

# 山岳隧道涌水评估及施工回馈分析

丘琳滨<sup>1</sup>, 谭志豪<sup>1</sup>, 雷世璋<sup>1</sup>, 吴富洵<sup>2</sup>, 俞旗文<sup>1</sup>

(1. 财团法人中兴工程顾问社, 台北; 2. 中兴工程顾问股份有限公司, 台北)

**摘要:** 以曾文越域引水隧道工程为例, 透过三维水文地质模式评估隧道施工期间之涌水。依据区域地质图及细部设计阶段地质图建构三维水文地质模型, 并透过现地试验结果、水位观测结果、隧道内量水堰及隧道洞口总出水量等量测结果进行水文地质参数率定。所建议之分析模式除可用于评估后续施工所可能遭遇之涌水灾害外, 亦可评估隧道开挖对邻近水文环境之影响, 并将评估成果回馈至隧道设计及施工。

**关键词:** 隧道涌水; 水文地质模式; 回馈分析

**中图分类号:** U 456.3<sup>+</sup>2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-741X(2010)增刊1-0029-06

## Assessment of Water Inflow in Mountain Tunnel and Back Analysis for Tunneling Construction

CHIOU Linbin<sup>1</sup>, TAN Chihhao<sup>1</sup>, LEI Shihchang<sup>1</sup>, WU Fuhsun<sup>2</sup>, YU Chiwen<sup>1</sup>

(1. Sinotech Engineering Consultants Inc., Taipei; 2. Sinotech Engineering Consultants Ltd., Taipei)

**Abstract:** In this paper, a case study of Tsengwen reservoir transbasin diversion tunnel is presented, with the emphasis being placed on the topics of hydrology. Three-dimensional hydrological model is applied to assess the amount of tunnel inflow and to estimate the effects on the adjacent groundwater environment. The hydrological model is established based on the regional geological maps and a series of geological investigations and in-situ tests. The hydrological parameters are calibrated according to the results of the aquifer tests, the measurements of the observation wells and weirs within the tunnel and the total inflow at tunnel portals. The hydrological model can be used to assess the future hazards due to the tunnel inflow. The results of assessment provide a good feedback for tunneling design and construction.

**Key words:** water inflow in tunnel; hydrological model; back analysis

## 0 引言

台湾位处欧亚板块与菲律宾海板块交界区域, 由于板块间的相对运动频繁, 造成台湾的地质构造复杂且破碎。此外, 台湾降雨丰沛, 年平均雨量约 2 500 mm, 雨水入渗至含水层蓄积, 形成丰富的地下水资源。

鉴于近年来陆续完工之山岳隧道工程, 施工中常遭遇大量涌水而肇生灾害并导致工程进度延宕 (Tseng et al., 2001; 张文城等, 2004; 黄俊鸿等, 2005)<sup>[1-3]</sup>, 故于规划、设计及施工阶段之隧道开挖涌水分析显得格外的重要。除了涌水灾害外, 隧道开挖亦可能影响周边区域之地下水水位变化、流动补注、水质及水资源蕴含量, 甚至可能改变山岳地区地质或环境灾害之发生潜势 (杨丰荣, 2006)<sup>[4]</sup>。因此, 山岳隧道工程不能仅就地质的观点考量, 尚需结合地表及地下水文等相关

因素, 方能获得较佳的解决方案。以下将以曾文水库越域引水 (以下简称曾文越引) 隧道工程为例, 透过本文所建议之三维水文地质概念模式, 预测隧道施工期间之涌水量。

## 1 工程概述

曾文越引隧道系将荖浓溪丰水期余水, 透过引水隧道横越荖浓溪、旗山溪及草兰溪流域, 引至曾文水库内蓄积。工程完成后预计可增加台湾南部地区每日 60 万 t 供水。越域引水隧道区分为东、西两段, 东隧道贯穿荖浓溪流域与旗山溪流域, 长度为 9.6 km; 西隧道则贯穿旗山溪流域与草兰溪流域, 长度为 4.3 km。东、西隧道之坡度皆为 1/700, 藉由重力流动方式达到越域引水之目的。隧道永久结构则采阻水隧道设计, 以减少日后工程对区域地下水资源之影响 (中兴工程顾问股份有限公司, 2005)<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2010-06-12

基金项目: 水利署南区水资源局项目研究案

作者简介: 丘琳滨 (1951—), 男, 1975 年毕业于成功大学土木研究所, 硕士, 现任执行长。E-mail: benchiou@sinotech.org.tw。

### 1.1 区域地质条件

隧道沿线通过之主要岩层有:三民页岩、红花子层及长枝坑层等中新世沉积岩层,岩性以砂岩、页岩及两者之互层为主。隧道穿越之地质构造甚多,主要为一系列东倾且走向近乎平行之逆断层及褶皱,这些断层及褶皱常形成局部的破碎带,包括:荖浓断层、高中断层、老人溪背斜、老人溪向斜、旗山断层、小林向斜、平溪断层及表湖断层等地质构造,上述岩层及构造之平面分布情形详如图1所示。另图2为细部设计阶段隧道轴线位置之地质剖面图,其中东隧道沿线岩覆最高达1300 m。

### 1.2 区域水文条件

1) 雨量。本文搜集研究范围内各气象站近20年之雨量资料及部分新增测站迄今之雨量观测资料。研究区域内各雨量站之年雨量值差异甚大,为1570~3410 mm,各站之平均雨量约为2680 mm。降雨集中于5~9月,丰水期平均总雨量约占年平均雨量之85%。

2) 入渗补注。杨丰荣等(2007)<sup>[6]</sup>采用美国地质调查所(Rutledge, 1994, 1998)建议之基流分离法分析区域地下水之补注量,该法经由分析河川流量资料与流量历线,利用基流分离技术将基流量由河川流量中分离出来,依据地下水水平衡原理,以此推估地下水之补注量。其中荖浓溪集水区长期稳定之地下水补注年总补注深度约为0.58 m,旗山溪集水区之年补注深度约为0.51 m。

3) 地下水位。由于隧道段位处山岳地区,过去并未进行大规模开发,因此可供利用之相关工程调查资料及研究成果甚少。杨丰荣等(2007)<sup>[6]</sup>就本案例规划设计阶段所设置21孔钻孔之地下水位量测资料进行汇整。由上述钻孔地下水位量测结果得知,水位深度为地表下1.25~75.1 m,兹将地下水位高程( $h_w$ )与钻孔所在位置之地表高程( $h$ )进行回归分析,可初步获得地下水位与地表高程之关系式为

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

## 2 现地量测及试验成果

本文透过现地量测及试验结果(中兴工程顾问股份有限公司,2009)<sup>[7]</sup>,将成果纳入水文地质概念模式,做为模型率定之依据。其现地工作项目包括地下水位观测、隧道总出水量测、隧道内渗水量测、隧道内水压计量测及隧道内透水试验等,各工作内容说明如后。

### 2.1 地下水位观测

本案例水位观测井(图2)分别为东引水隧道沿线之DB-93-04~07 4水位观测井,以及西引水隧道于2006年新增之HB-95-01及HB-95-02 2水位观测井。水位观测均采用自记式水位计,以观测水位随降雨量连续变化之情形。各水位井之资料及水位变化范围如表1所示。

### 2.2 隧道总出水量测

出水量观测资料于2008年5月前系以隧道抽水机之抽水能量及洞口污水处理槽之水位变化估算。自2008年5月起,采用设置于施工横坑与主隧道交叉段之量水堰进行总出水量测。

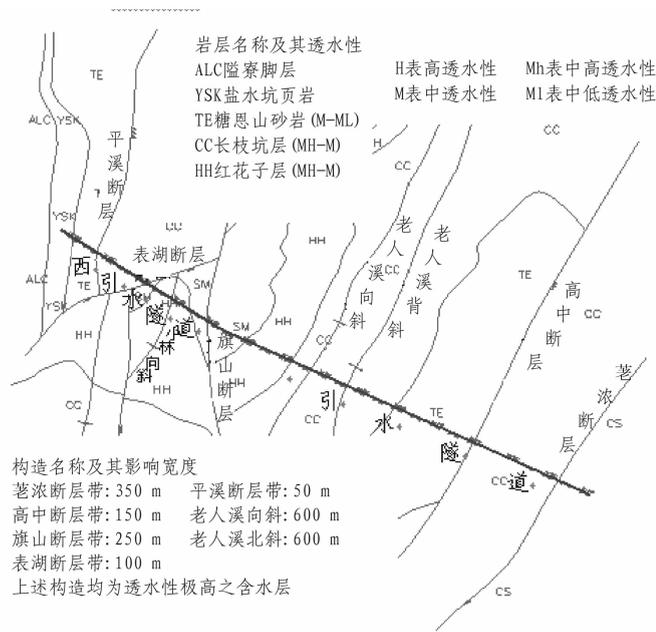


图1 区域地质平面

Fig. 1 Regional geological map

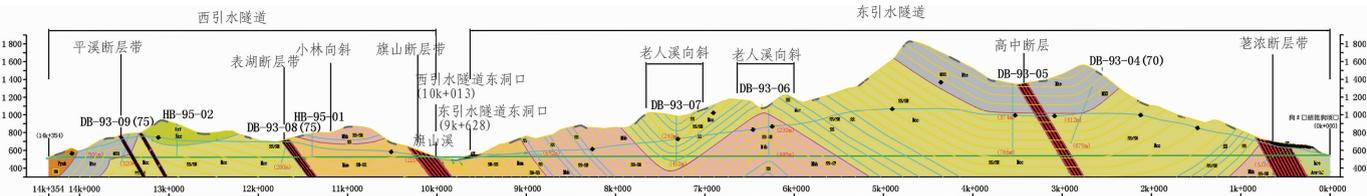


图2 细部设计阶段隧道轴线地质剖面图

Fig. 2 Geological profile of the project

表 1 地下水位观测成果表

Table 1 Observation results of groundwater

孔号	孔口高程/m	水位井深度/m	水位高程变化范围/m	模型初始水位高程/m
DB-93-04	1 327.00	670	1 270 ~ 1 331	1 290
DB-93-05	1 394.00	766	1 374 ~ 1 381	1 384
DB-93-06	1 053.00	495	1 053 ~ 1 054	1 047
DB-93-07	994.00	490	964 ~ 987	984
HB-95-01	803.42	250	685 ~ 691	681
HB-95-02	865.13	350	805 ~ 818	808

东引水隧道东口段自施工横坑开挖进入主隧道后,初期随开挖面之前进,地下水由层面、节理面与裂隙面渗出点逐渐增加,开挖面初期出水量约 30 ~ 50 L/min,水温约 38 ℃。至 2007 年 3 月,开挖至荖浓断层带时(约自里程 0K + 500 ~ + 800,含扰动带),隧道出水量逐渐增加,水温亦逐渐升高。至 7 月初(约里程 0K + 560),总出水量约达 1 250 L/min,温泉涌出量约达 540 L/min。而于 7 月 12 日发现少年溪温泉露头处之出水量减少,隧道紧急停工进行止水灌浆作业。至 8 月 26 日恢复隧道开挖,采先灌浆再开挖方式循环轮进通过温泉段。隧道出水量于复工后仍持续增加一段时间,至 9 月中旬后才逐渐减少。

进入 2009 年度第 1 季后,因隧道开挖至里程 1K + 940 ~ 960,及 1K + 995 附近遭遇局部较破碎之岩盘,有较大之出水量,该区段出水量超过 300 L/min。后续开挖至里程 2K + 100 及 2K + 170 时,亦遭遇较破碎之岩盘,使得隧道总出水量有再度升高之现象。

### 2.3 隧道内渗水量测

东引水隧道东口段主要之温泉出水区段在里程 0K + 600 和 0K + 800 之间,亦为本计画主要温泉出水量观测区段。本案例装设之量水堰为 Cutthroat 型式,适用于坡度小且较为平坦之沟渠进行流量量测,因其装置简单,在隧道内困难环境下有利于安装作业之执行。此装置由 Skogerboe 等人于 1967 年发展,主要由入流段、颈部及出流段所组成,量测入流段水深  $H$  值即可利用水位 - 流量率定曲线推算出流量值。

CTF - 01 量水堰设置于里程 0K + 770,量测 0K + 690 ~ + 770 的温泉出水量,如图 3 所示。该量水堰自 2008 年 01 月 18 日开始观测至 4 月中,尔后因台风豪雨造成隧道内停电、积水而数次中断量测,直至 2008 年 10 月 21 日修复并恢复正常观测,所观测之出水量资料如图 9 所示。

由 CTF - 01 量水堰观测资料显示,出水量由初期约 1 500 L/min,经过 1 个月后逐渐减少到约 800 L/min,后续出水量虽有上下波动,但整体而言有逐渐减少之趋势。后续于 10 月下旬恢复观测时,出水量由 400 ~ 600 L/min 逐渐降至 200 L/min 左右。进入 2009

年度后,出水量则大致上稳定维持在 200 ~ 400 L/min。



图 3 CTF - 01 量水堰现场装设情形

Fig. 3 In situ situation of CTF - 01 flow measurement weir

### 2.4 隧道内水压计量测

本案例于 2008 年先后于里程 0K + 890 及 1K + 361 两处装设 EE - WP - 01 及 EE - WP - 02 水压计,量测喷凝土后方之水压力。

因隧道施工期间,内衬砌尚未施做,故 EE - WP - 01 水压计之初始水压力多维持在 0.05 ~ 0.07 kg/cm<sup>2</sup>,后续于 2008 年 7,9 月之连续台风来袭后,水压有明显上升之趋势,待降雨停止后,水压则迅速恢复至常时水压。EE - WP - 02 水压计之量测值变化不大,水压力多维持在 0.03 ~ 0.05 kg/cm<sup>2</sup>。

### 2.5 隧道内透水试验

本案例于 2009 年 3 月进场至东引水隧道东口段里程 0K + 940 及 1K + 380 2 处回车道进行现地水文地质试验。分别于 2 回车道各钻设水平与垂直钻孔 1 个,共计钻设 4 个试验孔,并于各钻孔进行裂隙位态量测,依据裂隙分布状况选择适当钻孔区段进行双栓塞透水试验。

里程 0K + 940 及 1K + 380 2 处回车道的 4 个钻孔所进行之双栓塞透水试验成果整理如表 2 所示,其中部分钻孔深度之封塞方式采单封塞。单封塞试验目的主要为大范围调查钻孔周围岩盘透水性,可初步获得较长区段岩盘之透水性,而双封塞试验则针对特定兴趣之地质构造进行小范围之水力传导系数试验分析。两处之试验成果说明如下:

1) 里程 0K + 940 区段。为砂岩偶夹薄层页岩,岩体评分 RMR 值约为 47 ~ 52,回车道侧壁则有涌水现象。水力传导系数  $K$  为  $1.60 \times 10^{-4} \sim 7.16 \times 10^{-6}$  m/s,平均值为  $7.16 \times 10^{-5}$  m/s。

2) 里程 1K + 380 区段:为砂岩夹薄层页岩,微渗水,岩体评分 RMR 值约为 29 ~ 30。水力传导系数  $K$  为  $3.41 \times 10^{-5} \sim 4.82 \times 10^{-7}$  m/s,平均值为  $7.68 \times 10^{-6}$  m/s。



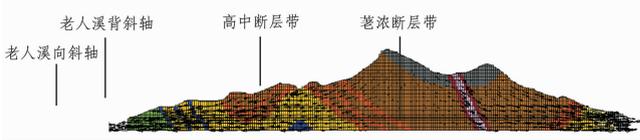


图 7 东引水隧道轴线初始渗水场

Fig. 7 Primary water seepage field along the axis of east tunnel

### 3.5 模型率定

水文地质参数可依据隧道内水力参数试验成果与东隧道东洞口段总出水量、隧道内量水堰及地表地下水位之观测值进行参数率定作业。本文水力参数率定着重于敏感度较高之水力传导系数, 次要参数如储水率、地层孔隙率等则分别假设  $S_v = 0.001$  及  $n = 0.20 \sim 0.35$ 。经由率定后, 本文模型所采用之地层水力传导系数与构造水力传导系数如表 3 及表 4 所示。参数率定成果及验证详述如后。

表 3 研究区各地层透水系数率定成果表

Table 3 Permeability coefficient of each stratum

地层名称	水力传导系数/(m/s)
隘寮脚层	$2.0 \times 10^{-7}$
盐水坑页岩	$1.0 \times 10^{-7}$
糖恩山砂岩	$8.0 \times 10^{-8}$
长枝坑层(砂页岩互层)	$1.4 \times 10^{-7}$
长枝坑层(砂岩)	$3.0 \times 10^{-7}$
红花子层(砂页岩互层)	$4.0 \times 10^{-7}$
红花子层(砂岩)	$1.0 \times 10^{-6}$
三民页岩	$7.0 \times 10^{-7}$
樟山层	$5.0 \times 10^{-7}$
红花子层(小林向斜)	$8.0 \times 10^{-7}$
三民页岩(小林向斜)	$3.0 \times 10^{-7}$
凝灰岩	$3.0 \times 10^{-7}$

表 4 研究区各构造透水系数率定成果表

Table 4 Permeability coefficient of each fault

构造名称	水力传导系数(m/s)
高中断层前后扰动带	$1.0 \times 10^{-6}$
高中断层带	$1.4 \times 10^{-7}$
茗浓断层带	$3.0 \times 10^{-6}$
旗山断层带	$1.0 \times 10^{-6}$
表湖断层带	$8.0 \times 10^{-7}$
平溪断层带	$2.0 \times 10^{-6}$

1) 由表 2 显示: 模型初始地下水位与前述地下水位观测值比较, 仅 DB-93-05 及 DB-93-06 略超出观测值外, 其余均落于观测值的变动范围内。

2) 由东隧道东洞口总出水量测值与模式评估出水量相比较, 如图 8 所示, 两者出水量及趋势相当, 惟从量测值可反应出单一水文地质单元的变异性对出水量的影响, 而模式仅能反应出不同水文地质单元对出水量的影响。

3) 图 9 显示东隧道里程 0K+690 ~ +790 渗水量测与模式评估结果之比较, 由于现地量水堰安置受到施工之影响, 往往需落后一段时间才能开始量测, 以致于无法量得到开挖初期的渗水量。图中显示模式评估值与现地量测值相当, 惟受到水文特性的变异性影响, 现场量测值波动较大。

### 3.6 隧道涌水量评估

截至 2009 年第 2 季, 隧道已开挖至里程 2K+296.6, 开挖面已逐渐接近高中断层带或外围扰动带, 由于断层破碎带孔隙裂发达、导水性良好可能构成高角度、高地下水头之含水层带, 隧道开挖至此处可能遭遇大量涌水。图 10 为模式仿真隧道逐步开挖通过高中断层时, 隧道内平均每公尺每分钟涌水量 ( $L/min \cdot m$ )。仿真结果显示, 开挖初期隧道涌水量约可达  $22 L/min \cdot m$ , 开挖 1 个月之后, 涌水量乃维持在  $13 L/min \cdot m$ , 直至 3 个月之后, 涌水量逐渐趋于稳定, 降至  $6 L/min \cdot m$  以下。

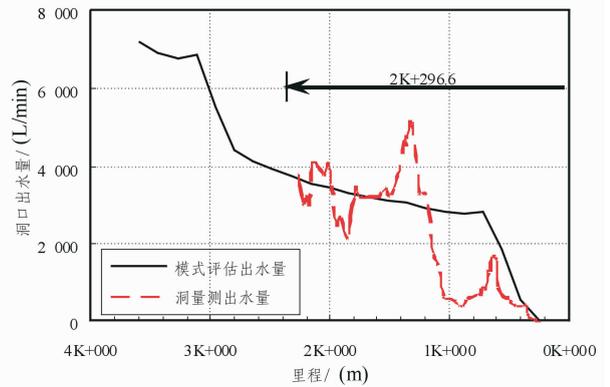


图 8 东隧道东洞口总出水量测与模式评估结果

Fig. 8 Curves of simulated water inflow quantity and measured water inflow quantity of east section of east tunnel

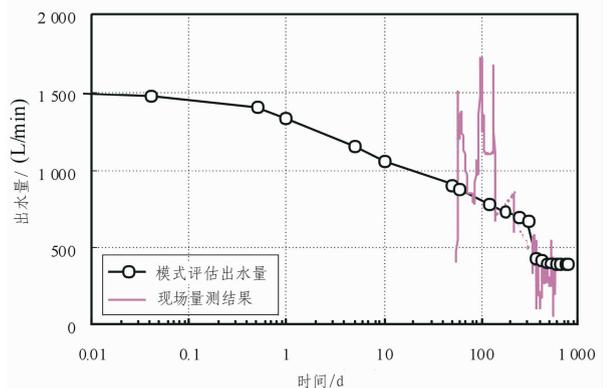


图 9 东隧道里程 0K+690 ~ 0K+790 渗水量测与模式评估结果

Fig. 9 Curves of simulated water inflow quantity and measured water inflow quantity in 0K+690-0K+790 section of east tunnel

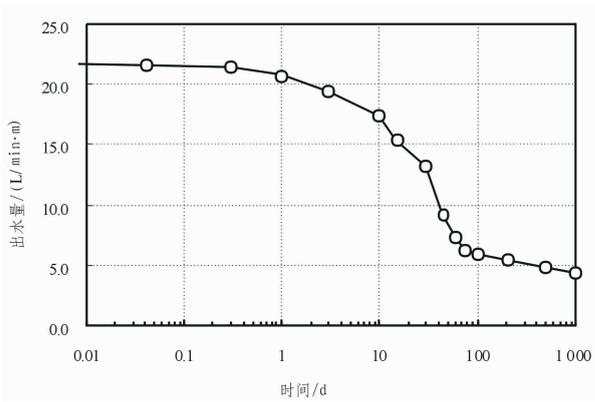


图10 通过高中断层破碎带涌水量历线评估图

Fig. 10 Time - dependent curves of quantity of inflow from fractured fault zones

另从隧道洞口总出水量评估结果(图8)显示:开挖面尚未进入高中断层破碎带前,由于长枝坑层渗透性较低,隧道总出水量仅随着隧道开挖长度增长而稳定增加至4 400 L/min,待开挖面进入高中断层破碎带(里程2K+800)时,隧道总出水量突增至6 900 L/min。

由上述之涌水评估结果得知隧道开挖至断层破碎带时,可能遭遇大量涌水;因此,当隧道开挖至断层破碎带前方,可透过前方地质钻探或长距离水平排水孔,以了解前方地质状况及降低涌水潜势,减少隧道因涌水引致的灾难。

#### 4 结论

以往评估隧道涌水量皆采用理论公式或隧道轴线近域的数值分析模型进行仿真,惟此方法尚无法掌握区域范围初始渗流场对隧道涌水之影响。本文则透过三维水文地质概念模型之建立,融入地形、入渗补注、地质条件及水文地质特性之影响,求得研究区域内之

初始渗流场,再透过隧道逐轮开挖之仿真,以评估隧道瞬时及稳态之涌水量。

此外,本文透过现地地下水位观测、隧道总出水量测、隧道内渗水量测及隧道内透水试验等,将成果纳入水文地质概念模式,做为模型率定之依据,适当地评估未来隧道开挖过程中可能遭遇之涌水潜势,可作为施工阶段应变对策之参考或回馈至隧道设计。

#### 参考文献:

- [1] Tseng D J, Tsai B R, Chang L C. A Case Study on Ground Treatment for a Rock Tunnel with High Groundwater Ingression in Taiwan [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001(16):175-183.
- [2] 张文城,张龙均. 雪山隧道特殊地质施工案例探讨[C]//2004 海峡两岸土工技术岩土工程交流讨论会论文集. 台北:隧道协会,2004:45-58.
- [3] 黄俊鸿. 雪山隧道工程施工涌水与邻近地表、地下水文集翡翠水库进流变异之关联研究[R]. 台北:国道新建工程局项目研究报告,2005.
- [4] 杨丰荣. 曾文水库越域引水隧道工程水文地质研究[C]//第五届海峡两岸隧道与地下工程学术与技术研讨会. 台北:隧道协会,2006.
- [5] 中兴工程顾问股份有限公司. 曾文水库越域引水工程计画——隧道工程补充地质调查验证及评估报告[R]. 台北:中兴工程顾问股份有限公司,2005.
- [6] 杨丰荣,顾承宇,谭志豪,等. 曾文越引隧道工程水文地质之调查与分析评估[J]. 土工技术,2007(112):69-80.
- [7] 中兴工程顾问股份有限公司. 曾文水库越域引水工程计画——隧道工程引水隧道水文地质模式检测与区域水资源环境影响分析2009年第二季季报告[R]. 台北:中兴工程顾问股份有限公司,2009.