

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

A DEBRIS ESTIMATION METHOD COMBINING HIGH ACCURACY UAV, DINSAR AND NDSI ANALYSIS

國立暨南國際大學
土木工程學系
副教授

王國隆*

Kuo-Lung Wang

國立暨南國際大學
土木工程系
博士班研究生

林俊廷

Jun-Tin Lin

水土保持局臺南分局
治理課
工程員

張峻瑋

Jun-Wei Zhang

水土保持局臺南分局
治理課
工程員

林妍琇

Yen-Hsiu Lin

水土保持局臺南分局
治理課
課長

洪志祥

Jr-Shiang Hung

水土保持局臺南分局
秘書

洪政義

Jheng-Yi Hung

水土保持局臺南分局
副分局長

邱啓芳

Ci-Fang Ciou

水土保持局台南分局
分局長

傅桂霖

Kuei-Lin Fu

摘要

台灣的高屏溪 2009 年的莫拉克颱風發生嚴重的坡地災害，流域內產生大量土砂堆積，堆積的土砂運移，造成下游河道變化，並引發二次災害，估計這些土砂量體及影響變成重要的課題，衛載合成孔徑雷達影像(Synthetic Aperture Radar, SAR) 為近年來高度發展的遙測技術，具有不受天候干擾、大面積探測、固定周期等特性，現已廣泛運用於坡地的災害調查，SAR 影像的紀錄包含強度、極化、相位等資訊，其中強度與極化主要運用於地形判釋及分類，相位資訊則可經差分干涉後得到厘米級的變形量資訊，本研究提出結合強度判釋技術及差分干涉技術進行莫拉克災害崩塌地的殘餘土砂量評估，運用於災後無法立即獲得災害範圍及難以追蹤土砂流失量等問題，使用 NDSI 分析於研究區內可成功自動化擷取 77% 崩塌範圍，透過 DInSAR 分析可以將崩塌地轉化的土砂量估計出來，此外於莫拉克颱風災後已經接近 10 年，災時所產生的崩塌土方的移動仍影響目前的工程整治，本研究選定高雄市桃源區復興地區為目標，進行短時間多幅雷達影像分析土方變遷趨勢，輔以無人載具進行四期正射影像及數值地表模型製作，驗證於 2017 年間進行之清疏治理工程成效。

關鍵詞：無人載具、合成孔徑雷達、土砂量評估。

* 通訊作者，國立暨南國際大學土木工程系，副教授

545 南投縣埔里鎮大學路 1 號國立暨南國際大學土木工程系，klwang@ncnu.edu.tw

A DEBRIS ESTIMATION METHOD COMBINING HIGH ACCURACY UAV, DINSAR AND NDSI ANALYSIS

Kuo-Lung Wang*

Civil Engineering,
National Chi Nan
University

Jun-Tin Lin

Civil Engineering,
National Chi Nan
University

Jun-Wei Zhang

Civil Engineering,
National Chi Nan
University

Yen-Hsiu Lin

Tainan Branch, Soil and
Water Conservation
Bureau, Council of
Agriculture,
Executive Yuan

Jr-Shiang Hung

Tainan Branch, Soil and
Water Conservation
Bureau, Council of
Agriculture,
Executive Yuan

Jheng-Yi Hung

Tainan Branch, Soil and
Water Conservation
Bureau, Council of
Agriculture,
Executive Yuan

Ci-Fang Ciou

Tainan Branch, Soil and
Water Conservation
Bureau, Council of
Agriculture,
Executive Yuan

Kuei-Lin Fu

Tainan Branch, Soil and
Water Conservation
Bureau, Council of
Agriculture,
Executive Yuan

ABSTRACT

Gaoping Creek in Taiwan suffered from severe landslide disasters in the typhoon Morakot in 2009. A large amount of debris stays in the basin, and the debris transportation causing changes in the downstream river channel and secondary disasters. It is estimated that these debris volumes and influences become essential. The subject of the Synthetic Aperture Radar (SAR) is a highly developed remote sensing technology in recent years. It has the characteristics of being unaffected by weather, large-area detection, and fixed revisit period. It has been widely used in landslide disaster investigation. The records of SAR images include information such as intensity, polarization, and phase. The intensity and polarization are mainly used for terrain interpretation and classification. The phase information can be obtained by DInSAR to centimeter-level deformation. The radar intensity identification and DInSAR are used to evaluate the residual debris content of the Morakot disaster landslide site, and it is impossible to obtain the disaster locations immediately after the disaster, and it is difficult to track the amount of debris loss. The NDSI analysis can successfully automate capture 77% landslides in the study area, and the DInSAR analysis can estimate the amount of soil sand converted from landslides. In addition, it has been close to 10 years after the Morakot typhoon disaster. The movement of the landslide debris still affects the current engineering remediation. Fushing area in Taoyuan District, Kaohsiung is selected for this study. Time series DInSAR analysis in one year and a half supplemented by four periods of unmanned vehicle's orthophoto and digital surface model to verify the effectiveness of the dredging project of governance in 2017.

Keywords: UAV, SAR, Debris estimation.

Wang, K.L.*, Lin, J.T., Zhang, J.W., Lin, Y.H., Hung, J.S., Hung, J.Y., Ciou, C.F., & Fu, K.L. (2019). "A debris estimation method combining high accuracy UAV, DInSAR and NDSI analysis." *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 65(4), 26-39. [https://doi.org/10.29974/JTAE.201912_65\(4\).0003](https://doi.org/10.29974/JTAE.201912_65(4).0003)

一、前言

台灣山區坡度陡且加以地震與颱風豪雨等外力作用之下，容易產生各種不同規模程度的崩塌，崩塌的位置、面積、體積都是影響後續山坡地治理與河川整治的重要因素，衛載合成孔徑雷達具有全天化觀測的優勢，差分干涉合成孔徑雷達(DInSAR)及干涉堆疊技術(Interferometric Stacking Technique)等監測方法，可於多年期時序性資料中篩選出地表變形趨勢(Yen *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2011; Lu *et al.*, 2012; Zhao, *et al.* 2012; Champenois *et al.* 2012; Tung *et al.*, 2012; 童忻, 2007; 盧志恆, 2008; 周鋒泯, 2008; 蕭逸凡, 2009; 黃雅雲, 2010; 蘇柏宗, 2011)。張中白等人 (Chang, *et al.* 2004) 利用 DInSAR 取得震前、同震及震後地表活動情形，所研究區域集中於車籠埔斷層西側，亦即斷層下盤範圍。Wang *et al.*(2007) 使用 DInSAR 作為初步的大面積邊坡受震滑移位移量分析，其使用之 DInSAR 分析流程取自 Bürgmann 等人方法。

本研究運用 SAR 影像進行分析，研究流程分為四個部分，第一部分為 SAR 影像的強度與極化運用，運用地上物的散射特性，選取有利於辨別植生的 HV 極化，將災害前後期 SAR 影像進行濾波及輻射校正後，計算差異歸一化指標(Normalized Difference Sigma Naught Index, NDSI)，並以 2009 莫拉克颱風為例，判釋崩塌災害的範圍，並依此訂出適合辨別坡地災害的 NDSI 門檻值；第二部分則結合 NDSI 判釋結果，並以 2009~2011 年日本的 ALOS 衛星產製的 9 幅 SAR 影像運用差分干涉技術(DInSAR)分析出災後 552 天間各時序的地表地形量，計算 NDSI 判釋的各崩塌地的逐期崩塌量，統計後回歸各坡面殘留土砂的流出量，第三部份為 2017 年間於集中研究區進行的清疏治理工程對於河川穩定性的評估與追蹤，於 2017 年開始至 2018 年 6 月共進行四次無人載具拍攝，總共製作四期正射影像及數值地表模型，於施工前、中以施工後追蹤對於土砂

穩定性的影像；第四部份為利用再訪週期僅 12 天的歐洲太空總署 Sentinel-1 雷達衛星分析與無人載具相同時間內鄰近河道地形變化，用以比較清疏整治工程之成效與否。

二、研究方法

2.1 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 1 所示，採用 ALOS PALSAR 雷達衛星資料主要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，該衛星之雷達波長為較短的 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。

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

表 1 研究使用雷達衛星資料(資料來源：JAXA, ESA)

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

地表上幾何特徵產生的反射，另一種則是依靠雷達波一般而言，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，而基產生散射後的後向散射值，此種回波被稱作後向散射，本值可參考瑞利法則(Rayleigh Criterion)進行概算(Sabins,1987)，根據瑞利法則：

$$\Delta h < \frac{\lambda}{8 \cos \alpha} \dots\dots\dots (1)$$

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。

2.2 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、HV)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 ALOS、的 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

2.3 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：

$$NDSI = \frac{\sigma_{master} - \sigma_{slave}}{\sigma_{master} + \sigma_{slave}} \dots\dots\dots (2)$$

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。

整體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強度變化率(NDSI)，設定 NDSI 門檻值及扣除地形效應影響較嚴重區域，為取出山區變化的成果，將低於 10 度的坡度區域濾除，完成後得到的影像將相鄰的影像合併為一區塊。

NDSI 分析產生的雜訊可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 ALOS 1 衛星空間為例，其解析度約 10 m，為使濾出的區域有足夠的代表性，以 4 × 4 個網格為濾除標準，亦即面積在 40m × 40m 以下的範圍會濾除不計，以減少雜訊的出現，最後比對崩塌區域，反覆測試最佳的 NDSI 門檻值，整體影像分析進行流程如圖 1 所示：

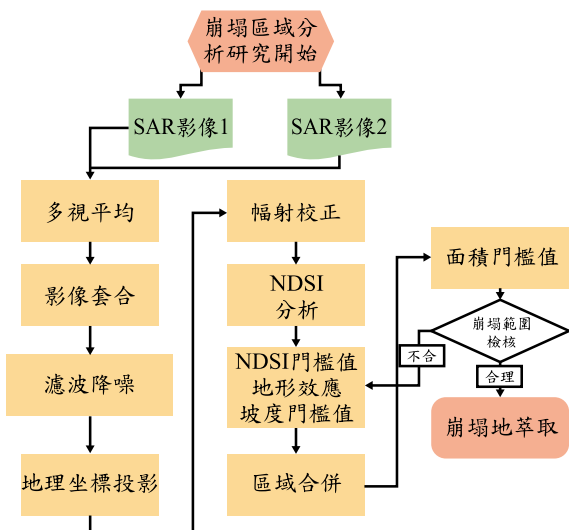


圖 1 NDSI 萃取崩塌地處理流程圖

2.4 差分干涉分析

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(式一)，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)。

$$\begin{aligned} \phi_{int} &= 4\pi \frac{R_1 - R_2}{\lambda} \\ \phi_{int} &= \phi_{Topography} + \phi_{Change} + \phi_{Movement} + \phi_{Atmosphere} \\ &= \frac{4\pi B_n}{\lambda R \sin \theta} h + \phi_{Change} + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{Movement} + \phi_{Atmosphere} \dots\dots(3) \\ &= \frac{4\pi B_n}{\lambda R \sin \theta} h + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{Movement} + \phi_{Noise} \end{aligned}$$

- 其中，
 R_1 及 R_2 為不同時間衛星至地表觀測點距離
 $\phi_{Topography}$ ：地形相位變化
 ϕ_{Change} ：地表特徵相位變化
 $\phi_{Movement}$ ：觀測點移動相位變化
 $\phi_{Atmosphere}$ ：大氣折射相位變化
 $\Delta R_{Movement}$ ：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。

三、NDSI 技術進行崩塌區域判釋

3.1 NDSI 強度分析流程

本研究運用 ALOS 1 產製的 SAR 影像進行 NDSI 分析及事件比對，針對莫拉克風災進行分類影像的精度評估，找出雷達影像的判釋基準及適用範圍。

將 SAR 影像進行 NDSI 分析，經 NDSI 分析後的影像可能受到大氣效應或地面反射條件影響，其可適用的值域並非為定值，因此需從中萃取不同的值域範圍進行後續的影像比對，並找到適當的值域作為崩塌的判釋結果，研究流程如圖 2 所示：

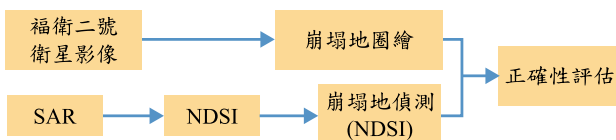


圖 2 NDSI 強度分析流程

3.1.1 2009 年莫拉克颱風崩塌災害 NDSI 分析

莫拉克颱風及引進的西南氣流影響期間約在 2009 年 8 月 6 日至 11 日間，本研究以 2009/07/08、2009/08/23 的兩幅 ALOS 1 的 SAR 影像，以 NDSI 技術判釋莫拉克颱風期間的高屏河流域崩塌範圍，並與福衛二號衛星判釋的崩塌範圍進行分類影像的精度評估，根據雷達回波強度變化，用以推測出崩塌地發生位置，而交叉極化(HV)在植生覆蓋散射的區域比同相極化(HH)更顯著，因此本研究選用 HV 極化用於後續分析。

由 NDSI 分析結果中值域應在-1~1 之間(如圖 3 左)，若值低於 0 則可能是地上有植生變化、含水量增加、產生裸露地等等反射條件增強，導致 SAR 接收的回波減弱的結果，而崩塌發生於具有坡度落差的區域內，因此本研究中以 5m 數值地形製作坡度圖，並以 10 度為山崩區域的判斷門檻值，濾除 10 度以內的平地及河床上的變化，取出崩塌地形的訊號(如圖 3 右)。

另外 NDSI 分析仍會產生小面積雜訊，可訂定面積

門檻值濾除，由於本研究使用的 ALOS1 衛星空間解析度約 10m，為使濾出的區域有足夠的代表性，本研究以 4 x 4 個網格為濾除標準，亦即面積在 40m X 40m 以下的範圍會被濾除不計，以減少雜訊的出現。

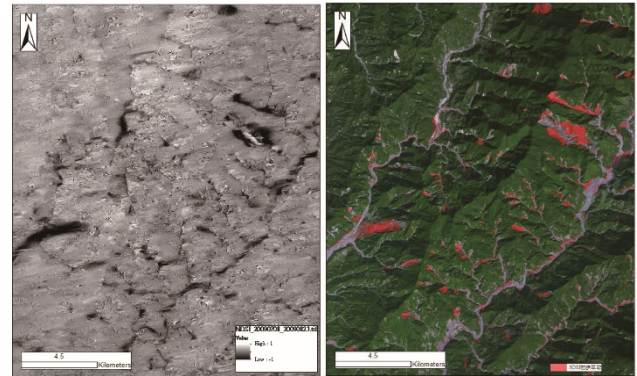


圖 3 NDSI 初步分析結果

(左：NDSI 分析示意圖、右：初步萃取及衛星套圖)

3.1.2 NDSI 於高屏河流域崩塌區域的判釋精確度評估

SAR 影像中新生崩塌地因具有較強的反射特性，後向散射值會偏弱，因此在濾除雜訊及扣除地形效應後的歸一化指標(NDSI)中，崩塌地的值域介於 0~1 之間，值域間包含變化幅度小的區域，使萃取面積過大不具指標性，需訂定門檻值界定值域，而不同時間拍攝的 SAR 影像受大氣影響仍有些微差異，新生崩塌地的平均值會有浮動，因此設定值域的門檻值並非定值，本研究發現以 NDSI 分析後的影像，可利用影像的標準差重新分類後提升判釋率，因此將 NDSI 分析結果的平均值配合不同的標準差組合進行精度評估。

以下利用混淆矩陣 (confusion matrix) 和 KAPPA 統計值進行分類的精度評估，混淆矩陣適用於表是某一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 4 所示，本研究中以林務局提供之衛星判釋全島崩塌地圖為真實崩塌的檢核資料，其製作時間約為每年 1~7 月間的福衛二號衛星影像，然而崩塌地可能伴隨擴大及縮小的情形，而 NDSI 萃取的僅有地表發生變異處，亦即可能為新生崩塌或是舊崩塌的擴大區，而原始的崩塌目錄僅能表達每年份的衛星影像的崩塌地範圍，因此本研究中將災後(2010)扣除災前(2009)的崩塌範圍，做為新生或擴大崩塌的檢核依據。

分析後雖然以平均值(μ)扣除 1.5 個標準差(σ)後可以判釋出部份小崩塌地，但也因此降低了判釋精度，而當扣除標準差超過 1.8 之後，則可判釋的崩塌地會大幅

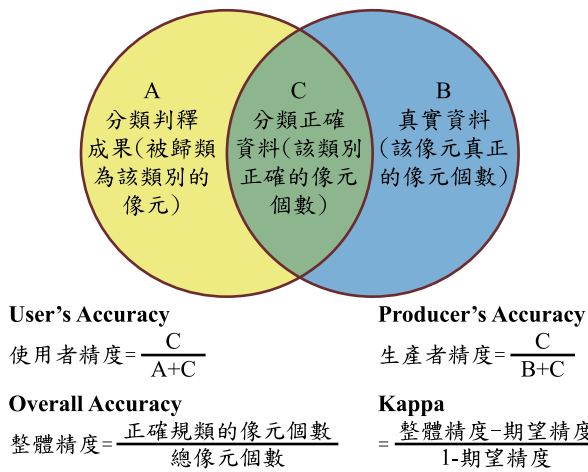


圖 4 混淆矩陣精度表示示意圖

下降，而以平均值(μ)扣除 1.75 個標準差(σ)後，可取得最符合崩塌範圍，又最少雜訊的成果，因此建議 NDSI 圈繪裸露地的值域範圍為 $-1 < NDSI < \mu - 1.75\sigma$ (μ 為該幅 NDSI 平均值、 σ 為標準差)。

以本次分析的成果中，高屏溪流域共有 2552 處裸露地，其中約有 1579 處與衛星影像判釋結果可套疊，約占總數 62%，但經挑選移除掉位於河道的裸露地後，約剩 1660 處崩塌地，以此 1660 處判釋結果再做一次混淆矩陣評估後，可讓使用者精度上升至 59%(亦即有 59%的判釋率)，分析結果如表 2 至表 4 所示。

而導致判釋率較低的原因，初步推測是因為初步判釋出的裸露地雖已扣除低於 10 度的坡度範圍，但是受限於 DEM 精度及產製年份，仍有部分區域屬於河道或上游溪流上的河道變化無法被去除，此外衛星影像判釋的崩塌是以一年一期，與 SAR 影像的產製時間尺度不同，兩者的時間差產生判釋錯誤，且 SAR 影像在產製時受地表變化，經校正後仍有偏差的情形，因此造成產製像元的精度下降，若將 1660 處 NDSI 判釋的崩塌與衛星影像判釋結果直接套疊，約有 1209 處可成功套疊，約占總數的 73%，因此可以此評估方式快速評估坡地災害範圍。

表 2 NDSI 混淆矩陣($-1 < NDSI < \mu - 1.5\sigma$)

	非崩塌	崩塌	總像元數	使用者精度	Kappa 指標
非崩塌	48370	1621	49991	97%	
崩塌	29758	20239	49997	40%	
總像元數	78128	21860	99988		
生產者精度	62%	93%		69%	
Kappa 指標					0.37

表 3 NDSI 混淆矩陣($-1 < NDSI < \mu - 1.75\sigma$)

	非崩塌	崩塌	總像元數	使用者精度	Kappa 指標
非崩塌	48283	1704	49987	97%	
崩塌	26995	23002	49997	46%	
總像元數	75278	24706	99984		
生產者精度	64%	93%		71%	
Kappa 指標					0.43

表 4 NDSI 去除河道堆積地混淆矩陣($-1 < NDSI < \mu - 1.75\sigma$)

	非崩塌	崩塌	總像元數	使用者精度	Kappa 指標
非崩塌	48149	1851	50000	96%	
崩塌	20461	29539	50000	59%	
總像元數	68610	31390	100000		
生產者精度	70%	94%		78%	
Kappa 指標					0.55

3.2 結合 NDSI 與 DInSAR 技術計算災後崩塌區域的沖蝕變化

前述研究中運用 NDSI 技術取得崩塌地判釋結果，而 SAR 影像的差分干涉技術(DInSAR)，可藉由兩幅影像產生干涉圖，經相位還原後產出地表變形量，並用於災後的崩塌地沖蝕量追蹤，本研究中以高屏溪為例，將前述於 NDSI 判釋的崩塌範圍進行後續的統計分析。

差分干涉技術需考量到兩影像間的時間基線及空間基線，若兩影像拍攝的時間區間過長或是軌道距離過遠，導致地上的相位資訊去相關，將會導致影像無法解算或解算錯誤，因此需先進行 SAR 影像的基線計算，移除無法順利產出干涉影像的像對，本研究中分析使用之 SAR 影像共計 9 幅，可供統計的部分共 7 個區間，像對時間差及基線長列如表 5 所示，其中 2010/02/23~2010/07/11 期間因長達 138 天，干涉結果嚴重去相關，因此移除該時序不予統計。

差分干涉技術(DInSAR)容易受地形效應影響，須運用高精度數值地形(DTM)進行地形校正並扣除嚴重的變形區，依此產出的垂直變化量可表示崩塌地的沖蝕或堆積情形，以 NDSI 的莫拉克崩塌判釋範圍，逐期統計災後從 2009/08/23~2011/02/26 共 7 期 552 天的地表變形量，最後統計各崩塌地的殘餘土砂變化量，並回歸崩塌地的變化趨勢，本研究流程各階段流程如圖 5。

表 5 衛星基線一覽表

	時間基線(天)	空間基線(m)
2009/08/23~2009/10/08	46	173.245m
2009/10/08~2010/01/08	92	121.097
2010/01/08~2010/02/23	46	537.534
2010/07/11~2010/08/26	46	368.384
2010/08/26~2010/10/11	46	201.457
2010/10/11~2010/11/26	46	-54.897
2010/11/26~2011/02/26	92	721.857

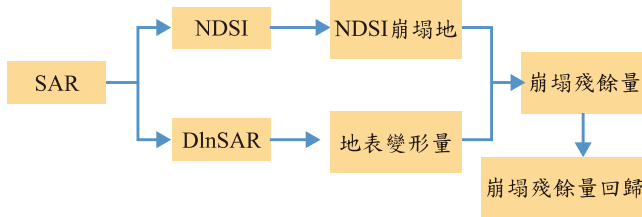


圖 5 崩塌地沖蝕量體評估流程

3.2.1 DInSAR 統計量誤差評估

本研究中運用 DInSAR 技術做為量體評估的主要工具，該分析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，為檢核 DInSAR 的地表變化量的計算成果，本研究以災前 93~95 年間產製的 5mDTM 與災後 99 年產製的 1mDTM 做為評估資料，以兩時序的 DTM 地表變化量做為評估誤差的真值，以 DInSAR 技術統計從 2009/08/23 至 2011/02/26 共 7 期 552 天的地表總

變形量做為估計值，其中 2010/02/23 至 2010/07/11 因時間基線過長失去相關性而移除，統計上述資料評估相對誤差量。

本研究取得判釋崩場地中的 1766 處真值，並以相對誤差值分布中的 95%信心區間計 1703 處進行統計分析減少極端值影響，其誤差分布如圖 6 所示，圖中可發現誤差分布的個數集中於+23%~-188%之間，相對誤差集中於負值為 DInSAR 統計結果有偏低的情形，造成此種現象的主要因素推測為兩種因素，第一為兩期 DTM 橫跨 4 年以上的時間，而 DInSAR 因資料來源限制僅能統計 2 年內的地表變化量，其統計量體略低，另一個因素為莫拉克災害時部分崩塌量體直接進入河道，其變化量已超出相位變化超過半波長的 DInSAR 技術限制，成為無法分析的雜訊，本研究中為探討崩塌後殘餘土沙量的流失情形，因而進一步分析崩塌量體的組成。

將DTM的地表變化量真值對照相對誤差如圖7所示：體積變化大的崩場地，相對誤差集中在0~-100%之間，而造成其他誤差分布的則是一些小面積的崩場地，顯示 DInSAR 對於大面積的地表變形量有較顯著的效果，另一方面將體積變化減少 20000 立方公尺以上的區域進行堆積區域的影像判釋，若是崩塌區域遠離河道，且崩塌量體堆積於坡面的崩塌，假設其崩塌後大部分量體並未流入河道中，此類區域在圖 7 中標記為橘色，可發現其相對誤差降低至-50%~26%之間，剩餘的誤差則是因仍有少量崩塌量流入河道所造成，由上述分析可驗證 DInSAR 分析技術已有足夠的精確度用於崩塌量體評估。

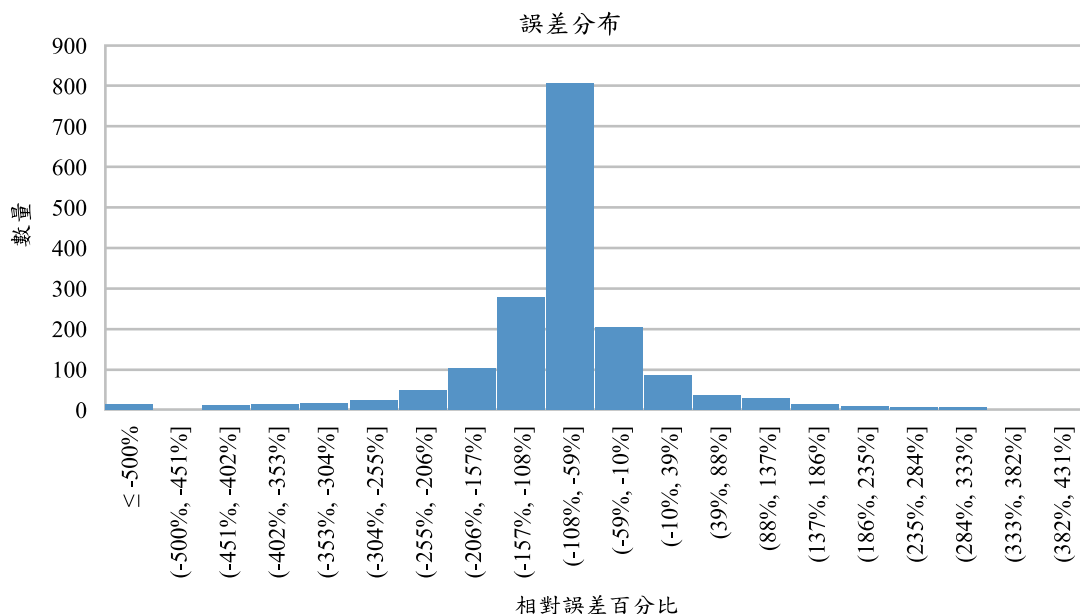


圖 6 誤差分布圖

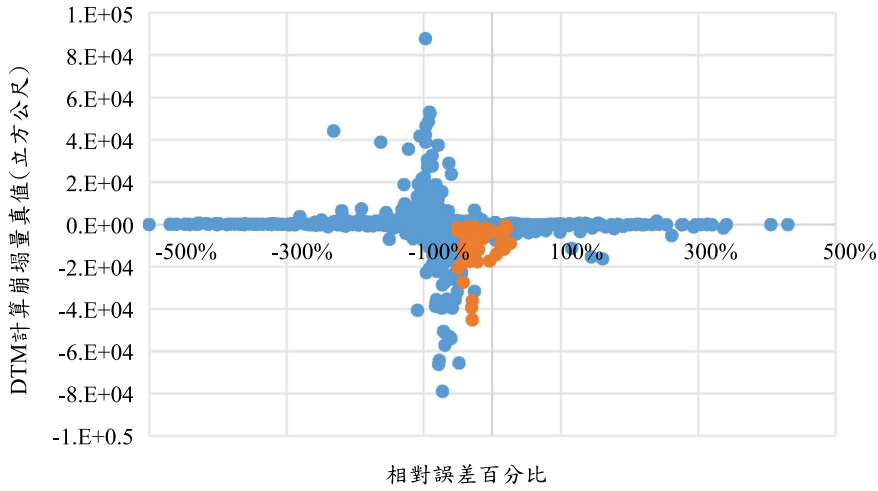


圖 7 DTM 量體變化真值與誤差關係圖

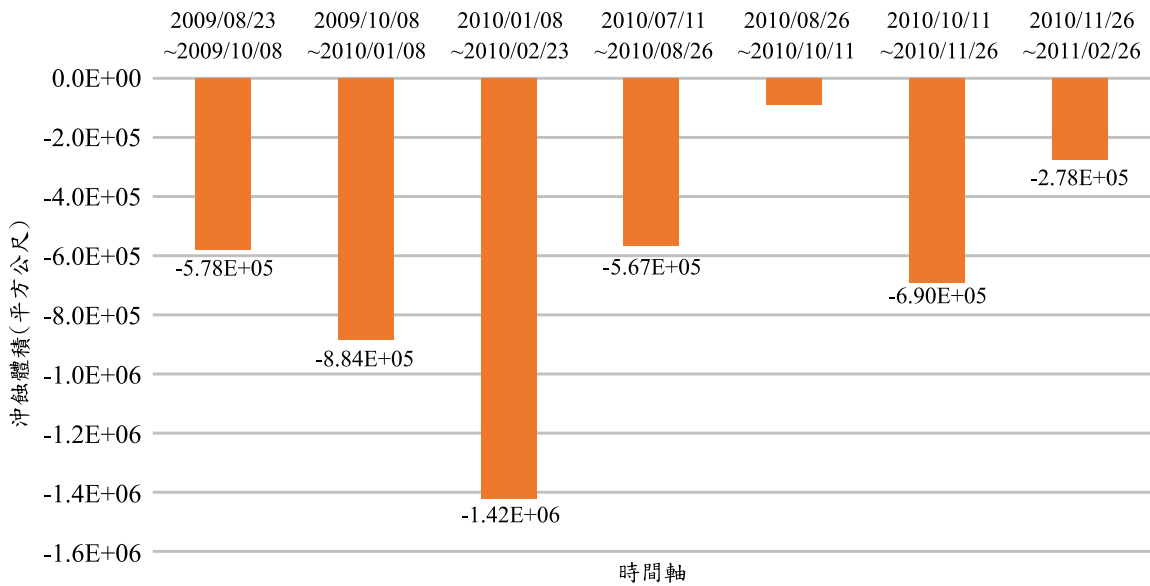


圖 8 隨時間計算之整體沖蝕變化

3.2.2 災後崩塌區域的整體沖蝕變化

統計災後從 2009/08/23 至 2011/02/26 共 7 期 552 天的地表總變形量，以每一期進行統計，並移除其中 2010/02/23 至 2010/07/11 時間基線過長的像對，統計結果中顯示莫拉克災後仍有殘餘土砂從崩塌坡面上流出如圖 8 所示，然而流出量體隨經過的時間有明顯的逐漸下降的趨勢，由此顯示崩塌地若無發生新的災害事件，則整個集水區內由坡面流出的土砂會在數年內趨於穩定。

3.2.3 坡面殘留量體的回歸

統計以 NDSI 判釋出的裸露區域 2552 處的災後七期的沖淤量體，位於河道上的判釋區域約占 892 處呈

現堆積(深綠色)的情形，而處於坡面上的崩塌地共 1660 處(淺綠色至深紅色)呈現沖蝕情形，明顯的表示殘餘土砂向河道運移的情形，如圖 9 所示。

計算崩塌面積與體積的回歸關係，各崩塌地若無災害事件擴大其崩塌面積，則單一事件的殘餘土砂量在災後的沖蝕量有一上限值，其回歸結果約為 $V = 0.3037A^{1.0287}$ (V 為流失體積、 A 為崩塌面積)如圖 10，對照水利署估算的災害崩塌體積，殘餘土砂的沖蝕比例與崩塌面積有關，在崩塌面積為 102 公頃時，約有總崩塌量 44% 的沖蝕量；當面積為 106 公頃時沖蝕量約為總崩塌量的 4%，由此統計發現崩塌後雖有土砂持續流出，但有逐期減少的趨勢，並在一段時間之後趨於穩定，此沖蝕量回歸結果可用以推演大型土砂災害發

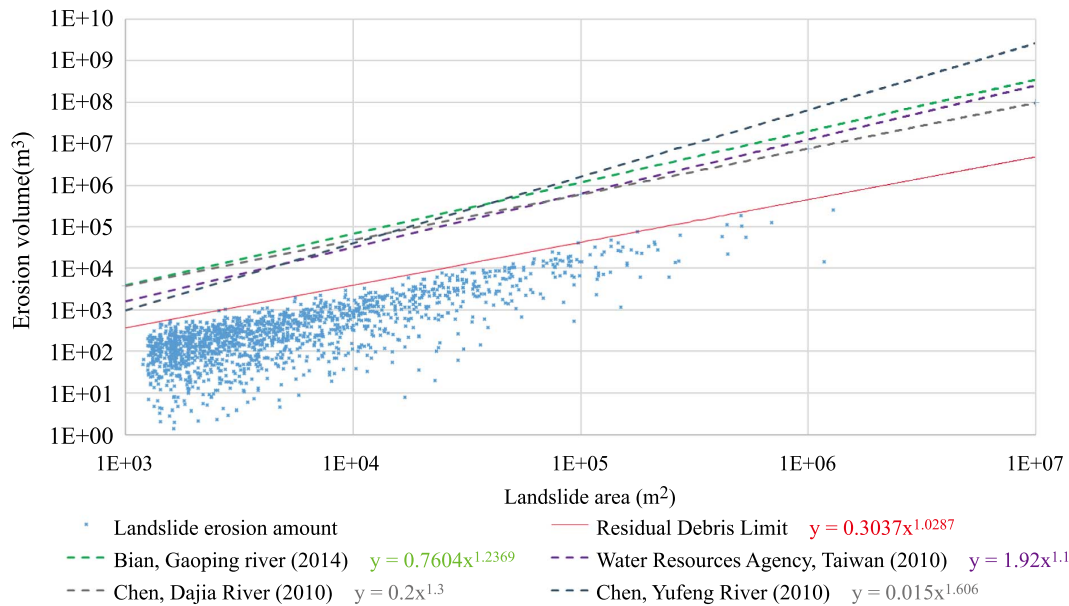


圖 10 殘餘土砂流出量分析

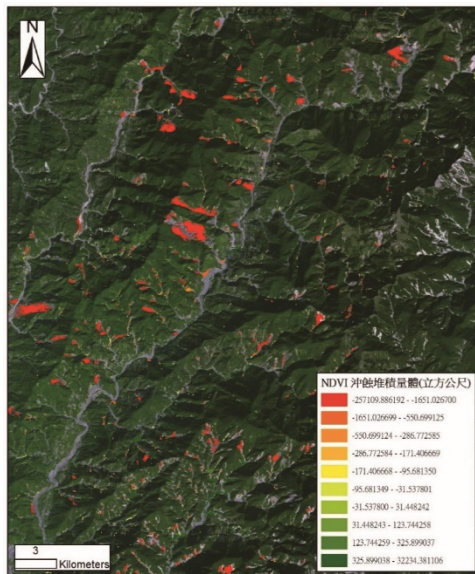


圖 9 莫拉克後各崩場地殘餘土砂沖蝕堆積情形

生後，崩塌地後續的土砂流出量體及運移情形，做為二次災害的評估及防災對策擬定都將有重要的應用價值。

四、無人載具配合連續式差分干涉合成孔徑雷達進行河道沖刷分析

為進一步瞭解崩塌沖刷於河道內之影響，本研究挑選荖濃溪流域中復興河段進行分析，荖濃溪流域山

坡地中上游地形陡峻、河流短且水流湍急，地質岩性脆弱易風化，表土沖蝕顯著，自 2009 年 8 月莫拉克、2012 年 8 月天秤等多場重大颱風挾帶連續雨量侵襲，造成許多集水區中上游崩塌嚴重，洪水挾帶大量土石下移導致河道淤積嚴重，清疏後多以兩岸設置臨時布設區，礙於布設區空間有限，對於處理清疏土石對策上需導入環境永續性、資源利用等思維，每年清疏土砂量甚鉅，如何有效去化清疏土石並做最有效利用，本研究選定高雄市桃源區復興里 107 年工程為對象，工程位於高雄市桃源區荖濃溪與拉庫斯溪交界周邊，因 106 年 0602 及 0613 豪雨事件後溪水往省道台 20 線沖刷，恐影響道路安全，107 年通過進行清疏並於該處將設置土砂堆置區及保護工，可保護道路安全，清疏土砂量為 100,000 立方公尺，期間分別於 2017 年 7 月、2018 年 1 月、2018 年 2 月及 2018 年 6 月合計進行 4 次無人載具空拍調查，歷次無人載具空拍均使用內政部 e-GNSS 進行地面控制點佈設及測量，所使用的無人載具為 DJI Inspire 1，搭配雲台及鏡頭分為 X5 及 Olympus 12mm 鏡頭，於 35mm 系統之等效焦距為 25mm，感光元件為 17.3mm，相片解析度為 1600 萬畫素，產製之數值地表模型施工前於完工後高程差異如圖 11 所示，取工程位置繪製河道斷面(圖 12)四次空拍高程變化如圖 13 所示，可看出施工後高程增加及施工後四個月工程位置高程趨於穩定，工程位置具有穩定道路基礎與減緩河道沖刷成效。

惟空拍調查需前往現場且於天候良好時方能進行，可執行天數與所需時間較長，本研究另以連續式差

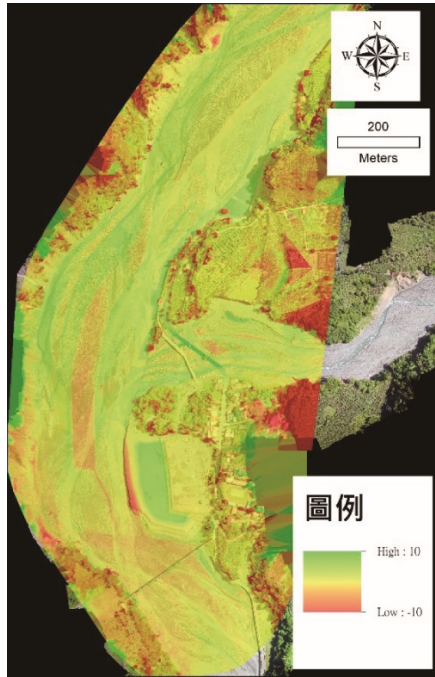


圖 11 桃源區復興里清淤治理工程完工後及施工前高程差(公尺)

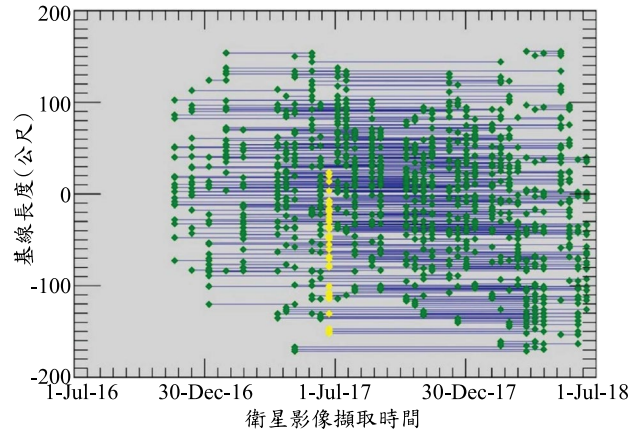


圖 14 2016/11/18 ~ 2018/6/17 間 35 幅 Sentinel-1 雷達影像分析時間基線

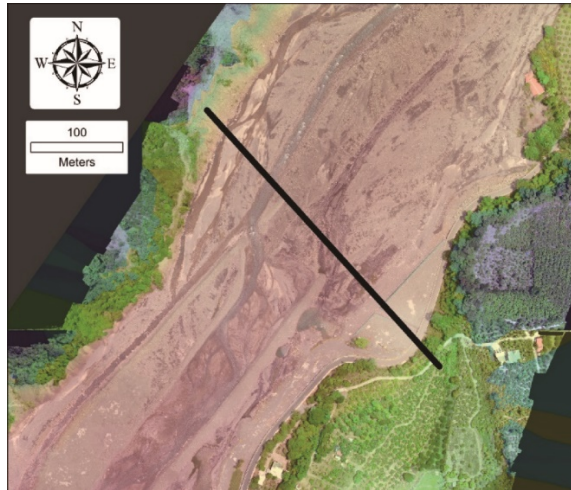


圖 12 工程位置及剖面位置圖

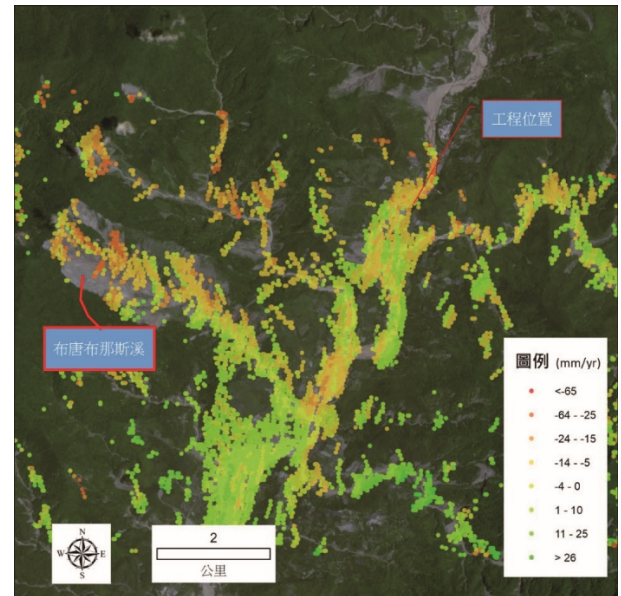


圖 15 差分干涉合成孔徑雷達分析之地表垂直變化(短基線法)

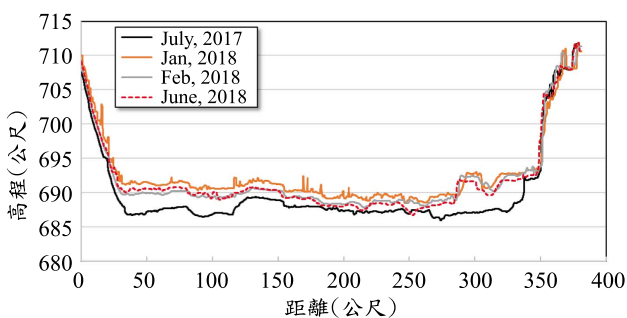


圖 13 無人載具歷次拍攝剖面位置高程

分干涉合成孔徑雷達分析方法進行溪床高程變化分析，差分干涉合成孔徑雷達分析方法除無天候限制之外，於反射良好地面精度可達 mm 等於，本研究採用 2016/11/18 至 2018/6/17 合計 35 幅歐洲太空總署 Sentinel-1 合成孔徑雷達衛星影像進行分析，Sentinel-1 衛星與前述衛星波段不同，屬於波長較短之 C 波段，但由於再訪週期僅 12 天，有助於連續地表觀測進行，因此本研究下載涵蓋無人載具拍攝前後期之 Sentinel-1 影像合計 35 幅影像進行分析，涵蓋時間由 2016/11/18 ~ 2018/6/17，影像時間基線如圖 14 所示，解得此時段內高程變化速率如圖 15 所示，由圖 15 可看出不同河段之一年半間之沖淤變化情形，另於布唐布那斯溪上

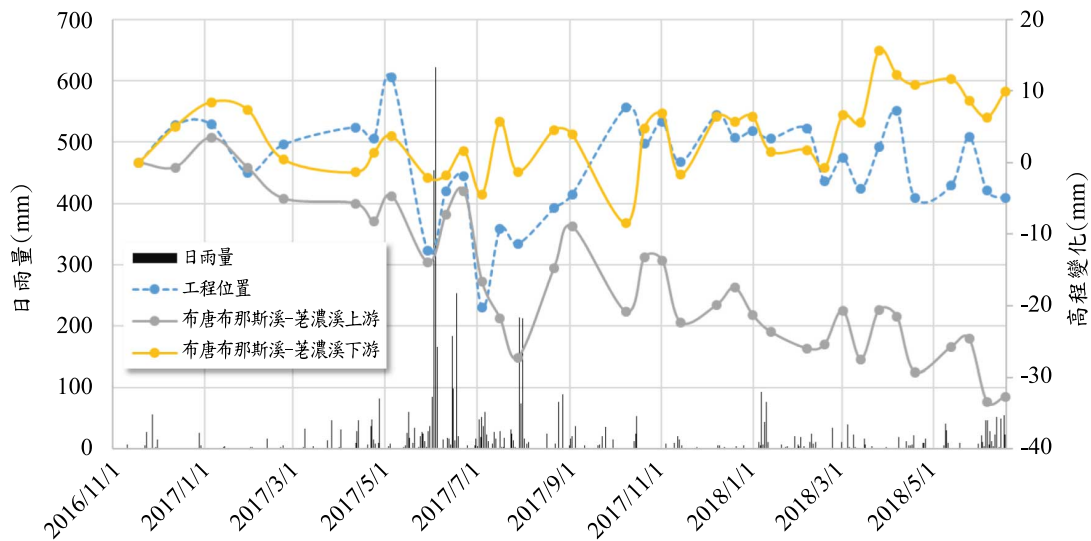


圖 16 桃源區復興里差分干涉合成孔徑雷達分析高程變化

游崩塌地則持續侵蝕，取本研究工程施工位置分析繪如圖 16 所示，於 2017 年 6 月豪雨期間高程變化較大，之後高程出現緩慢下降情形，顯示本案工程位置有助於減緩沖刷，另取布唐布那斯溪與荖濃溪匯流口上下游分析，可知布唐布那斯溪與荖濃溪匯流口上游持續刷深，而於布唐布那斯溪與荖濃溪匯流口呈現堆積情形，可比較出工程施作與否之差異。

整體而言，無人載具調查可以獲得低於 10 公分解析之高精度正射影像及地表數值高程，然連續式差分干涉合成孔徑雷達分析可獲得大面積短時間間隔高精度地面變形資料，兩者互為輔助可做為河道沖淤變化調查與評估良好工具，本研究工程位於河道沖刷區有助於穩定河道避免道路沖刷下陷。

五、結論

本研究使用衛載合成孔徑雷達影像進行莫拉克颱風災害崩塌地判釋，災後兩年的崩塌地沖蝕分析，及災後 10 年荖濃溪復興段河道內之變遷分析，總結結論如下：

1. 結合 SAR 影像的強度及極化性質可有效的進行崩塌地判釋，此結果已在 ALOS1 衛星上得到驗證，其 NDSI 值域範圍 $-1 < \text{Value} < \mu - 1.75\sigma$ 可得到最適當的裸露地範圍，但判釋結果包含地上的農耕或河道變化等情形，經人工剝除後僅留下崩塌區域，與真實崩塌資料比對可得到 59% 的生產者精度，kappa 指標約 0.55，這部分是因雷達本身解析度不佳及地形效應影

響，導致以像元為單位統計時會有較差的分類結果，若直接與真實崩塌地套合則有 73% 的崩塌地可成功套疊真實崩塌範圍，而 SAR 影像不受氣候條件影響，在災時無法立即取得光學影像時，可以迅速用於災害位置判斷。

2. 結合 NDSI 判釋結果及 DInSAR 技術，本研究統計出莫拉克災後新生崩塌地的沖蝕情形，並取得良好殘餘量體的回歸結果 $V = 0.3037A^{1.0287}$ (V 為流失體積、A 為崩塌面積)，此一回歸結果日後可用於各減災、防災工程的參考依據，並提供集水區治理可靠的土砂產出估算方式。
3. 使用無人載具進行正射影像及數值地形製作可以獲得高精度、高解析度成果，對於歷次事件或施工過程產生的土方及沖蝕情形可以進行分析與回饋設計條件成果，然而無人載具拍攝及分析所需時間、經費及所產生的範圍有其限度，較適合於 100 公頃以下面積範圍，對於較大範圍建議採用定翼型或垂直起降 (vertical take-off and landing, VTOL) 定翼式無人載具。
4. 利用連續式差分干涉合成孔徑雷達分析方法，可以獲得大面積觀測點高程變化趨勢，對於地表變遷的掌握有快速經濟的成效，亦可以進行長期分析，對於河道、山坡地監測有相當的助益。

參考文獻

1. Chang, C. P., Wang, C. T., Chang, T. Y., Chen, K. S., Liang, L. S., Pathier, E. and Angelier, J., "Application of

- SAR interferometry to a large thrust deformation: the 1999 Mw=7.6 Chichi earthquake in central Taiwan.” *Geophysiscs Journal International* 159: 9-16, 2004.
2. Champenois, J., Fruneau, B., Pathier, E., Deffontaines, B. Lin, K.-C., Hu, J.-C., Monitoring of active tectonic deformations in the Longitudinal Valley (Eastern Taiwan) using Persistent Scatterer InSAR method with ALOS PALSAR data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 337-338, 144-155, 2012.
 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. De Grandi , G. F., 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., 1997
 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. 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.
 8. Hung, W.C., Hwang, C.H., Chen, Y.A., Chang, C.P., Yee, J.Y., Andrew Hooper and, Yang, C.Y., Surface deformation from persistent scatterers SAR Interferometry and fusion with leveling data: a case study over the Choushui River Alluvial Fan, Taiwan. *Remote sensing of environment*, 115(4), 957-967, 2011.
 9. 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.
 10. Sabins, F.F., *Remote Sensing Principle and interpretation*, second edition. pp.177-233., 1987.
 11. 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.
 12. Shibayama, Takashi, Yamaguchi, Yoshio and Yamada, Hiroyoshi., “Polarimetric Scattering Properties of Landslides in Forested Areas and the Dependence on the Local Incidence Angle”, *Remote Sens.*, 7(11), 15424-15442., 2015.
 13. Tung, H., Hu, J.-C.. Assessments of serious anthropogenic land subsidence in Yunlin County of central Taiwan from 1996 to 1999 by Persistent Scatterers InSAR. *Tectonophysics*, 578, 126-135, Doi:10.1016/j.tecto.2012.08.009, 2012.
 14. Wang, K.-L., Lin, M.-L 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, 2007.
 15. Wang, K.-L., Dowman, Ian, and Lin, M.-L., “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, 2007.
 16. Wang, K.-L., Lin, M.-L., 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, 2005.
 17. Yen, J-Y., Lu, C.H., Chang, C.P., A. J. Hooper, Chang, Y.H., Liang, W.T., Chang, T.Y., Lin, M.S., and Chen, K.S., Investigating the active deformation in the northern longitudinal valley and hualien city of eastern taiwan by using persistent scatterer and small-baseline sar interferometry. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 22(3), 2012.
 18. Zhao, C., et al, "Large-area landslide detection and monitoring with ALOS/PALSAR imagery data over Northern California and Southern Oregon, USA." *Remote Sensing of Environment* 124: 348-359., 2012.

19. 周鋒泯，應用永久散射體差分干涉法觀測台灣北部地區之地表變形，中央大學地球物理研究所碩士論文，2008。
20. 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。
21. 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。
22. 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。
23. 童忻，利用永久散射體雷達干涉技術分析地表變形：以臺灣西南部平原為例，台灣大學地質所碩士論文，2007。
24. 黃雅囊，以永久散射體雷達干涉技術偵測屏東平原地表變形之研究，高雄應用科技大學土木所碩士論文，2010。
25. 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。
26. 盧志恆，應用永久散射體差分干涉法探討花蓮市區斷層活動與地表變形，臺北市立教育大學碩士論文，2008。
27. 蕭逸凡，永久散射體雷達干涉技術應用於地表變遷偵測，中央大學土木所碩士論文，2009。
28. 蘇柏宗，具多餘觀測的永久散射體雷達干涉測量法，成功大學測量所碩士論文，2011。

收稿日期：民國 107 年 12 月 28 日

修正日期：民國 108 年 01 月 29 日

接受日期：民國 108 年 10 月 17 日