計畫編號：**SWCB-110-028**

應用彈性錯位理論預測深層山崩破壞面之評估

Assessments of predicted failure surfaces of deep-seated landslides using elastic dislocation models

(成果報告書)

執行團隊：中 央 研 究 院

執行期間：110 年 1 月 27 日至 110 年 12 月 31 日

計畫主持人：郭 志 禹 研 究 員

計畫協同主持人：陳 柔 妃 助 理 教 授

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）

應用彈性錯位理論預測深層山崩破壞面之評估

摘　要

本計畫研究旨在評估彈性錯位理論預測深層山崩破壞面的可用性，在該模型中，我們假設由自由坡面與山崩破壞面包圍的山崩塊體是遵循彈性變形，而將破壞面上的錯位滑移，反應至表面位移。而在現今，表面位移可以藉由合成孔徑干涉雷達 (InSAR) 相關的遙測技術監測計算而得，因此推測該地表位移數據可利用前述彈性錯位模型來反演破壞面。然而，此反演推測在數學上是一類反算問題，地表位移數據條件和反演優化計算策略對結果可能具有相當高的影響。因此，在本計畫中，我們將由簡單彈性錯位理論開始，以 D066 和 D077 兩潛勢深層山崩區為例，探討 InSAR 地表位移觀測資料處理與其統計檢驗，並將其反演之破壞面與現有資料比對。最後則是提出一初步的廣義 3D 彈性錯位模式。

關鍵字：潛勢深層山崩，彈性錯位理論，破壞面反演，InSAR，地表位移

Assessments of predicted failure surfaces of deep-seated landslides using elastic dislocation models

Abstract

This project is aimed to assess the applicabilities of failure surface predictions of deep-seated landslides using elastic dislocation models. In the model, the landslide mass enclosed by the failure and free surfaces is assumed to deform elastically and incur the surface displacement in respond to the slip dislocation on the failure surface. In modern days, the surface displacements can be monitored by using InSAR-related techniques and it is thus expected that the displacement data can be used to calculate the failure surface through the elastic model. However, in principle, the proposition is a class of mathematical inverse problems, in which data conditions and optimization strategies are important for the results. Therefore in the project, we start with the simple elastic dislocation model, the processing and statistical examinations of its associated input InSAR displacement data. The D066 and D077 deep-seated landslide sites are selected as the benchmark casese and the inversed positions of the failure surfaces are compared with field surveys. Finally, a preliminary generalized 3D elastic dislocation model is proposed and illustrated.

keywords: potential deep-seated landslide, elastic dislocation model, failure surface inversion, InSAR, surface displacement

目　　錄

摘 要 I

Abstract II

圖次 VI

第一章　緒論 1

第一節　計畫緣起 1

第二節　計畫目標 3

第三節　應用情境及假設 4

第四節　D066 南投縣-仁愛鄉大規模崩塌潛勢區簡介 7

第一小節　研究區域位置及地質概況 7

第二小節　TCPInSAR 崩塌潛勢區地表變形量分析 9

第三小節　滑動面分析 12

第四小節　現 地 調 查 結 果 13

第五節　D077 新竹縣-尖石鄉大規模崩塌潛勢區簡介 30

第一小節　研究區域位置及地質概況 30

第二小節　TCPInSAR 崩塌潛勢區地表變形量分析 32

第三小節　滑動面分析 35
第四小節　現地調查結果 35
第二章　彈性錯位模式正向計算 46
第一節　幾何設定及參數 46
第二節　單位錯位之基本解 48
第一小節　單位走向錯位基本解 (unit elementary strike-slip solution) 48
第二小節　單位傾移錯位基本解 (unit elementary dip-slip solution) 49
第三小節　基本解輔助函數定義 50
第三節　單位錯位之完整解 51
第四節　已知破壞面之正算結果及討論 52
第五節　參數相依性分析 56
第三章　InSAR 地表坡面變形 59
第一節　InSAR 地表位移坡面轉換 59
第二節　多時序雷達衛星影像地表變形量分析 62
第三節　分區分塊多時序變形特性分析評估 64
第四節　地表位移統計叢集分析 64
第五節　D066 TCP-InSAR 坡面位移轉換及資料分群分析 67
第六節　D077 TCP-InSAR 坡面位移轉換及資料分群分析 72

第四章　深層山崩破壞面簡易彈性錯位模式反演 78

第一節　簡易彈性錯位模式 78

第二節　D066 崩塌潛勢區滑動面反演 81

第三節　D077 崩塌潛勢區滑動面反演 84

第五章　廣義彈性錯位模式 88

第一節　最小平滑曲面破壞面推估法 88

第二節　廣義彈性錯位模式 91

第六章　結論與未來展望 99

第一節　計畫結論 99

第二節　未來展望 101

參考文獻 105

附錄一：期初審查會議記錄暨回覆辦理情形 106

附錄二：期中審查意見回覆辦理情形 111

圖　　次

圖 1.1　計畫架構..... 5

圖 1.2　應用簡易彈性錯位反演破壞面模式概念圖，取自 Aryal 等 2015。 6

圖 1.3　D066 南投縣廬山精英聚落坡面潛在大規模崩塌位置圖，修改自經濟部中央地質調查所 2011 8

圖 1.4　D066 南投縣廬山精英聚落坡面鄰近地區災害分布圖 9

圖 1.5　南投縣廬山精英聚落崩塌地形特徵判釋成果圖 10

圖 1.6　南投縣-仁愛鄉-D066 崩塌地表地形資訊及活動性分布圖..... 11

圖 1.7　南投縣-仁愛鄉-D066(圖 1.3) 邊坡破壞面及 AA´ 地質剖面 (經濟部中央地質調查所 2011)..... 13

圖 1.8　調查點 1：富貴路上房屋損毀，土石崩落。 14

圖 1.9　調查點 2：茶園：地板多處裂縫 14

圖 1.10　調查點 3：廬山部落頂部，擋土牆傾斜且損裂 15

圖 1.11　調查點 4：廬山國小 (a) 樓梯斷裂 (b) 排水溝遭擠壓 (c) 操場地板多處裂縫 15

圖 1.12　南投縣-仁愛鄉-D066，廬山部落平面圖 17

圖 1.13　南投縣-仁愛鄉-D066，全景左半部 20
圖 1.14　南投縣-仁愛鄉-D066，全景右半部 20
圖 1.15　角反射器 CR-01 之照片 21
圖 1.16　GPS-3 照 片 21
圖 1.17　調查點 b 處，路旁牆面開裂 22
圖 1.18　調查點 c 處照片，路旁電線桿呈現傾斜 22
圖 1.19　角反射器 CR-03 之照片 23
圖 1.20　廬山國小校門口樓梯破裂 23
圖 1.21　GPS-01 之照片 24
圖 1.22　雨量計 R-01 之照片 24
圖 1.23　角反射器 CR-05 之照片 25
圖 1.24　高壓電塔旁之電線桿，明顯傾斜 25
圖 1.25　2016/6/27 拍攝廬山部落潛勢崩塌區塊冠部之擋土牆 26
圖 1.26　2021/10/20 拍攝廬山部落潛勢崩塌區塊冠部之擋土牆 27
圖 1.27　2021/10/20 拍攝廬山部落潛勢崩塌區塊冠部之擋土牆 27
圖 1.28　廬山部落頂部由上往下拍攝廬山國小之照片 28
圖 1.29　板岩地層 28
圖 1.30　調查點 2-茶園：地板多處裂縫 29
圖 1.31　調查點 2-茶園：路旁的電線桿呈現傾斜 29

圖 1.32　D077 新竹縣-尖石鄉-潛在大規模崩塌位置圖 (資料來源：水土保持局台北分局).....30

圖 1.33　新竹縣-尖石鄉-D077 潛在災害相關位置圖..... 31

圖 1.34　新竹縣-尖石鄉-D077 潛在大規模崩塌地區崩塌地形特徵..... 31

圖 1.35　新竹縣-尖石鄉-D077 崩塌地表地形資訊及活動性分布圖..... 33

圖 1.36　新竹縣-尖石鄉-D077 坡面潛在大規模崩塌 ALOS InSAR 成果圖　34

圖 1.37　新竹縣-尖石鄉-D077 監測儀器配置圖，修改自行政院農業委員會水土保持局臺北分局 2019.....34

圖 1.38　新竹縣-尖石鄉-D077 邊坡 BB´ 破壞面及地質剖面 (行政院農業委員會水土保持局臺北分局 2019) 35

圖 1.39　新竹縣-尖石鄉-D077 崩塌邊界之野外現調照片 (2016/08/17).....36

圖 1.40　新竹縣-尖石鄉-D077 崩塌頂部之野外現調照片 (2016/08/17).....37

圖 1.41　新竹縣-尖石鄉-D077 泰崗部落平面圖..... 38

圖 1.42　新竹縣-尖石鄉-D077，現勘照片-角反射器 CR01 40

圖 1.43　新竹縣-尖石鄉-D077，現勘照片-GPS 編號 JS077-G6.....40

圖 1.44　新竹縣-尖石鄉-D077，現勘照片-角反射器 CR02 41

圖 1.45　新竹縣-尖石鄉-D077，現勘照片-GPS 編號 JS077-G4.....41

圖 1.46　新竹縣-尖石鄉-D077，現勘照片-調查點 1.....42

圖 1.47　新竹縣-尖石鄉-D077，現勘照片-角反射器 CR05 42

圖 1.48　新竹縣-尖石鄉-D077，現勘照片-角反射器 CR04 43

圖 1.49　新竹縣-尖石鄉-D077，現勘照片-角反射器 CR03 43

圖 1.50　新竹縣-尖石鄉-D077，現勘照片-道路裂縫，為調查點 2 所拍攝到沿著泰崗道路的裂縫及損壞狀況。 44

圖 1.51　新竹縣-尖石鄉-D077，現勘照片-道路裂縫及損壞，為調查點 2 所拍攝到沿著泰崗道路的裂縫及損壞狀況。..... 45

圖 2.1　半無限域彈性錯位理論示意圖，破壞錯位面為水藍色矩形平面，而在斷層面上有均勻錯位位移量 $\mathbf{s} = (s_s, s_d, s_n)$。其中 (a) 以平面參考座標 (x, y, z) 表示之錯位面，而錯位面位態參數包含長 (W)、寬度 (W) 度，破壞面上緣深度 D，走向角 θ，傾角 δ 位態，以及位置 (x_m, y_m)（或 $\mathbf{x}_i$ 、$\mathbf{x}_f$），及錯位所引致之地表平面彈性變形 $\mathbf{d} = (d_x, d_y, d_z)$，(b) 以主參考座標 (x_p, y_p, z_p) 所表示之斷層錯位面及其引致之地表平面彈性變形 $\mathbf{d} = (d_{x_p}, d_{y_p}, d_{z_p})$，在主座標系統中，$y_p$ 軸平行於破壞面走向 48

圖 2.2 (a) 主座標系統中破壞面單位走向錯位（$s_s = 1$）引致之表面位移，主圖中箭頭代表 xy 平面位移，底圖色階代表位移大小以及右上嵌圖代表 z 方向位移分量，(b) 破壞面單位傾移錯位（$s_d = 1$）引致之表面位移。圖中長方形代表破壞面於 xy 平面的投影位置，左側為破壞面靠地表處之上緣，本例中破壞面位態參數為 $L = 100$ m，$W = 200$ m，$D = 40$ m，$\delta = 20^\circ$ 53

圖 2.3 (a) 主座標系統中破壞面單位走向錯位（$s_s = 1$）引致之表面位移，主圖中箭頭代表 xy 平面位移，底圖色階代表位移大小以及右上嵌圖代表 z 方向位移分量，(b) 破壞面單位傾移錯位（$s_d = 1$）引致之表面位移。圖中長方形代表破壞面於 xy 平面的投影位置，左側為破壞面靠地表處之上緣，本例中破壞面位態參數為 $L = 200$ m，$W = 100$ m，$D = 40$ m，$\delta = 20^\circ$ 54

圖 2.4 (a) 主座標系統中破壞面單位走向錯位（$s_s = 1$）引致之表面位移，主圖中箭頭代表 xy 平面位移，底圖色階代表位移大小以及右上嵌圖代表 z 方向位移分量，(b) 破壞面單位傾移錯位（$s_d = 1$）引致之表面位移。圖中長方形代表破壞面於 xy 平面的投影位置，左側為破壞面靠地表處之上緣，本例中破壞面位態參數為 $L = 100$ m，$W = 200$ m，$D = 40$ m，$\delta = 60^\circ$ 55

圖 2.5 無因次化破壞面位態參數影響，圖中位移為 x_p 軸上之 d_{x_p} 分量，由無因次單位位移錯位 ($s_d/D = 1$) 所引致，(a) 破壞面走向長度（L/D）影響，本例中固定 $W/D = 5$，$\delta = 10^\circ$，(b) 破壞面傾移長度（W/D）影響，本例中固定 $L/D = 2.5$，$\delta = 10^\circ$，(c)破壞面傾角（δ）影響，圖中黑虛線代表 $d_{x_p}/(W\cos\delta) = 0$ 之位置，本例中固定 $L/D = 2.5$，$W/D = 5$。破壞面無因次化後之 x_p 座標位於 $[0, 1]$ 之間 57

圖 3.1 雷達衛星升、降軌飛行姿態三維空間關係圖 (a) 為衛星入射角方向；(b) 衛星飛行方向 (Hu 等 2012) 60

圖 3.2 分區分塊時序變形特性分析 62

圖 3.3 花蓮縣-豐濱鄉-D001 地表變形及剖面成果..... 63

圖 3.4 南投縣-仁愛鄉-D066 地區地形圖及 TCP-InSAR 點位 66

圖 3.5 南投縣仁愛鄉 D066 地區 (a) 未空間濾波之地形圖及坡向，(b) 空間濾波後之地形圖及坡向，(c) 未空間濾波之地形平均曲率直方圖，(d) 空間濾波後之地形平均曲率直方圖 67

圖 3.6 南投縣仁愛鄉 D066 地區 LOS-坡面位移轉換因子 $-(\mathbf{e}_{SL} \cdot \mathbf{e}_{LOS})$ 分佈，見 (3.2) 及轉換奇異區（$|\mathbf{e}_{SL} \cdot \mathbf{e}_{LOS}| \leq 0.2$，黑色區域位置），紅實點代表位於轉換奇異區中被排除之 TCP-InSAR 資料點，綠色實線為 D066 崩塌區..... 68

圖 3.7　南投縣-仁愛鄉-D066 LOS (R^{A}_{LOS}) 及坡面轉換後之地表變形 (r)，(a) LOS 位移，(b) 坡面位移 68

圖 3.8　南投縣仁愛鄉 D066 潛勢崩塌區中 TCP-InSAR 資料分群數與貝氏信息量準則 70

圖 3.9　南投縣仁愛鄉 D066 潛勢崩塌區中TCP-InSAR 資料分群，紅實線代表崩塌區中顯著地表裂隙，黑橢圓虛線代表分群資料之特徵空間分佈 70

圖 3.10　南投縣仁愛鄉 D066 潛勢崩塌區中 TCP-InSAR 資料分群中各群之正規化位移分佈直方圖及函數，(a)~(g) 分別代表第一群 C_1 至第七群 C_7 之結果 71

圖 3.11　南投縣仁愛鄉 D066 潛勢崩塌區外部兩公里範圍之正規化位移分佈直方圖及函數 72

圖 3.12　新竹縣尖石鄉-D077 地區地形圖及 TCP-InSAR 點位 73

圖 3.13 新竹縣尖石鄉 D077 地區 (a) 未空間濾波之地形圖及坡向，(b) 空間濾波後之地形圖及坡向，(c) 未空間濾波之地形平均曲率直方圖，(d) 空間濾波後之地形平均曲率直方圖..... 74

圖 3.14 新竹縣尖石鄉 D077 地區LOS-坡面位移轉換因子 $-(\mathbf{e}_{SL} \cdot \mathbf{e}_{LOS})$ 分佈，見 (3.2) 及轉換奇異區（$|\mathbf{e}_{SL} \cdot \mathbf{e}_{LOS}| \le 0.2$，黑色區域位置），紅實點代表位於轉換奇異區中被排除之 TCP-InSAR 資料點，綠色實線為 D077 崩塌區..... 75

圖 3.15　新竹縣尖石鄉-D077 LOS (R^{A}_{LOS}) 及坡面轉換後之地表變形 (r)，(a) LOS 位移，(b) 坡面位移..... 75

圖 3.16　新竹縣尖石鄉 D077 潛勢崩塌區中 TCP-InSAR 資料分群數與貝氏信息量準則 76

圖 3.17 新竹縣尖石鄉 D077 潛勢崩塌區中 TCP-InSAR 資料分群，紅實線代表崩塌區中顯著地表裂隙，黑橢圓虛線代表分群資料之特徵空間分佈 76

圖 3.18 新竹縣尖石鄉 D077 潛勢崩塌區中 TCP-InSAR 資料分群中各群之正規化位移分佈直方圖及函數，(a)~(c) 分別代表第一群 C_1 至第三群 C_3 之結果 77

圖 3.19 新竹縣尖石鄉 D077 潛勢崩塌區外部兩公里範圍之正規化位移分佈直方圖及函數 77

圖 4.1 彈性錯位理論示意圖，其中固定地理參考座標為(X, Y, Z)，坡面座標系統 (x, y, z) 及斷層錯位面。其中地理參考座標軸 X 朝向東方、Y 朝向北方，坡面座標軸 x 朝向坡降方向、y 為坡面走向，斷層面於坡面座標系統中之七個幾何位置參數：$\theta, \delta, L, W, D, x_e, y_e$，斷層面錯位移量 $\mathbf{s} = (s_s, s_d, s_n)$ 及其引致的坡面彈性變形 $\mathbf{d} = (d_x, d_y, d_z)$..... 79

圖 4.2 (a) 水平面投影之位移向量位移, (b) 地表破面向位移分佈，(c) 地表位移權重分佈 82

圖 4.3 地表位移及彈性錯位模型反算位移比較，圖中黑點代表 InSAR 資料點位，黑色箭頭代表 InSAR 量測之坡面位移（轉換後），藍色箭頭代表彈性錯位模式反演之地表變形，圖面左緣中上處粗紅框圓虛點代表破壞面之代表位置，紅方向箭頭代表破壞面之傾向 .83

圖 4.4 (a) 水平面投影之位移向量位移, (b) 地表破面向位移分佈，(c) 地表位移權重分佈 86

圖 4.5 地表位移及彈性錯位模型反算位移比較，圖中黑點代表 InSAR 資料點位，黑色箭頭代表 InSAR 量測之坡面位移（轉換後），藍色箭頭代表彈性錯位模式反演之地表變形，圖面下緣中處粗紅框圓虛點代表破壞面之代表位置，紅方向箭頭代表破壞面之傾向 87

圖 5.1　破壞面示意圖及座標系統，地表及滑移破壞面分別以 $z_0 \equiv z_0(x,y)$ 及 $z_b \equiv z_b(x,y)$ 表示，Ω_p 及 Γ 分別為三維崩塌邊界及其於 xy 平面上的投影，摘自 郭志禹 等 (2019).....88

圖 5.2　最小平滑曲面破壞面推估法預測之 (a) D066, (b) D077 山崩深度分佈，紅實線標註崩塌區邊界，中心紅實圓點標示崩塌區重心位置，紅實點三角形點標示預測最大崩塌深度位置..... 90

圖 5.3　廣義彈性錯位模式範例案例 (a) 階梯型崩塌地及預設破壞面，(b) 以最小平滑曲面法計算之崩塌區深度分佈。..... 91

圖 5.4　廣義彈性錯位模式範例案例 (a) 三維崩塌體及其計算網格，(b) 計算網格上視圖。 93

圖 5.5　廣義彈性錯位模式範例案例 (a) 破壞面上給定位移之水平投影場，(b) 崩塌表面隨機採樣之位移，在此為圖面清晰，(a) 中僅為五分之一之資料點，兩圖中向量參考長度不等。..... 94

圖 5.6　廣義彈性錯位模式範例案例彈性解 (a) 三維位移量分佈，(b) 應變量級分佈。 94

圖 5.7　IpOPT 最佳化執行疊代報表 95

圖 5.8　正向計算之地表採樣點位移量分佈（共 99 點） 96

圖 5.9　地表位移測量誤差量級與反演準確度相依性，地表採樣點共 99 點，綠色回歸曲線為 95% 信心區間 97

第一章　緒論

第一節 計畫緣起

深層山崩已由水土保持局（水保局）定義為一新型態地質災害，此類災害特徵是破壞面深而有大規模的崩塌量體，產生之災害面積大，在其影響範圍則往往具有保全對象，諸如聚落與財產等，故完善其相關防災措施是政府相關單位責無旁貸的。水保局基於近年來對大規模崩塌潛勢區地表變形相關委辦計畫之執行，目前針對全台定義出近 200 處保全對象潛勢崩塌區以及 34 處優先整治目標崩塌區，接著在規劃這些潛勢崩塌區的防災作業中，除了對各區域的地質性質調查外，首重崩塌區面積、深度及體積的估計，因這些崩塌區幾何參數對規劃區域監測、災害影響範圍及防災計畫訂定是極其相關的。

隨著遙測技術的發展，近年來我們已可利用多期合成干涉孔徑雷達技術 (Multi-Temporal Interferometric Synthetic Radar, mtInSAR) 對深層山崩潛勢區域進行多期地表位移變形監測，此一監測技術可產生高密度的位移點位 (> 200 pts/ km^2)，在許多監測的潛勢崩塌區中，這些位移分佈型態與崩塌區地表裂隙分佈呈現高度相關，基於此一觀察歸納結果，我們產生本計畫之主要研究議題：是否得以利用 MT InSAR 位移點雲資料來推估深層山崩之破壞面深度？以及在關聯這些地表位移資料與破壞面深度作業中所必須的條件與程序。

在地震學中，彈性錯位模式 (Elastic Dislocation Model, Okada 1985, 1992) 經常結合地表同震位移來推估地下斷層位態、大小與錯位位移量，是一得以聯繫地表形變與地下剪切錯動的簡易模型，建構於經大幅簡化的半無限域平面彈性解析解之上。該模型首先由 Aryal 等 (2015) 應用該理論於利用 InSAR 位移資料

推估 Cleveland Corral Landslide 山崩深度，受該研究之啟發，此類彈性錯位模式或可成為關聯地表位移與破壞面深度之模型。

本計畫將著重在更系統性地延伸及擴充水保局計畫“廣域大規模崩塌潛勢區時序地表變形及活動性評估”(行政院農業委員會水土保持局 2020a)，及“蘭台大規模崩塌潛勢示範區觀測科技整合研究”(行政院農業委員會水土保持局2020b)兩計畫中所進行的彈性錯位模式初步應用，這是因為在這些初步嘗試中，我們發現此一簡易的彈性錯位理論是一組高維度的最佳化反算問題，且參數（破壞面深度、位態、大小等）間具有代償性，導致最佳化收斂不易，或呈現與初始猜測參數集高度敏感的現象，這意味著我們需對彈性錯位模型進行更深入的了解，其次是我們必需針對每一崩塌潛勢區域進行最佳化策略設計，而這策略必須與區域現場監測資料整合，這整合程序應該考量哪些因子，該如何設計，則是本計畫重要的擬待解決的問題。

除以上以簡易彈性錯位理論的反演計算策略探討之外，我們亦試圖將彈性錯位的概念，擴展為廣義三維模式，在目前的規劃中，我們不擬採用複雜的彈塑性理論，因這類計算的前置作業複雜，需要牽涉複雜的材料參數設定與檢核，以及數值計算的細膩調整等作業，而這些工作必需以個別的研究案來進行。相對地，本計畫將延續郭志禹 等 (2019) 以及 Kuo 等 (2020) 所提的最小平滑曲面法來建構廣義彈性錯位模型潛勢滑動塊體，繼之引入彈性錯位概念以及錯位束制條件來說明此法。

該方法首先是透過廣泛的實際深層山崩案例統計，以崩塌體積與面積間的半經驗對數關係 (Klar 等 2011)，利用潛勢崩塌區面積推估崩塌體積，而後求取視為破壞面的最小平滑曲面，求得實務可接受的預估破壞面深度分佈，隨之即可建立三維破壞體之計算網格。透過此網格，理論上加上適切的邊界條件，我們即可進行彈性體計算而求得崩塌體各處之位移及應力狀態，接下來，我們可以類比於彈性錯位模式的概念，利用最佳化技術來求得最適切位於破壞面上的位移量，使該位移量可產生最接近於崩塌表面的監測位移。我們將稱此一新方法為廣義三維彈性錯位模式，期可更近似於實際崩塌，衍生之物理量預期可包含評估邊坡穩定性的安全係數。

第二節 計畫目標

本計畫主要目標在探討彈性錯位模式及其應用於深層崩塌潛勢區域中，如何與區域現場監測資料整合，需考量哪些因子，及如何進行最佳化策略設計等。為達到以上目標，我們在本提案中完成以下目標：

(1) 系統性探討與展示彈性錯位理論斷層錯動與地表位移之關係，此項目為正向 (forward) 計算，著重在建構地下斷層位態與地表位移模式的關聯，在簡化的彈性錯位理論中，破壞面假設為一簡單矩形，共有七個幾何參數來描述其位態，分別為位置 (x_e, y_n)，深度 $-D$ ，傾斜角 δ，走向角 θ，及破壞面之長 L 與寬 W ，在進行這項目探討時，因可透過簡單座標旋轉與平移簡併，我們可將位置與走向角忽略，且此系統為彈性線性系統，例如我們可將深度 D 作為長度無因次化綱量，使成為一組三參數的系統，最後藉由分別給定破壞面上錯動位移的兩單位分量 (s_s, s_d)，來探討該錯動及幾何參數造成的地表錯動型態，這些訊息將為實際應用中，設計最佳化策略與束制條件的重要依據。

(2) 在與實際案例比較時，我們擬沿用 D066 南投縣-仁愛鄉與 D077 新竹縣-尖石鄉兩大規模崩塌潛勢區為探討對象，前期計畫 行政院農業委員會水土保持局 (2020a,b) 中我們展示了技術可行性，然並未對 InSAR 監測所得之位移點資料就彈性錯位模式適用性進行檢核，這向檢核工作預期包含 1. 離群值排除，2. 潛勢崩塌區內、外位移量統計比較等相關探討等，其中尤其是本彈性錯位理論非常依靠大範圍的表面位移型態模式，對比前期僅應用了崩塌區內之位移資料，其影響差異是必需加以探討的，本目標項目將產生一項統計檢核位移資料點之計算工具，以及針對兩研究區域應用不同位移點位集合所產生的破壞面位態之比較。

(3) 由於 D066 及 D077 兩區域已為重點潛勢山崩區域，本計畫中將再行檢視既有之區域地質研究 (科技部永續會計畫 2018；行政院農業委員會水土保持局臺北分局 2019)，目標在界定崩塌區細部分區結構，特別是常見於大型崩塌

區的多重裂隙結構以及已知破壞面位置分佈，這些資料將有助於在破壞面推估中束制條件的訂定。

(4) 利用於目標 (2) 與 (3) 所得之 InSAR 位移點位性質及現場監測紀錄，設計最佳化策略，檢視推估之破壞面，並檢視該破壞面位態與最佳化策略之敏感性。所謂最佳化策略在此主要包含破壞面參數搜尋範圍之束制條件設定，InSAR 位移點位權重設計。

(5) 建立廣義彈性錯位模式範例案例：本案例將為一簡單階梯型對稱崩塌，透過給定之破壞面位移，進行正向錯位計算，並以該計算結果，挑選崩塌塊體表面之數點位移當成觀察點，從而以其為反向錯位最佳化計算之依據，來檢核此法之可行性，若可行則以此案例為說明此法之原理依據。

基於以上目標，本計畫之整體架構可以圖1.1 表示，於該結構圖中，未著底色之項目行政院農業委員會水土保持局 2020a所部份完成的理論模式或第三方之資料來源，淺藍色部份為重要相關議題但不在本計畫探討範疇之中。而其中黃色底色項目，則是本計畫所發展之項目。

第三節　應用情境及假設

應用彈性錯位模式於山崩破壞面位置反演的概念如圖1.2所示，Aryal 等2015，由於一般山崩崩塌體呈現扁而薄的形狀，即深度通常遠小於其常與寬，破壞面通常呈現大致與地表平行的扁弧形（圖中之破壞面深度有些許誇示），假設崩塌體受觸發而產生一小錯動，但該錯動並未造成崩塌體完全脫離其所在之岩床，在這情況下，假設崩塌體內部並未產生塑性變形或流動，而其變形及應變仍得以彈性體來描述，而在破壞面上的錯移所引致的地表位移，則是（理想上）由 InSAR 或其類似之廣域監測技術所測量而得的地表位移。忽略破壞面兩端連結至地表的終端錯動段，我們則可進一步假設主體破壞面是一約略平行或以一小角度大致平行於地表的錯動面，如圖中紅色實線所示，在這條件下，我們可能可引入地震學中用來反演震源斷層位置的彈性錯位模型，以相同的原理來反演

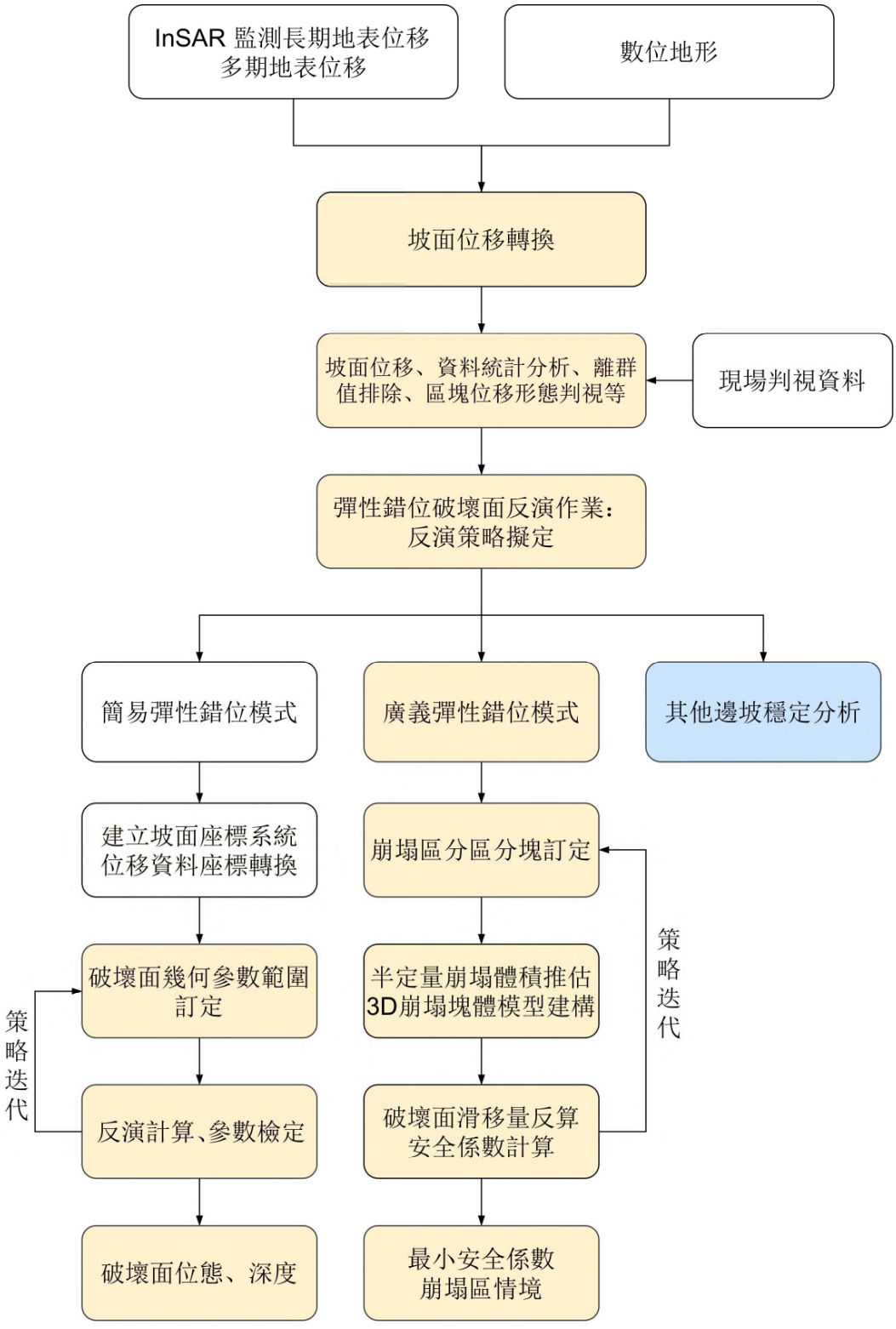

InSAR 監測長期地表位移
多期地表位移
數位地形
坡面位移轉換
坡面位移、資料統計分析、離群值排除、區塊位移形態判視等
現場判視資料
彈性錯位破壞面反演作業：反演策略擬定
簡易彈性錯位模式
廣義彈性錯位模式
其他邊坡穩定分析
建立坡面座標系統
位移資料座標轉換
崩塌區分區分塊訂定
破壞面幾何參數範圍訂定
半定量崩塌體積推估
3D崩塌塊體模型建構
反演計算、參數檢定
破壞面滑移量反算
安全係數計算
破壞面位態、深度
最小安全係數
崩塌區情境
策略迭代
策略迭代

圖 1.1: 計畫架構

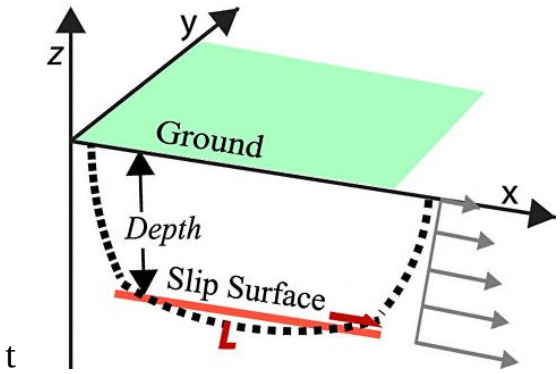


圖 1.2: 應用簡易彈性錯位反演破壞面模式概念圖，取自 Aryal 等 2015。

山崩破壞面，由於破壞面被簡化為一簡單平面，我們稱此模型為簡易彈性錯位模式，詳細的理論描述請見第 2及4章，由於彈性模式是一靜態理論，與錯動行為發生當下的加速度無關，只要變形期間崩塌體維持彈性，本模式即適用，

如以上對應用情境的假設條件簡述可知，我們需要破壞面錯移與地表位移之間的彈性體假設，在此前提下，適用的崩塌區宜具有較高的剛性，山崩塊體運移之型態，且應運移位移幅度小，檢視本計畫所選擇之南投縣廬山精英村D066及新竹縣尖石鄉泰崗部落 D077 兩區域，其崩塌位移主要呈現一些大面積（或成數個大面積分區）運移，與此模式假設近似，故判斷可以用來檢視此模式的可用性；相對的，對淺層、崩積層近似流體運動的土石流則不適用。由於本計畫中使用的模型均為均質等向性的彈性體，細節的地質與材料特性，如植批、表土、岩床劈理、斷層走向、材料參數空間異質性等等，均不在本計畫探討範圍。

而本計畫中之地表位移，主要是取自行政院農業委員會水土保持局 2020a; 行政院農業委員會水土保持局臺北分局2019等計畫以ALOS 衛星雷達影像以及時域相關點合成孔徑干涉雷達 (temporarily coherence point InSAR, TCP-InSAR) 技術所計算而得的，其特點是藉由多期影像來萃取影像間之相關點，提昇相關點之密度，再利用相位干涉原理計算相關點之位移。但由於衛星影像的擷取受限於衛星拍攝排程，影像良窳受氣候影響等因素，ALOS 在台灣地區影像採集週期並不規律，故以上計畫多以長時間之平均位移率 (deformation rate)，或具有多對影像時，以影像對間之位移 (deformation) 來表示，我們假設這些高密度的資料點能夠直接，或透過一些統計上的操作，能夠反應地表在 InSAR 施測時間

段中所產生的位移變形，而這變形量，則視為彈性錯位模式中破壞面上錯移所產生對應這段期間的新增位移，由彈性變形產生，而反演計算即在反演一破壞面之位態及錯位量，使模型推估之地表位移量與 InSAR 位移觀測量間之總和平方差為最低。最後由於彈性錯位模式為一線性靜態模式，只要在不違背彈性連續體的條件下，在模式中將位移以位移率取代並不影響結果，故我們在本報告結果呈現中，並不特別區分位移或位移率，即若 InSAR 資料為位移，其反演結果為位移，若為位移率，則反演結果為位移率。最後，廣義彈性錯位模式則是將給定破壞面以上之崩塌塊體當成彈性體，而其地表位移是由破壞面上給定錯位位移透過三維彈性體計算而得，所以塊體的形狀可為複雜型態的有限體積，且由於塊體可以自由體 (free body) 的概念來獨立處理，故可與崩塌區外圍岩床割離，推測與InSAR 位移整合時，同樣可限縮在較小範圍的位移資料點反演束制應用，且因廣義彈性錯位模式之假設破壞面通常是透過第三方方法來給定，如山崩面積-體積關係，在深度上有較佳的束制，此廣義模式在本計畫中定位為初探及計算工具開發階段。

第四節　D066 南投縣-仁愛鄉大規模崩塌潛勢區簡介

本節與下節段落部分摘自 行政院農業委員會水土保持局 2020a，本節首先介紹 D066 南投縣仁愛鄉大規模崩塌潛勢區。

第一小節　研究區域位置及地質概況

大規模崩塌潛勢區編號南投縣-仁愛鄉-D066 位於南投縣仁愛鄉精英村廬山地區，從福衛二號影像可見周遭山坡地多開發為雜林及農墾地為主，崩塌地範圍有部分現生崩塌分布 (圖1.4衛星影像)。崩塌中心坐標 TWD97 (268872,2658523)，潛在崩塌面積50.6公頃，平均坡度 25.2°，高差約為377m，坡向朝東南，上半部坡形較為平直，下半部呈現陡坡地形 (圖1.3)，潛在崩塌區最高點海拔約 1,388 公尺，保全住戶約37戶。聚落所在區域為舊崩塌地地形，可見路面及擋土牆有多處開裂、陷落等現象，具邊坡滑動徵兆 (圖1.4)。

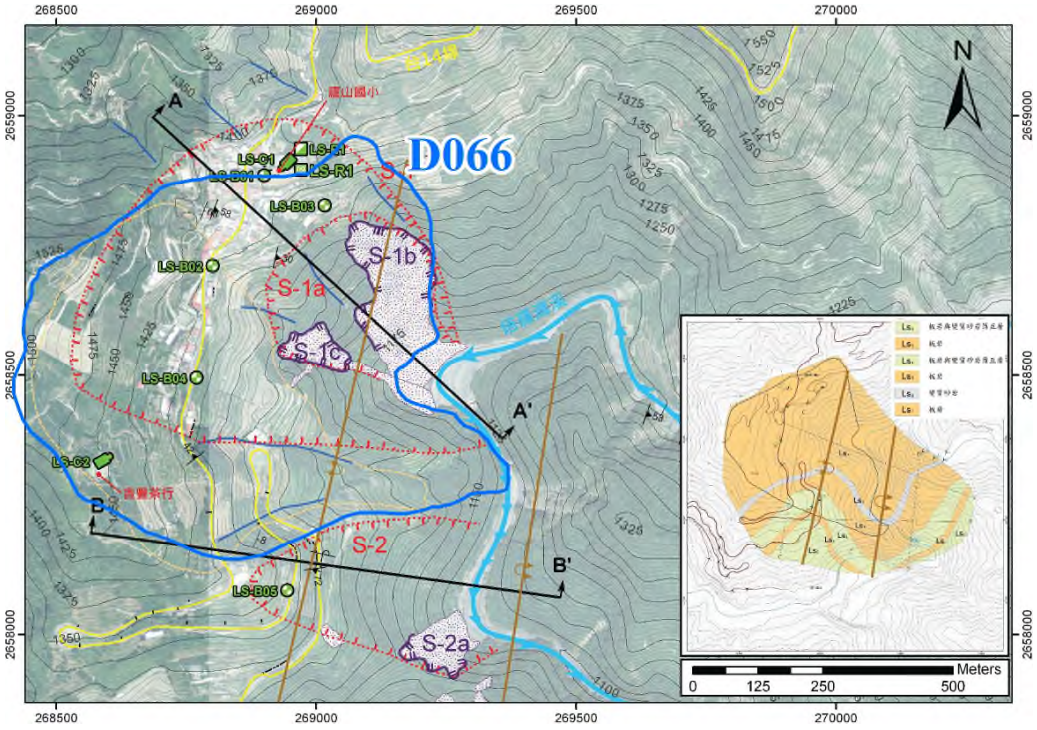


圖 1.3: D066 南投縣廬山精英聚落坡面潛在大規模崩塌位置圖，修改自經濟部中央地質調查所 2011

在區域地質方面，此區地層屬廬山層，廬山層岩性組成主要是由黑色到深灰色板岩所組成，偶夾薄層深灰色變質砂岩，劈理位態為往東南方傾斜，坡面主要坡向朝東，因此此處為順向坡地形 (圖1.5)。

地質構造方面，無名斷層位於崩塌地東側 30 公尺處通過。由高精度數值地形判釋大規模崩塌潛勢區編號南投縣-仁愛鄉-D066 坡面屬於上緩下陡之地形，其主崩崖滑動體區位面積約 34.9 公頃，坡面朝向東，且趾部已有數條侵蝕溝發育至坡腹位置。崩塌頂部主崩崖邊界地形因人為開發較不明顯，但仍可見崩崖發育 (圖 1.6 紅色地形影像圖)。坡面水系方面，崩塌區整體的主要水系是趾部的侵蝕溝，其侵蝕溝已影響之崩塌區坡趾處之現生崩塌，且持續發育中 (圖 1.6 坡度及細度判釋圖)。

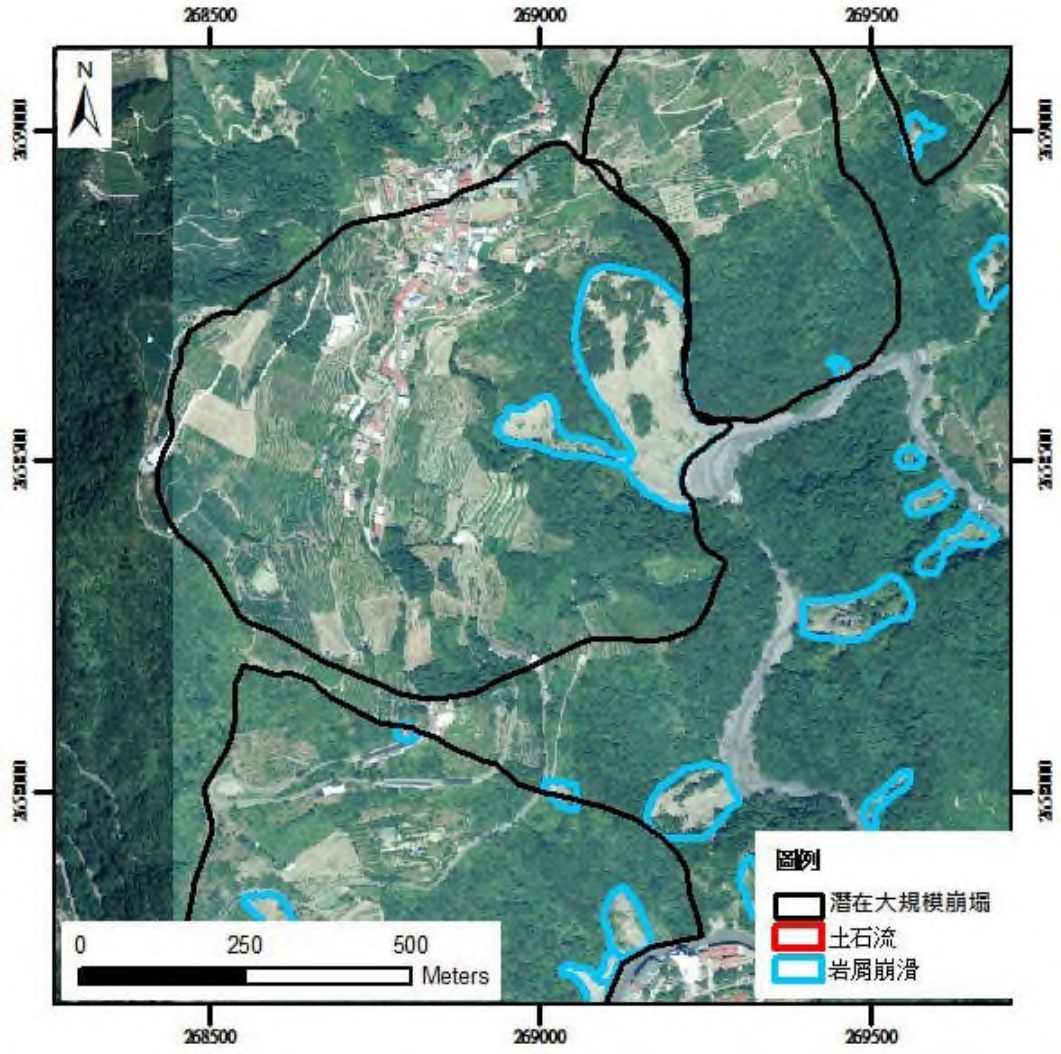


圖 1.4: D066 南投縣廬山精英聚落坡面鄰近地區災害分布圖

第二小節 TCPInSAR 崩塌潛勢區地表變形量分析

本計畫利用ALOS/ALOS2衛星影像期程配合TCPInSAR技術，針對南投縣-仁愛鄉-D066 產製 ALOS 及 ALOS2 地表平均變形量，其成果顯示崩塌地坡面TCP點位整體分布主要下沉區位分布於坡面中央靠近坡趾處，推測與位於河岸攻擊坡相關，崩塌區位內整體呈現相對下陷。ALOS及ALOS2長期地表平均下陷變形量2007-2011年間 (ALOS) 為6.93 mm/yr，而2015-2017年間 (ALOS2) 為10.48mm/yr(表1.1)。綜合上述分析結果崩塌編號南投縣-仁愛鄉-D066整體坡面呈上緩下陡之地形，坡面下方之滑動體發育受侵蝕溝控制，且其位於河道攻擊坡處，坡腳掏空造成坡面不穩定，影響坡面住戶安全。

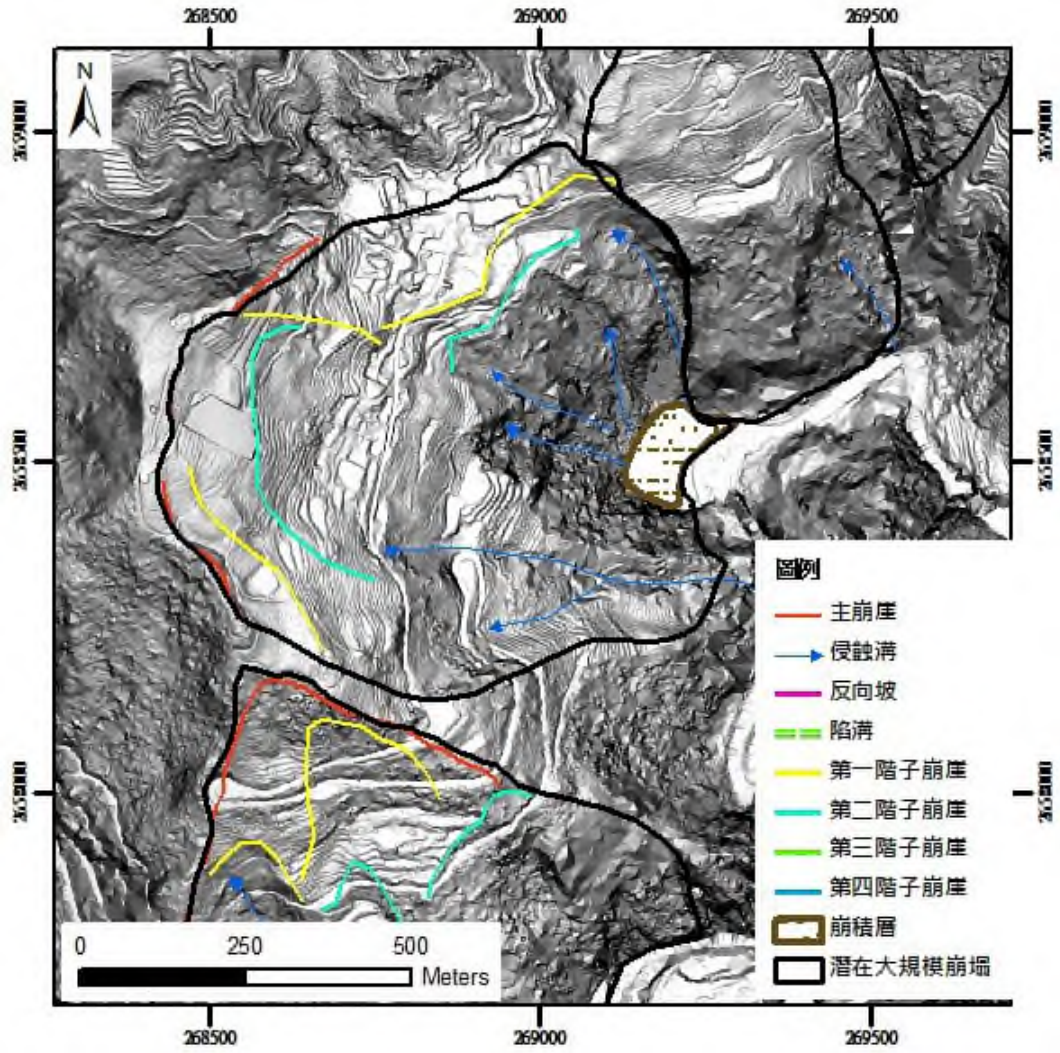


圖 1.5: 南投縣盧山精英聚落崩塌地形特徵判釋成果圖

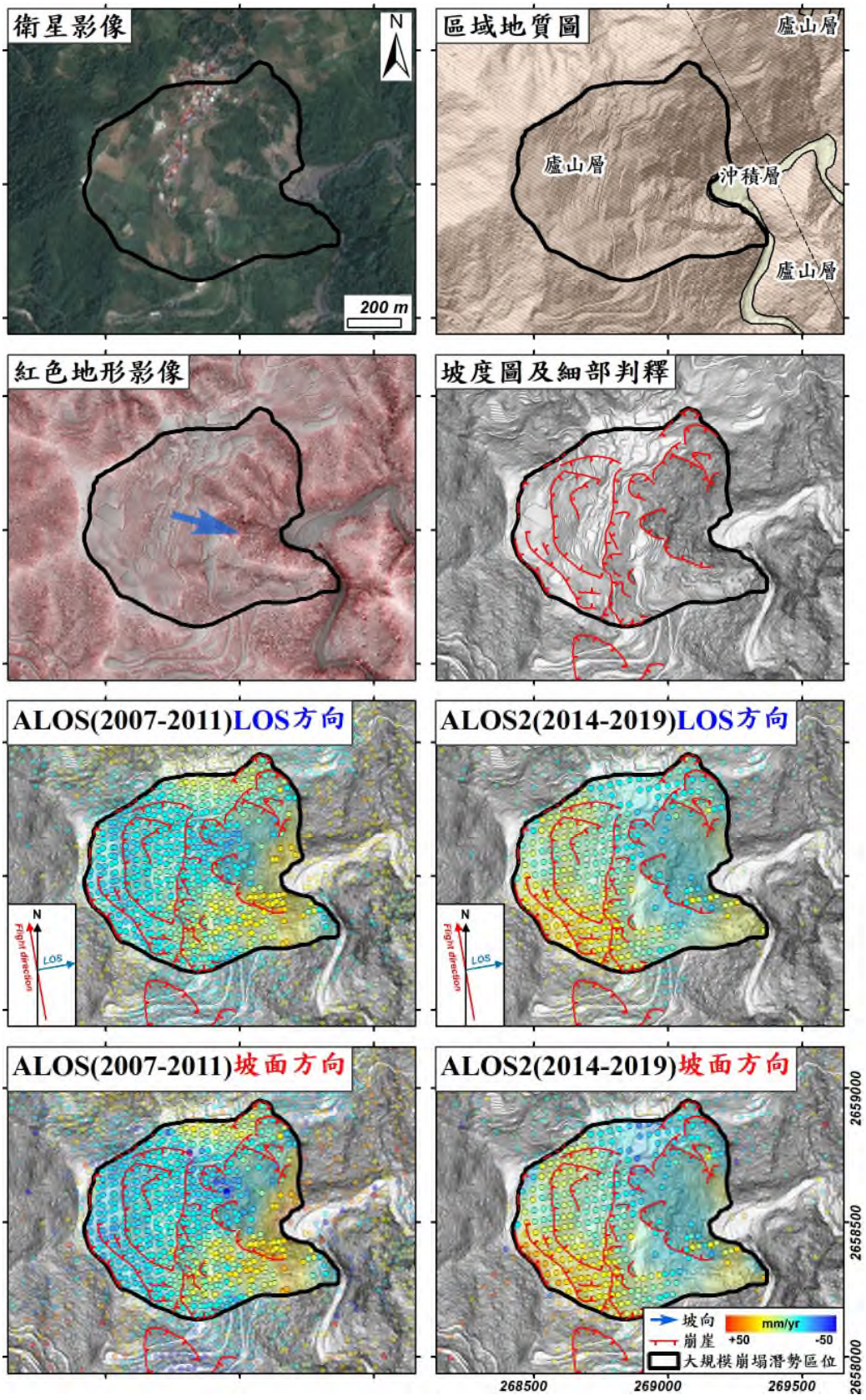


圖 1.6: 南投縣-仁愛鄉-D066 崩塌地表地形資訊及活動性分布圖

表 1.1: 南投縣-仁愛鄉-D066 崩塌地特性介紹

崩塌地區域地形地質資訊		崩塌地活動性	
行政位置	南投縣仁愛鄉精英村	ALOS (2007-2011)	
坐標	(268872 , 2658523)	活動點數 (點)	485
面積 (公頃)	50.6	活動總量 (公厘)	−3,364
坡度 (度)	25.2	活動平均 (公厘/年)	−6.93
坡向	東	ALOS2 (2014-2018)	
海拔 (米)	1,388	活動點數 (點)	406
崩塌長 (米)	617	活動總量 (公厘)	−4,256
崩塌寬 (米)	370	活動平均 (公厘/年)	−10.48
崩塌高差 (米)	377	崩塌發生潛勢	
順向坡	中度順向坡	發生度	低
地質年代	全新世、中新世	重要保全	高
地層分布	廬山層、沖積層	活動度	高
地質條件	變質岩		

第三小節 滑動面分析

圖1.7表示 D066 崩塌區中 AA′ 剖面之岩層劈理走向，以及研判之滑動面（經濟部中央地質調查所 2011），如同許多大型崩塌區，該剖面研判也存有多組破壞面，其中最深層破壞面 S-1 之最大破壞深度約在 70 m 左右，平均深度則約為 29 m。

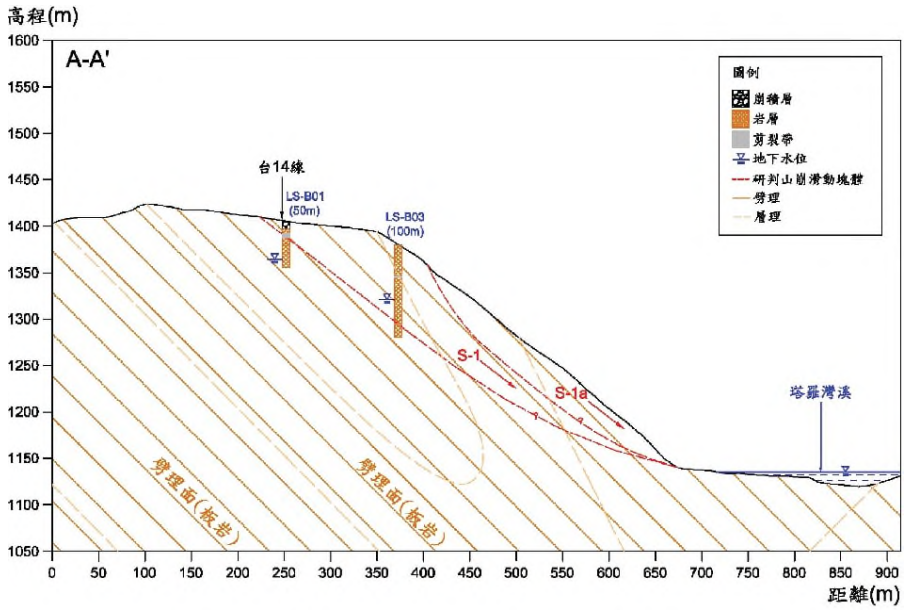


圖 1.7: 南投縣-仁愛鄉-D066(圖1.3) 邊坡破壞面及 AA´ 地質剖面 (經濟部中央地質調查所 2011)

第四小節　現地調查結果

過去地調查狀況，參考行政院農業委員會水土保持局 2016 及圖1.12

(1) 調查點 1：如圖1.8所示，此為 105/06/27 所拍攝之照片，照片中於富貴路上之房屋及擋土牆遭受土石崩落，產生嚴重損毀。

(2) 調查點 2：如圖1.9所示，此為 105/06/27 所拍攝之照片，照片中之茶園地板有多處裂隙。

(3) 調查點 3：如圖1.10所示，此為 105/06/27 所拍攝之照片，照片於廬山部落頂部之擋土牆明顯可見傾斜、破裂及損壞。

(4) 調查點 4：如圖1.11所示，此為 105/06/27 所拍攝之照片，此處於廬山國小，其操場地板、樓梯及水溝有多處裂縫及擠壓等現象。

(5) 調查點 5：過去於富貴路上，可見電線桿傾斜。

(6) 調查點 6：過去於富貴路上，同樣可見電線桿傾斜。



圖 1.8: 調查點 1：富貴路上房屋損毀，土石崩落。



圖 1.9: 調查點 2：茶園：地板多處裂縫



圖 1.10: 調查點 3：廬山部落頂部，擋土牆傾斜且損裂

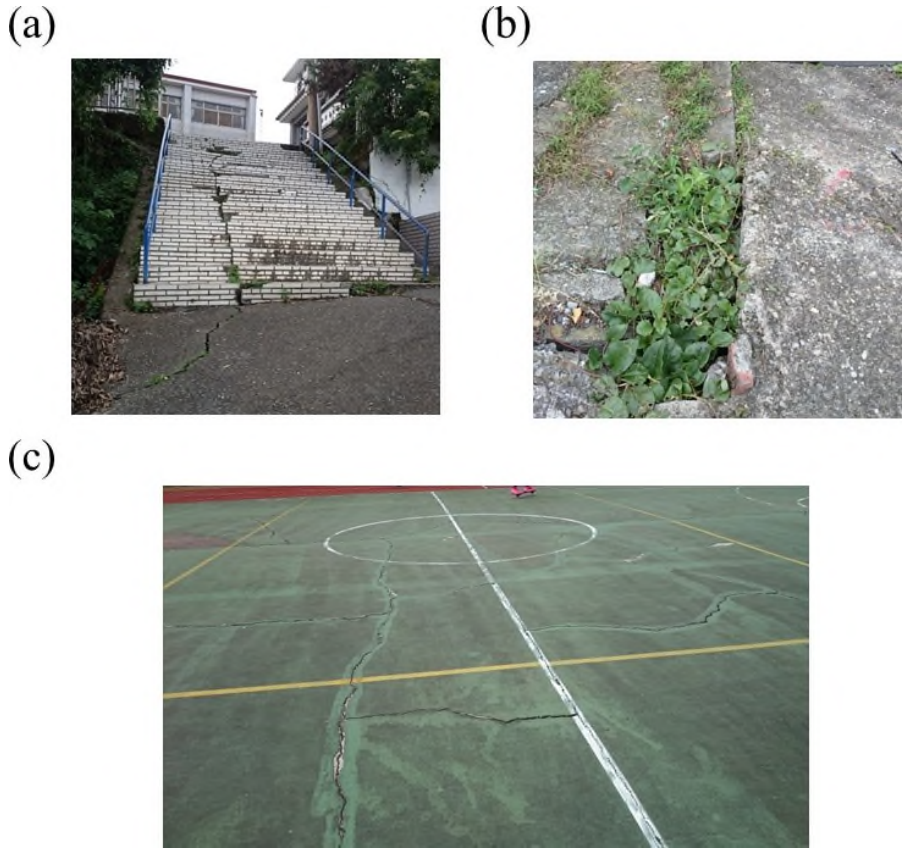


圖 1.11: 調查點 4：廬山國小 (a) 樓梯斷裂 (b) 排水溝遭擠壓 (c) 操場地板多處裂縫

參考科技部永續會計畫 2018、經濟部中央地質調查所 2011、經濟部中央地質調查所 2019、行政院農業委員會水土保持局 2016與行政院農業委員會水土保持局 2020a之計畫，針對廬山地區地質鑽探點、崩塌潛勢特徵處及儀器架設位置進行彙整，以供現勘時之參考，所有點位標示於圖1.12中，且相關觀測儀器 列於表1.2中，共有 5 個測傾管及電子式水壓計 (LS-B01 LS- B05)、1 個孔內伸縮計 (LS-E1)、2 個 CCD 攝影機 (LS-C1 LS-C2)、2 個雨量計 (LS-R1 與 R-01)、6 個雙頻 GPS 監測站及 5 個角反射器 (CR-01 CR-05)，共有 20 個點位，分別說明如下

1. 地質鑽探及相關觀測儀器：

(1) 測傾管及電子式水壓計：LS-B01 LS-B05 為測傾管及電子式水壓計，測傾管以人工方式開孔加工包覆不織布處理，內置 Jetec 廠牌之電子式水壓計或 HOBO 廠牌之自記式水壓計，可兼做水位觀測井使用。(經濟部中央地質調查所 2011)

(2) 孔內伸縮計：LS-E1 為孔內伸縮計，變位計採用 Midori 廠牌變位計。(經濟部中央地質調查所 2011)

(3) CCD 攝影機：LS-C1 ~ LS-C2 為 CCD 攝影機，採用 YOKO 廠牌。(經濟部中央地質調查所 2011)

(4) 雨量計：LS-R1 為雨量計，採用日本竹田廠牌之傾斗型雨量計，量筒直徑為 20cm。(經濟部中央地質調查所 2011)

(5) 雙頻 GPS 監測站：GPS-1 ~ GPS-5 為雙頻 GPS 監測站，GPS-6 為參考站。(科技部永續會計畫 2018)

(6) 角反射器：CR-01 ~ CR-05 採用傳統雷達角反射器。(行政院農業委員會水土保持局 2020a)

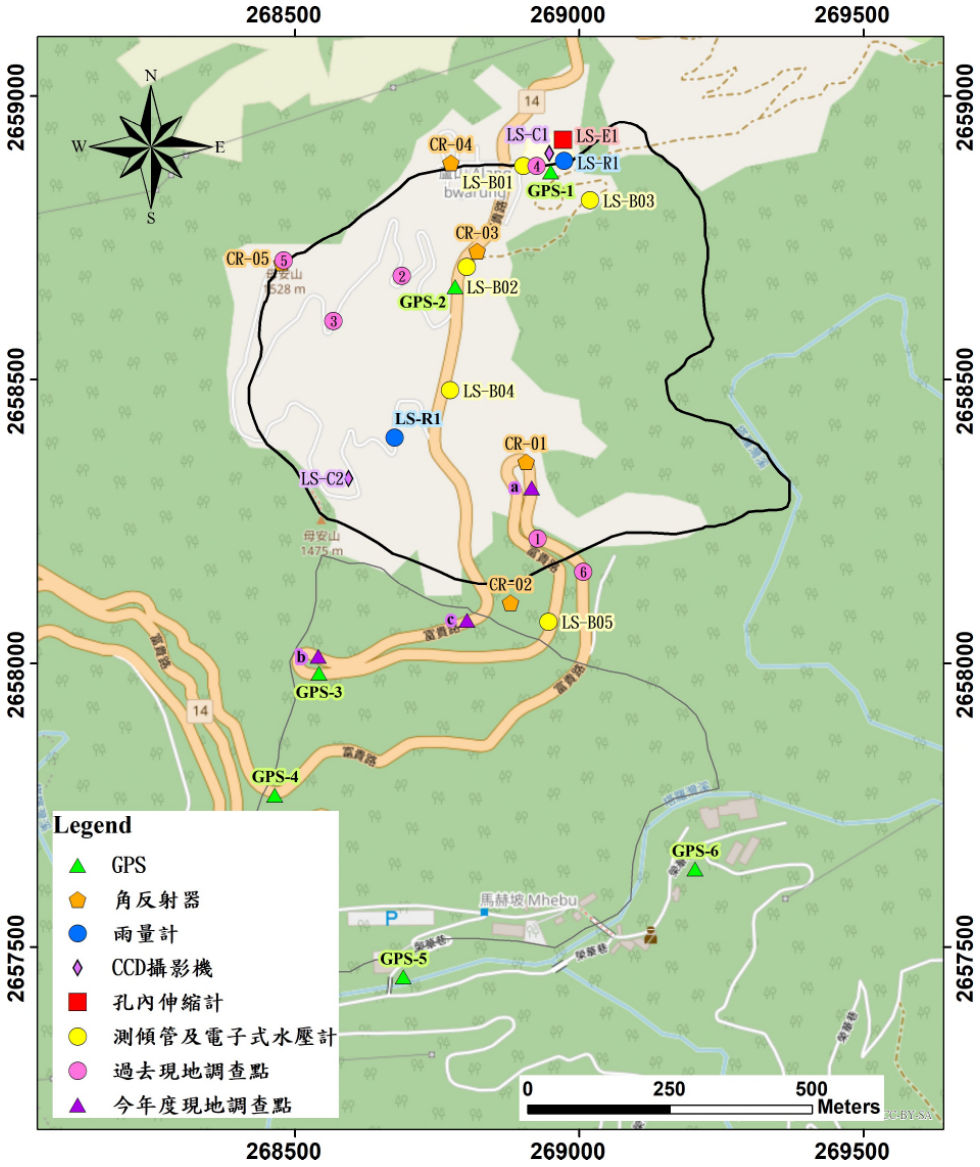


圖 1.12: 南投縣-仁愛鄉-D066，廬山部落平面圖

表 1.2: D066 南投縣仁愛鄉山部落相關觀測儀器及現地調查點

測站	座標 X	座標 Y	觀測儀器及說明
GPS-1	268951	2658866	GPS
GPS-2	268782	2658664	GPS
GPS-3	268543	2657982	GPS
GPS-4	268465	2657768	GPS
GPS-5	268691	2657447	GPS
GPS-6	269204	2657638	GPS
CR-01	268907	2658355	角反射器
CR-02	268880	2658107	角反射器
CR-03	268821	2658726	角反射器
CR-04	268775	2658882	角反射器
CR-05	268478	2658706	角反射器
LS-R1	268974	2658886	雨量計
R-01	268676	2658398	雨量計
LS-C1	268948	2658899	CCD 攝影機
LS-C2	268595	2658325	CCD 攝影機
LS-E1	268972	2658923	孔內伸縮計
LS-B01	268902	2658877	測傾管及電子式水壓計
LS-B02	268803	2658698	測傾管及電子式水壓計
LS-B03	269020	2658816	測傾管及電子式水壓計
LS-B04	268773	2658482	測傾管及電子式水壓計
LS-B05	268946	2658074	測傾管及電子式水壓計
調查點 1	268927	2658220	過去現地調查點
調查點 2	268688	2658683	過去現地調查點
調查點 3	268568	2658604	過去現地調查點
調查點 4	268925	2658877	過去現地調查點
調查點 5	268481	2658710	過去現地調查點
調查點 6	269007	2658162	過去現地調查點
調查點 a	268917	2658309	今年度現地調查點
調查點 b	268542	2658012	今年度現地調查點
調查點 c	268803	2658076	今年度現地調查點

2. 本年度現地調查狀況：

本計畫團隊於110年10月20日，至研究區域-D066 南投縣仁愛鄉廬山部落，進行現場複勘，當天天氣晴朗，視野良好。本次的現地調查，主要是針對崩塌災害處及相關觀測儀器進行現場勘查，沿著台 14 線經由廬山溫泉，進入廬

山部落潛勢崩塌區邊界 (如圖1.12之黑框) 交界處，路線由南方至北方的廬山國小，再至冠部處探勘。

首先於圖1.12現勘點 a 處觀看全景，如圖1.13及圖1.14兩張照片分別是當下視野的左半部及右半部，圖1.13左方高壓電塔在最高處，為此潛勢崩塌區塊冠 部，漸漸下來是圖1.12調查點 3 之擋土牆，至圖1.14前方有個明顯的現生崩塌裸露區塊，照片右方最低處為塔羅灣溪，可一覽由高至低的橫向剖面。圖1.15為 角反射器 CR-01 之照片，圖1.16為 GPS-3 之照片，路旁的牆面可明顯看出開裂跡象，如圖1.17照片所示，其位置於圖1.12現勘點 b 處。圖1.18現勘點 c 處路旁電線桿呈現傾斜，接著往北走至角反射器 CR-03 的位置，其照片如圖1.19所示。

接著至廬山國小附近探勘，圖1.20為進門口處的樓梯，呈現破裂損壞貌， 進入廬山國小後，原先操場地板的裂縫已修補過，觀禮台前方草地上，架設GPS-1儀器，如圖1.21所示。

往廬山部落潛勢崩塌區塊冠部方向前進，於 R-01 點位拍攝路旁雨量計照片，如圖1.22所示。冠部的高壓電塔處，圖1.23為角反射器 CR-05 之照片，高壓電塔旁之電線桿，明顯可見傾斜狀如圖1.24。於調查點 3 觀察廬山部落冠部下方之擋土牆，圖1.25為 2016/6/27 所拍攝，圖1.26及圖1.27為 2021/10/20 所拍攝，經過 5 年的變化，上坡土石滑動，擋土牆有漸漸外推且傾斜的情況，且明顯可見邊坡上的樹木將近 45 度角傾斜，將是需要持續關注的地區，未來可以考慮加強擋土牆之穩定度及排水措施，以保障當地住戶之安全。

圖1.28為廬山部落頂部由上往下拍攝廬山國小之照片，山區邊坡較平坦的地方大多皆是堆積如圖1.29之板岩地層，因上週下過大雨，板岩受到水的作用會呈現像樓梯狀。圖1.30為調查點 2 之茶園，地板裂縫依然存在，路旁的電線桿呈現傾斜，如圖1.31之照片。



圖 1.13: 南投縣-仁愛鄉-D066，全景左半部



圖 1.14: 南投縣-仁愛鄉-D066，全景右半部



圖 1.15: 角反射器 CR-01 之照片



圖 1.16: GPS-3 照片



圖 1.17: 調查點 b 處，路旁牆面開裂



圖 1.18: 調查點 c 處照片，路旁電線桿呈現傾斜



圖 1.19: 角反射器 CR-03 之照片



圖 1.20: 廬山國小校門口樓梯破裂



圖 1.21: GPS-01 之照片



圖 1.22: 雨量計 R-01 之照片



圖 1.23: 角反射器 CR-05 之照片



圖 1.24: 高壓電塔旁之電線桿，明顯傾斜



圖 1.25: 2016/6/27 拍攝廬山部落潛勢崩塌區塊冠部之擋土牆



圖 1.26: 2021/10/20 拍攝廬山部落潛勢崩塌區塊冠部之擋土牆



圖 1.27: 2021/10/20 拍攝廬山部落潛勢崩塌區塊冠部之擋土牆



圖 1.28: 廬山部落頂部由上往下拍攝廬山國小之照片



圖 1.29: 板岩地層



圖 1.30: 調查點 2-茶園：地板多處裂縫



圖 1.31: 調查點 2-茶園：路旁的電線桿呈現傾斜

第五節　D077 新竹縣-尖石鄉大規模崩塌潛勢區簡介

第一小節　研究區域位置及地質概況

新竹縣-尖石鄉-D077崩塌地位於新竹縣尖石鄉泰崗聚落，該崩塌地海拔高度1200米，交通可由新竹縣泰崗道路抵達。周圍的山坡地部分坡頂以農墾地和道路為主，坡腹和坡趾為原始林地，聚落位於該潛在大規模崩塌上方，面積23.5公頃，平均坡度 31 度，高差 437 米。而計畫區內包含秀巒現生崩塌區及泰崗潛在大規模崩塌區，秀巒現生崩塌區受2016 年9月梅姬颱風影響發生崩塌，其崩塌冠部活動性顯著，鄰近計畫區東側為為泰崗溪竹縣 D064 土石流潛勢溪流以及北側竹縣 D063 土石流潛勢溪流。水土保持局台北分局已於前期計畫辦理調查及監測作業，對於致災原因、規模及機制已初步掌握，同時延續前期計畫之相關儀器持續監測，以釐清邊坡之活動性及地下水特性 (圖1.32)。

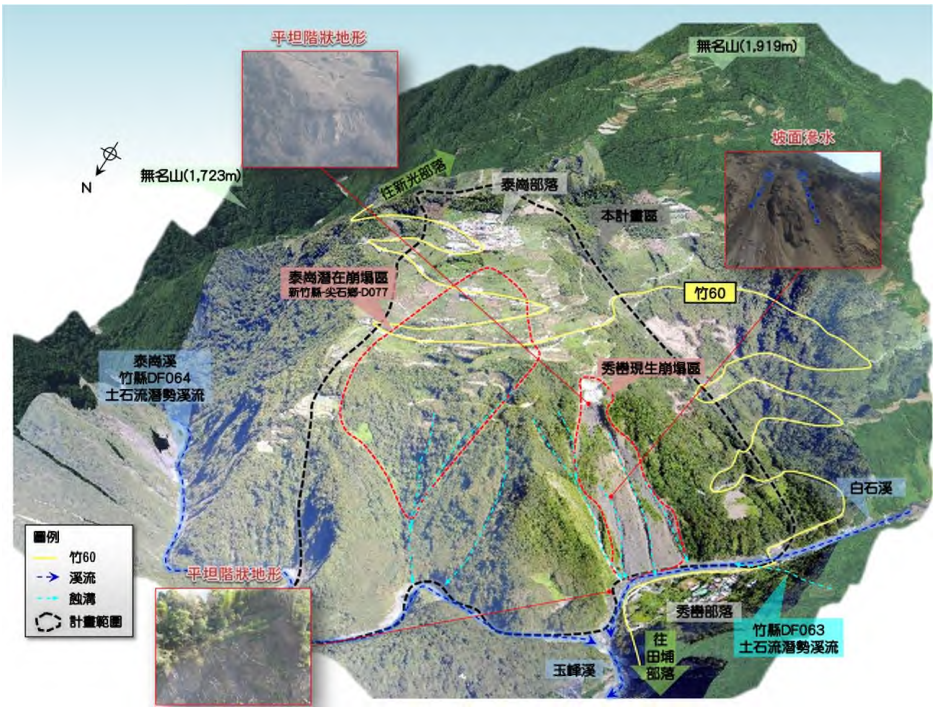


圖 1.32: D077 新竹縣-尖石鄉-潛在大規模崩塌位置圖 (資料來源：水土保持局台北分局)

由航空照片判釋顯示潛在大規模崩塌編號新竹縣-尖石鄉-D077坡面沒有大面積現生崩塌，僅在坡趾受白石溪沖刷影響，主要現生崩塌皆發生於坡趾的鄰

近坡面 (圖1.33)。根據高精度日照陰影圖判釋結果崩塌地形貌呈現上緩下陡，坡頂主崩崖和坡腹以上的區位，坡度較緩，崩塌特徵並不明顯，坡趾處的坡度較陡且發育較大型的崩崖地形 (圖1.34)。

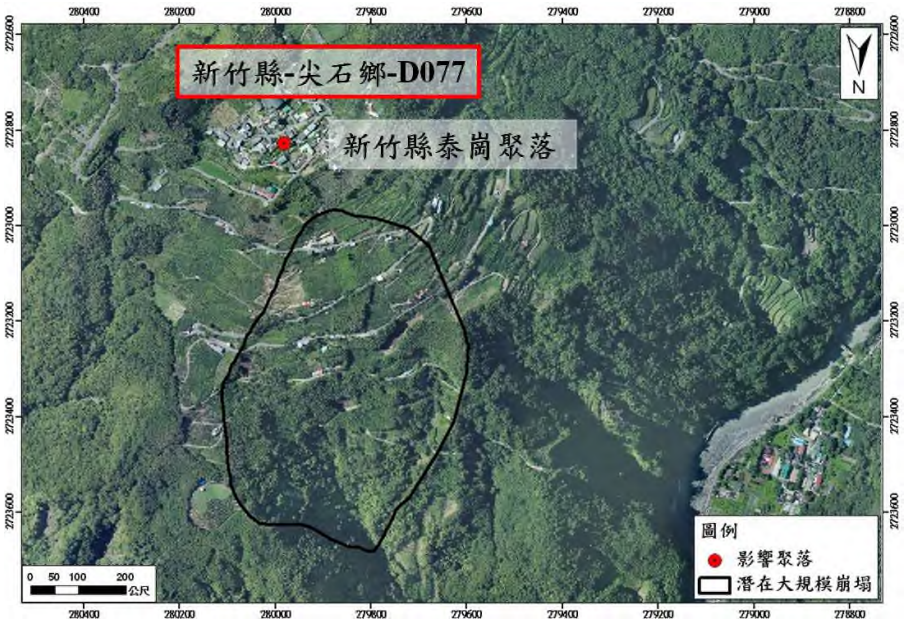


圖 1.33: 新竹縣-尖石鄉-D077 潛在災害相關位置圖

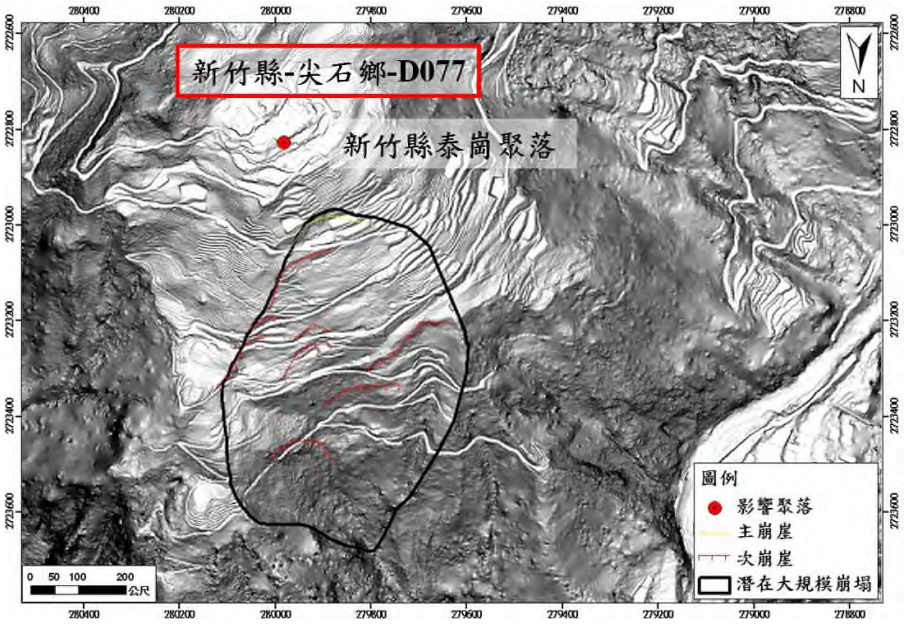


圖 1.34: 新竹縣-尖石鄉-D077 潛在大規模崩塌地區崩塌地形特徵

第二小節　TCPInSAR 崩塌潛勢區地表變形量分析

圖1.35為新竹縣-尖石鄉-D077 崩塌地表地形資訊及活動性分布圖， 由圖中 InSAR 時序圖來看，黑色實線所圈繪的邊框為地調所公告之大規模崩塌邊界，紅色實線為地表滑動受到擠壓隆起所造成地表開裂，由 TCP 點位來看，中間區塊顏色為藍色，代表地表下降區塊，往趾部漸漸變成綠色 (不動點) 及黃色 (抬升點)，表示 D077 潛勢崩塌區塊之趾部有受到坡面塊體滑動擠壓而堆積隆起的現象，可判斷 D077 潛勢崩塌區塊由冠部往趾部蝕溝方向滑動。

新竹縣-尖石鄉-D077 坡面屬順向坡，其 TCP-InSAR 成果顯示新竹縣-尖石鄉-D077 坡鄰近冠部主要是冷色系為主，下降位移速度較大的區域可達 −10 到 −15 mm/yr，而周邊地區反應最大下降位移量則是位於東側侵蝕溝崖面，下降位移速度較大的區域達 −20 到 −35 mm/yr，可能反應底部受到泰崗溪沖刷所造成崩滑現象。總合評估 InSAR 成果，其在坡面上 InSAR 成果點數為 192 點，位移總量為 −1768 mm，其平均活動性指標為 −9.21 mm，在全台 186 處大規模崩塌潛勢區屬於發生度低、重要保全度高以及的活動度中等之邊坡 (圖1.36及表1.3)。

表 1.3: 新竹縣-尖石鄉-D077 崩塌地特性介紹

崩塌地區域地形地質資訊		崩塌地活動性	
行政位置	新竹縣尖石鄉泰崗聚落	ALOS (2007-2011)	
坐標	(279875 , 2723334)	活動點數 (點)	192
面積 (公頃)	23.5	活動總量 (公厘)	−1, 768.8
坡度 (度)	31.0	活動平均 (公厘/年)	−9.2
坡向	北	ALOS2 (2014-2019)	
海拔 (米)	1,198	活動點數 (點)	91
崩塌長 (米)	675	活動總量 (公厘)	−1, 103.8
崩塌寬 (米)	430	活動平均 (公厘/年)	−12.1
崩塌高差 (米)	437	崩塌發生潛勢	
順向坡	順向坡	發生度	低
地質年代	漸新世	重要保全	高
地層分布	大桶山層、乾溝層	活動度	中
地質條件	變質岩、硬頁岩、板岩		

由於 D077 崩塌地為潛在崩塌區，該滑動體之岩屑厚度約 13～40 公尺，滑

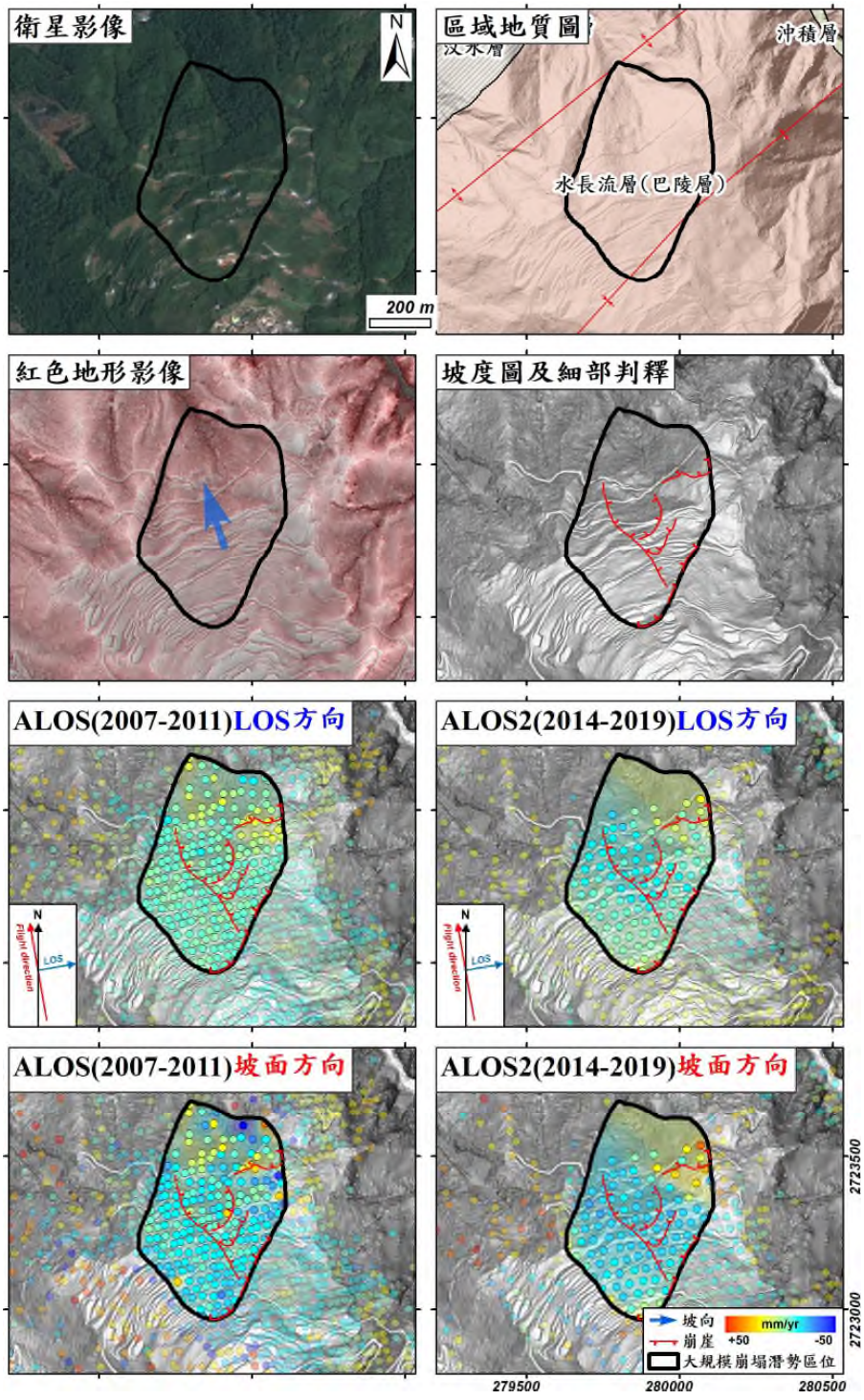


圖 1.35: 新竹縣-尖石鄉-D077 崩塌地表地形資訊及活動性分布圖

動深度約在 20～30 公尺之間，目前已架設水位觀測井、傾斜管兼水位井、地盤傾斜計、封層水位井進行地表及地下變位監測 (圖1.37之 D077 區域)。綜合評估新竹縣-尖石鄉-D077 大規模崩塌潛勢區位之活動性特徵，其崩塌坡面呈現整體性下滑趨勢，並在坡度較大之地區具有較大的變形量，而在下邊坡地區同時受

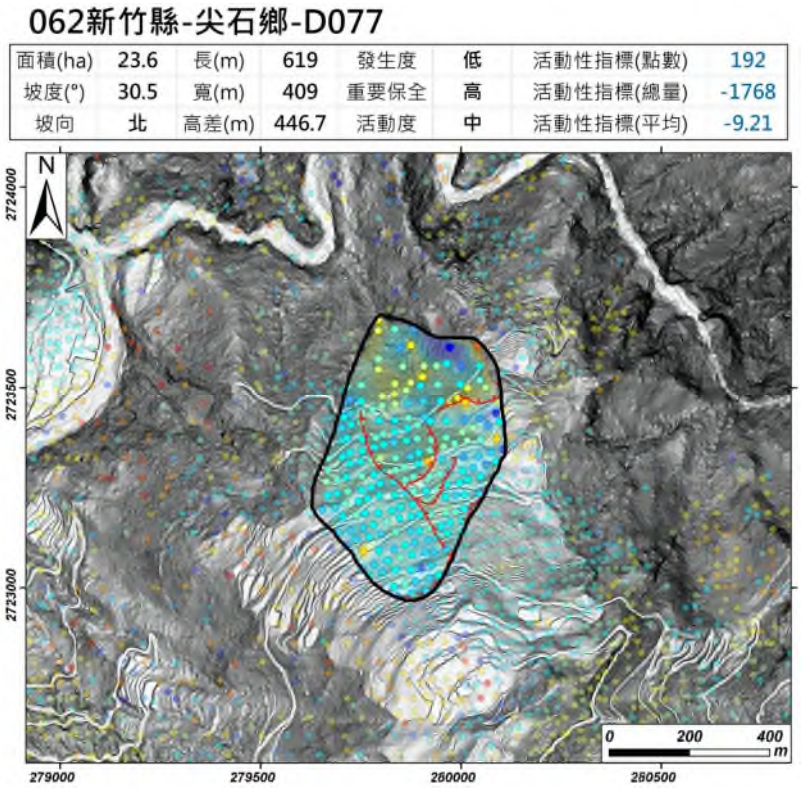


圖 1.36: 新竹縣-尖石鄉-D077 坡面潛在大規模崩塌 ALOS InSAR 成果圖

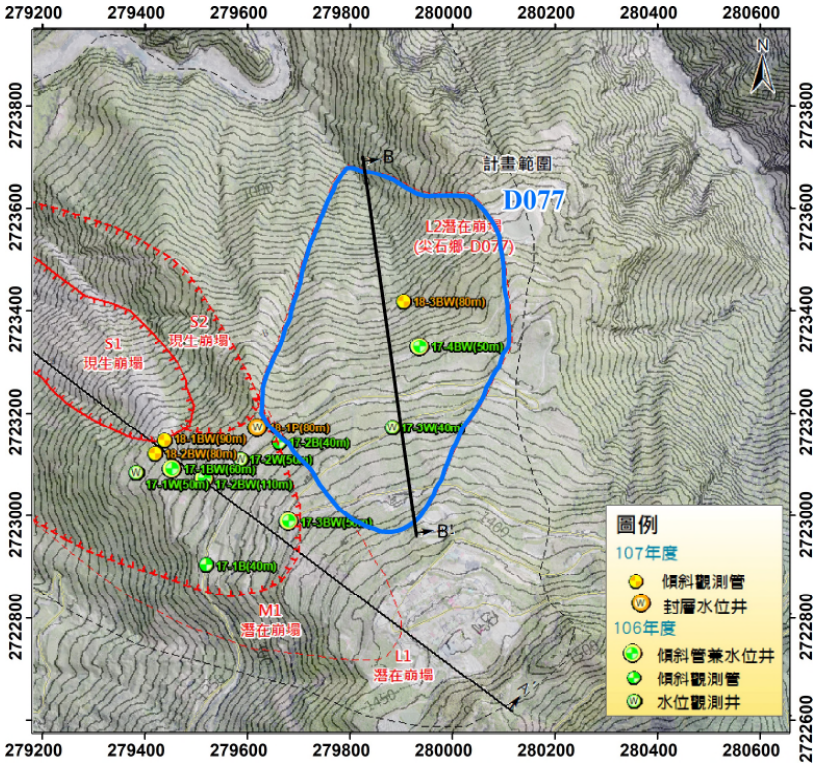


圖 1.37: 新竹縣-尖石鄉-D077 監測儀器配置圖，修改自行政院農業委員會水土保持局臺北分局 2019

河流側蝕影響，具有持續擴大的現象，因此可能的致災方式為該潛在大規模崩塌地因坡趾受底部侵蝕溝向源侵蝕影響，導致坡體失去坡腳，進而影響到位於該潛在大規模崩塌地上方的聚落。

第三小節 滑動面分析

由行政院農業委員會水土保持局臺北分局 2019 地質調查，在 D077 定義一潛勢滑動主剖面 BB´ （圖1.37），該主剖面如圖 1.38 所繪，其可能滑動型態分為三層：第一層為土岩界面滑動，此層最為活耀，滑動深度約 10m，即圖中紅線所指之堆積材料滑動；第二層為板岩所產生的碎屑滑動，滑動深度約30~40m，即黃線所指之破碎岩層滑動；第三層為更深的岩性碎面滑動，滑動深度約75m。

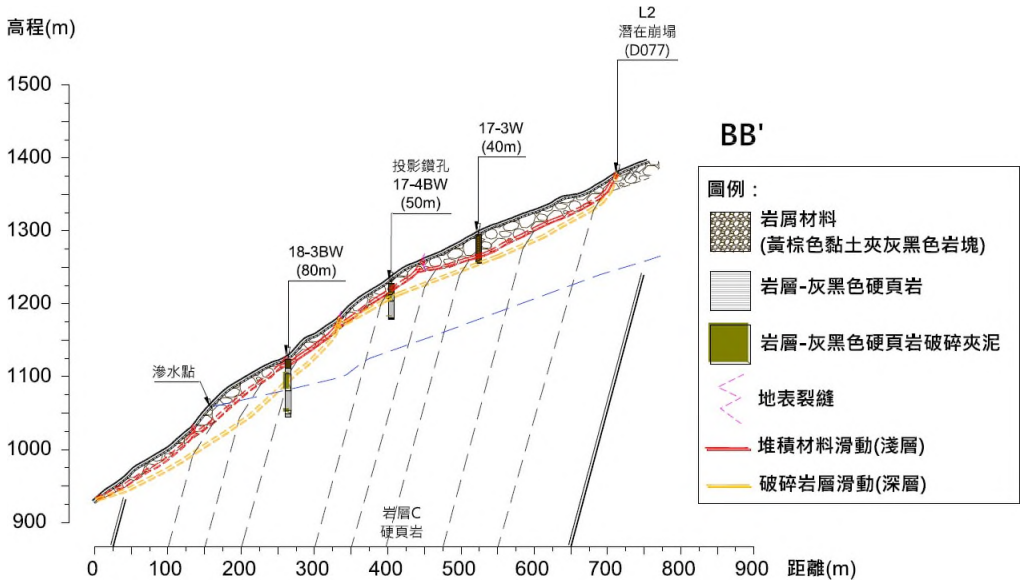


圖 1.38: 新竹縣-尖石鄉-D077 邊坡 BB´ 破壞面及地質剖面 (行政院農業委員會水土保持局臺北分局 2019)

第四小節 現地調查結果

由前期 InSAR 與過去現地調查結果顯示 (圖1.39A)，位於大規模崩塌冠部泰崗聚落可看出擋土牆受到剪切、已有拉張現象，大約為 2～3 公分 (圖 1.39B)，其

周圍鄰近地區房舍窗戶已明顯傾斜 (圖1.39C)，沿著圖 D 可看出其冠部整體呈現往北傾之趨勢。

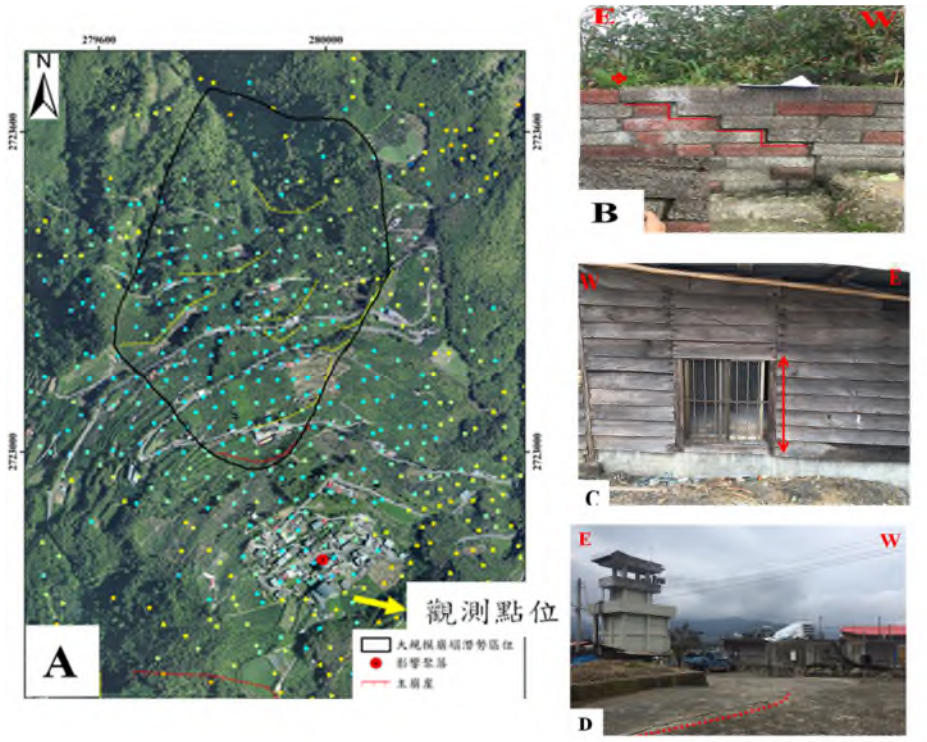


圖 1.39: 新竹縣-尖石鄉-D077 崩塌邊界之野外現調照片 (2016/08/17)

由前期 InSAR 與現地調查結果顯示 (圖1.40A)，位於大規模崩塌側向邊坡路旁排水溝張裂約 5 公分 (圖1.40B)，圖1.40C 則為路面沿著擋土牆延伸呈現數道 3-5 公分的張裂縫隙，圖1.40D 則為路面呈現圓弧型的破壞，延伸 3 公尺。此處野外結果其坡頂處坡度較陡，活動速率也較活躍。

過去地調查狀況，參考 行政院農業委員會水土保持局 2019 及圖1.41

(1) 調查點 3：過去於 105/06/29 觀測到道路上邊坡擋土牆裂縫開口 3～5cm。

(2) 調查點 4：過去於 105/06/29 觀測到道路裂縫開口 1～3cm，且路面朝下邊坡凹陷。

(3) 調查點 5：過去於 105/06/29 觀測到柏油路面開口裂縫 1～2cm，且持續延伸至後方道路轉彎處約 40m。

(4) 調查點 6：過去於 105/06/29 觀測到道路橫向之裂縫開口約 1～2cm，並

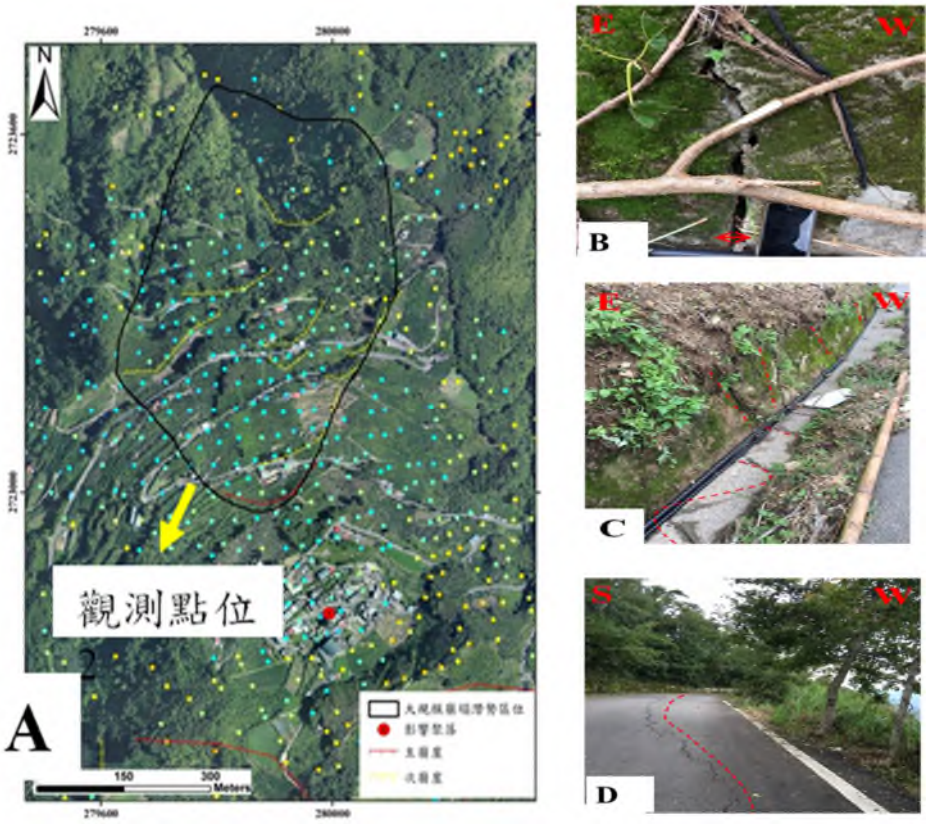


圖 1.40: 新竹縣-尖石鄉-D077 崩塌頂部之野外現調照片 (2016/08/17)

且延伸至上邊坡擋土牆之開口裂縫約 5cm。

參考過去報告書 行政院農業委員會水土保持局臺北分局 2019、行政院農業委員會水土保持局 2019 與 行政院農業委員會水土保持局 2020a 等計畫，針對泰崗地區地質鑽探點、崩塌潛勢特徵處及儀器架設位置進行彙整，所有點位標示於圖1.41中，且相關觀測儀器列於表 1.4 中，列出 3 個地質鑽探點 (17-3W、17-4BW 及 18-3BW)、1 個雨量計 (JS077-R)、6 個 GPS 監測站 (JS077-G1～JS077-G6)、1 個伸縮計 (JS077-E)5 個角反射器 (CR-01～CR-05) 及 6 個現地調查點位，共有 22 個點位，相關資料整理如下

1. 地質鑽探：D077 潛勢崩塌區塊內，目前共有 3 個地質鑽探點 (行政院農業委員會水土保持局臺北分局 2019)，分別如下

(1) 17-3W：水位觀測井，深度 40m，用以掌握 D077 地下水特性。

(2) 17-4BW：傾斜觀測管兼水位井，深度 50m，用以掌握 D077 潛在崩塌之

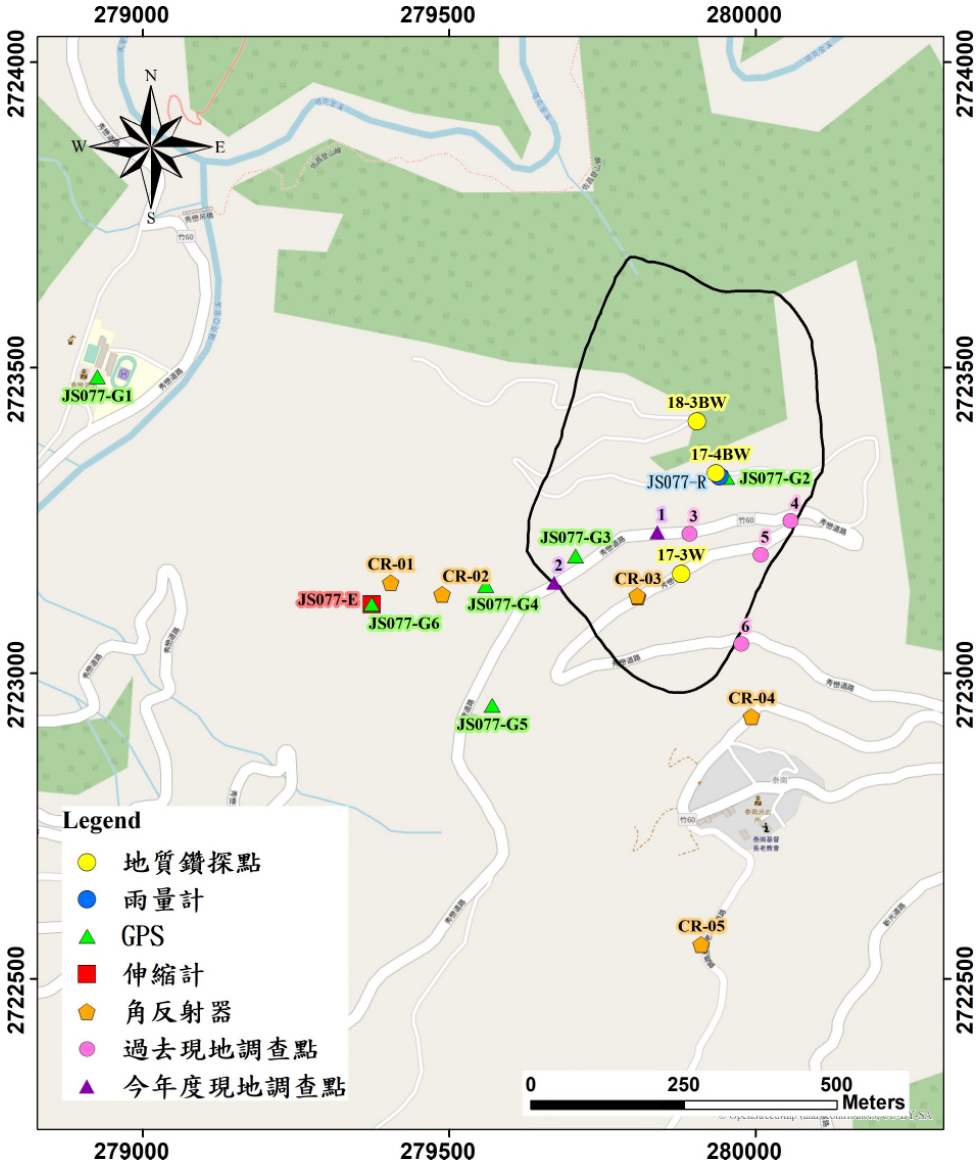


圖 1.41: 新竹縣-尖石鄉-D077 泰崗部落平面圖

活動性。

(3) 18-3BW：傾斜觀測管兼水位井，深度 80m，用以掌握 D077 潛在崩塌之活動性及地下水特性。

2. 本年度現地調查狀況：

本計畫團隊於 110 年 8 月 13 日，至研究區域-D077 新竹縣尖石鄉泰崗部落，進行現場複勘，當日天氣較不穩定，伴隨午後雷陣雨，雨勢不小且約略下午1點左右，路旁低窪處開始積水。本次的現地調查，主要是針對崩塌災害處及相

關觀測儀器進行現場勘查，路線由秀巒國小沿著秀巒道路，以及泰崗道路，觀測至新竹縣政府警察局橫山分局泰崗派出所附近。

圖1.42為角反射器 CR01 之照片，圖1.43為編號 JS077-G6 的 GPS 之照片，圖1.44為角反射器CR02 之照片，圖1.45為編號JS077-G4 的GPS 之照片。圖1.46為調查點 1 所拍攝到道路旁擋土牆的裂縫， 圖1.47為角反射器 CR05 之照片，圖1.48為角反射器 CR04 之照片， 圖1.49為角反射器 CR03 之照片， 圖1.50與圖1.51為調查點 2 所拍攝到沿著泰崗道路的裂縫及損壞狀況。

表 1.4: D077 新竹縣尖石鄉泰崗部落相關觀測儀器及現地調查點，參考行政院農業委員會水土保持局臺北分局 2019

測站	座標 X	座標 Y	觀測儀器及說明
17-3W	279879	2723163	水位觀測井
17-4BW	279936	2723327	傾斜管兼水位井
18-3BW	279905	2723412	傾斜管兼水位井
JS077-R	279941	2723322	雨量計
JS077-G1	278926	2723485	GPS
JS077-G2	279954	2723320	GPS
JS077-G3	279707	2723192	GPS
JS077-G4	279560	2723144	GPS
JS077-G5	279571	2722947	GPS
JS077-G6	279374	2723113	GPS
JS077-E	279374	2723113	伸縮計
CR-01	279405	2723149	角反射器
CR-02	279489	2723129	角反射器
CR-03	279809	2723124	角反射器
CR-04	279995	2722929	角反射器
CR-05	279912	2722556	角反射器
調查點 3	279892	2723228	過去現地調查點
調查點 4	280058	2723249	過去現地調查點
調查點 5	280009	2723194	過去現地調查點
調查點 6	279977	2723048	過去現地調查點
調查點 1	279841	2723230	今年度現地調查點
調查點 2	279672	2723148	今年度現地調查點



圖 1.42: 新竹縣-尖石鄉-D077，現勘照片-角反射器 CR01



圖 1.43: 新竹縣-尖石鄉-D077，現勘照片-GPS 編號 JS077-G6

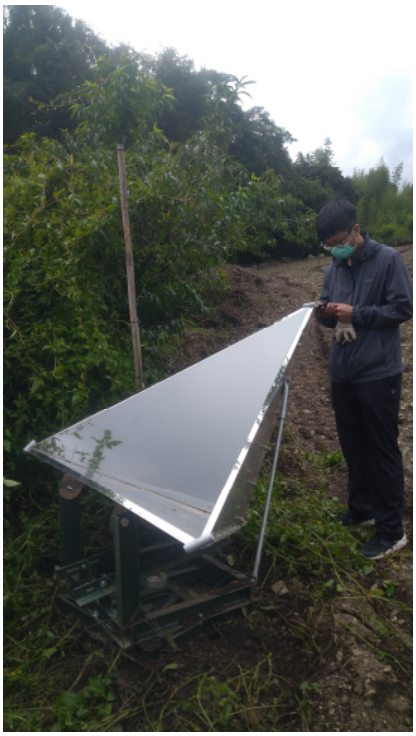


圖 1.44: 新竹縣-尖石鄉-D077，現勘照片-角反射器 CR02



圖 1.45: 新竹縣-尖石鄉-D077，現勘照片-GPS 編號 JS077-G4



圖 1.46: 新竹縣-尖石鄉-D077，現勘照片-調查點1



圖 1.47: 新竹縣-尖石鄉-D077，現勘照片-角反射器 CR05



圖 1.48: 新竹縣-尖石鄉-D077，現勘照片-角反射器 CR04



圖 1.49: 新竹縣-尖石鄉-D077，現勘照片-角反射器 CR03



圖 1.50: 新竹縣-尖石鄉-D077，現勘照片-道路裂縫，為調查點 2 所拍攝到沿著泰崗道路的裂縫及損壞狀況。



圖 1.51: 新竹縣-尖石鄉-D077，現勘照片-道路裂縫及損壞，為調查點 2 所拍攝到沿著泰崗道路的裂縫及損壞狀況。

第二章　彈性錯位模式正向計算

我們首先敘述彈性錯位模式的正向計算 (forward calculation)。由於彈性錯位及其引致的位移均為向量，其解結構複雜然必要，故在本節中，我們將本計畫中所使用到的錯位分量、引致位移及座標轉換等程序，以 Okada (1985) 及 Battaglia 等 (2013) 系統為綱，並將其符號修正符合至本計畫定義來說明，完整的彈性錯位模式則參考前述文獻。

第一節 幾何設定及參數

在彈性錯位模式中，地層假設為半無限域 (semi-infinite domein, $z\leq 0$,圖2.1(a)，在該區域中，材料假設為均值等向性 (homogeneous, isotropic) 材料，而斷層（破壞）面則假設為材料中之一矩形有限平面，如圖中淺藍色平面所示，而在該破壞面上方，由外力（地震或重力破壞）產生一均勻錯位 $\mathbf{s} = (s_d, s_s, s_n)$，而該錯位造成其所處之半無限域地層產生應變，而該應變則假設為彈性變形。在地球物理理學上，各錯動分量分別命名為S_d傾移錯動位移 (dip-slip)，S_s走向錯動位移(strike-slip)，以及S_n張力裂隙位移 (tensile crack)，本計畫中，我們假設山崩所造成的破壞滑移不存在張力裂隙位移，即S_n=0。而此錯位 **s** 引致之地表$\mathbf{x} = (x, y, 0)$ 處位移則為 $\mathbf{d}=(d_x, d_y, d_z)$，其分量分別為對應空間座標軸之位移分量。

而坡體中之破壞面簡化為一長方形有限大小之錯位面，該斷層面的長為 L， 寬是 W， 傾角為 δ， 走向角 θ，而其位置則由該斷層面之上緣的深度為常數 D 及其中點位置$\mathbf{X}_m = (x_m, y_m)$ 來表達，在此，我們稱此七參數

$(L,\ W,\ D,\ \delta,\ \theta, x_m, y_m) \equiv m$ 為破壞面位態參數。而為方便本節對彈性解的描述，我們定義破壞面之上緣走向起點與終點分別為 $\mathbf{X}_i$ 與 $\mathbf{X}_f$，使有 $\mathbf{X}_m = \frac{1}{2}(\mathbf{X}_i + \mathbf{X}_f)$ 之關係，而其下緣走向起點位置為$\mathbf{X}_0$，如圖2.1(a) 所示，而以以上定義之參數，$\mathbf{X}_0$可表示為：

$$\begin{aligned} x_0 &= x_i + W\cos\delta\cos\theta, \\ y_0 &= y_i - W\cos\delta\sin\theta, \\ z_0 &= -D - W\sin\delta, \end{aligned} \tag{2.1}$$

接著定義主座標系統如圖2.1(b) 所示，該座標系統之原點位於$\mathbf{X}_0$上方地表處，而其縱軸y_p平行於破壞面走向，在此主座標系統中，地表位移觀察點$\mathbf{x}$點則成為 $\mathbf{X}_p$：

$$\begin{aligned} x_p &= (x - x_0)\sin\theta + (y - y_0)\cos\theta, \\ y_p &= -(x - x_0)\cos\theta + (y - y_0)\sin\theta, \\ z_p &= 0, \end{aligned} \tag{2.2}$$

以及利用 $\mathbf{X}_p$ 所定義的幾何變數：

$$\begin{aligned} d &= D + W\sin\delta, \\ p &= y_p\cos\delta + d\sin\delta, \\ q &= y_p\sin\delta - d\cos\delta, \\ \tilde{y} &= \eta\cos\delta + q\sin\delta, \\ \tilde{d} &= \eta\sin\delta - q\cos\delta, \\ R^2 &= \xi^2 + \tilde{y}^2 + \tilde{d}^2, \\ X^2 &= \xi^2 + q^2, \end{aligned} \tag{2.3}$$

其中ξ以及稍後引進的η為表示本模式理論解析解所需之虛擬變數 (dummy variable)，這些幾何參數之空間意義可參考 Okada (1992) 一文中之 Fig. 4。

在彈性材料性質的假設下，彈性剪力模量為μ，拉梅第一模量 (Lamé's first parameter) 為λ，泊松比為ν，定義以下材料參數

$$\alpha = \frac{\mu}{\lambda+\mu} = 1-2\nu, \tag{2.4}$$

為一僅與地層材料泊松比有關之常數。

(a) (b)

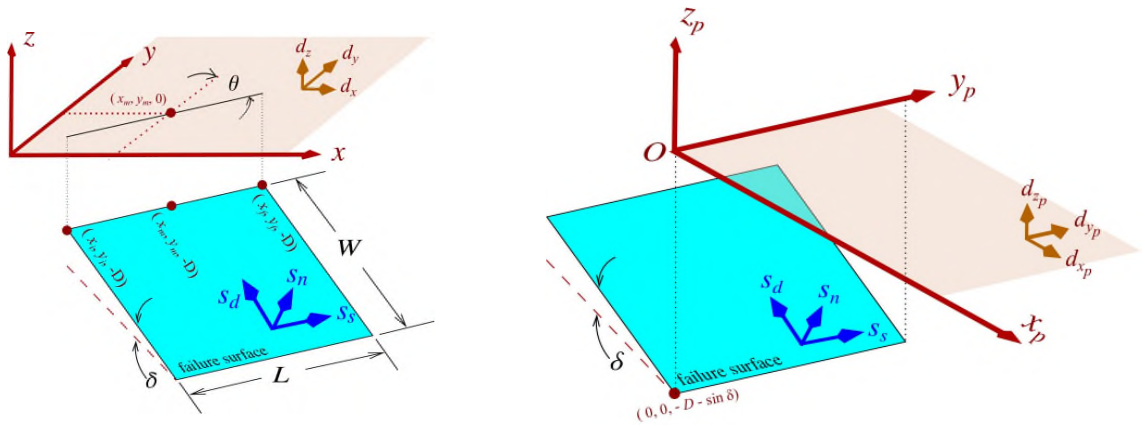


圖 2.1: 半無限域彈性錯位理論示意圖，破壞錯位面為水藍色矩形平面，而在斷層面上有均勻錯位位移量 $\mathbf{s} = (s_d, s_s, s_n)$。其中 (a) 以平面參考座標 (x, y, z) 表示之錯位面，而錯位面位態參數包含長 (W)、寬度 (W) 度，破壞面上緣深度 D，走向角 θ，傾角 δ 位態，以及位置 (x_m, y_m)（或 $\mathbf{X}_i$、$\mathbf{X}_f$），及錯位所引致之地表平面彈性變形 $\mathbf{d} = (d_x, d_y, d_z)$，(b) 以主參考座標 (x_p, y_p, z_p) 所表示之斷層錯位面及其引致之地表平面彈性變形 $\mathbf{d} = (d_{x_p}, d_{y_p}, d_{z_p})$，在主座標系統中，$y_p$ 軸平行於破壞面走向

第二節　單位錯位之基本解

本模式地表位移解析解是由數項基本解之線性疊加組合而成，以下我們將分別描述單位走向錯位基本解與單位傾移錯位基本解。同時由於假設在深層山崩應用中破壞面不存在張力裂隙破壞 $(s_n = 0)$，在此我們忽略張力裂隙破壞基本解。

第一小節 單位走向錯位基本解 (unit elementary strike-slip solution)

由於錯位基本解呈現與錯位位移量之線性乘數關係， 以下為單位走向錯位 $s_s = 1$（Okada 1985 及 Battaglia 等 2013 之 $U_1 = 1$）狀態下，在主座標系統下，

位於 $\mathbf{x}_p$ 之三軸方向之位移基本解：

$$\begin{aligned}
\tilde{g}_{x_p}^{ss} &= -\frac{1}{2\pi}\left(\frac{\xi q}{R(R+\eta)} + \tan^{-1}\frac{\xi\eta}{qR} + I_1 \sin\delta\right), \\
\tilde{g}_{y_p}^{ss} &= -\frac{1}{2\pi}\left(\frac{\tilde{y} q}{R(R+\eta)} + \frac{q\cos\delta}{R+\eta} + I_2 \sin\delta\right), \\
\tilde{g}_{z_p}^{ss} &= -\frac{1}{2\pi}\left(\frac{\tilde{d} q}{R(R+\eta)} + \frac{q\sin\delta}{R+\eta} + I_4 \sin\delta\right),
\end{aligned} \tag{2.5}$$

其中，若變數 $q=0$ 時，則

$$\tilde{g}_{x_p}^{ss} = -\frac{1}{2\pi}\left(\frac{\xi q}{R(R+\eta)} + I_1 \sin\delta\right) \tag{2.6}$$

以上基本解均為 ξ 和 η 之函數，即 $\tilde{g}_{x_p}^{ss} \equiv \tilde{g}_{x_p}^{ss}(\xi,\eta), \tilde{g}_{y_p}^{ss} \equiv \tilde{g}_{y_p}^{ss}(\xi,\eta)$，以及 $\tilde{g}_{z_p}^{ss} \equiv \tilde{g}_{z_p}^{ss}(\xi,\eta)$ 。

第二小節 單位傾移錯位基本解 (unit elementary dip-slip solution)

如同前小節之走向錯位基本解，以下為單位傾移錯位 $s_d=1$ （Okada 1985 及 Battaglia 等 2013 之 $U_2 = 1$）狀態下，在主座標系統下，位於 $\mathbf{x}_p$ 之三軸方向之位移基本解：

$$\begin{aligned}
\tilde{g}_{x_p}^{ds} &= -\frac{1}{2\pi}\left(\frac{q}{R} - I_3 \sin\delta\cos\delta\right), \\
\tilde{g}_{y_p}^{ds} &= -\frac{1}{2\pi}\left(\frac{\tilde{y} q}{R(R+\xi)} + \cos\delta \tan^{-1}\frac{\xi\eta}{qR} + I_1 \sin\delta\cos\delta\right), \\
\tilde{g}_{z_p}^{ds} &= -\frac{1}{2\pi}\left(\frac{\tilde{d} q}{R(R+\xi)} + \sin\delta\tan^{-1}\frac{\xi\eta}{qR} + I_5 \sin\delta\cos\delta\right),
\end{aligned} \tag{2.7}$$

其中，若變數 $q=0$ 時，則

$$\begin{aligned}
\tilde{g}_{y_p}^{ds} &= -\frac{1}{2\pi}\left(\frac{\tilde{y} q}{R(R+\xi)} + I_1 \sin\delta\cos\delta\right) \\
\tilde{g}_{z_p}^{ss} &= -\frac{1}{2\pi}\left(\frac{\tilde{d} q}{R(R+\xi)} + I_5 \sin\delta\cos\delta\right)
\end{aligned} \tag{2.8}$$

同樣地，以上基本解均為 ξ 和 η 之函數，即 $\tilde{g}_{x_p}^{ds} \equiv \tilde{g}_{x_p}^{ds}(\xi,\eta), \tilde{g}_{y_p}^{ds} \equiv \tilde{g}_{y_p}^{ds}(\xi,\eta)$, 以及 $\tilde{g}_{z_p}^{ds} \equiv \tilde{g}_{z_p}^{ds}(\xi,\eta)$ 。

第三小節　基本解輔助函數定義

在前述走向錯位與傾移錯位兩組基本解中，$I_1,\ldots,I_5$ 為輔助函數，其定義如下：

$$
\begin{aligned}
I_1 &= \alpha\left(-\frac{1}{\cos\delta}\frac{\xi}{R+\tilde{d}}\right) - I_5\tan\delta\,, \\
I_2 &= \alpha(-\ln(R+\eta)) - I_3\,, \\
I_3 &= \alpha\left(\frac{1}{\cos\delta}\frac{\tilde{y}}{R+\tilde{d}} - \ln(R+\eta)\right) + I_4\tan\delta\,, \\
I_4 &= \alpha\frac{1}{\cos\delta}(\ln(R+\tilde{d}) - \ln(R+\eta)\sin\delta)\,, \\
I_5 &= \alpha\frac{2}{\cos\delta}\tan^{-1}\left(\frac{\eta(X+q\cos\delta+X(R+X)\sin\delta}{\xi(R+X)\cos\delta}\right)
\end{aligned}
\tag{2.9}
$$

以上輔助函數包含三組奇異條件，當奇異條件發生時，需以下列原則處置：(1) 當 $\xi = 0$ 時，$I_5 = 0$；(2) 當 $R + \eta = 0$ 時，$\ln(R+\eta)$ 需置換為 $-\ln(R+\eta)$；以及 (3) 當 $\cos\delta = 0$ 時，則

$$
\begin{aligned}
I_1 &= -\frac{1}{2}\alpha\frac{\xi q}{(R+\tilde{d})^2}\,, \\
I_3 &= \frac{1}{2}\alpha\left(\frac{\eta}{R+\tilde{d}} + \frac{\tilde{y}q}{(R+\tilde{d})^2} - \ln(R+\eta)\right)\,, \\
I_4 &= -\alpha\frac{q}{R+\tilde{d}}\,, \\
I_5 &= -\alpha\frac{\xi\sin\delta}{R+\tilde{d}}\,,
\end{aligned}
\tag{2.10}
$$

以上基本解同樣為 ξ 和 η 之函數。

第 三 節　單位錯位之完整解

基於前節所述之單位走向錯位及單位傾移錯位基本解，我們可將有限矩形破壞面上之單位走向錯位與單位傾移錯位所造成的地表 $\mathbf{x}_p$ 處之位移分別表示為：

$$\begin{aligned} g_{x_p}^{ss}(x_p,y_p) &= \tilde{g}_{x_p}^{ss}(x_p,p)-\tilde{g}_{x_p}^{ss}(x_p,p-W) \\ &\quad -\tilde{g}_{x_p}^{ss}(x_p-L,p)+\tilde{g}_{x_p}^{ss}(x_p-L,p-W), \\ g_{y_p}^{ss}(x_p,y_p) &= \tilde{g}_{y_p}^{ss}(x_p,p)-\tilde{g}_{y_p}^{ss}(x_p,p-W) \\ &\quad -\tilde{g}_{y_p}^{ss}(x_p-L,p)+\tilde{g}_{y_p}^{ss}(x_p-L,p-W), \\ g_{z_p}^{ss}(x_p,y_p) &= \tilde{g}_{z_p}^{ss}(x_p,p)-\tilde{g}_{z_p}^{ss}(x_p,p-W) \\ &\quad -\tilde{g}_{z_p}^{ss}(x_p-L,p)+\tilde{g}_{z_p}^{ss}(x_p-L,p-W), \end{aligned} \tag{2.11}$$

及

$$\begin{aligned} g_{x_p}^{ds}(x_p,y_p) &= \tilde{g}_{x_p}^{ds}(x_p,p)-\tilde{g}_{x_p}^{ds}(x_p,p-W) \\ &\quad -\tilde{g}_{x_p}^{ds}(x_p-L,p)+\tilde{g}_{x_p}^{ds}(x_p-L,p-W), \\ g_{y_p}^{ds}(x_p,y_p) &= \tilde{g}_{y_p}^{ds}(x_p,p)-\tilde{g}_{y_p}^{ds}(x_p,p-W) \\ &\quad -\tilde{g}_{y_p}^{ds}(x_p-L,p)+\tilde{g}_{y_p}^{ds}(x_p-L,p-W), \\ g_{z_p}^{ds}(x_p,y_p) &= \tilde{g}_{z_p}^{ds}(x_p,p)-\tilde{g}_{z_p}^{ds}(x_p,p-W) \\ &\quad -\tilde{g}_{z_p}^{ds}(x_p-L,p)+\tilde{g}_{z_p}^{ds}(x_p-L,p-W), \end{aligned} \tag{2.12}$$

其中右側基本解之引數 p 則由 y_p 與式 (2.3) 之定義轉換。而以上位移向量定義於主座標系統（圖 2.1b）。

式 (2.11) 及 (2.12) 分別為在給定有限矩形破壞面位態上，單位破壞面走向錯位位移與單位傾移錯位位移時所造成的地表 $\mathbf{x}_p$ 處之位移，而該地表位移是以主座標系統表示，故當破壞面上之錯位為 $\mathbf{s} = s_s, s_d$ 時，其完整表面位移解則可表示為以下矩陣形式：

$$\mathbf{d}_p \equiv \begin{pmatrix} d_{x_p} \\ d_{y_p} \\ d_{z_p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{x_p}^{ss} & g_{x_p}^{ds} \\ g_{y_p}^{ss} & g_{y_p}^{ds} \\ g_{z_p}^{ss} & g_{z_p}^{ds} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_s \\ s_d \end{pmatrix} \tag{2.13}$$

將該位移量 $\mathbf{d}_p$ 乘入走向 θ 的反座標旋轉，該位移則成為原始座標之表面位移：

$$\mathbf{d} \equiv \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\theta & -\cos\theta & 0 \\ \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_{x_p} \\ d_{y_p} \\ d_{z_p} \end{pmatrix} \tag{2.14}$$

將 (2.13) 代入 (2.14) 合併，我們即得以原始空間座標系統 **x** 所表示的位於 **x** 處之地表位移：

$$\mathbf{d} = \begin{pmatrix} g^{ss}_{x_p}\sin\theta - g^{ss}_{y_p}\cos\theta, & g^{ds}_{x_p}\sin\theta - g^{ds}_{y_p}\cos\theta \\ g^{ss}_{x_p}\cos\theta + g^{ss}_{y_p}\sin\theta, & g^{ds}_{x_p}\cos\theta + g^{ds}_{y_p}\sin\theta \\ g^{ss}_{z_p} & g^{ds}_{z_p} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_s \\ s_d \end{pmatrix} \equiv \mathbf{Gs}, \tag{2.15}$$

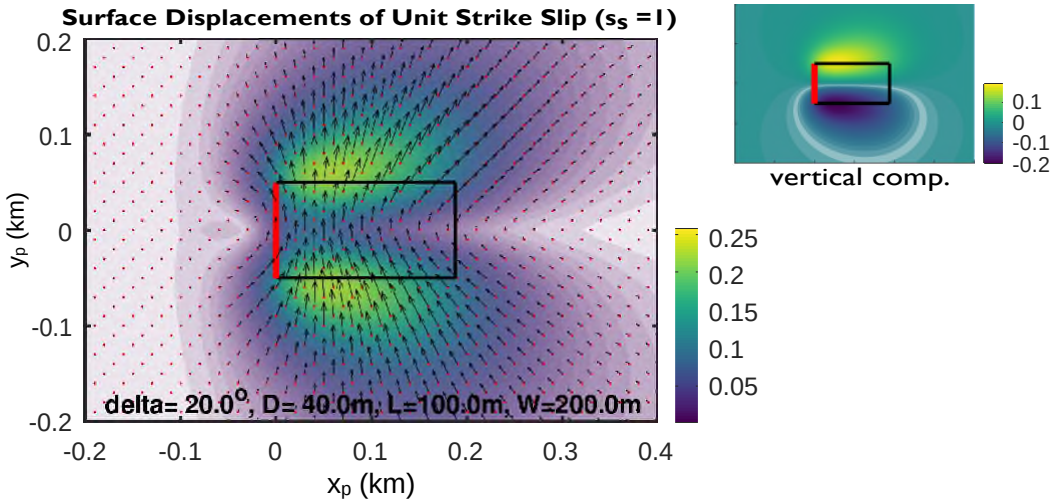
其中 **G** 即為彈性錯位理論之格林函數，其值由破壞面的位態 $\mathbf{m} = (L, W, D, \delta, \theta, x_m, y_m)$ 以及泊松比 ν 來決定，以下視行文狀況，偶爾會將該格林函數以帶引數的符號形式 $G(\mathbf{m}, \nu)$ 來表示。

第四節 已知破壞面之正算結果及討論

本節中我們概述給定破壞面位態下，單位走向及傾移錯位所造成的地表位移，由於具有非零原點位置及走向角的破壞面，其解僅為主座標系統解之平移(2.2)及旋轉走向角而得(2.15)，故為簡化描述，我們以主座標系統之彈性錯位解(x_p, y_p, z_p)來討論，在這條件下，破壞面位態參數僅於四項：L，W，D及δ。在此我們需注意，雖然在(2.15)中，錯位位移與表面位移量之單位看似一致即可，然在線性彈性力學小變形假設下，在山崩實際應用中，變形單位應限制於至多數公分以下。此外，在本節中，我們假設泊松比固定為ν =0.25。

首先我們計算破壞面位態參數為L=100 m, W=200 m, D=40 m 及δ=20°一例，其結果如圖2.2所示，其中(a)、(b)兩子圖分別對應至單位走向錯位(s_s= 1) 及單位傾移錯位(s_d = 1) 所造成之地表位移，就前者而言，我們可見其地表位移對x_p軸呈現反對稱的特徵，而位移極值區分佈在破壞面南北兩側（偏黃色區域），而位移方向則朝破壞面傾斜側偏折，而z_p方向之位移（右側小

(a)



(b)

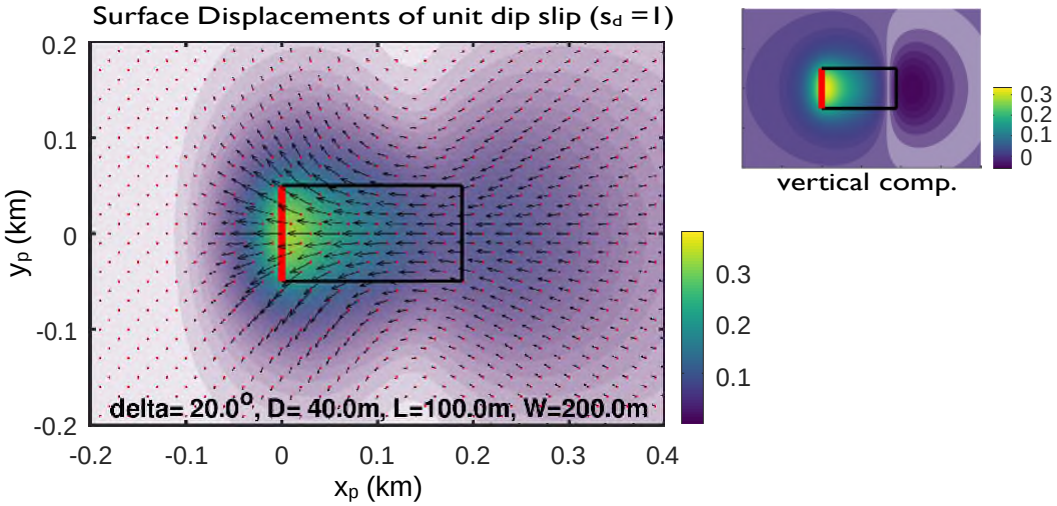
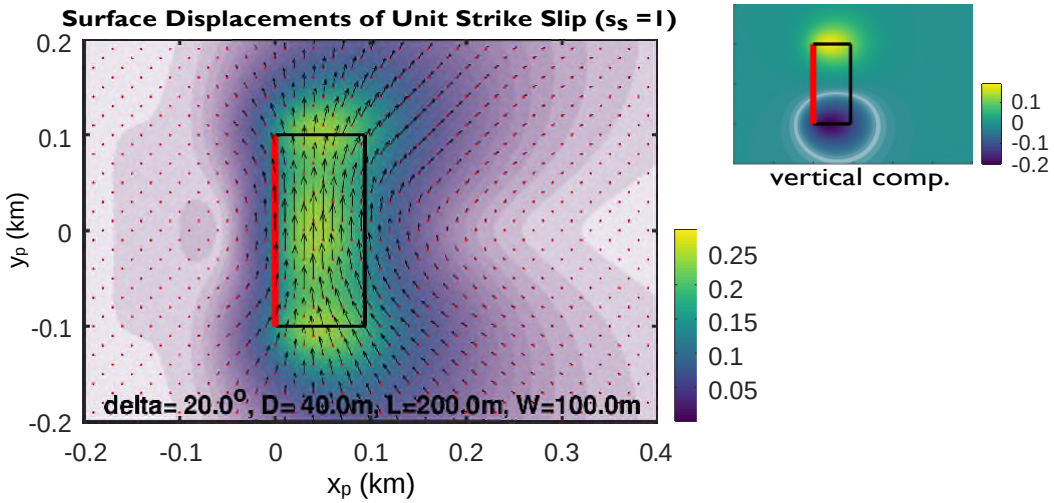


圖 2.2: (a) 主座標系統中破壞面單位走向錯位（$s_s = 1$）引致之表面位移，主圖中箭頭代表 xy 平面位移，底圖色階代表位移大小以及右上嵌圖代表 z 方向位移分量，(b) 破壞面單位傾移錯位（$s_d = 1$）引致之表面位移。圖中長方形代表破壞面於 xy 平面的投影位置，左側為破壞面靠地表處之上緣，本例中破壞面位態參數為 $L = 100$ m，$W = 200$ m，$D = 40$ m，$\delta = 20^\circ$

圖），也呈現對 x_p 軸反對稱狀況，而最大為位移同樣分佈於破壞面之南北兩側；而對後者，其位移場則呈現對 x_p 軸對稱的特徵，其最大位移區位於破壞面上緣（左緣靠地表側），而於破壞面上方，在此低傾角破壞面情況下，位移方向約略平行於給定之傾移錯位方向，並在破壞面上緣側產生偏移的位移過渡區。

其次我們檢視長走向長度之破壞面案例，本例中破壞面位態參數為 $L = 200$

(a)



(b)

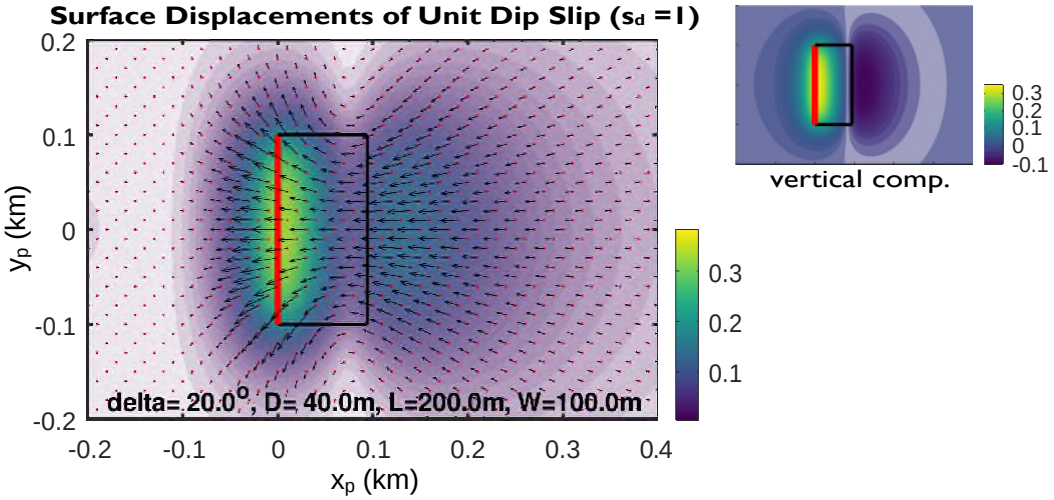
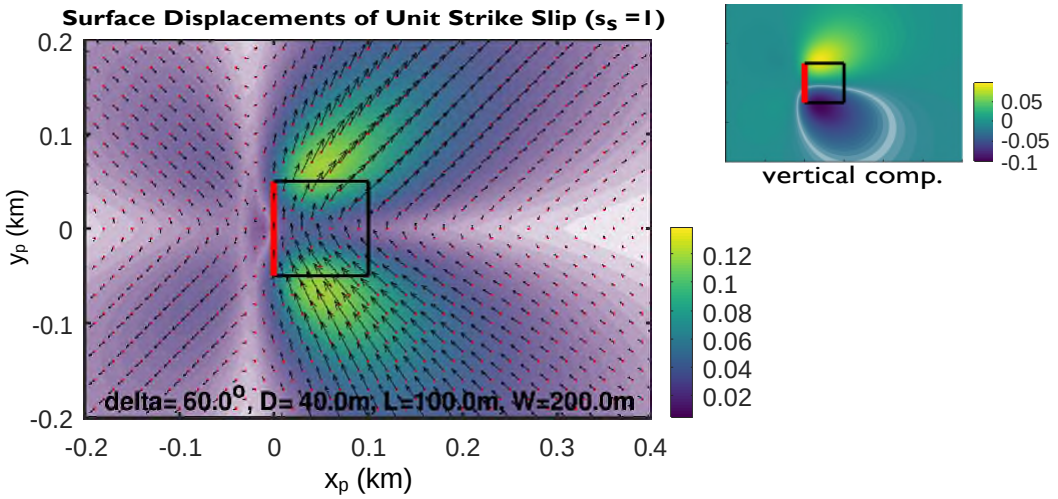


圖 2.3: (a) 主座標系統中破壞面單位走向錯位（$s_s = 1$）引致之表面位移，主圖中箭頭代表 xy 平面位移，底圖色階代表位移大小以及右上嵌圖代表 z 方向位移分量，(b) 破壞面單位傾移錯位（$s_d = 1$）引致之表面位移。圖中長方形代表破壞面於 xy 平面的投影位置，左側為破壞面靠地表處之上緣，本例中破壞面位態參數為 $L = 200$ m，$W = 100$ m，$D = 40$ m，$\delta = 20^\circ$

m, $W = 100$ m, $D = 40$ m 及 $\delta = 20^\circ$，其結果如圖 2.3 所示，對比於前例，本例仍然保有相同的對稱性及最大位移區位置等特徵，而隨者破壞面長度增加，顯著的位移區域亦隨之擴展。

最後檢視一高傾角破壞面案例，本例之破壞面位態參數為 $L = 100$ m, $W = 200$ m, $D = 40$ m 及 $\delta = 60^\circ$，其結果如圖 2.4，就單位走向位移之解

(a)



(b)

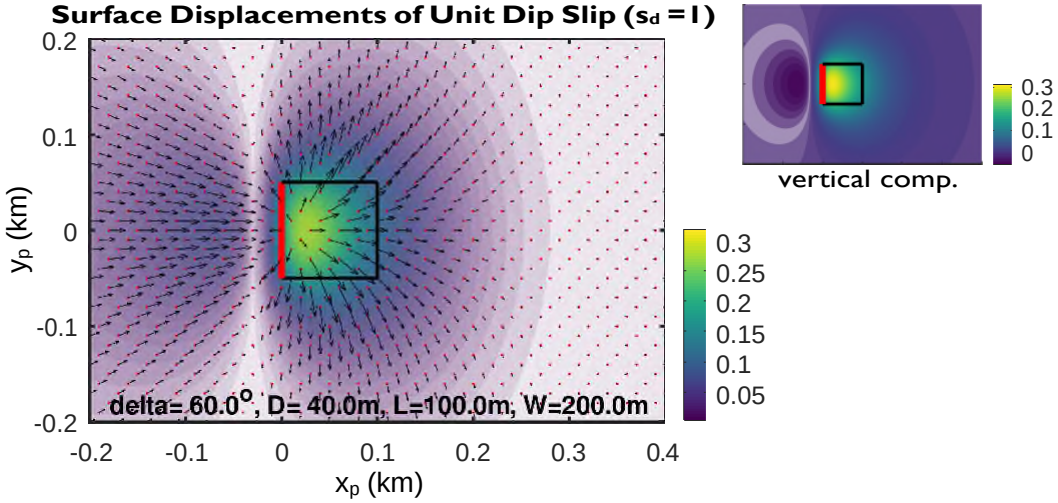


圖 2.4: (a) 主座標系統中破壞面單位走向錯位（$s_s = 1$）引致之表面位移，主圖中箭頭代表 xy 平面位移，底圖色階代表位移大小以及右上嵌圖代表 z 方向位移分量，(b) 破壞面單位傾移錯位（$s_d = 1$）引致之表面位移。圖中長方形代表破壞面於 xy 平面的投影位置，左側為破壞面靠地表處之上緣，本例中破壞面位態參數為 $L = 100$ m，$W = 200$ m，$D = 40$ m，$\delta = 60^\circ$

（圖2.4a），其特徵與前兩例相似，然而單位傾移位移（圖2.4b）之解則產生迥異的結果，由圖中可見在破壞面接近上緣側，有一具有正值 d_{z_p}分量位移但水平位移分量為零的停滯區 $(d_{x_p}, d_{y_p} = \mathbf{0})$，而在其周圍，水平位移方向呈現徑向分佈向四周展開，於是在破壞面下緣側，位移轉為反傾移方向移動，這是半無限域彈性體束制下，在高傾角所產生的現象，其分界傾角在本例長寬深的設定下，

約為 50°。

由於我們的應用目標在於深層山崩，檢視這些案例特徵，我們可建立一些參數搜尋策略，在此討論需稍加引述下一章關於反演的內容來推展，更完整的策略亦將在第4章中在加以詳述。首先是深層山崩發生於坡地，故先定義一傾斜的坡面座標體系，並以此坡面方向為坡面座標系統之 x 軸，如圖4.1所示。而在本座標系統中，該坡地則假設為吻合此座標體系 (x, y) 平面的無限邊坡系統，其次考量在沿坡面方向有較大的延展，故我們約有 $W \gtrapprox L$ 一條件，且破壞面寬度方向約略平行於 x 軸，亦即在坡面座標系統中，走向約略平行於 y 軸，再者依據如 Aryal 等 2015 之概念，破壞面約略平行於坡面，使有 $0 \leq \delta \lessapprox 30^\circ$ 等條件，在以上條件中以及本節所見之正算結果，我們可推估傾移位移是主要的反演依據，於是在下節中，我們將對傾移位移與位態參數的相依性做進一步的探討。

第五節　參數相依性分析

基於前節討論，在深層山崩應用中，傾移位移是主要的反演依據，在本節中我們對傾移位移與破壞面位態參數的相依性進一步的探討。在主座標系統中，破壞面位態參數簡化為四項 (L, W, D, δ)，由於彈性錯位模式為簡單線性系統，我們可以深度 D 為無因次化之特徵長度尺度，進一步將四自由度的位態參數簡化為以下三自由度無因次位態參數 $(L/D, W/D, \delta)$，而給定之傾斜位移則為無因次化之單位傾斜位移 $s_d/D = 1$，為比較的一致化基準，x_p 以破壞面在該軸的投影長度（$D\cos\delta$）來無因次化，在此無因次化條件下，破壞面的地表投影是在$[0, 1]$ 之間，如圖2.5中各子圖之橫軸。

參數相依則以依序掃描一參數區間來探討，對前述三無因次參數，其結果如圖 2.5所示，其中三子圖分別對應至 L/D、W/D 及 δ，圖中對應每一參數值的橫向色階數值，代表於 x_p 軸（$y_p = z_p = 0$）上傾移位移所造成之 x_p 位移分量，即 $d_{x_p,0} \equiv d_{x_p}/_{y_p=0, z_p=0}$，以下分別對此三無因次參數之相依性簡要分析。首先是 L/D 的影響（固定 $W/D = 5$ 及 $\delta = 10^\circ$），由圖2.5(a) 可見，隨

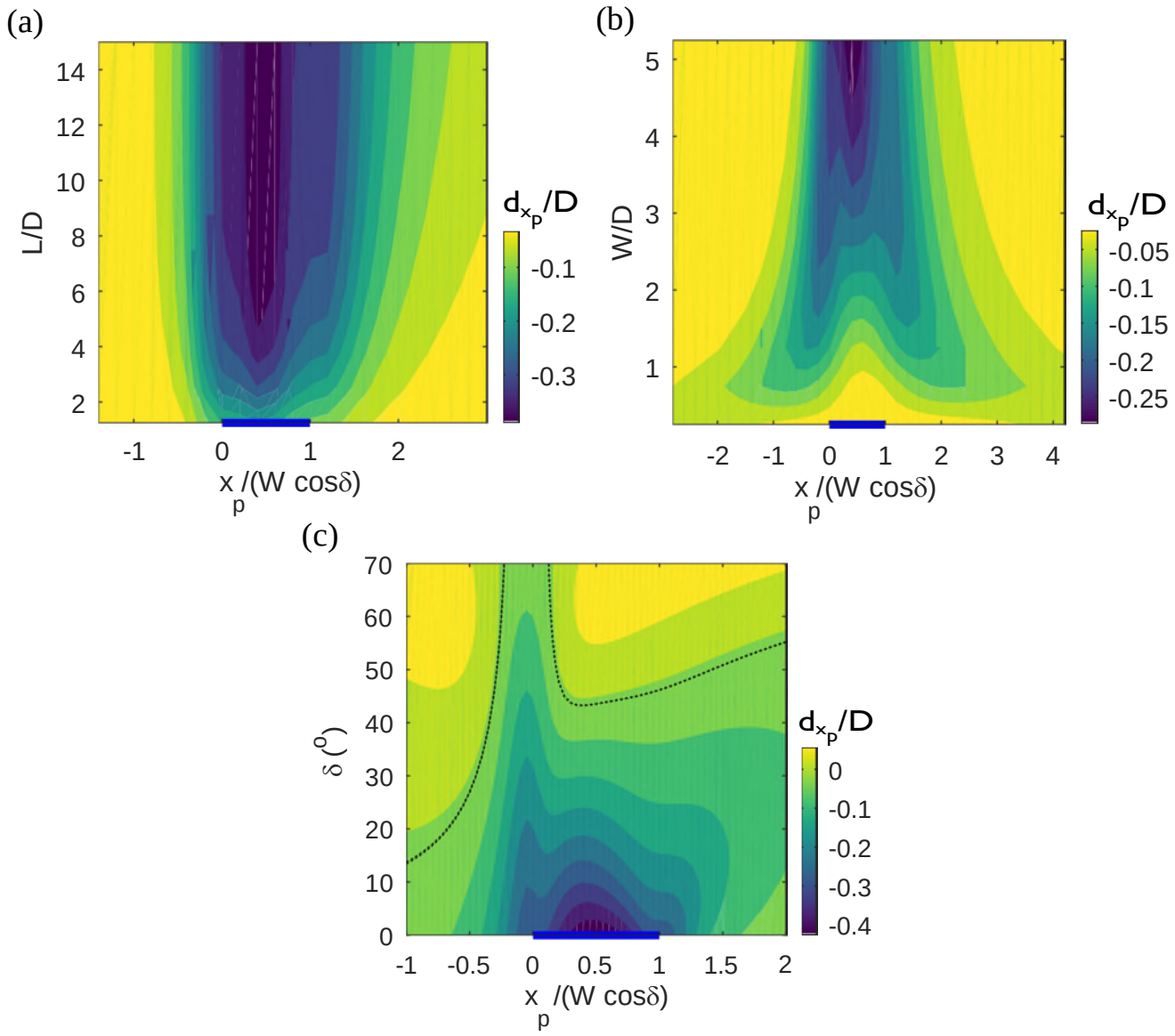


圖 2.5: 無因次化破壞面位態參數影響，圖中位移為 x_p 軸上之 d_{x_p} 分量，由無因次單位位移錯位 $(s_d/D = 1)$ 所引致，(a) 破壞面走向長度（L/D）影響，本例中固定 $W/D = 5$，$\delta = 10^{\circ}$，(b) 破壞面傾移長度（W/D）影響，本例中固定 $L/D = 2.5$，$\delta = 10^{\circ}$，(c) 破壞面傾角（δ）影響，圖中黑虛線代表 $d_{x_p}/(W\cos\delta) = 0$ 之位置，本例中固定 $L/D = 2.5$，$W/D = 5$。破壞面無因次化後之 x_p 座標位於 $[0, 1]$ 之間

著L/D增加，$d_{x_p,0}$ 受影響的區域隨著破壞面長度增加而擴大，最大位移則位於破壞面上方，並趨於飽和（約 $d_{x_p,0}/D \approx -0.38$）。其次是在 $L/D = 2.5$及$\delta = 10^{\circ}$下，W/D 的影響，圖2.5(b)，於圖中可見，當破壞面寬度遠小於深度時（$W/D \ll 1$），其地表變形 $d_{x_p,0}$小，而受影響的位移區域位於遠離破壞面的兩

端，而隨著 W/D 增加，影響區域則逐漸匯集至破壞面上方，並趨於一飽和值。最後是在 $L/D = 2.5$ 及 $W/D = 5$ 下，破壞面傾角 δ 的影響，由圖2.5(c)可知，傾角具有較複雜的效應，一般而言，隨著傾角加大，最大位移位置隨之逐漸移往破壞面上緣，而在參數跨過圖中黑色虛線時，$d_{x_p,0}$ 位移分量發生符號改變。

由以上結果與前節的討論可知，在應用此簡易彈性錯位模式至破壞面位置反演時，由於位移大小可以調整錯位量的大小來擬合而不具決定性，反而反演計算的良窳將倚賴崩塌區及其附近區域整體的表面位移方向分佈型態及大小改變更替的型態來決定，是故對表面位移監測數據的性質分析研判，是破壞面反演作業重要的探討項目。

第三章　InSAR 地表坡面變形

第一節　InSAR 地表位移坡面轉換

InSAR 技術所獲得的地表變形量，為相對於雷達觀測方向 (Line of sight, LOS) 的變形量，與一般傳統測量所獲得的地面資料不同，在全臺為數眾多大規模崩塌潛勢區之地表變形資料複雜，不易解釋。本計畫所提交之地表變形分析結果，皆將由 LOS 轉換為坡面位移方向，以利後續比對分析。由 LOS 方向一維的變形觀測值求解實際的三維變形量，必須要透過增加額外觀測或是先驗假設條件的方法才能進行解算，可分為兩大類方法：多軌道/多平台 InSAR 觀測方法以及先驗模型輔助單軌道 InSAR 解算。

以上兩方法皆基於 InSAR 在衛星視線方向與飛行方向由所量測到的位移數值，與實際地表變形位移（**r**）的關係 (Hu 等 2012) 來架構：

$$\mathbf{R(x) = U(x)r(x)},$$

其中 **x** 為地表位置，**R** 為對應於 **x** 位置之 InSAR 所測得之位移，包含上升及下降軌之視線 (LOS) 及飛行 (Azimuthal) 方向之位移量$R_{LOS,AZI}^{A,D}$，**r** 為在 **x** 處之實際位移，**U** 為 **x** 處之實際位移對應至 InSAR 位移影像之轉換矩陣，上式以分量型態表示，則為

$$\begin{pmatrix} R_{\mathrm{LOS}}^{A} \\ R_{\mathrm{LOS}}^{D} \\ R_{\mathrm{AZI}}^{A} \\ R_{\mathrm{AZI}}^{D} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_{\mathrm{inc}}^{A} - \cos\left(\alpha_{\mathrm{inc}}^{A} - 3\pi/2\right)\sin\theta_{\mathrm{inc}}^{A} & -\sin\left(\alpha_{\mathrm{inc}}^{A} - \frac{3\pi}{2}\right)\sin\theta_{\mathrm{inc}}^{A} \\ \cos\theta_{\mathrm{inc}}^{D} - \cos(\alpha_{\mathrm{inc}}^{D} - 3\pi/2)\sin\theta_{\mathrm{inc}}^{D} & -\sin\left(\alpha_{\mathrm{inc}}^{D} - \frac{3\pi}{2}\right)\sin\theta_{\mathrm{inc}}^{D} \\ 0 & \sin\left(\alpha_{\mathrm{azi}}^{A} - 3\pi/2\right) \quad -\cos\left(\alpha_{\mathrm{azi}}^{A} - 3\pi/2\right) \\ 0 & \sin(\alpha_{\mathrm{azi}}^{D} - 3\pi/2) \quad -\cos(\alpha_{\mathrm{azi}}^{D} - 3\pi/2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_u \\ r_n \\ r_e \end{pmatrix}, \quad (3.1)$$

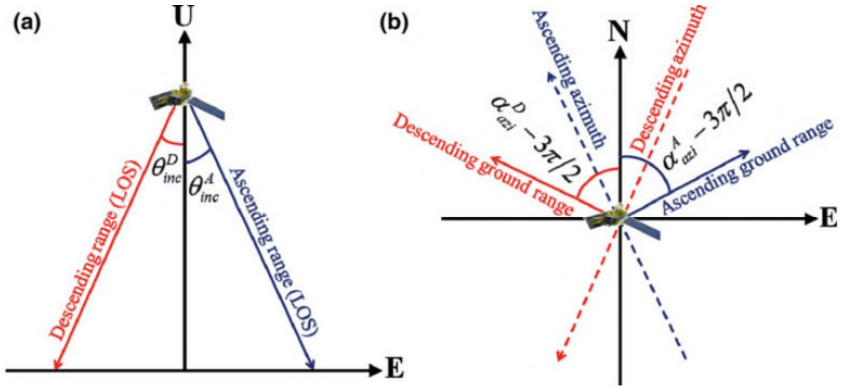


Fig. 2 The imaging geometries of the SAR from ascending and descending orbits: **a** vertical projection, **b** horizontal projection

圖 3.1: 雷達衛星升、降軌飛行姿態三維空間關係圖 (a) 為衛星入射角方向；(b) 衛星飛行方向 (Hu 等 2012)

其中 R^A_{LOS} 為升軌 (Ascending) 的視距方向位移，R^D_{LOS} 為下降軌 (Descending) 的視距方向位移。R^A_{AZI} 為升軌的頂天角方向位移，R^D_{AZI} 為下降軌的頂天角方向位移。實際位移 **r** 的三度空間位移分別如下，r_u 為垂直向位移，r_n 為南北向位移，r_e 為東西向位移。觀察轉換矩陣 **U**，我們可知該矩陣自第一及第二列分別為地表位置 **x** 處指向衛星的上升與下降軌之視線單位向量，而第三與第四列則分別為上升軌與下降軌的飛行方向。

由於 ALOS1 在台灣區僅上升軌影像具有較好的重訪率，在本計畫中，我們僅使用該影像，即式 (3.1) 中之第一分量R^A_{LOS}，在此實際資料來源的客觀限制條件之下，我們有以下 InSAR 視線位移與實際位移之關係

$$R^A_{\mathrm{LOS}} = \mathbf{e}_{\mathrm{LOS}} \cdot \mathbf{r}$$

其中 $\mathbf{e}_{\mathrm{LOS}}$ 為地表指向衛星之單位方向向量 (即轉換矩陣 **U** 之第一列)

$$\mathbf{e}_{\mathrm{LOS}} = \left(-\sin\left(\alpha^{\mathrm{A}}_{\mathrm{inc}} - 3\pi/2\right)\sin\theta^{\mathrm{A}}_{\mathrm{inc}}, -\cos\left(\alpha^{\mathrm{A}}_{\mathrm{inc}} - 3\pi/2\right)\sin\theta^{\mathrm{A}}_{\mathrm{inc}}, \cos\theta^{\mathrm{A}}_{\mathrm{inc}}\right)。$$

在本計畫中，我們僅有 ALOS1 升軌之 TCP InSAR 在 LOS 方向之量，即R^A_{LOS}，並不足以代表地表滑動的真正位移，然而僅憑單一分量影像，也無法利用多軌道/多平台 InSAR 觀測方法在空間上決定其他維度的方向，在這客觀限制下，若要取得地表三維位移量則必須引入位移方向假設，因此我們在此假設地表變形是沿著坡面最陡下坡方向 (steepest descent direction) 移動，假設該方向之地表切

線方向向量為 $\mathbf{e}_{\mathrm{SL}}$，則該位移量可表示為 $\mathbf{r} = -r\mathbf{e}_{\mathrm{SL}}$，而 r 為位移距離，依照本計畫符號慣例，坡面往下坡方向位移時 r 為負值，於是我們有以下關係式：

$$R^{A}_{\mathrm{LOS}} = \mathbf{r} \cdot \mathbf{e}_{\mathrm{LOS}} = -r\mathbf{e}_{\mathrm{SL}} \cdot \mathbf{e}_{\mathrm{LOS}} \ ,$$

而沿坡面向往下之位移量則為

$$r = -\frac{R^{A}_{\mathrm{LOS}}}{\mathbf{e}_{\mathrm{SL}} \cdot \mathbf{e}_{\mathrm{LOS}}} \ , \tag{3.2}$$

同前述定義，往下坡方向位移為負，而我們將上式右手側分母之 $\mathbf{e}_{\mathrm{SL}} \cdot \mathbf{e}_{\mathrm{LOS}}$ 項式稱為 LOS-坡面位移轉換因子。注意若坡面方向與 LOS 方向近乎垂直時，該 LOS-坡面位移轉換因子將趨於零，造成轉換位移量 r 產生奇異值。在目前實務上，除了特殊明言之處，我們將排除$|\mathbf{e}_{\mathrm{SL}} \cdot \mathbf{e}_{\mathrm{LOS}}| \leq 0.05$的區域，以上假設與轉換方法同 Cigna 等 2013; Zhang 等 2018。

以上計算中我們仍須由數值地形求得坡向向量$\mathbf{e}_{\mathrm{SL}}$，此向量可透過地表之法向量$\mathbf{e}_{\mathrm{N}}$求得。假設地形為$z_0 \equiv z_0(x, y)$，則

$$\mathbf{e}_{\mathrm{N}} = \frac{\nabla(z - z_0)}{\|\nabla(z - z_0)\|} \ ,$$

其中 ∇ 為梯度運算子$\left(\partial_x, \partial_y, \partial_z\right)$，直接計算可得

$$\mathbf{e}_{\mathrm{N}} = -c\left(\partial_x z_0, \partial_y z_0, -1\right) , \tag{3.3}$$

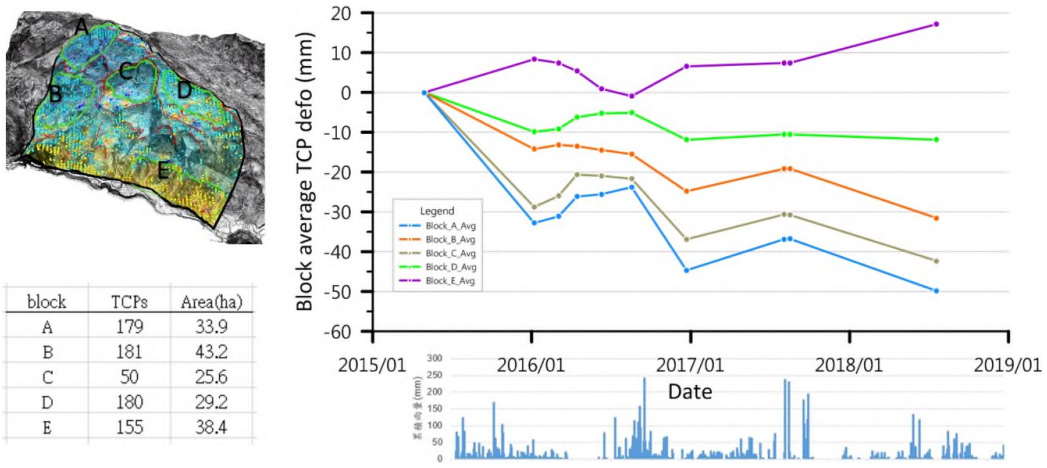
而 c則代表坡面斜率，其值為

$$c = \left(1 + (\partial_x z_0)^2 + \left(\partial_y z_0\right)^2\right)^{-1/2} \ 。$$

而(3.3)式中之 $xy-$ 分量即代表最陡下坡方向在水平面(xy) 上的投影方向，由此我們可得最陡下坡方向之坡面方向單位向量為

$$\mathbf{e}_{\mathrm{SL}} = -\frac{1}{\sqrt{1-c^2}}(c^2\partial_x z_0, c^2\partial_x z_0, 1 - c^2)。 \tag{3.4}$$

最後在實務方面，以上關於最陡下坡方向的計算會受所謂微地形顯著的干擾，亦即地表若有與數值地形解析度相近的地表高程變化，其法向量及其坡向



block	TCPs	Area(ha)
A	179	33.9
B	181	43.2
C	50	25.6
D	180	29.2
E	155	38.4

圖 3.2: 分區分塊時序變形特性分析

向量將透過(3.3)及(3.4)式中的微分彰顯出來，為降低此一微地形的敏感性，我們在執行方向向量計算前，以二維低通濾波器 (2-D low pass filter)，先將高波數（短波長）的地形變化，亦即隨空間變化快速的微地形濾除，而只要這一波長長度門檻足夠大於數值地形解析度，即可達成此一目的，經驗上只要滿足此一門檻，則坡向位移轉換結果均呈現良好均一性，故目前作業中，我們設定濾波波長門檻為深層山崩區短軸的長度。

最後，由於彈性錯位模式是建構於理想半無限域等向均勻彈性體中解析形式的格林函數之上 (見第2章)，而同時也將彈性錯位模式之地下錯位斷層假設為單一之山崩破壞面，在這些簡化條件下及後續破壞面反演所需，我們需定義一坡面座標系統，而將TCP-InSAR資料點為與坡面位移向量進行轉換至該座標系統，在此，本坡面座標系統是以潛勢崩塌區域邊界內平均坡度所定義出來的，記為 (x, y, z)，其中 x 為坡降方向 (dip direction)，y 為該坡面走向 (strike)，z 則為垂直於坡面方向，詳細圖示請見第 4章第1節。

第二節 多時序雷達衛星影像地表變形量分析

多時序合成孔徑雷達干涉技術 (Multi-temperal InSAR, MT-InSAR) 為克服傳統的 InSAR 技術受限於兩幅雷達衛星影像成像期間的時間間隔、地表差異變化及氣象條件等，對同一地區所獲取的多時序 SAR 數據進行處理和分析，數據處理的

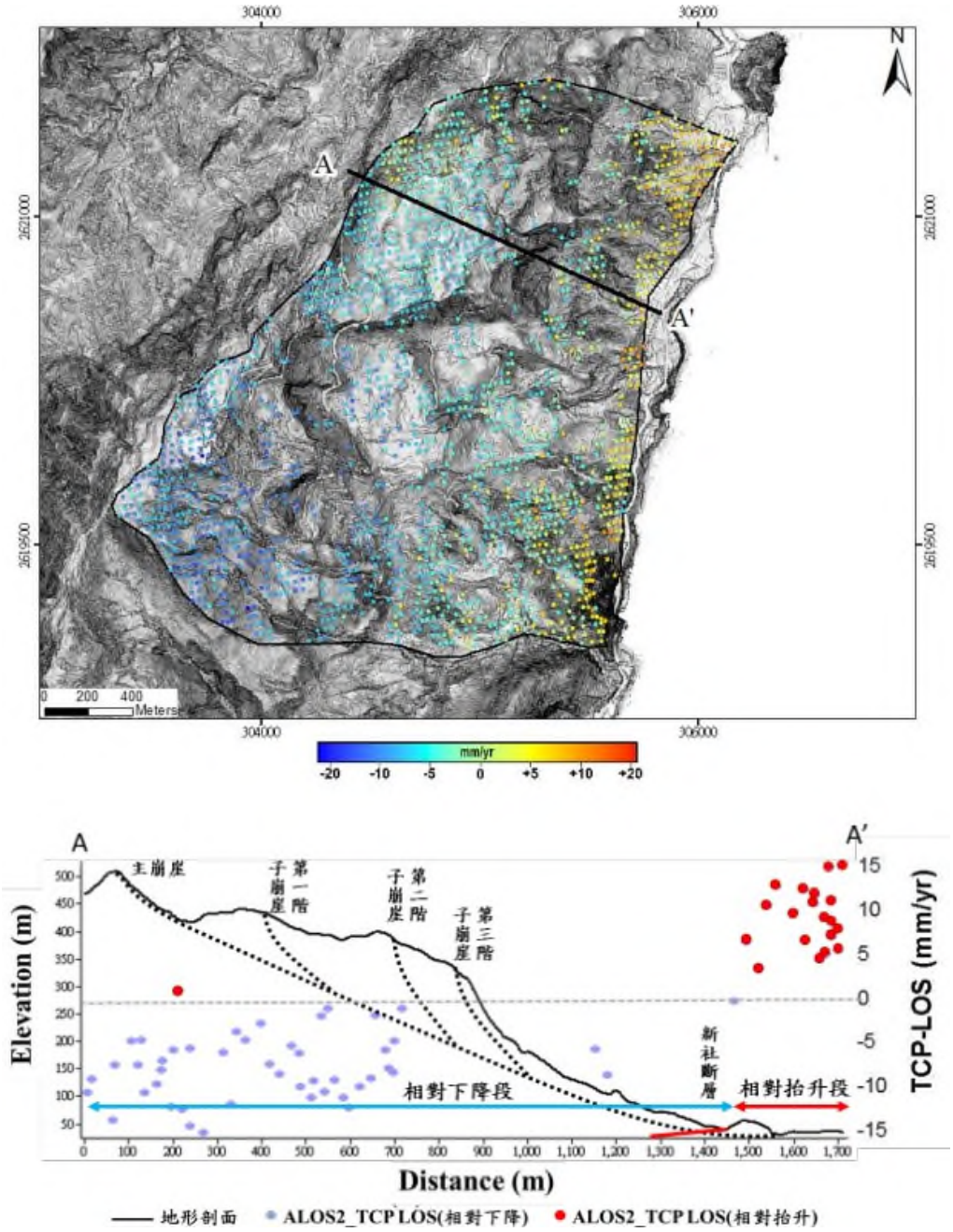


圖 3.3: 花蓮縣-豐濱鄉-D001 地表變形及剖面成果

焦點集中於被探測出來的具有穩定雷達波散射特性的目標上，這些目標可在數年甚至更長的時間內保持穩定的雷達後向散射特性，在SAR影像上表現為具有高同調性的像元。在這一技術中，參與計算的 SAR 影像集即為SAR影像時間序列，所探測出來的高同調性像元為TCP (Time Coherent Point) 點。TCP與傳統的 PS 探測方法不同，在一幅或多幅干涉圖中，在某時間段內雷達回波的同調性保持穩定的地面目標點，其中在所有干涉圖中保持穩定相關的點可視為永久性

散射體 (Permanent Scatterer, PS)，而只出現在部分干涉圖中的則被稱為分佈式散射體 (Distributed Scatter, DS)。利用此一技術，可監測長時間多期的地表變形位移時序。

本計畫將引用MT-InSAR在 D066 及 D077 兩處邊坡的多期位移時序資料，作為彈性錯位理論破壞面反演策略選擇之一，重點在探討可否藉由多期位移資料，來提昇破壞面反演的可信度。在多期資料中，以第1幅影像對時間段之解算資料視為初始參考資料，並對其後每一時間序列所解算之變形量則依序進行累加，以獲取崩塌區位內不同時間之累積地表變形。本計畫採用的資料為2007-2011年間ALOS 雷達所獲取之衛星影像。

第三節 分區分塊多時序變形特性分析評估

利用空載光達高精度數值地形清楚顯示崩塌地形，相較於傳統崩塌判釋圈繪方法更易於辨識，但無法顯示崩塌塊體活動性，因此借助 TCP-InSAR 坡面位移分析結果，更有助於釐清整體崩塌坡面活動情況與崩塌分區分塊之判釋。以花蓮縣-豐濱鄉-D001為例，高精度數值地形判釋顯示坡面主要有 3 個主崩崖滑動體，多時序 InSAR 活動性分析結果顯示活動情況是坡頂及坡腹下滑為主，而坡趾則為抬升為主，反應趾部崩塌活動由緩下滑轉為停止 (圖3.2)。而 TCP 沉降點分佈區位皆在坡頂至坡腹區位，整體坡面沉降位移較大的區位位於崩塌內部主崩崖面滑動體滑動體及第一階子崩崖滑動體最為活躍，且是長期活動性較高之區位，與高精度數值地形判釋之分區分塊範圍判釋成果相符 (圖3.3)，顯示高精度數值地形判釋之分區分塊與 TCP-InSAR 坡面位移結果可相互比對及進行檢核。

第四節 地表位移統計叢集分析

在圖3.2及3.3中潛勢山崩區之 TCP-InSAR 位移資料點可約見這些位移具有一些分佈樣態，而這些分佈極可能與崩塌區分區塊體滑移相關，基於此假設，藉由一客觀資料分群演算來進行TCP-InSAR點位資料分群，並探究這些分群與各崩塌分區間相關性，則為一重要研究議題，並可為彈性錯位模式破壞面反演提供反演計算束制條件。為方便數學描述，在本節中我們採用統計分析慣用的符號系統。

在資料分群演算中，我們忽略物理力學機制，而僅假設這些 TCP-InSAR 資料點位與位移量符合高斯隨機程序，由於有位置（坡面座標 x, y 兩分量）及位移量等三隨機變數，需考慮多變量模型，故利用統計模型中的高斯混合模型 (Gaussian Mixture Model) 來進行分群計算，該方法也歸類為一種非監度式機器學習演算法 (unsupervised machine learning)，而所謂的高斯混合模型為單一高斯機率密度函數模型的多變量推廣，在此我們採用 McLachlan、Basford 1988 所提出的兩個或兩個以上的高斯分配之線性組合來判定來自不同群組的資料，在該高斯混合模型中，令隨機變數 $x = (x_1, \cdots x_n)$ 為 n 點的資料，每點有 d 個維度，而此資料則來自於 K 組分群的不同 d 維高斯分配，其中第 j 群資料為來自 $f_i(x) = f(x|\mu_j, \Sigma_j)$ 高斯分配，$\mu_j = (\mu_1, \cdots, \mu_d)$ 為該分配的中心點的位置，Σ_j 為共變異矩陣。

接下來，令 π_j 為資料點第 j 群的比率 (事前機率)，則資料的聯合機率密度可表示為

$$f(x) = \prod_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{K} \pi_j f_j(x_i) = \prod_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{K} \pi_j f(x_i|\mu_j, \Sigma_j) \tag{3.5}$$

在此以 $\theta_i = (\pi_i, \mu_i, \Sigma_i)$ 代表每群各自的參數，而 $\theta = (\theta_1, \cdots, \theta_K)$ 為此高斯混合模型的所有參數，則此問題的對數概似函數 (log-likelihood function) 為

$$\log L(\theta) = \sum_{i=1}^{n} \log \sum_{j=1}^{K} \pi_j f_i(x_i) = \sum_{i=1}^{n} \log \sum_{j=1}^{K} \pi_j f(x_i|\mu_j, \Sigma_j) \tag{3.6}$$

在給定資料下，我們目標為找出此對數概似函數參數最大化的最佳參數估計式 (Maximum likelihood estimator)：

$$\hat{\theta} = \arg\max_{\theta} \log L(\theta) \text{ 。} \tag{3.7}$$

此問題的求解並不容易，除了一般的最佳化的方法外，我們利用期望最大化法 (expectation-maximization)，或稱 EM 演算法(Dempster 等 1977)來求算 θ 的最大

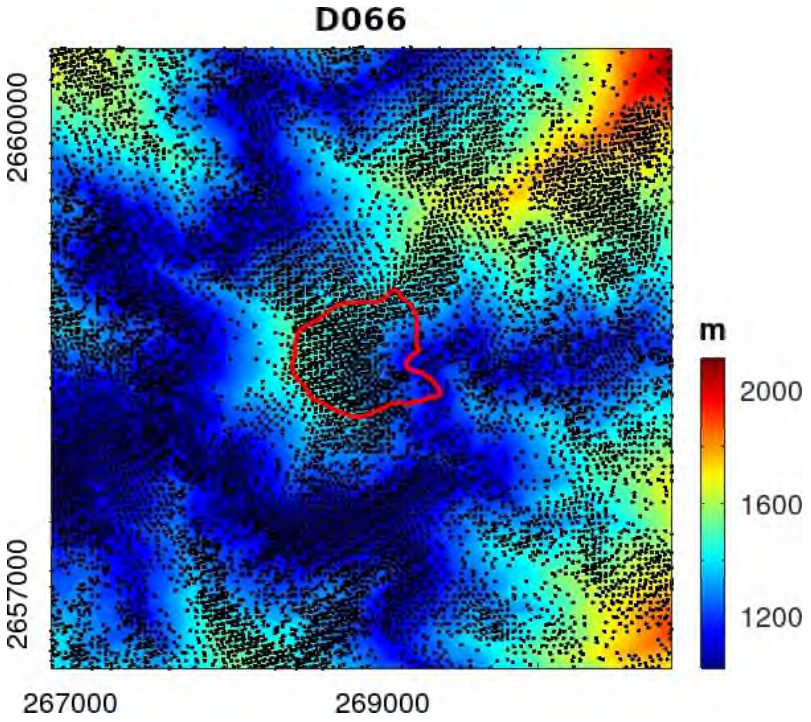


圖 3.4: 南投縣-仁愛鄉-D066 地區地形圖及 TCP-InSAR 點位

概似函數參數，在求得最大概似函數估計值後，我們以 π 的最大概似函數估計為資料分群的標準，也就是將資料歸屬到後驗機率最大的分群：

$$C(x_i) = j \quad \text{where } j = \max_j \{\hat{\pi}_1(x_i), \cdots, \hat{\pi}_K(x_i)\} \tag{3.8}$$

此方法與常用的 Kmeans 分群方法不同處是在此我們以機率模型來描述資料，此模型允許資料有各自的中心點與共變異矩陣。

應用此方法進行本計畫的 TCP-InSAR 資料分群時，資料為三維（$d=3$）的數據，即隨機變數 $x \equiv (x_1, x_2, x_3)$，其中 x_1 與 x_2 是資料點坡面座標系統中之 $xy-$ 平面座標位置，而 x_3 是該位置上 TCP-InSAR 所得之位移量。而分群組數則以貝氏信息量準則 (Bayesian Information Criterion, BIC) 來決定，該準則為常用有限模型之適配指標，是最大概似函數與模型參數及樣本量的組合，當該數值越小時，則模型適配越佳。在以下兩節中，我們分別以 D066 及 D077 ALOS1 2007~2011 升軌影像所得之平均變形速率為例來說明 TCP-InSAR 資料分群結果。

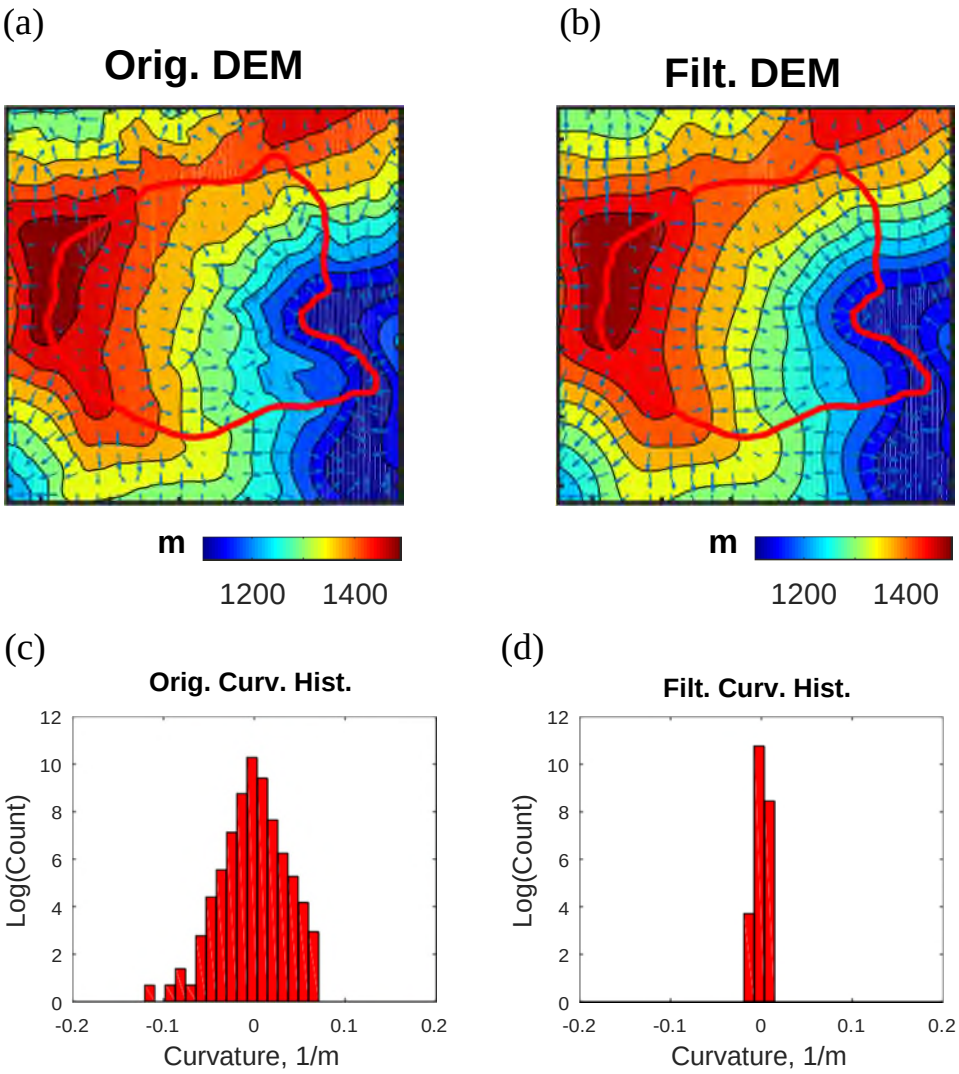


圖 3.5: 南投縣仁愛鄉 D066 地區 (a) 未空間濾波之地形圖及坡向，(b) 空間濾波後之地形圖及坡向，(c) 未空間濾波之地形平均曲率直方圖，(d) 空間濾波後之地形平均曲率直方圖

第五節 D066 TCP-InSAR 坡面位移轉換及資料分群分析

在本節與下一節中，我們以 2007 到 2011 年 ALOS1 上升軌影像所量測而得的 TCP-InSAR 平均位移率 (deformation rate) 來說明衛星視線 (LOS) 位移量轉坡面位移量的計算，以及轉換坡面座標後之分群分析，由於 TCP-InSAR 測量為擬靜態過程，在此我們不細分位移率 (deformation rate) 或位移 (deformation)，而所有提及之『位移』均指『單位時間』所發生之位移量，如於第 1 章第 3 節所提及之前題條件。以下我們分別以南投縣仁愛鄉 D066及新竹線尖石鄉 D077 為例說

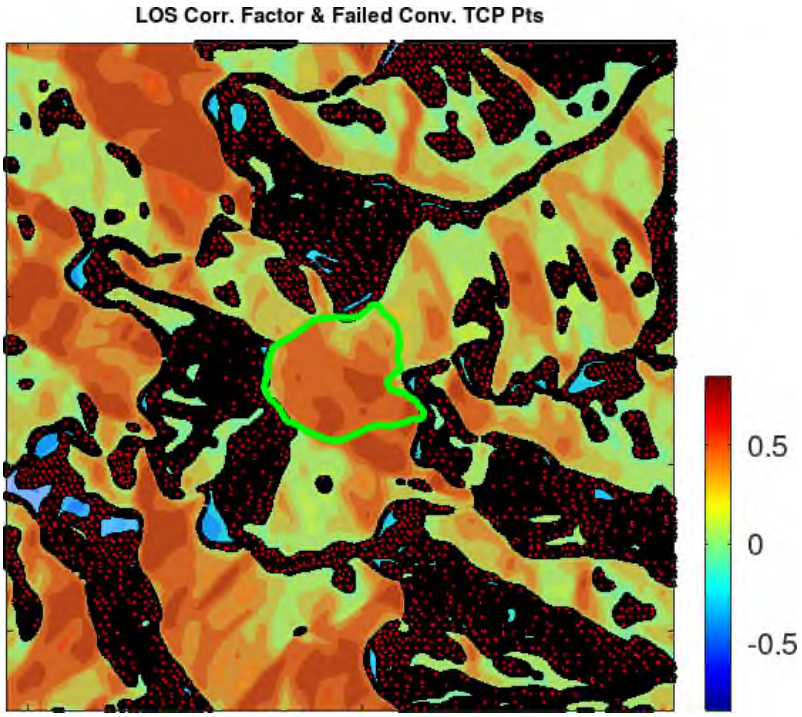


圖 3.6: 南投縣仁愛鄉 D066 地區 LOS-坡面位移轉換因子 $-(\mathbf{e}_{SL} \cdot \mathbf{e}_{LOS})$ 分佈，見 (3.2) 及轉換奇異區（$|\mathbf{e}_{SL} \cdot \mathbf{e}_{LOS}| \leq 0.2$，黑色區域位置），紅實點代表位於轉換奇異區中被排除之 TCP-InSAR 資料點，綠色實線為 D066 崩塌區

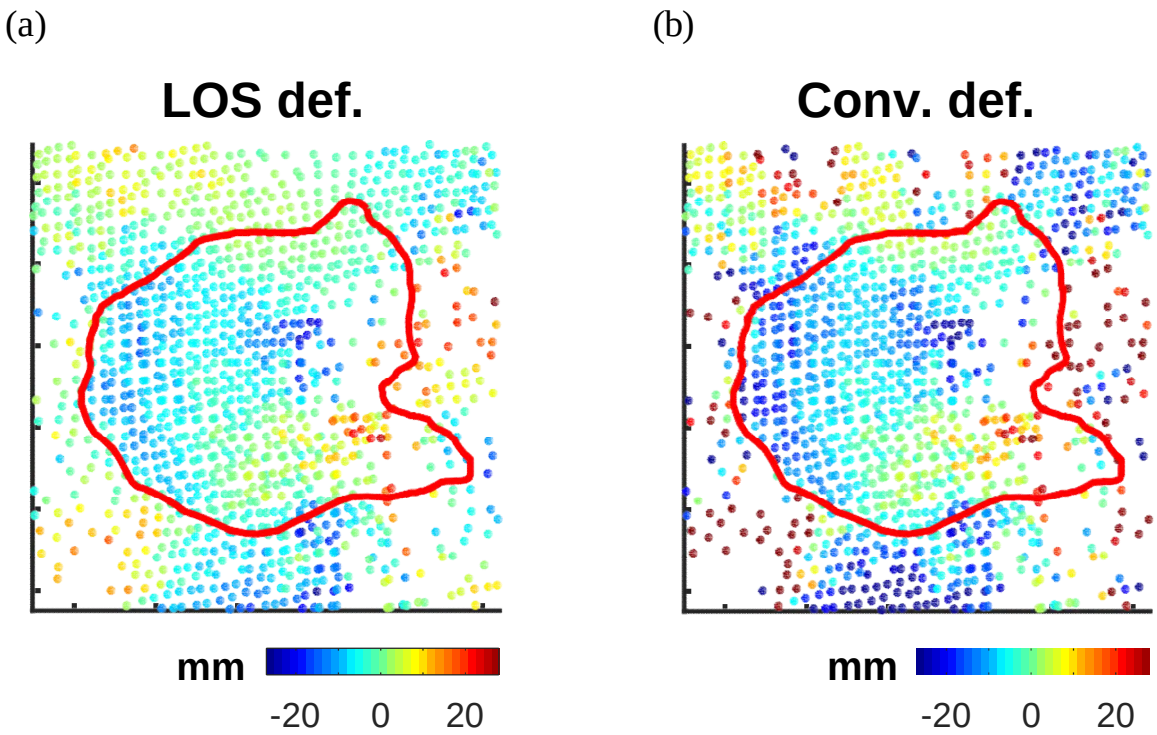


圖 3.7: 南投縣-仁愛鄉-D066 LOS (R^{A}_{LOS}) 及坡面轉換後之地表變形 (r)，(a) LOS 位移，(b) 坡面位移

明。

首先是南投縣仁愛鄉 D066 崩塌區，如圖3.4 所繪，該潛勢區崩塌區為圖中紅實線所框示，而 TCP-InSAR 衛星影像計算所得之時間相關資料點位如於本圖中之黑色散點，而每一點位上，均有一LOS 位移量，由於 InSAR 為一廣域位移測量技術，於本圖中約 2×2 km^2 的區域中，可見有超越 10,000 組資料點。

接著是進行如本章第1節所述之微地形濾除，其結果如圖 3.5所示，該圖 (a) 子圖所繪為原始之地形，為 5×5 m 之數值地形，箭頭代表則代表該位置（箭頭根部）之坡向，經過地形低通濾波之後地形則如子圖 (b) 所示，比較兩子圖之坡向分佈可見濾波後之地形呈現較平滑的坡向及坡向轉折，而子圖 (c) 與 (d) 則分別為濾波前後每一數值地形網格點上之平均曲率之直方圖分佈，由圖中清晰可見本低通濾波有效地移除高地表曲率的微地形特徵。

在單一升（降）軌位 InSAR 影像中，由於位移轉換束制條件不足，故我們提出位移是沿區域坡向方向位移的閉合條件，如本章第1節所述，在此條件下，坡面向位移量則如式3.2所示，為 LOS 位移除以一坡面與視線方向的內積因子 $-(\mathbf{e}_{SL} \cdot \mathbf{e}_{LOS})$，而該因子在坡向與衛星視線方向近乎垂直時，該因子於零而造成位移轉換奇異值，在此情況下坡面向位移轉換將失效，為了解該因子及其奇異區在本例中之分佈，我們將該因子繪於圖3.6中，其中黑色區域是假設 $|\mathbf{e}_{SL} \cdot \mathbf{e}_{LOS}| < 0.2$ 的區域，在本例 ALOS 升軌影像中，奇異區約略處於西向坡面區。

將坡向轉換因子除入 LOS 位移後，我們於圖3.7 中比較 LOS 位移與坡面向位移，由於其坡向朝東，且其轉換因子為正號小於 1 之值，因此該邊坡之 TCP-InSAR 位移值為之放大。依照本計畫符號慣例，該位移量若為正值 (暖色系) 代表地表位移為朝向衛星方向 (LOS) 之位移，在坡向朝東狀態大致為抬升， 而負值 (冷色系) 為遠離衛星，大致為下降 (圖3.7a)。經過坡面向轉換後，地表位移量由 LOS 方向轉換至坡面方向時，其下降值仍表示為負值，而位移量在本例中明顯增加，以坡冠地區為例 LOS 方向之地表位移量約為 −10 mm/yr，而轉換後可達約 −20 mm/yr。

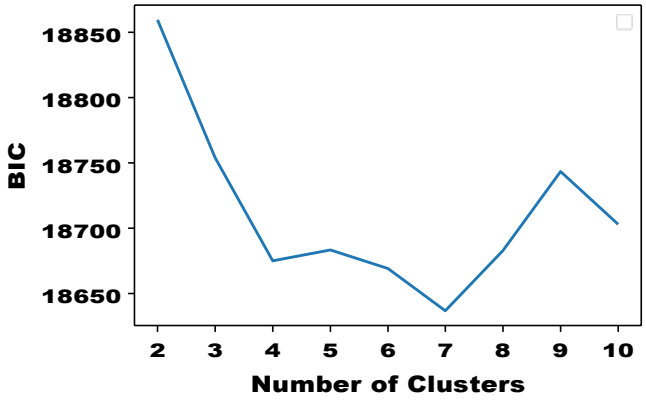


圖 3.8: 南投縣仁愛鄉 D066 潛勢崩塌區中 TCP-InSAR 資料分群數與貝氏信息量準則

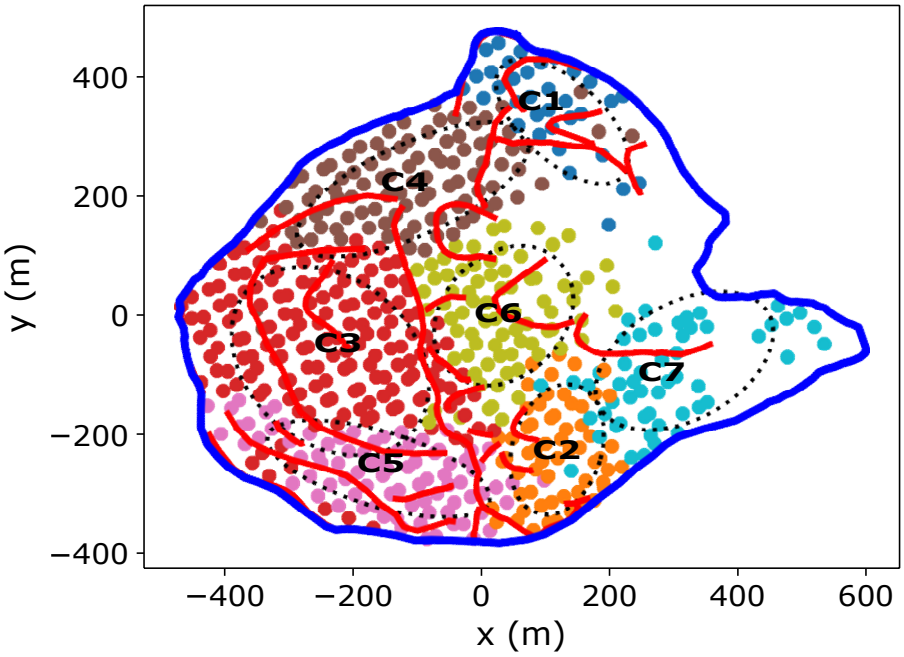


圖 3.9: 南投縣仁愛鄉 D066 潛勢崩塌區中 TCP-InSAR 資料分群，紅實線代表崩塌區中顯著地表裂隙，黑橢圓虛線代表分群資料之特徵空間分佈

接著我們利用前節所述之資料統計分群技術來分析這些坡面向位移資料點的分群特性，首先是去除離群位移，並以貝氏信息量準則來判斷最佳分群數，如圖 3.8 所示，該圖橫軸為假設分群的數目，而縱軸為對應分群量下的信息量，依照該信息量準則判斷標準，最適分群組數為七組。

經過七組分群計算後，坡面向位移分群分佈如圖 3.9所示，本圖採用坡面座

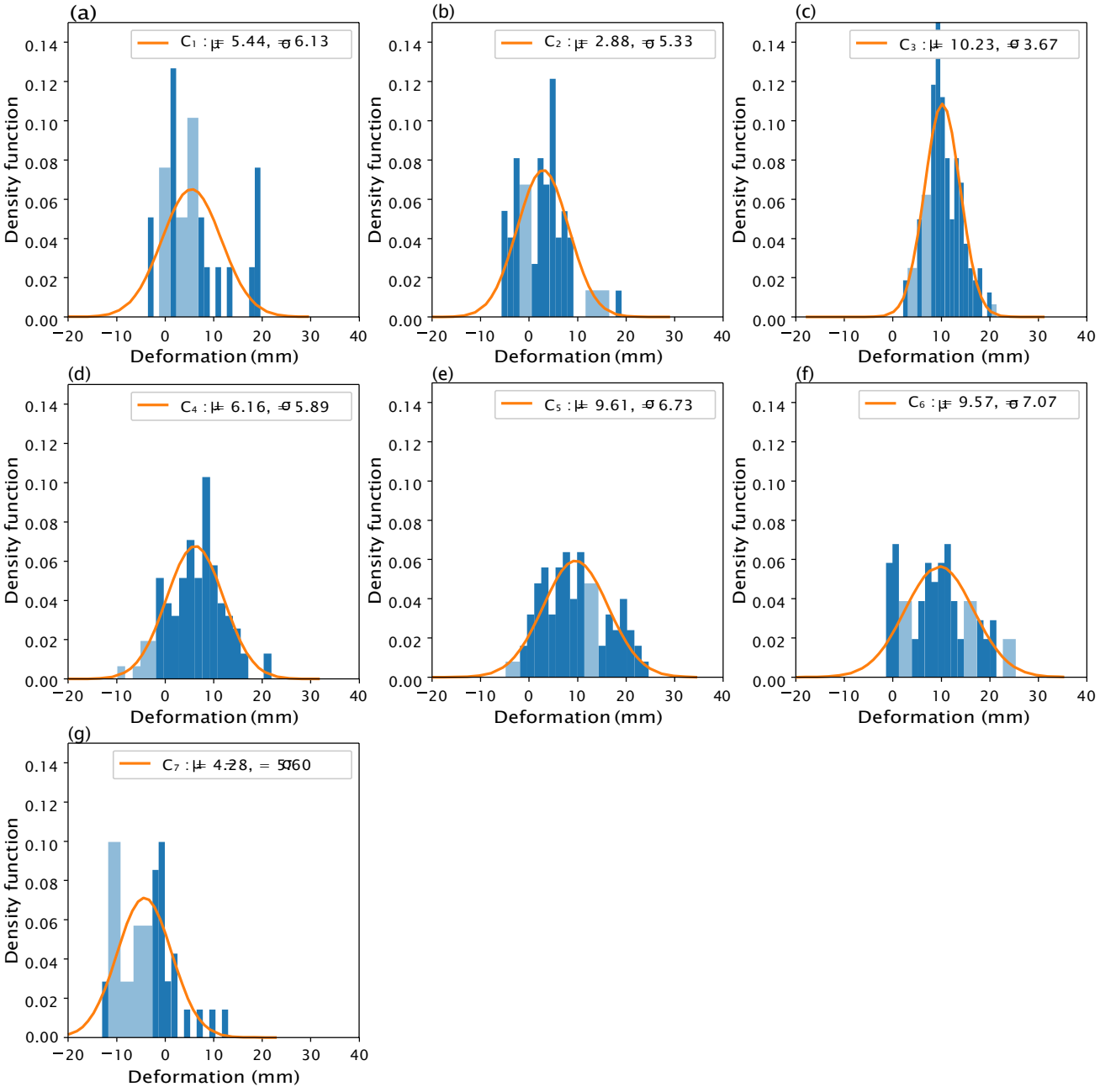


圖 3.10: 南投縣仁愛鄉 D066 潛勢崩塌區中 TCP-InSAR 資料分群中各群之正規化位移分佈直方圖及函數，(a)~(g) 分別代表第一群 C_1 至第七群 C_7 之結果

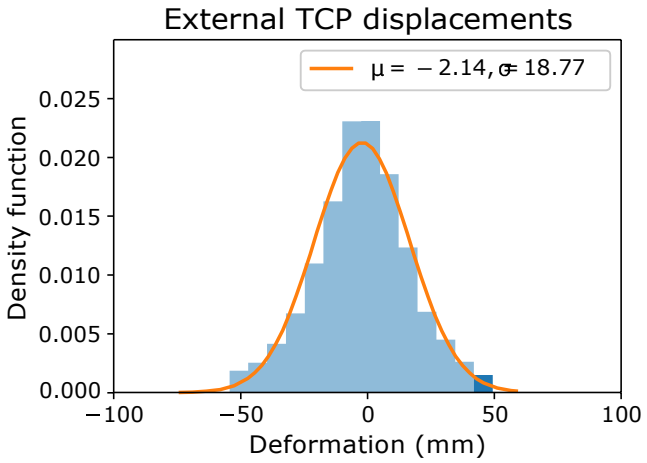


圖 3.11: 南投縣仁愛鄉 D066 潛勢崩塌區外部兩公里範圍之正規化位移分佈直方圖及函數

標系統，即 x 軸為指向坡面下降之方向，於圖中我們同時標註崩塌區中之顯著地表裂隙，對比兩組資料可發現本例中之位移分群近似呼應地表裂隙型態，假 設這些分群具有潛勢山崩之分區運移特性，則值得進一步萃取這些位移量之 分群特性，首先是各群空間分佈之特徵長寬尺度，我們利用離散點橢圓擬合(Halir、Flusser 1998) 求得各群之對應最適橢圓，如圖中各群中之黑虛線所示， 而其長短軸及角度預期將可用來規劃彈性錯位反演模式之破壞面參數。同理， 各我們亦可求出各分群之統計參數，如圖3.10所示，注意在此各群之平均位移 值為坡面座標中沿坡向方向之位移，正值為沿坡面向下位移，不同於地理座標 系統中之符號慣例。最後為整體對比，我們將分佈於潛勢崩塌區外 2×2 km^2 之位移分佈進行直方圖分析，結果如圖3.11 所繪，可見崩塌區外之位移平均值低於各分群位移，唯在此需注意資料點之母群 (population) 數量在崩塌潛勢區內外有顯著的差別，這項比較僅有部份定性意義。

第六節　D077 TCP-InSAR 坡面位移轉換及資料分群分析

我們依循前節所述之程序，簡述新竹縣尖石鄉 D077 崩塌區之 TCP-InSAR 坡面位移轉換及資料分群分析，該崩塌區及 TCP-InSAR 資料點分佈如圖3.12 所繪， 該潛勢區崩塌區為圖中紅實線所框示，而 TCP-InSAR 衛星影像計算所得之時間

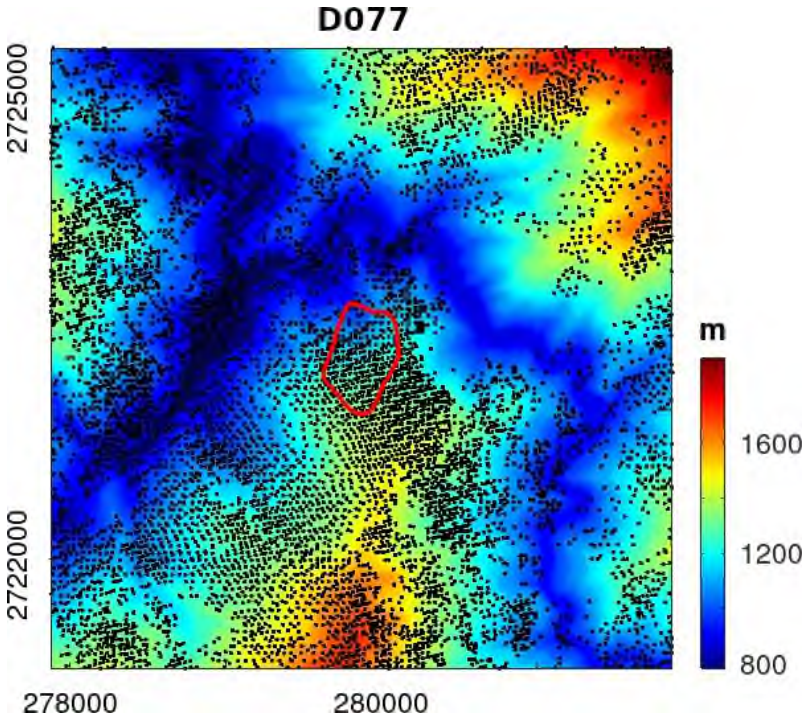


圖 3.12: 新竹縣尖石鄉-D077 地區地形圖及 TCP-InSAR 點位

相關資料點位如圖中黑色散點，於圖中約 2×2 km^2 的區域中，有超越 7,000 組資料點。

微地形濾除後其結果如圖3.13所示，該圖 (a) 子圖所繪為原始地形，為 5×5 m 數值地形，箭頭代表則代表該位置（箭頭根部）之坡向，經過地形低通濾波之後地形則如子圖 (b) 所示，比較兩子圖之坡向分佈可見濾波後之地形呈現較平滑的坡向及坡向轉折，而子圖 (c) 與 (d) 則分別為濾波前後每一數值地形網格點上之平均曲率之直方圖分佈，由圖中清晰可見如同 D066，本低通濾波有效地移除高地表曲率的微地形特徵。

本例中坡面向位移轉換因子 $-(\mathbf{e}_{SL} \cdot \mathbf{e}_{LOS})$ 如圖 3.14所示，其中黑色區域是 $|\mathbf{e}_{SL} \cdot \mathbf{e}_{LOS}| < 0.2$ 的轉換失效區域，在本例 ALOS 升軌影像中，這些奇異區如同 D066 是約略處於西向坡面區，而由於主要坡向向北，相較於 D066，該坡向與 LOS 方向夾角較小，造成轉換後位移值放大倍率較 D066 大之結果，推測這結果適用於一般南北向之邊坡：即南北向邊坡 LOS 位移有較東西向邊坡 LOS 位移低估其對應的坡向位移趨勢。

將坡向轉換因子除入 LOS 位移後，我們於圖3.15 中比較 LOS 位移與坡面向

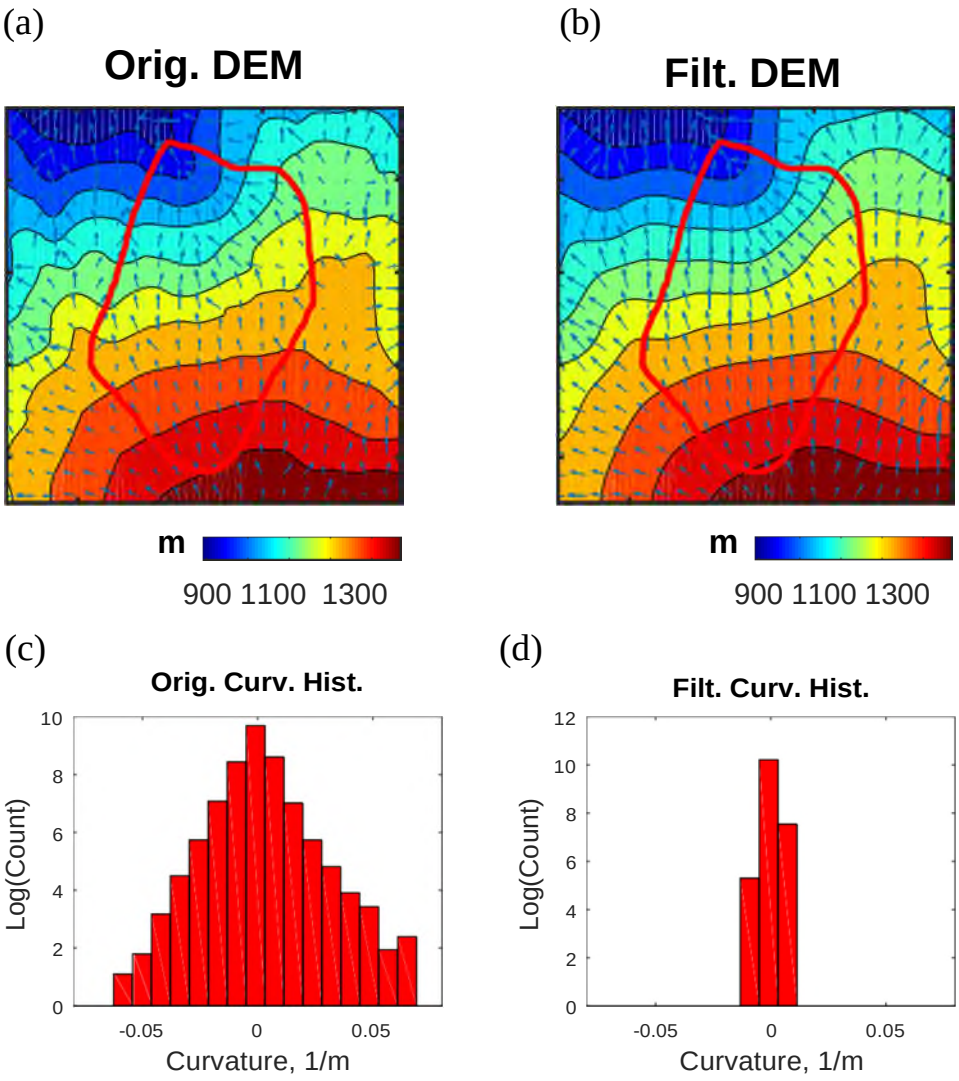


圖 3.13: 新竹縣尖石鄉 D077 地區 (a) 未空間濾波之地形圖及坡向，(b) 空間濾波後之地形圖及坡向，(c) 未空間濾波之地形平均曲率直方圖，(d) 空間濾波後之地形平均曲率直方圖

位移，由於其坡向朝北，且其轉換因子為正號，概略平均約為 0.2，因此該邊坡之 TCP-InSAR 位移值為之放大。依照本計畫符號慣例，該位移量若為正值 (暖色系) 代表地表位移為朝向衛星方向 (LOS) 之位移，在坡向朝東狀態大致為抬升，而負值 (冷色系) 為遠離衛星，大致為下降 (圖3.15a)。經過坡面向轉換後， 地表位移量由 LOS 方向轉換至坡面方向時，其下降值仍表示為負值，而位移量在本例中明顯增加，以坡冠地區（南側）為例 LOS 方向之地表位移量約為 −2 mm/yr，而轉換後可達約 −10 mm/yr。

接著我們利用前節所述之資料統計分群技術來分析這些坡面向位移資料點

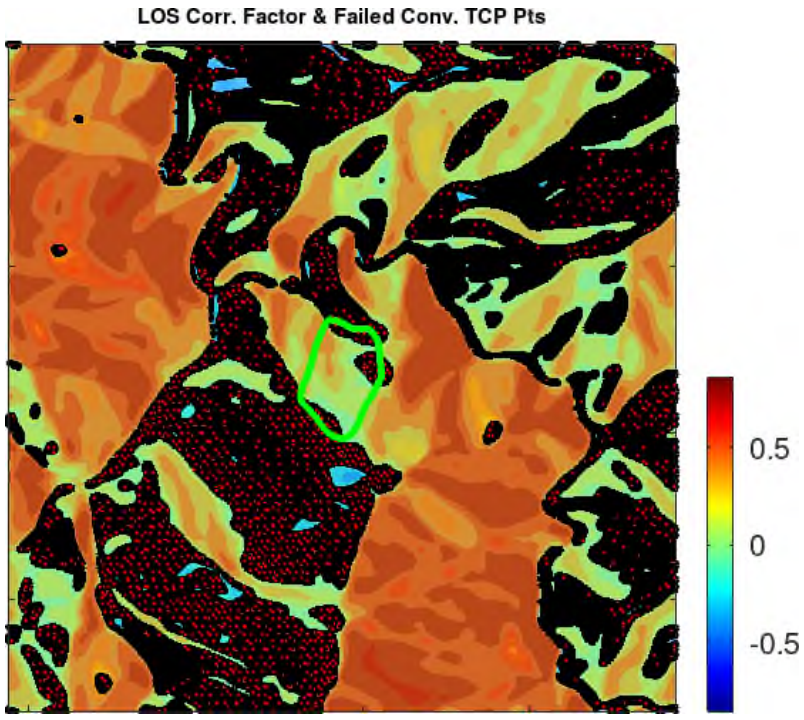


圖 3.14: 新竹縣尖石鄉 D077 地區 LOS-坡面位移轉換因子 $-(\mathbf{e}_{SL} \cdot \mathbf{e}_{LOS})$ 分佈，見 (3.2) 及轉換奇異區（$|\mathbf{e}_{SL} \cdot \mathbf{e}_{LOS}| \leq 0.2$，黑色區域位置），紅實點代表位於轉換奇異區中被排除之 TCP-InSAR 資料點，綠色實線為 D077 崩塌區

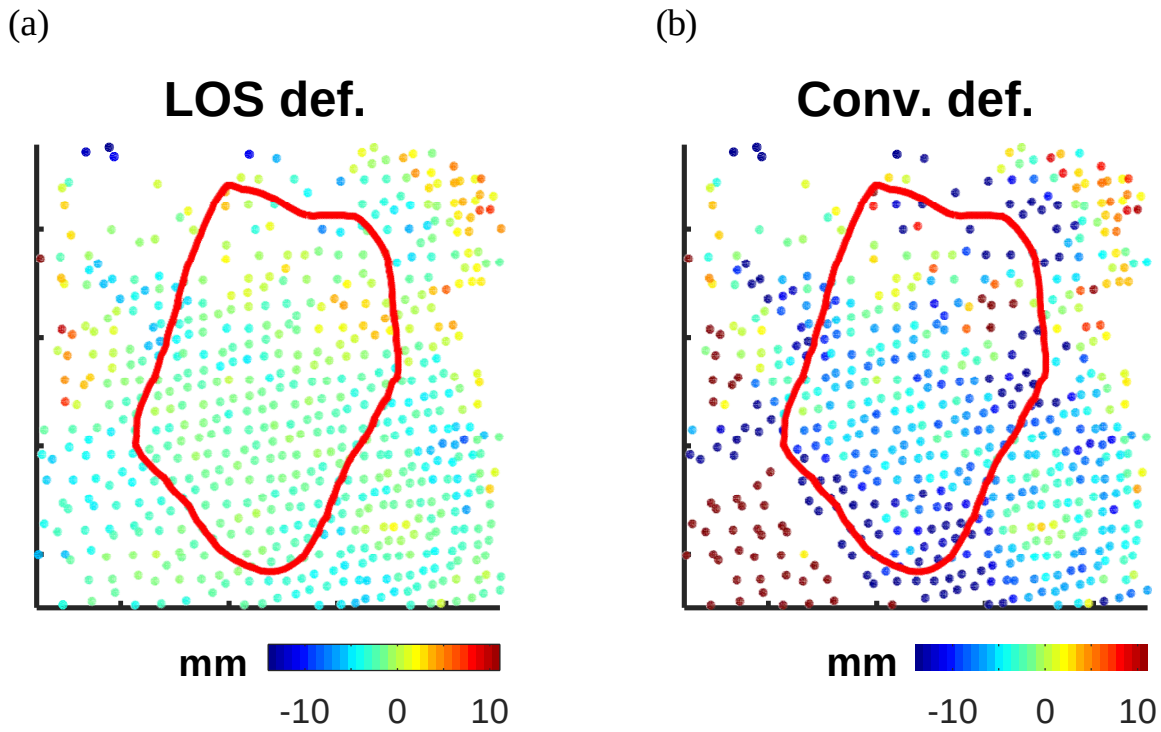


圖 3.15: 新竹縣尖石鄉-D077 LOS (R^{A}_{LOS}) 及坡面轉換後之地表變形 (r)，(a) LOS 位移，(b) 坡面位移

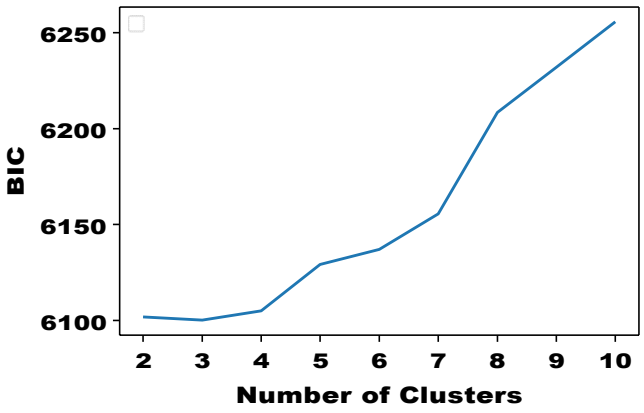


圖 3.16: 新竹縣尖石鄉 D077 潛勢崩塌區中 TCP-InSAR 資料分群數與貝氏信息量準則

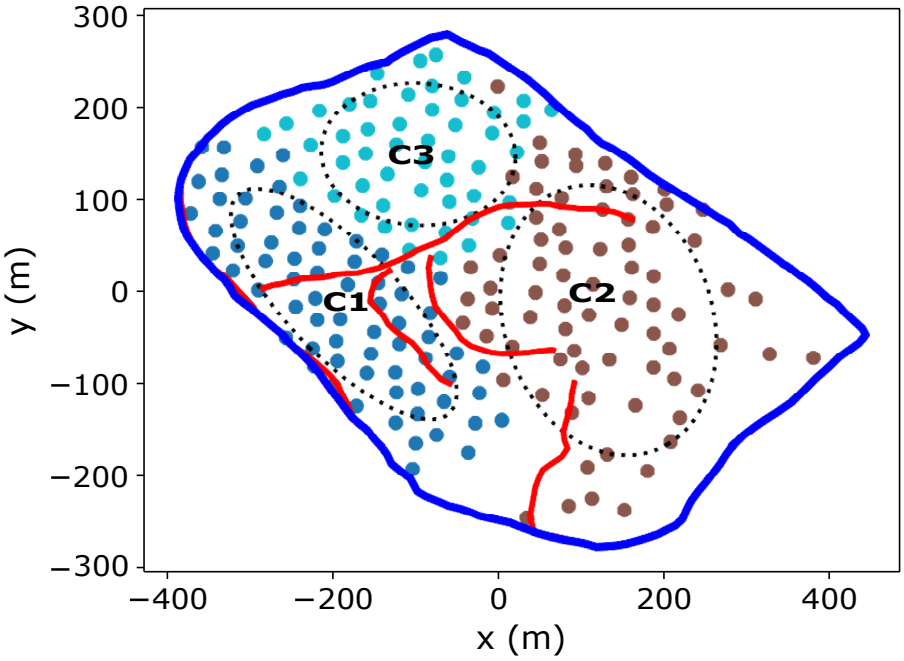


圖 3.17: 新竹縣尖石鄉 D077 潛勢崩塌區中 TCP-InSAR 資料分群，紅實線代表崩塌區中顯著地表裂隙，黑橢圓虛線代表分群資料之特徵空間分佈

的分群特性，首先是去除離群位移，並以貝氏信息量準則來判斷最佳分群數，如圖 3.16 所示，該圖橫軸為假設分群的數目，而縱軸為對應分群量下的信息量，依照該信息量準則判斷標準，最適分群組數為三組，然而由於兩組分群與 三組分群之貝氏信息量值差異不大，以本例而言，兩種分群應皆可接受，本計 畫中為維持應用工具之客觀性，在此仍採用三組分群。

經過三組分群計算後，坡面向位移分群分佈如圖 3.17所示，本圖採用坡面

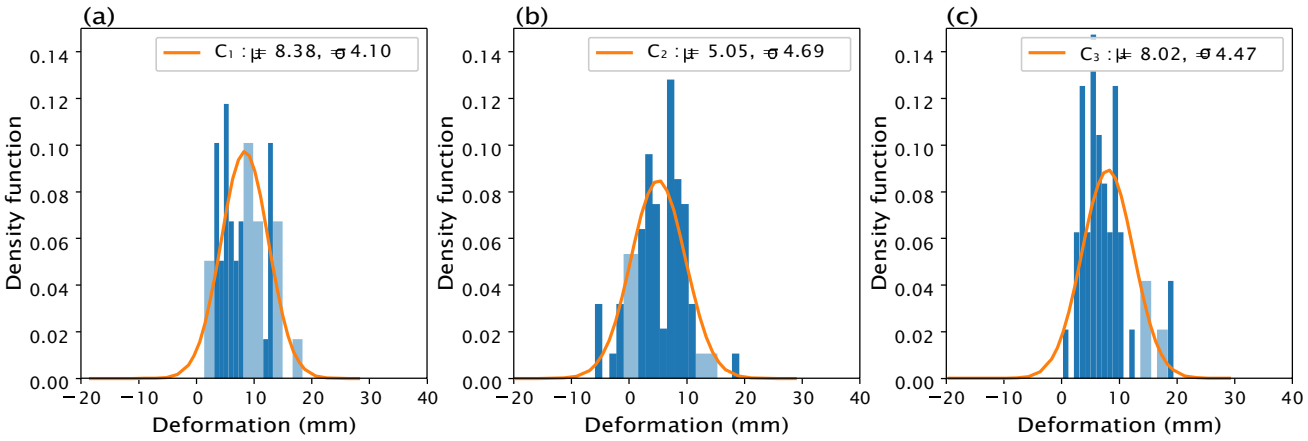


圖 3.18: 新竹縣尖石鄉 D077 潛勢崩塌區中 TCP-InSAR 資料分群中各群之正規化位移分佈直方圖及函數，(a)~(c) 分別代表第一群 C_1 至第三群 C_3 之結果

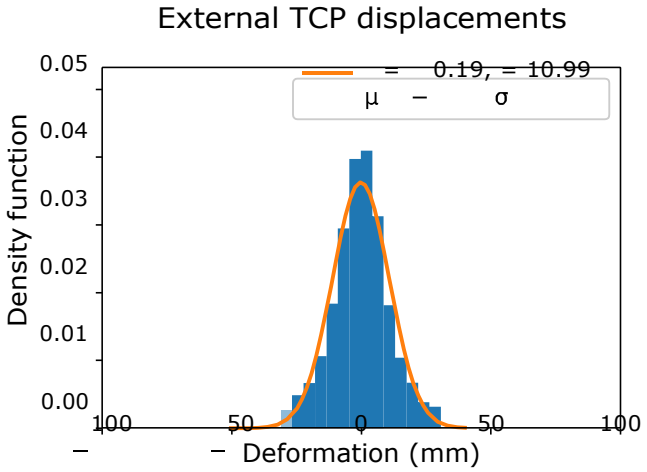


圖 3.19: 新竹縣尖石鄉 D077 潛勢崩塌區外部兩公里範圍之正規化位移分佈直方圖及函數

座標系統，即 x 軸為指向坡面下降之方向，於圖中我們同時標註崩塌區中之顯著地表裂隙，對比兩組資料可發現本例中之位移分群同樣有呼應地表裂隙的型 態，圖中各群中之黑虛線橢圓，則是利用離散點橢圓擬合求得之各分群對應之 最適橢圓，其長短軸及角度將用來規劃彈性錯位反演模式之破壞面參數。同理， 各分群之統計參數如圖3.18所示，在此各群之平均位移值為坡面座標中沿坡向 方向之位移，正值為沿坡面向下位移，而不同於地理座標系統中之符號慣例。最後為整體對比，分佈於潛勢崩塌區外 2×2 km^2 之位移分佈之直方圖如圖3.11， 同樣可見崩塌區外之位移平均值低於各分群位移，同樣在此需注意的是資料點 之母群數量在崩塌潛勢區內外有顯著的差別，使這項比較僅有部份定性意義。

第四章　深層山崩破壞面簡易彈性錯位模式反演

本章概述本計畫中目前完成之研究項目或摘自於 行政院農業委員會水土保持局 (2020a) 及 行政院農業委員會水土保持局 (2020b) 兩計畫中之相關部份，包含對 InSAR 坡面位移轉換與彈性錯位模式應用報告所作之理論簡述。

第一節 簡易彈性錯位模式

大規模崩塌滑動面分布之掌握，對於其崩塌活動機制扮演相當重要的角色。將彈性錯位模式應用於深層山崩破壞面的推估則是近年來一項新的嘗試 (Aryal 等 2015)，在利用該模式進行滑動面反演操作中，可利用大規模崩塌潛勢區內單頻 GPS 觀測站之地表位移資訊，結合 InSAR 多時序地表變形監測成果，配合現地調查相關成果建立地質模式，來推估山崩破壞面之近似深度、走向及彈性滑動量等資訊。於 109 年度中，我們進行共三處大規模崩塌潛勢區的初步彈性錯位模式滑動面反演分析，分別為 D066，D077以及太平山蘭台示範深層山崩區，前兩處是農委會水保局所定義之關鍵 34 處大規模崩塌潛勢區位中，已建置單頻GPS地表觀測站之崩塌區位，而後者為新興技術於深層山崩監測應用的示範研究區。

由於彈性錯位模式是建構於理想半無限域等向均勻彈性體中解析形式的格林函數之上(Okada 1985)，而不能反應地質構造及地表地形的複雜性，故在本計畫中，我們將忽略此二結構地質因子，將潛勢崩塌面簡化為單一坡度的平面，而同時也將彈性錯位模式之地下錯位斷層假設為單一平面，在這些簡化條件下，我們可建立如圖4.1所示之彈性斷層錯位坡面座標系統。其中(X,Y,Z)為固定

參考座標系統，X 與 Y 分別對應至地理方位東與北。而根據平均坡度所定義出來的坡面座標系統則為 (x, y, z)，其中 x 為坡降方向 (dip direction)，y 為走向 (strike)，z 則為垂直於坡面方向。

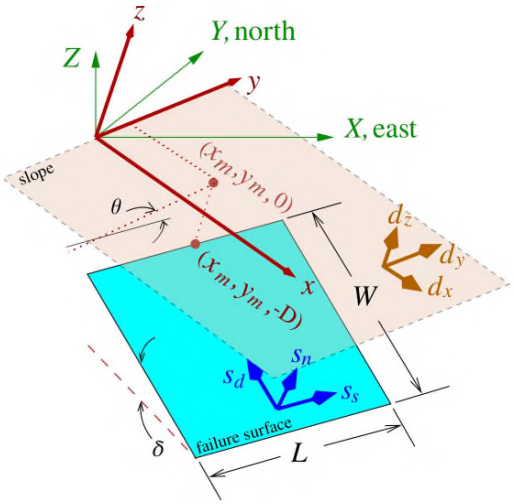


圖 4.1: 彈性錯位理論示意圖，其中固定地理參考座標為 (X, Y, Z)，坡面座標系統 (x, y, z) 及斷層錯位面。其中地理參考座標軸 X 朝向東方、Y 朝向北方，坡面座標軸 x 朝向坡降方向、y 為坡面走向，斷層面於坡面座標系統中之七個幾何位置參數：θ, δ, L, W , D, x_e, y_e，斷層面錯位移量 $\mathbf{s} = (s_s, s_d, s_n)$ 及其引致的坡面彈性變形 $\mathbf{d} = (d_x, d_y, d_z)$

於坡面座標系統中應用彈性錯位理論則隱含著將該坡面假設為無限平整的邊坡，而深層山崩的破壞面，則以類似於地震錯位應用的方式，利用長方形斷層模形為基礎來描述，如於圖4.1 中所示，其中該破壞面的位態、走向角 θ 定義為自 y 軸起，在 (x, y) 平面上順時鐘方向量測，而坡降角定義為破壞面坡降方向與 (x, y) 平面所夾之角度。注意在此定義下，所謂山崩破壞面的深度，是定義於垂直於坡面的方向，而非地理上的高程。而視所需，我們最終可將最佳化的坡壞面，透過座標轉換回復至地理上的固定參考座標。

圖 4.1 則顯示坡面座標系統，在此座標系統中，半無限域的坡體位於 $z \leq 0$ 的區域，而在坡體中有一簡化為長方形之錯位斷層面，該斷層面的長為 L，寬是 W，傾角為 δ，而其位置則由該斷層面上緣的深度 D 及其中點位置 (x_e, y_n) 來表達。而斷層面上的滑移量 $\mathbf{s}$ 則為 $\mathbf{s} = (s_s, s_d, s_n)$，其分量分別為沿走向、傾角，與垂直於滑動面方向之滑移量，假設在深層山崩是剪動型錯動位移，則

$s_n = 0$。而在斷層面上的錯動 **s** 則會透過錯位斷層面周圍的彈性介質變形在地表產生位移 $\mathbf{d} = (d_x, d_y, d_z)$，其中三分量分別為 x、y 與 z 方向的位移，藉由 Okada (1985, 1992) 之彈性模型，我們可利用彈性錯位理論之格林函數 **G**，將斷層面錯動與在地表位移表示為

$$\mathbf{d} = \mathbf{G}(\mathbf{m}, \nu)\,\mathbf{s}, \tag{4.1}$$

其中 **G** 為彈性體泊松比 (Poisson's ratio, ν) 與前述斷層面參數 **m** 之函數，而 $\mathbf{m} = (\theta, \delta, L, W, D, x_e, y_n)$，以上 (4.1) 為彈性錯位之前向問題 (forward problem)。

而應用上述彈性錯位模式在滑動面反演則是一反算問題 (inverse problem)， 其已知條件是地表位移觀測量 **d**，藉由給定一系列斷層面參數，透過最佳化程序來推求能夠造成最近於地表觀測位移數據的斷層位態參數與斷層錯動 **s**，其簡要推導如下，首先是利用 (4.1) 建立已知之 **d** 、未知之 **s** 與 **m** 間的關係式：

$$\mathbf{d} = \mathbf{G}\,\mathbf{s} + \boldsymbol{\epsilon}, \tag{4.2}$$

其中等式右側第一項代表彈性錯位模式造成的理論地表位移，而 $\boldsymbol{\epsilon}$ 則為觀測量與推測之斷層參數與滑移量間造成之誤差殘值。上式中，地表位移觀測與斷層滑移點位變數數量若分別為n與m時，則**d**與**s**分別擴展為$\mathbf{d} = (\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \ldots, \mathbf{d}_n)^T$與$\mathbf{s} = (\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \ldots, \mathbf{s}_m)^T$，而 **G** 則為 $n \times m$ 之矩陣（以上不計分量，而上標 ^{T} 表示為轉置）。由於觀測本身的位移存在誤差，而該誤差則影響觀測值間的權重，在此我們假設各觀測量的權重反比於觀測儀器取樣時的標準變異數，由此我們可定義一依觀測點位數量而為 $n \times n$ 大小之對角權重矩陣 (diagonal weighting matrix)，如下式

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1/\sigma_1^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1/\sigma_n^2 \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

其中 $\sigma_i, i \in 1 \cdots n$，代表每一觀測資料之標準偏差值。將該權重乘入 (4.2) 中， 便可得下列公式：

$$\mathbf{W}\boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{W}\,\mathbf{d} - \mathbf{W}\mathbf{G}\,\mathbf{s}, \tag{4.4}$$

或

$$(\mathbf{W}\mathbf{G})^T\mathbf{W}\boldsymbol{\epsilon} = (\mathbf{W}\mathbf{G})^T\mathbf{W}\,\mathbf{d} - (\mathbf{W}\mathbf{G})^T\mathbf{W}\mathbf{G}\,\mathbf{s}, \tag{4.5}$$

等式左側為加權後之誤差殘值，在運算中則可依數值方法的自由度或收斂性選擇任一式計算，在此我們利用最小平方法來求得滿足最小誤差殘值之未知斷層面滑移量 **s**，即定義最佳化殘值目標函數 E：

$$E(\mathbf{s}) = \min_{\mathbf{s}} \left|\left|\boldsymbol{\Sigma}(\mathbf{G}\mathbf{s} - \mathbf{d})\right|\right|^2 , \tag{4.6}$$

其中 $\boldsymbol{\Sigma}$ 代表地表觀測點權重矩陣 $\mathbf{W}$ 或斷層面滑移權重矩陣 $(\mathbf{WG})^T\mathbf{W}$，見 (4.4) 及 (4.5)。在原理上，基於 (4.6) 即可利用位移觀測值 **d** 及權重 **W**，求得最佳之斷層位態 **m**，滑移量 **s** 及其誤差殘值 E。在最佳化算則方面，我們可利用 Duan 等 (1994) 所提的高維度全域最優搜索法，或循序二次規劃 (SQP, Sequential Quadrature Programming) 非線性最佳化法，在七維度的斷層位態參數 **m** 空間中搜索最小誤差殘值，以決定最適宜的斷層位態。完成以上計算程序，我們即利用彈性錯位模式反演出最接近於地表觀測位移的斷層破壞面位態與在該破壞面上的滑移量。

在利用第3章中所述對 TCP-InSAR 資料點的分群結果進行分區破壞面反演前，我們先回顧前期計畫將崩塌區視為一單一整體的破壞面反演結果，同時在回顧中將坡面座標定義程序，以及定義破壞面位態參數搜尋空間之策略，本回顧主要取自行政院農業委員會水土保持局 2020a，以下二節分別陳述 D066 及D077 兩結果。

第二節 D066 崩塌潛勢區滑動面反演

在利用彈性錯位模型進行大規模崩塌潛勢區滑動面反演過程中，我們必須先定義如圖4.1 的坡面平面座標系統，並將坡面數位高程及 InSAR 監測點位之位移資料轉換於此座標系統之中。在實務操作中，我們利用水土保持局針對每一深層山崩區所定義的崩塌範圍內的地形，以二維線性迴歸分析求得一最適平面，並將此平面定義為坡面座標系統之 (x, y) 平面，而該平面之法向量為 z 軸，由空間幾何關係可知，在此法向量與 Z 軸所定義之切面中，垂直於該法向量之單位向量即為 x 軸之方向，最後由 z 與 x 軸之方向單位向量外積即坡面座標之y 軸，一旦各軸方向已知，則座標轉換矩陣也就隨之定義完成，最後為方便計

算，我們將坡面座標系統之原點定義於崩塌區近重心的位置，精確而言，該原點的水平面投影位置為崩塌區之重心，而其高程則為該位置於迴歸最適平面之高程。

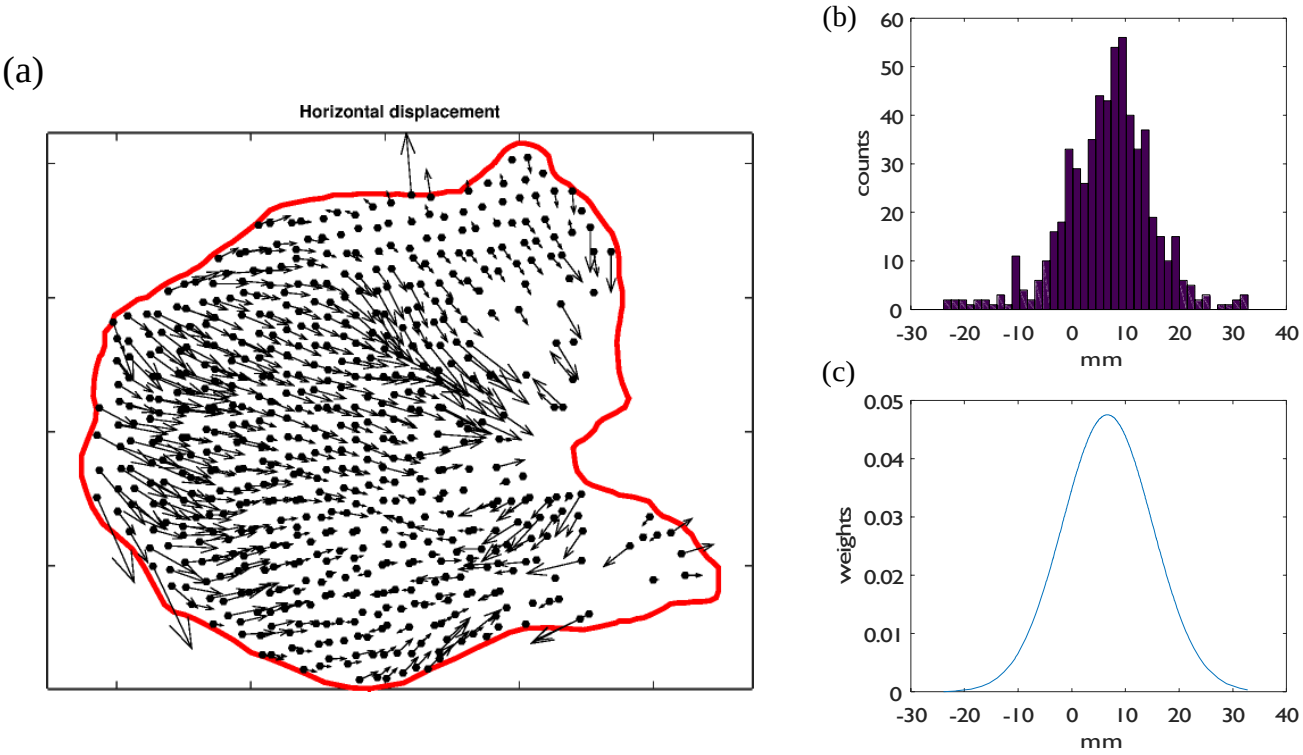


圖 4.2: (a) 水平面投影之位移向量位移, (b) 地表破面向位移分佈，(c) 地表位移權重分佈

D066 之崩塌邊界與其附近地形如圖1.5所示，潛勢崩塌區高程差約為 410.7 m，全區面積約為 $506,000\ \mathrm{m}^2$，崩塌區等效半徑 (R) 約為 401 m，經過以上計算，其座標原點為 TWD97 $(268872.062, 2658523.644)$，原點高程為海拔 1354.09 m，坡面座標系統之走向為 20.0°，傾角為 22.8°，崩塌區之粗糙度（地形在坡面座標系統中 $z-$ 分量之標準偏差值）為 27.8 m，對比等效直徑，其比值僅約 3.5%，坡面平整。注意此段中所述之參數係以 D066 山崩區內數值地形計算而得，詳細數值與表 1.1有些許出入，在坡面座標系統中，崩塌區邊界及 TCP-InSAR 點之分佈（含統計分群結果）如圖 3.9 所示。

我們利用行政院農業委員會水土保持局 2020a 中所獲得之 2007 ~ 2014 年之 TCP-InSAR 累積位移率來進行計算，其影像是藉由 ALOS 升軌資料所得，圖 3.7(a)該衛星之飛行角為$\alpha_{\mathrm{inc}}^{\mathrm{A}} = -10^\circ$，而俯視角為$\alpha_{\mathrm{inc}}^{\mathrm{A}} = 34^\circ$ ，利用InSAR地

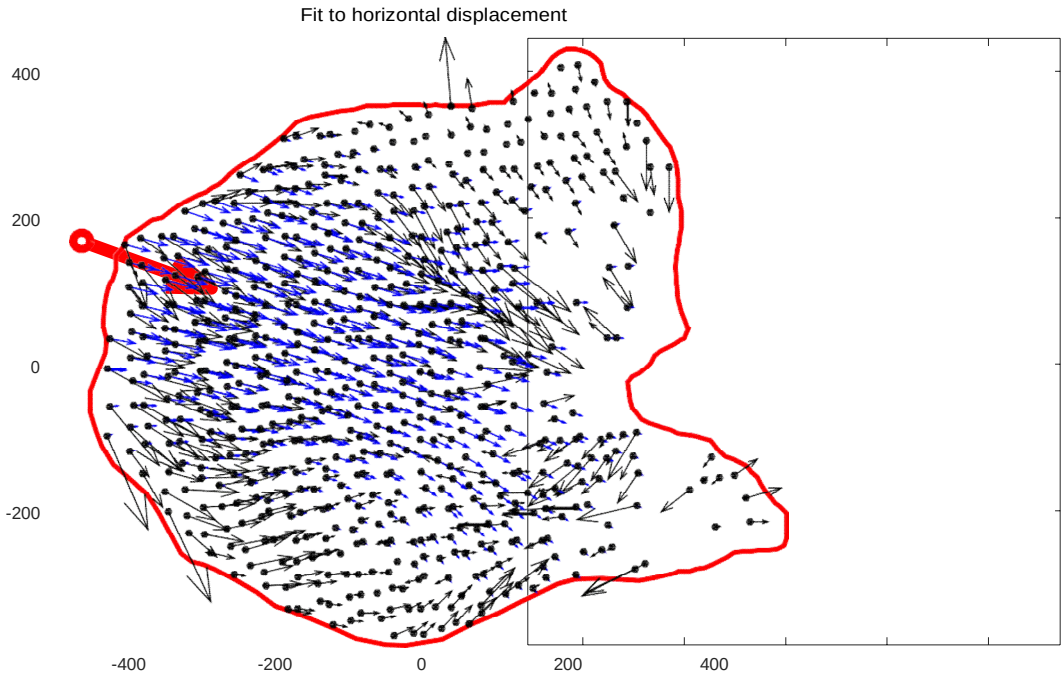


圖 4.3: 地表位移及彈性錯位模型反算位移比較，圖中黑點代表 InSAR 資料點位，黑色箭頭代表 InSAR 量測之坡面位移（轉換後），藍色箭頭代表彈性錯位模式反演之地表變形，圖面左緣中上處粗紅框圓虛點代表破壞面之代表位置， 紅方向箭頭代表破壞面之傾向

表變形分析成果轉坡面處理一節所述之法轉為坡面向之位移後（第3章第1節），其位移值（沿坡面向下為負）如圖3.7(b) 所示，因其坡面向東，其坡面轉換直觀上僅為數值上的大小調整，而未發生視角方向所造成的數值變號運算，依此轉換所得之水平面投影之位移向量如圖4.2(a) 所示，由該圖可知，在偏北側橫貫崩塌區東西向以及潛勢崩塌區冠部有較明顯的位移帶，而在這些資料點中，我 們亦發現些許無可避免的離群值，而在崩塌區之坡面位移量分佈如圖4.2(b) 所示，在本案中崩塌區之坡面位移平均值為 6.24 mm，其標準差為 10.1 mm。

在彈性錯位模式中，我們將位移離群值排除，並以高斯分佈賦予各位移點位權重，以降低反算計算時這些偏差所造成的干擾，這些權重分佈同樣繪製於圖4.2(c) 中，嚴格來說，目前的權重設定仍屬主觀，未來宜隨觀測量累積進行適切的調整。如於第1節所述，我們在高維度破壞面位態參數空間的最佳化中遭遇多局域最小值的問題，代表參數間可彼此補償，故需以降低參數維度以及在

搜尋空間中加以適當的限制條件來克服，這些也屬主觀設定，必須隨監測所觀察到實際坡面位移行為進行調整。以目前 D066 崩塌區為例，我們目前假設破壞面之長(L) 與寬(W) 分別為 321 及 642 m ($0.8R$及 $1.6R$)，由前節山崩面積-體積關係推測平均崩塌深度$\left(h_{\text{mean}}^{\text{pred}}\right)$約為 29.5 m，於是限制崩塌深度搜尋範圍自5.4～136 m $\left(0.2h_{\text{mean}}^{\text{pred}}\sim 0.5h_{\text{mean}}^{\text{pred}}\right)$，由於在坡面座標系統中，$x$ 及 y 軸分別定義為穿過崩塌區中（重）心沿著主要坡降及走向方向的度量，我們目前藉此性質限制破壞面位置是位於 x 軸上 ($y = 0$)，介於 $-601\sim 601$ m 的區間中（$-1.5R\sim 1.5R$，R 為崩塌區之等效半徑），而假設破壞面在坡面座標系統中之走向為$\theta = 0^{\circ}$ ，傾角為介於 $\delta = 0^{\circ}\sim 60^{\circ}$，而在破壞面上坡降方向 ($x$ 向) 之滑移量為負值，及破壞面上方之質量為向下移動（$s_d \leq 0$，圖4.1），在以上的限制下，我們將七維度的參數空間降維至三維（破壞面深度 d、x 位置與傾角 δ）。

在應用循序二次規劃 SQP 最佳化計算中，為檢視是否最佳化參數收斂至局域最小值，我們利用在三維參數空間域中多組 (30) 均勻分佈的隨機參數組合作為最佳化初始值，進行多次計算並比較收斂參數位置，另一重要項目是檢 視最佳化參數是否位於參數空間之邊界，若此情況發生時，需注意其合理性，或擴大搜尋空間重行計算。依循以上程序，我們求得 D066 破壞面位置之位置$x = -536$m (坡面座標)，深度為 $d = 36.8$ m，以及傾角為 $\delta = 4.35^{\circ}$，而破壞面上沿破壞面向下之位移量為 -16.9 mm，走向位移量為 1.27 mm，而在這狀態下，依照彈性錯位理論所計算的坡面地表位移與 TCP-InSAR 位移之比較如圖4.3所示，對比將於第5章第1節所述之最小平滑曲面破壞面法推估之破壞面平 均深度之誤差，尚屬可接受範圍。

第三節 D077 崩塌潛勢區滑動面反演

D077 之崩塌邊界與其附近地形如圖1.36所示，潛勢崩塌區高程差約為 439.9 m，全區面積約為 $235,000$ m^2，崩塌區等效半徑約為 273 m，經過如第 2 節所述之定義坡面座標之計算，其座標原點為 TWD97 (279875.402, 2723333.682)，原點高程為海拔 1198.78 m，坡面座標系統之走向為 -110.5°，傾角為 30.7°，崩塌

區之粗糙度（地形在坡面座標系統中 $z-$ 分量之標準偏差值）為 17.8 m，對比等效直徑，其比值僅約 3.2%，坡面平整，在坡面座標系統中，崩塌區邊界及 TCP-InSAR 點之分佈（含統計分群結果）如圖 3.17 所示。

如同第 2 節所述，我們利用行政院農業委員會水土保持局 2020a中所獲得之 2007 ~ 2014 年之累積 TCP-InSAR 形變量來進行計算，其影像是藉由 ALOS 升軌資料所得，圖 3.15(a) 該衛星之飛行角為 $\alpha^{\text{Asc}} = -10^\circ$，而俯視角為 $\alpha^{\text{Asc}} = 34^\circ$，利用 InSAR 地表變形分析成果轉坡面處理一節所述之法轉為坡面向之位移後（第3章第1節），其位移值（沿坡面向下為負）如圖3.15(b) 所示，坡面向北，同樣未發生視角方向所造成的數值變號運算，然因坡面向與衛星視角方向角度安排之故，其坡面轉換後之數值大小有顯著的調整，依此轉換所得之水平面投影之位移向量如圖 4.4(a) 所示，由該圖可知，此潛勢崩塌區位移基本上是自南而北呈現均勻位移的樣貌，同樣的在這些資料點中，我們亦發現些許無可避免的離群值，而在崩塌區之坡面位移量分佈如圖4.4(b) 所示，在本案中崩塌區之坡面位移平均值為 7.46 mm，其標準差為 8.94 mm。

在彈性錯位模式中，我們將位移離群值排除，並以高斯分佈賦予各位移點位權重，以降低反算計算時這些偏差所造成的干擾，這些權重分佈同樣繪製於圖 4.4(c) 中，嚴格來說，目前的權重設定仍屬主觀，未來宜隨觀測量累積進行適切的調整。如於第 1 節所述，我們在高維度破壞面位態參數空間的最佳化中遭遇多局域最小值的問題，代表參數間可彼此補償，故需以降低參數維度以及在搜尋空間中加以適當的限制條件來克服，這些也屬主觀設定，必須隨監測所觀察到實際坡面位移行為進行調整。以目前 D077 崩塌區為例，我們目前假設破壞面之長 (L) 與寬 (W) 分別為 219 及 437 m ($0.8R$ 及 $1.6R$)，由前節山崩面積-體積關係推測平均崩塌深度$\left(h_{\text{mean}}^{\text{pred}}\right)$約為19.3m，於是限制崩塌深度搜尋範圍自 3.86 ～ 96.6 m $\left(0.2h_{\text{mean}}^{\text{pred}}\sim 5.0h_{\text{mean}}^{\text{pred}}\right)$，由於在坡面座標系統中，$x$ 及 y 軸分別定義為穿過崩塌區中（重）心沿著主要坡降及走向方向的度量，我們目前藉此性質限制破壞面位置是位於 x 軸上 ($y = 0$)，介於 $-410\sim 410$ m 的區間中（$-1.5R\sim 1.5R$，R 為崩塌區之等效半徑），而假設破壞面在坡面座標系統中之走向為 $\theta = 0^\circ$，傾角為介於 $\delta = 0^\circ\sim 60^\circ$，而在破壞面上坡降方向 ($x$ 向) 之滑移量為負值，及破壞面上方之質量為向下移動（$s_d \le 0$，圖4.1），在以上的限制

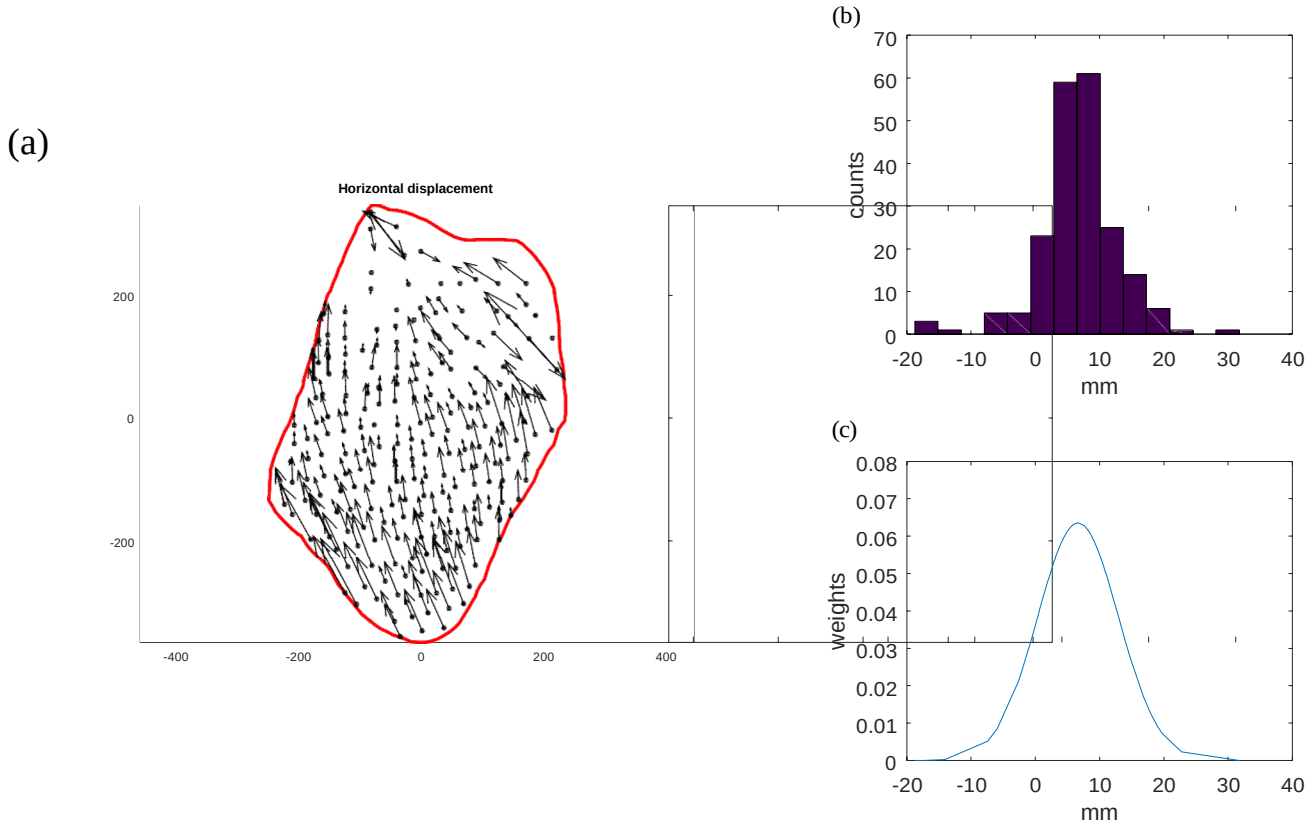


圖 4.4: (a) 水平面投影之位移向量位移, (b) 地表破面向位移分佈，(c) 地表位移權重分佈

下，我們將七維度的參數空間降維至三維（破壞面深度 d、x 位置與傾角 δ）。

在應用循序二次規劃 SQP 最佳化計算中，為檢視是否最佳化參數收斂至局域最小值，我們利用在三維參數空間域中多組 (30) 均勻分佈的隨機參數組合作為最佳化初始值，進行多次計算並比較收斂參數位置，另一重要項目是檢視最佳化參數是否位於參數空間之邊界，若此情況發生時，需注意其合理性，或擴大搜尋空間重行計算。依循以上程序，我們求得 D077 破壞面位置之位置$x = -20.3$m (坡面座標)，深度為$d = 58.3$m，以及傾角為$\delta = 5.9°$，而破壞面上沿破壞面向下之位移量為－20.3mm，走向位移量為－0.62mm，而在這狀態下，依照彈性錯位理論所計算的坡面地表位移與TCP-InSAR 位移之比較如圖4.5所示，在本例中彈性錯位模型推求出之破壞面深度 58.3 m 較前節最小平滑曲面破壞面法推估之破壞面平均深度 22.0 m 則高出許多，對比現地探勘資料，建議可在破壞面大小設定及搜索範圍設定略加調整。

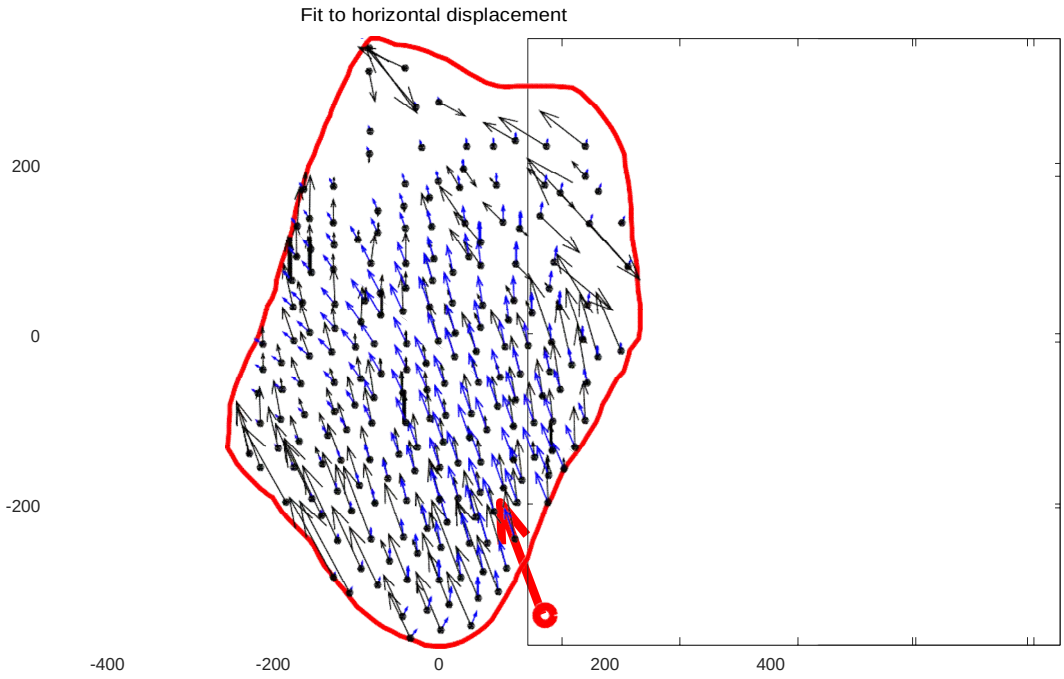


圖 4.5: 地表位移及彈性錯位模型反算位移比較，圖中黑點代表 InSAR 資料點位，黑色箭頭代表 InSAR 量測之坡面位移（轉換後），藍色箭頭代表彈性錯位模式反演之地表變形，圖面下緣中處粗紅框圓虛點代表破壞面之代表位置，紅方向箭頭代表破壞面之傾向

第五章　廣義彈性錯位模式

第一節　最小平滑曲面破壞面推估法

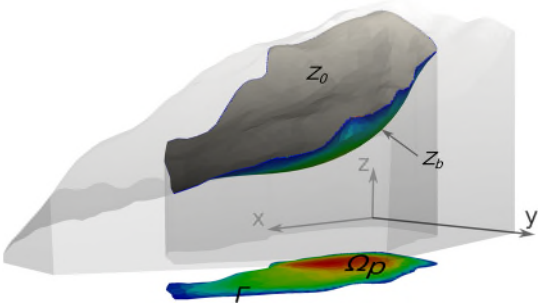


圖 5.1: 破壞面示意圖及座標系統，地表及滑移破壞面分別以 $z_0 \equiv z_0(x,y)$ 及 $z_b \equiv z_b(x,y)$ 表示，Ω_p 及 Γ 分別為三維崩塌邊界及其於 xy 平面上的投影，摘自郭志禹等 (2019)

此方法主要是基於郭志禹等(2019) 及 Kuo 等 (2020) 所提之以最小平滑曲面為基礎所建立的類比於前節所述之簡易彈性錯位模式，在該法中，我們假設山 崩破壞面是一具有最小面積的平滑曲面，而該曲面與地表坡面所包圍的體積為 給定之崩塌體積 V，而該最小曲面與地表的交界邊界則要求符合崩塌地之邊界。

以數學表示法而言，如圖5.1所示，首先令 (x,y,z) 為笛卡爾座標，z 方向為垂直向上，地表面可表示為 $z_0 \equiv z_0(x,y)$，而破壞面假設為 $z_b \equiv z_b(x,y)$，其中後者假設為平滑的表面，藉由數學上計算可獲得 z_b 表面積，即為

$$S(z_b) = \int \sqrt{1 + \|\nabla z_b\|^2}\, d\Omega_p \,, \tag{5.1}$$

在上式中，∇ 是一個二維梯度運算子 $(\partial/\partial x, \partial/\partial y)$；是破壞面邊界在 xy 平面上的投影面積，而 Γ 是 Ω_p 的邊界。將 (5.1) 式 z_b 表面積最小化即可得最小平滑曲

面

$$S_b = \min_{zb} S, \tag{5.2}$$

而此破壞面邊界由一封閉曲線 Γ 所定義，因此在邊界上的條件為

$$z_b = z_0 \text{ on } \Gamma, \quad z_b \leq z_0 \text{ in } \Omega_p, \tag{5.3}$$

以及

$$C(z_b) \equiv \int (z_0 - z_b)\, d\Omega_p - V = 0.$$

其中第一個條件 (5.3) 表示該破壞面與坡面相交的邊界具有相同的高程，即 $z_0 = z_0(x, y)$，而破壞面必須在自由面下方；第二個條件 (5.4) 則為崩塌體積是原先所給定的體積 V。在實際計算中我們則需利用優化程序來找到該最小平滑曲面。透過 24 處實際案例的檢核，我們發現此方法在平均與最大山崩深度方面，預測與實際資料有良好的一致性，而預測深度分佈則在山崩區圓度較小（狹長）或較大（較圓）時，本最小平滑曲面破壞面推估法具有較佳的預測準確度，而在圓度約為 0.25左右時，預測準確度較差，見 Kuo 等 (2020)，換言之，我們可藉由山崩之圓度-球度關係，來檢視崩塌體之形貌，來輔助判定本破壞面推估法之準確率區間。

我們以南投仁愛鄉 D066 及新竹尖石鄉 D077 為例，說明此法得以對實際崩塌區預測三維之破壞面。D066 崩塌區塊崩塌區全區面積約為 $506,000$ m^2，依照山崩面積-體積經驗迴歸關係，推估的山崩體積約為 15,100,000 m^3，使用最小平滑曲面破壞面推估山崩滑動面，並以此滑動面計算崩塌區中預測山崩深度分佈， 其結果如圖5.2所示，以此預測，我們可得最大深度約為 69.2 m，崩塌區平均深度約為 29.5 m，在精英村分佈區域，推測滑動面深度約為 30～50 m 之間，而最大深度位置約與重心位置重合。D077 崩塌區全區面積約為 $235,000$ m^2，依山崩面積- 體積經驗迴歸關係，山崩體積為 5,200,000 m^3，使用最小平滑曲面破壞面推估山崩滑動面，結果如圖5.2 所示，以此預測，最大深度約為 55.6 m，崩塌區平均深度約為 22.0 m，最大深度位置約位於重心位置西南方 95 m 處。

假設山崩面積-體積經驗迴歸關係得以準確預測山崩體積，基於 Kuo等 2020對相對誤差評估資料可知，依照 D066 圓度 (0.683) 推測，此最小平滑曲

面法推估之此山崩區的破壞面可能具有較低的相對誤差，故我們推估本預測破壞面之相對誤差分別為$\bar{E}_{\text{mean}} \leq 5\%$，$\bar{E}_{\text{mode}} \simeq 5\%$，$\bar{E}_{\text{max}} \simeq 20\%$，以及$\bar{E}_{\text{std}} \simeq 40\%$，在此必須注意的是極低的相對平均深度預測誤差$\bar{E}_{\text{mean}}$的前提假設是山崩面積–體積經驗關係為準確的，而在此相對誤差的參考長度是山崩平均深度$\left(h_{\text{mean}}^{\text{pred}}\right)$。

相同的，D077 依照圓度 (0.583) 推測，此最小平滑曲面法推估之破壞面可能具有較低的相對誤差，這些相對誤差分別推估為$\bar{E}_{\text{mean}} \leq 5\%$，$\bar{E}_{\text{mode}} \simeq 5\%$，$\bar{E}_{\text{max}} \simeq 20\%$，以及$\bar{E}_{\text{std}} \simeq 40\%$，在此必須注意的是極低的相對平均深度預測誤差$\bar{E}_{\text{mean}}$的前提假設是山崩面積-體積經驗關係為準確的，而在此相對誤差的參考長度是山崩平均深度。檢視現場監測儀器安裝位置（圖1.37）之預測山崩滑動面深度，我們可得其深度範圍約為 10～40 m，吻合第1章第5節所述，而此方法與其他理想破壞面推估法比較亦可參閱 Tai 等 2020。

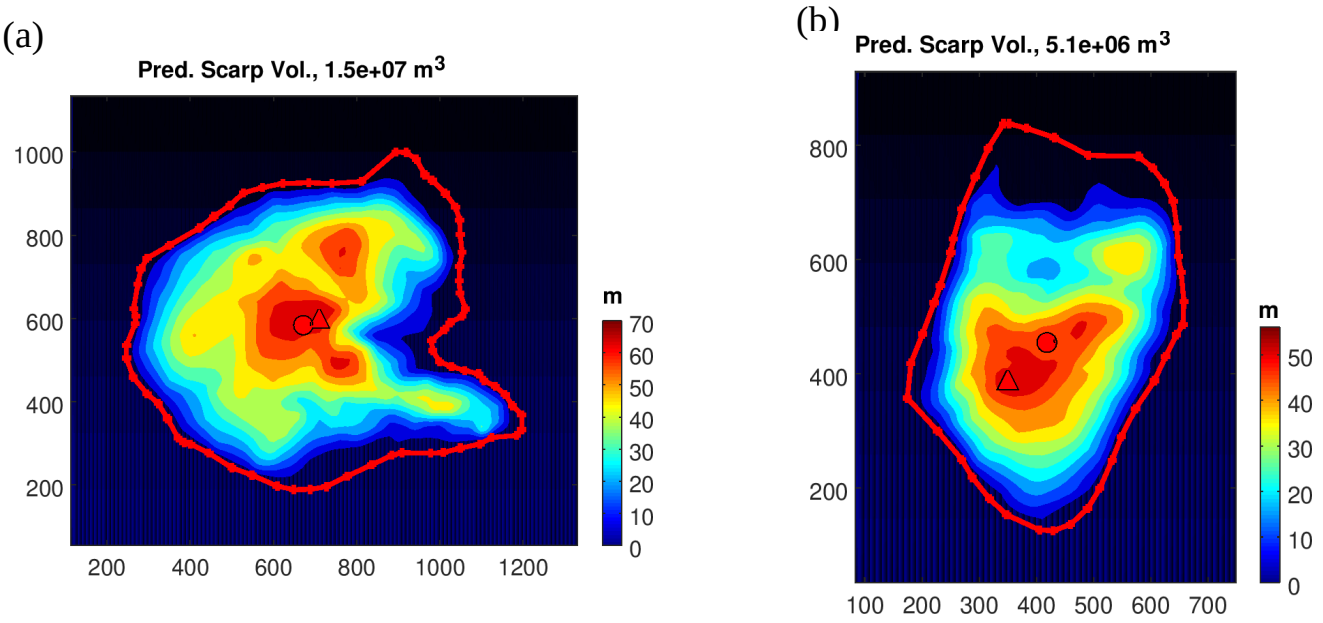


圖 5.2: 最小平滑曲面破壞面推估法預測之 (a) D066, (b) D077 山崩深度分佈，紅實線標註崩塌區邊界，中心紅實圓點標示崩塌區重心位置，紅實點三角形點標示預測最大崩塌深度位置

第二節　廣義彈性錯位模式

藉由以上最小平滑曲面計算，我們可同時建立崩塌體的三維計算網格，如於圖 5.3 所示之簡化範例，接下來的廣義彈性錯位模式中，我們假設該崩塌體為理想之小變形彈性體，在徹體力 (body force) 為 $\mathbf{f}$ 的狀態下，該崩塌體之靜應力平衡為

$$\nabla \cdot (\mathbf{C}\boldsymbol{\epsilon}) + \mathbf{f} = 0, \tag{5.5}$$

其中 $\mathbf{C}$ 為拉梅彈性常數 (Lame constant)，四階張量彈性常數，在此我們簡化崩塌體為等向均質 (isotropic, homogeneous)，故該彈性張量常數簡併為兩獨立材料參數，在此我們採用剪切模數(G, shear modulus) 以及泊松比(ν, Poisson's ratio)，而 $\boldsymbol{\epsilon}$ 為小變形二階張量彈性應變，與彈性體中之位移向量 $\mathbf{u} = \mathbf{u}(x,y,z)$ 之關係為 $\boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{u}) = \frac{1}{2}\left((\nabla_{\mathbf{u}}) + (\nabla_{\mathbf{u}})^T\right)$，假設材料重量為僅有的徹體力，故 $\mathbf{f} = \rho\mathbf{g}$，$\rho$ 為密度及 $\mathbf{g}$ 為重力加速度。於是 (5.5) 加上適切的邊界條件，即成為可解的系統，在本廣義彈性錯位模式中，這邊界條件為崩塌塊體表面的零應力

$$\mathbf{C}\boldsymbol{\epsilon}\big|_{z=z_0} = \mathbf{0}, \tag{5.6}$$

以及在破壞面上給定的錯位位移

$$\mathbf{u}\big|_{z=z_b} = \mathbf{u}_b(x,y)。 \tag{5.7}$$

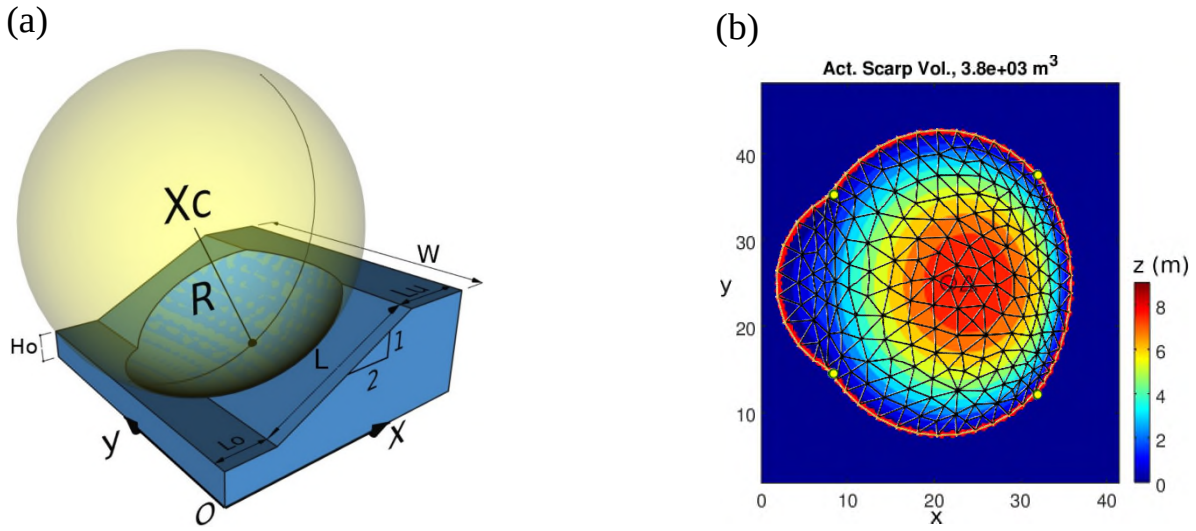


圖 5.3: 廣義彈性錯位模式範例案例 (a) 階梯型崩塌地及預設破壞面，(b) 以最小平滑曲面法計算之崩塌區深度分佈。

以上 (5.5)，(5.6) 以及 (5.7)為一組正向 (forward) 彈性問題，相當於前節所述之簡單彈性錯位模式的正向計算。

目前我們僅考慮均質等向彈性材料 (homogeneous, isotropic)，故拉梅彈性常數 $\mathbf{C}$ 張量中僅有兩獨立參數：拉梅第一常數 λ 及剪力模量 μ，將(5.5)表示為變分形式

$$\int_{\Omega}\{\lambda\nabla\cdot\mathbf{u}\nabla\cdot\mathbf{v}+2\mu\epsilon(\mathbf{u}):\boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{v})\}d\mathbf{x}+\int_{\Omega}\mathbf{v}\cdot\mathbf{f}d\mathbf{x}, \tag{5.8}$$

其中，Ω 為彈性體體積（如圖5.3(b) 所示之崩塌體），以及 $\mathbf{v}$ 為位移測試函數 (test function)，我們將以上式利用以 FreeFEM++ 計算語言，進行有限元素法數值計算來求解此彈性問題（Hecht 2012），利用該平台之優點為其程式語言架構近似數學結構，支援二、三維非結構網格生成及計算，大幅簡化工具開發期程。

接下來將進行反演計算。我們首先假設在破壞面上的錯位位移僅相切 (tangent to) 於破壞面，故該錯位(5.7)可表示為下式

$$\mathbf{u}_b = D_t\,\mathbf{t} + D_p\,\mathbf{p}, \tag{5.9}$$

其中 $\mathbf{t}$ 為崩塌滑移方向的破壞面切線單位向量，即該向量於 xy 平面投影之分量 (t_x, t_y) 平行於滑移方向，而 $\mathbf{p}$ 為垂直於破壞面法向量 $\mathbf{n}$ 及前述 $\mathbf{t}$ 方向之方向單位向量，即 $\mathbf{p}=\mathbf{n}\times\mathbf{t}$，以及 $(\mathbf{t},\mathbf{p},\mathbf{n})$ 形成與破壞面相切合之座標體系。接下來是為了避免反演計算的過度擬合 (overfitting)，我們假設在破壞面上的錯位位移呈現一定程度的連續與平滑性，故錯位量可用多項式來表示，為方便計算，我們假設上式錯位量參數 D_t 及 D_p 可表為

$$D_{t=}\sum_{i=0}^{N}\sum_{j=0}^{i}\bar{a}_{(i,j)}\,(x-x_C)^i(y-y_C)^j,\;\; D_{p=}\sum_{i=0}^{N}\sum_{j=0}^{i}\hat{a}_{(i,j)}\,(x-x_C)^i(y-y_C)^j, \tag{5.10}$$

其中 (x_C, y_C) 為崩塌體之重心於 xy 平面之位置，而 $\bar{a}_{(i,j)}$ 與 $\hat{a}_{(i,j)}$ 則為反演計算所要求取的錯位位移係數，在此注意呈現於式(5.10)之多項式並非唯一的選擇，在未來推廣應用時將可能採用更為廣義的形式。為方便以下推導，我們統整以上兩種型態之錯位位移係數為 $\mathbf{a}=\{\bar{a}_{(0,0)},\bar{a}_{(1,0)},\bar{a}_{(0,1)},\cdots,\bar{a}_{(N,N)},\hat{a}_{(0,0)},\hat{a}_{(1,0)},\hat{a}_{(0,1)},\cdots,\hat{a}_{(N,N)}\}$，而其中各係數依次對應至 a_i，其中 $i=1,2,\cdots,(N+2)(N+1)$。

假設在崩塌體表面，我們有總共 K 點位於 $\mathbf{x}_k, k = 1 \cdots K$ 之觀測位移資料，記為 $\mathbf{u}_k^{obs} \equiv \mathbf{u}^{obs}(\mathbf{x}_k)$；而用以上破壞面錯位設定(5.9)及彈性模式(5.8)，我們可正向計算出在 $\mathbf{x}_k$ 處之彈性模式位移 $\mathbf{u}_k^{calc}$，則我們目前所稱之廣義反演計算，即可定義為在錯位位移係數參數空間中，尋找一組參數 $\mathbf{a}$，使得計算位移 $\mathbf{u}_k^{obs}$ 與觀測位移 $\mathbf{u}_k^{calc}$ 之差的平方和為最小值，以算式表示則如下：

$$\min_{\mathbf{a}} F(\mathbf{a}) = \min_{\mathbf{a}} \sum_{k=1}^{K} \left(\mathbf{u}_k^{calc} - \mathbf{u}_k^{obs}\right)^2 . \qquad (5.11)$$

計算上，我們仍沿用整合於 FreeFEM++ 中之內部點優化器 (IpOPT, Interior point optimizer, Wächter、Biegler 2006)，該算則為一穩定高效率的泛用優化器。

在使用此類優化器中，需提供目標函式 (式5.11中之 F) 的梯度以及 Hessian 矩陣（二階梯度），前者為：

$$\delta_{a_i} F(\boldsymbol{a}) = 2 \sum_{k=1}^{K} \left(\mathbf{u}_k^{calc} - \mathbf{u}_k^{obs}\right) \delta_{a_i} \mathbf{u}_k^{calc} \ ,$$

其中 $\delta_{a_i} \mathbf{u}_k^{calc}$ 為微擾錯位位移係數 a_i 後所求得之地表位移改變量，該地表改變量為(5.5)之微擾方程 $\nabla \cdot (\mathbf{C}\boldsymbol{\epsilon}(\delta\mathbf{u})) = \mathbf{0}$ 在破壞面位移為微擾邊界條件

$$\delta_{a_i} \mathbf{u}_b = \frac{\partial \mathbf{u}_b}{\partial a_i} \delta a_i$$

(a)

(b)

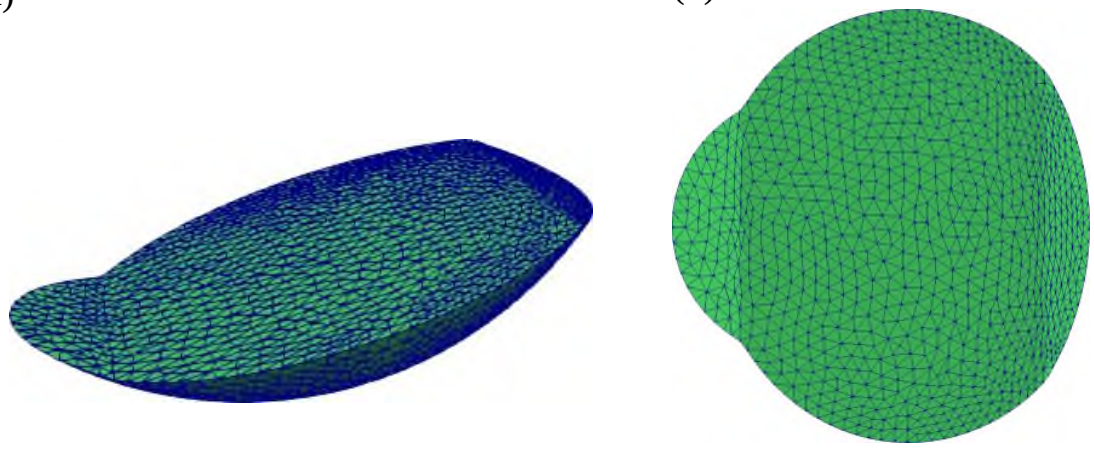


圖 5.4: 廣義彈性錯位模式範例案例 (a) 三維崩塌體及其計算網格，(b) 計算網格上視圖。

時之解；而 Hessian 矩陣為

$$\delta_{a_i}\delta_{a_j}F(\boldsymbol{a}) = 2\sum_{k=1}^{K}\delta_{a_i}\mathbf{u}_k^{\text{calc}}\,\delta_{a_j}\mathbf{u}_k^{\text{calc}}\text{。}$$

由以上 Hessian 矩陣形式可知，該系統對 **a** 參數微擾 δa_i 而言，僅為一常數矩陣，預期在收斂性方面應有良好的控制。

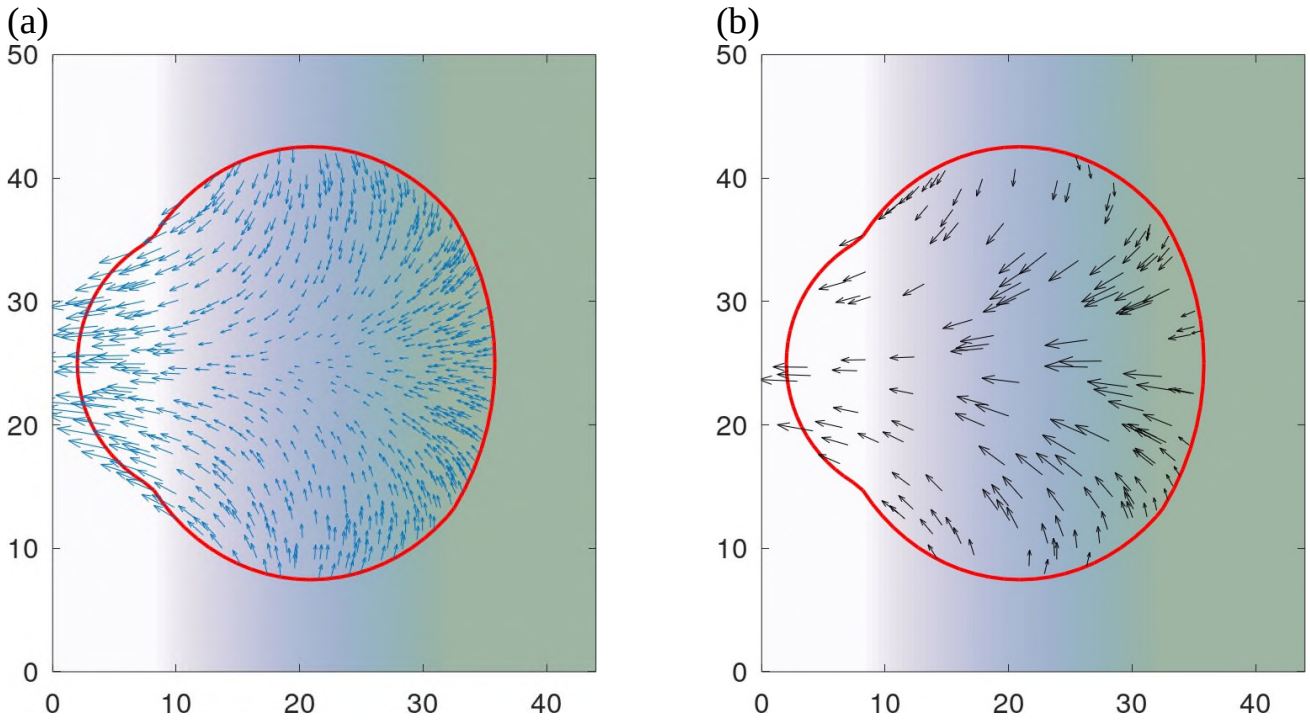


圖 5.5: 廣義彈性錯位模式範例案例 (a) 破壞面上給定位移之水平投影場，(b) 崩塌表面隨機採樣之位移，在此為圖面清晰，(a) 中僅為五分之一之資料點，兩圖中向量參考長度不等。

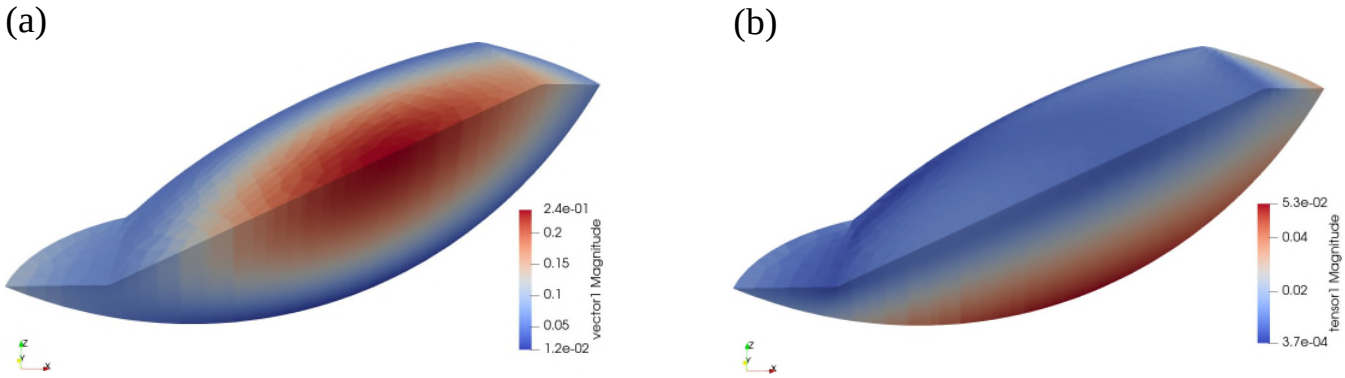


圖 5.6: 廣義彈性錯位模式範例案例彈性解 (a) 三維位移量分佈，(b) 應變量級分佈。

```
This is Ipopt version 3.11.9, running with linear solver mumps.
NOTE: Other linear solvers might be more efficient (see Ipopt documentation).

 Number of nonzeros in equality constraint Jacobian...:        0
 Number of nonzeros in inequality constraint Jacobian.:        0
 Number of nonzeros in Lagrangian Hessian.............:       15

 Total number of variables............................:        5
                     variables with only lower bounds:        0
                variables with lower and upper bounds:        0
                     variables with only upper bounds:        0
 Total number of equality constraints.................:        0
 Total number of inequality constraints...............:        0
        inequality constraints with only lower bounds:        0
   inequality constraints with lower and upper bounds:        0
        inequality constraints with only upper bounds:        0

iter    objective    inf_pr   inf_du lg(mu) ||d|| lg(rg) alpha_du alpha_pr ls
   0  1.9001806e+00 0.00e+00 1.00e+02    0.0 0.00e+00       0.00e+00 0.00e+00   0
   1 3.9148095e 01 0.00e+00 4.99e+01 11.0  7.39e 02       1.00e+00 1.00e+00f  1
   2 6.7244340e 05 0.00e+00 3.90e 03 11.0  6.41e 02       1.00e+00 1.00e+00f  1

Number of Iterations. ..... 2

                                   (scaled)                 (unscaled)
Objective...............:  3.6290411039629198e 06   6.7244339974041481e 05
Dual  infeasibility.....:  3.9004504856067872e  03  7.2273421819235989e  02
Constraint  violation....:  0.0000000000000000e+00  0.0000000000000000e+00
Complementarity.........:  0.0000000000000000e+00  0.0000000000000000e+00
Overall NLP error.......:  3.9004504856067872e 03   7.2273421819235989e 02


Number of objective function evaluations             = 3
Number of objective gradient evaluations             = 3
Number of equality constraint evaluations            = 0
Number of inequality constraint evaluations          = 0
Number of equality constraint Jacobian evaluations   = 0
Number of inequality constraint Jacobian evaluations = 0
Number of Lagrangian Hessian evaluations             = 2
Total CPU secs in IPOPT (w/o function evaluations)   =      0.035
Total CPU secs in NLP function evaluations           =    640.496

EXIT: Optimal Solution Found.
```

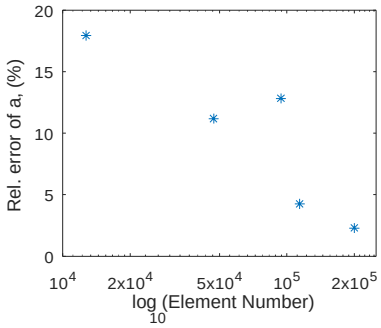
圖 5.7: IpOPT 最佳化執行疊代報表

在本計畫中，我們首先定義一標準範例，目標在已知破壞面錯位滑移條件 下，驗證是否能夠透過地表位移採樣反演求得。本案例將為一簡單階梯型對稱 崩塌 (Lam、Fredlund 1993; Xing 1988)，如圖 5.3 所示，該階梯斜面坡度為 1:2， 斜邊長 $L = 27.28$ m, 低階高 $H_o = 5$ m，其餘長度參數：$L_o = 8$ m，$L_u = 12$ m 及 $W = 50$ m，是以計算域範圍為 44.6×50 m，而崩塌區塊則以圖中球弧切面產生，對應該球弧面之球心位於 $X_c = (13.31\text{ m}, 25\text{ m}, 26.62\text{ m})$，而球弧半徑為 $R = 24.4$ m，以此原則產生之崩塌體體積為 3,811 m^3，利用前節之最小平滑曲面法計算之破壞面可驗證等同於該球弧（Kuo 等 2020），材料參數假設為偏軟的楊氏模數 $E = 22 \times 10^5$ Pa，泊松比 $\nu = 0.28$ 及密度 $\rho = 2,100$ kg/m^3。

在彈性模式中需要進行高精度的計算，故我們基於圖5.3(b) 之崩塌區布建三維非結構四面體網格並提昇網格密度，目前採用之計算網格如圖5.4所示，沿崩 塌區周邊我們設定 80 個均勻離散點，在對較扁平的三維計算域中，若欲利用較少的有限元素，垂直（z 方向）宜採垂直分層方式布建格點，在此方向，我們將 崩塌體切割為 40 層，以此網格網格生成參數，本崩塌體具有 200,160 個計算元素 (element)，相鄰邊界上之元素有 3,544 個，計算上則採用 P2 有限元素方法， 產生 270,531 節點 (node) 之 2,434,779 自由度（Degree of Freedom）之計算系統，

表 5.1: 反演準確度網格相依性分析

	總元素數 Total Ele. Num.	系統自由度 Degree Of Freedom	反演係數相對誤差 $\|\mathbf{a}^{inv} - \mathbf{a}^{given}\| / \|\mathbf{a}^{given}\|$
1	200,160	2,434,779	2.3%
2	114,104	1,392,084	4.3%
3	94,080	1,150,209	12.8%
4	47,140	581,751	11.2%
5	12,720	158,787	17.9%



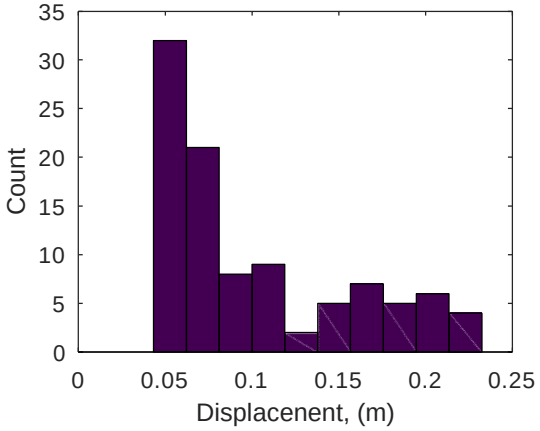


圖 5.8: 正向計算之地表採樣點位移量分佈（共 99 點）

為中等大小之網格，以目前大部分桌上型計算機之規模已可計算。

接下來我們假設主崩塌方向為平行於 $-x$ 軸（即 $\mathbf{t}$ 之 xy 投影分量 (t_x, t_y) 平行於 $(-1, 0)$），而式(5.10)中之錯位量參數 D_t 及 D_p 分別為一二次及一次多項式，具有給定之錯位位移係數為 $\mathbf{a}^{\text{given}} = \{\bar{a}_{(0,0)} = 0.01, \bar{a}_{(1,0)} = 0.0001, \bar{a}_{(2,0)} = 0.00025, \hat{a}_{(0,0)} = 0, \hat{a}_{(0,1)} = -0.0025\}$，在以上錯位條件下，破壞面上位移之 xy 平面投影如圖5.5(b) 所示，本位移場之最大位移量為 0.105 m，約小於崩塌區特徵長度三個數量級（~ 10^{-3}），符合小變形彈性模式，而該位移場下緣坡趾區域具有較大的水平向位移，而於上下兩側有向崩塌中心移動的位移，利用前段所示之網格，我們進行正向彈性模型計算，計算以 4.2 GHz AMD 3950 中央處理器, 單線程式，最終耗用 2GB 記憶體及 350 秒計算時間，完成三維崩塌體位移計算，在結果中，我們在崩塌體表面，隨機採樣 147 點，在這些點位上的位移向量 (xy 投影) 如圖 5.5(b) 所示。

假想以上隨機採樣的地表位移向量為遙測 (InSAR、Aerophotos 等）所產

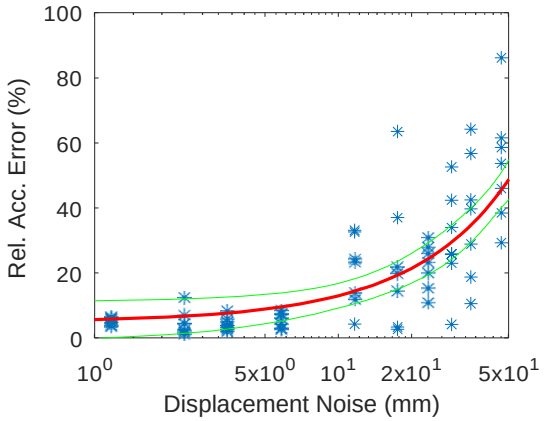


圖 5.9: 地表位移測量誤差量級與反演準確度相依性，地表採樣點共 99 點，綠色回歸曲線為 95% 信心區間

生的資料點，我們下一步則是利用式(5.11)，來反演錯位位移係數。首先我們採用相同的網格及計算模型，來檢視反演最佳化算則的正確性，最佳化誤差則設定為 5%。圖 5.7顯示 IpOPT 最佳化執行疊代報表，於表中可見，僅兩步疊代即由初始猜測參數 $(\mathbf{a} = \mathbf{0})$ 完成參數反算，而反算完成之參數為 $\mathbf{a}^{\text{inv}} = \{\bar{a}_{(0,0)} = 0.00988, \bar{a}_{(1,0)} = -0.0001, \bar{a}_{(2,0)} = 0.000251, \hat{a}_{(0,0)} = -3.26 \times 10^{-7}, \hat{a}_{(0,1)} = -0.00249\}$，為良好收斂至指定值的錯位位移係數，該反演係數與給定係數的相對誤差為 $/\mathbf{a}^{\text{inv}} - \mathbf{a}^{\text{given}}//\mathbf{a}^{\text{given}}/ = 2.3\%$，注意因各反演係數之單位並不齊一，因此本相對誤差僅在檢驗反演計算收斂性上具有意義，更適切的反演精度標準仍有待未來研究案例的施行來調整。

確認演算法無誤後，接著我們檢視網格密度相依性，在此我們降低地表位 移採樣點數至 99 點，將網粗化並以前述誤差檢驗收斂性，結果如表5.1所示， 於表中可見，反演精確度約略隨網格數目指數式降低而呈現線性的降低，然在 計算範例中，即便在最少的網格數目條件下，反演準確度仍可達到 20%，而若要求精確度維持於 5% 區間內，則我們可沿用本例之原始網格設定。

最後在本計畫中，我們測試在地表位移採樣中具有高斯雜訊時，對反演準 確度的影響，我們首先計算出地表理論位移的分佈標準差為 0.117 m，位移量分 佈值方圖如圖 5.8所示，以此分佈標準偏差為基準，我們在位移量各分量上以人為方式添加高斯分佈的雜訊位移，而後利用這些添加雜訊後的位移採樣點來反 演錯位位移係數，並計算準確度，在這組計算探討中，我們設計十組雜訊量級，

而每一雜訊量級中進行七組系集呈現 (emsemble realizations)，共 70 組計算，該十組雜訊量級分別為前述地表理論位移標準分佈偏差 0.117 m 的 0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 及 0.4 倍，等同於地表位移量測具有 1.17, 2.34, 3.51, 5.84, 11.69, 17.54, 23.38, 29.22, 35.07 及 46.76 mm 標準誤差量，而反演準確度如圖5.9所示，由該準確度趨勢可見，在量測誤差約為 10 mm 以下時，反演的相對準確度誤差約在 10% 之內，而以目前地表位移量測技術而言，10 mm 精準度是可確立，以此結果而言，反演準確度可藉由前述檢視方法，得到良好的控制。

第六章　結論與未來展望

第一節 計畫結論

近年來由於衛星影像遙測技術的進展，地表位移可藉由合成孔徑干涉雷達(InSAR)等相關的技術 (tcpInSAR, Mt-InSAR) 監測計算而得，藉由 InSAR 高密度的資料點，可歸納分類崩塌型態(行政院農業委員會水土保持局 2020a)，本計畫則在於開發一組分析工具與探討必需的程序，來利用這類新式地表位移資料推測深層山崩破壞面的位態。然而透過地表位移監測反推深層山崩地下破壞面是困難的，藉本計畫我們期以簡易及廣義彈性錯位模式來探討可行性，此方法在世界上坡地防災領域仍屬新興嘗試，預期未來可提供廣域地表影像遙測技術之擴展應用。

此破壞面反演模式是為一種彈性錯位理論，是假設由自由坡面與山崩破壞面包圍的山崩塊體是遵循彈性變形所推演的模式，在理論上是為一種反算問題，其對應之正算問題為破壞面上的給定錯動造成的自由坡面位移，這項作業將以南投仁愛鄉D066及新竹尖石鄉D077為潛勢深層山崩區為探討案例，並試以現地資料檢核。以技術來區分，本計劃探討兩種型態之彈性錯位模式，分別是1. 簡易彈性錯位模式及2. 廣義彈性錯位模式。前者是基於Okada 1985之半無限域彈性錯位解析模型來反演破壞面錯位位態，此模型之概念圖如1.2所示，而其正 向計算特性如第2章所述。由於理論上的半無限域假設，我們在該模式中利用平均坡度與坡向建立一坡面座標系統（圖2.1），破壞面簡化為約略平行於坡面的平面，故我們假設該破壞面之長 L 與寬 W 約略具有崩塌區坡面向延展特徵長度大小，而在坡面座標系統中，傾角 δ 與走向角 θ 兩者應於0°附近，而崩塌深

度，以山崩之體積-面積關係 (Klar 等 2011) 訂定參考深度，並假設錯位量均勻分佈於破壞面上，在以上的假設下，我們可訂定反演計算之參數搜尋空間。

我們以南投仁愛鄉 D066 及新竹泰崗 D077 兩崩塌區整體的滑動面為特徵尺度來定義破壞面位態參數搜尋空間，如於第4章第2及3節所敘述的反演策略，以 此策略反演破壞面位態結果得到 D066 破壞面深度為 36.8 m，D077 破壞面深度為 58.3 m，在前期監測治理計畫中我們可找到對應深度相近之滑動剖面，如圖1.7與1.38）所示之最大剖面深度，約略符合將崩塌區視為整體滑動的破壞面。在此必需再次強調的是，即便在此獲得相近的破壞面深度，但簡易彈性錯位模 式經過大幅度簡化，我們尚不能以工程的精確度來定義期望誤差，而應並採多 面向的分析來檢視反演結果。

在進行以上反演工作中，除了進行必要的坡面座標定義及轉換運算之外，我們亦須將 InSAR 等技術所量測之衛星視線方向 (LOS, Line of Sight) 之地表位移轉換至坡面位移，如第3章第1節所述，該計算重點在於利用單一升（或 降）軌影像時，在坡面向位移轉換時，必需引入坡面向位移是與坡向方向重 合之假設，此法如同 Cigna 等 2013; Zhang 等 2018 所提，同時為避免微地形造成不規則位移方向的干擾，我們加入地形濾波來排除之。而檢視多處長期InSAR 地表位移監測資料後，我們可約略認定許多資料似吻合崩塌區中的次崩塌區，或呼應一些地表裂隙分佈，這使進一步探尋是否可利用這些資料來探討 次崩塌分區的可行性，為此我們提出利用統計模型中的高斯混合模型 (Gaussian Mixture Model) 來進行位移資料分群計算，如第 3章第4節所述，以此法我們解析得 D066 之位移資料可分七群（圖3.9)，而 D077 分三群（圖3.17），此結果與地表裂隙分佈高度相關，期望可提供現場探勘作業與監測數據分析。

接著我們以郭志禹 等 (2019) and Kuo 等 (2020) 所提之最小平滑曲面破壞面推估法為基礎進行廣義彈性錯位模式研發，並完成廣義彈性錯位模式主體計算架構（第5章），我們以 Lam、Fredlund 1993; Xing 1988為例設計一標準測試邊坡，利用多項式來設計在破壞面上的已知位移，並以此給定的位移來正向計算範例中崩塌體的彈性位移，而後在崩塌體表面隨機採樣若干位置及其位移。將這些表面位移當成僅有已知，反過來假設破壞面上之位移多項式參（係）數為

未知時進行反演，我們展示了可成功反演出錯位位移場參數，接著我們探討了網格相依性及反演輸入資料點（地表位移採樣）的雜訊免疫性，在目前採樣點密度條件下，我們得到採樣位移雜訊在 10 mm 以下時，準確度誤差可小於10%。

第二節　未來展望

依據本計畫開發之分析工具與成果，我們在將來的研究開發提出以下展望：

(1) 崩塌區分區崩塌評估：大規模深層潛勢崩塌區中經常出現複合分區崩塌區塊，高斯混合模型似可應用於 InSAR 地表位移資料分群計算，而分群與子崩塌區之關聯性需要更多的實行經驗來檢驗，這部份檢驗將包含兩面向：1) 同崩塌區中多期合成干涉孔徑雷達 MT-InSAR 資料之分群間的關聯性，以及 2) 不同崩塌區的 InSAR 位移分群與崩塌區裂隙分佈檢視分析，並利用以上分群定義子分區崩塌區之特徵大小與深度，訂定崩塌破壞面位態參數空間與反演策略，並探討多期位移反演與結果比對。

(2) 廣義彈性錯位模式實際案例應用：實際案例將遇到複雜地形影響，預期對每一應用案例均需進行網格相依性、反演準確度評估等作業，這項作業預期可利用本計畫所提出之正算反演方式誤差評估程序來進行，針對各案例，我們先以最小平滑曲面破壞面推估法推測可能破壞面，其次利用 InSAR 量測之點位，先以模式之模擬採樣計算，決定計算網格布建準則，建立反演 準確率指標等，這些參數將為崩塌區相關之反演特性，取得這些特性後， 再進行實際資料反演，求取最小反演殘差以及錯位位移分佈，我們亦可同 時獲得彈性崩塌體之位移、應變與應力分佈等力學物理量，從而計算邊坡 安全係數。

(3) 最適崩塌面及深度決定策略：前項係針對利用山崩崩塌體體積-面積關係給定之崩塌體積並利用反演來求得破壞面錯位分布，將這程序進一步擴展：首先是我們可利用一系列崩塌體積來計算反演殘差，而視最小反演殘差案

例為最可能崩塌塊體，並以對應之破壞面深度分佈與實際監測檢核。其次在學理上，對應各反演邊坡崩塌體之安全係數，是否與該反演殘差呈現相關性，是值得探討的以議題。

(4) 最後，以下預期將是未來相關計畫所亟待改進的技術技術項目: 1) 破壞面上連續平滑之彈性錯位場之假設多項式項次宜更加完備，以涵蓋更廣泛的分佈模式；2) 最小平滑崩塌面預測技術預期可增加地層層面構造位態走向修正，來調整破壞面深度分佈預測；3) 利用衛星視線方向位移來進行反演計算及其對應準確度評估，目標在探討是否得以排除 InSAR 地表坡面向位移轉換程序，避免因轉換程序於引入假設及地形濾波所造成之偏差。

參考文獻

1. 行政院農業委員會水土保持局。集水區水理模式應用於深層潛勢山崩發生時序與警戒機制之評估。**2016**。

2. 行政院農業委員會水土保持局。大規模崩塌潛勢區地表位移觀測系統建置與分析。**2019**。

3. 行政院農業委員會水土保持局。廣域大規模崩塌潛勢區時序地表變形及活動性評估。**2020**。

4. 行政院農業委員會水土保持局。蘭台大規模崩塌潛勢示範區觀測科技整合研究。**2020**。

5. 行政院農業委員會水土保持局臺北分局。鎮西堡、秀巒及泰崗地區潛在大規模崩塌調查監測計畫。**2019**。

6. 科技部永續會計畫。集水區大規模崩塌多尺度先進遙測技術整合監測與崩滑行為模擬-總計畫暨子計畫: 集水區大規模崩塌高精度地表演化分析及滑移行為模擬之研究 *(I)*。**2018**。

7. 郭志禹，詹雅馨，蔡碧紋 等。“應用崩塌體積與最小平滑曲面法建構三維深層崩塌之近似破壞面”。中華水土保持學報，**2019**，*50*：143–153。

8. 經濟部中央地質調查所。大規模潛在山崩機制調查與活動性觀測 *(1/4)*。**2011**。

9. 經濟部中央地質調查所。山崩調查觀測技術精進與應用 *(1/4)*。**2019**。

10. A. Aryal, B. A. Brooks and M. E. Reid. "*Landslide subsurface slip geometry inferred from 3-D surface displacement fields*". *Geophys. Res. Lett.* **2015**, *42*: 1411–1417.

11. M. Battaglia, P. F. Cervelli and J. R. Murray. "*Modeling crustal deformation near active faults and volcanic centers- A catalog of deformation models*". In: USGS, **2013**.

12. F. Cigna, S. Bianchini and N. Casagli. "*How to assess landslide activity and intensity with persistent scatterer interferometry (PSI): the PSI-based matrix approach*". *Landslides*, **2013**, *10*: 267–283.

13. A. Dempster, N. Laird and D. Rubin. "*Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm*". *J. Royal Stat. Soc. Ser. B*, **1977**, *39*: 1–38.

14. Q. Duan, S. Sorooshian and V. K. Gupta. "*Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models*". *J. Hydrology*, **1994**, *158*: 265–284.

15. R. Halir and J. Flusser. "*Numerically Stable Direct Least Squares Fitting Of Ellipses*". In: *Proc. Intl. Conf. Computer Graphics and Visualization*. **1998**: 125–132.

16. F. Hecht. "*New Developments in Freefem++*". *J. Numer. Math.* **2012**, *20*: 251–265.

17. J. Hu, Z. W. Li, X. L. Ding *et al.* "*3D coseismic displacement of 2010 Darfield, New Zealand earthquake estimated from multi-aperture InSAR and D-InSAR measurements*". *J. of Geodesy*, **2012**, *86*: 1029–1041.

18. A. Klar, E. Aharonov, B. Kalderon-Asael *et al.* "*Analytical and observational relations between landslide volume and surface area*". *J. Geophys. Res.* **2011**, *116*: F02001.

19. C. Y. Kuo, P. W. Tsai, Y. C. Tai *et al.* "*Application assessments of using scarp boundary-fitted, volume constrained, smooth minimal surfaces as failure interfaces of deep-seated landslides*". *Front. Earth Sci.* **2020**, *8*: 211–228.

20. L. Lam and D. G. Fredlund. "*A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis*". *Can. Geotech. J.* **1993**, *30*: 905–919.

21. G. McLachlan and K. Basford. *Mixture models: inference and applications to clustering*. Marcel Dekker, **1988**.

22. Y. Okada. "*Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space*". *Bullet. Seism. Soc. Am.* **1985**, *75*: 1135–1154.

23. Y. Okada. "*Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space*". *Bullet. Seis. Soc. Am*, **1992**, *82*: 1018–1040.

24. Y. C. Tai, C. J. Ko, K. D. Li *et al.* "*An Idealized Landslide Failure Surface and Its Impacts on the Traveling Paths*". *Front. Earth Sci.* **2020**, *8*: 313. https://www.frontiersin.org/article/10.3389/feart.2020.00313.

25. A. Wächter and L. T. Biegler. "*On the implementation of a primal-dual interior point filter line search algorithm for large-scale nonlinear programming*". *Math. Programming*, **2006**, *106*: 25–57.

26. Z. Xing. "*Three-dimensional stability analysis of concave slopes in plan view*". *J. Geotech. Eng.* **1988**, *114*: 658–671.

27. Y. Zhang, X. Meng, C. Jordan *et al.* "*Investigating Slow-Moving Landslides in the Zhouqu Region of China Using Insar Time Series*". *Landslides*, **2018**, *15*: 1299–1315.

附錄一：期初審查會議記錄暨回覆辦理情形

開會時間：民 110 年 4 月 23 日（星期五）

開會地點：水土保持局第六會議室

主持人: 陳副總工程司振宇

表 1:「應用彈性錯位理論預測深層山崩破壞面之評估」案

項次	審查意見	回覆辦理情形
1	請說明「簡易彈性錯位模式」及「廣義彈性錯位模式」之優缺點及適用性。	簡易彈性錯位模式是在半無限域簡化條件下，藉由彈性理論推導得到的錯位位移與地表位移間之關係，為格林函數型態，見第 2章，在此假設下，坡面地形細節，如山脊、坡谷等地貌等均無法在本模式反映，而是簡化為如傳統無限邊坡的模式，而依前期相關計畫的破壞面反演經驗，本模式反演深度主要是由地表位移分佈型態來決定（即何種破壞面位態能夠產生較近似於第2章所展示的地表面位移型態），於此，其精確度取決於地表資料點分佈型態精確與否，故是屬於較弱的反演束制，造成束制較弱的主要原因與地表資料精確度有關，這是由於坡面位移型態需要以坡面向位移來探討，但目前以單一升（降）軌之LOS位移轉換技術，我們勢必會引入因假設坡面位移方向所造成的位移型態誤差，同樣的，如何在 InSAR 技術中獲得位移資料的精度估計，這些都是未來長期採用 InSAR 技術所必須注意並尋求克服的。而廣義彈性錯位模式則是將給定破壞面以上之崩塌塊體當成彈性體，而其地表位移是由破壞面上給定錯位位移透過三維彈性體計算而得，所以塊體的形狀可為複雜型態的有限體積，且由於塊體可以自由體 (free body) 的概念來獨立處理，故可與崩塌區外圍岩床割離，推測與 InSAR 位移整合時，同樣可限縮在較小範圍的位移資料點反演束制應用，且因廣義彈性錯位模式之假設破壞面通常是透過第三方方法來給定，如山崩面積-體積關係，在 深度上有較佳的束制。
2	本計畫採用何種彈性錯位模式估算及驗設？(P. 25)	本計畫主要重點在探討簡易彈性錯位模式之反演應用，將以 D066 及 D077 兩崩塌區已知狀態來驗設，而廣義彈性錯位模式則在備製可行性工具。

表 1（續）:「應用彈性錯位理論預測深層山崩破壞面之評估」案

項次	審查意見	回覆辦理情形
3	實施進度第四季，有關現場複勘，是只有第二處或二處均複勘?(第三季已複勘第二處) (P.26)	本計畫擬複勘 D066 及 D077 兩處，但由於已獲相關前期相關單位之監測及治理成果書，本計畫之複勘在於加深對現場設施及現況比對，但計畫之現勘為本年度五月疫情延誤，需移至下半年度進行。
4	彈性錯位模式係結合地震作用 (斷層) 推估變位，此與大規模崩塌機制是否符合?	在彈性錯位模式中，破壞面錯移所引致的地表位移，是以彈性連續體假設所推導而得，在此前提假設下，適用的崩塌區宜具有較高的剛性，山崩塊體運移之型態，且運移位移幅度小，檢視本計畫所選擇之區域，其崩塌條件與此假設近似，故判斷可以用來檢視此模式的可用性；相對的，對淺層、崩積層近似流體運動的土石流則不適用。另外該模式為靜態模式，即便在地震斷層面反演應用中，也無關於瞬時加速度動態因素（見第2章）。
5	所選 D066 及 D077 兩例是否已確實掌握崩塌機制與破壞面分布及其力學性質。	此兩崩塌區因承載精英及泰崗兩部落生活圈，其重要性早已為相關單位知悉並進行持續監測整治計畫，故較能掌握崩塌破壞面分佈及力學機制，這在開發新破壞面反演工具中是極為重要的訊息，特別是本計畫所提之反演方法目前皆處於非常早期的工具整備與性質探討的階段，這先現場已知的訊息是極為重要的。
6	InSAR 判釋位移應有足夠之參考點位網，以呈現其變位量與判釋之精確度，是否已有充分之掌握此等資料來源?	本計畫目前資料來源主要採用 ALOS 2007 ~ 2014 升軌影像所得之 TCP-InSAR 位移量測，在此時間段中，並未有固定參考點設置，如單頻連續 GPS 監測站是水保局於 2017 年設置，每區各六座，後續於 2020 設置角反射器以控制 InSAR 測量。但因 TCP-InSAR 是以多期影像及利用多重影像窗格疊代來選取多期影像中之相關點，在施測區域可大幅提高資料點密度，如這段期間中，D066 及 D077 分別可遠高於 700 與 600 points/km^2，所以目前計畫中之資料是以高密度之位移資料點來提昇判斷崩移運動的可信度；而自 2017 及 2020 後，於崩塌區之 GPS 與角反射器則可提供更可靠之 InSAR 量測。預期在未來更能掌握精確度後，可藉此調整反演最佳化計算的資料權重，但不影響目前的反演計算工具開發。

表 1（續）:「應用彈性錯位理論預測深層山崩破壞面之評估」案

項次	審查意見	回覆辦理情形
7	利用 InSAR 的量測資料，利用彈性錯位理論推估大規模崩塌的破壞面，推其間的關聯理為是否應詳加說明 (例如地表組成特性等)。	本計畫的主要目標就在試圖回答此一問題，今日我們已可利用衛星 InSAR 類之遙測技術以大範圍高密度的方式監測地表位移，在坡地崩塌區的應用中自然會聯想這些地表位移訊息是否可以用來推估地下破壞面的深度，所以在本計畫中我們提出以彈性錯位的模式來建立反演關係，其概念及假設如新增的第1章第3節所述。關於應用彈性體的假設，可參考答覆 1、4、9，而地表組成特性，我們目前認為是與分區崩塌行為相關，而 InSAR 資料是否得以反應分區崩塌性，我們引入統計分群技術試圖建立關聯，目前就 D066 及 D077 而言，結果堪稱樂觀，同見答覆 12 及 13。至於更細節的地質與材料特性，如植批、表土、岩床劈理、斷層走向、材料參數空間異質性等等，均不在本計畫探討範圍。
8	D077 及 D066 的實際山崩體積，可能滑動面深度及其形式是否為已知?	請見答覆 5。如同委員所提，此二區域之滑動面並非單一而是呈現一系列不同深度的複合型滑動面，部份深度已由鑽井或其他地球物理方法所探知。
9	如何從各事件位移量來推估破壞面，其代表位移量如何選定?	本研究尚未計畫針對單一事件來推估其對應之破壞面，主因是以目前對此彈性模式的破壞面反演行為所知仍不足，以本計畫主要依賴的 InSAR 位移輸入而言，可對此問題提供部份解答應屬多期 InSAR 的應用。在多期資料中，我們可利用影像對所定義時間段包夾的事件來關聯事件，這是由於以目前影像來源是被動受限於他國衛星攝取台灣地區影像的時間，以及 TCP-InSAR 計算中依照影像匹配品質選取影像對的結果。然而在進行這項研究前，仍需對 InSAR 地表位移型態有更深層的解讀與了解，將答覆 12 之分群技術應用至多期 InSAR，並檢視各期分群間一致性及其與分區崩移行為相關性，有了這些對比性質更多的了解，預期才得以逐漸解答與各事件關聯的破壞面推估。
10	簡易/廣義彈性錯位模式，此二者過去的經驗與真正的崩塌深度之誤差為何?	目前除了 Aryal 等 2015一文外，我們並不知有其他應用任何彈性模式來反演破壞面的嘗試，而在該文中針對 Cleveland Corral landslide, CA, USA 之反演結果破壞面深度推估為 2.5 至 3.25 m，尚遠低於深層山崩的情境，所以我們尚無法對此一問題提出解答，參酌答覆 1，在簡易彈性錯位模式中，誤差取決於地表位移型態的精確度，以目前此方法仍處於早期發展之狀況，仍需依靠累積案例來建立此誤差之來源及範圍。而廣義模式中由於引入第三方深度或破壞面位置之限制條件，誤差範為可能較易掌握，然而這仍屬研究範疇，對任何結果應審慎以對。

表 1（續）:「應用彈性錯位理論預測深層山崩破壞面之評估」案

項次	審查意見	回覆辦理情形
11	承上，其計算及資料蒐集成本，與 107 及 108 年成大戴義欽教授所提之理想化曲面之方法，二者差異為何？	本計畫所牽涉之計算、最小平滑曲面破壞面推估及戴教授的理想化曲面破壞面推估法的計算資源成本均不高，以今日一般電腦，最多在數分鐘內可完成。而本提問提及兩種理想破壞面方法之差異，簡言之是在假想破壞面形成的方式，戴教授的方法需藉由地形及山崩運移方向來選定縱橫兩方向之主要曲率，並以此曲率來建構破壞面，而本計畫所採用的方法則僅須潛勢崩塌區之封閉邊界，兩預估破壞面會有些許差異，其次是兩方法之準確性對潛勢崩塌區劃定之精準與否有些敏感性差異。戴教授團隊與本人近日完成一比較性研究，以兩種方法預估崩塌量體，並結合土石流崩塌模式進行情境模擬。我們已完成此比較研究一文稿，目前由某一國際相關期刊審稿中。回到資料蒐集成本而言，仍然以 InSAR 位移的影像獲取及解算佔有最高的成本，而這些成本也應包含資料檢核、詮釋及驗證等無形成本。
12	目前採用 D077 及 D066 案例，已有多處圈繪崩塌範圍及崩崖，故目前所選取分布群是以已知崩塌 SCARP 決定，在未來推廣其他案例恐有困難。	正是因為此原因促使本團隊提出本研究提案，在本提案中一項重要研究項目是檢視 TCP-InSAR 點位所反應的地表位移特徵，特別是與崩塌區中顯著裂隙分佈的對比，而在工具開發方面，方法的客觀性尤為重要，在這部份我們引入高斯混合模型分群技術，在應用至 D066 及 D077 兩案例中，分群結果與已知之裂隙分佈呈現高度相關，獲得初步成功，見第3章第5、6 節。預期此工具可更精確分析崩塌區分區崩塌運移性，來幫助破壞面反演，或定義崩塌區活動性等。
13	由 D066 案例，具有多處崩崖，故初步應可推斷為多重滑動破壞之可能性極高，目前以位移回推為單一破壞面，則其代表意義為何？	見答覆 12。以本例中兩案例，藉由客觀的統計分群工具極可能與多重滑動塊體高度相關，並建立分區破壞面反演之可行性。而前期相關計畫將位移回推為單一破壞面是工具開發必經之途，然以目前經驗而言，將這些位移視為一整體整體似可對應至大崩塌區的較深層破壞面，如 D077 反演出 58.3 m 深，D066 反演出 36.8 m，在監測治理計畫中可找到深度相近之滑動面，唯以目前單一反算尚不足以引導出決定性的結論，但應保持多面向的探討。循山崩面積、體積及深度經驗關係，我們預期分區檢視崩塌運移時，反演破壞面深度分佈應較淺，這點則待本計畫更多分析角度暨反演策略的進行來來觀察，長遠而言，若此趨勢建立，預期未來可藉由多期資料的反演，以統計趨勢加強對反演結果的判識。

表 1（續）:「應用彈性錯位理論預測深層山崩破壞面之評估」案

項次	審查意見	回覆辦理情形
14	InSAR 數值為多年期成至少一年期，故難以對應到單一事件滑動，比對困難，滑動面之意義模糊。	見答覆 4 及新增第1章第3節關於應用彈性錯位模式於深層崩塌破壞面反演之假設及應用情境所述，要使用彈性錯位模式必須有以下條件：崩塌體受觸發而產生一小錯動，但該錯動並未造成崩塌體完全脫離其所在之岩床，且內部並未產生塑性變形或流動，使變形及應變仍得以彈性體來描述，而由於本彈性模式是一靜態理論，與錯動行為發生當下的加速度無關，只要變形期間崩塌體維持彈性，本模式即適用，故我們不能將此反演定位為對應到任何一單一事件，而是應將其視為 InSAR 施測時間段內的總和性效應，但若資料是以短而多期的 InSAR 位移呈現，則可能將崩移事件的時間進一步限制在對應的 InSAR 時間段內，但這部份尚待進一步研究來釐清。
15	以 InSAR 所得之位移，其誤差範圍為何？所得之推估滑動面亦累積傳遞該項位移的誤差。	InSAR 所量測之位移為影像序列期間相關點的相對位移，但其與真實地表的位移誤差，我們則藉由不同測量技術的比對來估計，利用同樣的 TCP-InSAR 技術以及在多處 (> 30) 潛勢崩塌區安裝 GPS 監測站後之 GPS 紀錄資料，該兩測量系統間於監測期間累積誤差約在 5 ~ 20 mm 之間（行政院農業委員會水土保持局 2020a）。地表誤差確實會在反演時傳遞至破壞面位態反演與錯移計算中，此誤差將是固定跟隨相對應的 InSAR 時間段，而非以累積形式傳遞至反演中。本計畫目前並未將地表位移誤差對破壞面反演的敏感性分析列為本年度研究項目，但本議題確為未來必需加以探討了解的。

附錄二：期中審查意見回覆辦理情形

表 2:「應用彈性錯位理論預測深層山崩破壞面之評估」案

項次	審查意見	回覆辦理情形
1	本計畫執行在 InSAR 部份進行大量濾波，已將地形特徵加以濾除為單一平均平面，無法用以解釋不同區位崩塌塊體之個別位移情形。	在 TCPInSAR 或 MtInSAR 測量計算中引用計算所產生的濾波效應非本計劃訴求並產生貢獻，而轉坡面向位移時所引入之地型濾波是為去除微地形影響，目的確實在取得較為均值位移，但是否此運算就一概抹除不同區位崩塌塊體之個別位移，則可藉由濾波器閥值設定來調整，本計劃中該濾波閥值是以坡面特性長度之三分之一來定，理想上，已可解析主崩塌區約十組次崩塌塊體（(1/3)^2），我們認為已保留足夠之解析度，此外，我們可以第 3 章第4 節之 InSAR 資料點統計分群技術看出，在 D066 與 D077 崩塌區中，即便經過上述之地形濾波，仍可見到部份次崩塌塊體之行為。在實務考量下，過小塊體之行為應採用區域定點監測，而不應以本計劃所開發之技術進行。
2	大幅濾除結果導致冠部及坡趾多處出空值，且坡面位移有均一化情形，殊不合理。	坡面位移均一化是由於在本計畫中僅利用單一降軌影像來進行 InSAR 位移測量，而將該量測之位移轉換對應至坡面位移時，因資料條件不足，不得不引進坡面位移均平行於坡面最大坡降方向之假設而產生，而坡址處產生空值是因為該處坡向與衛星視線方向 (LOS) 近乎垂直而濾除，為客觀的觀測與坡面向轉換的幾何關係限制，並無不合理。本計畫所使用之坡面向位移轉換方式並非本團隊憑空獨創，同樣的方法先前出現於 Cigna 等 2013; Zhang 等 2018。將來為克服此客觀限制，應向尋求更完備的影像來源（如同時使用升、降軌，飛行向 (Azimuthal) 影像等），而這部份牽涉新型態之 InSAR 測量演算，非本計劃之訴求。 本意見同時引發我們思考另一反演計算程序：將彈性錯位位移轉換為衛星方向位移來進行反演，如此可避免坡面位移轉換之盲區，而得以交錯比較兩算則綜效，而此演算法將於未來相關計劃實現。

表 2（續）:「應用彈性錯位理論預測深層山崩破壞面之評估」案

項次	審查意見	回覆辦理情形
3	反演案例之位移分佈，標準差內已有大量反向位移，且分布有方向相反，無法解讀崩塌狀況，且與 InSAR 解算結果差異甚大。	本計畫資料來源目前僅限於單軌影像，在目前開發之反演計算時，必須引入轉換假設（見本表答覆 2），來將 InSAR 量測之衛星視線方向位移轉換為坡面位移，而轉換中產生之反向位移，為此轉換資料限制下不可避免的，目前的反演，也將之視為位移而不應進行人為干預。我們認為將來為了解並解決此一問題，一則是在目前已知疑義處加設地面位移監測站，目標在評估是否存在混合了區域抬升現象，其二則是引用多軌影像資料（同見本表答覆 2），以排除坡面向位移轉換之硬性假設。 另外以本計畫分群資料技術刺觀察分群特性，則可發現僅有廬山之 C7 分群（圖3.10) 呈現不符合直覺的抬升之外，其餘所有分群之群體均呈現沿坡降方向運動（由於參考座標體系選取之故，圖3.10中分群對應峰值位置之正值代表沿坡面向下移動，見相關章節之文字敘述）。本技術預期可提供更進一步分析 InSAR 資料分群分區行為之方法。
4	反演之崩塌傾角於兩項案例中都趨於水平，殊不合理。	本反演之破裂面位態為相對應於坡面坐標體系而言（請參考圖 4.1），以此座標體系以及坡滑具有約略平行於坡面的狀況而言（請參考圖 1.2），破壞面傾角趨於零值（平行坡面），反而是合理的。
5	反演崩塌深度與實際案例差異明顯，且無法解說究為多重滑動之哪一部分。	因為大自然環境的複雜異質性，我們不能預期這些簡易模式能完全取代現場鑽井及地球物理方面的量測，而應將此方法視為地表遙測可能提供的伴隨預估屬性。回到此一意見，請同參考前表關於期初審查意見 13、14 之答覆。在此引用前述答覆中與此意見相關部份：我們目前傾向將這些位移視為此二崩塌區整體的滑動面，對應至大崩塌區的較深層破壞面，如 D077 反演出 58.3 m 深，D066 反演出 36.8 m，在監測治理計畫中可找到深度相近之滑動面（第1章第4節圖1.7 及5節圖1.38），在此必需再次強調的是，簡易彈性錯位模式經過大幅度的簡化，我們不能以工程的精確度來定義期望誤差，並採用多面向的探討，例如綜合加入山崩面積、體積及深度經驗關係等。最後以技術開發的層面而言，我們將秉持以下答覆意見的態度。
6	各項簡化假設及多重統計及濾除，將導致分析結果累積錯誤及監測資訊失真。	我們深知目前的這些限制也承認目前確實有失真誤差，但在我們進行更廣泛的探討前，我們無法評估這些因素的影響程度，以目前模式開發進程而言，我們承認尚未到達逐一檢視這些因子的階段，相同地，這些因素也不成為否定終止開發這技術的理由，我們將採用正向的想法，未來逐漸將這些因素含納至此類反演模型的相關技術範圍，保持進展。

表 2（續）:「應用彈性錯位理論預測深層山崩破壞面之評估」案

項次	審查意見	回覆辦理情形
7	摘要之 DF066 及 DF077，應為 D066 及 D077。	已更正
8	文中「計劃」應為「計畫」。圖 1.1「迭代」應為「疊代」。	已更正
9	P56 圖 4.3 及 P59 圖 4.5 看不出地表位移及彈性錯位模型反算位移之比較？未見紅框圓虛點？藍色箭頭代表？	確實此二圖圖面資料屬性多，有 InSAR 觀測資料、反演資料以及推測之斷層位態，在本報告中，我們在本題所提兩圖之圖標中加入更詳細的敘述文句。
10	請說明第二季 (2021 年 4-6 月) 現場複勘潛勢崩塌區情形，並附佐證資料，相關現地監測資料與本計畫研究模式驗證結果如何？(p6-7)	本計畫現地調查重在更新一些距離本團隊上次勘查 (2016) 至今的一些地表變遷，除此之外，本團隊無現場監測資料直接調閱的管道，在此尚無更新今年之數據，此外計畫主體仍然在於反演方法論的建立，故反演比對的主要資料來源目前仍限於行政院農業委員會水土保持局 2019; 經濟部中央地質調查所 2019，再者反演結果屬性仍在於提供坡面整治規劃參考之靜態資料，即時追蹤動態資料來反演錯動對監測效益是否得以提昇仍待觀察，故在此暫緩此一建議衍生之相關工作；但我們近期勢將隨方法成熟度提昇而導入更近期的監測資料。
11	圖 6.1 計畫進度甘特圖只列規劃進度，請補充實際進度 (p6-8)。	計劃進度已無於期末報告，本部份以結案評估代替
12	請修正封底本局官網網址，修正為 https:// www.swcb.gov.tw/。	已更正
13	本計畫崩塌潛勢區反演與 109 年廣域大規模崩塌潛勢區時序地表地形及活動性評估報告書內容、圖片雷同，請問兩案計畫差異在那？	本計畫緣起於 109 年計畫，雖然於該期計劃中，反演計算初具雛型，並完成部份文字，但許多應進行的探討細節於該年度並未進行，在本計畫中，我們則逐一檢視這些細節，並尋求對由這些細節的了解，來規劃未來的方向。在本計劃中，第 2章為本計畫新增對簡易彈性錯位模式正向計算的探討，為未來反演計算中決定參數空間範圍所需：第 3 章第4 節中之 InSAR 資料點統計分群技術，預期則是未來大範圍崩塌區分區分析的重要客觀資料技術；而第 5 章第 2 節中之廣義彈性錯位反演，目標在於建構實際複雜地形的基礎反演技術，以上三項目，皆為本計畫所產生之展新研究結果。而回顧其他部份內容雖然圖表看似與前期雷同，但我們修正了許多之前的謬誤，且以計劃文件完整性考量，將相關段落再次引用，在引用時，我們亦依循學術倫理，清楚說明出處，而本段答辯內容，亦於主文中提及。

表 2（續）:「應用彈性錯位理論預測深層山崩破壞面之評估」案

項次	審查意見	回覆辦理情形
14	反演或逆推之深度均為數值演算成果，宜加入實證資料進行檢證。	本團隊在學術研究的本質下，自會密切注意相關實證資料的比對。 目前已有之書面資料已概述於第1章，而我們判定目前之反演結果較趨近於 D066 及 D077 之整體推估之破壞面（圖1.7及1.38）。

附錄三：期末聯合審查意見回覆辦理情形

開會時間：民110 年12 月10 日（星期五）

開會地點：水土保持局B 區辦公室第三會議

主持人: 陳主任秘書重光

表 3:「應用彈性錯位理論預測深層山崩破壞面之評估」案

項次	審查意見	回覆辦理情形
1	建議補充分析成果與實際調查成果之比較與差異分析。	目前的研究成果中能與實際案例比對的是簡易彈性錯位模式，且限於整體崩塌區塊長時間（2007~2011）之累積變形，請同參考回覆期初審查意見13、14（表1），期中審查意見4、5 之答覆（表2），與相關引述之本文段落。在此引用前述答覆中與此意見相關部份：我們目前傾向將這些位移視為此二崩塌區整體的滑動面，對應至大崩塌區的較深層破壞面，如D077 反演出58.3m深，D066 反演出36.8 m，在監測治理計畫中可找到深度相近之滑動面（第1章第4節圖1.7 及5節圖1.38），在此必需再次強調的是，簡易彈性錯位模式經過大幅度的簡化，我們不能以工程的精確度來定義期望誤差，並採用多面向的探討，例如綜合加入山崩面積、體積及深度經驗關係等。 其餘於本計畫中提及的InSAR 位移資料統計分群，與廣義彈性錯位模式等技術，則有待於未來崩塌區分區分塊檢視的相關研究中進行，其應用成果將整理於適當文獻中。
2	InSAR 影像用於地表位移的可行性高，具有高度應用潛力。本研究的方向值得肯定，針對兩個地區的個案偏向測試性質，期待未來能進一步延伸到更廣泛的範圍。	確實本計劃中所提之方法均朝向未來更廣泛的應用，而這兩區域相對許多其他的潛勢崩塌區具有相對豐富的訊息，是以可預期的未來，仍將不斷的出現在相關方法的開發與評估之中，而新案例勢將在適當時機，逐漸加入研究案例。
3	技術創新性高，成果明確，應用層面高，未來若能結合坡面運動相關理論進行坡體內部相關參數獲取，將有助於釐清坡體滑動臨界條件。	本計畫的確是希望將來應用於實際層面，目標是得以將遙測地表變形，透過彈性錯位模式反推至破壞面變形，此反演模式本質上是屬所謂反算問題，配合以實際量測資料，常為一超定系統(overdeterminant system)，以目前進展而言，我們逐漸可掌握地表變形處理、計算網格相依性評估、反演誤差評估程序等，相信這些技術確有機會結合坡面運動等相關理論，進行坡體內部相關參數獲取，助於釐清坡體滑動臨界條件，這也是我們發展這些技術對未來的期許。

表 3（續）:「應用彈性錯位理論預測深層山崩破壞面之評估」案

項次	審查意見	回覆辦理情形
4	本年度以南投縣仁愛鄉D066、新竹縣尖石鄉D077(泰崗）為案例探討。建議持續探討最深破壞面研究。	確實此二區域將成為本計畫重要的範例區域，我們將持續關注，相關議題如分區分塊崩移評估，定性破壞面與彈性錯位破壞面推估等，也請見前述第2 項回覆。
5	高斯混合模型可對InSAR 地表位移資料分群，又助於分區分塊化劃定探討，建議持續探討。	在本計畫中，發現統計中高斯混合模型可對InSAR 地表位移資料分群，並似吻合至崩塌區中地表裂隙分佈，我們確實也認為這方法值得進一步研究，目前規劃是首先利用該法分析多期LiDAR 位移資料分群之相關性，以本計劃兩崩塌區而言，我們預期可檢視2007~2011 年間ALOS 升軌及及其後ALOS2 之降軌影像多期tcpLiDAR 位移，並期待將來可應用於更多的崩塌區。
6	根據群集分析劃分不同的滑動體，係根據平面變形量抑或是整體變形量，此外是否需設定群集個數。	我們目前傾向於利用高斯混合模型中的貝氏訊息訊息量準則來客觀決定分群量，而不加以人為設定群數。我們相信此客觀訊息對詮釋InSAR 位移點位的分群特性與崩塌裂隙分佈之間的相關性是重要的，而離群變形量在這分群計算中會被自動排除。
7	深層山崩破壞影響因素甚多，理論研究結果會與實際相差甚多。建議針對相關因子與假設系統性說明。	謝謝此一建議，此議題在本計劃歷次審查中反覆出現，足見其重要性，我們回顧彈性錯位理論之理論應用條件，檢視整理至第1章第3節關於應用彈性錯位模式於深層崩塌破壞面反演之假設及應用情境，簡言之，彈性錯位模式應用必須有以下條件：在目前技術開發階段，我們必須忽略地質岩性構造等細節，採用等密度、等向均質之條件；其次，崩塌體受觸發而產生一小錯動，但該錯動並未造成崩塌體完全脫離其所在之岩床，且內部並未產生塑性變形或流動，使變形及應變仍得以彈性體來描述，而由於本彈性模式是一靜態理論，與錯動行為發生當下的加速度無關，且變形期間崩塌體維持彈性；最後，我們目前仍不能將此反演定位為對應到任何一單一事件，而是應將其視為InSAR 施測時間段內的總和性效應，但若資料是以短而多期的InSAR 位移呈現，則可能將崩移事件的時間進一步限制在對應的InSAR 時間段內。而InSAR 分群理論之應用條件目前則仍待以更多案例來檢視，我們將更了解其應用成果後，整理於適當文獻中。