

粉细砂地层盾构隧道拱部开挖围岩结构 安全性数值模拟

赵 波

(中铁十八局集团市政工程有限公司, 天津 300222)

摘要: 粉细砂地层具有非线性力学特性, 盾构隧道拱部开挖围岩结构引起的几何变形较大, 为研究渗透系数、衬砌厚度等因素的影响, 采用数值模拟分析了粉细砂地层盾构隧道拱部开挖围岩结构安全性。基于 COMSOL Multiphysics 软件确定网格划分原则; 根据盾构隧道工程实际情况构建盾构隧道拱部开挖围岩结构的几何模型, 并设定盾构隧道的土层参数; 基于弹性模量参数计算隧道结构参数, 记录盾构隧道的位移量及应力变化。结果表明, 盾构隧道拱部开挖过程中, 隧道的水平位移量最大值为 3.5 mm, 坚向位移量最大值为 2.2 mm, 最大应力值为 2.9 MPa; 当衬砌厚度为 56 cm 时, 盾构隧道的安全系数达 9.09; 粉细砂地层盾构隧道开挖对围岩结构的影响较小; 与坚向位移相比, 渗透系数对水平位移量的影响较大; 开挖过程中的衬砌厚度会影响围岩结构的安全性。

关键词: 粉细砂地层; 盾构隧道施工; 拱部开挖; 围岩结构; 结构安全性; 数值模拟

中图分类号: U459.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2026)02-0009-06

引文格式: 赵 波. 粉细砂地层盾构隧道拱部开挖围岩结构安全性数值模拟 [J]. 湖南工业大学学报, 2026, 40(2): 9-14.

Numerical Simulation of the Safety of Surrounding Rock Structure During Excavation of Shield Tunnel Arches in Fine Sand Formations

ZHAO Bo

(China Railway 18th Bureau Group Municipal Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: In view of the nonlinear mechanical properties of the fine sand formations as well as the significant geometric deformation caused by excavation of the surrounding rock structure at the arch of shield tunnels, a numerical simulation is used for the analysis of the safety of the surrounding rock structure during excavation of the arch of shield tunnels in fine sand formations to study the influence of such factors as permeability coefficient and lining thickness. The principle of grid division can be determined by adopting COMSOL Multiphysics software. According to the actual situation of shield tunnel engineering, a geometric model is constructed of the surrounding rock structure of the arch excavation of the shield tunnel, thus helping to set the soil parameters of the shield tunnel. Based on the elastic modulus parameter, the tunnel structure parameters can be calculated, with the displacement and stress changes of the shield tunnel recorded as well. The results show that during the excavation process of the arch of the shield tunnel, the maximum horizontal displacement of the tunnel is 3.5 mm, the maximum vertical displacement is 2.2 mm, and the maximum stress value is 2.9 MPa. With the lining thickness being 56 cm, the safety factor of the shield tunnel reaches as high as 9.09. The excavation of shield tunnels in fine sand formations is characterized with a relatively small impact

收稿日期: 2024-06-14

作者简介: 赵 波, 男, 中铁十八局集团市政工程有限公司助理工程师, 主要研究方向为工程安全技术管理,

E-mail: M126HUAMULAN@126.com

on the surrounding rock structure. Compared with vertical displacement, the permeability coefficient exerts a greater impact on horizontal displacement, with the thickness of the lining during excavation being a potential factor affecting the safety of the surrounding rock structure.

Keywords: fine sand formation; shield tunnel construction; arch excavation; surrounding rock structure; structural safety; numerical simulation

0 引言

盾构隧道作为一种高效、安全的地下交通工程，在城市建设与地下交通网络中扮演着越来越重要的角色。特别是在地质条件复杂、地层多变的地区，盾构隧道建设面临着诸多技术挑战和安全隐患^[1-3]。粉细砂地层作为一类典型的软弱地层，其工程性质复杂，对盾构隧道拱部开挖的围岩稳定性构成了严重威胁。这是因为粉细砂地层具有颗粒细、渗透性低、高压缩性等特点，使得盾构隧道在拱部开挖过程中极易发生围岩失稳或坍塌等安全事故。同时，盾构隧道施工过程中还受到地下水和地应力等多种因素的影响，使得围岩结构的稳定性分析更加复杂。因此，准确评估盾构隧道在粉细砂地层中拱部开挖的围岩稳定性，成为盾构隧道工程亟待解决的关键问题^[4-6]。现有研究缺乏对粉细砂地层盾构隧道拱部开挖围岩稳定性的系统研究，且在数值模拟时，由于条件限制，往往会忽略地下水、应力等因素，导致模拟结果的准确性和可靠性受限。

为此，本文针对粉细砂地层盾构隧道拱部开挖围岩结构安全性开展数值模拟研究。通过数值模拟方法，深入分析粉细砂地层盾构隧道拱部开挖过程中围岩结构的力学响应和变形规律，揭示围岩结构失稳机制，为盾构隧道施工安全和围岩稳定性评价提供科学依据。为盾构隧道施工提供理论依据和技术支持，指导施工人员选择合理的开挖方法和支护措施，确保盾构隧道施工安全，并提高支护结构的承载能力，减少施工对围岩结构的损坏，预测隧道施工风险，制定相应的风险控制措施，以降低施工风险。此外，通过本研究减少现场试验次数和成本，缩短工期，提高施工效率。同时，优化支护结构和施工方案可以降低工程造价，提高工程经济效益。

1 工程概况

本工程以某盾构隧道为研究对象，该工程在建设中采用盾构法施工，其施工范围如图1所示。

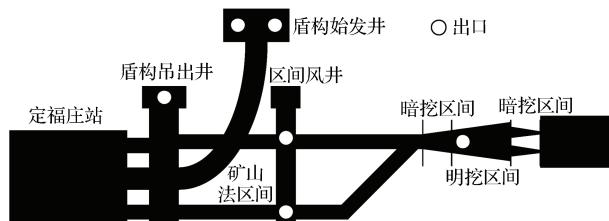


图1 盾构施工范围示意图

Fig. 1 Schematic diagram of shield tunnel construction scope

图1所示盾构施工开挖区域由定福庄站开始，自盾构始发井进行盾构开挖，分为明挖段与暗挖段，地势西高东低，局部存在起伏，地面标高为26~43 m。该区域土层主要为粉质黏土，土质类型多样，因而增加了施工难度。勘探结果显示，该区域地下水的台地浅层水水位标高为29.0~32.0 m。层间水位标高为21.0~26.0 m。地下水会影响施工进度，并影响围岩结构钢筋，因此需考虑该因素。

2 模型构建与参数设置

以某盾构隧道工程为对象，构建盾构隧道拱部开挖围岩结构安全性数值模拟模型。在构建模型时，考虑模型的真实性和可靠性，需要考虑以下事项：一是根据工程实际情况，准确模拟盾构隧道开挖后围岩结构的实际状态；二是全面考虑工程中各种因素，确保模拟结果的真实性，同时在保证模型精度的前提下简化模型，提高模型的模拟效率；三是考虑盾构隧道施工对周边环境的影响，为施工过程的环保性和可持续性奠定基础^[7]。基于以上构建原则，本研究采用COMSOL Multiphysics有限元软件，建立相应的数值模拟模型。

2.1 几何模型构建

基于某盾构隧道工程的工程概况，并考虑地下水对地质条件的影响，利用有限元软件构建相应的隧道开挖围岩结构几何模型^[8]，如图2所示。该盾构隧道的开挖跨度约18.4 m，隧道宽12.3 m，高8.6 m，围岩厚度为15.4 m。

在开挖时，为减少降雨对工程的影响，需要在轮

廓外侧进行注浆处理, 提高隧道稳定性, 减少隧道灾害发生^[9]。

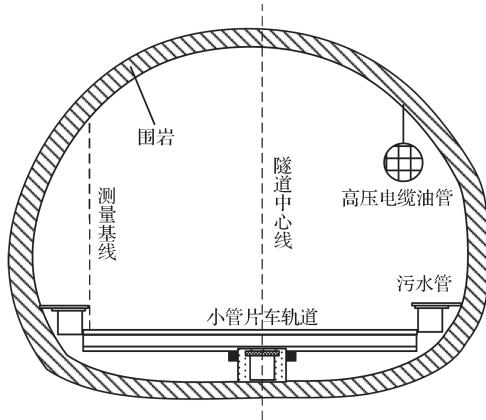


图2 盾构隧道拱部开挖围岩结构的几何模型

Fig. 2 Geometric model of the surrounding rock structure during the excavation of the shield tunnel arch

2.2 材料参数设置

根据构建的几何模型, 结合盾构隧道的土层结构, 设定相应参数^[10], 如表1所示。

表1 盾构隧道土层参数的设定

Table 1 Setting of soil parameters for shield tunnel

土层	重度 / (kN·m ⁻²)	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	泊松比
杂填土	19.0	5.0	15.0	0.35
粉质黏土	18.0	11.0	16.0	0.30
素填土	19.5	21.0	14.0	0.32
卵石	18.7	22.3	15.0	0.33
粉砂	18.5	30.2	16.0	0.28
细砂	17.8	25.4	18.2	0.36
黏质粉土	19.2	26.3	16.2	0.24
砂质粉土	18.3	27.2	13.2	0.65
黏土	17.2	26.5	15.4	0.36
圆砾	16.9	21.2	16.0	0.54
中砂	18.2	23.2	18.0	0.25

由表1可知, 不同的参数反映了土层的不同性能, 为后续构建网格结构模型奠定了基础。在此基础上, 设定盾构隧道拱部开挖围岩结构的相关参数。在设定参数时, 需要计算相应结构的弹性模量, 其具体计算公式为

$$E_t = F_\sigma / F_v, \quad (1)$$

式中: E_t 为弹性模量; F_σ 为盾构隧道工程多个结构在开挖过程中承受的应力值; F_v 为当前结构在应力作用下的变形量。

由式(1)计算出隧道结构的弹性模量^[11], 由于隧道涉及地下水层, 需要考虑地下水渗流与围岩结构变形、应力变化之间的耦合作用, 因此采用 Biot 固结理论构建渗流-应力耦合模型, 其表达式为

$$k \frac{\partial^2 h}{\partial F_v} + \frac{\partial F_\sigma}{\partial t} = 0. \quad (2)$$

式中: k 为渗透系数; h 为水头取值。

基于此, 实现对隧道结构参数的设定, 具体如表2所示。在后续设计中, 设置相应边界条件, 构建对应的网格模型。

表2 盾构隧道拱部开挖围岩结构的参数设定

Table 2 Parameter setting of the surrounding rock structure during excavation of the shield tunnel arch

结构编号	弹性模量 / GPa	泊松比	密度 / (kg·m ⁻³)	抗压强度 / MPa	渗透系数 / (m·s ⁻¹)	厚度 / m
盾构管片	35	0.20	7 800	40	-	-
注浆材料	1	0.30	2 000	10	-	-
初期支护	25	0.25	2 500	25	-	-
临时支撑	18	0.33	-	-	-	3
隧道衬砌	30	0.20	2 400	30	-	-
防水层	25	0.44	1 800	-	1e-10	-

2.3 网格结构模型构建

网格结构模拟需构建相应的网格结构模型。其模拟结果具体如图3所示。

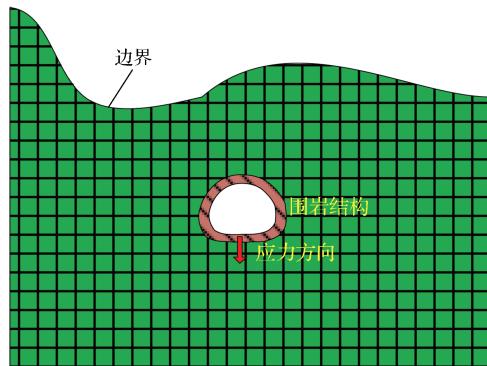


图3 网格结构模型结果

Fig. 3 Simulation results of the grid structure

由图3可知, 在构建网格结构模型时, 结合前文设定的材料参数和结构参数, 确定模型边界。该边界条件为 45 m × 45 m × 120 m, 包含 9 865 472 个单元, 6 532 个节点。由此, 划分多个网格结构, 从而对盾构隧道的围岩结构进行逐一确定。

针对不同网格的位移和应力进行计算, 并对计算结果进行分析。同时, 为进一步提高网格结构模型的性能, 需设置相应约束条件^[12-13], 所设约束条件为

$$\mathbf{K}_a \mathbf{u}_a = \mathbf{F}_z - \mathbf{F}_p. \quad (3)$$

式中: \mathbf{K}_a 为隧道工程的应力矩阵; \mathbf{u}_a 为隧道工程不同结构的位移量; \mathbf{F}_z 为隧道工程不同结构所承受的应力; \mathbf{F}_p 为渗流排水力。

式(3)为网格结构模拟时的位移和应力关系方程, 以保证网格结构模拟精度。

2.4 监测点设置

为了更好地分析粉细砂地层中盾构隧道拱部开挖围岩结构安全性数值模拟结果,需在盾构隧道围岩结构中设置相应的测点^[14-15]。布设测点时,需在隧道的关键位置布设传感器,实时记录盾构隧道开挖过程中围岩的变形量与应力数据。监测点的具体布设如图4所示。在隧道中布置了多个监测点,利用其实时记录隧道结构的应力变化。统计监测结果,用于后续实验分析。

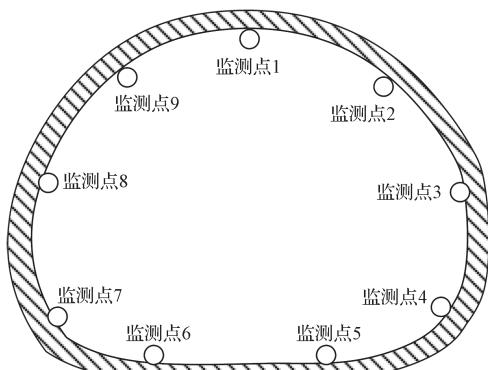


图4 监测点的具体分布图

Fig. 4 Specific distribution map of monitoring points

3 数值模拟结果分析

3.1 拱部开挖后围岩的结构位移量及应力分析

根据布设点监测,统计各监测点的盾构隧道位移量和应力变化,具体见表3。

表3 盾构隧道位移量及应力变化

Table 3 Displacement and stress changes of the shield tunnel

监测点	水平位移量 / mm	竖向位移量 / mm	最大应力值 / MPa	最小应力值 / MPa
1	2.5	1.8	1.5	0.6
2	3.1	2.2	1.6	0.7
3	2.8	2.0	1.9	0.6
4	3.2	2.1	2.1	0.5
5	2.7	1.9	2.2	0.8
6	2.9	1.8	1.6	0.6
7	3.3	1.7	2.3	0.7
8	3.5	2.2	2.6	0.9
9	2.9	2.2	2.9	0.6

由表3可知,隧道围岩结构的水平位移量为2.5~3.5 mm,表明该隧道开挖过程对围岩结构的扰动较小,竖向位移量为1.7~2.2 mm,说明该隧道开挖对地层沉降的影响较小,且不同监测点的位移变化较为稳定,未出现极值,表明该开挖过程对地层的影响总体稳定。监测点的最大应力值为1.5~2.9 MPa,最

小应力值为0.5~0.9 MPa,均处于安全范围,应力影响较小。各监测点的应力分布情况如图5所示。

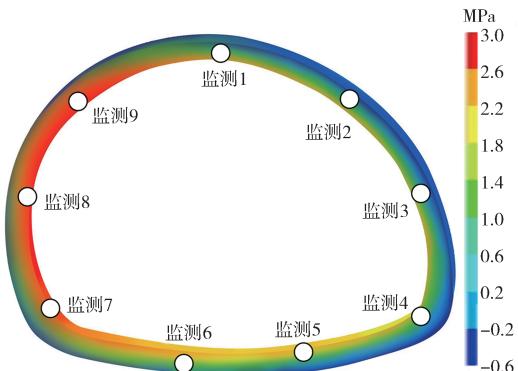


图5 不同监测点的应力分布图

Fig. 5 Stress distribution map of different monitoring points

3.2 拱部开挖围岩结构位移量随时间变化分析

以位移量最大的监测点8为例,分析不同监测点的盾构隧道位移变化,统计结果如图6所示。

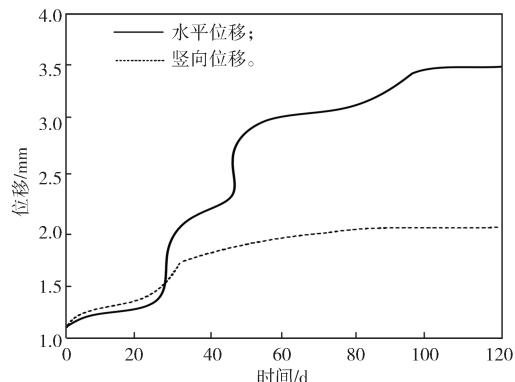


图6 位移随时间变化曲线

Fig. 6 Curves of displacement variation with time

由图6可知,施工前60 d,开挖围岩的水平位移随时间的增加而迅速增加,60 d后虽然仍在增加,但增长趋势渐缓。至100 d左右,位移量不再明显增加,达到最大值3.5 mm。竖向位移在前30 d随时间增加而快速增加,30 d后增长速度减缓,在70 d左右稳定于2.2 mm。

3.3 开挖围岩的结构位移随地下水渗流速率变化规律分析

以最靠近地下水防水层的监测点6为例,分析不同地下水渗流速率下盾构隧道的位移变化,统计结果如图7所示。由图7可知,在隧道开挖过程中,如果围岩的渗透系数增大,地下水更易排出,孔隙水压力下降得更快,隧道围岩有效应力增大,隧道围岩的水平和竖向位移增大。渗透过程中,隧道围岩坑壁土体的稳定性会受更大影响,因此其水平位移大于竖向位移。

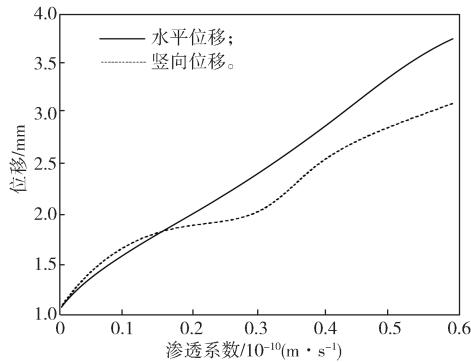


图 7 位移随渗流速度的变化曲线

Fig. 7 Curves of displacement variation with seepage velocity

3.4 拱部开挖后围岩结构安全系数分析

本次实验中, 将安全系数作为评价指标, 比较不同衬砌厚度下围岩结构的安全系数。同时, 考虑不同衬砌材料在长期受地下水侵蚀和应力循环等作用下的安全性变化, 加入渗流系数及外力作用时间, 安全系数的具体计算公式如下:

$$\begin{cases} K_n = N_c / N_k dk, \\ N_c = \varphi_c \alpha_c R_\alpha b_c h_c, \\ N_k = \varphi_c \times \frac{1.75 R_\beta b_c h_c}{6e/h_c - 1}. \end{cases} \quad (4)$$

式中: K_n 为计算的安全系数; N_c 为围岩结构所能承受的极限承载力; N_k 为围岩结构的实际承载力; φ_c 为围岩结构的纵向系数; R_α 为围岩结构的极限抗压强度; b_c 为围岩结构的截面积; h_c 为围岩结构的截面厚度; α_c 为偏心影响系数; R_β 为围岩结构的极限抗拉强度; d 为应力作用时间。

通过公式(4), 计算出不同衬砌厚度下围岩结构的安全系数, 具体如表4所示。

表 4 围岩结构的安全系数

Table 4 Safety factor of the surrounding rock structure

序号	衬砌厚度 /cm	安全系数	序号	衬砌厚度 /cm	安全系数
1	27	5.31	8	42	6.36
2	29	5.45	9	46	7.11
3	30	5.53	10	48	7.38
4	31	5.69	11	56	9.09
5	33	5.72	12	58	8.11
6	35	6.05	13	63	7.43
7	40	6.18			

由表4可知, 随着衬砌厚度增加, 围岩结构的安全系数随之增加。当衬砌厚度达56 cm时, 围岩结构的安全系数达最大值9.09。此后, 衬砌厚度继续增加, 但围岩结构的安全系数不再增加, 反而降低。这是因为衬砌厚度过大, 会对围岩结构的安全性产生不利影响。因此, 在实际工程中, 将衬砌厚度控制在合理范

围, 可有效保证围岩结构的安全性。

进一步探讨不同地质条件下盾构隧道开挖的安全差异: 在单一粉细砂层中, 盾构隧道拱部开挖时, 若支护措施得当, 围岩结构安全性较好。但需注意砂层的流动性, 防止开挖面失稳。黏土层的存在可提高围岩整体性。含水粉细砂层的围岩稳定性较差, 易发生涌水、坍塌等事故。

考虑衬砌材料对围岩结构安全性的影响, 在粉细砂地层中, 由于围岩稳定性较差, 采用钢筋混凝土或钢壳等强度较高的衬砌材料。这是因为高强度的衬砌材料能有效抵抗围岩压力, 防止围岩变形和破坏。

本文对盾构隧道的支护方式包括管片支护、注浆加固。由表3可知, 这种支护方式下围岩强度与稳定性均显著提升, 降低了开挖过程中的坍塌风险。

4 结语

本研究通过精细的数值模拟, 深入剖析了粉细砂地层中盾构隧道拱部开挖过程中围岩结构的动态响应特性, 为实际盾构隧道施工提供了重要的理论依据和技术支撑。隧道工程中, 特别是在复杂地质条件的粉细砂地层中, 围岩结构的稳定性直接关系到隧道施工的安全和效率, 通过数值模拟, 可以预测并评估不同施工参数下围岩结构的位移和应力状态, 为实际施工提供科学决策依据。有助于优化盾构隧道的开挖与支护设计, 降低施工风险, 提高施工的质量和效率。

参考文献:

- [1] 付功云, 王立彬, 青舟, 等. 复杂条件下盾构施工BIM管理平台研发及应用: 以大连地铁5号线海底隧道工程为例 [J]. 铁道标准设计, 2023, 67(11): 113–120.
FU Gongyun, WANG Libin, QING Zhou, et al. Development and Application of BIM Management Platform for Shield Construction Under Complex Conditions: Relying on the Submarine Tunnel Project of Dalian Metro Line 5[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(11): 113–120.
- [2] 张涛, 石钰峰, 周宇航, 等. 不同埋深下砂性地层盾构隧道衬砌荷载研究 [J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊2): 2682–2688.
ZHANG Tao, SHI Yufeng, ZHOU Yuhang, et al. Study on Lining Load of Shield Tunnel in Sandy Stratum Under Different Buried Depths[J]. Building Structure, 2022, 52(S2): 2682–2688.
- [3] 赵平, 徐锋, 王华东, 等. 隧道衬砌厚度对结构安全性及裂缝演化规律影响研究 [J]. 工业建筑,

- 2023, 53(11): 11–20.
- ZHAO Ping, XU Feng, WANG Huadong, et al. Influence of Tunnel Lining Thickness on Structural Safety and Evolution Laws of Crack[J]. Industrial Construction, 2023, 53(11): 11–20.
- [4] 杨朝帅, 崔臻, 牛富生, 等. 隧道衬砌病害对结构安全性影响机理研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(4): 180–186.
- YANG Chaoshuai, CUI Zhen, NIU Fusheng, et al. Influence Mechanism on Structural Safety by Tunnel Liner Diseases[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2023, 21(4): 180–186.
- [5] 王一鸣, 王浩璇. 基于数值模拟的隧道衬砌高水压风险评估 [J]. 长江工程职业技术学院学报, 2023, 40(1): 1–5.
- WANG Yiming, WANG Haoxuan. Risk Assessment of High Hydraulic Pressure Upon Tunnel Lining Based on Numerical Simulation[J]. Journal of Changjiang Institute of Technology, 2023, 40(1): 1–5.
- [6] 崔光耀, 克旭, 郭艳军. 城市浅埋双连拱双层隧道结构安全性分析 [J]. 太原学院学报(自然科学版), 2023, 41(1): 1–6.
- CUI Guangyao, KE Xu, GUO Yanjun. Analysis on the Structural Safety of Urban Shallow Buried Twin-Arch and Double-Deck Tunnels[J]. Journal of Taiyuan University (Natural Science Edition), 2023, 41(1): 1–6.
- [7] 潘涛. 软土地区双线区间盾构隧道施工对周边地表以及建筑物沉降的影响 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 101–108.
- PAN Tao. Influences of Double-Track Shield Tunnel Construction on Settlements of Adjacent Ground and Buildings in a Soft Soil Area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 101–108.
- [8] 张桥. 小三峡岩溶隧道围岩防突层安全厚度有限元分析 [J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 614–621.
- ZHANG Qiao. Finite Element Analysis on Safety Thickness of the Inrush Prevention Layer in Rock Beds of the Small Three Gorges Karst Tunnel[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(4): 614–621.
- [9] 侯圣均, 张少强, 王忠杰, 等. 开挖和降雨条件下类岩堆体隧道边坡稳定性试验研究 [J]. 地球科学前沿, 2021(5): 590–600.
- HOU Shengjun, ZHANG Shaoqiang, WANG Zhongjie, et al. Model Test on Tunnel Slope Stability of Talus-Type Rock Mass Under Excavation and Rainfall[J]. Advances in Geosciences, 2021(5): 590–600.
- [10] 鲍彤, 车增军, 张素磊, 等. 拱顶背后空洞对直墙式隧道结构安全性影响分析 [J]. 青岛理工大学学报, 2021, 42(4): 9–17.
- BAO Tong, CHE Zengjun, ZHANG Sulei, et al. Analysis of the Influence of the Cavity Behind the Vault on the Safety of the Straight Wall Tunnel Structure[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2021, 42(4): 9–17.
- [11] 周俊宏, 郎亮, 吴奕环, 等. 类矩形盾构隧道无立柱衬砌结构设计及参数研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(12): 50–55.
- ZHOU Junhong, LI Liang, WU Yihuan, et al. Design and Parameter Study of Pillarless Lining Structure for Quasi-Rectangular Shield Tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(12): 50–55.
- [12] 周国志. 基于FLAC3D的盾构施工穿越高架桥梁桩基稳定性影响数值试验研究 [J]. 北方交通, 2020(10): 5–10.
- ZHOU Guozhi. Numerical Experimental Study on Influence of Shield Construction on the Stability of Viaduct Pile Foundation Based on FLAC 3D[J]. Northern Communications, 2020(10): 5–10.
- [13] 薛红京, 高志斌, 杜伟农, 等. 8度抗震设防烈度区板柱-剪力墙高层结构安全性能分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(5): 165–174.
- XUE Hongjing, GAO Zhibin, SHU Weinong, et al. Safety Performance Analysis of Slab-Column Shear Wall High-Rise Structures in an 8-Degree Seismic Fortification Intensity Area[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(5): 165–174.
- [14] 陈小飞, 李创, 陈德刚, 等. 围岩-支护不同接触状态对隧道结构安全性影响分析 [J]. 青岛理工大学学报, 2023, 44(4): 64–72.
- CHEN Xiaofei, LI Chuang, CHEN Degang, et al. Influence of Different Contact States Between Surrounding Rock and Support on Tunnel Structure Safety[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2023, 44(4): 64–72.
- [15] 韩兴博, 陈子明, 苏恩杰, 等. 盾构隧道围岩压力分布规律及作用模式 [J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2022, 4(4): 34–43.
- HAN Xingbo, CHEN Ziming, SU Enjie, et al. The Distribution Law and Action Mode of Surrounding Rock Pressure of Shield Tunnel[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2022, 4(4): 34–43.

(责任编辑: 姜利民)