

考虑注浆圈与复合衬砌时体外排水方式设计

傅鹤林^{1,2}, 安鹏涛^{1,2†}, 成国文³, 王仁健³, 李鲇^{1,2}, 余小辉³

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075;

2. 高速铁路建造技术国家工程实验室(中南大学), 湖南 长沙 410075;

3. 广东省南粤交通投资建设有限公司, 广东 广州 510101)

摘要:基于反映法、叠加原理及渗流力学理论构建了是否含注浆圈两种体外排水简化计算模型, 推导了隧道与体外排水洞涌水量的计算公式、隧道二次衬砌外水压力表达式, 通过解析退化验证了理论模型及解析公式的正确性与适用性, 根据推导公式进行了参数敏感性分析, 最后通过数值模拟进一步进行了检验. 结果表明: 体外排水洞与隧道涌水量均随注浆圈渗透系数的下降而非线性降低, 隧道二次衬砌外水压力随注浆圈渗透系数的下降而非线性增大, 但其临界值小于常规排水方式; 增加初期支护的厚度可达到降低二次衬砌外水压力及隧道涌水量的目的; 围岩与注浆圈、注浆圈与初期支护渗透系数合理比值分别为 15 与 100, 同时须严格控制二次衬砌渗透系数; 排水洞洞径对体外排水洞涌水量影响显著, 为保护地下水资源, 体外排水洞洞径推荐为 0.2 m.

关键词:体外排水方式; 渗流力学; 涌水量预测; 水压力; 注浆圈

中图分类号:U459.2

文献标志码:A

Design of External Drainage Mode Considering Grouting Circle and Composite Lining

FU Helin^{1,2}, AN Pengtao^{1,2†}, CHENG Guowen³, WANG Renjian³, LI Jie^{1,2}, YU Xiaohui³

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. National Engineering Laboratory for High Speed Railway Construction(Central South University), Changsha 410075, China;

3. Guangdong Nanyue Transportation Investment & Construction Co Ltd, Guangzhou 510101, China)

Abstract: Based on the reflection method, superposition principle and the theory of seepage mechanics, two simplified calculation models for external drainage with or without grouting ring are constructed. The calculation formulas for the inflow of the tunnel and the external drainage tunnel, and the external water pressure expression of the secondary lining of the tunnel are deduced. Analytical degradation verifies the correctness and applicability of the theoretical model and analytical formula. The parameter sensitivity analysis is carried out according to the deduced formula, and finally it is further tested through numerical simulation. The results show that the water inflow of the external drainage tunnel and the tunnel decreases nonlinearly with the decrease of the permeability coefficient of the grout-

* 收稿日期:2020-11-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978668), National Natural Science Foundation of China(51978668); 广东省交通运输厅资助课题(DFH(201904)YS1-001), Program of the Guangdong Provincial Department of Transportation (DFH(201904)YS1-001)

作者简介:傅鹤林(1965—), 男, 江西高安人, 中南大学教授, 博士生导师

† 通信联系人, E-mail: apengtao@csu.edu.cn

ing circle, and the external water pressure of the secondary lining of the tunnel increases nonlinearly with the decrease of the permeability coefficient of the grouting circle, but the critical value is less than conventional drainage method; increasing the thickness of the initial support can achieve the purpose of reducing the external water pressure of the secondary lining and the amount of water inflow of the tunnel; the reasonable ratio of the permeability coefficient for the surrounding rock to the grouting circle, as well as the grouting circle to the initial support, is 15 and 100, respectively, and at the same time, the permeability coefficient of the secondary lining must be strictly controlled; the diameter of the drainage tunnel has a significant impact on the inflow of the external drainage tunnel. To protect the ground water resources, the external drainage tunnel diameter is recommended to be 0.2 m.

Key words: external drainage; seepage mechanics; prediction of water inflow; water pressure; grouting circle

“以堵为主、防排结合”的控制型防排水原则是目前富水区隧道涌水处置的首选准则^[1-6]。但运营情况表明^[7-11],排水堵塞时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,合理选择隧道防排水方式是有效解决措施之一^[12],其中文献[13]提出了一种排导能力强、隧底降压效果优的体外排水方式,此种排水方式在隧道正下方设置排水洞,将隧道支护结构外的渗水直接渗流至排水洞,降低了隧道拱底的渗水压力。

依托地下水经环、纵向排水管与横向排水管流入侧沟,再由侧沟与中心水沟共同排出隧道的常规排水方式,文献[14-22]针对注浆圈参数设计及涌水量计算问题进行了深入研究,分析了注浆圈的堵水作用机制,为注浆圈的设计提供了理论基础。针对体外排水方式,文献[23-24]利用数值分析软件对渗流场与衬砌水压力分布规律进行了探讨;文献[25-26]以镜像法和渗流力学理论为基础,推导了半无限平面内深埋式中心水沟排水时隧道渗流场及涌水量的解析解。

综上所述,国内外学者对常规排水方式下隧道涌水量及渗流场的分析较为广泛,而对体外排水方式下隧道及体外排水洞涌水量的理论分析较少,同时考虑注浆圈与复合衬砌时更鲜有涉及,但现有研究方法思路仍值得借鉴。为此,构建是否含注浆圈两种体外排水简化计算模型,以反映法、叠加原理及渗流力学理论为基础推导隧道与体外排水洞涌水量的计算公式、隧道二次衬砌外水压力表达式,并进行退化验证,同时对特征参数进行敏感性分析,并通过数值模拟进行验证,以求对体外排水方式下注浆

圈及支护结构的设计进行有意义的尝试与补充。

1 无注浆时渗流场解析解

1.1 计算模型及基本假定

建立半无限平面内隧道与体外排水洞渗流模型,如图1所示。

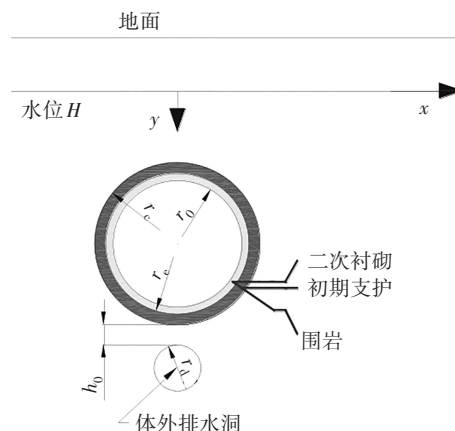


图1 不含注浆圈时隧道与体外排水洞渗流模型

Fig.1 Seepage model of tunnel and external drainage tunnel without grouting ring

图1中, r_0 、 r_e 、 r_c 分别为二次衬砌内径、二次衬砌外径及初期支护外径;体外排水洞半径为 r_d ;体外排水洞与隧道初期支护外径最小距离为 h_0 ;隧道圆心至给水边界竖直距离为 d ;地下水水位为 H 。

考虑实际工况及方便问题解答,作如下假定:

- 1) 围岩与各结构均质且各向同性;
- 2) 隧道与体外排水洞均处于稳定渗流状态;
- 3) 渗流服从达西定律;
- 4) 隧道为大埋深。

1.2 模型求解

利用反映法,将半无限双孔隧洞渗流场转化为无限渗流场下4个单孔隧洞的叠加问题,如图2所示.

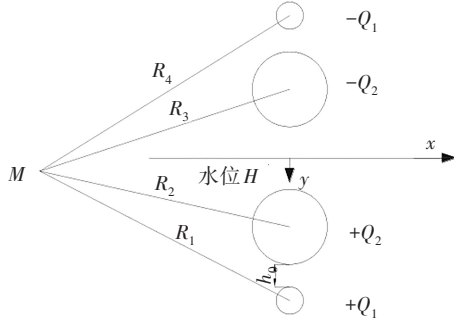


图2 不含注浆圈时隧道与体外排水洞渗流模型镜像图

Fig.2 Mirror image of seepage model of tunnel and external drainage tunnel without grouting ring

点 $M(x, y)$ 为渗流场中任意点; R_1, R_2, R_3, R_4 分别为点 M 至各孔洞中心点的距离; Q_1 与 Q_2 分别为体外排水洞与隧道涌水量.

根据假定,水流速度与水力坡度满足达西定律,表达式为:

$$v = ki \quad (1)$$

式中: v 为渗流速度; k 为介质渗透系数; i 为水力坡度.

根据渗流力学原理,无限平面内单孔隧洞稳定径向渗流连续性方程极坐标表达式为:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} \right) = 0 \quad (2)$$

式中: ρ 为计算点至孔洞中心的距离; Φ 为无限平面内计算点的渗流场水头势函数.

假定某断面的流量为 Q ,则:

$$Q = 2\pi\rho k \frac{d\Phi}{d\rho} \quad (3)$$

对式(3)积分得:

$$\Phi = \frac{Q}{2\pi k} \ln \rho + c \quad (4)$$

式中: c 为待定常数,其值由边界条件确定.

当无限平面内4个孔洞均达到稳定渗流时,平面内任意一点水头势函数根据势的叠加原理确定,计算式为:

$$\Phi = \sum_{i=1}^4 \frac{Q_i}{2\pi k} \ln \rho_i + c_1 \quad (5)$$

式中: Q_i 为第 i 个孔洞的涌水量; c_1 为待定常数.

假定围岩渗透系数为 k_r ,当 M 点位于围岩范围,则水头势函数表达式为:

$$\Phi = \frac{Q_1}{2\pi k_r} \ln \frac{R_1}{R_4} + \frac{Q_2}{2\pi k_r} \ln \frac{R_2}{R_3} + c_1 \quad (6)$$

式中:

$$\begin{aligned} R_1 &= \sqrt{x^2 + (y - d - r_c - h_0 - r_d)^2} \\ R_2 &= \sqrt{x^2 + (y - d)^2} \\ R_3 &= \sqrt{x^2 + (y + d)^2} \\ R_4 &= \sqrt{x^2 + (y + d + r_c + h_0 + r_d)^2} \end{aligned} \quad (7)$$

由给水边界条件 $y=0$ 时, $\Phi = H$ 可知:

$$\Phi_M = \frac{Q_1}{2\pi k_r} \ln \frac{R_1}{R_4} + \frac{Q_2}{2\pi k_r} \ln \frac{R_2}{R_3} + H \quad (8)$$

由于假定为深埋,忽略隧道复合衬砌外缘各位置渗流的离散型,对隧道结构有:

$$\begin{aligned} Q_c &= 2\pi k_c \frac{H_c - H_e}{\ln \frac{r_c}{r_e}} \\ Q_e &= 2\pi k_e \frac{H_e}{\ln \frac{r_e}{r_0}} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: Q_c, Q_e 分别为实际隧道中初期支护外缘、初期支护内缘涌水量; H_c, H_e 分别为实际隧道初期支护外缘、初期支护内缘的水头高度; k_c, k_e 分别为初期支护及二次衬砌的渗透系数.

据流体质量守恒定律

$$Q_c = Q_e = Q_2 \quad (10)$$

以隧道轴线位置为参考面,对实际隧道初期支护外缘及体外排水洞边缘有:

$$H_c = \frac{Q_1}{2\pi k_r} \ln \frac{h_0 + r_d + r_c}{h_0 + r_d + r_c + 2d} + \frac{Q_2}{2\pi k_r} \ln \frac{r_c}{2d} + H \quad (11)$$

$$\begin{aligned} -h_0 - r_d - r_c &= \frac{Q_1}{2\pi k_r} \ln \frac{r_d}{2(h_0 + r_d + r_c + d)} + \\ &\quad \frac{Q_2}{2\pi k_r} \ln \frac{h_0 + r_d + r_c}{h_0 + r_d + r_c + 2d} + H \end{aligned} \quad (12)$$

联立式(9)~(12),得:

$$Q_1 = - \frac{2k_r \pi \left((H + B)A + Hk_c k_e \ln \frac{B}{2d + B} \right)}{k_c k_e \left(\ln \frac{B}{2d + B} \right)^2 + A \ln \frac{r_d}{2(d + B)}} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} Q_2 &= 2k_c k_e k_r \pi \frac{H \ln \frac{r_d}{2(d + B)} - (H + B) \ln \frac{B}{2d + B}}{k_c k_e \left(\ln \frac{B}{2d + B} \right)^2 + A \ln \frac{r_d}{2(d + B)}} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $A = k_c k_r \ln \frac{r_c}{r_0} + k_e k_r \ln \frac{r_c}{r_e} - k_c k_e \ln \frac{r_c}{2d}$; $B = h_0 + r_d + r_d$.

1.3 解析结果验证

1) h_0 无穷大

若体外排水洞与隧道初期支护外径最小距离 h_0 趋于无穷大, 则有

$$Q_1 \Big|_{h_0 \rightarrow \infty} = -\frac{2k_r \pi (H + B) A}{A \ln \frac{r_d}{2(d + B)}} = \frac{2k_r \pi (H + h_0 + r_c + r_d)}{\ln \frac{2(d + h_0 + r_c + r_d)}{r_d}} \quad (15)$$

$$Q_2 \Big|_{h_0 \rightarrow \infty} = \frac{2k_r \pi H}{\frac{k_r}{k_e} \ln \frac{r_e}{r_0} + \frac{k_r}{k_c} \ln \frac{r_c}{r_e} - \ln \frac{r_c}{2d}} \quad (16)$$

此时式(13)退化为半无限平面内无支护隧道的最大涌水量计算公式; 式(14)退化为半无限平面内设置复合衬砌时隧道的涌水量计算公式^[27].

2) r_d 无穷小

若体外排水洞洞径 r_d 无穷小, 则有:

$$Q_1 \Big|_{r_d \rightarrow 0} = \frac{2k_r \pi \left((H + h_0 + r_c) A + H k_c k_e \ln \frac{h_0 + r_c}{2d + h_0 + r_c} \right)}{A \ln \frac{2(d + h_0 + r_c + r_d)}{r_d} - k_c k_e \left(\ln \frac{h_0 + r_c}{2d + h_0 + r_c} \right)^2} = 0 \quad (17)$$

$$Q_2 \Big|_{r_d \rightarrow 0} = 2k_c k_e k_r \pi \frac{H \ln \frac{r_d}{2B}}{A \ln \frac{r_d}{2B} - \frac{k_r}{k_e} \ln \frac{r_e}{r_0} + \frac{k_r}{k_c} \ln \frac{r_c}{r_e} - \ln \frac{r_c}{2d}} = \frac{2k_r \pi H}{A \ln \frac{r_d}{2B} - \frac{k_r}{k_e} \ln \frac{r_e}{r_0} + \frac{k_r}{k_c} \ln \frac{r_c}{r_e} - \ln \frac{r_c}{2d}} \quad (18)$$

此时式(13)趋近于0, 与事实符合; 式(14)退化为半无限平面内设置复合衬砌时隧道的涌水量计算公式.

由式(15)~(18)可知, 式(13)(14)均可退化为半无限平面内单孔洞涌水量计算公式, 而半无限平面内单孔洞涌水量计算公式为本文所得体外排水洞稳定渗流的特例, 验证了本文计算公式的正确性.

联立式(9)(10)与(14), 计算隧道二次衬砌外水压力表达式为:

$$P_c = \gamma_w \ln \frac{r_c}{r_0} k_c k_r \frac{H \ln \frac{r_d}{2(d + B)} - (H + B) \ln \frac{B}{2d + B}}{k_c k_e \left(\ln \frac{B}{2d + B} \right)^2 + A \ln \frac{r_d}{2(d + B)}} \quad (19)$$

式中: γ_w 为水的重度.

2 含注浆圈时渗流场解析解

2.1 计算模型及基本假定

建立半无限平面内含注浆圈时隧道与体外排水洞渗流模型, 如图3所示.

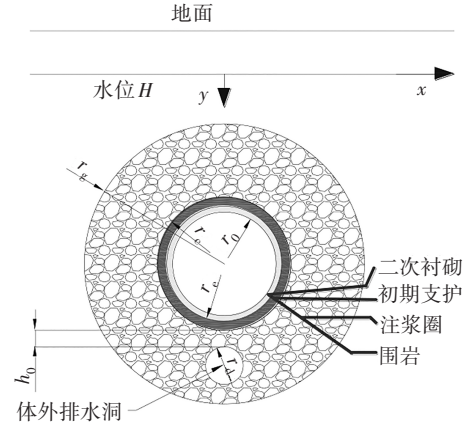


图3 含注浆圈时隧道与体外排水洞渗流模型

Fig.3 Seepage model of tunnel and external drainage tunnel with grouting ring

图3中, r_g 为注浆圈外缘半径, 其余参数同图1.

2.2 模型求解

由式(8)可知, 注浆圈外缘界面水头势函数为:

$$\Phi_g = \frac{Q_1}{2\pi k_r} \ln \frac{B}{B + 2d} + \frac{Q_2}{2\pi k_r} \ln \frac{r_g}{2d} + H \quad (20)$$

此时对隧道与体外排水洞而言, 注浆圈外缘为定水头边界. 由式(5)可知, 注浆圈内任一点水头势函数表达式为:

$$\Phi^* = \frac{Q_1}{2\pi k_g} \ln R_1 + \frac{Q_2}{2\pi k_g} \ln R_2 + c_2 \quad (21)$$

式中: Φ^* 表示注浆圈区域内任一点的水头势函数; k_g 为注浆圈渗透系数; c_2 为待定常数.

由式(21), 依次计算注浆圈外缘、隧道初期支护外缘及体外排水洞洞壁水头势函数:

$$\begin{aligned} \Phi_g^* &= \frac{Q_1}{2\pi k_g} \ln B + \frac{Q_2}{2\pi k_g} \ln r_g + c_2 \\ \Phi_c^* &= \frac{Q_1}{2\pi k_g} \ln r_d + \frac{Q_2}{2\pi k_g} \ln B + c_2 \end{aligned} \quad (22)$$

式中: Φ_g^* 、 Φ_c^* 分别为注浆圈外缘、隧道初期支护外缘及体外排水洞洞壁水头势函数.

流入初期支护与二次衬砌的渗水量满足流体质量守恒定律. 由式(9)可得:

$$H_c = \frac{Q_2}{2\pi} \left(\frac{1}{k_c} \ln \frac{r_c}{r_e} + \frac{1}{k_e} \ln \frac{r_c}{r_0} \right) \quad (23)$$

联立式(20)与式(22)(23),得:

$$Q_1 = -2k_g \pi \times$$

$$(B+H)E + Hk_c k_e \left(k_r \ln \frac{B}{r_g} + k_g \ln \frac{r_g}{2d} \right)$$

$$\frac{E \ln \frac{r_d}{B} + k_g \ln \frac{B}{B+2d} \left[k_c k_g \ln \frac{r_e}{r_0} + k_e k_g \ln \frac{r_c}{r_e} + k_c k_e \ln \frac{B}{r_c} \right]}{(24)}$$

$$Q_2 = -2k_c k_e k_g \pi \times$$

$$Hk_r \ln \frac{B}{r_d} + Bk_g \ln \frac{B}{B+2d}$$

$$\frac{E \ln \frac{r_d}{B} + k_g \ln \frac{B}{B+2d} \left[k_c k_g \ln \frac{r_e}{r_0} + k_e k_g \ln \frac{r_c}{r_e} + k_c k_e \ln \frac{B}{r_c} \right]}{(25)}$$

式(24)(25)中:

$$E = k_c k_g k_r \ln \frac{r_e}{r_0} + k_e k_g k_r \ln \frac{r_c}{r_e} + k_c k_e k_r \ln \frac{r_g}{r_c} + k_e k_g k_e \ln \frac{2d}{r_g} \quad (26)$$

2.3 解析结果验证

若未施加帷幕注浆,可令 $k_r = k_g$,式(24)与(25)退化为:

$$Q_1 = -2k_r \pi \frac{(B+H)A + Hk_c k_e \ln \frac{B}{2d}}{k_c k_e \ln \frac{B}{2d} \ln \frac{B}{B+2d} + A \ln \frac{r_d}{B+2d}} \quad (27)$$

$$Q_2 = 2k_c k_e k_r \pi \frac{H \ln \frac{r_d}{2d+B} - (H+B) \ln \frac{B}{B+2d}}{k_c k_e \ln \frac{B}{2d} \ln \frac{B}{B+2d} + A \ln \frac{r_d}{B+2d}} \quad (28)$$

忽略注浆圈外缘水头高度的离散型,式(27)(28)可分别退化为式(13)(14),而注浆圈外缘水头高度在非富水区时随注浆圈外缘的位置而变化,因此式(27)(28)仅适用于给水边界距隧道轴线位置较大的工况,此时 $B+2d \approx 2d$,则式(27)退化为(13),式(28)退化为(14). 即仅含复合衬砌支护结构为本节所推导的含注浆圈及复合衬砌支护结构的计算特例,验证了本节计算公式的正确性.

联立式(9)(25)(26),可计算隧道二次衬砌外水压力.

3 特征参数敏感性分析

鉴于所推导体外排水洞及隧道涌水量与二次衬砌外水压力计算公式影响参数众多,直接分析较为复杂. 现对体外排水方式的主要特征参数进行探讨分析.

3.1 注浆圈渗透系数

假定给水边界 $H = 200$ m;注浆圈厚度为 6 m;隧道尺寸参数 r_0 、 r_e 、 r_c 分别为:6 m、6.5 m、6.8 m;原岩渗透系数为 2×10^{-6} m/s,注浆圈与初期支护及二次衬砌渗透系数的比值分别为 200、100. 涌水量及隧道二次衬砌外水压力随注浆圈渗透系数的变化关系分别如图 4 与 5 所示.

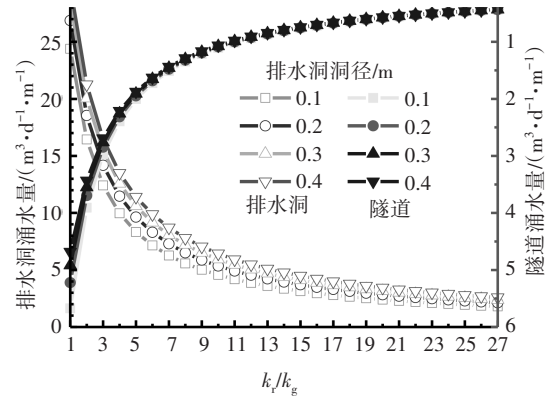


图 4 涌水量随注浆圈渗透系数的变化曲线

Fig.4 Variation curve of water inflow with permeability coefficient of grouting circle

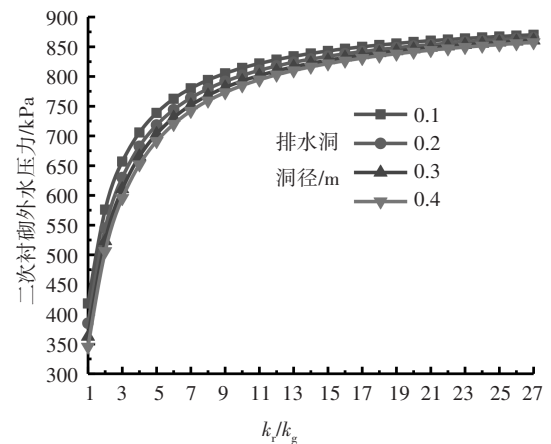


图 5 二次衬砌外渗水压力随注浆圈渗透系数的变化曲线

Fig.5 Variation curve of external seepage pressure of secondary lining with permeability coefficient of grouting circle

图 4 与图 5 表明体外排水洞与隧道涌水量均随注浆圈渗透系数的下降而非线性降低;隧道二次衬砌外水压力随注浆圈渗透系数的下降而非线性增大. 其中原岩与注浆圈渗透系数比值 (k_r/k_g) 小于 15 时,注浆圈渗透系数对涌水量及隧道二次衬砌外水压力敏感性显著;当原岩与注浆圈渗透系数比值大于 15 时,继续降低注浆圈渗透系数对体外排水洞与隧道涌水量及二次衬砌外水压力影响均较弱. 解析结果与文献[10]的研究结果具有一致性.

综合考虑经济及排水因素,注浆圈渗透系数与原岩合理比值为 15,而未实施体外排水洞时原岩与注浆圈渗透系数合理比值建议在两个数量级内^[28-30],表明设置体外排水洞时帷幕注浆在较高渗透系数时同样可发挥明显作用.原因为:未设置体外排水洞时,涌水通过隧道二次衬砌背后的环向盲管、纵向与横向排水管,进而利用水沟排出隧道,此时注浆圈内的涌水需经较长渗流路径才可排出隧道,而设置体外排水洞时注浆圈内的渗水可直接排出,渗流路径缩短,故对注浆圈堵水功能降低了要求,此时可减小注浆量,以达到安全、经济的最优效果.

同时随排水洞洞径增大体外排水洞涌水量增加而隧道涌水量及隧道二次衬砌外水压力降低,但排水洞洞径对排水洞涌水量的影响更为显著.如 k_f/k_c 为 3,体外排水洞洞径为 0.1 m、0.2 m、0.3 m 及 0.4 m 时,排水洞涌水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) 为:12.41、14.18、15.45、16.51,分别增加:14.23%、24.54% 与 32.99%;隧道涌水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) 为 2.97、2.85、2.76、2.69,分别降低:4.1%、7.02% 与 9.38%;隧道二次衬砌外水压力为:656.83、629.89、610.71 及 595.21,分别降低 4.1%、7.02% 与 9.38%,表明通过增大排水洞洞径而降低二次衬砌外水压力的同时会增加更多的涌水量,对当地水源破坏会加剧,因此体外排水洞洞径的确定需综合考虑支护结构受力及隧址区环境要求.

3.2 复合衬砌

3.2.1 初期支护

假定体外排水洞洞径为 0.2 m,原岩与注浆圈渗透系数比值为 15,其它参数同 3.1 节,绘制涌水量及外水压力与初期支护的关系如图 6 所示.

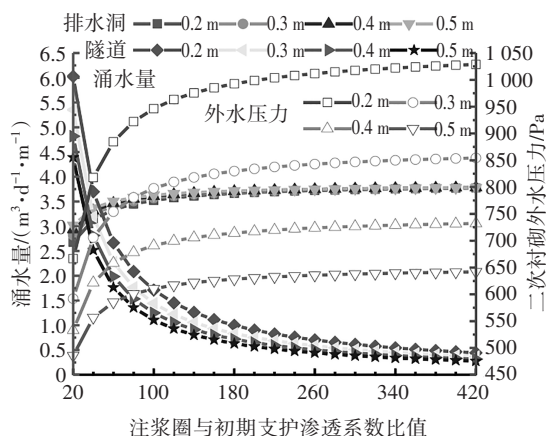


图 6 涌水量及外水压力与初期支护的关系

Fig.6 The relationship between water inflow and external water pressure with initial support

由图 6 可知,随初期支护渗透系数的降低体外

排水洞涌水量与隧道二次衬砌外水压力非线性增大,隧道涌水量非线性降低,其中初期支护渗透系数对隧道涌水量、隧道二次衬砌外水压力、体外排水洞涌水量的影响程度逐渐减弱.

同时随初期支护厚度的增加隧道二次衬砌外水压力与隧道涌水量急剧下降,而对体外排水洞涌水量影响较弱.如 k_g/k_c 为 60,初期支护厚度为 0.2 m、0.3 m、0.4 m 及 0.5 m 时,排水洞涌水量 ($\text{cm}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) 为:3.34、3.41、3.47、3.5,分别增加:2.28%、3.87% 与 5.02%;隧道涌水量 ($\text{cm}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) 为 2.67、2.27、1.98、1.76,分别降低:14.75%、25.56% 与 33.82%;隧道二次衬砌外水压力 (kPa) 为:884.49、754.04、658.43 及 585.35,分别降低 14.75%、25.56% 与 33.82%,表明可通过增加初期支护的厚度达到降低二次衬砌外水压力及隧道涌水量的目的.

设置体外排水洞时,隧道排水通道畅通,注浆圈内的渗水可快速通过体外排水洞排出,降低了对隧道支护结构的作用,因此初期支护对体外排水洞涌水量影响较弱.

3.2.2 二次衬砌

假定体外排水洞洞径为 0.2 m,初期支护厚度 0.4 m,原岩与注浆圈、注浆圈与初期支护渗透系数比值分别为 15 与 100.其余参数同 3.1 节,涌水量及外水压力与二次衬砌相关参数的关系如图 7 所示.

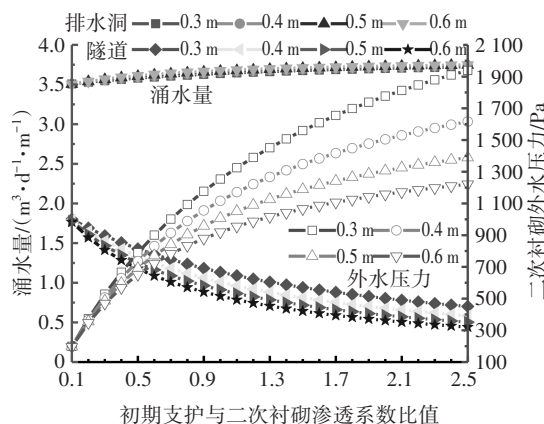


图 7 涌水量及外水压力与二次衬砌的关系

Fig.7 The relationship between water inflow and external water pressure with secondary lining

由图 7 可知,随二次衬砌渗透系数的降低体外排水洞涌水量与隧道二次衬砌外水压力非线性增大,隧道涌水量非线性降低,其中二次衬砌渗透系数对隧道涌水量及隧道二次衬砌外水压力影响程度大于对体外排水洞涌水量的影响程度.

随二次衬砌厚度的增加,隧道涌水量与二次衬砌外水压力均减小,体外排水洞涌水量基本保持不变.当二次衬砌与初期支护渗透系数比值为1.5,二次衬砌厚度为0.3 m、0.4 m、0.5 m及0.6 m时,隧道涌水量($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)为:0.94、0.81、0.72及0.64,涌水量分别降低:13.58%、23.78%及31.71%;隧道二次衬砌外水压力(Pa)分别为:1 560.08、1 348.15、1 189.15及1 065.45,分别降低:13.58%、23.78%及31.71%,表明适当增加二次衬砌厚度可降低二次衬砌外水压力与隧道涌水量.

综合分析,设置体外排水洞时可降低注浆量以保证原岩与注浆圈渗透系数比值维持在较低水平(10~15),注浆圈与初期支护渗透系数比值可保持在100附近,同时须严格控制二次衬砌渗透系数,在此基础上可通过增加初期支护与二次衬砌的厚度达到降低隧道涌水量与二次衬砌外水压力的目的.同时排水洞洞径对体外排水洞排水量影响显著,为保护当地水源平衡,体外排水洞洞径需控制在合理范围.

4 数值模拟分析

为验证本文构建模型的合理性及公式推导的正确性,以鸿图隧道在建工程为背景进行数值模拟分析.

4.1 工程背景

鸿图隧道位于广东省,左线与右线长分别为6 336 m与6 337 m,为分离式双向四车道公路隧道,最大埋深约739 m,处于区域性大断裂莲花山断裂带.同时隧道紧邻飞泉电站、飞泉水库、三度水库及下穿黄棉湖水库,部分断层与大型水体相连,突涌水风险极高,如图8所示.

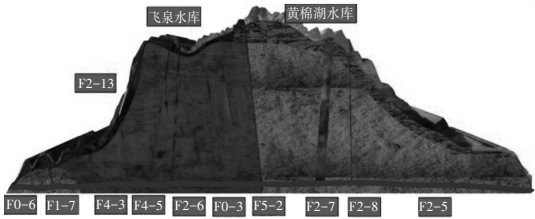


图8 地形地质纵断面图

Fig.8 Topographic and geological profile

4.2 参数选取

含仰拱的曲墙式隧道断面,较接近圆形,此时将隧道断面假定为圆形,误差一般在可接受范围^[31].采用等代圆法将非圆形隧道转化为圆形隧道进行研

究,文献[32]对等代圆半径进行了分析,本文取隧道断面外接圆半径为等代圆半径,表达式为:

$$r_0 = \frac{\sqrt{4h^2 + b^2}}{4 \cos(\arctan(\frac{b}{2h}))} \tag{29}$$

式中: r_0 表示原隧道做等代圆处理后的半径; b 表示原隧道的断面跨度; h 表示原隧道的断面高度.

计算得等代圆半径 $r_0 = 6.2 \text{ m}$.据第3节分析,体外排水洞洞径为0.2 m,初期支护与二次衬砌厚度分别设计为40 cm与50 cm,注浆圈厚度为6 m,静水头高度为250 m,结合设计院与现场测试及施工经验,材料参数如表1所示.

表1 材料参数

Tab.1 Material parameters

类别	E/GPa	μ	c/MPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	$k/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
围岩	1.3	0.42	0.2	29	3×10^{-7}
注浆圈	3.0	0.30	0.4	35	2×10^{-8}
初期支护	27	0.15	3.5	45	2×10^{-10}
二次衬砌	30	0.15	3.5	45	4×10^{-10}

4.3 三维模型建立

采用有限差分软件FLAC^{3D}进行模拟,考虑施工过程中的空间尺寸效应,按照估算与试算结果,确定模型尺寸为: $x \times y \times z = 100 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 100 \text{ m}$,隧道埋深为50 m.原岩、注浆圈、初期支护及二次衬砌均采用实体单元,模型四周为透水边界,底部不透水,约束模型四周法线方向上的位移,模型底部为固定端约束.顶部施加均布力,弥补地应力的不足,材料参数按表1取值.

4.4 结果对比

分别提取隧道二次衬砌外缘(顶部、底部、左边墙、右边墙,并求平均值)渗水压力及涌入体外排水洞与隧道涌水量,结果如表2所示.

表2 结果对比

Tab.2 Comparison of results

方法	二次衬砌外水压力/kPa					涌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	
	拱顶	拱底	左边墙	右边墙	均值	Q_1	Q_2
数值模拟	94.56	70.21	80.62	80.62	81.50	0.74	0.27
理论计算	—	—	—	—	88.56	0.67	0.24

由表2可知,理论值与模拟值有一定差异,其中隧道二次衬砌外水压力、隧道涌水量、体外排水洞涌水量分别相差:8.66%、9.46%与11.11%,误差在可控范围内,差异的原因是等代圆近似替代及理论公式推导时忽略隧道支护结构及注浆圈外水压力的离散型.数值模拟进一步验证了本文所推导公式的正确性,也为体外排水方式的设计提供了理论依据.

5 结 论

针对是否含注浆圈的两种体外排水简化计算模型,通过反映法、叠加原理及渗流力学理论推导了隧道与体外排水洞涌水量的计算公式、隧道二次衬砌外水压力表达式,并进行了退化分析,最后利用数值模拟手段进一步得到了验证,具体结论为:

1)推导了隧道与体外排水洞涌水量的计算公式、隧道二次衬砌外水压力表达式,未设置注浆圈时计算公式可退化为半无限平面内单孔洞涌水量计算公式,设置注浆圈时计算公式适用于给水边界较大的工况;

2)未设置体外排水洞时,涌水通过隧道二次衬砌背后的环向盲管、纵向与横向排水管,进而利用排水沟排出隧道,此时注浆圈内的涌水需经较长渗流路径才可排出隧道;而设置体外排水洞时注浆圈内的渗水可直接排出,渗流路径缩短,故对注浆圈堵水功能降低了要求,此时可减小注浆量,以达到安全、经济的最优效果;

3)注浆圈与初期支护渗透系数合理比值为80~120,同时须严格控制二次衬砌渗透系数,在此基础上可通过增加初期支护与二次衬砌的厚度达到降低隧道涌水量与二次衬砌外水压力的目的;

4)排水洞洞径对体外排水洞排水量影响显著,为保护当地水资源,体外排水洞洞径需取适宜值.

参考文献

- [1] 丁浩,蒋树屏,李勇.控制排放的隧道防排水技术研究[J].岩土工程学报,2007,29(9):1398-1403.
DING H, JIANG S P, LI Y. Study on waterproof and drainage techniques of tunnels based on controlling drainage [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29 (9) : 1398-1403. (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):121-127.
JIANG Z X. Interaction between tunnel engineering and water environment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1):121-127. (In Chinese)
- [3] 尹泉,程盼,傅鹤林,等.运营期隧道地下水位变化情况估算[J].铁道科学与工程学报,2017,14(2):303-307.
YIN Q, CHENG P, FU H L, *et al.* Calculation of underground water level for tunnel in operation period [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(2):303-307. (In Chinese)
- [4] 刘招伟,张顶立,张民庆.圆梁山隧道毛坝向斜高水压富水区注浆施工技术[J].岩石力学与工程学报,2005,24(10):1728-1734.
LIU Z W, ZHANG D L, ZHANG M Q. Grouting technique for high-pressure and water-rich area in maoba syncline at yuanliangshan tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10):1728-1734. (In Chinese)
- [5] 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 B, WU J, WU X L. 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)
- [6] 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,2017,38(5):53-61.
DU M Q, ZHANG D L, ZHANG S L, *et al.* Field test and analysis of mechanical characteristics of tunnel invert structure for high-speed railway [J]. China Railway Science, 2017, 38 (5) : 53-61. (In Chinese)
- [7] TAO X L, MA J R, ZENG W. Treatment effect investigation of underground continuous impervious curtain application in water-rich strata [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25(6):975-981.
- [8] SEMBENELLI P G, SEMBENELLI G. Deep jet-grouted cut-offs in riverine alluvia for ertan cofferdams [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(2):142-153.
- [9] HWANG J H, LU C C. A semi-analytical method for analyzing the tunnel water inflow [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22(1):39-46.
- [10] 李林毅,阳军生,高超,等.考虑注浆圈作用的体外排水隧道渗流场解析研究[J].岩土工程学报,2020,42(1):133-141.
LI L Y, YANG J S, GAO C, *et al.* Analytical study on seepage field of tunnels with external drainage considering effect of grouting rings [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(1):133-141. (In Chinese)
- [11] KOLYMBAS D, WAGNER P. Groundwater ingress totunnels - the exact analytical solution [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22(1):23-27.
- [12] 信春雷.不同防排水模式对山岭隧道衬砌水压力影响关系研究[D].成都:西南交通大学,2011:46-53.
XIN C L. Study on the impact of different waterproof and drainage patterns upon water pressure load on mountain tunnel lining [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011:46-53. (In Chinese)
- [13] NAM S W, BOBET A. Liner stresses in deep tunnels below the wa-

- ter table [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, 21(6): 626–635.
- [14] SHI H, BAI M Z, XING S C. Mechanics parameter optimization and evaluation of curtain grouting material in deep, water-rich karst tunnels[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 2017: 1–12.
- [15] ZHAO X, YANG X. Experimental study on water inflow characteristics of tunnel in the fault fracture zone [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(13): 1–14.
- [16] 潘以恒, 罗其奇, 周斌, 等. 半无限平面含注浆圈深埋隧道渗流场解析研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, 52(6): 1114–1122.
- PAN Y H, LUO Q Q, ZHOU B, *et al.* Analytical study on seepage field of deep tunnel with grouting circle in half plane [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2018, 52 (6): 1114–1122. (In Chinese)
- [17] 杨赛舟, 何川, 李铮, 等. 富水地区隧道注浆圈内部水压分布规律[J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(3): 546–553.
- YANG S Z, HE C, LI Z, *et al.* Inner water pressure distribution law of the tunnel grouting circle in water-rich area [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2017, 46(3): 546–553. (In Chinese)
- [18] 应宏伟, 朱成伟, 龚晓南. 考虑注浆圈作用水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 H W, ZHU C W, GONG X N. 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)
- [19] 张顶立, 孙振宇. 海底隧道主动控制式防排水系统及其设计方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(1): 1–17.
- ZHANG D L, SUN Z Y. An active control waterproof and drainage system of subsea tunnels and its design method [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(1): 1–17. (In Chinese)
- [20] FARMER I W, JENNINGS D H. Effect of strata permeability on the radial hydrostatic pressures on mine shaft linings [J]. *Mine Water & the Environment*, 1983, 2(3): 17–24.
- [21] 张丙强. 半无限平面双孔平行隧道渗流场解析研究[J]. *铁道学报*, 2017, 39(1): 125–131.
- ZHANG B Q. Analytical solution for seepage field of twin-parallel tunnels in semi-infinite plane [J]. *Journal of the China Rail Way Society*, 2017, 39(1): 125–131. (In Chinese)
- [22] 朱成伟, 应宏伟, 龚晓南. 任意埋深水下隧道渗流场解析解[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(11): 1984–1991.
- ZHU C W, YING H W, GONG X N, *et al.* Analytical solutions for seepage fields of underwater tunnels with arbitrary burial depth [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39 (11): 1984–1991. (In Chinese)
- [23] 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.
- [24] 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 X X, YANG J S, MA Y N, *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)
- [25] 李林毅, 阳军生, 王树英, 等. 体外排水方式在隧道工程中的研究及应用[J]. *铁道学报*, 2020, 42(10): 118–126.
- LI L Y, YANG J S, WANG S Y, *et al.* Research and application of external drainage method in tunnel project [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2020, 42(10): 118–126. (In Chinese)
- [26] 李林毅, 阳军生, 张峥, 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 L Y, YANG J S, ZHANG Z, *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)
- [27] 翟云芳. 渗流力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 26–37.
- ZHAI Y F. *Seepage mechanics* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 26–37. (In Chinese)
- [28] 张成平, 张顶立, 王梦恕, 等. 高水压富水区隧道限排衬砌注浆圈合理参数研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(11): 2270–2276.
- ZHANG C P, ZHANG D L, WANG M S, *et al.* Study on appropriate parameters of grouting circle for tunnels with limiting discharge ling in high water pressure and water-enriched region [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26 (11): 2270–2276. (In Chinese)
- [29] 李鹏飞, 张顶立, 赵勇, 等. 海底隧道复合衬砌水压力分布规律及合理注浆加固圈参数研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(2): 280–288.
- LI P F, ZHANG D L, ZHAO Y, *et al.* Study on distribution law of water pressure acting on composite lining and reasonable parameters of grouting circle for subsea tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31 (2): 280–288. (In Chinese)
- [30] 黄震, 朱术云, 赵奎, 等. 工程活动诱发的围岩结构变化对隧道突涌水的影响分析[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(3): 449–458.
- HUANG Z, ZHU S Y, ZHAO K, *et al.* Influences of structural variation of host rock induced by engineering activities on water inrush of tunnels [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(3): 449–458. (In Chinese)
- [31] 田云, 陈卫忠, 田洪铭, 等. 考虑软岩强度时效弱化的缓冲层压支护设计研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(S1): 237–245.
- TIAN Y, CHEN W Z, TIAN H M, *et al.* Study on design of buffer layer yielding support considering time-effect weakening of soft rock strength [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(S1): 237–245. (In Chinese)
- [32] 闫春岭, 丁德馨, 毕忠伟, 等. 深埋隧道围岩稳定性的粘弹性力学分析[J]. *贵州工业大学学报(自然科学版)*, 2005, 34(3): 125–129.
- YAN C L, DING D X, BI Z W, *et al.* Viscoelastic mechanical analysis of the stability of surrounding rock in deep tunnels [J]. *Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition)*, 2005, 34(3): 125–129. (In Chinese)