

曾文越引隧道工程水文地質之調查與分析評估

楊豐榮

經濟部水利署南區水資源局

顧承宇 譚志豪 許世孟 鍾明劍

中興工程顧問社大地工程研究中心

摘 要

台灣地區因雨量充沛，且位於歐亞板塊與菲律賓板塊交接處，活躍的造山運動造成岩層之破碎度高而節理發達，故地表水易沿地質弱面滲入岩層，以致岩盤中之地下水儲量豐富。近年來山岳隧道之開挖經驗顯示，穿過高山地形之長隧道因水文地質條件十分複雜，隧道施工時除因大量湧水造成施工困難外，亦常因地下水流失引發鄰近區域環境水文地質之爭議。本文以曾文越引隧道工程為例，分別針對：(1) 山岳隧道工程之水文地質現地試驗技術、(2) 結合地形、地層、地質構造及地下水文條件之水文地質概念模型建立、(3) 區域三維水文地質數值模式之分析、(4) 模式率定與驗證、與(5) 隧道開挖湧水對鄰近區域水文地質環境影響之分析等項目詳加探討。並期藉此降低隧道於施工時所可能遭遇之風險，以釐清隧道施工與營運對於周遭環境水文地質之可能影響。

關鍵字：隧道工程、水文地質調查、隧道湧水、地下水、三維數值分析。

HYDROGEOLOGICAL INVESTIGATION AND ANALYSIS OF TRANSBASIN DIVERSION TUNNEL OF TSENGWEN RESERVOIR

YANG FENG-RONG

SOUTHERN REGION WATER RESOURCES OFFICE, WRA, MOEA

KU C. Y. TAN C. H. HSU S. M. CHUNG M. C.

SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.

ABSTRACT

Taiwan is located at an active mountain belt created by the oblique collision between the northern Luzon arc and the Asian continental margin in which fissures, joints, beddings, and even faults prevail in most of mountainous areas. While existing joints and fractures provide ideal conduits for water to flow, large volumes of groundwater are stored in aquifers in which water inflows are often encountered during tunneling. Recently, several case studies of tunneling in Taiwan demonstrate that the water inflow is the major cause for the failure. As a consequence of groundwater loss, the problem of environmental arguments may also arise. In this paper, a case study of Tsengwen reservoir transbasin diversion tunnel with emphasis on the topics of hydrogeology was presented. Several major issues, including (1) the hydrogeological field testing technique, (2) the establishment of conceptual model, (3) the modeling of three-dimensional groundwater flow, (4) the calibration and verification of the conceptual model, (5) the prediction of tunnel inflow, were introduced. The application of each approach was described in details. It is believed that the predicted results may provide useful information for reducing the uncertainties of tunnel inflow and may also clarify the impact of environment issues.

KEY WORDS : Tunneling, hydrogeological investigation, tunnel inflow, groundwater, 3-D numerical modeling.

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（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。

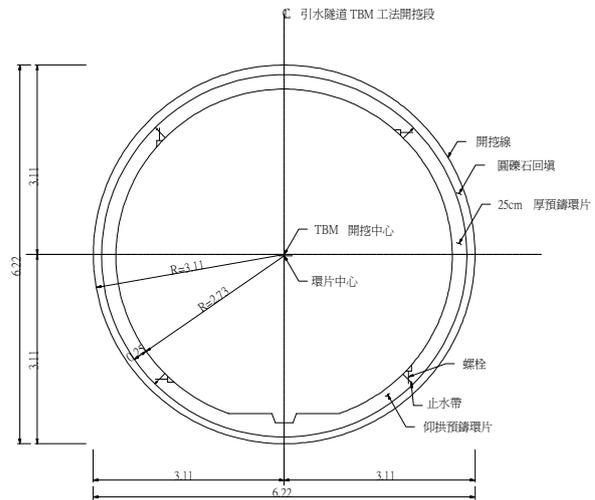
有鑒於近年來陸續進行之山岳隧道工程，施工中常遭遇大量湧水而肇生災害並導致工程進度延宕（Tseng et al., 2001；張文成與張龍均，2004；黃俊鴻等，2005），故於規劃、設計及施工階段之隧道開挖湧水分析顯得格外的重要。除了湧水災害外，隧道開挖亦可能影響周邊區域之地下水水位變化、流動補注、水質及水資源蘊含量，甚至可能改變山岳地區地質或環境災害之發生潛勢（楊豐榮，2006）。因此，山岳隧道工程不能僅就地質的觀點考量，尚需結合地表及地下水文等相關因素，方能獲得較佳的解決方案。以下則以曾文越引隧道工程為例，分別介紹本文所採用之水文地質調查與分析評估技術。

二、工程概述

2.1 工程概述

曾文水庫越域引水(以下簡稱曾文越引)隧道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，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，其設計斷面如圖一所示，東隧道貫穿荖濃溪流域與

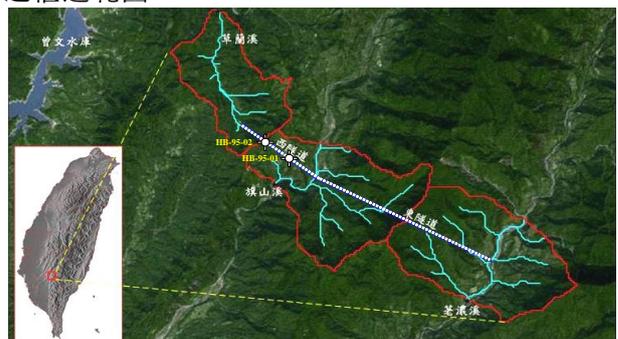
旗山溪流域，長度9.6 km；西隧道則貫穿旗山溪流域與草蘭溪流域，長度4.3 km。東、西隧道之坡度皆為1/700，藉由重力流動方式達到越域引水之目的（中興工程顧問股份有限公司，2005）。



圖一 隧道設計斷面(TBM段)

2.2 研究區域地理位置

曾文越引隧道位於台灣南部山區，其地理位置如圖二所示。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，研究區域內三條主要溪流及其支流之位置亦如圖中標示。研究範圍依據隧道可能之影響範圍，保守限定於隧道沿線周圍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，如圖中標示之框選範圍。



圖二 曾文越引隧道之地理位置

三、隧道水文地質調查

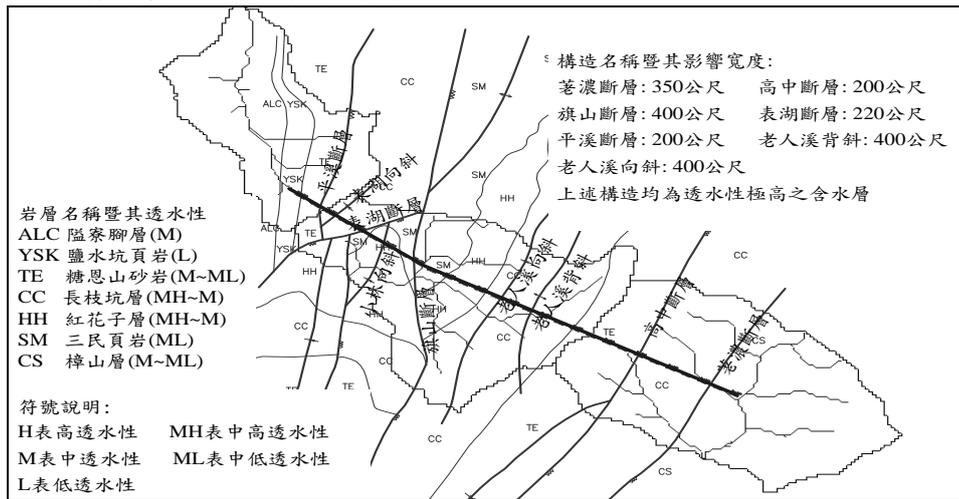
隧道水文地質調查主要係獲取正確之地質、水文地質資料，掌握隧道可能產生湧水之地質區段，作為後續分析評估之依據。一般水文地質調查工作，分為規劃、分析設計、施工、與完工後之長期觀測等階段，各階段所調查之重點與可獲取之精度均不相同，需整合各階段之調查成果始可進行精確之評估工作(陳昭旭等，2001)。地質鑽孔是隧道工程不可或缺之調查項目之一，地質鑽孔除提供基本水文地質調查所需之資料外，同時可供現地水文地質觀測與試驗所使用，對於水文地質參數之調查扮演重要之角色。

由於本工程計畫隧道水文地質調查工作包含甚多，各項調查工作均有其目的，限於篇幅，

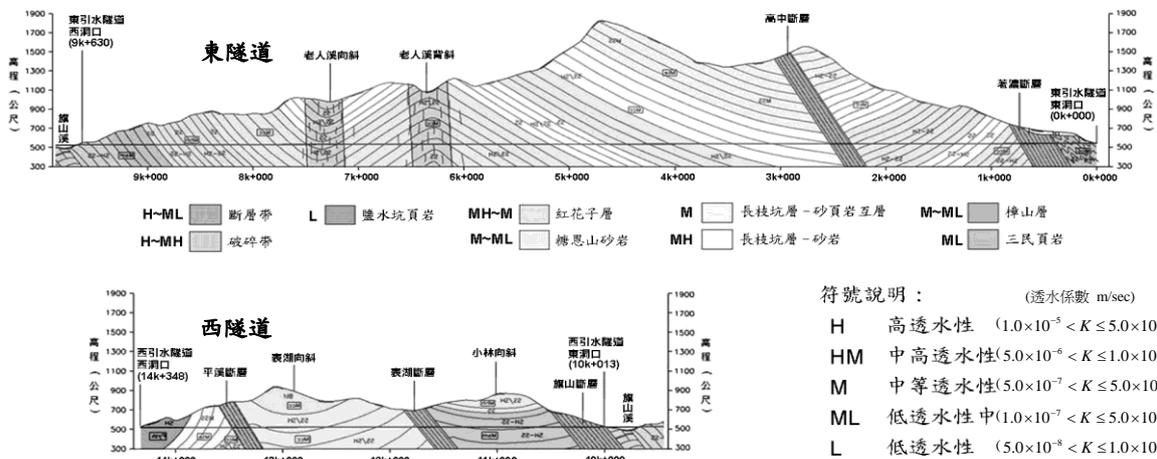
以下僅針對與本研究相關性較強之隧道水文地質調查工作與現地水文地質試驗加以說明。

3.1 地層與地質構造調查

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三所示。另圖四為隧道軸線位置之地質剖面圖，其中東隧道沿線岩覆最高達1300 m。



圖三 研究區域之地質構造平面圖



圖四 研究區域內隧道軸線位置之地質剖面圖

3.2 區域性地下水文調查

(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至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%。

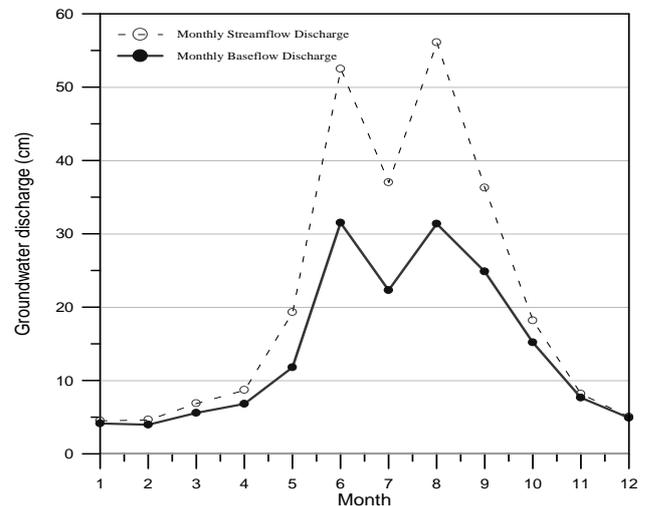
(2) 入滲補注：研究區域地下水補注量係採用美國地質調查所 (Rutledge, 1994, 1998) 建議之基流分離法分析區域地下水之補注量，該法經由分析河川流量資料與流量歷線，利用基流分離技術將基流量由河川流量中分離出來，依據地下水水平衡原理，以此推估地下水之補注量。

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2005年，分析考慮觀測年限內所有日流量紀錄（約16000筆資料），逐月基流量之分析結果如圖五所示。進一步考慮本計畫區域每年1至4月及11至12月為乾季，取各月平均補注深度，將累積補注深度與時間繪圖，取前5個月之累積補注深度斜率推估年度總累積補注深度（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補注深度約為0.58 m。考慮研究區域集水區面積為812.03 km²，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補注深度經低流分析可得約為0.51 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1.8億噸。

(3) 地下水位：由於隧道段位處山岳地區，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21孔鑽孔之地下水位量測資料可供利用。由上述鑽孔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 至 75.1 m間。本研究將量測之地下水位高程 h_w 與鑽孔所在位置之地表高程 h 進行迴歸分析，可獲得地下水位與地表高程之關係式為：

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

迴歸分析所得之相關係數 (Coefficient of determination) $R^2 = 0.994$ ，顯示地下水位與地表高程之相關性相當高。



圖五 逐月基流分析結果

3.3 現地岩盤透水試驗與分析

以往現地水文地質參數調查方法多以 Lugeon 試驗為主，該試驗係配合鑽孔深度調查岩體之水密性（或透水性），無法提供特定深度岩體構造區段之基本資料，另其分析之方法固定，對於裂隙岩體複雜多樣之含水層內地下水流動分析有相當限制。為克服此困難，本研究應用孔內攝影調查結合雙栓塞透水試驗，進行現地水文地質參數調查工作，本研究採用之現地試驗工作與目的如表一所示。

孔內攝影係於鑽孔中置入一攝影設備，直接攝錄孔壁情形，以即時研判地層狀況、節理及裂隙分佈及位態等資料。其設備機型可分為兩種型式：光學式和音射式，光學式設備為一般孔內攝影所常用，主要由一組光源及一架攝影機所構成，其拍攝結果如同一般肉眼所見，精度則取決於攝影機之解析度。惟其最大之缺點在於若孔內有水時，水質不可混濁，以免影響攝影品質。

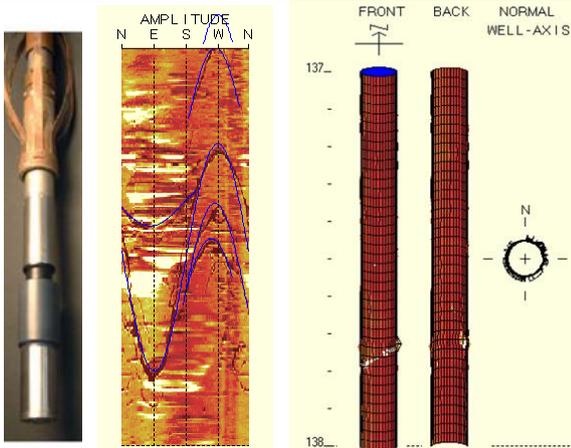
在以往的地下弱面調查，主要多藉由檢視鑽孔岩心，以統計弱面分佈、位態狀況等。但岩心弱面調查存在以下限制：(1) 當岩心破碎或無法提取時，無法了解地下地質狀況，然而該區段往往可能是調查的重點區域；(2) 不易或無法判斷

岩心顯示之弱面為原生或為施鑽過程中之機械破壞導致之破裂；(3) 對於空穴、弱面內寬、易流失之夾心等情形，不易透過岩心檢視得知；(4) 無法檢核岩心箱內鑽孔岩心是否放對位置。

為改善上述限制並提供雙栓塞透水試驗位置選擇的依據，本研究採用音射式孔內攝影方式進行裂隙弱面位態調查，以瞭解弱面真實之情形，如圖六所示。

表一 本研究採用之現地試驗工作與目的

試驗名稱	試驗目的
孔內裂隙位態調查	研判岩層狀況、量測鑽孔內節理及裂隙分佈及位態等資料
透水試驗 (Lugeon)	研判岩盤之透水係數，惟需配合鑽孔進度進行試驗，無法提供特定深度之構造區段資料且分析方法固定，對於裂隙岩體複雜多樣之含水層內地下水流動分析有相當限制。
雙栓塞透水試驗	研判岩體特定深度之裂隙構造之水文地質參數，可針對複雜多樣之含水層進行分析。



圖六 裂隙弱面位態調查

雙栓塞透水試驗 (double packer permeability test, 如圖七所示) 係在試驗過程中，利用兩個栓塞去分離鑽孔試驗區段，試驗區段的長度會依據不同試驗目的而不同，栓塞可以阻隔一個裂隙或是多個裂隙，甚至整個岩體結構。藉由試驗的結果，可以進一步描述裂隙岩體中在不同地質構造下水力特性之變化。此外，裂隙岩體內水文地質參數會受到尺度效應 (scale effect) 影響，雙栓塞透水試驗配合抽(注)水試驗，因試水量較大且試水時間長，相較於Lugeon

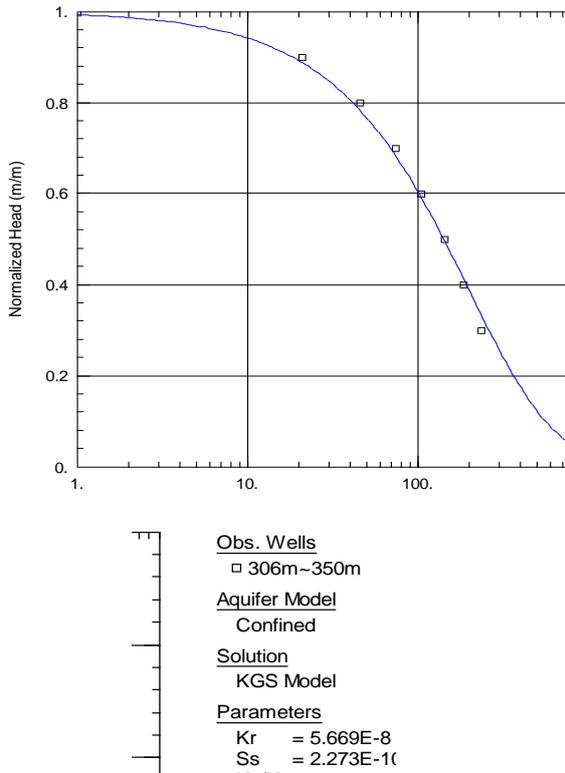


圖七 現地雙栓塞透水試驗

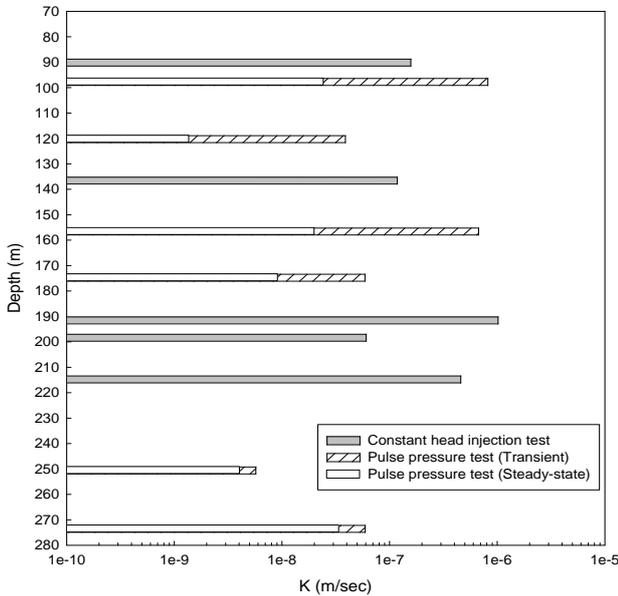
試驗，其整體試水影響範圍較大，可得到合理的大區域水文地質參數資料。

基於地質之不確定性，僅採用單一的理論模式分析現地水力試驗資料潛藏許多之不確定性，故本研究從現地試驗所得的資料，利用可考量含水層的異質性及非等向性之現有理論方法 (Kruseman et al. 1990 ; ASTM 2002) 解釋現地試驗所紀錄試驗資料，藉以推估裂隙岩體含水層水文地質參數。本研究曾於本案例西隧道進行兩處現地雙栓塞透水試驗，分別為HB-95-01與HB-95-02 (試驗孔位如圖二所標示)。以HB-95-02試驗為例，其透水試驗分析成果如圖八所示，該成果係以試驗量測資料匹配理論曲線 (Hyder et al., 1994) 進而求得該試驗段之水文地質參數。圖九則顯示HB-95-02試驗所獲得之岩盤透水係數隨深度之變化。

上述定量之分析可得水文地質之參數值，而定性分析可藉由理論模式以解釋目前試驗含水層的型態(侷限、非侷限、滲漏或是裂隙含水層等)及試驗過程中孔徑、孔壁 (skin effect) 和邊界效應存在與否之辨識，以推估最符合研究地區之水文地質參數。



圖八 現地雙柱塞透水試驗分析結果

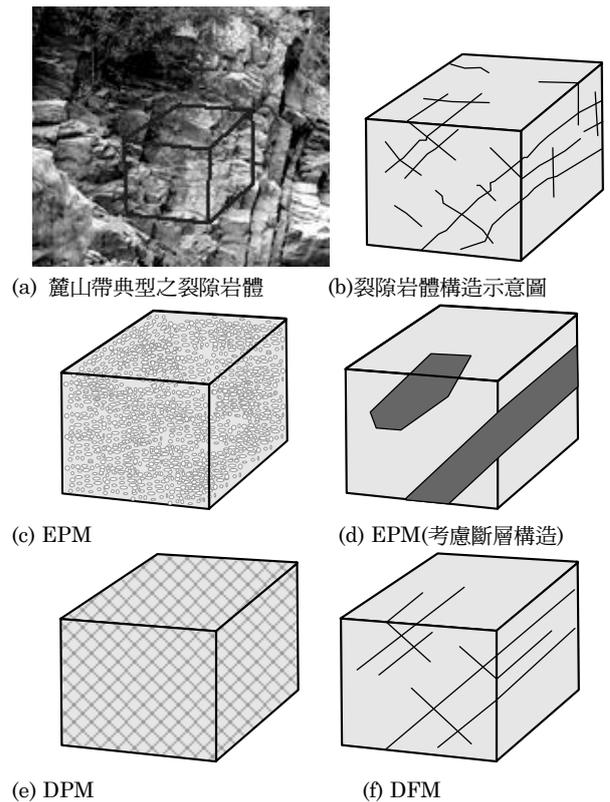


圖九 HB-95-02雙柱塞試驗分析成果(沿深度變化)

四、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，圖十(a)(b)顯示典型之裂隙岩體照片與簡化示意圖。由圖可知，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(Lee, 1993; NRC, 1996)，裂隙岩體模式主要可分成三類(如圖十(c)至(f)所示)，分別為：(1)等效孔隙介質模式(Equivalent Porous Media model, EPM)、(2)雙孔隙模式(Double Porosity Model, DPM)、及(3)分離裂隙模式(Discrete Fracture Model, DFM)。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，如圖十(d)所示。



圖十 裂隙岩體水文地質分析模式類型示意圖

本研究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質單元所組成，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。

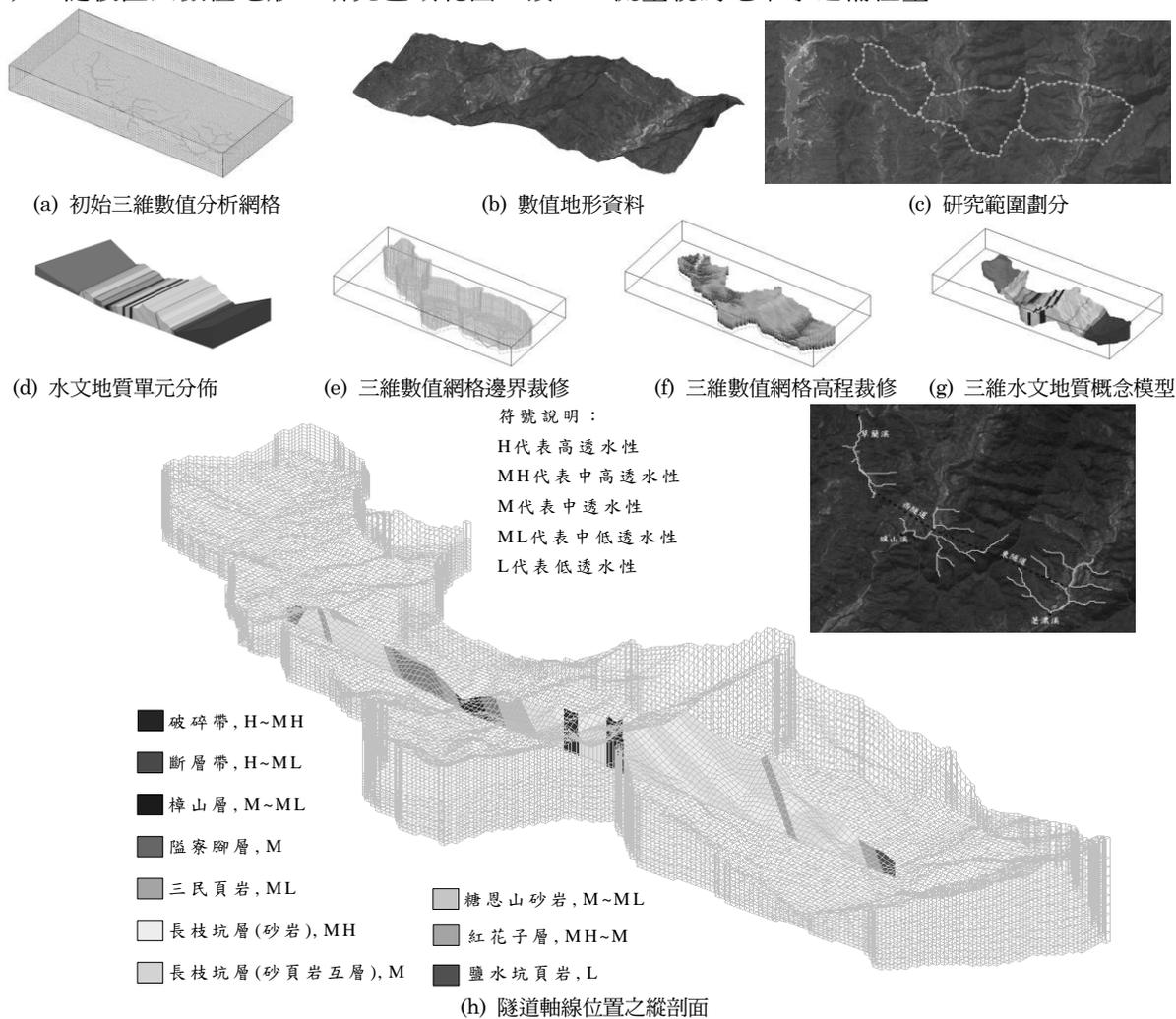
4.1 模型建立

本文首先依據研究區域之地理、地層、地質及地下水文等資料，建立區域性三維水文地質概念模型，另考慮不同水文地質特性，將模型劃分為多個水文地質單元。三維數值分析模型約計20萬個網格，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（如圖十一(a)所示）。隨後匯入數值地形、研究區域範圍、鑽

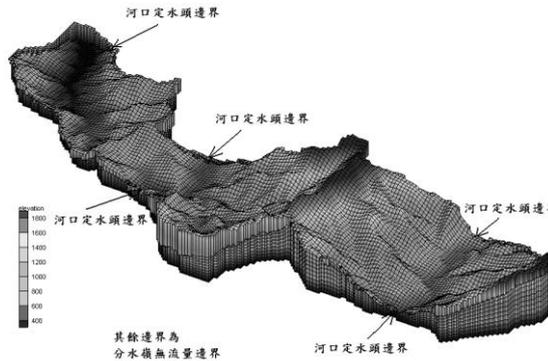
孔資料及地層分布等資料（詳見圖十一(b)及(c)）。圖十一(d)中，不同顏色代表不同的水文地質單元，透過網格編修，將模型之幾何尺寸修正為三維不規則空間分布之數值網格（如圖十一(e)及(f)所示）。圖十一(g)為最終所建立之三維水文地質概念模型，圖十一(h)則為模型於隧道軸線所在位置之切割剖面，與地質剖面圖相對照可驗證此數值內差之幾何關係應正確無誤。

4.2 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補注深度約為0.55 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。



圖十一 三維水文地質概念模型之建立流程



圖十二 三維水文地質概念模型



圖十三 研究區域之初始水位分布

4.3 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十二所示。初始條件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（如公式1）給定研究範圍內地下水位之空間分佈，如圖十三所示。

4.4 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、老濃斷層帶、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（中興工程顧問股份有限公司，2005）。各水文地質單元之代表值整理如表二、表三所示。

4.5 模型率定

模型率定係透過現地水位、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或地下水文荷載（如地表入滲量、層界滲漏量或人工抽水量等），以確保概念模型之正確性與適用性。本文採 MODFLOW 模式 (Harbaugh, 2005) 及 PEST 模組 (Doherty, 2000)

表二 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)
隘寮腳層	中	1.0×10 ⁻⁶
鹽水坑頁岩	低	1.0×10 ⁻⁷
糖恩山砂岩	中低~中	6.0×10 ⁻⁷
長枝坑層(砂頁岩互層)	中	1.12×10 ⁻⁶
長枝坑層(砂岩)	中高	5.0×10 ⁻⁶
紅花子層	中~中高	2.5×10 ⁻⁶
三民頁岩	中低	4.38×10 ⁻⁷
樟山層	中低~中	6.0×10 ⁻⁷

表三 研究區域內各地質構造之透水係數

地層分類	透水係數K (m/sec)
高中斷層前後擾動帶	1.12×10 ⁻⁵
高中斷層帶	5.10×10 ⁻⁷
老濃斷層帶	2.08×10 ⁻⁵
旗山斷層帶	8.68×10 ⁻⁶
表湖斷層帶	1.54×10 ⁻⁵
平溪斷層帶	1.1×10 ⁻⁵
老人溪背斜	1.8×10 ⁻⁶
老人溪向斜	2.38×10 ⁻⁶
小林向斜	1.06×10 ⁻⁶
表湖向斜	1.12×10 ⁻⁶

進行模式分析及率定各水文地質單元水理參數，同時透過規劃調查階段之水位監測資料進行模式率定。

模型率定係藉由數值程式調整模式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。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。上述率定相關成果，詳見參考文獻（中興工程顧問股份有限公司，2006）。

五、分析評估

5.1 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參數率定成果，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，如圖十四所示。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。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）。圖十四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，驗證本模式分析成果具有良好的正確性及可靠度。

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。圖十五及圖十六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。圖十五及圖十六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。

5.2 隧道開挖湧水量評估

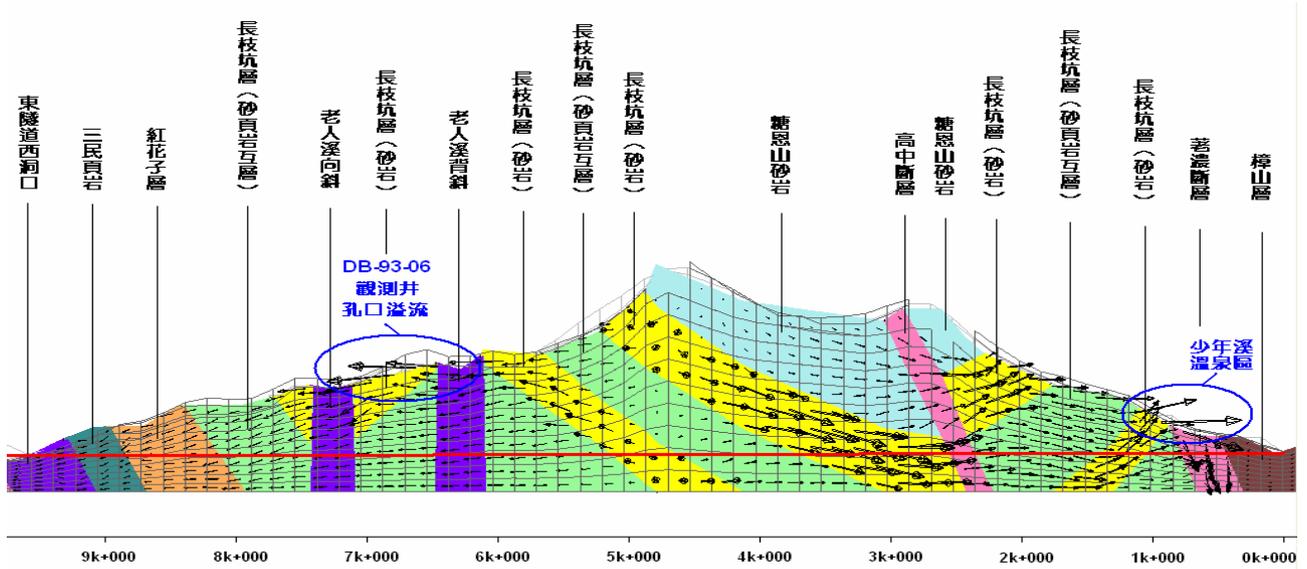
為進一步評估隧道開挖施工期間，前進開挖面或隧道頂拱、仰拱與側壁之湧水量，本研究進一步將隧道周圍數值網格加密（隧道橫斷面網格邊長為6.5m×6.5m，如圖十六所示），以獲得較精準的局部湧水量分析結果。分析時假設當隧道開挖至特定區段時，開挖面位置之水文地質單元網格 (i, j, k) 之初始水頭為 $h(i, j, k, t_{k-1})$ 。進一步透過隧道水文地質模式動態分析，可推得於開挖面通過後某時間後，該網格之水頭值變為 $h(i, j, k, t_k)$ ，此時其鄰近水文地質單元之水頭值分別可推得為 $h(i, j, k-1, t_k)$ 、 $h(i, j, k+1, t_k)$ 、 $h(i, j-1, k, t_k)$ 、 $h(i, j+1, k, t_k)$ 、 $h(i+1, j, k, t_k)$ 與 $h(i-1, j, k, t_k)$ 。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。藉此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：

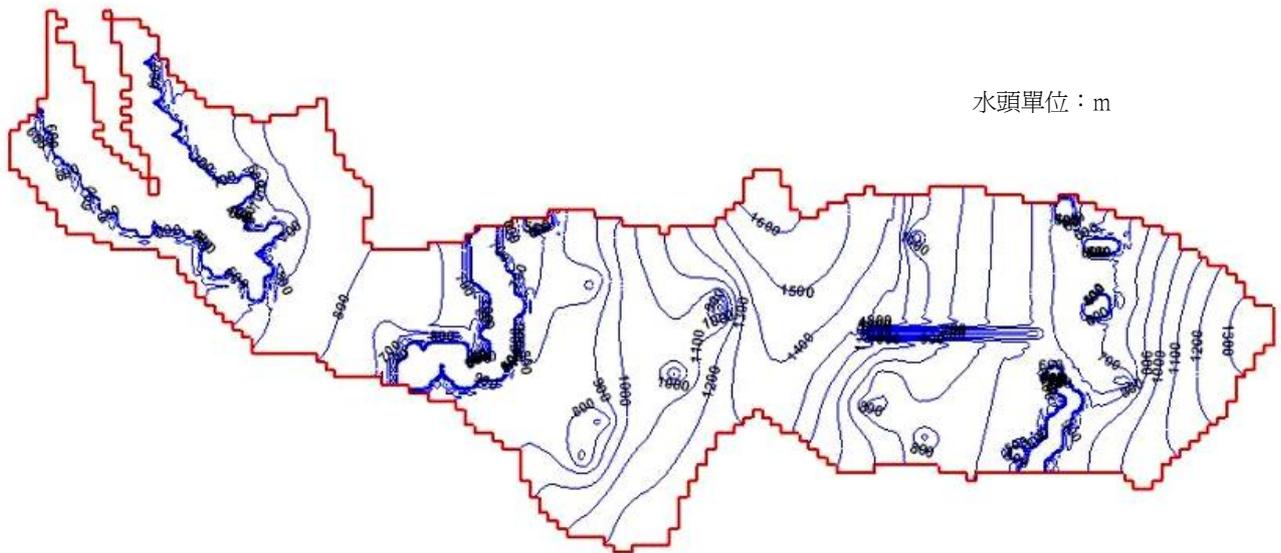
(1) 瞬時突發性湧水量評估

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。

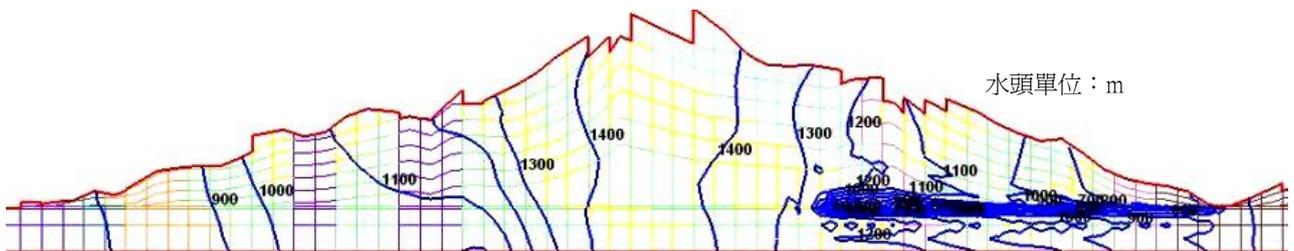
圖十七為模擬東隧道開挖至高中斷層時，近開挖面單位長度湧水量隨時間之變化關係。分析結果顯示，近開挖面處之瞬間最大湧水量可達242 L/min-m，主要來自頂拱與仰拱（約佔85.6%），並隨時間增長其所佔比例將逐漸下降，趨於穩定時約佔30%。



圖十四 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）



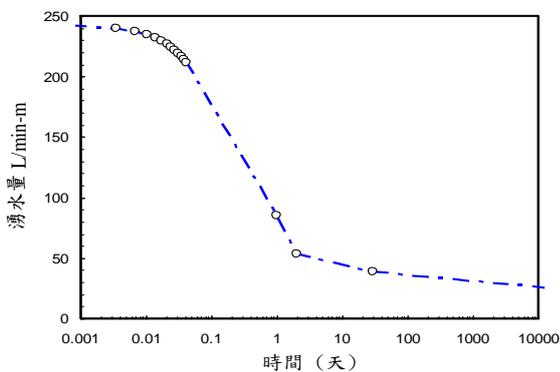
圖十五 模擬東隧道開挖之暫態湧水分析（俯視圖，模擬開挖至3000m後第30天之水頭分布）



圖十六 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）

(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。



圖十七 隧道開挖至高中斷層處湧水隨時間之遞減關係

六、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、與向斜構造等相關，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。藉由模式分析結果可進一步結合隧道施工對鄰近區域地下水流場、含水層補注量、河川基流量等相互之影響。(3) 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) 目前台灣地區在裂隙岩體相關的水文地質參數調查甚為缺乏，水文地質參數於山岳隧道湧水評估及鄰近環境水文地質問題中，扮演著相當重要之角色。建議於重點地區之地質鑽孔調查時，可一併納入孔內攝影調查與雙栓塞水力試驗，獲取更多之水文地質訊息，以利後續水文地質模式在預測隧道可能湧水量與鄰近地下水流場變遷之準確度。

誌謝

本文承蒙中興工程顧問公司大地工程部主任經理、李民政副經理與吳富洵先生協助與提供相關資料，特此申謝。

參考文獻

中興工程顧問股份有限公司 (2005), 「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。

中興工程顧問股份有限公司 (2006), 「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。

交通部中央氣象局網站 ([http:// www.cwb.gov.tw /](http://www.cwb.gov.tw/))。

陳昭旭、李振誥 (2001), 「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。

張文成、張龍均 (2004), 「雪山隧道特殊地質施工案例探討」, 2004海峽兩岸地工技術岩土工程交流討論會論文集, 第45-58頁, 台北, 台灣。

楊豐榮 (2006), 「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。

黃俊鴻等人 (2005), 「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。

ASTM D 4630-96 (2002), "Standard Test Method for Determining Transmissivity and Storativity of Low Permeability Rocks by In Situ Measurements Using

- the Constant Head Injection Test”, ASTM International.
- DOHERTY, J. (2000), PEST: Model-Independent Parameter Estimation 4th Edition, Watermark Numerical Computing.
- GOODMAN, R. E., MOYE, D. G. A., SCHALKWYK, V., and JAVANDEL, I. (1965), “Groundwater Inflows During Tunnel Driving”, Eng. Geol., 2, pp. 39-56.
- HARBAUGH A. W. (2005), MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, USGS, USA.
- HYDER, Z., BUTLER, J. J., MCELWEE, C. D., and LIU, W. (1994), “Slug Tests in Partially Penetrating Wells”, Water Resources Research, Vol. 30, No. 11, pp. 2945-2957.
- KRUSEMAN, G. P. and Ridder, D. E. (1990), Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, 2nd edition, Intl. Inst. For Land Reclamation and Improvement, Publication 47, Wageningen, p. 377.
- LEE, C. H., and FARMER, I. (1993), Fluid Flow in Discontinuous Rocks, Chapman&Hall, London.
- National Research Council (NRC) (1996), Rock Fractures and Fluid Flow: Contemporary Understanding and Applications, National Academy Press, Washington DC.
- RUTLEDGE, A. T. and Daniel, C. C., (1994), “Testing an Automated Method to Estimate Ground-water Recharge from Streamflow Records”, Ground Water, Vol. 32, No. 2, pp. 180-189.
- RUTLEDGE, A. T. (1998), “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.
- TSENG, D. J., TSAI, B. R., and CHANG, L. C. (2001) “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.