

# 基于流固耦合的富水软岩地层隧道排水方案研究

赖金星<sup>1</sup>, 樊浩博<sup>1</sup>, 申爱军<sup>2</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 西安 710064; 2. 宁夏路桥工程股份有限公司, 银川 750004)

**摘要:** 为研究富水软岩隧道最优排水方案, 以甘肃省道 S304 线关山隧道为研究对象, 基于流固耦合分析理论, 建立了应力场和渗流场作用下的隧道开挖模型。借助 SoilWorks 有限元软件对隧道全排水、全封堵及堵水限排三种施工方案进行了模拟, 并对孔隙水压力及水位线、位移场及应力场、围岩塑性区的分布规律进行了研究。结果表明: 富水软岩隧道开挖时, 采用堵水限排方案可以有效减小对地下水水位的影响, 经济效益显著; 三种施工方案中, 堵水限排方案隧道的拱顶沉降、隧底隆起以及地表下沉量最小, 但围岩的应力最大, 仰拱最大拉应力为全排水方案的 2.2 倍; 全排水方案与全封堵方案围岩塑性区主要产生在仰拱, 堵水限排方案围岩塑性区主要产生在边墙两侧, 塑性区的范围较小。研究结果可为富水软岩地层同类工程排水方案的确定提供借鉴。

**关键词:** 富水软岩隧道; 排水方案; SoilWorks; 流固耦合; 堵水限排方案

**中图分类号:** U455   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2015)02-0349-05

## Study on the drainage scheme of water-rich soft rock tunnel based on solid fluid coupling

LAI Jinxing<sup>1</sup>, FAN Haobo<sup>1</sup>, SHEN Aijun<sup>2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Ningxia Highway and Bridge Corporation, Yinchuan 750004, China)

**Abstract:** In order to determine the best drainage scheme of water-rich soft rock tunnel, the excavation models of the Guanshan tunnel in Gansu Province were established under stress and seepage fields based on the coupling theory of fluid and solid. The complete drainage scheme, non drainage scheme, and controlled drainage scheme were analyzed using the finite element analysis software SoilWorks. The distribution characteristics of pore water pressure and water level, tunnel displacement and stress, and plastic zone of surrounding rock were studied. The results showed that the controlled drainage scheme can reduce the effect to underground water during the tunnel excavation; for the controlled drainage scheme, the amounts of crown settlement, invert uplift, and ground settlement are the smallest while the surrounding rock stress is the largest, and the invert maximum tension stress for the controlled drainage scheme is 2.2 times of that for the complete drainage scheme; and the rock plastic zone is mainly distributed in the invert area for the complete drainage scheme and non drainage scheme, and in the side wall for the controlled drainage scheme. The results can provide reference for the selection of drainage scheme of water rich soft rock tunnel.

**Key words:** water rich soft rock tunnel; drainage scheme; SoilWorks; solid fluid coupling; controlled drainage scheme

随着我国高速公路建设的迅速发展, 富水地区的公路隧道修建也越来越多<sup>[1]</sup>。大量工程实践表明<sup>[2-5]</sup>, 以往采取的“排堵结合, 以排为主”地下水处理办法, 将导致地下水的大量流失, 一方面使得隧道内存在不同程度的水害, 影响衬砌结构和行车安全, 使后期维修和养护费用大大提高(如大瑶山隧道、华蓉山隧道、中梁山隧道等); 另一方面地下水下降, 会导致生态环境恶化, 严重影响隧址周围人民的生产和

生活<sup>[6]</sup>。

因此, 目前提出了“以堵为主、限量排放”和全封堵两种治水方案<sup>[7-8]</sup>。“以堵为主、限量排放”通常通过围岩注浆措施来实现, 全封堵则通过设置防水层和抗水压衬砌来实现。本文以甘肃省道 S304 线关山隧道 F3 断层 VI 级围岩为对象, 利用 SoilWorks 软件对隧道采用全排水、全封堵及堵水限排 3 种施工方案进行流固耦合模拟分析, 得出不同工况下

收稿日期: 2014-08-03   修回日期: 2015-02-12   网络出版时间: 2014-03-19  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150319.0933.009.html>  
基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2010JM7021)  
作者简介: 赖金星(1973-), 男, 广东龙川人, 副教授, 博士, 主要从事隧道工程方面的教学与科研工作。E-mail: 373159626@qq.com  
通讯作者: 樊浩博(1989-), 男, 河南漯河人, 博士研究生, 主要从事隧道工程方面的研究。E-mail: 739512276@qq.com

孔隙水压力及水位线、围岩的位移场、应力场及岩体破坏区的分布规律,并据此研究丰富软岩富水隧道的排水方案。

## 1 流固耦合计算原理

利用 SoilWorks 模拟岩体的流固耦合机理时,将岩体等效为均质、连续性介质,流固耦合分析计算采用的基本方程<sup>9-10)</sup>包括:

(1) Darcy 定律。即渗流计算基本方程:

$$q = k \cdot i \quad (1)$$

式中:  $q$  为单位面积的渗透流量;  $k$  为渗透系数;  $i$  为水力坡降。

(2) 渗流方程。二维非稳定流基本方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2)$$

式中:  $H$  为总水头;  $k_i$  为  $i$  方向的渗透系数;  $Q$  为流量;  $\phi$  为体积含水率;  $t$  为时间。

对于二维稳定流,流入和流出量随时间没有变化,故式

(2) 右边为零,即

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = 0 \quad (3)$$

(3) 流固耦合方程。流固耦合计算时采用小位移的胡克法则,基本方程如下:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_x \\ \gamma_y \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2+2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2+2\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x - p \\ \sigma_y - p \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yx} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $\tau_{ij}$  为  $ij$  方向的剪应力;  $\sigma_i$  为  $i$  方向上的有效应力;  $p$  为超孔隙水压;  $\nu$  为泊松比;  $E$  为弹性模量。

## 2 基于流固耦合的数值模拟

### 2.1 工程概况

关山隧道是甘肃省道 S304 线华亭至庄浪二级公路改建项目的控制性工程,全长 2 825 m,起止桩号 K108+ 829 至 K111+ 654。该改建项目是甘肃省“四纵四横”公路网主骨架中“一纵”的重要路段,是连接陇东和陇南的主要通道。隧道洞身穿越地层为白垩系六盘山群和尚铺组,上部岩性为紫红色砂岩和泥质砂岩互层,下部岩性为青灰色砂岩、砾岩互层,局部夹薄层砂质页岩,软硬相间;共穿越 7 处断层破碎带,断层走向与隧道轴线交角为 40°~ 60°,走向 NW、NE,倾角 70°~ 85°,多为正断层。断层影响带内岩体破碎、松散,裂隙水发育,稳定性差。

本次选取关山隧道 F3 断层 VI 级围岩进行模拟分析。衬砌内轮廓采用五心圆,初期支护采用 22 cm 厚的 C20 喷射混凝土;中空注浆锚杆直径规格为 D25,长度为 3.5 m<sup>[11]</sup>,数值计算中考虑锚杆和喷射混凝土的力学作用(不考虑工字钢和二次衬砌的作用)。隧道开挖采用台阶法,其中仰拱采用左、右拱脚导坑交错开挖、支护。隧道开挖示意图见图 1。

### 2.2 计算模型

计算时考虑边界条件的影响,计算模型网格划分见图 2。选取竖直方向为  $Z$  轴,水平方向为  $X$  轴,计算范围选取  $0 \leq z \leq 120$  m,  $0 \leq x \leq 120$  m,隧道埋深 75 m;在左右边界施加  $X$  方向的位移约束,在底部边界施加  $Z$  方向的位移约束;地下

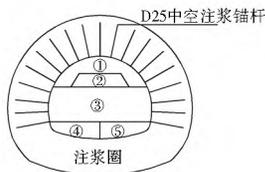


图 1 隧道开挖示意图

Fig. 1 Schematic of tunnel excavation

水位取地表计算,不考虑初期支护的堵水作用。

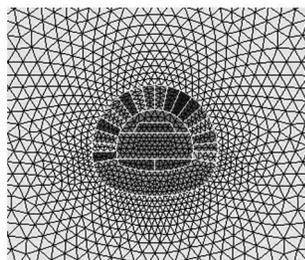


图 2 模型网格划分

Fig. 2 Mesh of the model

根据地质勘察资料和公路隧道设计规范,选取围岩及支护结构参数<sup>[12-15]</sup>,具体见表 1。

表 1 计算模型参数

Tab. 1 Parameters of the model

材料类型	弹性模量 $E$ /GPa	泊松比 $\mu$	容重 $\gamma$ $J$ /(kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力 $c$ /kPa	摩擦角 $\varphi$ (°)	渗透系数 $k$ /(m·d <sup>-1</sup> )
围岩	0.2	0.4	20.5	100	33	0.24
注浆圈	2.5	0.35	23.5	500	37	0.01
初喷混凝土	15	0.3	24	—	—	—
锚杆	206	0.3	76.8	—	—	—

将岩体的裂隙渗流模型等效为连续介质渗流模型,流体在岩体中流动服从 Darcy 定律,水头恒定,不因隧道开挖排水而衰减,渗流为层流;岩体为弹塑性材料,采用 Mohr Coulomb 本构模型。

### 2.3 计算方案

按照稳态流进行模拟,分析以下 3 种工况下围岩位移场及应力场的变化规律。

(1) 工况 1: 全排水方案。在模拟的过程中,地层的侧边及底部设置为不透水边界;顶部为自由地表,压力水头为 0 m;隧道的开挖边界设置为渗流边界,节点压力水头为设置为 0 m。

(2) 工况 2: 全封堵方案。地层边界条件同工况 1,同时将工况 1 中的开挖边界条件“节点压力水头 0 m”改为节点流量为 0 m<sup>3</sup>/d。

(3) 工况 3: 堵水限排方案。地层和开挖边界条件同工况 1,同时在工况 1 的开挖面以外 3.5 m 范围内设置注浆圈。

## 3 计算结果及分析

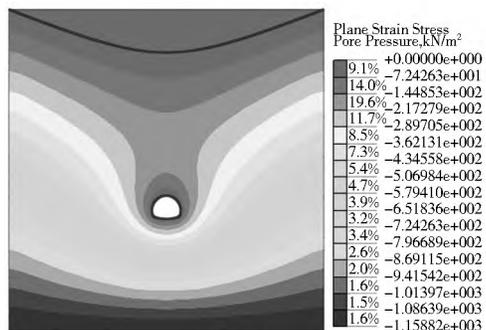
### 3.1 孔隙水压力及水位线分析

从图 3(a) 可以看出,工况 1 隧道开挖后,在水头压力差的作用下,远场孔隙水向隧道开挖面流动;当补给充分的条件下,最终形成以隧道为中心的等水压线降水漏斗,水位线距离

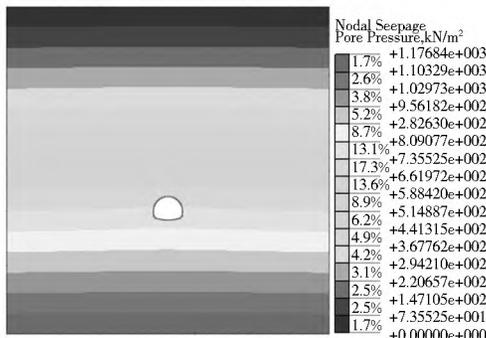
地面较远。隧道开挖后每延米渗流量为  $48.70 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$ ，说明全排水方案对地下水位造成的影响较为明显。

从图 3(b) 可以看出，工况 2 隧道开挖后，等水压线水平，水位线位于地表。隧道开挖后每延米渗流量为  $0 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$ ，说明全封堵方案未对原地下水造成任何影响。

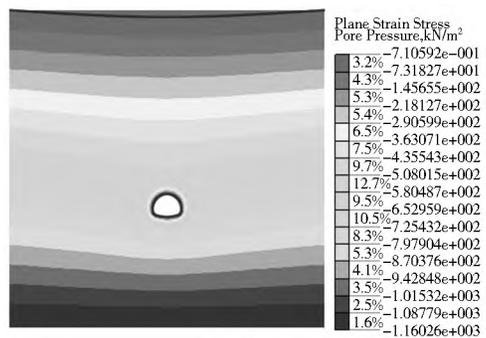
从图 3(c) 可以看出，工况 3 隧道开挖后，隧道顶部地表未形成明显的等水压线降水漏斗，水位线下降较小。隧道开挖后每延米渗流量  $4.2 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$ ，与工况 1 相比，采取堵水限排方案可以有效降低地下水流失和地下水位的下降。



(a) 工况 1



(b) 工况 2



(c) 工况 3

图 3 不同工况下孔隙水压力及水位线分布

Fig. 3 Distribution of pore water pressure and water level under different working conditions

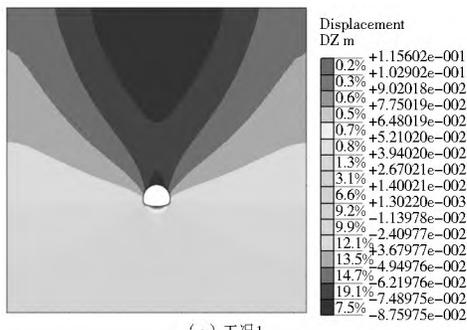
### 3.2 位移场分析

从图 4(a) 可以看出，工况 1 隧道开挖后，对地表的影响呈现出以隧道为顶点的倒三角分布，地面最大下沉量接近 55 mm，隧道拱顶的最大沉降为 87.6 mm，仰拱隆起为 115.6 mm，隆起量较大。

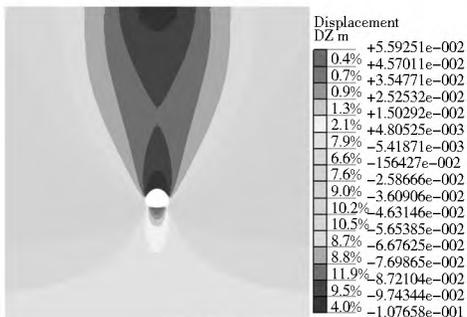
从图 4(b) 可以看出，工况 2 隧道开挖后，对地表的影响范围比工况 1 明显减小，但是地表最大下沉量增大到 68 mm，增加了 23.6%；隧道拱顶的最大沉降为 107.6 mm，增加了 22.8%；仰拱隆起为 55.9 mm，减少了 51.6%。表明在富

水软岩隧道开挖时，全封堵方案比全排水方案可以减小对地表的影响范围及仰拱隆起量，但会增加拱顶和地表的下沉量。

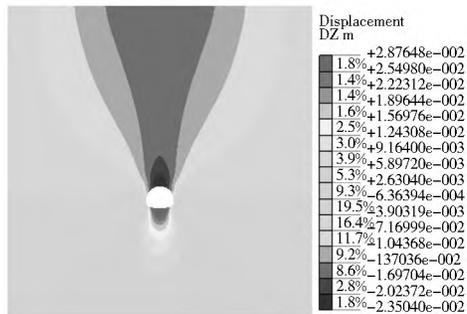
从图 4(c) 可以看出，工况 3 隧道开挖后，对地表的影响范围比工况 1 明显减小，地表最大下沉量为 16.1 mm，减少了 70.7%；隧道的竖向位移拱顶最大沉降位移为 23.5 mm，减少了 73.2%；仰拱隆起为 28.8 mm，减少了 75.1%。说明采取堵水限排方案可以极大地减小对隧道的影响，有利于围岩的稳定。



(a) 工况 1



(b) 工况 2



(c) 工况 3

图 4 不同工况竖向位移分布

Fig. 4 Distribution of vertical displacement under different working conditions

### 3.3 应力场分析

图 5 显示，隧道开挖后工况 1 对洞室周围岩的影响最大，由于地下水的大量流失，影响范围已经超出 3~5 倍洞径，工况 2 和工况 3 对地层影响则较小，但工况 3 的围岩应力比工况 2 的大。

从图 5(a) 可以看出，工况 1 隧道周围基本以压应力为主，局部有拉应力，边墙底部应力变化比较明显，其它部位变化较小。在仰拱及拱顶出现不同程度的拉应力，最大拉应力出现在仰拱中心位置，为 151 kPa。

从图 5(b) 可以看出，工况 2 隧道周围最大主应力的分布

基本与工况 1 相似,拉应力的影响范围有所减小,但仰拱中心最大拉应力增大为 225 kPa。这与工况 2 的围岩孔隙水压力较大有关。

从图 5(c)可以看出,工况 3 隧道边墙受压、拱顶和仰拱受拉较为明显,最大拉应力出现在拱腰位置,为 333 kPa,是工况 1 的 2.2 倍。这主要是由于注浆加固后限制了围岩的位移,从而导致围岩应力的增加。

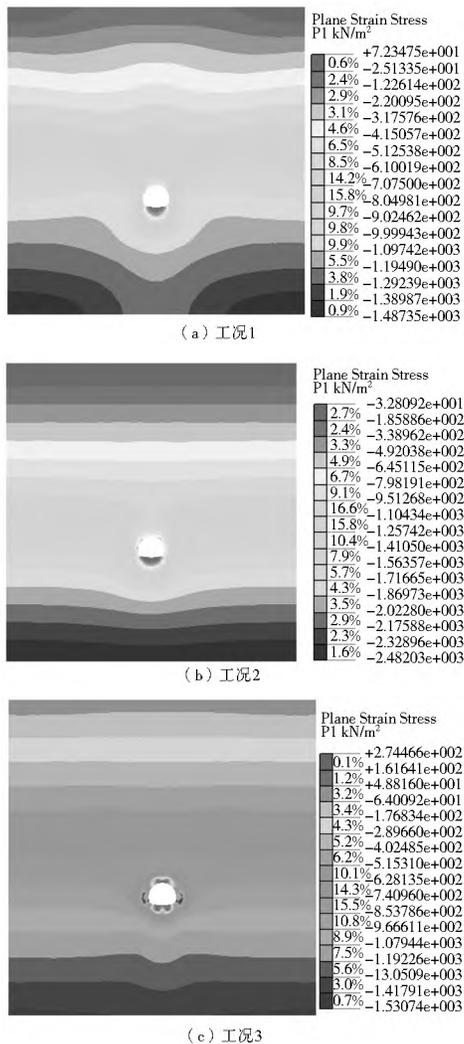


图 5 不同工况最大主应力分布

Fig. 5 Distribution of maximum principal stress under different working conditions

### 3.4 岩体破坏区分析

图 6 显示,隧道开挖后隧道周围岩体产生的塑性区及卸载区主要发生在仰拱及边墙两侧。工况 1 和工况 2 产生的岩体塑性区主要集中在仰拱,卸载区主要集中在边墙。工况 3 围岩的塑性区主要集中在边墙,卸载区主要集中在仰拱,围岩塑性区的范围明显缩小。表明注浆加固可以明显提高围岩的强度,保证隧道的安全与稳定。

## 4 结论

(1) 软岩富水隧道采取全排水方案措施对地下水的影响较大,不利于环保;采用全封堵方案,虽然不影响地下水位,但实际工程中造价较高且很难实现;采用堵水限排方案,隧

道开挖后对地下水位的影响较小,经济性也较好。

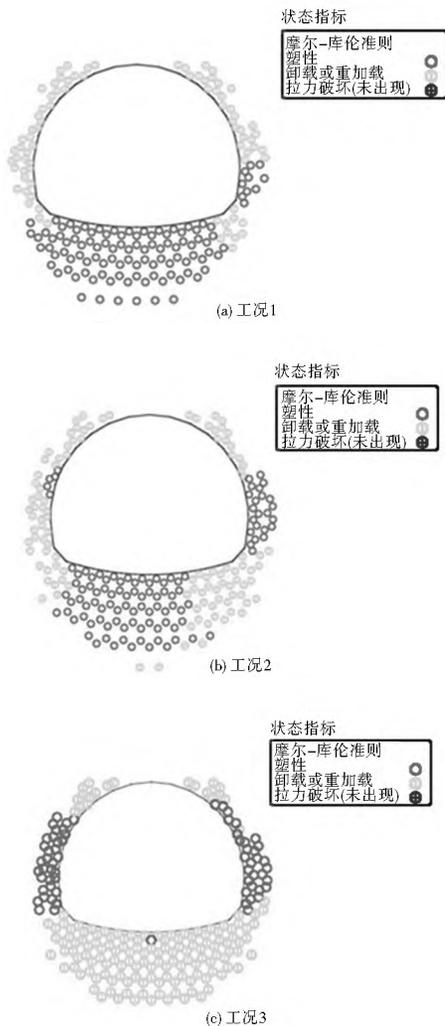


图 6 不同工况岩体塑性区分布

Fig. 6 Distribution of rock plastic zone under different working conditions

(2) 采用堵水限排方案,隧道开挖对地表的影响范围明显缩小,隧道拱顶沉降、隧底隆起以及地表下沉均大幅减小,堵水限排方案在控制围岩变形方面效果较为显著。

(3) 采用全排水方案与全封堵方案,隧道围岩以压应力为主,在仰拱区域产生拉应力,拉应力值较小。采用堵水限排方案隧道围岩应力明显增大,隧道边墙以压应力为主,拱顶及仰拱以拉应力为主,最大拉应力值为全排水方案的 2.2 倍,但未超过规范的允许值。

(4) 全排水方案与全封堵方案产生的塑性区及卸载区类似,围岩塑性区主要产生在仰拱,卸载区主要产生在边墙两侧。堵水限排方案围岩塑性区主要产生在边墙两侧,卸载区主要产生在仰拱,塑性区的范围明显缩小,表明注浆加固可以明显的提高围岩的强度,保证隧道的安全与稳定。

### 参考文献(References):

[1] 严绍洋,李亮辉,高燕希,等.公路隧道开挖渗流场的有限差分法分析[J].中外公路,2007,27(6):120-122. (YAN Shaoyang, LI Lianghui, GAO Yanyan, et al. To analysis the seepage field of highway tunnel excavation in finite difference method[J].)

- Journal of China & Foreign Highway, 2007, 27(6): 120-122. (in Chinese)
- [2] 蒋忠信. 隧道工程与水环境的相互作用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 121-126. (JIANG Zhongxin. Interaction between tunnel engineering and water environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 121-126. (in Chinese))
- [3] 罗鉴银, 傅瓦利. 岩溶地区开凿隧道对地下水循环系统的破坏—以重庆市中梁山为例[J]. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2005, 27(4): 432-435. (LUO Jianyin, FU Wali. Destruction caused by tunneling works to the circulatory system of underground water in karst areas a case study of the Zhong Liang Mountains in Chong Qing[J]. Journal of Southwest Agricultural University: Natural Sciences, 2005, 27(4): 432-435. (in Chinese))
- [4] 刘丹, 杨立中, 于苏俊, 等. 华蓥山隧道排水的生态环境问题及效应[J]. 西南交通大学学报, 2011, 36(3): 308-313. (LIU Dan, YANG Lizhong, YU Sujun, et al. On ecological environment problems and effects caused by discharge from Huayingshan Tunnel[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 36(3): 308-313. (in Chinese))
- [5] 邓谊明. 大瑶山隧道深层岩溶水地段洞内长期排水所引起的水文地质变化特征及其整治措施[J]. 水文地质与工程地质, 1992, 19(6): 44-49 (DENG Yiming. Changes characteristics in hydrogeological caused by long-term drainage inside the cave of Dayaoshan tunnel in deep water-enriched karst area and treatment measures[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1992, 19(6): 44-49 (in Chinese))
- [6] 丁浩, 蒋树屏, 李勇, 等. 控制排放的隧道防排水技术研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 27(6): 1398-1403. (DING Hao, JIANG Shuping, LI Yong, et al. Study on waterproof and drainage techniques of tunnels based on controlling drainage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 27(6): 1398-1430. (in Chinese))
- [7] 高新强. 高水压山岭隧道衬砌水压力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 983-987. (GAO Xiqiang. Study on the distribution rule of water pressure upon lining subject to high hydraulic pressure mountain tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 983-987. (in Chinese))
- [8] 张成平, 张顶立, 骆建军, 等. 高压富水岩溶隧道注浆机理及作用效果分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 683-685. (ZHANG Chengping, ZHANG Dingli, LUO Jianjun, et al. Analysis of grouting mechanism and its effect for karst tunnel lining high water pressure and water enriched region[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(5): 693-685. (in Chinese))
- [9] 路平. 考虑流固耦合的富水软岩隧道力学特性及合理注浆参数研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012. (LU Ping. The research on mechanical characteristics and reasonable grouting parameters considering the coupling of fluid and solid in water rich tunnel with soft rock[D]. Chang Sha: Zhong Nan University, 2012. (in Chinese))
- [10] 杨卓. 大丽高速双龙富水隧道稳定性分析及防排水措施研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013. (YANG Zhuo. Stability analysis and waterproof and drainage technology research of Shuanglong water-rich tunnel in Dali Highway[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013. (in Chinese))
- [11] 王永刚, 丁文其, 景韧, 等. 关山隧道断层破碎带三维有限元地震动力响应[J]. 公路交通科技, 2011, 28(8): 115-119. (WANG Yonggang, DING Wenqi, JING Ren, et al. Seismic dynamic response of fault fracture zone at Guanshan Tunnel based on 3D FEM[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(8): 115-119. (in Chinese))
- [12] 蔚立元, 李术才, 徐帮树, 等. 水下隧道流固耦合模型试验与数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1467-1474. (YU Liyuan, LI Shucai, XU Bangshu, et al. Study of solid fluid coupling model test and numerical analysis of underwater tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1467-1474. (in Chinese))
- [13] 长安大学. 富水软岩隧道防排水技术研究[R]. 西安, 2008. (Chang'an University. Study on the waterproof and drainage technology of water rich soft rock tunnel[R]. Xi'an, 2008. (in Chinese))
- [14] JTG D70-2004. 公路隧道设计规范[S]. (JTG D70-2004. Code for design of road tunnel[S]. (in Chinese))
- [15] 甘肃省交通科学研究院有限公司. 关山隧道地质勘察报告[R]. 兰州, 2007. (Gansu Provincial Communications Science Research Institute Co., Ltd. Geological survey report of Guanshan Tunnel[R]. Lanzhou, 2007. (in Chinese))