

計畫編號：110 保發-8.1-保-01-06-001(27)

應用地基合成孔徑雷達干涉技術於
邊坡與土石流之預警機制偵測
Mass Wasting Early Warning with GB-
InSAR

(成果報告書)

執行單位：國立成功大學

執行期間：110 年 01 月 27 日至 110 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 110 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

應用地基合成孔徑雷達干涉技術於邊坡與土石流之預警機制偵測

摘要

本研究使用 Ku 波段之地基合成孔徑雷達 (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。

本計畫以巡迴式掃描監測模式，於高雄寶來與臺南龍崎進行共 22 次作業，並搭配所收集的雨量站與地震站觀測資料，評估微變形量與外在擾動之相關性。監測結果可發現，地震的時間與空間距離之遠近，會影響監測邊坡之變動範圍；降雨則有延遲情況發生，需較長時間觀測才能確認。

另外，GB-SAR 創新應用測試方面，進行了不同種創新實驗。帆布增強同調性實驗，結果皆顯示帆布能提高所覆蓋區域之同調性。而在位移驗證實驗中，進行沙袋模擬帆布實驗，結果在有效的實驗變動下，GBSAR 可觀察到沙袋之位移。介電環境比較實驗，可發現在降雨造成之不同的介電環境之下，雷達回波強度並無太大變化，即雨滴無影響回波強度。巡迴式監測模式之討論實驗，可發現若架設量測穩固以及兩日大氣狀況與土壤含水量相似是有可能不失同調性。最後，儀器耗電量測試結果，若比較間隔掃描時間不同狀況下，其耗電量差異不大，但監測資料量可能就相差甚大。

關鍵詞：地基合成孔徑雷達、邊坡穩定、即時預警、微變形

ABSTRACT

Ground-based SAR interferometry (GB-InSAR) which adopted ku-band microwave, is a high-precision terrestrial remote sensing technique for deformation monitoring.

This study monitored two slopes which are located at Baolai, Kaohsiung, and Longchi, Tainan. We monitored the slopes for 22 times. By using of cruised-scanning monitor mode (CSMM.) , combined with precipitation and seismic data, some results were found as follow: The distance and origin time of earthquakes will affect deformation range of slopes but the effect by rainfall will not affect immediately. Compare to short-time observation, it needs a long-time duration observation to confirm the influence of rainfall.

In addition, we implemented different kinds of innovative application tests. First, laying canvases on the slopes will enhance the coherence value of coverage area. Second, in an effective experiment, GBSAR can observe the displacement of the sandbag. Third, in the experiment of different dielectric environment, rainfall can cause the difference of dielectric environment but since the radar echo intensity is still similar that means raindrops won't affect the echo intensity. Fourth, in the cruised-scanning monitor mode (CSMM.) experiment, it can be found that if the measurement is stable and the atmospheric conditions and soil moisture content are similar for the two day that we monitored , it is possible to have the certain amount of coherence. Last, in the power experiment, if comparing to the scanning time at different intervals, the power consumption is not much different, but the amount of monitoring data may be much different.

目次

目次.....	I
表次.....	III
圖次.....	IV
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	1-2
第二章 文獻回顧	2-1
第一節 地基合成孔徑雷達原理	2-1
第二節 地基合成孔徑雷達應用實例	2-10
第三節 地基合成孔徑雷達應用於邊坡實例	2-13
第三章 執行方法與步驟	3-1
第一節 執行方法	3-1
第二節 研究區簡介	3-3
第四章 計畫執行進度說明	4-1
第一節 高雄寶來	4-3
第二節 臺南龍崎	4-21
第三節 小結	4-35
第五章 GB-SAR 創新應用測試	5-1
第一節 增強同調性	5-1
第二節 實驗場位移驗證	5-6
第三節 介電環境比較	5-11
第四節 巡迴式 GBSAR 監測	5-12
第五節 耗電量測試	5-18
第六章 結論與建議	6-1
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附-1
附錄一、計畫說明書審查意見回覆表	附-1
附錄二、期初審查意見回覆表	附-3

附錄三、期中審查意見回覆表	附-7
附錄四、GB-SAR 觀測日誌.....	附-10

表次

表 2-1 雷達掃描波段功能與特性一覽表	2-2
表 2-2 各國主要 GBSAR 系統參數	2-7
表 2-3 本研究使用之 GB-SAR 參數	2-9
表 2-4 視距方向理論解析度	2-9
表 2-5 水平方向理論解析度	2-9
表 2-6 理論最大掃描距離	2-10
表 2-7 GB-SAR 監測特性表	2-10
表 2-8 比較星載 SAR、GB-INSAR、GB-LIDAR 於不同項目之特點 .2-13	
表 4-1 GB-SAR 工作時程紀錄	4-2
表 4-2 高雄寶來使用 GB-SAR 參數	4-5
表 4-3 臺南牛埔使用 GB-SAR 參數	4-22
表 4-4 崎頂氣象站(C00960)5 月 31 日 10 時至 13 時雨量	4-32
表 5-1 實驗場 2 帆布距離與尺寸一覽表	5-3
表 5-2 實驗場 2 帆布與角反射器同調性提升一覽表	5-5

圖次

圖 2-1 雷達合成孔徑示意圖	2-2
圖 2-2 雷達回波相位差示意圖	2-3
圖 2-3 地基合成孔徑雷達影像生成示意圖	2-3
圖 2-4 星載與地基合成孔徑雷達相位影響因子比較圖	2-4
圖 2-5 FMCW 原理示意圖.....	2-6
圖 2-6 透過改變電壓調整信號頻率	2-6
圖 2-7 地基合成孔徑雷達掃描範圍圖	2-8
圖 2-8 截至 2018 年 12 月，統計 GBSAR 發表文獻之應用(PIERACCINI， 2019)	2-14
圖 3-1 計畫流程圖	3-2
圖 3-2 經濟部中央地質調查所公告之寶來研究區地質分布圖	3-4
圖 3-3 寶來研究區現場邊坡概況	3-5
圖 3-4 荖濃溪右岸邊坡 2010 年～2017 年變遷圖(GOOGLE EARTH 影像)	3-5
圖 3-5 本研究選定之 GB-SAR 儀器監測位置(寶來).....	3-6
圖 3-6 經濟部中央地質調查所公告之龍崎研究區地質分布圖	3-7
圖 3-7 本研究選定之 GB-SAR 儀器監測位置(牛埔)	3-8
圖 4-1 高雄市桃源區寶來村 GB-SAR 架設位置	4-3
圖 4-2 高雄寶來現地照片	4-3
圖 4-3 高雄寶來現地照片(續 1).....	4-4
圖 4-4 高雄寶來工作區雷達回波涵蓋範圍	4-4
圖 4-5 同調性與現地位置判視圖(高雄寶來).....	4-5
圖 4-6 震幅強度與現地位置判視圖(高雄寶來).....	4-6
圖 4-7 高雄寶來當日累積變化量(2021/02/26)	4-6
圖 4-8 高雄寶來當日累積變化量(2021/06/11).....	4-7
圖 4-9 高雄寶來當日累積變化量(2021/08/31)	4-7
圖 4-10 寶來地區鄰近地震(2021/03/23).....	4-8
圖 4-11 高雄寶來當日累積變化量(2021/03/26).....	4-8
圖 4-12 寶來地區鄰近地震(2021/04/05).....	4-9

圖 4-13 高雄寶來當日累積變化量(2021/04/13).....	4-9
圖 4-14 寶來地區鄰近地震(2021/05/02).....	4-10
圖 4-15 高雄寶來當日累積變化量(2021/05/04).....	4-10
圖 4-16 寶來地區鄰近地震(2021/05/08).....	4-11
圖 4-17 高雄寶來當日累積變化量(2021/05/18).....	4-11
圖 4-18 高雄寶來當日累積變化量(2021/07/02).....	4-12
圖 4-19 高雄寶來累積變化量與現地對照圖(2021/07/02).....	4-12
圖 4-20 高雄六龜雨量站測得 7 月至 9 月期間每日降雨量整理	4-13
圖 4-21 寶來地區鄰近地震(2021/08/12).....	4-13
圖 4-22 高雄寶來累積變化量與現地對照圖(2021/08/17).....	4-14
圖 4-23 寶來地區鄰近地震(2021/09/01).....	4-15
圖 4-24 高雄寶來累積變化量與現地對照圖(2021/09/6).....	4-15
圖 4-25 9 月 28 日、29 日監測位置示意圖.....	4-16
圖 4-26 雷達影像與實際視野對照示意圖.....	4-17
圖 4-27 寶來 9 月 28 日至 9 月 29 日監測結果(105 幅影像).....	4-18
圖 4-28 寶來 9 月 28 日至 9 月 29 日監測結果(93 幅影像).....	4-18
圖 4-29 比較兩幅影像之像素空缺以及填補狀況.....	4-19
圖 4-30 臺南市龍崎區牛埔 GB-SAR 架設位置.....	4-21
圖 4-31 臺南牛埔現地照片	4-21
圖 4-32 臺南牛埔雷達回波涵蓋範圍.....	4-22
圖 4-33 同調性與現地位置判視圖(臺南牛埔).....	4-23
圖 4-34 震幅強度與現地位置判視圖(臺南牛埔).....	4-24
圖 4-35 臺南牛埔當日累積變化量(2021/03/30).....	4-25
圖 4-36 臺南牛埔當日累積變化量(2021/04/23).....	4-25
圖 4-37 臺南牛埔當日累積變化量(2021/05/06).....	4-26
圖 4-38 臺南牛埔當日累積變化量(2021/07/06).....	4-26
圖 4-39 臺南牛埔當日累積變化量(2021/05/21).....	4-27
圖 4-40 龍崎地區鄰近地震(2021/05/20).....	4-27
圖 4-41 臺南牛埔當日累積變化量(2021/06/15).....	4-28
圖 4-42 崎頂雨量站 7 月至 9 月日雨量紀錄.....	4-28

圖 4-43 臺南牛埔當日累積變化量(2021/07/27).....	4-29
圖 4-44 臺南牛埔當日累積變化量(2021/08/12).....	4-29
圖 4-45 臺南牛埔當日累積變化量(2021/09/2).....	4-30
圖 4-46 臺南牛埔當日累積變化量(2021/09/17).....	4-30
圖 4-47 車載 GB-SAR 觀測現地照片(臺南牛埔).....	4-31
圖 4-48 現地設置雨量筒(臺南牛埔).....	4-31
圖 4-49 降雨期間雷達回波圖(臺南牛埔).....	4-32
圖 4-50 降雨期間同調性圖(臺南牛埔).....	4-33
圖 4-51 臺南牛埔當日累積變化量(2021/05/31).....	4-34
圖 5-1 實驗場 1 現地照片(成功大學).....	5-1
圖 5-2 實驗場 1 儀器放置(成功大學).....	5-2
圖 5-3 實驗場 1 同調性增加位置圖(成功大學).....	5-2
圖 5-4 實驗場 1 測試成果(成功大學).....	5-3
圖 5-5 實驗場 2 儀器與帆布相對位置(高雄寶來).....	5-3
圖 5-6 角反射器照片(12 吋、16 吋與 18 吋).....	5-4
圖 5-7 實驗場 2 帆布與角反射器放置情形圖(高雄寶來).....	5-4
圖 5-8 實驗場 2 帆布鋪設現地照片(高雄寶來).....	5-4
圖 5-9 實驗場 2 同調性增加位置圖(高雄寶來).....	5-5
圖 5-10 實驗場 3 儀器與角反射器位置.....	5-6
圖 5-11 實驗場 3 角反射器底座加刻度.....	5-7
圖 5-12 強反射點位移測試角反射器與雷達回波圖.....	5-7
圖 5-13 強反射點位移測試成果圖.....	5-8
圖 5-14 沙袋模擬位移實驗場與位移模擬.....	5-9
圖 5-15 沙袋模擬位移模擬.....	5-9
圖 5-16 沙袋模擬位移成果圖.....	5-10
圖 5-17 降雨期間增加同調性範圍圖.....	5-11
圖 5-18 乾燥與濕潤土壤雷達回波差異圖.....	5-12
圖 5-19 巡迴式監測儀器架設方式.....	5-13
圖 5-20 巡迴式監測同調性成果圖(高雄寶來).....	5-13
圖 5-21 巡迴式監測同調性成果圖(臺南龍崎).....	5-14

圖 5-22 雷達主機(含天線)於俯仰平台位移.....	5-15
圖 5-23 雷達主機(含天線)於俯仰平台位移同調性成果圖	5-15
圖 5-24 雷達主機(含天線)於旋轉平台旋轉疊圖同調性成果圖	5-15
圖 5-25 儀器放置於旋轉平台旋轉疊圖變動圖	5-16
圖 5-26 儀器軌道腳架往後位移 5 公分	5-16
圖 5-27 儀器軌道腳架往後位移同調性成果	5-17
圖 5-28 儀器軌道腳架往後帶寬 200MHz 位移同調性成果	5-17
圖 5-29 儀器軌道腳架往後帶寬 400MHz 位移同調性成果	5-18
圖 5-30 耗電量測試現場照片	5-19
圖 5-31 待機與軌道移動時即時耗電量	5-19

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 SAR 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-SAR 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 SAR。另一方面，因 SAR 數據處理流程之差異，故 GB-SAR 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-SAR 極有潛力使用於邊坡與土石流預警機制的建置。

本計畫於 109 年度引進 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，期望 GB-SAR 技術可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。

事實上，109 年台灣南部並無豪大雨或颱風事件，降雨量遠低於往年紀錄。GB-SAR 分別在上述三個區域外，另外對花蓮舞鶴台地旁活動崩塌地進行監測，所獲得監測成果均顯示無明顯位移或為雜訊(植被)。根據監測結果，我們另外總結單次監測工作之標準工作流程，並且瞭解到環境因素(邊坡坡度、坡向、植被覆蓋)、監測距離、水平解析度、以及儀器本身放置的位置，分別對監測工作以及多次監測成果檢視造成了莫大的限制，其中，以植被的限制為最。

為了突破上述限制，本年度計畫的重點將分別著重於(1)研究輔助的方法(如覆蓋帆布)協助 GB-SAR 突破植被覆蓋區域的限制，使得 GB-SAR 在有植被邊坡可以進行微變動監測；(2)持續以固定頻率(2~3 週一次)對選定邊坡進行監測

本團隊認為，若在植生邊坡上鋪設一張以上、合適大小的帆布，

帆布之表面黏有可加強反射訊號之材質，應可作為雷射訊號的強反射源。至於適合用於帆布表面之材質，則為另一個需測試的課題。經初步測試(鋁箔、木頭、沙土、一般磚牆)結果顯示，鋁箔表面反射的訊號，強度較其他的材質為強，其強度差甚至為一個數量級。因此，若於邊坡上固定合適面積的強反射材質，或可以彌補植生覆蓋下訊號散射成雜訊的問題。

帆布覆蓋的另一個好處為，覆蓋區域可以長期維持植被不會生長，其荷重小不會造成邊坡負荷過大，若附加特定材料以維持訊號強度，長時間下來可作為穩定的反射點，反應邊坡區域的微變動。

此外，為實際瞭解降雨事件對邊坡的影響，本年度亦將選擇合適的降雨事件(如梅雨)對特定邊坡進行短期(1 日~數日)的連續監測工作，除瞭解在降雨過程中，邊坡實時的變化過程，並可測試在雨中進行 GB-InSAR 監測的可行性。

最終，所獲得誤差影響到最小的微變形監測數據，亦將與降雨及地震進行比對，以瞭解外在擾動對於案例邊坡微變形之相關性。

第二節 計畫項目與內容

本計畫擬精進 GB-SAR 監測技術，並將之應用於建構邊坡崩塌預警系統。具體目標為(1)透過覆蓋特殊材質之帆布，克服植生邊坡無法進行 GB-InSAR 監測的限制；(2)於降雨事件過程中，對滑動邊坡進行 GB-InSAR 微變形監測；(3)瞭解邊坡微變形對於降雨與地震之相關性。

第二章 文獻回顧

第一節 地基合成孔徑雷達原理

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 2-1。

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 2-1。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 2-2 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 2-3，計算其相位差與微變化量。

表 2-1 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

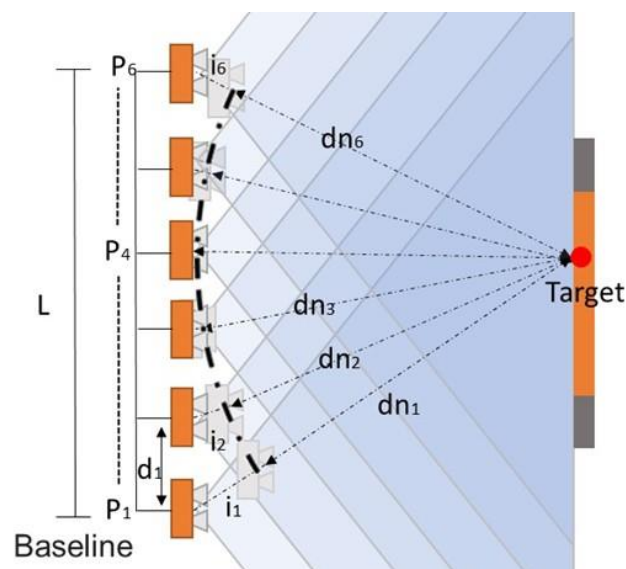


圖 2-1 雷達合成孔徑示意圖

(本研究繪製)

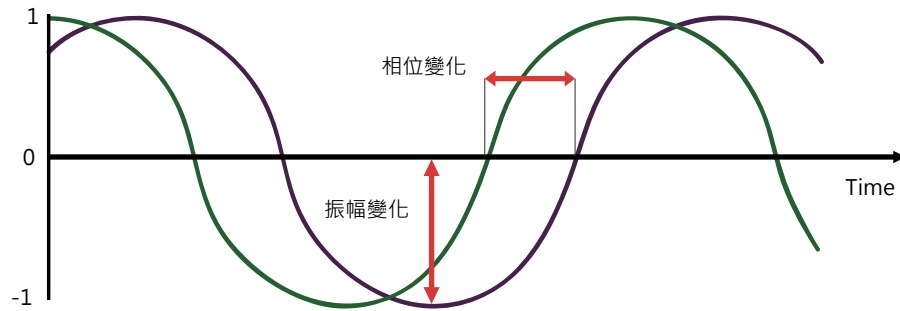


圖 2-2 雷達回波相位差示意圖

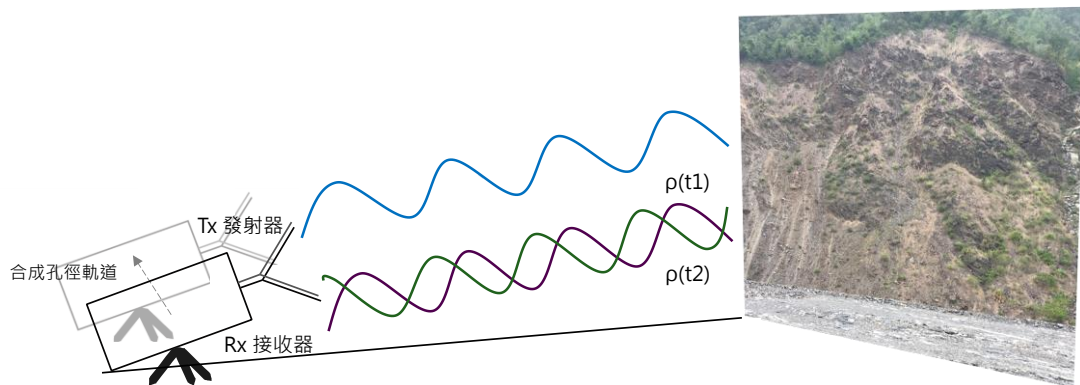


圖 2-3 地基合成孔徑雷達影像生成示意圖

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 2-4)，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，又稱為地基差分干涉合成

孔徑雷達(Ground Base Differential InSAR, GB-DInSAR)。

星載雷達影像相位干擾因子

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

GB-SAR相位干擾因子

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

圖 2-4 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

$\Delta\varphi_n$ ：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_γ ，選取那些平均同調性大於等於此閾值 ($\bar{\gamma} \geq T_\gamma$ 或 $\bar{\gamma} > T_\gamma$) 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 2-5，在連續掃描時改變訊號發射頻率，如圖 2-6 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，即可將各別訊號處理為強度與距離關係。

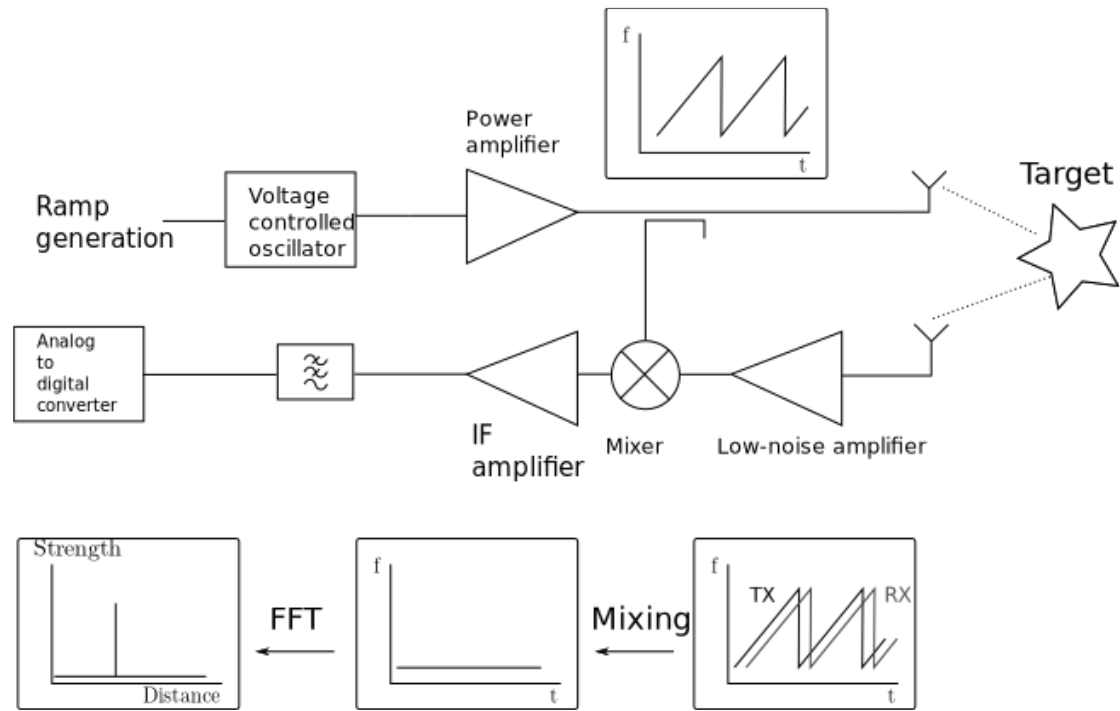


圖 2-5 FMCW 原理示意圖

(Forstén, 2017)

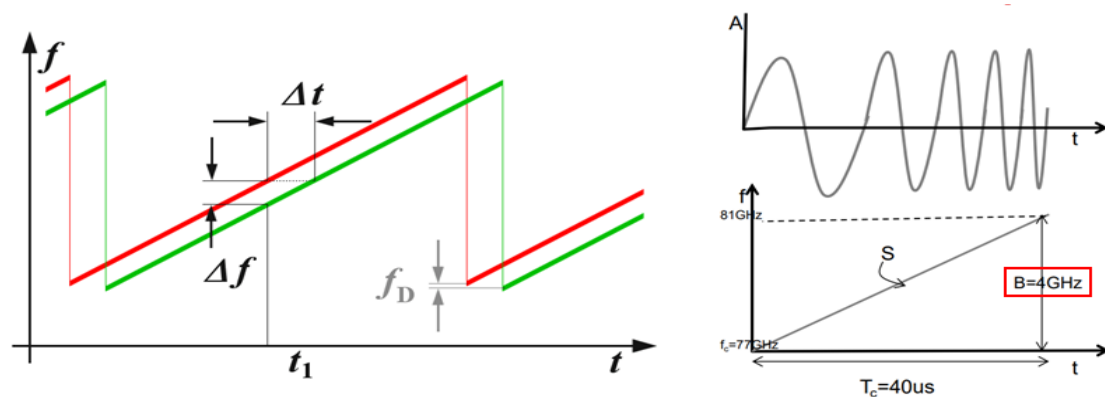


圖 2-6 透過改變電壓調整信號頻率

(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 GB-SAR 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 2-2。

表 2-2 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	GB-SAR	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	GB-SAR-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, Bw)，而帶寬影響 GB-SAR 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 $K = Bw/Pw$ ； Pw 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 2-7，可發現水平方向解析度隨著距離遞減。

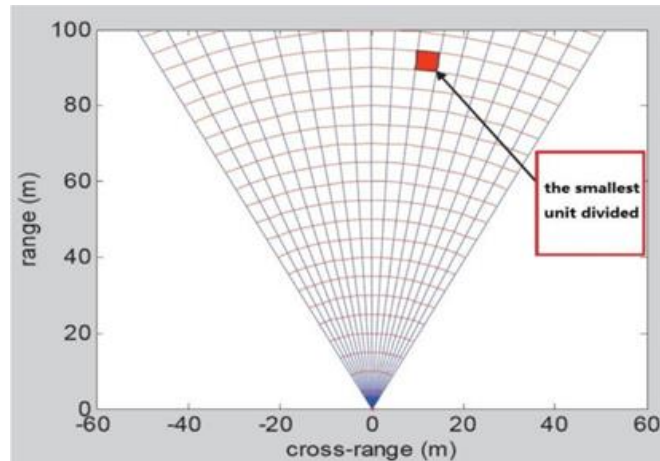


圖 2-7 地基合成孔徑雷達掃描範圍圖

本研究採用之地基合成孔徑雷達系統(GB-SAR-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 2-3。

表 2-3 本研究使用之 GB-SAR 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 2-4。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 2-5。帶寬(Bw)與脈寬(Pw)將影響最大掃描距離如表 2-6。

表 2-4 視距方向理論解析度

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

表 2-5 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
$\Delta CR = R * (\lambda / 2L)$ $\lambda = 1.7$ cm $L = 160$ cm	

表 2-6 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
Dmax = $f_s \cdot c / 4K$; $f_s = 0.6\text{MHz}$; $c = 299,792,458 \text{ m/s}$; K = Bw/Pw		

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。

表 2-7 GB-SAR 監測特性表

反射物	良好雷達反射體		
目標	可通視，正交為佳		
視距	70 公尺	2 公里	
解析度	37 公分	10.72 公尺	
範圍角度	18°	33°	48°
監測最快週期	2 分鐘/組	4 分鐘/組	6 分鐘/組
降雨	降雨可監測		
夜間	不受日夜影響		

第二節 地基合成孔徑雷達應用實例

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 2-8 所列為比較結果。

1. 星載 SAR 影像

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。

2. 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。

3. 地面光達(Lidar)

掃描工作受到地形影響；重複測量時間短；測量精度為公分等級；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 2-8 比較星載 SAR、GB-InSAR、GB-Lidar 於不同項目之特點

項目	星載 SAR (哨兵一號)	GB-InSAR	GB-Lidar
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	快	快
測量間隔 (週期)	長，6~12 天	短，數分鐘	數分鐘
測量精度	公分	0.2 公釐	8 公釐
植被影響	有，中等(視波段)	有，嚴重	較少
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 地基合成孔徑雷達應用於邊坡實例

最早在 2003 年，Tarchi 等人將 GBSAR 應用於滑坡進行監測，並將其與當時常規的變形測量工具做比較後，驗證 GBSAR 對於滑坡監測為有效工具，而後相關研究也紛紛提出。

Pieraccini 等人在 2019 年針對 1993 年至 2018 年，這近二十五年期間共 415 篇相關文獻進行統計，如圖 2-8，其中有 40% 的案例為針對邊坡的相關研究。在國外，此種監測方式已廣泛應用，下列以四個邊坡監測應用實例做介紹。

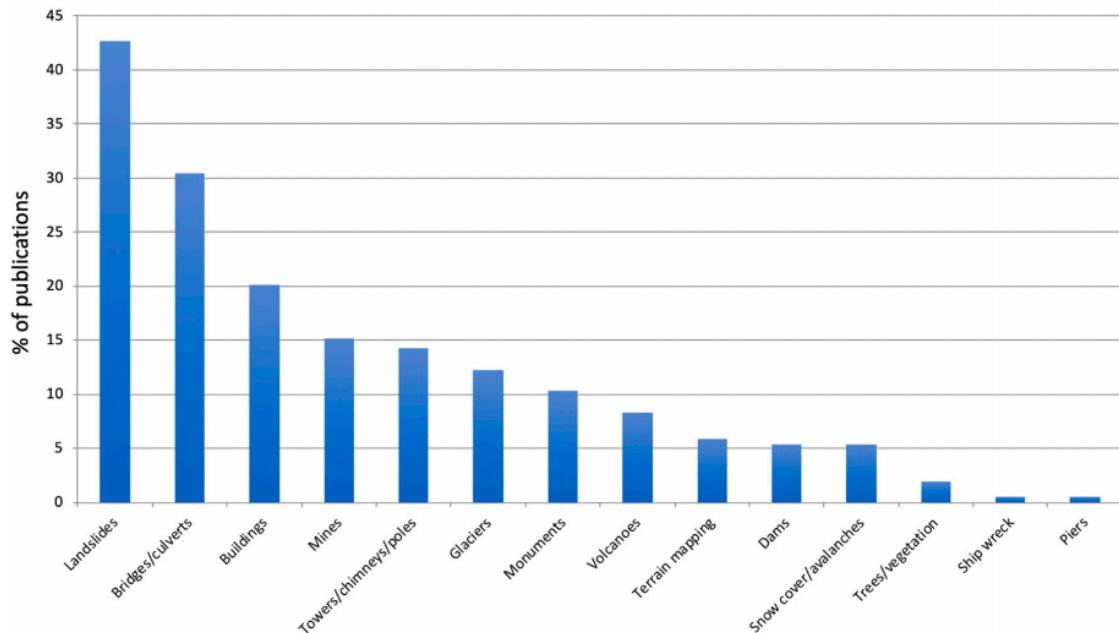


圖 2-8 截至 2018 年 12 月，統計 GBSAR 發表文獻之應用
(Pieraccini, 2019)

Lombardi 等人在 2015 年於義大利南部監測一因連日強降雨造成的山體滑坡，監測目的為分析滑坡的地貌與運動特徵，以評估二次災害風險；提供即時預警系統，確保參與施工工人之安全。結合地面光達綜合監測，並於緊急計畫中訂定兩個位移閾值與兩個速度閾值。

Carlà 等人在 2016 年於義大利阿爾卑斯山西北部滑坡進行 GBInSAR 八個月的監測，並結合十三年的 GNSS 資料與三年半的衛星 InSAR 資料，集結整合提供了滑坡變形運動的綜合視圖，成果以推斷其滑動機制與特徵，使人們對於難以進入的高山邊坡有更深入的了解，提高防災、救災之能量。

曾濤等人在 2017 年於貴州一處崩塌地進行變形監測。此邊坡在發生大規模崩塌後，持續又發生若干次小規模滑坡，因此架設 GBInSAR 進行即時監測，在二次災害發生前做預警之用。在九天的監測成果中，可以清楚顯示何處形變量較大，處於不穩定狀態，並在監測過程中，觀察到在某時間段內區域明顯的變形加速，隨後發生崩塌，說明了 GBInSAR 進行滑坡災害預報預警的可行性。

吳星輝等人在 2018 年北京山區公路發生崩塌後，為搶通施工及

提供安全保障，進行 GBSAR 的監測。將監測邊坡影像分為三個區域，分別為頂部岩體、下部滑移體及滑移側翼的鬆散層。在每一區域之形變結果圖中分別選定特徵點，觀察其累積形變量。可了解其不同區域的形變狀況，也觀察到降雨期間，累積形變會明顯上升。

綜合以上各案例，可知在國外有許多地基合成孔徑雷達監測自然邊坡之相關研究案例，並常以提供即時預警系統、防止災害發生造成生命安全損害、觀察邊坡滑動類型機制等為目的。故期望於台灣進行相關研究，以提高台灣山區邊坡之防救災能量。

第三章 執行方法與步驟

第一節 執行方法

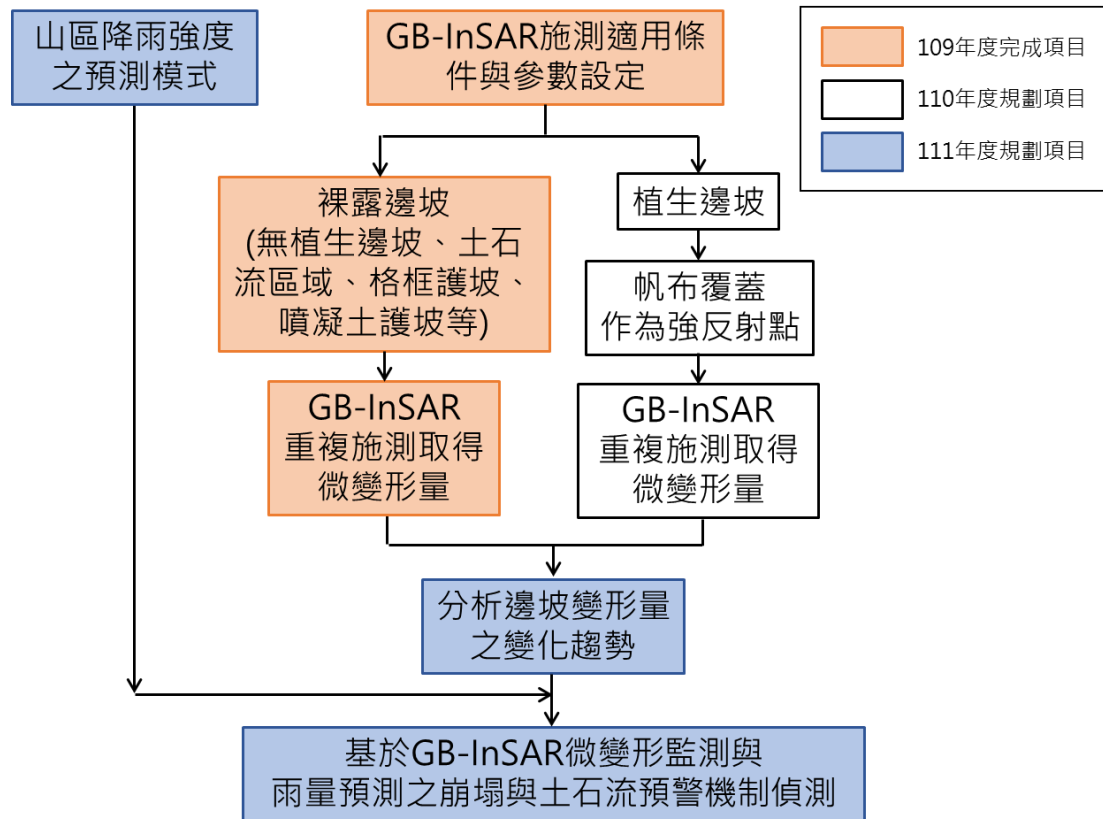
一、工作執行方法

本計畫目的為挑選合適的天然或人為整治過後的邊坡進行多次重複測試，利用 GB-SAR 之即時敏銳監測微變動的優點，協助建立更周延之邊坡與土石流預警。計畫流程圖示於如圖 3-1 中。

實行步驟與方法：

1. 選擇 1~2 個有植生的邊坡，以合適大小的帆布鋪設在植生邊坡之上，上黏可加強反射訊號的材質，做為雷達訊號的強反射源。
2. 以設計試驗的方式，實測雷射入射角與標的物材料性質的差異，對於 GB-InSAR 觀測之影響，並對此兩變因訂定操作的容許值。(110 年度)
3. 挑選兩處合適邊坡進行測試，以自然邊坡為優先考量；另挑選經過護坡工程、且有滑動疑慮(現象)之人工整治邊坡為優先考量，監測頻率為每兩~三個星期一次，另外，強降雨或強烈地震後亦將啟動監測。(110 年度)
4. 於降雨事件中，挑選合適條件的邊坡(裸露、無植被、常被報導有崩塌事件者)進行短期(1 日~數日)之連續觀察，實際瞭解降雨過程中，雨量對邊坡的影響以及邊坡微變動的過程。
5. 將邊坡微變形的資料，搭配所收集的雨量站與地震站觀測資料，評估微變形量與外在擾動之相關性，其結果除可用來建構基於 GB-InSAR 微變形監測之崩塌預警系統外，亦可瞭解目前設定的監測頻率是否能滿足需求。(110 年度)
6. 以致災事件前之 GB-InSAR 觀測數據與相關參數建構崩塌(或警戒)之滑動門檻值。(111 年度)
7. 依據累積資料評估不同(崩塌)邊坡參數所對應之臨界降雨量。(111 年度)

8. 建構山區降雨強度之預測模式。(111 年度)
9. 建構基於 GB-InSAR 滑動觀測與雨量預測之崩塌警戒模式。(111 年度)



第二節 研究區簡介

本年度的研究重點在確認鋪設帆布是否可有效進行 GB-SAR 監測。研究場址選擇為 1. 高雄市桃源區寶來村與荖濃溪相對之山坡地、以及 2. 臺南市龍崎牛埔泥岩水土保持園區。

一、高雄市桃源區寶來村

高雄市桃源區寶來約於台 20 線 78.5K 位置，位於荖濃溪左岸之堆積坡位置；對向(荖濃溪右岸)之攻擊坡位置(位於寶來一號橋與二號橋之間)為一大規模崩塌地。

2008 年莫拉克風災後，寶來村狀況與小林村不同，並沒有直接受到土石流襲擊，而是對面山坡地大規模崩塌，引起河道堵塞、沖垮對外橋樑，使寶來村變成孤島，之後河水暴漲、堰塞潰堤，泥水衝進寶來村，造成村民財產損失。儘管不如小林村嚴重，仍重創了寶來村經濟(莊文星，2012)；林穎東與張國楨利用 eCognition 軟體和 ENVI 軟體對本崩塌地進行分析，認為該崩塌地從 2009 到 2015 年，崩塌地已縮小 50%面積，但是在河道攻擊坡仍呈現不穩定，甚至擴大崩塌的趨勢；另藉由模擬發現，最有可能發生崩塌地的位置，多集中在舊崩塌地冠部及坡腳處(林穎東，2018)。

本研究透過 Google Earth 軟體，蒐集該邊坡 2010 年至 2017 年之衛星影像，以人工方式確認該崩塌地逐年發育。觀察到以坡頂部位在 2015 年起之影像變化最明顯；坡址位置因河道整治、疏浚工程，在影像上面並沒有如坡頂一般有顯著變化(圖 3-3、圖 3-4)。

藉由查詢中央地質調查所網站，得知本監測區域邊坡，主體由晚中新世長枝坑層組成，東側與早~中中新世樟山層接觸，西側與全新世階地沖積層接觸(圖 3-2)；下文將分別簡短介紹邊坡主體長枝坑層、以及樟山層相關地質背景資訊。

長枝坑層：由何春蓀(1956)辨識，標準剖面位於嘉義縣大埔鄉長枝坑；岩性主要以砂頁互層為主，偶爾有厚層泥質砂岩、泥岩，夾透鏡狀玄武岩質凝灰岩；沉積環境為遠濱相(陳文山等人，2016)。本層屬於西部麓山帶南部地質區，其之下為紅花子層，以上為糖恩山砂岩，

均為整合接觸。相對地質年代，於地層上部鑑定出超微化石種屬 *Discoaster quinquerramus*，年代分類屬於 NN10~NN11，晚中新世初期。

樟山層：由詹新甫(1964)辨識，標準剖面位於高雄桃源區樟山，分布於荖濃溪中上游六龜至樟山之間。岩性為硬頁岩與板岩為主；夾透鏡狀砂岩，與低度變質砂岩互層。本層有 50~100 公尺的枕狀熔岩。本層鑑定有超微化石種屬 *Sphenolithus belemons*、以及 *S. heteromorphus*，屬於 NN3~NN5 帶，年代屬於中中新世早~中期。本地層屬於中央山脈地質區，西側廬山板岩帶地層。

由於上述二地層於岩性上有所差異，其在地形方面呈現將略有不同：長枝坑層因為多砂頁互層，其岩性受到較弱的一方控制，因此屬於長枝坑層的邊坡較容易觀察到崩塌，樟山層在本區域因受到較密集植被覆蓋，其裸露部位、以及與長枝坑層交界處較不易觀察到，需要進一步進行調查才能夠進行辨識。由於該二地層，在地質上分屬於西部麓山帶及中央山脈西斜面地質區，因此或可在本區域觀察到二地層接觸之不連續面，於地形或植被覆蓋種屬差異應可約略辨識出來。

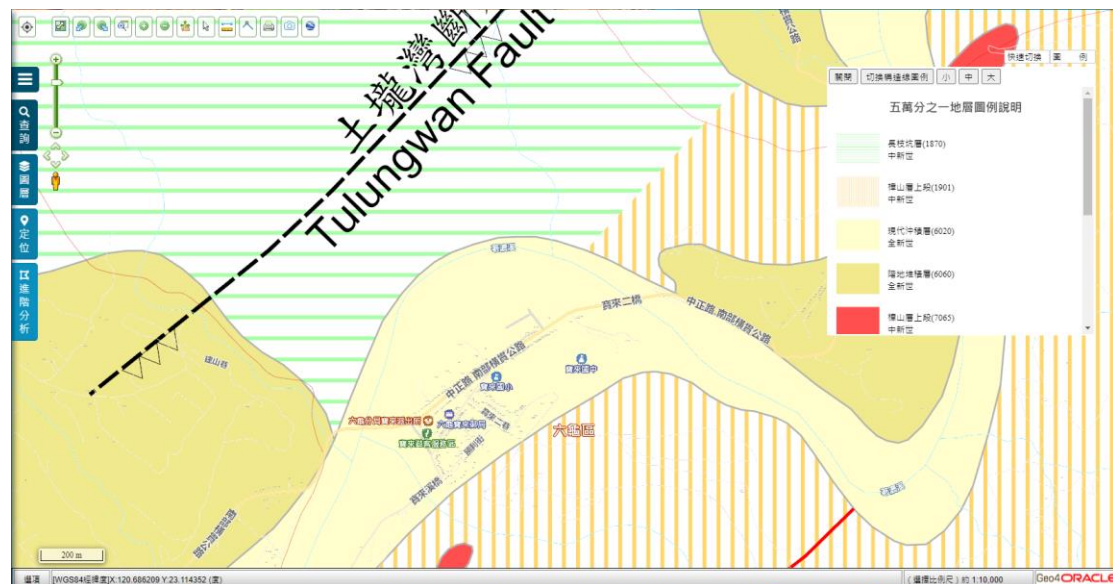


圖 3-2 經濟部中央地質調查所公告之寶來研究區地質分布圖



圖 3-3 寶來研究區現場邊坡概況



圖 3-4 荖濃溪右岸邊坡 2010 年～2017 年變遷圖(Google Earth 影像)

下圖 3-5 為本研究初擬定監測位置(相片拍攝時間,2020 年 11 月 17 日);現場距離崩塌地約為 300 公尺(坡址)至 800 公尺(坡頂),且具備電源,適合本研究進行帆布覆蓋測試、以及雨季來臨時進行短期(1 日~數日)的監測工作。



圖 3-5 本研究選定之 GB-SAR 儀器監測位置(寶來)

二、臺南市龍崎區牛埔里

惡地地形主要由古亭坑層泥岩所組成，地層年代橫跨上新世與更新世。由於泥岩之物理特性比其他岩類為弱，故容易受到降雨侵蝕影響，產生蝕溝、以及光禿尖銳的山脊(圖 3-7)；植物難以附著於其上，常見植物為刺竹或芒草等禾本科芒屬類的植物。

由於泥岩易受降雨侵蝕影響，易產生變動；同時植被覆蓋較其他類型邊坡為稀少，故選為 GB-SAR 試驗目標。

本區域地層為古亭坑層，岩性以泥岩為主沉積環境為外遠濱環境(圖 3-6)；偶夾薄層砂岩，推測可能為單一風暴事件，因較高能量而輸送粒徑較大之粉砂，砂泥比率小於 1/10。台灣地質學界對於古亭坑層的研究較多，定年結果較為明確，化石鑑定及磁地層研究顯示，本區域之地質年代介於晚上新世至早更新世。

由於本區域岩性以泥岩為主，容易受到雨水侵蝕而產生蝕溝；地形因為流水下切與地形快速抬升，進而發育出坡度較為陡峭而裸露之邊坡。



圖 3-6 經濟部中央地質調查所公告之龍崎研究區地質分布圖



圖 3-7 本研究選定之 GB-SAR 儀器監測位置(牛埔)

第四章 計畫執行進度說明

「固定式」監測意思為進行 GB-SAR 監測期間並無移動軌道或雷達機，有別於本計畫另嘗試之「巡迴式」監測，巡迴式代表透過地面噴漆定位，單次監測完成後，將軌道搬運回收直至下次監測再將軌道放回原處。計畫執行期間至期末報告時，於 2 個目標區進行 22 次儀器架設與掃描(高雄市桃園區寶來村 11 次、臺南市龍崎區牛埔月世界 11 次)，並使用光達分別對兩個目標進行掃描建模 1 次，在後續資料處理步驟時建立 3D 影像，以方便瞭解與展示 GB-SAR 監測影像中，目標區域的位置。表 4-1 為截至期末報告前，歷次 GB-SAR 工作時程一覽：

表 4-1 GB-SAR 工作時程紀錄

地點	日期	3 日累積降雨(mm)	掃描組數	起迄時間	監測時間	前五日周遭有無地震	備註
高雄寶來	2021/02/26	0	12	11:07~14:19	3 hrs 12mins		*光達掃描
	2021/03/26	8.5	12	11:45~13:42	1 hr 57mins	✓	
	2021/04/13	0.0	12	11:03~12:54	1 hr 51mins		
	2021/05/04	0.0	12	11:08~13:01	1 hr 53mins	✓	
	2021/05/18	0.0	12	11:39~13:30	1 hr 51mins	✓	
	2021/06/11	57	10	11:08~12:45	1 hr 37mins		
	2021/07/02	38.5	11	11:07~13:00	1 hr 53mins		*邊坡不穩 *累積雨量(寶來無資料，因此使用附近六龜測站之數據)
	2021/08/17	6	10	11:04~12:35	1 hr 31mins	✓	*邊坡不穩
	2021/08/31	1.5	10	11:04~12:50	1 hr 46mins		
	2021/09/06	36.5	10	11:59~13:34	1 hr 35mins	✓	*邊坡不穩
	2021/09/28-2021/09/29	0	105	09/28 13:02~09/29 09:55	20 hr 53mins		跨夜監測
臺南龍崎	2021/03/30	0.0	11	10:43~11:46	1 hr 03mins		*光達掃描
	2021/04/23	0.0	11	10:21~11:24	1 hr 03mins		
	2021/05/06	0.5	11	09:14~10:15	1 hr 01mins		
	2021/05/21	0.0	11	10:47~11:48	1 hr 01mins	✓	
	2021/05/31	63.0	12	10:38~11:49	1 hr 11mins		*降雨觀測
	2021/06/15	0.5	10	10:44~11:39	0 hr 55mins		
	2021/07/06	7.5	11	10:16~11:18	1 hr 02mins		
	2021/07/27	74	10	10:07~11:02	0 hr 55mins		
	2021/08/12	81	12	11:32~12:43	1 hr 11mins		
	2021/09/02	3	11	10:27~11:29	1 hr 02mins		
	2021/09/17	9	10	10:51~11:58	1 hr 0mins		

*雨量選取鄰近測站：高雄寶來：C1V231 高中；臺南龍崎：C00960 崎頂

(資料下載：<https://e-service.cwb.gov.tw/HistoryDataQuery/>)

第一節 高雄寶來

選定於荖濃溪左岸之堤防內進行 GB-SAR 觀測，位置如圖 4-1 紅色標籤位置，該點位可通視大部分邊坡。已知該地區邊坡常有崩落或滑動情形，透過定期觀察邊坡情況，確認邊坡穩定情形分為「無明顯變化」與有「局部變化」進行說明。本計畫於 2021 年 7 月 2 日、8 月 17 日、9 月 6 日、以及 9 月 28 日、29 日有觀察到邊坡持續位移情況，詳細說明如後。實際現況河道於今(2021 年)年度有整治施工，將河床土石改置於河岸邊，堆疊與堤防等高，導致邊坡下方於 6 月與 7 月觀測資訊變少，也使得原本放置帆布之區域無法觀測，如圖 4-2 與圖 4-3。



圖 4-1 高雄市桃源區寶來村 GB-SAR 架設位置



(2021/02/26)



(2021/07/02)

圖 4-2 高雄寶來現地照片



(2021/05/18)



(2021/06/11)

圖 4-3 高雄寶來現地照片(續 1)

經現場確認儀器架設位置與目標視距介於 260 至 500 公尺，儀器架設於河岸邊通視良好，掃描五個角度(60 度、75 度、90 度、105 度與 120 度)，使用之天線寬度為 18 度，預設各角度有 3 度的重合，整個視角單次掃描方位角自 51 度至 129 度(正前方為 90 度)，橫跨約 78 度，如圖 4-4。

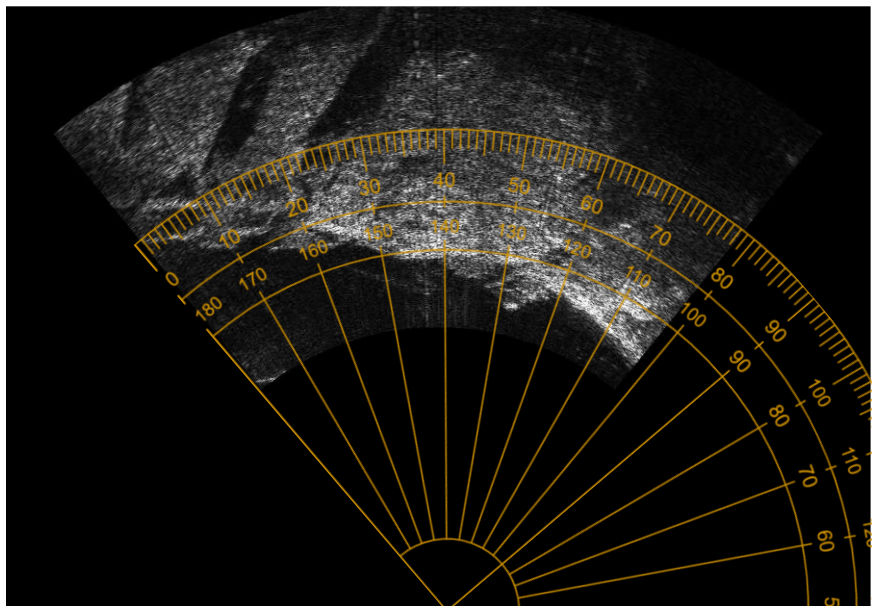


圖 4-4 高雄寶來工作區雷達回波涵蓋範圍

儀器其他使用參數說明如表 4-2，掃描週期約 11 分鐘，帶寬(BW)為 400MHz (作用頻率為 17,000 MHz 至 17,400 MHz)，方向解析度達 0.37 公尺，水平解析度則每網格為 1.41 至 2.72 公尺。

表 4-2 高雄寶來使用 GB-SAR 參數

波長	Ku-band(約1.7cm)
掃描距離	260m ~ 500m
掃描週期	11分鐘 (5個掃描角度)
方向解析度	0.37 m (bw:400)
水平解析度	距離 260m : 1.41m
	距離 500m : 2.72m

由於雷達回波屬於距離成像與實際照片位置會有所差異，本研究依據距離與地物特徵經驗，將雷達回波與現地位置進行對應，相關位置對應如下，以便確認資料位置與現地相對位置，透過同調性圖主要可判釋植被位置，植被覆蓋區通常同調性低，如圖 4-5。透過距離量測與雷達回波疊掩之特性，可知部分區域的土石流發生部與周圍邊坡有產生疊掩情形，如圖 4-6 箭頭所指黑色區塊處。

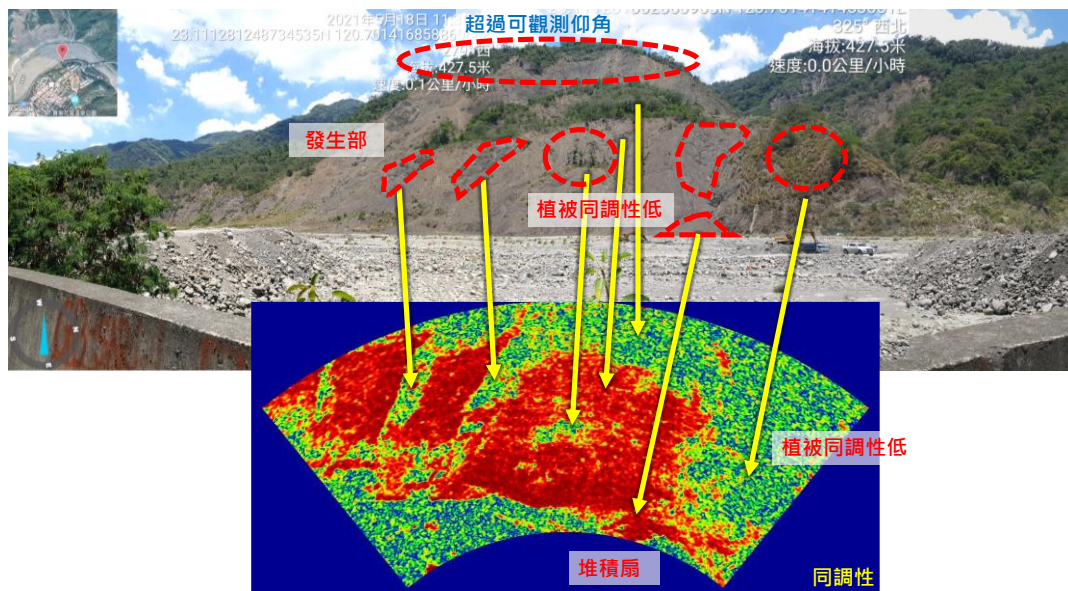


圖 4-5 同調性與現地位置判視圖(高雄寶來)

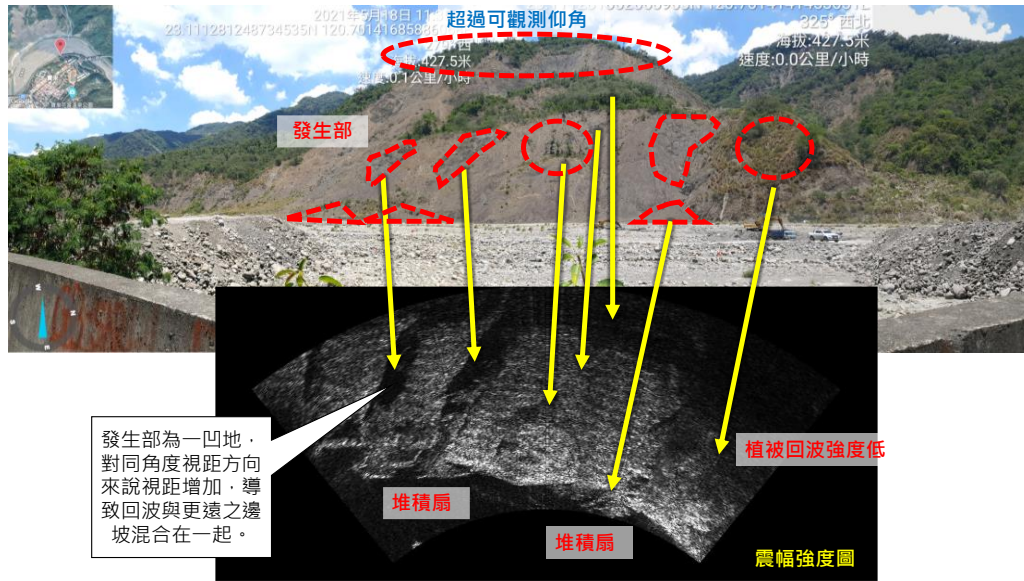


圖 4-6 震幅強度與現地位置判視圖(高雄寶來)

一、邊坡無明顯變化

本計畫至寶來地區每次觀測約 2 小時，其中於 2 月 26 日、6 月 11 日、以及 8 月 31 日，發現僅有數個網格有些許微幅變動，邊坡無明顯變化，各監測情況如圖 4-7 至圖 4-9。比較特別的是 6 月 11 日前三日累計降雨達 118.5 毫米，但是當日調查邊坡無明顯變化。

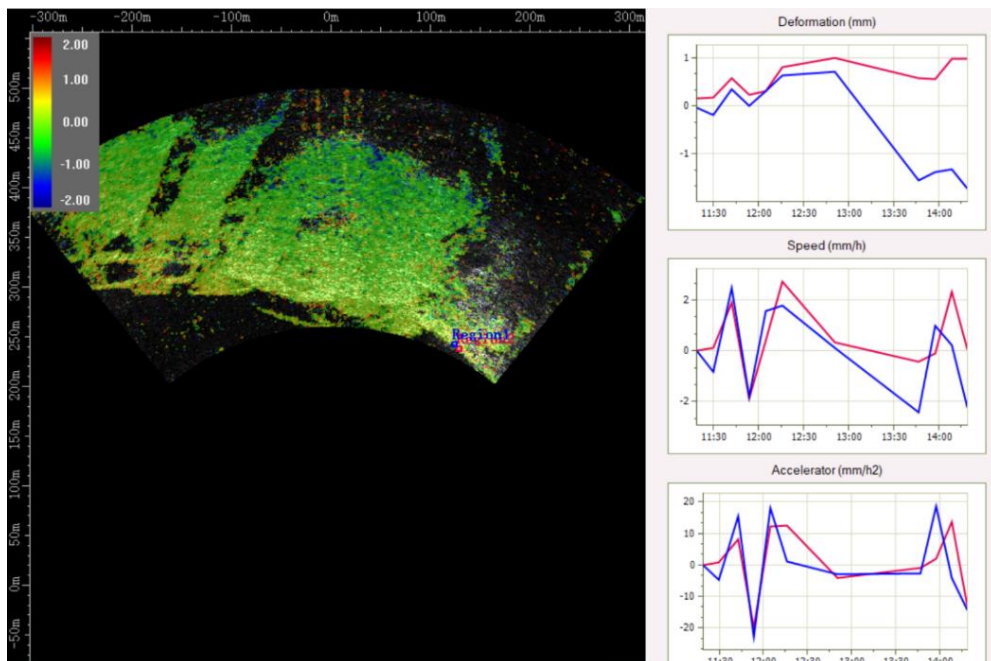


圖 4-7 高雄寶來當日累積變化量(2021/02/26)

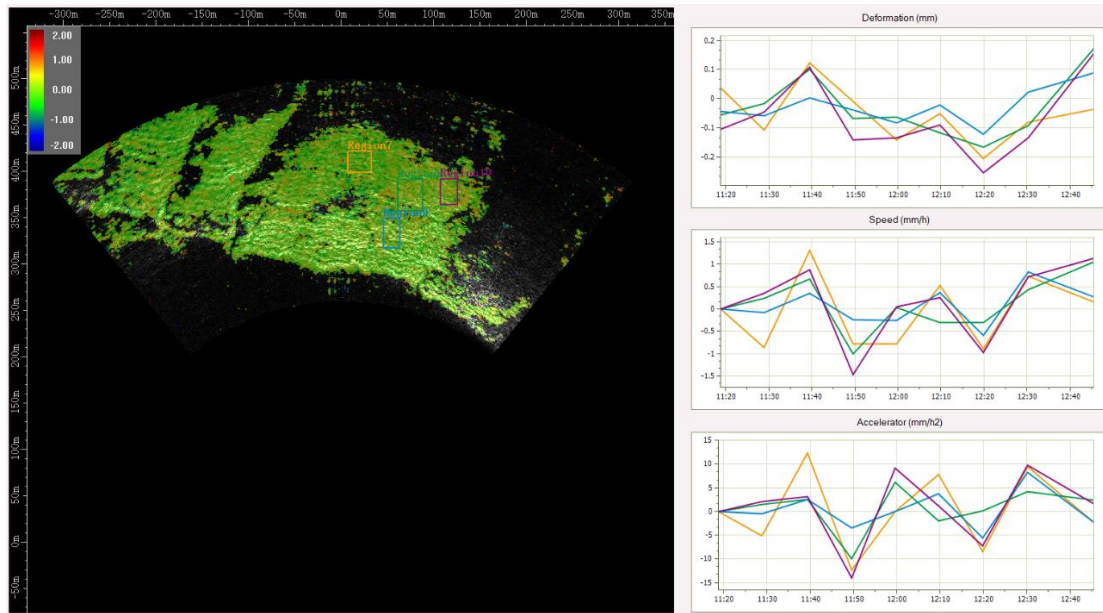


圖 4-8 高雄寶來當日累積變化量(2021/06/11)

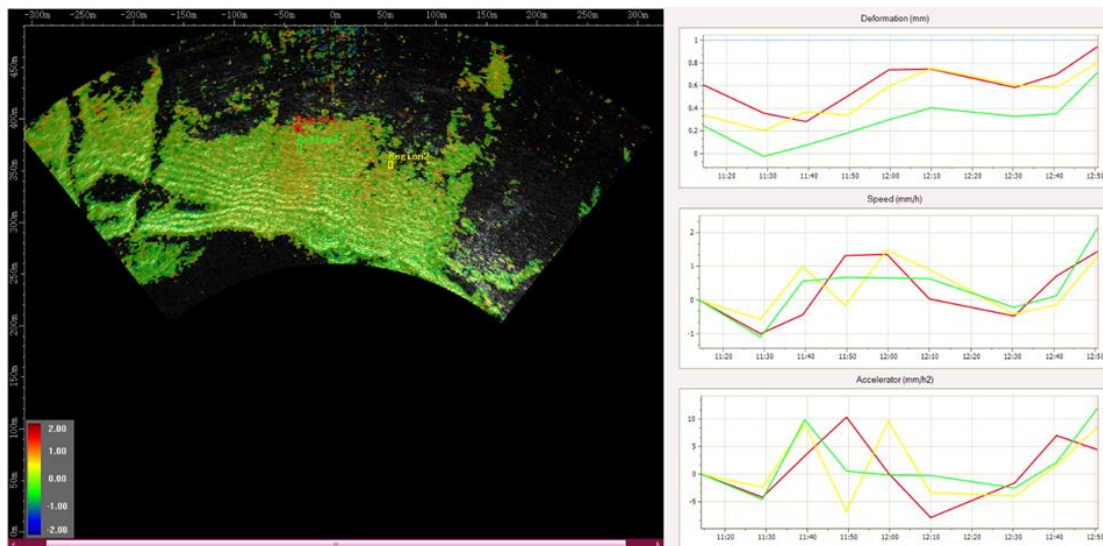


圖 4-9 高雄寶來當日累積變化量(2021/08/31)

二、邊坡有局部變化

本計畫於 3 月 26 日、4 月 13 日、5 月 4 日、5 月 18 日、7 月 2 日、8 月 17 日、9 月 6 日、9 月 28 日、以及 9 月 29 日，發現於觀測時間內，局部邊坡有明顯變動，分別說明如下。

3 月 26 日前三日累計有 6 毫米降雨，鄰近最近一次地震於 3 月 23 日規模 3.1 之地震，約 3 日前但震央距離實來較遠，如圖 4-10。GB-SAR 觀測之變動位置分布較為分散，可能是局部表面變化，如圖 4-11。

3月23日9時11分 規模 3.1 臺南市政府北偏東方 40.5 公里 (位於臺南市鹽水區)



圖 4-10 寶來地區鄰近地震(2021/03/23)

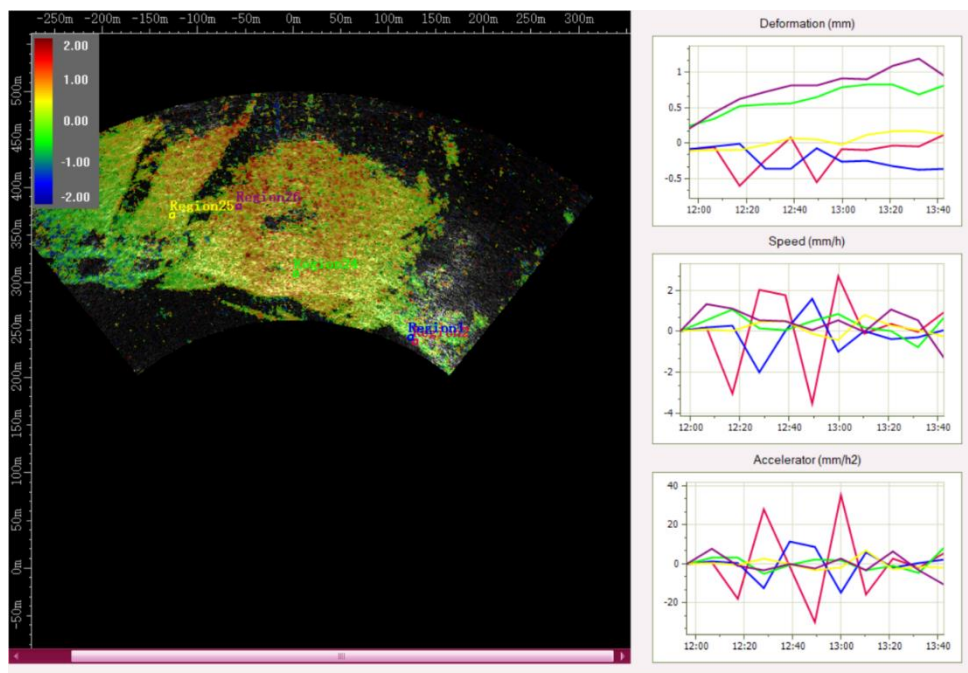


圖 4-11 高雄寶來當日累積變化量(2021/03/26)

4 月 13 日觀測前三日無降雨情況，鄰近最近一次地震發生於 4 月 5 日規模達 3.9，距離 8 日前，如圖 4-12，GB-SAR 偵測變動位置分布與 3 月 26 日相似，分布較為分散，可能是局部表面變化，如圖 4-13。

4月5日16時12分 規模 3.9 屏東縣政府東北方 24.4 公里 (位於屏東縣三地門鄉)



圖 4-12 寶來地區鄰近地震(2021/04/05)

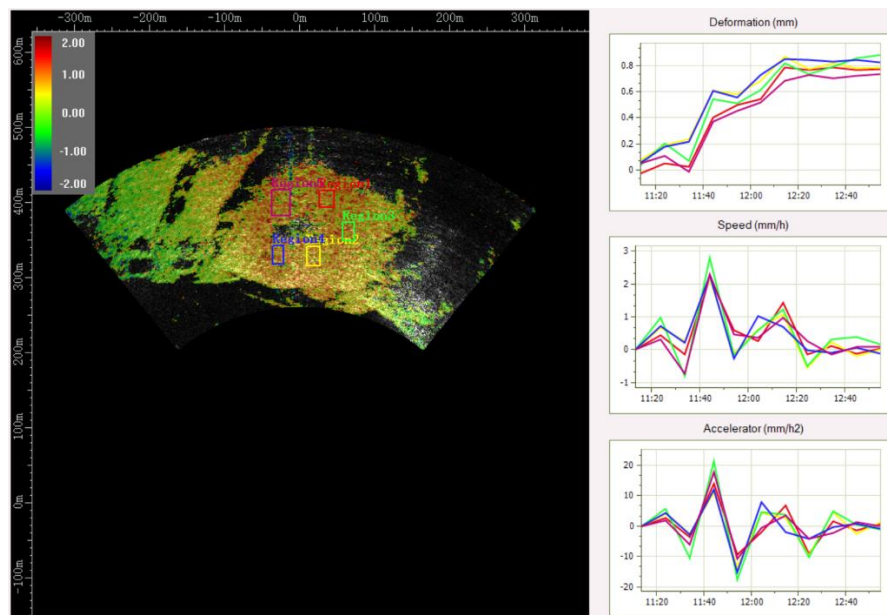


圖 4-13 高雄寶來當日累積變化量(2021/04/13)

5月4日觀測前三日無降雨情況，鄰近最近一次地震發生於5月2日規模達3.6，如圖4-14，變動位置分布與前幾次不同，主要集中於坡頂位置，如圖4-15。可能是距離地震時間較近，僅2日且震央距離前面幾次較近。

5月2日22時34分 規模 3.6 屏東縣政府東方 24.8 公里 (位於屏東縣霧台鄉)



圖 4-14 寶來地區鄰近地震(2021/05/02)

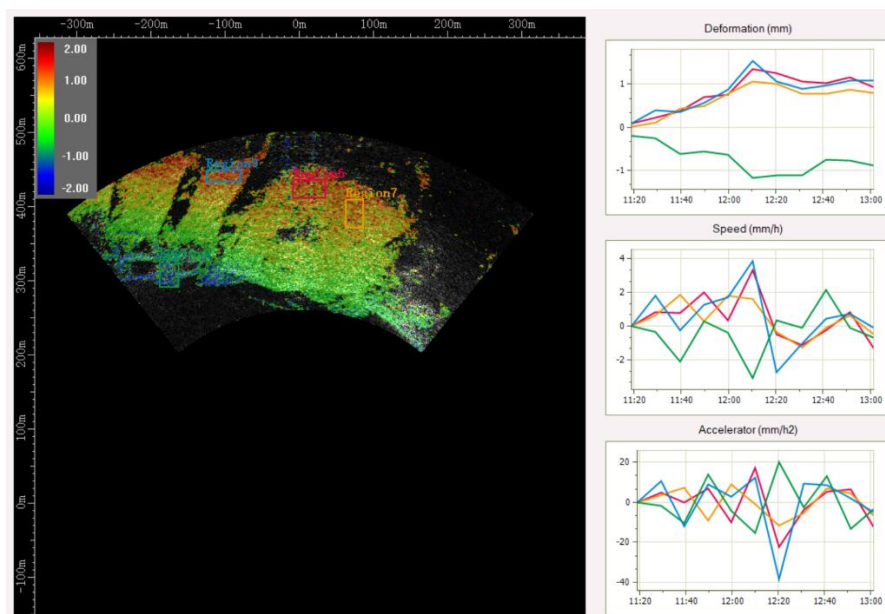


圖 4-15 高雄寶來當日累積變化量(2021/05/04)

5 月 18 日觀測前三日無降雨情況，鄰近最近一次地震發生於 5 月 8 日規模達 4.6，如圖 4-16，變動位置分布與 3 月 26 日相似，分布較為分散，可能是最近一次地震已經過了 10 日，僅剩下局部表面變化，如圖 4-17。

第033號 5月8日5時24分 規模 4.6 屏東縣政府東方 34.7 公里 (位於屏東縣霧台鄉)



圖 4-16 寶來地區鄰近地震(2021/05/08)

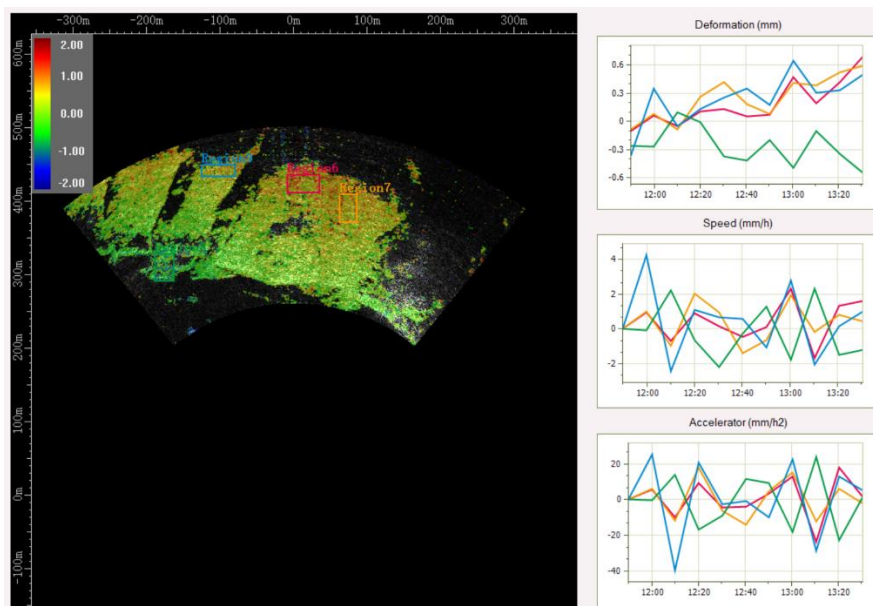


圖 4-17 高雄寶來當日累積變化量(2021/05/18)

7月02日發現於觀測時間約2小時內，局部邊坡有明顯變動，與前述位移型態有所差異，變動位於中央樹叢之右側邊坡，如圖4-18與圖4-19。自上午11點20分於觀測期間持續累積變形，累積變形量達2毫米，平均每小時變形量約1毫米。

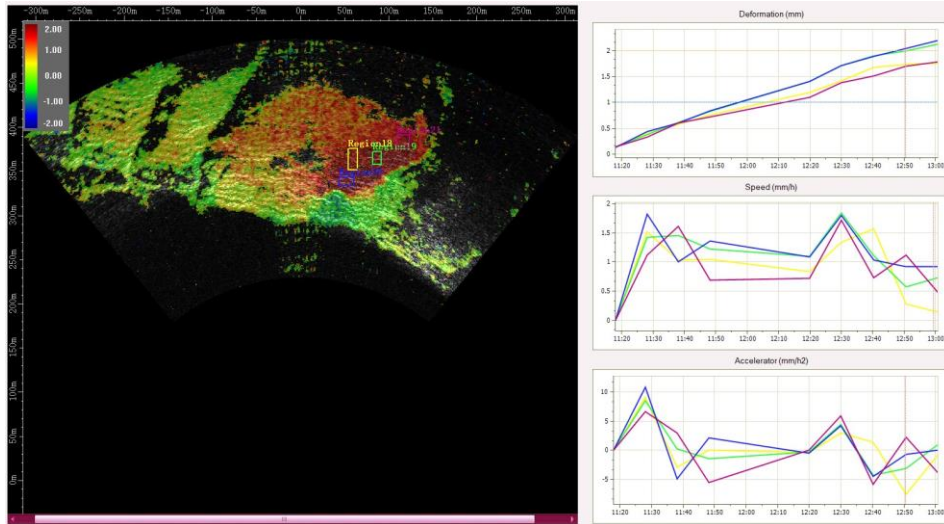


圖 4-18 高雄寶來當日累積變化量(2021/07/02)

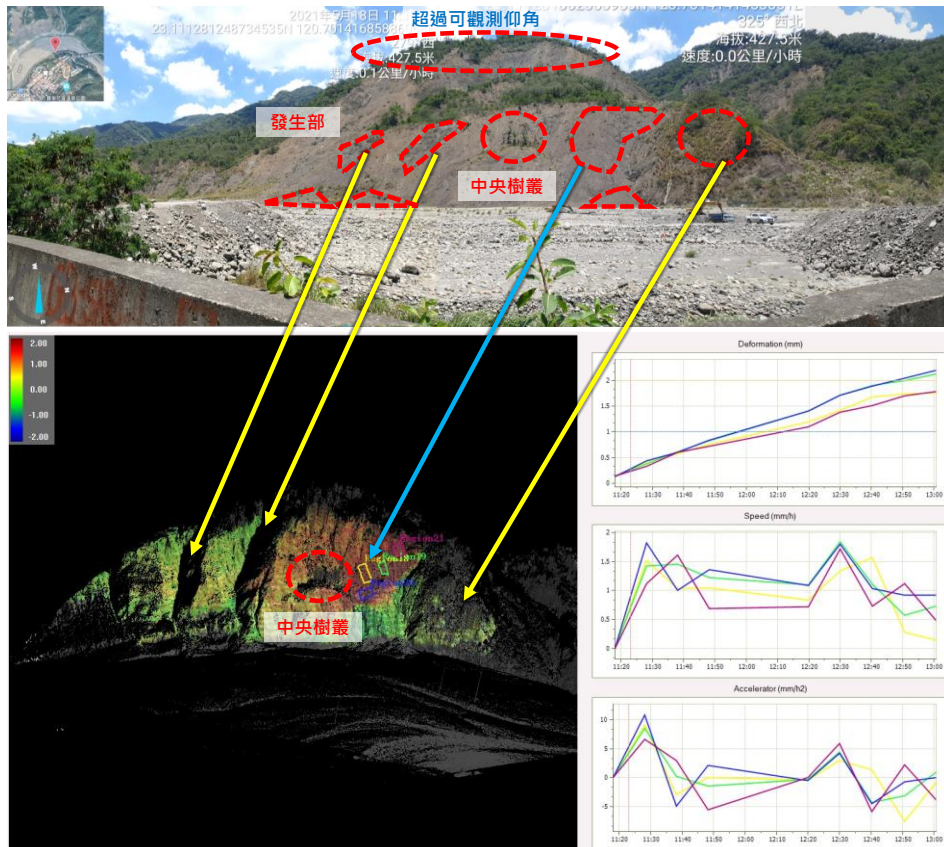


圖 4-19 高雄寶來累積變化量與現地對照圖(2021/07/02)

圖 4-20 為高雄六龜雨量站自 7 月至 9 月之每日降雨量整理結果；本區域從 7 月 5 日開始零星降雨，整體趨勢自 7 月 28 日開始上升，並於 8 月 1 日、8 月 17 日來到降雨最高峰，日雨量分別達到 446.5、以及 482.5 公釐。這一波連續降雨至 8 月 17 日告終。本研究團隊亦於 8 月 17 日當日進駐，進行例行性的掃描監測工作。

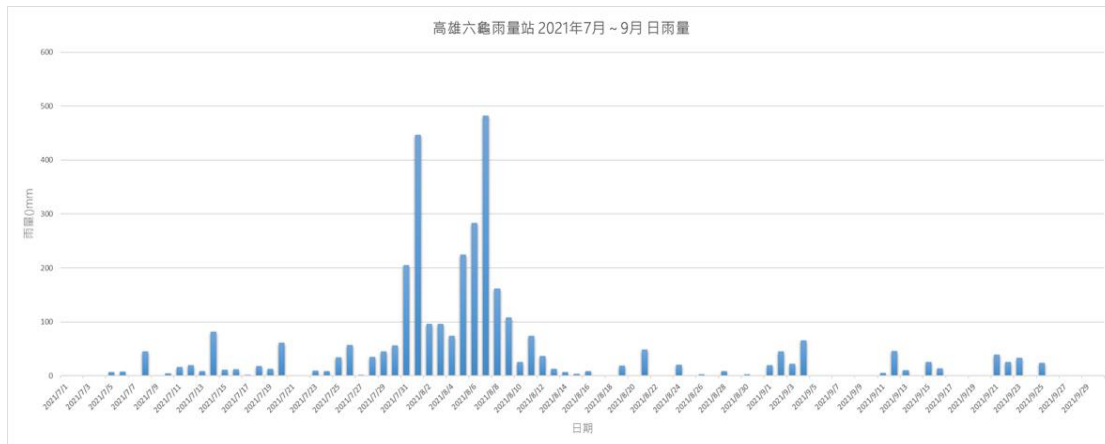


圖 4-20 高雄六龜雨量站測得 7 月至 9 月期間每日降雨量整理

本次監測工作前 5 日(8 月 12 日上午 10 時)，於高雄那瑪夏區有發生地震紀錄，於本監測點鄰近地區(高雄市桃園區)可觀察到最大震度為 4 級(圖 4-21)；地震結果合併降雨資料或許有影響所監測目標邊坡。

8月12日10時8分 規模 4 高雄市政府北北東方 77.8 公里 (位於高雄市那瑪夏區)



圖 4-21 寶來地區鄰近地震(2021/08/12)

由圖 4-22，8/17 日當日監測時間約為 1 小時 30 分，於現場觀察到邊坡上有 2 個小區域有明顯位移現象，累積微變動量分別來到 2mm、以及 1.75mm 左右。由 GB-SAR 觀察整體微變動範圍，可以清楚看到微變動邊坡的邊界以及形狀。

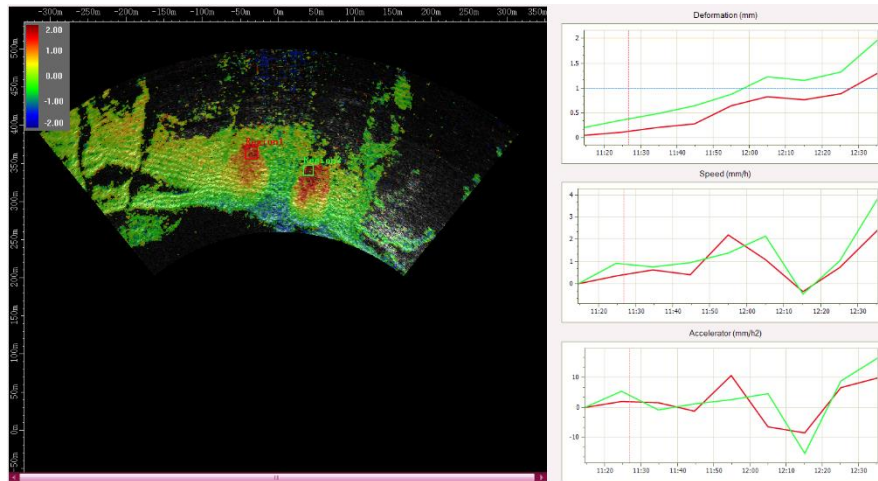


圖 4-22 高雄寶來累積變化量與現地對照圖(2021/08/17)

由圖 4-20 雨量記錄圖，可觀察到 9 月 1 日開始，六龜雨量測站即蒐集到新一系列連續降雨資料；其中以 9 月 4 日降雨量達到最大，共累計有 66 公釐雨量。另一方面，自 9 月 1 日開始，中央氣象局即記錄有高雄、台南、台東、花蓮等區域之地震記錄；其中規模最大者為 9 月 1 日發生於高雄那瑪夏區之地震，芮氏規模可達 4.9(圖 4-23)。

第091號 9月1日6時27分 規模 4.9 高雄市政府北北東方 82.4 公里 (位於高雄市那瑪夏區)



圖 4-23 寶來地區鄰近地震(2021/09/01)

由圖 4-24，9 月 6 日監測時間約為 1 小時 35 分。於現場觀察到邊坡上有 2 個小區域有明顯位移現象，累積微變動量普遍為 1 公釐左右，局部區域卻可以觀察到約 5 公釐的位移量。值得注意的是，本日監測發現明顯變化的區域，與 8 月 17 日觀察到的微變動區域類似，兩日唯一不同之處，在於本日的右側發生微變動的邊坡，其主要變動區域下移、加速，反映連續時間中，不穩定的邊坡的運動狀態之進展。

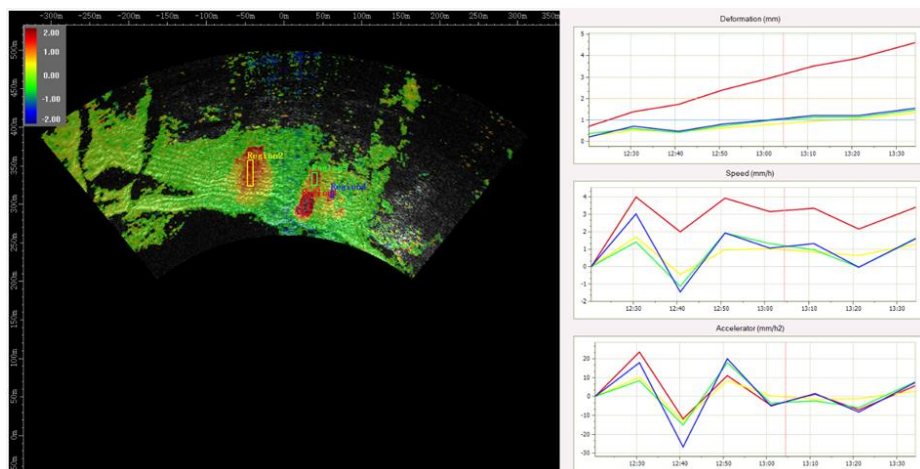


圖 4-24 高雄寶來累積變化量與現地對照圖(2021/09/6)

本觀測點最後一次監測工作日期為 9 月 28 日、9 月 29 日，為期兩天，總監測時間為 21 小時 8 分鐘，共取得 105 組有效影像。

本次監測工作分成兩個部分：9 月 28 日下午 1 時至下午 2 時之間，掃描 12 組影像、下午 9 時 8 分至隔日 9 月 29 日上午 10 時，掃描 93 組影像；兩組時段之間的空檔時間(約 6 小時 46 分鐘)，進行光達掃描、雙頻 GPS 定位、以及其他問題導致 GB-SAR 運作失常之檢修工作。

為了便利長時間監測工作，本次監測工作地點改為在高雄市寶來區荖濃溪左岸之「芳晨溫泉渡假村」後方露營地(圖 4-25)；營地高度較前幾次監測工作為高，觀測視野較高，可觀察較高邊坡(圖 4-26)，雷達影像下緣亦較不受相鄰河岸影響；於露營區取得並使用穩定市電做為 GB-SAR 供電來源。

由六龜雨量站紀錄 7 月至 9 月的降雨資料可知，監測工作前三天內有降雨紀錄(9 月 25 日，23.5 公釐)，最後於 9 月 26 日歸零，一直延續到月底；而 9 月底的地震事件之震源，全位於台灣東北邊宜蘭、花蓮一帶，因此本次監測工作較不受地震事件影響。



圖 4-25 9 月 28 日、29 日監測位置示意圖

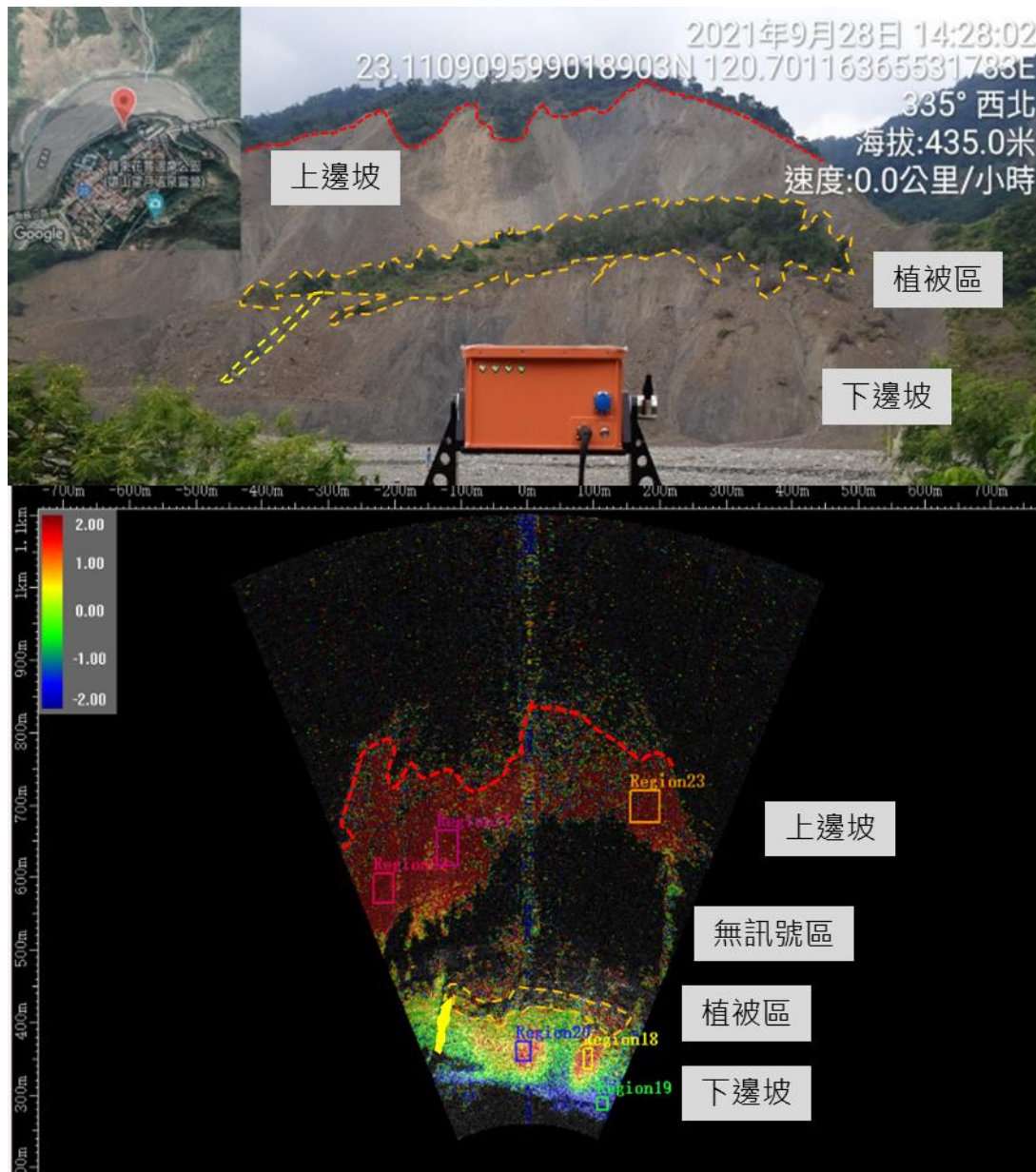


圖 4-26 雷達影像與實際視野對照示意圖

圖 4-26 為雷達影像與實際邊坡位置對照示意圖，主要區域可以以中間的植被區劃分為上下邊坡；中間無訊號區出現的原因可能包含「植被後方陰影區」、「部分上邊坡坡度較緩，導致雷達訊號抵達波面形成全反射，無法接收到有效回波訊號」等綜合影響結果。

本次監測工作結果，亦分為兩個部分來觀察：首先檢視全體影像(105 幅)，其次檢視 9 月 28 日晚上 9 點以後的影像組(93 幅)，兩者影像如下圖 4-27、圖 4-28 所示。

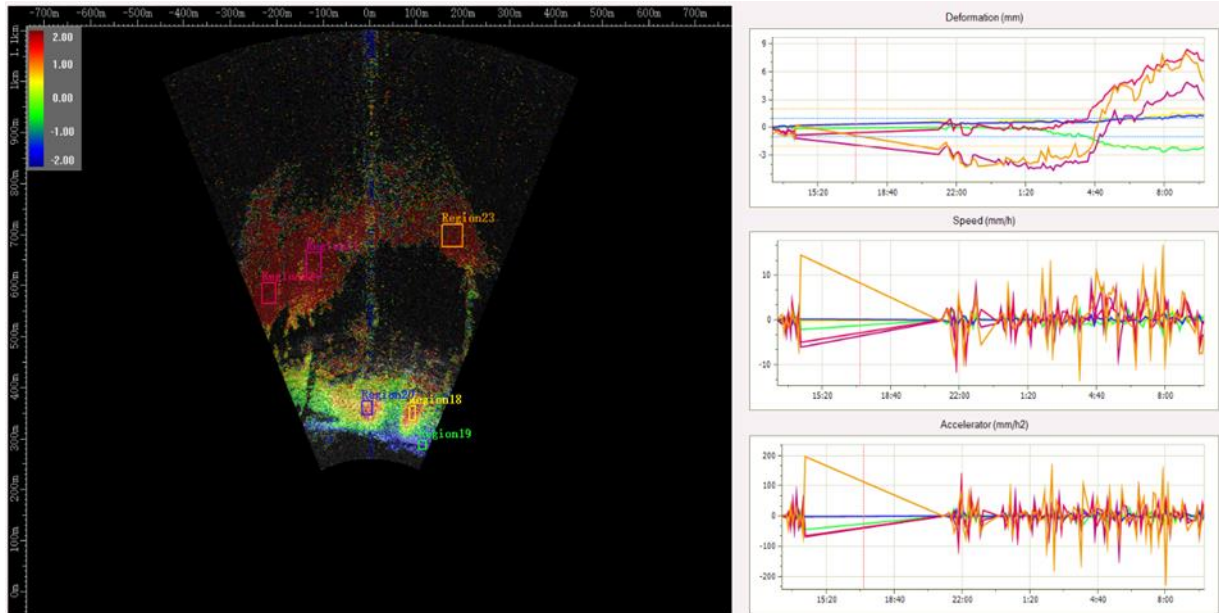


圖 4-27 寶來 9 月 28 日至 9 月 29 日監測結果(105 幅影像)

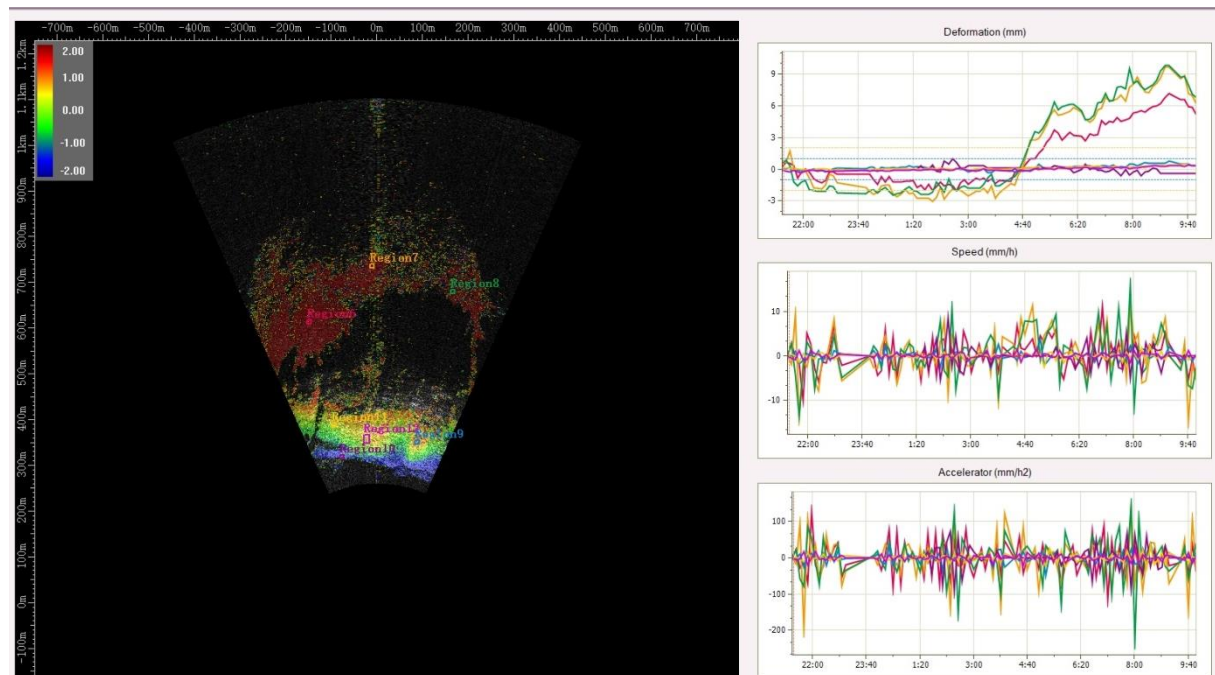


圖 4-28 寶來 9 月 28 日至 9 月 29 日監測結果(93 幅影像)

由圖 4-27、圖 4-28，可觀察到一些相似、以及相異之處：

1. 上邊坡的位移趨勢在 9 月 28 日晚上 9 時至 9 月 29 日上午 4 時之間，均呈現靠近監測點的趨勢，9 月 29 日上午 4 時至上午 9 時左右均呈現遠離監測點的趨勢，9 月 29 日上午 9 時之後則再度呈現靠近監測點的趨勢；
2. 下邊坡的移動趨勢幾乎無任何變化，唯在圖 4-27 之右下角下邊坡坡趾處約於 9 月 29 日上午 1 時左右開始出現朝向觀察者移動之趨勢；

計算二幅 GB-SAR 影像分析成果之有效像素數量，圖 4-27 影像之像素數量為 68,548 個，圖 4-28 影像之像素數量為 94,458 個，顯示兩組時段之間的空檔時間(約 6 小時 46 分鐘)存在有變化。

由於空檔時間中，GB-SAR 的位置並無移動，故可以優先排除儀器定位偏移造成可能的誤差；整體監測過程中，環境大氣狀況相對穩定，除了日夜溫差外其他並無變化，故大氣效應問題應可暫時排除。除了上述誤差需討論外，造成影像像素變化原因主要來自於受監測的目標變化。

監測過程中若發生變異，從 GBSAR 的角度來看，理想狀況下，應該會有兩個以上的像素的同調性會從所有影像中消失(崩塌處&堆積處)；如果在一連續監測的時間段發生，GB-SAR 的影像應該會呈現空洞(圖 4-29 左)。在崩塌事件後，崩塌處、以及堆積處位置會重新建立起同調性，因此前述的像素空缺則會被填補(圖 4-29 右)。

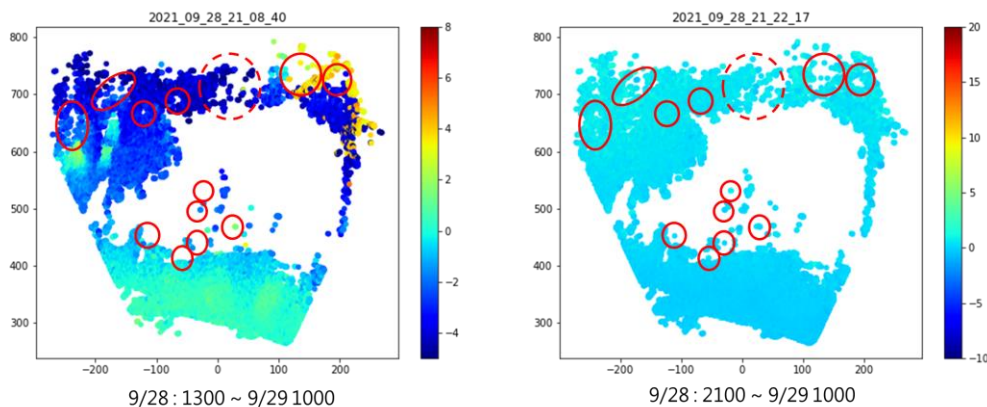


圖 4-29 比較兩幅影像之像素空缺以及填補狀況

圖 4-29 為將 GB-SAR 執行運算成果輸出後，將符合篩選，相對穩定的像素進行位移量累積計算，並且重新於 2D 坐標系統上投圖。圖 4-29 左側為圖 4-27 之像素投圖；右側為圖 4-28 之像素投圖結果。兩者像素數量、型態的差異，顯示空檔時間(約 6 小時 46 分鐘)無掃描過程中可能存在的地形變化。

第二節 臺南龍崎

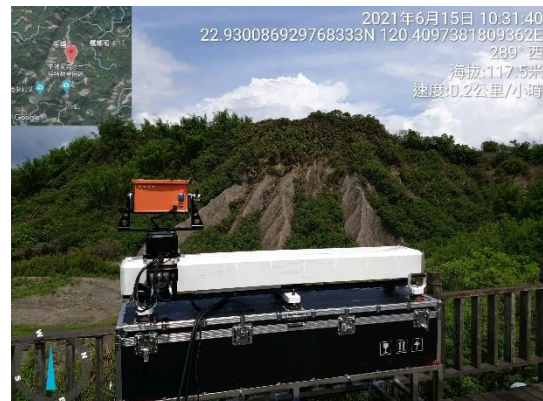
選定於臺南市龍崎區牛埔泥岩水土保持園區的露頭作為監測目標，於道路旁行人步道上設立儀器(約於牛埔村辦公室東南方 80 公尺處) 如圖 4-30 紅色標籤位置。自 3 月份觀察以來可發現當地植被原為乾枯草叢至雨季後草叢由枯轉綠，唯植被覆蓋範圍差異不大，故整體可分析範圍差異不大。



圖 4-30 臺南市龍崎區牛埔 GB-SAR 架設位置



(2021/03/30)



(2021/06/15)



噴漆定位



交通管制

圖 4-31 臺南牛埔現地照片

經現場確認儀器架設位置與目標視距介於 100 至 250 公尺，儀器架設於人行道上通視良好，掃描三個角度(75 度、90 度、105 度)，使用之天線寬度為 18 度，預設各角度有 3 度的重合，整個視角單次掃描方位角自 66 度至 114 度(正前方為 90 度)，橫跨約 48 度，如圖 4-32。

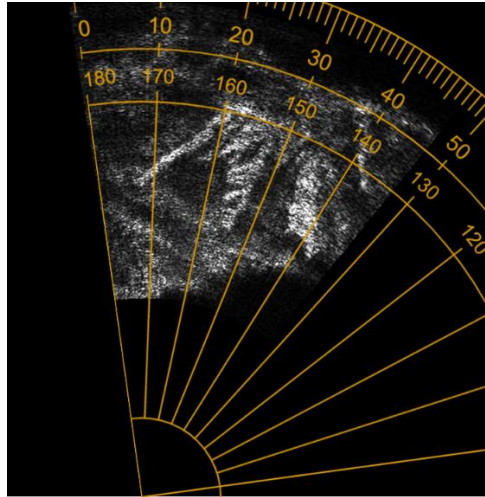


圖 4-32 臺南牛埔雷達回波涵蓋範圍

儀器使用參數說明如表 4-3 掃描週期約 7 分鐘，帶寬(BW)為 400MHz (作用頻率為 17,000 MHz 至 17,400 MHz)，方向解析度達 0.37 公尺，水平解析度則每網格為 0.54 至 1.36 公尺。

表 4-3 臺南牛埔使用 GB-SAR 參數

波長	Ku-band(約1.7cm)
掃描距離	100m ~ 250m
掃描週期	7分鐘 (3個掃描角度)
方向解析度	0.37 m (bw:400)
水平解析度	距離 100m : 0.54m
	距離 250m : 1.36m

比對雷達回波與現地位置進行對應，相關位置如下，可發現有三個主要的裸露區塊，植被覆蓋區則回波反射值較弱且無同調性如圖 4-33 與圖 4-34。

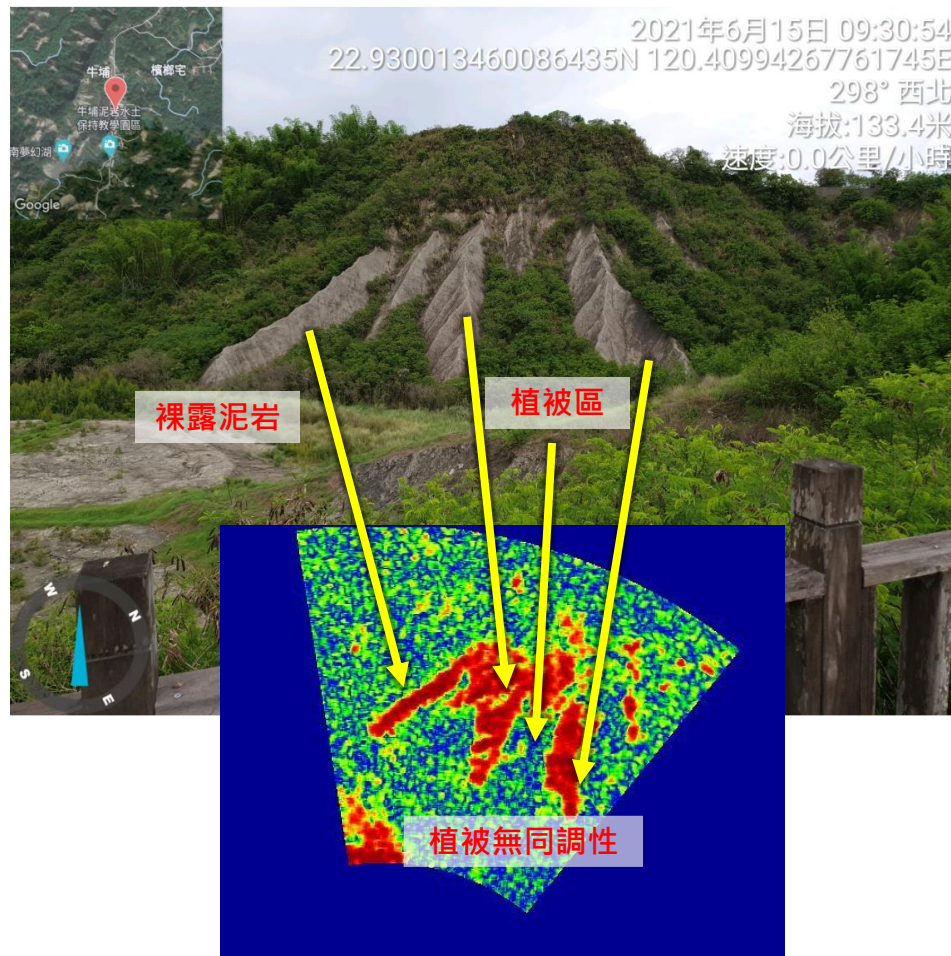


圖 4-33 同調性與現地位置判視圖(臺南牛埔)

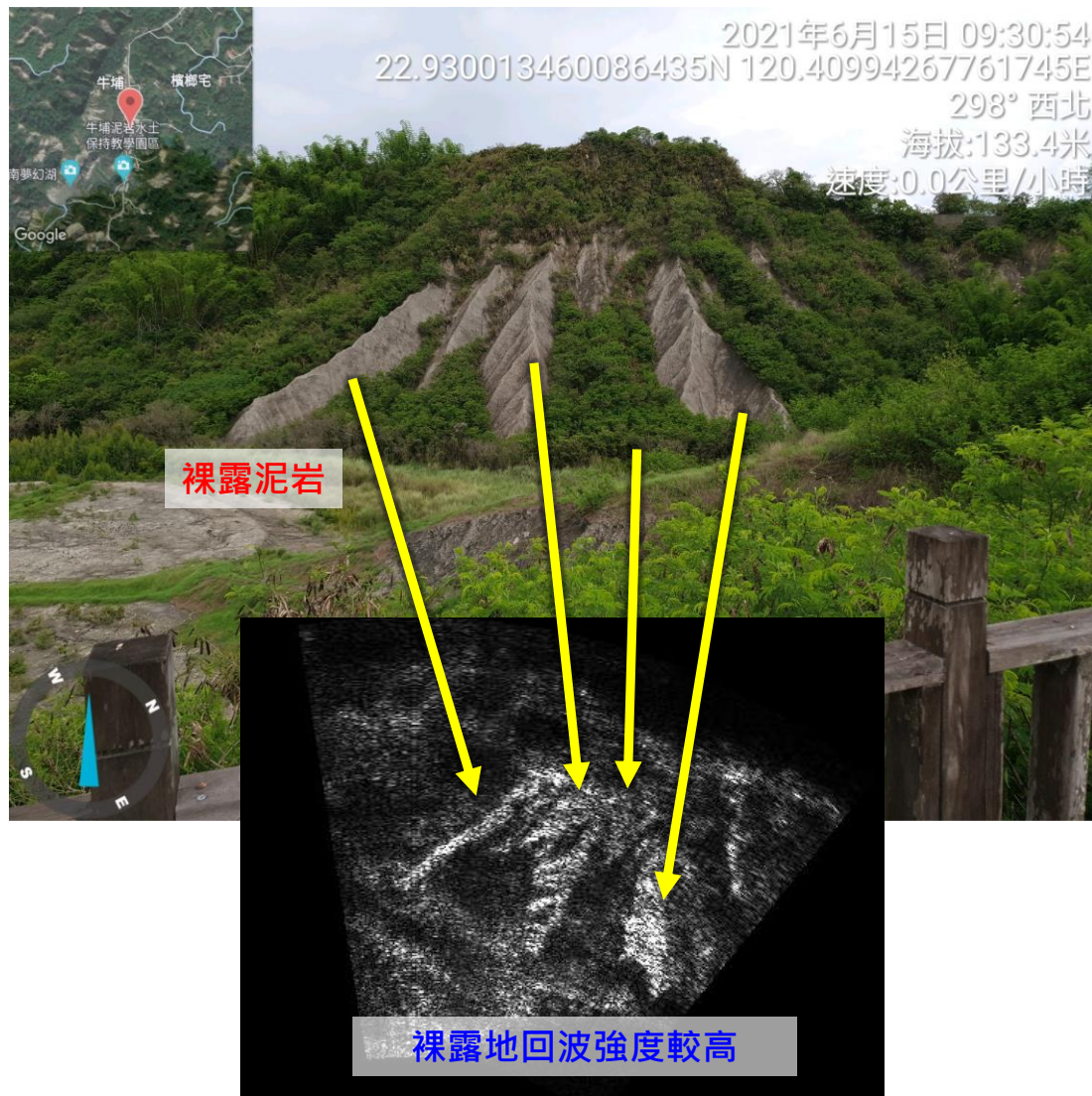


圖 4-34 震幅強度與現地位置判視圖(臺南牛埔)

一、邊坡無明顯變化

本計畫 3 月 30 日、4 月 23 日、5 月 6 日與 7 月 6 日至牛埔地區觀測，每次觀測約 1 小時，可發現達同調性範圍之裸露邊坡無顯著變化，偵測變化量小於 1 毫米，監測情況如圖 4-35 至圖 4-38。

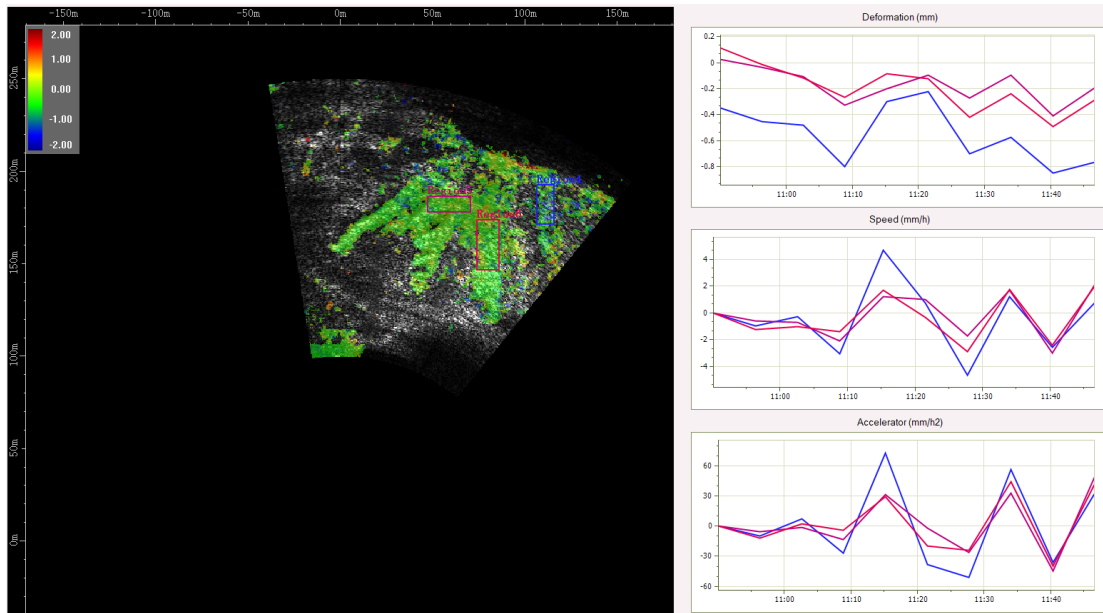


圖 4-35 臺南牛埔當日累積變化量(2021/03/30)

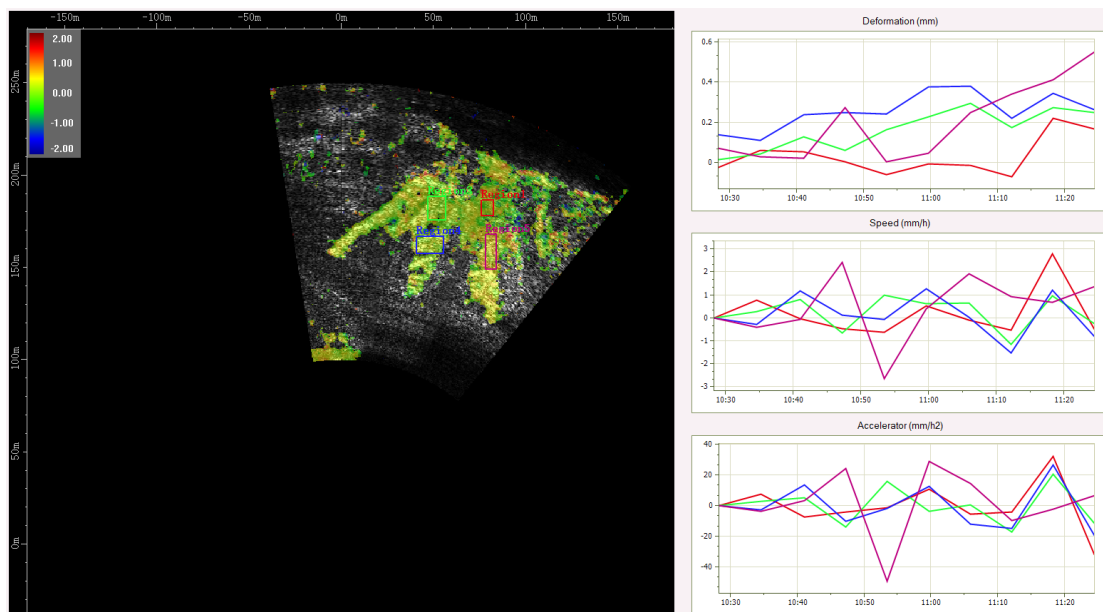


圖 4-36 臺南牛埔當日累積變化量(2021/04/23)

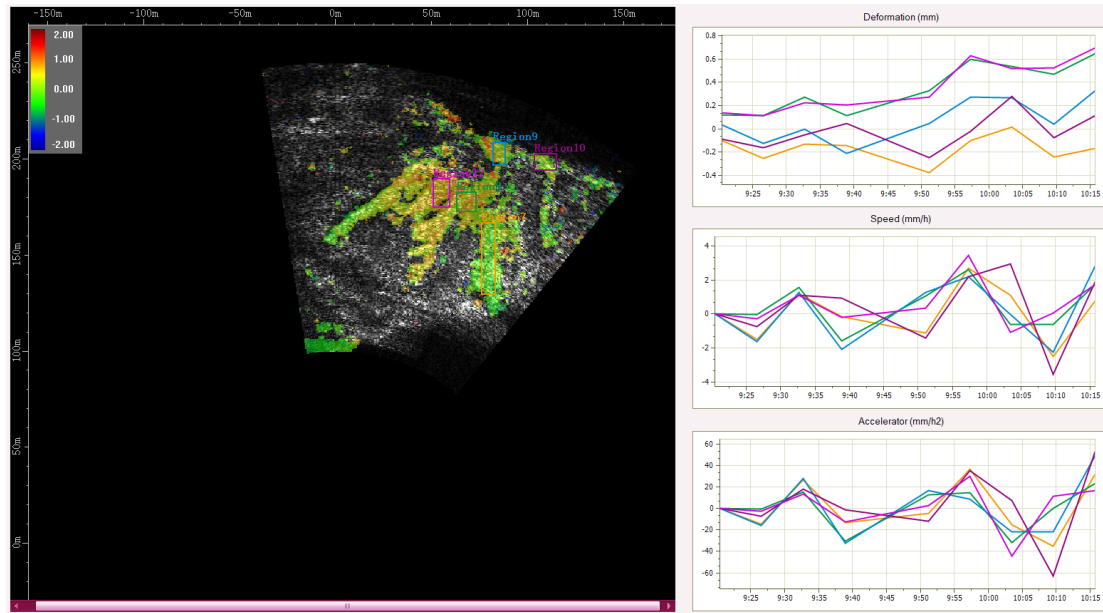


圖 4-37 臺南牛埔當日累積變化量(2021/05/06)

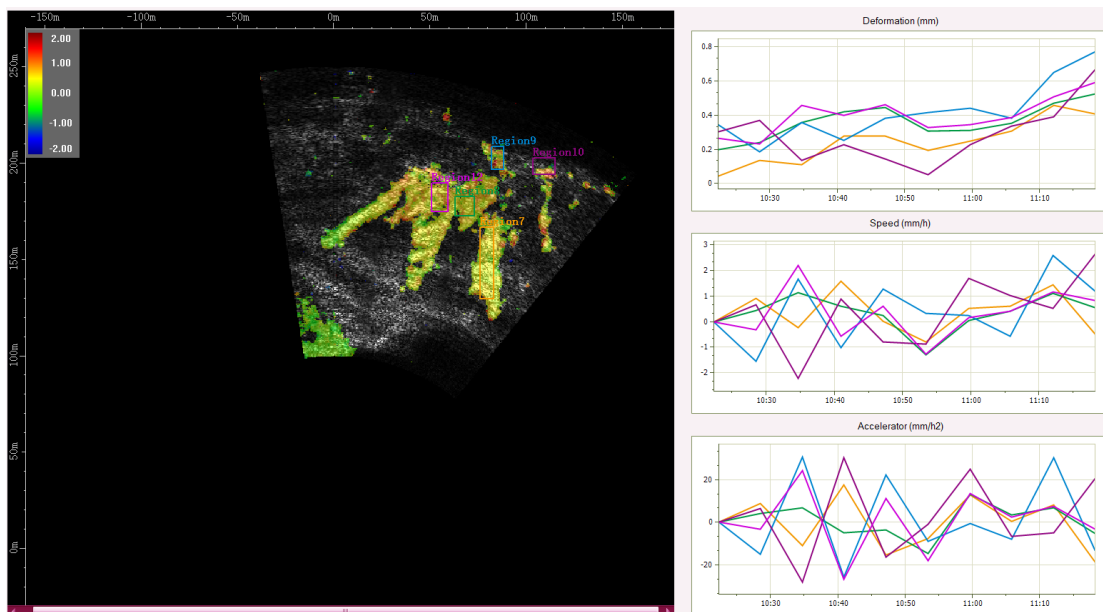


圖 4-38 臺南牛埔當日累積變化量(2021/07/06)

二、邊坡有局部變化

於 5 月 21 日至牛埔地區觀測，發現位於最右側之裸露邊坡有明顯變化，且累計超過 1 毫米，如圖 4-39，檢視其前三日並無降水，最近一次地震發生於 1 日前，5 月 20 日規模達 3.6 且該地區震度達到 2 級，如圖 4-40，變動可能與地震有關。

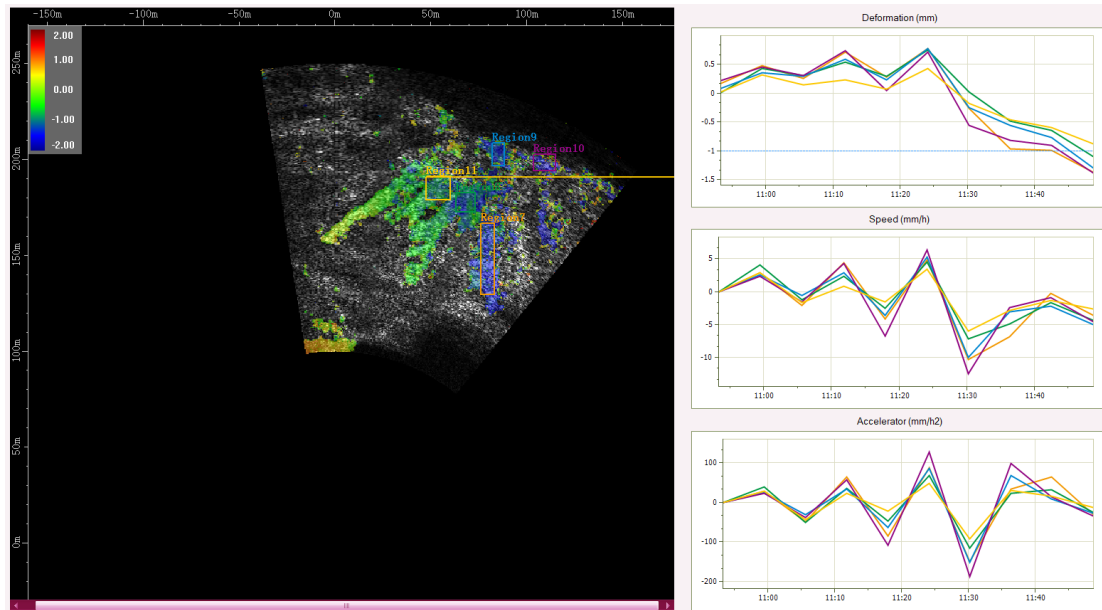


圖 4-39 臺南牛埔當日累積變化量(2021/05/21)

5月20日2時2分 規模 3.6 臺南市政府東偏北方 33.2 公里 (位於臺南市玉井區)

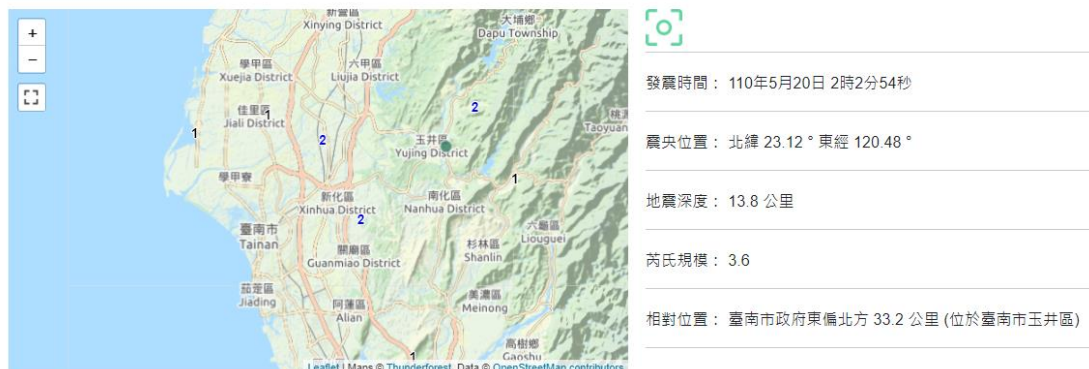


圖 4-40 龍崎地區鄰近地震(2021/05/20)

於 6 月 15 日至牛埔地區觀測，發現位於最右側之裸露邊坡有明顯變化，且累計超過 1 毫米，如圖 4-41，檢視其前三日降雨量僅 0.5 毫米，但兩週前降雨量為 63 毫米，最近兩週內鄰近無地震，變動可能與兩週前降雨導致土壤含水量上升有關係。

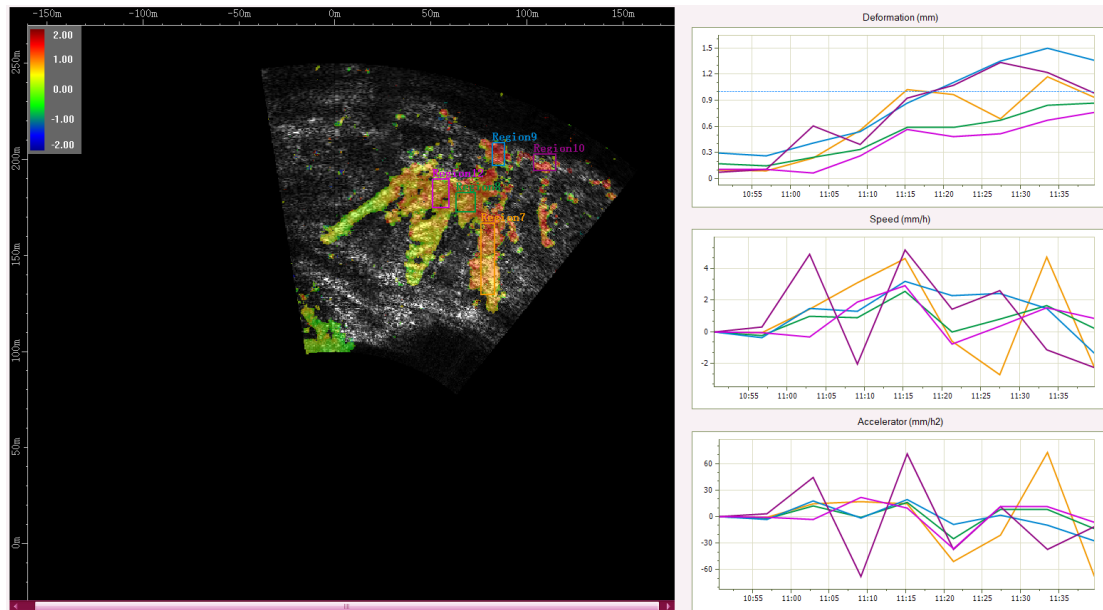


圖 4-41 臺南牛埔當日累積變化量(2021/06/15)

下半年7月至9月，3個月間均有降雨紀錄，其中7月13日至8月14日為最密集時期。連續降雨期間，測得最高日雨量為8月1日，總共有281公釐；降雨量次高與第三高的日期分別為7月31日(139公釐)、以及8月7日(152.5公釐)。詳細降雨紀錄，如下圖4-42所示

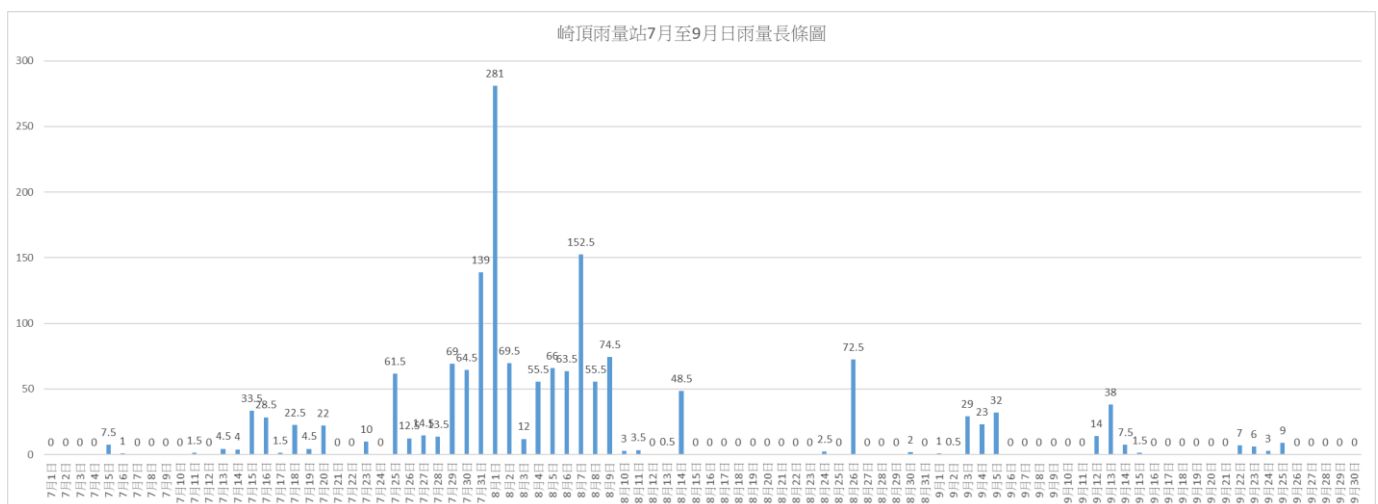


圖 4-42 崎頂雨量站7月至9月日雨量紀錄

於 7 月 27 日至牛埔地區觀測，發現位於右上側之裸露邊坡有明顯變化，且累計超過 1 毫米，如圖 4-43；檢視其前三日累積降雨量超過 88.5 毫米，監測當日仍有降雨記錄，最近 5 日內鄰近無地震，變動可能與短期連續降雨有關。

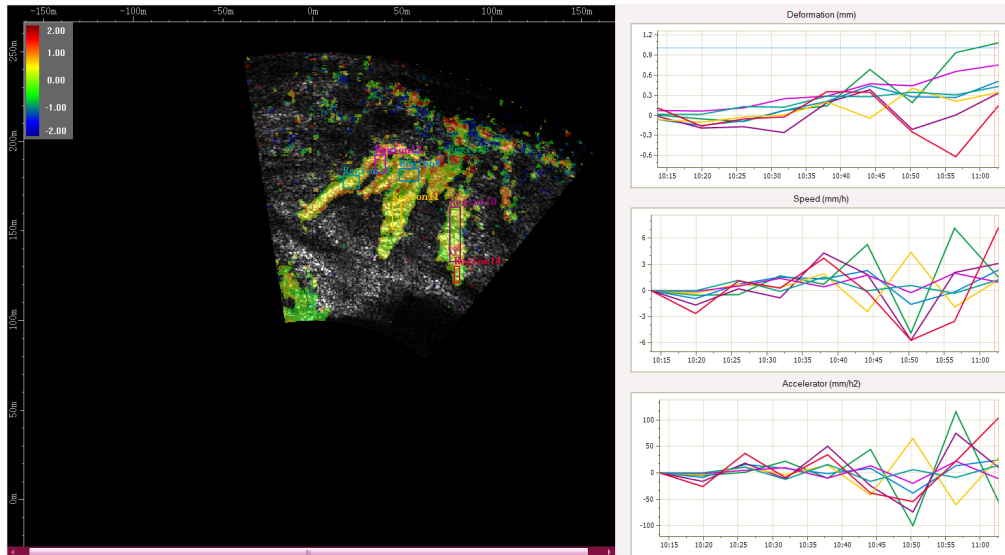


圖 4-43 臺南牛埔當日累積變化量(2021/07/27)

監測團隊於 8 月 12 日至牛埔地區觀測，發現位於右上側之裸露邊坡有明顯變化，且累計超過 2 毫米，如圖 4-44 所示；在此之前，監測區域正歷經連續降雨之結尾，前五日最大日雨量為 152.5 公釐，且近期無地震，因此認為微變動為反應連續降雨有關。

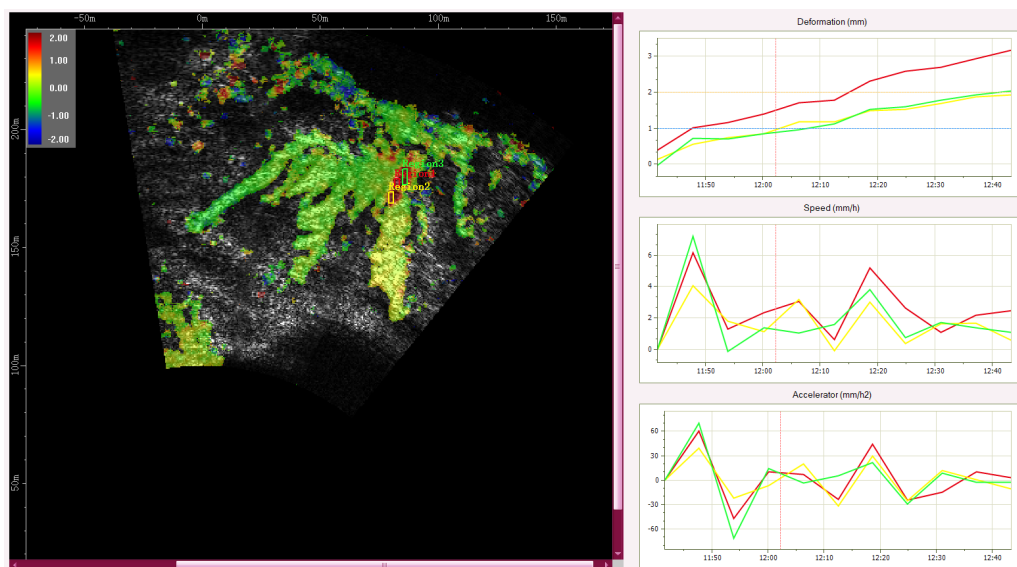


圖 4-44 臺南牛埔當日累積變化量(2021/08/12)

於 9 月 2 日至牛埔地區觀測，發現位於最右側之裸露邊坡有明顯變化，且累計超過 1 毫米，如圖 4-45，檢視其前三日降雨量僅 3 毫米，但一週前降雨量為 72.5 毫米，最近兩週內鄰近無地震，變動可能與降雨導致土壤含水量上升有關係。

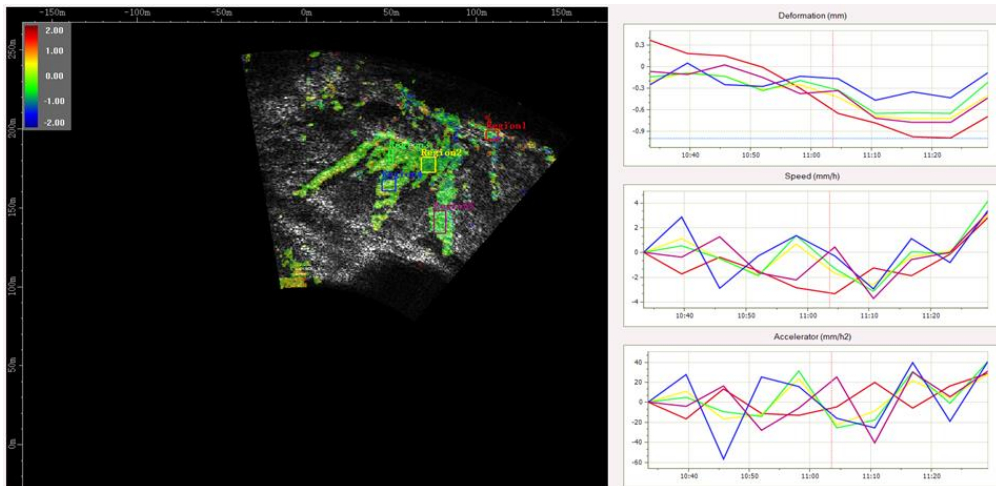


圖 4-45 臺南牛埔當日累積變化量(2021/09/2)

於 9 月 17 日至牛埔地區觀測，發現位於最右側之裸露邊坡有明顯變化，且累計超過 1 毫米，如圖 4-46，檢視其前 5 日降雨量有 61.5 毫米，最近兩週內鄰近無地震，變動可能與降雨導致土壤含水量上升有關係。

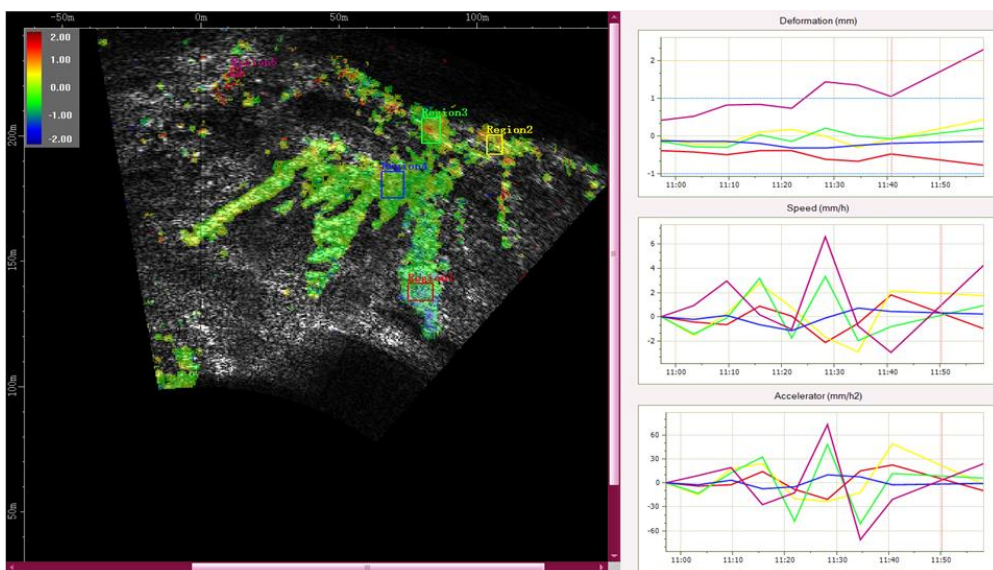


圖 4-46 臺南牛埔當日累積變化量(2021/09/17)

三、降雨期間監測

本計畫於 2021 年 5 月 31 日於降水期間進行，將儀器放置於車載上進行觀測，如圖 4-47。自上午 10 點 38 分開始觀測至 11 點 49 分，其中於 11 點 12 分至 11 點 36 分有降雨情況，於現地放置雨量筒進行觀測如圖 4-48。由於降雨量僅約幾毫米，簡易雨量筒不易量測，參考鄰近崎頂氣象站於觀測時間內降雨約 2 毫米，如表 4-4。



圖 4-47 車載 GB-SAR 觀測現地照片(臺南牛埔)



圖 4-48 現地設置雨量筒(臺南牛埔)

表 4-4 崎頂氣象站(C00960)5 月 31 日 10 時至 13 時雨量

日期：2021 05 31				
時間	氣溫 (攝氏度)	氣壓 (mpa)	濕度 (%)	累積雨量 (mm)
10：00 10：59	26.3	993.7	89	0.5
11：00 11：59	26.3	993.9	90	2.0
12：00 12：59	27.5	993.4	90	2.0

檢視降雨與非降雨期間雷達回波強度，可發現回波強度圖在降雨期間，如圖 4-49 藍色框，差異並不大，代表 GB-SAR 在降雨期間仍可取得回波並進行監測。

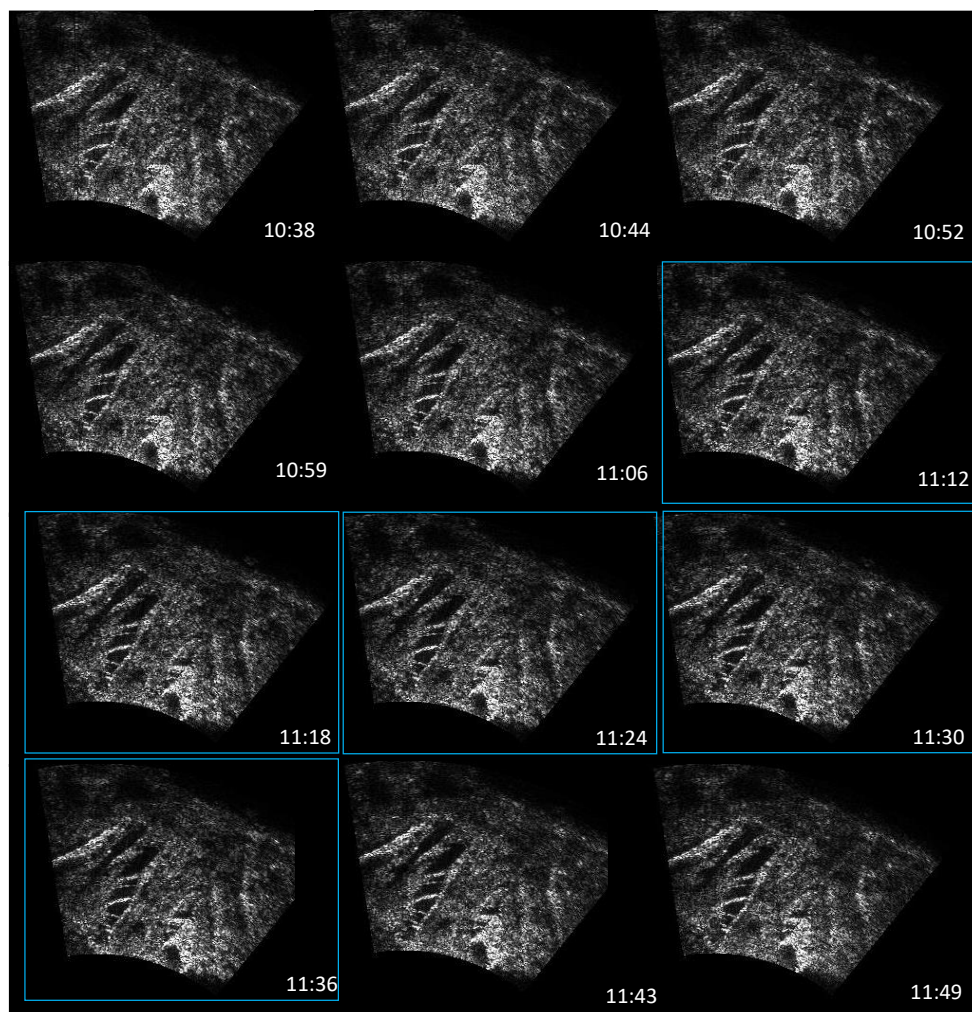


圖 4-49 降雨期間雷達回波圖(臺南牛埔)

檢視降雨與非降雨期間雷達同調性，如圖 4-50。可發現於降水期間同調性達閾值範圍有明顯增加(圖中紅色區塊)，增加的範圍為既有的植被區域。唯上方植被同調性未增加，僅有裸露地蝕溝間之植被同調性增加，其原因應可更進一步研究。

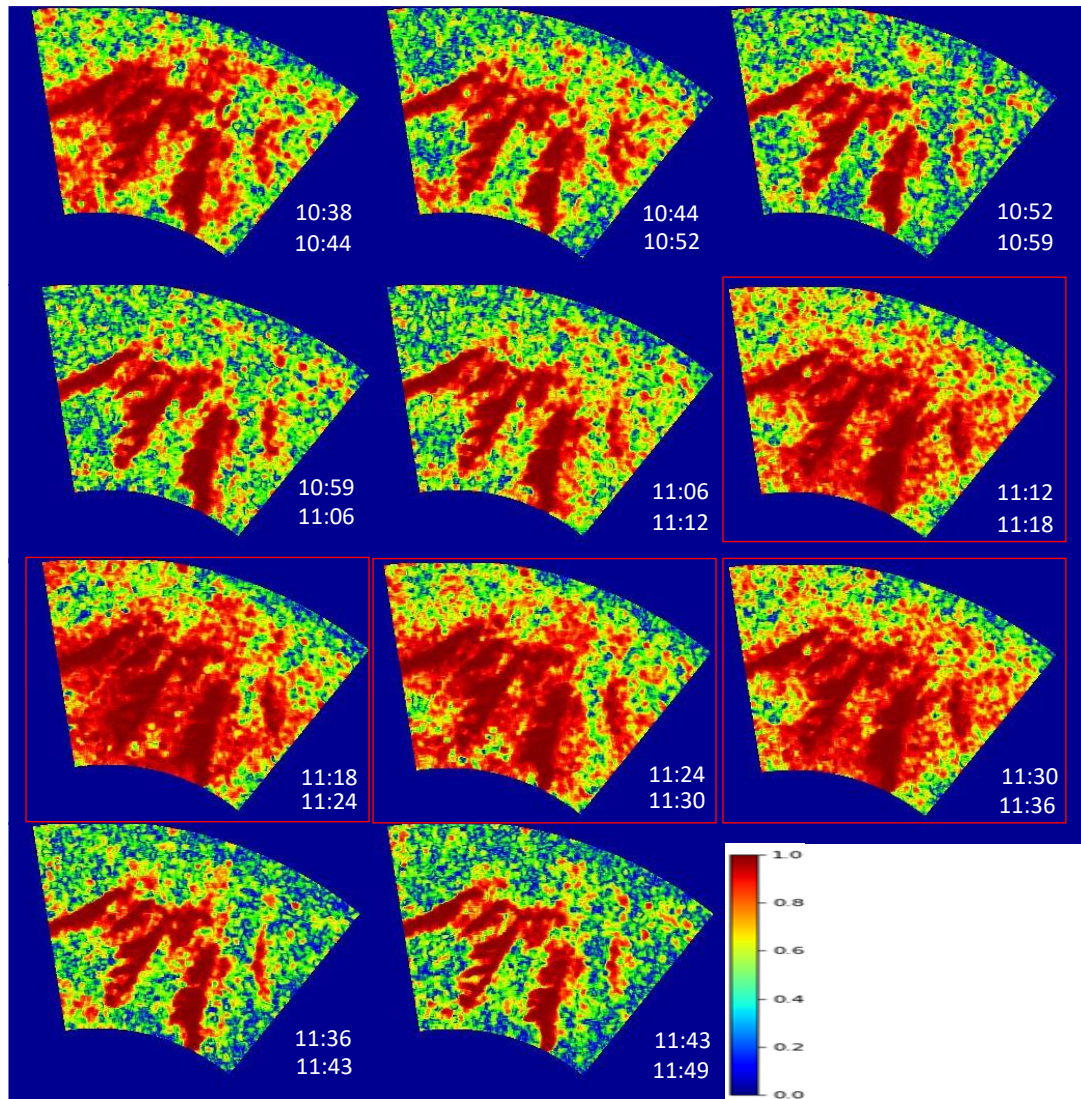


圖 4-50 降雨期間同調性圖(臺南牛埔)

檢視降水期間位移量圖，可發現整體邊坡並無顯著變化，如圖 4-51，推測原因為降雨非均質下降，而且因降雨所產生的侵蝕主要以蝕溝加深的作用呈現，由於蝕溝尺度較小，所架設雷達回波解析度為 30 公分至 1 公尺，故無法監測蝕溝侵蝕量。

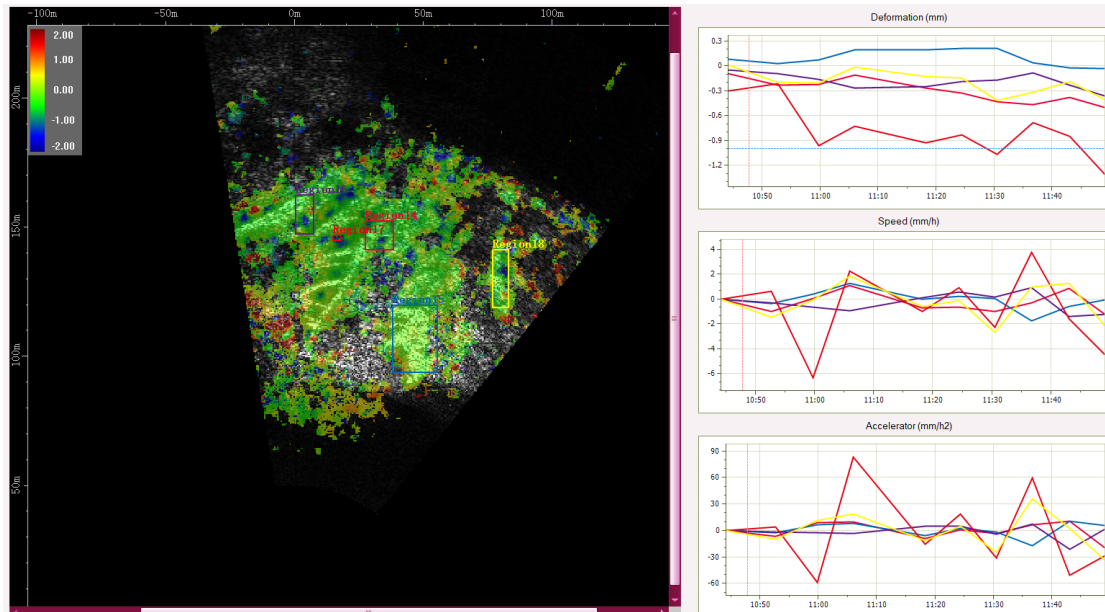


圖 4-51 臺南牛埔當日累積變化量(2021/05/31)

第三節 小結

從觀測結果檢視降雨期間 GB-SAR 受限於觀測尺度影響，無法觀測泥岩蝕溝濬深情況。以有發現邊坡明顯變化資料來看(觀測期間累積變化超過 1 毫米)，若地震時間與空間間隔較遠，則邊坡主要為表面變化，變動點呈現散佈情況，若地震時間與空間距離較近，在寶來地區邊坡變動主要發生於上邊坡，龍崎地區則整個右側邊坡都有變動的情況。

在降水驅動邊坡變化上，雖然寶來地區於 6 月 11 日臨前 3 日累計降雨達 118.5 毫米，但是當日觀測邊坡卻無明顯變化，於 2 週後 7 月 2 日觀測，雖然臨前 3 日降雨僅有 38.5 毫米，但邊坡確有明顯變化。龍崎地區於 5 月 31 日觀測，其臨前 3 日累積降雨達 63 毫米，但當日觀測邊坡無明顯變化，反而是 6 月 15 日臨前 3 日降雨僅 0.5 毫米，有觀測到明顯變化，顯示降雨導致邊坡位移可能有延遲情況。但實際降雨延遲仍須長時間觀測較能確認，期待未來能夠有機會進行更長時間的監測工作。

本年度下半年開始頻繁降雨，高雄寶來於七月底至八月初，迎來最大雨量，將近有 500 公釐。連續降雨期間亦存在有鄰近地區之地震記錄，因此可以觀察到邊坡上之特定區域出現明顯微變動特徵與型態。

9 月 28 日、9 月 29 日，研究團隊於寶來進行為時約 21 小時的連續監測工作；監測過程中觀察到明顯的微變動外，同時透過不同時期的連續影像，初步判釋出岩石可能的崩落/堆積位置，取得良好的監測成果。

第五章 GB-SAR 創新應用測試

第一節 增強同調性

一、帆布覆蓋法

由強降雨驅動之非穩定滑坡，現地緊急處理多會使用帆布隔離水分入滲，本研究期望確認是否透過帆布遮蓋之邊坡，仍可監測其微變形量。由於地基雷達解析度隨距離增加遞減快速，如表 2-5 說明，故帆布的大小將決定是否能被 GB-SAR 有效觀測。植被區為 GB-SAR 同調性較低的區域，透過鋪設帆布可有效確認鋪設位置，故實驗將帆布至於植被上，以確認是否可成功觀測。

(一) 實驗場1(成功大學)

在植被覆蓋的邊坡，如果以帆布覆蓋於其上，並且進行多次掃描，如圖 5-1。帆布覆蓋後，因植被散射訊號特性被改善，同調性應會有所提升。藉由同調值提升的特性，可藉此定位出帆布的位置；因此本團隊將 GB-SAR 架設在國立成功大學 成功校區 資源工程系之五樓天台，對遠處花叢進行覆蓋帆布前後之測試，如圖 5-2。



圖 5-1 實驗場 1 現地照片(成功大學)

帆布反射訊號測試

GB-SAR置於成大資源系館五樓空橋



由雷達機視角往下俯視照

圖 5-2 實驗場 1 儀器放置(成功大學)

試驗結果顯示，覆蓋帆布之花叢於 GB-SAR 掃描過程中，鋪設帆布範圍同調性有所提升，同調值普遍達到 0.7。前述結果顯示，本研究確認可以透過鋪設帆布前後之同調性變化進行定位，試驗結果同時顯示，鋪設帆布的花叢，其同調值從最低 0.3 提高至接近 0.7，如圖 5-3 與圖 5-4。

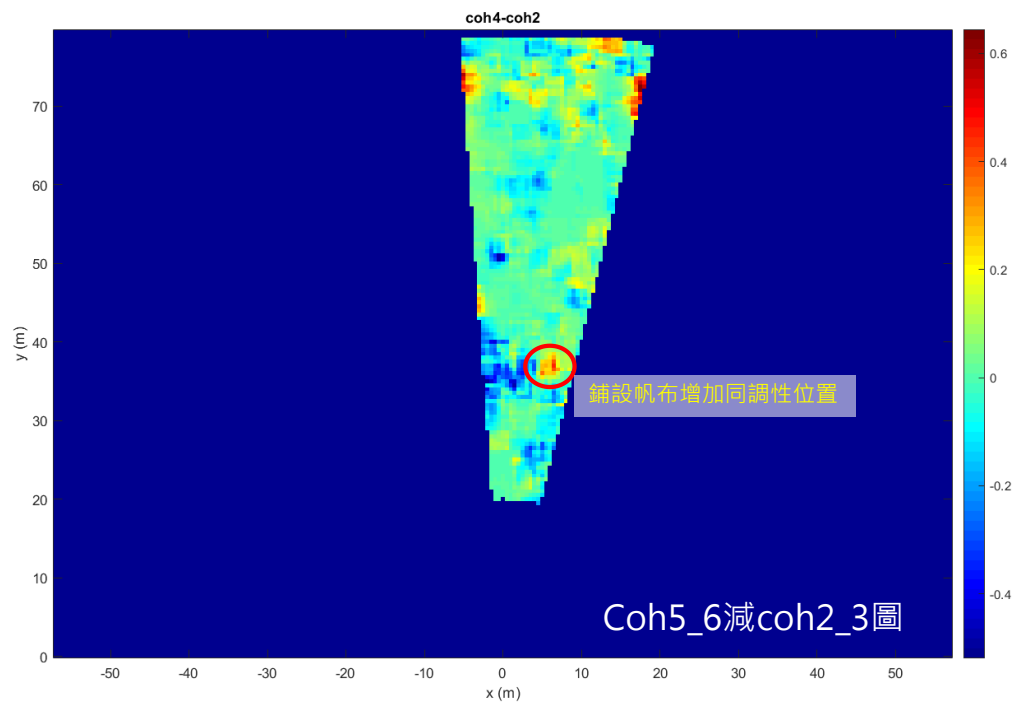


圖 5-3 實驗場 1 同調性增加位置圖(成功大學)

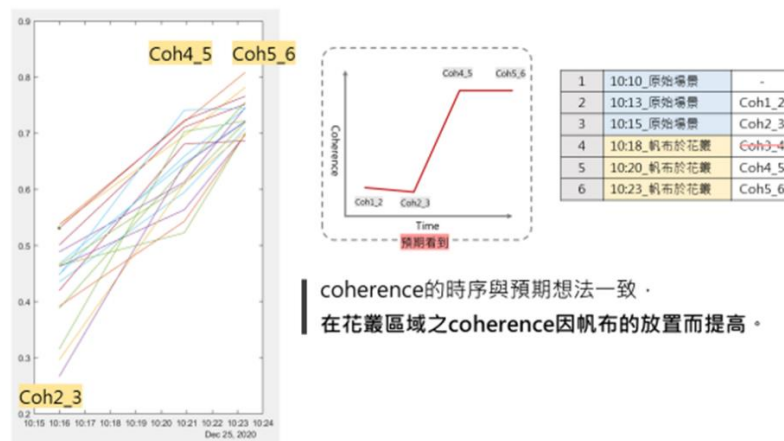


圖 5-4 實驗場 1 測試成果(成功大學)

(二) 實驗場2(高雄寶來)

寶來邊坡位於荖濃溪右岸，本團隊於 2021 年 2 月 26 日乾季期間涉水至邊坡鋪設帆布，如圖 5-5，帆布距離儀器設置地點約 267 公尺與 275 公尺，換算水平網格解析度約 1.49 公尺與 1.45 公尺，如表 5-1。帆布尺寸為長度 3 公尺正方形，另放置 18 吋角反射器，如圖 5-6 於帆布之間，現地放置情況如圖 5-7 與圖 5-8。

表 5-1 實驗場 2 帆布距離與尺寸一覽表

項目	距離	水平解析度	垂直解析度
帆布 1(左)	275 m	1.49 m	0.37 m
帆布 2(右)	267 m	1.45 m	0.37 m
*帆布尺寸：3 m X 3 m *角反射器尺寸：18 吋 (45.72 公分)			



圖 5-5 實驗場 2 儀器與帆布相對位置(高雄寶來)

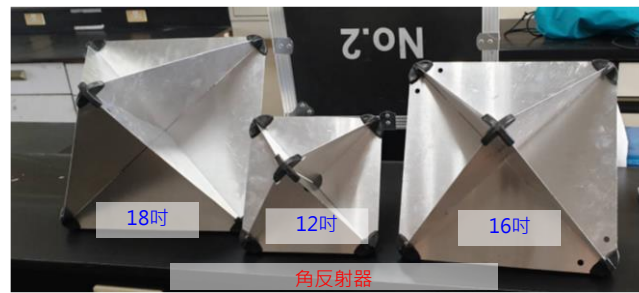


圖 5-6 角反射器照片(12 吋、16 吋與 18 吋)

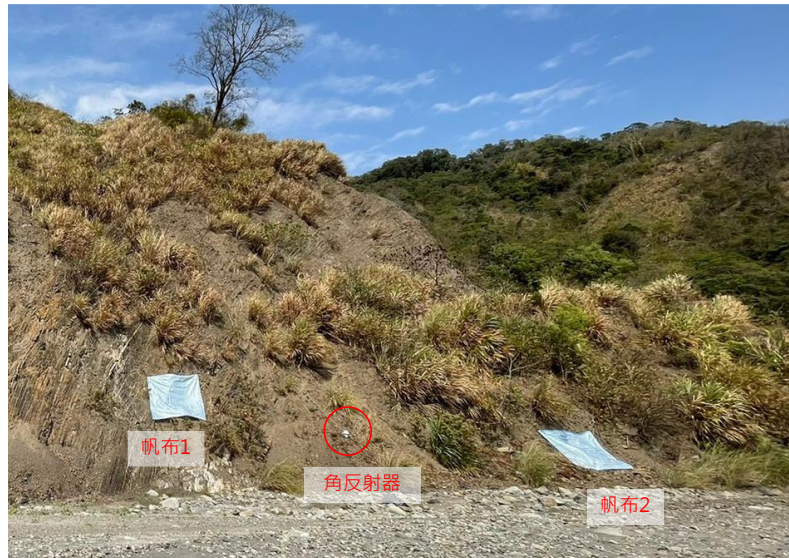


圖 5-7 實驗場 2 帆布與角反射器放置情形圖(高雄寶來)



圖 5-8 實驗場 2 帆布鋪設現地照片(高雄寶來)

試驗結果顯示，鋪設帆布範圍同調性有所提升，植被覆蓋區同調性數值自 0.15 上升至 0.65 左右，角反射器則自 0.26 上升至 0.71 左右，如表 5-2，增加位置如圖 5-9。

表 5-2 實驗場 2 帆布與角反射器同調性提升一覽表

	帆布 1	帆布 2	角反射器
Coh1_2 平均	0.1535	0.1916	0.2699
Coh10_11 平均	0.6573	0.6972	0.7195
提升平均數值	0.5038	0.5056	0.4496
提升百分率	328.21%	263.88%	166.58%

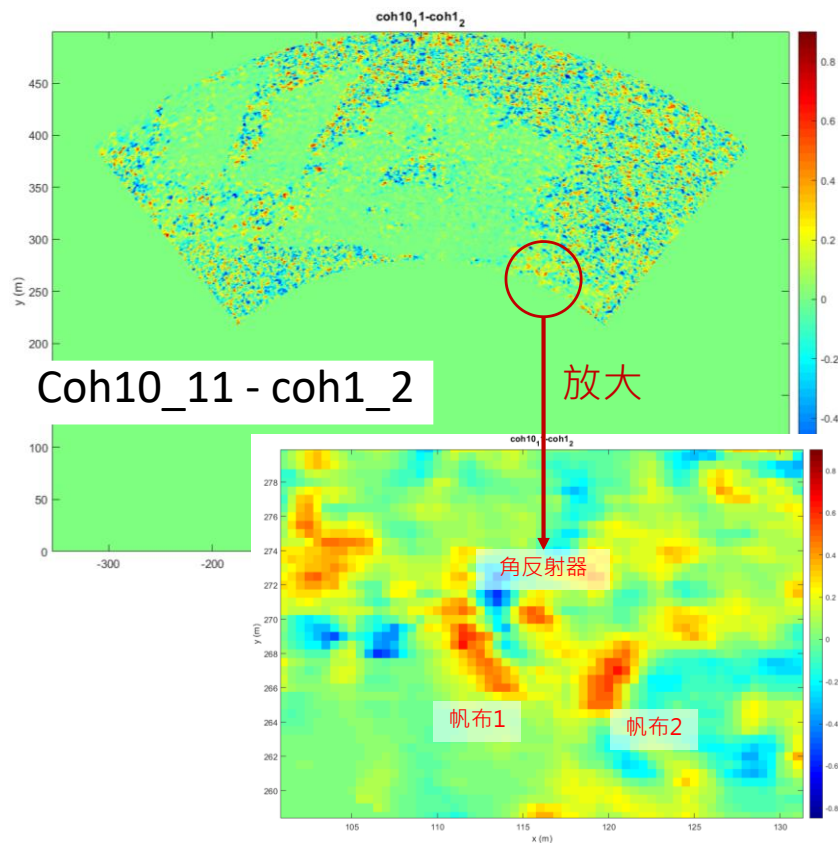


圖 5-9 實驗場 2 同調性增加位置圖(高雄寶來)

(三)小結

既使邊坡覆蓋帆布，若能有效固定則 GB-SAR 可取得高同調性，進而進行邊坡監測。放置角反射器，若能穩定固定也能作為監測位移使用。

第二節 實驗場位移驗證

GB-SAR 為透過雷達回波相位差進行變動量計算，唯在 GB-SAR 觀測之時間與空間尺度下，現地變動量無法得知，本計畫設計於實驗場布設角反射器與沙袋模擬實際位移量，確認是否可與實際變動量進行對應。

一、強反射點位移

雷達回波需要有強反射點才可獲得良好的回波以便於計算相位差，研究設計設置角反射器，如圖 5-10，並透過實際移動角反射器作為實際變化量與儀器偵測變化量比較圖 5-11。透過每次位移 2~3 毫米來確認 GB-SAR 儀器實際偵測數值。



圖 5-10 實驗場 3 儀器與角反射器位置



圖 5-11 實驗場 3 角反射器底座加刻度

分別於 4 月 6 日與 4 月 8 日以相同方式進行測試，從圖 5-13 可發現雷達回波圖內有兩個強反射物，其中較靠近雷達機的為裝置藝術，距離較遠的為角反射器。可發現角反射器所顯示的範圍在雷達回波圖內有被放大的情況，也就是雷達回波圖的大小($10\text{ m} \times 10\text{ m}$)比起實際角反射器尺寸($0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$)要大約 20 倍，故強反射點的變化區域，在雷達回波圖會有放大的效果，故若要明確瞭解「點」的變化量將無法獲得，會以「面」的方式呈現。



圖 5-12 強反射點位移測試角反射器與雷達回波圖

另發現實際角反射器位移量與儀器顯示之變動量相似，但方向性並不穩定，如圖 5-13，原本認為角反射器應往儀器靠近，但反而觀測到遠離儀器，可能原因為所有變動量都是前後兩幅雷達干涉結果，故實際變化量會受誰為基準而改變，故 GB-SAR 可瞭解某一地區屬於

不穩定情況，唯變動方向仍需依據現地經驗判斷。

此外，於 4 月 8 日再做一次相同的測試，可以發現雖然兩個強反射點仍可取得同調性，但位移則無法計算，出現條狀變形，其主要原因為 GB-SAR 需要在短時間內解算，故其將挑選範圍內之強反射點作為 PS 點(永久散射點)假設他們為固定基準點，其他資訊則相對於固定點移動，在 4 月 6 日時，角反射器資料未被納入 PS 點，故可監測其變動量，但在 4 月 8 日時角反射器資料被納入 PS 點，故當移動角反射器反而整個場景都在變化，如圖 5-13。若要將角反射器作為觀測目標則需要注意其反射強度不能過強，且觀測範圍內要更穩定的強反射點。或未來設置角反射器要設置在不會位移的地點始可進行監測。

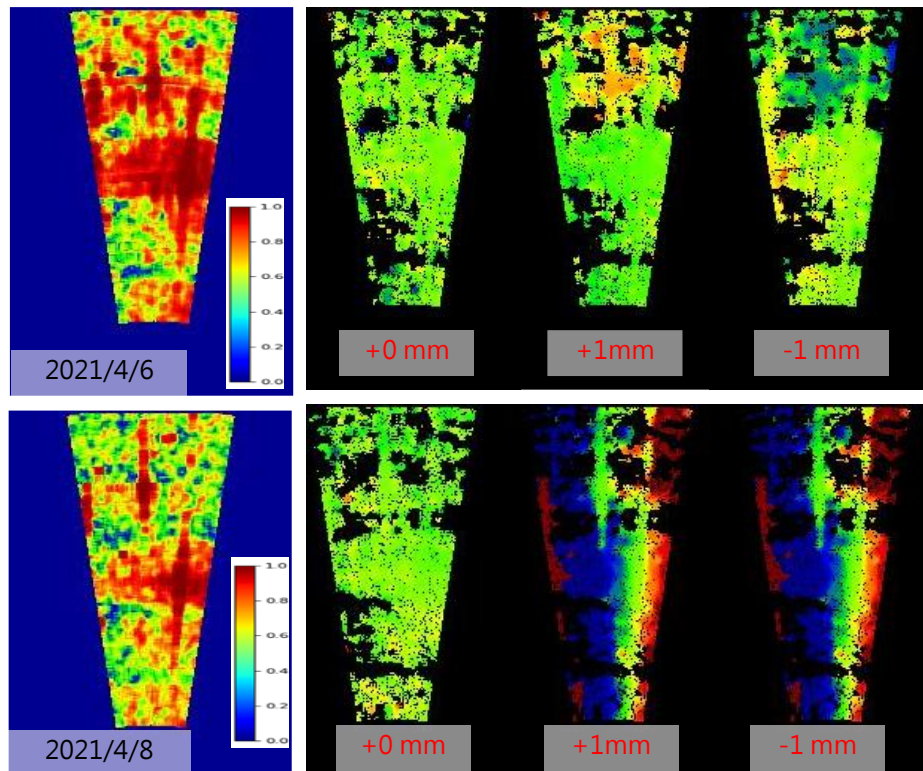


圖 5-13 強反射點位移測試成果圖

二、沙袋模擬位移

為確認帆布下之變動量是否可作為參考，本研究於實驗場放置沙包進行位移監測，於背板繪製網格並架設相機至上方與側面確認沙袋變形情況，並以膠槌製造變形。由於 GB-SAR 僅能監測毫米等級的變化，故每次變化均應在 5 毫米以下，實驗沙包架設如圖 5-14。



圖 5-14 沙袋模擬位移實驗場與位移模擬

實際經過敲擊造成的沙袋變化如圖 5-15，從圖中可以發現變形量並不均勻發生，上方的坡面變形較大，下方受到沙袋限制的變化較小。檢視位移與雷達回波如圖 5-16，於沙袋右側為放置之角反射器，主要用於定位以及 PS 點，從圖中可以發現沙袋有些許變化，再敲擊前後約偵測位移約 0.4 毫米，但由於沙袋的實際位移量並不均勻且都超過 0.4 毫米，故實驗僅能確認 GBSAR 可以偵測位移，且位移可能會受到整體位移範圍尺度過小而平滑化。

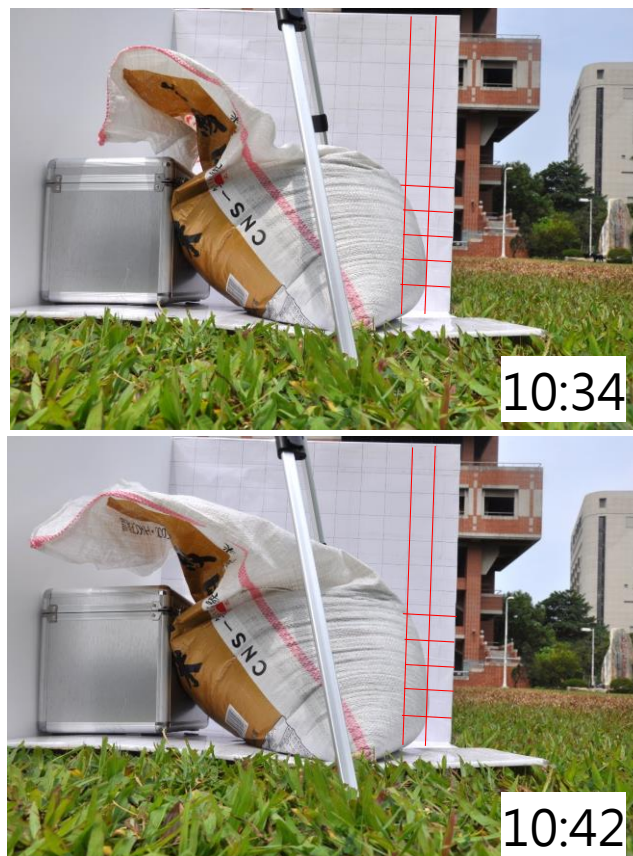


圖 5-15 沙袋模擬位移模擬

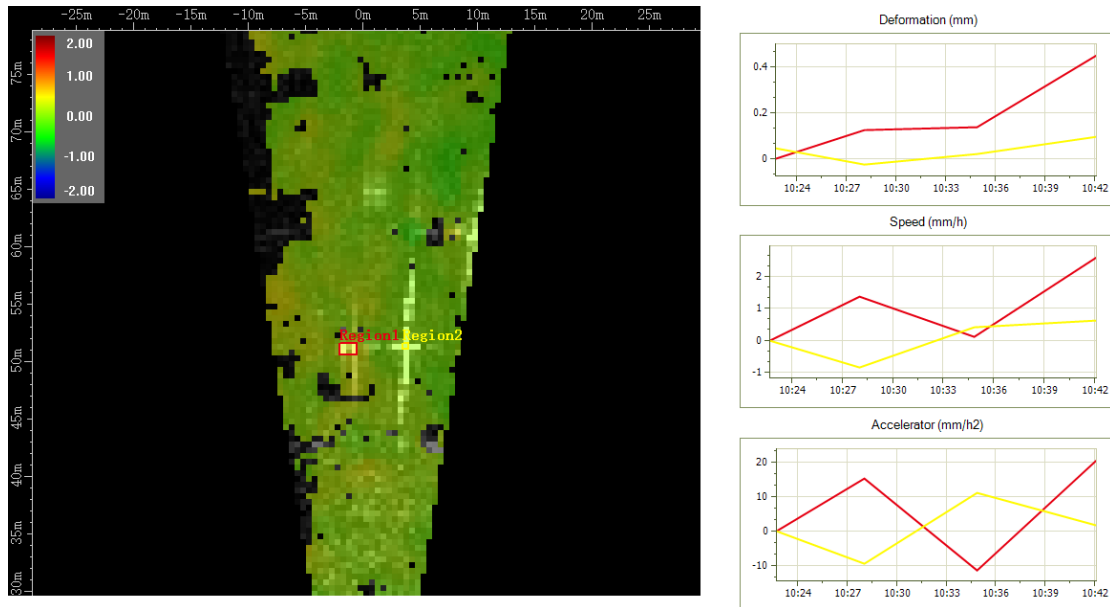


圖 5-16 沙袋模擬位移成果圖

三、小結

位移實驗結果顯示 GB-SAR 可有效「偵測」位移或變形的發生，但受到雷達反射特性會「放大區域」的特性，使得精確的「點」位移範圍變的較為模糊。

此外，變形量不一定是等量變化，GB-SAR 可以觀測大範圍的變化，但是若要達到大範圍等量變形則與雷達解析度有關，要控制可能至少數米的等量變化以及周圍還有明確不動的控制點才能較完善整個實驗，但透過目前做的實驗已經可以確認 GB-SAR 可以達到大範圍的邊坡變化預警能力。最後，若帆布受土石影響導致擠壓變形，其也是有觀測的可能。若變化幅度尺度小於監測解析度，如沙包測驗，GB-SAR 仍有機會觀測，但若為大尺度變化則 GB-SAR 的觀測優勢會更加顯著，可有效監測大範圍邊坡位移。

第三節 介電環境比較

因為不同的大氣環境會影響雷達波傳導速度以及相位，故研究初步測試降雨期間的 GB-SAR 反射與同調性情況。另乾燥土地與濕潤土地對於雷達回波強度有所影響，當土壤含水量越高則會有越高的回波數值，故在介電環境比較進行測試。

一、降雨期間測試

本計畫於臺南龍崎區牛埔進行降雨期間監測，成果如第四章第二節第三項。可發現在降水期間雷達回波強度並無太大變化，推測原因為地面均為濕潤，但雨滴無影響回波強度。有別於降雨期間回波強度無變化，同調性卻產生變化，下方原為植被區無法取得同調性，但在下雨期間卻取得同調性，初步判斷可能與同調性計算方式有關，增加同調性的範圍如圖 5-17 中左下紅色範圍。而原本屬於高同調性的裸露區則差異不大如圖 5-17 中黑色箭頭地區。

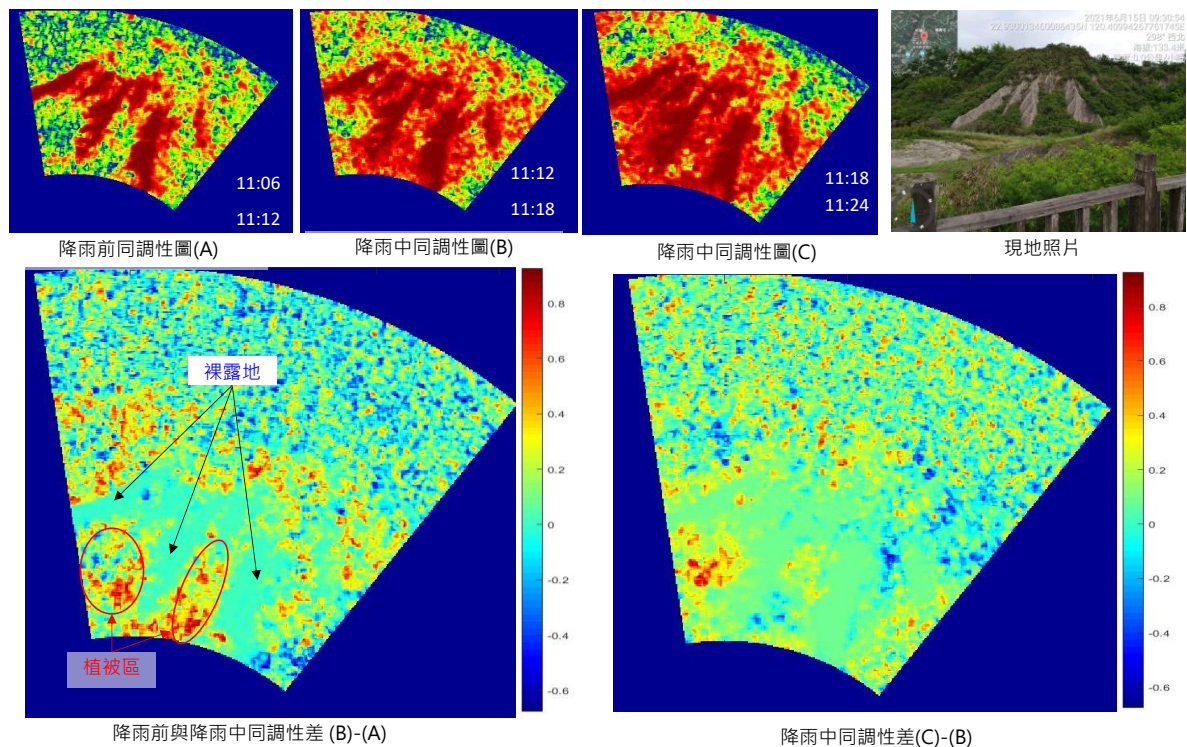


圖 5-17 降雨期間增加同調性範圍圖

二、乾濕地比較

本計畫於臺南龍崎區牛埔有乾燥泥岩與濕潤泥岩的紀錄，從整體資料可以發現雷達回波數值有明顯提升，整體振幅平均值自 0.00403 上升至 0.00646，提升約 1.6 倍。檢視高雄寶來資料，在 5 月 18 日雨季來臨前與 7 月 2 日比較，可發現雷達回波平均值自 0.00138 提升至 0.00182，提升約 1.3 倍，由於寶來 7 月份下方資料有受到河床土石堆高遮蔽影響，導致振幅強度減少，但上方整體裸露地振幅強度皆有所提升，故寶來地區雷達回波強度提升將略有低估。

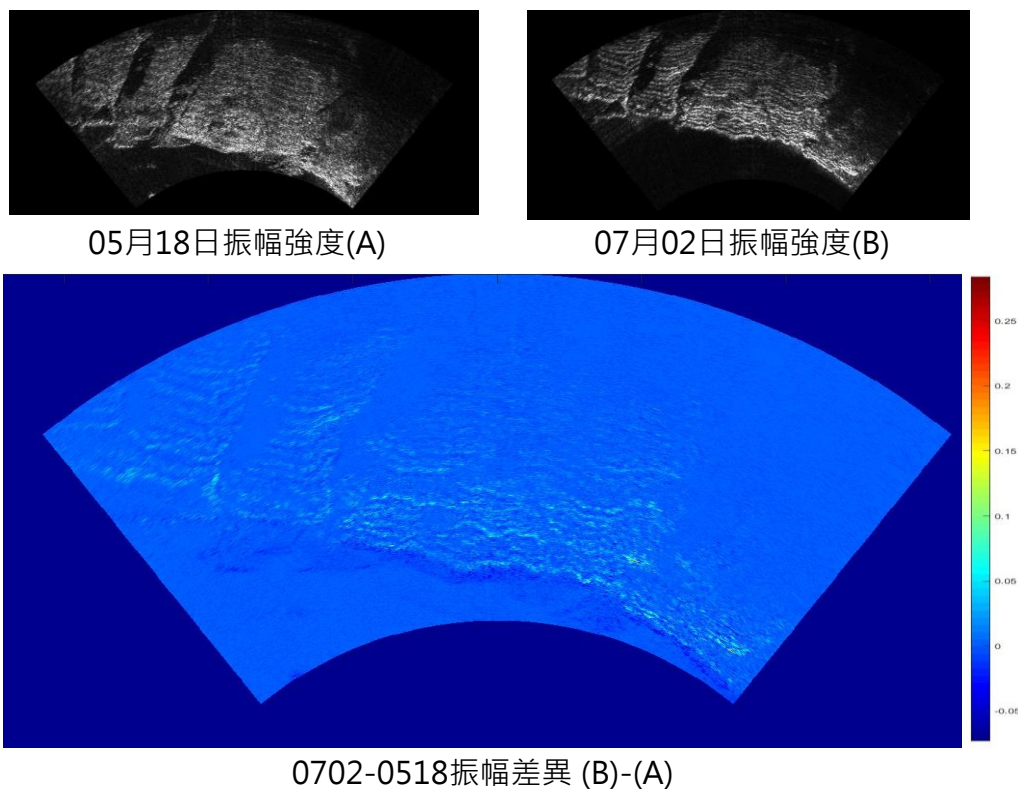


圖 5-18 乾燥與濕潤土壤雷達回波差異圖

第四節 巡迴式 GBSAR 監測

受限於儀器建置成本高，本研究僅有一部 GB-SAR，但因觀測頻率高且於同地點進行觀測，本研究嘗試是否能將不同梯次完成之雷達回波進行合併分析。所謂「巡迴式」為代表軌道與儀器有經過搬運與重新組裝後再行比較的資料。儀器透過噴漆定位與定高方式進行確保高度以及無旋轉情況，如圖 5-19。



圖 5-19 巡迴式監測儀器架設方式

一、高雄寶來

本研究將巡迴式放置之資料進行同調性分析，期間採用不同的時間，並儘量以時間間隔較低之資料進行同調性運算，如圖 5-20。從圖中可發現大多若儀器經重新放置後，同調性大多無法通過門檻值(紅色範圍才算達到門檻值)。其中 5 月 4 日與 5 月 18 日資料可發現達門檻值範圍明顯優於其他組合，推測可能兩日的氣候與土壤條件相似，使其有較佳的同調性，六月份之後開始降水，故 5 月 18 日與 6 月 11 日雷達回波強度差異較大，使得巡迴式架設同調性失去。

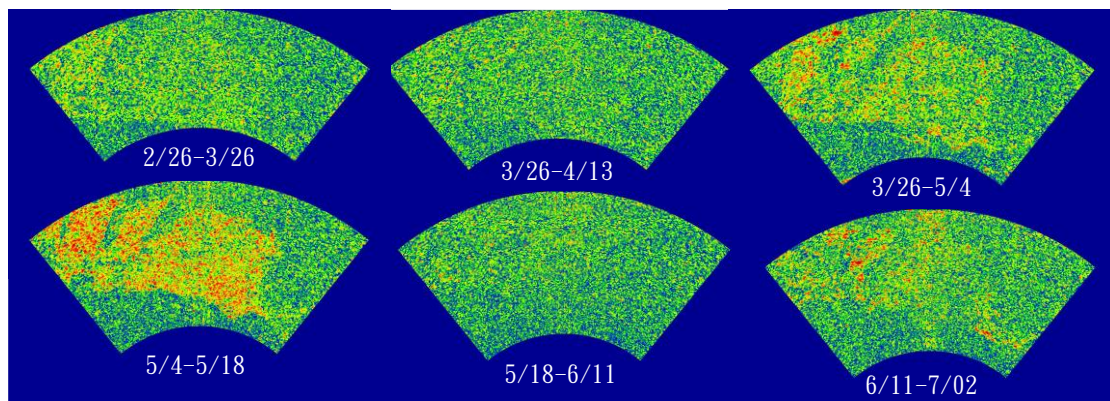


圖 5-20 巡迴式監測同調性成果圖(高雄寶來)

二、臺南龍崎

於龍崎研究區透過巡迴式放置方法，大多無法達到同調性，但在 5 月 6 日與 5 月 21 日資料，於裸露區可以勉強看到其輪廓，其餘的則同調性均很低，推測可能原因為兩日臨前降雨很低，泥岩均屬乾燥，在六月雨季雷達回波強度差異較大使得後續資料同調性低。

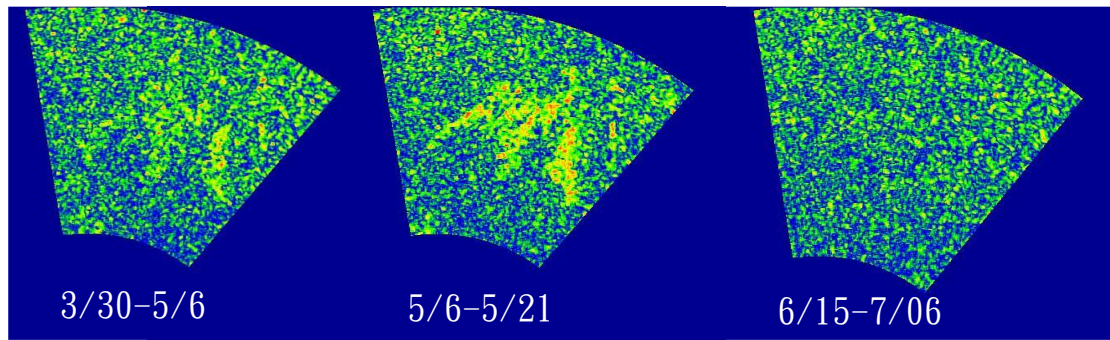


圖 5-21 巡迴式監測同調性成果圖(臺南龍崎)

三、小結

綜合巡迴式監測結果，可以發現若架設量測穩固以及兩日大氣狀況與土壤含水量相似是有可能取得同調性，唯獨即使取得同調性，所計算出的差值也在毫米變化，在兩個星期內是否邊坡僅有幾毫米的變化其不確定性極高，若要有較為可信任的成果仍須進行連續試驗。

四、巡迴式儀器放置偏差測試

由於巡迴式監測需要重新架設與放置儀器，較大問題為雷達軌道重量達 100 公斤，要能夠完全放在同一地點且誤差在 Ku 波段波長(1.7 公分)內在實務操作上有其難度，故進行軌道若放置不準確導致之觀測問題測試。

(一) 雷達主機於軌道上移動或旋轉

研究測試將雷達主機於俯仰平台上位移，如圖 5-22。並測試往右移動、往前移動與斜距移動，最多測試至 1 公分，可發現雷達均可取得同調性，推測原因為由於主機仍放置於軌道上，雖然兩次資料有所偏移，但整體變化為系統性變化，故仍能取得同調性，如圖 5-23。但實際上雷達主機會以螺絲固定，故於巡迴式放置此情境不會發生。

另將軌道不同旋轉角度資料進行測試，如圖 5-24，可以發現其仍能取得同調性，唯受旋轉影響網格最邊緣由無法有效重疊的網格。進一步檢視其位移量，可以發現整個位移也有旋轉的情況，且隨著角度增大位移的旋轉角度也增大，如圖 5-25。



圖 5-22 雷達主機(含天線)於俯仰平台位移

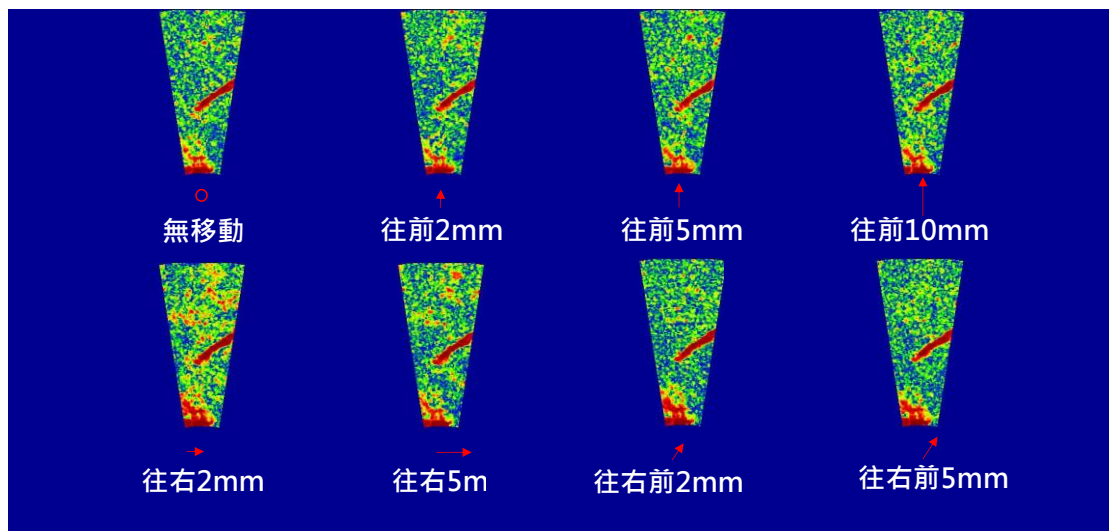


圖 5-23 雷達主機(含天線)於俯仰平台位移同調性成果圖

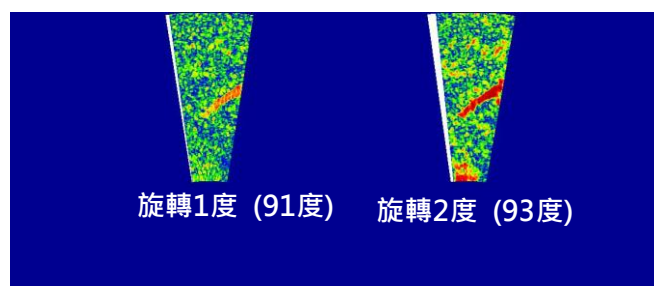
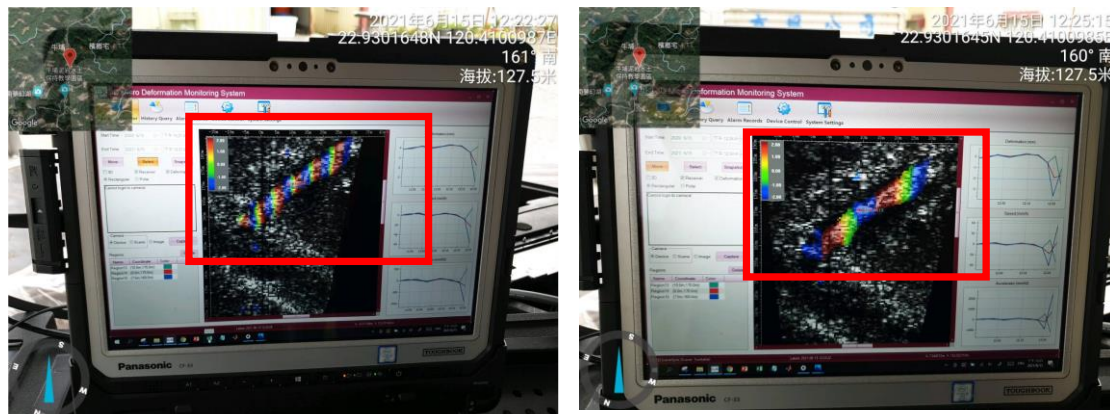


圖 5-24 雷達主機(含天線)於旋轉平台旋轉疊圖同調性成果圖



旋轉1度 (91度) 變形量

旋轉2度 (93度) 變形量

圖 5-25 儀器放置於旋轉平台旋轉疊圖變動圖

(二)雷達軌道位移

雖然移動雷達機 1 公分仍可取得同調性，但其成果不適用於巡迴式架設，因為巡迴式架設主要問題在軌道無法放置準確。故進行雷達軌道位移測試，測試將雷達軌道腳架往後位移 5 公分，如圖 5-26，可發現會直接失去同調性，可能由於軌道移動與僅於俯仰平台上變化差異更大。



圖 5-26 儀器軌道腳架往後位移 5 公分

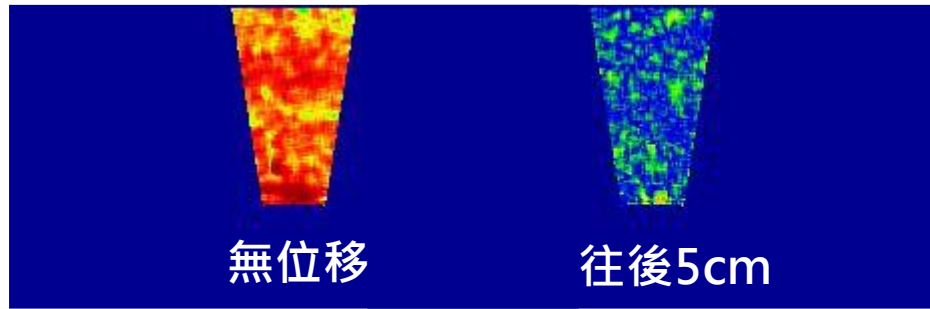


圖 5-27 儀器軌道腳架往後位移同調性成果

另參考第二章同調性計算公式(公式 2)，可發現同調性計算為透過網格罩窗進行計算，若透過降低帶寬方式，降低解析度，此時可能可以增加同調性，因為容許的誤差網格加大，故本研究測試將帶寬降至 200MhZ，發現在位移 5 公分的情況下其尚未完整失去同調性，如圖 5-28，但相同實驗場帶寬為 400MhZ 則連同調性圖都無法繪製，如圖 5-29。

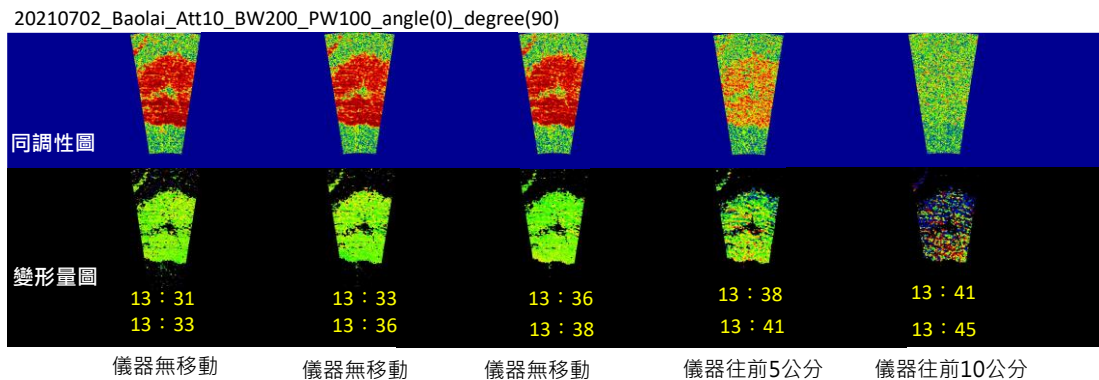


圖 5-28 儀器軌道腳架往後帶寬 200MhZ 位移同調性成果

20210702_Baolai_Att10_BW400_PW100_angle(0)_degree(90)

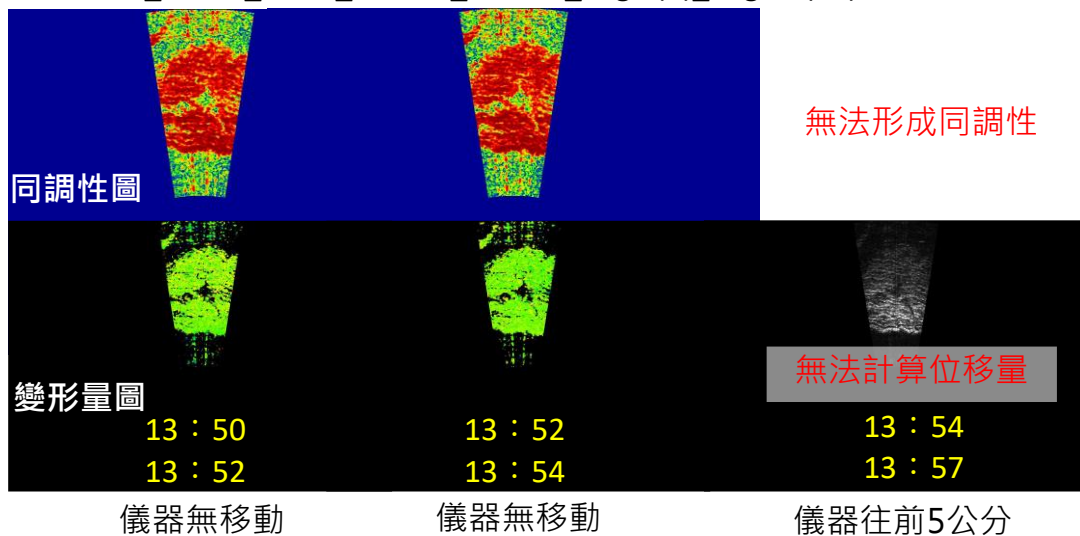


圖 5-29 儀器軌道腳架往後帶寬 400MhZ 位移同調性成果

第五節 耗電量測試

目前 GB-SAR 外業使用行動電源，故能持續觀測多久也是想要瞭解的參考因素，於室內停車場進行耗電量測試如圖 5-30。經量測儀器待機狀態每小時約消耗 115 Wh，軌道移動狀態約消耗 128Wh，如圖 5-31。經過實際測試目前團隊使用之 1461Wh 變頻電池約可使用 8 小時。發現即使雷達機不掃描其待機仍持續消耗 115 Wh 功率，故若採用間隔掃描(1 小時 1 筆)與持續掃描(1 小時 10 筆)，其耗電量大約僅差 10%左右，但監測資料量可能會是 10 倍。若需要長期監測仍須已可提供穩定電源為要件。



圖 5-30 耗電量測試現場照片



圖 5-31 待機與軌道移動時即時耗電量

第六章 結論與建議

本計畫以巡迴式掃描監測模式，於高雄寶來與臺南龍崎進行共 22 次作業，並搭配所收集的雨量站與地震站觀測資料，評估微變形量與外在擾動之相關性。另外，GB-SAR 創新應用測試方面，進行了帆布增強同調性實驗、實驗場位移驗證、介電環境比較、巡迴式監測模式之討論及儀器耗電量測試。最後提出以下結論及建議。

一、結論

- 1、 依照寶來與龍崎上半年度掃描數據觀察可發現，若地震時間與空間間隔較遠，則邊坡主要為表面變化，變動點呈現散佈情況，若地震時間與空間距離較近，影響岩體範圍較大，在寶來地區邊坡變動主要發生於上邊坡，龍崎地區則為右側邊坡有變動的情況。
- 2、 而在降水驅動邊坡變動方面，由觀察數據可發現，降雨導致邊坡位移可能有延遲情況，但實際降雨延遲仍須進行長時間觀測較能確認。
- 3、 寶來與龍崎下半年度監測期間，開始頻繁降雨，連續降雨期間亦存在有鄰近地區之地震記錄，即可觀察到邊坡上之特定區域出現明顯微變動特徵與型態。
- 4、 創新應用測試帆布增強同調性實驗，於校區實驗場與寶來現地，結果皆顯示帆布能提高所覆蓋區域之同調性。不同於角反射器為點狀數據，帆布為面狀數據，有其優勢，但如何穩固緊貼設於目標物，有待商榷。
- 5、 另外，討論沙袋模擬帆布實驗結果，了解在有效的實驗變動下，GBSAR 可觀察到沙袋之位移，但受限於沙袋尺度過小，變化幅度尺度小於監測解析度，而無法有等量變化。若為大尺度變化則 GB-SAR 的觀測優勢會更加顯著，可有效監測大範圍邊坡位移。
- 6、 實驗場之強反射點位移，角反射器位移實驗結果顯示 GB-SAR 可有效「偵測」位移或變形的發生，但受到雷達反射特性會「放

大區域」的特性，使得精確的「點」位移範圍變的較為模糊。

- 7、 在降雨造成之不同的介電環境之下，雷達回波強度並無太大變化，即雨滴無影響回波強度。但部分區域植被會因降雨提高同調性，初步判斷可能與同調性計算方式有關。
- 8、 綜合巡迴式監測結果，可以發現若架設量測穩固以及兩日大氣狀況與土壤含水量相似是有可能不失同調性。
- 9、 耗電量測試結果，發現即使雷達機不掃描時，其待機仍持續消耗電量。若比較間隔掃描時間不同狀況下，其耗電量差異不大，但監測資料量可能就相差甚大。

二、建議

1. 為釐清降雨所引發之邊坡變動延遲狀況，建議儀器於降雨期間前後進行長時間固定式連續掃描，期望於時間序列中，標示出降雨所造成之影響時間範圍。
2. 若想進行等量位移變化之實驗，建議將實驗場尺度拉大，以符合監測距離之解析度。

參考文獻

1. 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。
2. 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。
3. 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。
4. 吳星輝，馬海濤，& 張傑. (2019). 地基合成孔徑雷達的發展現狀及應用. 武漢大學學報信息科學版, 44(7), 1073-1081.
5. 李俊慧，洪，王.，汪學剛，and 陽，燕. (2016). "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.
6. 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。
7. 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。
8. 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，國立成功大學資源工程學系碩士論文，共 127 頁。
9. 陳強，劉國祥，李永樹，and 丁曉利 (2006). "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.
10. 曾濤，鄧雲開，胡程，& 田衛明. (2019). 地基差分干涉雷達發展現狀及應用實例. 雷達學報, 8(1), 154-170.
11. 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研究所，2000。
12. 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。
13. 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.

14. 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.
15. Carlà, T., Tofani, V., Lombardi, L., Raspini, F., Bianchini, S., Bertolo, D., ... & Casagli, N. (2019). Combination of GNSS, satellite InSAR, and GBInSAR remote sensing monitoring to improve the understanding of a large landslide in high alpine environment. *Geomorphology*, 335, 62-75.
16. 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.
17. Curlander, J. C., and McDonough, R. N. (1991). *Synthetic aperture radar*, Wiley, New York.
18. Eeckhaut, M. V. D., Poesen, J., Verstraeten, G., Vanacker, V., Nyssen, J., Moeyersons, J., Beek, L. v., and Van-dekerckhove, L. (2007). "Use of LIDAR-derived images for mapping old landslides under forest." *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(5), 754-769.
19. Ferrigno, F., Gigli, G., Fanti, R., Intrieri, E., and Casagli, N. (2017). "GB-InSAR monitoring and observational method for landslide emergency management: the Montaguto earthflow (AV, Italy)." *Natural Hazards and Earth Sys-tem Sciences*, 17(6), 845-860.
20. Forstén, H. (2017). "Third version of homemade 6 GHz FMCW radar." <<https://hforsten.com/third-version-of-homemade-6-ghz-fmcw-radar.html>>. (11/4, 2020).
21. Frodella, W., Salvatici, T., Pazzi, V., Morelli, S., and Fanti, R. (2017). "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.
22. Gili, J. A., Corominas, J., and Rius, J. (2000). "Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring." *Engineering geology*, 55(3), 167-192.
 23. Glenn, N. F., Streutker, D. R., Chadwick, D. J., Thackray, G. D., and Dorsch, S. J. (2006). "Analysis of Li-DAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity." *Geomorphology*, 73(1-2), 131-148.
 24. Godt, J.W., "Observed and modeled conditions for shallow landsliding in the Seattle, Washington area", Ph.D. dissertation, University of Colorado, 2004.
 25. 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.
 26. Iglesias, R., Aguasca, A., Fabregas, X., Mallorqui, J. J., Monells, D., López-Martínez, C., and Pipia, L. (2014). "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.
 27. Iverson, R.M., "Landslide triggering by rain infiltration," *Water Resource Research*, 36(7):1897-1910, 2000.
 28. Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.-H., Loye, A., Metzger, R., and Pedrazzini, A. (2012). "Use of LIDAR in landslide investigations: a review." *Natural hazards*, 61(1), 5-28.
 29. Jakob M., H. Weatherly, "A hydroclimatic threshold for landslide initiation on the North Shore Mountains of Vancouver, British Columbia," *Geomorphology*, 54:137-156, 2003.

30. 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.
31. 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.
32. Leva, D., Nico, G., Tarchi, D., Fortuny-Guasch, J., and Sieber, A. J. (2003). "Temporal analysis of a landslide by means of a ground-based SAR interferometer." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(4), 745-752.
33. 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.
34. Lombardi, L., Nocentini, M., Frodella, W., Nolesini, T., Bardi, F., Intrieri, E., ... & Casagli, N. (2017). The Calatabiano landslide (southern Italy): preliminary GB-InSAR monitoring data and remote 3D mapping. Landslides, 14(2), 685-696.
35. 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.
36. Luzi, G., Pieraccini, M., Mecatti, D., Noferini, L., Guidi, G., Moia, F., and Atzeni, C. (2004). "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.
37. Mensa, D. L. (1981). High resolution radar imaging, Artech House
38. Monserrat, O., Crosetto, M., and Luzi, G. (2014). "A review of ground-based SAR interferometry for deformation measurement." ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 93, 40-48.

39. Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., and Papathanassiou, K. P. (2013). "A tutorial on synthetic aperture radar." IEEE Geoscience and remote sensing magazine, 1(1), 6-43.
40. Pieraccini, M., & Miccinesi, L. (2019). Ground-based radar interferometry: A bibliographic review. Remote Sensing, 11(9), 1029.
41. Rao, S. (2017). "Introduction to mmWave sensing: FMCW radars." Texas Instruments (TI) mmWave Training Series.
42. Richards, M. A., Scheer, J., Holm, W. A., and Melvin, W. L. (2010). Principles of modern radar, Citeseer.
43. 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.
44. Tarchi, D., Casagli, N., Fanti, R., Leva, D. D., Luzi, G., Pasuto, A., ... & Silvano, S. (2003). Landslide monitoring by using ground-based SAR interferometry: an example of application to the Tessina landslide in Italy. Engineering geology, 68(1-2), 15-30.
45. Tarchi, D., Casagli, N., Moretti, S., Leva, D., and Sieber, A. J. (2003). "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).
46. Tarchi, D., Ohlmer, E., and Sieber, A. (1997). "Monitoring of structural changes by radar interferometry." Journal of Research in Nondestructive Evaluation, 9(4), 213-225.
47. Terlien M.T.J., "The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds," Environmental Geology, 35(2-3):125-130, 1998.
48. Zebker, H. A., and Goldstein, R. M. (1986). "Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations." Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 91(B5), 4993-4999.

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	以設計試驗方式檢討 GB-INSAR 之觀測技術，符合研究方法之應用方式，惟試驗設計之處理與重複如何設計，則未見詳述。	GBSAR受植被影響導致同調性不足，故本計畫將嘗試增加雷達同調性以增進使用本技術之情境。另由強降雨驅動之非穩定滑坡，現地緊急處理多會使用帆布隔離水分入滲，本實驗期望確認是否透過帆布遮蓋之邊坡仍可監測其微變形量。
2	以帆布覆蓋克服植生邊坡無法進行GB-INSAR 監測之限制，雖是一種嘗試，惟在現地大面積植生狀況下，其可行性，似有斟酌之處。	感謝委員意見，遮蔽植生為提高同調性；帆布覆蓋測試主要為希望後續可針對使用帆布進行緊急隔水處置之邊坡進行即時觀測。
3	主持人對INSAR之技術應用相當嫻熟，足可勝任本計畫之執行。	感謝委員意見。
4	由於地基合成孔徑屬近距離監測（相對於衛星載的合成孔徑）可減少各種修正參數，希望可以獲得更好的結果。	相較於衛載合成孔徑雷達，地基合成孔徑雷達所影響之誤差較少，且觀測頻率較高，可作為即時監測使用。
5	由於地基合成孔徑雷達解析結果精度高，建議要增設強化反射的介質，需要有固定穩定。	感謝委員意見，本計畫設計一金屬製角反射器，可有效提供強反射數值。角反射器設置確實應固定穩定減少其晃動穩定，始可作為有效之參照點。
6	GB-INSAR監測，受限於目前KU波段無法穿透密林區，是否有可改變使用之波段，為C波段或L波段？	本儀器尚無法改變其波段，後續可納入考慮。
7	使用GB-INSAR 之單次成本	若機動進行擺設人員出動費

項次	審查意見	回覆辦理情形
	約為多少？又其儀器的建置成本為多少？	用與儀器使用費之攤提單次觀測成本約30萬元。儀器包含軌道、雷達機、旋轉平台、電源穩定器、操作軟體、筆記型電腦，建置成本約800萬。
8	透過覆蓋特殊材質帆布，或可克服邊坡無法監測之限制，而其鋪設方式在植生區應如何鋪設？	帆布覆蓋測試主要為希望後續可針對使用帆布進行緊急隔水處置之邊坡即時監測。目前實驗為直接將帆布覆蓋於草本植被上，並於周圍以鋼釘固定，以提高該區域之同調性。

附錄二、期初審查意見回覆表

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	帆布鋪蓋所造成坡面反射與實際坡面之誤差值有多少？如高於崩塌變化量，則應加以評估此作法之合理性。	GBSAR為微變形自動化監測並非測量儀器，研發以近即時山崩預警為主軸。當地表有裂隙發生時，緊急搶救鋪設的不透水塑膠布就成了可以監測對像。本研究為展示這樣的可行性。帆布位置與大小是由現地狀況需求而鋪設，若帆布固定性不佳，則無法增強本方法量測。所以要在植生區，面狀，自動微變形監測是很困難的，本研究就是要增加可使用性而非發展成為適用於任何實際的觀測系統。
2	如何應用GB-INSAR於土石流之預警，請補充說明	土石流發生原因有三：豐富堆積物、充足水份與足夠坡度，然其大規模發生前幾小時土石流發生部應有地質不穩定徵兆，設置GBSAR可針對微變動偵測，並依據警戒值提出警告。
3	是否有波長較長，不受植被限制的GB-SAR？	目前學界或業界GBSAR採用最長波段GBSAR為C波段(波長5公分)，該波段依據經驗尚受植被影響嚴重，故目前無不受植被影響之GBSAR。若採更長波段如：L波段(波長30公分)，依據理論公式計算，其網格解析度在200公尺處為18公尺(距離越遠則遞減越快)，以可通視範圍，該解析度以無法明確判釋物體位置，無法進行監測，若波長再加長並不適用

項次	審查意見	回覆辦理情形
		於地面雷達觀測變形。
4	測量成本是否會很高?	儀器整套系統建置成本約800萬，若需要長時間監測，則需要穩定電源、固定平台與雨遮等，故視觀測時間長度將影響測量成本。若為短時間(數小時)監測則成本將降低。
5	本計畫書已經證實之前所提過的疑問，植被的確會破壞兩期資料的相干性，導致無法獲得可靠的差分干涉資訊，也因此無法推估公分等級的地表位移。而且也具體陳述「就算是放置角反射器也無法校正以植被為主導之邊坡」本期計畫提出幾點改善方法，唯執行前應細思幾個關鍵問題：	感謝委員建議，說明如意見回覆6與7。
6	影響雷達波反射訊號的另一項重要因子是地表之介電係數，但本計畫的實驗中沒有提及如何獲取前後兩期地表介電係數的方式?亦或是需要做如何的假設?屆時對結果會有什麼影響?	目前假設前後兩期的介電係數相同，始進行分析。然而，經過幾次測試下來，尚無法解決前後兩期差異過大的問題。以「固定式」觀測，儀器放置固定位置不移動軌道即使間隔1小時仍可取得同調性；以「巡迴式」觀測，將儀器位置噴漆，2週後於原地觀測，其同調性與變形量尚無法信任。儀器參數若要取得兩筆資料同調性，目前介電係數僅能設為相同，無法改變。另發現若於下雨期間監測，其高空氣濕度會讓回波反射值增強。另濕潤的土壤也會比起乾燥的土壤有更強的回波反射強度。
7	鋪設大型帆布於植被區域，是為了避免植被區細微變動頻	感謝委員意見，確實兩期影像需要能建立可靠同調性始可

項次	審查意見	回覆辦理情形
	繁，無法獲得可靠的差分干涉資訊。但鋪了帆布就解決問題了嗎？其實核心的問題是兩期影像要能建立可靠的相關，但從照片看來，帆布覆蓋的區域其實也只是一小塊，真的能建立相干嗎？	分析，目前研究尚無法建立相干性。
8	此方法需要先建立可靠的基準資料，建議先選取一處不受植被影響，出露良好，又有明顯位移之區域，同步使用雷達衛星DINSAR處理將位移量換算為水平與垂直位移量，然後與地基SAR的成果比對，這樣更有說服力，更清楚地基SAR的有效範圍。	衛星DINSAR觀測間隔時間為7~14天，目前計畫尚未將GBSAR放置長時間進行比較，後續將委員意見納入未來測試參考。
9	計畫書後面所載在茅濃溪裸露良好之邊坡進行的實驗，可以善加規劃，以目標物不動，雷達訊號源移動的方式，來模擬發生了微小位移，但前後兩期觀測條件又充分相干的理想情況下，測試儀器的精度，會是另一個好方法。	已進行相關測試，成果說明於期中報告書「第四章」，包含測試軌道移動、雷達機偏移等，在BW(帶寬)400Mhz下，同調性無法取得，但若BW(帶寬)200Mhz，則可取得同調性，然而其變形量無法有良好的解釋。
10	建議釐清GB-SAR能分析的特性，避免誤用了其結果。例如：在寶來架設3小時的觀測，由於沒有明顯位移，結論為「穩定狀態」，建議影該依據狀態說明3小時內無明顯變化，尚不能稱邊坡穩定。另外，牛埔月世界做1小時的觀測結論月世界地形屬於穩定的邊坡環境，也是不宜的結論。	相關文字已進行修正，感謝委員意見。
11	GB-SAR，得到的結果為「靠近」或「遠離」觀測站，其中	GB-SAR變化均為相對變化，靠近或遠離即代表邊坡處於

項次	審查意見	回覆辦理情形
	達mm等級的變化量，應用在裸露的邊坡坡體，是代表山體“位移”，靠近(/遠離)觀測站，抑或是山體上的破碎岩局的堆積(/掉落)應該要有一個比較恰當的描述。	極不穩定狀況，相關敘述將予以修正。
12	本研究在裸露的邊坡上覆蓋帆布，擬強化解算的效果，但是如何考慮帆布在風吹動下就是有cm等級的飄動，如何能解算出mm等級的位移？	若帆布有飄動情況，則其同調性將無法超過閾值，無法解算位移，故實驗為儘量將帆布繃緊並遮蔽晃動之植被，以增加可分析之範圍。
13	本研究擬以覆蓋帆布方式來解決GB-SAR無法應用於植生茂密地區，惟帆布覆蓋如未緊實，是否亦會有表面變動，造成誤判之可能性，這部份應如何克服？	帆布應覆蓋緊實，若有表面變動將會有誤判情況，測試結果尚無法克服實際變形應用，唯可確認若邊坡有鋪設帆布，GB-SAR仍可進場觀測，若帆布夠緊實，例如：已經被土石撐滿則可持續監測其變化量。
14	以GB-SAR 監測邊坡變形的方式可以理解，但本研究主包含土石流，而土石流像流體，這部份打算如何規劃？測區為何？	土石流發生前幾小時其發生部應有地質不穩定徵兆，設置GB-SAR可針對微變動偵測，並依據警戒值提出警告。

附錄三、期中審查意見回覆表

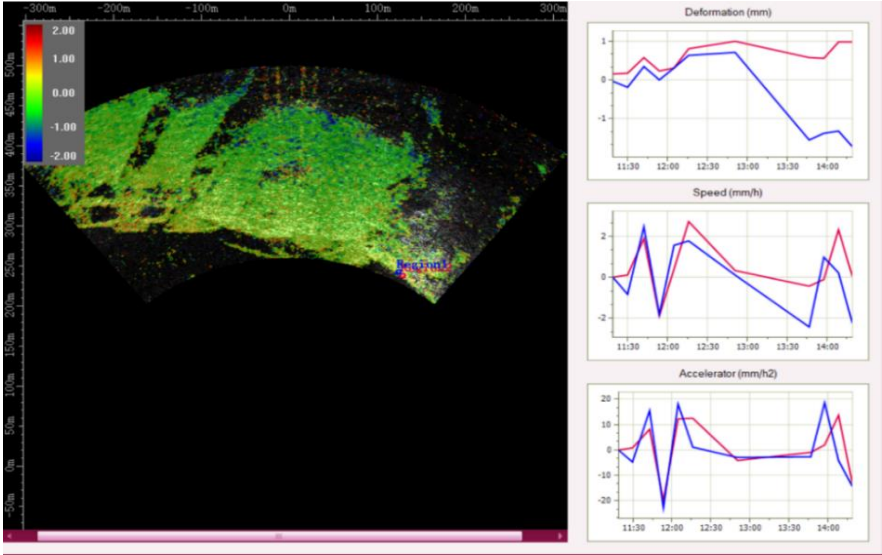
項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	建議文獻回顧除了地基合成孔徑雷達介紹之外，應該收集該設備用在坡地監測應用的實例。	補充說明坡地監測實例於文獻回顧第三節。
2	對於高精度量測設備的應用與校驗，需要先在現地建立高精度的三維地形資料，包括寶來、及龍崎牛埔，以利地基合成孔徑雷達監測分析比較之依據。	本計畫於龍崎牛埔與寶來已使用地面光達建立高精度地形資訊，作為GBSAR展示依據。分析比較方面，九月二十八日寶來監測為例，礙於GBSAR累積變化量為毫米量級，而光達則是公分或公尺量級變化，故還無法分析說明。
3	寶來地區的監測位移最高約1mm，對於裸露邊坡的變化，代表甚麼樣的意思？應該要進一步闡述。這可能是地表一個土壤顆粒的掉落？如果是這情境，並不能擴大解釋坡地穩定與否。	位移代表SAR影像相位差轉換表面變形量為1 mm，故單次的變化量並不能代表坡地是否穩定，而是持續變形量，以目標範圍平均值去觀察該目標位置之變化速度與加速度，此較可解釋坡地是否穩定。
4	目前單一事件的量測(1~2小時)的結果，與前期降雨、地震未必有直接關係，因對地震、降雨等事件，對於邊坡造成的落石或是潛變位移，大多是立即且即時，建議視為獨立事件，不須作相互影響的連結。	感謝委員意見。 根據李馨慈博士之研究成果(李馨慈，博士論文，2010)可瞭解到：台灣誘發山崩的主要因子，其中包含重大地震、以及高強度降雨二種；而複合型事件(先地震後降雨)在短時間內被證實與邊坡破壞有高強度的相關，當時間尺度拉大，

項次	審查意見	回覆辦理情形
		其相關性會逐步降低。 對於局部地區而言，邊坡變化確實未必與相鄰發生的地震或降雨事件有直接連結，亦不可忽視每一場事件對於邊坡所造成的影響。 地震與降雨於高雄寶來監測區域，是否可視為獨立事件？目前團隊無法下定結論。因此團隊在進行每次外業監測結果時，仍會紀錄監測前之地震與降雨量等資料，以利監測後分析研究、以及將提供後續相關區域之致災因子分析研究所用。
5	建議多加強校內實驗場地之位移分析，以了解設備的限制與效能。如果，目前試驗場這一部分未能解釋，更多現地監測結果，都將不易解釋。	本計畫已初步於校內實驗場建立GBSAR設備之限制與效能，驗證可偵測微幅變形量，並與真實變化量做對應，結果不盡完善，又因下半年度疫情，校內不開放等等因素，無法安排實驗，故將移至明年度計畫設計實驗。
6	本研究利用機動高的GB-SAR進行觀測，在現地條件符合下能即時獲取邊坡活動性變化，對於防災工作有其助益，但實務應用上，崩塌地觀測的限制性頗多，其技術可持續精進。	GBSAR儀器為偵測微幅變化，由於需放置軌道導致監測有所限制，其主要之應用可用於「即時」變化之紀錄。

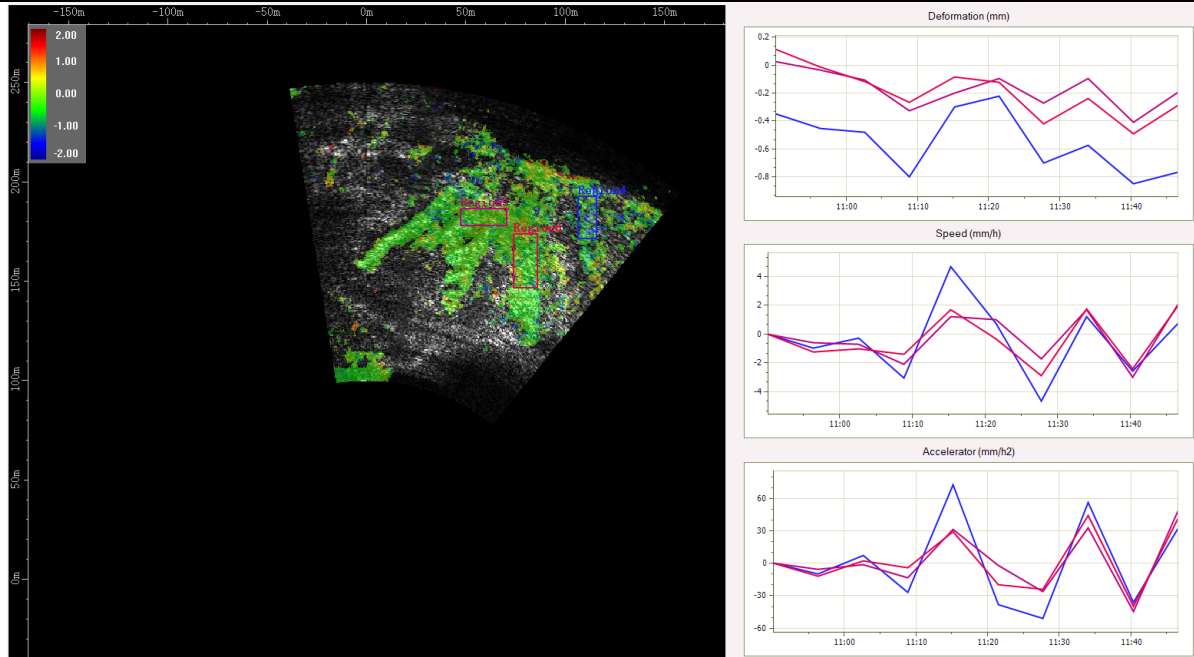
項次	審查意見	回覆辦理情形
7	本研究利用 GB-SAR 觀測邊坡活動，其研究地區寶來及龍崎均位於崩塌潛勢區，因研究題目為「土石流之預警機制偵測」，建議可強化與土石流警戒值之相互關係討論。	警戒值之發佈隨各土石流潛勢溪流有關，常見以雨量相關參數作為預警值，邊坡是否崩落則常以位移加速度作為預警值。GBSAR 作為監測位移量之工具要完成土石流警戒值偵測力猶未乏，僅能作為位移監測。
8	GB-SAR 未來可結合本局相關大規模崩塌辦理區進行研究。	感謝委員意見，參照辦理，若委員有相關需要監測內容可納入計畫進行評估或監測。
9	於實驗場設置角反射器，未來是否考慮將角反射器實際運用於研究地區？	已有放置角反射器於寶來崩塌地之經驗。角反射器放置監測與地點有關，有三點注意事項：1、易達性。2、距離，解析度與角反射器大小之考量。3、確定角反射器位置與架設固定不動，能做為控制點。
10	寶來於盧碧颱風期間有明顯崩塌及滑動擴大情形，建議進行前後期比較；惟當坡面變化較大時，此法是否仍可適用？	以 GBSAR 監測若兩次掃描之邊坡有顯著變化(位移超過 1.7 公分)則此方法不適用，會失去同調性，僅能適用於短時間基期之微小變形監測。
11	P5-11 龍崎雖於降雨期間觀測，惟其降雨量僅 2mm，似無法證明降雨對於雷達回波之影響，建議宜再安排降雨期間進行測試。	該次觀測雖然累計降雨量較少，但有觀測到降雨期間雷達回波與非降雨期間之雷達回波差異，且可發現對於目標邊坡仍可取得同調性並觀測其相位差，顯示 GBSAR 在觀測上較不受降雨影響。

附錄四、GB-SAR 觀測日誌

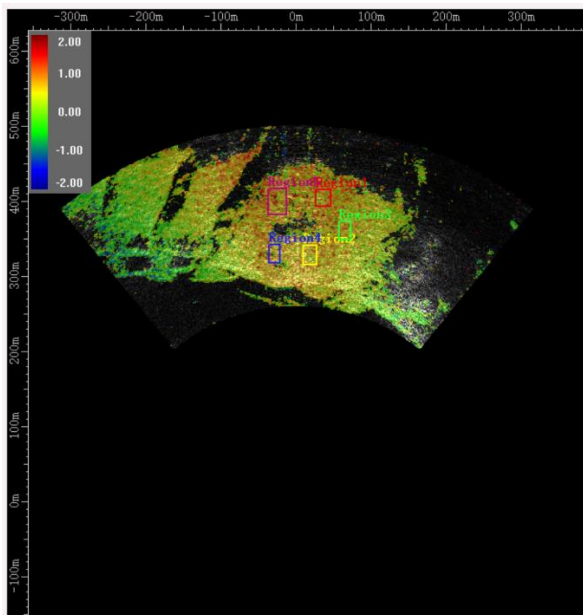
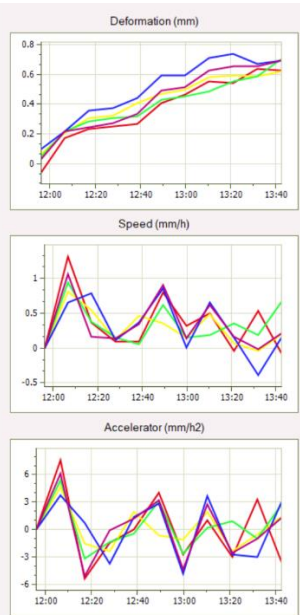
GB-SAR 觀測日誌

地點	高雄寶來區			日期	2021/02/26
緯度	23.111305 N				
經度	120.701387 E				
地點說明	高雄市寶來區荖濃溪左岸之「芳晨溫泉渡假村」後方露營地旁之河岸。				
儀器參數	PW	BW	組數	角度	
	50	400	12	60、75、90、105、120	
	大氣校正	天線			
	2	18			
觀測時間(起)		11：07		觀測時間(迄)	14：19
觀測圖表	現地照片	 參考位置  近照			
	SAR 累計變動量圖				
備註					

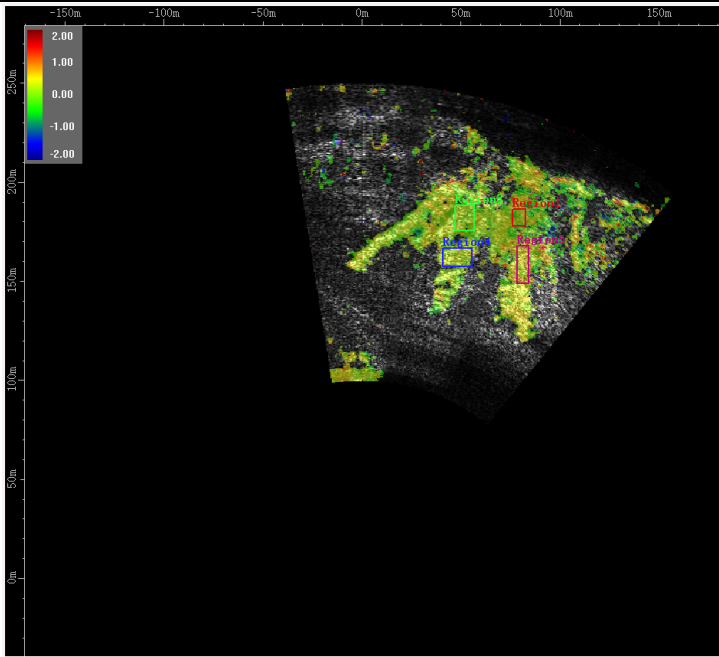
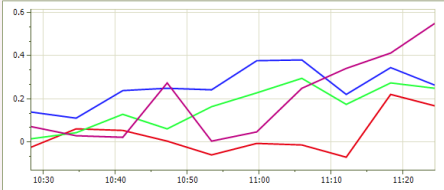
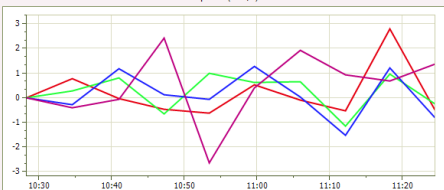
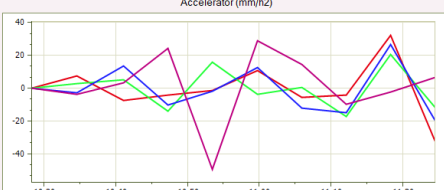
GB-SAR 觀測日誌

地點		臺南龍崎		日期	2021/03/30
緯度		22.9300 N			
經度		120.4100 E			
地點說明		牛埔泥岩水土保持園區道路旁行人步道上。(約於牛埔村辦公室東南方 80 公尺處)，			
儀器參數	PW	BW	組數	角度	
	50	400	11	90、105、120	
	大氣校正	天線			
	2	18			
觀測時間(起)		10：43		觀測時間(迄)	11：46
觀測圖表	現地照片	 參考位置		 近照	
	SAR 累計變動量圖				
備註					

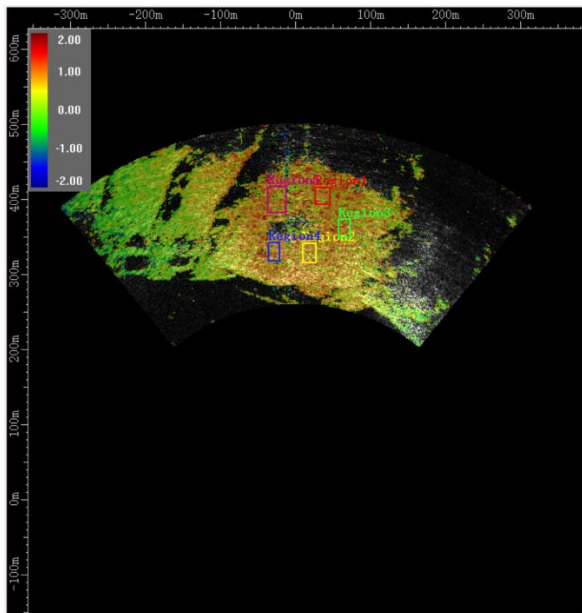
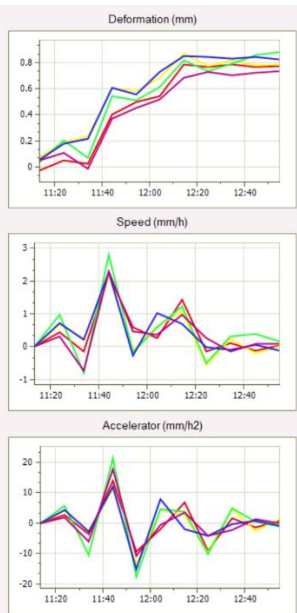
GB-SAR 觀測日誌

地點	高雄寶來區		日期	2021/03/26	
緯度	23.111305 N				
經度	120.701387 E				
地點說明	高雄市寶來區荖濃溪左岸之「芳晨溫泉渡假村」後方露營地旁之河岸。				
儀器參數	PW	BW	組數	角度	
	50	400	12	60、75、90、105、120	
	大氣校正	天線			
	2	18			
觀測時間(起)		11：45		觀測時間(迄)	
				13：42	
觀測圖表	現地照片	 參考位置		 2021年3月26日 11:39:54 23.1113N 120.7014E 338° 北 海拔:439.8米 速度:0.0公里/小時 近照	
	SAR 累計變動量圖	 			
備註					

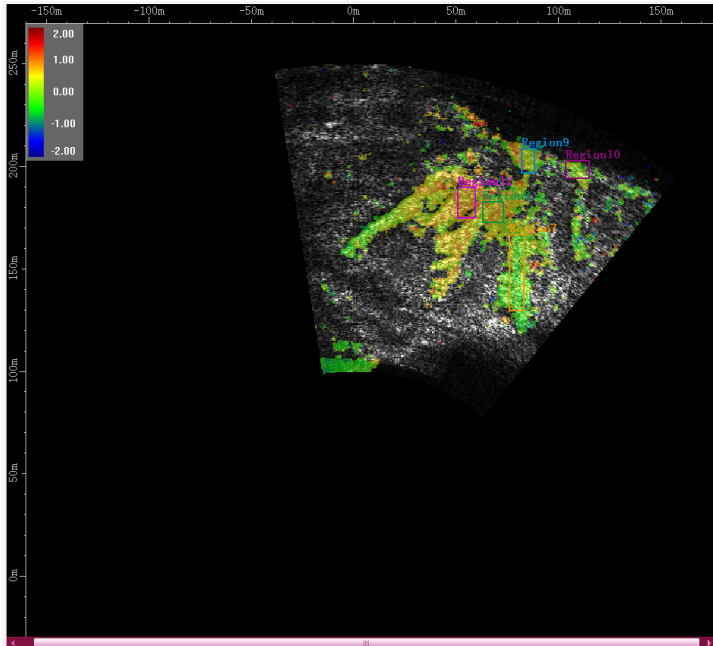
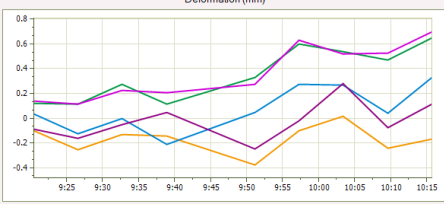
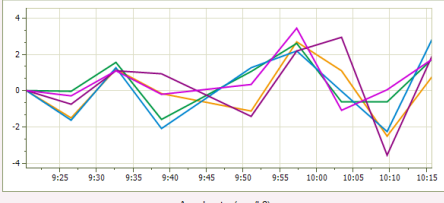
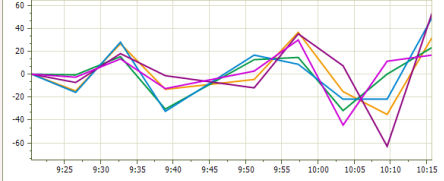
GB-SAR 觀測日誌

地點		臺南龍崎		日期	2021/04/23
緯度		22.9300 N			
經度		120.4100 E			
地點說明		牛埔泥岩水土保持園區道路旁行人步道上。(約於牛埔村辦公室東南方 80 公尺處)，			
儀器參數	PW	BW	組數	角度	
	100	400	11	90、105、120	
	大氣校正	天線			
	2	18			
觀測時間(起)		10：21		觀測時間(迄)	11：24
觀測圖表	現地照片	 參考位置		 近照	
	SAR 累計變動量圖	 Deformation (mm)  Speed (mm/h)  Accelerator (mm/h²) 			
備註					

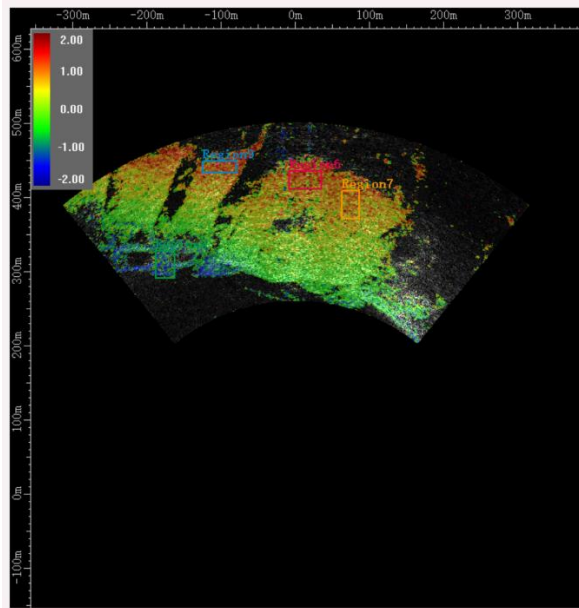
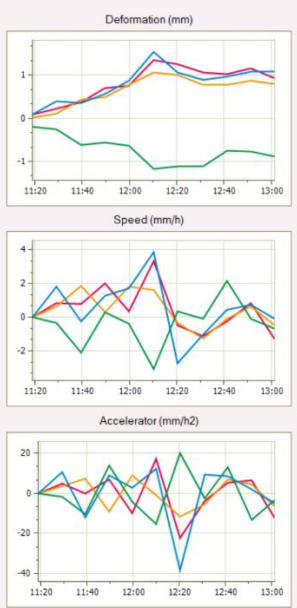
GB-SAR 觀測日誌

地點		高雄寶來區		日期	2021/04/13
緯度		23.111305 N			
經度		120.701387 E			
地點說明		高雄市寶來區荖濃溪左岸之「芳晨溫泉渡假村」後方露營地旁之河岸。			
儀器參數	PW	BW	組數	角度	
	50	400	12	60、75、90、105、120	
	大氣校正	天線			
	2	18			
觀測時間(起)		11：03		觀測時間(迄)	12：54
觀測圖表	現地照片				
		參考位置		近照	
觀測圖表	SA R 累 計 變 動 量 圖				
	備註				

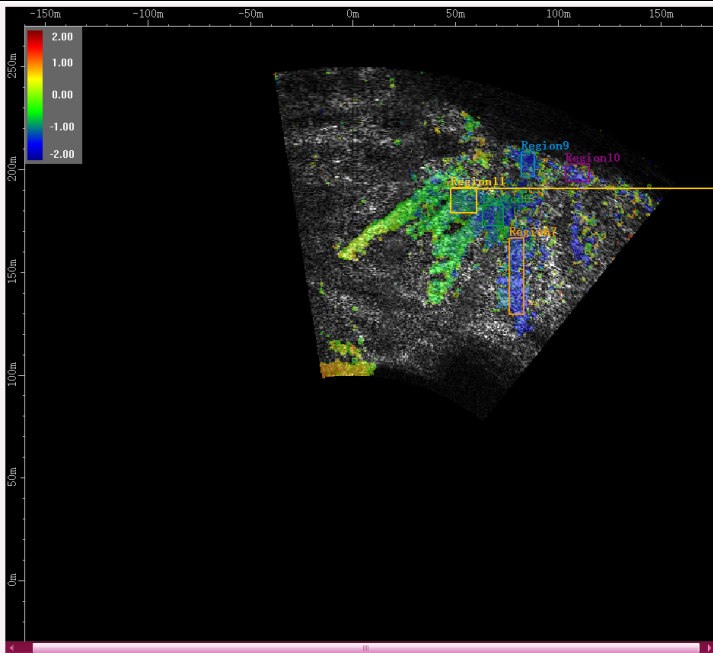
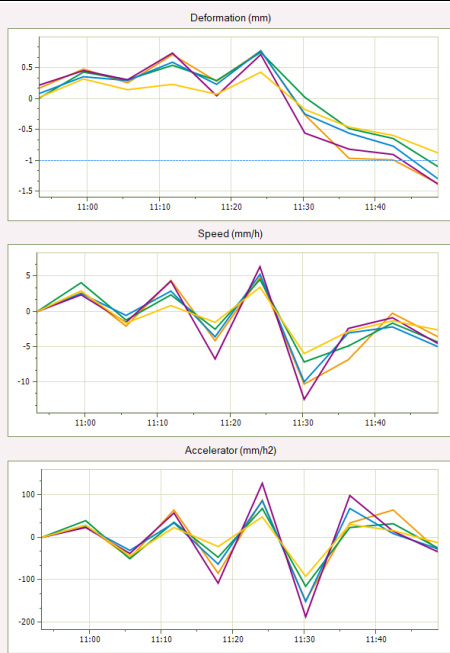
GB-SAR 觀測日誌

地點		臺南龍崎		日期	2021/05/06
緯度		22.9300 N			
經度		120.4100 E			
地點說明		牛埔泥岩水土保持園區道路旁行人步道上。(約於牛埔村辦公室東南方 80 公尺處)，			
儀器參數	PW	BW	組數	角度	
	50	400	11	90、105、120	
	大氣校正	天線			
	2	18			
觀測時間(起)		09：14		觀測時間(迄)	10：15
觀測圖表	現地照片	 參考位置		 近照	
	SAR 累計變動量圖			Deformation (mm)  Speed (mm/h)  Accelerator (mm/h2) 	
備註					

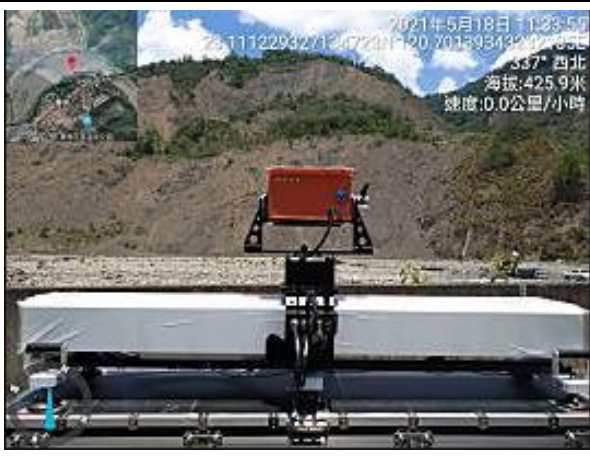
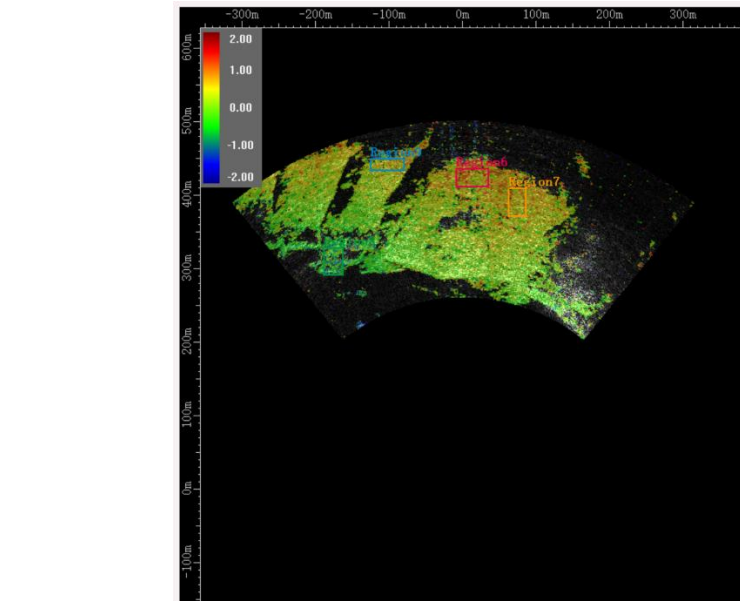
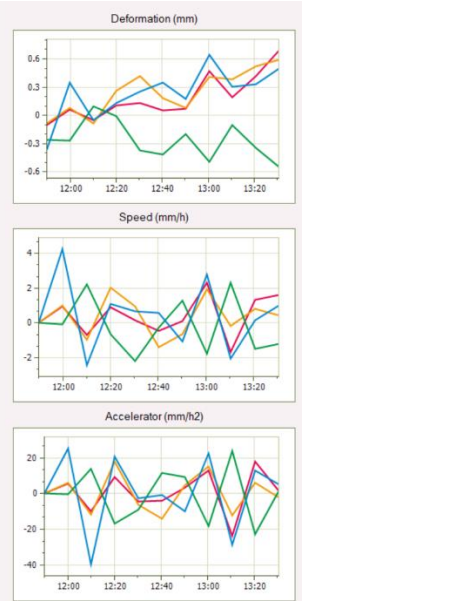
GB-SAR 觀測日誌

地點		高雄寶來區		日期	2021/05/04	
緯度		23.111305 N				
經度		120.701387 E				
地點說明		高雄市寶來區荖濃溪左岸之「芳晨溫泉渡假村」後方露營地旁之河岸。				
儀器參數	PW	BW	組數	角度		
	50	400	12	60、75、90、105、120		
	大氣校正	天線				
	2	18				
觀測時間(起)		11：08		觀測時間(迄)		13：01
觀測圖表	現地照片	 遠照		 近照		
	SA R 累 計 變 動 量 圖	 				
備註						

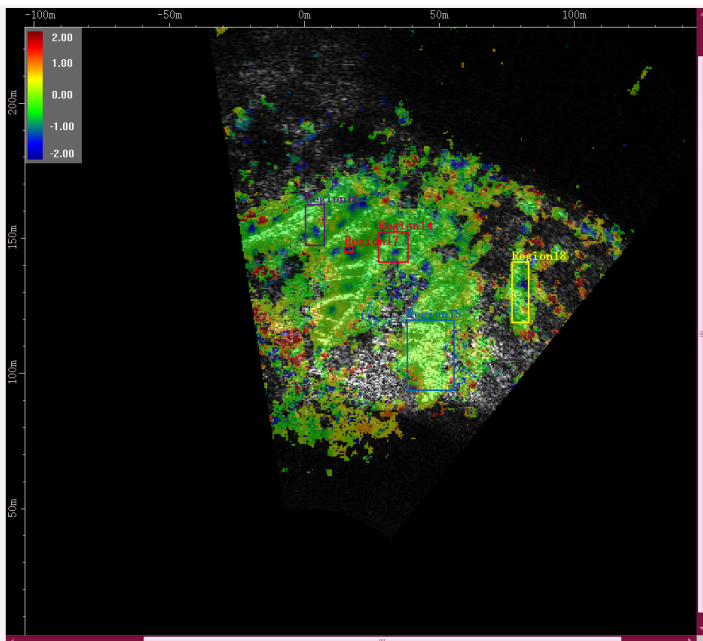
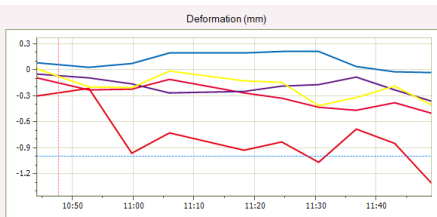
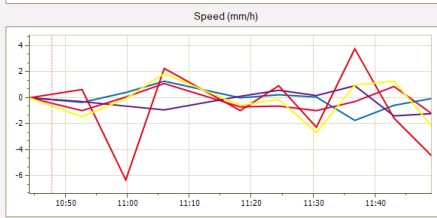
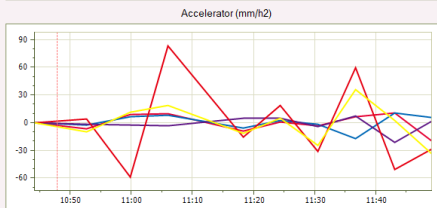
GB-SAR 觀測日誌

地點		臺南龍崎		日期	2021/05/21
緯度		22.9300 N			
經度		120.4100 E			
地點說明		牛埔泥岩水土保持園區道路旁行人步道上。(約於牛埔村辦公室東南方 80 公尺處)，			
儀器參數	PW	BW	組數	角度	
	50	400	11	90、105、120	
	大氣校正	天線			
	2	18			
觀測時間(起)		10：43		觀測時間(迄)	11：46
觀測圖表	現地照片	 參考位置		 近照	
	SAR 累計變動量圖				
備註					

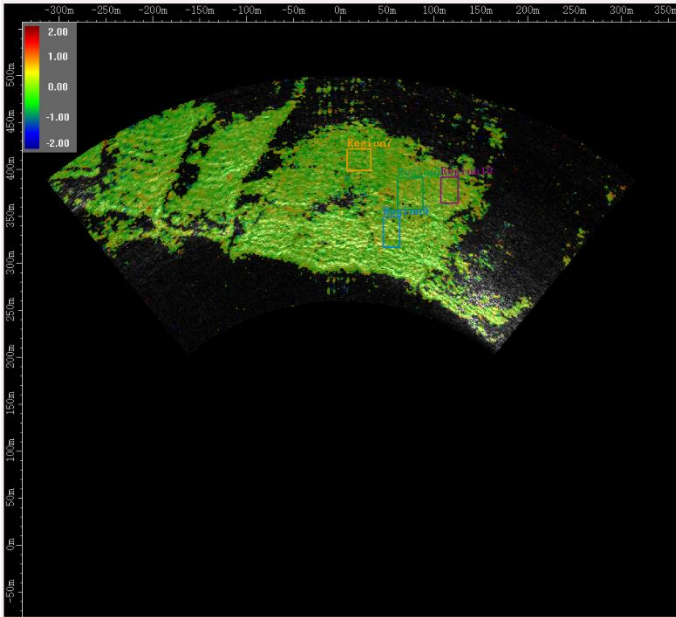
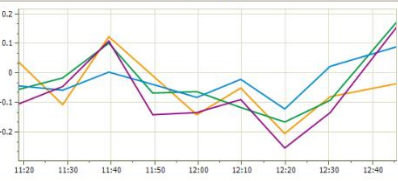
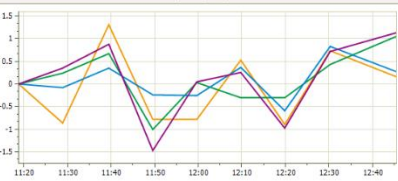
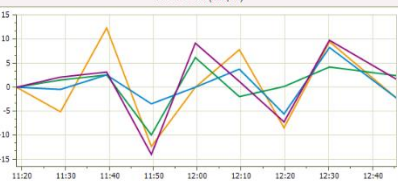
GB-SAR 觀測日誌

地點		高雄寶來區		日期	2021/05/18
緯度		23.111305 N			
經度		120.701387 E			
地點說明		高雄市寶來區荖濃溪左岸之「芳晨溫泉渡假村」後方露營地旁之河岸。			
儀器參數	PW	BW	組數	角度	
	50	400	12	60、75、90、105、120	
	大氣校正	天線			
	2	18			
觀測時間(起)		11：39		觀測時間(迄)	13：30
觀測圖表	現地照片				
	SA R 累計變動量圖				
備註					

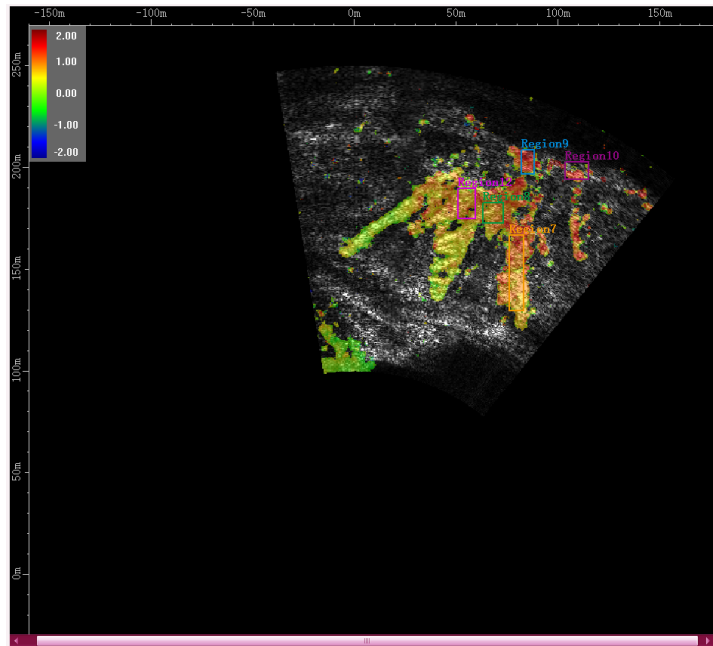
GB-SAR 觀測日誌

地點		臺南龍崎		日期	2021/05/31
緯度		22.9300 N			
經度		120.4100 E			
地點說明		牛埔泥岩水土保持園區道路旁行人步道上。(約於牛埔村辦公室東南方 80 公尺處)，			
儀器參數	PW	BW	組數	角度	
	50	400	12	90、105、120	
	大氣校正	天線			
	2	18			
觀測時間(起)		10：38		觀測時間(迄)	11：49
觀測圖表	現地照片	 參考位置  近照			
	SAR 累計變動量圖	 Deformation (mm)  Speed (mm/h)  Accelerator (mm/h2) 			
備註		下雨天測試			

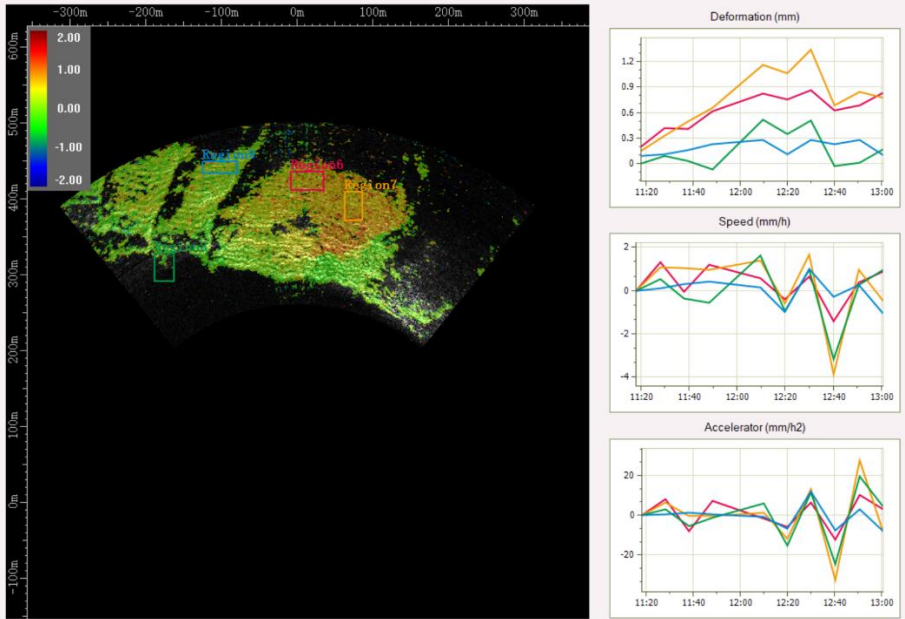
GB-SAR 觀測日誌

地點	高雄寶來區		日期	2021/06/11
緯度	23.111305 N			
經度	120.701387 E			
地點說明	高雄市寶來區荖濃溪左岸之「芳晨溫泉渡假村」後方露營地旁之河岸。			
儀器參數	PW	BW	組數	角度
	50	400	10	60、75、90、105、120
	大氣校正	天線		
	2	18		
觀測時間(起)		11:08	觀測時間(迄)	12:45
觀測圖表	現地照片			
	SA R 累計變動量圖	 Deformation (mm)  Speed (mm/h)  Accelerator (mm/h²) 		
備註				

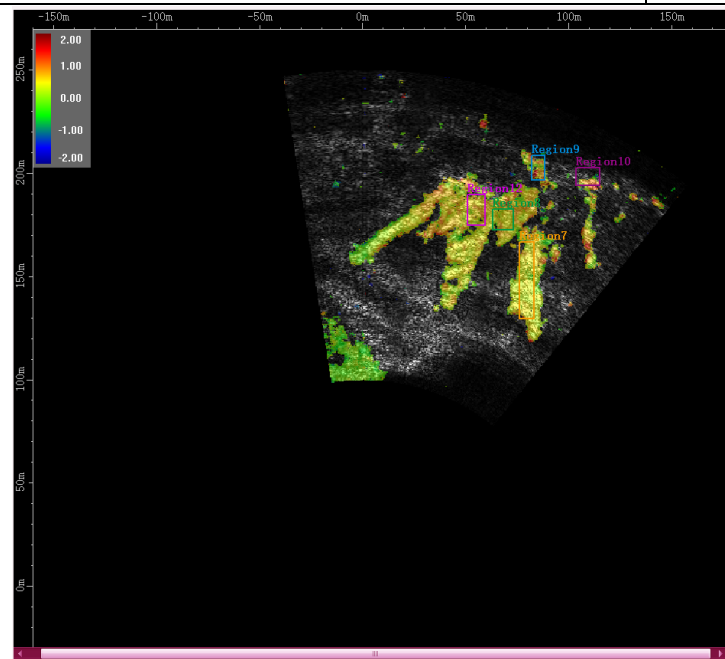
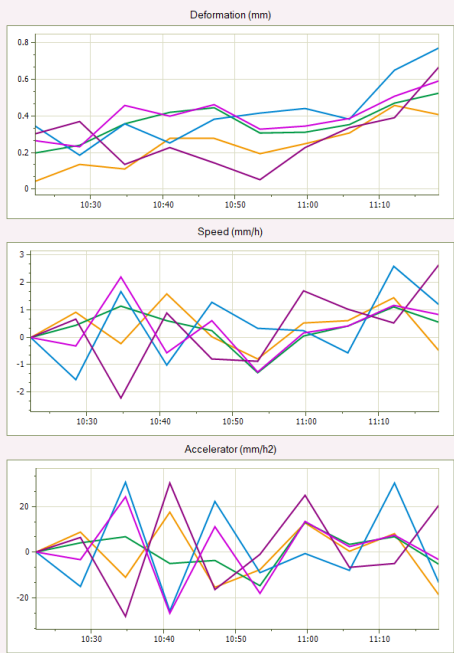
GB-SAR 觀測日誌

地點		臺南龍崎		日期	2021/06/15
緯度		22.9300 N			
經度		120.4100 E			
地點說明		牛埔泥岩水土保持園區道路旁行人步道上。(約於牛埔村辦公室東南方 80 公尺處)，			
儀器參數	PW	BW	組數	角度	
	50	400	10	90、105、120	
	大氣校正	天線			
	2	18			
觀測時間(起)		10：44		觀測時間(迄)	11：39
觀測圖表	現地照片	 參考位置		 近照	
	SAR 累計變動量圖	 			
備註					

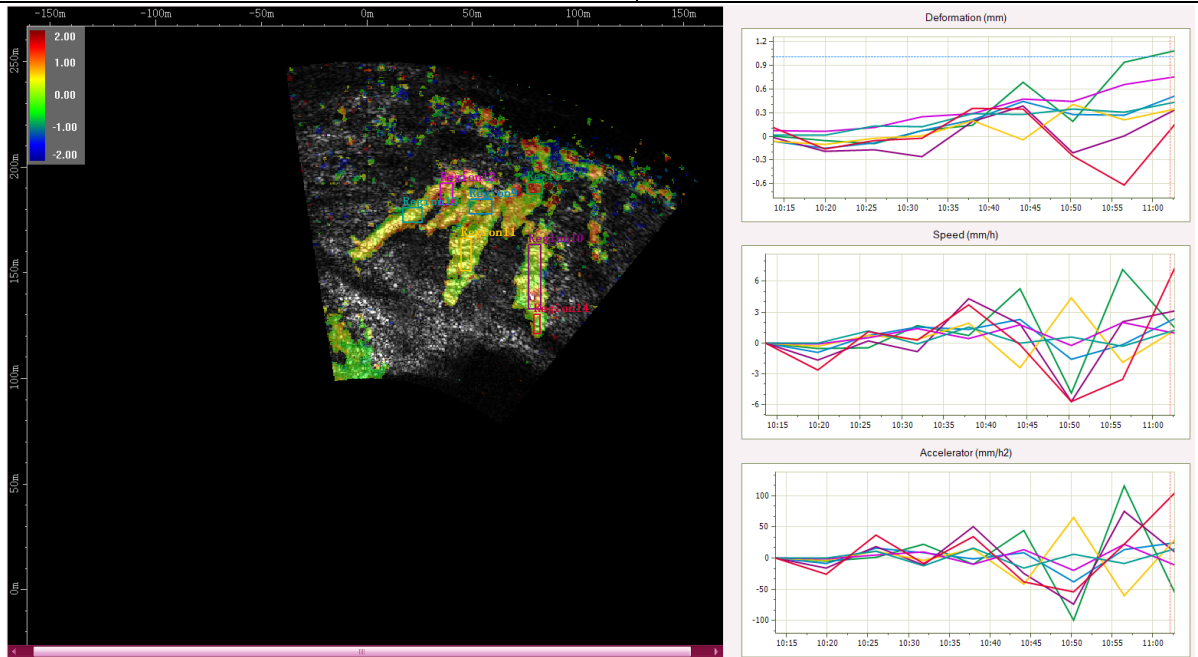
GB-SAR 觀測日誌

地點	高雄寶來區		日期	2021/07/02
緯度	23.111305 N			
經度	120.701387 E			
地點說明	高雄市寶來區荖濃溪左岸之「芳晨溫泉渡假村」後方露營地旁之河岸。			
儀器參數	PW	BW	組數	角度
	50	400	11	60、75、90、105、120
	大氣校正	天線		
	2	18		
觀測時間(起)		11:07	觀測時間(迄)	13:00
觀測圖表	現地照片			
	SA R 累計變動量圖			
備註				

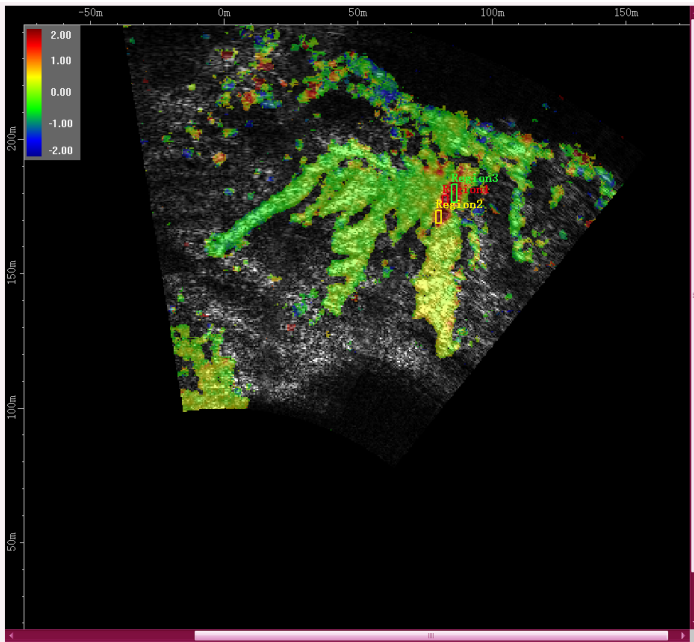
GB-SAR 觀測日誌

地點		臺南龍崎		日期	2021/07/06
緯度		22.9300 N			
經度		120.4100 E			
地點說明		牛埔泥岩水土保持園區道路旁行人步道上。(約於牛埔村辦公室東南方 80 公尺處)，			
儀器參數	PW	BW	組數	角度	
	50	400	11	90、105、120	
	大氣校正	天線			
	2	18			
觀測時間(起)		10：16		觀測時間(迄)	11：18
觀測圖表	現地照片	 參考位置		 近照	
	SAR 累計變動量圖				
備註					

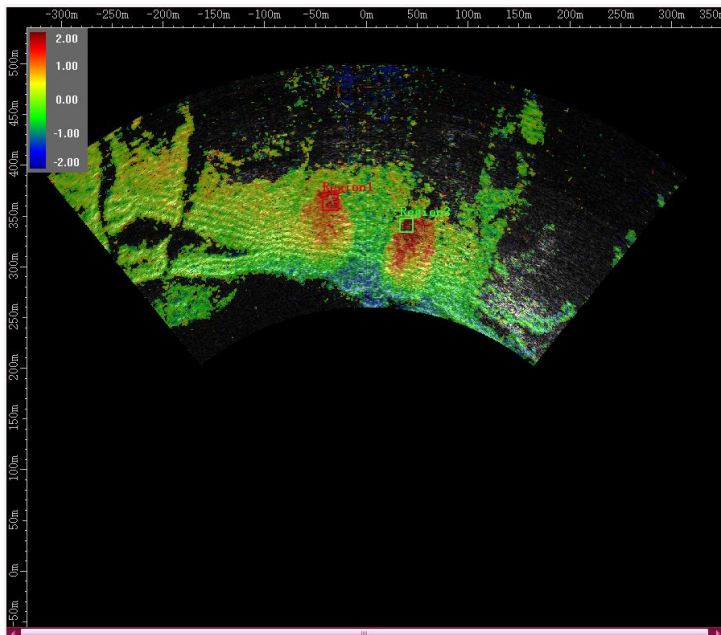
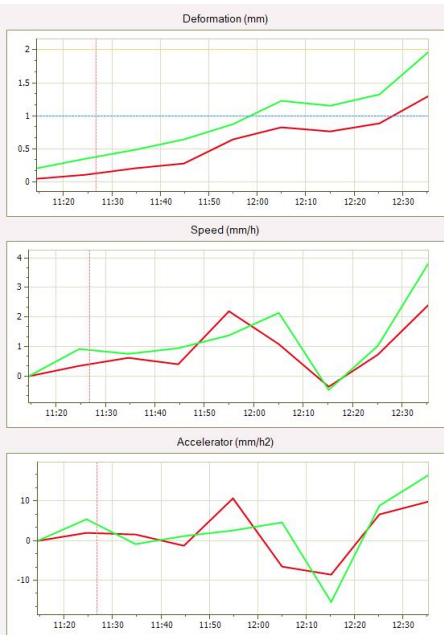
GB-SAR 觀測日誌

地點	臺南龍崎			日期	2021/07/27
緯度	22.9300 N				
經度	120.4100 E				
地點說明	牛埔泥岩水土保持園區道路旁行人步道上。(約於牛埔村辦公室東南方80公尺處)，				
儀器參數	PW	BW	組數	角度	
	50	200	10	90、105、120	
	大氣校正	天線			
	2	18			
觀測時間(起)		10：07	觀測時間(迄)		11：02
觀測圖表	現地照片	 參考位置		 近照	
	SAR 累計變動量圖				
備註					

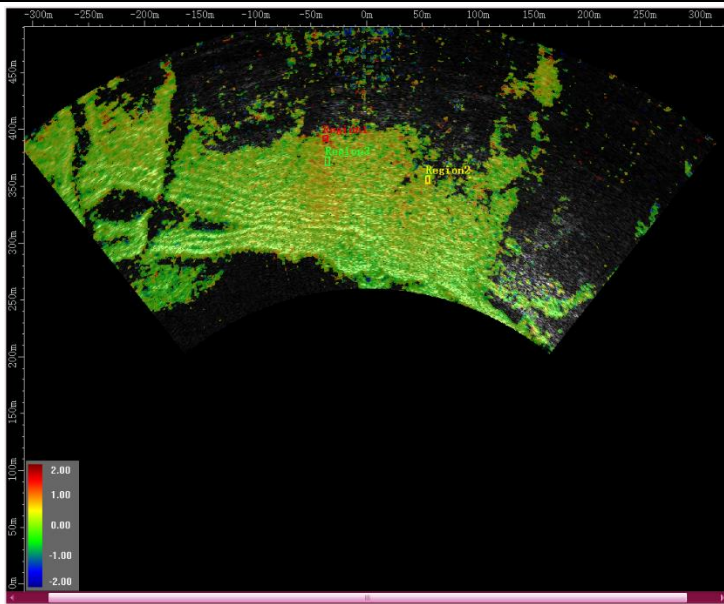
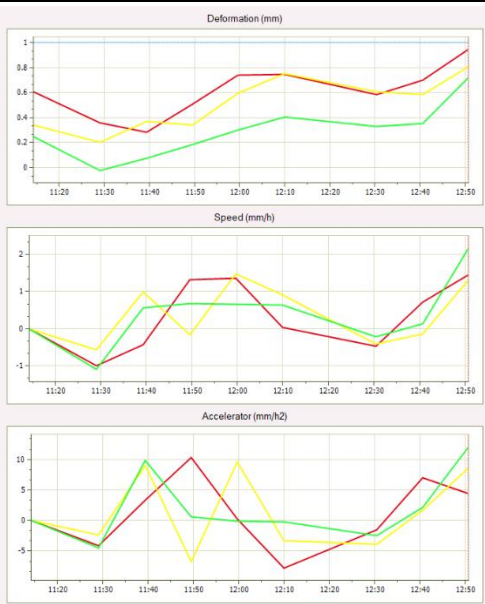
GB-SAR 觀測日誌

地點	臺南龍崎		日期	2021/08/12
緯度	22.9300 N			
經度	120.4100 E			
地點說明	牛埔泥岩水土保持園區道路旁行人步道上。(約於牛埔村辦公室東南方 80 公尺處)，			
儀器參數	PW	BW	組數	角度
	50	400	12	90、105、120
	大氣校正	天線		
	2	18		
觀測時間(起)		11:35	觀測時間(迄)	12:43
觀測圖表	現地照片	 參考位置  近照		
	SAR 累計變動量圖	 		
備註				

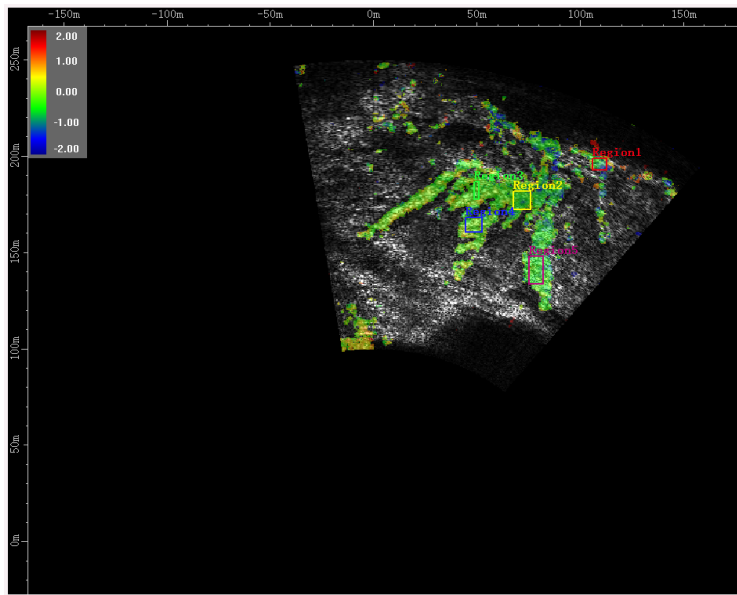
GB-SAR 觀測日誌

地點		高雄寶來區		日期	2021/08/17	
緯度		23.111305 N				
經度		120.701387 E				
地點說明		高雄市寶來區荖濃溪左岸之「芳晨溫泉渡假村」後方露營地旁之河岸。				
儀器參數	PW	BW	組數	角度		
	100	400	10	60、75、90、105、120		
	大氣校正	天線				
	2	18				
觀測時間(起)		11:04		觀測時間(迄)		12:35
觀測圖表	現地照片					
		遠照		近照		
觀測圖表	SA R 累計變動量圖					
	備註					

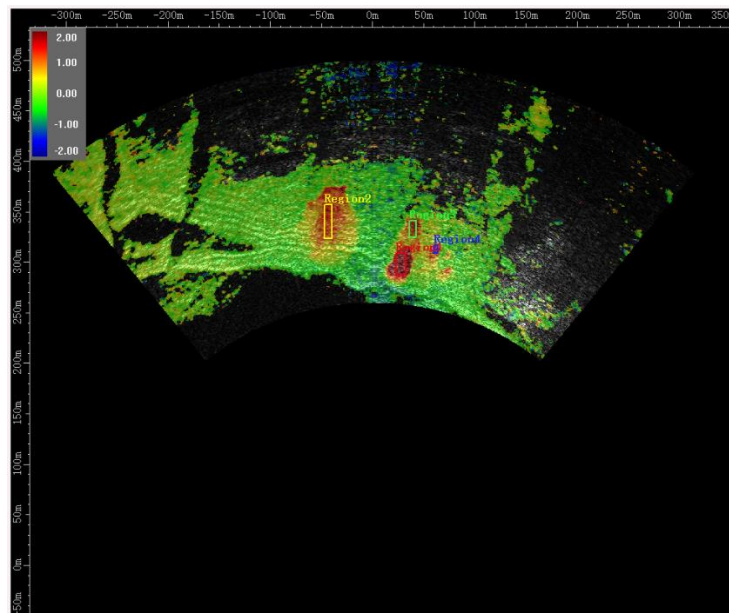
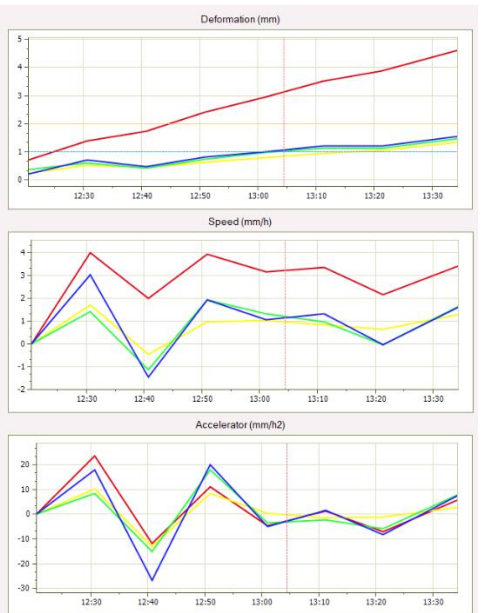
GB-SAR 觀測日誌

地點		高雄寶來區		日期	2021/08/31	
緯度		23.111305 N				
經度		120.701387 E				
地點說明		高雄市寶來區荖濃溪左岸之「芳晨溫泉渡假村」後方露營地旁之河岸。				
儀器參數	PW	BW	組數	角度		
	100	400	10	60、75、90、105、120		
	大氣校正	天線				
	2	18				
觀測時間(起)		11:04		觀測時間(迄)		12:50
觀測圖表	現地照片	 遠照		 近照		
	SAR 累計變動量圖					
備註						

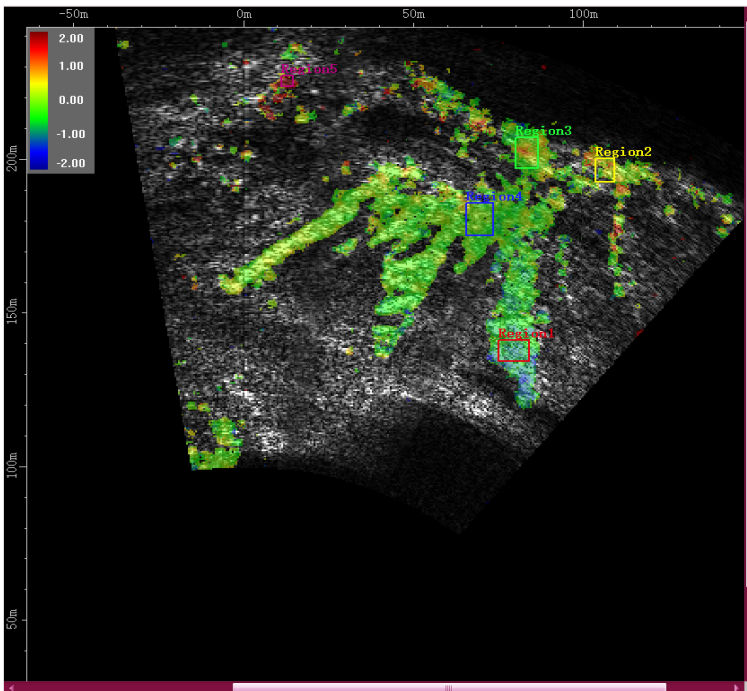
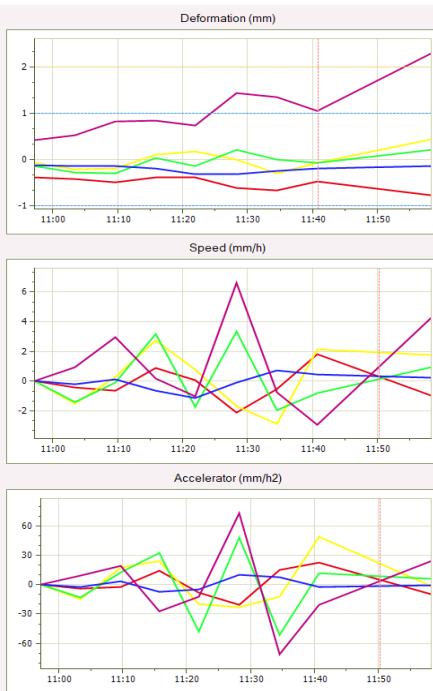
GB-SAR 觀測日誌

地點		臺南龍崎		日期	2021/09/02
緯度		22.9300 N			
經度		120.4100 E			
地點說明		牛埔泥岩水土保持園區道路旁行人步道上。(約於牛埔村辦公室東南方 80 公尺處)，			
儀器參數	PW	BW	組數	角度	
	50	400	11	90、105、120	
	大氣校正	天線			
	2	18			
觀測時間(起)		10:27		觀測時間(迄)	11:29
觀測圖表	現地照片	 參考位置		 近照	
	SA R 累計變動量圖	 			
備註					

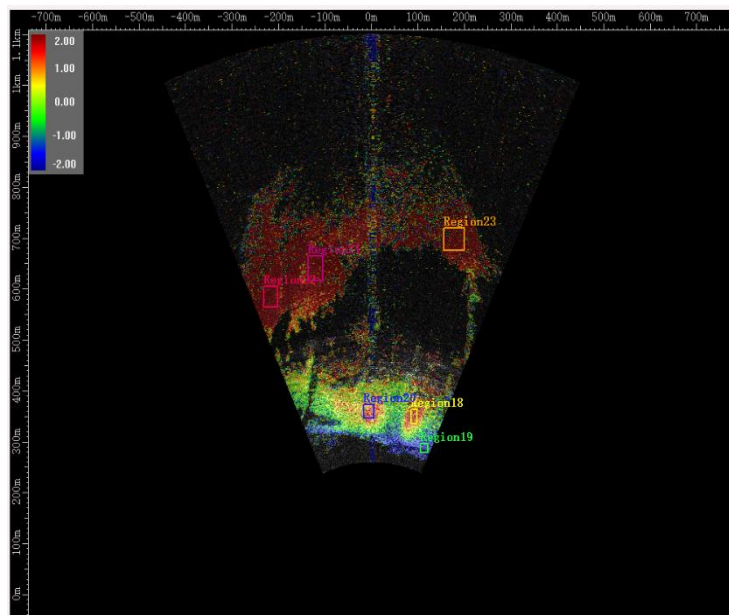
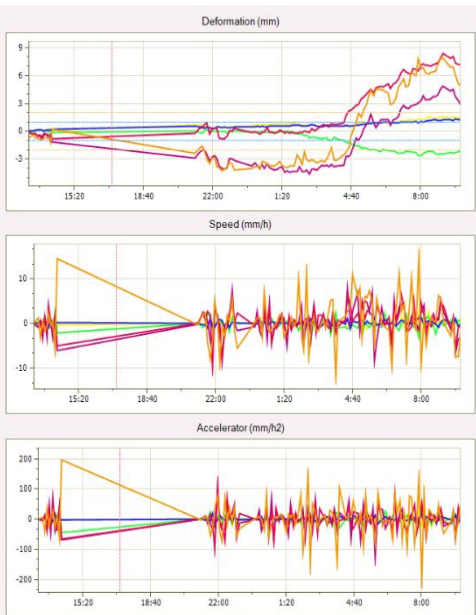
GB-SAR 觀測日誌

地點		高雄寶來區		日期	2021/09/06	
緯度		23.111305 N				
經度		120.701387 E				
地點說明		高雄市寶來區荖濃溪左岸之「芳晨溫泉渡假村」後方露營地旁之河岸。				
儀器參數	PW	BW	組數	角度		
	100	400	10	60、75、90、105、120		
	大氣校正	天線				
	2	18				
觀測時間(起)		11：59		觀測時間(迄)		13：34
觀測圖表	現地照片	 參考位置		 近照		
	SAR 累計變動量圖	 				
備註						

GB-SAR 觀測日誌

地點		臺南龍崎		日期	2021/09/17
緯度		22.9300 N			
經度		120.4100 E			
地點說明		牛埔泥岩水土保持園區道路旁行人步道上。(約於牛埔村辦公室東南方 80 公尺處)，			
儀器參數	PW	BW	組數	角度	
	50	400	10	90、105、120	
	大氣校正	天線			
	2	18			
觀測時間(起)		10:51		觀測時間(迄)	11:58
觀測圖表	現地照片	 參考位置		 近照	
	SA R 累計變動量圖	 			
備註					

GB-SAR 觀測日誌

地點		高雄寶來區		日期	2021/09/28- 2021/09/29	
緯度		23.110900 N				
經度		120.701168 E				
地點說明		高雄市寶來區荖濃溪左岸之「芳晨溫泉渡假村」後方露營地。				
儀器參數	PW	BW	組數	角度		
	100	400	105	75、90、105		
	大氣校正	天線				
	2	18				
觀測時間(起)		09/28 13:02		觀測時間(迄)		09/29 09:55
觀測圖表	現地照片					
		參考位置		近照		
觀測圖表	SAR 累計變動量圖					
備註						

