

# 大規模崩塌潛勢區的調查與監測

文／圖 ■ 廖志中 ■ 國立交通大學土木系教授

潘以文 ■ 國立交通大學土木系教授

李國維 ■ 國立交通大學土木系博士後研究員

王慧蓉 ■ 國立交通大學防災與水環境研究中心工程師

康耿豪 ■ 國立交通大學土木系博士生

簡翊文 ■ 國立交通大學防災與水環境研究中心副工程師

鄭又珍 ■ 國立交通大學防災與水環境研究中心副工程師

李膺讚 ■ 林務局集水區治理組科長

林貴崑 ■ 林務局集水區治理組技士

## 一、前言

近年全球在氣候變遷影響下，國內外時有大規模崩塌及土砂災害現象發生。民國 98 年莫拉克颱風所引發之大規模崩塌（如小林村地區）及土砂災害，不僅造成人命損失，且造成財產損失與復建經費龐大，其對於政府財政及社會經濟影響甚鉅。目前國內各相關單位對大規模崩塌的定義主要參考千木良雅弘（2007）深層崩滑規模：崩塌面積超過 10 公頃、土方量達 10 萬立方公尺或崩塌深度在 10 公尺以上；如透過判釋具有崩塌地形特徵，且潛在崩塌面積大於 10 公頃者，則定義為大規模崩塌潛勢區（何岱杰 et al., 103 年）。林務局（102，104）已完成部分國有林大規模崩塌潛勢區的圈繪與危險度分級，為執行國有林大規模崩塌潛勢區減災及監測計畫的規劃，本文首先就大規模崩塌潛勢區的活動性評估方法及其可能破壞形式加以說明，再提出需要進行大規模崩

塌潛勢區詳細調查與監測的原則與方法，並以高雄市-六龜區-D015 大規模崩塌潛勢區案例進行說明。

## 二、大規模崩塌潛勢區活動性簡易評估與細部調查、監測篩選

林務局（102，104）透過中央地質調查所空載光達（LiDAR）高精度數值地形提供的微地形特徵資料，搭配 0.25 公尺解析度航空照片，判釋潛在大規模崩塌特徵、圈繪大規模崩塌潛勢區，並以證據權重法計算大規模崩塌潛勢區的坡度、岩性、構造線距離、河道距離、順向坡等因子的權重值，正規化後加總作為大規模崩塌發生度評分，篩選出較危險的崩場地。然因國內過去發生一次式致災性的大規模崩塌的案例並不多，若直接使用證據權重法結果做為大規模崩塌防減災執行依據，恐失客觀。

針對林務局（102，104）由歷史災害事件篩選出的中高危險潛勢區、區內地形、地質的分析，國有林大規模崩塌潛勢區致災性的破壞，可概分為順向滑動及老崩積層破壞兩類，其中老崩積層因年代、堆積形式可能產生沿崩積層與岩盤界面規模不一的滑動，或因沖蝕溝或人工開挖（道路等）引致的崩積層的局部崩滑（如圖1）。活動性簡易評估與篩選細部調查、監測流程如圖2所示，首先蒐集基本資料及農航所早期（最早為民國65年）與最新（民國100年後）的航空照片，並由航空照片製作正射影像、數值地表模型(DSM)，並參考LiDAR數值高程模型(DEM)製作的坡度陰影圖判釋微地形資料（可獲得被植生覆蓋的早期崩崖、蝕溝、坡面形狀等資訊）進行比對。再依照前後期航照判釋的崩崖、蝕溝、坡趾、植生等邊坡活動性地表特徵變化情形，評估大規模崩塌破壞的活動性。活動性依可能破壞類型，考慮其影響因子的相關性，給予1～3不同的序分，再予加總，將活動性區分為高（8、9分）、中（5、6、7分）、低（3、4、5分），由風險評估的學理，活動性等級可類比於大規模崩塌發生機率(Hazard)。

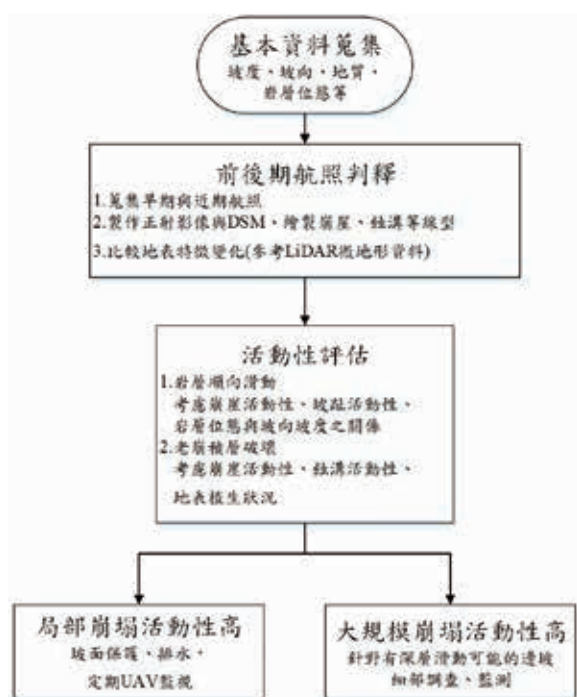
岩層順向滑動主要發生岩層見光(daylight)的順向坡，其坡趾穩定性常為主控順向滑動是否發生的重要因子，故考慮崩崖活動性、坡趾活動性、岩層位態與坡向坡度之關係進行評分。老崩積層破壞與蝕溝上溯發育或開挖息息相關，蝕溝上溯會影響崩塌層的穩定性，造成上邊坡、側坡崩塌。同時加速逕流下滲至岩土不整合界面，可能引致

崩積層內的圓弧型滑動，或者是沿著岩土不整合界面的非圓弧形滑動，其活動性則考慮崩崖活動性、蝕溝活動性、地表植生狀況進行評分。部分無法藉由航照判釋或現地勘查獲得，但是又與大規模崩塌活動性密切相關的指標因子（例如：崩積層厚度、地下水位變化、地層的物理性質及力學參數等），則可於細部調查後修正大規模崩塌潛勢區的活動性，詳細評估方法及案例可參考「國有林大規模崩塌潛勢區減災及監測執行計畫」（林務局，105年）。

若經活動性簡易評估後認為大規模崩塌活動性低、局部崩塌活動性高，例如：陡坡表層落石持續崩落，但經判釋無深層滑動潛勢，則建議坡面保護、排水並定期以UAV空拍持續變化，當未來發生明顯變化再重新檢討活動性。若經評估及現勘認為大規模潛勢區內發生範圍較大致災性的崩滑（深層滑動）活動性高且附近有保全對象，則必須做細部調查、監測、邊坡穩定分析，提供後續長期監測、治理策略之依據。



▲圖1、六龜區-D015高133線道路邊坡局部崩塌（林務局，105年）



▲圖2、大規模崩塌潛勢區活動性簡易評估與細部調查、監測篩選流程圖

### 三、大規模崩塌潛勢區細部調查方法

大規模崩塌潛勢區活動性簡易評估為大規模崩塌活動性高，則必須對有深層滑動可能的邊坡進一步細部調查。因為大規模崩滑邊坡的成因複雜，滑動機制也因地質條件、組成材料、啟動外力種類而異，因此需確實掌握地質模式、地質材料特性等，並透過數值模擬及監測結果加以驗證，方能建立合理的邊坡破壞機制。惟此方式須進行細部調查、試驗工作方能建立。細部調查項目包含地表及邊坡地質調查、地球物理探測、地質鑽探、室內試驗等相關工作，以下針對調查工作內容及目的進行說明。

#### (一) 地表及邊坡地質調查

調查工作包括地形、水文、滑動現象、岩層露頭等相關地質特性予以調查記錄，作為研判崩塌機制與原因之基礎資料，並以適當比例尺製作地表地質圖及剖面圖。現地調查項目如

1. 岩層岩性種類及位態；
2. 地質構造之型態、延伸長度及特性；
3. 地質弱面調查；
4. 崩積層厚度與潛在滑動特徵；
5. 地表植生狀態；
6. 地下水滲流位置及流況；
7. 航照判釋之地形特徵驗證與補充調查；
8. 蝕溝上溯行為及崩崖狀況，以上資料均須拍照並記錄 GPS 座標。

#### (二) 地球物理探測

地球物理探測可使用地電阻、震測、被動表面波等方法，目的是調查崩積層厚度、岩盤可能位置，以及相關地下水資訊。地球物理探測之探測結果可繪製為地球物理性質（地電阻或波速等）剖面圖，並依據鑽探岩性比對推估地層或岩性分布剖面圖。

根據「國有林大規模崩塌潛勢區減災策略研擬及安全監測」期中報告（林務局，106年）於六龜區-D015的探測結果顯示，折射震測較易決定崩積層的分布，但因其深度受測線展距影響，山區道路較不易施測長測線，因此較厚的崩積層（40公尺以上）較不適合施作折射震測。地層之地電阻受地下水、崩積土含泥量、岩石風化及破裂性影響甚巨，若無其他調查配合，不容易以地電阻法合理決定大規模崩塌區的地層剖面。若綜合折射、鑽孔結果，供地電阻解算參考，應可供大規模崩塌區調查使用。

### （三）地質鑽探

地質鑽探的位置及深度依照地表地質調查結果、地球物理探測結果及相關資料，評估可能崩塌機制與破壞型式，並考量後續邊坡穩定分析所需參數及監測儀器位置進行布置，且須考量道路可及性。例如若研判邊坡崩塌機制主要為崩積層沿岩土界面的滑動，則鑽探目的可定為探查崩積層分布及其厚度，地質剖面上的鑽孔需深入新鮮岩盤或達岩土界面處。考慮後續須安裝監測儀器使用，建議鑽探方式孔徑採用HQ尺寸以上。地質鑽探工作需全程取樣，依據岩心判釋結果進行地層分類。

鑽心取樣須詳細記錄，崩積層須記錄岩塊與基質特性，例如岩塊尺寸、排列特性，基質土壤分類等，可探討崩積層內是否有分層，反映崩塌行為、機制、量體次數等特性。岩層須記錄風化度與不連續面傾角，入岩段須進行孔內造影試驗，記錄層面傾角隨深度的變化，觀察是否有深層重力變形的跡象。

### （四）地質鑽探報告

至少應包含 1. 環境地質、2. 鑽孔位置圖、3. 鑽孔柱狀圖（含岩層傾角變化）、4. 孔內造影結果、5. 地質剖面圖、6. 各鑽孔岩心彩色照片、7. 地質資料比對說明（收集該地區經濟部中央地質調查所相關資料並與地球物理探測之結果比對分析說明）、8. 工程地質評估，說明各層土岩材料之物理性質、力學性質。

### （五）室內試驗

由地層分類結果挑選各分類之岩樣進行試驗，以獲取邊坡穩定、運移等相關分析所需之材料物性與力學參數，試驗項目選擇須視該大規模崩塌潛勢區的可能破壞機制而定。以表層覆蓋崩積土的岩石邊坡為例，破壞機制可能包含 1. 崩積層內圓弧形滑動、崩積層沿不整合面滑動，其力學參數可參考併構土三軸試驗；2. 沿岩體內部不連續面的滑動，力學參數可參考岩石弱面直剪試驗；3. 重力變形行為，力學特性可參考岩體分類及岩石三軸試驗。

綜合以上調查項目及結果，可初步掌握大規模崩塌潛勢區內地質狀況及可能滑動面位置，以提供邊坡穩定分析及後續工程規劃之參考。若細部調查及邊坡穩定分析後認為該區目前尚不需整治，或整治完成後需驗證成效，則進行後續監測。

## 四、大規模崩塌潛勢區監測方法

由航照判釋、崩塌區調查結果、邊坡穩定分析、歷史災害紀錄可以初步掌握邊坡現況穩定性，本文建議針對具深層滑動潛能的大規模崩塌潛勢區，進行長期監測（觀測）邊坡變形與降雨量隨時間的變化以了解活動性，降雨資料可以透過鄰近雨量站或設置雨量筒蒐集。透過長期監測結果分析降雨或地震事件對邊坡變形的影響，如地中變位持續增加，則須重新檢討活動性並提出整治建議。

現有邊坡變形監測方法可概分為地表監測與地中監測。常見的地表監測方式為裝設單

頻 GPS 或伸張計於地表。林務局（105 年）蒐集高雄市六龜區、桃源區、甲仙區的監測結果發現許多 GPS 位移變化上下跳動，或是位移方向呈現不合理的變化趨勢。經檢討，林班地多遍佈密林，透空度差，不容易挑選到適合裝設又具代表性的位置，若裝在不均質崩積層、道路旁、蝕溝、局部崩塌、整地填土處，位移行為易受到局部地形效應。若能充分掌握邊坡行為，將 GPS 裝設在合理處（如固定在岩層），其變形量才具代表性。

若經地形、地質資料、航照判釋評估具有深層滑動可能的大規模崩塌潛勢區，本文建議於地中裝設傾斜觀測管及水位／水壓監測井，掌握可能滑動面位置與地下水位或水壓分佈，未來可由長期監測結果的變化趨勢評估深層滑動邊坡的活動性。臺灣目前許多單位於地質調查鑽探後安裝傾斜觀測管並回填七厘石，試圖同時觀測地層變位及水位變化。由傾斜觀測管變位資料及崩積層水文特性，張芷英（106 年）的研究指出上述安裝方式不適合細部調查使用。以下針對常見邊坡監測項目提出建議。

### （一）傾斜觀測管

大規模崩塌潛勢區的地中變位監測（觀測）的主要目的是調查潛在滑動面的位置，必須能確實掌握地層初期的小變形量。由孔內造影或攝影結果可知在崩積層或高度風化岩層內鑽探時，管壁會留下凹凸不平的空洞（數公分甚至 10 公分），這些空洞無法僅由從孔口由上而下倒入七厘石完全回填密實，造成傾斜觀測管周圍留下孔洞，這也是造成許多傾斜觀

測管變位資料 S 型彎曲原因之一。建議應使用水泥混皂土漿（配比可依地層勁度調整）由鑽孔底部向上灌漿，才能將傾斜觀測管充分固結在地層之中。若有與地層固結，傾斜觀測管的初期為小變形量（ $\pm 1\text{mm} / 10\text{m}$ ，視傾斜觀測管整體系統精度而定）才能反映可能滑動面的變形趨勢。地中變位量測，除了傾斜觀測管，也可使用時域反射儀（TDR）、定置型孔內傾斜儀（IPI）、光纖等觀測方式。

### （二）水位／水壓監測井

大規模崩塌潛勢區的地質條件複雜且不均質，由地質分層至少包含新鮮岩盤、風化岩層、崩積層等，其透水性差異甚大，彼此也並非完全連通。若要觀察地下水位（水壓），必須分層量測，整管回填七厘石僅適用於水壓完全連通的地層，並不適用在大規模崩塌潛勢區的深層滑動監測。若以調查及後續邊坡穩定分析的角度，首先要從鑽孔岩心判斷要量測哪一層的水位（水壓）變化，於施作水位井時，在水壓計頭段回填乾淨砂濾料 50 ～ 70 公分，上下以皂土夯實封堵，再使用自記式水位計量測地下水位變化。

### （三）地表監測

地表監測在能充分掌握邊坡行為的條件下，可將 GPS 裝設於能反映滑動體變位處，例如桿件向下固結在順向滑動的岩層，獲得合理的變形趨勢。GPS 須裝設在透空度良好之處且須長期觀測，並應注意單頻 GPS 的精度較差，若邊坡變形量僅數公分可能難以表現。伸

張計可用來觀察崩滑體頭部的滑移速率，長度須足夠長，以確保二固定點分別位於穩定區及滑動區。

#### （四）降雨紀錄

將雨量筒設置在邊坡單元可以記錄降雨歷時曲線，短期可以由歷史災害與雨量關係做為邊坡破壞警戒值之參考，長期監測（觀測）邊坡變形與降雨量隨時間的變化以了解活動性。

### 五、案例探討

依照前述活動性簡易評估與細部調查及監測篩選流程，將 33 處崩塌地篩選出 4 處大規模崩塌活動性高、4 處大規模崩塌活動性中的大規模崩塌潛勢區需要細部調查及監測，並以高雄市-六龜區-D015 大規模崩塌潛勢區為例，說明大規模崩塌潛勢區的調查與監測。

由前後期航照判釋可得知 71 ~ 104 年間蝕溝上溯、崩崖後退的範圍，植生覆蓋區域可參考 LiDAR 輔助判釋，判釋結果如圖 3。由地質構造評估本區無岩層順向大規模滑動潛勢，但蝕溝下切導致局部側壁順向滑動。本區老崩積層大規模崩塌活動性高，坡腹有厚崩積層且坡趾持續沖刷，須進一步調查、建立地質模型，進行邊坡穩定分析。由航照判釋及現地勘查可知蝕溝持續上溯、崩崖範圍擴大、岩盤裸露、河道凹岸沖刷，種種跡象顯示，本潛勢區局部崩塌活動性高。

細部調查項目包含地表及邊坡地質調查、地球物理探測（地電阻、折射震測，測線總長

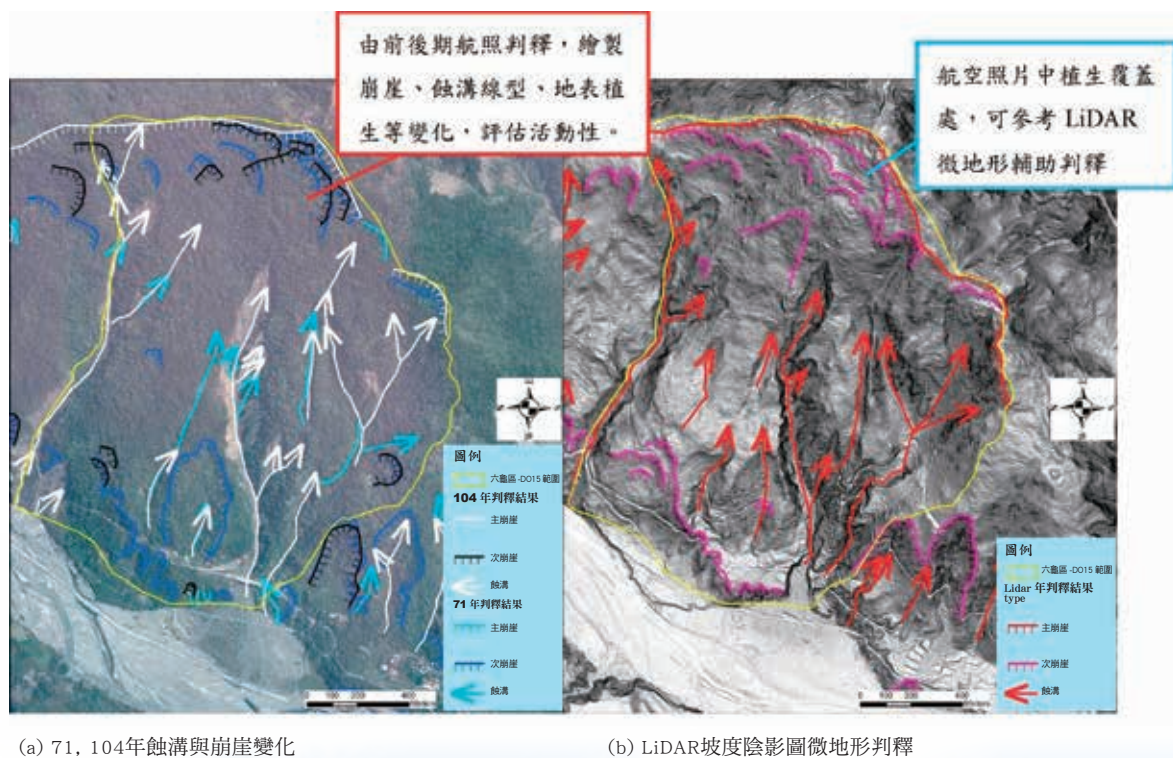
度約 1,700 公尺）、地質鑽探（8 孔共 375 公尺，入岩段孔內造影）、室內試驗（多組物性試驗、岩石單軸壓縮強度試驗、岩石弱面直剪試驗、完整岩石三軸試驗、崩積層三軸試驗）。監測項目為傾斜觀測管（4 孔）、TDR（1 孔）、水位／水壓監測井（4 孔）。

地表地質調查主要調查路線為崩塌區內兩條主要蝕溝、步道、荖濃溪河道露頭，並配合 UAV 空拍調查無法抵達處。圖 4 為潛勢區內道路現況，莫拉克颱風後造成許多道路中斷（高 133 線、登山步道及農路）、出現裂縫或陷落，這些跡象與蝕溝上溯行為經過整理分析，可以反映蝕溝上溯對邊坡穩定性的影響。由地表地質調查、地球物理探測結果及崩塌地形特徵可以決定鑽孔佈設位置。本區大規模崩塌潛能為老崩積層破壞，因此必須透過鑽孔得知崩積層厚度、地層的物理性質及力學參數等，並裝設傾斜觀測管及水位觀測井掌握本區地中變位、地下水位（水壓）變化，圖 5 為鑽孔位置及監測儀器佈設說明。整合以上細部調查工作，地表地質圖及地質剖面圖如圖 6、圖 7 所示。地質圖及剖面圖顯示本區可能的邊坡破壞機制包含沿崩積層界面或重力變形剪動帶的滑動、高 133 線道路邊坡崩滑（崩積層及表層風化岩層）、沖蝕溝兩側的崩滑及蝕溝源頭崩滑引致上溯。

六龜區-D015 共裝設 4 隻傾斜觀測管、4 個水位觀測井，每個水位觀測井在 2 個不同深度裝設水壓計頭，其中一個使用自記式水位計記錄，監測儀器佈設說明如圖 5。使用水泥混皂土漿作為傾斜觀測管回填料的效果良好，埋

設至今 6 個月尚未出現 S 型挫曲等不合理變位形狀。水位觀測井記錄結果亦證實同一鑽孔在不同深度的地下水並不一定連通，降雨後的地下水位變化行為也不同。以 BH5 為例，BH5 地層分布 0 ~ 7 公尺為崩積層，7 ~ 50 公尺為風化硬頁岩層。共裝設兩支水壓計頭，深度分別為 13.55 ~ 14.1 公尺及 44.35 ~ 44.85 公尺（自計式）。圖 8 為 106 年 6 月 1 日降雨事件（累積降雨量 642 毫米）後水位變化

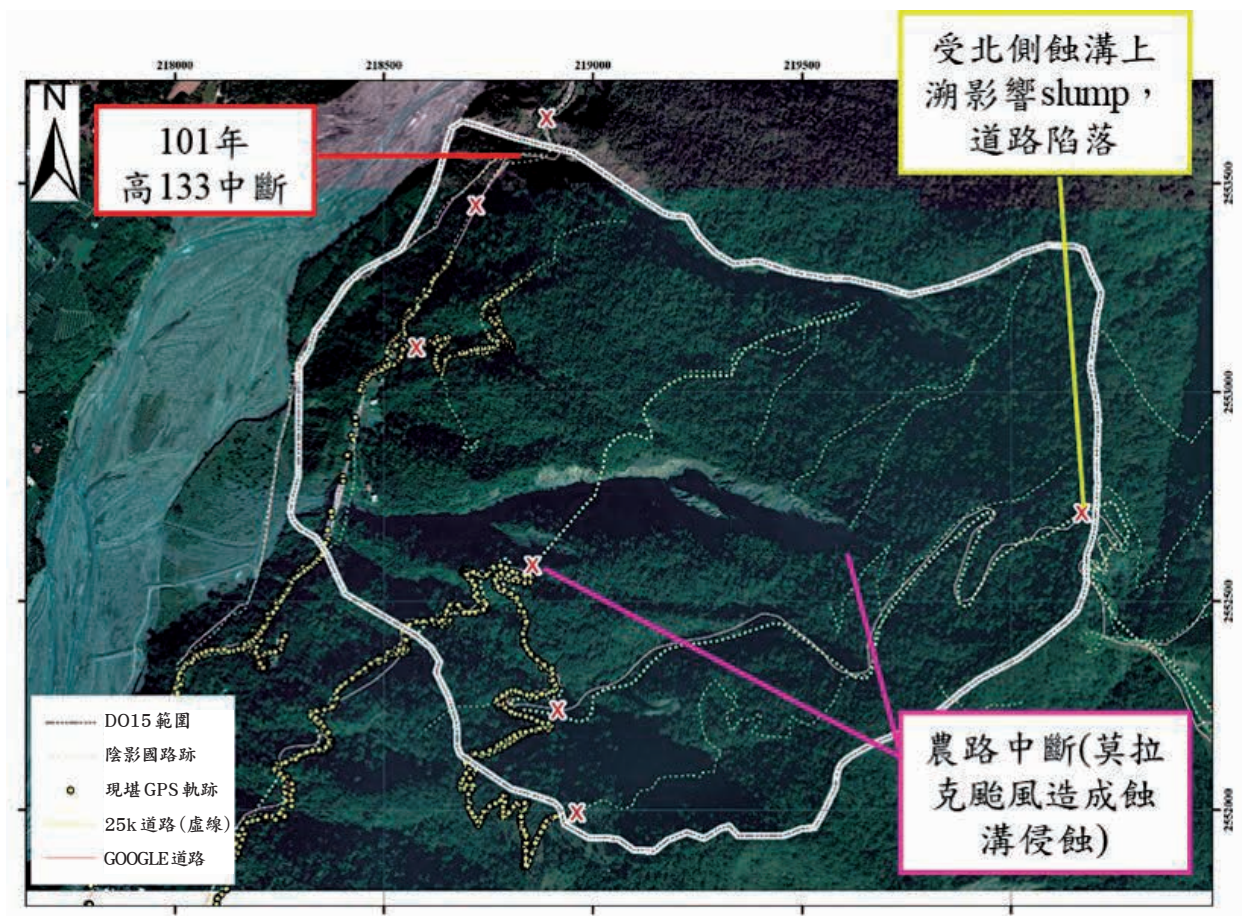
歷時曲線，由監測結果顯示 BH5 的風化岩層在不同深度的水壓並不連續，在較深處的自記式水位計監測結果顯示水壓在降雨期間抬升可達 15 公尺，結束後 24 天仍抬升 9 公尺。更進一步探討原因，BH05 位於蝕溝旁，由地形、地質可知地下水位在降雨時會明顯升高且消散較慢。詳細調查與監測結果請參考「國有林大規模崩塌潛勢區減災及監測執行計畫」（林務局，105 年）。



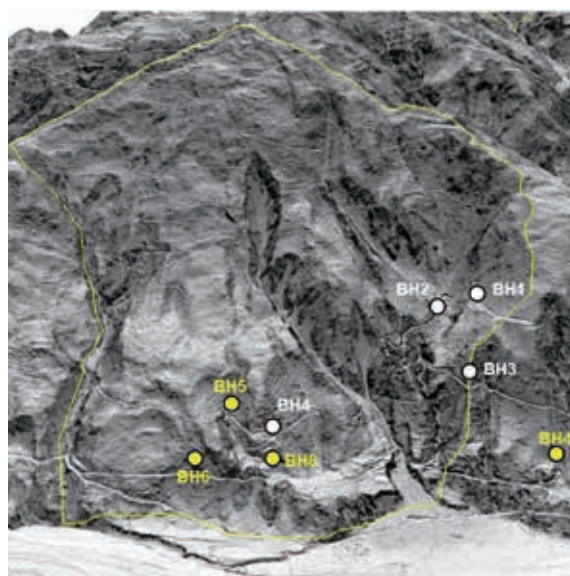
▲ 圖3、六龜區-D015前後期航照判釋結果



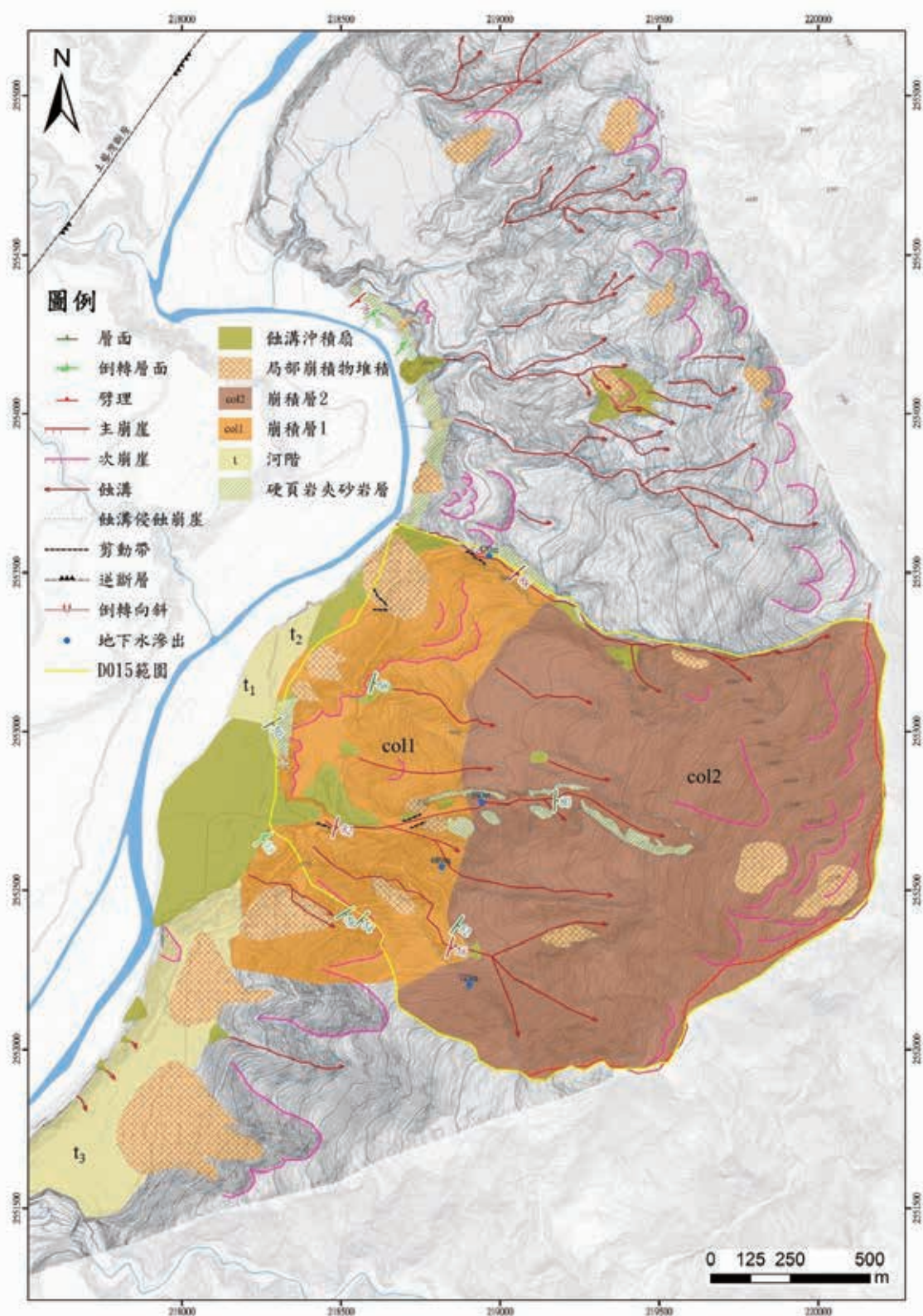
（圖片／高遠文化）



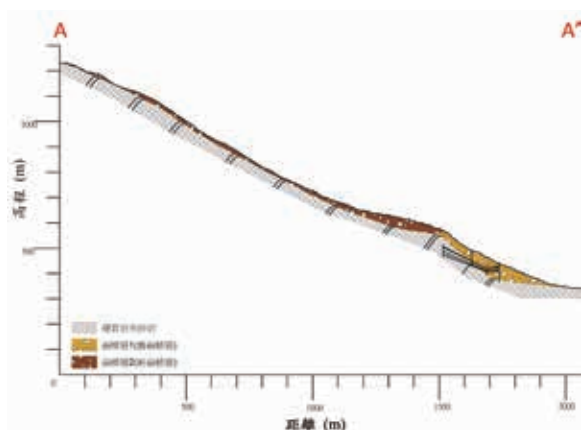
▲圖4、六龜區-D015莫拉克颱風後道路中斷位置與步道陷落處



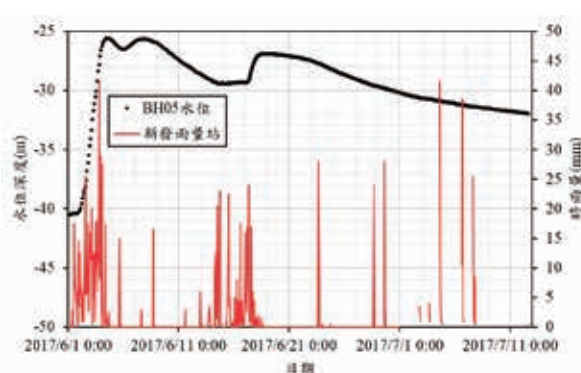
▲圖5、六龜區-D015鑽孔位置與監測儀器佈設  
(黃色：水位井；白色：傾斜觀測管，底圖為坡度陰影圖)



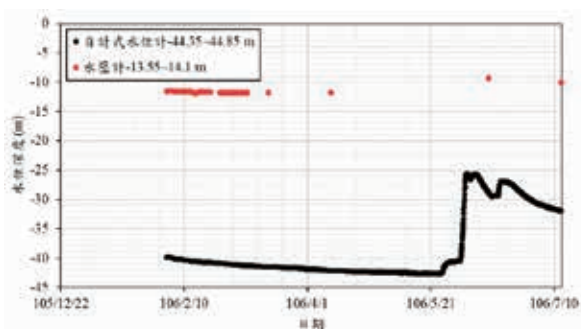
▲圖6、六龜區-D015地表地質圖



▲圖7、六龜區-D015地質剖面圖



(a) BH5自記式水位計升降與降雨關係圖



(b) BH5水位歷時曲線圖

▲圖8、六龜區-D015潛在大規模滑動邊坡水位監測結果

## 六、結論

若大規模崩塌潛勢區經活動性評估後疑有深層滑動的可能，則必須進行細部調查、監測、邊坡穩定分析。為了確實掌握大規模崩塌潛勢區的地質模式與地質特性，建議調查項目

包含地表及邊坡地質調查、地球物理探測、地質鑽探、室內試驗等相關工作，綜合以上調查項目及結果，可初步掌握大規模崩塌潛勢區內地下地質狀況及可能滑動面位置，以提供邊坡穩定分析及後續工程規劃之參考。

由航照判釋、崩塌區調查結果、邊坡穩定分析、歷史災害紀錄可以初步掌握邊坡現況穩定性，針對具深層滑動潛勢的大規模崩塌潛勢區，進行長期監測（觀測）邊坡變形與降雨量隨時間的變化以了解活動性，降雨監測項目包含傾斜觀測管、水位觀測井、地表監測、降雨記錄等，安裝時須注意變位監測（觀測）的主要目的是調查潛在滑動面的位置，必須要能確實掌握地層初期的小變形量，且大規模崩塌潛勢區的地質條件複雜且不均質，若要觀察地下水位（水壓）必須分層量測，透過長期監測結果分析降雨或地震事件對邊坡變形的影響。



## 參考文獻（請逕洽作者）



（圖片／高遠文化）