

DOI: 10.11779/CJGE202001015

考虑注浆圈作用的体外排水隧道渗流场解析研究

李林毅¹, 阳军生^{*1}, 高超¹, 夏万友², 麻彦娜³

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 大永高速公路投资开发有限公司, 云南 昭通 657000;
3. 湖南财政经济学院工程管理学院, 湖南 长沙 410205)

摘要: 体外排水方式在隧道工程中已得到逐步应用, 但考虑注浆作用的体外排水隧道渗流场解析理论未见报道, 导致理论滞后于工程实践。基于镜像法与渗流力学理论, 提出了考虑注浆圈作用的体外排水隧道渗流场理论模型, 通过解析退化、数值仿真两种方法共同验证了理论模型及解析公式的正确性, 探讨了注浆圈渗透系数与厚度对涌水量、隧道外水压力的影响规律。分析结果表明: 注浆圈渗透系数对体外排水隧道渗流场存在显著影响, 随注浆渗透系数比值增大, 涌水量可得到明显控制, 但会引起外水压力的增长; 注浆圈厚度影响相对较小, 其影响主要在于厚度值越大时能一定程度上加强对底部结构外水压力的控制。提出了兼顾隧道限排要求与隧底水压力控制效果的合理注浆圈参数。研究成果以期为体外排水隧道注浆参数设计及施工实践提供参考。

关键词: 体外排水方式; 渗流力学; 渗流场; 涌水量; 水压力; 隧道; 注浆圈参数

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2020)01-0133-09

作者简介: 李林毅(1994—), 男, 湖南郴州人, 博士研究生, 从事隧道工程防排水体系研究工作。E-mail:
tunnel_lly@csu.edu.cn。

Analytical study on seepage field of tunnels with external drainage considering effect of grouting rings

LI Lin-yi¹, YANG Jun-sheng¹, GAO Chao¹, XIA Wan-you², MA Yan-na³

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Dayong Highway Investment Development Co., Ltd.,
Zhaotong 657000, China; 3. School of Engineering Management, Hunan University of Finance and Economics, Changsha 410205, China)

Abstract: The external drainage method has been gradually applied in the tunnel engineering, but the analytical theory of the seepage field of the external drainage tunnel considering the grouting effect has not been reported, which leads to that the theory lags behind engineering practice. Based on the mirror image method and the theory of seepage mechanics, the theoretical model of seepage field of the external drainage tunnel considering grouting rings is proposed. The correctness of the formula is verified through the analytical degradation and numerical simulation. The influences of the permeability coefficient and thickness of the grouting rings on the water inflow and the water pressure outside the tunnel are discussed. The analysis results show that the permeability coefficient of grouting rings has a significant influence on the seepage field of external drainage tunnel, and with the increase of the ratio, the water inflow can be controlled obviously, but it will cause the increase of external water pressure. The influences of grouting ring thickness are relatively small, which mainly lies in that the greater the grouting ring thickness, the stronger the control of the bottom external water pressure. The reasonable parameters of grouting rings are put forward considering the requirements of groundwater environmental protection and the control effect of water pressure. The research results may provide reference for the design of grouting parameters and the construction practice of external drainage tunnels.

Key words: external drainage method; percolation mechanics; seepage field; water inflow; water pressure; tunnel; grouting ring parameter

0 引言

随着国家经济飞速发展, 为满足人们日益增长的出行需求, 隧道建设项目增长迅速。富水隧道运营情况表明^[1-4], 因衬砌水压力过高引发的仰拱开裂、轨道隆起、隧底翻浆冒泥等底部结构病害问题时有发生。

针对上述工程问题, 工程师们提出了一种排导能力强、

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB1302600); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(2019zzts291)

收稿日期: 2019-04-10

*通信作者(E-mail: jsyang@csu.edu.cn)

隧道降压效果优的新型排水方式（体外排水方式，如图 1 所示）^[5]，相比于常规的“中心水沟+边沟”排水方式，体外排水方式将排水通道改至仰拱以下，利于围岩渗水排泄，使得隧底水压力得到有效降低。截至目前，国内外学者对该排水方式及其与常规排水方式组合的深埋水沟排水方式^[6]进行了一系列研究：Seok-Woo 等^[7]基于 Pentagon^{3D} 软件，在防排水系统弱化与否两种情况下，模拟探究了韩国某体外排水隧道的渗流场与衬砌水压力分布规律；Arjnoi 等^[8]依托曼谷 MRT 地铁下穿湄南河段工程，采用 Abaqus 软件模拟分析了全堵、全排、限排、体外排水方式 4 种排水条件下的围岩渗流场与衬砌结构受力特征；樊祥喜等^[9]基于 FLAC^{3D} 软件对列车动载作用下深埋水沟排水方式、常规排水方式结构的动力学响应和地层渗流场变化规律进行了探讨；李洪涛^[10]通过数值模拟、模型试验两种研究方法，探究了 3 种排水条件下（常规排水方式、体外排水方式、降水井排水方式）高铁隧道仰拱变形影响规律；Li 等^[11]总结了当前国际主流隧道排水方式，分析日本新干线体外排水隧道排水型式特点与优势，探讨了国内常规排水方式的不足。上述研究成果经工程验证，促进并指导了体外排水方式的实践应用^[12]。然而，现有研究多以数值模拟方法、现场测试方法为主，解析研究却鲜有报道，导致体外排水方式渗流场理论体系远滞后于工程实践。同时，现有研究基本未考虑注浆作用影响，随着隧道排放理念的转变与水资源保护要求的提高^[13-14]，如何通过注浆堵水合理控制体外排水隧道排水量亦成为了工程设计人员关心的重点问题。

为此，笔者基于镜像法与渗流力学理论，提出考虑注浆圈作用的体外排水隧道渗流场理论模型，采用解析退化、数值模拟方法验证理论模型的正确性，研究注浆圈参数（注浆圈厚度、注浆圈渗透系数）对隧道排水量、结构外水压力的影响规律，探讨体外排水隧道的合理注浆参数。研究成果以期指导体外排水隧道的设计与施工。

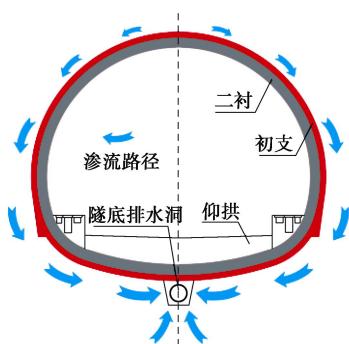


图 1 体外排水方式及其渗流路径

Fig. 1 External drainage method and its seepage path

1 考虑注浆圈作用的体外排水隧道渗流场理论模型

1.1 理论模型建立及基本假定

体外排水隧道渗流场理论模型以地下水水面为给水边界，同时对模型作以下假定：①围岩为各向同性均匀连续介质，且含水介质及流体不可压缩；②远场地下水补给充分，地下水位不随隧道排水而降低；③围岩渗流处于稳定层流状态，且服从 Darcy 定律；④隧道为地下水位下大埋深隧道；⑤体外排水隧道通过内壁水头为 0 的隧底圆形排水洞实现排水，不考虑圆形排水洞外的其他结构排水作用，即认为隧道主体结构不排水、不透水。

如图 2 所示，渗流场解析模型及其参数设定如下：地层地下水水面恒定，在地下水位以下 h_c 处存在一个圆形隧道，隧道结构外边界半径为 r_2 ，隧道以下 h_0 处存在一个圆形排水洞，排水洞半径为 r_1 ，隧道外围注有厚度为 r_3 的注浆圈，围岩渗透系数为 k_s ，注浆圈渗透系数为 k_c 。同时，为方便后文计算，增设参数及取值为： l_0 为排水洞圆心至注浆圈外的最短距离； l_1 为排水洞圆心至隧道外的最短距离， $l_1 = r_1 + h_0$ ， $l_2 = r_1 + h_0 + 2r_2$ ， $l_3 = r_1 + h_0 + 2r_2 + r_3$ ， $l_4 = r_1 + h_0 + 2r_2 + r_3 + h_c$ ， $n = k_s / k_c$ 。

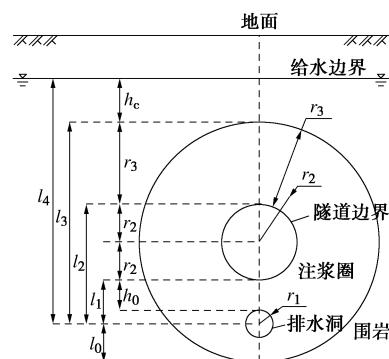


图 2 渗流解析模型及参数设定

Fig. 2 Analytical seepage model and setting of parameters

1.2 解析解推导

由围岩渗流服从 Darcy 定律，可得

$$Q = A_s(\rho) \cdot k \cdot \frac{d\Phi}{d\rho} , \quad (1)$$

式中， Q 为单位长度隧道涌水量， Φ 为总水头势函数， ρ 为点到排水洞圆心的距离， k 为渗透系数， $A_s(\rho)$ 为计算半径为 ρ 时单位长度（纵向）隧道渗流圆周线对应的渗流面积。

根据计算半径 ρ ，围岩渗流场可划分为 I 区、II 区、III 区、IV 区、V 区，如图 3 所示。需要说明的是，

根据 l_0 与 l_1 的量值关系, 分区形式分为“ $l_0 > l_1$ ”, “ $l_0 \leq l_1$ ”两种情况, 但由于体外排水方式特征参数推荐取值为“埋深 h_0 为0.2~0.5 m, 半径 r_1 为0.3~0.5 m”^[5], 而富水隧道注浆圈厚度通常为5~6 m^[15-16], 使得实际工程中参数关系基本为“ $l_0 > l_1$ ”情况, 故首先对“ $l_0 > l_1$ ”时的渗流场模型进行解析求解。

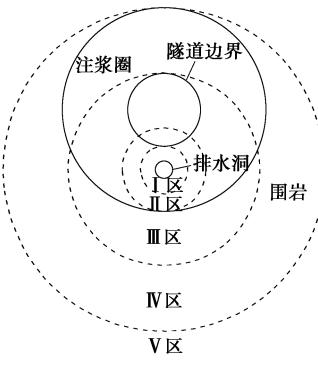
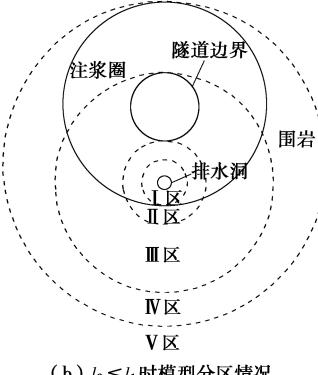
(a) $l_0 > l_1$ 时模型分区情况

图3 渗流计算模型分区

Fig. 3 Zoning of seepage model

由图3可知, 当渗流点位于I区、V区时, 渗流圆周线对应面积 $A_s(\rho)=2\pi\rho$, 而当渗流点位于II区、III区、IV区时, 渗流圆周线被隧道结构截断或分段为围岩渗流段和注浆圈渗流段。针对II区、III区、IV区渗流特征, 分别列出渗流点位于II区、III区、IV区时的局部参数图, 如图4所示。

利用余弦定理, 注浆圈渗流段、围岩渗流段渗流圆周线对应的实际面积 $A_{s1}(\rho)$ 、 $A_{s2}(\rho)$ 分别为

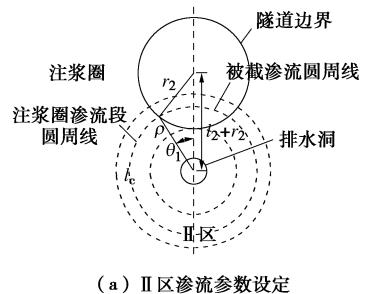
$$A_{s1}(\rho) = l_c \cdot 1 = \begin{cases} 2\rho \cdot [\pi - \theta_1(\rho)] & (\rho \in \text{II区}) \\ 2\rho \cdot [\theta_2(\rho) - \theta_1(\rho)] & (\rho \in \text{III区}) \\ 2\rho \cdot \theta_2(\rho) & (\rho \in \text{IV区}) \end{cases}, \quad (2)$$

$$A_{s2}(\rho) = l_s \cdot 1 = \begin{cases} 0 & (\rho \in \text{II区}) \\ 2\rho \cdot [\pi - \theta_2(\rho)] & (\rho \in \text{III区}) \\ 2\rho \cdot [\pi - \theta_2(\rho)] & (\rho \in \text{IV区}) \end{cases}, \quad (3)$$

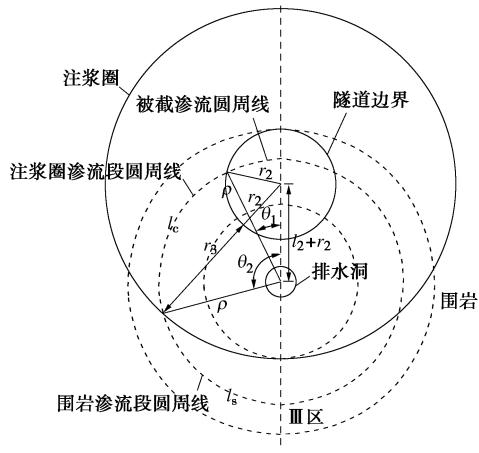
$$\theta_1(\rho) = \arccos \frac{\rho^2 + (l_2 + r_2)^2 - r_2^2}{2\rho(l_2 + r_2)}, \quad (4)$$

$$\theta_2(\rho) = \arccos \frac{\rho^2 + (l_2 + r_2)^2 - (r_2 + r_3)^2}{2\rho(l_2 + r_2)}, \quad (5)$$

式中, l_c 、 l_s 分别为注浆圈渗流段、围岩渗流段的渗流圆周线弧长, 1为单位长度。



(a) II区渗流参数设定



(b) III区渗流参数设定

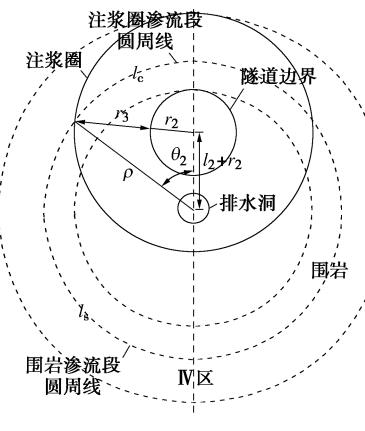


图4 各区模型计算参数

Fig. 4 Parameters for various zone models

在无限平面渗流场内, 按照I区—V区分段对式(1)进行积分。同时, 为利于模型求解, 补充假设“以排水洞为中心的无限平面单洞排水模型中, 距离中心的等距离处总水头势函数相等”, 解得

$$\Phi = \begin{cases} \frac{Q}{2\pi k_c} \ln \frac{\rho}{r_1} + c_1 & (\text{I 区}, l_1 > \rho \geq r_1), \\ \int_{l_1}^{\rho} \frac{Q}{[kA_s(r)]_{\text{II}}} dr + \frac{Q}{2\pi k_c} \ln \frac{l_1}{r_1} + c_1 & (\text{II 区}, l_0 > \rho \geq l_1), \\ \int_{l_0}^{\rho} \frac{Q}{[kA_s(r)]_{\text{III}}} dr + \int_{l_1}^{l_0} \frac{Q}{[kA_s(r)]_{\text{II}}} dr + \\ \frac{Q}{2\pi k_c} \ln \frac{l_1}{r_1} + c_1 & (\text{III 区}, l_2 > \rho \geq l_0), \\ \int_{l_2}^{\rho} \frac{Q}{[kA_s(r)]_{\text{IV}}} dr + \int_{l_0}^{l_2} \frac{Q}{[kA_s(r)]_{\text{III}}} dr + \\ \int_{l_1}^{l_0} \frac{Q}{[kA_s(r)]_{\text{II}}} dr + \frac{Q}{2\pi k_c} \ln \frac{l_1}{r_1} + c_1 & (\text{IV 区}, l_3 > \rho \geq l_2), \\ \frac{Q}{2\pi k_s} \ln \frac{\rho}{l_3} + \int_{l_2}^{l_3} \frac{Q}{[kA_s(r)]_{\text{IV}}} dr + \int_{l_0}^{l_2} \frac{Q}{[kA_s(r)]_{\text{III}}} dr + \\ \int_{l_1}^{l_0} \frac{Q}{[kA_s(r)]_{\text{II}}} dr + \frac{Q}{2\pi k_c} \ln \frac{l_1}{r_1} + c_1 & (\text{V 区}, \rho \geq l_3). \end{cases} \quad (6)$$

式中, $[kA_s(r)]_i$ 为在 i 区内 $kA_s(r)$ 项的对应取值, $i=\text{II}, \text{III}, \text{IV}$ 。

由于 II 区—IV 区内, 渗流圆周线被隧道结构截断或分段为围岩渗流段和注浆圈渗流段, 综合考虑上述影响, 采取分段叠加方式等效计算 $[kA_s(r)]_i$ 项, 即定义 $[kA_s(r)]_i = [k_c A_{s1}(r) + k_s A_{s2}(r)]_i$, 可得

$$[kA_s(r)]_{\text{II}} = 2rk_c[\pi - \theta_1(r)] = 2rk_s \left[\frac{\pi}{n} - \frac{1}{n}\theta_1(r) \right], \quad (7)$$

$$\begin{aligned} [kA_s(r)]_{\text{III}} &= 2rk_c[\theta_2(r) - \theta_1(r)] + 2rk_s[\pi - \theta_2(r)] \\ &= 2rk_s \left[\pi - \frac{1}{n}\theta_1(r) - \frac{n-1}{n}\theta_2(r) \right], \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} [kA_s(r)]_{\text{IV}} &= 2rk_c\theta_2(r) + 2rk_s[\pi - \theta_2(r)] \\ &= 2rk_s \left[\pi - \frac{n-1}{n}\theta_2(r) \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

如图 5 所示, 考虑到实际地下水渗流为半无限场, 通过镜像法原理^[17]与渗流力学水头势函数的叠加原理^[18], 可将半无限渗流场转化为相互对称且涌水量异号的包含注浆圈的实际、虚拟体外排水隧道无限渗流场的叠加, 即总水头势函数为

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2, \quad (10)$$

式中, Φ_1, Φ_2 分别为包含注浆圈的实际、虚拟体外排水隧道无限渗流场水头势函数。

同时, 规定任意点到实际、虚拟排水洞圆心的距离为 ρ_1, ρ_2 。

依据图 5 可知, 发生在实际半无限平面的渗流, 其属于虚拟体外排水隧道渗流场的 V 区 ($\rho_2 > l_3$), 而

对于实际体外排水隧道渗流场还应进行分区考虑, 因此在实际半无限平面内的总水头势函数 Φ 应是根据实际体外排水隧道渗流场分区的分段函数:

$$\Phi = \begin{cases} 2c_1 - \frac{Q}{2\pi k_s} \left\{ \ln \frac{\rho_2}{l_3} + \int_{l_2}^{l_3} \frac{\pi}{r \left[\pi - \frac{n-1}{n}\theta_2(r) \right]} dr + \right. \\ \left. \int_{l_0}^{l_2} \frac{\pi}{r \left[\pi - \frac{1}{n}\theta_1(r) - \frac{n-1}{n}\theta_2(r) \right]} dr + n \int_{l_1}^{l_0} \frac{\pi}{r [\pi - \theta_1(r)]} dr + \right. \\ \left. n \ln \frac{l_1}{\rho_1} \right\} & (\text{I 区}, l_1 > \rho_1 \geq r_1), \\ 2c_1 - \frac{Q}{2\pi k_s} \left\{ \ln \frac{\rho_2}{l_3} + \int_{l_2}^{l_3} \frac{\pi}{r \left[\pi - \frac{n-1}{n}\theta_2(r) \right]} dr + \right. \\ \left. \int_{l_0}^{l_2} \frac{\pi}{r \left[\pi - \frac{1}{n}\theta_1(r) - \frac{n-1}{n}\theta_2(r) \right]} dr + n \int_{\rho_1}^{l_0} \frac{\pi}{r [\pi - \theta_1(r)]} dr \right\} & (\text{II 区}, l_0 > \rho_1 \geq l_1), \\ 2c_1 - \frac{Q}{2\pi k_s} \ln \frac{\rho_2}{l_3} + \int_{l_2}^{l_3} \frac{\pi}{r \left[\pi - \frac{n-1}{n}\theta_2(r) \right]} dr + \\ \int_{\rho_1}^{l_2} \frac{\pi}{r \left[\pi - \frac{1}{n}\theta_1(r) - \frac{n-1}{n}\theta_2(r) \right]} dr & (\text{III 区}, l_2 > \rho_1 \geq l_0), \\ 2c_1 - \frac{Q}{2\pi k_s} \left\{ \ln \frac{\rho_2}{l_3} + \int_{\rho_1}^{l_3} \frac{\pi}{r \left[\pi - \frac{n-1}{n}\theta_2(r) \right]} dr \right\} & (\text{IV 区}, l_3 > \rho_1 \geq l_2), \\ 2c_1 - \frac{Q}{2\pi k_s} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} & (\text{V 区}, \rho_1 \geq l_3). \end{cases} \quad (11)$$

在地下水水面处(给水边界)有 $\rho_1 = \rho_2$ 且位于 V 区, 设水面处总水头 $\Phi = H$, 代入式 (11) 可得

$$2c_1 = H. \quad (12)$$

基于地下水水面下大理深隧道假定, 对于排水洞内壁面, 有 $\rho_1 = r_1$, $\rho_2 \approx 2l_4$, $H = l_4$, 联合式 (9), (12), “排水洞内壁水头 Φ 恒为 0”的假定, 可解得排水洞涌水量 Q 为

$$Q = \frac{2\pi k_s l_4}{\ln \frac{2l_4}{l_3} + \text{BB} + \text{CC} + n \left(\text{DD} + \ln \frac{l_1}{r_1} \right)}, \quad (13)$$

$$\text{BB} = \int_{l_2}^{l_3} \frac{\pi}{r \left[\pi - \frac{n-1}{n}\theta_2(r) \right]} dr, \quad (14)$$

$$\text{CC} = \int_{l_0}^{l_2} \frac{\pi}{r \left[\pi - \frac{1}{n}\theta_1(r) - \frac{n-1}{n}\theta_2(r) \right]} dr, \quad (15)$$

$$DD = \int_{l_1}^{l_0} \frac{\pi}{r(\pi - \theta_1(r))} dr \quad . \quad (16)$$

考虑上述定积分的复杂性, 求解具体问题时可采用 Guass 积分法等数值积分方法或借助计算机进行求解。

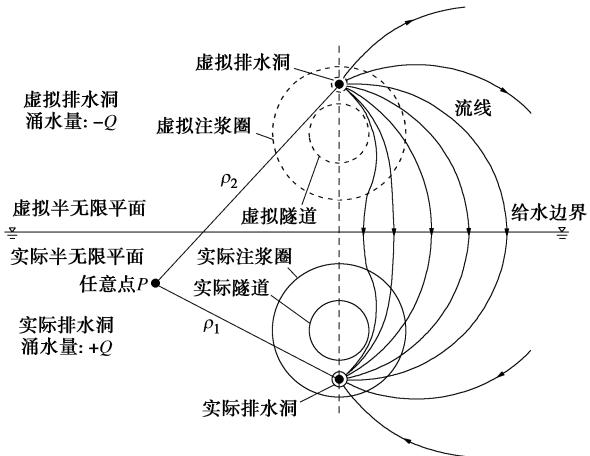


图 5 镜像法示意图

Fig. 5 Sketch of mirror image method

对于隧道结构外表面(依据位置分属 II 区、III 区), 取 $\rho_1 = \rho$, $\rho_2 \approx 2l_4 - l_1 - r_2$, 联合式 (11) ~ (16), 可解得隧道结构背后任意点处水压力 p_l 为

$$\begin{aligned} p_l &= (\Phi - y) \cdot \gamma_w = \\ &\gamma_w l_4 \left\{ 1 - \frac{\ln \frac{2l_4 - l_1 - r_2}{l_3} + BB + CC + n \int_{l_1}^{l_0} \frac{\pi}{r[\pi - \theta_1(r)]} dr - \frac{y}{l_4}}{\ln \frac{2l_4}{l_3} + BB + CC + n \left(DD + \ln \frac{l_1}{r_1} \right)} \right\} \quad (\text{II 区}, l_0 > \rho_1 \geq l_1), \\ &\gamma_w l_4 \left\{ 1 - \frac{\ln \frac{2l_4 - l_1 - r_2}{l_3} + BB + \int_{l_1}^{l_2} \frac{\pi}{r \left[\pi - \frac{1}{n} \theta_1(r) - \frac{n-1}{n} \theta_2(r) \right]} dr - \frac{y}{l_4}}{\ln \frac{2l_4}{l_3} + BB + CC + n \left(DD + \ln \frac{l_1}{r_1} \right)} \right\} \quad (\text{III 区}, l_2 > \rho_1 \geq l_0). \end{aligned} \quad (17)$$

式中 ρ 为隧道结构外表面待求水压点到排水洞圆心的距离; γ_w 为水的重度, 取 $\gamma_w = 9.8 \text{ kN/m}^3$; y 为位势水头, 且以排水洞圆心水平面为零势面。

以上解析结果均为 “ $l_0 > l_1$ ” 情况, 由于两种情况下解析推导过程大体类似, 故此处省略 “ $l_0 \leq l_1$ ” 情况推导过程, 得到 $l_0 \leq l_1$ 时排水洞涌水量 Q 为

$$Q = \frac{2\pi k_s l_4}{\ln \frac{2l_4}{l_3} + BB + CC_2 + n \left(DD_2 + \ln \frac{l_1}{r_1} \right)}, \quad (18)$$

$$CC_2 = \int_{l_1}^{l_2} \frac{\pi}{r \left[\pi - \frac{1}{n} \theta_1(r) - \frac{n-1}{n} \theta_2(r) \right]} dr, \quad (19)$$

$$DD_2 = \int_{l_0}^{l_1} \frac{\pi}{r \left[\pi - \frac{n-1}{n} \theta_2(r) \right]} dr. \quad (20)$$

1.3 解析结果退化验证

(1) 不考虑注浆圈的体外排水隧道退化验证

若不考虑注浆圈作用, 可视为注浆圈渗透系数 $k_c = k_s$ (即 $n=1$), 代入式 (13), (18) 均可得

$$Q = \frac{2\pi k_s l_4}{\ln \frac{2l_4}{l_2} + \int_{l_1}^{l_2} \frac{\pi}{r[\pi - \theta_1(r)]} dr + \ln \frac{l_1}{r_1}}. \quad (21)$$

式 (21) 隧道涌水量 Q 与文献[5]中不考虑注浆圈作用的半无限平面体外隧道涌水量计算公式相同。

(2) 毛洞排水隧道退化验证

若不考虑注浆作用且地层中仅存在排水洞时, 可视为注浆圈渗透系数 $k_c = k_s$ (即 $n=1$), 且 $\theta_1(r)=0$, 代入式 (11), (16) 均可得

$$Q = \frac{2\pi k_s l_4}{\ln(2l_4/r_1)}. \quad (22)$$

式 (22) 隧道涌水量 Q 与文献[16]中半无限平面单洞隧道涌水量简型计算公式相同。

综上所述, 文献[16]中仅考虑排水洞排水作用的涌水量解析解、文献[5]中不考虑注浆作用的体外排水隧道涌水量解析解均仅是本文涌水量计算公式的特解, 以此验证了本文解析解的正确性。

2 算例计算与注浆圈参数探讨

2.1 计算参数与数值验证模型设置

取隧道尺寸参数 $r_2 = 6.5 \text{ m}$, 典型排水特征参数 $r_1 = 0.4 \text{ m}$, $h_0 = 0.5 \text{ m}$, 地层参数 $k_s = 10^{-6} \text{ m/s}$, $h_c = 93.5 \text{ m}$ (地下水位至隧道圆心为 100 m), 并根据后续计算工况选定注浆圈参数, 采用 FLAC^{3D} 建立仿真模型^[19], 并设置边界条件如图 6 所示。需要说明的是, 在 FLAC^{3D} 模型中对于地下水位处施加了固定孔压的命令, 保证地下水位不受排水作用而降低。

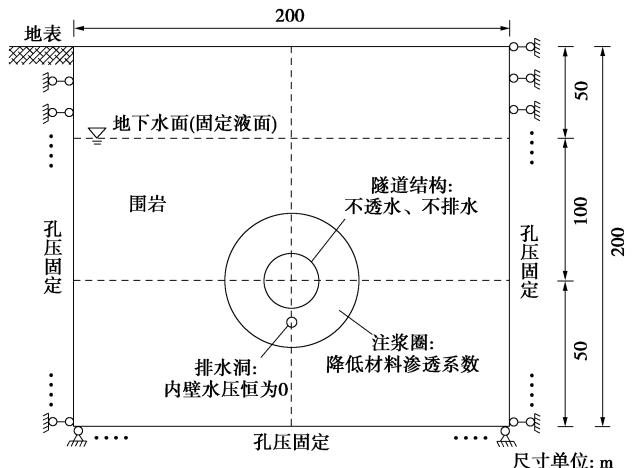


图 6 数值模型基本尺寸及边界条件

Fig. 6 Dimensions and boundary conditions of numerical models
为探讨围岩注浆作用对体外排水隧道渗流场影响

规律,选取注浆圈厚度、注浆圈渗透系数两个影响因素,结合类似富水隧道注浆圈参数取值^[15-16,20],设置对应计算工况,如表1所示。

表1 分析计算工况

Table 1 Analytical and computational working conditions

工况编号	注浆圈厚度/m	注浆圈渗透系数/(m·s ⁻¹)	注浆前后渗透系数比
1 (未注浆)	0	1×10^{-6}	1
2-1		1×10^{-7}	10
2-2	4	5×10^{-8}	20
2-3		2×10^{-8}	50
2-4		1×10^{-8}	100
3-1		1×10^{-7}	10
3-2	5	5×10^{-8}	20
3-3		2×10^{-8}	50
3-4		1×10^{-8}	100
4-1		1×10^{-7}	10
4-2	6	5×10^{-8}	20
4-3		2×10^{-8}	50
4-4		1×10^{-8}	100

2.2 隧道涌水量的验证与探讨

依据式(11)涌水量计算公式以及数值分析模型,对表1中各工况进行计算,得到隧道涌水量解析解与数值解对比情况如图7所示。由图7可知:

(1)从两解法对比来看,在考虑注浆作用下解析模型所得涌水量稍大于数值法,解析模型对于涌水量存在一定高估。但是总的来说,在不同工况下,涌水量解析结果与数值仿真结果相差较小,最大相差率为10.61%,且随注浆圈厚度的增加,两者结果差异逐渐减小。由此可见,上述两种解法结果互为验证,证明了本文解析理论模型的正确性。

(2)注浆前后渗透系数比值从1增至10,涌水量从 $7.95 \text{ m}^3/\text{d}$ 分别降至 $1.85, 1.65, 1.53 \text{ m}^3/\text{d}$ (注浆圈厚度4, 5, 6 m),涌水量降幅分别为76.7%, 79.2%, 80.7%,降幅明显;随着渗透系数比值的进一步增加(从10增至50),涌水量降幅出现明显转折,下降速率逐步减小,其中比值为20时,涌水量降幅为87.1%、88.7%、89.6%(注浆圈厚度4, 5, 6 m),涌水量已能得到较好控制;当比值超过50后,渗透性变化对涌水量影响已不明显。

(3)注浆圈厚度从4 m变化至6 m,当渗透比为10, 20, 50, 100时,涌水量降幅增长分别为4.02%, 2.54%, 1.21%, 0.64%,可见随着注浆圈厚度的增加,隧道涌水量出现了一定降低,但降幅并不显著。

(4)汇总各工况下涌水量结果,当注浆圈厚度取为工程适宜值时(4~6 m),注浆圈渗透系数对涌水量的影响明显大于注浆圈厚度,因此需要控制体外排水隧道涌水量时,应主要从注浆圈渗透系数入手。

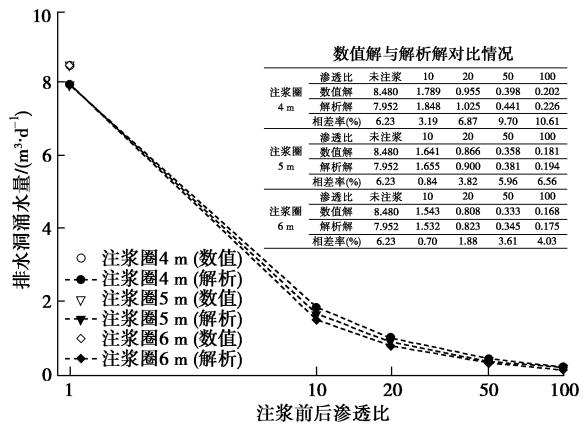


图7 隧道涌水量验证情况

Fig. 7 Verification of tunnel water inflow

2.3 隧道结构外水压力验证与探讨

依据式(17)结构外水压力计算公式以及数值分析模型,对表1中各工况进行计算,得到隧道结构外水压力解析解与数值解对比情况如图8~10所示。同时,为综合考虑全环水压力影响,将隧道结构分为四等分(拱顶、拱脚、边墙、底部),并通过求取各部分内多点均值(本算例取为20个点的均值)的方法,实现两种解法的结果对比。由图图8~10可知:

(1)从两解法对比来看,在考虑注浆作用下解析模型一定程度上高估了底部水压力的量值,而低估了边墙、拱脚、拱顶处的外水压力。但是总的来说,在不同工况下,本文结构外水压力解析结果与数值仿真结果相差较小,最大相差率为9.14%,且随注浆圈厚度的增加,两者结果差异逐渐减小。由此可见,本文解析理论模型与数值结果互为验证,能较好地反映隧道结构外水压力分布特征。

(2)由于图8~10的外水压力变化规律类似,以图9为例进行分析:①随注浆圈渗透系数比值从1变化至20,各位置处结构外水压力增长明显,当比值为20时,拱顶、拱脚、边墙、底部处结构外水压力从未注浆时的310.39, 577.96, 669.40, 684.01 kPa分别增至605.72, 915.66, 894.59, 869.59 kPa,增率分别为95.1%, 58.4%, 33.6%, 27.1%;而随着渗透系数比值的进一步增长(超过20后),结构外水压力增幅逐步减小,注浆圈渗透性变化对结构外水压力影响已不明显。②随注浆圈渗透系数比值的增长,全环结构外水压力分布形式发生了变化:未注浆时呈现“底部最小,边墙次之,拱脚再次,拱顶最大”的水压力分布特征,当考虑注浆作用后,转变为“底部最小,拱顶次之,拱脚再次,边墙最大”的分布特征,且上述规律随渗透性比值的增大而愈发明显。③结合图7涌水量分析结果,分析上述水压力变化规律的原因:由于体外排水方式下隧道通过隧底排水洞实现排水,当隧道未注浆时,排水洞排水量较大,泄水降压能力较强,对于

隧道全环结构外水压力均能起到较好的控制作用, 且随着到排水洞的距离越近其控制效果越强; 当隧道注浆后, 随着渗透系数比值的提升, 排水洞涌水量迅速降低, 结构外水压力控制效果逐步减弱, 由于底部部位距离排水洞较近, 其受到的水压控制效果削弱作用最为明显, 但仍能保证尚可的降压效果, 而对于距离排水洞较远的边墙、拱脚、拱顶部位, 其渗流场逐步趋于全堵隧道渗流场, 最终呈现受位势水头主导的水压力分布特征。

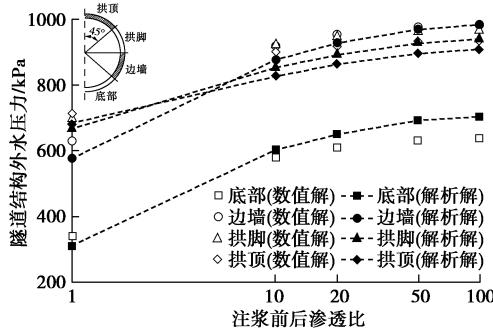


图 8 注浆圈 4 m 时隧道结构外水压力情况

Fig. 8 Water pressures outside tunnel (grouting ring of 4 m)

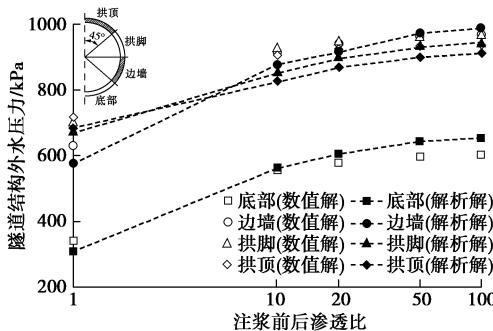


图 9 注浆圈 5 m 时隧道结构外水压力情况

Fig. 9 Water pressures outside tunnel (grouting ring of 5 m)

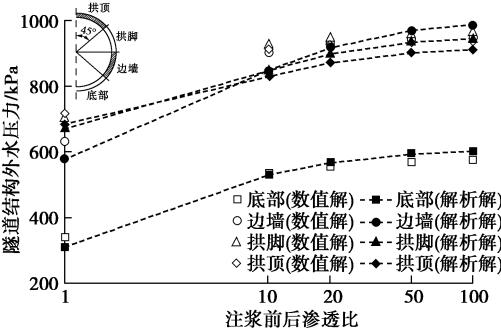


图 10 注浆圈 6 m 时隧道结构外水压力情况

Fig. 10 Water pressures outside tunnel (grouting ring of 6 m)

进一步汇总各工况下典型位置处(边墙、底部)的结构外水压力解析结果(图 11)。

由图 11 可以看出: ①随着注浆圈厚度的增加(从 4 m 到 6 m), 当注浆渗透比为 10, 20, 50, 100 时, 厚度变化带来的边墙部位结构外水压力降幅(相对于未注浆时)分别为 5.55%, 1.73%, 0.52%, 0.17%,

而底部部位降幅分别为 23.8%, 27.1%, 31.6%, 33.2%。由此可见注浆圈厚度的增加对不同部位结构外水压力的控制作用存在明显差异, 底部部位控制效果最为显著。②汇总各工况下涌水量结果, 当注浆圈厚度取为工程适宜值时(4~6 m), 注浆圈渗透系数对结构外水压力的影响大于注浆圈厚度, 但注浆圈厚度对隧底水压力仍存在一定影响, 因此就体外排水隧道水压力控制效果而言, 需要综合考虑注浆圈渗透系数与注浆圈厚度两因素的共同影响。

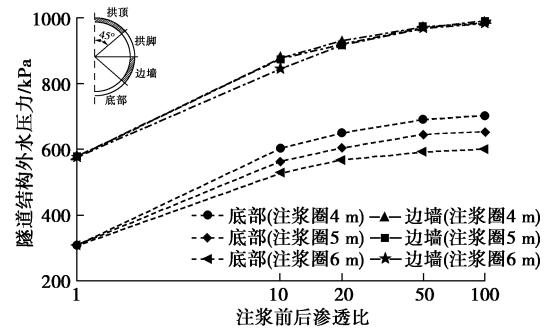


图 11 各工况下典型位置外水压力变化情况

Fig. 11 Variation of water pressure in typical location of tunnel

此外, 综合前文有关涌水量与结构外水压力的计算分析, 可以认为: 因受模型假设影响, 本文所得解析模型对排水洞涌水量、底部水压力存在一定高估, 而对除底部外的其他部位外水压力稍有低估; 但是, 两解法所得结果差异属于工程应用允许范围, 涌水量与结构外水压力的最大相差率仅为 10.61%, 9.14%; 因此, 在进行实际工程应用时, 本文所得解析模型可作为注浆设计与施工的理论依据。

2.4 合理注浆圈参数的探讨

为获取注浆圈参数综合影响规律及合理取值, 汇总各注浆圈参数(厚度、渗透系数)条件下隧道涌水量、底部水压力变化情况(图 12)。

由图 12 可以看出: ①从涌水量控制的角度来看, 注浆圈渗透比值影响较为明显, 应着重考虑渗透比值合理取值: 当比值为 20 时, 各工况涌水量降幅均已超过 85%, 隧道涌水量已能得到较好控制, 在此基础上进一步降低注浆圈渗透系数, 对降低涌水量的效果并不显著, 因此注浆前后渗透比取为 1/20 左右是比较合理的。此外, 对于注浆圈厚度而言, 较大的厚度值能在一定程度上加强涌水量的控制效果, 因此注浆圈厚度可在条件允许范围内选取较大值。②从水压力控制角度来看, 由于体外排水隧道不同于常规排水隧道, 隧道内未设排导措施, 一味强调堵水会使得排水洞排水量的大幅降低, 进而导致水压力值的明显增长, 不利于结构水压力的控制, 因此为保障良好的隧底降压效果, 体外排水隧道应选取相对较低的渗透系数比值,

结合具体数值,建议渗透比值不大于20;而对于注浆圈厚度,计算结果表明较大的厚度值能加强底部结构外水压力的控制效果,因此建议选取较大的注浆圈厚度值。③综合隧道涌水量与结构外水压力情况,笔者认为“注浆圈渗透系数比值取为1/10~1/20,注浆圈厚度取为6 m”是比较合理的,在上述条件下隧道每延米排水量仅0.823~1.53 m^{3/d},涌水量降幅可达80.7%~89.6%,满足基于生态环境的水排放要求^[21],同时底部结构水压力降幅达46.6%以上(较于初始水头),有效降低底部结构外水压力,对因隧底水压力过大导致的病害的发生可以起到有力防控。

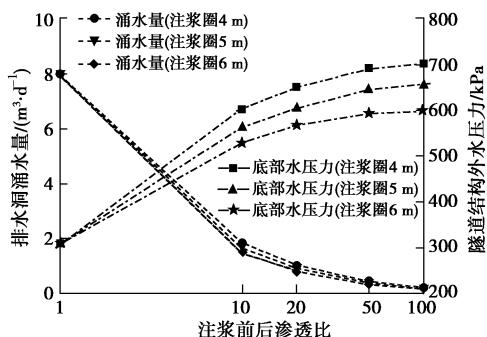


图12 各工况下隧道渗流特征参数情况汇总

Fig. 12 Summary of seepage characteristic parameters under different conditions

3 结论与展望

(1) 基于镜像法与渗流力学理论,提出了考虑注浆圈作用的体外排水隧道渗流场理论模型,推导了半无限场考虑注浆圈作用的体外排水隧道涌水量及结构外水压力解析解,并通过解析退化、数值仿真两种方法共同验证了公式的正确性。公式的提出对于完善体外排水隧道渗流场理论体系具有显著的理论意义。

(2) 基于本文理论模型及解析公式,探讨了注浆圈典型参数(注浆圈渗透系数、注浆圈厚度)对体外排水方式下隧道涌水量、结构水压力的影响规律。分析结果表明,注浆圈渗透系数对体外排水隧道渗流场存在显著影响,随注浆前后渗透比值的增大,涌水量将得到明显控制,但同时亦会引起结构外水压力的一定增长;而注浆圈厚度影响相对较小,其影响主要体现于注浆圈厚度越大时,能够一定程度上加强对底部外水压力的控制效果。

(3) 通过对隧道涌水量、结构外水压力的综合分析,提出了“注浆圈渗透系数比值取为1/10~1/20,注浆圈厚度取为6 m”的合理注浆圈参数,在此参数下隧道涌水量得到明显控制,满足基于生态环境的水排放要求,同时亦能够保证对于隧底水压力的控制。

鉴于体外排水方式的逐步推广应用,该参数的提出对于优化体外排水隧道设计并进一步指导施工实践具有现实意义。

(4) 同时,本文主要采用理论解析、数值仿真两种分析手段,对于如何将研究结果更好地联系工程实际,并采用实测数据进一步地验证研究结果,以及通过隧道缩尺模型试验方法获得更具参考性的合理注浆参数将作为笔者后续研究的主要方向。

参考文献:

- [1] 代鸿明. 运营铁路隧道水害引发的仰拱起鼓及衬砌开裂防治技术研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(3): 202~206. (DAI Hong-ming. Prevention and treatment of invert heaving and lining cracking induced by water disasters in operating railway tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(3): 202~206. (in Chinese))
- [2] 郑波, 吴剑, 吴晓龙. 水压力作用下隧道底部结构裂损机理及其防治[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(1): 91~96. (ZHENG Bo, WU Jian, WU Xiao-long. Research on the cracking mechanism and treatment measures of tunnel invert filling structure under the action of water pressure[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(1): 91~96. (in Chinese))
- [3] 杜明庆, 张顶立, 张素磊, 等. 高速铁路隧道仰拱结构受力现场实测分析[J]. 中国铁道科学, 2017(5): 53~61. (DU Ming-qing, ZHANG Ding-li, ZHANG Su-lei, et al. Field test and analysis of mechanical characteristics of tunnel invert structure for high-speed railway[J]. China Railway Science, 2017(5): 53~61. (in Chinese))
- [4] 肖广智, 薛斌. 向莆铁路隧道道床积水、轨道隆起病害整治技术[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(3): 200~204. (XIAO Guang-zhi, XUE Bin. Treatment of bed waterlogging and track heaving in tunnels on the Xiangtang-Putian Railway[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(3): 200~204. (in Chinese))
- [5] 李林毅, 阳军生, 麻彦娜, 等. 体外排水方式在隧道工程中的研究与应用[J]. 铁道学报.(已录用). (LI Lin-yi, YANG Jun-sheng, MA Yan-na, et al. Research and application of extracorporeal drainage method in tunnel project[J]. Journal of the China Railway Society. (accepted) (in Chinese))
- [6] 李林毅, 阳军生, 张峰, 等. 深埋式中心水沟排水隧道渗流场解析研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(11): 2050~2057. (LI Lin-yi, YANG Jun-sheng, ZHANG Zheng, et al. Analytical study of seepage field of deep-buried central ditch drainage tunnel[J]. Journal of Zhejiang University

- (Engineering Science), 2018, **52**(11): 2050 - 2057. (in Chinese))
- [7] NAM S W, BOBET A. Liner stresses in deep tunnels below the water table[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, **21**(6): 626 - 635.
- [8] ARJNOI P, JEONG J H, KIM C Y, et al. Effect of drainage conditions on porewater pressure distributions and lining stresses in drained tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, **24**(4): 376 - 389.
- [9] 樊祥喜, 阳军生, 麻彦娜, 等. 不同防排水方式下富水隧道受列车振动荷载动力影响分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, **15**(11): 2901 - 2908. (FAN Xiang-xi, YANG Jun-sheng, MA Yan-na, et al. Analysis of dynamic influence of train vibration load on water rich tunnel under different water proof and drainage ways[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, **15**(11): 2901 - 2908. (in Chinese))
- [10] 李洪涛. 排水模式对高速铁路隧道仰拱变形影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018. (LI Hong-tao. Study on the Influence of Drainage Mode on the Deformation of Inverted Arch of High Speed Railway Tunnels[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese))
- [11] LI P F, LIU H L, ZHAO Y, et al. A bottom-to-up drainage and water pressure reduction system for railway tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **81**: 296 - 305.
- [12] 姚希磊. 隧道深埋式中心水沟施工技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2017(6): 97 - 99. (YAO Xi-lei. Research on the construction technology for deep-buried ditch in tunnel[J]. Railway Construction Technology, 2017(6): 97 - 99. (in Chinese))
- [13] 赵乐. 基于堵水限排高压富水区山岭隧道防排水技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017. (ZHAO Le. Study on Waterproof and Drainage Technology of Mountain Tunnel in High Pressure and Rich Water Area Based on Blocking Groundwater and Limiting Discharge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese))
- [14] 黄锋, 魏源泉, 蒋树屏, 等. 高压富水区限排隧道围岩与衬砌水压力场研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, **13**(1): 146 - 152. (HUANG Feng, WEI Yuan-quan, JIANG Shu-ping, et al. Water pressure field study of surrounding rock and lining of controlling emission tunnel in high-pressure and water-rich zone[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, **13**(1): 146 - 152. (in Chinese))
- [15] 马青, 罗禄森, 阳军生, 等. 岩溶富水区深埋水沟排水隧道注浆圈参数研究[J]. 隧道建设, 2018, **38**(11): 1793 - 1799. (MA Qing, LUO Lu-sen, YANG Jun-sheng, et al. Study of parameters of grouting circle for deep-ditch drainage tunnel in water-rich karst area[J]. Tunnel Construction, 2018, **38**(11): 1793 - 1799. (in Chinese))
- [16] 邹育麟, 何川, 胡雄玉, 等. 富水区隧道合理防排水型式及注浆加固参数研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, **34**(4): 485 - 491. (ZOU Yu-lin, HE Chuan, HU Xiong-yu, et al. Study on reasonable waterproof and drainage pattern and grouting parameter of rich water tunnel[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, **34**(4): 485 - 491. (in Chinese))
- [17] 应宏伟, 朱成伟, 龚晓南. 考虑注浆圈作用下隧道渗流场解析解[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, **50**(6): 1018 - 1023. (YING Hong-wei, ZHU Cheng-wei, GONG Xiao-nan. Analytic solution on seepage field of underwater tunnel considering grouting circle[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, **50**(6): 1018 - 1023. (in Chinese))
- [18] 翟云芳. 渗流力学[M]. 北京: 北京石油工业出版社, 2009: 25 - 27. (ZHAI Yun-fang. Seepage Mechanics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 25 - 27. (in Chinese))
- [19] Itasca. FLAC^{3D} version 5.0 User's Manual[M]. Minnesota: Minneapolis ICG, 2012.
- [20] 王一鸣. 高水压岩溶隧道衬砌结构受力特征和防排水设计研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014. (WANG Yi-ming. Research on Mechanical Characters and Drainage of Karst Tunnel with High Water Pressure[D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese))
- [21] 程盼. 基于生态平衡的隧道地下水渗控方法及限排水标准研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014. (CHENG Pan. Groundwater Seepage and Control Method for Tunnel and Limit Drainage Criterion Based on Ecological Balance[D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese))