

掌握山崩的前兆

林錫宏、紀宗吉、費立沅

山會動嗎？它什麼時候會動？如何知道它在動？
高雄小林村的大山崩、國道 3 號 3.1K 的順向坡滑動等災害，
有沒有方法掌握先機以事先防範？

坡地的危機與轉機

近年來在極端氣候的劇變下，全球各種坡地災害逐漸趨於大規模化、高頻率化及複合化。在台灣，颱風豪雨、地震、人為擾動等都會誘發山崩，導致重大的坡地災害，如草嶺、九份二山、國道 3 號 3.1K 順向坡、高雄小林村、林肯大郡邊坡等山崩事件，都造成了嚴重的傷亡與社會的衝擊。因此，每逢颶風豪雨，高風險的坡地，尤其是依據災防法劃定的土石流潛勢溪流，都會啟動警戒或疏散避難措施，危險路段也實施預警性封閉，以期降低生命及財產的損失。

儘管目前土石流的防災機制已漸趨成熟，但對於山崩問題的掌握仍有科技上的限制。由於山崩會衍生地表變形、建物龜裂、崩積物質掩覆、土石流、河道淤積堵塞、堰塞湖潰壩、洪水等災害，其災情往往也甚嚴重。因此如何妥適利用防災觀測儀器掌握山崩前兆，是當前山崩防災的重要議題。



民國 95 年 0609 豪雨造成南投縣仁愛鄉翠巒地區大規模山崩，可明顯觀察到剛發生的岩體滑動、岩屑崩滑及土石流動的現象，照片下方尚有小規模的堰塞湖。

目前土石流的防災機制已漸趨成熟，但對於山崩問題的掌握仍有科技上的限制。

如何妥適利用防災觀測儀器掌握山崩前兆，是當前山崩防災的重要議題。

形形色色的山崩現象

廣義來說，「山崩」包括落石、岩屑崩滑、岩體滑動、土石流等 4 種型態。前三者較接近剛體或塑性體的運動型態，土石流則較接近流體運動型態，但在每次的山崩中，都可能出現這 4 種型態。

此外，國內對移動速度較緩慢而大致仍保持原狀的山崩，常稱其為地滑；而對運動速度較快，大部分已崩解者，則稱其為崩塌。滑動面積超過 10 公頃，土方量超過 10 萬立方米或深度超過 10 米以上，就稱為大規模崩塌。

有關山崩的移動方式，大致可分為兩種。

第一種是規模較大、深度較深（通常超過 10 米深，少數可達 100 米以上）的山崩型態，例如岩體滑動。其在發展初期，常以地滑的型式呈現，位移量緩緩累積、滑動速率較慢，甚至走走停停，並在滑動的過程中，留下許多與滑動相關的微地形證據，稱為老崩場地。但若任其持續發展，則在豪雨或地震時，滑動就會加速，導致大規模崩塌發生。這種類型的山崩，藉由地形特徵、地表裂縫或位移量測技術，並透過長期位移觀測，就能掌握山崩前兆及警戒。

另外一種則是規模較小、深度較淺的山崩型態，如陡坡上的落石或淺層的岩屑崩滑，常突然發生在豪雨或地震時，並以崩塌的型式快速崩解，甚至沿坡面或溝渠迅速流動。這類型因缺乏山崩前兆，較難在事前掌握，山崩警戒技術仍持續研發中。



南投縣仁愛鄉翠巒地區投 89 線道路 15.4K 處不同時期的照片。照片中央的農墾地，原本道路從中央穿過，但因不斷產生岩體滑動而逐漸下滑，周圍崩場地不斷擴大，目前重修的道路已在農墾地上方約 20 米處。

如何找出可能發生山崩的地點

老崩場地暗示這個地區曾有滑動的歷史，顯然體質也較為脆弱，是較容易發生山崩的潛在地點。因此針對曾經滑動後的地形證據，再利用地形特徵的分析方式，可以找出這類潛在的山崩。

潛在山崩的地形特徵包括：坡頂緩斜面；崩崖、反斜崖、側崩崖、圓弧形裂縫；二重或多重山稜線；線狀凹地；圓弧形滑動體；坡趾隆起；坡面及側邊蝕溝；岩盤潛變等現象。傳統上常藉由多時期的航照或地形圖、測量、現場踏勘等方式，找出潛在山崩的範圍，但這些地形特徵往往受到茂密植生的影響而難以發覺。

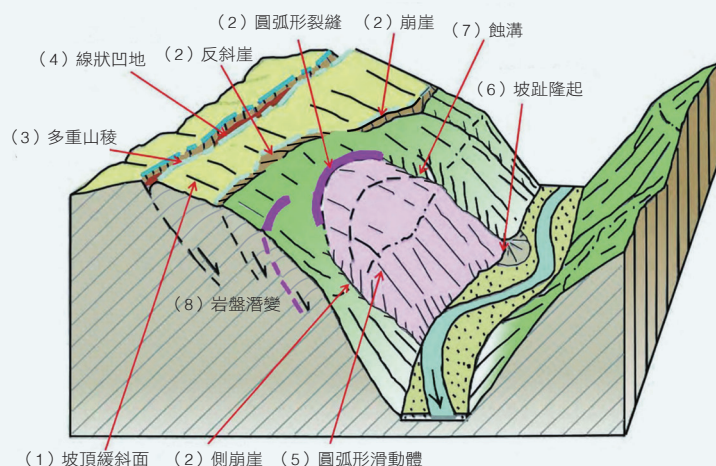
近年來發展快速的光達（light detection and ranging，簡稱 LiDAR）技術，藉著對地面大量發射雷射光束，提高雷射光穿過植物枝葉間隙到達地面的機會，可取得非常接近地表實際高程的資料。即使是隱藏在樹叢中只有 1 米高的小崩崖，在光達掃描到的數值地形圖上仍有可能辨識出來。光達地形資料經專業研判及野外調查確認後，就可掌握崩崖、裂縫、線狀凹地、坡趾隆起等代表孕育中的山崩地形特徵，進而找出可能發生山崩的範圍。

坡地是否有動靜，到現場勘查是最直接的方式。由於樹木有垂直向上生長的特性，因此樹木歪斜的狀況可反映曾有的坡地滑動，當滑動停止後，樹木會重新垂直向上生長。如此彎彎曲曲的樹木，有人稱做「馬刀樹」或「酒醉的樹」。如果知道這樹種的生長速度，只要計算樹木最後一段垂直向上生長的時間，便可以知道這地區滑動的歷程。此外，若道路、擋土牆或結構物中出現方向一致、具連貫性的新生裂縫，也可反映山崩的前兆與範圍。

替山把脈

想知道坡地動態，應該要有科學的數據。因此，必須有可量化的觀測技術。山崩的觀測儀器種類繁多，包括量測降雨、水文、應力、傾斜及位移的儀器，其中位移是最直覺的山崩前兆。對於活動性較明確，可能危及居民安全的坡地，自動化的位移觀測技術顯然最為需要，但設置的成本較高。

測傾儀是最常用且簡易的地中位移觀測方法。利用地質鑽孔埋設具溝槽的測傾管，再定期置入測傾儀量測每一深度的傾



潛在山崩的地形特徵示意圖



左下角的新生裂縫顯示右側已滑動約 20 公分。舊有且應鄰接的擋土牆已錯移超過 100 公分，暗示可能已累積多次的滑動紀錄。

斜角度，進而推算相對於孔底（假設不動點）的各深度水平位移量及滑動面深度。雖然測傾管是探查山崩動態的好方法，但

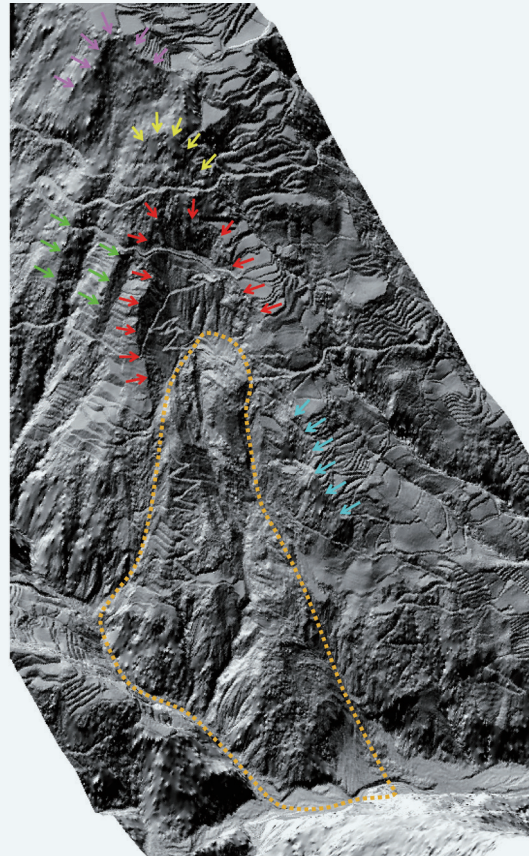


相較左側直立的樹木，彎曲的樹木反映右側曾經滑動過，邊界處（紅色虛線）形成小崩崖。

必須依賴人工定期量測，無法自動化取得時間連續的觀測資料，且塑膠材質的測傾管材被地層滑動剪斷後就失去功能。因此對於具有山崩活動特徵的危險聚落，顯然需要另謀可自動化、可即時傳輸資料的位移量測方法。

為解決自動化的問題，發明家從電影製作的動作捕捉技術中獲得了靈感。例如在動畫電影〈變形金剛〉的製作過程中，動畫角色的動作是由真人穿戴 3 軸傾斜感測的微機電晶片進行模擬。因此，把微機電晶片等距（間距 0.5 米）地串接在電纜中，最後把電纜置入鑽孔內並回填，便可即時量測各深度的傾斜訊號，再推算為各深度位移向量，便成為類似測傾儀但可自動化量測位移的「多點式地中變位儀」（shape accel array, SAA）。這項技術能獲得隨時間變化的地中 3D 動態位移曲線，且不易損壞，是目前偵測山崩動態的最新利器。

孔內伸縮計也是一種常用的地中自動化位移計。同樣利用鑽孔把鋼索一端固定



利用光達掃瞄得到的數值地形再製日照陰影圖，可明顯看出山崩的地形特徵，包括圓弧狀的主崩崖（紅色箭頭）及趾部隆起的滑動體（橘色區域）。此外，其他老崩場地或潛在山崩的地形特徵也清晰可見，包括隱藏在樹林或農墾地的崩崖（粉紅色及黃色箭頭）、側崩崖（藍色及綠色箭頭）等。



傳統的測傾管量測方式，需仰賴人力攜帶繁重的測傾儀及纜線，進行定期量測。

在孔底（假設不動點），另一端在孔口處是自由端並連接變位計，便能自動量測孔口與孔底之間的相對位移，缺點是無法了解位移深度及多個滑動面的個別位移量。惟近期已開發出類似前述可用於地層下陷監測的多段式孔內伸縮計，在鑽孔中置入多段鋼索，固定端個別錨定在設計深度，便能求得不同滑動面間的相對位移。

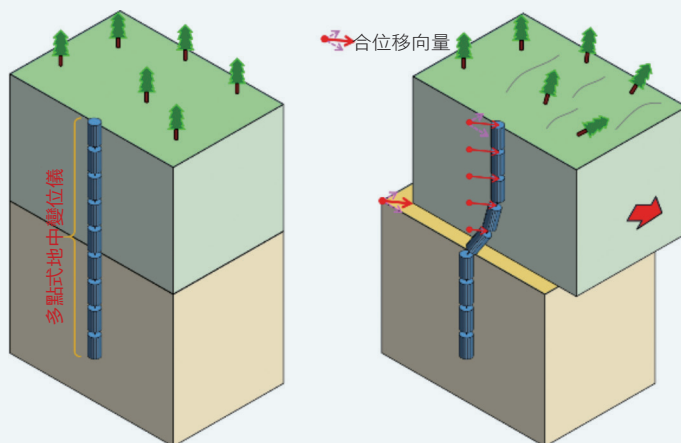
其他還有許多地表自動化的位移量測方法，包括地表伸縮計、裂縫計、傾斜計、GPS、全測站經緯儀、合成孔徑雷達差分干涉法等創新技術。但各種量測方法都需考量適用條件與限制，例如量測精度、溫度、人為干擾、植生等的影響。

山崩的前兆

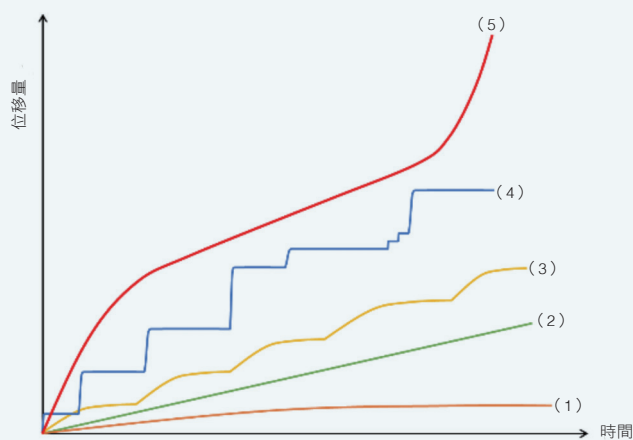
從學理推論，降雨不僅沖刷地表，也會滲為地下水並軟化土體或岩體，造成坡地不穩定而導致山崩。因此，若觀察到地下水位急遽升高或突然降低、坡面湧水、裂縫滲水，或地表出現系統性裂縫、地中位移加速，甚至震動造成的地鳴聲，都可能是山崩的前兆。

一般而言，坡地從開始滑動到最後完全崩壞的過程，可利用時間及位移的歷時曲線圖來說明，曲線的斜率代表位移速率，越陡處反映位移速率越快。斜率類型大致可分為 5 種：緩慢型位移、等速型位移、間歇型位移、階段型位移、加速型位移，在坡地完全崩壞之前，位移類型多屬於前 4 種之一。

坡地若因降雨減緩導致地下水位不再上升，位移便會停止。惟當下次降雨量夠大或地下水位上升時，會使邊坡位移持續發生、位移速率再度上升，達到不穩定的

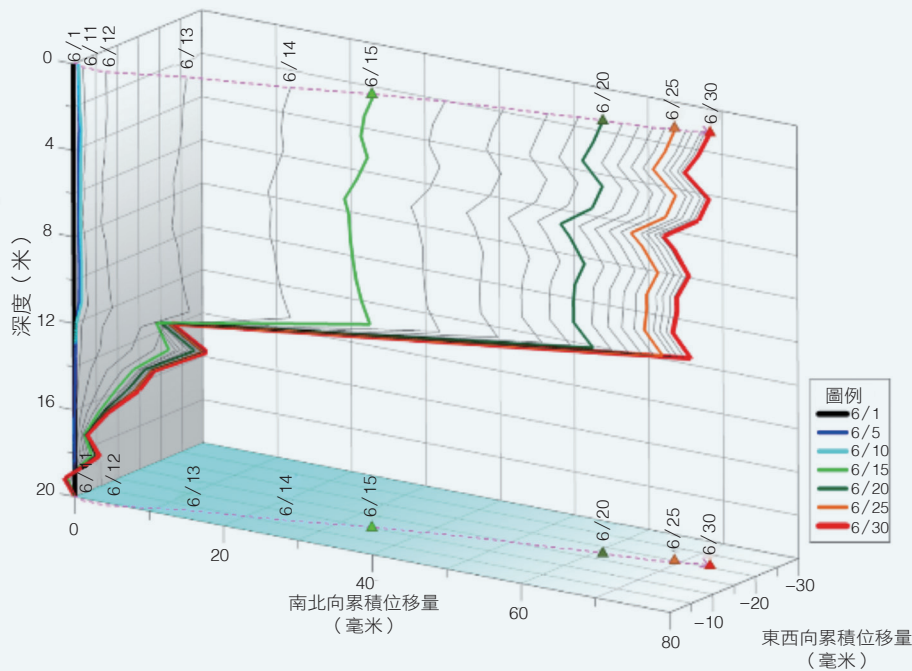


多點式地中變位儀的量測原理示意圖。電纜中等距串接 3 軸傾斜感測的微機電晶片，可換算求得地表及各深度的位移向量，同時能知道地中位移的深度。



坡地位移的歷時曲線類型示意圖。(1) 緩慢型位移，(2) 等速型位移，(3) 間歇型位移，(4) 階段型位移，(5) 加速型位移。

臨界狀態，進而變成加速型位移的型態，成為即將要發生山崩的臨界狀態。若環境條件未改善或甚至持續惡化，最後會完全崩壞。

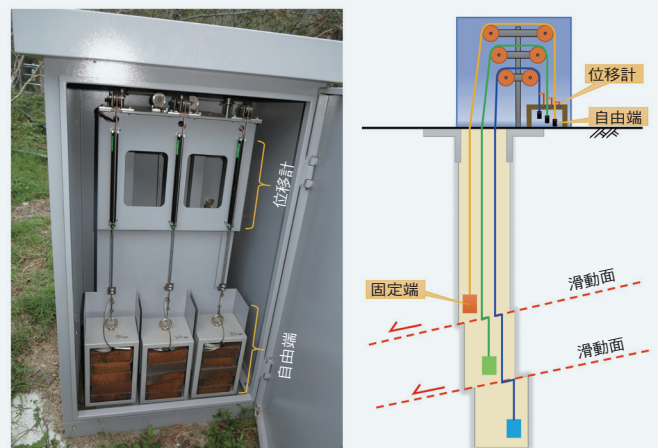


設置於廬山溫泉北坡的多點式地中變位儀於 101 年 0610 豪雨期間量得的位移曲線，除可推算位移向量、位移速率外，也發現地下 12.5 米處是明顯的滑動面。

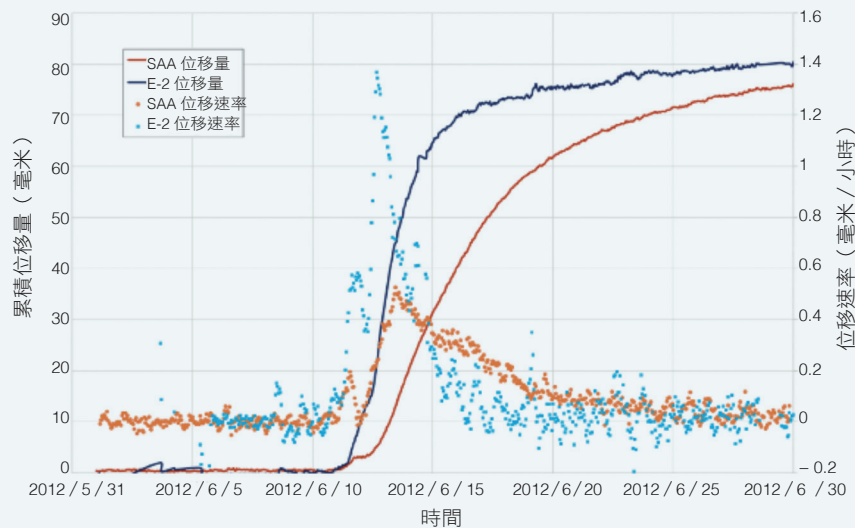
以南投廬山溫泉北坡為例，這是一處面積達 34 公頃，滑動面深度超過 109 米的潛在山崩地區，在 101 年 0610 豪雨期間，總累積雨量達 1,093 毫米。70 米深的孔內伸縮計的累積位移量超過 80 毫米，20 米深的多點式地中變位儀的累積位移量也超過 76 毫米。

這兩處位移計都自 6 月 11 日起偵測到地中位移現象，這時累積雨量約 500 毫米。隨後位移漸漸加速，至 6 月 13 日中午，累積雨量達 1,050 毫米，孔內伸縮計達到最高的位移速率約每小時 1.4 毫米，多點式地中變位儀達到最高的位移速率約每小時 0.52 毫米。所幸之後降雨停歇，位移速率漸減，位移延續約 1 個月後才完全停止。

由於坡地開始位移後，並無法確知位移是否會停止或加速至崩壞，因此在實務



多段式孔內伸縮計的孔口外觀（左）及設計示意圖（右）。固定端錨定在不同深度，透過鋼索及滑輪組連接自由端的位移計，可求得不同滑動面間的相對位移。



101年0610豪雨期間，廬山溫泉北坡的多點式中變位儀（SAA）及孔內伸縮計（E-2）量得的地表累積位移及位移速率，都具有先加速、後減速的位移特性，位移延續約1個月後才完全停止。

運作上，只要獲知超過觀測儀器精度的位移量，就視為是山崩的前兆。對於危險而重要的地區，更需要訂定較保守的觀測管理值，以做為提前警戒的管理措施。

掌握山崩前兆的危機意識

觀測管理值一般可分為注意值、警戒值及行動值，訂定方式主要是參考過去的滑動歷史紀錄、國內外案例經驗、規範或數值分析等。

位移計是最常做為山崩觀測管理值的項目，當達到注意值時（例如每月2毫米），就顯示坡地可能進入不穩定狀態，這時應審慎注意其他不利的環境條件或位移徵兆。若達到警戒值時（例如每日2毫米），顯示坡地已有明確的滑動現象，必須做好萬全的警戒與疏散準備。甚至達到行動值時（例

如每小時2毫米），顯示坡地可能開始加速滑動，在無法掌握未來會持續加速或停止的狀況下，儘速把山崩影響區內的民眾撤离至安全的地點才是上策。

降雨是導致山崩的主要誘因，因此實際或預報的累積雨量及降雨強度也常做為觀測管理值。例如國內土石流潛勢溪流的警戒雨量，目前設定在200至600毫米之間；公路單位也有依據雨量而設定的防災封路機制。104年8月蘇迪勒颱風期間，桃園合流部落在達到預測的警戒雨量時，立即提前疏散撤离，成功地使部落居民免於山崩與土石流的災難。

地下水位的的高低也可間接反映坡地的穩定狀況，但因不是直接的滑動證據，通常僅設定注意值及警戒值。此外，地震也會造成山崩，但在目前地震都難以預測的

具山崩地形特徵的「潛在山崩」或「老崩場地」，是致災機率較高的地區。

若能藉由光達技術的判釋，無論是老崩場地或潛在山崩，在災前都有機會發覺，若及早進行坡地動態觀測，也有機會提前防備。

狀況下，更難以掌握地震引致的山崩地點。不過，具山崩地形特徵的「潛在山崩」或「老崩場地」，是致災機率較高的地區。

極端氣候的啟示

面對全球氣候變遷，極端氣候已成常態，自然災害的強度與規模常常超乎大家的預期。例如 104 年夏天，位在台北水源地的南勢溪流域，鮮少發生地質災害的蔥鬱樹林，竟然無法承受蘇迪勒颱風及杜鵑颱風的侵襲，而造成嚴重的坡地災害。

烏來地區也是災區，當時福山的雨量站測得最大時雨量高達 95 毫米、3 小時是 253 毫米、6 小時是 442 毫米、12 小時累積降雨量是 655 毫米，不僅高於其他颱風事件的降雨量，也超過 200 年降雨頻率，是史無前例的短延時強降雨，引致許多山崩及大量土砂運移，連帶影響了飲用水的品質。

若能藉由光達技術的判釋，無論是老崩場地或潛在山崩，在災前都有機會發覺，及早進行坡地動態觀測，也有機會提前防

備。但是這些措施都需要長期投入大量的經費、人力與研究，而且國內近年才擁有這類技術及高解析度地形資料，因此尚有漫漫長路要走。

面對極端降雨及無法預料的異常氣候，現今的科技仍無法精確地掌握豪大雨會下在哪裡、下多少、下多久，同時我們對山崩的發生機制所知也有限，觀測技術也有其限制條件。因此，防災的思維已不再是人定勝天，而必須強化防災意識，完成整合性防災地圖，並落實各項防災機制，包括長期觀測、防災演練、災情傳遞、疏散撤離等，共同做好防災與避災的準備。

林錫宏、紀宗吉、費立沅
經濟部中央地質調查所環境與工程地質組

