

考虑洞间影响的三孔并行海底隧道渗流问题分析

闫科宇¹, 李善伟¹, 李航达¹, 韩智铭^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043)

摘要:海底隧道渗流场的分析是隧道建设的基本问题,它与隧道围岩稳定性、工程防排水设施的布置密切相关。考虑现有的工程实际,海底隧道常采用“主隧道+服务隧道”的三孔并行方式穿越海峡。以实际工程为背景,建立了不同覆岩厚度下三孔并行海底隧道渗流计算模型,从涌水量、孔隙水压力、渗流速度、注浆参数方面分析了隧道渗流特性。研究结果表明,隧道互相靠近时,渗流场相互影响,无论是采用现行规范中所给出的隧道涌水量计算公式,还是精确解析解公式来预测三孔并行海底隧道主隧道涌水量时均会产生较大误差,将会高估隧道涌水量,最大误差可以达到 40%;三孔隧道之间互为“泄压孔”,降低了主隧道周边孔隙水压力和渗流速度;注浆作为隧道堵水的关键措施,考虑注浆圈厚度的同时也应该注重注浆的密实性。

关键词:海底隧道;三孔并行;涌水量;孔隙水压力;渗流速度;注浆参数

中图分类号: U456.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2024)01-0039-06

0 引言

海底隧道作为交通运输网络的重要组成部分,对于优化城市空间结构、促进区域一体化发展具有重要意义。因其在雪、雾、风等恶劣天气条件下仍能保证全天候通行,且对航运影响较小而成为跨江越海的重要手段,更是解决区域内无法实现大跨径、高塔结构物的唯一方案^[1-2]。由于特殊的水环境,海底隧道工程面临高水压和无限水源补给的问题,导致隧道结构防水困难;同时,海底隧道特殊的“V”形结构,使得隧道无法实现自然排水。因此,海底隧道作为一项大体量、高风险工程,涌水问题在隧道设计和建设过程中都备受关注。隧道渗流场分析不仅直接影响下一步工程防排水设施的布置和结构稳定性加固,同时预测隧道涌水也成为工程建设中的关键问题^[3-4]。

国内外学者对海底隧道渗流问题进行了大量研究与实践,取得了一系列研究成果。应宏伟等^[5]以 Harr 提出的镜像法为基础,分析了注浆圈作用下的单孔隧道渗流问题,并与王育奎等^[6]的模型实验结果、陈俊儒等^[7]的数值模拟结果进行了对比分析,验证了该解析解的正确性和适用性。QIN et al^[8-9]采用镜像法,将隧道周线离散化,求解每一离散点处涌水量,通过取平均值的方式来等效替代隧道涌水量,但这种方法的合理性值得讨论。PARK et al^[10]为求解问题的简便,根据 VERRUIJT^[11]提出的分式线性映射(Mobius 变换),采用保角变换法将地面与隧道边界映射成为半径为 1 和半径为 α 的同心圆,由 Laplace 稳定渗流方程出发,严格求解出单孔隧道渗流问题的精确解析解,并分析了常水头边界条件与零水压边界条件的区别。秦松^[12]采用室内试验参数标定与数值模拟相结合的方法,研究了复杂地质海底隧道渗流场特性和隧道稳定性。LI et al^[13]采用大尺度物理模型实验和数值模拟的方法对海底隧道涌水过程进行研究,分析了隧道涌水机理及涌水过程中结构位移与孔隙水压力的变化,其结果可以为隧道结构设计和灾害预警提供参考。熊文威等^[14]以汕头湾海底隧道工程为背景,采用 ABAQUS 数值模拟软件,确定了高水压下隧道的合理涌水量限排设计方案。上述研究大多集中在单孔隧道渗流问题,然而由于交通流动

收稿日期:2023-11-02 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20230294

基金项目:河北省自然科学基金(E2019210182);石家庄铁道大学硕士研究生创新项目(YC2023061)

作者简介:闫科宇(1996—),男,硕士研究生,研究方向为隧道及地下工程。E-mail:yky_keyu@163.com

闫科宇,李善伟,李航达,等.考虑洞间影响的三孔并行海底隧道渗流问题分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2024,37(1):39-44.

性、安全性和可靠性等方面的优势,在规划和设计海底隧道时常采用三孔并行的布置方式,即两侧为主隧道中间为服务隧道,如厦门翔安海底隧道、青岛胶州湾第一海底隧道等。

大量的工程实践提出 2 个层次的问题,其一,三孔并行海底隧道之间渗流场是否有影响;其二,隧道之间的影响程度如何,采用单孔隧道渗流模型是否合理。以国内某海底隧道工程为背景,从涌水量、孔隙水压力等方面深入分析三孔并行海底隧道渗流特征,以期为工程提供参考。

1 工程概况

某海底隧道工程以双孔双向六车道的主隧道加中间服务隧道的三孔布置方式穿越海峡,采用“钻爆法+盾构法”组合施工方案。主隧道为多心圆形断面,采用钻爆法施工,隧道开挖面积约为 162.7 m^2 ,服务隧道采用盾构法施工,开挖直径为 7.7 m 。该隧道工程穿越多条小型断裂带,围岩级别多为 III ~ V 级,海域段岩层渗透系数集中在 $0.01 \sim 0.20 \text{ m/d}$ 范围内,平均海水深度为 13 m ,最深处约 49 m ;海域段全长约 10.5 km ,由于特殊的水环境及地质条件,隧道工程无设置竖井条件,具有超深、超长、超大、地质复杂的特点。海域隧道横断面布置如图 1 所示。

2 计算模型

覆岩厚度是海底隧道建设过程中安全性和经济性方面的关键考量参数。覆岩厚度较薄则隧道围岩稳定性差,易发生突涌水事故;覆岩厚度过厚则增加施工及运营成本。以实际工程为背景分别建立不同覆岩厚度下海底隧道渗流计算模型,讨论三孔并行海底隧道渗流场特性。隧道渗流计算模型网格划分及边界条件如图 2 所示,综合考虑求解效率与计算精度,模型尺寸取为 $500 \text{ m} \times 200 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 。计算过程中保持海水深度 20 m 不变,围岩渗透系数取整数值 $2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 。

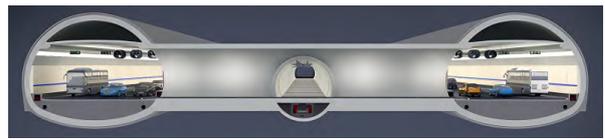


图 1 海域隧道横断面布置图

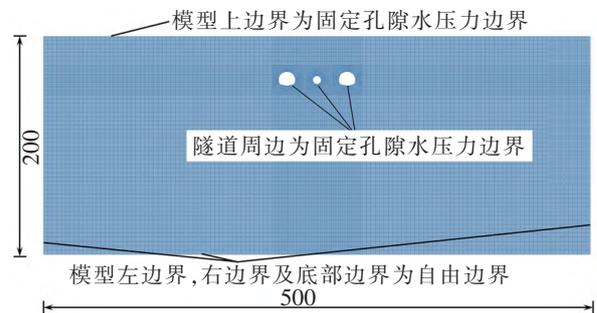


图 2 三孔并行海底隧道计算模型及边界条件(单位:m)

3 计算结果与分析

3.1 涌水量

首先采用文献[15]中的 Goodman 经验公式和 Park 精确解析公式预测主隧道涌水量,并与数值模拟结果进行对比,分析三孔并行海底隧道之间是否存在影响。涌水量计算公式简图如图 3 所示。

(1) Goodman 经验公式

$$Q = 2\pi k \frac{h_w + h}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)} \quad (1)$$

式中, h_w 为海水深度; h 为海床面至洞身横断面圆心的距离; k 为岩层渗透系数; r 为隧道横断面半径。

(2) Park 公式

$$Q = \frac{2\pi k(A + h_w)}{\ln\left[\frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1}\right]} \quad (2)$$

式中, A 为计算参数, $A = \frac{h(1-\alpha^2)}{(1+\alpha^2)}$, $\alpha = \frac{1}{r}(h - \sqrt{h^2 - r^2})$; 其余参数意义同式(1)。

值得注意的是,式(1)、式(2)均针对圆形断面隧

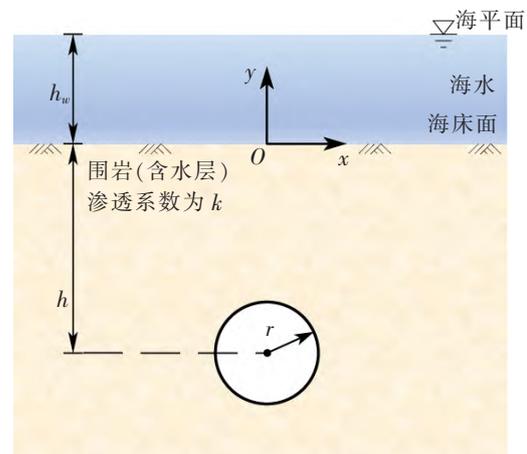


图 3 涌水量解析解计算简图

道,根据面积等效原则将多心圆形断面简化为圆形断面进行计算,面积等效时遵循 2 个原则:①多心圆形隧道断面面积与圆形隧道断面面积相等;②海床面到多心圆形断面形心的距离与海床面到圆形断面形心的距离相等。不同覆岩厚度下隧道涌水量如图 4 所示。对比发现,无论是文献[15]所推荐的 Goodman 经验公式还是单孔隧道涌水量精确的 Park 公式与数值计算结果均差异较大,涌水计算误差最大可达 40%,主要原因在于三孔并行海底隧道之间渗流场存在互相影响,由于隧道之间的泄压作用,导致隧道周围孔隙水压变化,从而降低了主隧道的涌水量。随着覆岩厚度的增加,隧道涌水量呈现出先减小后增加的变化规律,存在一个最佳覆岩厚度(最小涌水量所对应的覆岩厚度),三孔隧道中主隧道相比于单孔隧道最佳覆岩厚度也有所增加。

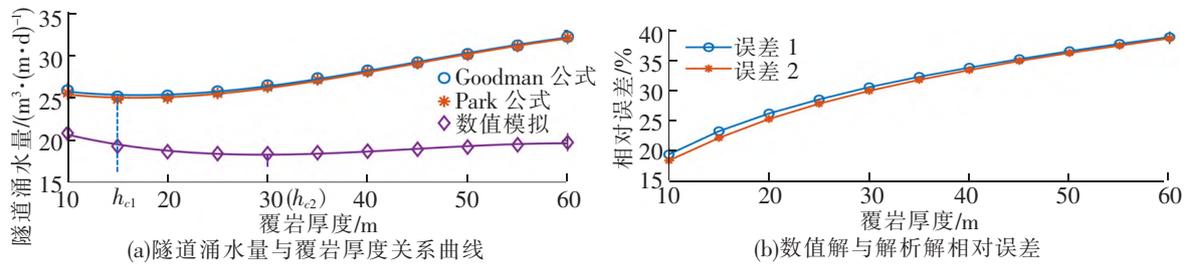


图 4 隧道涌水量随覆岩厚度变化及相对误差曲线

3.2 渗流速度

为分析隧道间的互相影响,在隧道轮廓特征位置监测点,记录不同特征点处的渗流速度。以最小涌水量对应的覆岩厚度(30 m)为例,绘制了主隧道渗流矢量图(见图 5)、单孔隧道和三孔隧道主隧道特征点处渗流速度对比图(见图 6)。分析可知,由于隧道间的泄压作用,主隧道渗流矢量图呈现出明显的非对称性,且隧道周边的渗流速度小于单孔隧道情况。

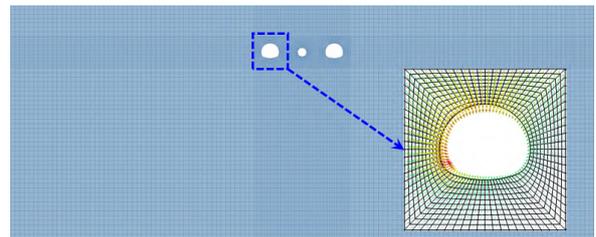


图 5 渗流速度矢量图

不同覆岩厚度条件下,隧道特征点渗流速度如图 7 所示。

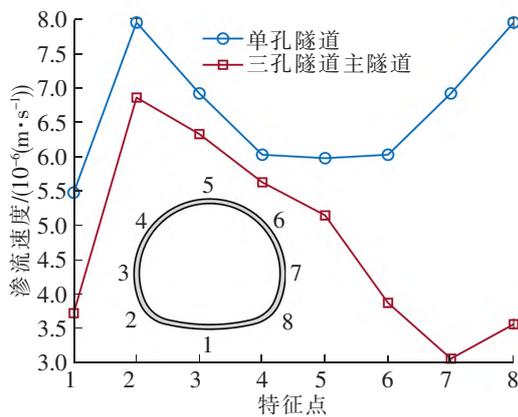


图 6 单孔隧道与三孔隧道主隧道特征点处渗流速度对比

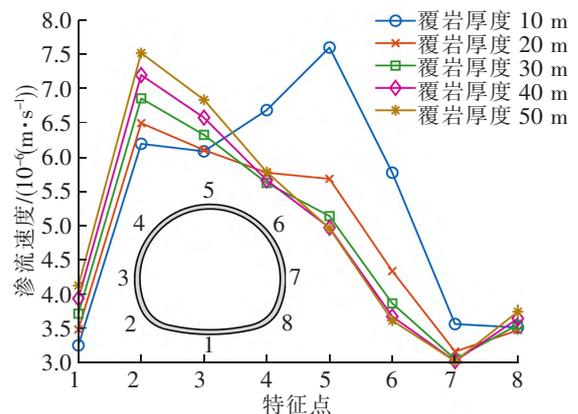


图 7 不同覆岩厚度特征点处渗流速度

分析图 7 可知,隧道周边渗流速度主要与隧道埋深、隧道断面轮廓及邻近隧道有关。当隧道覆岩厚度较薄时(即隧道埋深较浅),由于隧道拱顶位置渗流路径较短,因此,此时的拱顶位置渗流速度较大。随着覆岩厚度的增加,最大渗流速度位置逐渐由拱顶位置向左侧拱脚处移动,一方面拱脚位置比较靠下,水压力更大,但是相较于拱底,拱脚处隧道断面轮廓的曲率更大,容易汇聚更多的水流;另一方面,由于邻近隧道的影响,隧道间表现出“泄压作用”,使得右侧拱脚位置渗流速度小于左侧拱脚。当覆岩厚度增加到一定值时,最大渗流位置不发生变化,即当隧道覆岩厚度较厚时,最大渗流位置只取决于隧道断面形式与邻近隧道。因此,在施工过程中,对于远离邻近隧道一侧的主隧道拱脚部位,应该加强防水施工工艺,避

免发生渗透破坏。因为这个位置不仅渗流速度大而且是隧道边墙与仰拱的施工搭接部位。

3.3 孔隙水压力

不同覆岩厚度下隧道孔隙水压力云图如图 8 所示。隧道开挖后,在隧道周边一定范围内形成“压降漏斗”,隧道之间互为“泄压孔”,降低了隧道间的孔隙水压力。以最小涌水量对应的覆岩厚度(30 m)为例,在隧道竖直与水平轴线方向设置 4 条不同的测线,分析其孔隙水压力变化,如图 9 所示。

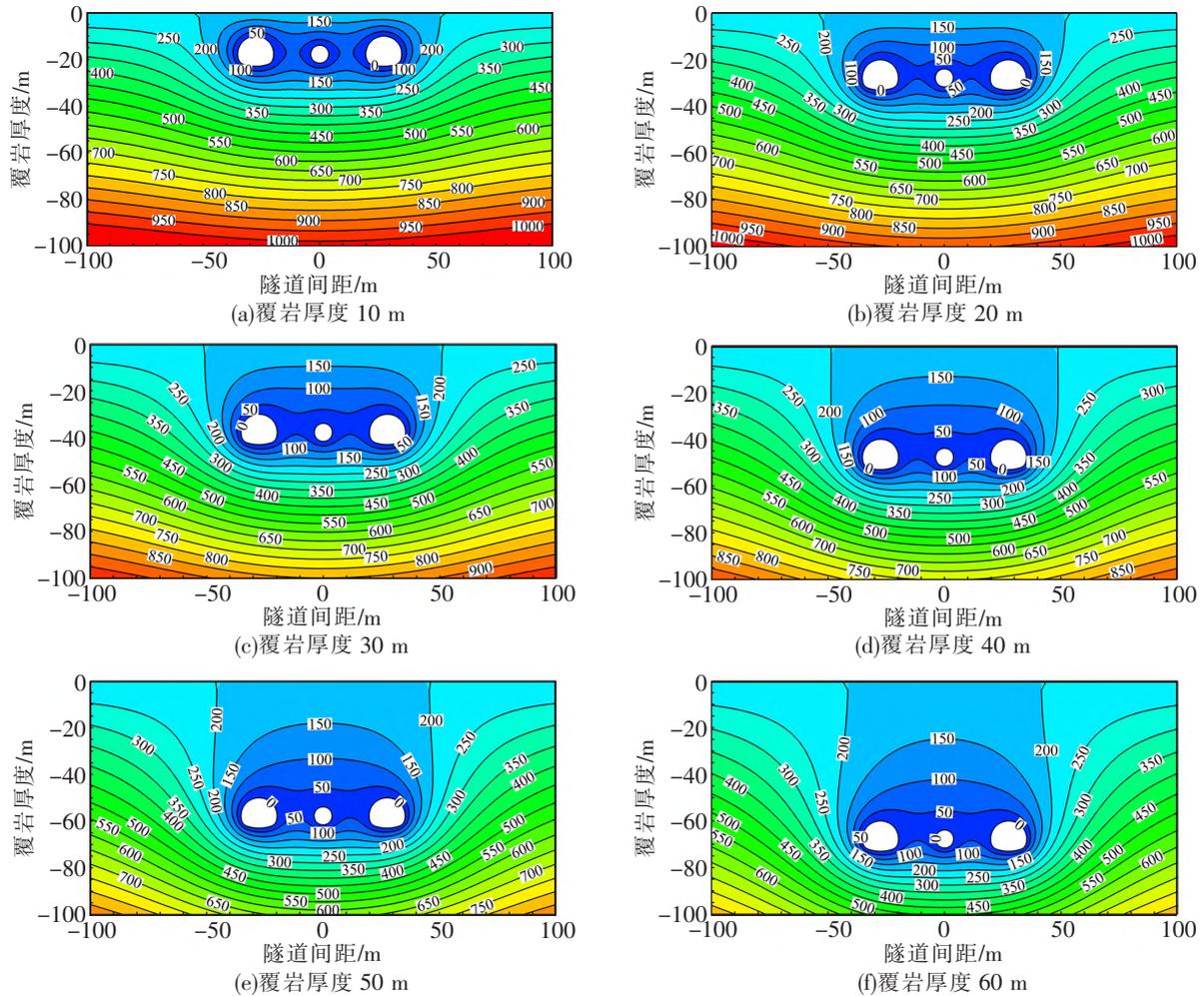


图 8 不同覆岩厚度孔隙水压力云图(单位:kPa)

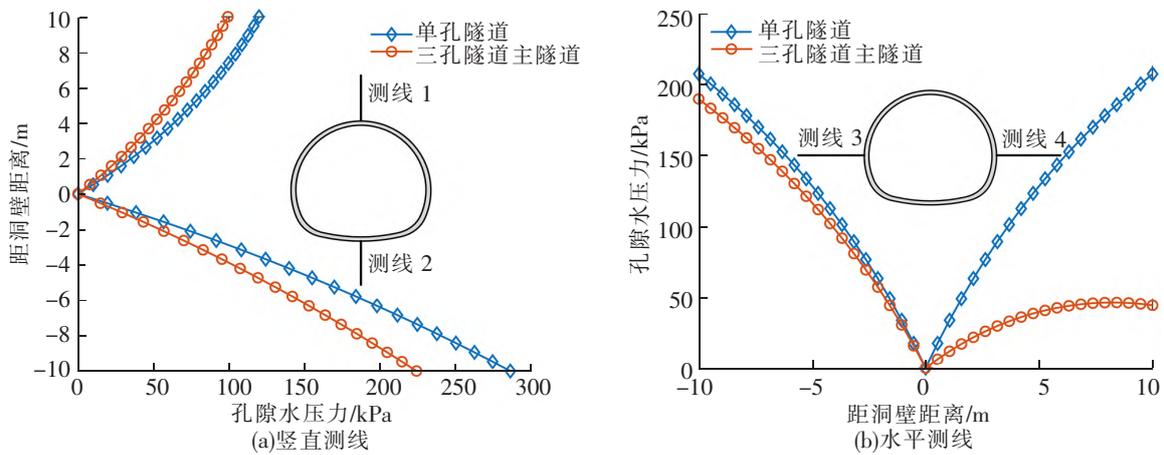


图 9 覆岩厚度 30 m 时不同测线孔隙水压力分布规律

由图 9 可知,由于隧道间的泄压作用,三孔并行海底隧道主隧道周边孔隙水压力小于单孔隧道,除测线 4 方向外,其余方向孔隙水压力随着距洞壁距离的增加而逐渐增大,但变化速率逐渐降低,说明隧道间的泄压作用随着距隧道洞壁的距离增加而逐渐减弱。在测线 4 方向,三孔隧道主隧道与单孔隧道相比孔隙水压力差距较大,且该方向主隧道孔隙水压力随着距隧道洞壁距离的增加先增大后减少,这是因为测线 4 方向与邻近隧道距离较近,由此也说明距离隧道越近泄压作用越明显。

3.4 注浆圈参数

注浆作为海底隧道堵水的基本措施,能够降低隧道排水量实现降低衬砌外水压力的目的。分析不同注浆参数下的堵水效果。注浆圈厚度取 2~6 m,注浆圈渗透系数分别取 1×10^{-8} 、 2×10^{-8} 、 5×10^{-8} 、 1×10^{-7} m/s,隧道的覆岩厚度取最小涌水量所对应的覆岩厚度(30 m),如图 10 所示。由图 10 可知,增加注浆圈厚度或者降低注浆圈的渗透系数均能达到降低隧道涌水量的目的。但随着注浆圈厚度的增加,隧道涌水量的降低速率也在降低,且过厚的注浆圈会增加注浆量、增加施工难度。建议在实际工程中,结合注浆材料与注浆工艺优先确定注浆圈所能达到的渗透系数,在此基础上确定注浆圈的合理厚度。

当然,从隧道洞室稳定性出发注浆圈也不宜过薄。综合考虑注浆效果与施工成本,注浆参数建议如下:注浆圈厚度为 4~6 m,注浆圈渗透系数控制在 2×10^{-8} m/s 以内,这样可以使得破碎带处隧道排水量严格控制在 $2 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$ 以内。

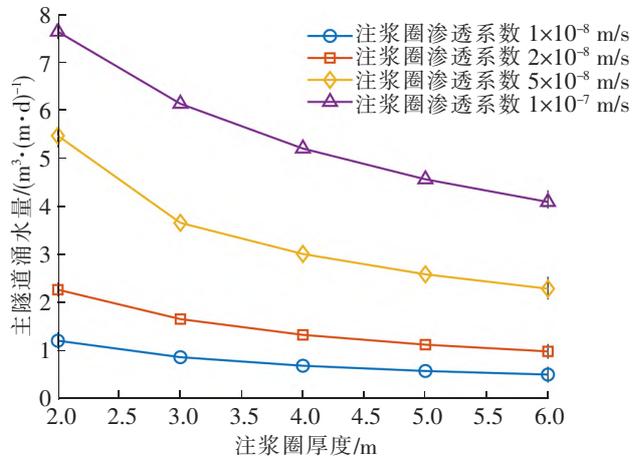


图 10 注浆圈参数与涌水量关系

4 结论

针对实际工程,采用数值方法对三孔并行海底隧道渗流场进行分析研究,讨论了三孔并行海底隧道中涌水量、孔隙水压力、渗流速度等参数,主要得出以下结论:

(1)隧道互相靠近时渗流场互相影响,现有规范中所推荐的涌水量经验公式及解析解均不能合理预测三孔并行隧道中主隧道涌水量,其预测误差最大可达 40%。与单孔隧道相同,主隧道涌水量随覆岩厚度增加呈现出先增加后减小的变化规律,存在一个最佳覆岩厚度,不同之处在于三孔隧道中最佳覆岩厚度大于单孔隧道。

(2)隧道周边渗流速度与隧道埋深、隧道断面形式及邻近隧道有关;由于隧道间的泄压作用,主隧道渗流速度呈现出明显的非对称性,同时也降低了隧道周边渗流速度,一定程度上可减小渗流破坏。

(3)增加注浆圈厚度或者降低注浆圈的渗透系数均能达到降低隧道涌水量的目的。但随着注浆圈厚度的增加,隧道涌水量的降低速率也在降低,建议在实际工程中优先确定注浆圈所能达到的渗透系数,在此基础上确定注浆圈的合理厚度。

参 考 文 献

- [1]《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术研究综述·2022[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 1-40.
- [2]肖明清, 孙文昊, 曲立清, 等. 胶州湾第二海底隧道总体设计方案研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(2): 199-216.
- [3]QIU D, CHEN Q, XUE Y, et al. A new method for risk assessment of water inrush in a subsea tunnel crossing faults [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2022, 40(6): 679-689.
- [4]DAI C, LONG Y, LV Y, et al. Water inrush mechanism and safety control in drilling and blasting construction of sub-sea tunnel[J]. Journal of Coastal Research, 2019, 94(S1): 218-222.

- [5]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[J].浙江大学学报(工学版),2016,50(6):1018-1023.
- [6]王育奎,徐帮树,李术才,等.海底隧道涌水量模型试验研究[J].岩土工程学报,2011,33(9):1477-1482.
- [7]陈俊儒,王星华.海底隧道涌水量的预测及其应用研究[J].现代隧道技术,2008(5):18-21.
- [8]QIN Zhenggui, WANG Yuan, SONG Yi, et al. The analysis on seepage field of grouted and shotcrete lined underwater tunnel[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 1-15.
- [9]QIN Z, HE W, ZHOU H. Analytical study on seepage field of subsea twin tunnels constructed by NATM[J/OL]. Ocean Engineering, 2022, 264: 112345[2023-11-02]. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112345>.
- [10]PARK K H, ADISORN O, LEE J G. Analytical solution for steady-state groundwater inflow into a drained circular tunnel in a semi-infinite aquifer: A revisit[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(2): 206-209.
- [11]VERRUIJT A. A complex variable solution for a deforming circular tunnel in an elastic half-plane[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1997, 21(2): 77-89.
- [12]秦松.复杂地质海底隧道不同防排水体系下渗流场及变形特征研究[J].公路交通科技,2023,40(5):138-145.
- [13]LI Shucai, LIU Hongliang, LI Liping, et al. Large scale three-dimensional seepage analysis model test and numerical simulation research on undersea tunnel[J]. Applied Ocean Research, 2016, 59: 510-520.
- [14]熊文威,汪波,蒙伟,等.高水压水下隧道合理涌水量限排设计研究[J].铁道标准设计,2022,66(12):104-110.
- [15]国家铁路局.铁路工程水文地质勘察规程:TB 10049—2014[S].北京:中国铁道出版社,2015.

Analysis of Seepage Problems in Three-hole Parallel Subsea Tunnels Considering the Influence Between Tunnels

YAN Keyu¹, LI Shanwei¹, LI Hangda¹, HAN Zhiming^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Road and Railway Engineering Safety Assurance, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The analysis of seepage fields in subsea tunnels is a fundamental issue in tunnel construction, which is closely related to the stability of the tunnel surrounding rock and the layout of engineering waterproofing and drainage facilities. Considering actual engineering conditions, subsea tunnels often use the three-hole parallel method of “main tunnel + service tunnel” to cross the strait. Taking practical engineering as the background, a seepage calculation model for a three-hole parallel subsea tunnel with different overburden thicknesses was established. The seepage characteristics of the tunnel were analyzed from the aspects of water inflow, pore water pressure, seepage velocity, and grouting parameters. The conclusions drawn are as follows: When tunnels are close to each other, there will be mutual interference in the seepage fields. Whether using the tunnel water inflow calculation formula given in the current specifications or the precise analytical solution formula to predict the water inflow of the main tunnel of a three-hole parallel subsea tunnel, there will be significant errors, which will overestimate the tunnel water inflow with a maximum error of 40%; The three-hole tunnels act as “pressure relief holes” for each other, reducing the pore water pressure and seepage velocity around the main tunnel. As a crucial method for tunnel water blocking, grouting should not only take into account the thickness of the grouting ring but also prioritize the compaction of the grout.

Key words: subsea tunnels; three parallel holes; water inflow; pore water pressure; seepage velocity; grouting parameters