

計畫編號：111 保發-8.1-保-01-06-001(17)

**GBInSAR 山崩即時預警觀測標準作業程
序律定與驗證**

**Establishment and Validation of SOP for
Landslide Early Warning Observation via
GBInSAR**

(成果報告書)

執行單位：國立成功大學

執行期間：111 年 01 月 18 日至 111 年 12 月 31 日

計畫主持人：余騰鐸 副教授

中華民國 111 年 12 月

GBInSAR 山崩即時預警觀測標準作業程序律定與驗證

摘要

本研究使用 Ku 波段之地基合成孔徑雷達(GB-SAR)取得監測目標影像；透過干涉技術(Interferometry)，以震幅(Amplitude)以及同調性(Coherence)作為篩選 PS 點(Persistent Scattered Point)等方法，對目標進行相關微變形監測工作。

本計畫以巡迴式監測模式，於高雄市田寮區國道三號中寮隧道北側出口之旗山斷層共進行 4 次監測作業，於監測期間無明顯變動。於降雨時進行監測，則有觀測到泥岩裸露區有 3 毫米的變化，變動時間與降水時間一致，推測可能跟泥岩吸水膨脹有關。

本計畫以定點式監測模式，於 2021 年 10 月、以及 2022 年 5 月、8 月分別至新竹縣尖石鄉秀巒部落之白石崩塌進行長時間監測。尤其於 2022 年 8 月的監測過程中，本研究觀察到降雨事件前後對邊坡微變動的影響、以及降雨事件當下，對邊坡不同位置產生不同的微變動型態。本年度監測果可作為後續監測工作的依據。

最後，本研究配合主辦機關，分別對台東大鳥 D21、D22 崩塌地、新北石碇大崙山 T001 崩塌地、新北市汐止區鵠鵠崙 D003 崩塌地進行 GB-SAR 監測之可行性評估。評估結果認為 D21、D22、以及 T001 崩塌地，由於植被覆蓋過多，不適合進行監測；D003 可使用 GB-SAR 監測崩塌地東緣裸露部分。

關鍵詞：地基合成孔徑雷達、邊坡穩定、即時預警、微變形

ABSTRACT

GB-SAR (Ground-based synthetic aperture radar) is used as a high precision micro-displacement monitoring tool in this study. GB-SAR obtains the coherence between images by interferometry, then selects PS points by amplitude and coherence, and calculates the phase difference to obtain the displacement of target.

By using of cruised-scanning monitor mode (CSMM.), a total of 4 monitoring operations are planned at the Chishan Fault at the north exit of Chungliao Tunnel, No. 3 National Road, Tinliao District, Kaohsiung. There were no significant changes during the monitoring period. The displacement of 3mm in the exposed area of mudstone was observed, and the displacement time was consistent with the precipitation time, which may be related to the water absorption and expansion of mudstone.

The White Rock landslide of Xiuluan tribe in Jianshi Township of Hsinchu County were monitored for a long time in October 2021, May 2022 and August 2022 respectively. In this study, the effects of rainfall events on slope micro-displacement were observed. In addition, we also observed that different displacement types occurred in different locations of slopes due to temperature changes. This year's monitoring results can be used as a basis for follow-up monitoring.

Finally, the feasibility of GB-SAR monitoring for D21 and D22 landslides in Taitung, T001 landslides in Dalun Mountain, and D003 landslides in Hsizhi District, Xinbei City was evaluated. The assessment concluded that the D21, D22 and T001 landslides were not suitable for monitoring due to vegetation cover. Instead, D003 can use GB-SAR to monitor the exposed portion of the eastern edge of the collapse site.

目次

摘要.....	III
ABSTRACT.....	IV
目次.....	I
表次.....	II
圖次.....	III
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 工作方法說明	2-1
第一節 執行工具	2-1
第二節 研究區簡介	2-5
第三章 工作成果說明	3-1
第一節 秀巒部落白石大崩塌監測	3-1
第二節 中寮隧道北側出口	3-30
第三節 台東大鳥 D021、D022 崩塌地	3-37
第四節 新北市石碇區大崙山 T001 崩塌地.....	3-38
第五節 新北市-汐止區-D003 (鵠鵠崙).....	3-42
第四章 結論與建議	4-1
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附-1
附錄一、掃描觀測日誌	附-1
附錄二、期初審查意見回覆表	附-10
附錄三、期中審查意見回覆表	附-12
附錄四、期末審查意見回覆表	附-17

表次

表 1-1 計畫項目變更表	1-2
表 2-1 本研究使用之 GB-SAR 參數.....	2-1
表 2-2 視距方向理論解析度	2-2
表 2-3 水平方向理論解析度	2-2
表 2-4 理論最大掃描距離.....	2-2
表 2-5 GB-SAR 監測特性表	2-3
表 3-1 秀巒部落白石大崩塌監測資訊一覽.....	3-2
表 3-2 秀巒部落白石大崩塌使用之 GB-SAR 參數.....	3-4
表 3-3 秀巒部落 8 月 11 日至 8 月 27 日上午降雨事件記錄.....	3-13
表 3-4 中寮隧道北側出口監測時間一覽表	3-30
表 3-5 中寮隧道北側出口使用之 GB-SAR 參數.....	3-32
表 3-6 GB-SAR 於 T001 崩塌地設定監測參數	3-39

圖次

圖 2-1 GB-SAR 掃描監測作業流程	2-4
圖 2-2 白石大崩塌五萬分之一地質圖(中央地質調查所-山崩雲).....	2-5
圖 2-3 山崩與地滑地質敏感區(中央地質調查所-山崩雲).....	2-6
圖 2-4 白石大崩塌逐年變遷影像(GOOGLE EARTH)	2-6
圖 2-5 2016 年 10 月白石大崩塌現場照(水保局，2016)	2-7
圖 2-6 2021 年 9 月 13 日白石大崩塌空拍照	2-7
圖 2-7 2021 年 9 月 13 日白石大崩塌現場照	2-8
圖 2-8 秀巒崩塌地監測現地勘查檔土牆施工(2022/4/19).....	2-9
圖 2-9 秀巒崩塌地監測現地勘查檔土牆施工說明(2022/4/19).....	2-9
圖 2-10 秀巒崩塌地土石流疏散撤離教育訓練(2022/4/19).....	2-10
圖 2-11 秀巒崩塌地土石流警戒溪流(2022/4/19)	2-10
圖 2-12 秀巒崩塌地監測點位確認(2022/4/19).....	2-11
圖 2-13 秀巒崩塌地監測點位入口處招牌(2022/4/19).....	2-11
圖 2-14 秀巒崩塌地監測點位視角情況(2022/4/19).....	2-12
圖 2-15 長期改善工程配置示意圖(高公局，2018)	2-13
圖 2-16 中寮隧道逐年變遷影像(GOOGLE EARTH)	2-14
圖 2-17 大地變位速度場分布平面圖及三維速度場剖面圖(高公局， 2018)	2-14
圖 2-18 中寮隧道北洞口俯視圖	2-15
圖 2-19 中寮隧道北洞口 GB-SAR 擺放監測視角(中寮隧道).....	2-16
圖 3-1 GB-SAR 監測秀巒白石大崩塌位置圖	3-1
圖 3-2 秀巒白石崩塌雷達反射強度圖	3-5
圖 3-3 秀巒白石崩塌 2022/5/17 至 2022/5/20 成果	3-6
圖 3-4 秀巒白石崩塌 2022/5/17 至 2022/5/20 現地對照圖	3-6
圖 3-5 秀巒白石崩塌 2022/5/17 單日成果.....	3-7
圖 3-6 秀巒白石崩塌 2022/5/18 單日成果.....	3-7
圖 3-7 秀巒白石崩塌 2022/5/19 單日成果.....	3-8
圖 3-8 秀巒白石崩塌 2022/5/20 單日成果.....	3-9
圖 3-9 秀巒白石崩塌 2021/10/20 至 2021/10/22 成果	3-9

圖 3-10 秀巒白石崩塌現地位置圖	3-10
圖 3-11 GB-SAR 儀器冒煙位置(左)設備相對位置照片(右).....	3-10
圖 3-12 旋轉平台現地拆解檢視問題.....	3-11
圖 3-13 秀巒部落 8 月 11 日至 8 月 27 日一小時累積雨量紀錄.....	3-12
圖 3-14 2021 年 10 月秀巒監測工作之雷達搭配光達監測結果.....	3-14
圖 3-15 2022 年 8 月秀巒監測工作之雷達影像(左)與現場目標對照(右)	3-14
圖 3-16 秀巒部落於 8 月 11 日至 8 月 27 日監測成果	3-15
圖 3-17 圖 3-16 之右側欄位放大圖	3-15
圖 3-18 邊坡資料、日照角度/時間、以及微變動變化一覽.....	3-17
圖 3-19 利用互動式圖表查詢各觀察點於不同時間的位移狀態.....	3-18
圖 3-20 8 月 12 日累積位移量、速度、加速度成果.....	3-20
圖 3-21 8 月 20 日累積位移量、速度、加速度成果.....	3-20
圖 3-22 8 月 24 日累積位移量、速度、加速度成果.....	3-21
圖 3-23 8 月 25 日累積位移量、速度、加速度成果.....	3-21
圖 3-24 比較降雨事件發時間及雨量與「累積位移量」變化關係.	3-24
圖 3-25 比較雨量事件與累積位移量(24 小時移動平均線)變化關係.	3-25

25

圖 3-26 PS 點資料個數、位置、累積位移量資料分佈狀況圖	3-27
圖 3-27 PS 點最終累積位移量於空間分佈狀況	3-27
圖 3-28 GB-SAR 監測範圍於整體崩塌區域中分佈	3-29
圖 3-29 秀巒現生崩塌區以及潛在崩塌範圍	3-29
圖 3-30 GB-SAR 監測中寮隧道位置圖	3-30
圖 3-31 中寮隧道北側出口 2022/01/27 成果(歷時：2 小時).....	3-32
圖 3-32 中寮隧道北側出口 2022/02/25 成果(歷時：2 小時).....	3-33
圖 3-33 中寮隧道北側出口 2022/03/21 成果(歷時：2 小時).....	3-34
圖 3-34 中寮隧道北側出口 2022/03/21 現地對照圖.....	3-34
圖 3-35 中寮隧道北側出口 2022/03/21 現地照片	3-34
圖 3-36 2022 年 3 月 21 日 C1V390_尖山測站氣象觀測資料	3-35
圖 3-37 中寮隧道北側出口 2022/04/15 成果(歷時：2 小時).....	3-35

圖 3-38 台東大鳥 D021 現場評估 GB-SAR 設置情況.....	3-37
圖 3-39 台東大鳥 D022 現場評估 GB-SAR 設置情況.....	3-37
圖 3-40 測量 T001 崩塌地內建築物與觀測點之相對距離	3-38
圖 3-41 GB-SAR 現場測試掃描 T001 崩塌地	3-40
圖 3-42 GB-SAR 現場監測結果	3-40
圖 3-43 GB-SAR 影像訊號震幅強度圖(上)、同調性圖(下)	3-41
圖 3-44 D003 崩塌上緣(紅色標示處)及可能監測位置(十字星形標 記).....	3-42
圖 3-45 選定可能適合架設 GB-SAR 之視野與相關坐標資訊.....	3-43
圖 3-46 備選監測位置與邊坡各部位之相對距離標示	3-43

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，難以滿足即時預警的防災資訊需求；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，即時獲得大區域的面狀邊坡高精度位移資料，其在即時預警的執行效率高於需龐大後處理作業量的 LiDAR 觀測，故 GB-SAR 適用於邊坡滑動與土石流預警機制的監測。

本計畫於 109 年度引進地基合成孔徑雷達(Ground Base -Synthetic Aperture Radar，以下簡稱 GB-SAR)量測技術，從萬山、來義與佳暮崩塌地中作為示範區，以 GB-SAR 技術配合山區降雨預測模式，建構以 GB-SAR 為監測工具之崩塌警戒模式。但因 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。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大量雜訊(植被)。故根據監測結果瞭解到環境因素(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限制，其中以植被的限制為最重大。

前期計畫於 110 年度於高雄寶來與臺南龍崎泥岩進行監測，觀察地震、降雨與邊坡變形量之關係。並試圖突破 GB-SAR 於植被覆蓋之邊坡監測限制，提出以覆蓋帆布為輔助，提高目標區域之同調性，使得 GB-SAR 在有植被邊坡可以進行微變動監測。其有明顯變動之數據結果顯示，若地震時間與空間間隔較遠，則邊坡主要為表面變化，變位點呈現散佈情況，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。降雨方面，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。帆布測試結果驗證其可增加植被邊坡之同調性，但設置上貼近地表與固定等問題必須克服。

為釐清 GB-SAR 於降雨事件之監測結果，欲安排其於欠穩定之自然邊坡進行固定式掃描，期望在此監測期間經歷降雨事件能觀察變形量與變形加速度之變化趨勢，並展示其於雨中監測之優勢，也凸顯其日夜連續監測之能力，以協助建置邊坡滑動預警系統。另外，為進行創新之應用實例，安排 GB-SAR 於斷層活動區進行巡迴式掃描，嘗試觀測斷層對於人工構造物之影響。以往常使用 GPS 做為監測斷層之工具，但其為點狀資料，會有內插方面之誤差，而 GB-SAR 為大規模之面狀數據，故嘗試使用其用於斷層監測上，展示 GB-SAR 之多元應用面。最後，以實驗場結果與現地經驗，建置完整標準作業程序，方便後人進行相關研究。

第二節 計畫項目與內容

本計畫賡續精進 GB-SAR 監測技術，以建構邊坡崩塌預警系統為目的，原訂規劃建設實驗場受限於人物力與經費影響，原訂計畫進行調整，說明如下表 1-1。

表 1-1 計畫項目變更表

原計畫	更改後計畫辦理方式	更改原因
1、挑選合適的自然崩塌地進行長時間固定式連續掃描監測，規劃約為期一個月，以分析崩塌範圍、崩塌機制，並了解誘發因子與變形加速度之關係，試圖標示出滑動時間點。	1、挑選合適的自然崩塌地進行長時間固定式連續掃描監測，規劃約為期一個月，以分析崩塌範圍、崩塌機制，並了解誘發因子與變形加速度之關係，試圖標示出滑動時間點。	無變更。 <u>補充說明：GB-SAR 於今年 5 月份進場連續監測一個月，然而在連續運作 72 小時後，發生旋轉機構伺服馬達故障，目前儀器已經維修完畢。</u>
2、挑選活動斷層區域	2、挑選活動斷層區域	無變更。

原計畫	更改後計畫辦理方式	更改原因
場址，使用巡迴式監測掃描模式，定期定點回訪監測，以面狀數據監測人工構造物。	場址，使用巡迴式監測掃描模式，定期定點回訪監測，以面狀數據監測人工構造物。	<u>補充說明：已重複調查中寮隧道口 4 次以上，發現若無降水狀態基本穩定，然而活動斷層變化速率與 GB-SAR 偵測變化之時間尺度不同，觀測有其難度，後續將嘗試結合巡迴式成果進行分析測試。</u>
3、設計實驗場，更深入了解設備的限制與效能，以支持後續現地監測的結果。並進而建立完整標準作業流程，包括如何選擇監測目標、架設點、設置儀器等，以供後續參照。	本點刪除。	因受限經費無架設實驗場，後續將參考秀巒相關現地儀器資訊進行比對。

第二章 工作方法說明

第一節 執行工具

一、GB-SAR簡介

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2-1。

表 2-1 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2-2。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2-3。帶寬(Bw)與脈寬(Pw)將影響最大掃描距離如表2-4。

表 2-2 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 2-3 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 2-4 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
$D_{\max} = fs * c / 4K$; $fs=0.6\text{MHz}$; $c=299,792,458 \text{ m/s}$; $K= Bw/Pw$		

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 2-5 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		

一、GB-SAR 執行流程

本研究之 GB-SAR 儀器監測流程如圖 2-1(修改自蘇昱瑄，2021) 所示。以下進行概要說明：

1. 開始執行 GB-SAR 掃描工作，先取得 3 幅以上影像；
2. 執行差分干涉，取得 2 幅以上干涉影像。同時藉由 3 種篩選 PS 點的方法，將目標區域中穩定的 PS 點篩出，並取得該點位之相位差資訊；
3. 透過設定控制點參數，取得最穩定之 PS 點，做為大氣校正之依據，並且對場景中所有相位差資訊進行校正；
4. 進行監測目標之變形量解算；
5. 取得目標之二維監測成果，或進一步匯入現地數值地形圖 (DEM)，以取得三維地形套疊成果；
6. 進行後續資料分析與討論。

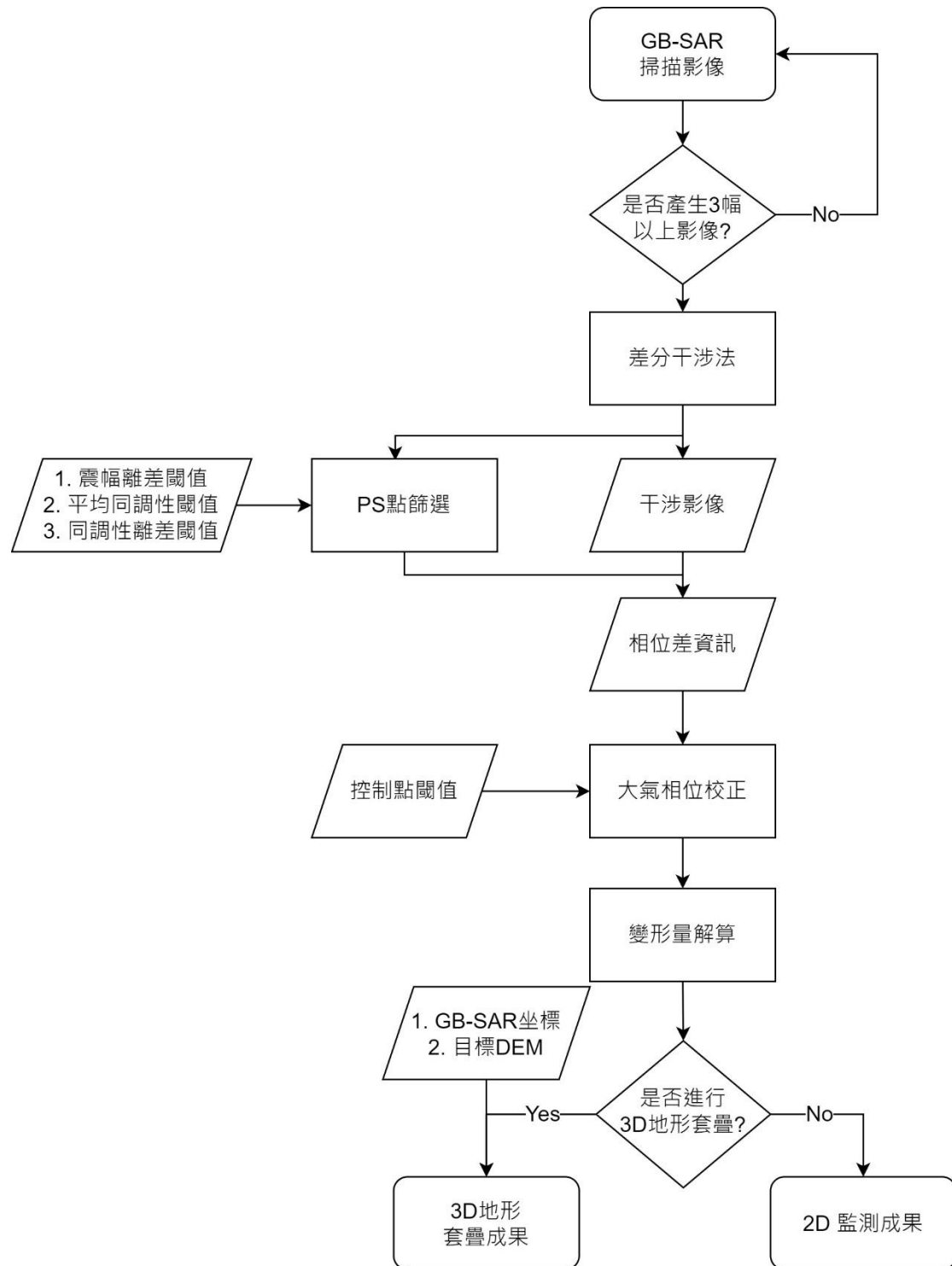


圖 2-1 GB-SAR 掃描監測作業流程

第二節 研究區簡介

GB-SAR 設置需有足夠腹地擺放儀器、欠穩定之邊坡或設施、容易到達且能長時間穩定供電之地點為主。目前規劃挑選 1.高雄市田寮區中寮隧道北洞口南下車道側邊坡、以及 2.新竹縣尖石鄉秀巒部落白石大崩塌為目標研究區。

一、新竹縣尖石鄉秀巒部落白石大崩塌

位於新竹縣尖石鄉，在海拔 850 公尺上的秀巒部落(又稱控溪部落)，身處群峰環繞的白石溪(薩克亞金溪)與泰岡溪(塔克金溪)交匯處。其竹 60 線 31k 處旁邊坡，被稱白石大崩塌，近年發生多起滑動崩塌事件，較大崩塌事件為 2016 年 10 月 1 日梅姬颱風過境後，及 2021 年 9 月 13 日璨樹颱風過境後。其地質岩性為巴陵層及汶水層，如圖 2-2，為中央主管機關劃定之山崩與地滑地質敏感區，如圖 2-3。其地形高差大且坡度陡，對於已崩塌區域，其可能的致災因子為此處鬆散材料堆積、溪流淘刷坡腳、地下水滲出沖刷坡面等(青山工程，2018)。逐年變化如圖 2-4。



圖 2-2 白石大崩塌五萬分之一地質圖(中央地質調查所-山崩雲)

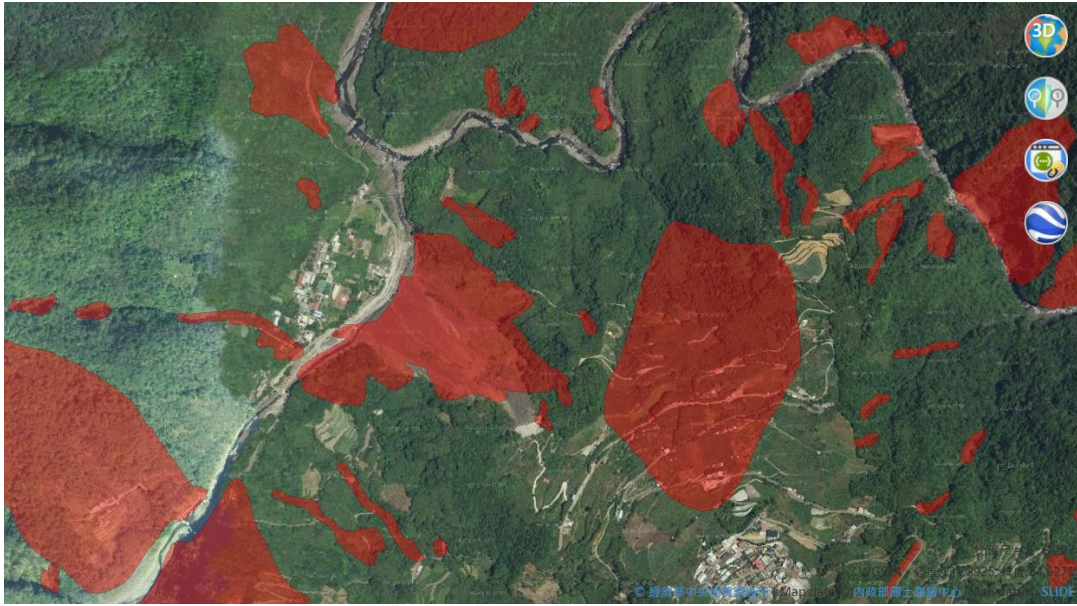


圖 2-3 山崩與地滑地質敏感區(中央地質調查所-山崩雲)



圖 2-4 白石大崩塌逐年變遷影像(Google Earth)

2016 年梅姬颱風過境後，受颱風的間接影響，10 月 1 日上午 10 時，白石大崩塌發生崩塌，崩落之土砂堆積於白石溪河道，佔據約三分之一河道寬度。推估崩塌面積約 5,460 平方公尺，土方量約 3,500 立方公尺。約有 70 公尺之護岸遭掩埋(水保局，2016)，現場如圖 2-5 所示。該年後續也陸陸續續發生山崩的災情。



圖 2-5 2016 年 10 月白石大崩塌現場照(水保局，2016)

2016 年璨樹颱風過境後，白石大崩塌受璨樹颱風外圍環流降雨影響，9 月 13 日十時發生大規模崩塌，崩落土石淤積於白石溪河道與左岸竹 60 線道路，造成交通中斷及溢流溪水漫淹民宅。由圖 2-6 空拍照可清楚看到，崩塌土石阻塞溪流，溪邊直接受淹水影響，五戶民宅緊急疏散撤離外，秀巒國小亦全面停課轉往分校上課。現場照片如圖 2-7 所示。



圖 2-6 2021 年 9 月 13 日白石大崩塌空拍照



圖 2-7 2021 年 9 月 13 日白石大崩塌現場照

本計畫於 2022 年 4 月 19 日於秀巒部落進行現地勘查作業，現地正在進行檔土牆維護作業，現地照片如圖 2-8 與圖 2-9。並參加台灣整合防災工程技術顧問有限公司辦理的當地土石流疏散撤離之教育訓練，如圖 2-10 與圖 2-11。經現地巡視後，確定於秀巒白石大崩塌地對面之「劉老村長露營區」進行 GB-SAR 長期監測設置地點，該地區有市電、可通視崩塌地範圍且有良好腹地唯合適架設 GB-SAR 儀器之場域，如圖 2-12 至圖 2-14。



圖 2-8 秀巒崩塌地監測現地勘查檔土牆施工(2022/4/19)



圖 2-9 秀巒崩塌地監測現地勘查檔土牆施工說明(2022/4/19)



圖 2-10 秀巒崩塌地土石流疏散撤離教育訓練(2022/4/19)



圖 2-11 秀巒崩塌地土石流警戒溪流(2022/4/19)



圖 2-12 秀巒崩塌地監測點位確認(2022/4/19)



圖 2-13 秀巒崩塌地監測點位入口處招牌(2022/4/19)



圖 2-14 秀巒崩塌地監測點位視角情況(2022/4/19)

二、高雄市田寮區中寮隧道北洞口南下車道邊坡

國道 3 號之田寮 3 號高架橋(南下 378k+298~378k+713；北上 378k+298~378k+673)及中寮隧道(南下 378k+795~380k+653；北上 378k+825~380k+653)位於高雄市田寮區，長度約 2.4 公里。該路段於民國 85 年開工，於民國 89 年竣工，至今已通車約 21 年。其跨越古亭坑層泥岩、烏山層砂岩及蓋子寮頁岩等複雜岩性地質及受鄰近旗山活動斷層、龍船斷層構造影響，通車以來，橋梁及隧道結構發現有持續位移情形，造成隧道內路面擠壓隆起及高架橋端伸縮縫擠壓損壞。經長期勘察和監測，確認該路段變形主要是受大地擠壓及活動斷層等地質因素影響。為確保行車交通安全，高公局即針對變形主因進行改善工程(交通部高公局，2018)，如圖 2-15。

田寮 3 號高架橋整體被地盤往西北方帶動，於龍船斷層附近橋台產生約每年 6 公分之擠壓量，導致部分活動盤式支承錯移。中寮隧道

北洞口則因旗山斷層北側地盤相對以每年 8 公分之速度抬升、每年以 6 公分的速度向西北位移，導致隧道內襯砌產生龜裂損壞，側壁與頂拱發生破碎混凝土掉落之情形，對於交通行車安全產生疑慮。

改善工程內容為拆除既有田寮 3 號高架橋，新建路堤通過斷層帶；拆除既有中寮隧道北洞口，以修坡路塹通過斷層帶。以柔性結構(路堤、路塹)取代剛性結構(橋梁、隧道)，吸納大地擠壓與斷層活動之變形。另外，觀察 Google Earth 衛星影像時序，也可更清楚了解改善工程的樣貌，如圖 2-16。大地變位速度場分布平面圖及三維速度場剖面圖如圖 2-17。



圖 2-15 長期改善工程配置示意圖(高公局，2018)

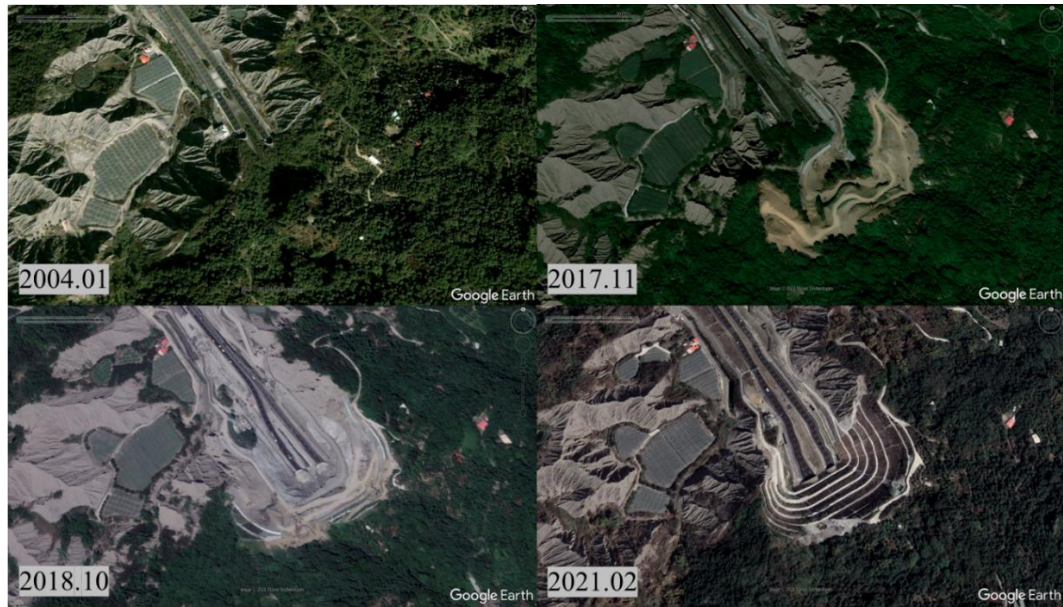


圖 2-16 中寮隧道逐年變遷影像(Google Earth)

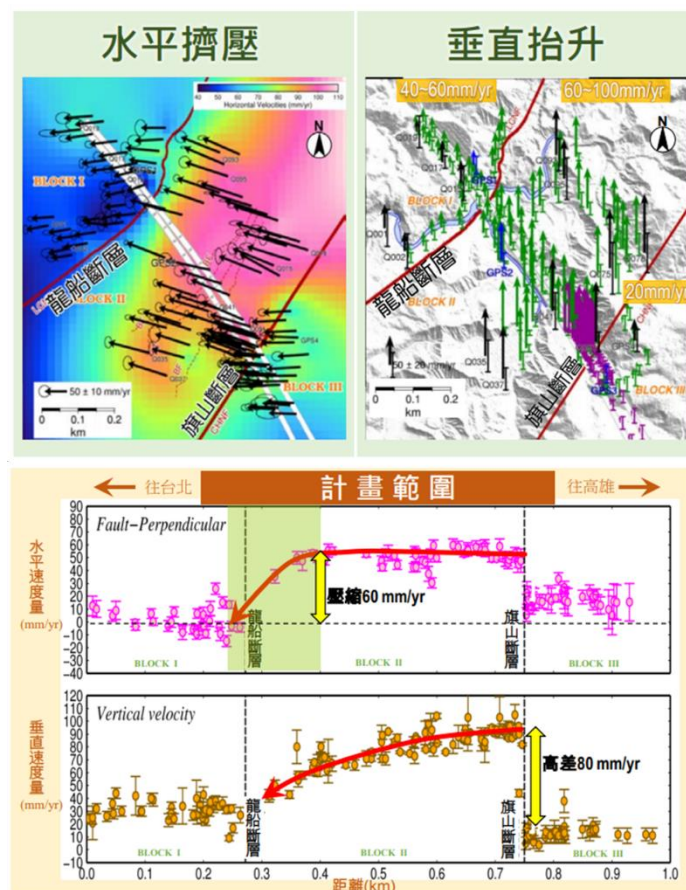


圖 2-17 大地變位速度場分布平面圖及三維速度場剖面圖(高公局，2018)

在改善工程完工後，隧道口現有規劃為將邊坡整治為 8 個台階，以排水設施、岩栓強化邊坡穩定性，如圖 2-18。據現場人員說明，近年觀察到於南下車道入口側邊坡(古亭坑層；岩性為泥岩；旗山斷層下盤)，第三階～第六階位置，發現裂縫產生，裂隙已填補，但仍持續成長；其中第五、第六階觀察到位移量約 4~5 mm，且裂縫計有明顯抬升現象。於北上車道出口側之邊坡(烏山層；岩性為砂、泥互層；旗山斷層上盤)則沒有觀察到明顯的位移量變化。

中寮隧道北洞口儀器擺放監測位置之視角，如圖 2-19，位於第七階層，目標距離約 100 至 280 公尺，視野開闊、足夠腹地，期望在此進行巡迴式 GB-SAR 掃描作業，以觀察斷層邊界錯動情形。

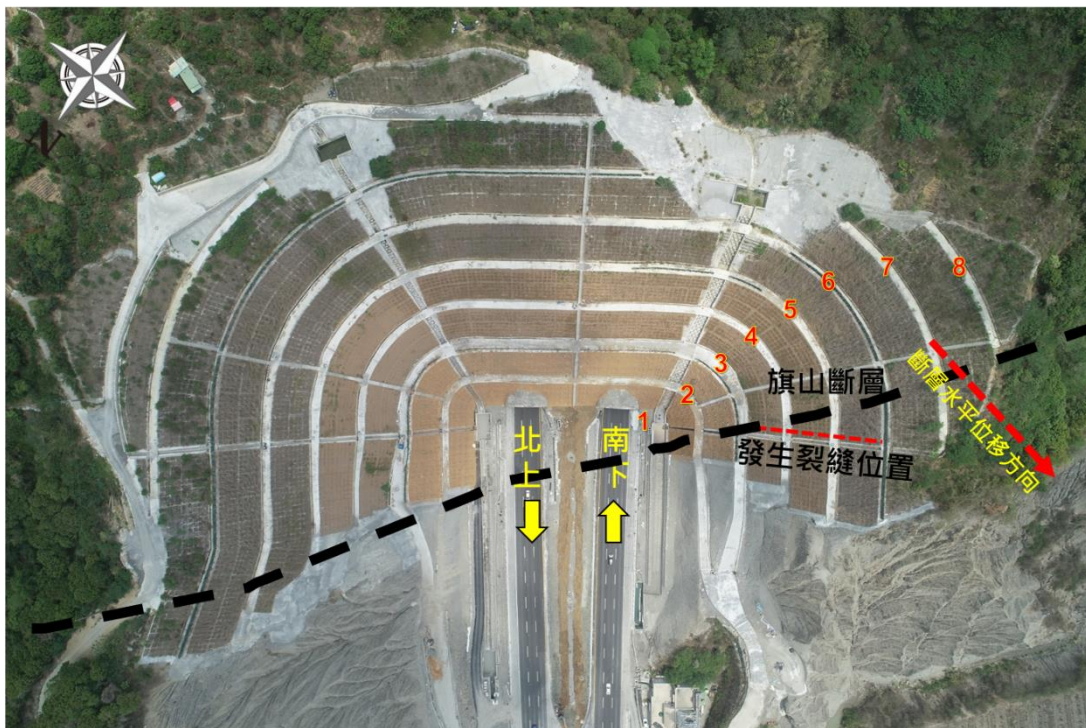


圖 2-18 中寮隧道北洞口俯視圖



圖 2-19 中寮隧道北洞口 GB-SAR 擺放監測視角(中寮隧道)

第三章 工作成果說明

本計畫以 GB-SAR 監測崩塌地之短、中期微幅變形位移，本計畫於中寮隧道邊坡、以及秀巒白石大崩塌進行監測，另對台東大鳥、新北石碇華梵大學兩處邊坡、以及新北汐止鵠鵠崙崩塌地”使用 GB-SAR 進行微變動監測之可能性”進行初步的評估。所監測及評估結果於本章節依序提出。

第一節 秀巒部落白石大崩塌監測

一、觀測點位

經評估觀測秀巒部落白石大崩塌，選擇坐標 “N24.6191°，E121.2861°” (如下圖 3-1 中所標記位置)之露營區架設 GB-SAR，由於需要長時間監測，露營區有 1.穩定電源（市電），2.良好腹地（水泥地），3.可通視崩塌區，有效距離約 180 至 575 公尺，相對位置屬於正交(垂直觀測)利於雷達回波接收，4.目標裸露無顯著覆蓋優勢且崩塌地持續微幅位移，為使用 GB-SAR 長時間觀測良好標的。

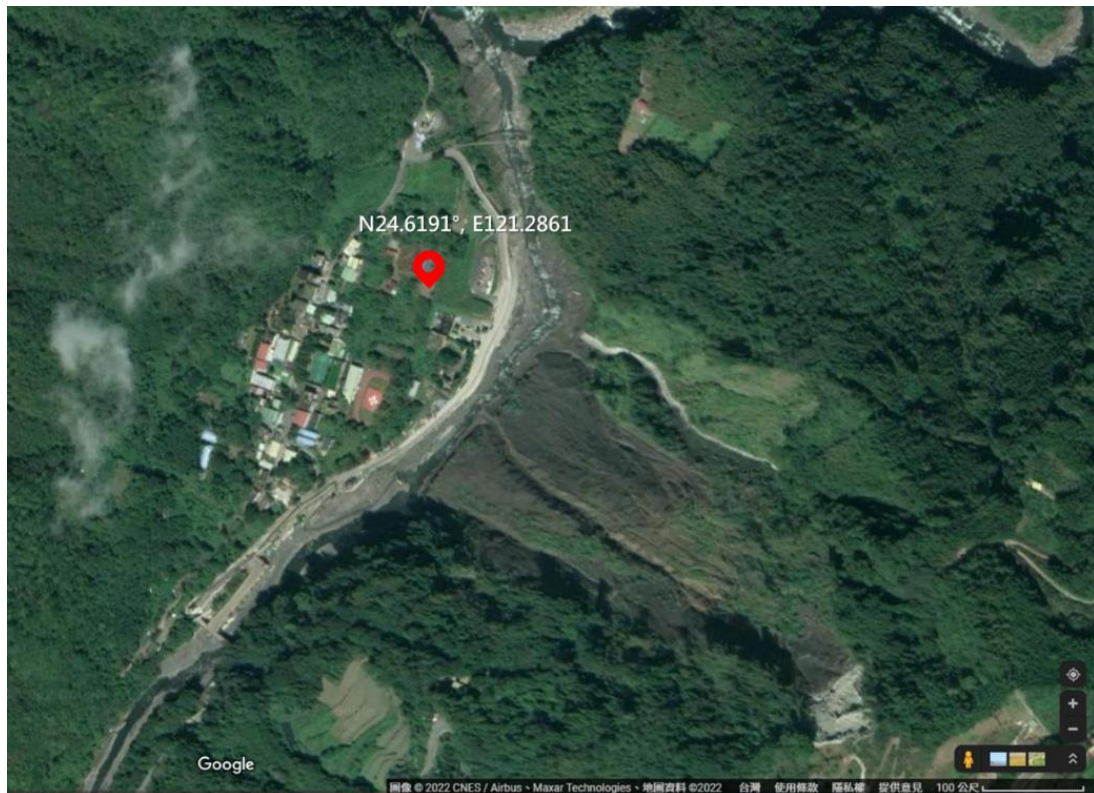


圖 3-1 GB-SAR 監測秀巒白石大崩塌位置圖

二、觀測時間

本計畫於秀巒白石大崩塌已觀測分別為 2021 年 10 月 20 日觀測 40 小時，原訂於 2022 年 5 月 17 日起要連續觀測一個月，但 GB-SAR 在連續操作使用約 72 小時後，發生旋轉平台故障情況，不得以先暫停監測。後經過檢修，於 8 月 11 日起再次啟動監測工作。掃描組數與累積掃描時數列於表 3-1。

表 3-1 秀巒部落白石大崩塌監測資訊一覽

地點	項次	狀態	日期	時間	掃描組數	累計觀測時	備註
秀巒白石崩塌地	1	開始掃描	2021/10/20	17：35	117 組	約 40 小時	
		結束掃描	2021/10/22	10：00			
	2	開始掃描	2022/05/17	10：28	356 組	約 72 小時	
		結束掃描	2022/05/20	14：40			
	3	開始掃描	2022/08/11	16：54	515 組	約 378 小時	
		結束掃描	2022/08/27	10：57			

三、儀器設置參數

觀測點距離秀巒崩塌地約 180 至 701 公尺，儀器主要參數設置帶寬(Bw)設置 400 MHz，代表操作頻率為(17.0 GHz 至 17.4 GHz)，視距方向解析度約 37 公分，最大帶寬(Bw)可設置 1000 MHz，可使視距方向解析度優化為 14 公分，但會使原始檔案大小增加 2.5 倍，增加儲存容量負擔與資料處理時間，詳細參數說明可參考報告書第二章，以秀巒案例帶寬(Bw)設置 400 MHz 掃描三角度雷達回波疊圖，單次掃描檔案大小約 25 MB。

秀巒崩塌地觀測水平方向解析度(Cross range resolution)受 GB-SAR 軌道基線與目標距離影響，本計畫使用之軌道最長距離為 1.6 公

尺，基線長度固定，故水平方向解析度受目標距離影響。目標距離 150 公尺至 700 公尺，水平方向解析度約在 80 公分至 382 公分，呼應前段說明，若 Bw 設定更高解析度，但水平解析度無法互相匹配，其效益也無法有大幅提昇。

脈寬設置(Pw)為 100 毫秒(ms)，代表脈衝持續時間，其設置與帶寬脈寬比有關，設置 Bw 為 400 MHz，Pw 為 100 ms，其最遠觀測距離可達 1,124 公尺，水平距離解析度約 5 公尺。雖然 Pw 可以設置至 1,000 毫秒，增加掃描最大距離至 10 公里，但若距離目標 10 公里，其水平解析度剩下 53 公尺，基本上無法對於邊坡進行有效進行觀測。

從上述可知道 GB-SAR 除基本雷達反射特性影響外，受與目標觀測距離影響大，原則實務上建議最遠距離約 2 公里，水平網格解析度 10.72 公尺，且崩塌地範圍需達 3 至 4 倍解析度大小才可以被有效觀測。

本計畫於秀巒掃描頻率為間隔 5 分鐘掃描 1 次，計畫使用之 GB-SAR 可以透過多角度雷達疊圖，使得單一次觀測視角增加。本次採用 18° 寬之天線，掃描 3 個角度，各角度重疊 3° ，故一組觀測視角約 $48^\circ (18^\circ + 18^\circ + 18^\circ - 3^\circ - 3^\circ)$ 。單一角度掃描需歷時約 2 分鐘，三角度約需 6 分鐘，加上間隔 5 分鐘，故約 1 小時可以獲得 5 組資訊左右(於 2022 年 5 月掃描 72 小時，獲得 356 組資訊)。

鑒於 2022 年 5 月 20 日 GB-SAR 之旋轉平台損毀，研究團隊著手維修儀器之際，同時探討機構損毀原因。初步討論結果認為 GB-SAR 以 5 分鐘頻率進行週期監測，其對旋轉平台而言為處在長時間持續運作的狀態下，導致機構內伺服馬達燒毀。因此在「保護儀器長時間運作」、同時「兼顧監測的時間解析度」的前提之下，研究團隊將掃描頻率改為 40 分鐘(非降雨期間)，並於降雨事件開始時，手動調整監測頻率至 20 分鐘，同時於每日早晚各挑 1 個小時進行關機冷卻，以確保 GB-SAR 在可長時間運作的前提下，監測到邊坡可能的快速變動。

表 3-2 秀巒部落白石大崩塌使用之 GB-SAR 參數

操作頻率	17000 - 17400 MHz
帶寬 (Bw)	400 MHz
脈寬 (Pw)	100 毫秒
天線增益	10 dB
天線大小	18° (azimuth), 40° (elevation)
雷達掃描角度	75°、90°、105°
雷達重疊角度	3°
基線長度	1.6 公尺
掃描距離	150 公尺- 700 公尺
視距方向解析度	0.37 公尺
水平方向解析度	0.8 公尺至 3.82 公尺
理論最遠觀測距離	1,124 公尺
掃描頻率(2022.05)	5 分鐘
掃描頻率(2022.08)	20 分鐘(降雨)、 40 分鐘(非降雨)

四、監測結果

(一) 秀巒白石崩塌 2022/5/17 至 2022/5/20 監測結果說明

從反射強度圖，如圖 3-2，可以觀察到接近坡趾的位置反射訊號較為強大；越往坡頂，因為坡度與觀察角度的關係，大部分的訊號被反射至他處，回到接收天線的訊號較弱。坡趾有幾處訊號較為薄弱、甚至完全沒有訊號的區域，該區域相對應的部分為植被、以及受到地形阻隔所影響的陰影區。

檢視三天之觀測結果，可發現冠部與趾部有明顯位移，從圖 3-3 可以明顯看到崩塌地的位移樣態差異，在冠部為遠離雷達機(圖中呈現暗紅色)，最遠變化達 2.5 公分左右，在滑動部基本上距離變化小(圖中呈現綠色)，在趾部距縮減，代表越靠近雷達機，可達 0.9 公分左右(圖中呈現為藍色)。從圖 3-4 可以看到整個崩塌地相對的位移情

況，可明顯看到植被區周圍有沖蝕溝的存在，整體土石滑動部相對位置差異不大，可能剛好為冠部侵蝕，趾部堆積所抵銷，導致看起來相對位置不變化，但可發現整體邊坡在觀測的三日之中，整個邊坡是慢慢的往下滑動約 0.9 至 2.5 公分左右。

若以局部單點小範圍檢視圖 3-3，可發現在冠部區域邊坡位移隨著時間有變化趨勢，如圖中冷色系點位(藍色、綠色折線)在上午 10 點半至 12 點左右會有逐漸遠離雷達機的情況，但是 12 點之後又會再靠近雷達機；在滑動部與坡趾地區圖中暖色系點位(紅色、橘色折線)則無此趨勢，呈現邊坡持續靠近雷達機情況，猜測可能與熱脹冷縮或大氣效應有關，亦或是不同邊坡位置的特性不同。

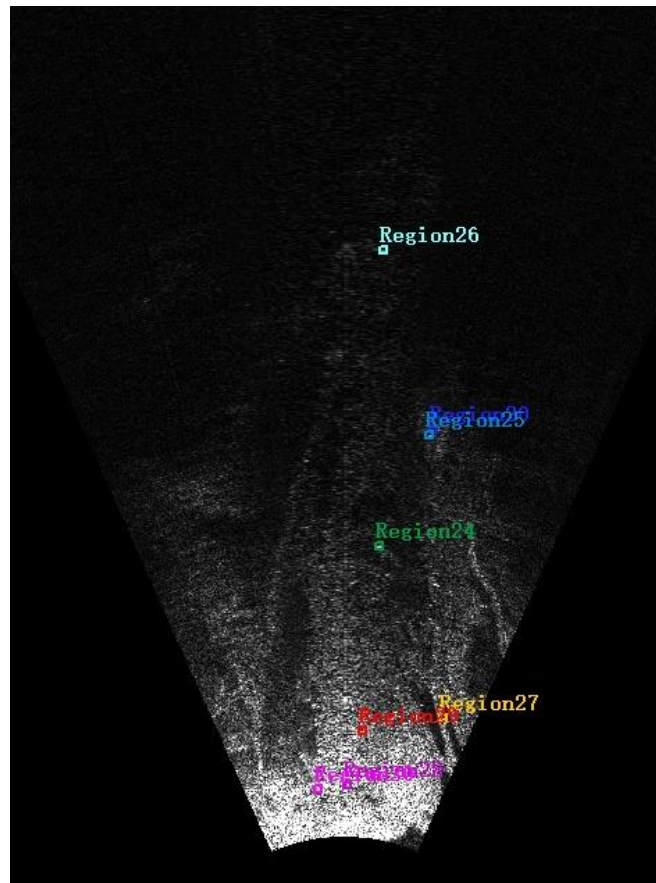


圖 3-2 秀巒白石崩塌雷達反射強度圖

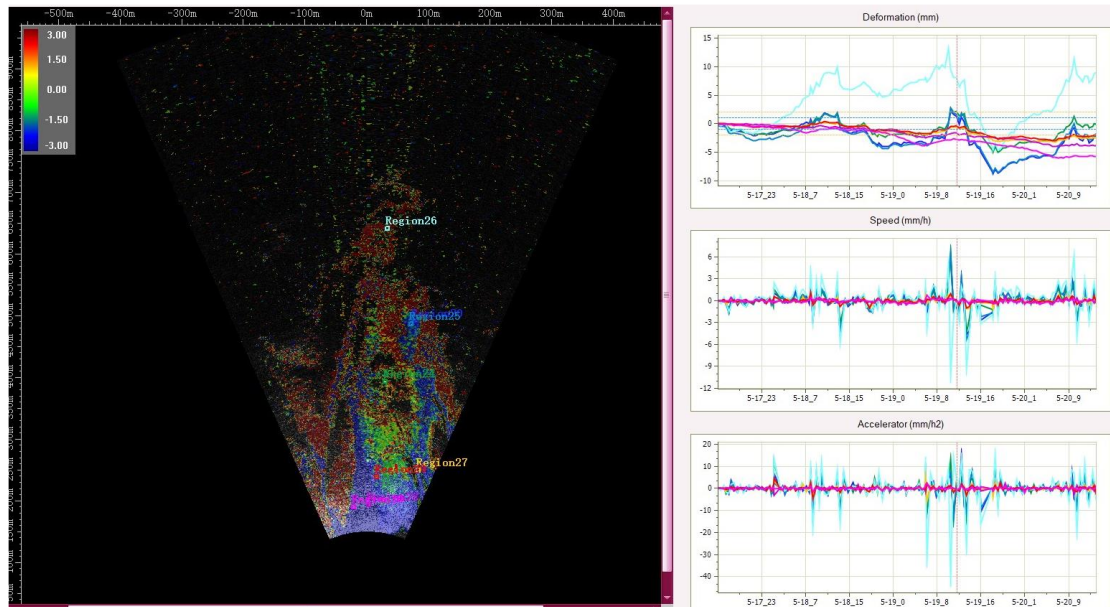


圖 3-3 秀巒白石崩塌 2022/5/17 至 2022/5/20 成果

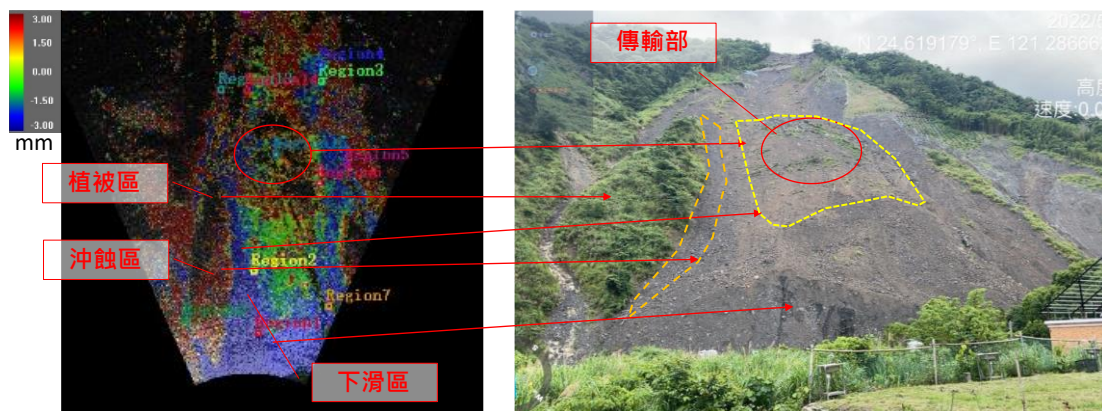


圖 3-4 秀巒白石崩塌 2022/5/17 至 2022/5/20 現地對照圖

1、秀巒白石崩塌 2022/5/17

逐日檢視觀測，可發現在 2022/5/17 自下午 14:10 開始觀測約 10 小時，可發現整體變化幅度並不大，僅有冠部地區位移約 2 至 3 毫米，如圖 3-5。

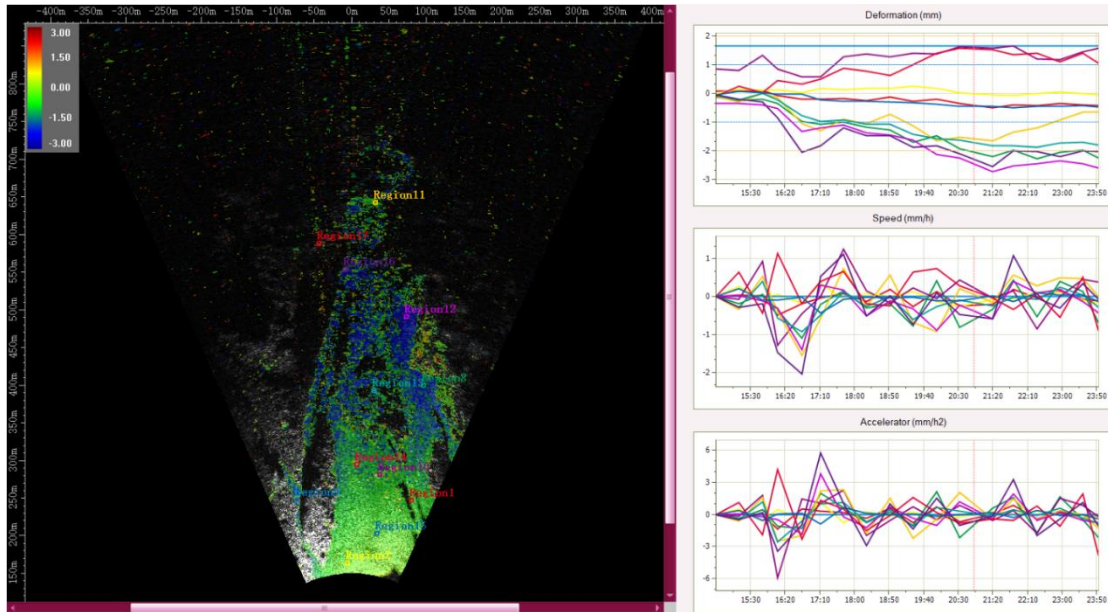


圖 3-5 秀巒白石崩塌 2022/5/17 單日成果

2、秀巒白石崩塌 2022/5/18

逐日檢視觀測，可發現在 2022/5/18 自 00：00 開始觀測約 24 小時，可發現主要變化位於左側植被區周圍之蝕溝有被侵蝕的情況，位移約 6 毫米，右側冠部則變動情況不大，如圖 3-6。

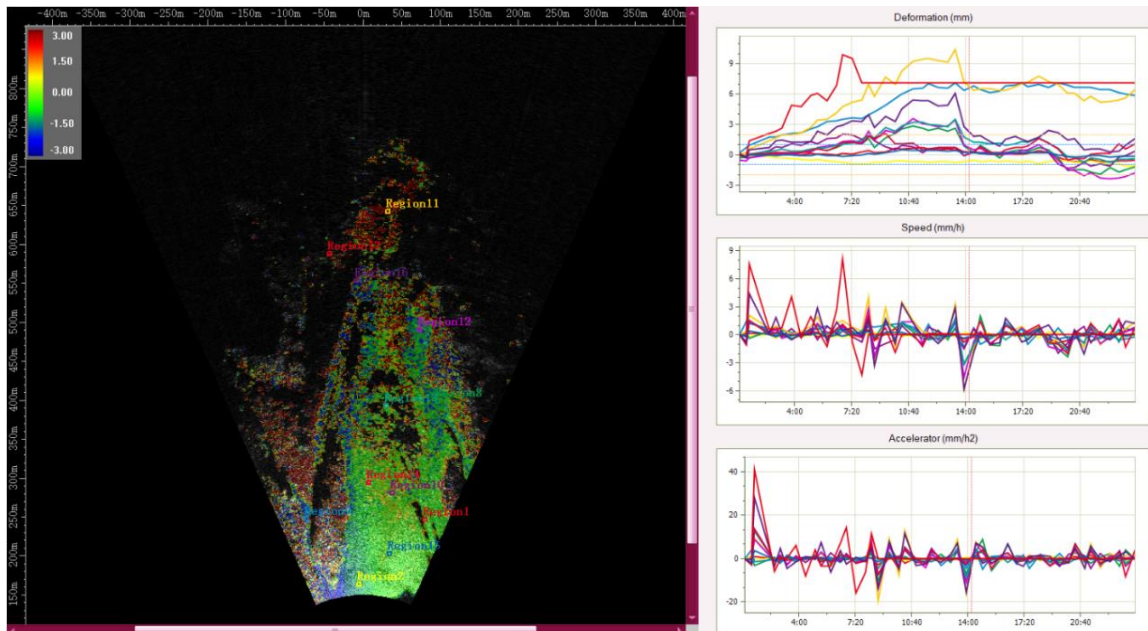


圖 3-6 秀巒白石崩塌 2022/5/18 單日成果

3、秀巒白石崩塌 2022/5/19

逐日檢視觀測，可發現在 2022/5/19 自 00：00 開始觀測約 24 小時，可發現主要變化位於左側植被區周圍之右側侵蝕溝有明顯位移約 6 毫米左右，如圖 3-7。

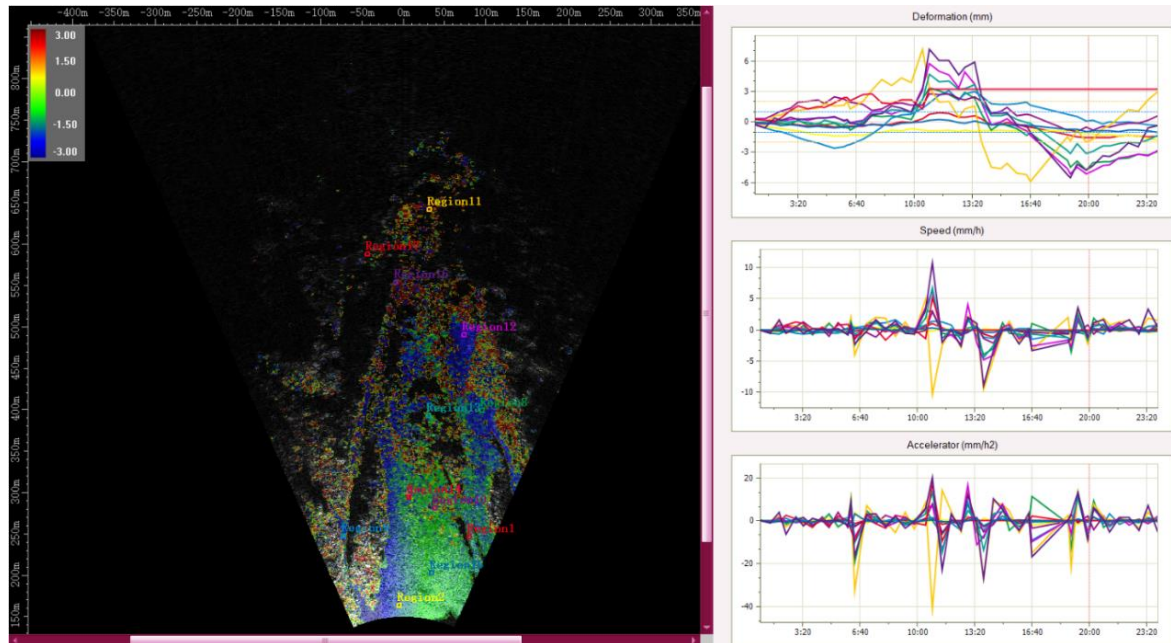


圖 3-7 秀巒白石崩塌 2022/5/19 單日成果

4、秀巒白石崩塌 2022/5/20

逐日檢視觀測，可發現在 2022/5/20 自 00：00 開始觀測約 14 小時，可發現主要變化在於上方冠部有明顯被侵蝕導致觀測距離增加，下方坡趾則有堆積情況，導致觀測距離減少，如圖 3-8。

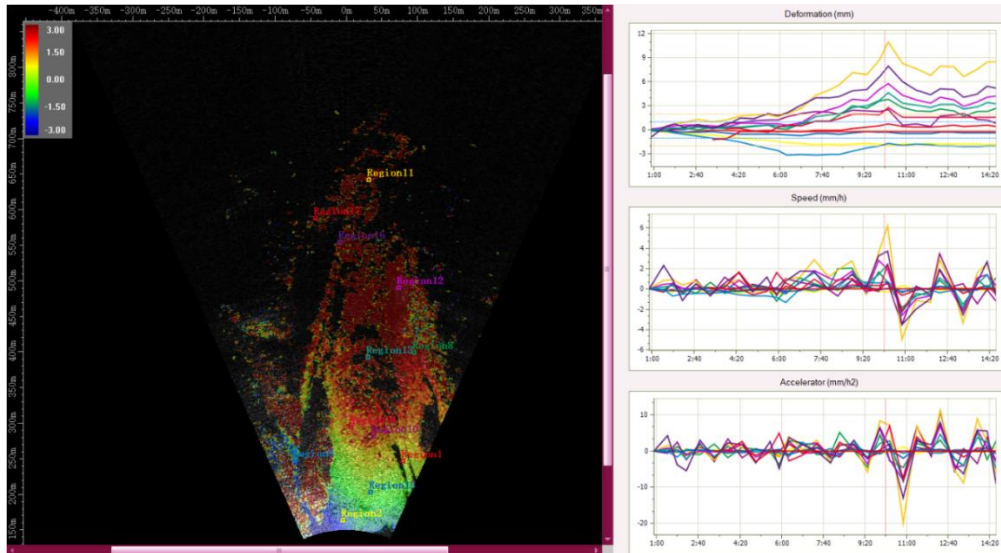


圖 3-8 秀巒白石崩塌 2022/5/20 單日成果

5、秀巒白石崩塌 2021/10/20 至 2021/10/22

檢視約 40 小時觀測結果，發現在滑動部有明顯的位移，位移量達 11 至 15 公分，如圖 3-9，由於觀測時間有降雨，故猜測變化可能與降雨有關係。主要位移區域在圖 3-4 之 A 區與 B 區的位置。

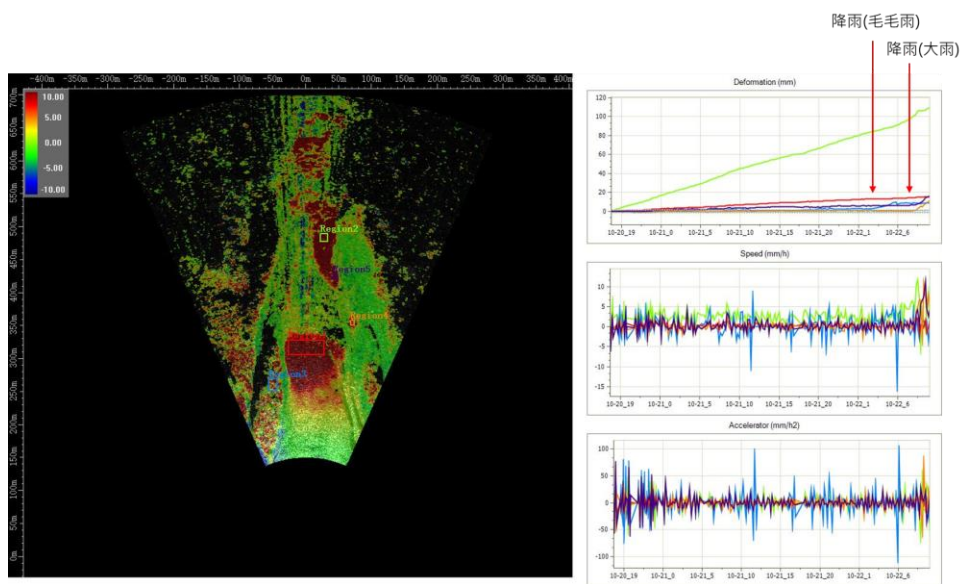


圖 3-9 秀巒白石崩塌 2021/10/20 至 2021/10/22 成果



圖 3-10 秀巒白石崩塌現地位置圖

6、遭遇困難與後續工作事項

在 GB-SAR 連續運作 72 小時候，儀器發生故障情況，旋轉平台發生冒煙，位置如圖 3-11(左)，故障儀器相對整體設置如圖 3-11(右)中紅框處，經現場拆解後如圖 3-12 仍無法現地排除，故僅觀測 72 小時後便先後撤。後續檢查為旋轉機構之伺服馬達燒毀。



圖 3-11 GB-SAR 儀器冒煙位置(左)設備相對位置照片(右)



圖 3-12 旋轉平台現地拆解檢視問題

由於本次設定掃描間隔為 5 分鐘 1 次，可能為機構散熱時間不足，或是機構因使用年限或電壓不穩等其他原因產生故障造成伺服馬達燒毀，若再進行監測則會增加掃描間隔時間，確保儀器有較長時間進行散熱。

7、2022 年 5 月監測小結

透過 GB-SAR 即時監測整體觀測時間邊坡位移，可以紀錄全邊坡的運動情況，在冠部有侵蝕情況，趾部有堆積情況，且觀測為毫米之變化量。透過雷達影像呈現，更可以瞭解整個邊坡運動的邊界為何，應用於提供邊坡整治上參考使用。以逐日檢視邊坡變化情況，可以發現邊坡潛移並非同時移動，而是有不同的時間點，可能為蝕溝侵蝕邊坡不穩定發生，冠部開始往下滑動，再由趾部漸漸往前方堆積，透過長時間監測可以觀測整個邊坡隨時間之位移樣態。

(二) 秀巒白石崩塌 2022/8/11 至 2022/8/27 監測結果說明

本研究所使用的 GB-SAR 儀器於 2022 年 5 月下旬故障，歷經 1 個多月的備料、檢修、以及進行壓力測試確認一切正常後，於 2022 年 8 月重新安排秀巒連續監測工作；由表 3-1 之記錄可瞭解到本次監測開始日期為 8 月 11 日下午，結束監測於 8 月 27 日上午，共歷經 378 小時 3 分鐘、並取得對邊坡監測雷達影像計有 515 組。

為瞭解監測過程中邊坡的微變動現象與當地的降雨量關係，工作人員除了現場重點紀錄天氣變化外(如降雨時間、現場溫度變化等)，另委請水土保持局曾名賢先生協助聯繫，透過「大規模崩塌監測整合系統」(簡稱大崩系統)取得秀巒部落現地雨量紀錄；雨量紀錄如下圖 3-13 所示。



圖 3-13 秀巒部落 8 月 11 日至 8 月 27 日一小時累積雨量紀錄
(註：資料引用自「大規模崩塌監測整合系統」)

由圖 3-13 可知，8 月 11 日下午日至 8 月 27 日上午間，有紀錄的降雨事件有四場，各雨量事件資訊記錄如下表 3-3 所示。

表 3-3 秀巒部落 8 月 11 日至 8 月 27 日上午降雨事件記錄

日期	開始降雨時間	持續時間長	累積雨量
8 月 12 日	15：50	20 min	2.5 mm
8 月 20 日	15：40	20 min	2.5 mm
8 月 24 日	18：30	50 min	6 mm
8 月 25 日	13：50	240 min	27.5 mm

其中，8 月 12 日、20 日的降雨量與持續時間較短；8 月 24 日的降雨時程次之、8 月 25 日的降雨量與持續時間最長。

由於本次監測工作時數較長，研究團隊觀察到，邊坡表面的微變動監測結果需要以較長時間的尺度來討論會較有意義；逐日報導位移量變化反而較無法看出整體趨勢。因此於本期末報告中，2022 年 8 月的監測工作會先討論整體監測結果、以及造成邊坡表面為變動現象的可能驅動原因；後依照各別降雨事件對邊坡影響進行簡單描述。

1、8 月 11 日至 8 月 27 日整體監測成果

監測作業，首要確定的事為 ”辨識目標在雷達影像中的位置”。由於雷達訊號特性，GB-SAR 監測所獲得的影像為二維平面影像，會稍微與真實地物分布有所差異，所以最佳的方式為導入光達掃描成果或數值地形模型(DEM)協助建立三維雷達影像。藉由 2021 年 10 月監測工作成果(含光達現場掃描建模，圖 3-14)，本年度監測工作可以輕易辨認目標邊坡大致相對位置(圖 3-15)。

由於 GB-SAR 水平解析度隨距離變差的特性，可以觀察到本次邊坡左側較靠近 GB-SAR 且較茂密的植被，其同調性幾乎全消失，僅剩強反射訊號；而距離相近，植被較為稀疏的邊坡中段，該位置之反射訊號強度稍弱，但存在有正負位移像素相鄰之特性。前述兩者雖然特性不同，但均被視為植被，故後續進一步選擇觀察資料點(簡稱觀察點)時，需避開這些屬於植被類型的像素。

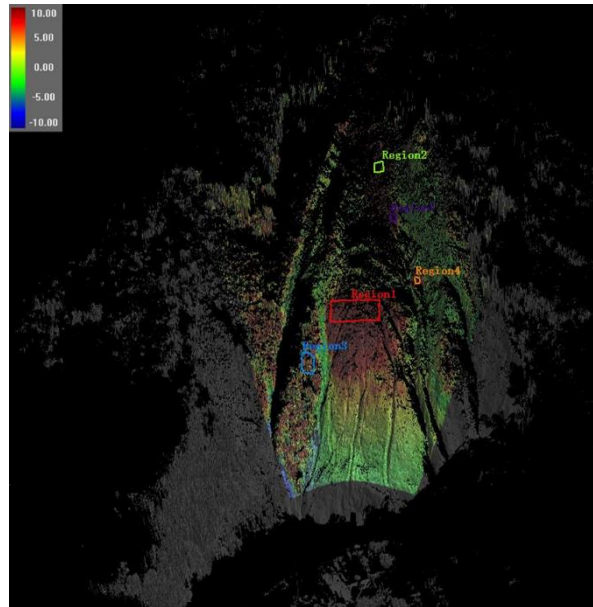


圖 3-14 2021 年 10 月秀巒監測工作之雷達搭配光達監測結果



圖 3-15 2022 年 8 月秀巒監測工作之雷達影像(左)與現場目標對照(右)

選擇觀察點的目的在於了解特定位置之像素隨時序之位移狀況。
為求所觀察資訊較無偏差，本次觀察點之選擇原則如下：

1. 只檢視單一像素，不框選範圍平均資訊；
2. 選擇訊號強度較強，足夠在程式中以灰階像素顯現；
3. 具有同調性(顯色)；
4. 不具有植被特徵。

如下圖 3-16 所示，觀察所選擇像素之相對位置(左下&中)與累積位移量(右上)、速度(右中)、以及加速度(右下)資訊。

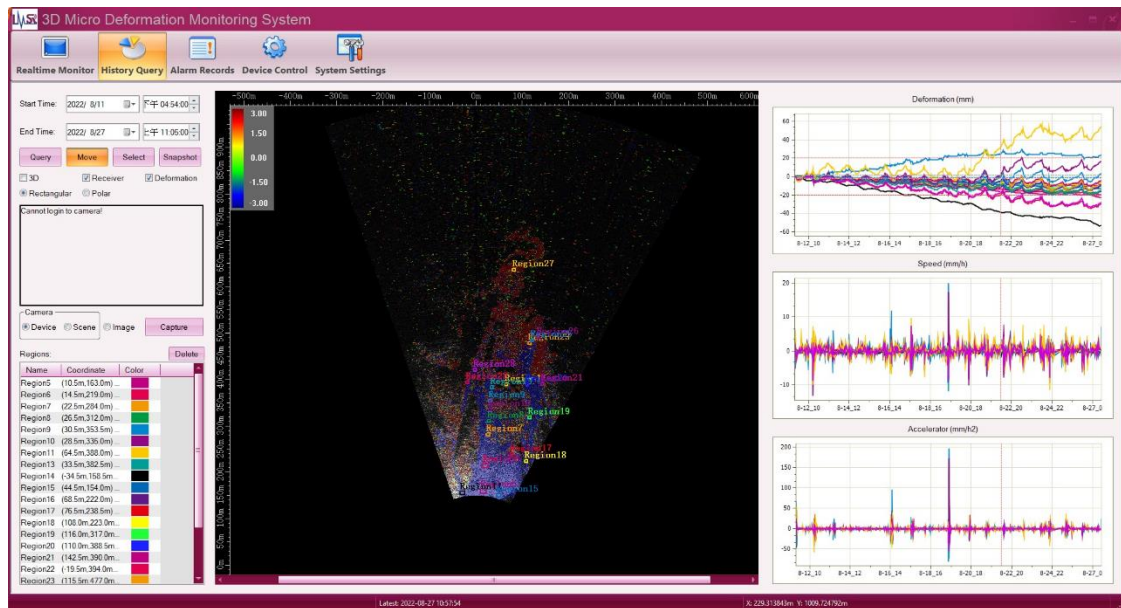


圖 3-16 秀巒部落於 8 月 11 日至 8 月 27 日監測成果

放大圖 3-16 之右側位移量等三欄資訊，如下圖 3-17 所示：

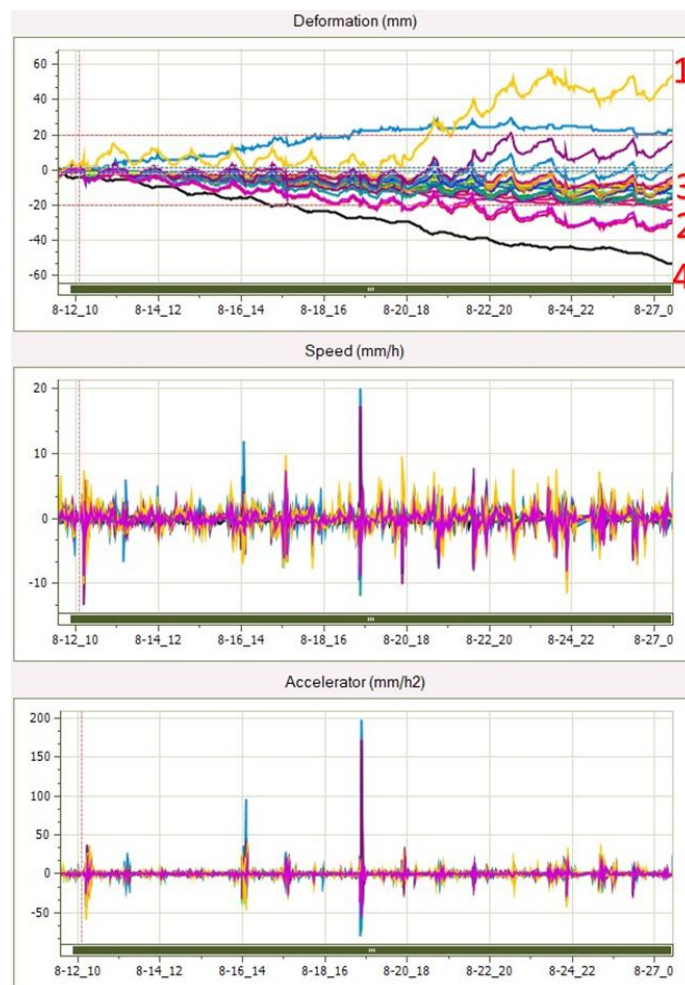


圖 3-17 圖 3-16 之右側欄位放大圖

由圖 3-17 上側所顯示之累積位移量，可以觀察到四種不同的特徵：

1. 位於邊坡中上部接近坡頂位置，每日有起伏變化，趨勢為「遠離」；
2. 位於邊坡中下部位置，每日有起伏變化，趨勢為「靠近」；
3. 位於邊坡趾部，每日無明顯起伏變化，位移量不明顯，整體趨勢為「靠近」；
4. 位於邊坡殘存植被接近趾部區域，無明顯起伏規律，趨勢為「靠近」。

簡而言之，邊坡趾部呈現接近 GB-SAR 的趨勢、邊坡中上部接近坡頂的區域普遍呈現遠離 GB-SAR 的趨勢。

有關觀察點位移波動起伏的現象，記錄到最遠離時間點集中在每天上午八點至十一點之間；之後開始轉向，朝向 GB-SAR 接近。位移由最接近轉向遠離的時間點則不固定。

由於所監測目標並不會移動；經由雷達掃描所呈現出來回接近/遠離等微變動現象，於現實中除了週期移動之外，其他最有可能的解釋為「環境溫度變化間接造成邊坡產生膨脹/收縮運動」。

邊坡表面若受到太陽光直接照射、或受到環境溫度變化而升溫，其應反應在體積變化上；岩體或土砂受熱而膨脹，進而開始在雷達監測結果中產生”接近”的趨勢。等到室溫因日落或降雨開始下降，低於邊坡當前的溫度，導致岩體或土砂開始降溫、收縮，從而在雷達監測結果中產生”遠離”的趨勢。

為了瞭解邊坡波動微變動變化與溫度有關，本研究分別進行下列兩項工作：

1. 透過查詢邊坡之坡度、坡向、太陽升起方位、以及陽光直射到邊坡，瞭解邊坡整體受熱膨脹的時機點；
2. 透過 GB-SAR 監測結果，降雨事件對邊坡表面微變動之影響。

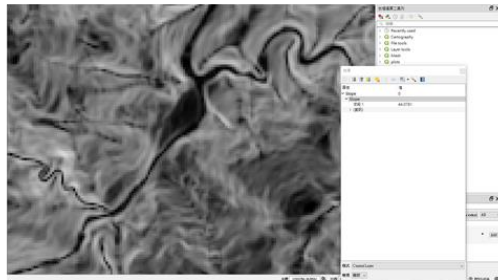
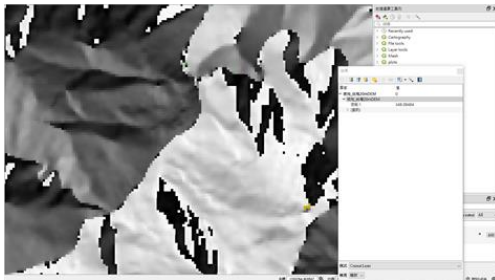
						坡趾		坡峰		
秀巒邊坡基本資料	數值	單位	備註			日照時間	微變動轉向 影像時間	臨界日落1	臨界日落2	
邊坡平均坡向	317.1662	度			8月11日	No Data	No Data	16:43:03	17:41:40	
邊坡平均坡度	41.72329	度			8月12日	08:37:35	09:02:00	16:42:25	17:41:00	
海拔(最低)	829	公尺	最高-最低 = 373公尺			8月13日	08:37:50	09:05:05	16:41:54	17:40:18
海拔(最高)	1202	公尺			8月14日	08:38:08	09:26:51	16:41:05	17:39:33	
對向邊坡海拔	1600	公尺			8月15日	08:38:25	09:12:23	16:40:25	17:38:50	
對向邊坡距離坡趾	1770	公尺	兩者高差 = 771 公尺			8月16日	08:38:42	09:06:13	16:39:43	17:38:05
對向邊坡距離坡峰	2160	公尺	兩者高差 = 398 公尺			8月17日	08:39:00	08:55:03	16:39:00	17:37:17
					8月18日	08:39:19	09:07:20	16:38:15	17:36:30	
臨界日落角度(坡趾)	23.54	度			8月19日	08:39:37	10:08:53	16:37:30	17:35:44	
臨界日落角度(坡峰)	10.44	度			8月20日	08:39:55	10:05:07	16:36:43	17:34:55	
						8月21日	08:40:12	10:39:58	16:35:58	17:34:05
						8月22日	08:40:32	10:17:04	16:35:10	17:33:15
						8月23日	08:40:50	09:29:47	16:34:47	17:32:24
						8月24日	08:41:10	09:29:11	16:33:30	17:31:31
						8月25日	08:41:30	09:37:57	16:32:40	17:30:40
						8月26日	08:41:50	11:04:35	16:31:47	17:29:47
						8月27日	08:42:10	10:39:48	No Data	No Data
						參考資料來源:		ESRL Global Monitoring Laboratory - Global Radiation and Aerosols (noaa.gov)		
	使用坐標	24.61911	121.28659	劉老村長露營區						

圖 3-18 邊坡資料、日照角度/時間、以及微變動變化一覽

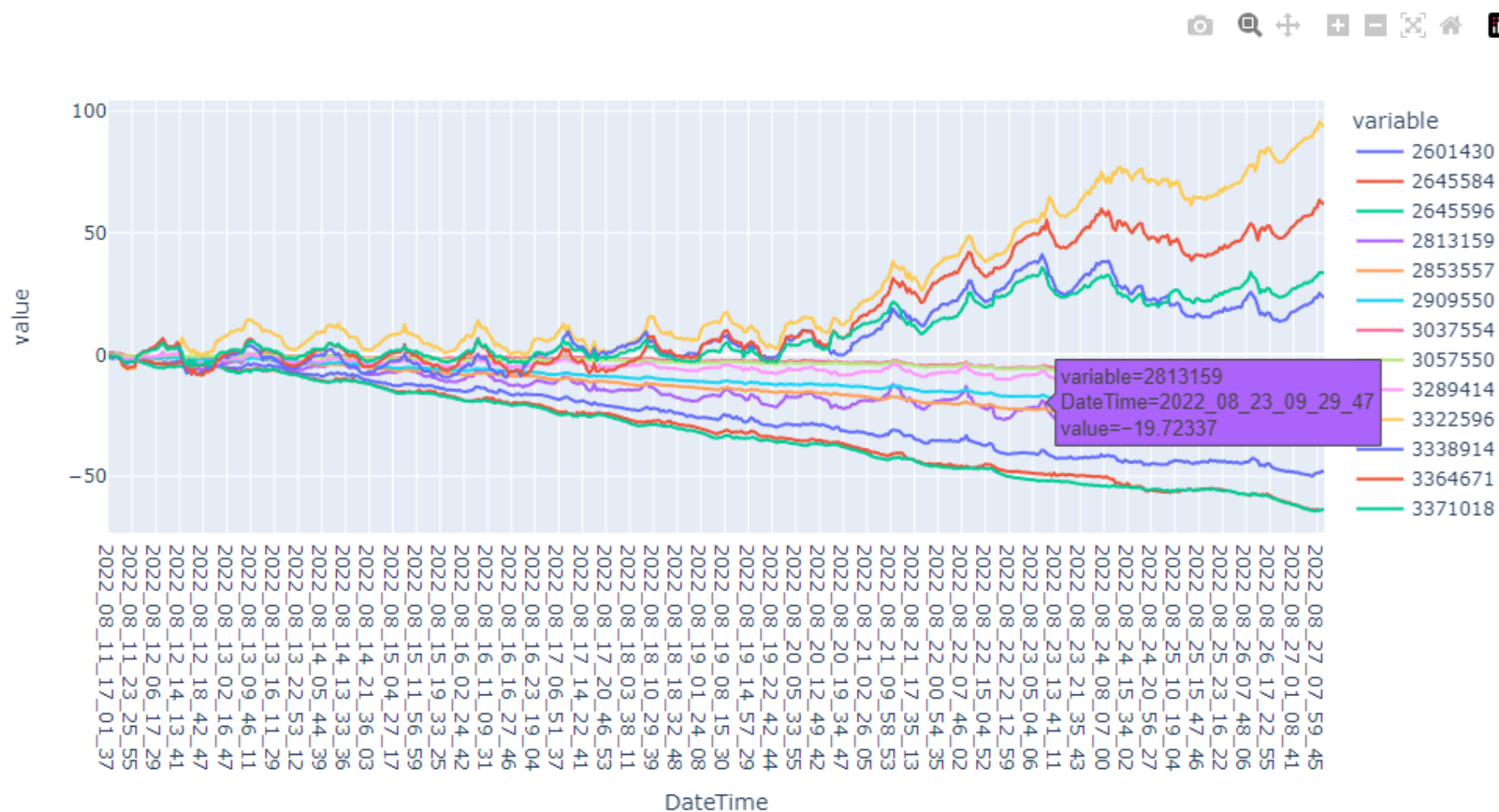


圖 3-19 利用互動式圖表查詢各觀察點於不同時間的位移狀態

2、太陽日照對邊坡表面微變動之影響

本研究使用國家公開 20 米數值地形圖，取得現場邊坡坡峰、坡趾之海拔高度、以及邊坡平均坡度、坡向。另外透過美國大氣海洋局網站(ESRL Global Monitoring Laboratory - NOAA Solar Calculator)，取得 8 月 11 日至 8 月 27 日秀巒當地的太陽方位、以及照射到邊坡的時間點。整體資料整理結果如圖 3-18 所示。

由圖 3-18 可知，秀巒平均邊坡坡向為 317.16° 、坡度為 41.72° ；查詢 2022 年 8 月 12 日至 27 日，當地太陽升起照射到邊坡的方位約為 91.51° 至 98.57° ，可以直接照射到邊坡的時間點落在上午 8 時 37 分至 8 時 43 分之間。

GB-SAR 偵測到邊坡趨勢開始轉變的影像時間介於上午 8 時 55 分至 11 時 5 分之間。其中時間間隔之所以差異至 2 個小時，部分原因在於本次監測時間間隔約為 40 分鐘，並且於每日上午時段進行 1 個小時的關機冷卻，因此導致監測到位移趨勢反轉時間不一。

若部分邊坡波動的漲縮現象跟太陽日照有關，則在邊坡受到日照後，邊坡應會被 GB-SAR 觀察到開始由收縮改為膨脹的現象。由圖 3-18 之「微變動轉向之影像時間(查詢方式如圖 3-19)」欄位可以瞭解到，邊坡中上部的微變動的趨勢確實在每天上午太陽升起之後，才開始發生轉變；而邊坡的中下部則沒有顯示明顯轉折趨勢。

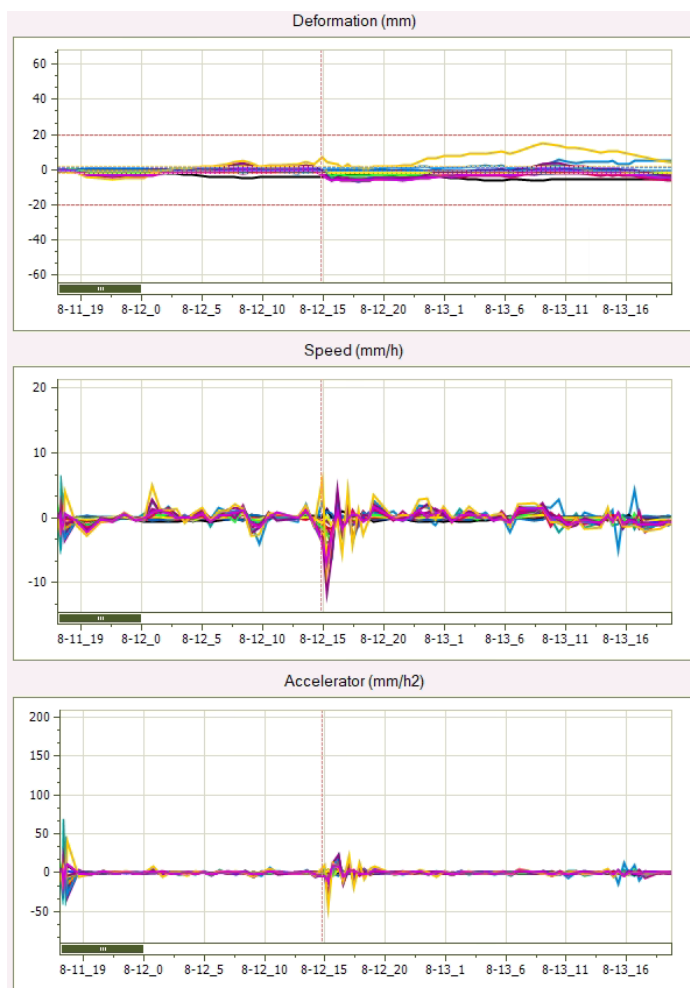


圖 3-20 8 月 12 日累積位移量、速度、加速度成果

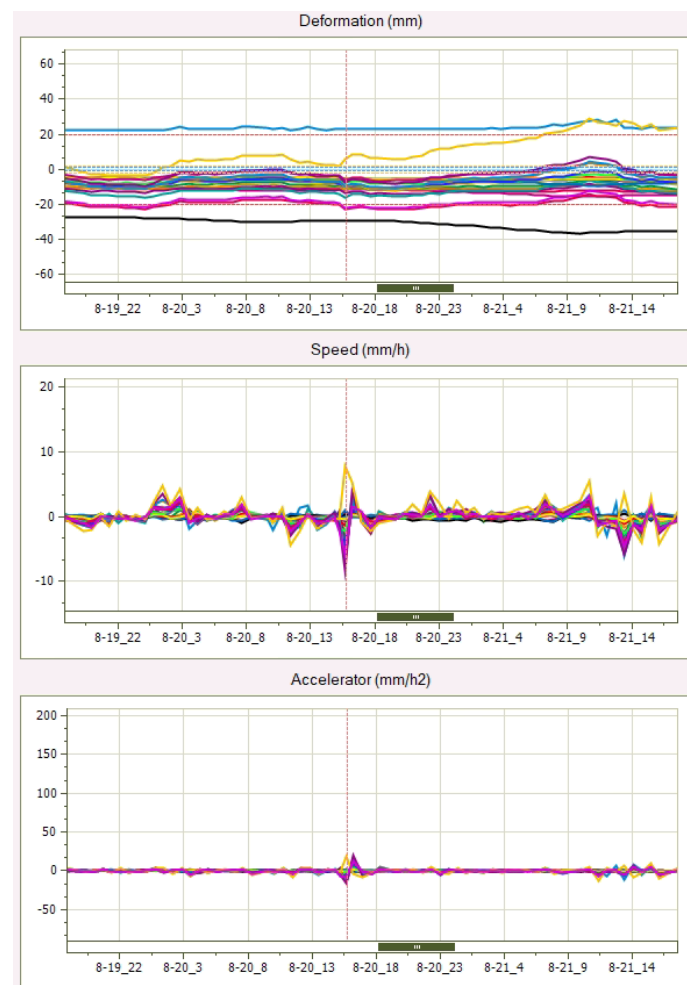


圖 3-21 8 月 20 日累積位移量、速度、加速度成果

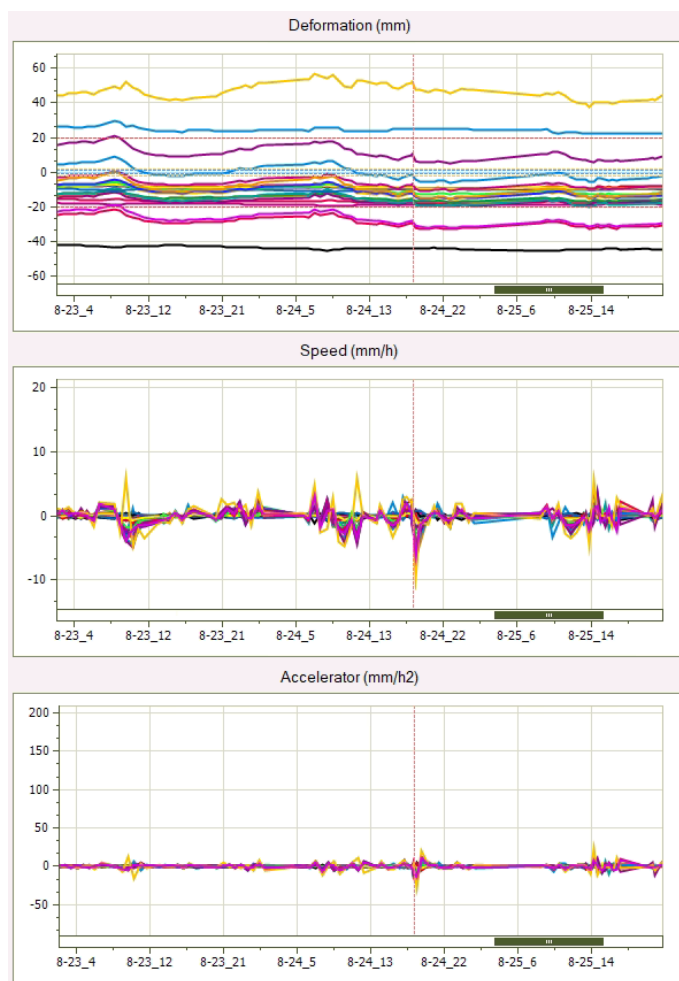


圖 3-22 8 月 24 日累積位移量、速度、加速度成果

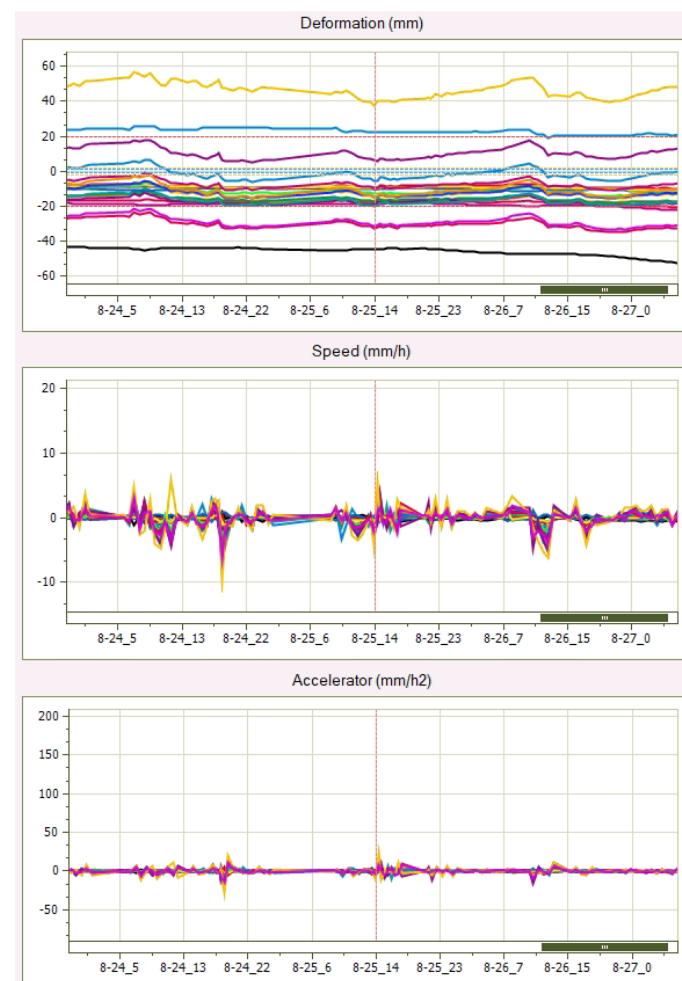


圖 3-23 8 月 25 日累積位移量、速度、加速度成果

3、降雨事件對邊坡表面微變動之影響

如表 3-3 所示，本階段監測工作過程，共紀錄到 4 次降雨事件：8 月 2 日、8 月 20 日、8 月 24 日、8 月 25 日；茲將 4 次事件的累積位移、速度、加速度結果列於上圖 3-20 至圖 3-23 中。

秀巒部落海拔約 820 公尺左右，8 月現場晴天白天最高溫可以到攝氏 38 度、晚間 17 度(夜間 22 時、凌晨 2 時分別量測)，溫差將近 20 度左右。若遇降雨，則溫度將會提前下降，則邊坡預期會因此從膨脹轉為收縮，從而在雷達影像下觀察到由「接近」轉往「後退」的趨勢。本次監測工作藉由 4 次的降雨事件來觀察環境降溫過程中，邊坡的微變動反應狀況為何。

(1) 8 月 12 日降雨事件

藉由「大崩系統」紀錄可瞭解，秀巒部落當天下午 3 時 50 分有零星降雨，24 小時累積降雨量為 2.5 mm。由圖 3-20 可以瞭解當時邊坡微變動狀況。觀測結果顯示邊坡無明顯位移(圖 3-20 上)現象，於速度(圖 3-20 中)、以及加速度圖(圖 3-20 下)可看到稍微明顯波動。

(2) 8 月 20 日降雨事件

秀巒部落當天下午 3 時 40 分有零星降雨，，24 小時累積降雨量為 2.5 mm。由圖 3-21 可以瞭解當時邊坡觀察點之累積位移量最高/最低位移量來到 -27 mm ~ 22 mm 左右，顯示兩次降雨事件之間，邊坡持續有微變動狀況發生。本日降雨事件過後，可以觀察到邊坡部分部位之微變動趨勢有由接近(膨脹)轉向為遠離(收縮)之趨勢。

(3) 8 月 24 日降雨事件

「大崩系統」記錄秀巒部落當天開始降雨時間為下午 6 時 30 分；本研究團隊於現場工作人員則提早於下午 4 時 50 分回報開始有零星降雨。5 時 30 分左右降雨強度增強，後一度趨緩。於下午 6 時 20 分重新出現雨勢，並於下午 6 時 40 分達到當日最強雨勢。

由圖 3-22 降雨過程中的累積位移量變化，可以觀察到邊坡觀察點於影像時間：下午 4 時 56 分左右開始由接近(膨脹)轉向遠離(收縮)，後於 6 時 40 分左右突然又轉向變成接近的趨勢，直到夜間 8 時停止。

(4) 8 月 25 日降雨事件

當天約下午 1 時 50 分即開始強降雨；於 2 時 40 分雨勢轉強烈，為監測開始以來最強雨勢，邊坡表面觀察到出現逕流，夾雜土石沿著蝕溝沖到邊坡趾部。

現場溫度從上午的 37 度快速下降到 24 度。雨勢持續到下午 4 時 50 分左右才開始轉小，當天 24 小時累積降雨量為約 27.5 mm。

由圖 3-23，GB-SAR 監測到邊坡在下午 2 時 30 分最為接近，之後開始朝遠離方向移動，遠離幅度最大達 1.6 公分(至隔天上午 7 時左右)。同時，邊坡趾部觀察到接近趨勢緩慢增加(斜率變陡)。有別於非降雨時的紀錄，邊坡開始朝遠離 GB-SAR 方向移動的時間約為晚間 6～10 時左右。

因此，研究團隊認為，降雨事件的發生，除了阻斷陽光提供邊坡熱能外，另使環境快速降溫，為導致邊坡遠離現象提前開始的可能原因。

降雨事件對邊坡的影響，除了前面小節所述會參與到邊坡中上部位膨脹收縮的運動外，藉由比對降雨事件前後，觀察點的累積位移量趨勢，也可以看出一些端倪。下圖 3-24 為擷取部分觀察點累積位移資訊，並插入 4 次降雨事件之時間及雨量進行觀察與比較。

由圖 3-24 可以發現，第一次降雨事件過後，邊坡累積位移量開始出現較明顯的波動起伏，邊坡趾部的累積位移量靠近趨勢在第一次降雨事件後逐漸明顯；第二次降雨事件後，邊坡中上部位累積位移量遠離趨勢開始加大；第三、第四次降雨事件後，邊坡中段的累積位移量趨勢漸緩，甚至一度轉向，而邊坡坡頂的累積位移趨勢則持續遠離。

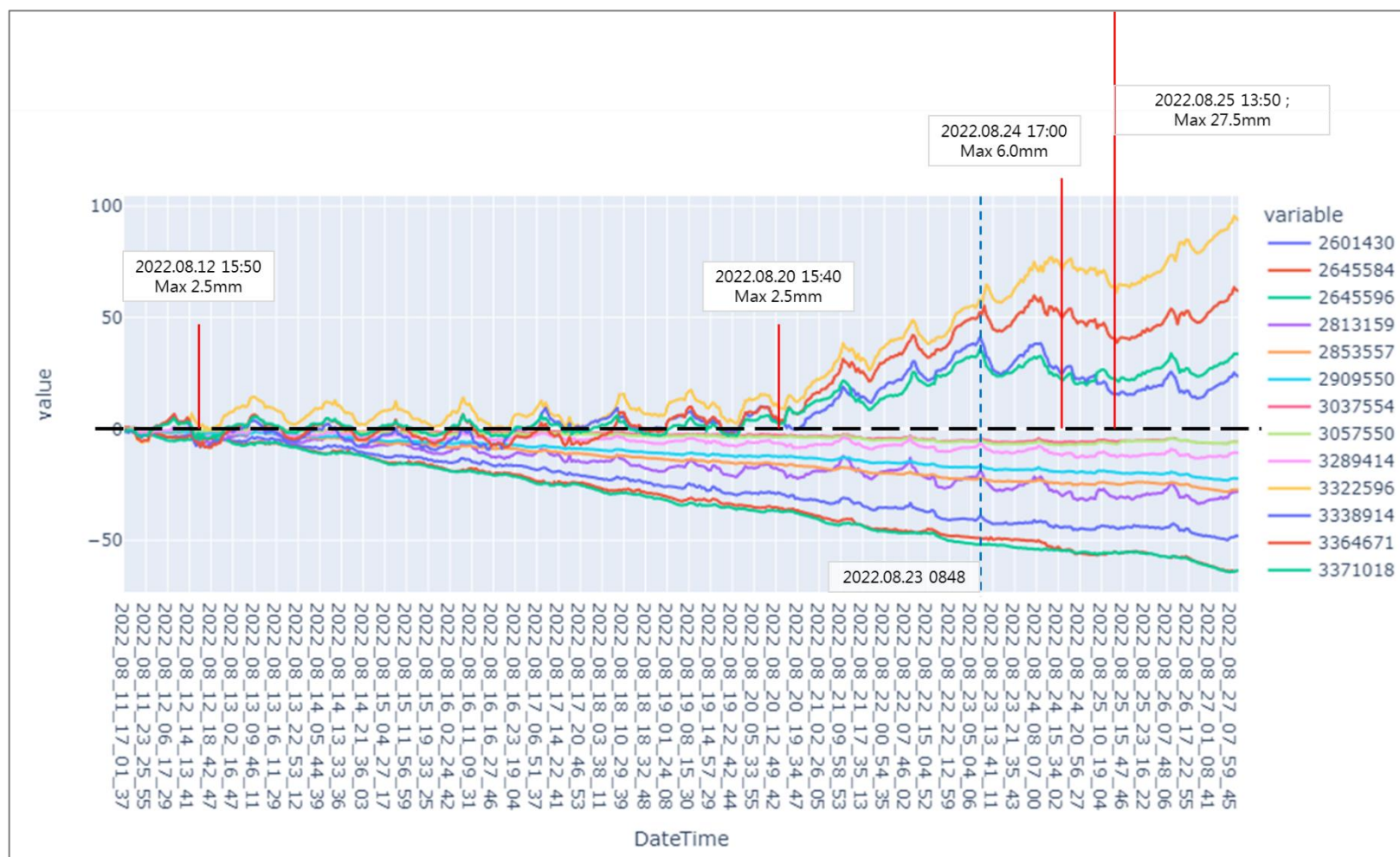


圖 3-24 比較降雨事件發時間及雨量與「累積位移量」變化關係

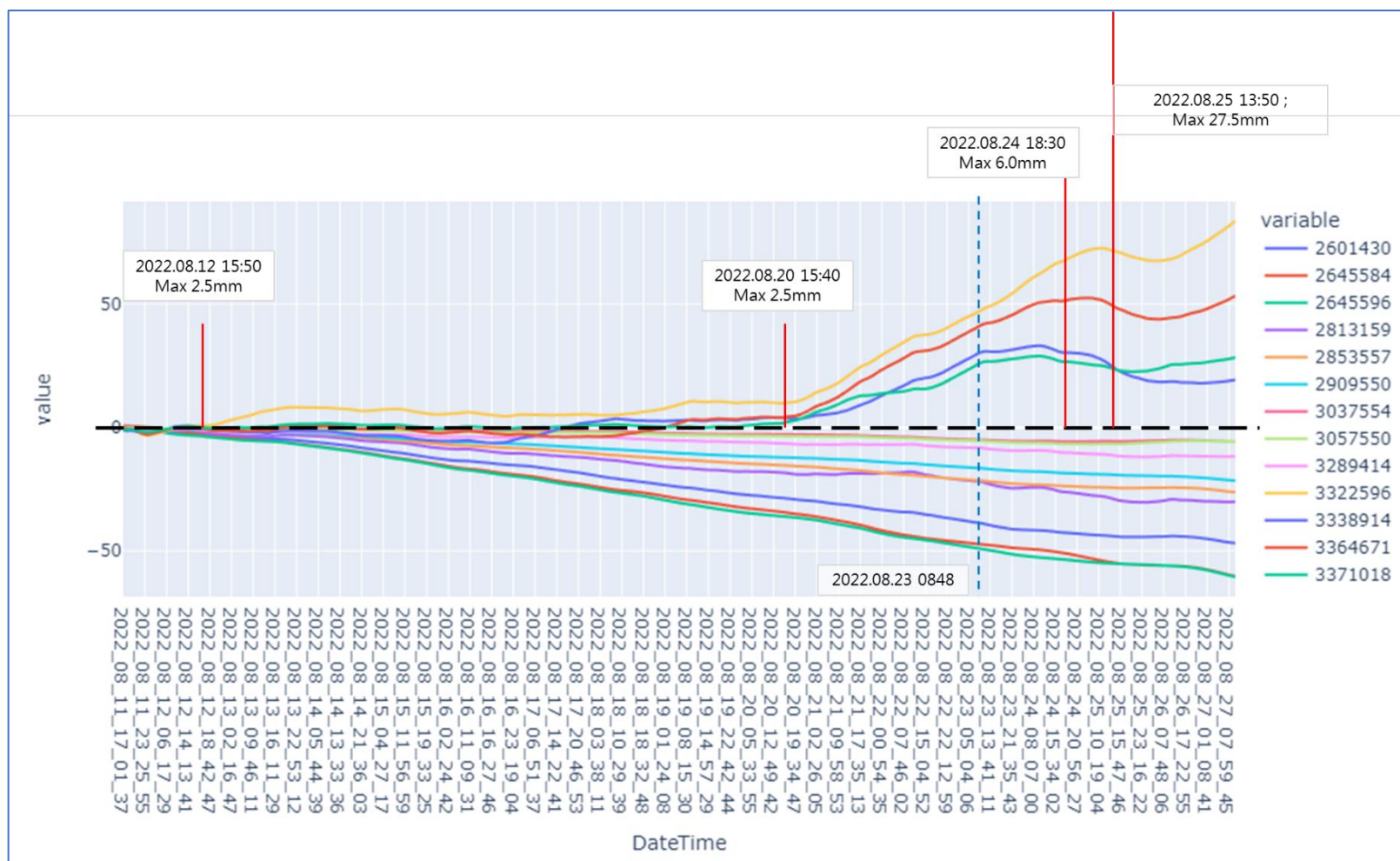


圖 3-25 比較雨量事件與累積位移量(24 小時移動平均線)變化關係

圖 3-25 為將圖 3-24 之各觀察點做 24 小時移動平均線；移動平均線可緩和日夜溫差造成波動起伏的影響，以較為平滑的線條輔助分析者瞭解累積位移量之當前動向；由圖 3-25 可以更清楚的瞭解邊坡於監測期間，經歷晴天與降雨事件後的整體發展態勢。

8 月 24 日、25 日降雨事件後的邊坡中上部累積位移趨勢稍微不符合預期地，沒有持續朝同一方向運動，反而一度有反轉的跡象，顯示除了日照與降雨事件外，尚有其他原因影響 GB-SAR 監測邊坡運動狀態的結果，有可能是邊坡其他部位的土石崩落或堆積的結果，抑或者是邊坡需要更長的觀察時間等待降雨事件完全發揮作用。

4、8 月 11 日至 8 月 27 日監測結果整理與討論

本次監測工作，利用 GB-SAR 之影像對進行干涉方法後，利用時序震幅離差閾值法、時序相關係數閾值法、以及同調性離差閾值法篩選出相對穩定的反射訊號點(PS 點)。影像總像素為 5,660,000 個；通過上述三個篩選方法後，共篩出 14,246 個像素(0.252%)作為 PS 點，所有 PS 點分佈及最終位移結果如圖 3-26、圖 3-27 所示。

最終累積位移結果顯示，大部分(94.02%) PS 點呈現靠近(負值)的趨勢；圖 3-27 可以觀察到，位於邊坡中下部的 PS 點主要累積位移結果為靠近(負值)的趨勢，邊坡中上部靠近坡峰的位置有較大的正值位移量；正、負值的極值分別位於影像的右上、以及左下角。

由前 2 小節討論可以瞭解到，秀巒邊坡表面「中上部位」之微變動趨勢確實與溫度變化有關。

同時研究團隊也注意到，越靠近坡趾，其波動越不明顯，甚至沒有明顯關連性。推測可能原因在於邊坡趾部接近白石溪，溪水的流動有助於邊坡趾部的溫度變化起伏較為平穩；又或者是邊坡趾部為歷次崩塌之土石堆積部，其內部孔隙較多、結構較為鬆散，因此熱導性與熱膨脹係數較成層理之澳底層為差，因此受環境溫度變化影響不大。

目前推測結果尚缺乏完整的驗證方法支持，需賴後續研究工作內容進一步證實。

	X	R	Distance	Sum
count	14246.000000	14246.000000	14246.000000	14246.000000
mean	57.132142	258.435666	267.097127	-14.067539
std	42.199383	109.547571	111.774629	12.726585
min	-79.500000	143.000000	150.000833	-63.600203
25%	21.000000	177.500000	183.790982	-20.670789
50%	54.500000	212.000000	222.293162	-11.646181
75%	92.000000	314.500000	330.142961	-8.966954
max	168.000000	701.500000	712.201692	93.774762

圖 3-26 PS 點資料個數、位置、累積位移量資料分佈狀況圖

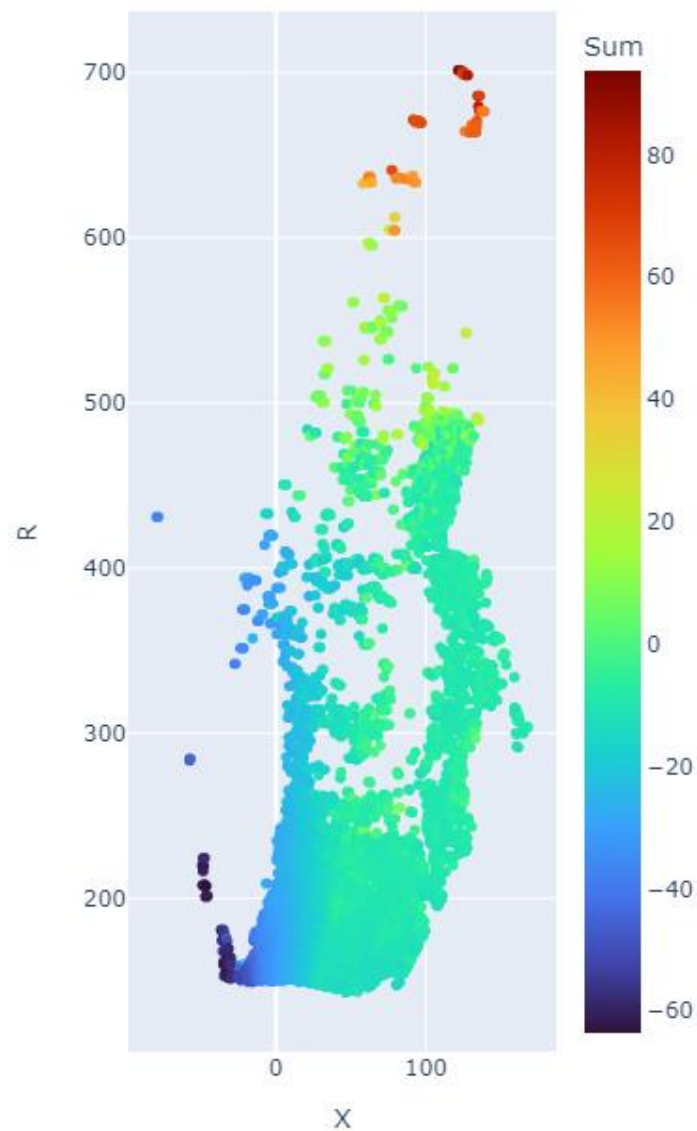


圖 3-27 PS 點最終累積位移量於空間分佈狀況

5、8 月監測工作小結

1. GB-SAR 於 8 月 11 日下午至 8 月 27 日中午期間，完整觀察到邊坡表面於非降雨/降雨時的運動現象。
2. 於監測期間，遭遇 4 場降雨事件；其中 8 月 25 日的強降雨事件，顯示除了雨水外，溫度為短時間主導邊坡運動狀態的主要因子。
3. 我們從累積位移型態中辨識出 4 種特徵：
 - a. 位於邊坡中上接近坡頂位置，每日有起伏變化，趨勢為「遠離」；
 - b. 位於邊坡中下部位置，每日有起伏變化，趨勢為「靠近」；
 - c. 位於邊坡趾部，每日無明顯起伏變化，趨勢為「靠近」；
 - d. 位於邊坡殘存植被接近趾部區域，無明顯起伏變化，趨勢為「靠近」。
4. 邊坡每日起伏變化規律，約於每日上午 8-11 時之間達到最遠離位置、於每日晚間 6-10 時達到最靠近位置；目前認為與日照對邊坡受熱膨脹或冷卻收縮的影響較為有關。降雨事件所導致之陽光阻隔、快速降溫的影響，會明顯反應在 GB-SAR 監測結果中。降雨事件除了會影響邊坡表面當下微變動趨勢變化外，另外對邊坡後幾天整體之變動有明顯相關。
5. 邊坡趾部的微變動變化之整體趨勢為「接近」，15 天累積位移量最高約達 63.6 mm 左右，平均一天位移量為 4.24 mm 左右；邊坡越靠近溪谷，所監測到位移量越明顯。
6. 目前 GB-SAR 監測範圍僅限於現生崩塌區之裸露部位(圖 3-28)。整體而言，邊坡狀態於 8 月時相對為穩定。
7. 若要使用 GB-SAR 觀察潛在崩塌(圖 3-29)是否發生，需配合傳統儀器進行進行更長期的觀察。
8. 若潛在崩塌區域開始運動，預測現生崩塌區的微變動模式將全部轉為朝向 GB-SAR 移動，而非分區域有「靠近」或「遠離」的現象。

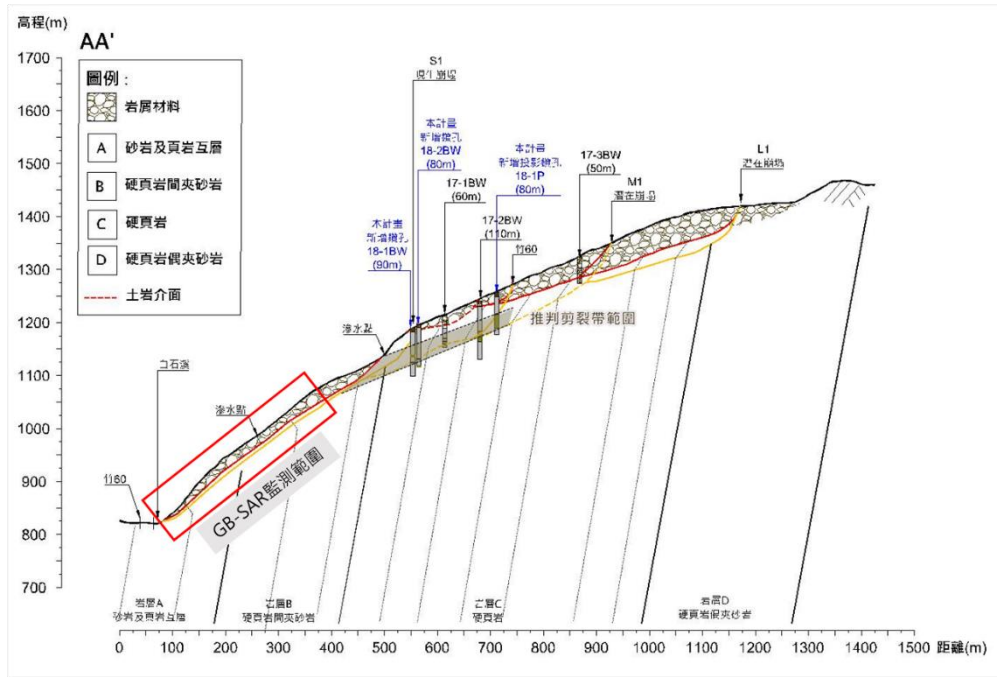


圖 3-28 GB-SAR 監測範圍於整體崩塌區域中分佈

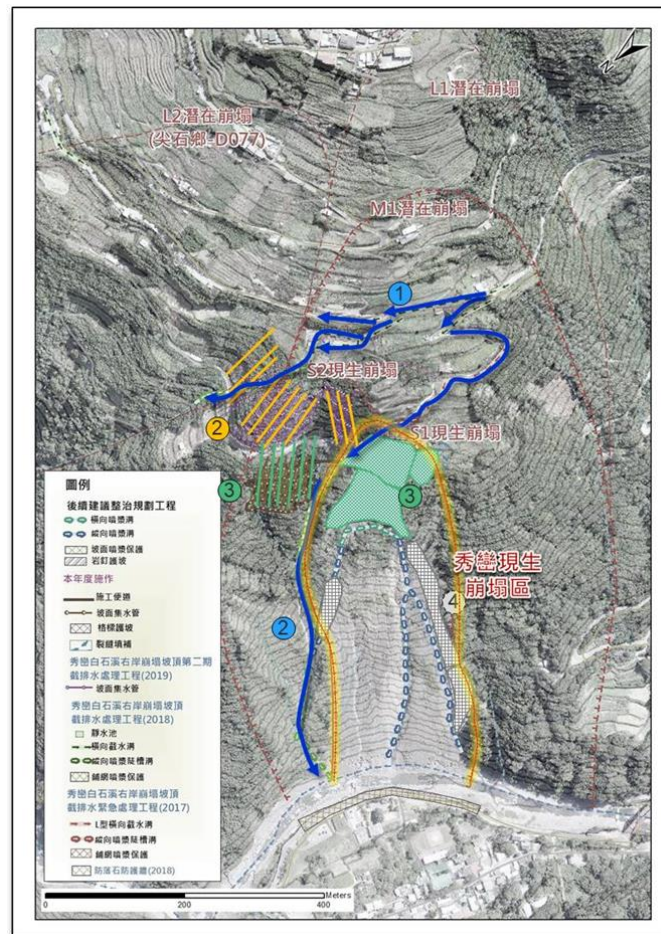


圖 3-29 秀巒現生崩塌區以及潛在崩塌範圍

(註：圖 3-28、圖 3-29 之圖資均引用自大崩系統資料庫)

第二節 中寮隧道北側出口

一、觀測點位

經評估觀測中寮隧道北側出口，選擇坐標 “N22.8210°，E120.4213°” (如下圖 3-30 中所標記位置)架設 GB-SAR。選擇原因為有良好腹地可以架設儀器，並且可通視目標，由於沒有穩定電源供應，故採用電池供電，電池最長大約可連續使用 8 小時。採用巡迴式監測每次監測約 2 小時。

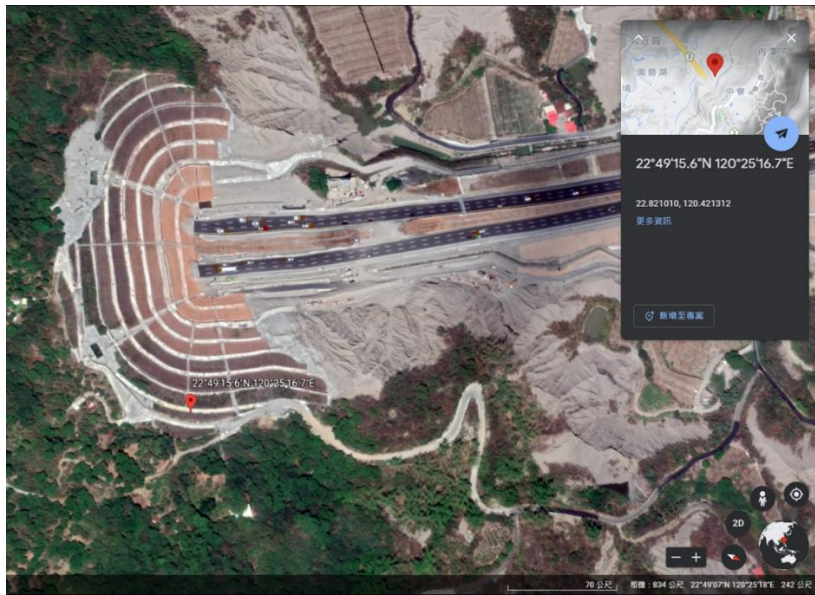


圖 3-30 GB-SAR 監測中寮隧道位置圖

二、觀測時間

本計畫於中寮隧道北側出口已觀測 4 次，分別為 2022 年 1 月 27 日、2 月 25 日、3 月 21 日與 4 月 15 日，觀測時間與累積掃描次數說明於表 3-4 與附錄一。

表 3-4 中寮隧道北側出口監測時間一覽表

地點	項次	狀態	日期	時間	掃描組數	累計觀測時	備註
中寮 隧道 北	1	開始掃描	2022/01/27	11：05	22	約 2 小時	
		結束掃描	2022/01/27	13：30			
	2	開始掃描	2022/02/25	11：26	19	約 2 小時	

側出口		結束掃描	2022/02/25	13 : 32			
	3	開始掃描	2022/03/21	11 : 17	20	約 2 小時	
		結束掃描	2022/03/21	13 : 29			
	4	開始掃描	2022/04/15	11 : 29	18	約 2 小時	
		結束掃描	2022/04/15	13 : 35			

三、儀器設置參數

觀測點距離目標區約 100 至 280 公尺，儀器主要參數設置帶寬(Bw)設置 400 MHz，代表操作頻率為(17.0 GHz 至 17.4 GHz)，視距方向解析度約 37 公分。

中寮隧道北側出口觀測水平方向解析度(Cross range resolution)受 GB-SAR 軌道基線與目標距離影響，本計畫使用之軌道最長距離為 1.6 公尺，基線長度固定，故水平方向解析度受目標距離影響。目標距離 100 公尺至 280 公尺，水平方向解析度約在 53 公分至 160 公分。

脈寬設置(Pw)為 50 毫秒(ms)，代表取樣頻率，其設置與帶寬脈寬比有關，設置 Bw 為 400 MHz，Pw 為 50 ms，其最遠觀測距離可達 562 公尺。

使用之 GB-SAR 透過多角度雷達疊圖，使得單一次觀測視角增加。本次採用 18° 寬之天線，掃描三角度，各角度重疊 3°，故單一觀測視角約 48°(18°+18°+18°-3°-3°)。單一角度掃描需歷時約 2 分鐘，三角度約需 6 分鐘，加上無間隔持續掃描，故約 1 小時可以獲得 10 組資訊左右，故單次觀測約獲得 20 組資訊。

表 3-5 中寮隧道北側出口使用之 GB-SAR 參數

操作頻率	17000 - 17400 MHz
帶寬 (Bw)	400 MHz
脈寬 (Pw)	50 毫秒
天線增益	10 dB
天線大小	18° (azimuth), 40° (elevation)
雷達掃描角度	75°、90°、105°
雷達重疊角度	3°
基線長度	1.6 公尺
掃描距離	100 公尺- 280 公尺
視距方向解析度	0.37 公尺
水平方向解析度	0.53 公尺至 1.60 公尺
理論最遠觀測距離	562 公尺

四、監測結果

1. 中寮隧道北側出口 2022/01/27

檢視中寮隧道北側出口 2022/01/27 結果，可發現整體變化幅度並不大，僅有路燈位置變化約 4 毫米，如圖 3-31 所示。

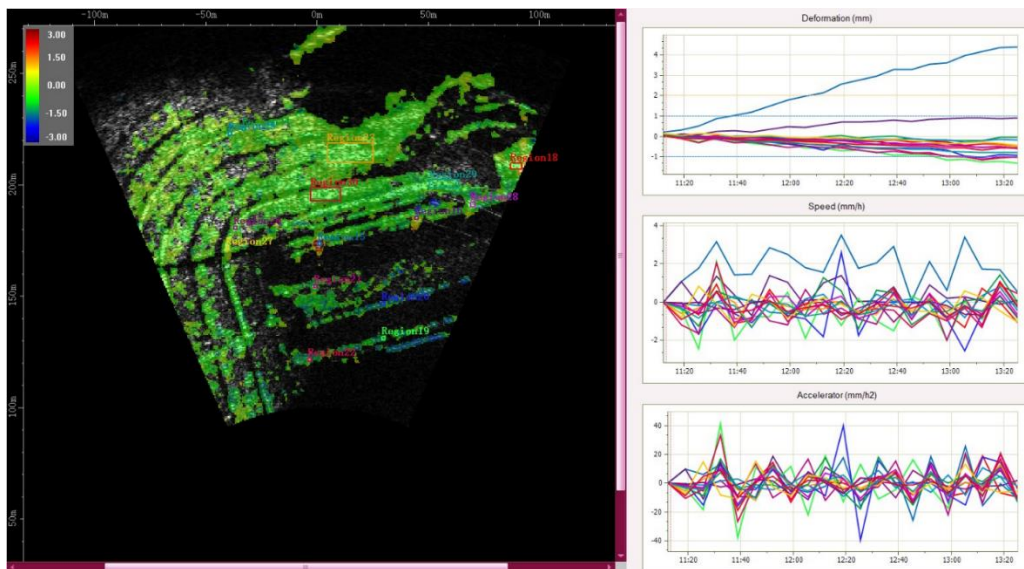


圖 3-31 中寮隧道北側出口 2022/01/27 成果(歷時：2 小時)

2. 中寮隧道北側出口 2022/02/25

檢視中寮隧道北側出口 2022/02/25 結果，可發現整體變化幅度並不大，僅有路燈位置變化約 4 毫米，如圖 3-32。

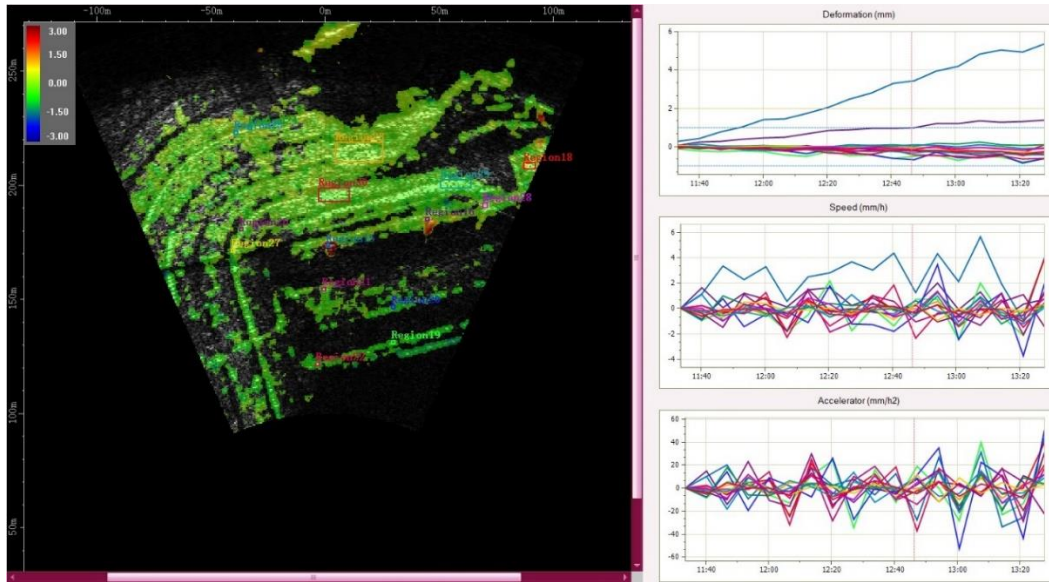


圖 3-32 中寮隧道北側出口 2022/02/25 成果(歷時：2 小時)

3. 中寮隧道北側出口 2022/03/21

檢視中寮隧道北側出口 2022/03/21 結果，變化的時間大約從 11:30 分開始，至 11:45 分截止，如圖 3-33。當天早上有降雨的情形發生，以距離 5.6 公里外之尖山雨量測站資料顯示，上午 7 時即有降雨發生。中寮監測現場約在 11:30 分左右降雨漸小停止。變動範圍發生在泥岩裸露區，與部分已整治之邊坡，如圖 3-34。推測可能跟泥岩吸水膨脹有關，唯獨部分變化區域位於整治工程上，若重複膨脹與收縮可能會導致已整治工程產生裂損等結構問題。現地觀測照片如圖 3-35。

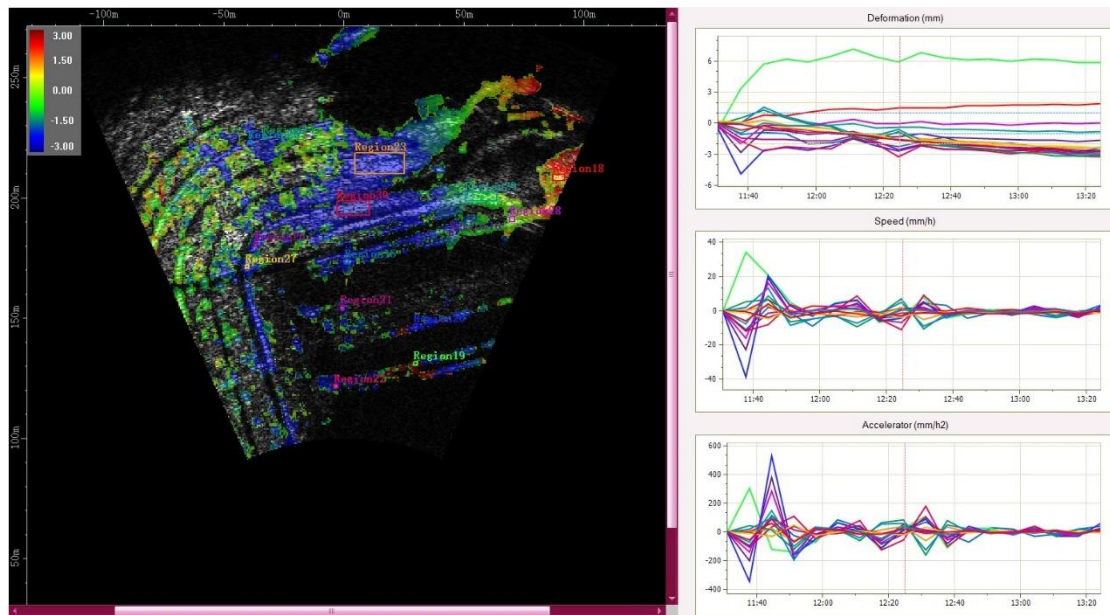


圖 3-33 中寮隧道北側出口 2022/03/21 成果(歷時：2 小時)

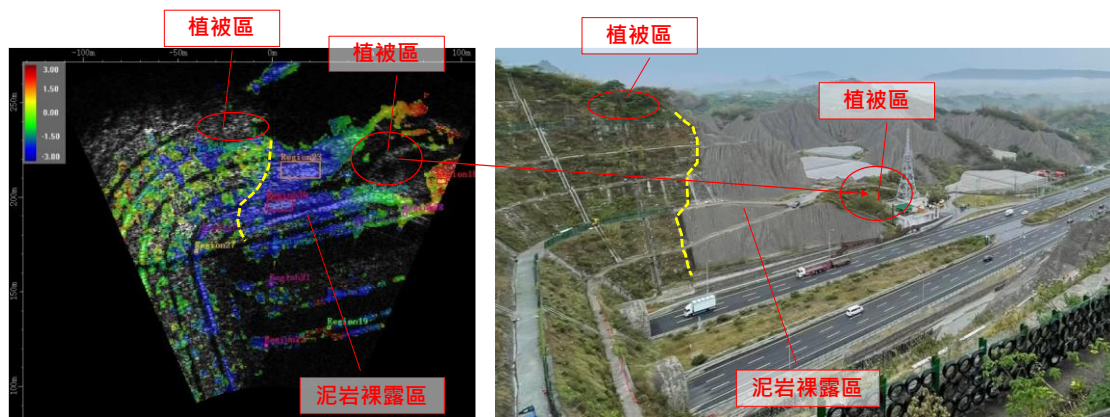


圖 3-34 中寮隧道北側出口 2022/03/21 現地對照圖



圖 3-35 中寮隧道北側出口 2022/03/21 現地照片

日報表 (daily data) 測站 C1V390_尖山 C1V390_尖山 觀測時間: 2022-03-21 CSV下載 資料定義請詳見 網頁說明Readme																
	Press		temperature	dew point	RH	WD/WS				Precp		SunShine		visibility	UVI	Cloud
觀測時間 (hour)	測站氣壓 (hPa)	海平面氣壓 (hPa)	氣溫 (°C)	露點溫度 (°C)	相對濕度 (%)	風速 (m/s)	風向 (360degree)	最大陣風 (m/s)	最大陣風風向 (360degree)	降水量 (mm)	降水時數 (h)	日照時數 (h)	全天空日射量 (MJ/m²)	能見度 (km)	紫外線指數	總雲量 (0-10)
ObsTime	StnPres	SeaPres	Temperature	Td dew point	RH	WS	WD	WSGust	WDGust	Precp	PrecpHour	SunShine	GlobRad	Visib	UVI	Cloud Amount
01	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.0	...	...	...	...	...	...
02	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.0	...	...	...	...	...	...
03	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.0	...	...	...	...	...	...
04	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.0	...	...	...	...	...	...
05	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.0	...	...	...	...	...	...
06	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.0	...	...	...	...	...	...
07	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.5	...	...	...	...	...	...
08	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.5	...	...	...	...	...	...
09	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.0	...	...	...	...	...	...
10	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.5	...	...	...	...	...	...
11	...	...	...	...	...	...	...	...	...	1.5	...	...	...	...	...	...
12	...	...	...	...	...	...	...	...	...	1.0	...	...	...	...	...	...
13	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.5	...	...	...	...	...	...
14	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.0	...	...	...	...	...	...
15	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.0	...	...	...	...	...	...
16	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.0	...	...	...	...	...	...
17	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.0	...	...	...	...	...	...
18	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.0	...	...	...	...	...	...
19	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.0	...	...	...	...	...	...
20	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.0	...	...	...	...	...	...
21	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.0	...	...	...	...	...	...
22	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.0	...	...	...	...	...	...
23	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.0	...	...	...	...	...	...
24	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.0	...	...	...	...	...	...

圖 3-36 2022 年 3 月 21 日 C1V390_尖山測站氣象觀測資料

4. 中寮隧道北側出口 2022/04/15

檢視中寮隧道北側出口 2022/04/15 結果，可發現整體變化幅度並不大，僅有部分區域變化約 4 毫米，如圖 3-37 所示。

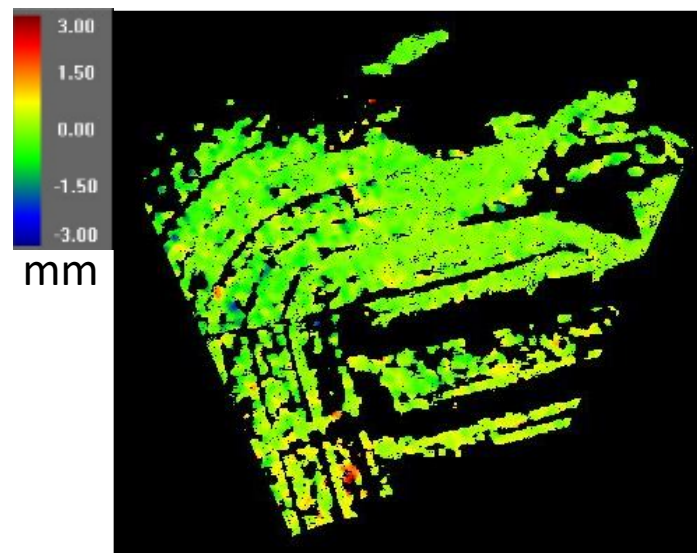


圖 3-37 中寮隧道北側出口 2022/04/15 成果(歷時：2 小時)

五、遭遇困難與後續工作事項

可發現如果是晴天於中寮隧道北側出口整體變化均不大，僅有發現降水的時候有所變化，但該地區並無良好得觀測場地，如果有大雨的情況儀器也無法進行觀測，因無良好得降雨遮蔽環境。本計畫剛好在觀測過程中有發生降雨約 30 分鐘，故有關測到降雨期間整體邊坡的變化。若排定固定時間監測其效益不大，因若無降水該地則基本沒有變化，故僅蒐集至目前之資料。

六、小結

於中寮隧道北側出口觀測到降雨期間裸露地與自然邊坡的變化情況，推測其可能原因為裸露泥岩吸水膨脹變化，而整治邊坡區域基本上已由混凝土覆蓋，故無觀測到變化情況。唯部分整治範圍仍有觀測到片狀的變化情況，可能需要多加注意該區的結構問題。

第三節 台東大鳥 D021、D022 崩塌地

一、現地勘查

於 2022 年 6 月 28 日於現地進行勘查，發現該崩塌地範圍廣大，且佈滿植被無裸露地，無法使用 GB-SAR 進行現地觀測，評估現況如圖 3-38、圖 3-39。



圖 3-38 台東大鳥 D021 現場評估 GB-SAR 設置情況



圖 3-39 台東大鳥 D022 現場評估 GB-SAR 設置情況

第四節 新北市石碇區大崙山 T001 崩塌地

一、背景說明

大崙山 T001 崩塌地位於新北市石碇區，國道五號 9.4 公里處以北約 500 公尺左右；崩塌地相對應保全對象包含民宅、道路外，華梵大學亦處於崩塌地範圍內。查詢地質圖可以了解，本區域屬木山層；地層位態之走向多呈西北西-東南東至東-西走向、傾角介於 20~30 度之間，與邊坡呈現順向坡關係。

本研究團隊於 9 月 22 日先至現場進行場勘，評估環境、並選擇通視良好地點，做為架設 GB-SAR 候選位置。最後選擇市道 106 乙線路旁民宅前廣場(坐標:24.971769N, 121.684487E)作為預備測試位置。

T001 崩塌地於現場勘查，發現除了部分建築物與道路外，其餘部分均被植被所覆蓋。現場利用 Google map 測量距離，認為距離最遠的華梵大學之距離大約在 1,300 公尺以內，其餘建築物位置分佈與觀測點距離如下圖 3-40 所示：

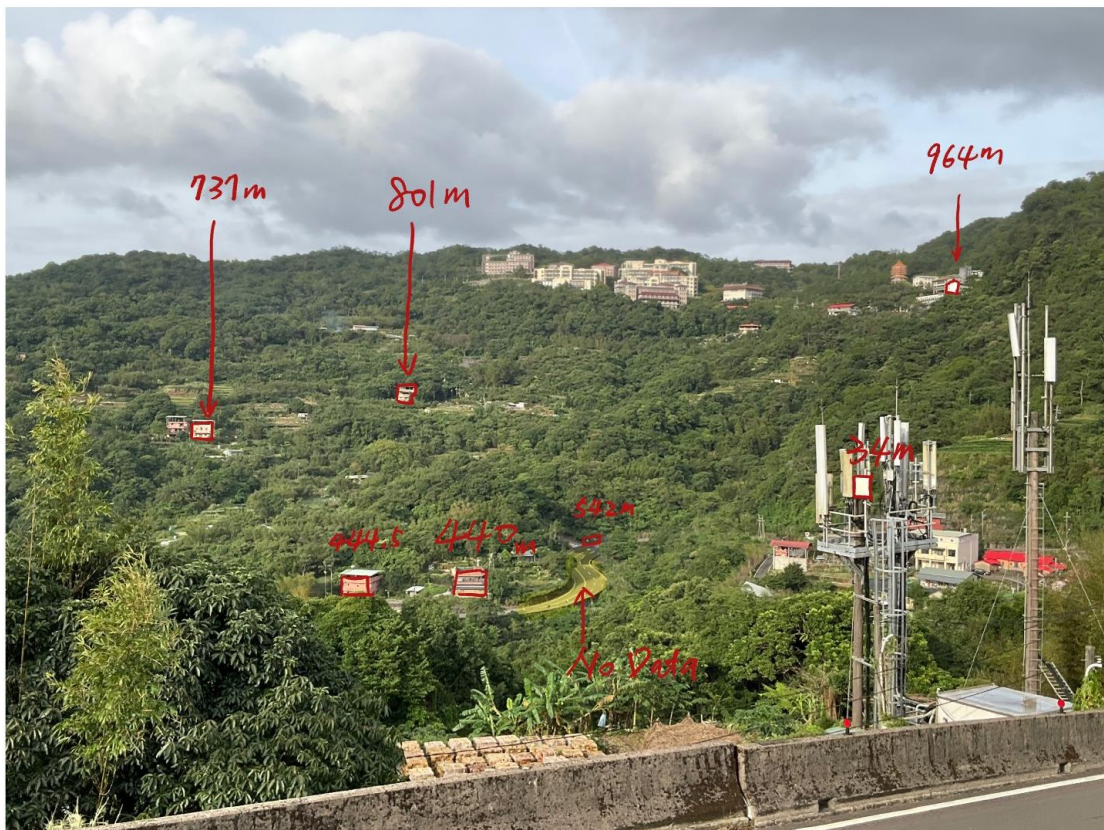


圖 3-40 測量 T001 崩塌地內建築物與觀測點之相對距離

二、GB-SAR相關參數設定與測試結果

研究團隊於 10 月 26 日上午至現場架設 GB-SAR 進行測試。考慮到最遠監測距離為 1,300 公尺，調整 Bw、以及 Pw 值以同時滿足最大監測距離、最小視距方向解析度、最小水平方向解析度、以及最佳儲存資料效率。最後選擇參數如下表 3-6 所示：

表 3-6 GB-SAR 於 T001 崩塌地設定監測參數

操作頻率	17000 - 17400 MHz
帶寬 (Bw)	400 MHz
脈寬 (Pw)	150 毫秒
天線增益	10 dB
天線大小	18° (azimuth), 40° (elevation)
雷達掃描角度	90°、105°、120°
雷達重疊角度	3°
基線長度	1.6 公尺
掃描距離	300 公尺- 1300 公尺
視距方向解析度	0.37 公尺
水平方向解析度	1.63 公尺至 7.08 公尺
理論最遠觀測距離	1,686 公尺
掃描頻率	2 分鐘

排除前期測試掃描角度、俯角、調整 PS 點篩選參數之測試影像，實際穩定掃描取得測試影像組數總共六組，現場監測狀況如下圖 3-41、GB-SAR 測試掃描結果如圖 3-42，目標邊坡反射訊號強度、以及影像間同調性比較結果如圖 3-43 所示。



圖 3-41 GB-SAR 現場測試掃描 T001 崩塌地

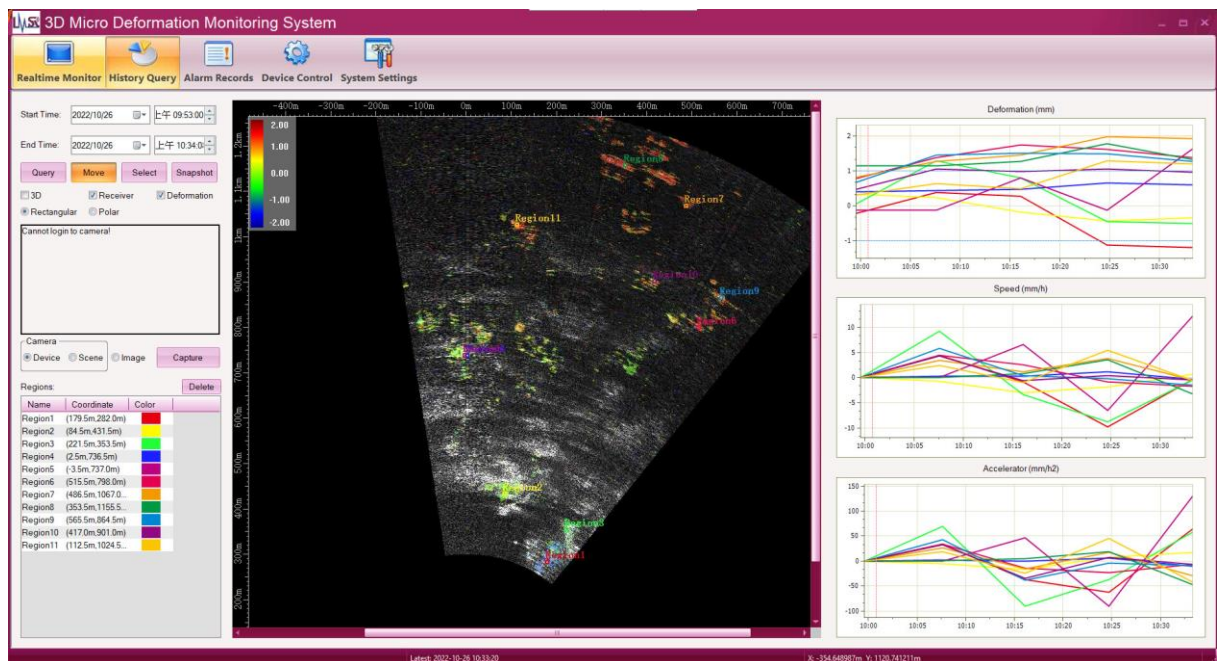


圖 3-42 GB-SAR 現場監測結果

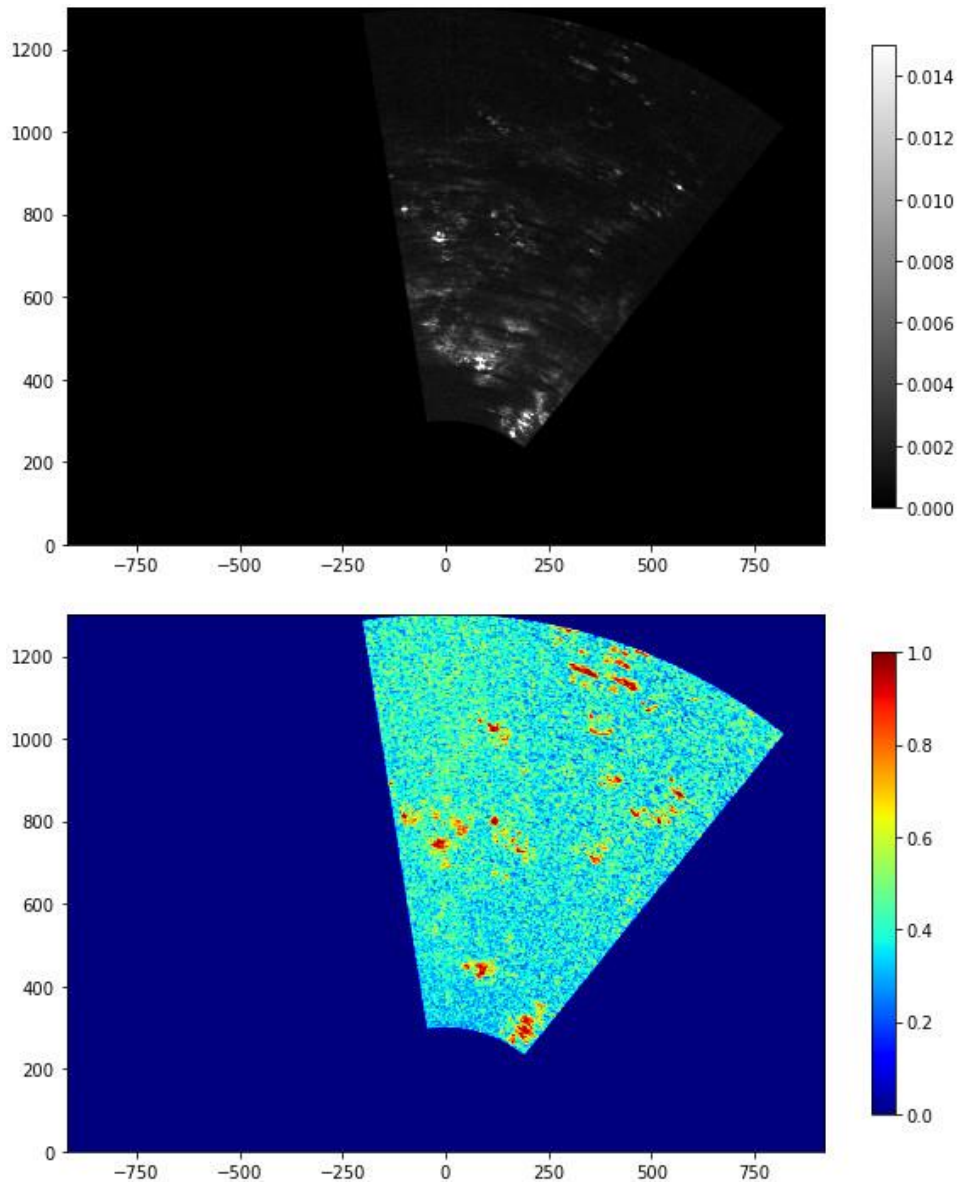


圖 3-43 GB-SAR 影像訊號震幅強度圖(上)、同調性圖(下)

由圖 3-42、圖 3-43 可知現場收到的訊號大部分為植被，少部分且具有穩定同調性者為邊坡上的建築物。

雖然 GB-SAR 可以清楚的監測到崩塌地上的建築物的動態，但研究團隊無法確定建築物的微變動可以完全的作為邊坡變動的代表。一部分原因為建築物在建造之初可能有進行某些耐震工法；另一部分原因為崩塌地的運動方向可能為垂直上下移動，其運動方向不與 GB-SAR 監測方位成正交。因此本團隊認為，若要使用 GB-SAR 對邊坡進行監測，最好還是尋找有裸露的目標為佳。

十字星形位置為目前團隊沿崩塌地周圍尋找到最適合 GB-SAR 架設位置，視野、相對距離分別如下圖 3-45、圖 3-46 所示。



圖 3-45 選定可能適合架設 GB-SAR 之視野與相關坐標資訊



圖 3-46 備選監測位置與邊坡各部位之相對距離標示

經現場勘查結果，D003 崩塌地裸露狀況初步判定適合 GB-SAR 進行監測；囿於所選擇監測點朝向限制，僅能對崩塌地東緣區域進行監測，無法監測全部區域。後續進一步監測工作是否進行，留待與研究團隊主持人、以及主管機關討論後再行動作。

第四章 結論與建議

1. 本研究確認可以使用 GB-SAR 以巡迴式監測模式對活動斷層進行監測。本計畫已於高雄市田寮區，國道三號中寮隧道北側出口地觀測 4 次。於晴天時監測，原則上十分穩定沒有變化；若有下雨發生，則有觀測到泥岩裸露區有 3 毫米的變化，變動時間與降水時間一致，推測可能跟泥岩吸水膨脹有關。
2. 本計畫已於新竹縣尖石鄉秀巒部落白石崩塌地監測 3 次(2021 年 10 月、2022 年 5 月、2022 年 8 月)，分別連續觀測 40 小時、72 小時、以及 378 小時。已觀測到全邊坡隨時間、隨不同天氣狀況的位移樣態，以及不同位置的位移差異。
3. 秀巒部落崩塌地之邊坡監測結果，由 GB-SAR 監測之累積位移量可以了解到整體邊坡有 4 種不同的位移型態；其中 3 種型態呈現波動前後運動現象，本研究認為其現象與日夜溫差與降雨事件，造成邊坡表面重複的漲縮運動作相關。
4. 降雨事件除了在事件發生當下，影響邊坡吸熱與放熱的狀態；於事件後數小時至數日均可觀察到明顯的累積位移趨勢變化。
5. 秀巒部落崩塌地之邊坡整體於 8 月監測期間朝向溪谷緩慢移動(94%)。其中坡趾位移速度為最快，平均 1 天有 4.2 mm 左右的位移量。邊坡靠近坡峰位置為少數監測到遠離 GB-SAR 之趨勢。
6. GB-SAR 已初步瞭解現生崩塌區域之微變動型態：邊坡趾部朝向 GB-SAR 前進、坡峰部位遠離；經評估應可進一步配合傳統監測儀器協助監測整體潛在崩塌區域。
7. 由秀巒監測工作成果可知，GB-SAR 於雨天與夜間監測，其監測品質並無明顯差異，因此可用於全天候全時段監測；GB-SAR 可同時監測邊坡上多處變異，並且辨識出不同的位移趨勢。
8. 若秀巒潛在崩塌區域開始運動，預期從 GB-SAR 的監測結果可觀察現生崩塌區域的微變動模式全部轉為「朝向」GB-SAR 接近的趨勢，而非分區域有「接近」及「遠離」的現象。
9. 研究團隊於 2022 年 6 月至台東大烏 D021 與 D022 崩塌地進行評

估，唯該地植被覆蓋無法進行 GB-SAR 觀測，後續將至新北石碇 T001 崩塌地進行評估設置。

10. 於 2022 年 10 月至新北石碇測試掃描 T001 大崙山崩塌地。由於植被覆蓋原因，GB-SAR 僅掃描獲得邊坡上的建築物之訊號。目前對於建築物的微變動是否可以完全代表邊坡的變動存疑，因此建議先行以其他不受植被影響之監測儀器進行監控較為有效率。
11. 於 2022 年 10 月至新北汐止評估 D003 鵠鵠崙崩塌地。初步選出合適候選點位，可監測現行崩塌地東緣裸露部位；另可配合施工單位整治時進行監測，作為保全工作。後續規劃將待與主持人與主管機關討論後另進行安排。

參考文獻

1. 曲世勃、王彥平、譚維賢、洪文(2011)，地基 SAR 形變監測誤差分析與實驗，電子與信息學報，第 33 卷，第 1 期，1-7。
2. 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.
3. 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.
4. 李健宏，詹佩臻，吳亮均，& 林銘郎. (2018). 跨斷層國道三號田寮 3 號橋與中寮隧道北口段變形機制. Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering, 30(1), 001-010.
5. 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。
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. 許強，董秀軍，& 李為樂. (2019). 基於天-空-地一體化的重大地質災害隱患早期識別與監測預警. 武漢大學學報, 信息科學版, 44(7), 957-966.
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. 陳國隆，呂文玉，吳文隆，& 楊智堯. (2018). 田寮高架橋及中寮隧道改善工程 以柔克剛. 營建知訊, (421), 35-45.
10. 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.
11. 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.
12. 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。
13. 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。
14. Akiyama, Y., Miyata, N., Yoshida, M., Kurita, K., & Sato, M. (2018, August). Development of a Simple Ground-Based Synthetic Aperture Radar System for Monitoring Fault Creep. In 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama) (pp. 2449-2454). IEEE.
 15. 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.
 16. 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.
 17. Antonello, G., Casagli, N., Farina, P., Fortuny, J., Leva, D., Nico, G., Sieber, A. J., & Tarchi, D. (2003). A ground-based interferometer for the safety monitoring of landslides and structural deformations. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 218-220
 18. 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.
 19. 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.
 20. Curlander, J. C., and McDonough, R. N. (1991). Synthetic aperture radar, Wiley, New York.

21. 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.
22. Ferrigno, F., Gigli, G., Fanti, R., Intrieri, E., and Casagli, N. (2017). "GB-SAR monitoring and observational method for landslide emergency management: the Montaguto earthflow (AV, Italy)." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(6), 845-860.
23. 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).
24. Frodella, W., Salvatici, T., Pazzi, V., Morelli, S., and Fanti, R. (2017). "GB-SAR monitoring of slope deformations in a mountainous area affected by debris flow events." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(10), 1779-1793.
25. Gili, J. A., Corominas, J., and Rius, J. (2000). "Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring." *Engineering geology*, 55(3), 167-192.
26. 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.
27. Godt, J.W., "Observed and modeled conditions for shallow landsliding in the Seattle, Washington area", Ph.D. dissertation, University of Colorado, 2004.
28. 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.
29. Iglesias, R., Aguasca, A., Fabregas, X., Mallorqui, J. J., Monells, D.,

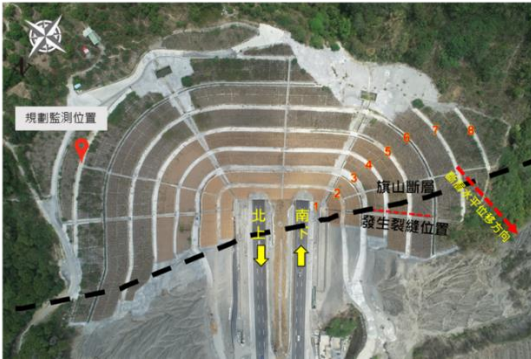
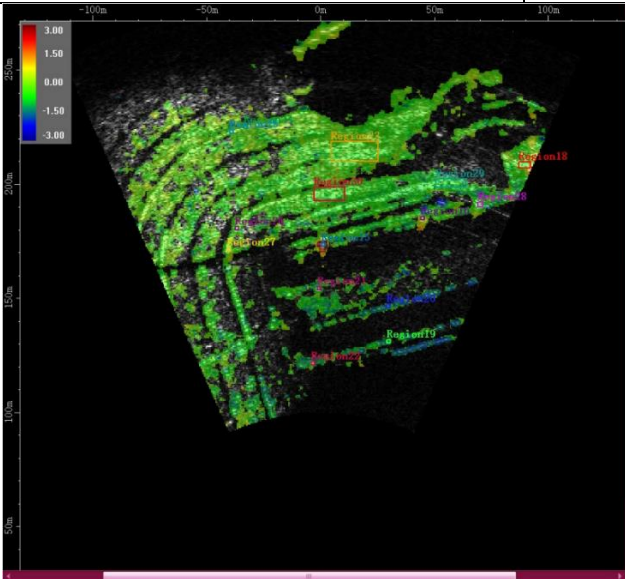
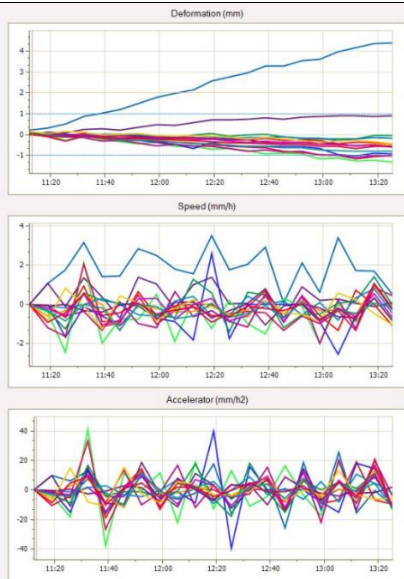
- López-Martínez, C., and Pipia, L. (2014). "Ground-based polarimetric SAR interferometry for the monitoring of terrain displacement phenomena—Part I: Theo-retical description." *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(3), 980-993.
30. Iverson, R.M., "Landslide triggering by rain infiltration," *Water Resource Research*, 36(7):1897-1910, 2000.
31. 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.
32. Jakob M., H. Weatherly, "A hydroclimatic threshold for landslide initiation on the North Shore Mountains of Vancouver, British Columbia," *Geomorphology*, 54:137-156, 2003.
33. 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. Zatkín, "Real-time warning during heavy rainfall," *Science*, 238:921-925, 1987.
34. 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.
35. 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.
36. Lim, C, S., Chan, Y, K., Koo, V, C., & Hii, W, H, H. (2019). Phase Statistical Model and Correction in Imagery of Ground Based Synthetic Aperture Radar (GBSAR) for Land Deformation Monitoring. *Progress In Electromagnetics Research*, 97, 189-200.
37. 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.

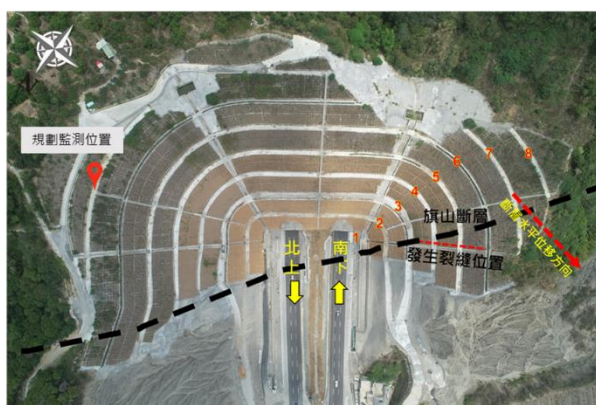
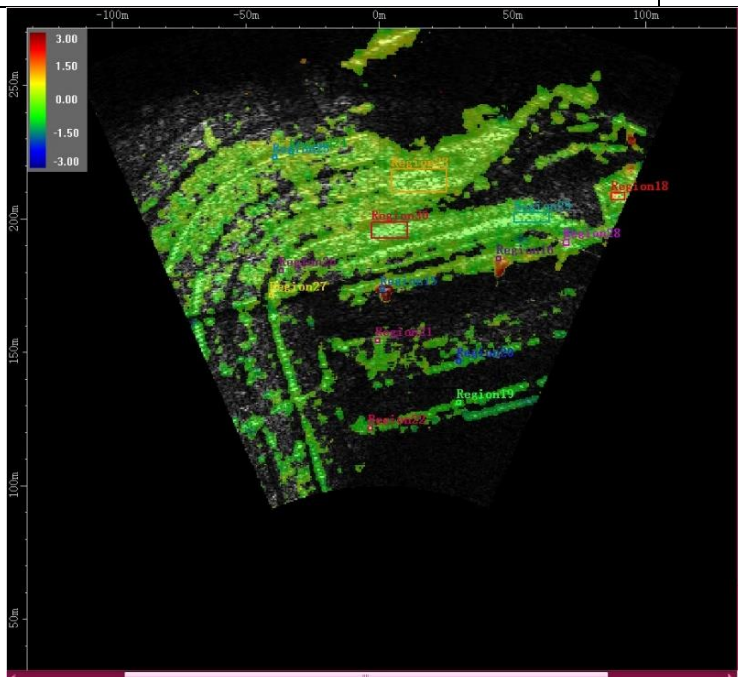
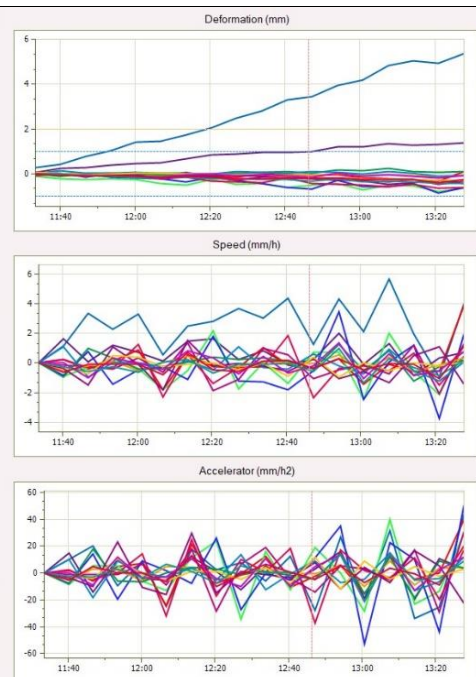
38. Lombardi, L., Nocentini, M., Frodella, W., Nolesini, T., Bardi, F., Intrieri, E., ... & Casagli, N. (2017). The Calatabiano landslide (southern Italy): preliminary GB-SAR monitoring data and remote 3D mapping. *Landslides*, 14(2), 685-696.
39. Long, S., Tong, A., Yuan, Y., Li, Z., Wu, W., & Zhu, C. (2018). New Approaches to Processing Ground-Based SAR (GBSAR) Data for Deformation Monitoring. *Remote sensing*, 10(12), 10.3390/rs10121936.
40. 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.
41. 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.
42. Martínez, A., Aguasca, A., Lort, M., & Broquetas, A. (2016). Micrometric deformation imaging at W-Band with GBSAR. *European Journal of Remote Sensing*, 49, 719-733.
43. Mensa, D. L. (1981). High resolution radar imaging, Artech House
44. 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.
45. 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.
46. Pieraccini, M., & Miccinesi, L. (2019). Ground-Based Radar Interferometry: A Bibliographic Review. *Remote sensing*, 11(9), 10.3390/rs11091029.

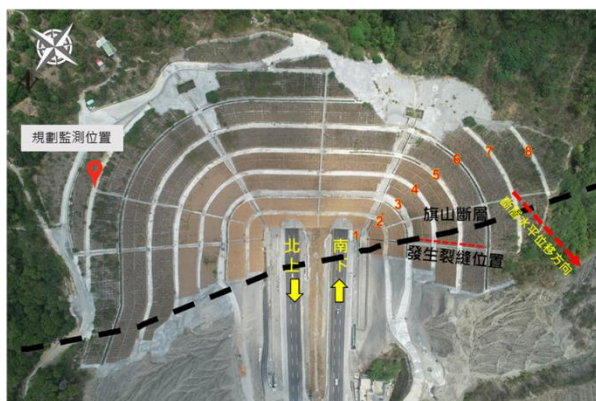
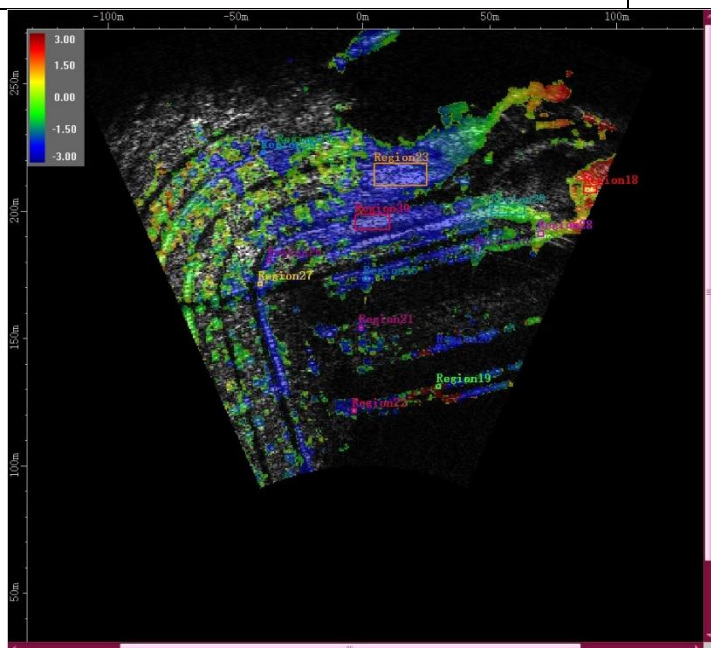
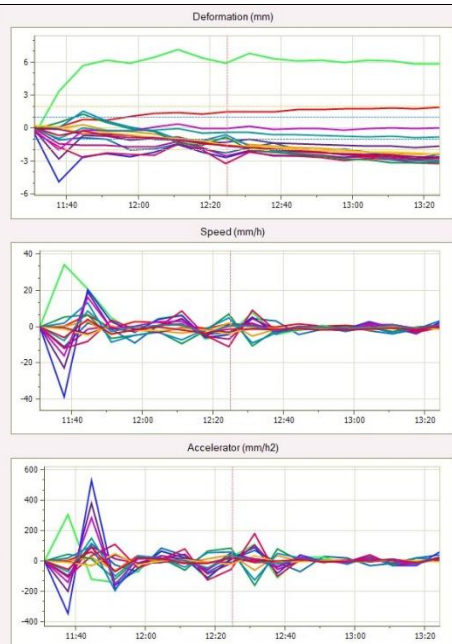
47. Rao, S. (2017). "Introduction to mmWave sensing: FMCW radars." Texas Instruments (TI) mmWave Training Series.
48. Richards, M. A., Scheer, J., Holm, W. A., and Melvin, W. L. (2010). Principles of modern radar, Citeseer.
49. Savage, W.Z., J.W. Godt, and R.L. Baum, "Modeling time-dependent slope stability", Proceedings of 9th international symposium on landslide, 28 June-2 July, Rio de Janeiro, Brazil, 23-28, 2004.
50. 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.
51. 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).
52. 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.
53. Terlien M.T.J., "The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds," Environmental Geology, 35(2-3):125-130, 1998.
54. 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.

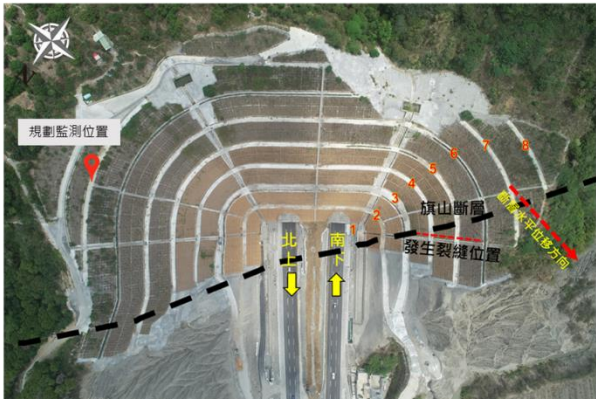
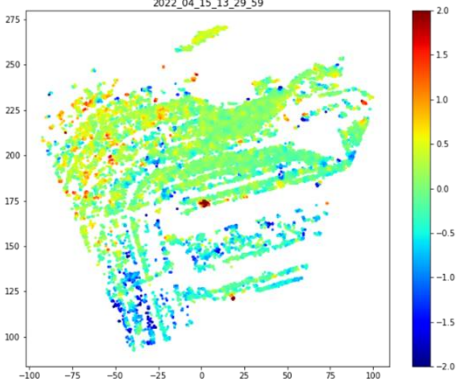
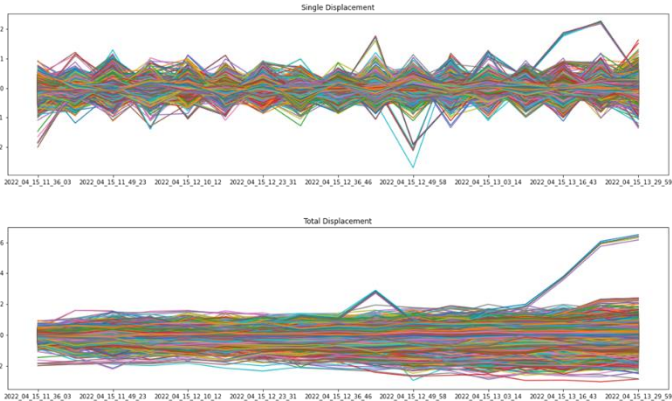
附錄

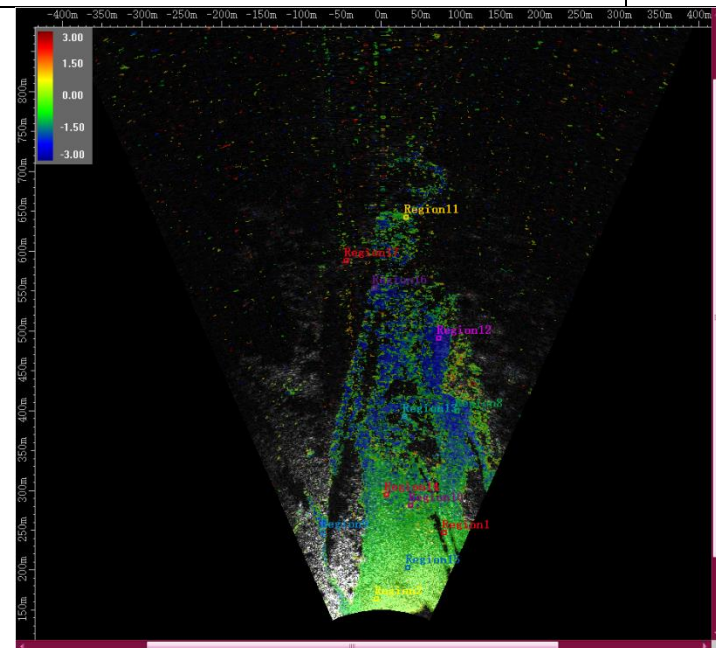
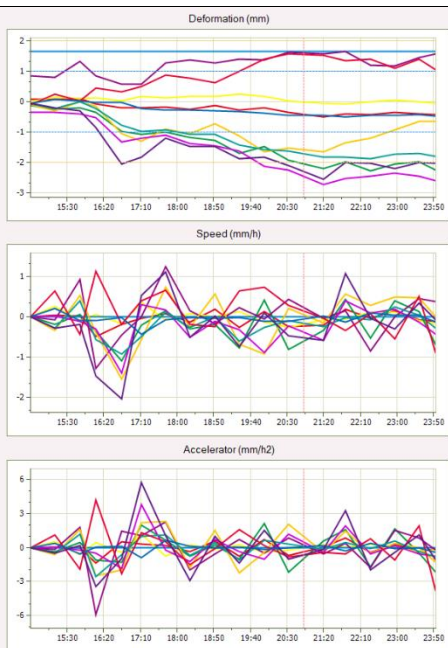
附錄一、掃描觀測日誌

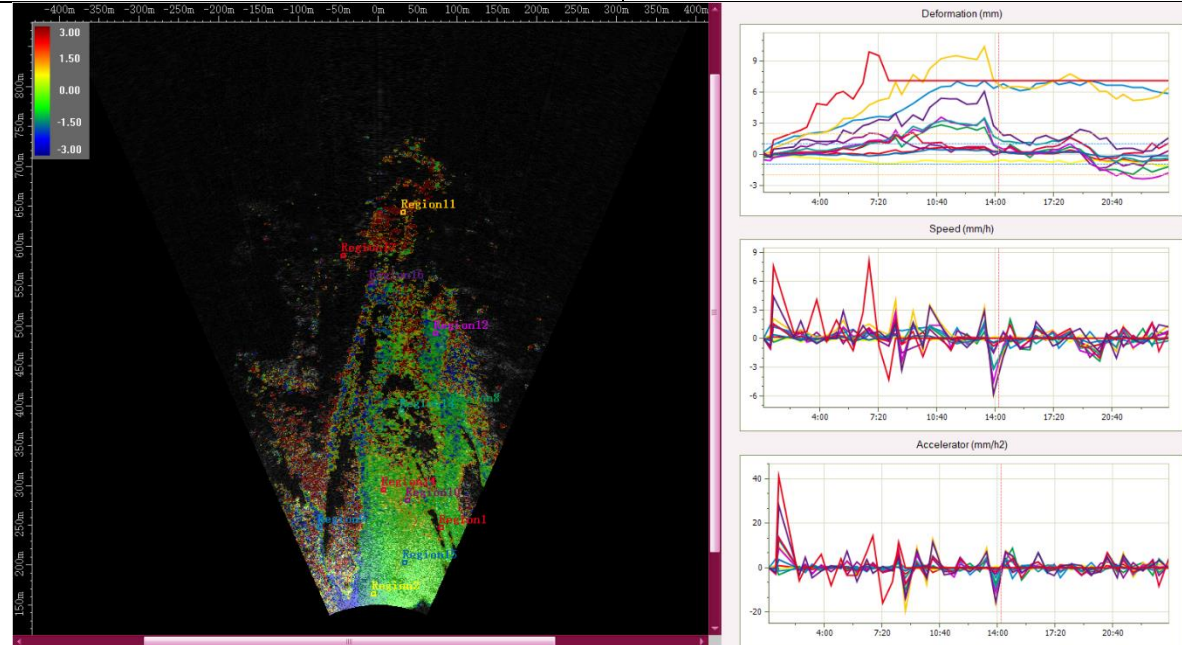
地點		高雄市田寮區中寮隧道		日期	2022/01/27	
緯度		22.8210 N				
經度		120.4213 E				
地點說明		高雄市田寮區，國道3號中寮隧道北上車道出口側邊坡。				
儀器參數	PW	BW		組數	角度	
	50	400		22	75、90、105	
	大氣校正	天線				
	2	18				
觀測時間(起)		11：05		觀測時間(迄)		13：30
觀測圖表	現地照片	 參考位置			 近照	
	SAR 累計變動量圖	 				
備註						

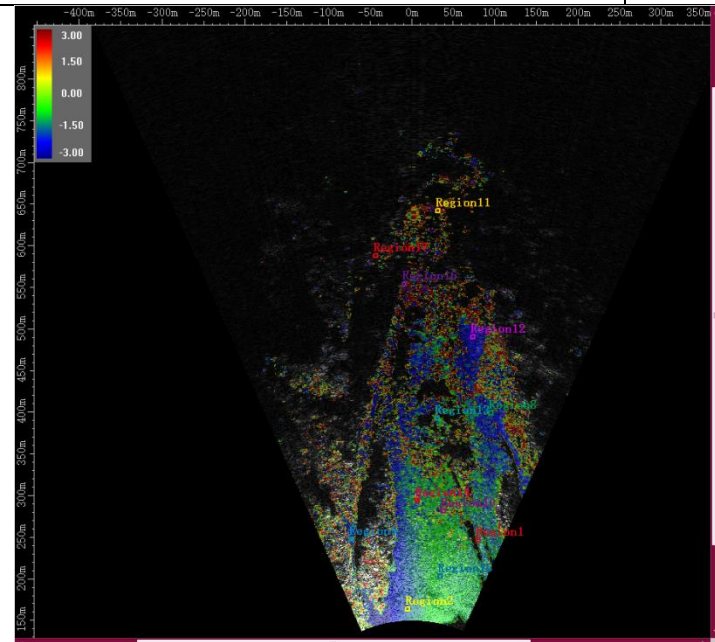
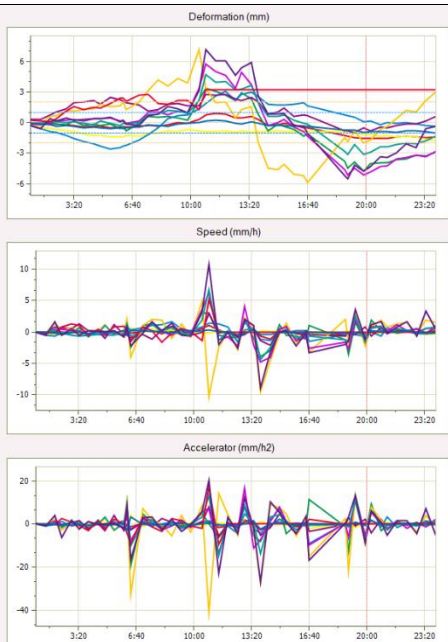
地點		高雄市田寮區中寮隧道		日期	2022/02/25
緯度		22.8210 N			
經度		120.4213 E			
地點說明		高雄市田寮區，國道3號中寮隧道北上車道出口側邊坡。			
儀器參數	PW	BW	組數	角度	
	50	400	19	90、105、120	
	大氣校正	天線			
	2	18			
觀測時間(起)		11：26		觀測時間(迄)	13：32
觀測圖表	現地照片				
	SAR 累計變動量圖				
備註					

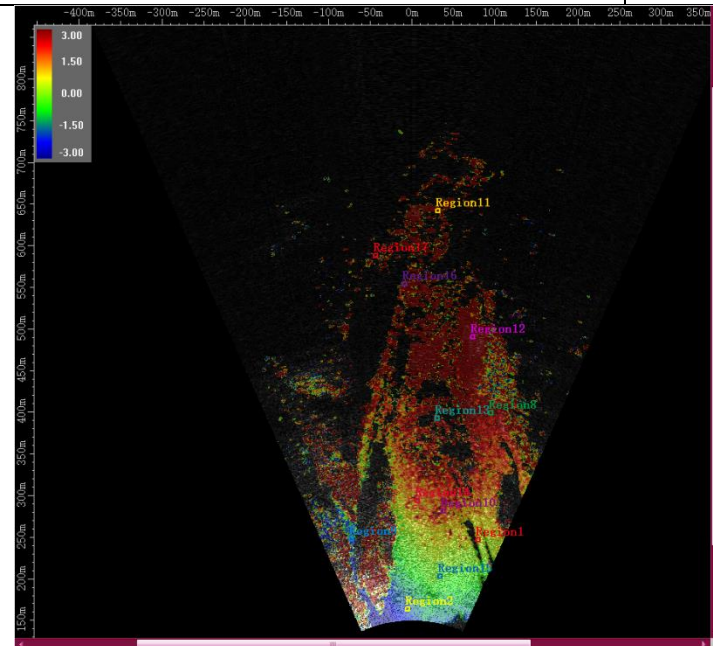
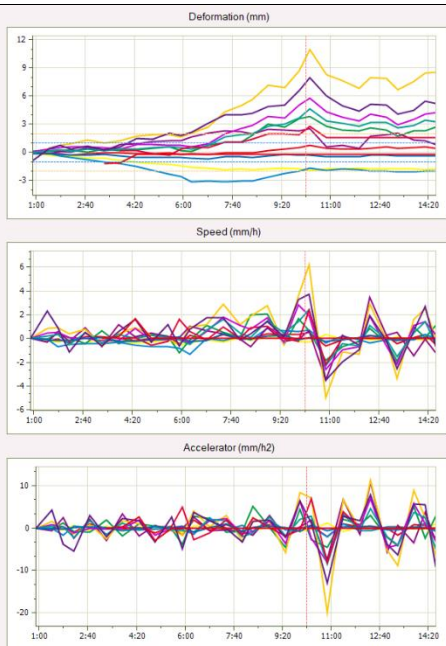
地點		高雄市田寮區中寮隧道		日期	2022/03/21
緯度		22.8210 N			
經度		120.4213 E			
地點說明		高雄市田寮區，國道3號中寮隧道北上車道出口側邊坡。			
儀器參數	PW	BW	組數	角度	
	50	400	20	90、105、120	
	大氣校正	天線			
	2	18			
觀測時間(起)		11：17		觀測時間(迄)	13：29
觀測圖表	現地照片	 規劃監測位置 旗山斷層 發生裂縫位置 監測位置移動方向 北 南 參考位置		 2022/3/21 11:17 N 22.820966°, E 120.421277° ±3.54m 298° 西北 高度191.8米 速度0.0公里/小時 近照	
	SAR 累計變動量圖	 Region18 Region27 Region21 Region19 Region12		 Deformation (mm) Speed (mm/h) Accelerator (mm/h²)	
備註					

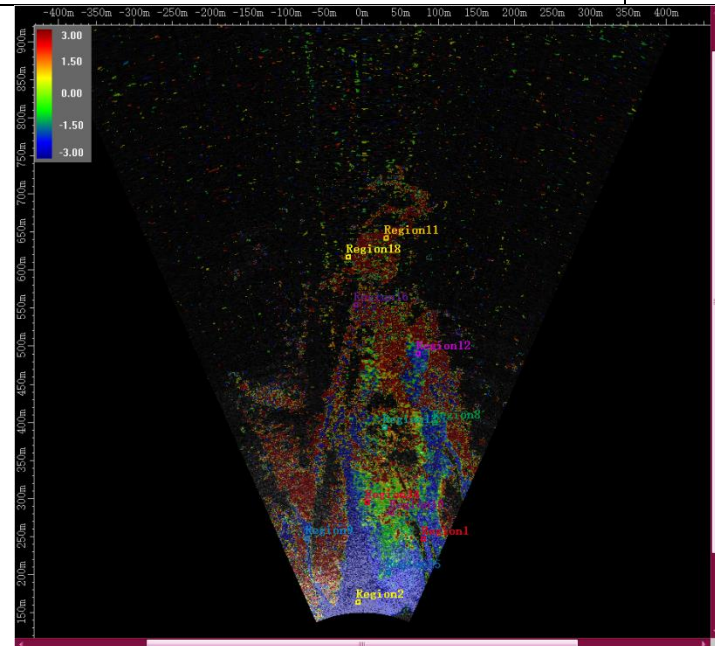
地點		高雄市田寮區中寮隧道		日期	2022/04/15		
緯度		22.8210 N					
經度		120.4213 E					
地點說明		高雄市田寮區，國道3號中寮隧道北上車道出口側邊坡。					
儀器參數	PW	BW	組數	角度			
	50	400	18	90、105、120			
	大氣校正	天線					
	2	18					
觀測時間(起)		11：29		觀測時間(迄)		13：35	
觀測圖表	現地照片						
		參考位置			近照		
SAR 累計變動量圖							
							
備註							

地點		新竹縣尖石鄉秀巒部落		日期	2022/5/17	
緯度		24.6191 N				
經度		121.2866 E				
地點說明		新竹縣尖石鄉秀巒部落，劉老村長露營區。				
儀器參數	PW	BW	組數	角度		
	100	400	46	90、105、120		
	大氣校正	天線				
	2	18				
觀測時間(起)		14：10		觀測時間(迄)		23：58
觀測圖表	現地照片	 參考位置		 近照		
	SAR 累計變動量圖					
備註						

地點	新竹縣尖石鄉秀巒部落			日期	2022/5/18
緯度	24.6191 N				
經度	121.2866 E				
地點說明	新竹縣尖石鄉秀巒部落，劉老村長露營區。				
儀器參數	PW	BW	組數	角度	
	100	400	116	90、105、120	
	大氣校正	天線			
	2	18			
觀測時間(起)		00：00		觀測時間(迄)	23：59
觀測圖表	現地照片	 參考位置  近照			
	SAR 累計變動量圖				
備註					

地點		新竹縣尖石鄉秀巒部落		日期	2022/5/19	
緯度		24.6191 N				
經度		121.2866 E				
地點說明		新竹縣尖石鄉秀巒部落，劉家村長露營區。				
儀器參數	PW	BW	組數	角度		
	100	400	117	90、105、120		
	大氣校正	天線				
	2	18				
觀測時間(起)		00：00		觀測時間(迄)		23：59
觀測圖表	現地照片	 參考位置		 近照		
	SAR 累計變動量圖					
備註						

地點		新竹縣尖石鄉秀巒部落		日期	2022/5/20	
緯度		24.6191 N				
經度		121.2866 E				
地點說明		新竹縣尖石鄉秀巒部落，劉老村長露營區。				
儀器參數	PW	BW	組數	角度		
	100	400	77	90、105、120		
	大氣校正	天線				
	2	18				
觀測時間(起)		00：00		觀測時間(迄)		14：40
觀測圖表	現地照片	 參考位置		 近照		
	SAR 累計變動量圖					
備註						

地點		新竹縣尖石鄉秀巒部落		日期	2022/5/17~20	
緯度		24.6191 N				
經度		121.2866 E				
地點說明		新竹縣尖石鄉秀巒部落，劉老村長露營區。				
儀器參數	PW	BW	組數	角度		
	100	400	356	90、105、120		
	大氣校正	天線				
	2	18				
觀測時間(起)		2022.05.17 14：10		觀測時間(迄)	2022.05.20 14：40	
觀測圖表	現地照片	 參考位置		 近照		
	SAR 累計變動量圖					
備註						

附錄二、期初審查意見回覆表

項次	審查意見	回覆辦理情形
一、張志新委員		
1	建議在期中報告時，重點說明前期成果與執行的困難，及本年度銜接之關係。	前期執行主要以進行植被、介電環境與儀器設置之問題探討，本年度將儀器應用於動態邊坡之行為觀測。
2	本案採用的GBSAR波長1.7公分，可以有很好的解析度能力，對於裸露岩屑邊坡上，如果1.7公分的是視距方向的位移，代表邊坡位移？還是什麼樣的物理量？另外，現地如果超過1.7公分的位移，如何處理？	1.7公分代表邊坡「表面位移」單次可以偵測的最大量，以本計畫之掃描頻率，若邊坡在6分鐘內位移少於1.7公分，則其微幅變化可以被GB-SAR所記錄，若在掃描間隔間發生超過1.7公分的變化則無法於GB-SAR微幅變動中觀測。
3	視距方向位移，是否可轉換計算成坡面上的位移量？	視距方向位移即是邊坡上的位移量。
二、林銘郎委員		
1	請針對本研究所選的案例(秀巒、中寮邊坡)實際的佈設，說明其掃描範圍、解析度與可以量測的變形率精度。	詳細說明已補充於期中報告P3-1至P3-3與P3-10至P3-12。
2	本案是測量儀器(GNINSAR)本身如何校驗？校驗精度為何？建議要做補充說明。	GB-SAR非屬測量儀器，僅為非接觸式觀測儀器，其變化量受大氣影響，於去年110年計畫已有架設角反射器試驗，原則上可以偵測微幅變動且變動趨勢相似，雷達反射面積受材質會有所差異，故僅能確認約略微幅變動位置，無法進行精確位置的數值校驗。
三、周良勛委員		
1	因經費刪減不足的問題，修正部分應依契約工作項目數量	參照辦理，實驗場改使用收集現有其他儀器資料進行比對。

項次	審查意見	回覆辦理情形
	期程施作。	
2	使用儀器是否有儀器校正紀錄？	GB-SAR非屬測量儀器，僅為非接觸式觀測儀器，其變化量受大氣影響，於去年110年計畫已有架設角反射器試驗，原則上可以偵測微幅變動且變動趨勢相似，雷達反射面積受材質會有所差異，故僅能確認約略微幅變動位置，無法進行精確位置的數值校驗。
3	圖表名應和內文整合(圖3-3至圖3-5等)(圖3-7至圖3-9)。	已將圖表與內文整合，改說明於第二章。
四、尹孝元委員		
1.	建議本計畫優先執行水保局有裝設角反射器(corner reflector)之地點進行測試，同時與現行計畫(TCP-InSAR)成果進行比對分析。	水保局有裝設角反射器為接收衛星使用，其角反射器為朝天空，GB-SAR角反射器則需朝向雷達機擺放位置，故兩者角反射器無法一起使用。
2	因GBInSAR為Ku band，建議針對臺灣茂密植生的情形進行適用性分析。	因為植生導致Ku band無法穿透屬於先天限制，可透過加強雷達反射的方式，如：覆蓋帆布、鋪設鐵網或混凝土鋪面增加觀測資訊的可能性。
五、黃效禹委員		
1.	此設備提供了破壞坡面之非接觸監測之選擇，唯秀巒現地於斷電及斷訓情況下之備案(如發電機、Data暫存等)。	計畫之備用電源可供應臨時8小時使用，並購置發電機確保斷電情況。資料將儲存於機台硬碟內，若無遠端回傳仍可讀取硬碟檔案。
2	本計畫監測成果是否有數值資料，可加值應用於土方變化量分析及邊坡穩定分析使用。	有數值資料可用，唯其變化量屬於坡面變化量，另外其坐標為視距方向需要坐標轉換。

附錄三、期中審查意見回覆表

項次	審查意見	回覆辦理情形
1	GBInSAR觀測距離對於解析度，包括視距方向、水平方向，有很大的影響。因此在本研究中的測試案例中，建議測試不同觀測距離對於觀測結果的影響比較。	水平向解析度(Cross-Range Resolution)較容易受到距離的影響；距離越遠，水平方向影像解析度則越差。視距方向解析度(Range Resolution/LOS.)則是在設定信號帶寬(Band Width)時就已經決定，且不會受到距離影響。 距離越遠，解析度越差；對於監測來說，時序影像間的相關性會越好，PS 點的挑選的決定權則是會偏向震幅離差法，因此建議若要進行超長距離的監測（例如 1 公里以上，水平解析度大於 5.36 公尺之目標），則需配合具有優良雷達散射面積的角反射器進行監測。
2	示範場域中的中寮隧道北洞口，雖然位移明顯。那是因為構造擠壓造成的，以目前的GB inSAR 觀測方式，短時間觀測是否能呈現 6cm/yr 位移效果？對於中寮隧道的觀測，採問段的方式進行，除觀測時間內之變化外。可否分析不同兩次觀測間，前後之位移變化？	經過多次監測，認為短時間觀測無法取得良好結果，必須回歸到長時間、定點的觀測模式，才有可能收到效果。 經合併檢視兩次監測結果，會發現第一次監測的最後一幅影像、以及第二次監測第一幅影像之間除了存在有明顯的變化外，另有PS點數量大幅下降的特性。由於時間的不連續性，導致邊坡地形變化、以及兩次架站過程中儀器位置些微差異，導致PS點數量大幅減少(兩個時段之間的影像相關性大幅下降)，並且產生明顯的變化。

項次	審查意見	回覆辦理情形
3	秀巒崩塌地有無設其他位移觀測站，建議收集GBinSAR觀測時間之各項設備的觀測結果，以利進行比較。	經向水土保持局土石流小組窗口尋求協助，瞭解到主管機關在秀巒崩塌地佈設之傳統監測站有 1. 傾斜觀測管兼水位觀測井 2. 傾斜觀測管 3. 水位井 4. 封層水位井 5. 自記式水壓計 6. 電子式水壓計：5 支 7. 電子式雨量計 8. 地表伸縮計 9. 現場影像攝影機 10. 地盤傾斜計 11. GPS 其中，第 9 項現場影像攝影機可以直接拍攝邊坡外、第 11 項 GPS 顯示維護中，其餘的監測儀器均正常運作中。 未來本團隊將與現場各項設備進行比較，期望收到最佳的成果。
4	建議補充說明現場解析資料所需的作業時間，並評估是否可以進行即時災害預警？	從選定的監測位置監測秀巒崩塌地，必須使用 3 個角度才能將整個主要崩塌區域含蓋在內。每一次掃描時間需時 6 分鐘左右；影像解析時間最多在 3 分鐘內完成。GB-SAR 的特性是監測邊坡表面可疑區域可能發生的微變動狀況，經過長時間監測，本團隊認為 GB-SAR 適合進行及時災害預警工作。

項次	審查意見	回覆辦理情形
5	台東大鳥 D021 與 D022 崩塌地因植覆蓋，無法進行 GB-SAR 觀測，將另尋其他地區，建議宜先評估該地區是否已觀測到有滑動情形，再為本案之觀測區域較有成效。	敬悉，目前候選目標點為新北市石碇區 T001 號潛勢區，將先行從衛星影像、現場勘查是否合適 GB-SAR 進場，後確定可行，再列為本案之間側區域。
6	建議針對 GBIInSAR、TCPIInSAR、PSInSAR 等不同系統，進行優劣比較及成本效益分析，同時針對水土保持局的特性，提出最佳的使用建議方式。	TCPIInSAR、PSInSAR 通常為雷達衛星監測所使用的方法。差異在於 PSInSAR 需要額外資訊進行解相位工作，才能得到地表的真實位移量；TCPIInSAR 基於 PSInSAR 的基礎，將 PS 點之間進行連接成為三角網格，在小時間尺度(時間解析度必須有一定的限制)下計算三角網格的變動量，從而避免解相位的不方便性而得到地表真實變形量。前述兩者衛星雷達監測的成效受到衛星軌跡方向與目標邊坡的方向的影響；大範圍監測與再訪週期的限制使得衛星監測方法適用於大尺度的地形變化監測。GB-SAR 的優點在於現場即時監測、即時解算影像資訊、快速獲得中小尺度個別邊坡「表面的」變異位置與微變動趨勢。 在現在各種不同工具共同輔助監測一個不穩定邊坡，GB-SAR 的定位不是主角，而是在邊坡開始變動之際最優秀、且最安全的監測手段。TCPIInSAR、PSInSAR 則是可

項次	審查意見	回覆辦理情形
		讓水保局進行大範圍國土監測時的優良方法，三者之間就扮演角色是無法以之評比優劣。 從成本的角度，GB-SAR 目前的人力成本相對為高，建議搭配其他方法，如地球物理方法、現場影像辨識、傳統鋼纜偵測應力變化等，在接近邊坡不穩定-滑動的之際再進場，方可達到人力成本支出最節省之效。
7	本計畫於秀巒崩塌地進行現場觀測，其連續使用近 72 小時，導致儀器馬達燒毀；請說明目前計畫之系統如何針對水土保持局大規模崩塌潛勢區進行長期地表位移監測之規劃。	本年度 5 月 17 日監測工作，其監測頻率設定為「間格 5 分鐘」就進行一次掃描，其屬高頻率的監測方式，事實上就當時當地的天氣狀況，完全不需要進行如此高頻率的監測。為了同時達到長時間監測與維護儀器運作的目的，本團隊於 8 月 11 日重新進場時，考慮到時間的解析度問題，於無下雨的時候設定監測頻率為 45 分鐘一次、於下雨的時候調整為 20 分鐘一次。改變頻率的監測策略，確保降雨的時候其時間解析度足夠觀察到可能的邊坡變化。
8	本系統 GB-InSAR 遇茂密植被時，有觀測上之困難，是否有可能使用波長較長之系統，以解決茂密植被觀測的問題。	從儀器原理可知，地基合成孔徑雷達之所以可以對目標進行微變動監測，其關鍵點在於選定特定波長的雷達波。至於使用波長較長的雷達訊號，目

項次	審查意見	回覆辦理情形
		前以知 C-Band 波長(約 5 公分)仍無法有效穿透植被進行監測;更長波長的雷達訊號或許可以穿透植被,卻無法敏銳辨識微變動的發生。 中央大學的張竝瑜教授於社群網站 Facebook 個人頁面分享中央大學自組車載地面 L-band 合成孔徑大功率雷達,在太遙中心林主任及太空中中心劉主任以及錢樺老師的協助之下,完成上線整備與測試。張教授表示,「此儀器之特點在於與一般商業 Ku 頻段 GBSAR 相較,L 頻段雷達可以有較佳的植被穿透能力及土壤濕度反饋,並且具有特殊的正交雙極化天線,可以呈現土壤或岩石空間方向異質特性。」(張竝瑜,2022/08/29)從張教授描述可以瞭解到,較長波長的雷達波可以穿透植被以及地表,可以反饋土壤濕度以及瞭解地下岩石土壤特性;對於是否可以使用 L-Band 雷達波進行邊坡微變動的監測工作,則無法從張教授的文章中得知。有鑑於張教授及其團隊為國內第一個開發長波長地基合成孔徑雷達的團隊,相關儀器特性有待該團隊後續研究發表。

附錄四、期末審查意見回覆表

項次	審查意見	回覆辦理情形
1	GB-SAR 的量測時間間距為何？大概量測到什麼變型量或變形速率，需要做什麼應變？	GB-SAR量測時間為2分鐘至6分鐘獲取一組雷達資料，本年度計畫分別設定降雨/非降雨的測量時間間距；前者20分鐘/張、後者40分鐘/張。 有效觀測大約在0.03公分左右，也就是兩次變化在0.03公分至1.75公分是可以被觀察到。 目前國內沒有任何位移警戒值供 GB-SAR監測參考，本團隊設定兩次監測之間，若目標超過 2mm、4mm、6mm的位移量，及發出警示通知工作人員。 若整體邊坡有下滑情況，則需要進行警戒或撤離措施
2	用電量有無下降可能(比方將資料傳輸回室內由室內進行運算)，以使用太陽能達到長時監測。	依據實際經驗計算，約一天需用電4度，以160公分乘上80公分大的太陽能板(200W)，每日充電6小時計算，約需4片可達成供電需求。
3	應用性高，請問本研究實用上待研究、待突破點為何？	GB-SAR為了達到即時監測的效果，系統會自動挑選最為穩定不動的標的物，作為大氣校正的參考，以之達到快速修正目標邊坡其他位置的相位。 實務上，因參考點受風吹或本身處於不穩定的邊坡，進而誤修正被監測目標全體的相位資訊，因此監測過程中，通常會選擇把系統大氣校正功能關閉。 若要進行真正的大氣校正，需先量測環境的溫度、濕度、壓

項次	審查意見	回覆辦理情形
		力，將其一一轉為相位並將之扣除，方能得到待監測目標真正的位移結果。 明年度預計於實際強降雨發生時間進行儀器架設，確認儀器觀測能力是否維持，以及實際觀測崩塌前期之預兆。