

# 城市轨道交通车站出入口大断面顶管工程穿越 城市道路的沉降控制技术

邢慧堂<sup>1</sup> 刘浩<sup>1</sup> 王栋<sup>2</sup> 李鹏飞<sup>2</sup> 周华<sup>3</sup> 张炎<sup>2</sup>

(1. 济南轨道交通集团有限公司, 250014, 济南; 2. 河海大学土木与交通学院, 210098, 南京;

3. 中铁二十一局集团轨道交通工程有限公司, 250117, 济南)

**摘要** [目的] 为了确保城市轨道交通车站出入口顶管施工项目顺利实施, 应对该工程穿越城市道路时地层的沉降影响及沉降控制措施进行研究。[方法] 结合济南轨道交通 R2 线长途汽车站出入口顶管工程, 在阐述该工程地质条件及重难点的基础上, 建立了大断面顶管工程穿越地下管线密集的城市道路的三维数值计算模型, 得到了距开挖面不同距离时的地面沉降曲线, 以及不同埋深处土层的沉降曲线。对比了顶管中轴线上方地面监测点竖向位移模拟计算值与现场实测值随开挖距离的变化情况。提出相应的施工优化措施, 并结合现场实测数据对优化效果进行分析验证。[结果及结论] 顶管施工时, 随着与顶管中轴线距离的增大, 地面沉降量逐渐减小; 随着深度的增加, 土层深层位移逐渐增大, 且沉降曲线逐渐由“矮胖型”变成“瘦高型”。现场受土舱压力波动较大、顶管与地层存在摩擦扰动等因素的影响, 模拟计算得到的最大沉降量略小于现场实测的最大沉降量, 二者间存在一定差异。通过采取控制掘进速度、合理压浆以减少摩阻力等措施后, 后续施工沉降控制效果明显, 地面最大沉降为 18.18 mm, 变形在施工允许范围内。

**关键词** 城市轨道交通出入口; 顶管隧道施工; 下穿施工; FLAC 3D 软件; 沉降控制

**中图分类号** U231.4; U215.8

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2024.04.033

## Settlement Control Techniques for Urban Rail Transit Station Entry/Exit Large Profile Pipe Jacking Engineering through Urban Roads

XING Huitang<sup>1</sup>, LIU Hao<sup>1</sup>, WANG Dong<sup>2</sup>, LI Pengfei<sup>2</sup>, ZHOU Hua<sup>3</sup>, ZHANG Yan<sup>2</sup>

(1. Jinan Rail Transit Group Co., Ltd., 250014, Jinan, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, 210098, Nanjing, China; 3. China Railway 21st Bureau Group Rail Transit Engineering Co., Ltd., 250117, Jinan, China)

**Abstract** [Objective] To ensure the smooth implementation of urban rail transit station entry/exit pipe jacking construction project, it is essential to study the impact of ground settlement

and explore settlement control measures for its engineering through urban roads. [Method] With reference to the long-distance bus station entry/exit pipe jacking engineering on Jinan Rail Transit R2 Line, and based on the description of project geological conditions and key difficulties, a 3D numerical calculation model for large profile pipe jacking engineering through urban roads with dense underground pipelines is established. Land subsidence curves at different distances from the excavation face and settlement curves at different depths of the soil layer are obtained. A comparison is made between the simulated vertical displacement values of land monitoring points above the pipe central axis and the field-measured values changing with excavation distances. Corresponding construction optimization measures are proposed, and the optimization effects are analyzed and verified based on field-measured data. [Result & Conclusion] During the jacking process, as the distance from pipe central axis increases, the land subsidence gradually decreases. With increasing depth, the deep layer displacement of the soil layer gradually increases, and the settlement curve gradually transitions from 'stout and short' to 'slender and tall'. Factors such as significant fluctuations in soil chamber pressure and frictional disturbance between the pipe and the stratum on-site lead to an outcome of the maximum simulated settlement, which is slightly less than the maximum field-measured settlement, posing certain discrepancy. By adopting measures such as controlling excavation speed and rational grouting for reducing friction, the subsequent construction settlement control effect is evident, with a maximum land subsidence of 18.18 mm, and the deformation is within construction allowable range.

**Key words** urban rail transit entry/exit; pipe jacking tunnel construction; under-passing construction; FLAC 3D software; settlement control

地下管线密集的城市道路对于顶管施工引起的地层沉降十分敏感。过大的地层沉降, 既会导致路

面出现裂痕,严重时甚至可能导致路面塌陷<sup>[1-2]</sup>,也会导致管线破裂<sup>[3]</sup>。因此,对顶管施工进行有效控制,减少地层沉降,避免地下管线及地面道路被破坏,是顶管施工过程中非常重要的任务。

近年来,国内外学者对顶管施工引起的沉降控制开展了大量的研究。文献[4]基于 Mindlin 弹性理论解,分析了顶管顶进过程中施工荷载引起的土体竖向位移;文献[5]揭示了注浆压力作用下矩形顶管隧道周围土体的变形模式,推导了由注浆填充引起的土体竖向变形计算方法;文献[6]基于 FLAC 3D 软件的数值计算分析,研究了不同注浆压力下顶管的位移特征;文献[7]采用数值计算方法,研究了大直径顶管在不同地层的沉降规律;文献[8]针对顶管施工导致地面变形机理进行了深入分析。

本文依据济南轨道交通 R2 线长途汽车站站出入口顶管工程,采用 FLAC 3D 有限差分软件进行数值计算,研究顶管开挖对地面道路及地下管线沉降的影响,并将模拟值与现场实测值进行对比分析,提出相应的施工控制措施。

## 1 工程概况及工程难点分析

### 1.1 工程概况

长途汽车站站出入口过街通道顶管工程平面位置如图 1 所示。过街通道长度为 69.0 m,采用大断面矩形顶管施工,矩形顶管机的尺寸为 6.9 m(长)×4.9 m(宽),管节内净尺寸为 6.0 m(长)×4.0 m(宽),单环管节宽度为 1.5 m。

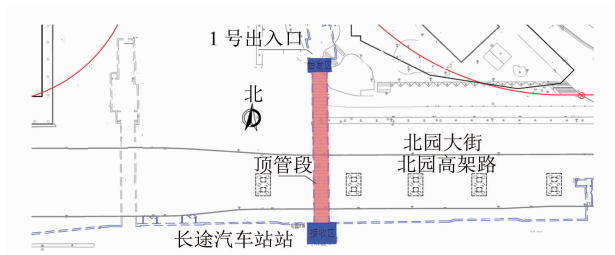


图 1 案例车站出入口过街通道顶管工程平面位置示意图  
Fig. 1 Planar position diagram of pipe jacking engineering for the case station entry/exist underground passageway

本工程地下水稳定水位埋深为 0.7~3.2 m。工程穿越的地层主要为杂填土、黏土、粉质黏土及风化闪长岩。其中,风化闪长岩的单轴抗压强度较低,属软岩至极软岩,其主要矿物成分为石英、长石、高岭石等,具有遇水易软化的特征。此外,该地层裂隙发育,渗透系数较大,岩体破碎程度严重。顶管隧道埋深约 6.0 m,主要穿越粉质黏土及风化闪长岩地层。

顶管下穿管线较多,主要有污水管、给水管、雨水管及热力管等。

### 1.2 工程难点分析

1) 矩形顶管外包尺寸为 6.9 m(长)×4.9 m(宽),施工开挖断面大,顶进过程中对周围土体的扰动较大;

2) 顶管覆土较浅,控制土舱压力的难度较大,易造成超挖,进而引起地层损失,影响地面道路及管线安全;

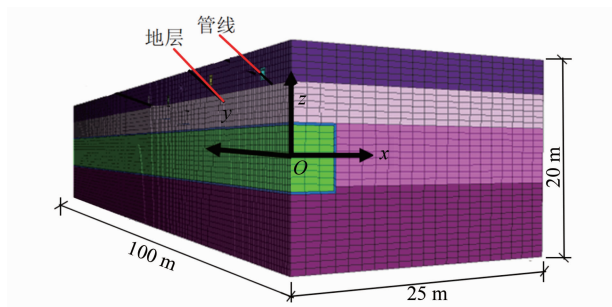
3) 顶管隧道处于富水全风化闪长岩地层,该地层的湿陷程度中等,管节存在脱节渗漏及继续沉降的风险;

4) 顶管下穿北园高架桥,与桥墩的最小间距约为 4.6 m,施工会导致开挖面上方一定区域土体产生卸载作用,进而对地面道路结构及高架桥体产生一定的影响。

## 2 数值模拟分析

### 2.1 模型建立

采用 FLAC 3D 软件建立该工程的三维数值计算模型。由于顶管掘进模型为轴对称模型,为减少计算时间,仅选取模型的一半结构进行数值模拟计算,其模型及网格划分如图 2 所示,顶管下穿管线位置如图 3 所示。



注:图中长、宽、高比例仅为示意。

图 2 模型及网格划分

Fig. 2 Model and grid division

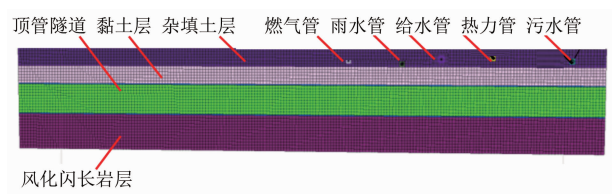


图 3 顶管下穿管线位置示意图

Fig. 3 Diagram of jack piping under-passing pipeline position

如图 2 所示, $x$  向为沿隧道横断面水平方向,取 25 m; $y$  向为沿隧道纵向方向( $y$  向正向为顶管顶进

方向),取 100 m; $z$  向为隧道高度方向,取 20 m。管线位置根据地质勘察报告选取。设定模型的边界条件为:模型顶面为自由边界,其余表面均施加法向位移约束。

土体采用实体单元模拟,本构模型选用 Mohr-Coulomb 模型;顶管管节采用 shell 壳结构单元模拟。在模型内部施加土体自重荷载,以模拟地应力场的初始平衡状态。采用 Model-null 空单元模拟隧道开挖部分,将每个计算步的掘进距离设为 6 m(顶管机壳体的长度),忽略多步施工及时间效应引起的土体累计变形。管节密度为  $2\,500\text{ kg/m}^3$ ,厚度为 450 mm,泊松比为 0.2,弹性模量为  $3\,500\text{ MPa}$ 。模型的土层物理力学参数取值如表 1 所示。

表 1 模型的土层物理力学参数取值

Tab.1 Values of soil physical and mechanical parameters in the model

土层名称	厚度/ m	密度/ ( $\text{kg/m}^3$ )	内摩擦 角/( $^\circ$ )	黏聚力/ MPa	切变模 量/MPa	弹性模 量/MPa
杂填土	2.8	1 900	15	5	4.30	11.21
黏土	3.2	1 880	15	30	4.96	14.40
粉质黏土	4.8	1 960	17	25	5.04	14.10
风化闪长岩	10.0	2 000	22	20	10.00	30.00

仿真计算的步骤为:①建立原始地层的三维数值模型,设置土体、管线的物理力学参数,使地层和管线模型在自重应力下达到初始平衡状态,将所有变形量初始值设为 0;②顶管从  $y=0\text{ m}$  处开挖,模拟每个计算步掘进开挖 6 m;③在顶管内部施加 shell 结构单元,以模拟管节;④重复开挖过程,针对每个计算步分别计算沉降量。

## 2.2 计算结果分析

在顶管中轴线上方的地面设置 9 个监测点(H1—H9),各测点的位置如图 4 所示。由于顶管隧道模型为半边结构,故监测点位于整个顶管隧道的中轴线位置上。

以  $y=0\text{ m}$  处断面为开挖断面,沿着  $y$  向选取 5 个监测断面,这 5 个断面分别为  $y=-6\text{ m}$  处断面、 $y=-3\text{ m}$  处断面、 $y=0\text{ m}$ 、 $y=3\text{ m}$  处断面、 $y=6\text{ m}$  处断面,模拟得到 5 个监测断面的地面沉降曲线如图 5 所示。从图 5 可知:地面沉降随着与顶管中轴线的距离增大而减小; $y=0\text{ m}$  处断面的地面最大沉降量为  $1.98\text{ mm}$ ;  $y=-6\text{ m}$ 、 $y=-3\text{ m}$ 、 $y=3\text{ m}$ 、 $y=6\text{ m}$  处断面的地面最大沉降量分别为  $0.36\text{ mm}$ 、 $0.85\text{ mm}$ 、 $4.16\text{ mm}$ 、 $6.85\text{ mm}$ 。

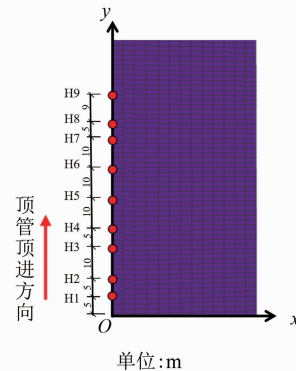


图 4 地面沉降监测点的布置平面图

Fig. 4 Planar layout diagram of land subsidence monitoring points

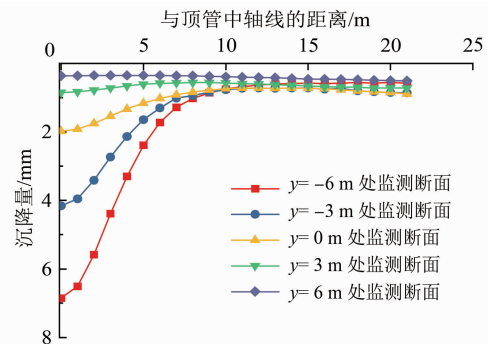


图 5 距开挖面不同距离处监测断面的地面沉降曲线

Fig. 5 Land subsidence curves of monitored sections at different distances from excavation face

为研究深层土体的沉降规律,选取  $y=15\text{ m}$  处监测断面,得到不同埋深  $h$  处土层的沉降曲线如图 6 所示。

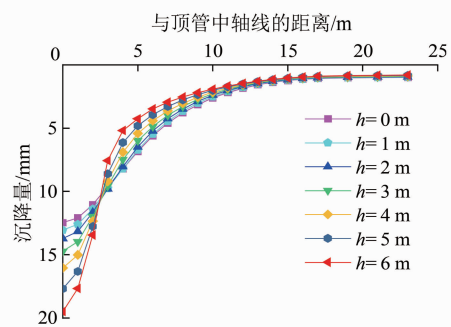


图 6 不同埋深处土层的沉降曲线

Fig. 6 Settlement curves of soil layers at different buried depths

从图 6 可知:地层沉降量随着  $h$  的增加而增大,  $h=0\text{ m}$ 、 $h=1\text{ m}$ 、 $h=2\text{ m}$ 、 $h=3\text{ m}$ 、 $h=4\text{ m}$ 、 $h=5\text{ m}$  及  $h=6\text{ m}$  时,对应土层的最大沉降量分别为  $12.47\text{ mm}$ 、 $13.06\text{ mm}$ 、 $13.73\text{ mm}$ 、 $14.73\text{ mm}$ 、 $16.04\text{ mm}$ 、 $17.69\text{ mm}$  及  $19.5\text{ mm}$ 。与  $h=0\text{ m}$  处土层的最大沉降量相比,

$h=1\text{ m}$ 、 $h=2\text{ m}$ 、 $h=3\text{ m}$ 、 $h=4\text{ m}$ 、 $h=5\text{ m}$  及  $h=6\text{ m}$  时对应土层的最大沉降量增幅依次为 4.70%、10.10%、18.12%、28.63%、41.86%、56.38%。此外,随着  $h$  的增加,土层沉降曲线逐渐由“矮胖型”变成“瘦高型”。

### 2.3 实测对比分析

图 7 为 H1—H5 监测点沉降模拟计算值与现场实测值随开挖距离的变化情况。由图 7 可知:模拟计算值和现场实测值的沉降变化趋势基本相同,这表明该数值模型能够较好地模拟现场的实际施工过程。但二者仍存在一定差异:现场实测的地面最大沉降量为 20.10 mm,而模拟计算的地面最大沉降量为 13.37 mm。此外,现场实测值出现了 2 处隆起,而模拟计算值未显示土层有明显隆起,其原因主要有以下两点:①施工人员操作不当,土舱压力波动较大,造成地面沉降;②顶管与地层间存在摩擦效应,顶管姿态控制不良,造成土层的较大扰动。

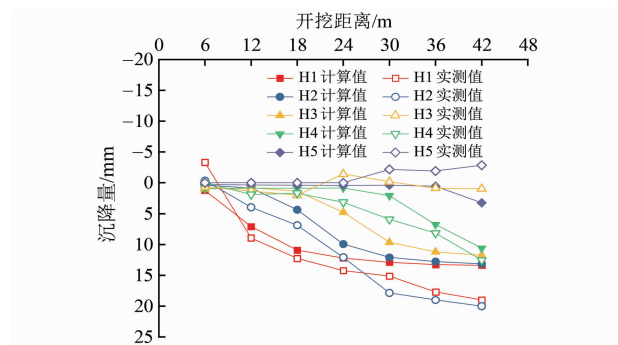


图 7 H1—H5 监测点沉降模拟计算值与现场实测值随开挖距离的变化情况

Fig. 7 Situation of subsidence simulation calculated and field-measured values changing with excavation distance at H1-H5 monitoring points

## 3 施工优化措施及效果分析

### 3.1 施工优化措施

基于模拟仿真结果,本工程制定的施工优化措施如下:

1) 施工参数控制:在顶进过程中,应对顶进速度做不断的调整,找出顶进速度、正面土压力及出土量三者的最佳匹配值,以保证舱压稳定。

2) 顶进轴线的控制:在每节管节顶进结束后,应进行机头的姿态测量,做到随偏随纠,控制单节管片纠偏量,以避免土体出现较大的扰动。

3) 降低管节摩阻力:及时用润滑泥浆填补顶进过程中形成的建筑间隙,形成饱满泥浆套,以降低管节摩阻力及减小地面沉降。压浆时应坚持“随顶随

压、逐孔压浆、全线补浆、浆量均匀”原则<sup>[9]</sup>。

### 3.2 后续沉降分析

通过采取上述优化措施后,继续跟踪后续沉降点(H6—H9),其沉降的模拟计算值和现场实测值随开挖距离的变化情况如图 8 所示。由图 8 可知:采取优化措施后,地面沉降得到了有效控制,测点 H6—H9 中地面最大沉降量为 18.18 mm,在施工允许范围内。

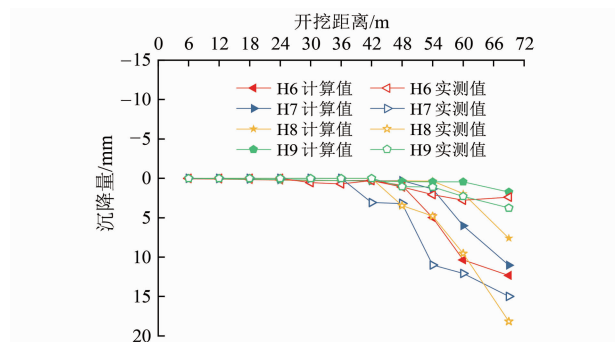


图 8 H6—H9 监测点沉降模拟计算值与现场实测值随开挖距离的变化情况

Fig. 8 Situation of subsidence simulation calculated and field-measured values changing with excavation distance at H6-H9 monitoring points

## 4 结论

1) 顶进施工时,随着与顶管中轴线的距离增大,地面沉降量逐渐减小;随着埋深的增加,土层位移逐渐增大,且沉降曲线逐渐由“矮胖型”变成“瘦高型”。

2) 由于受现场土舱压力波动较大、顶管与地层间存在摩擦等因素影响,数值计算的最大沉降值为 13.37 mm,现场监测的最大沉降量达 20.10 mm,二者间存在一定差异。

3) 采取控制掘进速度、保持土舱压力、减小纠偏量、合理压浆以降低管节摩阻力等措施后,后续施工沉降的控制效果明显,其地面最大沉降量为 18.18 mm,在施工允许范围内。

## 参考文献

- [1] 田配琴. 顶管施工引起地表塌陷及关键技术分析[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2014, 23(2): 10.  
TIAN Peiqin. Research on terrestrial deformation and controlled measures by pipe-jacking[J]. Journal of Hunan City University (Natural Science), 2014, 23(2): 10.
- [2] 邓婷, 黄茂松, 时振昊, 等. 软黏土深埋矩形顶管施工地层变形分析[J]. 土木工程学报, 2023, 56(增刊 2): 157.

(下转第 185 页)

- caused by leakage of the shield tail seal system[J]. *Underground Space*, 2020, 5(2): 105.
- [2] LYU H M, SHEN S L, ZHOU A, et al. Perspectives for flood risk assessment and management for mega-city metro system[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 84: 31.
- [3] SHEN X, YUAN D, CAO L, et al. Experimental investigation of the failure of shield grease seals under the influence of environmental factors: a case study[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 133: 105975.
- [4] 王德乾. 一种盾尾密封油脂的配方研究与性能表征[J]. *隧道建设*, 2013, 33(4): 277.  
WANG Deqian. Formulation research and property characterization of a kind of shield tail sealing grease[J]. *Tunnel Construction*, 2013, 33(4): 277.
- [5] ZHANG J, WANG Y, WANG J, et al. Primary research on preparation and properties of shield tail sealing grease[C]//Proceedings of the 2017 6th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2017). Zhuhai, China. Paris: Atlantis Press, 2017: 858.
- [6] 王德乾, 张锋, 贺春龙, 等. 安达环保型盾尾密封油脂的研究与应用[J]. *铁道建筑技术*, 2015(2): 86.  
WANG Deqian, ZHANG Feng, HE Chunlong, et al. Research and application of ANDR environment-friendly shield tail sealing grease[J]. *Railway Construction Technology*, 2015(2): 86.
- [7] 谢宇飞, 王德乾, 廖剑平, 等. 增黏剂对盾尾密封油脂性能影响的试验研究[J]. *国防交通工程与技术*, 2021, 19(5): 70.  
XIE Yufei, WANG Deqian, LIAO Jianping, et al. Experimental study on the effect of tackifier on shield tail sealing grease performance[J]. *Traffic Engineering and Technology for National Defence*, 2021, 19(5): 70.
- [8] 斯芳芳. 盾尾密封油脂的研究现状与发展趋势[J]. *铁道建筑技术*, 2022(1): 26.  
SI Fangfang. Research situation and development tendency of shield tail sealing grease[J]. *Railway Construction Technology*, 2022(1): 26.
- [9] 王德乾. 关于盾尾密封油脂抗水压密封性和泵送性测试的探讨[J]. *隧道建设*, 2014, 34(2): 107.  
WANG Deqian. Study on water-tightness and pumpability of shield tail sealing grease[J]. *Tunnel Construction*, 2014, 34(2): 107.
- 收稿日期:2023-08-14 修回日期:2023-10-06 出版日期:2024-04-10  
Received:2023-08-14 Revised:2023-10-06 Published:2024-04-10  
• 作者:郭世情,高级工程师,gsq-73@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

#### (上接第 180 页)

- DENG Ting, HUANG Maosong, SHI Zhenhao, et al. Ground deformation response induced by jacking process of deep rectangular tunnel in soft clay[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2023, 56(S2): 157.
- [3] 谢义华, 李翔. 探究长距离煤浆管道顶管工程施工中关键性技术环节的控制[J]. *化工管理*, 2020(2): 164.  
XIE Yihua, LI Xiang. Discussion on the control of key technical links in the construction of long-distance coal slurry pipeline jacking project[J]. *Chemical Enterprise Management*, 2020(2): 164.
- [4] 李辉, 杨贵阳, 宋战平, 等. 矩形顶管施工引起土体分层变形计算方法研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(5): 1482.  
LI Hui, YANG Guiyang, SONG Zhanping, et al. Study on calculation method of soil delamination deformation caused by rectangular pipe jacking construction[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(5): 1482.
- [5] 许有俊, 王雅建, 冯超, 等. 矩形顶管施工引起的地面沉降变形研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2018, 14(1): 192.  
XU Youjun, WANG Yajian, FENG Chao, et al. Research on ground deformation caused by rectangular pipe jacking construction[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2018, 14(1): 192.
- [6] 张明磊, 隆威, 李昌. 基于 FLAC-3D 的顶管施工护壁泥浆套研究[J]. *科技视界*, 2019(9): 197.  
ZHANG Minglei, LONG Wei, WANG Lichang. Study of protective mud screen of pipe-jacking based on FLAC-3D[J]. *Science & Technology Vision*, 2019(9): 197.
- [7] 邝风举, 王新, 习宁, 等. 顶管施工三维数值模拟及土质适用性研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2011, 7(6): 1209.  
BING Fengju, WANG Xin, XI Ning, et al. 3D numerical simulation of pipe jacking and its soil applicability study[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2011, 7(6): 1209.
- [8] 邓长茂, 彭基敏, 沈国红. 软土地区矩形顶管施工地表变形控制措施探讨[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(4): 1002.  
DENG Changmao, PENG Jimin, SHEN Guohong. Discussion on control methods of ground surface settlement caused by rectangular pipe jacking construction in soft soils[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(4): 1002.
- [9] 江晨悦. 城市道路下大断面矩形顶管沉降变形分析[D]. 太原理工大学, 2022.  
JIANG Chenyue. Analysis of settlement deformation of large-section rectangular pipe jacking under urban roads [D]. *Taiyuan University of Technology*, 2022.
- 收稿日期:2021-11-03 修回日期:2022-03-04 出版日期:2024-04-10  
Received:2021-11-03 Revised:2022-03-04 Published:2024-04-10  
• 第一作者:邢慧堂,高级工程师,happyxht@163.com  
通信作者:李鹏飞,硕士研究生,469153087@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