

近三十年間臺灣邊坡工程之技術發展與未來展望

翁孟嘉 國立臺灣大學土木工程學系 / 教授、大地技師

林銘郎 國立臺灣大學土木工程學系 / 教授

林承翰 國立陽明交通大學防災與水環境研究中心 / 助理研究員

一、前言

臺灣位處歐亞板塊與菲律賓海板塊交界，地質構造複雜，地形陡峻，山坡地面積約占全島三分之二以上，加上地震活動頻繁、颱風豪雨集中及河川侵蝕旺盛，使邊坡災害長期成為臺灣最重要且最具代表性之天然災害之一。近三十年間，隨著高速公路、快速道路、水庫、隧道、坡地社區及高山觀光產業快速發展，山區土地利用與工程開發日益增加，邊坡穩定問題已不再僅屬單一工程議題，而是直接關係國土保育、交通維生、防災治理與公共安全之重要課題。多起重大天然災害事件亦深刻影響臺灣邊坡工程之研究方向與工程技術發展。例如 1999 年九二一集集地震造成大量山崩與順向坡滑動災害，使岩體不連續面分析、地震邊坡穩定與深層滑動機制受到高度重視；2001 年桃芝颱風、2004 年敏督利颱風及 2009 年莫拉克颱風，極端降雨則引發大量崩塌、土石流與堰塞湖災害，其中小林村大規模深層崩塌事件，更成為臺灣大型山崩研究與深層崩塌防災政策之重要轉捩點。此外，國道三號順向坡崩塌、梨山地滑、廬山地滑及蘇花公路落石災害等案例，也促使國內邊坡工程逐漸由傳統災後治理模式，轉向災前預防、風險管理與韌性防災之發展方向。

在上述背景下，臺灣邊坡工程於學術研究與工程實務上均有顯著進展。過去三十年間，邊坡工程已由早期以地質調查、經驗式設計與安全係數分析為主，逐步發展為結合遙感探測、地球物理探測、高解析數值模擬、自動化監測與人工智慧分析之跨領域整合架構。尤其近年 LiDAR、UAV、GIS、InSAR、大數據、高效能運算與 AI 技術快速進步，使邊坡研究逐漸由傳統靜態穩定分析，發展為動態災害模擬、智慧監測與數位孿生（Digital Twin）之分析架構。過去作者與青山工程顧問股份有限公司同仁曾於「地工 40 紀念專刊」共同撰寫「大地工程技術發展—邊坡工程」一文（陳昭維等，2023），針對臺灣邊坡工程之發展歷程進行整理與回顧。本文以該文為基礎，摘要整理數十年來臺灣邊坡工程在「邊坡調查技術」、「邊坡力學分析方法」、「邊坡工程技術」及「邊坡監測技術」等四大面向之重要發展，並進一步探討邊坡工程在智慧化、高精度分析與韌性防災等方向之未來發展與展望。須說明的是，上述面向係依技術之主要應用目的區分，如「調查」著重於掌握特定時間點之地質條件與破壞機制，以建立地質模式；「監測」則著重於掌握邊坡狀態隨時間之變化。實務上有多項技術（如 LiDAR、UAV 測量、地球物理探測

等）同時兼具調查與監測功能，本文依其於各發展階段之主要應用情境分別敘述，並在相關章節中說明其雙重角色。

二、邊坡調查技術

臺灣邊坡調查技術之發展，與山區工程建設需求、重大天然災害事件以及遙測與資訊科技進步密切相關。1970 至 1990 年代期間，臺灣邊坡調查主要以工程地質調查為核心，包括地表地質踏勘、航空照片判釋、地形測量與地質鑽探等方法。當時國家重大建設快速推動，包括中山高速公路、北中南三條橫貫公路、水庫與山區道路等大型工程，使邊坡穩定問題逐漸受到重視。工程地質人員需透過現地踏勘，調查岩層分布、地質構造、不連續面位態與地下水條件，再配合地質鑽探建立地質剖面，以作為邊坡力學分析與工程設計之依據。此時期調查工作高度依賴地質人員之現地經驗與專業判釋能力，雖已建立臺灣山區工程之基本地質資料，但受限於山區交通不便、植生茂密與調查範圍有限等因素，對大型深層滑動與地下構造之掌握仍有相當限制。

1990 年代後，隨著地理資訊系統（Geographic Information System, GIS）的普及化，使邊坡調查開始由單點式與局部性分析，逐步轉向數位化分析與空間關係架構，而數值地形模型（DTM）、遙測影像與 GIS 之整合，也開始應用於崩塌之地形地貌判釋（潘國樑，1984；林真在、林四川，1997）。此外，地球物理探測技術亦逐漸導入邊坡工程調查，例如折射震測、地電阻探測、反射震測與透地雷達等方法，可協助推估地下岩層分布、破碎帶位置與地下水條件，雖然地球物理資料存在反演非唯一性的問題，但配合鑽探與現地調查交互驗證，仍可有效提升地下地質模式之完整性（楊潔豪，1989；董倫道與楊潔豪，1998）。

1999 年九二一集集地震後，大量山區崩塌與順向坡災害發生，基於 GIS 建立能夠快速篩選出環境地質敏感度較高區域之山崩潛感分析方法

也應運而生（黃南輝等，2002），此外，孔內探測技術亦逐漸成熟，翁孟嘉等（2006）應用孔內音波與造影技術於地質弱面調查，使地下破碎帶與滑動面調查能力大幅提升。另一方面，梨山地滑、五彎仔地滑與廬山地滑等大型地滑案例顯示，地下水位變化與地下構造往往為控制深層滑動之主要因素，因此地下水補注區、滲流路徑與地下水壓分布之調查，逐漸成為大型邊坡調查之重要核心（黃鎮臺與王文能，1997；交通部公路總區第五區養護工程處，2006）。此後井內攝影、孔內超音波掃描、地下水流向分析與深層地質調查技術逐漸成熟，更可精確掌握地下構造與地下水系統，林志平等（2020）與宋家宇等（2022）均指出，近地表地球物理方法與地電阻探測已逐漸成為崩場地地下水與地下構造調查之重要工具。

2009 年莫拉克颱風造成小林村大規模深層崩塌與堰塞湖災害後，臺灣邊坡調查技術產生重大轉變。災後政府開始大規模推動全臺光達（Light Detection and Ranging, LiDAR）測繪與潛在大規模崩塌區調查工作，LiDAR 技術可穿透植生取得裸露地形資訊，從而建立高解析數值高程模型（DEM），並據以有效辨識傳統航空照片難以觀察之微地形特徵，大幅提升大型崩塌與深層滑動區之辨識能力（侯進雄等，2014；謝有忠等，2016）。配合地形開闊度圖、陰影地形圖與紅色地形圖等加值分析方法，邊坡調查逐漸由傳統地質圖繪製，轉向精進工程地質圖與地表三維工程地質圖（邱家宏與李彪，2020）。

有別於傳統定翼機航空測量，UAV（Unmanned Aerial Vehicle）空拍測量與 SfM（Structure from Motion）技術的快速發展，使建立視覺化的邊坡模型更加便利與安全，且因 UAV 具有高機動性、低成本與高解析度等優勢，已從輔助工具躍升為大比例尺下空間資訊獲取的主流，尤其透過無人機搭載 LiDAR 設備或地面型 LiDAR，更可快速獲取高密度點雲資料，相較於 DTM 屬於二維半數值地形模型（即

每一個座標點僅對應單一的高程值)，點雲資料是由空間中無數個點所組成，每一個點都包含明確的三維坐標，據此配合點雲分析技術，得以實現包括立面地形圖建置、岩體裂隙網絡萃取與落石源區調查等，過去針對高陡岩坡難以獲得的特徵資料（黃韋凱等，2019；楊濟豪等，2020）。

除了影像與地形資料，近年雷達差分干涉（InSAR, Interferometric Synthetic Aperture Radar）技術亦逐漸應用於大型邊坡與地滑區的變形分析。InSAR 係透過比對不同時間點的衛星雷達回波相位差，計算毫米級地表變形位移，特別適合應用於大範圍山區變形分析，且具有全天候觀測優勢（林俊廷與王國隆，2019）。值得注意的是，隨著感測與資訊技術之進步，遙測技術與地球物理已由傳統單次性調查，逐漸發展為長期化、時序化之應用，使調查與監測之界線日趨模糊。許多傳統上屬於調查性質之技術，透過重複量測或長期布設，即可同時扮演監測角色：例如多期 LiDAR 與 UAV 測量可進行地形變遷偵測；InSAR 藉由 PS-InSAR 與 SBAS 等時間序列分析方法，可同時提供大範圍變形與長期活動性調查；地電阻探測經固定電極陣列定置化布設後（定置式地電阻監測，time-lapse ERT），可連續量測地層電阻率之時空變化，長期追蹤降雨入滲、地下水位變動與滑動帶含水狀態變化；分散式光纖感測（DAS）技術可將光纖纜線轉化為高密度之地下光纖地震計陣列，兼具淺層速度構造調查與微震、振動長期觀測功能（黃安斌等，2016）；微機電（MEMS）感測技術則使低成本、高密度之加速度與傾斜量測逐漸普及（陳志芳等，2016）。此外，在震波調查方面，除傳統折射與反射震測外，表面波震測與被動式震測等震波剖面調查方法，亦逐漸廣泛應用於滑動面深度、風化層厚度與地下構造之推估。

整體而言，近數十年間調查技術之進步，使臺灣邊坡調查技術已由早期以現地踏勘與地質鑽探為主之傳統模式，逐步發展為結合遙測、點雲分析、地球物理探測與高解析三維建模之整合

型調查架構（林銘郎等，2004；陳樹群、王鑫，2012），而「調查監測一體化」之發展，使邊坡空間特性調查與時間演化監測逐漸整合為單一資訊架構，亦為後續數位孿生與智慧防災系統之重要基礎。當前人工智慧與影像辨識技術之快速發展，也預期將逐漸融入邊坡調查作業，例如利用深度學習（Deep Learning）與語意分割技術，自動辨識岩體裂隙、崩塌地形、落石源區與地形變遷區域，大幅降低人工判釋時間，此外，基於 AI 的影像分析技術亦逐漸應用於崩塌地形分類、裂縫辨識與山崩潛勢分析，使邊坡調查逐漸由人工經驗判釋，邁向智慧化與自動化分析架構。

三、邊坡力學分析方法

臺灣邊坡力學分析方法之發展，與國內電腦運算與數值分析技術進步密切相關。1970 至 1980 年代期間，臺灣邊坡工程主要以極限平衡法（Limit Equilibrium Method, LEM）來分析邊坡穩定性。極限平衡法係預先假設一滑動面，將滑動土體視為剛體，並常以切片法進行分析，透過滿足力與（或）力矩之靜力平衡條件，以沿滑動面「可發揮之抗剪強度」與「維持平衡所需之剪應力」之比值定義邊坡安全係數，搜尋臨界滑動面求得最低安全係數。此法隱含安全係數沿滑動面為定值之假設，且不考慮材料應力－應變行為。由於切片間作用力屬靜不定問題，當時常用方法包括 Bishop 法、Janbu 法與 Spencer 法等，即分別採用不同之條間力假設使問題可解，各法滿足之平衡條件與計算結果亦略有差異，極限平衡法雖無法提供邊坡變形資訊，惟因其理論簡單、計算效率高且參數需求較少，因此長期廣泛應用於邊坡、擋土牆、坡地開發與水土保持工程分析，相關分析理念亦逐漸被導入國內工程實務。黃景川（1993）曾探討加勁邊坡穩定分析；黃景川等（1999）則進一步進行不對稱邊坡之三維破壞分析，顯示臺灣邊坡分析已由二維分析發展至三維穩定分析架構。另一方面，針對臺灣山

區眾多高陡岩坡之穩定分析，主要以立體投影法（Stereographic Projection）分析岩體不連續面與可能破壞模式，例如平面滑動、楔形滑動與傾倒破壞等。賴典章（1984）曾探討立體投影圖於岩坡工程之應用；張文城與翁作新（1986）則進一步進行楔形岩塊邊坡穩定之電腦分析，奠定臺灣岩坡穩定分析之重要基礎。

1990 年代後，隨著電腦運算能力快速提升，連續體分析如有限元素法（Finite Element Method, FEM）與有限差分法（Finite Difference Method, FDM）逐漸普及，使邊坡穩定分析由傳統剛體平衡概念，進入應力－應變分析架構。連續體分析可模擬邊坡由彈性進入塑性之變形歷程，並透過強度折減法求取安全係數，因此逐漸應用於山區邊坡與地下工程分析。此時期地下水與滲流分析亦快速發展。由於臺灣屬高降雨環境，降雨入滲與地下水位上升往往為邊坡失穩之主要誘因，因此不飽和土壤理論與滲流分析逐漸受到重視。拱祥生等（2003）曾探討不飽和土壤基質吸力量測及其於邊坡穩定分析之應用；鄭清江等（2009）則分析莫拉克降雨引致之高屏地區邊坡淺層崩塌與穩定性數值分析案例，使邊坡分析逐漸由單純安全係數計算，進一步考量降雨入滲與地下水變化對邊坡穩定之影響。另一方面，1999 年九二一集集地震後，大量山區崩塌案例顯示，地震作用不僅會降低岩體強度，也可能造成岩層鬆動、不連續面張裂與地下水路徑改變，因此，動態分析與地震邊坡研究快速發展，包括 Newmark 位移分析、動態有限元素分析與地震加速度反應分析等方法逐漸應用於工程實務。林美聆等（2009）曾探討集集地震邊坡滑動門檻條件；洪靜等（2019）則利用有限元素分析法模擬地震引致山崩之動態穩定問題。

2009 年莫拉克颱風造成小林村大規模深層崩塌後，臺灣邊坡分析逐漸由傳統「邊坡是否失穩」之穩定性問題，進一步發展為探討「崩塌後如何運移、堆積與致災」之動態演繹問題。傳統連續體分析方法已難以充分描述崩塌後之破裂、

碰撞與堆積行為。因此，非連續體分析如離散元素法（DEM, Discrete Element Method）、非連續變形分析法（DDA, Discontinuous Deformation Analysis），以及基於連續體分析之無網格模擬技術如物質點法（MPM, Material Point Method）等大變形分析方法逐漸受到重視。唐昭榮等（2009）曾利用 PFC3D 模擬草嶺與小林村邊變式山崩；吳建宏等（2011）則探討 DDA 於地震地滑模擬之應用案例；楊國鑫等（2020）則利用物質點法分析貓空邊坡崩塌過程與運動機制，顯示臺灣山崩研究開始重視崩塌啟動機制、致災範圍分析與二次災害風險評估等問題。相對於土壤邊坡，岩坡既有的不連續面使其分析上尤須考慮岩體的異向性與異質性，且岩坡中的地下水滲流亦是經由岩體內部節理網絡系統流動，翁孟嘉等（2021）提出板岩葉理之非線性破壞準則，並應用於板岩邊坡之重力變形與滑移分析，林承翰等（2022）則採水－力（HM）耦合之非連續體分析來探討地下水變化對節理岩坡失穩與後續堆積之影響，顯示邊坡分析已逐步納入非線性、異向性、多物理耦合等複雜地工材料行為。

另一方面，山崩潛勢分析與區域風險分析亦快速發展。透過 GIS、統計分析與類神經網路等方法，可建立山崩潛勢圖與降雨促崩模式，提供國土規劃、防災管理與道路預警系統之應用基礎，更可在小比例尺下分析廣域邊坡穩定性（李錫堤與黃健政，2005）。李錫堤與費立沅（2011）曾探討山崩災害分析與廣域製圖；譚志豪等（2011）則進行集水區降雨促崩潛勢分析；莊承穎等（2024）應用 16 年的事件型崩塌目錄劃定不安定土砂集水區及建立不安定土砂潛勢分級。近年機器學習方法亦逐漸應用於山崩潛勢分析與崩塌機率評估，陳進發等（2020）即建立蘇花公路因雨致災崩塌機率模式，並應用於防災管理。

整體而言，近數十年間分析方法之進步，臺灣邊坡力學分析已由早期以經驗法則與安全係數分析為主，逐步發展為結合地下水滲流、地震

作用、複雜岩體行為之進階數值分析架構。惟須說明的是，數值分析方法本質上為近似解；其將連續體離散化為有限單元、差分網格或非連續體元素，並以特定之組成律（constitutive model）理想化材料行為，數值分析結果受網格尺寸、邊界條件、組合律選擇、初始應力狀態與收斂準則等因素影響，而非解析之精確解，其可靠度須透過驗證與率定加以確認。此外，數值分析所需之輸入參數（如變形模數、剪力強度參數、剪脹角、滲透係數、初始應力比及岩體不連續面之勁度與強度等）遠較極限平衡法為多，實務上其取得常受限於室內與現地試驗之代表性、取樣擾動以及地層空間變異性等問題。因此，分析時須配合完整之地質調查與試驗規劃，並輔以監測資料之回饋分析與參數敏感度分析，方能確保分析結果之合理性與工程適用性。

四、邊坡工程技術

1970 年代，隨著十大建設與交通建設快速推動，包括中山高速公路、北迴鐵路、中橫公路與水庫工程等大型公共工程相繼展開，臺灣邊坡工程開始大量應用於交通建設與山區開發。此時期之邊坡工程多屬新建工程，以提供道路邊坡與路基穩定為主要目的。常見工法包括格梁植生護坡、分階擋土牆、擋土排樁與地錨工法等，而一般山區道路則常採用堡坎磚擋土牆或乾砌卵石擋土牆等傳統工法。此階段工程設計理念以結構抗力為主，透過擋土與坡面保護降低崩塌與侵蝕問題，奠定臺灣早期山區邊坡工程之基礎（廖瑞堂，2001）。

1980 年代後，隨著坡地社區、高山道路及山區開發案例快速增加，邊坡工程規模與複雜度亦逐漸提升，預力地錨、高強度岩栓與加勁土工法開始大量應用於高邊坡與深開挖工程。其中，地錨工法因具有可提供高抗滑力、施工彈性高及適用範圍廣等優點，逐漸成為臺灣邊坡穩定工程之重要技術。廖瑞堂等（2002）曾針對臺灣地錨工法之發展沿革與適用性進行探討，指出地錨技

術之進步與山區交通建設及大型邊坡治理需求具有密切關聯。後續廖瑞堂與楊品錚（2020）亦進一步整理臺灣地錨發展歷史與工程應用經驗，顯示地錨技術已成為臺灣邊坡工程最具代表性之工法之一。

1990 年代後，臺灣邊坡工程逐漸由「局部穩定」概念，轉向「整體邊坡治理」架構。梨山地滑、五彎仔地滑與廬山地滑等大型深層滑動案例顯示，地下水位上升與地下水壓增加往往為大型滑動之主要誘因，因此地下排水工法逐漸成為深層滑動治理之核心。大口徑集水井、水平排水井、排水廊道與地下排水系統快速發展，並逐漸建立「地下排水為主、擋土為輔」之治理理念。黃鎮臺與王文能（1997）針對梨山地滑工程地質調查與整治規劃進行案例探討，指出地下水控制對大型地滑治理具有關鍵影響。此外，林錫宏與紀宗吉（1997）亦針對廬山北坡大規模岩體滑動變形機制進行分析，說明深層滑動與地質構造之密切關聯。另一方面，林肯大郡災變事件亦使都會區坡地開發之工程地質與邊坡穩定問題受到社會高度重視（孫思優等，1998）。

1999 年九二一集集地震後，大量山區邊坡產生崩塌與順向坡滑動，使岩坡工程與地震邊坡穩定問題受到高度重視。大量崩塌案例顯示，地震作用不僅造成岩體鬆動與不連續面張裂，也可能誘發大規模順向坡滑動與落石災害。洪如江等（2000）針對草嶺順向坡滑動案例進行詳細探討，指出地質構造與地震作用對大型山崩形成之重要性。國道高速公路局北區工程處（2011）亦整理國道三號 3k+100 順向坡崩塌事故之救災與復原經驗，顯示高邊坡風險管理與災害應變已逐漸成為邊坡工程重要工作。另一方面，東部路廊蘇花公路因受地形地質脆弱及極端氣候影響，大小落石與坍方頻傳，成為交通痛點，近年落石防護工程逐漸由傳統剛性防護設施，轉以柔性防護系統為主（丘達昌與林義評，2021），例如高能量吸收型落石防護網、柔性鋼索系統與落石攔阻柵，可有效吸收落石衝擊能量並降低防護設施破

壞風險。然而對於無法改線且面臨大規模落石與坍方風險的山區交通路段，落石柵洞、明隧道與防護廊道等大型防護設施仍是降低災損的主要工程手段，而在 2024 年花蓮地震所引發的大量同震山崩的經驗也說明，上述大型遮擋構造物同時也可作為災害發生當下的緊急避災空間（王國隆等，2024）。

另一方面，2009 年莫拉克颱風造成小林村大規模深層崩塌與堰塞湖災害後，臺灣邊坡工程理念產生重大轉變。由於極端氣候條件下，大規模崩塌可能超越傳統工程治理能力。王國隆等（2019）曾探討板岩地滑治理之挑戰，以廬山北坡為例說明大型深層滑動治理之複雜性。廖瑞堂等（2019）則以阿里山公路五彎仔崩場地為例，指出深層滑動雖為坡地重大災害，但透過長期監測、地下排水與整體治理策略，仍可有效控制與管理。此外，近年來生態工法與環境永續概念受到重視，早期大量混凝土護坡與大規模開挖工法，雖可快速穩定邊坡，但往往造成景觀衝擊與生態破壞，因此植生工程、生態護坡與自然邊坡復育等概念逐漸導入邊坡工程，希望在維持穩定之同時，也兼顧生態環境與景觀需求。

整體而言，現代臺灣邊坡工程已由「避免崩塌」之概念，逐漸轉向「風險管理」與「韌性防災」架構，並重視土地利用管理與避災策略，傳統以建造工程為主的邊坡工程，也開始配合邊坡監測技術來建立邊坡分級管理（如陳進發，2018）與預警性封路制度（如張睿明等，2024）。隨著 GIS、三維地形建模技術與 BIM 的成熟，也逐漸應用於大型邊坡工程規劃與施工管理，以提升工程整合與維護效率。

五、邊坡監測技術

承前章所述，多項調查技術經重複量測或長期布設後亦具監測功能，本章敘述時將一併涵蓋此類技術於監測面向之應用發展。1970 至 1980 年代期間，臺灣邊坡監測主要以人工觀測

為主，包括傾斜觀測管、地表位移樁、伸縮計、水位井與裂縫觀測等方法。此時期監測工作多應用於已發生滑動或具有明顯變形之邊坡，主要目的在於確認滑動面深度、地下水位變化與邊坡活動性，以作為穩定分析與整治設計之依據。由於監測設備與通訊技術尚未成熟，因此大多採定期人工量測方式進行，監測頻率較低，且難以即時反映邊坡變化情形。1980 至 1990 年代後，隨著大型地滑區治理需求增加，自動化監測技術逐漸開始導入邊坡工程。廖瑞堂等（2005）亦曾探討崩場地地下水調查方法，指出地下水變化監測對邊坡穩定分析具有重要影響。因此，部分大型山區邊坡與水庫集水區開始設置自動化水位計、傾度計與降雨站，以長期監測地下水與降雨反應。此外，資料記錄器與有線傳輸系統逐漸普及，使部分監測資料可進行半自動化蒐集與分析。然而，此時期監測系統仍多以單點量測為主，監測項目與空間範圍相對有限。

2009 年莫拉克颱風後，邊坡監測技術進入快速發展階段，尤其為因應傳統人工巡查已難以應對快速變化且大量的山區災害，政府單位開始於大型地滑區、潛在危險聚落與高風險道路邊坡建置長期監測系統，監測內容包括地表位移、地中變位、地下水位與降雨量等，以掌握邊坡活動性與地下水變化情形。加上 2000 年代後，隨著感測器、自動化設備與通訊技術快速進步，臺灣邊坡監測逐漸朝向即時化與網路化方向發展，此時期大量自動化監測站設置於高風險山區，監測資料可透過無線通訊即時回傳至監測中心，隨著大量監測資料的累積，並逐漸建立監測資料即時傳輸與警戒值管理制度，建立地滑區監測與預警架構（經濟部中央地質調查所，2021），使監測技術逐漸由單純工程量測，轉向災害預警與防災管理用途。另一方面，針對邊坡地下滑動面活動性監測，鐘志忠等（2008）曾探討孔內聲波及光學造影儀於地質調查與地下變形判釋之應用，使地下變位與滑動面調查能力進一步提升；時域反射探測法（TDR, Time Domain Reflectometry）技

術亦逐漸應用於地中變位監測，可有效掌握地下滑動面變形情形（林志平等，2020）。邊坡地表活動性監測方面，如第二章所述，UAV 空拍監測與 LiDAR 點雲分析已逐漸應用於崩塌後地形重建、落石源區監測與四維（4D）地形變遷分析。侯進雄等（2014）與謝有忠等（2016）均指出，高解析光達地形資料可有效提升崩塌地形變遷分析與監測能力；GNSS（Global Navigation Satellite System）技術亦逐漸取代早期 GPS 系統，可提供邊坡特定位置上更高精度與更穩定之長期變形監測能力；InSAR 透過 PS-InSAR 與 SBAS 等時間序列分析技術，更可掌握邊坡地表大範圍之長期活動性與地表位移速率，有望成為大型地滑區與山區長期變形監測之重要工具。

近十年間，通訊技術與感測技術快速進步，使臺灣邊坡監測逐漸由單點監測，發展為整合型智慧監測架構。LoRa、NB-IoT、4G 與 5G 等無線通訊技術，使大量感測器資料可近即時回傳至雲端平台，提升調查、監測資料整合與分析效率（魏殷哲等，2022）。定置式地電阻監測（time-lapse ERT）與地下光纖地震計（DAS）等地物技術，亦已逐漸納入大型地滑監測系統之常設項目，其中光纖感測技術具有長距離、高耐久與抗干擾等優點，可量測應變、溫度與振動變化，因此適合應用於大型邊坡與高風險地區長期監測；其他如微機電（MEMS）感測技術則使低成本、高密度之加速度與傾斜量測逐漸普及，柱狀陣列位移計（SAA）可自動量測孔內連續變形剖面；此外，微地震監測與音射技術也被應用於岩體破裂與崩塌前兆分析，以提早掌握岩體破壞行為與潛在崩塌活動（經濟部中央地質調查所，2021）。

整體而言，過去數十年間，臺灣邊坡監測技術已由早期以人工量測與局部觀測為主之傳統模式，逐步發展為結合自動化感測與無線通訊之整合型監測架構，而監測資料之應用也逐漸由單純量測與資料蒐集，轉向災害預警與風險管理。

施乃慈等（2021）即利用多種科技技術進行南橫公路邊坡變異分析與評估，顯示智慧監測與多源資料整合已逐漸成為邊坡監測重要方向。近年來，人工智慧與影像辨識技術等自動化技術亦開始導入邊坡監測工作，包含例利用深度學習分析長期監測資料，可自動辨識異常變形與潛在崩塌前兆；AI 影像辨識則可應用於裂縫監測、落石偵測與崩塌事件判識。此外，大數據分析與雲端平台之整合，在未來也預期能基於大量監測資料進行長期統計分析與風險評估。

六、未來發展與展望

6.1 邊坡調查技術

未來邊坡調查技術將朝向「高解析化」、「智慧化」與「多源整合化」方向發展。由於深層滑動與大型崩塌具有高度空間異質性與不確定性，傳統單一調查方法已難以完整掌握邊坡地下構造與活動特性。因此，衛星遙測與 InSAR 技術之進步，將更有效率地獲取大範圍山區的地形地貌；定置式地電阻監測（time-lapse ERT）、震波剖面調查（含表面波震測）、地電阻層析、微震探測、透地雷達與分散式光纖感測（DAS）、MEMS 感測與柱狀陣列位移計（SAA）等地物探勘技術，亦將更加廣泛應用於地下破碎帶、剪裂帶與地下水系統之調查。

未來將更加重視 LiDAR、UAV、點雲資料、遙測影像、地球物理探測與地下鑽探之整合應用，用以建立高解析度之三維工程地質模型，且配合無線通訊與自動化技術的成熟，調查資料有望自三維（即空間上 X、Y、Z 座標位置）提升至四維（加入時間尺度），形成反映邊坡「即時」變形行為的大型資料集，加速邊坡調查成果與力學分析、工程整治和監測預警的整合應用。

另一方面，人工智慧與自動化影像判釋技術之快速發展，也將逐漸改變未來邊坡調查模式。透過深度學習（Deep Learning）與語意分割技術，可自動辨識崩塌地形、岩體裂隙、落石源

區與地形變遷區域，大幅降低人工判釋時間。未來 AI 技術亦可能進一步結合無人機與即時影像分析，使邊坡調查逐漸朝向智慧化、自動化與即時化方向發展。針對邊坡地質模型的建置，未來亦將更加重視不確定性分析與機率式地質建模，逐步導入 Random Field、Bayesian 更新與機率式分析方法，以提升後續大型崩塌與深層滑動分析之可靠性。

6.2 邊坡力學分析方法

未來邊坡穩定分析將逐步發展為「多物理耦合分析」、「高解析動態災害模擬」與「物理導向 AI 整合分析」架構，並更加重視地下水、地震作用、材料劣化、大變形行為與複合災害之整合分析。

在多物理耦合分析方面，未來水－力（HM）與水－力－化（HMC）耦合分析將逐漸普及。尤其在高山深層崩塌、長期降雨與地震作用環境下，地下水演化、岩體劣化與應力變化對邊坡穩定具有重要影響，因此未來分析將更加重視地下水流、滲流演化與材料劣化行為之長期影響。

另一方面，大型山崩與岩屑崩滑問題，將持續推動 DEM、DDA、MPM 與 FDEM 等大變形與非連續體分析方法之發展。未來分析不再僅探討「邊坡是否失穩」，而是進一步模擬崩塌啟動、運移、碰撞、堆積與河道堵塞等完整災害過程。特別是在高山河谷地區，未來將更加重視山崩堆積造成之堰塞湖形成、潰決洪水與下游淹水衝擊等複合災害分析，並逐步結合水利工程、水文分析與河道演變模擬，以建立跨領域之災害風險評估架構。此外，高效能運算（HPC）與 GPU 平行運算技術之進步，也將大幅提升大型三維模擬能力。未來甚至可能建立近即時崩塌模擬系統，於豪雨或地震發生後快速預估崩塌範圍、運移路徑與潛在影響區域，以作為防災決策與緊急應變之依據。

近年人工智慧技術快速發展，也將逐漸改變邊坡分析模式。Machine Learning、Deep

Learning 與 Physics-Informed Neural Networks（PINNs）等方法，已開始應用於山崩潛勢分析、降雨促崩模型與數值代理模型（Surrogate Models）。未來「物理－AI 混合分析架構」將成為重要研究方向，以兼顧分析效率、物理可信度與可解釋性。此外，Bayesian 分析、Monte Carlo 模擬與機率式風險分析，也將更加廣泛應用於可靠度分析與風險量化評估。

6.3 邊坡工程技術

未來邊坡工程技術將朝向「韌性化」、「低碳化」、「性能導向設計」與「智慧化」方向發展。過去邊坡工程主要以提高安全係數與防止崩塌為目標，但在極端氣候與大型災害頻率增加之背景下，未來工程理念的核心將由「完全避免災害發生」轉向「降低災害風險」與「提升系統韌性」。

在深層滑動治理方面，地下排水仍將是大型地滑治理之核心技術。未來將更加重視地下水長期演化、地下排水系統效能與地下水補注區控制，而不再僅依賴單純抗滑結構。此外，大口徑集水井、排水廊道與深層水平排水工法，也將持續朝向高效率與長壽命方向發展。在落石與崩塌防護方面，未來防護設施結構將逐漸整合智慧型告警系統形成一主動式防災設施，防護設施設計也將由傳統靜態外力設計，逐步轉向動態衝擊分析，且應跳脫單一安全係數之框架，在極端氣候條件下基於現地調查與長期監測資料，建立落石風險重現期（如林承翰等，2025），據以轉向性能導向設計。

未來臺灣邊坡工程亦將更加重視複合災害與國土韌性。例如大型山崩可能同時造成道路中斷、河道堵塞、堰塞湖形成與下游洪水災害，因此未來邊坡工程將更加重視與水利工程、交通工程、防災規劃與聚落管理之跨域整合，以提升整體國土防災與災後復原能力。智慧工程與數位化施工管理亦將逐漸應用於大型邊坡工程。BIM（Building Information Modeling）、GIS 與數位孿

生 (Digital Twin) 技術，可整合調查、設計、施工與監測資訊，建立全生命週期管理架構。另一方面，無人機巡檢、自動化量測與智慧施工管理技術，也將逐漸應用於高風險山區工程，以降低施工風險並提升維護效率。

此外，未來亦將更加重視結構工程與材料科技之整合應用，例如高延性纖維補強材料、FRP 複合材料、自癒混凝土與高韌性低碳材料等新型複合材料，將逐漸應用於邊坡補強、防護結構與耐震設計，以提升工程耐久性與災後韌性。另一方面，生態工法與低碳工程亦是邊坡工程之重要方向。植生工程、生態護坡、自然邊坡復育與低衝擊開發 (LID) 等概念，將更加廣泛應用於山區工程。未來低碳噴凝土、高延性纖維補強材料與可回收防護系統等技術，也可能逐漸普及。

6.4 邊坡監測技術

未來邊坡監測技術將朝向「全天候」、「近即時」、「多源整合」與「智慧預警」方向發展。隨著感測技術、無線通訊與雲端平台快速進步，未來監測系統將不再只是單純資料蒐集工具，而是智慧防災決策系統之核心。

未來邊坡監測將更加重視四維 (4D) 資料分析的整合應用，例如透過時間尺度上近乎連續的 LiDAR 點雲資料，可分析崩塌地形演變、河道侵蝕與落石源區變化，用以建立山區邊坡之長期演化模式，從而定義考量災害風險重現期之預警門檻。IoT、5G、GNSS 與分散式光纖感測技術之進步，也將使大量感測器資料可近即時回傳與整合分析，逐步建立整合降雨、地下水、位移、地震、交通與水位資訊之智慧監測平台。此外，人工智慧與大數據分析將大幅提升監測資料之應用能力。透過深度學習與異常辨識技術，可自動分析長期監測資料，判斷異常變形與潛在崩塌前兆，並降低傳統預警系統誤報率。AI 亦可應用於落石偵測、裂縫辨識與崩塌事件分類，以提升監測效率與災害辨識能力。

未來邊坡監測與分析亦將逐漸朝向「數位孿生 (Digital Twin)」方向發展。透過即時監測資料持續更新數值模型，可建立同步反映現地狀態之虛擬邊坡模型。例如大型地滑區未來可能建立專屬數位孿生系統，即時模擬降雨入滲、地下水演化與穩定性變化，以作為防災管理與工程決策之依據。進一步，智慧監測系統亦將更加重視與防災決策系統整合。例如未來監測系統可直接連結交通號誌、道路封閉系統、下游警報與避難系統，於崩塌風險升高或堰塞湖潰決風險增加時，自動啟動警戒與疏散措施，以提升山區道路與聚落之安全性。

七、結語

適逢大地工程技師公會成立三十周年，感謝《大地技師期刊》專刊邀稿，使本文得以回顧臺灣邊坡工程數十年來之發展歷程與技術成果。整體而言，臺灣邊坡工程在邊坡調查、穩定分析、工程治理與監測預警等方面，均已累積豐富經驗並獲得顯著進展。相關技術已由早期以現地踏勘、經驗判釋與安全係數分析為主之傳統模式，逐步發展為結合遙測、地球物理探測、高解析數值模擬、自動化監測與人工智慧分析之跨領域整合架構。現今之調查與監測技術，已可於多元時間與空間尺度下，掌握邊坡變形、地下水分佈、滑動面位置、崩塌運移與堆積行為，並配合高解析數值分析方法，進一步推估崩塌速度、運移距離、衝擊範圍與堆積厚度等重要災害資訊，作為邊坡治理與防災決策之重要依據，《大地技師期刊》第 31 期亦收錄數篇臺灣邊坡工程的技術發展現狀，有興趣的讀者可搭配本文一併參考閱讀。

整體而言，隨著大規模深層崩塌、極端降雨、同震山崩與複合災害風險日益增加，未來臺灣邊坡工程將全面朝向智慧化、即時化、高精度化與韌性防災方向發展。在邊坡調查方面，LiDAR、InSAR、UAV、近地表地球物理探測與 AI 影像辨識等技術之整合，將有助於建立具時

空演化能力之高解析三維地質模型；在力學分析方面，多物理耦合分析、大變形動態模擬、高效能運算 (HPC) 與物理導向 AI 模型 (PINNs) 之發展，將可更完整模擬崩塌啟動、運移、堆積與河道堵塞等災害過程，並進一步結合水利工程進行堰塞湖與複合災害分析。在工程治理方面，未來將更加重視韌性設計、低碳永續與智慧施工管理，並逐步導入高延性材料、複合材料與性能導向設計概念，以提升邊坡工程之耐久性與災後復原能力。另一方面，邊坡監測技術亦將朝向 IoT、5G、GNSS、分散式光纖感測與數位孿生 (Digital Twin) 整合之智慧監測架構發展，透過即時分析、自動預警與智慧決策，提升山區道路、聚落與重要基礎設施之安全性。

展望未來，臺灣邊坡工程界之重要目標，將是針對高山地區、大規模崩塌潛勢區及高風險交通路段，充分掌握其地質構造、地下水演化與潛在破壞機制，並結合調查、分析、治理與監測技術，建立具高山、高降雨、高地震與複合災害環境特色之新世代智慧邊坡防災體系，以提升國土防災韌性與永續發展能力。

參考文獻

1. 王國隆、柯明淳、林聖琪、柯永彥、林承翰、周昕成、郭觀豪、林于超、陳俊樺、楊哲銘、吳重君、詹家賓、林俊廷 (2024)，「2024 年 0403 花蓮地震地工災害初步調查報告」，《地工技術》，第 180，第 91 – 102。
2. 王國隆、陳昭維、呂家豪、汪俊彥、林錫宏、紀宗吉 (2019)，「板岩地滑治理的挑戰—以廬山北坡為例」，《地工技術》，第 167 期，第 61 – 68 頁。
3. 丘達昌、林義評 (2021)，「新型態柔性落石防護網系統之發展與應用」，《大地技師期刊》，第 22 期，第 64 – 73 頁。
4. 交通部公路總局第五區養護工程處、青山工程顧問股份有限公司 (2006)，「台 18 線五彎仔地滑區調查、整治規劃及安全評估—地質調查總

報告」，共 53 頁。

5. 吳建宏、陳春華、小山倫史、西山哲、大西有三 (2011)，「非連續變形分析法模擬地震地滑應用案例」，《地工技術》，第 129 期，第 89 – 96 頁。
6. 宋家宇、陳昭維、呂家豪、邱奕峰、白朝金 (2022)，「地電阻探測於崩塌地地下水調查之應用」，《地工技術》，第 171 期，第 29 – 38 頁。
7. 李錫堤、費立沅 (2011)，「山崩災害分析與區域製圖」，《地工技術》，第 129 期，第 67 – 76 頁。
8. 李錫堤、黃健政 (2005)，「區域性山坡穩定分析之回顧與展望」，《地工技術》，第 104 期，第 33 – 52 頁。
9. 林志平、吳采容、吳柏林、劉興昌、魏殷哲、林俊宏 (2020)，「近地表地球物理方法之簡介、挑戰及地工應用的調適」，《地工技術》，第 165 期，第 7 – 18 頁。
10. 林志平、魏殷哲、王凱、林婉婷、吳采容、鍾志忠 (2020)，「地工電磁波導監測技術之新近發展」，《地工技術》，第 166 期，第 25 – 34 頁。
11. 林承翰、林邵儒、張育瑄、林銘郎 (2022)，「節理岩坡之楔型破壞調查與分析案例介紹」，《地工技術》，第 173 期，第 7 – 16 頁。
12. 林承翰、郭觀豪、林于超、周昕成、陳俊樺、邱家吉、翁孟嘉、林銘郎 (2025)，「0403 花蓮地震後落石災害危害度評估—以臺鐵北迴線 K51 路段為例」，《地工技術》，第 184 期，第 83 - 92 頁。
13. 林俊廷、王國隆 (2019)，「運用差分干涉合成孔徑雷達技術 (DInSAR) 與模糊歸屬度分析邊坡潛在滑動範圍」，《地工技術》，第 161 期，第 71 – 80 頁。
14. 林美玲、黃紀禎、高贈智、王國隆 (2009)，「集集地震邊坡滑動門檻條件」，《地工技術》，第 121 期，第 5 – 14 頁。
15. 林真在、林四川 (1997)，「坍方地質調查案例介紹及探討」，《地工技術》，第 64 期，第 51 – 58 頁。
16. 林銘郎、陳樹群、游繁結 (2004)，「臺灣山崩

- 與地滑調查技術之發展」，《地工技術》，第 103 期，第 5–18 頁。
17. 林錫宏、紀宗吉（1997），「廬山溫泉北坡的大規模岩體滑動變形機制與地質模式探討」，《經濟部中央地質調查所彙刊》，第 25 號，第 1–26 頁。
 18. 邱家宏、李彪（2020），「應用 LiDAR 數值地形模型精進工程地質圖一以沉積岩區為例」，《大地技師期刊》，第 20 期，第 66–71 頁。
 19. 侯進雄、費力沅、邱禎龍、陳宏仁、謝有忠、胡植慶、林慶偉（2014），「空載光達數值地形產製與地質災害的應用」，《航測及遙測學刊》，第 18 卷，第 2 期，第 93–108 頁。
 20. 侯進雄、費力沅、邱禎龍、陳宏仁、謝有忠、胡植慶、林慶偉（2014），「空載光達數值地形產製與地質災害的應用」，《航測及遙測學刊》，第 18 卷，第 2 期，第 93–108 頁。
 21. 拱祥生、林宏達、吳宏偉（2003），「不飽和土壤邊坡基質吸力量測及其在邊坡穩定分析之應用」，《地工技術》，第 96 期，第 27–42 頁。
 22. 施乃慈、高玉惠、陳怡頻、林志交、王慶雄、陳正偉（2021），「科技技術應用於公路邊坡變異分析評估一以台 20 線南橫公路邊坡為例」，《大地技師期刊》，第 22 期，第 52–63 頁。
 23. 洪如江、李錫堤、林美聆、林銘郎、鄭富書、陳正興（2000），「天塹可以飛渡、崩山足以斷流（草嶺順向坡滑動）」，《地工技術》，第 77 期，第 5–18 頁。
 24. 洪靜、劉至軒、林承翰（2019），「應用有限離散元素法於分析大規模同震山崩」，《地工技術》，第 161 期，第 45–52 頁。
 25. 唐昭榮、胡植慶、羅佳明、林銘郎（2009），「邊變式山崩之 PFC3D 模擬初探一以草嶺與小林村為例」，《地工技術》，第 122 期，第 143–152 頁。
 26. 孫思優、黃進淇、許永松、陳家駿、陳國華、傅建華、王文祥（1998），「林肯大郡災變工程地質調查案例探討」，《地工技術》，第 68 期，第 19–28 頁。
 27. 翁孟嘉、李晉泓、彭嘉政、郭昱君、張荐宇、李沅昶、鄭富書、李宏輝（2021），「板岩葉理之非線性破壞準則及其邊坡穩定分析應用」，《地工技術》，第 167 期，第 51–60 頁。
 28. 翁孟嘉、許世孟、顧承宇、冀樹勇、高憲彰（2006），「音射式孔內探測儀於地質弱面調查之應用」，2006 岩盤工程研討會論文集，第 569–578 頁。
 29. 國道高速公路局北區工程處（2011），「國道 3 號 3k+100 崩塌事件動員救災與復原紀錄」。
 30. 張文城、翁作新（1986），「楔形岩塊邊坡穩定之電腦分析」，《地工技術》，第 15 期，第 37–45 頁。
 31. 張睿明、趙韋安、黃韋凱、陳俊堯、吳世傑、劉書維（2024），「基於微地動訊號分析技術之公路落石預警系統運作」，《地工技術》，第 181 期，第 75–82 頁。
 32. 莊承穎、陳振宇、詹婉妤（2024），「應用地文脆弱度建立集水區不安定土砂潛勢分級」，《中華水土保持學報》，第 55 卷，第 3 期，第 122–130 頁。
 33. 陳志芳、謝明志、張文忠、黃安斌、許智超、周仕勳、趙慶宇、甯敘堯（2016），「公路邊坡崩塌監測之無線感測網路模組研發 (1/2)」，交通部運輸研究所，共 165 頁。
 34. 陳昭維、高振誠、鄒鄭翰、呂家豪、汪俊彥、翁孟嘉（2023），「地工 40 紀念專刊～大地工程技術發展一邊坡工程技術發展」，《地工技術》，第 3 冊，第 51–78 頁。
 35. 陳進發（2018），「落石災害評分系統於省道邊坡分級管理之應用」，《臺灣公路工程》，第 10 卷，第 44 期，第 2–19 頁。
 36. 陳進發、林意晴、陳文信（2020），「蘇花公路因雨致災崩塌機率模式之建立與防災應用」，《地工技術》，第 166 期，第 55–66 頁。
 37. 陳樹群、王鑫（2012），「臺灣坡地災害調查與監測技術之發展」，《工程環境會刊》，第 31 期，第 1–15 頁。
 38. 黃安斌、何彥德、王建智、吳崑璋（2016），「光纖光柵在地工安全監測之應用」，《土木水利》，第 43 卷，第 1 期，第 48–52 頁。
 39. 黃南輝、黃建忠、陳宏宇、李錫堤、潘國樑（2002），「環境地質敏感度分析自動化系統開發」，《地工技術》，第 90 期，第 5–14 頁。
 40. 黃韋凱、魏倫璋、李璟芳、周姿良、楊丞勳、陳世元、林紹儒、林銘郎（2019），「手持式光達應用於海蝕洞岩體不連續面位態量測之初探一以龍峒海蝕洞為例」，《地工技術》，第 159 期，第 13–20 頁。
 41. 黃景川（1993），「加勁邊坡穩定分析」，《地工技術》，第 43 期，第 60–69 頁。
 42. 黃景川、蔡政晟、劉昭宏（1999），「不對稱邊坡之三度空間破壞自動化分析」，《地工技術》，第 73 期，第 101–112 頁。
 43. 黃鎮臺、王文能（1997），「梨山地滑工程地質調查及整治規劃案例探討」，《地工技術》，第 64 期，第 33–50 頁。
 44. 黃鎮臺、王文能（1997），「梨山地滑工程地質調查及整治規劃案例探討」，《地工技術》，第 64 期，第 33–50 頁。
 45. 楊國鑫、吳昱葵、鄧福宸、陳昭維、陳仁達（2020），「物質點法分析邊坡崩塌過程與運動機制一以貓空邊坡為例」，《地工技術》，第 166 期，第 79–92 頁。
 46. 楊潔豪（1989），「地球物理探勘技術簡介」，《地工技術》，第 27 期，第 6–14 頁。
 47. 楊濟豪、曹孟真、詹尚書、李亮瑩、王泰典、許宗傑、柯承宏、陳怡頻（2020），「地面光達應用於露頭不連續面調查與岩體工程特性評估探討」，《中華水土保持學報》，第 45 卷，第 1 期，第 1–18 頁。
 48. 經濟部中央地質調查所（2021），「山崩調查觀測技術精進與應用」。
 49. 董倫道、楊潔豪（1998），「地球物理新技術在大地工程之應用」，《地工技術》，第 69 期，第 5–14 頁。
 50. 廖瑞堂（2001），《山坡地護坡工程設計》，科技圖書出版。
 51. 廖瑞堂、吳佳陵、陳志南（2005），「崩塌地之地下水調查方法探討」，《地工技術》，第 104 期，第 75–86 頁。
 52. 廖瑞堂、陳昭維、高振誠、邱昶瀚、謝哲雄、陳錫恩、郭清水、黃秋揚（2019），「崩塌地深層滑動是坡地的重大疾病，但不是絕症一以阿里山公路五彎仔崩塌地為例」，《地工技術》，第 161 期，第 7–18 頁。
 53. 廖瑞堂、陳昭維、楊品錚（2002），「地錨在台灣之邊坡穩定發展沿革及適用性探討」，《地工技術》，第 94 期，第 105–116 頁。
 54. 廖瑞堂、楊品錚（2020），「大地工程發展史一臺灣地錨的發展史」，《地工技術》，第 165 期，第 111–122 頁。
 55. 潘國樑（1984），「遙測一工程地質之調查工具」，《遙感探測》，第 4 期，第 141–151 頁。
 56. 鄭清江、譚志豪、鍾明劍、李錦發、費立沅（2009），「莫拉克降雨引致高屏地區邊坡淺層崩塌災害勘查與穩定性數值分析案例」，《地工技術》，第 122 期，第 133–142 頁。
 57. 賴典章（1984），「立體投影圖在岩坡工程上的應用」，《地工技術》，第 7 期，第 74–79 頁。
 58. 謝有忠、侯進雄、胡植慶、費立沅、陳宏仁、邱禎龍、詹瑜璋（2016），「地形計測方法應用於潛在大規模崩塌之判釋」，《航測及遙測學刊》，第 20 卷，第 4 期，第 263–277 頁。
 59. 謝有忠、侯進雄、胡植慶、費立沅、陳宏仁、邱禎龍、詹瑜璋（2016），「地形計測方法應用於潛在大規模崩塌之判釋」，《航測及遙測學刊》，第 20 卷，第 4 期，第 263–277 頁。
 60. 魏殷哲、林志平、趙韋安、康耿豪、戴東霖（2022），「開源物聯網於智慧邊坡調查整合應用」，《地工技術》，第 173 期，第 19–25 頁。
 61. 譚志豪、呂昱達、冀樹勇、費立沅（2011），「集水區降雨促崩潛勢分析」，《地工技術》，第 129 期，第 77–88 頁。
 62. 鍾志忠、林志平、廖志中、唐禎國（2008），「孔內聲波及光學造影儀於地質調查之應用」，《地工技術》，第 115 期，第 29–38 頁。