

山岳隧道湧水分析

譚志豪¹ 顧承宇² 許世孟¹ 鍾明劍¹ 冀樹勇³

- 1.財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心研究員
- 2.財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心高級研究員兼組長
- 3.財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心經理

摘 要

本文以興建中之曾文水庫越域引水隧道工程為例，透過三維水文地質概念模式評估隧道施工期間之可能湧水量。隧道施工對區域水資源環境之影響及施工期間之湧水問題已不能僅就傳統地質學與力學觀點考量，尚須結合水文相關因素方能獲得較佳的解決方案。首先結合案例場址之地理、地層、地質構造及地下水文條件，並應用三維地下水分析模組 MODFLOW 建立水文地質概念模式。該模式係將複雜的物理環境簡化為三維水文地質概念模型，並透過水平衡及地下水流動方程式等原理模擬隧道開挖前後地下水流場之變化。為確保模式之準確度與正確性，除廣泛應用現地試驗及調查成果決定分析參數外，並採地下水水位監測資料進行模式率定及驗證。待隧道水文地質模式建構完成後，透過模式分析進行隧道開挖區段之湧水量評估。本模式除能評估隧道輪進開挖至不同岩層與地質構造區段之湧水量差異外，亦可透過暫態分析預先掌握隧道開挖時之瞬間最大湧水潛勢及其隨時間之衰減趨勢，以供後續擬定適當的止水或排水措施。本模式跳脫傳統隧道橫斷面二維解析法或縱斷面剖面流分析法之窠臼，改採三維數值分析辦理，故能同時推估隧道前進開挖面、頂拱、仰拱或側壁之各向湧水量，此項技術之開發可大幅提昇國內隧道湧水問題之分析技術，值得各界參考運用。

關鍵字：隧道、湧水、水文地質、MODFLOW、數值分析。

NUMERICAL ANALYSIS OF GROUNDWATER INFLOW DURING EXCAVATION OF MOUNTAIN TUNNEL

ABSTRACT

In this paper, the three-dimensional hydrogeological conceptual model is employed to estimate the tunnel water inflow during the excavation of tunnel in the case of Tseng-Wen Reservoir Water Diversion Project in southern Taiwan. A hydrogeological conceptual model was firstly developed to simplify the in-situ hydrogeological environment with geography, geo-stratum, geological structure, and hydrology in the study area. The code MODFLOW was then used to simulate the groundwater flow pattern based on the principle of water balance and the 3-D governing equation of groundwater flow. Besides, the automated parameter estimation method was also conducted to calibrate the hydrogeological parameters of model according to the observed data of groundwater levels in the study area for insuring the accuracy and reliability of the simulation. Finally, the hydrogeological conceptual model was applied to assess the possible quantity of tunnel inflow by using the MODFLOW zonebudget package.

The presented 3-D hydrogeological conceptual model could calculate the water inflow difference between an uniform geo-stratum and a geological structure, and could also predict the inflow decay with time. These valuable information could provide for the further design of retaining water or dewater. Furthermore, the 3-D model could calculate directly the quantity of inflow from the working face, crown, invert and side-walls of tunnel that differs from the conventional 2-D analytic or semi-analytic solutions which could only obtain the quantity of inflow from the side-walls of tunnel. The new numerical technique for estimating tunnel inflow could make a positive contribution to tunnel engineering.

Key Words: tunnel, tunnel inflow, hydrogeology, MODFLOW, numerical analysis.

一、前言

台灣位處歐亞板塊與菲律賓海板塊交界區域，由於板塊間的相對運動頻繁，造成台灣的地質構造複雜且破碎。此外，台灣降雨豐沛，年平均雨量約 2500 mm，雨水入滲至含水層蓄積，形成豐富的地下水水資源。惟降雨量時空分配不均，山區降雨可高達 4900 mm/year，平原則不足 1200 mm/year，每年 5 至 10 月降雨量約占全年總降雨量 80%。豐枯水期比例又與區域特性有關，北部雨量豐枯比約 6:4，但南部地區則達 9:1（交通部中央氣象局網站資料）。為平衡此一水資源分配不平衡之狀況，許多蓄水及引水之水利建設陸續規劃展開。本研究案例即為台灣南部正在進行之曾文水庫越域引水隧道興建案例，期能藉以改善區域水資源分配不均的問題。

有鑒於近年來陸續進行之山岳隧道工程，施工中常遭遇大量湧水而肇生災害並導致工程進度延宕（張文成、張龍均，2004），故於規劃、設計及施工階段之隧道開挖湧水分析顯得格外的重要。除了湧水災害外，隧道開挖亦可能影響周邊區域之地下水水位變化、流動補注、水質及水資源蘊含量，甚至可能改變山岳地區地質或環境災害之發生潛勢（楊豐榮，2006；黃俊鴻等人，2005）。因此，山岳隧道工程不能僅就地質的觀點考量，尚需結合地表及地下水文等相關因素，方能獲得較佳的解決方案。以下將以實際山岳隧道工程案例為例，透過本文所建議之三維水文地質概念模式，預測隧道施工期間之湧水量。

二、研究案例

2.1 工程概述

本案例為台灣曾文水庫越域引水隧道興建工程，其工程目的係將荖濃溪豐水期餘水，透過引水隧道橫越荖濃溪、旗山溪及草蘭溪流域，最終引至曾文水庫內蓄積。

工程完成後預計可增加台灣南部地區每日 60 萬噸供水。越域引水隧道區分為東、西兩段，東隧道貫穿荖濃溪流域與旗山溪流域，長度 9.6 km；西隧道則貫穿旗山溪流域與草蘭溪流域，長度 4.3 km。東、西隧道之坡度皆為 1/700，藉由重力流動方式達到越域引水之目的（中興工程顧問股份有限公司，2006）。

2.2 研究區域地理位置

本案例位於台灣南部山區，其地理位置如圖 1 所示。圖中深藍線部分為引水隧道，隧道由東至西橫跨荖濃溪、旗山溪及草蘭溪三個流域，三條主要溪流的流向約呈北北東向，而引水隧道軸向約呈東南東走向，淺藍色部分則標釋出研究區域內三條主要溪流及其支流之位置。研究範圍限定在隧道沿線周圍 2 至 3 km 範圍，研究區域範圍之劃分係根據地表水系、地形、地層與地質構造分布，以流域內河川、山脊稜線等自然邊界作為區域劃分依據，並考量隧道施工湧水所可能之影響範圍，最終訂定荖濃溪、旗山溪及草蘭溪三個流域之子集水區作為研究區域，如紅線框選範圍所示。

2.3 研究區域地層與地質構造

隧道沿線通過之主要岩層有：三民頁岩、紅花子

層及長枝坑層等中新世沉積岩層，岩性以砂岩、頁岩及兩者之互層為主。隧道穿越之地質構造甚多，主要為一系列東傾且走向近乎平行之逆斷層及褶皺，這些斷層及褶皺常形成局部的破碎帶，包括：荖濃斷層、高中斷層、老人溪背斜、老人溪向斜、旗山斷層、小林向斜、平溪斷層及表湖斷層等地質構造，上述岩層及構造之平面分佈情形詳如圖 2 所示。東隧道沿線岩覆最高達 1300 m，隧道施工進行至上述斷層及褶皺發達處，將可能遭遇局部湧水狀況。圖 3 為隧道軸線位置之地質剖面圖。

2.4 研究區域之水文條件

(1) 雨量：本文蒐集研究範圍內各氣象站近 20 年之雨量資料及部分新增測站迄今之雨量觀測資料。研究區域內各雨量站之年雨量值差異甚大，介於 1570-3410 mm，各站之平均雨量約為 2680mm。降雨集中於 5 月至 9 月，豐水期平均總雨量約佔年平均雨量之 85%。研究區域內具代表性之雨量站之長期計測資料如圖 4 所示。

(2) 入滲補注：研究區域地下水補注量係採用美國地質調查所 (USGS) 建議之基流分離法分析區域地下水之補注量，該法經由分析河川流量資料與流量歷線，利用基流分離技術將基流量由河川流量中分離出來，依據地下水水平衡原理，以此推估地下水之補注量。本文採用美國地質調查所所發展之 PART 程式 (Rutledge, 1998) 進行基流推估，河川流量資料以研究區域內荖濃溪新發大橋測站為例，其流量觀測紀錄由 1958 至 2002 年，觀測年限內所有日流量紀錄（約 16000 筆資料）均輸入 PART 程式進行分析，逐月基流量之分析結果如圖 5(a) 所示。進一步考慮本計畫區域每年每年 1 至 4 月及 11 至 12 月為乾季，取各月平均入滲深度，將累積入滲深度與時間繪圖，取前 5 個月之累積入滲深度斜率推估年度總累積入滲深度（即較保守之低流分析），可獲得荖濃溪集水區長期穩定之地下水補注年總入滲深度約為 0.58 m（如圖 5(b) 所示）。考慮研究區域集水區面積為 812.03 平方公里，則推估荖濃溪集水區之地下水年補注總量約為 4.7 億噸。至於旗山溪集水區之年入滲深度經低流分析可得約為 0.6 m，若考慮旗山溪集水區面積 354.3 km²，則推估旗山溪集水區之地下水總補注量約為 2.1 億噸。

(3) 地下水位：本案例場址位處山岳地區，過去並未進行大規模開發，因此可供利用之相關工程調查資料及研究成果甚少，目前僅有本案例於規劃設計階段所設置觀測井之地下水位監測資料可供利用，其成果整理於表 1（中興工程顧問股份有限公司，2005）。由觀測井之地下水位量測結果得知，地下水位高低分布差異頗大，水位深度介於地表下 1.25 - 75.1 m 間。將觀測井所量測之地下水位高程與觀測井所在位置之地表高程進行迴歸分析，可獲得地下水位與地表高程之關係式為：

$$h_w = 0.9672h - 4.781 \quad (1)$$

迴歸分析所得之相關係數 $R^2 = 0.994$ (coefficient of determination)，顯示地下水位與地表高程之相關性相當高，故初步分析時可利用上式推估研究區域內穩態地下水位之空間分布。

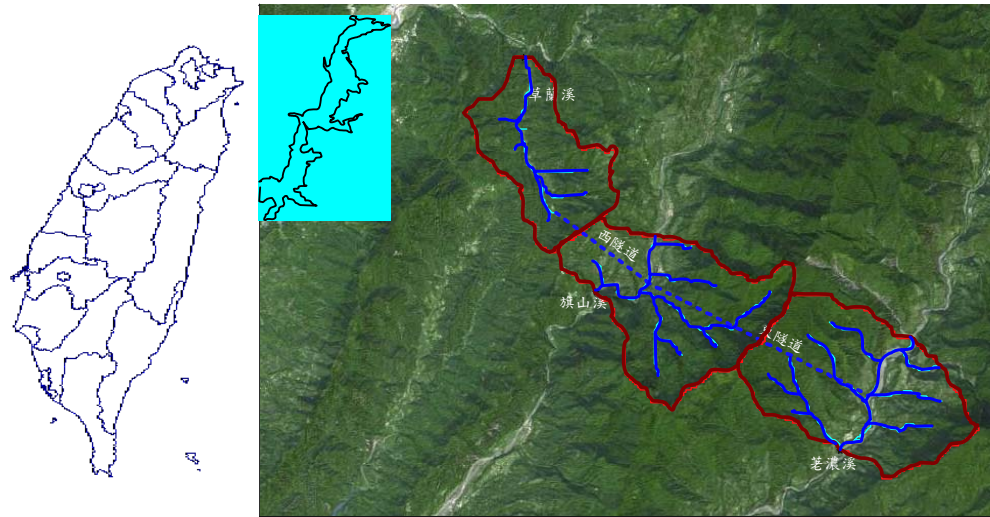


圖 1 研究案例之地理位置

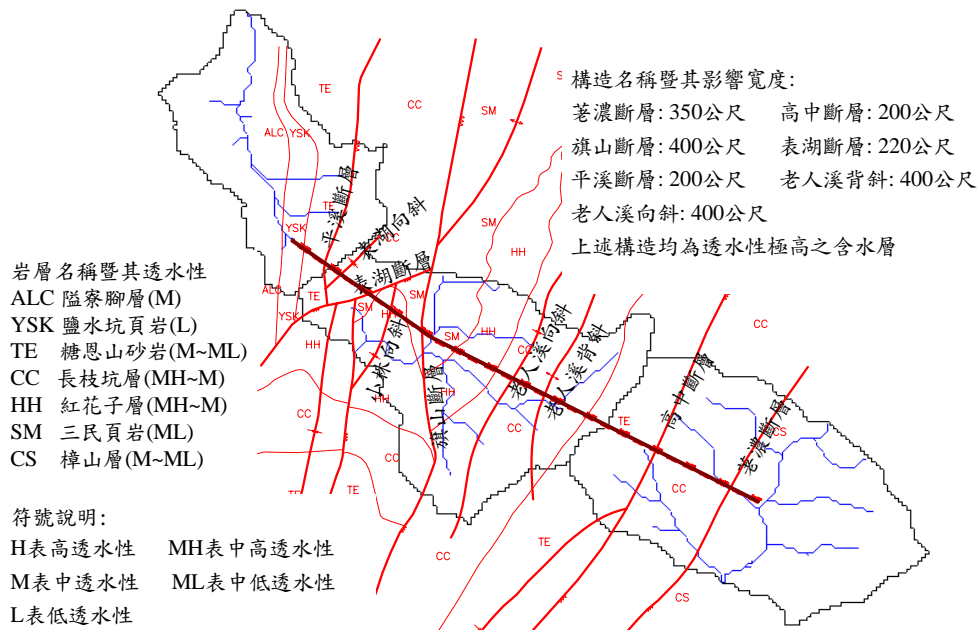


圖 2 研究區域之地質構造平面圖

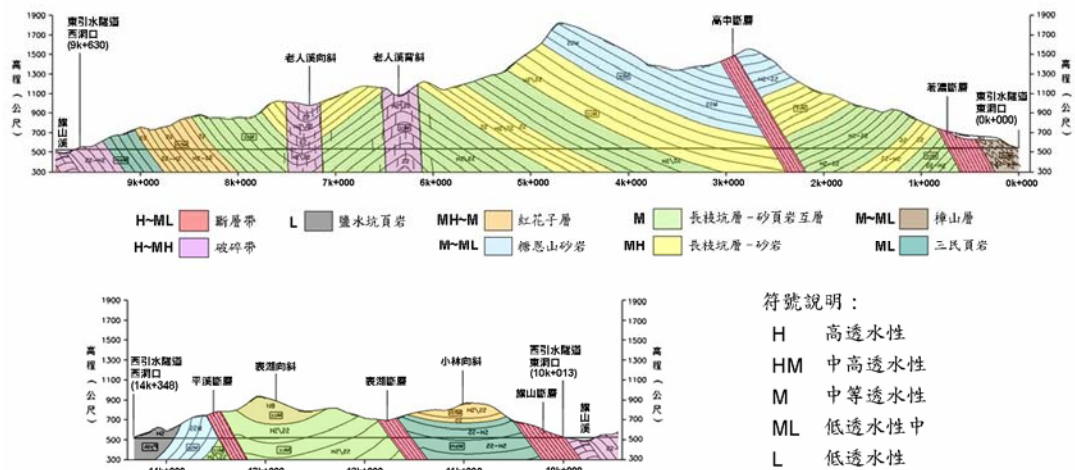
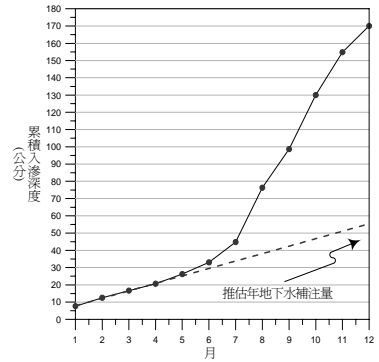
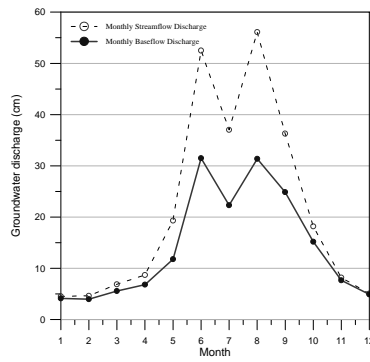
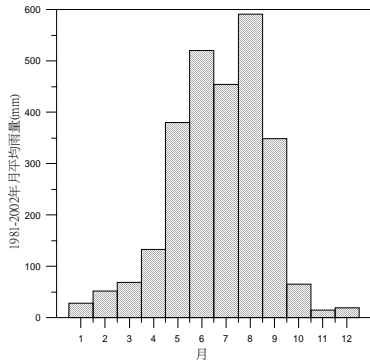


圖 3 研究區域內隧道軸線位置之地質剖面圖

表 1 地下水水位量測結果

孔號	位置	高程 (m)	水位高程 (m)
DB-85-01	荖濃斷層	735.4	660.3
DB-85-02	溫泉孔	710	671.2
DB-85-03	溫泉孔	718.7	649.6
DB-85-04	高中斷層	950.8	939.3
DB-85-05	高中斷層	915.3	912.5
DB-85-06	小鞍山背斜	1649.3	1579.3
DB-85-07	老人溪向斜	1238.7	1196.5
DB-85-08	表湖斷層	686.7	湧水
DB-85-09	凝灰岩	1040.3	1018.5
DB-85-10	平溪斷層	847.7	797.2
DB-85-11	東引水隧道東洞口	563.5	557.3
DB-85-12	東引水隧道西洞口	576.8	544.8
DB-85-13	西引水隧道西洞口	520.9	505.7
DB-85-14	橫坑西側崩塌地	624.5	623.25
DB-85-15	橫坑沿線	655.3	639.8



(a) 逐月基流分析結果

(b) 補注推估

圖 4 月平均雨量資料 (1981 至 2002 年)

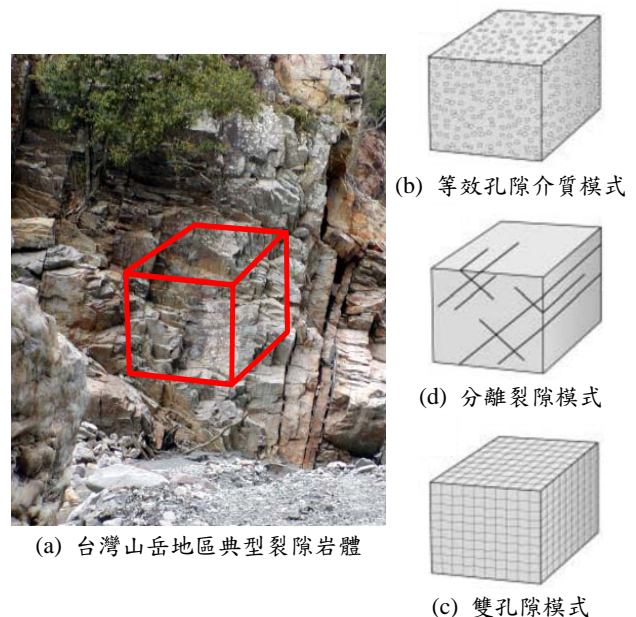
圖 5 荖濃溪新發大橋流量站之基流分析成果 (1958 至 2002 年)

三、水文地質概念模式

台灣地區因受造山運動之強烈擾動，山岳地區面積佔全島之 3/4 以上，且岩體破碎構造發達，不連續弱面遍佈於岩體之中，圖 6(a)顯示典型之裂隙岩體照片。由圖中可之水文地質模式必須將裂隙岩體特性加以考慮。前人之研究成果顯示，裂隙岩體模式主要可分成三類 (如圖 6(b)至圖 6(d)所示)，分別為：1. 等效孔隙介質模式、2. 雙孔隙模式、及 3. 分離裂隙模式 (Barenblatt et al., 1960; Snow, 1969; Louis, 1974; Long et al., 1982; Barton et al., 1985; Sharp, 1993; 張有天, 2005)。對於大區域之水文地質問題而言，考慮岩體內所有裂隙之模式並不切乎實際且不可行，因此過去研究多將其簡化為等效孔隙介質模式，惟一般等效孔隙介質模式無法考慮斷層構造等因素。故本研究採用可斷層構造之等效孔隙介質模式，如圖 7 所示。

分析模式係由概念化 (conceptualization) 的觀點出發，將引水隧道沿線區域範圍內複雜的岩層與地質構造簡化為水文地質概念模型 (hydrogeological conceptual model)。所謂水文地質概念模型係指基於水文地質觀點，透過含水層之分區、分層及地下水流動平衡等手段，將複雜的物理環境簡化為一理想化的概念模型。模型由若干個水文地層單元所組成，模型內地下水之流進與流出係透過水平衡原理達到穩定平

衡狀態，地下水流場則可透過三維地下水流動控制方程式，代入初始條件、邊界條件及地下水文荷載予以求得。



(a) 台灣山岳地區典型裂隙岩體

(b) 等效孔隙介質模式

(d) 分離裂隙模式

(c) 雙孔隙模式

圖 6 裂隙岩體水文地質分析模式類型示意圖

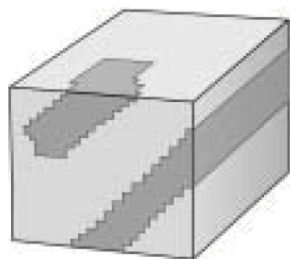


圖 7 本研究採用之模式 (考慮斷層構造之等效介質模式)

3.1 模型建立

本文根據案例場所所蒐集之地理、地層、地質及地下水等資料，建立區域性三維水文地質概念模型，依據水文地質特性之不同，模型劃分為多個水文地質單元。本文採用地下水分析軟體 GMS 建構三維水文地質數值模型，GMS 軟體主要係根據美國地質調查所 (USGS) 所發展之 MODFLOW 模組 (McDonald & Harbaugh, 1988; Harbaugh, 2005)、FEMWATER 模組 (Lin et al., 1996) 及其他相關組件研發而成，其中 MODFLOW 系列模組更是歷經多國學界及工程界近 20 年之改良與驗證，已驗證其正確性無虞且適用性良好 (Laronne & Gvirtzman, 2005; Blainey et al., 2006; Risser, 2006)。

本文首先透過 GMS 程式建立三維數值分析網格，模型初始計有 $200 \times 100 \times 10$ 個網格，水平方向各網格邊長約代表 100 m，垂直方向各網格厚度約代表 100 m。隨後匯入數值地形、研究區域範圍、鑽孔資料及地層分布等資料，並透過 GMS 程式所提供之網格編修功能，運用線性內差法、距離倒數加權法或克利金法等內插原理，將模型之幾何尺寸修正為三維不規則空間分布之數值網格 (如圖 8(a)及圖 8(d)所示)。圖 8(e)為最終所建立之三維水文地質概念模型，圖 8(f)則為模型於隧道軸線所在位置之切割剖面，與地質剖面圖相對照可驗證此數值內差之幾何關應正確無誤。

至於數值運算部分，本文採 MODFLOW 模組之 LPF (layer property flow) 有限差分法求解地下水流動，該法可直接模擬各水文地層，且可獨立計算各內部網格間之流量，不受水文地層單元尺寸之限制。至於數值演算法則採預置共軛梯度法，該法具有穩定性較佳且收斂速度較快之優點。

3.2 地下水補注

本文採用前述流量資料進行低流分析之成果，推估研究範圍之地下水年入滲深度約為 0.6 m。該法基於美國地質調查所建議之基流分離法，透過分析河川流量歷線資料，將基流量由河川流量中分離出來，並根據水平衡原理，將此基流量視為地下水之補注量。

3.3 邊界條件及初始條件

研究範圍係以子集水區之山脊稜線及河流等自然邊界為主，子集水區之山脊邊界視為無流量邊界，河流則視為定水頭邊界，以上邊界條件設定如圖 9 所示。初始水頭值係根據規劃設計階段所設置之觀測井水位監測資料，並根據本文建議之迴歸公式 (公式 1) 給定研究範圍內地下水水位之空間分布，如圖 10 所示。

3.4 水文地質特性

本文所建立之三維水文地質概念模型乃基於等效多孔介質 (Equivalent porous media) 理論，將複雜的岩層及地質構造簡化為多個水文地質單元，包括：隘寮腳層、鹽水坑頁岩、糖恩山砂岩、長枝坑層 (砂頁岩互層)、長枝坑層 (砂岩)、紅花子層、三民頁岩、樟山層等等岩層單元，亦包括：高中斷層帶、荖濃斷層帶、旗山斷層帶、表湖斷層帶、平溪斷層帶、老人溪背斜、老人溪向斜、小林向斜、表湖向斜等地質構造。各水文地質單元獨立，且具有其特定的水文地質特性參數，根據現地及室內所執行之相關水力試驗可獲得各水文地質單元之水理參數，整理如表 2 與表 3 所示。

3.5 廣域與近域模型轉換

為解決大區域水文地質模型先天上之應用限制，本文採用前人針對此議題之研究成果 (Ward et al., 1987)，先進行隧道全線所涵蓋範圍之區域水文地質分析，再針對研究所關注之局部區段重新調整網格密度，並將區域水文地質模型所解得之場址附近水頭分布指定為各區段細部模型之邊界條件或初始條件，如此一來，本研究所建立之山岳隧道水文地質分析模式除可評估大區域範圍內因隧道湧水所可能引致之水資源影響，亦能進一步求得場址小區域範圍內兼具正確性與精確度之分析結果。有關水文地質概念模型之尺度轉換原理可參考圖 11。

3.6 模型率定

模型率定屬逆推問題 (inverse problem) 範疇，係透過現地水位、水壓或流量等資料校驗 (calibration)，反推最適當的水文地質概念模型之水理參數。模型率定時係藉由數值程式調整模型內各水文地質單元之水文地質參數，以控制各觀測井之水位模擬結果與實際監測值之誤差均落於信賴區間內 (confidence interval)，藉以獲取模型內各水文地質參數之最佳配置，以確保概念模型之正確性與適用性。

本文採 MODFLOW 2000 PES 模組及 PEST 模組 (Doherty, 2000) 進行模式率定，以自動參數評估 (automated parameter estimation) 方式率定各水文地質單元水理參數，並透過本案例於規劃調查階段之水位監測資料進行模式率定，率定結果如圖 12 所示。圖中黑點為觀測井位置，柱狀校正指標之上、下限表示觀測值正負一個誤差容許值，而實心柱狀體部分則為計算值與觀測值之誤差，若柱狀體為綠色表示誤差落於容許範圍內。

本研究設定信賴區間為正負 2 倍標準差 ($\pm 2\sigma = \pm 5m$)，即模擬結果控制於各觀測井監測水位正負 5.0 m 範圍內，此時信心水準 (confidence level) 為 95%。由率定結果可知本文所建立之三維水文地質概念模型具相當程度之代表性與準確性。上述相關率定成果，詳見參考文獻 (中興工程顧問股份有限公司，2006)。

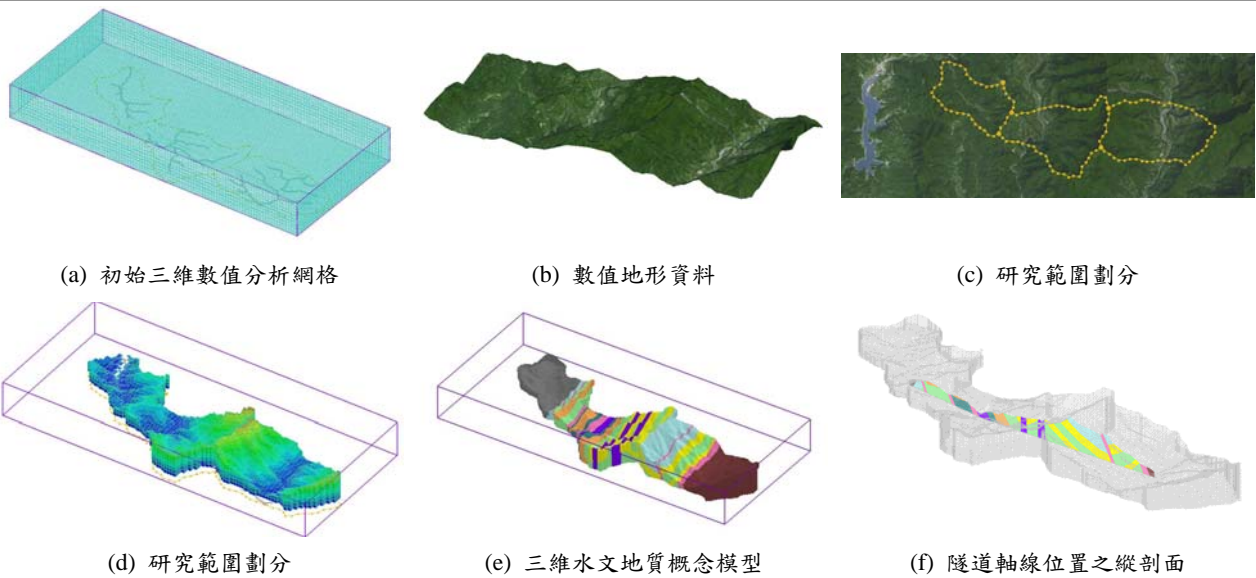


圖 8 三維水文地質概念模型之建立流程

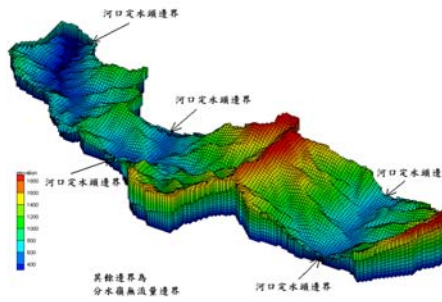


圖 9 研究區域之邊界條件設定

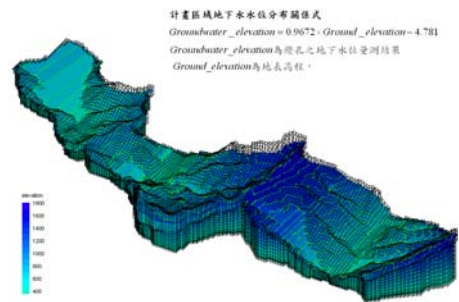


圖 10 研究區域之初始水位分布

表 2 研究區域內各岩層之透水係數

地層名稱	透水性	透水係數 K (m/sec)	貯水率 S_y
隘寮腳層	中	1.0×10^{-6}	0.001 - 0.01
鹽水坑頁岩	低	1.0×10^{-7}	0.001 - 0.01
糖恩山砂岩	中低~中	6.0×10^{-7}	0.001 - 0.01
長枝坑層 (砂頁岩互層)	中	1.12×10^{-6}	0.001 - 0.01
長枝坑層 (砂岩)	中高	5.0×10^{-6}	0.001 - 0.01
紅花子層	中~中高	2.5×10^{-6}	0.001 - 0.01
三民頁岩	中低	4.38×10^{-7}	0.001 - 0.01
樟山層	中低~中	6.0×10^{-7}	0.001 - 0.01

表 3 研究區域內各地質構造之透水係數

地層分類	透水係數 (m/sec)	備註
高中斷層前後擾動帶	1.12×10^{-5}	斷層前後方擾動帶取附近地層透水係數 10 倍
高中斷層帶	5.10×10^{-7}	本斷層帶附近孔號 DB-85-04 與 DB-85-05 共有 6 組 Lugeon 試驗值, 取其平均值 (斷層泥)
荖濃斷層帶	2.08×10^{-5}	本斷層帶附近孔號 DB-85-01、DB-85-02 與 DB-85-03 共有 4 組 Lugeon 試驗值, 取其平均值
旗山斷層帶	8.68×10^{-6}	本斷層帶岩體極為破碎且夾泥, 無透水試驗結果, 透水係數係參考附近地層推估
表湖斷層帶	1.54×10^{-5}	無透水試驗結果, 本斷層帶屬孔隙裂隙多, 假設其透水係數附近地層透水係數之 20 倍
平溪斷層帶	1.1×10^{-5}	無透水試驗結果, 本斷層帶岩體破碎且裂隙多, 假設其透水係數附近地層透水係數之 15 倍
老人溪背斜	1.8×10^{-6}	考慮向斜與背斜軸部較為破碎, 老人溪向斜軸部取兩倍原透水係數值, 而老人溪背斜則取 1.5 倍原透水係數值
老人溪向斜	2.38×10^{-6}	
小林向斜	1.06×10^{-6}	由 DB-84-14 試驗結果推估
表湖向斜	1.12×10^{-6}	無透水試驗結果, 參考附近地層透水係數值 (長枝坑層砂頁岩互層)

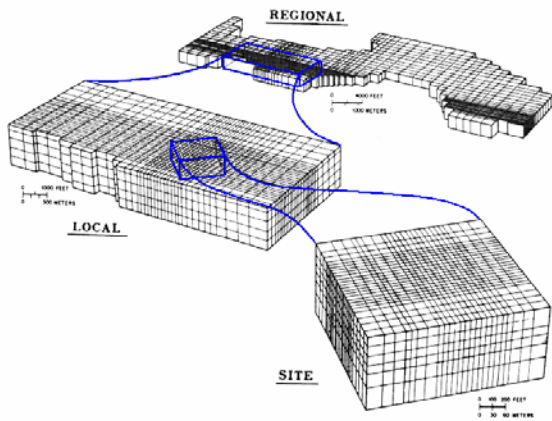


圖 11 水文地質概念模型尺度轉換原理

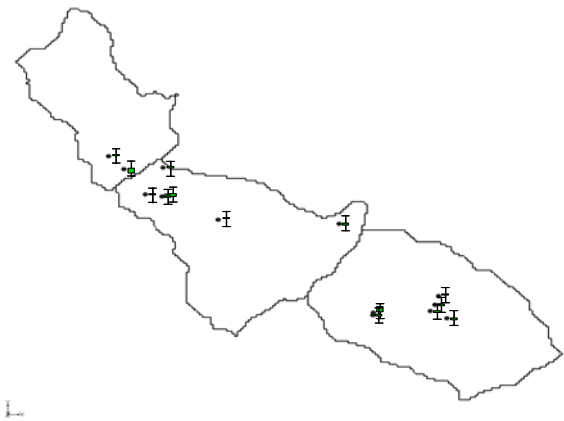


圖 12 水文地質概念模型率定成果

四、分析評估

4.1 區域性地下水影響評估

考量地質構造及水文地質特性對地下水流動之影響，本研究進一步結合現地水力試驗及水文地質概念模式之參數率定成果，並透過水文地質模式分析推估東隧道及西隧道沿線各水文地質單元之地下水三維流動情形。首先透過地下水穩態分析評估隧道開挖前之地下水流場分布（如圖 13 所示）。結果顯示各子集水區內地下水流動於山脊處區分為不同流場，且地下水具有沿著透水性較佳之地質構造流動之趨勢（如：斷層、摺皺等構造）。圖 13 亦顯示於東隧道里程 1k+000 及 6k+700 兩處之水頭均高於地表高程且流場向量指出地表（圖中向量最大值為 0.23），表示此處之水位（或水壓）高於地表，易形成自流井或湧泉。此分析結果與荖濃溪斷層附近之少年溪溫泉湧出及工程前期所設 DB-93-06 觀測井孔口溢流等現象十分吻合（中興工程顧問股份有限公司，2006），驗證本模式分析成果具有良好的正確性及可靠性。

為評估隧道施工對隧道鄰近區域地下水資源之影響，本研究採動態分析來模擬及評估隧道前進效應對區域地下水流場之影響程度。藉由逐階段指定內部排水邊界方式，模擬隧道輪進開挖對地下水流場之擾動程度。圖 14 及圖 15 分別為模擬東隧道開挖前進至 3000 m 後第 30 天之地下水流場分布俯視圖及前視圖。由圖中可獲知垂直隧道軸線方向（隧道半徑方向）之地下水流場變化主要侷限於隧道半徑約 200 m 範圍內，其餘位置流場之影響程度隨距離隧道開挖位置漸遠而遞減，至於山脊分水嶺處水頭變化甚小，而近地表之地下水位幾乎未受隧道前進開挖而產生變化。至於隧道開挖面前方之地下水流場則受隧道開挖面湧水影響而產生顯著變化，特別是隧道開挖至高水頭位置且突破剪裂泥阻水層之瞬間。圖 15 亦顯示隧道突破高中斷層剪裂帶進入長枝坑砂岩時，流場之影響範圍明顯擴大，可預期該位置因水頭變化梯度加劇，將產生明顯的湧水量。

4.2 隧道開挖湧水量評估

為進一步評估隧道開挖施工期間，前進開挖面或隧道頂拱、仰拱與側壁之湧水量，本研究進一步將隧道周圍數值網格加密（隧道橫斷面網格邊長為 6.5 m × 6.5 m，如圖 15 所示），以獲得較精準的局部湧水量分

析結果。分析時假設當隧道開挖至特定區段時，開挖面位置之水文地質單元網格 (i,j,k) 之初始水頭為 $h(i,j,k,t_{k-1})$ 。

進一步透過隧道水文地質模式動態分析，可推得於開挖面通過後某時間後，該網格之水頭值變為 $h(i,j,k,t_k)$ ，此時其鄰近水文地質單元之水頭值分別可推得為 $h(i,j,k-l,t_k)$ 、 $h(i,j,k+l,t_k)$ 、 $h(i,j-l,k,t_k)$ 、 $h(i,j+l,k,t_k)$ 、 $h(i+l,j,k,t_k)$ 與 $h(i-l,j,k,t_k)$ 。

將上述單元之透水係數、其與鄰近各單元間之水頭差值、及單元各向截面積代入達西定律，即可評估開挖面位置水文地質單元之各方向湧水量。若開挖面可細分成多個水文地質單元網格，則透過疊加原理將各網格之各向湧水量平衡加總，即可分別推估隧道前進開挖面、頂拱、仰拱、側壁或特定區段之湧水量。

若進一步考量湧水狀態之不同，可將湧水情況再區分為瞬時突發性湧水與穩定持續性湧水兩大類（Goodman et al., 1965），茲將其內容分述如下：

(1) 瞬時突發性湧水量評估

隧道開挖面瞬間突發性湧水量之評估係透過動態分析進行，其原理係求解短時間前、後之地下水流場變化，進而透過達西定律推估隧道開挖面位置網格之各向湧水量。

圖 16 為模擬東隧道開挖至荖濃斷層時，近開挖面單位長度湧水量隨時間之變化關係。分析結果顯示，近開挖面處之瞬間最大湧水量可達 203 (L/min-m)，模式分析結果亦顯示瞬間最大湧水量主要來自頂拱與仰拱（約佔 85.5%），隨時間增長其所佔比例將逐漸下降，趨於穩定時約佔 40%。

圖 17 則為模擬東隧道開挖至高中斷層時，近開挖面單位長度湧水量隨時間之變化關係。分析結果顯示，近開挖面處之瞬間最大湧水量可達 242 L/min-m，主要來自頂拱與仰拱（約佔 85.6%），並隨時間增長其所佔比例將逐漸下降，趨於穩定時約佔 30%。

(2) 穩定持續性湧水量評估

開挖面穩定湧水量之評估流程與前述瞬間湧水量評估方式相似，惟將開挖後水文地質單元之水頭變化計算改以穩態分析進行，以模擬隧道開挖區段之長期穩定湧水量（假設為無襯砌止水之保守狀態）。以隧道通過斷層帶為例，模式分析結果顯示，隧道開挖至荖濃斷層後，近開挖面附近隧道單位長度之穩定持續湧水量約為 23.2 L/min-m。隧道開挖至高中斷層後，近開挖面單位長度之穩定持續湧水量則為 17.7 L/min-m。

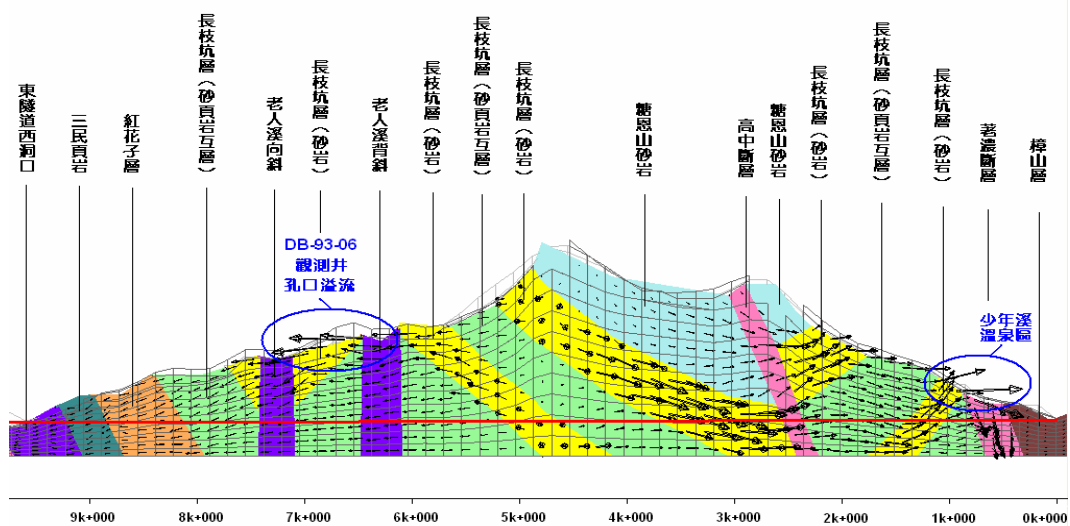


圖 13 考慮地質構造及水文地質特性之地下水流場剖面圖（東隧道沿線穩態分析成果）

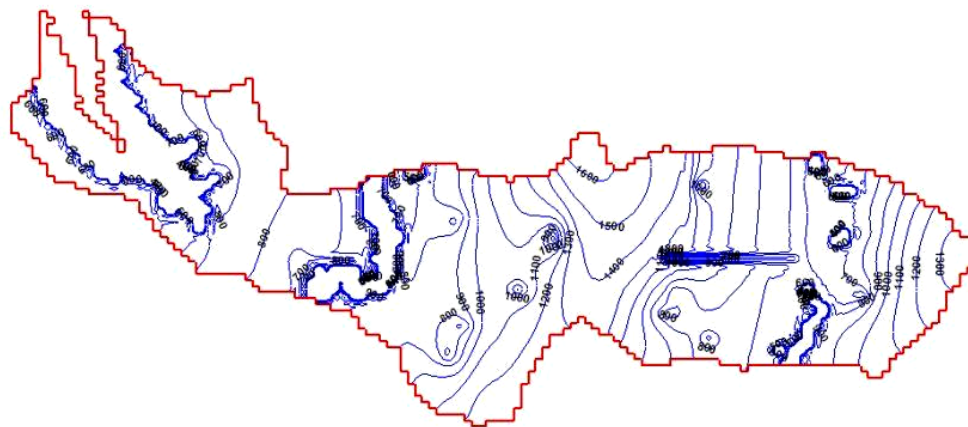


圖 14 模擬東隧道開挖之暫態湧水分析（俯視圖，模擬開挖至 3000m 後第 30 天之水頭分布）

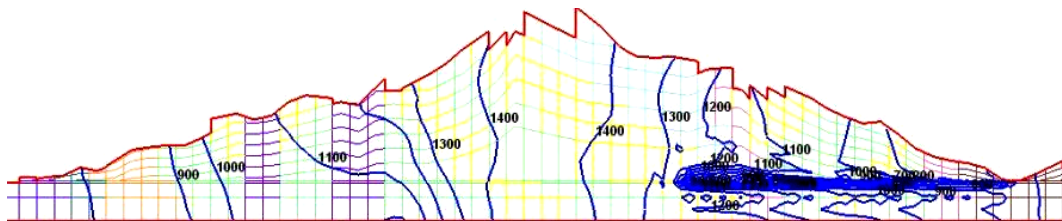


圖 15 模擬東隧道開挖之暫態湧水分析（前視圖，模擬開挖至 3000m 後第 30 天之水頭分布）

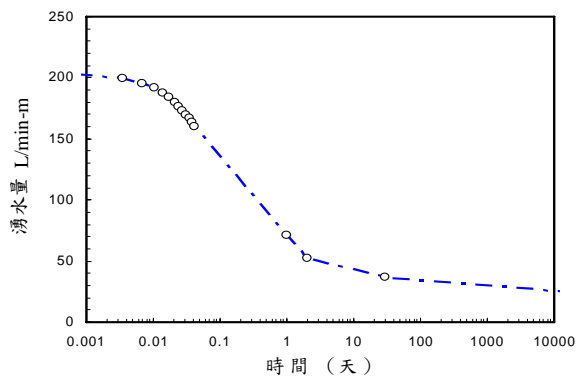


圖 16 隧道開挖至荖濃斷層處湧水隨時間之遞減關係

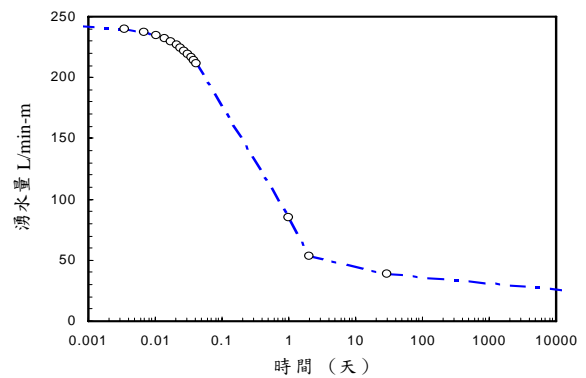


圖 17 隧道開挖至高中斷層處湧水隨時間之遞減關係

五、結論與建議

隧道開挖工程除了湧水災害外，亦可因開挖湧水後，造成區域水文地質環境衝擊。以往國內隧道工程多著重於利用工程手段克服湧水問題，對於隧道施工引致之大量地下水流失所可能衍生之區域水文地質環境影響問題，則較少系統化之研究。本文針對上述議題進行探討並獲致以下結論：

(1) 山岳隧道湧水問題多與地質弱面，如斷層、剪裂帶及向斜構造等相關，因此配合地質調查確認地質弱面位置，再結合水文地質調查及相關現地水力試驗，建構計畫區域之水文地質概念模型，可大幅增加山岳隧道開挖湧水量預測之準確性。

(2) 本研究透過隧道水文地質模式之暫態與穩態分析，預測隧道工程案例於施工期間之區域性地下水流場變化，進而評估隧道施工對鄰近區域地下水資源短期及長期的衝擊程度。

(3) 山岳隧道水文地質概念模型除能評估隧道輪進開挖至不同岩層與地質構造區段之湧水量差異外，亦可透過暫態分析預先掌握隧道開挖時之瞬間最大湧水潛勢及其隨時間之衰減趨勢，以擬定適當的止水或排水措施。此外，本研究之三維數值模式分析，亦可同時推估隧道前進開挖面、頂拱、仰拱或側壁之各方向湧水量。

(4) 待未來持續蒐集本案例隧道施工時所量測之分段湧水量資料後，除可逐步驗證模式正確性外，亦能提升本模式於此案例預測分析之準確度。

誌謝

本文承蒙中興工程顧問公司大地工程部侯秉承經理、李民政副經理與吳富洵先生、成功大學李振誥教授研究團隊之協助與提供相關資料，特此申謝。

參考文獻

- [1] 中興工程顧問股份有限公司，「曾文水庫越域引水工程計畫—隧道工程補充地質調查試驗及評估報告」，經濟部水利署南區水資源局，台灣 (2005)。
- [2] 中興工程顧問股份有限公司，「曾文水庫越域引水工程計畫—隧道工程引水隧道水文地質模式檢測與區域水資源環境影響分析九十五年度報告」，經濟部水利署南區水資源局，台灣 (2006)。
- [3] 交通部中央氣象局網站 (<http://www.cwb.gov.tw/>)。
- [4] 陳昭旭、李振誥，「隧道湧水災害之水文地質調查及其防治處理措施」，*土工技術*，第 87 期，第 81-92 頁 (2001)。
- [5] 張文成、張龍均，「雪山隧道特殊地質施工案例探討」，2004 海峽兩岸土工技術岩土工程交流討論會論文集，第 45-58 頁，台北，台灣 (2004)。
- [6] 楊豐榮，「曾文水庫越域引水隧道工程水文地質研究」，第五屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會，台北，台灣 (2006)。
- [7] 黃俊鴻等人，「雪山隧道工程施工湧水與鄰近地

表、地下水文集翡翠水庫進流變異之關聯研究」，交通部台灣區國道新建工程局專案研究報告，台北，台灣 (2005)。

- [8] ASTM D 4630-96, "Standard Test Method for Determining Transmissivity and Storativity of Low Permeability Rocks by In Situ Measurements Using the Constant Head Injection Test", *ASTM International* (2002).
- [9] DOHERTY, J., *PEST: Model-Independent Parameter Estimation 4th Edition*, Watermark Numerical Computing (2000).
- [10] GOODMAN, R. E., MOYE, D. G. A., SCHALKWYK, V., and JAVANDEL, I., "Groundwater Inflows During Tunnel Driving", *Eng. Geol.*, 2, pp. 39-56 (1965).
- [11] HARBAUGH A. W., "MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process", U.S. Geological Survey Techniques and Methods Report 6-A16, USGS, USA (2005).
- [12] HYDER, Z., BUTLER, J. J., MCELWEE, C. D., and LIU, W., "Slug Tests in Partially Penetrating Wells", *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 11, pp. 2945-2957 (1994).
- [13] KRUSEMAN, G. P. and Ridder, D. E., *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, 2nd edition*, Intl. Inst. For Land Reclamation and Improvement, Publication 47, Wageningen, p. 377 (1990).
- [14] LEE, C. H., and FARMER, I., *Fluid Flow in Discontinuous Rocks*, Chapman&Hall, London (1993).
- [15] National Research Council (NRC), *Rock Fractures and Fluid Flow: Contemporary Understanding and Applications*, National Academy Press, Washington DC (1996).
- [16] RUTLEDGE, A. T. and Daniel, C. C., "Testing an Automated Method to Estimate Ground-water Recharge from Streamflow Records", *Ground Water*, Vol. 32, No. 2, pp. 180-189 (1994).
- [17] RUTLEDGE, A. T., "Computer Programs for Describing the Recession of Ground-water Discharge and for Estimating Mean Ground-water Recharge and Discharge from Streamflow Data", U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4148, p. 43 (1998).
- [18] TSENG, D. J., TSAI, B. R., and CHANG, L. C., "A Case Study on Ground Treatment for a Rock Tunnel with High Groundwater Ingression in Taiwan", *Tunneling and Underground Space Technology*, 16, pp. 175-183 (2001).