



# 精細三維測繪世代的 岩盤工程地質調查展望

王泰典／國立臺灣大學土木工程學系 教授

地形展現國土人文及自然特徵，更是各類工程建設的基本資料。地質學發展二百餘年來，現地調查皆仰賴地形圖記錄不同礦物、化石、乃至於岩層層序、構造及不連續面的空間分佈，提供後續推論地質模型或是評估岩盤工程特性的依據。地形圖傳統上多以二維等高線形式呈現，提供做為工作底圖的地形圖比例尺，基本上決定了地質調查的精度上限。近年測繪技術突飛猛進，包括地形幾何的測定方法、地圖製圖技術及呈現，皆有跨世代的變革，不只快速、精細，而且三維立體，岩體工程的地質調查，也將有嶄新的作業方式與呈現方法。

## 前言

地形測量及地質調查為基礎建設的第一步，提供工程環境基本資訊。傳統的地形測量是現代化測繪學的濫觴，最早至少可以追溯至西元前六世紀畢達哥拉斯和西元前四世紀亞里士多德對於地球是圓的「地圓說」的探討。西元前三世紀透過日影觀測，推算地球半徑及子午圈長度，是目前所知「弧度測量」最早的方式。直到17世紀末，牛頓和惠更斯基於力學原理，認為地球應是南北兩極方向稍扁的橢球體；19世紀拉普拉斯和高斯則提出地球並非完美的橢球；1873年利斯汀提出大地水準面的概念，以與包圍地球的靜止海面重合的一個重力等位面表示地球的形狀。1945年莫洛斯基利用地球重力測量數據，才確定了地球的真實形狀。

理學領域確定了地球是表面不規則的橢球體，欲轉化為實務所用，卻得投影到二維平面展現地貌特徵與地形細節。三維橢球體表面地貌投影到二維平面地圖的變形問題，在日影觀測弧度測量後約莫五百年，也就是西元二世紀才受到關注，特別是羅馬時期托勒密所著「地理學指南」以及西晉裴秀所著「禹貢地域

圖」書中分別提到有關投影方法，以及比例尺、方向與距離等「製圖六體」程序規範，此後東西方的地圖可靠性才逐漸提高。再往後一千五百年，大航海時代（age of discovery）發明了望遠鏡，測繪作業逐漸脫離以短尺、繩尺等簡單工具測距的方式。1617年威理博斯涅提出「三角測量法」，開創了角度測量。1730年，西森研製出測角用的經緯儀，在航海盛行的十八世紀廣為應用於定位船隻。十九世紀中期，洛斯達首創攝影測量法；二十世紀後，航空攝影隨著飛機的發明，成為大範圍地圖測繪的主要方法；直到人造衛星升空、全球衛星定位系統（Global Positioning System，GPS）以及遙感探測技術廣泛應用，測繪再度回到起初以整個地球為觀測主體的世代，但數百公里外衛星觀測的解析力、二萬公里外衛星定位的精度，卻達令人瞠目結舌指掌之間的精細程度。

地質學的發展可以追溯到西元前三世紀古希臘、古羅馬探討岩石、礦物、金屬等地球的物質成分。中世紀伊斯蘭世界及中國皆有關於山脈、陸地形成以及地震原因的探討；透過觀察岩層所含礦物及化石，比

對岩層層序的地層學卻直到十八世紀末期才發展成獨立的科學，並逐漸演變成岩石地層、生物地層以及年代地層學三大分支。

工程地質學則在約莫一百年後首見於 1880 年 William Penning 出版的專書。隨後，歐美各國現代化基礎建設發展迅速，Terzaghi 在 1925 年出版土壤力學一書，提及土壤力學係工程地質學的分支，並於 1929 年再與 Redlich 及 Kamp 合著工程地質教科書。國際土壤力學及基礎工程學會、國際岩石力學學會以及國際工程地質學會先後於 1936、1962 以及 1973 年成立，並陸續建議了現代化工址調查的作業程序<sup>[1]</sup>。

## 測繪技術進展簡述

### 傳統測繪

測繪工作依據測區大小，可區分為大地測量與平面測量。前者測區廣大，作業及製圖須考慮地球表面曲率；後者通常基於有限測區範圍內，地球球體表面彎曲有限，常視為平面處理。大地測量通常採用空中攝影測繪作業，產製大範圍地圖作為基本圖，如 1/5000、1/10,000 像片基本圖、1/25,000 經建版地形圖等，提供製作各類地圖或其他應用。平面測量則採用水準儀、經緯儀、電子測距儀等儀器觀測地物之間的高程、角度、距離等，傳統工程測量多屬此類。

我國內政部於 1981 年發布臺灣地區基本圖測製管理規則，規範空中攝影測繪、製圖作業及成果等，歷經多次修正，迄 2003 年廢止；隨後，依據國土測繪法於 2007 年再發布施行基本測量實施規則，內容涵括測量基準及參考系統、測量基準之測量、基本控制測量、加密控制測量之實施方式及精度規範。

地圖是呈現測繪成果的主要方式，地圖製圖技術的提昇，反應測繪學理與科技的進步，以及提供其他應用領域參考的空間資訊的進展。托勒密以及斐秀繪製紙圖後將近二千年，二維平面地圖一直是測繪成果最主要的類型，標註地物表現平面相對關係，並透過內（外）插計算的等高線，呈現三維高度資訊。直到 20 世紀 70 年代地理資訊系統出現以前，雖有部分紀錄疾病、地下管線分佈等不同類型的三維圖資，應用並不普遍。

20 世紀 90 年代計算科技高速發展，地圖測製融

入資料庫、識別及管理資訊系統概念，逐步建構成為地理資訊系統的基本元素。地理資訊系統結合全球衛星定位系統與遙感探測技術，帶來全新觀看地球的視野，並且逐漸影響，甚至改變了傳統地圖測繪與製圖的架構。地理資訊系統將空間資訊分為兩大類：空間資料為與空間元素有關的幾何特性；屬性資料則提供空間元素的其他資訊。現實世界的物件依據數字化的連續性，被劃分為二個抽象概念：離散物件（如房屋）和連續的物件領域（如高程），並分別用網格和向量兩種方式儲存資料。

網格資料由一系列行、列組成儲存單元，每一儲存單元代表現實世界的一塊區域或是一個實物，其儲存值可以是單純的量值（如面積）、類型資料（如土地使用分區），空值（無紀錄或無用資訊），甚至是一連續的值（如降雨紀錄）。網格資料的解析度取決於其代表的現實世界地面單位的尺度。向量資料透過點、線、面幾何圖形的位置向量形式，儲存物件資料。

傳統地圖透過等高線展現代表不同的高程值，在地理資訊系統中則可以向量資料記錄等高線位置，給予不同的屬性資料（高程值）；或是在整個區域的儲存網格記錄高程值，需要時再計算展現。看似極為簡單的資料儲存處理方式，卻改變了傳統照準觀測的認知，深遠地影響了測繪技術的發展。

### 近期發展

測繪技術在二十世紀末出現了多元發展，傳統平面測量設備精度提升，並有測設、覘標追蹤自動化功能；航空攝影測量引入數位相機，搭配 GPS 以及慣性保持裝置 IMU 求得精密飛行軌跡，內外方位參數得以建置在拍攝的影像中一併儲存，空中三角測量解算程序大幅簡化。另一方面，衛星影像解析力提高，已達公尺等級，甚至更精細，並且結合雷達測繪技術，透過接收兩幅或多幅回波相位差資料，產製合成孔徑雷達（Synthetic Aperture Radar, SAR）影像圖及地表高程模型，觀測地表形變。而其中影響最為廣泛者，莫過於光學雷達檢測及測距（Light Detection And Ranging, LiDAR, 簡稱光達）及無人飛行載具（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）測繪技術。

光達係一種利用雷射進行測距或量測物體物理特性的光學遙測技術，依據載具可分為衛載、空載、車載、船載以及地面光達等。雷射依使用目的，有不同波段的選擇；由發射器發生的脈衝雷射，打到植生、建物或地面後引起散射和反射，一部分雷射反向散射返回到載具上的接收器中，將光信號轉變為電信號記錄下來，量測脈衝雷射自發射到被接收時間，即可計算載具與反射目標物間的距離。相對於傳統空中攝影測量，光達採用自體光源（雷射）施測，搭配 GPS 以及 IMU 求得精密飛行軌跡與姿態，無需於測區擺設任何接收儀器，屬於主動式測距技術之一種<sup>[2]</sup>。

相對於航空攝影測量，空載光達具有幾個特點：  
 (1) 高準確性，垂直方向準確度約 0.10 ~ 0.15 m，水平方向約 0.5 ~ 1.0 m；  
 (2) 高密度資料，雷射發射頻率達每秒數萬次以上，可在很短的時間內收集到非常高密度的資料，這些資料可以呈現量測目標的微小變化，例如蝕溝、山崩造成的 1 ~ 2 m 的微小地形落差；  
 (3) 氣候狀況影響較低，可於夜間或受霾氣及薄霧影響下作業；  
 (4) 有濾除植被的能力，雷射脈衝具有多重反射訊號，可精確地測得植被覆蓋區的地表及地面真實高程，可提供不同的地上物特徵；  
 (5) 快速測繪及相對成

本較低，不需布設大量控制點，對於大範圍的測區能快速的完成掃描，且成本低於傳統測量方式<sup>[3]</sup>。

UAV 搭配穩定且相對低廉的非量測型數位相機，取得高解析度的航拍影像，代替傳統飛機搭載量測型相機的航空攝影測量，則是近年來小區域地形圖測繪常見的作業方式。除了飛行載具及空拍設備差異外，產製數值地表模型所需的相機率定及影像變形修正、控制點基準校正、飛行軌跡解算、空中三角測量、航測製圖、地理定位與精度分析等作業流程大致相同。UAV 空拍地面影像產製數值地表模型（Digital Surface Model, DSM）相對於傳統航測成本低廉、極具彈性與機動性，接近地表數十公尺飛行拍攝解折度優於 0.1 m 影像，產製 DSM 高程內部精度可優於 1 m，水平誤差在 0.5 m 以內，並可針對特定範圍局部精細化，因而廣為應用。

### 地質調查

地質調查的目的不同，調查項目與作業的方法不同，所得結果的整理方式以及繪製的地質圖亦不相同。表 1 以最常見的基盤地質圖、環境地質圖以及工程地質圖為例，說明不同地質圖的測繪目的，並列舉基本的調查項目。

表 1 常見地質圖展現重點與測繪製圖主要調查項目（整理自<sup>[1,4,9]</sup>）

圖幅		基盤地質圖	環境地質圖	工程地質圖
展現重點測繪目的		地層分類、地層層序與地質構造分佈等地質資料，可以闡釋成岩（沉積）環境、地質構造演變、古氣候變化等構造地質史	地質災害現象與潛能，提供國土開發、保育與地質災害防治的依據	場址工程地質特性，提供規劃設計作業所需分段或分區工程特性參數、工程行為資訊，以及施工安全監測、補充地質調查與風險管理依據
調查項目	岩性	1. 一般岩性 2. 化石 3. 產狀 4. 地層上下界限、接觸情形、層序 5. 地質年代 6. 地層之變形 7. 岩石之變質或換質	1. 一般岩性 2. 露頭破壞類型 3. 歷史災害事件 4. 破壞規模、影響範圍 5. 地形、地理位置	1. 一般岩性 2. 災害區域 3. 可能遭遇的地質災害 4. 歷史災害事件 5. 地形地貌（高差、坡度） 6. 崩積層厚度
	構造不連續面	1. 褶皺 2. 斷層 3. 裂隙 4. 劈理 5. 節理 6. 片理  (描述破裂情形、位態、數量、程度)	1. 層面位態（順向坡、逆向坡、斜交坡） 2. 節理位態（落石、楔形、翻倒） 3. 斷層類型及延伸方向 4. 褶皺類型及延伸方向	1. 位態 2. 間距 3. 延續性 4. 粗糙度 5. 抗壓強度 6. 張開度 7. 充填情況 8. 滲流情形 9. 組數 10. 岩塊大小
	水文條件	×	○	○
	保全對象	×	○	○

## 基盤地質圖

基盤地質圖通常展現地層分類、地層層序與地質構造分佈等地質資料，可以闡釋成岩（沉積）環境、地質構造演變、古氣候變化等構造地質史。其測繪的基礎為路線地質圖，主要的野外調查項目包括岩性與不連續面兩大類。岩性的調查項目有：一般岩性、化石、產狀、地層上下界限、地質年代、地層的變形、岩石的變質或換質等，並常需透過室內試驗確定岩石的沉積年代輔助解釋。不連續面的調查項目針對褶皺、斷層、裂隙、劈理、節理與片理等，多採定性描述其位態、數量、破裂程度或情況。傳統常用的地質調查方式為沿著林道、施工道路、登山小徑、稜線、溪谷等路線進行露頭調查，並將觀察所得露頭的位置、岩性與分布範圍、不連續面位態等標示於地形底圖上，再於室內進行內業資料處理，利用製圖法進行岩層與構造線的延伸，最後針對岩性及構造交界帶等重點位置繪製剖面圖，說明其於地面下的空間分布情形。我國目前通行的基盤地質圖包括經濟部中央地質調查所出版的「五萬分之一臺灣地質圖說明書」，全台含離島共分為 76 幅（部分尚在測繪中），以及比例尺更小（如 1/100,000 ~ 1/500,000）的地質圖。由於基盤地質圖的比例尺太小，且測繪過程通常忽略成岩地層的地表動態地質演變，如崩積層、地表土壤分佈範圍與深度等，因此對於土木工程、大地工程與水土保持等提供的資訊為廣域的區域地質環境，不易精確反應工址的工程特性。

## 環境地質圖

環境地質圖展現地質災害現象與潛能，提供國土開發、保育與地質災害防治的依據。其測繪的基礎通常基於基盤地質圖，調查繪製地表地質災害的分佈，例如土石流、山崩、岩層崩滑、順向坡、蝕溝、河岸侵蝕等。環境地質圖的調查程序方面，通常先進行航空照片、衛星影像等遙感探測所得資訊判釋作業，掌握地質災害發生的位置、類型、規模與範圍後，再研擬現地調查與驗證的計畫；現地調查除了查核遙測影像判釋結果的正確性並加以局部修正外，通常評估危害程度、再次發生的可能、有無保全對象以及防災與

減災的對策。地質災害位置與鄰近範圍的岩性與不連續面亦為環境地質圖的調查項目之一，岩性部分常著重於一般岩性及其界面與地質災害的相關性，不連續面方面則量測層面、節理、地質構造位態等。我國地質災害規模大且發生頻率高，環境地質圖須時常更新，目前較常見的版本為 1985 年工業研究院調查測繪的「台灣省重要都會區之環境地質資料庫」與 2002 年中央地質調查所測繪的「坡地環境地質基本圖」及「坡地環境地質災害敏感區分布圖」。

## 工程地質圖

工程地質圖展現工程計畫所在位置的場址工程地質特性，提供規劃設計作業所需的分段或分區工程特性參數評估、工程行為研判等資訊，以及施工過程執行安全監測、補充地質調查與風險管理的依據。工程地質圖的測繪通常結合遙感探測技術、地球物理探查、地表地質與鑽孔探查等方式，以提昇調查精度與作業效率。在各項探查技術中，地表地質調查常配合鑽孔探查，取得更精確工程特性分段或分區位置、以及工址特性參數，因此對於影響岩體工程特性參數的岩性與不連續面兩大因素，調查工作更需精細。岩性調查除一般岩性外，通常觀察其風化程度，並調查地形地貌、崩積層厚度等廣義的岩性分佈；不連續面調查則以國際岩石力學學會（International Society of Rock Mechanics, ISRM）建議的 10 項半定量方法<sup>[10]</sup>最為完整，包括層理、葉理與節理等不同形成機制、各組不連續面的位態、間距、延續性（露頭調查判斷所得分級描述）或延續度（測線法調查所得轉換為量化描述）、粗糙度、岩壁單軸壓縮強度、隙寬（fracture width，或稱張開度）、充填情況、滲流情形、組數、岩塊大小，並繪製適當的調查結果示意圖或整理為表格型式，以評估代表性參數，藉以評估工程施工的穩定性或危害的類型等。露頭狀況不佳或工址多鬆散堆積物者，則以強度係數、聲波速度、風化係數、點載重指數、史密特錘回彈值為指標評估之。我國工程地質圖多數分幅展示地層分佈、主要斷層或剪裂帶位置，亦有考慮工程結構與配置位置者，透過地理資訊系統整合繪製案例<sup>[11]</sup>，可以提供工程設計與施工更精確的資訊。

## 精細測繪地形對地質調查的影響

本文以幾個案例，探討精細測繪地形成果對地質調查作業的影響。

### 岩性井錄及空間位置

露頭調查為地質圖測繪最基本、卻也是最重要的工作。在道路、小徑、稜線、溪谷等路線沿線岩石出露位置，觀察岩性與分布範圍、不連續面位態等，記錄資料並標示於地形底圖上，提供內業處理進行岩層與構造線的延伸，再繪製基盤平面圖與剖面圖，為典型的工作流程。

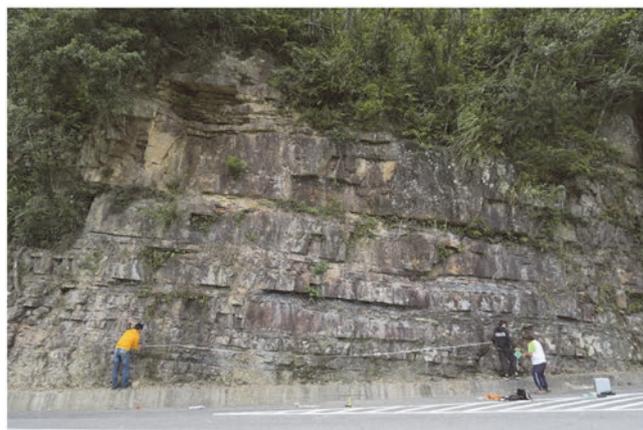
岩性觀察與判釋目前仍仰賴地質師親力為之，不僅需近距離研判，更常需「觸診」，甚至採樣進行室內實驗確認<sup>[6]</sup>。岩性在地表的空間分佈，則需透過露頭觀察所得製作岩性變化井錄，再依據不同露頭的岩性井錄，比對並釐清更大範圍的岩層層序，以至於地層層序。因此，大比例尺的地形底圖為精細岩性井錄及其位置記錄的必要圖資。當露頭範圍有限、連續性不佳、甚至出露在溪谷、稜線等地形崎嶇處時，調查作業環境相當惡劣，精細的記錄常是一大挑戰。

露頭所見的岩性厚度受到地形影響，為其在視傾角方向的厚度。若露頭表面不平整，調查岩性厚度時需連帶記錄出露位置的坡度，以供修正至層面真傾角方向得到真實的岩性厚度變化。因此地質師隨身攜帶的野簿通常提供簡易的三角函數轉換值，方便現場修正並直接記錄不同區位的岩性厚度。

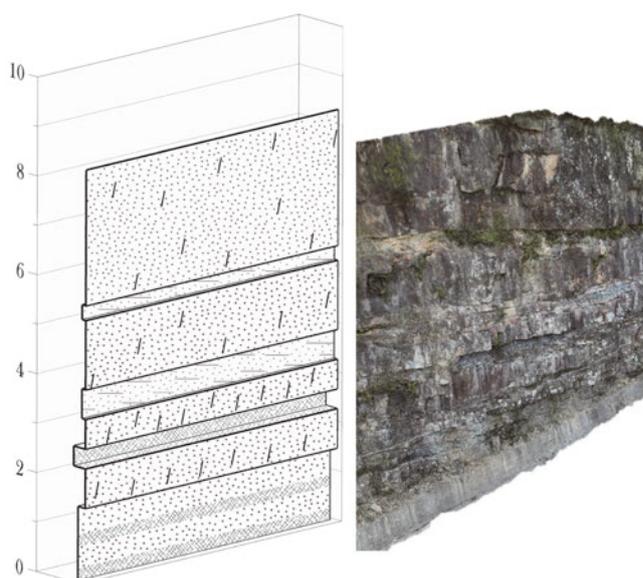
精細測繪的數值地表模型，提供測量不同岩性厚度的利器。圖 1 為宜蘭牛鬥橋附近一處垂直邊坡露頭影像，數值地表模型透過地面近景攝影配合 UAV 空拍影產製，影像解析度優於 5 mm，產製 DSM 水平向均方根誤差 61 mm，垂直向 58 mm，三維誤差 84 mm，不僅可以突破以往人力所達約 2 m 高度的量測範圍，測繪變質砂岩以及硬頁岩至板岩的厚度至公分等級，更能精確地記錄其空間位置。結合更廣域範圍其他露頭紀錄進行比對，地層層序的量化資訊將更為精緻。

### 不連續面調查與描述

ISRM 建議了岩石不連續面現場調查與描述的作業方法。在露頭新鮮、可及性與工作性皆良好的情況



(a)

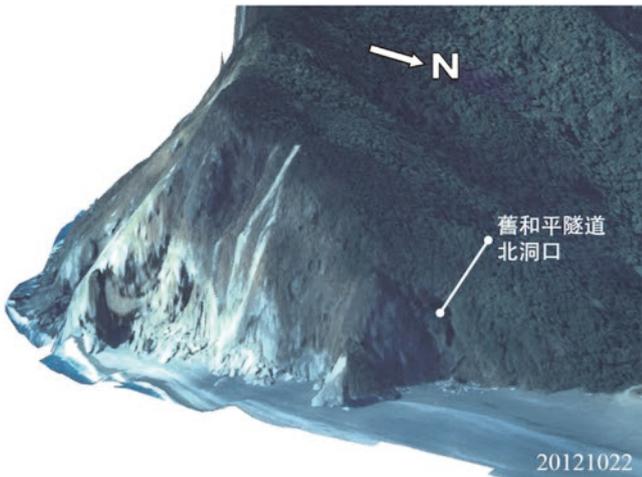


(b)

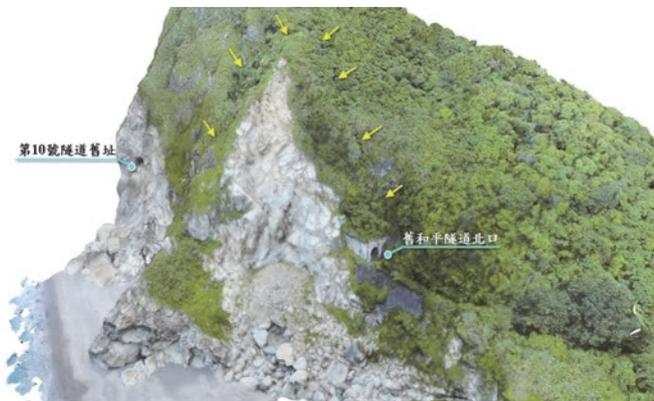
圖 1 (a) 宜蘭牛鬥橋附近一處邊坡露頭影像、(b) 數值地表模型及測繪岩石厚度井錄

下，按 ISRM 建議方法詳細且完整地調查與描述一個露頭，往往需要 1 個人日以上的野外工作時間。而欲掌握岩盤工程場址特性，常需要數個至數十個露頭資料，更遑論露頭風化、植被生長、可及性或工作性不佳的情況。換言之，工程地質調查最費時費力的部分即是龐大的野外工作，更有效率、更精準的調查工具與作業方法以及取得資料的評估方式，為工質地質調查及災害防救亟需改善的課題。

精細測繪的數值地表模型，可以大幅度地改善不連續面調查與描述的效率及精度。圖 2 比較傳統航空攝影與 UAV 空拍相片產製 DSM，近乎垂直拍攝的航照影像（圖 2a）解析度達 0.1 m，卻因邊坡陡峭，光軸與坡面夾角甚小，產製 DSM 有明顯的變形，無法辨



(a) 台 9 線舊和平隧道附近傳統航空攝影



(b) UAV 空拍相片

圖 2 產製數值地表模型 (DSM) 之比較

識不連續面。UAV 空拍 964 張相片，影像解析度約 15 mm，配合 14 個地面控制點產製 DSM，三維誤差約 40 mm，即可清楚地辨識崩塌裸露岩坡上的不連續面。

圖 3 進一步利用 UAV 空拍相片產製 DSM，調查並描述不連續面位態及間距。自 DSM 中辨識主要不連續面，擷取數個點，即可生成平面、計算位態，由位態相近的相鄰不連續面，即可量測間距。王泰典等<sup>[12]</sup>自 DSM 中擷取隧道北洞口下方可及岩坡壁面上的不連續面坐標，計算其位態值，再比較現地地質羅盤量測的調查結果。統計檢定結果顯示，點雲判釋位態皆落在量測值的 95% 信賴區間，表示 UAV 空拍相片產製 DSM 點雲判釋不連續面位態結果具代表性。Chiu 等<sup>[13]</sup>應用此 DSM 量測各組不連續面的間距。

王泰典與韓仁毓<sup>[14]</sup>研發三維雷射掃描在工程地質調查計量化與坐標化技術，結合地面光達多站掃描點雲，判釋岩石不連續面位態、間距、延續度等，並提

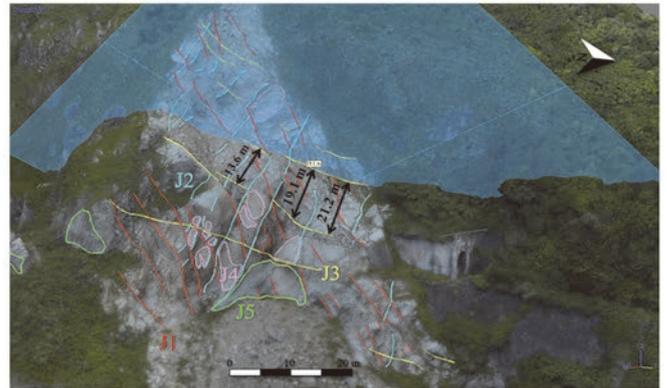


圖 3 應用 UAV 空拍相片產製 DSM 判釋不連續面位態，經統計檢定具代表性即可進一步量測各組不連續面間距

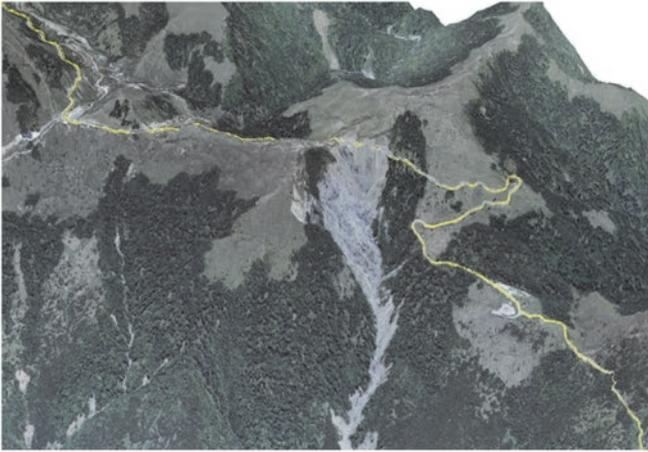
出統計檢定方法檢核判釋結果的代表性，可提供精準且高效率的岩盤工程地質調查應用。不連續面的空間分佈高度影響岩體工程特性。可以預期的，精細點雲足以判釋不連續面空間分佈，提供計量化與坐標化的調查成果後，岩體工程特性的評估方法，即將出現精緻化的進展。

### 微地形

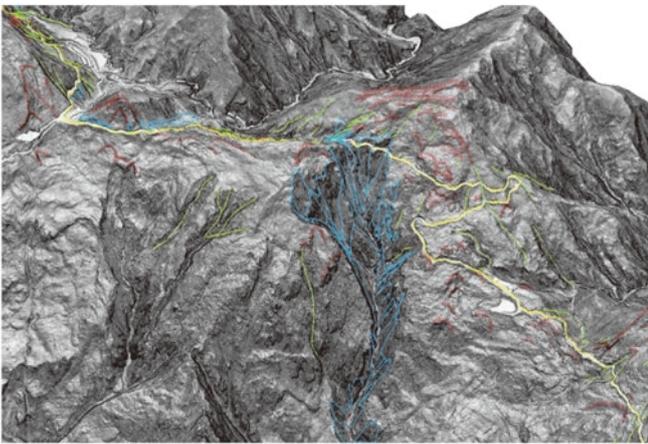
地形分析透過數學或統計途徑，解析地形面的坡度、坡向，繪製高度分佈、水系圖、連峰或連谷圖等，提供量化探討地表地貌特徵的資訊。地形分析因應測繪成果自等高線地圖至數值地表模型的演進，發展了許多不同的演算方法。然因地形圖精度限制，傳統的地形分析仍以廣域地貌的探討為對象。

空載光達測繪的數值地形，可以濾除建物與植生遮蔽，還原原始地面形貌，分別產製數值地表模型 DSM 與數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)，且具足夠可靠的解析度與精度，足以應用於辨識規模較小的地表地貌特徵，諸如大規模崩塌的冠部崩崖、次崩崖、坡頂緩斜面、反斜崖、線狀凹地、圓弧型滑動體、坡趾隆起等<sup>[3,15]</sup>。

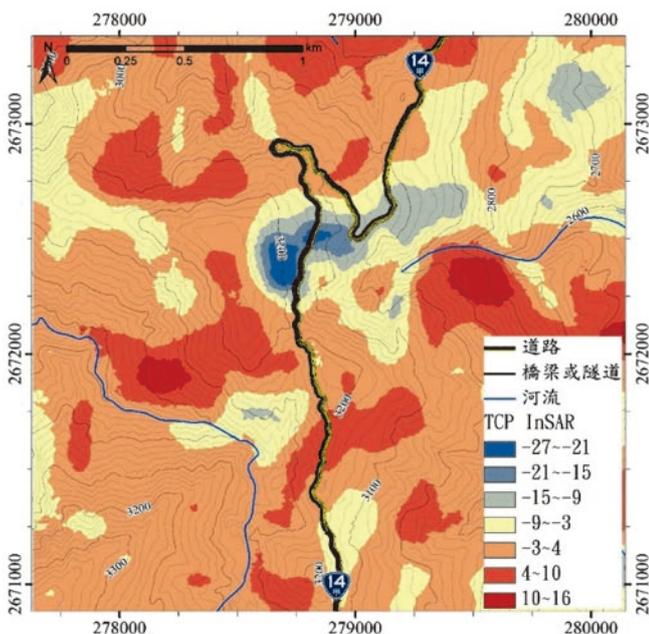
圖 4 以台 14 甲線克難關附近邊坡為例，說明精細測繪地形對於微地形辨識與公路防災的應用，此路段自 1980 年來屢發生路基掏空下陷、擋土牆錯動及路面開裂等現象，路基已回填約 10 m<sup>[16]</sup>。圖 4(a) 為傳統航照影像經正射處理，搭配空載光達測繪點雲產製 DSM，塔次基里溪向源侵蝕相當明顯，造成公路路基下陷，路線向山 (西) 側偏移。圖 4(b) 為應用空載



(a) 傳統航照影像經正射處理，搭配空載光達測繪產製 DSM。



(b) 空載光達測繪產製 DEM，製成坡度圖判釋微地形後，再套疊回三維 DEM。



(c) ALOS 衛星 2007 年與 2011 年 TCP-InSAR 解算所得地表位移，圖例中單位為公尺，負值表下陷。

圖 4 精細測繪地形對於微地形辨識與公路防災的應用

光達測繪產製 DEM，製成坡度圖判釋蝕溝與崩崖等規模較小的地貌特徵後，再套疊回 DEM，邊坡崩塌範圍可以明顯地圈繪，現生崩塌邊界及潛在崩塌鄰近的崩崖、蝕溝，亦可清楚識別。圖 4(c) 比較 ALOS 衛星 2007 年與 2011 年 TCP-InSAR 解算所得地表位移，公路下邊坡塔次基里溪源頭存有現生崩塌堆積物，造成侵蝕溝向南、北兩側發育，對於公路而言，路基下陷範圍已悄悄向北移動。

### 邊坡運動監測

除了圖 4 例舉利用空載光達測繪 DSM 及 DEM 判釋向源侵蝕及潛在大規模崩塌鄰近的微地形特徵外，精細測繪地形亦可應用於土石流<sup>[17]</sup>、淺層岩屑崩滑的觀測或監測，以至於應用至部分規模較大的落石邊坡。

圖 5 為東南部某邊坡案例，利用多期歷史航照分別產製 DSM，再製作正射影像，並比較 UAV 空拍相片所得，以利觀察運動歷程。圖 5(a) 為 2003 年航照產製正射影像，航照於邊坡崩滑不久後拍攝，圖中仍可見到溪流上方堰塞湖以及坡趾崖錐堆積，裸露邊坡上方正發育崩崖。圖 5(b) 為 2008 年航照產製正射影像，堰塞湖及坡趾崖錐堆積皆已不復見，而且崩滑向上發展，範圍明顯擴大，2003 年發育的崩崖東（照片中右）側已形成蝕溝。圖 5(c) 為 2016 年航照產製正射影像，河床明顯淤高，邊坡崩滑範圍加大，裸露殘坡坡面光滑。圖 5(d) 為 UAV 空拍相片產製正射影像，影像解析度明顯優於圖 5(a) 至圖 5(c)，然有部份位置因重疊率不足，以致形成空洞；河床面低於 2016 年，且在 2016 崩滑邊界的上坡側及下坡側，皆可見到崩崖發育，研判一個範圍更大的崩塌正在發育，既有裸露邊坡也可能醞釀另一更深的滑動面。圖 5(e) 一併示出各期影像判釋崩崖範圍，可以瞭解邊坡運動的歷程，做為研判邊坡失穩影響因素的參考。

台 8 線 168 k 附近，公路採明隧道通過落石區，2008 年發生落石，土石方約 2,500 m<sup>3</sup>，損毀明隧道長度約 20 m；經修復後，2009 年再度發生約 54,000 m<sup>3</sup> 落石，損毀約 45 m 長明隧道。隨後實施一系列調查，包括空載、車載、地面光達掃描，露頭地質調查等。Tsao 等<sup>[18]</sup> 年依據光達點雲判釋岩石不連續面，並以露頭調查所得檢定判釋成果具代表性；繼而分析歷史

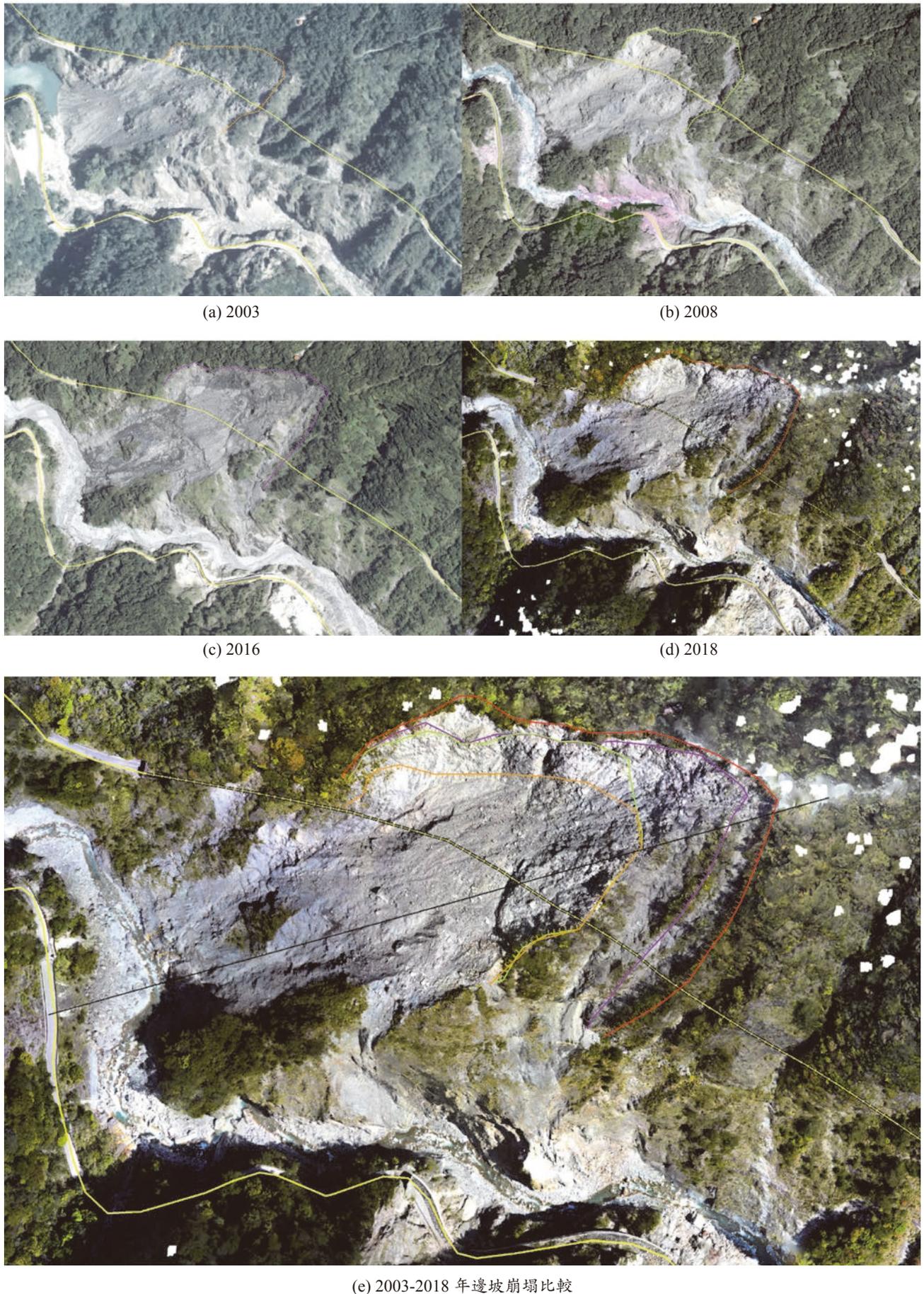


圖 5 東南部某案例邊坡歷史航照與 UAV 空拍相片分別產製 DSM 後製作正射影像，可供判釋分析邊坡運動歷程

航照產製 DSM，並參考落石過程錄影資訊，提出大量的落石起自淺層岩屑崩滑，誘發傾覆以及岩楔滑動所致。圖 6 為航照影像經正射處理後，疊合空載光達掃描點雲製成 DSM，闡釋邊坡失穩歷程。圖 7 則自空載、車載及地面光達掃描點雲疊合模擬的 DEM 中，辨識大量滑落岩楔位置。該坡面已清理浮石，並初步刷坡，然由精細點雲描繪的裸坡可以見到部分不連續面具有良好的延續度，仍構成潛在滑落的岩楔，可提供邊坡失穩監測參考。

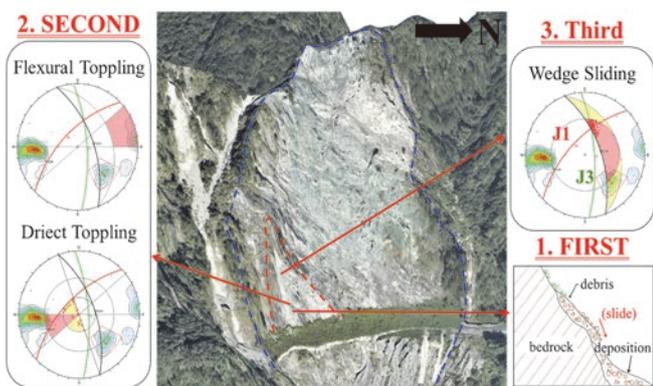


圖 6 台 8 線 168 k 附近邊坡 DSM，配合地面光達掃描點雲判釋不連續面位態以及失穩過程錄影，可闡釋邊坡失穩歷程

## 岩盤工程地質調查的展望

源自對地球的探索，測繪學及地質學俱為古老的科學。大航海時代以來近五百年，測繪技術因應海權擴張與軍事競爭，發展極為快速；全球衛星定位、遙感探測與地理資訊系統的普及化，以及現代化基礎建設與自然災害防治帶來的廣泛需求，測繪科技在國內外皆掀起一波高潮。大地測量可以產製精度優於公尺級的三維 DSM 及 DEM，測區較小的範圍，更可透過間距小於公分的點雲描繪，精度、準度俱佳，精細測繪時代已經來臨。地質調查，特別是現行工程地質調查，雖在近半世紀以來發展了許多調查技術與描述方法，然多數建立於傳統航測與等高線地圖的基礎上。本文簡要回顧測繪技術與地質調查的發展，並透過數個案例，展望精細測繪時代的岩盤工程地質調查。

1. 精細的 DSM 與 DEM 將成為地質調查的利器，岩性相對較複雜，仍由地質師親臨識別，然不同岩性的空間位置可以透過 DSM (DEM) 精細定位，露頭岩性并錄可自地質師人力可及、直接調查的位置，延伸至 DSM (DEM) 上連續可見的範圍，並精細量測不同岩性的厚度變化。透過地理資訊系統空間分析

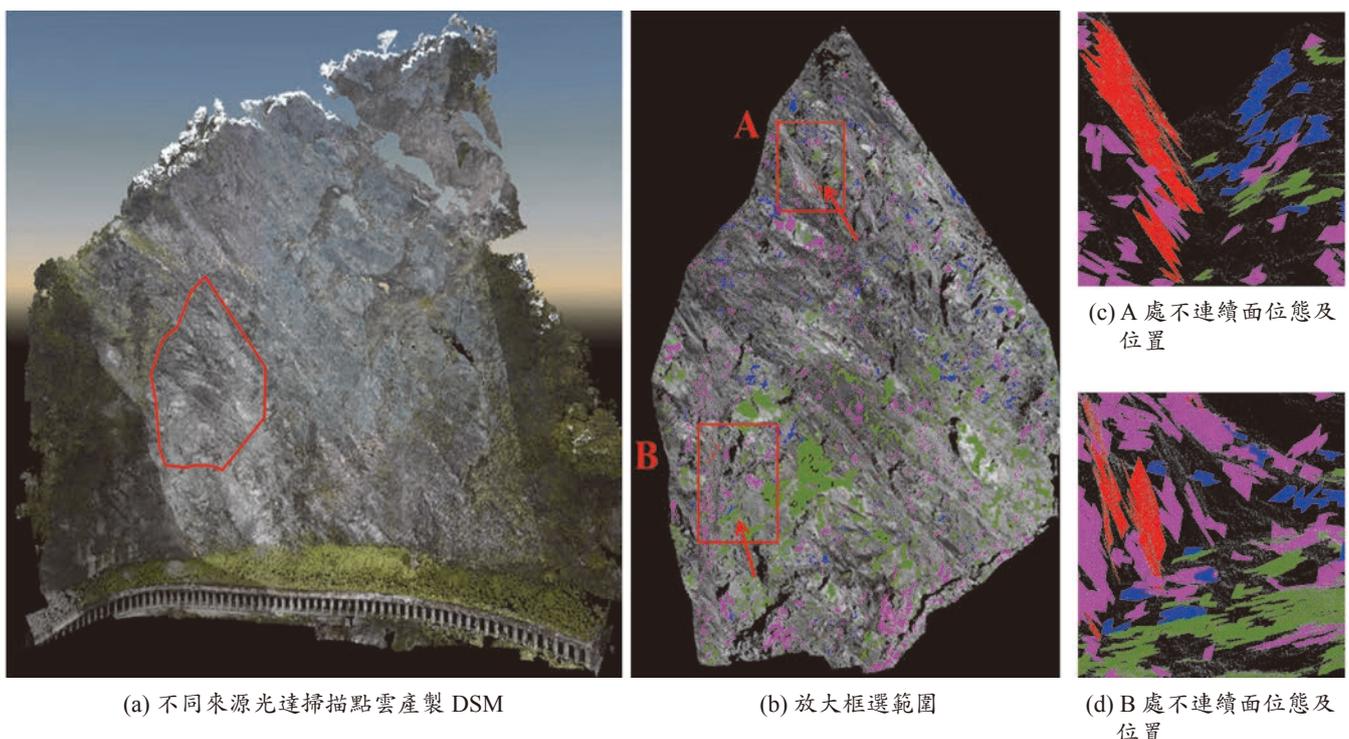


圖 7 台 8 線 168 k 附近邊坡疊合空載、車載及地面光達掃描點雲產製 DSM 中，可辨識前期大量滑落岩楔位置以及部分潛在滑落岩楔

等功能，有利於比對地層層序，並提升成果的量化資訊。

2. 精細描繪露頭的點雲，已足以判釋岩石不連續面的位態，透過統計分析決定不連續面組位態的平均值及標準差，進而量測間距與延續度等幾何參數；對於出露面積較大不連續面的粗糙度，亦可提供量化的表面起伏數據。利用點雲判釋岩石不連續面幾何參數，配合地質師現地量測結果，透過統計檢定程序驗證判釋所得，並據以計量化與坐標化記錄岩石不連續面，勢將為精緻化提昇岩盤工程地質調查的下一步；岩體工程特性的評估方法，必然也將出現更細緻化的發展。
3. 調查成果必然數位化，整合於三維坐標框架下，透過地理資訊系統或類似平台積累與分享資料，短期內即將實現。現行書面形式的地質調查紀實報告，特別是地質平面、剖面圖等特徵化場址特性的圖示方法，將逐漸轉換為三維視覺化模型擬真呈現；若結合歷史航遙測資訊、工程或是災害紀錄，調查報告即由傳統二維空間形態，進化為三維空間加上隨時間演化的四維資訊。
4. 數位視覺化的岩盤工程地質調查成果，將精緻化場址分區，並提昇工程特性參數的評估精度，有利於大地工程分析及設計，以及相關的監測作業。分析及設計成果將可基於三維視覺化模型，透過擴充實境方式呈現不同方案，監測成果亦可類比應用，提供後續建築資訊模型的基石。數位視覺整合的岩盤工程地質調查成果，不僅記錄各場址生命週期的完整資訊，並能提供大量數據彙整分析，提昇岩體工程特性調查評估、分析設計、建造以至於運營維管的精度與效能。
5. 然而，精細測繪地形欲應用至岩盤工程地質調查，同期巨量數據的品質、以及不同時期的精準度高度影響長期的應用性，目前有關地形測繪資料加值應用至地質調查、判釋分析等，尚缺乏可茲依循的品質標準與作業流程，成果檢核、資料呈現與保存方式欠缺規範，有待各界進一步共同努力促成。

## 誌謝

本文承邱雅筑博士、曹孟真博士候選人、羅百喬博士生，Mr. Senzo Ginious M. 協助繪圖得以順利完成，特此申謝。

## 參考文獻

1. 洪如江 (1991)，初等工程地質學大綱，財團法人地工技術研究發展基金會，台北。
2. Ackermann, F. (1999), Airborne laser scanning – present status and future expectations, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54.
3. 謝有忠、陳勉銘、費立沅 (2016a)，地質調查新趨向：光達俯看中央山脈湖泊，科學發展，524，42-46。
4. 徐鐵良 (1986)：地質與工程，中國工程師協會，第六版，台北。
5. 何春蓀 (1986)，臺灣地質概論：臺灣地質圖說明書，經濟部中央地質調查所出版，臺北。
6. 陳培源 (1994)，野外及礦業地質學，正中書局，台灣。
7. 潘國樑 (2007)，工程地質學導論，科技圖書，臺北市。
8. 謝敬義 (2009)，地質學與大地工程，科技圖書，台灣。
9. 楊濟豪、曹孟真、詹尚書、李亮瑩、王泰典、許宗傑、柯承宏、陳怡頻 (2014)，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。
10. Ulusay, R., Hudson, J.A. (2007), The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006.” Part 1, 3-50.
11. 廖志中、潘以文、林志平、徐志謙、王慧蓉、胡賢能、廖培明、楊光程 (2006)，整合性岩盤工址調查案例，岩盤工程研討會，台南，第 209-218 頁。
12. 王泰典、莊海岳、蘇威元、邱雅筑、羅百喬 (2017a)，無人載具攝影製數值地表模型在隧道洞口段及倒懸邊坡崩塌調查的應用，地質，頁 36 卷第 3 期，第 55-60 頁。
13. Chiu, Y.C., P.C. Lo, W.Y. Su, H.Y. Chuan, T.T. Wang (2018), Investigating continual collapse of a coastal highway cliff, In: 10th Asian Rock Mechanics Symposium, Oct. 29- Nov. 3, Singapore.
14. 王泰典、韓仁毓 (2016)，三維雷射掃描在工程地質調查計量化與座標化技術研發，科技部補助產學合作研究計畫成果報告，MOST 104-2622-E-027-006-CC2。
15. 謝有忠、侯進雄、胡植慶、費立沅、陳宏仁、邱禎龍、詹瑜璋 (2016b)，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。
16. 王泰典、曹孟真、羅百喬、陳柔妃 (2017b)，各種遙測技術觀測向源侵蝕影響高山公路的應用，三聯技術，第 104 期，第 2-7 頁。
17. 李璟芳、黃韋凱、曹鼎志、張玉焱、冀樹勇 (2015)，微地形判釋應用於土石流災害之三維數值模擬，中華水土保持學報，第 46 卷第 2 期，第 96-105 頁。
18. Tsao, M.C., R.F. Chen, T.T. Wang (2017). Factors affecting roadbed subsidence in mountain area: Example of Kenangan section of highway No. 14A, In: 5th International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation, Sep. 13-14, Taipei, 273-279.
19. 王泰典、李亮瑩、郭育安、許宗傑 (2016)，岩石隧道開挖面工程地質特性及開挖支撐快速量估評估新技術，大地技師，第 12 期，第 14-27 頁。

