

富水混合花岗岩地层地铁隧道施工中地面注浆止水帷幕的设计参数优化*

刘健美¹ 刘旭² 徐加兵³ 张聪² 魏井申⁴ 王树英⁵ 蔡根森⁵

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州; 2. 中南林业科技大学土木工程学院, 410004, 长沙;

3. 中铁建华南建设有限公司, 510220, 广州; 4. 中铁十二局集团第四工程有限公司, 710016, 西安;

5. 中南大学土木工程学院, 410075, 长沙)

摘要 [目的] 富水混合花岗岩地层新建隧道施工受地下水的影响显著, 通常采用地面预注浆形成止水帷幕的措施来降低地下水对隧道施工过程的影响。但止水帷幕设计参数的选择大多以经验为主, 可能存在隔水效果不佳、水位降低显著导致地层沉降超限, 以及隧道周围突涌水等现象, 故需要对富水混合花岗岩地层注浆帷幕设计参数进行优化。[方法] 依托广州地铁 18 号线番禺广场站—南村万博站区间工程, 基于正交试验设计, 通过数值模拟分析了止水帷幕设计参数(帷幕深度、帷幕厚度、帷幕渗透系数及帷幕与隧道间距离)对注浆隔水效果的影响; 采用 SPSS 软件进行多元线性回归分析, 拟合了选取止水帷幕设计参数的经验公式, 获取了止水帷幕最优设计参数并进行工程应用。[结果及结论] 止水帷幕的影响因素按影响程度排序依次为: 帷幕渗透系数、帷幕深度、帷幕厚度、帷幕与隧道间距离; 现场选取的止水帷幕设计最优参数中, 帷幕深度为 58 m、帷幕厚度为 2.0 m、帷幕渗透系数为 1×10^{-10} m/s、帷幕与隧道间距离为 0.5 m。现场工程实践表明, 采用最优参数后, 止水帷幕降低地下水位效果较好, 隧道开挖时的围岩稳定且开挖面干燥, 地下水对隧道开挖的影响得以有效降低。

关键词 地铁; 隧道施工; 止水帷幕; 正交试验; 设计参数
中图分类号 U455.49

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.06.020

Optimization of Design Parameters of Ground Grouting Waterproof Curtain in Water-Rich Mixed Granite Stratum

LIU Jianmei¹, LIU Xu², XU Jiabing³, ZHANG Cong², WEI Jingshen⁴, WANG Shuying⁵, CAI Gensen⁵

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, 410004, Changsha, China; 3. China Railway Construction South China

Construction Co., Ltd., 510220, Guangzhou, China; 4. The 4th Engineering Co. Ltd. of China Railway 12th Bureau Group, 710016, Xi'an, China; 5. School of Civil Engineering, Central South University, 410075, Changsha, China)

Abstract [Objective] Construction of new tunnel in water-rich mixed granite stratum is significantly affected by groundwater, so ground pre-grouting is usually adopted to form a waterproof curtain in order to reduce the effect of groundwater on the tunnel construction process. However, the design parameters of the waterproof curtain are selected mostly on the basis of experience, probably leading to phenomena like poor waterproof result, excessive ground settlement caused by significant water level decrease, and sudden water inrush around the tunnel. Therefore, it is necessary to optimize the design parameters of ground grouting waterproof curtain in water-rich mixed granite stratum. [Method] Based on the section project between Panyu Square- Nancun Wanbo Stations on Guangzhou Metro Line 18 and with orthogonal experimental design, the influence of waterproof curtain design parameters (curtain depth, curtain thickness, curtain permeability coefficient and distance between curtain and tunnel) on the grouting waterproof result is analyzed by numerical simulation. The SPSS software is used for multiple linear regression analysis, an empirical formula is fitted for selecting the design parameters of waterproof curtain, the optimal design parameters of waterproof curtain are obtained and applied in engineering. [Result & Conclusion] The influencing factors of the waterproof curtain are listed in order of influence degree as permeability coefficient, curtain depth, curtain thickness, and distance between curtain and tunnel. The optimal design parameters selected on site are as follows: the curtain depth of 58m, the curtain thickness of 2m, the permeability coefficient of 1×10^{-10} m/s, and the distance between curtain and tunnel of 0.5 m. The on-site engineering

* 广东省城市轨道交通工程建造新技术企业重点实验室资助项目(2017B030302009)

practice shows that after using the optimal parameters, the waterproof curtain performs well on reducing the groundwater level, the surrounding rock is stable and the excavation surface is dry during tunnel excavation, and the influence of groundwater on the tunnel excavation is effectively reduced.

Key words metro; tunnel construction waterproof curtain; orthogonal experiment; design parameters

为了减小地下水对隧道开挖的影响,一般采用降低水位、隔离地下水及底部地基加固等措施对开挖区间进行降水处理。其中,采用地面注浆形成止水帷幕措施具有隔水效果显著、适用性广泛和对环境影响较小等优点,在工程上被广泛应用^[1-2]。然而,在工程施工中,止水帷幕设计参数的选择大多以经验为主,故施工完成后的止水帷幕可能存在隔水效果不佳、水位降低显著导致地层沉降超限,以及隧道周围突涌水等现象^[3-4]。

近年来,许多学者围绕止水帷幕参数设计开展了广泛的研究。文献[5]采用数值模拟的方法,探讨了止水帷幕开口大小(埋深和密度)对其止水能力及对周边地下水环境的影响规律;文献[6]研究了注浆与否及注浆厚度等对地下水的影响;文献[7]分析了不同止水帷幕深度、帷幕厚度和帷幕渗透系数对稳态渗流场的影响。研究发现,止水帷幕深度、厚度、渗透系数及其到隧道距离等因素是影响的主要因素^[8-10],且针对不同施工环境确定合理的止水帷幕设计参数仍是目前工程上亟待解决的难题。

鉴于此,本文基于数值模拟方法,选用 L16(4⁴) 正交表作为正交试验设计,并且定义孔隙水压力为评价指标,依次分析帷幕深度、帷幕厚度、帷幕渗透系数,以及帷幕与隧道间距离等 4 个因素对孔隙水

压力的影响规律,并拟合孔隙水压力的多元线性回归方程。选取最优的止水帷幕设计参数,从而降低地下水对隧道开挖的影响,保证新建隧道的安全开挖,以期类似工程提供理论指导。

1 工程概况

新建的广州地铁 18 号线番禺广场站—南村万博站区间隧道(以下简称“新建隧道”)拟下穿既有运营的广州地铁 7 号线隧道(以下简称“既有隧道”),新建隧道下穿区间设计起讫里程为 YDK43 + 722.000—YDK43 + 763.100。新建隧道下穿区间左线采用双侧壁导坑法施工,断面跨度为 15.6 m,高度为 13.8 m,与既有隧道最小垂直净距为 4.6 m;右线采用 CRD(交叉中隔墙)法施工,断面跨度为 12.0 m,高度为 11.6 m,与既有隧道最小垂直净距为 4.5 m。施工场地地层如图 1 所示。现场勘察显示,施工场地地质条件差,主要地层为混合花岗岩残积土层、全风化层、强风化层、中风化层及微风化层,该类土遇水易崩解软化。施工场地的地层参数见表 1。

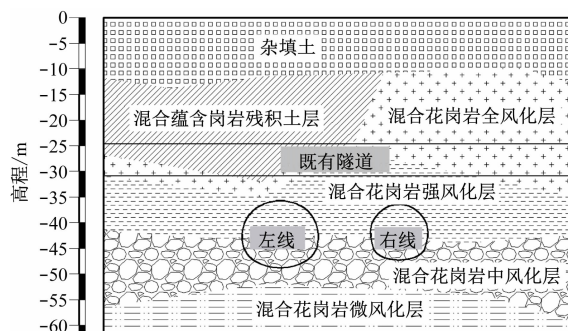


图 1 施工场地地层图

Fig. 1 Stratigraphic map of construction site

表 1 施工场地的地层参数

Tab. 1 Formation parameters of construction site

地层	密度/(kg/m ³)	孔隙率	泊松比	弹性模量/MPa	渗透系数/(10 ⁻¹⁰ m/s)
杂填土层	1 850	0.47	0.30	20	2.31
混合花岗岩残积土层	1 910	0.41	0.27	22	1.16
混合花岗岩全风化层	2 100	0.38	0.25	75	3.47
混合花岗岩强风化层	2 300	0.35	0.23	80	9.26
混合花岗岩中风化层	2 500	0.33	0.20	5 000	10.40
混合花岗岩微风化层	2 600	0.30	0.20	20 000	11.60

施工场地地下水位相对较浅,初始水位埋深为

2.00 ~ 2.80 m,稳定水位埋深为 2.20 ~ 3.10 m。在

富水混合花岗岩地层中施工新建隧道时,在渗透压力、地应力及工程开挖的共同影响下,极易失稳破坏引发突涌水。根据水文地质资料,该地层区域地下水丰富,直接进行降排水易引起场地周边地下水位的下降,从而导致既有隧道沉降及地面沉陷等问题。因此,在新建隧道下穿既有运营线施工之前有必要对地层进行井点降水,并在新建隧道两侧分别形成注浆止水帷幕,从而降低新建隧道周围地下水位,进而保障既有运营地铁线的安全运行。

2 构建模型与试验设计

2.1 数值模型的构建

本研究采用 COMSOL Multiphysics 多物理场数值软件进行数值分析,选用固体力学模型和达西定律模型来模拟应力场状态和渗流场状态。此外,考虑模型的复杂性和计算效率,仅建立二维平面数值模型(如图2所示)。为了消除边界效应、尺寸效应等影响,模型的厚度设置为 120 m,模型平面尺寸为 120 m(x 向) \times 68 m(y 向)。模型边界条件为:模型底部为固定约束,左右两侧为辊支撑约束,隧道内部为自由约束,模型四周为无流动边界,且采用稳态模式进行求解。

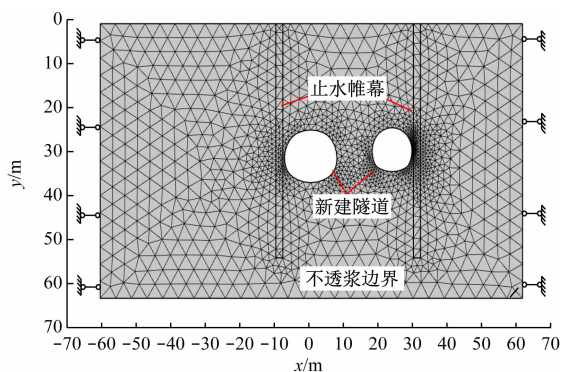


图2 二维平面数值模型

Fig.2 Two dimensional plane numerical model

2.2 正交试验方案设计

根据实际施工工况,选取影响止水帷幕隔水效果的4个因素:帷幕深度(因素A)、帷幕厚度(因素B)、帷幕渗透系数(因素C)以及帷幕与隧道间距离(因素D)开展正交试验^[11-12],每个因素分别选取4个水平。其中,帷幕深度(因素A)选择的4个水平为43 m、48 m、53 m、58 m;帷幕厚度(因素B)选择的4个水平为0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m;帷幕渗透系数(因素C)选择的4个水平为 1.0×10^{-7} m/s、

1.0×10^{-8} m/s、 1.0×10^{-9} m/s、 1.0×10^{-10} m/s;帷幕与隧道间距离(因素D)选择的4个水平为0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m。选取的L16(4^4)正交试验设计工况如表2所示。

表2 不同工况下正交试验的因素及水平

Tab.2 Factors and levels of orthogonal test under different construction conditions

工况序号	因素 A/m	因素 B/m	因素 C/(m/s)	因素 D/m
1	43	0.5	1×10^{-7}	0.5
2	43	1.0	1×10^{-8}	1.0
3	43	1.5	1×10^{-9}	1.5
4	43	2.0	1×10^{-10}	2.0
5	48	0.5	1×10^{-8}	1.5
6	48	1.0	1×10^{-7}	2.0
7	48	1.5	1×10^{-10}	0.5
8	48	2.0	1×10^{-9}	1.0
9	53	0.5	1×10^{-9}	2.0
10	53	1.0	1×10^{-10}	1.5
11	53	1.5	1×10^{-7}	1.0
12	53	2.0	1×10^{-8}	0.5
13	58	0.5	1×10^{-10}	1.0
14	58	1.0	1×10^{-9}	0.5
15	58	1.5	1×10^{-8}	2.0
16	58	2.0	1×10^{-7}	1.5

采用表2中16组正交试验设计参数,分别构建止水帷幕数值模型并进行模拟计算。为了更加直观描述帷幕隔水效果,本文选取数值计算结果中左侧隧道底部向下3.0 m处(以下简称“F点处”)孔隙水压力作为止水帷幕降水效果的评价指标,F点处孔隙水压力越小,则止水帷幕的作用效果越显著。

3 试验结果

3.1 正交试验结果分析

对每组试验水平进行数值模拟,计算得到16组试验数值计算结果中F点处的孔隙水压力结果,如表3所示。各影响因素对F点处孔隙水压力的影响规律如图3所示。

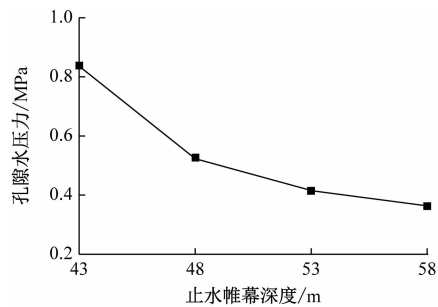
由图3可知:F点处孔隙水压力随着止水帷幕深度(因素A)的增大而逐渐减小;止水帷幕深度为43~48 m时,F点处孔隙水压力随止水帷幕深度的增加大幅减小,隔水效果显著增强;帷幕深度为53~58 m时,F点处孔隙水压力降幅减缓,隔水效果

仍增强;F点处孔隙水压力随着帷幕渗透系数(因素

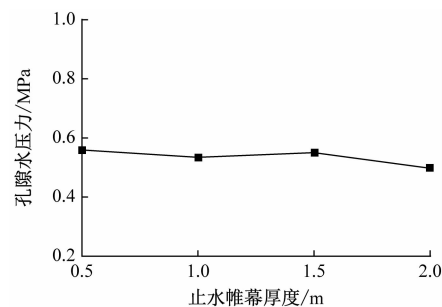
表3 正交试验结果

Tab.3 Orthogonal test results

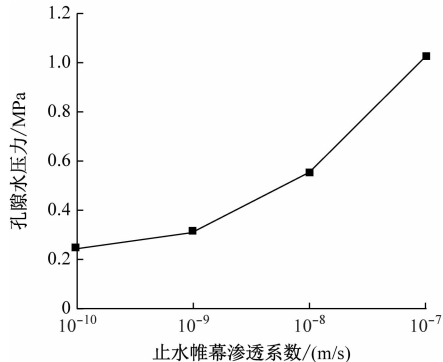
工况 序号	F点处孔隙水压力/ MPa	工况 序号	F点处孔隙水压力/ MPa
1	1.285 3	9	0.203 3
2	0.840 1	10	0.106 7
3	0.662 1	11	0.973 1
4	0.557 3	12	0.375 8
5	0.647 1	13	0.095 2
6	1.014 8	14	0.169 7
7	0.216 8	15	0.348 7
8	0.217 4	16	0.835 2



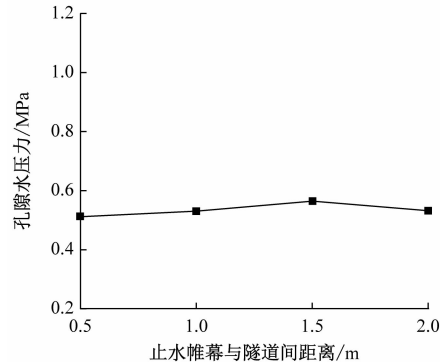
a) 止水帷幕深度对F点处孔隙水压力的影响规律



b) 止水帷幕厚度对F点处孔隙水压力的影响规律



c) 止水帷幕渗透系数对F点处孔隙水压力的影响规律



d) 止水帷幕与隧道间距离对F点处孔隙水压力的影响规律

图3 各影响因素对F点处孔隙水压力的影响规律

Fig. 3 Influence law of various influencing factors on pore water pressure at point F

表4 极差分析结果

Tab.4 Range analysis results

因素	K_1 / MPa	K_2 / MPa	K_3 / MPa	K_4 / MPa	极差/ MPa	按极差排序
因素A	0.836	0.524	0.415	0.362	0.474	2
因素B	0.558	0.533	0.55	0.496	0.062	3
因素C	1.027	0.553	0.313	0.244	0.783	1
因素D	0.512	0.531	0.563	0.531	0.051	4

注: K_1 — K_4 分别表示水平1—水平4对应的F点处孔隙水压力试验值之和。

C)的增大而增大,帷幕渗透系数由 1×10^{-10} m/s 增至 1×10^{-9} m/s 时,孔隙水压力增幅较小;帷幕渗透系数由 1×10^{-9} m/s 增至 1×10^{-7} m/s 时,孔隙水压力增幅较大。此外,止水帷幕厚度(因素B)、止水帷幕与隧道间距离(因素D)两个因素对F点处孔隙水压力的影响程度较弱。

3.2 极差分析

对正交试验所得各水平组合下的F点处孔隙水压力进行极差分析,进而判断各因素对其影响程度。极差分析结果如表4所示。

根据极差分析结果可知,各影响因素对止水帷幕降水效果影响顺序为:帷幕渗透系数>帷幕深度>

帷幕厚度>帷幕与隧道间距离。据此提出止水帷幕设计参数范围:止水帷幕的深度为53~58 m,厚度为1.0~2.0 m,渗透系数为 1×10^{-10} ~ 1×10^{-9} m/s,帷幕与隧道间距离为0.5~1.0 m。

根据上述分析,选取止水帷幕最优设计参数:止水帷幕深度为58 m,厚度为2.0 m,渗透系数为 10^{-10} m/s,距隧道距离为0.5 m。构建数值模型,计算得到F点处孔隙水压力云图,如图4所示。

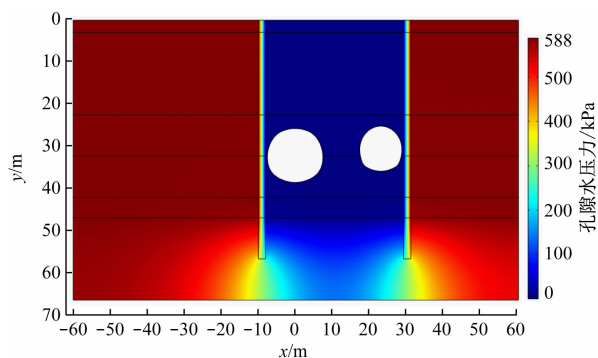


图4 F点处孔隙水压力云图

Fig. 4 Cloud map of pore water pressure at point F

3.3 多元线性回归分析

使用 SPSS 统计分析软件^[13]对正交试验数据进行多元线性回归分析,拟合 F 点处孔隙水压力与止水帷幕的设计参数之间的关系式。设止水帷幕深度为 X_1 、厚度为 X_2 、帷幕渗透系数为 X_3 、帷幕与隧道间距离为 X_4 ,孔隙水压力为 Y ,则多元线性回归方程为:

$$Y = a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_0 \quad (1)$$

式中:

a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 ——各项回归系数。

由试验数据拟合可得, $a_0 = 0.031, a_1 = 0.033, a_2 = 0.259, a_3 = 0.018, a_4 = 4.301$ 。其中,回归方程的相关系数为 0.935,拟合优度 $R^2 = 0.945$,表明止水帷幕的隔水效果同止水帷幕深度、厚度、帷幕渗透系数、帷幕与隧道间距离有较强的相关性。

4 工程应用与效果评价

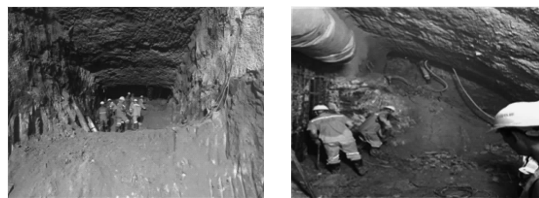
新建隧道在实际施工中采用袖阀管注浆进行地面帷幕注浆,在新建隧道两侧形成止浆隔水帷幕。注浆材料选用水玻璃-水泥双液浆,注浆参数根据现场试验确定。

基于数值模拟及分析,实际止水帷幕最优设计参数为:止水帷幕深度为 58 m,厚度为 2.0 m,渗透系数为 10^{-10} m/s,距隧道距离为 0.5 m。

现场施工完成后,地下水位自动化监测系统显示,隧道周围地下水位明显降低,地面注浆形成的止水帷幕隔水效果明显,且隧道开挖时,围岩稳定、开挖面干燥(见图 5)。这说明止水帷幕的参数选择合理,能有效降低地下水对隧道开挖的影响。

5 结语

通过正交试验及极差分析,影响止水帷幕的各



a) 围岩稳定

b) 开挖面干燥

图5 隧道开挖实景照片

Fig. 5 Tunnel excavation picture

因素按影响程度排序依次为:帷幕渗透系数、帷幕深度、帷幕厚度、帷幕与隧道间距离。这说明帷幕渗透系数对孔隙水压力的影响最为显著,其余因素的影响程度较弱。

给出了止水帷幕设计参数范围:帷幕深度为 53 ~ 58 m、帷幕厚度 1.0 ~ 2.0 m、帷幕渗透系数 $1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-9}$ m/s、帷幕与隧道间距离 0.5 ~ 1.0 m。工程实施效果表明,止水帷幕降低地下水位效果显著,且隧道开挖时,未出现大量涌水现象。

采用 SPSS 统计软件对正交试验数据进行多元线性回归分析,拟合了孔隙水压力与止水帷幕深度、厚度、帷幕渗透系数、帷幕与隧道间距离之间的经验公式,回归方程的相关系数为 0.935,拟合优度为 0.945。所提出的帷幕参数设计方法对于制定科学、合理、有效的止水帷幕设计方案,提高实际工程的安全性和经济性,以及降低地下水位具有重要的指导意义。

参考文献

- [1] 李方明,陈国兴. 江漫滩悬挂式止水帷幕基坑地面沉降变形研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(1): 33.
LI Fangming, CHEN Guoxing. Study of ground surface settlement and formation pit with suspended waterproof curtain in Yangtze River floodplain [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(1): 33.
- [2] 陈天明. 高原富水冰碛隧道洞内坍塌成因与处置技术研究: 以拉林铁路米林隧道为例[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(2): 274.
CHEN Tianming. Causes and countermeasures for collapse in a water-rich moraine tunnel in a plateau area: a case study on Milin tunnel of Lhasa-nyingchi railway [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(2): 274.
- [3] LIU J Q, YUEN K V, CHEN W Z, et al. Grouting for water and mud inrush control in weathered granite tunnel: a case study [J]. Engineering Geology, 2020, 279: 105896.
- [4] 韩林,孙国凯,路林海. 富水盾构接收施工控制技术及地表沉降分析[J]. 公路, 2019, 64(4): 312.
HAN Lin, SUN Guokai, LU Linhai. Construction control technology and surface settlement analysis of water rich shield receiving

- [J]. Highway, 2019, 64(4): 312.
- [5] 郑邦友, 陈富东, 雷明锋, 等. 考虑生态环境效应的止水帷幕设计方法初探[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(2): 68.
- ZHENG Bangyou, CHEN Fudong, LEI Mingfeng, et al. Preliminary study on design method of waterproof curtain considering ecological environment effect[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(2): 68.
- [6] 周旻旻. 基于限量排放思想的隧道防排水理论技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- ZHOU Minyang. Tunnel waterproof and drainage technology research based on the limit drainage idea [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.
- [7] 郭涛, 王海涛, 苏鹏, 等. 大连地铁 5 号线后盐站深基坑止水帷幕优化研究[J]. 大连交通大学学报, 2021, 42(3): 65.
- GUO Tao, WANG Haitao, SU Peng, et al. Optimization study of waterproof wall of deep foundation pit of houyan station on Dalian metro line 5[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2021, 42(3): 65.
- [8] 邱明明, 杨果林, 申权, 等. 地下连续墙与止水帷幕共同作用下富水砂层深基坑变形性状[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(11): 81.
- QIU Mingming, YANG Guolin, SHEN Quan, et al. Deformation characteristics of foundation pit excavation under the combined action of diaphragm wall and impervious curtain in water-rich sandy stratum[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(11): 81.
- [9] 杨艳青, 高永涛. 矿山边坡止水帷幕被动土压力及其影响因素研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(9): 99.
- YANG Yanqing, GAO Yongtao. Passive earth pressure of waterproof curtain in mine slope and its influencing factors[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(9): 99.
- [10] 赵阳, 雷国元, 徐亚, 等. 垂直防渗帷幕渗漏条件下示踪剂迁移模拟[J]. 中国环境科学, 2020, 40(7): 2985.
- ZHAO Yang, LEI Guoyuan, XU Ya, et al. Simulation of tracer transportation under the leak of vertical flexible barrier system [J]. China Environmental Science, 2020, 40(7): 2985.
- [11] 陈星佑, 张聪, 何怀光, 等. 基于多目标-理想点法的洞庭湖淤泥制备轻质骨料最优烧结条件[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(1): 29.
- CHEN Xingyou, ZHANG Cong, HE Huaiguang, et al. Multi-Objective Optimization of Sintering Condition of Lightweight Aggregate Prepared by Dongting Lake Silt by Ideal Point Method [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(1): 29.
- [12] 徐涛, 杨磊, 郭松涛, 等. 盾构弃渣在岩溶充填注浆材料中的资源化利用[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(11): 1842.
- XU Tao, YANG Lei, GUO Songtao, et al. Material of Shield Tunnel Resource Utilization of Foundation Pit Spoil in Karst Grouting [J]. Tunnel Construction, 2023, 43(11): 1842.
- [13] 薛薇. 统计分析与 SPSS 的应用[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2021.
- XUE Wei. Statistical analysis and application of SPSS[M]. Beijing: Renmin University of China Press, 2021.
- 收稿日期: 2022-01-04 修回日期: 2022-02-24 出版日期: 2024-06-10
Received: 2022-01-04 Revised: 2022-02-24 Published: 2024-06-10
· 第一作者: 刘健美, 正高级工程师, liujianmei@dsjy.com
通信作者: 刘旭, 博士研究生, liuxu6798@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 104 页)

- XIONG Hui, GU Yadong. Pile-soil-structure interaction analysis based on high-speed train vibration load[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(2): 302.
- [5] 陈金光, 孟德芹, 李建博. 高铁预应力管桩桩—网复合地基动力响应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊2): 679.
- CHEN Jinguang, MENG Deqin, LI Jianbo. Study on dynamic response of high-speed railway prestressed pipe pile-net composite foundation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S2): 679.
- [6] 杨文波, 陈子全, 徐朝阳, 等. 盾构隧道与周围土体在列车振动荷载作用下的动力响应特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 537.
- YANG Wenbo, CHEN Ziquan, XU Zhaoyang, et al. Dynamic response of shield tunnels and surrounding soil induced by train vibration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 537.
- [7] 张厚贵, 刘维宁, 刘卫丰, 等. 北京地下直径线运营对地铁 2 号线隧道结构振动影响控制标准的研究[J]. 隧道建设, 2007, 27(增刊2): 93.
- ZHANG Hougui, LIU Weining, LIU Weifeng, et al. Study on the control standard of the influence of Beijing underground diameter line operation on the vibration of subway line 2 tunnel structure [J]. Tunnel Construction, 2007, 27(S2): 93.
- 收稿日期: 2023-03-23 修回日期: 2023-07-02 出版日期: 2024-06-10
Received: 2023-03-23 Revised: 2023-07-02 Published: 2024-06-10
· 作者: 李团社, 正高级工程师, LLTSS0511@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license