

城市轨道交通基坑工程变形控制值研究*

孙长军^{1,2} 闫海生³ 郭涛³ 赵智涛^{1,2} 唐明明³ 钟巧荣³

(1. 北京市轨道交通建设管理有限公司, 100068, 北京; 2. 城市轨道交通全自动运行系统与安全监控北京市重点实验室, 100065, 北京; 3. 北京安捷工程咨询有限公司, 100050, 北京)

摘要 [目的] 设置监测项目的变形控制值, 对施工安全进行控制, 以确保施工期间结构自身及周边环境稳定性, 是城市轨道交通工程施工非常重要的工作内容。采用明挖法时, 变形控制值因所处地质条件的不同而表现出较为明显的差异, 需进一步明确不同地质条件下基坑的变形控制值。[方法] 以北京地铁基坑工程为研究案例, 分两个区域(西部、中东部)分别收集、整理了基坑工程的监测数据。选取基坑地面沉降、围护桩顶/墙顶处沉降、围护桩顶/墙顶处水平位移、围护桩体/墙体处水平位移作为监测项目, 利用统计分析方法对这四类监测项目的控制值进行深入研究, 并研究了变形值与基坑设计深度 H 的关系, 针对两个区域基坑的四类监测项目分别提出了控制建议值。[结果及结论] 这四类监测项目的控制建议值为: 西部区域基坑建议分别取 25 ~ 40 mm 和 $0.10\% H \sim 0.20\% H$ 、15 mm、15 mm、25 ~ 40 mm 和 $0.10\% H \sim 0.20\% H$; 中东部区域基坑建议分别取 30 ~ 50 mm 和 $0.15\% H \sim 0.30\% H$ 、20 mm、20 mm、30 ~ 50 mm 和 $0.15\% H \sim 0.30\% H$ 。

关键词 城市轨道交通; 基坑工程; 沉降控制值; 水平位移控制值

中图分类号 TU433: TU94⁺1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.09.023

Study on Deformation Control Value for Urban Rail Transit Foundation Pit Project

SUN Changjun^{1,2}, YAN Haisheng³, GUO Tao³, ZHAO Zhitao^{1,2}, TANG Mingming³, ZHONG Qiaorong³

(1. Beijing metro construction administration Co., Ltd., 100068, Beijing, China; 2. Beijing Key Laboratory of Fully Automatic Operation and Safety Monitoring for Urban Rail Transit, 100065, Beijing, China; 3. Beijing Agiletech Engineering Consultants Co., Ltd., 100050, Beijing, China)

Abstract [Objective] Setting deformation control values for the monitored project and controlling the construction safety is a very important task in the construction of urban rail transit engineering, aiming to ensure the stability of the structure itself

and the surrounding environment during construction. When the open-cut method is adopted, the deformation control values vary significantly with different geological conditions, and further clarification is needed on the mentioned values for foundation pits under different geological conditions. [Method] In the case study of a Beijing metro foundation pit project, the monitored data of the project are collected respectively from two areas (west, middle east) and then processed. The selected monitoring items include the ground settlement of foundation pit, the settlement and the horizontal displacement of the retaining pile top and wall top, the horizontal displacement of the retaining pile body and wall. Statistical analysis method is used to conduct in-depth study on the control values of the above four types of monitoring items, and on the relationship between the deformation value and the design depth H of foundation pit. Recommended control values of the four types of monitoring items are put forward for the foundation pits in two areas respectively. [Result & Conclusion] The recommended control values of the four types of monitoring items are as follows: 25 ~ 40 mm and $0.10\% H \sim 0.20\% H$, 15 mm, 25 mm, 25 ~ 40 mm and $0.10\% H \sim 0.20\% H$ for foundation pits in the western area, and 30 ~ 50 mm and $0.15\% H \sim 0.30\% H$, 20 mm, 20 mm, 30 ~ 50 mm and $0.15\% H \sim 0.30\% H$ for foundation pits in the middle east area.

Key words urban rail transit; foundation pit project; settlement control value; horizontal displacement control value

城市轨道交通基坑工程的监测项目控制值和预警级别, 是施工风险管理的两项主要技术标准。其中, 预警级别通常以累计变化量、变化速率“双控”指标进行界定, 这两个指标通过实际监测数据与对应的监测项目控制值进行比对, 进而实现工程预警。监测项目控制值通常由设计人员按照有关规范, 基于具体的设计方案、施工技术、地质条件及周边环境保护要求等因素综合制定, 控制值的确定

* 北京市轨道交通建设管理有限公司双创基金项目(SCJJ2023001)

需要充分依据现场的施工实践经验。

但是施工实践经验通常具有主观性,缺少数据支撑。随着各地城市轨道交通线网的不断扩大,城市轨道交通工程项目不断增多,所建项目涉及不同区域内更为复杂的地质条件,有必要整合已积累的庞大的监测数据及案例,为新建工程项目控制值的确定提供参考。本文以北京地铁基坑工程为研究对象,收集整理了北京市区不同区域基坑工程的监测数据,利用统计分析方法对监测项目控制值进行了深入研究,以提出具有针对性的基坑变形控制建议值。

1 研究现状

文献[1]收集了 14 个城市基坑工程的第三方监测资料,对基坑各变形监测项目进行了统计分析和相关性分析,给出了相应监测项目的控制建议值。文献[2]开展了不同监测项目变形实测值分布形态规律统计研究,提出了变形控制指标值与设计方

案、地质环境等因素密切相关的结论。

GB 50911—2013《城市轨道交通工程监测技术规范》开展了工程案例专题研究,统计了众多测点的最终变形值,给出了不同地质条件和围护结构形式下变形控制指标的参考值。GB 50497—2019《建筑基坑工程监测技术标准》规定,建筑基坑监测控制标准应结合基坑设计安全等级、工程地质条件、设计计算结果及工程经验等综合确定,针对地面沉降、围护墙/边坡的顶部沉降、围护墙/边坡的顶部水平位移、结构的深层水平位移 4 类监测项目,分别给出了 25~55 mm、10~60 mm、20~60 mm、30~90 mm 的控制要求。DB 11/T 1626—2019《建设工程第三方监测技术规程》在对北京市建设工程进行专题研究的基础上,按照工程监测等级,提出了基坑各监测项目的第三方监测控制标准,例如,地面沉降的控制值为 20~50 mm、支护桩顶/墙顶的沉降控制值为 10~50 mm、支护桩顶/墙顶的水平位移控制值为 15~60 mm、支护桩体/墙体的水平位移控制值为 20~60 mm。DB 11/490—2007《地铁工程监控量测技术规程》提出了北京地铁明挖法/盖挖法施工监控量测值的控制标准,对围护桩顶/墙顶的沉降、地面沉降、围护桩体/墙体的水平位移给出了允许位移控制值,分别为 10 mm、10 mm、30~50 mm。

综上所述,当前基坑工程监测控制标准相对较

为完善,但相关研究和行业规范给出的控制值范围较大,针对性不强。

2 研究方法

2.1 区域划分及基坑选取

北京市西部和中东部的工程地质条件差异较大^[3],西部地区以含卵石、圆砾卵石等地层为主,中东部地区以填土、粉质黏土、粉细砂、细中砂及含水砂层等地层为主,因此,两个区域明挖工程施工引起的基坑变形差异较大。依据 GB 50307—2012《城市轨道交通岩土工程勘察规范》对围岩的分级规定,结合北京市基坑工程的实际地质情况,本文将北京市划分为以 V 级围岩为主的西部区域及以 VI 级围岩为主的中东部区域,分别对这两个区域的明挖工程基坑变形控制值进行统计分析。

由于基坑开挖变形控制值与周边环境保护要求密切相关,若周边环境复杂,则需要对变形数据提出更为严格的控制要求。因此,本文对北京地铁 200 多个明挖车站进行筛选,最终选取周边环境较为复杂的 35 个典型明挖车站基坑工程进行分析。

1) 西部区域选取了 7 个代表性基坑,主要为北京地铁 19 号线一期、昌平线南延伸段、房山线北延伸段等线路的车站。这些基坑大多位于丰台区、海淀区及房山区,沿线建(构)筑物较多,且临近河流或道路。基坑沿线地层以圆砾及卵石为主,地层渗透性强,地下水位低。

2) 中东部区域选取了 28 个代表性基坑,主要为北京地铁 17 号线、12 号线、3 号线一期、7 号线东延伸段等线路的车站。这些基坑主要位于朝阳区和通州区,且临近河流或道路。基坑沿线地层以黏性土、粉土与砂土为主,上部杂填土层较厚。

2.2 数据收集

本次研究选取了 1 164 个监测断面的 2 466 个测点进行分析研究。

1) 围护桩顶/墙顶的沉降、围护桩顶/墙顶的水平位移、围护桩体/墙体的水平位移数据收集原则:此三类监测项目数据可以直接反映基坑变形情况,因此,选取全部监测断面;除因个别测点被破坏或数据缺失外,其余测点的数据均用于统计分析。

2) 地面沉降数据收集原则:由于地面沉降监测断面较多,测点布设范围广,监测数据量庞大,收集数据时主要从基坑两端及中部附近选取具有代表性的监测断面;监测点选取邻近基坑边缘的 2 排

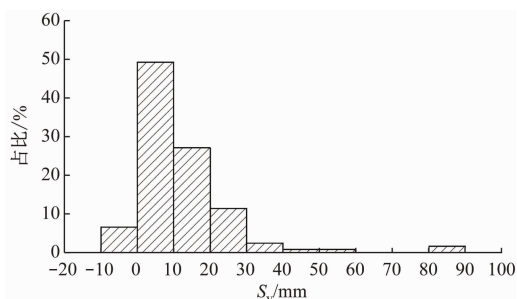
测点。

3 基坑变形数据统计分析

3.1 地面沉降

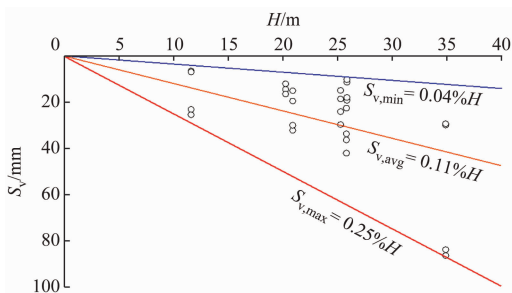
3.1.1 西部区域

对西部区域7个基坑122个地面沉降测点的沉降数据进行统计,统计结果如图1所示。图1中, H 为基坑设计深度, S_v 为地面沉降。



注:占比指沉降值在本范围内的测点数量占样本总数的比例。

a) 地面沉降分布比例直方图



注: $S_{v,min}$ —最小地面沉降; $S_{v,avg}$ —平均地面沉降; $S_{v,max}$ —最大地面沉降。

b) S_v 与 H 的关系图

图1 西部区域地面沉降测点的沉降数据统计

Fig. 1 Settlement data statistics from ground settlement monitoring points in the western area

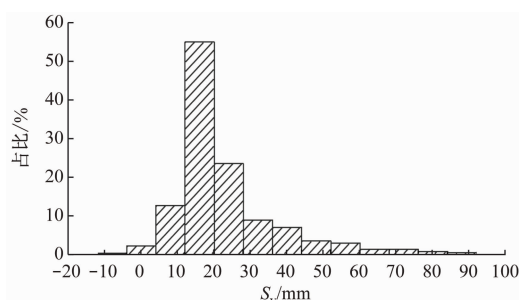
由图1a)可知:基坑周边地面以沉降现象为主,局部有隆起,沉降值在 $-10 \sim 40$ mm范围内的测点数占样本总数的96.7%。由图1b)可知:最小地面沉降为 $0.04\% H$,平均地面沉降为 $0.11\% H$,最大地面沉降为 $0.25\% H$ 。根据统计结果,西部区域地面沉降按40 mm和 $0.20\% H$ 进行控制,基本可以满足该区域内工程施工的安全控制要求。

3.1.2 中东部区域

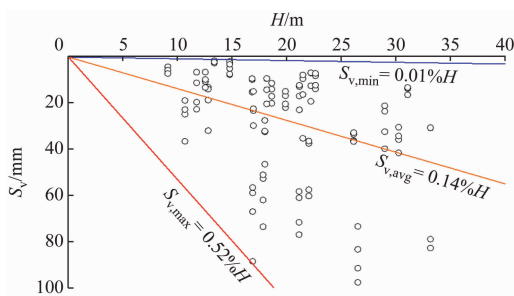
对中东部区域28个基坑445个地面沉降测点的沉降数据进行统计,统计结果如图2所示。

由图2a)可知:基坑周边地面以沉降现象为主,局部存在隆起,沉降值在 $-10 \sim 50$ mm范围内的

测点数占样本总数的92.1%。由图2b)可知:最小地面沉降为 $0.01\% H$,平均地面沉降为 $0.14\% H$,最大地面沉降为 $0.52\% H$ 。根据统计结果,中东部区域地面沉降按50 mm和 $0.30\% H$ 进行控制,基本可以满足该区域内工程施工的安全控制要求。



a) 地面沉降分布比例直方图



b) S_v 与 H 的关系

图2 中东部区域地面沉降测点的沉降数据统计

Fig. 2 Settlement data statistics from ground settlement monitoring points in the middle east area

3.2 围护桩顶/墙顶处沉降

3.2.1 西部区域

对西部区域4个基坑84个围护桩顶/墙顶处沉降测点的沉降数据进行统计,统计结果如图3所示。由图3可知:沉降在 $-15 \sim 10$ mm范围内的测点数约占样本总数的95.2%。对沉降数据做进一步分析后发现:发生隆起的测点数占样本总数64.3%,最大隆起量为21.47 mm;发生沉降的测点数占样本总数的35.7%,最大沉降量为9.36 mm。根据统计结果,西部区域围护桩顶/墙顶处沉降按15 mm进行控制,基本可以满足区域内工程施工的安全控制要求。

3.2.2 中东部区域

对中东部区域27个基坑650个围护桩顶/墙顶处沉降测点的沉降数据进行统计,统计结果如图4所示。由图4可知:沉降在 $-20 \sim 15$ mm范围内的测点数约占样本总数的95.5%。对沉降数据做进一步分析后发现,发生隆起的测点数占样本总数的

76.9%,最大隆起量为45.17 mm;发生沉降的测点数占样本总数的23.1%,最大沉降量为36.50 mm。根据统计结果,中东部区域围护桩顶/墙顶处沉降按20 mm进行控制,基本可以满足区域内工程施工的安全控制要求。

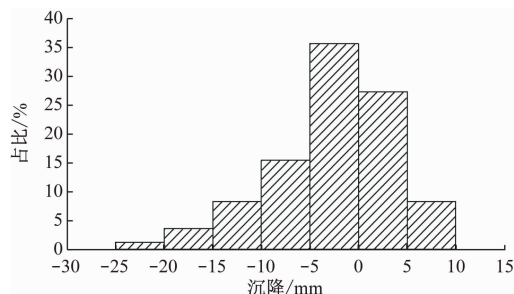


图3 西部区域围护桩顶/墙顶处沉降测点的沉降分布占比统计

Fig. 3 Settlement distribution proportion statistics from the settlement monitoring points at the retaining pile top and wall top in the western area

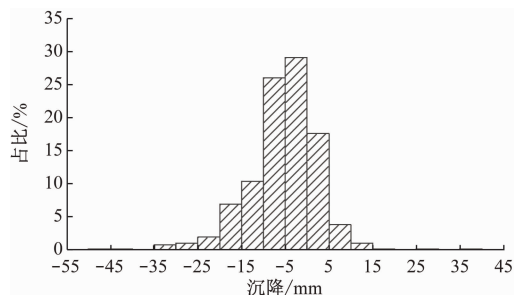


图4 中东部区域围护桩顶/墙顶处沉降测点的沉降分布占比统计

Fig. 4 Settlement distribution proportion statistics from the the settlement monitoring points at the retaining pile top and wall top in the middle east area

3.3 围护桩顶/墙顶处水平位移

3.3.1 西部区域

对西部区域7个基坑110个围护桩顶/墙顶处水平位移测点的水平位移数据进行统计,统计结果如图5所示。

由图5可知:水平位移在 $-15 \sim 15$ mm(负值表示向基坑外发生水平位移,正值表示向基坑内发生水平位移)范围内的测点数约占样本总数的92.7%。进一步分析发现,向基坑内的最大水平位移量为48.65 mm,向基坑外的最大水平位移量为52.75 mm。根据统计结果,围护桩顶/墙顶处向基坑内的水平位移按照15 mm进行控制,基本可以满足区域内工程施工的安全控制要求。

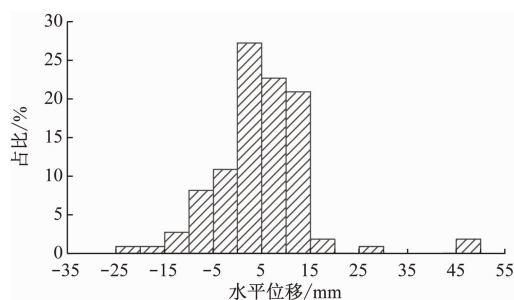


图5 西部区域围护桩顶/墙顶处水平位移测点的水平位移分布占比统计

Fig. 5 Horizontal displacement distribution proportion statistics from the horizontal displacement measuring points at the retaining pile top and wall top in the western area

3.3.2 中东部区域

对中东部区域27个基坑529个围护桩顶/墙顶处水平位移测点的水平位移数据进行统计,统计结果如图6所示。

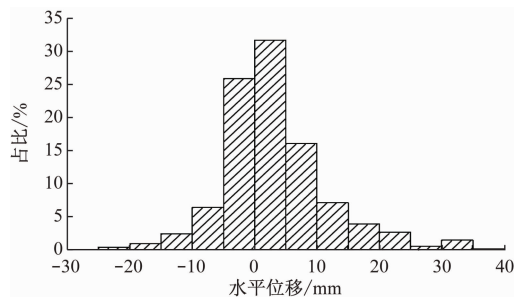


图6 中东部区域围护桩顶/墙顶处水平位移测点的水平位移分布占比统计

Fig. 6 Horizontal displacement distribution proportion statistics from the horizontal displacement measuring points at the retaining pile top and wall top in the middle east area

由图6可知:水平位移在 $-20 \sim 20$ mm范围内的测点数约占样本总数的94.7%。进一步分析发现,向基坑内的最大水平位移量为36.05 mm,向基坑外的最大水平位移量为23.91 mm。根据统计结果,围护桩顶/墙顶处向基坑内的水平位移按照20 mm进行控制,基本可以满足该区域内工程施工的安全控制要求。

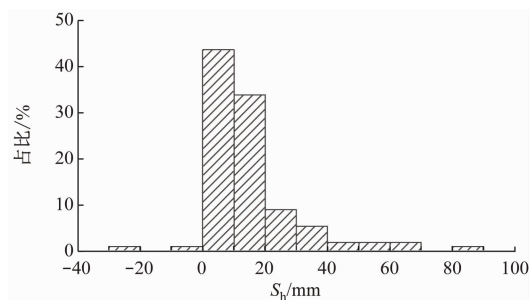
对于围护桩顶/墙顶向基坑外的水平位移,由于其变形原因复杂,应综合考虑支护结构、支撑轴力、地质条件等因素确定其控制值,本文不展开研究。

3.4 围护桩体/墙体处水平位移

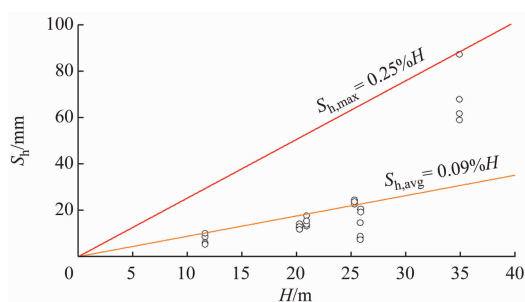
3.4.1 西部区域

设 S_h 为水平位移。对西部区域7个基坑110

个围护桩体/墙体处水平位移测点的水平位移数据进行统计,统计结果如图7所示。



a) 水平位移分布比例直方图



注: $S_{h,avg}$ —平均水平位移; $S_{h,max}$ —最大水平位移。

b) S_h 与 H 的关系

图7 西部区域围护桩体/墙体处水平位移测点的水平位移数据统计

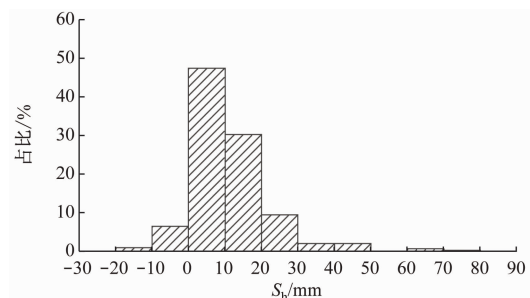
Fig. 7 Horizontal displacement data statistics from the horizontal displacement measuring points at the retaining pile body and wall in the western area

由图7 a)可知:水平位移在 $-10 \sim 40$ mm 范围内的测点数约占样本总数的 92.9%。由图7 b)可知:平均水平位移为 $0.09\% H$, 最大水平位移为 $0.25\% H$ 。根据统计结果,基坑围护桩体/墙体处向基坑内的水平位移按照 40 mm 和 $0.20\% H$ 进行控制,基本可以满足该区域内工程施工的安全控制要求。

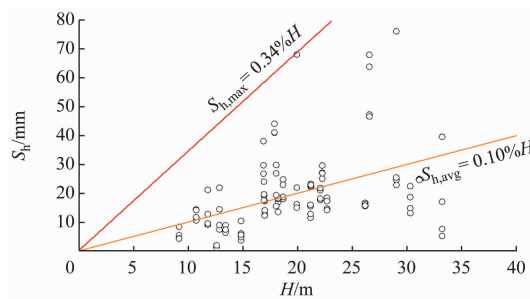
3.4.2 中东部区域

对中东部区域 27 个基坑 399 围护桩体/墙体处水平位移测点的水平位移数据进行统计,统计结果如图8所示。

由图8 a)可知:水平位移在 $-10 \sim 50$ mm 范围内的测点数约占样本总数的 96.1%。由图8 b)可知:平均水平位移为 $0.10\% H$, 最大水平位移为 $0.34\% H$ 。根据统计结果,基坑围护桩体/墙体处向基坑内水平位移按照 50 mm 和 $0.30\% H$ 进行控制,基本可以满足该区域内工程施工的安全控制要求。



a) 水平位移分布比例直方图



b) S_h 与 H 的关系

图8 中东部区域围护桩体/墙体处水平位移测点的水平位移数据统计

Fig. 8 Horizontal displacement data statistics from the horizontal displacement measuring points at the retaining pile body and wall in the middle east area

对于围护桩体/墙体向基坑外的水平位移,由于其变形原因复杂,本文也不展开研究。

4 结语

1) 基坑支护结构和周围岩土体的监测项目控制值应根据工程地质及水文地质条件、支护设计参数、工程风险等级、轨道交通工程施工经验等综合确定。

2) 考虑工程风险等级,对于基坑地面沉降、围护桩顶/墙顶的沉降、围护桩顶/墙顶处水平位移、围护桩体/墙体处水平位移四类监测项目,北京市西部区域的建议控制值分别为 25 ~ 40 mm 和 $0.10\% H \sim 0.20\% H$, 15 mm, 15 mm, 25 ~ 40 mm 和 $0.10\% H \sim 0.20\% H$; 中东部区域基坑这四类监测项目的建议控制值分别为 30 ~ 50 mm 和 $0.15\% H \sim 0.30\% H$, 20 mm, 20 mm, 30 ~ 50 mm 和 $0.15\% H \sim 0.30\% H$ 。

3) 根据基坑工程实测数据,利用统计分析方法对数据进行处理,是确定基坑变形控制值的重要手段。工程实施过程中,应注意积累资料,并对基坑

(下转第 138 页)

顶推力增加,其增幅约为 11.3%。

参考文献

- [1] 王福芝,曾聪,孔耀祖. 大直径长距离顶管润滑泥浆方案研究[J]. 地质科技情报, 2016, 35(2): 49.
WANG Fuzhi, ZENG Cong, KONG Yaozu. Mud scheme for a large diameter and long distance pipe jacking project[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(2): 49.
- [2] 王明胜,刘大刚. 顶管隧道工程触变泥浆性能试验及减阻技术研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(6): 182.
WANG Mingsheng, LIU Dagang. Test of thixotropic slurry properties and study of resistance-reducing technology for pipe jacking tunnel construction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(6): 182.
- [3] 袁为岭,荣亮,杨红军. 原材料含量对顶管施工触变泥浆性能的影响[J]. 隧道建设, 2016, 36(6): 683.
YUAN Weiling, RONG Liang, YANG Hongjun. Influence of raw materials content on performance of thixotropic slurry used in pipe jacking[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(6): 683.
- [4] 王李昌,赵跃奇,隆威,等. 大直径顶管穿越沙漠深部护壁浆液体系研究与应用[J]. 地质与勘探, 2020, 56(1): 163.
WANG Lichang, ZHAO Yueqi, LONG Wei, et al. Research on the wall protection slurry system of large diameter pipe jacking across deep desert and its application[J]. Geology and Exploration, 2020, 56(1): 163.
- [5] 罗云峰. 长距离大直径混凝土顶管中的减阻泥浆研究与应用[J]. 建筑施工, 2014, 36(2): 186.

- LUO Yunfeng. Research and application of drag reduction mud to long-distance and large diameter concrete pipe-jacking[J]. Building Construction, 2014, 36(2): 186.
- [6] 王春婷,隆威. 大口径长距离顶管工程泥浆配方试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(1): 106.
WANG Chunting, LONG Wei. Experimental study on the slurry formulation used for the large diameter long distance pipe-jacking project[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(1): 106.
- [7] 张云杰. 小间距大直径双孔顶管顶进对周围土体的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
ZHANG Yunjie. The analysis on the surrounding soil deformation by propulsion of closely spaced parallel pipes with large diameter [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [8] 喻军,李元海. 顶管泥浆套的物理性质对顶推力的影响[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊2): 327.
YU Jun, LI Yuanhai. Influence of physical properties of pipe jacking mud sleeve on jacking force[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S2): 327.

· 收稿日期:2022-05-07 修回日期:2022-09-19 出版日期:2024-09-10
Received:2022-05-07 Revised:2022-09-19 Published:2024-09-10
· 第一作者:张锐,高级工程师,279625702@qq.com
通信作者:申政,硕士研究生,1060509522@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 131 页)

的变形控制标准进行深入分析,以期为不同地质条件下基坑变形控制值的优化提供数据支撑。

参考文献

- [1] 吴锋波,金淮,张建全,等. 轨道交通基坑工程变形监测控制指标[J]. 都市轨道交通, 2013, 26(6): 78.
WU Fengbo, JIN Huai, ZHANG Jianquan, et al. Deformation monitoring controlled indexes of urban rail transit foundation pit engineering[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2013, 26(6): 78.
- [2] 金淮,张建全,吴锋波,等. 城市轨道交通工程变形统计分析与控制指标[J]. 都市轨道交通, 2014, 27(3): 65.
JIN Huai, ZHANG Jianquan, WU Fengbo, et al. Engineering deformation statistical analysis and control index in urban rail transit [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2014, 27(3): 65.

- [3] 张建全,姚爱敏,闫宇蕾. 基于监测大数据的地表沉降控制值研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(5): 1646.
ZHANG Jianquan, YAO Aimin, YAN Yulei. Analysis of surface subsidence control value based on monitoring big data [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(5): 1646.

· 收稿日期:2023-07-03 修回日期:2023-11-08 出版日期:2024-09-10
Received:2023-07-03 Revised:2023-11-08 Published:2024-09-10
· 第一作者:孙长军,正高级工程师,2421394502@qq.com
通信作者:闫海生,高级工程师,172404530@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