
應用地基合成孔徑雷達干涉技術於
邊坡崩塌預警系統建置
Slope Early Warning System with
GB-InSAR

(成果報告書)

執行單位：國立成功大學

執行期間：109 年 02 月 06 日至 109 年 12 月 31 日

計畫主持人：余騰鐸 副教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 109 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

應用地基合成孔徑雷達干涉技術於邊坡崩塌預警系統 建置

摘要

地基合成孔徑雷達 (GB-SAR) 配合干涉技術 (Interferometry)，以同調性 (Coherence) 進行濾波，保留有效干涉點，可作為地表變形監測工具。本研究雷達採用 Ku 波段 (波長約 1.7 公分)，結合頻率調變連續波技術 (Frequency Modulated Continuous Waveform, FMCW)，使單次觀測時間可於 3 分鐘內完成且有效觀測精度約達 0.3 毫米。

本計畫挑選萬山、來義與佳暮崩塌地作為研究區，另觀測位於舞鶴台地的林務局玉里事業區 21 林班地的崩塌地，根據 2020 年 7 月份林務局研究報告，其每日滑動超過 5mm。透過現地放置儀器瞭解地基合成孔徑雷達用於監測天然邊坡之應用與限制。

本研究提出地基合成孔徑雷達觀測建議如下：(1) 有良好雷達強反射材質 (裸露邊坡或混凝土)；(2) 雷達天線需要與目標正交；(3) 適當觀測距離 (70 至 2,000 公尺)，適當目標尺度 (3 公尺至 100 公尺以上)；(4) 穩定平台與電源供應 (雷達軌道長 2 公尺，重量約 100 公斤)。透過本研究成果確認合適監測目標與儀器放置位置，針對後續應用作為地基合成孔徑雷達設置參考，以增進坡地防災效能。

關鍵詞：地基合成孔徑雷達、邊坡穩定、即時預警、微變形

Slope Early Warning System with GB-InSAR

ABSTRACT

Ground-Based Synthetic Aperture Radar Interferometry (GB-InSAR) is a high-precision surface deformation monitoring system. We used the radar of Ku band which wavelength is about 1.7cm and combined with frequency modulated continuous waveform (FMCW) technology. With the technologies system could gather InSAR data with less than 3 minutes and the accuracy could reach about 0.3 mm.

We had set up the GB-InSAR system in Wanshan, Laiyi, Jiamu and Wuhe landside in Taiwan. According the report of the Forestry Bureau the Wuhe landside slided 5 mm per day on July 2020. After we monitored those cases , we had summarized the applications and limitations of Ku band ground-based Synthetic Aperture Radar interferometry technology in real-time monitoring of slope.

This research proposes the following recommendations for setting up ground-base synthetic aperture radar system:1.The target must has strong reflectivity of microwave (bare land or concrete);2.Radar antenna needs to be orthogonal to the target;3.Appropriate observatig distance (70 to 2,000 meters) and appropriate target scale (3 meters to more than 100 meters) 4. Stable platform and power supply (the radar track is 2 meters long and weighs about 100 kg). The results of this research are used to confirm appropriate monitoring targets and instrument placement, and serve as a reference for ground-based synthetic aperture radar settings for subsequent applications to improve the effectiveness of slope disaster prevention.

Key Words : GB-InSAR, Slope safety, Real-time warning, Deformation.

目次

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
目次.....	IV
表次.....	VI
圖次.....	VII
第一章 前言.....	1-1
第一節 計畫緣起與目的	1-1
第二節 計畫項目與內容	1-1
第二章 工作執行方法	2-1
第一節 工作執行方法	2-1
第二節 文獻回顧	2-3
第三節 研究區概述	2-7
第三章 地基合成孔徑雷達	3-1
第四章 地基合成孔徑雷達干涉技術分析成果	4-1
第一節 萬山研究區 GB-InSAR 分析成果	4-5
第二節 來義研究區 GB-InSAR 分析成果	4-15
第三節 佳暮研究區 GB-InSAR 分析成果	4-26
第四節 舞鶴研究區 GB-InSAR 分析成果	4-30
第五章 地基合成孔徑雷達干涉技術特性與限制	5-1
第一節 雷達回波強度	5-1
第二節 同調性	5-3
第三節 微變形	5-5
第四節 空間解析度	5-6
第六章 結論與討論	6-1

第一節 結論	6-1
第二節 討論	6-1
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附錄-1
附錄一、計畫說明書審查意見回覆表	附錄-1
附錄二、工作執行計畫書審查意見回覆表	附錄-3
附錄三、期中報告書審查意見回覆表	附錄-7
附錄四、期末聯合審查暨成果發表會審查意見回覆表	附錄-12
附錄五、GB-InSAR 儀器安裝標準作業流程	附錄-14
附錄六、GB-InSAR 掃描工作紀錄	附錄-21

表次

表 2-1 比較星載 SAR、GB-INSAR、全測儀於不同項目之特點.....	2-6
表 2-2 萬山地區鑽探孔位資料表與監測儀器	2-9
表 2-3 來義地區鑽探孔位資料表與監測儀器	2-12
表 3-1 雷達掃描波段功能與特性一覽表	3-2
表 3-2 各國主要 GBSAR 系統參數	3-8
表 3-3 GBSAR - CHSCK01 參數	3-10
表 3-4 視距方向理論解析度	3-11
表 3-5 水平方向理論解析度	3-12
表 3-6 理論最大掃描距離	3-12
表 4-1 GB-INSAR 工作說明一覽表	4-1
表 4-2 SENTINEL 衛星影像取樣日期	4-3
表 4-3 舞鶴崩塌地與觀測點坐標	4-30

圖次

圖 2-1 計畫流程圖	2-2
圖 2-2 萬山崩塌區地形圖	2-9
圖 2-3 DS43 萬山大規模潛勢崩塌地位置圖	2-10
圖 2-4 中央地質調查萬山崩塌地判釋成果	2-10
圖 2-5 來義部落旁 DS32 及上游大規模崩塌地地理位置圖	2-12
圖 2-6 來義崩塌地現場野外地質調查照片說明	2-13
圖 2-7 佳暮 D038 崩塌區位置圖	2-14
圖 2-8 佳暮 D038 崩塌區監測系統位置與節理位態	2-15
圖 2-9 花蓮瑞穗大規模崩塌潛勢區之地理位置圖	2-17
圖 2-10 經濟部中央地質調查所網站檢索本崩塌地之地質資訊	2-17
圖 2-11 舞鶴崩塌地衛星影像	2-18
圖 3-1 雷達合成孔徑示意圖	3-2
圖 3-2 雷達回波相位差示意圖	3-3
圖 3-3 地基合成孔徑雷達影像生成示意圖	3-3
圖 3-4 星載與地基合成孔徑雷達相位影響因子比較圖	3-4
圖 3-5 FMCW 原理示意圖	3-6
圖 3-6 透過改變電壓調整信號頻率	3-6
圖 3-7 地基合成孔徑雷達掃描範圍圖	3-9
圖 4-1 SENTINEL-1 不同之成像系統	4-2
圖 4-2 台灣南部地表變形圖示意圖_升軌	4-4
圖 4-3 萬山研究區儀器擺設位置 A、B	4-5
圖 4-4 高雄萬山研究區掃描現場照片	4-5
圖 4-5 高雄萬山研究區 A 點 GB-INSAR 微變動圖	4-6
圖 4-6 高雄萬山研究區 B 點 GB-INSAR 微變動圖	4-7

圖 4-7 第二次高雄萬山研究區掃描現況照片	4-7
圖 4-8 高雄萬山研究區 A 點 GB-INSAR 微變動圖	4-8
圖 4-9 高雄萬山研究區植被覆蓋變化比較圖	4-8
圖 4-10 高雄萬山研究區 A 點 GB-INSAR 微變動圖	4-9
圖 4-11 高雄萬山研究區 A 點 GB-INSAR 微變動圖+DSM.....	4-9
圖 4-12 高雄萬山荖濃溪河岸裸露山壁測試圖	4-10
圖 4-13 結合 SNAP 與 STAMPS 之 PS-INSAR 流程.....	4-11
圖 4-14 萬山星載影像 INSAR 相位分析結果	4-12
圖 4-15 萬山星載影像 INSAR 變動量分析結果	4-13
圖 4-16 高雄萬山地表變形量圖_升軌.....	4-14
圖 4-17 屏東來義研究區儀器擺設位置 A、B	4-15
圖 4-18 屏東來義研究區掃描現場照片	4-15
圖 4-19 屏東來義研究區 A 點 GB-INSAR 微變動圖	4-16
圖 4-20 屏東來義研究區 A 點 GB-INSAR 微變動圖+DSM.....	4-17
圖 4-21 屏東來義研究區 A 點 GB-INSAR 微變動圖	4-18
圖 4-22 屏東來義研究區 A 點 GB-INSAR 微變動圖+DSM.....	4-18
圖 4-23 屏東來義現場廣角照	4-19
圖 4-24 屏東來義研究區 A 點 GB-INSAR 微變動圖	4-20
圖 4-25 屏東來義研究區 A 點 GB-INSAR 微變動圖+DSM.....	4-20
圖 4-26 屏東來義研究區 B 點 GB-INSAR 微變動圖	4-21
圖 4-27 屏東來義研究區 A 點 GB-INSAR 微變動圖	4-21
圖 4-28 屏東來義研究區 A 點 GB-INSAR 微變動圖+DSM.....	4-22
圖 4-29 屏東來義研究區 B 點 GB-INSAR 微變動圖	4-22
圖 4-30 屏東來義 A 點 4/21 至 6/23 GB-INSAR 微變動圖	4-23
圖 4-31 屏東來義 A 點 4/21 至 6/23 GB-INSAR 微變動圖+DSM...	4-23

圖 4-32 來義星載影像 INSAR 相位分析結果	4-24
圖 4-33 來義星載影像 INSAR 變動量分析結果	4-24
圖 4-34 屏東來義地表變形圖_升軌	4-25
圖 4-35 屏東佳暮研究區儀器擺設位置 A、B	4-26
圖 4-36 屏東佳暮研究區掃描現場照片	4-26
圖 4-37 屏東佳暮研究區 A 點 GB-INSAR 微變動圖	4-27
圖 4-38 屏東佳暮研究區 B 點 GB-INSAR 微變動圖	4-28
圖 4-39 屏東佳暮研究區 B 點 GB-INSAR 微變動圖	4-28
圖 4-40 屏東佳暮研究區 B 點現地照片	4-29
圖 4-41 屏東佳暮研究區 B 點同調性分析	4-29
圖 4-42 舞鶴崩塌區觀測點與目標區相對位置	4-30
圖 4-43 觀測點 1(左)與觀測點 2(右)現場照片與參數	4-31
圖 4-44 舞鶴崩塌地觀測點 1 第一次掃描雷達回波成像	4-32
圖 4-45 觀測點 1 第一次掃描進階分析	4-32
圖 4-46 舞鶴崩塌地觀測點 1 第二次掃描雷達回波成像	4-33
圖 4-47 觀測點 1 第二次掃描進階分析	4-33
圖 4-48 舞鶴崩塌地觀測點 2 掃描雷達回波成像	4-34
圖 4-49 觀測點 2 掃描進階分析	4-34
圖 5-1 良好的雷達回波圖(曾文水庫大壩)	5-2
圖 5-2 自然邊坡雷達回波圖(來義)	5-2
圖 5-3 同調性計算成果圖(曾文水庫大壩)	5-4
圖 5-4 非連續性觀測同調性成果(來義)	5-4
圖 5-5 連續性觀測失去同調性成果(某礦場)	5-4
圖 5-6 本團隊使用之角反射器	5-5

第一章 前言

第一節 計畫緣起與目的

傳統以位移觀測數據作為邊坡崩塌警報發布依據的崩塌預警系統，為藉由設於特定位置的 GPS 站、傾斜管或位移計進行點狀的觀測，此作法較缺乏進行大範圍的崩塌監控。而有條件進行大規模位移觀測的作業方法中，星載 InSAR 之拍攝時間、拍攝位置與入射角度，皆受限於衛星軌道之限制而無法依實際需求而調整；LiDAR 之訊號處理需要大量的時間，難以滿足防災資訊取得的迫切性；然而 GB-InSAR 除可進行大規模邊坡位移觀測外，因其儀器設置點位於地面，故拍攝時間、拍攝位置與入射角度亦皆可由使用者自行掌控，且其解析度亦高於星載 InSAR。另一方面，因 InSAR 數據處理流程之差異，故 GB-InSAR 幾乎可在測量完成後，同步即時獲得大區域的邊坡位移資料，其執行效率遠高於需龐大後處理作業量的 LiDAR 觀測，故 GB-InSAR 極有潛力使用於崩塌預警系統的建置。因此，本計畫即引進 GB-InSAR 量測技術，從萬山、來義與佳暮崩塌地中挑選至少兩處作為示範區，配合山區降雨預測模式，建構出以 GB-InSAR 為監測工具之崩塌警戒模式。

第二節 計畫項目與內容

本計畫從萬山、來義與佳暮崩塌地中挑選至少兩處作為示範區，建構邊坡崩塌預警系統。作法為使用 GB-InSAR 量測技術，進行大規模邊坡位移量測，掌握目前邊坡狀態，並由所建構滑移速度與降雨的相關性，藉由對未來短期的當地山區降雨預測，評估邊坡滑移超過門檻值的可能性，並適時發布警報。

第二章 工作執行方法

第一節 工作執行方法

一、工作執行方法

本計畫目的為以萬山、來義、佳暮崩塌地或其他水保局重大崩塌區做為候選場址，從中至少挑選兩個做為研究示範區，建構出以 GB-InSAR 為監測工具之崩塌警戒模式。

執行內容說明如下，使用 GB-InSAR 儀器進行滑動監測，監測時間平均落於乾濕季，以建立致災事件前的常時(背景)滑動參數。作業中規劃時將針對研究區現地狀況，挑選適合架設 GB-InSAR 之場地，規劃拍攝角度與範圍，使得拍攝角度正對邊坡滑動方向，依據現地植生分布設置反射錐以增加量測精度，以此建構 GB-InSAR 標準作業程序。後續以此大範圍位移監測結果，偵測出邊坡滑動之局部區域，並檢視崩壞前之位移記錄，評估並歸納出崩壞前可能的局部位移徵兆與臨界(或警戒)滑動量，以供建置研究區之崩塌預警系統之用。此外，並將此由 GB-InSAR 所觀測之滑動參數，與位移計及傾斜管等(水保局)現地監測儀器之單點滑動監測結果進行比對，以瞭解其相關性。另一方面，於豪大雨或大型地震等致災事件後，使用 GB-InSAR 觀測致災事件所產生之滑動量與崩塌區域，並配合致災事件前由 GB-InSAR 所累積量測的滑動參數、降雨強度、地震動強度、地下水位計與傾斜管等現地監測數據，建構出不同參數下所對應之臨界降雨量。

本計畫完成後，將可於研究區中建置一崩塌警戒模式，藉由高解析度、高機動性、大範圍量測與高運算效率的 GB-InSAR 位移觀測，監控大範圍邊坡之位移狀況，以此偵測出滑移前兆，瞭解後續可能發

生崩塌之區域；另一方面，於豪大雨發生時，則配合短期之降雨強度預測，於崩塌發生前，發布崩塌警戒。計畫流程圖示於如圖 2-1 中，執行內容與步驟如下。

以地基合成孔徑雷達干涉技術 建置邊坡崩塌預警系統之流程圖

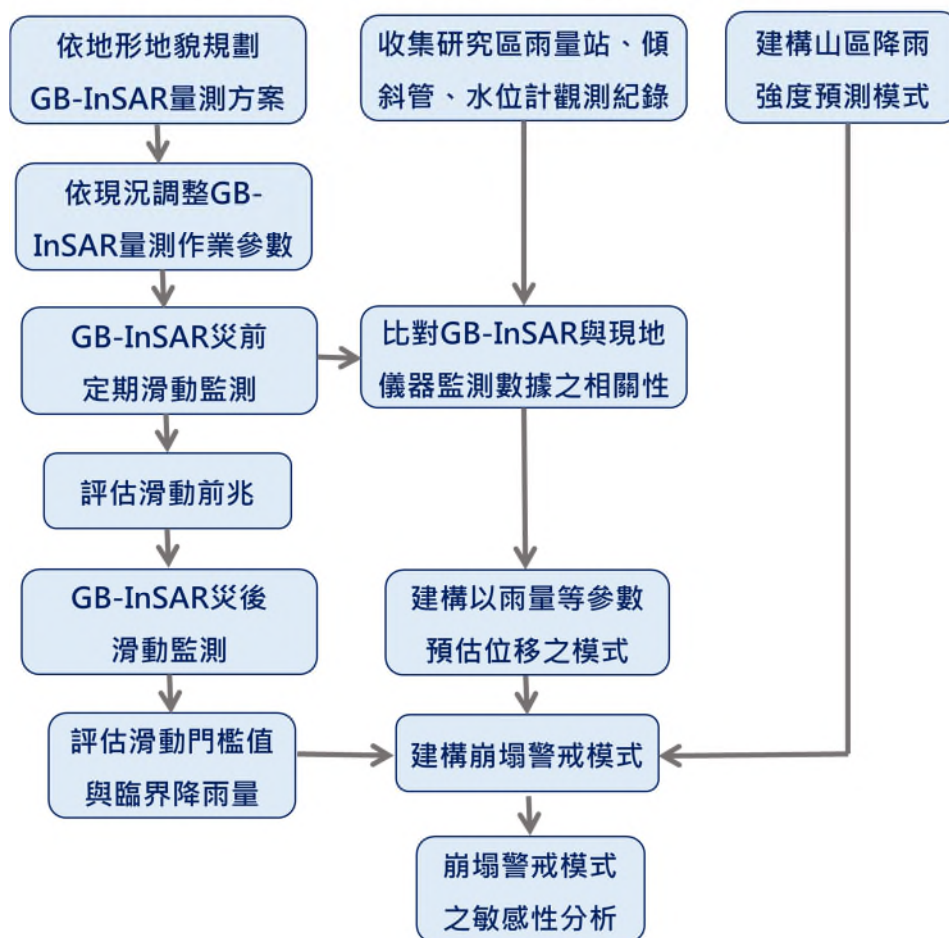


圖 2-1 計畫流程圖

第二節 文獻回顧

GB-InSAR 大量地被使用在監測邊坡環境用途上。不管是災前、災害發生當下、或者是災後，GB-InSAR 均有能力提供穩定而有力的監測結果。在災前，GB-InSAR 可以監測坡地的微變動，若變動量超過設定的臨界值則提前預警，以減少災害損失擴大；災害發生當下，正當現場人員進行緊急救難、搶通、移除落石等工作時，GB-InSAR 可針對不穩定目標物進行緊急監測，以高頻率重複掃描的方式立即獲取目標最新的狀態。若該邊坡變形位移超過臨界值時則發出警告，令所有人員進行避難措施，避免二次災害發生；災後，GB-InSAR 可以針對人工整治後之護坡進行定期監測，瞭解工程整治後坡地穩定狀況。GB-InSAR 亦可以遠距離監測自然邊坡在崩塌後發育狀況，為當局政策提供參考資訊 (Federica et. al., 2017)。

災害前後，GB-InSAR 可以透過長期監測的方式來取得山崩即時而精細的變化結果，缺點是儀器必須長期擺在現場。由於目前台灣的 GB-InSAR 數量稀少，目前的策略是希望可以多點同時監測，因此長期置放在現場、隨時進行掃描監測的方式不適合現在的運作策略。Renato 等人(Renato et. al., 2018)在加拿大偏遠山區，克服夏天植被茂密、冬天冰雪覆蓋、電力供應不穩定等不利觀測條件下安裝 GB-InSAR 進行長期監測工作 (2016 年 10 月至 2017 年 6 月)；雖然無法使儀器隨時運轉進行監測預警，卻能夠提供長期監測山區邊坡累積崩塌量，使人可以客觀了解坡地隨時間季累積變化狀況。

不管是 Federica 等人或是 Renato 等人，其 GB-InSAR 設置的位置均符合開闊視野、掃描方向正對坡地、以及目標與觀察點之間無遮蔽物等基本要件。

藉由上述說明，本研究認為，在台灣進行自然邊坡的掃描監測工作，除了比照上述要件進行觀測的點選擇外，尚需要另外考慮邊坡地質與環境狀況；由於 GB-InSAR 在視距方向具可分辨細微變動，從當地的地質狀況（地層位態、破碎程度、裂隙等資訊）評估邊坡破裂方向；若邊坡有變形位移現象，則評估邊坡屬於哪種類型的崩塌地（滑動、移動、崩落等）以及位移方向。另一方面，台灣地形崎嶇，在很短的觀察距離內常有其他障礙物阻礙監測（如植被、人造建物、地形轉折處等），因此建議使用 GB-InSAR 當下，多尋找強反射物、或者設置兩個以上的角反射器作為糾正點為宜。另一方面，搭配其他測量工具，如全測儀、以及星載光學、雷達衛星影像進行輔助，將補足 GB-InSAR 掃描視野受到干擾之不利狀況。

比較使用星載 SAR 影像、GB-InSAR、全測儀等儀器的特點。透過下列項目進行比較：(1)測量距離、面積；(2)測量時間；(3)測量時間間隔；(4)測量精度；(5)受到植被影響；(6)後處理速度；(7)是否安排人員至現場工作。表 2-1 所列为比較結果。

一、星載SAR影像

本計畫利用歐洲太空中心所發射之哨兵一號 (Sentinel-1/ C-band) 為例。星載 SAR 影像掃描範圍寬廣，一次寬度可達百公里，受限於軌道運轉，再訪週期為 6~12 天；測量精度可達公分級；受到植被以及地表粗糙度影響，在台灣山區大部分為雜訊，在平原地區可以用於農業或土地利用的領域；影像後處理速度慢、需要的運算資源較大，現場不需安排人員。

二、GB-InSAR

掃描工作受到地形影響；掃描範圍中等，一次掃描距離從數十公

尺至數公里；單次測量時間快，重複時間短，數分鐘內即可重新測量一次；測量精度為公釐等級；受到植被影響；影像處理速度快速，掃描完即立即運算取得測量結果；需要安排人員至現場測量。

三、全測儀

掃描工作受到地形影響；重複測量時間短；測量精度為公釐等級；較不受植被影響；需要進行後解算才能得到測量結果，現場必須有人員工作。

比較項目之間各有各的優點與適用範圍，衛星影像的優點在於一次取得大尺度的影像，可以掌握整個空間的局勢變化。但受限於衛星再訪週期、以及測量精度的影響，比較不能看到區域的細微變化；全測儀的使用精度高，但必須親自到現場測量，若遇到地形障礙則會嚴重拖延工作時間；GB-InSAR 雖然也必須到現場操作，但其具備高精度、遠距離測量的特性，有效提升測量的靈活性。因此在進行測量工作時，需先考慮目標地的地理環境位置，評估該目標適合哪一種測量方法，才可以收穫最有效率的結果。

表 2-1 比較星載 SAR、GB-InSAR、全測儀於不同項目之特點

項目	星載 SAR (哨兵一號)	GB-InSAR	全測儀
測量距離、面積	距離長、掃描面積大 (數百公里)	距離中等(數公尺至數 公里)、掃描面積中等	測量人員必須至現場測 量，測量範圍最狹窄
測量時間	快	中	快
測量間隔 (週期)	長，6~12 天	短，數分鐘	數分鐘
測量精度	公分等級	公釐等級	公釐等級
植被影響	有，中等	有，嚴重	無
後處理速度	慢，數十分鐘	快，數分鐘	慢
安排現場人員	無	有	有

第三節 研究區概述

一、萬山

2013 年起水土保持局針對中央地質調查所判定為高潛勢不穩定區域之萬山里萬山部落西北側，及萬山部落東北側之邊坡進行調查及監測系統建置，其之基地範圍如圖 2-2。

萬山部落位於脊樑山脈南段關山地塊之西南側山麓，因潮州斷層活動而成，主要河川為荖濃溪及其支流濁口溪，而因河流的下切作用力強，使此地區多為峽谷地形，因有荖濃斷層和潮州斷層通過，亦使附近區域多為瀑布及斷崖景觀；於地質分區上，屬中央山脈的脊樑山脈帶地質區，為中新世之潮州層，岩性以灰黑色板岩為主，有發育良好的劈理，局部夾灰白或黃色的變質砂岩，坡面表層則為角礫狀的風化土壤與岩屑。

中央地質調查所於 2010 年利用 Lidar 判釋莫拉克南部災區之大規模潛勢崩塌區域，其中一潛勢崩塌區域位於萬山部落西北方坡地，編號為 DS43，如圖 2-3，此區域為莫拉克颱風時所造成之邊坡坑溝，略呈西北長、東北窄的外形，坡向東南方，平均坡度 27.5 度，屬上凹下凸之坡形，面積約 131 公頃。根據高精度 DEM 地形判釋及現場調查結果，DS43 萬山崩塌地雖不屬順向坡地形，但崩塌地上半部發現一系列平行排列 U 形溝，判斷應為岩體潛移形成的張力裂隙，顯示此處岩體存在潛移運動，且既有崩塌之主崩崖之岩體裸露，崩塌地有持續擴大之虞。加上 DS43 萬山崩塌地位於濁口溪之攻擊坡，坡腳受侵蝕作用，相當不利於邊坡穩定，因此研判萬山崩塌地具有高潛勢的活動性，判釋成果如圖 2-4。

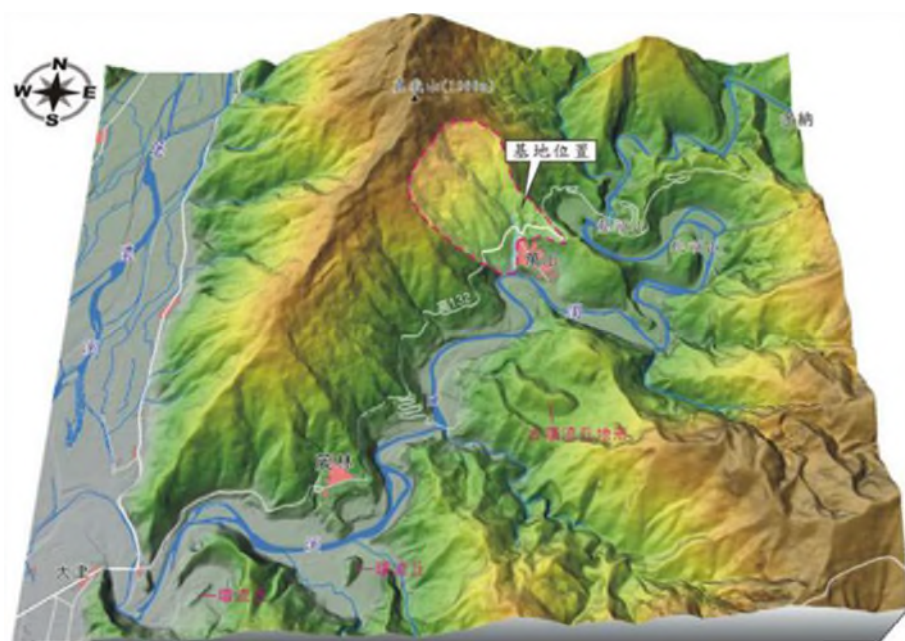
萬山地區已裝設數座監測儀器，其中四處傾斜管分別為 BH-1、

BH-6、BH-10、BH-11，TDR 有三處分別為 BH-3、BH-5、BH3-1，傾斜管與 TDR 詳細資料詳表 2-2 所示。

表 2-2 萬山地區鑽探孔位資料表與監測儀器

監測點 (孔號)	橫坐標 (TWD97)	縱坐標 (TWD97)	鑽探深度 (公尺)	儀器 內容	備註
BH-1	217038	2534133	40	傾斜管	
BH-3	217123	2534346	60	TDR	
BH-5	217321	2534505	50	TDR	
BH-6	217304	2534468	40	傾斜管	
BH-11	217342	2534425	40	傾斜管	
BH-10	217252	2534487	40	傾斜管	
BH-3-1	217141	2534345	60	TDR	自動化儀器

資料來源：水土保持局(2014)



資料來源：水土保持局(2014)

圖 2-2 萬山崩塌區地形圖

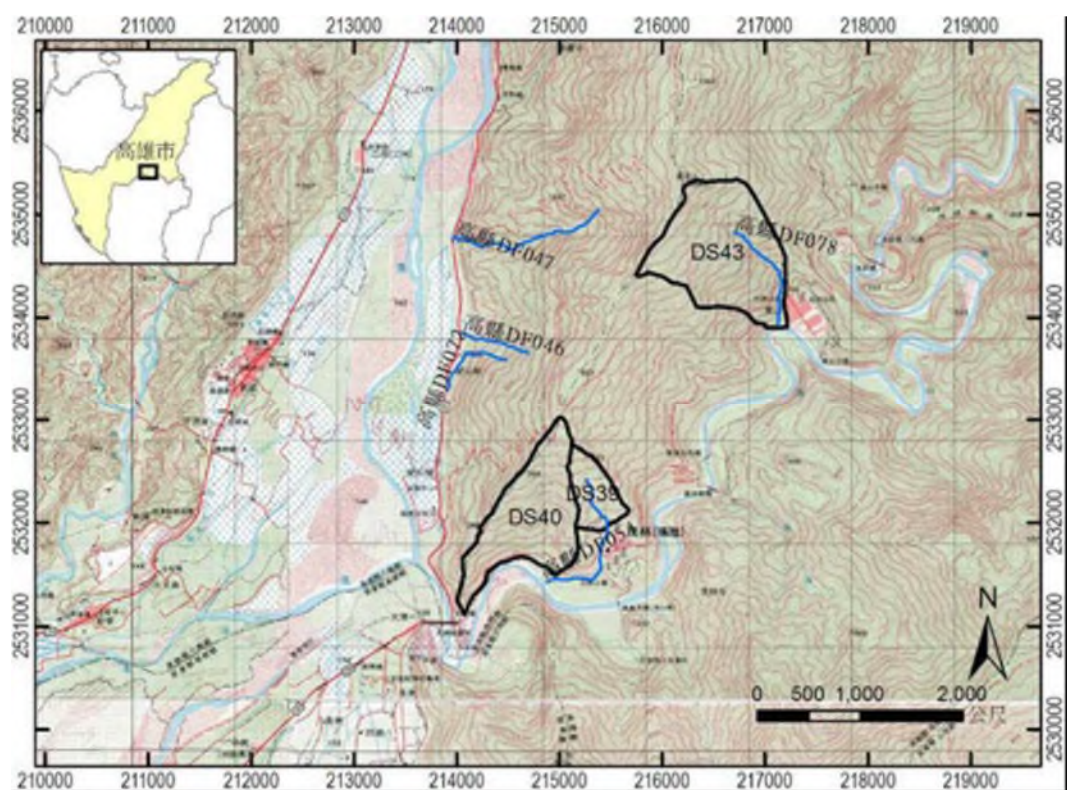


圖 2-3 DS43 萬山大規模潛勢崩塌地位置圖

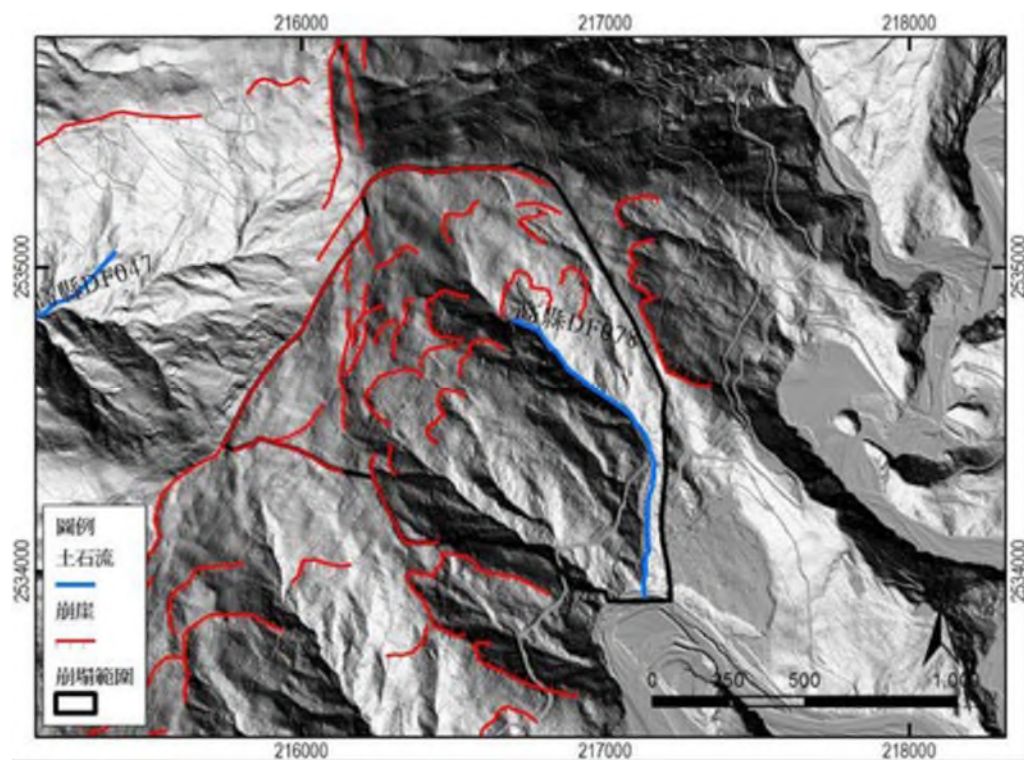


圖 2-4 中央地質調查萬山崩塌地判釋成果

二、來義

來義崩塌地位於屏東縣來義鄉來義村東西部落旁的來社溪旁之右岸，地理位置如圖 2-5 所示，崩塌面積約 79 公頃，其上游 1 公里處亦有一大型崩塌地，崩塌面積約 108 公頃，兩崩塌地皆曾於莫拉克、凡那比風災期間發生崩塌，崩塌土石下移造成來社溪及內社溪匯流口處回淤嚴重，若再次發生大規模滑動，將影響來義部落居住安全。

根據「102 年屏東縣來義鄉來義村潛在大規模崩塌地區調查監測計畫」中顯示，來社溪右岸來義鄉內社聚落北側之河岸邊坡受河流轉彎攻擊侵蝕崩塌情形，主要為板岩碎屑崩塌，如圖 2-6A 所示。其下游右岸板岩或硬頁岩的岩層裸露邊坡，劈理呈 $N30^{\circ}\sim 50^{\circ}E/30^{\circ}\sim 40^{\circ}SE$ ，且為順向坡地形，如圖 2-6B 所示。該崩塌坡面發現岩層斷層錯動痕跡，岩層局部有擾動及破碎情形，如圖 2-6C 所示。以及邊坡上方已出現明顯向源侵蝕溝，如圖 2-6D 所示。

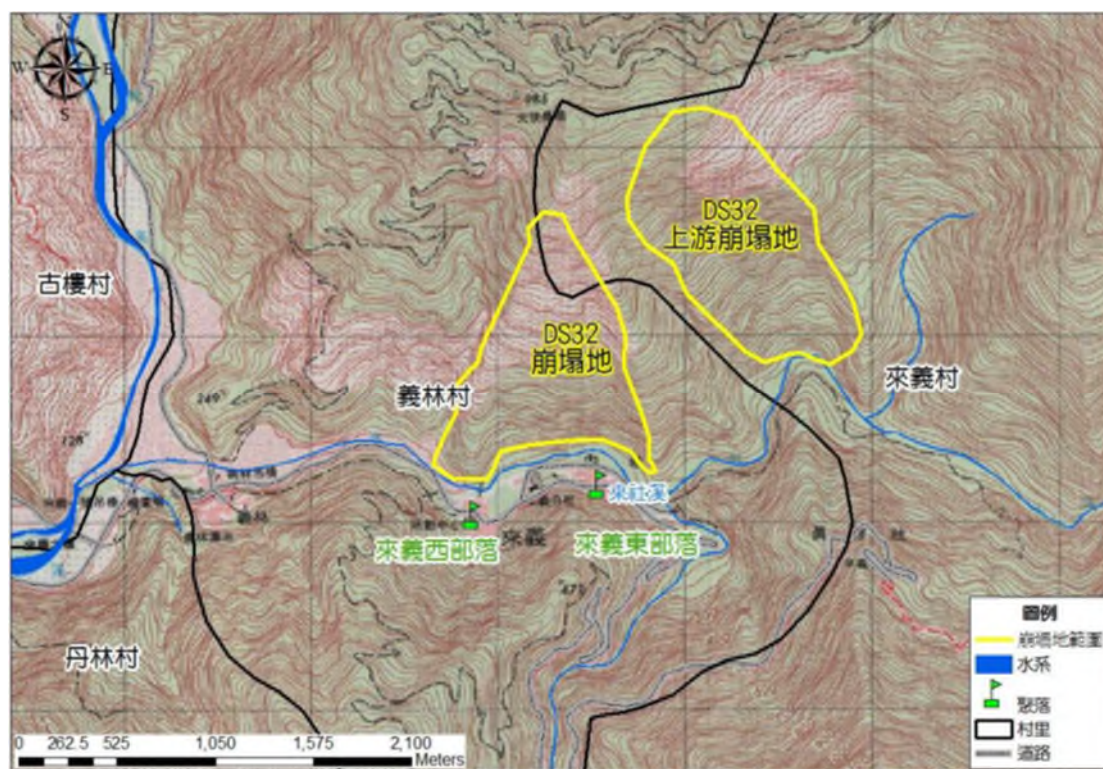
內社聚落上游右岸之河岸邊坡受河流轉彎攻擊侵蝕崩塌情形，已堆積大量崩塌土體，如圖 2-6E 所示。崩塌土體下游測出現明顯向源侵蝕溝，如圖 2-6F 所示。崩塌邊坡上緣發現疑似岩層斷層錯動痕跡，岩層局部有擾動及破碎情形，如圖 2-6G 所示。兩處崩塌地之間的右岸，邊坡受河流轉彎攻擊侵蝕崩塌情形及向源侵蝕溝發育，如圖 2-6H 所示。

來義地區共有四處傾斜管分別為 BH-3、BH-4、BH-6、BH-10，監測儀器設置之資料詳表 2-3。

表 2-3 來義地區鑽探孔位資料表與監測儀器

監測點 (孔號)	橫坐標 (TWD97)	縱坐標 (TWD97)	鑽探深度 (公尺)	儀器內容
BH-3	217216	2493066	50	傾斜管
BH-4	217106	2492726	50.8	地下水位計、傾斜管
BH-6	217091	2492421	50	傾斜管
BH-10	218476	2492761	32	傾斜管

資料來源：水土保持局(2013)



資料來源：水土保持局(2013)

圖 2-5 來義部落旁 DS32 及上游大規模崩塌地地理位置圖



A. 來社溪右岸來義鄉內社聚落北側之河岸邊坡受河流轉彎攻擊侵蝕崩塌情形，主要為板岩碎屑崩塌。



E. 內社聚落上游右岸之河岸邊坡受河流轉彎攻擊侵蝕崩塌情形，已堆積大量崩塌土體。



B. 編號A下游右岸板岩或硬頁岩的岩層裸露邊坡，劈理呈 $N30^{\circ}\sim 50^{\circ}E/30^{\circ}\sim 40^{\circ}SE$ ，且為順向坡地形。



F. 編號E崩塌土體下游測出現明顯向源侵蝕溝。



C. 編號A位置近拍，裸露岩層邊坡發現岩層剪裂錯動痕跡，岩層局部有擾動及破碎情形。



G. 編號A位置近拍，崩塌邊坡上緣發現疑似岩層斷層錯動痕跡，岩層局部有擾動及破碎情形。



D. 裸露岩層邊坡上方已出現明顯向源侵蝕溝。



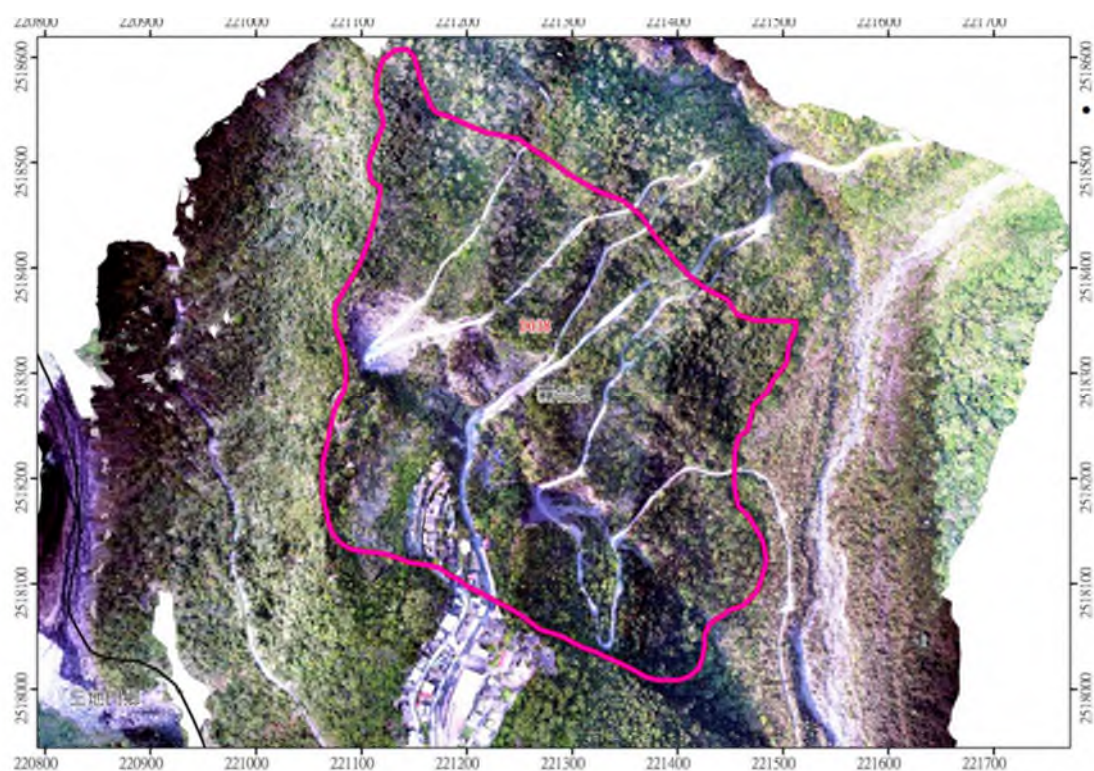
H. 於編號A及編號E兩處崩塌地之間的右岸，邊坡受河流轉彎攻擊侵蝕崩塌情形及向源侵蝕溝發育。

資料來源：水土保持局(2013)

圖 2-6 來義崩塌地現場野外地質調查照片說明

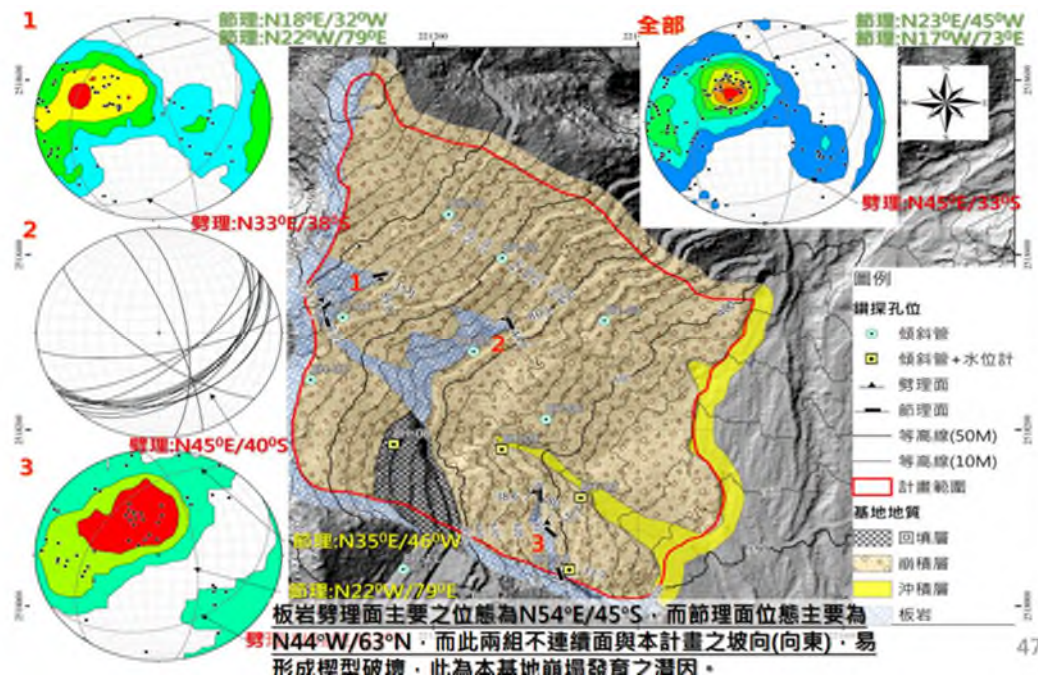
三、佳暮

D038 佳暮崩塌地坐標為 TWD97 (221265, 2518163)，位於省道臺 24 線 31K~32K 處之間，崩塌地範圍如圖 2-7 所示，面積約 16.2 公頃，海拔介於 344 至 610 公尺間，坡度以五級坡面積佔 50%，地質為潮州層，主要岩性為板岩及硬頁岩為主，由過去的調查指出，D038 屬於淺、中層的地滑邊坡，地表也受到沖刷而不穩定，水保局於當地設置監測儀器，佈設位置示於圖 2-8 中。



資料來源：水土保持局(2019)

圖 2-7 佳暮 D038 崩塌區位置圖



資料來源：水土保持局(2019)

圖 2-8 佳暮 D038 崩塌區監測系統位置與節理位態

四、舞鶴

該崩塌地位於花蓮舞鶴台地以西、瑞穗牧場西南方約 2.52 公里，如圖 2-9。屬林務局花蓮林區玉里事業區 21 林班地內，二度分帶坐標為 TE：283,399 m，TN:2,595,999 m。地質上，根據臺灣大學陳文山教授所出版之「台灣地質概論」，崩塌地位處於漸新世-中新世玉里層以及中新世崙山層交界之「超基性岩塊」上；由經濟部中央地質調查所地質資料整合查詢網頁進一步檢索得知，本崩塌地歸屬於中生代之「打馬燕構造地塊」，由藍閃石片岩、角閃岩、以及蛇紋岩所構成，如圖 2-10。與周圍地層關係方面，打馬燕構造地塊以瑞西逆掩斷層分別與西側玉里層、東南側崙山層、以及北側全新世沖基層進行不整合接觸。該崩塌地坡向朝向為東南-南南東方位，北邊有紅葉溪、南邊有豐坪溪，崩塌地恰巧位於二溪之分水嶺上；紅葉溪與豐坪溪流向均由西向東進入花東縱谷，後轉向北邊會合成秀姑巒溪，繼續向東穿過海岸山脈，最後從太平洋進入海中。

該崩塌地由林務局花蓮林管處從 2018 年啟動調查評估，自 2015 年天鵝颱風、2016 年尼伯特颱風、莫蘭蒂颱風及 10 月豪雨，崩塌面及堆積的趾部，逐年陸續擴大。2020 年由交通大學土木工程系翁孟嘉教授團隊執行「玉區 21 林班崩塌地調查評估委託研究案」於 2020 年七月發現其每日滑動量超過 5mm 之警戒值。由 Google 所提供之 2020 年衛星影像俯視結果，崩塌地外觀近似於大寫英文字母 M 符號，如圖 2-11。整個崩塌地寬度約為 234.93 公尺、垂直邊坡裸露高度約為 14.12 公尺。由「玉區 21 林班崩塌地調查評估委託研究案」之調查發現其每天地表位移約 1.4cm；在崩塌地上佈置的 3 個監測孔 (TDR 或測傾管)，都在佈設後 10 天內剪斷 (無雨、無地震)，最後一孔是 7/2

完成，7/8 早上剪斷，屬於非常活躍的崩塌地。本團隊認為其變化幅度符合 GB-InSAR 儀器特性，故於 7 月時進行觀測。



(影像來源：Google Map)

圖 2-9 花蓮瑞穗大規模崩塌潛勢區之地理位置圖

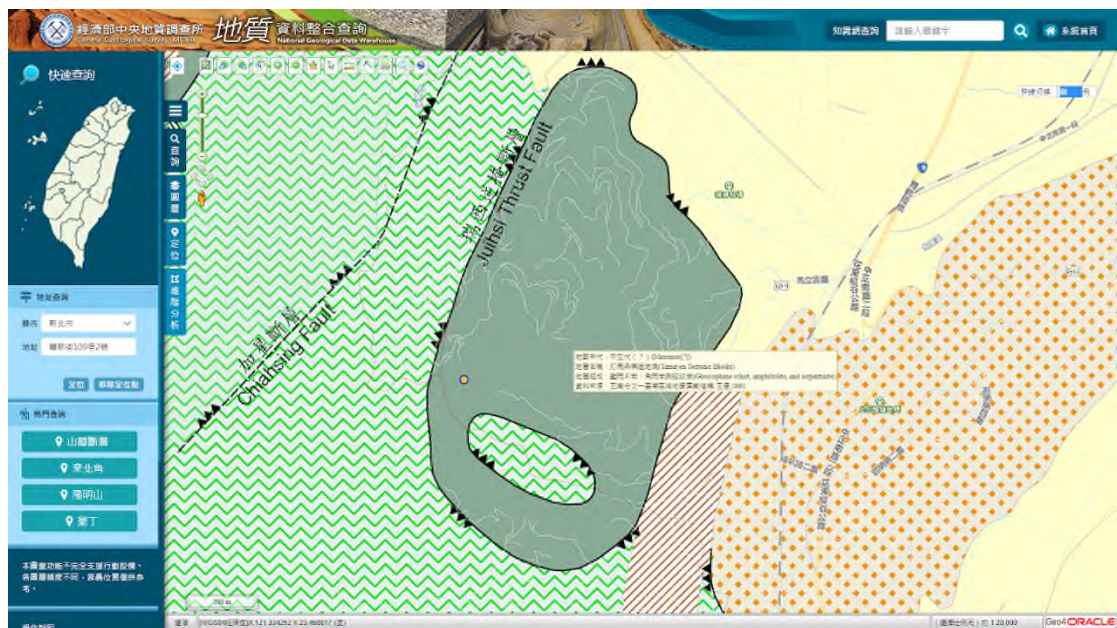


圖 2-10 經濟部中央地質調查所網站檢索本崩塌地之地質資訊



(影像來源：Google，2020 年)

圖 2-11 舞鶴崩塌地衛星影像

第三章 地基合成孔徑雷達

一、雷達回波分析

透過雷達主動發射微波後，依據其回波進行分析，技術最早應用於第二次世界大戰透過回波強度推算其截面積大小以估算敵機大小，以回波時間估算其位置，不同微波波段有不同特色，波長較長之電波其較不易消散，觀測距離可達 500 公里以上，但其波長較長導致空間解析度較差，而波長較短之微波雖可觀測距離較短，但可以提供更佳的解析度，雷達掃描波段功能與特性如表 3-1。

雷達單次觀測範圍受限其雷達天線大小所影響，為了增加其觀測範圍而有了合成孔徑雷達技術 (synthetic aperture radar, SAR) (Curlander and McDonough, 1991)，如圖 3-1。結合干涉技術 (Interferometry)(Zebker and Goldstein, 1986)，將兩組合成孔徑雷達回波以同調性 (Coherence) 進行濾波，保留有效干涉點，在透過兩次雷達回波反射之相位差異 (Difference of phase)，如圖 3-2 可計算其變化量。本計畫系統採用 Ku 波段，地基合成孔徑雷達接收經目標散射後之雷達回波，如圖 3-3，計算其相位差與微變化量。

表 3-1 雷達掃描波段功能與特性一覽表

波段	縮寫	波長 (公分)	頻率 (GHz)	觀測距離 (公里)	備註
UHF 波段	舊稱(P 波段)	10-100 公分	<0.3	500 公里以上	用於監視太空船、彈道導彈等外太空目標的雷達波段。
L 波段	Long	20-30 公分	1-2	500 公里以上	L 代表「遠距離」的意思，用於軍事地基對空警戒之雷達波段。衛星平台：JERS、SEASAT、ALOS。
S 波段	Short	10 公分	2-4	400-500 公里	常用於長距離大範圍天氣監測，天線約 7 公尺。衛星平台：ALmaz
C 波段	Compromise	5 公分	4-8	100-200 公里	用於機場飛航安全。衛星平台：RADARSAT、ERS-2、ENVISAT、SENTINEL-1。
X 波段	Crosshair	3 公分		數十公里	十字瞄準線的意思，短距離氣象監測，天線可放置於飛機上。衛星平台：SRTM。
Ku 波段 K 波段 Ka 波段	Kurtz	1.7-2.5 公分 1.2-1.7 公分 0.75-1.2 公分	12-18 18-27 27-40	約 2 公里	為德語「短」的意思，因 1.5 公分之 K 波段會被水蒸氣吸收，固另細分 Ku 與 Ka 波段。 *本計畫採用 Ku band GBSAR 系統

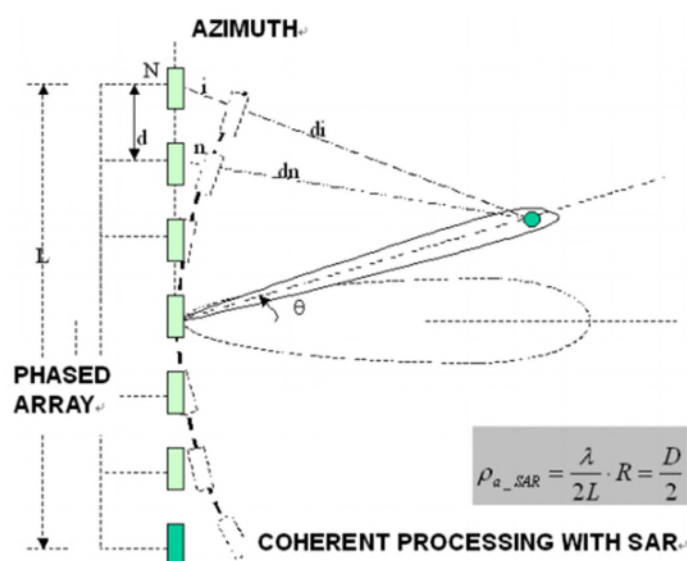


圖 3-1 雷達合成孔徑示意圖

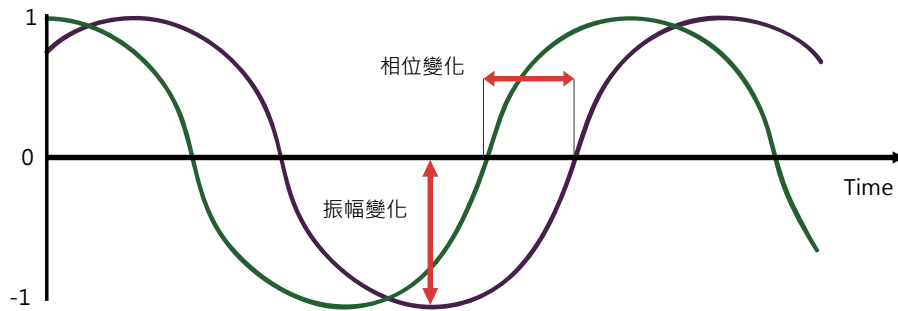


圖 3-2 雷達回波相位差示意圖

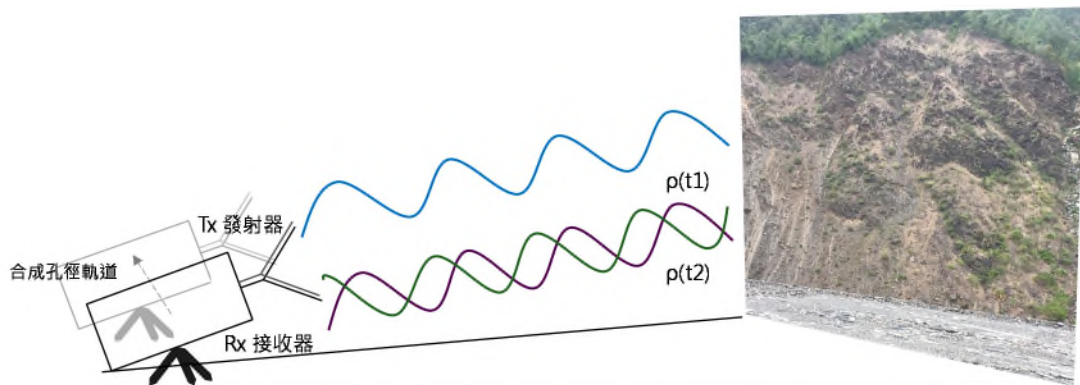


圖 3-3 地基合成孔徑雷達影像生成示意圖

二、雷達回波相位差與微變動計算

影響雷達回波相位因子有許多：(1)平地效應：兩物體水平高度相同，但其相對於觀測距離不同所產生的相位差異。(2)地表變形量：視距方向(LOS)的距離變化資訊。(3)地形效應：前波縮短、疊置與陰影等。(4)大氣效應：不同的介電環境對於雷達回波速度與反射影響。(5)基線效應：雷達取像之位置不同導致之差異。(6)時間效益：衛星的時間同步誤差。(7)其他：其他影響之因子。地基合成孔徑雷達干涉不同於星載合成孔徑雷達干涉所遭遇的問題，由於其雷達影像成像位置相同（零基線）的特性 (Monserrat et al., 2014)，故平地效應、地形效應、基線效應、時間效應、大氣效應與其他基本上可視為相同（如圖 3-4），因此其相位間的差異基本上可視為地表變形量。由於大氣效應涉及傳達速度，會影響微變形之計算量，由於其估計上誤差很小，故本研究

假設兩張地面合成孔徑雷達之相位差為僅受變形量影響。此技術不受地形效應影響，計算兩次雷達圖之變形量，又稱為地基差異干涉合成孔徑雷達 (Ground Base Differential InSAR, GB-DInSAR)。

星載雷達影像相位干擾因子

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\text{flat}} + \Delta\varphi_{\text{dif}} + \Delta\varphi_{\text{terr}} + \Delta\varphi_{\text{atm}} + \Delta\varphi_{\text{baseline}} + \Delta\varphi_{\text{time}} + \Delta\varphi_{\text{n}}$$

GBSAR 相位干擾因子

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\text{flat}} + \Delta\varphi_{\text{dif}} + \Delta\varphi_{\text{terr}} + \Delta\varphi_{\text{atm}} + \Delta\varphi_{\text{baseline}} + \Delta\varphi_{\text{time}} + \Delta\varphi_{\text{n}}$$

圖 3-4 星載與地基合成孔徑雷達相位影響因子比較圖

$\Delta\varphi_{\text{flat}}$ ：平地相位誤差； $\Delta\varphi_{\text{def}}$ ：地表變形量相位誤差

$\Delta\varphi_{\text{terr}}$ ：地形相位誤差； $\Delta\varphi_{\text{atm}}$ ：大氣延遲相位誤差

$\Delta\varphi_{\text{baseline}}$ ：基線相位誤差； $\Delta\varphi_{\text{time}}$ ：時間相位誤差

$\Delta\varphi_{\text{n}}$ ：其他影響監測之雜訊。

透過計算雷達回波之相位差，可得知目標在一個波長之內的變動，由於一個完整的波長為 2π ，當兩個雷達回波相減 ($\Delta\varphi$) 除以 2 個完整的波 2π 乘上其波長就可以計算出實際的微幅變動量，計算方法如下 (Moreira et al., 2013)：

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta\varphi}{4\pi} \lambda \quad (1)$$

其中 $\Delta\gamma$ 為變形量； $\Delta\varphi$ 為觀測相位差； λ 為使用儀器之波長。

由於使用儀器之波長為 ku 波段，故每次相減僅可快速取得 1.7 公分內微幅變動，若兩次的變化量超過一個波長則其計算之結果將不可信。在星載影像是可透過相位解纏的方式進行運算超過一個波長的變化，唯本研究採用之儀器並無採用此方式計算，僅單以相位差進行分析，以保持 GB-InSAR 之快速分析微幅變動之優勢。

三、同調性計算與濾除

若要比較兩幅雷達影像，首先需先確認兩張影像相似程度，其相關程度夠高相位差之可信程度才夠高，計算其相關係數的方法如下。首先選取適當的移動罩窗，根據目標像素四周臨近的像素值來估計其同調性 (Coherence)，並把估計的同調性作為判斷永久散射點 (Persistent Scatterers, PS) 的標準，第 n 個像素的相關係數公式如下 (陳強 et al., 2006)。

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n M(i, j) S^*(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |M(i, j)|^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |S(i, j)|^2}} \quad (2)$$

其中 $M(i, j)$ 、 $S(i, j)$ 分別為構成第 k 個干涉對的主從影像之局部像素，*表示複數共軛， m 、 n 為移動罩窗大小。

在 N 個時序干涉像對存在的前提下，由式(2)可求得影像重疊區域內的任一像素之時序同調性 ($\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 \dots \dots \gamma_N$)。為選取永久散射點候選點，計算時序同調性之平均值 (陳強 et al., 2006)。

$$\bar{\gamma} = \frac{\sum_{i=1}^N \gamma_i}{N} \quad (3)$$

計算完時序同調性之平均值可設定一個適合的同調性閾值 $T_{\gamma}^{TY} T_{\gamma}$ ，選取那些平均同調性大於等於此閾值 ($\bar{\gamma} \geq T_{\gamma}^{TY} \bar{\gamma} \geq T_{\gamma}^{TY} T_{\gamma}$) 之像素做為永久散射點候選點。一般經驗，同調性等同於相關係數分析，若較為穩定之橋樑與人工設施則閾值建議設定 0.9 以上，因為既使調整成較高閾值，整個構造物尚可滿足同調性；若為自然邊坡則閾值建議 0.75 以上，否則將濾除過多資料。

四、連續變頻技術 (FMCW)

連續變頻技術 (Frequency-Modulated Continuous Wave, FMCW) 應用於地面合成孔徑雷達技術，如圖 3-5，在連續掃描時改變訊號發射頻率，如圖 3-6 透過控制電壓調整信號頻率發射，並在接收時將回波信號與發射訊號進行混合形成中頻 (Intermediate Frequency, IF)；中頻經過快速傅立葉處理後，即可將個別訊號處理為強度與距離關係。

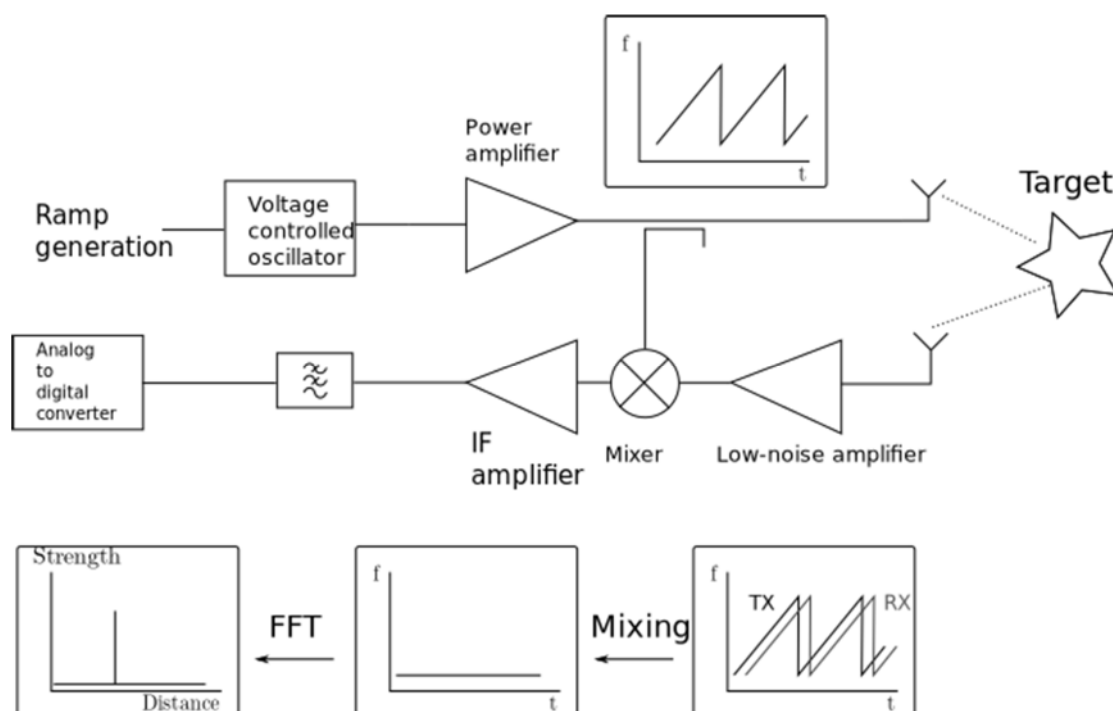


圖 3-5 FMCW 原理示意圖

(Forstén, 2017)

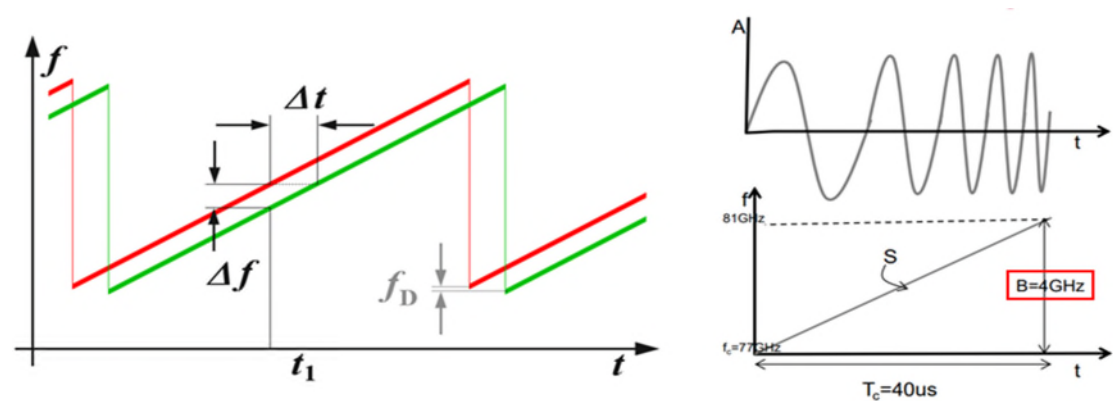


圖 3-6 透過改變電壓調整信號頻率

(Rao, 2017)

本儀器使用 FMCW 雷達技術，其提供了高度的距離方向上的解析度、以及縮短掃描時所耗費的時間，允許儀器邊移動邊掃描，掃描工作所耗費時間可以壓縮至 1 分鐘以內。若再加上掃描前後的運算處理，全部工作預計耗時約 2 分半至 3 分鐘。相較之下，義大利出產的儀器，其使用 SFCW 技術 (step-frequency continuous wave technology)，他們的運作方式必須先停止軌道上面的運行、發射訊號、接收訊號、重新移動到下一個位置、再一次的進行訊號的發射與接收。整個過程需要 5~8 分鐘。

五、各國主要GBSAR系統

地基合成孔徑雷達系統依據其掃描模式可分為線性 (linear) 與角 (angular) 模式，常用波段為 S、C、Ku、Ka、X，最早將其商用化為 2003 年義大利 Ellegi-LiSALab 的 LiSA Lab 系統以及 Ingeneria Dei Sistemi 的 IBIS 系統，後續有英國 Sheffield 大學研究 GBSAR 系統、日本東北大學研發 GBPBSAR 系統與韓國 Korea Institute of Geoscience and Mineral 研發 Arc-Scanning SAR...等，各主要 GBSAR 系統彙整如表 3-2。

表 3-2 各國主要 GBSAR 系統參數

Country	System	Band	Scanning mode	Waveform	Rail length (m)	Acquisition time (min/image)	Scanning distance(m)	Azimuth resolution
Italy	LiSAR	C, Ku	linear	SFCW	2.8	30	800	4mard
Italy	LiSAR Lab	Ku	linear	SFCW	2	12	400	3mard
Italy	IBIS-S/L/M	Ku	linear	SFCW	2	5	200-4000	4.5mard
UK	GBSAR	C, X	linear	-	4	-	-	-
Japan	GBPBSAR	S,C,X	linear	-	H:20 V:1.5	-	-	-
Spain	RiskSAR	C,X,Ku	linear	LSFCW	2		1600	3.75mard
本研究	GBSAR-CHSCK01	Ku	linear	FMCW	1.6	3	70-2000	5.36mard
Korea	ArcSAR	X	angular	-	-	14	-	0.07°/180° 1.07°/350°
Switzerland	GPRI	Ku	angular	SFCW	-	20	4000	6.9mard
Ukraine	GBNWSAR	Ka	angular	-	-	14	-	-

1.mard 為毫弧度換算成長度單位，單位為公尺，即 1000 公尺遠的方位分辨率。
2.” -” 代表尚未取得資訊。

引用並修改自(李俊慧 et al., 2016)

六、雷達回波空間解析度

訊號變化頻率差稱為帶寬 (Bandwidth, B_w)，而帶寬影響 GBSAR 視距方向的解析度 (Range Resolution, ΔR)，計算方式如下(Richards et al., 2010)：

$$\Delta R = c/2B, B = B_w * m \quad (4)$$

c 為光速 (299,792,458 m/s)； B_w 為帶寬 (400 MHz、1000 MHz)； m 為回波延時影響 (0~1)，理想狀況下， m 設定為 1，代表訊號傳遞時忽略介質影響。

儀器最大掃描距離 (Maximum Scanning Distance, D_{max})計算如下 (Rao, 2017)：

$$D_{max} = (f_s * c)/4K \quad (5)$$

f_s 為類比信號轉換為數位信號的採樣頻率，本研究採用設備之採

樣頻率為 0.6 MHz； c 為光速 (299,792,458 m/s)； K 為帶寬與脈寬之比值 $K = B_w/P_w$ ； P_w 為脈寬，為脈衝持續時間，單位為毫秒 (千分之一秒)。

雷達掃描水平方向解析度 (Cross-Range Resolution, ΔCR) 則與軌道基線長度有關 (Mensa, 1981)：

$$\Delta CR = R\lambda/2L \quad (6)$$

R 為目標物距離； λ 為雷達波長； L 為基線軌道長度

整體掃描範圍之扇形網格區域如圖 3-7，可發現水平方向解析度隨著距離遞減。

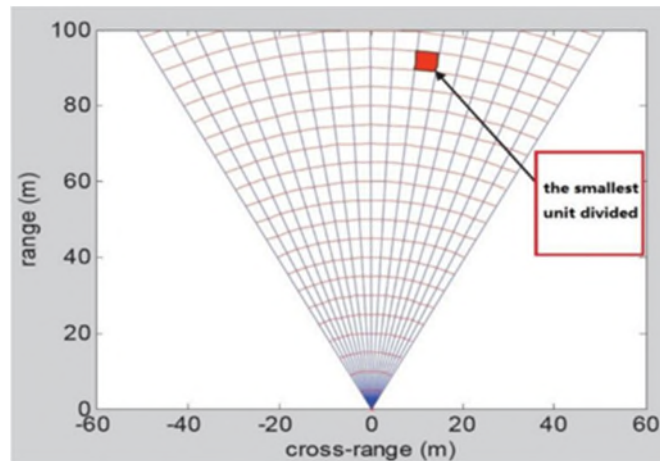


圖 3-7 地基合成孔徑雷達掃描範圍圖

本研究採用之地基合成孔徑雷達系統 (GBSAR-CHSCK01)，其採用 ku 波段之雷達，波長約 1.7 公分，基線長度為 1.6 公尺，可調整頻率範圍為 17,000 MHz 至 18,000 MHz，最大帶寬為 1,000 MHz，由於其 FMCW 技術使得單次觀測時間可壓縮至 3 分鐘以內，透過雷達機旋轉讓觀測可視角度提升。儀器主要參數如表 3-3。

表 3-3 GBSAR - CHSCK01 參數

Operating Frequency	17000-18000MHz (17.0 GHz-18.0 GHz)
Bandwidth (Bw)	0 ~ 1000 (MHz)
Pulse-width (Pw)	1 - 1000 (ms)
Waveform	FMCW
Radar Rotation Angle	360°
Polarization	None
Transmit Power	2 mW ~ 1 W
Antenna Gain	0 - 30 dB
Antenna Scanning Angle	18° (azimuth), 40° (elevation) 28° (azimuth), 18° (elevation)
Radar Scanning Angle	-30° ~ 30°
Synthetic Length	1.6 m
Scanning Distance	70 m - 4000 m
Range Resolution	0.75 m - 0.15 m
Cross Range Resolution	5.36 mrad

以本儀器參數計算各項參數之理論解析度，地基合成孔徑雷達視距方向解析度(Range spatial resolution) 由帶寬 (Bw) 所控制如表 3-4。水平方向解析度 (Cross Range spatial resolution) 則受使用雷達波段、距離 (R) 與雷達軌道長度 (L) 影響如

表 3-5。帶寬 (Bw) 與脈寬 (Pw) 將影響最大掃描距離如

表 3-6。

表 3-4 視距方向理論解析度

Bw (MHz)	Range resolution, ΔR (m)
400	0.37
1000	0.14
$\Delta R = c / 2Bw$ $c=299,792,458 \text{ m/s}$; $Bw=400\text{MHz}$ 、 1000 MHz)	

表 3-5 水平方向理論解析度

Target distant, R (m)	Cross range resolution, ΔCR (m)
70	0.37
100	0.53
150	0.80
300	1.60
500	2.68
1000	5.36
2000	10.72
$\Delta CR = R * (\lambda / 2L)$ $\lambda = 1.7\text{cm}$ $L = 160\text{ cm}$	

表 3-6 理論最大掃描距離

Bw (MHz)	Pw(ms)	Dmax(m)
400	50	562
400	100	1,124
400	200	2,248
1000	50	224
1000	100	449
1000	200	899
$D_{\max} = f_s * c / 4K$; $f_s = 0.6\text{MHz}$; $c = 299,792,458\text{ m/s}$; $K = B_w / P_w$		

綜合上述，透過調整 Bw 可改變視距方向的解析度，水平方向解析度則隨目標距離增加而遞減，如果以雷達發射天線為基準點，投影至二維坐標系統，本儀器在 Bw 為 400 MHz，其視距方向網格解析度 (Range resolution) 為 0.37 公尺。水平網格解析度 (Cross range resolution) 若目標距離 70 公尺遠，則解析度為 0.37 公尺，若目標距離 1,000 公尺遠則水平網格解析度降為 5.36 公尺。

第四章 地基合成孔徑雷達干涉技術分析成果

本計畫自籌備時間與計畫執行期間已至目標區進行 11 架次儀器架設與測量 (表 4-1)，於目標區做連續監測與不連續的監測。採用 e-GNSS 進行儀器架設之定位，供後續比對資料使用。規劃於同一地點以兩個不同視角進行觀測，期望後續可進行 3D 位移量 (pseudo-3D) 之計算。

表 4-1 GB-InSAR 工作說明一覽表

地點	日期	成功掃描次數	使用儀器	3 日累積降雨	微變動量測成果
高雄 萬山	2020/03/03	A 點：3 B 點：3	GBSAR e-GNSS	無降雨	0.3 至 -0.3 mm
	2020/05/12	A 點：5	GBSAR	45.5 mm	0 至 -4 mm
	2020/06/02	NA	GBSAR GBLidar	4 mm	強反射點不足
屏東 來義	2019/12/18	A 點：4	GBSAR GBLidar	無降雨	0.4 至 -0.09 mm
	2020/04/21	A 點：8	GBSAR e-GNSS	無降雨	-0.2 至 2.5 mm
	2020/06/03	A 點：7 B 點：6	GBSAR	4 mm	-0.5 至 2 mm
	2020/06/23	A 點：7 B 點：6	GBSAR GBLidar	無降雨	-1.5 至 1 mm
	2020/10/26	NA	GBSAR	5.5mm	強反射點不足*
屏東 佳暮	2020/03/06	NA	GBSAR	2.5 mm	強反射點不足
	2020/03/31	NA	GBSAR	3 mm	強反射點不足
花蓮 舞鶴	2020/7/20	NA	GBSAR	35mm	強反射點不足

資料來源：中央氣象局 C0V790_萬山、C0R240_來義、C1R120_上德文測站、C0Z070_舞鶴

*依據經驗並無導致雷達強反射不足條件，可能為儀器接收問題。

本研究另外補充使用衛星雷達差分干涉技術，期望以不同尺度下，觀察目標地區的地表變形量。資料來自於歐洲太空總署 (European Space Agency, ESA) 之哨兵一號衛星雷達影像 (Sentinel-1A)，其為歐洲航天局哥白尼計劃 (GMES) 中的地球觀測衛星，提供 C 波段之連續影像，其中依照飛行方向又分為升軌與降軌影像，主動式觀測，不受晝夜及天氣影響，再訪週期十二天，空間解析度於台灣地區約為十公尺，圖 4-1 為 Sentinel-1 不同之成像系統。哨兵一號最大之特色在於其影像可供使用者於歐洲太空總署網站免費下載，本研究使用 2020 年 2 月 29 日至 2020 年 6 月 4 日之九張升軌影像，及 2020 年 3 月 2 日至 6 月 6 日之九張降軌影像，如表 4-2 所示。

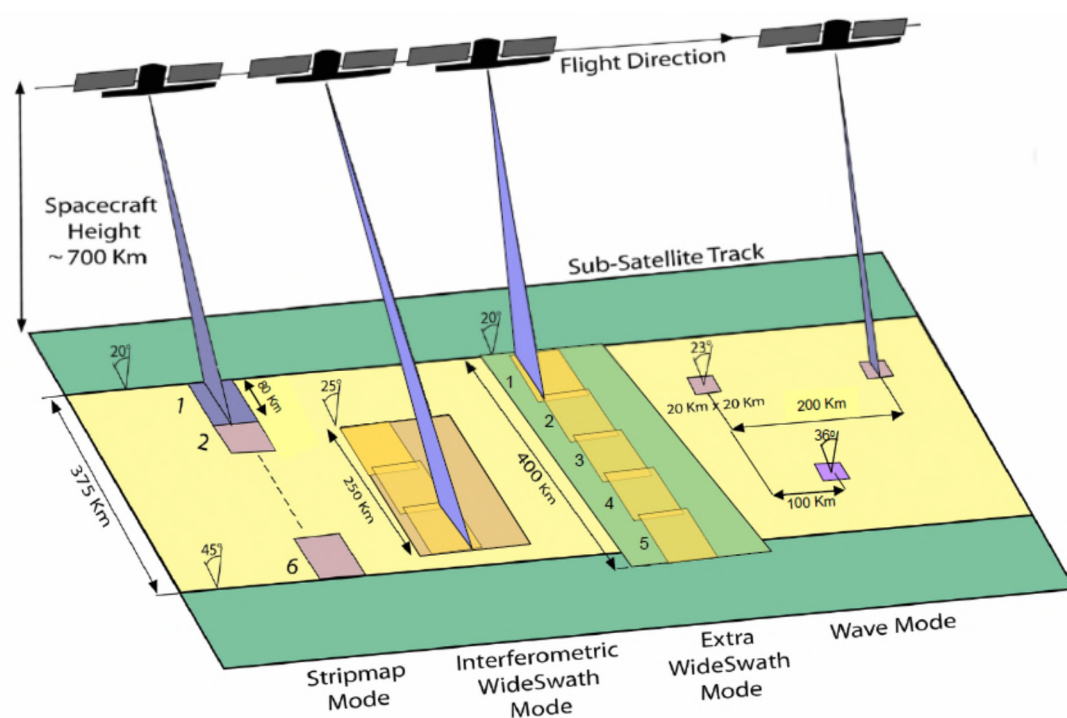


圖 4-1 Sentinel-1 不同之成像系統

資料來源：歐洲太空總署(European Space Agency，ESA)，<https://sentinel.esa.int/>

表 4-2 Sentinel 衛星影像取樣日期

使用衛星	升軌影像(69)	降軌影像(105)
Sentinel 1A	2020 年 2 月 29 日	2020 年 3 月 2 日
	2020 年 3 月 12 日	2020 年 3 月 14 日
	2020 年 3 月 24 日	2020 年 3 月 26 日
	2020 年 4 月 5 日	2020 年 4 月 7 日
	2020 年 4 月 17 日	2020 年 4 月 19 日
	2020 年 4 月 29 日	2020 年 5 月 1 日
	2020 年 5 月 11 日	2020 年 5 月 13 日
	2020 年 5 月 23 日	2020 年 5 月 25 日
	2020 年 6 月 4 日	2020 年 6 月 6 日

影像前處理軟體為 SNAP，為歐洲太空總署專為哨兵系列影像處理所開發之軟體，可進行影像之匯入、精軌校正、資料條帶分割、影像套合、去除影像條帶、干涉等處理。並匯出進行解算相位(Unwrapping)，解算過程使用外插軟體 SNAPHU 執行，是由美國 Stanford RadarInterferometry Research Group 所研發出的解相位軟體(Chen et al., 2002)。最後變形量由 Google Earth 展示。

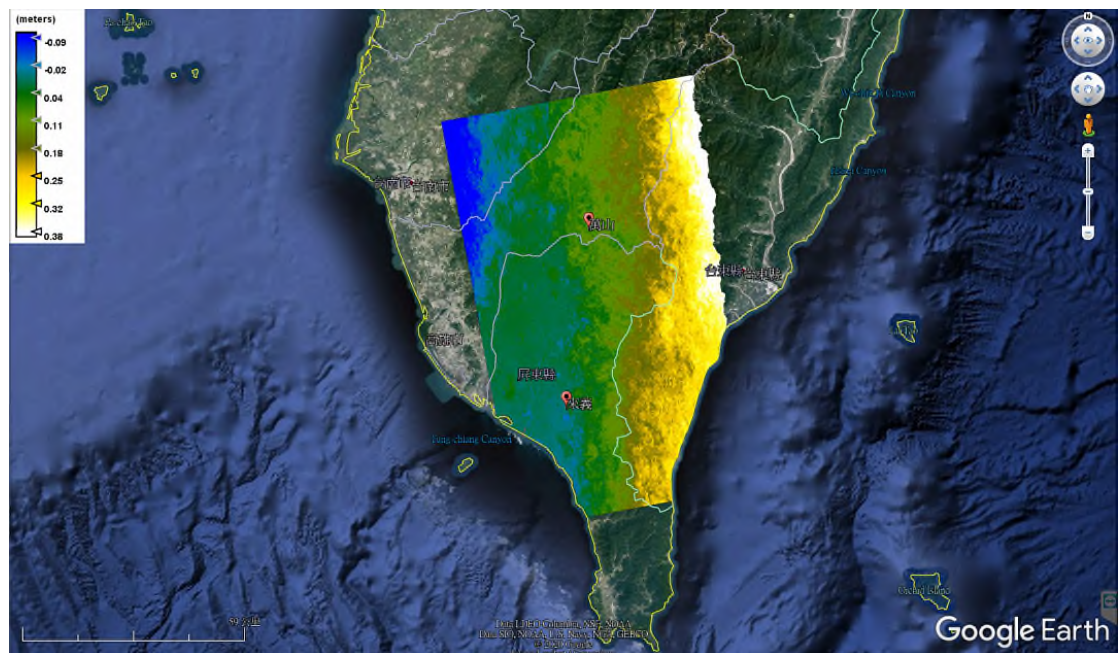


圖 4-2 台灣南部地表變形圖示意圖_升軌

第一節 萬山研究區 GB-InSAR 分析成果

萬山崩塌潛勢區位於萬山部落之西北方，為了與崩塌地有良好之正交情況，故將觀測點設於荖濃溪畔，觀測點 A 與 B 分布如圖 4-3，實際現場照片如圖 4-4，分次觀測成果說明如後。



底圖來源：Google map 衛星圖

圖 4-3 萬山研究區儀器擺設位置 A、B



高雄萬山觀測點 A



高雄萬山觀測點 B

圖 4-4 高雄萬山研究區掃描現場照片

一、2020年3月3日

Region 1 為萬山部落位置、Region 2、3 為邊坡下方植被較少較為裸露之坡面、Region 4 為高 132 鄉道，掃描結果如圖 4-5、圖 4-6。可發現無植被覆蓋之裸露地都可形成強反射點，萬山部落也為良好之強反射點。

由測量結果可發現，Region1、2、3 之變化多為往視距方向移動，Region 4 則為往視距遠處移動，微變動介於-0.3 mm 至 0.3 mm 尚屬於儀器測量精度範圍內。

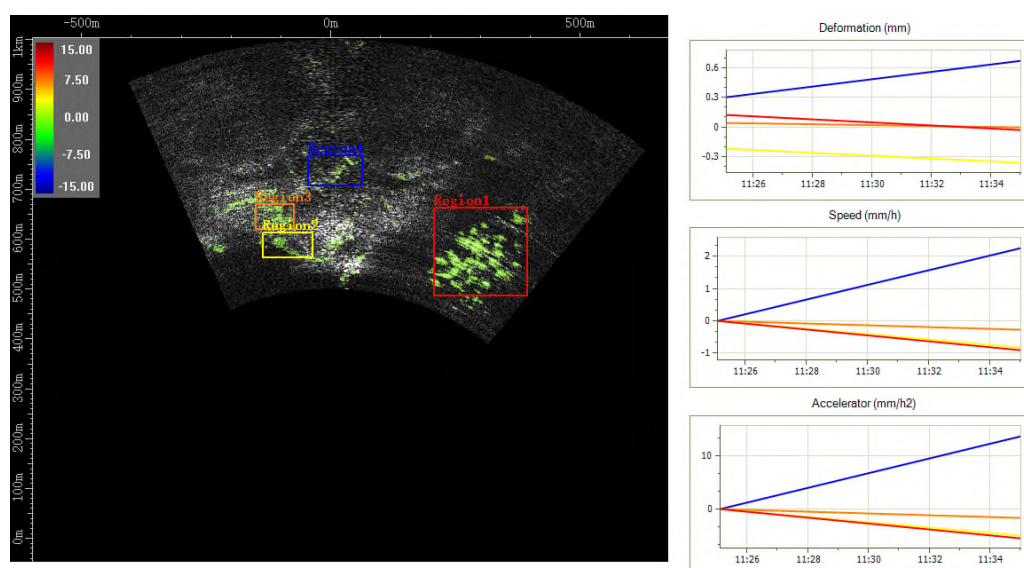


圖 4-5 高雄萬山研究區 A 點 GB-InSAR 微變動圖

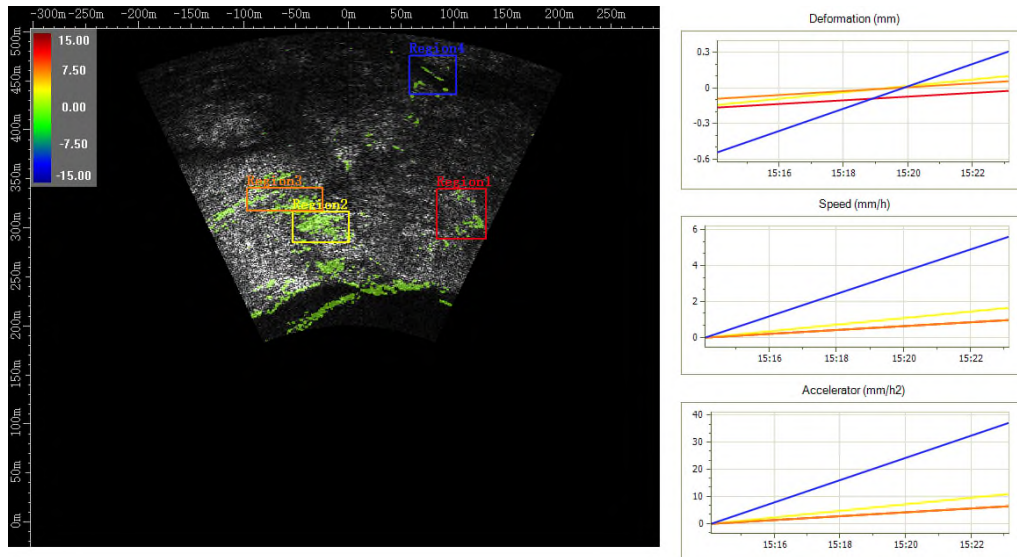


圖 4-6 高雄萬山研究區 B 點 GB-InSAR 微變動圖

二、2020年5月12日

本次觀測有雲霧覆蓋且植被較上次茂密，如圖 4-7，回收訊號品質不佳，幾乎不見強反射區，如圖 4-8，僅有萬山部落有微弱訊號及少許達同調性門檻之點計算出微變動值微變動值約 0 至 -4 mm 之間，可能受大氣與植被影響導致。因大雨導致河川上漲，故無至觀測點 B 進行觀測。



圖 4-7 第二次高雄萬山研究區掃描現況照片

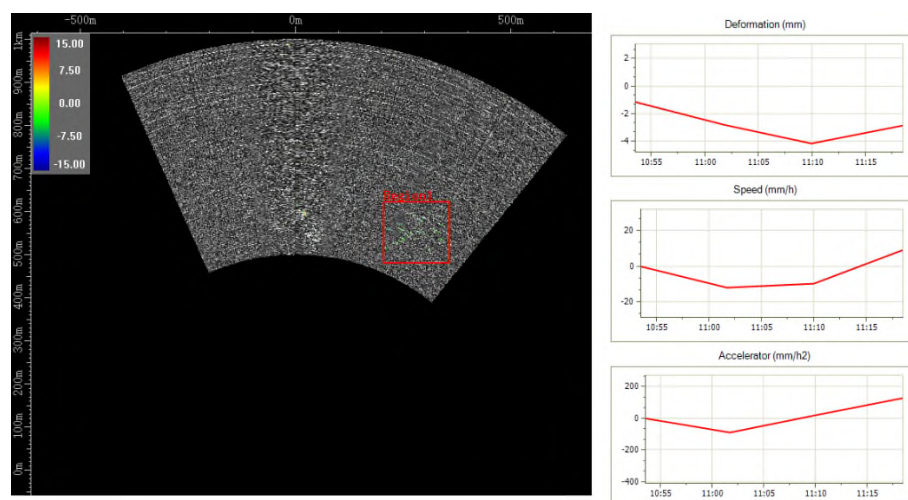


圖 4-8 高雄萬山研究區 A 點 GB-InSAR 微變動圖

三、2020年6月2日

本次觀測發現既有裸露地已被植被覆蓋如圖 4-9，導致回收強反射點不足，如圖 4-10，僅萬山部落位置有極少之強反射及微變動值。



2020 年 3 月 3 日



2020 年 6 月 2 日

圖 4-9 高雄萬山研究區植被覆蓋變化比較圖

經測試 GB-InSAR 掃描雷達之強反射點需佔窗口一定比例以上，才能有良好之成像。另測試角反射器架設，期望可夠增加強反射點數量，解決現場強反射點略少或提供大氣校正之控制點等問題，但發現本研究區使用此方法效果不佳，主要原因為角反射器與坡面尺度差異過大。萬山部落區之建築物，為良好強反射點，然而，若針對坡面則不能有良好之成像。

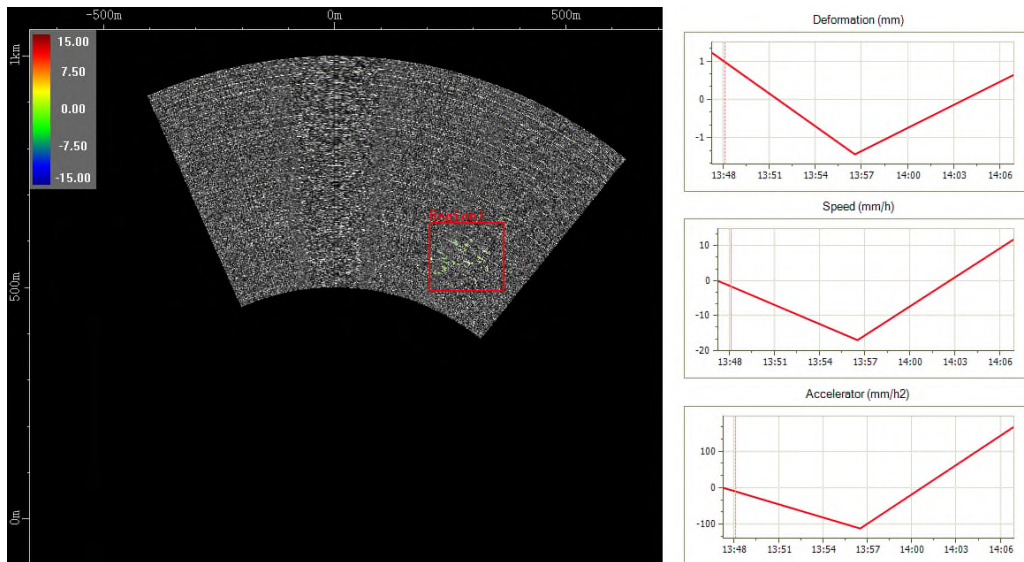


圖 4-10 高雄萬山研究區 A 點 GB-InSAR 微變動圖

本次有進行光達掃描，套疊 6 月 2 日萬山 A 點 InSAR 微變動影像，如圖 4-11，即能夠確定可產生干涉之地區為萬山部落位置 (Region1)。

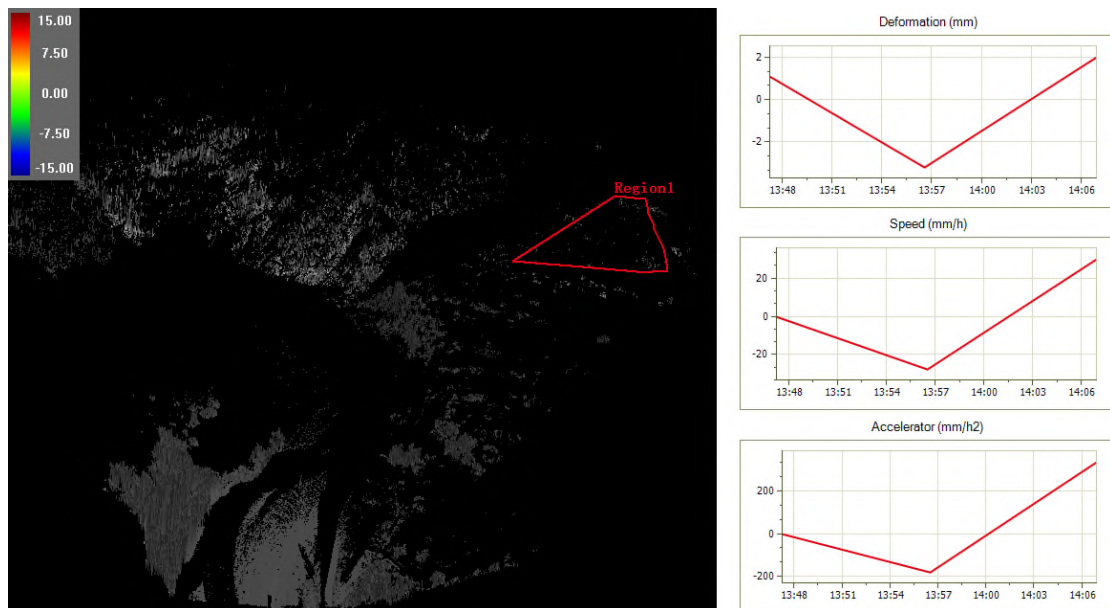


圖 4-11 高雄萬山研究區 A 點 GB-InSAR 微變動圖+DSM

本團隊至萬山研究區掃描受當地植被、崩塌面位置與可掃描角度影響，尚未能針對萬山部落西北方之潛在崩塌地有良好之強反射與干涉成果。為確保是否為儀器特性，另針對荖濃溪河岸處之裸露坡地進行掃描，可產生良好之干涉成果，如圖 4-12。故掃描無法呈現良好干涉圖可能為受植被與可觀測角度所影響。

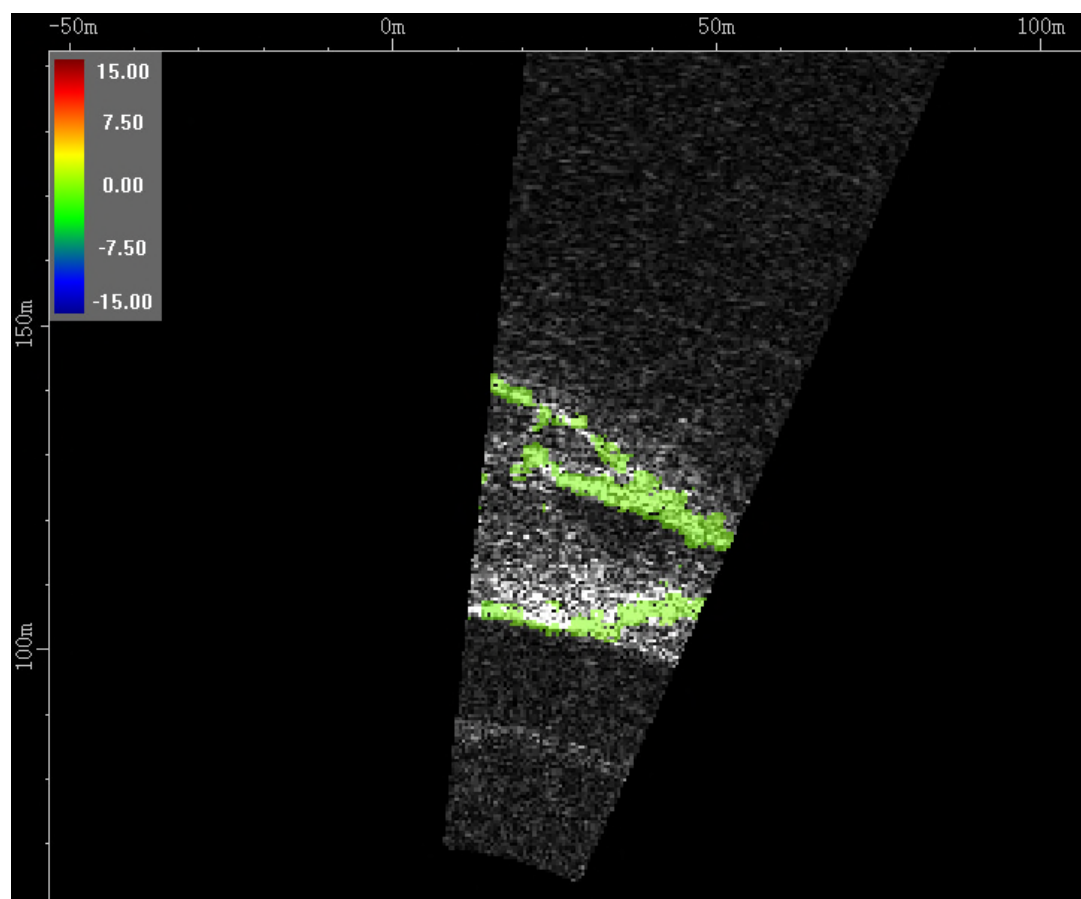
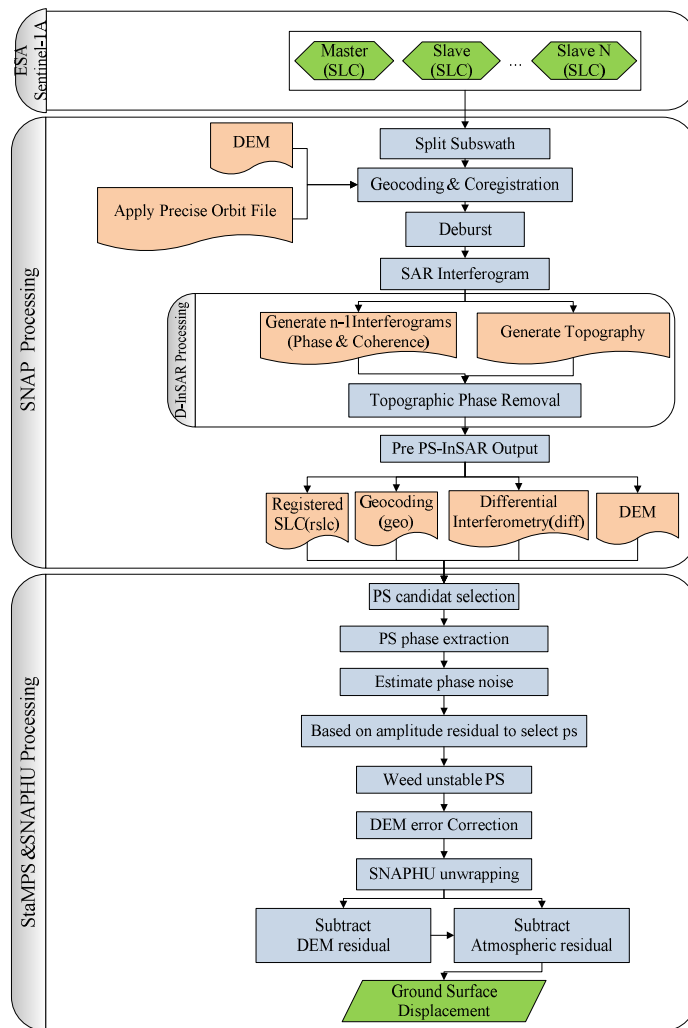


圖 4-12 高雄萬山荖濃溪河岸裸露山壁測試圖

四、星載影像分析相位比較

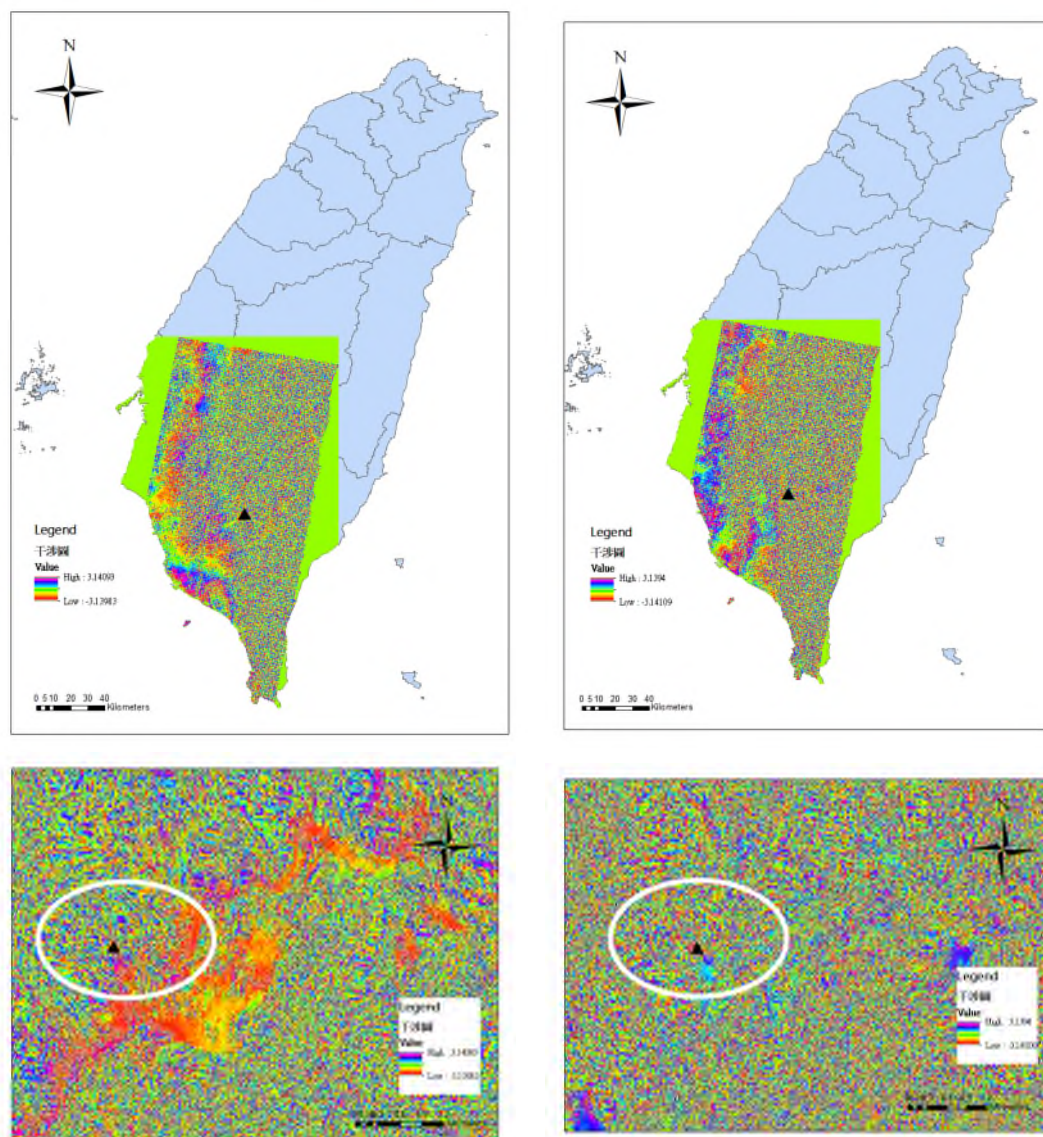
本計畫收集 Sentinel-1 之合成孔徑雷達影像，作為與 GBSAR 影像之參考。操作方法參考陳郁琪(2019)「PS-InSAR 技術於台灣山區地形變化偵測誤差因素分析」之分析臺灣山區地形變化流程如圖 4-13。資料取用時間如表 4-2。



資料來源：陳郁琪(2019)

圖 4-13 結合 SNAP 與 StaMPS 之 PS-InSAR 流程

Sentinel 1 使用的合成孔徑雷達為 C 波段(波長約 5 公分)，一個色階環變化約為 5 公分。雷達影像相位差資訊，如下圖 4-14。變動量分析結果如圖 4-15。



時間：2020/03/02 - 2020/05/13

時間：2020/05/13 - 2020/06/06

圖 4-14 萬山星載影像 InSAR 相位分析結果

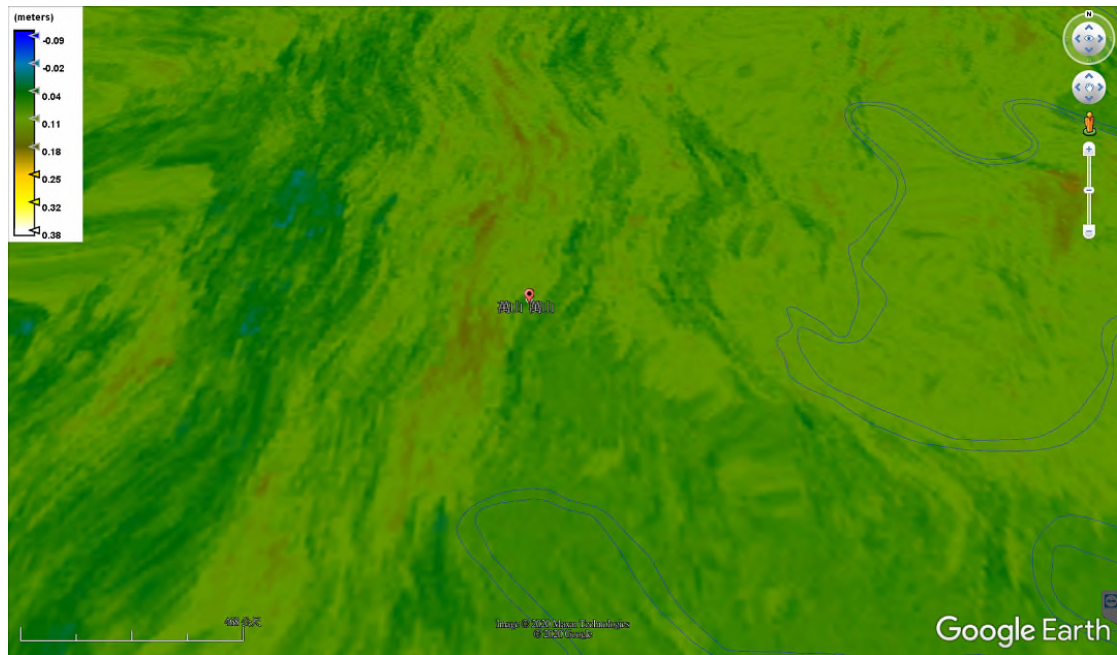


圖 4-15 萬山星載影像 InSAR 變動量分析結果

將 GB-InSAR 第一次掃描至第三次掃描日期區間內 9 張雷達衛星影像進行分析。因崩塌邊坡坡向約向南方，故選取升軌影像觀察，其視距方向較適合。最後執行 Phase to displacement 步驟，變形單位為公尺。由圖 4-16 觀察可發現，在萬山部落上方以及河川攻擊坡區域，有明顯較大之變形，自今年 3 月到 6 月約有 0.18 公尺沉降。

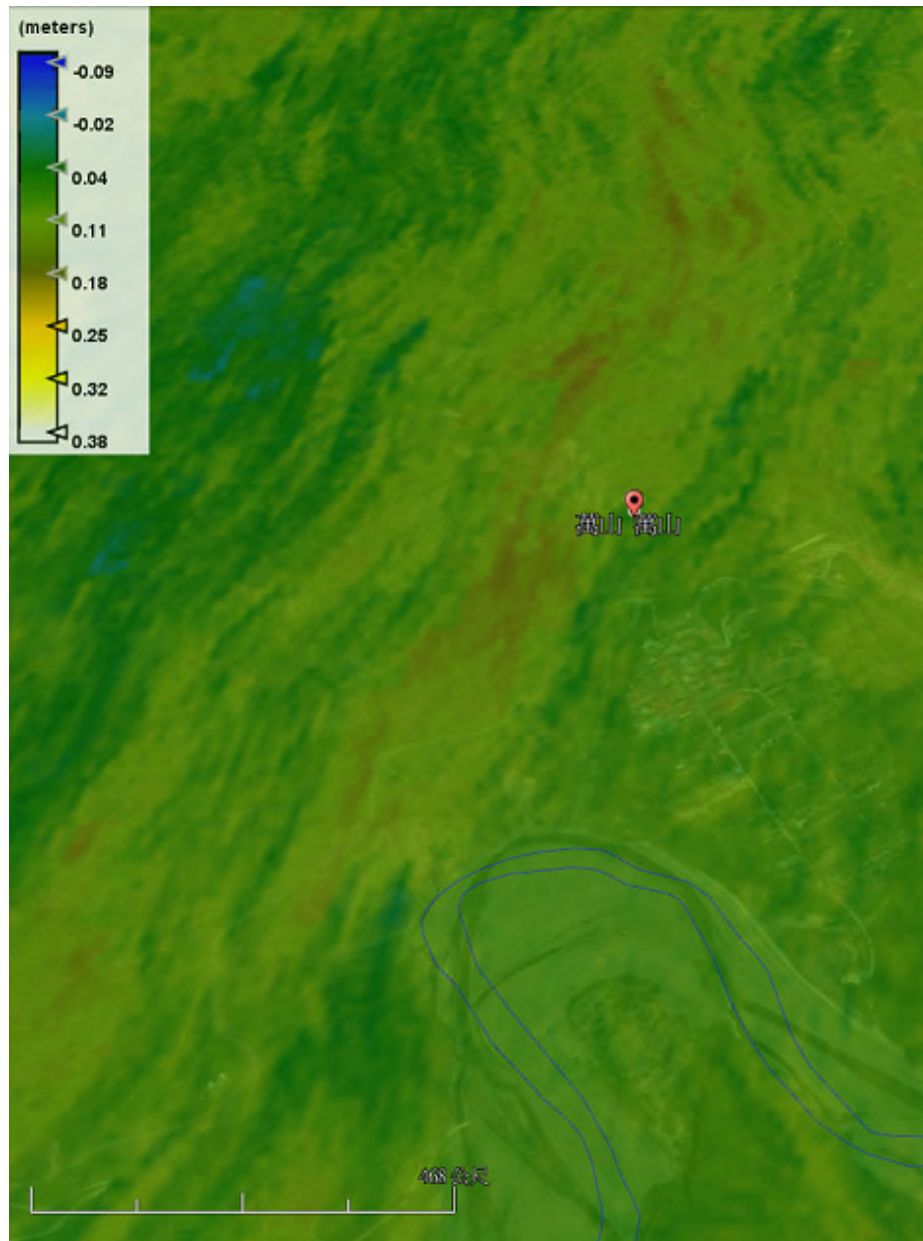


圖 4-16 高雄萬山地表變形量圖_升軌

第二節 來義研究區 GB-InSAR 分析成果

來義崩塌潛勢區位於屏東來義鄉來義村部落旁的來社溪旁之右岸，為能進行正交觀測，擇定於來社溪左岸設置觀測點，觀測點 A 與觀測點 B 分佈位置如圖 4-17 與圖 4-18。



圖 4-17 屏東來義研究區儀器擺設位置 A、B



屏東來義觀測點 A



屏東來義觀測點 B

圖 4-18 屏東來義研究區掃描現場照片

一、2019年12月18日

前往屏東來義掃描，現場坡面植被稀少，大部分為裸露地，掃描結果如圖 4-19，有良好的強反射點與干涉成果，整體微變形量介於 -0.1 至 0.4 mm，尚屬於儀器測量精度範圍內。並將 InSAR 微變動圖套疊立體地圖如圖 4-20，以利瞭解微變動實際變化位置。

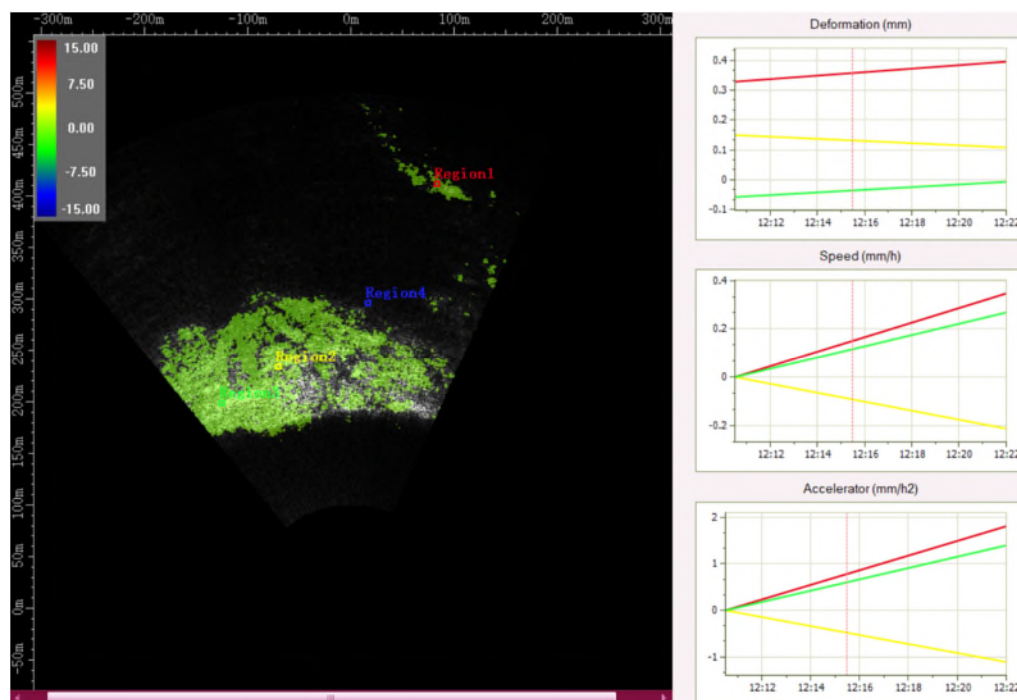


圖 4-19 屏東來義研究區 A 點 GB-InSAR 微變動圖

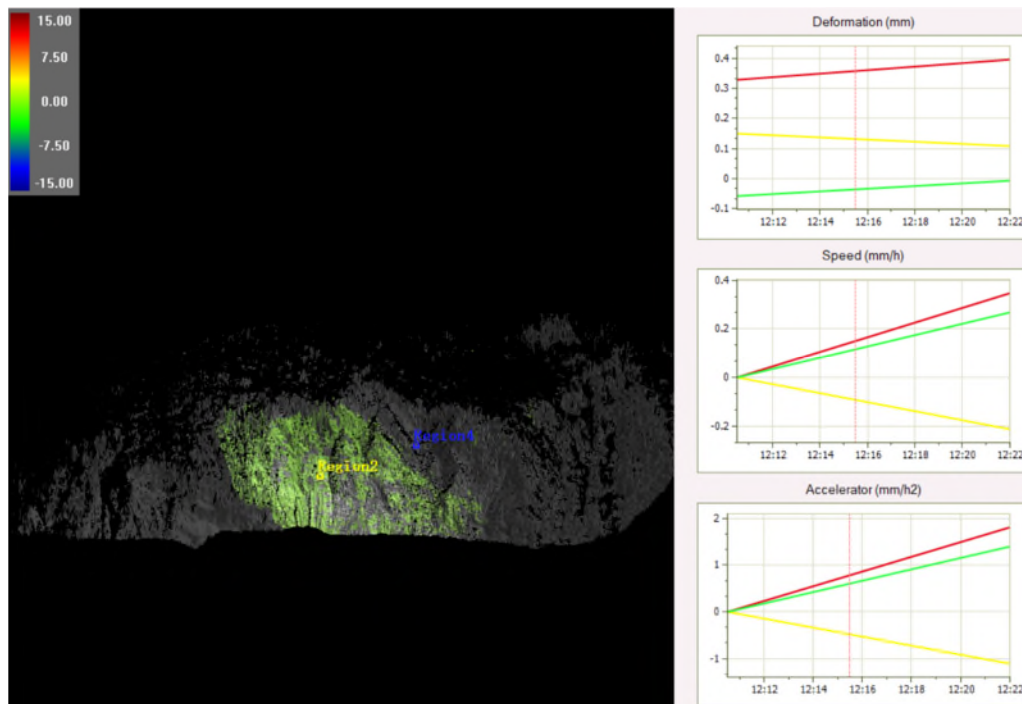


圖 4-20 屏東來義研究區 A 點 GB-InSAR 微變動圖+DSM

二、2020年4月21日

現場裸露地仍明顯，掃描結果如圖 4-21，微變形量為 -0.2 至 2.5 mm。由不同圈選範圍可知在不同地區有不同的微變形量，在正交區域的 Region 1 (紅色)、Region 2 (橘色)、Region 3 (綠色)，微變形朝視距移動，範圍為 1 至 2.5 mm，周圍裸露地 Region 4 (紫藍)、Region 5 (紫色) 則變動幅度較小約為-0.2 至 1 mm。配合套疊於立體地形圖之圖 4-22，Region5 (紫色) 位於圖 4-23 紅圈處，此區與其他區域之坡向、坡度、風化程度較不相同所致，此區相對來說較穩定。而其他區域之微變動大致落於-0.2 至 2.5 mm 之間。

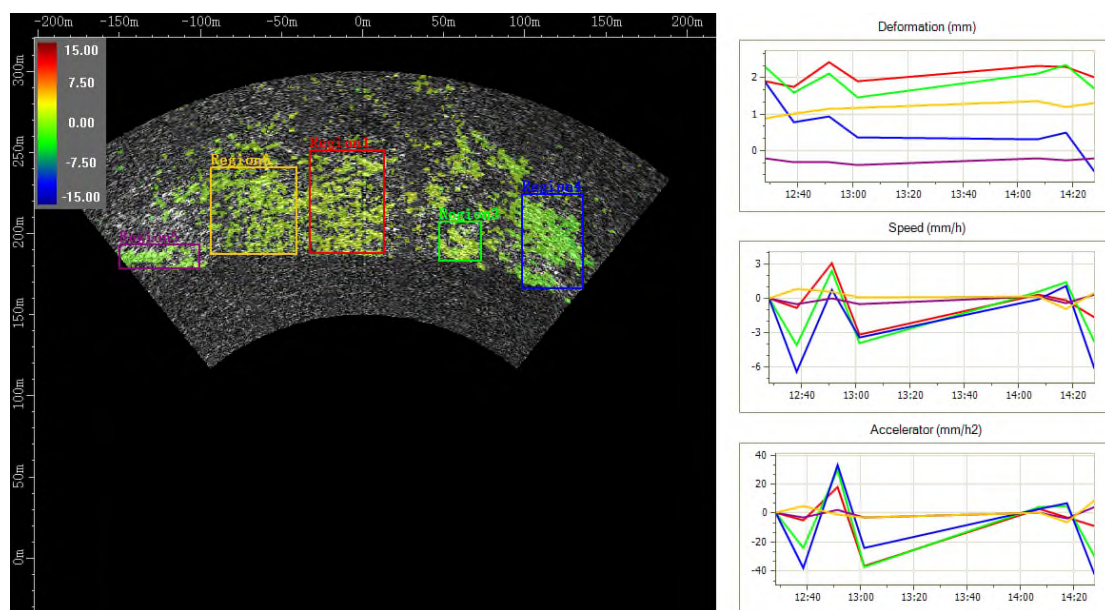


圖 4-21 屏東來義研究區 A 點 GB-InSAR 微變動圖

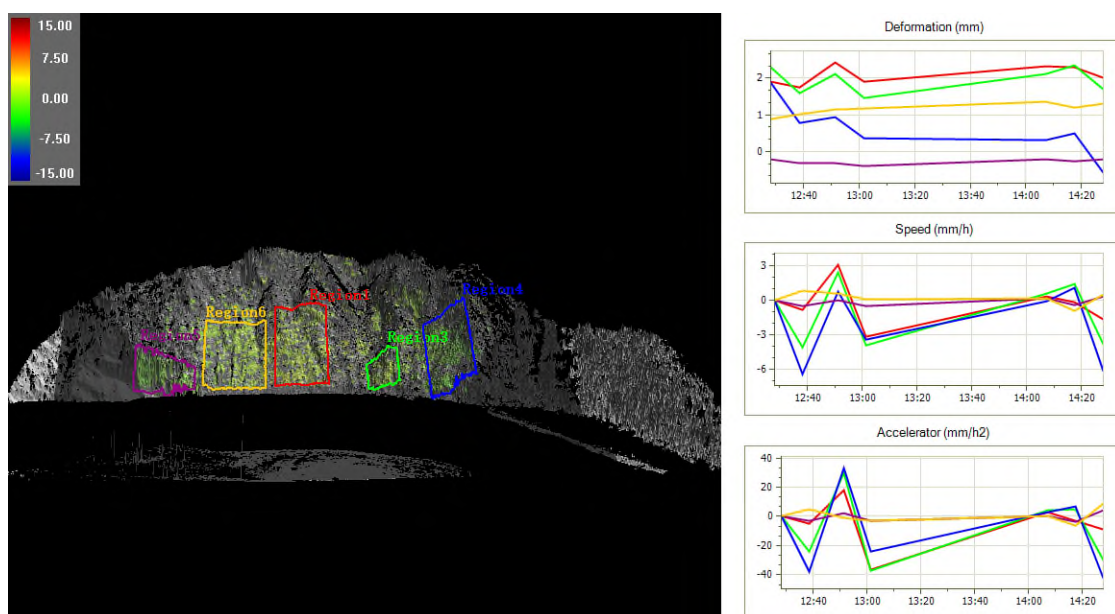


圖 4-22 屏東來義研究區 A 點 GB-InSAR 微變動圖+DSM



圖 4-23 屏東來義現場廣角照

三、2020年6月3日

屏東來義地區受滯留鋒影響，於 5 月 21 至 5 月 23 日發生豪大雨，三日累積降雨量達 550 mm。本團隊於 6 月 3 日進場，希望可獲得含水量較高之坡面微變動情況。而 6 月 3 日進場前 3 日，來義地區則無降水情況，掃描結果如圖 4-24 至圖 4-26，可配合圖 4-25 結合立體地形圖來看。圖 4-24 之 Region5(紫色)和圖 4-26 之 Region4(藍色)仍呈現較不同之變動趨勢，但其變動比前次(4/21)來得略大而其他區域依舊在 2 mm 之變動範圍內，可之既使為豪大雨過後，但已經經過十日且後續無持續降水，則該地區微變形量與前期無降水時期類似。

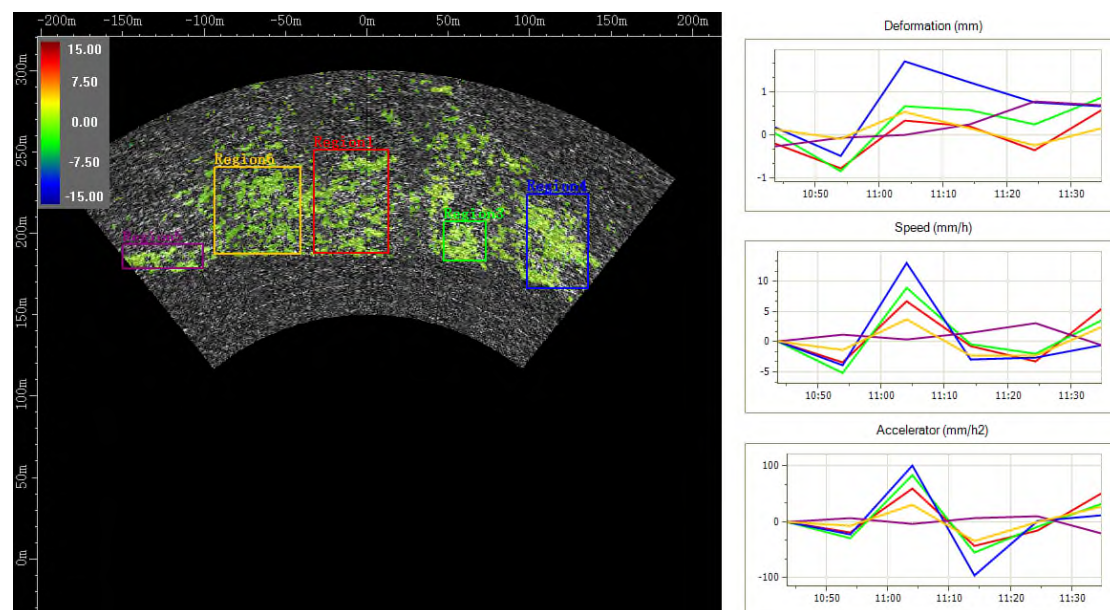


圖 4-24 屏東來義研究區 A 點 GB-InSAR 微變動圖

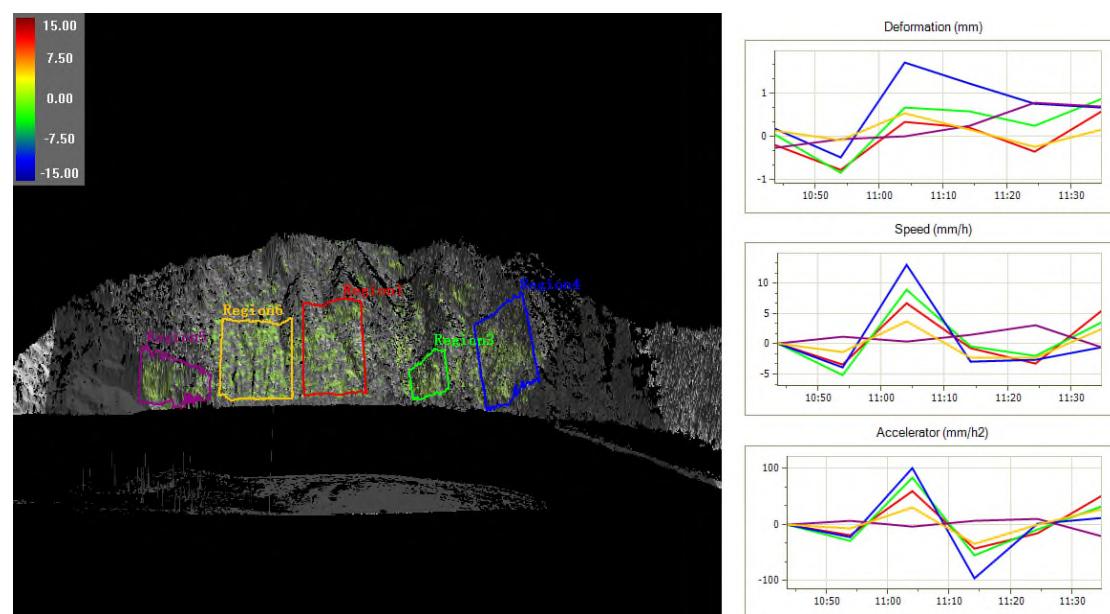


圖 4-25 屏東來義研究區 A 點 GB-InSAR 微變動圖+DSM

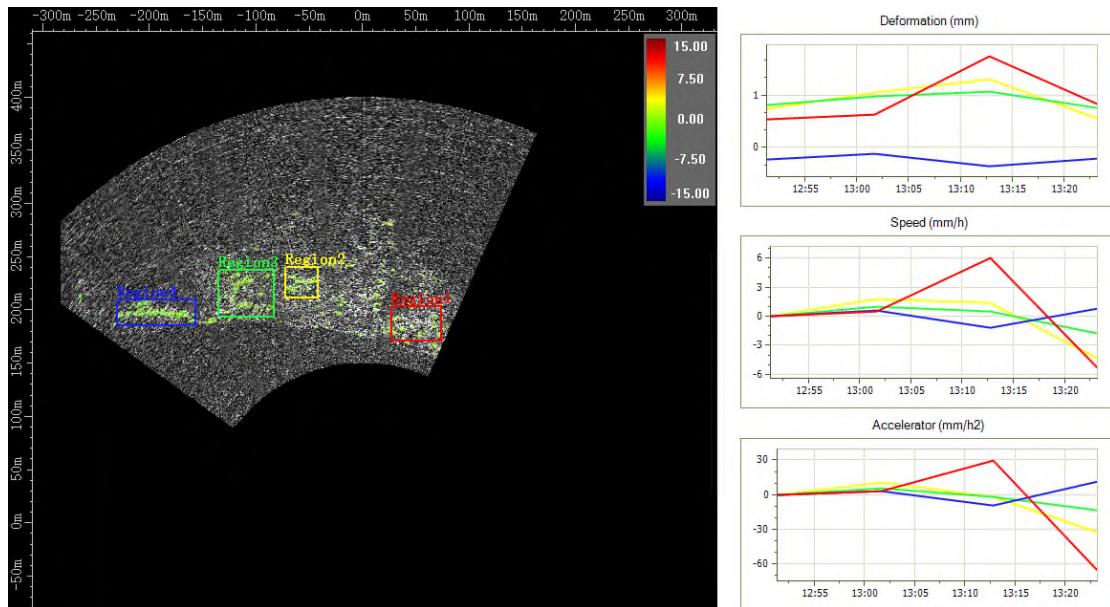


圖 4-26 屏東來義研究區 B 點 GB-InSAR 微變動圖

四、2020年6月23日

第四次屏東來義掃描，現場坡面植被仍稀疏，結果如圖 4-27、圖 4-29，可配合圖 4-28 三維地形圖來看。發現這六個月以來 Region 5 (紫色) 仍與其他區域之變動趨勢不同，而其他區域之變動也仍在 2mm 範圍間。

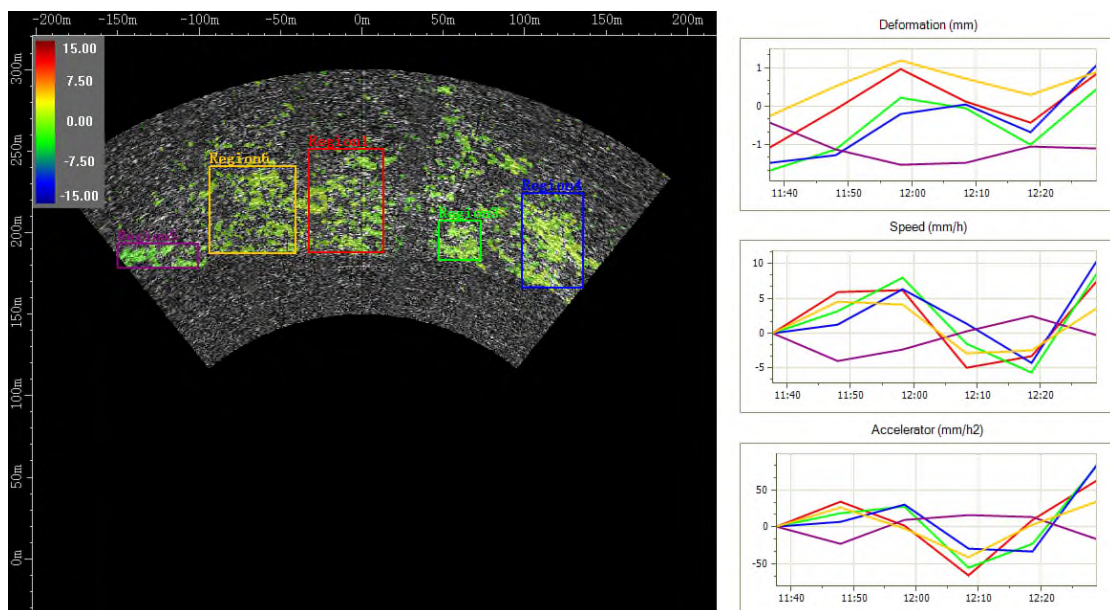


圖 4-27 屏東來義研究區 A 點 GB-InSAR 微變動圖

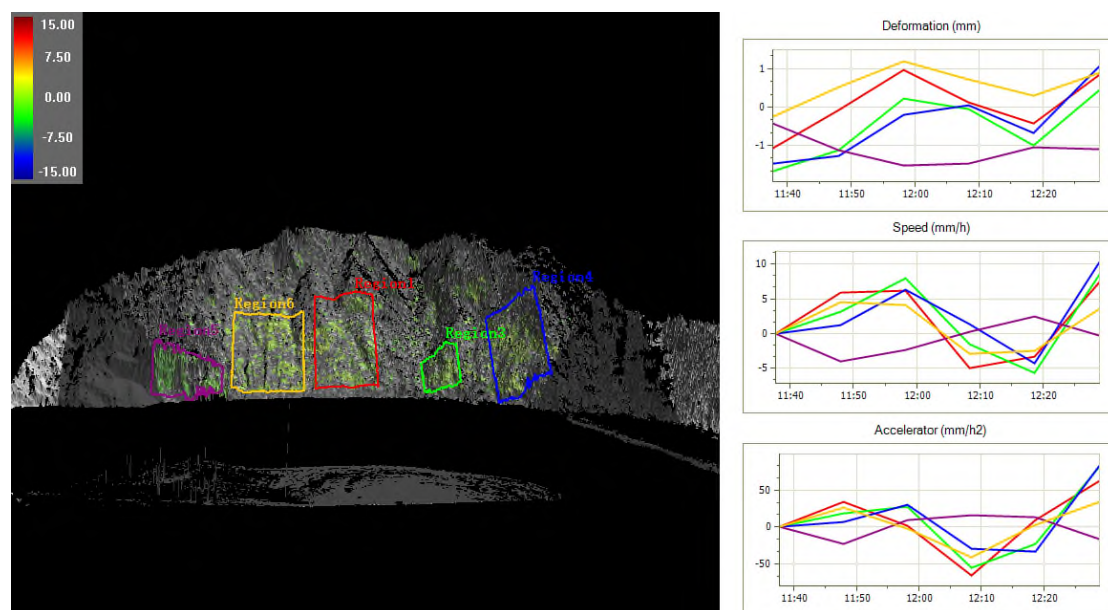


圖 4-28 屏東來義研究區 A 點 GB-InSAR 微變動圖+DSM

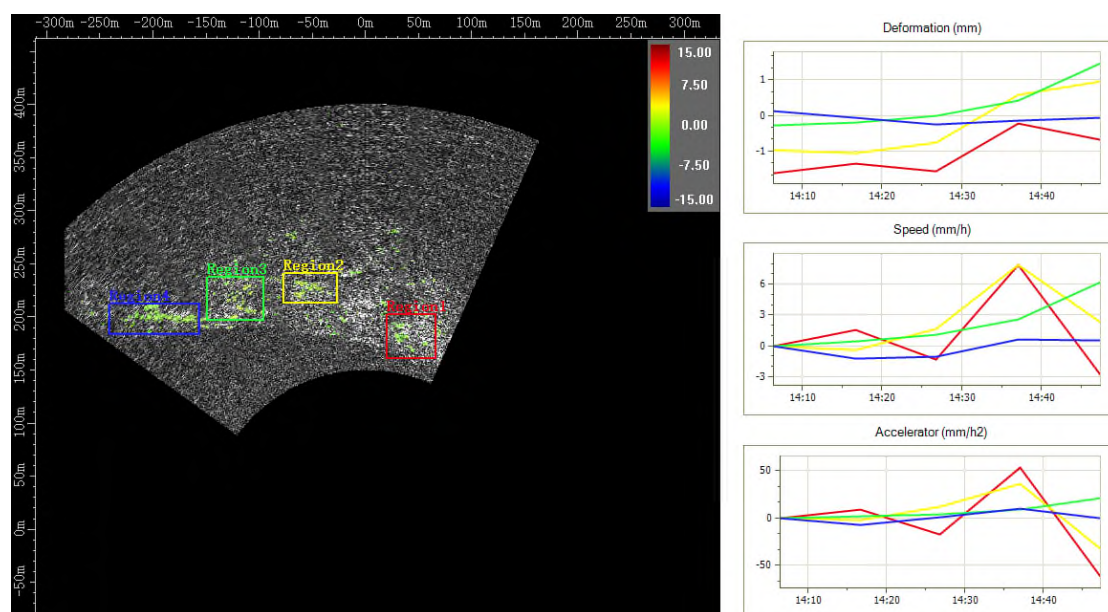


圖 4-29 屏東來義研究區 B 點 GB-InSAR 微變動圖

五、微變動歷程比較 (2019/12/18至2020/6/23)

自觀測之 6 個月以來，因雨季來臨造成坡面上植被的生長，使整體的微變動圖能達到同調性門檻之點位有變少之趨勢。整體微變形幅度在+2 至 -2 mm 間，既使在十天前有強降雨發生，但後續微變動量並無顯著差異，即可知來義邊坡整體微變動，雖然在不同時間但其不同區域微變動有一致性的情況，可視為該邊坡微變形之背景值，如圖

4-30、圖 4-31。

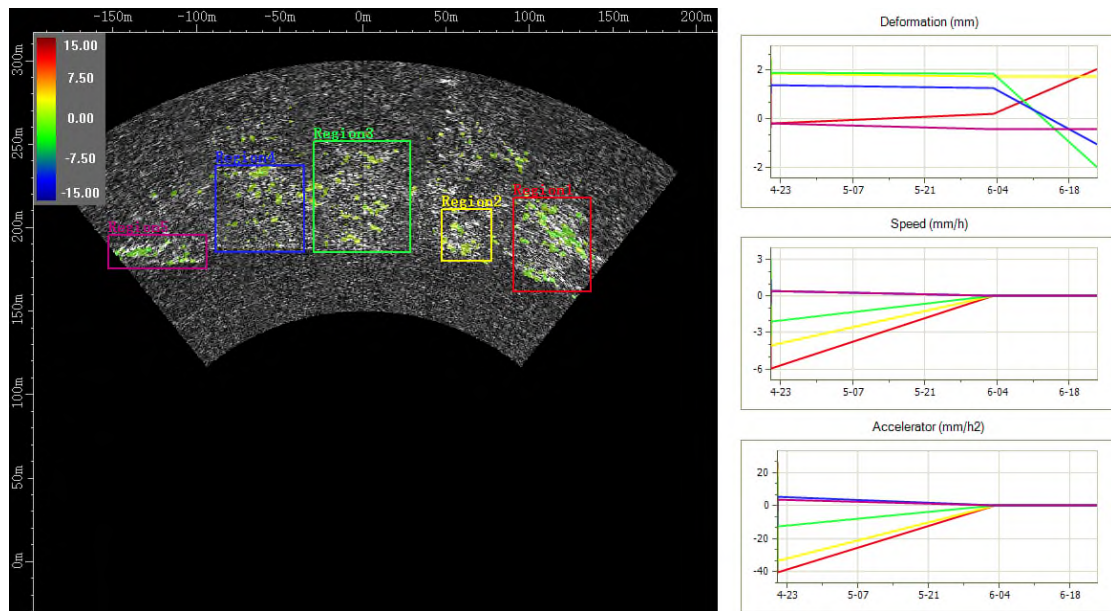


圖 4-30 屏東來義 A 點 4/21 至 6/23 GB-InSAR 微變動圖

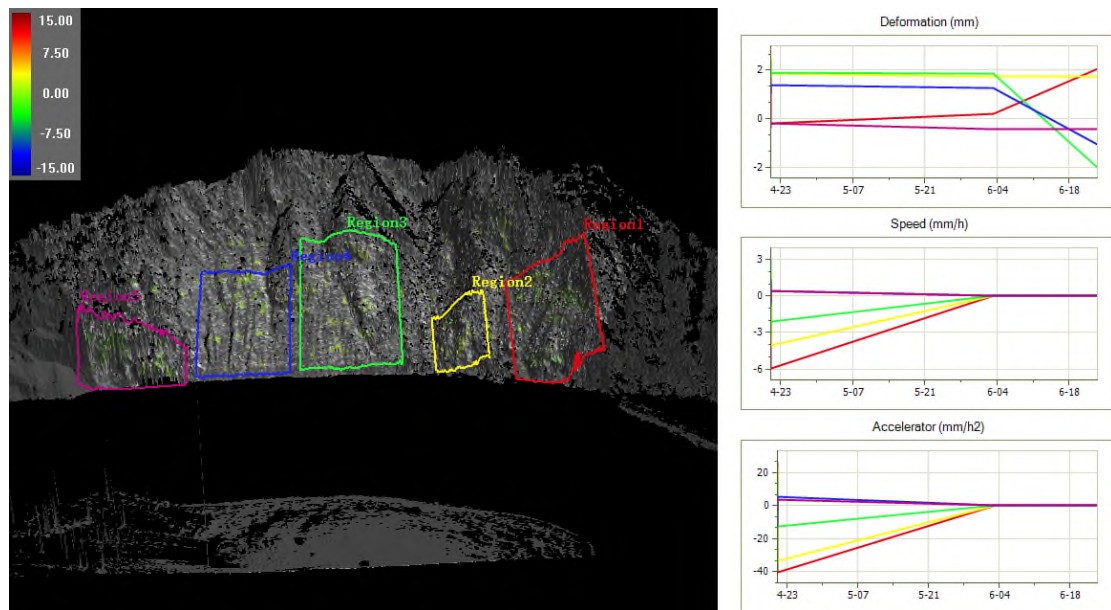
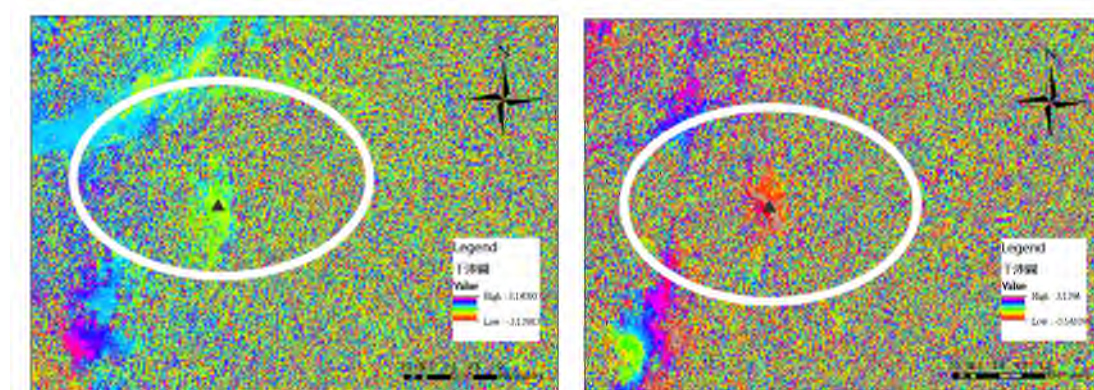


圖 4-31 屏東來義 A 點 4/21 至 6/23 GB-InSAR 微變動圖+DSM

六、星載影像分析相位比較

來義地區於 5 月 21 至 23 日有強降雨事件，從右圖可發現其有顯著的變化（變化超過 1 個相位差）如圖 4-32。



時間：2020/03/02 - 2020/05/13

時間：2020/05/13 - 2020/06/06

圖 4-32 來義星載影像 InSAR 相位分析結果

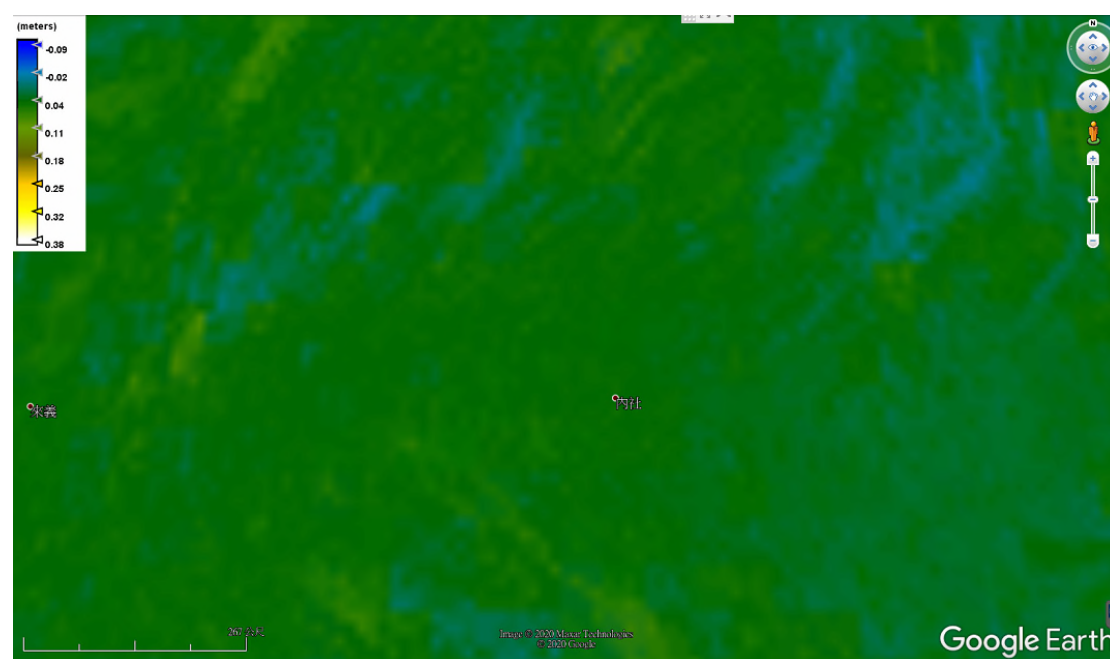


圖 4-33 來義星載影像 InSAR 變動量分析結果

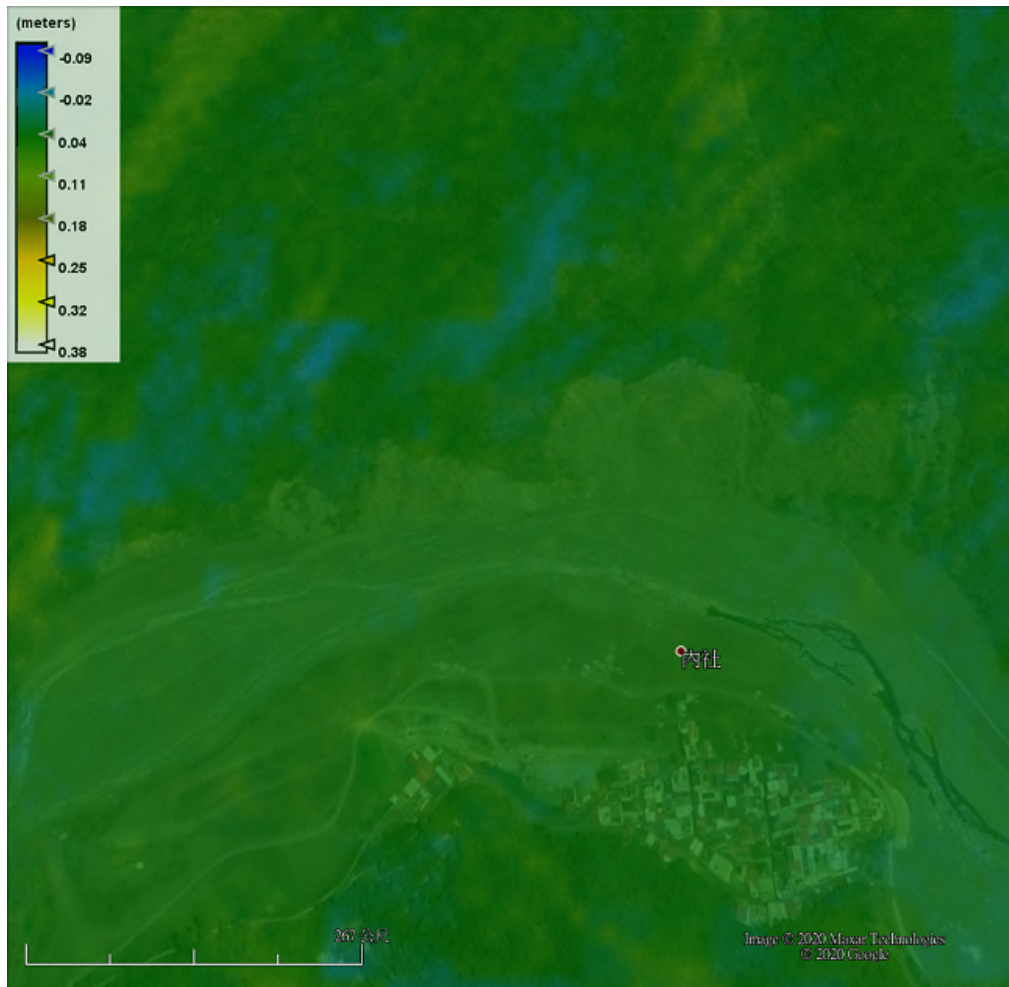


圖 4-34 屏東來義地表變形圖_升軌

使用今年 3 月至 6 月之雷達衛星影像，進行差分干涉求取地表變形量如圖 4-33，因來義崩塌邊坡坡向向南，故觀察升軌影像之視距方向較為合適。進行最後 Phase to displacement 步驟後得到變形量，觀察圖 4-34 可發現，雖然在此三個月期間有發生強降雨，來義邊坡在此期間無明顯之變形，與 GBInSAR 之結果相符。

第三節 佳暮研究區 GB-InSAR 分析成果

佳暮崩塌地位於佳暮國小西北側，介於省道臺 24 線 31K~32K 處，觀測之掃描點 A 規劃於佳暮國小南側與掃描點 B 於隘寮北溪左岸，分布如圖 4-35，現地照片如圖 4-36。



圖 4-35 屏東佳暮研究區儀器擺設位置 A、B



屏東佳暮觀測點 A



屏東佳暮觀測點 B

圖 4-36 屏東佳暮研究區掃描現場照片

一、2020年3月3日

前往屏東佳暮 A 點掃描，現場發現坡面上有許多植生覆蓋，掃描結果如圖 4-37，回收訊號不佳，確認非儀器本身問題後，推測整體坡面因植生覆蓋，強反射點太少，導致無法有良好之成像。而後轉往 B 點進行掃描，結果仍是無法成像，如圖 4-38。

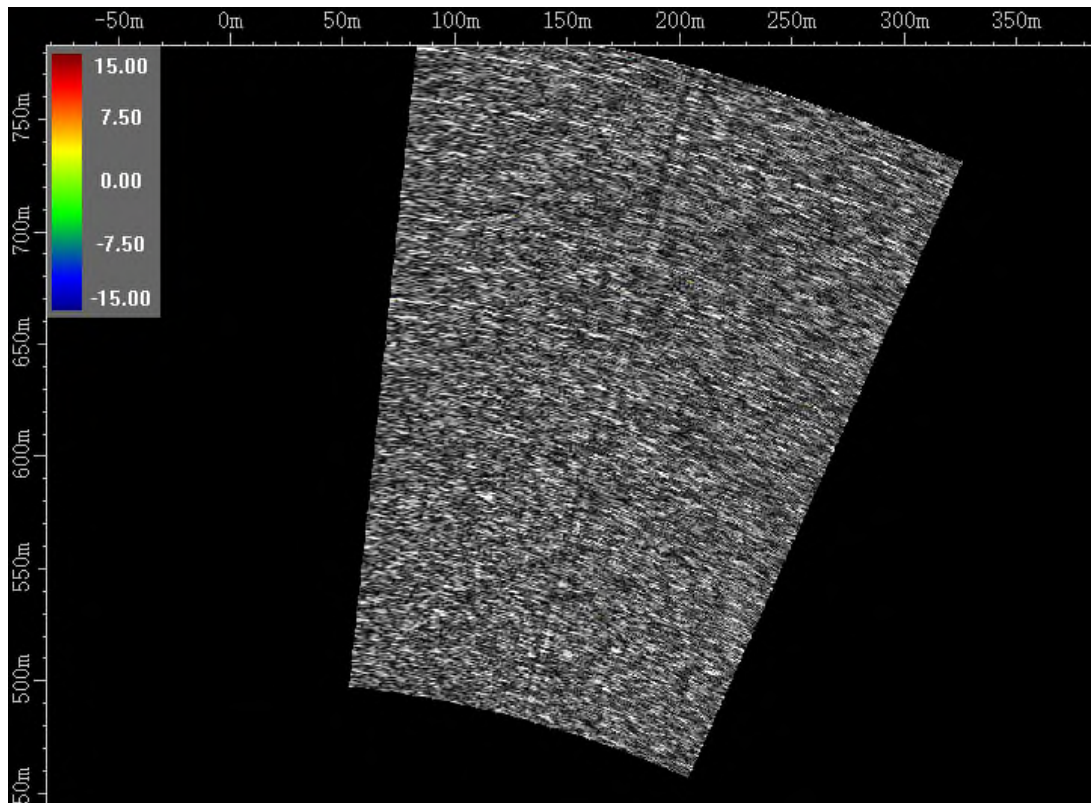


圖 4-37 屏東佳暮研究區 A 點 GB-InSAR 微變動圖

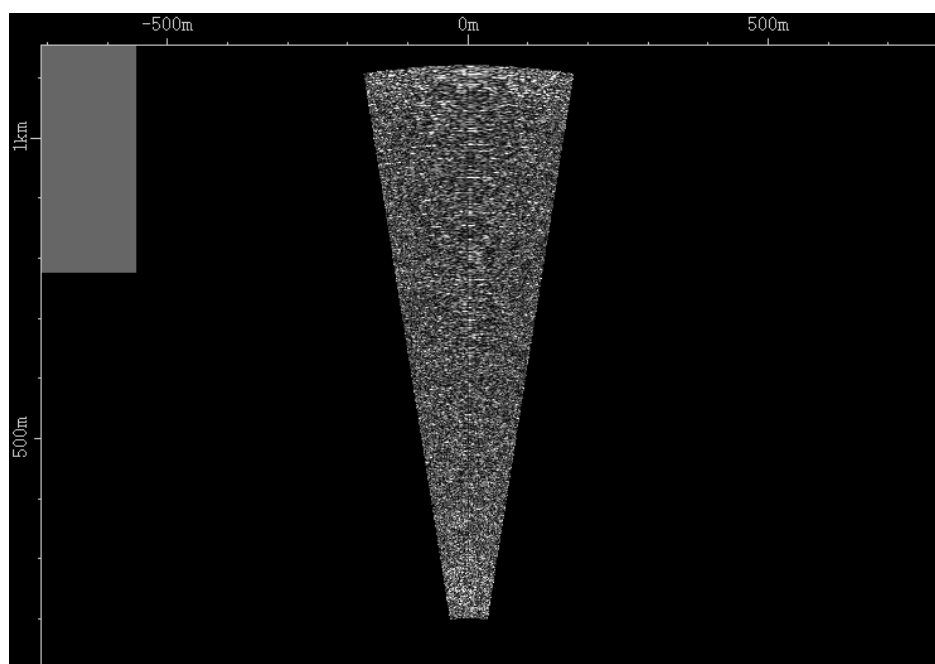


圖 4-38 屏東佳暮研究區 B 點 GB-InSAR 微變動圖

二、2020年3月31日

第二次前往屏東佳暮掃描，目標坡面如圖 4-39 A 區塊其反射強度仍不佳。雷達反射較強的地方 B 區塊，距離儀器約 200 公尺左右，比對現地距離約為河道右岸裸露灘地，如圖 4-40。透過同調性分析圖也可清楚判視，同調性高於 0.8 的分布區也是屬於同樣範圍，如圖 4-41。

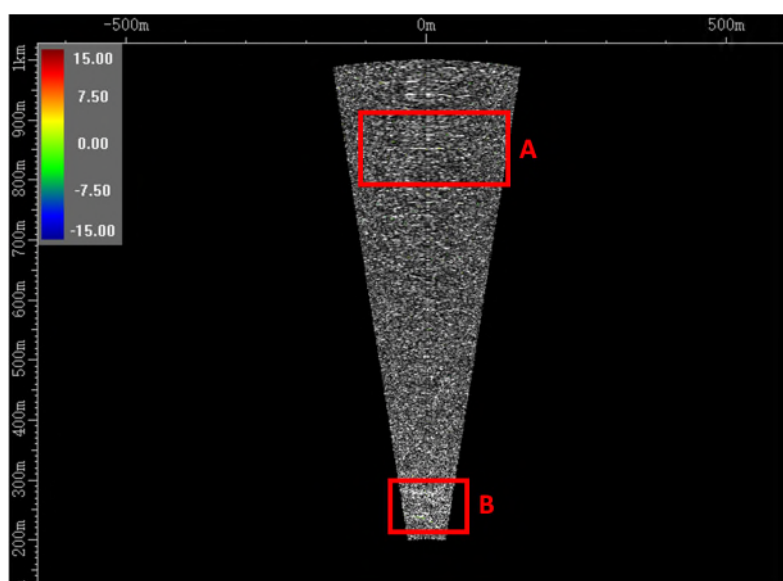


圖 4-39 屏東佳暮研究區 B 點 GB-InSAR 微變動圖



(資料來源：google 街景)

圖 4-40 屏東佳暮研究區 B 點現地照片

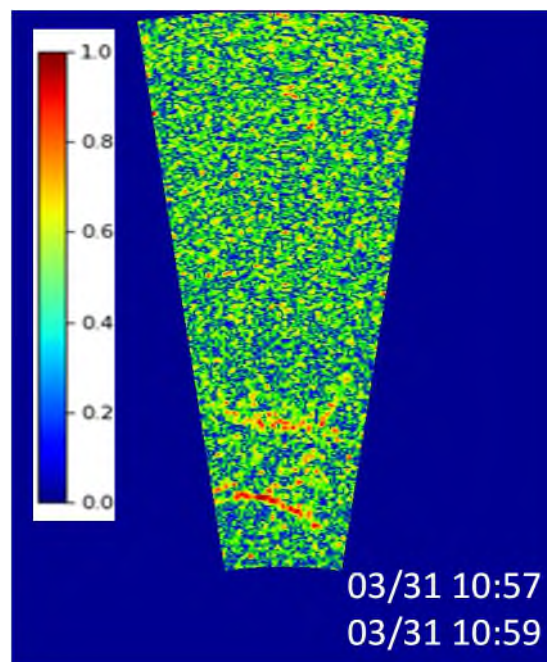


圖 4-41 屏東佳暮研究區 B 點同調性分析

第四節 舞鶴研究區 GB-InSAR 分析成果

一、2020年7月20日

受限於儀器設置需求，規劃兩處車子可以到達的地方進行觀測，崩塌地與監測位置坐標以及相對距離如表 4-3，相對位置如圖 4-42；監測位置現地照片與儀器參數設定如圖 4-43。

表 4-3 舞鶴崩塌地與觀測點坐標

名稱	TE (m)	TN (m)	與崩塌地距離(m)
崩塌地	283399.879	2595999.980	
觀測點 1	285687.195	2594445.584	2,750
觀測點 2	284521.304	2594941.137	1,520

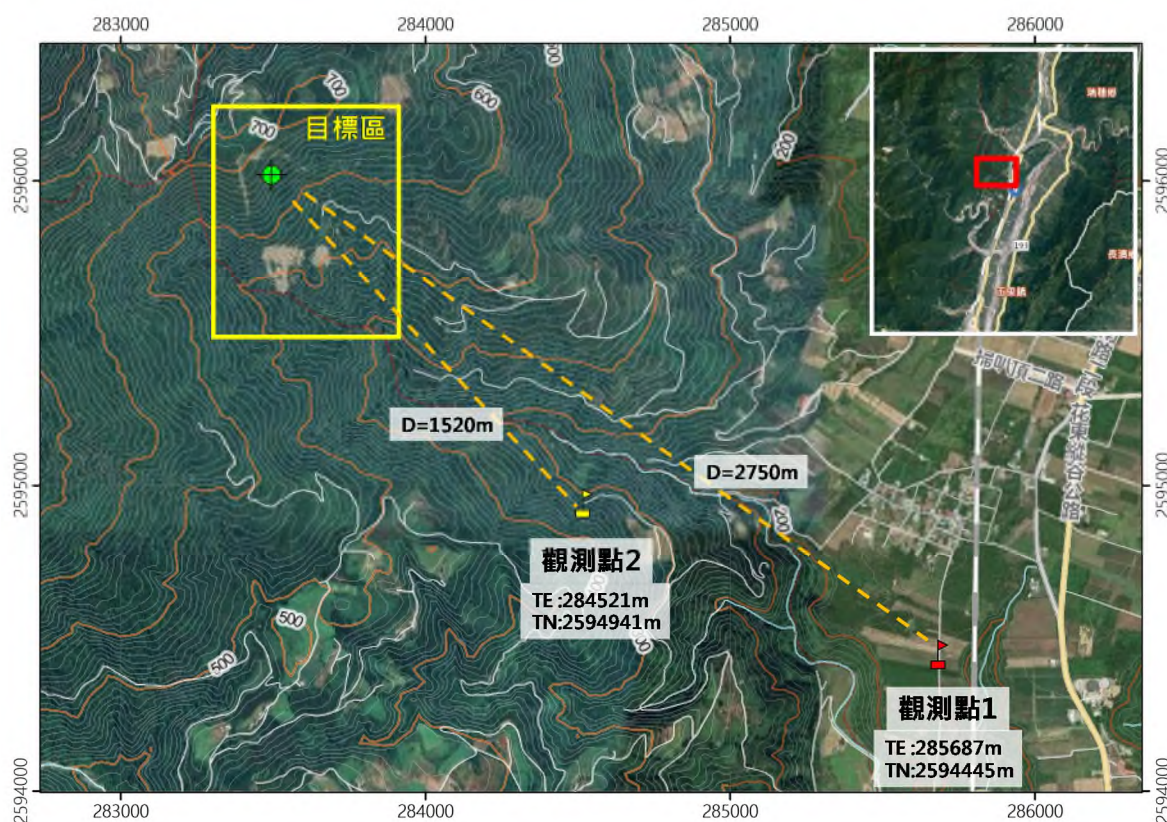


圖 4-42 舞鶴崩塌區觀測點與目標區相對位置

			
日期	2020.07.20	日期	2020.07.20
天氣	晴	天氣	晴
目測雲量	少	目測雲量	少
Bw	400 MHz	Bw	400 MHz
Pw	300 豪秒	Pw	200 豪秒
Max-Distance of Scanning	3,372.67公尺	Max-Distance of Scanning	2248.44公尺
ΔR	0.375m	ΔR	0.375m
ΔCR	18.37m	ΔCR	12.25m
資料筆數	3+2	資料筆數	2+2

圖 4-43 觀測點 1(左)與觀測點 2(右)現場照片與參數

觀測點 1 的位置距離崩塌地約為 2,750 公尺，由觀測點 1 的位置看向崩塌地的方向，可以看到冠部崩崖 (如圖 4-43 左)；觀測點 2 的位置距離崩塌地約為 1,520 公尺，由可看到冠部崩崖與趾部隆起區 (如圖 4-43 右)。下列將兩個觀測點的掃描調整之參數分別說明：

(一) 觀測點 1 第一次掃描

設定 Bw 為 400 MHz、Pw 為 300 毫秒，理論最大觀測距離約為 3,372 公尺，目標距離觀測點 2,750 公尺左右應可取得該地區之雷達回波，觀測結果如圖 4-44 所示，顯示雷達回波反射值均弱，無強反射區域。透過額外訊號分析，如圖 4-45，強制選取同調性 0.85 以上的像素之網格進行分析，透過計算相位差與微

變動量，發現位移量呈現無趨勢性分布，顯然網格點代表性仍不足。

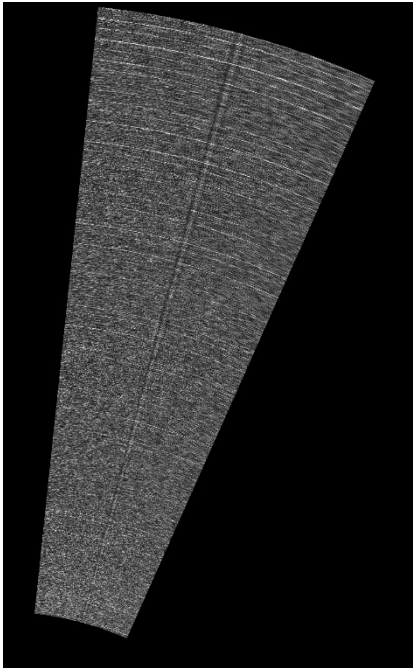


圖 4-44 舞鶴崩塌地觀測點 1 第一次掃描雷達回波成像

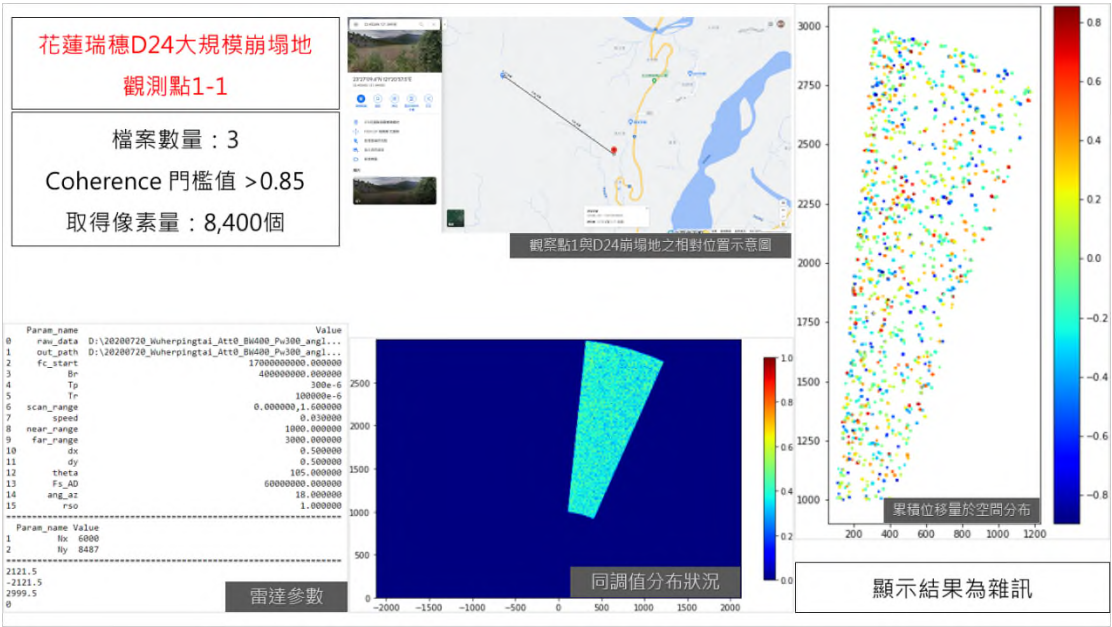


圖 4-45 觀測點 1 第一次掃描進階分析

(二) 觀測點 1 第二次掃描

由於觀測點 1 第一次掃描成果，成效不佳，故修正 1.減少掃描植被比例、以及 2.強化所收到訊號的分辨率。因此調整仰角以及將接受訊號放大，由 0dB 調整為 30dB。另外，為了減少系統運算時間，因此調整掃描距離為 2,200~2,800 公尺。調整參數成果如圖 4-43。由圖中發現仍然無法取得清晰之崩塌地的訊號如圖 4-46，進階分析結果如下圖 4-47，位移量呈現無趨勢性分布，顯然網格點代表性仍不足。

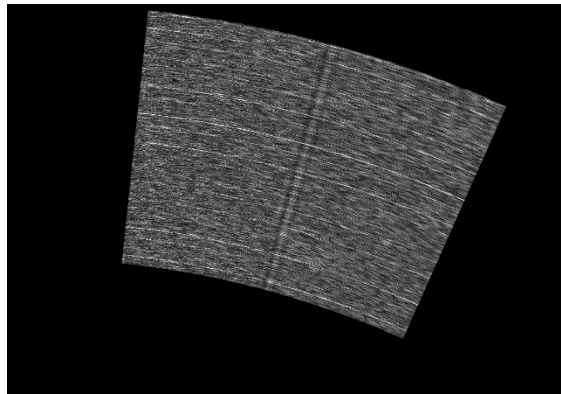


圖 4-46 舞鶴崩塌地觀測點 1 第二次掃描雷達回波成像

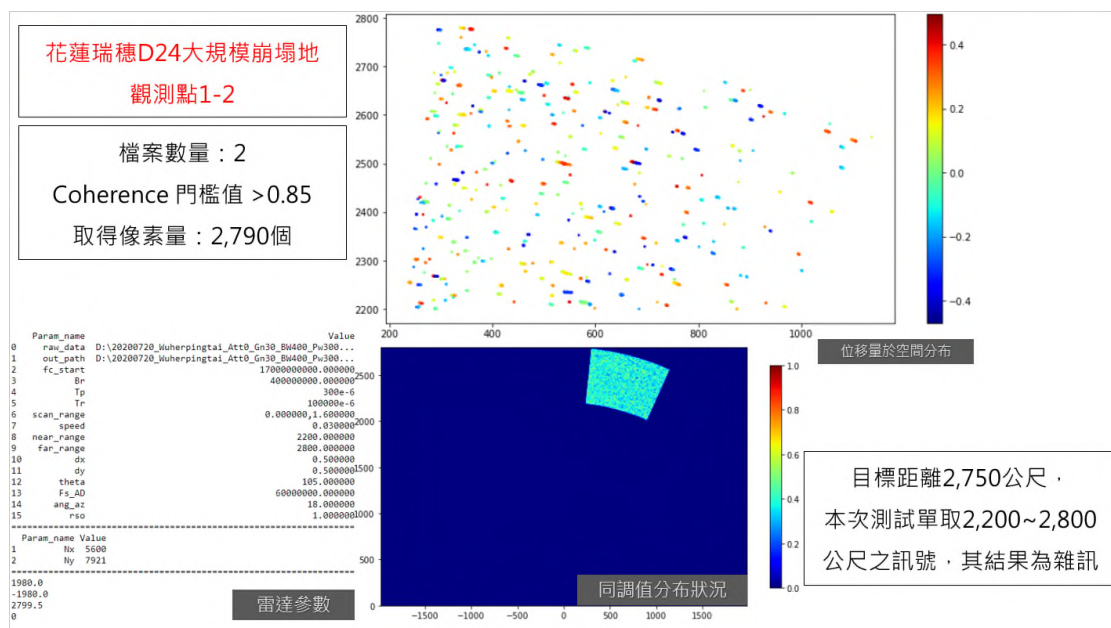


圖 4-47 觀測點 1 第二次掃描進階分析

(三) 觀測點 2 掃描

設定 Bw 為 400 MHz、Pw 為 200 毫秒，理論最大觀測距離約為 2,248 公尺，目標距離觀測點 1,520 公尺左右應可取得該地區之雷達回波，掃描成果如圖 4-48。由進階分析圖 4-49 可以觀察到觀測點 2 所取得高同調性 (>0.85) 的像素，其位移結果無趨勢分布，顯然網格點代表性仍不足。

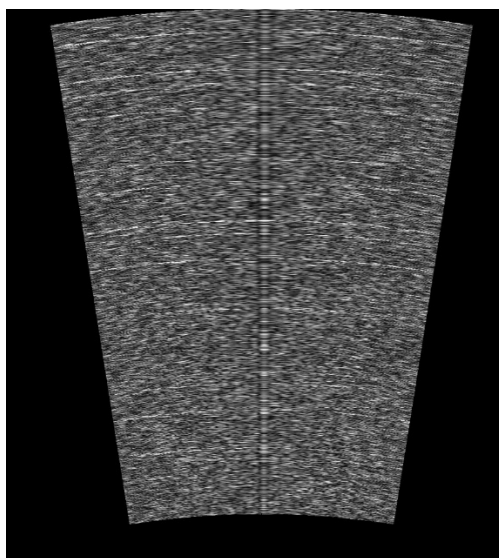


圖 4-48 舞鶴崩塌地觀測點 2 掃描雷達回波成像

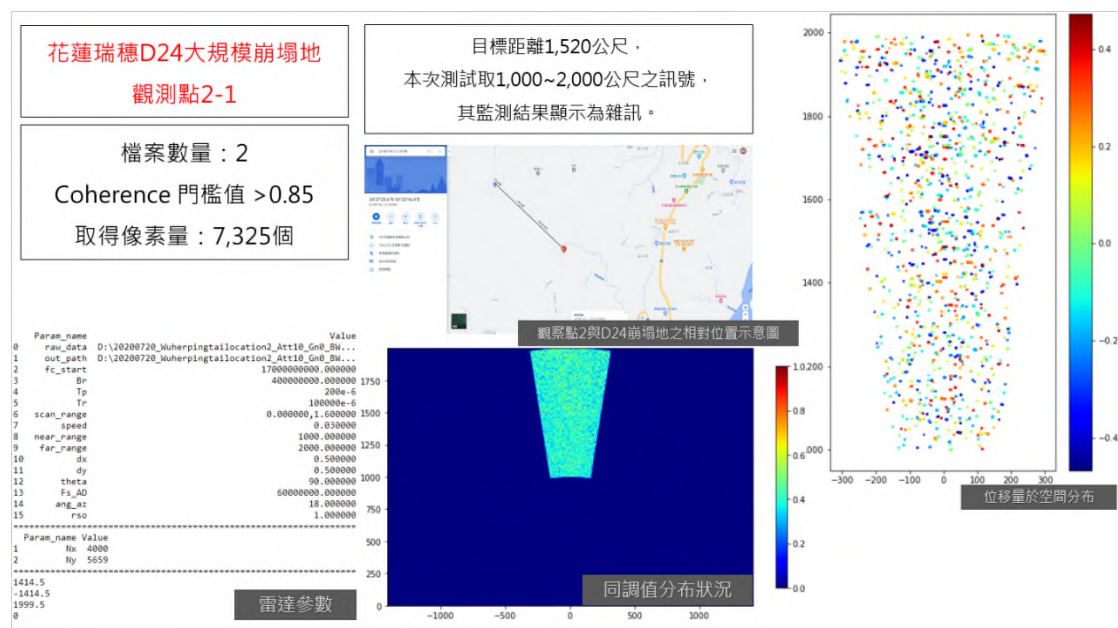


圖 4-49 觀測點 2 掃描進階分析

綜上所述，兩個觀測點均無法取得較強的雷達回波數值，推測其可能原因為周圍植被茂密，崩塌地裸露的面積，依據水平解析度計算僅產生 1~2 個像素的訊號，雷達回波訊號強度不足，使得無法觀測。若崩塌地範圍更大或是現地儀器設置距離可縮短才可能可收集該崩塌地之雷達回波，以記錄整體崩塌地位移情形。

第五章 地基合成孔徑雷達干涉技術特性與限制

第一節 雷達回波強度

雷達主動式遙測資訊主要來自於雷達反射之微波訊號，透過多次回波訊號的微小差異進行分析。故雷達回波訊號強弱是分析資料的最基礎資料。影響雷達回波強度在主機來說有「天線增益」與「訊號放大」兩種方式，現地則依據儀器與目標的相對位置影響較大。依據本研究儀器放置，已設置適當之「帶寬」與「脈寬」確認理論可獲得回波之距離，但部分實驗區雷達回波強度仍不足，探討可能發生的原因為：(1)目標區與雷達天線角度未正交，導致雷達回波強度不足。(2)目標表面過於粗造，例如：若有植被覆蓋將使得雷達波散射，導致回波強度不足。由圖 5-1 可發現雷達回波較強地方為與儀器天線正交的地區，如大壩上方閘門與溢洪道旁的道路側邊坡，非正交區如溢洪道坡面與照片左方之側邊坡，其雷達回波強度較低。又從圖可發現土石壩若未被植被覆蓋其雷達回波強度尚可，但若植被覆蓋處則可發現其雷達反射強度不足。

自然邊坡以來義研究區為例，如圖 5-2，可發現由於其沒有特別高的雷達反射強度，故整體雷達資訊若用黑白色階檢視會有許多類似噪訊產生，裸露邊坡則可獲得強度略強的雷達回波數值。

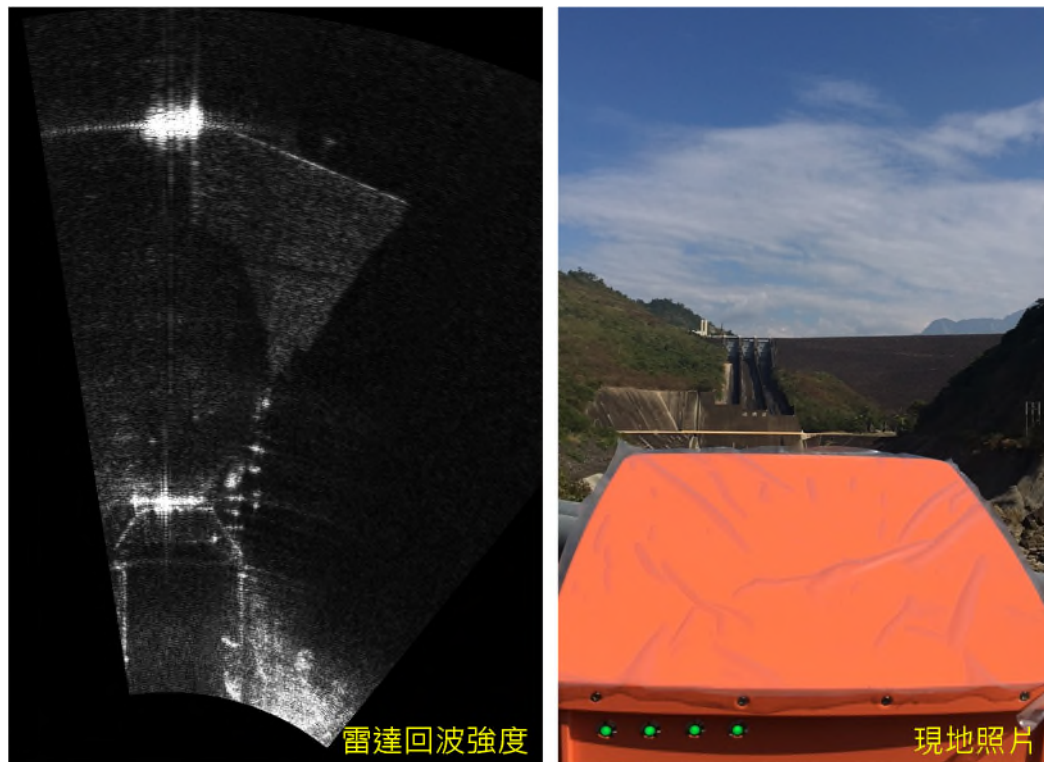


圖 5-1 良好的雷達回波圖(曾文水庫大壩)

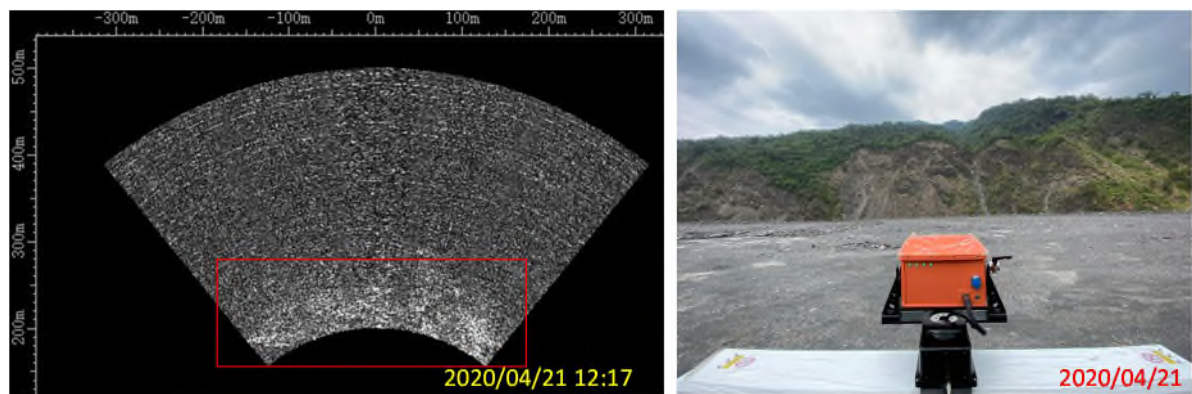


圖 5-2 自然邊坡雷達回波圖(來義)

第二節 同調性

有持續性的良好回波，則可進行同調性 (Coherence) 分析 (相關分析) 確認兩張雷達回波的相似程度，若回波相似程度夠高，後續進行微變形計算的信心度則較高，若相似程度不高則解算微變動之信心度將不足。由於同調性是以常態分布作為設定閾值，建議至少同調性需達 0.75 以上其信心程度才夠，若為水泥或人工構造物其一致性夠高則同調性可提升 0.85 以上，若為天然邊坡則建議 0.75 以上。如圖 5-3 紅色區塊為同調性大於 0.85 的地區，其他植生區與非正交區則無法進行分析。

本研究嘗試以非連續觀測，於儀器放置 1~2 小時候，於下一期再行放置，評估其非連續觀測之可行性，由圖 5-4 可發現，若為同日觀測，在儀器不移動的情況下其高雷達反射區同調性尚可維持，但若下個月進行擺放則其同調性與上次觀測之雷達回波資訊以無法達到高同調性。透過此特性可進行連續性同調性觀測，若有區域有持續高同調性，但突然失去同調性，則可明確知道該地區有一強烈的變化，如圖 5-5，為某礦場施炸前後之同調性變化。

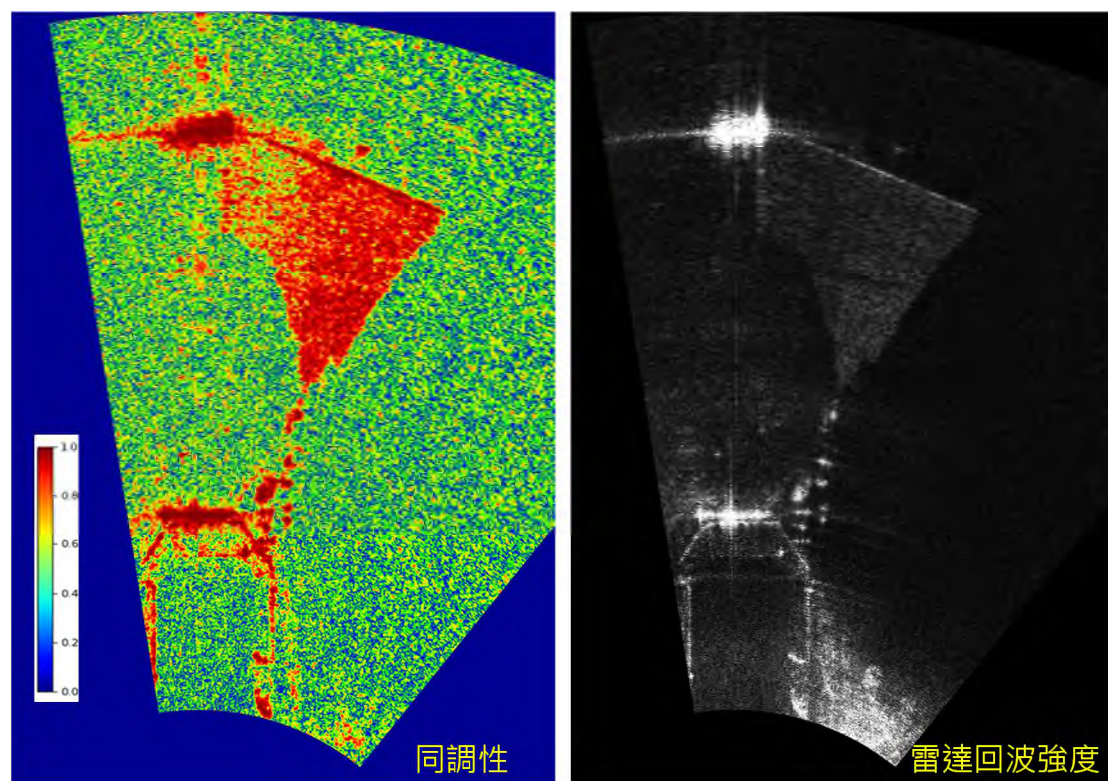


圖 5-3 同調性計算成果圖(曾文水庫大壩)

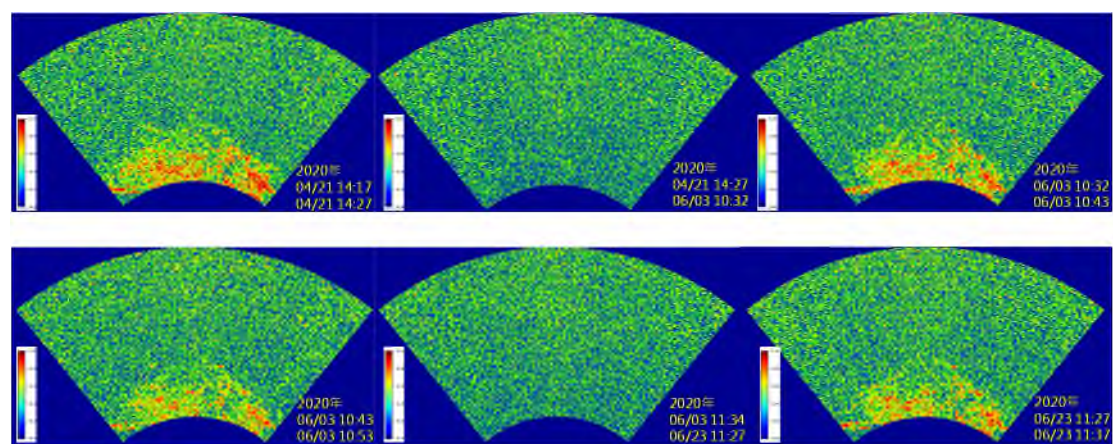


圖 5-4 非連續性觀測同調性成果(來義)

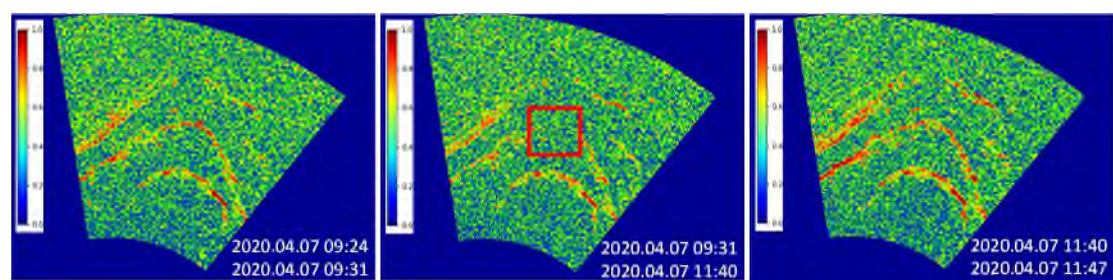


圖 5-5 連續性觀測失去同調性成果(某礦場)

第三節 微變形

微變形之計算為透過第 3-2 章所列之公式 1 所計算而來，需選取有雷達強反射區且前後同調性達設定門檻值之範圍進行計算，由於地基合成孔徑雷達並未採用相位解纏，僅計算一個波長內的變化，故本計畫成果微變形量將僅計算 1.7 公分內的變化量，若於掃描期間變化幅度超過，可能會有錯誤的微幅變形計算，或是直接無法達成同調性門檻值。另由於介電環境也會影像雷達回波之速度故不同的介電環境會導致微變形之計算會有所差異，唯短時間內相對的相位差變動不會有影響，僅在轉換成實際位移量會有所差異。由介電環境影響之相位可透過放置兩組角反射器透過距離函數擬合法校正其位置，本研究以 18 吋 (45 公分) 之角反射器進行試驗，如圖 5-6，發現其於雷達成像上並不顯著。原因應為本研究之自然邊坡觀測距離至少都 300 公尺以上，空間解析度大約 1.6 公尺，故所需角反射器直徑需大於 1.6 公尺才可於雷達回波圖上有所成像，若建置大型之角反射器於現地則受限於角反射器之穩定程度以及設置與移動之便利性，本研究認為設置角反射器之效益並不顯著。



圖 5-6 本團隊使用之角反射器

第四節 空間解析度

地基合成孔徑雷達之最大掃描距離受取樣頻率、脈寬 (PW) 與帶寬 (BW) 所影響，本研究所採用之儀器掃描範圍約在 70 公尺至 2,000 公尺間，透過調整參數以取得最合適之掃描距離。空間解析度則受軌道基線長度與波長所影響，空間解析度將隨著距離遞減，以水平網格解析度 (Cross range resolution) 若目標距離 70 公尺遠，則解析度為 0.37 公尺，若目標距離 1,000 公尺遠則水平網格解析度降為 5.36 公尺。在實務應用上建議觀測目標寬度需大於 10 倍理論解析度較容易辨識出目標位置。本研究認為舞鶴台地無法獲得雷達強反射資訊為其儀器可設置距離過遠 (約 1,520 公尺) 水平網格解析度 8.27 公尺，但其冠部裂隙約 16 公尺，僅包含 2 個網格，無法對於強反射值有效判視。

第六章 結論與討論

第一節 結論

本計畫透過 GB-DInSAR 可直接量測兩張雷達影像視距方向之變形量，整體空間解析度相似於雷達影像。然而，地基合成孔徑雷達仍有其侷限性，例如：覆蓋範圍大約僅 10 公頃，受限於觀測距離與地形遮蔽可視角度。其次，其需要安裝在一固定且穩定的平面 (Tarchi et al. 2003)。雖然有上述問題，但對於水庫大壩監測、邊坡安全監測、橋樑監測、堰塞湖之天然壩監測與大規模裸露崩塌地監測仍有其適用性。

以實際觀測瞭解自然邊坡應用地基合成孔徑雷達之效果與應用性，自然邊坡若要進行地基合成孔徑雷達需要有裸露地，以便於提供強反射區域作為分析依據。此外，儀器的設置需要有合適之尺度 (距離目標 70 至 2,000 公尺)，目標區要有相對應的尺度 (3 公尺至 100 公尺以上) 的雷達強反射範圍，才可適用於地基合成孔徑雷達觀測。

本計畫瞭解其觀測自然邊坡之特色與限制，發現若用於堰塞湖之潰壩監測、公路邊坡崩塌二次穩定性確認、裸露岩層、人工構造物變形監測應為較合適之用途。

植生問題與訊號反射可藉由角反射器或安裝不透水布方式改善。

第二節 討論

一、連續性觀測

由於地基合成孔徑雷達若採用非連續性觀測則其同調性不足以進行微變動分析，建議以連續性觀測為主。若後續發展永久性散射點可能可突破連續性觀測限制，以資料點的方式進行分析。

二、電力

連續性的觀測需要有持續的電力進行分析，本團隊使用之電池為 273,000mA 容量，約 27 個手機行動電源，可持續工作 3 小時。若要能持續長時間監測建議架設於有穩定提供電源之場所，所採用之電壓為 220V，以作為長時間觀測使用。

三、研究限制

本計畫原規劃取得傾斜管之邊坡變形資訊作為地基合成孔徑雷達微變動之參考，受限於地基合成孔徑雷達主要為觀測「地表」的變化量，與傾斜管埋設於「地下」50 公尺深之資料兩者無法進行比較。其次，地表變形量為視距方向變形量，與地底變形量之方向性應不相同。再者，受限於雷達反射回波強度影響，若地表有植被則該地區之變形量將無法計算。本計畫放置儀器時間約 2 至 3 小時，與傾斜管長時間紀錄也有不同。綜合上述，本研究認為兩者於時間與空間尺度、變形位置均不相同難以做比較。

四、其他

以本計畫收集之現地結果投稿 2020 年中華水土保持研討會摘要論文集全文「Ku 波段地基合成孔徑雷達干涉技術於邊坡安全即時監測應用與限制」。

本計畫原預計採用雷達回波降雨進行邊坡預警系統建置，作為地基合成孔徑雷達監測參考，預計將於後續接續案件提出。

參考文獻

1. 行政院農業委員會水土保持局，「萬山潛在大規模崩塌區調查監測計畫成果報告書」，2014。
2. 行政院農業委員會水土保持局，「102 年屏東縣來義鄉來義村潛在大規模崩塌地區調查監測計畫」，2013。
3. 行政院農業委員會水土保持局，「屏東縣霧臺鄉 D081、D082、D038 大規模崩塌區即時監測系統調查規劃」，2018。
4. 李馨慈，博士論文，重大地震地表擾動衰減特性於震後高強度降雨之山崩潛勢分析，國立成功大學資源工程學系，2011。
5. 李俊慧、洪、王、汪學剛、陽、燕，“GBSAR 系統的發展及其形變監測應用”，太赫茲科學與電子信息學報，14-5，2016。
6. 林錫宏、紀宗吉、費立沅，掌握山崩的前兆，科學發展，第 524 期，第 26-33 頁，2016。
7. 陳強、劉國祥、李永樹、丁曉利，“干涉雷達永久散射體自動探測-算法與實驗結果”，測繪學報，35(2)，112，2006。
8. 陳郁琪，碩士論文，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，共 127 頁，2019。
9. 藍世欽，碩士論文，工程地質因子對道路邊坡穩定性之影響-以南橫公路甲仙至梅山段為例，國立成功大學資源工程學系，2000。
10. 譚志豪、陳憶璇、冀樹勇，“以定率法評估集水區山崩臨界雨量”，中興工程季刊，第 105 期，第 5-16 頁，2009。
11. Allaway, A., Merrett, P., Eyre, J., and Stead, D., “The application of GPS in monitoring landslide movements,” Proc., Proc. of 8th Int.

- IAEG Congress, Balkema, Rotterdam, 1633-1640, 1998.
12. Antonello, G., Casagli, N., Farina, P., Fortuny, J., Leva, D., Nico, G., Sieber, A., and Tarchi, D., “A ground-based interferometer for the safety monitoring of landslides and structural deformations,” Proc., IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No. 03CH37477), IEEE, 218-220, 2003.
 13. Casadei, M., Dietrich, W.E., Miller, N.L., “Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation in soil-mantled landscapes,” Earth Surface Processes and Landforms 28, 925 – 950, 2003.
 14. Curlander, J. C., and McDonough, R. N., “Synthetic aperture radar,” Wiley, New York, 1991.
 15. Eeckhaut, M. V. D., Poesen, J., Verstraeten, G., Vanacker, V., Nyssen, J., Moeyersons, J., Beek, L. v., and Van-dekerckhove, L., “Use of LIDAR-derived images for mapping old landslides under forest,” Earth Surface Processes and Landforms, 32(5), 754-769, 2007.
 16. Ferrigno, F., Gigli, G., Fanti, R., Intrieri, E., and Casagli, N., “GB-InSAR monitoring and observational method for landslide emergency management: the Montaguto earthflow (AV, Italy),” Natural Hazards and Earth System Sciences, 17(6), 845-860, 2017.
 17. Forstén, H., “Third version of homemade 6 GHz FMCW radar,” <https://hforsten.com/third-version-of-homemade-6-ghz-fmcw-radar.html>, 2017.

18. Frodella, W., Salvatici, T., Pazzi, V., Morelli, S., and Fanti, R., “GB-InSAR monitoring of slope deformations in a mountainous area affected by debris flow events,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(10), 1779-1793, 2017.
19. Gili, J. A., Corominas, J., and Rius, J., “Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring,” *Engineering geology*, 55(3), 167-192, 2000.
20. Glenn, N. F., Streutker, D. R., Chadwick, D. J., Thackray, G. D., and Dorsch, S. J., “Analysis of Li-DAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity,” *Geomorphology*, 73(1-2), 131-148, 2006.
21. Godt, J.W., “Observed and modeled conditions for shallow landsliding in the Seattle, Washington area,” Ph.D. dissertation, University of Colorado, 2004.
22. Guzzetti, F., S. Peruccacci, M. Rossi, and C.P. Stark, “Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe,” *Meteorology and atmospheric physics*, 98(1-2):239-267, 2007.
23. Iverson, R.M., “Landslide triggering by rain infiltration,” *Water Resource Research*, 36(7):1897-1910, 2000.
24. Iglesias, R., Aguasca, A., Fabregas, X., Mallorqui, J. J., Monells, D., López-Martínez, C., and Pipia, L., “Ground-based polarimetric SAR interferometry for the monitoring of terrain displacement phenomena – Part I: Theoretical description,” *IEEE Journal of*

- Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8(3), 980-993, 2014.
25. Jakob M., H. Weatherly, “A hydroclimatic threshold for landslide initiation on the North Shore Mountains of Vancouver, British Columbia,” *Geomorphology*, 54:137-156, 2003.
 26. Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.-H., Loye, A., Metzger, R., and Pedrazzini, A., “Use of LIDAR in landslide investigations: a review,” *Natural hazards*, 61(1), 5-28, 2012.
 27. Keefer, D.K., R.C. Wilson, R.K. Mark, E.E. Brabb, W.M. Brown, S.D. Ellen, E.L. Harp, G.F. Wieczorek, C.S. Alger, and R.S. Zatkun, “Real-time warning during heavy rainfall,” *Science*, 238:921-925, 1987.
 28. Kim, B. S., B. K. Kim, and H. S. Kim, “Flood simulation using the gauge-adjusted radar rainfall and physics-based distributed hydrologic model,” *Hydrological Processes* 22 (22): 4400 – 4414, 2008.
 29. Leva, D., Nico, G., Tarchi, D., Fortuny-Guasch, J., and Sieber, A. J., “Temporal analysis of a landslide by means of a ground-based SAR interferometer,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(4), 745-752, 2003.
 30. Lin, G., Chen, H., Chen, Y., Horng, M., “Influence of typhoons and earthquakes on rainfall-induced landslides and suspended sediments discharge,” *Engineering Geology* 97, 32 – 41, 2008.
 31. Looper, J. P., and B. E. Vieux, “An assessment of distributed flash

- flood forecasting accuracy using radar and rain gauge input for a physics-based distributed hydrologic model,” *Journal of Hydrology* 412: 114 – 132, 2012.
32. Luzi, G., Pieraccini, M., Mecatti, D., Noferini, L., Guidi, G., Moia, F., and Atzeni, C., “Ground-based radar interferometry for landslides monitoring: atmospheric and instrumental decorrelation sources on experimental data,” *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 42(11), 2454-2466, 2004.
 33. Mensa, D. L., *High resolution radar imaging*, Artech House, 1981.
 34. Monserrat, O., Crosetto, M., and Luzi, G.,. “A review of ground-based SAR interferometry for deformation measurement,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 93, 40-48, 2014.
 35. Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., and Papathanassiou, K. P., “A tutorial on synthetic aperture radar,” *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*, 1(1), 6-43, 2013.
 36. Rao, S., “Introduction to mmWave sensing: FMCW radars,” *Texas Instruments (TI) mmWave Training Series*, 2017.
 37. Richards, M. A., Scheer, J., Holm, W. A., and Melvin, W. L., *Principles of modern radar*, Citeseer, 2010.
 38. Savage, W.Z., J.W. Godt, and R.L. Baum, “Modeling time-dependent slope stability” , *Proceedings of 9th international symposium on landslide*, 28 June-2 July, Rio de Janeiro, Brazil, 23-28, 2004.
 39. Terlien M.T.J., “The determination of statistical and deterministic

- hydrological landslide-triggering thresholds,” *Environmental Geology*, 35(2-3):125-130, 1998.
40. Tarchi, D., Casagli, N., Moretti, S., Leva, D., and Sieber, A. J., “Monitoring landslide displacements by using ground-based synthetic aperture radar interferometry: Application to the Ruinon landslide in the Italian Alps,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B8), 2003.
41. Tarchi, D., Ohlmer, E., and Sieber, A., “Monitoring of structural changes by radar interferometry,” *Journal of Research in Nondestructive Evaluation*, 9(4), 213-225, 1997.
42. Zebker, H. A., and Goldstein, R. M., “Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B5), 4993-4999, 1986.

附錄

附錄一、計畫說明書審查意見回覆表

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	建議可針對本局已有其他 satellite-based InSAR 技術進行崩塌動監測之地區進行 GB-InSAR 的觀測，以利進行不同方式的比較與分析。	與水保局窗口聯繫，討論利用已執行之星載 InSAR 影像與本計畫掃描結果進行比較。
2	植生覆蓋對 GB-InSAR 量測結果干擾極大，如何調整訊號處理、去除或改善干擾宜有說明。現場必須設置反射錐，最後會限制了大範圍位移監測之應用。	目前現有的技術仍無法排除植被對於 GB-InSAR 的影響。作為輔助辨識邊坡位移的替代方案，最常用的方法為尋找穩定的反射點，目前初步可以採用兩個辦法： 設立角反射器：其提供強反射的特性，可以作為穩定(高同調性)的控制點。觀察角反射器不同時間的位置變化，可以反應邊坡移動狀況。另一方面，角反射器同時可以作為大氣狀況不佳時，進行大氣效應修正的矯正點。具體要佈放多少角反射器，才可以同時可以反應邊坡移動、以及提供儀器進行大氣效應修正，有待本計畫執行過程中進一步了解。 若不穩定邊坡上面有建築物，則針對邊坡上的建築物進行掃描，透過掃描建於不穩定邊坡上的建築物，可以同時了解邊坡位移的狀況。 在掃描進行同時，可輔以星載雷達干涉影像(Bardi et. al., 2014)、或者透過地面光達(Pieraccini et. al., 2006)等資

項次	審查意見	回覆辦理情形
		訊同時進行比較。使用上述不同技術對同一邊坡同時進行監測，有利具體的了解邊坡整體移動狀況，也可以補足 GB-InSAR 僅對 LOS 方向變化偵測靈敏的限制。
3	每年僅三次災前定期滑動監測，能否有效獲取滑動速度分佈，宜有較具體說明。	本計畫所選擇的三個目標邊坡/崩塌地(由北至南：茂林萬山、霧台佳暮村、屏東來義)，其近幾年均沒有明顯變動紀錄。中央地質調查所 2010 年利用 LiDAR 判識萬山部落西北方坡地，認為其崩塌地不屬於順向坡地形、有一系列可能由岩體潛移形成的 U 形張力裂隙，認為該處岩體存在潛移運動(Creeping，每年數公釐至數公分的緩慢移動)。 本計畫的儀器使用雷達微波測量目標，並且將兩個時間點的掃描影像進行干涉處理，因此能靈敏偵測微變動。為避免目標邊坡因時間間隔過長，導致控制點位移量過大而造成同調性降低，因此於第一年計畫執行初期，將會較密集進行外業掃描(數週至一個月即掃描一次)，以偵測目標邊坡真實的地表位移速度；後續根據所測量整理後的位移速度調整最大時間掃描間隔。目前初估，在每年豪大雨/重大地震等事件之前的掃描次數應為三次即滿足需求。
4	與既有觀測設施整合及附加價值之提供宜有論述。	感謝建議納入參考。

附錄二、工作執行計畫書審查意見回覆表

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	本計畫書一開始即強調所採用的方法會受到植被影響，但整本計畫書卻無提及究竟要如何克服植被影響？ 如果只是在現場設置反射錐，最後會限制了進行大範圍位移監測的應用。	本計畫採用之 GB-InSAR 設備為地基合成孔徑雷達，其波長為 Ku band(1.7-2.5 公分)，主要目標用於監測連續性微小變化(連續性 2.5 公分內之變化)，因植被受風吹拂之自然晃動已超過 2.5 公分，故其同調性(coherence)無法適用於本系統。 反射錐之使用可作為強反射點參考，可為作為相對位置參考，本計畫有同步進行 GB LIDAR(地面光達)與 GNSS(衛星定位)可輔助確認微變動區域。 植被遮蔽部位可結合星載 SAR 進行監測，如利用：L 波段(20-30 公分)之衛星 SEASAT 或 ALOS，監測 20-30 公分內之差異。
2	合成孔徑雷達差分干涉技術是由影像中自行尋找出可以建立相干的地點，並由這些位置來計算地表位移，但是崩塌發生前後，地表肯定發生劇烈變化，因此必定喪失相關性，要如何透過建立相干來做雷達差分計算位移量？	本計畫欲想達成的目標為觀測崩塌前期之冠部裂隙(Crown cracks)，因其變化速率較慢故可透過 Ku band 波段之雷達差分建立相干性。

項次	審查意見	回覆辦理情形
3	本計畫題目是要建置邊坡崩塌預警系統，請說明所發展的技術如何達成預警的功能？是靠架設雷達對監測區域反覆掃描？還是定期對監測區域掃描？	透過本計畫雷達降水預測模型以提供未來兩小時之可能降雨進行降水警戒值估計。在未來可能產生崩壞地進行 GB-InSAR 監測，目前監測方式採定期監測與即時監測並行，透過定期監測瞭解該地區之變化情況(下雨後或乾季)，若有發佈豪大雨警示，將在可能發生崩壞處進行即時監測。
4	為能準確掌握崩塌前的潛勢，監測點位之選擇建議優先考慮易致災且尚未大規模治理地區，因已進行治理工程場域，其未來即時資料蒐集僅能以長期監測為目的，較無法再提供有效崩塌警戒模式，作為各致災區域參考。	感謝意見納入參考。
5	本計畫之成果於未來實務應用上是否能因應即時分析、即時監測，其資料能否即時傳輸，請納入後續考量。	除資料傳輸外，因合成孔徑雷達需要軌道移動與主動式雷達，耗電量較大，故後續若需即時、長期觀測需有穩定之電力提供。目前本團隊使用之電池為 273,000mA 容量，約 27 個手機行動電源，可持續工作 3 小時。
6	請說明每年 3 次的災前定期滑動監測，如何進行即時大範圍之滑動量監控。	定期監測主要為蒐集基礎變動資料，若發現該地區變化量有持續增大，或可預知之豪大雨事件則可進場放置 GB-InSAR 進行即時監控。
7	建議補充說明 GB-InSAR 與位移計及傾斜管等現地監測儀器，進行比對之目的、分析及比對方法及如何評估其相關性、合理性等，進一步才能	感謝意見納入參考。

項次	審查意見	回覆辦理情形
	瞭解本計畫之效益。	
8	預測降雨強度之工作項目建議可從第一年開始執行，並比對氣象局 24H 預報、系集預報或水保局現行使用之有效累積雨量之相關性。	感謝意見相關預測降雨將補充說明於第五章節。
9	文中描述多項雨量促崩因子，請詳述最後僅選擇降雨強度之原因。	促崩因子眾多，然而主要影響為降水入滲導致之正應力增加與摩擦力降低，故僅選擇主要因子：降水強度，作為分析參考依據。
10	第一年重點工作項目為比對 GB-InSAR 與現地觀測資料之相關性，以及架設 GB-InSAR 進行量測作業，建議列出工項成本評估表。	感謝意見納入參考。
11	GB-InSAR 量測資訊，建議未來可回饋至本局監測系統及整合。	量測資訊可提供相關干涉成果圖片供貴局參考。
12	本創新計畫為一年期計畫，但計畫書內容是以三年期計畫來撰寫執行內容與步驟，建議先強調本年度計畫完成後階段成果於實務應用上之貢獻。	感謝意見納入參考。
13	內文錯字、漏字部分： (1) P1--8 頁第 2 及 6 行，圖號 14、15 請修正。 (2) P 一-15 第 3 行應改為"...下列項目進行比較..."。 (3) P 一-15 第 5 行的表編號請修正。 (4) P 一-16 表標題請改為"植被"影像。 (5) P 一-23 第 1 行靈敏的"偵測	感謝委員建議已修正。

項次	審查意見	回覆辦理情形
	"請刪除。 (6)P 一-23 第 16 行，請改成" 由於儀器本身.."。	

附錄三、期中報告書審查意見回覆表

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	GB-InSAR 近十年已受國際重視為有效形變監測方式，值得推廣，但其訊號之內容仍受相當多自然條件影響，此案之未來擴充及實用須謹慎。	本計畫以 GBSAR 儀器實際於臺灣多個崩塌地與人工構造物進行觀測，確實受自然條件影響，尤其是植被覆蓋區域，因其受風吹拂導致雷達干涉成果同調性不足，無法進行分析，建議目標物需要有持續性的同調性：例如：裸露地、混泥土壩或橋樑...等，可作為較好之監測成果。但是作為即時預警的功能卻非常值得推廣。
2	目前報告書中亦說及執行成果可能為儀器之誤差，應予以確認。	在計畫執行前(2019 年 12 月)本團隊即針對來義崩塌地進行測試，觀察到儀器在全部的監測過程中，顯示邊坡存在有 $\pm 0.4\text{mm}$ 的位移量。因監測前一週當地並無降雨，監測當下亦無任何地震紀錄，監測過程中確認儀器沒有移動，故認為所顯示 $\pm 0.4\text{mm}$ 的位移量應為儀器本身之精度限制。在其他非植生區偵測到同等級位移量顯示本儀器偵測變形能力。
3	InSAR 受植生雜訊影響距離分辨率等條件應予以確認。	本研究所使用之儀器於水平方向的解析度為 5.36mrad (解析度計算之參考公式： $\Delta CR = R(\lambda^*/2L)$)；亦即，目標物距離觀察者 1000 公尺處，其水平方向解析度為 5.36 公尺。 由於雷達回波僅能針對強反射物分析，植被密集區其雷達發射波多被散射，導致回波反

項次	審查意見	回覆辦理情形
		射強度不足訊雜比過高。本研究也在找尋 ku 波段雷達在不同距離對於植生密度容忍性。
4	研究中比較星載 SAR 及地基 SAR，但其適用性十分不同，不易進行完整小區比較，建議仍應較信任就地監測儀器。	星載 SAR 與地基 SAR 其觀測尺度與視距方向均不同，故兩者適用性有所差異。就地監測儀器其可信度高為良好的監測方式，唯地基 SAR 其優勢為非接觸性、大面積與即時微變形監測，約 3 分鐘可獲得變形資料，對於不穩定邊坡更可以確保監測人員安全。
5	GB-InSAR 對垂直視線方向形變較無法反映，未來亦應予以探討。	GBSAR 之儀器設計目標為針對視距方向(Line of Sight)之微變動進行監測，其精度可達毫米等級。雷達波僅能直線移動，若欲達成多方向之分析可透過同時架設兩組以上儀器並放置強反射器確認同一點位的位移量進行解算。本儀器有近兩米軌道基線，在不同位置掃描雷達波會降低完全垂直視線方向形變的機率。
6	GB-InSAR 放置地點及目前挑選之實驗地似乎應重新設計，否則難有顯著成果。	檢討今年度實驗結果，實驗地區與放置地點需要更換。透過今年的現地放置經驗，針對明年年度實驗地提出更合適之地點。Ku 波段在有植生的坡地滑動偵測一直未能完善，本研究就是採用實際作為找出可使用時機與條件。
7	建議補充英文摘要。	已補充英文摘要。
8	期初意見「建議補充說明 GB-InSAR 與位移計及傾斜管等現地監測儀器，進行比對之目的、分析及比對方法及如何評	本計畫原想透過 GBSAR 現地觀測微變形選取與現地觀測儀器於相同時間內做變形比較，唯本計畫於佳暮地區

項次	審查意見	回覆辦理情形
	估其相關性、合理性等，進一步才能瞭解本計畫之效益。」未予回復，工作執行計畫意見項次 4 亦有類似意見未見回復，仍建議補充說明為宜。	(有現地監測)並無法進行有效之 GBSAR 觀測。GBSAR 儀器需持續供電，本研究採用電池供電，約可連續監測 8 小時，僅能觀測短時間變化資料，且又若現地無良好強反射點將使 GBSAR 觀測產生限制，故若要與位移計或傾斜管進行比對，本研究認為有其困難性。 工作執行計畫書之項次 4 為「與既有觀測設施整合及附加價值之提供宜有論述。」回覆為：由於 GBSAR 特性為非接觸性之微變動監測，不需於滑動面上埋設感測器，由於監測需至少距目標 70 公尺，且需能持續供電，故建議若現地有攝影機放置可能為 GBSAR 可設置地點，GBSAR 上需要建置在一穩定的平台，故對於儀器放置位置需要有至少 2 公尺的平坦地，此外目標需有可提供雷達強反射的特性，建議為裸露地較為合適。
9	P2-23 提及對研究區進行週期觀測，建立充分資料量，評估適當之位移警戒值似有不足，建議補充取得滑動門檻值之方法或本研究參採何種模式評估。	週期觀測評估警戒值確有不足，原規劃透過多次觀測可比較前後兩次之微幅變形量計算變形量速率，但經本研究實地試驗，若採不連續性觀測則兩幅雷達回波其同調性將不足，無法進行微幅變動計算，其滑動門檻值尚不可得。若要有有效觀測其變動速率則需要建立中長期觀測場域，連續觀測數週才能較好的描繪出變

項次	審查意見	回覆辦理情形
		化速率。
10	建議補充說明 GB-InSAR 圖如何衍伸出 Deformation, Speed, Accelerator(例如圖 3-3)。	GB-InSAR 所掃描的每幅影像均跟前一幅影像進行比對，計算同調值，同時計算影像間同位置像素之相位差，以計算微變動量。 研究人員可以點選、或框選影像特定區域，取得所選目標在每幅影像之位移量變化，並記錄在右上第一幅 "Deformation(mm)"圖表中(請參考圖 3-3)。 圖 3-3 右中的 "Speed"圖則計算 "微變動量/兩幅影像之時間間隔"而得； 圖 3-3 右下之 "Accelerator"圖，則是計算 "微變動量/兩幅影像之時間間隔²"之結果。
11	建議補充架設 GB-InSAR 儀器時，選址注意事項及與目標物之相對距離或角度等條件；並依據現階段成果歸納出合適與不合適應用 GB-InSAR 儀器之場址特徵分別為何。	GBSAR 儀器建議其設置地點距離目標需在 70 至 2,000 公尺間(受限於雷達變頻帶寬、脈衝持續時間之脈寬與數位轉換頻率影響)，目標需對雷達有良好的強反射特性，故植被與水體均不適合，建議以裸露地、人工構造物、橋樑與新鮮崩塌地為主。其水平解析度受距離影響較大，於 1,000 公尺其水平解析度剩下約 5 公尺左右，故若目標物距離 2,000 公尺則水平解析度降至 10 公尺，故目標物於不同距

項次	審查意見	回覆辦理情形
		離需要有適當之尺度，建議目標需有至少 10 倍理論解析度大小較能夠易於判視目標物位置。

附錄四、期末聯合審查暨成果發表會審查意見回覆表

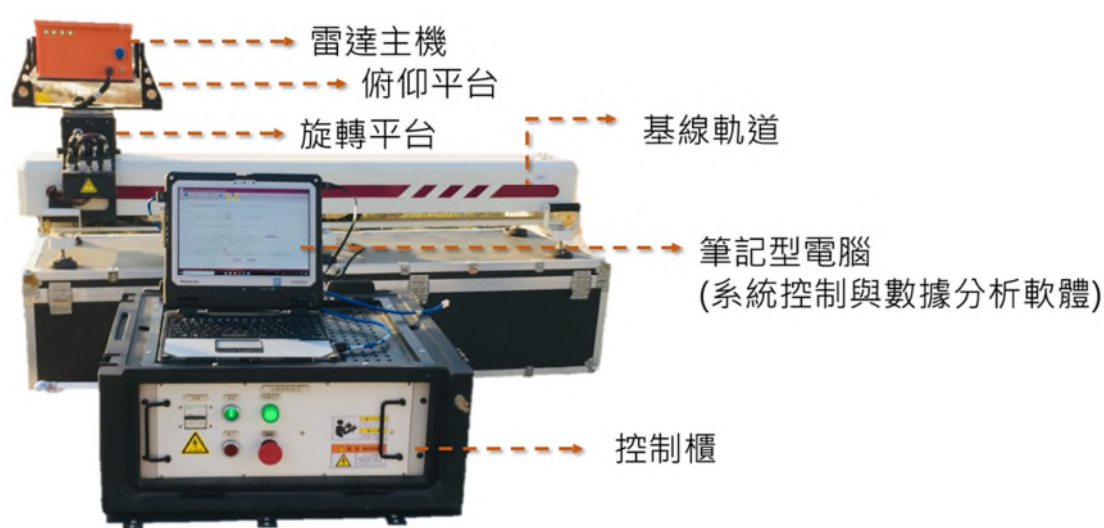
項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	使用Ku band植生問題一定無法解決，是否有L band的GBSAR產品呢？	採用Ku band之位移分辨率為0.04 mm，以義大利LiSAR系統為例，C band GBSAR位移分辨率僅4 mm，若採用較長波段其分辨微變形的能力將顯著下降。 地基合成孔徑雷達受限現地情況軌道長度有其限制，若以本計畫1.6公尺之軌道計算空間解析度($\Delta CR=R\lambda/2L$)，L band (波長30cm) 的空間解析度在距離70公尺水平解析度約5.29公尺，2公里約176公尺，將大幅縮小GBSAR應用性。義大利LiSAR系統所採用的C band GBSAR軌道2.8公尺，才有較為可接受之解析度。(距離1公里，網格解析度4公尺)但僅能固定於一處進行持續監測。
2	是否有試過加設角反射器？	內部測試有加入角反射器，所測試之角反射器尺寸約40公分，可有效增強反射程度(距離約100公尺)，現地野外由於監測目標距離較遠且無便利放置角反射器之位置，故無置放於本研究之坡地上。另有於花蓮某礦場放置角反射器，由於其放置距離較遠且強反射回波資料較多，並無法清楚判釋角反射器實際位置。於明年年度測試大型角反射器(70公分)之可行性。

項次	審查意見	回覆辦理情形
3	地基型SAR的設置原則或限制為何？建置成本約多少。	設置原則需要有合適的觀測距離、觀測目標(角度與材質)，若以本研究採用之移動式合成孔徑雷達，其軌道長1.6公尺，建議目標為距離70至2000公尺，角度需要盡量垂直為原則，材質則需有強反射特性之目標物，如混凝土、金屬等。環境則需有穩定之電源以及至少約9平方公尺之作業區。建置成本為500~900萬，依據不同廠牌型號而定。
4	有無其他現行運用案例？建議補充。	其他運用案例為他案之工作成果，尚無法提供詳細資訊，另花蓮某礦場之成果已發表於「2020中華水土保持學會研討會」。
5	建議能增加GB-InSAR的成本討論與其他預警系統之比較，以供本局作為後續決策的參考。	邊坡監測儀器眾多，有設置攝影機、傾斜管、傾度盤、水位計、地錨荷重計、拉伸計等，每一區域合適之監測方式均不同，GBSAR之可觀測之特性為有良好反射面、合適之距離與尺度，以及變化量幅度為可觀測範圍，可提供之成果為遙測、可取得面量資料且變形量為毫米等級，建置成本為500~900萬，依據不同廠牌型號而定。。

附錄五、GB-InSAR 儀器安裝標準作業流程

一、GB-InSAR儀器硬體介紹與儀器架設說明

GB-InSAR 系由基線軌道、旋轉平台、俯仰平台、雷達主機等部件所組合而成，透過電纜線與電池、機櫃、以及控制電腦進行連接，以控制發射雷達波（微波，波長約 170mm）進行掃描工作，如附圖-1 所示。



附圖- 1 GB-InSAR 系統整體外觀示意圖

GB-InSAR 必須到現場操作，其具備高精度、遠距離測量的特性，可以的提升測量的靈活性。又為了確實取得高精密的測量結果，故架站時，除了必須考慮目標地的地理環境位置，選擇合適的觀察點外（觀測點選擇規則將於下一節討論），嚴謹的架站流程規範是必須優先建立，並且嚴格遵守。在符合職業安全法規相關規範的前提下，GB-InSAR 應架設在無墜落、崩塌之虞的作業場所。

儀器擺放（為提升儀器掃描之視角，儀器通常擺放在「基線軌道外箱」之上，在此為描述設置外箱之環境要求）的地面應為平整、無

滑動之虞的平面；若該監測點需要定期重複掃描監測，則儀器擺放的位置需使用顯眼色調之噴漆或標示物進行標記，以便下次工作時進行識別與正確擺放。

當基線軌道外箱設置完畢之後，接著進行各項配件的組裝。為了避免安裝時各項組件缺漏、或是安裝流程出錯，導致浪費不必要的時間或增加儀器損壞的可能性，我們建立「現場安裝作業流程清單」，依照清單提示步驟進行安裝流程，增進儀器安裝效率，如下附圖-2 所示。

GB-InSAR 現場安裝 Checking list:

1	☐	確定雷達軌道的水平
2	☐	測量雷達軌道左右兩側座標位置: 起點 X: _____ Y: _____; 終點 X: _____ Y: _____
3	☐	安裝旋轉平台，確定線路沒有被壓到，有在平台凹朝內，確認六顆螺絲確實鎖死
4	☐	安裝俯仰平台，確定雷達電源線有通過俯仰平台中間挖空處，確認 10 顆螺絲確實鎖死
5	☐	調整俯仰平台角度，需紙筆記錄下俯仰角度____°，調整好後確認俯仰平台鎖死不可晃動
6	☐	安裝雷達機，置放前確認俯仰平台無晃動，4 顆螺絲確實鎖死
7	☐	安裝天線，確認共 8 顆(一邊各 4 顆)螺絲確實鎖死
8	☐	連接控制櫃和雷達軌道線路，確認控制櫃之線路從雷達軌道下方通過
9	☐	電源線確實插入電池或是發電機
10	☐	電腦安裝，確定網路線插在螢幕旁網路線插口，和電源線跟 USB 確實連接
11	☐	由下往上扳起控制櫃總電源，按下 Power 鍵後，開啟雷達主機
12	☐	確認雷達軌道和放置周圍沒有異物
13	☐	建立警戒範圍，確保測量過程中不會有閒雜人等從前方經過
14	☐	主機和雷達連接後須等 5 分鐘才可以開始測量
15	☐	測量前須將雷達回到原點(0mm)，雷達主機角度必須回到 90°
16	☐	測量檔案儲存資料夾，需要命名確實幫助分析人員作業

資料統整

日期：

地點：

天氣狀況：

雷達軌道 起點 X： _____ 起點 Y： _____
 終點 X： _____ 終點 Y： _____

俯仰角度：

填表人：

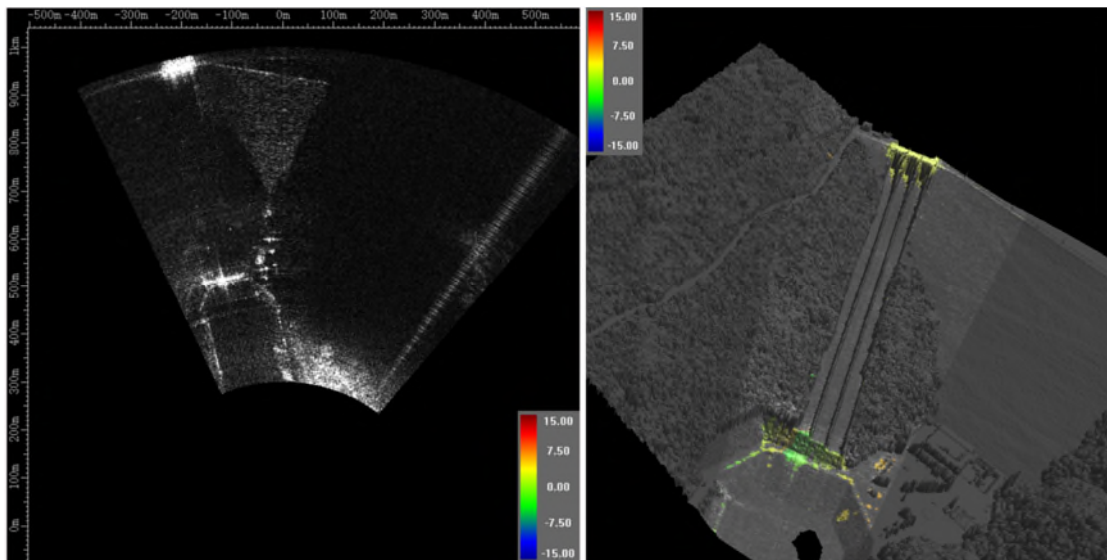
附圖-2 儀器現場安裝作業流程清單

目前雷達在掃描過程中時，並不會記錄下列三個資訊：基線軌道水平狀況、雷達機在基線軌道兩個端點的坐標、以及雷達機之俯仰角度，因此必須手動進行記錄，作為後續資料判釋時納入誤差參考依據

之一。

「基線軌道水平狀況」由現場安裝人員利用水平尺進行水平校準。

由於本儀器可以透過擬合光達或既有 DSM 資料，取得三維變化圖像 (坐標格式: XYZ 或 XYZRGB)；擬合過程中必須將基線軌道二端點坐標，另外使用程式將坐標資訊與光達進行擬合，因此現場工作人員透過 E-GPS 或雙頻 GPS 接收訊號後、進行解算，取得基線軌道端點坐標資訊，進一步取得監測目標三維立體監測結果，供資料分析人員後續使用，如下附圖-3 所示。



附圖-3 2 維 SAR 影像(左)、以及套疊光達資料後 3 維立體影像(右)

雷達機之俯仰角度，則透過安裝「俯仰平台」配件同時設定。

雷達機掃描工作結束後，基本拆卸步驟與安裝步驟為相反，本研究亦建立「儀器卸除流程清單」。依照清單所提示之步驟操作卸除流程，確實避免不必要的失誤發生，如附圖-4 所示。

二、掃描選點原則與儀器架設位置說明

GB-InSAR (微變感知雷達) 可用差分的方式，靈敏的偵測到視距方向的微變動。因其使用波長非常的短，因此在視距方向有非常高的分辨率，其解析度可達公釐等級。

GB-InSAR 的掃描模式分為 2 種：單角度模式、以及多角度模式。其中多角度模式可以令雷達機掃描區域涵蓋 60 度的範圍 (90 度為儀器預設中心點，即 60 度~120 度)；搭配上天線具有 18 度的測向掃描角度、40 度的縱向掃描角度，因此多角度模式可以一次掃描相當廣的區域，節省許多測量時間。

GB-InSAR 在約 2 公尺 X2 公尺 的空間內即可完成架設；雖然全部配件總重近 200 公斤 (個別配件含外箱最重 100 公斤)，卻尚屬於三個人力徒手搬運可以承受的範圍內，因此 GB-InSAR 具有下列三項高自由度的特性，有利於研究人員在野外設置並進行掃描工作：

1. 可以自由選擇合適的觀測位置；
2. 可以自行調整掃描方向 (包含基線軌道方向、俯仰角度)；
3. 不受天氣變化影響 (除了機櫃)。

由於儀器本身設計，待掃描目標物需距離儀器 70 公尺以上 (掃描範圍：70~5000 公尺)，才能偵測微變動。綜上所述，GB-InSAR 的觀測點設置，最基本、必須滿足的要件為：適當的觀察距離 (70~5000 公尺)、適當的安裝空間 (在開闊視線不受阻礙的環境)、盡可能的將儀器掃描方向正對目標物。

以本工作團隊於 2020 年 1 月 18 日至屏東來義崩塌地預掃工作為例，本團隊選擇正向面對崩塌地距離約 200 公尺左右位置架設儀器，如附圖-5 所示。

此處的「正向面對」為本團隊預期岩壁裂縫產生、岩體發生位移最大值之方位（通常最大位移方向為垂直坡面方向），因此架設儀器時，雷達機之原始歸零角度需與坡面垂直、基線軌道與坡面走向平行。

為了避免掃描當天有大量沙塵、降雨或其他大氣環境變化影響掃描品質，因此本團隊將於崩塌地四周架設角反射器，藉此提供高反射訊號控制點作為儀器大氣校正之基準（註：大氣效應影響 GB-InSAR 掃描品質，請參考前述章節：「大氣效應與人工控制點（角反射器）」）。



附圖-5 屏東來義崩塌地現場掃描工作示意圖

附錄六、GB-InSAR 掃描工作紀錄

一、萬山研究區

本團隊於 2 月 27 日至高雄茂林區萬山部落附近場勘後，發現此區擁有兩個適合擺放儀器之地點，A 點為萬山部落階地底部河堤旁、B 點為崩塌地邊河谷對岸「琉璃灣」露營區，如附圖-6 所標示，決議先後於兩處皆進行掃描，以便後續研究分析。



附圖-6 萬山研究區儀器擺設位置 A、B (Googlemap 衛星圖)

本團隊分別於 2020 年 3 月 3 日、5 月 12 日及 6 月 2 日前往萬山進行掃描工作，以下依序說明。

(一) 2020 年 3 月 3 日

3 月 3 日當天天氣晴朗，於上午十點左右抵達 A 點掃描處，如附圖-7 所示，邊坡上有明顯之裸露地，且視線方向右邊萬山部落之建築物，皆為良好之強反射點，以利進行掃描。而後於當

天下午三點左右抵達 B 點掃描處進行掃描。



附圖- 7 高雄萬山研究區 A 點 GB-InSAR 掃描現場照



附圖- 8 高雄萬山研究區 B 點 GB-InSAR 掃描現場照

當天為萬山首次進行掃描作業，為了後續再訪時儀器擺放位置相同、定位精確，在 A 點我們將架高儀器之外箱四角於地面噴漆標定，且儀器放於外箱上之四腳亦噴漆標定，並在外箱兩斜對角使用雙頻 GPS 接收衛星定位，以利再訪時能準確將儀器放於同個位置。另外，在 B 點，因現地為石頭路，無法確保噴漆能長留，故我們於外箱三點，使用錨釘打入地面，以標示儀器位置如附圖- 10。



附圖- 9 萬山 A 點噴漆標定示意圖



附圖- 10 萬山 B 點錨釘標定示意圖

(二) 2020 年 5 月 12 日

本團隊當天於上午十點左右抵達萬山 A 點掃描處，發現現場多了不少植被，可由附圖-11 看出。天氣多雲，過不久便下起傾盆大雨，因掃描數據不佳且大雨不停，便取消下午至 B 點掃描處作業。



附圖- 11 高雄萬山研究區 A 點 GB-InSAR 掃描現場照



附圖- 12 高雄萬山研究區 A 點掃描處逢大雨

(三) 2020 年 6 月 2 日

本團隊當天因道路施工等問題，於上午十一點左右才抵達萬山 A 點掃描處，天氣晴朗多雲，由附圖- 13 可以看出，現場的植被已非常茂密，與附圖- 7 相比，許多 3 月時第一次掃描所看到的裸露地皆被植被覆蓋。本次有配合使用光達掃描現場地形，以便後續研究呈現更清楚。因 GB-InSAR 掃描結果不佳，為測試是否為儀器本身故障等問題，我們將儀器轉向左側，掃描左側較為裸露的山壁，如附圖- 15，其掃描結果正常合理。最後推斷，萬山研究區因植被密度增加，而使 GB-InSAR 掃描無法有效回收訊號，導致結果影像無法判斷。琉璃灣觀察點 B 點因為上週強降雨，因此過不去。



附圖- 13 高雄萬山研究區 A 點 GB-InSAR 掃描現場照



附圖- 14 萬山 A 點掃描處光達現場照



附圖- 15 GB-InSAR 掃描左側山壁

二、來義研究區

本團隊分別於 2019 年 12 月 18 日、2020 年 4 月 21 日、6 月 3 日及 6 月 23 日前往來義進行掃描工作，以下依序說明。

(一) 2019 年 12 月 18 日

本團隊當天於上午十點左右抵達屏東來義，天氣晴朗，由附圖-16 顯示，此邊坡大部分為裸露地，為良好強反射點，以利 GB-InSAR 進行掃描，且儀器位置能正交掃描此坡面，為最佳擺放地點，不過本次掃描為測試階段，故無在地面標記定位等。另外，本次有配合使用光達掃描現場地形，先行建立資料庫，測試 GB-InSAR 影像與 3D 光達影像套合的狀況。



附圖- 16 屏東來義研究區 GB-InSAR 掃描現場照



附圖- 17 屏東來義研究區光達現場照

(二) 2020 年 4 月 21 日

本團隊當天於中午十二點左右抵達屏東來義，現場邊坡多了少許植被，如附圖- 18，還不至於影響掃描作業。本次為正式掃描，故於架高儀器之外箱四角噴漆標定位置及於一角打入一只錨釘，以利後續再訪時擺放位置相同。



附圖- 18 屏東來義研究區 GB-InSAR 掃描現場照



附圖- 19 屏東來義噴漆標定及錨釘位置示意圖

(三) 2020 年 6 月 3 日

本團隊當天於上午十點左右抵達屏東來義，發現現場因前陣子之豪雨，導致坡面蝕溝處有小水流，如附圖-20 箭頭處。而植被方面，有少少增加，但密度仍無太高，明顯之裸露地有利於 GB-InSAR 掃描。



附圖- 20 屏東來義研究區 GB-InSAR 掃描現場照

因得知高雄萬山研究區植被問題，而無法取得良好資料進行同地點兩處掃描之研究分析，便於此次在屏東來義原掃描點右前方約 50 公尺處，再建立 B 點進行掃描。於 B 點掃描處，我們將儀器架於新製鐵架上，其鐵架有四輪能夠方便移動，有六腳能固定於地面，為再訪時位置相同，於此鐵架六腳噴漆標定。



附圖- 21 屏東來義 A、B 點位置



附圖- 22 屏東來義研究區 B 點 GB-InSAR 掃描現場照

(四) 2020 年 6 月 23 日

本團隊當天於上午十點左右抵達屏東來義，天氣晴朗多雲，蝕溝處之小水流已消失。坡面上之植被又少許的增加，但仍無影響作業。於上次有將儀器水平之調整參數記錄下來，此次便依照

上次進行水平調整，以求與上次儀器擺放相同。



附圖- 23 屏東來義研究區 A 點 GB-InSAR 掃描現場照

約於下午兩點移動至 B 點掃描處進行掃描，而本次亦配合使用光達掃描現場地形，以利後續研究分析。



附圖- 24 屏東來義研究區 B 點 GB-InSAR 掃描現場照



附圖-25 屏東來義研究區光達現場照

三、佳暮研究區

本團隊分別於 2020 年 3 月 6 日、3 月 31 日前往屏東佳暮進行掃描工作，此研究區亦規劃兩處掃描點，為 A 點舊部落佳暮國小上方空地以及 B 點神山-佳暮聯絡道接近河谷位置，掃描工作以下依序說明。

(一) 2020 年 3 月 6 日

本團隊當天於上午十點左右抵達屏東佳暮 A 點掃描處，天氣晴朗多雲，由附圖-26 可看出，坡面上之植被蠻多，為許多枯黃的樹木植生。本次掃描結果不佳，檢查儀器零件狀況無異狀，轉往佳暮 B 點掃描處嘗試。



附圖- 26 屏東佳暮研究區 A 點 GB-InSAR 掃描現場照

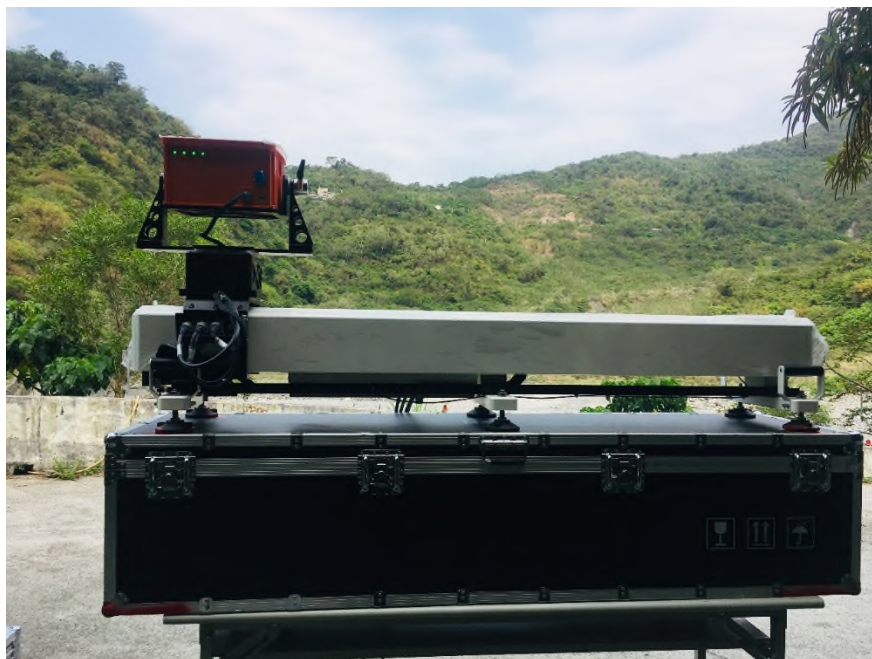
於中午十二點左右抵達佳暮 B 點掃描處，此點位置能夠使儀器掃描正交坡面，是良好之掃描點。由附圖-27 亦能看出坡面上有許多枯黃植生，回收訊號不佳，掃描結果不盡理想。



附圖- 27 屏東佳暮研究區 B 點 GB-InSAR 掃描現場照

(二) 2020 年 3 月 31 日

再次前往屏東佳暮 B 點掃描測試，現場坡面上植生仍不少，我們將儀器置於桌上，試圖架高儀器排除前方小矮牆問題。掃描的成果仍不佳，討論後認為此研究區因植生問題不適合進行 GB-InSAR 監測。



附圖- 28 屏東佳暮研究區 B 點 GB-InSAR 掃描現場照