

屏東林區管理處大規模崩塌監測及治理經驗

文／圖 ■ 臧運忠 ■ 成功大學防災研究中心副主任

林彥志 ■ 林務局屏東林區管理處治山課技正

施保呈 ■ 林務局屏東林區管理處治山課課長

李膺讚 ■ 林務局集水區治理組科長

一、前言

民國 98 年 8 月莫拉克颱風期間於臺灣中南部誘發多處大規模崩塌，並造成重大傷亡，其中以高雄縣小林村獻肚山所發生之大規模崩塌事件最為嚴重，並引起國際間高度關注，我國各級機關（中央地質調查所、林務局以及水土保持局）亦開始針對可能發生大規模崩塌之區域為進行調查，利用空載雷達掃描（LiDAR）高解析度數值地形與影像，輔以航攝影像、地質圖之地層與構造資料，合併地形坡向、野外初勘查核，據以推測具有發生潛勢之「大規模崩塌區」（崩塌面積大於 10 公頃、崩塌土方量超過 10 萬立方公尺、崩塌深度 10 公尺以上者）。

然因此類「大規模崩塌潛勢區」之數量眾多，傳統地工監測及工程處理之規模與經費頗高，因此，屏東林區管理處針對轄內危險度較高之大規模崩塌潛勢區，先行採用單價相

對較低之單頻 GPS 作為監測坡面位移之設備，透過資料解算提升精度，並廣泛的布置於可能滑動的重點坡面，進行較長時期、週期性的觀測作業，並輔以伸張計以及雨量計之資料收錄成果，分析坡面移動性與時間的關係，並探討坡體滑動與降雨、地震等促崩因子間之關聯性，以供防減災工作執行之參考及依據，俾利掌握易致災區域及早研擬因應對策。

二、坡面變動監測方法

常見坡面變動監測方式依設置地點主要分為地表、地下。

（一）地表

1. 雨量計

降雨量為崩塌重要觸發因子，蒐集監測區鄰近雨量以了解降雨量與塊體滑動或其他因子間關係。

2. 裂縫計

裂縫計為位移量測裝置，將其兩端固定在結構物裂縫的兩側，可測得裂縫寬度的變化量。

3. 地表伸張計

裝設於滑動塊體崩塌頂部，固定兩端以鋼絲相連，藉由鋼絲變化量測地表兩點間之相對變位。

4. 傾度盤

利用傾度儀感應器搭配傾度儀記錄指示器，通常安裝於建物或結構體上進行量測，以便隨時掌握傾斜程度是否有擴大趨勢。

5. GPS

GPS 接收站利用衛星定位得到其絕對座標值，再解算與遠端不動點間之相對位移量，長期觀測地表位移變形，為因雙頻 GPS 單價較高，但可慮除電離層誤差，單頻 GPS 價位較為低廉但相對精度較差，近年來利用單頻 GPS 搭配雙頻 GPS 進行校正，則可達到接近雙頻 GPS 精度之成果。

6. 光達地形 (LiDAR)

是一種光學遙感技術，它通過向目標照射一束光，通常是一束脈衝雷射來測量目標的距離等參數，是通過測量發送和接受到的脈衝信號的時間間隔來計算物體的距離，但拍攝單價昂貴。

7. 干涉合成孔徑雷達 (InSAR)

使用兩幅或多幅合成孔徑雷達影像圖，根據衛星或飛機接收到的回波的相位差來生

成數字高程模型或者地表形變圖。理論上此技術可以測量數日或數年間厘米級的地表形變，可以用於自然災害監測，例如地震、火山和地滑，以及結構工程尤其是沉降監測和結構穩定性。

(二) 地下

1. 鑽探

利用人工鑽探鑽取岩心，鑽取所得之岩心試體透過判釋，可了解地下地質分層，以及可能弱面，鑽孔位置選擇相當重要，鑽探後可灌漿架設觀測管配合其他地下監測方法。

2. 地下水位計

反應地下水位變化大的位置，了解滑動或雨量與地下水位關係，地下水位加速上升時可能為崩塌前兆，通常裝設於位移計附近。

3. 傾斜管

在選定之深度之觀測管（須配合鑽探）內置入一支傾斜儀之管底，利用傾斜儀之陀螺儀角度傾斜之變化，手動量測至孔口，求得該孔測傾管之水平地層變位量。

4. 孔內伸縮計

類似地錨，錨錠於穿過滑動面之不動地層，量測錨錠端與孔口端之相對位移，採自動監測；優點：經濟、反應靈敏、精度高、不易損壞，缺點滑動機制不易掌握。

5. 定置型測傾儀 (IPI)

裝設於測傾管（須配合鑽探架設）內，利用自動量測的方式由測傾儀之傾斜變化及

裝設深度推求地層水平變位量，須裝測於滑動面附近，價格較昂貴。

6. 全自動傾斜管量側系統 (SAA)

裝設於測傾管（須配合鑽探架設）內，地中變位儀 SAA 採用最新之微機電原理 (MEMS)，利用加速度感應器及陀螺儀量測物體實際之變形曲，SAA 可以單一電纜串連數百點之感應器，安裝深度可達 100M，近年來亦已快速導入土木監測應用，價格昂貴，不適合深井。

三、簡易地表位移監測系統

大規模崩塌潛勢區判釋，首先利用圖面判釋找出可能之坡面，再利用地表地質調查找出地形跡證（例岩體變形、陷落等），因大規模崩塌運動機制仍未有明確之定論，應透過可長期監測且能即時回傳監測儀器進行監測，傾斜管等雖可測知地下變形狀況，但是變形幅度較大時，觀測管錯動閉鎖將影響到後續測量，另考量施測經費地下監測通常須配合鑽探，所需經費較高，地表監測相對較為低廉，為了取得連續變化資料，選用單頻 GPS 作為監測區初期主要監測方法。

簡易地表位移監測系統為利用單頻 GPS 以每秒一筆資料的頻率收集衛星定位座標資料並進行紀錄，透過分析衛星定位資料來了解位移狀況，單頻 GPS 監測站設有 GPS 接收天線、資料紀錄器、電力系統及儀器保護箱（圖 1），於同一坡面上至少設置 5 個單頻 GPS 監測站，並於坡面外設立一固定站，作為位移參考點與計算分析位移狀況使用。單頻 GPS 站

之設置，須於設置點下挖並利用水泥灌漿，確保站點與坡面之設置為穩固且不易變動，以免監測資料受干擾。

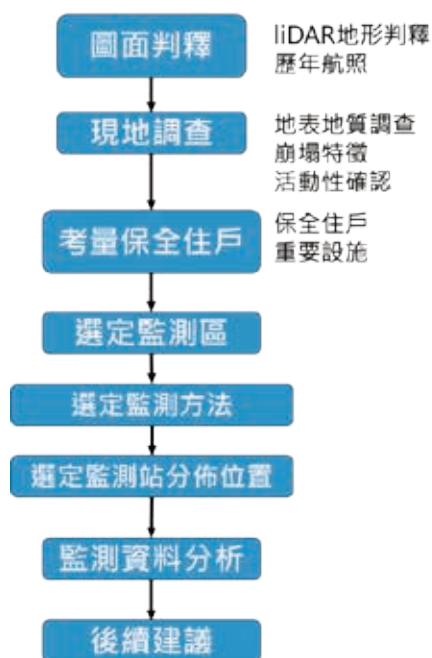
衛星定位座標資料之分析計算，透過設置於坡面上的單頻 GPS 監測站，以及坡面外的固定站，組成一 GPS 觀測網，利用固定站做為參考基站，進行觀測網中各站點的位移計算，計算方式採用最小約制網平差計算，配合鄰近雙頻 GPS 地面追蹤站分析單頻 GPS 監測站的資料，並進行時間序列資料的剔錯與篩選作為觀測資料與解算成果的品質控制，經由每日坐標成果的時間序列分佈圖，擬合一最佳擬合趨勢線，凡單日坐標值偏離趨勢線過大者（以標準化後的 3 倍的殘差量為篩選門檻），則當日的坐標成果將不採用，最後透過座標解算成果了解監測區域內各點位的滑移程度。



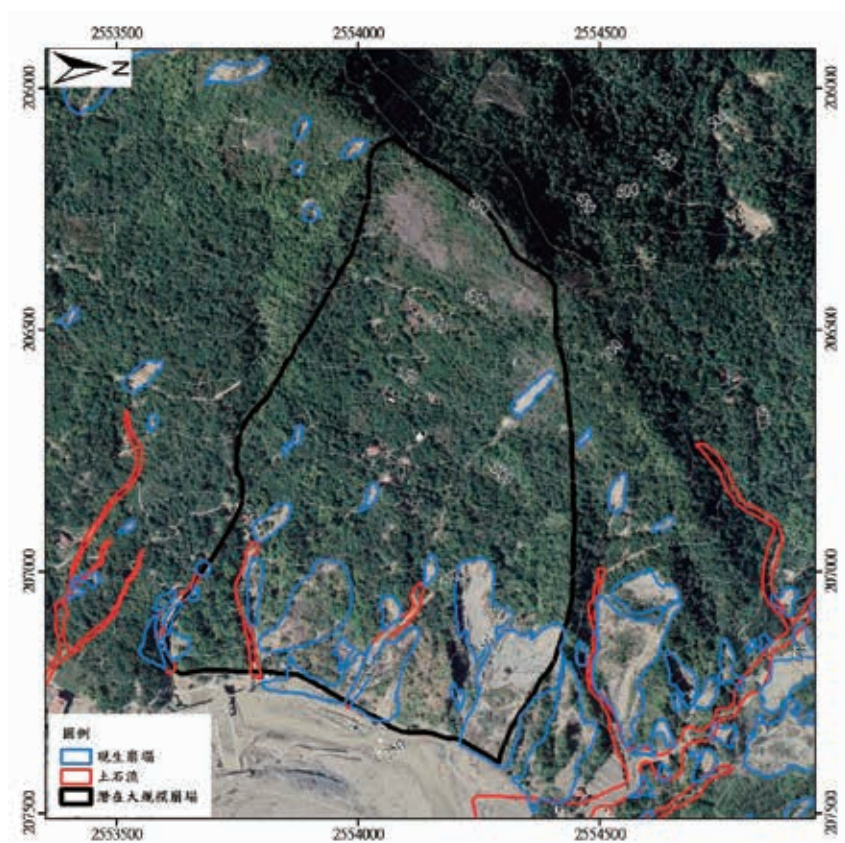
▲圖1、單頻GPS監測站

四、觀測點位評估與選定方法

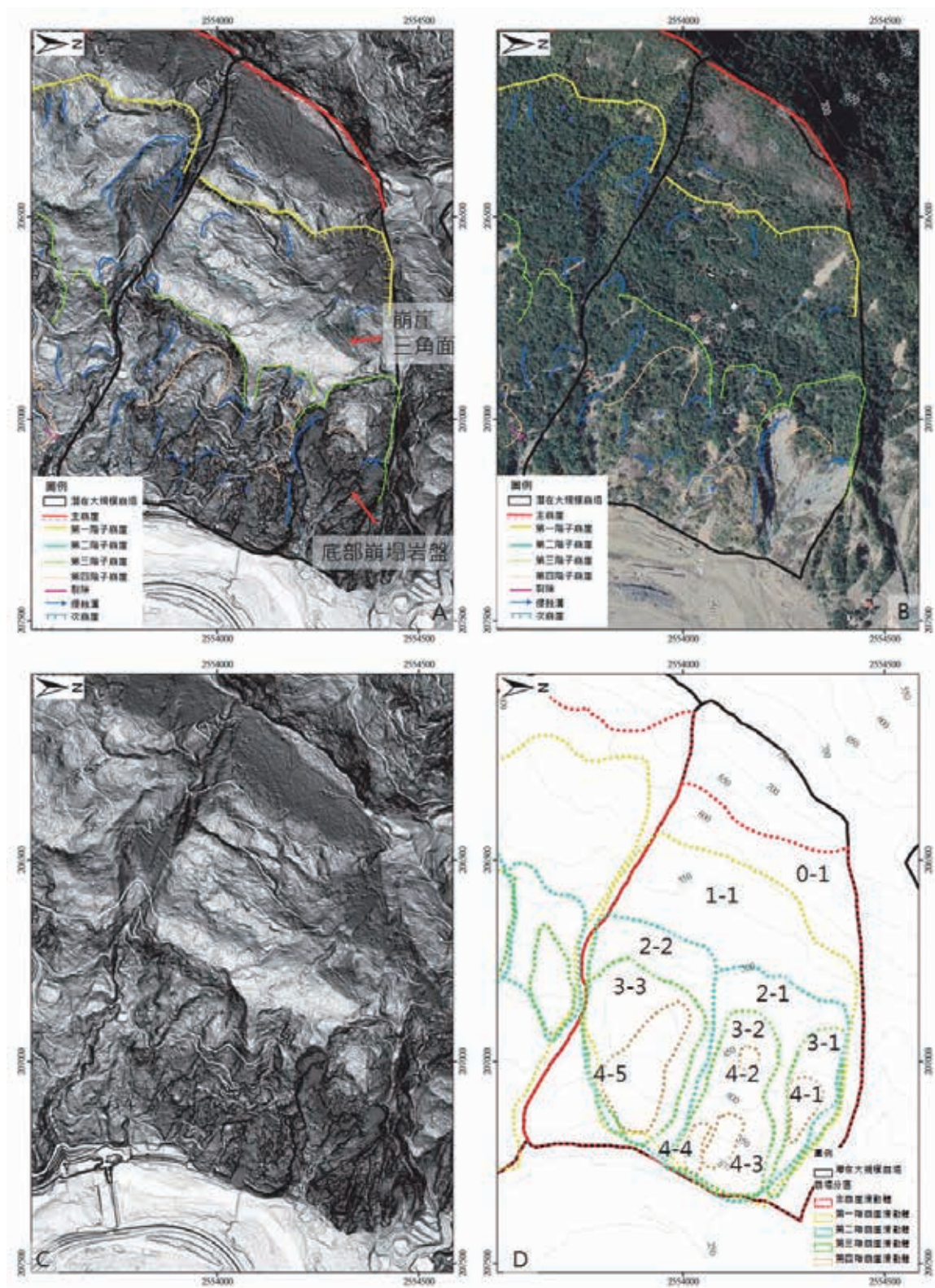
大規模崩塌潛勢區監測區選定以交通可達、施工便利、具有相對穩定的基地及透空通視佳的區域為原則，選定流程如圖 2，首先利用航空照片初步判釋坡面崩塌之情況（圖 3），再結合空載雷達掃描 (LiDAR) 製作高精度數值地形判釋崩塌潛勢區之主崩崖、次崩崖等大規模崩落地形特徵，判釋成果詳見圖 4。依據影像判釋結果，進一步現場調查各區位之 (1) 崩塌地區地表崩塌特徵及各區位的活動性，以及 (2) 地表地質調查。最後綜合影像判釋結果、潛勢區內部區位劃分與岩盤變形情況，觀測點位選點以活動性高為原則，次之考慮保全住戶數目。



▲圖2、大規模崩塌潛勢區監測流程



▲圖3、高雄市-甲仙區-D044航空照片影像判釋結果



▲圖4、高雄市-甲仙區-D044高精度數值地形影像判釋成果

五、觀測點位介紹

茲以 101 年度「國有林深層崩塌致災潛勢調查評估－南部重點流域」計畫中判釋並經現地查核，崩塌地編號高雄市-桃源區-D346 為例，該區位於荖濃溪事業區 104 號林班地，寶來溪右岸，距離荖濃溪匯流口約 2.7 公里，崩塌面積約為 96.6 公頃。由高精度數值地形判釋結果認為此區崩塌地是由多處小崩塌組成，內部崩崖特徵明顯。現場調查顯示此坡面有多處裂隙發育，具有較高的活動性。在致災方式與保全方面，若發生深層崩塌，可能導致寶來溪產生堰塞湖，影響寶來溪出口兩岸約 24 戶的住戶。林務局「國有林深層崩塌致災潛勢調查評估－南部重點流域」計畫中在 102 年度，建置共 5 處單頻 GPS 監測站、2 處地表伸張計以及 1 處雨量計，另固定站採用地調所於此區域所建置的 GPS 監測站，進行坡面監測。

崩塌地編號高雄市-甲仙區-D044、D047 位於旗山事業區 4 號林班地，旗山溪右岸，崩塌面積分別為 67、84 公頃。由航空照片影像判釋，坡面現生崩塌主要發育在趾部，坡頂或坡腹現生崩塌形貌多為長條型。D044、D047 坡面沒有大面積現生崩塌。D044、D047 為 2 處相鄰之坡面，其保全對象除坡面及下緣甲仙區大田里住戶外，甲仙攔河堰亦位於 D044 潛勢區坡面下方，因為坡面相鄰於此視為同 1 處進行監測，之後由前述圖面判釋及現地調查成果找出可能移動坡面單元（圖 4）。於屏東林區管理處「圓山集水區及周遭崩塌地治理評估暨先期工程規劃、設計監造委託技術」計畫中

在 103 年度，建置共 6 處單頻 GPS 監測站（包含一固定站）、1 處地表伸張計，進行 D044、D047 的坡面監測。

六、觀測站位置選定方法

完成圖面判釋及地面調查後，由所判釋之可能坡面滑動塊體，搭配現地調查成果選定適合之觀測站位置，觀測站位置選點方法概述如下：

為瞭解大規模崩塌區的發生成因、破壞機制與活動性，必須透過崩塌區位移觀測，瞭解崩塌地滑移的速度或規模，以建立更正確的大規模崩塌發育或活動特性，供防減災對策擬定之參考；屏東林區管理處對於坡面的位移採用單頻 GPS 設備進行記錄、解算與分析，並將單頻 GPS 設備布置於可能滑動的重點坡面，進行較長時期的連續觀測，同時配合冠部崩崖或其他活動性高之地點設置地表伸張計及雨量筒進行資料收集，如圖 5，分析坡面土體與時間的移動性關係，做為後續高精度觀測或治理計畫推動的參考。

由於主要誘發大規模崩塌地移動的外力因子為地震或降雨，地震因中央氣象局已布建有完善的觀測網，一旦地震發生可藉由中央氣象局觀測資訊進行崩塌外力的分析；降雨量部分則採用中央氣象局既有的雨量站資料，或另於監測坡面架設雨量筒紀錄，配合前述觀測資料進行分析，完整瞭解大規模崩塌的移動機制與特性。

GPS 觀測資料的穩定性與正確性為 GPS 觀測點位的選定重點，除須考慮大規模崩塌移

動特性外，還需考慮在現地觀測點位是否因遮蔽而影響 GPS 訊號品質同時針對記錄訊後的資料傳輸也需一併進行測試與評估，本次崩塌地監測設備的設置，主要依據崩塌判釋與調查成果評估大規模崩塌潛勢區高風險區位，觀測點位選定位置及現況如表 1 所示，各觀測點基本資料概況如表 2、表 3 所示。



▲圖5、(a)GPS監測站及雨量筒，(b)地表伸張計。

表 1、大規模崩塌潛勢區觀測點現地概況

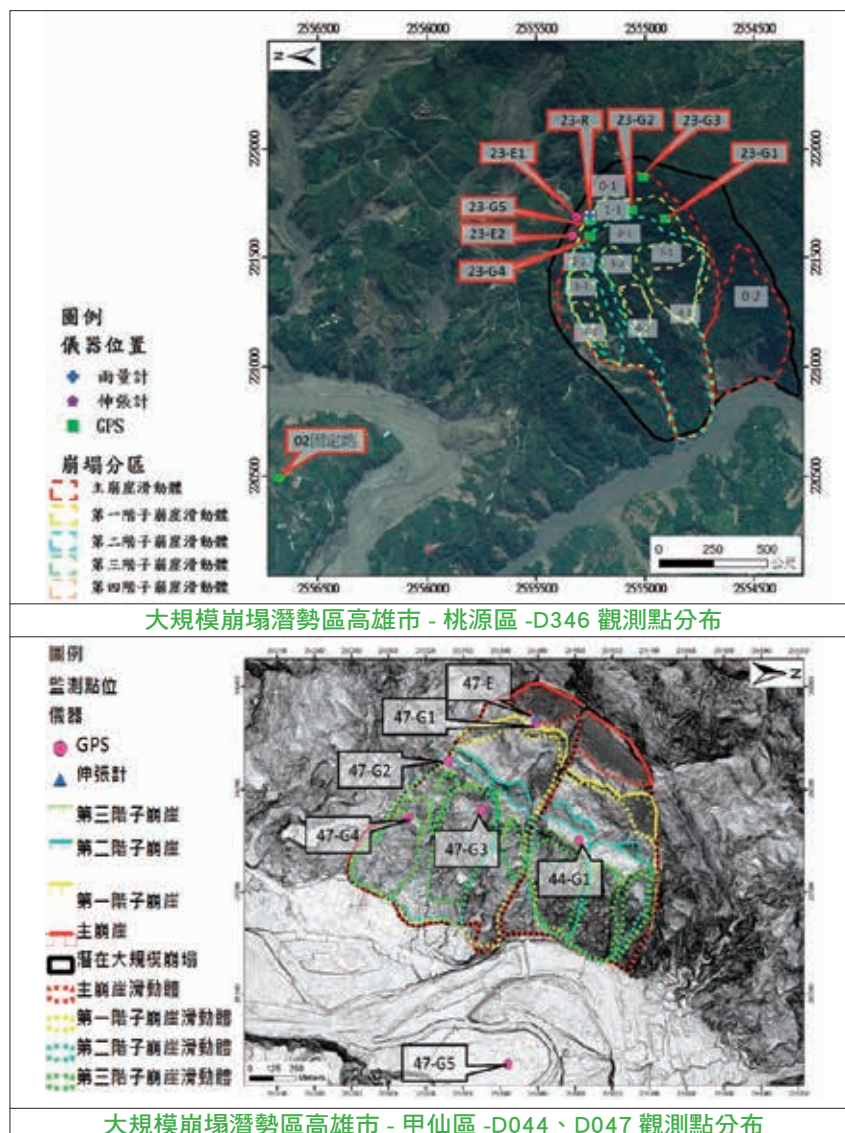


表 2、大規模崩塌潛勢區高雄市 - 桃源區 -D346 各觀測點說明表

設備	編號	觀測對象	TWD97_X	TWD97_Y
GPS	23-G1	D346 第一階子崩崖滑動體頭部東側	221678	2554910
	23-G2	D346 第一階子崩崖滑動體頭部	221719	2555060
	23-G3	D346 主崩崖滑動體頭部	221871	2555010
	23-G4	D346 第二階子崩崖滑動體頭部	221598	2555250
	23-G5	D346 第一階子崩崖滑動體頭部	221672	2555250
	02固定站	D346坡面外之穩定河階，作為固定站	220492	2556680
地表伸張計	23-E1	D346 主滑動體和主崩崖相對滑移速度	221687	2555320
	23-E2	D346 第一階子崩崖滑動體頭部張力裂縫變化	221603	2555340
雨量筒	23-R	D346 坡面之雨量紀錄	221676	2555260

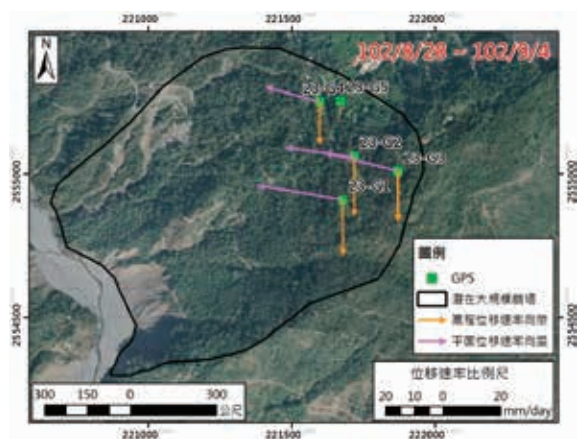
表 3、大規模崩塌潛勢區高雄市 - 甲仙區 -D044、D047 各觀測點說明表

設備	編號	觀測對象	TWD97_X	TWD97_Y
GPS	44-G1	D044 第二階子崩崖滑動體頭部	206799	2554052
	47-G1	D047 主滑動體頭部	206201	2553760
	47-G2	D047 第二階子崩崖滑動體頭部	206350	2553309
	47-G3	D047 第三階子崩崖滑動體頭部	206602	2553508
	47-G4	D047 第三階子崩崖滑動體頭部	206642	2553091
	47-G5	固定站(甲仙分站)	207842	2553499
地表伸張計	47-E	D047 主滑動體和主崩崖相對滑移速度	206160	2553801

七、觀測成果

(一) 大規模崩塌潛勢區高雄市-桃源區-D346 自 102 年 6 月 20 日至 104 年 10 月 14 日接收 GPS 資料，觀測資料顯示位移趨勢為往西北向移動，且高程有下降之趨勢，以下針對 102 年康芮颱風後，及 104 年蘇迪勒颱風後，發生較明顯之位移落差做相關說明。

102 年康芮颱風後（圖 6）南北向最大位移點為 23-G3，位移距離向北 41.2 毫米；東西向最大位移點為 23-G1，向西 189.6 毫米；垂直向以 23-G2 觀測點向下 132.4 毫米最大，23-G5 於颱風期間有資料缺失故未列入分析中（表 4）

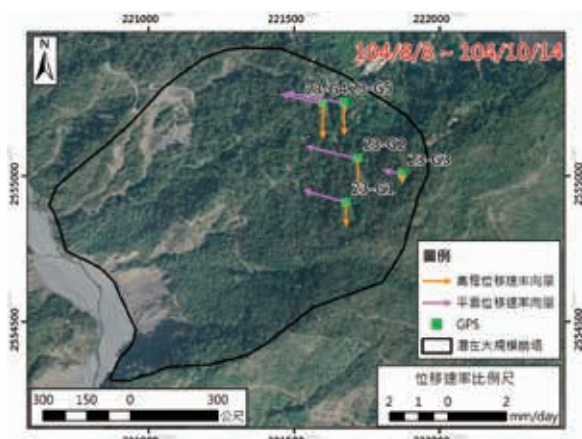


▲圖6、高雄市-桃源區-D346 102年康芮颱風後位移速率向量圖

表 4、高雄市-桃源區-D346 GPS 三軸方向最大變化量（102 年康芮颱風後）

站點	N (毫米)	E (毫米)	H (毫米)
23-G1	30.9	-189.6	-118.7
23-G2	20.4	-151.9	-132.4
23-G3	41.2	-161.8	-124.5
23-G4	33.0	-119.9	-96.5

在 104 年蘇迪勒颱風後（圖 7）各觀測點有明顯往西及向下移動現象。觀測至 104 年 10 月 14 日止，南北向最大位移點為 23-G2，蘇迪勒颱風後總變化量 13 毫米往北；東西向最大位移點為 23-G5，蘇迪勒颱風後總變化量 131.2 毫米往西；垂直向最大位移點為 23-G4，蘇迪勒颱風後總變化量向下 101.8 毫米（表 5）



▲圖7、高雄市-桃源區-D346 104年蘇迪勒颱風後位移速率向量圖

表 5、高雄市-桃源區-D346 GPS 三軸方向最大變化量（104 年蘇迪勒颱風後）

站點	N (毫米)	E (毫米)	H (毫米)
23-G1	10.5	-101.2	-58.7
23-G2	13.0	-121.9	-69.1
23-G3	-10.9	-46.3	-26.1
23-G4	2.7	-105.7	-101.8
23-G5	12.6	-131.2	-67.6

地表伸張計位移變化結果顯示（1）102 年 8 月 17 ~ 10 月 2 日，監測點 23-E1 約有 80 毫米的拉伸量，而監測點 23-E2 也約有 50 毫米的拉伸量；（2）103 年 6 月 1 日 ~ 8 月 1 日，23-E1 約有 13 毫米的拉伸量，23-E2 約有 33 毫米拉伸量；（3）104 年 9 月 3 日 ~ 10 月 1 日，兩處監測點為壓縮狀態，壓縮量約 8 及 14 毫米。整體而言地表伸縮計的觀測點是屬於拉伸環境（表 6）。

表 6、高雄市 - 桃源區 -D346 地表伸張計監測結果

日期	23-E1		23-E2	
	對應長度 (毫米)	變化量 (毫米)	對應長度 (毫米)	變化量 (毫米)
102/08/17	114.50	(初始值)	141.51	(初始值)
102/10/02	196.37	81.87	192.31	50.80
102/10/25	202.47	6.09	196.37	4.06
102/12/04	208.56	6.09	198.41	2.03
102/12/16	210.60	2.03	200.44	2.03
103/04/19	216.69	6.09	206.53	6.10
103/06/01	216.69	0.00	198.41	-8.13
103/08/01	229.90	13.21	230.92	32.51
103/09/02	232.94	3.05	222.79	-08.13
103/11/03	224.82	-8.13	208.57	-14.22
104/09/03	232.94	8.13	222.79	14.22
104/10/01	224.82	-8.13	208.57	-14.22

(二) 大規模崩塌潛勢區高雄市 - 甲仙區 -D044、D047 自 103 年 7 月至 105 年 11 月底監測資料解算成果，各 GPS 觀測位置之位移量統計整理如表 2。觀測期間經歷麥德姆颱風、0807 豪雨、蘇迪勒颱風及梅姬颱風等事件，相關天然災害事件統計如表 7 所示。

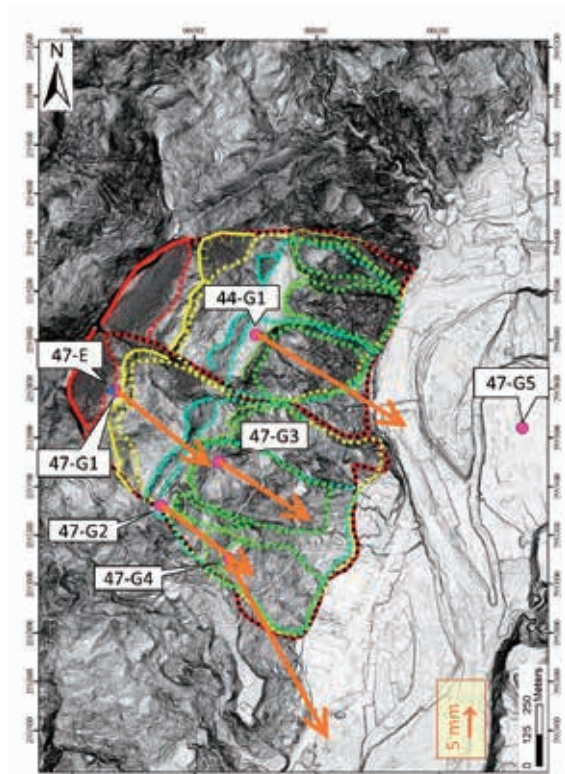
由 GPS 觀測資料顯示坡面 5 處觀測站皆有朝西南向移動的趨勢。在 103 年 7 月至

105 年 09 月觀測期間歷經 3 次雨季，因 103 年雨季期間觀測較短，位移變化較不明顯。由觀測結果顯示 104 年與 105 年雨季期間皆有明顯變化。104 年雨季 (104/05 ~ 104/09) 期間，5 處觀測站 N 軸變化分別約有 2 ~ 2.5 公分的位移量，E 軸變化分別約有 2 ~ 4 公分的位移量。105 年雨季 (105/05 ~ 105/10) 期間，5 處觀測站 N 軸變化分別約有 1 ~ 4 公

分的位移量，E 軸變化分別約有 1.5 ～ 2 公分的位移量，將水平方向移動距離總量繪製於位置分佈圖上，如圖 8。伸張計變化整體呈現為拉伸狀態，自 103 年開始伸張變化為 37.5 毫米（圖 9）。

於表 8 顯示最大位移點位為 47-G4，在 N 方向位移量為 -71.57 毫米，E 方向位移量為 40.19 毫米，垂直位移量 -6.35 毫米，GPS 觀測站對於高程(H)變化誤差量較水平方向(N-E)大，仍需更長期的觀察。

整體坡面監測資料雖顯示崩塌土體大致朝坡腳的方向移動，但就位移量變化而言仍屬小規模變動，此可能與監測期間降雨、地震事件相關，因無較大降雨、地震事件觸發，而使變動規模較小。



▲圖8、高雄市甲仙區-D044、D047大規模崩塌潛勢區觀測移動情形

表 7、高雄市甲仙區 -D044、D047 近年地震、降雨事件

項次	事件名稱	發生時間	備註
1	麥德姆颱風	103/7/21～103/7/23	甲仙雨量站累積雨量340.5毫米
2	0807豪雨	103/8/7～103/8/8	甲仙雨量站累積雨量240毫米
3	小區域地震	104/05/28	震央位於屏東縣政府北偏東方 31.2 公里（位於高雄市杉林區），震源深度20.3公里，規模4.1，甲仙地區最大震度2級
4	蘇迪勒颱風	104/8/8～104/8/9	甲仙雨量站累積雨量475.0毫米
5	杜鵑颱風	104/9/28～104/9/29	甲仙雨量站累積雨量275.5毫米
6	105年006號地震	105/02/06	甲仙地區最大震度6級
7	尼伯特颱風	105/07/06～105/07/09	甲仙雨量站累積雨量214毫米
8	莫蘭蒂颱風	105/09/12～105/09/15	甲仙雨量站累積雨量175.5毫米
9	馬勒卡颱風	105/09/15～105/09/18	甲仙雨量站累積雨量54毫米
10	梅姬颱風	105/09/25～105/09/28	甲仙雨量站累積雨量927.5毫米



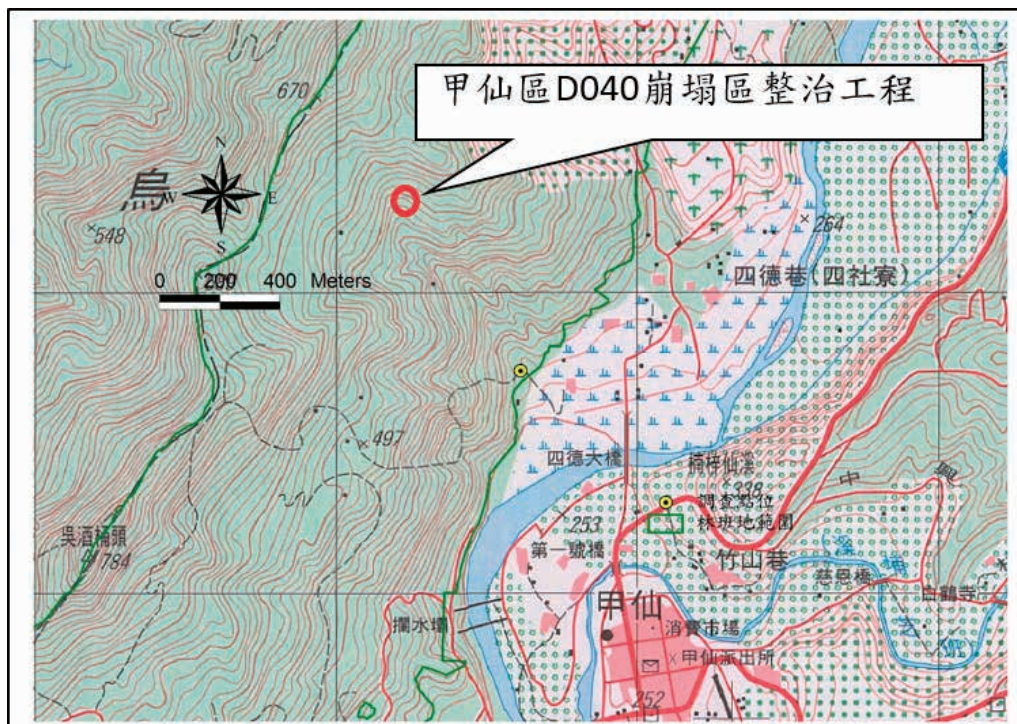
▲圖9、高雄市甲仙區D044、D047地表伸張計變化歷線

表 8、點位高程方向位移量解算成果 (103/07/01 ~ 105/11/30)

GPS點位	103/07/01~105/11/30總位移量 (毫米)		
	N	E	Z
JS044-G1	-36.72	59.87	70.08
JS047-G1	-29.51	37.43	-24.55
JS047-G2	-28.42	37.08	-12.98
JS047-G3	-22.86	36.45	-17.6
JS047-G4	-71.57	40.19	-6.35

八、大規模崩塌潛勢區治理對策

除上述監測外，近年亦針對大規模崩塌潛勢區坡面進行治理，如大規模崩塌潛勢區編號甲仙區 D040，位置如下圖 10，由工程配置圖套疊衛星影像（圖 11），其崩塌區底部有兩條坑溝冲刷且匯流於趾部，為提昇崩塌區底部安定性，宜進行治理工程，以穩定坡面，擬透過固床工、RC 護岸、擋土牆、噴漿溝、框型植生護坡加強坡腳及蝕溝，防止蝕溝逐漸侵蝕而加速大規模崩塌發育。



▲圖10、工程位置圖



▲圖11、衛星影像套疊工程配置圖



▲圖12、坑溝現況

九、結論與建議

地表 GPS 位移監測利用長時間連續觀測資料了解坡面變化情形，其優勢較過去坡面監測方法為可取得連續即時資料，與傾斜儀等量測方法相較，受坡面移動毀損可能較小，但亦受現場植生、太陽、磁力等影響之限制。建議須以長期監測之整體趨勢來進行判斷，而非單就一場事件前後進行比對。

林務局針對高雄市 - 桃源區 -D346 從 102 年開始進行地表位移監測，至 104 年共經歷了 6 次颱風事件（潭美、康芮、天兔、麥德姆、蘇迪勒、杜鵑颱風）及兩次梅雨事件，102 年在潭美颱風及康芮颱風影響下，GPS 資料有明顯變化，尤其在康芮颱風的降雨影響最為明顯，因降雨因素造成往西向下滑動，此趨勢與坡向相符。103 年無重大降雨事件，因此 GPS 變化趨勢並無變動，以相對緩慢速度持續向西向下滑動。104 年在蘇迪勒颱風後各觀測點有

往西向下滑動之趨勢。整體觀察認為此坡面在觀測期間大區域呈現穩定狀態，但在局部位置仍有較小的崩塌發育。

屏東處針對高雄市 - 甲仙區 -D044、D047 從 103 年開始進行地表位移監測，初步已觀測坡面有向東南移動之趨勢，以目前移動速度暫無致災之疑慮，其原因可能與降雨事件相關，設站後降雨事件多數偏小，僅 105 年梅姬颱風降雨量較大。

大規模崩塌自 98 年莫拉克颱風後受到各界之關注，但其細部發生、運動機制仍未有明確之定論，仍待累積各種基礎研究，以及各項監測資料，以期了解其災害發生機制，故選定大規模崩塌潛勢區將地表位移監測或鑽探等方法，先投入一處累積長期數據，逐步發展並投入其他監測技術，以保居家安全。🏠

參考文獻（請逕洽作者）

（圖片／高遠文化）