

DOI: 10.11779/CJGE2019S1042

# 基于流固耦合分析的富水隧道外水压力与 限量排放标准研究

郭鸿雁<sup>1, 2, 3</sup>, 纪亚英<sup>4</sup>, 方林<sup>1, 2, 3</sup>, 李科<sup>\*1, 2, 3</sup>, 唐承平<sup>4</sup>, 王世法<sup>4</sup>

(1. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067; 2. 国家山区公路工程技术研究中心, 重庆 400067;  
3. 公路隧道建设技术国家工程实验室, 重庆 400067; 4. 四川雅康高速公路有限责任公司, 四川 雅安 625000)

**摘 要:** 隧道衬砌结构外水压力和限量排放标准是岩溶山区隧道工程建设关注的焦点。以某富水隧道为依托, 借助FLAC<sup>3D</sup>软件通过流固耦合数值分析, 对富水隧道衬砌结构合理的外水压力取值和限量排放标准进行研究。分析了围岩无注浆条件下隧道外水压力随排水量的变化规律, 进而提出了基于结构安全的隧道外水压力取值和地下水排放标准, 同时分析了围岩注浆条件下隧道外水压力随注浆圈厚度和地下水排放量的变化规律, 提出不同注浆厚度条件下地下水排放标准和合理的注浆圈厚度取值。

**关键词:** 富水隧道; 流固耦合; 外水压力; 排放标准; 注浆圈厚度

中图分类号: TU43; U455.49

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S1-0165-04

**作者简介:** 郭鸿雁(1985—), 男, 硕士, 主要从事隧道工程、地下结构工程等领域科研与咨询工作。E-mail: guohongyan@cmhk.com。

## External water pressures and limited emission standards of water-rich tunnels based on fluid-solid coupling analysis

GUO Hong-yan<sup>1, 2, 3</sup>, JI Ya-ying<sup>4</sup>, FANG Lin<sup>1, 2, 3</sup>, LI Ke<sup>1, 2, 3</sup>, TANG Cheng-ping<sup>4</sup>, WANG Shi-fa<sup>4</sup>

(1. China Merchants Chongqing Communication Research & Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, China; 2. National Engineering and Research Center for Mountainous Highways, Chongqing 400067, China; 3. National Engineering Laboratory for Highway Tunnel Construction Technology, Chongqing 400067, China; 4. Sichuan Yakang Expressway Co., Ltd., Ya'an 625000, China)

**Abstract:** The external water pressures of tunnel lining structures and the limited discharge standards are the focus of tunnel construction in karst mountainous areas. Based on a water-rich tunnel, by using the FLAC<sup>3D</sup> software, the reasonable values of the external water pressures for the lining structures of the tunnel and the limited discharge standards are studied through the numerical analysis of fluid-solid coupling. The variation laws of water pressures of the tunnel with displacement without grouting is analyzed, then the values of the external water pressures of the tunnel and the standards of groundwater discharge based on the structural safety are proposed. At the same time, the variation laws of the external water pressures of the tunnel with grouting ring thickness and groundwater discharge under grouting are analyzed, the standards of groundwater discharge and the reasonable values of grouting ring thickness under different grouting thicknesses are put forward.

**Key words:** water-rich tunnel; fluid-solid coupling; external water pressure; emission standard; grouting ring thickness

## 0 引 言

我国地域广阔, 隧道工程建设规模庞大, 其中西南岩溶山区的地下水问题成了该区域隧道工程建设面临的主要问题之一, 隧道发生涌水时, 根据以往的经验多采用“宁疏勿堵”的原则<sup>[1]</sup>。然而经验证明, 隧道地下水的排放将导致土层被疏干, 使生态环境恶化, 同时丰富的地下水和不完美的防排水系统导致隧道水害问题频发, 影响隧道行车安全, 降低衬砌结构的耐久性<sup>[2-4]</sup>。因此, “控制型防排水”的理念随之产

生。付钢等<sup>[5]</sup>针对隧道采用“以堵为主, 限量排放”的防排水措施后, 衬砌外水荷载的计算, 以及排水系统排水能力大小对衬砌外水荷载的影响进行了探讨。赵瑞<sup>[6]</sup>等开展了隔挡式背斜区隧道群地下水渗流场模

**基金项目:** 国家重点研发计划专项项目(2017YFC08053005); 西藏自治区重点科研项目(2016XZ01G31); 国家自然科学基金项目(41601574); 重庆市基础与前沿研究项目(cstc2015jcyjBX0118)

**收稿日期:** 2019-04-30

**\*通讯作者** (E-mail: 364842342@qq.com)

拟演化研究,认为数值法可以较好地模拟预测隧道群开挖过程中隔挡式背斜区的渗流场变化。刘志春等<sup>[7]</sup>开展了地层注浆加固对隧道与地下水相互作用过程中的“双赢”影响效应分析,认为地层注浆加固既可降低衬砌背后水压荷载,又可减少地下水资源流失量,从而可以实现隧道与地下水相互作用过程中的“双赢”影响效应。然而目前对于“控制型防排水”的合理注浆圈厚度取值、衬砌结构的外水压力取值以及限量排放标准等问题仍悬而未决,亟待深入研究。基于此本文拟以某富水隧道为依托开展基于流固耦合分析的富水隧道外水压力与限量排放标准研究,以指导类似工程建设。

1 工程概况

依托工程隧道位于重庆市九龙坡区,建设环境较为敏感,隧址区岩溶地下水大约有三层。其中第二层地下水分布标高 260~300 m,地下水呈伏流,仍然由北向南运移。该高程的夷平面在本区的地貌上表现不明显,但发育有溶洞,表明该层地下水存在。这层地下水水量丰沛,直接影响工程建设。

2 隧道排水量理论解析研究

当隧道洞周围岩节理裂隙分布比较均匀,地下水渗流水流符合达西定律,隧道处于稳定渗流状态,隧道的排水是通过衬砌均匀渗水实现的,建立渗流计算模型<sup>[8-10]</sup>,见图 1。根据达西定律、轴对称原理和水流连续性方程(式 1),进行理论推导获得隧道排水量理论计算公式(式 2)。

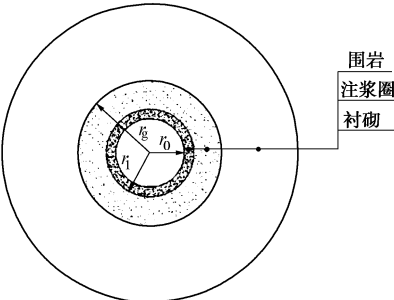


图 1 理论解析计算模型

Fig. 1 Theoretical analytical model

1/r \* d/dr (r \* dH/dr) + 1/r^2 \* d^2H/dθ^2 + d^2H/dz^2 = 0, (1)

Q = (2πHk\_r) / (ln(r2/r\_g) + (k\_r/k\_1) \* ln(r1/r0) + (k\_1/k\_g) \* ln(r\_g/r1)), (2)

式中  $H$  为隧道位置静水头;  $k_1$  为衬砌渗透系数;  $k_g$  为注浆圈渗透系数;  $k_r$  为围岩渗透系数;  $r_2$  为围岩远场半径。如果不进行注浆加固,可令  $k_g=k_r$ ,  $r_g=r_1$  进行

计算。

3 隧道外水压力取值与地下水排放标准研究

3.1 模型建立

本次研究采用数值仿真分析的方法,综合分析隧道注浆圈和排放量对围岩渗流场及应力场的影响<sup>[11]</sup>,计算选取岩溶发育强烈易突水段落 ZK2+569~583 段进行计算分析。隧道设计标高为 300 m,最大水位标高为 484 m。考虑隧道开挖和渗流的影响半径,在方向左右各取单洞的 10 倍洞径,模型尺寸为 350 m×230 m×1 m。计算分析的位移边界条件为顶部为自由边界,底部和左右边界为固定边界;渗流边界条件为隧道顶部地表为自由渗流边界,孔隙水压力为 0,其余各面均为透水边界,孔压固定。隧道的数值计算模型如图 2 所示。

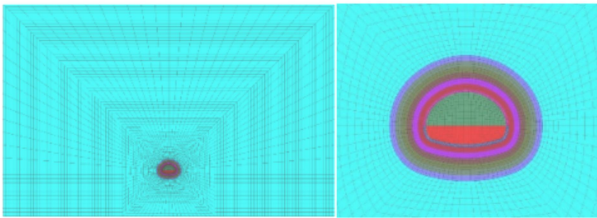


图 2 流固耦合数值分析模型

Fig. 2 Numerical model for fluid-solid coupling

3.2 参数选取

根据依托工程勘察资料确定本次计算的围岩与支护结构力学参数和流体力学参数,详见表 1 和表 2。

表 1 基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters

材料名称	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kN·m <sup>-3</sup> )	摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	孔隙率
围岩	1.5	0.45	1800	24	0.12	0.20
注浆体	4.0	0.30	1900	33	0.45	0.10
二次衬砌	29.5	0.20	2500	—	—	0.05

表 2 流体力学参数

Table 2 Hydromechanical parameters

参数	围岩	注浆体	二次衬砌
渗透率/(m·s <sup>-1</sup> )	2.8×10 <sup>-6</sup>	2.8×10 <sup>-7</sup>	8.5×10 <sup>-8</sup> ~1.19×10 <sup>-7</sup>
饱和度/%	100	100	—
流体抗拉强度/MPa	0	—	—
流体重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	1.0×10 <sup>3</sup>	—	—
流体模量/GPa	2	—	—

3.3 结果分析

首先计算分析了不同地下水排放量对围岩渗流场以及外水压力的影响, 绘制不同排放量下衬砌结构外地下水排放量与衬砌外水压力、衬砌主应力的关系图, 如图 3。

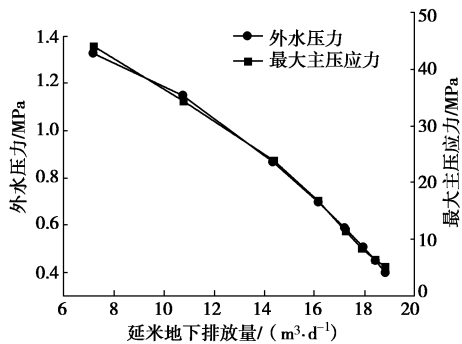


图 3 外水压力与最大主压应力随排放量变化规律图

Fig. 3 Variation of external water pressure and major principal compressive stress with discharge

由图 3 可知, 随着隧道地下水排放量增大, 隧道二次衬砌结构背后的外水压力也随之减小。根据隧道工程设计规范, C30 混凝土的轴心抗压强度设计值为 15 MPa。当隧道延米地下水排放量为 17.22 m³/d, 衬砌结构外水压 0.59 MPa (见图 3), 衬砌最大主压应力为小于 15 MPa, 衬砌结构能够保证运营安全。因此, 对于依托工程隧道富水段落, 地下水排放量宜取每延米 17.22 m³/d, 如需减小排放量, 需进行围岩注浆。

4 围岩注浆条件下隧道地下水排放标准研究

研究分析不同衬砌结构渗透系数时注浆圈的厚度分别为 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 m 等 6 种工况, 绘制不同工况下流固耦合平衡状态下的外水压力值随注浆厚度变化曲线, 见图 4。

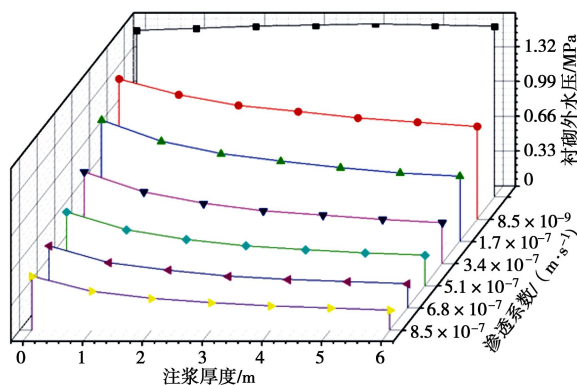


图 4 衬砌外水压力随注浆圈厚度变化规律图

Fig. 4 Variation of water pressure of linings with thickness of grouting ring

由图 4 可知, 当采用限量排放的地下水处理方式时, 衬砌外水压力随注浆圈厚度的增大而逐渐减小, 但衬砌结构的水压力受注浆圈厚度的影响逐渐减弱。提取不同工况下流固耦合平衡状态下的外水压力值, 如表 3 所示, 并通过式 (2) 可以换算获得不同工况下隧道地下水排放量, 见表 4。

表 3 不同工况下流固耦合平衡状态下的外水压力值统计表

Table 3 Values of external water pressure under different flow conditions and solid-state coupling equilibrium

注浆圈厚度/m	衬砌结构外水压力/MPa						
	$K=0$	$K=8.5 \times 10^{-9} \text{ m/s}$	$K=1.7 \times 10^{-7} \text{ m/s}$	$K=3.4 \times 10^{-7} \text{ m/s}$	$K=5.1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$	$K=6.8 \times 10^{-7} \text{ m/s}$	$K=8.5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$
0	1.58	1.33	1.15	0.87	0.70	0.59	0.51
1	1.60	1.18	0.95	0.68	0.53	0.43	0.37
2	1.62	1.08	0.83	0.57	0.44	0.36	0.30
3	1.63	1.02	0.76	0.50	0.38	0.30	0.26
4	1.64	0.96	0.70	0.46	0.34	0.27	0.23
5	1.63	0.92	0.65	0.42	0.31	0.25	0.21

表 4 不同工况下不同注浆圈厚度时隧道地下水排放量统计表

Table 4 Values of groundwater discharge of tunnels under different conditions with different grouting ring thicknesses

注浆圈厚度/m	隧道地下水排放量/(m³·d⁻¹)						
	$K=0$	$K=8.5 \times 10^{-9} \text{ m/s}$	$K=1.7 \times 10^{-7} \text{ m/s}$	$K=3.4 \times 10^{-7} \text{ m/s}$	$K=5.1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$	$K=6.8 \times 10^{-7} \text{ m/s}$	$K=8.5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$
0	—	7.17	10.75	14.34	16.14	17.22	17.94
1	—	6.28	8.89	11.23	12.31	12.93	13.34
2	—	5.69	7.76	9.49	10.25	10.67	10.95
3	—	5.26	6.98	8.34	8.92	9.24	9.45
4	—	4.92	6.40	7.53	8.00	8.26	8.42
5	—	4.66	5.95	6.92	7.31	7.53	7.66
6	—	4.43	5.60	6.44	6.78	6.96	7.08

如前分析, 隧道在该富水段落衬砌所能承受的外水压力值为 0.59 MPa, 在此基础上, 可通过围岩注浆的方式降低地下水排放量。由表 3 和表 4 通过插值的方法可以得到不同注浆圈厚度时隧道地下水排放量的控制标准, 见表 5。

表 5 不同注浆圈厚度隧道地下水排放量的控制标准

Table 5 Control standards of groundwater discharge of tunnels with different grouting ring thicknesses

注浆圈厚度/m	0	1	2	3	4	5	6
排放量标准/(m³·d⁻¹)	17.22	11.88	9.36	7.87	6.92	6.20	5.71

5 结 论

(1) 隧道全封堵不排水的情况下, 衬砌外水压力接近静水压力值, 随着隧道地下水排放量增大, 隧道二次衬砌背后的外水压力随之减小。

(2) 可通过控制地下水排放量减小二衬结构外水压力。就依托工程而言, 在不采用围岩注浆的措施下, 按其结构承载能力, 衬砌结构的外水压力安全取值为

0.59 MPa, 地下水排放量宜取每延米 17.22 m<sup>3</sup>/d。

(3) 当采用全封堵式的地下水处理方式时, 衬砌外水压力不随注浆圈厚度变化而变化, 始终接近静水压力水头; 而当对地下水控制排放时, 衬砌外水压力随注浆圈厚度的增大而逐渐减小, 在无实测资料的条件下, 隧道注浆圈厚度和限量排放标准可按表 4 进行取值设计。

(4) 隧道注浆圈厚度的增加, 衬砌结构的外水压力受注浆圈厚度影响随之减弱, 综合环保、安全、经济等因素考虑, 华岩隧道注浆圈厚度取 3 m 为宜。

#### 参考文献:

- [1] 余庆锋, 吴立. 高速铁路隧道岩溶突水发生机理研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(30): 199 - 205. (YU Qing-feng WU Li. Study on karst water inrush mechanism in high-speed railway tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(30): 199 - 205. (in Chinese))
- [2] 刘建, 刘丹, 宋凯. 渝怀铁路歌乐山隧道排水的地下水环境负效应评价[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(4): 179 - 183. (LIU Jian, LIU Dan, SONG Ka. Evaluation of the negative effects on groundwater environment resulted by Geleshan tunnel drainage[J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 49(4): 179 - 183. (in Chinese))
- [3] 单士军, 李耐霞. 歌乐山隧道施工过程环境影响分析及建议[J]. 工业安全与环保, 2004, 30(11): 21 - 22. (SHAN Shi-jun, LI Nai-xia. The analysis and suggestion of environmental impact on Geleshan tunnel construction[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2004, 30(11): 21 - 22. (in Chinese))
- [4] 刘志春, 朱永全, 高新强, 等. 干旱山区隧道施工地下水环境保护技术研究[R]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2010. (LIU Zhi-chun, ZHU Yong-quan, GAO Xin-qiang, et al. Study on technology of groundwater environment protection during tunnel construction in the arid mountain area[R]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2010. (in Chinese))
- [5] 付钢, 王磊. 高压富水地层中隧道衬砌结构设计方法探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(2): 252 - 257. (FU Gang, WANG Lei. Study on design method of lining structure of the highway tunnel in deep-lying stratum with highwater level[J]. Chinese Journal of Under ground Space and Engineering, 2007, 3(2): 252 - 257. (in Chinese))
- [6] 赵瑞, 许模, 范辰辰. 隔挡式背斜区隧道群地下水渗流场模拟演化[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(3): 69 - 74. (ZHAO Rui, XU Mo, FAN Chen-chen. Numerical simulation of the groundwater seepage field of a tunnel group in an ejective anticline zone[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(3): 69 - 74. (in Chinese))
- [7] 刘志春, 万良勇. 地层注浆加固对隧道与地下水相互作用过程中的“双赢”影响效应分析[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(2): 87 - 96. (LIU Zhi-chun, WAN Liang-yong. Win-win effect of ground consolidation grouting on the interaction between tunnel and groundwater[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(2): 87 - 96. (in Chinese))
- [8] 王建宇. 再谈隧道衬砌水压力[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(3): 5 - 10. (WANG Jian-yu. Once more on hydraulic pressure upon lining[J]. Modern Tunnelling Technology, 2003, 40(3): 5 - 10. (in Chinese))
- [9] 王秀英, 王梦恕, 张弥. 计算隧道排水量及衬砌外水压力的一种简化方法[J]. 北方交通大学学报, 2004, 28(1): 8 - 10. (WANG Xiu-ying, WANG Meng-shu, ZHANG Mi. A simple method to calculate tunnel discharge and external water pressure on lining[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2004, 28(1): 8 - 10. (in Chinese))
- [10] 皇甫明, 谭忠盛, 王梦恕, 等. 暗挖海底隧道渗流量解析解及其应用[J]. 中国工程科学, 2009, 11(7): 66 - 70. (HUANGFU Ming, TAN Zhong-sheng, WANG Meng-shu, et al. An analytical solution for water inflow into a subsea tunnel and its application[J]. Journal of China Engineering Science, 2009, 11(7): 66 - 70. (in Chinese))
- [11] 杨会军, 王梦恕. 深埋长大隧道渗流数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 511 - 519. (YANG Hui-jun, WANG Meng-shu. Numerical simulation of seepage in deep-buried long and big tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 511 - 519. (in Chinese))

(责编: 明经平)