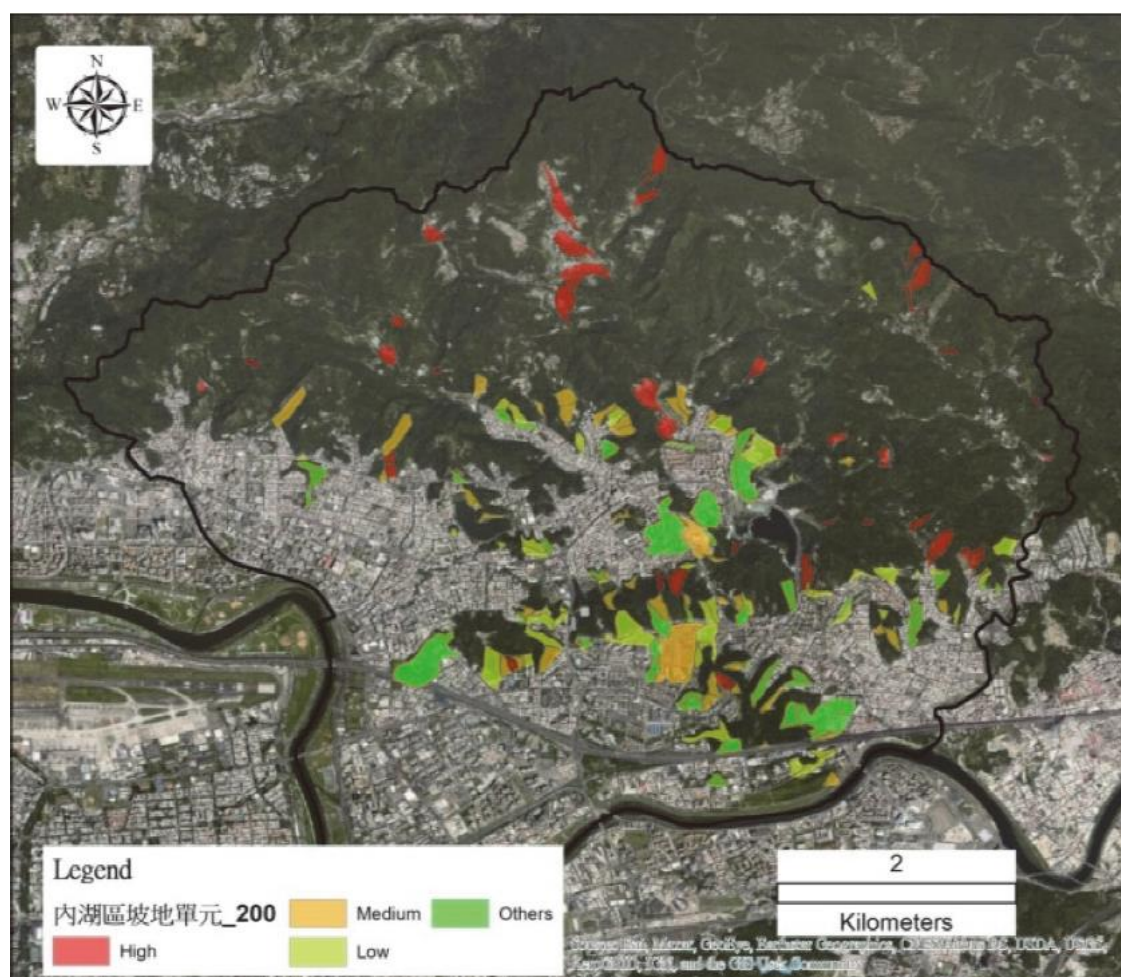


圖2-27 200處潛在滑動斜坡單元滑動速度潛勢分級(王國隆，2021)



圖2-28 篩選事件之示意圖（王國隆等人，2021）

茲將各大規模崩塌潛勢區變形速度取其平均整理如表 2-3 所示，將潛勢區內各解算點垂直變位速度取其平均值如第一資料欄，為瞭解潛勢區內確認下滑點情形，將高程向下之各點萃取後進行平均，所得結果如第二欄，所得結果之排序則與第一欄大致相符，然此一結果顯示在長期變形條件下，如以台北市變位潛勢分類為參考，大規模崩塌的範圍較大，此三處變位活躍性均分類為中低變形潛勢（6-12mm），此一結果與實際情況部分出入，如觀察如前所述之三處變形歷時，可能出現變形-停止-變形之循環；此外，大規模崩塌範圍面積較大，使用整體範圍為單一塊體檢視時可能造成低估，應可嘗試朝向將完整塊體切割為各滑動塊體後進行評估，或將本年度全台 48 處均進行分析之後，將統計結果進行歸納後再次進行分類。

表2-3 崩塌區內變位速度平均值

	V (mm/yr)	V neg(mm/yr)	2022 年 7 月 至 2023 年 9 月平均變形速 度(mm/yr)	2022 年 7 月至 2023 年 9 月單位 面積平均變形速 度(mm/yr)
南投縣-仁愛鄉- D066	-5.42	-7.86	-12.7	-0.25
南投縣-鹿谷鄉- D006	-7.01	-11.2	-23.5	-1.41
南投縣-國姓鄉- T002	-0.42	-7.67	-26.0	-0.14



第四節 活躍性分類

在前項工作中獲得之分析結果為點資料，為確認解算點是否影響整體大規模崩塌之行為，本研究將分類步驟簡述如下：

變形方向：由於前項分析結果產出為垂直變形量且具有至少每 12 天一組資料，為節省分析流程時間及效率，僅取出坡體變形往下者進行分析。

此外，由於前述利用整體大規模崩塌塊體可能造成變位潛勢較低，故本計畫將 2023 年度公開之 48 處大規模崩塌均進行分析，依據分析資料再次分級。

一、事件篩選：

基於前述參考文獻中之變形速度篩選機制，取出僅為事件變形之解算點進入下階段分析。

二、活躍性分類：

由於各大規模崩塌大小不一，在不考慮保全對象權重前提下，採用以變形為活躍性之分類較為客觀，故本階段以單位面積變形量高低作為正規化依據，由計算結果統計分類並計算出滑動活躍性。

第一期計畫成全台 48 處大規模崩塌篩選，分析時間訂為為 2022 年 7 月至 2023 年 9 月，以能跨越 2022 年底北部降雨事件及 2023 年卡努颱風後續豪雨事件，另為減少考慮坡向可能之問題，故 48 處均進行上升軌及下降軌分析，其中上升軌分析 36 幅，下降軌分析 35 幅，均採用短基線法（SBAS）分析。

48 處計算完成之 2022 年至 2023 年平均下降變位與坡向關係繪製如圖 2-29 所示，圖中顯示少部分坡向位於南向，均未有北向之坡向，亦即使用 DInSAR 分析之弱勢坡向在 48 處公開大規模崩塌潛勢區中佔比較低，暫不提出單獨討論。另將坡度與變位繪圖如圖 2-30 所示，可以觀察出整體上呈現坡度越陡變形越大的趨勢。

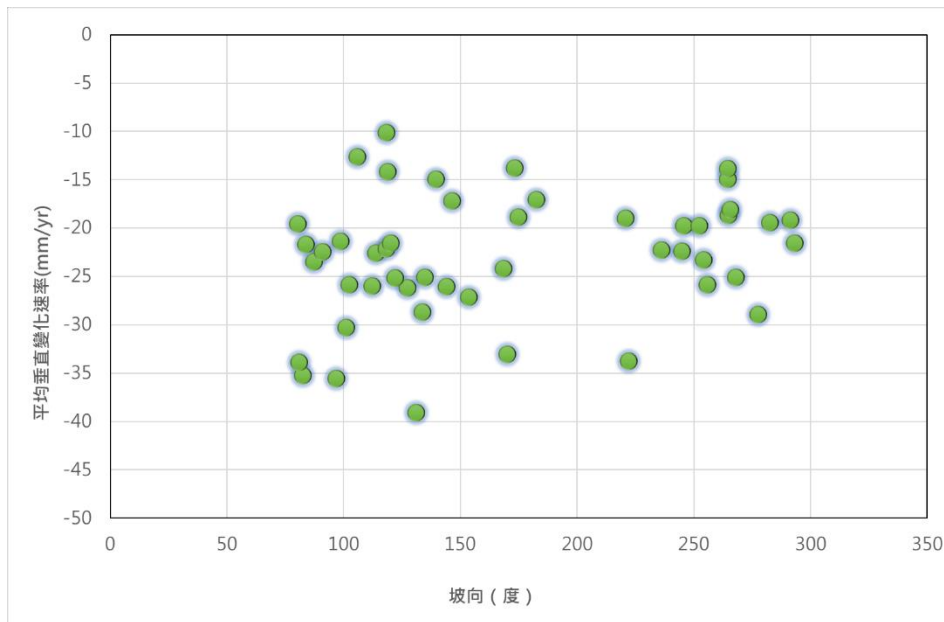


圖2-29 48處平均下降變位速度與坡向之關係

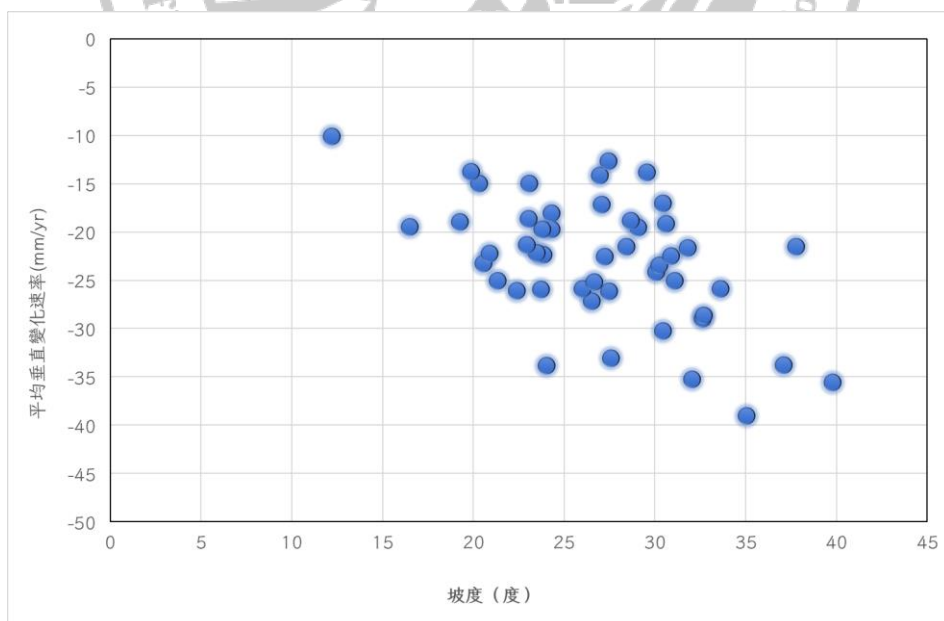


圖2-30 48處平均下降變位速度與坡度之關係

為將活躍性進行分級，本研究提出兩種方法，其一為整體潛勢範圍內平均下降速度，此一考量為如範圍內下降速度越高，可能之風險越高；其二為單位面積內平均下降速度，採用此一原則原因為大規模崩塌面積大小不一，可能造成的危害程度亦可能影響最終潛勢，將兩者累積百分比分別繪製如圖 2-31 及圖 2-32 所示，由圖中可見各圖之累積百分比上升情形爬升速度並非一致，顯示使用單位面積法可能可獲得不同結果，本案提出對應之累積百分比為活動性潛勢分級依據，將擬定之分級結果列如表 2-4 所示，分類時以中變位潛勢假設為百分之五十，其實分類各增減百分之二十做為界限，由圖中可知對應潛勢變形速度與台北市以斜坡單元之變形速度分佈並不相同，本案使用之平均變形速度法與現地調查與觀測較為一致，故建議在不考慮面積情形下，直接使用平均變形速度法即可。

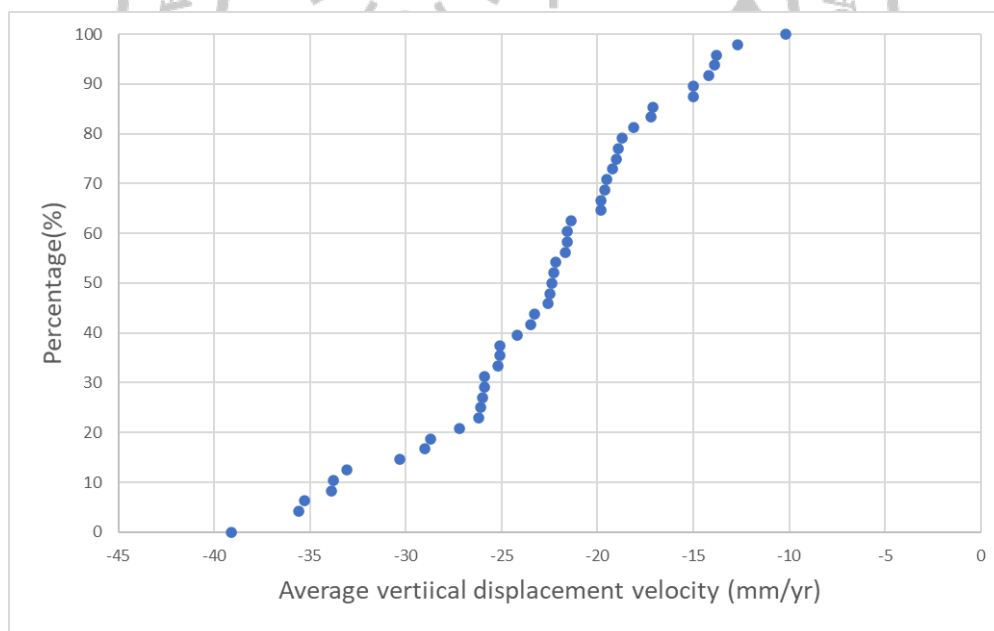


圖2-31 2022年7月至2023年9月之平均變形速度與百分比關係

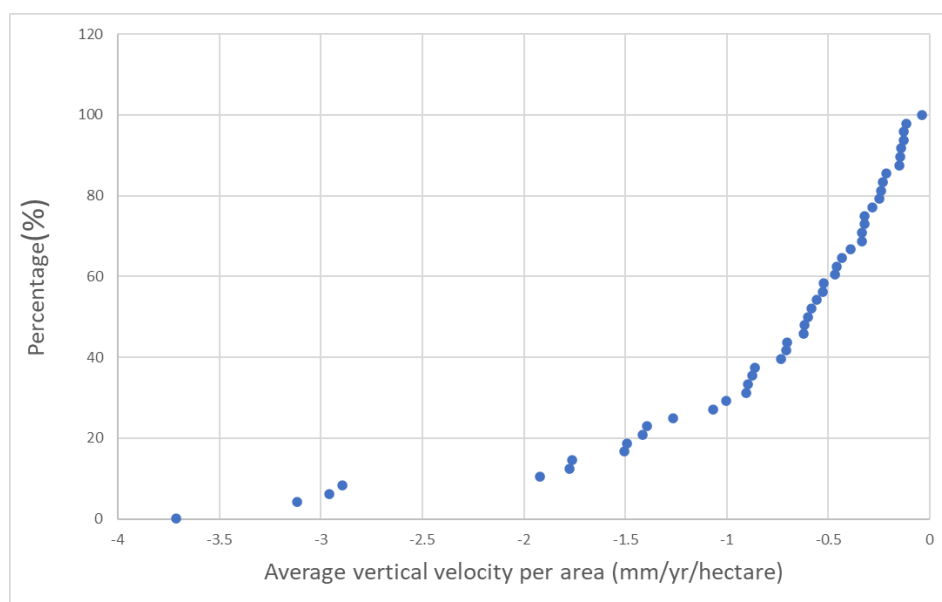


圖2-32 單位面積平均變形速度與百分比關係

表2-4 大規模崩塌潛勢分級門檻

	百分比	對應變形速度 (mm/yr)	對應單位面積變形速度 (mm/yr/hactare)
高變形潛勢	10	-33.85	-1.90
中高變形潛勢	30	-25.90	-1.00
中變形潛勢	50	-22.40	-0.60
中低變形潛勢	70	-19.50	-0.33
低變形潛勢	100	-10.00	0.00

表2-5 南投縣3處大規模崩塌變形活動潛勢分級

	台北市斜 坡單元法	本案平均變 形速度法	本案單位面積平均 變形速度法
南投縣-仁愛鄉- D066	中低	中低	低
南投縣-鹿谷鄉- D006	中低	中	中高
南投縣-國姓鄉- T002	中低	中高	低

本期延續前期分析，將 2023 年度公開之 48 處分析期限延伸至 2024 年 10 月，其中上升軌分析至 2024 年 10 月 17 日，共計 68 幅，下降軌分析至 2024 年 10 月 7 日，共計 66 幅。

在前期分析中，考量平均值是否能代表大規模崩塌，或可嘗試使用其他指標代替，在分析完成 48 處之後，將平均變形速度與中位數變形速度進行比較，其結果如圖 2-33 所示，由圖中可知在 48 處中使用中位數或平均值差異極小，且使用平均變為速度較能呈現變形情況，故建議採用平均變形速度即可。

然將本期完成之 48 處之平均變形速度與累積百分比關係製圖如圖 2-34 所示，將其與前期比較可發現，當時間拉長時，平均變形速度也將趨緩，故整體之變形速度數值（絕對值）均變小，故各處之變形潛勢分析時間越長，將無法凸顯出各處因事件變形特徵。故將 2023 年度變形與 2024 年度變形做圖如圖 2-35 所示，其中 2024 年因僅分析至 10 月份，將其變形「假設」乘以 12 除以 10 作為 2024 年變形，此一假設或與事實有差異，但仍可觀察其累積百分比趨勢，對照前期與本期結果，得出如果使用百分比作為潛勢分級門檻，則變形門檻值將持續變化，其優點為可控制中高潛勢以上個數。如將潛勢分級門檻鎖定為變形量，則每年各處之變形潛勢變化及中高變形潛勢以上數量將呈現浮動狀態。

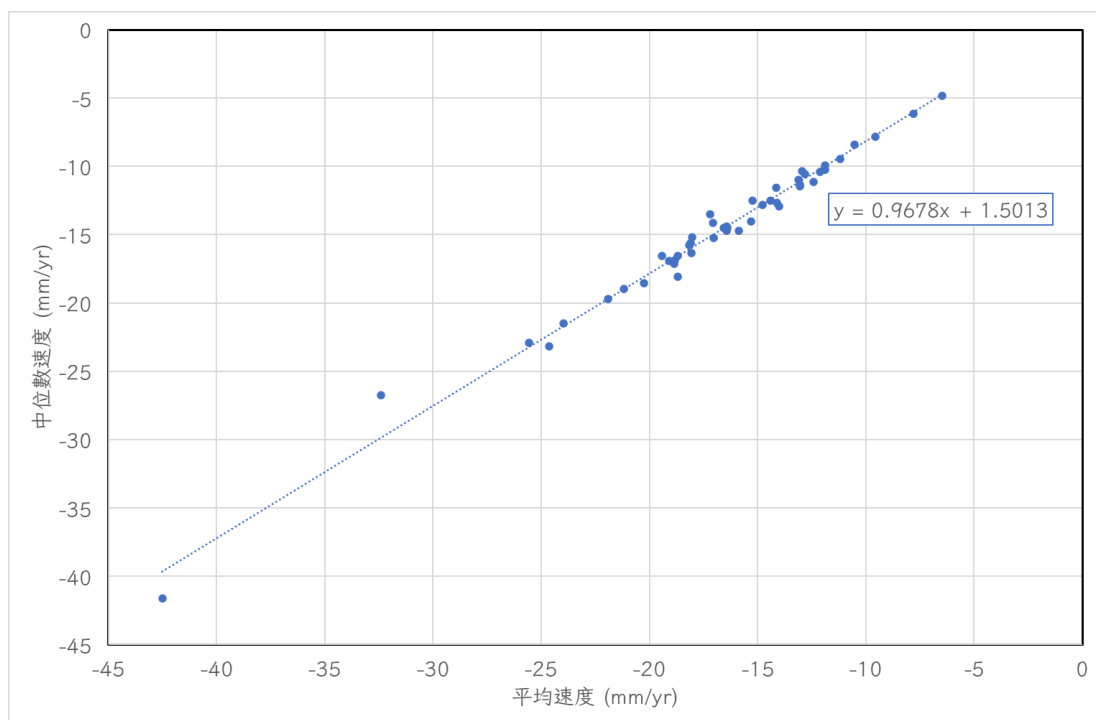


圖2-33 平均變形速度法與中位數變形速度關係

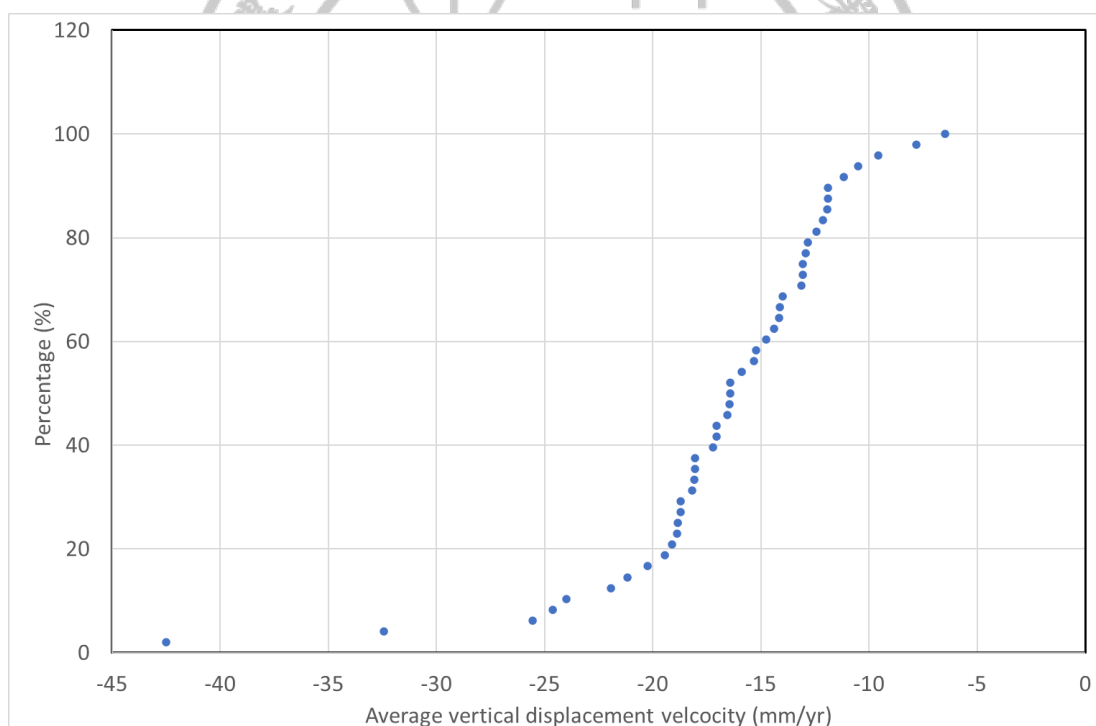


圖2-34 2022年7月至2024年10月之平均變形速度與百分比關係

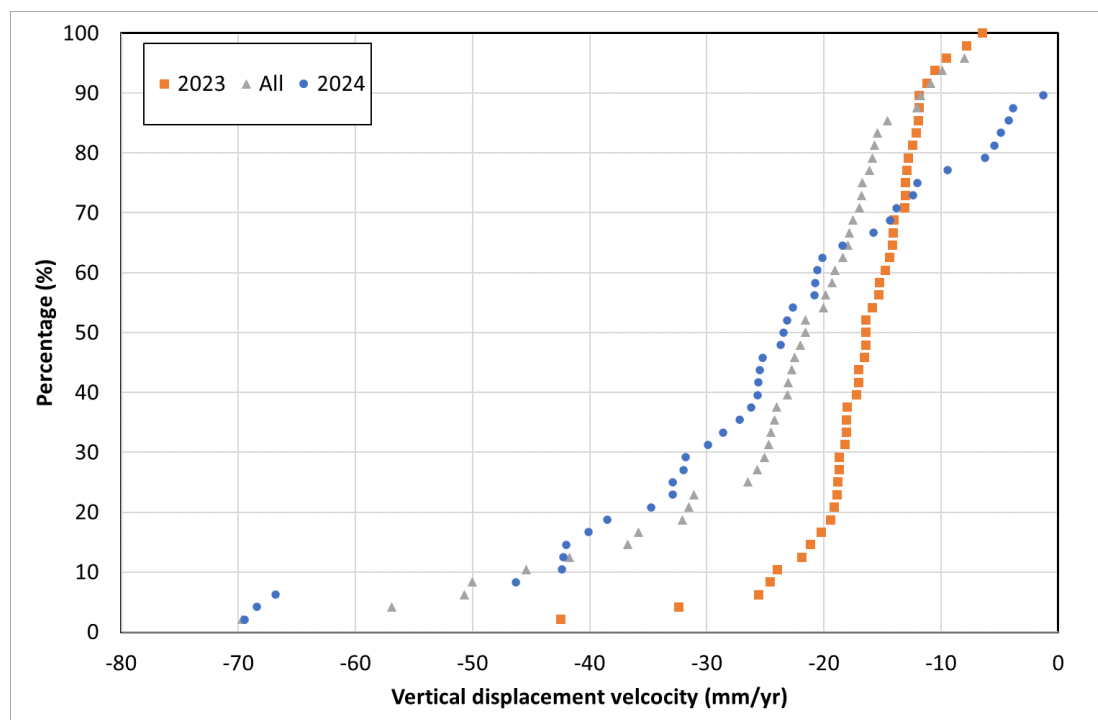


圖2-35 不同年份與平均變形速度百分比之關係



第三章 研究成果與創新性

本研究中運用免費申請下載之衛載合成孔徑雷達資料，建構連續式可行之分析模式，由於坡向控制分析結果之正確性，依據坡向採用軌道分析結果後建立是否為降雨事件產生之類型，並據以建立大規模崩塌活躍性分類，為大規模崩塌之活躍性與否提供更精細之探討。所得測試結果顯示此一分析流程具有可行性，期中時由於花蓮地震發生，故先執行花蓮縣內前期分析過之五處大規模崩塌區，期末時延伸分析其餘崩塌區。

前期本案依據固定平均變形速度、百分比切割法平均變形速度、百分比切割法單位面積平均變形速度等方法，界定出大規模之變形潛勢。

使用百分比作為潛勢分級門檻，則變形門檻值將持續變化，其優點為可控制中高潛勢以上個數。如將潛勢分級門檻鎖定為變形量，則每年各處之變形潛勢變化及中高變形潛勢以上數量將呈現浮動狀態。

由兩期分析結果顯示，地表變形受外在因素影響甚劇，建議在此計畫規模下，先縮減研究範圍，拉長研究時間，將外力導致之變形影響詳細探討，例如地震後可能之變形影響時間，或降雨後導致之變形影響區間等，也可導入AI學習判斷外力作用下之變形預測。



第四章 計畫進度甘特圖

本補助計畫自 113 年 2 月 7 日開始至民國 113 年 12 月 31 日，計畫甘特圖如表 4-1。重要期程一覽，如表 4-2。

表4-1 計畫甘特圖

項次	工作項目	2024 年										
		2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
一	多時序合成孔徑雷達影像資料蒐集及建置											
二	多時序判釋堆疊分析											
三	坡向為導向之合成孔徑雷達地表變位模式建立											
四	重力變形或降雨導致滑移之大規模崩塌區別											
五	以事件為基礎之大規模崩塌活躍性分類方法建立											
	各階段成果報告	2/7 計畫開始					7/17 期中計畫書				11/13 期末計畫書	12/31 成果報告
1	期中報告						★					
2	期末報告										★	
3	成果報告											★
	進度累積百分比(%)	5	10	20	30	45	60	70		80	90	100

表4-2 重要期程一覽

工作項目	應完成時間
提送期中報告書(一式 5 份)	於 113 年 7 月 17 日前
提送期末報告書(一式 5 份)	於 113 年 11 月 13 日前
交付成果報告書(一式 5 份)及 結束會計報告	預估於 113 年 12 月 31 日前



參考文獻

1. 王國隆, 林俊廷, 吳建羣, 陳建帆, 邱亭瑋, 謝旻希 (2021 年 03 月)。山坡地變形潛勢分級研究 – 以台北市內湖區為例。中國土木水利工程學刊 (EI)
2. 卜艾西, 「利用 SAR 干涉測量研究菲律賓雷伊泰 Tongonan 地熱場抽提地熱水引起的地面沉降」, 國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文, 2018
3. 王倍紋, 「應用 Sentinel-1A 合成孔徑雷達影像於邊坡變位監測之研究」, 國立中興大學水土保持學系所碩士論文, 2020
4. 努巴迪, 「用於滑坡監測的 PS- 和 SBAS-InSAR 處理的參數研究——以阿里山為例」, 國立中央大學土木工程學系碩士論文, 2021
5. 吳笙緯, 「應用短基線集干涉技術探討六龜地區地表形變」, 國立交通大學土木工程系所碩士論文, 2019
6. 李佳純, 「降雨觸發崩塌的可能性評估研究—以高屏溪流域為例」, 國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文, 2012
7. 李恩誠, 「應用 Sentinel-1A 影像與 SBAS 方法監測屏東沿海地區地層下陷」, 國立交通大學土木工程系所碩士論文, 2020
8. 阮銘, 「應用 Sentinel-1 衛星 TOPS 合成孔徑雷達及最小基線長分析技術監測越南河內的地層下陷」, 國立中央大學遙測科技碩士學位學程碩士論文, 2018
9. 阮蔡榮長, 「應用 SBAS-DInSAR 技術分析濁水溪沖積扇沈陷型態與地下水及降雨變化之關聯性」, 國立中央大學應用地質研究所碩士論文, 2021
10. 林俊廷, 「以衛載雷達影像分析進行崩塌潛勢及潛在量體評估」, 國立暨南國際大學土木工程學系博士論文, 2021

11. 林紹弘,「利用持久性散射體合成孔徑雷達干涉技術與數值模型探討台北盆地地下水引起的地表變形與水力參數」,國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文,2018
12. 洪翊甯,「應用 PS-InSAR 於大屯火山地表形變之長期監測」,國立政治大學地政研究所碩士論文,2012
13. 張育璋,「利用雷達干涉測定雲林地區地層下陷和儲水係數」,國立陽明交通大學土木工程系所碩士論文,2021
14. 陳郁琪,「PS-InSAR 技術於台灣山區地形變化偵測誤差因素分析」,國立成功大學資源工程學系碩士論文,2019
15. 楊苡絮,「以 Sentinel-1A SAR 及 SBAS 方法監測雲林地區地層下陷」,國立交通大學土木工程系所碩士論文,2018
16. 楊豐毓 2012,「多元衛星雷達影像於臺灣北部 執行 PS-InSAR 之研究」,國立政治大學地政研究所碩士論文,2012
17. 歐司瓦,「應用多時域雷達干涉技術於台灣屏東平原沿海區域測量抽水引致地層下陷」,國立中央大學應用地質研究所碩士論文,2018
18. 盧志恒,「應用雷達影像分析地質災害的特性與時空分佈」,國立中央大學應用地質研究所博士論文,2018
19. 戴于恒,「應用合成孔徑雷達差分干涉技術監測山崩之潛移現象—以九份及烏來地區為例」,國立中央大學地球科學學系碩士論文,2016
20. 謝渝棋,「以 SBAS-InSAR 技術監測土壤沖蝕變化」,國立中興大學水土保持學系所碩士論文,2020
21. 魏祥鴻,「利用雷達測高衛星 Cryosat-2 及 ICESat 監測雲林及加州高鐵沿線嚴重地層下陷區:與水準、GPS 及 Sentinel-1A SAR 結果比較」,國立陽明交通大學土木工程系所博士論文,2021
22. Kuo-Lung Wang, Jun-Tin Lin, Hsun-Kuang Chu, Chao-Wei Chen,

Chia-Hao Lu, Jyun-Yen Wang, Hsi-Hung Lin and Chung-Chi Chi (2021, Nov). High-resolution LiDAR digital elevation model referenced landslide slide observation with differential interferometric radar, GNSS, and Underground measurements. Applied Sciences, 11(23) 11389.. (SCIE)





附錄

附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	P2-2 本案使用 ALOS 與 sentinel 系列影像，但後文僅提到 Sentinel 的分析結果，ALOS 成果是否於成果報告一併提出比較？	原先規劃使用 ALOS，然計畫主持人所收集之 ALOS 及 ALOS2 高解析度模式有限，無法解算全台大規模崩塌位置，雖可改用較差解析度之 SCANSAR 模式，然其對於面積較小之大規模崩塌解析能力較差，最終放棄使用 ALOS/ALOS2。
二	請詳加補述多時序判釋堆疊分析方法與過程，並說明大規模崩塌選址(3 處)及各場址 AB 關注點之原因及條件。	方法已補充。三處選址為原先計畫書提出之公開 48 處南投縣內三處，後續發現使用三處在整體統計上無法進行有效辨識，故在前一年度期中報告完成後決定將全台 48 處均進行分析討論。在選擇關注點順序上依序為 a. 變形速度快，b. 地形起伏小 c. 保全對象等。
三	本研究僅針對垂直變位速度進行分析，雖可觀察同一空間點位多時序之高程隆起或下降之現象，是否有明確之規則可推論出大規模崩塌之特徵？或是推導出坡體滑動方向及速度？	使用垂直向變形其中之主要目的為早期發現滑動特徵，如出現趾部隆起時已經發展出全面性破壞，以早期偵測為目的時，僅計入下陷位置。對於各種崩塌類型之變形規則，仍須就個案詳細分析後才有機會歸納。本案使用過多時間才將 48 處分析完畢，如後續仍持進行可考慮。推導出坡向速度並非困難，然就邊坡受力變形解釋時，坡向速度可能存在計算錯誤可能導致無法以物理意義解釋，採用垂直變形為目前較為可靠之指標。
四	本研究針對各大規模崩塌之垂直	濾除訊號時採用設定誤差法，

	變位結果進行雜訊濾除，其主要濾除之雜訊種類為何？濾除方法為何？	設定水平及垂直誤差為門檻條件，將理論上過大誤差進行濾除。當進行事件分析時，則以長期速度為參考值，將反向變形點位濾除。
五	研究中僅針對每一崩塌區內之單點或雙點觀察其垂直變位歷時變化，是否可能觀察剖面線或面積範圍內之高程變化趨勢？	因已產生解算點，可將解算點製作高度暈染圖後則可切取變形剖面。
六	請補充說明表 2-3 的百分比欄位門檻值之原則。	已補充於報告中。
七	參考文獻僅列出計畫主持人著作之兩篇論文，建議多增加國內外相關參考文獻，以了解相關研究之最新進展及應用。	已補充參考文獻。



附錄二、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	建議加強說明實際完成度與可行性、以及影像資料的資訊，如幅數、極化與升降軌。	使用之影像資訊於報告中 P2-30 頁已說明，所規劃之全台 48 處也已完成。
二	各區域達到災害發生的臨界值可能不同，要如何界定統一標準？另建議概述大崩的影響範圍與保全對象。	目前使用發生方法為「發生度」，如本報告結論，欲達到一體適用標準可能因為面積或變形量及年度產生浮動標準。 目前影響範圍與保全對象仍以公開資料為標準。
三	即時監測的時效為何？觀測的水平與垂直解算精度為何？	即時監測的時間為取得影像計算，目前取的影像的頻率為每 12 天一幅。 水平解算精度在東西向與南北向不同，以垂直像計算公式較無爭議，另，由於 SAR 衛星為側向發射接收，精度在不同的坡向和坡度均不同，除非進行單點監測才可確認。過去本人研究中在平原地區垂直精度可達 1mm，在山區垂直精度為 12mm。
四	長期觀測定義為 3 個月，是否有統計分析？	在過去分析經驗及變位歷時記錄上，以兩幅相鄰分隔時間容易產生變位跳動產生錯誤計數，統計資料顯示將 3 個月（96 天，8 幅）資料作為標準檢查可有效降低錯誤判斷次數。
五	C-band 可能有無法穿透地面的問題，是否需要增加地表反射點以增加觀測精度？	應為無法穿透茂密植生，此一情形在冬日落葉時或將分析時間加密可能可以解決，在本案分析時曾發現植生條件可能造成較大的數值跳動範圍，但不影響整體趨勢。 地表反射點確實能增加解算精度和密度，然其建設經費不易納入，建議仍以自然解算點或工程施工位置進行增加反射點設計。