

長隧道工程之地質調查技術應用案例探討

曾大仁¹、侯秉承²、魏建生³

^{1、3}國道新建工程局

²中興工程顧問股份有限公司

摘要

地質為隧道工程一重要考量因素，亦為隧道施工最大的風險因子，但隧道工程地質調查工作有難以克服之實質條件限制下，具有不易一次達到整體地質構造與水文模式完全清楚之特性，通常需採階段性持續補充方式進行，在長隧道且高覆蓋之隧道工程中，更難由選線規劃、設計階段之調查成果提供隧道施工所需足夠地質資訊，因此如何隨施工之進行應用各種地質調查技術，以提供完整地質參考資料便為一重要課題；台灣北宜高速公路雪山隧道工程全長12.9公里，全線穿越雪山山脈，其覆蓋深度300公尺以上的路段達10公里，最深的覆蓋深度約為700公尺，為世界級之隧道工程，本文以雪山隧道工程施工為案例，對各階段之地質調查工作作一分析與探討，以提供未來台灣長隧道工程之地質調查技術應用時之參考。

關鍵詞：雪山隧道、地質調查、長隧道、TSP、水平長距離鑽探、前進探查

一、前言

雪山隧道為一雙孔雙向之高速公路隧道，長12.9公里，穿越台灣雪山山脈北段，隧道除兩主坑隧道外，於其間下方尚置一導坑隧道。主坑間每1.4公里設有車行聯絡道，每350公尺設有人行聯絡道。沿線則設有通風豎井三座，自地表分別深達501，249，459公尺。隧道主坑直徑11.8公尺，導坑直徑4.8公尺，除洞口段採D&B施工外，均採TBM鑽掘施工。本隧道自1982年起即辦理不同階段之地質調查與研究，包括先期研究、可行性研究、路線評選、基本設計及詳細設計。於前述各規劃、設計階段均曾進行不同程度之地質探查，包括地表地質調查、衛星影像及航空照片判釋、鑽孔調查、震測探勘、槽溝及水平橫坑開挖調查等，透過這些不同階段之調查，建立隧道沿線之基本地質架構，並以之推估沿線地質平、剖面圖及岩體品質分級圖。自1991年及1993年導、主坑隧道分別動工迄今，因地質條件嚴峻，湧水量大，施工遭遇極大困難，致施工進度不如預期，然憑藉各參與單位之通力合作，配合施工過程不斷改善鑽探、灌漿技術及進行施工中補充地質調查，以充份了解開挖面前方之地盤狀況，業使施工進度獲得大幅改善，目前已完成開挖近百分之六十。雪山隧道雖尚未完工，但因台灣山多平地少，未來山岳地下工程仍多，雪山隧道規設期間之調查結果與施工期間迄今所曾利用之

各主要探查技術正提供未來類似深埋長隧道工程地質調查之參考。

二、深埋長隧道地質探查之困難性

地質條件係影響隧道工程成敗之最大影響因子，舉凡施工安全性、工期、造價無一不受其控制，設計階段若能事先精確掌握隧道地質狀況，施工可能遭遇的困難問題，將可透過事先提出之對策妥予解決。然而，深埋長隧道之地質調查工作，於規劃及設計階段，往往受限於探查技術本身精度以及天然條件限制，而無法定點定量精確預測隧道高程困難地質段之位置與長度。Prokopovich(1972)曾詳細比較透過地表調查及實際隧道開挖所獲致之節理與斷層數量差異發現，在一總長3.5公里之隧道範圍內，二者之數量差異可分別高達20.6倍及5.9倍，是故，深埋長隧道地質探查之困難性由此可見一斑。

以設計階段常使用之鑽探工作為例，由地表淺鑽孔所獲得的資料常因地質條件的快速變異而不易準確研判，而其在深埋長隧道之地質研判最易發生，而由地表進行深孔地質鑽探所需費用不貲，且常因經費之限制而無法於隧道沿線鑽取足夠之長鑽孔以為地質研判之輔助。是故，隧道沿線少數長鑽孔所能提供之地質資料相較於隧道之長度，僅能視為一垂直線性資料，對整體地質構造之推估貢獻極少，僅能做為地表地質調查所建立之地質構造模型之檢核驗證參考或對特殊地質段作一詳細且精確之地質確認檢核用。至於實際隧道所可能遭遇困難地質之位置與寬度等資訊提供，雖說透過地表地質調查結果，可針對所研判之斷層等地質構造進行較淺部之鑽探確認，並據此推估其與隧道間之空間關係，但由於斷層之延展與厚度變化常因不同岩覆與地質條件而有不同，變化不易掌握。又如隧道可能承受之地下水壓量測調查，於垂直長鑽孔中往往僅能藉由水位觀測或水壓計量測之，惟於複雜地質構造條件下，常發生對地下水分層不易掌握或深孔封層技術不良之情況，而對地下水壓之估計失準。因此，現階段地質探查技術之應用方式以及投注調查經費多寡與預期獲致結果間落差之認知，確有重新調整之必要。

三、雪山隧道規設階段之探查與檢討

雪山隧道規設階段之地質調查工作及數量如表一，其地質調查費用約佔工程費用0.9%，由規設階段的地質調查成果獲得隧道沿線之地質模式、岩性分佈、岩盤強度、構造特徵、湧水概估等。相較目前完成之開挖段地質與規設階段之研判，對岩盤品質變化之趨勢、岩性之分佈、主要斷層之位置、總湧水量之預估等均略在調查研判結果之內，但對主要斷層之寬度、次要斷層、較大規模之剪裂帶及湧水等之定點定量預估則尚有差異。就雪山隧道此一具相當規模之深埋長隧道而言，規設階段受限岩覆或調查精度所致之無法避免之盲點，按原調查理念，均應透過導坑之開挖及施工中輔助地質調查等，予以驗證或補足，以供後續工程施工規畫之參考。

表一：雪山隧道規設階段地質調查工作

	先期研究	可行性研究	路線評選	基本設計	細部設計
地表地質調查	✓	—	✓	✓	✓
遙感探測	—	—	✓	✓	—
航照判釋	—	—	✓	✓	—
鑽孔調查	16孔, 1145m	—	15孔, 1037m	38孔, 2606m	12孔, 792m
震測探勘	—	—	9條, 12190m	隧道沿線, 13110m	—
槽溝開挖	—	—	—	7處, 2100m ³	1處, 30m
橫坑開挖	—	—	—	1處, 150m	—

雪山隧道全線均位於台灣中央山脈地質區之雪山山脈地質亞區，是由已褶皺之第三紀沉積岩地層構成，屬造山帶中之褶皺衝斷帶。區域性之褶皺軸及逆衝斷層之走向均大致平行山脈走向，即東北東-西南西之趨向（TREND）。除褶皺與逆衝斷層外，造山運動亦產生橫切地層走向之橫移斷層及在局部區域產生正斷層。從大地構造型態而言，雪山隧道沿線地質複雜多變。本隧道在規設階段之地質調查項目包括地表地質測繪、遙測判釋、鑽探以及地球物理探查等。其中地表地質測繪工作是各項調查項目中傳統而必要之工作，它將地表及地下各項分散之調查資料，透過地質模式之建立而相互串聯起來；而其他調查項目則是輔助蒐集資料或驗證地質構造模式之用。

雪山隧道在先期研究及路線評選階段對隧道鄰近地區即已進行相當深入之地質調查研究。由於隧道岩覆深厚，地質調查係從野外地質測繪做起，同時輔以遙測及航照判釋，供合理地質構造解釋。在調查作業上是以地層調查及建立製圖單位為起步，進而調查地層之連續性及位態變化，以確定褶皺及斷層之位置，並據以製作區域地質圖。在調查過程中由於隧道沿線岩層露頭常呈零散分佈，調查過程中對於各地層單位之岩性特徵、化石及指準層之認定極為重視。再者，為確認地質構造模式之正確性，以及對疑似斷層或可疑線型存在確實度之驗證，亦配合施作相關地質鑽探及折射震測工作。最後在地質平、剖面製作時，亦特別考慮下列問題：地層厚度及體積之平衡、斷層位移之平衡、地形與地質之相容、構造發展順序與大區域地質資料之相容等。另在資料取得後之分析評估中，亦用構造均勻區之概念，將計畫區畫分為八個主要構造均勻分區，並以之分別進行岩盤弱面統計，以供岩盤品質評估之參考。構造均勻區係指地層位態變化大致相似之有限區域，可依區域主要構造單元劃分之。

綜合規設階段之地質調查成果，雪山隧道沿線於規設階段之地質評估可歸納出以下數項整體性地質結論，並與開挖結果相對比，概述如下：

- 1.沿線穿越之地層由老而新計有始新世之四稜砂岩、漸新世之乾溝層、粗窟層、大桶山層、及中新世之媽崗層與枋腳層，均屬台灣地質分區中之雪山山脈歷經輕度變質之沉積岩；其中四稜砂岩為細至粗粒之石英砂岩，強度可達300Mpa以上，主要分佈於隧道東段約四公里範圍內，其餘岩層強度

兼具排水功能，為供設計導坑斷面，曾對導坑沿線可能之湧水總量作一定量評估。依該評估，導坑之累積湧水量可達3.5 cms。但依目前之探查技術，規設階段尚無法達到沿線各點湧水量之精確評估，開挖面前方之定點定量湧水評估仍有賴施工中之超前探查予以探明。

四、施工中探查技術之應用與探討

雪山隧道工程中之導坑，按原設計理念，除完工後可供作維修及緊急逃生隧道外，於施工階段負擔超前地質探查之重任，以取得足夠地質資料供主隧道施工參考，並可同時作為主隧道開挖面前端地盤改良之用，故導坑本身即是地質調查技術應用之一環。另導坑開挖施工中所應用之超前探查技術尚包括於隧道中施作之隧道內震測法(TSP; Tunnel Seismic Prediction)及水平長、短距離前進鑽探，以及地表補充施作之地電阻影像剖面法，雪山隧道施工迄今之施工階段地質調查工作統計如表二。其中TSP係於隧道內利用高頻人工震波遇傳波材質變化時所產生之反射波偵測地層中可能的弱帶位置及寬度；而水平前進鑽探則係採用取心或不取心方式，由現場地質師根據所鑽獲之岩心品質或鑽進速率及迴水等進行開挖面前端地質判釋，以為後續開挖之依據。至於地電阻影像剖面法施作之目的，則為利用地層因構造變動或含水量不同所造成之地層材料電阻變化，而進行地電阻分布變化量測，以探查地下水包分布、範圍或可能出水點，以及可能之斷層帶位置與延伸。茲將就導坑內所採用之各探查技術之應用、成果及有效性探討敘述如后。

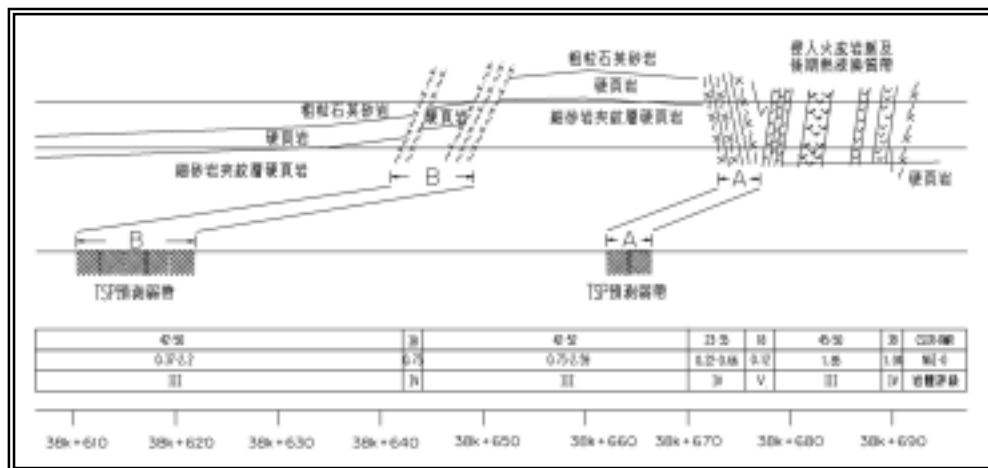
表二：雪山隧道施工階段辦理前進探測工作統計表

前進探測工法	統計長度/次數(範圍公尺)
不取心鑽孔	3633.1 公尺
取心鑽孔	85.7 公尺
HSP 震測	5 次(1065 公尺)
TSP 震測	22 次(3590 公尺)
水平長距離反循環鑽孔	229.95 公尺
水平長距離鋼索取心鑽孔	850.45 公尺
RIP 探測	4 次(6440 公尺)

4.1 隧道內震測法施測

考量隧道內震測法操作成本低、事前準備工作對隧道施工干擾小、正式施作時作業流程迅速有彈性，且可配合短程前進鑽孔探查作業施作時TBM停機時間操作，再者，根據國外施作經驗預期其對開挖面前方100至200公尺範圍內之地質弱帶具鑑別能力，故於兼具經濟與效率考量下決定採用為施工中地質調查方法之一。工作開始之初係採用水平震測剖面法(HSP-Horizontal Seismic Profile)，其原理與TSP極為相似，僅於施測佈置及資料處理上有所不同。本法於導坑施工過程中經5次施作並比對開挖資料後顯示，對於數公

尺寬之剪裂帶鑑別率稍低，研判應係接收器之接收頻率及其與隧道之耦合程度稍低。此後改採專為隧道設計具高解析度且可透過灌漿增加耦合度之TSP設備施測，或可提昇對規模較小之剪裂帶或物性界面之鑑別率。惟累計22次之試驗及與開挖記錄比對後發現，本探查技術於材料均勻或構造單純之環境中，對剪裂帶或水包之鑑識率較高，然於構造複雜多變之地質環境中，則因週邊反射訊號來源過多，導致無法有效解析。其所產生之誤差主要為反射面性質與位態不明確，以及速度估算誤差，因而造成弱帶與隧道交點估算失準（圖二）。依其施作原理研判有以下之基本限制：



圖二 TSP 探測結果與隧道開挖記錄比較圖

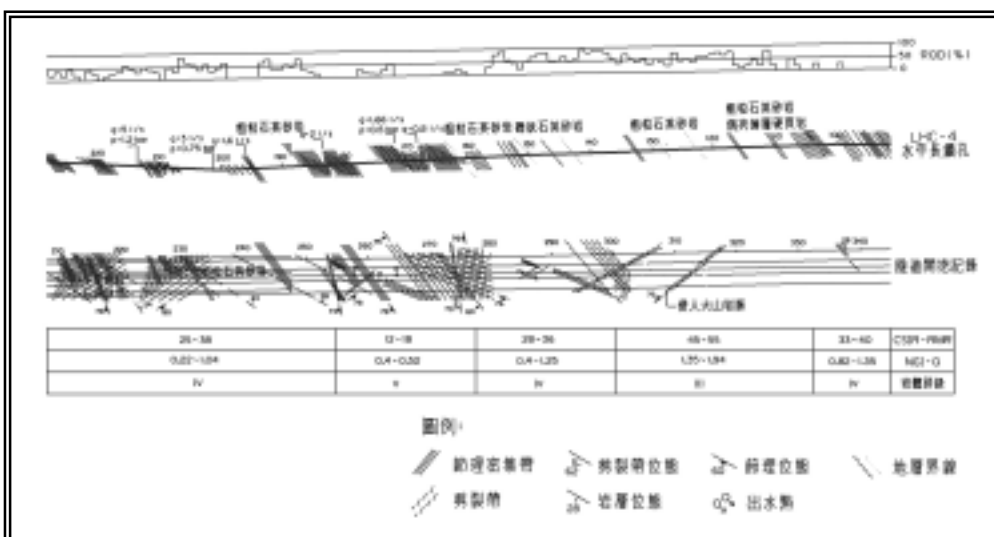
- 1.地層波速無法精確計算：受限於隧道空間，震源與受波器間展距不足，導致同一來源反射訊號時間差過小，無法進行速度分析，僅能以已開挖段之平均速度替代。
- 2.反射訊號代表意義不明確：所接收之訊號究屬岩性變化界面或存在剪裂破碎帶並無法明確定義，雖說依據理論分析反射波之波形、相位、頻率、尾波衰減特性及速度值變化等資料可研判反射界面之材料性質，但由於台灣地質構造複雜以及隧道內背景雜訊過多，不同來源之反射波相互干涉，導致前述波形特徵分析困難。
- 3.反射面位態無法直接推求：由於震源所發送之震波係球狀傳遞，故反射訊號亦來自四面八方，依目前資料處理方式並無法進行三維解析，因此反射面位態無法直接獲得，僅能依開挖面所量得之弱帶走向推求。
- 4.波行路徑非直線：由於地質材料變異性大，震波傳遞時常發生折射現象，致波傳路徑呈現曲線形式而非分析時所假設之直線路徑。

4.2 隧道內水平前進鑽探

隧道內水平前進鑽探依鑽進長度可分為長、短距離鑽孔兩種。短距離前進鑽探係使用TBM盾身後方所附之鑽機執行，其作業又可分為不取心一次探查及

取心之二次探查，其中不取心鑽探因工進快、耗時少而為預設之探查方式。使用初期由於開挖面地質構造複雜多變且破碎，且鑽機導孔與盾身上岩盤面交角僅 6° ，致常發生鑽孔鬆動坍塌現象，極不利於鑽進作業，不但耗時且坍塌孔嚴重。初期估計每施作一次30公尺之前進探查，須耗時達6-10小時。爾後經使用能克服該等不良地質狀況之新型鑽機，並經多次調整試驗，且增大鑽機施鑽角度至 10° 後，終能有效克服困難，每次施鑽達深度可達50公尺以上，且需時亦控制於6-8小時。

由於導坑TBM所附之鑽機無法與TBM開挖併行作業，且無法一次獲得足夠長度之地質資料供整體地質評估之用，遂於關鍵地質區段施作水平長距離鑽探作業。其施作方式係以大型鑽機置於側壁擴挖段或迂迴坑中進行鑽探取樣作業，此項作業期間並不影響TBM或短距離前進鑽探之作業。其採取工法計有鋼索取心與反循環套管鑽探，施鑽長度由103公尺至480公尺不等。經比對鑽孔岩心資料與實際開挖地質情況後發現，水平長距離取心鑽探透過檢視岩心品質以及鑽進過程中迴水與出水等狀況，能有效掌握開挖面前方之地質情況及可能之地盤破壞模式（圖三）；且透過提取岩心之岩石品質指數（Rock quality designation - RQD）之統計，亦可推估岩盤品質狀況；根據統計結果，當RQD百分比 $\geq 25\%$ 時，岩盤RMR評分等級為差至極差之V - VI級；RQD介於 $25 \sim 50\%$ 時則為IV之平級；RQD $> 50\%$ 為III以上之良級。是故就預估開挖面前方地質變化而言，水平長距離取心鑽探為一最佳之前進探測法，另對於存在高水壓之地盤，其亦可做為排水孔，以減小開挖時湧水之水量及水壓，降低施工風險，水平反循環長孔鑽孔在導坑隧道39K+079之高壓含水帶，即提供了相當良好之排水功能。



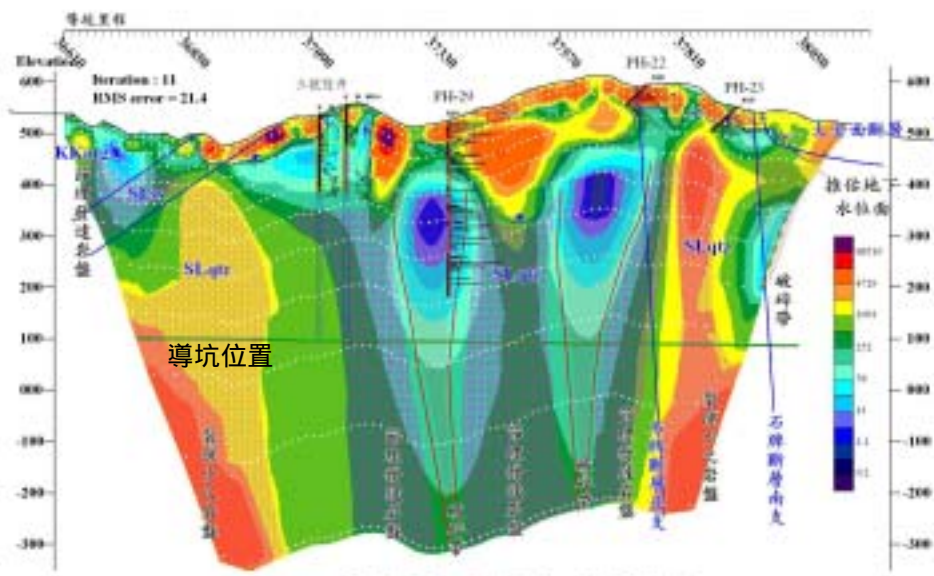
圖三 長距離前進鑽探結果與隧道開挖記錄比較圖

4.3 地表補充地電阻影像剖面法施測

此外，為瞭解開挖面前方高岩覆隧道段廣域性地下水分佈狀況，亦曾應用地

電阻影像剖面法(RIP-Resistivity Image Profiling)進行研究,以先期探測隧道前方未開挖段地下水分布狀況及可能地質弱帶位置,並預估可能出水點位置及寬度(圖四)。以導坑里程36k+610至38k+050之RIP探測為例,依據地電阻影像剖面探測結果,顯示探測範圍內有兩處具極低地電阻數值之區段,據研判可能為地下水富集帶(水包),且依據電阻值變化狀況推估,里程37K+585 37K+645以及37K+585 37K+645為隧道可能出水點位置。經與隧道開挖資料對比後發現,導坑TBM推進至里程37K+772 756遭遇剪裂破碎帶,其中剪裂泥含量極高,並夾剪磨角礫,且地下水量不大,而與預估之出水點位置差距在127公尺左右。再者,當導坑TBM推進至里程37K+431時,則遭遇高角度剪裂帶並伴隨約10 l/s之地下湧水,而與預估之出水點位置差距在71公尺左右。研判兩者間差距造成原因應係以下兩點:

- 1.低電阻所代表的涵義不明確:一般而言,地層中地下水含量高將導致地層地電阻值相對降低,但並非低電阻值區域即代表地層中含大量地下水,單獨依據低電阻值範圍並無法判定地下水包位置,而須與整體地質構造及地層分布狀況做比較後方能判定。
- 2.高覆蓋造成隧道線高程附近訊號強度不足:檢視地電阻影像剖面成果圖可發現,剖面圖中地表下200公尺範圍內之地電阻值分布變化極為複雜,而200公尺以下則轉為單調且一致之變化;雖說淺層部分可以風化作用影響致地層電性變化大而解釋該現象,但深層分布情況卻明顯偏離已知之地質構造情況,研判在深層部分可能因所接收訊號過於微弱而無法解析,致其等值線僅畫出單調且一致之地電阻值分布情況。



圖四 RIP 探測結果與隧道開挖記錄比較圖

4.4 水文補充調查

地下水之富含量與雨量、地形、岩性、地質構造及岩體破碎程度有密切關聯，於隧道地質調查中，甚難對於地下水之水源、水量及水壓作一適當推估，規設階段僅能粗估隧道沿線之地下水位，施工期間累積地下水量及鑽孔所提供之透水係數，並概估斷層帶、剪裂破碎帶及向斜軸之軸部為較具湧水或滲水之地段，但無法確知定點定量評估，雪山隧道施工期間進行之水文補充調查工作主要分為三部份，包括地下水水位監測、隧道內湧水之同位素定年分析及地表溪流流量監測。依地下水位監測資料及隧道施工湧水量及降雨量顯示之隧道湧水主要來自深層地下水，與淺層地下水並無直接關聯性，淺層地下水主要受降雨量影響。而隧道湧水之定年分析結果則顯示地下水混合了深層地下水及淺層地下水，推估淺層地下可能經由局部地質破碎構造滲入，地表溪流流量監測則尚需長期性觀測，以確定隧道湧水流失與地表水之關聯。

五、結 語

隧道如埋深大、長度長，工程本身即具相當艱難性，再加上鑽掘過程具有地質不確定因素，以及遭遇困難地質時處理不易等特性，深埋長隧道工程艱難，國內外皆然，台灣大地構造活躍，地質變異性大，艱難程度尤高，並不意外。規設階段所執行之地表調查，雖因自然條件與現有探查技術之限制而有其精度與準度之限制，但透過有經驗之專業地質師仍可將經由地表地質調查、鑽探、地球物理探查所獲取之片面資料整合成趨勢正確且具整體性地質構造模式供設計及施工參考。再者，施工中之前進探查工作亦屬於地質調查之延伸，其操作係依據規設階段地質調查結果所提出之可能地質破壞模式及構造進行逐段探查驗證，以補地表調查之不足，而其目的則是提高施工者對開挖面前方地質的瞭解程度並適時提出警告。

台灣由於地處溼熱的亞熱帶區域，近地表岩盤因受快速風化解壓作用影響，多無法充份反應隧道高程附近岩盤品質狀況，往年之地表地質探查工作往往受限於經費及深孔鑽探技術，而無法進行隧道高程以下足夠數量之深孔探查。近年來，不論垂直或水平長鑽孔技術日趨成熟，且所需經費亦日漸合理，於規設階段施作隧道沿線之垂直深鑽孔或沿隧道高程之水平長鑽孔，以增加地質調查準確度之必要性，已成為現今深埋長隧道地質調查之共識。

以雪山隧道為例之地質特性，其斷層構造及剪裂弱帶大都呈高角度傾斜，地質不連續面中僅地層層理為緩傾角分布構造，於規設階段僅能獲得主要地質構造位態及分佈，再者由折射震測震測低速帶推估潛在之地質弱帶，並不易由地表淺孔或深孔垂直鑽探探測得知，勢必需由施工中之水平鑽探探得潛在剪裂破碎帶、含水層，對於深埋長隧道，應建立一完整有系統之前進探查方式，尤其在地質較差，富含地下水之地段，亦可應用水平長鑽孔技術進行地質探測及排除地下水之水量及水壓。

精確且可行的施工中地質調查技術可以相當有限的經費預先瞭解隧道開挖面前方之地質狀況，並可透過早期的預警減低往後百倍於此之隧道災變處理費用與完工時程延後的損失。依據雪山隧道前進探查施作之經驗，水平前進長鑽孔因其一次涵蓋距離長、提取岩心可充份反應岩盤品質及出水狀況、不與隧道施工相互干擾等特性而被認為是有效之施工中前進探查技術。TSP及RIP探查技術有其快速、簡便及探查範圍廣等優點，惟受限於自然環境與技術或儀器發展未臻成熟，而仍有判讀上的盲點。若往後能於分析技術與儀器輸出功率上有所突破，則取代其他前進探查方式之潛力無窮。再者，地質調查導坑的施作不僅有先期地質調查的功能，尚具備預排水、先期地盤改良及隧道工法試驗等用途，實為深埋長隧道施工中探查之利器。考量台灣未來深埋長隧道之施工困難度逐漸升高（如中部橫貫快速公路貫穿中央山脈之長隧道），前進地質調查導坑之施作實屬必要，且宜儘早完成，以作為主隧道設計及因應工法研選之重要論證資料來源，並幫助主隧道之順利貫通。

誌謝

本文特別感謝中興工程顧問公司北宜高工程處地質組梁洪波組長提供論文相關地質參考資料，並提供寶貴意見，使本文更臻完善。

參考文獻

- 1.交通部台灣區國道新建工程局（1990）「國道南港宜蘭快速公路工程路線評選階段坪林隧道段地質調查工作期末報告」
- 2.交通部台灣區國道新建工程局（1991）「國道北宜高速公路工程基本設計階段坪林—頭城段地質調查工作期末報告」
- 3.交通部台灣區國道新建工程局（1993）「國道北宜高速公路工程細部設計階段補充地質調查工作期末報告」
- 4.交通部台灣區國道新建工程局（2001）「北宜高速公路雪山隧道工程專家諮詢顧問會議總結報告」
- 5.QUIDO ZÁRUBA, VOJTĚCH MENCL (1976). "Engineering Geology"- Developments in Geotechnical Engineering No.10, Czechoslovak Academy of Sciences.
- 6.H. Hagedorn (2001). "Basic Concepts of Excavation Support for Medium to Poor Rock Conditions – Overview", CUC Training Course "Rock Support in Medium to Poor Rock Conditions".