

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

林廷彥*、蕭富元**、高憲彰***、彭詩容****

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，公路隧道施工與鄰近水資源環境影響互動關係日益受到關注。理論公式解析及二維平面分析實無法適用複雜多變之山區水文地質狀況，而隨電腦科技與相關技術之進步，三維數值分析已逐漸廣泛應用於複雜狀況之地下水流問題探討與水資源評估。本文乃介紹廣泛應用於地下水模擬之 MODFLOW 有限差分法，說明模式基本原理及三維模式建立程序、並以臺灣東部變質岩區之複雜水文地質條件為例，利用三維數值分析技術，探討公路隧道施工可能對鄰近區域水資源環境之影響。本文所提方法技術與經驗可提供臺灣未來公路隧道興建與水資源環境保護溝通之參考。

關鍵字：公路隧道、水文地質、三維數值分析、水資源環境。

一、前言

台灣降雨量豐沛，平均年降雨量達 2500 公厘，約為世界平均降雨量之 2.6 倍(鍾侑達等, 2009)^[13]。但由於台灣之河川普遍河身短、坡度大且水流湍急，地表水不易蓄留，加上人口密集，導致每人所分配之水量僅約世界平均值之 1/7 左右，因此被聯合國列為水資源貧乏地區。國家災害防救治中心所出版之臺灣氣候變遷科學報告(2011)^[10]進一步指出：臺灣百年來之年平均降雨量變化不明顯，但降雨日數則呈現逐漸減少之趨勢(如圖 1 所示)，且大豪雨日數(日雨量大於 200mm)有逐漸增加現象。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，此種

* 交通部公路總局蘇花公路改善工程處設計科 科長

** 財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心 高級研究員

*** 財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心 資深研究員

**** 財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心 助理研究員

降雨特性除易釀成各種災害外，並進而影響水資源供應之穩定性。

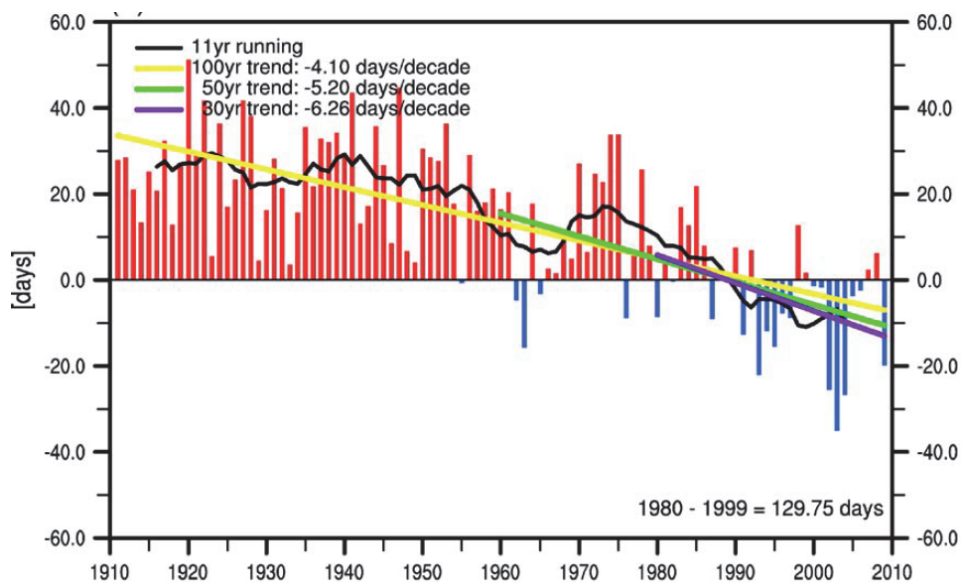


圖 1 臺灣年總降雨日數(日雨量 $\geq 0.1\text{mm}$)變化趨勢圖(摘自許晃雄等, 2011^[10])

面臨氣候變遷劇烈影響之臺灣，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，例如國道5號雪山隧道及東部鐵路新永春隧道等案例。而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？問題原因之釐清，實需輔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。

在隧道工區及鄰近範圍設置各項觀測儀器，如隧道洞口量水堰、地下水位觀測井、河川流量站及雨量觀測站等，長期觀測隧道施工前、中、後之水文地質變化情形，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。惟區域水資源環境影響評估所探討之範圍常涉及整個集水區，面積廣大，儀器設置位置與數量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單點資料，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。傳統之地下水滲流分析技術，多僅用理論公式解析或以垂直隧道軸線之二維簡化剖面進行數值分析，然而由於公路隧道多穿越地形陡峭之山區，臺灣山區之水文地質條件複雜，各種水文地質單元(包括含水層、侷限含水層及不透水層等)其性質變化與空間分布遠較平原地區複雜，使用理論公式解析需將問題簡化假設以便求解，故常無法描述山區複雜之水文地質狀況，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)^[1]；另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，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)^[4]。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，包括地下水資源評估(Ben-Itzhak and Gvirtzman, 2005^[2]； Yang et al., 2008^[7])及地下水污染研究(Wycisk et al., 2009^[6])等。目前可採用之三維數值分析方法甚多，例如MODFLOW、PLASM、SUTRA、MODPATH等(Fetter, 2011)^[3]，各種方法各自有其適用性與特點，本文乃介紹廣泛應用於地下水流模擬之MODFLOW有限差分法，說明模式基本原理及三維水文地質模式建立程序，並以臺灣東部變質岩區之複雜水文地質條件為例，利用三維數值分析技術，探討公路隧道施工可能對鄰近區域水資源環境之影響研究，本文所提方法技術與經驗可提供臺灣未來公路隧道興建與水資源環境保護溝通橋梁之參考。

二、模式分析基本原理

MODFLOW有限差分法係由美國地質調查所(U.S.G.S; United States Geological Survey) McDonald & Harbaugh(1988)^[5]所初步發展，歷經超過25年持續之更新與驗證，其正確性及功能性已普遍獲世界各國產官學界之認可，為可靠之地下水模式分析工具。MODFLOW可模擬分析穩態或暫態、受壓或非受壓含水層等各種情形之地下水流問題。除了地下水系統本身之外，外來水力荷載改變(如抽水井抽水、區域補注、蒸發、河床水位變動及區域排水等)影響亦可納入模式分析。

MODFLOW係以多種模組或副程式群為架構，描述密度恆定之地下水在孔隙介質中流動情形，以二維、三維飽和地下水流控制偏微分方程式表示，考量質量平衡關係及達西定律推導控制方程式，並利用體心式有限差分法(block centered finite difference approach)之計算方式求解。目前已有數種迭代運算技巧可進行求解，包括強制隱式法(strongly implicit procedure; SIP)、片式連續鬆弛法(slice-successive over-relaxation; SSOR)、預置共軛梯度法(Preconditioned Conjugate Gradient2; PCG2)等，可用於模擬各水文地質單元之地下水水頭流向、流速、水位分佈及隨時間變化情形，為目前最普遍使用之地下水流場模擬程式。其控制方程式之偏微分方程式如下：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中， K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} 分別為多孔介質體於 x 、 y 、 z 方向之水力傳導係數； S_s 為比貯水率； h 為水頭； W 為淨源匯量， $W>0$ 為淨流入、 $W<0$ 為淨流出； t 為時間。

模式分析可搭配內建之GIS模組、CAD模組及Image模組，並透過三維數值地形、地形等高線、衛星或航空照片等資料，建構研究區之三維有限差分網格。依據每個網格之水文地質特性，設定為均質、非均質以及等向性、非等向性等類型之含水層，如圖2所示，並給定各個網格之水文地質參數，進行三維地下水流動問題求解，探討研究區範圍之地下水流況，並可評估水力荷載改變(如隧道開挖)所造成之水文環境影響。

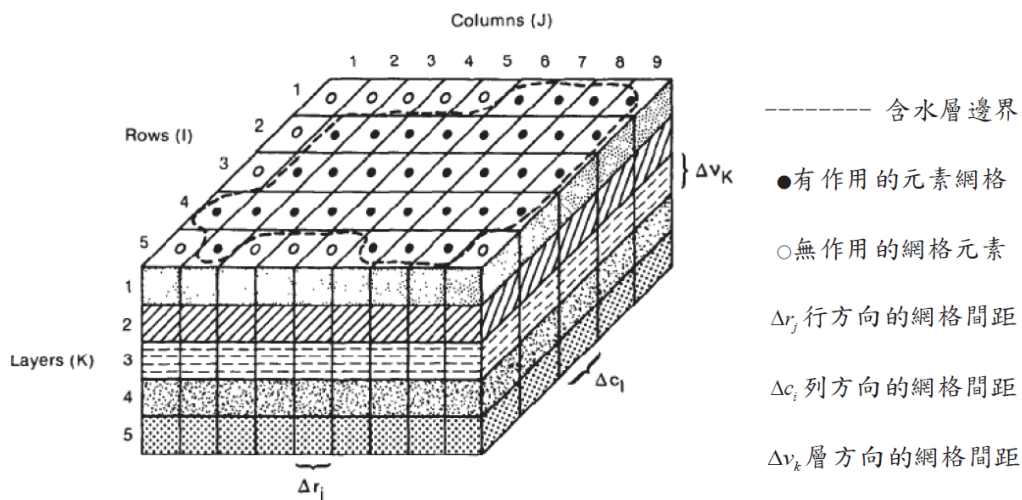


圖 2 MODFLOW 網格化含水層示意圖(摘自 Mcdonald & Harbaugh, 1988)

三、水文地質概念模型建構

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。模型建構主要步驟包括研究範圍劃定、地形與地質資料整合、邊界條件設定、水文地質單元分區與分層劃分、數值模型建置等，分別概述如下：

(1)研究範圍劃定：

水文地質概念模型建構首先需劃定欲研究之區域範圍。以隧道工程為例，研究區範圍之劃定主要乃參考隧道沿線鄰近區域之水文地質狀況，包括地表水系、地層及地質構造分布等，將隧道沿線劃分出適當之子集水區作為分析範圍，進一步引入地形及水系等邊界條件，基本上盡量採用山脊稜線、河川等自然邊界，以建構研究區域之代表性水文地質概念模型。

(2)地形資料整合：

研究區範圍劃定後，進一步需蒐集研究區範圍之地形圖及高精度數位地形(DTM)資

料，以作為基本地形立體模型架構建立之依據。並根據所蒐集之資料將山脊及工程結構物(如隧道)等數化為數值高程模型(Digital Elevation Model；簡稱DEM)，除可進行相關地形分析外，更能藉以評估岩體內常時地下水受重力作用所形成之三維空間分佈狀態。

(3)地質資料整合：

研究區地質資料之整合，主要乃蒐集彙整既有之地質圖幅、鑽探調查、地表踏勘等資料，以掌握研究區之地質狀況與空間分布情形，作為水文地質單元分區與分層劃分依據，並進一步將地質資訊數化，據以建立三維水文地質概念模型。

(4)邊界條件設定：

水文地質概念模型內地下水之穩態流場主要由邊界條件所控制，而地下水之暫態流場則受概念模型初始條件之影響較大，若某時段內水文荷載(例如隧道施工出水)效應延伸擴展至邊界時，則邊界條件亦將影響此暫態流場。

隧道施工滲流影響分析常採用之邊界條件包括：特定水頭邊界(Specific-head Boundary)、特定流量邊界(Neumann Boundary)、溪流邊界(Stream Boundary)及地表水補注邊界(Surface Recharge Boundary)等。其中，溪流河口水位高程可視為地下水典型之特定水頭邊界，合理之定水頭值可設定為溪流水位高程；若僅考量重力作用對地下水流場之影響，則山脊稜線位置常視為區隔兩個地下水系統之界線，在稜線上彼此無側向流通，故山脊稜線可視為側向零流量之邊界，如圖3所示；至於溪流邊界在水文地質及地下水流場所扮演之角色，為地表水與地下水兩者之間互動之水體，可進行後續河水與地下水互動行為評估；而地表入滲邊界條件為數值模型用來反應降雨扣除地表逕流後經由地表垂直入滲至地下含水層之補注邊界機制。

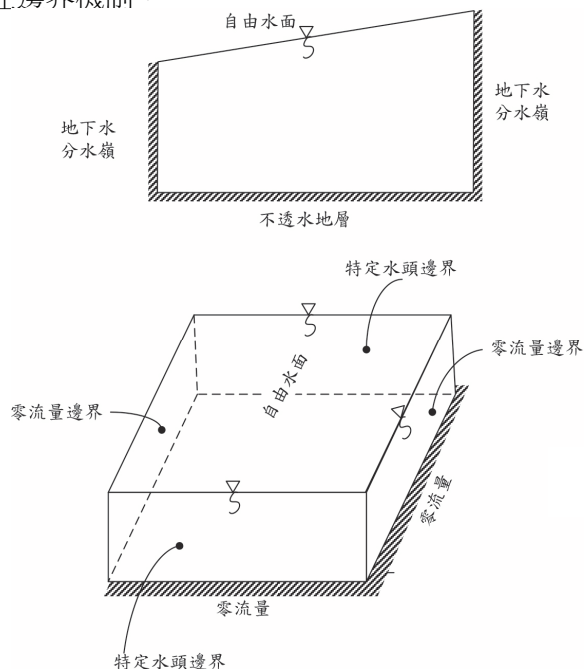


圖3 典型水文地質模型之邊界條件設定示意圖

(5)水文地質單元分區與分層劃分：

水文地質單元分區係為釐定地下水之水文地質邊界，包括含水層邊界、地下水分水線及地質構造邊界等；而水文地質單元分層則為釐定研究區範圍主要之含水層與阻水層。

其中水文地質單元分區主要依據為：(1)含水層邊界：地下水含水層厚度常隨地形起伏變化而變薄或變厚，其在接近邊界時常變薄而終於自然消失，消失處即為含水層之邊界；(2)地下水分水線：含水層在地形高處時之地下水頭常亦較高，降雨由地表滲入形成地下水，而在地下水分水線兩側之地下水則背向流動，若此種流動途徑經常不變，則地下水分水線亦可視為邊界；(3)地質構造邊界：因大地應力作用，岩層發生斷裂及移動造成斷層破碎帶，而斷層帶常可截斷含水層之側向延伸，若斷層本身不透水，或斷層另一側為不透水，均可形成含水層之邊界。

至於水文地質單元之分層劃分則需從區域性之尺度來考量，亦即各層應有相當之厚度，若細分太多層次，在觀測及管理上亦不可行。故在分層時需掌握區域性主要岩性之分層結構，而將次要之細節捨棄，並考慮區域性地下水觀測與管理之便利性，將系統做合適之切割和劃分，以釐定出水文地質架構。一般水文地質單元之分層原主要包括：(1)利用厚層並延長較佳之岩層(如大理岩、片岩等)作為分層依據；(2)互相連通且滲透性相近之含水層(aquifer)可視為同一層；(3)薄層或延展不佳之層次則略去不計；(4)地質構造常因岩層受到大地應力擠壓造成斷層破碎帶，而成為較佳之儲水層或剪裂泥阻水層，應獨立視為接近垂直之高角度分層。

(6)數值模型建置：

根據前述研究區範圍劃定、地形與地質資料彙整、邊界條件設定及水文地質單元分區與分層劃分等步驟，勾勒出足以代表研究區之水文地質概念模型，進一步透過數值化過程將其轉為數值模型網格。數值模型網格之佈置原則以能精確且有效的代表研究範圍之水文地質與地下水水文狀況為主要考量，同時應儘可能兼顧網格數量減少化以縮短運算時間。

四、變質岩公路隧道案例分析

現正推動中之台9線蘇花公路山區路段改善計畫共有8座長度不等之隧道，其中位在蘇澳至東澳間之東澳隧道穿越水文地質條件極為複雜之變質岩山區，該區地下水資源豐沛，隧道施工可能遭遇滲湧水問題。本文乃以東澳隧道為例，蒐集隧道鄰近區域之三維數值地形、河川水系、集水區範圍、地下水位分佈、地質構造等資料，同時考量自然邊界條件及水文年乾濕季循環之地下水有效補注量等因素，建構東澳隧道鄰近區域之三維水文地質模型，並進一步透過模式分析隧道施工可能之出水量區段與地下水流場變化情形，進而評估隧道施工對鄰近區域水資源環境之影響。案例分析評估結果詳述如下：

4.1 研究區域概述

東澳隧道於臺鐵永樂車站附近向南貫穿猴椅山與東澳嶺間相連之山脊，兩山嶺標高分別為633.3公尺及820.7公尺，隧道沿線最大岩覆深度約514公尺，隧道南洞口位在東澳北溪北支流處。隧道全長約3.32公里，為雙孔單向單車道隧道，地理位置如圖4所示。

(1)區域地質：

東澳隧道通過中央山脈東翼及脊梁山脈地質區，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，參見圖5。東澳片岩以黑色片岩、綠色片岩及矽質片岩為主，並夾有大理岩與角閃岩體。區域性地層延伸約略呈東-西或西北西-東南東走向，並向南傾斜。依據地調所地質圖資顯示，本研究區內之蘇澳層與南蘇澳層，以及南蘇澳層與東澳片岩間均係斷層之接觸關係。惟孫荔珍(1982)^[11]曾在部分南蘇澳層之底部發現有疑似基底礫岩出露，研判其與下伏之東澳片岩可能為不整合接觸關係。

(2)地質構造：

隧道所在區域接近板塊碰撞帶，在長期地殼變動與板塊相互碰撞擠壓過程中，本區岩層歷經多次區域變質與構造變形作用，形成本區所出露之板岩、硬頁岩與變質雜岩，以及地層內複雜之褶皺與剪切變形構造。

隧道路線沿線主要所遭遇之地質構造為區域性逆斷層及局部性之橫移斷層構造，以及由較小尺度褶皺構造組合而成的大尺度複向斜構造。主要之區域性逆斷層有小帽山斷層及猴椅山斷層，兩斷層於計畫區內均呈西北西-東南東方向延伸，並通過東澳隧道之北段，斷層面均向南傾斜。小帽山斷層通過圳頭溪中游，斷層北側地層屬蘇澳層，斷層南側為南蘇澳層。猴椅山斷層位於小帽山斷層南側，通過圳頭坑附近，斷層南側地層為東澳片岩，斷層北側地層為南蘇澳層。兩斷層破碎帶影響寬度約100~200公尺。橫移斷層則主要分布於東澳隧道東、西兩側，分別呈北北東-南南西走向與南-北走向，往南延伸至東澳隧道以南逐漸聚合，隧道東側之橫移斷層帶，局部有斷層密集帶，可能對東澳隧道南段之鄰近區段造成影響。

(3)河川水系：

本區屬中央山脈北段，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，北側為蘇澳河流域，南側為東澳河流域。蘇澳溪發源於蘇澳港溪南方標高960 m之西帽山，流經蘇澳市區注入蘇澳港，流域面積29.65 km²，主流長8.83 km，集水區範圍為臺灣北區石灰石礦源之一，上游水流湍急，地形陡峭，土石坍塌流失，大量土石受暴雨夾帶堆積至下游，除影響下游通水斷面外，亦造成泥沙淤積於蘇澳港，影響港區有效水深之維持；另東澳河流域則包括東澳北溪及東澳南溪兩大支流，東澳北溪主流長約6.7 km，流域面積20.81 km²，上游發源於中央山脈之大白山，蜿蜒向東南延伸，東澳南溪則起源於楓樹山往東延伸，總長約4.4 km，流域面積11.08 km²。東澳北溪及東澳南溪

上游除部分石灰石礦區與運輸道路外，林相大致完整。

(4)氣象資料：

根據氣象局雨量站資料顯示，蘇澳地區之年平均降雨量約介於3,800~4,600 mm間，另東澳嶺地區之年平均降雨量約介於4,800~5,800 mm間(2012年更測得7004 mm之年降雨量)，本區為蘇花地區雨量最高之區域。進一步蒐集參考蘇澳河流域之蘇澳站降雨頻率分析結果(財團法人中興顧問社，2012^[12])，以200年重現期為例，1小時降雨量為238.6 mm；24小時降雨量為1438.1 mm；48小時降雨量為1765.2 mm；72小時降雨量為1855.9 mm。

(5)水文地質特性：

有關本研究區內各種代表性岩層之透水性質，本文乃蒐集隧道設計階段所辦理之岩盤滲漏試驗結果，結果顯示本區綠色片岩之滲透係數(Hydraulic conductivity, K)約為 $0.12\sim 25.9\times 10^{-7}$ (m/sec)、黑色片岩滲透係數約為 $0.6\sim 16.9\times 10^{-7}$ (m/sec)、矽質片岩滲透係數約為 $33.9\sim 45.5\times 10^{-7}$ (m/sec)、大理岩滲透係數約為 $0.32\sim 7.79\times 10^{-7}$ (m/sec)、片麻岩滲透係數約為 $0.10\sim 18.6\times 10^{-7}$ (m/sec)、角閃岩滲透係數約為 $11.5\sim 13.7\times 10^{-7}$ (m/sec)，參見圖6。基本上研究區變質岩之透水性不高，地下水之主要流通管道應為斷層破碎帶、岩性界面及岩盤中張力裂隙。

(6)地下水位資料：

為瞭解研究區之初始地下水位背景資料，乃蒐集相關工程計畫在不同規設階段所鑽設之地下水位觀測井資料，包括東部鐵路改善計畫、國道東部高速公路、蘇花改可行性研究及蘇花改細設等計畫在不同階段所辦理之地質探查孔地下水位資料，共計302孔地下水位資料。地下水流場之分佈與地形及地質構造相關，匯集降雨之水系型態與流域面積，因流域內之河谷、沖積扇等不同地形，具不同之地下水蘊藏特徵，圖7為所蒐集之鑽孔孔位高程與地下水位高程關係圖，結果顯示研究區域之地下水位與地形高程有相當高之關聯性，回歸結果參見如下式，此關係式可作為評估計畫區初始地下水位分佈與流向之參考。

$$GW = 0.8513 \times E - 6.6074 \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中之GW為地下水位高程；E為地表高程。

(7)河川基流分析：

河川流量可大致區分為基本流量及直接逕流量，而由於山岳地區地下水較少人為抽水、灌溉或補注，故可將枯水期之河川基流量作為山區地下水補注量推估參考(李振誥等，2002^[9])。惟因研究區之圳頭溪及東澳北溪現階段無足夠之流量觀測資料(一般需10年以上之觀測資料)可供進行基流分析，故乃蒐集鄰近南澳溪之河川基流分析結果，如表1所示，以作為本區地下水補注量參考。

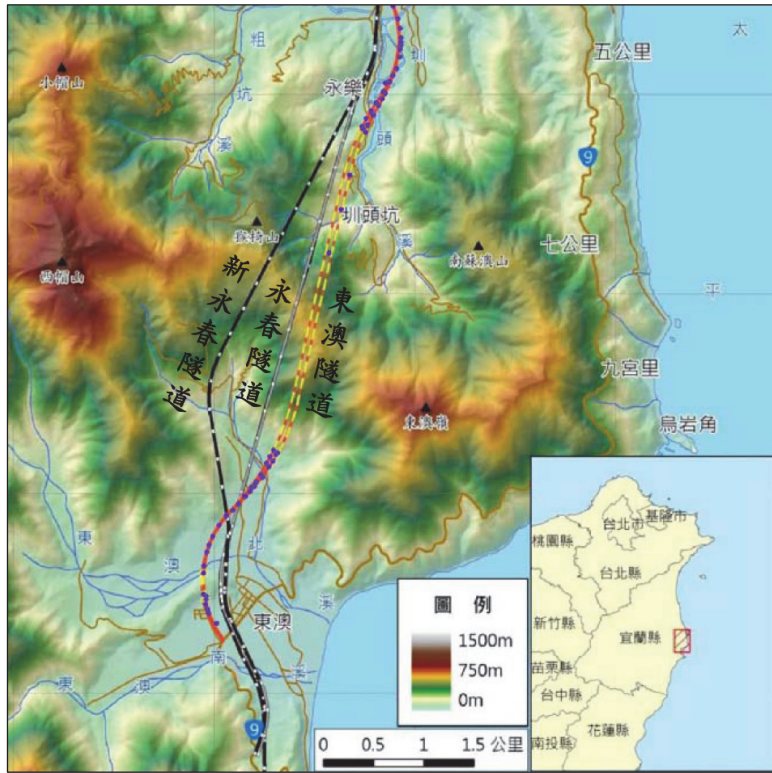


圖 4 東澳隧道平面位置與地形圖

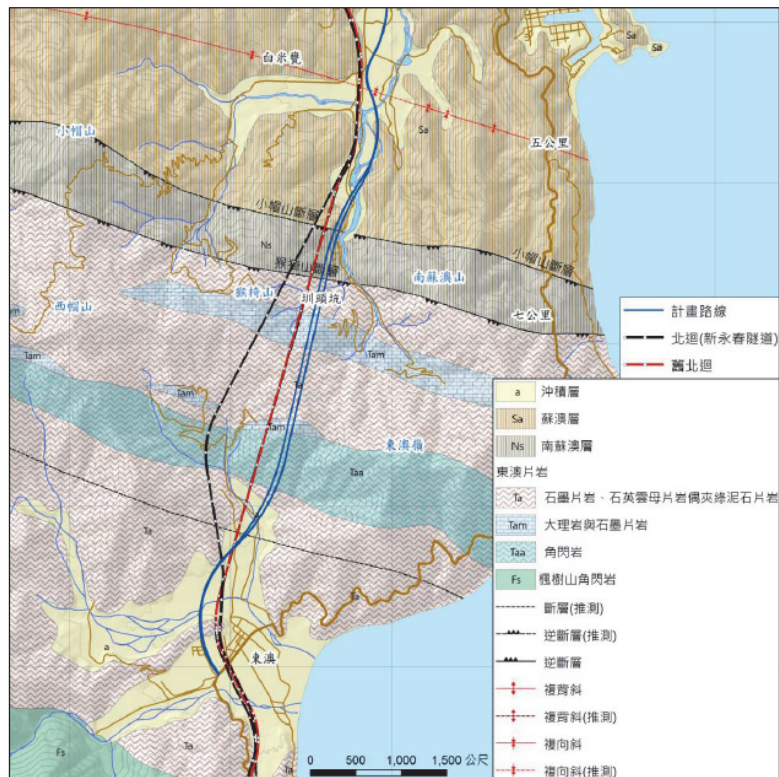


圖 5 東澳隧道區域地質圖

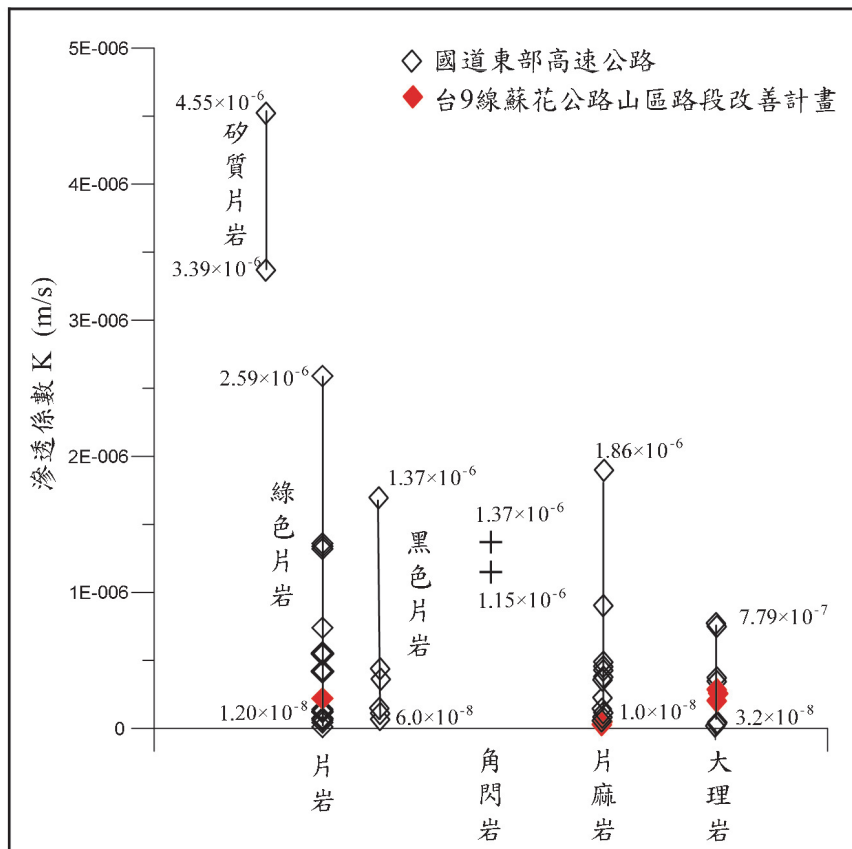


圖 6 研究區代表性岩層滲透係數彙整圖

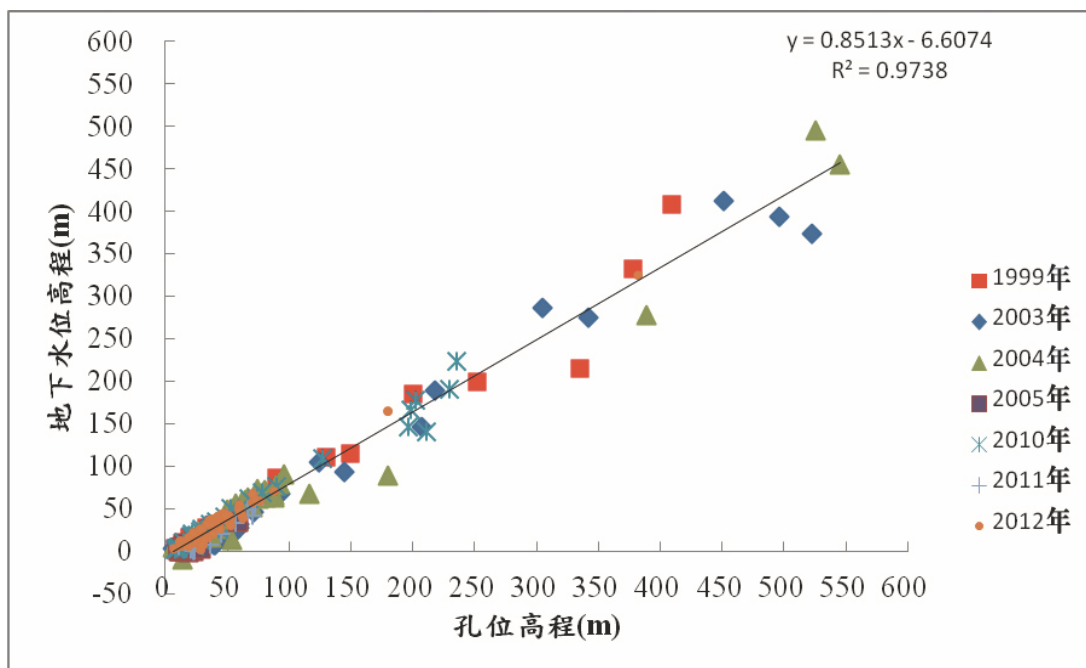


圖 7 研究區之鑽孔地形高程與地下水位關係圖

表 1 研究區鄰近流量站之基流分析結果彙整表(摘自財團法人中興顧問社，2012)

流域	南澳溪	南澳溪
站號	2510H006	2510H004
站名	南澳橋	澳尾橋
河川流量年均深度(cm)	285.47	240.17
基流量年均深度(cm)	220.93	129.68
基流指數(%)	77.39	54
穩定基流量年均深度(cm)	115.12	41.14
穩定基流指數(%)	40.33	17.13

4.2 三維水文地質模型建置、率定與分析

(1)模型建置：

綜合上述隧道沿線之地表水系、地層及地質構造分布，並結合高精度地表數值高程資料(5m×5m DEM)，將東澳隧道沿線劃分出適當之子集水區作為分析範圍，劃定後之研究範圍如圖8所示。並再引入地形及水系等邊界條件，將北側、西側與東側之山脊稜線設定側向零流量之邊界，並將北側之蘇澳溪與南側之東澳北溪設定為研究範圍之溪流邊界，另根據前述所蒐集之水文資料及基流分析成果，將地下水有效補注量透過地表水補注邊界予以輸入模型內。進一步依據研究區內之岩性、地質構造、水文地質特性及現地試驗等結果，進行水文地質單元之劃分，初步將研究區域劃分為以下數類水文地質單元，分別為S1(板岩、板岩與變質砂岩互層)、S2(變質砂岩、變質灰綠岩)、Sch(黑色片岩、綠色片岩、矽質片岩)、M(低透水性大理岩)、M2(高透水性大理岩)、M3(中透水性大理岩)、A(角閃岩)、Q1(新河道沖積層、台地堆積層)、Q2(舊河道沖積層)、F1(小帽山斷層)、F2(猴椅山斷層)、F3(層間破碎帶)、F4(東猴椅山斷層)、F5(東澳嶺破碎密集帶)。

東澳隧道鄰近區域區域之三維水文地質概念模型建置結果如圖9所示。圖10則為進一步檢核三維水文地質概念模型，乃透過分析軟體將三維模型沿隧道軸線切出縱剖面圖，經與隧道沿線縱剖面圖比對後，可確認兩者之一致性及其代表性。

(2)模型率定：

東澳隧道西側已完工營運之2座北迴鐵路隧道(永春隧道及新永春隧道)在施工期間均曾遭遇斷層破碎帶與湧水等困難，特別是在斷層、破碎帶或是大理岩溶洞等區段。因永春、新永春隧道已存在於模式研究範圍內，對東澳隧道而言，可視為已存在之排水廊道，且持續有洞口量水資料可供參考，故乃將此兩座隧道所觀測到之出水量納入模型初始率定之依據；另研究區內尚有3孔地下水位觀測井之觀測資料亦可供率定使用。

進行模式率定時，先將永春隧道及新永春隧道設定為具有源進及流出之封閉式排水

設施(DRN模組)，並考量隧道沿線高程變化，將前述洞口水量觀測值按集水長度及坡度等條件輸入模式。另採蘇澳、東澳及東澳嶺地區之平均降雨量作為地表補注依據。相關設定完成後，再透過反覆人工校調方式反推模式之代表性參數，以使得各地下水位觀測井所處位置之模式分析水位與實測水位相近，率定結果誤差約在 ± 5 m內，顯示所建立之水文地質概念模型具有相當之代表性與準確度。經模式率定後之最適化參數配置如表2所示。

(3) 施工前地下水流況分析：

研究區在東澳隧道施工前之地下水總水頭分布情形及地下水流況如圖11所示。圖11(a)顯示水文地質模型範圍內之地下水可概分為兩個水系，包括北側蘇澳溪及南側東澳北溪。其中，蘇澳溪集水區之地下水位高程由西、南側向東北角隅遞減；東澳北溪集水區之地下水位高程則由東、西兩側向南方遞減。此為隨地形分布之重力流趨勢，以山脊稜線為地下水水系之分水嶺，並沿著透水性相對較佳的地質構造朝已開通之隧道或溪流處流動，此亦為山岳地區地下水流動之特有現象。

至於地下水流向部分(參見圖 11(b))，蘇澳溪集水區主要自西側及南側向東北角隅流動；東澳北溪集水區則由東、西兩側向南流動。但集水區中央鄰近永春隧道及新永春隧道處，局部地下水有往垂直兩條隧道軸線之方向流動之現象。且模型西側因有東猴椅山斷層阻擋來自西側之地下水，而東側有東澳嶺密集破碎帶，將來自東澳嶺地區之地下水引流至東澳北溪支流。

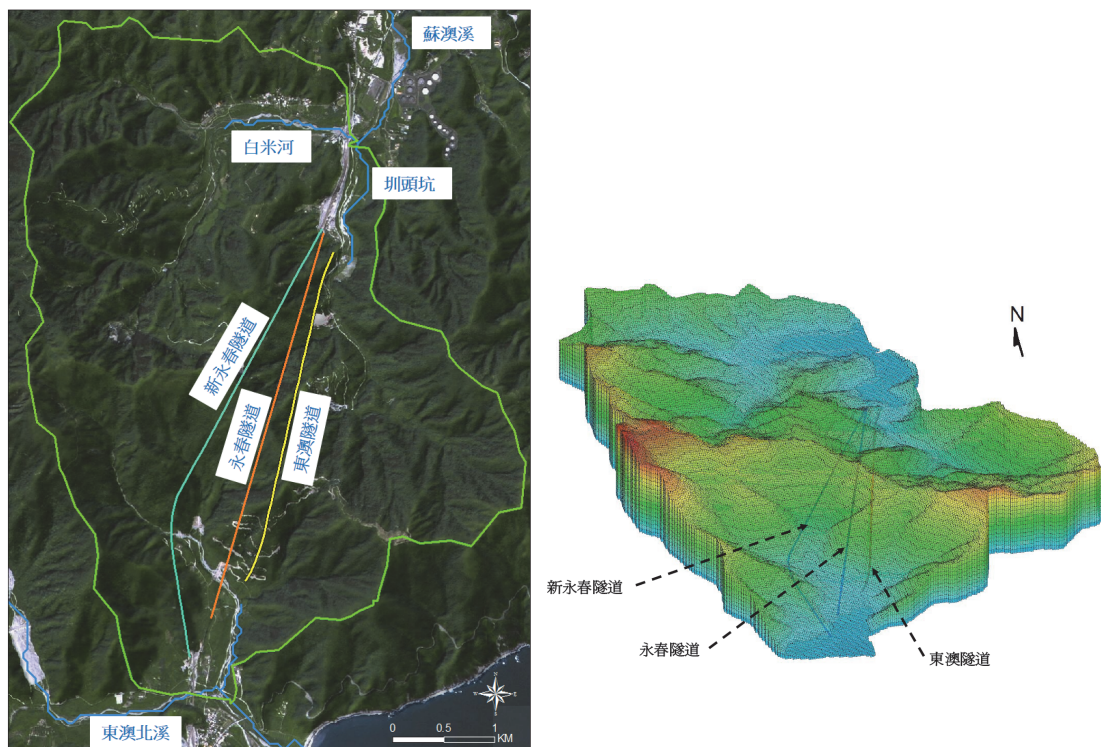


圖 8 東澳隧道研究範圍劃定及地形分佈圖

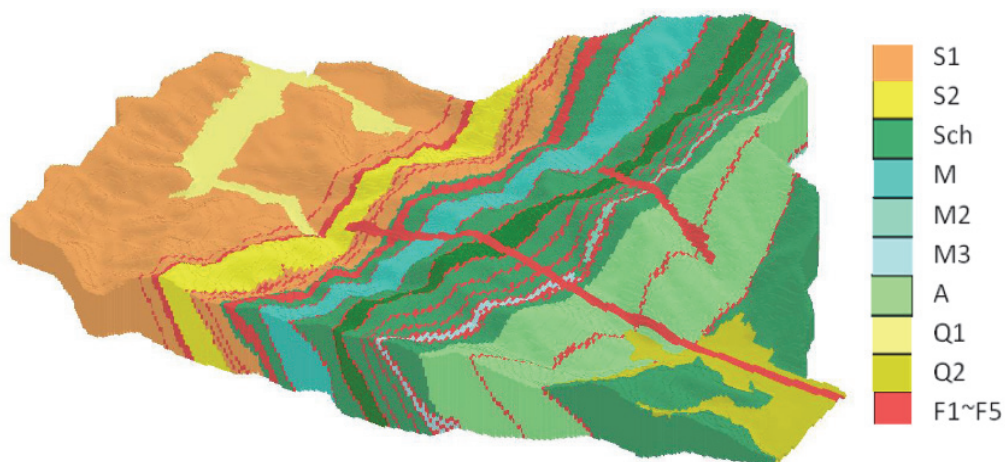


圖 9 東澳隧道鄰近區域三維概念模型與水文地質單元分區示意圖

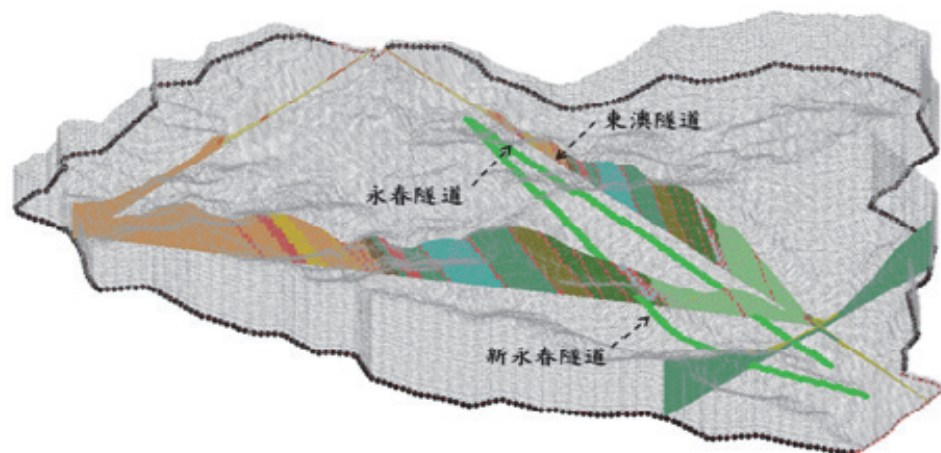
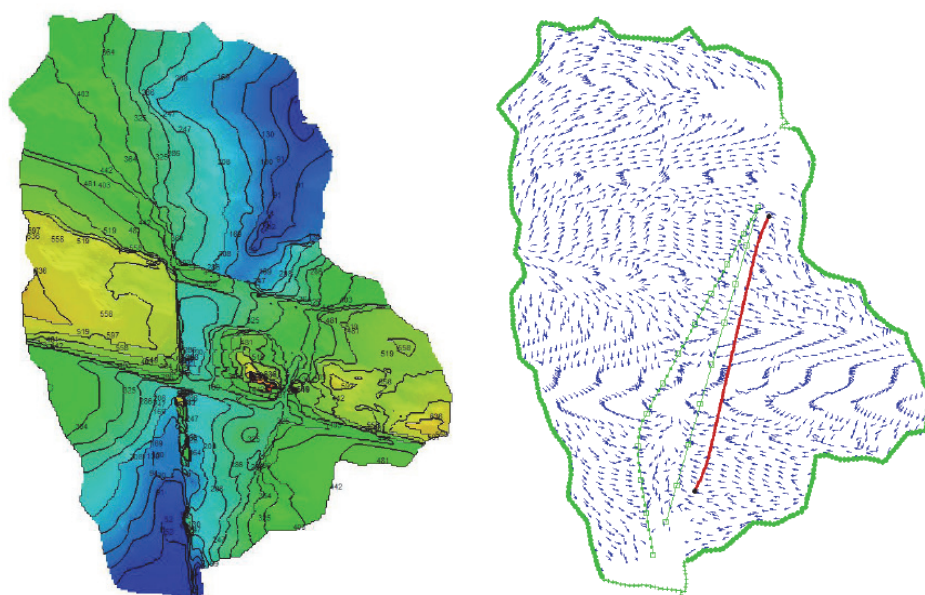


圖 10 東澳隧道鄰近區域三維水文地質模式之幾何空間檢視(隧道沿線縱剖面)

表 2 研究區代表性水文地質單元與其參數彙整表

水文地質單元名稱	地層	透水性	透水係數 K (m/sec)	比貯水係數 Ss(1/m)
S1	板層	M	3.0×10^{-7}	10^{-5}
	板層與變質砂岩互層	M	8.0×10^{-7}	10^{-5}
S2	變質砂岩	M	8.0×10^{-7}	10^{-5}
	變質灰綠岩	M	1.0×10^{-7}	10^{-5}
Sch	黑色片岩	M	9.98×10^{-7}	10^{-5}
	矽質片岩	M	5.29×10^{-7}	10^{-5}
	綠色片岩	M	2.34×10^{-7}	10^{-5}
M	大理岩	L	1.42×10^{-7}	10^{-4}
M2	大理岩 2	H	1.3×10^{-5}	10^{-4}
M3	大理岩 3	M	7.96×10^{-6}	10^{-4}
A	角閃岩	M	5.24×10^{-7}	10^{-5}
Q1	沖積層(新河道)	MH	2.0×10^{-5}	10^{-4}
	台地堆積層	MH	1.0×10^{-5}	10^{-4}
Q2	沖積層(舊河道)	MH	2.0×10^{-5}	10^{-4}
F1	小帽山斷層	L	3.0×10^{-8}	10^{-5}
F2	猴椅山斷層	L	3.0×10^{-8}	10^{-5}
F3	層間破碎帶	H	5.0×10^{-5}	10^{-4}
F4	東猴椅山斷層	L	3.0×10^{-8}	
F5	東澳嶺破碎密集帶	H	3.0×10^{-5}	



(a)總水頭分佈情形(單位公尺) (b)地下水流況(隧道高程之橫斷面)

圖 11 東澳隧道開挖前之地下水總水頭與流向分佈變化圖

4.3 隧道開挖對鄰近區域地下水環境影響評估

透過三維水文地質模式可評估隧道開挖對鄰近區域地層地下水流場變化影響。圖12為模擬東澳隧道開挖後之研究區範圍內地下水總水頭及地下水流況之分布變化情形(暫不考慮襯砌止水之極端保守狀況)。由圖中可知研究範圍地下水流場變化主要發生在隧道沿線左右各約40~45個網格(800公尺~900公尺)範圍內，隧道開挖導致地下水流場發生改變，地下水流況由開挖前隨地形分布之重力流動，轉變為受隧道開挖水頭洩降所產生之水力梯度影響，而由四周朝向隧道軸線方向流動。

另依據規劃階段之調查資料(臺灣世曦, 2010)^[8]研究區內在新永春及永春間可能存在位態為南北向/85°E 之東猴椅山斷層，其透水性低，將東澳山區分隔成東西兩側不同地下水系統，其中因永春及新永春隧道在經過北側大理岩段時，永春隧道順利通過並無異常現象，而新永春隧道卻產生湧水災變，東澳隧道則位在永春東側之水文地質條件較佳區域，研判西側高地下水頭之地下水受東猴椅山斷層阻隔無法流至東澳隧道，主要水源將來自東澳嶺及東側發育之東澳嶺破碎密集帶。由於現階段對於東猴椅山斷層之確實位置、寬度、延伸長度與透水性質仍無明確資料，故本文模式分析乃假定東猴椅山斷層具高阻水性且貫穿研究區南北，分析結果亦顯示東猴椅山斷層西側地下水流場受東澳隧道開挖影響甚微，隧道施工主要影響區為東猴椅山斷層東側區域，此結果與規劃階段之論述大致相符。惟由於變質岩區地質變化劇烈，上述地質構造之確實位置與特性仍存在相當程度之不確定性，本區所存在之區域性逆斷層及局部性之橫移斷層或破碎帶均可能影響局部地下水流場變化，實際結果仍待隧道施工時所揭露之地質資料與水文觀測結果進行率定與檢討修正。

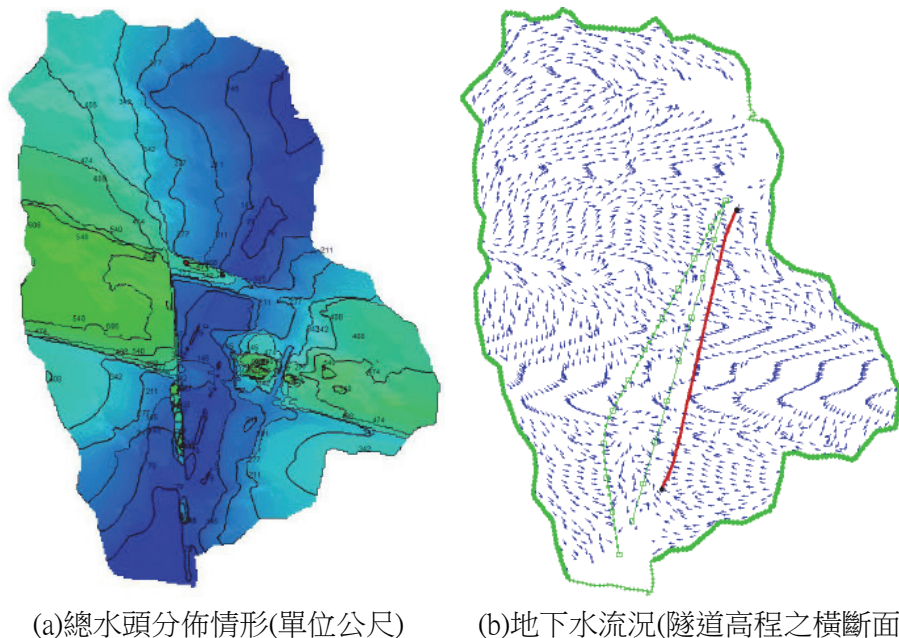


圖12 東澳隧道開挖後之地下水總水頭與流向分布變化圖

五、結語

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。臺灣水庫興建數量已趨飽和，新的水資源開發極為不易，導致地下水資源保護與應用日益受到重視。未來公路工程之推動，勢必面臨水資源環保議題之討戰，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。

臺灣山區地質多變，各種斷層破碎帶與褶皺構造均影響岩層之水文特性，導致山區水文地質條件複雜，適用於平原地區層狀且均質含水層之理論公式解析及二維分析方法，實無法確實描述山區複雜水文地層分布與特性，故其分析結果常引起許多質疑聲浪。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。本文乃引入由美國地質調查所(U.S.G.S)所發展之MODFLOW地下水流分析模式，並結合三維數值地形高程、水文地質調查與試驗等資料，據以建立隧道鄰近區域三維水文地質模型，進一步透過水平衡原理及地下水流動控制方程式，模擬研究區域內地下水流況，並推估隧道施工對鄰近區域地下水資源環境影響。三維水文地質模式若能結合詳實且長期之儀器觀測資料，持續進行模式之率定、檢討修正與驗證，將可更提升模式分析結果之準確性。此種三維分析技術之應用在國外已不乏案例，包括礦山開採過程與停採後對地下水資源環境影響評估，以及地下水庫開發與管理等課題；而臺灣過去在地下水領域方面之研究，較少深入山岳地區，而且工程進行亦多未將水文地質特別提列為工作項目，在氣候變遷劇烈及乾淨水資源匱乏之情況下，工程施工與鄰近區域水資源環境影響關係之研究勢必不可避免。

本文所提出之三維水文地質概念模型建構與分析技術，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。未來對於重要公路隧道或公路邊坡若能建立其周圍區域之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之施工風險，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，使臺灣未來公路工程邁向更優質化與科學化里程。

六、參考文獻

1. Anderson, M. P., and W.W. Woessner, "Applied Groundwater Modeling- Simulation of Flow and Advective Transport", Harcourt Asia Pte Ltd., 2000.
2. Ben-Itzhak, L.L. and H. Gvirtzman, "Groundwater Flow Along and Across Structural Folding:

- An example from the Judean Desert, Israel", *Journal of Hydrology*, Vol. 312, pp.51-69, 2005.
3. Fetter, C.W., "Applied Hydrogeology (Fourth Edition)", Prentice Hall, New Jersey, 2011.
 4. Kitterod, N.O., H. Colleuille, W.K. Wong and T.S. Pedersen, "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, 2000.
 5. McDonald M.G. and Harbaugh A.W., "A Modular Three Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model", Book 6 Chapter A1 of *Techniques of Water Resources Investigation of USGS, U.S.A.*, 1988.
 6. Wycisk, P., T. Hubert, W. Gossel and C.H. Neumann, "High-resolution 3D Spatial Modeling for an Environmental Risk assessment of Abundant Mining and Industrial Megasites", *Computer & Geosciences*, Vol.35, pp.165-182, 2009.
 7. Yang, F. R., C.H. Lee, W.J. Kung and H.F. Yeh, "The Impact of Tunneling Construction on the Hydrogeological Environment of Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project in Taiwan", *Engineering Geology*, Vol.103, pp.39-58, 2008.
 8. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，「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，2010。
 9. 李振誥、陳尉平、李如晃，「應用基流資料估計法推估臺灣地下水補注量」，*臺灣水利季刊*，第 50 卷，第 1 期，第 69-80 頁，2002。
 10. 許晃雄、陳正達、盧孟明、周佳、吳宜昭等，「臺灣氣候變遷科學報告」，行政院國家科學委員會，2011。
 11. 孫荔珍，「臺灣東北部蘇澳地區大南澳片岩與其上覆岩層之接觸關係」，國立臺灣大學地質學研究所碩士論文，1982。
 12. 財團法人中興工程顧問社，「臺 9 線蘇花公路山區路段改善計畫-水文地質模式檢測及區域水資源環境影響分析委託專業服務工作-101 年半年度分析評估報告」，交通部公路總局蘇花公路改善工程處，2012。
 13. 鍾侑達、郭峻菖、陳昶憲，「臺灣區域降雨趨勢分析」，*農業工程學報*，第 55 卷，第 4 期，第 1-18 頁，2009。