
**大規模與大範圍之崩塌監測
警戒技術研發與對應警戒值建置
The development of large-scale and
widerange collapse monitoring alert
technology and the establishment of
corresponding alert thresholds
(成果報告書)**

執行單位：國立成功大學

執行期間：113 年 02 月 07 日至 113 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 113 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本署施政參考)



目次

目次.....	I
表次.....	II
圖次.....	III
第一章 前言.....	1-1
第二章 研究區簡介	2-1
第三章 工作成果說明	3-1
第一節 ArcSAR 精進理解.....	3-1
第二節 新式角反射器設計	3-8
第三節 新竹縣尖石鄉 DS194 邊坡監測工作	3-28
第四章 結論.....	4-1
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附-1
附錄一、研提計畫書審查意見回覆表	附-1
附錄二、期中審查意見回覆表	附-3
附錄三、期末審查意見回覆表	附-6

表次

表 3-1	測試不同 DX、DY 值對同一目標掃描之生成檔案比較.....	3-6
表 3-2	常見角反射器樣式、RCS、半功率寬度參考	3-10
表 3-3	不同角反射器對不同邊長之最大 RCS 試算	3-11
表 3-4	自製角反射器樣式一覽	3-13
表 3-5	JS077-G6 半年時間位移變化整理	3-29
表 3-6	JS077-E 半年時間伸縮量變化整理	3-29
表 3-7	2024 年 6 月掃描影像資訊	3-31
表 3-8	2024 年 9 月掃描影像資訊	3-33
表 3-9	監測邊坡位移狀況	3-34
表 3-10	本計畫邊坡監測方式之比較	3-47



圖次

圖 2-1	白石大崩塌五萬分之一地質圖(中央地質調查所-山崩雲) ..	2-2
圖 2-2	山崩與地滑地質敏感區(中央地質調查所-山崩雲).....	2-2
圖 2-3	白石大崩塌逐年變遷影像(GOOGLE EARTH).....	2-3
圖 2-4	民國 105 年十月白石大崩塌現場照(水保局，2016).....	2-3
圖 2-5	民國 110 年九月白石大崩塌空拍照	2-4
圖 2-6	民國 110 年九月白石大崩塌現場照	2-4
圖 2-7	秀巒現生崩塌區以及潛在崩塌範圍	2-5
圖 3-1	2023 年 10 月兩部 GBSAR 至 DS194 邊坡進行掃描	3-1
圖 3-2	2023 年 10 月 LINEARSAR 與 ARCSAR 掃描 DS194 邊坡結果 比較	3-1
圖 3-3	ARCSAR 於阿里山公路 56 公里龍頭大峭壁進行天線模組試 驗.....	3-3
圖 3-4	垂直增益 30°天線掃描邊坡的位移(左)、同調性(右上)、震幅 圖(右下).....	3-4
圖 3-5	垂直增益 60°天線掃描邊坡的位移(左)、同調性(右上)、震幅 圖(右下).....	3-4
圖 3-6	以資源系系館 5 樓作為測試 DX、DY 參數環境	3-6
圖 3-7	設定 DX、DY 為 0.1 的震幅(左)、同調性(右上)、位移量影像 (右下).....	3-6
圖 3-8	設定 DX、DY 為 0.5 的震幅(左)、同調性(右上)、位移量影像 (右下).....	3-7
圖 3-9	2023 年 10 月與 2024 年 4 月 ARCSAR 影像比較	3-8
圖 3-10	方形三面(邊長 50 公分)外觀及野外測試示意圖	3-12
圖 3-11	”八角”角反射器模型外觀示意	3-12

圖 3-12	角反射器進行戶外測試示意圖	3-13
圖 3-13	以 ARCSAR 進行角反射器校內測試結果.....	3-14
圖 3-14	以 ARCSAR 進行角反射器校內測試之詳細資料.....	3-15
圖 3-15	使用 GEE 程式調取哨兵一號時序強度資料.....	3-16
圖 3-16	台 9 線南迴公路設置角反射器(藍等人，2021)	3-17
圖 3-17	GEE 程式測試 藍等人於台九線南迴公路段角反射器設置 狀況	3-17
圖 3-18	使用 GEE 程式檢測角反射器於戶外設置之成效.....	3-18
圖 3-19	角反射器回收現場狀況	3-19
圖 3-20	角反射器(A)面板設計圖、尺寸與(B)面板外觀	3-20
圖 3-21	角反射器外觀與測試照片	3-21
圖 3-22	角反射器模組位置圖	3-23
圖 3-23	角反射器模組於 DS194 邊坡之照片(113 年 9 月 19 日). 3-24	
圖 3-24	角反射器觀測模組安裝於 DS194 邊坡之配置.....	3-24
圖 3-25	角反射器模組於成功大學校園內測試	3-25
圖 3-26	角反射器設置(左)及撤離時(右)雷達影像變化.....	3-26
圖 3-27	比較角反射器撤離前後訊號強度變化	3-26
圖 3-28	ARCSAR 掃描角反射器模組於 DS194 邊坡安裝前後變化....	3-27
圖 3-29	比較角反射器裝設於邊坡前後訊號強度變化.....	3-27
圖 3-30	透過大規模崩塌監測整合系統追蹤 DS194 邊坡狀況.....	3-28
圖 3-31	4 月 9 日~11 日地震監測結果	3-30
圖 3-32	2024 年 6 月 DS194 邊坡累積位移監測結果.....	3-31
圖 3-33	色調強化 DS194 邊坡累積位移量	3-32
圖 3-34	2024 年 9 月 DS194 邊坡累積位移監測結果.....	3-35

圖 3-35	色調強化 9 月監測 DS194 邊坡累積位移量.....	3-35
圖 3-36	ARCSAR 監測邊坡的雷達影像(左)、以及同調性影像(右)....	3-36
圖 3-37	ARCSAR 於 2024 年 9 月監測 DS194 邊坡之累積位移量	3-37
圖 3-38	加速規、GNSS 與儀器溫度之原始逐日觀測數據 (2024/9/19~10/30)	3-39
圖 3-39	時雨量與最大風速記錄(2024/9/19~10/30).....	3-39
圖 3-40	以溫度校正加速度觀測數據	3-40
圖 3-41	角反射器翻滾角(ROLL)逐日變化曲線.....	3-41
圖 3-42	角反射器傾角(PITCH)逐日變化曲線.....	3-41
圖 3-43	觀測期間 GNSS 坐標逐時變化曲線.....	3-42
圖 3-44	單日 GNSS 坐標逐時變化曲線(以 10/22 為例).....	3-42
圖 3-45	GNSS 觀測平均 Y 坐標逐日曲線.....	3-43
圖 3-46	GNSS 觀測平均 Y 坐標逐日曲線.....	3-43
圖 3-47	以全站儀量測角反射器位移(113/10/28)	3-45
圖 3-48	全站儀觀測期間雨量記錄與角反射器位移曲線	3-45
圖 3-49	角反射器位移過程與對應之雨量	3-46
圖 3-50	康芮颱風前後角反射器下方土石侵蝕掏空	3-46
圖 3-51	年度單頻 GPS 及時雨量紀錄與團隊監測時程一覽	3-51
圖 3-52	康芮颱風後 DS194 活動邊坡現況	3-52



第一章 前言

本年度工作項目，除規劃持續監測新竹縣尖石鄉秀巒部落旁邊坡(DS194)外，另規劃三項目標：1. 持續精進對 ArcSAR 的認識、瞭解優勢與限制；2. 設計 ArcSAR 基座，以降低 ArcSAR 在進行巡迴式監測時，因儀器設置過程產生偏差，導致監測發生誤差；3. 設計新式角反射器，使其可以同時服務於星載、以及地基合成孔徑雷達，並且尋求可以穩定安裝於天然邊坡上，以便提高在植被濃密區域監測之效率。

整理計畫執行工作項目並簡述如下：

一、ArcSAR精進理解：

1. 新製作兩個天線，使訊號的垂直涵蓋範圍從 18° 拓展到 30° 、以及 60° ，並討論不同天線適用環境。
2. 鑑於雷達影像較第一代為模糊，嘗試調整參數以增進影像清晰度，以利研究人員進行地物辨識。

二、新式角反射器設計：

1. 外型設計討論。
2. 角反射器 Prototype 製作與戶外測試。
3. 新型角反射器觀測模組初步設計完成、並移至 DS194 邊坡進行安裝測試。

三、GBSAR監測工作：

1. 於 4 月 3 日於花蓮大地震後第一個的降雨事件中，本團隊至 DS194 邊坡，使用 ArcSAR 進行為時 3 天的緊急監測工作。

2. 6月4日至6月10日，以第一代GBSAR(Linear GBSAR)進行為時7天的邊坡監測工作。

3. 9月17日至9月24日，先以Linear GBSAR監測邊坡，後儀器發生故障，再緊急調動ArcSAR上山進行監測，總共進行為時8天的監測工作。

四、透過角反射器進行相關監測工作：

1. 角反射器觀測模組常時觀測。
2. 角反射器與全站式電子速距儀監測。



第二章 研究區簡介

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，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。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(水保局，2016)，現場如圖 2-4 所示。該年後續也陸陸續續發生山崩的災情。儘管水保局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 2-1 白石大崩塌五萬分之一地質圖(中央地質調查所-山崩雲)

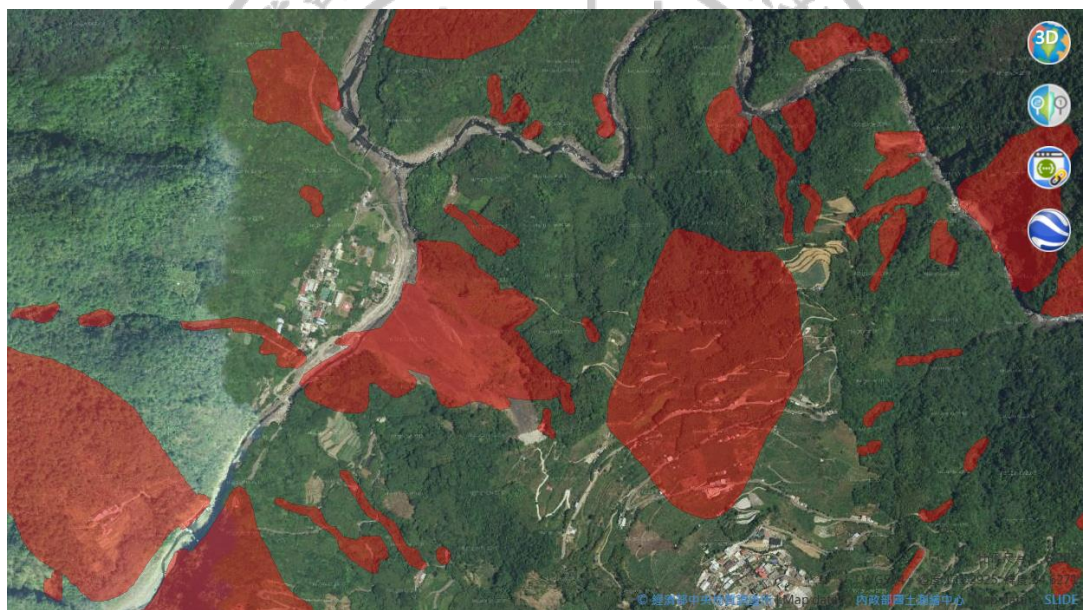


圖 2-2 山崩與地滑地質敏感區(中央地質調查所-山崩雲)



圖 2-3 白石大崩塌逐年變遷影像(Google Earth)



圖 2-4 民國 105 年十月白石大崩塌現場照(水保局，2016)

民國 110 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 2-5 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 2-6 所示。



圖 2-5 民國 110 年九月白石大崩塌空拍照



圖 2-6 民國 110 年九月白石大崩塌現場照

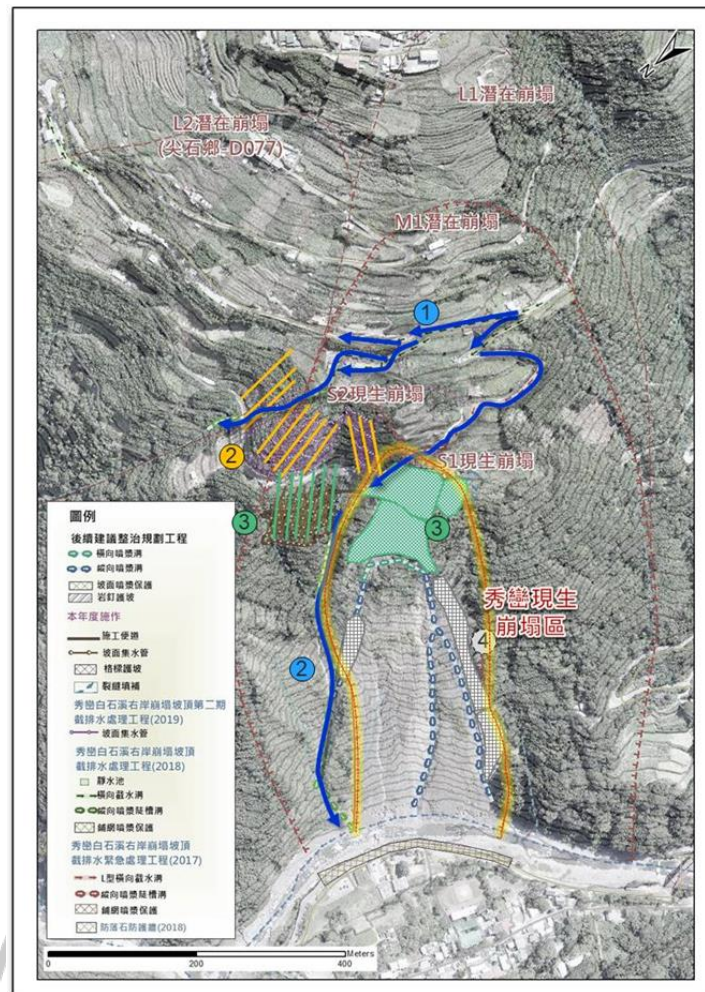


圖 2-7 秀巒現生崩塌區以及潛在崩塌範圍
(註：引用自大崩系統資料庫)



第三章 工作成果說明

第一節 ArcSAR 精進理解

ArcSAR 自 2023 年 9 月完成開發，隨後於 10 月時至新竹秀巒部落，對 DS194 邊坡進行短期掃描測試，並與第一代 GBSAR 的掃描結果進行比較(圖 3-1)。

2023年10月至秀巒進行掃描

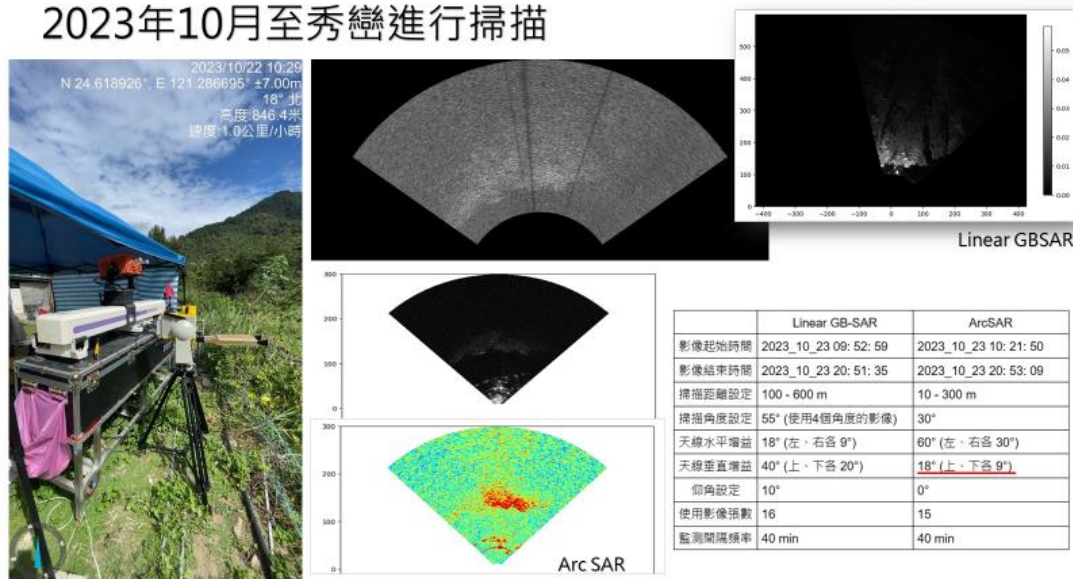


圖 3-1 2023 年 10 月兩部 GBSAR 至 DS194 邊坡進行掃描

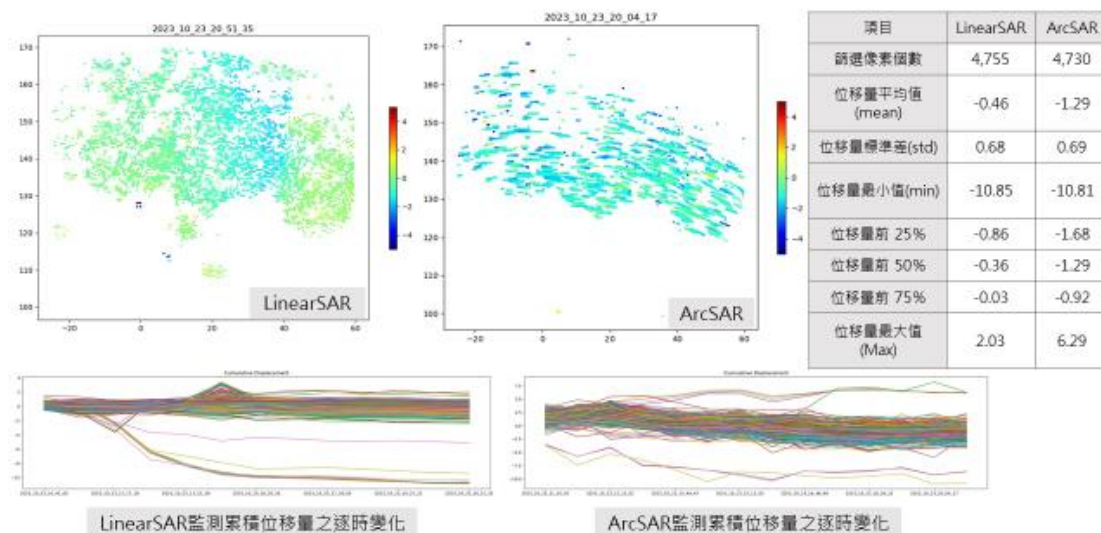


圖 3-2 2023 年 10 月 LinearSAR 與 ArcSAR 掃描 DS194 邊坡結果比較

圖 3-2 左側為第一代 GBSAR(後簡稱 LinearSAR)監測 DS194 邊坡坡趾部分位移狀況(左上)、以及邊坡時序累積位移結果；中央上下分別為 ArcSAR 對 DS194 邊坡監測成果以及累積位移結果；右側為兩代 GBSAR 監測位移量統計。

由圖 3-2 可知，ArcSAR 監測 DS194 邊坡坡趾部分結果無太大差異。同時，當次監測結果可以觀察到兩個問題：

1. ArcSAR 的監測範圍僅止於坡趾至下部坡腹的範圍，再往上的部分就看不到穩定的 PS 點作為監測。
2. ArcSAR 的訊號常以數個連續的點組合在一起，連接形成短而連續的弧形線段，這些線段組合成邊坡坡趾的外觀，常影響現場人員進行雷達影像與地物之間的辨識效率，進而影響到我們對於邊坡現況的監控。

前述第 1 項掃描範圍受到限制的問題，其可能原因有二：1. 監測時所使用的天線，其垂直範圍增益角度僅為 18° (上下各 9°)，訊號發射範圍較為集中，因此無法涵蓋到下部坡腹以上範圍；2. 由圖 3-1 左側儀器現場監測照片可以了解，ArcSAR 天線的高度較 LinearSAR 為低約 50~60 公分左右，其發射訊號位置相對於邊坡的坡度，可能存在訊號入射邊坡角度過大，導致沿原路徑返回雷達的訊號過少，導致邊坡坡度較緩部位的像素較為不穩定。

前述第 2 項短弧線的問題，研究團隊另外調整參數(Bw 值、Pw 值、調降雷達旋轉速度) 進行比較以後認為，其為 ArcSAR 雷達影像的特性，目前尚無法將短弧線縮短、或者是還原成單一像素點。此外，針對「改善雷達影像解析度不佳」的問題，研究團隊討論嘗試是否可以透過改變 Dx、Dy 值(設定雷達影像解析度的參數)來改善。

(一)不同 ArcSAR 天線模組對監測結果的影響

2024 年初，研究團隊新增兩組天線，其水平方向增益均為 60° ，垂直方向增益則分別為 30° 以及 60° 。為了瞭解新的兩組天線在監測上的差異，研究團隊於 2024 年 1 月 30 日，選擇嘉義阿里山公路(台 18 線)56 公里處「龍頭大峭壁」作為試驗場域。

如圖 3-3 所示，阿里山公路沿著地形向右遠離；道路兩旁，由外至邊坡依序有金屬護欄、蛇籠、金屬鋼樑護坡、覆蓋有植被的緩坡、以及裸露出岩石的陡坡。

垂直增益 30° 、 60° 的天線測試結果如下圖 3-4、圖 3-5 所示。



圖 3-3 ArcSAR 於阿里山公路 56 公里龍頭大峭壁進行天線模組試驗

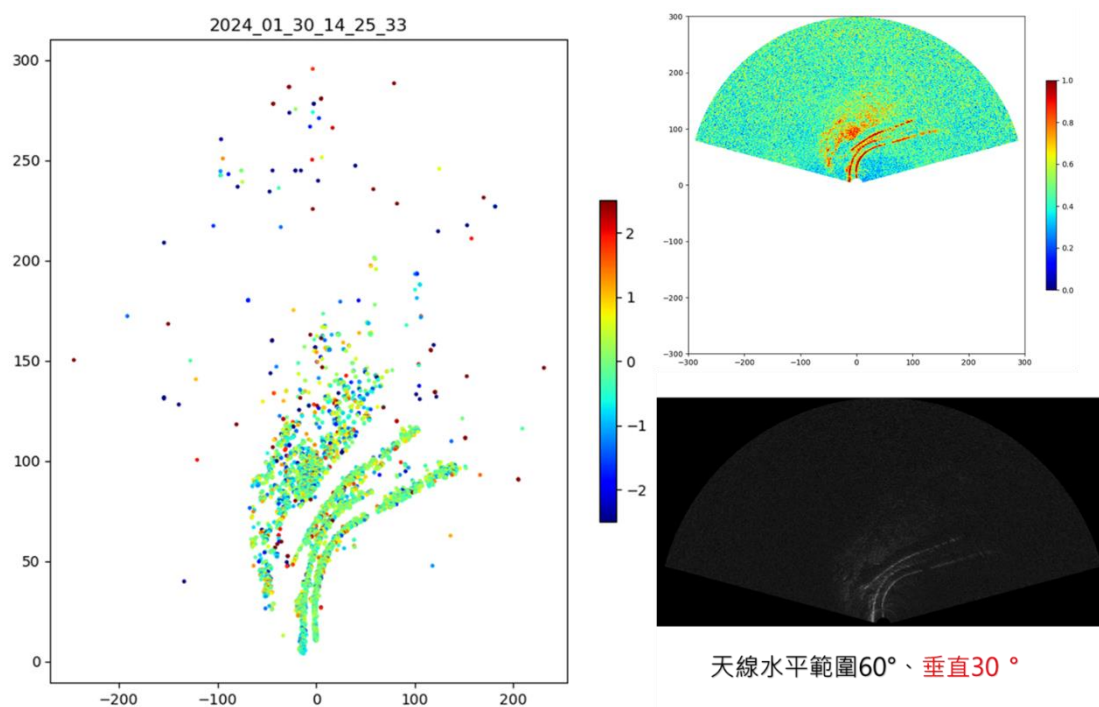


圖 3-4 垂直增益 30°天線掃描邊坡的位移(左)、同調性(右上)、震幅圖(右下)

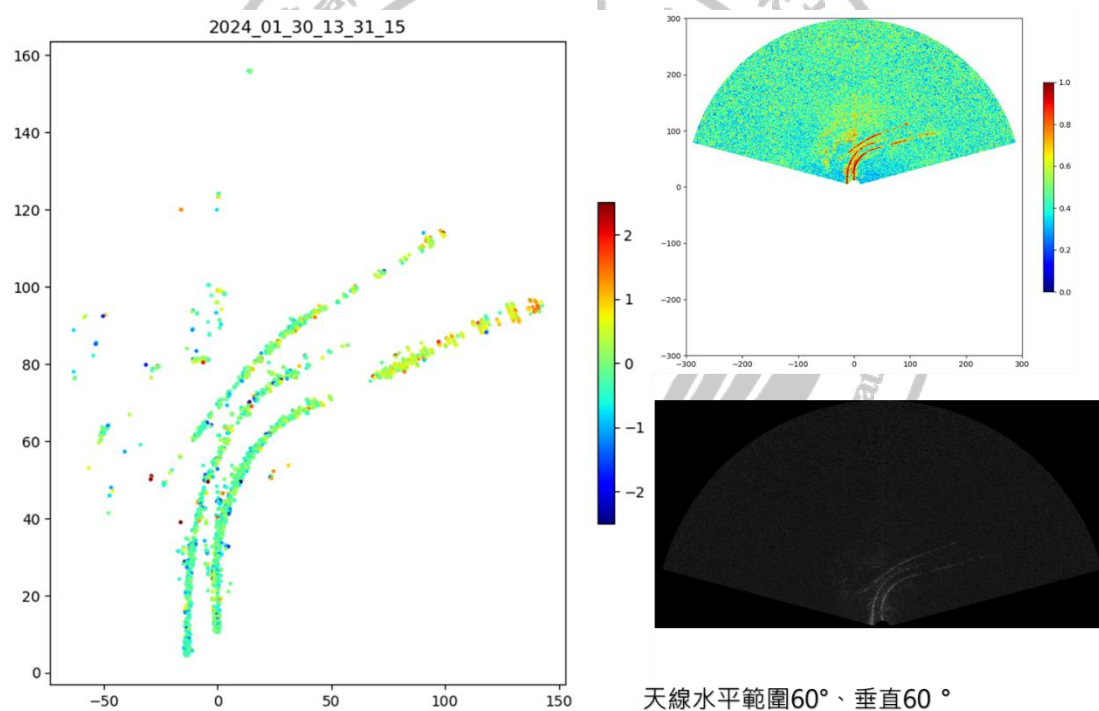


圖 3-5 垂直增益 60°天線掃描邊坡的位移(左)、同調性(右上)、震幅圖(右下)

比較圖 3-4、圖 3-5 的結果，可以觀察到垂直增益 30°的天線所獲取的 PS 點數量與分佈較 60°的天線為多；從震幅圖亦可觀察到在

30°的天線模組底下，岩石陡坡的訊號強度較為明顯。

由以上的觀測結果，我們可以瞭解到，在不同天線模組的測試過程中，所有儀器內部參數設定均為一致；因此在發射訊號頻率、波長變化、功率為一定的前提下，天線涵蓋角度越窄，其訊號越集中，在特定距離下的目標會較為顯著。

反過來說，監測較近距離的目標(如公路旁邊坡)，我們可以適度的使用天線增益比較廣的模組；雖然其涵蓋範圍較廣、能量較為分散，但在近距離的情況下，訊號逸散的程度應較遠距離為弱，因此仍可納為使用。

簡而言之，透過阿里山公路邊坡測試，我們認為應依照現地監測需求，挑選合適的天線模組進行監測。若監測目標較遠，則可使用垂直增益 18°~30°的模組；若目標較近，則依照需求選擇 30°~60°的模組。

(二)調整 Dx、Dy 對監測結果的影響

Dx、Dy 參數影響了雷達影像成像時，每個像素所代表的真實空間大小，通常會設定 Dx、Dy 為同一數值，單位為公尺。假設 Dx、Dy 設定為 0.1，意指每一個雷達像素的長、寬都會以 0.1 公尺大小輸出。原則上 Dx、Dy 數值設定越小，其成像解析度會越好，因此本項測試意圖通過調整 Dx、Dy 數值(0.1、0.5)，來瞭解是否可以改善雷達成像解析度不佳的問題。

本次測試以成功大學資源工程系系館 5 樓天台作為試驗場地，以資源工程系館附近的大樓作為測試目標，掃描範圍為 50~500 公尺；測試環境如下圖 3-6 所示：



圖 3-6 以資源系系館 5 樓作為測試 Dx、Dy 參數環境

表 3-1 測試不同 Dx、Dy 值對同一目標掃描之生成檔案比較

資料	Bin檔大小	amp檔大小	Cache檔大小
dx、dy=0.1 (3幅影像)	37,713	390,704	6,710
dx、dy=0.5 (4幅影像)	37,713	15,641	391

Unit: KB Unit: KB Unit: MB

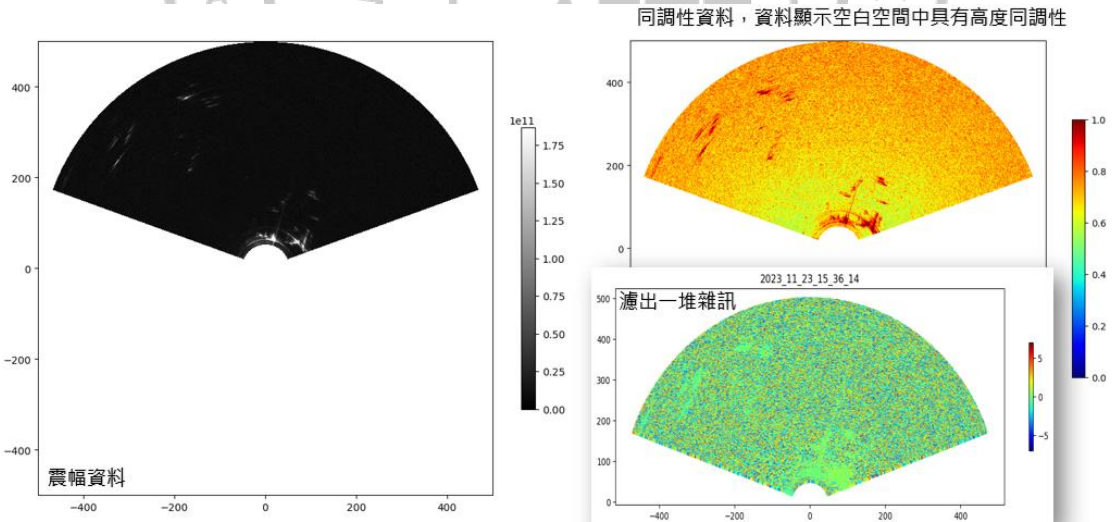


圖 3-7 設定 Dx、Dy 為 0.1 的震幅(左)、同調性(右上)、位移量影像(右下)

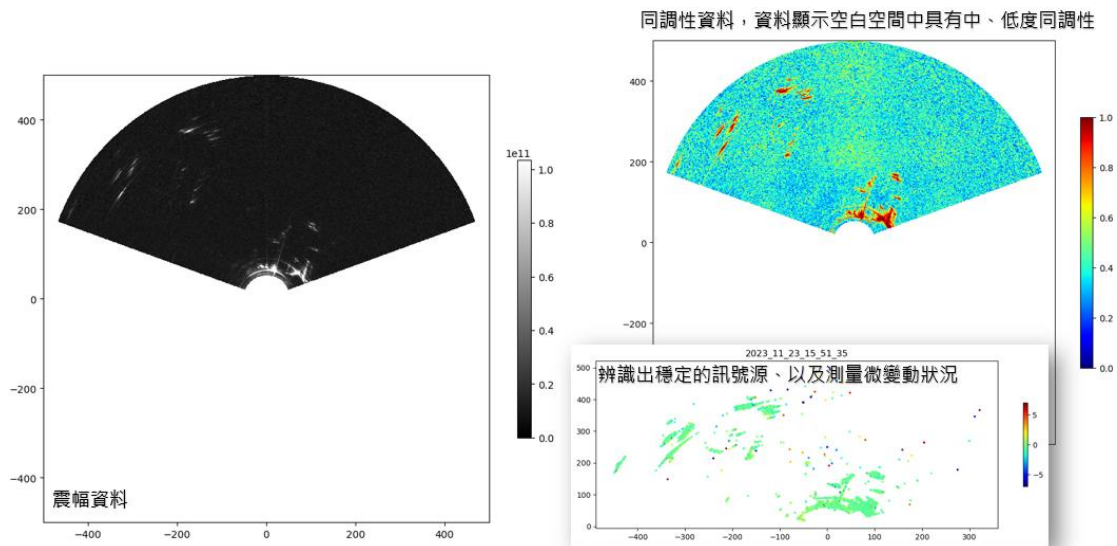


圖 3-8 設定 Dx、Dy 為 0.5 的震幅(左)、同調性(右上)、位移量影像(右下)

表 3-1 為測試過程中，以不同 Dx、Dy 數值進行少量掃描後，儀器自行產生的：1.原始檔(bin)、2.震幅檔(amp)、以及 3.整體檔案(包含震幅、同調性、相位差、以及附加參數記錄檔案等)的消耗儲存空間大小的比較。

由表 3-1 可以瞭解到，若使用比較小的 Dx、Dy 數值進行掃描，後續所產生的震幅、以及整體檔案大小會遠遠高於 Dx、Dy 設定為 0.5 的影像；以比較整體檔案大小為例，其消耗儲存空間量，相差高達 17 倍左右。

圖 3-7、圖 3-8 分別為 Dx、Dy 設定為 0.1、以及 0.5 的掃描結果。兩相比較可以觀察到兩者震幅影像並無太大差異。但 Dx、Dy = 0.1 的同調性圖可以看到整個背景環境的同調值都非常的高，所篩選出的 PS 點數量亦因此異常高於正常監測結果。相反的 Dx、Dy = 0.5 的同調性、以及位移圖則呈現正常的情況：人工建物為高同調性、背景為低同調性的特徵，ArcSAR 因此可以辨識出穩定的訊號，進行後續位移量解算的工作。

第二節 新式角反射器設計

於前一節中，0403 花蓮地震震後監測工作，研究團隊使用 ArcSAR 對邊坡進行監測，所使用的天線為水平增益 60° 、垂直增益 30° ，其掃描結果與 2023 年 10 月時監測影像(水平增益 60° 、垂直增益 18°) 比較如下圖 3-9 所示。

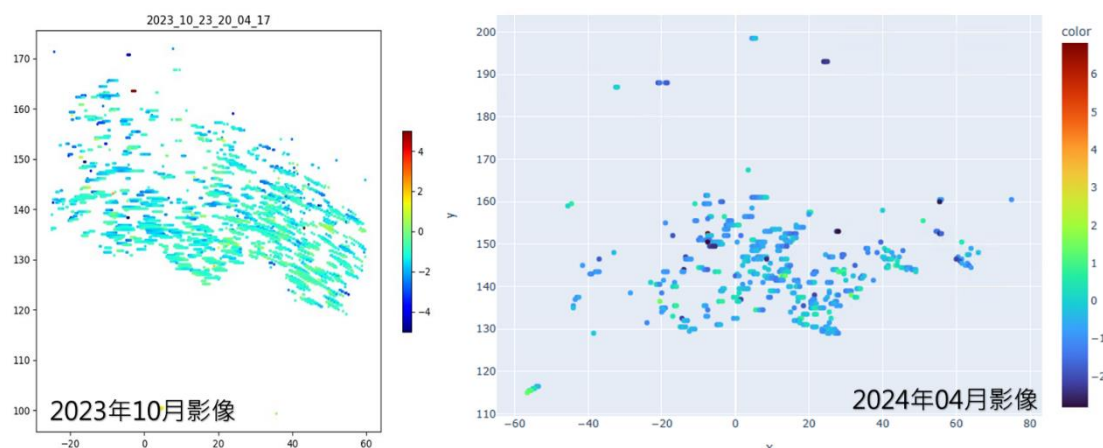


圖 3-9 2023 年 10 月與 2024 年 4 月 ArcSAR 影像比較

比較兩個時期的影像，可以注意到，使用不同垂直增益範圍的天線模組，其可監測範圍仍然受到侷限於邊坡坡趾的位置，顯示使用 ArcSAR 監測 DS194 邊坡應非受到天線垂直增益角度所限制，而是有其他的因子。

綜觀前述幾組不同場景使用 ArcSAR 的結果：1. 圖 3-3、圖 3-4、圖 3-5；2. 圖 3-6、圖 3-8；3. 圖 3-31，我們可以觀察到反射訊號足夠穩定到成為 PS 點的像素，其共同特徵有：(1)目標為足夠正交的反射面、(2)若反射面略不正交，則可透過較集中的訊號來提高雷達接收到反射訊號的機率。

反過來說，DS194 坡腹以上平均坡度約為 41.7° (詳參閱 111 年度計畫：GBInSAR 山崩即時預警觀測標準作業程序律定與驗證，3-17

頁);地形上,從坡趾轉折至坡腹的位置高於 ArcSAR,意即從 ArcSAR 發射的訊號,可能將以非常大的入射角角度擊中坡腹表面,並從相對的反射角度遠離 ArcSAR,入射角過大導致無法取得反射資料,致使雷達機無法有效回收穩定的訊號作為 PS 點。

為了改善 ArcSAR 難以在 DS194 邊坡坡腹以上找到有效的 PS 點進行監測,團隊認為在邊坡上面放置角反射器,應可助於拓展 GBSAR 監測邊坡的範圍。又,GB-SAR 僅能夠監測目標 1 維方向的位移變化,若能夠合理設計角反射器,使其能夠同時服務衛星合成孔徑雷達(瞭解邊坡垂直方向的位移變化),則將有助於我們更進一步的瞭解邊坡動態。

(一) 角反射器構思

新的角反射器期望服務目標包含 1. GBSAR、2. 衛星 SAR、3. 掛載 GNSS、4. 其他;其中,前兩項為優先完成目標。

雷達發射信號後,所接收回來的信號強度,我們可以參考通用公式來表達:

$$\text{Signal Energy} = \frac{P_{\text{average}} G^2 \lambda^2 \sigma_{\text{tot}}}{(4\pi^3) R^4}$$

上述公式中, P_{average} 為接收信號能量強度, G 為天線增益, λ 為雷達信號波長, $\sigma = \text{RCS}$ (雷達散射截面積,以下以 RCS 為簡稱), t_{tot} 為訊號傳輸-接收時間, R 為雷達至目標的距離。

其中,RCS 與反射體面積、反射體材質、反射回雷達的能量佔比相關。

另外,平均噪聲公式為:

$$P_n = f_n k T_s B_w$$

其中， f_n 為變動係數， K 為波茲曼常數， t_s 為系統溫度， BW 為 Band Width。

因此，我們可以將上述兩個公式合併成為訊號信噪比公式：

$$SNR = \frac{\text{Signal Energy}}{P_n} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi^3) R^4 k T_s B_w f_n}$$

由信噪比公式可以瞭解到，若角反射器的信號要明顯突出於環境，在不更動其他固定參數的基礎上，我們必須著手優化 RCS 來討論，而 RCS 的優化，最長見且直接的方法為決定角反射器的外型樣式。

下表 3-2 為常見角反射器樣式與計算 RCS 公式、以及 3dB(半功率值)波束寬度：

表 3-2 常見角反射器樣式、RCS、半功率寬度參考

反射器樣式	最大RCS	3dB波束寬度
球狀	πr^2	2π
方形平板	$4\pi a^2 / \lambda^2$	$0.44\lambda/a$
三角形三面	$4\pi a^4 / (3\lambda^2)$	$\sim 40^\circ$
方形三面	$12\pi a^4 / (\lambda^2)$	$\sim 40^\circ$
龍柏透鏡	$\sim 2\pi a^4 / (\lambda^2)$	$\sim 150^\circ$

表 3-2 中， r 為球體半徑， a 為幾何形狀邊長， λ 為雷達信號波長；其中，龍柏透鏡通常為軍事所使用、製造工藝難度較高，國內目前尚未找到廠商可以協助製造，因此龍柏透鏡暫不於本計畫中討論。

下表 3-3 為各樣式的角反射器帶入不同的半徑/邊長進行最大 RCS 的試算結果：

表 3-3 不同角反射器對不同邊長之最大 RCS 試算

形狀描述	最大RCS	半徑(邊長)	最大RCS試算
球狀	πr^2	20	1,256.64
方形平板	$4\pi a^2/\lambda^2$		1,739.29
三角形三面	$4\pi a^4/(3\lambda^2)$		1,936,896.56
方形三面	$12\pi a^4/(\lambda^2)$		2,087,148.02
球狀	πr^2	50	7,853.98
方形平板	$4\pi a^2/\lambda^2$		10,870.56
三角形三面	$4\pi a^4/(3\lambda^2)$		75,660,021.78
方形三面	$12\pi a^4/(\lambda^2)$		81,529,219.72
球狀	πr^2	70	15,393.80
方形平板	$4\pi a^2/\lambda^2$		21,306.30
三角形三面	$4\pi a^4/(3\lambda^2)$		290,655,539.68
方形三面	$12\pi a^4/(\lambda^2)$		313,202,650.49

由表 3-3 可觀察到，在所有角反射器樣式中，方形三面所試算的 RCS 值為最優，其次依序為三角形三面、方形平版、球狀等樣式。因此，角反射器樣式的設計，將優先朝類似方形三面(圖 3-10)的形狀進行考慮。

此外，新型角反射器的設計，必須優先考慮到能夠同時服務於 GBSAR、以及衛星 SAR(含升軌、降軌)。因此，團隊初步決定嘗試組合 8 個方形三面(以下簡稱為「八角」)進行測試，如下圖 3-11。



圖 3-10 方形三面(邊長 50 公分)外觀及野外測試示意圖



圖 3-11 ”八角”角反射器模型外觀示意

(二) 角反射器設計與試驗

前章節的圖 3-11 為研究團隊所製作模型，其使用鐵網製作整體框架，另貼覆鋁箔以強化訊號。研究團隊另外製作數個不同的模型，長度及材質如下表 3-4、戶外測試如下圖 3-12 所示：

表 3-4 自製角反射器樣式一覽

類型	邊長(公分)	材質
方形三面	50	不銹鋼
八角	39	鐵網
八角	40	鐵網+鋁箔
八角	60	鐵網
八角	60	鐵網+硬紙板+鋁箔



圖 3-12 角反射器進行戶外測試示意圖

戶外測試分成兩個部分：

- 1.校園測試：使用 ArcSAR 測試在不同的距離、姿態(水平旋轉/俯仰角)的狀況下雷達的反射強度。
- 2.野外測試：將角反射器放置於空曠且無任何遮蔽的野外，透過檢視哨兵一號(含升軌、降軌軌道)掃描該地點的訊號強度，確認角反射器是否提升反射效率。

1. 校園測試

第一部分校園測試的結果如下圖 3-13、詳細資料如下圖 3-14 所示：

CR類型	距離	強度	強度比較	與最強訊號比較
四方三面，50公分，不鏽鋼板	15 公尺	2.17952E+13	100%	100%
八角，40公分，鋁箔	15 公尺	8.08195E+12	37%	37%
八角，60公分，烤網	15 公尺	3.59577E+12	16%	16%
八角，39公分，烤網	15 公尺	3.01875E+12	14%	14%
四方三面，50公分，不鏽鋼板	25公尺	1.81273E+13	100%	83%
八角，40公分，鋁箔	25公尺	1.96847E+12	11%	9%
八角，60公分，烤網	25公尺	2.3579E+12	13%	11%
八角，39公分，烤網	25公尺	1.10444E+12	6%	5%
八角，60公分，鋁箔 (2024_03_26)	25公尺	2.95312E+12	16%	14%
四方三面，50公分，不鏽鋼板	35公尺	2.98208E+12	100%	14%
八角，40公分，鋁箔	35公尺	9.25234E+11	31%	4%
八角，60公分，烤網	35公尺	2.37898E+12	80%	11%
八角，39公分，烤網	35公尺	6.57777E+11	22%	3%
八角，60公分，鋁箔 (2024_03_26)	35公尺	1.03694E+13	348%	48%
八角，60公分，臨時貼鋁箔	15 公尺	4.18584E+12		19%
	35 公尺	2.12616E+12		10%
四方三面+八角40公分、八角60公分	85 公尺	1.0863E+12		5%
	50 公尺	6.20946E+12		28%
背景訊號強度		6.84E+06		

圖 3-13 以 ArcSAR 進行角反射器校內測試結果



圖 3-14 以 ArcSAR 進行角反射器校內測試之詳細資料

由上圖 3-13 可以瞭解到：

- (1) 邊長 50 公分的方形三面(圖 3-13 中以"四面三方"稱呼)在不同距離測試中，均反射較強烈的訊號。
- (2) 八角模型中，同距離的前提下，邊長較長的模型具有較強的訊號反射、包覆鋁箔材質的模型所反射的訊號比沒有包覆的模型強。
- (3) 同樣尺寸的八角模型，以厚紙板進行表面平整化，其反射效率會優於僅包覆鋁箔的模型。
- (4) 參照圖 3-14 內試算表資訊：方形三面進行調整水平角度測試，觀察到角度越偏，訊號強度越弱，最弱可達原始強度的 15%。
- (5) 承 4，以包覆鋁箔的八角模型進行仰角調整測試，觀察到訊號弱化程度較少，最弱可達原始強度的 70%。
- (6) 不管測試距離多遠，所測試的角反射器訊號強度，均高於背景強度 5~7 個數量級。

由前述表 3-2 可以知道，方形三面的角反射器樣式，其波束半功率寬度約為 40° 。實際進行戶外測試時觀察到，雷達訊號在調整水平

角度超過半功率寬度的情況下，其強度衰弱程度遠高於預期。相對的，由於包覆鋁箔的八角模型，由於其為多個方形三面所組成，在進行姿態調整的過程中，訊號強度經歷了變弱、再轉強的變化，其中可能原因在於角度轉變過程中，另外一個方形三面的角反射器機構協助參與訊號的反射，因此可以保持雷達訊號在一定的距離中維持一定的強度。

校園測試的結果，均獲得「角反射器所反射的訊號強度均大於環境背景訊號強度，並可維持一定強度」的結果，初步的確認其具有可行性。

2. 戶外測試

在校園測試中，確認了 ArcSAR 可有效辨別角反射器，接著研究團隊將角反射器設置於屏東萬巒的農地，透過哨兵一號升軌、降軌影像確認是否可提升該區域訊號強度。

角反射器反射效率檢測工具，為使用 Google Earth Engine(GEE)所撰寫之程式如圖 3-15，其功能為透過 GEE 取得哨兵一號的雷達影像，並從中獲取時序強度資訊，以瞭解某區域訊號強度變化。

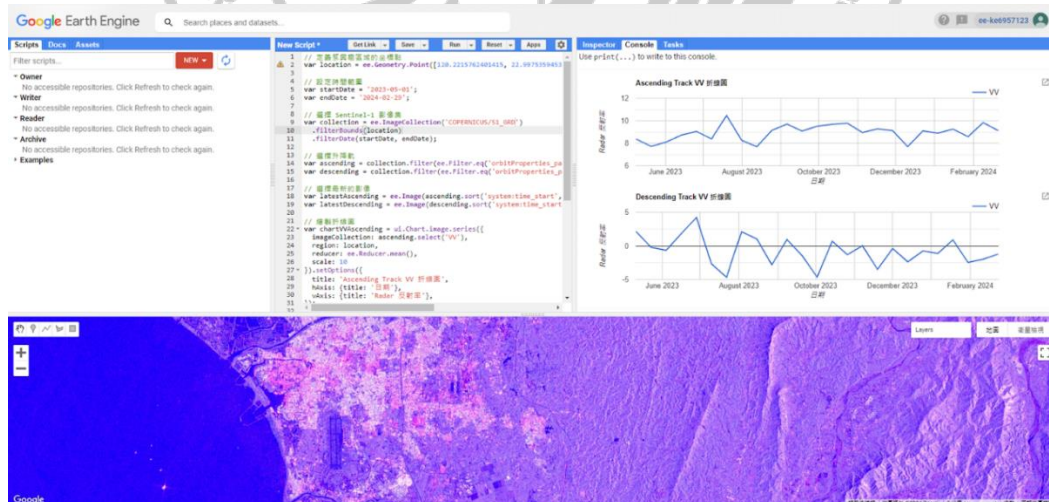


圖 3-15 使用 GEE 程式調取哨兵一號時序強度資料

為了確認 GEE 程式的功效，研究團隊參考藍振維等人(2021)的文章，找到該團隊於台九線南迴公路的角反射器設置位置(圖 3-16)，將其坐標匯入 GEE 程式中，程式執行結果如圖 3-17 所示。



圖 3-16 台 9 線南迴公路設置角反射器(藍等人，2021)

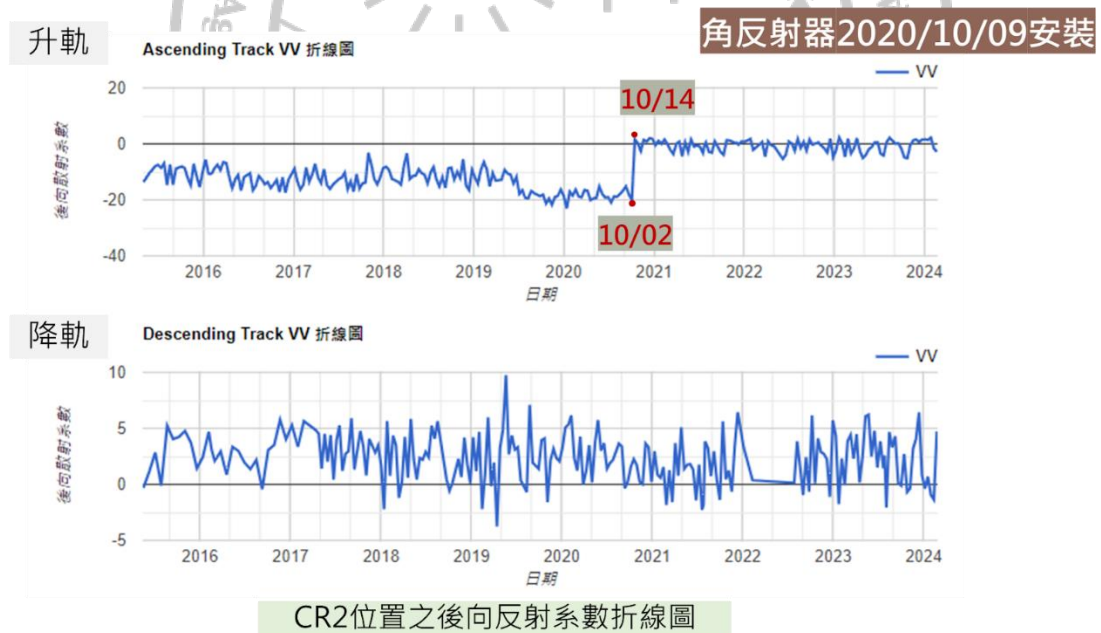


圖 3-17 GEE 程式測試 藍等人於台九線南迴公路段角反射器設置狀況

由圖 3-17 可瞭解到，藍等人於台九線設置之角反射器的安裝日期為 2020 年 10 月 9 日，透過 GEE 程式可觀察到哨兵一號於該區域之升軌訊號於角反射器設置前後有明顯的強度變化，因此可確認 GEE 程式用於檢測地面角反射器設置狀況確實可行，研究團隊遂使用該程式用於檢測本研究於戶外放置角反射器成效，測試成果如下圖 3-18 所示。

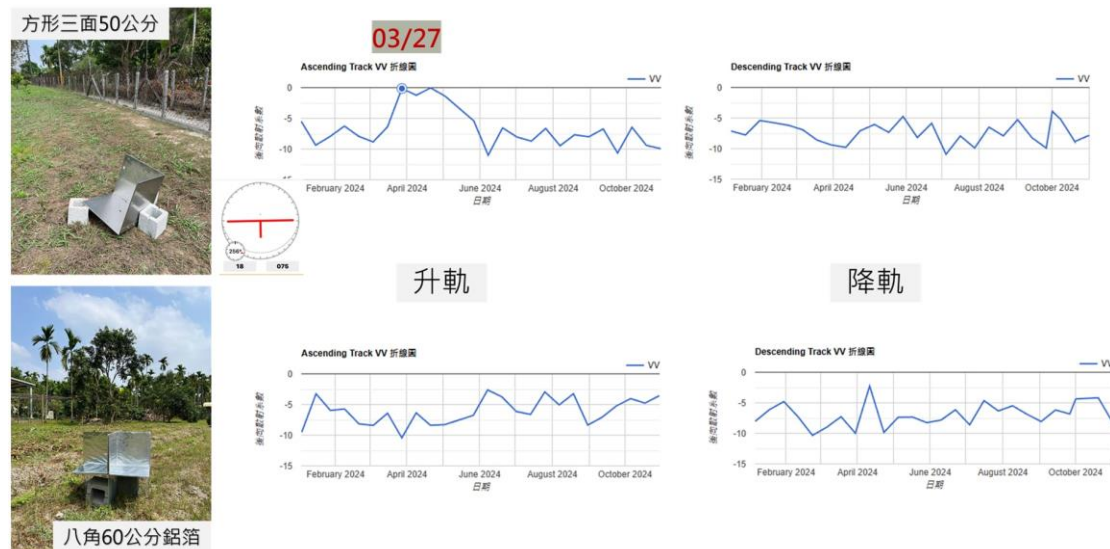


圖 3-18 使用 GEE 程式檢測角反射器於戶外設置之成效

本次申請角反射器放置時間為 37 天，哨兵一號於期間共掃描 4 次；透過 GEE 程式可以觀察到，由不銹鋼製作的 50 公分方形三面於升軌軌道確實可獲得較強的訊號，而八角模型無論於升軌軌道、或者是降軌軌道都沒有發現任何訊號強化的現象。

研究團隊事後回收角反射器時發現，除戶外設置的現場雜草超過角反射器的高度植被覆蓋導致反射訊號較弱，包覆烤肉網的鋁箔與硬紙板因為反覆的日曬雨淋產生了彎曲褶皺的狀況，推測為影響八角模型反射訊號的主要原因(圖 3-19)。



圖 3-19 角反射器回收現場狀況

受到製作材料的影響，團隊暫時無法確認八角模型應用於衛星 SAR 的成效。研究團隊規劃於下半年將開始以新的材料著手製作新的八角模型，並進一步進行測試。未來期望可以將模型應用於 DS194 邊坡，強化監測成效。

(三) 新式角反射器觀測模組

本章節介紹研究團隊依照測試結果，修改角反射器外觀，並且新增其他軟硬體，使之成為一角反射器觀測模組。

1. 角反射器模組軟硬體配置

角反射器觀測模組的軟硬體配置包含角反射器、反射稜鏡、GNSS 模組、加速規、處理器、基座、太陽能供電系統等，說明如下。

(1) 角反射器面板：以網狀金屬板製作之角反射器面板，角反射器分成上下兩部分，角反射器上半部為供星載 InSAR 使用，下半部為供 GB-InSAR 使用，板設計圖與尺寸如圖 3-20(a)。考慮角反射器在戶外的環境，需克服山谷中強勁的風力與排水，故反射面板使用佈滿直徑 2mm 圓孔的沖孔不銹鋼板，圓孔間距則為 1.5mm，如圖 3-20 (b)。於成功大學歸仁校區的測試照片如圖 3-21，實測結果 GB-InSAR 可清楚測得角反射器的訊號。

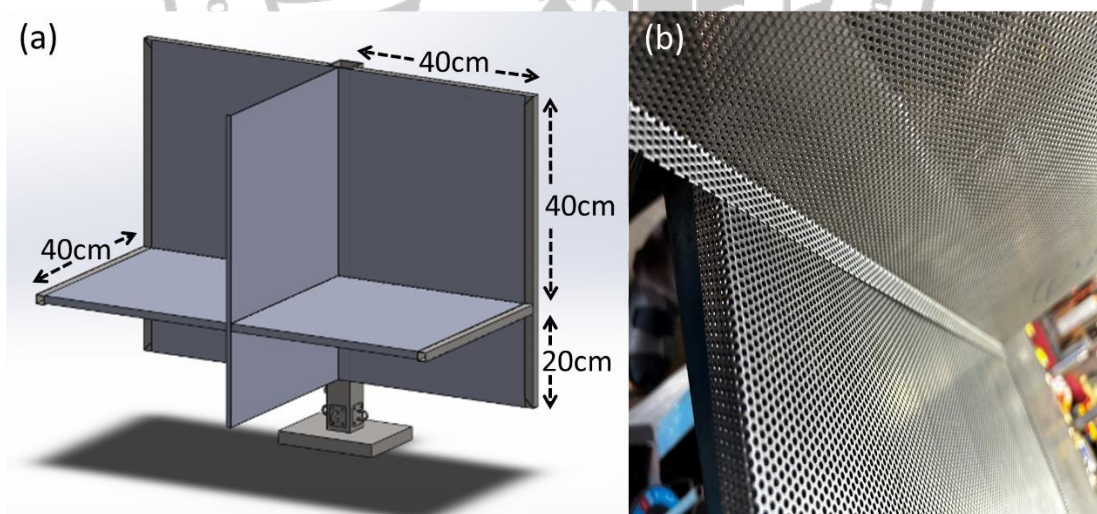


圖 3-20 角反射器(a)面板設計圖、尺寸與(b)面板外觀



圖 3-21 角反射器外觀與測試照片

- (2) 反射稜鏡：反射器上方設置反射稜鏡，供全站式電子速距儀(全站儀)進行高精度的坐標量測。
- (3) GNSS 模組：GNSS 天線設置於角反射器上方，GNSS 晶片配置於處理器旁，型號為 SparkFun GPS-RTK2 Board (ZED-F9P)。於邊坡外的穩定區域設置 GNSS 基地站，配合實時動態技術 (Real Time Kinematic, RTK)，對位於角反射器上的移動站進行實時動態坐標量測。
- (4) 加速規：加速規晶片配置於處理器旁，觀測三軸方向加速度，進而計算出角反射器即時的姿態。
- (5) 處理器：處理器主體為 Raspberry Pi 5，以太陽能儲電系統供電，收集並處理 GNSS、加速度、時間、溫度、電壓強度等訊號後，即時將相關資訊藉由 4G 網路模組對外發送至遠端控制中心，每 10 秒發送一組觀測訊號，相關資料亦同時備份於處

理器上的記憶卡中。處理器連同相關晶片固定於隔熱防水盒內。

(6) 基座：角反射器、GNSS 天線、反射稜鏡、處理器、加速規、無線電天線與 4G 網路天線皆安裝於基座上。基座固定於三角架上，姿態保持水平。三角架固定於角鋼上，角鋼以 15 公分長之鋼釘固定於邊坡上。

(7) 太陽能供電系統：太陽能板對鉛酸電池充電，鉛酸電池同時提供電力給處理器。供電模組即時傳送電壓資訊給處理器，當長期陰天導致電壓低於門檻值時，供電模組停止供電，處理器將強制關機，此為一保護電池的機制，待太陽能板回充電力，電壓上升至啟動值後，供電模組重新供電，處理器自動開機，繼續處理並回傳資料。鉛酸電池與相關配件皆放置於隔熱防水盒內，電池防水盒與太陽能板皆以鋼釘固定於坡面上。

2. 角反射器安裝說明

本角反射器安裝地點為自然邊坡，目的為量測淺層邊面的滑動，規劃以手持式工具即可完成安裝的固定方法，不使用鑽掘機具與水泥灌漿，以便於快速安裝，不使用與深層岩體連結的岩錨，以確保測得的結果為淺層坡面之位移。安裝程序如下。

(1) 固定角反射器：三根角鋼構成三角形，平貼於邊坡上，以 15 公分長之鋼釘將角鋼固定於邊坡上，三角架固定於角鋼上。

(2) 拉拔測試：將角反射器往側向方向橫拉，施力時以手持式磅秤確保提供的拉力大於設定值，以加速規所獲得之姿態確認沒有傾斜。所給定之拉力設定值=質量*PGA/g，PGA 為設計

地震力(in g)。以此方式確認發生此等強度的地震時，角反射器將不會因為固定的失敗導致傾斜，所產生的傾斜將為邊坡滑移的結果。

- (3) 觀察確認穩固性: 安裝完成後，以 a.全測儀觀測相對坐標、b.加速規觀測姿態，連續觀察數日，以確定坐標與姿態沒有發生明顯變化，藉此確認角反射器安裝完成。

本角反射器模組於 113 年 9 月 19 日完成安裝於 DS194 邊坡之植生區，位置圖示於圖 3-22 中，坐標(N24.6182, E121.2881)，GNSS 的基站則設於秀巒國小內，距離 260 公尺。角反射器模組安裝後的從遠方拍攝的照片示於圖 3-23，各設備的配置照片示於圖 3-24。

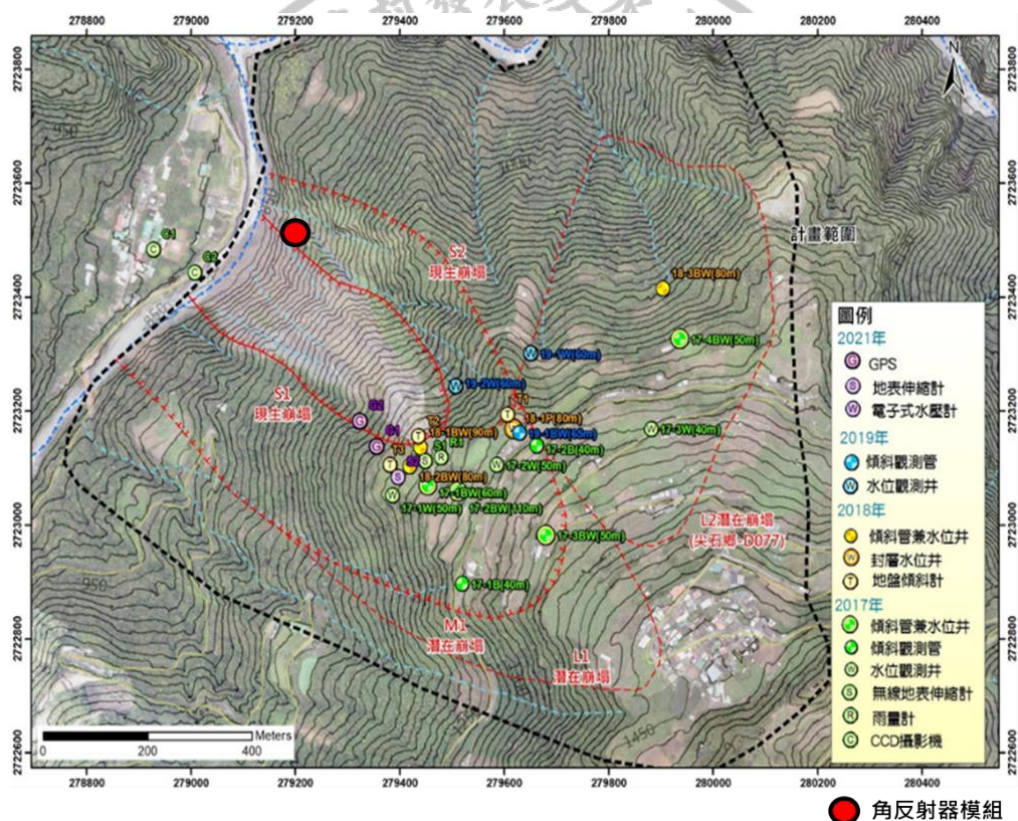


圖 3-22 角反射器模組位置圖

底圖來源:農村發展及水土保持署「大規模崩塌監測整合系統」



圖 3-23 角反射器模組於 DS194 邊坡之照片(113 年 9 月 19 日)



圖 3-24 角反射器觀測模組安裝於 DS194 邊坡之配置

(四) 新式角反射器觀測模組效能測試

角反射器觀測模組設計完成後，由 ArcSAR 分別於成功大學校內進行近距離測試、以及於 2024 年 9 月 DS194 邊坡現場監測時進行中距離測試；兩次測試均設定天線仰角 10 度進行掃描測試。

1. 成功大學校內測試

本角反射器模組於 2024 年 9 月 10 日進行校內測試。測試地點位於成功校區資源工程系、以及資訊工程系間之 5 樓空橋位置，如下圖 3-25 所示。



圖 3-25 角反射器模組於成功大學校園內測試

使用 ArcSAR 進行掃描過程中，手動將角反射器撤離原位，透過比較雷達影像(圖 3-26)、以及取得該位置雷達訊號強度變化(圖 3-27)，瞭解角反射器於近距離反射狀況。

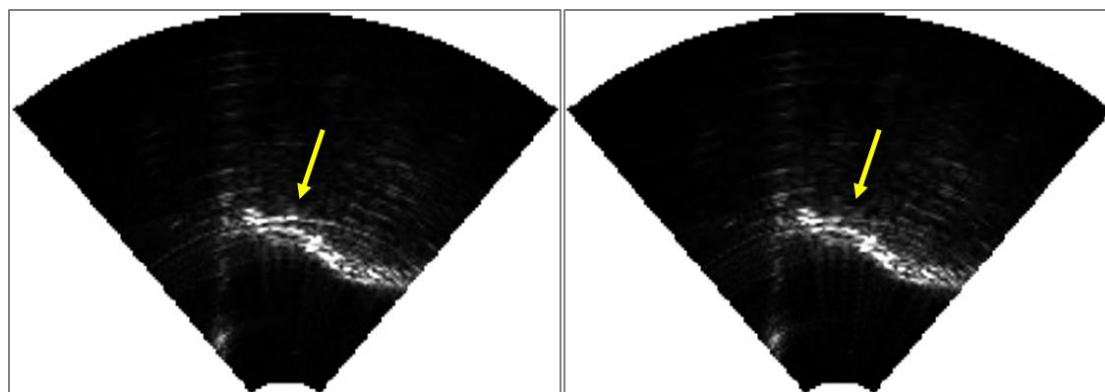


圖 3-26 角反射器設置(左)及撤離時(右)雷達影像變化

檔案順序	動作	X (公尺)	Y (公尺)	Pixel Index	amp 強度	平均值	
0	CR布置	1	41	25200	3.99E+12	CR平均值	3.98E+12
1					3.98E+12		
2					3.98E+12		
3					3.98E+12		
4					3.99E+12		
5					3.95E+12		
6					3.97E+12		
7					4.03E+12		
8	CR撤走	1	41	25200	4.11E+11	無CR平均值	4.173E+11
9					4.20E+11		
10					4.18E+11		
11					4.19E+11		
12					4.23E+11		
13					4.11E+11		
14					4.18E+11		

圖 3-27 比較角反射器撤離前後訊號強度變化

由上圖結果可觀察到，角反射器模組於近距離掃描測試時，角反射器可強化該位置訊號 1 個數量級，亦可於雷達影像中清楚觀察到訊號位置。

2. DS194 邊坡測試

角反射器模組於 9 月 19 日完成在 DS194 邊坡設置；其位置、現場樣態，如前段小節之圖 3-22～圖 3-24 所示。

ArcSAR 於角反射器模組於邊坡安裝前後亦進行掃描，觀察影像變化(圖 3-28)、以及雷達訊號強度變化(圖 3-29)結果。

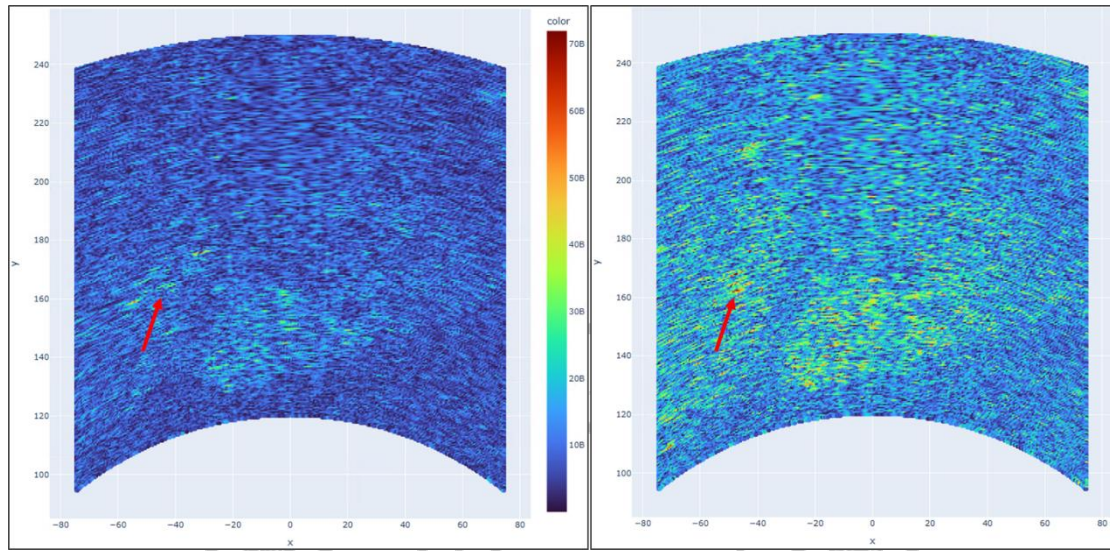


圖 3-28 ArcSAR 掃描角反射器模組於 DS194 邊坡安裝前後邊化

檔案 順序	動作	X (公尺)	Y (公尺)	Pixel Index	amp 強度	隨機背景強度	換算直線距離
0	無 CR	-47	162	2104382	5.28E+09	1.56E+09	168.68
1					4.94E+09	2.05E+09	
2	CR 布置	-47	162	2104382	3.70E+10		
3	CR	-47	162		4.41E+10		168.68
4		-48	161.5	2106781	4.07E+10		168.48

圖 3-29 比較角反射器裝設於邊坡前後訊號強度變化

研究團隊事先使用測距儀量測角反射器模組與 ArcSAR 之間的距離，約為 169 公尺。由圖 3-28、圖 3-29 結果可以瞭解到，角反射器模組在如此距離之下，最高可讓反射訊號強度增加 1 個數量級，並於雷達影像中辨別。

表 3-5 JS077-G6 半年時間位移變化整理

單位：公尺

JS077-G6	2023/10/23	2024/04/27	半年最大值	半年最小值
E	279435.04	279435.007	279435.055	279435.00
N	2723138.492	2723138.572	2723138.535	2723.138.463
H	1218.829	1218.811	1218.881	1218.811
ΔE		-0.033m (向西)		-0.055m
ΔN		0.04m (向北)		0.072m
ΔH		-0.017m (向下)		-0.07m

表 3-6 JS077-E 半年時間伸縮量變化整理

JS077-E	震前	震後
觀測數值	135.9~138.9	138.8~141.8
Δ 位移量		2.9mm

由表 3-5 的可以知道，DS194 邊坡於半年時間內，最多向西位移約 0.055 公尺、向北位移 0.072 公尺、向下位移約 0.07 公尺。由表 3 可以瞭解，DS194 邊坡的伸張量增加了 2.9 mm。其中，位移量最顯著的時間點，即為 0403 大地震當天。

0403 地震過後，根據根據交通部中央氣象署自動氣象站「鳥嘴山」站資料，DS194 邊坡附近從 4 月 4 日~4 月 10 日開始及迎來第一波降雨；在 4 月 4 日、8 日有較顯著的降雨，其中以 4 日為最高，日雨量有 40 公釐，8 日次之，日雨量有 18 公釐。

在餘震不斷、且新竹尖石鄉境內有降雨事件，團隊於 4 月 8 日完成 ArcSAR 相關儀器裝備之整理，並於 4 月 9 日出發至現場進行監測。研究團隊原規劃進行 5 天的監測工作，但由於監測現場市電電壓不穩定，於 4 月 9 日當晚將用於穩壓穩流的不斷電系統燒毀，只能啟動緊急備用電源進行監測，而可監測時間從 5 天減至 3 天；監測參數、以及成果如下圖 3-31 所示。

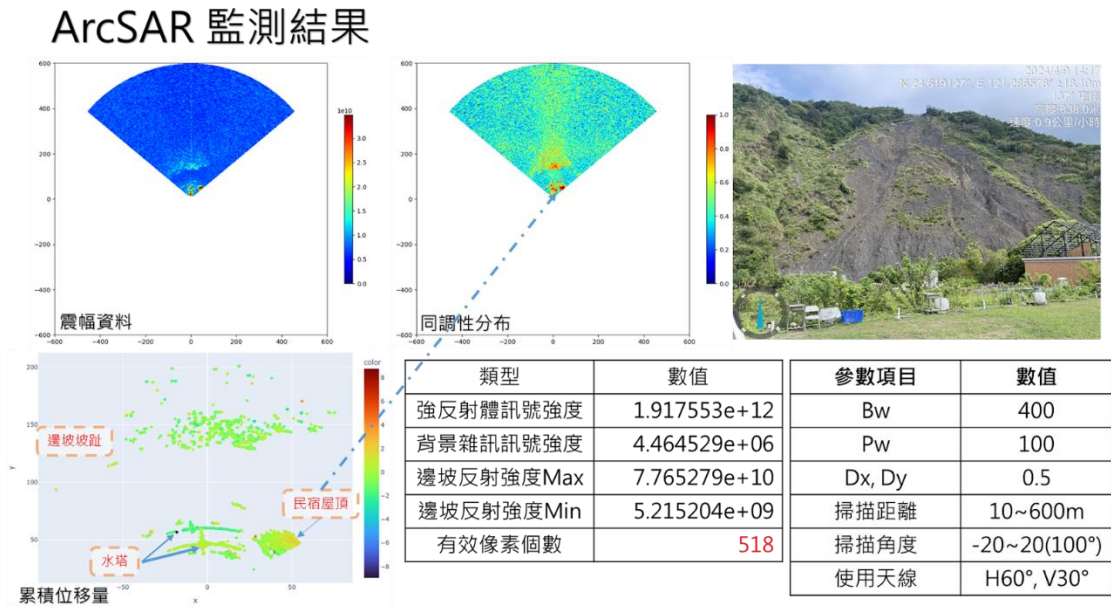


圖 3-31 4 月 9 日~11 日地震監測結果

由上圖 3-31 的震幅、同調性資料可以瞭解，靠近 ArcSAR，約 75 公尺以內的強反射訊號可以比對為實景中的水塔、建築物側邊牆面、以及鋼骨屋頂的部分，中距離約 130 至 200 公尺範圍、較為微弱的訊號為邊坡坡趾的位置。

由圖 3-31 左下角的累積位移量可以瞭解到，監測過程中，偵測到較為明顯的位移量都發生在靠近監測端的強反射訊號部分；邊坡坡趾的累積位移量主要集中於 -3~3 公釐之間，顯示邊坡雖然遭受地震以及短時降雨的影響，其邊坡仍維持一定的穩定狀態。

(二) 2024 年 6 月監測工作

新竹縣尖石鄉於今年 5 月中下旬開始有一新的一波降雨，研究團隊遂規劃 6 月 4 日至 10 日，共計 7 天，進行現場監測工作。本次監測工作安排使用 LinearSAR 進行監測利用其解析度較高優勢。下表

3-7 為本次掃描影像開始與結束時間、以及掃描影像組數、有效像素數量等資訊；圖 3-32 為邊坡累積位移監測結果、圖 3-33 為利用色調強化 DS194 邊坡累積位移量、以及位移量初步統計(單位：公釐)。

表 3-7 2024 年 6 月掃描影像資訊

地點	項次	狀態	日期	時間	掃描組數	累計觀測時	有效像素
DS194	1	開始掃描	2024/06/04	16 : 01	160 組	約 136 小時	6825 個
		結束掃描	2024/06/10	08 : 29			

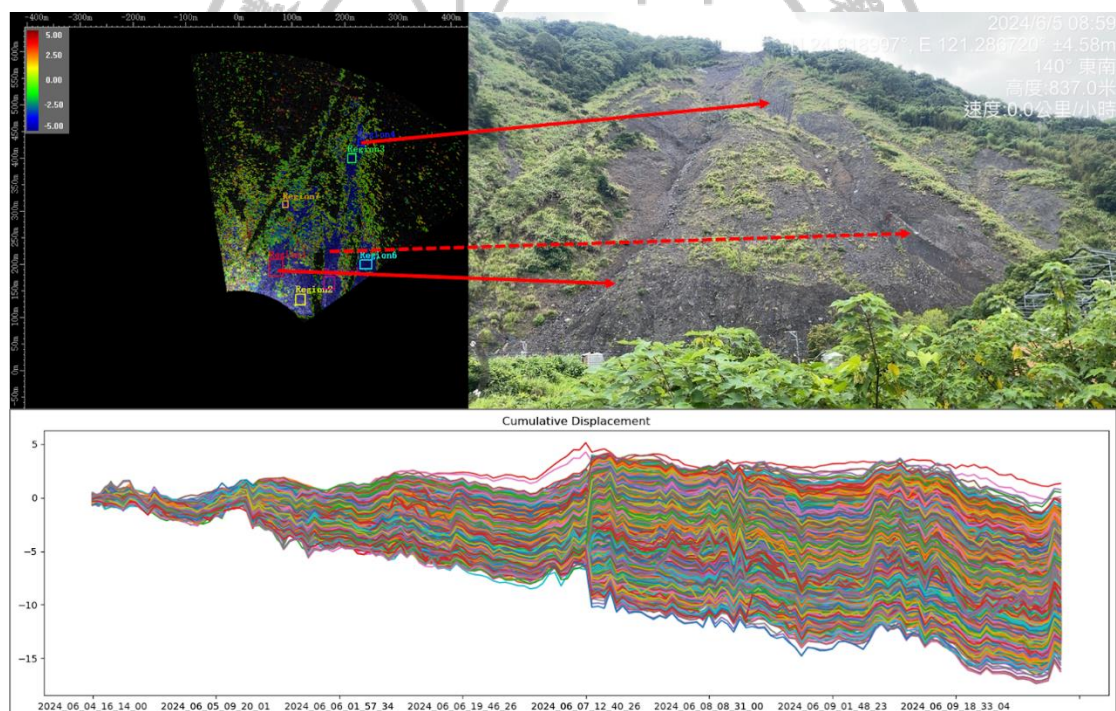


圖 3-32 2024 年 6 月 DS194 邊坡累積位移監測結果

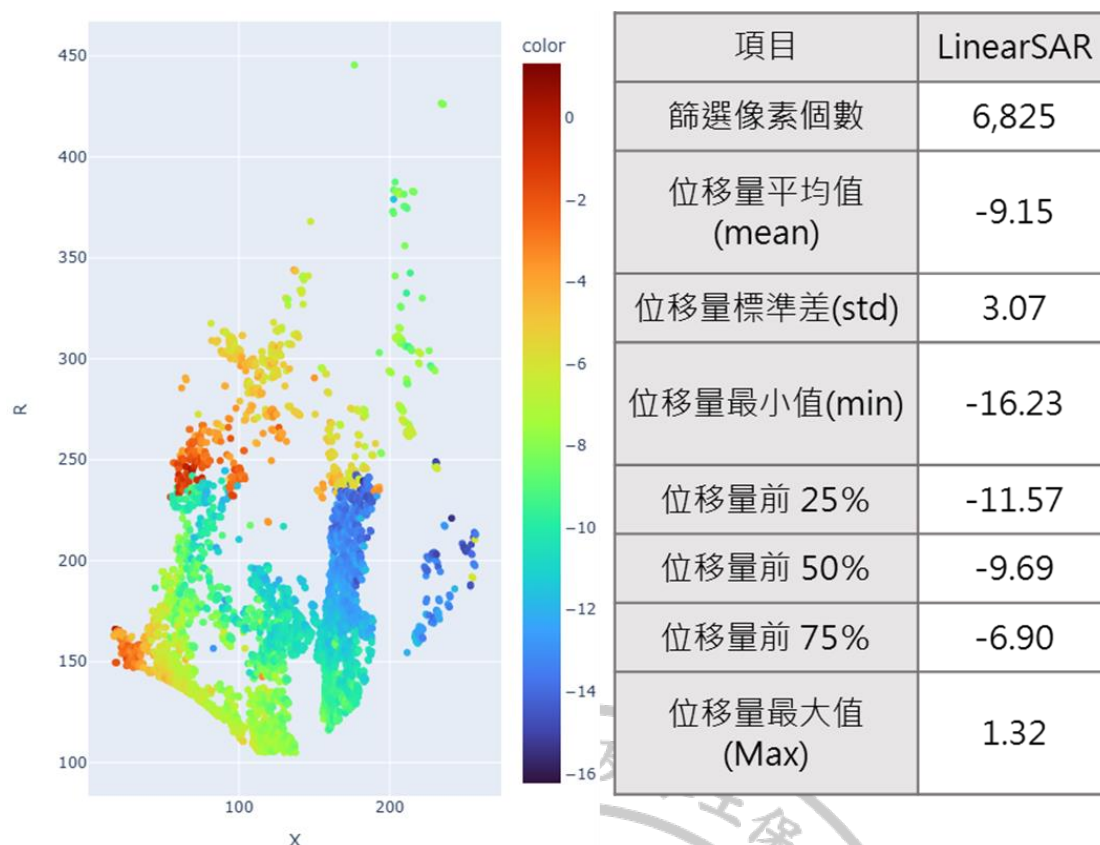


圖 3-33 色調強化 DS194 邊坡累積位移量

由圖 3-32、圖 3-33 可瞭解到，通過條件所篩選出的 PS 點有 6825 個，整體位移趨勢仍然延續 2023 年 10 月的觀察結果：持續朝觀察者靠近中；由圖 3-33 的色調強化位移量，可以看到位移相對小值(最小值為 -16.23 公釐)的主要分布區域在邊坡右側坡腹位置，而左側位移趨勢則較為緩和。

不論由大規模崩塌監測整合系統的 GPS 儀器、或者由 2023 年 10 月、2024 年 6 月的現場 GBSAR 監測結果，均顯示 DS194 邊坡以非常緩慢的速度持續朝西北(正對河谷)的方向移動。未來研究團隊仍會持續選擇合適的時機至 DS194 邊坡進行監測工作，瞭解邊坡逐時動態。

(三) 2024 年 9 月監測工作

2024 年 9 月監測工作，原規劃 9 月 17 日～9 月 25 日進行為時 9 天的監測工作，使用解析度較好的 LinearSAR 進行監測。雷達機臨時於 9 月 18 日遇到內部電容元件燒毀，因此僅拍攝 14 幅影像。

團隊在 LinearSAR 故障時，立即安排人手將儀器攜帶回台南，並於 9 月 19 日攜帶 ArcSAR 重回現場，並安排進行掃描，卻發生旋臂訊號放大模組損毀，有效影像只記錄到 9 月 21 日晚間，總共 84 幅影像。研究人員後於現場進行狀況排除無效之後，最後提前在 9 月 24 日撤離現場。

下表 3-8 為本次掃描影像開始與結束時間、以及掃描影像組數、有效像素數量等資訊；其中，項次 1 為 LinearSAR、項次 2 為 ArcSAR。

表 3-8 2024 年 9 月掃描影像資訊

地點	項次	狀態	日期	時間	掃描組數	累計觀測時	有效像素
DS194	1	開始掃描	2024/09/17	19：20	14 組	約 7 小時	9290 個
		結束掃描	2024/09/18	02：35			
	2	開始掃描	2024/09/19	14：47	84 組	約 56 小時	201 個
		結束掃描	2024/09/21	22：47			

下表 3-9 為兩代 GBSAR 監測邊坡位移狀況整理：

表 3-9 監測邊坡位移狀況

項目	LinearSAR	ArcSAR
篩選像素個數	9,290	201
位移量平均值 (mean)	-1.97	1.78
位移量標準差(std)	1.34	1.11
位移量最小值(min)	-7.89	-0.56
位移量前 25%	-2.76	1.28
位移量前 50%	-1.81	1.75
位移量前 75%	-0.92	2.09
位移量最大值 (Max)	3.53	10.98

1. LinearSAR 監測結果

本次 LinearSAR 監測位置與 2024 年 6 月監測位置相近，因此雷達影像與邊坡對照可參考圖 3-32；雷達影像、局部/整體累積位移狀況，如圖 3-34 所示；圖 3-35 為利用色調強化 DS194 邊坡累積位移量(單位：公釐)。

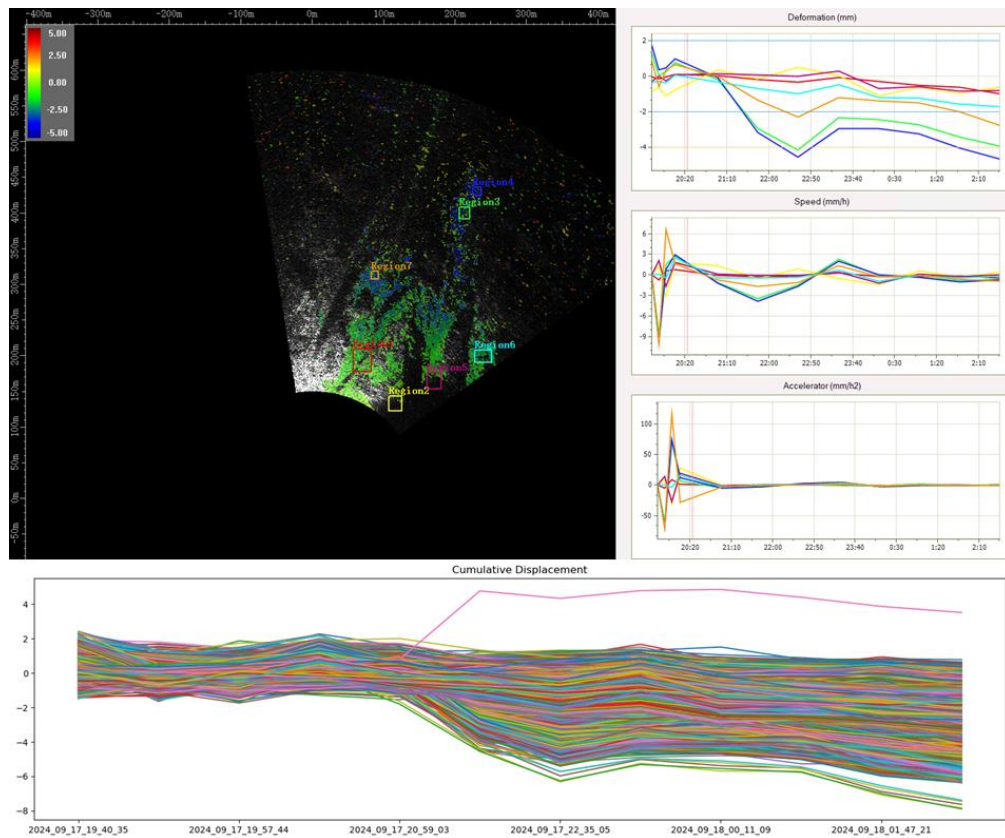


圖 3-34 2024 年 9 月 DS194 邊坡累積位移監測結果

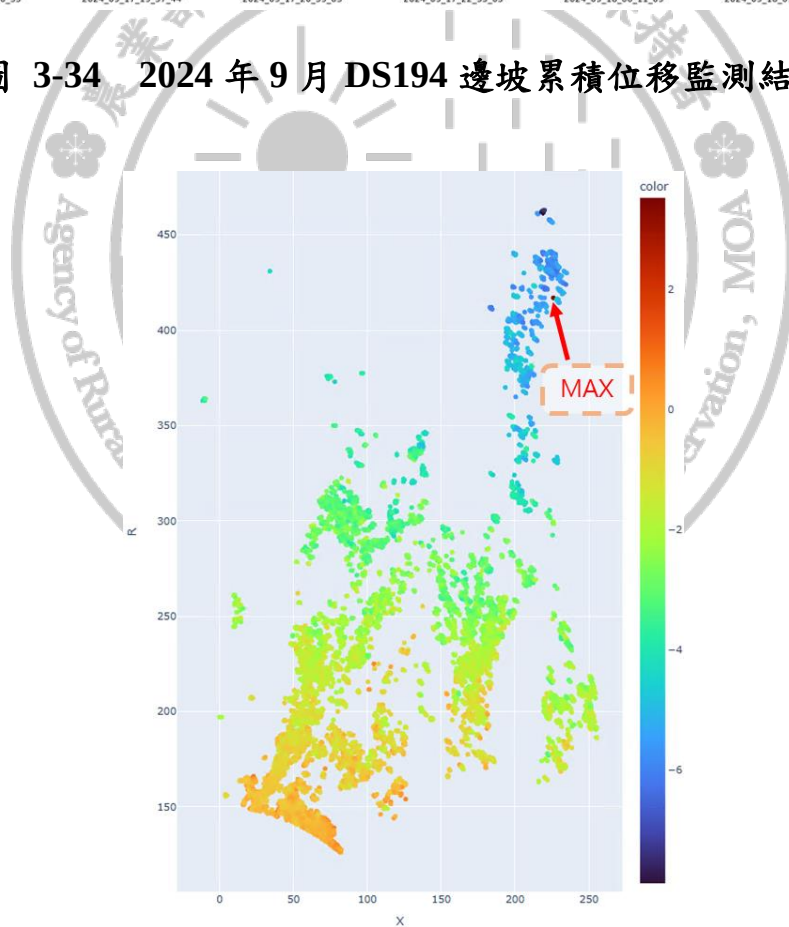


圖 3-35 色調強化 9 月監測 DS194 邊坡累積位移量

由前述圖表結果可以理解到，LinearSAR 監測期間，DS194 邊坡坡峰的部位為累積位移最大量處，位移量約有 7.89 公釐，位移方向朝向溪谷的方向前進。邊坡坡趾的部位位移量呈現不動，甚至以約略遠離觀察者的方向位移的趨勢後退；由於監測時間主要為夜間，因此所監測到的位移為邊坡夜間降溫而收縮的現象。

整體而言，邊坡的位移趨勢符合研究團隊自 2023 年期末以來至今的監測結果：坡峰、坡腹呈現朝向河谷方相位移的趨勢。

2. ArcSAR 監測結果

經過本年度測試，本研究團隊對 ArcSAR 的特性逐步取得瞭解，也逐漸接受 ArcSAR 監測 DS194 邊坡，僅能夠監測到坡腹位置的特性。下為 ArcSAR 本次監測 DS194 邊坡的雷達影像(左)、以及同調性影像(右)。

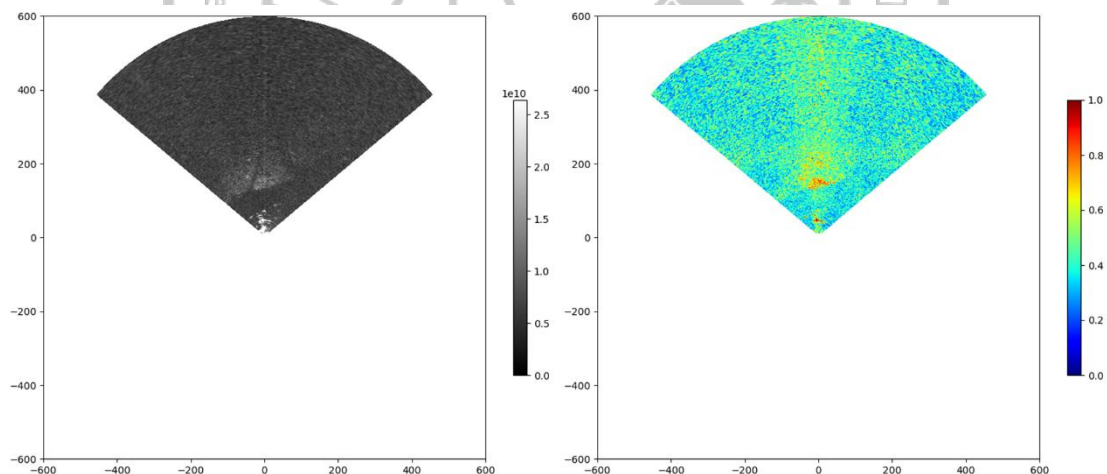


圖 3-36 ArcSAR 監測邊坡的雷達影像(左)、以及同調性影像(右)

DS194 邊坡現場於 9 月 20 日開始有些微降雨，至 9 月 21 日為降雨最高峰，最高時雨量紀錄達到 7mm。現場有觀察到泥流沿著邊坡兩側蝕溝流下、並可聽到落石滾落的聲音。從表 3-8、表 3-9 結果可之，ArcSAR 雖然僅能夠監測邊坡坡趾的部分，但由於降雨、以及邊坡表面有土石滾落的變化，以致有效監測像素減少至 201 個。

下圖 3-37 為 ArcSAR 本次監測 DS194 邊坡之累積位移量結果。我們可以觀察到邊坡坡趾整體位移量在-2~4 公釐之間，中間有觀察到個別像素突然朝向遠離 ArcSAR 方向移動的現象，推測可能為少量土石崩落所致。除此之外，我們可以觀察到 9 月 21 日時，觀察到邊坡整體累積位移量有明顯朝向 ArcSAR 方向移動現象，可能跟短時間的降雨有相關連。

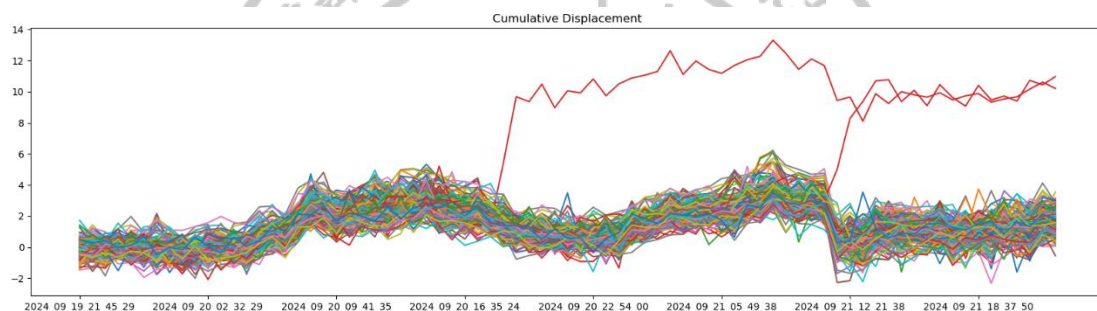


圖 3-37 ArcSAR 於 2024 年 9 月監測 DS194 邊坡之累積位移量

(四) 角反射器模組觀測結果

角反射器模組於 113 年 9 月 19 日完成安裝於 DS194 邊坡之植生區後，隨即開始回傳觀測訊號。後續於 113 年 10 月 2 日至 4 日的山陀兒颱風事件前後，角反射器並無發生明顯位移，姿態也無出現變化。而 10 月 31 日的康芮颱風事件時，角反射器下方坡面出現掏空，角反射器隨即出現約 7 公分的位移，並造成電源模組損毀，觀測訊號停止回傳。

以下觀測結果分成(1)無明顯位移出現的常時時間段與(2)崩壞過程進行說明。其中常時的觀測中，說明角反射器模組姿態的變化與校正，並討論 GNSS 觀測坐標的穩定性；崩壞過程則以全站式電子速距儀所觀測之移動量進行說明。

1. 常時觀測數據與處理

將角反射器觀測模組於 9 月 19 日至 10 月 30 日之間所回傳的加速規、GNSS 與儀器溫度等完整原始觀測數據，逐日繪於圖 3-38 中，其中加速規觀測兩個水平加速度分量(X 與 Y)及垂直方向加速度(Z)，GNSS 方面繪出兩個水平方向的觀測坐標(97 坐標)。另外，將所對應的時雨量記錄(秀巒國小站)與當日最大風速記錄(梅花國小站)，繪於圖 3-39 中，其中梅花國小風速計於 10 月 1 日至 7 日顯示為故障，故該時段無數據。

首先分析加速規所測得之數據。觀察每日加速規所觀測之加速度數據分布，可發現於幾個日期中分布較為離散，例如 9/28、9/29、10/22 與 10/28 等，而這幾天加速度較為離散的日期，都有較高的風速記錄相對應，故推測此離散與風產生的振動有關，與所在的邊坡移動(轉

動)無關。

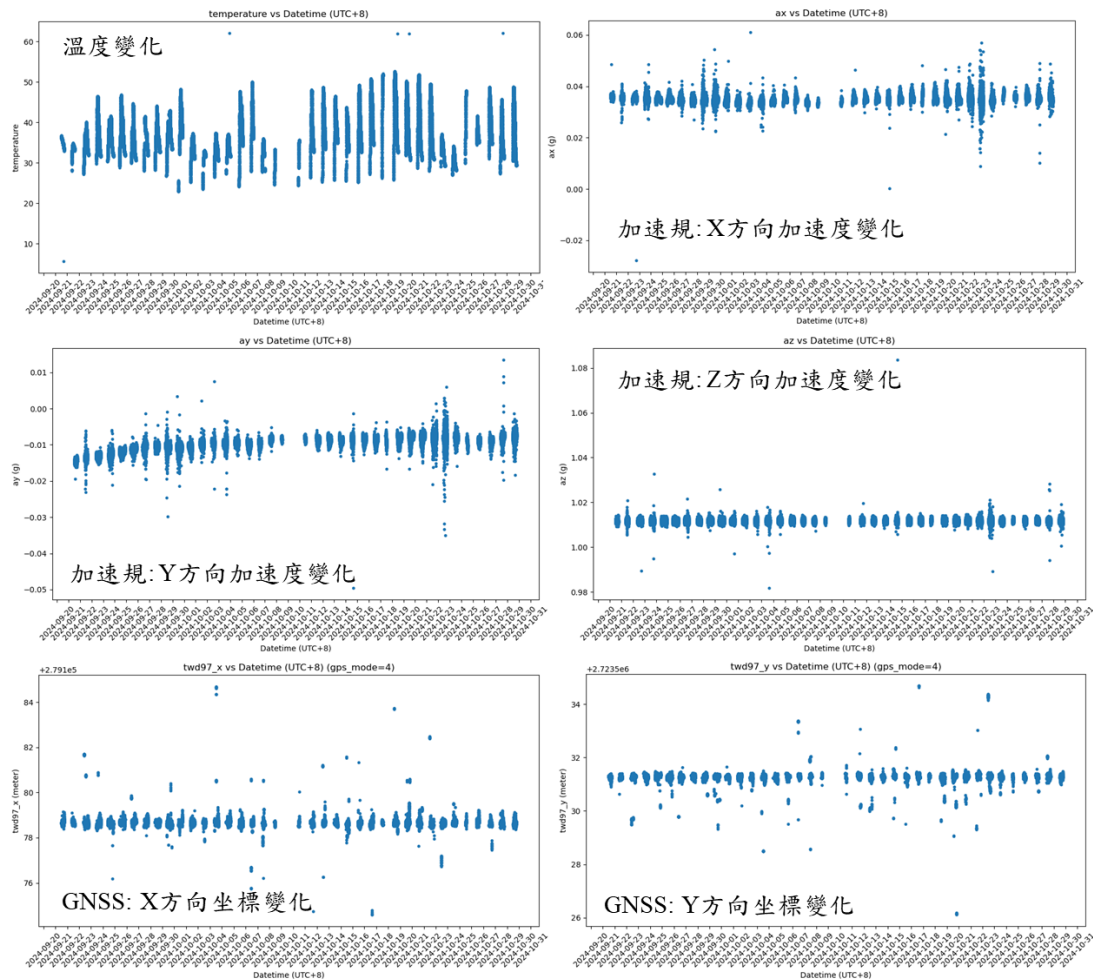


圖 3-38 加速規、GNSS 與儀器溫度之原始逐日觀測數據 (2024/9/19~10/30)

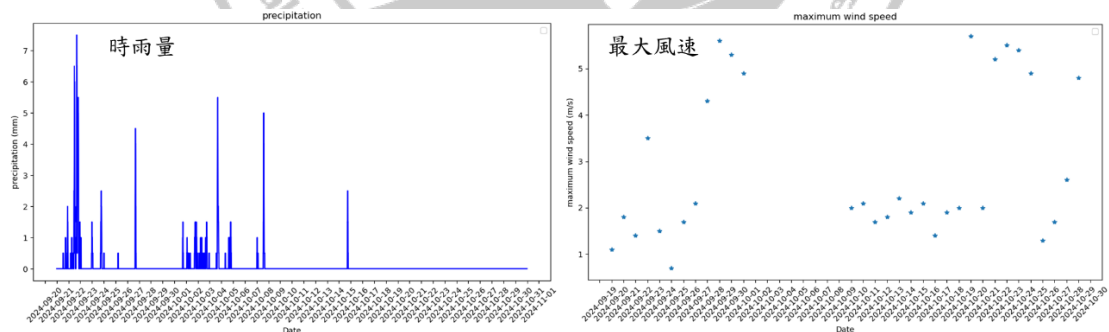


圖 3-39 時雨量與最大風速記錄(2024/9/19~10/30)

因硬體上的限制，溫度對於加速規的觀測結果有所影響，即使加速規晶片輸出訊號時已經過校正，但仍不可避免有未完善之處，故將原始加速度觀測結果對溫度進行修正。例如圖 3-40 即為觀測期間三軸向加速度對於溫度的變化，可知 X 方向修正前的加速度，與溫度呈負相關，假設此誤差為線性相關，據此予以修正，修正後的結果一併繪於圖 3-40 中。

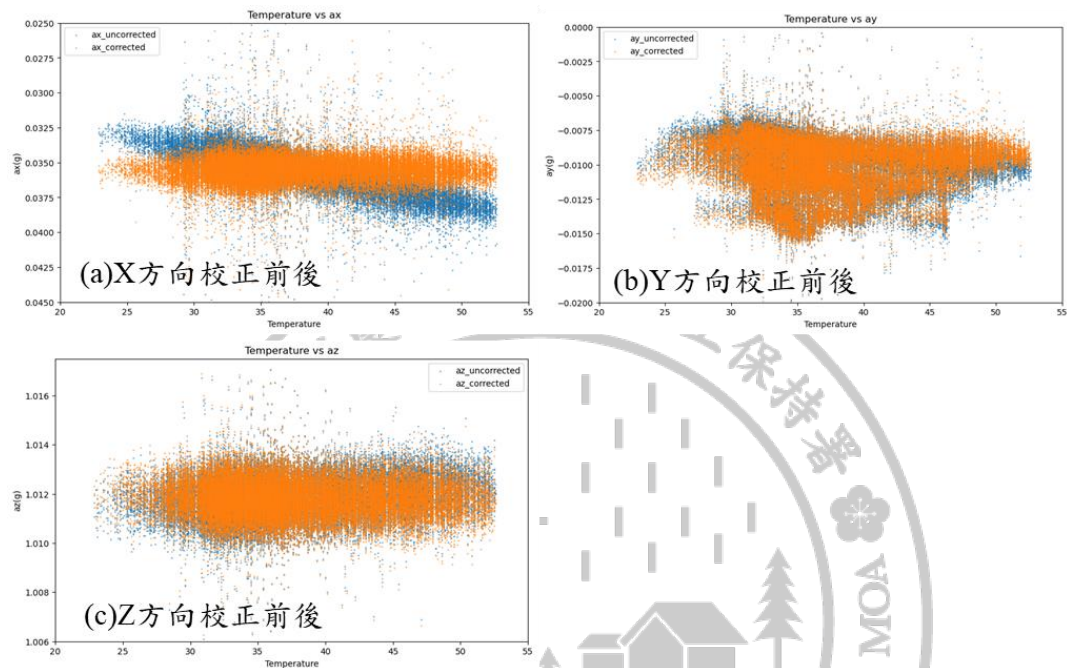


圖 3-40 以溫度校正加速度觀測數據

因加速規所觀測之三軸加速度值會受到風的影響而有震盪，故試圖將受風影響訊號剔除，再將留下訊號計算角反射器姿態。以下以日為機算單位，將每日經溫度校正過後的加速度記錄，剔除離散程度大於正負一個標準偏差的數據後，將留下來的數據再次計算平均值，將所得之三軸平均加速度，計算對應的姿態，獲得角反射器每日的平均傾角(pitch)與翻滾角(roll)。傾角與翻滾角的逐日變化曲線示於圖 3-41 與圖 3-42 中。

觀察翻滾角的逐日數據，可看出翻滾角於 9/20 至 10/7 間有穩定增加的趨勢，累積增加的幅度約為 0.3 度，推測此變化為角反射器放置於邊坡上，初期所產生的荷重導致的夯實行為。雖然夯實行為導致角反射器姿態變化，但累積的角度變化也僅有 0.3 度，幾乎可忽略。翻滾角於 10/7 之後即趨於穩定，變化程度約 0.05 度。另一方面，角反射器安裝後傾角變化的區間為 0.1 度，變化微乎其微。由上述角反射器姿態變化的觀察，可初步驗證本計畫所擬定的角反射器固定方案具有一定的可靠性。

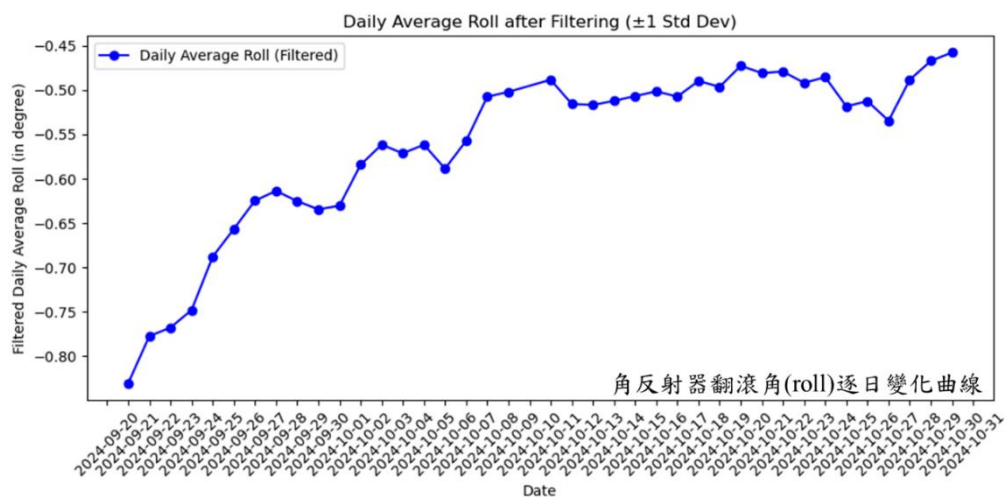


圖 3-41 角反射器翻滾角(roll)逐日變化曲線

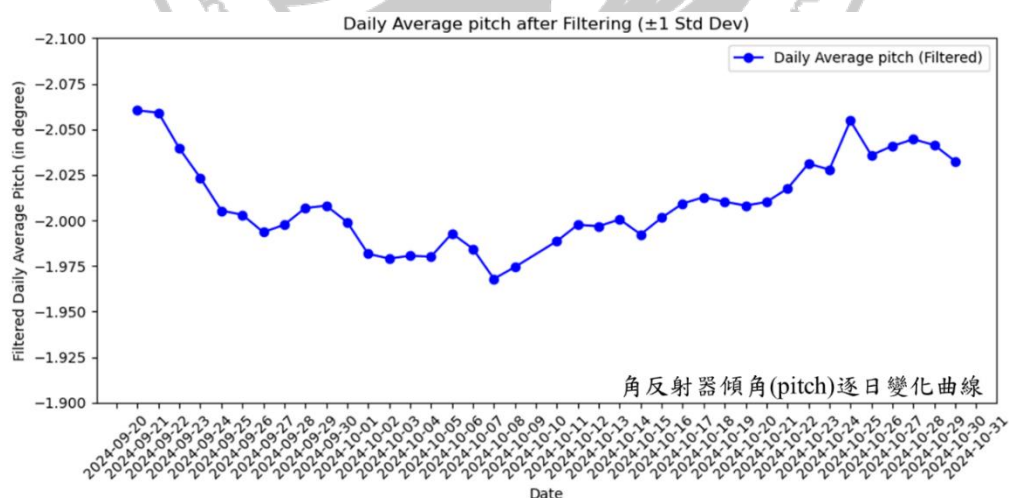


圖 3-42 角反射器傾角(pitch)逐日變化曲線

接著分析 GNSS 所觀測之角反射器坐標數據。將每日所觀測之坐標數據，以不同顏色繪於圖 3-43 中。觀察其分布，可瞭解基本上觀測坐標會趨近於一固定值，但每日之中會有部分時間段出現公尺級的誤差。圖 3-44 中繪出以 10/22 作為範例的單日資料，此趨勢更能明顯呈現。

此偏差量明顯高於 GNSS 在平地進行觀測時的公分級精度，推測應與山區地形起伏對於衛星訊號遮蔽與干擾有關。若欲使用上述觀測資訊計算邊坡之坐標，則必須將明顯的偏差值加以剔除，留下的數據才有代表性。剔除的方法說明如下，以每日資料為單位，計算資料中的平均值與標準差，剔除偏差量大於正負一個標準差的數據點。以此方法濾除兩次後，使用留下來的坐標資訊計算每日平均坐標值。觀測期間平均 X 與 Y 坐標逐日曲線分別繪於圖 3-45 與圖 3-46 中，所對應的標準差分別為 3.3 公分與 2.5 公分，變化區間為分別為 12 公分與 11 公分。

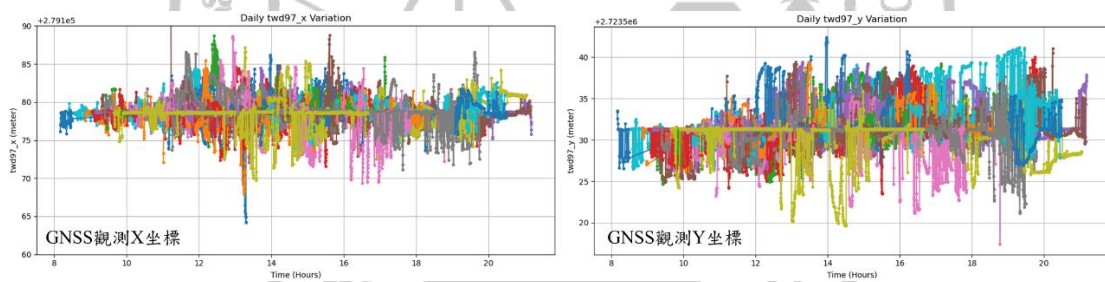


圖 3-43 觀測期間 GNSS 坐標逐時變化曲線

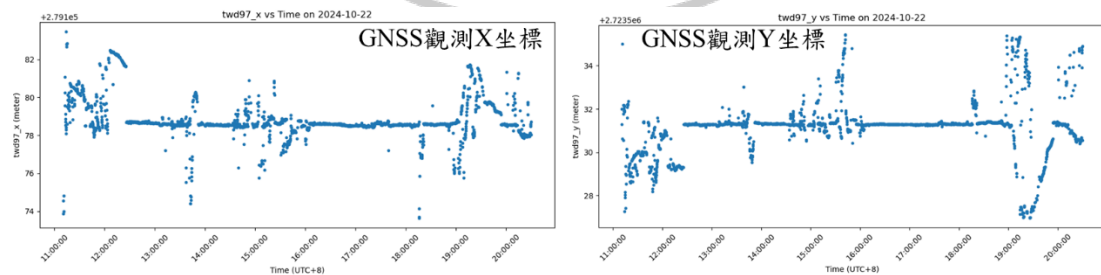


圖 3-44 單日 GNSS 坐標逐時變化曲線(以 10/22 為例)

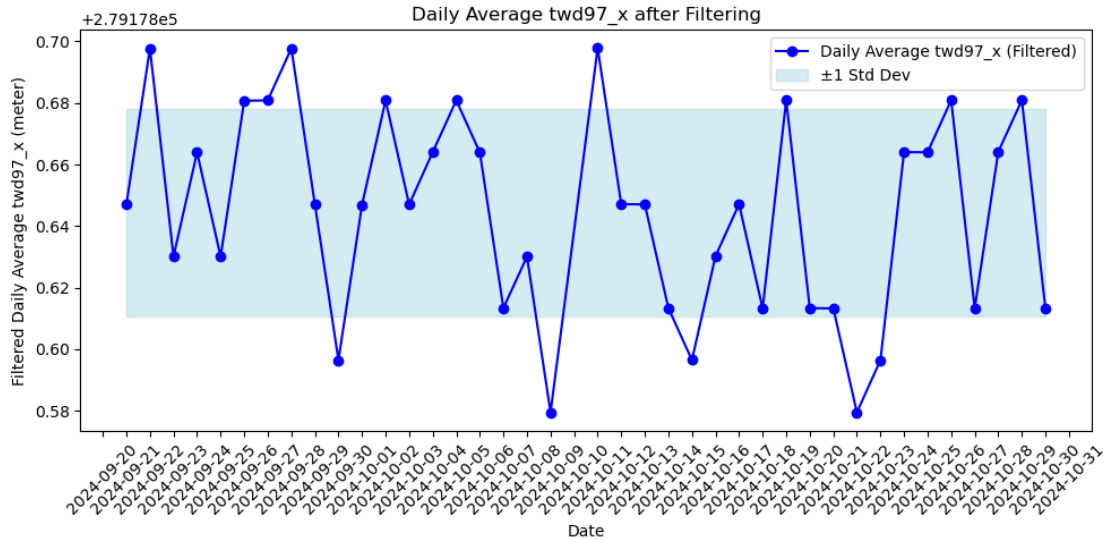


圖 3-45 GNSS 觀測平均 Y 坐標逐日曲線

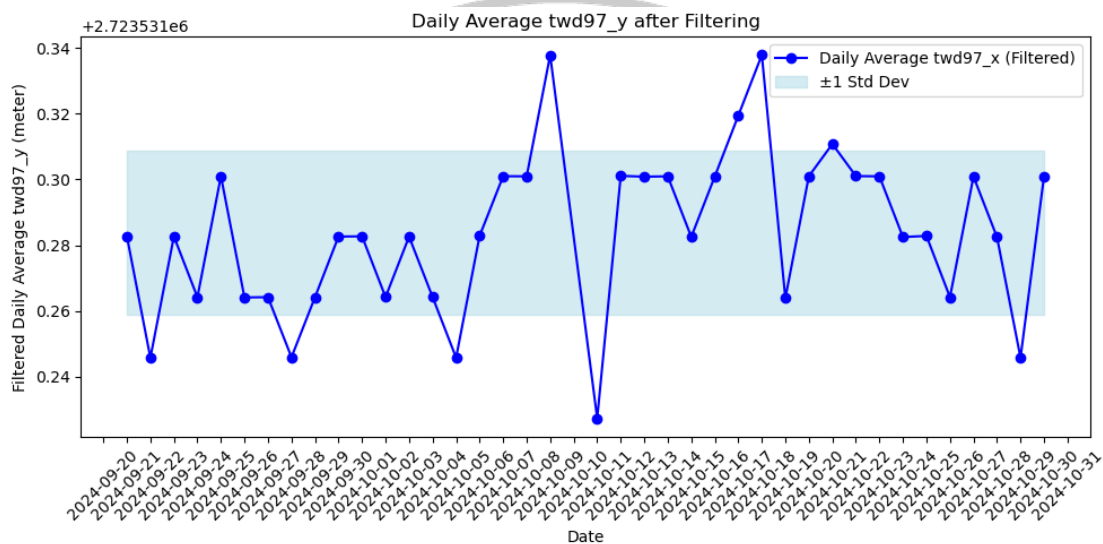


圖 3-46 GNSS 觀測平均 Y 坐標逐日曲線

GB-SAR 觀測角反射器位移量的過程與成果說明於前面章節，該處邊坡裝設角反射器前因植生過於茂盛，故無法被 GB-SAR 所觀測，而安裝角反射器後，反射強度明顯增加。

然而使用星載 SAR(Sentinel-1)對該處進行觀測，則安裝角反射器前後的反射訊號並無明顯增加，推測原因可能為所選用角反射器面板的孔洞過密，導致效果不佳，後續將改用其他樣式之角反射器面板。

2. 角反射器崩移過程

康芮颱風襲台前，工作團隊進駐 DS194 邊坡場址，使用全站式電子速距儀(全站儀)量測角反射器之位移狀況(113 年 10/28 至 11/5)，全站儀與角反射器照片如圖 3-47 所示。

觀測期間之時雨量與 24 小時累積雨量記錄如圖 3-48 (a)所示，全站儀測得角反射器之直線位移、水平位移與垂直位移曲線繪於圖 3-48 (b)中。因距離 DS194 最近的秀巒國小雨量站於颱風登陸前已故障，故雨量記錄改採用次接近的田埔分校雨量站記錄。康芮颱風登陸後，10/30 深夜 DS194 邊坡開始降下大雨。角反射器於 10/31 上午 8 時左右開始出現明顯位移，至上午 10 時累積位移量約 5 公分。隨後配合當地大規模崩塌潛勢區提升為紅色警戒，工作人員隨即撤離。警報解除後於 11/1 下午回到現場繼續觀測，測得角反射器累積位移量約為 7 公分，此後位移趨於停止。若將角反射器產生明顯位移時段的資訊，與所對應的雨量記錄共同繪於圖 3-49 中，則可瞭解此滑動發生時所對應的 24 小時累積雨量為 100 mm 至 200 mm 之間。

康芮颱風前後角反射器現地照片比對於圖 3-50 中，可發現颱風過後角反射器下邊坡處的土石有明顯侵蝕掏空的狀況，推測角反射器產生滑移的原因，應與下方邊坡承载力不足導致基座滑移有關。而觀察康芮颱風後的照片圖 3-50(b)，太陽能板已向下滑落，推測電源線已經脫離而無法供電，故 10/31 起角反射器模組已不再回傳觀測訊號。



圖 3-47 以全站儀量測角反射器位移(113/10/28)

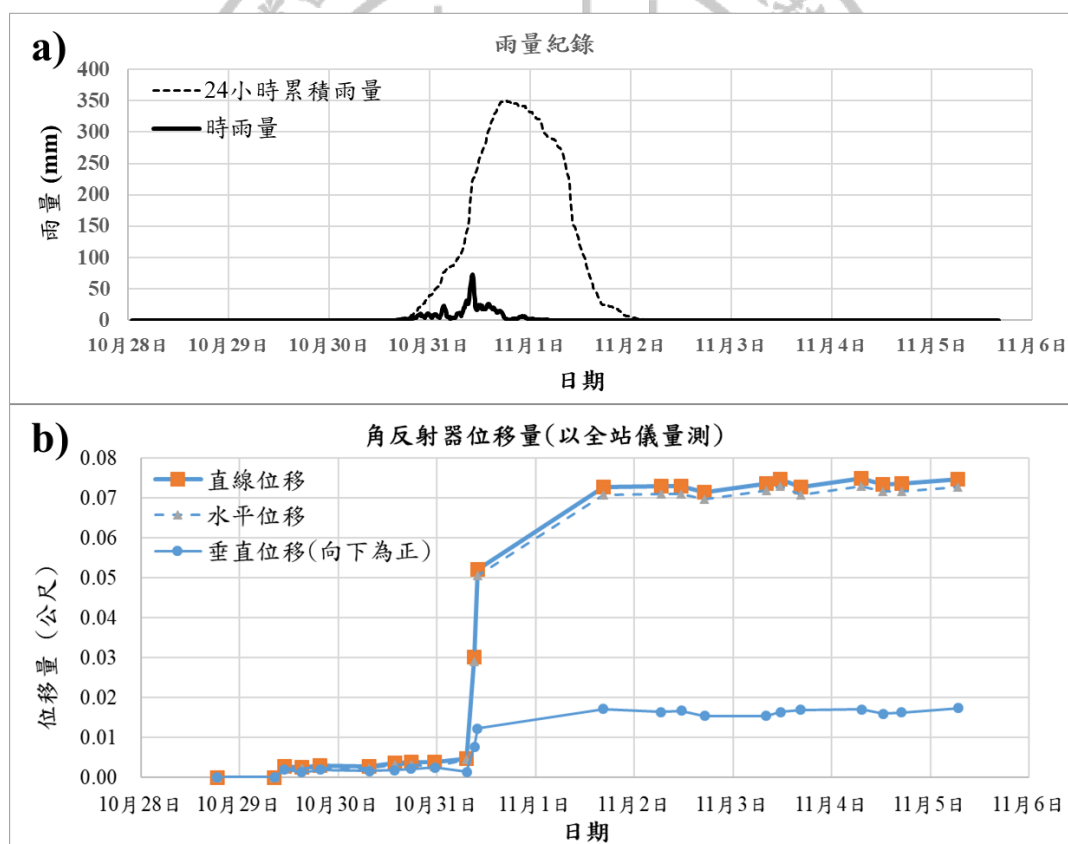


圖 3-48 全站儀觀測期間雨量記錄與角反射器位移曲線

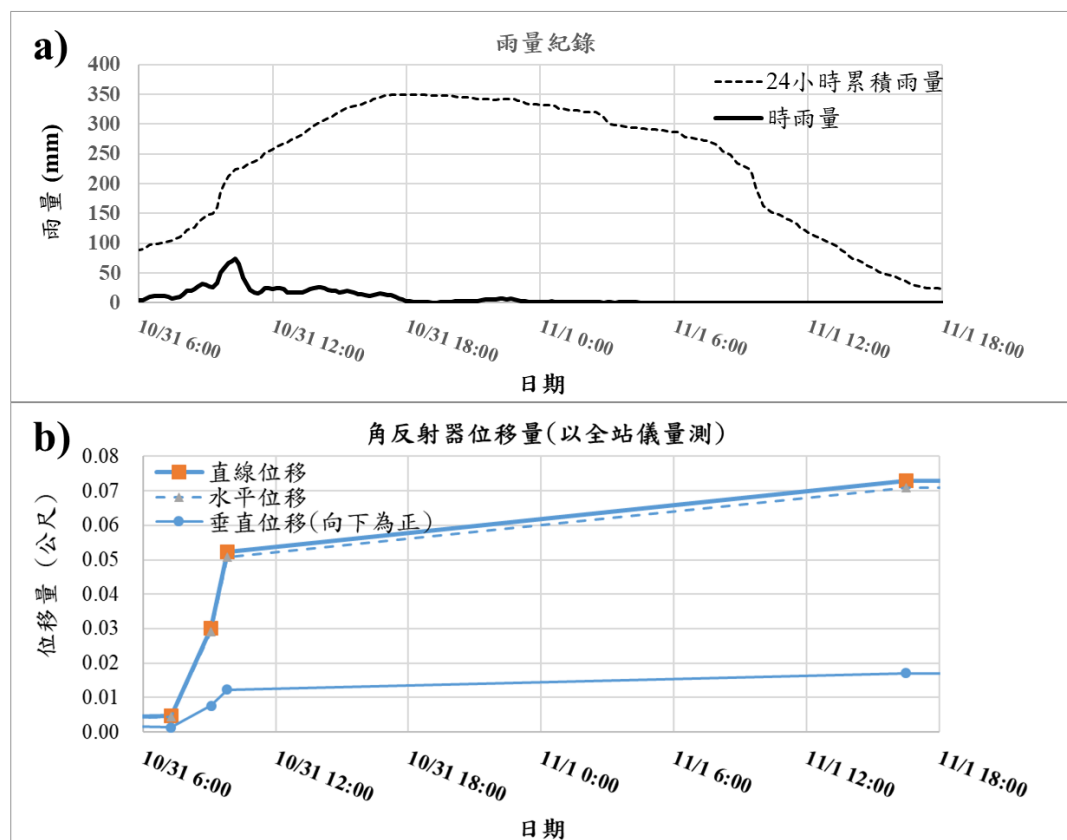


圖 3-49 角反射器位移過程與對應之雨量



圖 3-50 康芮颱風前後角反射器下方土石侵蝕掏空

3. 角反射器模組觀測作業小結

為彌補 SAR 無法穿透植生區所導致的觀測盲區，本年度使用角反射器模組架設於 DS194 邊坡植生茂盛處，進行植生區之位移觀測。本角反射器安裝地點為自然邊坡，目的為量測淺層邊面的滑動，故規劃一套以手持式工具即可完成安裝的固定方法，不使用鑽掘機具與水泥灌漿，以便於快速安裝，不使用與深層岩體連結的岩錨，以確保測得的結果為淺層坡面之位移。角反射器觀測模組的軟硬體配置包含角反射器、反射稜鏡、GNSS 模組、加速規、處理器、基座、太陽能供電系統等，即時將 GNSS、加速度、時間、溫度、電壓強度等訊號藉由 4G 網路模組對外發送至遠端控制中心。所能進行的邊坡監測項目包含 GB-SAR、星載 SRA、加速規、GNSS 與全站式電子速距儀等，所對應的特點列於表 3-10 中。以下統整各監測項目的測試結果。

表 3-10 本計畫邊坡監測方式之比較

名稱	觀測項目	最短觀測週期	誤差量	主要限制	優點
GB-SAR	LOS 位移量	數分鐘以內	mm	需額外搭配 GB-SAR 主機施測、用於非植生區	精度高、機動性高
衛星 SAR	LOS 位移量	約數日(衛星通過)	mm	衛星通過週期過長、空間解析度低、用於非植生區	精度高、不須配合其他設備
加速規	姿態	0.005 秒以內	0.01 度以下	受風振動影響	觀測頻率高、精度高、成本低廉、可用於植生區
GNSS	坐標	1 秒以內	cm	在山區地形遮蔽、誤差較平地明顯	觀測頻率高、成本低廉、可用於植生區
全站式電子速距儀	坐標	約 5 秒	mm	需額外搭配全測站施測、稜鏡需無遮蔽	觀測頻率高、精度高、可用於植生區

(1) GB-SAR：

裝設角反射器之邊坡因植生過於茂盛，故無法被 GB-SAR 所觀測，而安裝角反射器後，反射強度明顯增加。

(2) 星載 SRA：

使用星載 SAR(Sentinel-1)對角反射器進行觀測，安裝前後的反射訊號並無明顯增加，推測原因可能為所選用角反射器面板的孔洞過密，導致效果不佳，後續將改用其他樣式之角反射器面板。

(3) 加速規：

使用加速規所觀測之三軸加速度值，計算角反射器模組於該瞬間所對應的翻滾角與傾角。因測得之加速度會受晶片溫度的影響而產生誤差，故本觀測模組使用即時監測之儀器溫度作為校正之因子於以修正。觀察常時之數據可發現加速度較為離散的日期，於氣象站所觀測的風速皆較大，因此較強的風力可能干擾角反射器姿態的量測。目前克服的方法為將離散較大的訊號予以剔除，再以留下的訊號計算姿態角。觀察平時逐日姿態角曲線，角反射器安裝後約 17 天的初期，翻滾角微幅量增加 0.3 度，隨後即趨於穩定，推測為邊坡荷重導致的夯實行為所致。穩定之後，翻滾角與傾角逐日變動的範圍分別介於 0.05 度與 0.1 度間。初步驗證本計畫所擬定的角反射器固定方案具有一定的可靠性。為避免風力對於姿態量測的影響，後續可考慮將加速規晶片單獨安裝於邊坡坡面上，以增加穩定性。

(4) GNSS：

山區邊坡上 GNSS 於常時的觀測結果，其偏差量明顯高於 GNSS 在平地進行觀測時的公分級精度，推測應與山區地形起伏對於衛星訊號遮蔽與干擾有關。目前修正的方法為將偏移量過大的訊號加以剔除，再以留下的訊號計算當日的坐標。目前所獲得逐日 GNSS 坐標(X, Y) 的標準差分別為 3.3 公分與 2.5 公分，變化區間為分別為 12 公分與 11 公分。此位移量 2~3 公分的標準差或許某種程度已具邊坡災害監測的意義，但一天獲得一筆坐標資訊，即時性仍不足，後續將加裝 Choke Ring GNSS Antenna 以濾除不適當的反射訊號，或以其他演算法濾除仰角過低的衛星訊號，以提高正確性。

(5) 全站式電子速距儀

使用全站式電子速距儀監測角反射器模組上稜鏡的坐標。觀測期間恰巧遇上康芮颱風襲台，DS194 邊坡發布大規模崩塌區的紅色警戒。當雨量站的 24 小時累積雨量介於 100mm 至 200mm 之間時，測得角反射器產生約 5 公分的位移量，警報解除後，測得的總位移量約 7 公分。事後查看角反射器移動狀況，發現角反射器下邊坡處的土石有明顯侵蝕掏空的狀況，推測角反射器產生滑移的原因，應與下方邊坡承载力不足導致基座滑移有關。

(五) 年度監測總結

本年度台灣歷經一個大地震事件(0403)、三個颱風事件(凱米、山陀兒、康芮)。其中，地震事件與康芮颱風對新竹縣尖石鄉區域有比較明顯的影響。

本研究團隊除了使用 2 代 GBSAR 對 DS194 邊坡的活動邊坡部分進行三次現場監測之外，另開發、安裝新型角反射器模組於邊坡，以供衛星 SAR、地基 SAR、以及籌載 GNSS、加速規、反射稜鏡、太陽能電池、以及網路通訊模組，除強化雷達反射訊號外，另透過網路將模組監測資訊傳輸回主機。於康芮颱風襲台前後，研究團隊攜帶全站式電子速距儀(全站儀)量測角反射器之位移狀況。

研究團隊下載農村水保署所屬的「大規模崩塌監測整合系統」資訊，使用單頻 GPS：JS077-G6、及時雨量站(田埔國小；秀巒國小雨量站於康芮颱風期間故障)時雨量資訊，結合本年度監測時程，如下列圖 3-51 所示。

由圖 3-51 單頻 GPS：JS077-G6 之 E、N、H 資訊可瞭解到，邊坡在 0403 地震後，不斷的向西、向北、向下位移的趨勢。整體而言，邊坡持續朝向河谷的方向不斷位移。這個位移趨勢與研究團隊使用 GBSAR 儀器對邊坡進行監測的結果一致。

DS194 邊坡表面於近幾年不斷的有土石鬆落輸送至溪谷，且邊坡兩側蝕溝不斷加大、加深。康芮颱風後(11 月 1 日、2 日)，研究人員於現場觀察 DS194 邊坡，觀察到有泥石流沿著蝕溝沖落，於坡趾位置形成沖積扇(圖 3-52)；於現場不時有岩石沿著蝕溝滾落至河谷。結合儀器監測結果顯示，DS194 活動邊坡除了緩慢位移外，邊坡表面受外營力作用侵蝕的現象非常明顯。未來研究團隊將不斷對 DS194 邊坡進行監測，確保當地居民生命財產安全。

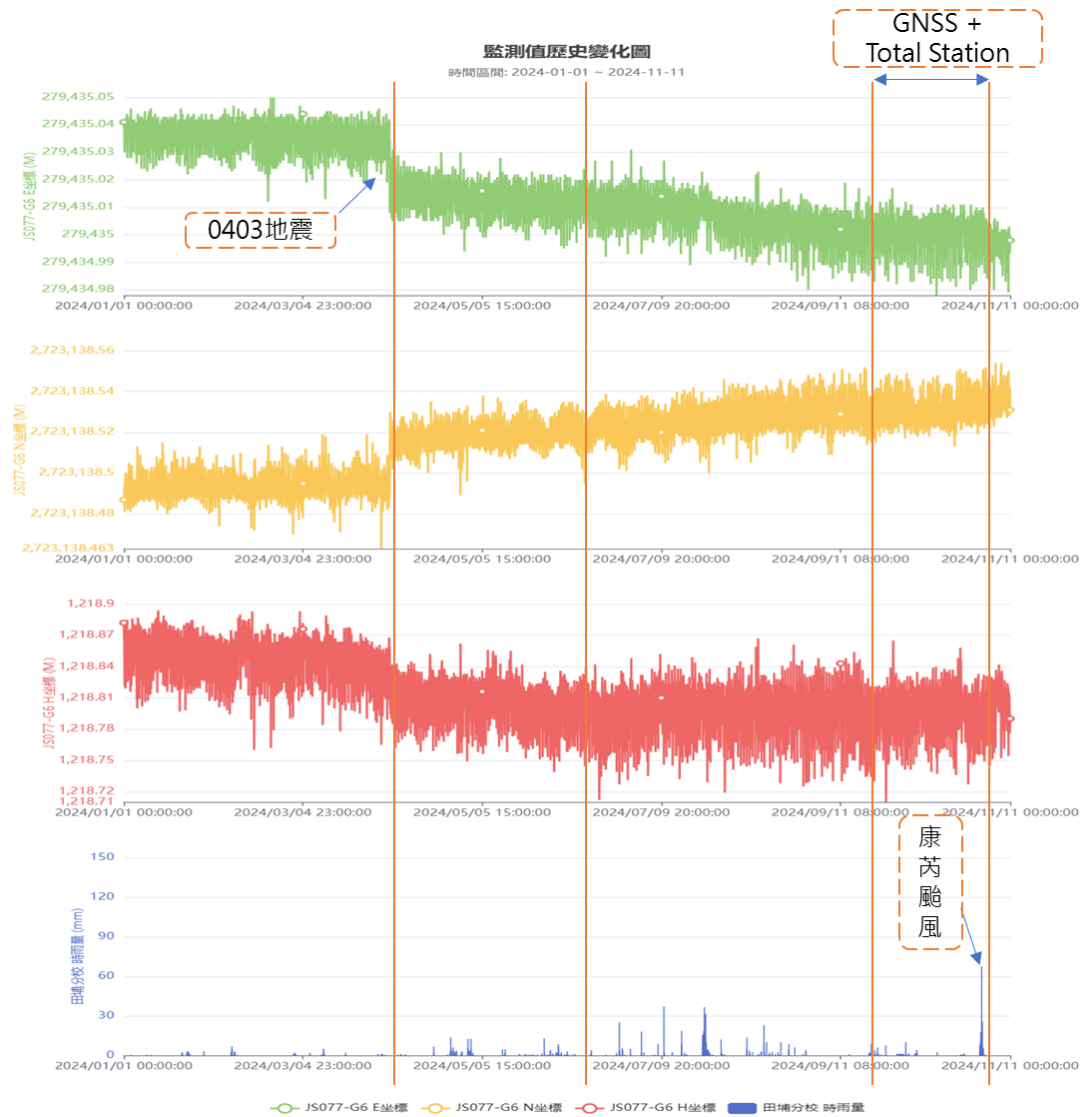


圖 3-51 年度單頻 GPS 及時雨量紀錄與團隊監測時程一覽



圖 3-52 康芮颱風後 DS194 活動邊坡現況

第四章 結論

(一)ArcSAR 精進理解部分：

1. 製作 2 個不同垂直增益範圍的天線，測試並瞭解其特性與適用範圍；結果發現增益範圍越廣的天線，其所發射/接收訊號的強度與密度將相對減弱。因此可在不同的監測距離與範圍的限制下，彈性挑選合適的天線模組進行監測。
2. 瞭解調整 ArcSAR 的 Dx、Dy 參數，無助於改善 ArcSAR 的雷達影像解析度的缺點。調整 Dx、Dy 參數，會影響到內部儲存空間大小外，亦會影響環境背景同調值，因此應慎選此參數數值。
3. 經過 3 次(112 年度 10 月、113 年度 4 月、以及 113 年度 9 月)的實地監測，並手動測試所有可調整參數，研究團隊確認 ArcSAR 於 DS194 邊坡的可監測範圍僅限於邊坡坡趾、以及下部坡腹的區域。

(二)角反射器觀測模組部分：

1. 本年度規劃設計新型角反射器，主要目標可以同時服務 GBSAR、以及衛星 SAR 的監測工作。透過討論雷達訊號的訊噪比、以及雷達散射截面積，團隊初步構思以 8 個方形三面角反射器組合而成”八角”為基礎，並透過校內測試、戶外測試、再依照測試狀況修改成最合理、符合需求之角反射器模組。
2. 於邊坡植生區建構角反射器模組，除供 GB-SAR 與星載 SRA 監測位移量外，並設置加速規觀測姿態、GNSS 與全站式電

子速距儀觀測坐標，本年度安裝於 DS194 邊坡進行約 45 天的聯合觀測。

3. 角反射器模組安裝於 DS194 植生區後，該處於 GB-SAR 監測中的反射強度明顯增加，故即可改善原有的監測盲區。
4. 角反射器模組於 40 天的常時測試中，安裝後的夯實行為結束後，由加速規所獲得每日姿態角變動範圍不超過 0.1 度，以此驗證本計畫所規劃，以手持式工具即可完成安裝的固定方法，其特點為不使用鑽掘機具與水泥灌漿，以便於快速安裝，不使用與深層岩體連結的岩錨，以確保測得的結果為淺層坡面之位移。此由加速規所獲得姿態角，可監測邊坡塊體旋轉的狀況。

(三) DS194 邊坡監測部分：

1. 本年度 4 月 3 日花蓮大地震過後，研究團隊除以農村水保署的「大規模崩塌監測整合系統」持續關注 DS194 邊坡外，亦於 4 月 9 日進駐監測 DS194 邊坡。礙於供電設備損壞，團隊僅能夠使用緊急備用電池監測 3 天。使用 ArcSAR 監測過程中，DS194 邊坡呈現穩定狀態。
2. 因應本年度 5 月新竹縣尖石鄉開始有持續降雨狀況，團隊安排 6 月 4 日進駐 7 日，取得 160 組影像、約 136 小時的連續監測結果；本次監測工作觀察到邊坡呈現穩定狀態，維裸露區域所觀察到的位移狀況仍延續 2023 年 10 月所觀察結果，邊坡整體狀況仍持續朝溪谷方向緩慢前進。
3. 本年度 9 月，團隊安排監測工作期間，發生 GBSAR 接連故障意外。邊坡監測工作時數約 63 小時，蒐集影像將近 100 幅。

整體使用 GBSAR 監測 DS194 邊坡的趨勢如同本年度 6 月結果一致。

4. 角反射器模組上的 GNSS 於邊坡進行坐標觀測，因地形起伏產生的複反射，導致精度降低，經過初步處理後，逐日測得角反射器坐標的標準差約為 2~3 公分。
5. 康芮颱風 24 小時累積雨量介於 100mm 至 200mm 之間時，使用全站儀測得角反射器模組位移量約 5 公分，整場颱風造成的累積位移量約 7 公分，位移的成因為角反射器下方邊坡侵蝕掏空，承载力不足導致基座滑移。
6. 本年度整體監測結果顯示，邊坡仍持續朝溪谷方向緩慢前進，未來將持續對 DS194 邊坡進行監測。

(四)建議

1. GNSS 於邊坡進行坐標觀測，因地形起伏產生的複反射，導致精度降低，建議加裝 Choke Ring GNSS Antenna 以濾除不適當的反射訊號，或以其他演算法濾除仰角過低的衛星訊號，以提高正確性。
2. 目前角反射器上的面板無法增加星載 SAR(Sentinel-1)的反射訊號，建議後續改用其他樣式的面板。
3. 目前太陽能板供電效能無法提供處理器 24 小時運作，建議後續增加太陽能板。
4. 為避免風力產生的振動影響姿態的量測，後續可考慮將加速規晶片單獨安裝於邊坡坡面上，以增加穩定性。



參考文獻

1. 藍振維等人(2021)新世代合成孔徑雷達影像評估技術－ATS-InSAR 研發與應用。中興工程，153 期。
2. 土石流防災資訊網：<https://246.swcb.gov.tw/>。
3. 交通部中央氣象署 CODIS 氣候觀測資料查詢服務：<https://codis.cwa.gov.tw/StationData>。
4. 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。
5. 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.
6. 李俊慧 (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.
7. 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。
8. 陳郁琪(2019)，PS-InSAR 技術於台灣山區地形變化偵測誤差因素分析，國立成功大學資源工程學系碩士論文，共 127 頁。
9. 陳強、劉國祥、李永樹、丁曉利 (2006). "干涉雷達永久散射體自動探測-算法與實驗結果." 測繪學報, 35(2), 112.
10. 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.
11. Allaway, A., Merrett, P., Eyre, J., and Stead, D. "The application of GPS in monitoring landslide movements." Proc., Proc. of 8th Int. IAEG Congress, Balkema, Rotterdam, 1633-1640.

12. Antonello, G., Casagli, N., Farina, P., Fortuny, J., Leva, D., Nico, G., Sieber, A., and Tarchi, D. "A ground-based interferometer for the safety monitoring of landslides and structural deformations." Proc., IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No. 03CH37477), IEEE, 218-220.
13. 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.
14. Curlander, J. C., and McDonough, R. N. (1991). Synthetic aperture radar, Wiley, New York.
15. 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 System Sciences*, 17(6), 845-860.
16. 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.
17. 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.
18. 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.

19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. Mensa, D. L. (1981). *High resolution radar imaging*, Artech House
24. 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.
25. Rao, S. (2017). "Introduction to mmWave sensing: FMCW radars." *Texas Instruments (TI) mmWave Training Series*.
26. 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.
27. 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、研提計畫書審查意見回覆表

項次	審查意見	回覆辦理情形
1	本計畫為二年期之第二年計畫。第一年以GBSAR對寶來、龍崎等對象進行22次掃瞄監測作業，而獲得可供判釋之成果。惟該等位移現象是否確實為地滑機制之作用，宜詳加檢核，以確認之為佳。同樣在斷層帶之監測亦是。	GBSAR的特性為監測邊坡表面"相對於觀察者方向"的1維方向位移量。其運動方向反映何種運動機制，需要後續研究者進一步分析資料才能得知。
2	本年度計畫擬引入ArcSAR作為量測工具，有其嘗試之必要。惟其監測之同時，仍應尋求實地位移之證據，以佐證之。	感謝委員意見，GBSAR(含ArcSAR)的功用為快速取得、快速解算目標區域之1維方向微變動位移量，其偵測結果與實地位移狀況有所出入。研究團隊將尋找機會比較GBSAR與現地位移量測結果。
3	對於SAR應用到監測，過去主持人已經進行多年，技術成熟，且成果豐碩。但是大規模崩塌地，通常是需要長期監測，邊坡變形量監測的精度其實不需要太高。這是因為大規模崩塌長期的風化與重力變形作用之下才比較會發生。我們通常對於大規模崩塌需要瞭解的是它的活動性，而不是僅止於絕對的位移量而已，所以短期(may be 一年)位移的精度不需要太高。需要的是對活動性的長	不管是短期或長期，GBSAR均可依需求調整監測頻率與監測時長。作為災害監測體系的一環，並考量到儀器使用與人力維護成本，建議中長期監測仍以其他監測儀器為主導，GBSAR在必要時機，依其快速監測、快速解算獲得位移成果的優勢，扮演臨時機動支援的角色。

項次	審查意見	回覆辦理情形
	期觀測，而不是短期內絕對的位移量。這一點建議主持人多加以考量。	
4	大規模崩塌潛勢區不一定均能進行正面監測，若需側面監測坡面是否仍可行？其限制條件為何？	若側邊坡面有潛在活動性，會影響到保全對象的安全，則監測側面邊坡即有其必要性。監測環境條件限制，除需要考量到 Linear SAR 或 ArcSAR 本身最短距離限制之外，監測環境的乾淨度、是否頻繁有機具、車輛經過、材料堆放，都必須審慎評估後才能確定其監測結果的可靠度。
5	角反射器之數量及大略安裝位置，請補充說明。	角反射器數量與位置調整等相關研究，為本年度計畫預研究探詢問題之一。角反射器的設置目的，為增加/補全監測困難區域的訊號數量，除此之外，可依照需求進行其他區域之角反射器佈放。
6	角反射器之安裝地點決定是否有方法及流程？	目前並無相關方法與流程。
7	雷達掃描，20及40分鐘一次，資料多久可傳回至系統，請補充說明。	雷達掃描資料，依照現場是否有必要調整時間解析度(如降雨與否、現場有明顯感到地震晃動)而進行時間間隔的調整。通常掃描完後，系統會立即分析時序雷達資料，可在掃描完後1~2分鐘內完成目標區微變動分析工作。

附錄二、期中審查意見回覆表

項次	審查意見	回覆辦理情形
1	本研究的目標之一為大範圍崩塌警戒值之建立，截至期中報告為止已利用地面雷達觀測技術對DS194邊坡進行數次監測，惟未來將如何利用相關觀測資料訂定崩塌警戒值。	目前觀測到降雨對表面滑動的對應雨量值，累積雨量對於滑動面積與滑動速度觀測值。當降雨強度或是降雨累積值引起局部滑動速度加速時，該值便是合適的警戒值。若是量到較大範圍的滑動速度加速時，此數值變為區域致災臨界。
2	本研究嘗試新增天線模組，期望藉由增益角度以獲取較多的PS點，結果顯示垂直增益30°的天線所獲取的PS點數量較60°的天線為多。但相較於原18°的天線，30°天線是否具有優勢？是否可解決DS194邊坡監測無法觀察坡腹上部範圍之問題？另是否可從雷達影像學理的角度說明造成上述現象之原因為何？以及內文提及若監測目標較遠及較近可選擇垂直增益不同模組，該近之定義或數值能否量化？	1. 在系統發射訊號強度為定值的前提下，天線所涵蓋的角度越大，傳送到整個邊坡的平均訊號強度越小。因此應就ArcSAR與目標的距離、以及垂直方向所覆蓋的範圍兩個因子進行考慮是否更換合適的天線。 2. 目前實際上的監測結果顯示，ArcSAR在更換天線後，仍無法監測到坡腹上部範圍，究其原因，可能跟坡度、以及儀器以旋轉方式掃描等問題有關，詳細將於期末報告中提出討論。 垂直增益模組的選擇，與目標之間的距離，目前無相關量化數值，有待後續持續研究，並歸納經驗。
3	在解析度之測試中，調整較佳解析度(0.1)並無法獲得較好的結果，則原「改善雷達影像解析度不佳的」的問題是否有其他解決方法。	研究團隊後續有嘗試降低掃描時，旋轉機構的轉速，但目前並無觀察到解析度有改善的跡象。
4	P3-10圖3-10左下累積位移	感謝委員建議，將於期末報

項次	審查意見	回覆辦理情形
	量模糊不清，請提高解析度或以較大圖表示，以利閱讀。	告中提出修正。
5	P3-12內文提及”由圖3-12的色調強化位移量可以看到位移相對小值的主要分布區域在邊坡右側坡腹位置，而左側位移趨勢則較為緩和”，那位移相對大的區域又是在哪？文句請再斟酌修改	感謝委員意見，將修於期末報告內文修改完成。
6	2024年6月LinearSAR的觀測結果是否能與2024年4月ArcSAR的觀測結果進行比較？	兩者觀測結果無法進行比較，原因為： 1. 時間解析度過大，邊坡整體位移量可能超過SAR可監測波長； 2. 兩台SAR安裝時沒有進行精密定位，容易因位置偏移、旋轉而產生明顯監測誤差。
7	角反射器校內測試結果，四面三方角反射器相較於各種八角模型具有較強烈的反射訊號，則八角模型的優勢為何？	八角模型設計的初衷是為了可在同一地點同時服務衛星SAR、以及GBSAR，在訊號入射的角度有更大的包容性。另外，四面三方的材質、邊長，均與八角模型差異甚大，因此在校內測試過程中，較能獲得強反射訊號回饋。
8	圖3-22並無法看出方形三面角反射器具有較強的訊號？	因原圖時間跨度約為3年，因此看不出來訊號強化結果，後續將輸出時間跨度適合的圖片取代原圖。
9	角反射器的幾何截面積大小為影響反射回波強度的因素之一，適合於地面雷達的角反射器是否亦適用於衛載雷達影像？是否有相關文獻進	可以，只要調整到相對應的方位、以及仰角，角反射器可以用於任何雷達訊號儀器。目前主要搜尋到的文獻，包含設計角反射器的幾何形

項次	審查意見	回覆辦理情形
	行類似研究？	狀，以達到多功能性需求；或者討論角反射器的材質與鑽孔，對於訊號衰減的程度等相關研究。
10	報告中許多圖因大小及排版關係，導致圖模糊不清(如雷達觀測之震幅圖及同調性等)，無法看出其差異。另許多圖中缺有資料表格以顯示觀測資料，建議增加觀測值的單位(如圖3-12)。	感謝委員建議。 解析度不足的图片我們會使用解析度較高的圖片取代之；震幅或同調性圖，將盡量使用圖片後製的方式標示出重點，以提升可閱讀性；圖3-12、以及相類似的位移圖，於本研究中默認使用單位為公釐(mm)。將新增單位於圖說中。
11	秀巒大崩塌腹地崩止區多為鬆散易滑動之碎石，角反射器欲安裝於坡腹之可行性及人員安全性亟請團隊於事前慎重規劃及評估。	感謝委員建議。

附錄三、期末審查意見回覆表

項次	審查意見	回覆辦理情形
1	反射距離及掃瞄距離似乎太短，對水保業務的創新及應用有限。	本計畫所使用的GBSAR主機掃描最遠距離為公里以上，監測位置以實際監測需求、以及現場條件而機動調整。 GBSAR具有快速掃描、解算、即時反饋目標變異的優勢，依其特性並無法獨立而完整的提供整體監測結果。本研究目的在於透過GBSAR的貢獻，期望成為監測體系的一環，提升水保業務於活動邊坡之有限監測量能(於秀巒僅有監視器)。
2	以秀巒的案例來說，安裝在坡面上的角反射器可能因其坡面上碎石的移動而有誤報的問題，並非反應真正的位移訊號，建議能將觀測場地移至如中心崙等地點觀測。	本計畫在秀巒的角反射器裝設位置，其地表為堅硬表層，並非碎石區或鬆散的風化表土，故不會有因坡面上碎石移動而誤報的問題。 研究團隊以實地至中心崙進行場勘，有注意到現場已設有許多監測儀器，包含GNSS，因此暫時應不缺多功能角反射器進駐提供現地位移狀況等監測。