

# 建構隧道數位孿生三維工程地質模型

邱家宏 倍思特工程顧問股份有限公司 / 應用地質技師  
國立臺灣大學土木工程學系大地組 / 博士生

黃詠智 國立臺灣大學土木工程學系大地組 / 博士候選人

林璋元 國立臺灣大學土木工程學系大地組 / 碩士

李佳翰 倍思特工程顧問股份有限公司 / 大地技師

王泰典 國立臺灣大學土木工程學系大地組 / 教授、大地技師、土木技師

## 摘要

三維地質模型受限於調查精度，傳統多按區域地質資料建構。隨著土木工程設計施工精細度提升、風險管理要求加大，更為精細、易於溝通理解的三維工程地質模型已逐漸成為工程計畫不可或缺的一環。建模工具軟體以及先進測繪技術的突飛猛進，更促進三維工程地質模型的發展，配合施工過程動態測繪所得，建立數位孿生三維工程地質模型，已基本上具備應用的條件，能夠近實反映隧道於規劃、設計、施工各項資訊以至於運營維護的狀態。本文以臺灣北部新建山岳隧道為案例，依據工程計畫推動階段與可獲得資料精細程度，展示多個三維地質模型與工程地質模型及應用，並呈現隧道淺覆蓋段數位孿生三維工程地質模型，以及比較不同模型預測岩性界面的差異，提供相關工程應用參考。

## 一、前言

工程地質資訊的瞭解與掌握是如期、如質、如度達成工程計畫目標的關鍵要素，而其精度不足、甚至存在誤差或錯誤，造成工程計畫延宕、經費追加甚或生命財產損失情事時有所聞，如國道 5 號雪山隧道、臺鐵新永春隧道及蘇花改觀音隧道等（王泰典與黃燦輝，2016）。建築資訊模型（Building Information Modeling, BIM）普遍應用於土木工程之際，設計條件誤差以及施工性不佳問題獲得大幅改善

後，傳統二維平面、剖面方式呈現的工程地質圖資精細程度不足、難於突顯工程地質不確定性對工程計畫可能造成風險、不利於工程團隊充分溝通與事先準備的缺陷畢露，工程界對工程地質模型（Engineering Geology Model, EGM）、特別是三維工程地質模型的要求大幅提高。國際工程地質與環境協會（International Association for Engineering Geology and the Environment, IAEG）遂於 2024 年頒布由其轄下第 25 委員會建議的「建設計畫工程地質模型發

展與應用準則」，說明運用科學方法發展工程地質模型的相關建議。其中關鍵的內容包括工程地質模型建立過程、工程地質模型的架構、工程地質模型的不確定性、地質與工程結合與地質模型的工程特徵等。

大地工程如隧道、大壩、橋梁與高樓基礎對於工程地質資訊，包括地質材料、構造、地下水等的瞭解與掌握要求甚高，特別是線狀分布的隧道工程，規劃設計階段受限於地形與計畫期程等因素，對於隧道沿線工程地質特性難於充分瞭解，常需配合計畫生命週期推展，逐步整合各種技術調查成果，發展或是修正工程地質模型，突顯建構三維工程地質模型的優勢。

本文以臺灣北部麓山帶沉積岩區新建隧道工程為例，介紹三維工程地質模型的發展與精細化過程。為說明之便，三維工程地質模型分為 2 個尺度介紹（圖 1），即涵蓋整個隧道的大範圍模型以及隧道通過淺覆蓋段的局部範圍模型，除搭配先進測繪技術採用數位孿生方式建模外，並考慮介接隧道開挖支撐分析與監測回饋分析所需數值模擬模型界面。期望透過本文之分享，提供相關工程應用參考。

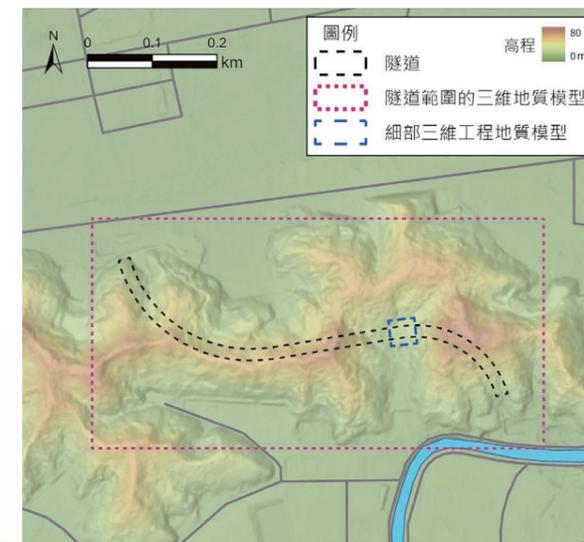


圖 1 三維數位孿生工程地質模型位置圖

## 二、文獻回顧

多種地質資料如區域地質圖、路線地質調查、地球物理探勘與鑽孔探查成果整合，繼而對資料缺乏區域進行地質推估為早期經典的工程地質模型發展途徑 Wu 等（2005），隨後 Stavropoulou 等（2007）結合地質統計與數值分析方法，評估隧道周圍岩體的空間變異性，提供開挖支撐設計依據。隨著測繪技術進步，高精度且寫實的測繪成果逐漸應用於工程地質模型的發展，例如 Vanneschi 等（2014）結合地面雷射掃描（TLS）點雲與傳統地質調查成果，建立地下大理石採石場的三維地質模型；Gaich & Pischinger（2016）利用攝影測量技術進行隧道數位地質繪圖。也有透過隧道開挖面影像將岩體特徵進行座標化，提升資料收集的效率與準確性（Thum & De Paoli, 2015）。王泰典等（2016）應用地面光達掃描開挖中岩石隧道，快速量化評估開挖面工程地質特性及開挖支撐效能。Wang 等（2024）提出透過地質特徵點與線資料，利用局部克里金插值法實現了快速且高精度的建模，以應對隧道工程中開挖地質研判時效性的需求。數位孿生三維地質模型亦可以運用於工程風險評估與地質不確定性，Soldo 等（2019）強調了地質條件在地下開挖中的不確定性，指出地質資料須在嚴謹的地質概念框架內進行解釋，以避免錯誤的判斷，凸顯了工程地質模型建構在風險管理中的關鍵作用。Xiong 等（2018）提出了一種多尺度工程地質模型的發展方法，將地質模型分為區域、工址與露頭 3 種調查尺度，以應對隧道工程不同階段的需求。三維工程地質建模在隧道與地下工程領域已從早期的資料整合階段，發展至結合多種數位化與測繪技術的綜合性應用。既有研究不僅提升了工程地質模型的精確度與效率，更已經應用於工程設計與風險評估，並朝向數位孿生與即時性工程地質模型修正與工程地質特性預測發展。

### 三、三維工程地質模型建構工具與方法

多種套裝軟體或自行撰寫程式皆可做為建立三維工程地質模型的工具，目前市面上常見的軟體包含 GOCAD、Leapfrog Geo、Petrel、RockWorks、JewelSuite 等，都具備了不同的三維工程地質模型建構、評估與視覺化展示功能，並提供程度不一的建模品質管理以及地質不確定描述選項。表 1 列出數種建構三維工程地質模型常見的軟體類型與特性。

建構三維工程地質模型需自蒐集以及探勘獲得的岩性、構造、地球物理特性、岩體工程特性參數等資料中，按資料原用的座標資料與物理量空間分布，轉換為建構工程地質模型所需地理座標系統，其中涉及資料數值化或數位化、以及必要的篩選與修訂等判斷，例如座標對位、座標轉換、測線或鑽孔位置修正與施工紀錄的補遺等。表 2 列出三維工程地質模型建模常見之資料種類與來源，以及其中可獲取的幾何與物理資訊種類。需注意這些資料呈現不同的點、線、面空間分布特性，不僅精度與解析度各不相同，代表的意義有時亦不能透過簡單公式直接轉換，亟需要具有完整地質訓練以及大地工程經驗的人員，經過充分討論篩選判斷。

表 1 常用三維工程地質模型軟體類型與目的

軟體/程式	軟體類型與目的
GOCAD	三維工程地質模型建構與展示
Blender	
Cloud Compare	
Meshlab	
ArcGIS Pro	地理資訊系統 (GIS)
QGIS	
AutoCAD	工程規劃設計資料
Excel	數值化與數位化資料處理
Python	
FLAC 3D	數值模擬

表 2 資料蒐集種類與來源表

資料種類	資料來源	幾何種類
量測位態點	地表地質調查	點
岩性分界、RQD、力學試驗	鑽探井錄	
地質圖、地質剖面、地球物理剖面	平面或立面資料	線、面
開挖地質影像及地質紀錄	隧道竣工紀錄	
地形	數值地形及等高線	點、線、面
設計圖	工址規劃設計	
異狀位置圖	檢監測紀錄	

工程地質調查過程，蒐集及研判既有地質資料是有效且可以快速掌握工址地質狀況第一步，可對一工址範圍有初步的地質模型概念，提出後續補充地質調查的方向。三維工程地質模型在隧道選線、規劃、初步設計、細部設計、甚至是維護管理階段皆可導入，不限於隧道處於生命週期那個階段，但從資料整合以及價值工程觀點，愈早著手建立對計畫永續發展的整體效益愈顯著。以隧道工程為例，工程地質模型關注隧道沿線土岩邊界、淺覆蓋與洞口段、地下水分佈、地層或岩層對比、地質弱帶或構造分佈、岩體參數到運營中的異狀位置等，發展三維工程地質模型的第一步即是要自蒐集所得資料進行研判分析，找出需要的資料進行數值化、座標化及視覺化處理，繼而進行初步的品質管理，標註不確定、存疑的基本資料，甚至是剔除錯誤或不適宜資料，以避免產生錯誤或不合理的三維工程地質模型，或避免當結果出現歧異無法進行檢核的困境。建構於全域地理座標系統中的三維工程地質模型搭配上關注範圍的隧道模型，可以直觀地展示出隧道位置的地質條件，隨時依據計畫推動過程新資料的加入進行補充、研判、修改，必要時結合施工監測過程取得的隧道圍岩變位等資料，整合檢視隧道行為，提供進一步數值模擬回饋設計的依據；甚至是結合維護管理過程結構安全檢測取得的襯砌異狀分布，評估隧道結構安全等級與服務性能。

圖 2 為本文所使用之數位孿生技術建立三維工程地質模型流程，透過使用三維工程地質模型軟體、地理資訊系統、工程規劃設計軟體，以及整合部分自行發展程式輔助，進行資料處理與成果檢核以及模型的建構。

### 四、隧道三維工程地質模型

案例隧道位於臺北盆地東南方之丘陵地，隧道總長約 680 m，按區域地質圖幅說明，隧道通過地層為中新世晚期的桂竹林層大埔段，其岩性為厚層泥質砂岩，間夾薄層頁岩，隧道周圍沒有地質構造通過呈一單斜樣貌，附近地層平均位

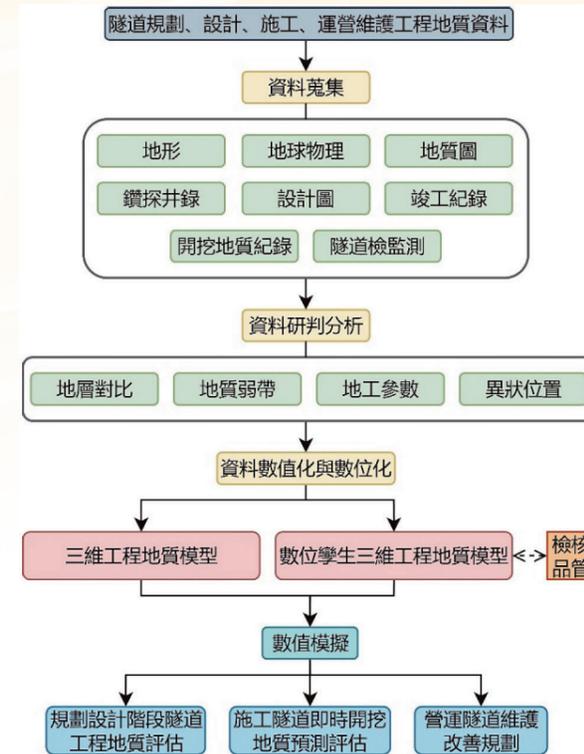


圖 2 數位孿生三維工程地質模型流程圖

態為 N74°E/21°S (走向/傾角)，整體而岩地質條件較為單一 (圖 3)。

為說明工程地質模型精細程度的差異，以下首先按區域地質資訊與高精度數值地形辨識尺

度分別建立三維地質模型，繼而納入隧道規劃設計階段地質調查資料建立三維工程地質模型，並依據施工後開挖面揭露地質資料修正全隧道三維工程地質模型；最後以一淺覆蓋段為例，透過局部範圍模型提供詳細探討。按製圖與模型發展順序，后述模型尺度可整理為 (1) 區域地質尺度、(2) 數值地形辨識尺度、(3) 設計調查尺度與 (4) 全隧道開挖地質紀錄尺度，而後者並再區分為以數輪進開挖地質紀錄平均其位態與岩性特徵、以及每輪開挖断面影像及開挖面地質繪製紀錄為基礎資料產製的 (5) 數位孿生三維工程地質模型。

圖 3 為按案例隧道所在位置的區域地質圖幅套疊地形產製的三維地質模型，模型中已納入隧道路線，所能提供的資訊有限。圖 4 為透過高精度數值地形進一步按沉積岩中不同岩性的差異侵蝕程度判釋岩層線 (層面跡線)，搭配區域地質圖幅與地表地質調查成果推論岩性空間分布，據以計算層面位態，據以建立三維地質模型 (邱家宏，2018；邱家宏與李彪，2020)。

案例隧道規劃設計階段進行地表地質調查、鑽孔探查以及地電阻剖面影像法，依據調查結果將隧道鄰近地層岩性進一步劃分為 4 種，分別為砂岩、頁岩、砂岩為主的砂岩與頁岩互層、

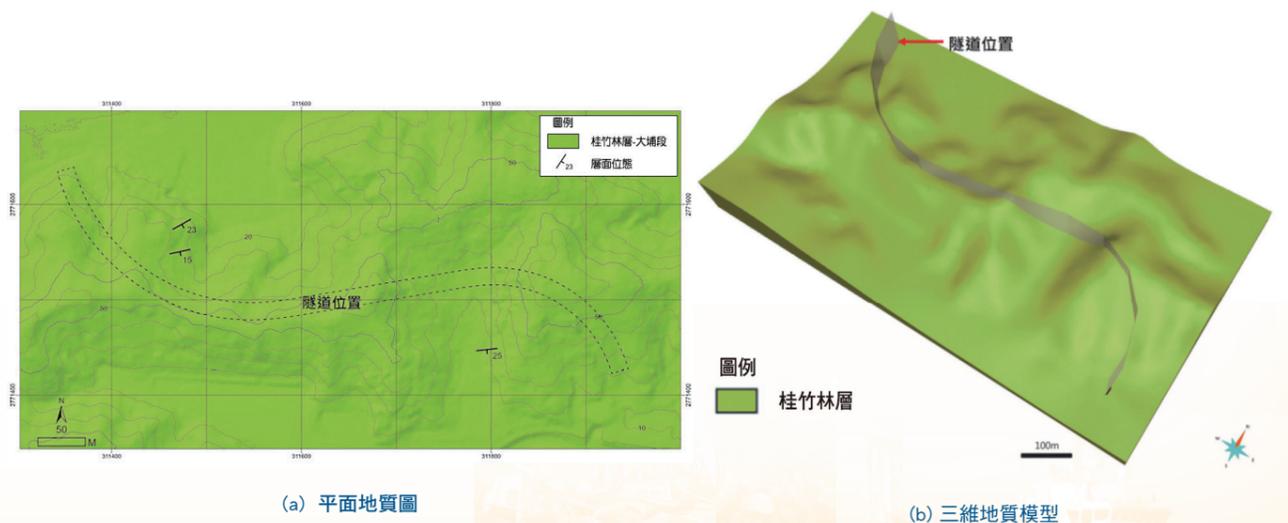
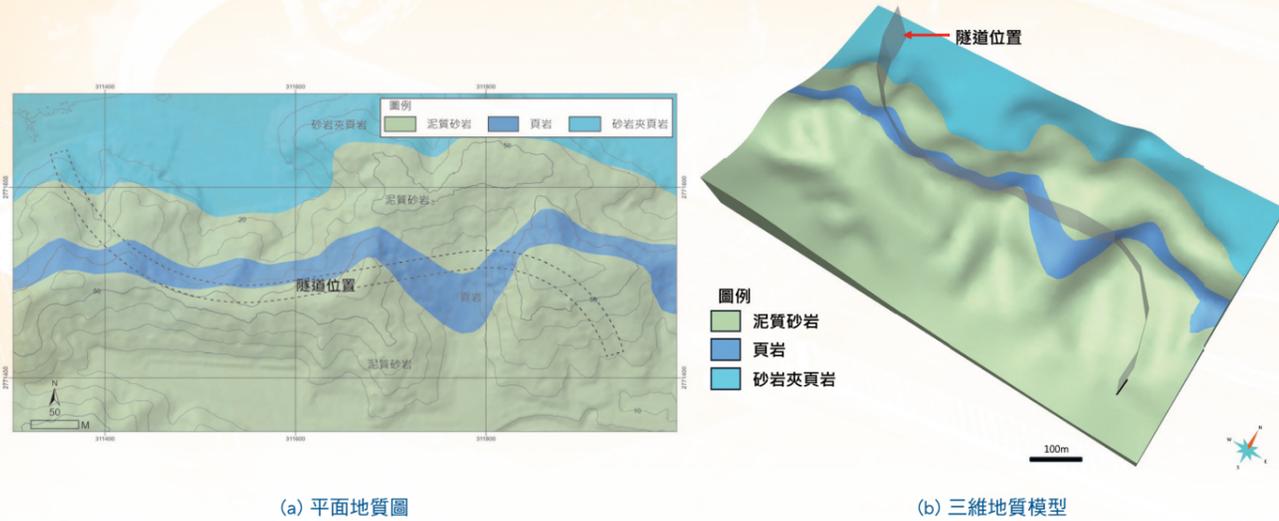


圖 3 區域地質尺度



(a) 平面地質圖

(b) 三維地質模型

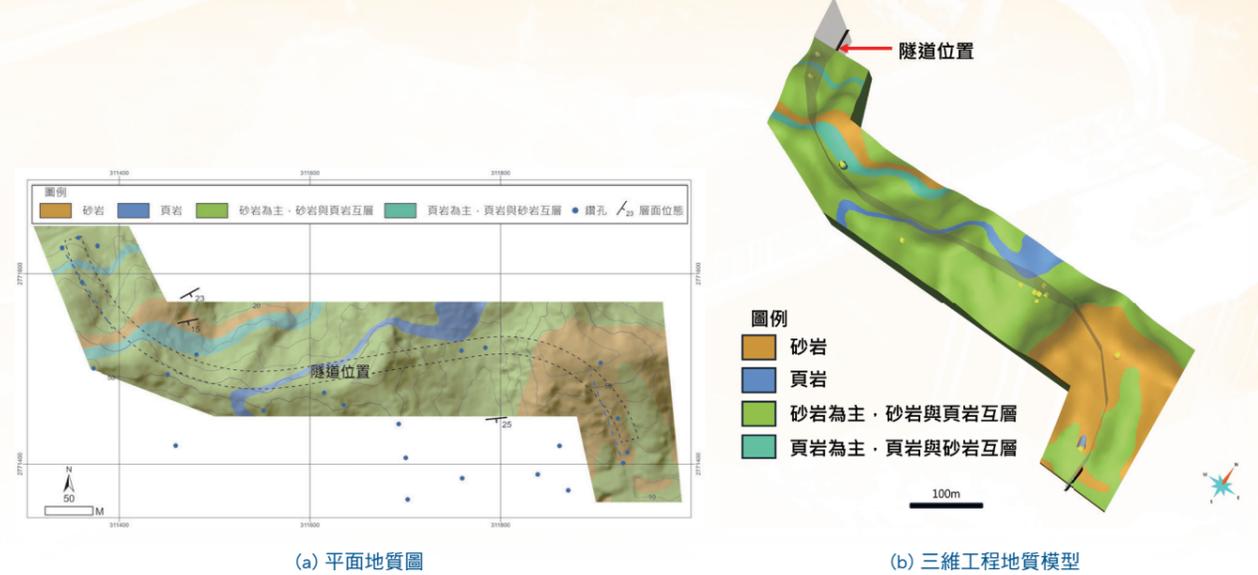
圖 4 數值地形辨識尺度

以及頁岩為主的頁岩與砂岩互層。層面位態在隧道北洞口為 N61°E，而向南洞口漸變為 N70°E，傾角介於 17° 至 27°S，圖 5 為設計調查尺度之成果，包含設計階段地質調查平面地質圖 (圖 5(a))，用以建立的三維工程地質模型 (圖 5(b))，其中展示岩性空間分布，並將各岩層界面之位態資料標示於隧道地質剖面圖 (圖 5(c))。圖 6 則為依據隧道施工後開挖面地質紀錄修繪的三維工程地質模型，實測的開挖面出露岩性及層面位態經統計，走向為 N77°E 至 N85°E，傾角介於 20° 至 27°S。相較於圖 5，岩性同樣分為 4 種，但依據現場研判分為泥質砂岩、泥質砂岩與頁岩互層、泥質砂岩為主夾頁岩與泥質砂岩、頁岩與風化砂岩夾礫岩。

比較圖 5 與圖 6，三維地質模型除了岩性及層面位態的差異外，透過前期隧道開挖面揭露資料更直觀地反映實際開挖情況，使後續施工研判更直觀；設計階段地質剖面認為隧道會通過較多的岩段，即岩層走向與隧道有較大的夾角，然實際隧道開挖除了隧道洞口兩端外，隧道中段則沿著岩層走向挖掘，其中頁岩與風化砂岩夾礫岩，依據開挖紀錄及所建構的三維工程地質模型可知屬沉積尖滅的岩層，僅出現在隧道中段偏東側 (圖 6(c) 中以淡黃色標示的里程 0k+470 至 0k+600 區段)。

為建構隧道逐輪開挖的數位學生三維地質模型，呈現開挖面附近隧道寬度尺度的精細工程地質資訊，需先求得隧道各輪進出露開挖面於三維空間位置，以利後續據以描繪地質資料。圖 7 標示案例隧道中關注的淺覆蓋範圍，並標記作為預估表土層範圍與岩層分布之輪進數量 (共 39 輪，包含 1 輪至 N39 輪)、輪進位置及間距。橙色方框為關注及預測的範圍，約略包含隧道未開挖方向與側壁約 0.5D 範圍。此區段周邊有 4 孔鑽孔亦可作為分析及比較使用。利用隧道設計開挖斷面得知隧道尺寸及上半開挖範圍 (128.3 m<sup>2</sup>)，以開挖斷面影像中桁架支撐頂拱及兩側支保腳位置進行空間對位及幾何校正，並檢核現場繪製的開挖面地質紀錄，獲取土岩邊界、岩性邊界以及利用套色區分出岩性種類 (圖 8(a))，透過設計圖中隧道線型與斷面幾何，賦予校正斷面影像中可參照的全域地理座標，再選擇具有代表性的斷面位置建構岩性分布三維柵狀圖，除方便展示外，更可以確認並即時標定其岩體特性隨開挖輪進位置的幾何分布 (圖 8(b) 與圖 8(c))。

淺覆蓋段的岩層界面 (層面) 以及土岩界面 (圖 9) 則提供良好的討論題材。開挖面所見岩層界面多為規律，即在不同開挖面量測該層面可

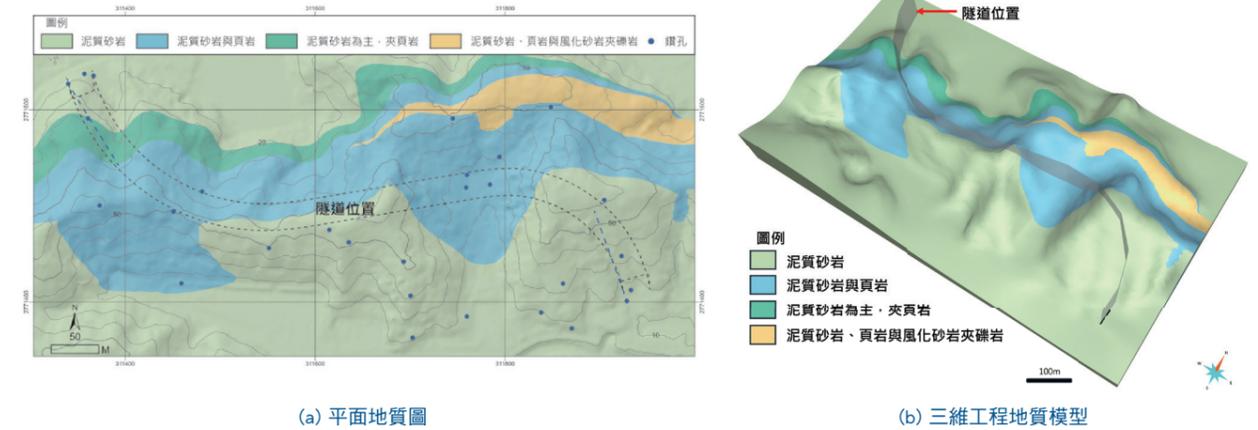
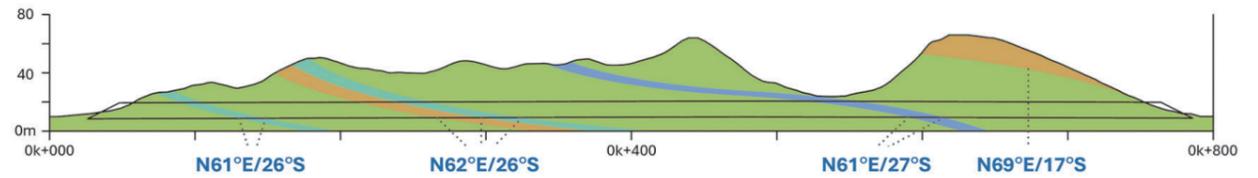


(a) 平面地質圖

(b) 三維工程地質模型

(c) 隧道地質剖面圖

圖 5 設計調查尺度

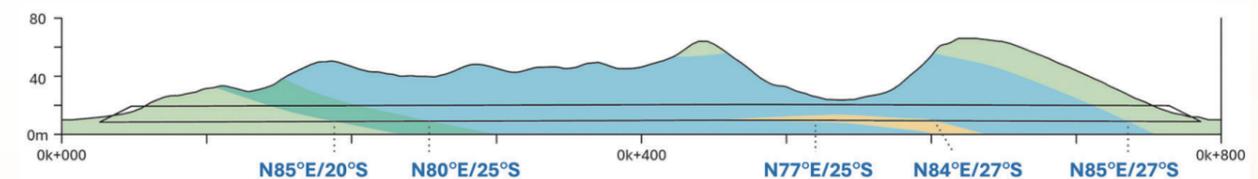


(a) 平面地質圖

(b) 三維工程地質模型

(c) 隧道地質剖面圖

圖 6 全隧道開挖地質紀錄尺度



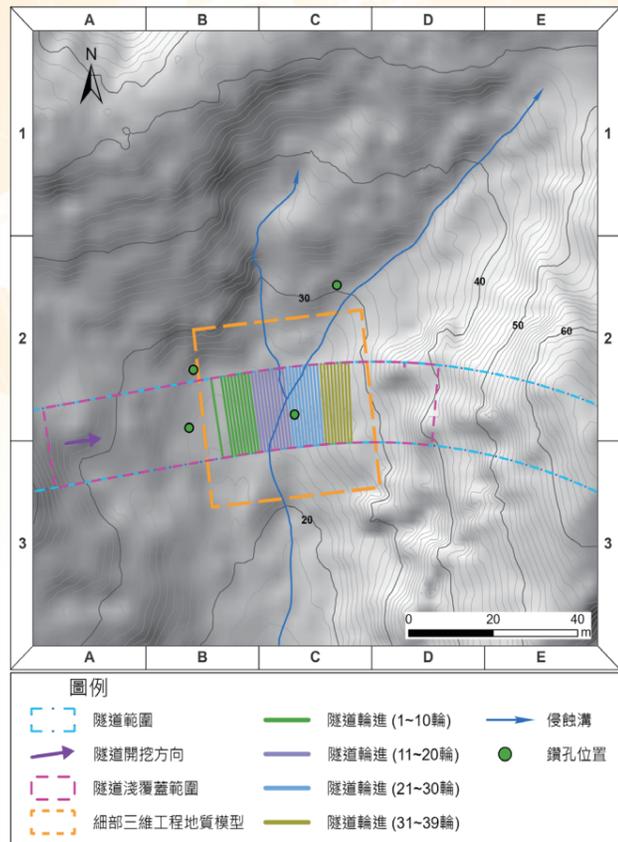


圖 7 逐輪開挖地質紀錄範圍

以獲得相似的位態成果，可與實際量測結果加以比較。而土岩界面幾何分布不如岩層面規律，開挖成果與經驗及學理預測略有出入，以下對前述二種情況採用不同方式預估未開挖之區段層面及土岩界面的結果進行討論。

圖 9 中岩性界面 A 與岩性界面 B 有相近的位態，分別為 N79°E/29°S 與 N72°E/30°S，故圖 10 僅以岩性界面 A 預測成果與後續實際開挖量測所得進行比較，圖中將 1 至 10 輪以黑點標示出於開挖面地質研判成果岩層出露之端點，進行平面擬合得出位態為 N82°E/27°S、 $R^2 = 0.9$  之平面，與該區段量測的 44 組平均值約略相同。再將 1 至 39 輪以綠點標示出於岩層出露之端點進行平面擬合，得出 N79°E/29°S、 $R^2 = 0.9$  之平面，亦與整體區段量測 160 組平均值 N81°E/27°S 幾乎一致。由此可知現場量測值與平面迴歸的位態相近，若現場開挖環境不佳亦可以用計算的方式加以補充。為進一步比較兩平面擬合成果，將 1 至 39 輪的擬合成果扣除 1 至 10 輪的擬合成果，並比較擬合平面的高程差異，其值介於 0.5 m 至 -0.7 m，且呈現越往東側

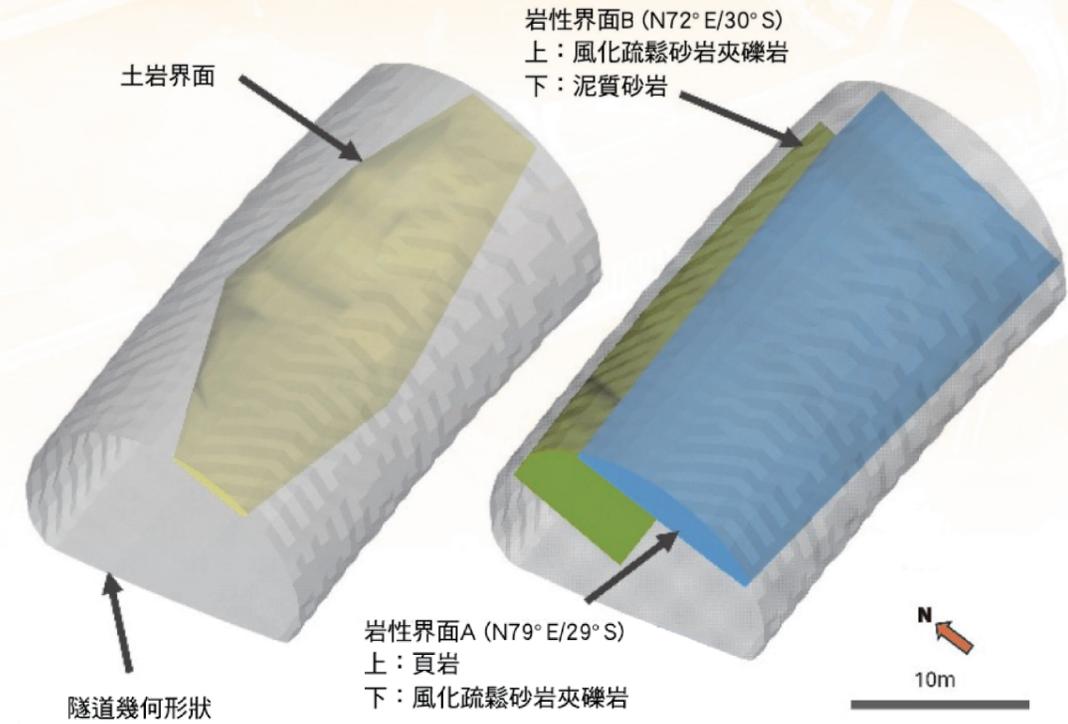


圖 9 隧道與地質材料幾何關係 (左) 土岩界面；(右) 岩性界面 A 與岩性界面 B

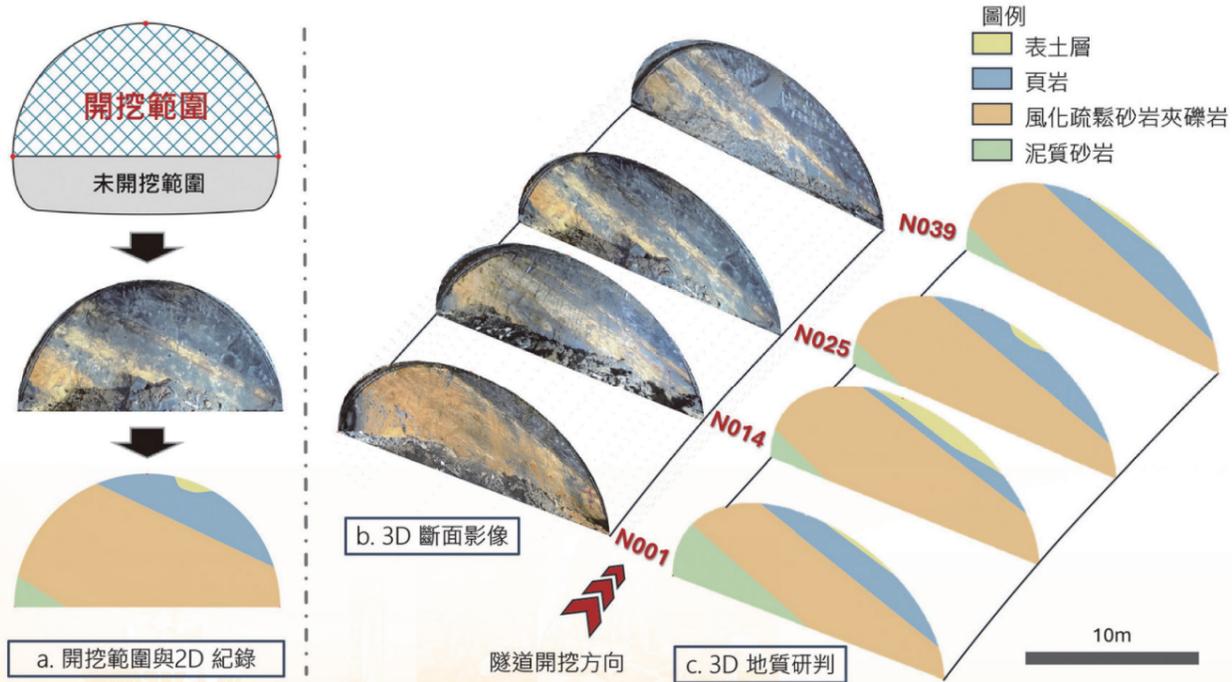


圖 8 隧道地質逐輪研判流程圖 (a) 隧道開挖範圍與紀錄；(b) 3D 斷面影像與 (c) 3D 地質研判

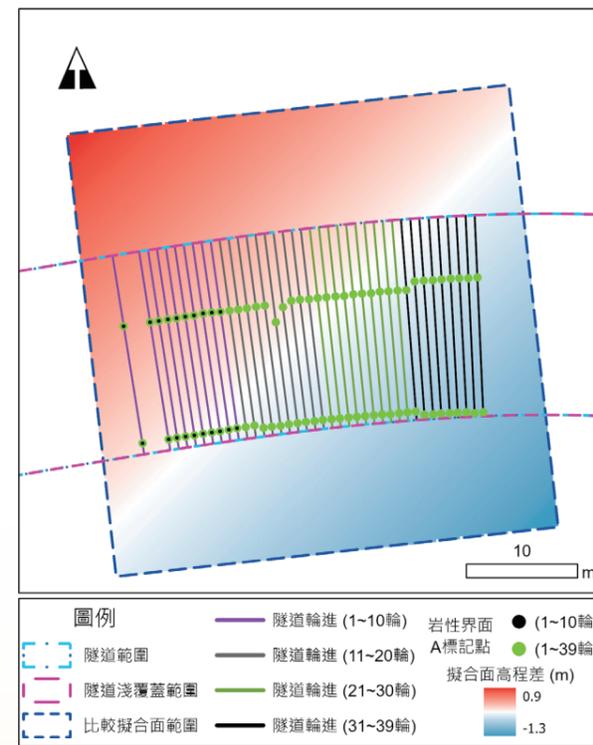


圖 10 岩性界面 A 預測成果比較

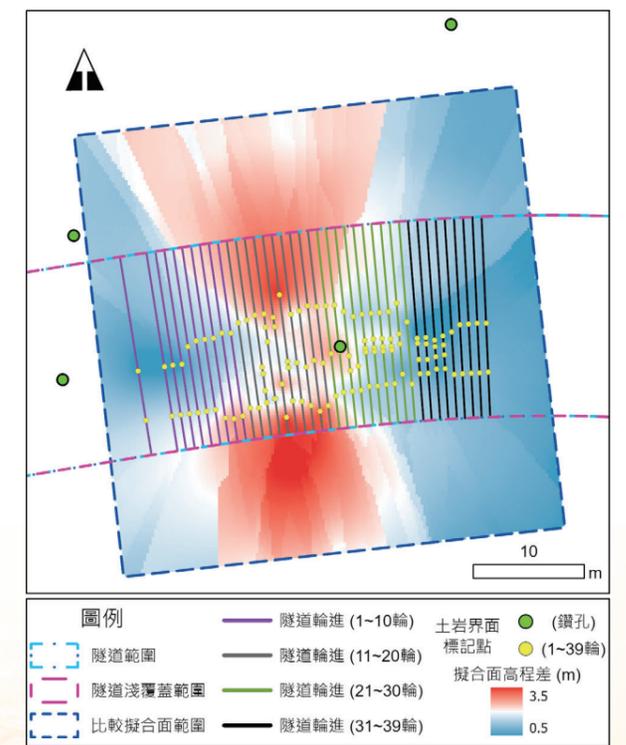


圖 11 土岩界面預測成果比較

開挖擬合高程差越低的情況，即預測值比實際開挖的岩層界面略低。由於本隧道段屬於淺覆蓋區，土層厚度與分佈對隧道開挖的穩定性與安全性至關重要，故於隧道的設計階段即對周邊進行鑽探，主要目的就是探查土岩界面位置，可以提供隧道施工前對於土岩界面的掌握，圖 11 利用 4 孔補充鑽孔（位置以綠點標示）探查資料與 1 至 39 輪實際露出範圍之位置（以黃點標示），搭配迴歸克利金法（Regression Kriging）展示高程差異，曲面高程差異介於 0.5 m 至 3.5 m，顯示除鑽孔探查

預測值比實際開挖的土岩界面較淺以外，按鑽探資料預測在隧道開挖頂拱不會遇到表土層，亦與實際情形有所差異。另比對數值地形以及地形等高線可以觀察到蝕溝位置（圖 7），可能是在 11 至 20 輪的範圍有比較大的高程差異的因素之一。

圖 12 呈現淺覆蓋段隧道數位孿生三維地質模型，地表面與隧道斷面賦予全域地理座標後，可將逐輪開挖後取得的開挖面影像及地質研判紀錄與三維工程地質模型整合，並呈現土岩界面及岩層界面之預測成果。

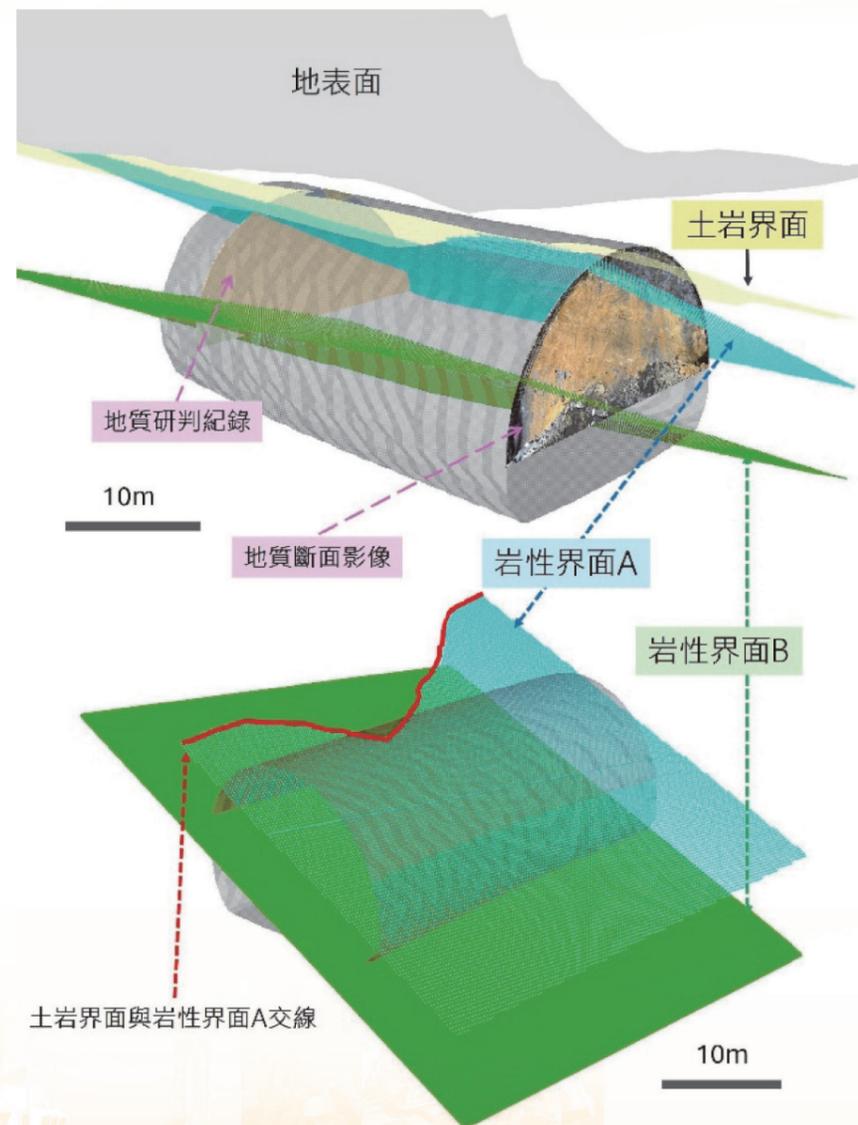


圖 12 隧道淺覆蓋段數位孿生三維地質模型

## 五、結論與討論

本文以臺灣北部新建山岳隧道為案例，依據工程計畫推動階段與可獲得資料精細程度，展示 5 個三維地質模型與工程地質模型及應用，包括於規設階段可先建構的區域地質尺度與數值地形辨識尺度的大範圍三維地質模型，以及施工前透過地調資料建構的設計調查尺度模型、及按全隧道開挖地質紀錄尺度的修繪三維地質模型，最後針對隧道淺覆蓋段的數位孿生三維地質模型，比較不同模型預測岩性界面的差異。

三維地質模型的建構可以因應工程地質調查尺度與不同探查目的性，自既有的區域地質、地形資料，以及工程計畫的設計、施工以及運營階段獲得的多元資料，將製圖及地質模型比例尺逐漸加大，亦依照大地工程需求，針對特定地點建構局部、比例尺較大的三維工程地質模型。

隧道施工前的地下地質推估仰賴鑽孔探查與地球物理探勘資料，鑽孔與測線的座標對於調查成果推估土岩界面、岩層界面、地質構造的位置有重要的影響；而隧道開挖面影像校正所標定的絕對座標位置需考慮隧道設計斷面與縱坡，可能因實際開挖範圍有些許誤差。若能配合隧道現場斷面量測或影像掃描資料，可以提升影像校正的測量精度，提高三維工程地質模型應用於預估開挖面後方岩性分布以至於岩體工程特性的準確度。

隧道工程取得的開挖面影響以及詳實的地質紀錄為地真資料（ground truth），亦為建構精細數位孿生三維工程地質模型最佳依據，不僅提供即時的前進面地質預估與數值模擬所需邊界條件，亦為隧道營運階段維護管理的寶貴資訊。

## 參考文獻

1. 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測評估新技術，大地技師，第 12 期，p.14-27。
2. 王泰典、黃燦輝（2016）：從雪山隧道談臺灣的岩石隧道建設與工程地質，地質，35-2，6-11。

3. 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。
4. 邱家宏、李彪（2020）：應用 LiDAR 數值地形模型精進工程地質圖—以沉積岩區為例，大地技師，第 20 期，p.66-71。
5. Gaich, A., & Pischinger, G. (2016). 3D images for digital geological mapping: focussing on conventional tunnelling. *Geomechanics and Tunnelling*, 9(1), p.45-51.
6. International Association for Engineering Geology and the Environment, Commission 25. (2024). Guidelines for the development and application of engineering geological models on projects (Version 2.0). International Association for Engineering Geology and the Environment.
7. Soldo, L., Vendramini, M., & Eusebio, A. (2019). Tunnels design and geological studies. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 84, 82-98.
8. Stavropoulou, M., Exadaktylos, G., & Saratsis, G. (2007). A combined three-dimensional geological-geostatistical-numerical model of underground excavations in rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 40(3), 213-243.
9. Thum, L., & Paoli, R. D. (2015). 2D and 3D GIS-based geological and geomechanical survey during tunnel excavation. *Engineering Geology*, 192, 19-25.
10. Vanneschi, C., Salvini, R., Massa, G., Ricucci, S., & Borsani, A. (2014). Geological 3D modeling for excavation activity in an underground marble quarry in the Apuan Alps (Italy). *Computers & Geosciences*, 69, 41-54.
11. Wang, K., Guo, W., Shi, S., Zhao, R., & Wang, X. (2024). 3D geological model of a tunnel for improving construction measures: A case study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 42, 975-989.
12. Wu, Q., Xu, H., & Zou, X. (2005). An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration. *Computers & Geosciences*, 31(1), 35-43.
13. Xiong, Z., Guo, J., Xia, Y., Lu, H., Wang, M., & Shi, S. (2018). A 3D multi-scale geology modeling method for tunnel engineering risk assessment. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 73, 71-81.