

iSlope® 邊坡整合性調查技術

陳俊諺 亞新工程顧問股份有限公司 / 工程師
 許景富 亞新工程顧問股份有限公司 / 應用地質技師
 周忠仁 亞新工程顧問股份有限公司 / 協理



圖 1 iSlope® 管理架構

表 1 廣域遙測工具

觀測工具	觀測目的	觀測尺度	觀測解析度	觀測精度
InSAR	變位	太空	公尺	公分
GNSS	變位	太空	單點	毫米
UAV 正射影像	土地利用	天空	公分	-
三維空間模型	空間交互關係	天空	公分	-
空載光達	地形特徵	天空	公分	公分
地面光達	變位	地面	毫米	毫米

摘要

因應極端氣候與自然災害威脅，傳統邊坡管理與調查受限於經費、土地所有權、人力等諸多因素，業管單位無法有效率地進行邊坡管理。因此 iSlope® 提供了整合性邊坡調查及管理架構，透過整合性調查、4D 雲端資料平台、專業分析與風險管理，提供全面性的邊坡管理服務。其中整合性調查提供了廣域的邊坡觀測服務，包含合成孔徑干涉雷達 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 地表多時序變位監測、全球導航衛星系統 (Global Navigation Satellite System, GNSS)、無人飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 空拍、空載光達與地面光達掃描等技術，能夠快速內獲得大量觀測數據，補足人力難以進行調查之資料，擴及完整邊坡集水區範圍，提升調查效率，並結合現地量測資料，實現整合性調查之目的。同時 iSlope® 已成功應用於實際邊坡管理案例中，透過空載光達產製高解析度地形模型，協助我們判釋廣域邊坡集水區範圍內之舊崩塌地形，並經現勘確認，作為崩塌邊破壞整治的重要參考資料。

一、前言

因極端氣候與台灣地質條件脆弱，丘陵、山地面積將近 75%，且除斷層活躍外，氣候變遷所致短延時強降雨進一步增加了坡地地質災害發生之風險。且邊坡破壞往往與邊坡路權範圍外集水區範圍內的水文及地質特性息息相關，如 2020 年台鐵侯硐路路段、2021 年集集線之邊坡坍塌事件、2021 年高鐵通霄段邊坡坍塌等。對於每一處邊坡的集水區關注範圍管理，乃變成現今邊坡管理的一大挑戰。對此我們提出 iSlope® 的邊坡管理構想，透過新興測量技術：無人機、衛星雷達影像分析等技術於工程領域之

應用發展蓬勃，廣域邊坡調查補足了傳統調查的限制性，在有限的人力及資源下，提供廣域山崩潛在地表變位、細微地形特徵、坡地土地利用等成果，結合數位化邊坡管理平台、地質地工分析與風險評估，供邊坡業管單位參考及利用，進一步降低社會、人民生命財產損。

二、基本架構

iSlope® 之基本架構如圖 1 所示，主要由四大框架組成：整合性邊坡調查、4D 雲端資料平台、專業分析與風險管理服務。與傳統邊坡調查相較，iSlope® 以整合性邊坡調查為重要基礎，

隨遙測技術快速發展，使我們可以於短時間內獲得大範圍的邊坡管理與路權外邊坡的變位資訊，深入人力難以進行調查的區域，提供全面性邊坡觀測資料。在本文後續的小節中，我們將著重於 iSlope® 所使用各項新興遙測工具之整合與挑戰：合成孔徑干涉雷達、全球導航衛星系統、無人載具空拍及三維模型、空載光達與地面光達 (圖 2)。

並根據調查目的、觀測尺度與觀測精度不同，廣域邊坡量測乃需由廣入深 (表 1)，透過較大尺度的衛星遙測進行初判，後續規劃透過無人飛行載具調查，並於變位熱區進行更高精度的地面調查，如地面光達、水準測量等，循序漸進有效整合各項觀測成果。

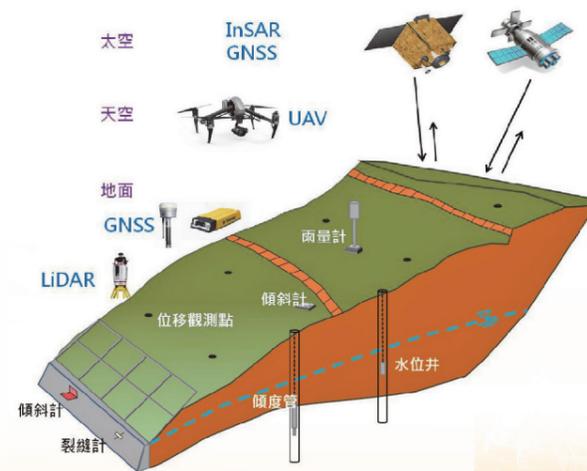


圖 2 廣域邊坡調查工具

三、合成孔徑干涉雷達測量與全球導航衛星系統量測

合成孔徑干涉雷達主要是利用衛星搭載主動式微波雷達，因微波可穿透雲層，故能從太空全天候對地表進行掃描。藉由比對長期對同一地點的掃描成果，比對回波相位變化，萃取出斜距向廣域地表變位。本文主要使用歐洲太空總署 (European Space Agency, ESA) 所發射的哨兵 1 號衛星 (Sentinel-1) 作為主要分析材料，該衛星為公開資料，使用波段為 C 波段 (波長 5.6 公分)。同時亦可針對業主不同的保全對象，蒐集 / 採購 X 波段 (波長 3.1 公分) 與 L 波段 (波長 20 公分) 影像進行分析。

同時可以透過架設角反射器，提升訊號品質 (圖 3)，因衛星軌道、衛星飛行方向的不同，根據不同的衛星、地點，計算其開口仰角、方位與面積。也因應不同的架設場域，如風力強勁處，為避免角反射器受風導致毀損或脫落造成危害，設計為具開孔版之形式，但仍可有效達成增強信號之目標。

同時 iSlope® 提供了不同的雷達影像長期地表變位時間序列解決方案，如針對結構物變位可以採用 PS 影像分析分析技術 (Hooper 等, 2004)、植被較密集之山坡地使用 PSDS 影像分析 (Ferretti 等, 2011) 與適合大範圍斷層構造變位之小基線影像分析技術 (Berardino 等, 2002)。以桃園台地為例，透過雷達遙測技術可快速獲得大範圍之地表變位成果 (圖 4)。



圖 3 角反射器及設置

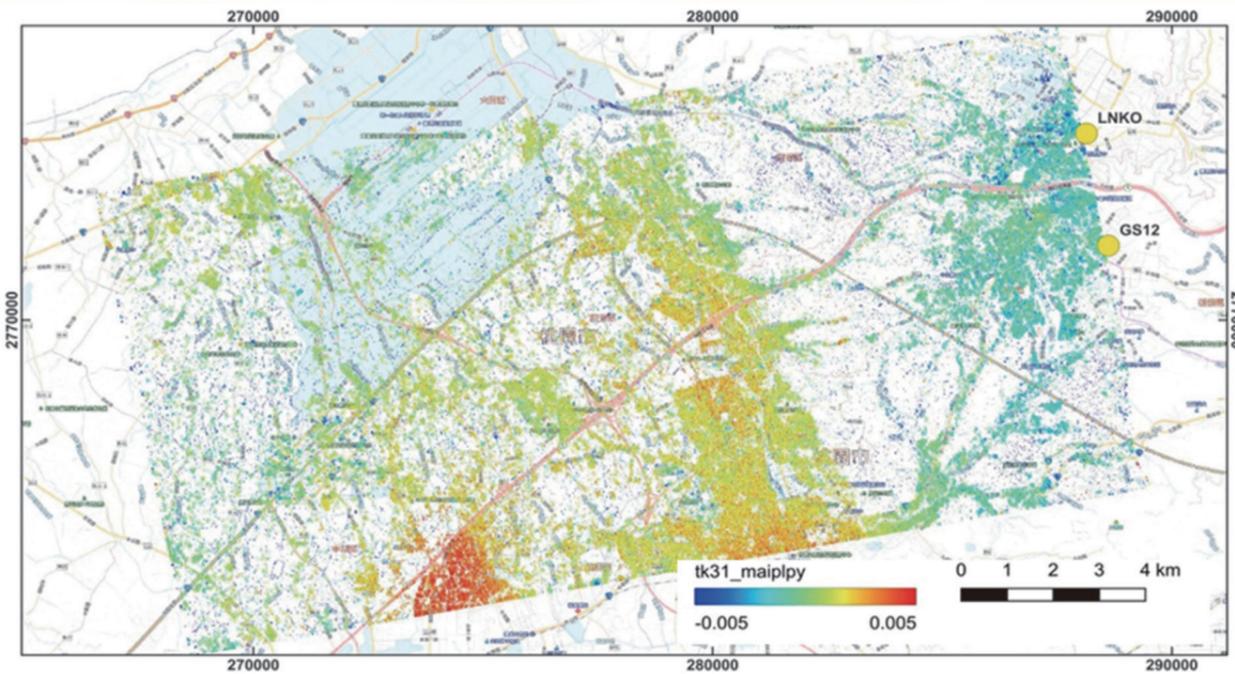


圖 4 雷達影像調查成果

全球導航衛星系統 (Global Navigation Satellite System, GNSS)，為全球衛星定位系統 (Global Positioning System, GPS) 之通稱，透過連續量測站 (continuous GPS station, cGPS station) 的架設，能提供全天候、全日不間斷監測。

本技術目前業已成熟應用邊坡監測中，可以透過小區域監測網之建立，以獲得邊坡連續變位量測成果。同時因全球衛星定位系統與合成孔徑雷達均屬於太空衛星遙測，其量測基準面相通，故可以整合兩者之觀測成果，作為檢核具時間序列校正之依據。以圖 4 GS12 與 LNKO 兩連續站觀測成果之

相對變位進行檢核，其成果具備高度一致性 (圖 5)。透過 GNSS 站進行檢核及時間序列校正，提升了雷達觀測成果之可靠度，將 GNSS 的點觀測，擴展到面空間，實現多維度資料整合之目標。

四、無人飛行載具調查

無人飛行載具 (Unmanned aerial vehicle, UAV) 能夠到達人力難及處進行調查，且當天候狀況允許便可以進行測量，具備一定機動性。藉由搭載不同量測工具，如光達掃描儀及高解析度相機等進行拍攝作業。

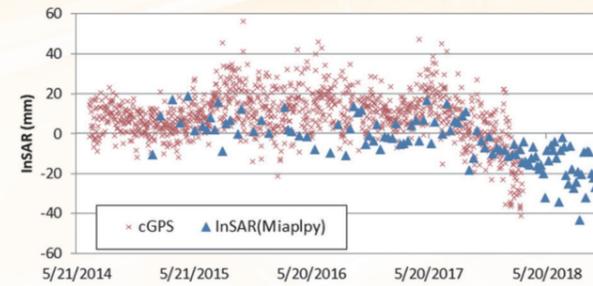


圖 5 GNSS 連續站與 InSAR 成果結合檢核

空載光達可穿透植被量測到真實地表起伏，產製高解析度數值地形模型 (圖 6)，其空間解析度可達到公分等級。經加值處理產製赤色地圖 (Red relief map) (Chiba 等, 2008) 與水系分析 (圖 7)，可以輔助判釋潛在崩塌跡象、崩塌蝕溝發育情形。透過多視角拍攝進行三維空間模型製作 (圖 8)，並以 ArcGIS Pro 等軟體進行

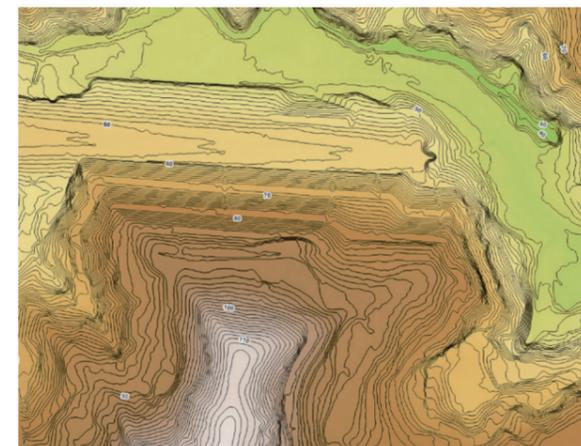


圖 6 高解析度 DEM 與等高線產製

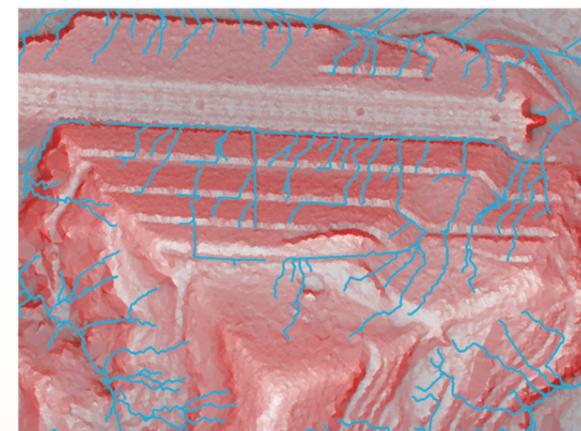


圖 7 赤色地圖及水系分析成果



圖 8 空拍三維模型

三維視覺化，提供多角度的廣域邊坡特徵觀察，亦可作為邊坡三維基本底圖，以及邊坡量測、監測規劃的基本資料。

五、地面光達量測

透過地面光達掃描儀，於目標位置進行多次掃描，直到完成全部邊坡之量測。光達能夠穿透植被縫隙，獲得坡面之反射點。進而得反射強度 (Reflectivity)、高精度點雲資料等觀測成果 (圖 9)。

透過多期重複掃描，比對點雲的位移量 (Montserrat & Crosetto, 2008)，可以協助管理單位了解結構物變位 (排水道、地錨與格樑等) 或邊坡紋理提取，其精度可達到次公分等級 (圖 10)。

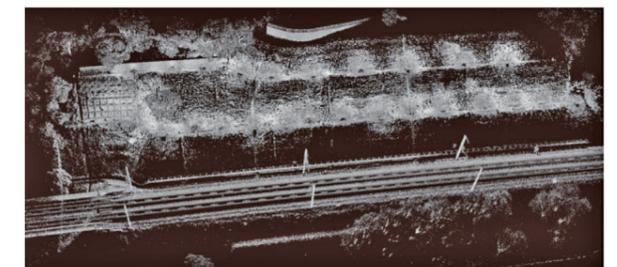


圖 9 地面光達掃描成果



圖 10 多期光達比對變位成果

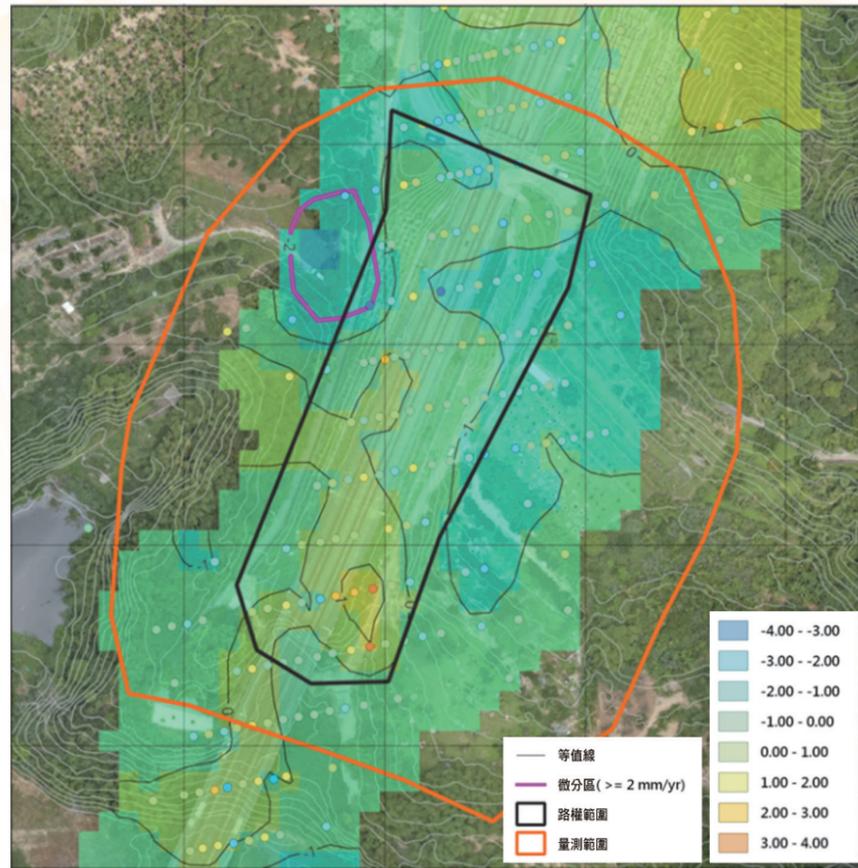


圖 11 雷達遙測成果

六、案例分析—潛在滑動邊坡調查與風險分析成果

iSlope® 廣域邊坡調查及風險評估技術已實際應用於邊坡管理專案之中，我們於新竹一處邊坡進行分析。該案我們透過 InSAR、空載光達、航照及地面光達等調查工具。InSAR、地面光達調查成果顯示坡面穩定無顯著變位（圖 11），但從高精度地形赤色地圖成果（圖 12）顯示於東側緩坡面有崩崖、雙溝同源等早期崩塌特徵，作為現地調查之重要底圖。經地質師等專業技師進行現勘後，確認了沖蝕溝與舊崩塌地冠部植生傾斜等現象。進一步，我們可以結合現地既有鑽孔與專業人員現勘成果產製三維地質模型（圖 13），了解邊坡破壞之可能模式。並就各山崩潛感因子：環境地質、坡度、護坡類型、地下水匯聚及排水狀況、監測儀器、廣域地表變位以專家

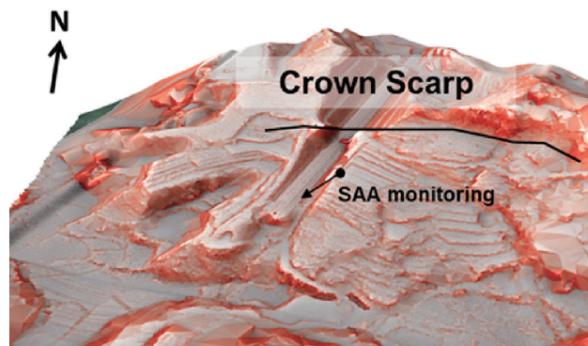


圖 12 本案例赤色地圖三維成果

法進行評估，最後綜合考量邊坡破壞對保全對象之影響程度，提供各區域深層與淺層崩塌風險分析評估成果（圖 14）。而本案推估崩塌面南傾，但未來若發生潛移對保全對象直接影響較小，並已著手進行工程補強作業，後續將持續透過廣域地表觀測輔助現地鑑測，持續關注變位情形，以避免後續邊坡破壞之發生。

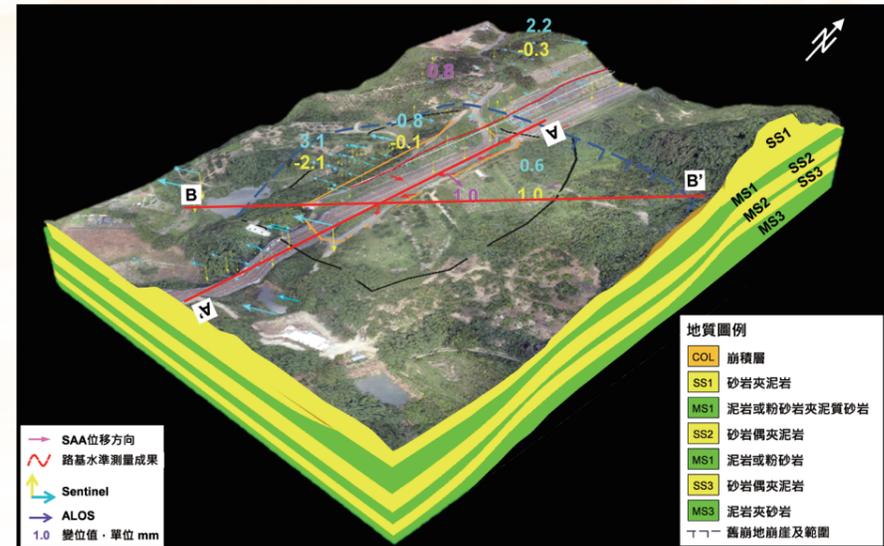


圖 13 三維地質模型

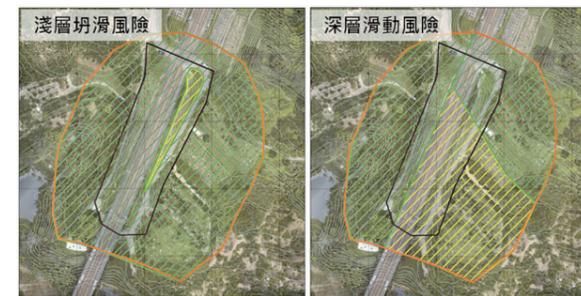


圖 14 風險評估成果

七、結論

iSlope® 整合各項先進調查技術，並透過實際案例研析，成功判釋了路權範圍外影響邊坡穩定之不利因子，說明了整合性調查之重要性。以傳統監測搭配廣域邊坡調查成果，包含合成孔径雷達變位觀測、高精度數值地形產製及分析與地面光達測量等成果資料，並持續累積邊坡觀測資產，才能夠了解潛在邊坡變位之發生因子，並透過專業分析擬定相應風險管理對策，降低邊坡破壞所造成之社會、人民生命財產之危害。

誌謝

本文內容及相關資料主要來源為亞新工程顧問公司執行之廣域邊坡調查技術顧問服務。承蒙亞新工程顧問公司的支持和同意發表，使得本文得以順利完成，謹致以最大謝忱。

參考文獻

1. Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31(23).
2. Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., & Rucci, A. (2011). A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9), 3460–3470. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
3. Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 40, 2375–2383.
4. Chiba, T., Kaneta, S.-I., & SUZUKI, Y. (2008). Red relief image map: New visualization method for three dimensional data. *Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 37.
5. Monserrat, O., & Crosetto, M. (2008). Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(1), 142–154.