

# 空載光達於國有林班地大規模崩塌災害 評估之應用

文/圖 何岱杰 ■ 國立成功大學防災研究中心研究助理(通訊作者)  
張維恕 ■ 國立成功大學防災研究中心研究助理  
劉守恆 ■ 國立成功大學地球科學系博士後研究員  
林慶偉 ■ 國立成功大學地球科學系教授

## 一、前言

台灣山區位於歐亞板塊與菲律賓海板塊交界，因強烈的板塊造山運動導致台灣山脈高聳、地形變化大，地質破碎。台灣四周臨海，水氣充沛，每年4月到9月期間分別是主要的降雨期間，雨量分布甚為極端。因台灣地質破碎，山區廣泛、發生地震頻率高等先天條件不良，再加上雨量充沛且極端降雨事件頻傳的外在環境條件不佳，種種不利因素使得台灣山區山崩頻傳。

自93年內政部為因應國內高精度與高解析度的數值地形資料的需求，引進具有穿透植被特性的空載光達測繪系統，建立5米網格解析度的數值地形資料。而莫拉克風災過後，經濟部中央地質調查所在「國土保育之地質敏感區調查分析計畫」中推行空載1米網格解析度的高精

度光達數值地形測繪，並開始積極應用於山坡崩場地的調查。而台灣在光達數值地形的應用上已極為廣泛，如林業調查(羅詔元與陳良健，2009)、土石災害調查(周憲德等，2012)或地質斷層調查(Chan *et al.*, 2007)等。本研究利用空載光達可穿透植被的特性(內政部國土測繪中心，2005)並配合航空照片，針對南部重點流域進行大規模崩塌判釋及調查，找出具有大規模崩塌發生潛勢之區位，供防減災工作執行之參考。

本研究判釋範圍為高屏溪與曾文河流域上游集水區之國有林班地，涵蓋大埔、玉井、旗山、荖濃溪、玉山、屏東等林班事業區，判釋總面積約4,036平方公里。在傳統判釋大規模崩塌的方法是利用航照立體鏡尋找崩塌特徵(如崩崖)，有耗時耗力、不易判釋、難以數位化展示

之缺點，且航空照片和衛星影像解析度不足，難以呈現潛在大規模崩塌細部地形特徵。而本研究判釋範圍廣大，傳統航照影像判釋難以快速、明確的找出具崩塌地形特徵的大規模崩塌潛在區位，故本計畫利用高精度數值地形配合地理資訊系統軟體，利用陰影圖、坡度圖找出潛在大規模崩塌區位，將判釋結果直接在圖面上數化，提高判釋效率，並配合現場調查驗證查核判釋結果。同時傳統監測崩場地的地工方法花費甚大，本研究利用單頻GPS、地表伸縮計與雨量計建置簡易型的坡面位移監測系統，其花費相對傳統地工監測較少且快速，以有效長期掌握評估整體坡面活動性。

## 二、潛在大規模崩塌判釋方法與現場調查

### (一)潛在大規模崩塌判釋方法

歐洲地區將坡面長期受重力造成大面積，破壞面深入岩盤，並緩慢運動的崩塌稱為DSGSD(Deep-Seated Gravitational Slope Deformation) (Agliardi *et al.*, 2001)，而日本將滑動深度大於3米且深入岩盤的崩塌，稱為「深層崩壞」。但國內各相關單位尚未對這一般狀態下大面積緩慢運動的崩塌明確定義或命名。而此類性崩塌在台灣常見的的山崩分類法中，如Varnes (1978)指一般情形下為緩慢運動「滑動」和「側滑」(表1)；經濟部中央地質調查所則是以「岩體滑動」一詞代表，指岩體滑動之滑動面深入岩盤，滑動體具有較大厚度與規模。因滑動面較深滑動體常保有完整性；滑動範圍較大者，可達數十公頃以上，依破壞的模式大致可分為平面型、圓弧形型或複合型(表2)；水土保持手

表1 Varnes山崩分類法

運動類型	材料分類		
	岩石	工程土壤	
		岩屑	土
墜落	岩石墜落	岩屑墜落	土墜落
傾覆	岩石	傾覆岩屑	土傾覆
滑動	岩石滑動	岩屑滑動	土滑動
		圓弧形 平面型	
側滑	岩石側滑	岩屑側滑	土側滑
流動	岩石流動	岩屑流動	土流動
複合型運動	綜合兩種或兩種以上之運動方式		

表2 中央地質調查所山崩分類法

運動類型	材料分類		
	岩石	工程土壤	
		岩屑	土
墜落	落石	岩屑崩滑	
傾覆			
滑動	岩體滑動	土石流	
流動	土石流		

表3 水土保持局山崩分類法

運動類型	材料分類		
	岩石	工程土壤	
		岩屑	土
墜落	落石	山崩	
傾覆			
滑動	圓弧形 平面型	地滑	
流動	土石流		

冊中「地滑」定義係指移動土體或岩體之規模較大，通常在較緩坡度之斜面發生，其運動之典型特徵在於移動速度緩慢，而移動時可能呈斷斷續續或持續緩慢運動，往往移動土體上方之構造物尚可保持原狀(表3)。目前行政院對於莫拉克颱風時在小林村所發生之嚴重土石災害是以「大規模崩塌」稱之，國家災害防救科技中心則初步以崩塌面積大於10公頃或滑動深度超過

10米者為大規模崩塌。

相關單位對於此類型的崩塌是崩塌深度作為分類的依據，但圖面判釋崩塌地難以藉由崩塌深度作為判釋依據。為方便大範圍、快速地圖面判釋此類大面積且緩慢運動的崩塌區位，本研究引用的大規模崩塌定義為：崩塌土方大於10萬立方的崩塌，也就是崩塌面積大於10公頃，崩塌深度10公尺的大型崩塌(千木良雅弘，2011)。一般來說，崩塌面積越大，崩塌深度亦越深，崩塌土方也就越多，因此在判釋時，定義「潛在大規模崩塌」為具有崩塌地形特徵且潛在崩塌面積大於10公頃之崩塌區位。

在歐洲地區利用光達資料進行大規模崩塌區位判釋已相當成熟，而在日本相關研究(千木良雅弘，2011)也認為大規模崩塌的發育過程中，地形上常存在崩崖、凹谷等崩塌地形特

徵，2014年3月美國華盛頓州Snohomish County造成多人傷亡的崩塌便是一例，而此崩塌區位在災前的光達數值地形便已經發育明顯的崩塌特徵。大規模崩塌地形大致可以分為冠部、陷落區和隆起區，其主要特徵有主崩崖、次崩崖、冠部崩崖、冠部裂隙，反向坡與陷溝(Trench) (Agliardi *et al.*, 2001; Chigira, 2009; Chigira and Kiho, 1994; Crosta *et al.*, 2013; Pedrazzini *et al.*, 2013; Varnes, 1978; 日本土木研究所，2008)等線性構造，如圖1所示。

- 1.冠部是大規模崩塌發育的頭部，此區為張裂環境。坡面因拉張而發育較大落差者稱為冠部崩崖，較小者為冠部裂隙。
- 2.陷落區是大規模崩塌主要材料來源，一般地貌會發育為似碗狀的凹谷地形。內部主要崩塌構造是主崩崖、次崩崖，若滑動體因圓弧滑動，

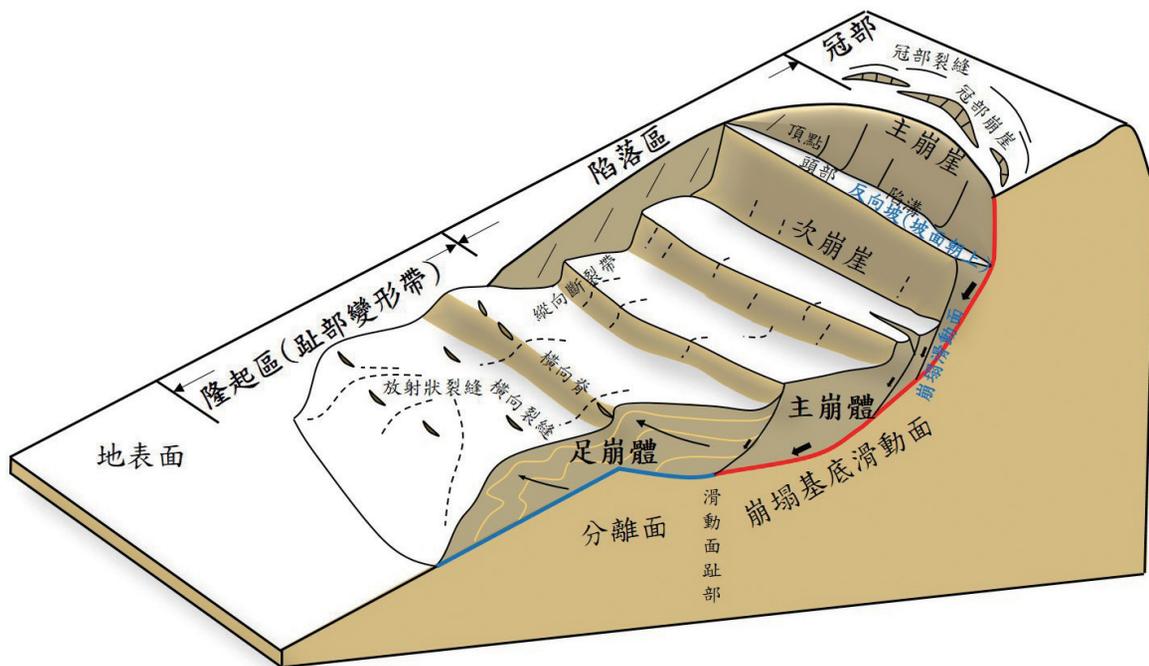


圖1 大規模崩塌特徵示意圖(修改自Varnes, 1978)

可能造成坡面反轉(坡面朝山脊，形成反向坡地形)。

- 3.主崩崖為大規模崩塌主要判釋特徵，為崩塌最主要的滑動面，是高精度數值地形判釋中最重要之線性。
- 4.次崩崖是大規模崩塌滑動體內部之崩崖，主要為舊崩崖。若崩塌區內存在許多次崩崖，會使坡面如階梯狀，也就是坡面內部存在許多舊崩塌。
- 5.多重山脊地形是指滑動體因旋轉運動，導致坡面反轉使坡向朝山脊，而與正常坡面(朝河谷)之間形成一凹谷。此朝山脊之坡面稱為反向坡(Counterslope)，而凹谷稱之為陷溝(Trench)。
- 6.隆起區為大規模崩塌趾部變形帶或崩崖堆積區。趾部變形帶的主要應力狀態是壓應力，並呈現隆起狀。崩塌體內可見岩盤破碎變形。

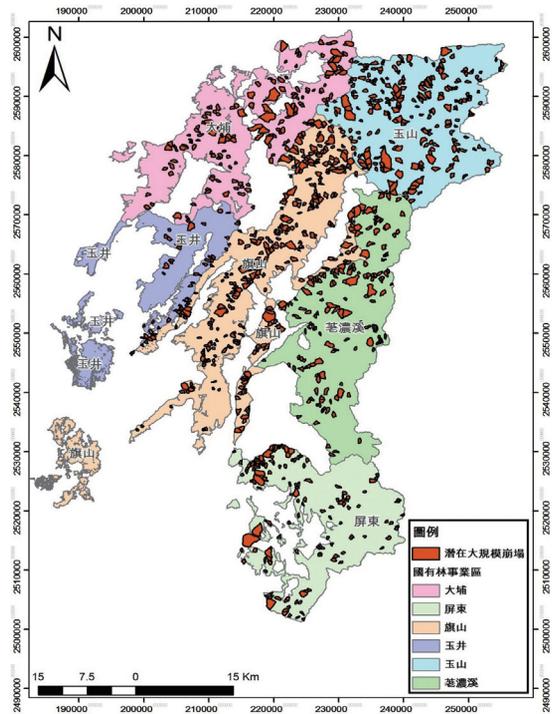


圖2 潛在大規模崩塌分布圖

表4 林班地潛在大規模崩塌調查表

林班地潛在大規模崩塌資料表										
林班事業區	荖濃溪事業區104號林班地		山崩編號	高雄市·桃源區-D346	山崩中心點坐標 (TWD97)	X: 221324 Y: 2554900	調查人員	何岱杰、許志宇		
保全對象	<input checked="" type="checkbox"/> A. 道路 <input checked="" type="checkbox"/> B. 橋樑 建物 <input type="checkbox"/> C1. <5棟 <input type="checkbox"/> C2. 5-10棟 <input checked="" type="checkbox"/> C3. >10棟 <input type="checkbox"/> D. 其他 <input type="checkbox"/> E. 無				保全對象位置	寶來溪河道下游				
岩性	沉積岩(主要岩性)	<input type="checkbox"/> A1. 礫岩 <input type="checkbox"/> A2. 砂岩 <input type="checkbox"/> A3. 粉砂岩 <input type="checkbox"/> A4. 頁岩 <input type="checkbox"/> A5. 泥岩 <input type="checkbox"/> A6. 石灰岩 <input type="checkbox"/> A7. 凝灰質砂岩 <input type="checkbox"/> A8. 其他 _____								
	變質岩	<input checked="" type="checkbox"/> B1. 硬頁岩 <input type="checkbox"/> B2. 板岩 <input type="checkbox"/> B3. 千枚岩和片岩(片麻岩) <input type="checkbox"/> B4. 變質砂岩 <input type="checkbox"/> B5. 大理岩(含白雲岩)								
	火成岩	<input type="checkbox"/> C1. 安山岩 <input type="checkbox"/> C2. 玄武岩 <input type="checkbox"/> C3. 火山角礫岩(集塊岩) <input type="checkbox"/> C4. 凝灰岩 <input type="checkbox"/> C5. 其他 _____								
地質特性	沉積或未固結材料	<input checked="" type="checkbox"/> D1. 前積層 <input type="checkbox"/> D2. 風化層 <input type="checkbox"/> D3. 紅土礫石層 <input type="checkbox"/> D4. 其他 _____								
	層面位態	層面 (N16W, 56W)		劈理、片理位態		劈理、片理 N /				
	節理特性	位態	節理組1: N /		平均間距	節理組1: m		開口	節理組1: cm	
			節理組2: N /			節理組2: m			節理組2: cm	
節理組3: N /		節理組3: m		節理組3: cm		滲水		節理組3: <input type="checkbox"/> 有 <input type="checkbox"/> 無		
斷層構造		<input type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 有 名稱: _____、類型: <input type="checkbox"/> 正 <input type="checkbox"/> 逆 <input type="checkbox"/> 橫移、觀測方式: <input type="checkbox"/> 現地量測 <input type="checkbox"/> 地質圖研判								
褶皺構造		<input type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 有 名稱: _____、類型: <input type="checkbox"/> 背斜 <input type="checkbox"/> 向斜 觀測方式: <input type="checkbox"/> 現地量測 <input type="checkbox"/> 地質圖研判								
山崩材料	<input checked="" type="checkbox"/> A. 新鮮岩塊 <input type="checkbox"/> B. 風化土石 <input type="checkbox"/> C. 礫石(紅土礫石) <input checked="" type="checkbox"/> D. 崩積土石 <input type="checkbox"/> E. 礫石堆積 <input type="checkbox"/> F. 填土 <input type="checkbox"/> G. 其他 (可複選)									
規模大小	開面數化	面積	966000 m <sup>2</sup>		最大寬度	920 m		最大高差: 600 m		
地形坡度	<input type="checkbox"/> A. 緩 (0-20度) <input checked="" type="checkbox"/> B. 陡 (21-40度) <input type="checkbox"/> C. 極陡 (41-60度) <input type="checkbox"/> D. 崖 (61度以上)									
地下水狀況	<input type="checkbox"/> A. 乾 <input type="checkbox"/> B. 溼 <input checked="" type="checkbox"/> C. 滲水 <input type="checkbox"/> D. 湧水									
地面水匯集	<input checked="" type="checkbox"/> Y. 有 <input type="checkbox"/> N. 無		河岸侵蝕		<input checked="" type="checkbox"/> Y. 有 <input type="checkbox"/> N. 無		趾部人為開挖 <input type="checkbox"/> Y. 有 <input checked="" type="checkbox"/> N. 無			
山崩趾部特徵	趾部河道寬度		m		趾部突出河道		<input checked="" type="checkbox"/> Y. 有 <input type="checkbox"/> N. 無			
崩塌地形	主崩崖特徵	崖高: 18 m		崖寬: m		崖面新鮮		<input checked="" type="checkbox"/> Y. 是 <input type="checkbox"/> N. 否		
		冠部有張力裂縫		<input checked="" type="checkbox"/> Y. 是 <input type="checkbox"/> N. 否		主崩崖下方有窪地或水池		<input type="checkbox"/> Y. 是 <input checked="" type="checkbox"/> N. 否		
	滑動體特徵	外觀呈凹陷地形		<input checked="" type="checkbox"/> Y. 是 <input type="checkbox"/> N. 否		上段呈下陷地形		<input checked="" type="checkbox"/> Y. 是 <input type="checkbox"/> N. 否		
		中段呈緩坡狀		<input checked="" type="checkbox"/> Y. 是 <input type="checkbox"/> N. 否		下段呈隆起地形		<input checked="" type="checkbox"/> Y. 是 <input type="checkbox"/> N. 否		
		滑動體裂隙		<input checked="" type="checkbox"/> Y. 是 <input type="checkbox"/> N. 否		圓弧形次崩崖		<input checked="" type="checkbox"/> Y. 是 <input type="checkbox"/> N. 否		
崩塌體與圍岩剪切破壞, 土石破碎		<input type="checkbox"/> Y. 是 <input checked="" type="checkbox"/> N. 否		兩翼排水溝呈雙溝同源		<input checked="" type="checkbox"/> Y. 是 <input type="checkbox"/> N. 否				
可能致災情形	若河道發生堰塞湖, 對寶來壑落腳近寶來溪, 可能影響戶數有24戶, 並衝擊寶來溪橋, 影響荖濃溪左岸聯外道路。									

## (二)潛在大規模崩塌判釋與現場調查結果

本研究判釋範圍分別為曾文溪流域高屏溪流域之國有林班地。潛在大規模崩塌判釋結果共有1,003處潛在大規模崩塌，其中大埔事業區144處、玉井事業區41處、旗山事業區306處、荖濃溪事業區152處、玉山事業區228處、屏東事業區132處(圖2)。為查核判釋準確性與了解現地情況，本研究選擇交通可達的潛在大規模崩塌進行現場調查，以崩塌編號高雄市-桃源區-D346為例，其崩塌調查表如表4。

此崩塌位於寶來溪右岸，與荖濃溪匯流口上游約3公里處(圖3)，崩塌中心坐標TWD97 (221324, 2554900)，崩塌面積約為96.6公頃、平均坡度約為31.1度，潛在崩塌區位最高點標高1,060公尺，最低點標高460公尺，最大寬度920公尺，岩層為潮州層(硬頁岩)。

由高精度數值地形判釋地形特徵結果顯示，崩塌範圍為一上下近等寬的五角形。坡面可分為兩大區，北側坡面中間呈現多處圓弧狀崩崖，崩崖分成兩部分，外側為主崩崖，內側為坡腹崩崖(圖4)。南側坡面為上下凹下緩近三角

形凹狀坡面。現場查核結果(調查點如圖5)，崩崖調查方面，調查點15顯示主崩崖高差約18公尺，並有3階連續崩崖地形，每階崩崖高約6到8公尺(照片1)。在調查點17與調查點8皆位於主崩崖北側附近，因崩塌滑動體活動而分別造成30公分(照片2)和40公分的裂隙(照片3)。而崩塌區位內道路損壞情形十分常見，調查點19和11皆有道路因裂隙發育(照片4、5)，導致產業道路破壞。

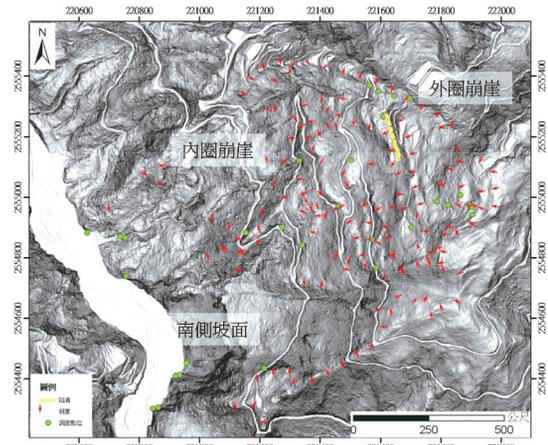


圖4 崩塌高精度數值地形判釋結果，紅色箭頭處為崩崖的遷急線(坡面從上而下坡度由緩變陡處)。

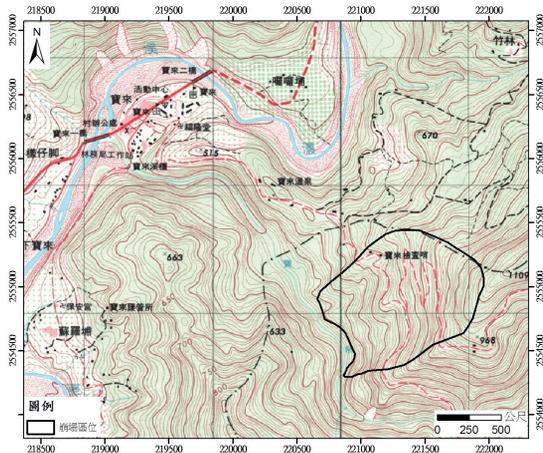


圖3 高雄市-桃源區-D346地理位置圖

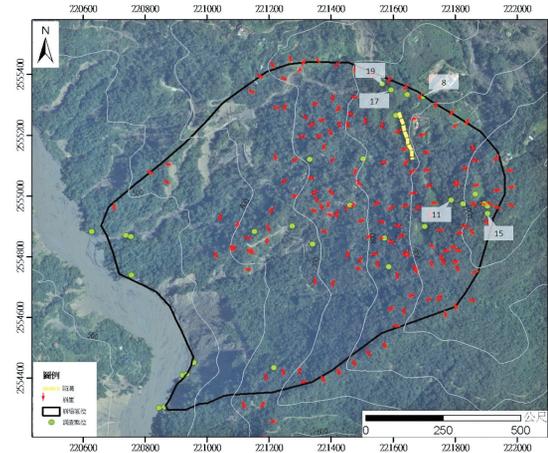


圖5 崩塌航空照片與調查點位置



照片1 調查點15是主崩崖中最高一階的崩崖，崖面高差8米。



照片4 調查點19因裂隙活動造成產業道路破壞，產生約50公分的落差。



照片2 調查點17因崩塌活動導致主崩崖附近發育裂隙，並導致路面破壞，裂隙高差約30公分。



照片5 調查點11位於坡面部分滑移，導致舊有路面毀損，產生60公分不等的高差。



照片3 調查點8因主崩崖活動而發育約40公分高差的裂隙。

### 三、潛在大規模崩塌簡易監測系統建置

#### (一)簡易監測系統建置方法

潛在大規模崩塌具有崩塌面積廣大，滑動體滑移距離長且常由數處崩塌組合而成之特性，因此當滑動體尚未完全崩前可能已有十數米之滑移現象發生，傳統現地鑽探與傾斜管監測等方法除經費龐大外，仍可能無法有效監測潛在大規模崩塌之滑動。潛在大規模崩塌數

目龐大，無法每處崩塌區都進行傳統花費甚高的地工監測，故在進行崩場地詳細調查之前，如何建立一套簡易有效、花費較低的監測系統是本研究重要的工作。

為達到有效、簡易，長期性的進行潛在大規模崩塌前期評估，確認崩塌活動性，針對此一目的，利用(1)單頻GPS設備，布置於適宜安裝儀器重點坡面，進行較長時期、週期性的觀測作業。崩塌坡面裂隙發育是崩塌活動性的重要指標，且降雨易透過地表裂隙直接入滲到岩盤進到底部滑動面，導致滑動面強度降低，故配合(2)地表伸縮計直接量測地表裂隙變化。因台灣地區的地形及氣候特性，降雨隨空間的變異性相當高，為瞭解大規模崩塌較精確的降雨

資訊，在崩塌潛勢坡面適當地點設置(3)雨量觀測站，配合前述兩項移動監測資料進行分析，方能完整了解大規模崩塌的移動機制與特性。

為取得較佳的監測資料，本研究選擇活動性較高的潛在大規模崩塌編號高雄市-桃源區-D346進行監測，因此區國有林班地植生茂密的喬木樹林，僅部分地點透空度佳，監測儀器配置有5個單頻GPS站、2處地表伸縮計與1個雨量筒。地表伸縮計架設於主崩崖附近的裂隙，單頻GPS站則位於滑動體頭部，其配置圖如圖6。

## (二)監測資料結果與分析

1.坡面降雨量觀測：雨量筒記錄時間為102年7月起迄今，此期間主要的明顯降雨事件有：(1)8月20日-8月24日，潭美颱風，其累計雨量386毫米；(2)8月27日-9月1日，康芮颱風，其累積雨量為680毫米；(3)9月19日-9月22日，天兔颱風，其累積雨量為139.5毫米。降雨歷程與累積雨量如圖7所示。

2.衛星地位系統(GPS)觀測資料分析：GPS接收時間為102年6月20日迄今，GPS測量分析結果，N軸正值為朝北移動，E軸正值為朝東移動，H軸正值為朝上移動，故得到23-G1的位移量朝北3.7公分，朝西17公分，下降11.8公分；23-G2的位移量朝北3.9公分，朝西21公分

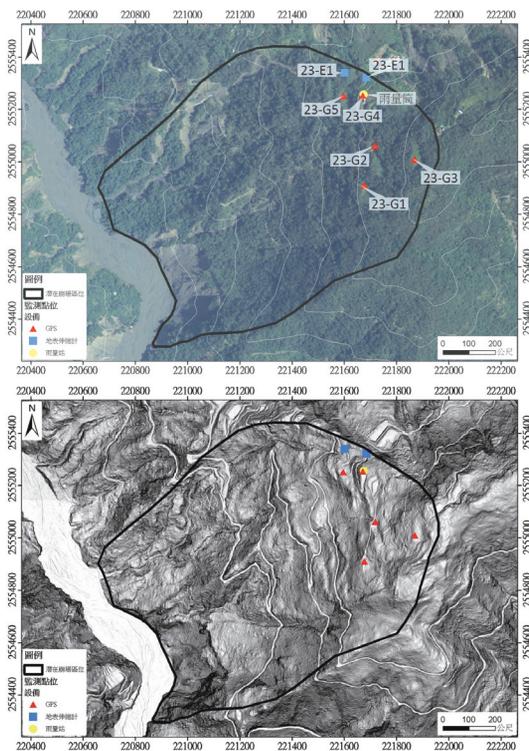


圖6 監測儀器配置圖，上圖為航空照片影像，下圖為高精度數值地形圖。

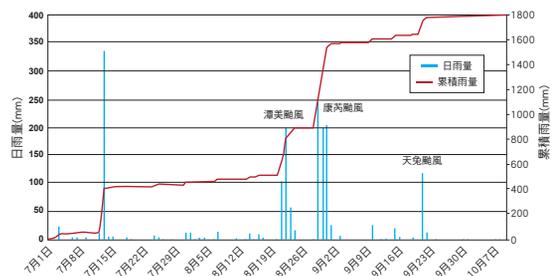


圖7 雨量筒累計雨量紀錄與降雨事件

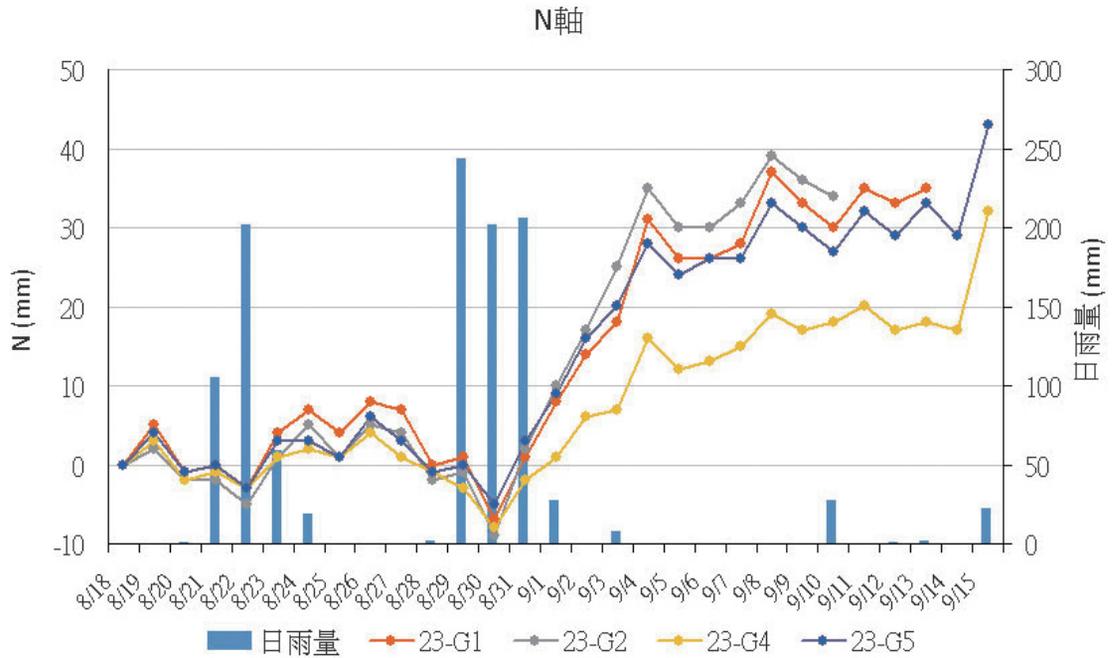


圖8 單頻GPS站南北方向(N軸)位移變化資料與雨量資料比對

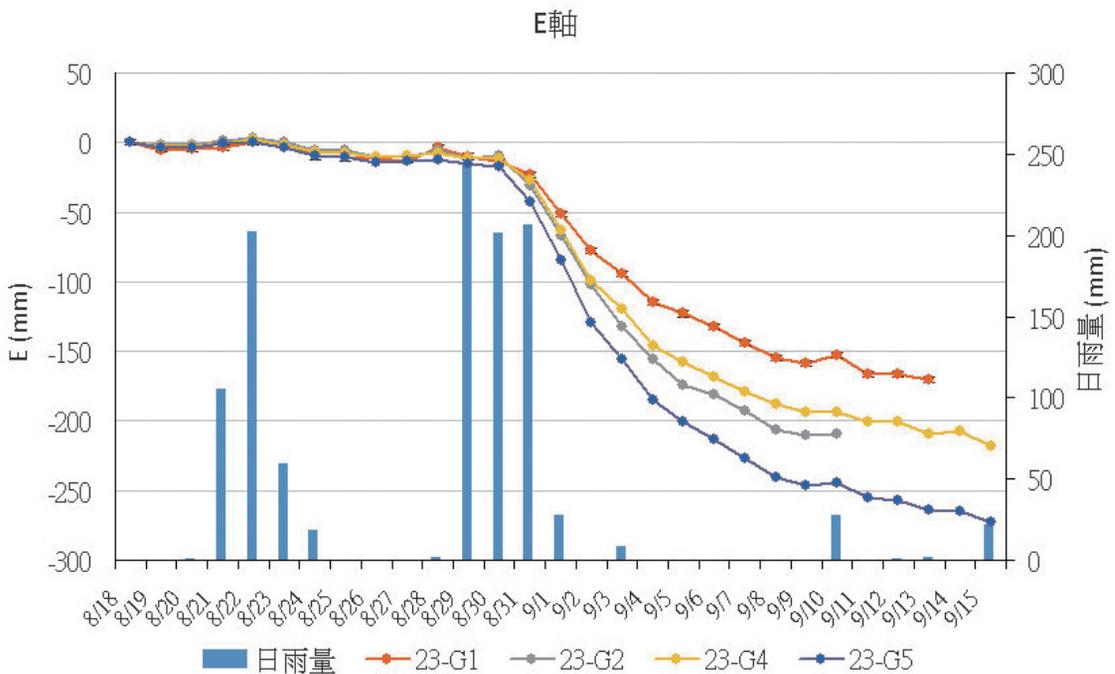


圖9 單頻GPS站東西方向(E軸)位移變化資料與雨量資料比對

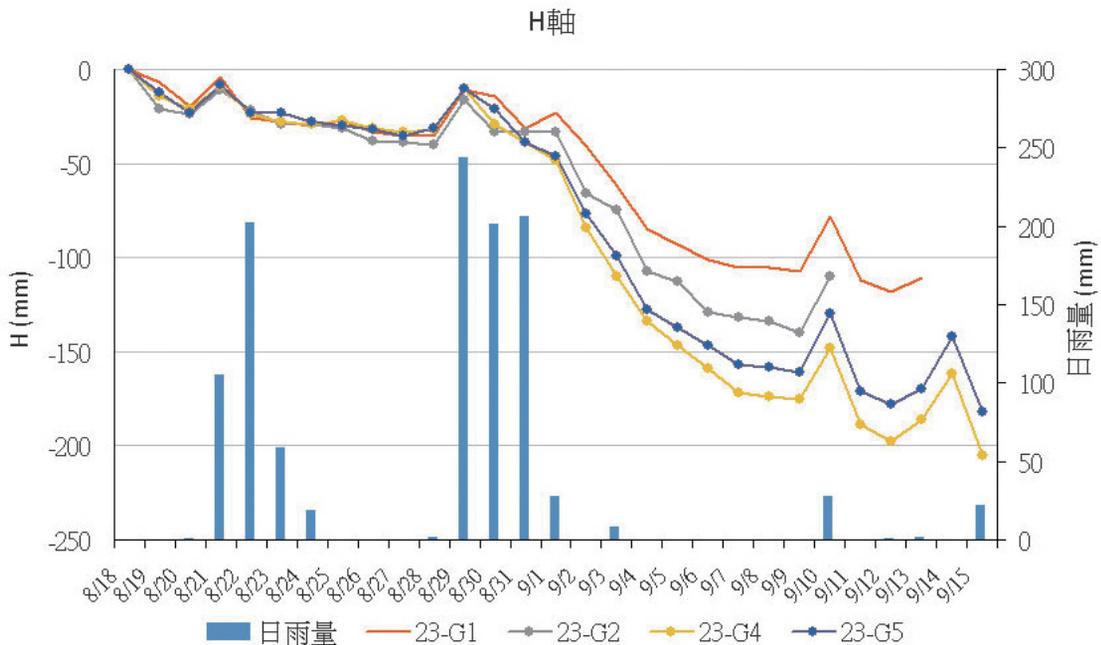


圖10 單頻GPS站高程(H軸)變化資料與雨量資料比對

分，下降14公分；23-G4的位移量朝北3.2公分，朝西21.8公分，下降20.5公分23-G5的位移量朝北4.3公分，朝西27.3公分，下降18.2公分。顯示崩場地高雄市-桃源區-D346位移趨勢為往西北向移動，高程部分則有往下滑動趨勢如圖8-圖10所示。

3.地表伸縮計：地表伸縮計自102年8月17日架設至今，期間於10月2日及10月25日各收取一次紀錄數據，其結果顯示8月17-10月2日，監測點23-E1約有8公分的拉伸量，而監測點23-E2也約有5公分的拉伸量；而10月2日-10月25日，兩個監測點則無明顯的變化量。

綜合分析以上監測資料，監測點23-G1、23-G2、23-G4、及23-G5四個GPS位移變化資料與雨量資料(8月18日-9月15日)同時分析比對可發現，在雨量事件前坡面地表GPS站原為穩定狀態，位移變化曲線大致為一水平線。但在

潭美颱風(8月20日-8月24日)及康芮颱風(8月27日-9月1日)這兩個主要強降雨的影響下，坡面地表GPS站有明顯的位移變化，尤其在康芮颱風的降雨影響最為明顯(累計雨量達680毫米)，位移變化曲線斜率突然變陡(圖8-圖10)。而在降雨期間，四個坡面地表GPS站在南北向分量，最大約有4.3公分往北分量；東西向分量，最大約有27.3公分往西分量；高程向分量，最大約有20.5公分往下分量(表5)。

表5 GPS三軸方向最大變化量

	N (cm)	E (cm)	H (cm)
23-G1	3.7	-17.0	-11.8
23-G2	3.9	-21.0	-14.0
23-G4	3.2	-21.8	-20.5
23-G5	4.3	-27.3	-18.2

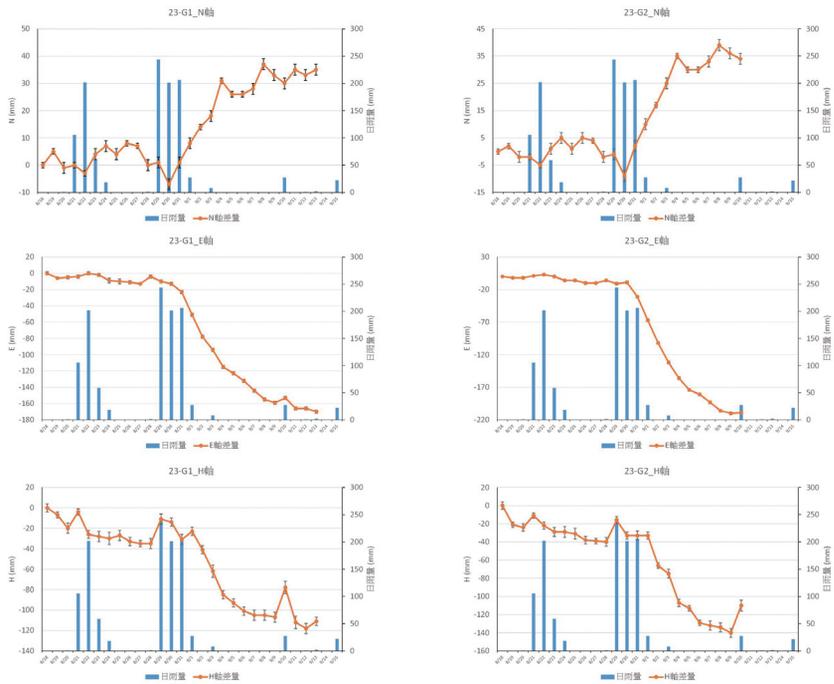


圖 11 單頻GPS編號23-G1、23-G2監測資料與雨量資料比對

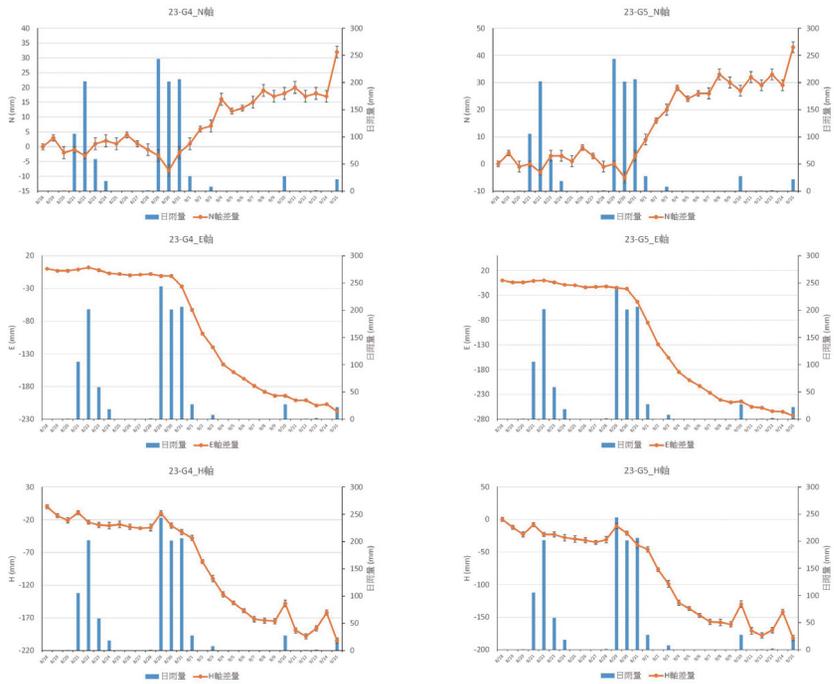


圖 12 單頻GPS編號23-G4、23-G5監測資料與雨量資料比對

在康芮颱風過後，南部地區並無重大降雨事件，因此從坡面地表GPS站位移結果顯示，在9月4日後坡面地表GPS站位移速度趨緩，坡面逐漸穩定，位移曲線逐漸由陡線轉為水平。因此由坡面地表GPS站位移變化與雨量資料，顯示崩塌地高雄市-桃源區-D346因降雨因素造成坡面明顯往西向下滑動，表示坡面的位速度與強降雨事件有高度相關性。

再比對地表伸縮計與雨量資料，也可發現在8月17-10月2日期間共經歷了三次颱風事件(潭美、康芮、天兔颱風)，監測點23-E1約有8公分的拉伸量，監測點23-E2也約有5公分的拉伸量，而10月2日-10月25日，因無明顯的降雨事件影響，兩個監測點皆無明顯的變化量，顯示崩塌地高雄市-桃源區-D346因降雨因素造成顯著的滑動。

#### 四、結論與建議

過去利用航空照片立體對成像的判釋方法或衛星影像(或航空照片)結合5米或40米網格解析度的數值高程來判釋細微的崩塌地形特徵，

因受限解析度與植生因素，難以明確反應地表地形特徵。此研究藉由高精度數值地形配合航空照片來判釋具有崩崖、反向坡等微崩塌地形特徵的潛在大規模崩塌，再藉由現場調查的結果確認判釋結果，確認是否為潛在大規模崩塌區位，顯示此判釋與查核方法不論在時效性、準確性都獲得極佳的成果。由本研究與國外案例和研究，也都支持利用高精度數值地形在植被茂密的國有林找出潛在大規模崩塌是一套可行且快速的方法。

藉由判釋成果再搭配本研究發展的簡易坡面監測方法，不論在經費、效率與成果，和過去傳統地工監測方法有相當大的進步，此簡易監測可以快速且長期的提供坡面岩體滑動與雨量關係的資料，有助於其他研究機關或相關業務單位未來研究與了解大規模崩塌與降雨之關係，以提升國內後續防救災規劃之參考。⚠

參考文獻(請逕洽作者)