

# 長隧道工程之三維水文地質分析研究

譚志豪 顧承宇 許世孟 鍾明劍 冀樹勇

中興工程顧問社 大地工程研究中心

## 摘要

本文結合案例場址之地理、地層、地質構造及地下水文條件，應用三維地下水分析模式MODFLOW建立一套評估隧道開挖對鄰近地下水資源環境影響之數值分析模式，該模式將複雜的物理環境簡化為水文地質概念模型，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，透過監測資料進行模式率定及驗證，期能正確預測未來隧道施工階段所可能遭遇之湧水量及評估施工對區域地下水資源之影響程度，並將分析成果反饋至工程設計。

## 前言

台灣山區降雨豐沛且地質構造複雜、破碎，故地表水易滲入岩層蓄積，形成豐富的地下水水資源。惟山區與平地降雨時空分配不均，造成部分區域水資源失衡。為抒解此一失衡影響，許多蓄水及引水之水利建設陸續規劃進行。本案例即南部地區正在進行之曾文水庫越域引水隧道興建工程。有鑒於近年來陸續進行之山岳隧道工程，施工中常遭遇湧水災害及地下水水資源變遷等問題（黃俊鴻，2005），故山岳隧道興建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。以下將以實際山岳隧道工程案例為例，透過本文所建立之水文地質概念模式，評估施工期間之湧水量及對鄰近區域水資源環境之影響程度。

## 研究案例

工程概述：引水隧道由東至西橫越荖濃溪、旗山溪及草蘭溪流域，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，東長9.6km；西隧長4.3 km。東、西隧道之坡度皆為1/700，以借重力流動輸送水源（楊豐榮，2006）。

地理條件：案例位於台灣南部山區，研究區域限定在隧道沿線周圍2-3 km影響範圍，範圍劃分係根據地表水系、地形、地層與地質構造分布，並以流域內河川、山脊稜線等自然邊界作為劃分依據，訂出荖濃溪、旗山溪及草蘭溪三個流域之子集水區（如圖一所示）。

地質條件：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主

要為一系列東傾且走向近乎平行之逆斷層及褶皺，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二所示。東隧道沿線岩覆最高達1300m，圖三為隧道軸線位置之地質剖面圖。

水文條件：蒐集研究區域附近各氣象站近20年之雨量資料（荖濃溪流域之高中雨量站與旗山溪流域之民族雨量站）及部分新增測站迄今之雨量觀測資料，年雨量介於1570-3410mm。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%。地下水位部分，由於案例場址位處深山，過去並未進行大規模開發，故可供利用之水位觀測資料甚少，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資料可供利用，故初步分析時可藉以推估研究區域內穩態地下水位之空間分布。

## 水文地質概念模式

本文根據案例場址之地理、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。首先透過地下水分析程式MODFLOW模組 (McDonald & Harbaugh, USGS, 1988) 建立三維數值分析模型。數值模型初始計有200×100×10個網格，單一網格之水平及垂直邊長約為100m。再匯入數值地形、鑽孔資料及地層分布資料，透過數值程式所提供之網格編修功能（運用線性內差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。至於數值運算部分，採MODFLOW有限差分法求解地下水流動方程式。數值演算法則採穩定性較佳且收斂速度較快之預置共軛梯度法(PCG)進行。至於邊界條件部分，山脊邊界視為無流量邊界，河流則視為定水頭邊界。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。關於水文地質概念模式之建立程序可參考圖四說明。

## 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、表湖單斜等構造單元。各水文地質單元具有其特定的水文地質特性參數，參數給定係根據現地及室內相關之水力試驗獲得（中興工程顧問股份有限公司，2005）。

## 模式率定與驗證

本文採MODFLOW 2000 PES模組進行模式率定。模式率定條件控制在觀測井水位正負5.0m，信心水準為95%。率定結果顯示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。此外，根據東隧道沿線之地下水穩態分析結果顯示，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，此結果與荖濃溪斷層附近之少年溪溫泉湧出溫泉水及DB-93-06觀測井孔口溢流等現象吻合（如圖五所示），亦驗證模式分析成果之正確性及可靠度。

## 隧道開挖對鄰近地下水資源之影響評估

本文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，輸入各水文地質單元之水文地質參數合理值，並透過水文地質模式分析推估東隧道及西隧道（圖五）沿線各水文地質單元之地下水三維流動情形。分析成果顯示，地下水具有沿著透水性較佳之地質構造流動之趨勢，甚至可沿著向斜構造往上流動，此現象為山岳地區地下水流動之特有現象，與一般所認知之平原地區地下水沿重力方向流動有所不同。

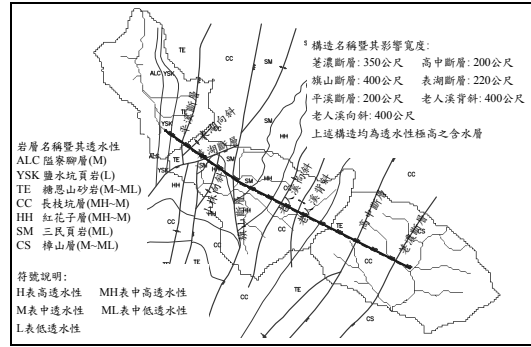
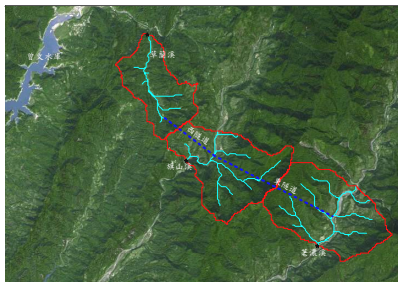
此外，為掌握隧道開挖施工期間地下水流場之變化，本文採用暫態模式分析來評估隧道前進效應對地下水流場及湧水量之影響程度。圖六(a)-(g)分別為隧道開挖前進1000-3000m時地下水流場變動之模擬分析結果。由圖中可知隧道開挖面前方之地下水流場則受隧道開挖面湧水之影響而產生顯著變化，特別是位於高水頭位置且突破斷層泥之瞬間。至於垂直隧道軸線方向之地下水流場變化主要侷限於隧道外圍半徑各約150m範圍內。

## 結論

本文所建立之三維水文地質概念模式具有以下特點：(1)模式考量地理、地層、地質構造及水文條件，並根據各水文地質單元之空間分布決定分析網格之三維幾何關係、(2)根據現地水力試驗結果輸入各水文地質單元之水理參數值、(3)根據主要河流之基流分析結果輸入模型之地下水補注量、(4)以河流、稜線等自然邊界給定定水頭或無流量等邊界條件、(5)根據水位觀測井之監測資料進行模型率定與驗證，具有較高的正確性與準確性、(6)可進行穩態及暫態地下水流動分析，藉以評估工程施工對鄰近地下水資源環境之短期及長期影響程度。

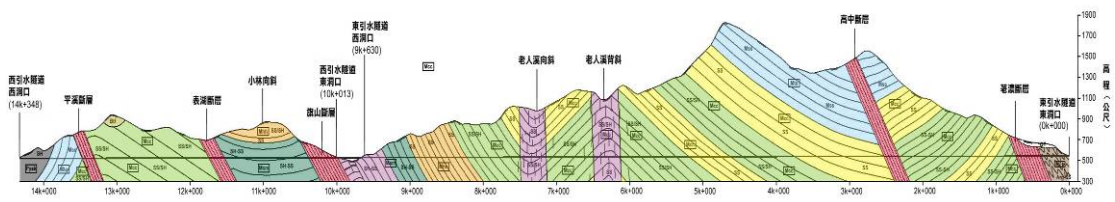
## 參考文獻

- 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。
- 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。
- 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。
- McDonald M.G. and Harbaugh A.W. (1988), MODFLOW: A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model, USGS, U.S.A.



圖一 研究案例之地理位置

圖二 研究區域之地質構造平面圖



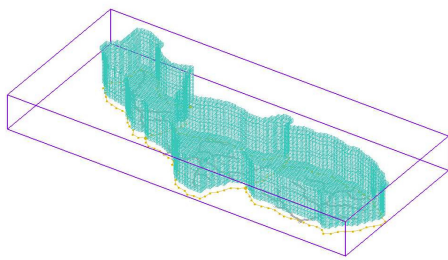
圖三 研究區域內隧道軸線位置之地質剖面圖



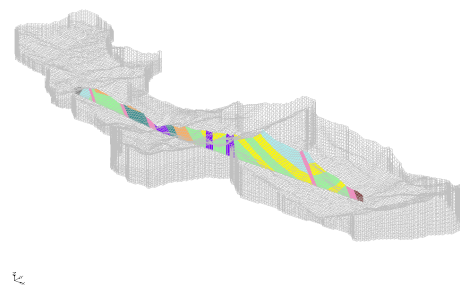
(a) 數值地形資料



(b) 研究範圍劃分

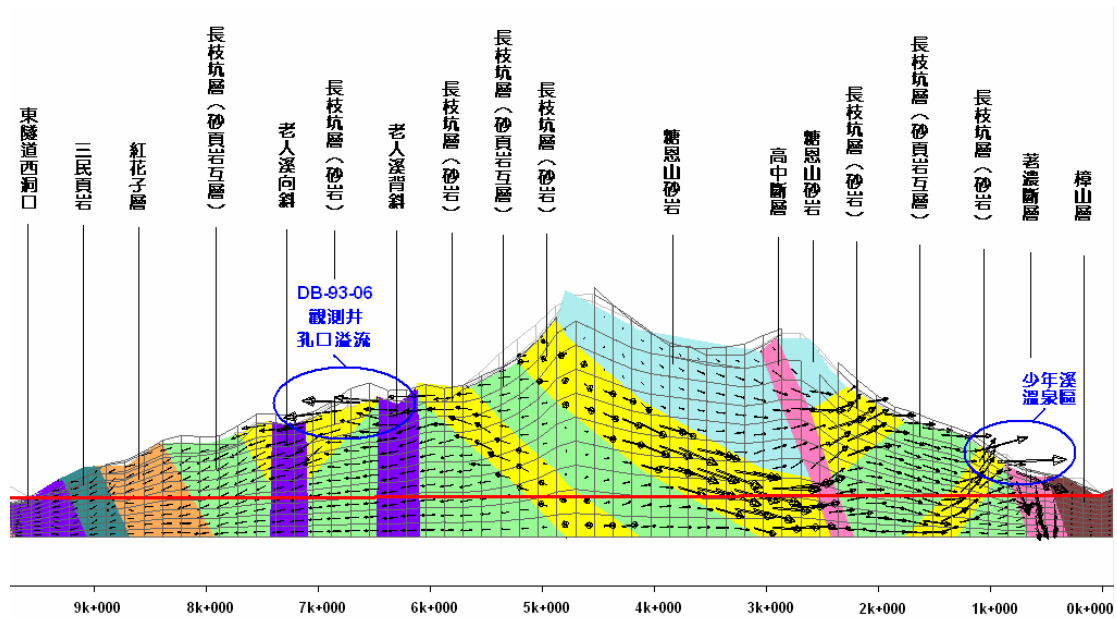


(c) 三維數值網格邊界裁修

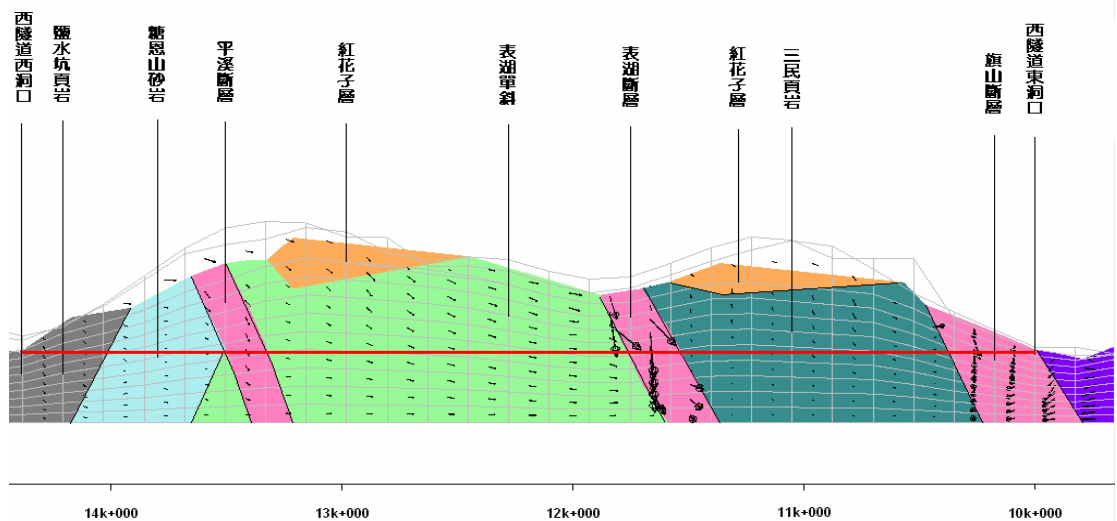


(d) 隧道軸線位置之縱剖面

圖四 三維水文地質概念模型之建立流程

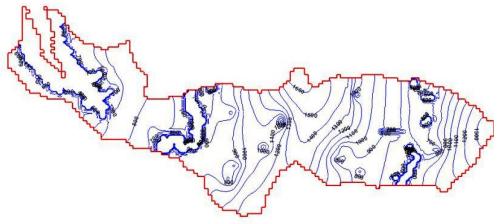


(a) 東隧道沿線

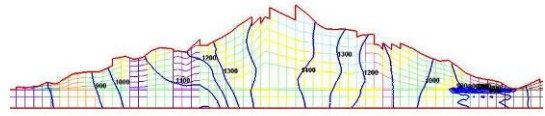


(b) 西隧道沿線

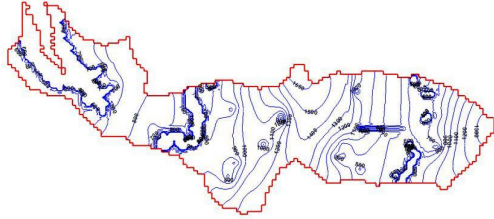
圖五 考慮地質構造及水文地質特性之地下水流動分析



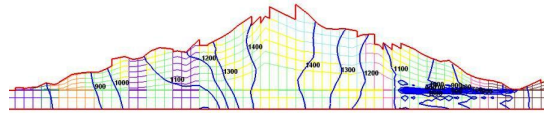
(a) 東隧道開挖 1000m 時之水頭分布 (俯視圖)



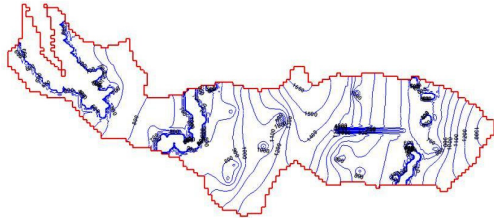
(d) 東隧道開挖 1000m 時之水頭分布 (前視圖)



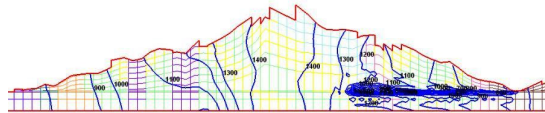
(b) 東隧道開挖 2000m 時之水頭分布 (俯視圖)



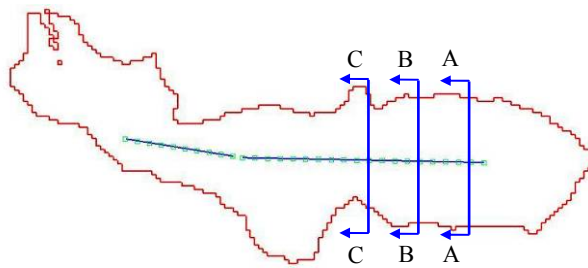
(e) 東隧道開挖 2000m 時之水頭分布 (前視圖)



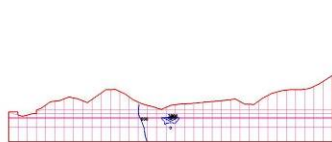
(c) 東隧道開挖 3000m 時之水頭分布 (俯視圖)



(f) 東隧道開挖 3000m 時之水頭分布 (前視圖)



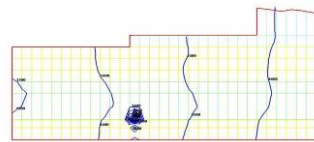
(剖面線位置)



A-A 剖面



B-B 剖面



C-C 剖面

(g) 東隧道開挖 3000m 時之水頭分布 (各斷面側視圖)

圖六 隧道開挖期間之湧水模擬