

隧道施工對鄰近地下水資源影響評估案例探討

蕭富元¹、彭詩容²、邵厚潔³

¹財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心 組長

²財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心 助理研究員

³交通部公路總局蘇花公路改善工程處 處長

摘要

臺灣降雨量豐沛，山區蘊藏豐富之地下水資源，山岳隧道施工通過斷層破碎帶或高透水性地層時常出現大量出水情形，除影響隧道施工安全及造成工程進度延宕外，亦引發地下水資源流失之疑慮。近年來氣候變遷劇烈，衝擊水資源供應之穩定性，地下水資源之保護與利用在臺灣日益受到重視，而隧道施工對於鄰近區域地下水資源之影響評估，則應以科學方法與實測數據來進行驗證探討，以免流於空談爭議。本文以臺灣東部具湧水潛勢之隧道施工為例，說明各種水文地質調查技術(包括孔內攝影調查、鑽孔封塞水力試驗、地下水位觀測井、隧道出水量觀測等)在案例隧道之應用結果，並進一步藉以評估隧道施工對鄰近區域地下水資源之影響情形，本文案例經驗可提供未來隧道施工與地下水資源保護溝通之參考。

關鍵詞：山岳隧道、地下水資源、水文地質調查、案例經驗。

一、前言

臺灣地處板塊交接帶，破碎複雜之水文地質狀況成為極佳之地下水通路及儲存環境，臺灣平均之年降雨量亦達 2500 公厘，約為世界平均降雨量之 2.6 倍左右，而局部地區之年降雨量更高達 6000 公厘以上，豐沛之降雨與破碎之水文地質環境，使臺灣山區蘊藏豐富之地下水資源。因此隧道施工遭遇滲湧水問題在臺灣實屬常見，部分工程甚或出現巨量湧水災變情形，例如國道 5 號雪山隧道及東部鐵路改善之新永春隧道等，除影響施工作业安全與工程進度外，亦引發地下水資源流失疑慮。

近年來臺灣氣候變遷劇烈，年降雨量雖差異不大，但降雨常集中於短時間內發生，且降雨強度有逐漸增強之趨勢，此降雨特性之演變除易釀成各種災害外，

進而並易影響水資源供應之穩定性。各地區水資源供應穩定性之改變，常引發民眾將枯水期之水資源短缺問題歸咎於鄰近工程施工，尤其在隧道施工過程如發生突發性短期或長期出水時，更易引發相關之聯想，甚或引起地方民眾抗爭。至於區域水資源環境變化究竟係肇因於氣候變遷影響？抑或確實為鄰近工程施工影響？問題之釐清，實應以科學量化數據與分析結果加以佐證，否則易流於空談爭論，無法取得共識。

對於隧道施工與鄰近地下水資源環境影響關係之探討，可由近年來廣受重視之水文地質領域著手。水文地質(hydrogeology)係指研究地下水與其流經地層關係之學科(Hudak, 2005)，各地區地下水之形成、補注來源、儲存環境、流動規律與蘊藏量等地下水資料均可透過水文地質調查與分析來掌握，並進一步應用於地下水資源之開發與管理，因此在氣候變遷劇烈

及乾淨水資源匱乏影響下，水文地質在國際上逐漸成為一門顯學。

水文地質由於應用範圍甚廣，包括地質災害(如山崩、地滑等)、隧道工程、場址調查(污染物傳輸、核廢料儲存)、資源探勘(地下水資源、地熱、天然氣水合物)、二氧化碳地質封存、蓄水構造物(大壩滲流分析)、海岸地區(海水入侵問題)、地層下陷等，相關調查技術種類繁多，基本上視問題特性與範疇各有其適用技術。在隧道工程目前常用之水文地質調查技術主要包括水文地質遙感探測、水文地質地球物理探查、水文地質測繪、鑽孔水文地質調查、水文地質現地試驗、水文動態觀測調查等(蕭富元等, 2014)。本文以臺灣東部具高出水潛勢隧道施工為例，說明水文地質調查技術在案例隧道之應用情形，並進一步藉以評估隧道施工對鄰近區域地下水資源影響程度，本文案例經驗可提供隧道施工與地下水資源保護溝通之參考。

二、案例隧道水文地質狀況

本文所採用之案例為蘇花改東澳隧道，蘇花改計畫主要係因承擔臺灣東部花蓮地區與北部地區之人員與物資運輸重任之臺9線蘇花公路，其現有路線彎繞迂迴，道路標準低，行車安全性與舒適性不佳，且每逢颱風豪雨常出現道路坍方中斷情形，甚或危及人車安全。因此於 2010 年底推動「臺9線蘇花公路山區路段改善計畫」(簡稱蘇花改)，以提供東部民眾一條安全回家的路。案例之東澳隧道為蘇花改北段蘇澳至東澳間之關鍵工程，東澳隧道為雙孔單向單車道隧道，全長約 3.32 km，由臺鐵永樂車站東緣起，向南貫穿東澳嶺(標高 820.7 m)山區，於東澳北溪北支流出露，如圖 1 所示。

隧道鄰近區域地形崎嶇陡峭，屬中央山脈北段，以小帽山、西帽山、東澳嶺及南蘇澳山等山脊嶺線為主要分水嶺，北側為蘇澳河流域，南側為東澳河流域。本區因位在東北季風之迎風面，降雨主要集中於每年 11 月-2 月。資料顯示蘇澳地區於 2007 年至 2013 年間之年降雨量約介於 3800~5500 mm 間，另東澳嶺地區之年降雨量更高達 6000~7000 mm，降雨量遠高於台

灣平均降雨量，具有豐沛降雨補注情形。

東澳隧道沿線經過之地層，自北而南分別為現代沖積層、新生代第三紀之蘇澳層、南蘇澳層，以及古生代晚期至中生代之東澳片岩。其岩性主要包括板岩、變質砂岩、片岩、大理岩及角閃岩等。本區岩層歷經多次區域變質與構造變形作用，呈現複雜之褶皺與剪切變形構造，隧道沿線遭遇數條區域性逆斷層及局部性之橫移斷層，主要之區域性逆斷層為穿越隧道北段之小帽山斷層及猴猗山斷層，兩斷層均呈西北西-東南東方向延伸，斷層面向南傾斜。至於橫移斷層則分布於隧道東、西兩側，分別呈北北東-南南西走向與南-北走向。

東澳隧道與鄰近之永春及新永春鐵路隧道相距僅約數百公尺，而上述兩座鐵路隧道於施工期間均曾遭遇滲湧水問題，其中新永春隧道更曾遭逢達 83 T/min 之巨量湧水，嚴重影響隧道工進並導致部分路段改線；兩座鐵路隧道於完工營運至今仍持續有相當之出水量，顯示東澳隧道施工亦具高出水潛能，有必要辦理相關水文地質調查與分析，以研判釐清隧道施工對鄰近地下水資源可能之影響。

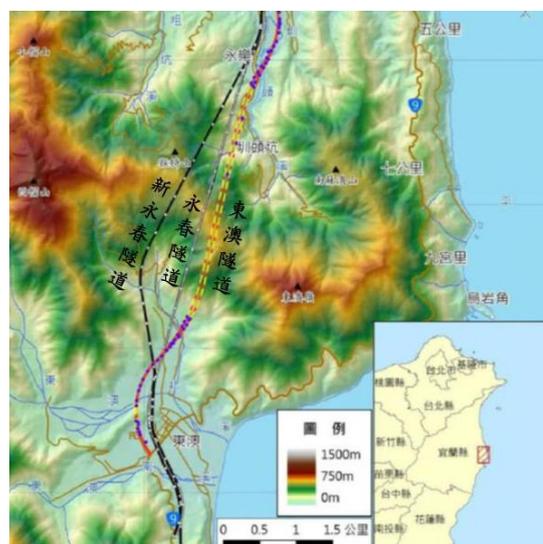


圖 1 案例隧道位置與地形圖

三、隧道施工水文地質調查

東澳隧道於 2013 年 8 月開挖進洞，施工迄今已辦理多項水文地質調查，本文乃針對東澳嶺水文地質

鑽孔與試驗調查，以及隧道施工水文動態觀測調查等兩部分進行說明，詳述如下：

3.1 水文地質鑽孔與試驗調查

東澳隧道在規劃階段調查發現，於新、舊永春隧道間存在一條南北向之東猴椅山斷層，此橫移斷層提供阻絕及導引兩項功能，將東澳地區分隔成東西兩側不同地下水系統，分別擁有不同的水文地質特性。東澳隧道係位在東猴椅山斷層之東側，主要受斷層東側之水文地質特性影響，其地下水來源應為東澳嶺之豐沛水量，而西側與中央山脈連通之地下水系統應不致影響案例隧道施工(台灣世曦, 2010)。另東澳嶺山區存在一南北向之橫移斷層密集帶，且該斷層密集帶受鄰近猴椅山斷層及東猴椅山斷層交互影響，產生一局部張力區，地層呈高角度片狀交疊陷落，形成一漏斗狀構造(如圖 2 所示)，將東澳嶺山區豐沛之降雨量引入地下，隧道開挖通過此區時可能存在高出水潛在風險。

東澳隧道雖於規劃設計階段已在隧道洞口及沿線辦理多項調查，惟對於本區地下水文狀況極為關鍵之東澳嶺斷層密集破碎帶，仍侷限於定性論述，實際量化調查資料仍極為缺乏。因此於隧道施工期間進一步依據衛星影像判釋及鑽孔試驗用地取得可行性，於東澳嶺山區鑽設 BT-01(孔深 200m)及 BT-02(孔深 100m)等 2 座鑽孔(其位置如圖 3 所示)，利用上述 2 座鑽孔進行孔內水文地質試驗，試驗項目包括封塞水力試驗、孔內攝影、井測、地下水流速量測等，並待試驗完成後，於 2 座鑽孔進一步設置自記式地下水位觀測井，進行施工期間長期地下水位變化監測。囿於篇幅限制，僅就孔內攝影及封塞水力試驗等兩項重要調查結果加以說明。

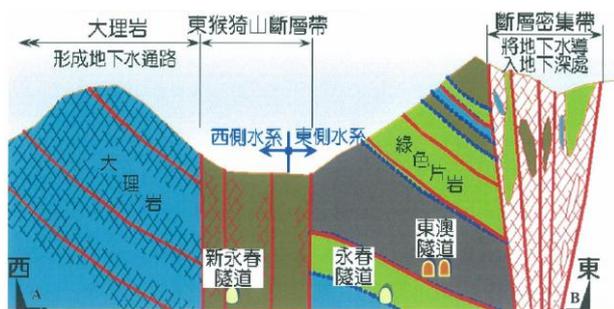


圖 2 東澳地區水文地質模式剖面示意圖

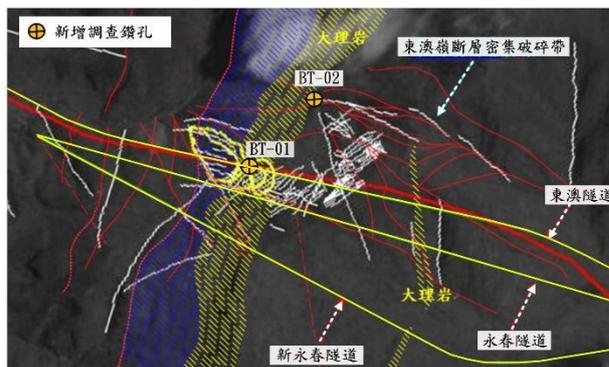


圖 3 東澳嶺水文地質調查鑽孔位置圖

3.1.1 孔內攝影調查

孔內攝影係於鑽孔中置入攝影設備，於鑽孔吊放或拉升過程直接攝錄孔壁影像，以獲取鑽孔岩層狀況、節理及裂隙分布及特殊地質材料，評估岩層破碎程度與主要含水層位置等，並可克服鑽孔岩心檢視之諸多限制(許世孟等, 2008)，提供較佳裂隙研判成果。

本次調查係採用英國Robertson Geologging公司所發展之音射式孔內攝影儀(high resolution acoustic televiewer, ACTV)，音射式孔內掃描係發射一起超音波訊號，再藉由接收所產生之反射訊號振幅與走時來轉換地層影像，具有解析度高，可適應多種環境等優點。惟超音波訊號發射需以地下水為媒介，因此音射式調查最大之限制為僅能在地下水存在區段進行調查。孔內攝影係直接測錄岩層裂隙或破碎帶之分布，並透過內建數位羅盤儀可進一步記錄各探測深度裂隙之位態，反推求得弱面位態資料，藉由投影分析方法可進而針對不同層面或節理來判定其主要位態方向，提供區域水文地質特性重要之參考資訊。

本次孔內攝影調查結果顯示，BT-01鑽孔之片理面平均傾向(dip direction)約為194度，平均傾角(dip)約為55度，意即片理面之平均位態為N76°W/55°S；而BT-02鑽孔之片理面平均傾向則約198度，平均傾角約為72度，意即BT-02鑽孔之片理面平均位態為N72°W/72°S，參見圖4。片理位態統計結果可知，靠近東澳嶺東側之BT-02鑽孔，其片理走向(N72°W)與位在隧道路線上方之BT-01鑽孔片理走向(N76°W)大致相近，但BT-02鑽孔之片理傾角(72°)則高於BT-01鑽孔片理傾角(55°)，另BT-02鑽孔亦可見傾角達60-80°之高角度鏽染節理，高

傾角之片理與節理可提供地表降雨及淺層地下水入滲管道，成為深層地下水良好之補注通路，搭配東澳嶺山區豐沛之降雨量，使本區蘊藏豐富之地下水。

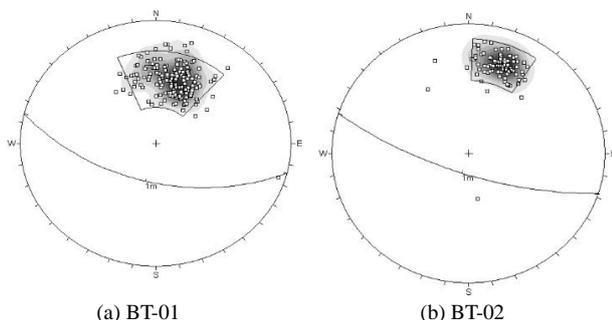


圖 4 孔內攝影調查之片理位態極點立體投影圖

3.1.2 孔內封塞水力試驗

地層透水係數(hydraulic conductivity, K)及儲水係數(storativity, S)等水文地質重要參數，可提供山區地下水流動特性、水資源開發潛勢評估及水文地質概念模式建立之參考依據。以往水文地質參數調查方法多以施作岩盤漏程試驗(Lugeon test)為主，該試驗係配合鑽孔進尺辦理不同深度岩體透水性調查，方法單純，但無法提供某特定深度岩體構造區段之透水性，在探討特定破碎含水層或裂隙主導之地下水流分析時有相當之限制。因此為克服岩盤漏程試驗之限制，本次乃配合孔內攝影之岩體裂隙調查結果，評估並挑選出具代表性之岩體區段施作孔內封塞水力試驗(如圖5所示)。孔內封塞水力試驗係在試驗過程中利用兩個或多個封塞以分離孔井試驗區段，試驗區段之長度乃依據不同試驗目的而有所不同。封塞可以阻隔一個或多個裂隙，甚至整個岩體結構，以取得特定區段之水文地質參數。

本次孔內封塞水力試驗分別針對大理岩及片岩中不同裂隙特性進行試驗，包括岩體緻密完整段、片理主控段、片理及節理發達段、剪裂泥區段等。彙整試驗結果可知，調查區之完整緻密片岩(即岩材孔隙主控地層透水性質者)其透水係數K約為 10^{-10} m/s數量級，屬極低透水性地層單元；而片理發達之片岩(即片理主控地層透水性質者)其透水係數K約提高至 10^{-7} ~ 10^{-8} m/s數量級，惟仍屬低透水性地層單元；至於裂隙發達之片岩(即節理裂隙主控地層透水性質者)其透水係數

則將提高至 10^{-6} m/s數量級，已屬中度透水性地層單元；而受大地應力擠壓剪磨之片岩(即剪裂泥主控地層透水性質者)其透水係數則為 10^{-8} ~ 10^{-9} m/s數量級，屬低透水性地層單元。至於調查區大理岩層之透水性質，試驗結果顯示裂隙發達大理岩之透水係數約為 10^{-5} m/s數量級，為高透水性地層單元，另灌漿後之大理岩層其透水係數則可降至 10^{-7} m/s數量級，意謂若灌漿成效良好，則大理岩層之透水性將可能降低2個數量級左右。

東澳隧道在設計階段所辦理之岩盤滲漏試驗結果顯示，本區片岩之透水係數位在 10^{-7} m/s數量級，而大理岩之透水係數亦位在 10^{-7} m/s數量級(中興工程，2012)。本次孔內封塞水力試驗可提供不同構造特性對岩層透水性質之具體影響，而此為岩盤漏程試驗所無法達成者。

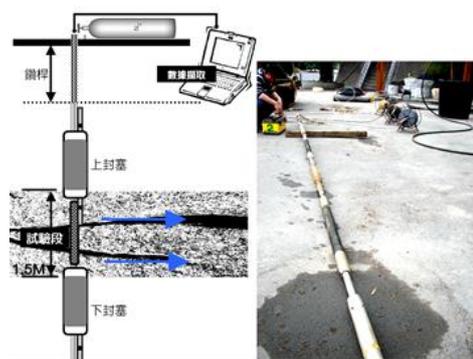


圖 5 單井雙封塞水力試驗設備示意圖

3.2 隧道施工水文動態觀測調查

水文動態觀測調查係在代表性位置設置監測儀器(如雨量站、水壓計、量水堰等)觀測水文變化情形，以瞭解調查區之地下水位、水量、地下水流向及補注情形等資料。東澳隧道於施工中亦辦理水文動態觀測，觀測項目包括隧道開挖面及洞口量水堰、鄰近鐵路隧道洞口排水量觀測、隧道通過集水區之河川流量觀測、洞口及鄰近區域地下水位觀測、降雨量觀測等。

施工水文動態觀測調查結果顯示，截至 2014 年 6 月底，隧道北口開挖進洞長度約 480~520 m 左右，現階段隧道開挖主要遭遇板岩夾變質砂岩，局部節理發達，岩盤破碎夾泥，易呈片狀坍塌，惟開挖面僅為潮濕，洞口量水堰所觀測到之總出水量約 0~75 L/min

左右，如圖 6 所示；至於隧道南口之開挖長度則約 780~900 m 左右，隧道開挖主要遭遇角閃岩，岩石強度且自立性佳，岩體完整，偶有小規模突發性瞬間出水，惟出水量在短時間內即迅速減少，意謂可能為變質岩內局部之小型水包所致，南洞口量水堰所觀測之總出水量約 177~723 L/min，參見圖 7 所示。

鄰近之永春與新永春鐵路隧道洞口排水量觀測結果顯示，兩座鐵路隧道在完工營運後仍持續有相當之排水量，排水量規模與季節乾濕季有關，2009 年 4 月至 2010 年 5 月間(蘇花改施工前)之新永春隧道南口最大排水量仍可達約 45 T/min 左右，而永春隧道南口最大排水量則約 25 T/min (臺灣世曦，2011)；兩座鐵路隧道於 2014 年 1-6 月間(蘇花改動工後)之洞口排水量觀測結果如圖 8 所示，其中可見鐵路隧道洞口排水量變化主要仍與季節有關，並未有異常增減情形。至於鄰近區域之地下水觀測結果(詳圖 9)，地下水變化與降雨量有密切關係，並未呈現受施工影響而產生水位洩降情形。整體而言，東澳隧道開挖迄今並未遭遇大量或持續出水情形，施工水文動態觀測結果亦呈現對鄰近區域地下水資源影響有限。

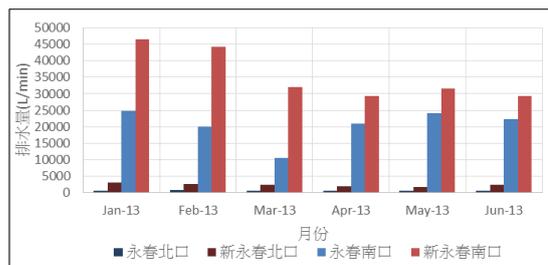


圖 8 鄰近營運中鐵路隧道洞口排水量觀測結果彙整

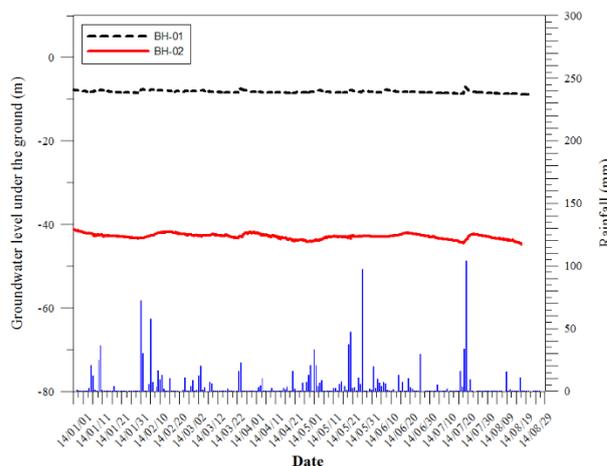


圖 9 東澳隧道鄰近自記式水位觀測井之水位變化歷時曲線圖

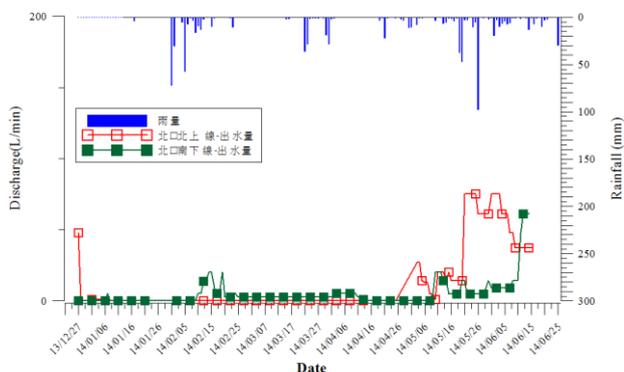


圖 6 東澳隧道北洞口量水堰觀測結果歷時曲線圖

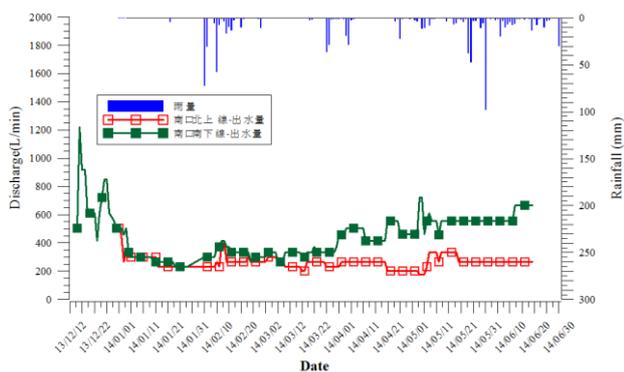


圖 7 東澳隧道南洞口量水堰觀測結果歷時曲線圖

四、鄰近區域地下水環境影響評估

在隧道施工對鄰近區域地下水環境影響評估議題上，由於地下水流場之研究常需涉及整個集水區，面積廣大，僅以水文地質調查方法可能無法涵蓋全部區域，因此仍需透過結合其他分析技術(如理論解析或數值分析等)，將調查所得到之單點及線狀資料，延伸至平面，甚或進一步擴充至地下三度空間情形，以研判區域地下水文變化情形。

臺灣山區之水文地質條件複雜，各種水文地質單元性質變化與空間分布遠較平原地區複雜，使用理論公式解析常無法描述山區複雜之水文地質狀況。近年來由於電腦運算能力及相關技術之快速發展，三維數值分析已逐漸應用於各種複雜水文地質狀況之地下水問題探討，本文乃採用目前廣為應用在地下水流模擬分析之 MODFLOW 有限差分法(彭詩容等，2013)，進行東澳隧道鄰近區域三維水文地質模式之建立與率定，並進一步據以探討施工期間之地下水環境變化情形，建立東澳隧道鄰近區域三維水文地質概念模型，模型建立結果如圖 10 所示。進一步依據上述營運中鐵路隧

道洞口排水量、地下水位觀測結果，以及東澳隧道施工出水量等資料，進行模型率定驗正，分析結果顯示隧道施工所造成之地下水流場變化主要侷限於開挖面附近小範圍內，如圖 11 所示，並且地下水位洩降深度僅約 0-1 m 不等，顯示現階段隧道施工對鄰近區域地下水資源之影響仍有限。

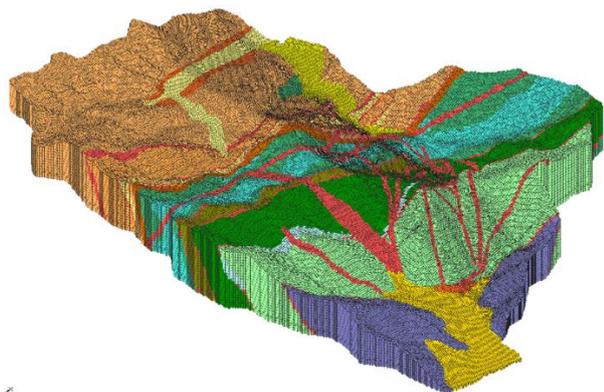


圖 10 東澳隧道鄰近區域三維水文地質模式

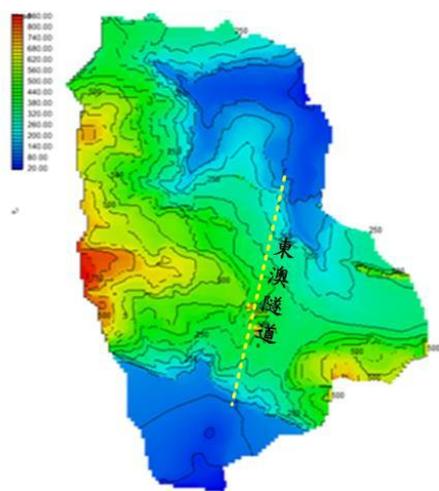


圖 11 東澳隧道施工後之區域地下水流場分布俯視圖

五、結論與討論

近年來全球氣候變遷劇烈，臺灣年降雨量雖變化不大，但極端天氣發生之頻率與強度則有升高現象，豐水期與枯水期之水量差異亦有逐漸增加趨勢，影響水資源供應之穩定性。未來隧道工程之推動與興建，勢必面臨地下水資源環保議題之挑戰，主管機關除加強與民眾溝通外，實需再輔以充足之調查資料與可信之分析評估技術，以釐清工程興建與鄰近水資源環境

影響關係。

水文地質條件複雜之臺灣，隧道及邊坡等公共工程從規劃選線、設計、施工、營運之全生命週期均不應忽視水文地質影響因子，目前台灣在隧道水文地質領域之研究與實際應用仍屬起步階段，仍有甚多議題有待進一步研究與發展，本文乃拋轉引玉期盼水文地質在隧道工程有更多之應用與貢獻。

參考文獻

1. 中興工程顧問股份有限公司，2012，臺 9 線蘇花公路蘇澳東澳段工程委託地質探查服務工作-工程地質鑽探報告書，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，2010，臺 9 線蘇花公路山區路段改善計畫-可行性研究與工程規劃暨優先路段工程設計工作「大地工程調查綜合評估報告」，交通部公路總局蘇花公路改善工程處。
3. 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-可行性研究與工程規劃暨優先路段工程設計工作「蘇花路廊隧道施工湧水對地表、水文環境之影響及因應研析成果報告」，交通部公路總局蘇花公路改善工程處。
4. 許世孟、顧承宇、鍾明劍、蘇泰維、李錦發，2008，岩盤工址之水力特性調查與案例應用，土工技術，第 115 期，第 39-48 頁。
5. 彭詩容、蕭富元、譚志豪、高憲彰、邵厚潔，2013，三維分析技術應用於高湧水潛能隧道環境影響初步評估-以東澳隧道為例，第十二屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會，四川成都，第 A-1-1~A-1-10 頁。
6. 蕭富元、彭詩容、高憲彰、冀樹勇，2014，水文地質調查與分析在隧道工程中的應用探討，隧道建設，第 34 卷(增刊)，第 6-14 頁。
7. Hudak, Pual F., 2005, Principals of Hydrogeology, CRC Press, Boca Raton, Florida.