

# 山岳隧道施工出水量推估與鄰近地下水資源影響研究

李宗仁<sup>1</sup>、吳明恩<sup>1</sup>、項授青<sup>1</sup>、蕭富元<sup>2,\*</sup>、辜炳寰<sup>2</sup>

<sup>1</sup>公路總局蘇花公路改善工程處 <sup>2</sup>財團法人中興工程顧問社

## 摘要

臺灣水文地質環境複雜，山岳隧道施工遭遇出水問題時有所聞。近年來利用水文地質研究瞭解地下水流路徑、補注來源、儲存環境與地層透水性，據以探討隧道施工出水與區域地下水資源影響逐漸受到重視。本文以高出水潛勢的蘇花改東澳隧道為例，辦理長期水文地質觀測，建構三維水文地質模式，並配合隧道施工進度，滾動檢討修正模式的適用性，據以推估隧道施工出水量及鄰近區域地下水資源變化評估。本文研究結果顯示隧道施工雖曾一度造成鄰近地下水位出現明顯洩降，但隧道開挖貫通及混凝土襯砌澆築後，在隧道出水量減少及豐沛降雨補注下，地下水位已大致回復。本文經驗可提供隧道工程推動與地下水資源保護參考。

**關鍵字：**水文地質模式、隧道出水、地下水資源變化。

## Assessment of Water Inflow and Neighboring Groundwater Resource Influence during Mountain Tunnel Construction

C. J. Lee<sup>1</sup>, M. E. Wu<sup>1</sup>, S. C. Hsiang<sup>1</sup>, F. Y. Hsiao<sup>2,\*</sup>, and B. H. Ku<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Suhua Improvement Engineering Office, Directorate General of Highways, M.O.T.C. <sup>2</sup>Geotechnical Engineering Research Center, Sinotech Engineering Consultant, INC.

## Abstract

The hydrogeological condition is complicated in Taiwan and tunnel inflow is often occurred during construction. In recent years, hydrogeological investigation is often used to help understand the groundwater flow path, recharge source, storage environment and stratum permeability around the tunnel alignment. The tunnel inflow and groundwater resource variation are assessed according to the realized hydrogeological conditions. A high water inflow potential case, which is from the Dangao Tunnel in the Suhua Highway improvement project, is introduced in the paper. The long-term hydrogeological measurement and 3D hydrogeological modeling were conducted during the tunnel construction. Furthermore, the applicability of the hydrogeological model was continuously revised according to the revealed data during the tunnel construction. The tunnel inflow and regional groundwater resource variation were estimated based on the validated hydrogeological model. The research results show that an obvious groundwater level drawdown induced by the tunnel excavation was once observed. However, the regional groundwater level had generally recovered due to the recharge from abundant rainfall and the tunnel inflow reduction after the tunnel concrete lining installation. The hydrogeological investigation in this paper provides a valuable experience for tunnel engineering promotion and groundwater resource protection.

**Key Words :** hydrogeological modeling, tunnel inflow, groundwater resource variation.

\*通訊作者(Corresponding author) : fuyuan@sinotech.org.tw

## 一、前言

臺灣位於板塊交接帶，中央山脈綿亙臺灣南北長達三百餘公里，山區面積廣袤，地層破碎，豐沛降雨(平均年雨量達2500mm)沿地層裂隙與連通孔隙入滲流動，地下水蘊藏豐富；此外，受發達裂隙與斷層剪裂帶影響，山區地下水流向複雜，造就臺灣複雜的水文地質環境。近年來在全球氣候劇烈變遷及乾淨水資源匱乏影響下，透過水文地質研究，瞭解各地區地下水補注來源、水流路徑、儲存環境與地層透水性等課題，進而應用於地下水資源開發與管理，逐漸受到重視，成為熱門領域。

水文地質與大地工程關係密切，尤其臺灣複雜水文地質環境對隧道工程影響尤巨，致使臺灣隧道施工遭遇出水問題層出不窮(林等人，2003；許等人，2015)，相關可能衝擊包括：1.突發湧水影響隧道穩定、2.持續出水妨礙施工作業、3.高壓出水導致隧道抽坍、4.圍岩長期浸水弱化，變形加劇等；反之，隧道開挖亦將改變周圍水文地質環境，例如：1.開挖解壓導致岩體裂隙內寬擴增及延伸連通，地層透水性增加、2.持續出水改變鄰近地下水流場、3.大量湧水造成水資源流失等。

上述諸項議題中，隧道開挖湧水為施工需直接面對的挑戰，故此方面的案例探討與經驗回饋文獻較多，例如：北迴鐵路新永春隧道遭遇巨量湧水災變處理對策探討，包括補充地質調查、大孔徑排水孔施作、熱瀝青灌漿、排水廊道設置及隧道改線等(Wang et al., 2011)；蘇花公路改善計畫-岩覆深度達1200公尺的中仁隧道，隧道已開挖段在豪雨過後出現大量出水情形，蕭等人(2018)提出出水機制與處理對策探討，包括減漏灌漿、排水容量擴增、路基RC底板設置等；另臺灣南部引水隧道施工遭遇溫泉入滲特殊案例，蕭等人(2013)說明其溫泉來源調查、高溫酸性泉水對施工與材料影響、灌漿止水處理及成效檢討等。

隧道湧水事件除事件發生後的處理對策外，隧道開挖出水量推估亦為要點。一般常用的調查方法大致分為地質分析法與地球物理法等兩大類型，其中地質分析法係指透過導坑

先進或水平探查孔，結合現場地質構造，推估隧道開挖面前方可能蘊藏水體；而地球物理法則是利用各種地物特性探測，間接推估地下水文狀況，常用方法包括TSP探測、地電阻探測、瞬變電磁法、激發極化法等。近年來各種水文地質調查技術快速發展，例如水文地質遙測、鑽井孔內攝影、井內電測、封塞水力試驗、地下水流速測定等，在國內隧道工程逐漸受到重視與應用(Chou, 2021；柯等人，2021；辜等人，2019)。此外亦有許多隧道出水量推估數學解析法(Faehadian et al., 2012)，由於理論解析需將問題簡化假設以便求解，故僅適用於層狀規律水文地質環境(Kitterod et al., 2000)。各種調查評估方法各有其優點與限制，但地下水體探查不易，透過間接或理論解析推估方式，對於臺灣複雜水文地質環境的適用性有其侷限性，基本上應視各地區水文地質特性，結合數種方法綜合評估之，提升結果精度。

近年來由於電腦運算能力及軟體程式發展，利用三維數值分析於各種複雜水文地質問題探討逐漸推廣。例如謝等人(2014)針對緊鄰邊坡的南迴鐵路隧道營運維護問題，透過水文地質調查與三維模式分析，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，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；Hsiao et al. (2019)透過水文地質調查及監測資料，建構區域三維水文地質模型，探討隧道施工對地下水文影響；張等人(2020)針對複雜褶皺構造導致之隧道抽坍，結合廣域與近域三維模式，分析探討隧道抽坍前後的出水行為，提供抽坍處理研擬與長期營運參考。

臺灣過去在地下水領域研究，較少深入山岳地區，工程進行亦多未將水文地質特別提列為工作項目，2020年初完工通車的臺9線蘇花公路山區路段改善計畫，在施工期間辦理一系列水文地質調查與分析評估工作，開創國內第一個完整蒐集隧道施工前、中、後水文地質資料全紀錄的工程，並針對沿線5座長隧道(東澳

隧道、觀音隧道、谷風隧道、中仁隧道、仁水隧道)建構其三維水文地質模式，探討隧道施工與鄰近區域水資源影響關係，結果具參考價值。本文以水文地質條件複雜且具高出水潛勢的東澳隧道為例，說明如何透過水文地質研究推估隧道出水量，以及隧道施工對鄰近區域地下水資源影響評估，分述如后。

## 二、隧道出水量推估

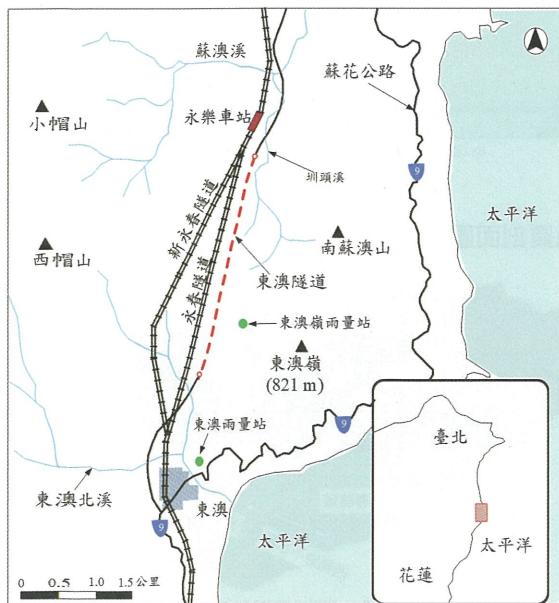
### 2.1 案例水文地質環境

本文案例東澳隧道位置如圖一所示，隧道長約 3.3 公里，為雙孔單向隧道。隧道施工通過大南澳變質岩區，多種岩性(包括矽質片岩、綠色片岩、黑色片岩、千枚岩、板岩、變質砂岩、大理岩、角閃岩、輝綠岩等)交互出現，岩性變化劇烈。在地質構造上，受板塊擠壓及沖繩海槽伸張作用，形成複雜褶皺與剪切變形構造，岩體裂隙及斷層破碎帶等次生構造主導區域地下水流。

調查設計階段的岩盤滲漏試驗顯示，本區地層透水係數(hydraulic conductivity, K)約  $10^{-8} \sim 10^{-6} (m/s)$ ，大致屬中等~低透水性地層，此試驗結果無法研判裂隙對透水性質影響。Katibeh and Aalianvari (2012)提出裂隙岩體滲透性質在長隧道內可能出現高達 6 個級數

(order)差異，影響隧道出水問題與規模。東澳隧道在施工期間進一步辦理鑽井封塞水力試驗，結果顯示完整緻密片岩的透水係數約為  $10^{-10} m/s$ ，片理發達的片岩的透水係數提高至  $10^{-7} \sim 10^{-8} m/s$ ，裂隙破碎段片岩透水係數再增加為  $10^{-6} m/s$ ，而擠壓剪磨片岩的透水係數則降低為  $10^{-8} \sim 10^{-9} m/s$ ，顯示節理裂隙構造主控本區地層透水性質(如圖二所示)；另大理岩段試驗結果顯示，裂隙發達大理岩具高透水性(透水係數約  $10^{-5} m/s$ )，而灌漿後大理岩透水係數則降至約  $10^{-7} m/s$  數量級，意謂灌漿成效良好時，大理岩透水性將可降低 2 個數量級左右。

東澳隧沿線道通過蘇澳溪流域的上游支流-圳頭溪及東澳溪流域的東澳北溪北支流，兩條流流呈現暫時溪特性，即溪床在無降雨時常呈現乾涸狀，降雨時才出現水流，隨後溪床再次呈現乾涸情形，河川流量與區域降雨豐枯有直接對應關係。根據雨量觀測資料顯示，東澳地區受東北季風影響，降雨集中在每年 9 月至隔年 1 月，平均年雨量約 4,510mm，遠高於臺灣平均年雨量 2,500mm，另面對東北季風迎風面的東澳嶺雨量每年約達 5,851mm，2019 年時年雨量更高達 8,350mm，地下水補注來源不虞匱乏。此外，東澳地區豐枯水年雨量有明顯差異，東澳雨量站豐水年(2012 年及 2017 年)降雨量約 4,907~4,954mm，而枯水年(2014 年)降雨量僅 2,530mm；東澳嶺豐枯水年



圖一 東澳隧道地理位置圖

- ◆ 完整緻密片岩：透水係數約  $10^{-10} m/s$  數量級  
岩材孔隙主控地層透水性質，極低透水性地質單元



- ◆ 片理發達片岩：透水係數約  $10^{-7} \sim 10^{-8} m/s$  數量級  
片理主控地層透水性質，低透水性地質單元



- ◆ 裂隙發達片岩：透水係數約  $10^{-6} m/s$  數量級  
節理裂隙主控地層透水性質，中度透水性地質單元



- ◆ 擠壓剪磨片岩：透水係數約  $10^{-8} \sim 10^{-9} m/s$  數量級  
剪裂泥主控地層透水性質，低透水性地質單元



圖二 裂隙構造對片岩透水性質影響彙整圖

雨量亦有顯著差異(豐水年8,350mm, 枯水年4,028mm), 約達2倍左右, 如圖三所示。

東澳隧道鄰近兩座營運中鐵路隧道(舊永春及新永春隧道), 在施工期間遭遇規模不等出水問題, 新永春鐵路隧道更曾出現巨量湧水災變, 瞬間最大出水量達約83(T/min), 嚴重影響施工安全, 並造成工期延宕。因此, 如何避免新永春隧道湧水噩夢重現乃為東澳隧道設計施工的關鍵課題。經水文地質調查評估後, 東澳隧道路線向東偏移至舊永春隧道東側, 避開西側高山寬廣集水區, 同時隧道高程向上提高約40m, 研判可降低隧道施工大量地下水入滲風險(蕭等人, 2020)。

### 2.2 隧道施工出水量推估

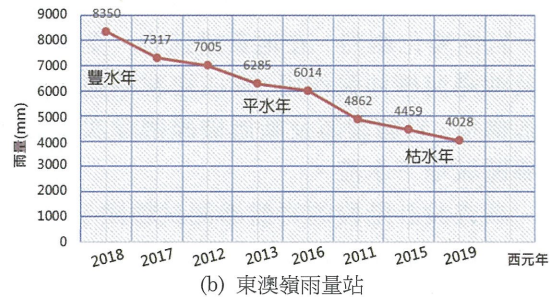
東澳隧道地層變化劇烈(圖四), 且有約呈東西向的小帽山斷層帶及猴椅山斷層帶通過, 鄰近並有約呈南北向的東猴椅山斷層, 隧道東側的東澳嶺具豐沛降雨補注, 地下水文地質環境複雜。理論解析及二維分析基本上不適用於本隧道出水量推估, 本研究由水文地質觀點出發, 透過含水層分區與分層, 建構隧道三維水文地質模型, 並採用美國地質調查所(USGS)所發展的MODFLOW程式, 利用水平衡原理及地下水流動控制方程式, 模擬分析區

域地下水流場, 推估隧道施工可能出水量。

東澳隧道設計階段所建構的三維水文地質模型如圖五(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, 另透水性佳的大理岩層, 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1,500L/min(中興工程顧問股份有限公司, 2012)。

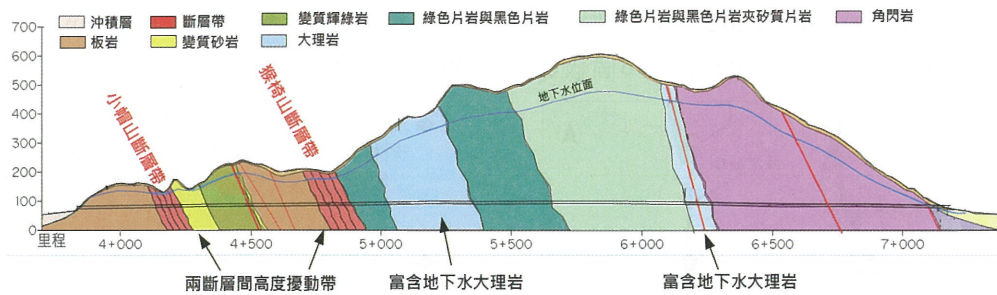


(a) 東澳雨量站

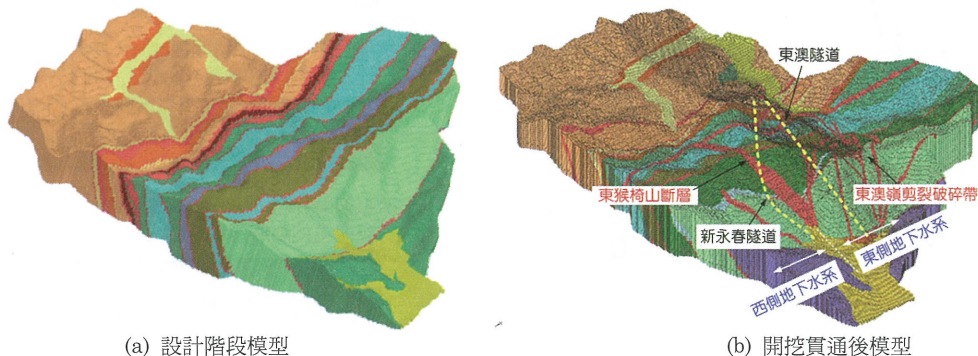


(b) 東澳嶺雨量站

圖三 東澳地區豐枯水年雨量分布圖



圖四 東澳隧道地質剖面圖



圖五 東澳隧道鄰近區域三維水文地質模型

隧道施工期間持續根據開挖所揭露的地質資料及水文觀測資料(包括隧道開挖面出水量、洞口累積出水量、洞口邊坡及鄰近區域地下水位、鄰近營運中鐵路隧道出水量、降雨量等)，進行三維水文地質模式參數率定與模型檢討修正。施工期間辦理多次的重要修正，包括：1.調降小帽山斷層帶及猴椅山斷層帶透水係數、2.細分主要透水地層-大理岩為低、中、高三種不同透水性質、3.新增東澳嶺密集剪裂破碎帶水文地質單元、4.新增東猴椅山斷層構造、5.調整各水文地質單元位置與厚度、6.各單元水力係數率定修正等，隧道貫通後的三維水文地質模型如圖五(b)所示。

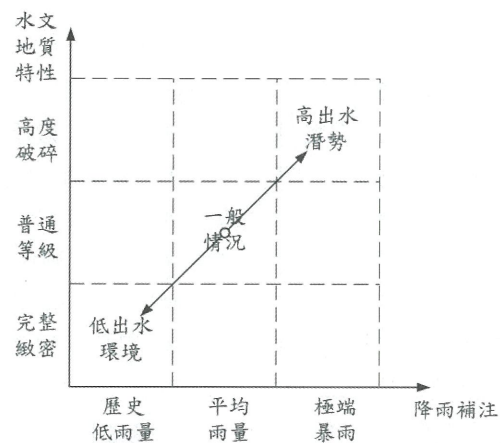
此外，因應施工需求，本研究在隧道施工期間，依據檢討修正的模式，持續辦理隧道未開挖段出水量推估工作。假設隧道開炸品質不變情形下，影響出水量的主要因子大致可歸納為水文地質環境(包含岩盤孔隙率、裂隙、通路徑連通性等)及地下水補注量(包含降雨補注、含水層側向補注)。由於未開挖段水文地質環境及地下水補注情形無法事先精確掌握，因此本研究乃透過情境設定方式來探討隧道出水量，情境設定說明如下：

1. 水文地質環境情境：由於岩體破碎程度及裂隙連通性可具體反映在岩體透水係數的改變，因此本研究以不同岩體透水係數來呈現未開挖段的不同水文地質特性。依據現地水力試驗及模式率定結果，東澳隧道已開挖段岩體透水係數變化範圍約在4個級數(order)以內，故情境設定乃以4個級數變動範圍為原則，初步以初始值、100倍及0.01倍透水係數做為3種情境(普通等級、高度破碎、完整緻密)的設定參數。

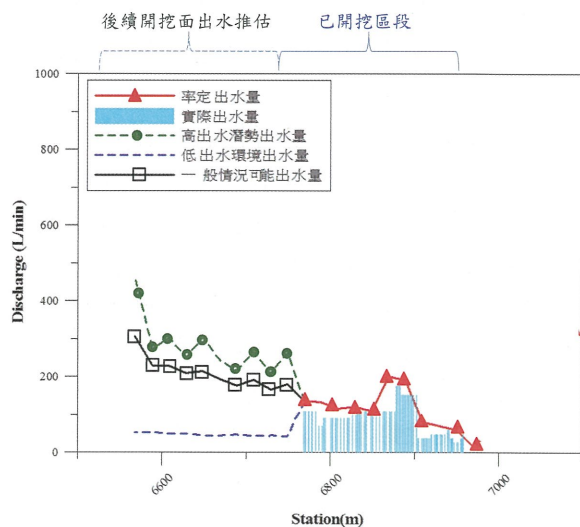
2. 地下水補注情境：地下水補注來源大致分為含水層側向補注及降雨補注兩大部分，其中含水層補注依據河川基流分析結果，將不同乾濕季節的補注變化情形納入模式分析；至於降雨補注則參考蘇花改工程鄰近雨量站的降雨頻率分析結果，以歷史低雨量、平均降雨量及50年重現期暴雨量等三種降雨補注條件分級。

依據上述兩項影響因子變化情形，進行各種情境組合，據以推估一般情況及極端條件下隧道出水量可能變動範圍，包括高出水潛勢

(50年重現期降雨量與100倍岩體透水係數之組合)及低出水環境(無降雨情形與0.01倍岩體透水係數組合)，如圖六所示。本研究利用隧道「已開挖區段」模式率定修正結果，結合上述三種情境條件，分析隧道未開挖段200m範圍遭遇不同情境條件的可能出水量，出水量推估結果示意如圖七所示。本研究配合隧道開挖進度，根據新揭露的水文地質資料，重複上述步驟，進行滾動修正及率定，進行隧道未開挖區段出水量推估，提供施工參考。



圖六 隧道出水量推估情境設定示意圖



圖七 隧道後續開挖出水量推估結果示意圖

### 2.3 隧道開挖出水量探討

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。隧道開挖所遭遇的出水狀況概述如下：

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岩性相對單純,開挖主要遭遇數百公尺厚角閃岩,岩層大致完整透水性低,隧道南口段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,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);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。

有關隧道開挖出水量推估結果探討,本文以出水量較大的北上線隧道為例進行比對說明。隧道北上線開挖面出水量觀測如圖八所示,隧道沿線通過地層複雜,在岩性變化交接處常有突發性出水出現,隧道開挖面現場可見岩性變化處多有厚度不等的剪裂破碎帶,研判係由於兩側岩體存在顯著差異時,在地體構造活動過程中容易成為層間滑移剪動帶,因而成為地下水流通道,所幸此岩性變化交接處的突發出水多於短期內即減少,未造成致災性影響。此出水特性在三維水文地質模式分析時,可將岩性交接處設定薄層透水性佳的水文地質單元因應。因本研究探討區域廣達數十公里,水文地質單元過度細分,將造成模型網格設定與分析平衡困擾,故模式分析推估未予以特別考量。模式分析推估與實測結果均顯示隧道出水量與所通過地層透水性有關,以隧道北上線里程4K+000~5K+250區段為例,實測出水量有時會有略超出推估情形,主要皆發生在岩性交界帶。但整體來說,情境模擬推估出水量與實際開

挖出水量的比對結果,出水趨勢大致符合,如圖九所示,可供施工預先因應參考。

本文推估經驗顯示,對於岩性交界處的剪動破碎情形,可透過高出水潛勢情境分析推估可能出水規模。惟本文所設定的100倍透水係數的高度破碎透水性,對於臺灣東部大南澳變質岩帶受多期地質作用而言,可能仍略有不足,實際差異可能須達3個數量級距。

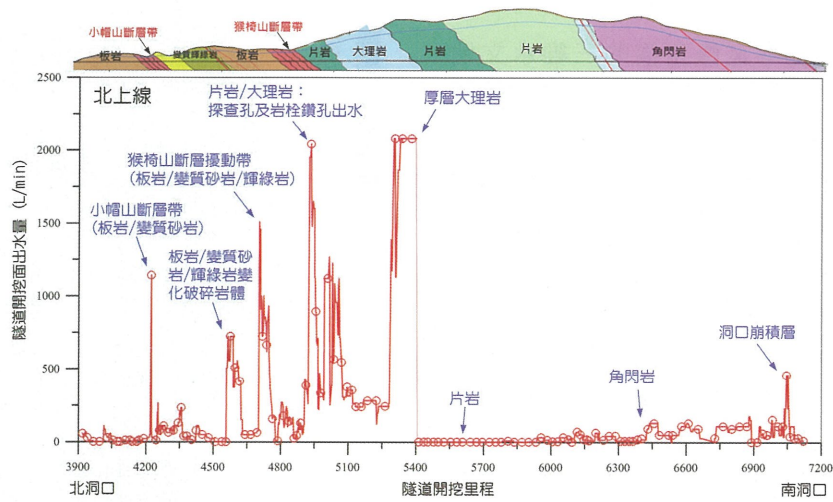
### 三、地下水資源影響探討

#### 3.1 地下水位監測

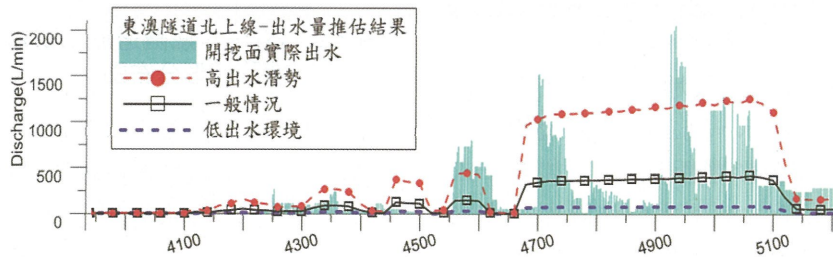
面臨氣候變遷劇烈影響的臺灣,各地區水資源供應穩定性的改變,常引發民眾將枯水期的水資源短缺問題歸咎於鄰近工程施工。對於問題原因的釐清,實需要輔以科學量化數據予以佐證。在隧道工區及鄰近範圍設置各項觀測儀器(如地下水位觀測井、隧道量水堰、雨量站及河川流量站等),觀測隧道施工前、中、後的水文地質變化情形,為評估工程施工對鄰近區域水資源環境變化影響的最直接方法。

東澳隧道施工期間設置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,各井位置如圖十所示。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,觀測結果歷時區線如圖十一所示。

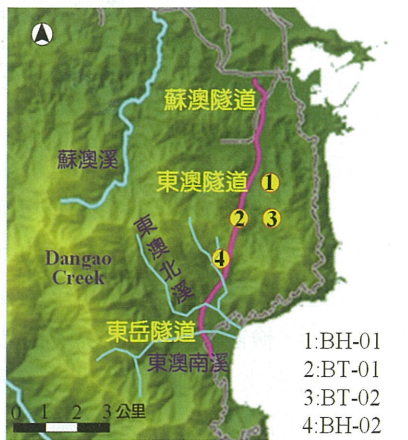
地下水位觀測結果顯示:1.BH-01及BH-02水位井的水位在施工過程雖有起伏變化,但仍有一定的範圍內變動,而且水位的變化呈現與降雨量多寡密切相關,隧道施工並未對兩座水位井的水位產生直接的影響;2.BT-01及BT-02水位井初期亦呈現與BH-01及BH-02水位井的水位變化相同的趨勢,意即水位變化主要與降雨量相關。惟2016年初出現明顯水位下降狀況,研判除該年度降雨量減少的影響外,主要受隧道開挖通過北側大理岩段時,隧道內出現大量出水,導致位在該段大理岩的BT-01水位井明顯下降,此水位下降範圍並進



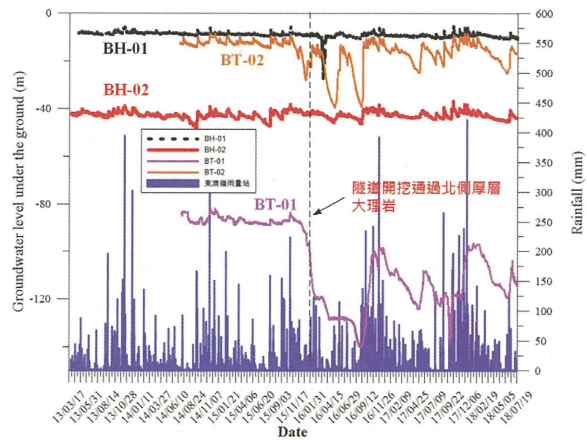
圖八 東澳隧道北上線開挖面出水量觀測值與開挖里程對應關係圖



圖九 東澳隧道北上線(里程4K+000~5K+250)開挖出水量推估結果圖



圖十 東澳隧道鄰近地下水位井位置圖



圖十一 東澳隧道地下水位觀測井歷時曲線圖

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，混凝土襯砌施作逐步完成，隧道出水量減少，同時東澳嶺持續豐沛的降雨補注，地下水位下降情形逐漸減緩，並有回升情形，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，但亦有明顯回升現象，顯示隧道施工影響已限縮至隧道沿線小範圍區域。

### 3.2 水文地質模式分析研判

隧道施工透過儀器的觀測雖為掌握水資源變化最直接的手段，惟水資源環境影響評估需由集水區的水平衡觀點著手，所涉及範圍面積通常甚為廣大，儀器設置數量與位置無法涵蓋全部區域，因此仍需透過結合分析技術(如理論解析或數值分析等)，將儀器觀測所得到的有限點狀資料，延伸至線狀及平面資料，甚進一步擴充至地下三度空間情形，以研判區域

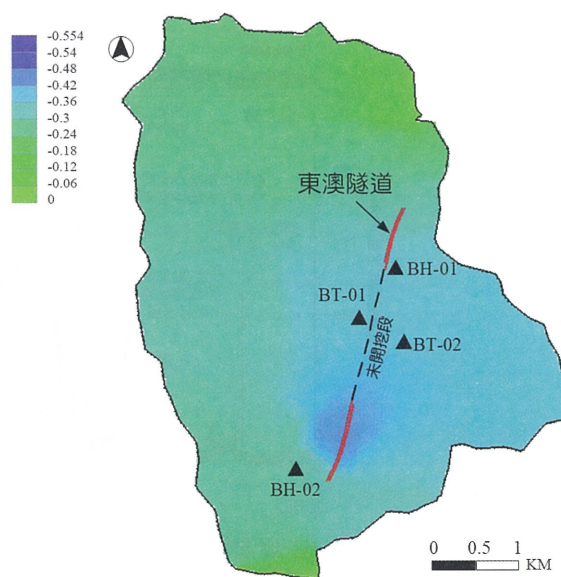
地下水文變化情形(林等人, 2014)。

本文利用前述率定修正後的三維水文地質模式, 探討隧道施工對鄰近區域地下水資源影響。模式分析結果顯示, 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, 施工期間主要的出水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, 研判隧道施工對鄰近區域地下水資源環境影響。分析研判結果顯示, 施工初期隧道開挖對鄰近區域地下水資源影響極為有限, 如圖十二所示, 隧道北口段最大地下水位洩降深度僅約0.38m, 且主要集中在隧道開挖面附近, 隧道南口段地下水位最大洩降深度約0.55m, 主要影響集中在南下線里程6K+150~6K+250的薄層大理岩區段, 並未向外擴大延伸。

東澳隧道開挖通過北側厚層大理岩時, 開始出現明顯出水, 隧道於2016年開挖貫通, 貫通初期大理岩持續出水, 導致地下水位有明顯洩降, 模式分析顯示最大地下水位洩降深度超過20m, 主要發生在北側大理岩段, 洩降範圍並向東延伸至東澳嶺附近(如圖十三); 後續經過減漏灌漿及混凝土襯砌逐步施作, 隧道出水量逐漸降低, 而東澳嶺持續的豐沛降雨補注, 使得東澳嶺側的地下水位有顯著回復趨勢, 至2018年10月時地下水位最大洩降深度約5.5m, 相較隧道剛貫通時有顯著減少, 且範圍限縮在隧道沿線主要出水的大理岩段附近, 如圖十四所示。

東澳嶺位於臺灣東北角, 每年秋冬時節受東北季風影響, 迎風面有豐沛降雨, 東澳隧道的出水主要來自於東澳嶺地區, 因此隧道出水行為除受開挖施工影響外, 亦與東澳嶺降雨量呈現明顯正相關。本工程地下水位觀測結果顯示, 隧道開挖通過北側厚層大理岩的大量出水, 雖曾導致鄰近地下水位明顯下降, 同時並



圖十二 2014年底隧道施工對鄰近區域地下水位洩降情形分布圖

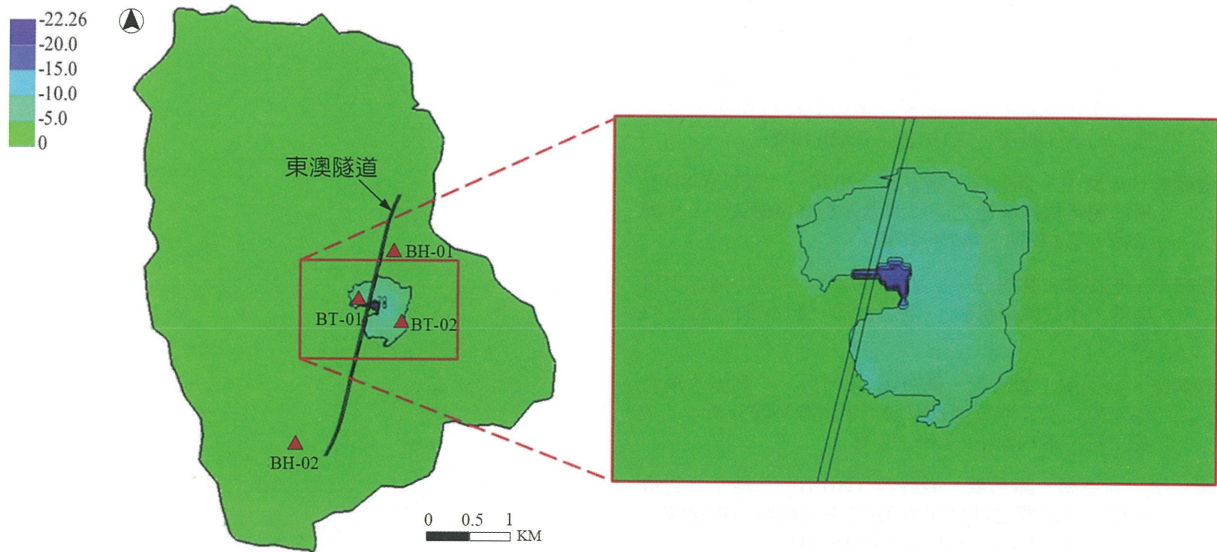
一度向東延伸擴大, 但隧道開挖貫通後, 出水量減少, 以及東澳嶺持續豐沛降雨補注, 地下水位已逐漸回復趨於穩定。

## 五、結語

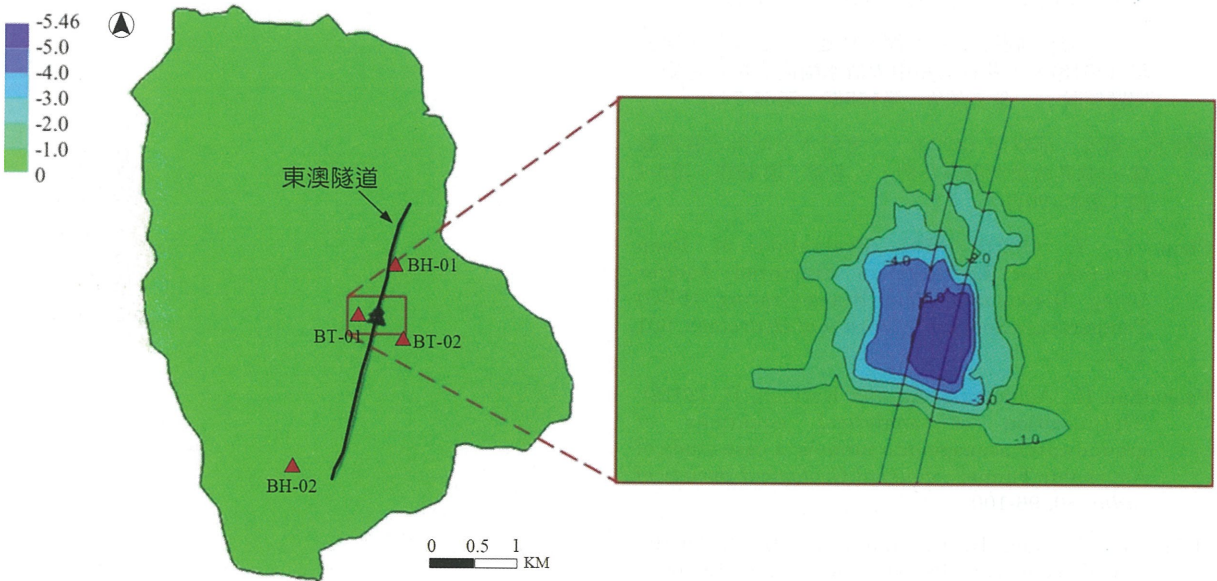
臺灣山區水文地質條件複雜, 並有豐富地下水儲存, 導致山岳隧道施工遭遇出水問題時有所聞。在水資源保護意識抬頭下, 水文地質在臺灣逐漸受到重視。本文研究前後長達8年時間(2012年~2020年), 且資料蒐集起至施工前至少5年時間, 以瞭解隧道施工前的水文地質環境, 並自隧道動工起全程觀測施工期間水文地質變化情形, 檢討建立符合現場狀況的隧道鄰近區域三維水文地質模式, 據以滾動檢討推估隧道開挖面前方可能出水量, 雖在岩性變化交界處與實際觀測值略有差異, 但整體出水趨勢與出水量規模仍大致符合, 可提供施工參考; 另利用率定檢討修正後的水文地質模式, 進一步分析隧道施工期間鄰近區域地下水位變化情形, 以科學量化數據釐清隧道施工對鄰近區域地下水資源的影響衝擊。

隧道施工水文地質觀測除攸關環評承諾外, 亦為研判水資源保護的重要資訊。東澳隧道施工出水觀測與模式分析結果顯示, 施工前期(2013~2014年), 隧道開挖出水所造成的地下水位洩降主要集中在開挖面附近, 水位最大





圖十三 2016年隧道開挖貫通時之鄰近區域地下水位洩降情形分布圖



圖十四 2018年隧道通車營運時之鄰近區域地下水位洩降情形分布圖

洩降深度約0.3~0.5m；而隧道貫通前(2015~2016年)開挖遭遇大理岩段持續出水，使地下水位出現明顯洩降，最大深度曾達22.3m，影響範圍並一度擴大至東澳嶺地區；貫通後至通車營運期間(2017~2018年)，隧道鄰近區域地下水位已明顯回升，由於東澳隧道為公路排水隧道，水位洩降集中於隧道路線上方，最大深度約5.5m，至於東澳嶺地區地下水位則已回升至原先狀態，顯示施工影響若可控制在短期間，地下水資源並非不可回復。臺灣目前隧道水文地質研究與實際應用仍屬起步階段，本研

究乃係拋磚引玉，期盼水文地質在隧道工程能有更多應用與貢獻。

### 參考文獻

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。  
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。

- 林銘郎、黃燦輝、蔣序元 (2003), 「新永春隧道湧水段水文地質之探討」, 第三屆兩岸結構與大地工程研討會論文集, 臺北。
- 柯建仲、陳柏瑞、魏倫璋、許世孟、林燕初 (2021), 「變質岩之水文地質特性與實務調查分析技術建置之研究」, *地工技術*, 第167期, 第29-40頁。
- 張偉哲、徐文杰、辜炳寰、蕭富元 (2020), 「FLAC3D應用於複雜褶皺構造之近域流場分析案例研究」, *中興工程*, 第149期, 第19~25頁。
- 許鈺漳、李懷淵、林賜忠、王進成(2015), 「雪山隧道工程與地下水之關係探討」, *地工技術*, 第146期, 第21-32頁。
- 辜炳寰、蔡文瀚、蕭富元、高憲彰 (2019), 「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」, *中興工程*, 第143期, 第57~67頁。
- 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。
- 蕭富元、高憲彰、譚志豪、吳富洵 (2013), 「隧道施工遭遇溫泉湧水案例探討」, 2013海峽兩岸地工技術/岩土工程交流研討會論文集, 臺北, 第171-178頁。
- 蕭富元、辜炳寰、高憲彰、邵厚潔、林廷彥、劉文煜、陳敏璋 (2018), 「蘇花改和中大清水斷高岩覆隧道施工問題探討」, *地工技術*, 第157期, 第65-74頁。
- 蕭富元、鄭安、邵厚潔 (2020), 「考量水文地質之隧道選線-以蘇花改東澳隧道為例」, *地質*, 第39卷, 第3-4期, 第85-90頁。
- Chou P. Y. (2021), "The Evaluation of Deep Groundwater Recharge in Fractured Aquifer Using Distributed Fiber-Bragg-Grating (FBG) Temperature Sensors", *Journal of Hydrology*, 601, 1-11.
- Faehadian H., Aalianvari, A., and Katibeh, H. (2012), "Optimization of analytical equations of groundwater seepage into tunnels: a case study of Amirkabir Tunnel", *Journal Geological Society of India*, 80, 96-100.
- Hsiao, F. Y., Kao, H. C., and Shau H. J. (2019), "Hydrogeological Investigation and Environmental Impact Assessment During a Large Water Inflow Tunnel Construction in Taiwan", *Proceedings of the World Tunnel Congress 2019 – Tunnel and Underground Cities: Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture*.
- Katibeh, H., and Aalianvari, A. (2012), "Common Approximations to the Water Inflow into Tunnels", *Drainage Systems, InTech*, 75~88.
- Kitterod, N. O., Colleuille, H., Wong, W. K., and Pedersen, T. S. (2000), "Simulation of Groundwater Drainage into A Tunnel in Fractured Rock and Numerical Analysis of Leakage Remediation, Romeiksporten Tunnel, Norway", *Hydrogeology Journal*, 8, 480-493.
- Wang T. T., Jeng F. S., and Lo, W. (2011), "Mitigating larger water ingresses into the New Yungchuen Tunnel, Taiwan", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70, 173-186.