

臺灣大地工程監測之維度轉型——從多尺度時空感知邁向數位孿生的即時決策回饋

林俊宏 國立中山大學海洋環境及工程學系 / 副教授、大地技師

一、緒論

在大地工程與岩土力學實務中，地下地質構造的非均質性、材料強度的非線性以及地下水文動態的複雜性，共同構成了工程設計與施工階段的高度不確定性。大地工程監測技術的導入，在維護地盤穩定、保護鄰近結構物安全以及預防地質災害上，扮演著無可替代的角色。

適逢中華民國大地工程技師公會成立三十週，這三十年不僅記錄了台灣經濟與基礎建設的蓬勃發展，更見證了大地工程監測技術從早期手動觀測，逐步走向自動化、物聯網化，乃至當前數位孿生與智慧化主動預警的演進歷程。

相較已有眾多文獻介紹之詳細的監測技術原理描述，本文旨在回顧過去 30 年裡，臺灣大地工程監測技術上的發展與趨勢，監測設備配置的核心邏輯建構以及技術面上從自動化、數位化、智慧化與大範圍遙測的導入，達到空間維度上「由離散點訊號擴增至連續線與多維面」、時間維度上「由低頻收錄提升至近即時傳輸」，以及預警機制上「由靜態管理值躍升至動態數位孿生即時回饋」的技術變革。期望透過多尺度、多精度的現代監測整合概念，以及全生命週期思維的導入，協助大地工程技師在既有的監測體系

下，有效掌握新興技術的應用時機，提升國內的工程與環境安全。

1.1 大地工程監測技術的目的

大地工程監測技術的主要目的，是在工程建設或自然邊坡、地下構造物、基礎設施等環境中，持續掌握地盤與結構物的變化行為，以評估安全性、降低風險並支援工程決策。其主要核心目的有

1. 掌握地盤與結構物的變形行為：例如監測沉陷、側向位移、傾斜、裂縫發展、孔隙水壓變化、地下水位變化等，了解工程或地層是否正在產生異常變化（Kavvas, 2005）。
2. 確認設計假設是否符合現地狀況：大地工程常受地層不均質、地下水、施工擾動影響，監測資料可用來檢核原本設計採用的參數與分析結果是否合理（Finno and Calvello, 2005）。
3. 提供施工期間的安全預警：在開挖、隧道、邊坡整治、填海造地、基礎施工等工程中，監測可即時發現異常趨勢，避免災害突然發生（Kavvas, 2005; Lollino *et al.*, 2002）。

4. 支援觀測法與動態調整施工：當監測結果顯示變形或水壓變化超出預期時，可即時調整開挖順序、支撐系統、排水方式、補強措施或施工速率（Peck, 1969; Spross and Johansson, 2017）。
5. 評估工程完成後的長期穩定性：對於邊坡、堤防、水庫壩體、擋土牆、橋梁基礎、離岸風機基礎、海堤或地下結構物，長期監測可評估其服役期間是否仍維持安全（Luo *et al.*, 2019）。

1.2 以防災決策證據鏈建立之儀器配置概念

為更加優化監測儀器的效益以達到監測之目的，在進行監測儀器的選擇以及配置上應當考慮

1. 空間配置之協同性提升：若能將單點式（Point-based）感測器（如支撐應變計或地表沉陷釘）與擋土結構的側向變形（如傾斜觀測管）進行空間上的協同配置，將能建立更穩健的應力與變位關聯分析，有效驗證並優化初始設計假設（中華民國大地工程學會，2025）。
2. 物理機制因果關係之完整性：若在觀測壁體側移或地表沉陷的同時，加強與地下水位或孔隙水壓的動態校核，當位移發生異常加速時，現場工程師將能更精準地判定其物理機制（如主動側土壓力因入滲飽和而劇增），從而做出更科學的應變決策（中華民國大地工程學會，2025；農業部農村發展及水土保持署，2023）。

3. 動態管理值之精進調校：針對工址特定地層建立客製化的動態管理值，相較於僅套用通用規範，能顯著提升預警的準確性。特別是在軟弱黏土地層，能有效調校因潛變（Creep）所產生的警報機制；而在硬岩裂隙中，則能精準捕捉應力前兆，爭取寶貴的防災黃金時間（廖瑞堂等，2013）。

為充分發揮監測系統之效益，核心關鍵在於重塑監測數據與力學行為之間的因果關係。基於此一觀點，可藉由監測數據分類與協同設置之概念，作為監測系統規劃之依據，並進一步建構支撐防災決策所需之證據鏈。

監測數據分類：眾多的監測技術可根據其所獲得之數據將其區分為「直接量測之主證據類」與「間接量測之機制與誘發類」的物理分工（如表 1 所示）。直接量測（主證據類）係指結構物或地體之位移（Displacement）、角變位（Rotation）及力學受力（Stress/Strain）者為之。位移與變形是岩土體自剪力屈服至極限平衡狀態發展的直接物理表現。結構受力則與設計應力路徑直接對接。這些數據是判定結構與地體是否發生幾何不穩定或強度破壞的「直接證據」（中華民國大地工程學會，2025；廖瑞堂等，2013）。而間接量測（機制與誘發類）係指地下水位、孔隙水壓及降雨量等。這些量測數據並不直接代表幾何形變的發生，而是用於解釋應力演變、土體內部有效應力消散以及邊坡安全係數降減的驅動機制（中華民國大地工程學會，2025；農業部農村發展及水土保持署，2023）。

表 1 監測數據分類與特性

監測物理層級	代表量測參數	力學物理機制與本質	對決策與證據鏈之定位	主要不確定性來源	基本校正與品質保證／控制要求
直接量測 （主證據類）	結構位移、壁體側移、地層滑動量、支撐軸力、地錨荷重	反映應變累積至屈服或結構承受之實時應力	判定幾何不穩定與強度破壞的直接證據，與管理值及應變決策綁定	零點飄移、溫度效應干擾、邊界錨定點（Fixed Base）位移	定期基準點閉合校核、溫度補償率定、初值須多次讀取採用平均值
間接量測 （機制與誘發類）	地下水位、超額孔隙水壓、累積降雨量、土壤含水量	改變岩土體有效應力降低抗剪強度，或增加滑動力	解釋位移異常加速的「機制證據」，用於動態調整位移管理值與早期預警之安全係數	土層非均質滲透性、水位井遲滯效應、孔壓計局部氣阻干擾	水壓計飽和排氣處理、水位計鋼捲尺實測對位、氣壓效應修正

（本表整理自中華民國大地工程學會，2025；農業部農村發展及水土保持署，2023；廖瑞堂等，2013）

協同配置：先前提到單純觀測壁體側移或沉陷若缺乏水壓校核將導致成因判定困難，但若能透過前述直接與間接量測之協同配置，則可將地下水文變化（間接機制）與幾何剪切形變（直接表現）之結果進行具機制解釋之判讀，實現完整的力學因果解析。例如，在預警機制中，降雨量等環境因子雖具備極高的便利性與前瞻預報價值，但若能同時結合考量工址特定地質的非均質性與入滲延遲效應，將更臻完善。因此，實務上推薦採取主、輔結合的雙重邏輯，將環境因子與位移等直接力學證據協同應用，以達到更全面且穩健的防災預警效果。

二、臺灣大地工程監測 30 年的演進

回顧 1996 年至 2026 年這三十年間，臺灣大地工程監測技術經歷了四次關鍵的變革（如表 2 所示），每一次的技術變革，皆是由重大地質災害、國家級基礎測繪網路的佈設，以及資通訊技術的躍升所共同驅動。各技術的發展與累積非一蹴可就，此處僅就應用端的明顯轉折與事件分為 4 期，而非採編年史方式鋪陳，特此說明。

2.1 奠基期與手動量測

在九〇年代末期，臺灣大地工程監測以手動點位觀測為主流，仰賴精密水準儀、光電全站

儀、人工計讀式傾斜觀測管、水位井以及初期的振弦式力學儀器（中華民國大地工程學會，2025；農業部農村發展及水土保持署，2023）。此時期的監測數據主要用於施工紀錄與變位之校核。

手動點位監測在特定工程尺度下具有其穩健價值，而隨著對降雨或開挖步序中岩土體瞬時非彈性變形響應的掌握需求提高，手動觀測也在時間與空間解析度上展現了轉型自動化的契機，從而可進一步精進因天候或人為抄錄帶來的系統性挑戰。這段時期不僅成功建立了臺灣大地工程監測的基本力學語言與管理習慣，更為後續主動型預警與防災決策的蓬勃發展奠定了不可或缺的實踐基石。

2.2 九二一地震與國家及空間資訊基礎建設之引進

1999 年集集大地震（九二一地震）成為臺灣大地與地球物理觀測網擴展的關鍵轉折點。地震引發了全臺大規模地滑、山崩與地體結構毀損，大地工程界深刻意識到區域性、高頻率監測網絡的必要性。中央氣象署隨即展開台灣地殼動態觀測網（TGNS）之規劃，並於 2001 年建置完成高密度 GPS 動態觀測站，用以監測地殼板塊動態變形與地震誘發之滑移（中央氣象署，2021；內政部國土測繪中心，2014）。

隨後，內政部國土測繪中心亦於 2006 年起籌建 e-GPS 系統，2009 年正式營運，並於 2014 年升級為 e-GNSS 實時動態定位系統（內政部國土測繪中心，2014）。這些國家級衛星觀測站的佈設，提供了解算毫米級至厘米級地表三維變形的時間序列基準，使台灣大地監測逐步從單一工址走向系統性、網絡化的監測階段，為後續大範圍不穩定邊坡區的空間幾何基準確立奠定了基石（內政部國土測繪中心，2014）。

2.3 莫拉克颱風後與多維度、多尺度新興技術的導入

2009 年莫拉克颱風後，國內對於大型崩塌與下游警戒需求升高，進入 2010 年代，隨著衛星雷達遙測（InSAR）、無人飛行載具（UAV）以及地面三維雷射掃描（TLS）技術的成熟，監測視野徹底突破了傳統「點位觀測」的空間局限，實現了「面狀連續監測」（中華民國大地工程學會，2025；內政部建築研究所，2023）。

透過永久散射體雷達干涉（PS-InSAR）與小 baseline 集（SBAS）等先進差分技術，觀測人員能利用合成孔徑雷達（SAR）相位差，在不架設現地儀器的前提下，獲取大範圍、多時相的沿視線（LOS）地表微量形變（中央氣象署，2021；內政部建築研究所，2023；余騰鐸等，2026）。結合農村水保署自 2000 年代中期起逐年更新之全台崩場地圖層，以及多時相高解析度光學衛星影像，大地工程師得以在坡地開發或鐵路沿線規劃初期，採用「先廣域快篩、篩出活動性熱點、再針對特定工址進行精密現地觀測」的配置程序（中華民國大地工程學會，2025；農業部農村發展及水土保持署，2023）。

此外，UAV 攝影測量與 UAV-LiDAR（光達測繪）的進場，大幅補足了林下植被遮蔽區的地形盲區，在公路邊坡巡檢與落石崩塌災害應變中，成為中尺度高精度三維幾何重建的標準配置（曾廷睿等，2025）。

2.4 雲端治理期之資通訊整合與大數據分析

近年來（2020 年代），臺灣大地監測技術的關注已從「如何獲取量測數據」轉移至「如何治理與應用數據」（中華民國大地工程學會，2025）。隨著低功耗廣域網路（LPWAN，如 LoRaWAN、NB-IoT）與雲端計算的普及，現場監測儀器已高度集成物聯網架構，實現了高頻率、自動化數據回傳（謝志龍，2021）。在 2024 花蓮地震與 2025 馬太鞍溪事件更加凸顯透過平台整合的快速偵測需求。

地方政府（如台北市、台中市等都市建築主管機關）已針對深開挖工地、高風險坡地社區，制定了嚴格的自動化監測數據上傳雲端平台規範，並要求於工地周邊設置 QR Code 告示牌，即時對大眾揭露安全觀測數據（中華民國大地工程學會，2025；農業部農村發展及水土保持署，2023）。同時，政府機關亦著手推動數據格式標準化（如農村水保署訂定之《大規模崩塌監測資料規範》），規範統一的點位代碼、時間戳、觀測頻率與資料交換欄位，使大數據融合分析與跨單位協作治理成為可能（中華民國大地工程學會，2025；農業部農村發展及水土保持署，2024）。

三、新興技術與跨域技術的應用介紹

近年來新興監測技術的快速發展，使大地工程監測逐漸由傳統點位式量測，擴展至面狀、連續化、自動化與智慧化的資料獲取模式，在本章中簡要介紹其近年來在臺灣大地工程監測中的應用狀況。

3.1 廣域快篩與衛星／機載遙測

3.1.1 雷達遙測（InSAR/GB-SAR）

合成孔徑雷達干涉測量（InSAR）利用衛星或地面雷達波發射與接收的相位差，可對大面積區域（如山坡地、地層下陷區）進行毫米等級的高精度三維變形解算，並能穿越雲霧於夜間施測（王國隆等，2018）。王國隆等（2018）利用

表 2 臺灣大地工程監測 30 年之演進階段

演進階段	核心技術特徵	代表性空間／力學尺度	典型數據更新頻率	制度與政策推動背景	對防災決策之實質意義
第一階段： 手動點位觀測期 （1996～2000）	水準測量、手動傾斜管、人工水位計、全站儀。	工址尺度單點觀測（幾十公尺內）。	週、月或每施工步序施測一次	依憑傳統《建築物結構設計規範》與施工圖說要求。	建立基本安全紀錄與長期基準，並為後續自動化變形分析奠定基礎
第二階段： 自動化奠基期 （2001～2009） （中華民國大地工程學會 2025）	TGNS 高密度 GPS 連續觀測站、e-GPS、有線自動化數據擷取	區域板塊至大型單案尺度	小時、天級別數據自動儲存與傳輸。	1999 年九二一地震震災響應、國家幾何測繪網絡建置。	建立毫米級大地幾何運動時間序列，將監測成功融入國家級防災系統。
第三階段： 廣域遙測面測期 （2010～2019）	PS-InSAR、SBAS、UAV 攝影、UAV-LiDAR、TLS、地基雷達。	廣域面狀至中尺度（公里至公頃級）。	衛星軌道周期（6～12 天）至現地即時（分鐘級）	極端氣候變遷事件、大規模崩塌潛勢調查計劃啟動	實現「先廣域快篩、再精準佈站」之雙重尺度防災，大幅拓展工程勘查視野
第四階段： 雲端智慧治理期 （2020～2026）	IoT/LPWAN、雲端大數據庫、智慧 AI 分析、數位孿生、共通 Metadata。	多源跨案場大數據融合	動態實時（秒級至分鐘級）	都會區深開挖工地安全新制（如 QR Code 告示）、農村水保署監測資料交換規範	監測數據資產化，實現高透明度的社會協同治理與智慧化動態預警。

Sentinel-1 衛星雷達影像進行 PS-InSAR 分析，成功觀測到 2018 年花蓮地震後的地表變形，同時也精準解算出雲林臺西鄉冬季持續發生的地層下陷現象，驗證了遙測技術在大範圍地表變形監測的可靠性。

楊宇恩等 (2024) 在高雄寶來老濃溪右岸邊坡、新竹縣尖石鄉 DS194 崩塌地，以及國道一號 10.1K 汐止段邊坡坍塌災害搶修工程中，透過地基式合成孔徑雷達 (GB-SAR) 在施工與搶災期間，無需派人進入不穩定邊坡掛設稜鏡的前提下，對整個滑動面進行了全天候連續面狀監測，記錄短時間內邊坡變化趨勢並提供二次災害預警。

3.1.2 光達 (LiDAR) 與無人機攝影測量

在局部高風險邊坡、交通道路或災後人員難以接近的崩塌工址，無人飛行載具攝影測量與無人機光達 (UAV-LiDAR) 已成為不可或缺的中尺度三維幾何重建工具 (中華民國大地工程學會, 2025; 曾廷睿等, 2025)。光達 (LiDAR) 與無人機攝影測量 (UAV Photogrammetry) 可快速獲取地表高解析度的 3D 點雲資料，藉由多時序影像的比對自動建立數值高程模型 (DEM)，並計算出坡面或結構物的整體變位量 (何金益等, 2024)。

台灣山區植被極為茂密，傳統光學無人機攝影僅能獲取植被樹冠表層的三維表面模型。而無人機光達具備多重回波特性的第一個回波多反射自樹頂，而最後一個回波則可透過林木間隙穿透至地面層。經過去噪、分類與濾波算法，能過濾林木植被點雲，重構出真實的裸露地表數位地形模型 (曾廷睿等, 2025)，這對顯露林下隱蔽的微地形特徵 (如張裂縫、剪切滑坡坡腳隆起、古滑坡特徵) 具備極高的價值，有助於早期防範。

曾廷睿等 (2025) 在台 21 線 141k+415 塔塔加高陡岩質邊坡落石防災工作中，針對高程自 2,110 公尺延伸至 2,597 公尺、總面積達 8.74 平方公里之複雜高陡邊坡 (該路段地質較為脆弱，曾發生多次非降雨誘發的落石事件) 導入 UAV 攝影建模與光達技術，透過林下裸露點雲差分

析，成功在人員不便接近之高陡崖壁上精確定位出落石源頭，量化了防護工程前後的坡面堆積演變，並在處置工法完工後使邊坡安全評估指標顯著優化。

何金益等 (2024) 針對燕巢地區的泥岩滑動邊坡，採用了不移動式的智能 LiDAR 變位預警系統。透過全天候的面狀雷射掃描獲取 3D 形貌，並即時解算邊坡位移，若達管理值即連動告警裝置發布預警。羅國峯等 (2025) 於草埔隧道採用雷射掃描系統，定期對營運中的隧道主線與通風管道進行 360 度影像與點雲掃描，可精確判釋寬度 0.5 mm 以上的裂縫，建立歷年襯砌異狀展開圖以診斷破壞機制。

3.2 微地動地聲邊坡監測

微地動地聲邊坡監測技術主要是利用滑動體在變形、剪裂、塊體脫離、摩擦滑移與撞擊過程中所產生的地表微振動訊號。三向度地震檢波器可同時記錄垂直向與兩個水平向之粒子速度或加速度，因此不僅能判斷振動能量大小，也可進一步分析振動方向性、波形到時差、頻率組成與持續時間。當邊坡由穩定狀態逐漸進入加速變形或局部破壞時，裂隙擴展與顆粒摩擦可能形成短延時、高頻率的地聲事件；若進一步發展為落石、土石流或大規模滑動，則常伴隨較長延時、能量逐漸增強或呈三角形能量分布的時頻特徵。

實務上，監測資料可透過連續波形、頻譜圖、STA/LTA、PGA 或能量門檻進行事件偵測，再結合多測站到時差、振幅衰減或交相關定位方法，區分地震、降雨、交通、人為干擾與可能的邊坡滑動訊號。

臺灣已有若干相關應用案例。嘉義八寶寮潛在崩塌地曾佈設三部 Raspberry Shake RS-3D，以三向度短週期檢知器進行連續監測，資料透過 4G 傳輸並以太陽能供電，初步可辨識地震、降雨及不明局部振動事件，作為滑動徵兆判釋資料庫 (Yen *et al.*, 2020)。另在較大尺度上，臺灣亦利用即時寬頻地震網建置近即時山崩震波監測系

統，並應用於莫拉克颱風等大規模山崩事件分析 (Chao *et al.*, 2017)；公路邊坡落石與岩體崩落案例也已發展以地震訊號快速定位、估計規模並判釋破壞過程的技術 (Chang *et al.*, 2021)。

整體而言，地聲邊坡監測價值在於夜間、暴雨、濃霧、震後孤立或視線受限條件下，先於人工巡查與部分影像手段發出異常徵候，再把訊號直接轉譯成下游封橋、停駛、疏散與收容的啟動條件，是山崩預警與災後快速判釋的重要輔助技術。

3.3 光纖感測技術

光纖感測 (Distributed Fiber Optic Sensing, DFOS) 將光纖電纜自身作為傳感介質，其核心優勢在於抗電磁干擾、高耐久性、極佳的抗拉應變能力以及在長線性基礎設施上的連續觀測能力。根據其採用之技術原理的不同，有眾多不同的應用，在地工監測中，光纖光柵感測技術 (Fiber Bragg Grating, FBG) 以及分佈式聲學感測技術 (Distributed Acoustic Sensing, DAS) 具有高度應用潛力。

3.3.1 光纖光柵感測 (FBG)

光纖光柵 (FBG) 技術是在光纖特定位置利用雷射蝕刻布拉格光柵。當光纖受拉或受壓時，光柵週期發生改變，導致反射的光布拉格波長產生偏移。其波長漂移量與溫度、應變呈線性關係，因此可作為應變、溫度、孔隙水壓或結構受力感測器；其特性屬於「多點式」或「準分散式」量測，適合理設於邊坡鑽孔、隧道襯砌、擋土構造與地錨系統。Huang *et al.*, (2012) 於南部公路邊坡深層崩塌監測案例中，成功於 60 m 深鑽孔內布設多組 FBG 孔隙水壓感測器，追蹤颱風降雨期間的孔壓剖面變化，並用於力學式邊坡穩定評估。

3.3.2 分佈式聲學感測技術 (DAS)

DAS 利用光學干涉和光相位解調技術，將整條通信光纖轉化為密集的高頻振動與地震感測器陣列 (Anjana *et al.*, 2024)。其原理是利用瑞利

回向散射 (Rayleigh Backscattering) 在光纖受到微弱聲學或機械振動引致折射率改變時產生的干涉相位偏移作為訊號。在土壤開挖、滑動面初始微剪切、隧道掘進等過程中，地體內部會發生微細裂縫發育並釋放出彈性波 (即微地震或地聲信號)，DAS 能以動態頻率捕捉這些高頻振動訊號，並沿光纖路徑進行微震事件定位。此技術在地工監測的應用尚在起步階段，Huang *et al.*, (2026) 在宜蘭蘭臺大規模崩塌地之 60 米深鑽孔安裝有 DAS 監測系統，成功捕捉到深部的微小滑移。未來若將其與前述微地動地聲邊坡監測整合，將可更進一步發揮其效益。

3.4 時域反射儀 (TDR) 技術

TDR 技術是利用電磁波在波導 (通常為同軸電纜) 內傳輸，並以其作為感測器量測環境中之電學性質或介面的變化。最初應用在地層滑動之深度位置監測上，當地層剪動、冲刷面下降或構件產生斷裂、脫黏、灌漿缺陷時，會造成阻抗不連續，反射波形的位置與振幅即可用來判斷異常深度與變化趨勢。相較於單點式儀器，TDR 具維修少、可自動化、其分佈式的感測特性使其可提供更高的空間解析能力等優點，適合作為邊坡與基礎設施安全監測的輔助技術。隨著理論的持續擴充與創新式的感測設計，相關應用領域逐漸擴充到橋墩冲刷、土釘與地錨等現地監測工作 (林志平等, 2020)。

國內已有眾多現地應用案例。吳輝龍等 (2003) 在梨山地滑區進行 TDR 纜線安裝，作為連續性感測器，藉由反射波形變化判斷滑動面位置與位移量。該研究彙整三年現地監測成果，確認 TDR 用於不穩定邊坡滑動面監測具有可行性。黃安斌等人 (2008) 搭配人工傾斜管監測之量測於新山水庫右山脊安裝一處自動化 TDR 錯動變形監測儀器進行效能測試，比對傾斜管與 TDR 之量測資料顯示，TDR 錯動變形監測儀器在邊坡穩定之使用上，透過室內大型試驗之剪動量參數標定，除可正確獲得剪動深度外，亦可良好估計剪動量。

3.5 影像分析與 AI 智能判識

現代監測系統，特別是物聯網與大範圍遙測，會產生龐大的連續性數據（Big Data）。面對複雜多變的大地工程環境，傳統基於簡化假設的力學模型常難以精準預測所有行為（Wu *et al.*, 2022），因此，導入機器學習（Machine Learning）與人工智慧（AI）成為關鍵。AI 技術（如神經網路、分類演算法）能自動從海量監測數據中清理雜訊、尋找隱藏的關聯性特徵，並建立預測模型（Tan *et al.*, 2025）。例如，利用 AI 結合歷史監測數據與降雨紀錄，可以實時預測邊坡安全係數或預判隧道開挖的岩體變形量；而在最佳化無線感測網路部署中，也可利用演算法來優化感測器節點的位置與降低能耗（Lv *et al.*, 2026; Tan *et al.*, 2025）。

黃俊維（2016）應用大數據演算法，比較 K-means 分群演算法與基因演算法，用於最佳化無線感測網路（WSN）的節點佈設與路由分配，有效解決了邊坡監測感測器耗電不均及資料傳輸的問題。何金益等（2024）在高雄燕巢邊坡監測案例中，光達掃描產生的大量 3D 點雲資料，透過人工智慧物聯網技術（AIoT）自動濾除環境雜訊（如植被干擾或天候雜訊），提升變位解算的精準度與即時性。

另一方面在影像分析上，可透過監視器影像流或空拍影像，搭配影像分析技術（如光流法、卷積神經網路 CNN 與 YOLO 算法等），能在無需接觸地體的條件下，實現對落石軌跡追蹤、坡面局部土石坍方範圍自動圈定以及地表張裂縫影像寬度特徵的實時識別。王又德（2020）利用光流法有效追蹤落石軌跡並有效計算其落下動力，可作為防護設計參考；交通部運研所（黃宇謙與胡啟文，2025）已聚焦於 UAV 影像結合深度學習技術，開展公路邊坡破壞特徵自動化判釋研究，將其作為人工徒步巡檢的高效替代與異常初篩工具，大幅提高管理效率。

四、核心成熟技術之定位與新興技術之協同

新興技術的導入，無疑大幅提升了監測資料的空間覆蓋率、資料更新頻率與異常辨識效率，也使監測成果更容易與數位孿生、風險地圖及即時預警系統整合。然而，新興技術的興起並不代表傳統監測儀器的角色被取代，相反地，越是在多元資料快速湧入的監測環境中，越需要精密水準、全站儀、GNSS、傾斜觀測管、定置型孔內傾斜計、鋼筋計、支撐應變計、地錨荷重計、沉陷點與鄰房傾斜計等傳統現地監測系統，作為資料校核、力學解釋與防災決策的基準骨架。在現代大地工程監測系統中，傳統儀器已不再只是單純的資料蒐集工具，而是多元監測資料整合過程中不可或缺的幾何基準、地下真值、力學反驗證與防災決策依據。

4.1 證據鏈的主軸：直接量測的位移與受力

4.1.1 精密水準、全站儀與 GNSS 的基準角色

新興遙測技術的最大優勢，在於其能以高效率取得大範圍地表形變資訊，補足傳統點位監測在空間覆蓋上的不足。以 InSAR 為例，其所解算之形變通常為相對於特定參考點的相對觀測值，且多為沿衛星視線方向之形變分量。其成果可能受到參考點選定、大氣延遲、去相關、軌道誤差、地表散射條件變化，以及垂直與水平變形分量轉換假設等因素影響。因此，若缺乏穩定的地面基準點與現地量測校核，新興遙測成果容易停留在形變影像或相對變化趨勢層次，而難以進一步轉化為具工程意義的絕對坐標、變位歷程與安全判斷依據。其成果常需透過水準測量或 GNSS 觀測量進行檢核，方能提升其在工程監測與地層下陷分析中的可信度（沈鈺旻等，2021）。

因此，精密水準量測、自動全站儀與 GNSS 連續站，在現代監測系統中仍具有不可取代的基準角色。精密水準可提供高精度垂直位移控制，全站儀可提供三維坐標與視準線位移監測，

GNSS 則可提供長期連續之絕對坐標變化趨勢。這些儀器所建立的地面基準點，能將 InSAR、UAV、LiDAR 或影像式監測成果錨定至實際工程坐標系統中，使新型面狀觀測資料不只是呈現空間變化圖像，而能進一步與結構物、地層、開挖階段與安全管理值產生可追溯、可驗證的幾何關聯。

4.1.2 傾斜觀測管與定置型孔內傾斜計之基準配置與側向應變分析

在地下變形行為的判讀上，傾斜觀測管至今仍是最具工程判讀力的地下位移觀測手段之一。廖瑞堂等（2013）彙整臺灣多處邊坡監測案例後指出，與邊坡穩定性最直接相關的監測項目，通常為地層位移量測資料；其中，傾斜觀測管可清楚呈現量測深度範圍內之水平位移分布、滑動速率及滑動深度。相較於雨量、地下水位或孔隙水壓等間接誘發因子，傾斜觀測管所呈現的是地層是否已實際產生變形或滑動的直接證據。因此，在邊坡防災與滑動機制研判中，傾斜觀測管不僅是位移量測工具，更是判斷潛在滑動面位置、建立管理值與研擬預警門檻的重要依據。特別是在滑動深度定位、剪切帶厚度研判、邊坡滑動機制分析，以及連續壁側向變形分析等工程課題中，傾斜觀測管所提供之深度方向位移剖面，仍是建立力學因果鏈的核心資料（中華民國大地工程學會，2025；廖瑞堂等，2013）。此地體內部之滑動數據是新興技術無法取代之處。

隨著自動化監測需求持續增加，定置型孔內傾斜計（In-Place Inclinator, IPI）、陣列式位移計（SAA, ShapeAccelArray）、時域反射儀（TDR, Time Domain Reflectometer）地滑監測技術（Chung *et al.*, 2021）可視為傳統傾斜觀測管的功能延伸，而非單純替代。傳統傾斜觀測管通常依賴人工定期量測，具有穩定、可重複、長期資料品質佳等優點，適合用於建立長期監測基線與人工複核資料。自動化地滑監測技術提供高頻率、連續化與自動化的側向位移量測，特別適用

於鄰近捷運、高鐵、重要管線、既有建築物或高敏感保全對象之高風險工址。透過手動傾斜觀測管與自動化地滑監測技術的協同配置，監測系統可同時兼具長期穩定性、資料可驗證性與突發性變位即時預警能力。

因此，在新興技術快速發展的浪潮中，傾斜觀測管的不可取代性，並不僅在於其能量測位移，而在於其能提供滑移深度與方向的力學資訊，而此正是將地表變形訊號轉化為地下變形機制判讀的關鍵橋樑，也是現代大地工程監測系統中仍難以被取代的核心觀測數值。

4.1.3 結構受力與支撐內力之直接度量

在深開挖工程中，擋土壁與支撐系統的內力響應直接關係到結構安全極限。位移監測雖可反映擋土系統整體變形趨勢，但若缺乏結構受力資料，工程師仍難以判斷壁體彎矩、支撐軸力或地錨拉力是否已接近設計容許值。因此，鋼筋計、支撐應變計與地錨荷重計構成了位移觀測之外的力學反驗證鏈條。這些儀器所提供的不是外觀變形，而是擋土結構與支撐構件實際承受內力的直接或近直接量測資料。

因此，鋼筋計、支撐應變計與地錨荷重計的核心價值，在於其能將監測系統由單純的變形觀測提升為內力驗證。新興遙測與影像技術可以協助掌握空間變化，但無法直接量測支撐軸力、壁體彎矩或地錨預力，唯有透過結構受力監測，才能將觀測到的位移與設計安全極限相互連結，形成可供工程師採取行動的力學證據鏈。

4.2 新興技術與傳統監測之協同設置

4.2.1 協同設置之精神

綜合上節討論可知，現代大地工程監測系統的發展方向不在於新興技術取代傳統儀器，所要專注的是在於新興技術擴大觀測尺度，傳統儀器提供基準與力學真值，唯有將二者協同設置，才能形成兼具廣域辨識、局部精度、地下判讀與結構安全驗證的完整監測系統。

這樣的協同關係將監測拆分為三個層次，精密水準、全站儀與 GNSS 提供穩定坐標與高程控制，提供幾何基準，使 InSAR、UAV 或 LiDAR 成果可被校正至工程坐標系統中；第二是力學機制層次，傾斜觀測管、定置型孔內傾斜計與沉陷點提供地層及結構變形剖面，使工程師能判斷變形深度、沉陷槽形態與滑動機制；第三是安全驗證層次：鋼筋計、支撐應變計與地錨荷重計提供受力資料，使監測成果能進一步對應至設計內力、安全裕度與管理值。

監測系統的核心目的並非蒐集越多資料越好，而是建立足以支持防災決策的證據鏈，在此，在協同配置監測儀器的精神下，在此提出「一主、一輔、一驗證」之技術組合概念，以不同情境提供協作參考。

4.2.2 都會深開挖情境

一主（直接受力與變位）：以擋土壁內側傾斜觀測管（可協同搭配自動化技術）為主量測量，精確獲取壁體隨開挖步序產生的水平側向變形剖面。

一輔（環境與機制因子）：以壁背側水位觀測井及特定不透水層下方之孔隙水壓計為輔助，實時監控超額孔隙水壓動態與抗上舉安全係數，完備水文分析。

一驗證（廣域幾何基準）：以自動全站儀（RTS）或高密度地表沉陷剖面觀測點，實時觀測開挖影響區內鄰近建物與道路的沉陷特徵，與壁體側移形變槽進行幾何互補校對與三維反演，大幅強化數據可信度。

4.2.3 山區不穩定滑坡情境

一主（地下深部變形）：以深孔傾斜觀測管（配手動或 IPI 連續觀測）為主，精確定位地體內部的剪切滑動面垂直位置與滑移速率。

一輔（水文驅動機制）：以滑動面孔隙水壓計、現地雨量計與土壤含水量計為輔，監控降雨入滲過程、地下水位線抬升高度以及有效應力動態，提供深層力學解釋。

一驗證（面狀空間位移）：以地基雷達（GBSAR）或 UAV-LiDAR 多期點雲差分，提供整個坡面暴露區的實時面狀變形場，有效擴展地下傾斜管點位離散之觀測成果。

4.2.4 地層下陷區域治理情境

一主（垂直分層沉陷）：以磁環分層式地層下陷監測井為主量測量，定位出地層在不同地下水抽汲層位下的特定壓密壓縮特徵。

一輔（含水層水頭波動）：以分層地下水位觀測井及孔壓計為輔，記錄含水層承壓水頭的季節性與人為抽汲波動，科學評估壓密演變機制。

一驗證（廣域空間形變）：以衛星 InSAR 雷達遙測形變圖，提供整個盆地或沖積扇的大範圍形變地圖，並以現地 GNSS 基準連續站進行坐標絕對修正與基準校核，展現跨尺度觀測效益。

五、展望：資料管理與數位學生之導入

5.1 監測資料之標準化

地工監測技術在自動化以及新興技術的導入後，資料的取得已不再是防災決策的瓶頸，需進一步思考的是，監測資料如何被充分應用，轉化為風險判讀、災害預警、維護管理與決策支援的核心依據。

傳統邊坡與基礎設施監測常以單一指標作為判斷基準，例如累積雨量、地下水位或單點位移量。然而，地工災害通常並非由單一因子所控制，而是地質條件、降雨入滲、孔隙水壓、地表與地下變形、振動事件及人為擾動等多重因素共同作用的結果。因此，現代地工防災更應朝向多參數融合監測發展，將不同物理意義的資料納入同一個工程判讀架構。

多參數融合監測的重點，並不是單純增加儀器數量，而是使不同監測資料能夠彼此對話。GNSS、全站儀與 InSAR 可提供地表位移與廣域變形趨勢；傾斜管與 SAA 可掌握地下變形深度與滑動面發育；孔隙水壓與土壤含水量可反映降

雨入滲與強度折減機制；微地動或地聲訊號則可捕捉落石、崩塌、裂隙擴展等事件型訊號。當這些資料被整合於 GIS、三維地質模型或智慧防災平台時，監測系統便可由「點狀量測」提升為「空間化、時間化與機制化」的風險判讀工具。建構連續風險面，協助判斷潛在災害影響範圍、道路封閉區段與搶災優先順序。

然而，多參數融合監測能否發揮效益，關鍵在於監測資料是否已標準化與結構化。不同儀器廠牌、資料格式、取樣頻率、時間戳記、坐標基準、單位、安裝深度、品質註記與維護紀錄若缺乏一致規範，即使資料量龐大，也難以進行跨系統整合、長期比對與模型更新。地工監測資料至少應包含測點編號、觀測對象、三維坐標與高程基準、感測器型號、安裝方式、取樣頻率、量測單位、資料品質旗標、缺值處理、校正紀錄、警戒值、事件註記與維護歷程等欄位。

如此一來，資料才不只是單一專案中的紀錄，而能成為可查詢、可比對、可計算、可回饋模型的工程資訊資產。開放地理空間協會 (Open Geospatial Consortium, OGC) 觀測與量測標準即強調，觀測資料應描述觀測行為、觀測對象、取樣特徵與觀測結果，以支援不同科學與工程社群之間的資料交換，這對地工監測資料平台尤其重要。

農村水保署於 2024 年修訂之《大規模崩塌監測資料規範》為業界提供了一套示範基準（農業部農村發展及水土保持署，2024），訂定統一格式與交換語法並結構化元數據（Metadata）之必要欄位以確保數據鏈的完整性。希冀可作為地工監測資料標準化的開端，未來持續擴大至各類新興技術，完善監測資料之管理以及有效的應用。

5.2 數位學生之定位與推行

監測資料標準化也是地工數位學生建構的前置條件。數位學生的核心並非單純建立三維模型，而是在物理場域與虛擬模型之間形成即時映射，使三維地質模型、BIM 模型與數值分析模型能夠隨監測資料持續更新，形成「感知—建模—

分析—決策—回饋」的閉環系統（羅百喬等，2025）。

若監測資料缺乏統一格式、空間基準與語意描述，虛擬模型便無法正確接收現地狀態，也難以進行預測分析與預防性維護。臺灣在大型工程中已逐步導入 BIM、共通資料環境與工程資訊平台，未來若能將自動化監測資料依標準格式即時回饋至三維地質—結構模型，並與警戒值、風險推估、維護策略及防災儀表板連動，地工監測便可由「看見變化」進一步邁向「理解機制、預測風險與輔助決策」的數位學生階段。

然而，建構數位學生之監測防災技術需大量資源的投入，建議數位學生導入工程監測時，宜採取分階段與分層級推動，而非一次性追求完整系統。推動初期可先建立資料標準化與監測儀表板，整合既有監測資料、圖資、警戒值與事件紀錄，使資料具備可查詢、可比對與可追溯性。中期則可針對高風險邊坡、深開挖、隧道、橋樑基礎或重要管線等關鍵場域，導入多參數融合監測，將位移、水文、振動與地質模型連結，建立場址化風險判讀與預警邏輯。後期再進一步結合 BIM、GIS、三維地質模型與數值分析模型，使現地監測資料能即時回饋虛擬模型，形成預測分析與維護決策的閉環。不同工程類型亦應區分導入深度：一般工程可著重資料管理與視覺化，高風險或長生命週期工程則應朝動態模型更新與預防性維護發展，以提高導入效益與可行性。

六、結論與建議

本研究針對台灣過去三十年大地工程監測技術的演進與展望進行了系統性梳理。大地的變形與結構的受力具有高度關聯性，在新興技術蓬勃發展的當下，本文以監測數據分類與協同設置之概念，作為監測系統規劃之依據，避免在眾多新興技術下無所適從，建立「一主、一輔、一驗證」協同設置之決策思維，優先辨識工址的主控力學問題與破壞機制，據以配置核心主量測量、環境機制輔助量以及面狀幾何驗證量，形成具有

物理因果印證關係的完整證據鏈，提升監測設計的安全韌性。

隨著地工監測技術在自動化以及新興技術的導入後，大量的資料累積帶來對現場狀態的掌握的可能性，但如何有效利用監測數據，透過多參數融合監測發展，將不同物理意義的資料納入同一個工程判讀架構為下一步提升的重點。其中，針對監測資料推動資料標準化與 Metadata 治理，便利不同單位間的資料流通，即為其中的一項。

地工數位學生的建構推動可將地工監測由看見變化進一步邁向理解機制、預測風險與輔助決策的階段，但數位學生之監測防災技術的建構需大量資源的投入，宜採取分階段與分層級推動。短期以達成監測資料標準化為目標，繼而建構數據管理平台，再開場址級學生，最後推進生命週期全治理之漸進式路徑，以確保資源的最佳化配置與長效維管。另方面也應參考工程規模，調整其導入程度，以提高導入效益與可行性。

期許，在下一個十年裡，藉由上述具前瞻性的管理與技術變革，臺灣的大地工程監測技術邁向「智慧預測與資產永續治理」，在氣候極端變遷與高密度都會開發的時代，為國土與人居安全奠定更為穩固的科技屏障。

參考文獻

- Anjana, K., Herath, M., & Epaarachchi, J. (2024). Optical fibre sensors for geohazard monitoring—A review. *Measurement*, 235, 114846. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114846
- Chang, J. M., Chao, W. A., Chen, H., Kuo, Y. T., & Yang, C. M. (2021). Locating rock slope failures along highways and understanding their physical processes using seismic signals. *Earth Surface Dynamics*, 9(3), 505-517. DOI: 10.5194/esurf-9-505-2021.
- Chao, W. A., Wu, Y. M., Zhao, L., Chen, H., Chen, Y. G., Chang, J. M., & Lin, C. M. (2017). A first near real-time seismology-based landquake monitoring system. *Scientific Reports*, 7(1), 43510. DOI: 10.1038/srep43510
- Chung, C. C., Lin, C. P., Ngui, Y. J., Lin, W. C., & Yang, C. S. (2022). Improved technical guide from physical model tests for TDR landslide monitoring. *Engineering Geology*, 296, 106417. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106417
- Finno, R. J., & Calvello, M. (2005). Supported excavations: observational method and inverse modeling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(7), 826-836. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:7(826).
- Huang, A. B., Lee, J. T., Ho, Y. T., Chiu, Y. F., & Cheng, S. Y. (2012). Stability monitoring of rainfall-induced deep landslides through pore pressure profile measurements. *Soils and Foundations*, 52(4), 737-747. DOI: 10.1016/j.sandf.2012.07.013
- Huang, H., Huang, Y., Chen, H., Wang, K., Hsu, Y., Chen, C., & Ku, C. (2026, April 14–18). *Unveiling stick-slip dynamics in deep-seated landslides using borehole distributed acoustic sensing* [Conference presentation]. 2026 Annual Meeting Seismological Society of America Technical Sessions, Pasadena, CA, United States.
- Kavvasdas, M. J. (2005). Monitoring ground deformation in tunnelling: Current practice in transportation tunnels. *Engineering Geology*, 79(1-2), 93-113. DOI: 10.1016/j.enggeo.2004.10.011.
- Lollino, G., Arattano, M., & Cuccureddu, M. (2002). The use of the automatic inclinometric system for landslide early warning: the case of Cabella Ligure (North-Western Italy). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 27(36), 1545-1550. DOI: 10.1016/S1474-7065(02)00175-4.
- Luo, J., Zhang, Q., Li, L., & Xiang, W. (2019). Monitoring and characterizing the deformation of an earth dam in Guangxi Province, China. *Engineering Geology*, 248, 50-60. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.11.007.
- Ly, Y., Pang, Y., Ju, L., Xu, W., Liang, Z., He, J., & Zhang, L. (2026). Automating digitalization of engineered slopes to support interactive digital twin visualization. *Automation in Construction*, 181, 106564. DOI: 10.1016/j.autcon.2025.106564.
- Peck, R. B. (1969). Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Géotechnique*, 19(2), 171-187.
- Spross, J., & Johansson, F. (2017). When is the observational method in geotechnical engineering favourable? *Structural Safety*, 66, 17-26. DOI: 10.1016/j.strusafe.2017.01.006.
- Tan, W., Wu, S., Li, Y., & Guo, Q. (2025). Digital twins' application for geotechnical engineering: A review of current status and future directions in China. *Applied Sciences*, 15(15), 8229. DOI: 10.3390/app15158229
- Wu, J., Dai, L., Xue, G., & Chen, J. (2022). Theory and technology of digital twin model for geotechnical engineering. In *Proceedings of the 8th International Conference on Civil Engineering: ICCE 2021* (Vol. 213, pp. 403-411). Springer. DOI: 10.1007/978-981-19-1260-3_37
- Yen, Y. T., Lin, P. S., Ke, C. C., & Lin, Y. Y. (2020). Seismic monitoring for potential local landslide: A case study of the Babaoliao site in Taiwan. In *the 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE* (Article No. C001550). International Association for Earthquake Engineering.
- 中央氣象署 (2021)。台灣地殼動態觀測網 (TGNS) 網站說明與運作，交通部中央氣象署。
- 中華民國大地工程學會 (2025)。建築物基礎開挖工程監測準則，中華民國大地工程學會。
- 內政部建築研究所 (2023)。坡地社區智慧防災系統暨安全管理計畫 (一) — 廣域地表變形雷達衛星遙測技術應用，內政部建築研究所。
- 內政部國土測繪中心 (2014)。e-GNSS 實時動態定位系統與坐標系統更新報告，內政部國土測繪中心。
- 王又德 (2020)。以動態光學影像估算運動與動力分析於落石坡災緩衝網之研調—南投原址足尺試驗為例，國立臺北科技大學碩士論文。
- 王國隆、林俊廷、賴正儒 (2018)。差分干涉合成孔徑雷達方法偵測活躍地表變形—以地震、地層下陷、坡體活動為例，大地技師大地期刊，16，16-23。
- 何金益、黃慧仁、陳聰海、陳正勳、蕭秋安 (2024)。應用物聯網與雲端技術於特殊地工安全監測之案例分享，地工技術，179。
- 余騰鐸、楊宇恩、林彥均、彭文飛、藍士欽、蘇昱瑄 (2026)。從點位量測至面狀監測—地基雷達即時毫米級變形監測在工程管理中的應用，營建知訊，519，33-42。
- 吳輝龍、陳德天、蘇苗彬 (2003)。TDR 岩層滑動監測的新方法建立，水土保持學報，35，271-278。
- 沈鈺旻、蕭宇伸、卓宥瑄、賴柏霖 (2021)。以 GNSS 觀測站驗證 SBAS-InSAR 在雲林地區垂直位移監測成果，水土保持學報，59，3069-3082。
- 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，166。
- 曾廷睿、吳宥增、劉昱緯、邱雅筑 (2025)。多期無人機影像建模及光達測繪於落石型災害公路邊坡之養護與減災應用，水土保持學報，55，3499-3512。
- 黃宇謙、胡啟文 (2025)。UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討 交通部運輸研究所。
- 黃安斌、林志平、王彥博 (2008)。水庫壩體監測及檢測與安全診斷技術研發 (3/3)，成果報告書，經濟部水利署水利規劃試驗所。
- 黃俊維 (2016)。使用 K-means 分群以及基因演算法建置最佳化無線感測網路系統。國立交通大學碩士論文。
- 楊宇恩、余騰鐸、林彥均 (2024)。線性地基合成孔徑雷達技術在露天礦場與自然邊坡監測實際應用與技術限制，鑛冶，68，11-20。
- 農業部農村發展及水土保持署 (2023)。大規模崩塌調查與監測作業指引，農業部農村發展及水土保持署。
- 農業部農村發展及水土保持署 (2024)。大規模崩塌監測資料規範，農業部農村發展及水土保持署。
- 廖瑞堂、陳昭維、紀宗吉、林錫宏 (2013)。由臺灣監測案例探討邊坡位移量之管理值，地工技術，136，59-70。
- 謝志龍 (2021)。IoT 物聯網傳輸技術於大地工程監測之應用，地工技術，169，126-135。
- 羅百喬、林璋元、黃詠智、王泰典 (2025)。數位學生模型在工程實務的介紹，地工技術，185，91-92。