計畫編號：**ARDSWC-113-091**

多元衛星測量方法應用於崩塌坡面地形變遷分析與穩定性評估 II

Applying multi-satellite observations for landslide morphological change analysis and stability assessment II

(成果報告)

執行　單位：國立中央大學

執行　期間：113 年 02 月 07 日至 113 年 12 月 31 日

計畫主持人：姜壽浩 中央大學太空及遙測研究中心 副教授

研究　人員：劉子榕 研究助理

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，僅供本局施政參考）

摘要

本計畫提出一多元衛星測量方法，整合光學以及雷達衛星觀測資料，應用於崩塌地形監測，並根據邊坡土砂堆積變動情形以評估其之穩定性，以期能對土砂災害防治工作提供助益。本計畫預計為二年期計畫，第一年期之主要目的為運用光學衛星資料建立新型影像指標用於快速偵測因崩塌造成之不安定土砂之分布位置。第二年期所應用之高程測量方法為本團隊於 111 年水保局創新計畫「精進雷達衛星 InSAR 技術於河道侵淤高程變化測量」提出之 InSAR 高程測量技術，其方法為整合地面控制點資訊、衛星測量參數與機器學習演算法以精進高程測量結果。本計畫針對高雄玉穗溪於 2021 年 8 月盧碧颱風發生之崩塌地與土石流等地形變遷事件進行研究，並使用 Sentinel-1 多時序雷達衛星影像建立多時序之地形，並與農村水保署提供之空拍機生產之地形資料進行比對。結果發現，本計畫利用 InSAR 技術產制之高程資料與空拍機資料相比，約有 4~8 公尺方均根誤差，但總體能反映地形的時序變遷，本研究亦發現研究區之崩塌物與堆積土砂仍持續往下游輸送砂源，顯為不安定土砂之重要來源，未來仍將持續對下游造成影響。

關鍵詞：崩塌監測、合成孔徑雷達、高程測量、InSAR 技術、颱風

ABSTRACT

This project aims to propose a satellite-based method to monitor the surface dynamics of landslides by integrating optical and Synthetic Aperture Rara (SAR) observations. This second-year project focuses on the application of InSAR on landslide elevation estimation to understand the temporal change of landslide surfaces, followed by the optical index delineation of unstable areas of landslides in the first year. The method applied in this study was developed in the 2022-year project, utilizing machine learning techniques to improve the InSAR elevation estimation by incorporating Ground Control Points (GCPs), and satellite observation parameters. This project uses multitemporal Sentinel-1 to perform the InSAR analysis and the landslides in Yusui Creek are selected as the monitoring targets. We utilized multi-temporal Sentinel-1 imagery to construct multi-temporal elevation models and compared them with terrain data produced by drones provided by the Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation. The results indicated that the elevation data generated using InSAR technology had a root mean square error (RMSE) of approximately 4 to 8 meters compared to the drone data. However, it is able to capture the temporal morphological changes due to the impact of Typhoon Lupit in August 2021. The study also revealed that landslide debris and deposited sediment in the study area will continue to impact downstream areas in the future.

Keywords: landslide monitoring, Synthetic Aperture Radar, Elevation estimation, InSAR, Typhoon

目次

ABSTRACT IV

目次 V

表次 VI

圖次 VII

第一章 緒論 1-1

第一節 研究背景與目的 1-1

第二節 工作項目與進度 1-5

第二章 研究區與研究方法 2-1

第一節 研究區與汛期降雨事件 2-1

第二節 研究方法 2-8

第三章 研究成果 3-1

第一節 研究資料收集 3-1

第二節 InSAR 高程測量試驗 3-10

第三節 多時序 InSAR 高程測量 3-13

第四節 無人機高程比對 InSAR 高程 3-17

第五節 不安定土砂估計 3-19

第四章 結論 4-1

參考文獻 附-1

附錄一、 期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形 參-1

附錄二、 期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形 參-3

表次

表 3- 1 本計畫選取之 SENTINL-1 影像 3-2

表 3- 2 PSCs 解算使用 SENTINEL-1 影像..... 3-5

表 3- 3 農村與水土保持署無人機空拍任務資料收集 3-6

表 3- 4 INSAR 高程校正前後誤差統計 3-12

表 3- 5 本研究解算高程使用之 SENTINEL-1 雷達影像對..... 3-13

表 3- 6 空拍機 DSM 與 INSAR DSM 觀測統計(公尺)..... 3-20

表 3- 7 盧碧颱風後玉穗溪集水區崩塌及不安定土砂估算 3-21

表 3- 8 盧碧颱風後玉穗溪集水區沖積扇土砂估算 3-21

圖次

圖 1- 1 玉穗溪及其上游崩塌之 SENTINEL-2 光學影像 1-2

圖 1- 2 玉穗溪上游斯拉巴庫山邊坡崩塌變遷過程 1-3

圖 1- 3 玉穗溪上游邊坡崩塌權重樣態指標(WLSI)變遷分析 1-4

圖 2- 1 荖濃溪流域中段研究區範圍..... 2-2

圖 2- 2 玉穗溪集水區多時期崩塌分布..... 2-2

圖 2- 3 玉穗溪流域周邊復興雨量站及小關山雨量站位置 2-3

圖 2- 4 2021 年盧碧颱風-玉穗溪崩塌及河道土砂變化..... 2-5

圖 2- 5 研究區復興河段 8 月 7 日降雨事件後現況..... 2-7

圖 2- 6 隨機森林作用原理示意圖 2-13

圖 2- 7 隨機森林高程誤差校正模式架構..... 2-14

圖 3-1 INSAR 雷達影像對同調性 COHERENCE 分布情形圖 3-1

圖 3- 2 地面控制點分布 3-5

圖 3- 3 2021 盧碧颱風(左圖)以及 2023 年 8 月 22-23 強降雨(右圖)之重大土砂災例最速報 3-9

圖 3- 4 高程精度校正試驗 3-11

圖 3- 5 研究區 INSAR 高程校正初步成果..... 3-12

圖 3- 6 INSAR 雷達影像對之 INSAR 高程計算成果..... 3-16

圖 3- 7 無人機空拍所得之 DSM 與 INSAR 所得之高程進行比較 . 3-18

圖 3- 8 2021 年盧碧颱風前後之高程變化 3-20

圖 3- 9 2021 盧碧颱風前-2023 年 11 月之高程變化..... 3-22

第一章 緒論

第一節 研究背景與目的

台灣山區崩塌、土石流以及河岸侵蝕等造成之輸砂往往成為集水區管理之重大問題，山區野溪因不易到達且河道土砂變化快，本計畫提出一基於雷達衛星影像之方法，進行不同時期之高程測量工作，能即時、快速進行玉穗溪上游之崩塌地裸露面高程變動之監測。

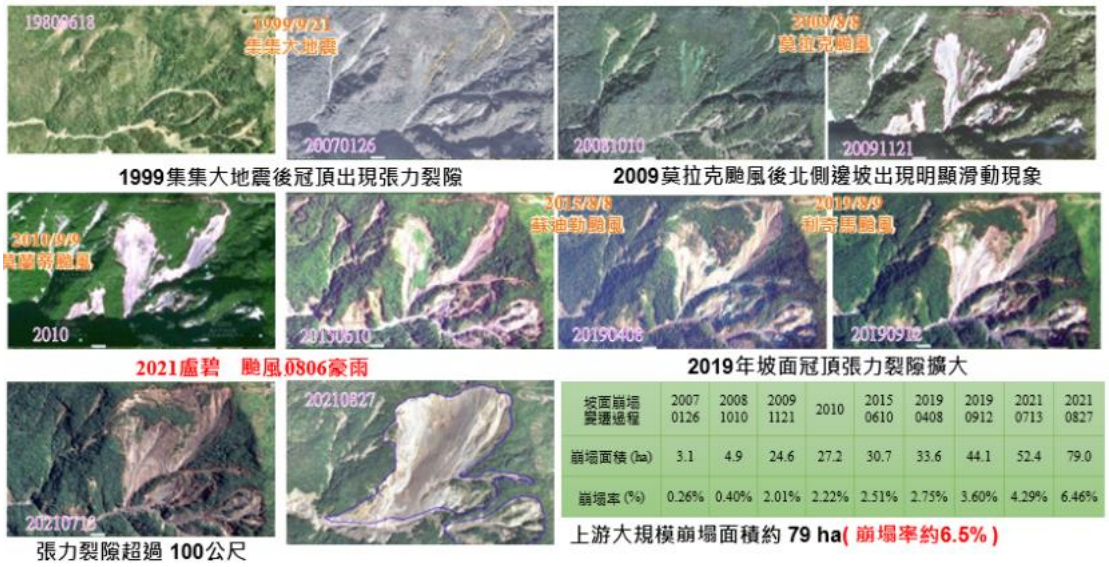
近年來合成孔徑雷達影像已經開始應用於山區崩塌之監測與預判工作(Colesanti and Wasowski, 2006; Bovenga et al., 2012; Raspini et al., 2015)，主要為偵測潛在崩塌地區或崩塌事件前後地表變異之訊號。此外因為合成孔徑雷達感測器屬於主動式微波感測器，相較於光學感測器，其波長較長可以穿透雲層，觀測較不受天候影響。運用雷達影像可用於監測地表變形，其方法為求算不同時期之雷達觀測回波之相位差，如DInSAR(合成孔徑雷達差分干涉，Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar)、PS-InSAR(永久散射體差分干涉技術，Persistent Scatterers InSAR)等方法(Hopper et al., 2004)。目前國內已有研究運用雷達影像於崩塌判釋或潛在崩塌地區的變形偵測上(王國隆、林俊廷，2014; 陳柔妃等，2015)。另外則是利用差分干涉結果中所含的地形干涉相位 (Topographic Interferometric Phase) 資訊來計算地表高程，並建置數值高程模型(吳彥誼等，2020)，利用不同時期建立之DEM來計算地表變形量。使用 InSAR 技術進行高程測量有許多先天性的優勢，相較於光學衛星，雷達影像的取得不受日夜及天氣的影響；且較無人力需求的考量，不耗費時間與金錢來取得，可在較短時間取得大面積的影像(吳彥誼等，2020)。

本研究於111年期創新研究計畫「精進雷達衛星InSAR技術於河道侵淤高程變化測量」中成果指出，主要為透過影像資料品質篩選的條件去確立其製作出之DEM之品質與最小誤差，並利用InSAR技術建立較為可靠的高程測量結果，結果則有可選擇應用之影像對較少，可用影像對取用時間不固定的問題。為增進雷達資料的應用價值，本計畫則將基於前期計畫之成果，針對導致InSAR高程測量之誤差來源進行分析與解決，本研究使用不同時間段之雷達資料與UAV正射影像去做進一步校正，且引入機器學習技術嘗試縮小觀測誤差，除如前期計畫提高河川高程變化測量之精度準確性外，同時將此研究技術套用在河川上游崩塌地之高程測量精度上做應用。本研究計畫針對2021年8月3日侵台之盧碧颱風為研究事件，該颱風為台灣本島中南部帶來超大豪雨，並於2021年8月7日至9日連續三日中南部的降雨量高達800至1,200 mm，其農業損失約4.3億(中央氣象局，2021)。本計畫選定研究區為玉穗溪源頭之崩塌地區域(圖1- 1)。



圖 1- 1 玉穗溪及其上游崩塌(圖右側)之 Sentinel-2 光學影像(拍攝時間為 2021 年 8 月 28 日)

根據農村水保署-BigGIS平台可查閱之歷年光學衛星影像資料(其影像時間自1980至2021年為止共計10幅，圖1- 2)，可判釋玉穗溪上游斯拉巴庫山邊坡崩塌變遷過程。由歷年衛星及正射影像崩塌面積判釋成果，自1980年至2009年莫拉克風災前，其坡面僅部份蝕溝出現；但於莫拉克颱風後，坡面出現大範圍崩塌且冠部出現明顯張力裂隙；自2015年蘇迪勒颱風後，冠部張力裂隙與下部未崩塌區形成明顯殘坡區塊，並形成暫態平衡或不穩定平衡之不安定土砂殘留於坡面上；自2019年利奇馬颱風至2021年7月影像資料，該殘坡下部崩落部份擴大且冠部張力裂隙區域往坡面下部滑移，造成冠部張力裂隙寬度已超過100公尺；於2021年8月盧碧颱風及0806豪雨之長延時降雨影響下，該殘坡不安定土砂崩落於河道下，土砂生產量約851萬立方公尺。



坡面崩塌變遷過程	2007 0126	2008 1010	2009 1121	2010	2015 0610	2019 0408	2019 0912	2021 0713	2021 0827
崩塌面積 (ha)	3.1	4.9	24.6	27.2	30.7	33.6	44.1	52.4	79.0
崩塌率 (%)	0.26%	0.40%	2.01%	2.22%	2.51%	2.75%	3.60%	4.29%	6.46%

圖 1- 2 玉穗溪上游斯拉巴庫山邊坡崩塌變遷過程

(資料來源：農村水保署-BigGIS 平台)

本計畫第一年(112年)期之研究成果，根據2021年8月28日之玉穗溪上游邊坡崩塌位置之崩塌權重樣態指標(Weighted Landslide State

Index, WLSI)影像(圖1- 3)，該處崩塌面積約為49公頃，圖中紅色部分為顯著變動區域且分布不穩定之崩塌岩屑；由此成果可知，該處崩塌之土砂堆積變動性大，仍持續向下邊坡、河道遞移土砂，為該集水區之主要不穩定土砂來源之一。

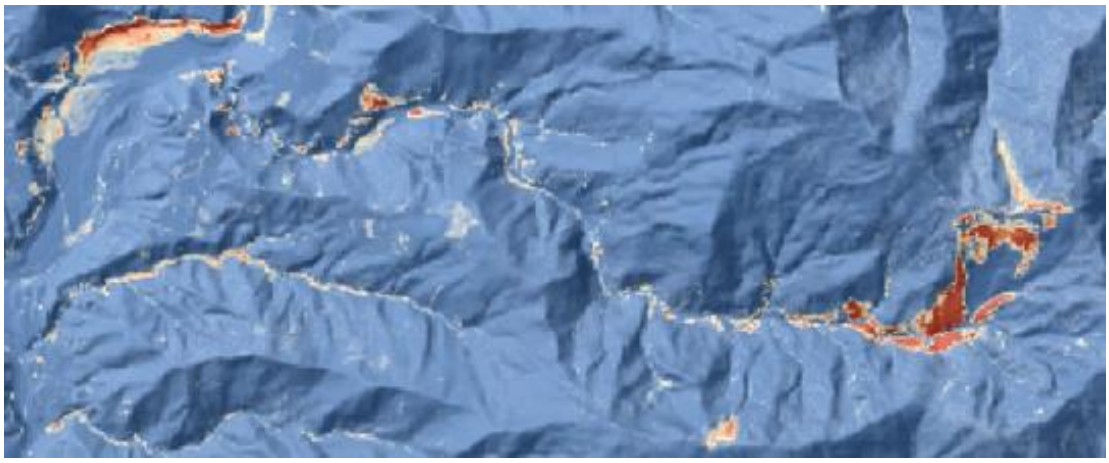


圖 1- 3 玉穗溪上游邊坡崩塌位置之崩塌權重樣態指標(WLSI)變遷分析(時間為 2023 年 6 月 24 日)

2021年期間本研究欲利用農業部農村及水土保持署所提供之空拍機拍攝正射影像，建立盧碧颱風汛期前後之數值地形作為成果驗證之用，針對已界定之不穩定土砂所在之邊坡或區域進行高程測量，已得到更詳盡之土砂侵蝕或遞移之變動情形，以評使用估雷達衛星影像進行山區崩塌地裸露面高程監測之可行性，其總體目標為整合兩年期計畫成果，建立一崩塌地穩定性之量化評估方式。期許此研究成果對我國崩塌災害管理與減災措施能有具體貢獻。

第二節 工作項目與進度

本計畫預計完成之主要工作項目有五項：(1)雷達影像資料收集篩選與前處理、(2)使用雷達干涉方法產製 DEM 高程模型、(3)進行多時序 InSAR 高程測量、(4)進行多時序崩塌地形變遷分析，以及(5)崩塌地穩定性量化評估。

目前已完成之工作包含雷達影像資料收集篩選與前處理，並同時收集研究區數次空拍任務建構之數值地表模型(Digital Surface Model, DSM)，以利後續評估 InSAR 方法建構之數值地形之精度。另外本研究也已完成 InSAR 方法進行高程測量之初步試驗，確認後續研究之高程資料之產出流程以及多時序分析。

第二章 研究區與研究方法

第一節 研究區與汛期降雨事件

一、研究區概況

本計畫選定台灣南部荖濃溪上游之支流玉穗溪(圖2-1)源頭之不穩定土砂崩塌地區作為研究區(圖2-2)，玉穗溪發源於斯拉巴庫山（2,782 公尺）南方，分水嶺最高點約2,800公尺，主流道向西北西陡降，於明霸克露橋（舊名勤和橋）處，匯入荖濃溪，谷口高約 680 公尺，集水區面積約 1,213.4 公頃，平均坡度約42度。受到莫拉克颱風與盧碧颱風等極端豪雨事件驅動，造成邊坡不穩定，形成大量崩壞地形單元，並為往後數年提供大量不安定土砂。

本圖2-2位於荖濃溪流域中上游，僅西北隅屬於旗山溪（楠梓仙溪）流域。以地形分區而論，荖濃溪主流東側為中央山脈，西側為玉山山脈的延續（楊貴三與沈淑敏，2010）。圖幅範圍內的山地主要屬於中央山脈主稜線南段（關山至馬西巴秀山）西坡，支流水系(如玉穗溪)分別自兩側匯入荖濃溪主流。整體而言，地勢由北向南傾斜，稜線高度則漸次向西緩降。

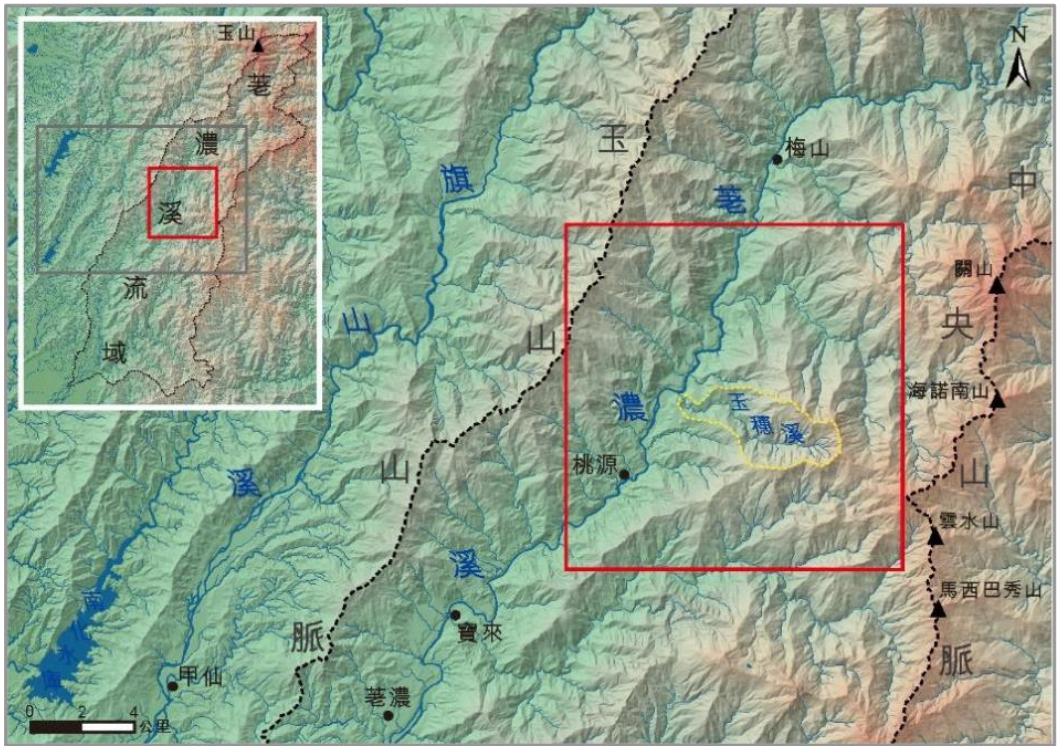


圖 2- 1 圖為荖濃溪流域中段，黃色虛線為玉穗溪流域，紅框為本研究區範圍。

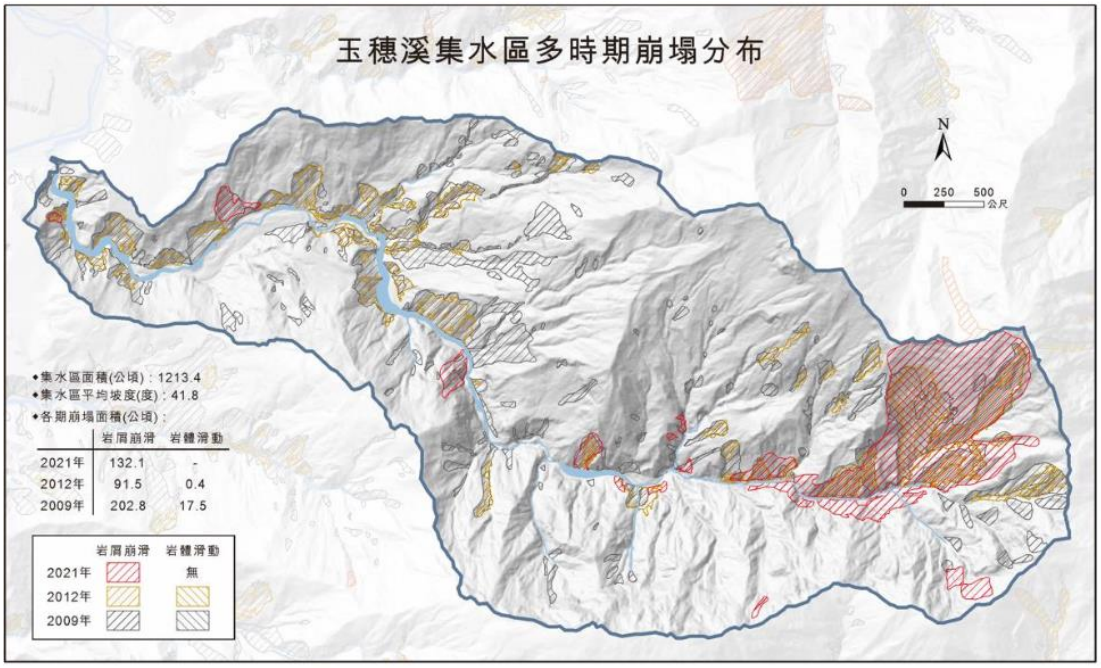


圖2- 2 玉穗溪集水區多時期崩塌分布

研究區域附近目前有交通部中央氣象署設置之復興(C0V210) 氣象站與小關山(C1V220)雨量站（圖2-3），均為自動測站。統計 1995 至 2024 年間降雨資料，復興測站平均年雨量約 2,601 毫米，最大年雨量為 2005 年達 4,873 毫米；小關山測站平均年雨 量約3,406毫米，最大年雨量為2007年達4,596 毫米。

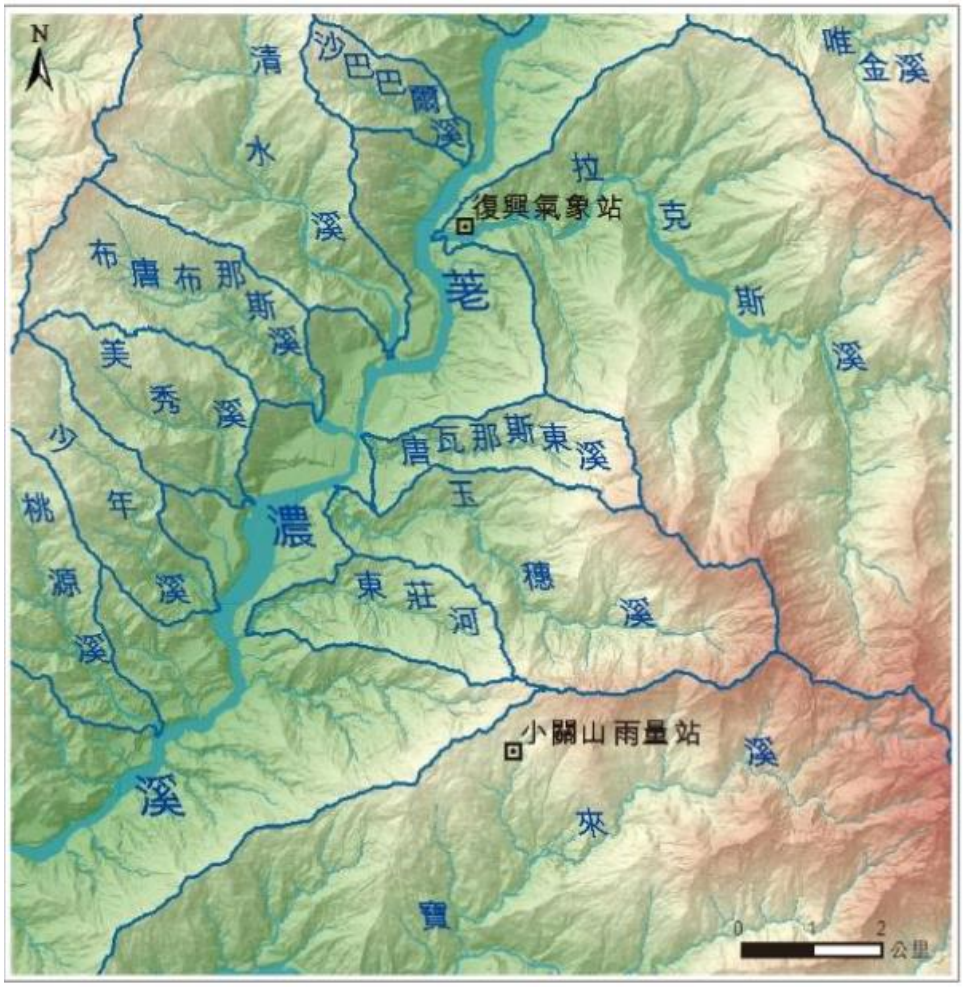


圖2-3 玉穗溪流域周邊復興雨量站及小關山雨量站位置

研究區地屬熱帶海洋季風氣候，氣溫約在19ºC~21ºC間，以一月最低，七月最高，每年降雨主要集中於5-9月，8月最高，佔全年90%，季節性豐枯明顯。復興及小關山測站之歷年月平均雨量分別達581及

771毫米，以午後雷陣雨、西南氣流於迎風坡面造成的豪大雨（含外圍環流降雨等）為主，每年11月至隔年2月屬乾季，月平均雨量經常低於 50 毫米。

於2009年8月8日發生之莫拉克颱風豪雨事件，復興及小關山測站分別為1,051及1,173毫米，遠高於資料期間各年度的最大日雨量。在布唐布那斯溪對岸的玉穗溪，過去被認為是安定的溪流，甚至在莫拉克颱風時，雖然集水區內發生崩塌，河床尚無顯著變化。但2021年盧碧颱風事件及8月6日豪雨造成的崩塌和土石流，使其谷口平均堆高約16公尺，而且形成最大堆積高度22.3公尺的大型土石流扇（農業部水土保持署，2022），2021年盧碧颱風後，玉穗溪集水區內崩塌地面積約佔其總面積的10.4%，主要來自於上游的一處大規模崩塌。該處不安定土砂推估量有1,098萬立方公尺，而推估其坡腳崩積層的土砂體積達489萬立方公尺，佔全集水區內不安定土砂總量的 61.3%。玉穗溪中游土砂來源則是兩岸野溪造成的崩塌，由河流侵蝕坡腳誘發；下游河段崩塌較少，以堆積作用為主。目前估算，玉穗溪集水區在2021年盧碧颱風後仍約有739萬立方公尺的不安定土砂存在，持續作用的土石流曾在其谷口堆積成平均高度約 15.8 公尺、最大高度 22.3 公尺、體積 319 萬立方公尺的土石流扇，甚至迫使荖濃溪主流道沿西岸而行(圖2- 4)。

而本研究區因盧碧颱風事件持續發生源頭性崩塌，下游處也傳出許多嚴重之土石流災情，並於下游河道內造成大量砂石堆積，造成河道有堆高情形，以及大型崩塌持續堆積形成堰塞湖，溪流源頭不安定土砂變化造成之高程變動情形明顯(圖2- 4)，適合作為本研究之試驗區，以檢視雷達技術進行高程測量之可行性。

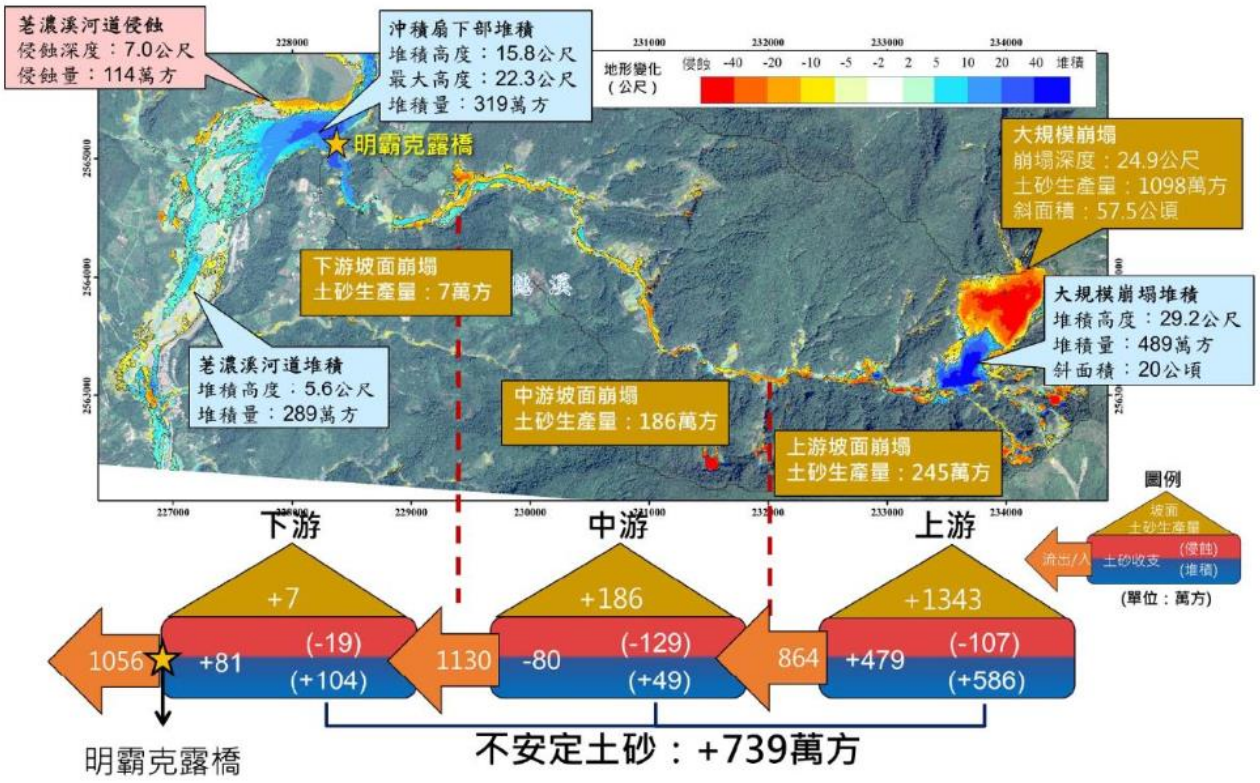


圖 2- 4　2021 年盧碧颱風-玉穗溪崩塌及河道土砂變化。圖示之不安定土砂變化時間區間為 2021.03.11 至 2021.08.27。

資料來源：農委會水土保持局（2022）

二、盧碧颱風崩塌土石流事件

盧碧颱風2021年8月3日8時於南海北部海面生成後向東移動，引進西南氣流，於8月5日侵台，5日午間於廣東沿海登陸後減弱為熱帶性低氣壓，隨後受西南氣流影響，台灣本島中南部發生超大豪雨，豪雨造成玉穗溪集水區上游北側邊坡發生大規模崩塌，所積累的大量不安定土砂沿著玉穗溪下移、沖出，8月7日至9日連續三日中南部的降雨量高達800至1,200 mm，農業損失約4.3億(中央氣象局，2021)。2023 年 8 月受到卡努颱風及颱風引進的西南氣流接力影響，於當月22日再度發生土石流，顯示區內土砂仍處於不穩定狀態。研究區下游之明霸克露橋遭到暴雨引發的土石流沖毀(圖 2- 5a)，玉穗溪有大量土石堆積(圖 2- 5b)。本研究利用雷達影像分析技術監測該區域不安定土砂狀況，並以數值地形資料檢視雷達監測成果之正確性。

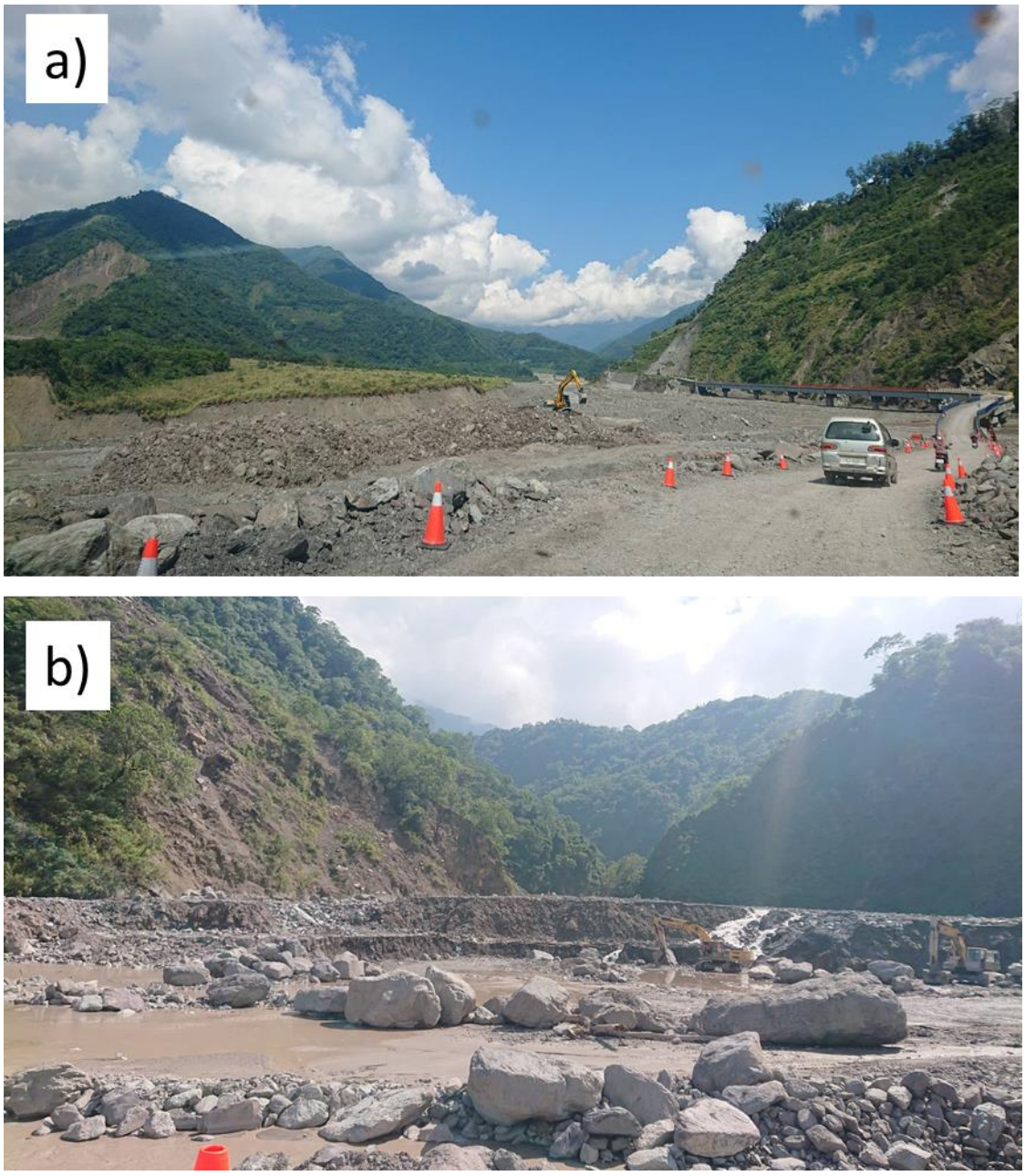


圖 2- 5 研究區復興河段 8 月 7 日降雨事件後現況。

a)明霸克露橋毀壞後施工狀況，b)玉穗溪河床大量土石堆積情形

(照片於 2021 年 10 月 24 日拍攝)

第二節 研究方法

一、雷達影像資料

本研究選用之雷達影像 Sentinel-1，為歐洲太空總署 (European Space Agency, ESA) 哥白尼計畫 (GMES) 中的地球觀測衛星。此計畫由兩顆衛星組成(Sentinel-1A 及 Sentinel-1B)，主要目的是用於土地與海洋的監測，Sentinel-1 的目標是為了在 ERS-2 及 ENVISAT 退役後，持續提供 C-band 合成孔徑雷達資料。Sentinel-1 搭載四個不同的感測器：Stripmap Mode, Interferometric Wide Swath Mode, Extra Wide Swath Mode, Wave Mode。各模式影像可於歐洲太空總署網站免費下載，臺灣地區可取得 VV 和 VH 極化影像。Sentinel-1 於 2014 年升空後，便開始對地球的陸地及海洋進行監測，並釋放資料供使用者下載，臺灣地區的第一張影像是 2014 年的 10 月底，本研究在 DEM 的產製作業上乃是使用 IW mode 產品。

二、雷達干涉方法進行高程測量與影像篩選

本研究使用合成孔徑雷達干涉(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 技術可以利用雷達資料的相位資訊來產製數值高程模型(DEM, Digital Elevation Model)，其原理為解算兩不同時期之干涉相位(interferometric phase)ψ，並解析各項因素造成的干涉相位貢獻，包含數值高程(DEM)、大地基準(flat)、地形位移變形(disp)、大氣效應(atm)以及其他雜訊干擾(noise)，可以下式表之：

$$\phi = \phi_{DEM} + \phi_{flat} + \phi_{disp} + \phi_{atm} + \phi_{noise}$$

$$-\frac{4\pi}{\lambda}\frac{B_n s}{R\tan\theta} \qquad -\frac{\Delta q}{\sin\theta}\cdot\frac{B_n}{R_0}\cdot\frac{4\pi}{\lambda} \qquad +\frac{4\pi}{\lambda}d \tag{1}$$

其中 DEM 與 flat 的部分即為因地形表面起伏造成之干涉相位貢獻，因此，在假設地形位移變形(disp)、大氣效應(atm)以及其他雜訊干擾可以忽略的前提下，由地形高程貢獻之相位差可由下式表之：

$$\phi_{DEM} = \phi - \phi_{flat} - \phi_{disp} + \phi_{atm} + \phi_{noise} \tag{2}$$

在操作上，使用雷達資料需要兩時期之影像有較高的同調性(coherence)，而 EAS 針對此問題有下列建議可作為本研究進行雷達資料選取時的參考(DEM generation with Sentinel-1Workflow and challenges, EAS, 2020)：

- 選取時間較為相近影像資料，可降低時間去相關性(temporal decorrelation)問題，並較能確保由地形位移變形造成之相位差為可忽略的部分。
- 選取較適合之衛星觀測垂直基線(perpendicular baseline)：

150m 到 300m 之間，其理由為若兩期影像之基線過短，則解算之相位差分干涉可能不足以表現出由地形造成之貢獻；反之，若基線過長則可能導致較大的去相關性(decorrelation)，同樣不利於 DEM 產製。

- 選取合適的大氣條件所取得之影像，其理由為大氣中的水氣有可能對訊號的相位產生影響，導致干涉相位的解算偏誤，因此建議選取天氣較晴朗、無雨、乾燥的天氣狀況取下得之影像。

本研究使用 ESA-Snap 以及 Snaphu 軟體進行合成孔徑雷達干涉(InSAR)分析、以及相位解纏(unwrapping)來產製 DEM，其步驟包含影像對位(corigistration)、干涉圖解算(interferogram)、去訊號重合高值(deburst)、取子集(subset)、影像濾波(filtering)、相位解纏(unwrapping)、相位轉高程(phase to elevation)與距離-都卜勒校正(range-doppler correction)等步驟。

三、機器學習技術—隨機森林(Random Forest)

本次研究選擇以隨機森林模型來關聯各項可能影響 InSAR 高程測量的參數，包含大氣、輻射、地形等參數，並分析各因子對測量誤差之貢獻。具體來說，便是以上述各項因子為基礎，機器學習對象則為 InSAR 測量之誤差。隨機森林是一種機器學習方法，其原理為根據決策樹(Decision Tree)演算法延伸而成。決策樹是使用樹狀結構處理分類問題的分析法，將資料依照不同的因子條件分類到對應的子集合，決策的起點為樹的根(root)，從根開始生長，以不同的分類特徵因子做為決策樹的節點，將資料進行二元分類，樹會持續分枝直到達到自訂的終止條件，並計算分類後兩個子集合資料的亂度(Entropy)或是不純度(Impurity)評估選擇的因子是否能提供最佳的分類結果，若分類後的資料一致性高，其亂度會呈現越低，得到的模擬成果越佳。為了避免模式僅反應出訓練資料的局部特徵而無法應用在其他資料的過度擬合現象(Overfitting)，決策樹演算法會修剪掉不穩定或是多餘的分支，常見的修剪包含事前修剪(Pre-pruning)與事後修剪(Post-pruning)，避免樹生長過多複雜分支影響模式精度。而隨機森林模型因為隨機的挑選訓練樣本和分類參數來產生許多決策樹模型進行分類模擬而命名，其操作包含以下幾個步驟(圖 2- 6)：

- 確認訓練資料的數量為 n 個，而每筆資料皆有 m 個分類特徵因子。
- 使用拔靴法(Bootstrap)，從訓練資料隨機抽樣出要放入模型進行訓練的資料(training data)，以增加每顆決策樹的差異性。沒有被抽到的資料稱之為袋外資料(out of bag)，通常會有三分之一的訓練資料沒有被抽到，可作為後面檢驗模式正確性的驗

證資料(testing data)。

- 決定要生成的決策樹總數量(ntry)，而每一個要生長決策樹的抽樣訓練資料隨機的挑選出 mtry 個分類特徵因子作為分支的節點，本次研究每個決策樹會隨機選出$\sqrt{m}$個因子，不斷產出決策樹直到達到設定的樹木總量。
- 隨機森林的最後成果會根據每一顆決策樹的結果做計算，若應變數為連續型資料，成果將以所有樹木的結果取平均值作為預測成果；若應變數為類別型資料，最終成果則是根據決策樹的成果進行統計，出現最多次的數值為預測成果。
- 在產生每顆決策樹的過程，隨機森林會計算選取的因子是否有降低整體模式的不純度(Gini Impurity)，以及模式若移除該因子對整體模式的精度影響的程度，計算出各個因子的重要性。
- 以沒有被抽樣的資料進行模式的精度檢驗，將驗證資料輸入模式後與地真資料進行比對，常見的模式表現衡量指標為產生出誤差矩陣(confusion matrix)，計算其整體精度(Overall Accuracy, OA)、Kappa 係數或接收者操作特徵曲線(Receiver Operating Characteristics, ROC)下的面積(Area Under Curve, AUC)作為檢驗隨機森林學習成果的評估指標。

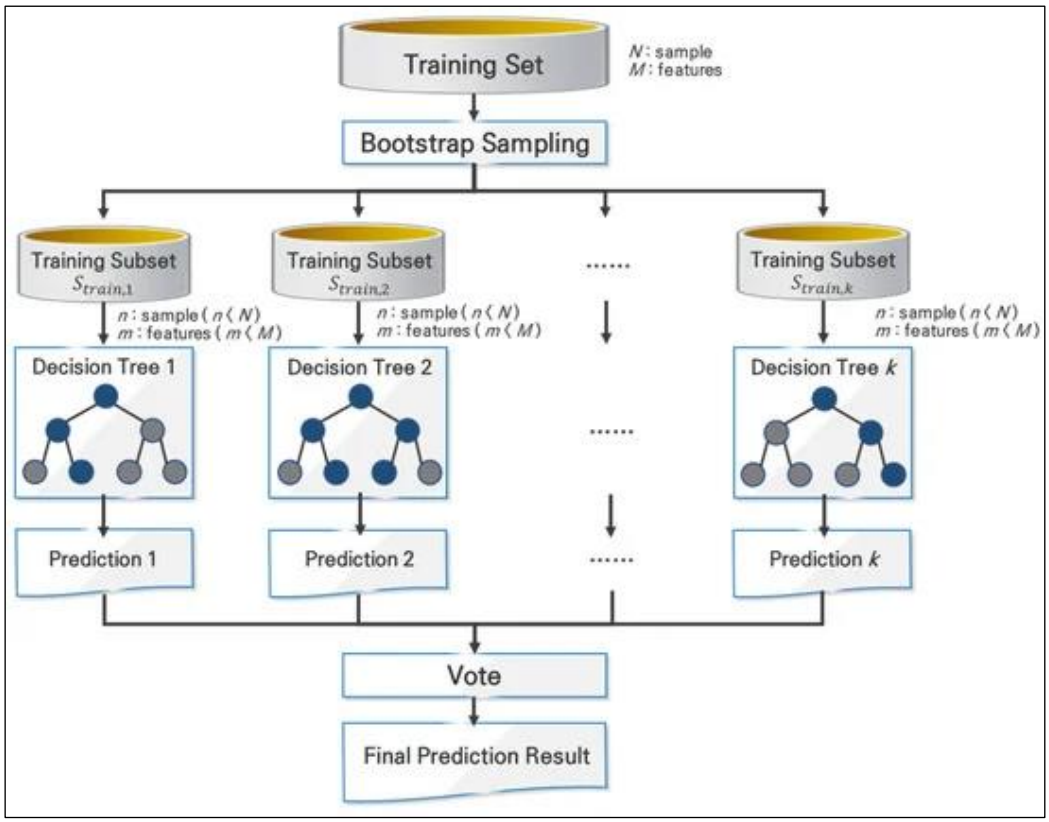


圖 2- 6 隨機森林作用原理示意圖

三、高程誤差校正模式

1. 模式架構

本計畫針對 InSAR 測量之高程誤差校正其作法為利用機器學習方法來進行，本計畫採用決策樹(random froest, RF)進行之，模式架構可見圖 2- 7。具體來說 RF 之學習對象為計算高程誤差(dH)，而 RF 模式則利用雷達衛星常見可得之觀測資料作為輸入，包含影像同調性(Coh)、影像相位差(Phi)以及 InSAR 兩幅影像之影像強度值(I_{t1}、I_{t2})。另外，基於 InSAR 量測之高程與實際高程之測量差異應存在系統性誤差之假設，本研究以控制點位高程也作為 RF 之輸入值。

在 RF 演算得到模式高程誤差(dh)後，可據此(加回)InSAR 高程(h)得到修正 InSAR 高程(h')，而此修正之高程值則將取代(原始)InSAR

高程值重新計算高程誤差(dH)，隨後本計畫則據此計算 RMSE，並給定一期望 RMSE(k)作為標準，若能滿足 RMSE<k (本研究設置為 1 公尺)則得到最終修正高程(H')，若否則進入下一輪 RF 模式。若此循環之學習對象 dH 不為 0，則可期望能趨於收斂，致使 RMSE 越來越小，意即能提高最終修正高程(H')之精度。後續則將利用實際高程資料試驗是否可達預期模式收斂。

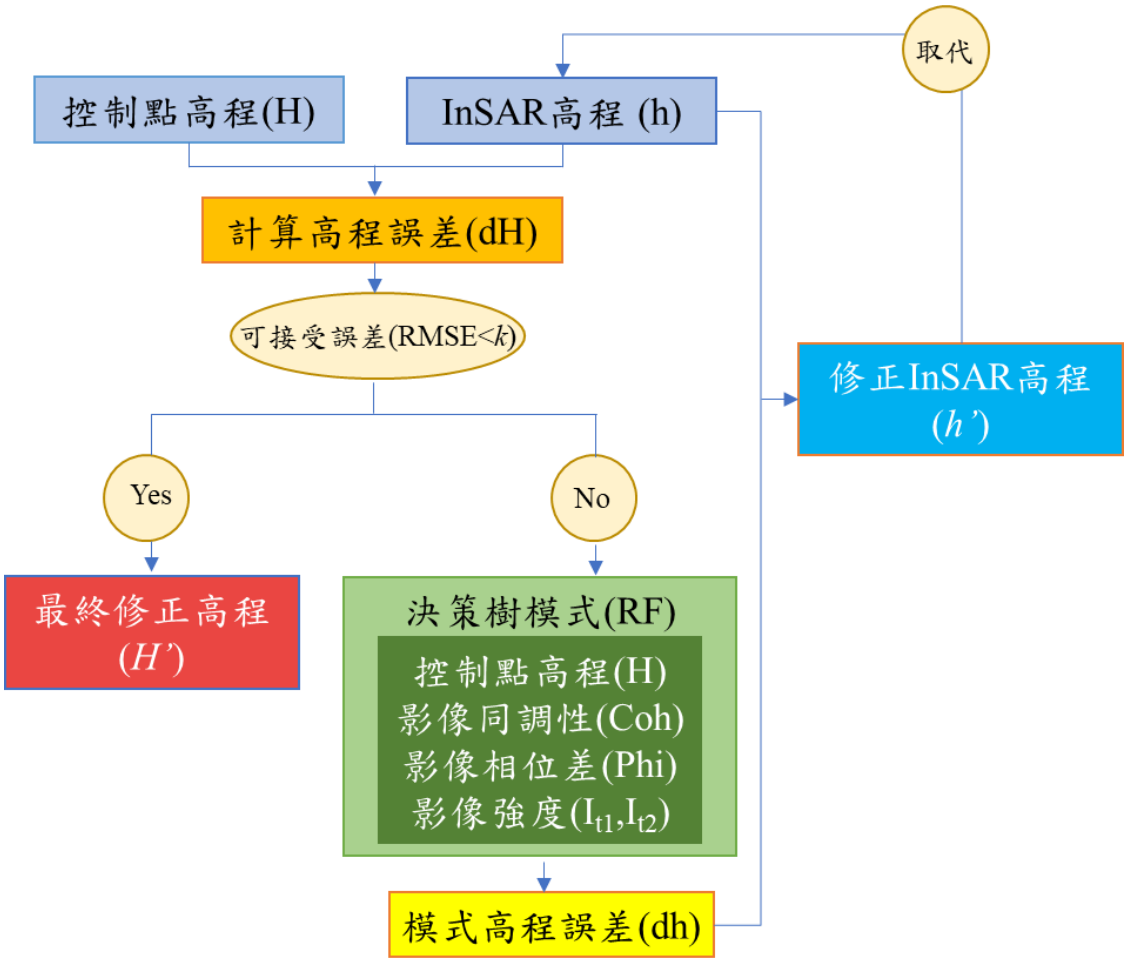


圖 2- 7 隨機森林高程誤差校正模式架構

2. 高程地面控制點

高程誤差校正模式之應用需要利用地面控制點來校正原始高程測量結果，由於研究區為山區又多植披覆蓋，若要取得大範圍且數量較多(數百個)之地面控制點則相當困難。因此本研究控制點資料的建構方為利用現有之高精度數值地表模型，搭配 PS-InSAR 技術中提取永久散射點(Persistent Scatterer Point Candidates, PSCs)的技術來進行。此概念利用多時期的 SAR 影像中之 PSCs 來界定長時距穩定不變之地表點位，利用現有之高精度 DSM(內政部 5 公尺 DSM)提取這些點位之高程作為地面控制點。

在 PSCs 的選取上，本研究另外應用了大氣相位屏蔽(Atmospheric Phase Screen, APS)技術來排除大氣效應對多期影像同調性之影響，方法為透過比對選取的 master-PSCs 以及 slave-PSCs 之相位來消除可能由大氣貢獻之相位誤差。其主要原理為假設大氣造成之相位差在空間上(大氣)之位移程度較小(相對於地表)，而其在時間上之變異應極大，因為各時期的大氣狀況都應該不一致，透過多組 master-PSCs 以及 slave-PSCs 的比對，在擷取出地形基線、地表變形、散射相位貢獻後，則可擷取由大氣造成之相位誤差(Guarnieri et al., 2018)。而其中 PSCs 之選取則可透過計算空間同調性$Coh_{s\gamma}$ (如式 1)以及時間同調性$Coh_{t\gamma}$ (式 2)進行之。

$$Coh_{s\gamma} = \frac{\sum\gamma}{\mathrm{n}} = \frac{\left|\frac{\sum C_1 C_2^* e^{-j\Phi_{det}}}{\sqrt{\sum|C_1|^2 \sum|C_2|^2}}\right|}{n} \tag{1}$$

其中$\sum_\gamma$ 為各期影像對之同調性之合，n 使用之雷達影像對，C_1 與

C_2 為 Complex-value backscattering coefficients，$j\Phi_{det}$ 由基線誤差、地形與地表變形貢獻之干涉相位差。

$$Coh_{t\gamma} = max\left|\frac{1}{n}\sum_{m;i=1}^{n} e^{j(\Delta\Phi^{i,m}-\Delta\Phi_{height}^{i,m}-\Delta\Phi_{defo}^{i,m})}\right| \quad (2)$$

其中$\Delta\Phi^{i,m}$ 為影像 i 與影像 m 計算之干涉相位差，$\Delta\Phi_{height}^{i,m}$為影像 i 與影像 m 計算由高程貢獻之干涉相位差，$\Delta\Phi_{defo}^{i,m}$ 為影像 i 與影像 m 計算由地表變形貢獻之干涉相位差。本研究將透過結合空間同調性與時序同調性來界定高同調性區域作為無發生變遷偵測的區域，例如 Pamungkas and Chiang (2021)同時考慮結合兩者均大於 0.6 做為 PSCs 的選取條件。

第三章 研究成果

第一節 研究資料收集

1. 適配雷達影像資料

InSAR 分析中，匹配影像的同調性(coherence)為相當關鍵的影響因素，在進行 InSAR 分析前，本計畫先行檢視不同極化觀測資料(VV 極化與 VH 極化資料)的同調性差異。首先，如圖 3-1 所示，高同調性的點位主要出現在地表的裸露面上，如河道、崩塌面、地表人工建物等地，而圖 3-1a 與圖 3-1b 分別顯示了 VH 以及 VV 之極化資料差異，就同調性問題上，VV 極化的雷達影像對有較佳的同調性，具有較多的高同調性匹配點位，較適合進行本研究進行高程量測。

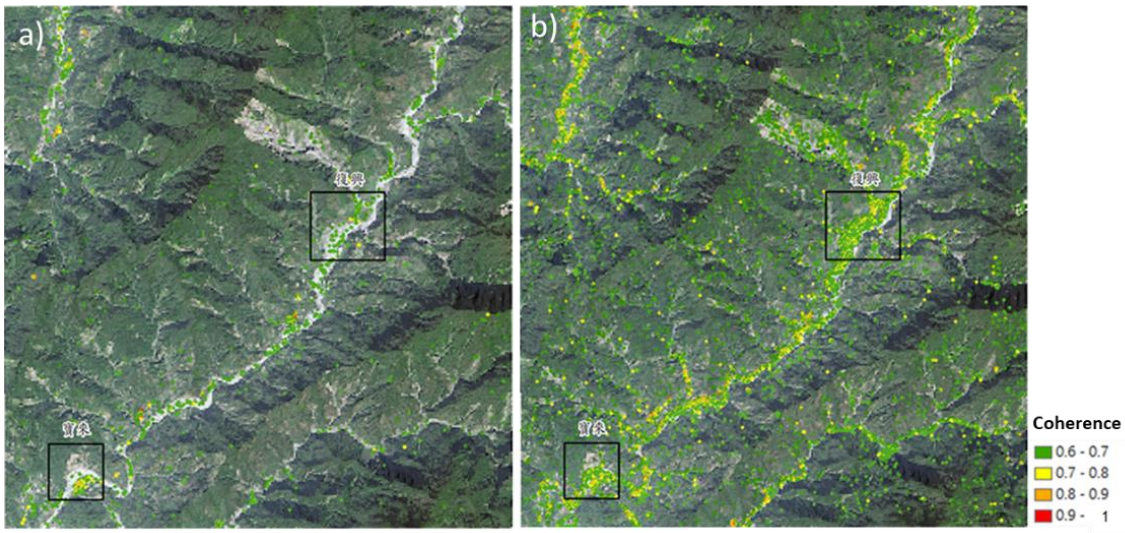


圖 3-1 InSAR 雷達影像對同調性 Coherence 分布情形圖，(a)VH 極化資料，(b)VV 極化資料。

如前所述，本研究使用雷達資料需要兩時期之影像有較高的同調性(coherence)，本研究將選取時間較為相近之影像資料、選取較適合之衛星觀測垂直基線(perpendicular baseline)，約為 150 m 到 300 m 之間(根據 Sentinel-1 Toolbox: DEM generation with Sentinel-1 Workflow and challenges 之建議)，以及選取天氣較晴朗、無雨、乾燥的天氣狀況取下得之影像。

針對 VV 極化資料，本研究首先匹配 Sentinel-1 雷達影像於研究區之拍攝日期，並確立進行 InSAR 分析之影像對之時間間隔為兩個月以內，同時比對兩期影像間之觀測垂直基線是否介於 150-300 公尺之間，並進一步選取天氣較晴朗、無雨、乾燥的天氣狀況之影像對做使用，若符合上述所有條件即為本次研究選取可使用於 InSAR 分析之雷達影像，本研究於 2019 年至 2023 年共五年期間， 選取出 21 對影像組合，整理如表 3- 1。

表 3- 1 本計畫選取之 Sentinl-1 影像

年份	模式	前期影像	氣候條件	後期影像	氣候條件	垂直基線 (m)
2019	Descending	09/29	無雲無雨	10/23	無雲無雨	175
	Descending	10/23	無雲無雨	11/16	無雲無雨	162
	Ascending	10/26	無雲無雨	11/19	無雲無雨	160

2020	Ascending	06/04	無雲無雨	08/09	無雲無雨	174
2021	Descending	01/15	無雲無雨	01/21	無雲無雨	169
	Descending	01/21	無雲無雨	02/14	無雲無雨	188
	Descending	02/14	無雲無雨	03/04	無雲無雨	193
	Ascending	10/03	無雲無雨	10/09	無雲無雨	181
2022	Ascending	06/06	無雲無雨	06/18	無雲無雨	153
	Descending	09/13	有雲無雨	09/25	有雲無雨	264
	Ascending	10/28	無雲無雨	11/09	無雲無雨	205
	Ascending	11/09	無雲無雨	11/21	無雲無雨	210
	Descending	11/12	無雲無雨	11/24	有雲無雨	223
2022-2023	Descending	12/30	有雲無雨	01/11	有雲無雨	191
2023	Descending	01/11	有雲無雨	01/23	有雲無雨	262
	Ascending	01/20	無雲無雨	02/13	無雲無雨	175
	Descending	02/04	有雲無雨	02/16	無雲無雨	209
	Descending	02/16	無雲無雨	02/28	無雲無雨	191

Descending	06/28	有雲無雨	07/10	無雲無雨	282
Ascending	11/16	無雲無雨	11/28	無雲無雨	162
Ascending	12/10	無雲無雨	12/22	無雲無雨	170

應用本研究提出之高程誤差校正模式進行 InSAR 高程之改正需利用現有之高精度 DSM，搭配 PS-InSAR 技術中提取永久散射點(Persistent Scatterer Point Candidates, PSCs)，並以之作為地面控制點來提取高程資訊。本研究之控制點高程資料選取乃是使用由內政部取得之 5 公尺數值高程資料(2017 年光達產製)，PSCs 選取則是分別針對升軌及降軌之多時序影像來計算空間同調性Coh_{sy}以及時間同調性Coh_{ty}。為保證升軌及降軌資料的品質具有一致性，本研究所有使用之升軌及降軌影像之取像日期均僅差 2 日(升軌早於降軌)。

本研究發現，升軌資料與降軌資料的觀測同調性差異甚大(表 3-2)，升軌資料明顯優於降軌資料。因此本研究將選取升軌資料，並聯合空間同調性以及時間同調性兩者皆大於 0.8 之點位來提取地面控制點(圖 3-2)，以進行後續 InSAR 高程資料之產制。選取之影像資料將用於監測 8 月 6 日降雨事件造成玉穗溪上游崩塌地不安定土砂之高程變化，並配合農村發展與水土保持署提供之災情報告以及空拍機建置數值高程資料檢視其正確性。

表 3- 2　PSCs 解算使用 Sentinel-1 影像

模式	起始時間~結束時間	影像數	同調性閾值	控制點數
升軌	2017/04/09~2023/12/22	176	0.6	35,275
			0.7	6,577
			0.8	1,007
			0.9	17
降軌	2017/04/11~2023/12/24	176	0.6	927
			0.7	126
			0.8	50
			0.9	12

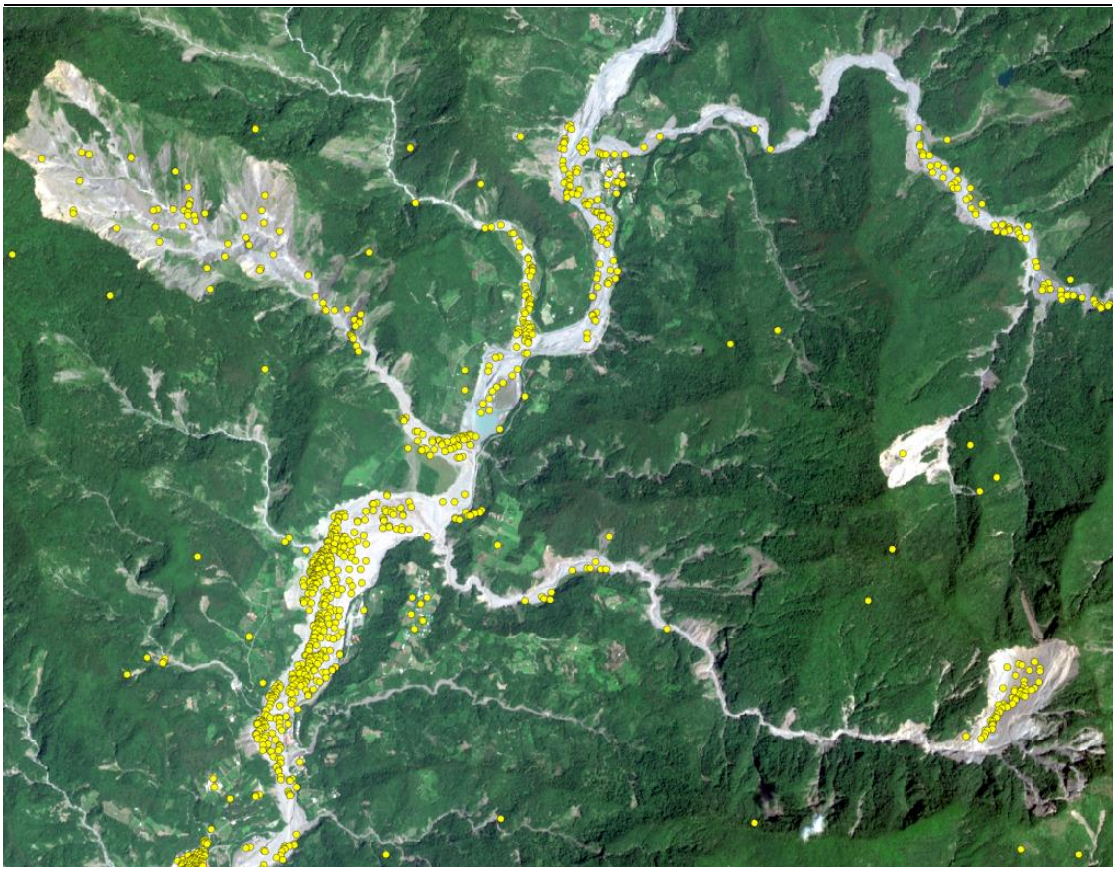


圖 3- 2 地面控制點分布(VV 極化-升軌影像)

2. 成果驗證資料

針對本研究完成之 InSAR 高程測量成果，本計畫針對農村與水土保持署過去於研究區玉穗溪區域範圍執行之空拍任務，進行查詢並申請相關資料，包含正射影像、原始照片、精度評估報告、控 制 點座標、數值地表模型(Digital Surface Model, DSM)、3D 模型、環景照片(Panorama)照片以及飛行影片等資料，共收集空拍任務 11 次。時間跨度為 2021 年 8 月 6 日盧碧颱風後至 2023 年 10 月，其中 2021 年 4 次任務，2022 年 1 次任務，2023 年為最多，有 7 次任務。後續本研究將整理分析上述資料，包含界定各任務之拍攝目標範圍(上游崩塌、匯流出口等)以及比對各其任務產製之 DSM 高程精度報告，以確保後續進行比較分析時，能有較可靠之分析成果，相關資料整理於表 3-3。

表 3-3 農村與水土保持署無人機空拍任務資料收集

對應事件	影像日期	水保署 UAV 影像編號	水平精度 (X error) mm	水平精度 (Y error) mm	高程精度 (Z error) mm
盧碧颱風事件前	2021/03/11	20210311_DSM 全幅		n.a.	
盧碧颱風事件後	2021/08/10	高雄市桃源區玉穗溪明霸克露橋		n.a.	
	2021/08/11	高雄市桃源區玉穗溪上游	2.03235	0.481221	1.44084
	2021/08/27	20210827_DSM 全幅		n.a.	

0822 降雨事件前	2023/08/09	高雄市桃源區玉穗溪明霸克露橋	5.36319	4.73363	3.273
	2023/08/13	高雄市桃源區玉穗溪勤和部落	3.44417	5.37791	1.58381
0822 降雨事件後	2023/08/27	高雄市桃源區玉穗溪下游	0.125776	0.236676	0.182195
	2023/10/03	高雄市桃源區玉穗溪下游		n.a.	
	2023/10/07	高雄市桃源區玉穗溪匯流口		n.a.	
	2023/10/15	高雄市桃源區玉穗溪上游	0.847272	0.200406	0.645157
	2023/10/25	高雄市桃源區玉穗溪中游	1.71932	1.39313	2.89075

針對研究區玉穗溪流域於 2021 年 8 月 6 日盧碧颱風之崩塌、土石流災害，相關地形變遷調查可見農業部農村發展及水土保持署之委辦計畫—「112 年土砂災害空間資訊蒐集判釋與變遷分析」，取得災情相關資訊(請見前章圖 2- 4)。此外，本研究於農村水保署之土石流及大規模崩塌防災資訊網(https://246.ardswc.gov.tw/)盤查玉穗溪區域之例年災例事件：農村水保署針對 2021 年 8 月 6 日盧碧颱風以及 2023 年 8 月 22-23 日因強降雨造成之災情均有發布重大土砂災例(圖 3- 3)。從其災例速報中可以獲得災情概況，包含災害時間、地點、類型以及災情描述、災害規模與災情統計等資訊，可作為後續分析成果之參照資料。

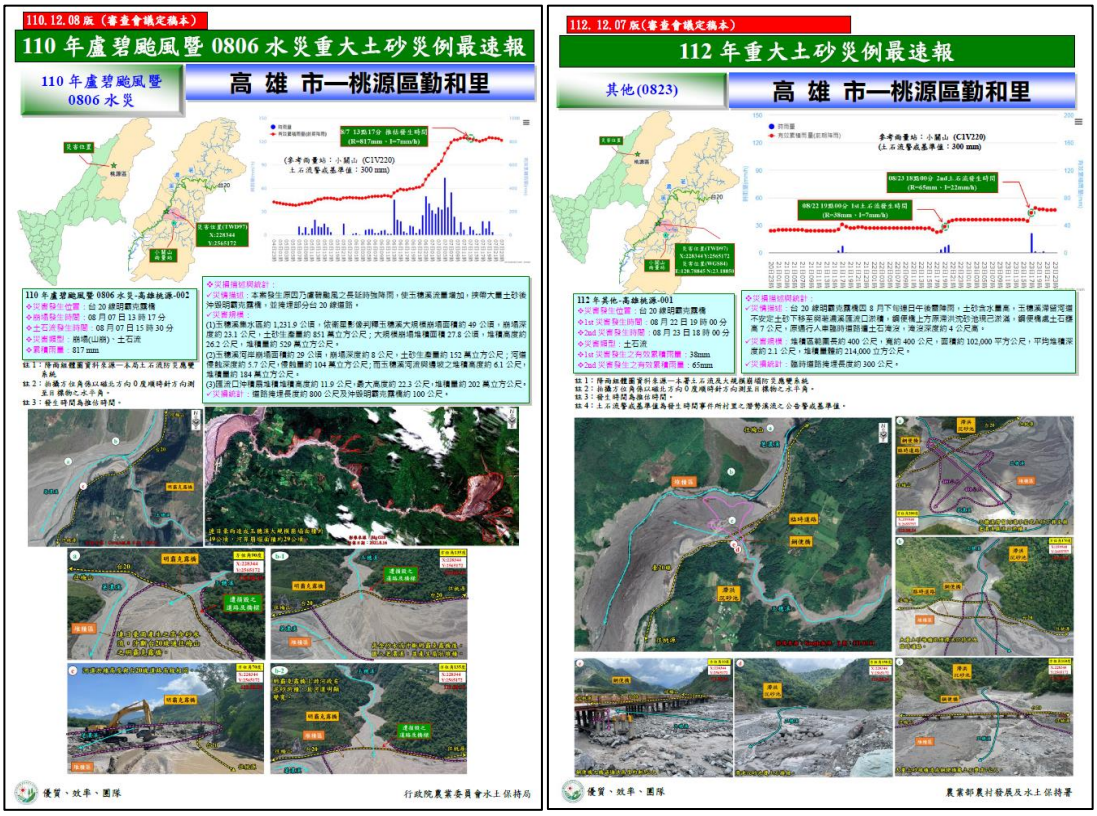


圖 3- 3 2021 盧碧颱風(左圖)以及 2023 年 8 月 22-23 強降雨(右圖)之重大土砂災例最速報

第二節 InSAR 高程測量試驗

本研究進行高程校正之初步試驗，旨在釐清選取之 PSCs 之可靠性以及演算應用之相關參數，以利後續分析應用。此試驗中之控制點資料為利用多時序 VV 極化-升軌影像來計算取得空間同調性$Coh_{s\gamma}$以及時間同調性$Coh_{t\gamma}$同時大於 0.8 之點位(圖 3- 2)，配合內政部數值高程資料(2017 年光達產製，為配合 InSAR 高程之影像解析度 10 公尺，光達資料以 Bilinear 方法重新取樣至 10 公尺)所提取之地面控制點，共 1,007 點。InSAR 高程部分則是使用本研究收集資料時間差距最短之影像對：2021 年 10 月 3 日以及 2021 年 10 月 9 日兩幅 Sentinel-1A 之 VV 極化升軌影像來產製高程資料。在成果評估的部分，為選取控制點 705 點(70%)來進行高程校正，剩餘 302 點(30%)則用以計算 RMSE 作為作為模式成效評估之依據。圖 3- 4 為模式多次疊代計算 RMSE 之校正試驗成果，可以發現整體之 RMSE 呈現收斂趨勢，顯示透過此模式的確可提高 InSAR 之高程精度。

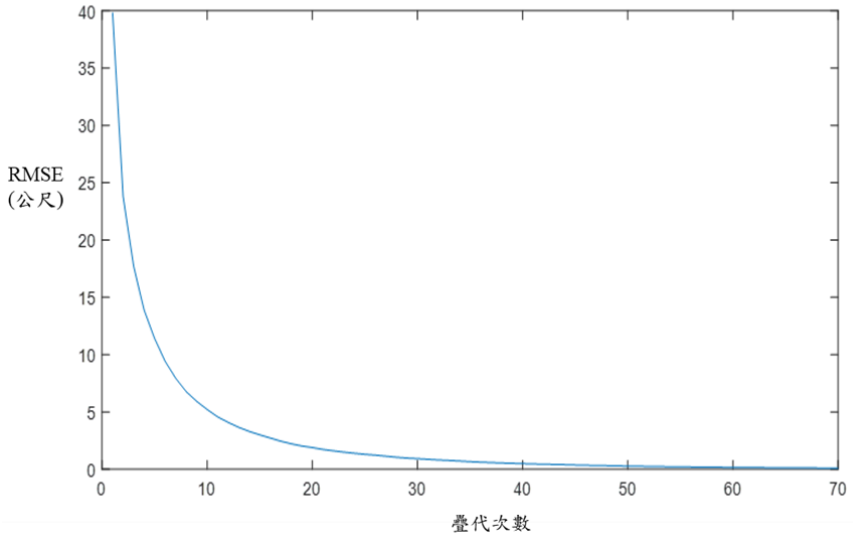


圖 3- 4 高程精度校正試驗

圖 3- 4 中顯示，在模式疊代達 29 次後其 RMSE 之下降趨勢呈現平緩，低於 1 公尺，耗時 8 分 32 秒。以此試驗在疊代次數達 70 次時 RMSE 可小於為 0.1 公尺為目標，耗時 19 分 19 秒(設備機能為 Intel(R) Core(TM) i7-11370H @ 3.30GHz/RAM:32G)。高程資料校正前後之 RMSE 比較整理於表 3- 4，校正之數值高程成果如圖 3- 5。圖中部分區域之較大誤差(數十公尺)，容易出現在無控制點分布、陡峭之壁崖處，此外，此成果大致上確有東南向坡面低估、西北向坡面高估之情形，顯見其誤差與地形應具有系統性之關聯。

表 3- 4　InSAR 高程校正前後誤差統計

高程誤差 (公尺)	平均值	RMSE
未校正	-25.67	39.81
校正後	-5.3762e-05	0.0949

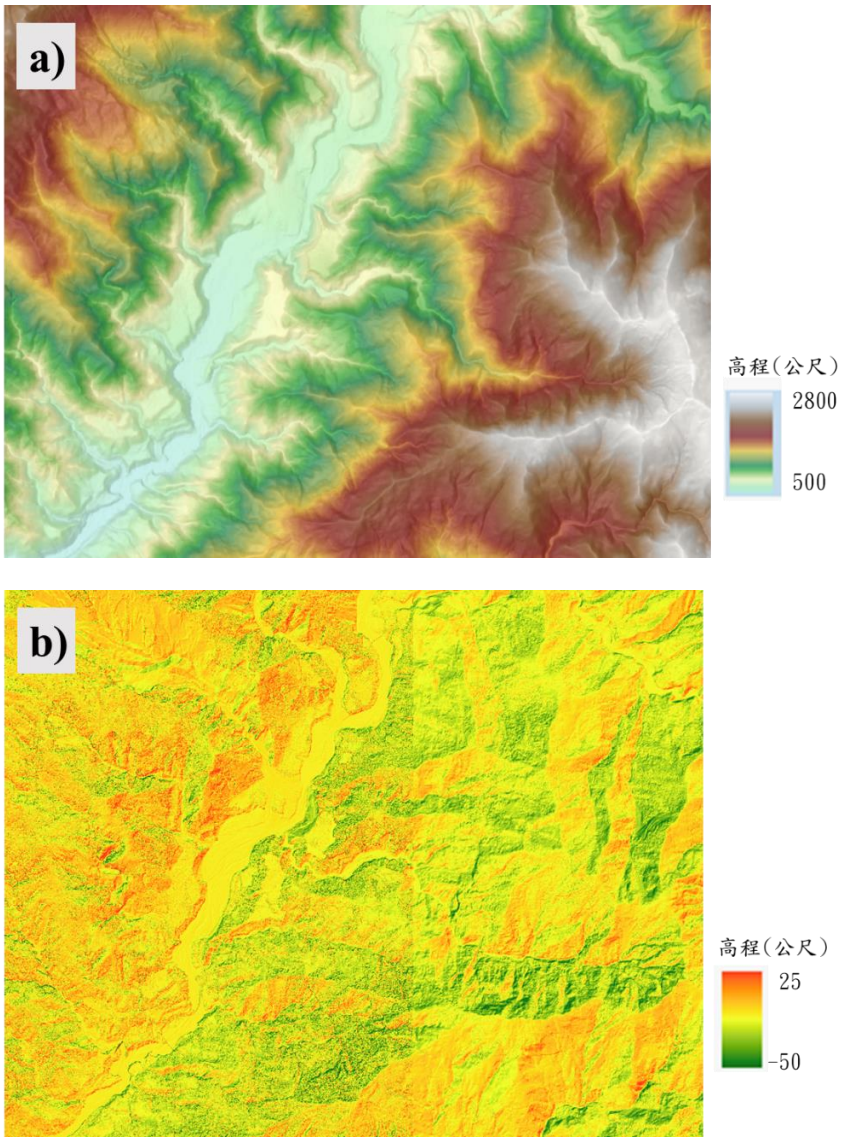


圖 3- 5 研究區 InSAR 高程校正初步成果。

(a)校正後 DEM、(b)校正前後差異(後減前)

第三節 多時序 InSAR 高程測量

本計畫使用 Sentinel-1 雷達影像，選取 VV 極化資料，且運用多時期影像分別對升軌資料進行 PSCs 擷取，並計算其空間同調性以及時間同調性，選取兩者同時大於 0.8 之 PSC，配合內政部數值高程資料提取 1,007 點之地面控制點來進行高程校正；高程校正以 RMSE<1 公尺作為可接受閾值，最後成功校正下列表 3-5 中 7 組高程資料，用以分析研究區—玉穗溪流域之多時期高程變化，以進行其邊坡穩定性以及不穩定砂源評估。各期高程解算成果則見圖 3-6。

表 3-5 本研究解算高程使用之 Sentinel-1 雷達影像對

影像對日期	平均值	最大值	最小值	RMSE	災害事件
2019/10/26-2019/11/19	0.0005	33.21	-11.35	0.87	--
2020/06/04-2020/08/09	0.0027	13.39	-13.01	0.97	盧碧颱風
2021/10/03-2021/10/09	0.0020	14.18	-25.21	0.86	(2021/08/06)
2022/06/06-2022/06/18	0.0001	30.02	-14.68	0.96	--
2022/10/28-2022/11/09	0.0012	29.84	-28.97	0.86	
2023/01/20-2023/02/13	0.0007	10.4243	15.00	0.85	強降雨事件
2023/11/16-2023/11/28	-0.0018	14.8920	-18.55	0.87	(2023/08/22)

從圖 3-6 可見，玉穗溪下游溢流口於盧碧颱風(2021/08/06)前，可於圖 3-6(a)與圖 3-6(b)中發現已有明顯之土砂堆積(堆高約 2-5 公

尺)，颱風後，可於圖 3-6(c)中見其土砂堆積範圍擴大，蔓延至對岸，並有明顯堆積增加現象。其後地形並無明顯變動(圖 3-6d~圖 3-6f)，而於圖 3-6(g)中則發現下游有土砂堆積之情形，應為由 2023 年 8 月 22-23 日因強降雨造成之土石流所造成。根據成果不難發現研究區之崩塌物與堆積土砂仍持續往下游輸送砂源，顯為不安定土砂之重要來源，未來仍將持續對下游造成影響。

(a) SAR image pair: 2019/10/26-2019/11/19



(b) SAR image pair: 2020/06/04-2020/08/09



(c) SAR image pair: 2021/10/03-2021/10/09



(d) SAR image pair: 2022/06/06-2022/06/18



(e) SAR image pair: 2022/10/28-2022/11/09



(f) SAR image pair: 2023/01/20-2023/02/13



(g) SAR image pair: 2023/11/16-2023/11/28



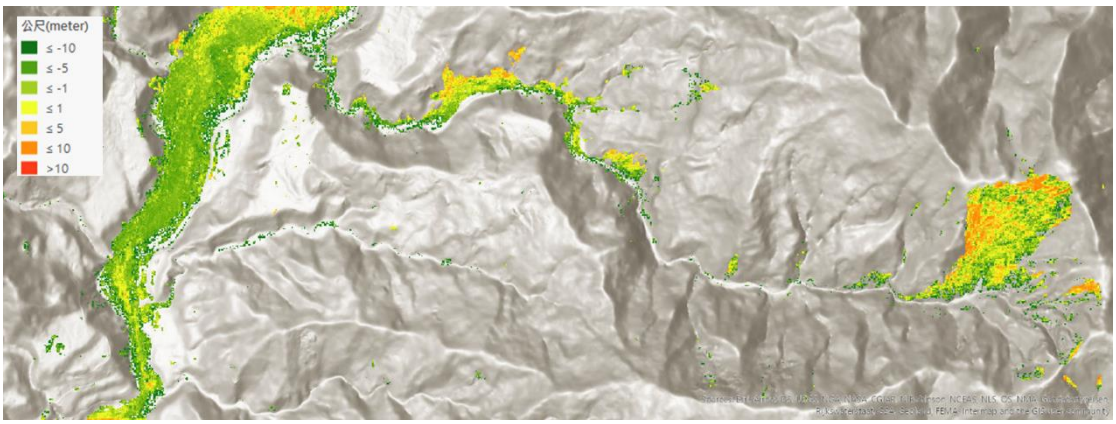
圖 3- 6　InSAR 雷達影像對之 InSAR 高程計算成果。

(a) 2019/10/26-2019/11/19，(b) 2020/06/04-2020/08/09，(c) 2021/10/03-2021/10/09，(d) 2022/06/06-2022/06/18，(e) 2022/10/28-2022/11/09，(f) 2023/01/20-2023/02/13，(g) 2023/11/16-2023/11/28。

第四節 無人機高程比對 InSAR 高程

本研究將 InSAR 高程測量成果與農村與水土保持署過去於研究區玉穗溪區域範圍執行之空拍任務所得之 DSM(表 3- 3)進行比較。目前本先以盧碧颱風之成果進行比較，下圖 3- 7 為以空拍之 DSM 減去 InSAR 所得高程之結果；其中圖 3-7a 為使用盧碧颱風事件前之高程資料進行比較，發現 InSAR 高程相對於無人機資料位於上游崩塌侵蝕區域對高程有低估(約 1-3 公尺)的狀況，反之對於下游土砂堆積處則有高程高估(同樣約 1-3 公尺)的情況。從圖 3-7b 中則可發現，於颱風事件後，InSAR 對整體的土砂堆積之高程相較於無人機資料有低估的情形(約 5 公尺)，但此處需注意，兩者之差異也應包含幾何對位以及測量之時間點的差異。

(a) 無人機 2021/03/11 比對 InSAR 2020/06/04-2020/08/09



(b) 無人機 2021/08/27 比對 InSAR 2021/10/03-2021/10/09

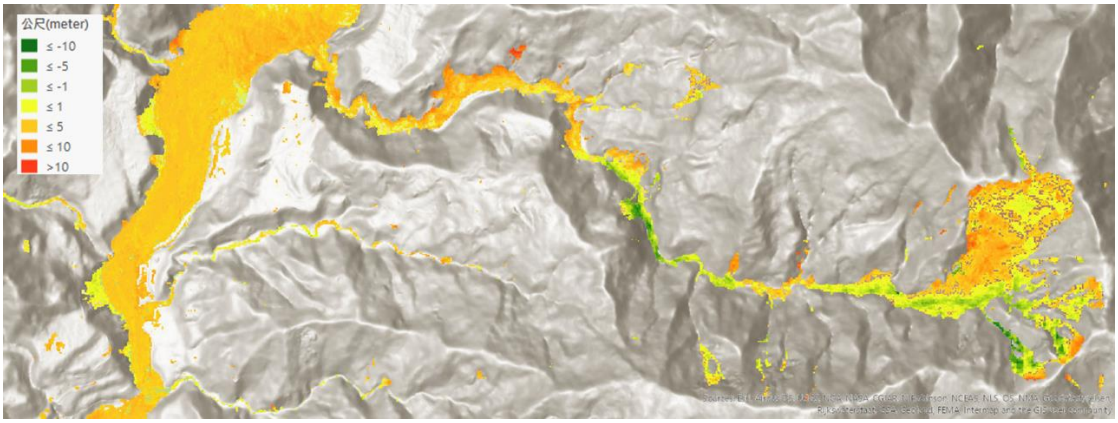


圖 3- 7 無人機空拍所得之 DSM 與 InSAR 所得之高程進行比較。

(a)盧碧颱風事件前：無人機 2021/03/11 比對 InSAR 2020/06/04-2020/08/09，(b) 盧碧颱風事件後：無人機 2021/08/27 比對 InSAR 2021/10/03-2021/10/09。

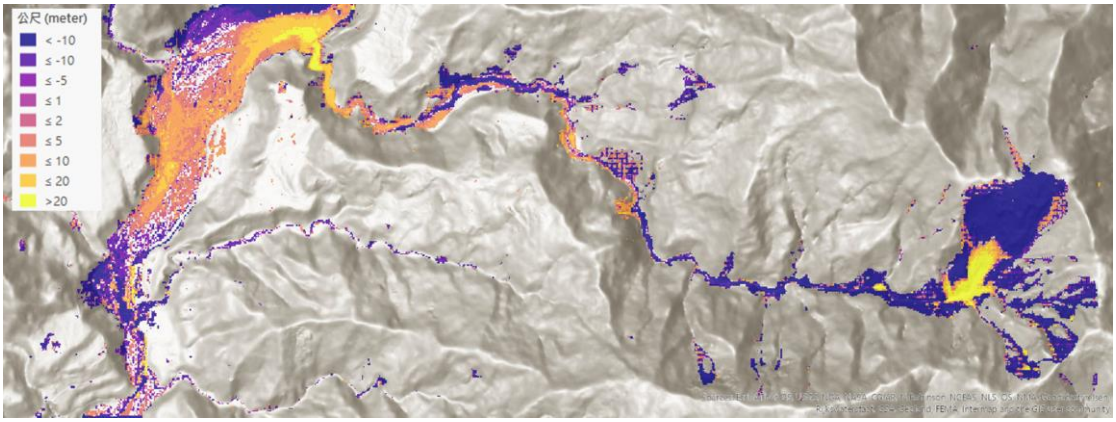
第五節 不安定土砂估計

本計畫針對盧碧颱風事件，可利用事件前後的 DSM 計算兩期之高程變化，用以計算侵蝕與堆積體量，藉以估算留存於集水區內之不安定土砂。

首先本計畫進行盧碧颱風事件前後高程變化之成果，與空拍機 DSM 進行比較，可見圖 3- 8，空拍機 DSM 與 InSAR DSM 兩者所得之地形變化分布情形於整體來說相當類似，均顯示了主要的小部分差異為 InSAR DSM 之崩塌冠部、河道中段部分有較多的堆積情形。

針對 2021 年盧碧颱風的高程與其事件前後地形變化的測量比較，表 3- 6 整理了空拍機 DSM 與 InSAR DSM 兩者的觀測結果。整體來說，InSAR 觀測之高程，相較於空拍機資料略有保守收集中，兩者差距之 RMSE 約為 4~8 公尺，當然，此兩者的差異也同樣需注意幾何對位以及測量時間不同等問題。

(a)空拍機 DSM：2021/08/27 減去 2021/03/11



(b)InSAR DSM：2020/06/04-2020/08/09 減去 2021/10/03-2021/10/09

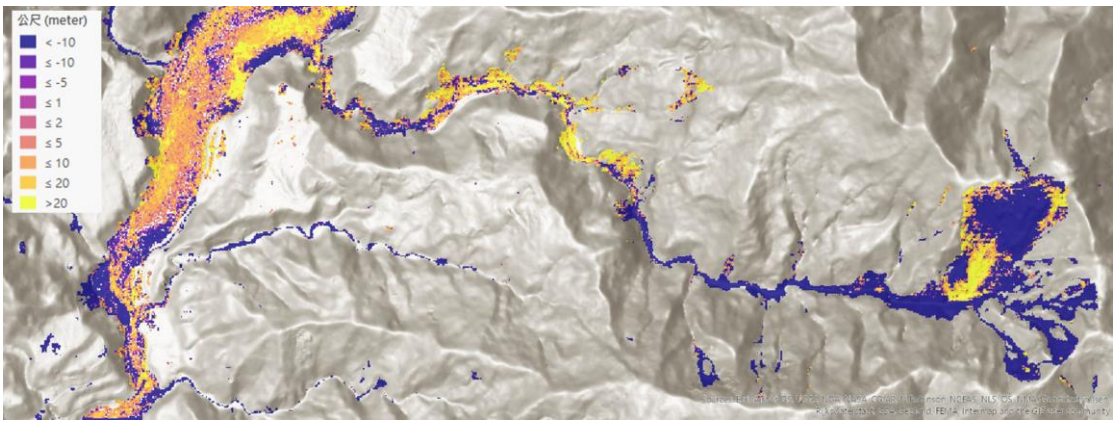


圖 3- 8　2021 年盧碧颱風前後之高程變化

(a)空拍機 DSM，(b)InSAR DSM

表 3- 6 空拍機 DSM 與 InSAR DSM 觀測統計(公尺)

事件	高程資料(月份)	平均值	最大值	最小值	RMSE
盧碧颱風事件前	空拍機(3 月)	1303.6	2748.3	497.5	515
	InSAR(6-8 月)	1305.5	2735.8	502.5	502.3
	空拍機 - InSAR	-2.3	10.4	-18.4	4.6
盧碧颱風事件後	空拍機(8 月)	1315.1	2742.5	501.8	513.7
	InSAR(10 月)	1308	2733.3	494.2	505
	空拍機 - InSAR	6.2	23.8	-26.5	7.3
前後變化高程差	空拍機	-6.3	28.1	-32.5	13.3
(後減前)	InSAR	-2.1	23.2	-22.6	10.7

針對盧碧颱風事件，本計畫利用事件前後高程變化之成果，計算集水區內之上游大規模崩塌最大侵蝕深度(公尺)、上游大規模崩塌最

大堆積深度(公尺)、上游大規模崩塌堆積量(立方公尺)以及集水區內殘餘之不安定土砂(立方公尺，集水區內高程變化網格數 x 網格面積 <100m^2 > x 網格深度)。集水區以明霸克陸橋位置為溢流點(參考圖 2-4)，其下游估算沖積扇堆積深度(公尺)、平均深度(公尺)以及總堆積量(立方公尺)。本計畫比較不同觀測來源，包含水保署重大土砂災例(圖 3-3)、112 年調查報告(圖 2-4，水土保持署之委辦計畫—「112 年土砂災害空間資訊蒐集判釋與變遷分析」)、水保署提供之 UAV 產製 DSM(圖 3-8a)，以及本計畫產製之 InSAR DSM(圖 3-8b)，成果列於表 3-7 與表 3-8。

表 3- 7 盧碧颱風後玉穗溪集水區崩塌及不安定土砂估算

資料來源	崩塌最大侵蝕深度 (公尺)	崩塌最大堆積高度 (公尺)	崩塌堆積 (立方公尺)	殘餘不安定土砂 (立方公尺)
重大土砂災例	23.1	26.2	529 萬	--
112 年調查報告	24.9	29.2	489 萬	739 萬
水保署 UAV	32.5	28.1	513 萬	822 萬
本計畫 InSAR	22.6	23.2	505 萬	721 萬

表 3- 8 盧碧颱風後玉穗溪集水區沖積扇土砂估算

資料來源	沖積扇堆積深度 (公尺)	平均深度 (公尺)	總堆積 (立方公尺)
重大土砂災例	22.3	11.9	202 萬
112 年調查報告	22.3	15.8	319 萬
水保署 UAV	23.7	14.9	312 萬
本計畫 InSAR	18.6	12.2	232 萬

首先，上游大規模崩塌最大侵蝕深度在 32.5-22.6 公尺之間、上

游大規模崩塌最大堆積深度為 23.2-29.5 公尺之間、上游大規模崩塌堆積量在 505 萬-529 萬立方公尺之間，集水區內之不安定土砂量則在 721 萬-822 萬立方公尺之間。在上述估計中，本計畫所計算之估計值均較為保守(值最小)，其中不安定土砂與最大估計值有 10%的保守估計體量，必須要注意的是，此不安定土砂僅考慮盧碧颱風所致，不考慮該事件前既存於集水區內之體量。其次，以明霸克陸橋位置為溢流點(參考圖 2-4)，其下游估算沖積扇堆積深度在 18.6-23.7 公尺、平均深度在 11.9-15.8 公尺以及總堆積量則約在 202 萬-319 萬立方公尺之間。比較本計畫與水保署 UAV 與 112 年調查報告則發現本計畫約有 34%~37%之低估，但此也因與估測範圍面積不同有關。最後，本計畫利用 2023 年 11 月與盧碧颱風前產製之 InSAR DSM 進行比較，估計其殘餘不安定土砂為 688 萬立方公尺(圖 3-9)，減少約 33 萬立方公尺。

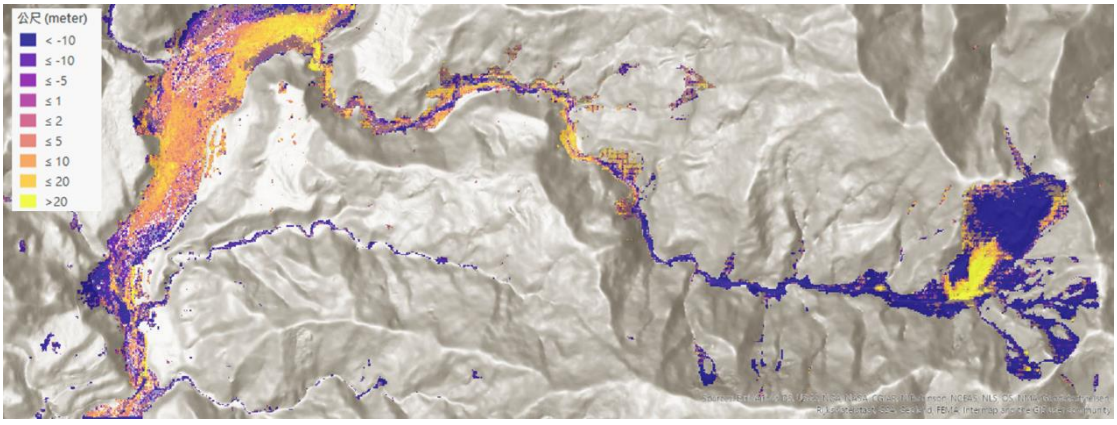


圖 3- 9　2021 盧碧颱風前-2023 年 11 月之高程變化

第四章 結論

本計畫結合 InSAR 技術、地面控制點資訊、衛星測量參數與機器學習演算法來進行多時序之高程測量。本計畫針對高雄玉穗溪於 2021 年 8 月盧碧颱風發生之崩塌地與土石流等地形變遷事件進行研究，並使用 Sentinel-1 多時序雷達衛星影像建立多時序之地形，並與農村水保署提供之空拍機生產之地形資料進行比對。結果發現，VV 極化資料與升軌影降資料較適合用於本研究之 InSAR 分析。首先，本計畫利用 InSAR 技術產制之高程資料與空拍機資料相比，發現約有 4~8 公尺方均根誤差，但總體能反映研究區的地形時序變遷。

針對盧碧颱風進行高程資料時序分析可知，上游大規模崩塌最大侵蝕深度在 32.5-22.6 公尺之間、該崩塌最大堆積深度為 23.2-29.5 公尺之間、其堆積量在 505 萬-529 萬立方公尺之間。集水區內之不安定土砂量則在 721 萬-822 萬立方公尺之間；若以明霸克陸橋位置為溢流點，其下游估算沖積扇堆積深度在 18.6-23.7 公尺、平均深度在 11.9-15.8 公尺以及總堆積量則約在 202 萬-319 萬立方公尺之間。本計畫估算自盧碧颱風至 2023 年 11 月期間，其殘餘不安定土砂減少約 33 萬立方公尺，留存約 688 萬立方公尺。整體而言，研究區之崩塌物與堆積土砂仍持續往下游輸送砂源，顯為不安定土砂之重要來源，未來仍

將持續對下游造成影響。本計畫研究之玉穗溪崩塌，並無保全對象，然能持續對溢流點位置之明霸克露橋造成斷橋，也就是說，區域之土砂災害，對公共設施的損害可使下游保全對象同樣受災，此應為加強關注之議題。

參考文獻

1. 王國隆、林俊廷（2014）運用 ALOS PALSAR 雷達影像之差分干涉成果於潛在崩塌地調查–以眉溪流域為例，航測及遙測學刊，19(3)：253-265。
2. 吳彥誼、林士淵、任玄（2020）合成孔徑雷達干涉產製數值高程模型影響因素評估—以季節像對與多視處理為例，航測及遙測學刊，255(2)：115-128。
3. 陳柔妃等（2015）運用雷達影像進行莫拉克颱風災區大規模潛勢區位之可行性評估，經濟部農委會水土保持局，計畫編號：SWCB-104-069。
4. 農村水保署（2022）112 年土砂災害空間資訊蒐集判釋與變遷分析，農業部農村發展及水土保持署委辦計畫，計畫編號：ARDSWC-112-142。
5. Bovenga, F.; Wasowski, J.; Nitti, D.O.; Nutricato, R.; Chiaradia, M.T. Using COSMO/SkyMed X-band and ENVISAT C-band SAR interferometry for landslides analysis. *Remote Sens. Environ.* 2012, *119*, 272–285.
6. Casagli, N., Cigna, F., Bianchini, S., Hölbling, D., Füreder, P., Righini, G., Del Conte, S., Friedl, B., Schneiderbauer, S., Iasio, C., Vlcko, J., Greif, V., Proske, H., Granica, K., Falco, S., Lozzi, S., Morak, O., Arnaud, A., Novali, F., Bianchi, M., 2016. Landslide mapping and monitoring by using radar and optical remote sensing: Examples from the EC-FP7 project SAFER, *Remote Sensing Applications: Society*

and Environment, 4: 92-108.

7. Chiang SH., and Chang KT, 2011. The Potential Impact of Climate Change on Typhoon-Triggered Landslides in Taiwan, 2010-2099. *Geomorphology*, 133: 143-151.
8. Colesanti, C., Wasowski, J. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Eng. Geol.* 2006, *88*, 173–199.
9. Correa-Muñozl, N. A., Murillo-Feo, C. A., 2018. Detection of Landslides with SAR Polarimetry: Case Study of South-eastern Colombia. *The International Archives of the Photogrammetry*, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-3/W4, GeoInformation for Disaster Management. Istanbul, Turkey.
10. EAS Sentinel 1 web: https://sentinel.esa.int/
11. Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., Chang, K. T., 2012. Landslide inventory maps: New tools for an old problem, *Earth-Science Reviews*, 112: 42-66
12. Hopper, A., Zebker, H. A., Segall, P., Kampes, B., 2004, A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophys. Res. Lett.*, *31*, L23611.
13. Konishi, T., Suga, Y., 2018. Landslide detection using COSMOSkyMed images: a case study of a landslide event on Kii Peninsula, Japan, European Journal of Remote Sensing, 51:1, 205-221, DOI: 10.1080/22797254.2017.1418185

14. Lee, J.S.,1981. Speckle Analysis and Smoothing of Synthetic Aperture Radar Images. Computer Graphics and Image Processing, Vol.17:24-32.
15. Mondini, A. C., 2017. Measures of Spatial Autocorrelation Changes in Multitemporal SAR Images for Event Landslides Detection, *Remote Sensing*, 9(6), 554; doi:10.3390/rs9060554.
16. Mondini, A. C., Chang, K. T., Chiang, S. H., Schlögel, R., Notarnicola, C., Saito, H., 2017. Automatic mapping of event landslides at basin scale in Taiwan using a Montecarlo approach and synthetic land cover fingerprints. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 63: 112-121.
17. Pamungkas, Y. A., Chiang, S. H. (2021). Monitoring Land Subsidence Induced by Groundwater Change using Satellite Gravimetry and Radar Interferometry Measurements, Case Study: Surabaya City, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 916 012030.
18. 15. Raspini, F.; Moretti, S.; Fumagalli, A.; Rucci, A.; Novali, F.; Ferretti, A.; Prati, C.; Casagli, N. The COSMO-SkyMed constellation monitors the Costa Concordia wreck. *Remote Sens*. 2014, *6*, 3988–4002.
19. 16. Shibayama, T., Yamaguchi, Y., Yamada, H., 2015. Polarimetric Scattering Properties of Landslides in Forested Areas and the Dependence on the Local Incidence Angle. *Remote Sens*. 7, 15424-15442; doi:10.3390/rs71115424.

20. 17. Shimada, M., Watanabe, M., Kawano, N., Ohki, M., Motooaka, T., 2014. Detecting Mountainous Landslides by SAR Polarimetry: A Comparative Study Using Pi-SAR-L2 and X-band SARs. *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan* Vol. 12, No. ists29, pp. 9-15.
21. 18. Yamaguchi, Y., Moriyama, T., Ishido, M., Yamada, H. 2005. Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*. 43, 1699–1706.

附錄一、 期中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
報告內容審查意見：		
一	P2-17，請補充說明同調性門檻值為0.6之原因。	謝謝委員意見,此為先期適用之門檻植,本計畫透過先期試驗(表 3-2)，已提高門檻植至0.8。
二	本案用來驗證及比較的UAV資料共12組,因空拍團隊與儀器可能不同，建議是否針對UAV資料進行一致性檢核後，再應用於InSAR高程成果之校驗。	感謝委員建議,本計畫處理此UAV 資料一致性問題遭遇相當多困難,包含原始資料差異過大以及空間對位不良等問題，目前僅能分析二組資料(圖 3-7)，本計畫將會評估UAV 資料在此計畫的可用性。
三	本研究應UAV資料的用隨機森林法(RF)進行InSAR高程測量之誤差校正,所考量的影響因子有哪些？與利用傳統方法對這些因子進行誤差校正，RF是否具優勢？是否可獲得更佳的誤差校正結果。	謝謝委員建議,本研究提出之誤差校正使用因子為利用雷達衛星常見可得之觀測資料作為輸入，包含影像同調性(Coh)、影像相位差(Phi)以及InSAR 兩幅影像之影像強度值(I_{t1}、I_{t2})。另外，基於 InSAR量測之高程與實際高程之測量差異應存在系統性誤差之

項次	審查意見	回覆辦理情形
		假設，本研究以控制點位高程也作為 RF 之輸入值。另外，研究團隊已於 111 年創新計畫「精進雷達衛星 InSAR 技術於河道侵淤高程變化測量」中進行試驗比較，說明 RF 方法可以將精度 10 公尺(或以上)降低至約 3 公尺。
四	建議將RF進行誤差校正的結果與一般以物理模式進行InSAR高程校正的結果進行比較，以突顯所提方法之優勢。	謝謝委員建議，本研究團隊已於 111 年創新計畫「精進雷達衛星 InSAR 技術於河道侵淤高程變化測量」中進行試驗比較，說明 RF 方法可以將精度 10 公尺(或以上)降低至約 3 公尺。
五	地面控制點的來源主要為影像中的永久散射點(PSCs)，於實際應用中，是否可能會遭遇永久散射點數量不足的問題。	謝謝委員指教，本計畫透過先期試驗(表 3-2)，確立可用之 PSCs 數量。
六	建議針對RF之計算時間進行高程誤差較正之效率分析。	謝謝委員建議，已增加說明於第三章第二節。

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
報告內容審查意見：		
一	為何部分區域在資料處理後仍有數十公尺的誤差?會不會影響後續分析結果?控制點數量是否需要再增加?	謝謝委員的提問，部分區域之較大誤差(數十公尺)，容易出現在無控制點分布、陡峭之壁崖處。關於控制點數量問題，當以數量越多、分布越均勻越佳，但以本計畫可解取之數量為 1,007 點，應用控制點評估之各期 RMSE 為在 1 公尺以下，可應用於大部分區觀測區域。
二	以升軌資料製作DEM，是否有部分坡向精度不足或資料缺失?	謝謝委員的提問，僅以升軌進行 DEM 製作，大致上確有東南向坡面低估、西北向坡面高估之情形，未來在 RF 高程修正模式上，可以考慮加入坡度、坡向資料來強化高程修正。
三	是否有跟地面控制點進行變形精度檢核?是否有不同年度地形變遷辨識精度的比較?空拍機是否還有設置地面控制	謝謝委員的提問，本計畫為克服地面控制點數量不足且少分布於山區之問題，本計畫之地面控制點擷取為以內政部

項次	審查意見	回覆辦理情形
	點用來產製DEM資料?	5 公尺 DSM 為基礎(2017 年)，利用 PS-InSAR 技術中擷取高高時間同調性及空間同調性(>0.8)之永久散射點作為地面控制點，以此為基礎來製作各期 DEM，並比較其相對之高程變化；另外，本計畫並無取得與水保署申請之空拍 DSM 之控制點資料。
四	建議多增加其他觀測樣區，並探討土砂遞移量的變化與工程進入的時機。	謝謝委員的建議，本計畫後續將持續精進此研究方法，增加其他觀測樣區，並探討土砂遞移量的變化與工程進入的時機。
五	建議簡要說明土砂地點、影響範圍及是否有保全對象，提高成果之可行性。	謝謝委員的建議，本計畫研究之玉穗溪崩塌，並無保全對象，然能持續對溢流點位置之明霸克露橋造成斷橋，也就是說，區域之土砂災害，對公共設施的損害可使下游保全對象同樣受災，此應為加強關注之議題。