
滑動塊體量體評估-以合成孔徑雷達
資料分析為例

**A Study of Landslide Volume and
Mechanism Assessment by DInSAR
Analysis**

成果報告書

執行單位：國立暨南國際大學

執行期間：109年2月6日至109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 109 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)

滑動塊體量體評估-以合成孔徑雷達資料分析為例

摘要

本研究以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，於條件良好情況下可得到毫米級的變形精度。

本研究中針對各波段 SAR 影像完成適用性評估，篩選出各期可進行 DInSAR 分析的時間像對，並建立 NDSI 技術分析流程，以及完成 ALOS1 的各期主要事件中的崩塌範圍探測以及 Sentinel-1 的初步嘗試，其中 2007、2008、2009 三年的主要降雨事件中，寶來崩塌地的 NDSI 判釋結果與光學影像辨識的真實崩塌相當符合，並提出各波段影像的建議門檻值，以及量化分析以完善分析成果。

本計畫在後續分析中以 DInSAR 技術完成各時序的崩塌量體評估，並運用 NDSI 技術及 DInSAR 技術探討崩塌範圍的潛變過程以及潛勢範圍評估，並將與整合型計畫「先進遙測技術於大規模山崩之活動監測、土砂運移及模擬分析」中其他子計畫，整合不同遙測技術的產出成果與模式比較，以不同尺度資料分析模式加以驗證崩塌滑動量體評估。

關鍵詞：崩塌量體、崩塌機制、DInSAR、邊坡數值模擬、潛勢分析

目次

| | |
|------------------------------|------------|
| 摘要..... | I |
| 目次..... | III |
| 表次..... | V |
| 圖次..... | VII |
| 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 | 1-3 |
| 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 | 2-9 |
| 第三章 工作進度 | 3-1 |
| 第一節 DINSAR 分析技術適用性及篩選區間..... | 3-1 |
| 第二節 NDSI 崩塌範圍探測判釋範圍分析..... | 3-6 |
| 第三節 崩塌滑動量體分析 | 3-16 |
| 第四節 崩塌機制及潛勢範圍評估 | 3-21 |
| 第四章 計畫進度甘特圖 | 4-1 |
| 第五章 結論..... | 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-7

表次

| | | |
|-------|---------------------------------|------|
| 表 2-1 | 研究使用雷達衛星資料(資料來源：JAXA, ESA)..... | 2-2 |
| 表 3-1 | ALOS1 DINSAR 像對篩選成果..... | 3-5 |
| 表 3-2 | 2015~2016 寶來崩塌地變化情形..... | 3-14 |
| 表 3-3 | DINSAR 分析採用時間區間一覽表..... | 3-17 |
| 表 4-1 | 進度甘特圖..... | 4-1 |
| 表 4-2 | 重要期程一覽..... | 4-2 |

圖次

| | | |
|--------|------------------------------|------|
| 圖 1-1 | 整合型計畫之子計畫分工研究項目 | 1-2 |
| 圖 2-1 | DINSAR 技術處理流程 | 2-7 |
| 圖 2-2 | 整體計畫相關性及分工架構圖 | 2-10 |
| 圖 2-3 | 本計畫與整體計畫研究回饋關係圖 | 2-11 |
| 圖 2-4 | 工作流程圖 | 2-11 |
| 圖 2-5 | 軌道誤差示意圖 | 2-13 |
| 圖 2-6 | 大氣效應示意圖 | 2-14 |
| 圖 2-7 | 受地形效應影響情形 | 2-16 |
| 圖 2-8 | 適用性評估流程 | 2-17 |
| 圖 2-9 | NDSI 萃取崩塌地處理流程圖 | 2-18 |
| 圖 2-10 | ALSO1 NDSI 初步分析結果 | 2-18 |
| 圖 2-11 | 混淆矩陣精度表示示意圖 | 2-19 |
| 圖 2-12 | 殘餘土沙流出量分析（引用自王國隆等，2019） .. | 2-20 |
| 圖 2-13 | DINSAR 判釋重複發生滑動範圍 | 2-22 |
| 圖 3-1 | SAR 影像相關性與干涉成果 | 3-2 |
| 圖 3-2 | 各時序差分干涉成果圖 | 3-4 |
| 圖 3-3 | ALOS1 HV 極化影像拍攝時間 | 3-7 |
| 圖 3-4 | 各時序 NDSI 分析成果圖 | 3-8 |
| 圖 3-5 | 高中雨量站 2006~2011 年降雨分布圖 | 3-9 |

| | | |
|--------|---|------|
| 圖 3-6 | NDSI 與 SPOT5 光學衛星比對成果圖 | 3-11 |
| 圖 3-7 | 2007~2009 各事件 ALOS1 NDSI 套疊成果..... | 3-12 |
| 圖 3-8 | SENTINEL-1 2016/9/5~2016/9/29 NDSI 分析成果 . | 3-15 |
| 圖 3-9 | 崩塌範圍演變及主崩區統計區域 | 3-16 |
| 圖 3-10 | DINSAR 分析之地表垂直變形量圖..... | 3-18 |
| 圖 3-11 | ALOS-1 SBASINSAR 分析之各時序累積邊坡變形量. | 3-19 |
| 圖 3-12 | SENTINEL-1 SBASINSAR 分析之各時序累積邊坡變形量 | 3-20 |
| 圖 3-13 | 2007 年崩塌判釋與邊坡變形 | 3-21 |
| 圖 3-14 | 2009 年崩塌判釋與邊坡變形 | 3-22 |
| 圖 3-15 | 2006~2011 ALOS-1 SAR 的邊坡垂直變化速率分析 | 3-23 |
| 圖 3-16 | 2016~2020 SENTINEL-1 SAR 的邊坡垂直變化速率分析. | 3-24 |
| 圖 3-17 | 三維有限元素分析垂直變化量 | 3-25 |
| 圖 3-18 | 三維有限元素分析最大剪應變 | 3-25 |
| 圖 3-19 | 寶來崩塌地推測的滑動塊體 | 3-26 |

第一章 緒論

第一節 計畫動機

台灣地區由於版塊擠壓造成地形破碎山高流短的地質現象，加上地理位置易受到颱風豪雨的侵襲，以及目前氣候變遷的趨勢之下，造成近年坡地災害頻繁且有愈趨嚴重的情形，雖然坡地災害的影響範圍廣且發生頻率高，但卻是最難以預測其發生及影響的災害，近年來由於遙測技術的進步，讓上述困難有了解決的契機，由於遙測能以更快速且低廉的成本進行持續性的坡地監測，有助於提早發現災害潛勢，讓工程單位能提前因應，保障人民生命財產的安全。

第二節 計畫目的

坡地災害會為河川帶來大量土砂堆積，而土砂運移又造成河道變化引發後續的二次災害，因而評估坡地災害的土砂量體則是後續分析前的重要課題，雖然使用航拍或是光達測量可得到精準的數值地形，但需花費人力、受天候限制，資料取得頻率亦受限，因此本研究擬以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。

本研提計畫擬針對高雄寶來的坡地災害區域，建立 DInSAR 技術建立評估流程，並進行多時序崩塌量體分析，以各時序的滑移情形探討邊坡滑動的破壞機制，而後運用光達與 UAV 產製的高精度數值地形進行崩塌量體及範圍的驗證，確認此評估的準確性，以期建立完整且快速的崩塌量體評估方式。

本計畫為北科大土木系張國楨教授研提 109 年度創新研究計畫「先進遙測技術於大規模山崩及周邊區域之活動監測、土砂運移及模擬分析」整合型研究之子計畫一，因此本研究結果亦將提供給該計畫分析應用，本計畫與整合型計畫關係如圖 1-1。

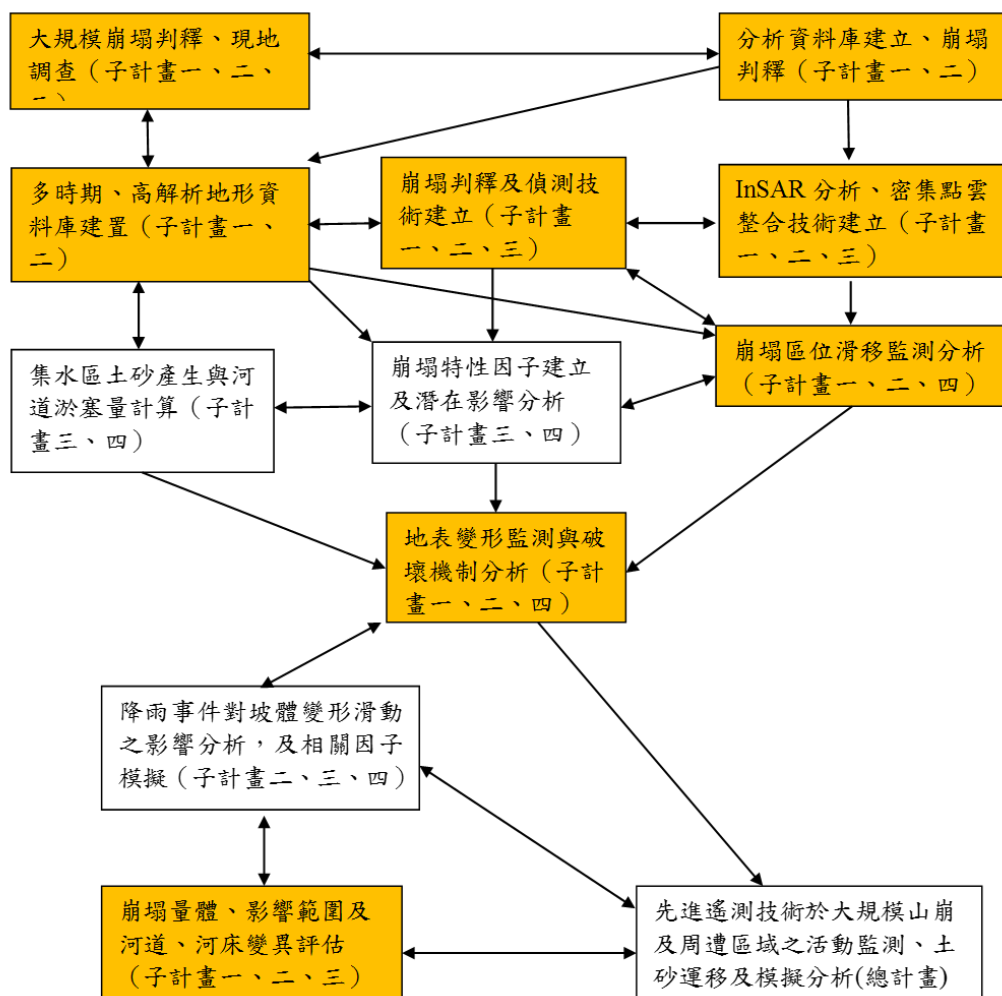


圖1-1 整合型計畫之子計畫分工研究項目

第三節 計畫研究區域

本計畫研究區域位於高雄市六龜區寶來一帶的崩塌區域，位於荖濃溪流域，此研究區域地質分帶屬於中央山脈，岩層為輕微變質之硬頁岩至板岩，主要地質為潮州層及長支坑層，夾雜階地堆積層，潮州層以硬頁岩為主，間夾透鏡狀砂岩體，長支坑層主要是深灰色頁岩和淡灰色細粒砂岩組成，砂岩很緻密堅硬，部份且為石灰質，此區域歷年有多次崩塌紀錄，且因位於攻擊岸，有持續擴大及滑移情形。

第四節 計畫重點項目

一、分析 C 波段、L 波段 SAR 影像在山區的適用性及使用限制。

建立 DInSAR 分析適用性的評估流程，分析 L 波段的 ALOS 衛星、ALOS 衛星、C 波段的 Sentinel 衛星產製的 SAR 影像其適用情形及使用限制。

二、以 NDSI 技術進行崩塌範圍探測分析。

崩塌範圍探測模式建立，運用 NDSI 技術建立崩塌範圍快速判釋技術，以運用於光學衛星無法拍攝的天候條件下，能有災害範圍供救災參考。

三、供精確且多時序的崩塌量體評估方式。

以 DInSAR 技術完成歷次崩塌滑動量體分析，並結合歷次光達及 UAV 產製的高精度數值地形建立分析驗證模式，提出崩塌滑動的參考依據。

四、以 DInSAR 技術進行崩塌潛勢範圍評估。

運用多期地表形變判釋成果，結合崩塌發生率，建立崩塌潛勢基準，以完成廣泛的潛在崩塌區域探測。

五、評估土砂生產量以及二次崩塌的發生機制。

結合 DInSAR、NDSI 分析技術，評估崩塌地滑動量體及發生機制，並運用有限元素法模擬驗證。

六、成果整合運用

提供成果給北科大土木系張國楨教授研提 109 年度創新研究計畫「先進遙測技術於大規模山崩及周邊區域之活動監測、土砂運移及模擬分析」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

本章節針對合成孔徑雷達的成像原理及物理性質、差分干涉技術(DInSAR)、後向散射係數的歸一化指標(NDSI)、進行初步文獻蒐集與回顧，為後續研究做基礎資訊之建立。

一、合成孔徑雷達影像基本成像原理

合成孔徑雷達影像(SAR)是一種微波觀測技術，其基本原理利用衛星運行時連續發射雷達波，並將雷達回波接收後進行解算，以得到成像結果，雷達波具有優越的穿透性，比起可見光，雷達波更能輕易穿透雲霧煙塵到達地表，經反射後再被衛星接收，此外也能於夜間順利施測，其運作時會從衛星上向地表發射一系列的電磁波，當電磁波遇到物體產生反射時，接收這些回波訊號，並量測反射波強度與時間差，以達到量測的目的。

然而對於星載雷達而言，為了達到標準的解析度，必須安裝的雷達天線口徑會超過數百公尺，在現實中不可能達到，為了克服此問題，運用了都卜勒頻率位移的理論，在飛行過程中重複發射電磁波，在這過程中每個小天線接收到地面上的回波，會因都卜勒效應產生些微的相位變化，藉此相位史的變化過程可區分出地面的每個相元，將這一系列的回波匯整，就如同衛星搭載的小天線朝方位向移動，形成一個等效的大天線，即為合成孔徑雷達成像的運作原理。

二、雷達波的回波強度性質

本研究使用之合成孔徑雷達資料為日本 JAXA 的 ALOS PALSAR 及歐洲太空總署(European Space Agency; ,ESA)的 Sentinel-1, 衛星基本資料如表 2-1 所示, 採用 ALOS PALSAR 雷達衛星資料主要原因為其使用之雷達波為 L-band, 相較於其他雷達訊號具有較長波長 (23.62cm)的雷達波訊號, 因此有更多機會穿透植生獲得真實地表之反射, 更適合台灣地區植生密集的狀態, 然其資料中對台灣進行資料獲取時間間隔較長, 本研究於近年較為常態性的監測另以 ESA 的 Sentinel-1 雷達衛星進行, 該衛星之雷達波為較短的 C-Band, 雖對於植生克服能力較差, 但因再訪週期及資料獲取間隔僅 12 天, 較適用於常態性的監測。

表2-1 研究使用雷達衛星資料(資料來源：JAXA, ESA)

| 模式 | Sentinel-1(IW) | ALOS (Fine) | | ALSO2(Fine) | |
|------|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------|----------------------|
| 中心頻率 | 5.405GHz (C-band) | 1270MHz(L-band)) | | | |
| 帶狀頻寬 | 0-100MHz (可程式化) | 28MHz | 14MHz | 28MHz | |
| 偏極類型 | HH+HV, VV+VH, VV, HH | HH or VV | HH+HV or VV+VH | HH or VV HH+HV or VV+VH | HH + HV + VH + VV |
| 入射角度 | 20 – 40 degree | 8 - 60 degree. | 8 - 60 degree. | 8-70 degree | 23.7 degree |
| 解析度 | 5 x 20 m | 7 to 44 m | 14 to 88 m | 10m | 10m |
| 觀察帶寬 | 250 km | 40 to 70km | 40 to 70km | 70km | 30km |

衛星依路徑可區分為上升軌道及下降軌道兩種, 本研究所使用之軌道均為下降軌道, 合成孔徑雷達影像(SAR)會紀錄地表上每一相元的強度及相位資訊, 須進一步分析方能得到有分辨力的影像, SAR 影像接收的回波強度是與原始發射的微波的比值, 一般而言介於 0 ~ 1 之間, 並沒有單位, 表示方式除了比值外, 亦可用取自然對數以分貝 (dB)表示, 普遍為 0~-60 之間, 但是在受到其他因素影響仍有可能超過上述數值的情形, 影響雷達回波的強度, 則須考慮地表粗糙度、地表目標物的幾何特徵、介電質、地型效應等四個主要因素。

雷達影像的成像必須在發射微波之後，有雷達回波循原傳遞方向返回天線，為達成此條件，一種是依靠地表上幾何特徵產生的反射，另一種則是依靠雷達波產生散射後的後向散射值，此種回波被稱作後向散射，一般而言，地表面越粗糙則產生的後向散射越明顯，但此粗糙程度必須考慮雷達波入射的波長及角度，而基本值可參考瑞利法則(Rayleigh Criterion)進行概算(Sabins,1987)，根據瑞利法則：

$$\Delta h < \frac{\lambda}{8\cos\alpha} \quad (\text{公式一})$$

其中 Δh 為物體表面以波長為單位測試高低起伏的均方差， λ 為電磁波波長， α 為電磁波入射角。由上式可得知當入射波波長增加時，則可使更粗糙的地表產生反射，合成孔徑雷達的微波大多介於2.5cm~30cm之間，對此波長區間而言，裸露地、水面、公路、建築物等表面都可視為光滑的鏡面反射體，雷達波將可能朝前進方向反射，而不會產生後向散射，因此不會出現回波訊號，而在成像上出現黑色區域，因此在廣布植生的區域，會比發生崩塌裸露的區域有更高的後向散射值。

地上物的幾何特徵亦會影響雷達波的反射方向，假如地上物可以構成多面體的反射條件，使雷達波產生多次的鏡面反射，因而反彈回雷達天線上，即可形成強烈的回波訊號，此類特殊的反射條件一般常見於建築群、水壩、等有固定形狀的人工構造物，此外亦常利用此一反射特性，於地面佈設直角反射鏡，加強關注地區的回波訊號。

三、雷達波極化性質

雷達波是具有電場向量特性的能量微波，此電場向量的特性稱作極化，極化根據其方向又分為水平極化(H)或垂直極化(V)，而接收訊號時同樣分成水平(H)或垂直(V)的接收方式，根據發射及接收的方式，

可分為：單偏極(HH、VV)即發射水平訊號並接收水平訊號(HH)，或發射垂直訊號接收垂直訊號(VV)；雙偏極(HH、HV 或 VV、VH)即在接收模式上增加了另一極化的接收模式，即發射水平訊號接收水平訊號(HH)同時接收垂直訊號(HV)，或是發射垂直訊號接收垂直訊號(VV)同時接收水平訊號(VH)；全偏極(HH、HV、VV、VH)代表同時做到發射水平及垂直訊號，並也同時接收水平及垂直訊號。

由於雷達回波訊號具有極化特性，因此面對不同的地上物時，其反應的極化特性也有所不同，因而極化可以做為強度、相位之外的另一種物理性質，並用於影像分類，不同波段的雷達回波在散射的組成上也有所差異，以 L 波段的 ALOS1 SAR 影像而言，裸露地更趨近於表面散射，因此會有比植生茂盛區域更弱的後向散射結果，另一方面極化也與散射特性有關，交叉極化(HV、VH)在體散射的區域會有更顯著的反應，在鏡面散射的區域則散射效果較差，雖然同相極化(HH、VV)會有更強烈的後向散射值，但受地形影響較多也夾雜較多雜訊，且在對於植生、裸露地的分辨也較不顯著，不過對於二次散射更為明顯，如建築物、船隻或橋樑等構造物，因此 HV、VH 極化更適合用於植生觀測。

本研究中主要運用強度及極化資訊進行崩塌地判釋，極化是雷達波具有電場向量的特性，由於雷達波傳遞到地表時會發生各種散射情形，傳回接收器時其偏振方向可能發生改變，由多不同極化配合波段強度的組合，可用於辨別地上物的類型，陳錕山等(2011)以小林村為例，運用 TerraSAR-X 兩幅不同極化(HH、HV)的影像，依其比值計算雷達植被指數(Radar Vegetation Index, RVI)，藉由 RVI 訂定門檻值後，可用於追蹤邊坡及地上物的變異點偵測

四、後向散射係數的歸一化指標 NDSI 分析

SAR 影像為電磁波的回波強度值，由於電磁波具有電場向量的特性，可根據發射與接收方式記錄不同的極化模式，依地上物的類型會有不同的極化分布，據分析顯示 HV 極化對於植生狀況有明顯的變化，因此可運用災害前後 HV 極化的 SAR 影像，尋找發生崩塌的位置，計算崩塌事件前後的後向散射係數的歸一化指標 NDSI(Normalized Difference Sigma naught Index)，過去研究中 Furuta(2011)則提出以單極化影像進行 NDSI(normalized sigma-naught index)分析後，發現 NDSI 趨近於 1 或-1 時，則代表地表發生急劇的變化，在山坡地上多為崩塌地的發生區，加入 NDSI 分析則可排除 DinSAR 分析所無法檢測到的變形區；Takashi Shibayama(2014)運用 ALOS2 影像進行分析，發現發生崩塌的區域，其體散射減少，而表面散射增加，因此隔年(2015)進一步研究後，發現崩塌區域的散射特性與雷達波局部入射角(Local Incidence Angle)的關聯性，崩塌區域的表面散射率與體散射率會隨著入射角度而有明顯的改變，但是樹林茂盛的區卻不會有此現象，因此可運用此差異劃分出滑坡所在的位置；陳俊斌(2016)運用 Sentinel-1A 的 SAR 影像，結合 NDSI 分析技術探討台灣南部水稻種植的情形，並逐時進行動態分析後，歸類出水稻種植區在生長的過程中，其散射值的變化曲線。

計算崩塌事件前後期的後向散射係數，正規化的後向散射係數值介於 0~1，假設災後後向散射係數為 σ_{master} ，災前後向散射係數為 σ_{slave} 代入下列公式：

$$NDSI = \frac{\sigma_{master} - \sigma_{slave}}{\sigma_{master} + \sigma_{slave}} \quad (\text{公式二})$$

由於 σ_{master} 值與 σ_{slave} 值的值域介於 0~1 之間，因而帶入此式後 V 值的值域變為 -1~1 之間，因此可確保不同時序的 SAR 影像代入計算後，可以得到相同的值域，不會因時序不同而產生差異，若兩時序的 NDSI 值趨近於 0 則表示此時段中地表沒有太大變化，若 NDSI 值趨近於 -1 或 +1，則表示地表發生較劇烈的差異(Furuta and Tomiyama, 2011)，此差異一般來自於地上物發生改變，如崩塌、植生、構造物、水體、農作成長等情形，皆會造成 NDSI 值發生變化。

五、差分干涉分析(DInSAR)

差分干涉分析(DInSAR)是採用合成孔徑雷達(SAR)的相位變化資訊取得衛星至地表變形量，藉由計算兩幅軌道接近的 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，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，故經過解算之結果必須檢核及修正控制點位置，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 2-1 所示。

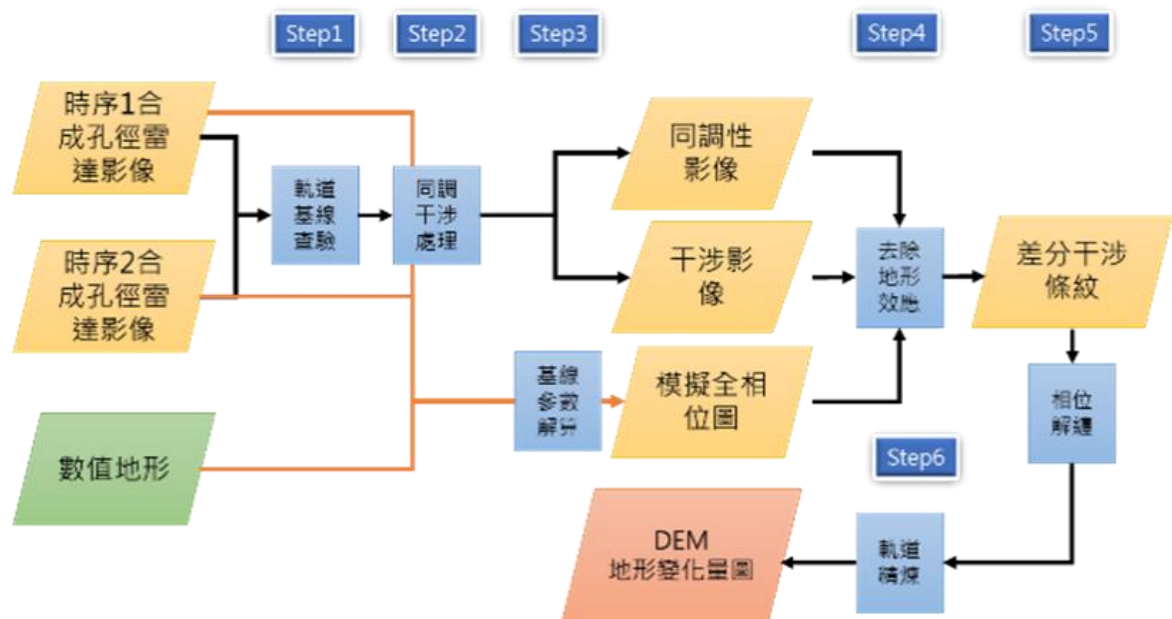


圖2-1 DInSAR 技術處理流程

採用合成孔徑雷達影像的地表位移訊號，使用差分干涉技術來取得衛星至地表變形量，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(Wang et al., 2007a, 2007b, 2005)，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(公式三)，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)。

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

(公式三)

其中,

R_1 及 R_2 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

王秀雯等(2007)曾將多時序的雷達影像正射化後，用以觀測並進行水線萃取，並配合潮位資料獲取潮間帶的地形概況，以及沙洲面積變化情形，或是以差分干涉法進行數十年間的地層下陷程度測量(張中白等，2004)，由於採用差分干涉取得的相位差，在條件良好情形下可轉換為毫米等級之變形量，此外也可在相位還原及位移量解算前，由干涉產生出來的干涉條紋顯示出地表變動位置，以人工判釋出滑動塊體範圍。

進行干涉差分後的影像進一步進行相位還原處理之前，必須先設定控制點(GCP)，並此為基準進行解算，故此控制點設定必須在相位良好的不動點上，設定位置落在移動點上將會使地形變化值的解算偏斜，無法紀錄正確結果，故經過解算之結果必須透過檢核，若產生明顯偏移則必須重設控制點。經由相位還原解算之後可以得到一組重新採樣過的DTM，用不同時間區間 SAR 影像做差分干涉後得到的DTM相互扣除後，可顯示出地表變化量。

第二節 工作執行步驟

本計畫「滑動塊體量體評估-以合成孔徑雷達資料分析為例」屬於子計畫二，與子計畫一「無人載具多時序高解析空間資訊擷取技術整合、精度評估及應用」、子計畫三「無人載具高解析影像及光達點雲於山區河川表層粒徑分析之精進研究」、子計畫四「高精度數值地形應用於整合型崩塌發生與流出數值模擬技術開發之研究」同屬於「先進遙測技術於大規模山崩之活動監測、土砂運移及模擬分析」整合型研究計畫之子計畫項目，為使各計畫研究成果能達到互補及回饋，本計畫中分三階段進行討論與整合作業，第一階段為計畫執行前，完成各計畫現有資料盤點及分工規劃，規劃結果如圖 2-2 所示，

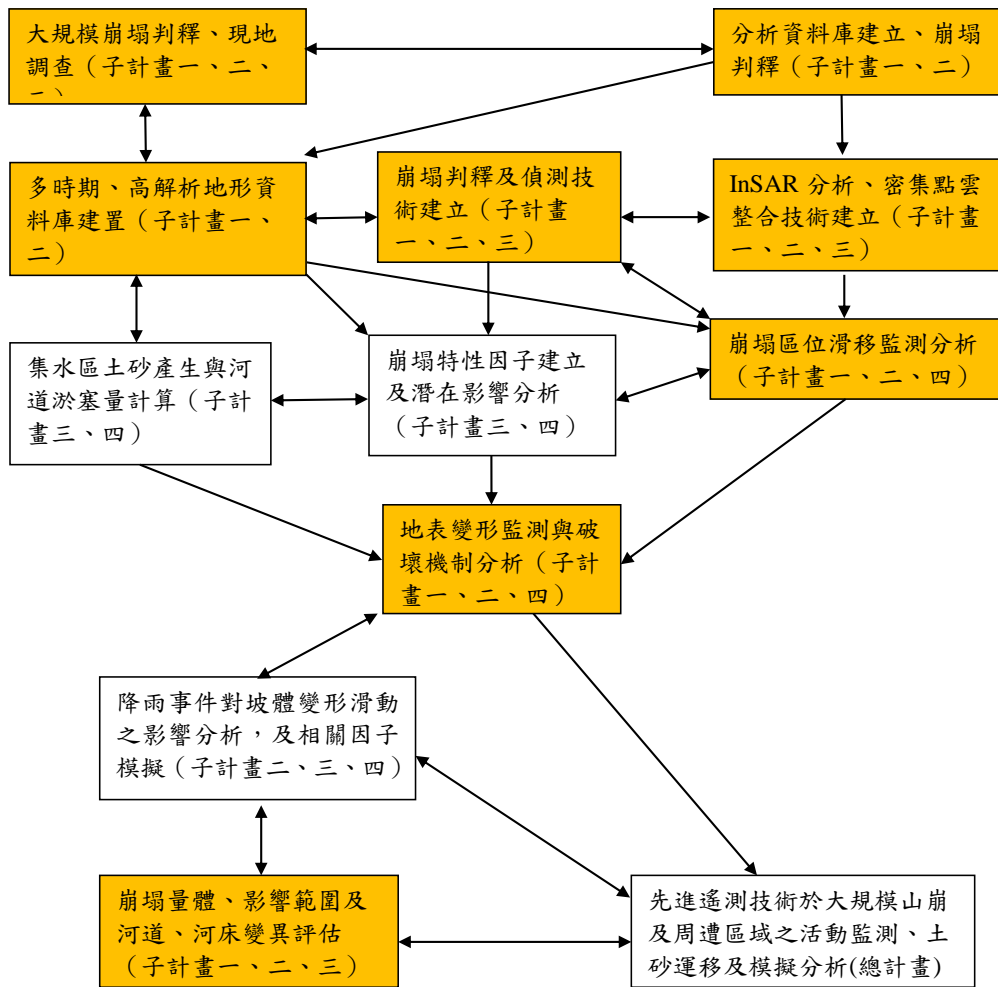


圖2-2 整體計畫相關性及分工架構圖

第二階段為本計畫完成 DInSAR 地表變位分析，進行崩塌滑動量體評估，與子計畫一、三、四分享地表變位成果，並與子計畫一的崩塌量體進行驗證，第三階段為建立崩塌機制分析與潛勢範圍評估，此部份將與子計畫四的模擬結果進行邊坡破壞機制的討論，並與子計畫四提出的崩塌潛勢評估方式進行彙整與討論，此外於本計畫中將提供長距離高精度全測站施測，於計畫中調查及驗證資料時使用，並與各子計畫共享成果，有關本計畫各階段與整體計畫的研究回饋關係如圖 2-3 所示。

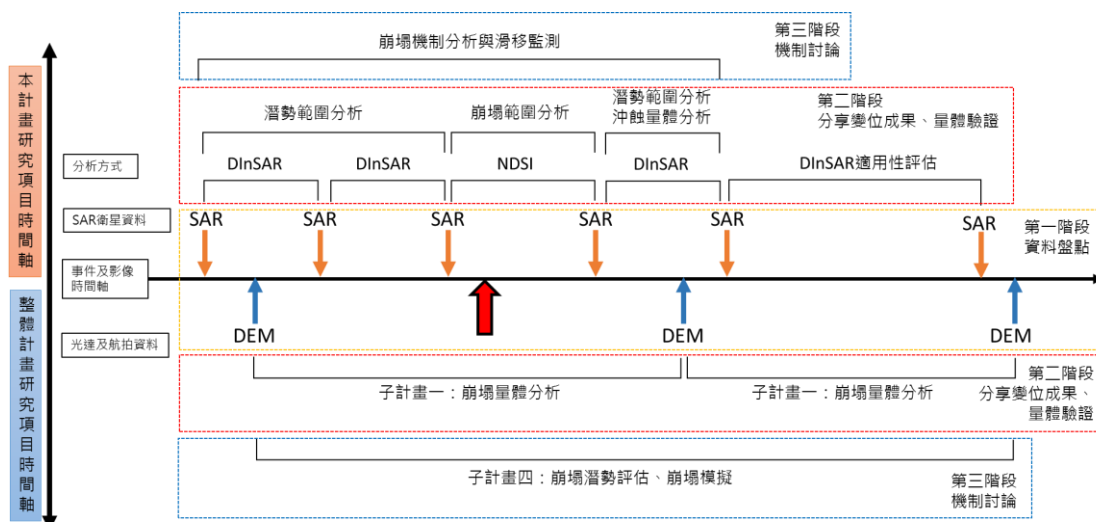


圖2-3 本計畫與整體計畫研究回饋關係圖

本研提計畫擬針對高雄寶來的坡地災害區域，建立 DInSAR 技術建立評估流程，並進行多時序崩塌量體分析，結合 NDSI 技術以各時序的滑移情形探討邊坡滑動的破壞機制，而後運用光達與 UAV 產製的高精度數值地形進行崩塌量體及範圍的驗證，確認此評估的準確性，以期建立完整且快速的崩塌量體評估方式，最後將本研究中以 DInSAR 探測潛勢崩塌區域的方法，套用至研究區域鄰近之地質區域，尋找潛在崩塌區域，提供日後防災研究及規劃之建議。

實施方法步驟條列如下，本計畫工作流程圖如圖 2-4。

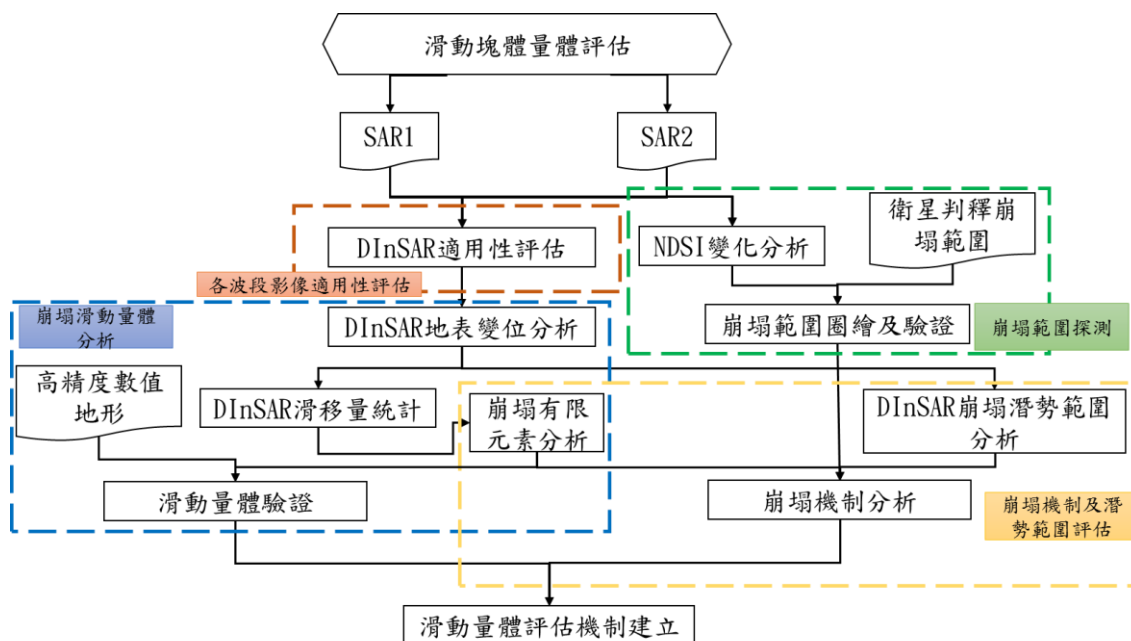


圖2-4 工作流程圖

一、DInSAR 分析技術適用性評估

SAR 影像不同的波段存在不同的干涉限制，理論上 L 波段的 ALOS1、ALOS2 衛星比起 C 波段的 Sentinel 衛星對於植生覆蓋區域有更好的干涉效果，且 L 波段也較能發現比較大幅度的地表變形，因此本研究先分析 ALOS1、ALOS2、Sentinel 衛星在坡地區域的干涉成果進行適用性評估，排除超出限制條件的範圍，針對 DInSAR 分析技術的適用性、運用範圍及限制等文獻進行蒐集及整理，嘗試並建立適合崩塌量體分析的參數、控制點選取機制，分析並排除受地形效應影響區域，建立相位還原以取得地表變形量等相關流程並篩除干涉不佳的影像相對。

DInSAR 技術本身包含幾種誤差因素，分別為大氣效應、地型效應、軌道誤差、空間及時間不相關性、以及反射點產生的雜訊等等，以上因素皆會降低評估量體的精準度，以下以不同誤差來源說明：

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

(公式四)

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

(一)衛星軌道誤差

衛星軌道誤差是因為不精確的軌道紀錄造成兩幅 SAR 影像干涉後的誤差，則干涉後會產生水平且固定周期的干涉條紋(如圖 2-5)，進而造成干涉條紋的判讀，一般而言軌道誤差可以透過控制點校正，並經過相位還原後，得到良好的控制效果。

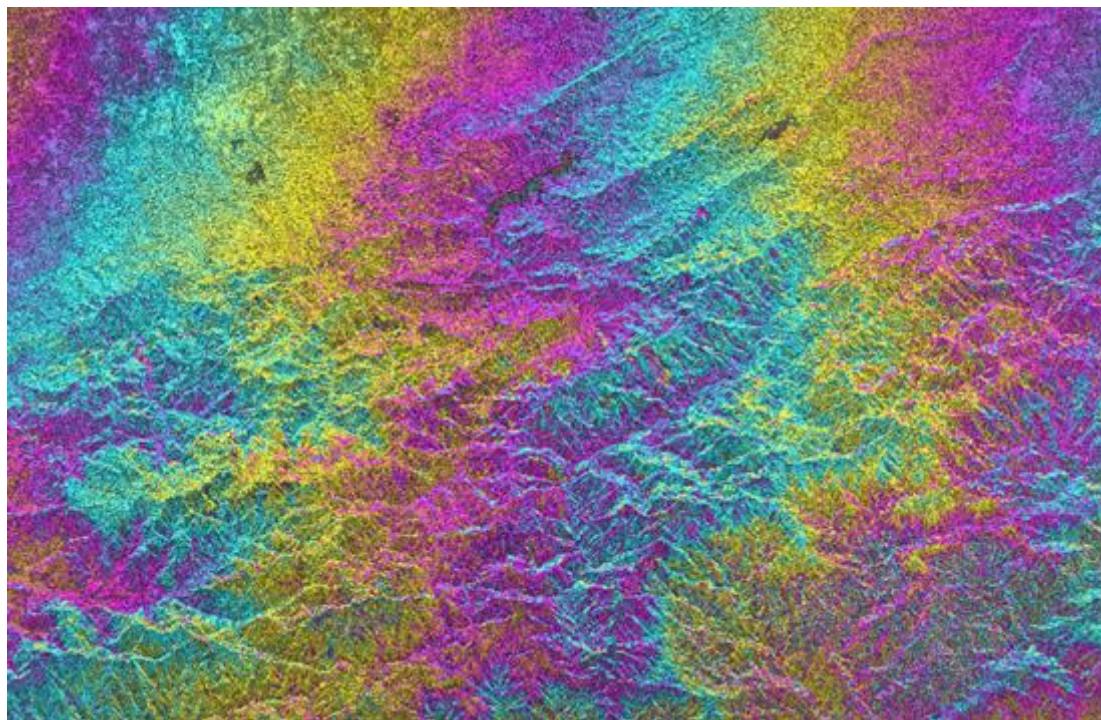


圖2-5 軌道誤差示意圖

(二)大氣效應

SAR 影像屬於主動觀測的遙測方式，在產生及接收雷達波的過程中不受天候及光線限制，但仍會受到大氣中的各種因素而產生訊號延遲，進而影響觀測精度，其中大氣效應主要來自於對流層的影響，其來源有水氣造成的濕延遲，以及壓力和溫度造成的乾延遲(林士淵等，2015)，訊號延遲的結果會造成影像解算錯誤(圖 2-6)，其次電離層干擾也會造成訊號誤差，且波長越長其造成的誤差也越大，以上皆為大氣效應造成觀測誤差來源。

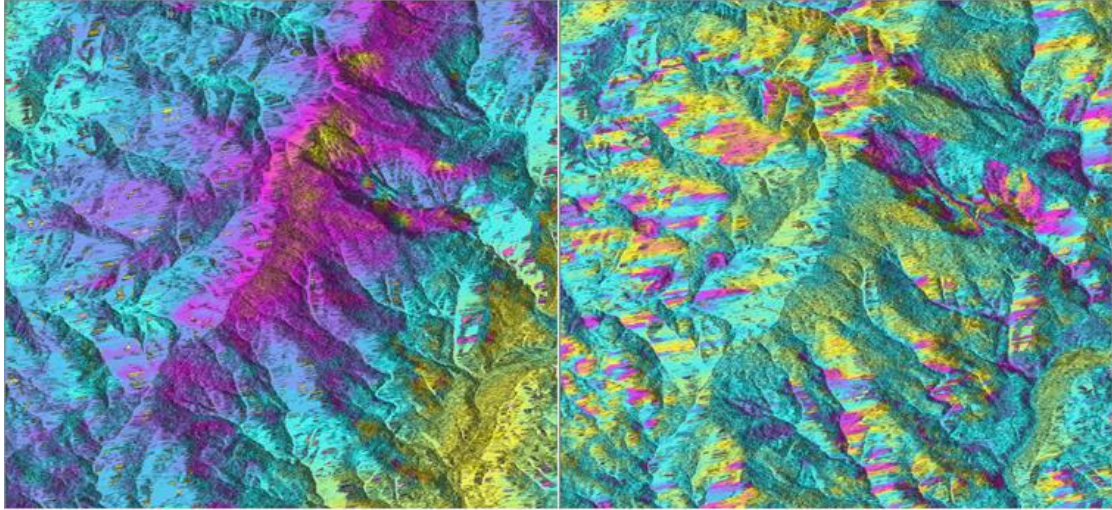


圖2-6 大氣效應示意圖

(三)地形誤差

差分干涉的處理中，使用兩幅 SAR 影像產生干涉影像後，一般會使用已知的 DEM 模擬出全相位圖（地形相位圖），並以干涉影像扣除地形相位，藉此去除地形造成的相位變化，然而若模擬用的 DEM 與 SAR 觀測時的地形不同，則會產生多餘的相位差，造成地形變化判斷的誤差，一般而言地形的相位誤差會隨基線長度增加，產生的誤差在 10mm 以內，若地形有發生大規模變化，則須注意採用的 DEM 年份。

(四)雜訊

雜訊來源較為多元，主要可能是時間基線過長使地上物失去相關性，或是衛星軌道的空間基線過長失去相關性，造成大規模的雜訊來源；另外在地上物散射特性複雜的區域：如森林，可能使地上物反射的強度發生衰減或疊加的情形，造成雷達影像呈現斑駁的情形，採用波長較長的 SAR 影像可減少森林的雜訊影響，並搭配適當濾波模式，可消除部份雜訊。

(五)空間時間去相關：

DInSAR 對於相位資訊相當嚴格，若兩幅影像拍攝的時間過長，或是地面發生劇烈變化，導致原本相鄰兩點超過使用衛星的半波長 ($\lambda/2$ ，ALOS1 為 11.8cm)，即超出 SAR 影像判釋的相位限制而無法形成干涉環，本研究中僅以地表發生微變量區域作為未來可能發生崩塌的潛在崩塌區，若計算期間發生崩塌失去相關性則無法產生干涉環。

(六)地形效應

雷達波採側視入射地面，並接收雷達回波，如圖 2-7 (a)，此過程中因地形起伏產生的幾何誤差稱作地形效應，地形的起伏嚴重時會造成雷達回波的解算錯誤，一般而言有三種情形在對山區進行分析時較容易發生：

1. 前坡縮短：雷達入射方向的坡面，在接收雷達波時，因地形起伏而縮短了接收的斜距，在雷達影像上產生壓縮的現象，如圖 2-7 (b)。
2. 疊置：此為前坡縮短的極端現象，由於本來地形上屬於不同高度的散射點，卻因方位向與雷達的斜距相同，當雷達波成像時，將本來不同位置的回波，重疊為一像素，甚至發生坡頂與波址翻轉的現象，因而無法分析出其真實的相位差，以至於相位還原後也無法取得該區域的變形值，如圖 2-7 (c)。
3. 陰影：在雷達波發出時，受到地形遮蔽，使雷達波無法抵達地面進行反射，進而使回波中產生一片無法成像的區域，如圖 2-7 (d)。

本研究中的山區因地勢變化急遽，合成孔徑雷達的成像受到地形效應影響較大，前坡縮短的效應在地理編碼時，可進行幾何校正，而針對無法校正的疊置陰影效應區則產生遮罩，在後續分析時排除，以避免將錯誤的地形變化值列入，影響統計結果。

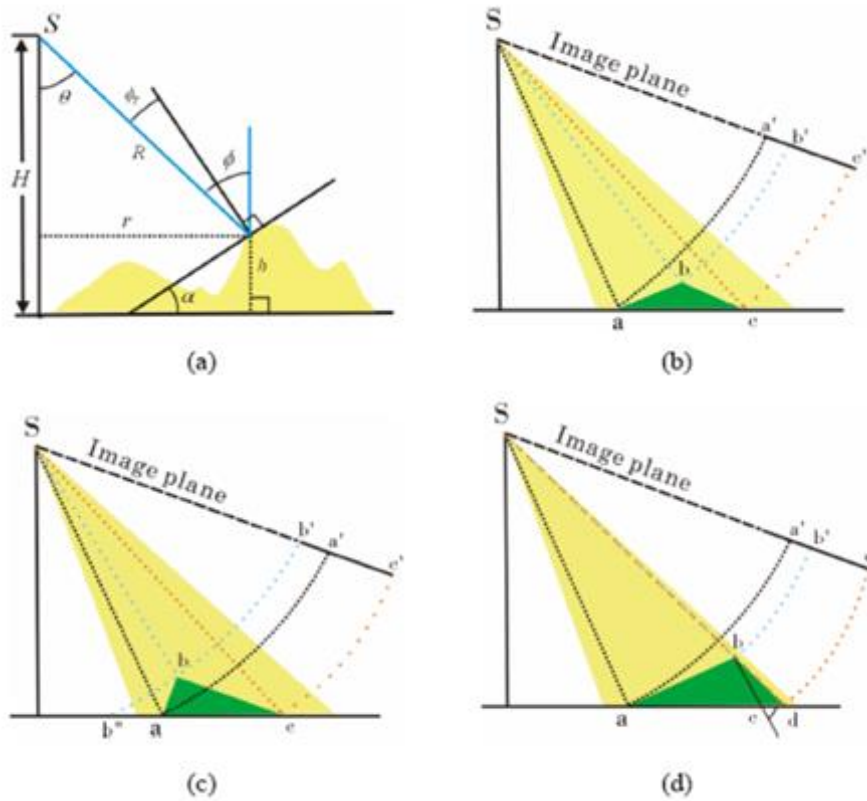


圖2-7 受地形效應影響情形

(圖片摘自何世紀，2006)

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，流程如圖 2-8。

另一方面，為使 DInSAR 技術的分析結果中能消除地殼變動所造成的變形，本研究中擬運用研究區周邊的 GPS 接收站做為控制點進行校正，得到邊坡位置與臨近校正點的相對變形，用以弭平因地殼變動所造成的地形變化。

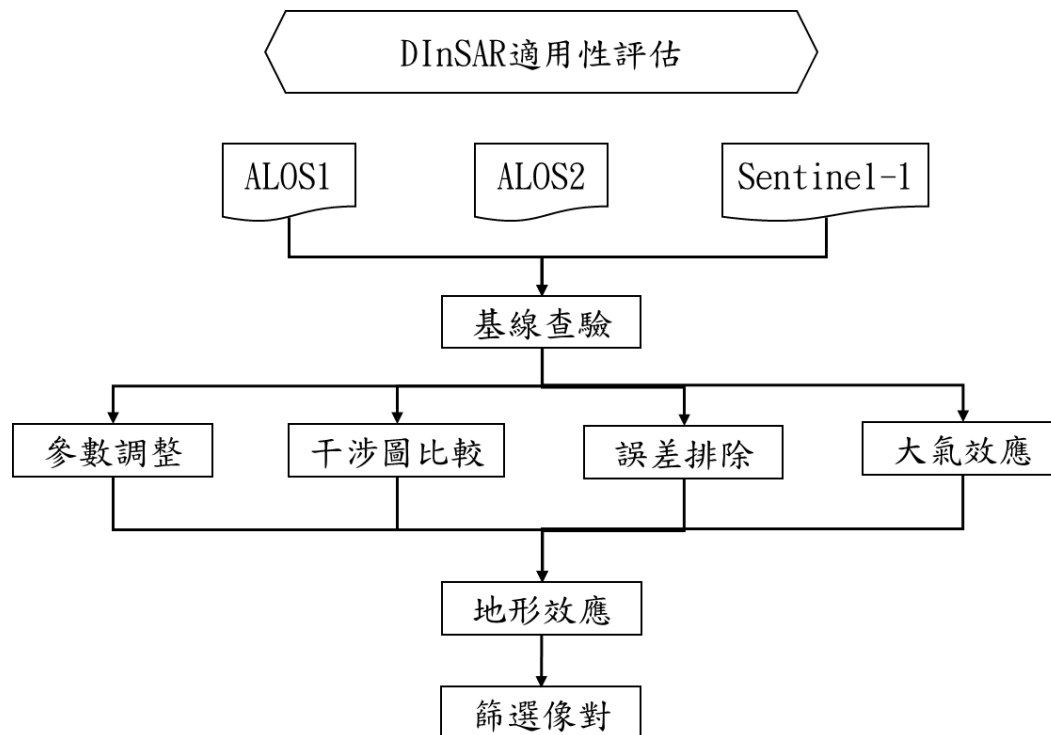


圖2-8 適用性評估流程

二、崩塌範圍探測技術建立

本研究運用 NDSI 分析建立快速崩塌範圍探測技術，並結合現有衛星判釋崩塌範圍，完成分析結果驗證，NDSI 分析流程需將兩影像進行多視平均後將影像套合，經過濾波消除雜訊，然後進行地理坐標投影及輻射校正使影像正規化，處理後的兩幅影像計算後向散射規一化指標(NDSI)，設定 NDSI 門檻值及扣除地型效應影響較嚴重區域，為取出山區變化的成果，需設定坡度門檻值移除非坡地區域，完成後得到的影像將相鄰的影像合併為一區塊。

NDSI 分析時多少會因地上植生特性產生雜訊，擬運用面積門檻值濾除，根據使用的衛星解析度不同，需進行雜點的濾除，以本研究使用的 ALOS1、ALOS2、Sentinel 衛星而言，需建立不同的濾除門檻，初步先以 4 x 4 個 pixel 為最低濾除標準，逐步尋找最適門檻值，過去研究顯示以 ALOS1 SAR 判釋的崩塌範圍有 73% 以上可成功套合真實

崩塌地(王國隆等，2019)，本計畫中擬以多個波段個別建立分析模式與相關參數，整體影像分析進行流程如圖 2-9 所示，初步分析成果如圖 2-10 所示：

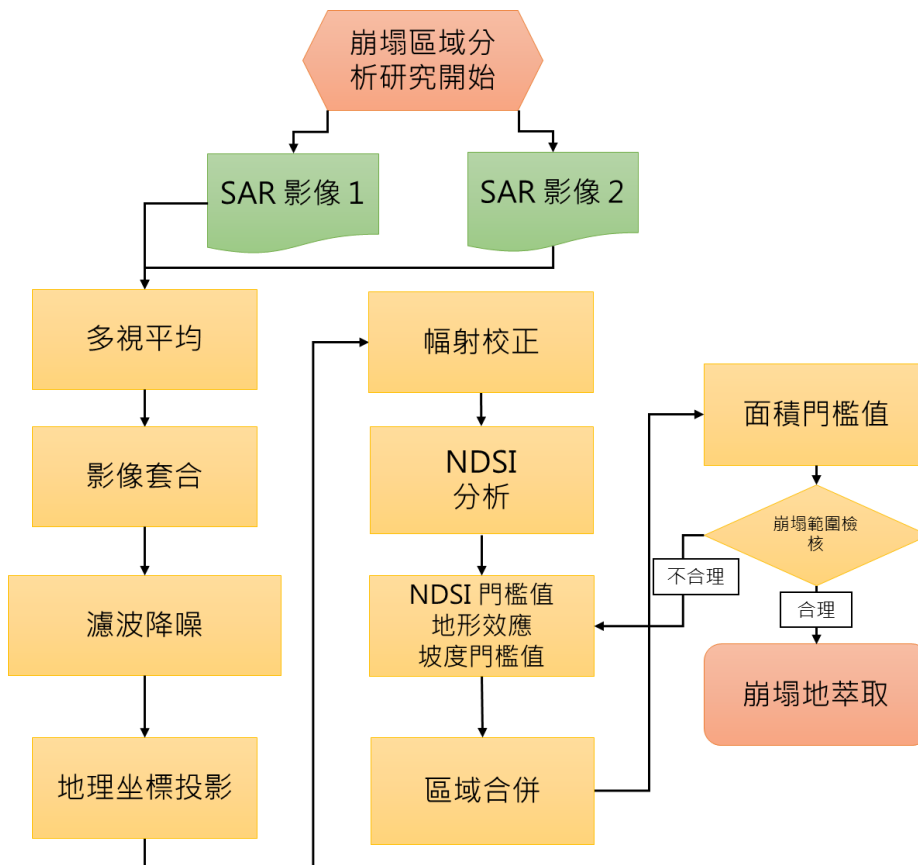


圖2-9 NDSI 萃取崩塌地處理流程圖

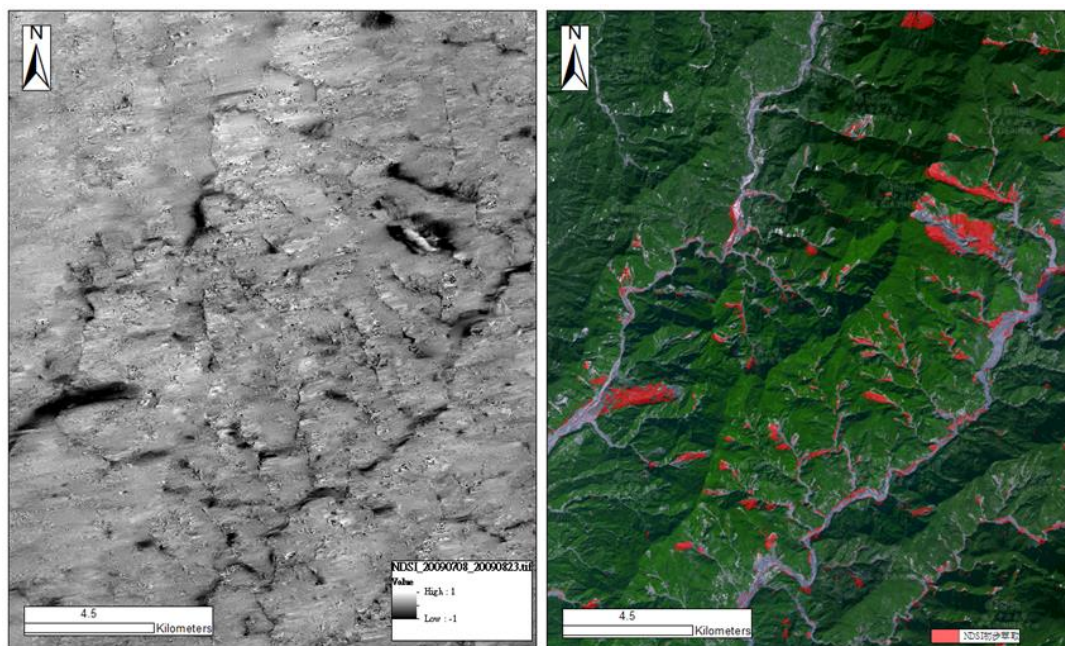


圖2-10 ALSO1 NDSI 初步分析結果

(左：NDSI 分析示意圖、右：初步萃取及衛星套圖，王國隆等，2019)

為檢核崩塌判釋結果，擬利用混淆矩陣（confusion matrix）和 KAPPA 統計值進行分類的精度評估，混淆矩陣適用於分類像元與真實像元的比較陣列，一般列表示為分類的結果，而行表示為真實的檢核資料，其示意圖如圖 2-11 所示，本研究中擬以多期衛星判釋全島崩塌地圖為真實崩塌的檢核資料，萃取兩期之間的崩塌擴大區域，與 NDSI 萃取的發生變異處，進行精度檢核與驗證。

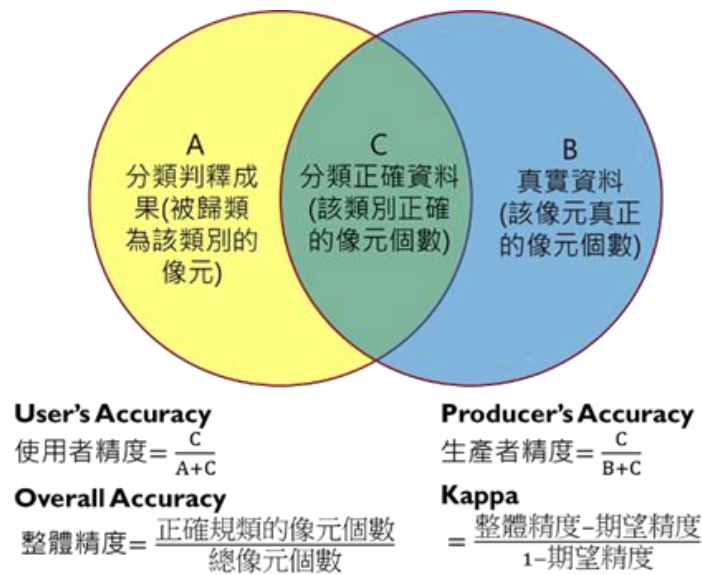


圖2-11 混淆矩陣精度表示示意圖

三、崩塌滑動量體分析

常見的崩塌體積的計算方法一般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等方式，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

據前期適用性評估後篩選的影像相對，進行 DInSAR 分析，並以分析得知的地表變形量，以有限元素法推估崩塌量體。

DInSAR 技術初步可運用解算過程中產生的干涉條紋圈繪潛在崩塌變形區，進一步相位還原後可得到地表變形量，相位還原過程中需有良好的地表控制點(GCP)進行軌道精煉參考，用於排除軌道誤差，且控制點的選取必須在相位良好、無地形變化的區域，在大面積的選取上尤其困難，本研究運用中研院的 GPSLAB 整合的 GPS 量測資料做 GCP 選取參考，並用以驗證地形變化量的分析精度。

初步計算的地表變形量觀測方向地表變化量(Line of Sight, LOS)，並投影成垂直分量， $D_{los} = D_{vertical} \times \cos \theta$ ，做為滑動量參考，若滑動區域發生了刷深或滑動的現象，理論上垂直變化量會出現明顯的變化，累積多期的分析結果，得以統計出該崩塌地區的滑動量體，並回歸出崩塌面積與體積的回歸式，過去研究顯示荖濃溪一帶的崩塌殘餘量體流出有上限值為 $V = 0.3037A^{1.0287}$ (V 為流失體積、A 為崩塌面積) (如圖 2-12，王國隆等，2019)

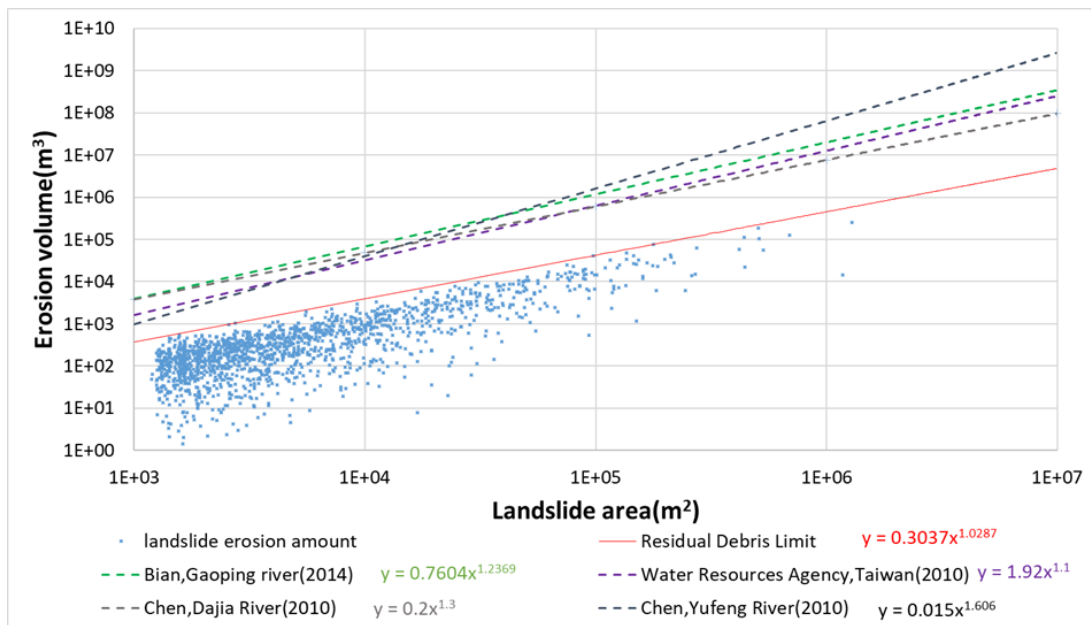


圖2-12 殘餘土沙流出量分析 (引用自王國隆等，2019)

然而 DInSAR 技術在使用上有最大相位變化的限制，若相鄰兩點的變動幅度超過雷達波的半波長時，干涉結果將會形成一團雜訊，因此一般較適用於邊坡破壞的潛變階段，本研究將篩選後可順利干涉的相對取出，並根據 DInSAR 分析的地表變形量作為監測值，以有限元素法進行分析，尋找多期的崩塌破壞面位置，用以推估崩塌滑動量體，最後與歷年拍攝之數值地形比對成果。

四、崩塌機制及潛勢範圍評估

本研究中為進行崩塌機制的探討，分別運用 NDSI 技術與 DInSAR 技術進行崩塌行為的分析，由於前述 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，而 NDSI 技術可以藉由測得地表散射條件改變，探測出發生崩塌的訊息，可用於互補或檢視 DInSAR 分析時超出相位限制的變動區域。

由於兩種分析技術在物理意義上並不相同，DInSAR 可計算出滑動量及潛在滑動區域，過去研究中曾發現多數潛在滑動區域會在多期判釋結果中重複出現變動徵兆，並可以模糊歸屬度分析出發生頻率較高的範圍（如圖 2-13，林俊廷等，2019），NDSI 能獲得崩塌範圍而無法計算滑動量體，但可用於套疊並檢視 DInSAR 分析結果，在組合運用上因不同波段的影像有分析限制上的差異，因此不同衛星產製成果的評估模式必須加以調整。

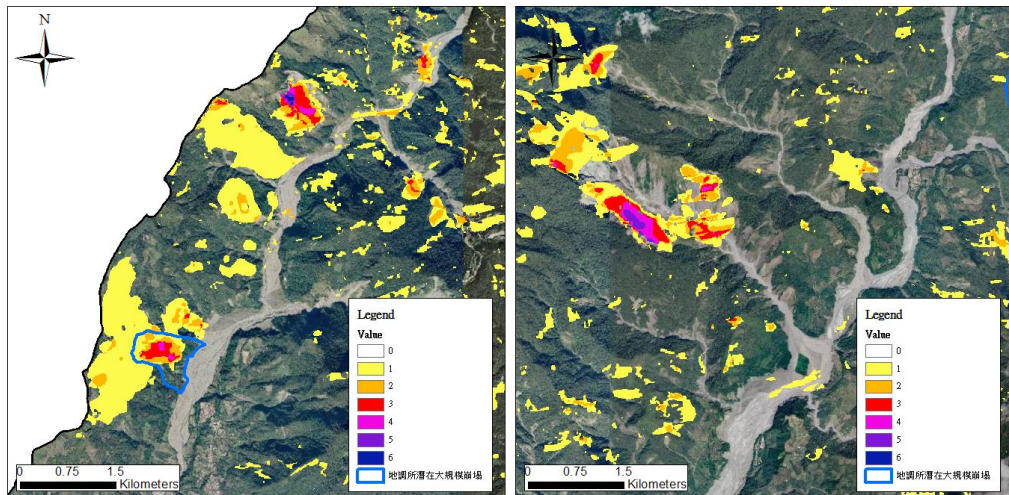


圖2-13 DInSAR 判釋重複發生滑動範圍

針對研究區域內由前項工作完成的適用性分析，先完成各波段影像的分析差異評估，將先建立初步的評估模型，而以 DInSAR 完成各期滑動量評估後，以 NDSI 技術劃出各事件新生崩塌的擴大範圍，依時序排定各期分析結果，依照前期的地表變形量進行地質參數率訂，若 NDSI 技術探測到崩塌擴大後，再根據 DInSAR 分析結果重新以有限元素法分析滑動面位置，以前期得到率定模擬參數進行調整，以符合崩塌擴大後的地表變形量，以此逐步建立邊坡破壞模型，用以推估滑動量體及崩塌機制。

DInSAR 分析之地表變位分析，可進行崩塌潛勢範圍的圈繪，以本案研究的寶來溫泉區完成崩塌探討後，進一步搜尋周遭相同地質區域，以類似的地表變動條件下建立崩塌潛勢分析方法，找出其他有滑動可能的崩塌潛勢區域，作為日後防災規劃的建議指標。

第三章 工作進度

第一節 DInSAR 分析技術適用性及篩選區間

單一區間 DInSAR 分析要能順利進行差分干涉測量，需考量到軌道誤差、大氣效應、地形誤差、地形效應、空間時間去相關、噪訊等因素，上述因素中，軌道誤差可以透過控制點排除，地形誤差在地形變化小的狀況可以忽略不計，而本計畫中主要針對寶來崩塌地做分析，在限縮範圍的情況下，寶來的崩塌較不受地形效應影響，而噪訊則是普遍存在，可在濾波後降低期影響，因此在此區域中能否適用的主要條件只剩下大氣效應干擾、空間時間去相關兩種主要因素，以下就相關考量進行探討。

在第一階段中 Sentinel1 因屬 C 波段影像，波長難以穿透植生，故在山區難以建立相關性，並不適用 DInSAR 的單一區間分析模式，需採用 SBASInSAR 等干涉堆疊技術截取有效的干涉資訊，而 ALOS1 影像採用的 L 波段對於山區植生具有良好繞射的效果，因此從 ALOS1 含括荖濃溪拍攝範圍的 20 幅影像，依時序共組成 19 組像對進行差分干涉分析，並就成果進行篩選，各期的差分干涉成果如 0。

差分干涉成果適用原則從上述描述中，可以空間時間相關性及有無大氣效應干擾做為基本判斷指標，空間及時間的相關性會受到幾點因素影響，第一為軌道基線是否超過臨界值，超過即無法進行干涉，由於此 20 幅影像皆為同一軌道拍攝，因此初步評估軌道基線並無超出臨界基線的可能性，第二為時間基線過長，也就是兩次拍攝時間間隔過久，導致地上物失去相關性而成為雜訊，如圖 3-1 所示為 2010/2/23~2010/7/11 期間的影像相關性(左圖)與干涉成果(右圖)示意圖，此為時間基線過長導致的失相關情形，在左上角處因相關性降低，致使相位還原後成為雜訊，此類影像經人工辨識後濾除，各時間區間適用情形請參考表 3-1。

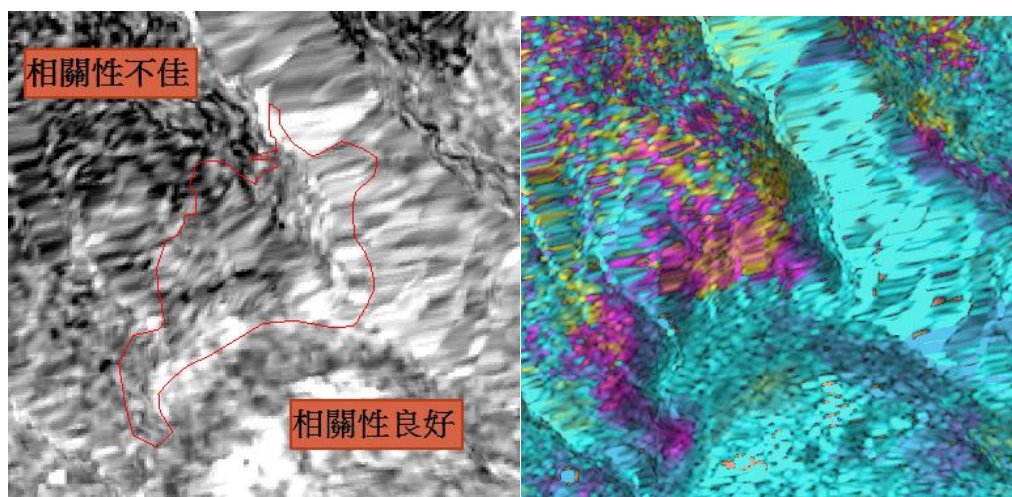
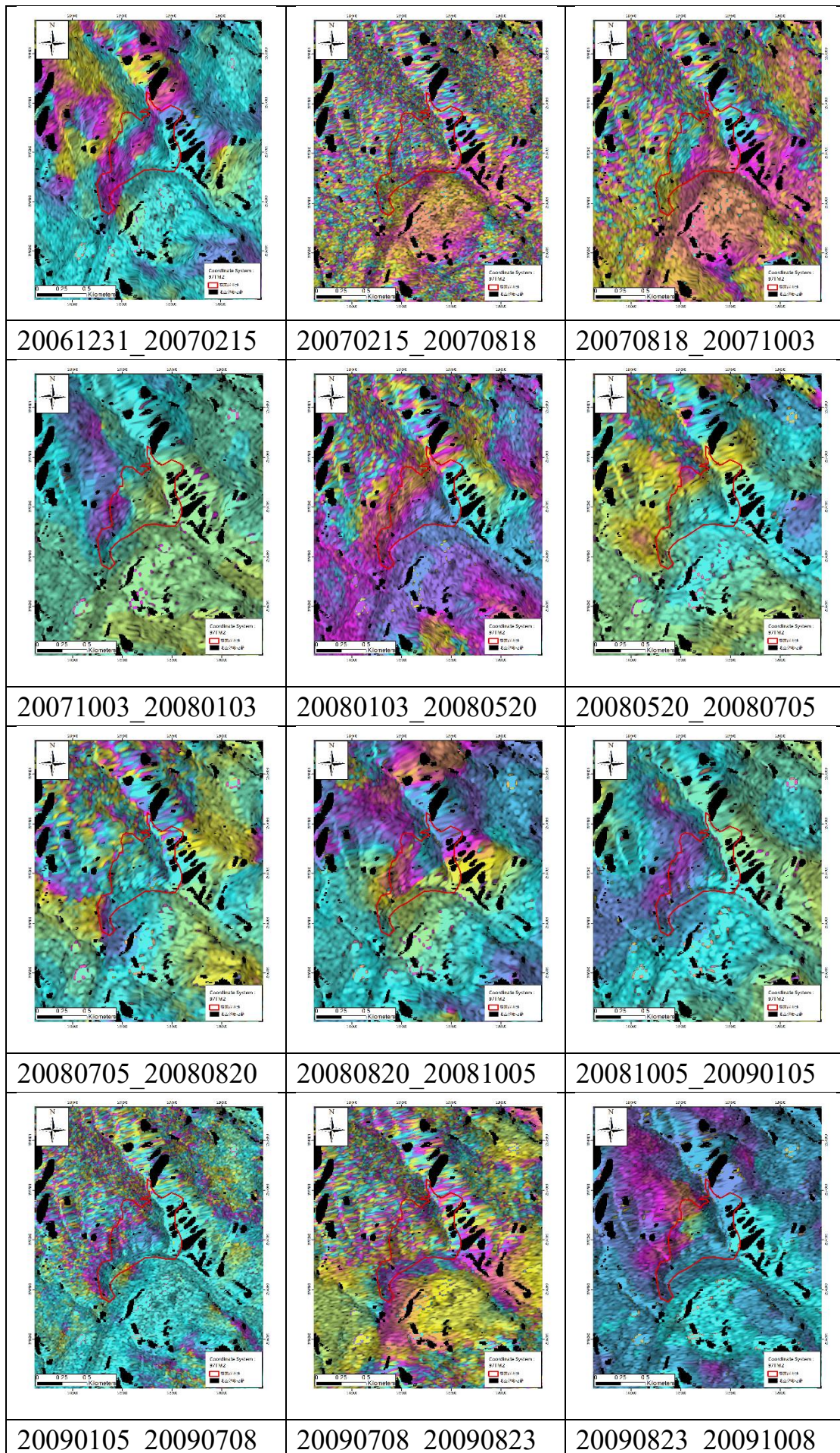


圖3-1 SAR 影像相關性與干涉成果

對照圖 3-2 的差分干涉成果可以發現當時時間基線超出一個周期以上時(ALOS1 的重現周期為 46 天)，地上失去相關性的情形會很明顯，如 2007/02/15~2007/08/18、2009/01/05~2009/07/08 等像對中，都因時間基線而喪失相關性，第三種失相關性可能為地上物發生較大的地形變化，導致失去相位變化超出半波長的探測限制，這在嚴重的降雨事件中容易發生，例如 2009/07/08~2009/08/23 的像對受到莫拉克風災影響，地上的相關性很低，難以進行差分干涉分析，由於此量化指標目前難以建立，因此在本研究中主要配合相關係數圖、差分干涉圖及基線分析結果輔助人工判釋及篩選像對，在排除相關性限制後，從差分干涉圖中搜尋是否有受到大氣效應影響較大的時間像對，其中 2008/08/20~2008/10/05 受影響較大而移除後續分析。



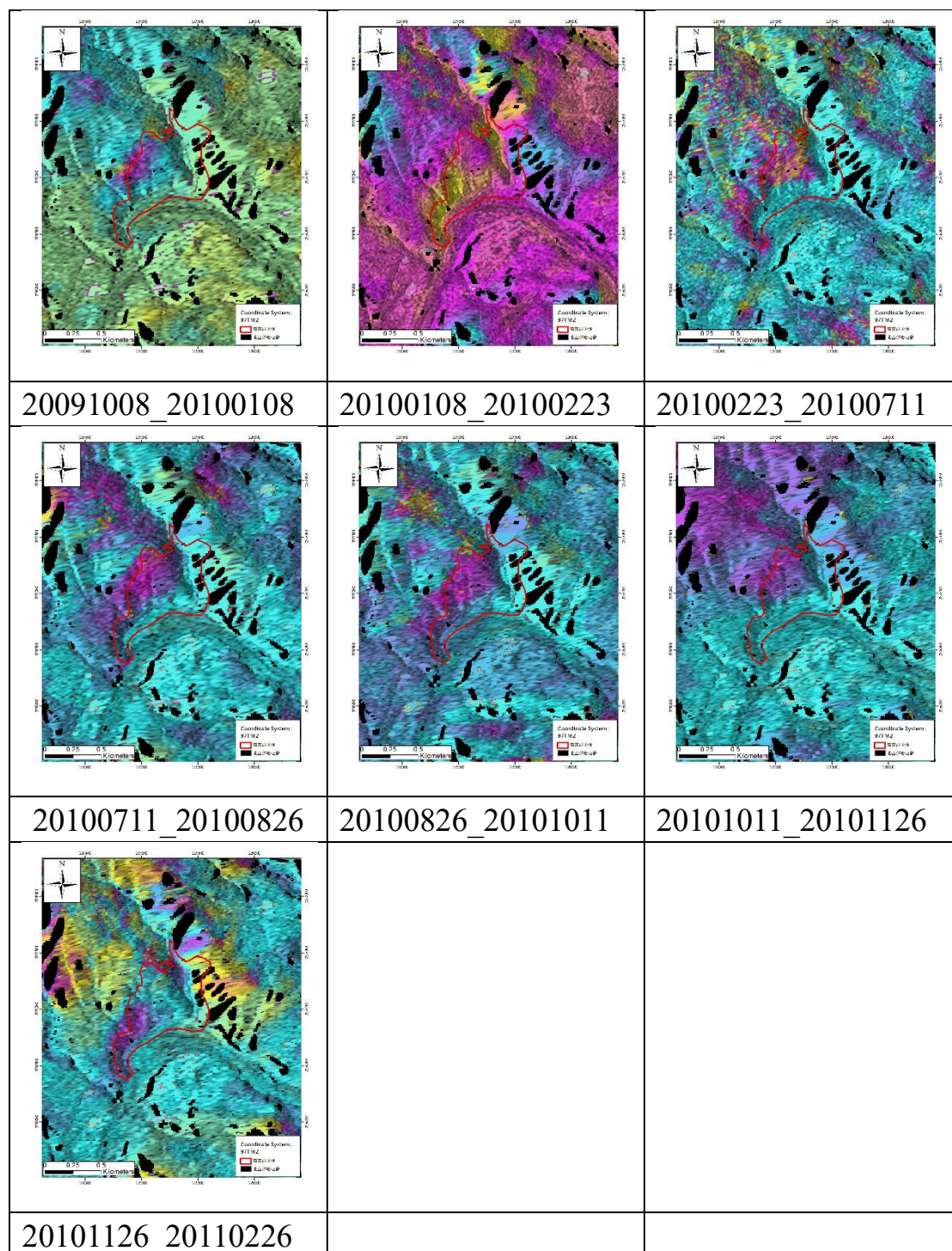


圖3-2 各時序差分干涉成果圖

表3-1 ALOS1 DInSAR 像對篩選成果

| 時間區間 | 時間基線 | 大氣干擾 | 干涉相關性 | 評估 |
|-------------------|------|------|-------|-----|
| 20061231_20070215 | 46 | | | |
| 20070215_20070818 | 184 | | 低 | 不適用 |
| 20070818_20071003 | 46 | | 低 | 不適用 |
| 20071003_20080103 | 92 | | | |
| 20080103_20080520 | 138 | | 低 | 不適用 |
| 20080520_20080705 | 46 | | 低 | 不適用 |
| 20080705_20080820 | 46 | | 低 | 不適用 |
| 20080820_20081005 | 46 | 嚴重 | | 不適用 |
| 20081005_20090105 | 92 | | | |
| 20090105_20090708 | 184 | | 低 | 不適用 |
| 20090708_20090823 | 46 | | 低 | 不適用 |
| 20090823_20091008 | 46 | | | |
| 20091008_20100108 | 92 | | | |
| 20100108_20100223 | 46 | | | |
| 20100223_20100711 | 138 | | 低 | 不適用 |
| 20100711_20100826 | 46 | | | |
| 20100826_20101011 | 46 | | | |
| 20101011_20101126 | 46 | | | |
| 20101126_20110226 | 92 | | | |

第二節 NDSI 崩塌範圍探測判釋範圍分析

NDSI 分析技術僅考慮 SAR 影像中的強度因素，也就是後向散射係數的強度，因此在分析上不同於相位容易受到相關性、變化量、大氣效應延遲等條件干擾，僅考慮強度因素的狀況下，SAR 影像因波長較長所以不受到雲霧等影響，有別於傳統光學影像對天候條件的限制，使其有惡劣氣候條件下的測量優勢，然而因解析度不足且是單波段影像，對於地上物的分類無法取代傳統光學影像，儘管近年來發展出極化分解(polarimetry decomposition)的分析技術，能提供一定程度的地上物判釋，但是需使用全偏極的接收模式，而各類 SAR 衛星的全偏極影像在台灣幾乎沒有影像產出，因此應用上仍有困難，因此本計畫中選擇結合 NDSI 分析技術，進行快速判釋地上物發生變化的概況，使防救災初期能建立崩塌範圍的探測技術。

由於雷達發射的電磁波具有電場向量的特性，可根據發射與接收方式記錄不同的極化模式，依地上物的類型會有不同的極化分布，植生覆蓋的區域符合體散射的散射形態，而當崩塌後形成裸露地，則將呈現表面散射的形態，而異相極化(HV、VH)對於散射形態的改變更為敏感，在崩塌前後 HV 極化會有明顯的變化，因此可運用災害前後 HV 極化的 SAR 影像來進行崩塌範圍探測。

一、ALOS1 衛星分析成果

本研究中從 ALOS1 取出 12 組 HV 極化影像進行 NDSI 分析，依時序共產出 11 組強度變化影像，其中黃色部分為受到衛星地形效應影響的範圍，需加以濾除，並以光學衛星影像為基準畫設 2017 年的裸露地範圍(紅色範圍)，影像根據時間軸列如圖 3-3，各時序 NDSI 影像時間如圖 3-4。

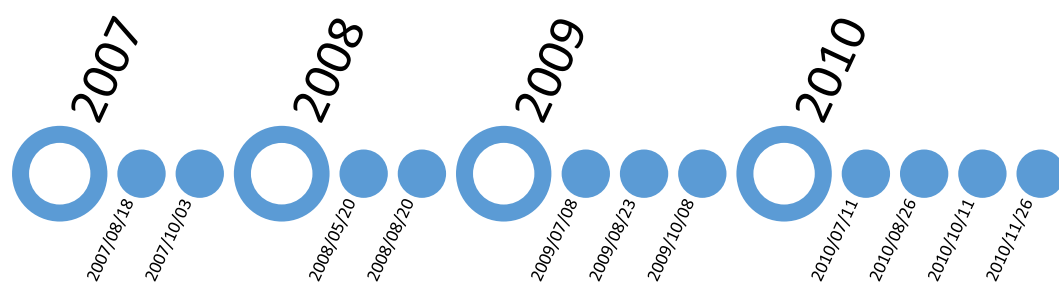


圖3-3 ALOS1 HV 極化影像拍攝時間

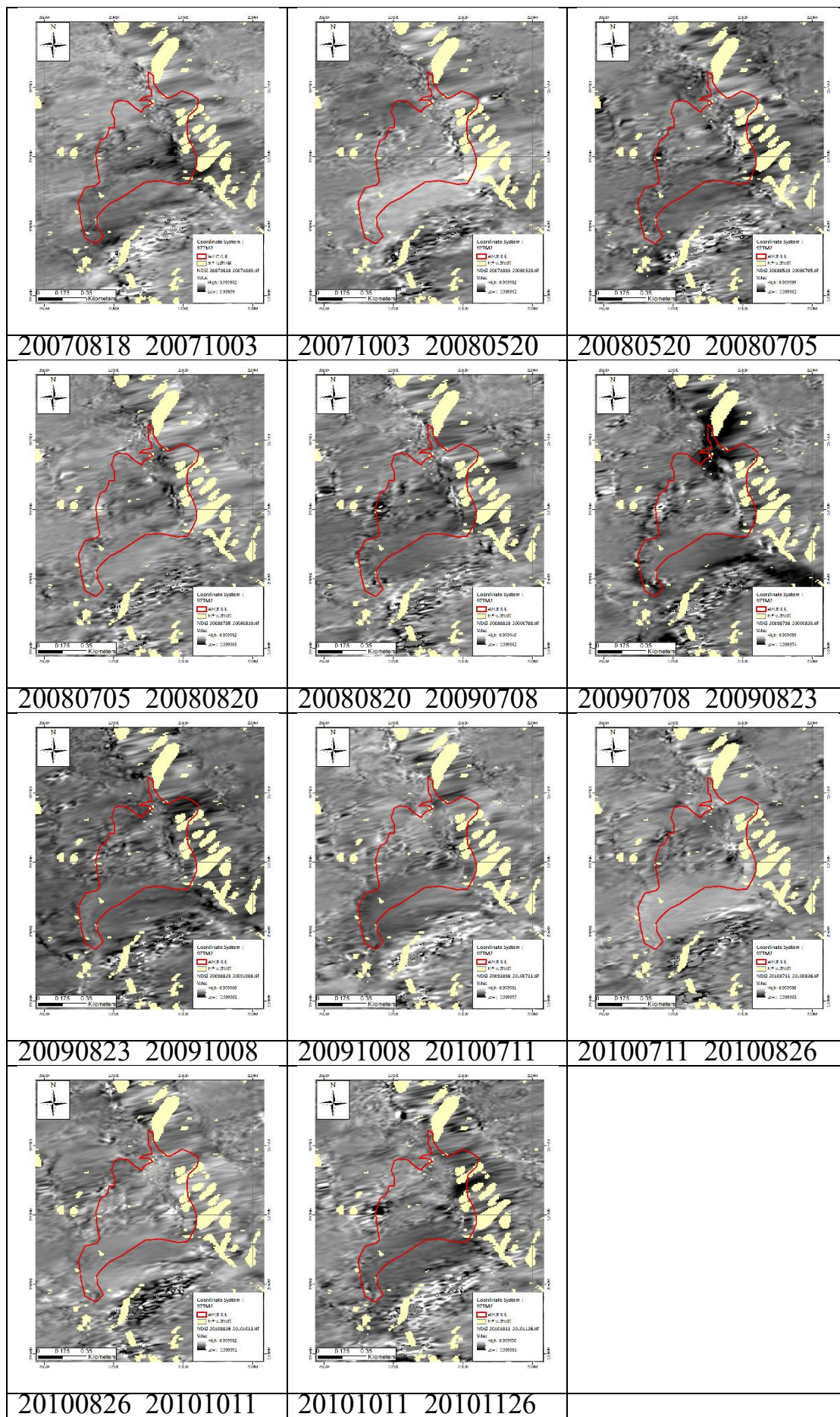


圖3-4 各時序 NDSI 分析成果圖

影像含括的這段時間中，可參考中央氣象局的高中氣象站(編號 C1V230、C1V231，坐標：120.7167，23.1349)，該站屬高雄市桃源區但鄰近本計畫研究區的寶來崩塌地，該區從 2006~2011 的降雨如圖 3-5 所示，在這之中比較重要的事件為 2006 年 6 月的梅雨鋒面累積 1172mm 雨量、7 月的西南氣流累積 1224mm 的雨量、2007 年 8 月的聖帕颱風累積 1047.5mm 雨量、2008 年 7 月的卡玫基颱風累積 854mm 雨量、9 月的辛樂克颱風累積 791mm 雨量、2009 年 8 月的莫拉克颱風累積 2373mm 雨量。

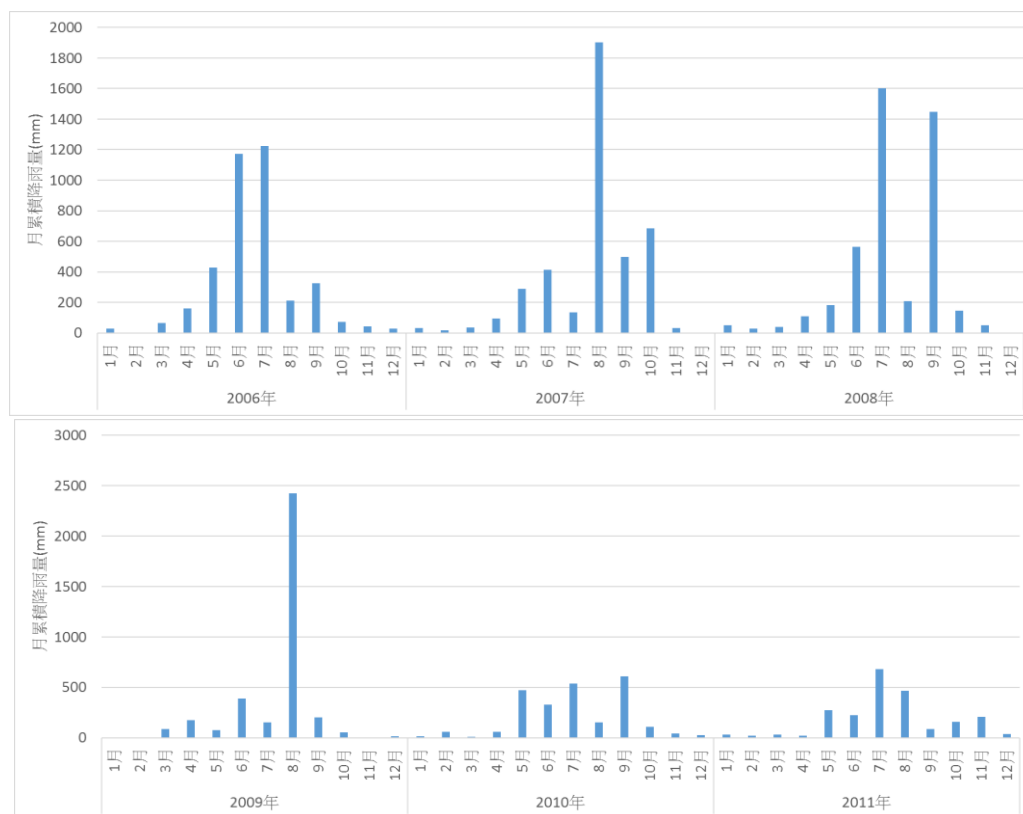


圖3-5 高中雨量站 2006~2011 年降雨分布圖

從圖 3-5 中的分析結果與雨量資料對照下，可以從 2007、2008、2009 三年的強降雨事件崩塌事件對照，20070818~20071003、20080705~20080820、20080820~20090708、20090708~20090823 四個時間序中有因降雨事件而產生的崩塌，在影像呈現中呈現黑色的區域，由於在影像分析中較難辨別，因此本計畫引用王國隆等 (2019)，提出的 NDSI 建議值域範圍 $-1 < NDSI < \mu - 1.75\sigma$ ，其中 μ 代表整體影像平

均值， σ 代表影像標準差，以此值域可分析出 NDSI 影像中變動明顯的區域，以此方式進行各時期的 NDSI 值分離，其中 20070818~20071003、20080705~20080820、20090708~20090823 因個包含一次主要事件，且時間間隔較近，故取出後與 SPOT5 衛星影像比對崩塌位置，成果如圖 3-6，圖中分別為各 SPOT5 衛星各事件前、後的全色態影像，以及套疊 NDSI 判釋結果的該年 SPOT5 衛星假色影像，各事件中的 NDSI 判釋成果與光學影像判釋的崩塌位置相當符合，將光學影像與 NDSI 判釋像元設定為 10m 解析度進行比較，並移除受地形效應影響像元後統計分類像元的歸類成果，在 2007/8/18~2007/10/3 的分類成果中，像元判釋為崩塌的精確率 21%、整體判釋準確率 88.7%，kappa 值 15.2%，2008/7/5~2008/8/20 分類成果中，像元判釋為崩塌的精確率 38.2%、整體判釋準確率 91.4%，kappa 值 21.9%，2009/7/8~2009/8/23 分類成果中，像元判釋為崩塌的精確率 52.4%、整體判釋準確率 84.73%，kappa 值 33%，直接像元分類 SAR 影像受到解析度限制、拍攝角度、校正偏移等因素影響精度，若將真實崩塌地與判釋崩塌區域進行套疊，則寶來崩塌區的 NDSI 判釋崩塌區域可判釋出 2007/8/18~2007/10/3 的 80% 新生崩塌地，2008/7/5~2008/8/20 的 100% 崩塌地，2009/7/8~2009/8/23 的 100% 崩塌地，這顯示 SAR 的 NDSI 技術在崩塌範圍的判釋準確度雖不如光學影像清晰，但對於判釋出發生的崩塌的區域仍有足夠的參考性，且不受天候限制，在災時應用能提供另一個快速判斷的基準。

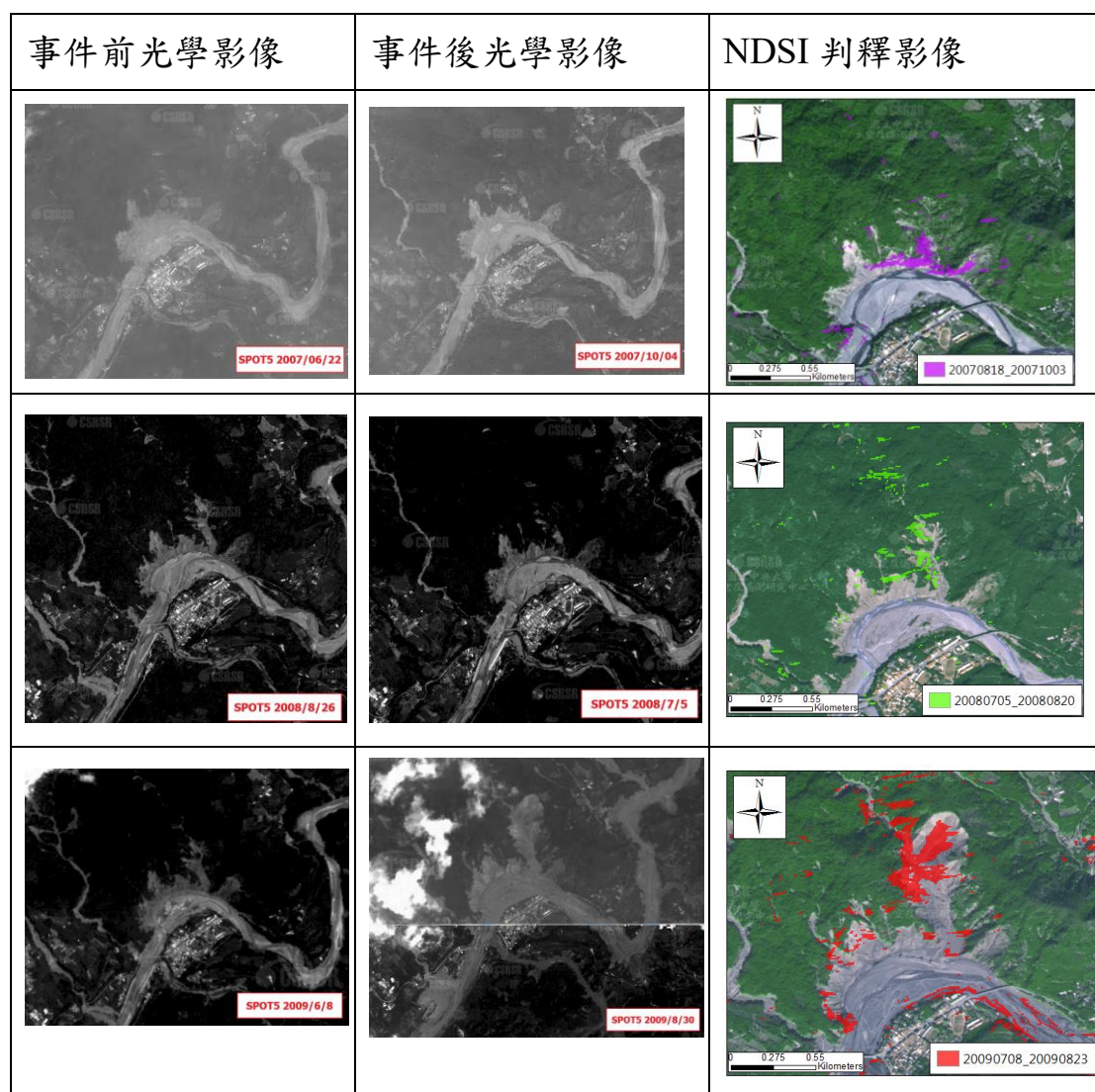


圖3-6 NDSI 與 SPOT5 光學衛星比對成果圖

(資料來源：中央大學太空及遙測研究中心)

將 4 次主要事件分析結果套疊於 2017 年正射影像上，成果如圖 3-7，圖中咖啡色區域為林務局的 2007 年崩塌目錄，該圖資是由 2007 年 1~6 月的福衛二號影像判釋成果，因此可視為 2007 上半年之前的原始崩塌範圍，而從同年 8 月開始崩塌地進一步擴大，之後逐年有向上發展的趨勢，而該趨勢在歷次的 NDSI 判釋成果中也有清楚的顯示，從紫色 (20070818~20071003)、綠色 (20080705~20080820)、藍色 (20080820~20090708)、紅色 (20090708~20090823)，分別代表 4 次事件，而影響最大的事件則是 2009 年的莫拉克風災，從圖中可以發現各事件判釋出的崩塌範圍，套合後與最後的崩塌範圍相當符合。

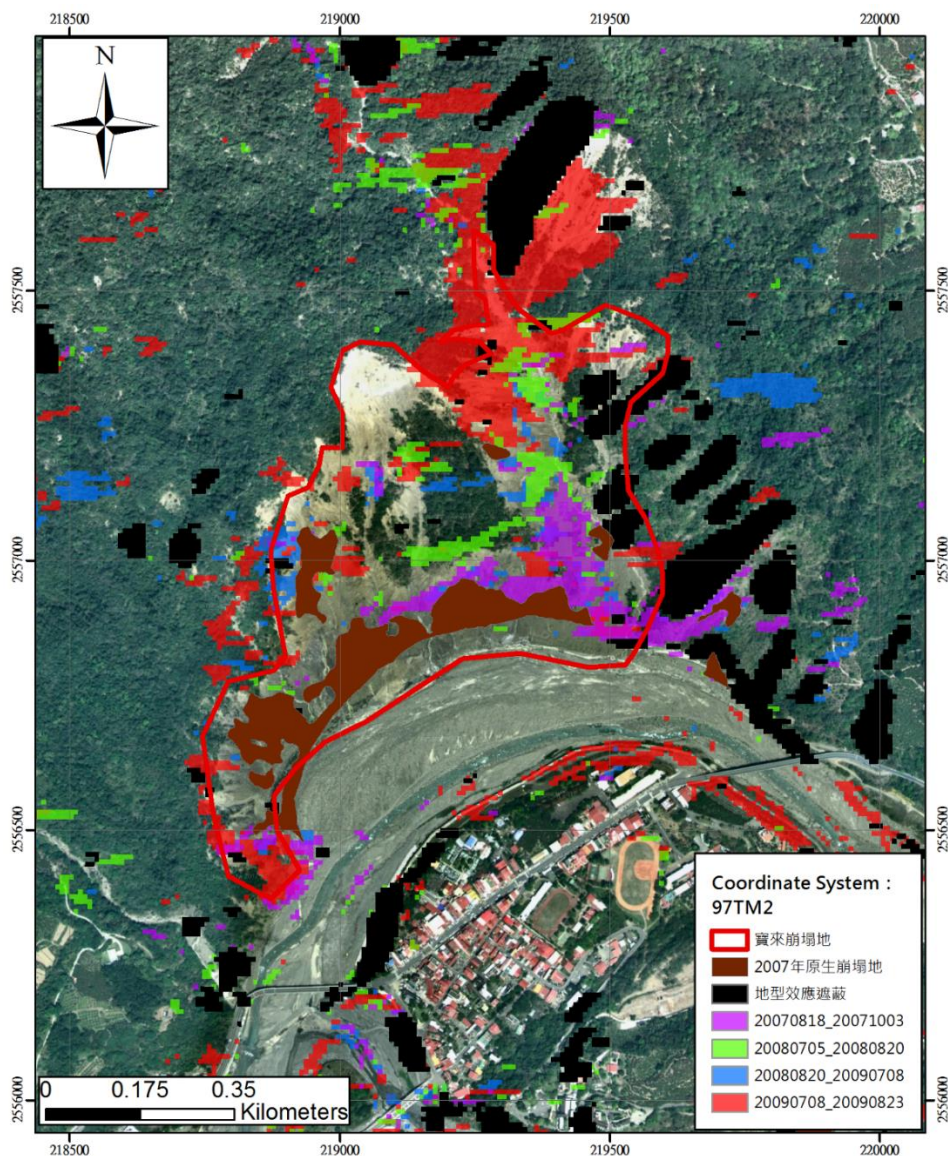


圖3-7 2007~2009 各事件 ALOS1 NDSI 套疊成果

二、Sentinel-1 初步分析結果

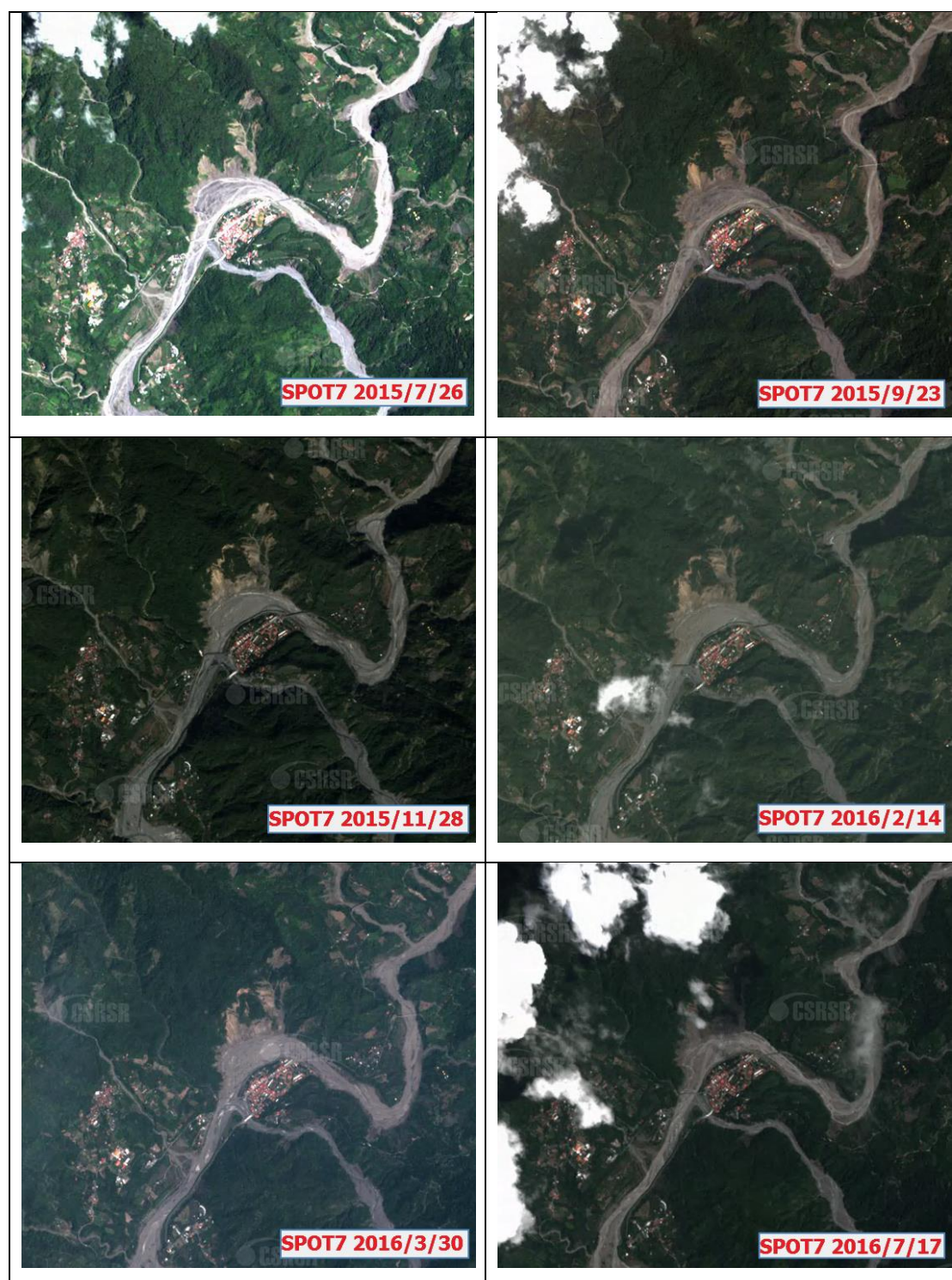
Sentinel-1 衛星由歐盟太空總署從 2015 年發射至今穩定運作中，其產出為 C 波段 SAR 影像，現今圖資可免費下載使用，由於 C 波段影像在穿透力上不如 L 波段影像，因此對植生的敏感程度需另行評估指標，根據姜壽浩(2019)的研究中，運用了 sentinel-1 在 2016 年的 6 月 11 日的降雨事件中，曾文溪及高屏溪流域有部分地區發生崩塌，並且以 NDSI 技術進行紋理分析驗證了部分崩塌區域，本計畫研究區域的寶來崩塌地由 SPOT6、SPOT7 的衛星影像的變化顯示(如表 3-2)，該處崩塌地雖然從 2015 年 9 月新的崩崖開始逐漸擴大，並有岩體向

下滑落的情形，但是在 2016 年 7 月以前，該崩塌地並無明顯的擴大，而較小的崩崖雖然在光學影像可觀測，但受限於 SAR 影像解析度及解算限制，在崩塌面積低於 100 平方公尺時判釋率約 30%，因此此時間區間中 NDSI 技術無法分析出崩塌變化，直到 2016 年 10 月 12 日的衛星影像中才看出明顯移動後，崩塌地有進一步擴大的情形。

本研究中將 Sentinel-1 的 VV、VH 極化個別進行 NDSI 分析，其成果如所示，將光學影像判釋結果：擴大的崩塌區域以綠色框線表示，紅色框線表示現有的崩塌範圍，可以發現不論 VV 極化或是 VH 極化的 NDSI 值中，擴大崩塌區跟原裸露地都有明顯的差異變化，然而在植生茂盛區域則受限於 C 波段影像穿透性不足，因此受到的散射干擾較為嚴重，因此若以寶來崩塌地的 NDSI 判釋數值做為標準，進行其他區域的崩塌判釋，則會得到大片的判釋區域，這明顯不符合實際情況，在 Sentinel-1 的崩塌判釋上仍須考慮其他限制條件以加強其判釋準確性。

表3-2 2015~2016 寶來崩塌地變化情形

(資料來源：中央大學太空及遙測研究中心)



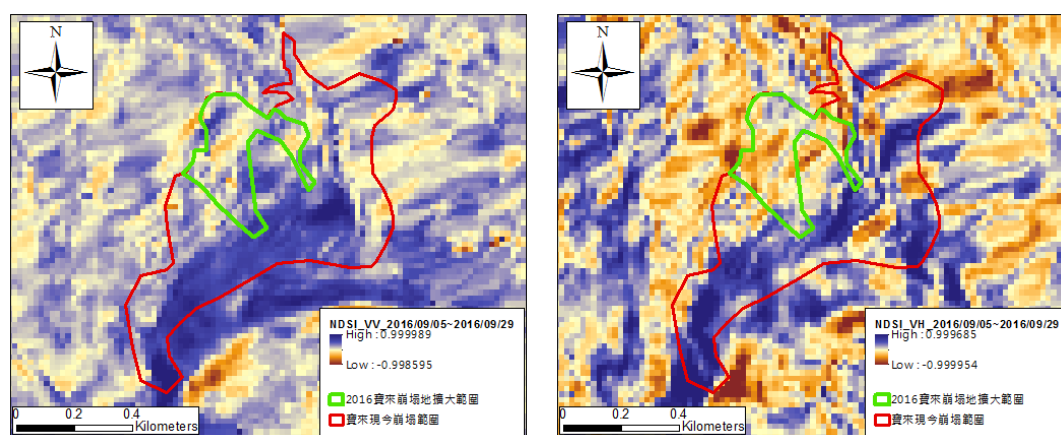


圖3-8 Sentinel-1 2016/9/5~2016/9/29 NDSI 分析成果

(左圖：VV 極化、右圖：VH 極化)

第三節 崩塌滑動量體分析

寶來崩塌地由於衛星資料產制區間不同，因此分為前後兩時期，前期 2006/12/31~2011/02/26 運用 ALOS1 SAR，後期 2016/12/22 日至 2020/06/28 運用 sentinel-1 SAR，以 SBASInSAR 技術分析崩塌地各期變位量後，統計總變化量。

從衛星影像變化中可得知(如圖 3-9)，寶來崩塌地從 2005 年開始發展、2006 年明顯擴大、2009 年受莫拉克風災影響進一步發展，至 2017 年時崩塌向上延伸，因此推測潛在的崩塌範圍將連續至稜線，並以 2011 年光達掃描影像圈繪紅色虛線的主崩區的潛勢範圍，本研究以此潛勢範圍進行崩塌量體統計。

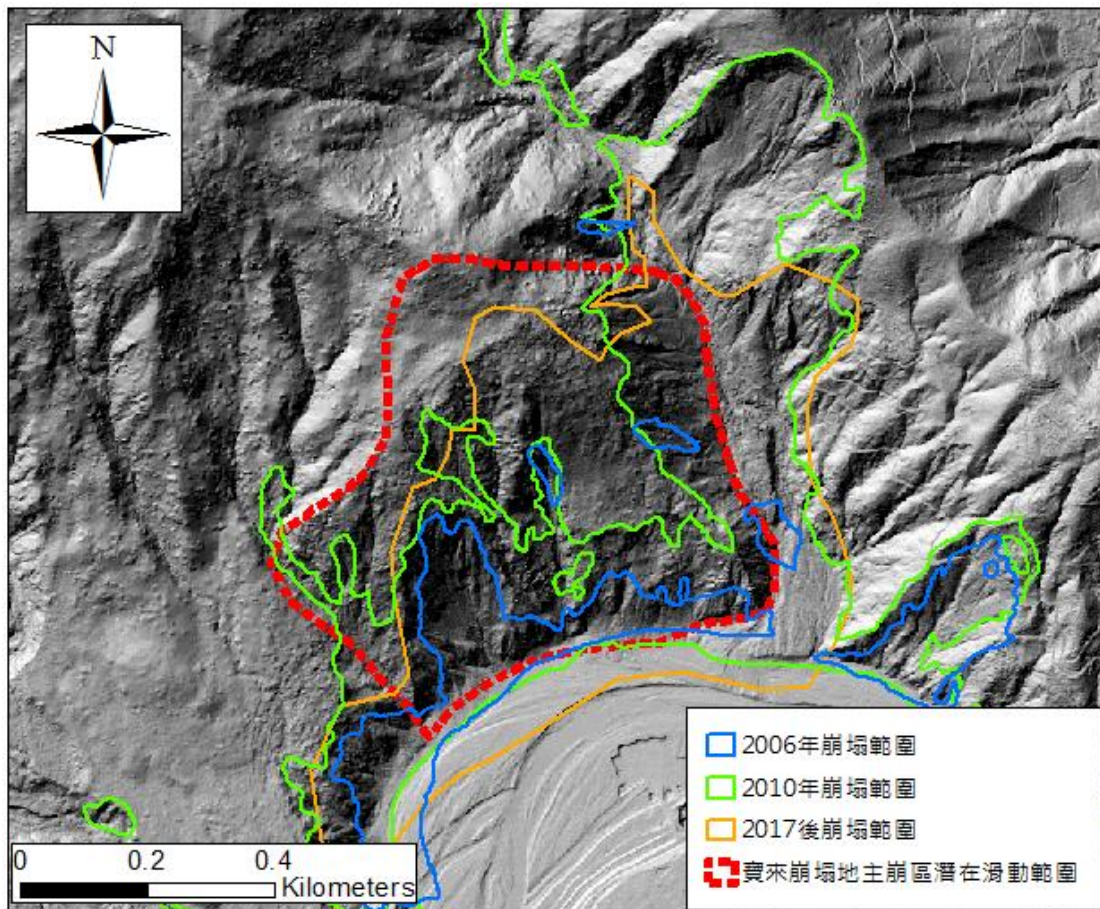


圖3-9 崩塌範圍演變及主崩區統計區域

ALOS1 SAR 影像的 DInSAR 分析區間位於 2006/12/31 至 2011/02/26 之間，其中 2007/08/18~2007/10/03、2008/07/05~2008/08/20、2008/08/20~2009/07/08、2009/07/08~2009/08/23 四次區間內發生崩塌，造成相關性缺失，以及超過 120 天的回歸週期造成的時間去相關，將上述受影響的時間像對移除後，僅使用兩幅 SAR 影像的 DInSAR 分析共有 11 個像對，可採用的分析區間如表 3-3 所示，其產出的地表變形圖如圖 3-9 所示。

表3-3 DInSAR 分析採用時間區間一覽表

| 時間區間 | 時間基線 |
|-------------------|------|
| 20061231_20070215 | 46 |
| 20071003_20080103 | 92 |
| 20080820_20081005 | 46 |
| 20081005_20090105 | 92 |
| 20090823_20091008 | 46 |
| 20091008_20100108 | 92 |
| 20100108_20100223 | 46 |
| 20100711_20100826 | 46 |
| 20100826_20101011 | 46 |
| 20101011_20101126 | 46 |
| 20101126_20110226 | 92 |

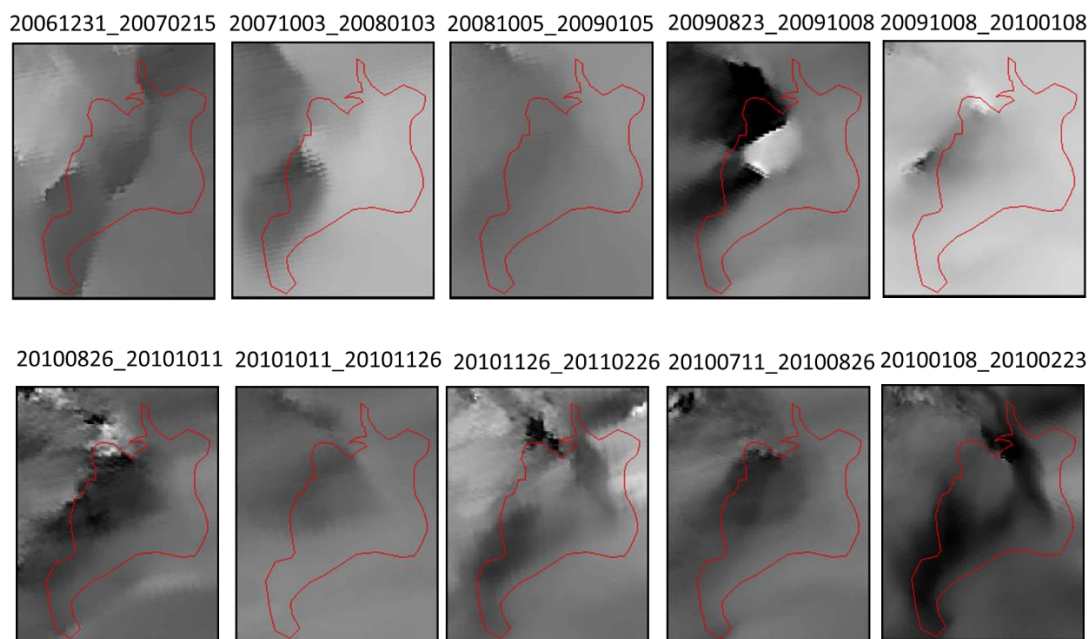


圖3-10 DInSAR 分析之地表垂直變形量圖

單一區間的 DInSAR 分析中可大致觀測出邊坡變形的位址隨時間向上邊坡發展，紅色範圍為 2017 年以前的裸露地位置，然而 DInSAR 分析受到相位飽和限制，同時也容易受到大氣效應影響，在統計滑動量體時容易有相位不連續的問題，因此本研究採用 SBASInSAR 技術分析崩塌變動量後進行崩塌量體統計，SBASInSAR (Small Baseline Subset InSAR) 技術為 Berardino(2002) 提出，能運用較短的時間及空間基線產出干涉成果，減少因長基線導致去相關的問題，並保留變形區的分布密度，而根據 GCP 控制進行軌道校正及大氣效應校正之後，獲得精確的變形成果。

SBASInSAR 採取短基線有高相關的特性，即使 Sentinel-1 SAR 的 C 波段影在植生茂盛的山區不易解算，仍能從其他相關基線中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。

本研究中蒐集了 20 幅 ALOS-1 SAR 影像及 103 幅 sentinel-1 SAR 影像，經過 SBASInSAR 處理流程產生 SBAS 點雲後，統計範圍內點雲在各時期的平均變化量並乘以面積後，統計各時期的崩塌量體。

兩時期的點雲經統計各時期的變化量後，繪製各時序間的邊坡潛勢區累積變化量圖如圖 3-11 與圖 3-12 所示，圖 3-11 為統計 2006~2011 ALOS-1 分析的累積變化量，從 2006/12/31~2007/08/18 之間，量體變化呈現上升趨勢，推測原因可能為潛在滑動範圍中有部分位於河道邊造成的堆積情形，同時因為 2006 年前的邊坡失穩後，靠近坡址處開始出現攏起等現象較明顯所導致，此後邊坡開始持續滑動，直至 2011/2/26 時統計滑動量達到-7803 立方公尺，統計期間包含了 2009 年莫拉克風災在內三個紅色箭頭標示的降雨事件，理應會有大量土沙流出，然而因滑動體已超過 L-band 半波長 11.8cm，在達到相位飽和後會無法正確回復相位，在分析中會成為量體統計的誤差來源。

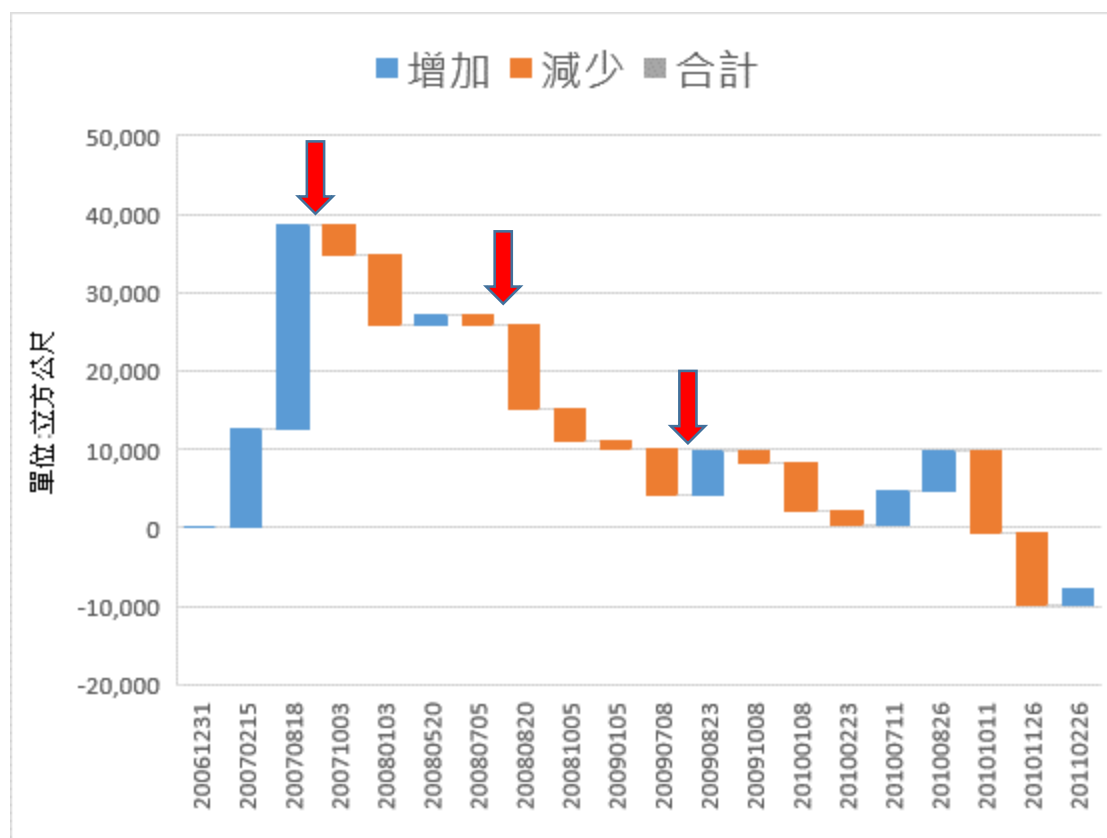


圖3-11 ALOS-1 SBASInSAR 分析之各時序累積邊坡變形量

2016/12/22~2020/06/28 期間以 103 幅 sentinel-1SAR 分析邊坡累積變化量，sentinel-1 衛星的再訪週期為 6~12 天，分析的時間基線較短可以減少相關性缺失，但其使用 C-band 的半波長僅 2.8，因此更容易達到相位飽和。

在 2016 年初開始寶來崩塌地有明顯的滑動趨勢，從表 3-2 中可發現其因位於河川攻擊岸，導致坡腳持續被沖刷流失，崩塌範圍持續擴大至更上層，在圖 3-12 的統計中，包含了 2017、2018 年的兩場降雨事件，從統計結果中發現，當大形降雨事件（紅色箭頭）觸發崩塌後，之後一段時間內的邊坡滑落的速度也會增加，並在維持一段時間後恢復穩定，統計至 2020/6/28 止，累積滑動量為-44635 立方公尺。

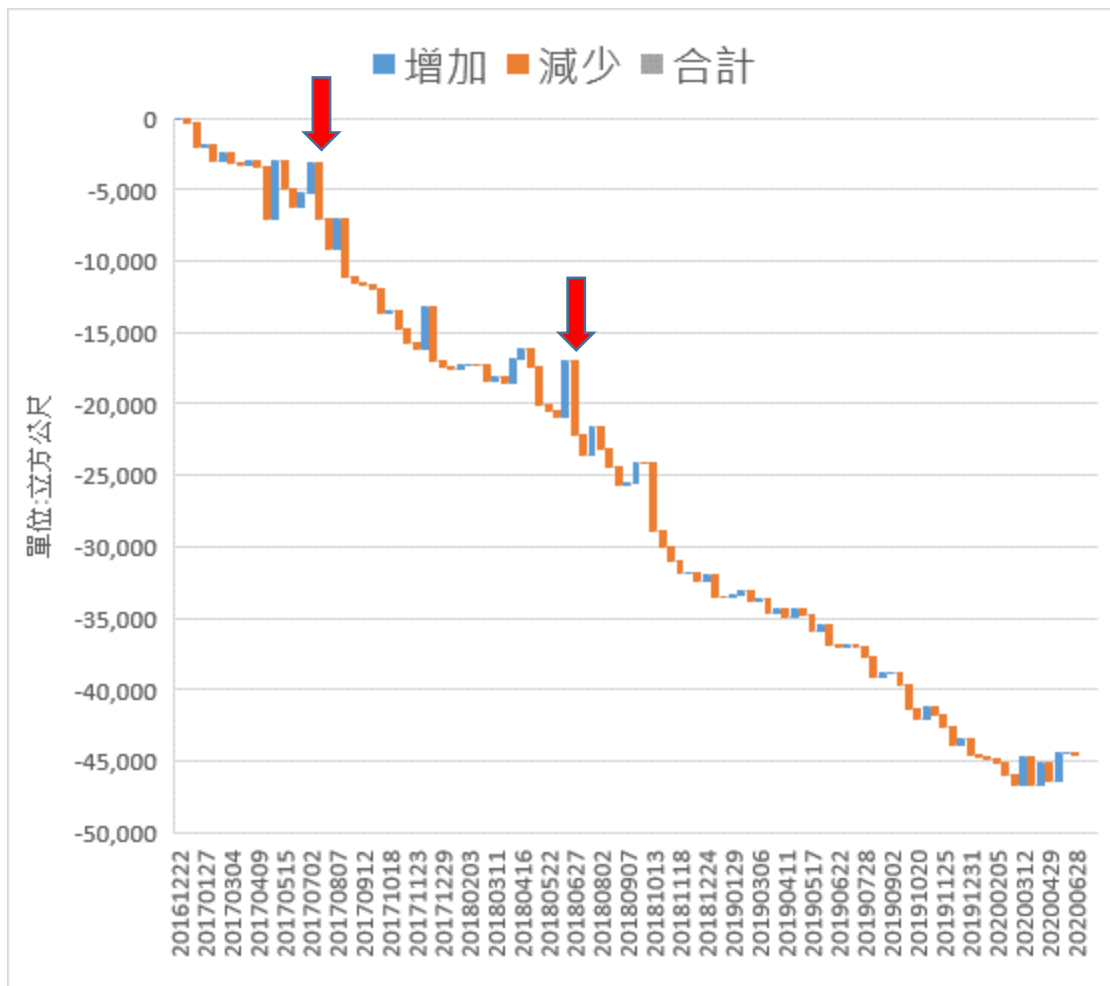


圖3-12 Sentinel-1 SBASInSAR 分析之各時序累積邊坡變形量

第四節 崩塌機制及潛勢範圍評估

前兩節運用 SAR 的分析技術完成崩塌範圍探測跟滑動量體分析，在本節中將兩者套疊分析崩塌擴大後造成的邊坡變形，在圖 3-13 中紫色部分為 2007 年的降雨事件導致的崩塌範圍，綠色區域為隔年 2008 年初的衛星崩塌地判釋成果，實際上以 NDSI 判釋出的崩塌區域大多原先已是崩塌地，因為表面的植生被沖刷後造成 SAR 影像的強度改變，因而被判釋為擴大區域，在崩塌事件之後至 2009/7/8 日的變形量集中在坡地的中上段，而下邊坡處則呈現些許攏起的情形。

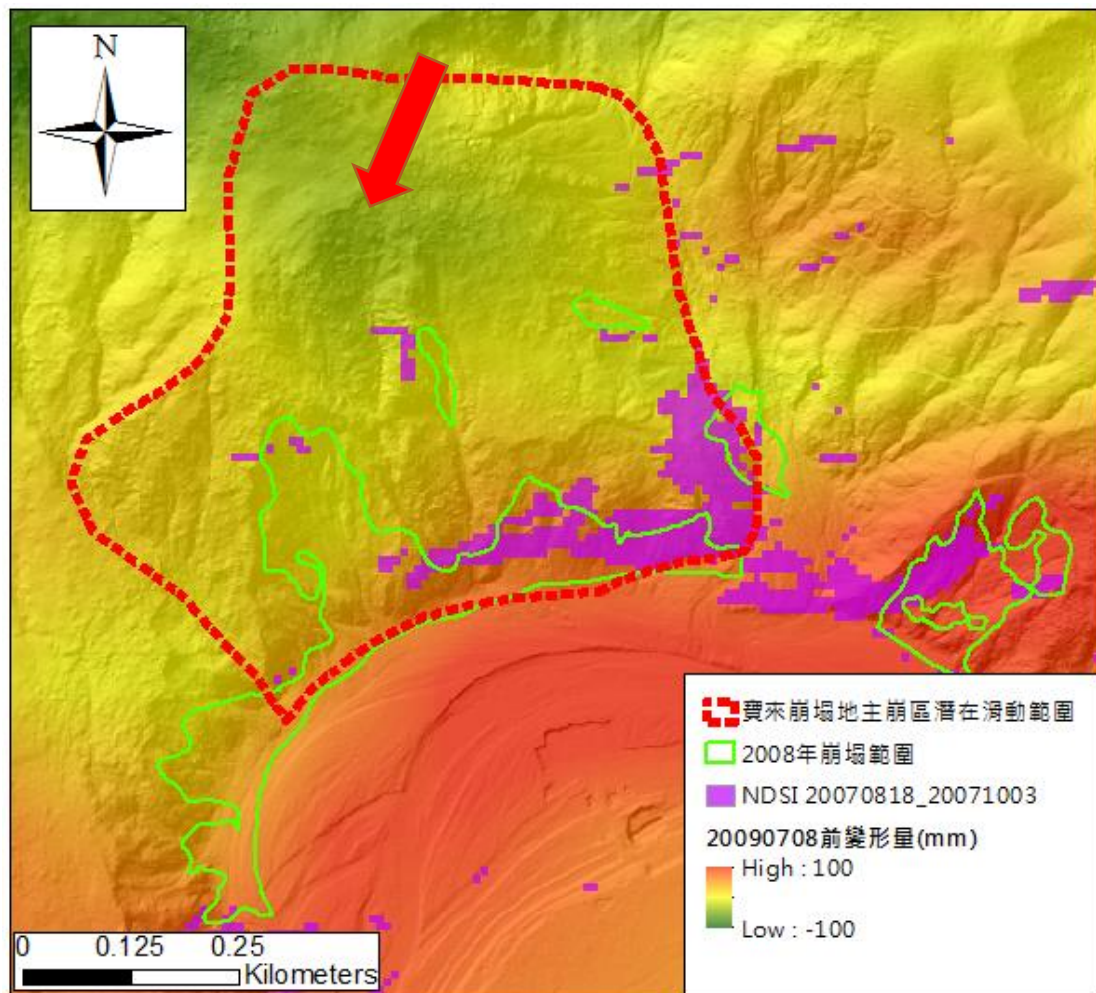


圖3-13 2007 年崩塌判釋與邊坡變形

圖 3-14 表示 2009 莫拉克風災後的崩塌擴大區域，藍色部分為 NDSI 技術在災害前後判釋的崩塌範圍，褐色實線為 2010 年初的衛星崩塌地判釋成果，NDSI 判釋的區域與崩塌地擴大的位置大致相符，而在前期累積變形量較大的區域也發展出新的崩塌範圍，在莫拉克風災後至 2010/2/26 的累積變形也有所增加，崩塌區的變型位置也朝著稜線發展。

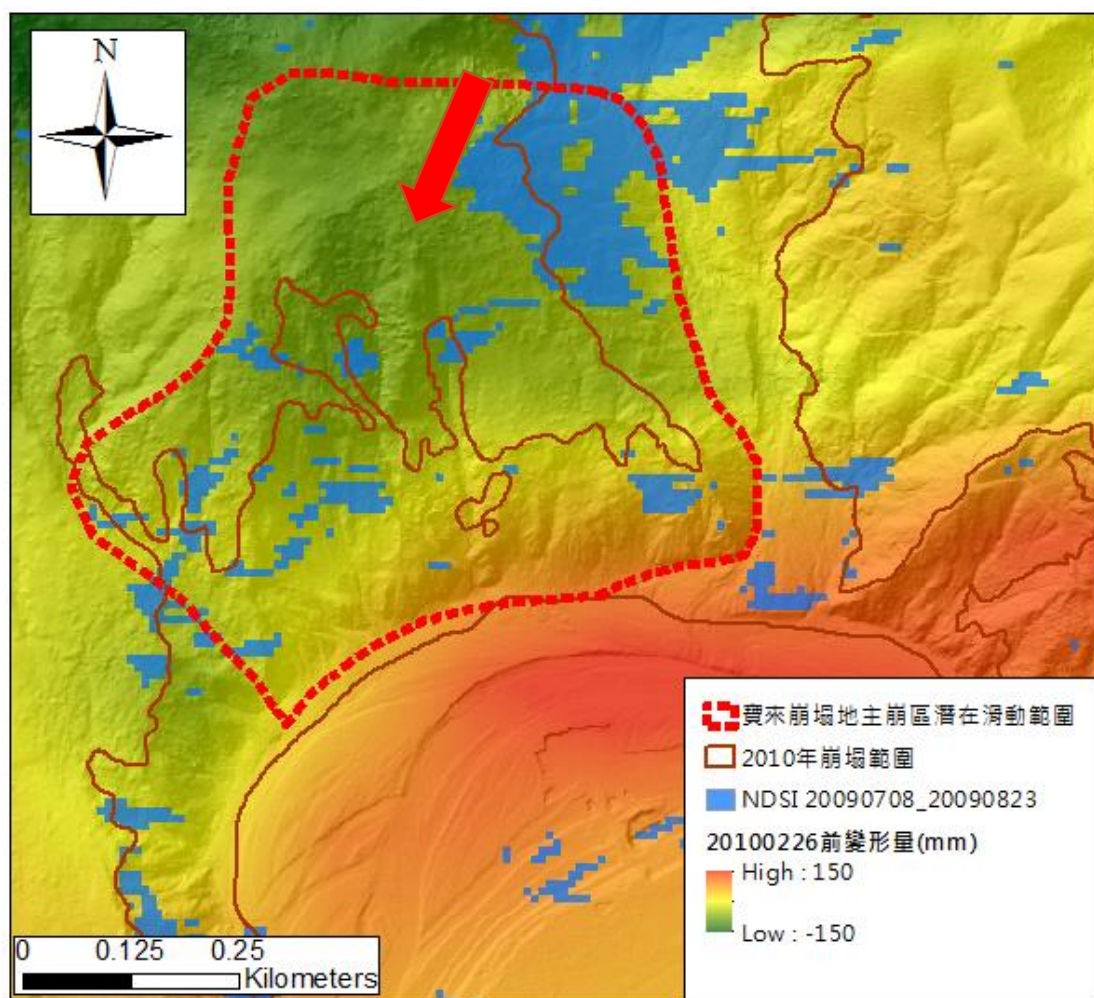


圖3-14 2009 年崩塌判釋與邊坡變形

2006~2011 年間以 ALOS-1 SAR 的邊坡垂直變化速率分析如圖 X，2016~2020 年間的 Sentinel-1 邊坡速率分析如圖 X 所示，從兩區間可以觀察到邊坡破壞有加速的情形，在 2006~2011 年間，邊坡的滑動速率的平均值為-18mm/year，速率最大值為-47.8mm/year，到了 2016~2020 年間平均值為-37.7mm/yea，速率最大值為-88.4mm/year，除了滑動增速之外，最大速率的位置也發生改變，2011 年之前的變化主要在整個滑動區的中段，到 2016 年時前期相對變化速率高的部分已經形成新的崩塌區域，而更高的位置則形成新的變形區。

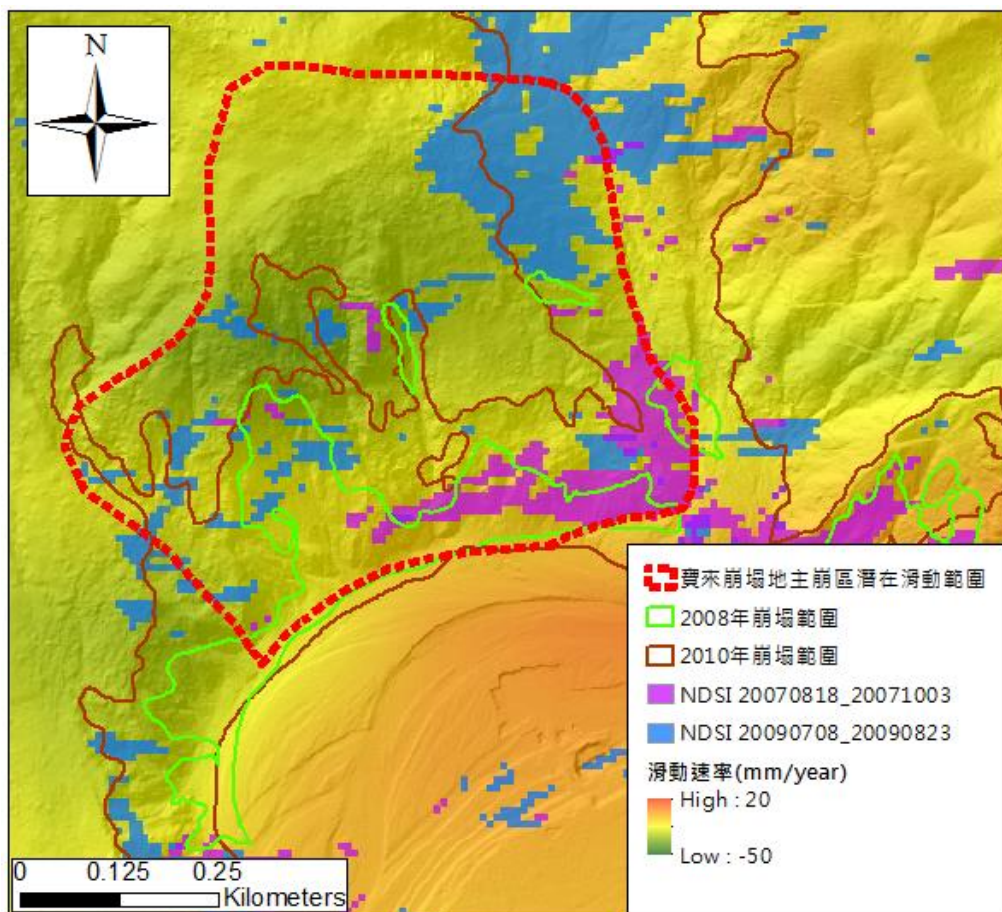
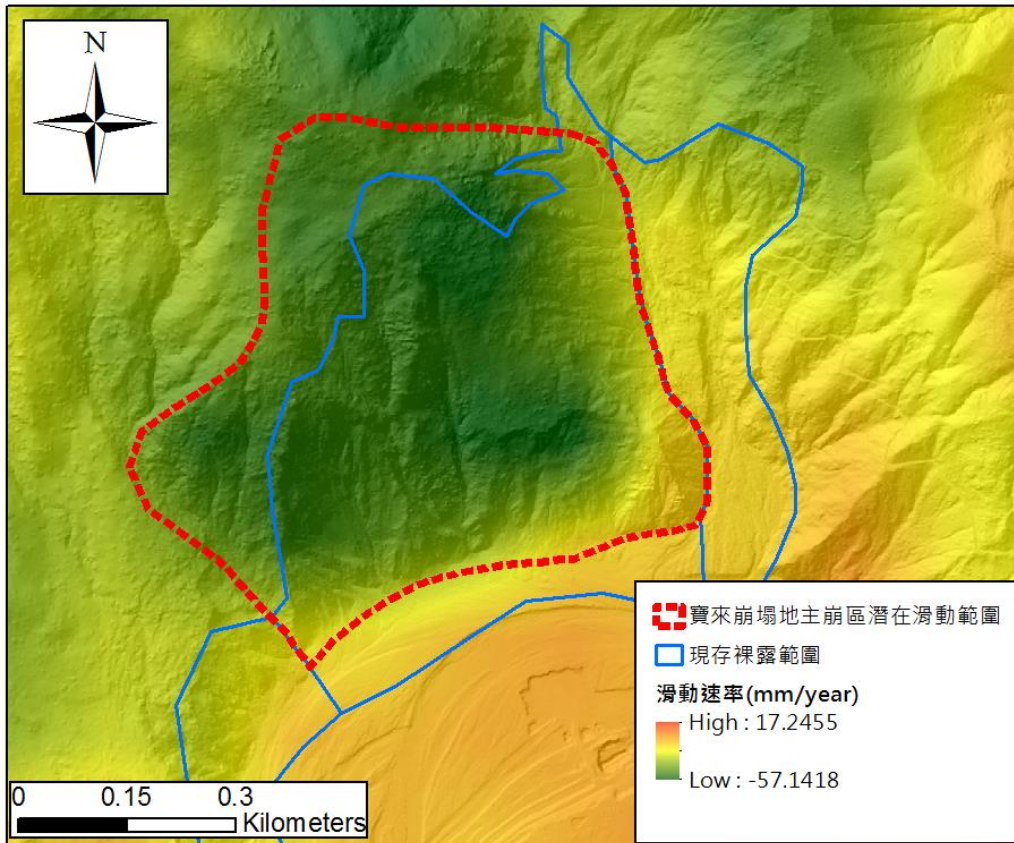


圖3-15 2006~2011 ALOS-1 SAR 的邊坡垂直變化速率分析



本研究根據 2011 年的光達地形進行三維有限元素法分析，簡化地層相關參數，模擬 2011 年後的地形變化位置與觀測變形相符的參數，以尋找破壞面位置，模擬參數本研究採用單位重(kN/m^3)=25.3、楊氏模數(E)=4.98 GPa、波松比(ν)=0.32、凝聚力(C)=500 kPa、摩擦角(φ)=40 度，以上述參數進行分析結果如圖 3-17 及圖 3-18 所示，分析結果顯示邊坡破壞位置與 2016 後的變化速率變化大的位置相符，模擬中的滑動區域可以分為左右兩個區塊，右側的塊體發展的位置略高於左側，顯示右側的崩塌塊體可能滑動速率跟範圍會更大，其兩側變形量大的區域已在 2016~2017 年發生崩塌，且滑動區域仍有向上發展的趨勢。

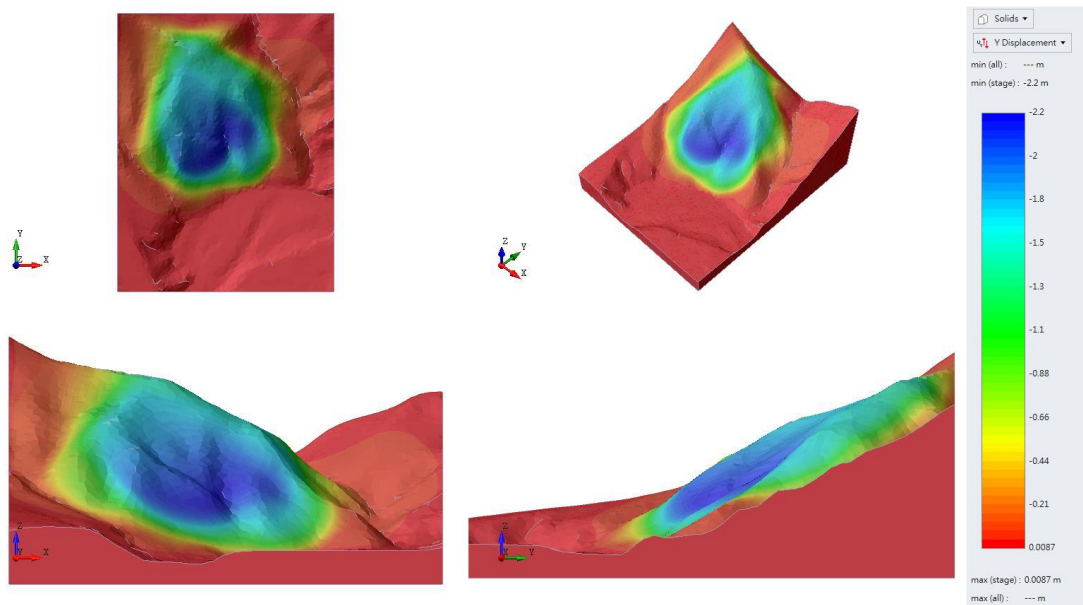


圖3-17 三維有限元素分析垂直變化量

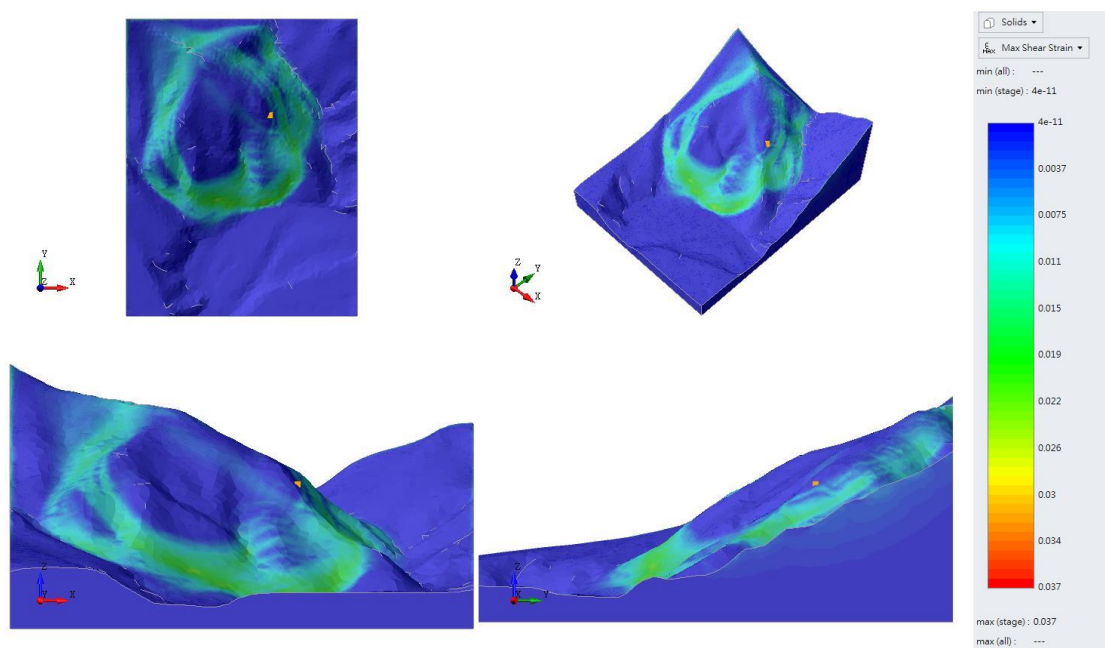


圖3-18 三維有限元素分析最大剪應變

結合光達影像判釋、衛星及雷達崩塌判釋成果，以及三維有限元素分析及 SBASInSAR 分析的地表變化速率等參考，略可將寶來崩塌地的崩崖塊體進行劃分為 6 區塊(如圖 3-19 所示)，其中 1 區塊在 2005 年已經失穩，而後在 2008 年看到區塊 1 的破壞進一步擴大，區塊 2 坡腳開始流失，在 NDSI 的分析中可以看到其破壞的範圍，而在 SBASInSAR 的分析中也可以觀測到區塊 4 開始累積變形量，然後在 2、3、4 區塊在莫拉克風災後開始破壞，NDSI 的分析與破壞的範圍相符，2、3、4 區塊在 2015 年開始破壞及擴大，至 2018 年發展成現有的崩塌範圍。

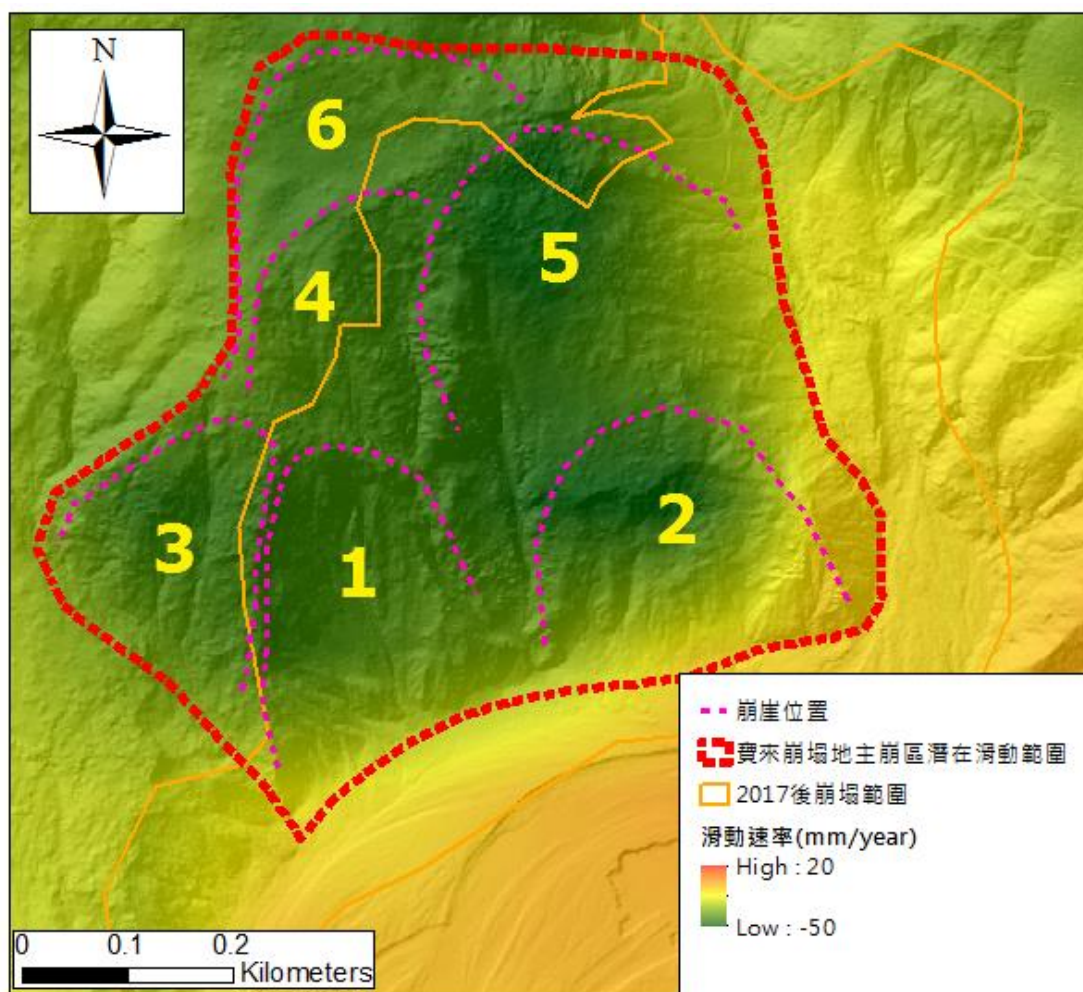


圖3-19 寶來崩塌地推測的滑動塊體

第四章 計畫進度甘特圖

本補助計畫至民國一百零九年十二月三十一日完成，進度甘特圖如表 4-1。重要期程一覽如表 4-2，本計畫期中報告進度已完成文獻蒐集及 DINSAR 分析技術適用性評估、崩塌範圍探測等主要前置工作項目，期末報告建立分析參數及差分干涉崩塌滑動量體分析崩塌量體估算、崩塌機制及潛勢範圍評估等工作項目，將於成果報告提出最後的修正成果。

表4-1 進度甘特圖

| 工作項目 | | 工作月別 | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|------|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|--|
| | | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | |
| 文獻蒐集及 DINSAR 分 析技術適用 性評估 | 文獻蒐集 | | | | | | | | | | | | |
| | 排除去相關干 涉圖資、誤差 排除 | | | | | | | | | | | | |
| | 大氣效應、地 形效應排除 | | | | | | | | | | | | |
| | 各波段適用性 評估 | | | | | | | | | | | | |
| 崩塌範圍探 測並建立崩 塌量體分析 參數 | 建立分析流程 | | | | | | | | | | | | |
| | 建立分析參數 | | | | | | | | | | | | |
| | NDSI 變化分析 | | | | | | | | | | | | |
| | 崩塌範圍圈繪 及驗證 | | | | | | | | | | | | |
| 差分干涉崩 塌滑動量體 分析 | DInSAR 地表 變位分析 | | | | | | | | | | | | |
| | 有限元素分析 | | | | | | | | | | | | |
| | 滑動量體驗證 | | | | | | | | | | | | |
| 崩塌機制及 潛勢範圍評 估 | DInSAR 與 NDSI 技術分析 模式建立 | | | | | | | | | | | | |
| | 崩塌機制討論 | | | | | | | | | | | | |
| | 崩塌潛勢分析 | | | | | | | | | | | | |
| 累積總進度(%) | | 5 | 10 | 20 | 30 | 45 | 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 6 份) | 核定文到 20 日內 |
| 提送期中報告書(一式 5 份) | 於 109 年 7 月 31 日前 |
| 提送期末報告書(一式 5 份) | 於 109 年 11 月 13 日前 |
| 交付成果報告書(一式 5 份)及會計報告 | 於 109 年 12 月 25 日前 |

第五章 結論

本計畫已完成 DInSAR 分析技術的適用性及篩選可用的分析區間，之後將根據適用結果進行後續的 DInSAR 分析，以及滑動範圍與滑動量體的後續分析方法，而第一階段中以 NDSI 技術完成崩塌範圍的分析成果，並與各事件的光學影像判釋範圍比對，證實此技術對於崩塌範圍探測的可行性，而後針對不同波段的分析成果提出建議分析參數，以建立完整的崩塌範圍探測技術。

本計畫第二階段中以 DInSAR 技術結合數值分析模式完成歷次崩塌滑動量體分析，分別就 ALOS-1、Sentinel-1 衛星資料進行 2006~2011、2016~2020 兩時期的邊坡滑動量統計，分別統計出 -7803、-44635 立方公尺的潛在滑移量。

在第三階段中本研究結合 DInSAR、NDSI 分析技術，討論各時序間崩塌及地表變形關連性，並以有限元素法加以驗證滑動塊體的劃分，最後本計畫研究成果將與 109 年度創新研究計畫「先進遙測技術於大規模山崩及周邊區域之活動監測、土砂運移及模擬分析」整合型研究計畫之其他子計畫所提出的不同模式進行探討，以期建構完整的潛在崩塌地量體分析方式，供日後防災及工程需求參考。

參考文獻

1. Didier Massonnet , Kurt L. Feigl ,“GEOPHYSICAL RADAR INTERFEROMETRY” *Reviews of Geophysics*, 36, 4, pp.441-550,1998
2. Florian Rudolf-Miklau, Michaela Leitgeb, Rudolf Schmidt, Christian Weber, Felix Daschek, Franz Roßnagl. Austrian Service for Torrent and Avalanche Control. Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management Marxergasse 2, 1030 Vienna,2007.
3. 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.
4. G. F. De Grandi, M. Leysen, J. S. Lee, and D. Schuler, “Radar reflectivity estimation using multiple SAR scenes of the same target: Technique and applications,” in *Proc. IEEE Int. Remote Sens. Sci. Vis. Sustain. Develop. Geosci. Remote Sens. (IGARSS’97)*, Aug. 3–8, 1997, vol. 2, pp.1047–1050.
5. Lane, E. W., “A Study of the Shape of Channels Formed by Natural Streams Flowing in Erodible Material,” Missouri River Division Sediments Series No. 9, U.S. Army Engineer Division, Missouri River, Corps of Engineers, Omaha, Nebraska, U.S.A., 1957.
6. 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
7. 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

8. 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
9. 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
10. Furuta, R., Tomiyama, N.(2011), A Study of Detection of Landslide Disasters due to the Pakistan Earthquake using ALOS data, *34th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Sydney, Australia, April 10-15, 2011.
11. Sabins,F.F.(1987), Remote Sensing Principle and interpretation, second edition. pp.177-233.
12. 10. Shibayama, Takashi and Yamaguchi, Yoshio., “A Landslide Detection Based On The Change Of Scattering Power Components Between Multi-Temporal POLSAR Data”., In *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Quebec, QC, Canada, 13–18 July 2014.
13. 11. Shibayama, Takashi, Yamaguchi, Yoshio and Yamada, Hiroyoshi. (2015), “Polarimetric Scattering Properties of Landslides in Forested Areas and the Dependence on the Local Incidence Angle”, *Remote Sens.*, 7(11), 15424-15442.
14. Takashi Shibayama, Yoshio Yamaguchi., A Landslide Detection Based On The Change Of Scattering Power Components Between Multi-Temporal POLSAR Data., In *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Quebec, QC, Canada, 13–18 July 2014.
15. Takashi Shibayama, Yoshio Yamaguchi., Hiroyoshi

- Yamada.(2015),Polarimetric Scattering Properties of Landslides in Forested Areas and the Dependence on the Local Incidence Angle, Remote Sens., 7(11), 15424-15442.
16. 王國隆、林俊廷、張竣瑋、林妍琇、洪志祥、洪政義、邱啟芳、傅桂霖。結合高精度無人載具測量及差分干涉合成孔徑雷達與 NDSI 分析於土砂量體的評估方法。農工學報, 64(5)。(EI), 2019。
 17. 王秀雯、王志添、陳錕山、林延郎, “利用衛星雷達影像分析臺灣西部水線變遷” 航測及遙測學刊第十二卷第二期, pp.107-119, 2007。
 18. 林俊廷、王國隆。運用差分干涉合成孔徑雷達技術(DInSAR)與模糊歸屬度分析邊坡潛在滑動範圍。地工技術。第 161 期, P.71-P.80, 2019。
 19. 林士淵、洪連吉, 乾延遲改正後之雷達差分干涉成果評估, 航測及遙測學刊第十九卷第 3 期, pp.189-205, 2015。
 20. 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。
 21. 陳俊斌, 應用 Sentinel-1A 合成孔徑雷達影像於臺灣中部水稻田之判釋研究, 碩士論文, 中央大學, 2016。
 22. 洪浩倫、王瑋鈴、王志添、陳錕山, 雷達影像觀測技術於坡地災害之應用, 農業委員會水土保持局, 2011。
 23. 極準科技股份有限公司, 雷達遙測技術於林地災害判釋之研究, 農業委員會林務局, 2012。
 24. 姜壽浩, 應用 Sentinel-1 合成孔徑雷達影像對舊有崩塌進行再發性評估, 水土保持局, 2017。
 25. 姜壽浩, 崩塌地之雷達迴波訊號與影像紋理特性之分析研究, 水土保持局, 2018。

26. 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。

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 | 本計畫擬運用 Din SAR 技術及 NDSI 技術進行分析崩塌滑動體、探討崩塌可能範圍，進而完成崩塌潛勢範圍的評估，具學術性及實用性質。 | 感謝委員肯定。 |
| 2 | NDSI 門槌設定之基準如何？何以需清除非坡地區域？此等濾除雜訊之操作是否有主觀之意識？ | NDSI 分析結果為後向散射正規化介於-1~1 之間的數值，為其設定基準的方式主要仍是試誤法，取不同的值域範圍，與發生崩塌的範圍進行 KAPPA 指標分析，取得評分最高的值域範圍作為基準，然而因 NDSI 是因地貌改變所造成的強度變化，因此在山區與平地的表現不同，山區可能是崩塌，平地則通常是種植灌溉等行為，因此濾除 10 度的範圍來降低影響，雖此濾除方式有受到人為影響，但在建立基礎上仍以統計成果為原則。 |

| 項次 | 審查意見 | 回覆辦理情形 |
|----|---|---|
| 3 | 建議未來研究成果能夠強化說明研究分析結果的可靠性，以利於實務應用操作。 | 遵照委員意見辦理。 |
| 4 | 影像之處理有無因處理方法不同，而出現不同之圖像結果？是否可能造成判釋之落差？如何因應？ | 在本研究的影像處理過程中，同波段的影像都將以相同參數進行，避免出現圖像差異過大導致的判釋落差，若在分析過程中有發現需改變分析參數進行分析的情形將另外加以補充說明。 |
| 5 | 報告所提以 DinSAR 分析的地表變形量作為監測值，並以有限元素法尋找現場破壞面位宜之作法，使用之軟體等，請補充 | 本研究中使用的有限元素法軟體為 Rocscience 中的 RS3D，另外也在研擬使用其他力學模式，與有限元素分析進行比較的可能性。 |
| 6 | 文中僅說明將以 DinSAR 與 NDSI 為基礎來建立崩塌潛勢區，僅以兩種指標來訂定潛勢，依過去經驗在實務應用上恐稍嫌不足，建議配合個別點位環境之差異建立定量指標模式。 | 本計畫中擬以 DInSAR 成果進行崩塌潛勢判釋，將再研擬定量指標的可行性。 |

| 項次 | 審查意見 | 回覆辦理情形 |
|----|--|---|
| 7 | 以 NDSI 偵測出之崩塌範圍與光學衛星之範圍進行比較時，是否有考慮兩者資料來源、所取得之面積皆同屬垂直投影面和亦或坡面面積？以及兩者影像拍攝時間差異？並詳述門檻值設定基準。 | 本計畫中偵測之範圍皆為垂直投影面積，光學影像資料以 SPOT 衛星的鄰近拍攝時間進行比對，衛星影像並已考量降雨事件影響進行篩選，盡量降低時間差異。 |
| 8 | 建議在預期成果第二項部份，運用 NDSI 建立快速崩塌判釋，請團隊分析時盡量找同時期光學衛星與 NDSI 分析成果進行比較，以瞭解光學衛星受雲夜率影響下，SAR 影像可提供判釋範圍及其正確性。 | 遵照委員意見辦理，本計畫中將參考 SPOT 衛星拍攝成果進行比較。 |
| 9 | 建議在預期成果第三項，DinSAR 技術結合有限元素法模擬崩塌滑動量體分析，請團隊簡述數值模式之適用性，並提供率定後之參數表，以利後續分析比較。 | 遵照委員意見，將於相關分析完成後提供資訊與參數。 |
| 10 | 本計畫為整合型計畫其中之一子計畫，建議團隊在數值模式方面，統合各子計畫使用之數值模式，以利後續總計畫整合。 | 遵照委員意見辦理，本計畫將與其他子計畫進行數值模式整合。 |

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 | 本研究以 NDSI 技術進行崩塌範圍探測分析，並以實際崩塌事件為例，來說明方法的可行性。計畫進度正常，與預定進度大致相符。 | 感謝委員肯定。 |
| 2 | P3-11，NDSI 判釋結果和 SPOT5 光學衛星結果之比對，比對結果之說明似乎只有定性說明，建議進行定量之說明，比對結果一致的佔多少比例，不一致的佔多比例，並建議對於誤判或是少判的原因加以探討。 | 遵照委員意見辦理，成果將補充於期末報告中。 |
| 3 | P3-13 頁有關寶來崩塌地判釋之結果也只是定性說明崩塌地有進一步擴大的情形而已，缺乏定量之描述。 | 遵照委員意見辦理，成果將補充於期末報告中。 |
| 4 | 使用 NDSI 判識已崩塌之範圍似已有成果，惟針對尚未發生崩塌之「潛勢區」要如何判識出其範圍？ | 崩塌潛勢區本研究將以邊坡滑動量進行判釋後圈繪，並在後續討論中探討潛勢區及崩塌發生之相關性。 |

| 項次 | 審查意見 | 回覆辦理情形 |
|----|---|------------------------|
| 5 | 本計畫針對滑動塊體量體評估部分尚未見具體案例成果期待於期末報告時呈現。 | 遵照委員意見辦理，成果將補充於期末報告中。 |
| 6 | P3-3，表 3-1 應為各時序差分干涉成果圖，p3-8，各時序 NDSI 成果圖，p3-11，NDSI 與 SPOT5 為光學衛星成果圖，請團隊再修正圖名及內文。 | 遵照委員意見辦理。 |
| 7 | P3-13，以 Sentinal-1 初步分析結果，文中指出受限於 SAR 影像解析度，在時間區間中 NDSI 無法分析出崩塌變化，再請團隊精進以完成計畫重點項目二「運用 NDSI 技術建立崩塌範圍快速判釋技術」及項目三「以 DInSAR 技術完成歷次崩塌滑動量體分析」 | 遵照委員意見辦理，相關章節與文字已進行修正。 |

| 項次 | 審查意見 | 回覆辦理情形 |
|----|--|-----------------------|
| 8 | <p>內文錯字、漏字部分：圖 1-1 與圖 2-2 的左列第三項無寫該工作項目之歸屬子計畫；P2-3 頁倒數第四行，單偏極應為(HH、VV)；P2-3 第 6 行標點符號有誤的；P2-21 倒數第 8 行句末應該句點；P3-1 頁有錯字與連結錯誤，請修正。</p> | <p>感謝委員指正，已修正。</p> |
| 9 | <p>圖 3-1 並未說明紅線範圍圈會標準，請補充。</p> | <p>已補充於期末報告中。</p> |
| 10 | <p>請量化比較雷達衛星與光學衛星運用於圈繪崩塌坡面方面之面積。</p> | <p>相關比較結果補充於第三章中。</p> |

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 | 使用 NDSI 是否即可於颱風豪雨期間由 SAR 影像判識新生崩塌？或是只能針對已知崩塌處去進行崩塌邊緣判識？ | 回覆委員意見，NDSI 技術可以直接判釋出 SAR 影像兩時間之間的地上植生變化，可用於直接搜索新增崩塌地，或是擴大的崩塌範圍。 |
| 2 | 潛在滑動量體之計算對於集水區土砂生產係為重要的參數，目前國外是否已有直接應用 SAR 的方式來估算的案例？ | 目前的文獻大多用於判釋崩塌地是否具有滑動行為或是崩塌潛勢，但用於量體評估則受限於 DInSAR 本身的使用限制，分析難度較高，因此較少相關研究。 |
| 3 | 透過 SAR 影像進行崩塌地變遷分析，並予以量化，可以提供崩塌發生前變化情形。 | 感謝委員意見，在本研究中仍是初步進行變遷分析的嘗試，日後將相關技術加入其他判釋基準，以提升可靠性。 |
| 4 | 其成果亦可搭配相關分析技術進行加值應用。 | 感謝委員肯定，日後必繼續精進。 |

| 項次 | 審查意見 | 回覆辦理情形 |
|----|--------------------------------------|--|
| 5 | NDSI 之波段是否會受季節影響而使得判釋結果有起伏變化。 | NDSI 技術運用前後期 SAR 影像的確會因季節產生數值起伏，因此在本研究中設定了影像平均值及標準差組成的值域公式，可有效降低這種影像的系統性誤差，因此判釋結果較不受影響。 |
| 6 | 本研究以合成孔徑雷達進行滑動塊體量體評估，可行性甚高。 | 感謝委員肯定，日後必繼續精進。 |
| 7 | 本計畫為整合型計畫之一，宜說明本子計畫目標和其他子計畫間之相關性及貢獻。 | 在本研究中的量體評估結果，與子計畫的光達數值地形做資料校核，並考量 DInSAR 技術的限制條件，以及運用子計畫的高精度數值地形進行地形修正，以提升並驗證本研究中的分析資料準確性，另一方面，本研究的地表變形分析也與子計畫中模擬分析技術相互比對，建立不同計畫間的分析成果相互運用的模式。 |

| 項次 | 審查意見 | 回覆辦理情形 |
|----|--|--|
| 8 | 合成孔徑雷達並非新技術，相關研究成果非常多，建議研究成果針對與其他研究的差異性加強說明。 | 在本研究中彙整了 NDSI 及 DInSAR 兩個 SAR 影像不同性質的判釋技術，並初步完成整體崩塌地變遷的分析，在本研究運用的 NDSI 技術配合誤差排除法、演算法的修正，在判釋率亦高於傳統的雷達植生差異指標 RVID 法。 |