
**應用 Sentinel-1 雷達影像地表變位資訊於
坡面土砂生產及運移量變遷分析
Application of Sentinel-1 Radar Image's
Surface Displacement Information to the
Analysis of the Production and
Transportation of Slope Debris
成 果 報 告 書**

執行單位：國立暨南國際大學

執行期間：110 年 1 月 27 日至 110 年 12 月 31 日

計畫主持人：王國隆 副教授

研究人員：林俊廷、李苡宣

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 110 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

應用 Sentinel-1 雷達影像地表變位資訊於坡面土砂生產及運移量變遷分析

摘要

本計畫與其餘子計畫共同組成整合型計畫團隊，運用遙測技術與資料共享，共同完成「多尺度監測技術在坡面變形及河道土砂運移之整合應用」的課題，本研究中則嘗試以合成孔徑雷達等遙測技術，建立坡地變位資料的分析模式、坡面土砂生產量的評估、多時序的土砂運移量及變遷分析。

本研究與組成整合型計畫團隊共同蒐集多期 SAR 影像組建資料庫、光達及航空攝影 DEM 資料，並自行以無人機航空攝影建模搜集近期的研究資料後與整合型計畫團隊共享使用，

本計畫中以 SAR 強度判釋法分析崩塌範圍，並比較與衛星崩塌判釋差異，在 ALOS、Sentinel-1 兩種衛星影像中皆得到良好的判釋結果，在坡面變位資訊分析，使用 7 期 DSM、DEM 與 26 期衛星影像整理研究區近期變化，並結合 SBASInSAR 進行滑動速率分析，用已評估潛在崩塌區的範圍，最後運用力學模型推測潛在滑動深度與滑動量體，計算出上游崩塌地的潛在滑動量體約有 1100 萬立方公尺，並與 DSM 分析結果進行驗證，將來可替土砂生產量提供另一種評估方法。

關鍵詞：合成孔徑雷達、差分干涉分析、崩塌量體、崩塌範圍

目次

摘要	I
目次	III
表次	V
圖次	VI
第一章 緒論.....	1-1
第一節 計畫動機	1-1
第二節 計畫目的	1-1
第三節 計畫研究區域	1-2
第四節 計畫重點項目	1-3
第二章 工作執行方法與步驟	2-1
第一節 工作執行方法	2-1
第二節 工作執行步驟	2-2
第三章 工作進度與研究成果	3-1
第一節 無人載具空拍資料建置成果	3-1
第二節 影像資料庫蒐集及建置成果	3-5
第三節 SAR 影像地表變形資訊分析	3-12
第四節 坡面土砂生產及變遷分析.....	3-18
第五節 滑動深度及量體分析.....	3-37
第六節 研究成果.....	3-41
第四章 計畫進度甘特圖	4-1
第五章 結論與建議	5-1
參考文獻	參-1

附錄		附錄-1
----	-------	------

附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄-1
---------------------------	------

附錄二、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄-4
---------------------------	------

附錄三、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄-8
---------------------------	------

表次

表 3-1	UAV 控制點誤差表(2021/04/14)	3-1
表 3-2	UAV 控制點誤差表(2021/09/04)	3-3
表 3-3	本計畫蒐集多時序 SAR 影像	3-7
表 3-4	數值地型資料一覽表	3-7
表 3-5	各期事件前後衛星影像變化一覽表	3-8
表 3-6	滑動面模擬結果一覽表	3-38
表 4-1	計畫甘特圖	4-1
表 4-2	重要期程一覽	4-2

圖次

圖 1-1	計畫研究區崩坪坑集水區地理位置圖	1-2
圖 2-1	計畫工作流程圖	2-1
圖 2-2	航空攝影測量預計拍攝範圍圖	2-3
圖 2-3	DInSAR 技術處理流程	2-5
圖 2-4	受地形效應影響情形(圖片摘自何世紀，2006)	2-7
圖 2-5	適用性評估流程	2-7
圖 2-6	差分干涉合成孔徑雷達分析之地表垂直變化(短基線法)	2-9
圖 2-7	潛在滑動區塊圈繪範例	2-11
圖 2-8	Sentinel-1 SBASInSAR 分析之各時序累積邊坡變形量範例	2-11
圖 2-9	Okada 彈性錯位模型	2-13
圖 2-10	崩塌量體幾何示意圖(改繪自:E. Nikolaeva(2014))	2-13
圖 2-11	整體計畫相觀性及分工架構圖(子計畫二)	2-15
圖 3-1	2021/4/14 崩坪坑流域無人機第一次影像三維建模成果	3-1
圖 3-2	2021/04/14 崩坪坑流域無人機資料數值地表模型成果	3-2
圖 3-3	2021/04/14 崩坪坑流域無人機影像正射成果	3-2
圖 3-4	2021/09/04 崩坪坑流域無人機第二次影像三維建模成果	3-4
圖 3-5	2021/09/04 崩坪坑流域無人機資料數值地表模型成果	3-4
圖 3-6	2021/9/4 崩坪坑流域無人機影像正射成果	3-5
圖 3-7	本計畫 SAR 資料庫蒐集分類	3-6
圖 3-8	Sentinel-1 拍攝示意圖(左為上升軌道 69 右為下降軌道 105)	3-6

圖 3-9	2009 年莫拉克風災崩塌範圍初步判釋成果	3-15
圖 3-10	2009 年莫拉克風災崩塌範圍修正判釋成果	3-16
圖 3-11	2021 年 806 豪雨崩塌範圍修正初步成果	3-17
圖 3-12	2021 年 0806 豪雨崩塌範圍堆疊分析成果	3-17
圖 3-13	2002 至 2011 年地表變形	3-18
圖 3-14	2011 至 2015/12/19 DSM 地表變形	3-19
圖 3-15	2015/12/19 至 2017 DSM 地表變形	3-20
圖 3-16	2011 至 2017 DEM 地表變形	3-20
圖 3-17	2017 至 2018/01/26 DSM 地表變形	3-21
圖 3-18	2018/01/26 至 2021/09/04 DSM 地表變形	3-22
圖 3-19	2017 至 2021/04/14 DSM 地表變形	3-23
圖 3-20	2021/04/14 至 2021/09/04 DSM 地表變形	3-24
圖 3-21	2021/04/14 至 2021/09/04 下游變化圖	3-25
圖 3-22	崩塌剖面位置	3-27
圖 3-23	2002~2021 年間崩塌地剖面變化	3-27
圖 3-24	永久散射體之時空基線	3-28
圖 3-25	短基線法之時空基線	3-29
圖 3-26	2006~2011 ALOS 垂直變形速率圖	3-30
圖 3-27	ALOS 崩塌判釋與潛變區域速率圖	3-31
圖 3-28	A1 各時序位移量變化圖	3-31
圖 3-29	2017~2021 上升軌垂直變形速率圖	3-33

圖 3-30 2017~2021 下降軌垂直變形速率圖	3-33
圖 3-31 2002~2021 DSM 變化量	3-36
圖 3-32 ALOS 與 sentinel-1 P1 點累積位移量	3-36
圖 3-33 ALOS 與 sentinel-1 P2 點累積位移量	3-36
圖 3-34 模擬坡面土砂變化量體統計範圍	3-37
圖 3-35 2009/10/08~2021/01/08 DInSAR 分析地表微變量	3-38
圖 3-36 Okada 模型模擬滑動量成果	3-39
圖 3-37 崩塌地 Okada 模型模擬殘餘量	3-39

第一章 緒論

第一節 計畫動機

臺灣受到位於環太平洋地震帶，受到板塊擠壓而有破碎的地質現象，近年來受到氣候變遷影響，劇烈的降雨型態也使坡地災害日趨頻繁，如何進行坡地災害潛勢的評估以擬定防災對策則成為重要的課題，近年來由於遙測技術快速發展，監測方式變得更有效率且更多元，結合傳統監測方式後得以建立更立體的多尺度監測模式，提供更經濟且即時的監測資訊。

第二節 計畫目的

本研究中運用差分干涉合成孔徑雷達技術(DInSAR)做為量體分析的遙測工具，合成孔徑雷達(SAR)有不受天候干擾、大面積、固定周期等優勢，能紀錄包含強度、極化、相位等資訊，DInSAR 技術分析兩次重複軌道的影像相位差，還原為地表變形量，於條件良好時可得到毫米級的變形精度。

在本研究中主要解決的課題包含：地表變位資訊分析與建立、坡面土砂生產量評估、多時序土砂運移量及變遷分析，現階段因 Sentinel-1 SAR 的衛星資料開放，可以取得周期短且大範圍的 C 波段影像，在本研究中將運用 DInSAR 技術從多時序大範圍的探測中擷取地表變形資訊，並依此完成土砂生產量評估及其運移行為分析，此研究成果將有助於對於集水區防災策略提供參考建議。

擬解決問題條列如下：

- 一、蒐集研究區域內之 SAR 分析影像。
- 二、建立地表變位資訊分析流程。
- 三、坡面土砂生產量評估。
- 四、多時序土砂運移量及變遷分析。

第三節 計畫研究區域

本計畫與共同整合型計畫擬選取旗山溪支流油礦溪上游之崩坪坑集水區為研究區域(圖 1-1)，崩坪坑集水區為潛在大規模崩塌區亦為高市 DF020 土石流潛勢溪流集水區。崩坪坑集水區自 2008 年卡玫基颱風及 2009 年莫拉克颱風後迄今，坡面地表變位、崩塌、土石流及河道土砂運移等土砂現象仍然持續活躍，且崩坪坑集水區航遙測資料及雨量水文監測資料建置完整，符合本計畫執行與研究需求。

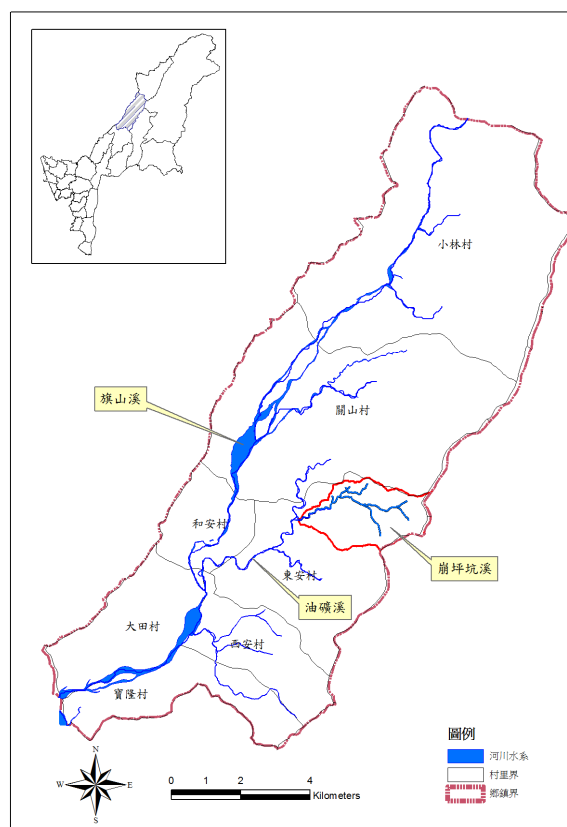


圖1-1 計畫研究區崩坪坑集水區地理位置圖

(圖片摘自曾志民，2021)

第四節 計畫重點項目

一、蒐集研究區域內之 SAR 分析影像：

建立研究區內 L 波段的 ALOS 衛星、ALOS-2 衛星、C 波段的 Sentinel-1 的 SLC(單觀點複數影像)、GRD(地距影像)格式影像資料庫。

二、分析多期坡地變位量資訊：

蒐集的 SAR 影像進行 SBASInSAR 分析，計算地表垂直方向變化量。

三、評估多時序土砂生產量及變遷情形：

以 SBASInSAR 分析後的密集點雲進行分析統計,計算潛變滑移量及分析坡面位移的變遷情形。

四、分析坡地滑動潛勢範圍及潛在滑動量：

結合地面變位圈繪的潛勢區域，並以 DInSAR 分析結果做力學模型分析，找出潛在滑動深度及驗證滑動量。

五、成果整合運用

提供成果給長榮大學土地管理與開發系曾志民教授研提 110 年度創新研究計畫「多尺度監測技術在坡面變形及河道土砂運移之整合應用」整合型研究計畫整合應用。

第二章 工作執行方法與步驟

第一節 工作執行方法

在本研究中主的研究工作項目包含：一、無人機空拍資料建置；二、多時序合成孔徑雷達影像資料蒐集及建置；三、地表變形資訊分析；四、坡面土砂生產量評估及變遷分析；五、滑動潛勢範圍及潛在滑動量；六、成果整合運用。以下針對各工作項目說明。

本計畫執行流程如圖 2-1 所示。

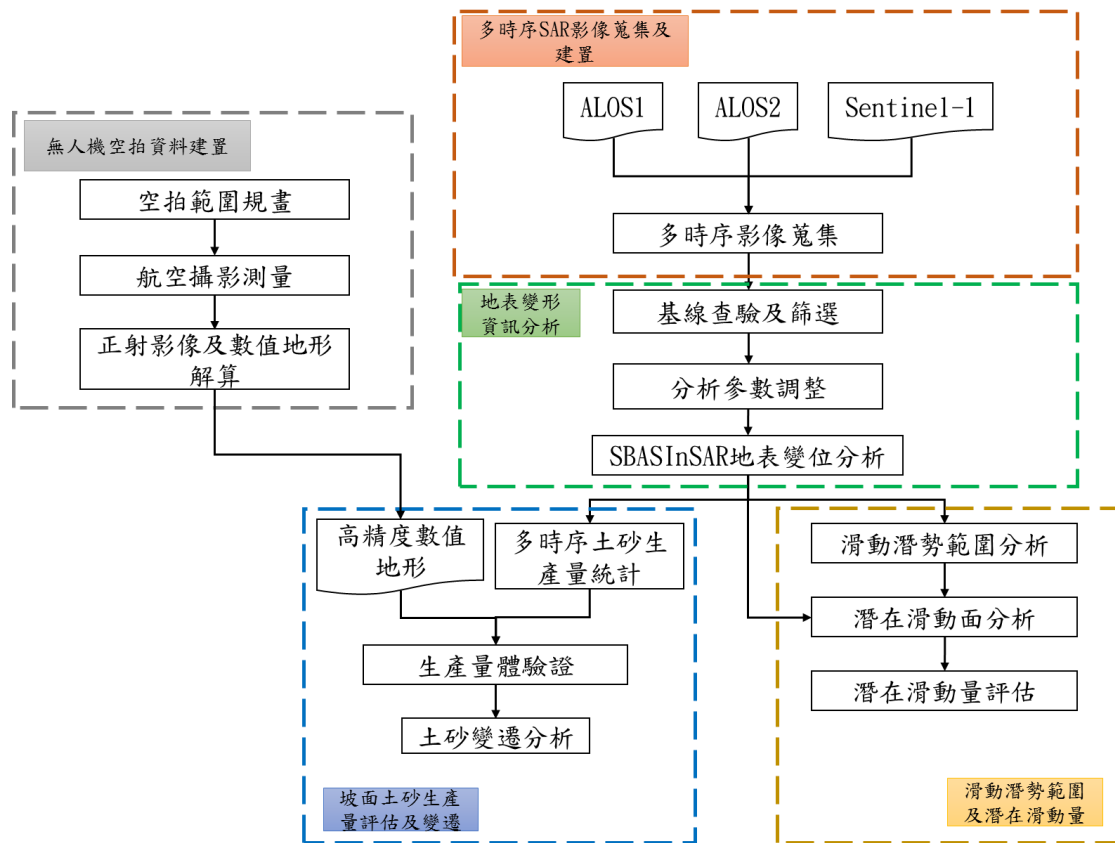


圖2-1 計畫工作流程圖

第二節 工作執行步驟

一、無人機空拍資料建置

本研究團隊欲利用無人飛行載具(UAV)建置從山崩區至下方堆積區之多時序、高解析、高精度數值地形、正射影像及三維模型，以利後續進行地形變異分析及滑動位移量測，為整合各計畫的跨領域分析技術，達到研究效益最大化。此部分主要工作內容包括：(一)現地控制點佈設及量測；(二)多期無人機影像拍攝建模；(三)多期無人機影像之正射、地形及三維模型建置。

(一)現地控制點佈設及量測

本計畫研究在進行拍攝任務，需量測控制點(GCP, Ground Control Point)，以校正成果模型之坐標資訊。控制點需選定於任務航線範圍內區，點位盡量均勻分佈在航線拍攝區，所選點位必須透空度良好且可架設儀器(衛星定位儀)，且必須能於 UAV 拍攝照片中清楚辨識及準確對點，即所選點位之標線線粗細不得小於此任務中之地面解析單元(Ground Sampling Distance, GSD)。本計畫採用衛星定位儀量測系統進行佈點測量，並利用內政部國土測繪中心 e-GNSS 即時動態定位系統，運用 VBS-RTK 即時動態定位技術進行動態測量。

(二)多期無人機影像拍攝建模

無人機拍攝建模任務主要進行河道記錄拍攝，於計畫期間至少拍攝 2 次，第一次為建立集水區全域，約 4~4.5 平方公里(400~450 公頃)，第二次為河道堆積變化段，約 1.3 平方公里(130 公頃)，若有降雨事件則另行評估是否進行拍攝，預計拍攝範圍如圖 2-2 所示：

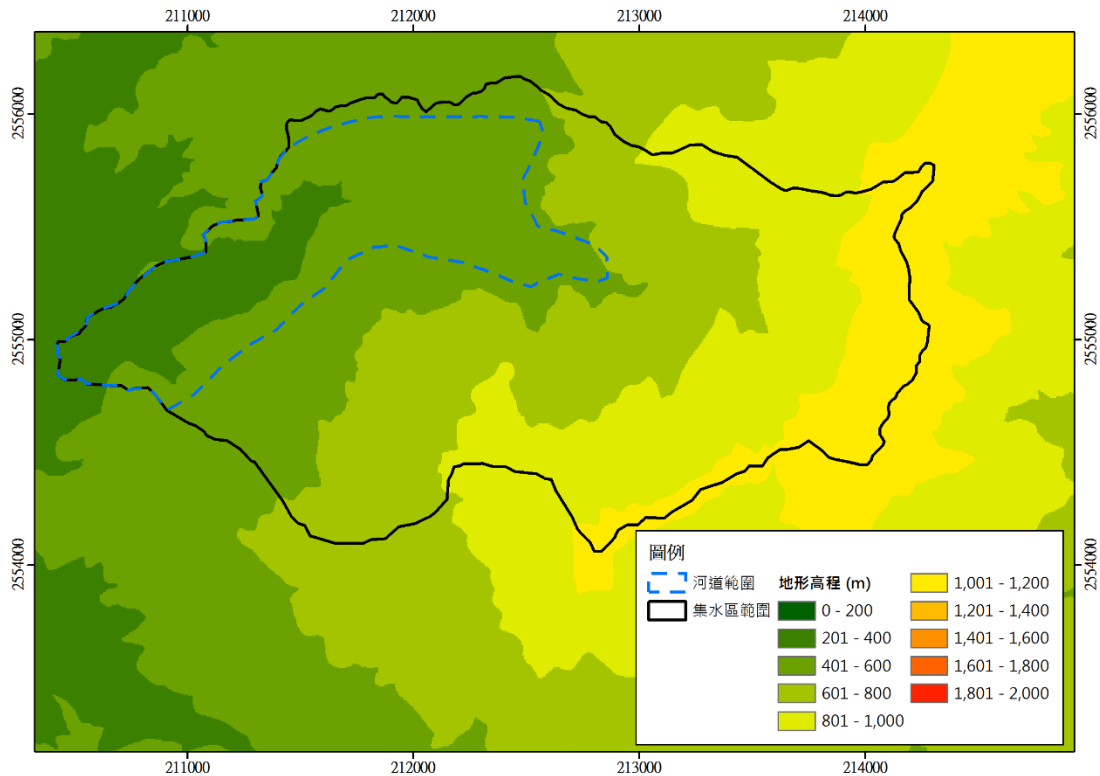


圖2-2 航空攝影測量預計拍攝範圍圖

(三)多期無人機影像之正射、地形及三維模型建置

根據無人飛行載具空拍資訊，利用空中三角測量之原理，解算研究區域正射影像、數值地表模型(DSM)，其空拍建置成果可提供整合型計畫間應用。

二、多時序合成孔徑雷達影像資料蒐集及建置

合成孔徑雷達影像(SAR)是一種主動微波觀測技術，具有主動觀測的特性，不受到天候及夜晚的限制，且能大面積、固定週期的量測振幅、極化、相位等地上物理性質，由於雷達波且具有優越的繞射能力，能穿透雲霧及植生到達地表，藉由反覆發射及接收這些訊號後，達到量測的目的。

SAR 的觀測能力及適用範圍受到其波長的長度有顯著的差異，在本研究使用之合成孔徑雷達資料主要為日本 JAXA 的 ALOS、ALOS-2 及歐洲太空總署(European Space Agency,ESA)的 Sentinel-1 衛星，ALOS 系列衛星波長為 L-band，在山區穿透植生的效果良好，然而在 JAXA 現行策略中，ALOS-2 在台灣的拍攝密度較低，資料取得週期過長，對於長期監測而言資料相對匱乏，且因資料需付費購置而增加了運用成本。

Sentinel-1 衛星的 SAR 影像波長為 C-band，為歐洲太空總署哥白尼計畫中的觀測衛星之一，其合成孔徑雷達觀測系統由兩顆衛星組成 (Sentinel-1A、Sentinel-1B)，單一軌道回歸週期為 6~12 天，資料目前為免費開放使用，因為穩定且高頻率的資料產出使持續監測變得可能，在此條件下使近年來 Sentinel 衛星有大量的研究及應用成果。

Sentinel-1 的 SAR 資料包含 Stripmap、Interferometric Wide Swath Mode、Extra Wide Swath Mode 與 Wave 四種拍攝模式，其不同處理等級的產品主由 GRD、SLC 兩種格式組成，地距影像 GRD(Ground Range Detected)格式由聚焦的 SAR 數據組成，其使用橢球體模型校正經多視投影到地面範圍，且失去了相位訊息，該格式經過多視圖處理及熱噪訊校正，以降低解析度的代價減少斑剝雜訊的影響。

單觀點複數影像 SLC(Single Look Complex)格式為使用衛星的軌道和姿態數據進行地理參考的聚焦 SAR 數據，其影像每一個像素由一個複數值(I&Q)表示，SLC 影像由零多普勒幾何形狀產生，並對天線方向及距離損耗進行校正，影像生成時保留了振幅與相位信息。

在本研究中為了進行多時序的雷達強度分析，以及運用干涉堆疊技術進行地表變位分析，因此須蒐集研究區內從 Sentinel-1 發射至今的雷達影像，解算並建置檔案後，作為後續分析原始資料使用。

三、地表變形資訊分析

差分干涉技術 DInSAR 技術是由干涉兩幅不同時序的合成孔徑雷達影像的相位變化，藉由計算兩幅相同軌道的 SAR 影像相位差產出干涉圖，並運用數值地形產出模擬地形相位圖，將地形產生的地形相位移除後的差分干涉圖，其干涉條紋的變化可顯示出地表變動位置，經相位還原可計算出兩時序間的地表變形量，進行干涉差分後的影像進一步進行相位還原處理之前，必須先選取控制點(GCP)作為基準，控制點必須在相位良好的不動點上，不當的控制點會使地形變化值產生偏斜的錯誤結果，在條件良好情形下，干涉條紋可解算為毫米等級之地表變形量，差分干涉技術流程如圖 2-3 所示。

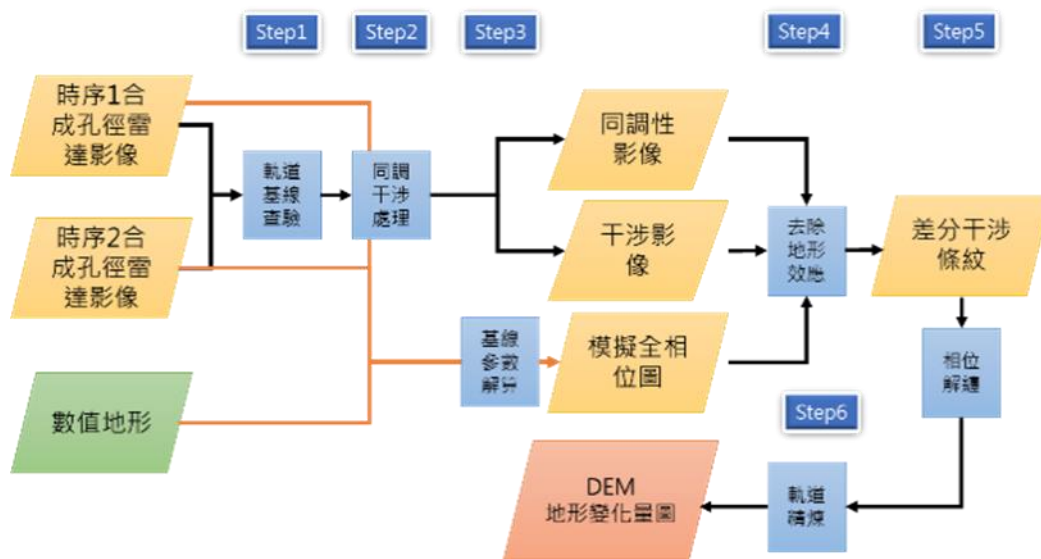


圖2-3 DInSAR 技術處理流程

合成孔徑雷達影像的地表位移訊號，此變形量也可用以監測地表或自然環境災害(Didier et al.,1998)，然而單一組差分干涉技術所取得地表變形量可能存在多種誤差如式 1(Wang et al., 2007a, 2007b, 2005)，其誤差包含：衛星軌道誤差、大氣效應、地形誤差、雜訊、空間時間去相關、地形效應，由於 SAR 影響屬於側視影像，因此取像時會受到地形效應影響，導致前坡縮短、疊掩、陰影等情形(圖 2-4)，此外

也受到入射角度影響，導致反射訊號不足等情形，故先進行初步分析，確認研究區所適用的軌道，各波段 SAR 影像先完成初步的基線查驗，依序調整參數設定，排除誤差後，根據干涉成果排除相對不佳的時間相對，以及排除大氣效應影響較大的區域，最後分析地形效應影響區域進行排除，篩選出有效相對，其評估流程如圖 2-5 所示。

$$\begin{aligned}
 \phi_{\text{Int}} &= 4\pi \frac{R_1 - R_2}{\lambda} \\
 \phi_{\text{Int}} &= \phi_{\text{Topography}} + \phi_{\text{Change}} + \phi_{\text{Movement}} + \phi_{\text{Atmosphere}} \\
 &= \frac{4\pi B_n}{\lambda R \sin \theta} h + \phi_{\text{change}} + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{\text{Movement}} + \phi_{\text{Atmosphere}} \\
 &= \frac{4\pi B_n}{\lambda R \sin \theta} h + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{\text{Movement}} + \phi_{\text{Noise}} \\
 &= \frac{4\pi B_n}{\lambda R \sin \theta} h + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{\text{Movement}} + \phi_{\text{Noise}} \quad (\text{式1})
 \end{aligned}$$

其中，R1 及 R2 為不同時間衛星至地表觀測點距離

$\phi_{\text{Topography}}$ ：地形相位變化

ϕ_{Change} ：地表特徵相位變化

ϕ_{Movement} ：觀測點移動相位變化

$\phi_{\text{Atmosphere}}$ ：大氣折射相位變化

$\Delta R_{\text{Movement}}$ ：衛星 1 及 2 至觀測點地表移動量

ϕ_{Noise} ：雜訊相位

B_n 為正常基線 (Normal Baseline)

h 為待測位置地表高程

λ 為雷達波長

θ 為側視角。

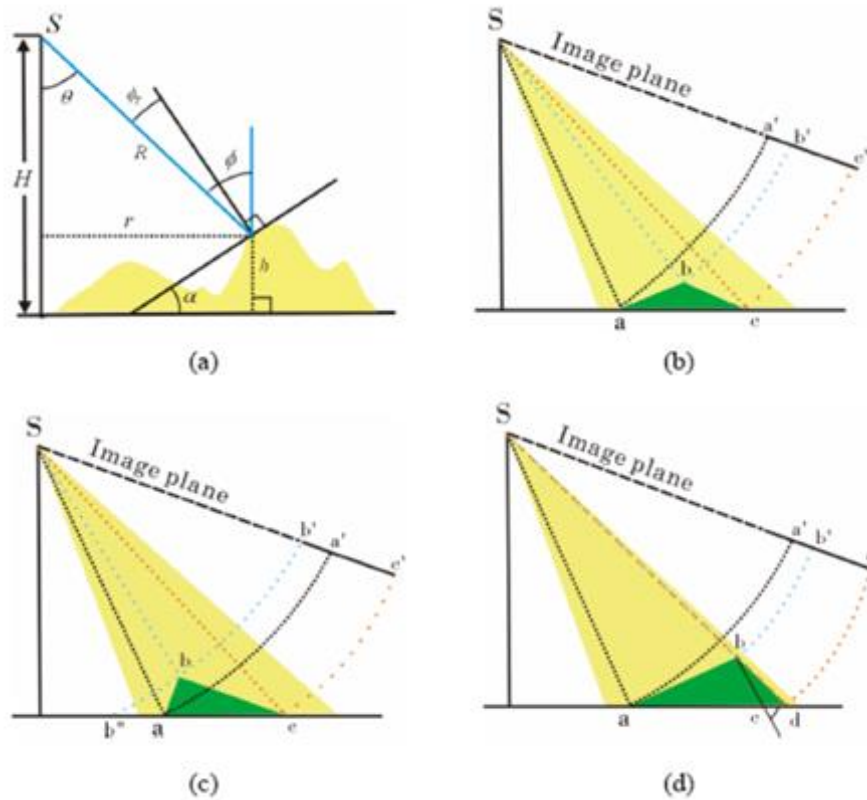


圖2-4 受地形效應影響情形(圖片摘自何世紀，2006)

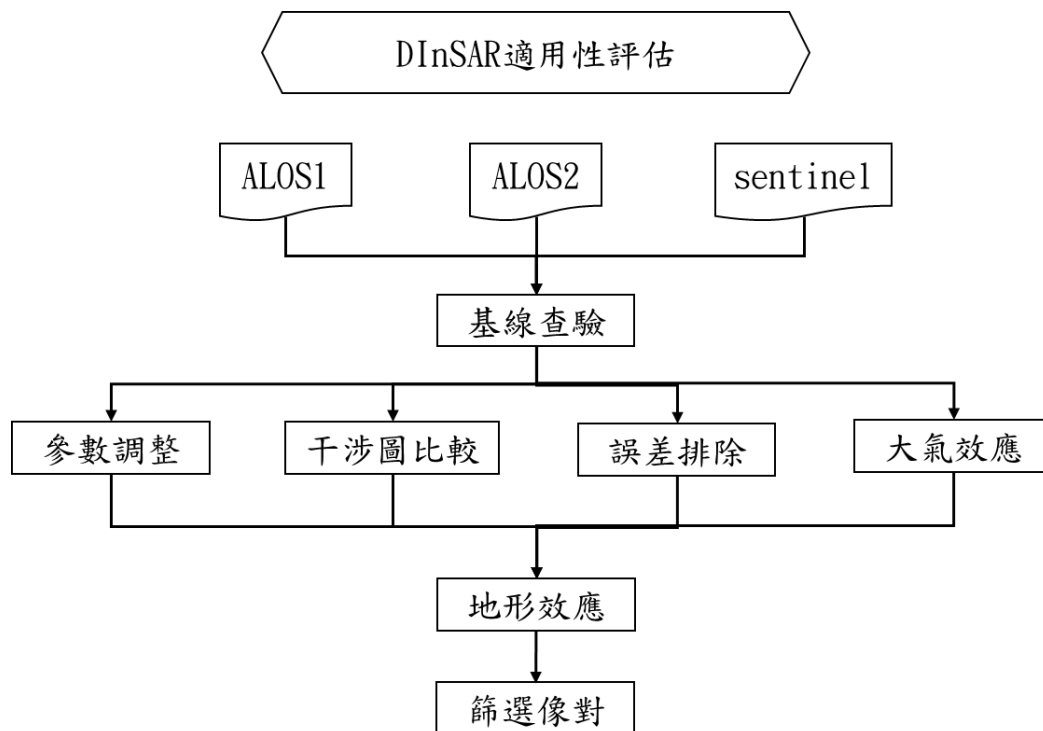


圖2-5 適用性評估流程

利用時序性的合成孔徑雷達影像進行干涉分析時，主要產生的干涉相位資訊包含了地形、地表特徵變化、地表移動量以及大氣效應等(式 2)，其中地形的相位變化資訊可以採用高精度數值地形及短基線長去除該項誤差，相干值的門檻調整則可以去除低相干區域的影響，以及副產品數值地形的精準度(謝嘉聲與史天元，1999)，大氣效應的誤差可以用長時間多影像的觀測降低，當消弭可能誤差來源後，僅剩下地表移動及雜訊相位差，可藉此式取得較高精度且可信任之地表變形量(Lu et al., 2012; Greif and Vlcko., 2012)。

當利用短基線法計算多期的干涉影像堆疊成的技術稱作 SBASInSAR，該技術能有效的排除大氣效應影響，建立多時序的地表變形資訊，SBASInSAR (Small Baseline Subset InSAR) 為 Berardino(2002)提出，相較於 PSInSAR 對於散射體的嚴格要求，SBASInSAR 技術運用較短的時間及空間基線產出干涉成果，因此減少了因長基線導致去相關的問題，更能保留變形區的分布密度，而後根據 GCP 控制進行軌道校正及大氣效應校正，獲得精確的變形成果。SBASInSAR 因其採取短基線有高相關的特性，因此對於植生茂盛的山區，仍能獲得良好的量測成果(莊凱婷，2012、王國隆等，2018)，對於非線性變形區域也減少了失相關性的狀況，在分析應用上更具彈性，在過去研究中 SBASInSAR 在山區有良好的解算效果，能有效探測地表位移情形(如圖 2-6)，進而發現潛在滑動區域，以作為後續工程規劃使用。

$$\Delta \phi = \Delta \phi_{orb} + \Delta \phi_{Atmosphere} + \Delta \phi_{Topography} + \Delta \phi_{noise}$$

(式 2)

其中， ϕ_{orb} ：衛星軌道變化

$\phi_{Atmosphere}$ ：大氣折射相位變化

$\phi_{Topography}$ ：地形相位變化

ϕ_{Noise} ：雜訊相位

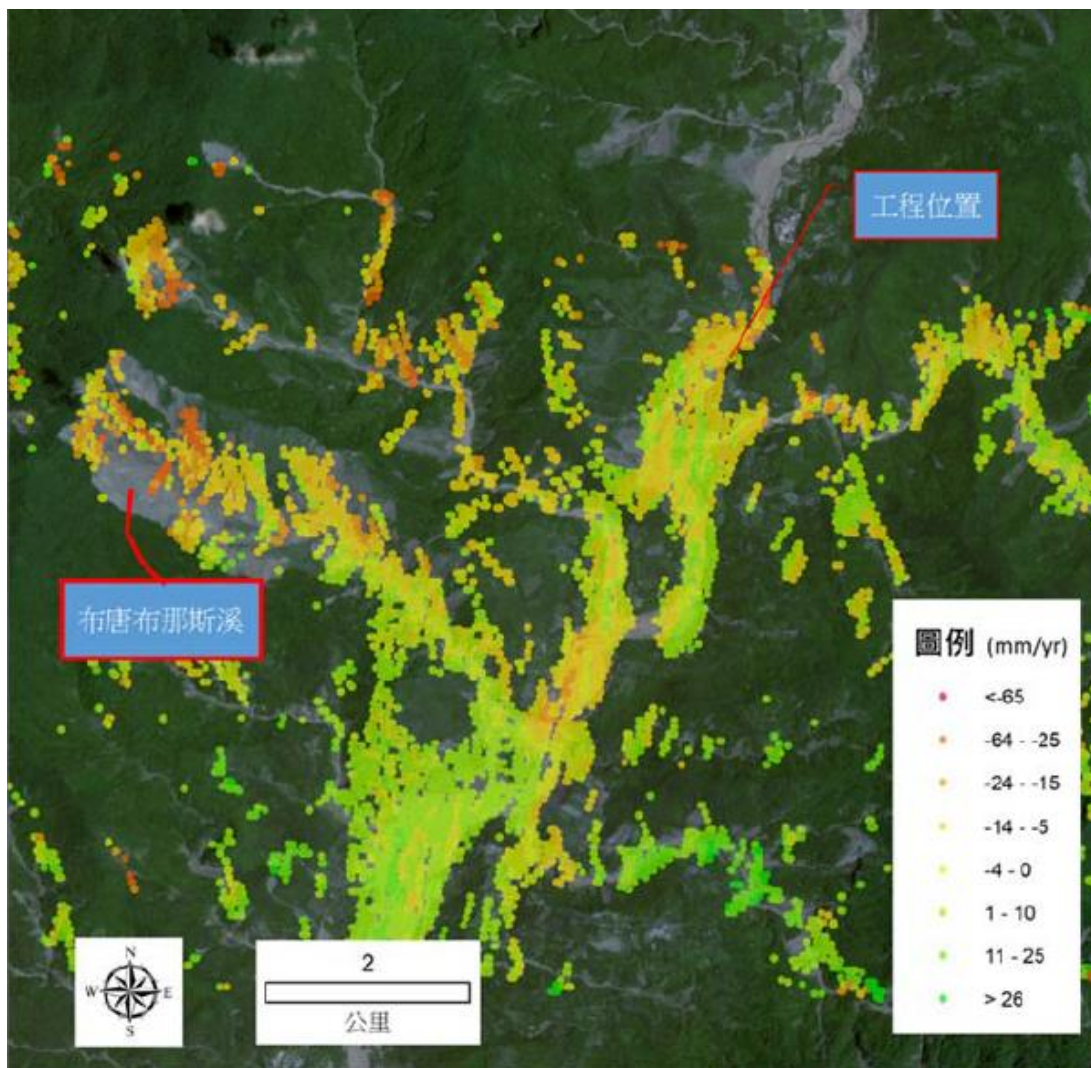


圖2-6 差分干涉合成孔徑雷達分析之地表垂直變化（短基線法）

四、坡面土砂生產量評估及變遷分析

統計坡地崩塌體積的計算方法，主要可以分為經驗公式與實測法兩種主要類型，經驗公式需根據不同的崩塌案例資料，建立滑動面積與深度關係式、坡度與深度等關係式，或是根據地質調查得到覆土厚度與滑動坡度關係式，也有使用力學法反推滑動土壤厚度值，進而推測滑動體積等々方式，經驗法的好處在於當災害發生後，能迅速的推估出岩體滑動的土方量，雖然卻存在誤差過大的問題，但有利於短時間、低成本的估算模式。實測法除了以現地量測的方式外，另外可以不同時期的 DEM 進行相減，以測得精確崩塌地的滑移量。

本研究中將根據前一工作項目以 SBASInSAR 建立的密集地面點，透過多期的地表變化，用於分析土砂生產量及坡面塊體的潛變行為，從坡面上的滑動速率相對變化中，結合高精度數值地形的地面微特徵變化可以觀測並圈繪出不同的滑動區塊（如圖 2-7），以此判釋出的滑動範圍，繪製潛勢滑動區域，進行崩塌機制的分析。理論上在發生崩塌事件之前，坡面會有一段崩塌的潛變期，此潛變量可由 SBAS 點雲進行觀測，在本計畫中將統計圈繪範圍內點雲在各時期的平均變化量，乘上潛變面積後，計算各時期的潛變滑動量體(如圖 2-8)，滑動量體可以運用多期的高精度數值地形進行驗證，數值地形產製早期可參考農林量測所測繪的 5m 數值地形，而近年來 LiDAR 技術成熟，因雷射光穿透力較高，而以空載光達進行高密度的點雲資料建置而成的 DEM 更為精準，此外在整合型計畫中與其他子計畫共同建置的多期 LiDAR 及高精度數值地形，將歷次地形變化情形套疊 SBASInSAR 分析多時序地表變形量，用以回歸及驗證滑動量體的統計結果，並探討及水區內的土砂變遷分析。

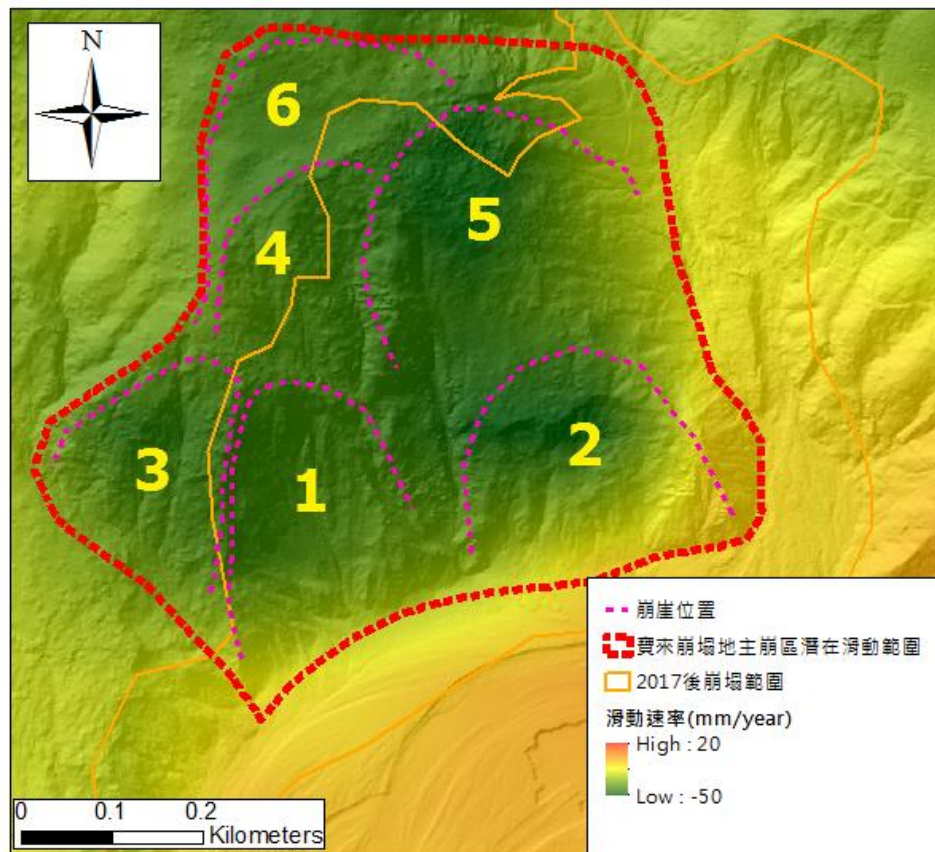


圖2-7 潛在滑動區塊圈繪範例

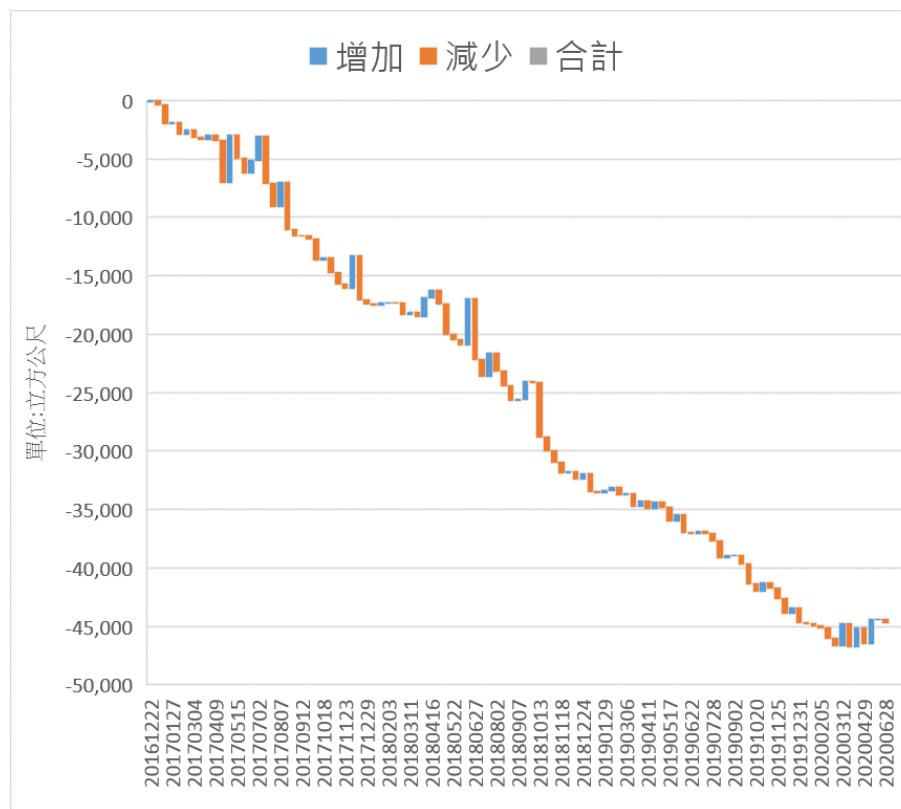


圖2-8 Sentinel-1 SBASInSAR 分析之各時序累積邊坡變形量範例

五、滑動潛勢範圍及潛在滑動量

在 SBASInSAR 的地表變化量的判釋成果中，可根據坡面滑動的相對速率變化，結合高精度數值地，圈繪出潛在的滑動區域，藉由滑動塊體的圈繪情形完成滑動潛勢範圍的分區，然而因為 DInSAR 存有相位變化的物理限制，當相鄰兩點的變化超過半個波長時，會失去空間相關性無法順利干涉，若崩塌地發生急遽變化時，用 DInSAR 技術只能得到相位雜訊，因此本研究中以彈性錯位理論模型的反演算技術，根據崩塌前的地表微變化，提出崩塌潛在滑動量體的評估方法，根據 Okada(1985) 提出的模型中，在地層中岩石受到錯動所發生的變形會近似於線性的彈性關係，整個變形場被稱做彈性半無限空間(elastic half-space)，Okada 簡化了由矩形或點源的剪切與拉伸造成的表面變形的理論基礎，當估計出弱面的長度(Length)、寬度(Width)、深度(Depth)、傾度(Dip)、方位角(Strike)、錯動角度(Rake)、滑動量(Slip)、E、N 坐標資訊(East、North)，即可進行彈性行為的模擬(如圖 2-9 所示)，也可透過地表變形資訊進行模型反演算，並依此建立弱面與表面位移的模型，Nikolaeva et al.(2014)將彈性錯位的理論運用在崩塌地深度及量體推估，反推出地層弱面，作為崩塌滑動面位置，本研究中將假設滑動區域為一完美橢球體，地層弱面為橢球中的一個切面，以此推估潛在量體(如圖 2-10、式 3、式 4)，並由 DInSAR 圈繪的變形範圍決定 A、B 長短軸，計算滑動面潛在滑動深度以評估潛在滑動量體，為驗證 okada 力學模型中推估的潛在滑動深度及量體，在本研究中將從前期的數值地形中，以該區域中已發生的崩塌區深度，對潛變區的破壞量體進行估算，並與本研究中提出的 Okada 模型分析成果進行比較，以驗證該分析的量體估算模式。

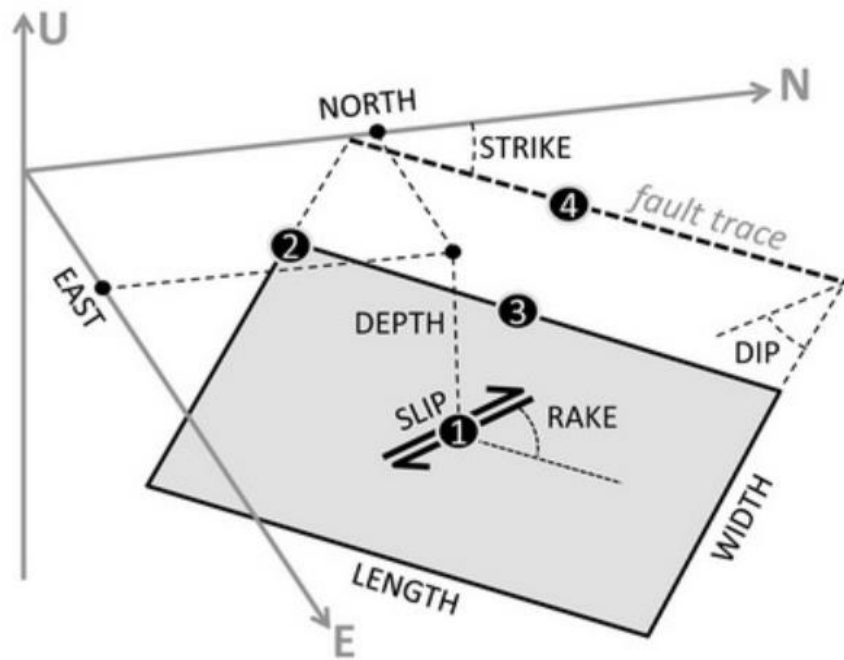


圖2-9 Okada 彈性錯位模型

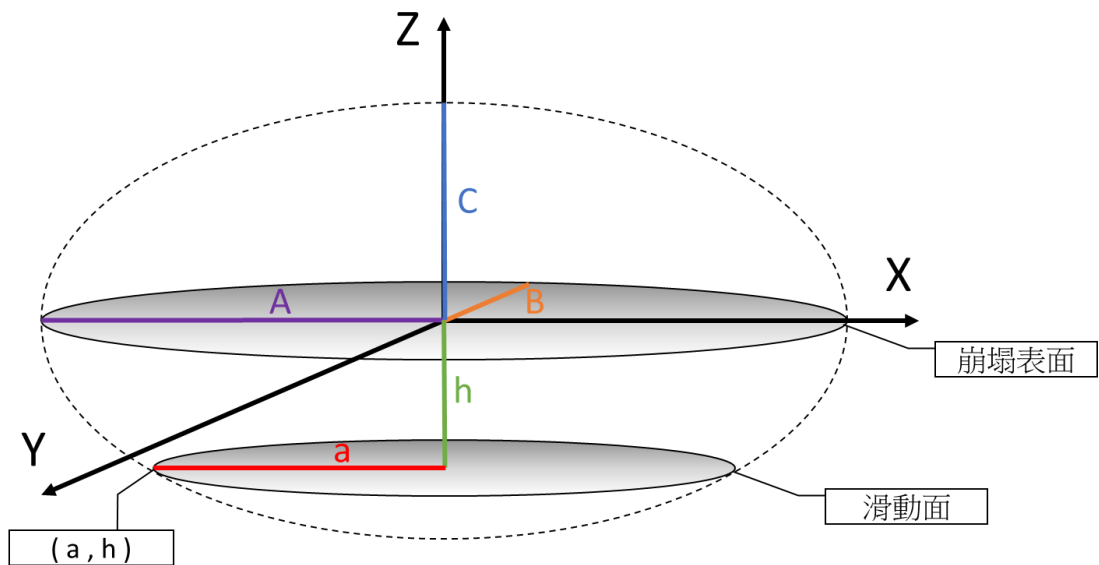


圖2-10 崩塌量體幾何示意圖(改繪自:E. Nikolaeva(2014))

$$C = \frac{Ah}{\sqrt{A^2 - a^2}} \quad (\text{式3})$$

$$\begin{aligned} V &= \int_0^h \pi \times A \times B \times \left(1 - \frac{z^2}{C^2}\right) dz \\ &= \pi \times A \times B \times \left(h - \frac{h^3}{3C^2}\right) \end{aligned} \quad (\text{式4})$$

六、成果整合運用

本計畫「應用 Sentinel-1 雷達影像地表變位資訊於坡面土砂生產及運移量變遷分析」為曾志民教授整合型研究計畫「多尺度監測技術在坡面變形及河道土砂運移之整合應用」之子計畫二，與子計畫一「結合多時序 Sentinel-1 雷達影像與人工智慧演算於集水區尺度土砂生產量分析」、子計畫三「崩塌發生與流出整合型模式應用於坡面變形分析-以甲仙崩坪坑為例」同屬於整合型研究計畫之子計畫項目；在整合研究中運用技術包含合成孔徑雷達(InSAR)、航空攝影測量、無人機及光學影像感測器，建置從山崩區至下方堆積區的多時序、高解析、高精度數值地形、正射影像及三維模型，以利後續進行地形變異分析及滑動位移量測。

為整合各計畫的跨領域分析技術，達到研究效益最大化，總計畫中分階段進行討論與整合作業：第一階段為計畫執行前，進行各計畫現有資料盤點及分工規劃，如已拍攝之 DEM、正射影像、研究區的基本圖資及研究報告；第二階段為計畫執行初期整合分析基本資料庫，內容包含多時序、多元高精度地形資料庫整合建置(子計畫一、二)；第三階段為期中報告提交前，完成 DInSAR 分析技術、密集點雲整合技術建立(子計畫二)，以及崩塌影響範圍評估之課題探討(子計畫三)；第四階段為期末報告提交前，完成坡地滑動潛勢及土砂量評估，包含坡地滑動潛勢範圍及潛在滑動量(子計畫二、三)、多時序坡面土砂生產及下移量(子計畫一、二)。整合計畫間在各階段中提供研究分析圖資與各子計畫共享成果，有關本計畫各階段與整體計畫的計畫相關性及分工如圖 2-11 所示。

本團隊將定期與整合計畫團隊進行討論會議以達成資料共享及整合，本計畫將共同分享研究區域各項基本圖資、合成孔徑雷達(InSAR)，以及 UAV 攝影測量所產製之高精度數值地形，提供相關判識與監測資訊。

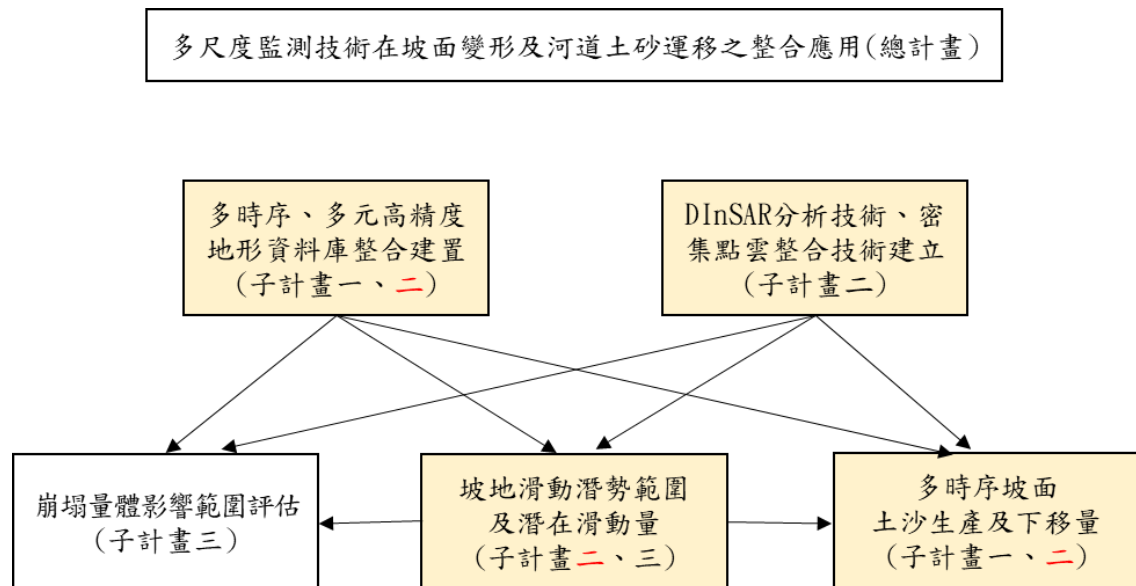


圖2-11 整體計畫相觀性及分工架構圖(子計畫二)

第三章 工作進度與研究成果

第一節 無人載具空拍資料建置成果

一、崩坪坑流域第一次拍攝

本年度計畫之無人機影像拍攝，由於上游處現已難以抵達，故第一次拍攝以崩塌後的河道堆積區為主要範圍，本研究團隊於 2021 年 4 月 14 日計畫初期進行第一次拍攝：一共拍攝 1687 張影像，拍攝面積共計 259 公頃，圖 3-1 為第一次所拍攝影像地形三維建置成果。圖 3-2 為本計畫所建置之數值地表模型(DSM)，由於本研究區之 DSM 因研究區域高低落差大，故影像解析度從 3.2 公分至 11 公分之間變化，平均解析度為 8.4 公分，拍攝區域內共佈設控制點 5 處，經控制後影像水平均方根誤差為 0.015m，垂直均方根誤差為 0.023m，各控制點誤差精度如表 3-1，本區之無人機航拍影像正射為圖 3-3。

表3-1 UAV 控制點誤差表(2021/04/14)

項次	控制點	X 誤差 (cm)	Y 誤差 (cm)	高程誤差 (cm)
1	Pt1	0.0038	0.0029	0.0177
2	Pt2	-0.0049	-0.002	0.0089
3	Pt3	0.0011	-0.0016	-0.0077
4	Pt4	0.015	-0.0077	-0.0032
5	Pt5	-0.0245	0.0154	-0.046



圖3-1 2021/4/14 崩坪坑流域無人機第一次影像三維建模成果

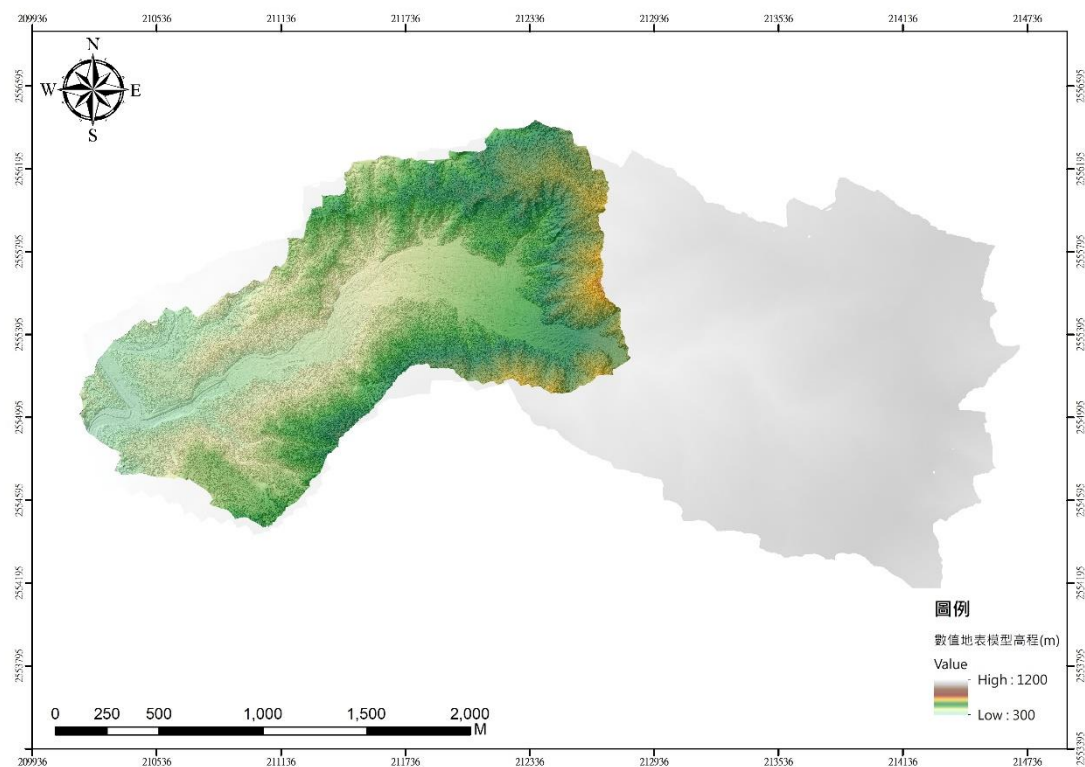


圖3-2 2021/04/14 崩坪坑流域無人機資料數值地表模型成果

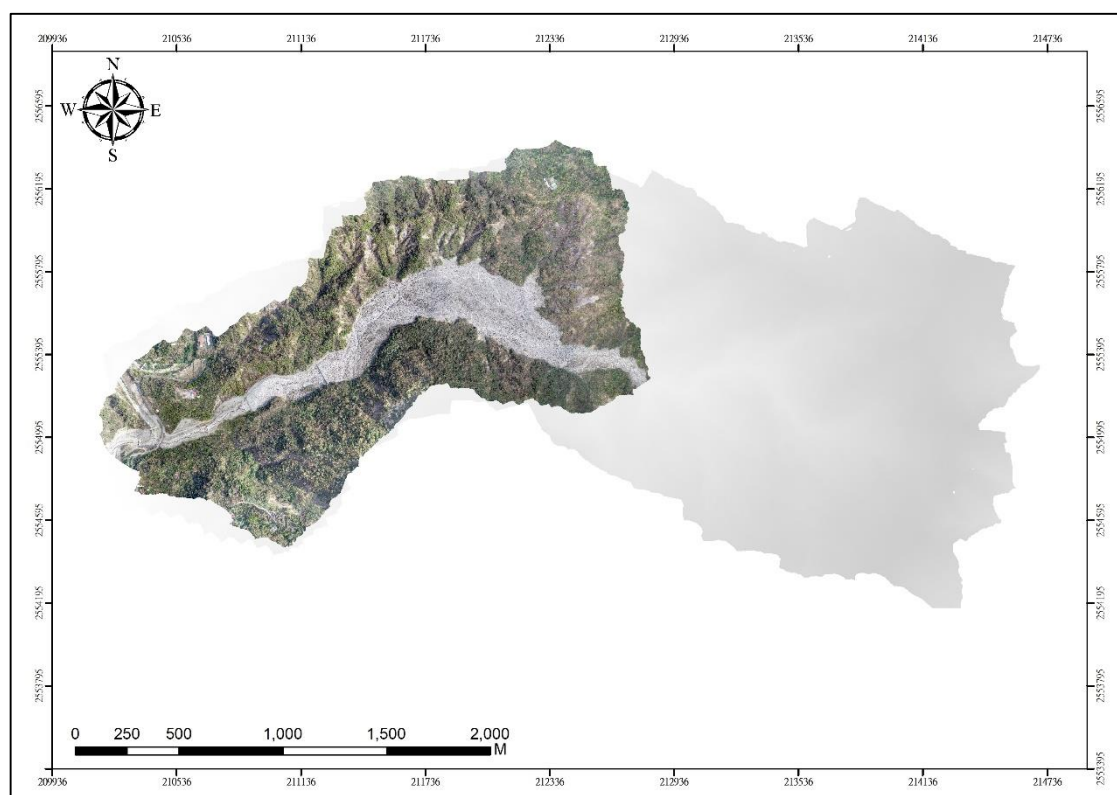


圖3-3 2021/04/14 崩坪坑流域無人機影像正射成果

二、崩坪坑流域第二次拍攝

本研究團隊於 2021 年 9 月 2 日至 4 日間進行第二次拍攝，鑒於 4 月的拍攝範圍中未有上游崩塌情形，故本次另尋路徑徒步約一小時登上山頂進行拍攝：一共拍攝 2720 張影像，拍攝面積共計 569 公頃，圖 3-1 為本年度第二次所拍攝影像地形三維建置成果。圖 3-2 為本年度第二次空拍所建置之數值地表模型(DSM)，由於本研究區之 DSM 因研究區域高低落差大，故影像解析度從 2.9 公分至 26 公分之間變化，平均解析度為 10 公分，拍攝區域內共佈設控制點 5 處、自然點 3 處，其中兩處自然點僅採用高程控制，經控制後影像水平均方根誤差為 0.013m，垂直均方根誤差為 0.136m，控制點誤差精度如表 3-1，本區之無人機航拍影像正射為圖 3-3。

表3-2 UAV 控制點誤差表(2021/09/04)

項次	控制點	X 誤差 (cm)	Y 誤差 (cm)	高程誤差 (cm)
1	Pt3	0.0105	-0.0046	0.0122
2	Pt4	-0.014	-0.0254	0.2492
3	Pt5	-0.0781	0.0025	-0.2057
4	Pt6	0.0683	0.0162	-0.1338
5	Pt7	0.001	-0.0009	-0.1079
6	T1	0.0003	0.0064	-0.0063
7	T2	-	-	-0.0366
8	T3	-	-	0.1152



圖3-4 2021/09/04 崩坪坑流域無人機第二次影像三維建模成果

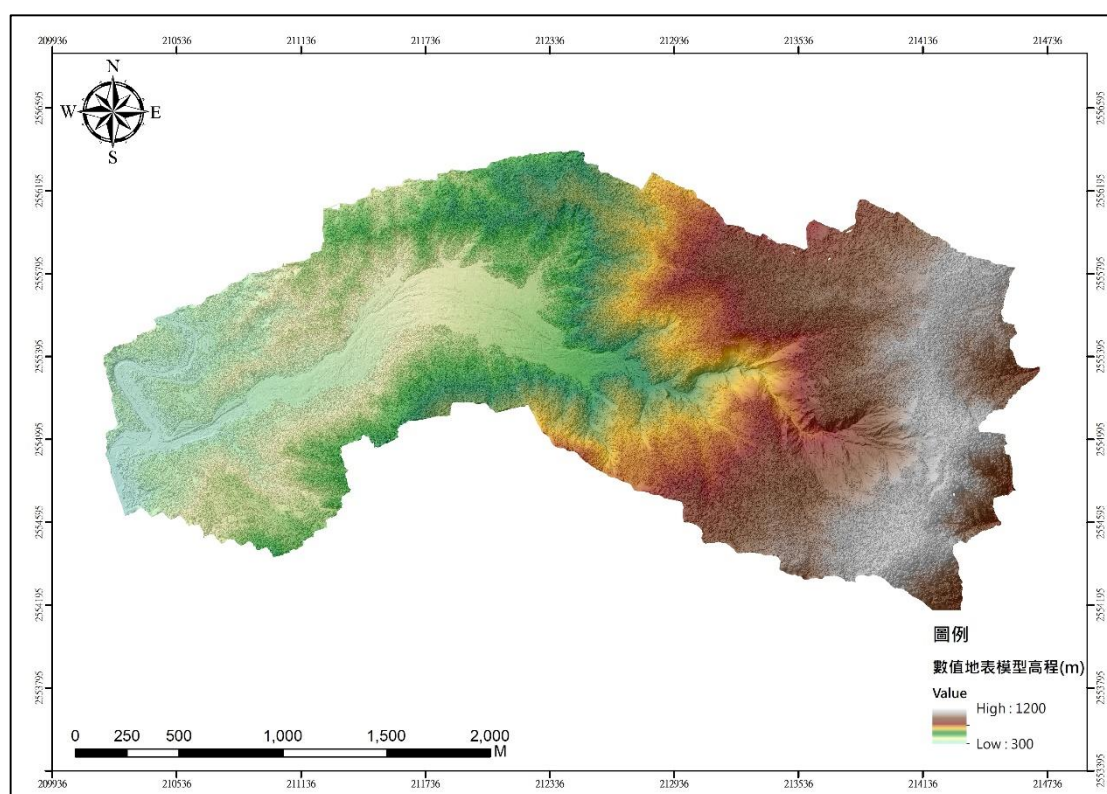


圖3-5 2021/09/04 崩坪坑流域無人機資料數值地表模型成果

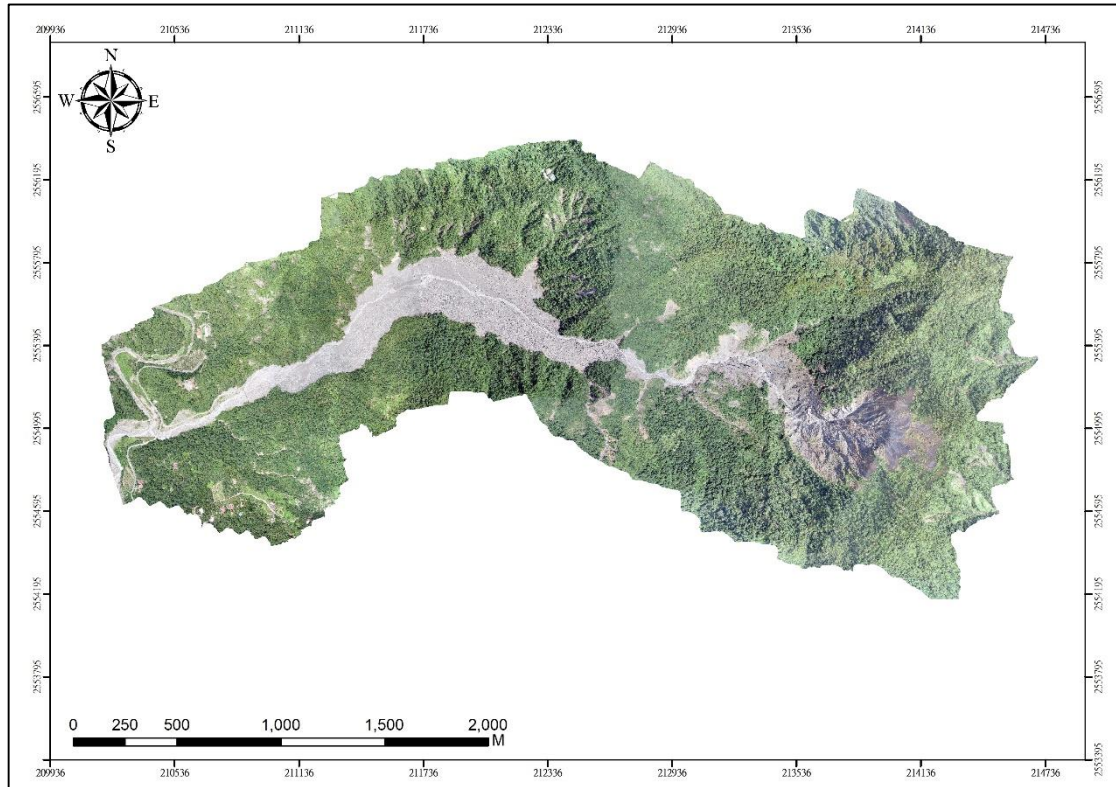


圖3-6 2021/9/4 崩坪坑流域無人機影像正射成果

第二節 影像資料庫蒐集及建置成果

一、合成孔徑雷達影像資料

為進行後續 DInSAR 分析，本研究需蒐集的圖資包含歐洲太空總署的 Sentinel-1、ALOS、ALOS-2 三種衛載合成孔徑雷達影像，ALOS PALSAR 使用 Fine 拍攝模式，資料格式為單觀點複數影像(SLC)，Sentinel-1 衛星資料本研究使用 Interferometric Wide Swath Mode 拍攝模式，格式分為地距影像(GRD)及單觀點複數影像(SLC)，其影像搜集及分類結果如圖 3-7 所示，

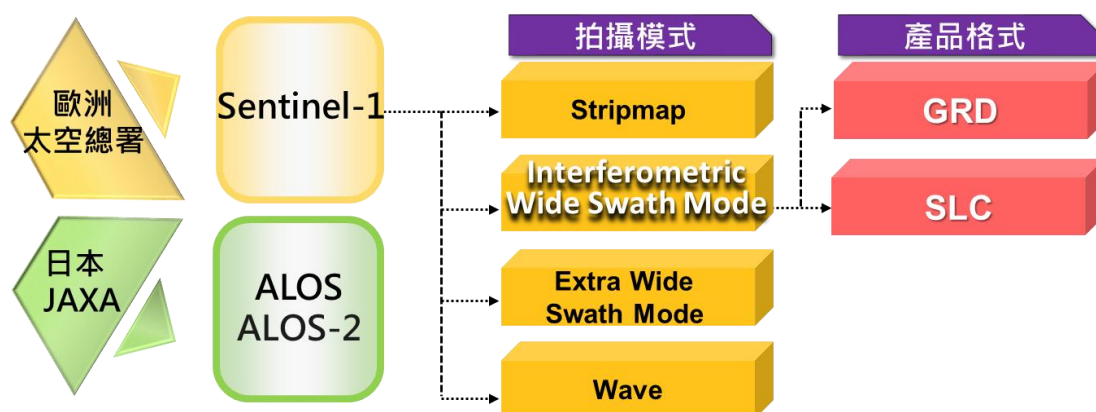


圖3-7 本計畫 SAR 資料庫蒐集分類

合成孔徑雷達根據拍攝軌道又分為上升軌及下降軌，拍攝軌道會使分析時受到不同坡向的地形效應影響，因此盡量保有兩種軌道的資料，有助於減少地形效應的盲區，在本計畫中 ALOS 衛星資料的上升軌道資料較少，主要蒐集的是下降軌道，而 Sentinel-1 在本研究區的資料分別為上升軌道 69 跟下降軌道 105 其拍攝範圍示意如圖 3-8 所示，在本計畫中已蒐集的衛星資料一共有 426 幅，其蒐集結果如 0 所示

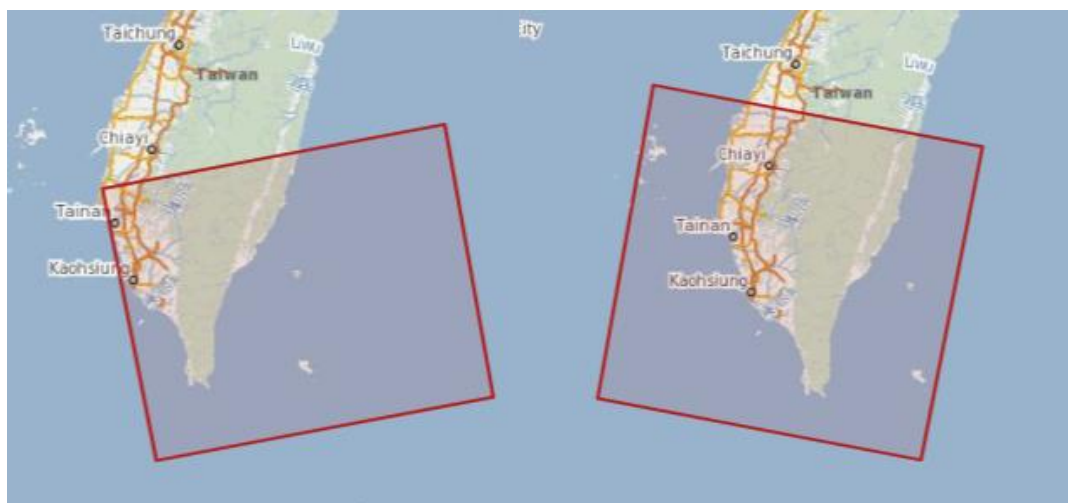


圖3-8 Sentinel-1 拍攝示意圖(左為上升軌道 69 右為下降軌道 105)

表3-3 本計畫蒐集多時序 SAR 影像

衛星/軌道	資料格式	蒐集區間	數量(幅)
ALOS 下降軌	SLC	2006/12~2011/2	20
Sentinel-1 上升軌 69	SLC	2015/1~2021/9	174
Sentinel-1 下降軌 105	SLC	2015/3~2021/9	127
Sentinel-1 上升軌 69	GRD	2016/9~2021/8	49
Sentinel-1 下降軌 105	GRD	2016/1~2021/8	56

二、數值影像資料蒐集

本計畫為瞭解崩坪坑溪流域演化情形，本計畫蒐集包含 2002、2011、2017、2021 年等多期 DEM、DSM，其中分別為 2002 年由農林量測所以航空攝影測量影像建製的 DEM，2011、2017 年由中央地質調查所製作的航空光達影像，2015、2018 年由本計畫所屬之整合型計畫中，曾志明教授以 DMC 航空影像計算之 DSM 資料，2021 年 414 日、2021 年 9 月 4 日兩期 UAV 攝影測量則由本計畫進行拍攝並經正射糾正後產製的 DSM，各影像之資料類型、拍攝年份、拍攝方式、資料來源與資料解析度如表 3-4 所示：

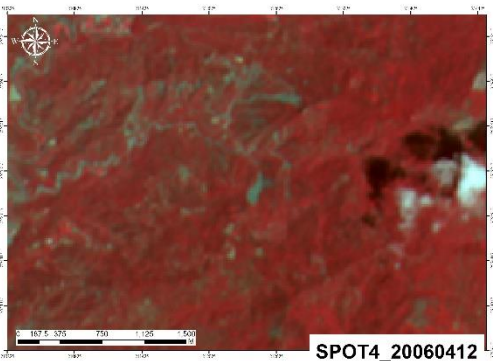
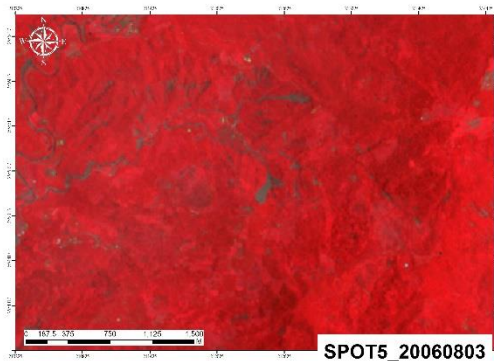
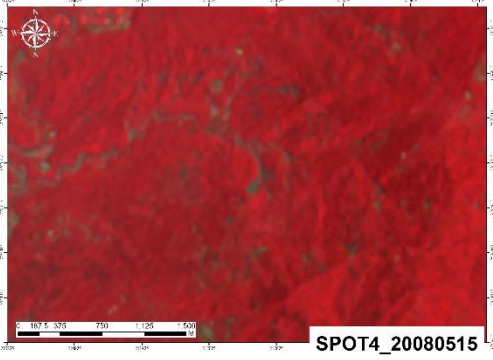
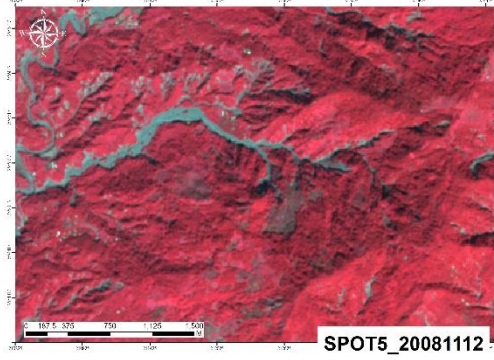
表3-4 數值地型資料一覽表

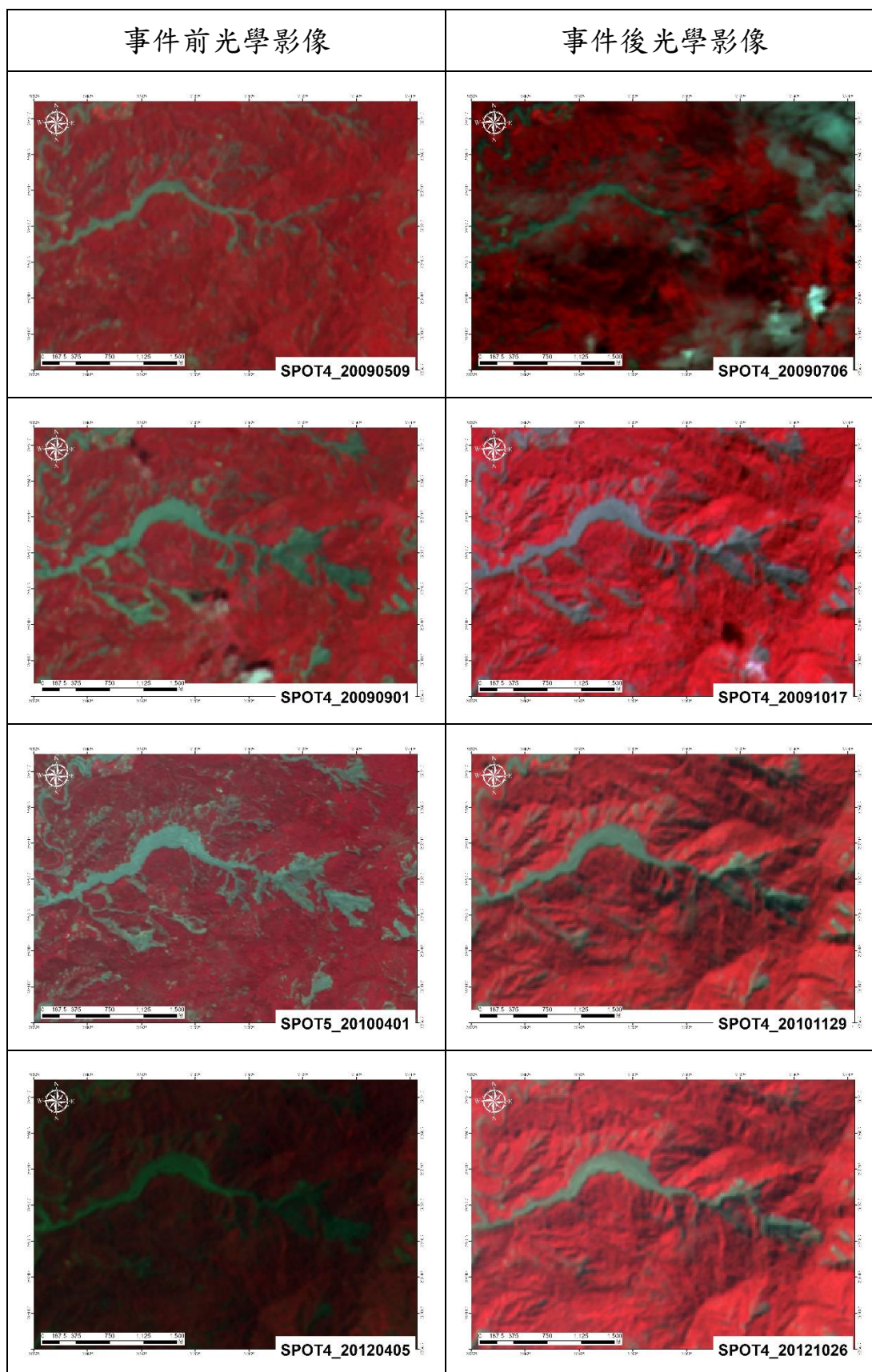
資料內容	拍攝年份	拍攝方式	資料來源	解析度
DEM	2002	航空攝影	農林量測所	5m
DEM、DSM	2011	航空光達	國土測繪中心	1m
DSM 正射影像	2015	航空攝影	整合團隊製作	2m
DEM、DSM	2017	航空光達	國土測繪中心	1m
DSM 正射影像	2018	航空攝影	整合團隊製作	2m
DSM 正射影像	2021/4/14	UAV 攝影	本計畫團隊	0.1m
DSM 正射影像	2021/9/4	UAV 攝影	本計畫團隊	0.1m

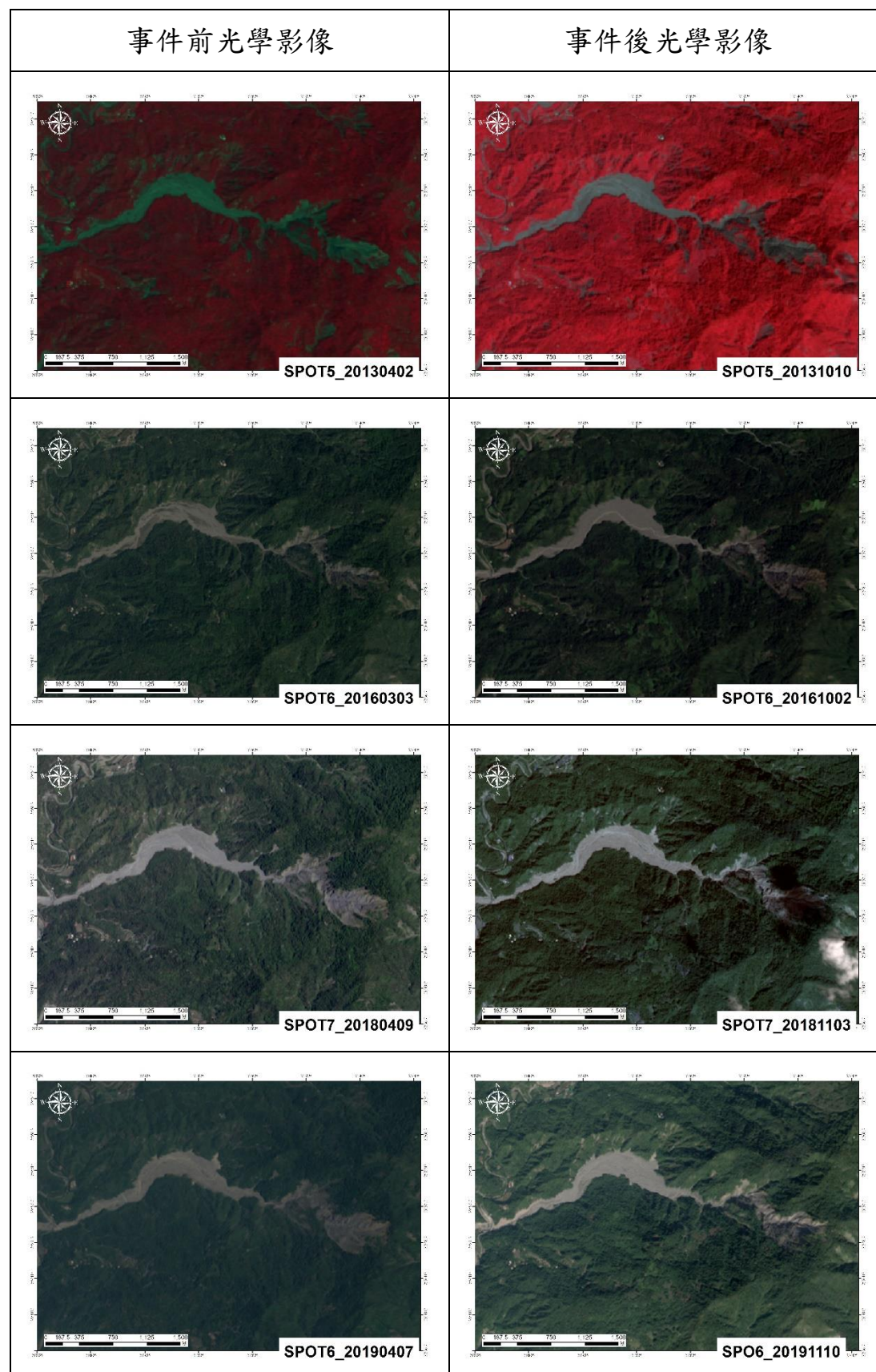
三、衛星影像資料蒐集

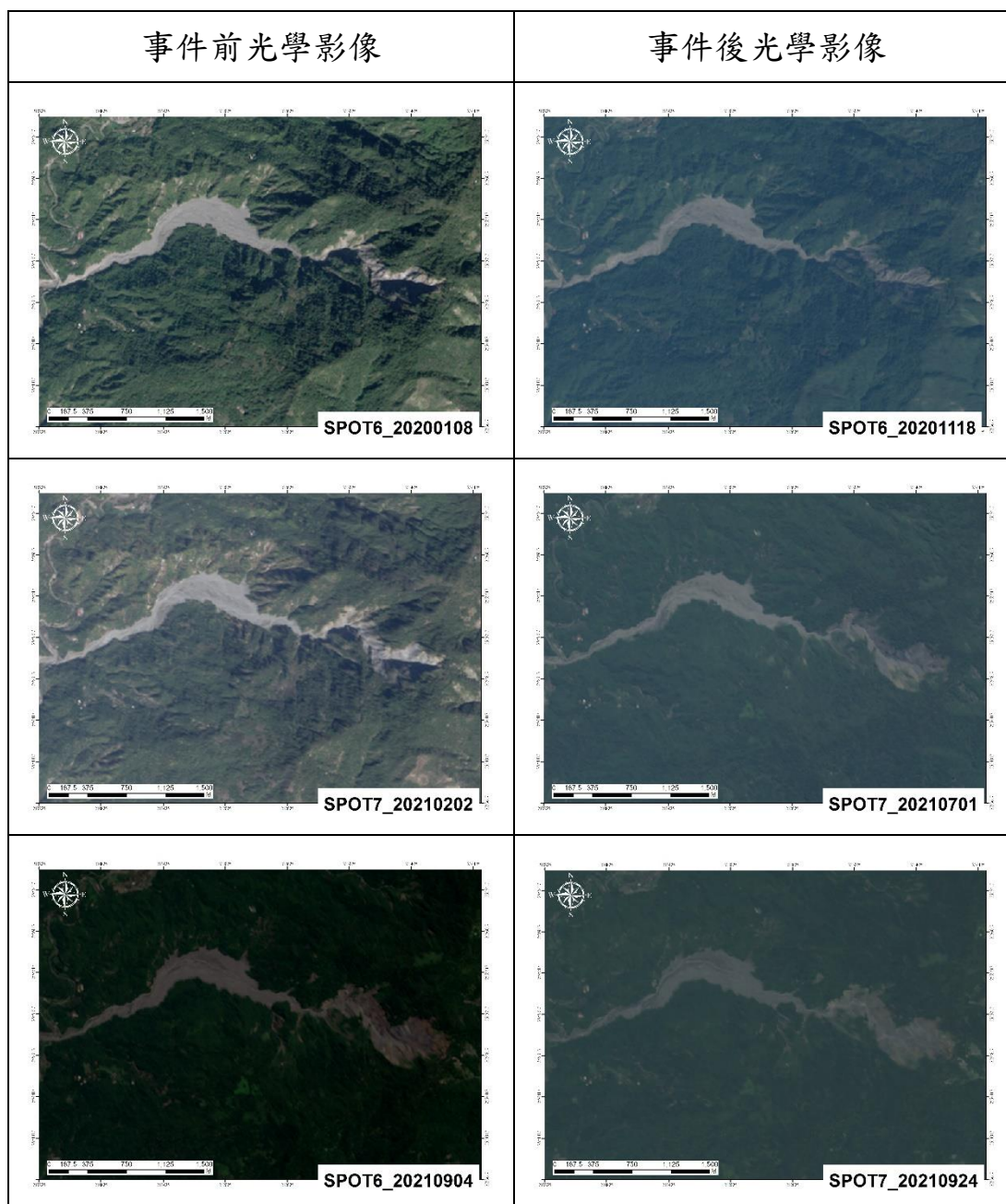
本計畫中所需判釋的崩塌範圍，崩塌事件分析所用的衛星影像，則以 2006~2021 年間的 SPOT 衛星資料進行分析，其蒐集之資料事件包含 2006 年 6、7 月兩次因西南氣流導致的豪雨事件、2007 年 8 月聖帕颱風、2008 年 7 月卡枚基颱風、9 月辛樂克颱風、2009 年 8 月莫拉克颱風、2010 年 7 月豪雨、9 月莫蘭蒂、凡那比颱風、2012 年 0610 豪雨、2013 年 8 月潭美颱風、2016 年 7 月尼伯特、9 月莫蘭蒂颱風、2018 年 8 月熱帶性低壓致災事件、2019 年 0812 豪雨事件、2021 年 7 月西南氣流、0806 豪雨事件等，共計 26 幅影像，其各期事件地貌演變如表 3-5 所示

表3-5 各期事件前後衛星影像變化一覽表

事件前光學影像	事件後光學影像
 SPOT4_20060412	 SPOT5_20060803
 SPOT4_20080515	 SPOT5_20081112







第三節 SAR 影像地表變形資訊分析

一、SAR 強度崩塌範圍判釋

DInSAR 技術雖然可以探測出地表的微小變形，但當地表變形超過電磁波的相位限制時，兩幅影像即無法進行干涉分析，此時得到的地表變形成果則需要謹慎解讀，為了提升差分干涉資訊的分析效率，本計畫運用合成孔徑雷達回波強度的特性，快速分析發生崩塌的範圍，同時運用林務局的衛星判釋崩塌目錄，完成分析結果驗證，並比較光學影像與雷達影像的特性。

在本研究中使用的雷達影像需包含事件前後的交叉極化影像（HH、HV or VV、VH）等四幅影像，並經前處理流程產出後向散射係數，以及地形效應遮罩。

由於雷達影像的強度變化來自於事件發生前後的散射條件改變，因此如平原區的農業使用、建物興建與拆遷、含水量條件變化、河道泥砂堆積等情形都會在雷達影像分析的過程中被判釋出，干擾到崩塌地的判釋成果，降低判釋精度，研究流程中，需先排除干擾因素的影響，在研究分析中使用 2002 年以航空影像產製的解析度 5 公尺的數值高程地形(DEM)，將其計算為地形坡度後，設定 10 度坡度門檻濾除平地的雷達影像變化，河道的影響區域則透過衛星影像判釋建立影像遮罩，考量到河道濾除的標準需一致，此遮罩同時運用於雷達影像及提供精度檢核的衛星影像崩塌目錄以排除河道影響，此外由於雷達影像是側視拍攝的特性，因地形產生的疊掩(Layover)、前坡縮短(Fore Shortening)、陰影(Shadow)等地形效應區域本身已失去參考性，並產生極端值影響後續影像的平均值及標準差等參數，因此使用從雷達影像前處理中產生的地形效應遮罩將其移除，同時地形效應範圍也用於排除衛星影像的崩塌目錄中。

在本計畫研究區崩坪坑流域中，前期主要災害為 2009 年的莫拉克風災，此是造成上游坡地崩塌的主要事件，因此本研究分析的第一個事件區間為 20090708~20090823 的 ALOS SAR 影像，其判釋方法以結合 NDSI&RVID 方式進行(林俊廷，2021)，其指標說明如下：

NDSI 為後向散射係數歸一化指標 (Normalized Difference Sigma naught Index)，利用地上物的植生發生變化時，極化影像強度改變的特性，計算崩塌事件前後的後向散射係數的歸一化指標，以此得到崩塌區域的參考範圍，NDSI 計算方式如式(1)所示：

$$NDSI = \frac{\sigma_{\text{master}} - \sigma_{\text{slave}}}{\sigma_{\text{master}} + \sigma_{\text{slave}}} \quad (1)$$

其中，災後後向散射係數為 σ_{master} ，

災前後向散射係數為 σ_{slave}

雷達植生差異化指數(Radar Vegetation Index Difference, RVID)是運用雷達植生指數(RVI)為利用極化對於散射反應的差異性，表現地表植生的方式，當衛星具有接收雙偏極訊號的能力時，以不同極化組合計算雷達植生指數表現地表植生的方式，在前人研究中 RVI 指標包含多種組合(Freeman et al., 1998 ; Kim and Zyl, 2009 ; Plank, 2016)，然而上述指標皆需採用全偏極的雷達影像進行極化分解，因此本計畫中選擇以 Kao et al.(2010)所提出以雙偏極影像(HH、HV or VV、VH)構成的計算式(2)，該式的計算方式僅需使用雙極化影像就可以完成計算，符合台灣本島目前容易取得的 SAR 影像類型，以前後兩期雷達植生指數相減，即為雷達植生差異化指數(Radar Vegetation Index Difference, RVID)，如式(3)所示：

$$\text{Kao RVI} = 20 \times \log \left(\frac{HV}{HH} \right) \text{ or } \text{Kao RVI} = 20 \times \log \left(\frac{VH}{VV} \right) \quad (2)$$

$$RVID = RVI_1 - RVI_2 \quad (3)$$

在單一指標的判釋成果中，NDSI 可得到比 RVID 法更好的判釋成果，然而 NDSI 在地形起伏的特定坡向上，容易產生極端值而漏判崩塌區域，RVID 指標則因可參考不同極化的比值，可彌補前者的漏判區域，使崩塌判釋結果更一致，因此 NDSI&RVID 的組合法即是運用此一互補特性提升崩塌區域的判釋成果，前期研究中(林俊廷，2021)此組合在莫拉克風災的分類精度 KAPPA 值可達到 38.9%，其建議的指標判別式如式(4)

$$\text{NDSI HV} < \overline{\mu}_N - c\sigma_N \text{ and RVID} < \overline{\mu}_R - c\sigma_R \quad (4)$$

其中， $\overline{\mu}_N$ ：NDSI HV 影像平均值

σ_N ：NDSI HV 影像標準差

$\overline{\mu}_R$ ：RVID 影像平均值

σ_R ：RVID 影像標準差

C：門檻參數，建議起始為 1.5

二、ALOS 崩塌判釋結果

莫拉克災害事件 20090708~20090823 區間的 ALOS SAR 影像判釋結果，移除受地形效應影響像元、河道範圍、坡度 10 度以下區域以及面積小於 1600m² 的區塊，與林務局公布的崩塌目錄套疊成果如圖 3-9，其中黃色區域為 NDSI&RVID 法判釋成果，紅色為光學影像判釋成果，紫色則為兩者同時判釋區域，初步得到像元判釋為崩塌的精確率 21.97%、整體判釋準確率 92%，kappa 值 27.1%。

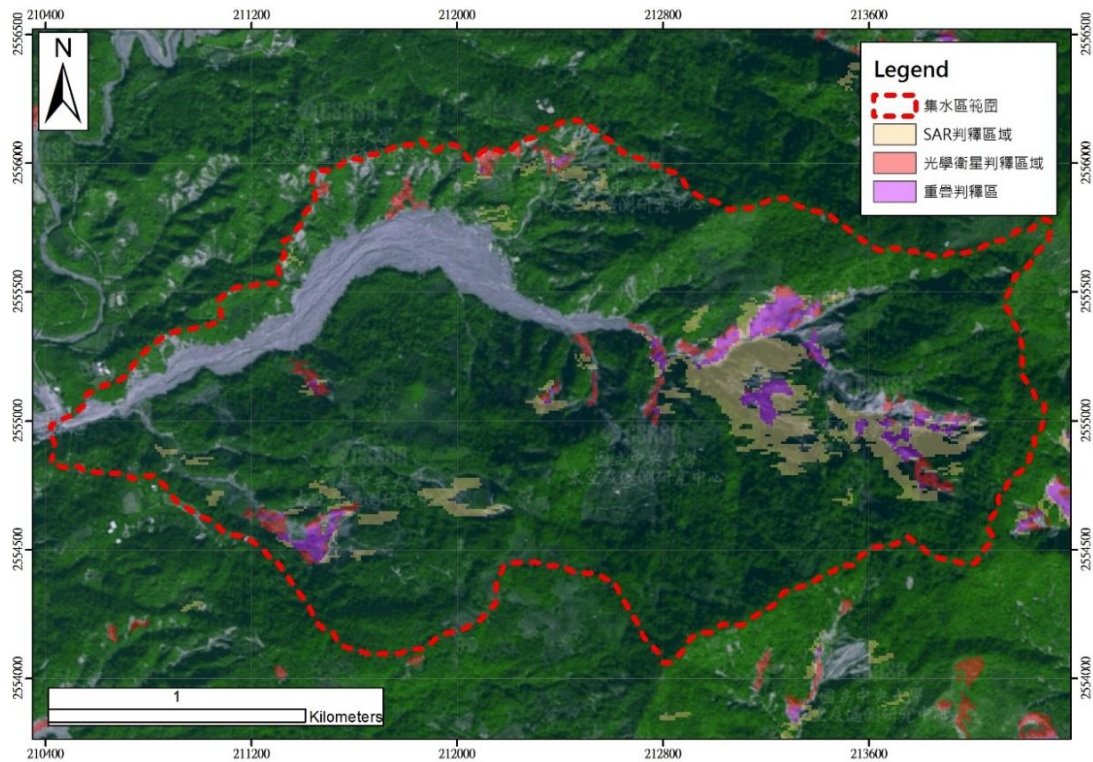


圖3-9 2009 年莫拉克風災崩塌範圍初步判釋成果

然而經仔細比對不同衛星影像的崩塌範圍後，部分位於陰影處的崩塌地，實際上未被光學衛星影像的判釋法發現，因此崩塌地面積有被低估的情形，經重新判釋衛星影像陰影處的崩塌地後，判釋成果如圖 3-10 所示，像元判釋為崩塌的精確率 44.41%、整體判釋準確率 90.97%，kappa 值 42.01%，整體分類精度都有所提升，雖然 SAR 影像因為受制於影像解析度，因此判釋崩塌地的範圍未能如光學影像般精準，但對於判釋出發生的崩塌的區域仍有足夠的參考性，且不受到天候限制，在災時應用能提供另一個快速判斷的基準。

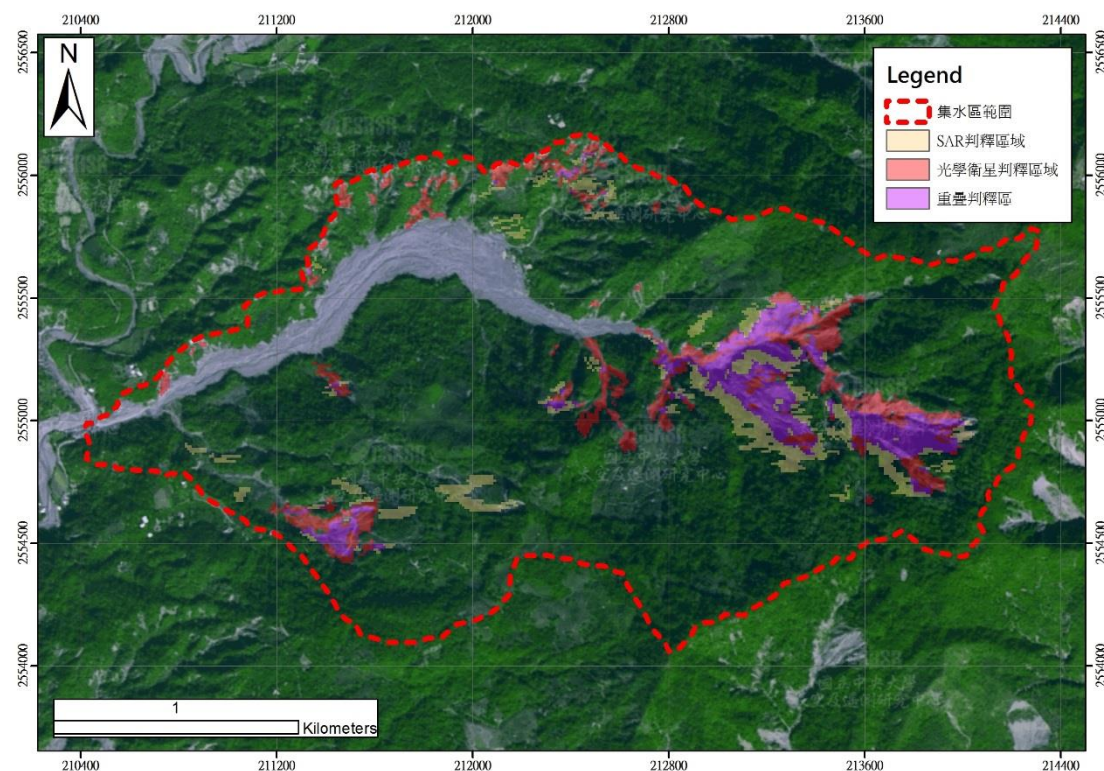


圖3-10 2009 年莫拉克風災崩塌範圍修正判釋成果

三、Sentinel-1 崩塌判釋成果

2021 的 0806 豪雨事件中崩坪坑集水區上游同樣有崩塌擴大的情形，在連日豪雨中難以取得無雲覆蓋的光學影像，因此本計畫運用前述的崩塌判釋技術，以 sentinel-1 衛星的 C-band SAR 影像進行上游崩塌區域的判釋，由於 C-band 影像易受地面植生干擾，初步判釋中會包含了大量雜訊(如圖 3-11)，對真實崩塌情形的判釋效果較不顯著，因此在本計畫中採用堆疊多時序影像的判釋成果，找出重覆判釋的區域如圖 3-12 所示，圖中顏色越深處表示被判釋的次數越多，亦即該處真實發生地表變異的可能性越高，與 2021 年 9 月 4 日的無人載具空拍成果比對後，判釋結果與裸露區域相當吻合，證實了 sentinel-1 SAR 亦能快速的進行判釋工作，但需要更多的影像參與分析，其判釋成效未來將進一步研究，並可應用於災後崩塌地的快速判釋中。

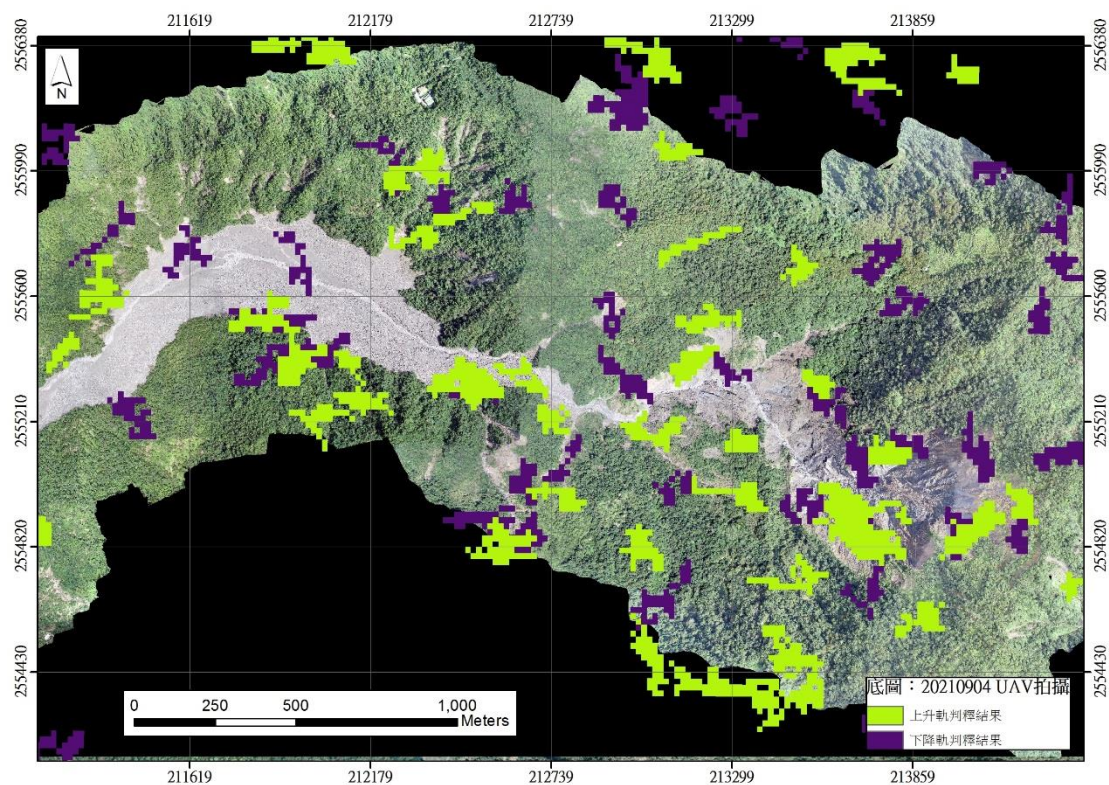


圖3-11 2021 年 806 豪雨崩塌範圍修正初步成果

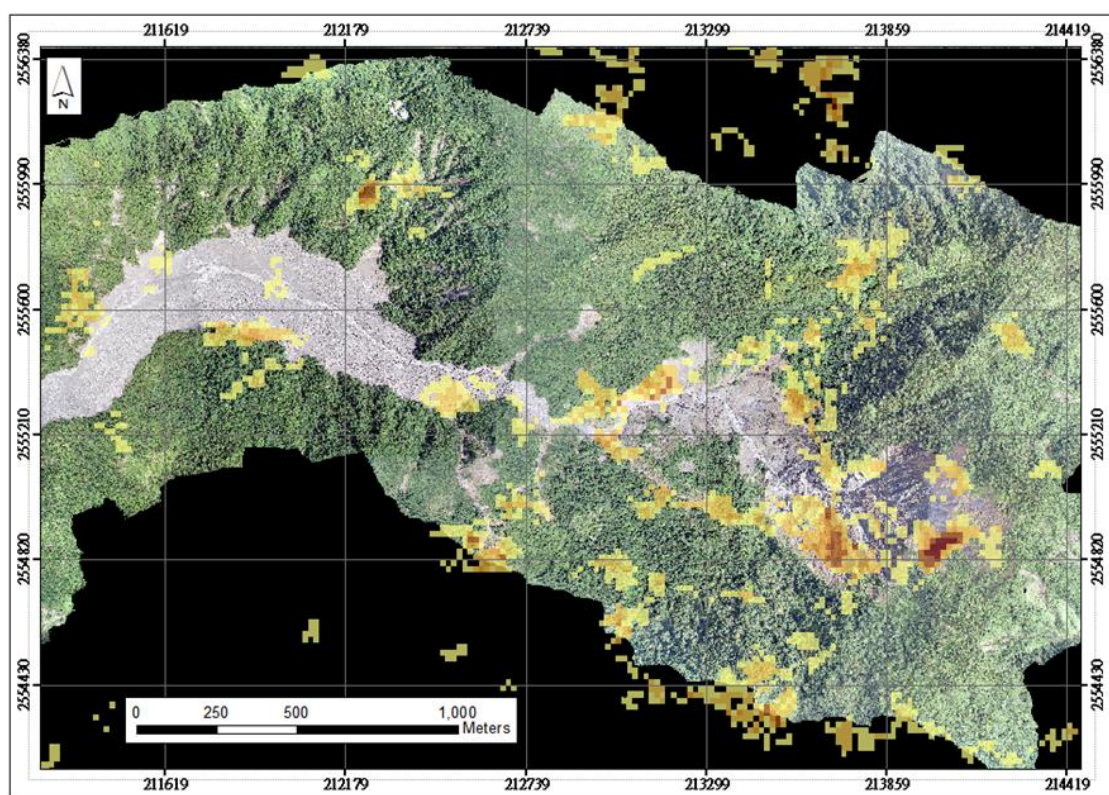


圖3-12 2021 年 0806 豪雨崩塌範圍堆疊分析成果

第四節 坡面土砂生產及變遷分析

一、數值地形資料比對成果

第一期分析時間從 2002~2011 年，兩期 DEM 的變化情形如圖 3-13 所示，這段分析區間遭受了 2009 年的莫拉克颱風，也是主要崩塌區發生破壞的階段，對照 2009 年之前的衛星影像圖，崩塌區域已有蝕溝發育，沿著蝕溝有小規模坍方，到 2009 年時才發生大規模的破壞，從變化圖可以看出崩坪坑溪上游崩塌地發生後，大量土石堆積於河道平緩處，因 2002 影像資料是以航空攝影測量取得，因此去除植被的效果較差，在原先植生茂密的區域發生的地形變化與實際情形會有比較大的誤差。

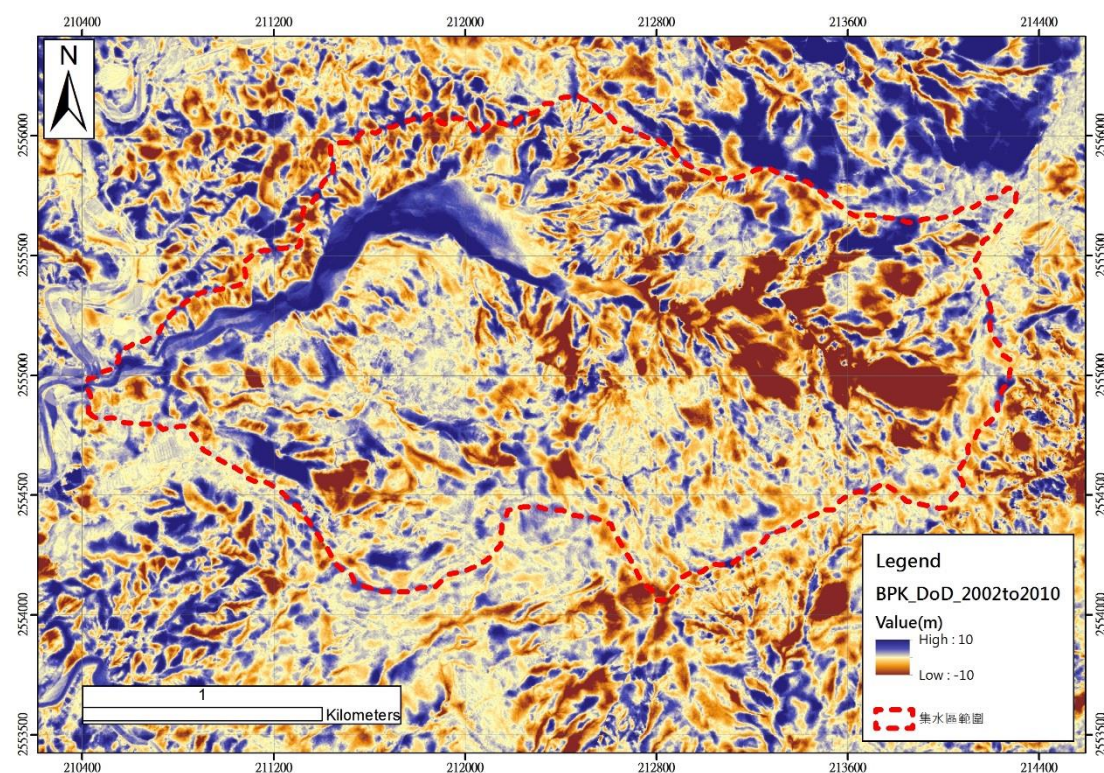


圖3-13 2002 至 2011 年地表變形

第二期分析時間從 2011~2017 年，以 DMC 航拍影像建置一幅 2015/12/19 的數值地形 DSM，與 2011、2017 兩幅航空光達 DSM 的變化量如圖 3-14、圖 3-15 所示，在 2011~2015 年間上游崩塌地受到了 2012 年 6 月的西南氣流、2013 年潭美颱風兩次累積雨量超過 1000mm 的降雨事件影響，持續擴大並流出土砂，而在 2015~2017 年間則有 2016 年尼伯特颱風的降雨事件，上游崩塌仍有擴大，但土砂產出稍有減少，土砂運移並堆積至河谷開闊處。

由於 DMC 航空影像的精度略差，因此另以前後期航空光達製做的 DEM 分析 2011~2017 年的變化情形如圖 3-16 所示，這段分析區間崩塌區進一步破壞，崩塌範圍擴大到稜線邊界上，由於前一次事件中河道寬度從原先的 50 公尺增加到 200 多公尺，導致此次的土石堆積的位置更靠近河道的入口處。

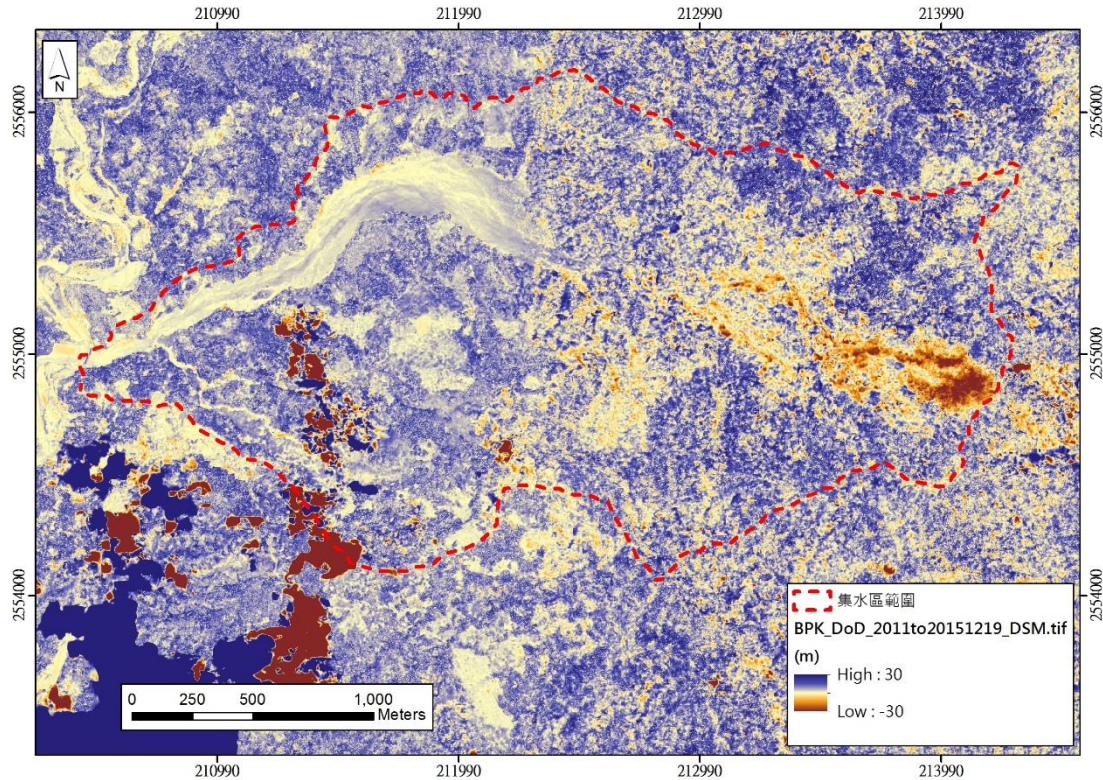


圖3-14 2011 至 2015/12/19 DSM 地表變形

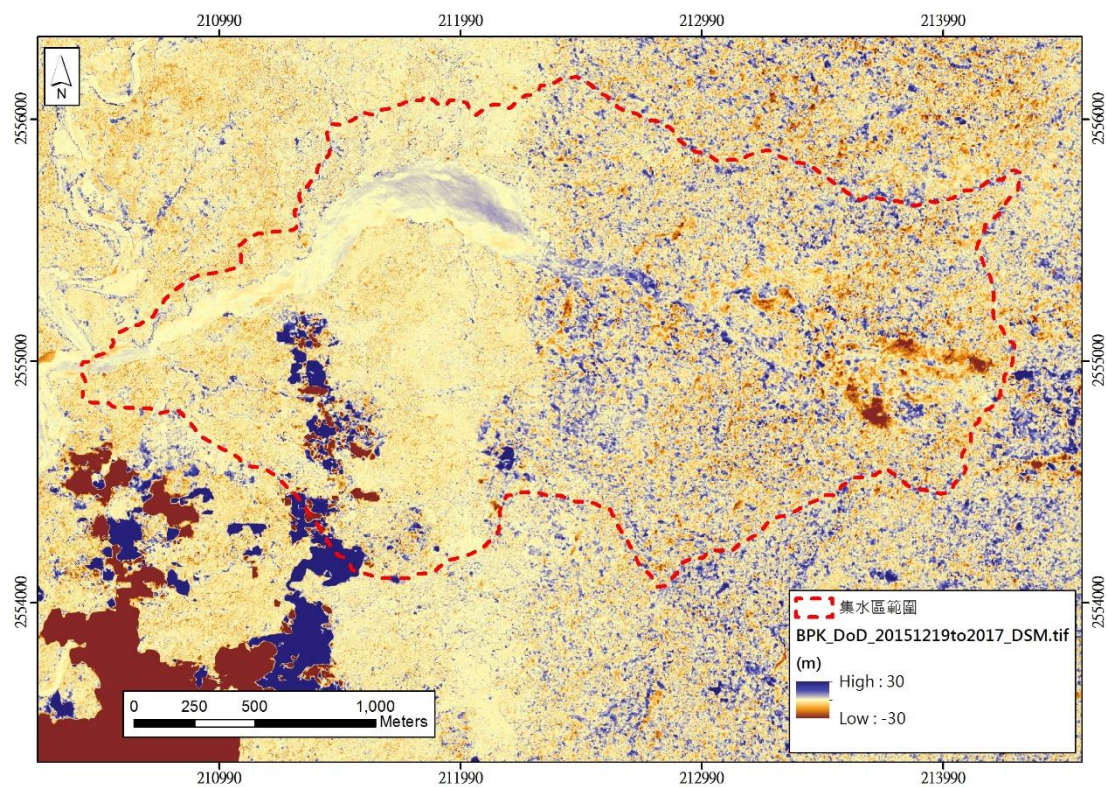


圖3-15 2015/12/19 至 2017 DSM 地表變形

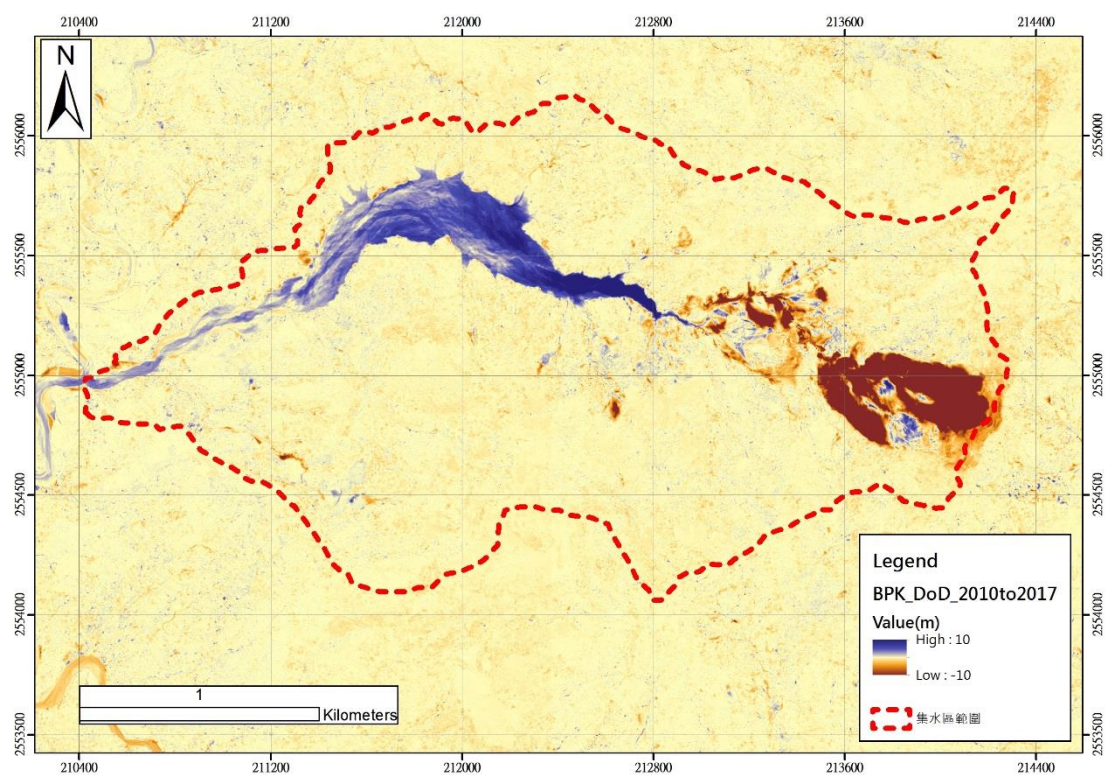


圖3-16 2011 至 2017 DEM 地表變形

第三期為 2017~2018/1/26，由航空光達產製的 2017 年 DSM、以 DMC 航拍影像建置 2018/1/26 的 DSM，分析之地表變化如圖 3-17，此區間並無致災降雨事件，因此上游崩塌地略有掏刷之外，整體地貌並無太大變化。

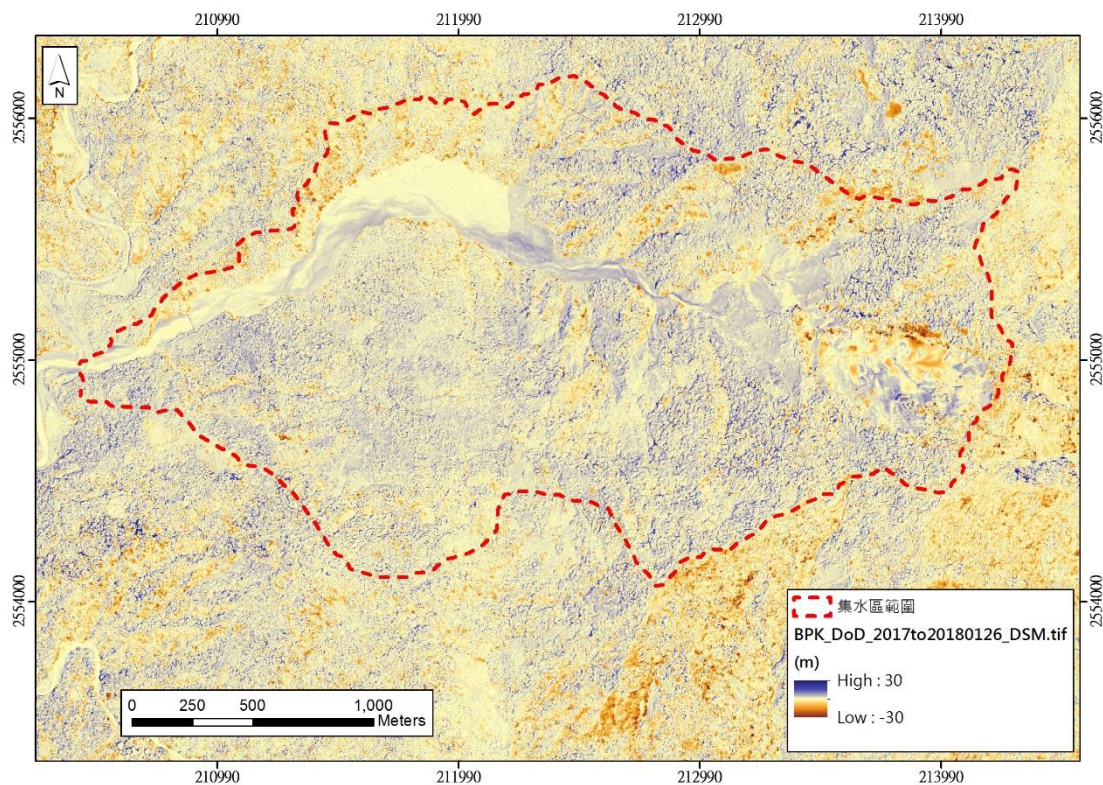


圖3-17 2017 至 2018/01/26 DSM 地表變形

第四期為 2018/1/26~2021/9/4，此區間包含 DMC 航拍影像建置 2018/1/26 的 DSM，以及本計畫以 UAV 拍攝建置的 2021/09/04 DSM 進行分析，分析成果如圖 3-18 所示，此區間包了 2018 年 8 月的熱帶低壓強降雨、2019 年 8 月的豪雨事件以及 2021 年 7、8 月豪雨等事件影響，上游崩塌地進一步朝稜線發展，崩塌範圍明顯擴大，中下游河道平緩處大量堆積流出的土砂，河床兩邊也受到侵蝕作用影響，使部份河床斷面增加約 20 公尺。

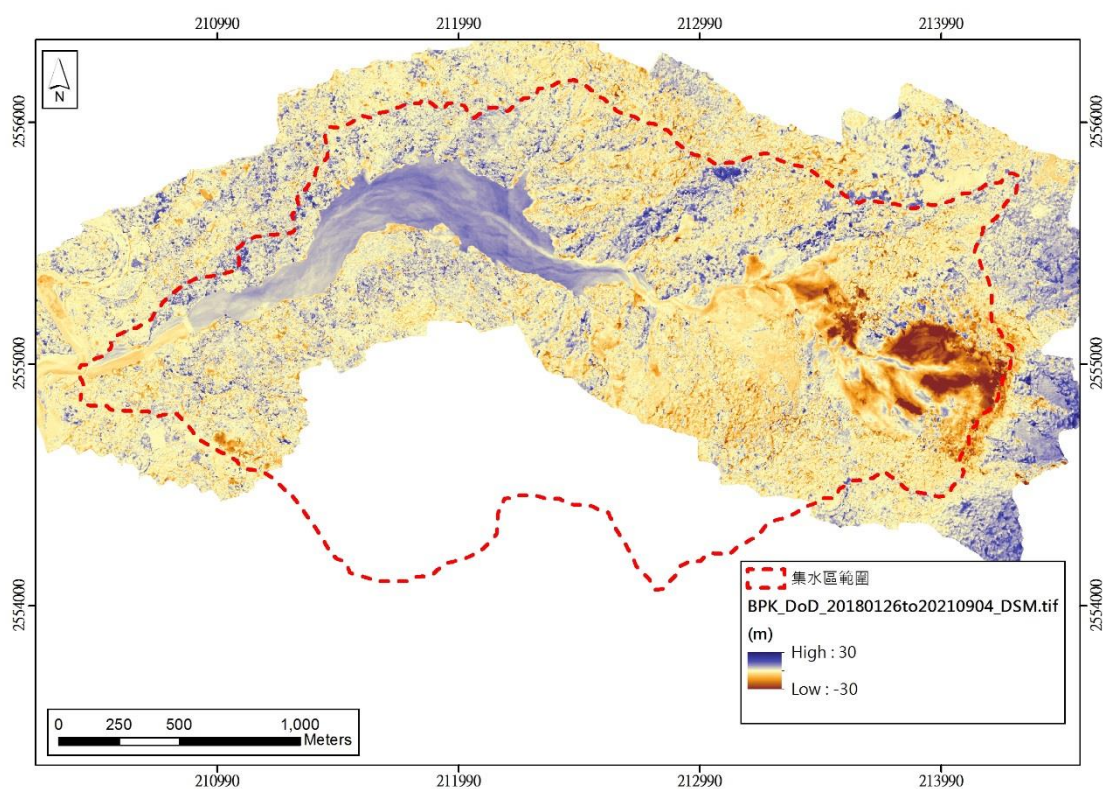


圖3-18 2018/01/26 至 2021/09/04 DSM 地表變形

計畫執行間的 2021/08/06 曾發生豪雨事件，進一步分析此期間的集水區變化，從前面第三期的分析中可發現 2017~2018 年間地貌並無明顯變化，因此直接以精度較高的 2017 年航空光達掃描的 DSM 與本計畫以 UAV 拍攝之 DSM 進行分析，以取得河道的沖淤變化。

於 2021/04/14 日 UAV 拍攝範圍僅含下游河道堆積區，經選取參考點完成影像校正，彌補了原先因控制點不足的影像變形，重新分析後 2017 至 2021/04/14 的河床變化如圖 3-19 所示，分析結果發現此一區間的土砂運移至谷口開闊平坦處，從上游進入谷口的中游位置約增加了 6~10 公尺的堆積量體，但尚未往下游處運移。

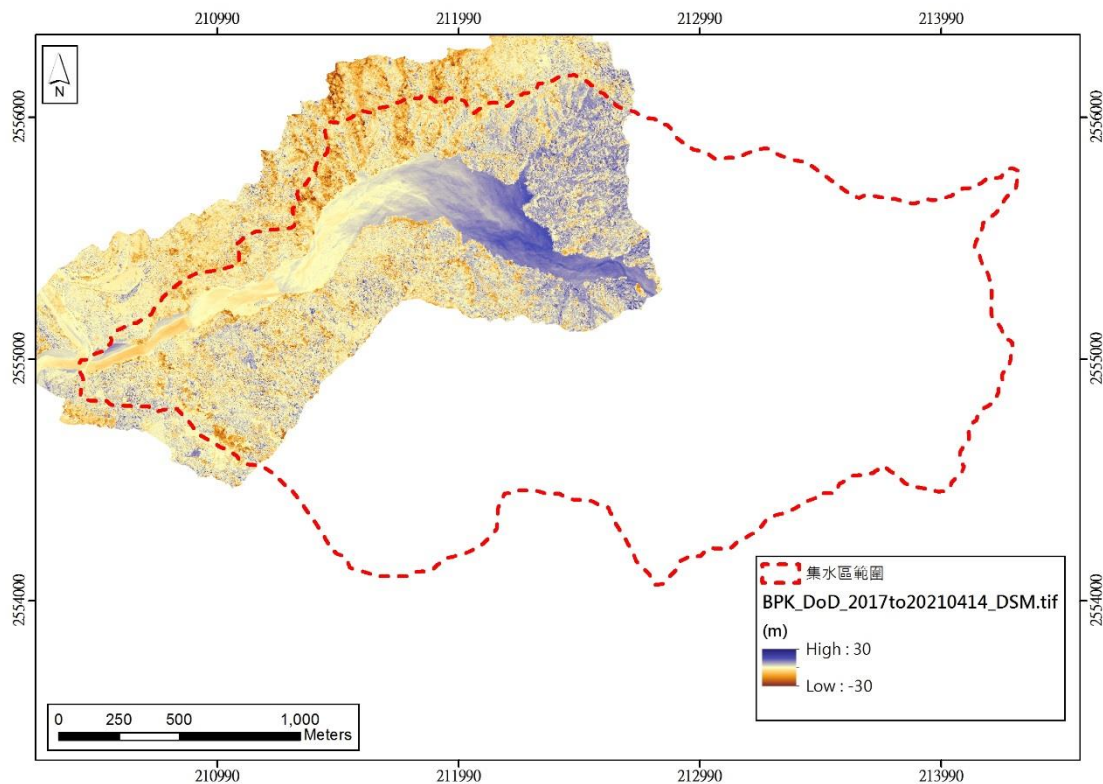


圖3-19 2017 至 2021/04/14 DSM 地表變形

2021/04/14 及 2021/09/04 兩次的 UAV 拍攝 DSM 變化如圖 3-20 所示，在這期間發生的 0806 豪雨事件從中上游區域運移了大量土砂至下游河道處，並將下游處三座防砂壩淤滿，在圖 3-21 (a)中展示了兩時序間三座設施的淤積情形，可看出原防砂壩的壩體落差幾乎已經被填平，對照圖 3-21 (b)、圖 3-21 (c)兩幅前後期的正射影像，接近中游位置的防砂壩淤積深度達 5~10 公尺，現已經被土砂完全淤沒，下游的梳子壩淤積了約 3~6 公尺，最下游的防砂壩約淤積 1~2 公尺，原有的三座防砂壩剩下游的兩座能從空拍影像中辨識。

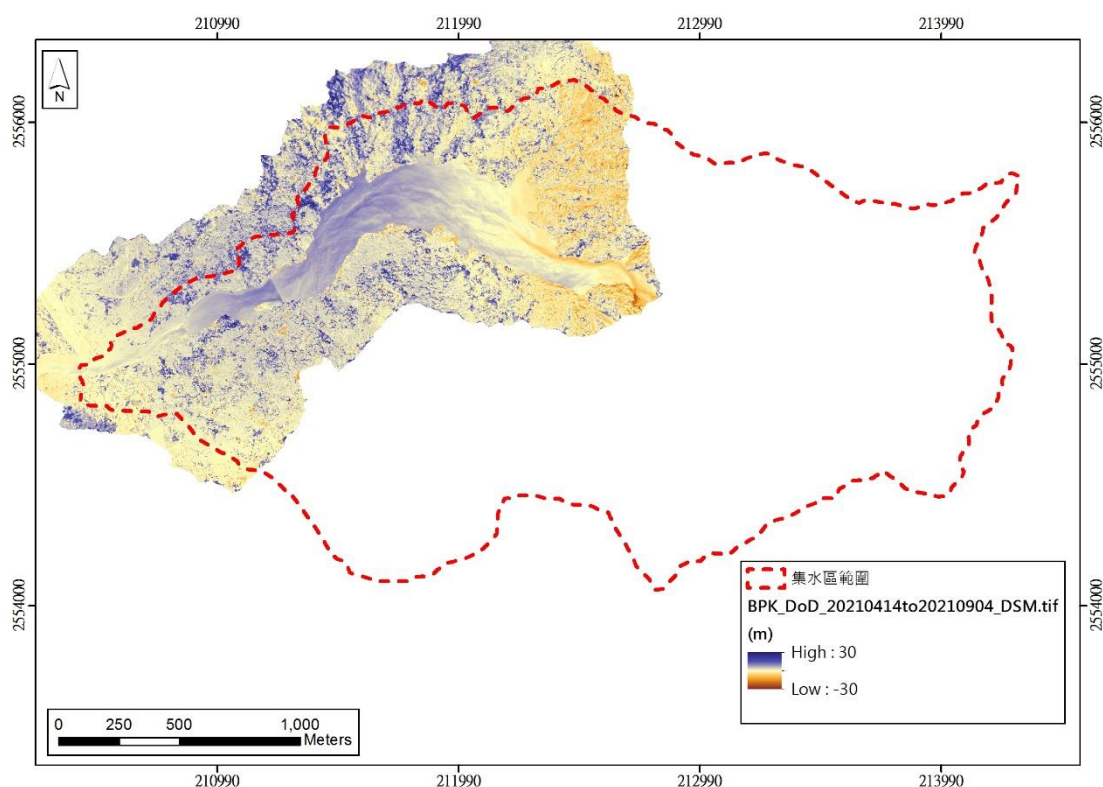
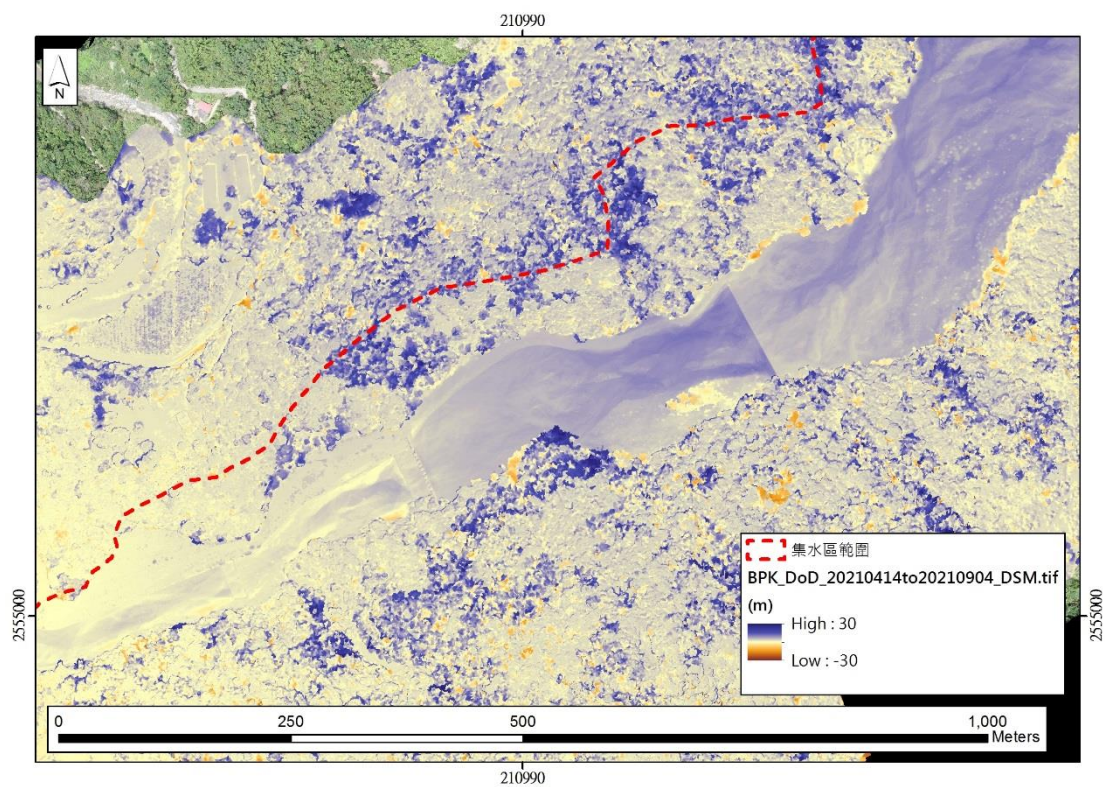
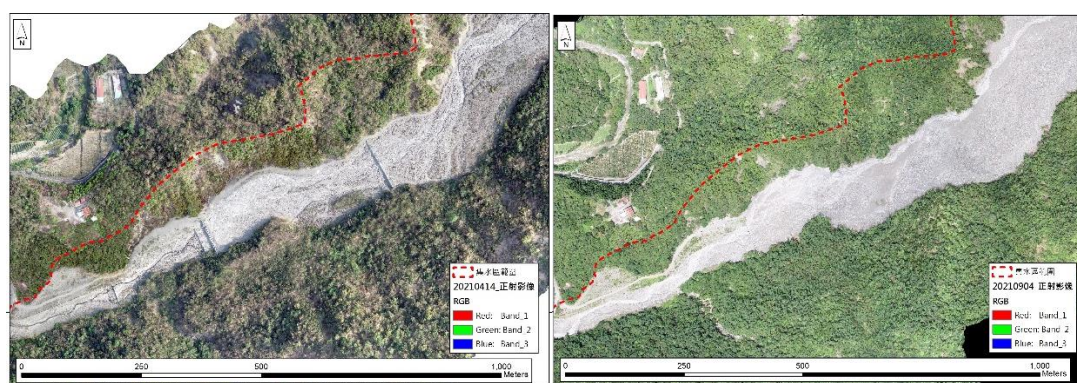


圖3-20 2021/04/14 至 2021/09/04 DSM 地表變形



(a) DSM 變化圖



(b) 2021/04/14 正射影像

(c) 2021/09/04 正射影像

圖3-21 2021/04/14 至 2021/09/04 下游變化圖

本子計畫以上游崩塌地擴大產出的土砂量為關注重點，因此從整合計畫團隊蒐集並校正的歷年 DSM 變化中觀察崩塌區域的變化，圖 3-22 為本計畫於 2021/09/04 拍攝之上游崩塌地正射影像，此崩塌範圍為崩坪坑溪的主要土砂生產來源，從歷年分析中呈現逐年擴大的趨勢，從其中取 A-B 剖面線，繪製歷年地形剖面圖如圖 3-23，歷年剖面變化中以 2002~2011 年間變化最大，滑動深度最深約 50 公尺，2011~2015 年間，崩塌位置繼續向上發展，滑動深度約 30 公尺，2015~2017 年間剖面兩側失去穩定的塊體滑落，但 A-B 剖面並未有明顯變化，大致維持原本高度，2017~2018 也無致災事件發生，滑動面並無擴大情形，剖面也與前兩期略同，而在 2018~2021 崩塌朝上緣及兩側發展，對照 2018~2020 年間的衛星影像，崩塌地並無明顯變化，而在 2021/09/04 的拍攝影像中崩塌則有擴大情形，由此可推測出此滑動量的致災事件應為本年度 6 月及 08/06 豪雨事件所導致，滑動深度約達 40 公尺。

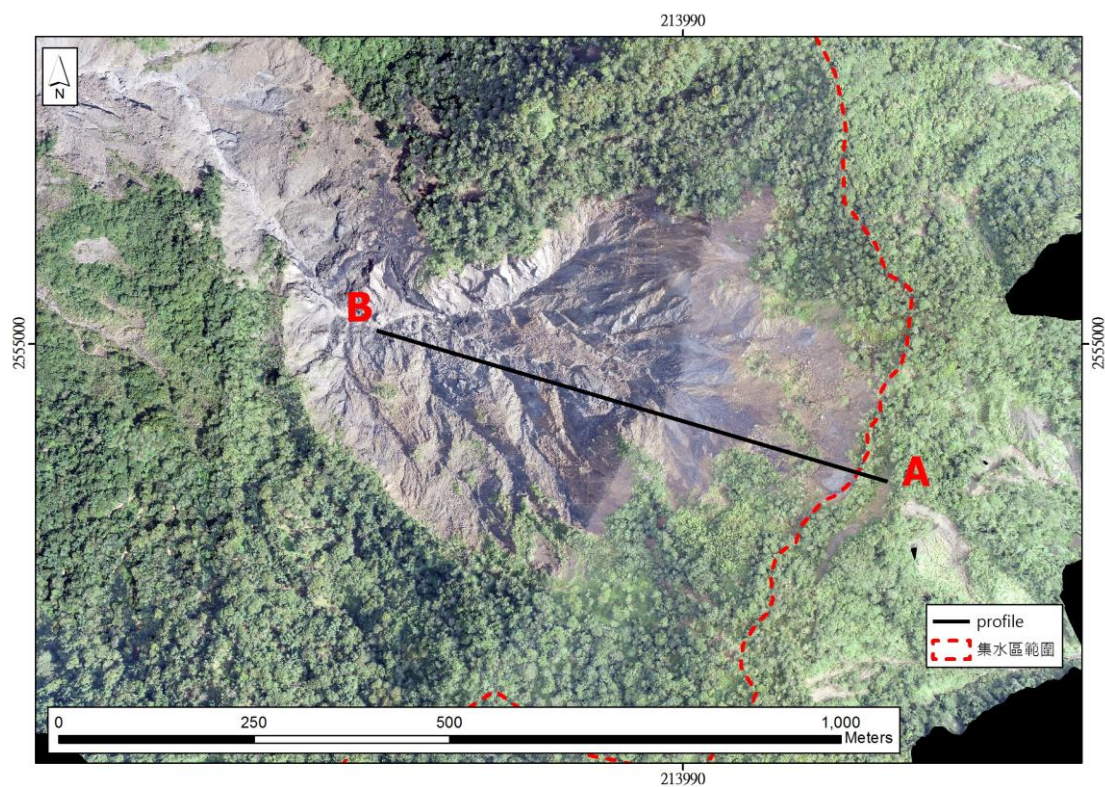


圖3-22 崩塌剖面位置

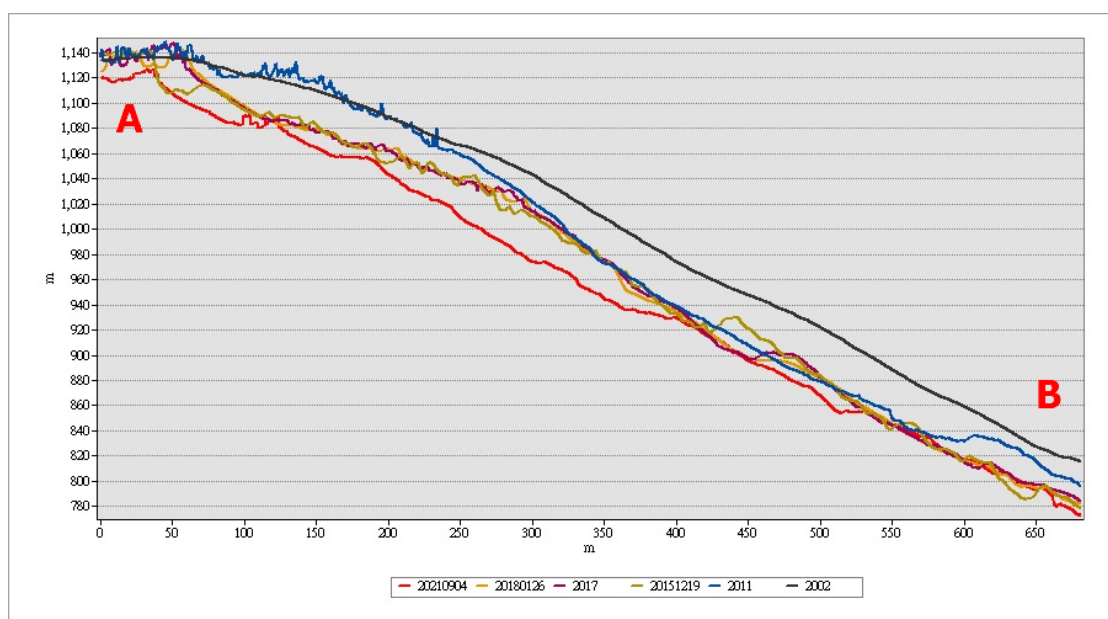


圖3-23 2002~2021 年間崩塌地剖面變化

二、SBASInSAR 坡地潛變區域範圍分析

DInSAR 技術在理論上的可獲得地形上的小變形，但事實上僅有單一像對時大變形（數公分）比小變形來的可靠，如果要能偵測到可靠的小變形，需要倚靠其他方式如干涉堆疊技術或 SAR 相位時序分析等方法，其中干涉堆疊技術常用的方法包含永久散射體法（PSInSAR，以下簡稱 PS 法）及短基線法（以下簡稱 SBAS 法）兩種主流分析法，其時空基線分別如圖 3-24 及圖 3-25 所示，由圖中 PS 法採用單一主像對應其他副像，計算時間較少，而 SBAS 法則採用參考主像方式，於設定之時空範圍內均可進行解算，計算時間為 PS 法數十倍以上；於實際應用上，PS 法需要較多幅影像且同調性要求較高，較為適用於人工構造物之變形偵測，而 SBAS 法可減少雷達影像且同調性僅需 PS 法一半，適用於自然環境之變形偵測，於山坡地變形偵測時由於通常人工構造物不夠密集，使用 SBAS 法較能獲得較佳之變形偵測結果，而分析流程與前述差分干涉合成孔徑雷達分析相同，但增加地表變形模式模擬，由於分析像對較多且時間間隔僅 12 天，假設兩幅間之變形模式為線性，加之 SBAS 法連續處理中，以高精度參考數值地形、地面控制點以及大氣修正等步驟，可藉由多時序的連續分析有效提升精度。

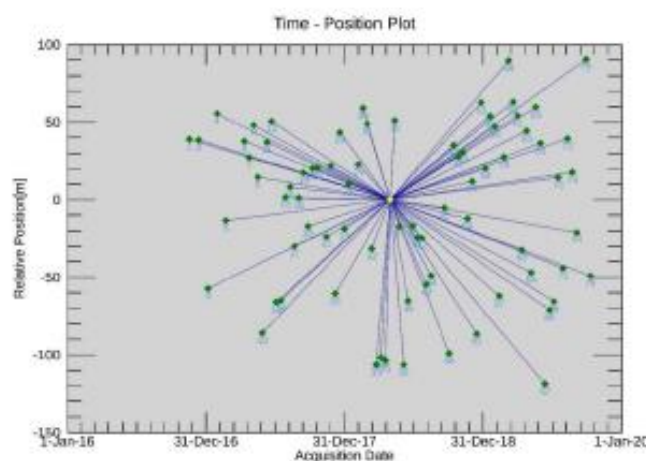


圖3-24 永久散射體之時空基線

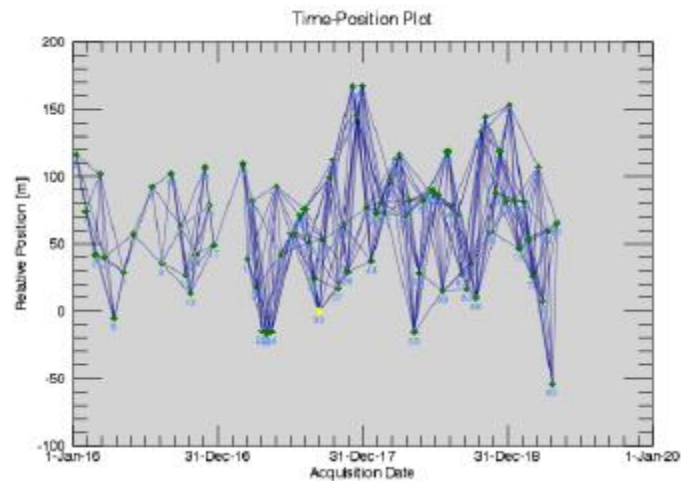


圖3-25 短基線法之時空基線

使用差分干涉合成孔徑雷達分析方法及干涉堆疊技術之 SBAS 法，可以獲得多時序之地表變形資料，可有效的偵測滑動塊體及其範圍與規模，過去常運用於火山活動、地層下陷等活動的觀測，而大規模分析時地表變形資訊可能包含地表下陷及隆起，如隆起區位在地表下陷區高程下邊坡，則可明顯區別地滑範圍，然而差分干涉技術有相位極限的限制，一但滑動量過大達到了相位飽合，則會使相位去相關，此變形量將無法被探測，因此在遭遇致災事件實，需搭配其他分析方法已確認滑動資訊是否合理。

在研究中的地形變化分析中，於 2006~2011 年之前的分析採用 20 幅 ALOS SAR 影像進行 SBASInSAR 分析，分析成果如圖 3-26 所示，從圖中可發現位於發生崩塌的區域之上，地表變形速率明顯快於其他區域，約以 30mm/yr 的速率移動，這顯示了此崩塌區處在崩塌發生的潛變階段，且有持續發展的跡象，因此根據滑動速率的探測結果與數植地形陰影圖繪製崩塌的崩崖位置，供後續分析與評估應用。

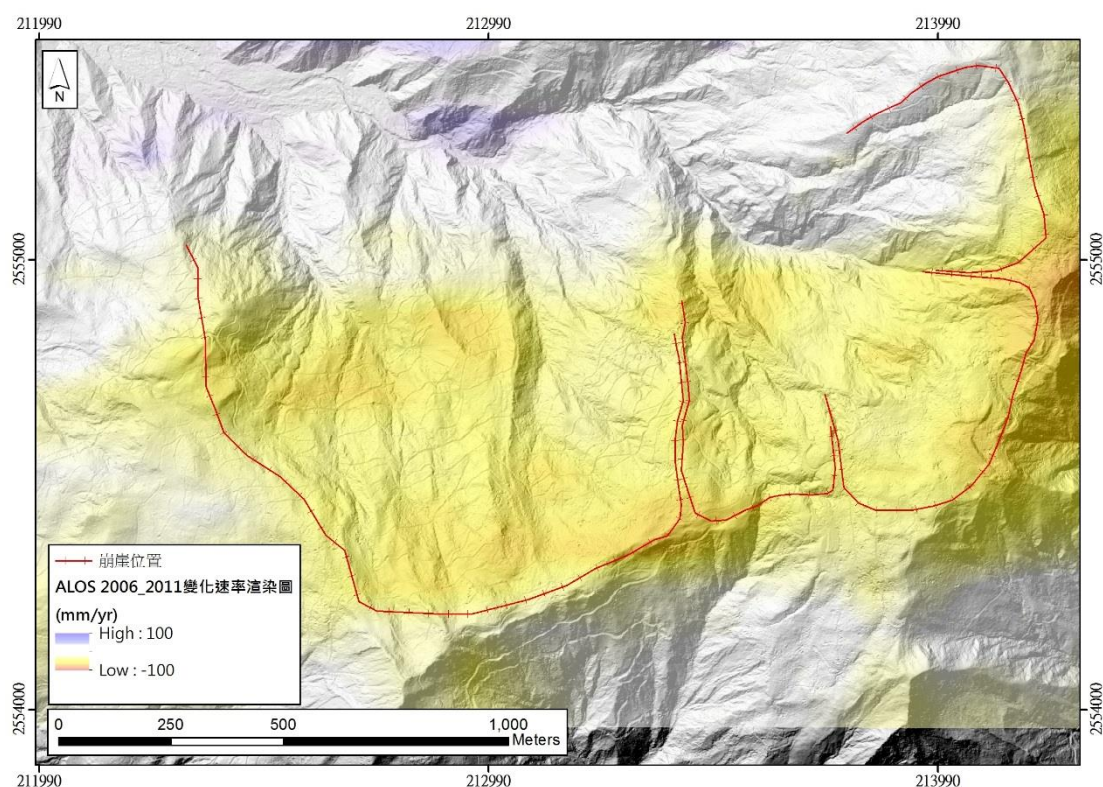


圖3-26 2006~2011 ALOS 垂直變形速率圖

從圖 3-27 圖中 A1 點檢視各時序的位移量如圖 3-28 所示，此處在莫拉克風災的崩塌發生前後，地形皆有繼續滑落的情形，對照發生崩塌的位置，觀測出的潛變區位於現生崩塌範圍之上，且在觀測時間內仍是植生茂密的區域，此一變化區應為後續崩塌地擴大的潛在範圍，後續仍需進一步分析。

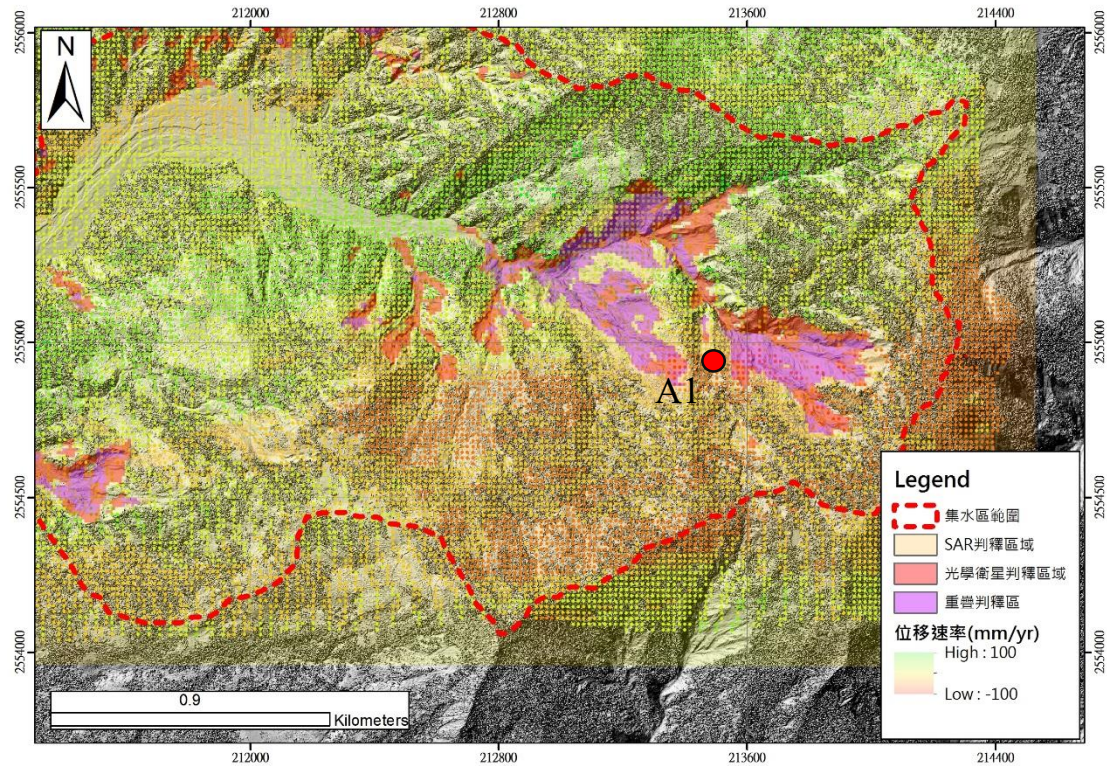


圖3-27 ALOS 崩塌判釋與潛變區域速率圖

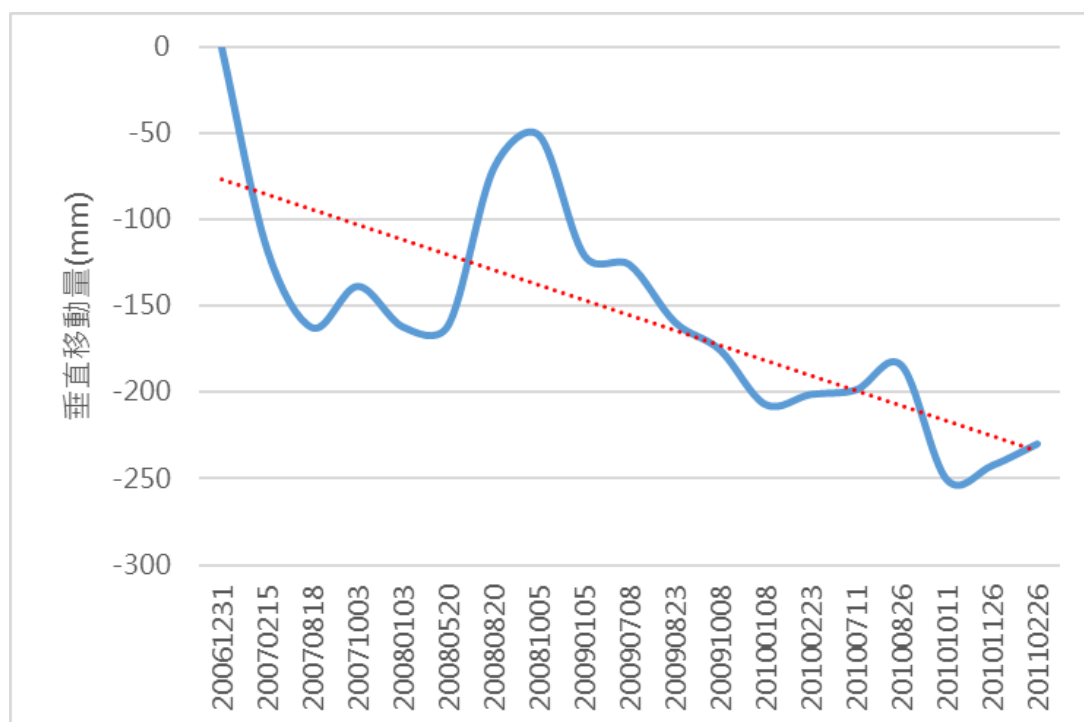


圖3-28 A1 各時序位移量變化圖

前述分析中的 ALOS 衛星受限於資料採集頻率，故分析中多採用上升軌資料，而在 Sentinel-1 衛星資料中則有充足的上升及下降軌影像，由於衛星軌道影響著雷達波入射方向，亦即其受地面效應影響的範圍不同，比如軌道編號 69 入射方向約略為由東方入射，此時坡向朝東較為適合，而軌道編號 105 入射方向約略由西方入射，此時坡向朝西較為適合，由於不同軌道對坡向分析的結果會有所差異，因此應盡量以兩個入射方向同時加以考量。

基於前述使用差分干涉合成孔徑雷達分析方法及干涉堆疊技術之 SBAS 法，分別以 sentinel-1 上升軌 121 幅影像、下降軌 106 幅影像分析之位移速率圖如圖 3-29、圖 3-30 所示，由於上升軌影像在西南坡向上有比較嚴重的地形遮蔽，因此分析的潛在滑動範圍不會完全一致，在圖中所判釋出的變動活躍區域，上升軌約在-20~-50mm/year 的範圍，下降軌約在-20~-100mm/year 之間，但在朝西北坡向的崩塌面上皆有明顯的滑動情形發生，對照前期數值地形資料的變化，潛變的滑動區域可觀察出與崩塌區域一致，且皆位於光達日照陰影影像可判釋的崩崖之中，因此可以此分析法評估出潛在的崩塌範圍，做後續的崩塌範圍追蹤。

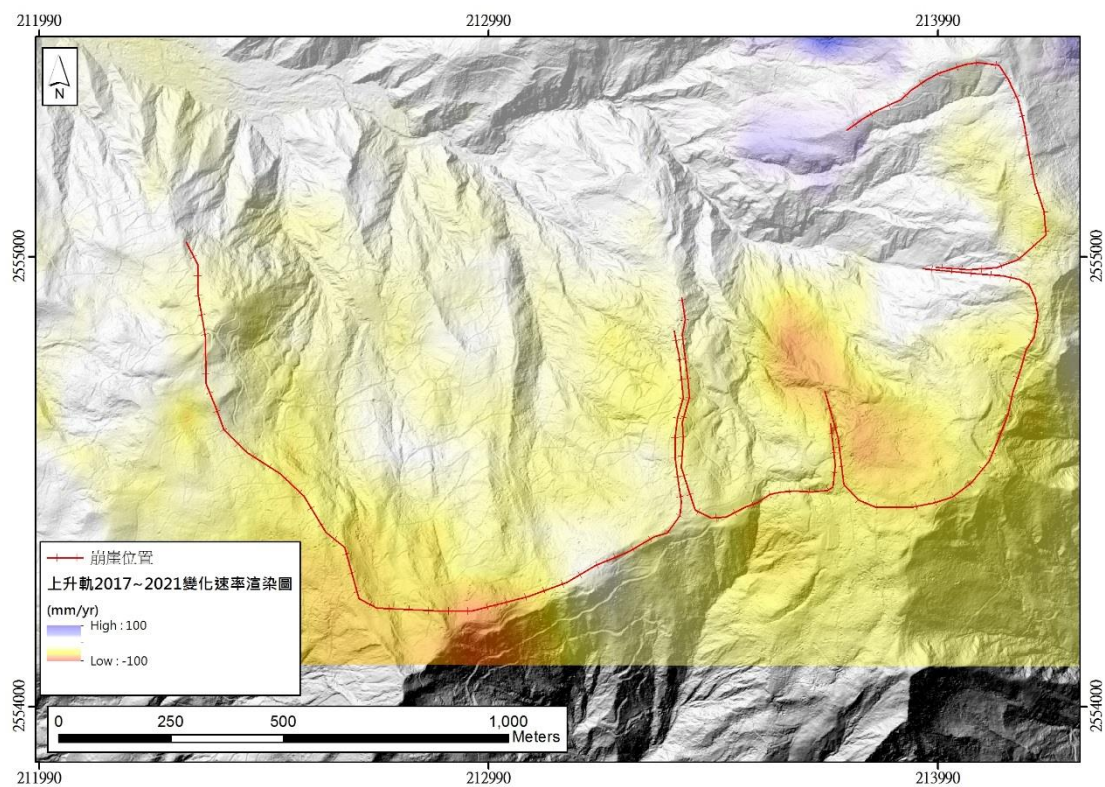


圖3-29 2017~2021 上升軌垂直變形速率圖

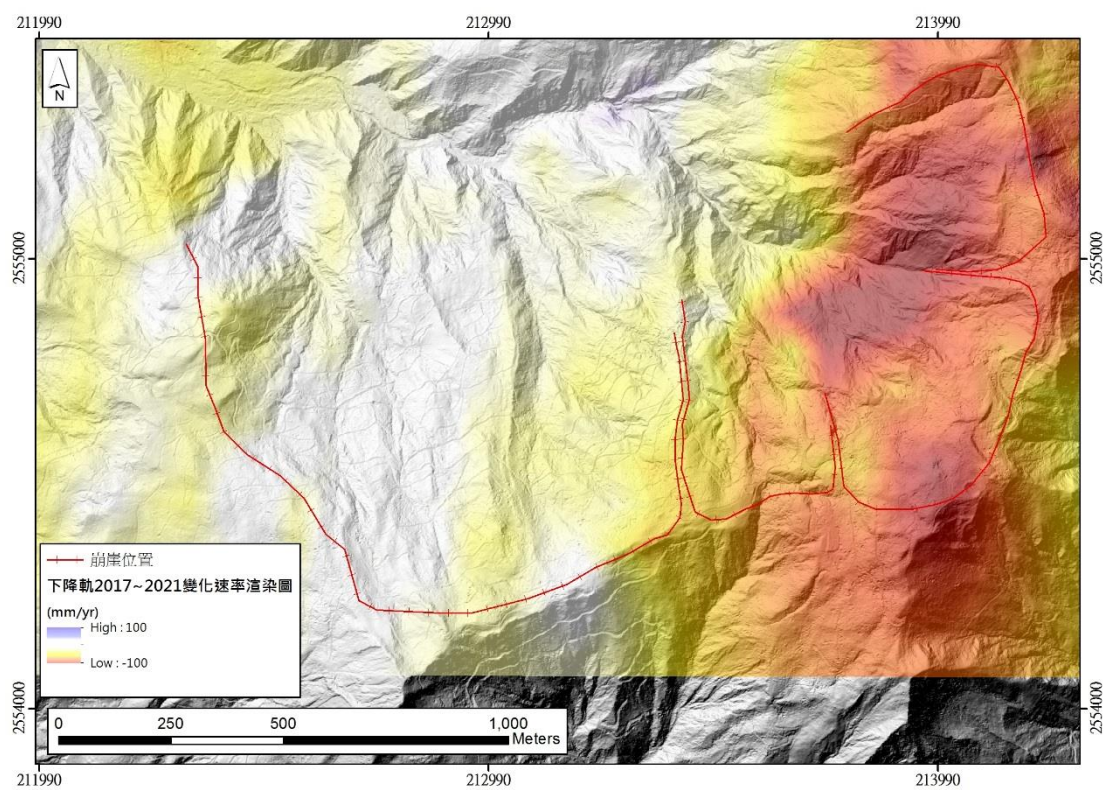


圖3-30 2017~2021 下降軌垂直變形速率圖

為了解整體崩塌區域的潛在變化範圍與實際崩塌區的變化之間的關聯性，將 2002~2021 年的數值地形變化製作圖 3-31，圖中位於潛變區中的 P1、P2 兩點為 SBASInSAR 的觀測點，其中 P1 為 2015 年之前未發生崩塌，而於之後發生崩塌之一點，P2 表示位於崩崖處，持續發生潛變的一點，此兩點後續將用以分析其變化情形。

本計畫將 ALOS、Sentinel-1 兩種衛星資料經 SBASInSAR 計算後，將觀測的變化資訊以時間序列合併後製作觀測變化量與日雨量組體圖，其中皆以 ALOS 結合 sentinel-1 的上升與下降軌變化資訊，P1 點的變化如圖 3-32、P2 點的變化如圖 3-33，由於 ALOS 衛星資料僅到 2011 年，Sentinel-1 則是從 2017 年開始，因此中間有 5 年的空窗期未能採計變化量。

在圖 3-31 的 P1 點上，其數值地形變化已經超過 40 公尺，但在 SBASInSAR 的累積變化量中（圖 3-32），此處僅有 50 公分左右的變化，此原因緣自於在差分干涉的分析中，當變化量超過相位的探測極限後，此變化量將無法被觀測，而在此崩塌地自莫拉克風災以來，崩塌面積在屢次的豪雨事件中都有所增加，其累積位移量在如 2018、2021 等年份中的重大降雨事件中因已超出相位限制，並不直接出現變化，而是在降雨事件過後一段時間，仍不穩定的土砂持續滑落而累積位移量，此類不穩定的土砂通常位於現生崩塌之上，而後在之後的降雨事件中發展為新的崩塌地。

P1(圖 3-32)、P2(圖 3-33)兩處的觀測點在 ALOS 衛星的觀測階段中皆仍是植生茂密的區域，兩點在潛變區間的滑動量約累積到 100~150mm 之間，但在 P1 點發生崩塌發生之後，其累積的位移量則急遽的增加，最終累積了約 50 公分左右的變位量，平均變化速率約-81mm/year，而未崩塌的 P2 點則以較緩慢的變化累積至 30 公分的變位量，平均變化速率約-61mm/year，此情形在其他區域有相同的現象，

但受限於軌道差異，上升軌與下降軌入射角不同，會受不同坡向的地形效應影響，探測結果未必能完全一致，在此崩塌區域中，下降軌的分析結果明顯優於上升軌的成果，這點與預測結果一致。

以差分干涉探測的位移數據雖受到變化相位的限制，難以直接評估真實崩塌量體，但其能清楚的顯示地質不穩定的區域，未來可根據變位速率的變化，對後續崩塌潛勢區域進行評估與應用。

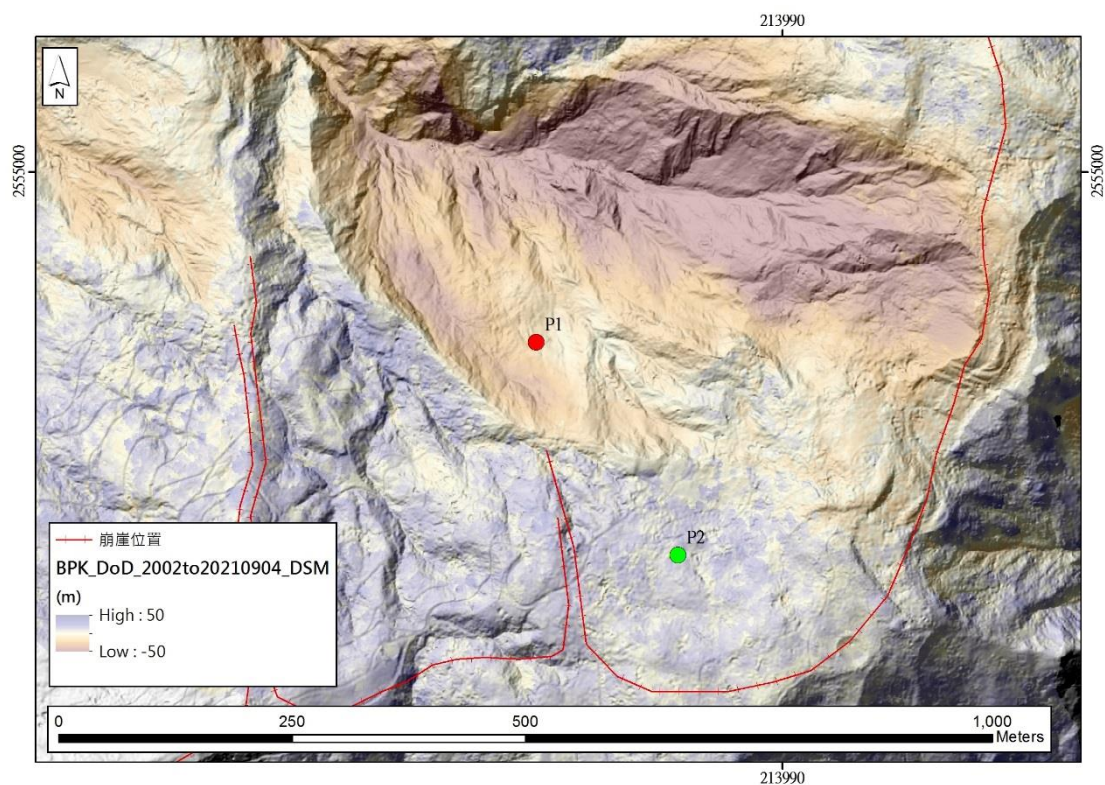


圖3-31 2002~2021 DSM 變化量

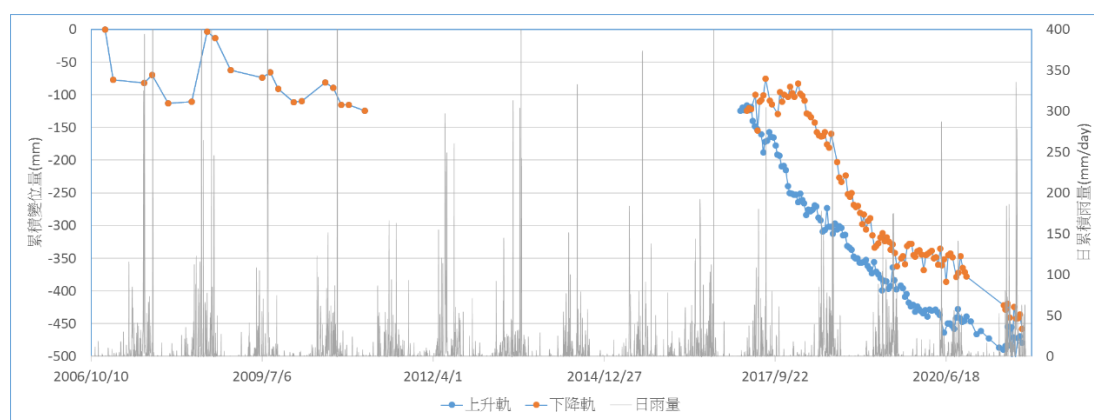


圖3-32 ALOS 與 sentinel-1 P1 點累積位移量

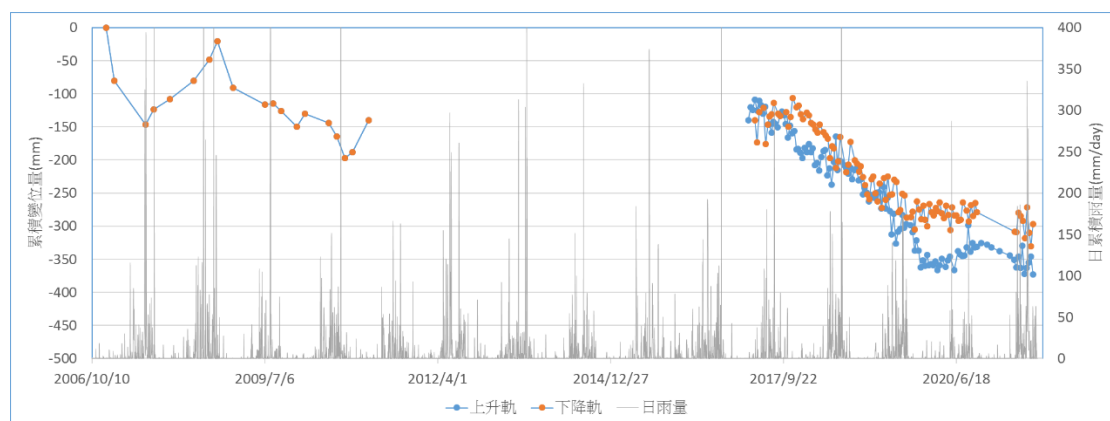


圖3-33 ALOS 與 sentinel-1 P2 點累積位移量

第五節 滑動深度及量體分析

從前述的崩塌地形判釋結果與 SBASInSAR 分析中，對於崩塌的潛在滑動區已有大致範圍的了解，因此在本節處將進一步以前期 DInSAR 的地表變形量分析結果，運用彈性錯位理論的 Okada 模型進行潛在滑動面的反演算，為此先勾勒出變形區域(如圖 3-34)該數值為後續進行反演算使用，此變化區域的土砂量體以 2011 年至 2021/9/04 的 DSM 變化進行統計，這段區間共流失了土砂量約 250 萬立方公尺，此坡面現生崩塌地呈現西北向，然而從地表潛變的坡面觀察，此坡面未來崩塌的斜坡單元應會朝北向發生崩塌。

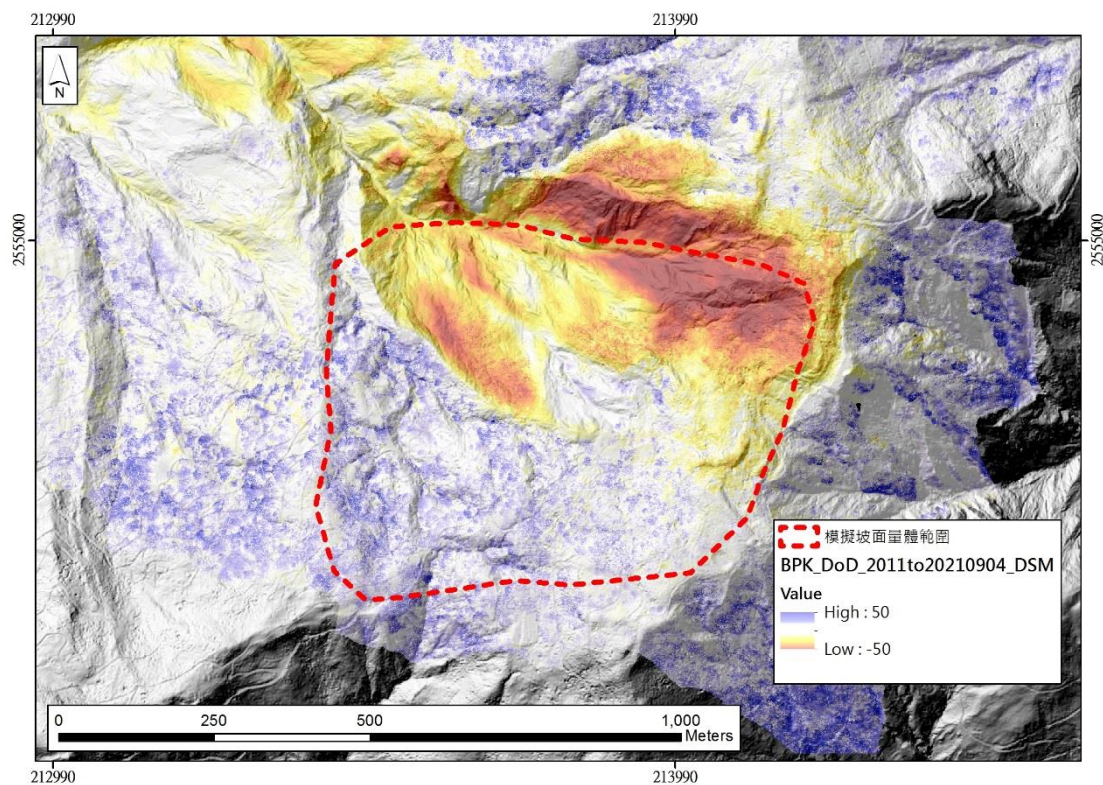


圖3-34 模擬坡面土砂變化量體統計範圍

用於反演算的影像為 2009/10/08~2021/01/08 年的 ALOS DInSAR 分析成果，該時期剛經過莫拉克風災影響，甫經擴大的崩塌地尚未恢復穩定，探測的地表微變量可用於進行滑動面的模擬，該期影像中的地表變化圖如圖 3-35 所示。

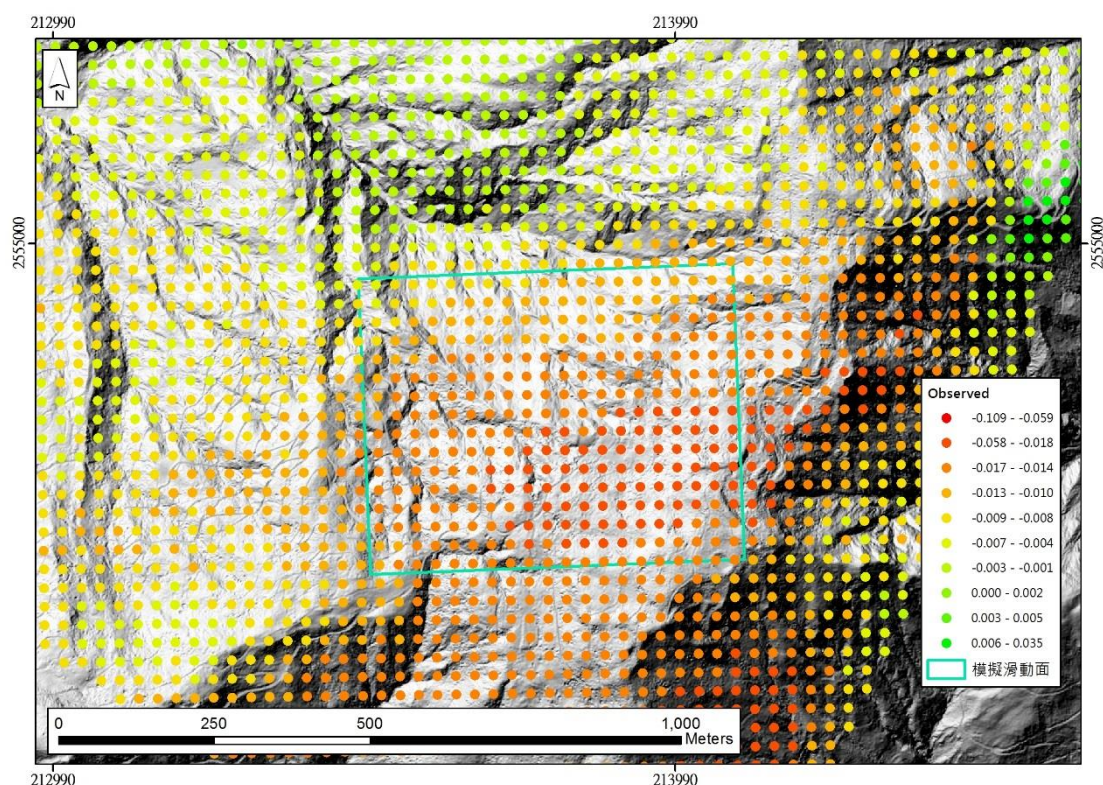


圖3-35 2009/10/08~2021/01/08 DInSAR 分析地表微變量

本計畫中使用 ENVI SARscape 進行滑動面模擬，其中假設坡面朝約北側移動，約束分析參數，分析結果如表 3-6 所示，而依此滑動面所模擬的變形量如圖 3-36 所示，滑動面模擬的變形量與 DInSAR 分析的變形量，兩者相差的殘餘值如圖 3-37 所示，從滑動面的模擬中分析出滑動面的長為 539.4m、寬 601.7m，頂部滑動深度 34.7m，傾度 28.1 度，傾度與此處地層坡度接近，視為滑動面平行地層表面，對比 2011 年之後擴大的崩塌面積中，崩塌最大深度約在 30~40 公尺之間，初步檢核滑動面參數後確定滑動面符合現況。

表3-6 滑動面模擬結果一覽表

WIDTH(m)	LENGTH(m)	DEPTH(m)	STRIKE(degree)	DIP(degree)
539.4	601.7	34.7	268.4	28.1

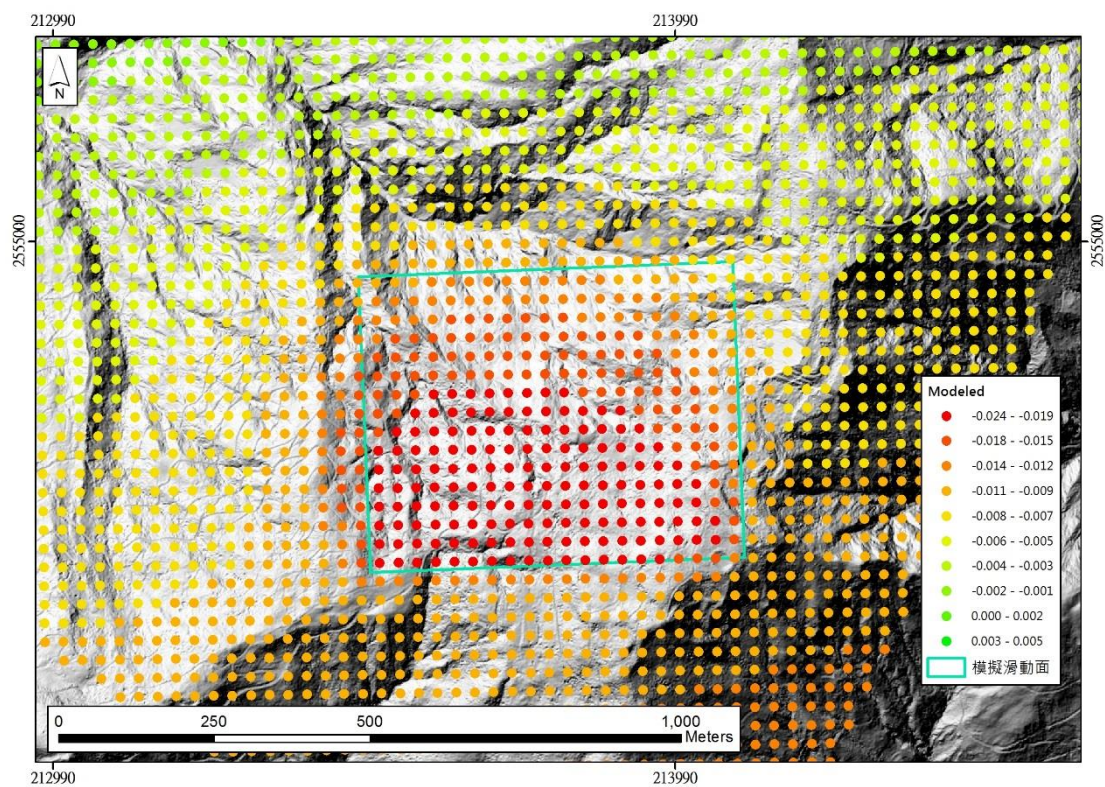


圖3-36 Okada 模型模擬滑動量成果

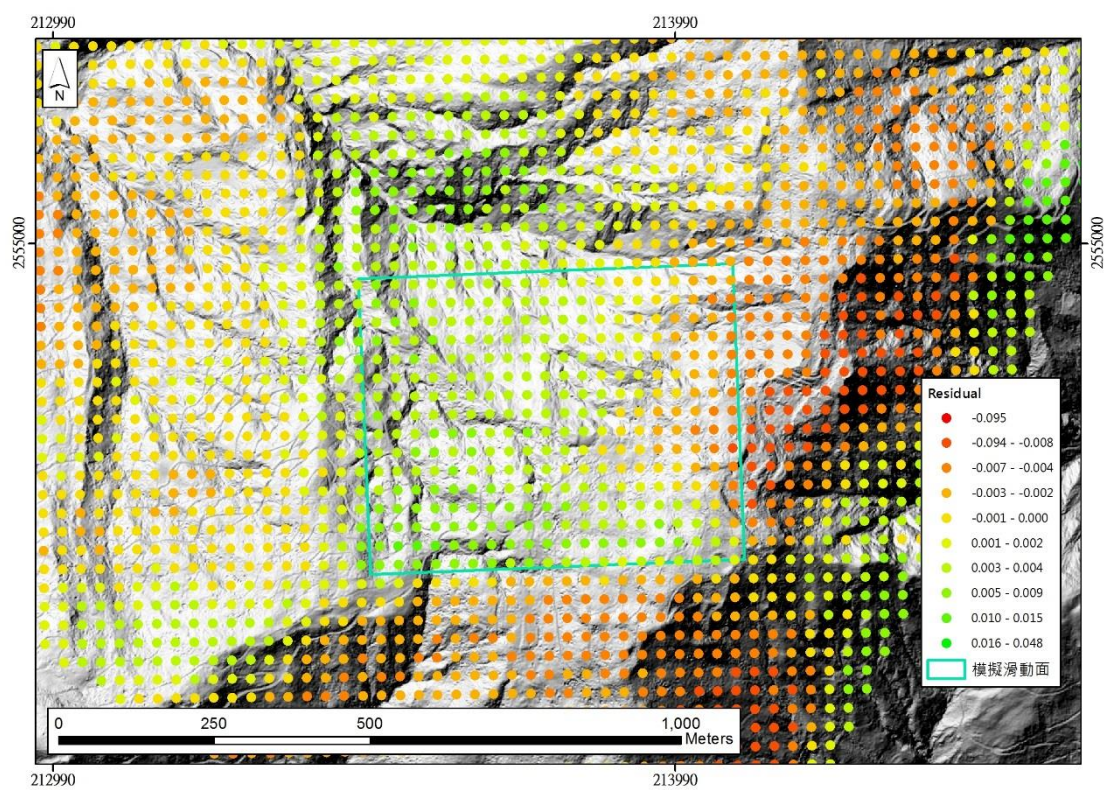


圖3-37 崩塌地 Okada 模型模擬殘餘量

本研究中使用 Nikolaeva(2014)的假設，將崩塌體積視為一標準橢球體，在得到滑動面的長度及深度資訊後，將能在幾何條件充足的情況下以式(如圖 2-10 、式 3、式 4)計算出崩塌體積，本研究中從地表變形量的變形區範圍中量測短邊約為 565m，A 軸為 282.5m，長邊約為 738.18m，B 軸為 369.9m，滑動深度 h 為 34.7m，模擬滑動面長度 539.4m，滑動面長軸 a 取為 269.7m，將上述的 A 、 a 、 h 代入式(式 3)，計算出橢球的最大深度 C 值約 116.6m，而將上述參數代入式(式 4)後計算得到潛在的滑動體積約是 1,100 萬立方公尺，而從前後期的 DSM 統計結果(圖 3-34)，在 2011 年之後該處崩塌地約已流失 250 萬立方公尺的土砂，從 SBASInSAR 的的邊坡潛變分析中，該滑動區應仍不穩定，有持續擴大的可能性。

第六節 研究成果

一、完成今年度兩期 UAV 攝影測量，並建置數值地形及正射影像等基礎資料，提供各子計畫共享及整合運用，已完成兩期測量結果並已校正第一期影像資料。

二、蒐集研究區域內之 SAR 分析影像：建立研究區內 L 波段的 ALOS 衛星、ALOS-2 衛星、C 波段的 Sentinel-1 的 SLC(單觀點複數影像)、GRD(地距影像)格式影像資料庫，共計蒐集分析影像資料 426 幅。

三、分析多期坡地變位位量資訊：蒐集的 SAR 影像進行 SBASInSAR 分析，計算地表垂直方向變化量，並已完成多期 DEM 分析、崩塌面積分析、ALOS、sentinel-1 崩塌事件分析。

四、評估多時序土砂生產量及變遷情形：以 SBASInSAR 分析後的密集點進行分析統計，計算潛變滑移量及分析坡面位移的變遷情形，本計畫中完成 ALOS、Sentinel-1 的 SBASInSAR 分析。

五、分析坡地滑動潛勢範圍及潛在滑動量：結合地面變位圈繪的潛勢區域，並以 DInSAR 分析結果做力學模型分析，找出潛在滑動深度及驗證滑動量。

第四章 計畫進度甘特圖

本補助計畫至民國 110 年 12 月 31 日完成，計畫甘特圖如表 4-1。重要期程一覽，如表 4-2。

表4-1 計畫甘特圖

工作月別 工作項目		1-2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
文獻蒐集 整理、影像 資料庫 蒐集及建置	文獻蒐集											
	無人載具空拍 資料建置											
	影像資料庫 蒐集及建置											
地表變形 資訊分析	地表變形資 訊分析											
坡面土砂 生產量評 估及變遷 分析	坡面土砂生 產量評估											
	土砂變遷分 析											
	分析資料驗 證											
滑動潛勢 範圍及潛 在滑動量	滑動潛勢範 圍分析											
	潛在滑動量 推估											
	滑動量體驗 證											
累積總進度(%)		10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	100

表4-2 重要期程一覽

工作項目	應完成時間
提送工作執行計畫(一式 10 份)	於 110 年 4 月 12 日前
提送期中報告書(一式 5 份)	於 110 年 7 月 19 日前
提送期末報告書(一式 5 份)	於 110 年 11 月 15 日前
交付成果報告書(一式 5 份)及 會計報告	於 110 年 12 月 30 日前

第五章 結論與建議

一、結論

本計畫中完成兩期的 UAV 航空攝影測量等基本資料建置，在期中報告完成前已於 2021/4/14 日進行第一期拍攝，後於 2021/9/04 完成第二期拍攝，並將拍攝範圍擴大到上游崩塌地，在缺乏地面控制點造成的地形偏差也於增加參考點之後完成修正，並提供給團隊其他計畫共享使用。

在本期工作項目中，已建構影像資料庫建置，蒐集 4 期來自航空攝影、航空光達、無人機攝影的 DEM、DSM 影像之外，也完成 ALOS SAR 影像 2006~2011 年間共 20 幅、Sentinel-1 SAR 影像 2015~2021 年間共計 406 幅，全部 SAR 影像共計 426 幅，另有蒐集 SPOT 衛星影像 26 幅。

本計畫中運用 SAR 影像的 NDSI&RVID 強度判釋法分析的崩塌發生範圍，在以 ALOS 分析的莫拉克颱風事件中得到良好的判釋結果，與衛星影像判釋的崩塌區域進行比對後，KAPPA 指標達到 42.01，顯示其在災害應用有極大潛力，而該技術同樣運用於 2021 年 0806 豪雨中，儘管 sentinel-1 衛星的判釋效果不如 ALOS 衛星，仍能有效判釋出崩坪坑溪的上游崩塌情形，與之後完成的 UAV 正射影像比對後顯示也能有良好的分析成果。

本研究中的地表變形資訊分析中完成共計 7 期 DSM、DEM 資料分析，確定崩塌發生區域與實際崩塌量體，最後完成 ALOS、Sentinel-1 衛星的 SBASInSAR 分析，確立崩塌破壞區的坡面滑移速率約在 80mm/year，但在發生破壞的潛變區則約 40~60mm/year，適合用於評估坡面是否有失穩的現象，然而以差分干涉技術計算之位移量須考慮是否超過相位限制，在極端事件中的位移量則須審慎評估。

在運用 DInSAR 技術進行滑動面的模擬中，本計畫從 2009 年底

的滑動事件中，計算出上游崩塌地約有 34.7m 的邊坡滑動深度，推估總滑動量約有 1100 萬立方公尺，而在 2011 至 2021 年間的實際崩塌量約 250 萬立方公尺，已發生的崩塌面積約為潛在滑動區的四分之一，推測上游仍有潛在量體 850 萬立方公尺。

二、建議

SAR 具有不受天候影響的特性，相較光學衛星，在災時能更迅速的提供崩塌參考資訊，在本年度的 0806 豪雨中曾經快速判釋出玉穗溪及崩坪坑溪的崩塌區域，此一分析方法可持續精進發展，未來能提供災時應變的有效資訊。

差分干涉技術對於崩塌潛勢區域有良好的判釋效果，未來仍應與其他分析方法進一步整合，排除判釋誤區及使用限制，將有助於未來提供更多的坡地災害潛勢資訊。

參考文獻

1. 林俊廷，以衛載雷達影像分析進行崩塌潛勢及潛在量體評估。
國立暨南國際大學土木工程學系，博士論文，2021。
2. 王國隆、林俊廷、賴正儒。差分干涉合成孔徑雷達方法偵測活躍地表變形-以地震、地層下陷、坡體活動為例。大地期刊，16,16-23。2018.06。
3. 張中白、王志添、王皓正、陳錕山，“應用雷達差分干涉法監測都會型地表變形：以中壢工業區為例”航測及遙測學刊第九卷第三期，pp.9-14，2004。
4. 莊凱婷，“台北盆地及周圍山區之現今地表變形研究”，碩士論文，國立中央大學地球物理研究所，2012。
5. 謝嘉聲，史天元，“以雷達干涉量測技術產生數值高程模型資料實作探討”，地圖第十期，pp.69-82，1999。
6. Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, “A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. ”, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 40, p.2375-2383, doi:10.1109/TGRS.2002.803792.2002.
7. Cruden, David & Varnes, D.J.. (1996). “Landslide Types and Processes,” In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), Landslides: investigation and mitigation. National Academy Press, Washington, D.C. 247, pp.36–75.
8. Didier Massonnet , Kurt L. Feigl ,“GEOPHYSICAL RADAR INTERFEROMETRY” Reviews of Geophysics, 36, 4, pp.441-550,1998
9. Freeman A., and Durden S. L., (1998), A three-component scattering model for polarimetric SAR data, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 36 No. 3, pp.963-973.

10. Greif, V. and J. Vlcko, "Monitoring of post-failure landslide deformation by the PS-InSAR technique at Lubietova in Central Slovakia." *Environmental Earth Sciences* 66(6), pp 1585-1595, 2012.
11. H.A. Zebker, J. Villasenor (1992). "Decorrelation in interferometric radar echoes," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 30, Issue 5, pp. 950-959.
12. Kao, J. R., Wang, C. T., and Chen, K. S., (2010), Landslide Mapping Using Dual-Polarization SAR Imagery: A case study of Xiaulin Village, Remote Sensing Symposium across Taiwan Strait, National Central University, Taoyuan, Taiwan.
13. Kim, Y., and van Zyl, J. J., (2009), A Time-Series Approach to Estimate Soil Moisture Using Polarimetric Radar Data, in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 47 No. 8, pp.2519-2527.
14. Nikolaeva, Elena & Walter, Thomas R. & Shirzaei, M. & Zschau, J. (2014). "Landslide observation and volume estimation in central Georgia based on L-band InSAR," *Natural hazards and earth system sciences*, Vol. 14, pp.675-688.
15. Okada, Y. (1985), Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75, 1135–1154.
16. Plank, S., Tuele, A., and Martinis, S., (2016), Landslide Mapping in Vegetated Areas Using Change Detection Based on Optical and Polarimetric SAR Data, *Remote Sens.* Vol. 8 No. 4, p.307.
17. Lu, Ping, Casagli, Nicola, Catani, Filippo, Tofani, Veronica et al., "Persistent scatterers interferometry hotspot and cluster analysis (PSI-HCA) for detection of extremely slow-moving landslides." *International Journal of Remote Sensing* 33(2): 466-489, 2012
18. Wang, Kuo-Lung, Lin, Meei-Ling and Dowman, Ian, "The observation of landslide coupling uplift of earthquake with

- Interferometric Synthetic Aperture Radar – the case study of Chi-Chi earthquake and Ju-Fen-Err mountain area”, *EGU General Assembly*, Vienna, Austria, 2007.04, NSC94-2211-E-002-039
19. Wang, Kuo-Lung, Dowman, Ian, and Lin, Meei-Ling, “Estimation of Crustal Deformation From Newmark’s Displacement and Insar – The Case of Chi-Chi Earthquake”, *International Workshop – Applications of SAR Data in Taiwan*, Taoyuan, Taiwan, 2007.06, NSC94-2211-E-002-039
20. Wang, Kuo-Lung, Lin, Meei-Ling, Dowman, Ian & Muller, Jan-Peter, “Assessment of Landslides Caused by Earthquake – Case Study of Chi-Chi Earthquake in Taiwan, 1999”, *The 2nd EGU General Assembly*, Vienna, Austria, 2005.04, NSC 93-2211-E002-017.

附錄

附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	地表變位分析，在 DInSAR，但植被區相關性差，崩塌區特徵少，也會隨時間改變，也很難建立相關。	感謝委員意見，會將不符合的干涉像對進行篩選後移除，減少去相關的影響。
2	本計畫使用 SAR 資料產製地表變位分析，建議說明 ALOS 及 Sentinel-1 的資料如何克服臺灣山區茂密之植生覆蓋問題，以取得地表真實變位資料。	感謝委員意見，由於不同波段在山區效果會有所差異，過去的經驗中 L 波段的 ALOS 資料可適用於山區，C 波段的 Sentinel-1 則需調整合適的參數因應。
3	另 SAR 資料所得之崩塌潛勢範圍常常和地調所公開以 LiDAR 所得之崩塌範圍不同，應如何解釋說明。	SAR 影像可求得地表的微變形量資料，與 LiDAR 透過微地形特徵判釋範圍的方法存在差異，微變形範圍是否能轉化為真實崩塌範圍仍需進一步研究分析。
4	建議計畫中由地表變位推估地下滑動面深度之工作，應提出相關評估驗證之案例分析。	遵照委員意見辦理。
5	本案與另一子計畫中，有關坡面土砂生產量之差異為何？	在本計畫中是以 DInSAR 技術分析微變形量模擬力學模

		型的滑動深度，另一子計畫採用以 InSAR 干涉測量法得到的 DSM 進行分析，屬於 SAR 的不同技術應用，可在此整合性研究中交互映證。
6	P1-3 另一子計畫之名稱(曾智民教授)似有誤，請修正。	感謝委員指正，已修正。
7	結合地面資訊找出潛在滑動深度之方法，於 110 年及 108 年創研計畫分別有中研院郭志禹博士及成功大學戴義欽教授做過類似研究，建議可為參考比較。	感謝委員意見，兩位學者提出方式略有不同，會進一步了解相關研究成果。
8	採取短基線對植生茂盛山區仍能獲得良好測量結果，有關地表垂直變化大的區位，是否受鄰近植生覆蓋所影響，宜有說明。	感謝委員意見，若受到植生覆蓋造成的落差，有可能超出短基線法對於地表變化的探測限制，將於後續補充說明之。
9	如何利用 Sentinel-1 影像地表變化資訊於坡面土砂生產及運移量變遷分析，因涉及時間差，如何及時反映其空間及時間分布，宜有串聯說明。	遵照委員意見辦理，將於相關工作進行時加以說明。
10	應強化解釋如何確定產製之 DSM 資訊能有效且準確製成 DEM 資訊。	感謝委員意見，在本計畫中產制的資料主要以 DSM 為主，因考慮崩塌及堆積區的分析

		可不用去除地上物進行，若有需產制 DEM 時，則進一步進行討論。
11	坡地變位位置僅以地表垂直方向變化量計算是否足夠，應再強化說明。	僅以垂直變化量考慮坡地變位範圍確實略嫌不足，另外會加入影像判釋技術綜整分析。
12	應強化潛變滑移量及坡面位移之變遷計算方式，因為其與降雨事件、地表植生、甚至地震誘因等影響皆高。	感謝委員意見，將於相關章節強化闡述。
13	以 SAR 進行力學模型甚至潛在滑動深度及滑動量推估是否可完整進行，應再強化解釋。	感謝委員意見，目前已有類似的研究可供回顧，將於後續章節中補充說明。

附錄二、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	此計畫為與長榮大學曾志民教授同時進行另一計畫為一整合計畫，建議仍應明確區分兩這間之同及異事項，方便區隔各自研究內容及成果，建議未來朝向申請單一計畫方向，否則較難分別檢視其各自成效。	曾教授執行之「結合多時序 Sentinel-1 雷達影像與人工智慧演算於集水區尺度土砂生產量分析」與本計畫同樣運用 Sentinel-1 SAR 影像資料，在本計畫中著重於運用 SAR 影像進行關注坡面崩塌發生，坡面潛變運移行為，及運用力學模型推估崩塌量判釋分析，曾教授之研究則偏向於 AI 演算法及大尺度的集水區土砂量產出的分析。
2	光學影像利用 NDVI 判斷植生、非植生，甚至崩塌、裸露地表原就易受陰影影響其準確性。但 NDSI 或 RVID 亦易受地形起伏甚至坡向因素影響其判斷準確度。建議本計畫中對於不同來源資訊進行地表判釋應能詳述其 accuracy 計算之實際資訊，如 GCP 之數量及分布？commission error？較易正確了解判釋準確	本計畫中使用的 NDSI 及 RVID，在過去的研究中，ALOS SAR 針對崩塌像元的判釋率約有 52%，但判釋正確性的提升仍須進一步研究。

	率是否可為可靠信賴區間參考使用。	
3	建議本計畫後續重點應為滑動潛勢範圍及潛在滑動量之分析，且能有更明確之方法敘述及其成果之檢核。	本計畫運用前期判釋的分析結果，將與橫跨事件前後期的 DSM 的分析量體進行比較，用以驗證成果。
4	建議有如另一計畫之後續，可考慮使用光華地區崩塌資訊作為本計畫之最佳驗證場域。	感謝委員建議，在本計畫中將仍以崩坪坑溪的分析為主，日後將在其他後續計畫中列入評估。
5	建議應尋求缺乏地面控制點之解決方式，因國內已有完整之地形圖控制點資訊可參考。另目前所暫列坡面滑移速率及累積陷落深度成果應仍待更完整資訊檢驗。	感謝委員意見，本計畫研究區域內因缺乏有效的控制點，在後續分析中將採用 2011 年的光達影像資料中選用合適的控制點進行校正，並將校正後的 DSM 影像用於分析成果檢驗。
6	P2-2 本計畫完成之二期 UAV 空拍正涉及 DSM，請回饋本局俾上傳至本局 UAV 成果平台。	遵照委員意見辦理。
7	P2-11 圖 2-7 圖例之滑動速率是否宜標示為垂直方向速率，且說明負值表下降。	遵照委員意見修正。
8	P2-11 圖 2-8 之圖名是否宜調整為「Sentinel-1 SBASInSAR	遵照委員意見修正。

	分析之各時序潛變滑動量體範例」？	
9	P3-8 以 NDSI 判釋崩塌地，以本計畫試驗區為例，約 4.5 平方公里，自取得影像後，大約需時多久可得到初步成果？	以本研究區範圍為例，分析結果大約可在取得資料後的 3 小時內完成分析，並提供大致的崩塌判釋範圍。
10	建議詳細分析比較以 SAR 強度判釋法及衛星崩塌判釋法之結果有何異同點，並提出具體之建議。	感謝委員意見，衛星光學影像資料分辨解析度可達到 1~5 公尺，但受到雲霧覆蓋影響，災時未能即時取得有效影像，SAR 強度判釋法雖解析度約 20~40m，但可在雲霧覆蓋下取得可靠的參考資訊，目前較適合運用在 1 公頃以上的崩塌判釋中，本計畫將於期末報告中補充論述。
11	建議針對本研究中坡面滑動體邊界及滑動深度的推估方式進行深入說明，同時提出數個實際崩塌案例進行事件前後之估算及驗證，以說明本研究方法之可行性。	遵照委員意見辦理
12	報告書封面計畫編號請修正為 SWCB-110-054。	遵照委員意見辦理
13	報告書 P.3-4 文字有誤，衛星	遵照委員意見辦理

	資料 396”蝠””一改為”幅”，計劃宜改為”計畫”，請修正。	
14	請補充第三章第三節數值地形資料之解析度。	遵照委員意見辦理

附錄三、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	建議可針對滑動區，進行不同期地形剖面之探討，以進一步評估推估方法之準確性。	本研究已針對關注崩塌面進行相關分析，但因可供評估的事件有限，且受限於 SAR 影像的及各期 DEM 的時間尺度不同，未來將對評估方式進一步檢驗。
2	計畫整合 UAV 和 SAR 影像產製數值地形，並將其應用在土砂生產和運移的推估，屬於集水區尺度廣域的監測方法。未來局內有廣域土砂生產和運移的監測需求時，可以參考使用辦理。本計畫亦提出透過地表位移量推估崩塌量體的方法，不同於過去局內使用的經驗法，讓局內對既有大規模崩塌潛勢區內崩塌量體推估上，有更多方法選擇。	感謝肯定，未來將進一步精進此推估模式，以期能提供可靠的分析技術。
3	ALOS 與 Sentinel 影像有精度差異，如何整合使用？	兩衛星資料因採集時間跟波長不同，各有優缺點，ALOS 更適合坡地分析，而 Sentinel 有採集時間的優勢，由於現行 ALOS 拍攝間隔過長，應以

		Sentinel 為主要分析影像。
4	資料收集的成果與模擬案例，使用的參數與流程希望可以搭配情境進行累積整理，提供後續再利用。	在本研究中所建立之資料將提供日後參考。
5	SBInSAR 測量之 coherence 的選用條件為何？	coherence 的選用會因研究案例的環境狀況做調整，在本研究中會更低一些。
6	建議進一步說明 Sentinel-1 崩塌辨識成果中使用多時序影像去除雜訊之細節。	本研究中係以多時序判釋結果進行疊加分析，並減少地形效應影響，然此模式為初步成果，將持續精進與完善。