

遙測影像於地滑及土石流的辨識

鄭錦桐¹、潘國樑²、王順民³、邵國士⁴

¹財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心高級研究員兼副理

²財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心顧問

³財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心助理研究員

⁴財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心正研究員兼組長

摘要

地滑及土石流，不管其發生年代的新舊，都會保留著明顯的地形特徵。而此些特徵可以作為辨認地滑及土石流的重要證據。

遙測影像做為面狀調查的重要工具，有別於地面的點狀及線狀調查。一般而言，影像上調查的廣度、完整度、精度、以及工作效率都比地面調查要高。因此，以影像判釋來承擔大部份的調查工作，而將地面調查用於核證、釋疑、以及細查等工作，這是一種既科學又有效率的方法。

本文陳列許多從遙測影像辨認地滑及土石流的微地形及植被之特徵。為作者推動遙測影像應用於防災科技研究上的一些重要心得。

一、前言

在台灣所有天然災害中，論規模、頻率、危險度、及遺傳率之大、之高，地滑及土石流都是站在前茅的。但是它們大多位居深山、無路可及，在地面上很難調查。加以在地面進行調查時，視線常受阻隔，無法窺其全貌，遑論要追蹤其邊界，更難推論其災源及成因。因此，最好的方法就是利用遙測影像（包括衛星影像及航照），並且在影像上作業，搭配地理資訊系統的坐標控制，則以上的難題全部可以獲得

解決。唯一要考慮的是，我們平常習慣於從側面看物像，而遙測影像則是從空中鳥瞰，因此地物的性狀看起來會非常不習慣。不過，只要加以訓練，以及取得一經驗，以上的問題即可迎刃而解。目前遙測影像常被應用在坡地防災、坡地管理、坡地開發審議、都市開發規劃等項目之判斷參考依據。

二、遙測技術於工程上之應用

在冷戰年代揭開太空競賽的人造衛星，進入 21 世紀之後，卻在每個人的生活中扮演了重要的角色。現在，有許多人造衛星環繞地球，擔負著通訊廣播、軍事、導航、氣候觀測等各種任務，我們每天進行的看氣象預報、打電話、使用 GPS、上網查看地圖等行為，都與人造衛星的運作有關。對工程師來說，人造衛星更是提供了許多幫助，讓我們得以探索的觸角進一步延伸，可大量累積空間與度量空間與時間之序列資料，即四維空間資料庫，而此項技術被稱為遙感探測 (remote sensing) 技術，簡稱遙測技術，是探索地面地物的重要利器，常見利用各種遠端載具裝設感測器來接收地球上各種物體的資訊，載具可為人造衛星、飛機、飛行船及氣球等。

土木工程應用方面，遙測技術可以提供許多寶貴的資訊，過去某些人跡罕至或有坡地災害而無法快速到達地區、重大工程建設（高速公路、水庫大壩、核電廠…）的選址及選線、流域集水區土壤沖蝕、坡地災害歷史變遷、地質構造判釋等面向，皆可透過衛星影像或航照遙測判釋達成初期評估，以及提供工程師進行工程規劃與減災對策參考。近年本社主要應用此技術於坡地災害之歷史變遷及機制探討居多，同時也關注坡地災害可能衍生之工程災害問題，提供軟性防災與硬體工程減災等調適策略建議。隨著科技之進步，各式遙測資訊種類增加、取得的成本降低、遙測影像解析度與相關技術提升等，遙測技術於土木水利相關工程領域之應用層面因而更擴增。

林書毅等人(2002)指出不同尺度之遙測影像在地質災害、工程種類、工程階段上扮演角色如表一所示，由表一可大略呈現出目前國內遙測對於大地工程之主要功能，主要應用項目如影像展示、水系、山崩、構造、岩層岩性、土地利用以及數值分析等，對於各不同載具所獲得之遙測資料，進行其不同尺度與光譜特性之應用現況。

表一 遙測在地質災害、工程種類、工程階段之扮演角色(修改自林書毅等人，2002)

應用領域		遙測技術扮演之角色
地質災害	土石流監測	舊崩塌地判釋、土石流區域判釋、水系分析
	土壤液化	土地利用分區、岩層岩性分析
	震源機制	線形判釋、活斷層判釋、岩層岩性分析
	坡地防治	崩塌地判釋、地質構造判釋、岩層岩性分析
	地盤下陷	土地利用判釋、漁塭判釋
工程種類	工業區開發	土地利用分類、工址地質判釋
	水利工程	地質構造判釋、岩層岩性、崩塌地判釋、水系分析
	交通運輸	工址調查、地質構造判釋、岩層岩性、崩塌地判釋、選址評估
	建築工程	工址調查、選址評估、展示
	填海造陸	海岸線變遷分析、水系分析
工程階段	調查	全面性工址調查（地形、植生、水文、地質、土地利用）
	規劃	不同空間解析力的遙測影像可輔助不同尺度需求的工址候選
	設計	利用遙測影像配合數值模型建構三維之虛擬實境
	施工	利用不同時期的遙測影像進行工程進度掌控
	營運維修	利用不同時期的遙測影像進行變遷分析

三、遙測技術於國內之應用

在國內坡地防災應用與坡地管理應用方面，經濟部中央地質調查所(2007, 2011)利用豪雨事件前後的多期衛星影像，進行遙測影像的山崩判釋工作，建立各事件的山崩目錄，最後利用此山崩目錄進行山崩潛勢評估。農委會水土保持局(2010)利用近期的航照與衛星影像，

定期更新判釋土石流潛勢溪流上游集水區的崩塌狀況，隨時掌握土石流潛勢溪流上游的土砂材料來源狀況，成為防災整備的重要基本資料，該資料更可進一步利用於土石流風險管理(曹鼎志等人，2011)。另外，內政部建築研究所(2008)利用遙測判定技術判釋坡地社區鄰近區域是否有地滑(順向坡)與土石流災害，進而進行社區地質災害風險排序(林彥享等人，2008)，並建置成坡地社區環境地質查詢系統(沈哲緯等人，2011)。

在坡地開發審議、都市開發規劃應用方面，台北市工務局大地工程處(2011)利用遙測影像判釋各項環境地質災害，並將製作環境地質圖冊，內容包括地滑與土石流的空間分布，該圖冊已廣泛利用於台北市各項土地開發與都市規劃參考。更值得關注2010年11月16日立法院第7屆第6會期第8次會議三讀通過地質法，並於2010年12月8日制定公佈，行政院則訂定自2011年12月1日開始施行。該法之第五條：中央主管機關應將具有特殊地質景觀、地質環境或有發生地質災害之虞的地區，公告為地質敏感區。可預期未來利用遙測影像(包括衛星影像及航照)判釋技術於地質法實施後的山崩與地滑地質敏感區之劃設，與工程開發評估等相關工作將扮演著舉足輕重之重要角色。

在工程開發審議之應用，以台灣電力公司青山電廠復建案為例，大甲溪流域是台灣重要的水力發電資源，歷經1999年集集大地震，及其後數次颱風豪雨，尤其72水災，讓台灣電力公司水力發電設施受到重創，幾乎被掩埋於河床礫石中。台灣電力公司為復建上游青山電廠，台灣電力公司(2008)利用遙測影像判釋技術，瞭解各期災害事件的地滑與土石流空間分布，並掌握土砂運移的狀況(Chiou et al., 2007; 鄭錦桐等人，2007)，提出青山電廠復建之可行性評估報告，有利於青山電廠順利原地復建相關資訊參考。另外，依據1996年通過的「石門水庫及其集水區整治特別條例」，農委會水土保持局(2011)

即透過遙測影像判釋地滑與石流之分布，來規劃石門水庫集水區之各項保育治理工程配置與預算，並且於施工至完工階段，透過遙測影像監測集水區各項保育整治工程之量化治理成效(鄭錦桐等人，2008；林伯勳等人，2011)。

四、新生地滑及土石流的影像特徵

由於地滑及土石流的遺傳率甚高，也就是它們在空間分佈上常繼承先前的遺跡，發生過後也常留下疤痕，但在非汛期間，植生常會復生，只不過生長於上的植生種類、生長狀況、及覆蓋密度等，有別於周圍的未受擾動之植被。因此，上述這些細微的現象只有在遙測影像上才易於發覺，在地面上一般是不易看出其異狀(潘國樑等人，2006)。

從遙測影像上可以作面狀的調查，有別於地面的點狀及線狀調查，影像上調查的廣度、完整度、精度、以及工作效率都比地面調查要高。因此，將影像判釋做為調查工作之重心，而將地面調查用於核證、釋疑及細部分析等工作，這是一種既科學又有效率的方法。雖然遙測影像具有多項優勢以及應用領域，但本文將以台灣較常見的地滑及土石流為應用案例，說明新生的地滑及土石流於遙測影像上之特徵；根據這些特徵，一般不必經過費時的地面核證，我們即可逕於初步確認其存在。

(一) 地滑

地滑具有明顯的滑動面，滑動體即在滑動面上發生剪切式滑動。滑動之後，滑體即發生變形及裂解，但是整體結構並未受到嚴重的破壞；不像崩塌體會產生整體潰散的現象。不過卻有一些例外的案例，如草嶺及小林地滑都是因為造成滑動的力源太大、以及滑速太快，終致全體潰散。

依據滑動面的形狀，滑動可分成弧型地滑、平面型地滑、及楔型地滑三種。弧型地滑的滑動面，其凹口向上如碗狀，又稱旋滑型

(Rotational Slide)。因為滑體在滑動過程中係以某一個圓心，順著圓弧旋轉了一個角度。它通常發生於均質性較佳的土壤、填土、礦渣、非常破碎的岩層、或逆向坡上(潘國樑，2007)。平面型地滑(Translational Slide)的滑動面為平面或近乎平面，如層面、節理面、斷層面、葉理面、軟弱夾層、向坡外傾斜的不整合面、土岩介面或風化殼與岩盤的介面等。楔型地滑(Wedge Failure)是一種廣義的平面型地滑；它是由兩組位態不同的不連續面相交而成的一種楔型柱體之滑動；兩面的交線之傾斜方向就是它的滑動方向。

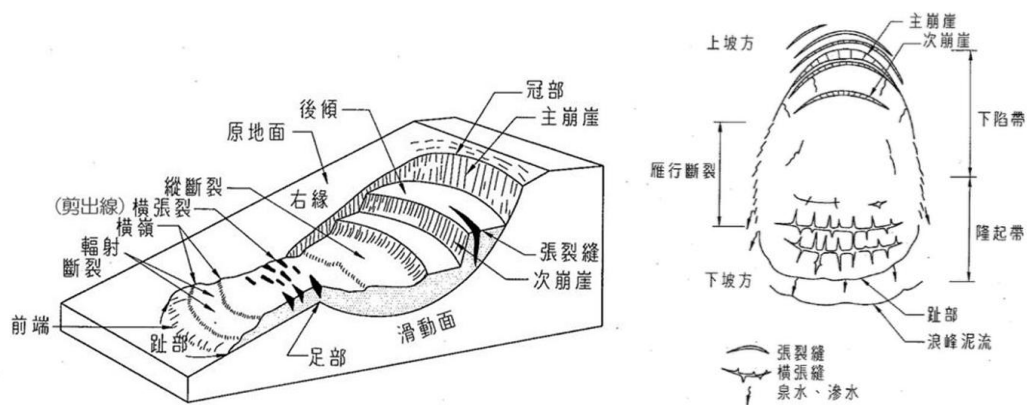
1. 弧型地滑的影像特徵(見圖一及圖二)

在遙測影像上，弧型地滑一般具有如下的特徵(潘國樑等人，2011)：

- 主崩崖呈新月形，植生不長或非常稀疏，反射率強，為最具特徵的部位。
- 冠部呈弧形；其背後可能出現張力裂縫，呈同心弧狀。
- 外形呈馬蹄形、畚箕形、舌形、或不規則形；長寬比接近於 1，其比值比崩塌地小。
- 滑體上的水系被破壞，或缺乏水系；且植生枯死。
- 在地形上，滑體的上半部凹陷，下半部則凸出地表。
- 滑體的上半部可能出現下陷台階及封閉窪地；且台階面向後傾；冠部或次崩崖之下可能發現蓄水塘。
- 滑體可能出現亂丘地形；下半部的岩層可能倒傾，使得整個滑體形成崩塌向斜(即上半部的岩層向下邊坡傾，而下半部的岩層則向上邊坡傾)。
- 滑體的前端(趾部)會出現地滑舌；且趾部呈捲筒狀。
- 有時地滑舌會侵入河道或堵塞河道；即使經過久遠時間，在河道內仍然遺留一些孤石，激起水花。
- 滑體前端的道路或河道可能受逼而往外推移，因而形成彎曲狀，

包圍著滑體前端。

- 滑體的下半部可能出現扇狀的剪裂縫，向下方撒開(見圖一下)。
- 滑體的兩側可能出現倒八字的羽狀(雁行狀)剪裂縫(見圖一下)。
- 切過邊界的線性地物被錯開，如水系、道路、地形的軸線、不同地物的界線等。
- 對於大規模的地滑，其滑體會裂成數個滑塊，而滑塊上的岩層位態都不盡相同；前端的岩層傾向可能與後端者相反(即崩塌向斜)。
- 趾部或滑體內常見到泉水或濕地。
- 常見發生於逆向坡的上邊坡(此種滑動稱為滑落，Slump)。



圖一 弧型地滑滑動體的各部名稱(左為透視圖，右為平面圖)

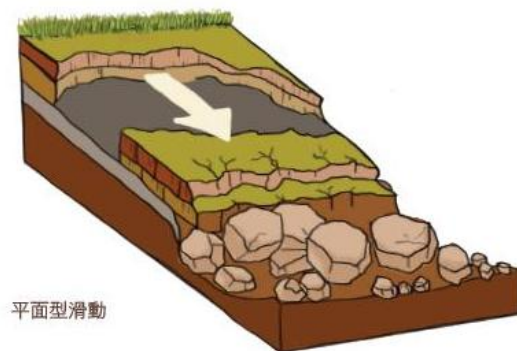


圖二 衛星影像上典型之弧型地滑特徵(Google Earth 影像)

2. 平面型地滑的影像特徵(見圖三、圖四及圖五)

同樣的，平面型地滑則具有如下的影像特徵(潘國樑等人，2011)：

- 冠部的橫斷面呈 U 形，類似斷層類型中的地塹。
- 冠部及兩側通常呈現線形，為不連續面所框限。
- 如果滑移的距離足夠長，有時可見到滑動面上的擦痕。
- 滑體裂解成塊；且滑塊大小與滑動的距離成反比。
- 冠部底下無水塘。
- 滑體缺水系。



圖三 平面型地滑示意圖



圖四 平面型地滑，發生在五指山層的順向坡上。在此類型看不到弧型地滑的弧型冠部。(Google Earth 影像)



圖五 平面型地滑經過大約 10 年的復育，植物沿著節理又慢慢的長回來，但是滑動痕跡仍然清晰可辨(朝滑動方向看)(Google Earth 影像)

3. 楔型地滑的影像特徵(圖六)

楔型地滑常由兩個不同位態的節理面、或者不同位態的節理面與斷層面、節理面與層面、或由順向坡與逆向坡合組成一個 V 型塊體，滑過之後就形成 V 型槽。小林地滑即屬於後者。

楔型地滑的影像特徵與平面型地滑非常類似，常可發現其中一個滑動面會比另外一個還明顯；這個比較明顯的滑動面通常是層面。如果兩個滑動面同樣明顯，則 V 型槽即非常容易辨認。

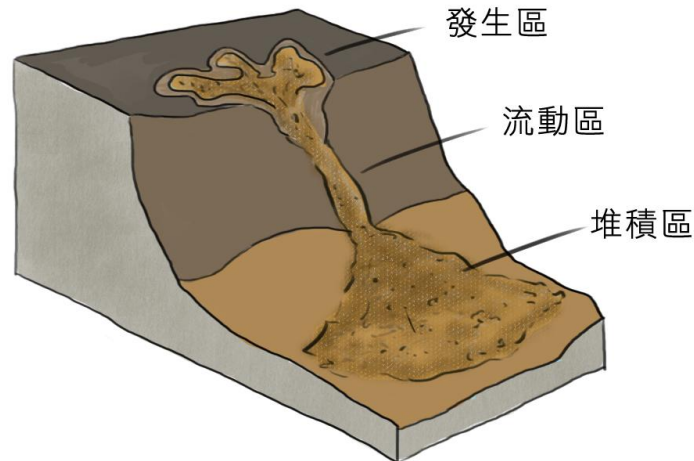


圖六 節理面與層面組成一個 V 型塊體，形成楔型地滑(Google Earth 影像)

(二) 土石流(見圖七)

土石流是土、石與水的三相流體；其中水的體積含量可以從 30% 至 70% 不等。土石流的流動靠的是重力，而不是水力。當水量達到土石飽和含水量的 1.167 倍時，即可啟動土石流。但是土石流的發生，其所需水量遠多於此，也就是要有充沛的水才能產生土石流。如果要符合這項條件，則土石流的源頭必須要有一個聚水盆地，才可能達成。由於土石流的聚水盆地不見得是一個盆地，有時候一個凹地也可以達到聚水的目的，所以就稱為匯水窪地。這個匯水窪地就是辨認土石流的重要影像特徵之一。

土石流一旦啟動了，它就會循著溝槽迅速的流動；而溝槽的長度一般都有數公里以上，稱為流通段。在槽溝的盡頭，即谷口的地方，地形驟然開朗，土石流即不再受溝槽的約束，乃向外發散，並形成堆積扇。因此，一條土石流具有發源地、流通段、及堆積區三大顯著的地形單元，它們自成一個系統(見圖七)。職是之故，土石流的辨認必須通過整個系統的一體判釋，其中缺一不可。



圖七 土石流的基本地形單元

典型的新生土石流具有如下的影像特徵；茲分別說明於下(潘國樑等人，2012)。

1. 發源地(圖八)

- 源頭顯示碗狀或魚骨狀的匯水窪地；前者呈現指狀水系，後者呈現非字狀水系。
- 源頭有崩塌或地表水沖刷的痕跡，常無植生倖存。

2. 流通段(圖九)

- 溝槽被土石流深切，兩壁刷深、變陡，可從顯著的陰影予以辨認。
- 溝槽的全段幾乎等寬。
- 土石流的刷深及側蝕之共同作用造成兩壁的邊坡滑落(Slump)；在溝槽的兩側常可見到排成一系列的崩塌三角面，狀似鋸齒，且齒尖向外(指向河槽的外側)。
- 有時大型滑落會堵塞河道，造成河道改道；大規模的滑落會在上游形成堰塞湖。
- 使用精密的衛星影像，有時可辨認流通段佈滿著巨石，產生陰影，達到凸顯的效果。
- 利用精密的衛星影像，有時可辨認土石流在受阻過程中所造成的較寬、且較高的鼻頭及鼻翼堆積。
- 有時可辨認因為土石流的直進性而造成的溢流現象。

- 土石流因為超高現象，所以兩側常見自然堤。
- 土石流在河道中的堆積會形成中間高兩側低的超高現象(即超出兩岸的高度)。



圖八 土石流的發源地；流水沖刷是土石材料最主要的生產者及供應者。影像中可見岩盤非常破碎，且被流水嚴重沖刷(Google Earth 影像)



圖九 土石流的流通段，可清楚的辨識其巨石(Google Earth 影像)

3. 堆積區(見圖十、圖十一)

- 土石流在谷口常形成堆積扇，呈扇狀；其扇頂位於谷口；扇緣向外，呈弧形，或不規則的參差狀。
- 堆積扇整體呈三角錐狀，錐頭位於谷口，錐體則表現中間高、兩側低的特殊地形，以此可與河階台地區別。後者橫跨谷口，且與谷口的位置無關(河階台地不一定要位於谷口；但是堆積扇一定是位於谷口)，其階地面平坦，或微微向下游傾斜。
- 堆積扇常呈扇狀水系型態。
- 堆積扇的扇頂部位與接近谷口的流動段堆積物有顯著的坡度轉折(Slope Break)。
- 有時可見到樹幹。



圖十 兩個土石流堆積扇結合為一；於常水期時，流水切割著扇面，且發育出扇狀至瓣狀水系(USGS)



圖十一 古土石流堆積扇(Google Earth 影像)

五、結論

地滑及土石流均具有週期性與交替性發生的特性，但是以空間預測的準確率較高，而時間預測則較難把握。目前仍以遙測影像為辨認地滑及土石流之最佳工具。其中，尤其以空間的辨認力最高，主要是因為地滑及土石流發生過後均會留下顯著的遺跡，而這些遺跡很難在地面上加以辨認。但是如果以其微地形及植被的影像特徵綜合予以研判，則可以從遙測影像上發現及肯定的識別其存在。

至於時間的辨認力稍遜，但如果以危險度(考慮發生規模及頻率)的大小來評估，則從多期的衛星影像加以追蹤，也可以預測災害發生的相對頻率與概率。

總而言之，遙測影像是研究地滑及土石流非常有用的一種工具。研究人員只要能夠辨認地滑及土石流的影像特徵，即可輕而易舉的在

影像上進行圈繪。

台灣島造山帶地殼抬昇速率與年平均降雨量幾近世界之冠，地震與豪雨造成台灣山區之崩塌、土石流、河道淤積等土石災害頻仍，加上地表侵蝕速率高，造成河流地形與集水區變化劇烈，已嚴重影響水利設施與抽蓄發電計畫的正常運作。有鑑於此，利用遙測影像判釋技術不僅可判釋地滑與土石流，更可搭配各期數值地形變化差異，進行豪雨、強震等災變之廣域範圍且快速的災害監測與評估，提供後續工程復救可行性評估或防救災整備規劃，值得推廣利用。

參考文獻

1. Chiou, S. J., C. T. Cheng, S. M. Hsu, Y. H. Lin, and S.Y. Chi (2007) Evaluating Landslides and Sediment Yields Induced by the Chi-Chi Earthquake and Followed Rainfalls along the Ta-Chia River, Journal of GeoEngineering, 2, 2, 73-82.
2. 內政部營建署建築研究所(2008)山坡地社區災害防制技術之研究-GIS、RS 科技應用坡地社區環境災害評估判釋準則建立之研究，執行單位財團法人中興工程顧問社，臺北市。
3. 台北市大工務局地工程處(2011)100 年度山坡地環境地質調查及系統更新計畫，執行單位財團法人中興工程顧問社，臺北市，193 頁。
4. 台灣電力公司(2008)大甲溪流域德基至馬鞍段集水區崩塌地暨土石流潛勢調查及因應對策研究，執行單位財團法人中興工程顧問社，臺北市。
5. 林彥享、邵國士、吳秋雅、沈哲緯、鄭錦桐、李怡先、陳建忠、高憲彰、冀樹勇(2008)運用遙測與 GIS 技術輔助坡地社區之安全評估與管理，建築學報，68 期，141~156 頁。
6. 林伯勳、梁惠儀、蕭震洋、冀樹勇、王晉倫、鐘啟榮、邱世宜(2011)

- 石門水庫集水區土砂監測與治理成效評估，地工技術，129 期，第 109~114 頁。
7. 曹鼎志、陳振宇、羅文俊、楊永祺(2011)台灣地區土石流風險管理成效評估，地工技術，第 25~34 頁。
 8. 經濟部地質調查所(2011)地質敏感區災害潛勢評估與監測-都會區周緣坡地山崩潛勢評估，執行單位財團法人中興工程顧問社，臺北市。
 9. 經濟部地質調查所(2007)易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置—集水區地質調查及山崩土石流調查與發生潛勢評估計畫(第 1 階段 96 年度)，執行單位中興工程顧問公司、亞新工程顧問公司、台北科技大學資源工程研究所、中央大學應用地質研究所，臺北市，652 頁。
 10. 農委會水土保持局(2010) 99 年土石流潛勢地區易致災因子調查與危害頻率分析，執行單位財團法人中興工程顧問社，臺北市。
 11. 農委會水土保持局(2011)石門水庫集水區土砂歷程調查與災害評估，執行單位財團法人中興工程顧問社，臺北市。
 12. 潘國樑(2006)遙測學大綱—遙測概念、原理與影像判釋技術，科技圖書公司，臺北市，共 292 頁。
 13. 潘國樑(2007)山坡地的地質分析與有效防災，科技圖書公司，臺北市，共 279 頁。
 14. 潘國樑、沈哲緯、鄭錦桐、冀樹勇(2011)遙測影像判釋手冊，財團法人中興工程顧問社，臺北市，共 236 頁。
 15. 潘國樑、曹鼎志、沈哲緯、鄭錦桐、冀樹勇(2012)我們從土石流災害學到什麼(初稿)。
 16. 鄭錦桐、林伯勳、蕭震洋、梁惠儀、許振崑、冀樹勇、連榮吉、林柏壽、張州男(2008)石門水庫集水區之土砂災害監測及評估技術，土木水利，第 36 卷，第二期，6-19 頁。

17. 沈哲緯、謝寶珊、冀樹勇、高憲彰、陳建忠(2011)山坡地社區環境地質災害 GIS 查詢、展示系統建立，建築學報，78_S 期，47-62 頁。
18. 鄭錦桐、顧承宇、邱顯晉、林彥享、許世孟、張玉璘(2007)大甲溪上游土石災害潛勢評估方法之研究，中興工程季刊，95，第 31-39 頁。
19. 林書毅、于陳明、張德文(2002)大地資訊技術發展與應用，90，地工技術雜誌，第九十期，第 5-14 頁。