

隧道施工地質調查-以東澳隧道為例

王豐仁^{1,2}，林崇賢³

¹ 臺北市應用地質技師公會

² 勝田工程技術顧問有限公司

³ 福清營造股份有限公司

摘要

山區隧道施工順利與否之關鍵，地質調查資料之完整、正確、與施工環節之連結性至為重要，一般工程在規劃階段與設計階段之地質調查資料皆有相當的水準與完成度，但規劃設計階段之地質調查成果有其比例尺之限制，加以其在調查時限、經費上的限制，同時，考量臺灣長隧道施工多在山區地質變異複雜處，更顯施工期間施工者的現場地質調查工作至為重要。臺灣東部山區在板塊擠壓之環境下，地質構造複雜，施工期間的現場地質調查才是最為實際與詳細的施工資訊。

國內目前主要之施工期間的現場地質調查工具主要包括：地電阻影像剖面(RIP)、隧道內震波探測(TSP)、隧道內不取心探查。如何選用適當之調查工具，用以提升隧道地質剖面之細部精確資訊，並對鄰近開挖面前方區段作細部施工評估，並兼顧開挖施工之連貫性，為施工階段之重要課題。

一、介紹

臺九線蘇花公路東澳隧道新建工程位在宜蘭縣蘇澳鎮及南澳鄉之間，路線北起臺鐵永樂車站東緣圳頭溪左岸(南側)河階地，以隧道貫穿東澳嶺山區，並於東澳北溪支流左岸(北側)出露，銜接 A-3 標「東澳東岳段新建工程」東澳北溪河川橋，北端則與 A-1 標「蘇澳永樂段新建工程」永樂高架橋接壤。東澳隧道西側鄰近之舊永春隧道、新永春隧道於開挖建造期間皆曾經遭遇多次地質破碎區段、高壓大量地下水湧出，顯示本區段地質情況複雜，故施工期間補充地質調查為各方重視，為一重點工作。

國內目前主要之施工期間的現場地質調查工具包括：地質師現場測繪紀錄分析、鑽探調查(含地表與洞內，含取心與不取心)、地電阻影像剖面(RIP)、隧道震波震測(TSP)。以下將就東澳隧道之操作分析經驗作一分享。

二、隧道施工期間的現場地質調查工具

2.1 鑽探調查

鑽探調查工具一般依照施工位置可分為地表鑽探、隧道內鑽探，依照機具的不同又可分為取心鑽探與不取心鑽探，各方式之特性與優缺點不同。若考量依照施工位置之地表鑽探、隧道內鑽探，需綜合考量地表鑽探之岩覆深度、所需穿越地質弱帶的位態夾角、隧道內鑽探所需占據施工場地時間幾個項目，上述項目意

即包括鑽探總長度與經費、施工難度、影響隧道開挖時間等幾個大方向，可綜合整理如表 1 所示。

表 1 鑽探位置特性(地表、隧道內)選用綜合評估表

評估項目	地表鑽探	隧道內鑽探	評估項目說明
岩覆深度	視地表位置與岩覆深度，決定總鑽探深度，一般較隧道內鑽探長度多出許多	一般可直接鑽遇地質弱帶，但可預留安全警戒緩衝範圍	鑽探總長度與經費之考量
穿越地質弱帶的夾角	較適合平緩傾角之地質弱帶。雖可考量以斜孔帶替垂直孔施工，但斜孔之施工難度增加，費用增加，鑽孔偏移亦增加	較適合高角度傾角之地質弱帶。一般而言臺灣東部山區隧道遭遇地質弱帶以高角度傾角者較多	施工難度之考量
占據施工場地時間	無佔據隧道施工場地，無影響隧道開挖，需在該位置開挖前探查	鑽機施工佔據隧道開挖場地，影響隧道開挖，需評估工期與其影響	影響隧道開挖時間之考量

依照機具的不同可分為取心鑽探與不取心鑽探，各方式之特性與優缺點不同，綜列如表 2。

在綜合評估所需動員時間與方式、施工時間(影響開挖面時間)、獲取地質資料的因素下，東澳隧道目前採用 PC200 油壓鑽機、隧道鑽堡兩者為目前短距離、長距離的鑽探工具，並交互使用：一般地質情況，以隧道鑽堡 51 mm 口徑不取心探查為主要方式，遇評估有小規模破碎帶、岩性變化、地下水變化時，增加 76 mm 口徑不取心探查為輔助。遇評估有特殊或重點地質情況，如大規模破碎帶、剪裂帶、高壓或大量地下水變化時，以 PC200 油壓鑽機不取心探查為主要方式。

不取心探查調查過程需注意之項目包括：迴水顏色及其變化，岩屑岩性、鑽進速率變化、湧水情形。由於其施工快速，影響隧道開挖時間相當微小，故一般多接受為隧道施工中地質調查之首要選項。本工程施工以來至 103 年 7 月開挖長度約 2,730 公尺(四處開挖面開挖長度加總)，計完成短距離不取心探查(隧道鑽堡)142 次，長距離不取心探查(PC 油壓鑽機)2 次。不取心探查獲取之地層資訊主要包括：岩屑(判定岩性、地層)，破碎帶大致位置，地下水水量水壓；除地下水水量水壓可由現場施工人員量測之外，岩屑、破碎帶需地質師評估判定，尤其鑽遇破碎帶與否，需地質師依據現場多項探查變化與經驗來研判，包括：岩屑顆粒變化、含泥與否、迴水顏色與混濁度的輕微變化、鑽探速率變化、塞管與否，等等項目之綜合評估，較難以量化評估。其中在鑽探速率變化部分，若為不同隧道斷面鑽機、人員不同，不易對比鑽進速率；若在同一隧道斷面在固定鑽機、固定人員之情況下，一般鑽進速率與岩性強度強弱、岩體完整性、不連續面稀疏至密集、遭遇地質弱帶與否等，一般認為有其相關性；本文嘗試將 144 次之不取心鑽探速率依照不同隧道斷面、不同岩性，分別將以統計與對比，獲得圖 1~圖 5 的鑽進速率圖，依照鑽進速率圖統計評估認為：在同一次的不取心探查中，鑽進速率(慢至快)與上述之岩性強度(強至弱)、岩體完整性(完整至有構造變異)、不連續面(稀疏至密集)、遭遇地質弱帶(無至否)等，認為有其正相關性；但即使同一斷面之不同里程、不同岩性，其鑽進速率仍多有變異，不易將鑽進速率單純量化分級來作岩盤優劣之對

比。同時，在不同機具(包括考量機具廠牌、型式、新舊、保養情形等)情形下，將鑽進速率量化分級來作岩盤優劣對比並無意義。故依此經驗，建議地質人員在評估時可以當次鑽探施工開挖面地質情況作為基準，綜合考量岩屑顆粒變化、含泥與否、迴水顏色與混濁度的輕微變化、鑽探速率變化、塞管與否等項目，較能有符合實際之精準評估。

表 2 鑽探工具特性選用綜合評估表

	機具	機動能力	隧道配合與動員	施工時間	可獲取地質資料	工地選用特性評估	
不取心鑽探	隧道鑽堡	輪式	極高，隧道內整平即可	2~4 小時	地層岩屑(判定岩性地層)，破碎帶大致位置，地下水水量水壓	現場現有機具。隧道內施作長度一般 21~30 公尺為最迅速，長度若加長易卡桿不易完成	大致地質資訊，資訊距離最短，施工迅速
	氣動式鑽堡	履帶，吊空機洞	極高，隧道內整平極可	4~8 小時	地層岩屑(判定岩性地層)，破碎帶大致位置，地下水水量水壓	隧道內可獲取地質資訊，約 60~75 公尺	大致地質資訊，範圍較長，需吊掛空壓機
	PC 油壓鑽機	履帶	極高，隧道內整平極可	4~8 小時	地層岩屑(判定岩性地層)，破碎帶大致位置，地下水水量水壓	隧道內可獲取地質資訊，約 70~75 公尺	大致地質資訊，範圍較長，施工迅速
取心鑽探	KH-120	需吊掛設置	需 1~2 天設置鑽機時間	數天以上(視鑽探長度而異)	完整地層岩心，地下水水量水壓，剪裂帶詳細寬度與夾角	隧道內可獲取約 50~70 公尺地質資訊	地質資訊完整，但佔據開挖面時間長
	CS-1000	需吊掛設置	需 1~2 天設置鑽機時間	數週以上(視鑽探長度而異)	完整地層岩心，地下水水量水壓，剪裂帶詳細寬度與夾角	隧道內可獲取最長距離地質資訊(水平深度可達 600 公尺，視破碎情況而定)	地質資訊完整，範圍最大，但佔據開挖面時間最長

同時，多次不取心探查發現：該次探查第一根鑽桿之鑽進速率常有較其他根鑽桿快速許多之情形，故需注意莫將第二根鑽桿鑽進速率下降，即視為岩體轉佳

之訊息，仍需以多項目綜合評估才能避免誤判。

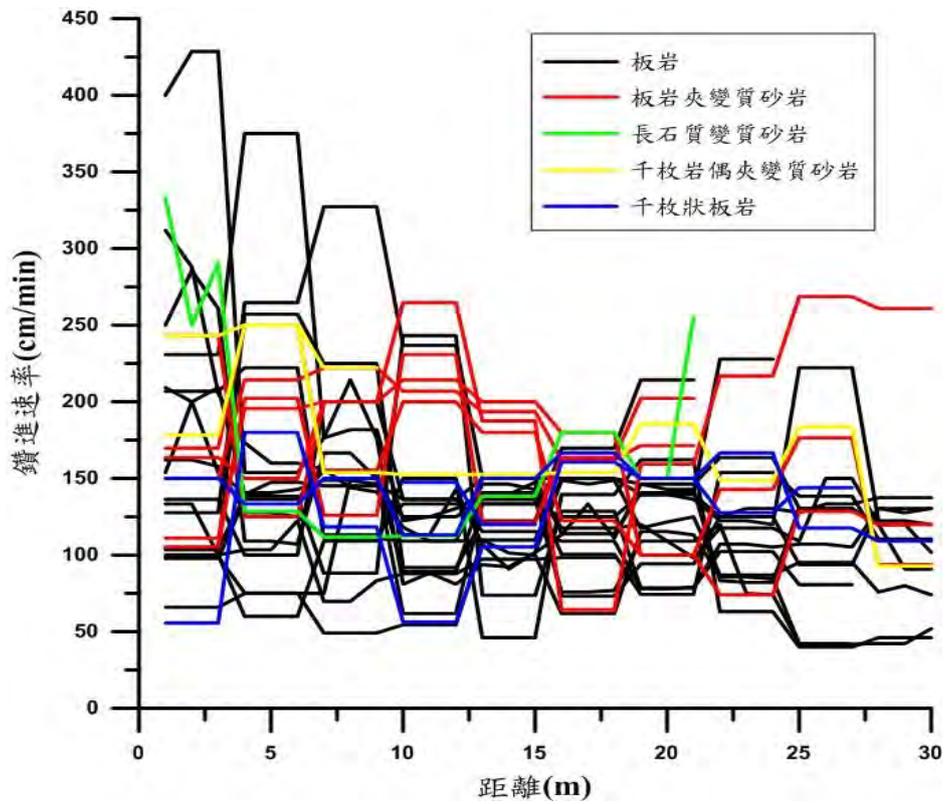


圖 1 東澳隧道北口北上線隧道鑽堡鑽機不取心探查鑽進速率圖

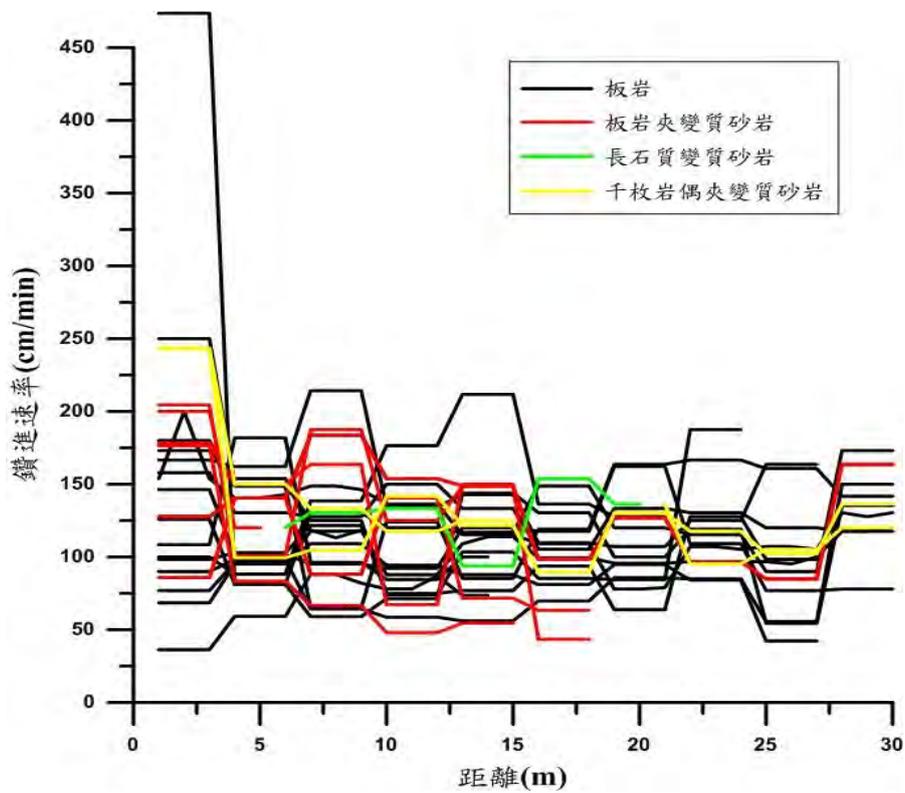


圖 2 東澳隧道北口南下線隧道鑽堡鑽機不取心探查鑽進速率圖

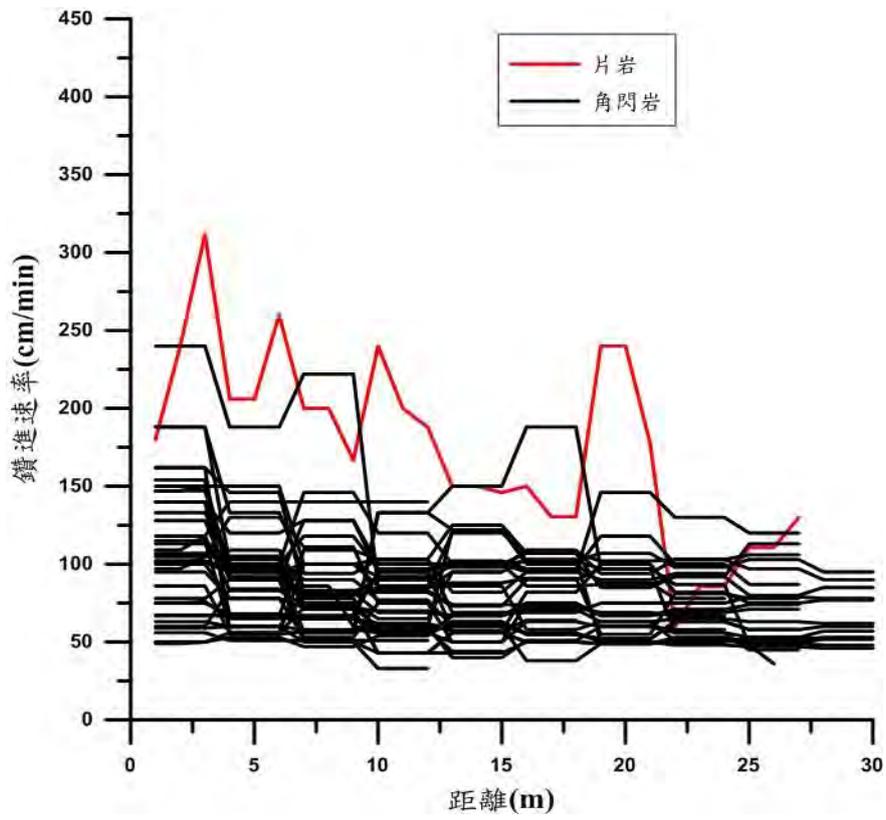


圖 3 東澳隧道南口北上線隧道鑽堡鑽機不取心探查鑽進速率圖

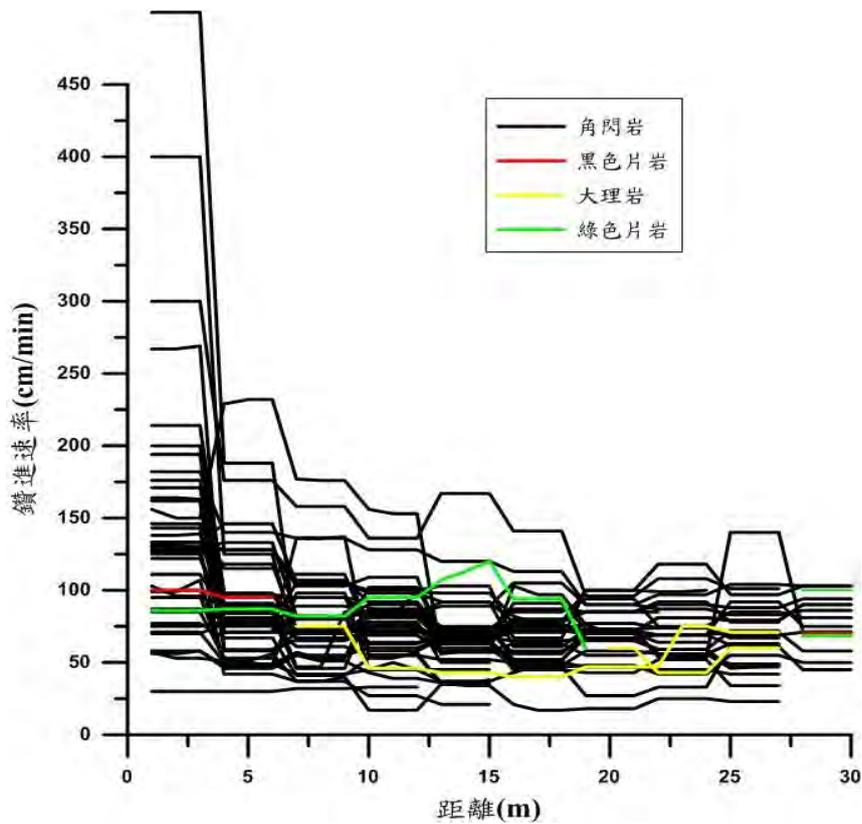


圖 4 東澳隧道南口南下線隧道鑽堡鑽機不取心探查鑽進速率圖

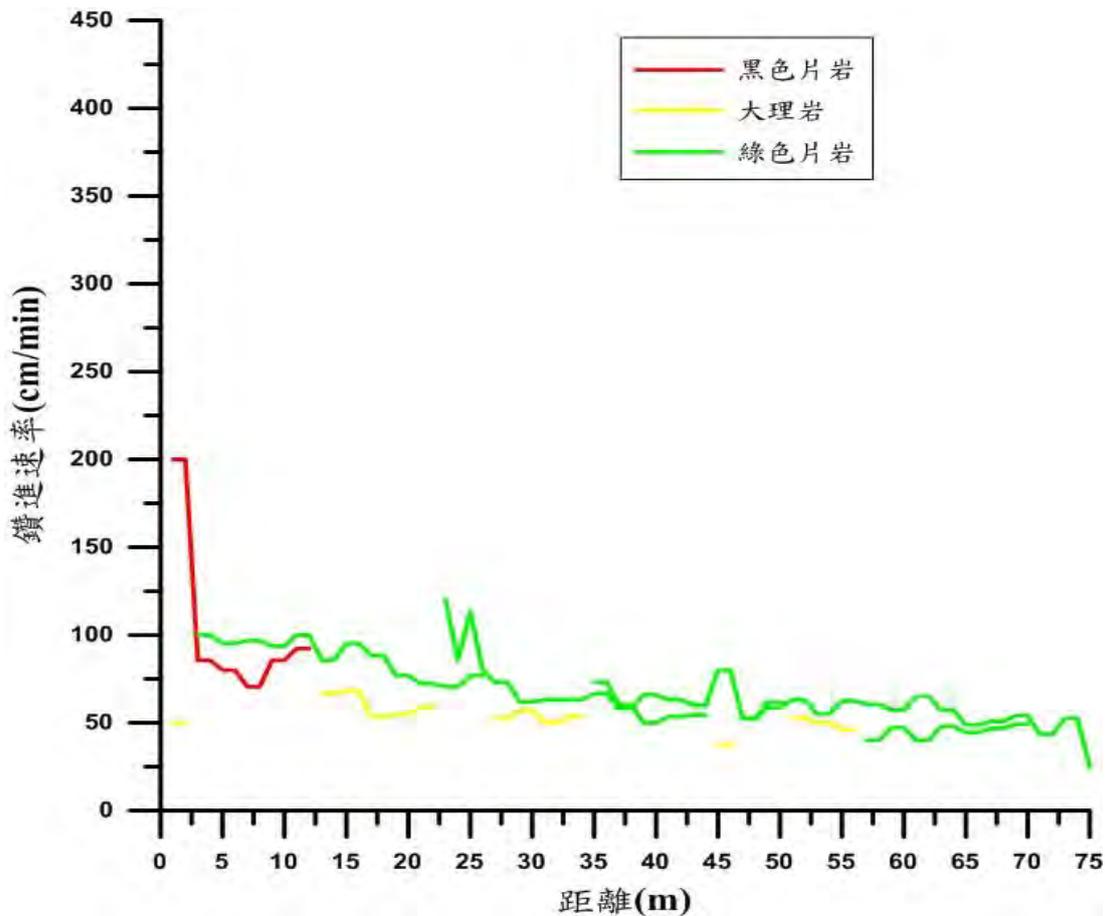


圖 5 東澳隧道南口南下線長距離不取心(PC200 鑽機)探查鑽進速率圖

2.2 地電阻影像剖面(RIP)

本工程地電阻影像剖面(Resistivity Image Profiling, RIP)委由聯合大地工程顧問公司專業調查。其由地層所含礦物成分、膠結疏密程度、裂隙多寡及風化程度等物理性質之差異，可造成電性差異，藉由地層電性差異可獲得地下水分佈概況，並依其推估地下水可能富集之區域位置，並研判地層之水文定性特徵，以輔助評估對隧道施工之影響範圍。

RIP 工作執行前段需實施隧道上方地表測量精測，一般視天候遇地形崎嶇狀況約需數天至數週時間；實際施測視天候與地形崎嶇狀況，亦約需數天至數週時間之久。其獲得隧道區段地下水文特性後，可與其他調查工具成果比對，輔助判釋地質構造、地層分佈等地質狀況。故考量 RIP 測線位置時，亦需考慮上述狀況，以使 RIP 探測發揮最大功效。本工程在調查設計階段已執行過 2 條 RIP 測線調查，長度分別為 200 公尺與 600 公尺，隧道施工期間依據地質剖面與地質弱帶、剪裂帶之位置為原則、地下水文地質特性調查，配合隧道開挖風險等級之評估，評估計有 5 條側線位置適合執行 RIP 探測工作，其中 3 條測線位於隧道上方，總長 2,500 公尺；2 條測線位於隧道斜交與側面上方，以調查本區地下水文地質特性為目的，總長 1,550 公尺。測線布置位置如表 3 與圖 6 所示。

表 3 東澳隧道地電阻影像剖面(RIP)測線布置表

施測階段	RIP 編號	地表里程(南下線里程)或(座標)	地表施測長度	備註
設計調查階段	RIP-01	4K+200~4K+400	200 公尺	
	RIP-02	4K+600~5K+200	600 公尺	
施工階段	RIP-1	3K+940~4K+360	420 公尺	小帽山斷層
	RIP-2 併 5	4K+880~6K+960	2,080 公尺	猴猗山斷層~大理岩層 A~大理岩層 B 沿線
	RIP-3	(335431,2716412)~(334639,2715887)	950 公尺	大理岩 A, 斜交隧道, 以水文特性為目的
	RIP-4	(335331,2716093)~(335051,2715562)	600 公尺	東澳嶺破碎密集區, 以水文特性為目的

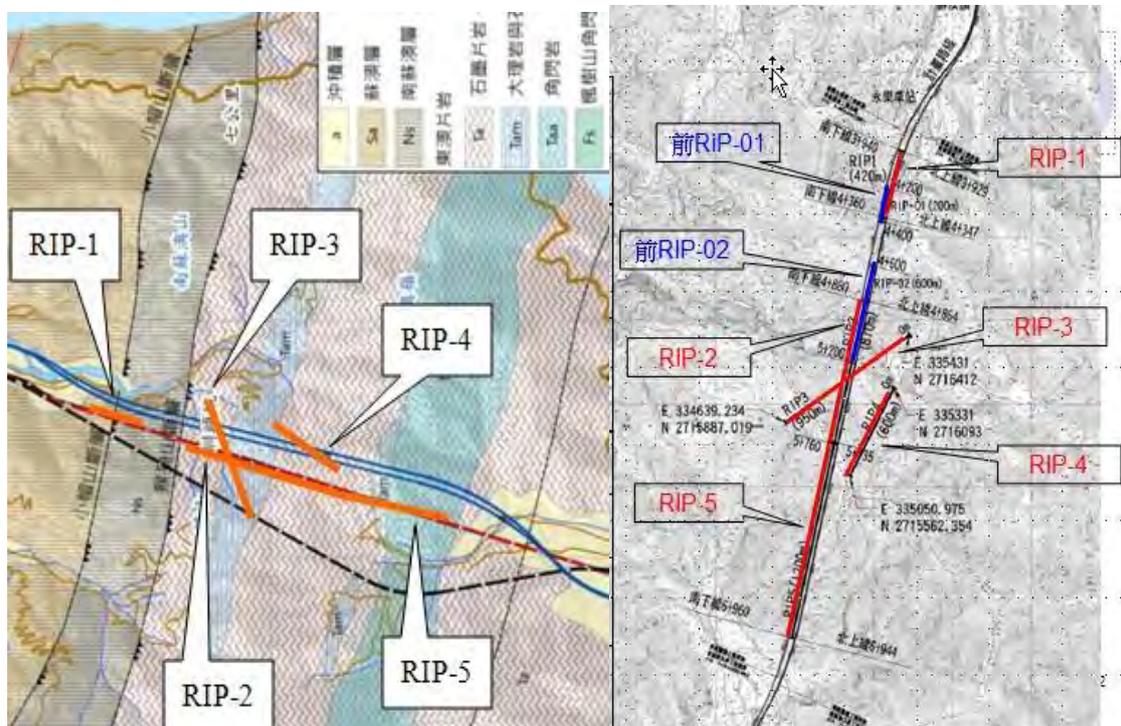


圖 6 東澳隧道地電阻影像剖面(RIP)測線布置與地質構造關係圖(改繪自中興工程顧問公司)

2.3 隧道震波震測(TSP)

本工程隧道內震波探測工作(Tunnel Seismic Prediction, TSP)委由聯合大地工程顧問公司專業調查,探勘儀器採用瑞士 Amberg Measuring Technique 公司 TSP 203 Plus 系統,該系統是專門探測隧道未開挖段地質變化而設計,可使用於鑽炸工法。施測震源採用高爆速炸藥,並搭配瞬發電氣雷管;施測使用之炸藥量可視地質狀況做適當調整,並搭配高感度受波器用以接收開挖面前方所傳回之反射訊號,在震測資料清晰度及岩體強度成果之研判標準中,可具備完整、均一、優良之評估基礎。

在完整現場預備作業下,探測工作僅約需 2~3 小時即可完成,前製作業(佈孔

與鑽孔)約 5~9 個小時，對於現場施工之影響很小(如表 4)，並於 3 日內提交隧道受測位置之震波探測成果報告。對於評估隧道岩體強度變化及測定岩體彈性模數特性，具有便捷、有效、完整之參考依據。

震波探測工作(TSP)以炸藥震波作為調查能量工具，對於岩體強弱、地質弱帶所形成的波速變異有敏感的回應，故本工程以地質剖面與地質弱帶、剪裂帶之位置為原則，配合隧道開挖風險等級之評估，評估約有 38 處位置適合執行震波探測工作，目前至 103 年 7 月底已經執行 10 次，每次獲得地質資訊範圍約前方 110~120 公尺，在保留較可信度之反射波情形下，約可得知前方 100 公尺地質狀況。

表 4 震波探測工作(TSP)現場工作配合時程表(修改自聯合大地成果報告)

工作類別	工作內容	時程
準備工作	孔位放樣並紀錄	40~60 分鐘
	鑽設炸孔與受波器孔	可同時依順序並行執行，共約 4~8 小時
	安置套管及 PVC 管	
現場試驗	雷管與炸藥確認及領取	視現場排程(可與上述項目同時並行執行)
	TSP 現場工作	1~2 小時
資料處理	TSP 成果報告	3 個工作天

2.4 地質師現場測繪紀錄分析

隧道開挖過程中，地質師需完成每一開挖輪進之開挖面地質測繪紀錄。除描繪開挖斷面圖形之外，需詳細紀錄有觀岩性、地層、岩石強度推估、岩石品質指標(Rock Quality Designation, RQD)、地質構造(斷層、褶皺、剪裂帶等)、不連續面狀況、不連續面間距、地下水狀況、特殊地質狀況(流沙、地熱、氣體)等，並附以清晰之開挖斷面照片。相關成果如附錄一為其中之成果範例，目的為蒐集紀錄完整之地質資訊以作為施工與地質研判之資料。

三、東澳隧道地質剖析

3.1 地質剖面研析

東澳隧道西側之新永春隧道與舊永春隧道，皆在施工過程中發現有嚴重地質破碎區段與高壓大量地下水，在調查設計階段皆已有相當詳實之地質評估，惟在調查時程、調查比例尺與調查經費的限制之下，無法完全施工階段都應要有更為詳細之地質調查，且施工階段有相當多的調查工具與位置，是設計階段無法抵達或使用的，故在東澳隧道的施工前段，在既有地質剖面與資訊的前提之下，且不以工程契約數量為限制，單純以獲得有助於實際開挖工作的地質調查需求為目的，綜合考量各種調查工具之優點與限制，綜合提出施工中補充地質調查方式與項目如表 5 所示。

經由施工中補充地質調查成果、已開挖地質測繪成果，配合規設階段地質調查成果，更新東澳隧道地質剖面，如圖 7 所示。其成果顯示：

1. 隧道南側角閃岩區段位置與原研判符合，隧道大量湧水可能性較低。
2. 大理岩 B 區段位置與原研判符合，隧道湧水可能性高，大理岩 B 南北兩側皆有破碎帶。

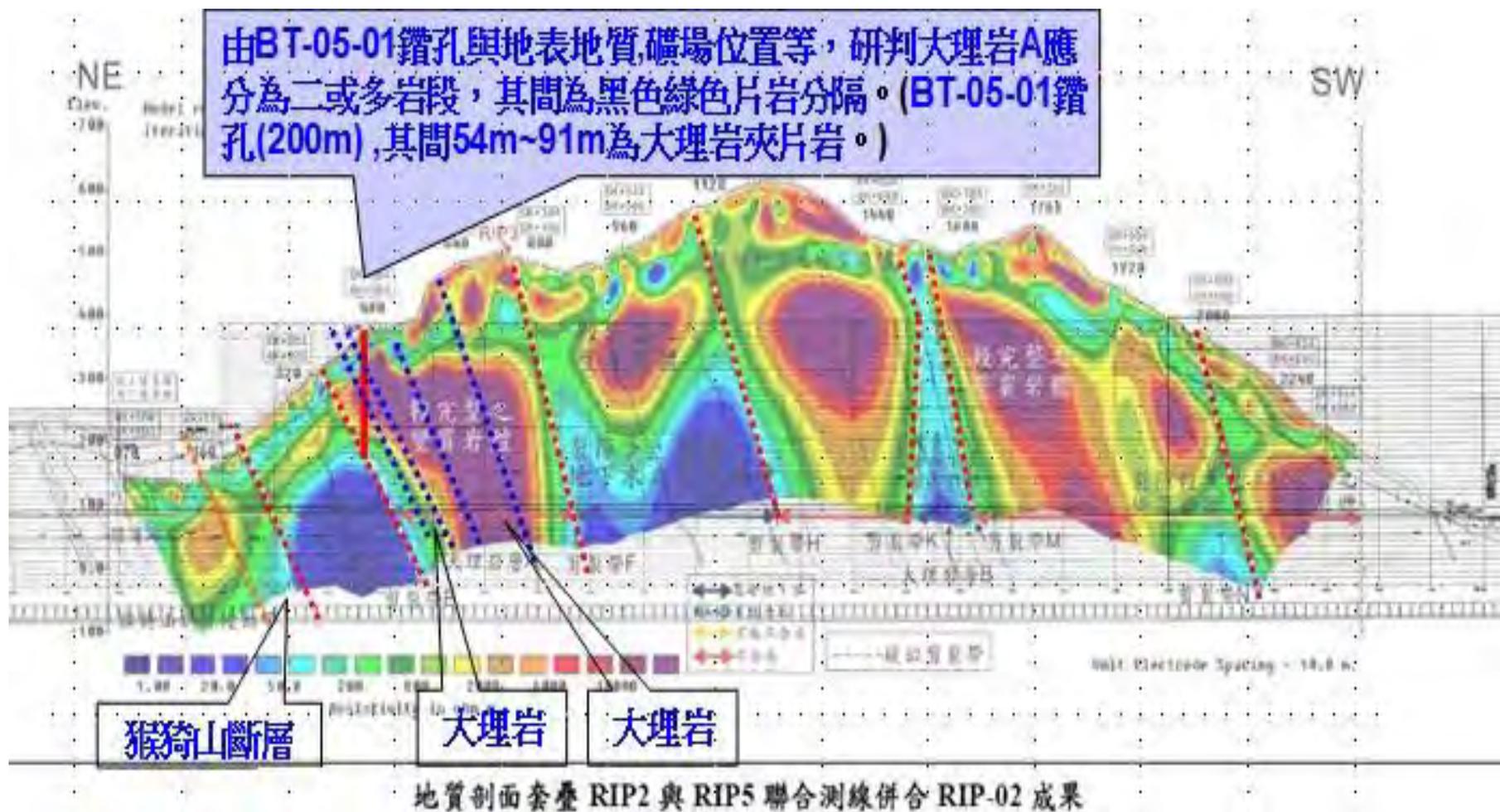


圖 7 東澳隧道施工中補充地質調查後更新地質剖面圖

表 5 東澳隧道施工中補充地質調查一覽表

補充地質調查方法	次數或測線數目	總長度	備註
地電阻影像剖面(RIP)	5 條測線	4,050 公尺	已完成全線所需調查
隧道內震波探測(TSP)	10 次	1,000 公尺	預估共 38 次 (統計至 103 年 7 月為止)
隧道內不取心探查 (隧道鑽堡鑽機)	142 次	3,511 公尺	4 開挖面總計 (統計至 103 年 7 月為止)
隧道內長距離不取心 探查(PC200 鑽機)	2 次	145 公尺	南口南下線 (統計至 103 年 7 月為止)

- 3.南下線 5k+430~5k+800 區段片岩，因剪裂明顯(剪裂帶 F, G 與 H)裂隙多，富含地下水。
- 4.大理岩 A 區段厚度可能較原有估計為薄，或夾有較厚層的綠色片岩或黑色片岩，呈交互出露。惟不論其為大理岩或片岩，隧道湧水可能性較不高。
- 5.猴猗山斷層南側片岩因剪裂明顯(剪裂帶 E)裂隙多，富含地下水。
- 6.猴猗山斷層可能因剪磨泥質較多，含水並不明顯，但恰成為其南側片岩富含水區段的封阻層。

3.2 鄰近開挖面之地質剖面與施工評估

上述施工中補充地質調查成果當中，對於整體大範圍隧道地質剖面研析較為適用之資訊主要為地電阻影像剖面(RIP)，其配合開挖面地質測繪、規設階段地質剖面、地表鑽探成果等，可以對整體大範圍有明確的對比研判，但因其範圍廣大，其界面位置里程仍有微調空間，不需拘泥於其界面里程；但若需對某開挖面前方鄰近位置作細部之剖面更新與施工評估，則隧道內震波探測(TSP)、隧道內不取心探查(一般、長距離)、配合開挖面地質測繪成果，可以獲取較為細部且明確之資訊。以東澳隧道南口南下線鄰近大理岩層 B 區段為例(如圖 8 所示)，經由不取心探查(岩性、弱帶、探查速率)，水量量測，配合開挖面地質測繪成果，繪製詳細並可對比之資料，可以對開挖面前方 30~70 公尺有詳細之岩性弱帶地下水量評估，即使面臨高壓地下水情境，該距離應足可作為安全緩衝距離，並可供應變施作更進一步的鑽灌或排水處理。

四、結論

由東澳隧道施工中補充地質調查之經驗，地電阻影像剖面(RIP)、隧道內震波探測(TSP)圖形、隧道內不取心探查(隧道鑽堡鑽機)、隧道內長距離不取心探查(PC200 鑽機)皆為相當有效之補充調查工具。對於整體大範圍隧道地質剖面研析較為適用之資訊主要為地電阻影像剖面(RIP)，其配合開挖面地質測繪、規設階段地質剖面、地表鑽探成果等，可以對整體大範圍有明確的對比研判。若需對於開挖面前方鄰近位置作細部之剖面更新與施工評估，隧道內震波探測(TSP)、隧道內不取心探查(一般、長距離)、配合開挖面地質測繪成果，可以獲取較為細部且明確之資訊，其並可供研判應變施作更進一步的鑽灌或排水處理。

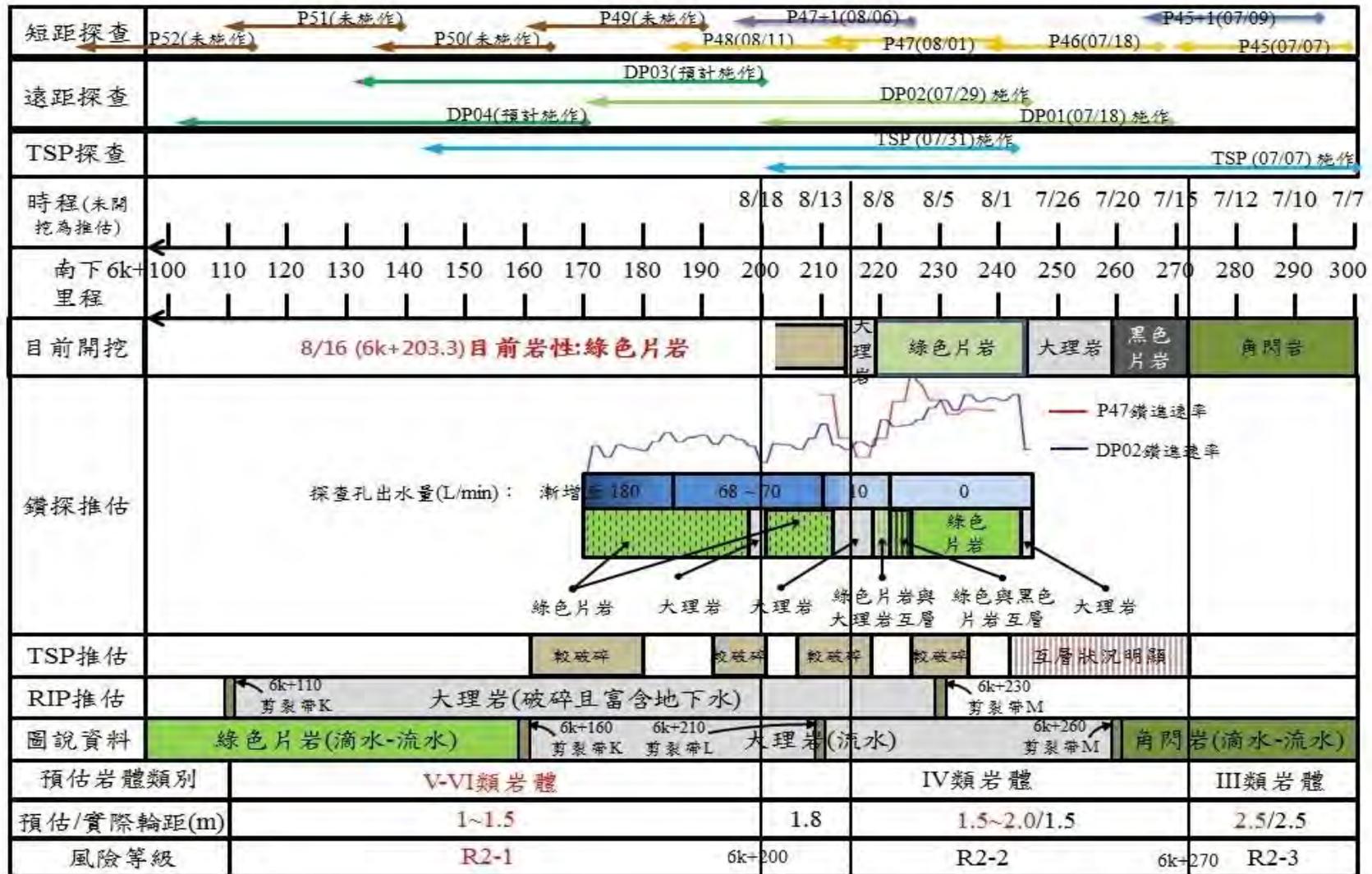


圖 8 東澳隧道南口南下線鄰近大理岩層 B 區段細部施工評估研擬圖

致謝

感謝蘇花公路改善工程處、工務段、中興工程顧問公司監造團隊對於補充地質調查工作之重視與協助；施工團隊福清營造公司施工同仁、聯合大地工程顧問公司地質部與地物部的調查協助；萬大鑽探公司、創宇工程公司提供鑽探經驗與資訊；尤其勝田工程顧問公司地質師溫謝穎、宋正輝、劉正隆對於現場調查資料之提供與彙整統計，對於本文完成皆是非常重要的。

參考文獻

1. 中興工程顧問股份有限公司 (2012)，臺九線蘇花公路蘇澳東澳段工程地質鑽探報告，交通部公路總局蘇花公路改善工程處。
2. 台灣世曦工程顧問股份有限公司 (2011)，臺9線蘇花公路山區路段改善計畫大地工程調查報告，交通部公路總局蘇花公路改善工程處。
3. 聯合大地工程顧問股份有限公司 (2014)，臺9線蘇花公路東澳隧道新建工程地電阻影像剖面探測工作成果報告。
4. 聯合大地工程顧問股份有限公司 (2014)，臺9線蘇花公路東澳隧道新建工程隧道內震波探測工作成果報告。

王豐仁

臺北市應用地質技師公會 理事長

地址：臺北市八德路三段12巷20弄1號5樓

電話：0921-950-297

傳真：02-2579-4299

電郵：geodennis99@gmail.com



主要工作

地質調查，隧道工程，邊坡穩定監測，地質教育推廣。

專業資歷

- ✓ 臺北市應用地質技師公會第六屆理事長(100.1~103.1)
- ✓ 臺北市應用地質技師公會第七屆理事長(103.1~106.1)
- ✓ 公共工程委員會第七、八屆技師懲戒委員會委員(101.7~105.6)
- ✓ 臺北市加強坡審委員會審查委員(102.5~104.5)

參與專案

- ✓ 交通部國道新建工程局，國道5號雪山隧道開挖地質調查
- ✓ 經濟部水利署中區水資源局湖山水庫引水路隧道工程
- ✓ 臺北市第二原水輸水幹線隧道工程
- ✓ 臺灣電力公司，梅檀暨仲岳水力發電計畫可行性研究地表地質調查工作
- ✓ 水利署北區水資源局，石門水庫增設取水工程計畫，駐地地質技師
- ✓ 經濟部中央地質調查所，臺灣地質知識網絡推動與發展計畫(101~104)，協同主持人

學歷

國立成功大學地球科學研究所碩士

發表文章

- ✓ 王豐仁、陳本康、陳利貞、郭麗秋、蔣培琛 (2013)，「地質知識諮詢服務系統建構與初步成果」，2013TGA 研討會論文集。
- ✓ 王豐仁 (2013)，「竹山與草嶺一帶峽瀑之美」，地質，第32卷，第2期，第56~60頁。
- ✓ 林慶偉、王豐仁、黃鎮臺、吳銘志 (1998)，「玉山國家公園新中橫公路段落石邊坡調查研究」，國家公園學報，第8卷，第1期，第26~40頁。
- ✓ 王豐仁、林慶偉 (1994)，玉山國家公園新中橫公路段落石邊坡調查研究，內政部營建署玉山國家公園管理處研究成果報告。