

地铁车站密贴下穿施工地面及既有 车站沉降规律研究*

许明杨^{1,2} 王海涛² 田江涛² 张志伟³ 尤 强³

(1. 辽宁科技学院资源与土木工程学院, 117004, 本溪;

2. 大连交通大学土木工程学院, 116028, 大连; 3. 中铁十四局集团隧道工程有限公司, 250002, 济南)

摘 要 [目的] 随着城市地下空间开发利用向立体化、多维化方向推进, 城市轨道交通的上跨下穿工程日益增多。其中, 大断面新建车站密贴下穿施工对周边环境的影响显著, 因此, 亟须对采用洞桩法施工的新建车站密贴下穿既有车站过程中的地面沉降及既有车站的变形规律进行深入研究。

[方法] 基于北京地铁6号线苹果园站密贴下穿既有地铁1号线苹果园站的实际工程案例, 本研究采用数值模拟方法, 分析了地面沉降与既有车站变形的规律。通过对比实际监测数据, 进一步验证了施工过程中地面沉降与既有车站变形的实际情况, 并将数值模拟结果与实测数据进行了对比分析。[结果及结论] 洞桩法施工的导洞开挖阶段及二次衬砌扣拱阶段是地面沉降和既有结构变形的最不利阶段。在二次衬砌扣拱施工完成后, 地面沉降和既有结构变形均出现回弹现象。此外, 既有车站的刚度对上方地面沉降有显著的抑制作用, 表现为重叠段地面沉降值小于非重叠段。洞桩法施工引起的新建车站对既有车站结构的变形主要为刚体位移, 而对轨道结构的变形则主要为倾覆变形, 局部表现为刚体位移。

关键词 地铁车站; 密贴下穿; 沉降规律; 数值模拟; 监测数据

中图分类号 TU921; U231.4; U455.46

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.10.012

Research on the Settlement Law of the Ground and Existing Stations in the Close Under-crossing Construction of Subway Station*

XU Mingyang^{1,2}, WANG Haitao², TIAN Jiangtao², ZHANG Zhiwei³, YOU Qiang³

(1. School of Resources and Civil Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, 117004, Benxi, China; 2. School of Civil Engineering, Dalian Jiaotong University, 116028, Dalian, China; 3. China Railway No. 14 Group Corporation Tunnel Engineering Co., Ltd., 250002, Jinan, China)

Abstract [Objective] As the development and utilization of urban underground space advances towards the three-dimensional and multi-dimensional direction, there are more and more over-crossing and under-crossing urban rail transit projects. Among them, the close under-crossing construction of new stations with large cross-section has a significant impact on the surrounding environment. Therefore, it is urgent to carry out an in-depth study on the ground settlement and deformation law of existing stations during the new station construction process closely under-crossing existing stations by Pile-Beam-Arch (PBA) method. [Method] Based on the actual engineering case of Beijing Metro Line 6 Pinguoyuan Station, which closely under-crosses the existing station with same name on Metro Line 1, the law of ground settlement and deformation of the existing station is analyzed by adopting numerical simulation method in the study. By comparing the actual monitoring data, the actual situation of ground settlement and deformation of the existing station during the construction process is further verified, and the numerical simulation results are compared and analyzed with the measured data. [Result & Conclusion] The most unfavorable stages for ground settlement and existing structure deformation are the guide hole excavation stage and the second lining arch stage of PBA method. After the completion of second lining arch construction, both the ground settlement and the deformation of the existing structure show rebound phenomenon. In addition, the stiffness of the existing station has a significant inhibiting effect on the ground settlement above, which is manifested in the fact that the ground settlement value of the overlapping section is smaller than that of the non-overlapping section. The deformation of the existing station structure caused by new station constructed with PBA method is mainly the rigid body displacement,

* 辽宁省自然科学基金计划项目(2020-MS-271); 辽宁省教育厅科学研究项目(JDL2020014); 中铁十四局集团科技研究开发计划项目(2020QT03)

while it caused track structure deformation is mainly the overturning deformation, which is locally manifested as rigid body displacement.

Key words metro station; closely under-crossing; settlement law; numerical simulation; monitoring data

0 引言

随着城市轨道交通日益发展,交通线网不断扩大,地铁线之间会出现空间交叉的节点,上、下穿越既有结构会面临更复杂的施工环境和更困难的工程问题。

洞桩法具有对周围环境扰动小,施工质量好,施工周期短,经济效益高,受力-传力体系简单等优点,往往应用于周围环境复杂,新建车站结构断面大,施工要求苛刻的工程。国内外学者对洞桩法做了大量的研究:文献[1]通过统计分析,得到了洞桩法施工过程中地面沉降变形规律;文献[2]采用缩尺模型试验和数值模拟的方法,研究了洞桩法中不同桩径、桩距和埋深对施工的影响;文献[3]采用FLAC 3D有限差分软件,建立了地铁车站三维施工模型,研究了地铁车站施工过程中既有管线的力学响应规律;文献[4]研究了密贴下穿既有车站施工时既有车站的力学响应规律;文献[5]研究了洞桩法施工引起的地面沉降和结构受力规律;文献[6]采用数值模拟结合现场实测的方法,研究了地铁车站四导洞洞桩法施工引起的地层变形规律、承重结构应力变化规律、承重结构受力转化规律及施工顺序对钢管柱的影响规律;文献[7]通过对北京地铁16号线达官营站的监测数据进行研究,得到洞桩法施工地铁车站时的地面、既有建筑物、既有管线的力学响应规律;文献[8]针对洞桩法现有研究的不足之处,通过引入高承台竖向承载力计算方法,采用数值分析的方法,建立了洞桩法地铁车站施工阶段钢管柱承载力计算模型;文献[9]依托某暗挖车站工程,提出了一种用于监测边桩应力与应变的监测方案。

以上研究结果表明,许多专家学者对洞桩法引起的沉降规律进行了研究,但针对洞桩法密贴下穿既有地铁车站引起的沉降规律鲜有研究。本文对北京地铁6号线(以下简称“6号线”)苹果园站密贴下穿既有地铁1号线(以下简称“1号线”)苹果园站工程实例进行研究,采用数值模拟结合现场实

测数据的方法,分析了洞桩法密贴下穿施工时地面沉降及既有车站变形规律,以期为类似工程提供参考借鉴。

1 工程概况

新建6号线苹果园站位于苹果园南路地下,车站主体结构包含站厅层及站台层,设计跨度为三跨,地下水位于车站底部以下约11 m处,故不需要考虑地下水的影响。新建车站包括一段全长为52.40 m的下穿段,顶板距地面的距离为11.64 m,最大断面宽度为23.5 m。下穿段采用洞桩法进行施作,密贴下穿既有1号线苹果园站;两车站之间呈70°夹角,最小竖向间距仅为0.45 m,工程风险等级为特级风险。既有车站为单层4跨及单层5跨框架结构,开挖断面尺寸分别为6.45 m×17.00 m(4跨)、6.45 m×21.00 m(5跨),既有车站顶板距地面4.69 m。新-既车站位置关系如图1所示。

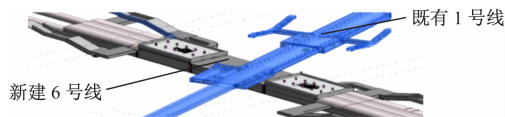


图1 新建车站和既有站位置关系图

Fig. 1 Location relationship between the new station and the existing station

新建车站施工时,会对地层、既有车站结构产生较大的影响,可能导致地面发生较大的塌陷,既有车站结构开裂等。根据地铁运营方的要求,在新建车站施工过程中,1号线要保证正常运行。根据相关规范及业主方面的要求,既有车站结构及轨道结构整个施工过程中累计沉降量要控制在5 mm以内,其中导洞开挖阶段沉降量要控制在3 mm以内。

2 洞桩法密贴下穿施工数值分析

2.1 模型建立

考虑尺寸效应,数值模型尺寸取为150 m×90 m×60 m,上边界为自由边界,四周采用法向约束,底部采用固定约束。在保证计算精度的前提下,做如下假设:材料均为均质、各向同性,土层为水平分层,荷载仅考虑自重及地面超载。

由现场地勘资料可将土层分为6层,采用实体单元模拟;车站初期支护、中板采用板单元模拟;既有车站柱、边桩及钢管柱采用梁单元模拟;二次衬砌、底板及侧墙等结构通过采用软件中的更改属性选项

进行模拟。土层采用修正-摩尔库伦本构模型,结构采用弹性本构模型。数值模拟计算参数如表 1 所示。

表 1 数值模拟计算参数表
Tab.1 Numerical simulation calculation parameters table

项目	厚度/m	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	天然密度/ (g/cm ³)	孔隙率
杂填土	2.3	7.00	0.31	0	8	1.70	—
2-5 卵石	1.5	30.00	0.20	0	25	2.02	0.34
5 卵石	8.0	40.00	0.29	0	40	2.10	0.33
7 卵石	11.0	45.00	0.29	0	42	2.15	0.32
9 卵石	8.5	50.00	0.29	0	45	2.15	0.31
11 卵石	7.6	55.00	0.29	0	45	2.15	0.31
既有车站柱	—	2.10×10^5	0.20	—	—	—	—
边桩	—	2.00×10^4	0.20	—	—	—	—
钢管柱	—	2.10×10^5	0.20	—	—	—	—
初期支护	—	2.55×10^4	0.20	—	—	—	—
二次衬砌	—	3.25×10^4	0.20	—	—	—	—
冠梁、条基、顶(底)纵梁	—	3.25×10^4	0.20	—	—	—	—
超前注浆	—	50.00	0.23	—	—	—	—

2.2 结果提取位置

1) 地面沉降提取位置:地面沉降提取位置 1,该位置对应实际 DB-14 监测点布设位置,地面以下中心区域无既有车站结构;地面沉降提取位置 2,该位置对应实际 DB-16 监测点布设位置,地面以下中心区域有既有车站结构。地面沉降提取位置如图 2 所示。

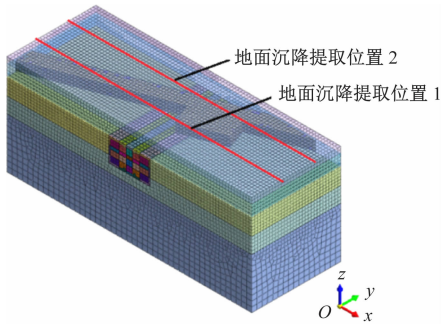


图 2 地面沉降提取位置

Fig. 2 Extraction positions of ground settlement

2) 既有车站变形提取位置:车站结构变形提取位置在两边侧墙中部,对应车站结构监测线布设位置,设定平直一侧为左侧车站结构,对应监测线为 SCJ-01,5 跨结构框架突出一侧为右侧车站结构,对应监测线为 SCJ-02;轨道结构变形提取位置对应实际轨道监测线为 DCJ-01(左线)及 DCJ-02(右线)布设位置,以备与实测结果进行对比分析。既有车站

变形提取位置见图 3。

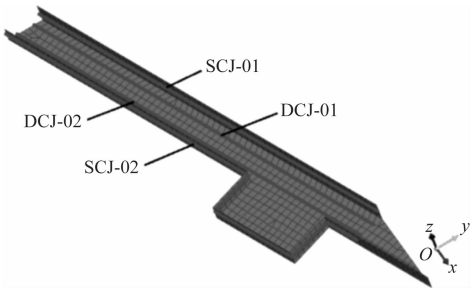


图 3 既有车站变形提取位置

Fig. 3 Deformation extraction positions of the existing station

2.3 结果分析

2.3.1 地面沉降结果分析

考虑到密贴下穿过程对既有车站的影响较大,故提取地面沉降提取位置 2 的不同施工阶段地面沉降值进行分析,绘制地面累计沉降曲线如图 4 所示。

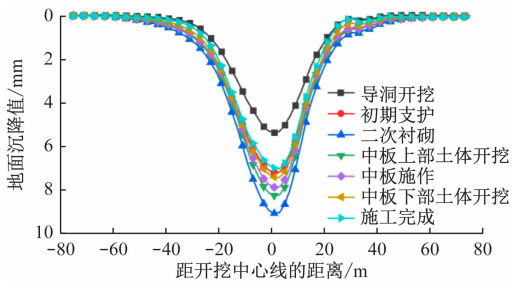


图 4 地面累计沉降曲线

Fig. 4 Ground cumulative settlement curves

由图 4 可知:洞桩法施工引起地面沉降变形与 Peck 曲线较为吻合,各阶段沉降槽宽度基本相同;导洞开挖阶段引起的地面沉降变形值最大,应在施工中对其进行重点关注;扣拱阶段引起的地面沉降变形值较大,为 3.73 mm,其主要原因为该阶段存在受力体系转换;扣拱后的阶段,地面沉降会出现回弹,这是因为扣拱施工完成后,受力框架已经全部完成,之后土体开挖、中板及底板施作均是在稳定的结构中进行,而土体开挖对于受力体系属于卸载作用,从而导致地面沉降回弹,最终地面沉降值为 7.01 mm。

2.3.2 既有车站结构变形结果分析

提取左侧车站结构不同施工阶段的竖向变形值对车站结构变形进行分析,绘制车站结构累积竖向变形曲线如图 5 所示。

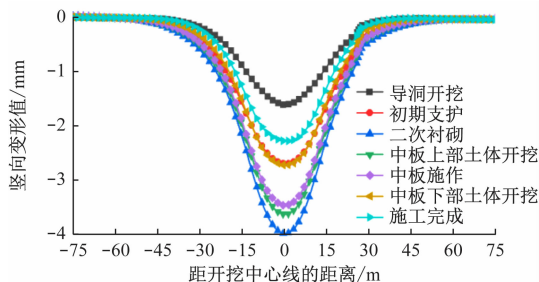


图 5 既有车站结构累积竖向变形曲线

Fig. 5 Cumulative vertical deformation curves of the existing station structure

由图 5 可知:洞桩法施工引起既有车站结构变形沿开挖中心线呈对称分布,其变形曲线与 Peck 曲线较吻合,各个阶段沉降槽宽度基本相同;导洞施工引起的既有车站结构竖向变形最大,最大变形值为 -1.58 mm ;导洞开挖完成后至二次衬砌扣拱阶段,既有车站结构竖向变形逐渐增加;二次衬砌扣拱施工完成后,既有车站结构竖向变形出现回弹,最终既有车站结构竖向变形值为 -2.26 mm 。

2.3.3 既有车站轨道结构变形结果分析

提取左侧轨道结构不同施工阶段的竖向变形值对轨道结构变形进行分析,绘制轨道结构累积竖向变形曲线如图 6 所示。

由图 6 可知:洞桩法施工引起既有车站轨道结构变形沿开挖中心线呈对称分布,其变形曲线与 Peck 曲线较吻合,各个阶段沉降槽宽度基本相同;导洞施工引起的既有车站轨道结构竖向变形最大,最大变形值为 -1.69 mm ;导洞开挖完成后至二次

衬砌扣拱阶段,轨道结构竖向变形逐渐增加;二次衬砌扣拱施工完成后,轨道结构竖向变形出现回弹,最终既有车站轨道结构竖向变形值为 -2.05 mm 。

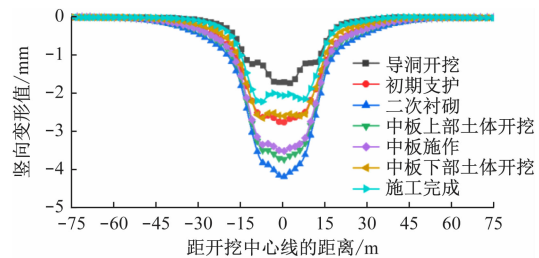


图 6 既有车站轨道结构累积竖向变形曲线

Fig. 6 Cumulative vertical deformation curves of the existing station track structure

3 现场监测分析

3.1 地面沉降分析

对导洞开挖阶段的监测数据进行分析,选取 DB14 监测线及 DB16 监测线上 05 号监测点的监测数据,两个监测点分别对应数值模拟地面沉降提取结果位置 1、2 与模型 y 轴的交点。导洞开挖阶段地面沉降实测点时程曲线如图 7 所示。

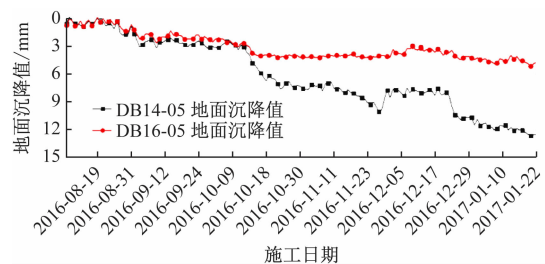


图 7 导洞开挖阶段地面沉降实测点时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of measured ground settlement points during the excavation stage of the guide hole

由图 7 可知:随着开挖的进行,地面沉降在不断累积,DB14-05 监测结果在同一时刻要大于 DB16-05 监测结果,这是由于 DB16-05 监测点位于重叠段,既有车站较大的刚度限制了地面变形。在导洞开挖前期两监测点地面沉降时程曲线基本重叠,随着导洞开挖进行,两者差距逐渐变大,这是由于实际施工中导洞开挖采取按相应错距依次开挖下边导洞、上边导洞、下中导洞、上中导洞的方式,随着导洞数量开挖增多,土体卸载及群洞效应会对地面沉降影响越来越大。

图 8 为各个施工阶段 DB16-05 监测点实测结

果与对应的数值模拟结果的地面沉降值对比曲线。

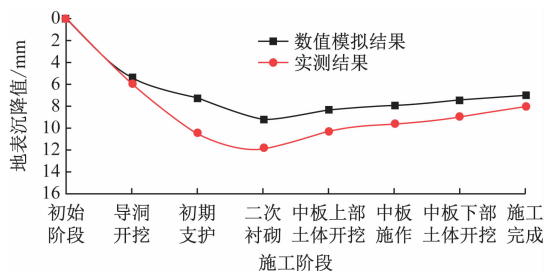


图 8 地面沉降数值模拟结果与实测结果对比曲线

Fig. 8 Comparison curves between numerical simulation results and measured results of ground settlement

由图 8 可知:经对比分析,数值模拟结果得出的二衬扣拱引起的地面沉降值与现场实测数据约有 3 mm 左右的误差,但沉降趋势较为吻合,故数值模拟可以较好地反映开挖的实际情况。

3.2 既有车站结构变形分析

整理施工完成后既有车站结构监测线 SCJ-01 (左侧)与 SCJ-02 (右侧)的监测数据,绘制车站结构变形曲线如图 9 和图 10 所示。

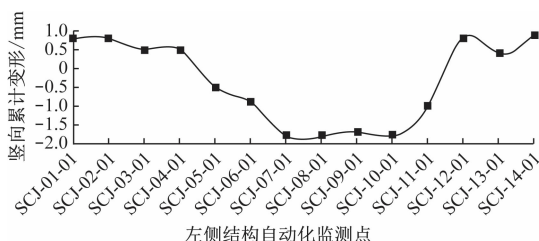


图 9 既有车站左侧结构竖向变形曲线

Fig. 9 Vertical deformation curve of the left side structure of the existing station

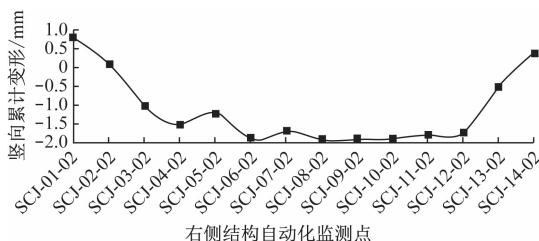


图 10 既有车站右侧结构竖向变形曲线

Fig. 10 Vertical deformation curve of the right side structure of the existing station

由图 9 和图 10 可知:洞桩法施工引起的既有车站两侧结构变形趋势大致相同,但影响范围不同;车站左侧结构产生较大变形的范围为监测点 SCJ-06—SCJ-11,而车站右侧结构产生较大变形的范围为监测点 SCJ-04—SCJ-12,范围略大于左侧;两者最

大变形值基本一致,故洞桩法密贴下穿施工引起的既有车站结构变形主要为刚体位移变化。监测数据显示,既有车站结构沉降最大值为 1.96 mm,满足业主方对于该既有车站运营安全的要求。

3.3 既有车站轨道结构变形分析

整理施工完成后既有车站轨道结构监测线 DCJ-01 (左线)与 DCJ-02 (右线)的监测数据,绘制轨道结构竖向变形曲线如图 11 和图 12 所示。

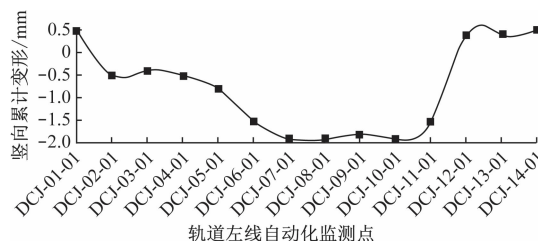


图 11 既有车站轨道结构(左线)竖向变形曲线

Fig. 11 Vertical deformation curve of the existing station track structure (left line)

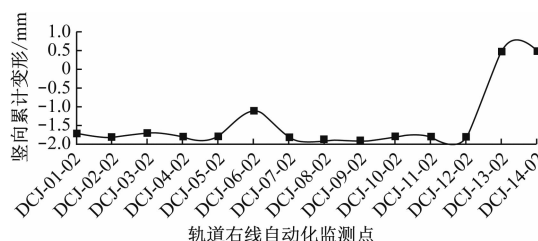


图 12 既有车站轨道结构(右线)竖向变形曲线

Fig. 12 Vertical deformation curve of the existing station track structure (right line)

由图 11 和图 12 可知:轨道左线受开挖影响较大的监测点为 DCJ-06—DCJ-11,轨道右线监测点受开挖的影响较大的监测点为 DCJ-01—DCJ-12;轨道结构发生的变形主要为倾覆变形,局部为刚体位移变化。监测数据显示,轨道左、右线结构的最大沉降值均小于 2 mm,满足业主方要求。

4 结语

本文采用数值模拟结合现场实测数据的方法,对 6 号线苹果园站进行了分析,得出了洞桩法密贴下穿施工时地面沉降及既有车站变形规律:

1) 通过分析数值模拟结果得出,洞桩法导洞开挖阶段及二次衬砌扣拱阶段为地面沉降、既有车站结构变形、轨道结构变形的最不利阶段,但在二次衬砌扣拱施工完成后的阶段中,三者变形均有回弹。

2) 通过分析监测数据得出:既有车站较大的刚

度使得重叠段地面沉降值要小于非重叠段;洞桩法新建车站施工引起的既有车站结构的变形主要为刚体位移,引起的轨道结构的变形主要为倾覆变形,局部为刚体位移变化。

参考文献

- [1] YU L, ZHANG D, FANG Q, et al. Surface settlement of subway station construction using pile-beam-arch approach[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 90: 340.
- [2] LIU X, LIU Y, QU W, et al. Internal force calculation and supporting parameters sensitivity analysis of side piles in the subway station excavated by Pile-Beam-Arch method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 56: 186.
- [3] 王秀英, 雷可, 王滕, 等. 洞桩法车站下穿既有管线工程的沉降预测[J]. 土木工程学报, 2021, 54(增刊1): 65.
WANG Xiuying, LEI Ke, WANG Teng, et al. Prediction of existing pipeline settlement resulting from the construction of an underground metro station using the pile-beam-arch (PBA) method[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(S1): 65.
- [4] 赵伟. 基于结构概念分析法的洞桩法密贴下穿既有地铁站施工力学研究[J]. 铁道建筑技术, 2021(11): 9.
ZHAO Wei. Mechanical study of construction closely passing underneath the existing subway station with PBA method based on the structural concept analysis[J]. Railway Construction Technology, 2021(11): 9.
- [5] 周稳弟, 梁庆国, 张晋东. 某地铁车站洞桩法施工变形和结构受力分析[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(6): 121.
ZHOU Wendi, LIANG Qingguo, ZHANG Jindong. Analysis of the deformation and structural stress of a metro station constructed by pile-beam-arch method [J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(6): 121.
- [6] 罗庆斐. 地铁车站洞桩法梁拱柱结构施工力学转换研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2021.
LUO Qingfei. Study on construction mechanics transformation of main structure of pile-beam-arch method of subway station[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2021.
- [7] 张振营, 孙玮泽. 地铁车站洞桩法暗挖施工对地表沉降及邻近构筑物变形的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(11): 14.
ZHANG Zhenying, SUN Weize. Surface settlement and deformation law of existing structure influenced by metro station constructed with PBA method [J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(11): 14.
- [8] 刘力, 高辛财. “洞桩法”暗挖车站施工阶段钢管混凝土柱承载力计算[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(7): 1152.
LIU Li, GAO Xincan. Bearing capacity calculation of concrete-filled steel tubular column during construction of metro station by PBA method[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(7): 1152.
- [9] 孙玉辉, 张子真, 陈昌彦, 等. 单层洞桩法暗挖车站边桩结构受力及变形特征研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(9): 30.
SUN Yuhui, ZHANG Zizhen, CHEN Changyan, et al. Study on stress and deformation characteristics of side pile structure of station excavated by single-storey hole-pile method[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(9): 30.

· 收稿日期:2022-07-29 修回日期:2022-09-16 出版日期:2024-10-10
Received:2022-07-29 Revised:2022-09-16 Published:2024-10-10
· 第一作者:许明杨,助教,xmy524524@163.com
通信作者:王海涛,教授,whtdjtu@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

勘 误 声 明

尊敬的读者:

本刊2024年第9期刊登的《城市轨道交通系统安全韧性思考与实践》一文3.3节(第4页)关于“城市轨道交通供电系统设计采用了冗余设计理念,从110 kV到400 kV设备系统均实现了单设备故障不影响运营的韧性设计,是城市轨道交通关键设备系统中在设计上韧性最强的系统。”的阐述中,其中的“110 kV到400 kV”应更正为“110 kV到400 V”。特此勘误,并诚挚地向读者表示歉意。

《城市轨道交通研究》编辑部
2024年10月10日