
**GB-SAR 於偵測局部與大範圍地滑
技術研發與驗證**
**Methodology Developing and Validation
for Monitoring Portion or Large Scale
Landslide with GB-SAR**
(期末報告書)

執行單位：國立成功大學

執行期間：112 年 02 月 08 日至 112 年 12 月 31 日

計畫主持人：余騰鐸 副教授

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 112 年 11 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)

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	1-1
第二節 研究區簡介	1-2
第二章 工作執行方法與步驟	2-1
第三章 崩塌地基本資料蒐集與彙整	3-1
第一節 崩塌地雷達回波特徵分析	3-1
第二節 崩塌地雷達同調性	3-3
第三節 現地照片變化	3-8
第四節 崩塌地溫度變化	3-13
第五節 現場監測儀器成果	3-17
第四章 GB-SAR 觀測成果	4-1
第一節 DS194 崩塌地大雨期間 GB-SAR 特徵(112 年).....	4-1
第二節 DS194 崩塌地無雨期間 GB-SAR 特徵(112 年).....	4-17
第三節 DS194 崩塌地觀測時間微幅變動彙整(110 年~112 年) .	4-18
第四節 軌道式與旋臂式 GB-SAR 比較.....	4-25
第五章 結論與建議	5-1
第一節 結論.....	5-1
第二節 儀器使用限制	5-2
第三節 建議.....	5-6
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附-1

附錄一、GB-SAR 累積位移量.....	附-1
附錄二、GB-SAR 瞬時位移量.....	附-15
附錄三、期中審查意見回覆	附-29

表次

表 2-1	秀巒部落白石大崩塌使用之 GB-SAR 參數	2-5
表 2-2	GB-SAR 儀器操作時間表	2-6
表 2-3	秀巒 T001 監測儀器配置	2-7
表 2-4	常用變形量應變管理基準彙整	2-11
表 3-1	GB-SAR 植被區產生同調性一覽表	3-4
表 3-2	監測儀器清單及警戒值_地下水	3-18
表 3-3	監測儀器清單及警戒值_地表、地中變位	3-22
表 4-1	降雨時間 GB-SAR 觀測一覽表	4-3
表 4-2	GB-SAR 顯著變化時間一覽表	4-14
表 4-3	ARCSAR 機構及外箱之尺寸、重量一覽	4-26
表 4-4	軌道式及旋臂式 GBSAR 參數比較	4-26
表 4-5	GBSAR 與 ARCSAR 短期監測資訊一覽	4-30
表 4-6	LINEARSAR 與 ARCSAR 短期監測位移量簡單統計結果	4-34

圖次

圖 1-1	秀巒現生崩塌區以及潛在崩塌範圍.....	1-2
圖 1-2	DS194 崩塌地五萬分之一地質圖	1-4
圖 1-3	DS194 崩塌地山崩與地滑地質敏感區	1-4
圖 1-4	DS194 崩塌地逐年變遷影像(GOOGLE EARTH).....	1-5
圖 1-5	民國 105 年十月 DS194 崩塌地現場照(農村水保署，2016).....	1-5
圖 1-6	民國 110 年九月 DS194 崩塌地空拍照.....	1-6
圖 1-7	民國 110 年九月白石大崩塌現場照	1-6
圖 1-8	秀巒崩塌地土石堆積於河道情形(2023/7/1)	1-7
圖 1-9	秀巒崩塌地土石堆積於河道情形-續(2023/7/1).....	1-7
圖 2-1	外業監測進撤場說明圖	2-2
圖 2-2	GB-SAR 監測 DS194 崩塌地位置圖	2-3
圖 2-3	DS194 崩塌地監測點位視角情況	2-4
圖 2-4	秀巒 T001 監測儀器配置分布圖	2-8
圖 2-5	新竹縣尖石鄉秀巒村簡易疏散避難圖	2-9
圖 2-6	大規模崩塌之應變-時間曲線(M. SAITO,1960).....	2-9
圖 2-7	分析臨界雨量線方法(取自:土石流防災資訊網).....	2-10
圖 3-1	本研究規劃 GB-SAR 擺放營地(劉老村長露營區).....	3-1
圖 3-2	GB-SAR 設置實際位置.....	3-1
圖 3-3	GB-SAR 雷達回波強度圖(1).....	3-2
圖 3-4	GB-SAR 雷達回波強度圖(2).....	3-3
圖 3-5	植被區產生同調性位置圖(中)無同調性(右)產生同調性	3-4
圖 3-6	GB-SAR 植被區產生同調性一覽圖	3-7

圖 3-7 DS194 崩塌地現地照片(2021/10/20)	3-9
圖 3-8 DS194 崩塌地現地照片(2021/10/21)-空拍照	3-9
圖 3-9 DS194 崩塌地現地照片(2022/5/20)	3-10
圖 3-10 DS194 崩塌地現地照片(2022/8/17)	3-10
圖 3-11 DS194 崩塌地現地照片(2023/6/8)	3-11
圖 3-12 DS194 崩塌地現地照片(2023/10/19)	3-11
圖 3-13 DS194 崩塌地現地照片(2023/10/26)-空拍照	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	3-12
圖 3-15 DS194 崩塌地 5 月份紅外線測溫結果	3-13
圖 3-16 可能造成更多紅外線反射之近物	3-13
圖 3-17 5 月份 DS194 崩塌地不同時間表面溫度圖	3-14
圖 3-18 10 月份 DS194 崩塌地不同時間表面溫度圖	3-15
圖 3-19 邊坡溫度隨高度增加遞減	3-16
圖 3-20 裸露地與植被覆蓋區白天溫差圖	3-16
圖 3-21 白天裸露地與植被覆蓋區域呈現的溫度差異	3-17
圖 3-22 夜晚裸露地與植被覆蓋區域呈現的溫度差異	3-17
圖 3-23 DS194 崩塌地監測儀器配置分布圖	3-18
圖 3-24 封層水壓觀測井(18-1P@64M)監測值歷史變化 圖(2023/05/30-6/12)	3-19
圖 3-25 封層水壓觀測井(18-1P@64M)監測值歷史變化 圖(2023/10/15-28)	3-19
圖 3-26 水位觀測井(17-1BW)監測值歷史變化圖 (2023/05/30-6/12)	3-20
圖 3-27 水位觀測井(17-1BW)監測值歷史變化圖 (2023/10/15-28)	3-20

圖 3-28	水位觀測井(19-2W)監測值歷史變化圖 (2023/05/30-6/12).....	3-21
圖 3-29	水位觀測井(19-2W)監測值歷史變化圖 (2023/10/15-28).....	3-21
圖 3-30	地表傾斜計(雙軸)(T1)監測值歷史變化圖 (2023/05/30-6/12).....	3-23
圖 3-31	地表傾斜計(雙軸)(T1)監測值歷史變化圖 (2023/10/15-28).....	3-23
圖 3-32	地表傾斜計(雙軸)(T2)監測值歷史變化圖 (2023/05/30-6/12).....	3-24
圖 3-33	地表傾斜計(雙軸)(T2)監測值歷史變化圖 (2023/10/15-28).....	3-24
圖 3-34	地表傾斜計(雙軸)(T3)監測值歷史變化圖 (2023/05/30-6/12).....	3-25
圖 3-35	地表傾斜計(雙軸)(T3)監測值歷史變化圖 (2023/10/15-28).....	3-25
圖 3-36	地表傾斜計(雙軸)(T4)監測值歷史變化圖 (2023/05/30-6/12).....	3-26
圖 3-37	地表傾斜計(雙軸)(T4)監測值歷史變化圖 (2023/10/15-28).....	3-26
圖 3-38	地表傾斜計(雙軸)(JS077-T4)監測值歷史變化 圖(2023/05/30-6/12).....	3-27
圖 3-39	地表傾斜計(雙軸)(JS077-T4)監測值歷史變化 圖(2023/10/15-28).....	3-27
圖 3-40	地表傾斜計(雙軸)(JS077-T5)監測值歷史變化 圖(2023/05/30-6/12).....	3-28

圖 3-41	地表傾斜計(雙軸)(JS077-T5)監測值歷史變化 圖(2023/10/15-28).....	3-28
圖 3-42	地表傾斜計(雙軸)(JS077-T6)監測值歷史變化 圖(2023/05/30-6/12).....	3-29
圖 3-43	地表傾斜計(雙軸)(JS077-T6)監測值歷史變化 圖(2023/10/15-28).....	3-29
圖 3-44	地表伸縮計(S1)監測值歷史變化圖(2023/05/30- 06/12).....	3-30
圖 3-45	地表伸縮計(S1)監測值歷史變化圖(2023/10/15- 28).....	3-30
圖 3-46	地表伸縮計(S-2)監測值歷史變化圖(2023/05/30- 06/12).....	3-31
圖 3-47	地表伸縮計(S-2)監測值歷史變化圖(2023/10/15- 28).....	3-31
圖 3-48	地表伸縮計(JS077-E)監測值歷史變化圖 (2023/05/30-06/12).....	3-32
圖 3-49	地表伸縮計(JS077-E)監測值歷史變化圖 (2023/10/15-28).....	3-32
圖 3-50	GNSS 地表變位(G1)監測值歷史變化圖 (2023/05/30-06/12).....	3-33
圖 3-51	GNSS 地表變位(G1)監測值歷史變化圖 (2023/10/15-28).....	3-34
圖 3-52	GNSS 地表變位(G2)監測值歷史變化圖 (2023/05/30-06/12).....	3-35
圖 3-53	GNSS 地表變位(G2)監測值歷史變化圖 (2023/10/15-28).....	3-36

圖 3-54	GNSS 地表變位 (GP3) 監測值歷史變化圖 (2023/05/30-06/12)	3-37
圖 3-55	GNSS 地表變位 (GP3) 監測值歷史變化圖 (2023/10/15-28)	3-38
圖 3-56	GNSS 地表變位 (GP4) 監測值歷史變化圖 (2023/05/30-06/12)	3-39
圖 3-57	GNSS 地表變位 (GP4) 監測值歷史變化圖 (2023/10/15-28)	3-40
圖 3-58	單頻 GPS 位移 (JS077-G4) 監測值歷史變化圖 (2023/05/30-06/12)	3-41
圖 3-59	單頻 GPS 位移 (JS077-G4) 監測值歷史變化圖 (2023/10/15-28)	3-42
圖 3-60	單頻 GPS 位移 (JS077-G5) 監測值歷史變化圖 (2023/05/30-06/12)	3-43
圖 3-61	單頻 GPS 位移 (JS077-G5) 監測值歷史變化圖 (2023/10/15-28)	3-43
圖 3-62	單頻 GPS 位移 (JS077-G6) 監測值歷史變化圖 (2023/05/30-06/12)	3-44
圖 3-63	單頻 GPS 位移 (JS077-G6) 監測值歷史變化圖 (2023/10/15-28)	3-45
圖 3-64	現場監測攝影機角度 1 (SL_CCD1)	3-46
圖 3-65	現場監測攝影機角度 2 (SL_CCD2)	3-46
圖 3-66	現場監測攝影機角度 3 (SL_CCD3)	3-47
圖 4-1	秀巒雨量站 10 分鐘累計降水量 (2023/5/30 - 2023/6/12)	4-1
圖 4-2	秀巒崩塌地 GB-SAR 於降雨時間觀測現況圖	4-1
圖 4-3	團隊接收累積雨量警訊通知	4-2

圖 4-4	蝕溝土石流流動情形	4-2
圖 4-5	蝕溝土石流流動情形(續).....	4-3
圖 4-6	坡腹與坡趾與雷達圖位置對照	4-4
圖 4-7	2023/05/31 21:30–06/01 01:55 (GROUP_5)變化圖	4-5
圖 4-8	2023/06/01 11:56–06/01 18:50 (GROUP_10)變化圖	4-6
圖 4-9	2023/06/03 15:19–06/03 20:59 (GROUP_16)變化圖	4-7
圖 4-10	2023/06/04 22:04–06/05 05:55 (GROUP_20)變化 圖.....	4-8
圖 4-11	2023/06/06 15:06–06/06 20:56 (GROUP_25)變化 圖.....	4-9
圖 4-12	2023/06/07 15:06–06/07 20:56 (GROUP_28)變化 圖.....	4-10
圖 4-13	2023/06/09 18:31–06/09 21:01 (GROUP_37)變化 圖.....	4-11
圖 4-14	2023/06/10 15:03–06/10 21:01 (GROUP_40)變化 圖.....	4-12
圖 4-15	2023/06/11 07:04–06/11 15:24 (GROUP_42)變化 圖.....	4-13
圖 4-16	2023/06/02 21:26–06/03 03:05 (GROUP_14).....	4-15
圖 4-17	2023/06/05 22:08–06/06 05:49 (GROUP_23).....	4-15
圖 4-18	2023/06/10 15:03–06/10 21:01 (GROUP_40).....	4-16
圖 4-19	2023/06/10 22:05–06/11 05:45 (GROUP_41)	4-16
圖 4-20	2023/10/20 06:00–10/21 08:00 微幅變動圖	4-17
圖 4-21	2021/10/20 至 2021/10/22 累計趨勢成果	4-18
圖 4-22	秀巒白石崩塌現地位置圖	4-18

圖 4-23	2022/5/17 至 2022/5/20 累計趨勢成果	4-19
圖 4-24	2022/5/17 至 2022/5/20 累計趨勢與現地對照圖	4-20
圖 4-25	2022/8/11 至 2022/8/27 累計趨勢成果	4-20
圖 4-26	2022/8/11 至 2022/8/27 累計趨勢與現地對照圖	4-21
圖 4-27	2023/5/30 至 2023/6/12 累計趨勢成果	4-22
圖 4-28	2023/5/30 至 2023/6/12 累計趨勢與現地對照圖	4-22
圖 4-29	GB-SAR 於整體監測期間位移量變化較大之時間點	4-23
圖 4-30	2023/10/15 至 2023/10/28 累計趨勢成果	4-24
圖 4-31	2023/10/15 至 2023/10/28 累計趨勢與現地對照圖	4-24
圖 4-32	ARCSAR 機構組成	4-25
圖 4-33	LINEAR SAR(左)與 ARCSAR(右)同時掃描 DS194 崩塌地	4-29
圖 4-34	ARCSAR 監測 DS194 崩塌地之訊號震幅圖	4-31
圖 4-35	ARCSAR 監測 DS194 崩塌地之同調性比較圖	4-31
圖 4-36	LINEARSAR 監測 DS194 崩塌地之訊號震幅圖	4-32
圖 4-37	LINEARSAR 監測 DS194 崩塌地 100 ~ 170 公尺結果	4-33
圖 4-38	ARCSAR 監測 DS194 崩塌地 100~170 公尺結果	4-33
圖 4-39	LINEARSAR 監測累積位移量之逐時變化	4-34
圖 4-40	ARCSAR 監測累積位移量之逐時變化	4-34
圖 5-1	GB-SAR 套疊變形量與雜訊干擾結果	5-2
圖 5-2	GB-SAR 掃描邊坡時所發現之重影現象	5-4

圖 5-3 在分時段影像分析工作階段觀察到約 7 組重影現象.....	5-5
-------------------------------------	-----

第一章 前言

第一節 計畫緣起

本團隊 111 年度計畫嘗試以固定式連續數日的形式對一處欠穩定邊坡進行監測，選定新竹縣-尖石鄉-T001(秀巒)DS194 崩塌地，以下簡稱(DS194 崩塌地)，該崩塌地與控溪部落隔白石溪相望。本團隊曾於控溪部落使用 GB-SAR 連續觀測 40 小時、72 小時、以及 378 小時。觀測邊坡隨時間的位移樣態，以及局部的位移差異。觀測到有 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和降雨事件，造成邊坡表面重複的漲縮運動作相關。大多數時間邊坡無大規模且明顯之位移，觀測到局部之表面微位移與位移型態，至多在小場降雨時有明顯之位移加速度提升。本年度(112 年)調整 GB-SAR 進場條件，於梅雨及豪雨特報發布進行進場觀測，確認 GB-SAR 於豪大雨時間儀器接收到的特徵，並比較其他監測儀器與 GB-SAR 相同時間的差異，做為分析與探討警戒模式、分析警戒值之落點，提升防救災之預警效能。

112 年度計畫規劃安排於梅雨季節、豪大雨事件、或者颱風事件時進場進行監測，使用 GB-SAR 儀器監測豪雨期間秀巒白石崩塌變化的情況，於 2023 年 5 月 30 日至 6 月 12 日以及 10 月 15 日至 10 月 28 日，合計 2 輪共 28 天的監測工作。

本次監測時間由強烈颱風瑪娃(5 月 19 日- 6 月 3 日)於台灣東部外海轉向，朝往東北登陸日本，台灣本島則受到颱風所吸引西南氣流影響，於監測期間陸續有約 9 場較大的降雨事件，最大的降雨事件於 24 小時內累積約 100ml 雨量。由於後續並無颱風路徑侵襲臺灣北部地區，無法提前估計強降雨的時間進場，故團隊於 10 月 15 日至 10

一、新竹縣尖石鄉 DS194 崩塌地

DS194 新竹縣-尖石鄉-T001(秀巒)崩塌地，位於新竹縣尖石鄉，在海拔 850 公尺上的控溪部落，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，較大崩塌事件為民國 105 年 10 月 1 日梅姬颱風過境後，及民國 110 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，為中央主管機關劃定之山崩與地滑地質敏感區。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)。

民國 105 年梅姬颱風過境後，受颱風的間接影響，10 月 1 日上午 10 時，DS194 崩塌地發生崩塌，崩落之土砂堆積於白石溪河道，佔據約三分之一河道寬度。初步推估崩塌面積約 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(農村水保署，2016)，現場如圖 1-5 所示。該年後續也陸陸續續發生山崩的災情。儘管農村水保署已在上方進行噴漿等土石固定之工程，崩塌範圍還是持續發展。



圖 1-2 DS194 崩塌地五萬分之一地質圖

資料來源：中央地質調查所-山崩雲

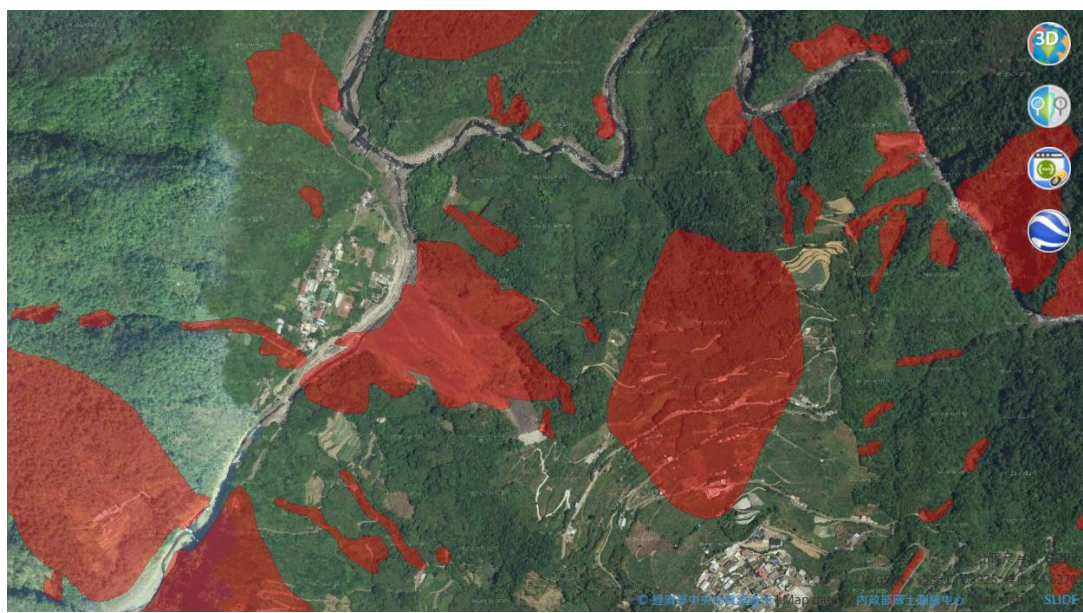


圖 1-3 DS194 崩塌地山崩與地滑地質敏感區

資料來源：中央地質調查所-山崩雲



圖 1-4 DS194 崩塌地逐年變遷影像(Google Earth)



圖 1-5 民國 105 年十月 DS194 崩塌地現場照(農村水保署，2016)

民國 110 年璨樹颱風過境後，DS194 崩塌地受璨樹颱風外圍環流降雨影響，9 月 13 日十時發生崩塌，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 1-6 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 1-7 所示。



圖 1-6 民國 110 年九月 DS194 崩塌地空拍照



圖 1-7 民國 110 年九月白石大崩塌現場照

DS194 崩塌地於 2023 年 6 月 30 日發生河道阻塞之情況，現場狀況無立即安全疑慮，相關單位於 7 月 7 日完成河道疏通作業，如圖 1-8 與圖 1-9。



圖 1-8 秀巒崩塌地土石堆積於河道情形(2023/7/1)



圖 1-9 秀巒崩塌地土石堆積於河道情形-續(2023/7/1)

第二章 工作執行方法與步驟

本年度計畫著重將 GB-SAR 應用於大規模崩塌的監測與分析，也持續觀察表面局部位移的影響。以 DS194 崩塌地為目標，規劃監測時機、監測模式及頻率，以獲得之資訊分析警戒值落點，提升防救災預警效能。以下本節進行詳細說明。

一、外業監測流程

1.進撤場時機

本團隊規劃兩部分的進場時機，第一為梅雨季節之降雨預報，第二則是豪大雨事件達警戒值之預報。每次出動監測天數依現場與天氣狀況而定，預計累積總外業天數為 28 天，依實際條件浮動。

(1)梅雨季節

梅雨為冷熱氣團交鋒時，雙方勢均力敵而使鋒面無法迅速移動，形成所謂的滯留鋒。常發生在台灣春末夏初時，約五月中旬至六月中旬，這種鋒面常會引發持續數日的局部性大雨，降雨量僅次於颱風時期。故本團隊規劃於梅雨季節預報公告時，規劃提前進場設置 GB-SAR 儀器，監測秀巒白石崩塌地之梅雨期間即時狀況。

(2)降雨量達黃色警戒

現行行政院農業委員會農村水保署公告之大規模崩塌潛勢區雨量警戒基準值與土石流警戒基準值，於新竹縣尖石鄉秀巒皆為 300 毫米降雨量。農委會所定義之警戒發布分為兩個時機，黃色警戒為預測雨量大於警戒值，紅色警戒為實際雨量大於警戒值。故本團隊規劃第二種進場時機為氣象預

報公告新竹秀巒地區，當降雨預報達 300 毫米以上之降雨事件(黃色警戒)，即規劃提前進場，並架設 GB-SAR 儀器進行監測。

儀器進場後完整地監測降雨期間之邊坡，降雨事件結束後，因考慮降雨入滲之延遲情形，故撤場時機依照實際狀況做調整。可依據 GB-SAR 現場所監測到之資訊，觀察和推測位移量與位移加速度是否有在持續增加，若位移量越趨平緩、位移加速度沒有明顯逐漸提高，則可安排撤離。



圖 2-1 外業監測進撤場說明圖

(註:黃色警戒:預測雨量>警戒值)

2.儀器設置

(1) GB-SAR 架設位置

經評估觀測 DS194 崩塌地，選擇坐標 “N24.6191°，

E121.2861⁰⁰”(如下圖 2-2 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。

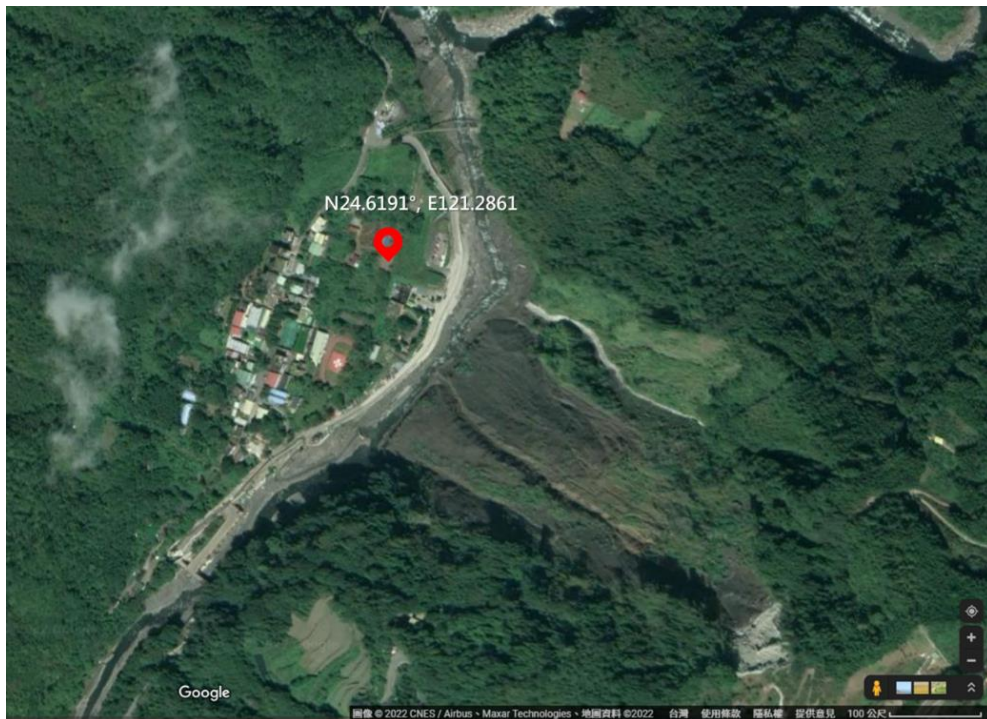


圖 2-2 GB-SAR 監測 DS194 崩塌地位置圖



圖 2-3 DS194 崩塌地監測點位視角情況

(2) GB-SAR 監測參數

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。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。

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)，代表取樣頻率，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。

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，研究團隊規劃掃描頻率為 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，每運作約 6 至 8 小時停機 1 小時，讓儀器適時冷卻，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 2-1 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	20 分鐘(降雨)、 40 分鐘(非降雨)

掃描間隔為每 40 分鐘一筆，若有下雨則間格時間縮短至 20 分鐘一筆。秀巒崩塌地的掃描設計為三個角度進行視野合併，故完整掃描一組資料需要約 6 分鐘左右。為了讓儀器有穩定的運作，每運作約 6 至 8 小時停機 1 小時，確保儀器適時冷卻，每日開機與休息時間如表 2-2。

表 2-2 GB-SAR 儀器操作時間表

時間	狀態	說明
07：00～14：00	連續掃描	運作 7 小時(上午)
14：00～15：00	休息	休息 1 小時
15：00～21：00	連續掃描	運作 6 小時(下午)
21：00～22：00	休息	休息一小時
22：00～06：00	連續掃描	運作 8 小時(夜間)

*備註：連續掃描每筆資料間隔 40 分鐘；降雨間隔為 20 分鐘

3.其他現場監測儀器

為了解潛在崩塌地之活動性、可能滑動深度及地下水分布情形，作為崩塌潛勢、整體安全評估及整治規劃參考，農村水保署相關單位在秀巒白石崩塌地頂部有裝設些監測儀器，包括手動與自動化併行。監測儀器類型大致可分為：(1)降雨量、(2)地下水位、(3)地中變位(包含傾斜觀測管)等，現場還有影像攝影機實時觀測。本計劃需蒐集監測期間現場其他監測儀器之資料，一併作分析與討論。

表 2-3 秀巒 T001 監測儀器配置

監測儀器	數量	備註
傾斜觀測管兼水位觀測井	6 孔	455m
傾斜觀測管	2 孔	80m
水位井	4 孔	210m
封層水位井	1 孔	80m
自記式水壓計	3 支	-
電子式水壓計	5 支	-
電子式雨量計	1 套	-
地表伸縮計	2 套	-
現場影像攝影機	2 套	-
地盤傾斜計	3 套	-
GPS	2 套	-

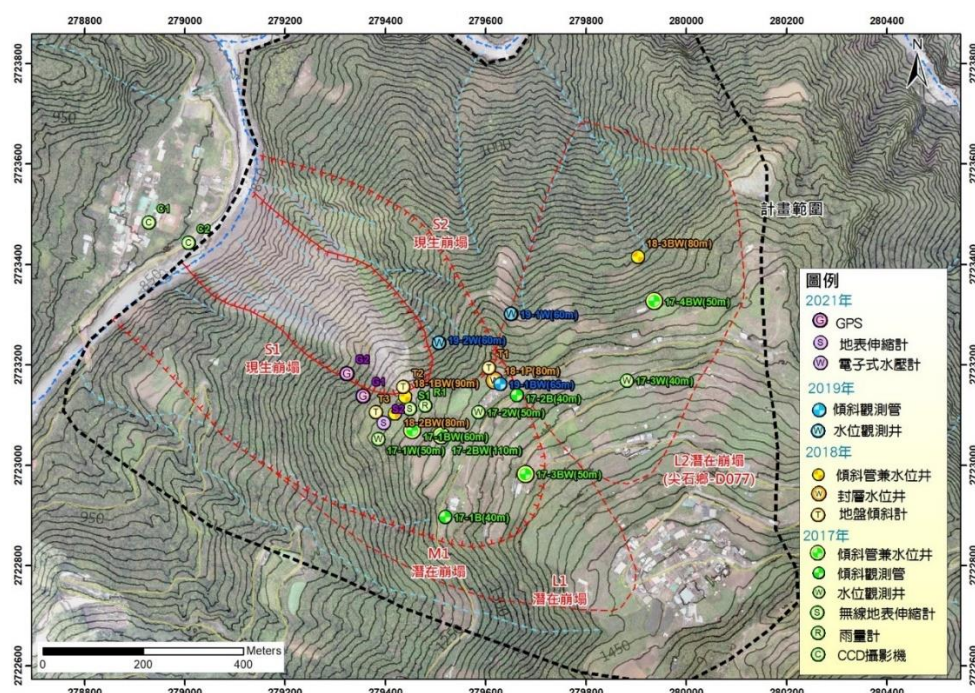


圖 2-4 秀巒 T001 監測儀器配置分布圖

4.疏散避難

以上所有工作項目，皆建立在確保作業人員之生命財產安全之上。因應觀察邊坡之動態情形，所規劃之進場事件皆為高災害風險之時機，故需於降雨事件發生前，提前上山準備，以免交通上受阻。若氣候變化迅速，已有相當程度之風雨開始，卻還未上山，即捨棄該次監測，以確保人員安全。

若於 GB-SAR 監測期間，相關單位發布紅色警戒(實際雨量大於警戒值)，強制撤離民眾時，本團隊作業人員應一同前往疏散避難，而 GB-SAR 儀器之去留，依擺設位置現場狀況，風險評估後決定是否繼續監測。

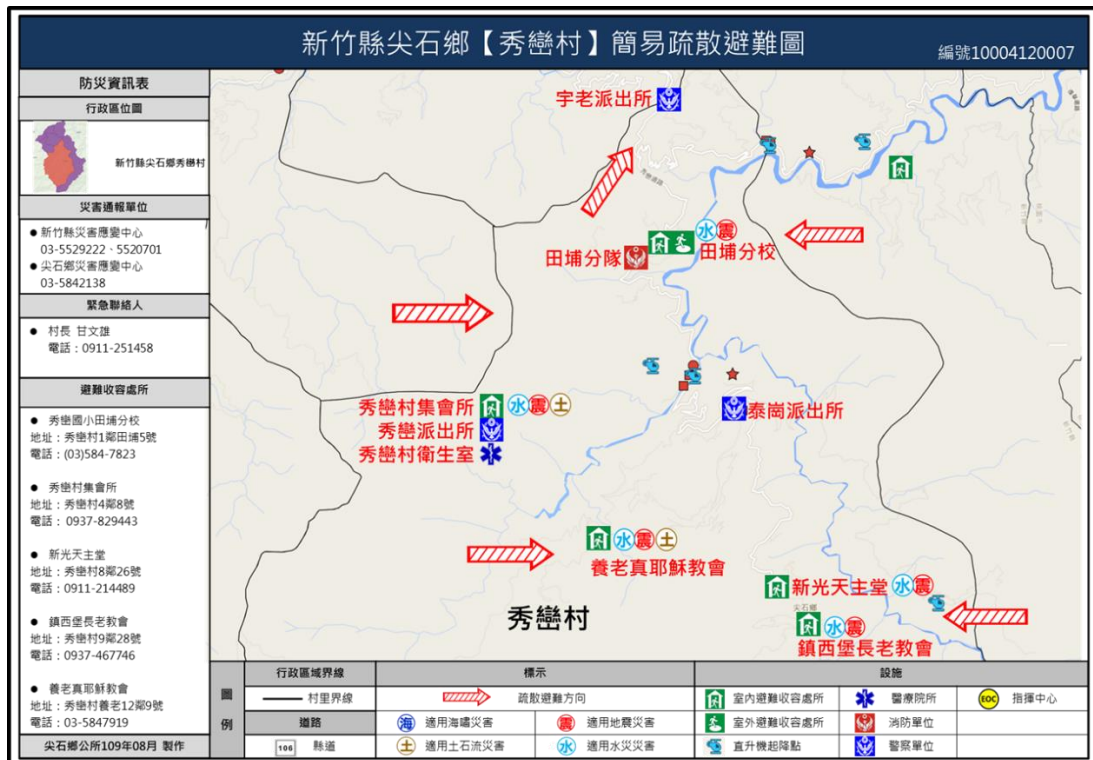


圖 2-5 新竹縣尖石鄉秀巒村簡易疏散避難圖

(取自:新竹縣災害防救資訊平台)

二、警戒值分析

大規模崩塌之發生機制複雜，當邊坡出現變形徵兆後，在重大事件發生時常會誘發其變形量之增加，而啟動崩塌發生。

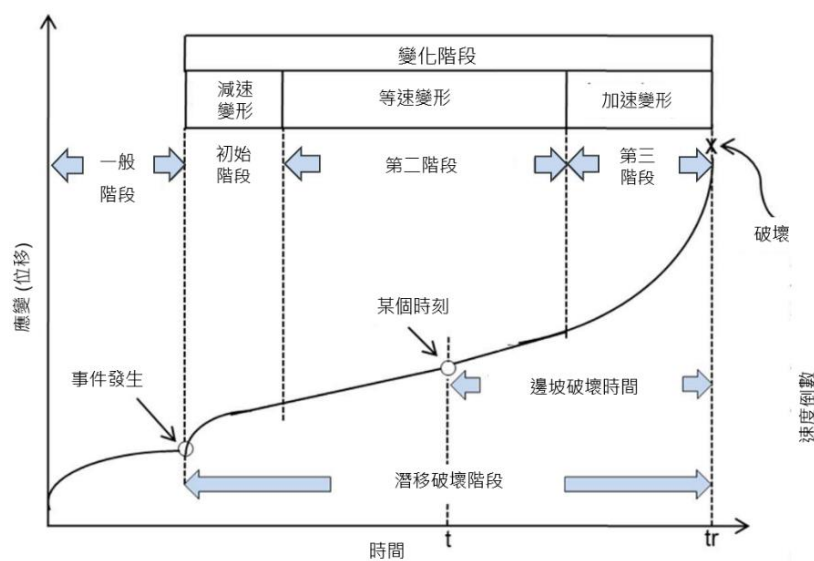


圖 2-6 大規模崩塌之應變-時間曲線(M. SAITO,1960)

變形量之增加則可依照變形速度分為減速變形、等速變形及加速變形等階段。因此警戒系統之建立應針對不同階段進行考慮，一般來說啟動條件之判定，可透過雨量及現地監測變動資料，做為事件發生之判斷指標。

關於降雨量之警戒值，農村水保署利用寬頻地震網得到之訊號進行分析，從民國 90-105 年期間之降雨事件找出 28 筆具體知道發生時間的新生大規模崩塌案例，利用其發生時刻對應之累積雨量進行分析，建立大規模崩塌發生臨界雨量線，做為評估潛勢區發生條件之依據，並利用另 79 筆大規模崩塌案例進行驗證，確定臨界雨量線之合理性。同時配合疏散避難準備之考慮，將發生臨界雨量轉換為大規模崩塌發生警戒雨量線，做為警戒值設定之參考。

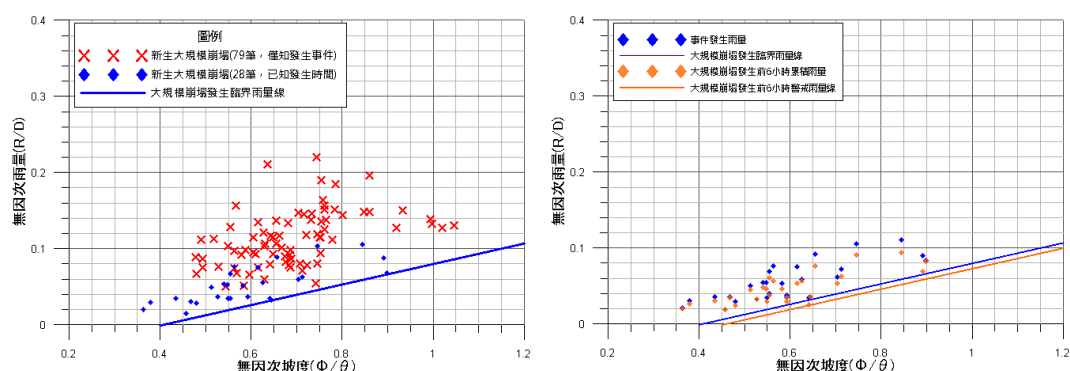


圖 2-7 分析臨界雨量線方法(取自:土石流防災資訊網)

另外，也常見使用現地監測儀之量測值作為警戒值，如所示。本計劃期望以 GB-SAR 之監測成果，觀測其位移量與位移加速度，去探討警戒值之訂定。

表 2-4 常用變形量應變管理基準彙整

監測項目	應變管理基準	使用單位
地表伸縮計	依平均變形量進行潛勢區之活動度分級，包含每日變形量(0.5 mm/日至 20 mm/日)，或每月變形量(0.5 mm/月至 300 mm/月)	中華水土保持學會，1999 日本高速公路調查會，1988 日本道路公團土質地質調查要領，1992 Flentje and Chowdhury, 2002 日本地滑協會，1978
地表傾斜儀	5 sec/日~50 sec/日	中華水土保持學會，1999 日本高速公路調查會，1988 日本道路公團土質地質調查要領，1992
管內傾斜儀	0.5 mm/日~10 mm/日	中華水土保持學會，1999 日本高速公路調查會，1988 日本道路公團土質地質調查要領，1992

資料來源:土石流及大規模崩塌防災資訊網

三、委託可行性分析

因所規劃之外業進場監測時機有一定之標準，若 112 年度台灣皆無重大降雨事件發生，恐怕計劃難以有所成果，故依實際情況而定，接受主辦機關委託至其它不同潛在大規模崩塌區域進行 GB-SAR 監測之可行性評估，推廣其於台灣之應用，以補足外業訂定 28 天工項之約定。

第三章 崩塌地基本資料蒐集與彙整

第一節 崩塌地雷達回波特徵分析

本團隊將 GB-SAR 設置於露營區，圖 3-1，民國 111 年 5 月與民國 112 年五月將 GB-SAR 放置於較靠近於鐵皮屋頂下，如圖 3-2 紅色點位該地區比較不容易有淹水情況。民國 110 年 10 月與 112 年 10 月則放置於露營區的草皮空地上，位置如圖 3-2 黃色點位。由於放置地點不同導致視角會有所差異，以下說明雷達顯示的地形特徵。



圖 3-1 本研究規劃 GB-SAR 擺放營地(劉老村長露營區)



圖 3-2 GB-SAR 設置實際位置

分析雷達回波特徵，從民國 110 年 10 月與 111 年 5 月，蝕溝並不明顯，如圖 3-3；在民國 112 年 5 月與 10 月的雷達強度圖可發現，如圖 3-4，蝕溝有逐漸加大的情況(雷達回波圖黑色的範圍增加)。在同調性圖可以看到植被區的同調性都很低(藍色與綠色區塊)，裸露地的範圍同調性都很高(紅色區塊)可以進行微幅變動偵測。

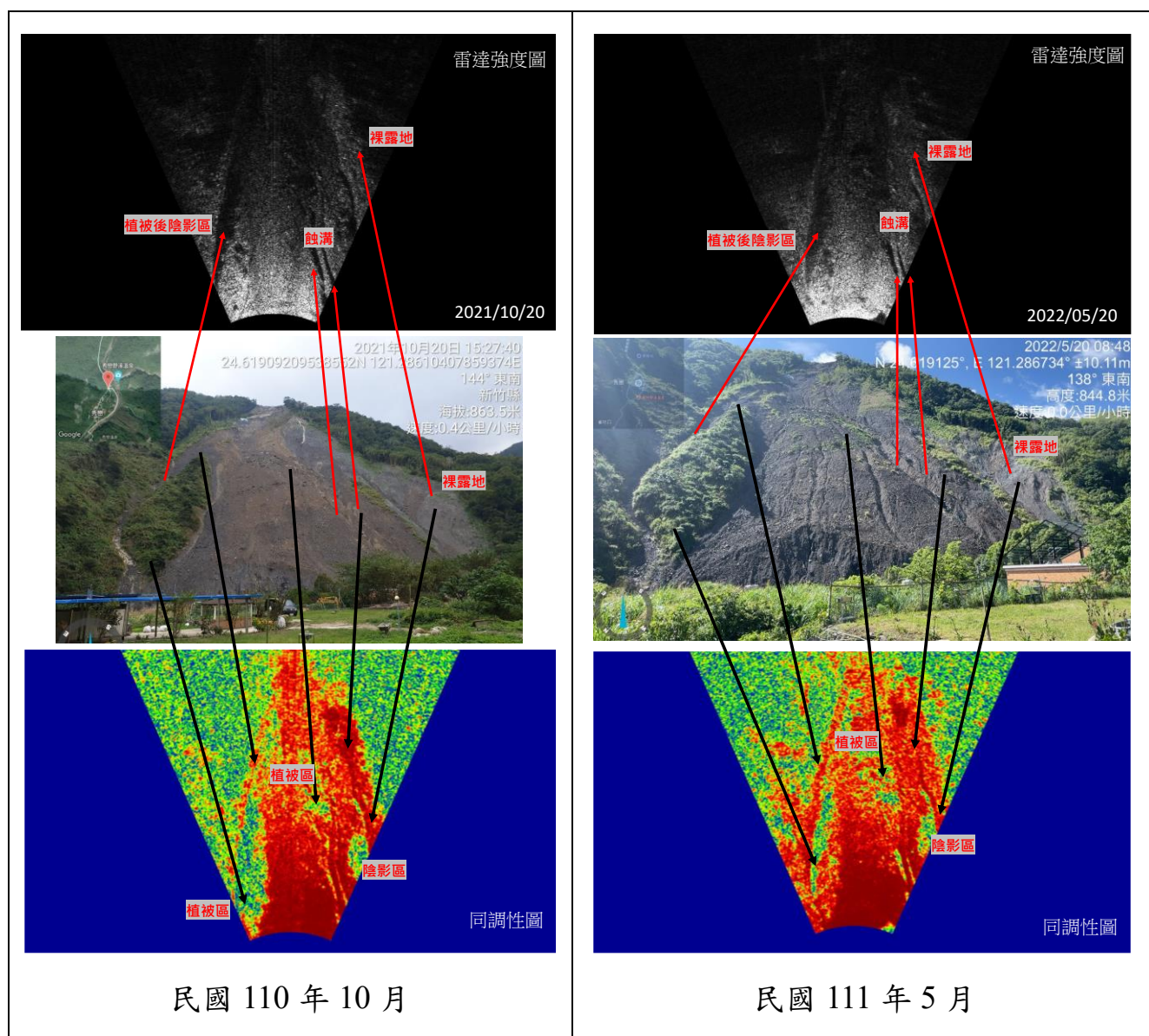


圖 3-3 GB-SAR 雷達回波強度圖(1)

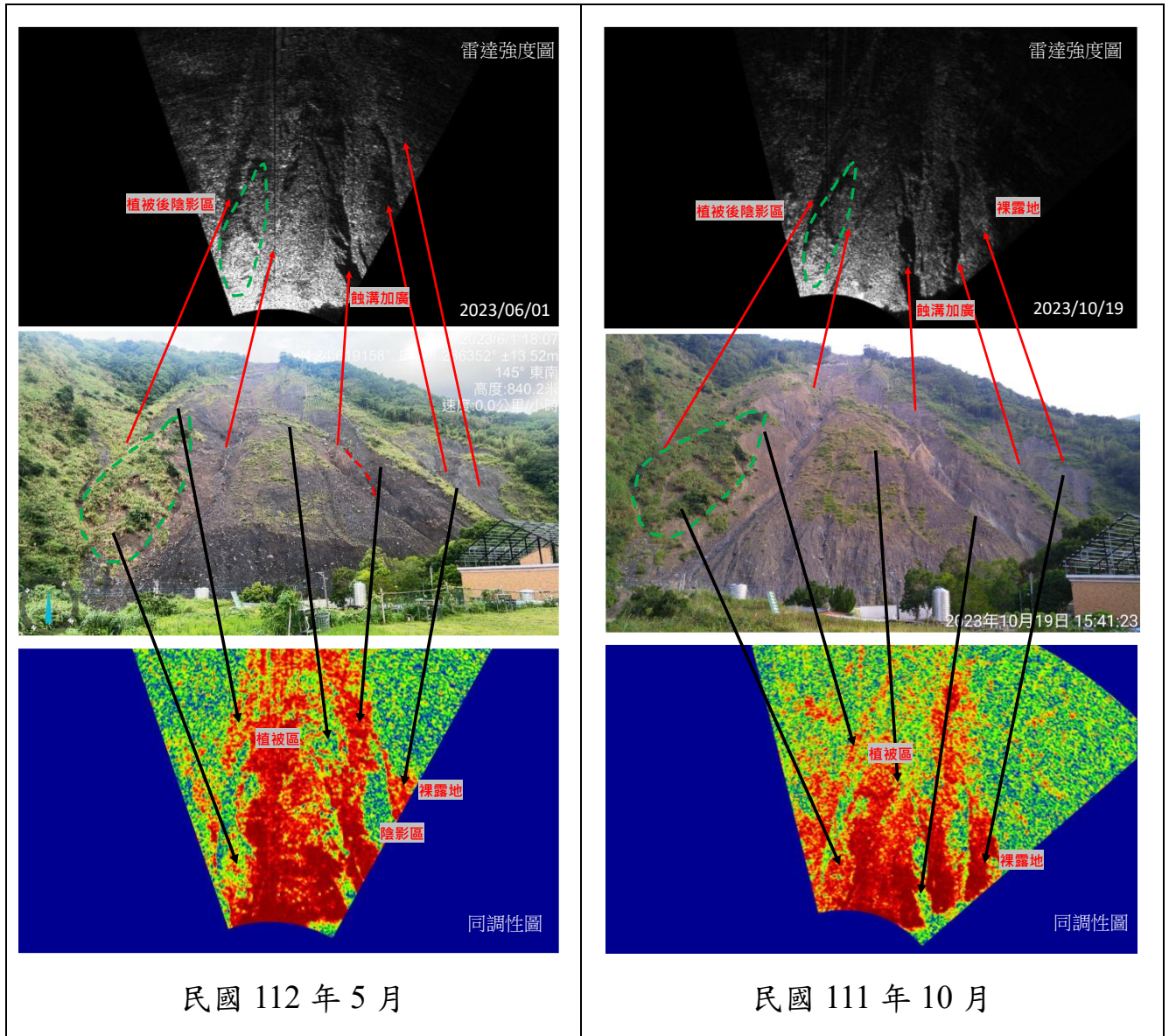


圖 3-4 GB-SAR 雷達回波強度圖(2)

第二節 崩塌地雷達同調性

檢視各分組的資訊，於 DS194 崩塌地左側的植被區在夜間觀測時均有建立同調性的情況發生，使得可以分析微變動的範圍增加，可能由於夜間的溫度與濕度，使雷達回波之同調性的計算可以建立起來，但是白天當溫度升高濕度降低則植被產生同調性的情況即會消失的情況，如圖 3-5。詳細發生的時間彙整如表 3-1，大多在夜間發生。

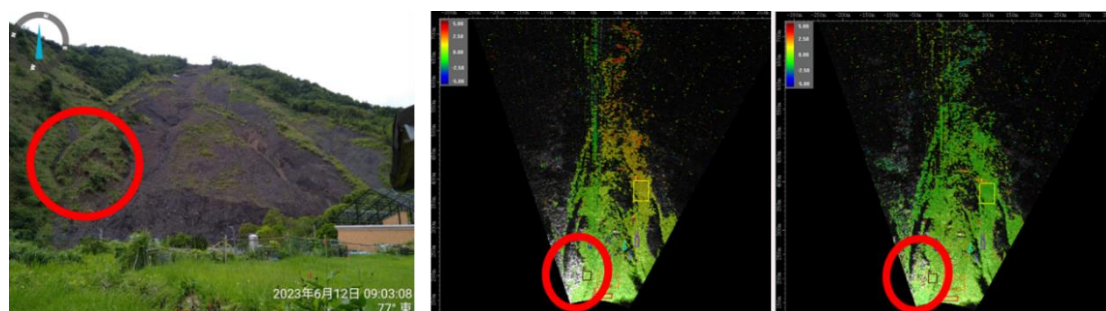
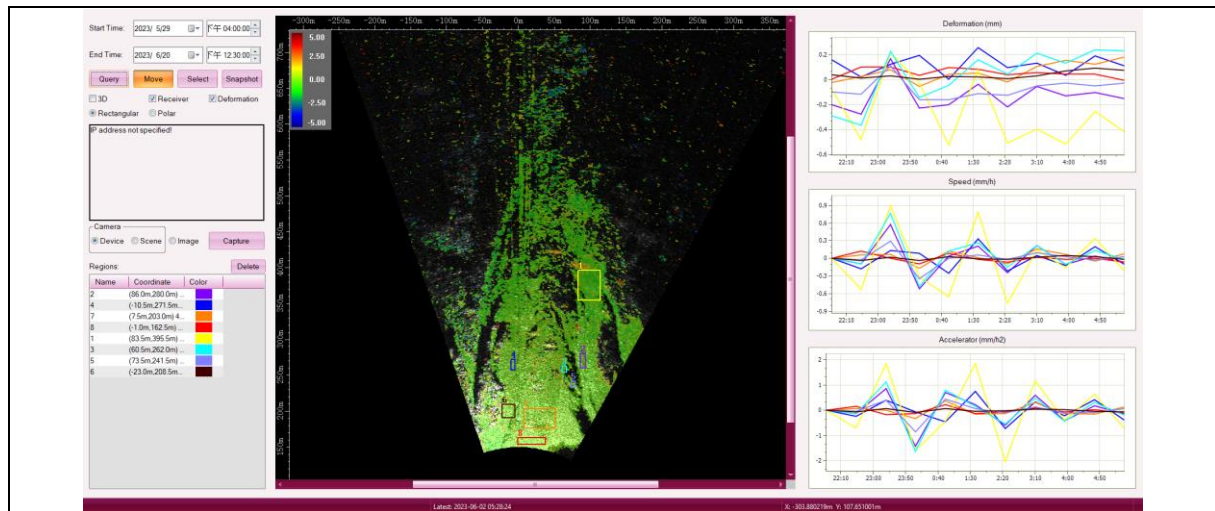


圖 3-5 植被區產生同調性位置圖(中)無同調性(右)產生同調性

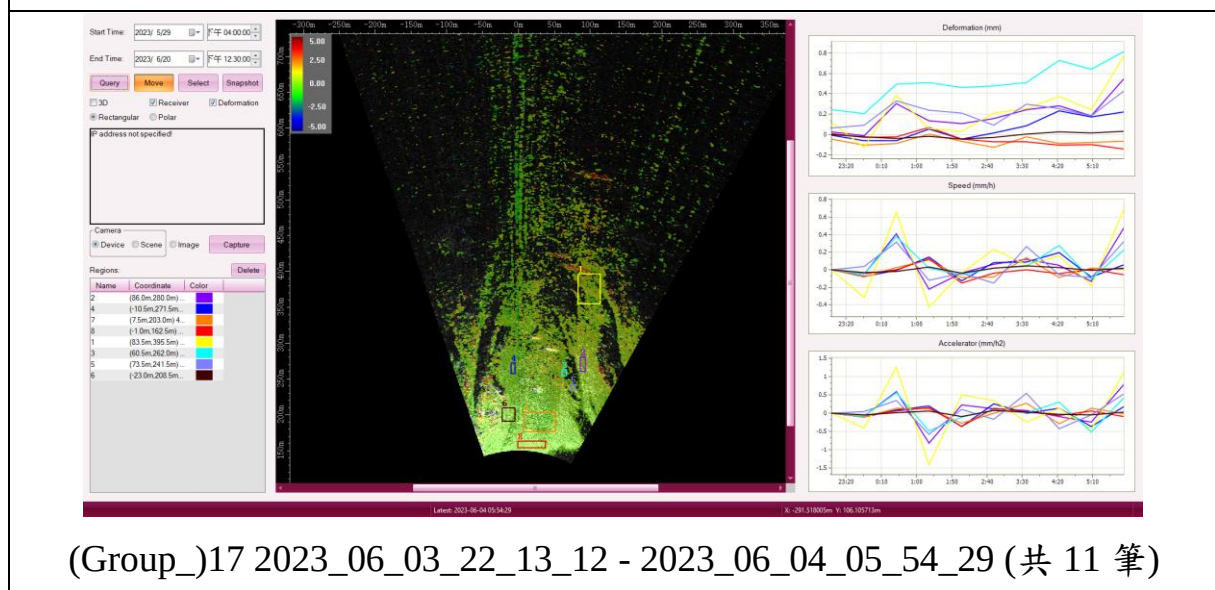
表 3-1 GB-SAR 植被區產生同調性一覽表

時間	觀測時間	即時狀態
2023/06/01 21:01 - 2023/06/02 05:28(Group_11)	夜間	
2023/06/02 06:54 - 2023/06/02 13:49(Group_12)	上午	
2023/06/02 21:26 - 2023/06/03 05:54(Group_14)	夜間	
2023/06/03 22:13 - 2023/06/04 05:54(Group_17)	夜間	
2023/06/04 22:04 - 2023/06/05 05:55(Group_20)	夜間	大雨
2023/06/05 22:08 - 2023/06/06 05:49(Group_23)	夜間	
2023/06/06 22:06 - 2023/06/07 05:47(Group_26)	夜間	
2023/06/07 22:24 - 2023/06/08 06:05(Group_29)	夜間	
2023/06/08 19:38 - 2023/06/08 21:00 (Group_32)	夜間	
2023/06/09 00:12 - 2023/06/09 05:34 (Group_34)	夜間	
2023/06/09 18:31 - 2023/06/09 21:01 (Group_37)	夜間	大雨
2023/06/09 22:06 - 2023/06/10 05:48 (Group_38)	夜間	
2023/06/10 22:05 - 2023/06/11 05:45 (Group_41)	夜間	
2023/06/11 17:05 - 2023/06/11 20:56 (Group_43)	夜間	
2023/06/12 00:17 - 2023/06/12 05:40(Group_45)	夜間	

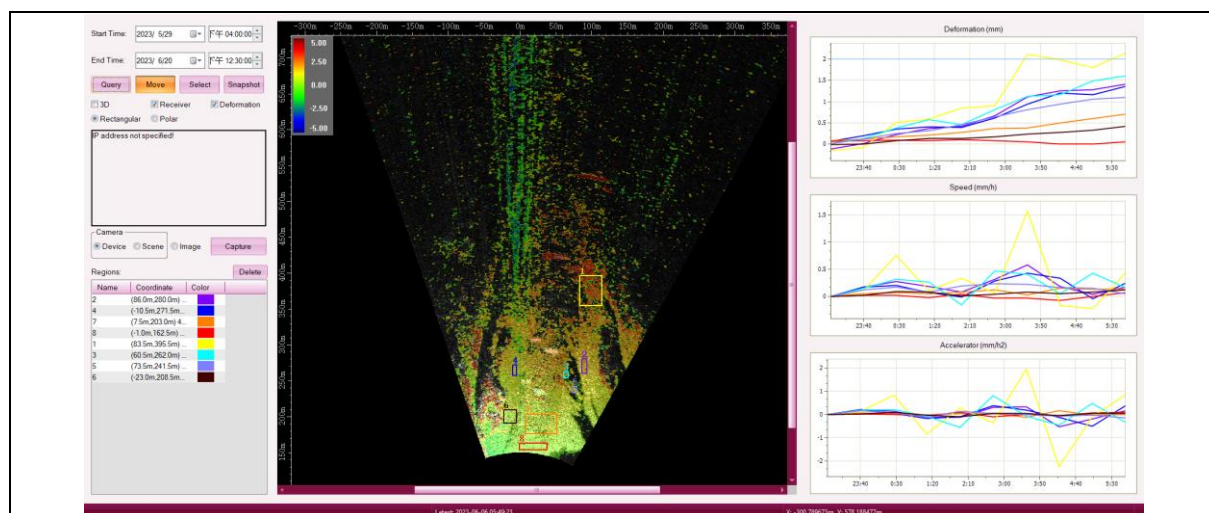
彙整植被區域產生同調性區域，可以發現在第 23、26、29 組的時間內，在植被區域內有顯著變動，且有往下滑動的趨勢變化量達 5mm 以上。但當日出後溫度漸增則植被區的同調性消失則無計算其變化量。



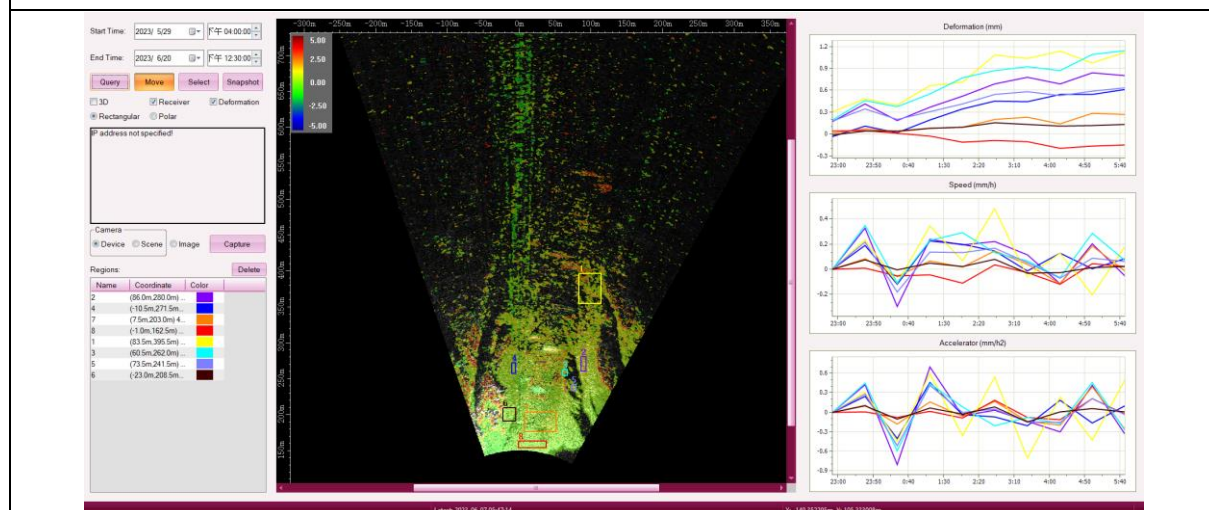
(Group_)11 2023_06_01_21_01_08 - 2023_06_02_05_28_24 (共 12 筆)



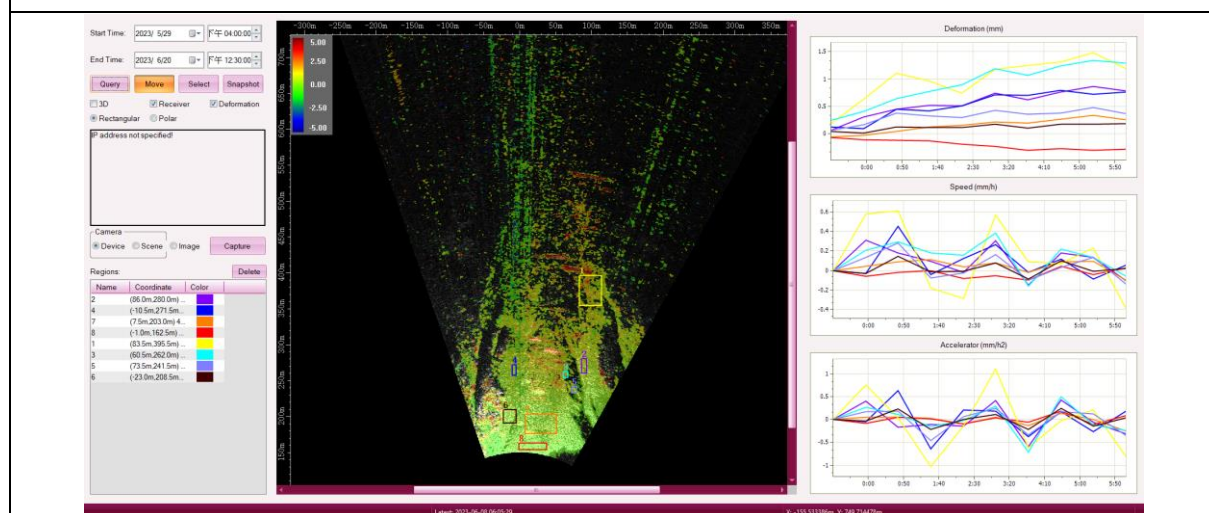
(Group_)17 2023_06_03_22_13_12 - 2023_06_04_05_54_29 (共 11 筆)



(Group_)23 2023_06_05_22_08_03 - 2023_06_06_05_49_23 (共 11 筆)



(Group_)26 2023_06_06_22_06_01 - 2023_06_07_05_47_14 (共 11 筆)



(Group_)29 2023_06_07_22_24_17 - 2023_06_08_06_05_29 (共 11 筆)

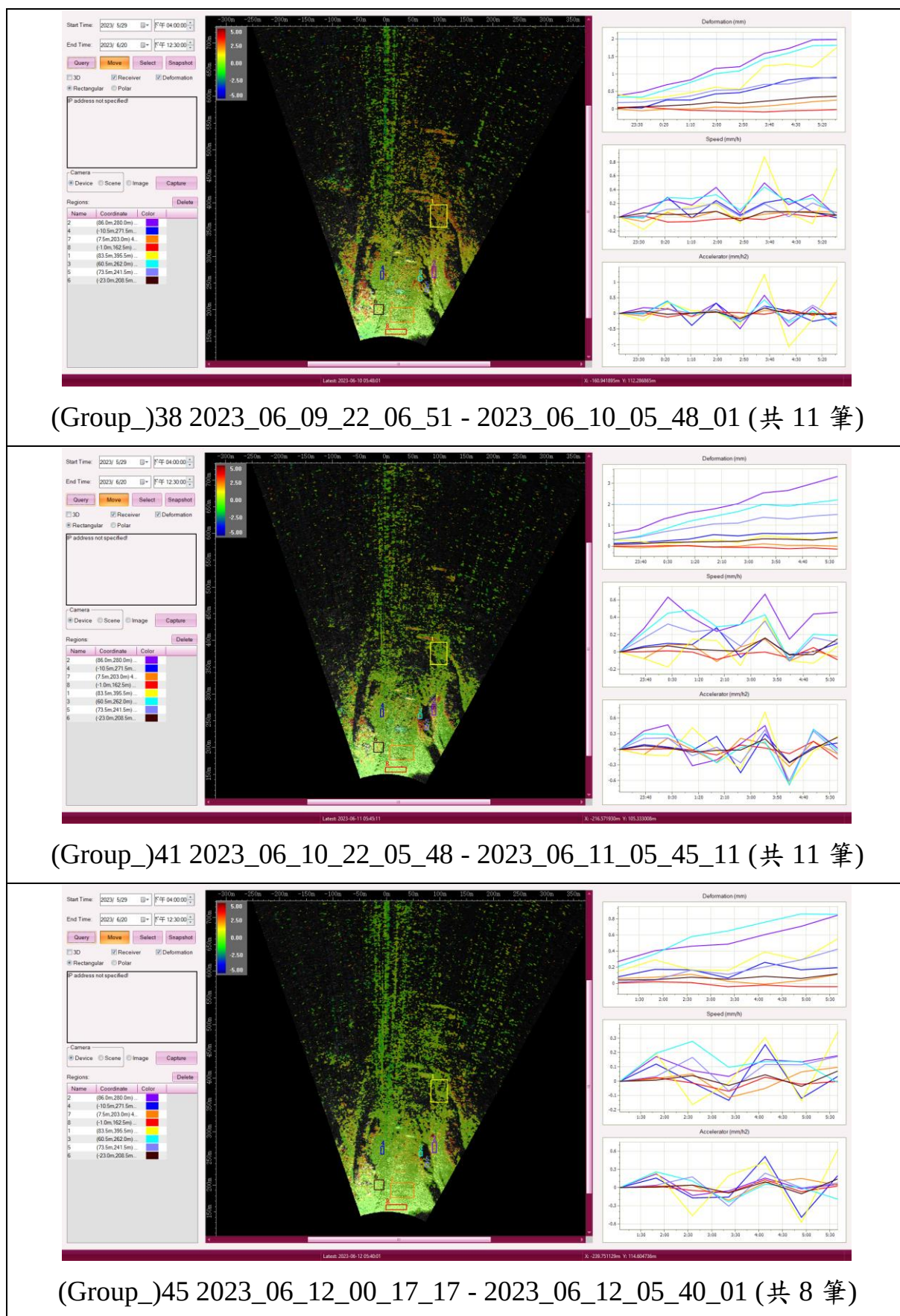


圖 3-6 GB-SAR 植被區產生同調性一覽圖

在 SAR 分析中，同調性持續與否可以作為是否有較大的變化的指標，若變化過大則失去同調性。但觀察本研究區的同調性失去與重新建立的位置位於植被區域，在大部分的時間，植被區不能穩定形成同調性，主要原因為葉面的晃動會使 GB-SAR 的同調性無法超過閾值，故即使同調性範圍有增加或減少，仍應以有持續且穩定同調性的範圍做為微幅變動分析的範圍，並不適合用於檢視是否有變化過大的情形。

第三節 現地照片變化

進行 GB-SAR 監測期間，每日早上及下午皆會拍攝一張現場邊坡狀況照作紀錄。本團隊自 2021 年已前往 DS194 崩塌地進行共五次監測作業。在 2021 年的照片可以發現蝕溝並不明顯，觀察兩年來現場邊坡之狀況，可發現，中央邊坡裸露處長了些植被，而左側原先近似臺灣形狀之植被區域，於 2023 年 5 月份與前次相比，明顯有滑動現象，可見此處植生無法穩固邊坡。因 2023 年 6 月 30 日右側蝕溝 2 土石大量滑落，造成河道阻塞情形，故可發現 2023 年 10 月份與前次 5 月份現場照相比，蝕溝有明顯加深加寬現象。而第一次與最後一次現場照相比，上邊坡較為鬆動之裸露土石，至今已被沖刷下來，且整體蝕溝皆有加深情形。合計於監測期間(2021 年至 2023)進行了兩次無人機空拍及一次光達掃描，以利人員現場邊坡狀況釐清。



圖 3-7 DS194 崩塌地現地照片(2021/10/20)

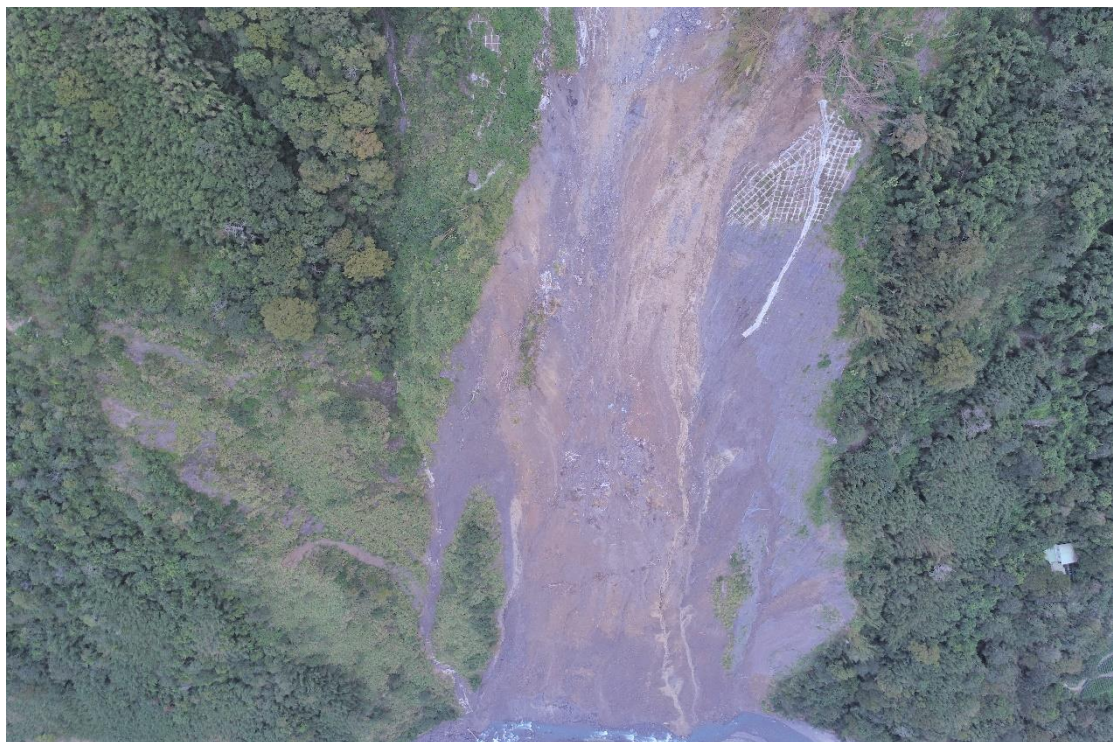


圖 3-8 DS194 崩塌地現地照片(2021/10/21)-空拍照



圖 3-9 DS194 崩塌地現地照片(2022/5/20)



圖 3-10 DS194 崩塌地現地照片(2022/8/17)



圖 3-11 DS194 崩塌地現地照片(2023/6/8)



圖 3-12 DS194 崩塌地現地照片(2023/10/19)



圖 3-13 DS194 崩塌地現地照片(2023/10/26)-空拍照

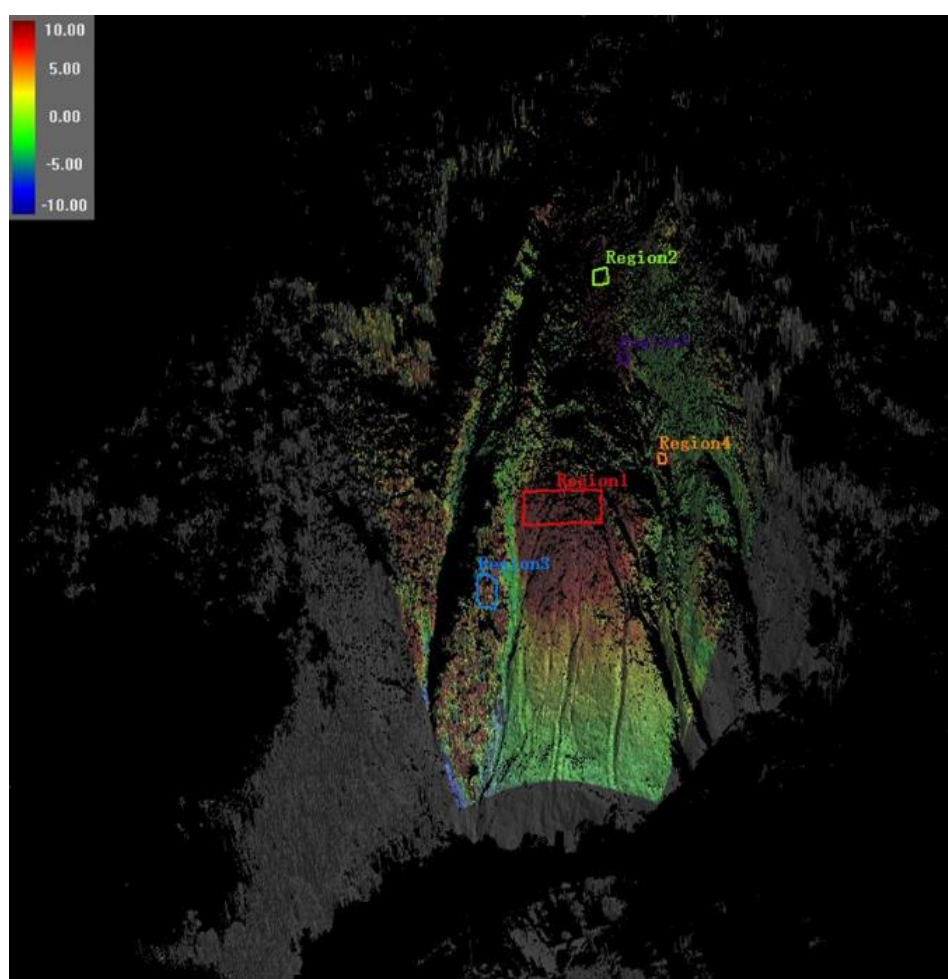


圖 3-14 2021 年 10 月秀巒監測工作之雷達搭配光達監測結果

第四節 崩塌地溫度變化

112 年兩次於秀巒進行 GB-SAR 監測期間，每日早中晚亦使用附有紅外線熱感應鏡頭之手機進行 3 至 4 次的邊坡溫度監測記錄。2023/05/30-2023/06/12 監測期間，以 06/02 當日凌晨與中午的單日溫差最大，達到約 20°C ，如圖 3-15，然而中午 43°C 的監測可能受到近處水塔等建物反射之紅外線影響，如圖 3-16。

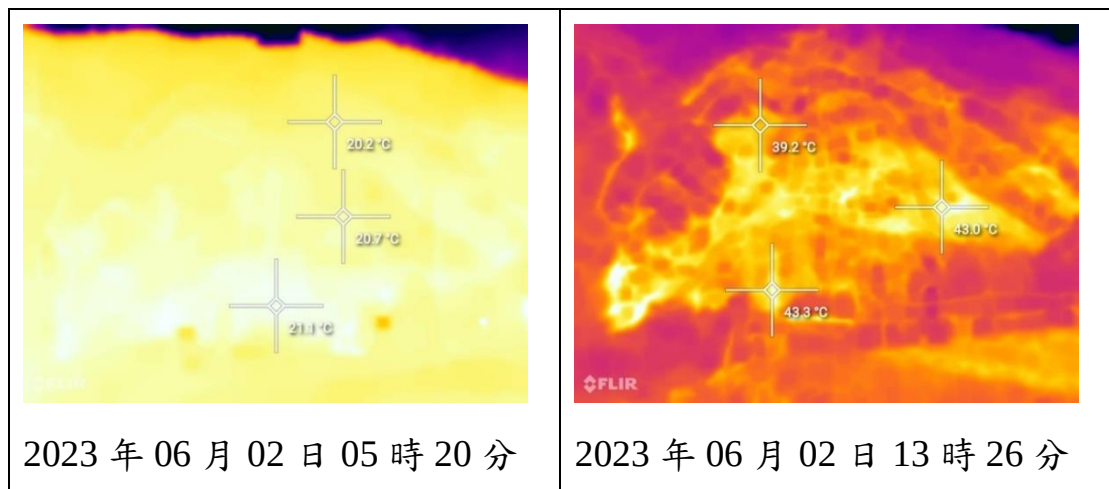


圖 3-15 DS194 崩塌地 5 月份紅外線測溫結果



圖 3-16 可能造成更多紅外線反射之近物

撇除各別較高的監測數值，夏季觀測於上午 5 時至 9 時的邊坡溫度約為 20°C ，其中 2023/06/09-12 上午 5 時至 9 時的邊坡溫度較高，

約為 23°C；中午 10 時至 15 時邊坡溫度約在 35°C 上下；下午 15 時至 18 時邊坡溫度約為 26-30°C；日落後夜晚 18 時至 22 時邊坡溫度又會持續降至 20°C 附近，如圖 3-17。

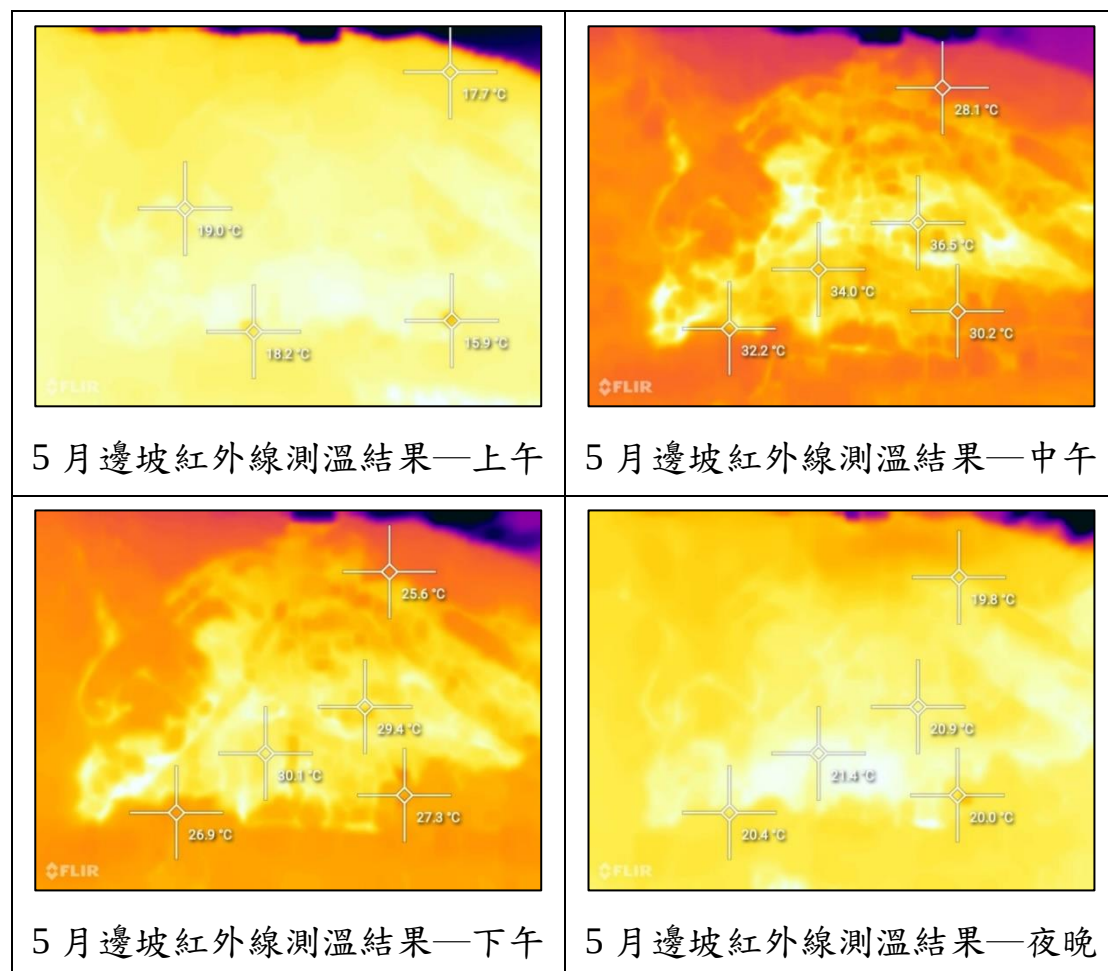


圖 3-17 5 月份 DS194 崩塌地不同時間表面溫度圖

2023/10/15-2023/10/28 監測期間，固定每日紀錄上午 7 時、下午 15 時及晚上 22 時的邊坡溫度。上午 7 時的邊坡溫度為 14-17°C，其中 2023/10/18、20、21 三日早上的邊坡溫度較高，約為 19°C；下午 15 時邊坡溫度約在 24-28°C 上下；夜晚 22 時邊坡溫度降至 16-19°C，如圖 3-18。

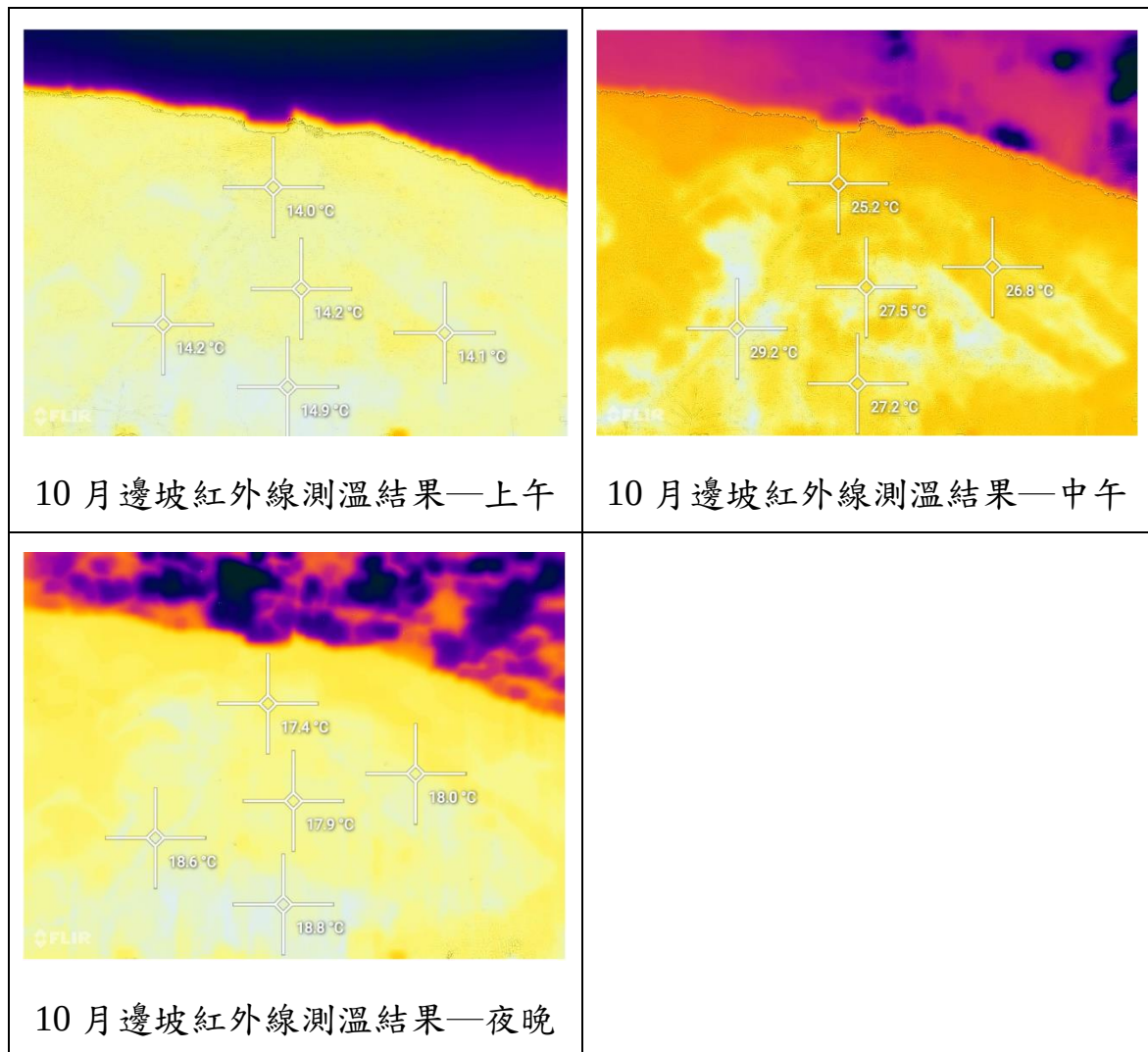


圖 3-18 10 月份 DS194 崩塌地不同時間表面溫度圖

觀察此二次邊坡溫度紀錄可發現，邊坡溫度與日照強度直接相關，清晨與晚上溫度較低，中午時分日照充足，邊坡反射的紅外線也相對增加。除此之外 5 月正值台灣炎熱的夏季，太陽直射北半球，日照時長且充足，相較日照時短的 10 月秋末，5 月早晚的邊坡溫度高出 10 月約 5°C ，5 月中午的邊坡溫度高出 10 月約 10°C 。

再比較同一時間裸露邊坡溫度，發現坡趾處的溫度最高，並且溫度隨高度遞減，可能與氣溫垂直遞減有關，如圖 3-19。

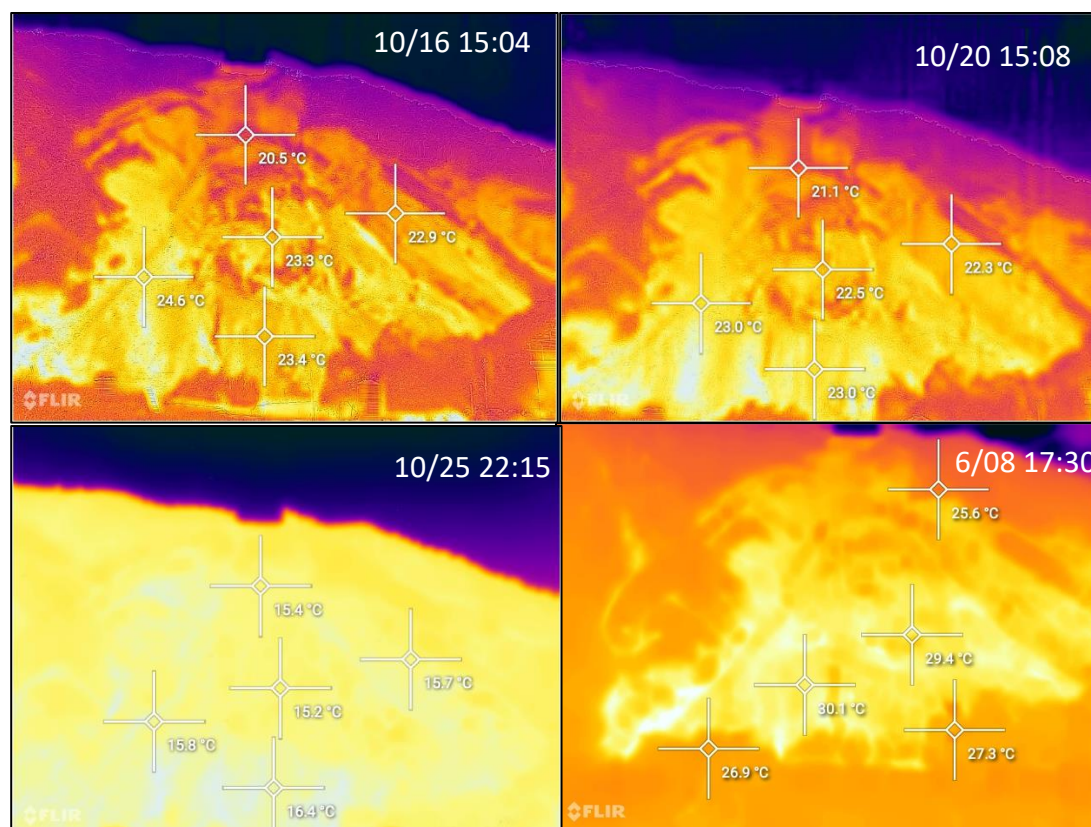


圖 3-19 邊坡溫度隨高度增加遞減

比對原像影像，邊坡中間的三角區域為裸露區，除少數幾處植被覆蓋，大部分呈現地表裸露。依據裸露地表和植物表面輻射溫度的高低差異，理論上在受光照的情形下，裸露地所測得的溫度會高於植被覆蓋地，如圖 3-20。

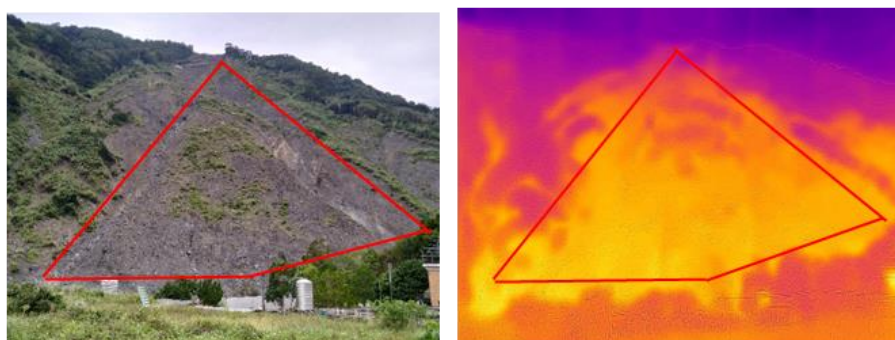


圖 3-20 裸露地與植被覆蓋區白天溫差圖

日照充足的白天時間，邊坡溫度監測紀錄有呈現裸露地與植被覆蓋區域的明顯差異情形，且散佈於裸露地範圍的零星植被區域也能從

影像中清楚辨識出來，如圖 3-21。但夜晚沒有日光給予的熱能後，便無法清楚分辨出裸露地與植被，如圖 3-22，不過依稀還能辨別裸露地模糊的輪廓。

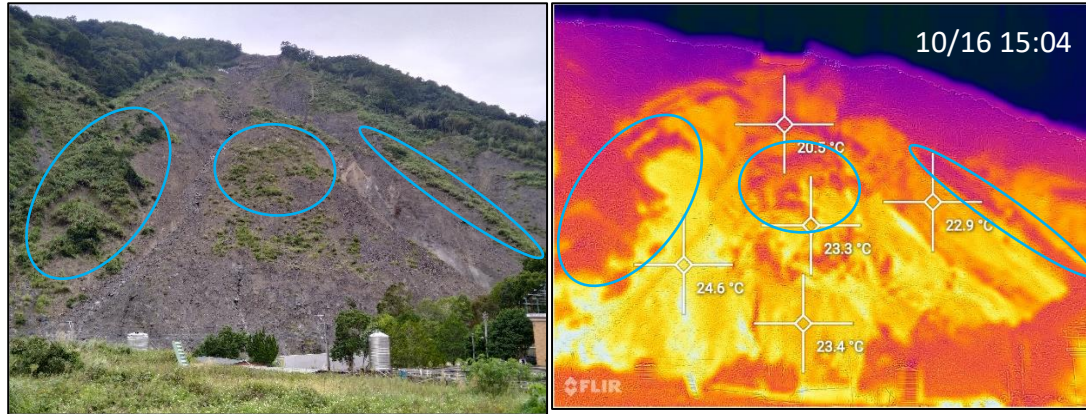


圖 3-21 白天裸露地與植被覆蓋區域呈現的溫度差異

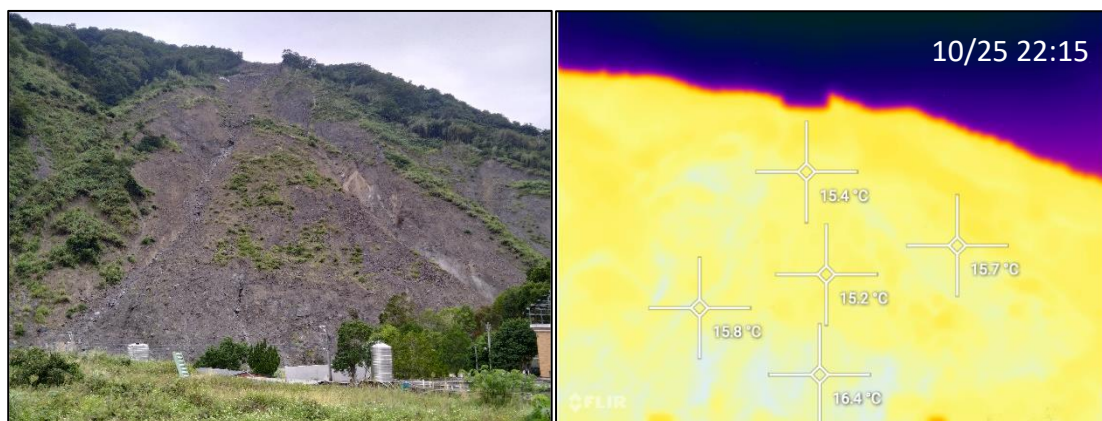


圖 3-22 夜晚裸露地與植被覆蓋區域呈現的溫度差異

此外，由於水的比熱較大，若去除地表覆蓋與氣溫垂直遞減影響，檢視裸露區域若白天溫度較低而夜間溫度較高的地區則可能為地下水冒出的區域，未來可研究是否為主要微幅變化區域。

第五節 現場監測儀器成果

本團隊自大規模崩塌監測整合系統擷取於 GB-SAR 監測期間其他儀器的資料，儀器分布如圖 3-23。分別有地下水監測、地表、地中

監測與現場影像攝影機監測。

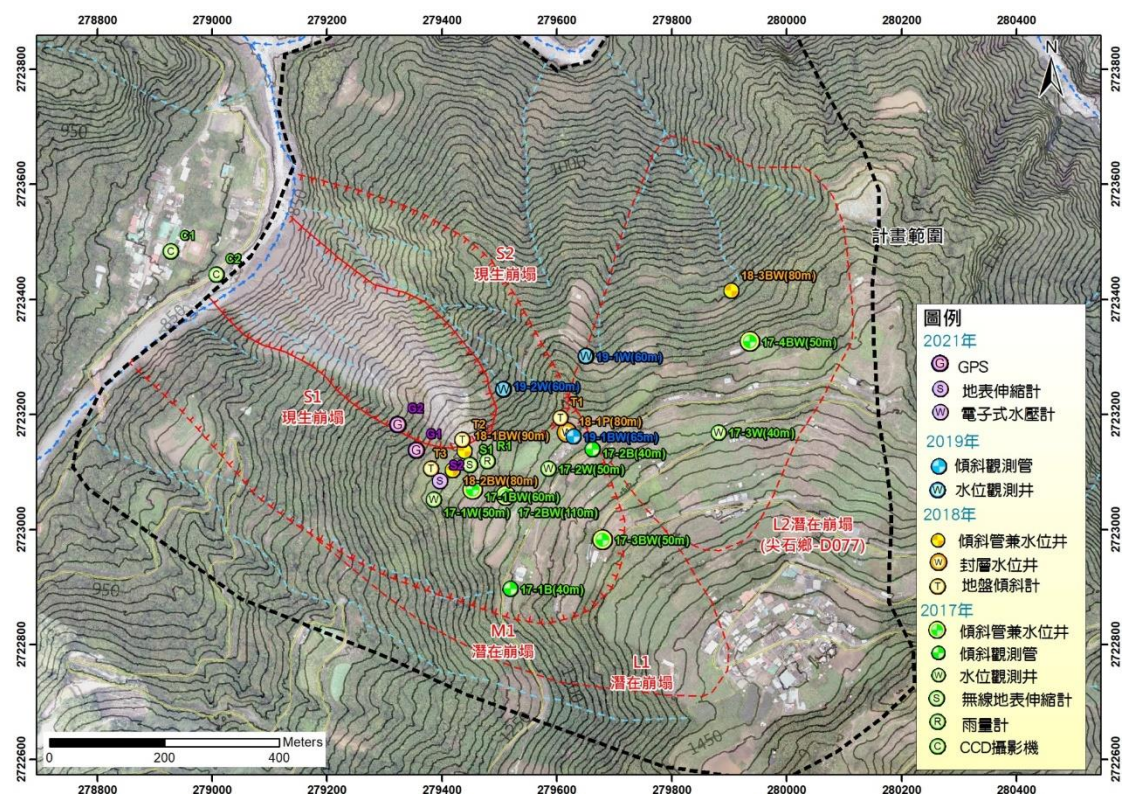


圖 3-23 DS194 崩塌地監測儀器配置分布圖

一、地下水監測

表 3-2 監測儀器清單及警戒值_地下水

設備編號	設備種類	警戒值	單位	活動區塊
18-1P@64m	封層水壓觀測井	-33	m	M1
17-1BW	水位觀測井	-41	m	M1
19-2W	水位觀測井	-33	m	S2

1.封層水壓觀測井

封層水壓觀測井(18-1P@64m)於觀測期間並無超過警戒值，並於2023年6月10日觀測井水位有升高的情況，該段時間也為大雨情況。2023年10月則沒有顯著降雨，封層水壓觀測井也沒有明顯變化。

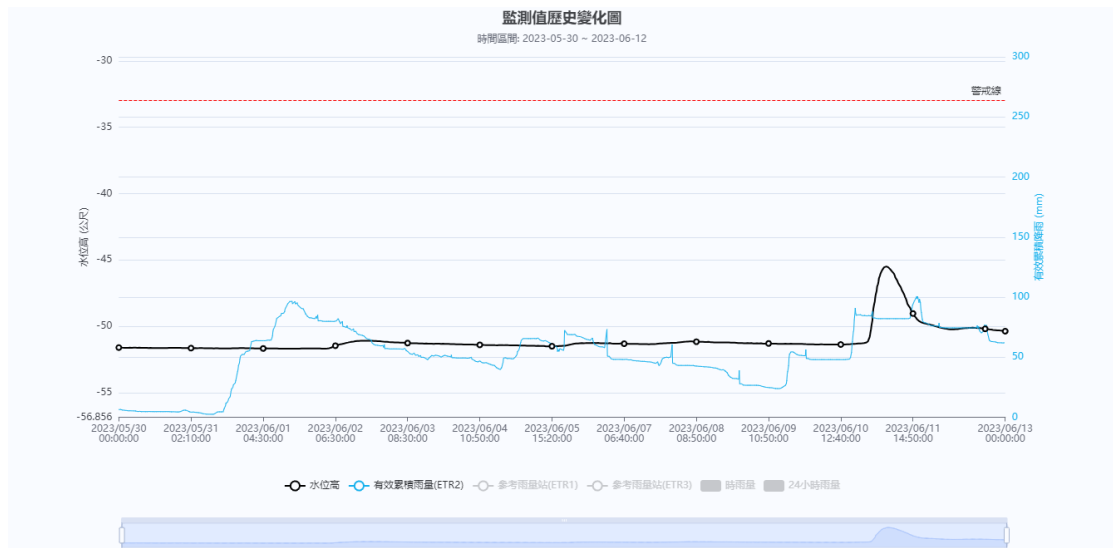


圖 3-24 封層水壓觀測井(18-1P@64m)監測值歷史變化圖
(2023/05/30-6/12)

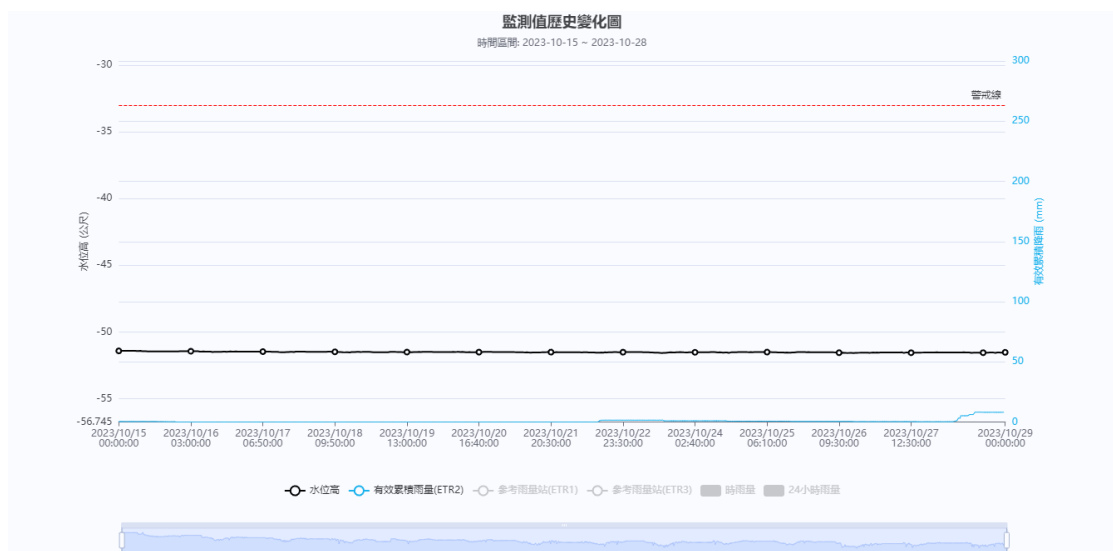


圖 3-25 封層水壓觀測井(18-1P@64m)監測值歷史變化圖
(2023/10/15-28)

2. 水位觀測井

水位觀測井(17-1BW)於觀測期間並無超過警戒值，並於 2023 年 6 月 10 日觀測井水位有升高的情況，該段時間也為大雨情況。2023 年 10 月則沒有顯著降雨，水位觀測井也沒有明顯變化。

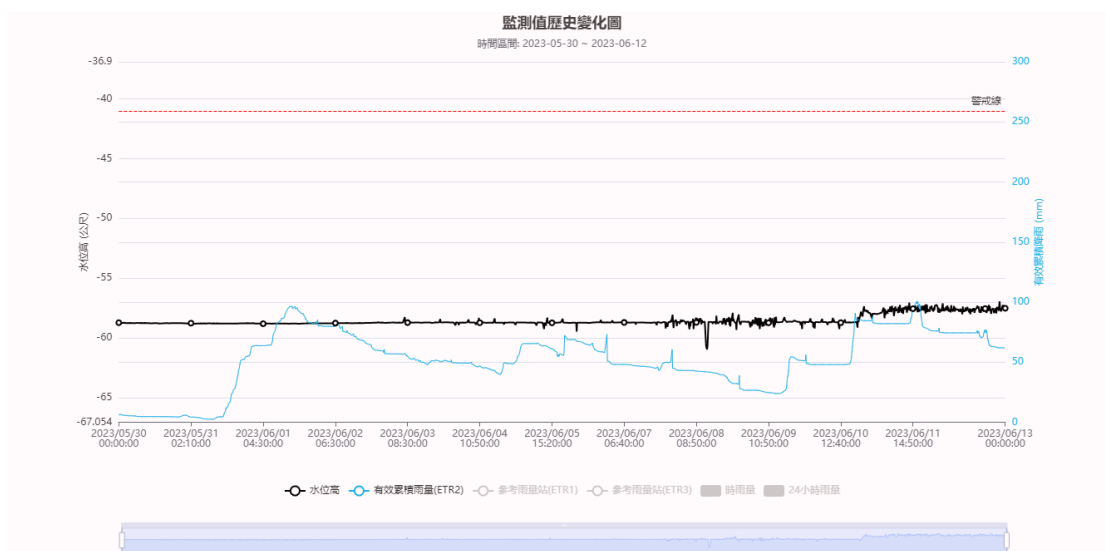


圖 3-26 水位觀測井(17-1BW)監測值歷史變化圖(2023/05/30-6/12)

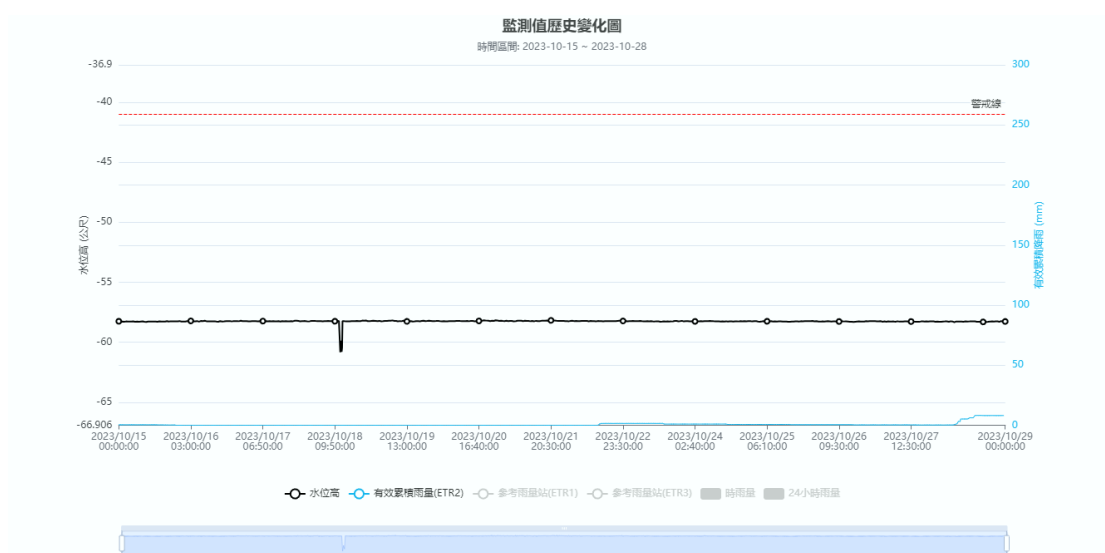


圖 3-27 水位觀測井(17-1BW)監測值歷史變化圖(2023/10/15-28)

水位觀測井(19-2W)於觀測期間並無超過警戒值，並於 2023 年 6 月 10 日觀測井水位有下降的情況，該段時間也為大雨情況。2023 年 10 月則沒有顯著降雨，水位觀測井也沒有明顯變化。

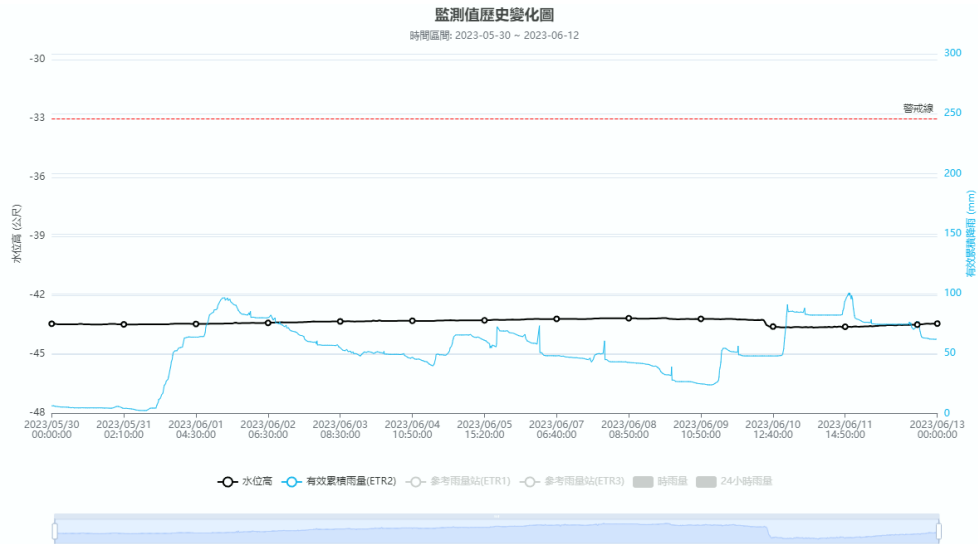


圖 3-28 水位觀測井(19-2W)監測值歷史變化圖(2023/05/30-6/12)

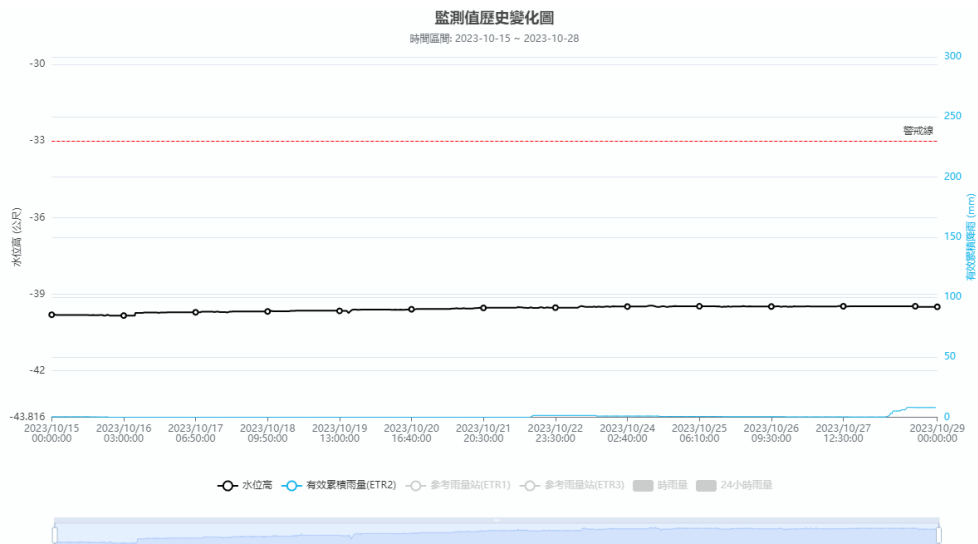


圖 3-29 水位觀測井(19-2W)監測值歷史變化圖(2023/10/15-28)

二、地表、地中監測

地表與地中監測放置地表傾斜計、地表伸縮計、GNSS 地表變位與單頻 GPS 位移設備，如表 3-3。

表 3-3 監測儀器清單及警戒值_地表、地中變位

設備編號	設備種類	1 日警戒值	7 日警戒值	單位	活動區塊
T1	地表傾斜計(雙軸)	500	2500	s	M1
T2	地表傾斜計(雙軸)	500	2500	s	M1
T3	地表傾斜計(雙軸)	500	2500	s	M1
T4	地表傾斜計(雙軸)	500	2500	s	-
JS077-T4	地表傾斜計(雙軸)	3600	25200	s	M1
JS077-T5	地表傾斜計(雙軸)	3600	25200	s	M1
JS077-T6	地表傾斜計(雙軸)	3600	25200	s	M1
S1	地表伸縮計	180	900	mm	M1
S-2	地表伸縮計	180	900	mm	M1
JS077-E	地表伸縮計	50	350	mm	M1
G1	GNSS 地表變位	70	350	mm	-
G2	GNSS 地表變位	70	350	mm	-
GP3	GNSS 地表變位	70	350	mm	-
GP4	GNSS 地表變位	70	350	mm	-
JS077-G4	單頻 GPS 位移	50	350	mm	M1
JS077-G5	單頻 GPS 位移	50	350	mm	M1
JS077-G6	單頻 GPS 位移	50	350	mm	M1

1.地表傾斜計(雙軸)

地表傾斜計(雙軸)(T1)於 2023 年 5 月 31 日在降雨時間有明顯的變化趨勢，後續至 2023 年 6 月 13 日雖然仍有降雨情況，但儀器並無顯著變化。2023 年 10 月 28 日上午 7 點有明顯變化唯 GB-SAR 僅監測至該日上午 6 點，無法進行比較。

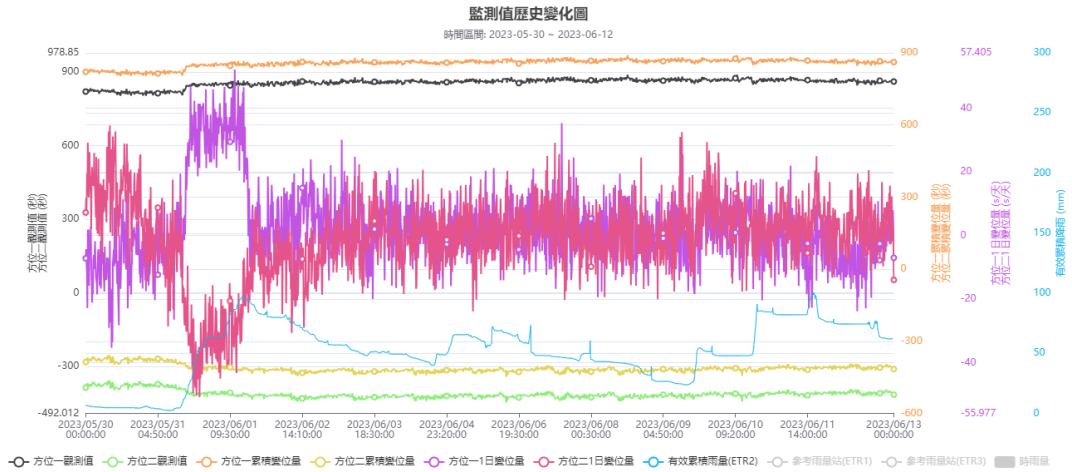


圖 3-30 地表傾斜計(雙軸)(T1)監測值歷史變化圖(2023/05/30-6/12)



圖 3-31 地表傾斜計(雙軸)(T1)監測值歷史變化圖(2023/10/15-28)

地表傾斜計(雙軸)(T2)於 2023 年 6 月在降雨時間無明顯的變化趨勢可能儀器訊號接收有所問題。2023 年 10 月無明顯降雨，儀器於每日變化有來回移動的趨勢。

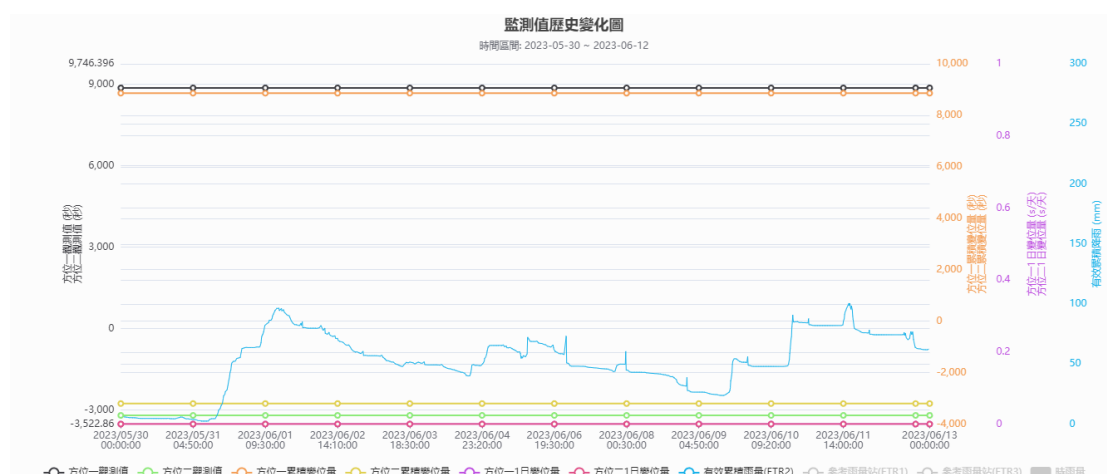


圖 3-32 地表傾斜計(雙軸)(T2)監測值歷史變化圖(2023/05/30-6/12)



圖 3-33 地表傾斜計(雙軸)(T2)監測值歷史變化圖(2023/10/15-28)

地表傾斜計(雙軸)(T3)於 2023 年 6 月在降雨時間有顯著變化情況，趨勢上則無顯著變化。2023 年 10 月 28 上午 7 點有明顯變化唯 GB-SAR 僅監測至該日上午 6 點，無法進行比較。

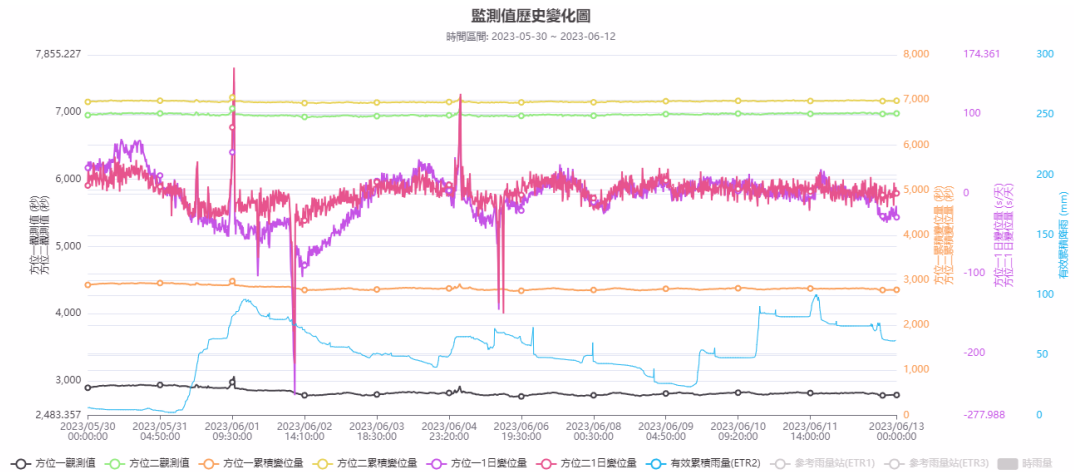


圖 3-34 地表傾斜計(雙軸)(T3)監測值歷史變化圖(2023/05/30-6/12)

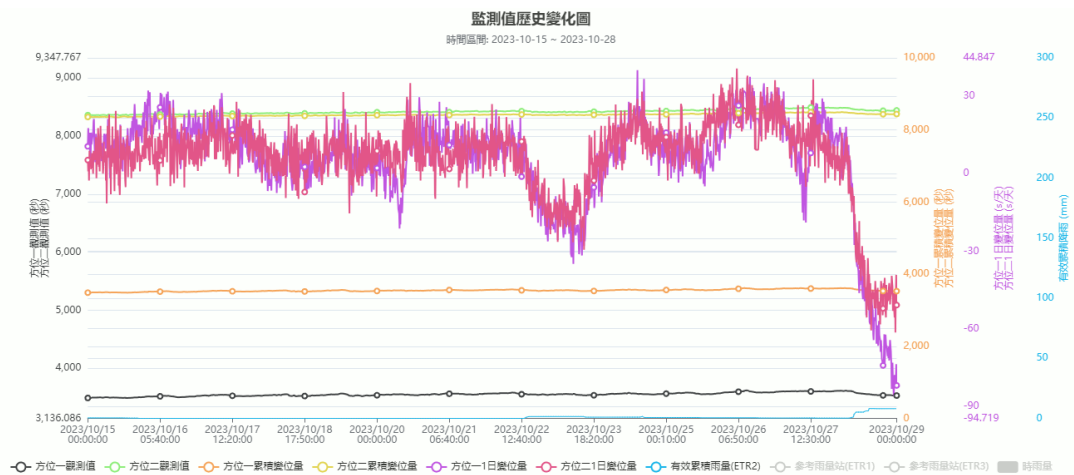


圖 3-35 地表傾斜計(雙軸)(T3)監測值歷史變化圖(2023/10/15-28)

地表傾斜計(雙軸)(T4)於 2023 年 6 月在降雨時間有顯著變化情況。2023 年 10 月有發現每日變化的趨勢，在 10 月 25 日與 26 日則有顯著的變化。

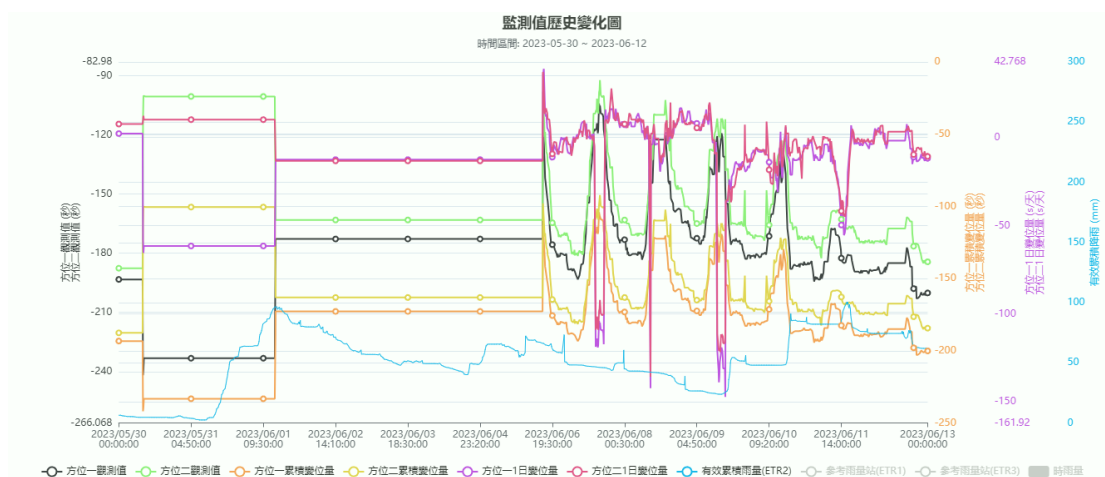


圖 3-36 地表傾斜計(雙軸)(T4)監測值歷史變化圖(2023/05/30-6/12)

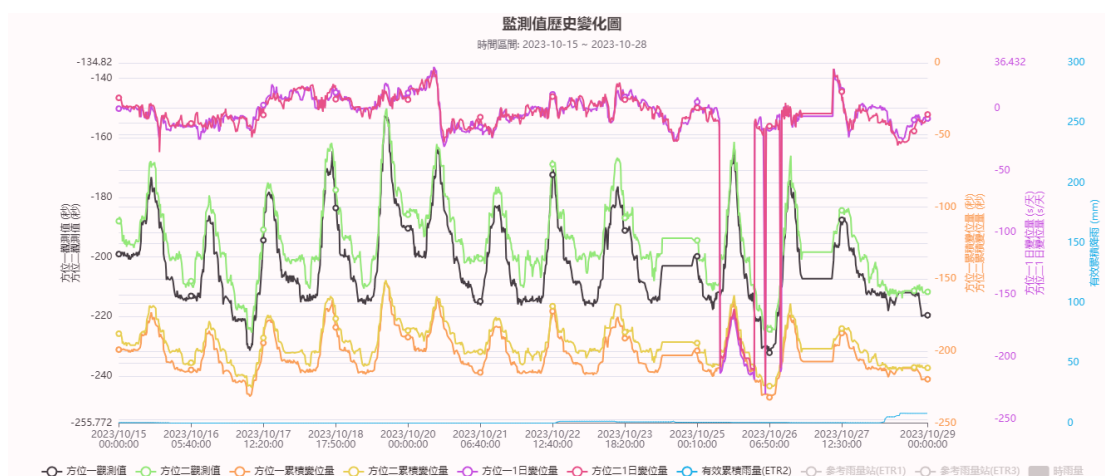


圖 3-37 地表傾斜計(雙軸)(T4)監測值歷史變化圖(2023/10/15-28)

地表傾斜計(雙軸)(JS077-T4)於 2023 年 6 月在降雨時間有顯著變化情況，但累積趨勢並無顯著變化。2023 年 10 月有發現每日變化的趨勢，但累積趨勢並無顯著變化。

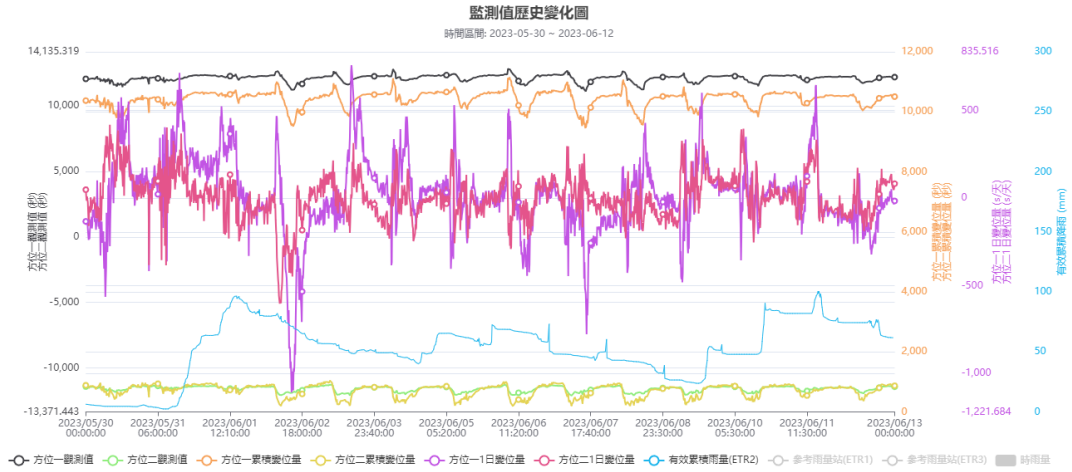


圖 3-38 地表傾斜計(雙軸)(JS077-T4)監測值歷史變化圖
(2023/05/30-6/12)

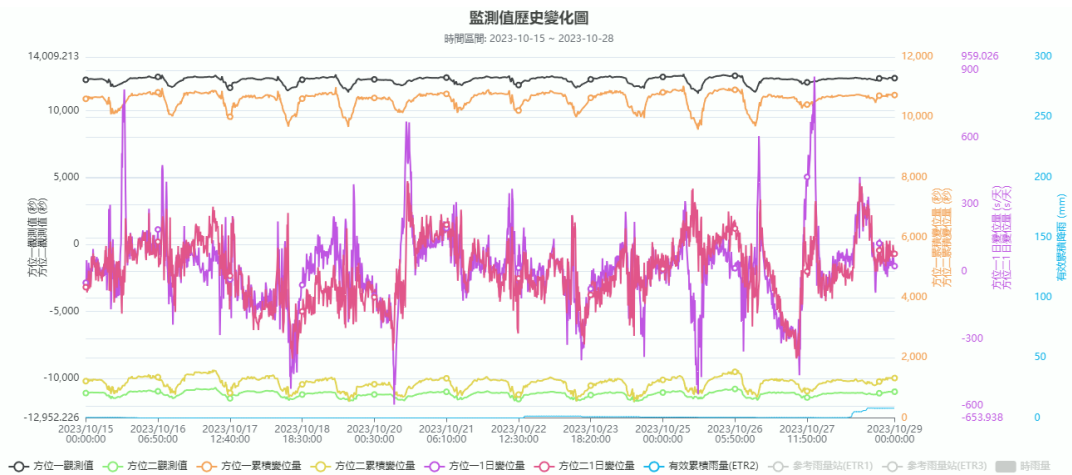


圖 3-39 地表傾斜計(雙軸)(JS077-T4)監測值歷史變化圖
(2023/10/15-28)

地表傾斜計(雙軸)(JS077-T5)於 2023 年 6 月在不同方位每日有來回變化情況，但累積趨勢並無顯著變化。2023 年 10 月在不同方位每日有來回變化情況，但累積趨勢並無顯著變化。

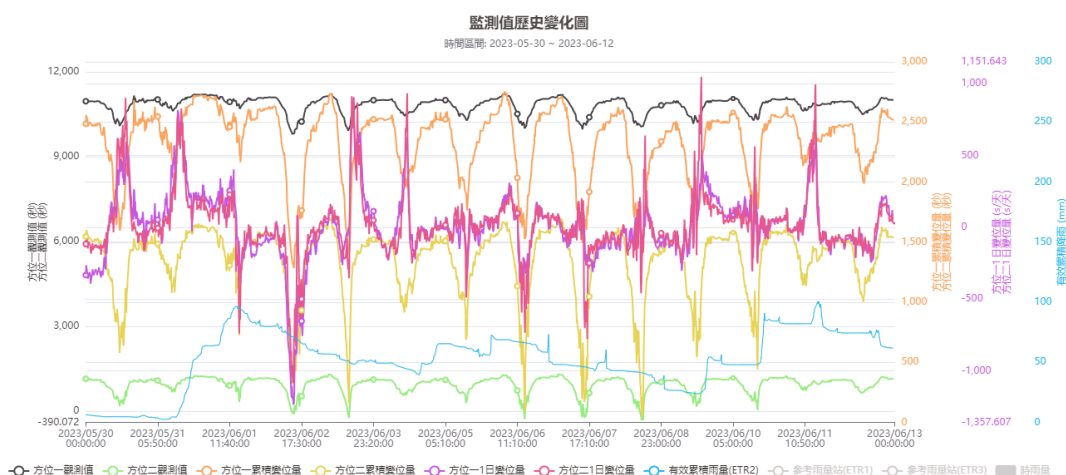


圖 3-40 地表傾斜計(雙軸)(JS077-T5)監測值歷史變化圖
(2023/05/30-6/12)

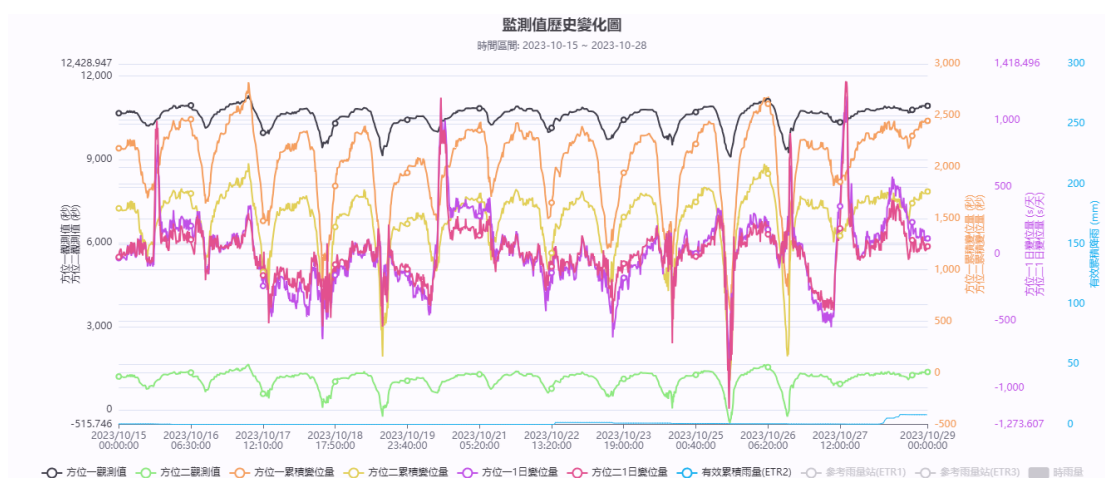


圖 3-41 地表傾斜計(雙軸)(JS077-T5)監測值歷史變化圖
(2023/10/15-28)

地表傾斜計(雙軸)(JS077-T6)於 2023 年 6 月在不同方位每日有來回變化情況，但累積趨勢並無顯著變化。2023 年 10 月在不同方位每日有來回變化情況，但累積趨勢並無顯著變化。

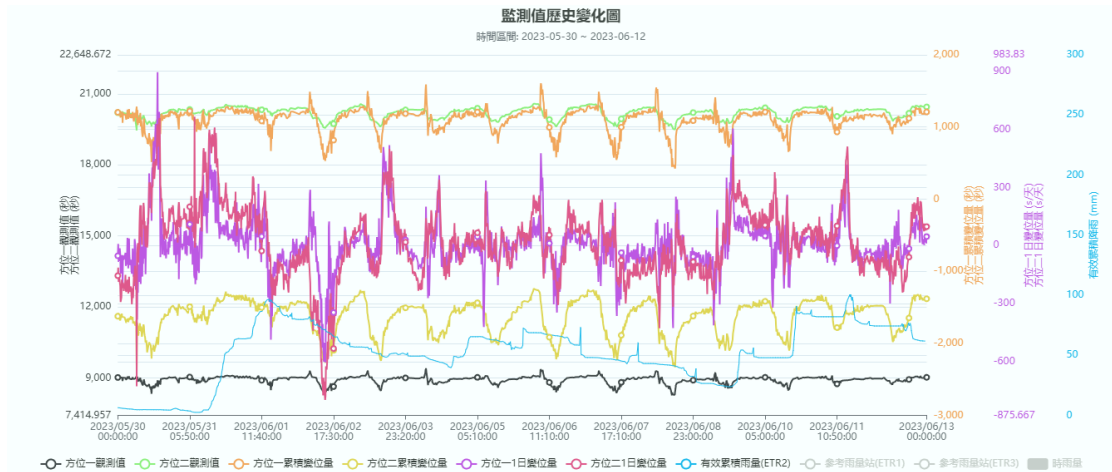


圖 3-42 地表傾斜計(雙軸)(JS077-T6)監測值歷史變化圖
(2023/05/30-6/12)

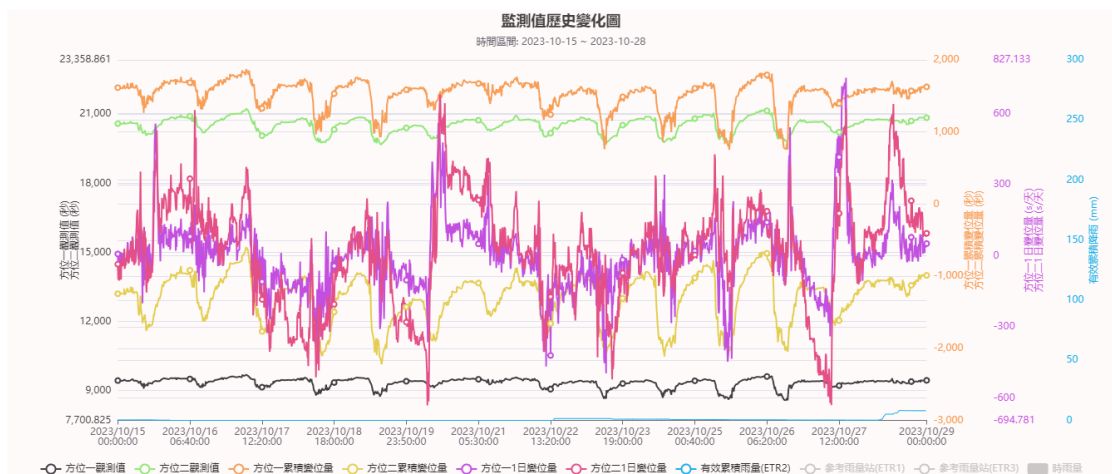


圖 3-43 地表傾斜計(雙軸)(JS077-T6)監測值歷史變化圖
(2023/10/15-28)

2.地表伸縮計

地表伸縮計(S1)於 2023 年 6 月有強降雨發生，但是地表伸縮計累積趨勢並無顯著變化。2023 年 10 月觀測期間則有略微伸張 1 毫米。

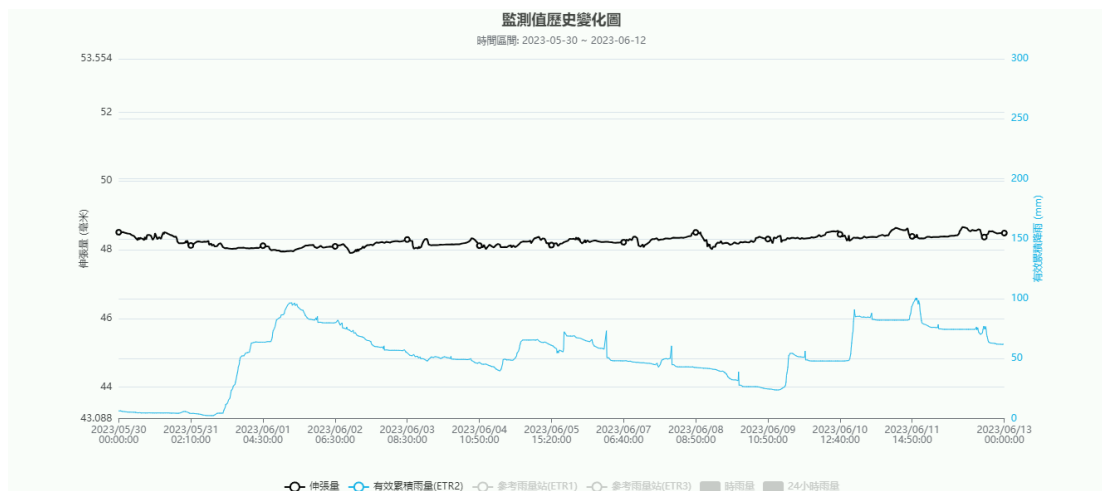


圖 3-44 地表伸縮計(S1)監測值歷史變化圖(2023/05/30-06/12)

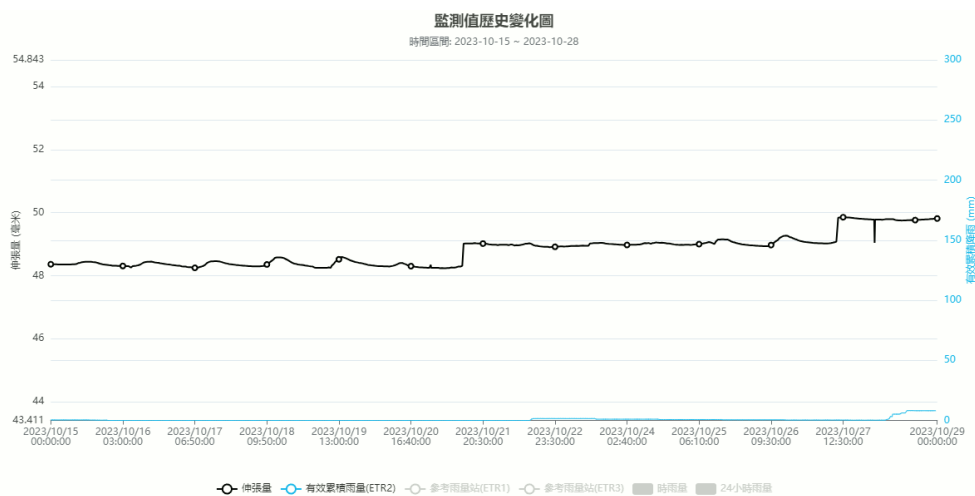


圖 3-45 地表伸縮計(S1)監測值歷史變化圖(2023/10/15-28)

地表伸縮計(S2)於 2023 年 6 月有強降雨發生，地表伸縮計累有來回變化的情況，但趨勢並無顯著變化。2023 年 10 月觀測期間則無變化。

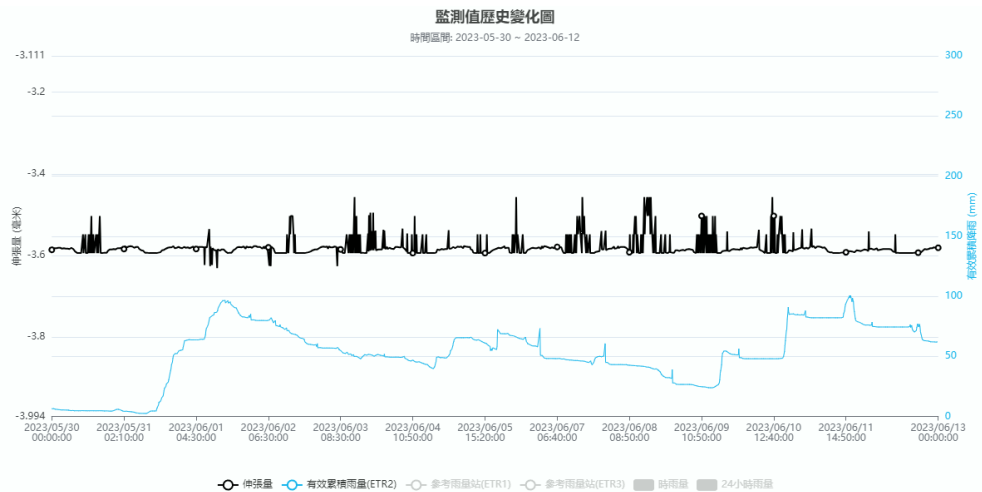


圖 3-46 地表伸縮計(S-2)監測值歷史變化圖(2023/05/30-06/12)

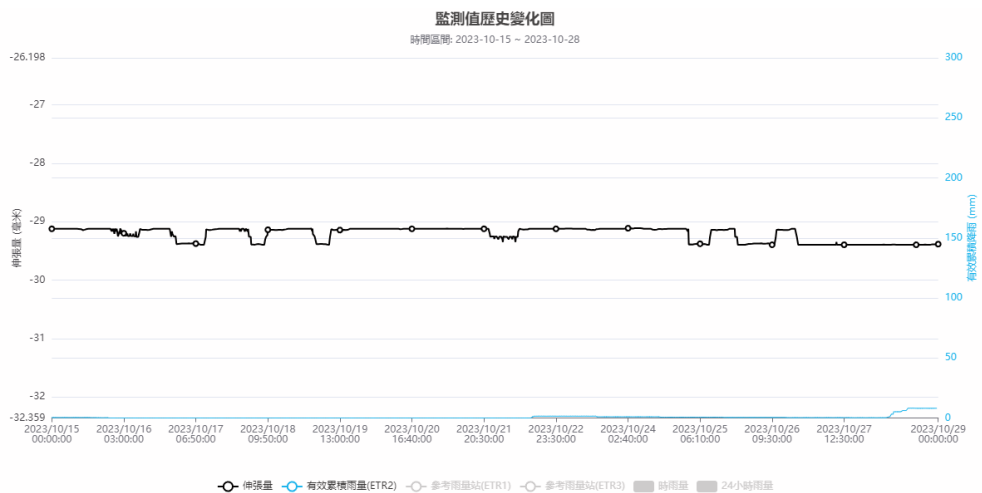


圖 3-47 地表伸縮計(S-2)監測值歷史變化圖(2023/10/15-28)

地表伸縮計(JS077-E)於 2023 年 6 月有強降雨發生，地表伸縮計累有較大來回變化的情況，但趨勢較為縮短。2023 年 10 月觀測期間地表伸縮計累有來回變化的情況，但趨勢並無顯著變化。

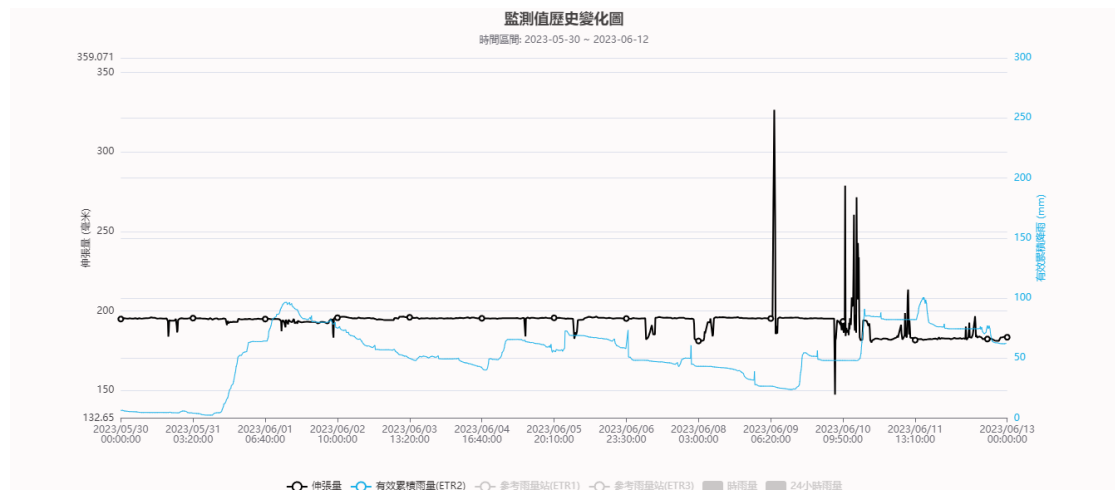


圖 3-48 地表伸縮計(JS077-E)監測值歷史變化圖(2023/05/30-06/12)

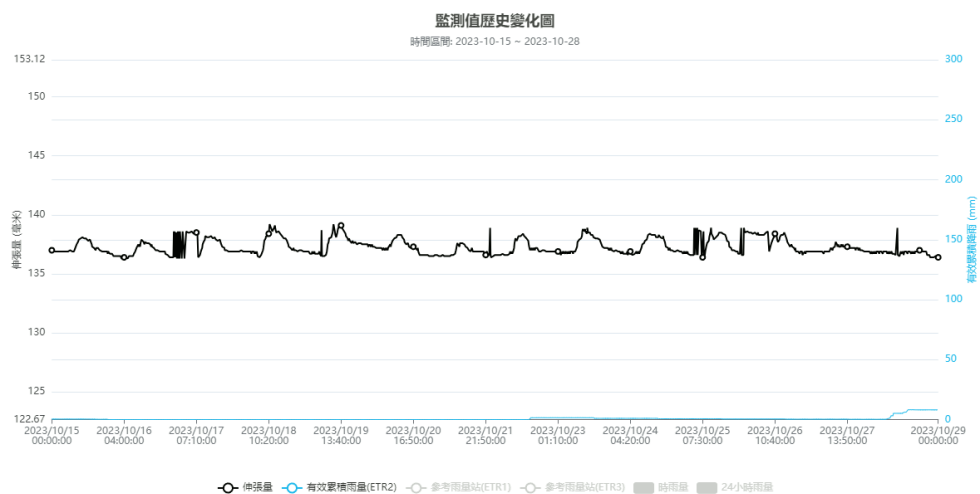


圖 3-49 地表伸縮計(JS077-E)監測值歷史變化圖(2023/10/15-28)

3.GNSS 地表變位

GNSS 地表變位(G1)於 2023 年 6 月有強降雨發生，GNSS 地表變位無超過警戒值。2023 年 10 月觀測期間 GNSS 地表變位有來回變化的情況，於 10 月 20 日至 21 日有靠近警戒值的情況，但無超過警戒值。

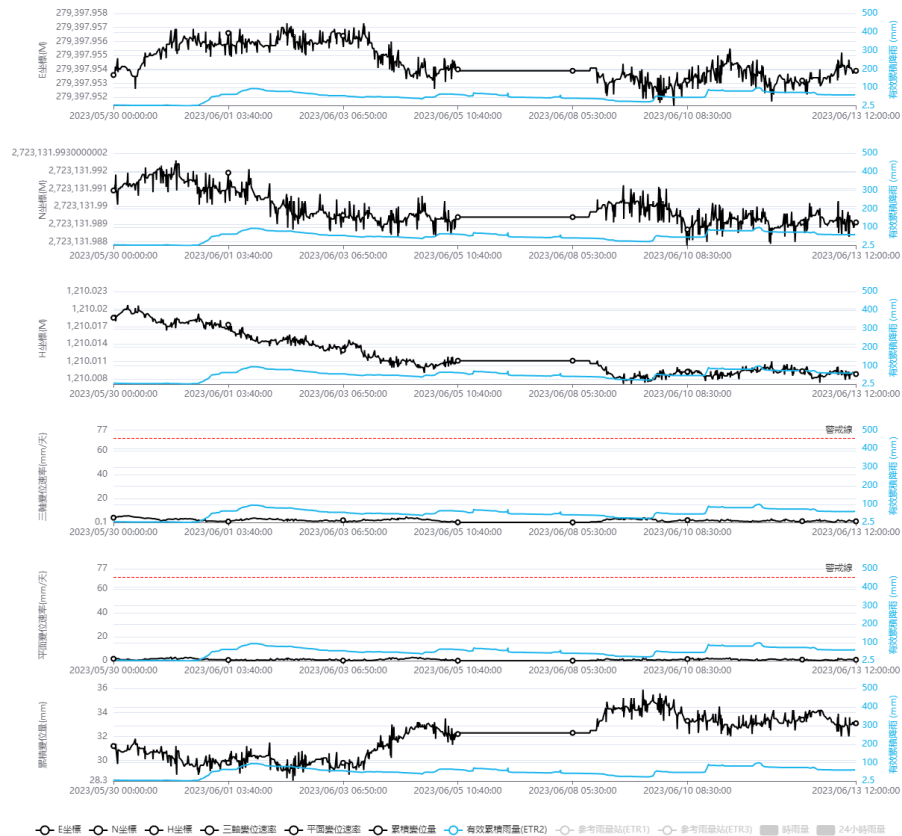


圖 3-50 GNSS 地表變位(G1)監測值歷史變化圖(2023/05/30-06/12)

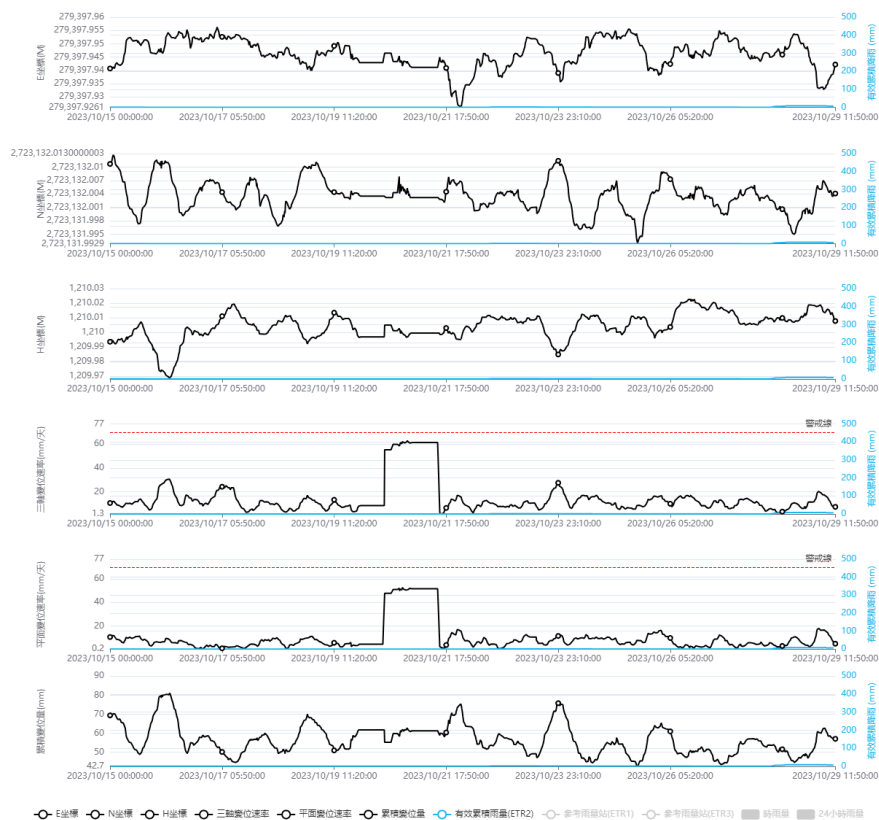


圖 3-51 GNSS 地表變位(G1)監測值歷史變化圖(2023/10/15-28)

GNSS 地表變位(G2)於 2023 年 6 月有強降雨發生，GNSS 地表變位有來回變化的情況，但無超過警戒值。2023 年 10 月觀測期間 GNSS 地表變位有來回變化的情況，於 10 月 20 日至 21 日有超過警戒值的情況。

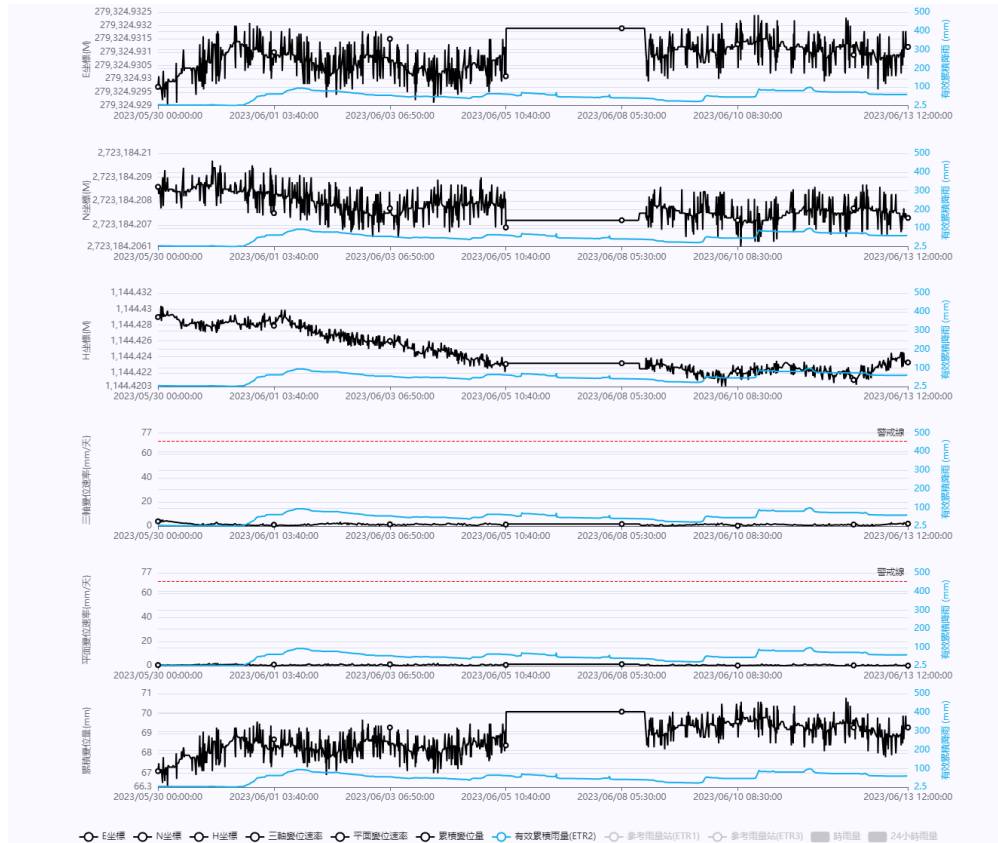


圖 3-52 GNSS 地表變位(G2)監測值歷史變化圖(2023/05/30-06/12)

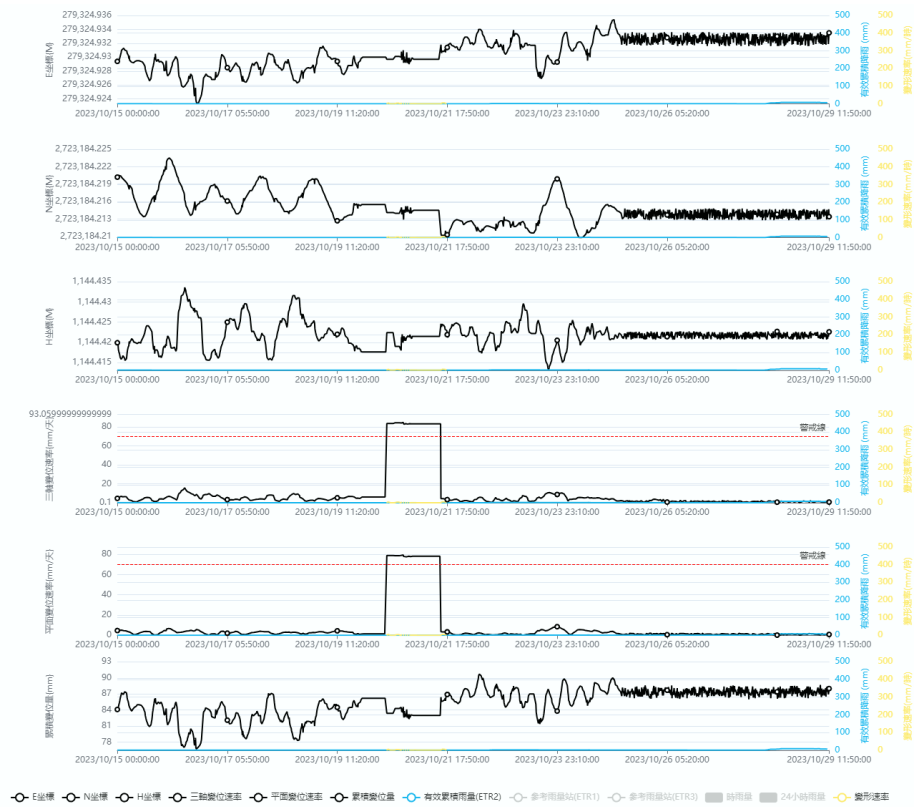


圖 3-53 GNSS 地表變位(G2)監測值歷史變化圖(2023/10/15-28)

GNSS 地表變位(GP3)於 2023 年 6 月有強降雨發生，GNSS 地表變位有來回變化的情況，但無超過警戒值，但是累積圖有顯著增加。2023 年 10 月觀測期間 GNSS 地表變位有來回變化的情況，於 10 月 20 日至 21 日有接近警戒值的情況。

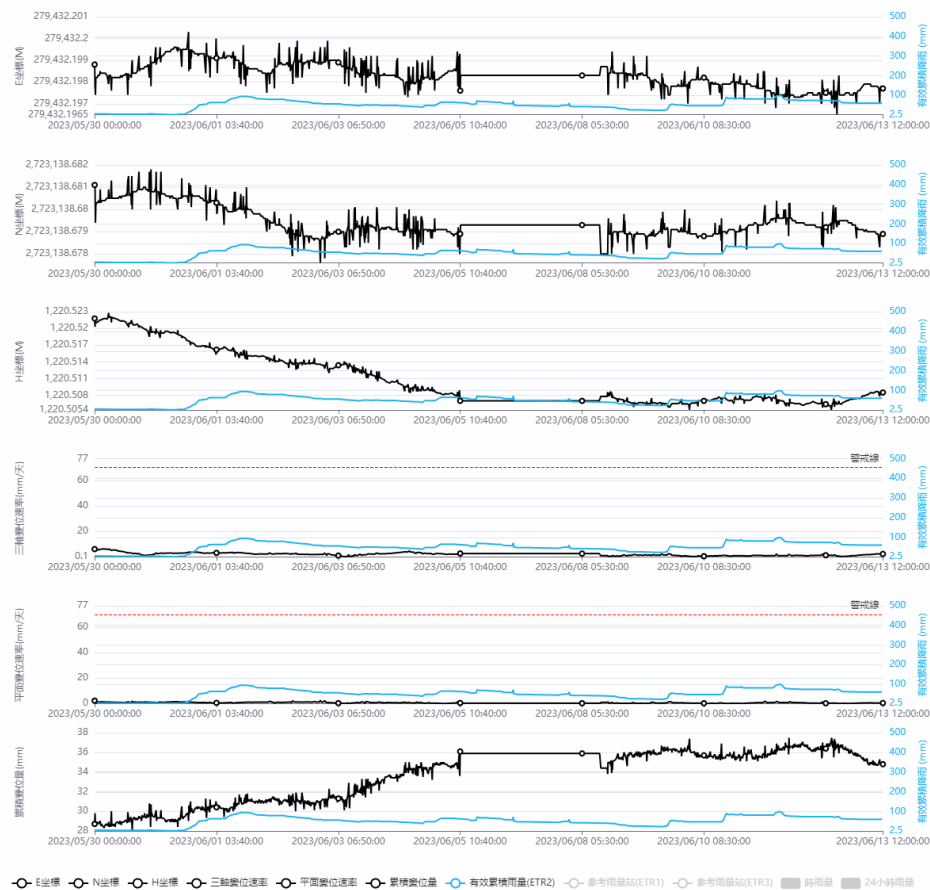


圖 3-54 GNSS 地表變位(GP3)監測值歷史變化圖(2023/05/30-06/12)

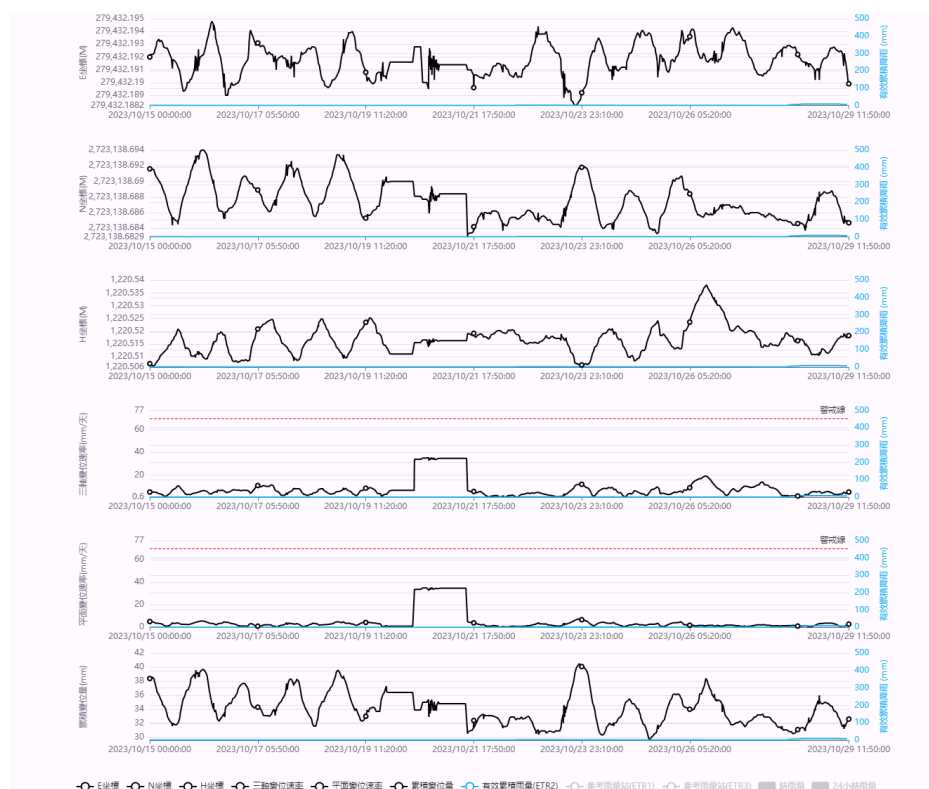


圖 3-55 GNSS 地表變位(GP3)監測值歷史變化圖(2023/10/15-28)

GNSS 地表變位(GP4)於 2023 年 6 月有強降雨發生，GNSS 地表變位有來回變化的情況，但無超過警戒值，但是累積圖有顯著增加。2023 年 10 月觀測期間 GNSS 地表變位有來回變化的情況，於 10 月 20 日至 21 日接近警戒值的情況。

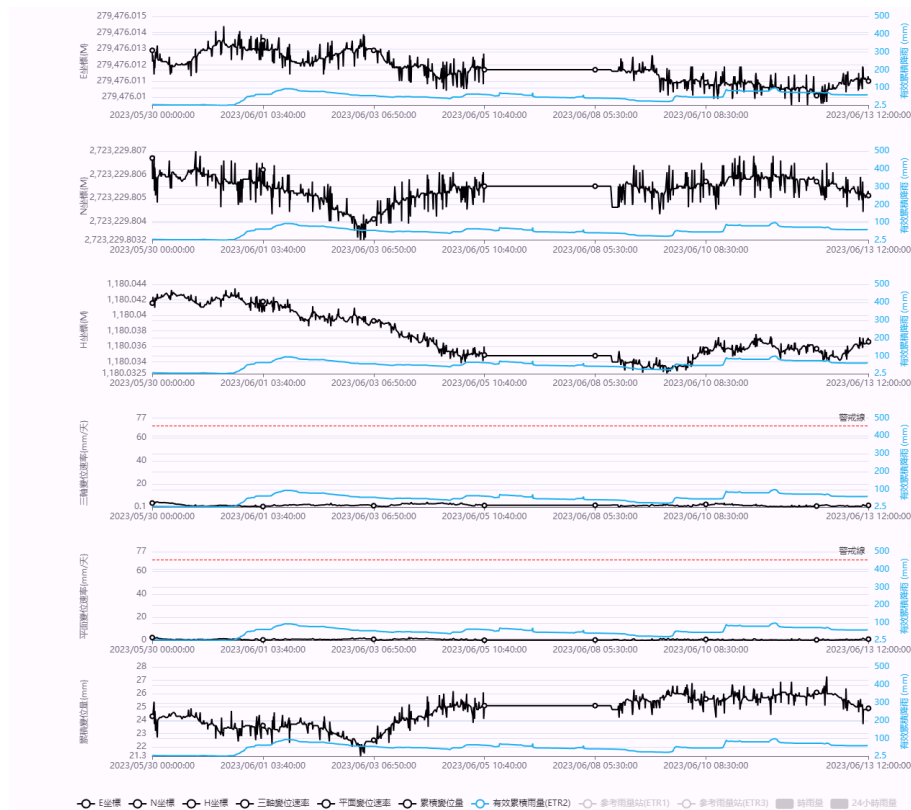


圖 3-56 GNSS 地表變位(GP4)監測值歷史變化圖(2023/05/30-06/12)

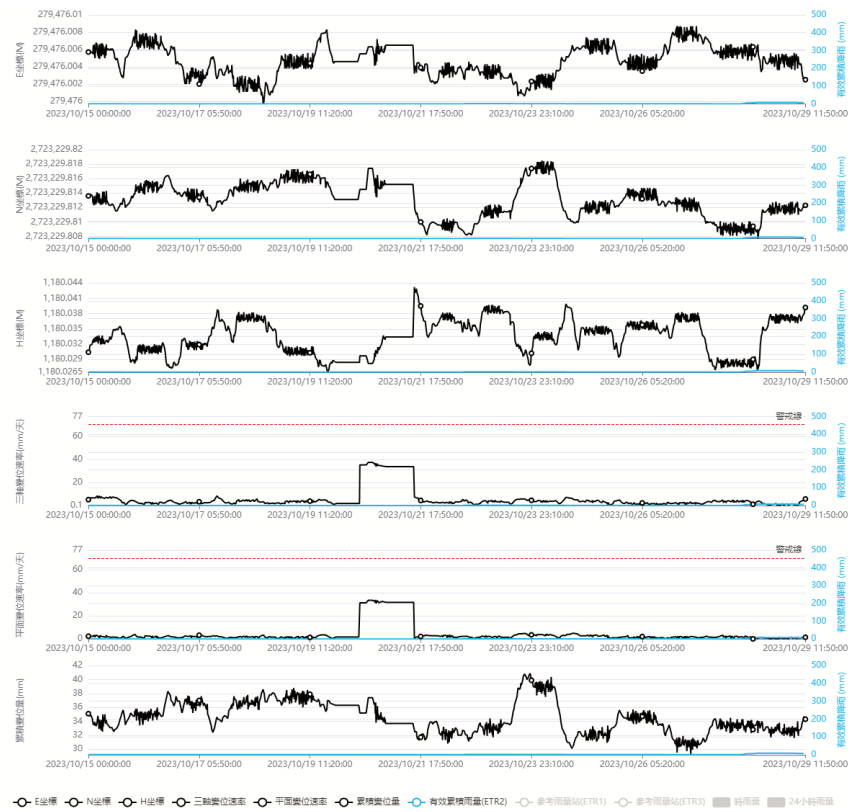


圖 3-57 GNSS 地表變位(GP4)監測值歷史變化圖(2023/10/15-28)

4.單頻 GPS 位移

單頻 GPS 位移(JS077-G4)於 2023 年 6 月有強降雨發生，單頻 GPS 位移變位有來回變化的情況，但無超過警戒值，但是累積圖無顯著增加。2023 年 10 月觀測期間 GNSS 地表變位有來回變化的情況，累積圖無顯著增加。



圖 3-58 單頻 GPS 位移(JS077-G4)監測值歷史變化圖(2023/05/30-06/12)

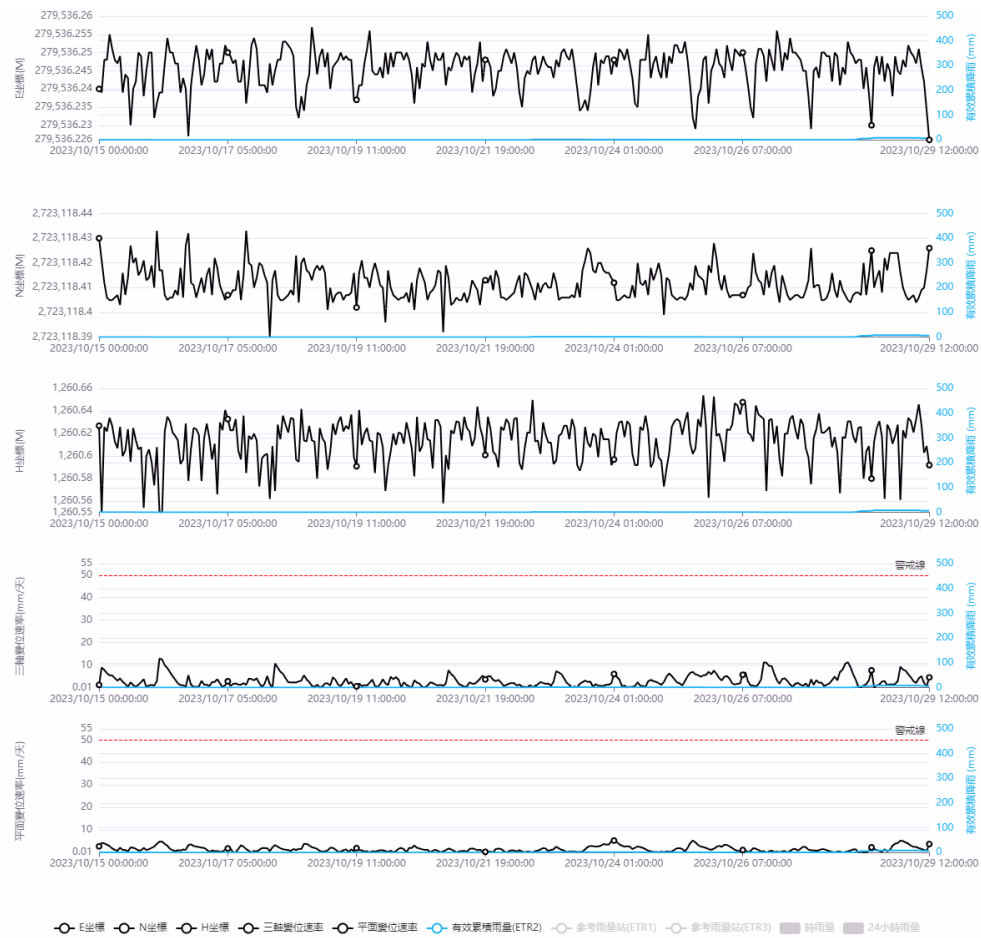


圖 3-59 單頻 GPS 位移(JS077-G4)監測值歷史變化圖(2023/10/15-28)

單頻 GPS 位移(JS077-G5)於 2023 年 6 月有強降雨發生，單頻 GPS 位移變位有來回變化的情況，但無超過警戒值，累積圖無顯著增加。2023 年 10 月觀測期間 GNSS 地表變位有來回變化的情況，累積圖無顯著增加。

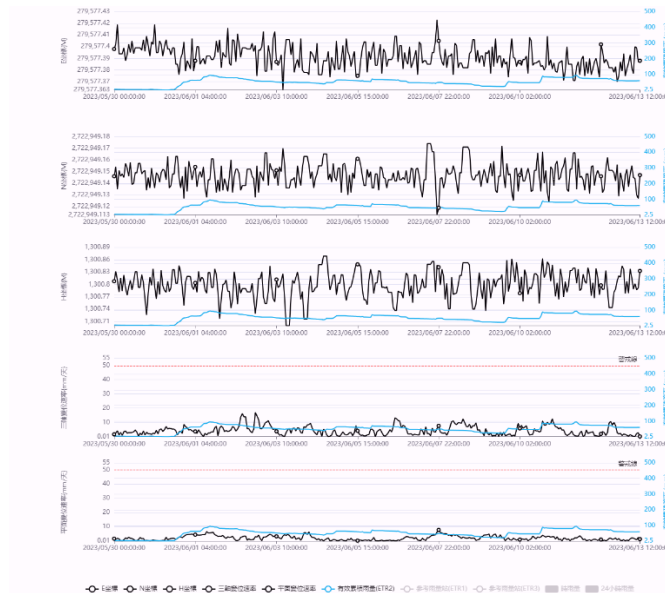


圖 3-60 單頻 GPS 位移(JS077-G5)監測值歷史變化圖(2023/05/30-06/12)

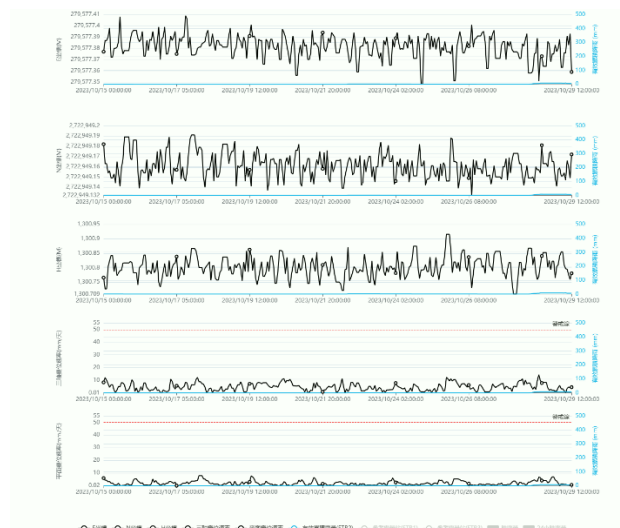


圖 3-61 單頻 GPS 位移(JS077-G5)監測值歷史變化圖(2023/10/15-28)

單頻 GPS 位移(JS077-G6)於 2023 年 6 月有強降雨發生，單頻 GPS 位移變位有來回變化的情況，但無超過警戒值，累積圖無顯著增加。2023 年 10 月觀測期間 GNSS 地表變位有來回變化的情況，累積圖無顯著增加。

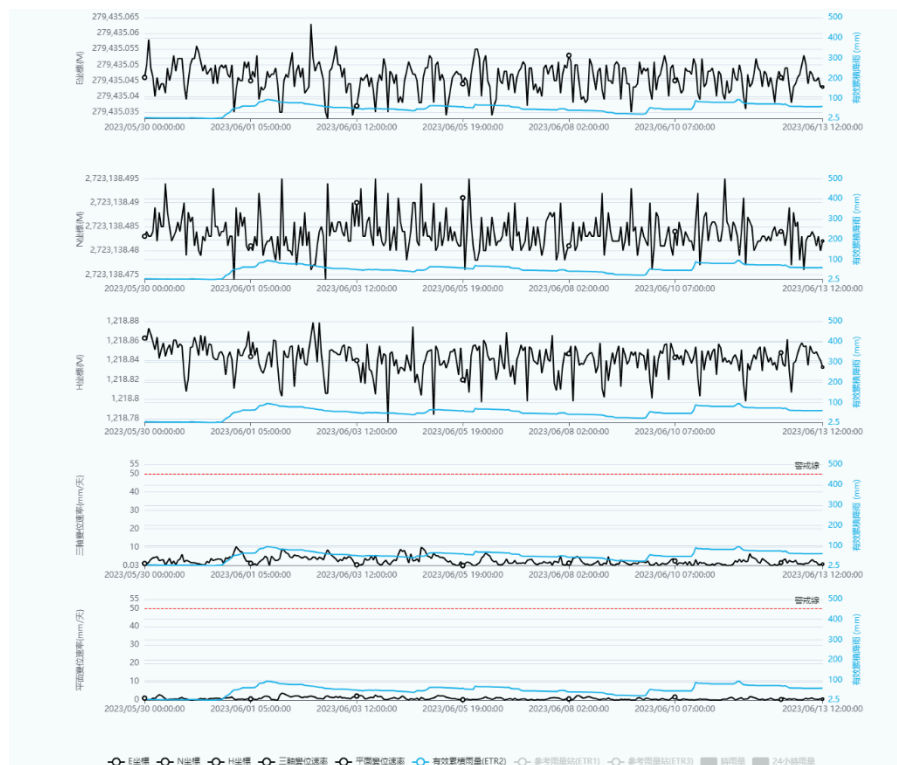


圖 3-62 單頻 GPS 位移(JS077-G6)監測值歷史變化圖(2023/05/30-06/12)



圖 3-63 單頻 GPS 位移(JS077-G6)監測值歷史變化圖(2023/10/15-28)

三、現場影像攝影機監測



圖 3-64 現場監測攝影機角度 1 (SL_CCD1)



圖 3-65 現場監測攝影機角度 2 (SL_CCD2)



圖 3-66 現場監測攝影機角度 3 (SL_CCD3)

第四章 GB-SAR 觀測成果

第一節 DS194 崩塌地大雨期間 GB-SAR 特徵(112 年)

蒐集大崩系統秀巒測站之降雨資料，分成 9 個雨場，如圖 4-1，將針對各雨場的 GB-SAR 資料進行說明。實際降雨 GB-SAR 觀測情況如圖 4-2，於 2023 年 6 月 10 日下午有發生大雨的情況，如圖 4-2 右，於營地產生積水情形；團隊於當地有接收到累積雨量警訊通知，如圖 4-3。

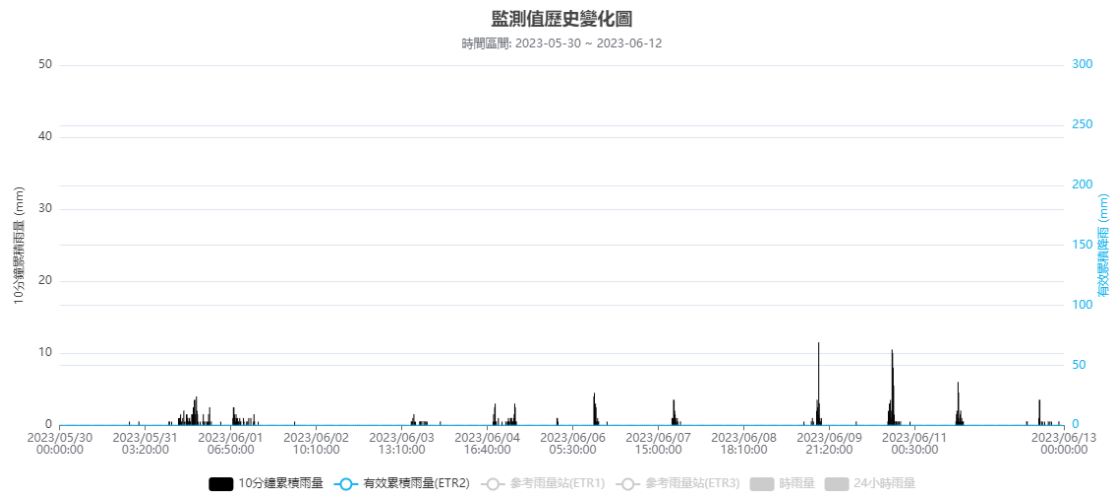


圖 4-1 秀巒雨量站 10 分鐘累計降水量(2023/5/30 - 2023/6/12)



圖 4-2 秀巒崩塌地 GB-SAR 於降雨時間觀測現況圖



圖 4-3 團隊接收累積雨量警訊通知

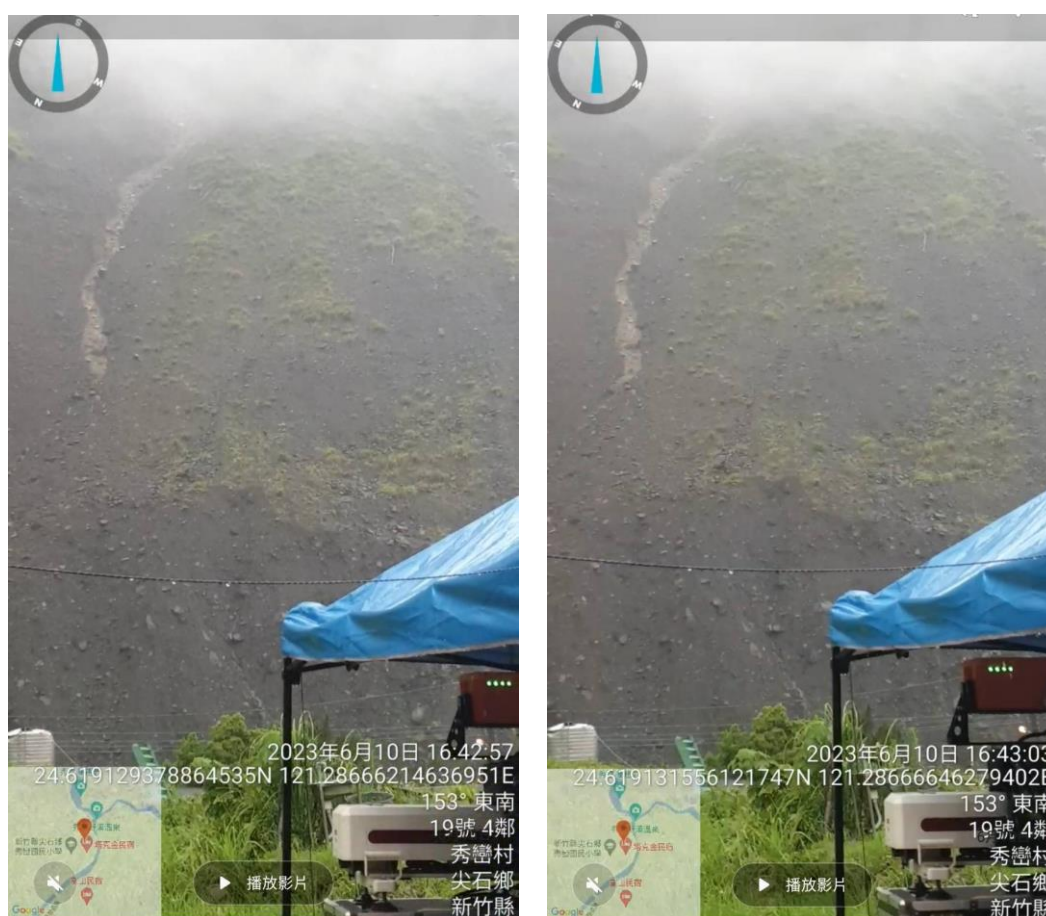


圖 4-4 蝕溝土石流流動情形



圖 4-5 蝕溝土石流流動情形(續)

表 4-1 降雨時間 GB-SAR 觀測一覽表

時間	累計降雨	累積時間
2023/05/31 21:30 – 06/01 01:55 (Group_5)	9 mm	4 小時
2023/06/01 11:56 – 06/01 18:50 (Group_10)	6 mm	7 小時
2023/06/03 15:19 – 06/03 20:59 (Group_16)	8.5mm	6 小時
2023/06/04 22:04 – 06/05 05:55 (Group_20)	17 mm	8 小時
2023/06/06 15:06 – 06/06 20:56 (Group_25)	18.5 mm	6 小時
2023/06/07 15:06 – 06/07 20:56 (Group_28)	16 mm	6 小時
2023/06/09 18:31 – 06/09 21:01 (Group_37)	27 mm	3 小時
2023/06/10 15:03 – 06/10 21:01 (Group_40)	55 mm	6 小時
2023/06/11 07:04 – 06/11 15:24 (Group_42)	23.5 mm	8 小時

本次 GB-SAR 監測時間於 5 月 30 日下午 4 時零 57 秒開始，至 6 月 12 日下午 12 時 27 分 02 秒結束，總時長為 12 天 20 小時 26 分 5 秒；不包括因故損毀的 2 幅影像，總共掃描 422 幅影像；綜合前述時

間與掃描影像張數，換算平均約 44 分鐘掃描一幅影像。原則上 GB-SAR 被設定每隔 40 分鐘進行一次掃描，實際監測頻率則會因降雨事件(改為 20 分鐘掃描 1 次)、或其他突發狀況(儀器修整、秀巒部落停電)而有所調整。針對裸露地上坡趾進行微變動偵測，黃色標示為上邊坡，紅色與橘色為坡趾，藍色與紫色為蝕溝周圍的地區，分布如圖 4-6。

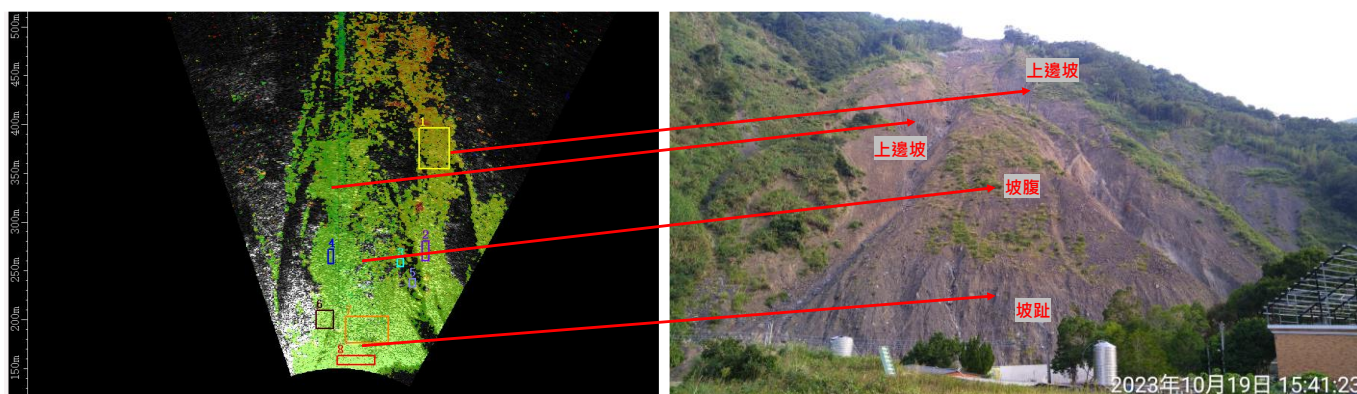
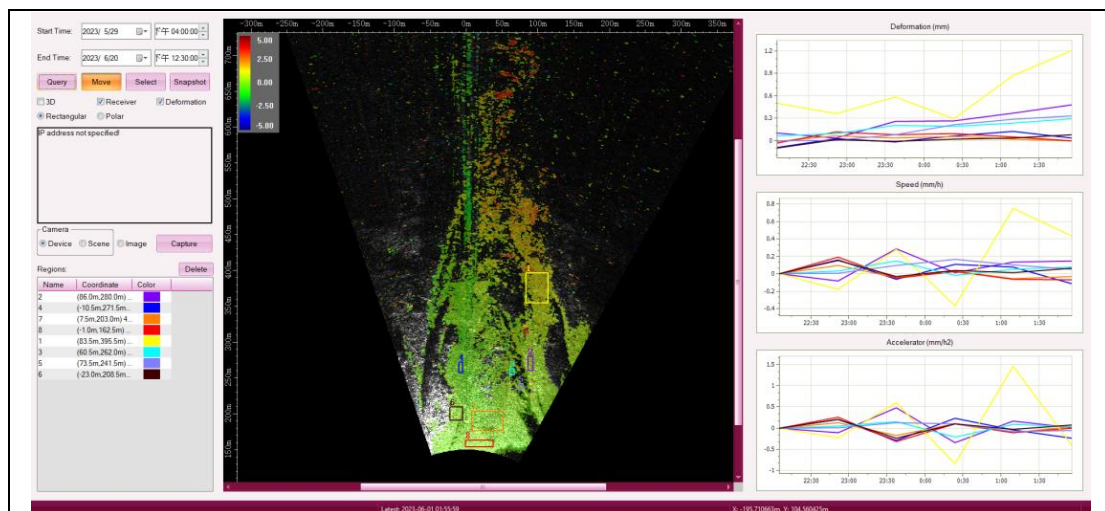


圖 4-6 坡腹與坡趾與雷達圖位置對照

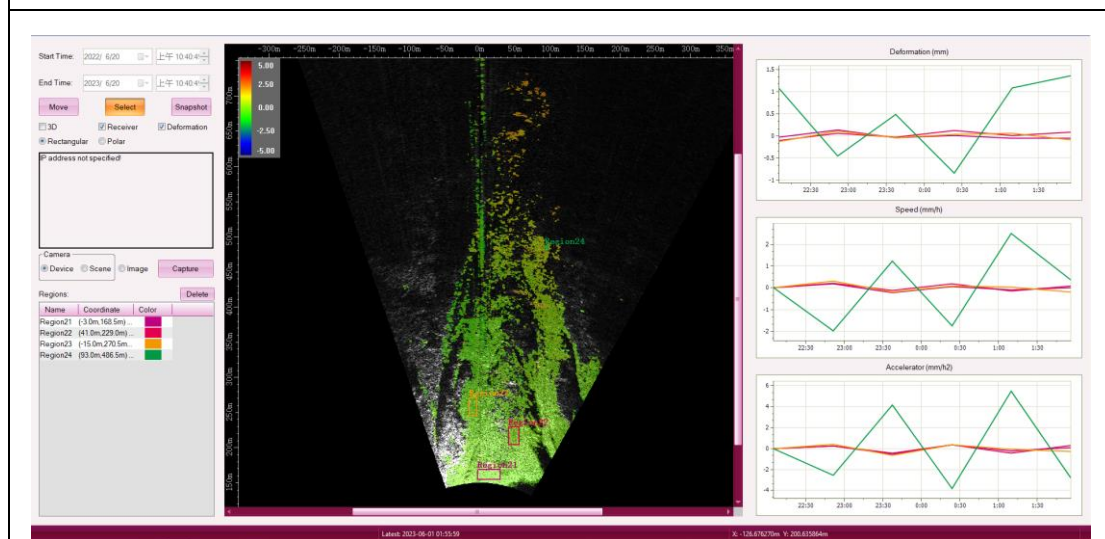
一、DS194 崩塌地大雨期間微變動特徵

1. 2023/05/31 21:30 – 06/01 01:55 (Group_5)

觀測 4 小時，共降雨 9 mm，微幅變動在上邊坡累積變動為 1.2 mm，坡腹累積變動為 0.3 mm，坡趾則累積變動較小；即時變動檢視兩幅間變化，於上邊坡有來回趨勢，但是遠離的次數較多，故累積為遠離情況；坡趾則來回變化較小，累積變動也則較小。



累計變動



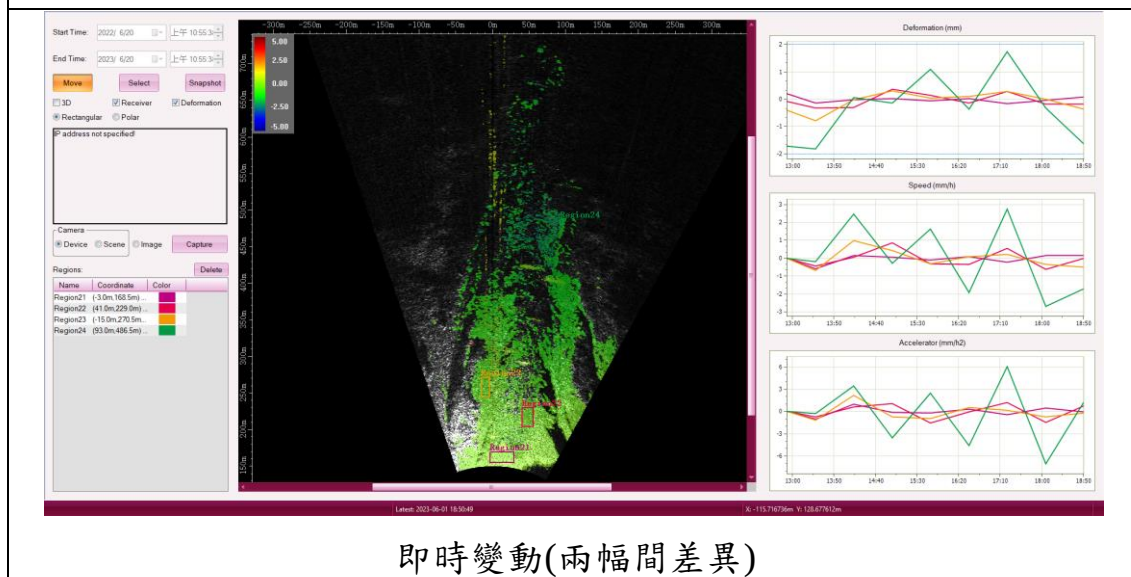
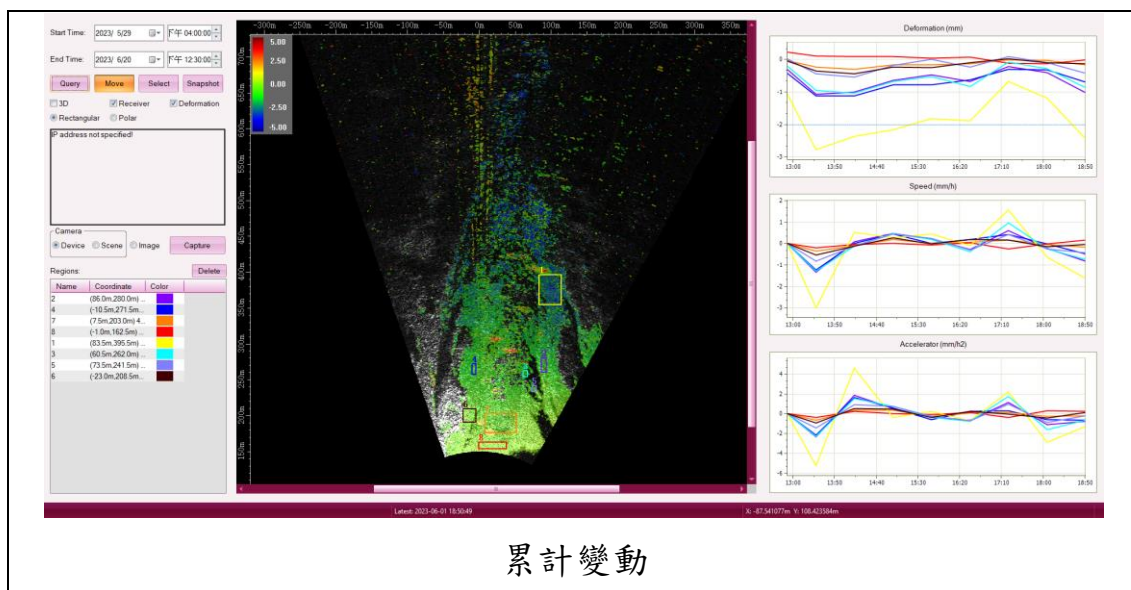
即時變動(兩幅間差異)

(Group_5) 2023_05_31_21_30_21 - 2023_06_01_01_55_59 (共 7 筆)

圖 4-7 2023/05/31 21:30–06/01 01:55 (Group_5) 變化圖

2. 2023/06/01 11:56 – 06/01 18:50 (Group_10)

觀測 7 小時，共降雨 6 mm，微幅變動在上邊坡累積變動為 -3 mm，坡腹累積變動為 -1 mm，坡趾則累積變動較小；即時變動檢視兩幅間變化，於上邊坡有來回趨勢，但是靠近的次數較多，故累積為靠近情況；坡趾則來回變化較小，累積變動也則較小。



(Group_10) 2023_06_01_11_56_25 - 2023_06_01_18_50_49 (共 10 筆)

圖 4-8 2023/06/01 11:56–06/01 18:50 (Group_10)變化圖

3. 2023/06/03 15:19 – 06/03 20:59 (Group_16)

觀測 6 小時，共降雨 8.5 mm，微幅變動在上邊坡累積變動接近零，坡腹累積變動接近零，坡趾則累積變動接近零；即時變動檢視兩幅間變化，於上邊坡有來回趨勢，但是靠近的次數較多，故累積為持平情況；坡趾則來回變化較小，累積變動也則較小。

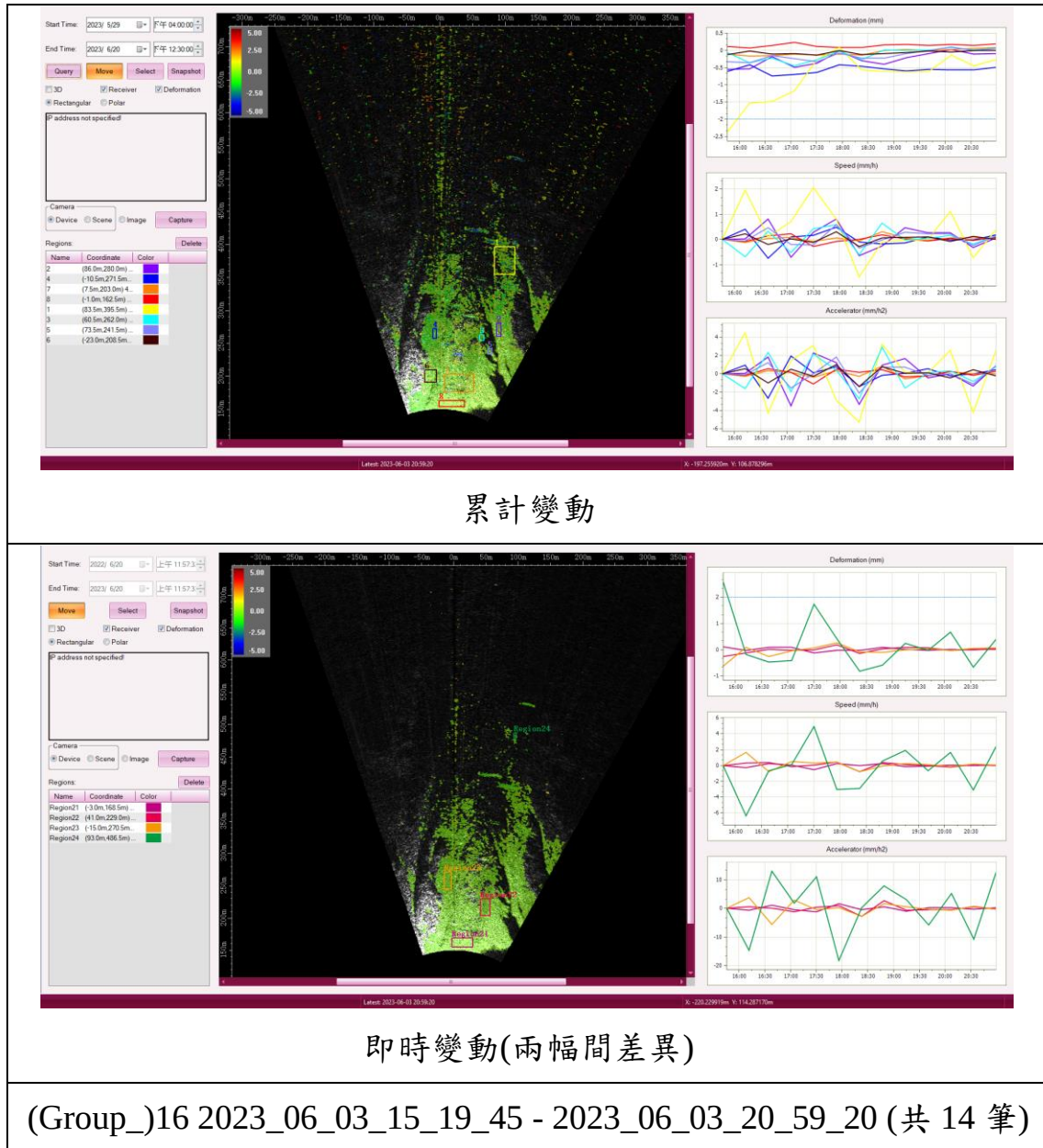


圖 4-9 2023/06/03 15:19–06/03 20:59 (Group_16)變化圖

4. 2023/06/04 22:04 – 06/05 05:55 (Group_20)

觀測 8 小時，共降雨 17 mm，微幅變動在上邊坡累積變動為 1.5 mm，坡腹累積變動為 1 mm，坡趾則累積變動較小；即時變動檢視兩幅間變化，於上邊坡有來回趨勢，但是遠離的次數較多，故累積為遠離情況；坡趾則來回變化較小，累積變動也則較小。

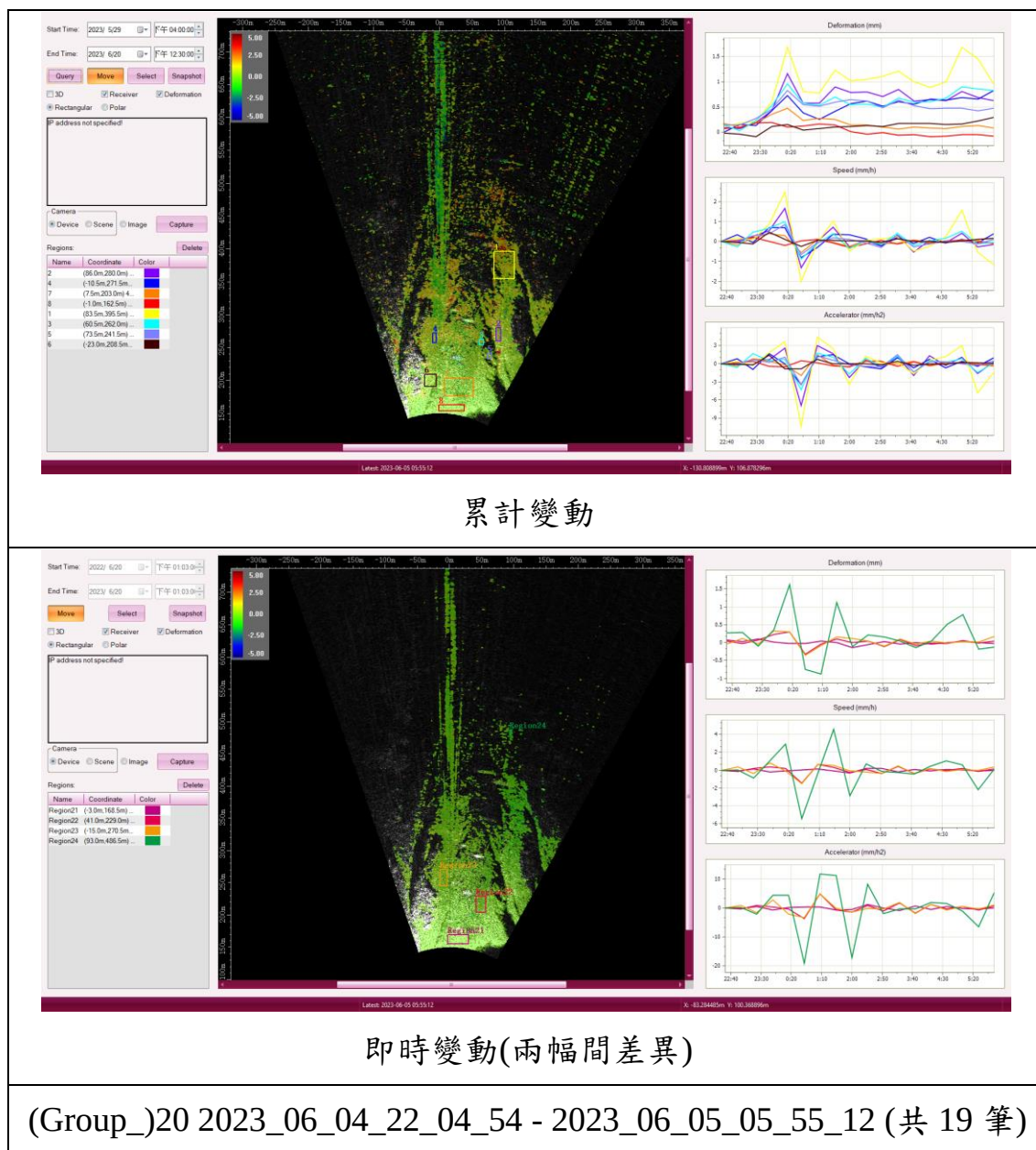
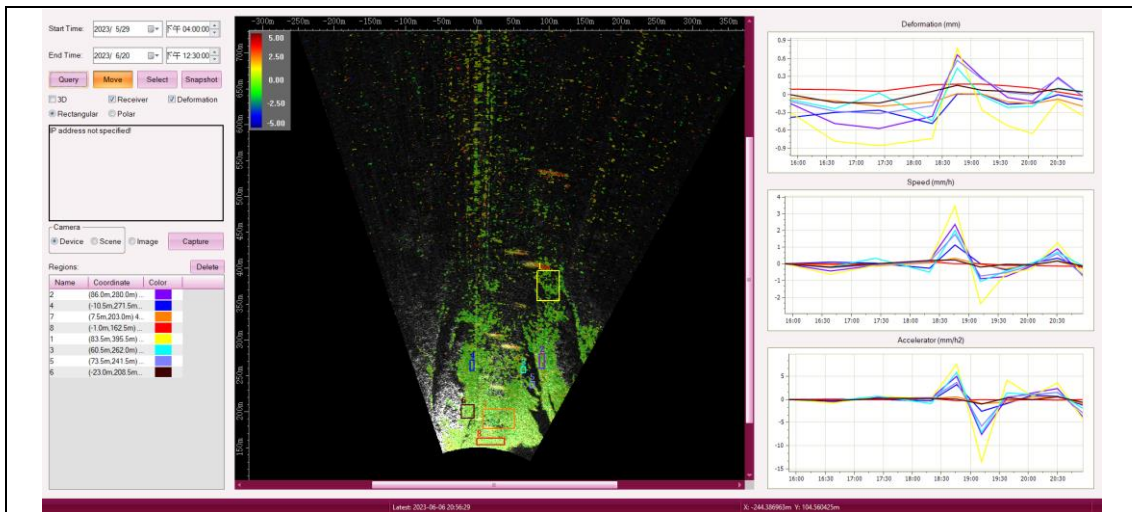


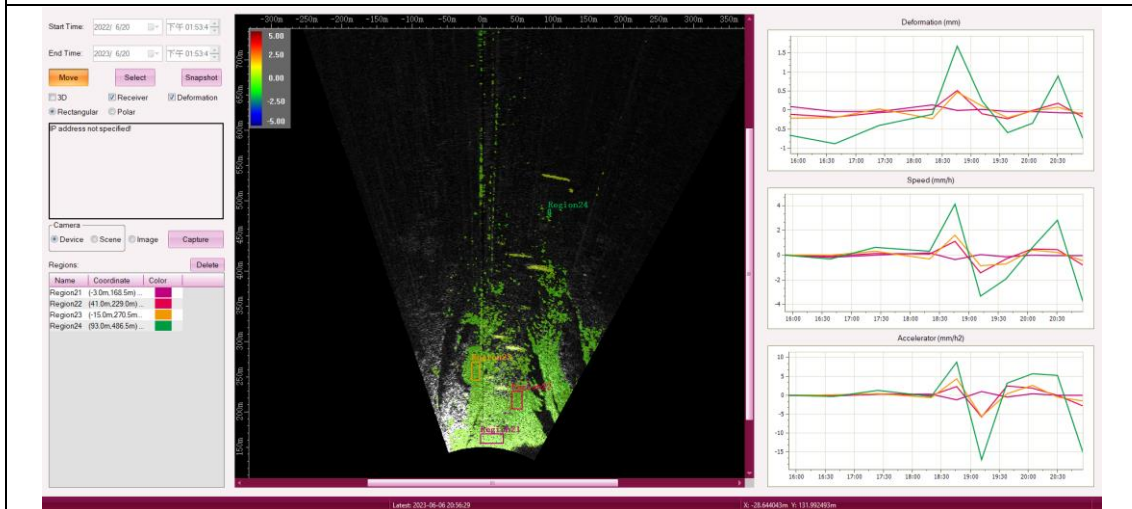
圖 4-10 2023/06/04 22:04–06/05 05:55 (Group_20)變化圖

5. 2023/06/06 15:06 – 06/06 20:56 (Group_25)

觀測 6 小時，共降雨 18.5 mm，微幅變動在上邊坡累積變動趨近於零，坡腹累積變動趨近於零，坡趾則累積變動趨近於零；即時變動檢視兩幅間變化，於上邊坡有來回較大趨勢，但是遠離與靠近的次數差不多，故累積變動趨近於零；坡趾則來回變化較小，累積變動也則較小。



累計變動



即時變動(兩幅間差異)

(Group_25 2023_06_06_15_06_09 - 2023_06_06_20_56_29 (共 12 筆))

圖 4-11 2023/06/06 15:06–06/06 20:56 (Group_25)變化圖

6. 2023/06/07 15:06 – 06/07 20:56 (Group_28)

觀測 6 小時，共降雨 16 mm，微幅變動在上邊坡累積變動為 -2 mm，坡腹累積變動為 -1 mm，坡趾則累積變動約 -0.5 mm；即時變動檢視兩幅間變化，於上邊坡有來回較大趨勢，但是靠近的次數較多，故累積為靠近情況；坡趾則來回變化較小，累積變動也則較小。

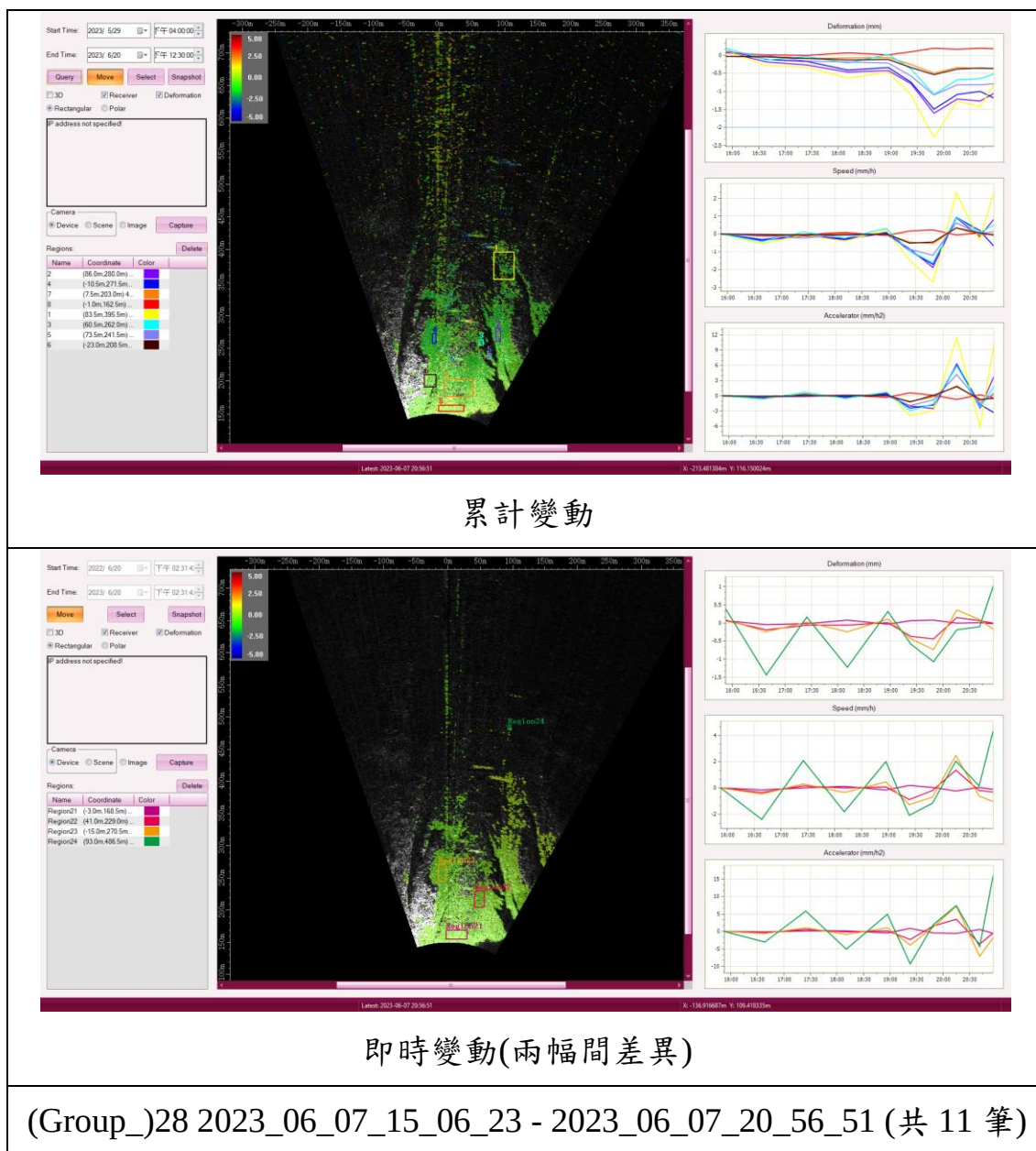


圖 4-12 2023/06/07 15:06–06/07 20:56 (Group_28)變化圖

7. 2023/06/09 18:31 – 06/09 21:01 (Group_37)

觀測 3 小時，共降雨 27 mm，微幅變動在上邊坡累積變動趨近於零，坡腹累積變動為 1.2 mm，坡趾則累積變動為靠近約 -0.5 mm；即時變動檢視兩幅間變化，於上邊坡有來回趨勢，變化不大；坡趾則來回變化較小，累積變動也則較小。

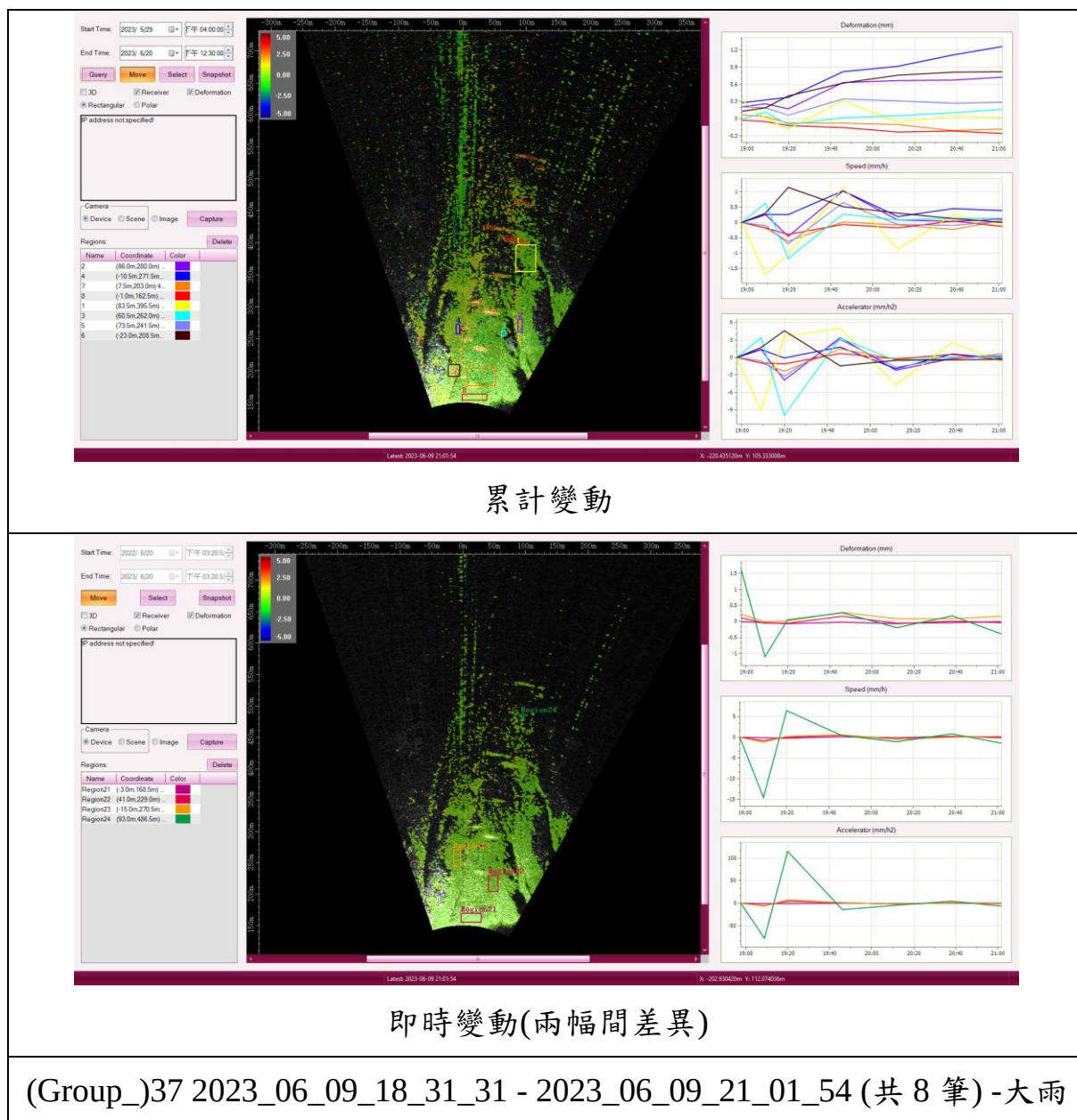


圖 4-13 2023/06/09 18:31–06/09 21:01 (Group_37)變化圖

8. 2023/06/10 15:03 – 06/10 21:01 (Group_40)

觀測 6 小時，共降雨 55 mm，微幅變動在上邊坡累積變動趨近於零，坡腹累積變動為 8 mm，坡趾累積變動也較小；即時變動檢視兩幅間變化，於上邊坡有來回較大趨勢，但累積變化不大；坡趾則來回變化較小，累積變動也則較小。

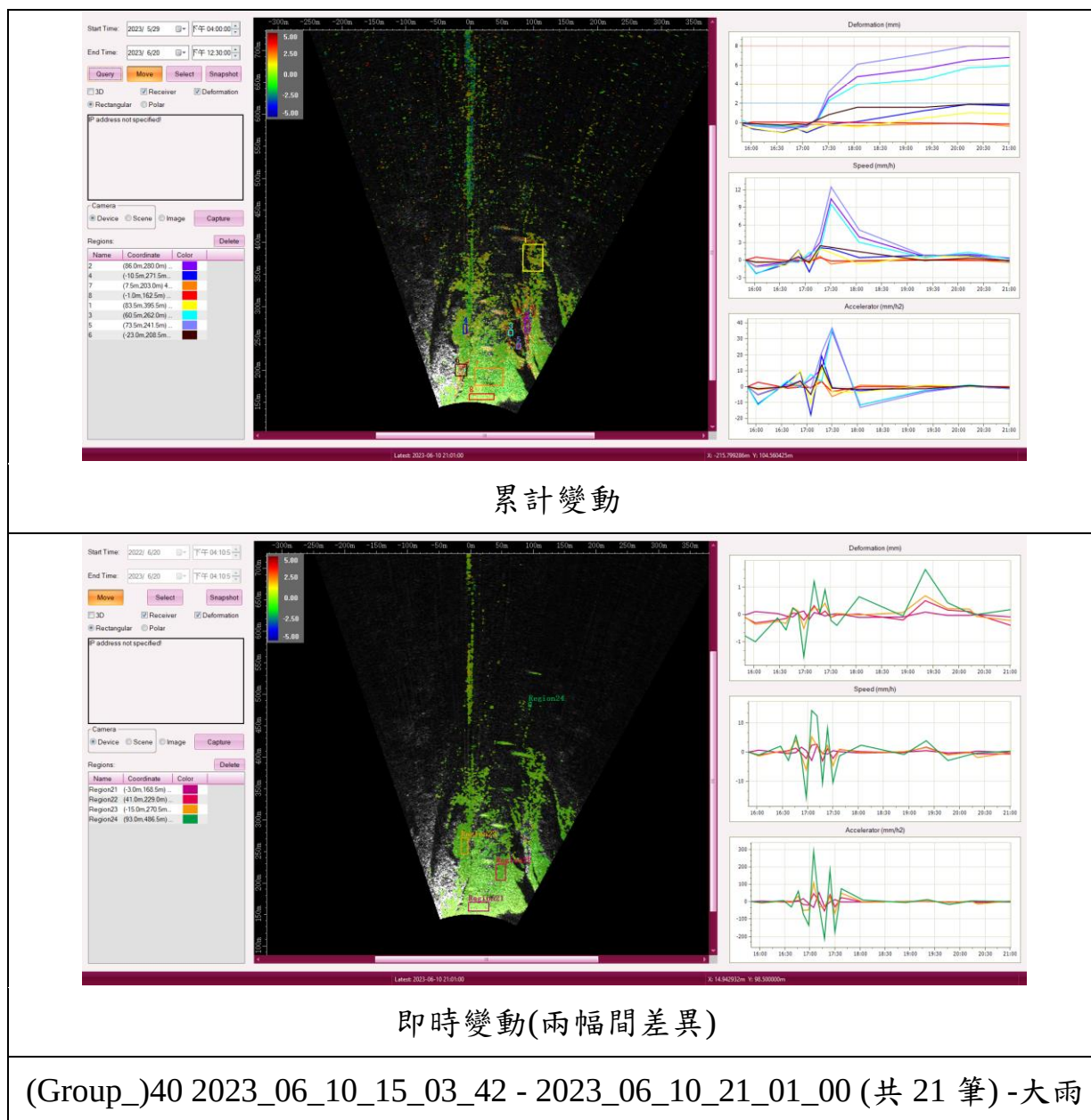
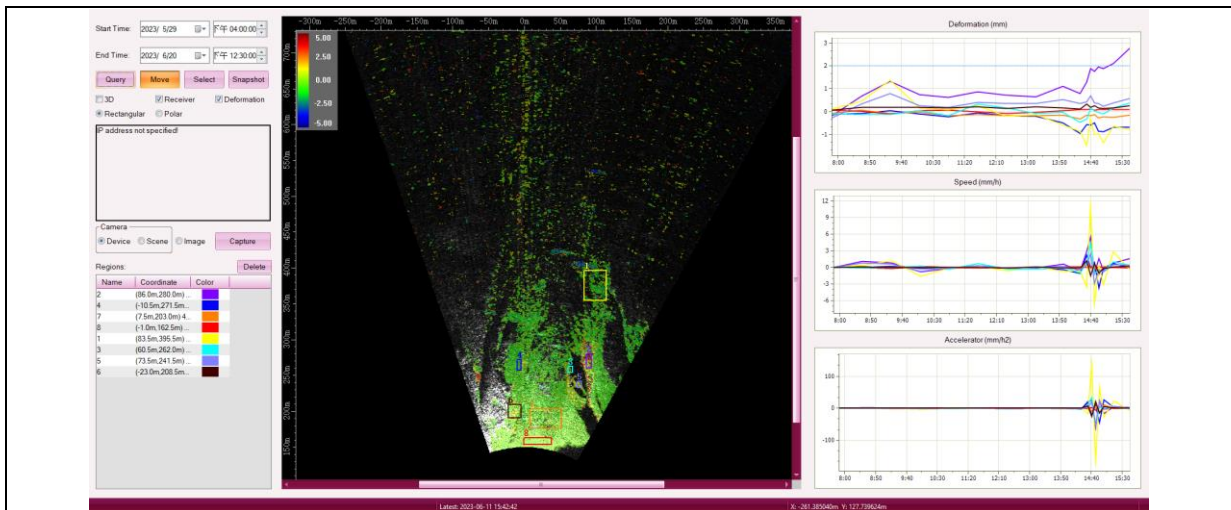


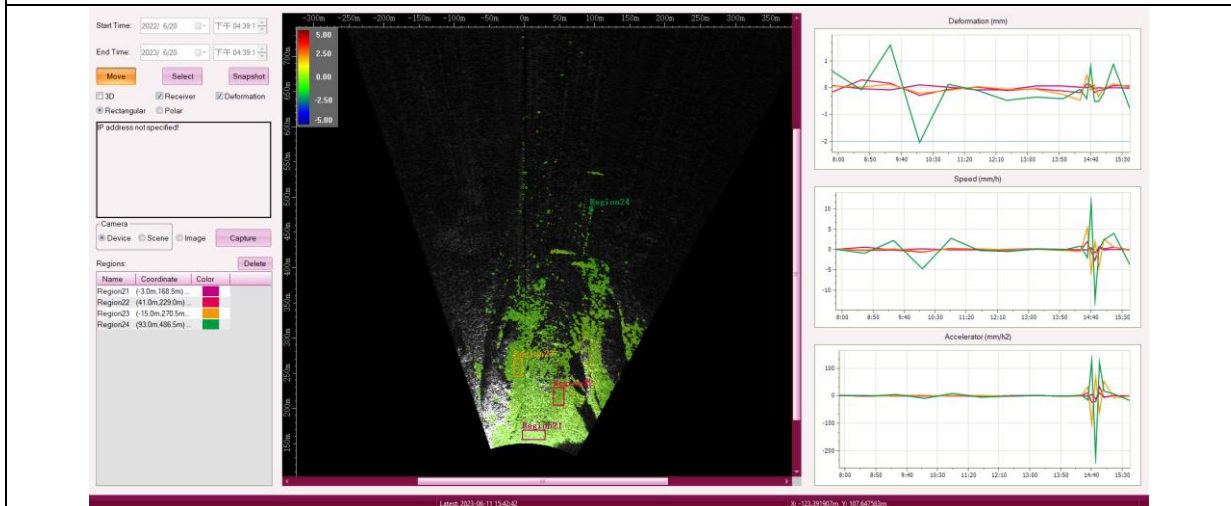
圖 4-14 2023/06/10 15:03–06/10 21:01 (Group_40)變化圖

9. 2023/06/11 07:04 – 06/11 15:24 (Group_42)

觀測 8 小時，共降雨 23.5 mm，微幅變動在上邊坡累積變動約 -1 mm，坡腹累積變動趨近逾零，坡趾累積變動較小；即時變動檢視兩幅間變化，於上邊坡有較大來回趨勢，但是靠近的次數較多，故累積為靠近情況；坡趾則來回變化較小，累積變動也則較小。主要變化則在蝕溝旁邊的側蝕地區，累計變化達 3 mm。



累計變動



即時變動(兩幅間差異)

(Group_42 2023_06_11_07_04_31 - 2023_06_11_15_42_42 (共 19 筆) -大雨

圖 4-15 2023/06/11 07:04–06/11 15:24 (Group_42)變化圖

從降雨期間觀測資料並無觀測到全邊坡同時滑動情況。在降水期間雨水匯流於蝕溝，並有小型土石流情況。蝕溝因土石流動，地表形貌產生變化，其變化量大於 GB-SAR 可觀測的範圍，故蝕溝的侵蝕區、運輸區與堆積區會產生失去同調性的情況。

即時變動圖可以發現在上邊坡有較大的來回變化幅度，坡趾的變化幅度則較小。另在蝕溝的周圍，可以觀測局部的微變動情況，應為蝕溝產生側蝕的情況，而其變動速度可被 GB-SAR 方式記錄。但其變動應超過一個波長，屬於未解纏狀態數值，也就是說，GB-SAR 有觀測到變化靠近或遠離的趨勢，而實際的變化數值應更高。

二、DS194 崩塌地顯著變化時段

本研究列出發生顯著變化時間彙整如表 4-2。

表 4-2 GB-SAR 顯著變化時間一覽表

時間	累積時間	即時狀態	24 小時累積降雨	48 小時累計降雨	72 小時累計降雨
2023/06/02 21:26 – 06/03 03:05 (Group_14)	6 小時	無雨	0.5 mm	25 mm	79.5mm
2023/06/05 22:08 – 06/06 05:49 (Group_23)	8 小時	無雨	4.5 mm	32 mm	41.5 mm
2023/06/10 15:03 – 06/10 21:01 (Group_40)	6 小時	大雨	51 mm	80.5 mm	82.5 mm
2023/06/10 22:05 – 06/11 05:45 (Group_41)	8 小時	無雨	51 mm	81 mm	81 mm

1. 2023/06/02 21:26 – 06/03 03:05 (Group_14)

觀測當下並無下雨，72 小時累積降雨量為 79.5 mm，接收 GB-SAR 資料約 12 筆，在上邊坡處有持續遠離趨勢(下滑)達 3 mm 以上，如下圖上方紅色範圍，坡腹則穩定沒有變化，坡趾則有微幅向前約 0.5mm。在蝕溝堆積處有產生靠近的情況，如下圖左下角藍色範圍。

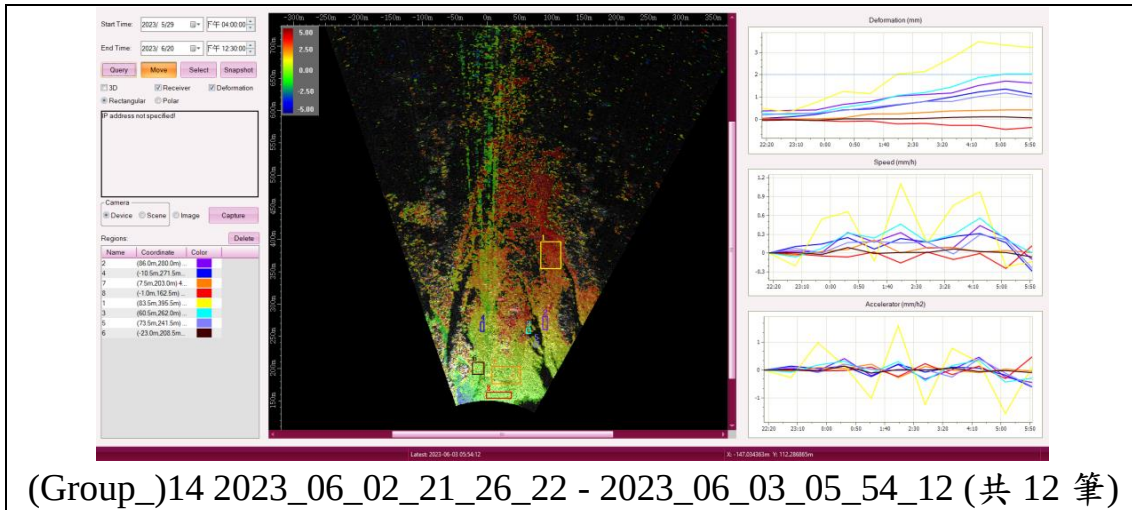


圖 4-16 2023/06/02 21:26–06/03 03:05 (Group_14)

2. 2023/06/05 22:08 – 06/06 05:49 (Group_23)

觀測當下並無下雨，72 小時累積降雨量為 41.5 mm，接收 GB-SAR 資料約 11 筆，在上邊坡處累積變動達 2 mm，有持續遠離的趨勢(下滑)，坡腹與則坡穩定沒有變化。

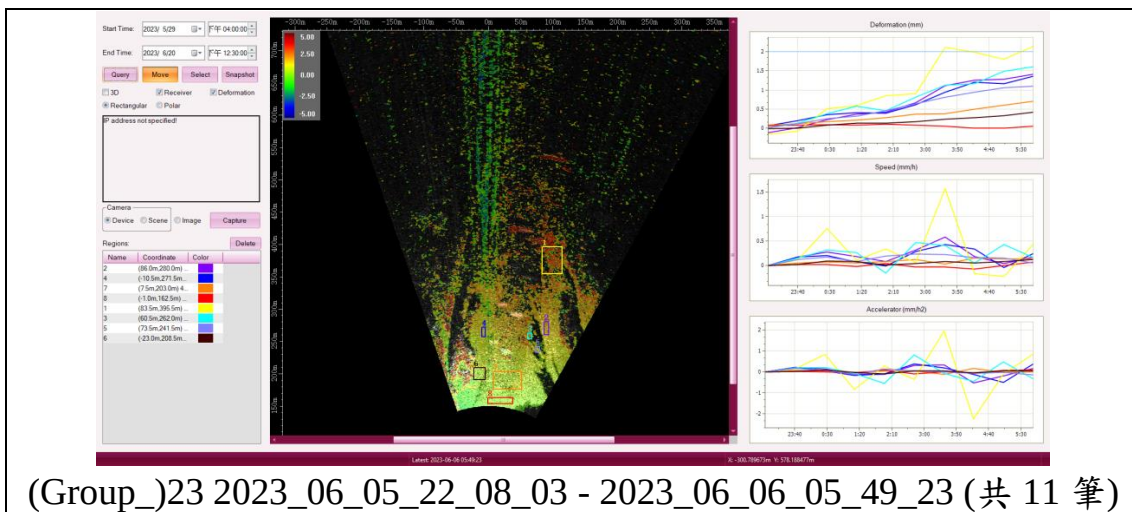


圖 4-17 2023/06/05 22:08–06/06 05:49 (Group_23)

3. 2023/06/10 15:03 – 06/10 21:01 (Group_40)

觀測當下為大雨中，72 小時累積降雨量為 82.5 mm，接收 GB-SAR 資料約 21 筆，在上邊坡與坡趾處沒有變化，蝕溝周圍則有顯著

的變化，累積遠離約 8mm。

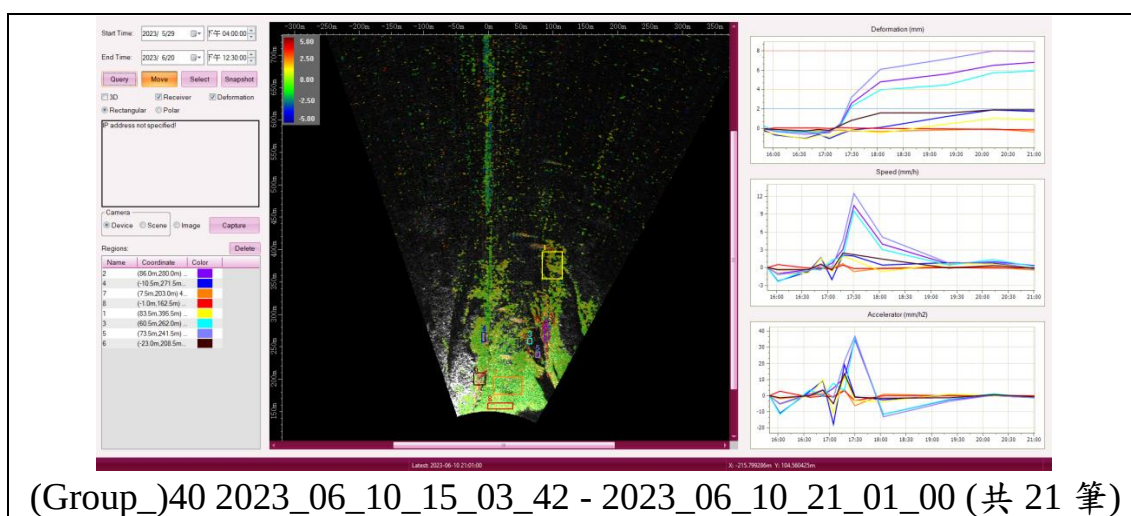


圖 4-18 2023/06/10 15:03–06/10 21:01 (Group_40)

4. 2023/06/10 22:05 – 06/11 05:45 (Group_41)

觀測當下無下雨，72 小時累積降雨量為 81 mm，接收 GB-SAR 資料約 11 筆，在上邊坡與坡趾處沒有變化，蝕溝周圍則有顯著的變化，累積遠離約 3 mm。

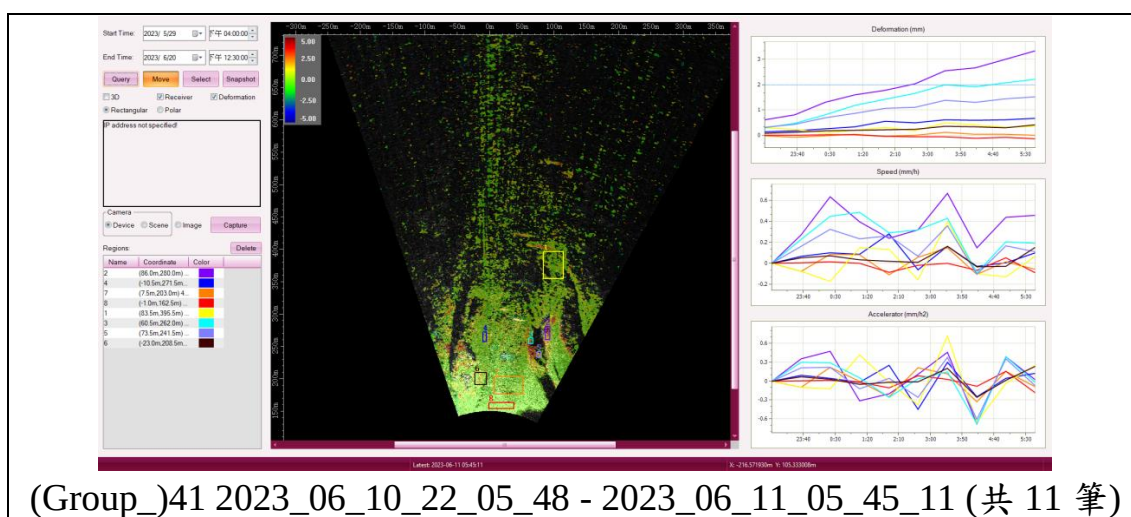


圖 4-19 2023/06/10 22:05–06/11 05:45 (Group_41)

在分組檢視各組的變化以及組間的變化，可以發現在坡頂有逐漸下滑(遠離)的趨勢，在坡趾有逐漸堆積(靠近)的趨勢，坡腹則沒有變化較多。另發現有觀察到在大雨過後或進行中，有側蝕的現象可以被觀

察到，在侵蝕溝的左右兩側都有土石滑動的現象被紀錄。

第二節 DS194 崩塌地無雨期間 GB-SAR 特徵(112 年)

無降雨期間 GB-SAR 資料無短時間顯著大範圍變化，整體變化說明如第三節 2023/10/15 至 2023/10/28 (112 年)結果。比對地表傾斜計(雙軸)於上午 7 點有明顯變化，唯 GB-SAR 僅監測至該日上午 6 點，無法進行比較。另 GNSS 地表變位於 10 月 20 日至 21 日有超過警戒值的情況，其他的 GNSS 地表變位於該時間區段也都有一致變化約 7mm 的變化情況。由於該 GNSS 地表變位儀器放置於植被覆蓋範圍，研判應為 GB-SAR 掃描的盲區，如圖 4-20 綠色框範圍，而下方裸露地在該類似位置與時間也有類似變化的情況。

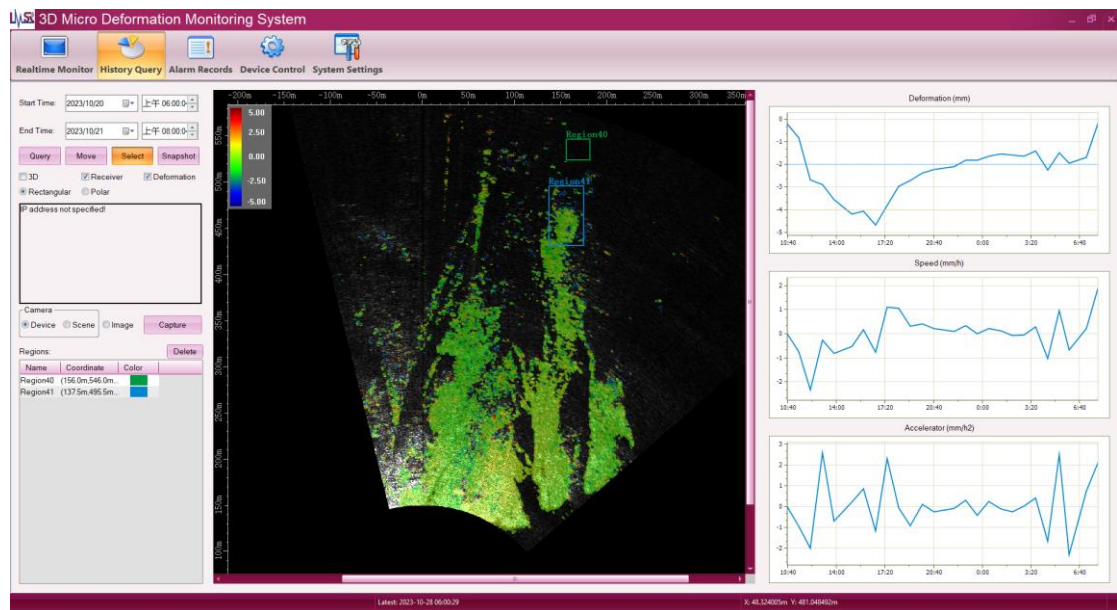


圖 4-20 2023/10/20 06:00–10/21 08:00 微幅變動圖

第三節 DS194 崩塌地觀測時間微幅變動彙整(110 年~112 年)

一、2021/10/20 至 2021/10/22 (110 年)

檢視約 40 小時觀測結果，發現在滑動部有明顯的位移，累計位移量達 11 至 15 公分，如圖 4-21。主要位移區域在圖 4-22 之 A 區與 B 區的位置。

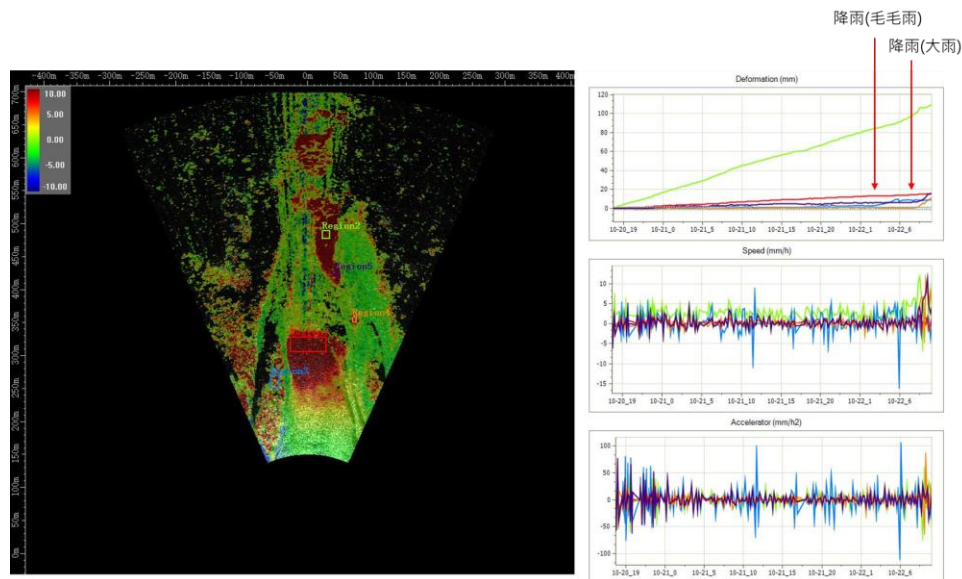


圖 4-21 2021/10/20 至 2021/10/22 累計趨勢成果



圖 4-22 秀巒白石崩塌現地位置圖

二、2022/5/17 至 2022/5/20 (111 年)

檢視三天觀測結果，可發現上邊坡與趾部有明顯位移，從圖 4-23 可以明顯看到崩塌地的位移樣態差異，在上邊坡為遠離雷達機(圖中呈現暗紅色)，累計變化達 2.5 公分左右，在坡腹基本上距離變化小(圖中呈現綠色)，在坡趾成果為靠近雷達機，累計可達 0.9 公分左右(圖中呈現為藍色)。其中，從圖 4-24 除了坡趾有靠近雷達波的情況，GB-SAR 也可以有效觀測到蝕溝區域也有靠近雷達機的情況，蝕溝區普遍變化都持續往雷達方向靠近(藍色區塊)。

若以局部單點小範圍檢視圖 4-23，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。

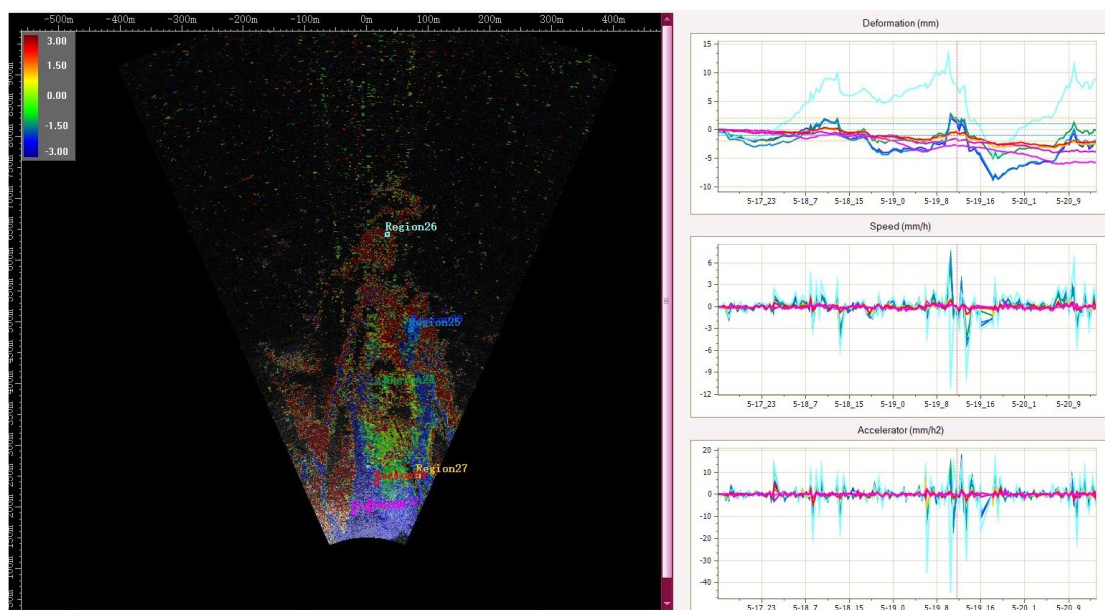


圖 4-23 2022/5/17 至 2022/5/20 累計趨勢成果

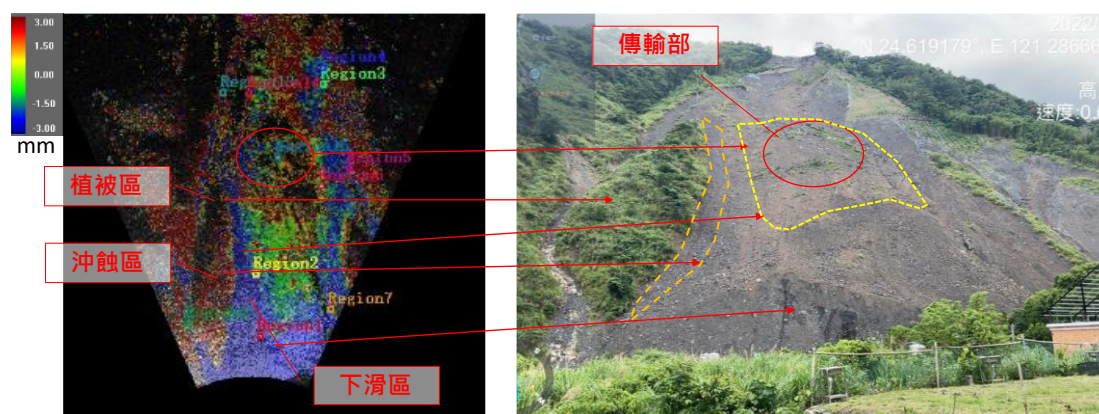


圖 4-24 2022/5/17 至 2022/5/20 累計趨勢與現地對照圖

三、2022/8/11 至 2022/8/27 (111 年)

檢視 16 天觀測結果，可發現上邊坡與趾部有明顯位移，從圖 4-25 可以明顯看到崩塌地的位移樣態差異，在上邊坡為遠離雷達機(圖中呈現暗紅色)，在坡腹因為有植物導致同調性無法建立，在坡趾成果為靠近雷達機 (圖中呈現為藍色)。觀測時間共紀錄到 4 次降雨事件：8 月 2 日、8 月 20 日、8 月 24 日、8 月 25 日，從圖 4-26 除了坡趾有靠近雷達波的情況，GB-SAR 也可以有效觀測到蝕溝區域也有靠近雷達機的情況，蝕溝區普遍變化都持續往雷達方向靠近(藍色區塊)。

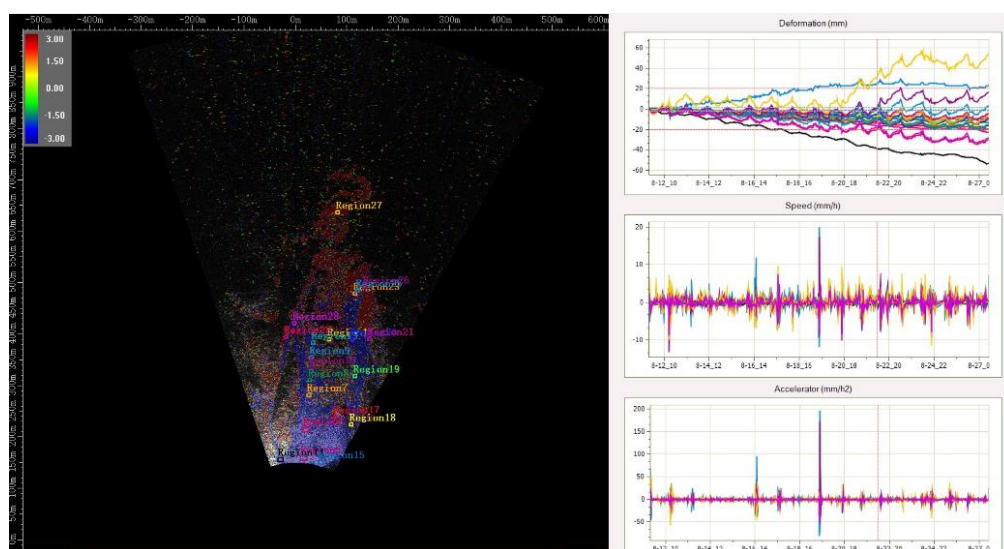


圖 4-25 2022/8/11 至 2022/8/27 累計趨勢成果

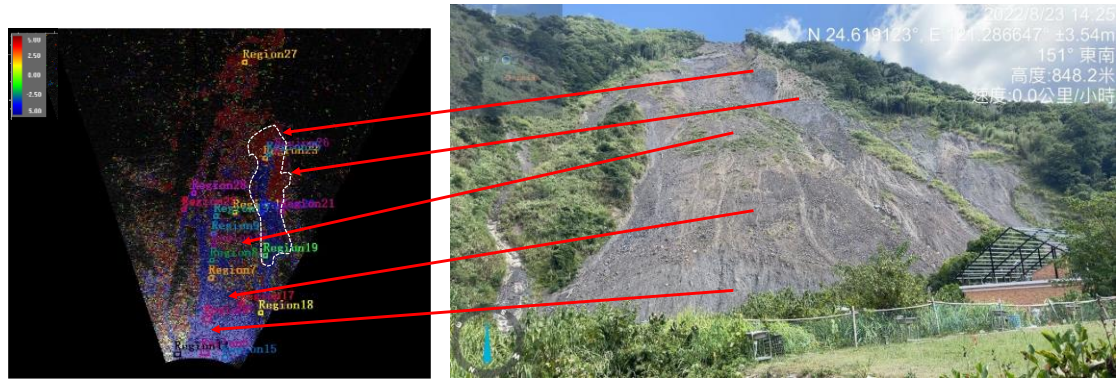


圖 4-26 2022/8/11 至 2022/8/27 累計趨勢與現地對照圖

四、2023/5/30 至 2023/6/12 (112 年)

檢視於夏季連續 12 日觀測結果，觀測期間也有強降雨的情況發生，微幅累積趨勢如圖 4-27，與現地對照如圖 4-28。可以發現強降雨在更小的邊坡單元有產生侵蝕的情況(紅色區塊)，與堆積的情況(藍色區塊)，整個邊坡表面都在變化。大量的降雨，對邊坡產生沖蝕的現象，部分土石除了沿著邊坡上的蝕溝流下以外，藉由 GB-SAR 的輔助，亦可以觀察到邊坡整體土石微變動現象。邊坡坡趾往坡腹的方向，共可觀察到成帶狀藍色-紅色位移極值相鄰出現的現象；紅色為 GB-SAR 觀察到目標遠離雷達機的標記、藍色為 GB-SAR 向雷達靠近的標示。藉由連續時序影像的比較，坡趾紅、藍帶狀位移現象為幾乎同時發生。造成如此現象的原因，有可能來自於邊坡土石遭到沖刷，經過搬運，最後土石在接近坡趾堆積；另一種可能原因為邊坡土石因吸水而加大荷重，使得坡趾位置向外突出，而上方靠近坡腹的位置則因為向下荷重而在雷達視野中產生後退的現象。

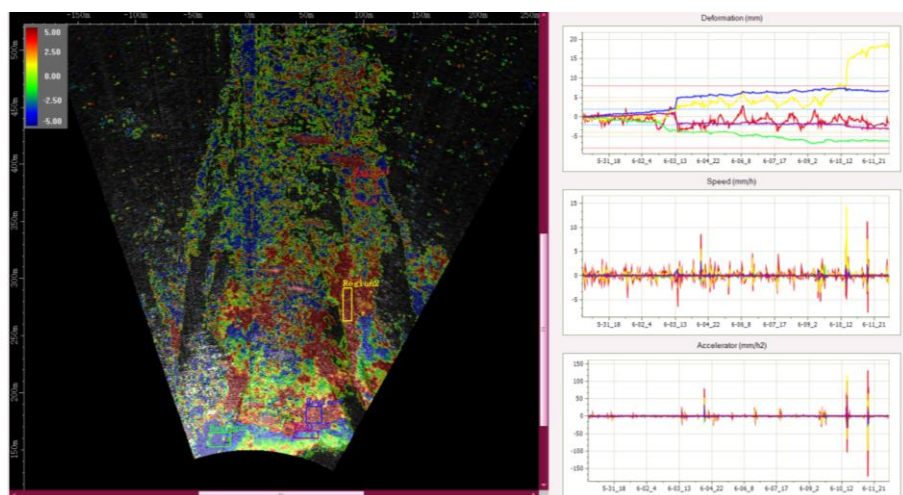


圖 4-27 2023/5/30 至 2023/6/12 累計趨勢成果

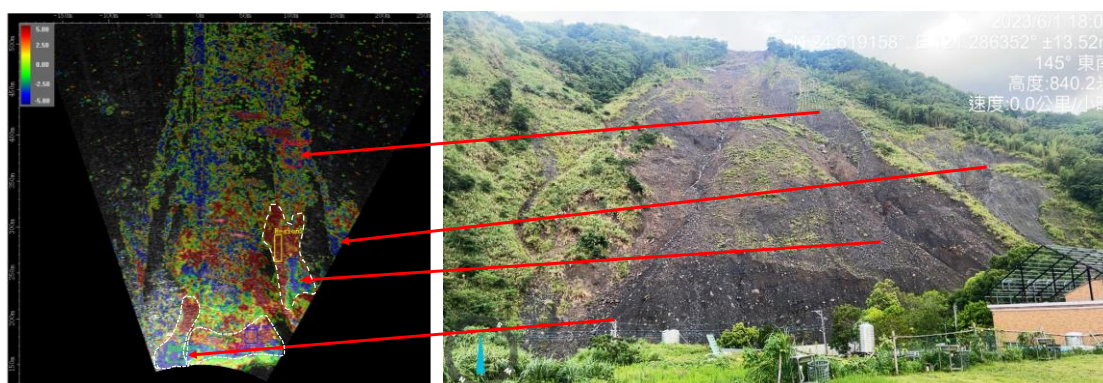


圖 4-28 2023/5/30 至 2023/6/12 累計趨勢與現地對照圖

本次監測工作，目標位移量變化較為劇烈的時間有 2 個時間：6 月 3 日下午 1 時、以及 6 月 10 日下午 5 時。5 月 30 日至 6 月 1 日連日均有下雨，6 月 2 日至 6 月 3 日下午 4 時為晴天；GB-SAR 於當日下午 1 時至 3 時的影像偵測到邊坡有明顯位移變化現象。6 月 10 日下午 4 時秀巒當地開始下雨，下午 5 時左右雨勢一度變大，GB-SAR 監測位移量亦於本時間點出現明顯變化。從圖 4-29 可發現遠離雷達與靠近雷達發生的時間相似，顯然侵蝕與堆積的發生的時間相同。

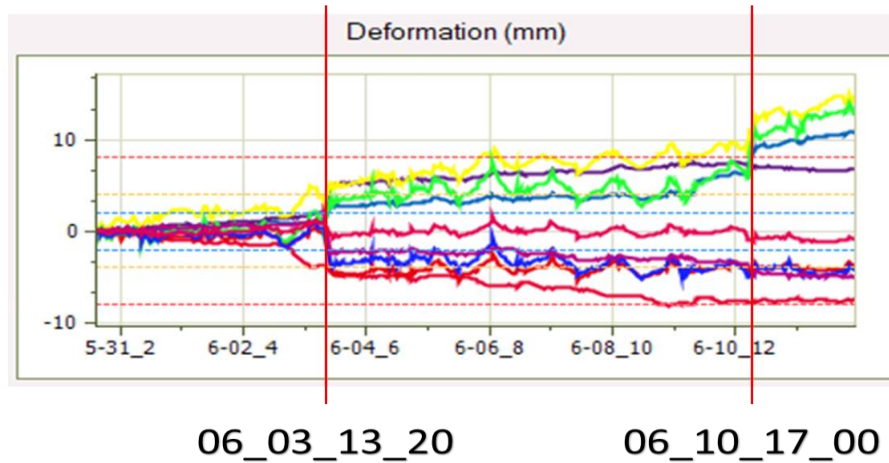


圖 4-29 GB-SAR 於整體監測期間位移量變化較大之時間點

進一步透過程式，以相同的篩選 PS 點條件及閾值篩選 PS 點。所篩選符合資格之像素點僅剩 901 個像素點；總像素數量：5,662,000 點，所篩選之 PS 點比例為 0.0159%。像素最大位移量為 18.69 mm，最小位移量為 -15.81 mm；顯示最大位移量之像素為前述之多次反射影像訊號，最小位移量之像素為邊坡左下角靠近坡趾位置。

本次監測因經歷多場降雨事件，邊坡土石於 2 週間受到降雨及侵蝕搬運作用，其符合穩定定義之 PS 點僅剩 901 點，顯示本邊坡受到外營力作用影響之劇烈。

五、2023/10/15 至 2023/10/28 (112 年)

檢視於秋季連續 12 日觀測結果，觀測期間也無強降雨的情況發生，微幅累積趨勢如圖 4-30，與現地對照如圖 4-31。可以發現在蝕溝範圍接往雷達機靠近(藍色區塊)，顯示既使在沒有降雨的情況，則整個邊坡還是有靠近雷達的方向移動(藍色區塊)的趨勢，顯示整個邊坡表面仍持續變化。

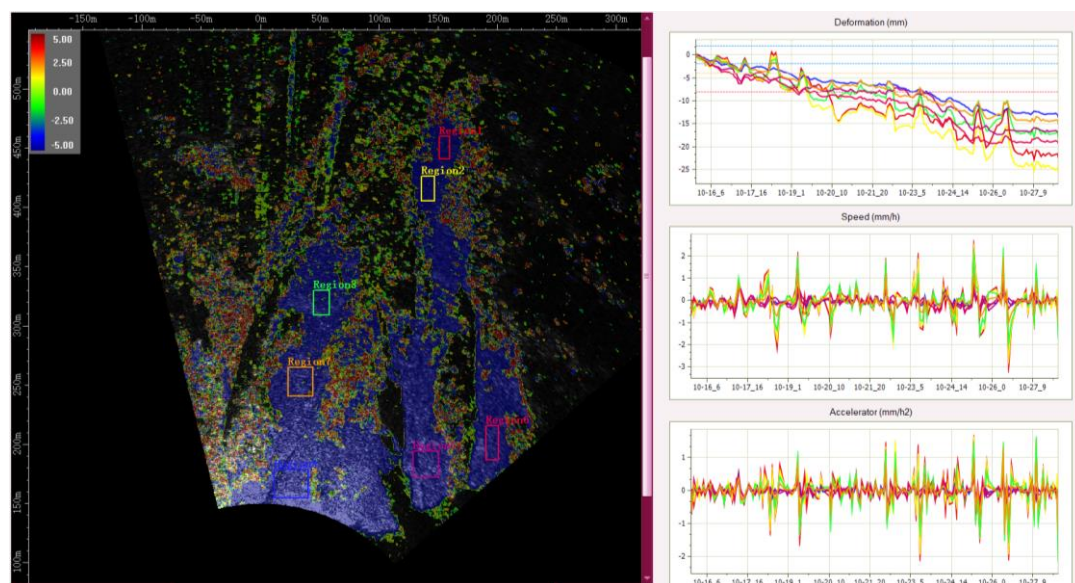


圖 4-30 2023/10/15 至 2023/10/28 累計趨勢成果



圖 4-31 2023/10/15 至 2023/10/28 累計趨勢與現地對照圖

第四節 軌道式與旋臂式 GB-SAR 比較

團隊於 112 年 9 月開始使用旋臂式地基合成孔徑雷達(以下稱 ArcSAR)，並於 112 年 10 月至秀巒監測現場對邊坡進行測試，後與軌道式地基合成孔徑雷達(以下簡稱 LinearSAR")進行比較。

一、ArcSAR 基本配件

ArcSAR 主要由 4 個配件所組成，分別為：雷達機與旋轉機構、旋臂與天線機構、工控電腦、三腳架，如圖 4-32。4 個機構及其外箱的尺寸與重量如表 4-3 所示；ArcSAR 的參數與第一代軌道式 GB-SAR 參數比較如表 4-4。

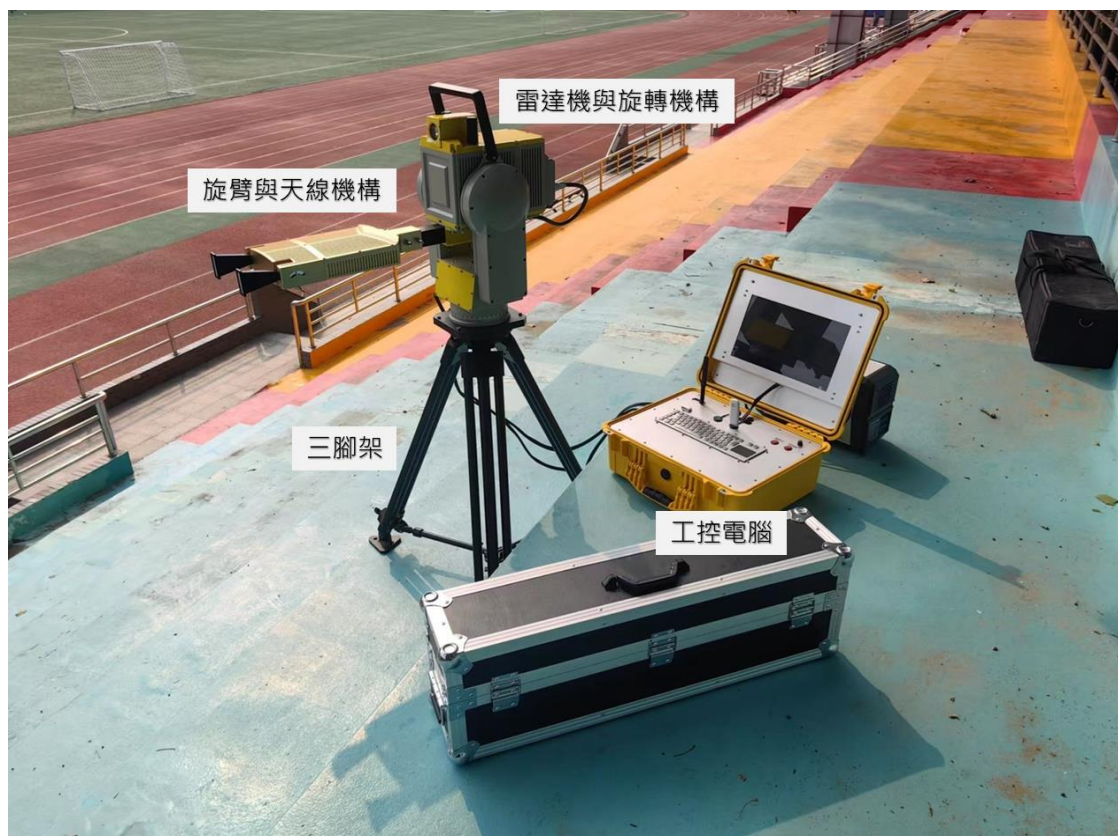


圖 4-32 ArcSAR 機構組成

表 4-3 ArcSAR 機構及外箱之尺寸、重量一覽

名稱	尺寸(cm)	重量(Kg)	外箱尺寸(cm)	外箱重量(Kg)
雷達機	36*34*54	23.4	43*41*73	36.95
懸臂機構	53*44*22	3.55	51*24*45	11.95
工控電腦	72*20.5*5.5	15.55	85*19*21	15.55
三腳架	21*18*100	11.85	100*26*24	14.9

表 4-4 軌道式及旋臂式 GBSAR 參數比較

	Gen 1 (Linear GBSAR)	Gen 2 (ArcSAR)
Waveform	FMCW	FMCW
Operating Frequency	17000-18000MHz (17.0 GHz-18.0 GHz)	17000-18000MHz (17.0 GHz-18.0 GHz)
Bandwidth (Bw)	0 ~ 1000 (MHz)	0 ~ 1000 (MHz)
Pulse-width (Pw)	1 - 1000 (ms)	1 - 300 (μs)
Max Radar Rotation Angle	108° (additional 18° from antenna)	360° (Can select specific angle)
Polarization	None	None
Transmit Power (ATT)	2 mW ~ 1 W	2 mW ~ 4 W
Antenna Gain (GN)	0 - 30 dB	0 - 30 dB
Antenna Scanning Angle	18°(azimuth), 40°(elevation)	60°(azi) , 18° (ele)
	28°(azimuth), 18°(elevation)	60°(azi) , 30° (ele) or 60° (ele)
Radar Scanning Angle	-30° ~ 45°	0-360°
Synthetic Length	1.6 m	Up to the length of arm (0.65m)
Scanning Distance	70 m - 4000 m	10 m - 5000m
Range Resolution	0.75 m - 0.15 m	0.75 m - 0.15 m (?)
Cross Range Resolution	5.36 mrad	~ 6 mard (?)
Weight of Equipments	> 100 Kg	< 50 Kg (4 items)
Acquisition time (min/image)	~ 1 min	3°/s (20s/60°)

二、ArcSAR 儀器簡介

ArcSAR 單一配件長度最長 1 公尺，配件重量最重約為 37 公斤，合計總重量約為 80 公斤。使用三腳架架設雷達機，設置需求範圍較小，約 4 平方公尺就可以設置。使用 Ku 波段的雷達波，可監測微變動之能力維持在豪米(mm)等級。使用調頻連續波(FMCW)的方法發射

雷達波，以增加於雷達影像中辨識不同地物能力。帶寬(Band Width, Bw)可設定範圍為 1000Mhz 以內，其距離解析度(Range Resolution)介於 0.15~0.75 公尺之間。脈衝持續時間(又稱脈寬，Pulse- width, Pw.)範圍為 1~300 μ s。單次掃描之水平掃描範圍可達 360 度，垂直掃描範圍，依照天線的設計為 18 度。最近掃描距離為 10 公尺。二天線連線中點位置到旋轉軸中心之長度(以下簡稱為"旋臂長度")，合計約為 0.65 公尺。監測旋轉掃描的速度約每秒 3 度，即 60 度範圍之目標，可於 30 秒內完成一次掃描。

三、Linear GB-SAR 與 Arc GB-SAR 比較

儀器安裝限制：LinearSAR 之機動性受其直線軌道長度(1.6 公尺長)與重量(100 公斤)的限制，儀器架設過程中需挑選合適開闊空間、且環境不隨儀器荷重而產生下陷的水泥地、碎石地為主，搬運過程較為費時費力，且需要小心搬運過程中所衍生之可能職業傷害發生；ArcSAR 因重量較輕、尺寸較為精簡，安裝僅需使用三腳架，因此可以在較為多元複雜的環境底下進行監測。

水平掃描範圍：LinearSAR 使用直線形軌道作為合成孔徑基礎，搭配多角度掃描並於資料處理階段將不同角度之影像進行融合，達到單一場景最寬 108 度之水平監測範圍；ArcSAR 使用旋臂(0.65 公尺長)作為合成孔徑雷達之基礎，搭配旋轉機構，單一場景之水平掃描範圍最寬可達 360 度。

最近掃描距離限制：LinearSAR 的最近掃描距離受到雷達訊號功率限制、以及角解析度的限制，其最近掃描距離為 70 公尺以上；ArcSAR 由於為旋臂式設計，角解析度為恆定，因此最近掃描距離縮短為 10 公尺以上。

單次掃描需時：LinearSAR 掃描單一角度約需 2 分鐘，多角度掃描模式下，每多一個角度約增加 2 分鐘的時間。以 DS194 崩塌地為例，全部邊坡掃描需要使用 3~4 個角度($48^{\circ}\sim 63^{\circ}$)，亦即完成一次掃描工作，需時 6~8 分鐘；ArcSAR 以每秒 3 度的速度進行掃描，水平範圍 63 度的場景僅需約 30 秒即可完成一次掃描，可提高監測頻率。

儀器損耗：LinearSAR 進行單次掃描作業時，需要重複在基線軌道上運行，並搭配旋轉機構進行多角度掃描。若進行長時間監測作業、或因特殊需求需增加監測頻率，將無疑提高儀器損耗之可能性。因此出於保護儀器的角度，LinearSAR 監測的頻率設定為 5 分鐘(特殊緊急狀況)、10~20 分鐘(豪大雨事件、颱風)、以及 40 分鐘(無緊急情況)。

相較之下，ArcSAR 僅需透過單一旋轉機構，即可達到大角度成像的目的，儀器損耗的狀況會較 LinearSAR 為佳。故理論上 ArcSAR 更能適應較為繁複的監測工作條件。

四、LinearSAR 與 ArcSAR 比較

由前述章節可瞭解到，ArcSAR 不論在硬體、掃描範圍、掃描效率、儀器損耗方面均較具有優勢。本小節進一步使用 LinearSAR 及 ArcSAR 同時於 DS194 崩塌地現場進行監測工作，如圖 4-33。GB-SAR 參數設置如表 4-5，並比較二者於 8 個小時之監測結果。



圖 4-33 Linear SAR(左)與 ArcSAR(右)同時掃描 DS194 崩塌地

表 4-5 GBSAR 與 ArcSAR 短期監測資訊一覽

	Linear GB-SAR	ArcSAR
影像起始時間	2023_10_23 09: 52: 59	2023_10_23 10: 21: 50
影像結束時間	2023_10_23 20: 51: 35	2023_10_23 20: 53: 09
掃描距離設定	100 - 600 m	10 - 300 m
掃描角度設定	55° (使用 4 個角度的影像)	30°
天線水平增益	18° (左、右各 9°)	60° (左、右各 30°)
天線垂直增益	40° (上、下各 20°)	18° (上、下各 9°)
仰角設定	10°	0°
使用影像張數	16	15
監測間隔頻率	40 min	40 min

由圖 4-33 可觀察到，ArcSAR 位於 LinearSAR 之前方，略靠近 DS194 崩塌地，實地測量天線水平位置差約 1 公尺，垂直位置差約為 0.5 公尺。

由於監測地點前方有水塔及建築物鋼骨屋頂等強反射源；於天氣較穩定的時候是很好的大氣校正點，但訊號過強，於監測時可能會造成訊號的污染，因此 LinearSAR 的仰角調整為 10°，綜合垂直天線範圍增益後，仍保有 10° 的俯角視野。

相較之下，ArcSAR 由於垂直天線範圍增益僅為 18° (上、下各 9°)，因此仰角設定 0° ，即可讓監測視野下緣與 LinearSAR 趨近於一致。

圖 4-34 與圖 4-35 分別為 ArcSAR 現場監測之震幅訊號以及同調性比較結果；圖 4-36 為 GBSAR 現場監測之震幅訊號。

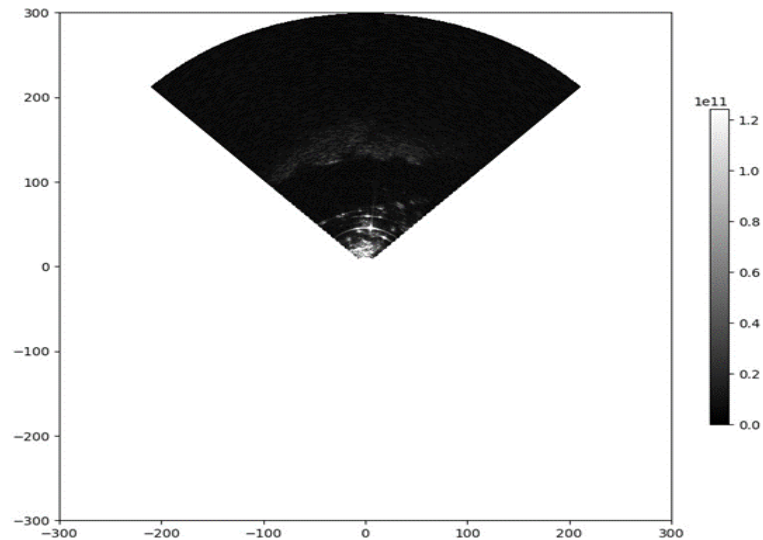


圖 4-34 ArcSAR 監測 DS194 崩塌地之訊號震幅圖

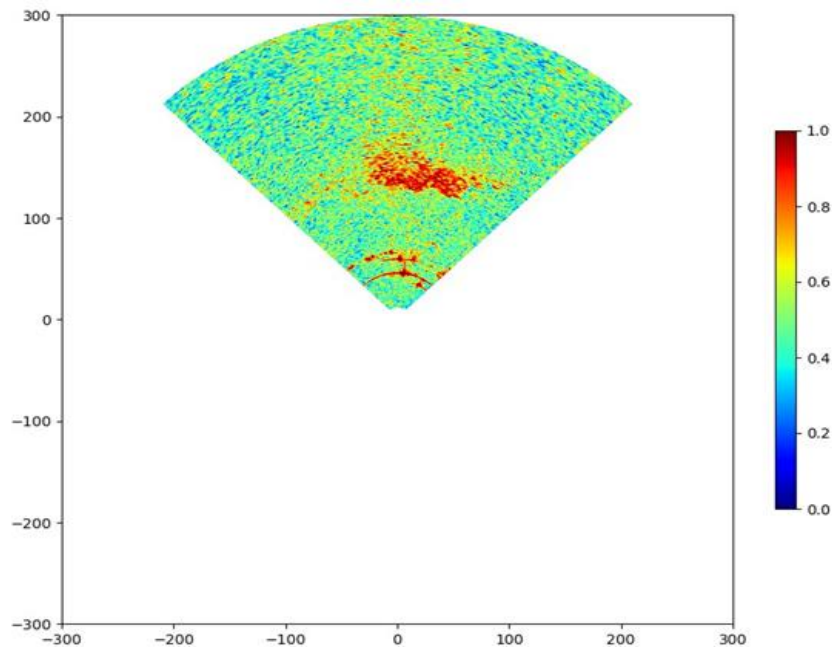


圖 4-35 ArcSAR 監測 DS194 崩塌地之同調性比較圖

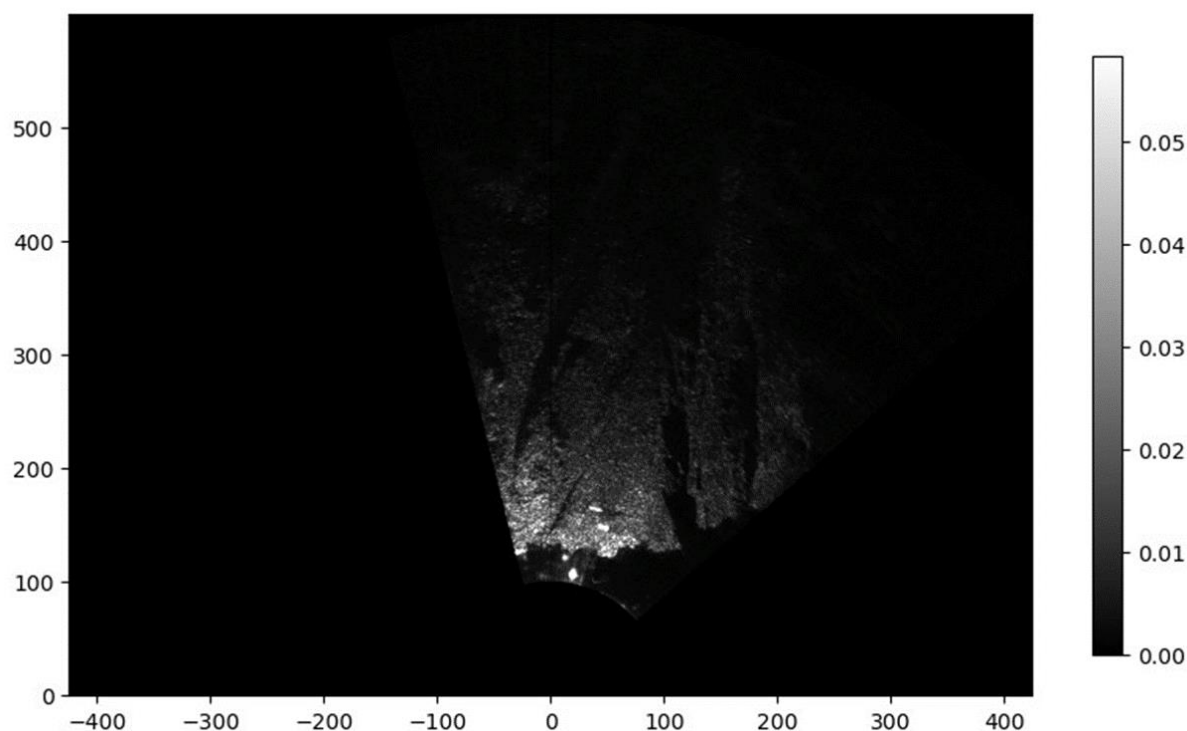


圖 4-36 LinearSAR 監測 DS194 崩塌地之訊號震幅圖

綜合上述結果，我們可以觀察到 2 部 GBSAR 均可成功對邊坡進行成像，初步可以觀察到下列差異：

LinearSAR 的震幅成像較為清晰；相比之下，ArcSAR 的成像較為模糊，需要透過近距離，約 10~20 公尺處的水塔所形成之強反射位置作為輔助辨識標的；成像的清晰與否，關係到現場雷達影像與真實地物辨識的難易度。

因綜合地物與雷達天線範圍增益，LinearSAR 可監測到有效的視野在 100~600 公尺左右；ArcSAR 的有效監測視野在 10~170 公尺。因此若要討論 2 部儀器的監測成果，需要另外將共同監測到的範圍 (100~170 公尺) 挑出進行檢視。

以下分別將 LinearSAR、以及 ArcSAR 所監測 DS194 崩塌地之 100 至 170 公尺區域挑出、以及比較，結果如圖 4-37 至圖 4-38。多數點位都為靠近雷達機的趨勢(藍色與綠色)。

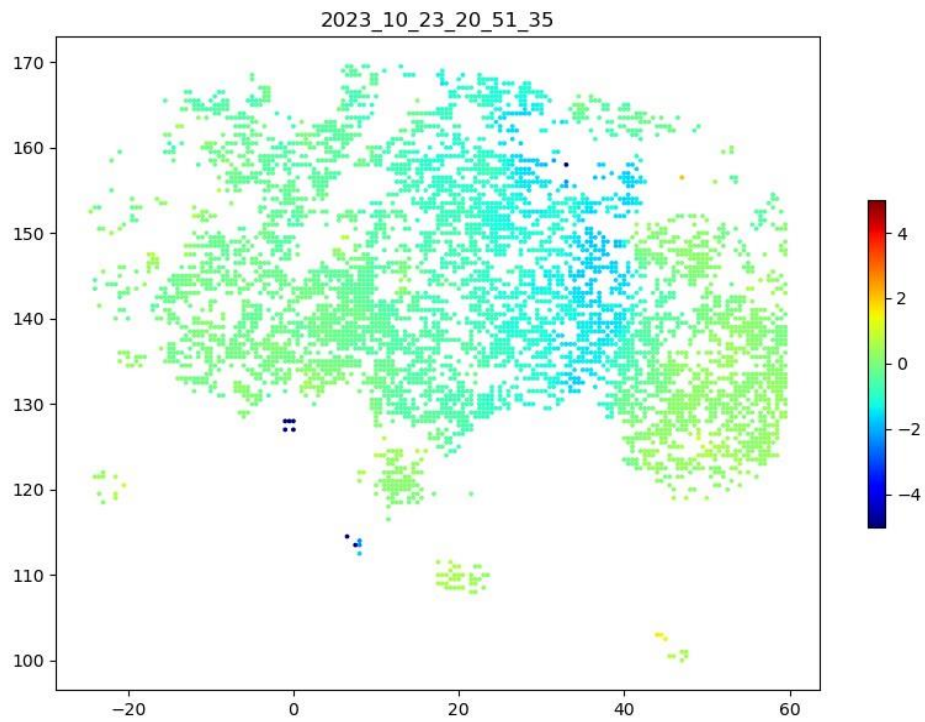


圖 4-37 LinearSAR 監測 DS194 崩塌地 100 ~ 170 公尺結果

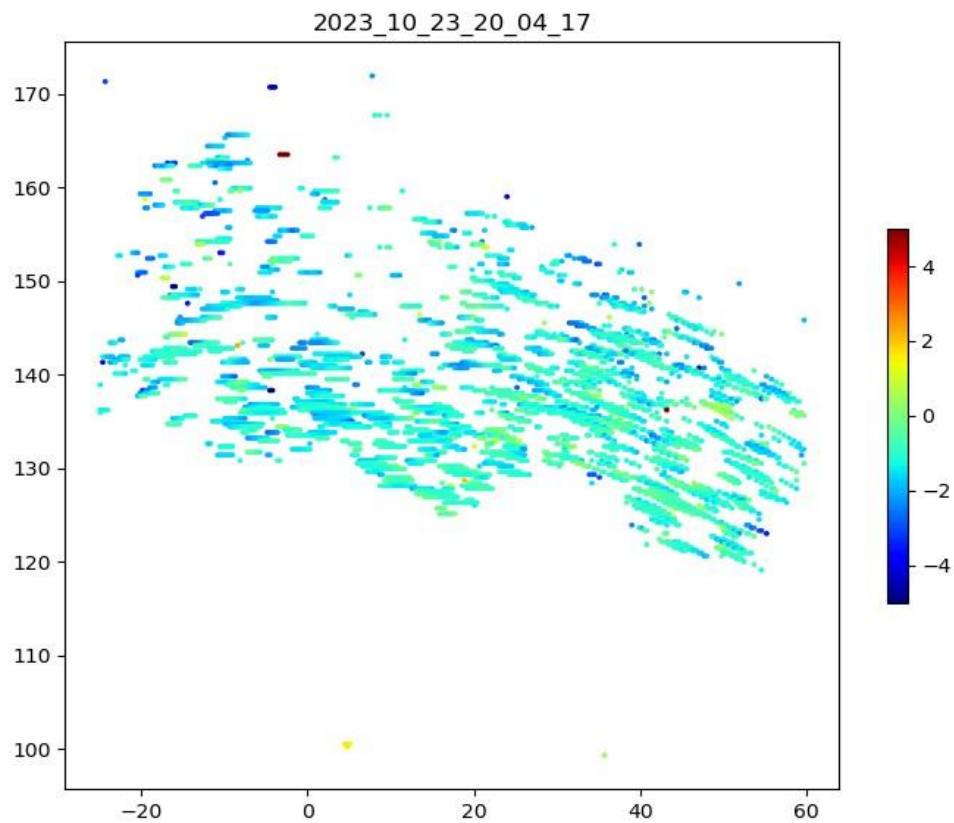


圖 4-38 ArcSAR 監測 DS194 崩塌地 100 ~ 170 公尺結果

LinearSAR、以及 ArcSAR 所有點位累積變化趨勢成果如圖 4-39 與圖 4-40。大多數點位的微幅變化都在 2 mm 之間，而最大有到 -10 mm。資料統計結果如表 4-6，平均都為靠近，而標準差為 0.68 mm 至 0.69 mm，顯示兩者資料趨勢相似。

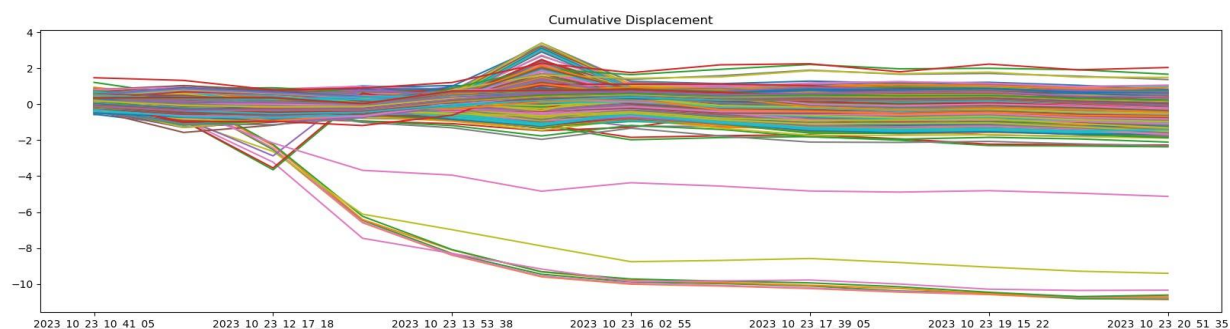


圖 4-39 LinearSAR 監測累積位移量之逐時變化

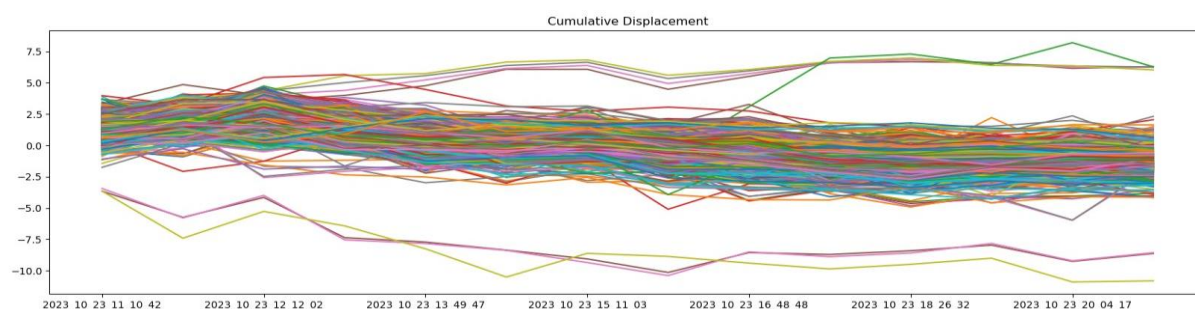


圖 4-40 ArcSAR 監測累積位移量之逐時變化

表 4-6 LinearSAR 與 ArcSAR 短期監測位移量簡單統計結果

項目	LinearSAR	ArcSAR
篩選像素個數	4,755	4,730
位移量平均值(mean)	-0.46	-1.29
位移量標準差(std)	0.68	0.69

項目	LinearSAR	ArcSAR
位移量最小值(min)	-10.85	-10.81
位移量前 25%	-0.86	-1.68
位移量前 50%	-0.36	-1.29
位移量前 75%	-0.03	-0.92
位移量最大值(Max)	2.03	6.29

單位：mm

由前述圖、表可觀察到兩部 GBSAR 的監測結果，兩部 GBSAR 所篩選出的 PS 點像素個數相近，其微變動位移量之平均值、最小值、以及標準差相近，而最大值相差約 4mm。圖 4-37 的 LinearSAR 的 PS 點資料主要分佈於 100~170 公尺之間，於橫坐標 24 公尺至 41 公尺處有一明顯的藍色位移帶，其相對位置為邊坡坡腹向內凹、靠近蝕溝之位置，位移量約在 -1.65 ~ -1 mm 之間；圖 4-38 的 ArcSAR 的 PS 點主要分佈於 130~160 公尺之間，於沒有看到相類似於 LinearSAR 的特殊位移分佈。

由圖 4-39 與圖 4-40 之累積位移量逐時變化比較可觀察到，兩者雖然最終主要的累積位移量介於 -2.5 ~ 2.5 mm 之間，並存在雜訊若干；在圖 4-40 的 ArcSAR 部分卻可以看到明顯的先遠離、後靠近觀察者的趨勢，而在圖 4-39 的 GBSAR 卻沒有看到相類似的趨勢。

綜合本小節 LinearSAR、以及 ArcSAR 對 DS194 崩塌地進行為時一天的短時間監測，我們可以初步歸納出以下結論：

LinearSAR 成像解析度較 ArcSAR 為優，其根本原因在於 LinearSAR 具有 1.6 公尺的直線軌道，在建立合成孔徑的影像解析度會較旋臂長度僅 0.65 公尺的 ArcSAR 還要好；透過雷達影像中強反射點，如水塔、鋼骨、或者角反射器分佈位置，可以之輔助進行地物辨識。

第五章 結論與建議

第一節 結論

團隊於 112 年度主要目標為檢視 GB-SAR 在強降雨期間的訊號情況，若邊坡變化幅度過大，則 GB-SAR 無法分析微幅變動量，透過今年計畫瞭解 DS194 崩塌地在強降雨發生時間的地表變化情況，有下列發現。

一、邊坡持續位移情況

彙整 111 年至 112 年至 DS194 放置 GB-SAR 進行微幅變動觀測，該裸露邊坡為合適的 GB-SAR 設置地點，且可以裸露邊坡檢視到變化情況，在 111 年的數小時的觀測時間內，由於邊坡仍不太穩定，可以在 40 小時觀測到邊坡有部分變化情況，在上邊坡與坡腹有變化的情況。後續在較長時間的連續觀測，從連續 3 日至連續 14 日與連續 16 日都有觀察到邊坡在裸露範圍區都有向下邊坡位移的趨勢，由於 GB-SAR 並無解饒計算，故累計的位移量僅能參考，但若合計為往下邊坡移動，則其往下邊坡位移的趨勢仍十分明顯，顯然該邊坡仍屬於十分活躍的情況。

二、強降雨時間 GBSAR 適用性

理論上邊坡有劇烈變化 GB-SAR 無法微幅偵測，在強降雨發生時間，GB-SAR 仍觀測到蝕溝的側蝕情況，可以瞭解蝕溝正在側蝕影響的範圍位置，並同時可以監測整個大面積邊坡是否有位移情況，但在本次強降雨監測時間內 GB-SAR 訊號成果，有發現許多子單元邊坡有侵蝕與堆積的情況被紀錄，但並即時監測到大面積邊坡有顯著位移情況。

第二節 儀器使用限制

GB-SAR 在使用上仍有其限制，以下進行研究限制的說明。

一、植被無法同調性

植被地區仍然無法進行有效觀測，雖然在夜間濕度較高的時候於植被區有建立起同調性，但本團隊認為其暫時建立的同調性可性程度不高，無法用於微幅變化偵測。

二、雷達合併雜訊問題

使用合成孔徑雷達會有雷達影像融合導致雜訊增強的情況發生，，如圖 5-1 中央橫軸 0 公尺位置，可以觀察到一系列窄扇形向遠處發散訊號，故雷達資料的判讀仍須以人工進行資料檢視。

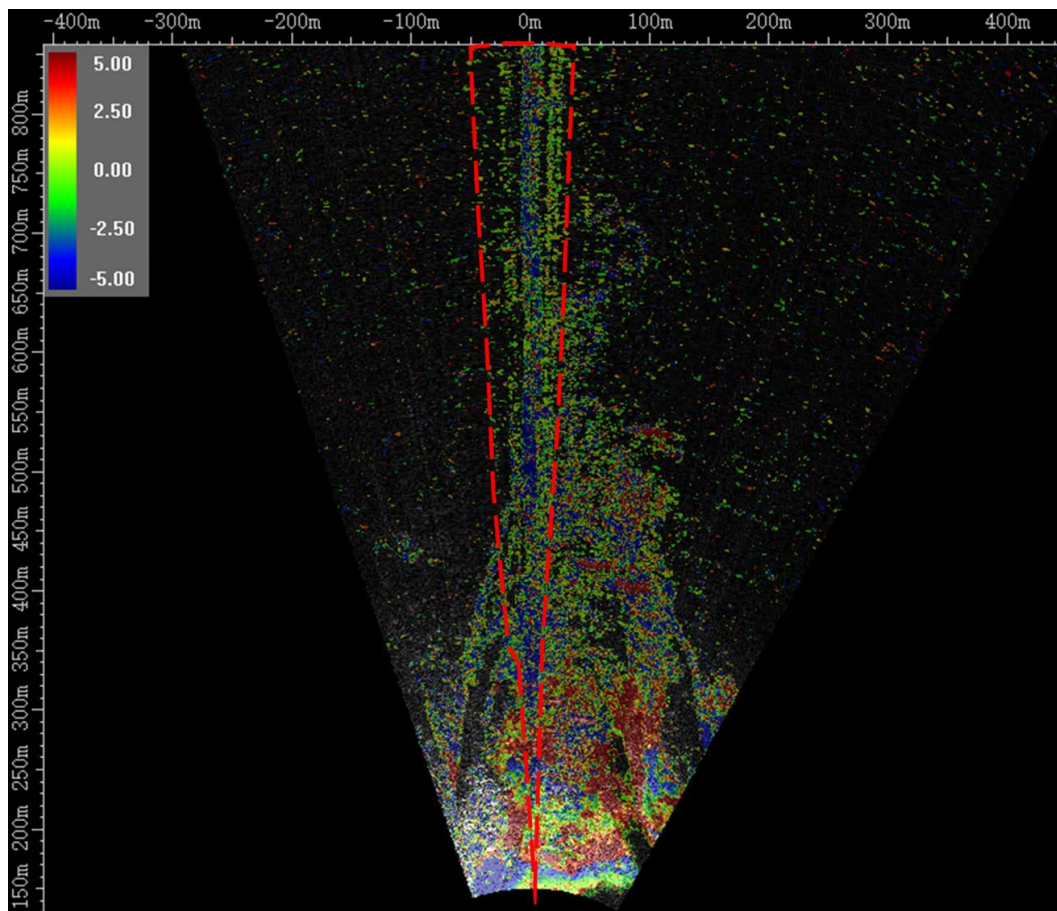


圖 5-1 GB-SAR 套疊變形量與雜訊干擾結果

三、現地雷達強反射體複反射問題

從雷達回波圖可以看到若在觀測範圍內有雷達的強反射體，接收到的訊號會有複反射的情況發生，在 DS194 崩塌地 GB-SAR 放置位置前方有兩個不鏽鋼水塔，因多重反射作用而在雷達影像中產生重影現象，如下圖 5-2 與圖 5-3 中，紅色圓形虛線範圍內所示。依照同方向、等信號距離的特性，觀察到 7 組完整/不完整的重影現象。

在分時段影像分析工作階段，若雜訊產生與複反射發生的區域為目標區則會使得可以監測的範圍減少，需透過研究人員會篩選調多重影像區域進行判斷。

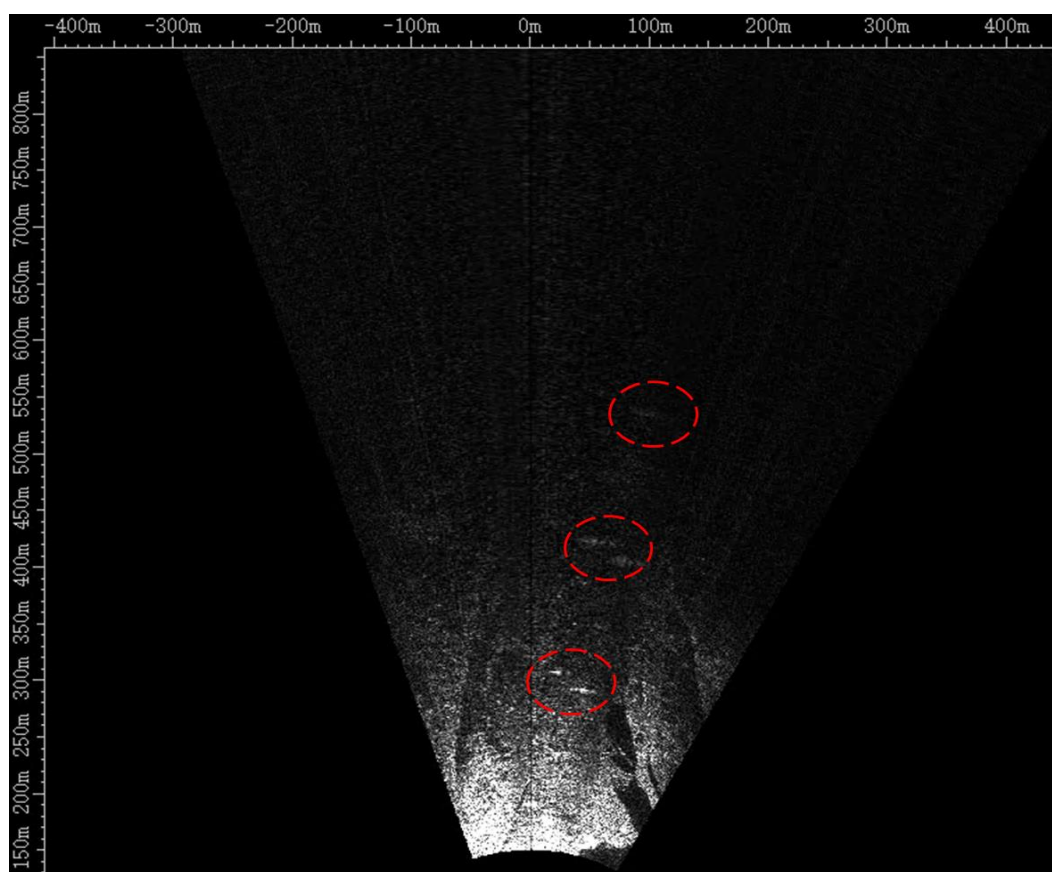


圖 5-2 GB-SAR 掃描邊坡時所發現之重影現象

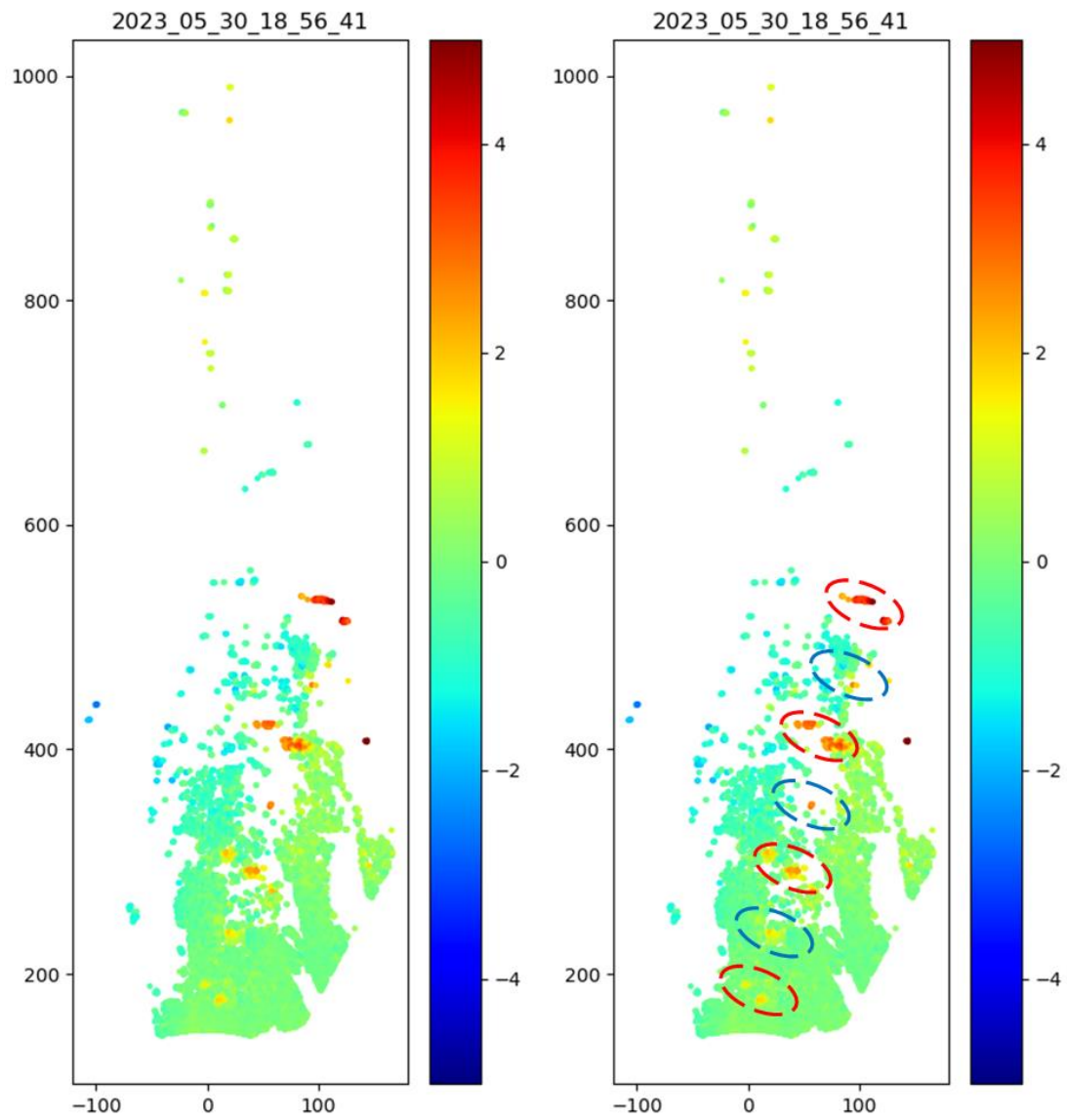


圖 5-3 在分時段影像分析工作階段觀察到約 7 組重影現象

第三節 建議

一、設置角反射器

由於植被區域無法有效觀測，建議可以設置 GB-SAR 的角反射器於植被覆蓋區，以反應該地區的地表變化情況，並可配合 GPS 接收做為位移量相互參考使用。

二、比較旋臂式 GB-SAR 與軌道式 GB-SAR 適用性差異

團隊已取得旋臂式 GB-SAR 設備，建議可以比較軌道式 GB-SAR 的適用性差異，並把資料做為相互驗證或相互補足為三維度變化計算。

參考文獻

1. 109 年簡易疏散避難圖_尖石鄉公所。取自:新竹縣災害防救資訊平台：<https://sites.google.com/g.ncu.edu.tw/hc119>，2020/11/14 檢索。
2. 土石流防災資訊網：<https://246.swcb.gov.tw/>，2020/11/15 檢索。
3. 中華民國交通部中央氣象局網頁：<https://www.cwb.gov.tw/V8/C/>，2020/11/14 檢索。
4. 台灣環境管理協會(2002)，土永續發展指標分析及其政策意涵之研究。
5. 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。
6. 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.
7. 李俊慧，洪，王.，汪學剛，and 陽，燕. (2016). "GB-SAR 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.
8. 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.
9. 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。
10. 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。
11. 洪嘉好(2010)，台灣中部地區山崩影響因子之時間序列分析，國立中興大學。
12. 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.
13. 造成山崩的因素有那些? , 2019 經濟部中央地質調查所:
https://www.moeacgs.gov.tw/faqs/faqs_more?id=5bb03e3e8a794ab09051e7b5bab49357 , 2022/11/15 檢索。
14. 陳宏宇 (1998) 山崩, 地球科學園地, 第 6 期, 第 12-21 頁。
15. 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。
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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。
20. 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。
21. 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.
22. 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.
23. 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.
 24. 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
 25. 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.
 26. 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.
 27. Curlander, J. C., and McDonough, R. N. (1991). Synthetic aperture radar, Wiley, New York.
 28. 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.
 29. 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.
30. 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).
 31. 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.
 32. Gili, J. A., Corominas, J., and Rius, J. (2000). "Using Global Positioning System techniques in landslide monitor-ing." Engineering geology, 55(3), 167-192.
 33. 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." Ge-omorphology, 73(1-2), 131-148.
 34. Godt, J.W., "Observed and modeled conditions for shallow landsliding in the Seattle, Washington area", Ph.D. dissertation, University of Colorado, 2004.
 35. 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.
 36. 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.
 37. Iverson, R.M., "Landslide triggering by rain infiltration," Water

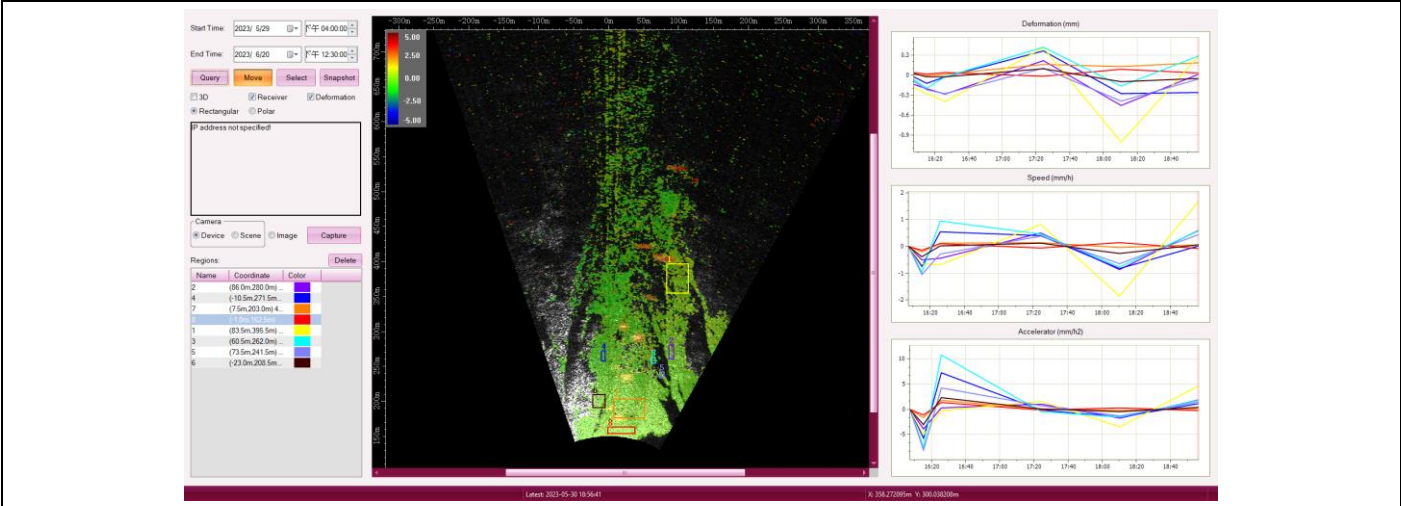
- Resource Research, 36(7):1897-1910, 2000.
38. Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.-H., Loye, A., Metzger, R., and Pedrazzini, A. (2012). "Use of LIDAR in landslide investigations: a review." *Natural hazards*, 61(1), 5-28.
39. Jakob M., H. Weatherly, "A hydroclimatic threshold for landslide initiation on the North Shore Mountains of Vancouver, British Columbia," *Geomorphology*, 54:137-156, 2003.
40. 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.
41. 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.
42. 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.
43. 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 (GB-SAR) for Land Deformation Monitoring. *Progress In Electromagnetics Research*, 97, 189-200.
44. 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.
45. 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.
46. Long, S., Tong, A., Yuan,Y., Li, Z., Wu, W., & Zhu, C. (2018). New

- Approaches to Processing Ground-Based SAR (GB-SAR) Data for Deformation Monitoring. Remote sensing, 10(12), 10.3390/rs10121936.
47. 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.
 48. 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.
 49. Martínez, A., Aguasca, A., Lort, M., & Broquetas, A. (2016). Micrometric deformation imaging at W-Band with GB-SAR. European Journal of Remote Sensing, 49, 719-733.
 50. Mensa, D. L. (1981). High resolution radar imaging, Artech House
 51. 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.
 52. 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.
 53. Pieraccini, M., & Miccinesi, L. (2019). Ground-Based Radar Interferometry: A Bibliographic Review. Remote sensing, 11(9), 10.3390/rs11091029.
 54. Rao, S. (2017). "Introduction to mmWave sensing: FMCW radars." Texas Instruments (TI) mmWave Training Series.
 55. Richards, M. A., Scheer, J., Holm, W. A., and Melvin, W. L. (2010). Principles of modern radar, Citeseer.

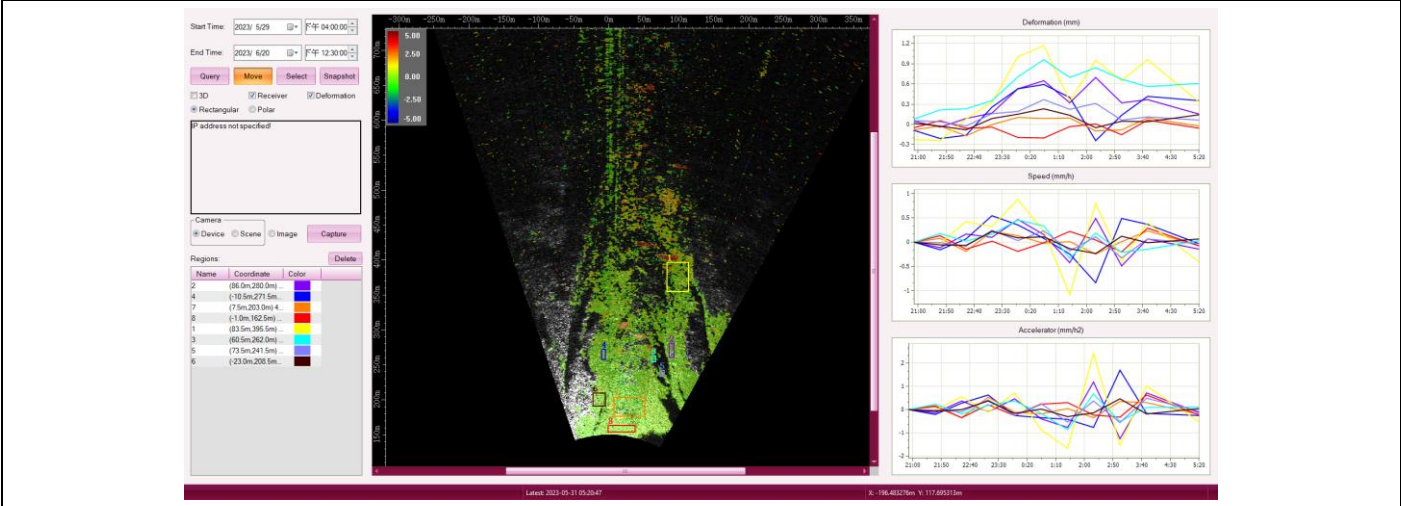
56. Savage, W.Z., J.W. Godt, and R.L. Baum, "Modeling time-dependent slope stability", Proceedings of 9th international symposium on landslide, 28 June-2 July, Rio de Janeiro, Brazil, 23-28, 2004.
57. Tarchi, D., Casagli, N., Fanti, R., Leva, D. D., Luzi, G., Pasuto, A., ... & Silvano, S. (2003). Landslide monitoring by using ground-based SAR interferometry: an example of application to the Tessina landslide in Italy. *Engineering geology*, 68(1-2), 15-30.
58. 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).
59. 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.
60. Terlien M.T.J., "The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds," *Environmental Geology*, 35(2-3):125-130, 1998.
61. 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

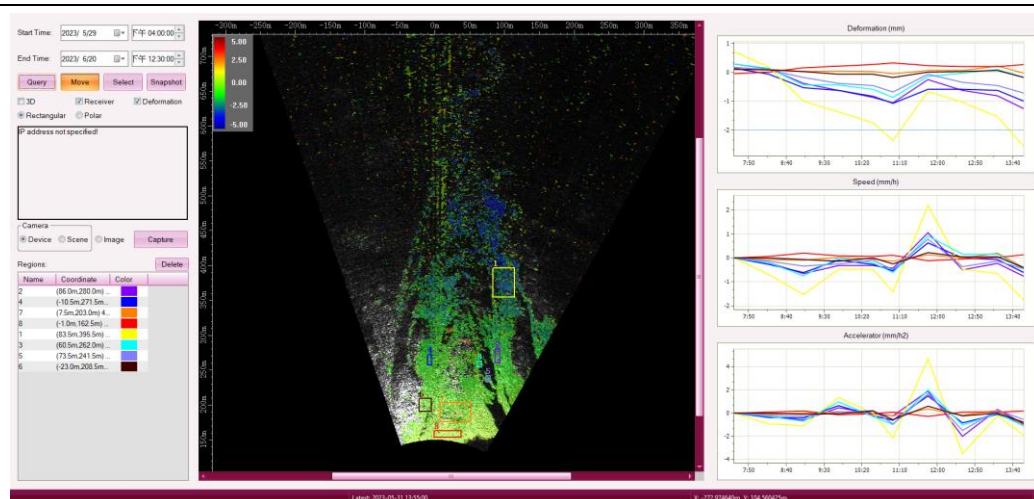
附錄一、GB-SAR 累積位移量



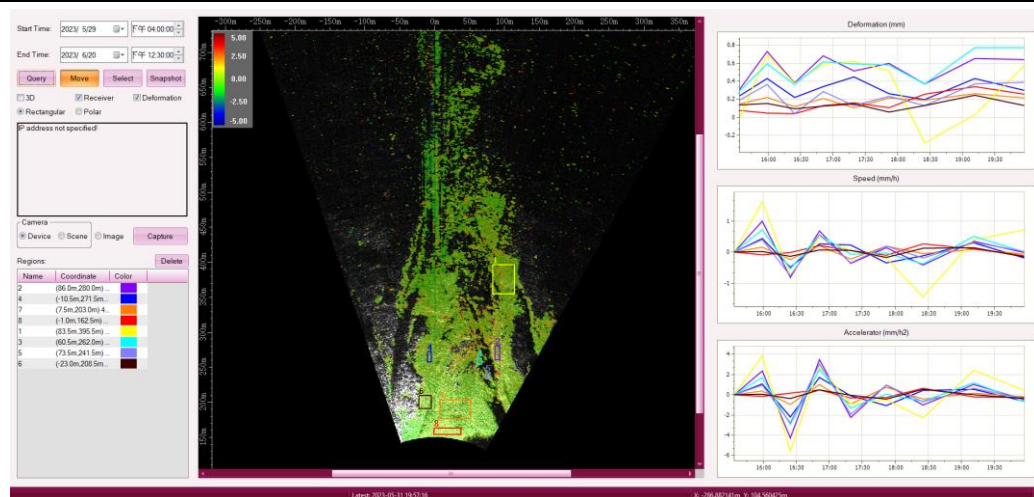
(Group_1) 2023_05_30_16_00_57 - 2023_05_30_18_56_41 (共 7 筆)



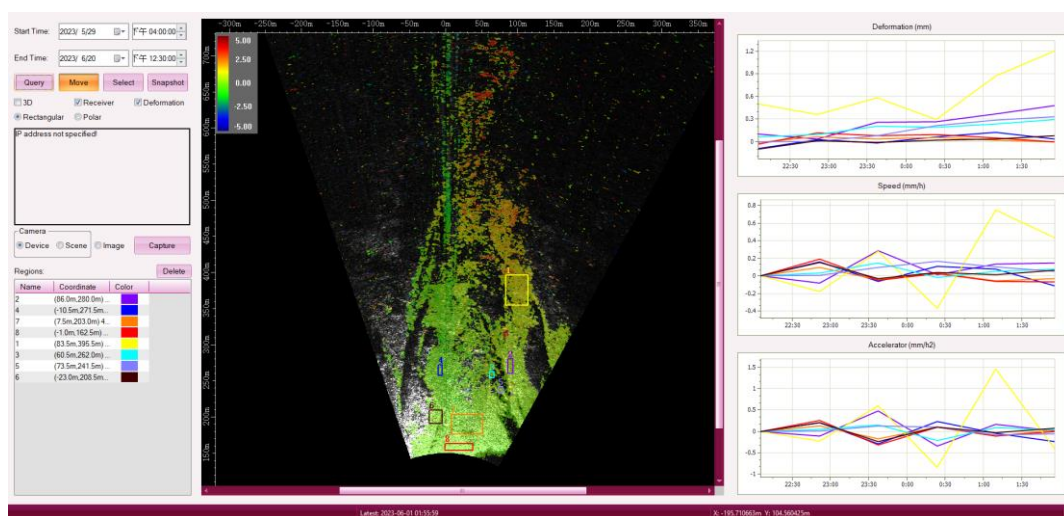
(Group_2) 2023_05_30_20_36_55 - 2023_05_31_05_20_47 (共 13 筆)



(Group_3) 2023_05_31_06_44_53 - 2023_05_31_13_55_00 (共 11 筆)



(Group_4) 2023_05_31_15_08_36 - 2023_05_31_19_57_16 (共 10 筆)



(Group_5) 2023_05_31_21_30_21 - 2023_06_01_01_55_59 (共 7 筆) -大雨

資料不足

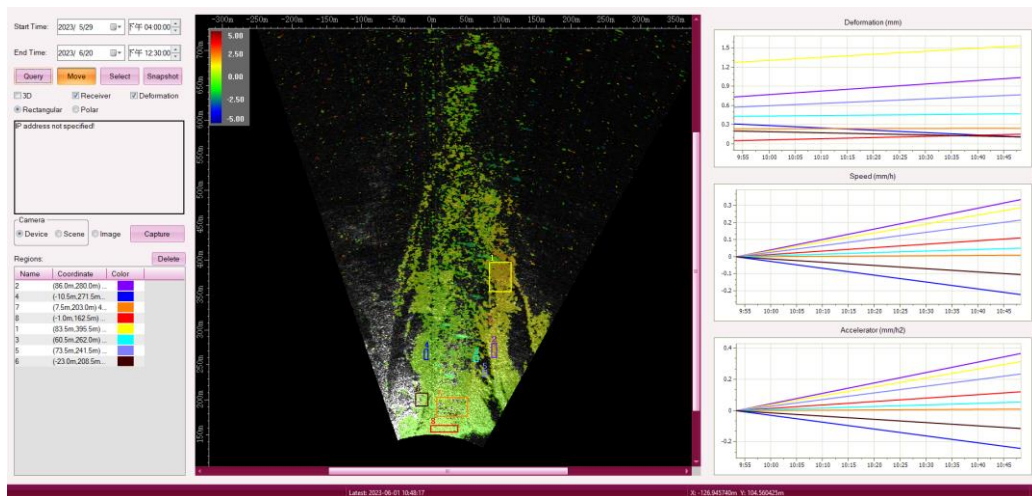
(Group_6) 2023_06_01_04_46_44 - 2023_06_01_05_32_52 (共 2 筆)

資料不足

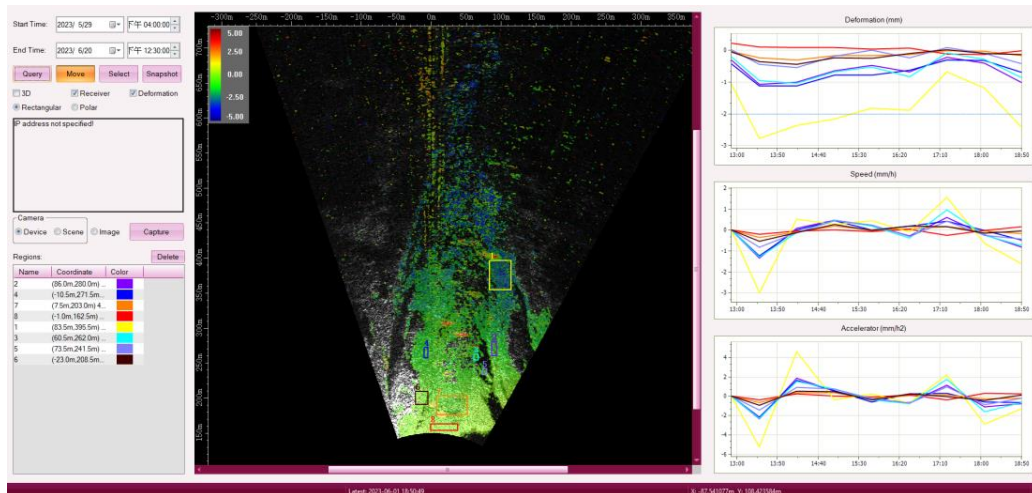
(Group_7) 2023_06_01_06_47_06 (共 1 筆)

資料不足

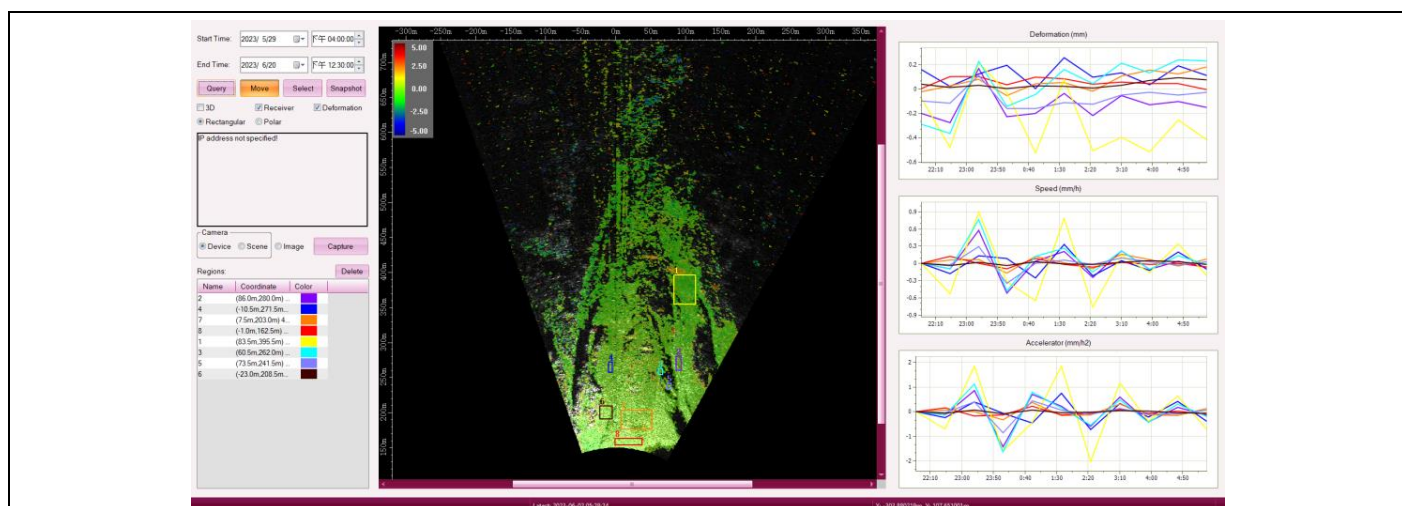
(Group_8) 2023_06_01_07_58_05 (共 1 筆)



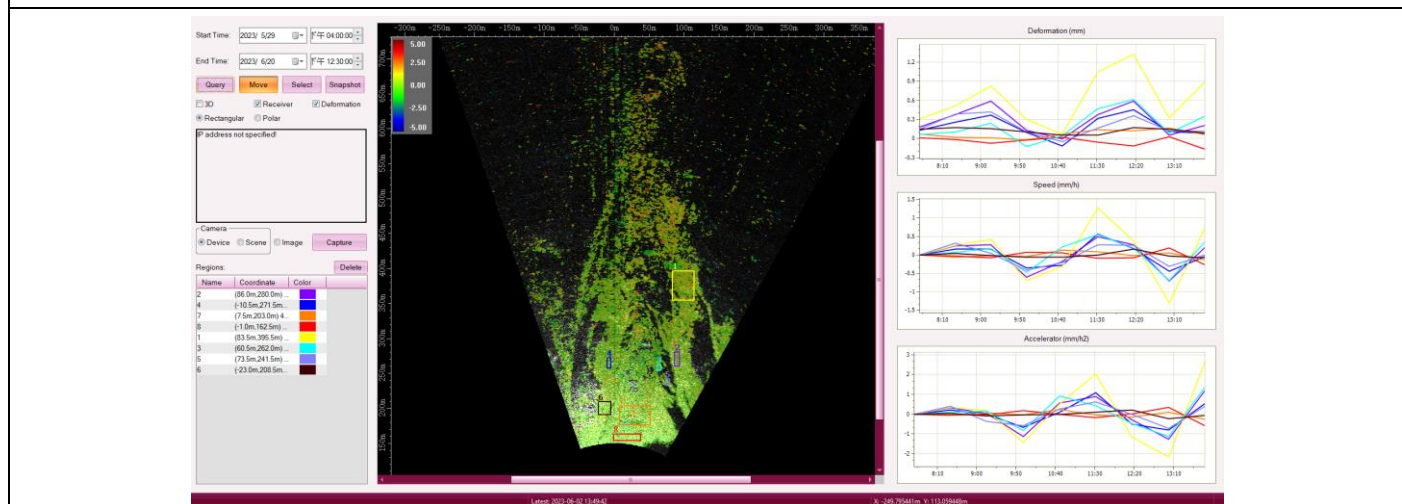
(Group_9) 2023_06_01_09_00_22 - 2023_06_01_10_48_17 (共 3 筆)



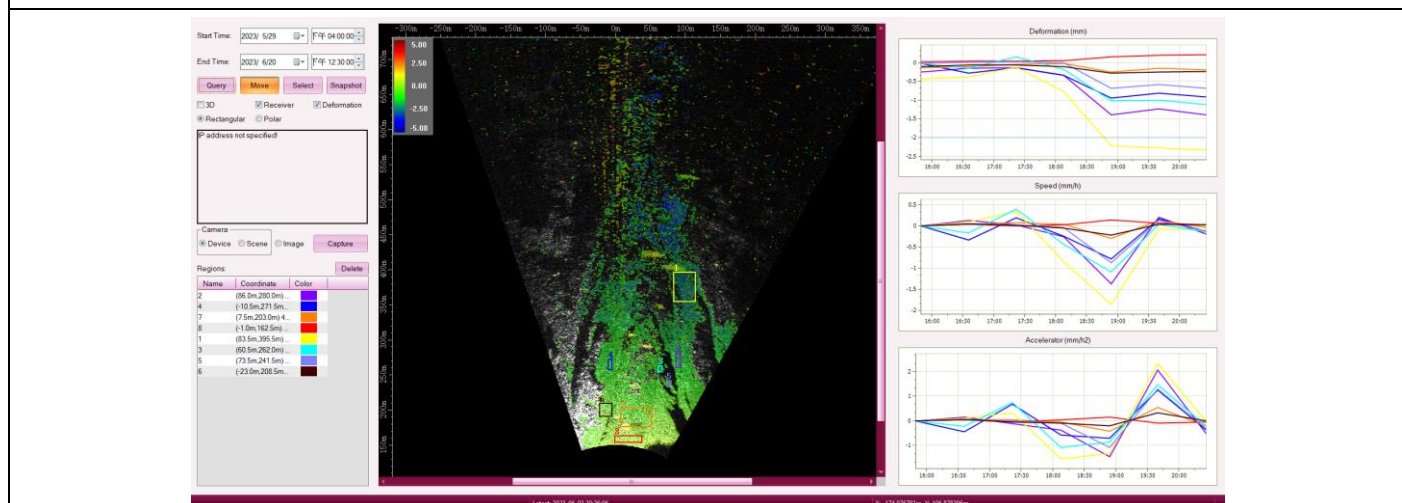
(Group_10) 2023_06_01_11_56_25 - 2023_06_01_18_50_49 (共 10 筆) -大雨



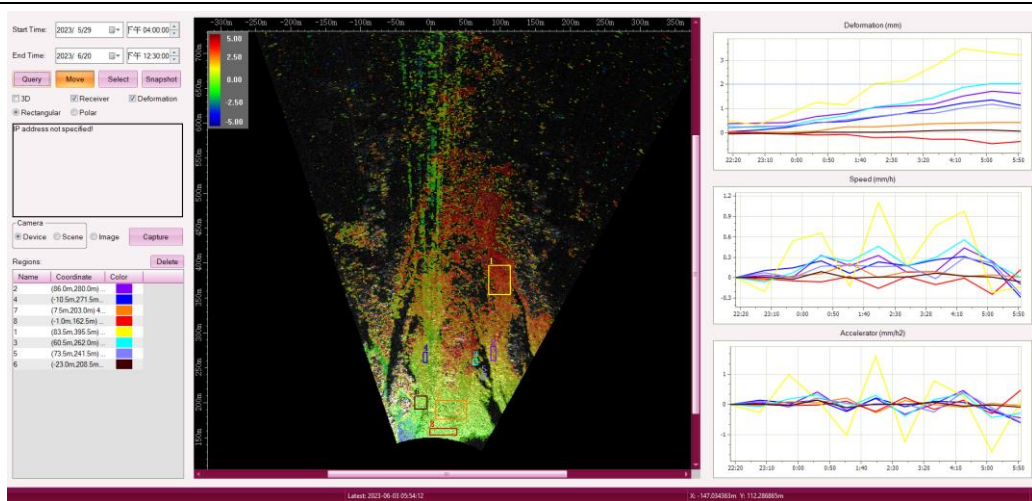
(Group_11) 2023_06_01_21_01_08 - 2023_06_02_05_28_24 (共 12 筆)



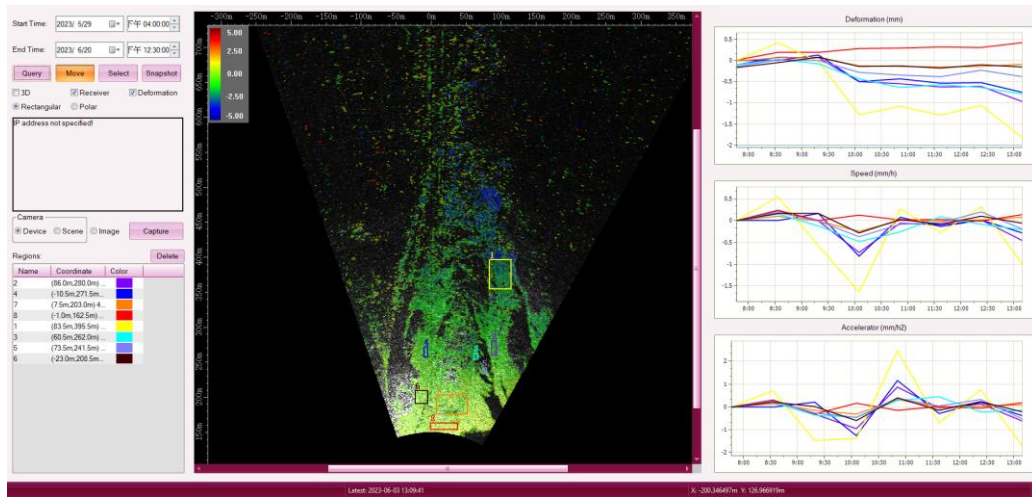
(Group_12) 2023_06_02_06_54_40 - 2023_06_02_13_49_42 (共 10 筆)



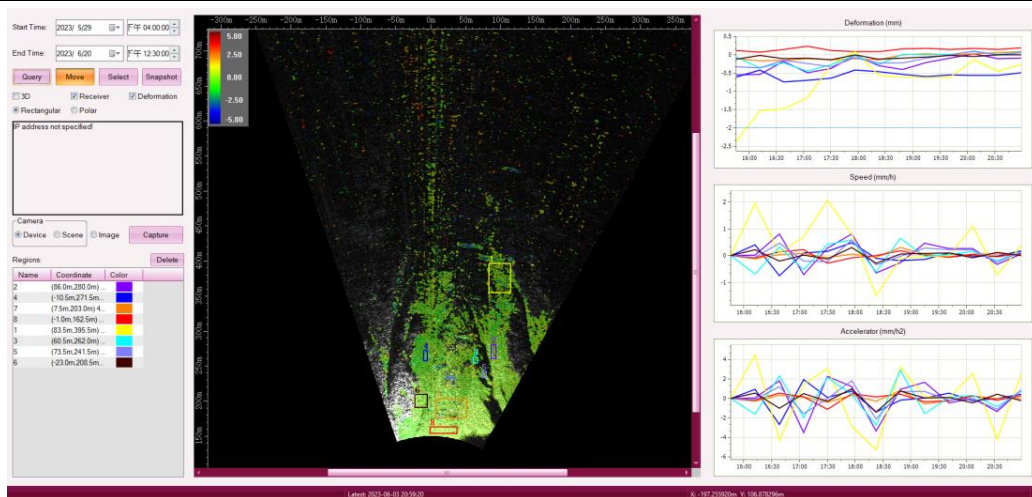
(Group_13) 2023_06_02_15_03_24 - 2023_06_02_20_26_06 (共 8 筆)



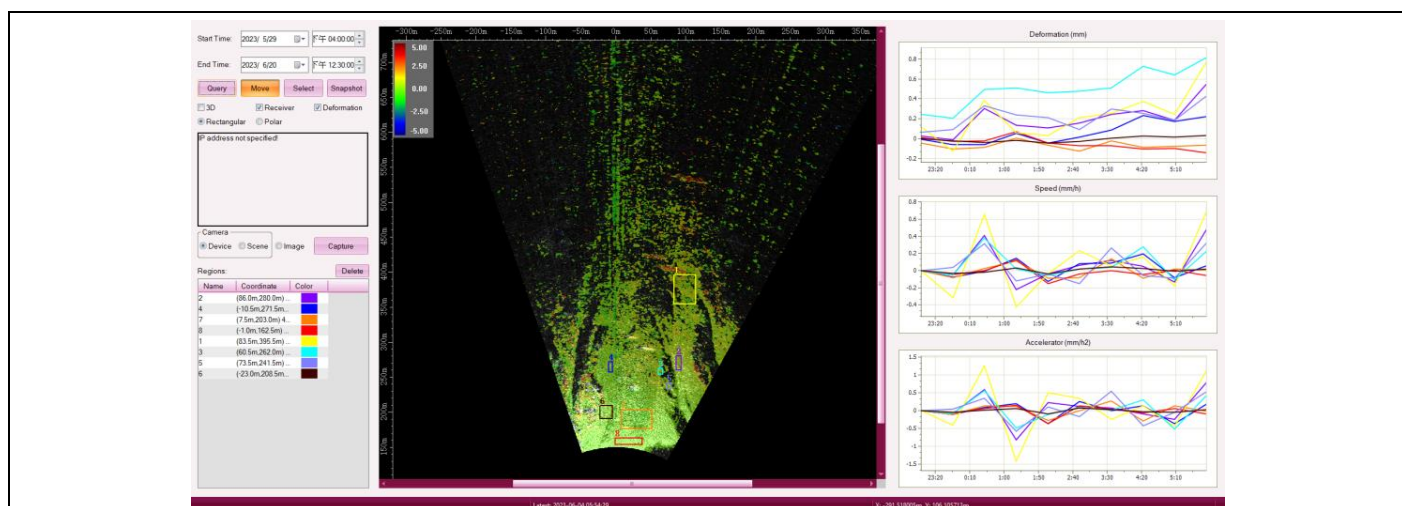
(Group_14) 2023_06_02_21_26_22 - 2023_06_03_05_54_12 (共 12 筆)



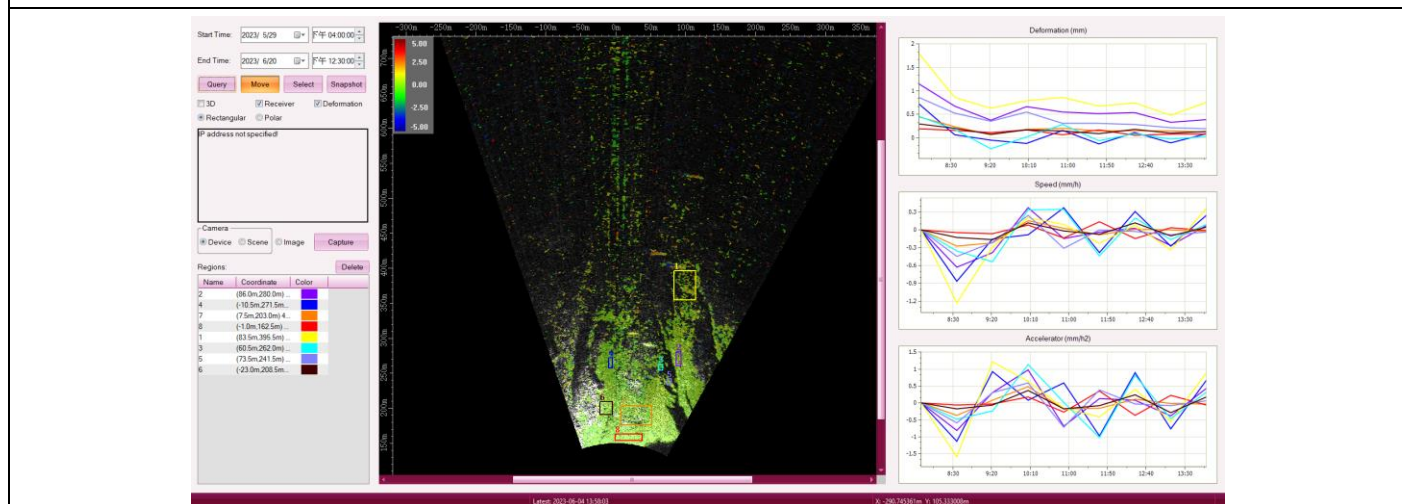
(Group_15) 2023_06_03_07_00_49 - 2023_06_03_13_09_41 (共 9 筆)



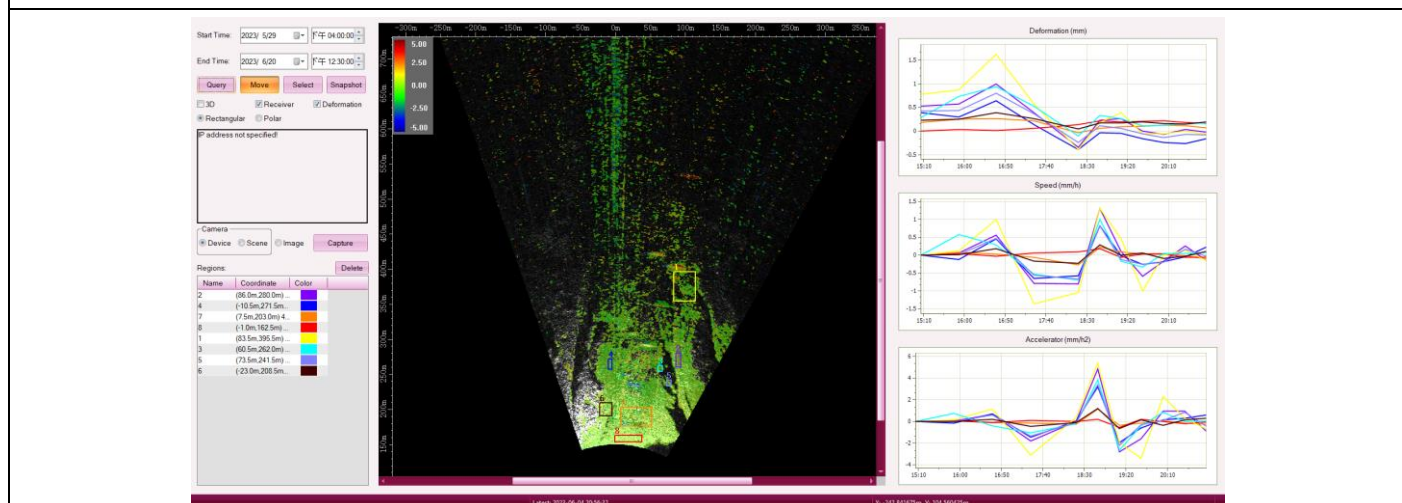
(Group_16) 2023_06_03_15_19_45 - 2023_06_03_20_59_20 (共 14 筆) -大雨



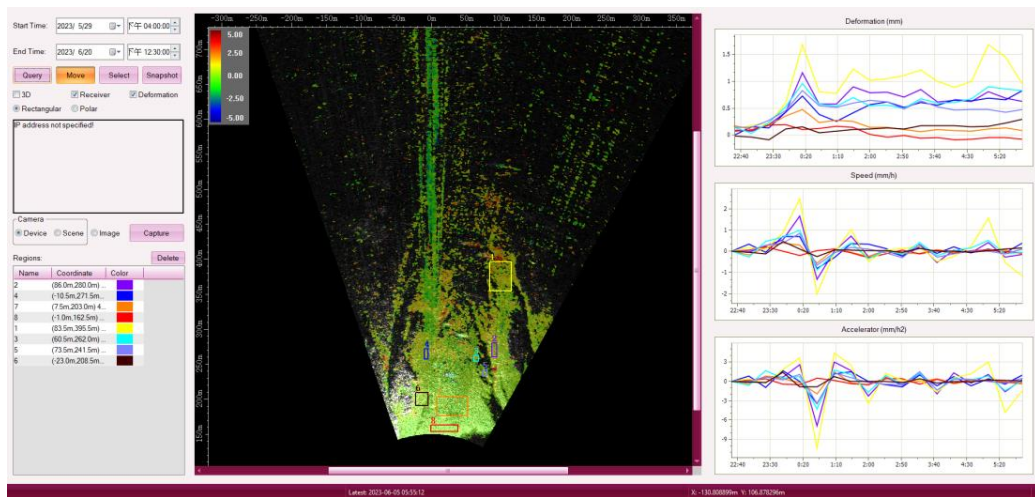
(Group_17) 2023_06_03_22_13_12 - 2023_06_04_05_54_29 (共 11 筆)



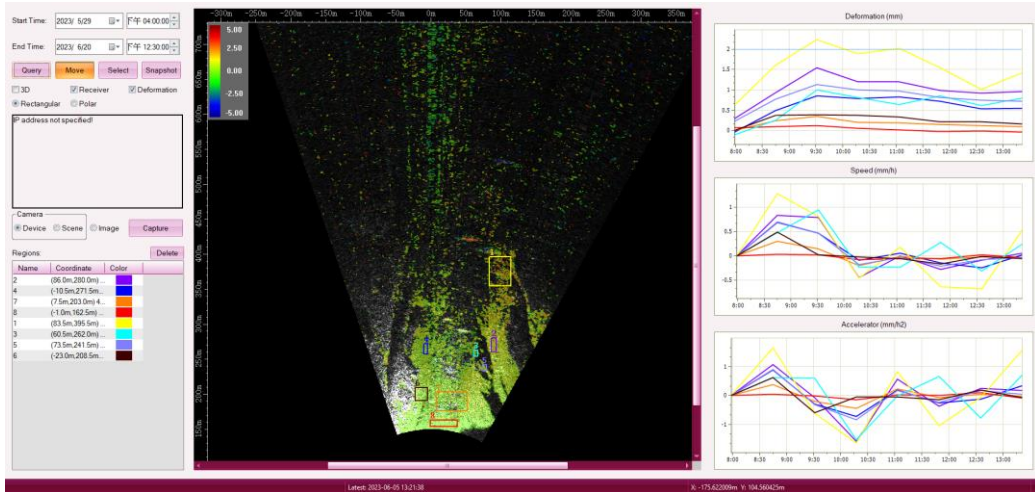
(Group_18) 2023_06_04_07_03_01 - 2023_06_04_13_58_03 (共 10 筆)



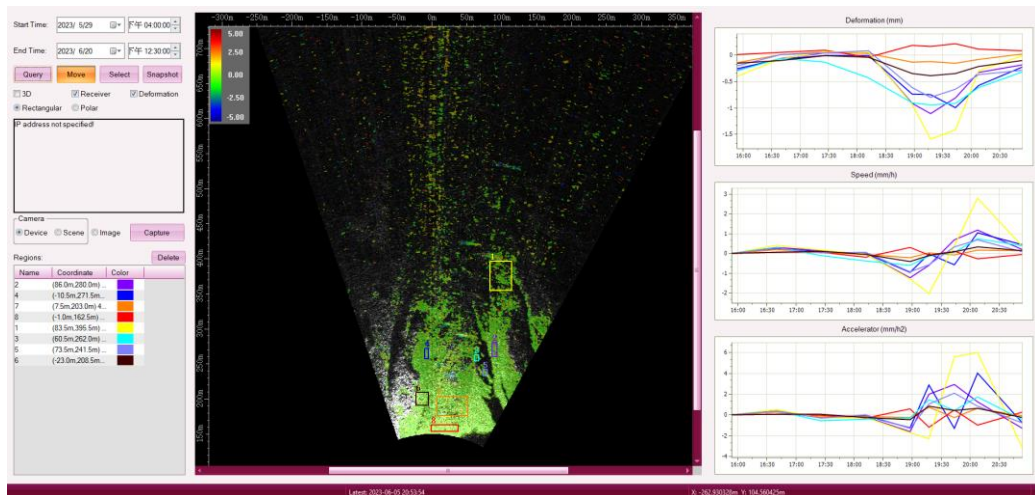
(Group_19) 2023_06_04_14_58_55 - 2023_06_04_20_56_32 (共 13 筆)



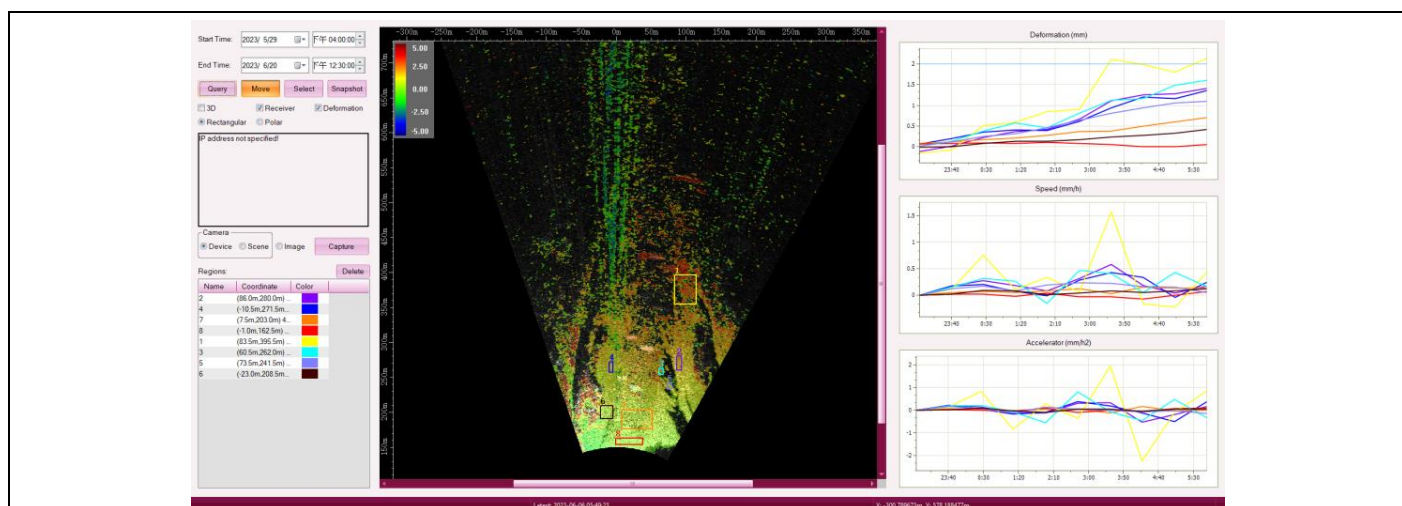
(Group_20) 2023_06_04_22_04_54 - 2023_06_05_05_55_12 (共 19 筆) -大雨



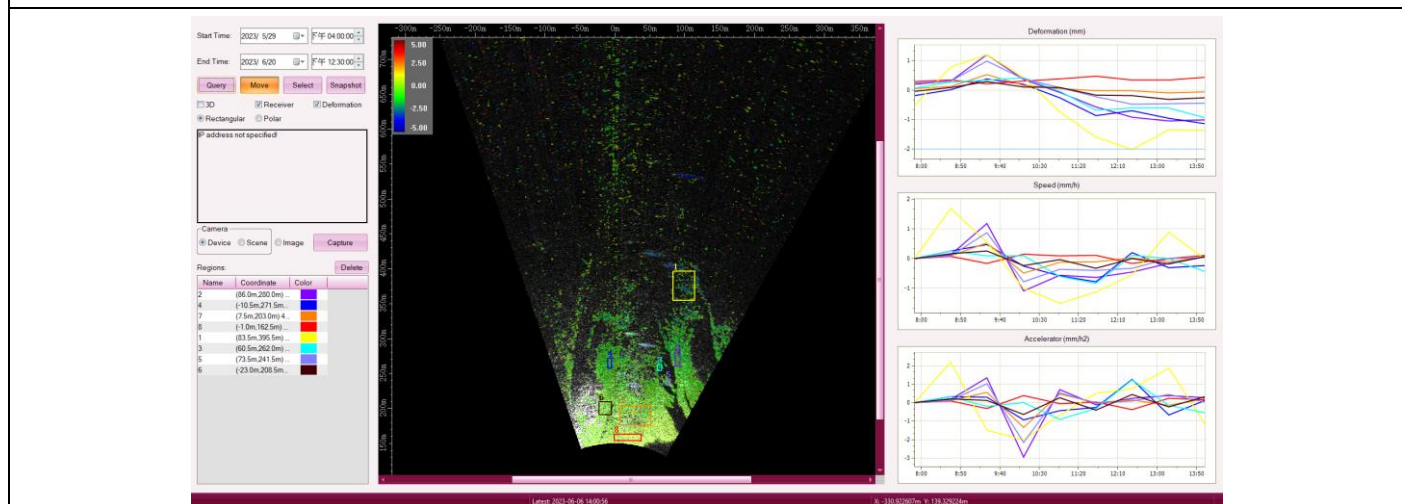
(Group_21) 2023_06_05_07_12_48 - 2023_06_05_13_21_38 (共 9 筆)



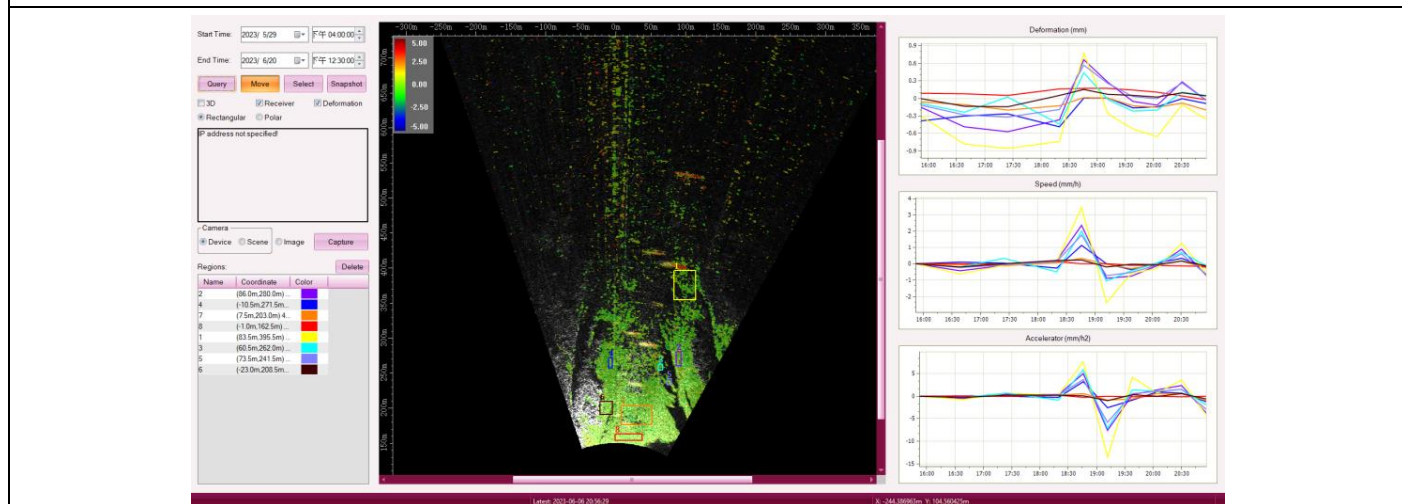
(Group_22) 2023_06_05_15_07_31 - 2023_06_05_20_53_54 (共 10 筆)



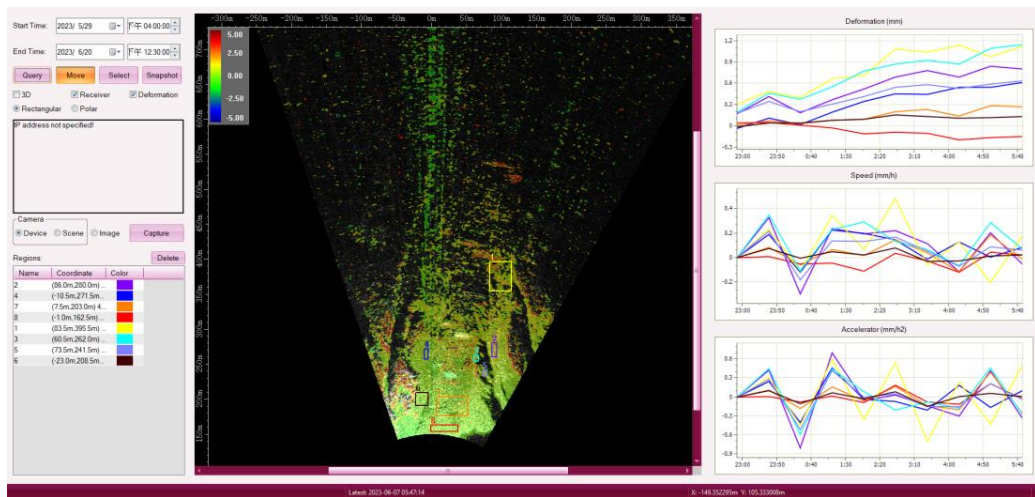
(Group_23) 2023_06_05_22_08_03 - 2023_06_06_05_49_23 (共 11 筆)



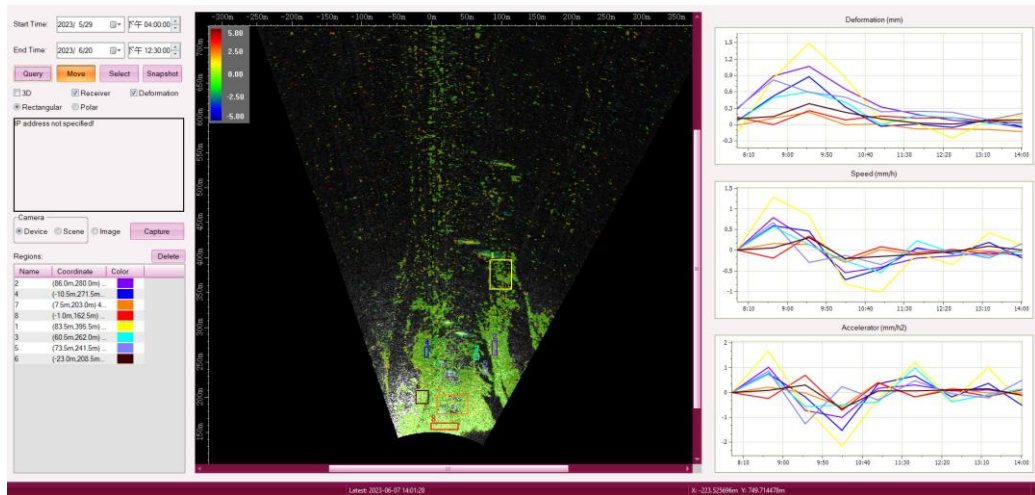
(Group_24) 2023_06_06_07_05_46 - 2023_06_06_14_00_56 (共 10 筆)



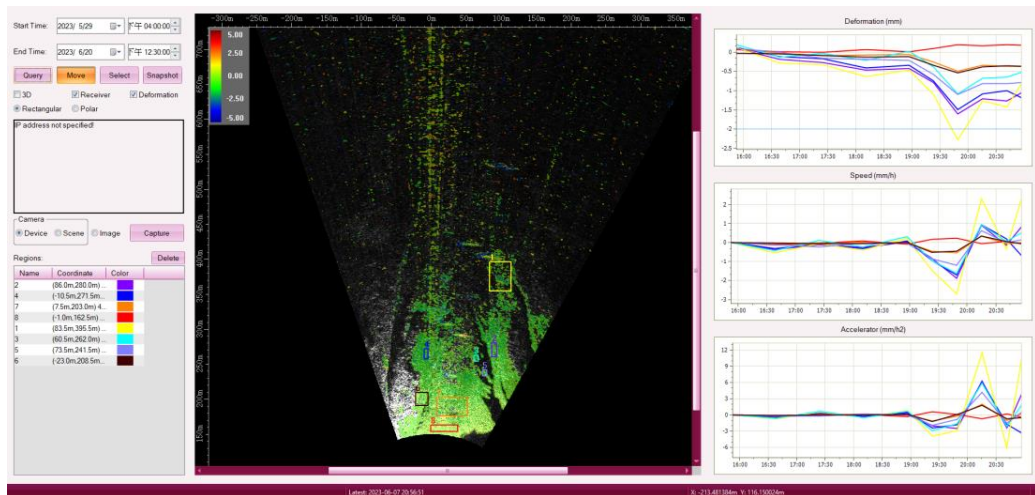
(Group_25) 2023_06_06_15_06_09 - 2023_06_06_20_56_29 (共 12 筆) -大雨



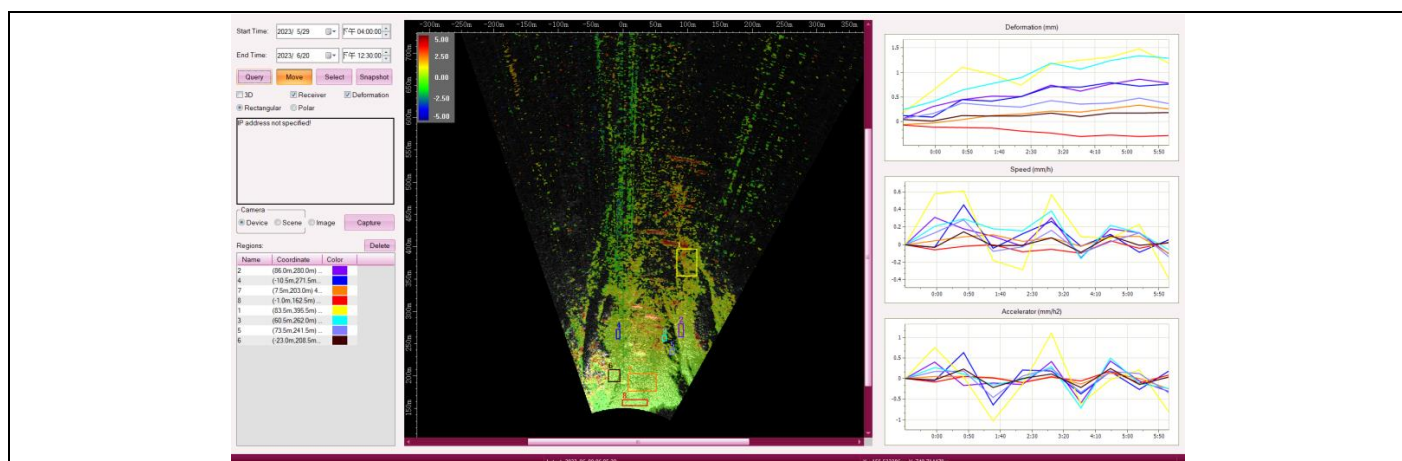
(Group_26) 2023_06_06_22_06_01 - 2023_06_07_05_47_14 (共 11 筆)



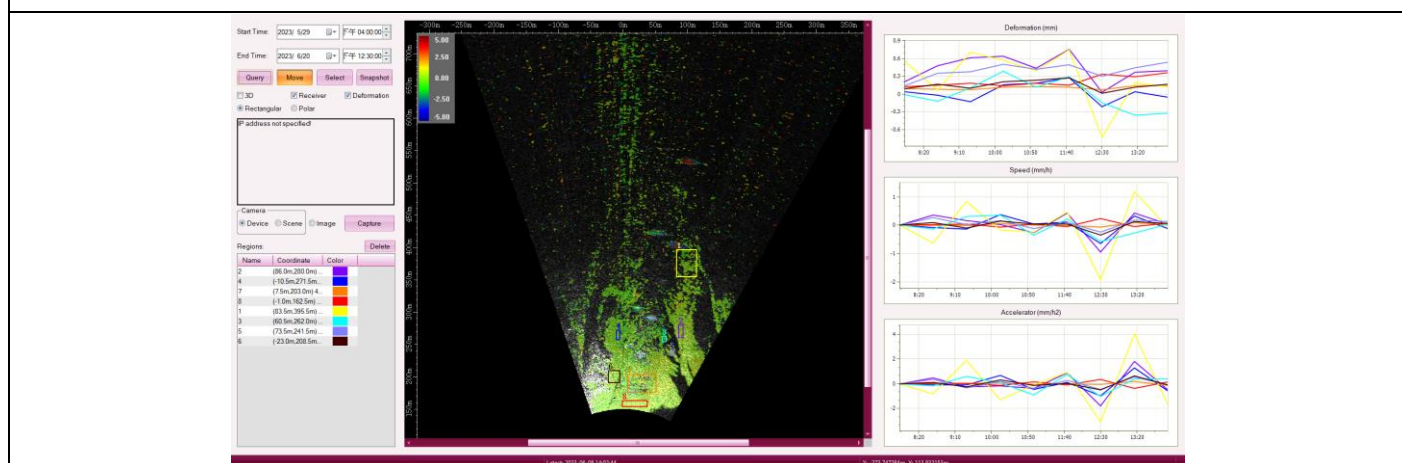
(Group_27) 2023_06_07_07_09_25 - 2023_06_07_14_01_28 (共 10 筆)



(Group_28) 2023_06_07_15_06_23 - 2023_06_07_20_56_51 (共 11 筆) -大雨



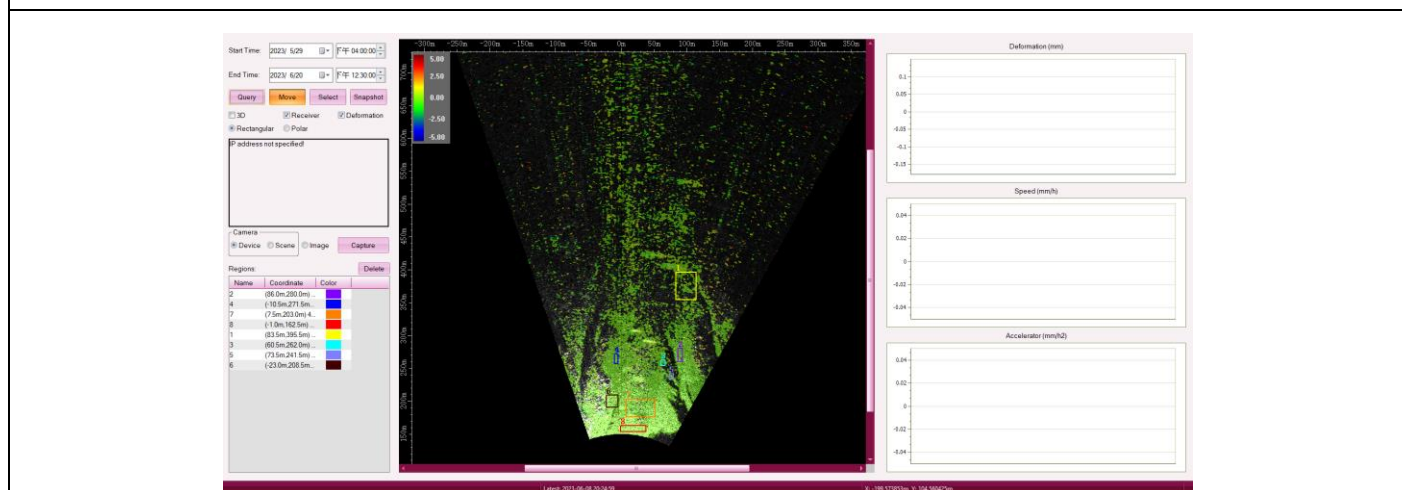
(Group_29) 2023_06_07_22_24_17 - 2023_06_08_06_05_29 (共 11 筆)



(Group_30) 2023_06_08_07_07_36 - 2023_06_08_14_02_44 (共 10 筆)

資料不足

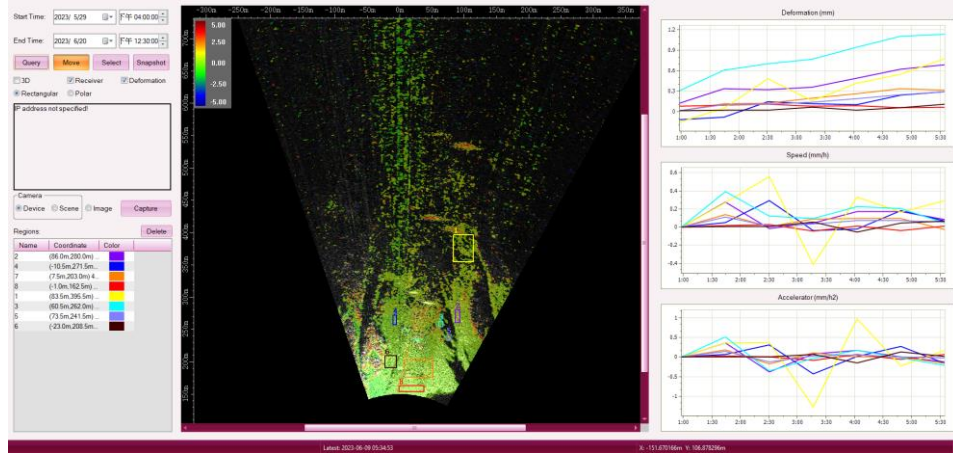
(Group_31) 2023_06_08_15_20_00 (共 1 筆)



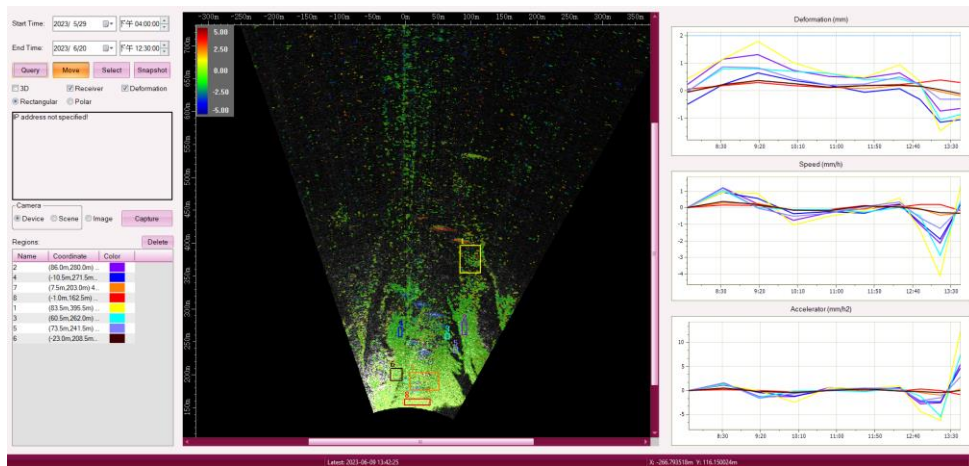
(Group_32) 2023_06_08_19_38_50 - 2023_06_08_21_00_34 (共 3 筆)

資料不足

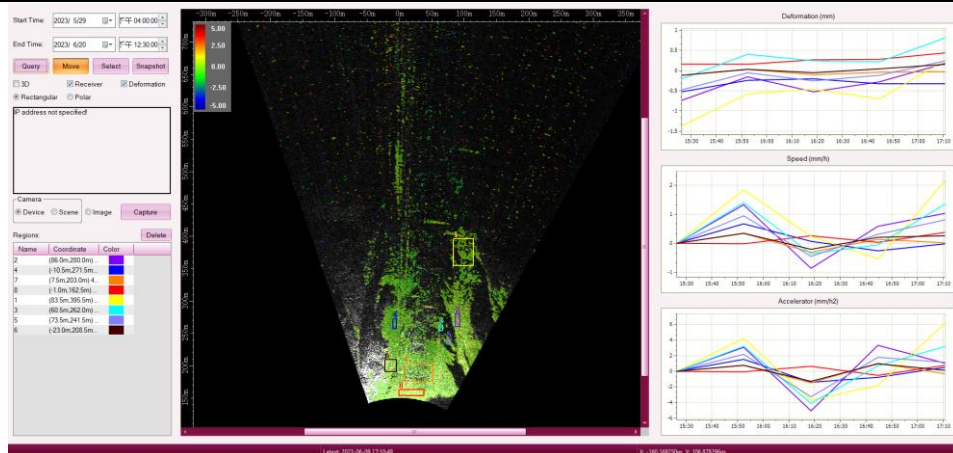
(Group_33) 2023_06_08_22_03_50 - 2023_06_08_22_50_02 (共 2 筆)



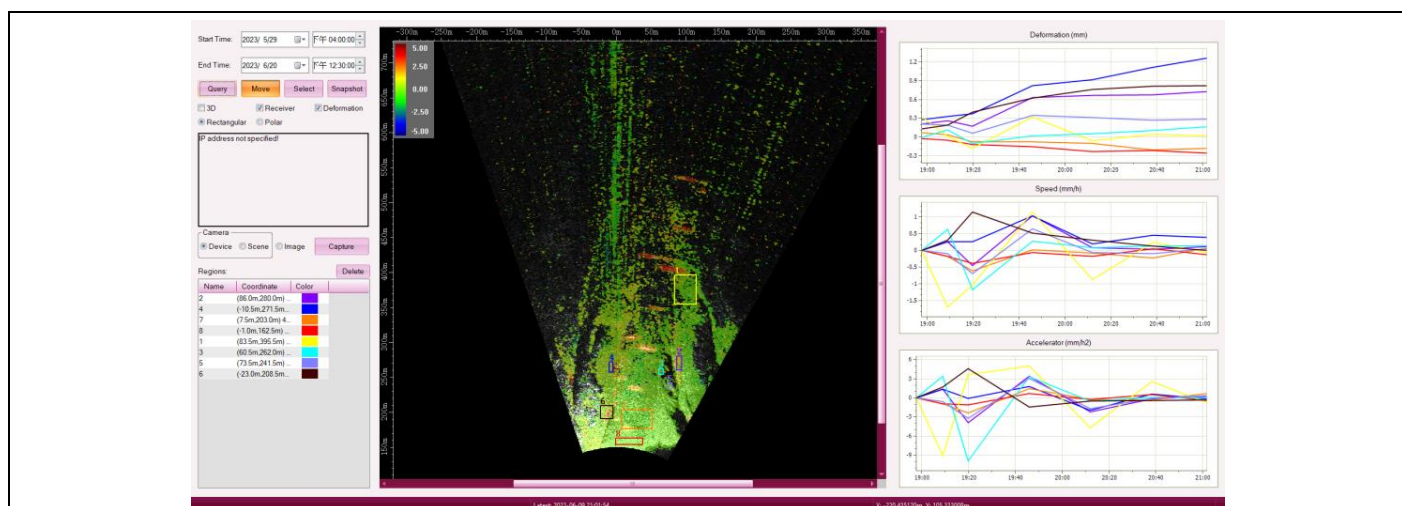
(Group_34) 2023_06_09_00_12_06 - 2023_06_09_05_34_53 (共 8 筆)



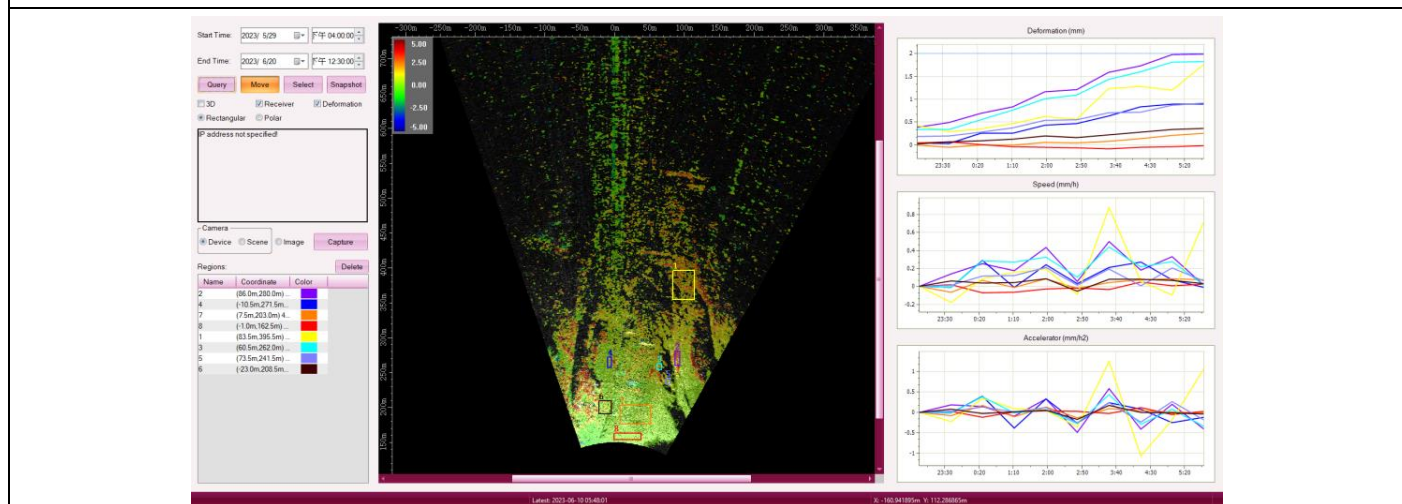
(Group_35) 2023_06_09_07_12_54 - 2023_06_09_13_42_25 (共 11 筆)



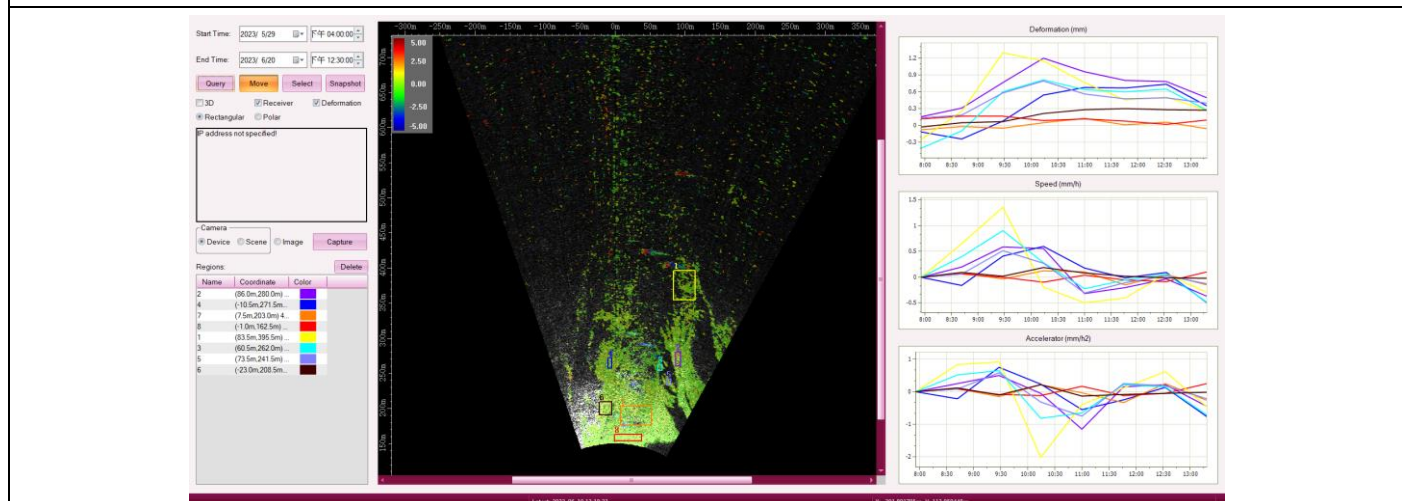
(Group_36) 2023_06_09_15_06_06 - 2023_06_09_17_10_48 (共 6 筆)-大雨



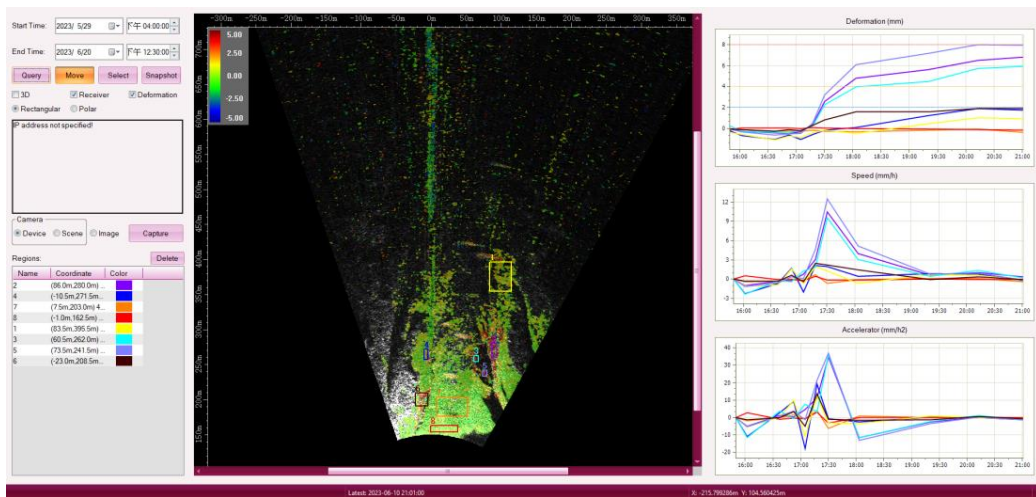
(Group_37) 2023_06_09_18_31_31 - 2023_06_09_21_01_54 (共 8 筆) -大雨



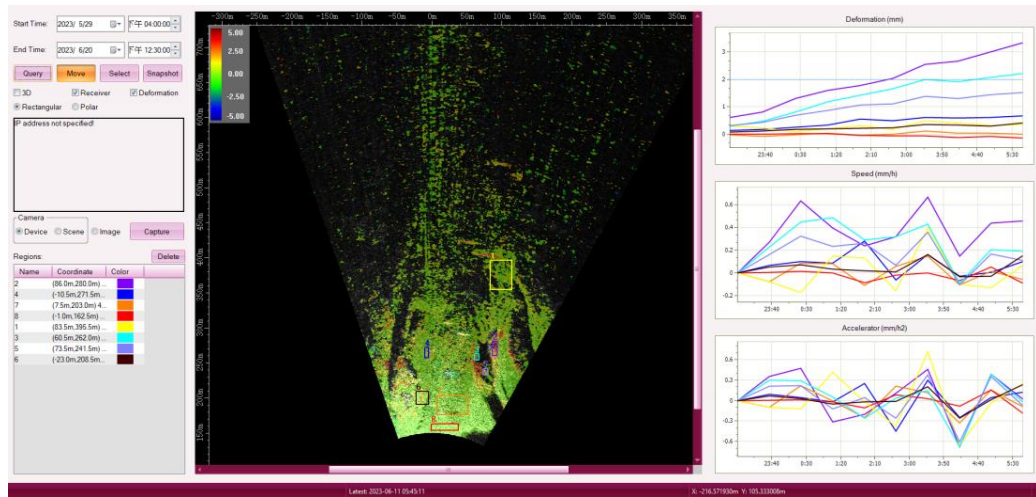
(Group_38) 2023_06_09_22_06_51 - 2023_06_10_05_48_01 (共 11 筆)



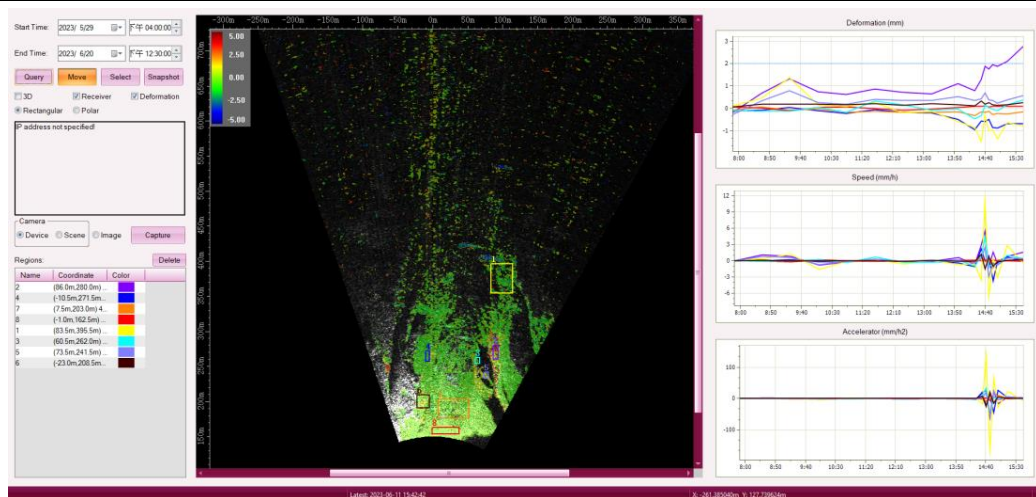
(Group_39) 2023_06_10_07_09_29 - 2023_06_10_13_18_22 (共 9 筆)



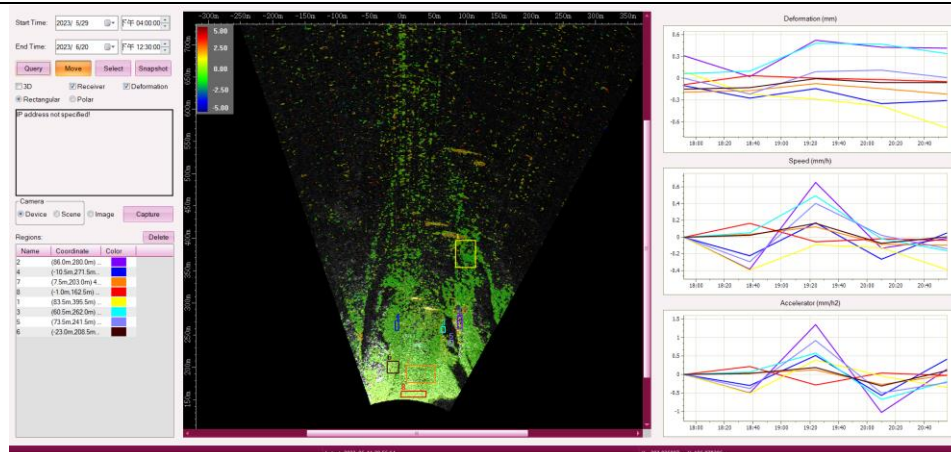
(Group_40) 2023_06_10_15_03_42 - 2023_06_10_21_01_00 (共 21 筆) -大雨



(Group_41) 2023_06_10_22_05_48 - 2023_06_11_05_45_11 (共 11 筆)



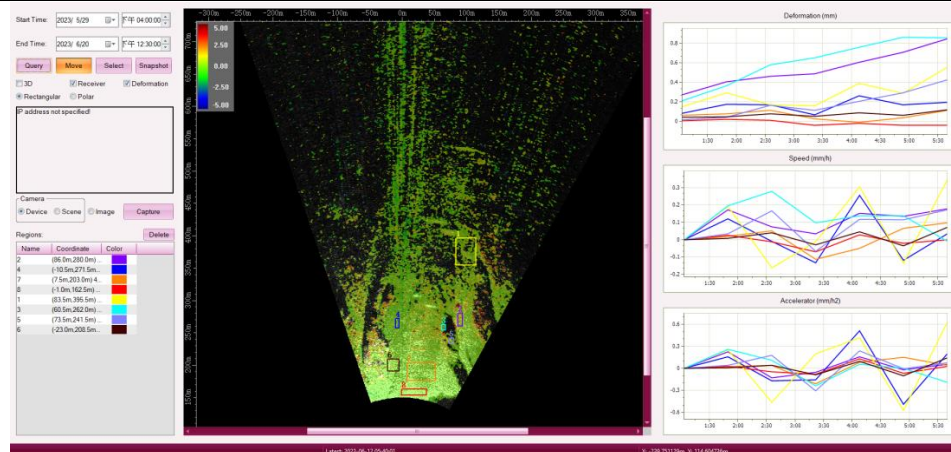
(Group_42) 2023_06_11_07_04_31 - 2023_06_11_15_42_42 (共 19 筆) -大雨



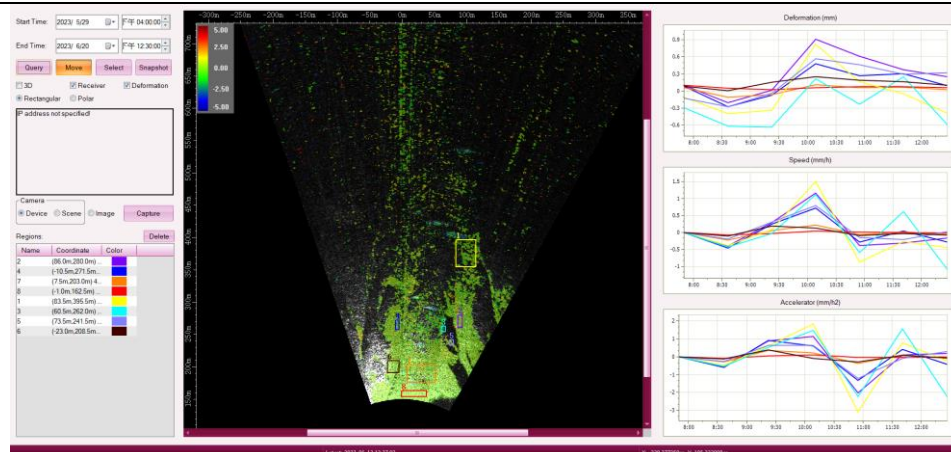
(Group_43) 2023_06_11_17_05_36 - 2023_06_11_20_56_14 (共 6 筆)

資料不足

(Group_44) 2023_06_11_22_02_24 - 2023_06_11_22_48_37 (共 2 筆)

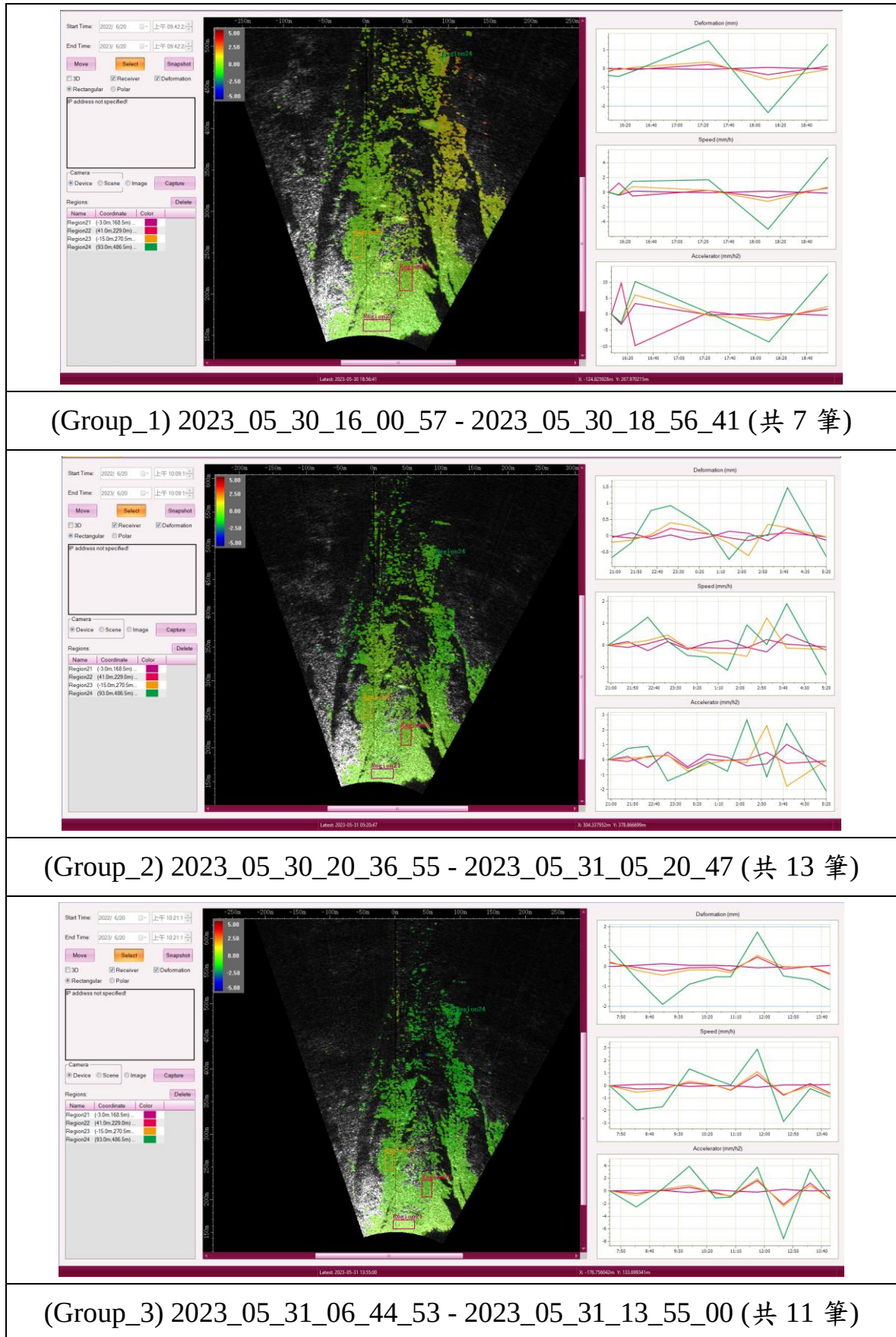


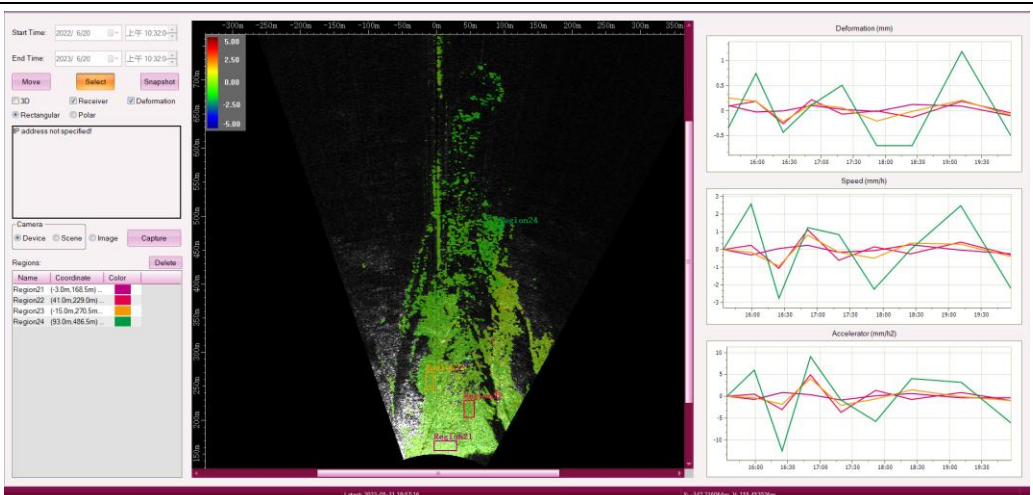
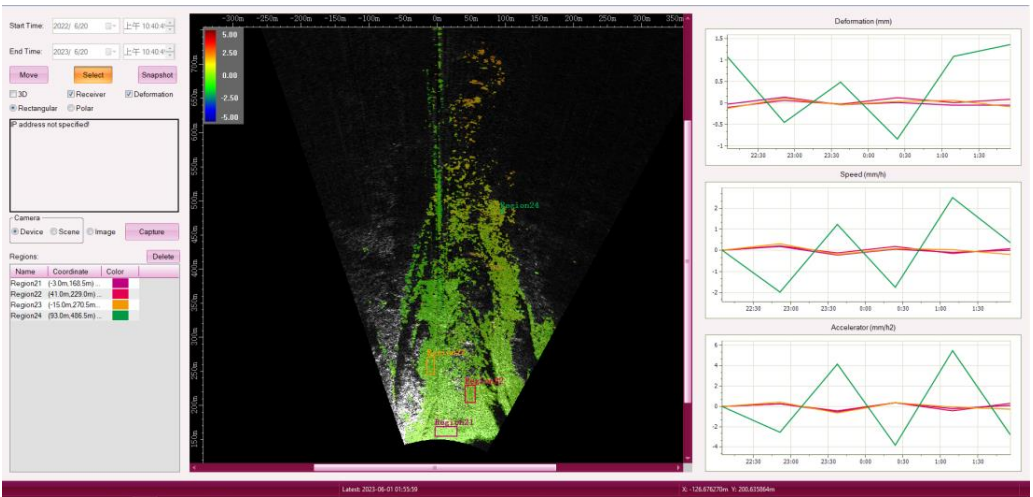
(Group_45) 2023_06_12_00_17_17 - 2023_06_12_05_40_01 (共 8 筆)

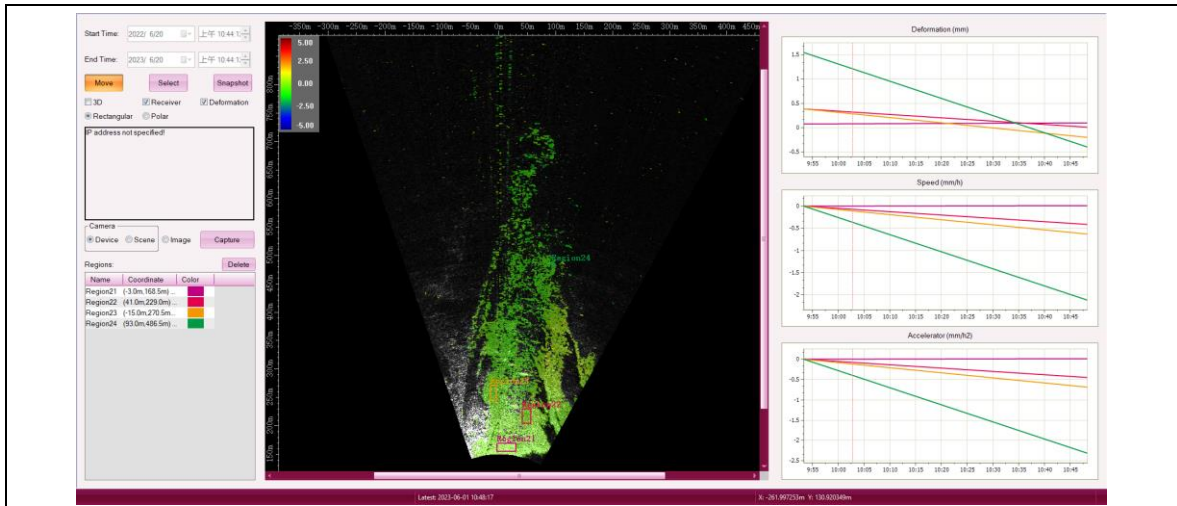


(Group_46) 2023_06_12_07_04_00 - 2023_06_12_12_27_02 (共 8 筆)

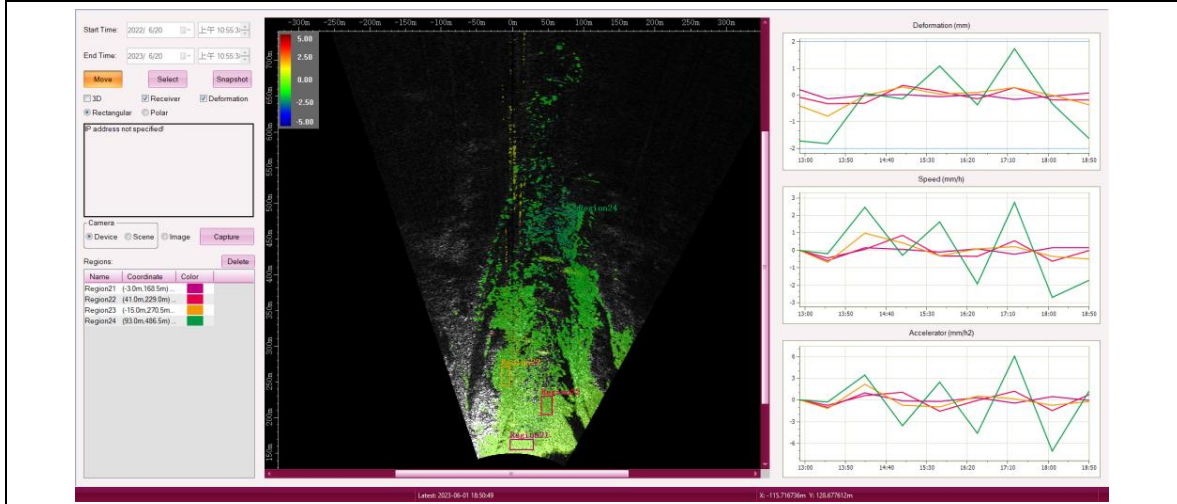
附錄二、GB-SAR 瞬時位移量




(Group_4) 2023_05_31_15_08_36 - 2023_05_31_19_57_16 (共 10 筆)

(Group_5) 2023_05_31_21_30_21 - 2023_06_01_01_55_59 (共 7 筆)-大雨
資料不足
(Group_6) 2023_06_01_04_46_44 - 2023_06_01_05_32_52 (共 2 筆)
資料不足
(Group_7) 2023_06_01_06_47_06 (共 1 筆)
資料不足
(Group_8) 2023_06_01_07_58_05 (共 1 筆)

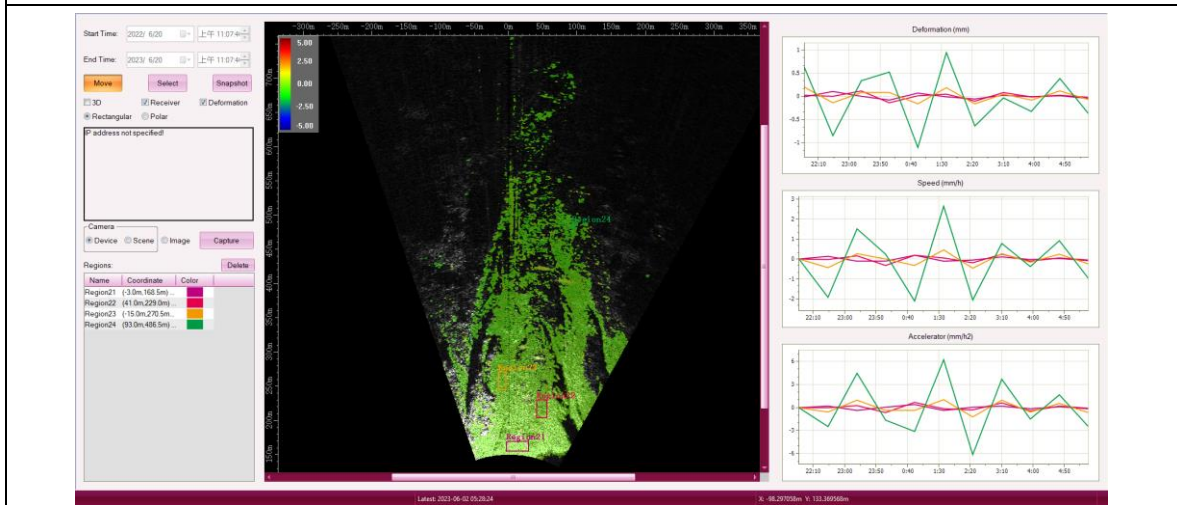


(Group_9) 2023_06_01_09_00_22 - 2023_06_01_10_48_17 (共 3 筆)

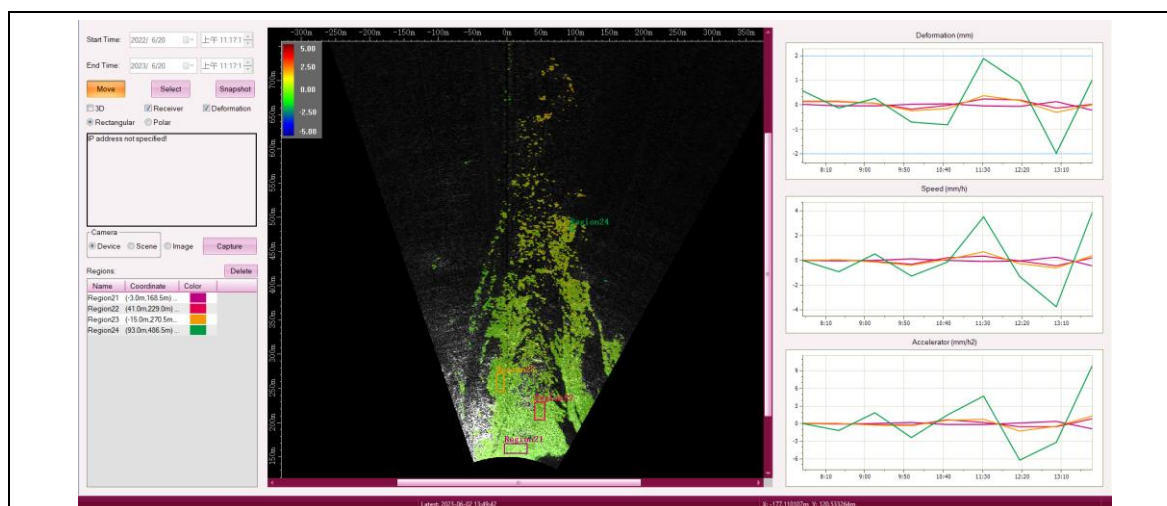


(Group_10) 2023_06_01_11_56_25 - 2023_06_01_18_50_49 (共 10 筆) -

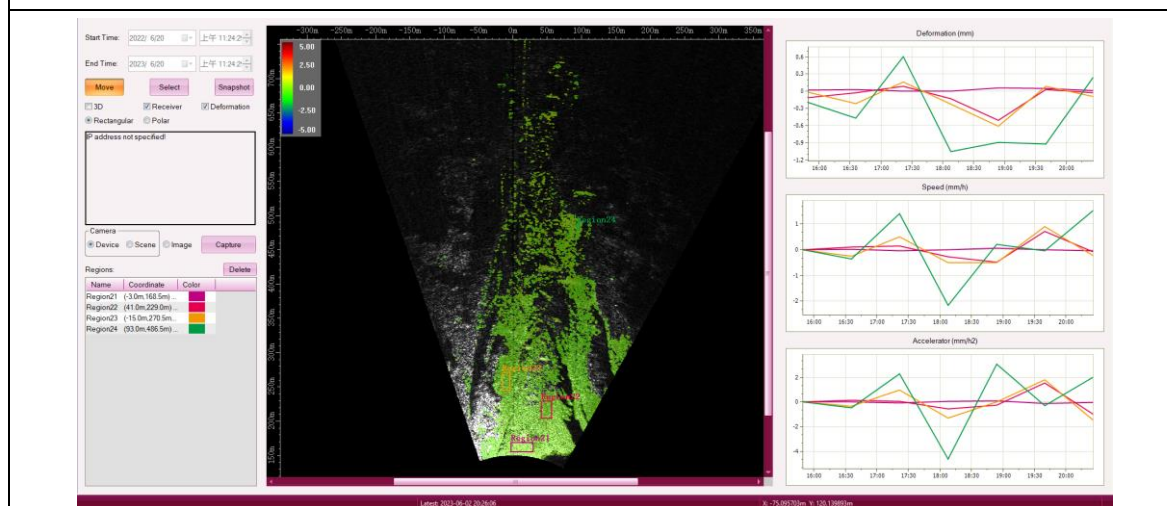
大雨



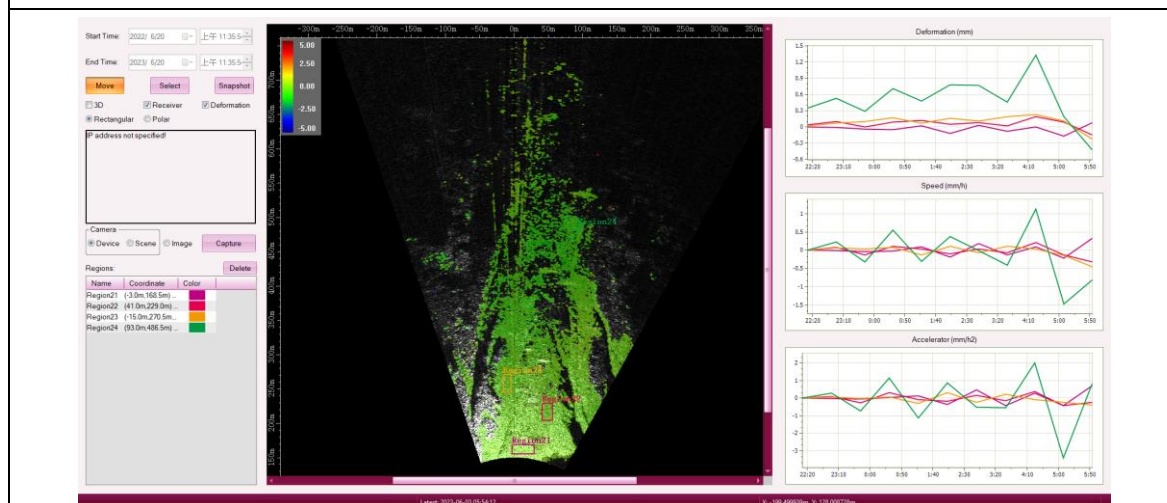
(Group_11) 2023_06_01_21_01_08 - 2023_06_02_05_28_24 (共 12 筆)



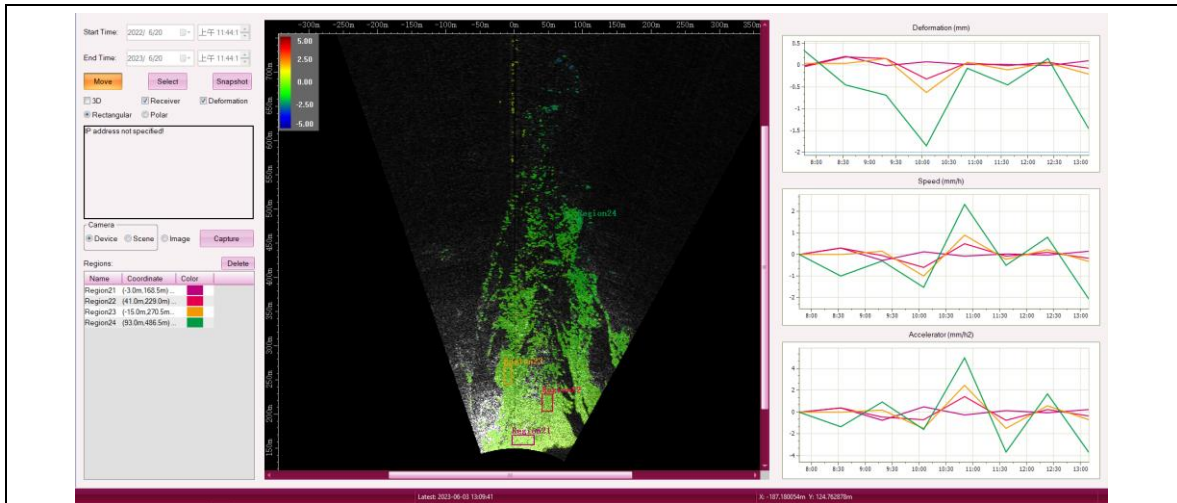
(Group_12) 2023_06_02_06_54_40 - 2023_06_02_13_49_42 (共 10 筆)



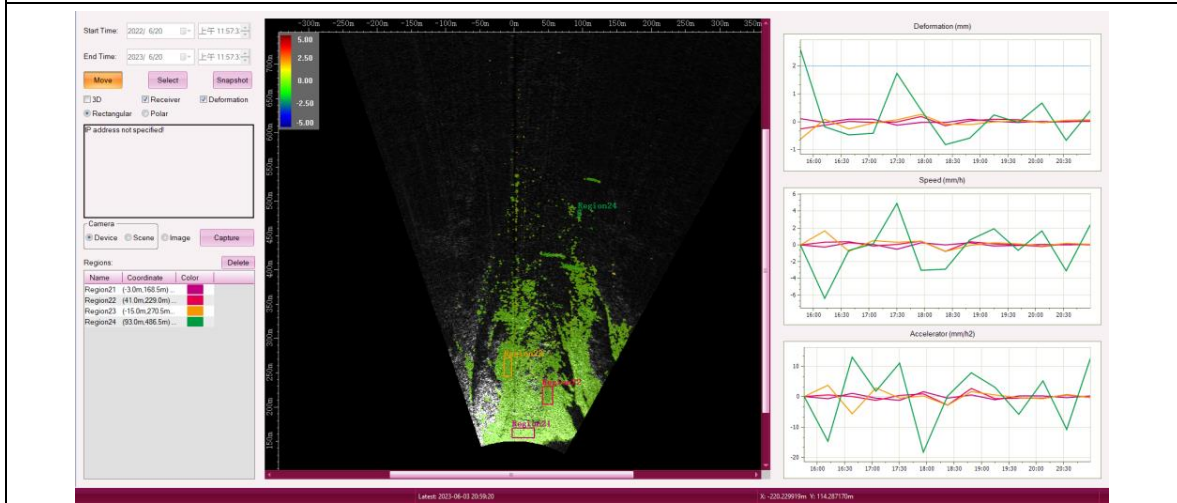
(Group_13) 2023_06_02_15_03_24 - 2023_06_02_20_26_06 (共 8 筆)



(Group_14) 2023_06_02_21_26_22 - 2023_06_03_05_54_12 (共 12 筆)

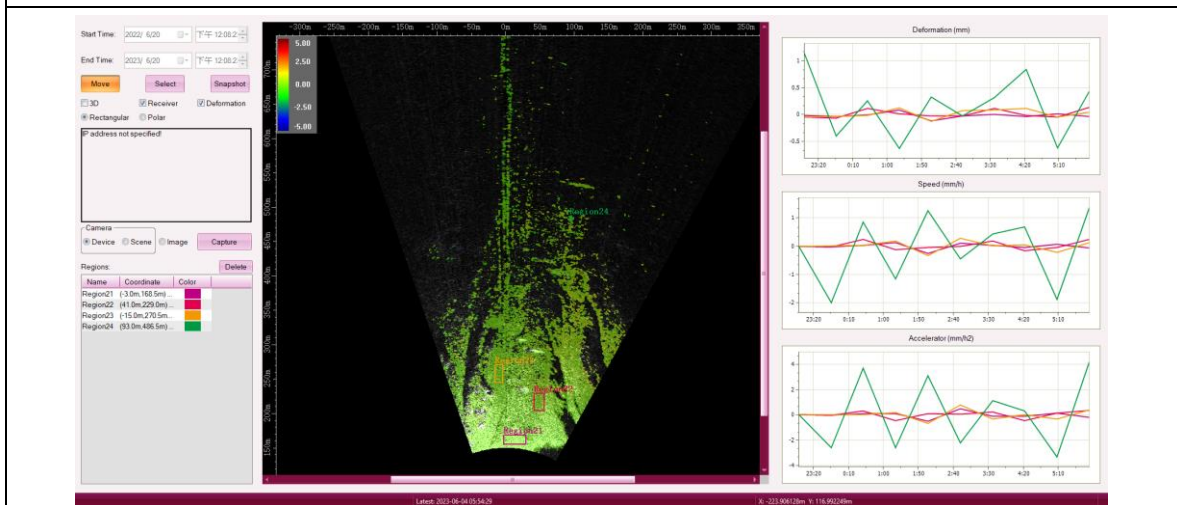


(Group_15) 2023_06_03_07_00_49 - 2023_06_03_13_09_41 (共 9 筆)

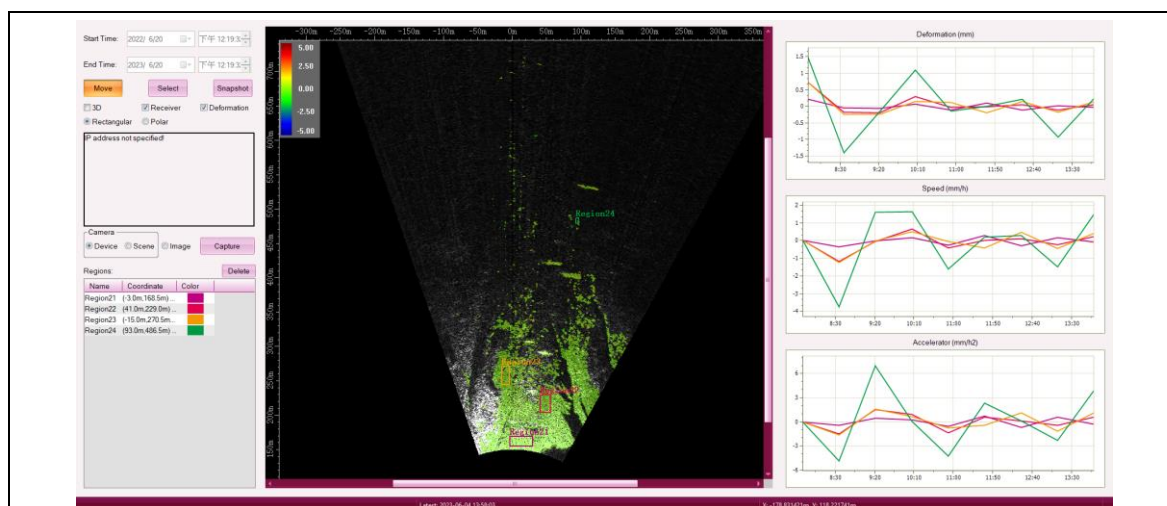


(Group_16) 2023_06_03_15_19_45 - 2023_06_03_20_59_20 (共 14 筆) -

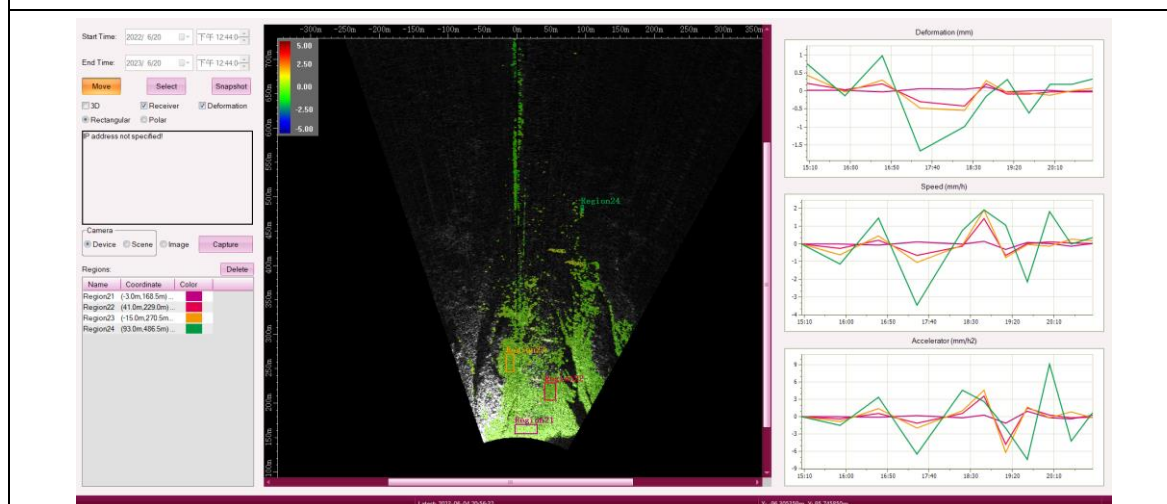
大雨



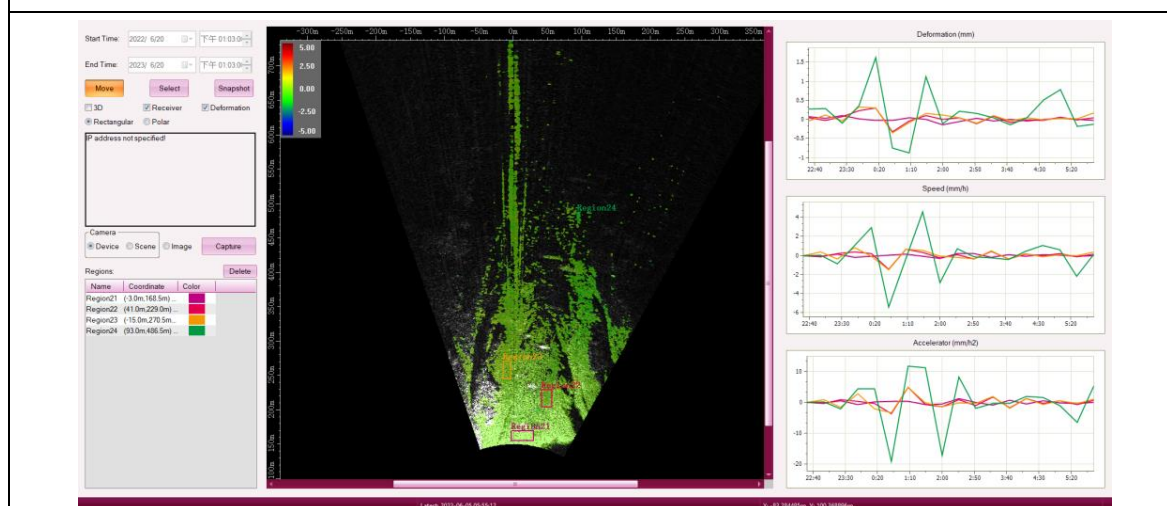
(Group_17) 2023_06_03_22_13_12 - 2023_06_04_05_54_29 (共 11 筆)



(Group_18) 2023_06_04_07_03_01 - 2023_06_04_13_58_03 (共 10 筆)

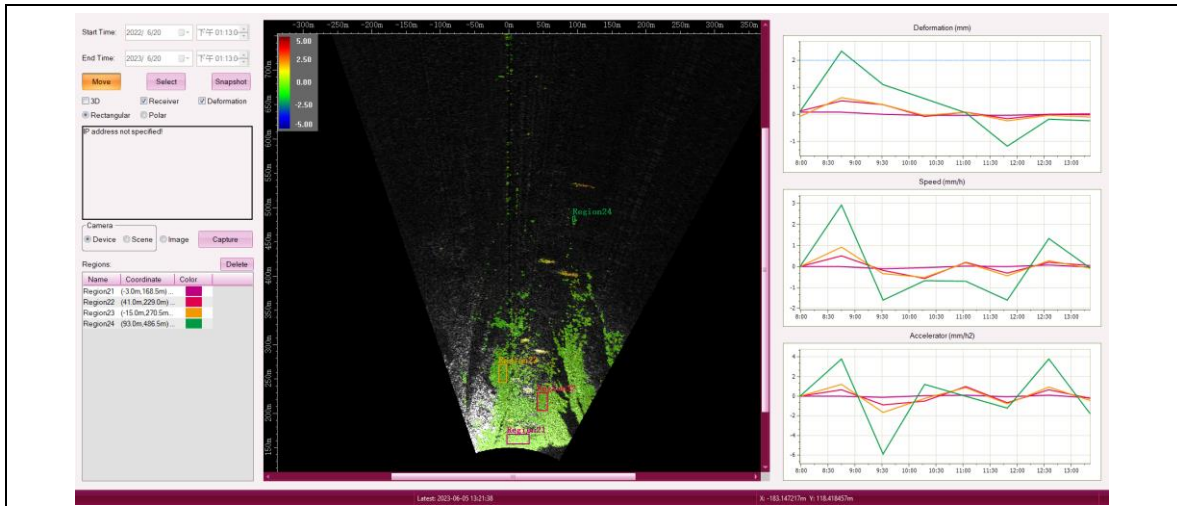


(Group_19) 2023_06_04_14_58_55 - 2023_06_04_20_56_32 (共 13 筆)

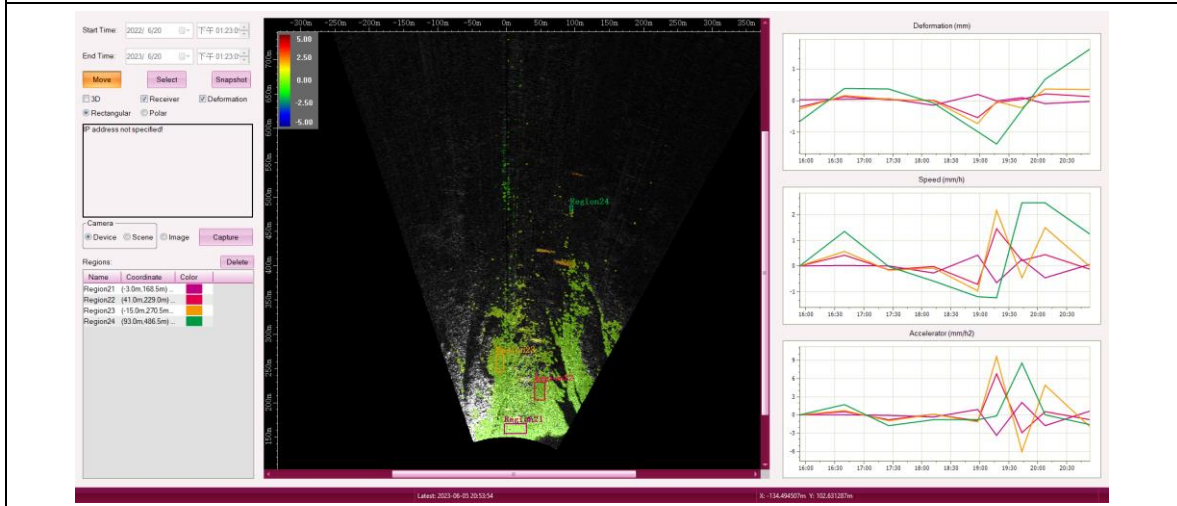


(Group_20) 2023_06_04_22_04_54 - 2023_06_05_05_55_12 (共 19 筆) -

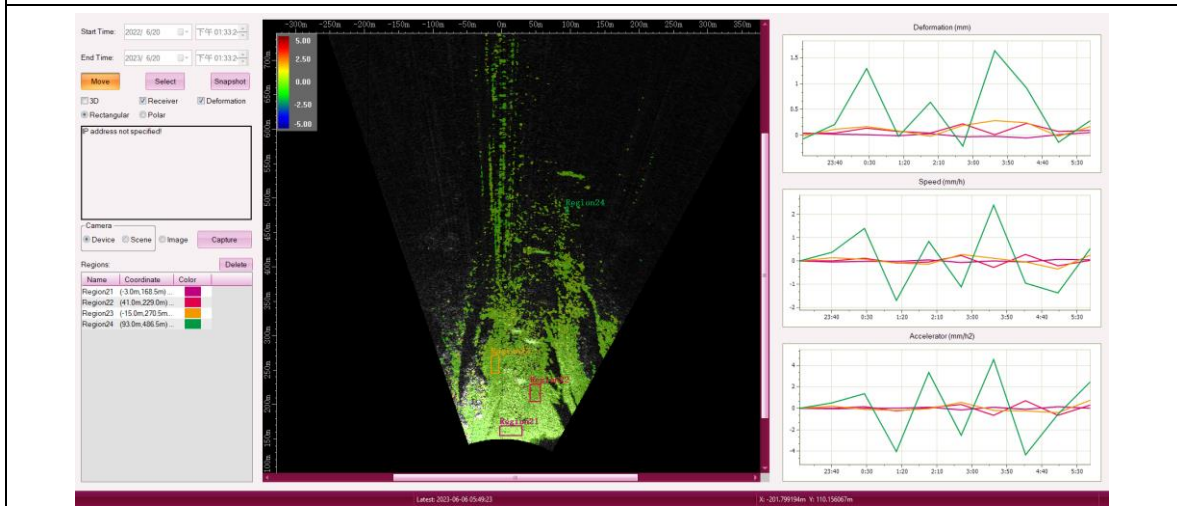
大雨



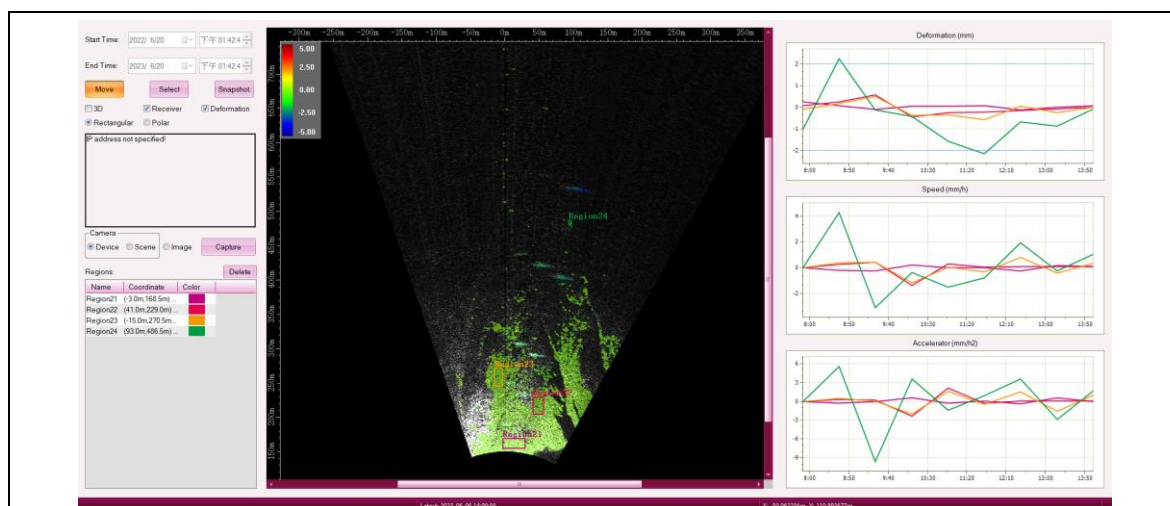
(Group_21) 2023_06_05_07_12_48 - 2023_06_05_13_21_38 (共 9 筆)



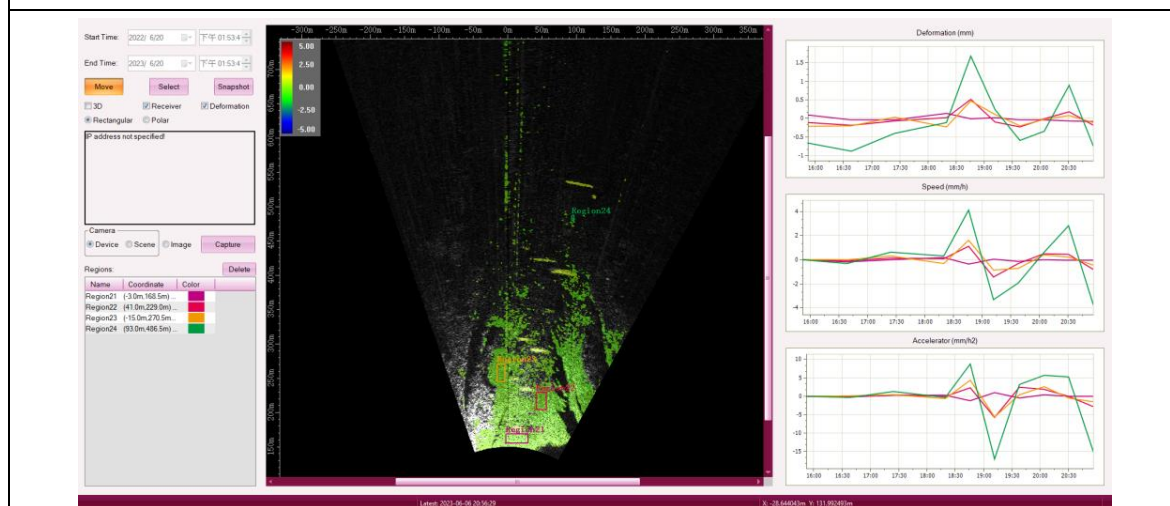
(Group_22) 2023_06_05_15_07_31 - 2023_06_05_20_53_54 (共 10 筆)



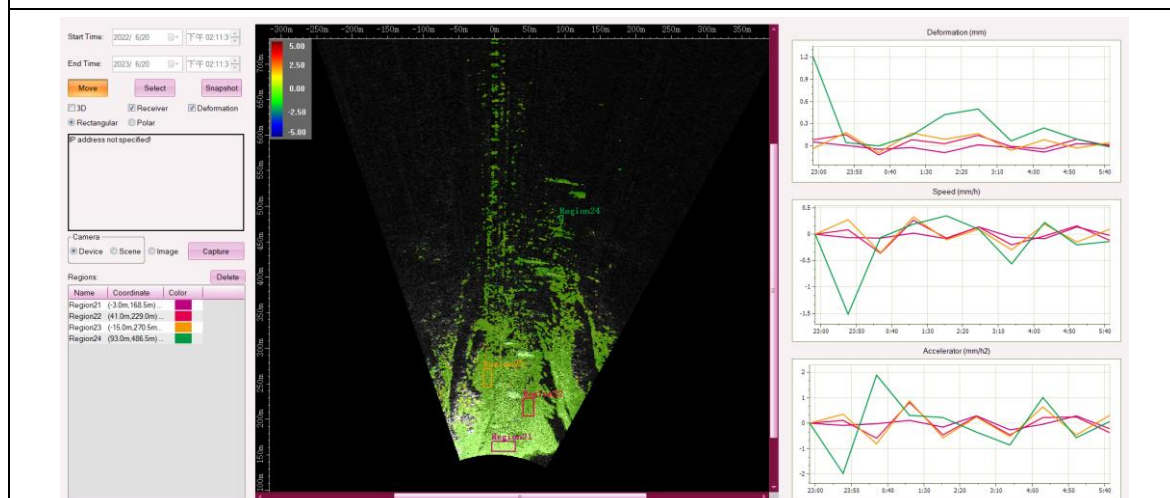
(Group_23) 2023_06_05_22_08_03 - 2023_06_06_05_49_23 (共 11 筆)



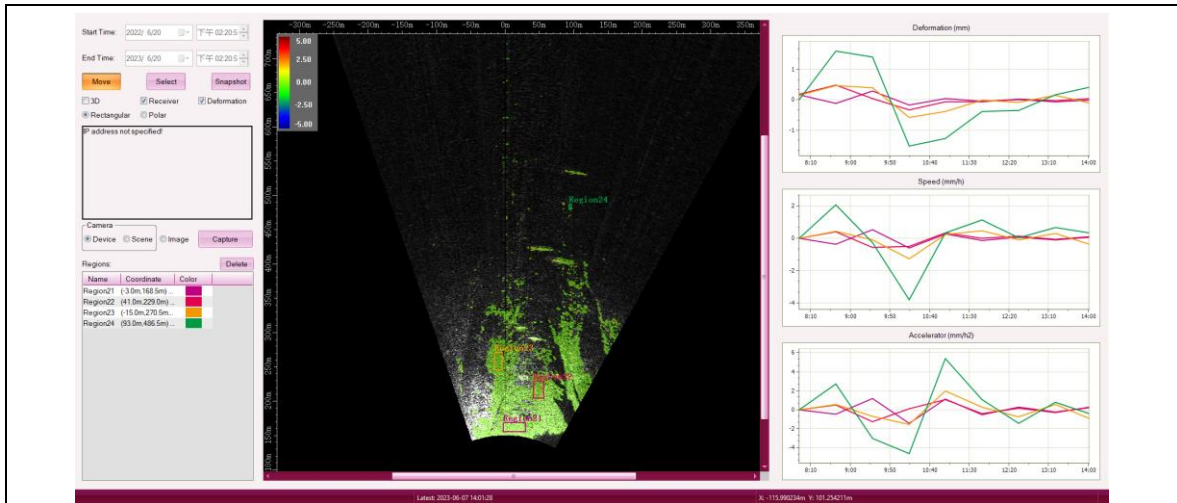
(Group_24) 2023_06_06_07_05_46 - 2023_06_06_14_00_56 (共 10 筆)



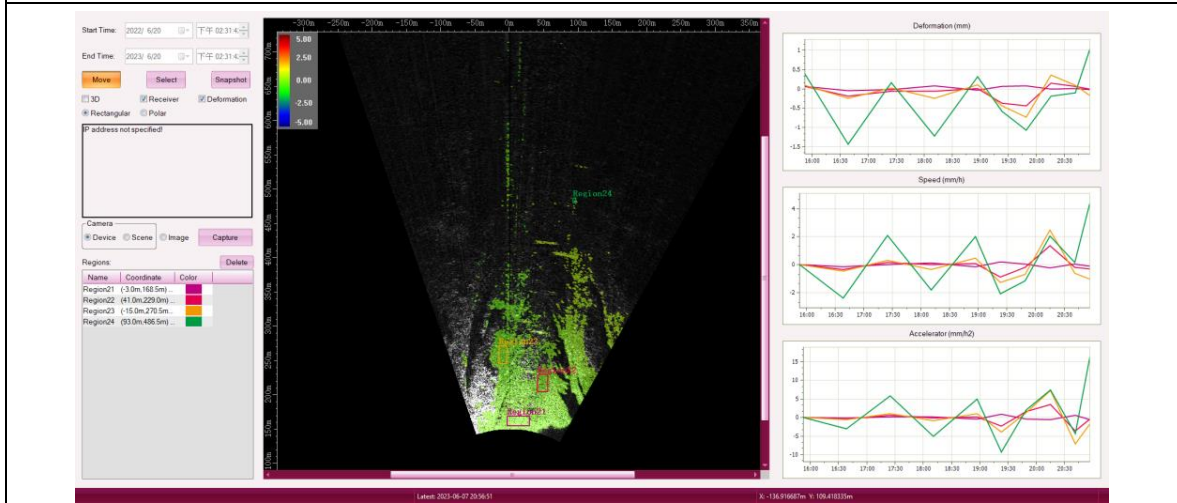
(Group_25) 2023_06_06_15_06_09 - 2023_06_06_20_56_29 (共 12 筆) -
大雨



(Group_26) 2023_06_06_22_06_01 - 2023_06_07_05_47_14 (共 11 筆)

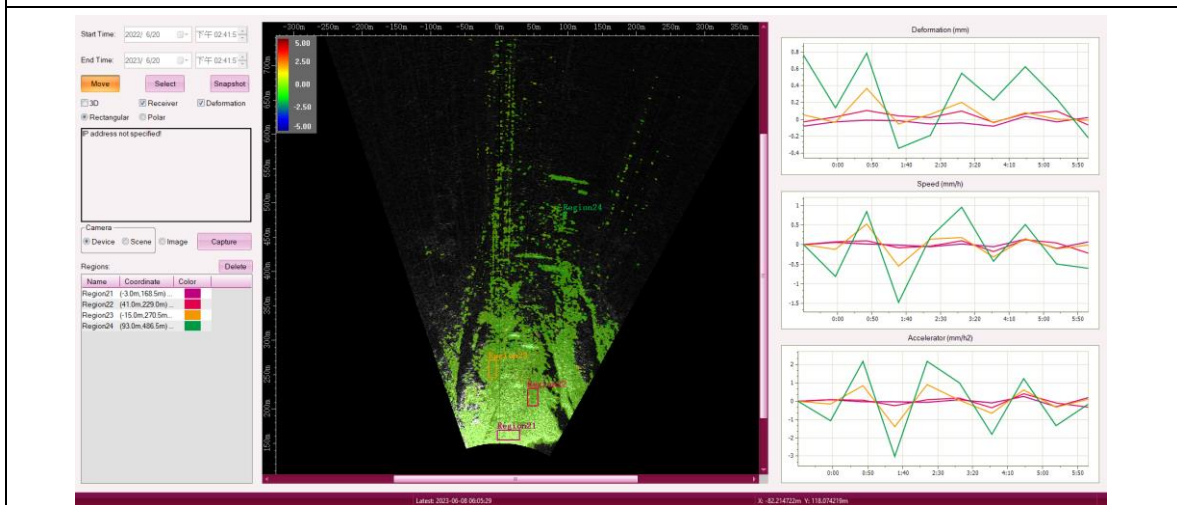


(Group_27) 2023_06_07_07_09_25 - 2023_06_07_14_01_28 (共 10 筆)

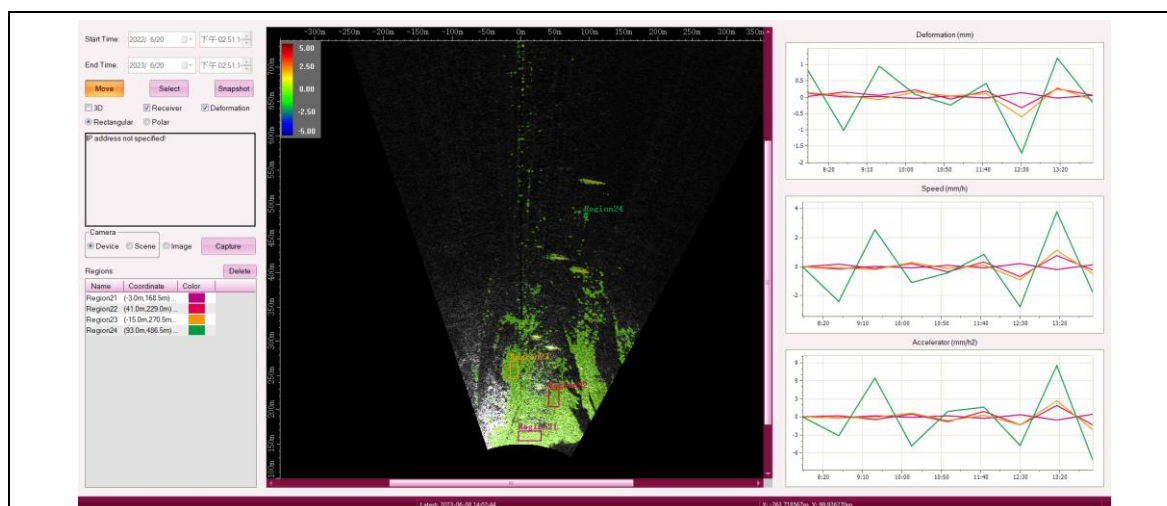


(Group_28) 2023_06_07_15_06_23 - 2023_06_07_20_56_51 (共 11 筆) -

大雨



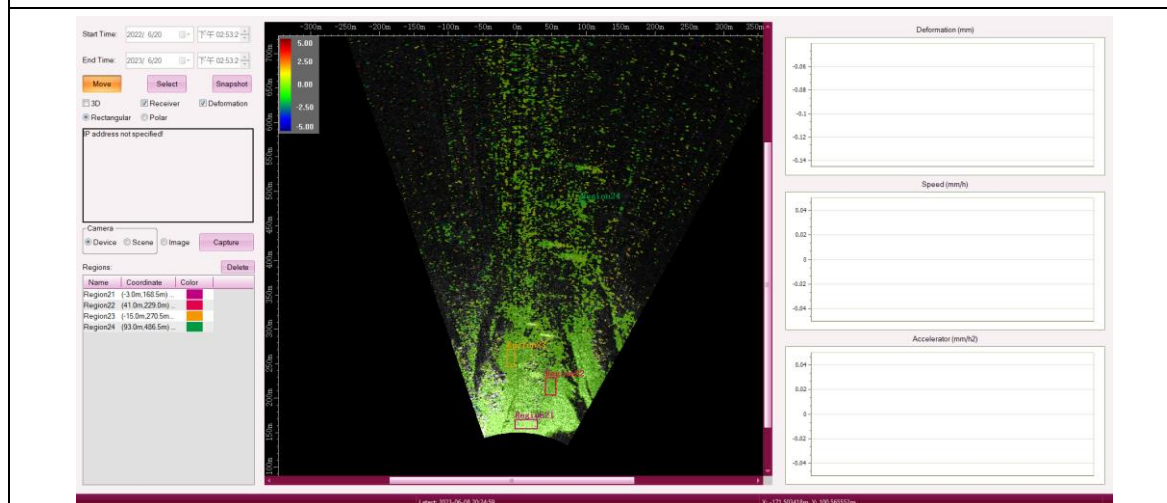
(Group_29) 2023_06_07_22_24_17 - 2023_06_08_06_05_29 (共 11 筆)



(Group_30) 2023_06_08_07_07_36 - 2023_06_08_14_02_44 (共 10 筆)

資料不足

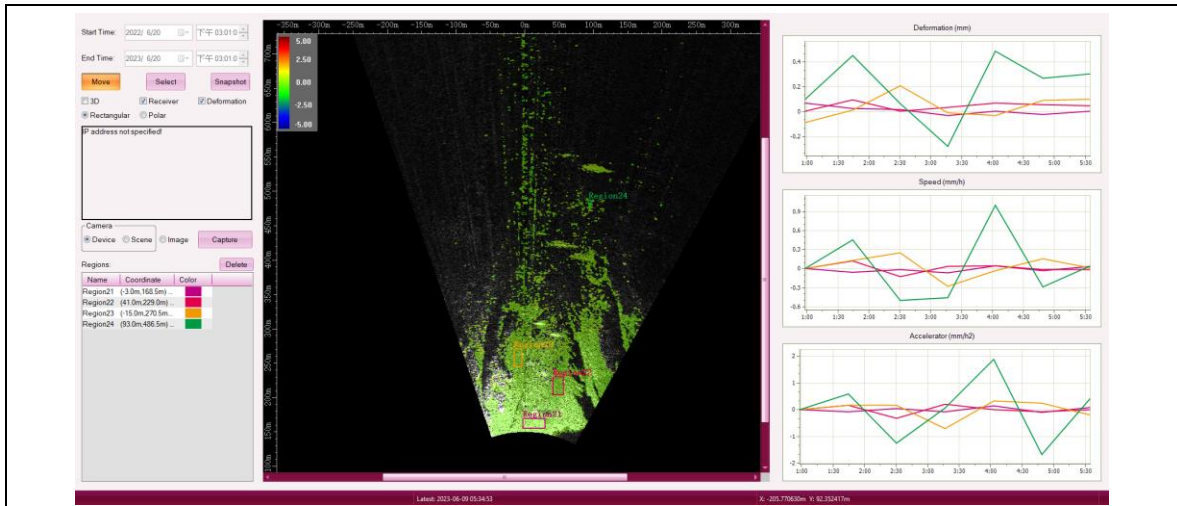
(Group_31) 2023_06_08_15_20_00 (共 1 筆)



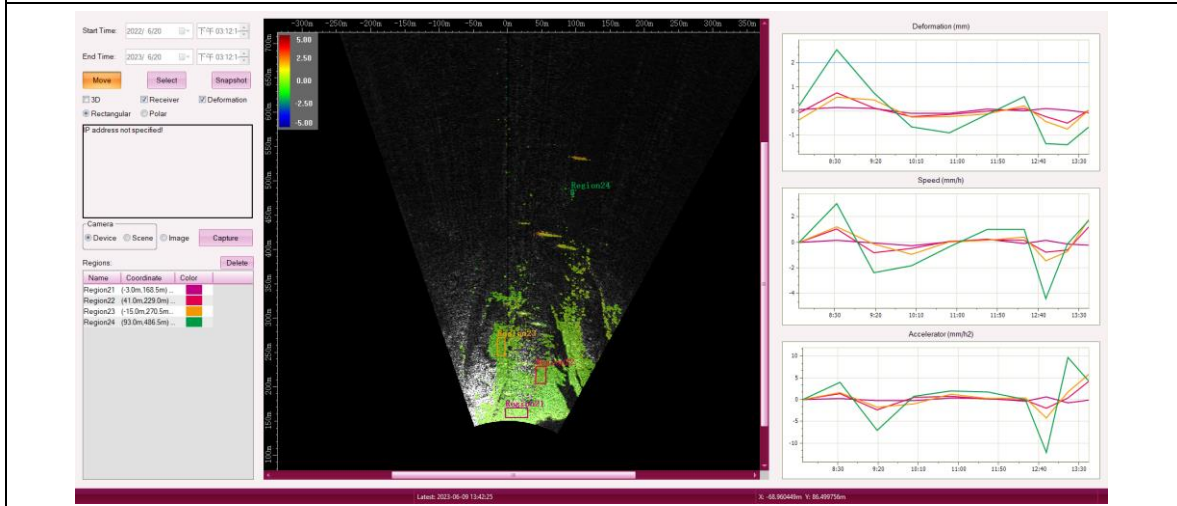
(Group_32) 2023_06_08_19_38_50 - 2023_06_08_21_00_34 (共 3 筆)

資料不足

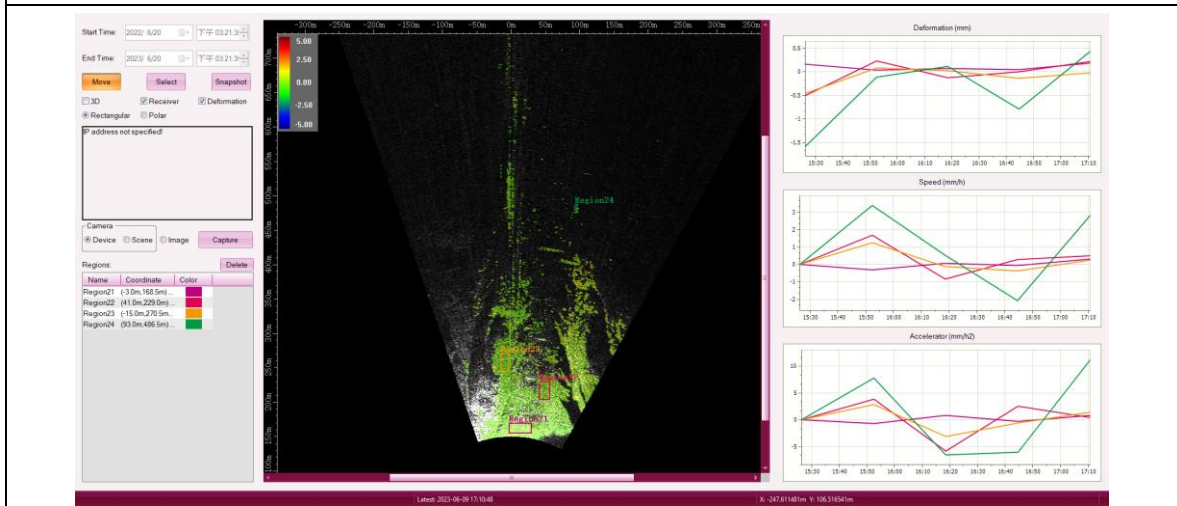
(Group_33) 2023_06_08_22_03_50 - 2023_06_08_22_50_02 (共 2 筆)



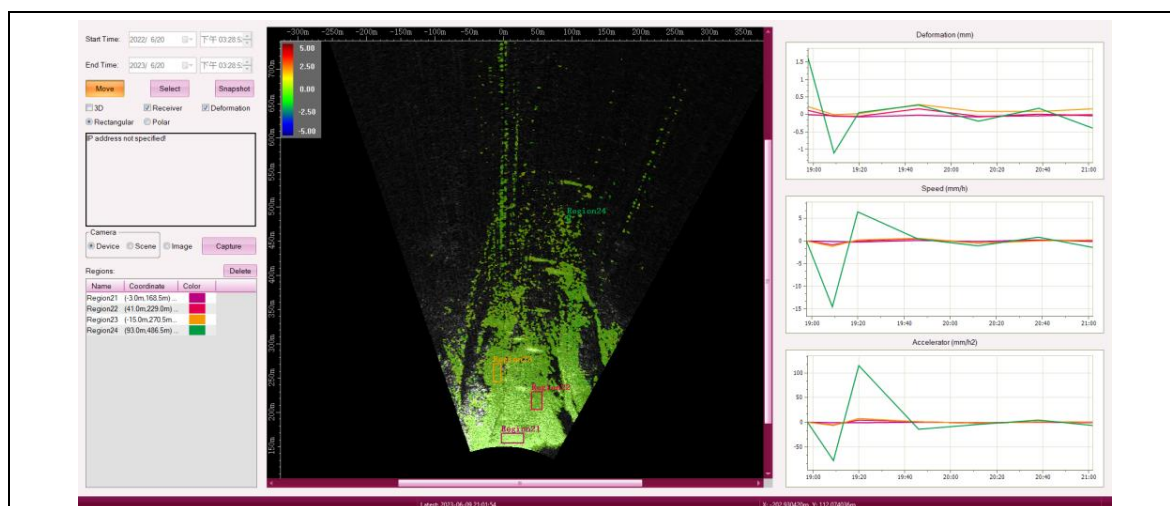
(Group_34) 2023_06_09_00_12_06 - 2023_06_09_05_34_53 (共 8 筆)



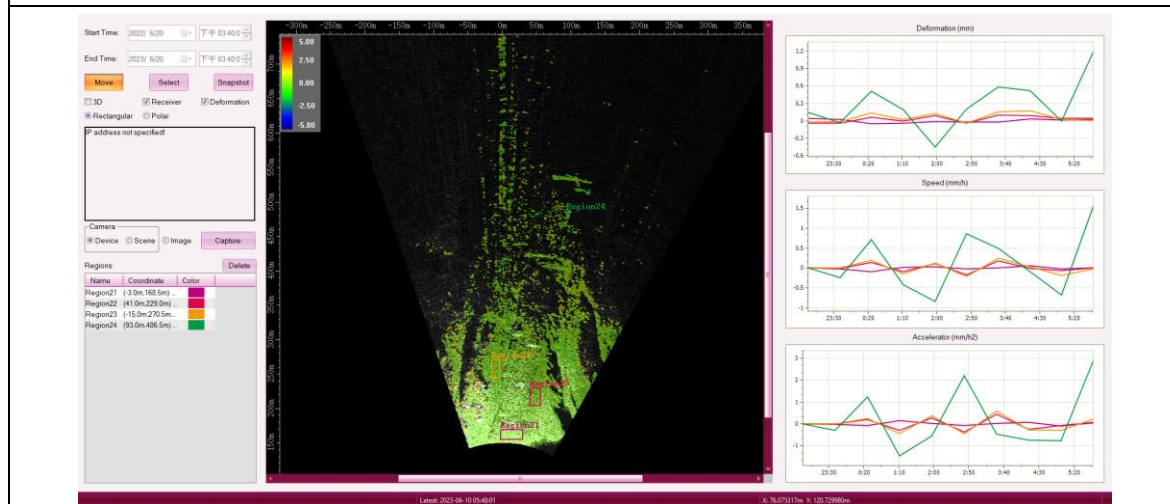
(Group_35) 2023_06_09_07_12_54 - 2023_06_09_13_42_25 (共 11 筆)



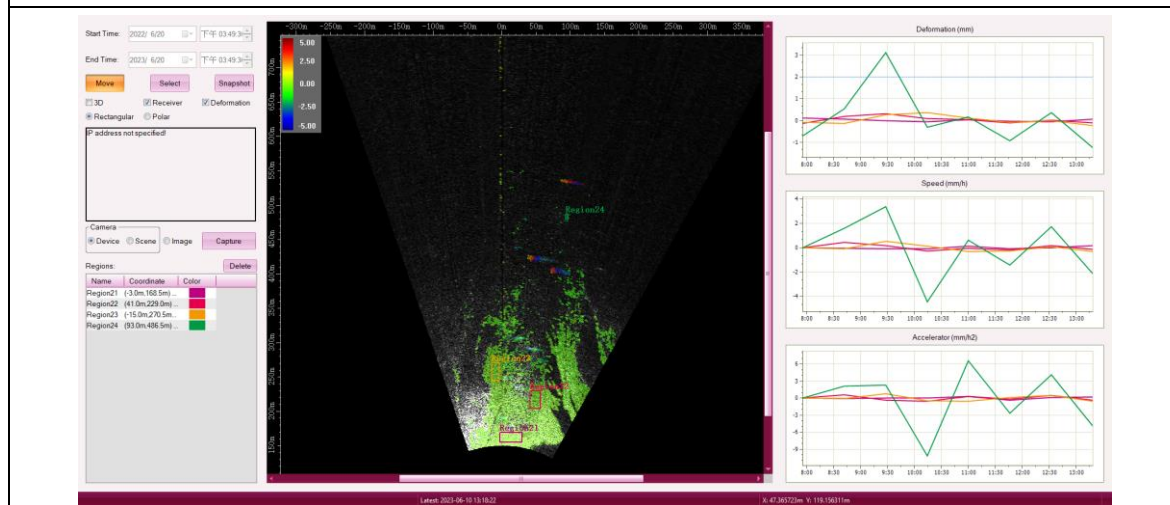
(Group_36) 2023_06_09_15_06_06 - 2023_06_09_17_10_48 (共 6 筆)



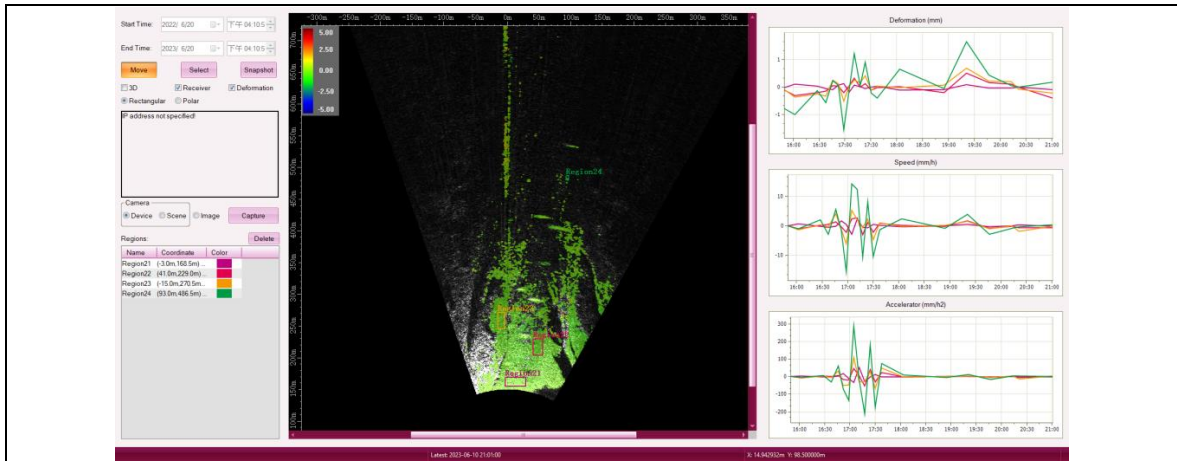
(Group_37) 2023_06_09_18_31_31 - 2023_06_09_21_01_54 (共 8 筆) -大雨



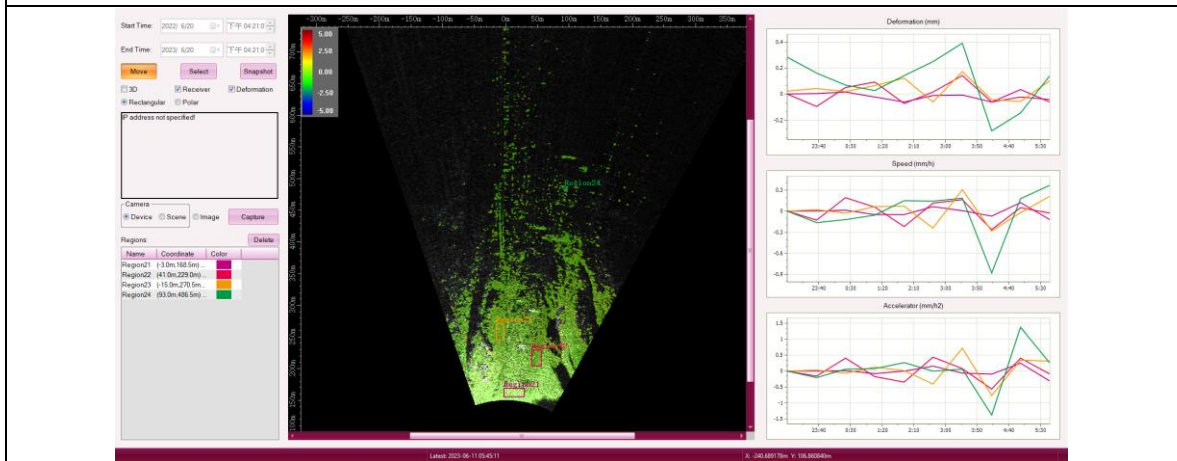
(Group_38) 2023_06_09_22_06_51 - 2023_06_10_05_48_01 (共 11 筆)



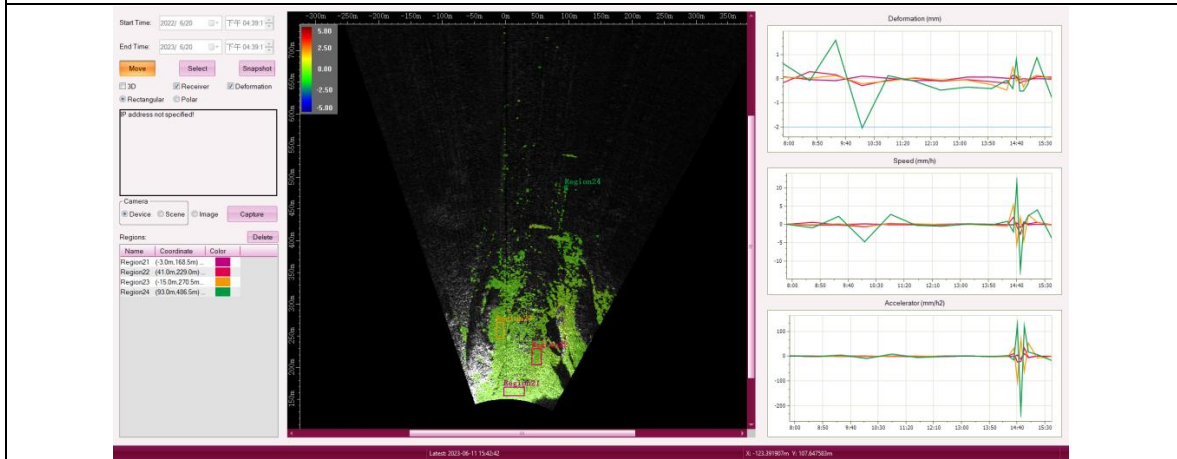
(Group_39) 2023_06_10_07_09_29 - 2023_06_10_13_18_22 (共 9 筆)



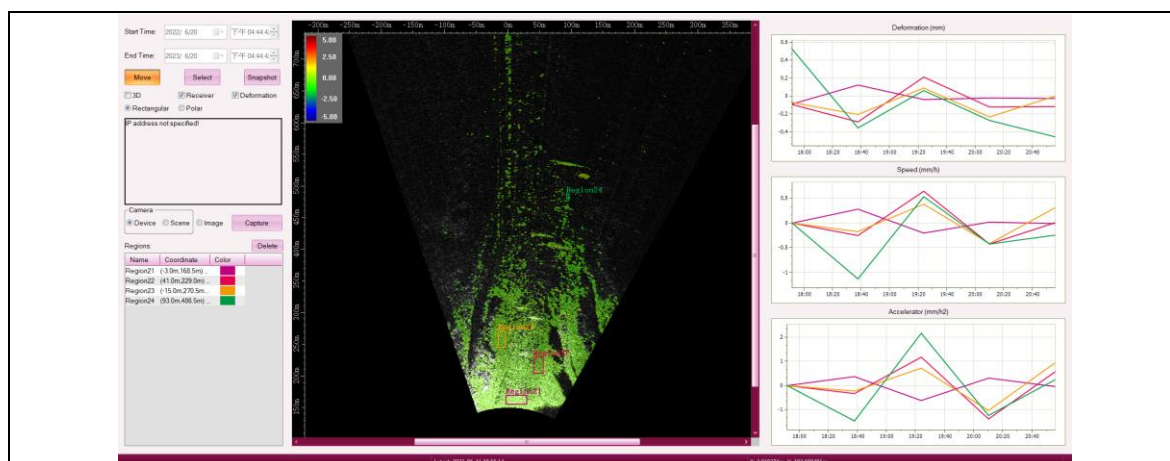
(Group_40) 2023_06_10_15_03_42 - 2023_06_10_21_01_00 (共 21 筆) -
大雨



(Group_41) 2023_06_10_22_05_48 - 2023_06_11_05_45_11 (共 11 筆)



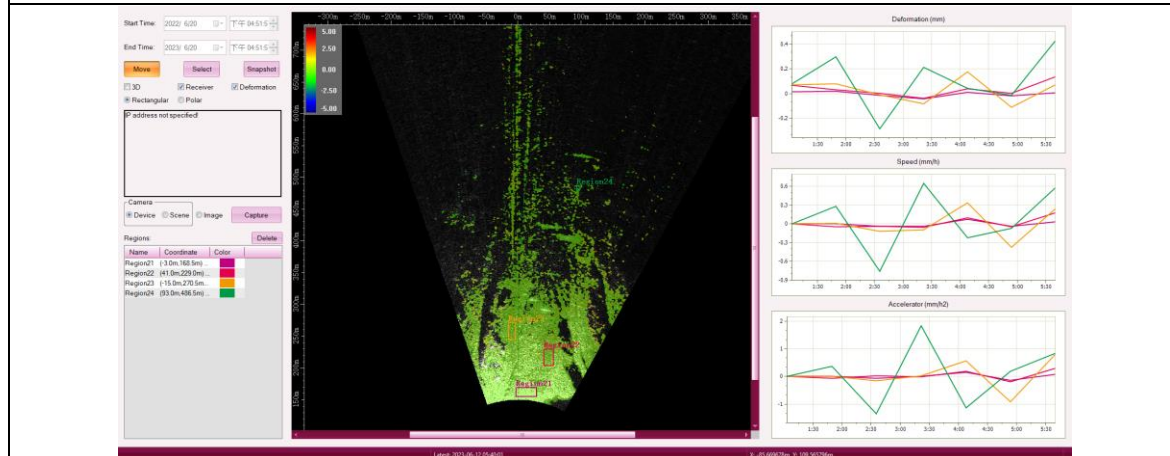
(Group_42) 2023_06_11_07_04_31 - 2023_06_11_15_42_42 (共 19 筆) -
大雨



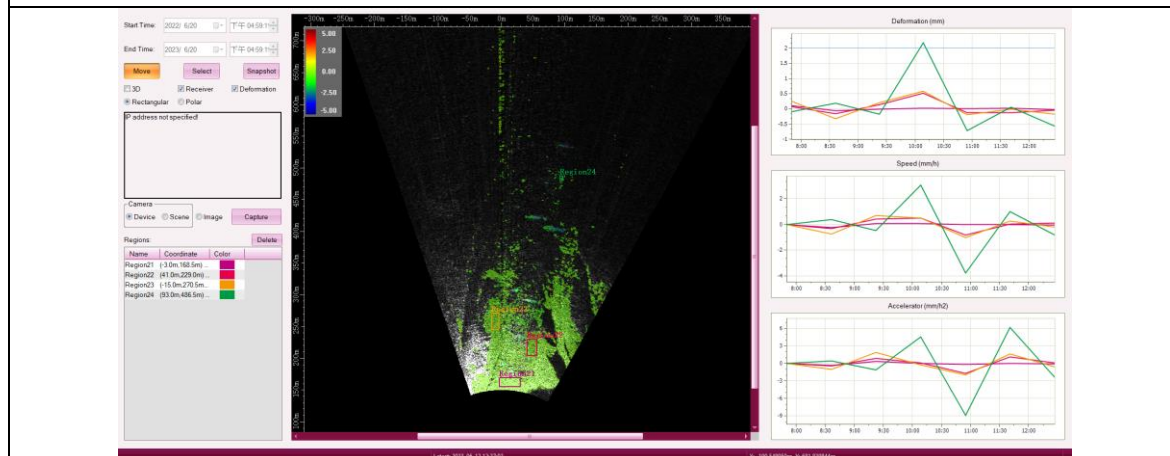
(Group_43) 2023_06_11_17_05_36 - 2023_06_11_20_56_14 (共 6 筆)

資料不足

(Group_44) 2023_06_11_22_02_24 - 2023_06_11_22_48_37 (共 2 筆)



(Group_45) 2023_06_12_00_17_17 - 2023_06_12_05_40_01 (共 8 筆)



(Group_46) 2023_06_12_07_04_00 - 2023_06_12_12_27_02 (共 8 筆)

附錄三、期中審查意見回覆

項次	審查意見	回覆辦理情形
1	報告中的專有名詞，需要正確使用，例如在坡面蝕溝，用了「逕流」、「土石流流動」(圖3-4、圖3-9)等專有形容詞，應正確使用之。	參照辦理，修正專有形容詞敘述。
2	報告中提到位移過大，溫度變化大，即因同調性問題，而無法計算，本研究應釐清監測適用性。	本計畫GB-SAR監測適用為大範圍微幅變動與趨勢偵測，同調性範圍為說明可以進行雷達分析的範圍，DS194崩塌地為合適用於GB-SAR地點。
3	符合PS點的像素，目前以上邊坡、下邊坡形容，建議界定上下邊坡的區位。	參照辦理，補充說明於邊坡概述章節。
4	目前說明邊坡位移，是邊坡所有像素的平均值?或是位移最大值?	位移為邊坡兩幅之間觀測的變化值，由於變化可能會超過一個波長，故呈現的為累積的位移趨勢。
5	報告中，團隊每日用手機拍攝影像，建議盡量在同樣的角度、焦距、時間下紀錄，以求照片一致性。	參照辦理，已於10月份觀測架設腳架進行觀測。
6	濕度變化(圖3-5)，建議以表格紀錄即可，由於濕度變化大，建議固定時間量測，或是記錄試驗當時的濕度。另外報告中有提及溫度變化大，造成同調性問題，應連同，溫度、濕度變化都進行記錄。	在觀測中，有發現溫濕度會影響同調性變化的範圍，最終的微幅變動分析，僅針對能持續計算同調性的範圍進行分析，故對於微變動分析影響不大。

項次	審查意見	回覆辦理情形
7	建議釐清GB-SAR可以監測崩塌地的適用性，哪些崩塌位移型態是可以監測？哪些是不能監測？	GBSAR受限於波段影響，無法於植被覆蓋區進行監測，僅能針對裸露邊坡進行監測，秀巒為良好的適用場地。
8	表2-3資料取自”土石流防災資訊網”，請修正為”土石流及大規模崩塌防災資訊網”，另因應農委會及水保局組改後更名為「農業部農村發展及水土保持署」，未來相關資料也請使用新的名稱。	參照辦理。
9	近期嘉義縣-竹崎鄉-T003(中心崙)-DS169有較大位移量，建議團隊可評估未來GB-SAR進行監測的可行性。	中心崙已至現地評估，該地區無適合設置的地點。
10	秀巒崩塌地目前已屬公開之大規模崩塌潛勢區，建議報告書補充使用相關資訊，如崩塌區名稱:新竹縣-尖石鄉-T001(秀巒)-DS194。	參照辦理，已修正敘述為「DS194崩塌地」。
11	GB-SAR進行崩塌監測，其相較於其他的監測方式，其優勢為何？目前是否有何應用上的瓶頸待克服。	監測優勢為遠距離微幅變動偵測，應用上因為設備較重，且需要持續供電，在設置上有基礎需求。在應用上仍有植被區域無法偵測，以及微幅變動需要發生再偵測期間，若可以預估微幅變動的時空，則可以瞭解變化的趨勢。
12	為因應機關組織改造，機關名稱修正為「農業部農村發展及水土保持署」，報告書封面及內文等請依本署最新範本格式撰寫，相關範本檔案請至本署電子圖書管理中心下載。 (https://elibrary.ardswc.gov.tw/)	參照辦理。

