

視覺化工程地質模型在順向坡風險管理應用探討

黃詠智 國立台灣大學土木工程學系 / 博士候選人
 邱家宏 國立台灣大學 土木工程學系 / 博士生
 王泰典 國立台灣大學 土木工程學系 / 教授
 陳佳芬 聯合大地工程顧問股份有限公司 / 應用地質技師
 魏佳韻 交通部高速公路局 / 副工程司

摘要

工程地質特性的掌握是邊坡穩定與維護管理的基礎。然而地質條件包括岩層與構造的空間分布以及岩土材料工程特性皆具有變異性，傳統地質調查係將結果簡化為二維地質平面或剖面圖，易導致各種調查成果不一致、不確定的資訊難以有效傳遞至後續設計、施工與營運維護階段，並影響邊坡風險管理。本文以一臺灣北部緊鄰公路順向坡、在多次補強工程及監測作業實施下之崩塌案例，透過崩塌後補充地質調查建立更精細的工程地質模型，並比對災害前推測的地質模型，探討地質模型不確定性與偏差對高風險區辨識的影響。文中整合鑽探岩心柱狀圖與實際出露滑動面，藉由視覺化方式將抽象的不確定性轉換為可解讀的空間資訊。結果顯示，災前模型難以完整捕捉弱層分布，導致潛在滑動面位置偏移；視覺化工具不僅能協助風險辨識與監測設計，亦可作為跨單位溝通的橋梁。然而，其應用仍受限於調查密度、經費與專業判釋能力。整體而言，本研究案例顯示，唯有將視覺化與地質專業解釋相結合，並適度補充地質調查成果修正模型，方能逐步提升邊坡風險管理的可靠性。

一、前言

地質條件與地層材料工程特性的調查是邊坡工程設計、施工以至於建成邊坡維護管理的基礎；將地表地質調查、鑽孔探查、地球物理探勘等調查成果適度簡化、去蕪存菁，呈現影響邊坡穩定重要因子的空間分布與隨時間可能的變化，即所謂的地質模型與地盤模型，則是評估邊坡工程保護措施效能的依據。地質模型、地盤模型以及描述大地設施分布的地工模型組合成為工程地

質模型 (Engineering Geological Model, EGM)，不僅是工程場址綜合性的展現，也是現代化工程生命週期不同階段各種分析的依據。

儘管工程場址的工程地質模型極為重要，然而其呈現方式目前多數仍為二維的地質平面或是剖面的形式。除了契合傳統地形圖表現方式之外，另一主要的原因即是各項地質調查方法精細程度差異大，調查結果常出現不一致、甚至相互抵觸的窘境。將調查結果篩選並整合後採二維圖

面表示，分別給予各地層對應的工程特性參數，成為多數調查人員的選擇，也逐漸演變為約定成俗的做法。此一做法將大多數地質調查結果不一致、不確定的資訊傳遞停止於二維地質平面、剖面圖，一旦施工情況未如預期，地質條件與工程地質特性的變異遂成為解釋設計與施工差異最常見的說法。或許相去不遠，但是地質條件與工程地質特性的不確定性，實則難於評估，並可能將其影響程度傳遞到工程生命週期的後續階段。

三維工程地質模型則強調採用數位化、視覺化方式、在全域坐標系統框架下呈現工程地質模型，並將各種調查結果儘可能匯入模型中，使工程地質模型使用者得以直覺地閱覽工程場址地質特性的做法。使用者可以瞭解調查結果不一致或是調查資料稀疏、貧乏的範圍，並觀察調查人員解釋地質模型的脈絡，認知地質條件與工程地質特性不確定性較高的位置，有助於辨識高風險的區域，並提升工程參與人員與決策者溝通的效率 (Wellmann & Caumon, 2018)。

臺灣北部某處順向坡崩塌影響公路通行，該順向坡近十年的維護管理皆依循規範及養護手冊辦理，卻仍在監測期間發生崩塌。順向坡災害具有破壞速度快、量體大、缺乏明顯前兆等特性，導致預警困難與管理複雜度提升 (Cruden & Varnes, 1996; Van Westen *et al.* 2006; IAEG, 2009)。本文蒐集該邊坡設計、施工、維護管理、與災後調查鑑定原因階段地質資料，探討視覺化工程地質模型在順向坡風險管理的應用。

二、案例介紹

為了探討工程地質模型不確定性在順向坡風險管理中的影響，本研究選取一處公路邊坡崩塌案例 (以下簡稱案例邊坡)，該處邊坡長期以來多次發生崩塌，且具高度交通敏感性，適合作為不確定性分析與視覺化應用的示範案例。本章首先說明案例邊坡的位置與地質背景，並回顧歷史災害紀錄，作為後續工程地質模型建立與風險分析的依據。

2.1 案例背景

案例邊坡坡高約 30 ~ 40 m，坡面朝南面向公路匝道與主線道路，地形屬於典型開挖後形成的人工順向坡 (圖 1)。

案例邊坡地層屬中新世南港層之上段，岩性多為青灰色細粒石灰質砂岩，與淺灰色至青灰色細粒砂岩和深灰色至青灰色頁岩為主的砂頁岩互層，地質構造上屬於八堵向斜北翼，地層位態走向約為 N79°E，傾角 28°S。坡體坡度約 25° 至 30°，上方設有舊施工便道，中段有平台與地錨加固，下方臨公路匝道。由於交通敏感性高，自 2006 年起邊坡管理單位即持續佈設監測系統，包括水位觀測井、傾斜計、地錨荷重計與雨量計等自動與半自動監測儀器 (圖 2)。

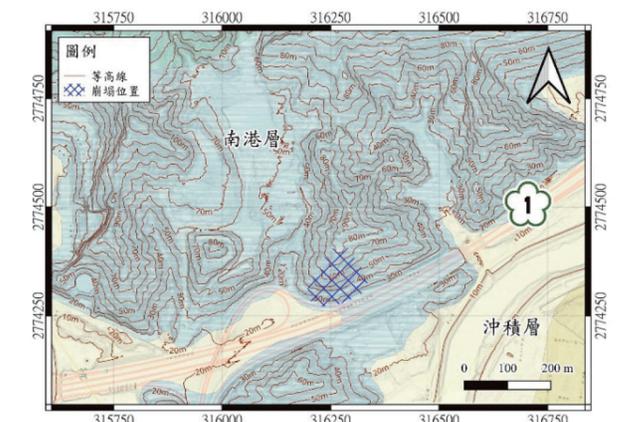


圖 1 案例位置與區域地質圖 (底圖：經濟部地質調查及礦業管理中心 — 五萬分之一全島無接縫地質圖)

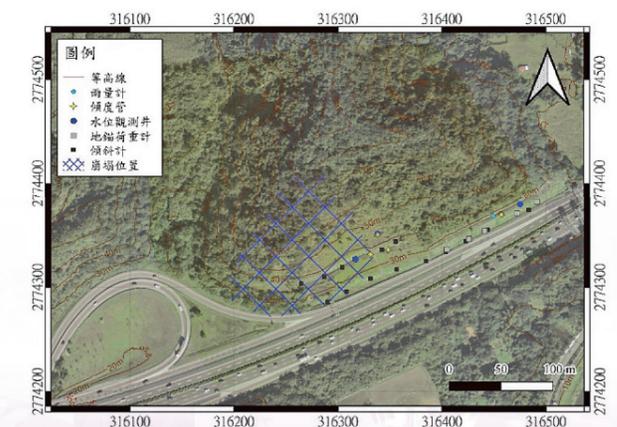


圖 2 災前航照與邊坡監測儀器佈設位置

2.2 歷史災害

案例邊坡及其鄰近自 1960 年代以來多次發生崩塌，包括 1962、1977、2008 年，均導致道路阻斷，並於災後進行邊坡補強工程。最近一次邊坡安全評估成果時間位於 2022 年中，其中考慮不同的地下水位高低、不同地錨效率下安全係數變化，同時亦進行有限元素法分析，結果顯示無邊坡失穩問題，但很不幸的，2022 年 11 月 1 日上午 11 點 21 分、11 月 2 日下午 18 點 50 分再次發生大規模坍塌，部分位置深度超過 10 m，滑動體沿弱層剪出並堆積於公路匝道上（圖 3），迫使道路封閉，影響北部交通。

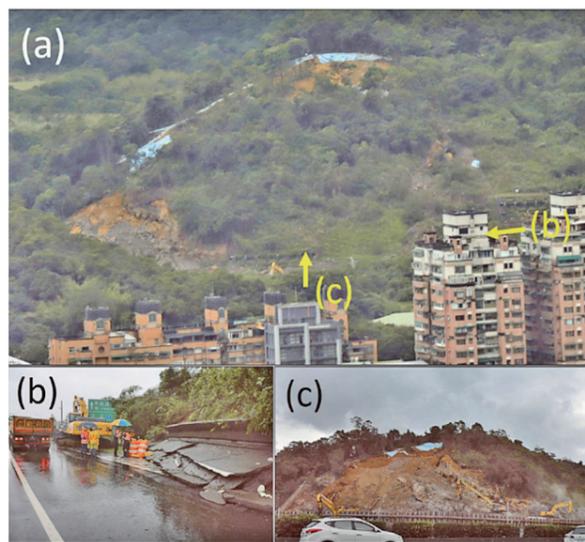


圖 3 案例邊坡崩塌照片（地質調查與礦業管理中心提供）

三、工程地質模型建立

為了進一步探討案例邊坡崩塌原因，工程地質模型建置是必要的。工程地質模型是進行邊坡穩定性評估與風險分析的核心依據，其精確度直接影響監測設計與補強策略的合理性。本章首先介紹災後調查成果，其次比較災前與災後模型的差異，最後討論視覺化在模型建立過程中的重要性，以凸顯模型不確定性在實務應用上的影響。

3.1 災後調查

災後該邊坡佈設 12 孔鑽探（圖 4(a)），並透過岩心紀錄與地層柱狀圖對比（圖 4(b)），辨識潛在滑動的弱層（圖 4(b) 中紅色層）。由於工址範圍遠小於區域地質尺度，案例邊坡地層對比係以岩心柱狀圖進行，並以岩心柱狀圖中的白色鈣質砂岩為對比指準層。調查結果顯示，滑動面主要發育於膠結不良、遇水易軟化的泥質砂岩層，厚度約 2~4 m，坡頂分布較薄，接近坡趾處明顯較厚，顯示滑動面發展時在坡趾處有較大不確定性。

值得注意的是，岩心柱狀圖對比在此調查中扮演關鍵角色。多數邊坡調查僅依賴局部岩心描述或是岩心品質指標（Rock Quality Designation, RQD）的變化，往往無法精確連結並解釋不同鑽孔間岩層的延續性；然而，本研究透

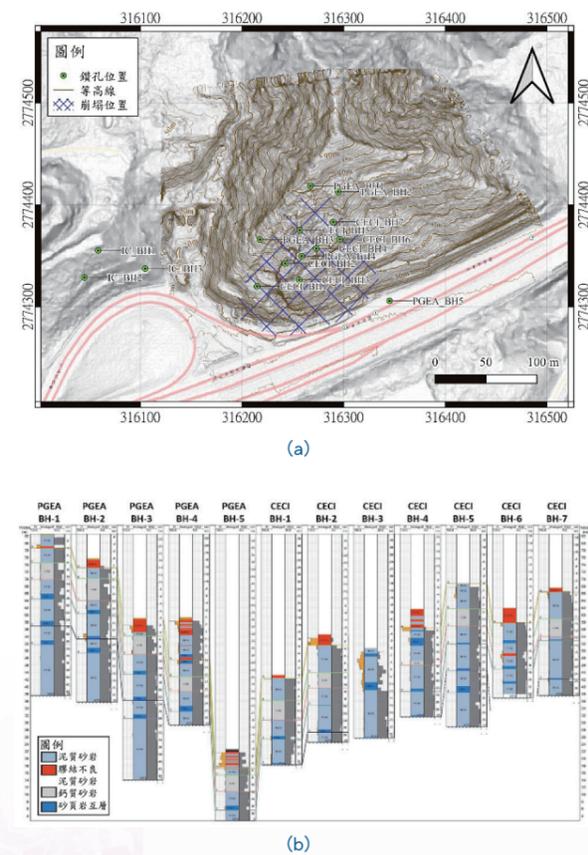


圖 4 災後地質調查 (a) 鑽孔分布 (b) 岩心柱狀圖對比

過系統性的岩心柱狀圖對比，不僅能在多孔鑽探之間建立準確的地層關聯，也能清楚鎖定弱層在空間中的分布。圖 5 揭示臺灣北部地區具順向坡歷史災害之高潛勢地層岩段，其岩性組合均為厚層砂岩覆蓋於頁（泥）岩或薄互層等軟弱岩性上方，依此可追溯大型順向坡滑動好發於特定地層岩段中，如大寮層中段至上段、石底層下段（八斗子段）、以及南港層中段至上段等，均具備相似地質條件，可見此方法不僅適用於本研究案例，亦可推廣至其他地層，以進一步界定其潛勢高岩段的範圍。

透過實際出露的滑動面對比，可以證實該弱層確實沿著特定岩段延伸並發展，最終成為順向坡失穩的主控滑動面。這也說明若缺乏地層或岩心柱狀圖對比，僅以單孔或局部觀察推估滑動面，難以清楚掌握關鍵弱層分布，使後續工程決策存在風險。

3.2 災前模型與災後模型對比

本研究稱「災前模型」係指災害發生前設計與監測階段所依據之地質解釋結果，主要根據災前既有鑽探與地形資料推估地層面延伸及潛在滑動面位置；而「災後模型」則為災害發生後新增鑽探、岩心柱狀圖對比與現地出露面調查所得之更新模型。兩者差異反映不同調查密度與資料完整性下的地質解釋差異，而非設計錯誤或個別人員判斷疏失。本研究以此對比作為討論「模型不確定性對風險管理影響」之示例，旨在提醒未來於規劃及設計階段，應考量模型假設差異所可能帶來的風險判斷變化。

本次災害的滑動方向與災前認定存在顯著差異。為釐清原因，本研究採用 Python 與開源地質建模套件 GemPy (de la Varga et al. 2019)，分別建立災前與災後三維工程地質模型，並結合空載光達產製之高解析度地形資

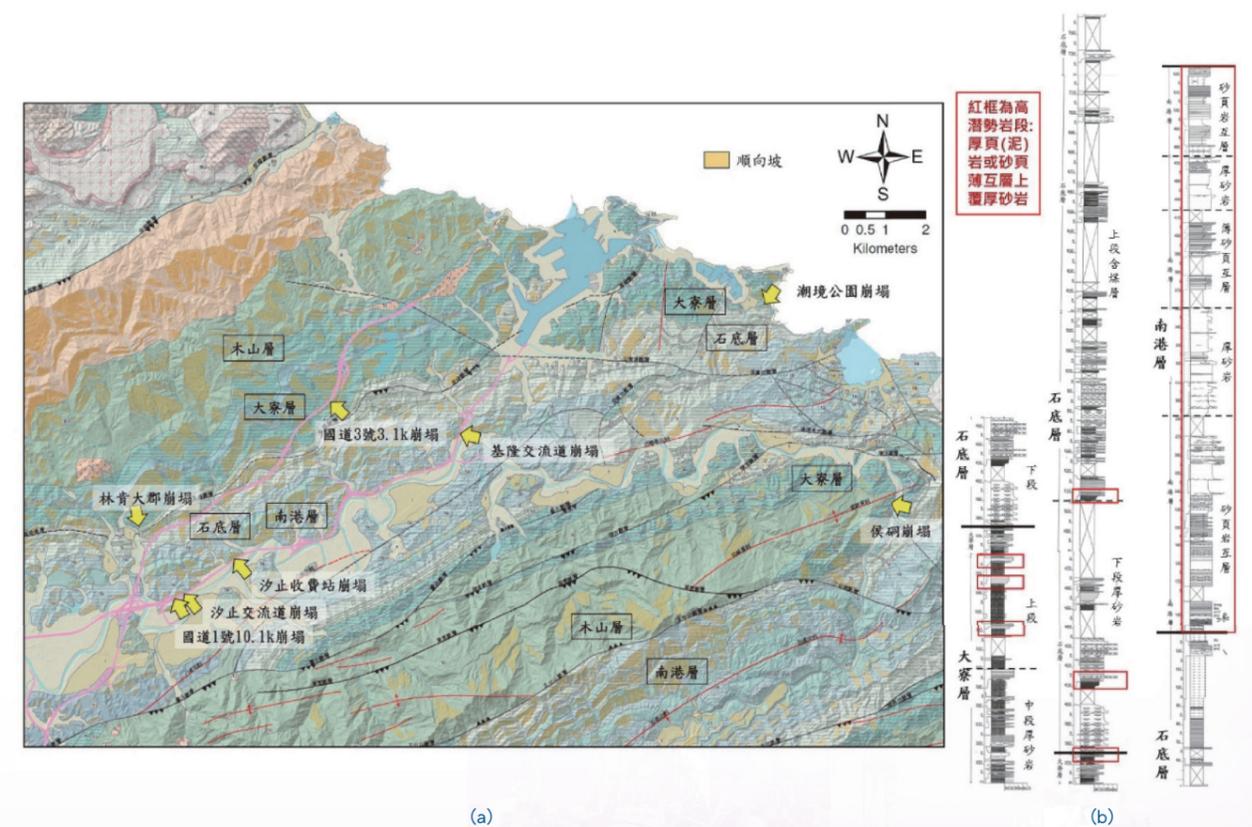


圖 5 順向坡歷史事件對應地層 (a) 歷史事件位置（底圖：經濟部地質調查及礦業管理中心 一 五萬分之一流域地質圖）；(b) 地層柱中高潛勢岩段（改自游與鄧，1996 & 游與鄧，1999）

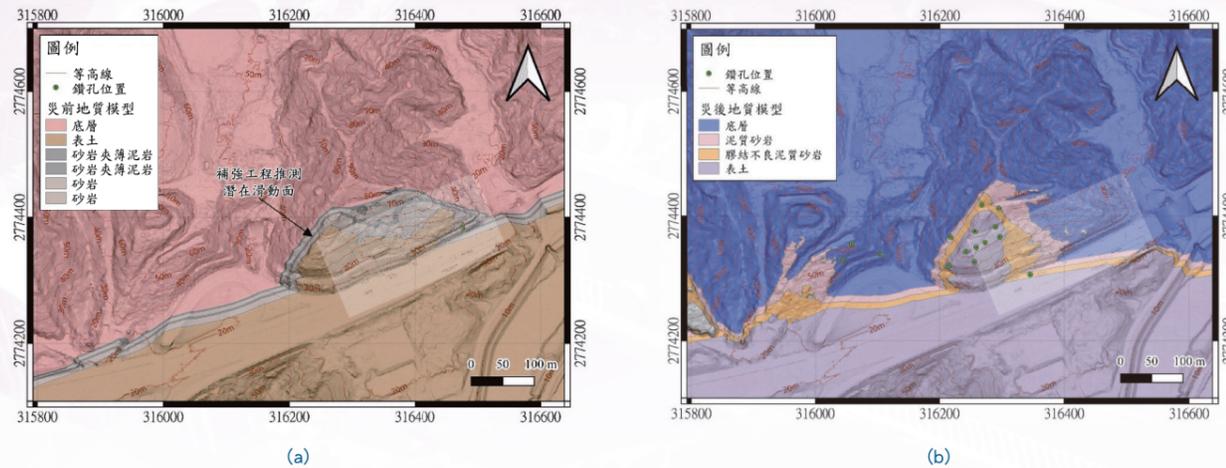


圖 6 災前與災後工程地質模型對比 (a) 災前既有資料建置模型；(b) 災後模型

料，以地理資訊系統 (GIS) 平台進行展示與對比。

圖 6(a) 為災前既有資料建置模型，設計階段依有限鑽探資料推估，認為潛在滑動面較深、傾角偏大 (走向/傾角為 N75°E/30°S)。依此假設，按邊坡坡向 N65°E/27°S，獲致邊坡西側坡趾較為穩定的結論，而將補強與監測配置集中於東側及中段。

然而，圖 6(b) 為災後模型，補充鑽探與岩心柱狀圖對比成果顯示，實際滑動面較淺、傾角更平緩 (走向/傾角為 N81°E/25°S)，這種差異雖僅為數度，但對潛在滑動範圍卻有重大影響。

比較圖 6(a) 與圖 6(b) 可知，即便走向與傾角僅有 5° 甚至更小差異，對工程判斷與安全評估卻可能帶來「質變」的結果。這呼應 Bond (2015) 所指地質解釋的不確定性，即使在細微尺度上，也可能對最終工程決策造成顯著影響。因此，對比災前與災後模型不僅揭露了地質判釋的誤差，也凸顯視覺化模型在不確定性分析與風險辨識中的必要性。

3.3 視覺化的重要性

工程地質模型的建立過程中，視覺化扮演檢核與驗證的核心角色。透過三維工程地質模

型、鑽探資料與地形資料的疊合，可以即時檢查模型假設是否與實測成果一致，並快速辨識出潛在的不確定性來源。這種即時比對的功能，能在模型尚未應用於工程分析之前，先行排除不合理的假設。

以案例邊坡為例，災前推估的滑動面深度與傾角與災後重建模型存在極小的差異。若僅依文字與剖面表達，這些差異往往不易被察覺；但透過三維視覺化比對，模型假設與真實出露的偏差能被直觀揭示，顯示出調查與判釋策略中的盲點。正如 Wellmann & Caumon (2018) 所強調，三維地質結構建模本質上伴隨不確定性，而視覺化不僅是展示成果，更是檢核假設與溝通不確定性的核心手段。

此外，視覺化能協助模型在不同假設下進行敏感度測試。例如透過滑動面傾角或深度調整的假設情境 (Yeh *et al.* 2021)，工程師可立即觀察其對潛在失穩範圍的影響，進而釐清哪些參數對模型最敏感。這不僅提升模型建置的透明度，也使不確定性能在早期階段被量化與呈現。

四、工程應用與風險管理

本章進一步探討視覺化三維工程地質模型於邊坡設計與風險管理流程中的應用。由於模型

的可靠度直接影響監測配置與補強工法選擇，因此透過災前與災後模型的對比，可以檢視不確定性或是偏差對工程對策的影響。以下首先說明工程地質模型差異對設計與監測配置的影響，其次探討視覺化在風險辨識中的價值，最後歸納其於風險管理流程中的應用方式，以彰顯模型視覺化在實務層面的關鍵角色。

4.1 對設計與監測配置的影響

災前工程地質模型推估的潛在滑動面較深、傾角偏大，尤其在西側滑動面更為明顯，東側及中段則距離地表較淺，因此補強工程設計與監測配置主要集中於邊坡東側及中段 (圖 7)。然而，災後調查顯示實際滑動面較淺且傾角更緩，特別是在西側坡趾，風險顯著高於原判斷。結果導致：

1. 西側風險較高區域監測配置量少，難以及早捕捉失穩跡象。
2. 補強工法 (地錨) 集中於東側，而西側坡趾缺乏足夠抵抗能力，最終成為破壞發生區。

圖 7 可見，工程地質模型不僅攸關邊坡穩定補強工程對策，對監測配置亦具舉足輕重的影響，尤其在此類以地質構造面主控破壞模式之邊坡，若缺乏準確的地質模型，工程對策與風險管理容易偏向「看似合理卻低估風險」的情境。

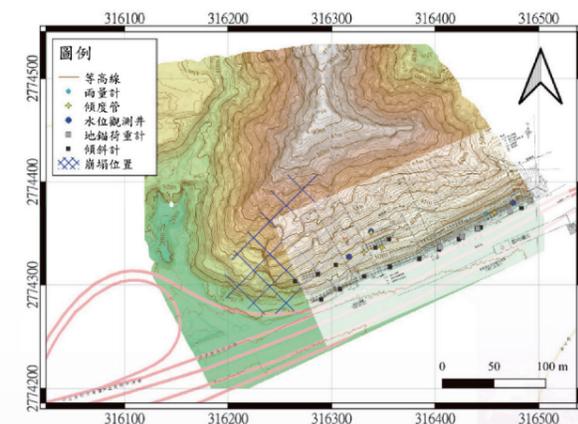


圖 7 災後地形與災前補強範圍、監測配置對比

4.2 視覺化在風險辨識中的價值

將災前與災後模型透過全域坐標對位，採三維重疊呈現，可清楚看出補強工程推測的「潛在滑動面」與「實際滑動面」的差異範圍。此視覺化資訊具有以下價值：

1. 高風險區定位：協助工程師辨識坡趾與局部淺層區為失穩熱點。
2. 溝通工具：讓業主、主管機關或非地質背景的人員能直觀理解風險分布，而不僅依賴數值報告。
3. 決策依據：有助於後續補強設計與監測點位的再規劃。

為使地質資料數位化且透明化，視覺化是關鍵技術，憑藉近年開源科學視覺化套件發展，如 PyVista、VTK 套件得以將數化資料顯示於三維空間中，搭配精確的坐標定位方法 (如 RTK, Real Time Kinematic)，測定鑽孔高程獲取精確岩性紀錄於空間中分布成果，使得地質模型不再抽象，而是明確且可考量接觸不確定性分布的數據點 (Wellmann *et al.* 2010)。

圖 8 比對災前補強工程設計階段推測的潛在滑動面與災害發生後之實際滑動面，揭露地質模型存在極大不確定性，說明在邊坡穩定分析不容忽視地質模型不確定性。

近年地理資訊系統 (GIS) 的應用已逐漸普及，早期因商用軟體授權費用限制，使其應用多受限於學術研究機構，隨開源軟體蓬勃發展，QGIS 此類開源的 GIS 系統誕生使得普羅大眾也能進行資訊整合應用。地質模型資料、監測佈設位置、潛在滑動面位置等重要資訊得以整合在相同系統中，並可以直觀的方式判讀資料間是否存在偏差或衝突，指示不確定性高或存有風險疑慮位置。

透過 GIS 系統，各式資料整合與對比變得容易，尤其在精細地形資料的應用上更能夠協助工程師進行判斷。自 2009 年莫拉克風災後台灣

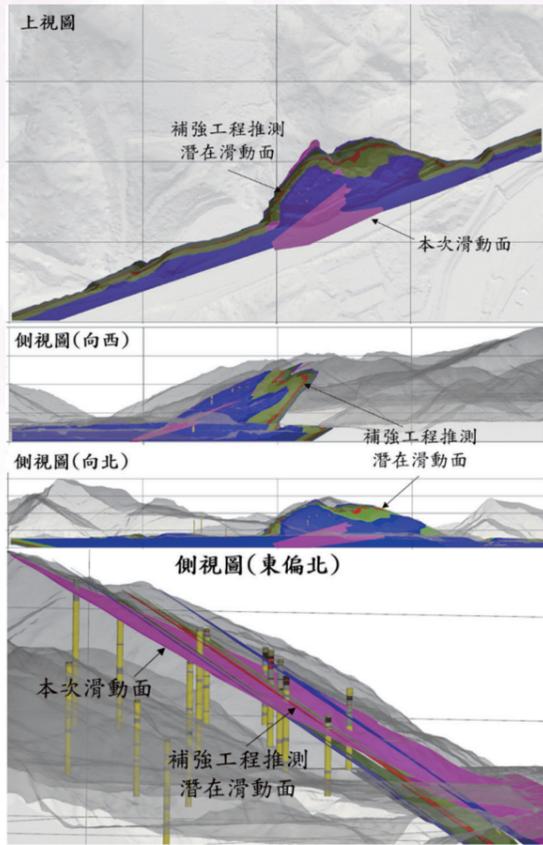


圖 8 災前補強工程推測的潛在滑動面與災後實際滑動面重疊的三維視覺化圖

開始大量使用空載光達獲取高解析度及高精度之地形資料，2016 年已完成全台空載光達圖資建置，迄今仍不斷定期更新。國內外許多研究已可透過精細地形資料進行地層判釋，甚至是大比例尺地質圖製圖（邱，2018）。案例邊坡透過空載光達測繪高精度地形圖，再加值產製的坡度圖套疊回地形圖，可以在沉積岩地層中可明顯觀察並描繪地層走向，與本研究所製災前災後地質模型中地表出露線型對比，得以進一步判斷兩者是否具備相同的型態，如不符則需要更多證據說明該區是否具明顯地質構造導致地層變形或截切。

圖 9 為在 QGIS 系統中套疊坡度圖、地形及地質模型所製平面地質圖結果，在工址尺度下（數百公尺），圖 9(a) 和圖 9(b) 為災前地質模型呈現單面山地形，屬於典型的順向坡地形，東側和邊坡中間處滑動面距離地表較淺，西側滑動面較深，潛在滑動方向和高速公路主線近乎垂直；圖 9(c) 和圖 9(d) 為利用災後資料重建之地質模型，具滑動風險塊體集中在邊坡西側，且弱層部分見光。

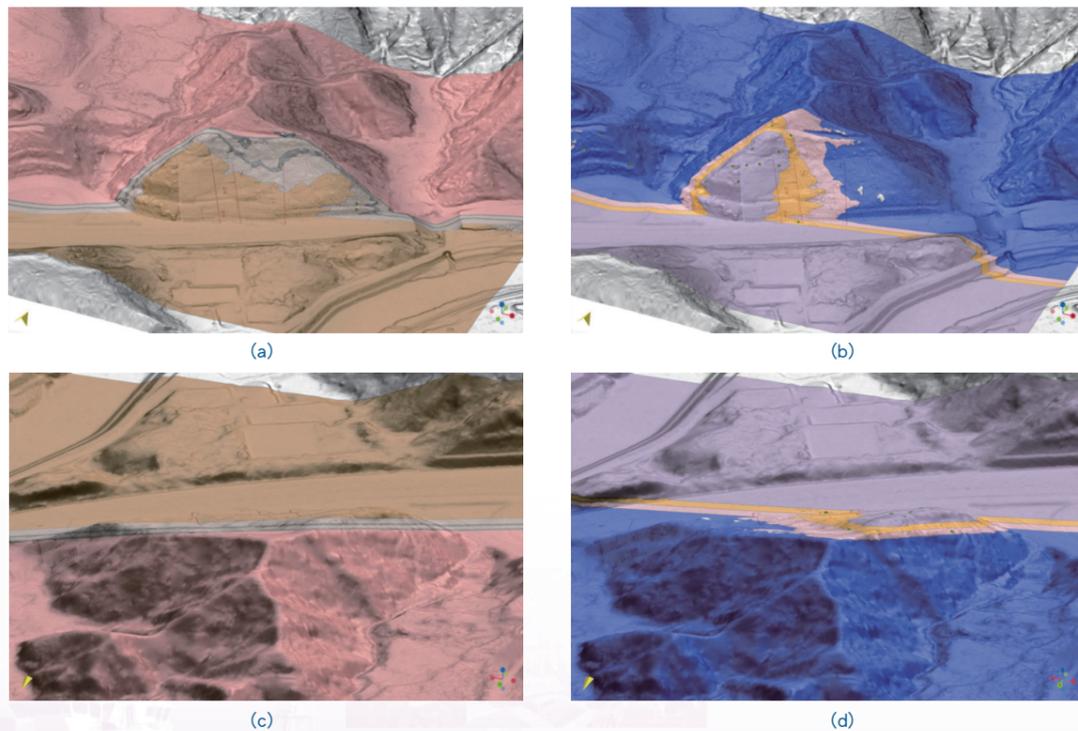


圖 9 工址尺度下，地質模型套疊地形 (a)-(b) 災前模型 (c)-(d) 災後模型

4.3 在邊坡風險管理流程中的應用

本案例顯示，工程地質模型的視覺化不僅是研究與分析的工具，更能在風險管理流程的不同階段發揮關鍵作用。首先，在災前規劃階段，透過建立多種地質模型假設並進行視覺化對比（圖 10），可以提前辨識潛在的高風險區域，避免僅依賴單一解釋而導致判斷偏差。這種多模型比較的思維有助於決策者在規劃初期即掌握不確定性範圍，進而提升整體規劃的可靠度。

其次，在監測設計階段，視覺化模型能有效指引監測儀器的佈設位置。特別是當不同模型的滑動面在某些區域重疊時，如圖 10 中邊坡西側所示，這些區域往往代表失穩的高風險帶，且西側不確定性明顯較東側低，即邊坡變形異狀易於該處顯現，將監測設施優先配置於不確定性低位置，可提升監測的敏感度與效率，確保在災害徵兆出現時能及時捕捉。

最後，在災後檢討階段，視覺化提供了一個快速比對平台，使專業人員能直接比較災前模型與實際滑動面的差異，進而反思調查策略與設計假設的不足。這種即時回饋機制，不僅能改善後續的調查與建模流程，也能逐步累積經驗，形成更具適應性的風險管理體系。

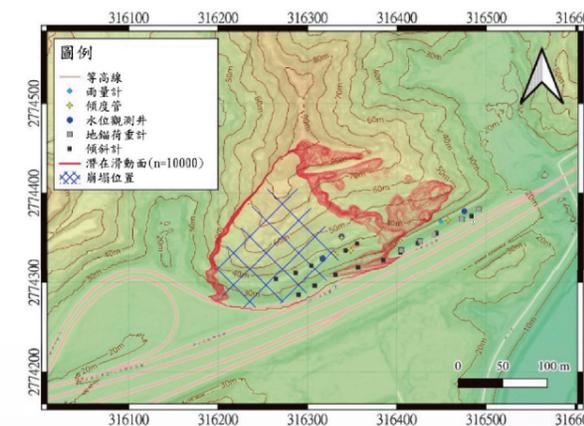


圖 10 潛在滑動面多模型假設示意圖，紅線為依據鄰近鑽孔岩心柱狀圖判釋潛在弱層位置，結合徑向基底函數與高斯過程迴歸得到可能滑動面出露於地表跡線

綜合而言，工程地質模型的視覺化已逐漸成為邊坡風險管理的重要環節，從災前、災中到災後，皆能提供可視且可溝通資訊，確保風險辨識與工程決策更為全面而精確。

五、討論

案例邊坡分析可知，工程地質模型在不同調查階段可能呈現差異，進而影響對邊坡風險的判斷與管理。本章進一步討論工程地質模型不確定性的來源、比較視覺化方法相較於傳統剖面表達的優勢，以及探討在實務應用上可能面臨的挑戰與限制。透過綜合上述面向，期能凸顯本研究在學術與工程實務上的啟示，並為後續改進調查策略與管理流程提供參考。

5.1 工程地質模型的不確定性

工程地質模型的不確定性主要來自於調查資料的侷限性與地質判釋的主觀性。鑽孔間距過大或岩心品質不佳，容易造成滑動面深度與幾何推估的偏差；地層的不連續性與構造擾動，更進一步增加了解釋難度。案例邊坡走向或傾角即便僅有數度的差異，對於潛在滑動面深度的判斷就可能截然不同，進而導致安全係數評估與監測配置的差異。正如 Bond (2015) 所強調，地質解釋中的細微差異，往往會對工程決策產生顯著影響。因此，在實務應用上，若未能充分認知與表達這些不確定性，將直接導致風險評估與設計的偏差。

5.2 視覺化優勢

與傳統剖面圖相比，三維視覺化模型能更完整地呈現地下幾何的空間差異。傳統方法僅能在單一剖面上表達滑動面假設，往往直接忽略了岩體在三維空間中的連續性與不確定性。而透過三維模型，不同假設情境下的潛在滑動面可被直觀地展示，協助工程師辨識高風險區段。本案例中，災前與災後模型的對比清楚揭示了假設與實際之間的落差，若僅依賴文字或剖面表達，這些

關鍵差異將不易被察覺。此外，視覺化亦能作為跨領域溝通的橋梁，將「抽象的不確定性」轉化為「具體的空間範圍」，提升決策透明度與合理性 (Wellmann and Caumon, 2018)。

5.3 實務應用的挑戰

雖然視覺化模型在風險辨識中展現重要價值，但在實務應用上仍存在挑戰。首先，視覺化建模仰賴足夠密度的鑽探與地形資料，若調查密度不足，模型仍可能產生偏差。其次，模型建置需要額外的時間與經費投入，並依賴相關軟體操作與專業判釋能力，對工程單位而言是一項負擔。最後，即便透過視覺化，模型本質上仍是解釋性的產物，不能被視為唯一正解。若忽略其不確定性來源，反而可能讓決策者過度信任模型輸出。

因此，視覺化模型的價值在於融入風險管理流程 (圖 11)，作為溝通與決策輔助工具，而非單一答案。本研究探討的案例邊坡顯示透過視覺化模型可在「穩定工法設計」、「運營期監測設

計」與「災後檢討」三個面向展現應用價值。唯有將視覺化與專業地質判釋結合，並持續將災後實測成果回饋至模型，才能逐步提升工程決策的可靠性。

六、結論與建議

本研究藉由災前與災後工程地質模型的對比，揭示工程地質模型的不確定性與偏差對邊坡穩定判斷與補強策略的直接影響，顯示若僅依賴單一模型解釋，可能導致高風險區域被低估。視覺化技術的引入，則能將地質不確定性轉化為可解讀的空間資訊，不僅提升風險辨識的準確性，也有助於監測規劃與工程設計。

此外，視覺化工具兼具專業分析與跨領域溝通的功能，能縮短資訊落差，強化決策透明度，並促進工程單位間的協作。然而，其效益仍依賴資料完整性與專業判釋能力，若缺乏持續回饋與修正，模型可能流於靜態展示，難以發揮應有價值。

案例邊坡的審視經驗，提出數個建議：(1) 邊坡規劃、調查階段宜建立多版本地質模型，突顯有限資料各種可能性，避免依賴單一解釋；(2) 設計階段結合視覺化成果，選擇適切的補強工法並佈設監測點位；(3) 管理階段將維護管理實測成果回饋至模型，逐步提升判斷精度與可靠性。透過上述循環機制，工程地質模型的不確定性可逐漸收斂，並在風險管理中發揮更大的決策輔助效益。

本研究顯示視覺化工程地質模型能有效應用於邊坡風險管理，此成果不僅為國內相關工程提供實務參考，也為未來在不確定性量化與視覺化結合的研究方向，奠定發展基礎。

參考文獻

- Bond, C. E. (2015). Uncertainty in structural interpretation: Lessons to be learnt. *Journal of Structural Geology*, 74, 185–200.
- Cruden, D. & Varnes, D. J. (1996). Landslide Types and Processes. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. National Academy Press, Washington, D.C, 247, 36–75.
- De La Varga, M., Schaaf, A., & Wellmann, F. (2019). GemPy 1.0: Open-source stochastic geological modeling and inversion. *Geoscientific Model Development*, 12(1), 1–32.
- International Association for Engineering Geology and the Environment Italian Group. (2009). Recommendations for reliability quantification of the Reference Geological Model in large civil engineering projects.
- Parry, S., Baynes, F. J., Culshaw, M. G., Eggers, M., Keaton, J. F., Lentfer, K., Novotny, J., & Paul, D. (2014). Engineering geological models: An

- introduction: IAEG commission 25. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(3), 689–706.
- Van Westen, C. J., Van Asch, T. W. J., & Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation — Why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2), 167–184.
- Wellmann, F., & Caumon, G. (2018). 3-D Structural geological models: Concepts, methods, and uncertainties. In *Advances in Geophysics* (Vol. 59, pp. 1–121). Elsevier.
- Wellmann, J. F., Horowitz, F. G., Schill, E., & Regenauer-Lieb, K. (2010). Towards incorporating uncertainty of structural data in 3D geological inversion. *Tectonophysics*, 490(3–4), 141–151.
- Yeh, C.-H., Dong, J.-J., Khoshnevisan, S., Juang, C. H., Huang, W.-C., & Lu, Y.-C. (2021). The role of the geological uncertainty in a geotechnical design – A retrospective view of Freeway No. 3 Landslide in Northern Taiwan. *Engineering Geology*, 291, 106233.
- 邱家宏 (2018)。應用高精度數值地形精進臺北地區褶皺逆衝帶地質圖，碩士論文，國立臺灣大學。
- 游能悌、鄧屬予 (1996)。臺灣北部中上中新統的岩相與沈積循環。經濟部中央地質調查所。
- 游能悌、鄧屬予 (1999)。臺灣北部大寮層石底層之沉積環境。經濟部中央地質調查所。
- 社團法人中華民國大地工程技師公會 (2023)。國道 1 號南下路段 10.1k 邊坡坍塌事件原因調查工作鑑定報告。交通部高速公路局。

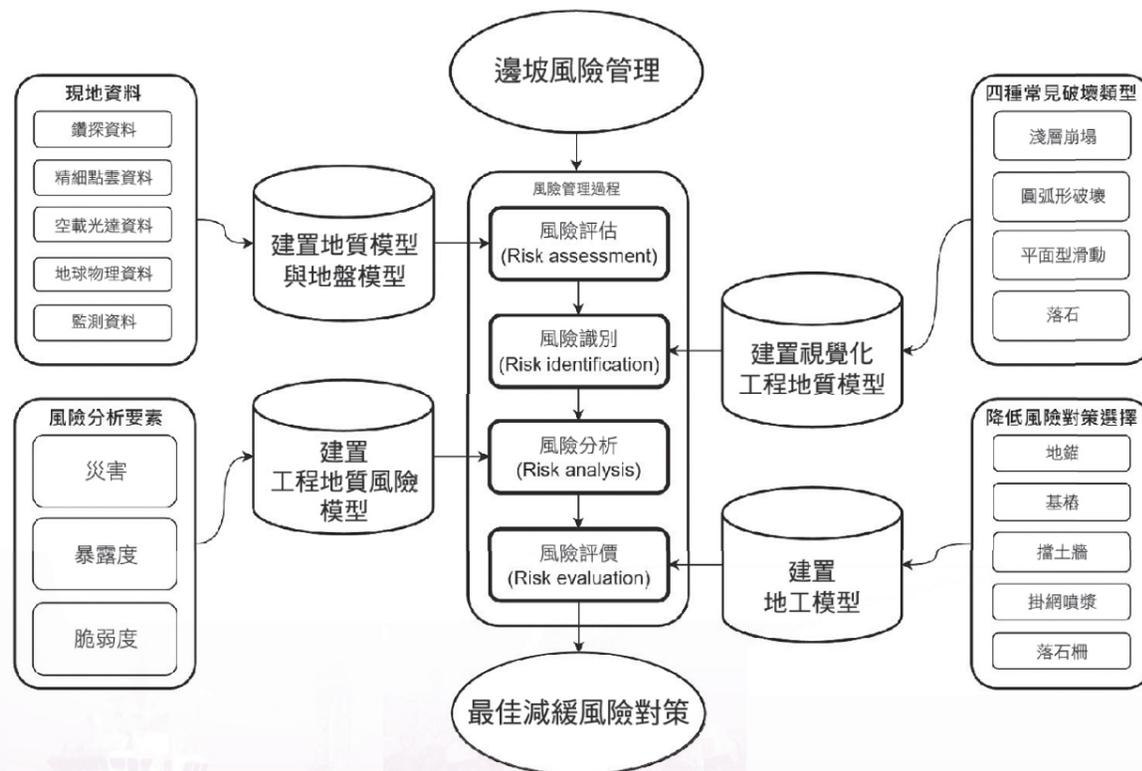


圖 11 視覺化模型在邊坡風險管理中的角色