

隧洞衬砌结构外水压力和渗流量的影响因素分析

董培源

(陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001)

摘要: 为了分析隧洞工程建设中衬砌结构外水压力和渗流量的影响因素,以无压圆形断面隧洞为研究对象,采用控制变量法,研究在灌浆层厚度、灌浆层渗透系数、初期衬砌渗透系数以及二次衬砌渗透系数变化条件下衬砌结构外水压力和渗流量的变化规律。结果表明:随着灌浆层厚度的增加或灌浆层、初期衬砌渗透系数的减小,作用于二次衬砌的外水压力及衬砌渗流量逐渐减小。相较初期衬砌,固结灌浆对衬砌渗流量的调控更显著。随着灌浆层厚度增大到一定程度,衬砌外水压力和渗流量的变化趋于平缓,工程中应考虑建设成本及工程安全合理选取灌浆层厚度和渗透系数等参数。

关键词: 衬砌; 外水压力; 渗流; 灌浆; 渗透系数

中图分类号: TV223.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)06-0161-05

Variables Affecting Outside Water Pressure and Seepage Flow of Tunnel Lining Structure

DONG Peiyuan

(Shaanxi Water Conservancy and Electric Power Survey and Design Institute, Xi'an, Shaanxi 710001, China)

Abstract: In order to analyze the influencing factors of external water pressure and seepage volume of lining structures in tunnel engineering construction, by using the control variable method, the following characteristics of the external water pressure and seepage flow of the non-pressure circular tunnel are examined in relation to the thickness of the grouting layer, the permeability coefficient of the initial lining, the permeability coefficient of the secondary lining, and the permeability coefficient of the groove. The external water pressure and the seepage flow of the secondary lining decrease in a progressive fashion with the increase of grouting layer thickness, or the decrease of the permeability coefficient of the grouting layer and the main lining. Compared with the initial lining, the consolidation grouting has more significant control on the seepage flow of the lining. With the increase of grouting layer thickness to a certain extent, the changes of external water pressure and seepage flow of lining tend to be gentle, so the parameters such as grouting layer thickness and permeability coefficient should be reasonably selected considering construction cost and engineering safety.

Keywords: lining; external water pressure; seepage; grouting; permeability coefficient

在水利水电、公路、铁路等隧洞(道)工程建设中,外水压力的确定往往比较复杂,作为隧洞基本荷载之一,其与隧洞沿线地下水运动、围岩节理裂隙分布等诸多因素有关^[1-2]。外水压力的应对措施主要包括排放和封堵。通过排放可以减小外水压力,但大量排放会影响区域地下水环境,可能引起沉降塌陷等地质灾害。采用封堵可以阻挡水流渗透,但衬

砌需承担初始水头压力,存在衬砌破坏等安全隐患。在工程实践中,堵排结合的方式逐渐被广泛采用^[3-4],常见措施有围岩固结灌浆、设置排水孔等,目前仍多以工程类比和经验为主。开展外水压力和渗流量的影响因素分析对技术方案的确定具有重要的指导意义^[5-6]。近年来,许多学者对外水压力的确定和应对进行了深入研究。王克忠等^[7]采用裂

隙介质渗流经典理论和数值方法,对裂隙围岩渗透特性及衬砌外水压力变化规律进行了研究。肖欣宏等^[8]针对滇中引水工程引水隧洞,研究分析了不同衬砌及注浆圈参数下隧洞衬砌外水压力及渗流场变化规律,得出减小注浆圈渗透系数或增大其厚度在降低衬砌外水压力的同时可有效减小渗流场扰动。于丽等^[9]采用大型隧道渗流模拟试验系统,给出了围岩渗透影响范围、隧道背后水压力的计算公式。杨赐金等^[10]在分析多种外水压力计算方法的基础上,通过建立横置圆筒模型进行理论公式推导,得出了相对较为简单明了的公式。张治国等^[11]基于镜像法和渗流理论得到了富水区山岭深埋圆形隧道衬砌、注浆圈和围岩等关键位置的隧道排水量和水头变化规律,同时引入了水头差参数来求解隧道结构上的水头不均匀分布规律。杜雷功^[12]结合新疆某深埋隧洞工程,开展了高外水压力下深埋隧洞衬砌与围岩联合承载设计研究。

在考虑隧洞结构设计时,通常采用折减系数法确定衬砌结构外水压力,但当隧洞埋深较大时,会出现折减系数的小变化导致外水压力大不同,造成过于保守或危险。本文以埋深较大的隧洞为研究对象,采用控制单一变量对衬砌结构外水压力和渗流量进行研究,分析衬砌结构外水压力随灌浆层厚度、灌浆层渗透系数、初期衬砌渗透系数以及二次衬砌渗透系数变化的规律,揭示灌浆层厚度、灌浆层渗透系数、初期衬砌渗透系数对衬砌渗流量的影响,以期工程设计和施工提供参考和借鉴。

1 计算模型

以引汉济渭工程的秦岭输水隧洞为案例,隧洞全长 98.3 km,最大埋深 2 012 m,采用钻爆法和 TBM 法联合施工,TBM 法施工段为环状无压隧洞。隧洞内衬砌结构的外水压力与灌浆层初次及二次衬砌等的工程参数联系紧密。参考秦岭输水隧洞 TBM 施工段典型断面,选取圆形断面的无压隧洞进行建模分析。模型从内向外依次为二次衬砌层、初期衬砌层、灌浆层和岩层。模型上边界为 100 m 的全水头,前后左右及下方均为不透水的边界,模型示意图如图 1 所示。以(0,0,0)为坐标原点,沿隧洞轴向为 X 轴,垂直于洞轴水平向为 Y 轴,竖直方向为 Z 轴,向上为正。隧洞内半径 r_0 为 5.0 m,二次衬砌外半径 r_1 为 5.5 m,初期衬砌外半径 r_2 为 6.5 m,灌浆层外半径 r_3 为 11.5 m,将该区域进行有限元单元划分。其余参数随分析工况而定。

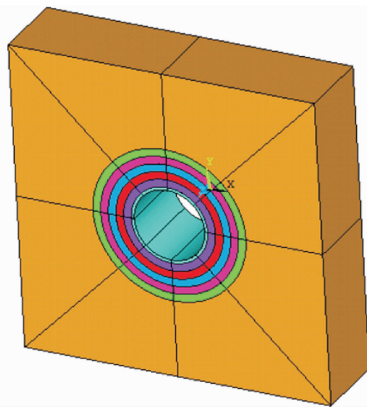


图 1 模型示意图

2 衬砌结构外水压力的影响因素分析

2.1 灌浆层厚度

工程中灌浆层厚度一般会根据洞室埋深,结合二次衬砌所能承受外水压力值进行相应调整。隧洞衬砌、灌浆层、岩体的渗透系数的数值范围因其材料特性、施工工艺、地质条件等多种因素而异,没有固定的统一标准。衬砌结构外水压力随灌浆层厚度的变化如图 2 所示。隧洞及地下工程中不可忽视的重要因素有:二次衬砌外水压 P_1 、初期衬砌外水压 P_2 、灌浆层外水压 P_3 ,分别表示由于地下水作用施加在二次衬砌结构的外边缘、初期衬砌结构的外边缘、灌浆层外部结构上的水压荷载。

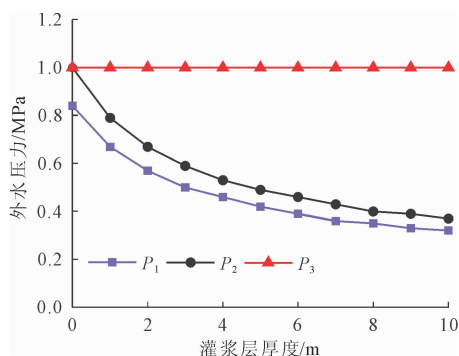


图 2 外水压力随灌浆层厚度变化曲线

由图 2 可知,随着灌浆层厚度的增加,二次衬砌外水压力 P_1 、初期衬砌外水压力 P_2 均逐渐降低。当灌浆层厚度达到 6.0 m 时, P_1 、 P_2 分别为 0.39 MPa、0.46 MPa。作用于衬砌上的外水压力在灌浆层厚度较小时明显下降,随着厚度的增加,其对地下水的阻隔作用也逐渐增强。这是由于灌浆层能够有效地填充地层中的空隙和裂缝,减少地下水的渗透通道。在灌浆层厚度达到一定值的情况下,继续加大厚度降低外来水压的作用就不再明显了。这是由

于此时灌浆层已经形成了相对完整的隔水屏障,地下水难以再通过灌浆层渗透到衬砌体上。因此,外水压力下降的幅度趋于平缓。在提高灌浆层厚度上不加限制,从工程造价费用上考虑,这种做法是不可取的。因为当灌浆层厚度达到一定值后,继续增加厚度对外水压力的降低效果有限,而工程造价成本却会显著增加。因此,对灌浆层厚度的合理控制需要在确保工程安全的前提下进行。

为了便于分析外水压力与渗流量的变化规律,本文根据一般经验和工程实践选取渗透系数参数,如表1所示。

表1 选取的渗透系数 $\times 10^{-9}$ m/s

二衬 k_1	初衬 k_2	灌浆层 k_3	岩体 k_4
1	10	5 或 50	5000

2.2 灌浆层渗透系数

本文以岩体与灌浆层渗透系数比值 n_1 ($n_1 = k_4/k_3$) 为变量,衬砌结构的外水压力随渗透系数比 n_1 变化曲线如图3所示。

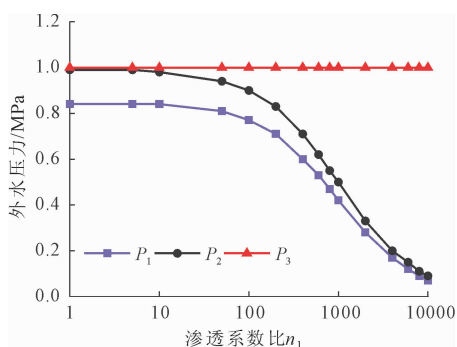


图3 外水压力随渗透系数比 n_1 变化曲线

由图3可知,在一定的岩体环境中,外水压力 P_1 和 P_2 分别作用于二次衬砌和初期衬砌体上,并随岩体与灌浆层的渗透系数比 n_1 的增加而逐渐降低,即灌浆层的渗透系数逐渐降低。当灌浆层渗透系数较大时,地下水更容易通过灌浆层渗透到衬砌体上,从而产生较大的外水压力。反之,地下水的渗透通道在灌浆层渗透系数逐渐降低的情况下受到了有效的阻隔,其作用于衬砌体上的外层水压就会逐步减小。当灌浆层渗透系数 k_3 为 5.0×10^{-9} m/s 时, P_1 降低为 0.42 MPa, P_2 降低为 0.49 MPa, 相较初始外水压力 1.0 MPa 分别降低 58%、51%。外水压力的降低有助于提升二次衬砌、初期衬砌结构的稳定性和安全性,减少因水压力作用而导致的衬砌破坏或变形风险。灌浆层外水压力 P_3 基本保持不变,这说明灌浆层渗透系数基本无法影响灌浆

圈外的外水压力大小,而是取决于地下隧洞的埋深和岩层渗透系数,在稳定渗流场的值不变。

2.3 初期衬砌渗透系数

以岩体渗透系数与初次衬砌渗透系数的比值 n_2 ($n_2 = k_4/k_2$) 为变量,此处 $k_3 = 50 \times 10^{-9}$ m/s,衬砌结构的外水压力随渗透系数比 n_2 变化曲线如图4所示。

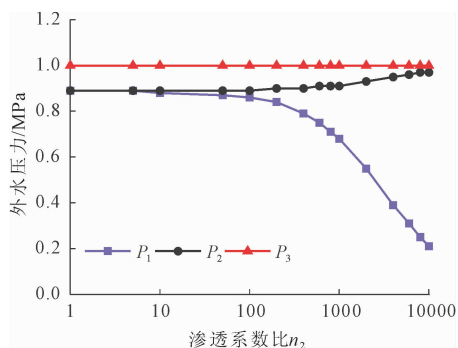


图4 外水压力随渗透系数比 n_2 变化曲线

由图4可知,二次衬砌上作用的外水压力 P_1 在一定的岩体环境中随岩体与初衬渗透系数之比 n_2 的升高而逐渐减小,即当 k_2 降至 5.0×10^{-9} m/s 时, P_1 值达到 0.68 MPa。当渗透性较高时,意味着介质的孔隙较大、连通性较好,流体可以较为顺畅地通过这些孔隙流动。然而,当渗透性降低时,孔隙变小或堵塞,连通性变差,流体在介质中的流动变得困难。渗透性越低,地下水在渗流过程中需要克服的阻力和摩擦越大,流动速度越慢,路径越复杂,所消耗的能量也越多。因此,当初期衬砌的渗透系数降低时,地下水在初期衬砌材料中的流动受到阻碍,在初期衬砌表面附近积聚,形成较高的动水压力。为维持流体系统的动力平衡,作用于初衬的外层水压值 P_2 会逐渐升高。同时,随着初期衬砌渗透系数的降低,孔隙水压力难以迅速释放,导致在初期衬砌表面附近形成较高的孔隙水压力,增加外水压力值 P_2 。

2.4 二次衬砌渗透系数

以岩体渗透系数与二次衬砌渗透系数比值 n_3 ($n_3 = k_4/k_1$) 为变量,此处 $k_3 = 50 \times 10^{-9}$ m/s,衬砌结构的外水压力随渗透系数比 n_3 变化曲线如图5所示。

由图5可知,在一定的岩体环境下,随着岩体与二衬渗透系数之比 n_3 的增加,作用于二衬和初衬的外水压力 P_1 和 P_2 逐渐增大,即二衬渗透系数的逐渐降低。二次衬砌与围岩渗透系数相等时, P_1 接近于 0 MPa,即二次衬砌上不承受外水压力的作用。当 n_3 增加至 10 000 时,二次衬砌及初期衬砌上所

作用的外水压力值分别为 0.87 MPa、0.95 MPa, 基本与初始地下水压力相同。

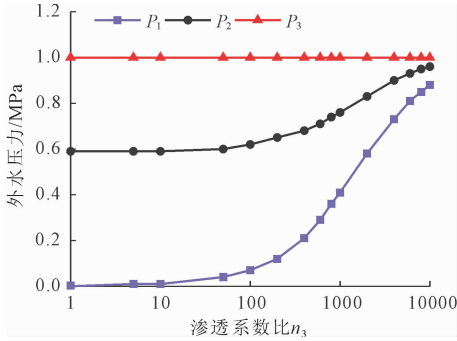


图 5 外水压力随渗透系数比 n_3 变化曲线

3 衬砌渗流量的影响因素分析

3.1 灌浆层厚度

衬砌渗流量随灌浆层厚度变化曲线如图 6 所示。此处 $k_3 = 5 \times 10^{-9}$ m/s。

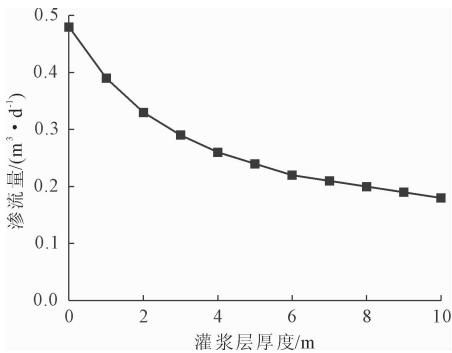


图 6 衬砌渗流量随灌浆层厚度变化曲线

由图 6 可知,在一定范围内,随着灌浆层厚度的增加,其对地下水的阻隔作用逐渐增强,衬砌的渗流量会逐渐减小。当灌浆层厚度达到 6 m 时,渗流量降至 $0.22 \text{ m}^3/\text{d}$,降低约 54%。衬砌的渗流量并不随灌浆层厚度的无限增加而达到理想无流量状态,当灌浆层厚度增加到一定程度后,其对渗流量的影响将趋于平缓。这是因为此时灌浆层已经形成了相对完整的隔水屏障,地下水难以再通过灌浆层渗透到衬砌体上。此外,随着灌浆层厚度的进一步增加,其经济性和施工难度也会显著增加,而渗流量的减小幅度却不再明显。因此,要考虑工程建设成本和工程安全性,需合理选择灌浆层的厚度。

3.2 灌浆层渗透系数

以岩体渗透系数与灌浆层渗透系数之比 n_1 ($n_1 = k_4/k_3$) 为变量,衬砌渗流量随渗透系数比 n_1 变化曲线如图 7 所示。

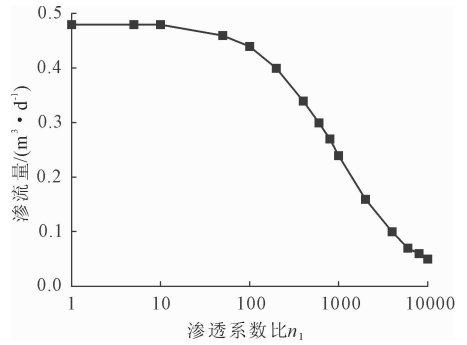


图 7 复合衬砌渗流量随渗透系数比 n_1 变化曲线

由图 7 可知,当灌浆层渗透系数较高时,地下水更容易通过灌浆层渗透到衬砌上,从而产生较大的渗流量。通过灌浆层渗水的地下水通道逐渐变窄,渗水难度加大,因为随着灌浆层渗水系数的逐渐降低,衬砌渗水的流量会逐渐减少。当岩体与灌浆层渗透系数比值 n_1 为 1 000 时,渗流量降低至 $0.24 \text{ m}^3/\text{d}$,降低约 50%。由于在实际工程中,灌浆层材料本身具有一定的渗透性,因此不受限制地降低灌浆层渗透系数并不会使渗透流量降低到 0,即使渗透系数很小,地下水仍有可能通过极小的渗透通道渗透到衬砌中。此外,隧洞及地下工程通常处于复杂的地质环境中,地层中的空隙和裂缝分布不均匀,且可能受到地下水、地应力等多种因素的影响,因此完全消除衬砌渗流量是非常困难的。因此,工程应综合考虑灌浆工艺和水灰比等参数,结合排水系统的合理选择灌浆层渗透系数,以及二次衬砌所能承受的外水压力值。同时,加强对灌浆层渗透性能和衬砌渗流量的监测与预警,及时发现并处理异常情况,确保隧道及地下工程的安全和稳定。

3.3 初期衬砌渗透系数

以岩体渗透系数与初期衬砌渗透系数比值 n_2 ($n_2 = k_4/k_2$) 为变量,此处 $k_3 = 50 \times 10^{-9}$ m/s,衬砌渗流量随渗透系数比 n_2 变化曲线如图 8 所示。

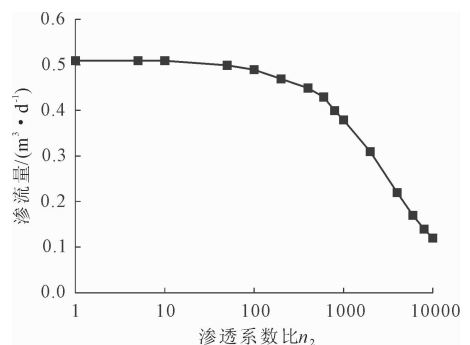


图 8 复合衬砌渗流量随渗透系数比 n_2 变化曲线

由图8可知,当初期衬砌渗透系数较高时,地下水更容易通过衬砌材料渗透到隧洞内部,从而产生较大的渗流量。相反,当初期衬砌渗透系数逐渐减小时,地下水通过衬砌的渗透通道逐渐变窄,渗透难度增加,因此衬砌的渗流量也会逐渐降低。当岩体与初期衬砌渗透系数比值 n_2 达到 1 000 时,此时渗流量为 $0.39 \text{ m}^3/\text{d}$,降低约 24%。相较于灌浆层,初期衬砌的厚度通常较小,这意味着初期衬砌的防水性能相对较弱,其渗透系数对渗流量的影响也相对较小。这是因为较薄的衬砌层即使渗透系数有所降低,其阻隔地下水的功能也相对有限。相比之下,灌浆层通常具有较大的厚度和更好的防水性能,因此其渗透系数的变化对渗流量的影响更为显著。

4 结 论

(1) 随着灌浆层厚度增大或灌浆层和初衬层渗透系数降低,作用于二次衬砌的外水压力减小;作用于初衬、二衬的外水压力随二衬渗透系数的降低而逐步增大。

(2) 衬砌渗流量随着灌浆层厚度增加或初衬渗透系数的减少而减少。相较初期衬砌,固结灌浆对衬砌渗流量的调控更显著。

(3) 灌浆层厚度增加到一定程度后,衬砌外水压力和渗流量的降幅会趋于平缓,灌浆层厚度的无限增加或灌浆层渗透系数的无限降低并不会使渗流量降为零,因此工程中为考虑建设成本及工程安全,在综合考虑灌浆工艺及水灰比等参数的基础上,应合理选取灌浆层厚度和渗透系数。

参考文献:

- [1] 侯新文,李常锁,郑婷婷,等. 基于围岩及灌浆圈非均质性的外水压力计算[J]. 煤炭学报,2015,40(3):534-540.
- [2] 谢小帅,谢兴华,王小东,等. 隔水层对深埋隧洞衬砌外水压力的影响研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(S2):146-150.
- [3] 高 鑫. 高外水压力下水工隧洞设计理念的初步探讨[J]. 珠江水运,2020(23):19-20.
- [4] 黄 威,孙 云,张建平,等. 深埋隧洞高外水压力研究进展[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2023,45(5):1-11.
- [5] 谢小帅. 珠江三角洲水资源配置工程深埋引水隧洞衬砌外水压力分析[J]. 广东水利水电,2023(4):17-20.
- [6] 朱成伟,应宏伟,龚晓南. 任意埋深水下隧道渗流场解析[J]. 岩土工程学报,2017,39(11):1984-1991.
- [7] 王克忠,倪绍虎,吴 慧. 深部隧洞裂隙围岩渗透特性及衬砌外水压力变化规律[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(1):168-176.
- [8] 肖欣宏,王 静,谢小帅,等. 复杂岩溶地区引水隧洞衬砌外水压力研究[J]. 水利水运工程学报,2018(5):82-88.
- [9] 于 丽,方 霖,董宇苍,等. 基于围岩渗透影响范围的隧道外水压力计算方法模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(10):2288-2298.
- [10] 杨赐金,崔 忠,崔 炜,等. 水工隧洞的外水压力计算和控制[J]. 水利规划与设计,2022(7):59-61,118.
- [11] 张治国,汪嘉程,赵其华,等. 富水山岭地区邻近补水断层隧道结构上的水头分布解析求解[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(S2):3378-3394.
- [12] 杜雷功. 高外水压力下深埋隧洞衬砌与围岩联合承载设计研究[J]. 水利水电技术,2019,50(8):106-109.

(上接第 105 页)

- [26] 李圃林. 土体弹性模量在基坑工程有限元计算中的应用研究[J]. 绿色科技,2014(10):237-239.
- [27] 李荣庆,侯永为. 考虑泥沙淤积影响的高桩码头三维有限元分析[J]. 水运工程,2016(10):95-99.
- [28] Deodatis G. Non-stationary stochastic vector processes; seismic ground motion applications [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1996,11(3):149-167.
- [29] 刘章军,曾 波,吴林强. 非平稳地震动过程模拟的谱表示-随机函数方法[J]. 振动工程学报,2015,28(3):411-417.
- [30] 李 杰,刘章军. 基于标准正交基的随机过程展开法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2006,34(10):1279-1283.
- [31] Hua Lookeng, Wang Yuan. Applications of number theory to numerical analysis[M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [32] Zhu Pengrui, Liu Hongbiao, Sun Xiping. Research on the construction of health monitoring system and evaluation technology of coastal high pile wharf[J]. Journal of Civil Engineering and Urban Planning, 2023,5(8):29-39.