



# 地表變形與崩塌初步研析

王國隆 / 國立暨南國際大學土木工程學系 教授、兼任環境保護暨安全衛生中心安全衛生組 組長

謝佑明 / 國立臺灣科技大學營建系 副教授、兼任副教務長、全校不分系學士班 主任

林聖琪 / 國家災害防救科技中心 助理研究員

柯明淳 / 國家災害防救科技中心 助理研究員

塗冠婷 / 國家災害防救科技中心 專案助理研究員

林俊廷 / 瑞模德科技有限公司 總經理

本文就 2024 年 4 月 3 日發生於花蓮外海之規模 7.2 地震所衍生之地表變形與初步完成邊坡受震崩塌結果進行說明與研析，邊坡受震破壞主要來自於地震時產生之加速度，以擬靜態分析時則以加速度為外力，如以能量法分析則包含受震歷時，本文則初步以擬靜態為初步破壞分析基礎。首先以衛載合成孔徑雷達 (SAR) 影像對地表進行分析，日本宇宙航空研究開發機構 JAXA 之 ALOS-2 SAR 影像於地震後隔日立即對臺灣取像，快速獲得地表變形趨勢；歐洲太空總署 (ESA) 之 Sentinel-1A 則分別於 4 月 8 日及 4 月 10 日分別以上升軌及下降軌取像，經分析獲得較佳的地表變形。由差分干涉合成孔徑雷達 (DInSAR) 分析結果顯示，在花蓮沿海地表有明顯抬升量，最高抬升量約為 49 公分，越往內陸抬升量越少；DInSAR 分析結果東西向大致上呈現向東位移，然花蓮吉安一線則出現部分向西位移情形。從 DInSAR 分析結果取出部分地震站加速度歷時進行分析，結果發現在米崙斷層以東之測站與其他測站歷時及時間頻率均有差異；在高程差異地震歷時方面，分析月眉國小、銅門國小及西寶國小三站加速度，銅門國小所產生之地震放大效應較為明顯。在崩塌地分析上，崩塌地數化以農村發展與水土保持署數化之崩塌地為基礎，以航空照片為驗證，在雲覆無法辨識位置則以 SAR 影像之 NDSI 分析輔助，所得之地震引致加速度門檻在南北向與東西向為 220 gal 左右，垂直向為 100 gal 左右，均較 921 地震為高。

## 差分干涉合成孔徑雷達 (DInSAR) 地表變形分析

差分干涉雷達 (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, DInSAR) 係利用兩幅同一地區不同時間 (位置) 所拍攝的影像作干涉處理，合成孔徑雷達利用衛星運行時，快速地重複發射雷達波，並將回波資料加以解算；當兩束波長相同、相位相同或保持固定相位差的光線照射在同一目標上，會產生一系列亮暗相間的干涉條紋，兩束雷達波在一定條件下也會產生干涉現象。當干涉雷達使用兩套相距  $B$  基線長的天線在地面產生干

涉現象，干涉條紋出現時代表變形呈現雷達波波長的相位循環，一般以 RGB 色彩表示，R-G-B 一組循環為相對半個雷達波長對衛星距離變化，將此一相位還原後經計算即可測得地表變形。

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 (Line of sight, LoS)，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，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 1)，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去除該項誤差，相干值（同調，coherence）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<sup>[1]</sup>。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，可藉以取得較高精度且可信任之地表變形量。

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

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

$\phi_{\text{Change}}$ ：地表特徵相位變化

$\phi_{\text{Movement}}$ ：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

$\phi_{\text{Noise}}$ ：雜訊相位

$B_n$  為正常基線（Normal Baseline）

$h$  為待測位置地表高程

$\lambda$  為雷達波長

$\theta$  為側視角。

使用此一方法將日本於 2024/4/4 與 2023/10/19 取得之 ALOS-2 觀測影像進行分析，其干涉條紋如圖 1 所示。如前所述，因地表變形產生之干涉條紋呈現東北–西南向平行排列，亦即未分析出可能之地表破裂跡，而圖中干涉條紋則顯示沿岸至內陸的高程變化趨勢。從 ALOS-2 波長為 23.6 公分可以計數對衛星距離變化。

於 2024/4/8 及 4/10 取得 ESA Sentinel-1 上升軌及下降軌全台影像後，將往前 12 天取得之全台影像進行差分干涉分析，所得結果之全台及花蓮地區干涉條紋分別如圖 2 至圖 5 所示，從圖中可之全台均受到地震影響位移，而於花蓮地區由於取像時間兩天差異，在米崙斷層以東位置出現不同的干涉條紋分佈，其餘則大致相同。

為了分析真實變形量，將不同時間之像對組合分析，Fialko and Simons<sup>[2]</sup> 提出將 line of sight 觀測資料轉換為三維觀測方法，其使用之方程式如公式 (2)：

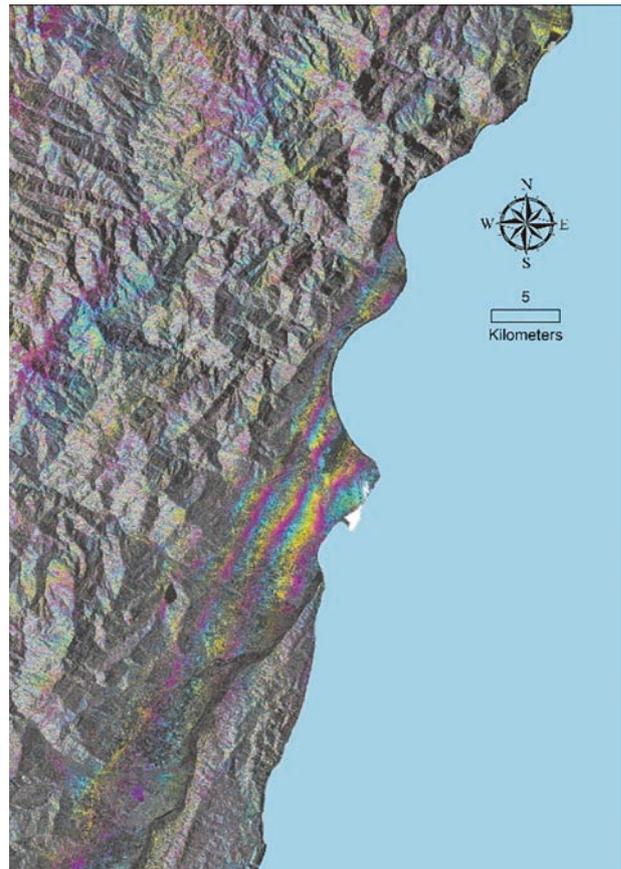


圖 1 日本 ALOS-2 之 DInSAR 分析結果 (2023/10/19-2024/4/4)

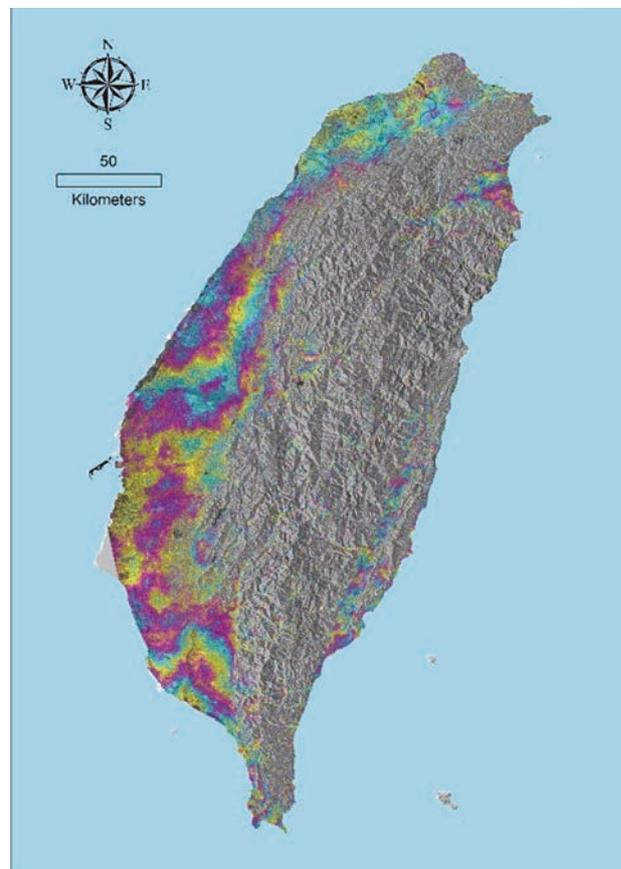


圖 2 歐洲 ESA 之 Sentinel-1A 上升軌 (2024/3/27-2027/4/8)

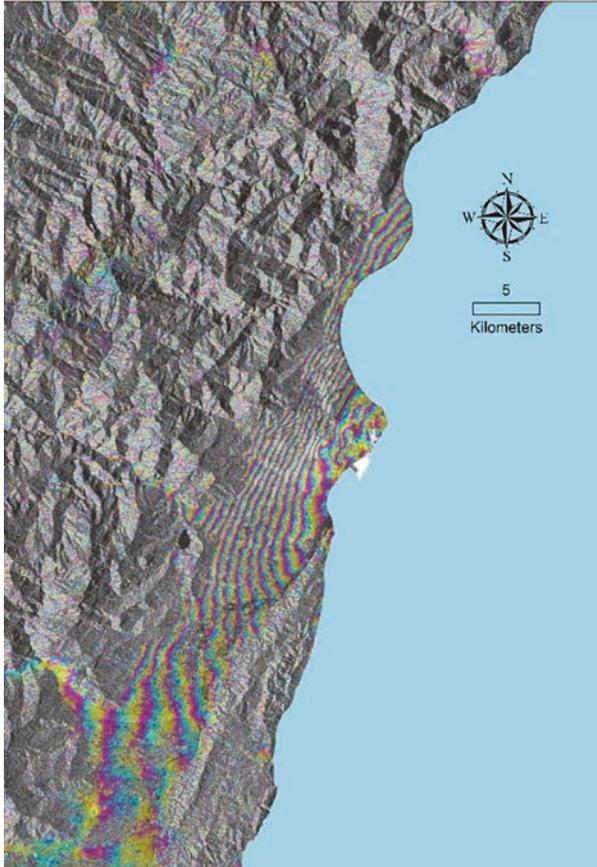


圖 3 歐洲 ESA 之 Sentinel-1A 上升軌 (2024/3/27-2027/4/8)

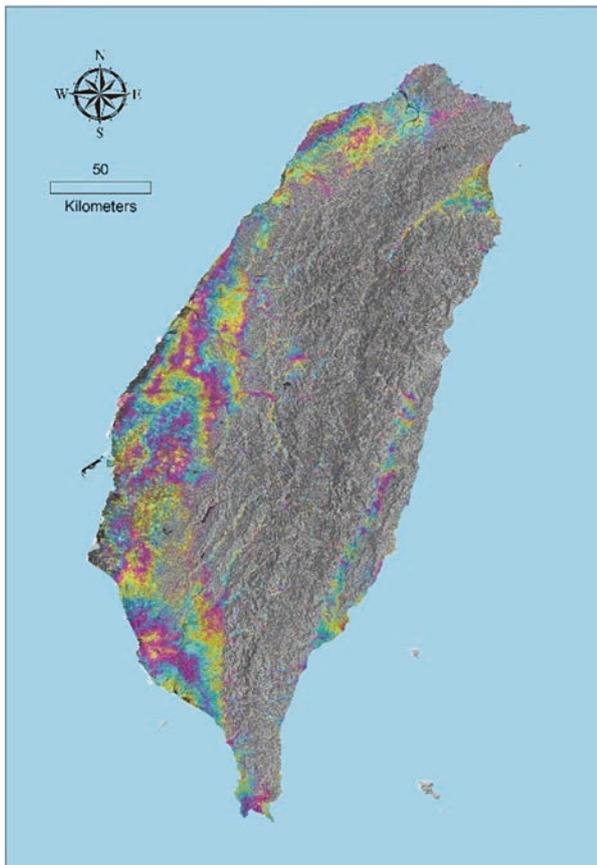


圖 4 歐洲 ESA 之 Sentinel-1A 下降軌 (2024/3/29-2027/4/10)

$$[U_n \sin \phi - U_e \cos \phi] \sin \lambda + U_u \cos \lambda + \delta \text{los} = d\text{los} \quad (2)$$

其中， $\phi$  為衛星運行方向方位角， $\lambda$  為衛星發射至地面點之傾斜角， $U_n, U_e, U_u$  分別代表北南方向、東西方向及垂直方向變形， $\delta \text{los}$  則是量測誤差，包含軌道誤差、大氣延遲、低同調性以及錯誤的數值地形等。

從上式可知，我們可以藉由多個不同角度觀測點利用上式解算出直角坐標變位。

Ng *et al.*<sup>[3]</sup> 於 2011 年進一步依據 Fialko 方法重新將此一方法分離為兩種模式，由於 Fialko 當時所使用的 SAR 衛星為右視，故在右視情況下的三維變形計算可藉由公式 (3) 獲得：

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \cos \alpha & \sin \theta \sin \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_u \\ D_e \\ D_n \end{bmatrix} = [\Delta R] \quad (3)$$

其中， $\theta$  是衛星發射至地面點之傾斜角， $\alpha$  為衛星運行方向之方位角， $D_u, D_e, D_n$  分別代表垂直方向、東西方向及北南方向之地表變形， $\Delta R$  則為 line of sight 變形。

而當衛星為左視情形時，將其拆解為直角坐標三方向變形方程式則為公式 (4)：

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \cos \alpha & -\sin \theta \sin \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_u \\ D_e \\ D_n \end{bmatrix} = [\Delta R] \quad (4)$$

由以上兩式可知，欲解算三維方向變形，必須由至少三個不同方向的量測值才能取得。

另外，由於 SAR 衛星運行方向為南北方向運行並側向觀測，所以對於南北方向的變形較為不敏感，一般情況下可能計算所得變形小於真實變形量，故 Ng *et al.*<sup>[3]</sup> 為了將在計算過程中最小平方誤差降低，亦提出忽略南北方向僅採用東西方向及垂直方向之計算方式公式 (5)：

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & \mp \sin \theta \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_u \\ D_e \end{bmatrix} = [\Delta R] \quad (5)$$

上式中負號為右視情形使用，正號為左視情形使用。

在影像的使用上，上升軌使用 2024/3/27, 4/8, 4/20 三個時間，下降軌使用 2024/3/29, 4/10, 4/22 三個時間，經組合分解後之垂直向與東西向變形量分別如圖 6 及圖 7 所示，在垂直向變形上，花蓮沿海均呈現抬升情形，高程抬升最高約為 49 公分，與現場情況吻合。然在東西向變形上，大致上為往東位移情形，在花蓮市 - 吉安鄉東北 - 西南向則出現往西位移。

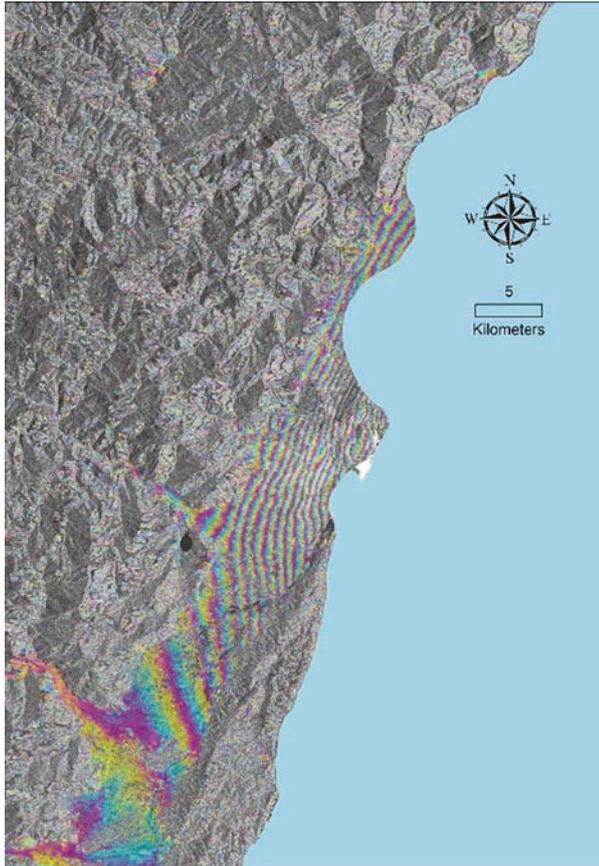


圖 5 歐洲 ESA 之 Sentinel-1A 下降軌 (2024/3/29-2027/4/10)

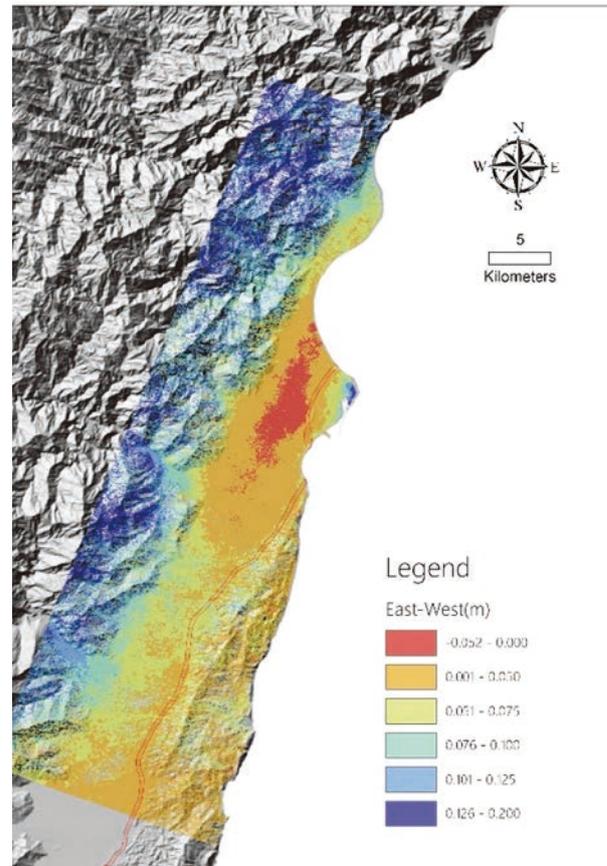


圖 7 東西向變形 (2024/3/27-2024/4/20)

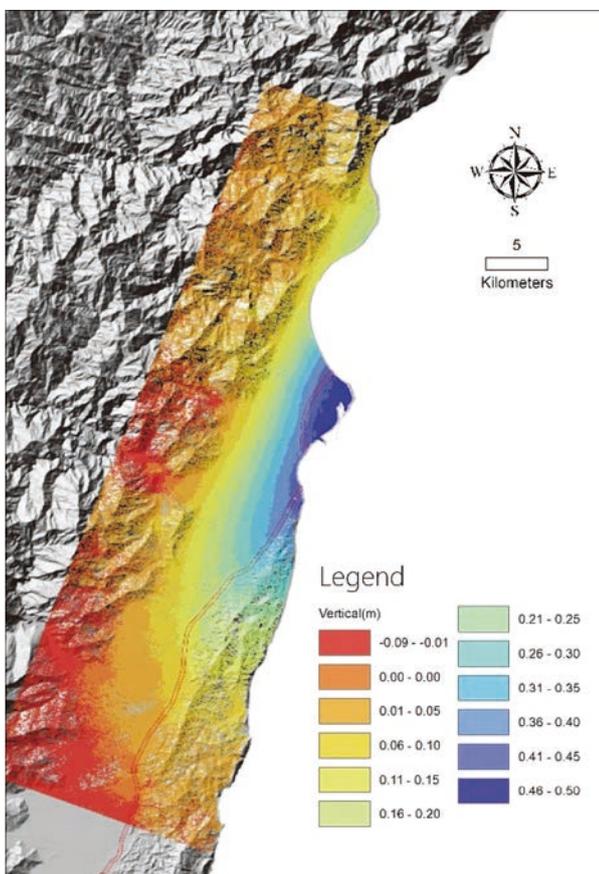


圖 6 垂直向變形 (2024/3/27-2024/4/20)

## 地震站加速度差異

從以上分析結果顯示，米崙斷層以東與以西在東西向變位存在方向上的差異，取得氣象署 GDMS 之地震站加速度資料進行分析。在圖 1、圖 3 及圖 5 中米崙斷層及以東位置有 F076 及 F019 兩處地震站如圖 8 所示，其中 F076 位置靠近翰品酒店，而 F019 位置靠近天王星建築。將兩處地震站之東西向加速度歷時與時頻圖繪製分別如圖 9 及圖 10 所示。觀察 F076 測站在最大地表加速度來之前出現較長波長之加速度歷時，兩處地震站在時間頻率圖上均出現高頻震動訊號，而 F019 則在地震開始時存在一約 20 Hz 明顯高頻訊號；為進行比較，選用在太平山森林遊樂區內（宜專一線 13.5k）之蘭台大規模潛勢區安裝於邊坡擋土牆上之 MEMS SDM（Static-Dynamic Measurement）儀器比較，MEMS SDM 為台科大營建系謝佑明開發，能持續記錄三向度 200 Hz 加速度訊號，將其沿邊坡滑動方向之加速度訊號繪製如圖 11 所示，從圖上可見紀錄之加速度主頻率約為 1.5 Hz，在幾個較大加速度峰值時則出現較廣分佈頻率，可能為地下錯動之訊號。



圖 8 取用分析之米崙斷層以東 (F076) 及近米崙斷層 (F019) 地震站

在邊坡之加速度歷時反應方面，選用距離震央最近的月眉國小 (F051；高程 51 m)，邊坡上之銅門國小 (F058；高程 170 m) 及太魯閣國家公園內之西寶國小 (F072；高程 1005 m) 進行比較，其中銅門國小及西寶國小於地震開始不久隨即斷訊，故僅取其地震開始時之東西向加速度進行比較，將加速度歷時位置如圖 12 所示，月眉國小由於較靠近震央，其加速度反應最早，其次為銅門國小，而西寶國小加速度反應起使時間與月眉國小差距接近 4 秒；在加速度震幅反應上，銅門國小之放大效應相當明顯，兩者之高程差異僅 119 公尺，依照 Lin and Wang [4] 及 Wang and Lin [5] 在震動台之邊坡試驗結果，模擬 10 公尺高的邊坡，其坡頂/坡趾之加速度放大約為 1.1 倍，相較而言，銅門國小測

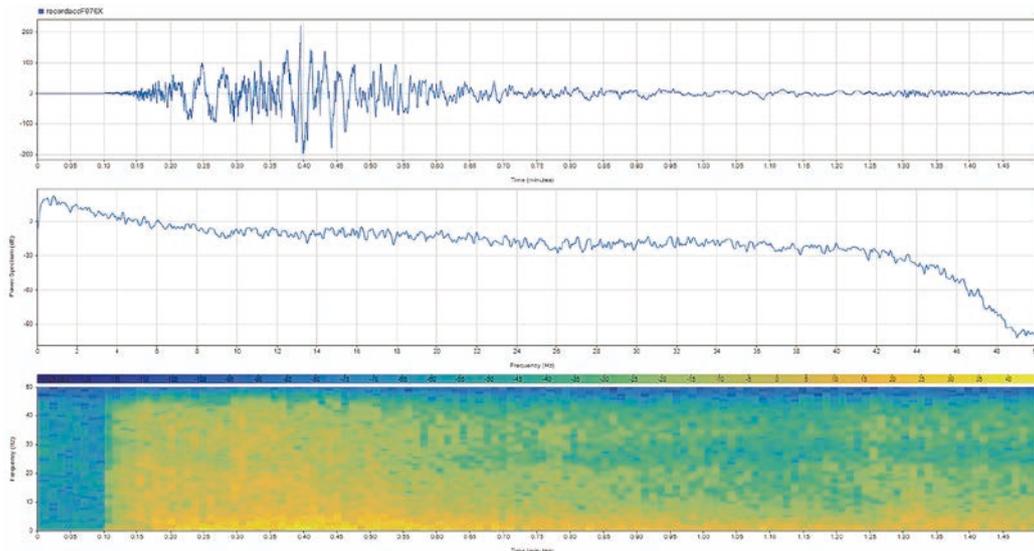


圖 9 F076 地震站東西向加速度歷時及時頻圖 (加速度單位：gal)

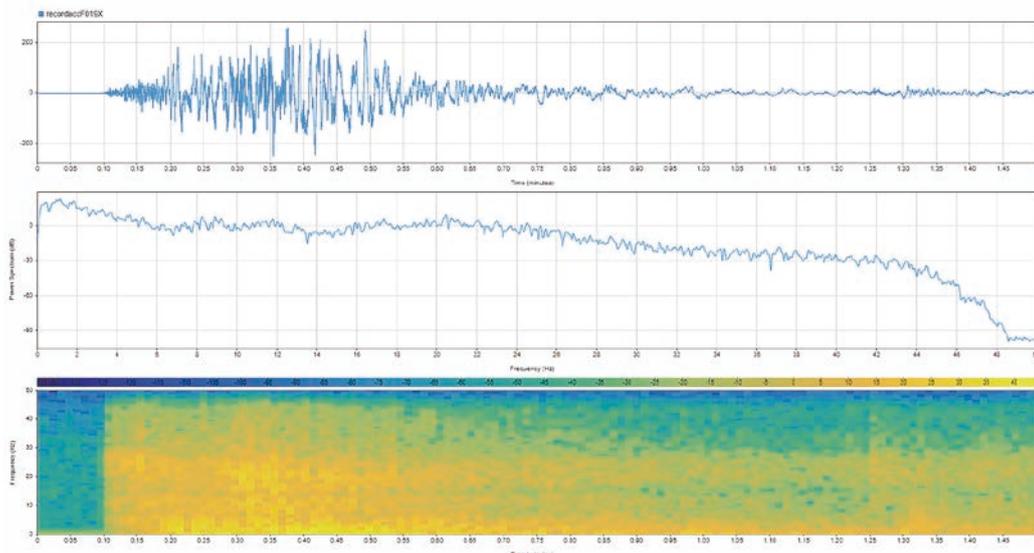


圖 10 F019 地震站東西向加速度歷時及時頻圖 (加速度單位：gal)

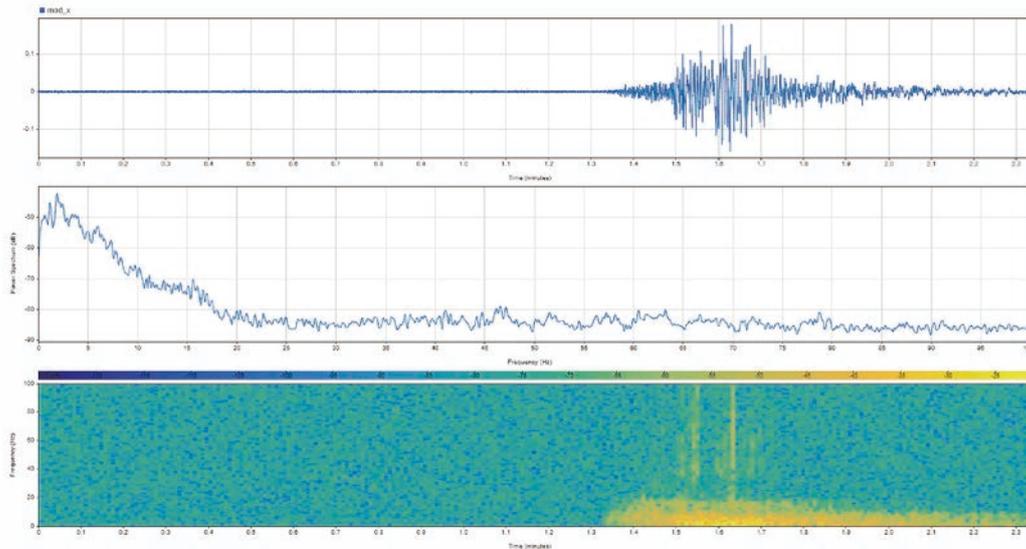


圖 11 位於太平山宜專一線 13.5k 之 MEMS SDM 朝下邊坡方向紀錄之加速歷時及時頻圖 (加速度單位: g)

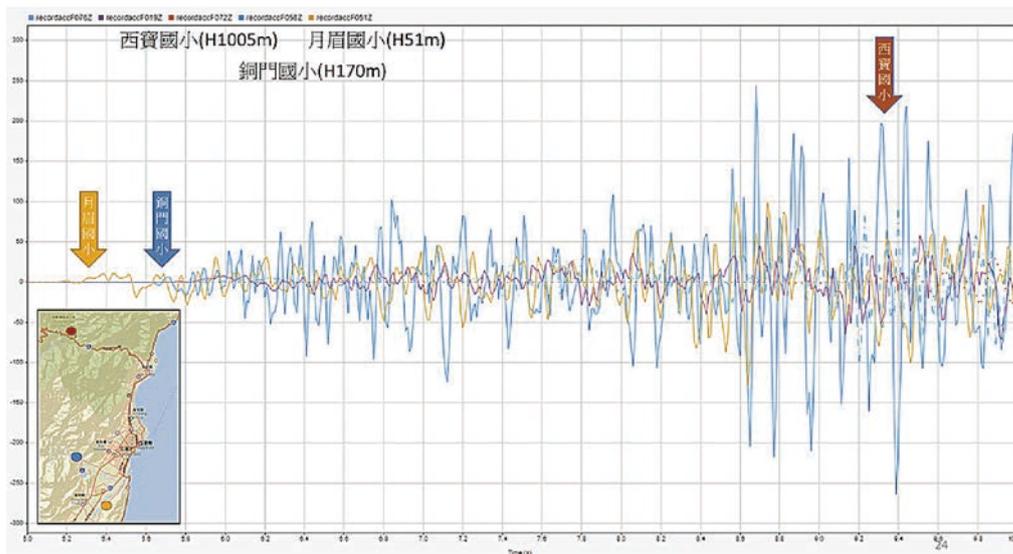


圖 12 地震之放大效應

站之放大效應高於預期；而西寶國小卻無明顯放大效應，可能原因在於西寶國小具震央較遠，地震反應到達西寶國小已經減弱。

### 崩塌地數化及初步分析

地震後林業保育署所屬之遙測及航測分署立即規劃並執行航拍任務，惟礙於雲覆因素未能於第一時間取得最佳影像，農村發展及水土保持署則以光學衛星影像進行數化。本文中之崩塌地數化結果建立流程如下：

1. 使用農村發展及水土保持署數化成果為底圖。
2. 使用國家災害防救科技中心航照判釋結果修訂。
3. 使用王國隆等人<sup>[6]</sup>開發之 NDSI 法改良模式增補雲覆下之崩塌地。

4. 將完成之崩塌地範圍繪製如圖 13 所示，初步完成之崩塌地為 1773 處，主要集中於花蓮市西北，以台 8 線南北兩側較為集中。將崩塌區內平均坡度及坡向繪製如圖 14 及圖 15 所示，崩塌區平均坡度 48.1 度，其標準差為 7.9 度，較 921 坡度為高。在坡向方面，以南向為主要崩塌方向，分佈則主要為東向至西向。將崩塌區坡度與坡向之關係繪製如圖 16 所示，主要崩塌集中於坡度 50 度及坡向 150 度。

另，如前所述，地震時崩塌受力分析可分為最大地表加速度與能量，能量需考慮受震時間，本文暫且以最大地表加速度為因子進行探討，地震發布速報時在台 8 線出現太魯閣南北向加速度超越 1g 情形，經國家災害防救科技中心獲得該站加速度歷時，檢視後應為可

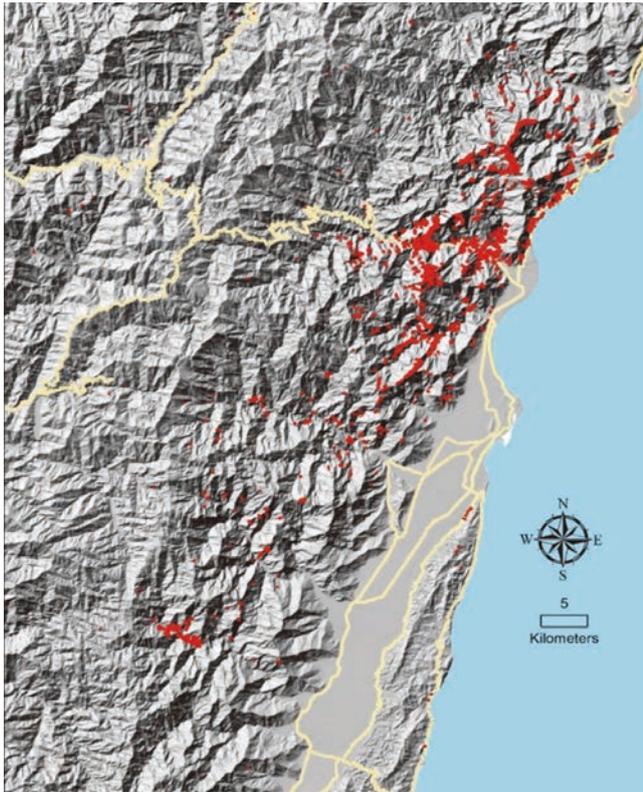


圖 13 初步完成之崩塌地數化

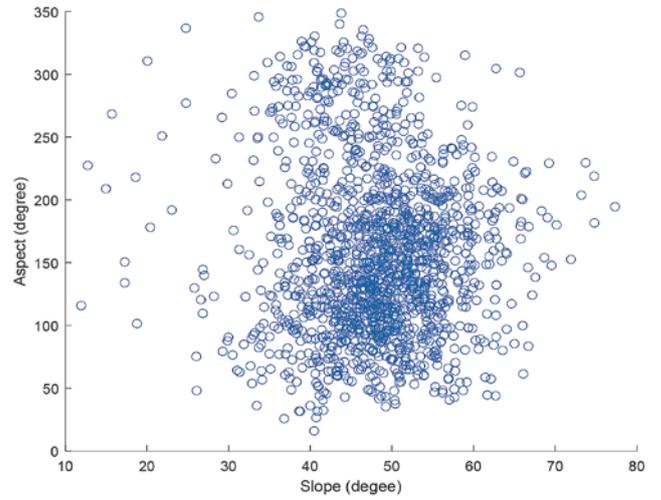


圖 16 坡度與坡向之關係

使用資料，故以氣象署發布之最大地表加速度重新繪製地表最大加速度如圖 17 至圖 19 所示，重新取樣方式以 Kriging 法進行，所得之結果則供崩塌區最大地表加速度分析使用。

將崩塌區之地表最大加速度與震央距離繪製如圖 20 所示，在距離 55 公里後之崩塌地出現加速度衰減，與常見衰減符合，然 42 公里左右水平最大加速度出現放大現象至 55 公里才衰減，需進一步探究可能原因。

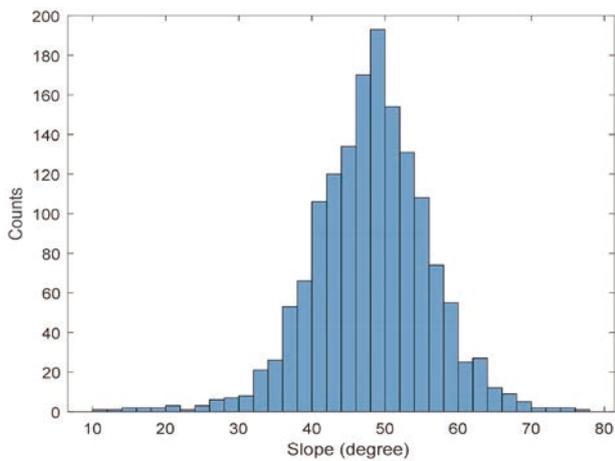


圖 14 崩塌地坡度分佈

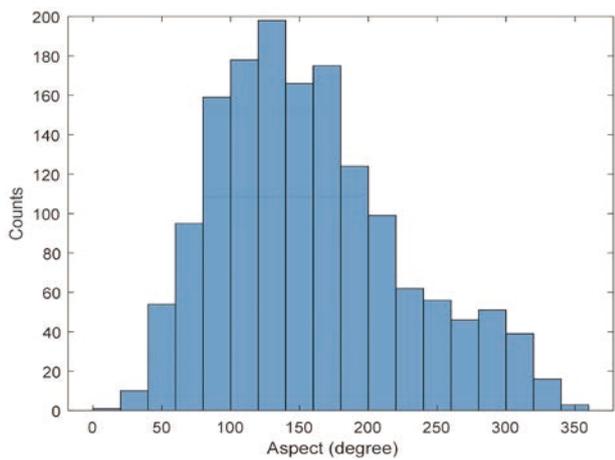


圖 15 崩塌地坡向分佈

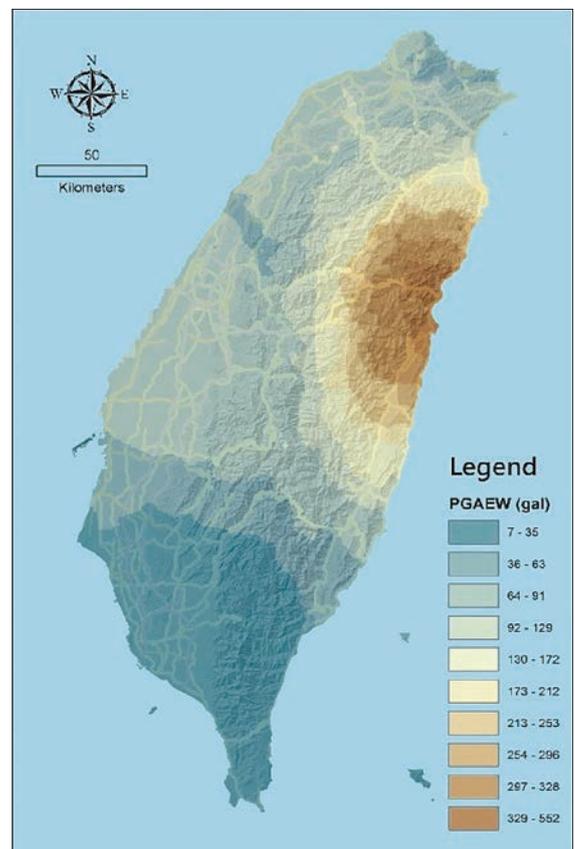


圖 17 東西向 PGA 分佈

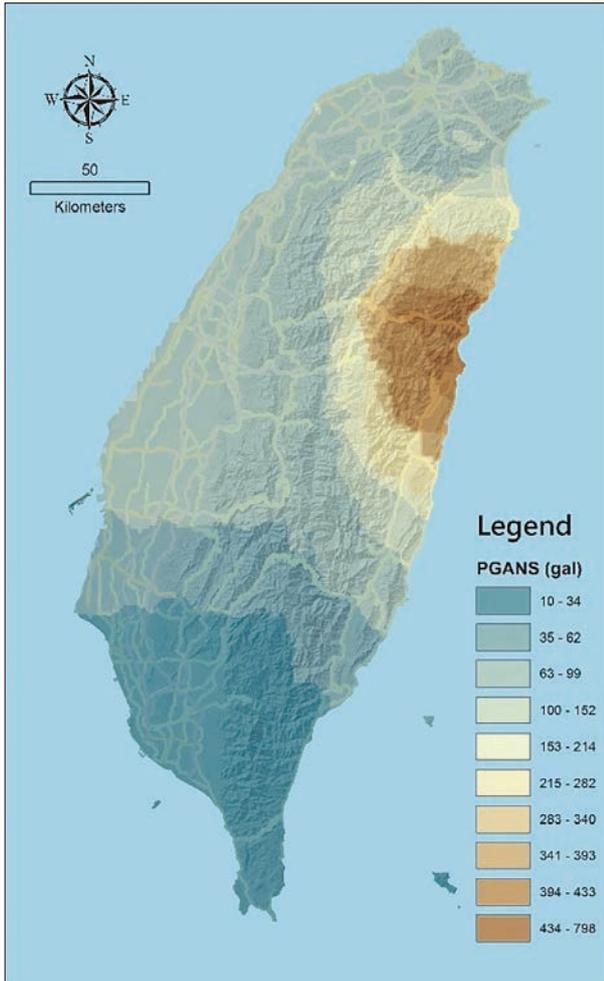


圖 18 北南向 PGA 分佈

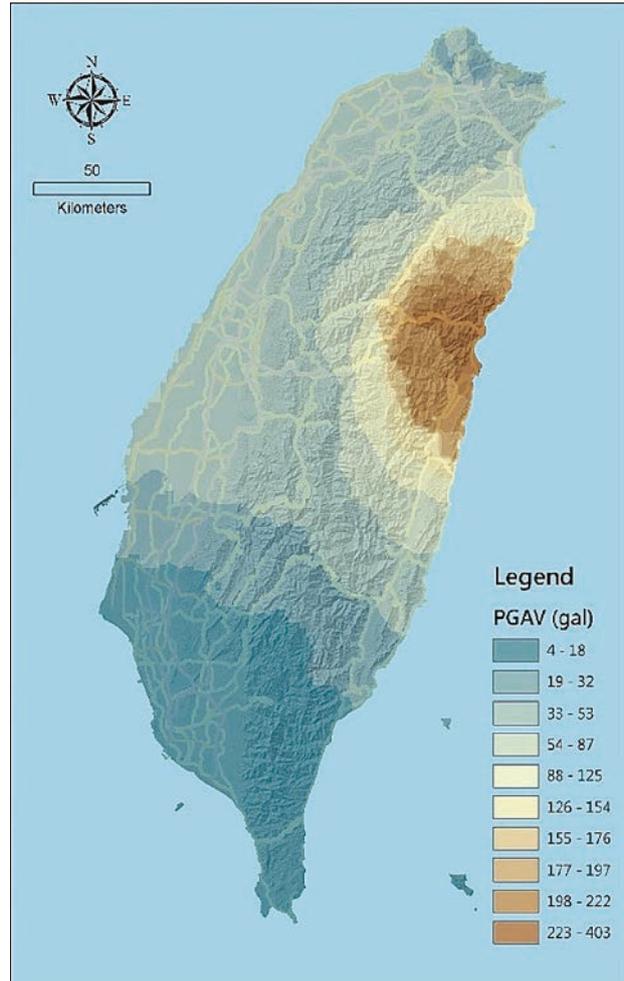


圖 19 垂直向 PGA 分佈

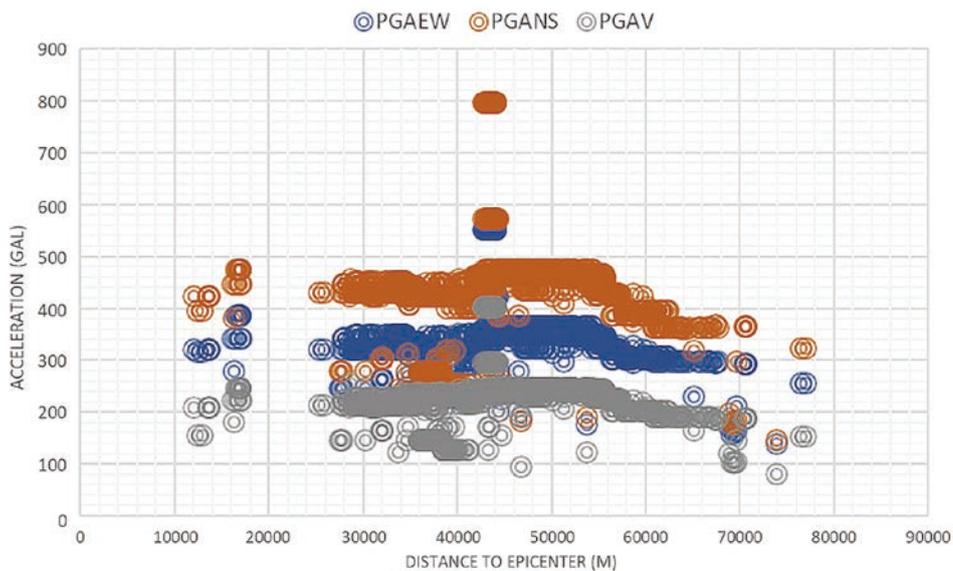


圖 20 崩塌地距震央距離與 PGA 之關係

在崩塌地坡度與最大地表加速度方面，將觸發之崩塌地坡度與最大地表加速度繪製如圖 21 所示，從圖中

可知，觸發崩塌之最大水平加速度下限約為 220 gal、垂直向約為 100 gal，均較 921 地震時高<sup>[7]</sup>。

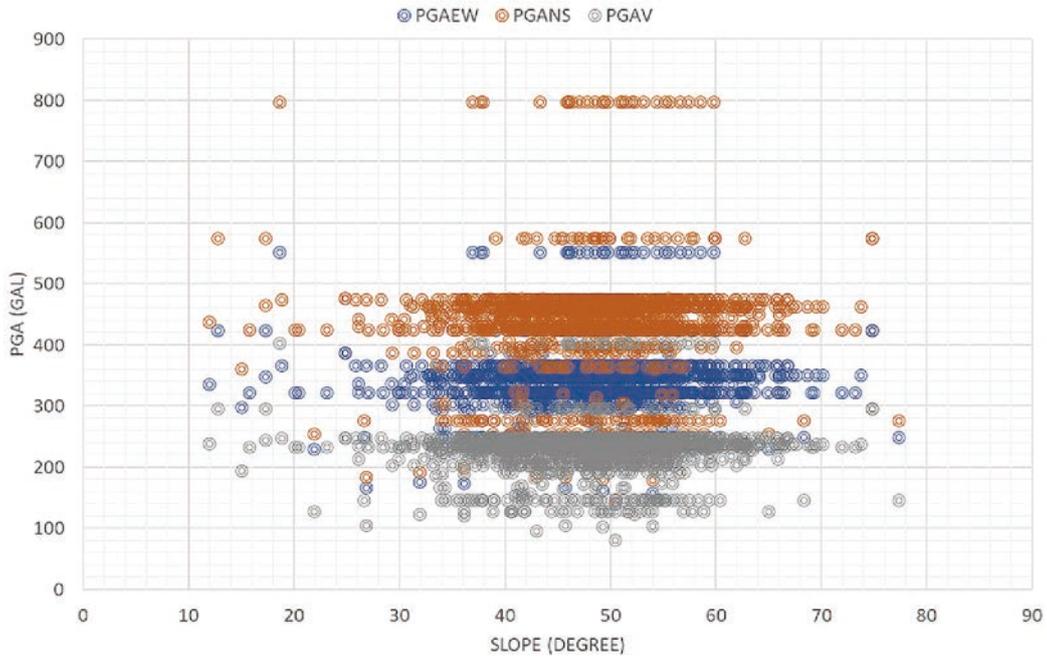


圖 21 崩塌地坡度與 PGA 關係

## 結論與建議

本文由於時間緊迫，所得結果僅為初步成果，提供以下幾點結論與建議參考。

1. 日本 JAXA 雷達衛星最早至臺灣上空取像，其長波長（23.6 公分）有助於地表植生及尋找較大變形區間，然其取像間隔時間較長，對於判斷短時間事件不利。
2. 歐洲 ESA 之 Sentinel-1A 取像間隔時間為 12 天，可獲得針對事件之較為細節之變形，如上升軌 4 月 8 日與下降軌 4 月 10 日通過分析所得之米崙斷層東側干涉條紋，顯示持續之餘震對該處有一定程度之影響。
3. 利用不同方向之多像對分析結果，拆解出垂直向與東西向地表變形，取得之垂直向變形臨海處最高抬升約 49 公分，往內陸遞減；而東西向變形則多數朝東向移動，在花蓮市及吉安鄉東北－西南，出現往西位移情形。
4. 崩塌地數化目前主要倚靠光學影像進行，輔以可穿透雲層雷達影像之振幅訊號，然本次之太魯閣國家公園地形過於陡峭，對於斜向取像之雷達衛星訊號不利，如不考慮 DInSAR 分析，可考慮取像角度較為彈性之雷達衛星，如 Umbra。
5. 初步分析結果觸發崩塌地最低水平加速度約為 220 gal，較 921 地震為高，可能與震央位於外海有關。

然本文崩塌地為快速數化完成，後續如能取得較佳影像，應重新確認並分析。

## 參考文獻

1. 謝嘉聲、史天元 (1999)，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：中華民國地圖學會會刊，(10)，69-82。  
<https://doi.org/10.30006/JC.199912.0007>
2. Fialko Y., and Simons M. (2001). "The complete (3-D) surface displacement in the epicentral area of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine earthquake, California, from space geodetic observations," *Geophysical Research Letters*, **28**(16), 3063-3066.
3. Ng, A.H.M., Ge, L., Zhang, K., Chang, H.C., Li, X., Rizos, C., and Omura, M. (2011). "Deformation mapping in three dimensions for underground mining using InSAR—Southern highland coalfield in New South Wales, Australia," *International Journal of Remote Sensing*, **32**(22), 7227-7256.
4. Lin, Meei-Ling and Wang, Kuo-Lung (2006, Aug). Seismic Slope Behavior In Large-Scale Shaking Table Model Test. *Engineering Geology*.
5. Wang, Kuo-Lung and Lin, Meei-Ling (2011, Sep). Initiation And Displacement of Landslide Induced By Earthquake – A Study of Shaking Table Model Slope Test. *Engineering Geology*, **122**(1-2), 106-114.
6. 王國隆、林俊廷、張竣璋、林妍琇、洪志祥、洪政義、邱啟芳、傅桂霖 (2019 年 12 月)，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)。
7. Lin, M.-L., Wang, K.-L., Kao, C.-C., and Huang, J.-J. (2009). "Ground Motions and Landslide Displacements Caused by the Chi-Chi Earthquake," *International Conference in Commemoration of the 10th Anniversary of the 1999 Chi-Chi Earthquake*. 