

高出水潛勢隧道施工水文地質調查 與地下水資源影響分析

辜炳寰* 蔡文瀚* 蕭富元** 高憲彰***

摘 要

近年來臺灣氣候變遷劇烈，水資源供應之穩定性亦受影響，降雨豐枯變化極端化，隧道施工與鄰近水資源環境影響互動關係日益受到關注。本文介紹具有高出水潛勢之東澳隧道施工期間水文地質調查與分析評估成果，透過開挖過程之出水量觀測及地下水位監測，可瞭解隧道開挖出水主要受地層透水性質影響。施工期間雖在厚層大理岩內發生明顯出水情形，導致鄰近區域地下水位短暫下降，但隨著隧道完工通車及持續降雨補注之下，區域地下水位已明顯回復。本文所提方法技術能應用於複雜水文地質條件下之隧道施工行為與地下水環境影響互動關係評估，提供未來工程興建與水資源環境保護溝通之參考。

關鍵字：隧道施工、水資源環境、水文地質、環境保護

一、前 言

臺灣位於歐亞板塊及菲律賓板塊交接處，板塊間擠壓碰撞劇烈，造成臺灣地質構造複雜破碎，具有良好的地下水通路及儲水環境。此外，臺灣的平均年降雨量達 2,500 mm 左右，約為世界平均降雨量之 2.6 倍，局部地區之年降雨量更可高達 6,000~7,000 mm，使得臺灣蘊藏豐富的地下水資源。山岳隧道施工遭遇出水問題在臺灣時有所聞，甚有工程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新永春隧道等，除影響隧道施工安全外，亦引發地下水資源流失的疑慮。

近年來氣候變遷劇烈，臺灣的年降雨量雖然變化不大，但降雨日數則呈現減少趨勢，且豪大雨的天數（日雨量大於 200mm）有逐漸增加的現象（許晃雄等，2011）。上述情形意謂臺灣近年來之降雨型態呈現年降雨總量變化不大，但降雨集中於短時間內且降雨強度增加情形，此種降雨特性除容易釀成各種災害外，並將影響水資源供應的穩定性。面臨劇烈氣候變遷影響的臺灣，各地區水資源供應穩定性的改變，常引發民眾將枯水期的水資源短缺問題歸咎於鄰近工程的施工，尤其在隧道施工過程如發生突發性短期或長期出水時，更易引發相關聯想與抗爭行為。

以往的隧道地質調查工作，多偏重於力學穩定的工程地質特性探查，但隨著隧道施工遭遇湧

* 中興工程顧問社大地工程研究中心助理研究員

** 中興工程顧問社大地工程研究中心地工維安組組長

*** 中興工程顧問社大地工程研究中心副主任

水問題案例層出不窮，以及地下水資源保護意識的抬頭，強調研究地下水與其流經地層關係的水文地質（Hydrogeology）逐漸受到重視（Hudak, 2005），例如為提高曾文水庫蓄水容量所推動之曾文越域引水隧道工程，兩條引水隧道總長共約 13.9 公里，橫跨 3 個集水區，為瞭解隧道施工可能遭遇的出水問題，以及對鄰近區域地下水環境可能的影響，譚志豪等（2008）乃進行隧道沿線的水文地質調查與數值模式分析，此為國內首次辦理實際隧道工程之水文地質調查與分析案例，惟 2009 年因遭遇莫拉克風災影響，隧道取水口荖濃溪嚴重淤積，並淹埋隧道東洞口，導致工程停工，未能完成整個調查評估，殊為可惜；另謝立德等（2014）針對緊鄰邊坡的南迴鐵路隧道營運維護問題，考量隧道安全與邊坡穩定息息相關，故乃透過水文地質調查與模式分析，評估不同降雨規模與排水配置對隧道與邊坡整體穩定性影響，提出在隧道山側鑽設排水管及開挖排水廊道方案，改變鄰近區域地下水流場，提高排水範圍及成效，可降低隧道地下水入滲量與襯砌背水壓力，同時亦可提高邊坡安全係數，兼顧隧道與邊坡兩者穩定。

隧道工程在設計階段如能辦理水文地質調查，評估隧道開挖可能遭遇的出水區段與出水規模，據以研擬因應對策，將可降低施工湧水災害風險。近年來各種水文地質調查技術蓬勃發展，蕭富元等（2014）彙整目前隧道工程常用之水文地質調查技術，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，如圖 1 所示。隧道施工出水問題雖已為設計探討的重點項目之一，惟實際上臺灣山岳隧道施工仍常遭遇突發性的出水問題，探究其因主要為：

1. 臺灣的水文地質環境複雜，在調查經費與調查時間有限情形下，對於長度達數公里以上規模之隧道工程，沿線水文地質狀況難以精確調查掌握。尤其在變質岩區的隧道施工，水文地質的劇烈變異性將會使問題難度進一步擴大。

2. 水文地質所涉及之領域廣泛、包括水文學、地質學、物理學、化學及數學等，地下水流問題複雜，目前許多技術係採用間接調查方式，例如水文地質遙感探測即係利用各種遙測影像間接推測地下水文地質狀況；而水文地質地球物理探查則利用地質材料與地下水體之物理性質差異（如導電性、波速及放射性等）來間接研判地下水文地質狀況。間接調查推估易受各種不確定因素的假設影響，降低調查結果的精度。
3. 面對臺灣複雜的水文地質環境，實需要結合多種不同調查方法綜合評估之。惟現階段仍缺乏簡單且實用的分析工具與評估方法，仍需具備豐富經驗與專業素養的工程師進行資料判釋，以免影響研判結果之合理性與正確性。



圖 1 隧道水文地質調查技術彙整圖

隧道出水問題已成為臺灣山岳隧道施工安全及工期影響的重要因子，由於設計階段可掌握之水文地質資料精度受限，因此對於具有高出水潛勢隧道在施工期間實有必要持續進行水文地質調查與評估，根據施工所持續揭露的資料，進行滾動式的因應調整，以降低施工出水風險。本文乃以蘇花改 2018 年 2 月營運通車之東澳隧道為對象，說明隧道施工期間所辦理之水文地質調查與鄰近區域地下水資源影響分析結果，希望可提供未來隧道工程面對出水風險與地下水資源保護議題溝通參考。

二、案例隧道背景

臺 9 線蘇花公路承擔臺灣東部花蓮地區與北部地區之人員與物資運輸的重任，惟受地形與地質限制，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，且每逢颱風暴雨常出現道路坍方中斷情形，甚或危及人車安全。因此為因應東部民眾「一條安全回家的路」訴求，政府乃從「社會正義」的觀點切入，並兼顧「環境保護」之理念，於 2010 年底推動「臺 9 線蘇花公路山區路段改善計畫」（以下簡稱蘇花改），主要針對沿線三處易發生災損阻斷及交通肇事頻率高的路段（即蘇澳-東澳段、南澳-和平段、和中-大清水段）進行改善工程，改善路段最北端之蘇澳-東澳段主要包括 3 座隧道（蘇澳隧道、東澳隧道、東岳隧道），其中東澳隧道全長約 3.4 公里（圖 2）為本區段施工之關鍵工程。

東澳隧道段位在中央山脈東翼及脊梁山脈地質區，沿線通過地層由北而南主要為蘇澳層、南蘇澳層、東澳片岩等，其中東澳片岩夾有大理岩與角閃岩體，而蘇澳層、南蘇澳層及東澳片岩彼此間係為斷層接觸關係。由於本區位在板塊縫合帶，受大地應力擠壓影響，產生許多褶皺與斷層構造，沿線通過多條斷層（包括小帽山斷層、猴猗山斷層、東猴猗山斷層、東澳嶺斷層等），其寬度由十數公尺至約二百公尺間不等。斷層帶岩

體破碎，成為地下水流動與貯存之主要通路，本區水文地質條件極為複雜，隧道沿線通過破碎地層及高透水性的大理岩層（圖 3），同時鄰近兩座營運中的鐵路隧道（舊永春及新永春隧道）在施工期間均遭遇規模不等的出水問題，新永春鐵路隧道更曾出現巨量湧水情形，瞬間最大出水量達約 80 (T/min)，除影響施工安全及工期延宕外，甚導致隧道部分路段進行改線，方使順利完成，因此研判東澳隧道具有高出水潛勢。

（一）案例水文地質環境

東澳隧道位於蘇澳至東澳之間區域，東臨太平洋，沿線多山地，局部為河流沖積地形。區內山區部分屬中央山脈北段，以小帽山、西帽山、東澳嶺及南蘇澳山連結之嶺線為主要分水嶺，北側為蘇澳溪流域（上游支流包括圳頭溪及白米河），南側為東澳溪流域（包括東澳北溪及東澳南溪）。本區河川普遍具坡陡流急之特性，河川豐水期與枯水期之流量變化劇烈，根據氣象局之雨量站資料顯示，本地區受東北季風影響，降雨主要集中於 9-12 月秋冬時節，歷年平均年雨量約為 3,000-4,000mm，遠高於臺灣平均年降雨量，顯示本區降雨極為豐沛，地下水補注來源不虞匱乏。



圖 2 東澳隧道地理位置平面圖

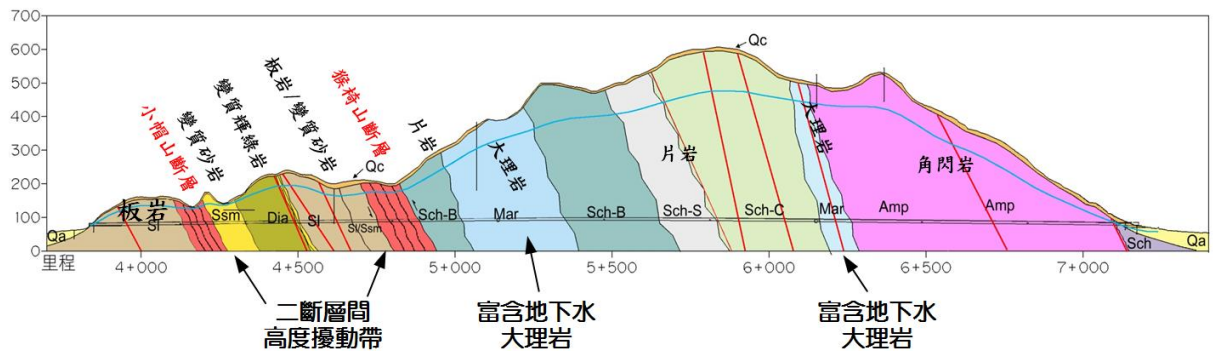
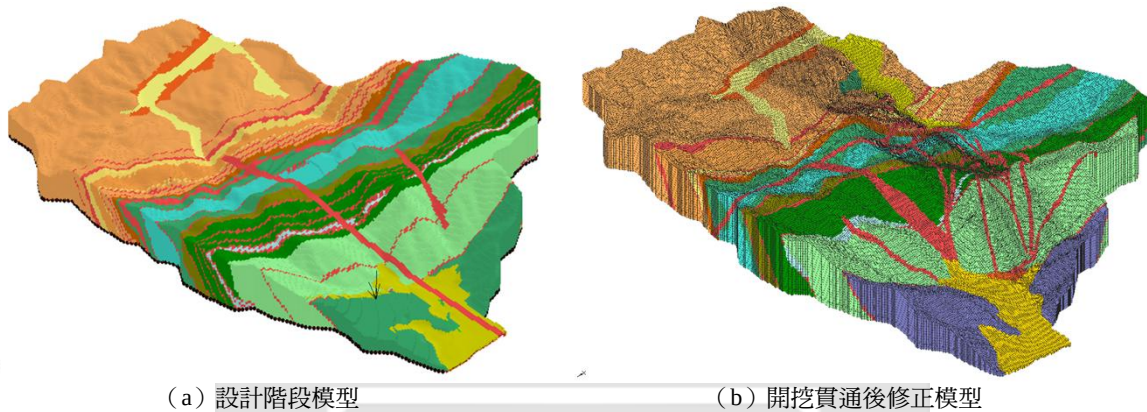


圖 3 東澳隧道地質剖面圖



(a) 設計階段模型

(b) 開挖貫通後修正模型

圖 4 東澳隧道鄰近區域三維水文地質模型

東澳隧道沿線以變質岩為主，岩性變化複雜，不同岩性間之接觸帶，由於兩側岩體性質存在著差異性，在地體構造活動過程中容易成為主要之層間滑移剪動帶，因而在不同岩性界面易形成規模不一之剪裂破碎帶，容易成為地下水之流通管道。至於本區主要變質岩類（包括片岩、角閃岩及大理岩等）之透水性質，根據岩盤滲漏試驗結果顯示，其滲透係數（Hydraulic Conductivity, K）主要均位在 $10^{-8} \sim 10^{-6}$ (m/sec) 之間（蕭富元等，2015），大致屬中等-低透水性地層。整體而言，隧道沿線的地下水主要流通管道應為斷層破碎帶、岩性界面及岩盤中的張力裂隙。

（二）設計階段水文地質模式

東澳隧道沿線山區水文地質條件複雜，除地層岩性的透水性質外，地質構造對區域地下水流場亦有甚大影響，理論解析法並不適用於本案例隧道複雜的水文地質問題解析，故隧道於設計階

段乃透過三維水文地質模型之建構，並利用水平衡原理及地下水流動控制方程式，模擬分析區域內地下水流況，推估隧道施工可能遭遇的湧水量及其對於鄰近區域地下水資源環境所可能造成的影響。水文地質概念模型係由水文地質觀點出發，透過含水層之分區、分層及地下水流動平衡等觀念，將複雜之隧道周圍環境簡化為一理想化之三維概念模型。模型由若干個水文地層單元所組成，經劃定分析範圍後，模型內地下水之流進與流出量根據水收支平衡原理達到穩定平衡狀態。待概念模型勾勒完成後，後續再透過數值程式輸入邊界條件及初始條件求解地下水流動控制方程式，即可求得模型內地下水水頭之空間分佈隨時間之變化情形。

東澳隧道設計階段所建構之三維水文地質模型如圖 4 (a) 所示，模式分析結果顯示，隧道開挖後的地下水流場變化主要發生在隧道沿線約 1~2 公里範圍內，隧道開挖出水量集中在小帽山斷

層帶、猴椅山斷層帶、層間剪裂帶及東澳嶺斷層密集帶，另大理岩層因透水性較大，研判亦為主要的出水區段，模式分析推估隧道開挖最大出水量約 1,500 (L/min) (中興公司，2012)。

三、施工中水文地質調查

在水文地質條件複雜的臺灣，山岳隧道施工一般將穿過數種不同水文地質特性地層，而除地層原生孔隙連通的透水能力外，次生破裂面（如節理、溶隙、褶皺張裂等）均將大幅影響地層的導水能力，尤其臺灣位在板塊交接帶，次生破裂面常成為優勢水流路徑，對於地層的透水性質影響甚大，Katibeh and Aalianvari (2012) 提出裂隙岩體的滲透性質在長隧道內可能出現高達 6 個數量級 (Order) 的差異，影響隧道出水問題與規模。

根據東澳隧道設計階段有限的調查資料，實不易精確掌握隧道沿線實際水文地質狀況及地下水流況，因此在施工過程仍應持續辦理水文地質觀測及分析。東澳隧道施工中所辦理的水文地質調查工作包括：(1) 隧道開挖地質資料蒐集與整理、(2) 隧道開挖出水量觀測、(3) 鄰近營運中鐵路隧道洞口出水量觀測、(4) 既有及新增地下水位井觀測、(5) 既有及新增雨量站觀測、(6) 既有及新增河川流量站觀測、(7) 水文地質補充鑽孔及現地水力試驗辦理等。由於本文篇幅有限，故本文主要說明隧道施工出水量觀測與結果探討。

(一) 隧道開挖出水量觀測

東澳隧道開挖出水量的觀測，主要係在隧道洞口及開挖面分別設置量水堰，觀測每日施工出水量。其中設置於開挖面的量水堰，如要配合隧道每輪開挖隨時往前移置，在實務執行上有其困難，因此乃於隧道開挖一段距離後再往前移置，大致控制在距離開挖面 20-50m 之內，量水堰設置及量測情形如圖 5 所示。

東澳隧道於 2013 年 8 月開挖進洞，由南、北洞口分別設置工作面向前開挖，開挖過程遭遇多次抽坍及規模不等的出水量，所幸並未影響整個工期，於 2016 年 7 月全線開挖貫通，並於 2018 年 2 月正式通車營運。隧道開挖面出水量觀測彙整如圖 6 及圖 7 所示。隧道開挖所遭遇的出水狀況包括：

1. 隧道北口段開挖遭遇板岩、千枚岩、變質砂岩、變質輝綠岩、片岩及大理岩等多種岩性變化與其互層交叉出現，尤其小帽山斷層與猴椅山斷層間擾動帶的岩體破碎，剪裂夾泥，造成隧道施工困難，除出現多次抽坍外，岩性變化處亦遭遇規模不等的出水情形，瞬間最大出水量約 2,050 (L/min) 左右。
2. 隧道南口段開挖所遭遇之岩性相對單純，南口開挖進洞後主要遭遇數百公尺厚之角閃岩，此層角閃岩大致完整透水性低，隧道開挖未有明顯出水情形。
3. 東澳隧道開挖除斷層破碎帶外，主要出水區段係發生於里程 5K+300~5K+400 的厚層大理岩段，大量地下水沿大理岩裂隙滲出，同時隧道頂拱及側壁的岩栓鑽設過程遭遇地下水流出，瞬間甚出現高壓水噴出狀況（如圖 8 所示），後續岩栓鑽孔有持續出水情形，導致隧道洞口水量大增，北上線隧道貫通時的洞口水量觀測值約 6,500 (L/min)，如圖 9 所示；而南段大理岩（里程 6K+250 附近）開挖的出水規模則相對有限，開挖面出水量觀測值低於 500 (L/min)，且隧道開挖通過大理岩後，水量即大幅減少。



(a) 隧道洞口量水堰



(b) 開挖面附近量水堰

圖 5 隧道洞口及開挖面量水堰觀測情形

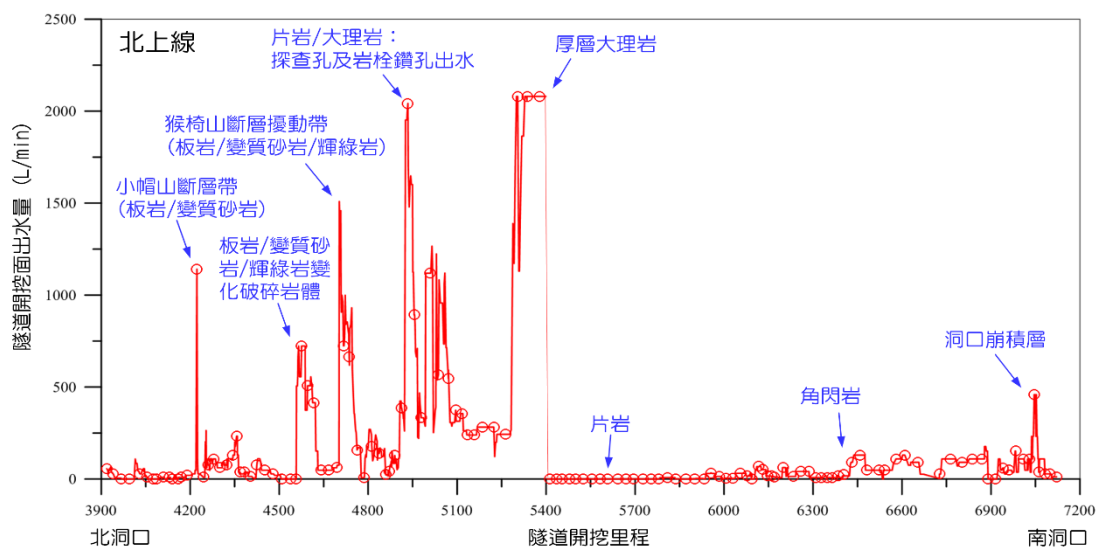


圖 6 北上線隧道開挖面出水量觀測值與開挖里程對應關係圖

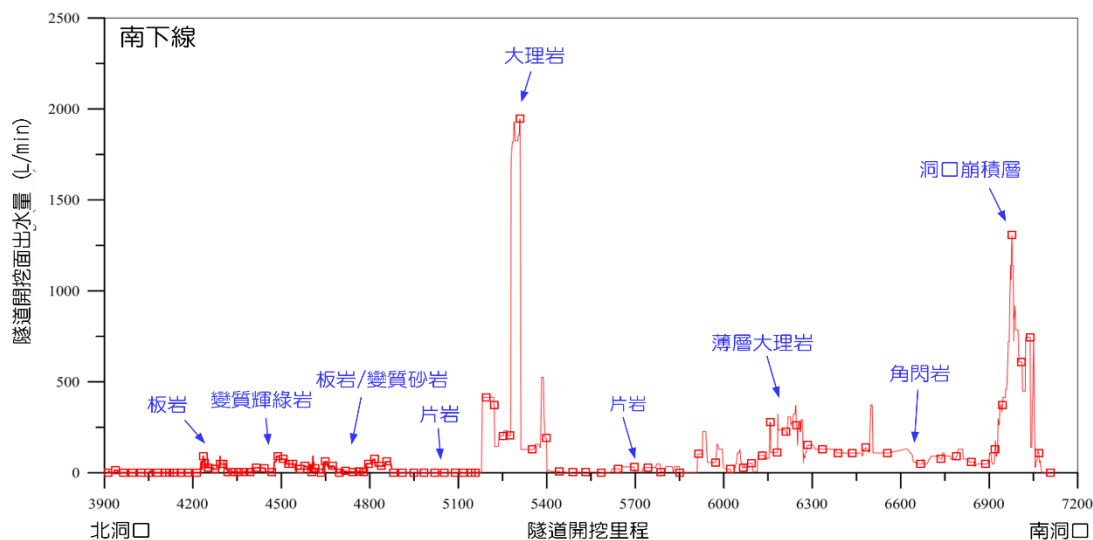


圖 7 南下線隧道開挖面出水量觀測值與開挖里程對應關係圖



圖 8 東澳隧道大理岩段岩栓鑽孔瞬間大量下水噴出情形

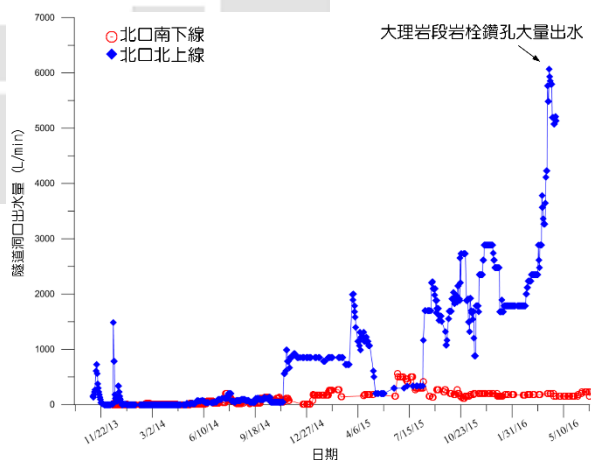


圖 9 東澳隧道北洞口出水量觀測歷時曲線圖

（二）東澳隧道地下水系統探討

根據規劃設計階段的調查資料（臺灣世曦，2010），本區北側大理岩脈的層厚較厚且連續，而南側大理岩脈則受斷層構造影響呈現不連續的凸鏡體夾層狀，兩段大理岩脈均為節理發達破碎，局部有溶洞現象，為影響東澳地區地下水儲存與流動路徑的重要因子。北迴鐵路舊永春隧道及新永春隧道施工開挖通過北側大理岩段時，並未發生湧水災變，惟在經過南側大理岩段時，較早施工的舊永春隧道順利通過，但後續施工的新永春隧道則遭遇巨量湧水災變，瞬間最大出水量達 80 (T/min)，研判除大理岩為地下水的湧水通路外，新永春隧道東側有一條約呈南北向的東猴椅山斷層，此斷層將西側山脈內大量高壓地下水阻絕存留在此段大理岩脈內，以致新永春隧道開挖遭遇巨量高壓湧水災變。

根據地質調查及北迴鐵路隧道施工狀況，約呈南北向的東猴椅山斷層帶（如圖 10）將東澳地區的地下水分隔成東西兩側不同地下水系，斷層帶提供阻絕及導引兩項功能，斷層泥將區域地下水區隔成東、西二個系統，兩側的地下水則分別經由斷層破碎帶流入東澳北溪支流內，匯流入海。東澳地區的東、西兩側地下水系統分述如下：

1. 西側地下水系統：主要源自於西側高山集水區所提供大量源源不絕的高水頭地下水補注，同時受斷層阻絕影響，蓄存於斷層帶西側破碎地層及大理岩內，不易滲流到斷層帶東側，此亦為舊永春隧道開挖通過南段大理岩時，未出現湧水災變的原因。
2. 東側地下水系統：主要源自於東澳嶺地區的豐沛降雨量（年雨量約 6,000~7,000mm）入滲補注，降雨透過東澳嶺地區密集破碎帶所形成的漏斗狀裂隙通路入滲（如圖 11 所示），蓄存於北側厚層大理岩及破碎地層。基本上在東側地下水系統內開挖隧道，仍具有出水風險，但東側地下水系統的補注區集水面積較小，山體高

度亦較低，故蓄存的地下水量及水壓應低於西側的地下水系統。

東澳隧道位在東側的地下水系統內，研判隧道施工雖亦會遭遇出水問題，但應不致遭遇類似新永春隧道的巨量湧水規模。東澳隧道實際施工結果顯示，對於新永春隧道施工發生巨量湧水的南側大理岩，東澳隧道施工過程並未遭遇明顯的出水狀況，開挖主要的出水係發生在隧道里程 5K+300~5K+400 的北側大理岩段，其中南口南下線北向開挖首先進入北側大理岩內，一如預期發生相當規模的出水量（圖 8），其如圖 12 所示出水點①，但隨後北口北上線南向開挖至此段大理岩時，北上線隧道亦出現大量出水問題（如圖 12 所示出水點②），但於此同時南下線隧道內的出水量則迅速減少，呈現近乎無水狀態，北上線隧道則持續出水，意謂地下水的主要補注源是來自東側東澳嶺地區（如圖 12 所示），來自西側的地下水量極少。另相對位置偏東的北上線開挖出水量普遍高於南下線（詳圖 6 及圖 7），亦可論證上述東西兩側地下水系統分布的可信度。

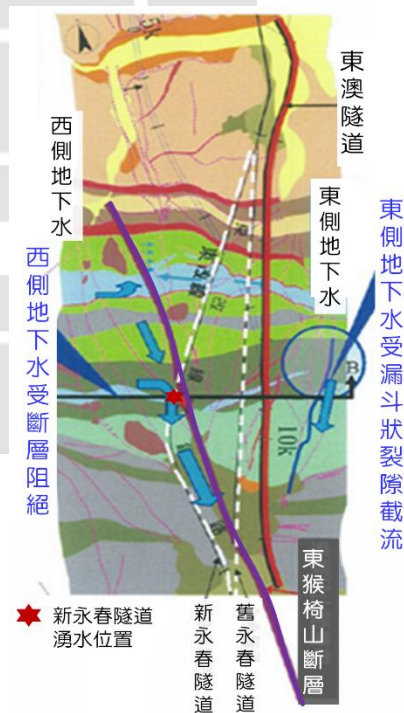


圖 10 東澳隧道鄰近區域地下水系統平面示意圖

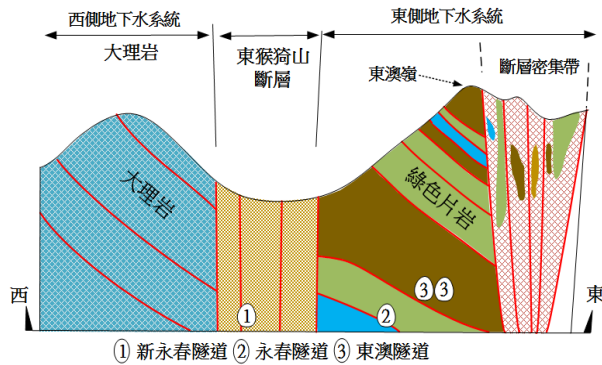


圖 11 東澳隧道鄰近區域地下水系統剖面示意圖

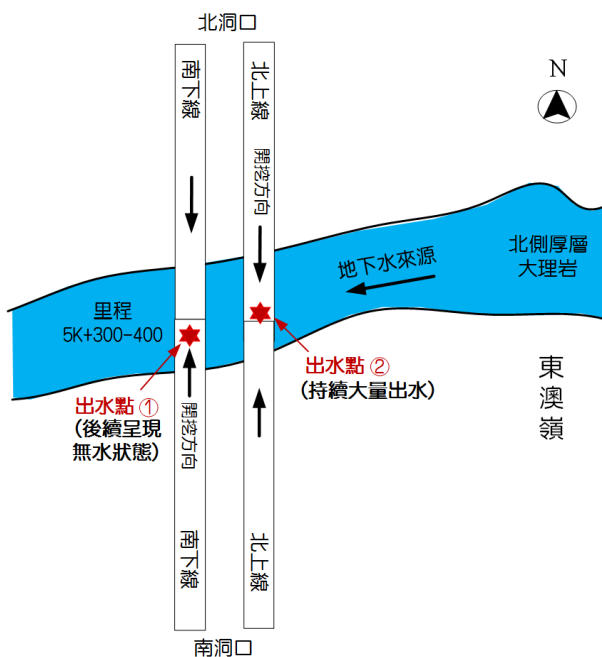


圖 12 東澳隧道北側大理岩開挖出水位置與地下水來源關係平面示意圖

四、鄰近區域地下水資源影響評估

(一) 地下水位觀測研判

面臨氣候變遷劇烈影響之臺灣，各地區水資源供應穩定性的改變，常引發民眾將枯水期的水資源短缺問題歸咎於鄰近工程施工。對於問題原因的釐清，實需要輔以科學量化數據予以佐證。在隧道工區及鄰近範圍設置各項觀測儀器（如地下水位觀測井、隧道出水量、雨量站及河川流量站等），觀測隧道施工前、中、後的水文地質變

化情形，為評估工程施工對鄰近區域水資源環境影響之最直接方法。

東澳隧道在施工期間設置 4 座自記式地下水位觀測井，分別為：（1）位在隧道北段圳頭溪上游的 BH-01 水位井、（2）位在隧道南段東澳北溪上游的 BH-02 水位井、（3）位於隧道中段上方大理岩層的 BT-01 水位井、（4）位於隧道中段東側東澳嶺的 BT-02 水位井，其位置如圖 13 所示。4 座自記式水位觀測井以每 10 分鐘記讀一筆資料方式，全程記錄施工期間的地下水位變化情形，觀測所得水位變化歷時區線圖如圖 14~圖 16 所示。



圖 13 東澳隧道沿線鄰近區域地下水位觀測井平面位置示意圖

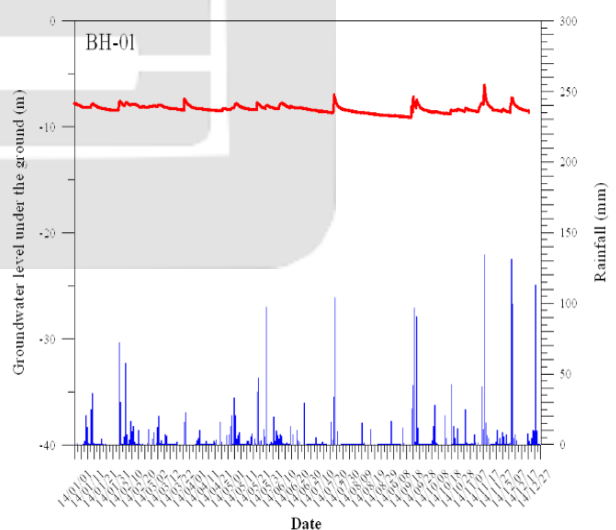


圖 14 BH-01 水位觀測井歷時曲線圖

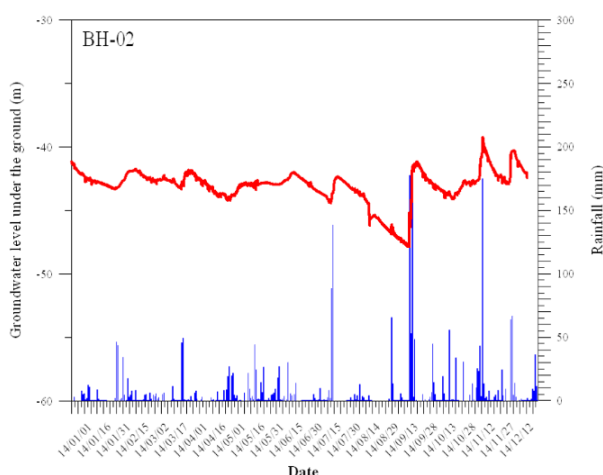


圖 15 BH-02 水位觀測井歷時曲線圖

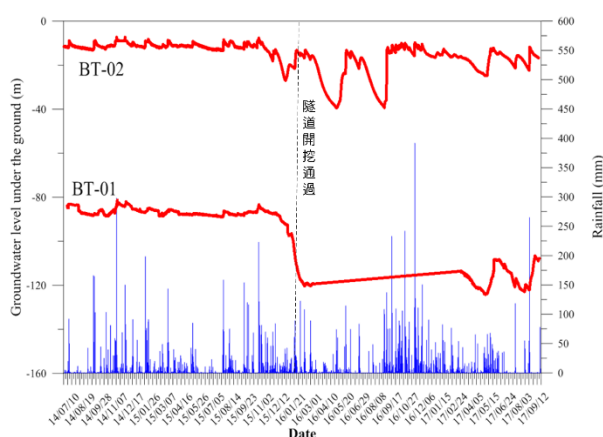


圖 16 BT-01 及 BT-02 水位觀測井歷時曲線圖

地下水位觀測結果顯示：(1)BH-01 及 BH-02 水位井的水位在施工過程雖有起伏變化，但仍在一定的範圍內變動，而且水位的變化呈現與降雨量多寡密切相關，隧道施工並未對兩座水位井的水位產生直接的影響；(2) BT-01 及 BT-02 水位井初期亦呈現與 BH-01 及 BH-02 水位井的水位變化相同的趨勢，意即水位變化主要與降雨量相關。惟 2016 年初出現明顯水位下降狀況，研判除該年度降雨量減少的影響外，主要受隧道開挖通過北側大理岩段時，隧道內出現大量出水，導致位在該段大理岩的 BT-01 水位井明顯下降，此水位下降範圍並進一步向東側延伸，導致 BT-02 水位井的水位也出現下降的狀況。但隨著隧道開挖

貫通後的襯砌施作逐步完成，以及東澳嶺持續的豐沛降雨補注，此地下水位下降情形已逐漸減緩，並有回升現象，其中 BT-02 水位井的水位大約已回復至施工前狀態，BT-01 水位井的水位雖尚未完全回復，但亦有回升的現象，顯示隧道施工的影響範圍已縮小至隧道鄰近小區域內。

(二) 三維水文地質模式分析研判

施工期間透過儀器的觀測雖為掌握水資源影響最直接的手段，惟水資源環境影響評估需由集水區內水平衡的觀點著手，所涉及的範圍面積常甚為廣大，儀器設置數量與位置實無法涵蓋全部區域，因此仍需透過結合其他分析技術（如理論解析、水文地質類比或數值分析等），將儀器觀測所得到之有限點狀資料，延伸至線狀及平面資料，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（林廷彥等，2014）。

由於臺灣山區的水文地質條件甚為複雜，理論解析方法常無法描述山區複雜的水文地質狀況，且理論解析法多僅用於水井力學（例如評估隧道施工出水量），並不適用於區域水資源環境變化研究（Anderson, 2000）；二維數值分析法則對於所有岩層之延伸關係、岩層介面、褶皺軸面、甚至斷層破裂面等係僅以一條粗略線段或點表示，無法反應地層異質性、異向性及地質構造分佈等情形，而且二維平面分析無法獲知區域地下水流場變化情形。基本上理論解析法及二維數值分析法一般較適用於平原地區之規律層狀水文地質狀況，而對於水文地質條件變異複雜之山岳地區則仍應採用三維分析技術（Kitterod *et al.*, 2000）。

本文利用東澳隧道設計階段所建構的三維水文地質模式為基底，進一步依據隧道開挖所揭露之水文地質狀況，率定修正模型水文地質單元設置與參數給定，隧道施工期間共辦理數次的模式修正，包括：(1) 新增東猴椅山斷層帶，將東澳

地區隔成東、西兩側不同地下水系統、(2) 參考羅偉及王泰典等(2010)所繪製的新永春隧道鄰近區域地質構造圖，調整新永春隧道鄰近區域的水文地質單元分布，並將大理岩區分為低、中、高等不同透水性質、(3) 參考潘國樑教授的東澳嶺地區衛星影像資料判釋結果及隧道工程細部設計圖，於模型中大幅度增修東澳嶺地區的剪裂破碎帶、(4) 依據隧道開挖所揭露之實際狀況，修正里程 4K+232~4K+754 區段的變質砂岩、板岩、輝綠岩與黑色片岩的位置與厚度、(5) 模式原設定里程 4K+792~5K+400 區段為厚層大理岩，實際開挖顯示里程 4K+792~5K+262 主要遭遇黑色片岩，里程 5K+262~5K+400 則為厚度不等的大理岩與綠色片岩，依據實際狀況修正模型水文地質單元分布、(6) 隧道里程 5K+945~5K+989 實際開挖遭遇矽質片岩及綠色片岩，與原模式設定的綠色片岩不一致，予以修正、(7) 依據開挖所揭露資料，修正里程 6K+235~6K+259 區段的薄層大理岩與綠色片岩的位置與厚度。最終隧道貫通後的模式如圖 4 (b) 所示，相較於圖 4 (a) 已有相當幅度的修正。由於模式分析係採用等效孔隙介質模式，所劃分之水文地質單元較大，整體考量設定其水文地質參數，無法完全反應局部較小規模之高透水性地質單元或阻水構造，因此在局部地區可能出現分析結果與實測值略有差異情形，惟整體分析結果與觀測值仍大體相符，顯示修正後的模式可吻合現場情形。

模式分析結果顯示，隧道施工前的地下水位分布如圖 17 所示，施工前的初始地下水流場於兩個集水區（蘇澳溪及東澳北溪）內各成體系，總水頭分布呈現隨地形起伏之重力流趨勢，地下水流場變化較大處主要發生於高水頭（高岩覆）與透水係數較大之區域（斷層、密集破碎帶），除鄰近既有北迴鐵路隧道周圍之地下水朝隧道軸線方向流入外，其他區域地下水流場變化不顯著。隧道開挖可能造成周圍水力梯度改變，並引致地

下水流場變化，東澳隧道已全線開挖貫通，施工過程主要的出水係發生於北側大理岩段，透過比對隧道施工前、後的地下水文變化情形，可研判隧道施工對鄰近區域地下水資源環境影響。圖 18 為 2017 年底隧道貫通後的區域地下水頭洩降分布情形，分析結果顯示隧道北側大理岩段（里程 5K+300~5K+400）為主要之水位洩降區域，雖貫通後隧道修挖過程仍發生規模不等的抽坍事件（如南下線里程 4k+519.7~4k+545.7 及北上線里程 5k+499.1~5k+475.1 等），而使洞口水量有再增加狀況，但抽坍段修復後，隨著降雨持續補注（東澳嶺 2017 年上半年的降雨量為 2,112mm；2017 年下半年的降雨量為 5,203mm），本區地下水位洩降範圍相較貫通時已有明顯縮小，最大洩降深度亦顯著減少。

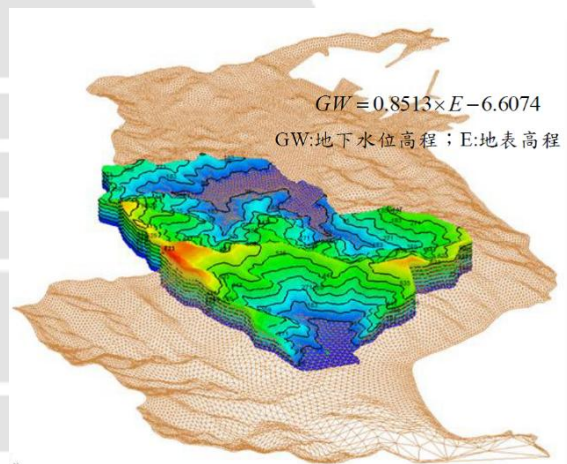


圖 17 東澳隧道鄰近區域施工前地下水位分布圖

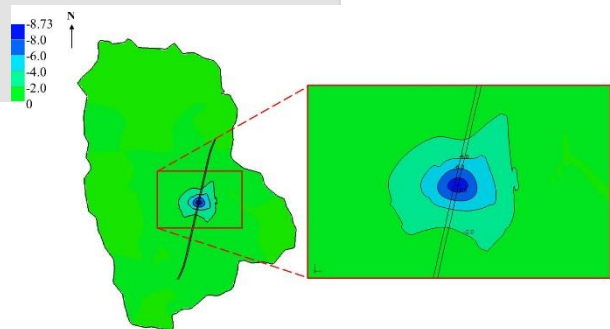


圖 18 東澳隧道貫通後 2017 年底區域地下水頭變化分布情形示意圖

七、結論與建議

臺灣山區水文地質條件複雜，並有豐富地下水儲量，導致山岳隧道施工常遭遇各種出水問題。在劇烈氣候變遷衝擊下，易引發民眾將枯水期的水資源短缺現象歸咎於鄰近工程的施工。在水資源保護意識抬頭下，水文地質調查在臺灣逐漸受到重視，本文乃介紹具有高出水潛勢之東澳隧道施工期間水文地質調查與分析評估工作執行，東澳隧道開挖全程進行出水量觀測及鄰近區域地下水位監測，結果顯示隧道的出水與開挖長度無關，主要受地層的透水性質影響，北口段因岩性變化劇烈，在斷層帶及岩性變化處發生多次抽坍及規模不等的出水問題，惟仍尚在施工可處理的範疇內。隧道主要出水係發生在北側厚層大理岩內，其地下水主要源自於東側東澳嶺地區，西側的地下水受東猴椅山斷層阻隔影響，並未影響東澳隧道施工；北側大理岩段大量持續出水狀況，雖導致鄰近區域地下水位短暫下降，但透過地下水位觀測及三維水文地質模式分析結果顯示，近期區域地下水位已有明顯回升，大部分區域已回復至施工前狀態，目前洩降範圍僅侷限於隧道上方小範圍內，研判隨著隧道完工後，出水規模下降及東澳嶺豐沛的降雨補注影響，區域地下水資源的影響規模將會持續縮小。

本文案例隧道在辦理的水文地質調查與三維水文地質模式分析技術，能應用於研判複雜水文地質條件下之隧道施工行為與地下水環境影響互動關係，未來對於重要工程建設若均能調查建立其鄰近區域三維之水文地質模型，可藉以瞭解並降低水文地質環境對工程興建可能造成的施工風險，同時避免工程推動可能對鄰近區域地下水資源造成巨大之衝擊，在工程興建與環境保護間取得平衡，使臺灣未來的工程建設邁向更優質化與科學化里程。

誌謝

本文特別感謝交通路蘇花公路改善工程處及中興工程顧問股份有限公司蘇澳東澳工程處提供隧道施工資料及現場調查協助，使本研究計畫得以順利執行完成。

參考文獻

- 中興工程顧問有限公司（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
- 林廷彥、蕭富元、高憲彰、彭詩容（2014）三維分析技術應用於公路隧道施工鄰近區域水資源環境影響研究，臺灣公路工程，第40卷，第8期，第26-42頁
- 許晃雄、陳正達、盧孟明、周佳、吳宜昭（2011）臺灣氣候變遷科學報告，行政院國家科學委員會
- 臺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
- 謝立德、高憲彰、譚志豪、彭詩容（2014）地下水對邊坡穩定性影響之評估與對策-以南迴鐵路沿線邊坡為例，隧道建設，第34卷，第98-104頁
- 譚志豪、顧承宇、侯秉承、李民政、吳富洵（2008）曾文越引隧道工程水文地質之調查評估，中興工程季刊，第99期，第27-35頁
- 蕭富元、彭詩容、高憲彰、龔樹勇（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，第6-14頁
- 蕭富元、高憲彰、邵厚潔、林廷彥（2015）蘇花改隧道施工對地下水文影響評估，地工技術，第146期，第33-42頁
- Anderson, M. P., and W. W. Woessner (2000) Applied Groundwater Modeling - Simulation of Flow and Advective Transport, Harcourt Asia Pte Ltd.
- Hudak, Pual F. (2005) Principals of Hydrogeology, CRC Press, Boca Raton, Florida
- Katibeh, H., Aalianvari, A. (2012) Common Approximations to the Water Inflow into Tunnels, Drainage Systems, InTech, pp. 75-88
- Kitterod, N. O., H. Colleuille, W. K. Wong and T. S. Pedersen (2000) Simulation of Groundwater Drainage into a Tunnel in Fractured Rock and Numerical Analysis of Leakage Remediation, Romeiksporten Tunnel, Norway, Hydrogeology Journal, Vol. 8, pp.480-493