

曾文越引隧道工程水文地質 之調查評估

譚志豪* 顧承宇** 侯秉承*** 李民政**** 吳富洵*****

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節理發達且破碎度高，故地表水易沿地質弱面滲入岩層，以致岩盤中地下水儲量豐富。根據近年來山岳隧道之開挖經驗顯示，穿過高山地區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，亦常因地下水流失而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，分別針對山岳隧道工程之水文地質現地試驗技術、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、區域三維水文地質數值模式之分析、模式率定與驗證、及隧道開挖湧水對鄰近區域水文地質環境影響之分析等課題進行詳盡之研究，並期望藉此模式分析降低隧道於施工時所可能遭遇之風險，並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

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 2,500 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 4,900 mm/year，平原則不足 1,200 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。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，本文所介紹之曾文水庫越域引水隧道興建工程即為一例。

有鑒於近年來陸續進行之山岳隧道工程施工，常遭遇大量湧水而肇生災害並導致工程進度延宕（Tseng, 2001；張文城等，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

* 中興工程顧問社大地工程研究中心研究員

** 中興工程顧問社大地工程研究中心高級研究員兼組長

*** 中興工程顧問股份有限公司大地工程部經理

**** 中興工程顧問股份有限公司大地工程部技術經理

***** 中興工程顧問股份有限公司大地工程部工程師



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。本文以曾文越引隧道工程為例，介紹水文地質調查與分析評估之技術。

二、工程簡介

曾文水庫越域引水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，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（中興工程顧問公司，2005）。

曾文水庫越域引水隧道位於台灣南部山區，其地理位置如圖 1 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。

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使用，對於水文地質參數之調查扮演重要之角色。

(一)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

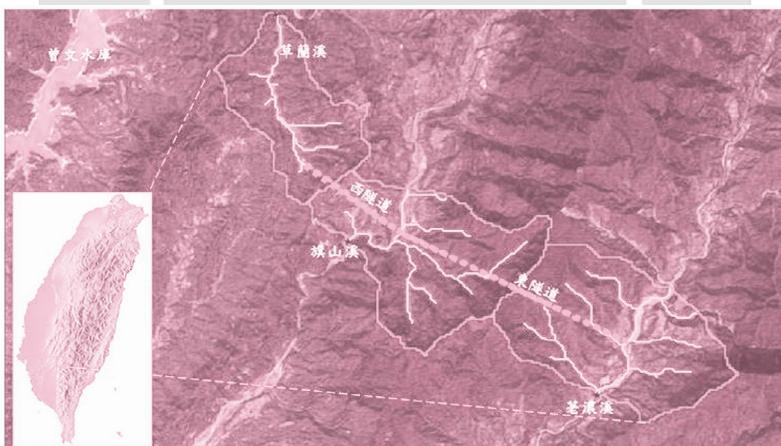


圖 1 曾文越引隧道之地理位置

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布情形詳如圖 2 所示。另圖 3 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 1,300 m。

(二)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 1,570 至 3,410 mm，各站之平均雨量約為 2,680 mm。降雨集中於 5 月至 9 月，豐水期平均總雨量約占年平均雨量之 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, 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，流量觀測紀錄為 1958-2005 年，分析考慮觀測年限內所有日流量紀錄（約 16,000 筆資料），逐月基流量之分析結果如圖 4 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 58 公分。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

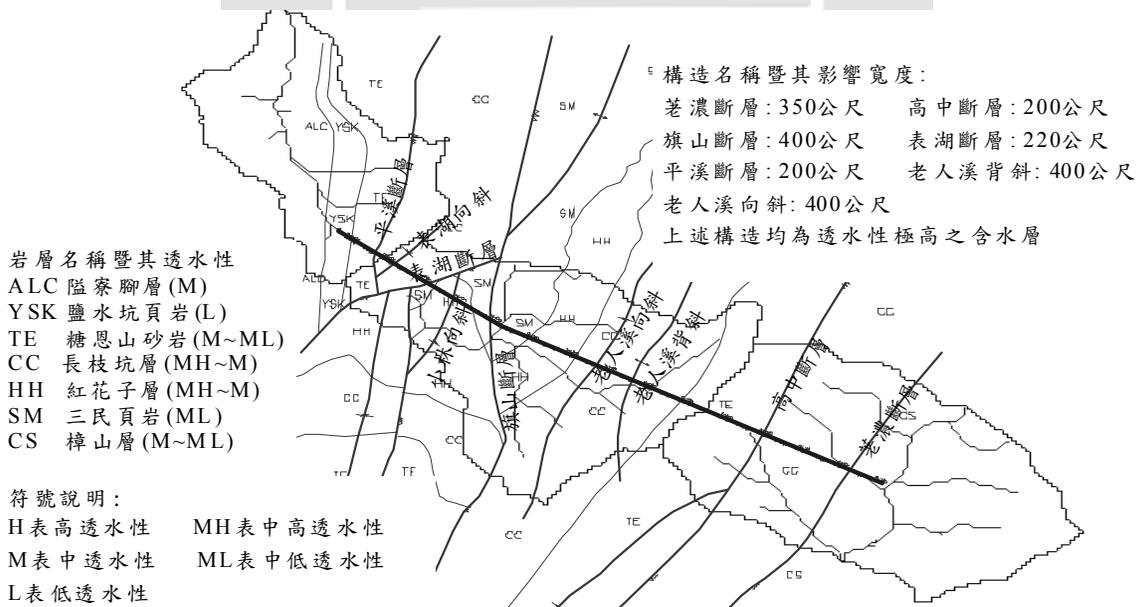


圖 2 研究區域之地質構造平面圖

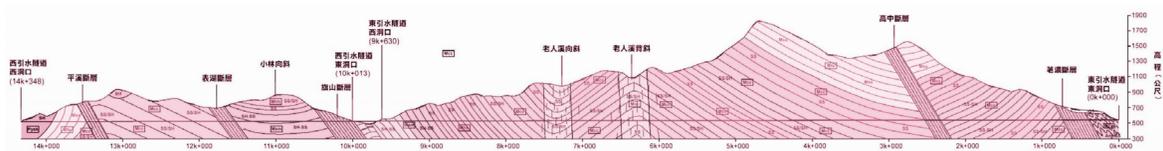


圖 3 研究區域內隧道軸線位置之地質剖面圖

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 51 cm，若考慮旗山溪集水區面積 354.3 平方公里，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：

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

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

(三)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封塞透水試驗，進行現地水文地質參數調查工作，本研究所採用之現地試驗工作與目的如

表 1 所示。

以往的地下弱面調查，主要多藉由檢視鑽孔岩心，以統計弱面分布、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封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，以了解弱面真實之情形，如圖 5 所示。雙封塞透水試驗 (Double Packer Permeability Test) 係在試驗過程中，利用兩個封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，封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，水力特性的變化。此外，裂隙性地層內水文地質參數會受到尺度效應 (Scale Effect) 影響，雙封塞透水試驗配合抽(注)水試驗，如圖 6 所示，因試水量較大且試水時間長，相較於 Lugeon 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。套用既有理論方法 (Kruseman and Ridder, 1990) 分析試驗記錄資料所得成果如圖 7 所示。

表 1 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布及位態等資料
透水試驗 (Lugeon Test)	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
雙封塞透水試驗	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



四、水文地質概念模式

(一)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 8(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 8(b) 及圖 8(c)。圖 8(d) 中，不同灰階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 8(e) 及圖 8(f) 所示）。圖 8(g) 為最終所建立之三維水文地質概念模型，圖 8(h) 則為模型於隧道軸線位置之切割剖面。

(二)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 55 cm。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。

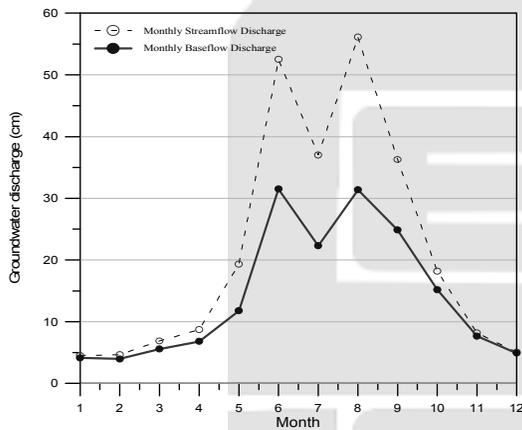


圖 4 逐月基流分析結果

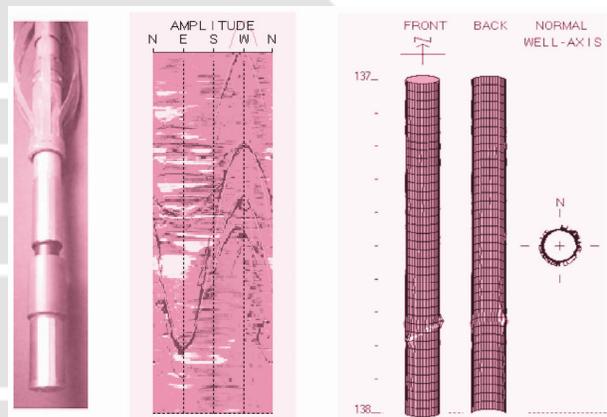


圖 5 裂隙弱面位態調查



圖 6 現地雙封塞透水試驗

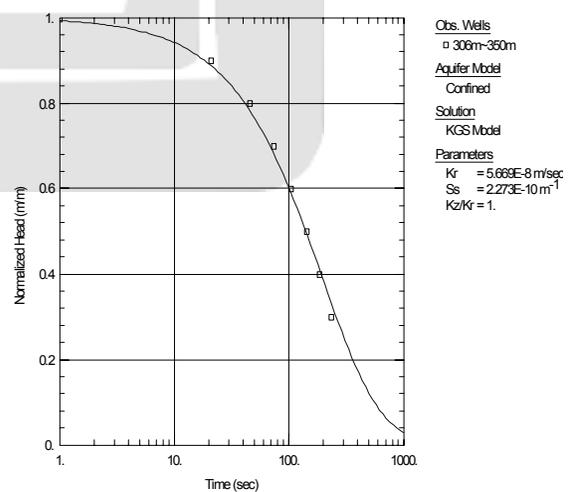


圖 7 現地雙封塞透水試驗分析結果

(三)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（如式(1)）給定研究範圍內地下水位之空間分布，如圖 10 所示。

(四)水文地質特性

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、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（中興工程顧問公司，2006）。

(五)模型率定

本文採 MODFLOW 模式及 PEST 模組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。模型率定結果顯示模擬結果與各觀測井監測值之誤差均小於容許誤差（ $\pm 5.0\text{m}$ ），模型校正結果控制於各觀測井水位正負 5.0 m 內，信心水準為 95%，顯示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。

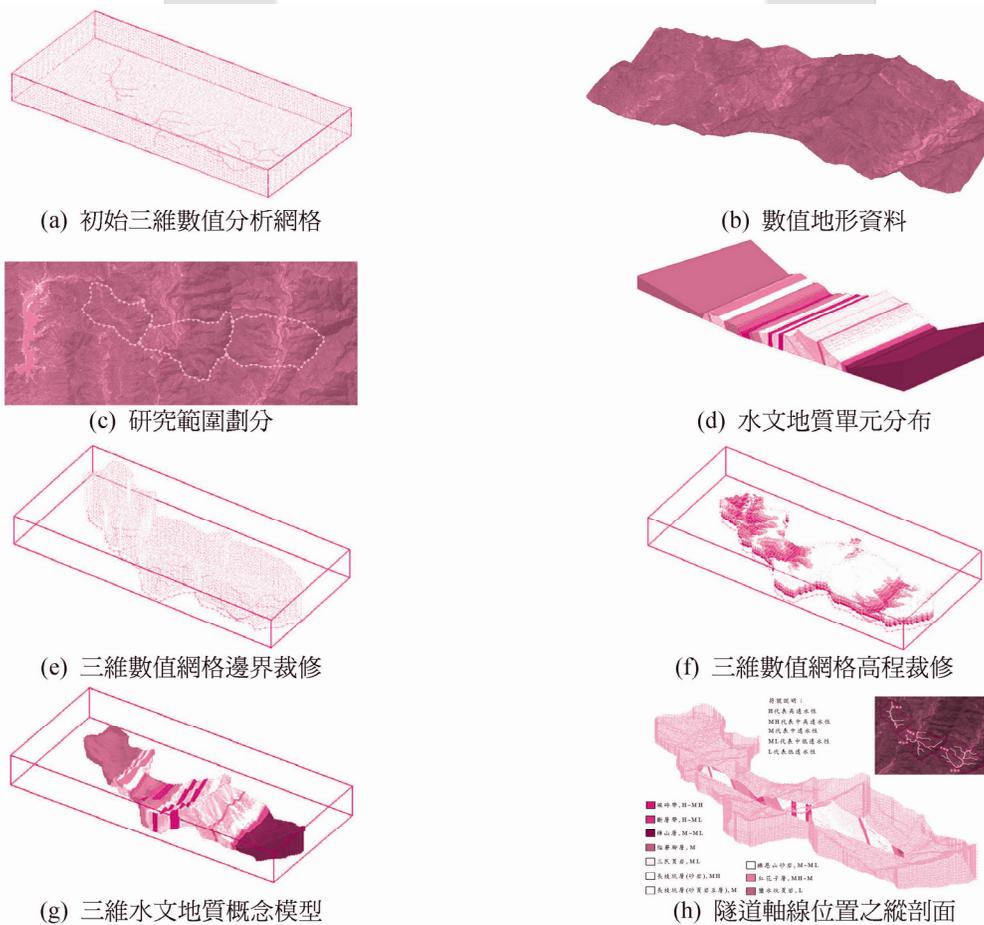


圖 8 三維水文地質概念模型之建立流程

五、分析評估

(一)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 11 所示。穩態分析結果顯示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、褶皺等構造）。圖 11 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(向量最大值为 0.08)，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

模式分析成果具良好的正確性及可靠性。

為進一步掌握隧道開挖施工期間，評估前進開挖面或隧道頂拱、仰拱與側壁之湧水量，本研究採暫態分析來模擬及評估隧道前進效應對地下水流場及湧水量之影響程度。圖 12 及圖 13 分別為模擬隧道開挖前進時沿隧道軸線垂直剖面位置地下水流場分布變化之俯視圖及前視圖。由圖中可獲知垂直隧道軸線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，其餘位置隧道流場之變化隨距離之增加而影響程度遞減，尤其是近地表之地下水位未受隧道前進開挖受到明顯之改變。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，特別是位於高水頭位置且突破剪裂泥阻水層之瞬間，隧道突破高中斷層剪裂帶而進入長枝坑砂岩時，流場之影響範圍擴大。

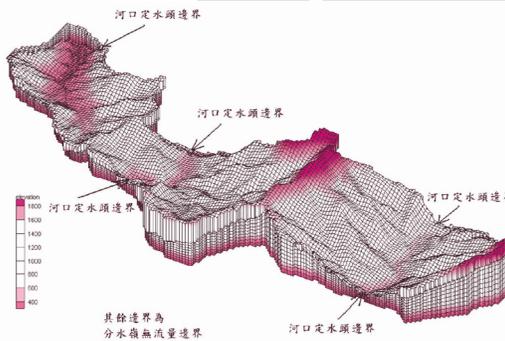


圖 9 三維水文地質概念模型邊界條件設定



圖 10 研究區域之初始水位分布

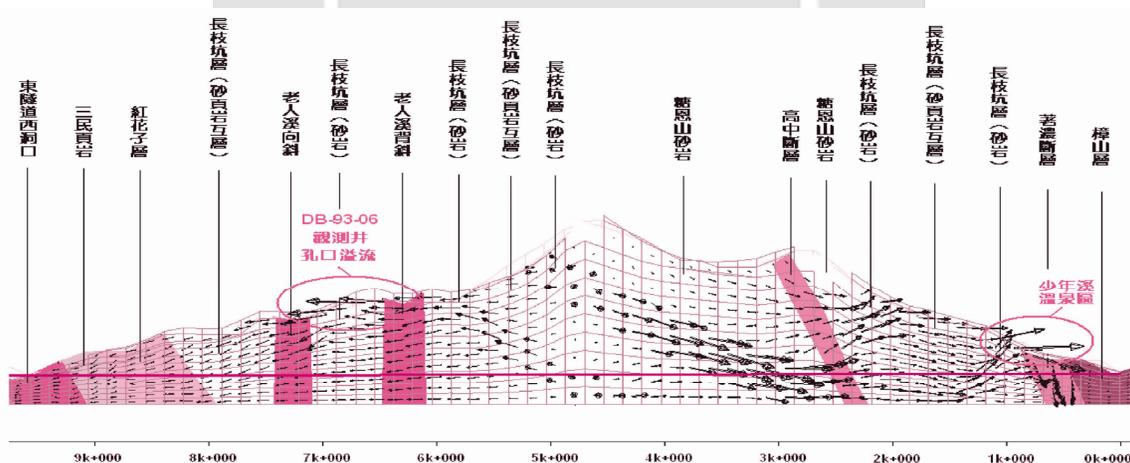


圖 11 考慮地質構造及水文地質特性之地下水流場剖面圖（東隧道沿線穩態分析成果）

(二) 隧道開挖湧水量評估

隧道湧水狀態可分為瞬時突發性湧水與穩定持續性湧水兩大類 (Goodman, 1965)，兩者推估方式有所差異，茲將本研究評估之內容分述如下：

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暫態分析進行，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 14 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%)，並隨時間增長其所占比例將逐漸下降，趨於穩定時約占 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)。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。

六、結論與建議

隧道開挖工程除了湧水災害外，亦可能因持續湧水而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，則較無系統化之研究。本文針對上述議題進行詳盡之研究，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，建構區域水文地質概念模型，可大幅增加山岳隧道開挖湧水量預測之準確性；(2) 本文透過地下水暫態與穩態分析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

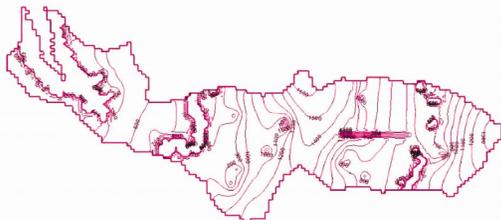


圖 12 模擬東隧道開挖之暫態湧水分析
(俯視圖，開挖 3000m，第 30 天)

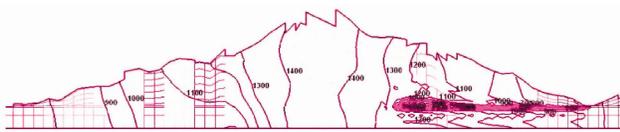


圖 13 模擬東隧道開挖之暫態湧水分析
(前視圖，開挖 3000m，第 30 天)

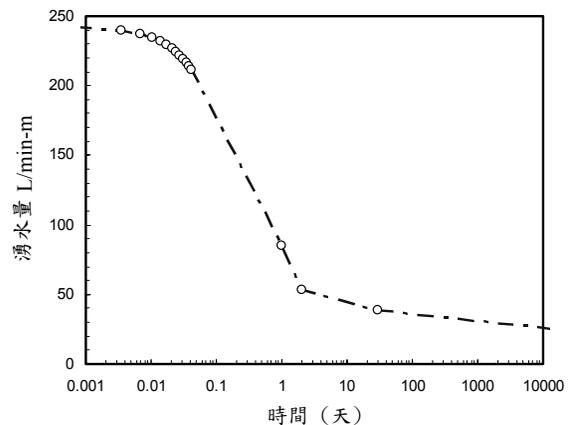


圖 14 隧道開挖至高中斷層處湧水
隨時間之遞減關係

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封塞水力試驗，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。

參考文獻

- 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
- 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
- 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
- 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
- 張文城、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
- 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，地工技術，第 87 期，第 81-92 頁
- 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
- Goodman, R. E., Moye, D. G. A., Schalkwyk, V., and Javandel, I. (1965) Groundwater Inflows during Tunnel Driving, Eng. Geol., 2, pp. 39-56
- Kruseman, G. P. and Ridder, D. E. (1990) Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, 2nd ed., 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
- 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, pp. 43