

滨海地区土岩复合地层城市轨道交通车站 深大基坑施工稳定性分析

杜 岩¹ 殷建国² 李文斌² 王宝泉² 宋卓华^{3,4}

(1. 中交(成都)城市开发有限公司, 641400, 成都; 2. 中交公路规划设计院有限公司, 100007, 北京;
3. 中交集团绿色建筑技术研发中心, 100022, 北京; 4. 中交建筑集团有限公司, 100022, 北京)

摘 要 [目的] 基坑开挖会引起周围地层和建(构)筑物产生变形, 轻则影响施工进度, 重则造成工程事故。为了保证城市轨道交通车站深大基坑的稳定性和安全性, 需对基坑开挖过程中土层与围护结构的受力和变形特性进行研究。[方法] 以青岛某地铁车站深大基坑为工程背景, 结合土岩复合地层特性, 采用数值模拟方法对深大基坑各施工工况下的变形及内力进行分析。结合现场数据, 研究土岩复合地层下深大基坑开挖过程中地面沉降、围护桩位移及支撑轴力的变形规律。[结果及结论] 数值模拟表明: 未施工双轴高压旋喷桩时, 端头井东墙、西墙及南墙均发生侧向位移, 且侧向位移方向均朝向基坑内部, 最大侧向位移为 2.19 mm, 发生在南墙中部; 施工双轴高压旋喷桩时, 基坑端头井一侧旋喷桩加固过程中, 端头井侧墙变形量出现峰值, 最大变形量为 2.21 mm。未施工双轴高压旋喷桩时, 地连墙内力变化峰值出现在其腰部, 最大值为 101 kN; 施工双轴高压旋喷桩时, 端头井旋喷桩加固地层侧的地连墙结构内力变化明显, 其内力变化峰值出现在地连墙腰部, 最大值为 96 kN。由此可见, 双轴高压旋喷桩对基坑各施工工况下的地连墙的内力有一定的减小作用, 但对基坑变形影响不大。

关键词 城市轨道交通; 车站; 深大基坑; 施工稳定性; 土岩复合地层; 滨海地区

中图分类号 U455.43:U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.03.033

Stability Analysis of Deep and Large Foundation Pit Construction for Urban Rail Transit Station in Soil Rock Composite Stratum in Coastal Area

DU Yan¹, Yin Jianguo², LI Wenbin¹, WANG Baoquan², SONG Zhuohua^{3,4}

(1. CCCC (Chengdu) Urban Development Co., Ltd., 641400, Chengdu, China; 2. CCCC Highway Planning and Design Institute Co., Ltd., 100007, Beijing, China; 3. CCCC Group Green Building Technology R & D Center, 100022, Beijing, China; 4. CCCC Construction Group Co.,

Ltd., 100022, Beijing, China)

Abstract [Objective] Excavation of foundation pit will cause deformation of surrounding strata and buildings, which affects construction progress and even causes engineering accidents in some degree. In order to ensure the stability and safety of deep large foundation pit in urban rail transit stations, it is necessary to study the stress and deformation characteristics of the soil layer and the enclosure structure during the foundation pit excavation. [Method] With the deep foundation pit excavation for a metro station in Qingdao as the project background and in view of the characteristics of soil rock composite stratum, numerical simulation method is used to analyze the deformation and internal force of the deep foundation pit. Based on the on-site data, the deformation law of ground settlement, retaining pile displacement and supporting axial force during excavation of deep foundation pit under soil rock composite stratum is studied. [Result & Conclusion] The numerical simulation shows that when biaxial high-pressure rotary jet grouting pile is not under construction, the lateral displacement occurs in the east, west and south walls of the end shaft, all towards the internal of the foundation pit, and the maximum lateral displacement of 2.19 mm occurs in the middle of the south wall. During the construction, the deformation of the side wall of the end shaft reaches peak in the process of reinforcement of the rotary jet grouting pile at the end shaft of the foundation pit, and the maximum deformation is 2.21 mm. When the biaxial high-pressure rotary jet grouting pile is not under construction, the peak value of the internal force of the diaphragm wall appears at its waist, and the maximum value is 101 kN. During construction, the internal force of the diaphragm wall structure at the stratum side strengthened by the end shaft jet grouting pile changes obviously, and the peak value of the internal force appears at the waist of the diaphragm wall, and the maximum value is 96 kN. It can be seen that the biaxial high-pressure rotary jet pile has certain effect on reducing the internal force of the diaphragm wall under different con-

struction conditions, but has little effect on the deformation of foundation pit.

Key words urban rail transit; station; deep and large foundation pit; construction stability; soil rock composite stratum; coastal area

青岛位于滨海地区,其地层属于土岩复合地层。此类型地层下基坑的开挖会引起周围地层和基坑产生变形,变形过大,轻则影响施工进度,重则造成工程事故,这给基坑施工更带来了较大的困难^[1-2]。目前,土岩复合地层条件下基坑支护结构的安全稳定性是许多学者较为关注的课题之一,其重点在于研究工程环境对支护结构体的影响特性^[3]。文献[4-6]通过对基坑支护结构体系全过程运营状态开展现场监测,研究支护结构安全稳定性变化,以此分析支护结构的最佳设计。文献[7-9]结合具体工程对其工程环境与关键施工技术进行

数值模拟分析。

本文以青岛某地铁车站为工程依托,简述基坑旋喷桩加固对其开挖变形的影响,采用有限元软件研究基坑开挖对土体受力及变形预测,结合现场实测数据分析土岩复合地层条件下的基坑稳定性,以期为今后类似工程提供借鉴。

1 工程概况

青岛某地铁车站为中间站,车站长 484.9 m,有效站台为长 118 m、宽 13 m 的岛式站台;车站标准段宽 21.8 m,车站外包高度为 13.21 m;标准段基坑深 17.41 m,宽 22.0 m。

车站主体结构顶板覆土主要为平均厚度为 4.0 m 的素填土,其底板下岩层主要为中风化安山岩;基坑围护桩插入下部岩层 4~5 m,插入比约为 0.34。地质纵断面图见图 1。

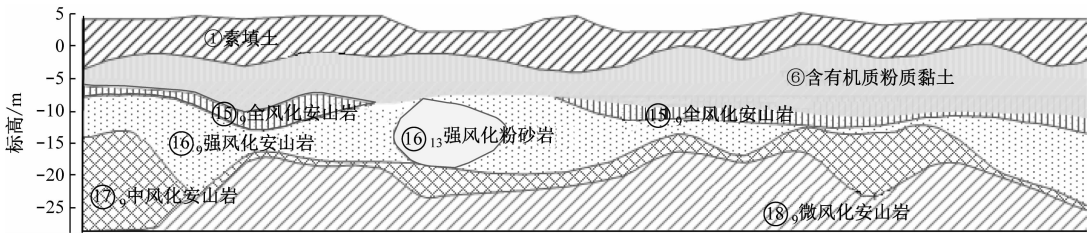


图1 地质纵断面图
Fig.1 Geological section map

2 基坑加固关键技术

2.1 双轴高压旋喷桩加固

本工程采用双轴高压旋喷桩施工,一杆到底,同时完成两根咬合旋喷桩作业,减少了止水帷幕搭接接头。利用钻机将带有喷嘴的注浆管钻进土层预定位置后,以高压设备使水泥浆液或水、空气成为高压射流从喷嘴中喷射出来,冲切、扰动土体;同时钻杆以一定速度逐渐提升,将浆液与土粒强制搅拌混合,浆液凝固后,在土中形成旋喷桩,以达到加固地基或止水防渗的目的。双轴高压旋喷桩止水帷幕布置如图 2 所示。

2.2 软弱土层开挖关键技术

根据地勘资料,⑥含有机质粉质黏土层在工程施工范围内连续分布,层厚 1.60~5.80 m,为典型的软弱土层。由于其承载力较低且不均匀,在工程施工过程中易发生基坑坍塌现象,施工中采用长臂挖机将⑥含有机质粉质黏土层垂直开挖掉,避免

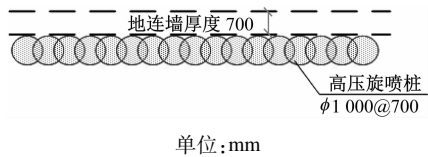


图2 双轴高压旋喷桩止水帷幕布置图
Fig.2 Arrangement of the water proof curtain for biaxial high-pressure rotary jet pile

长臂挖机在坑内作业时,由于地层的流变性导致机械设备倾覆。同时双轴高压旋喷桩施工也可以对该地层起到一定的加固作用。

3 基坑施工变形与内力数值模拟分析

3.1 模型假设与模拟参数

根据文献[10-13],本次数值计算模型满足以下基本假定:①模拟中所有地层与地连墙结构完全符合线弹性体特性;②各类荷载属于均布荷载。

模型中各层土体物理力学参数如表 1 所示。

表 1 模型中各层土体物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of each soil layer in the model

地层名称	密度/(g/cm ³)	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	泊松比	弹性模量/MPa	渗透系数/(m/d)
素填土	1.95	15	20.0	0.33	10.0	8.00
含有机质粉质黏土	1.91	7	8.0	0.33	12.0	0.02
全风化基岩	2.04	20	27.3	0.28	800.0	5.00
强风化基岩	2.10	35	30.0	0.30	2 200.0	5.00
中风化基岩	2.20	55	52.6	0.30	2 400.0	2.00

3.2 模型建立

本计算基于工程实际,于靠水域一侧进行双轴高压旋喷桩加固区模拟。车站基坑三维模型示意图如图 3 所示。

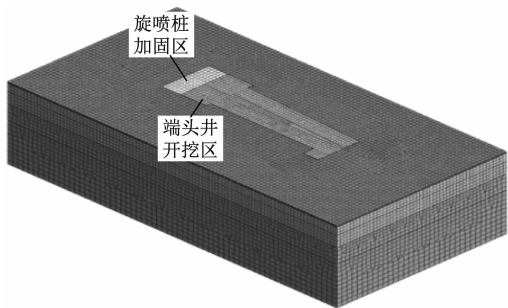


图 3 车站基坑三维模型示意图

Fig. 3 3D model diagram of the station foundation pit

模型中,侧墙及各层楼板采用板单元,各层围檩、抗拔桩等结构采用梁单元,各层土体以及端头井一侧旋喷桩加固区采用三维实体单元。

3.3 各施工工况下的基坑变形

对未施工双轴高压旋喷桩和施工双轴高压旋喷桩两种工况下基坑变形进行计算模拟分析。

1) 未施工双轴高压旋喷桩。对基坑施工过程中的各地层与结构变形进行计算模拟分析。结果表明,基坑施工过程中,端头井东墙、西墙及南墙均发生侧向位移,且侧向位移方向均为向基坑内部移动方向,最大侧向位移为 2.19 mm,发生在南墙中部,整体满足施工要求。

2) 施工双轴高压旋喷桩。对端头井一侧地层旋喷桩加固过程中的各地层与结构变形进行计算模拟分析。结果表明,基坑端头井一侧旋喷桩加固过程中,端头井侧墙变形量出现峰值,最大变形量为 2.21 mm,整体满足施工要求。

由此可见,双轴高压旋喷桩对各施工工况下的基坑变形影响不大。

3.4 各施工工况下的结构内力

对未施工双轴高压旋喷桩和施工双轴高压旋喷桩两种工况下地连墙的内力进行计算模拟分析。

1) 未施工双轴高压旋喷桩。基坑施工过程中,地连墙内力变化峰值出现在其腰部,最大值为 101 kN,整体满足施工要求。

2) 施工双轴高压旋喷桩。基坑施工过程中,端头井旋喷桩加固地层侧的地连墙结构内力变化明显,其内力变化峰值出现在地连墙腰部,最大值为 96 kN,整体满足施工要求。

由此可见,双轴高压旋喷桩对各施工工况下的地连墙的内力有一定的减小作用。

4 基坑开挖阶段现场监测数据分析

4.1 监测方案设计

本文针对基坑的围护结构做了相关监测设计,主要监测内容为基坑围护结构及地层变形监测。基坑中主要测点及仪器的布置如图 4 所示。

4.2 监测数据分析

4.2.1 地面沉降分析

图 5 为某地铁车站基坑各测点地面沉降-开挖时间关系曲线。由图 5 可以看出:最大地面沉降量为 11.81 mm。随着开挖时间和开挖深度的不断推进,基坑各处地面沉降量一直变化。在开挖开始的前几周内,基坑开挖深度不大,基坑周边各点沉降量变化不大,且其变化率相对较小;随着基坑开挖的进行,开挖深度越来越深,基坑周边各点地面沉降变化量也逐渐增大,且其总沉降量也显著增加;地面最大沉降量位置并未出现在紧邻基坑处,而出现在距基坑一定距离处,距基坑约 5 m 处的地面沉降量最大。

随着距离的再次增大,沉降量反而随着逐渐减小,在距基坑 20 m 远处,沉降量在 1 mm 左右,可视 为没有变化。该沉降变化趋势符合“沉降勺”规律,

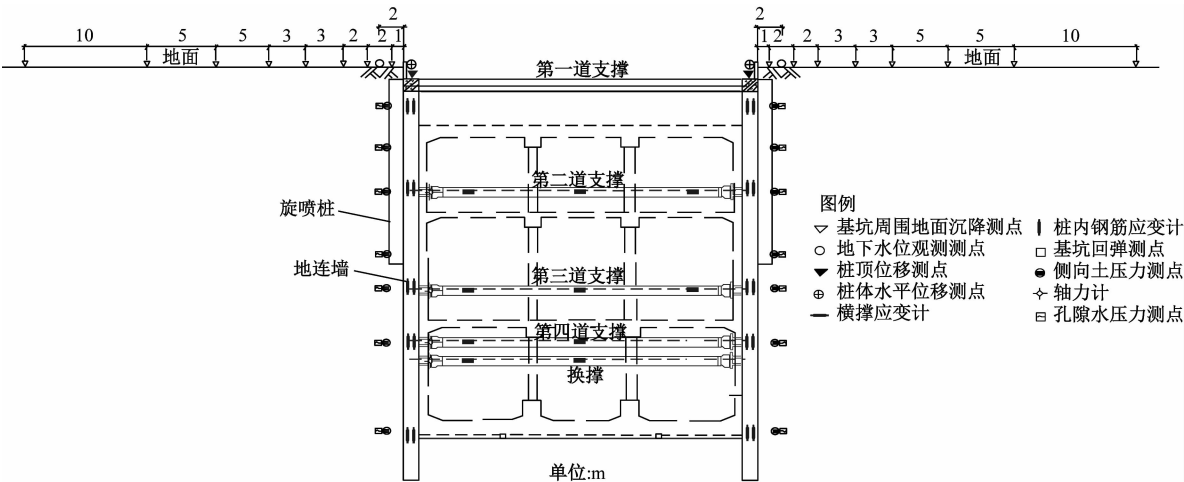


图4 基坑主要测点及仪器布置图

Fig.4 Main test points and instruments layout in foundation pit

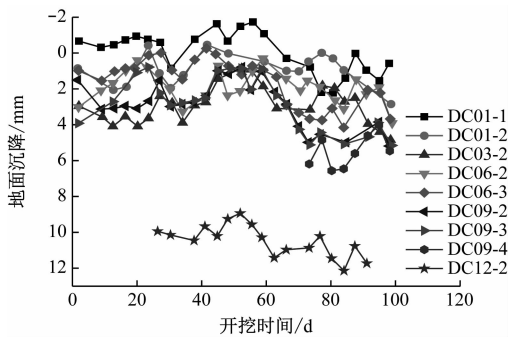


图5 基坑各测点地面沉降-开挖时间关系曲线图

Fig.5 Relation curve of surface settlement-excavation time in each measuring point in the foundation pit

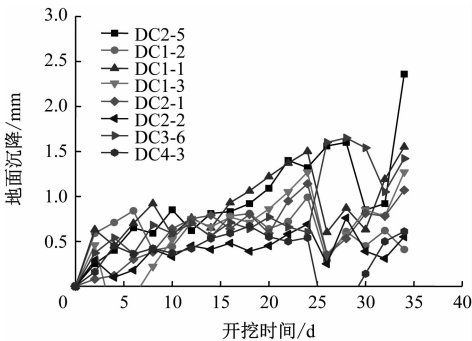


图6 开挖至第2道支撑时地面沉降-开挖时间变化曲线

Fig.6 Relation curves of surface settlement-excavation time when excavating to the secondary support

基坑近邻地面沉降量的表现与带有内支撑体系的基坑地面沉降曲线形式吻合。基坑近邻地面沉降量均在变形允许值范围内,可看出基坑的支护体系是稳定和安全的。

由图6—图8为基坑继续开挖时地面沉降-开挖时间变化曲线。由图6—图8可以看出:随着基坑开挖深度的增大,地面沉降量也随之增大,且最大沉降量出现在第3道支撑安装阶段。以DC2-5测点为例,在第2道支撑安装完成后,最大地面沉降量为2.4 mm;当第3道支撑安装完成后,该测点地面沉降量达到了7.8 mm,较之前增长了5.4 mm;而当全部支撑安装完毕后,最终的地面沉降量为9.0 mm,仅增长了1.2 mm。由此可见,混凝土支撑在限制地面沉降上起到了明显的作用。

4.2.2 围护桩位移分析

围护桩1-1截面、2-2截面位置如图9所示。围护桩1-1截面水平位移-深度变化曲线见图10所示。

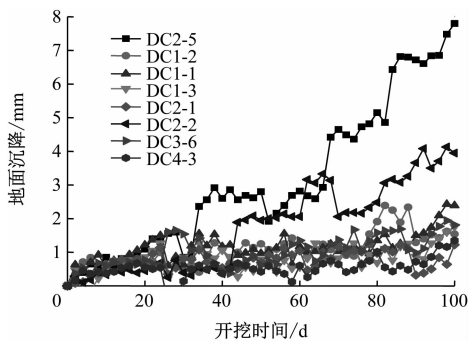


图7 开挖至第3道支撑时地面沉降-开挖时间变化曲线

Fig.7 Relation curves of surface settlement-excavation time when excavating to the 3rd support

由图10可见:基坑在开挖过程中,1-1截面的CX1-4处围护桩最大水平位移为5.1 mm,且其发生在桩顶以下2.8 m。与前两道支撑的安装过程相比,后续的施工对整个围护桩的水平位移影响较明显,说明基坑开挖过程中的空间效应以及其他施工因素

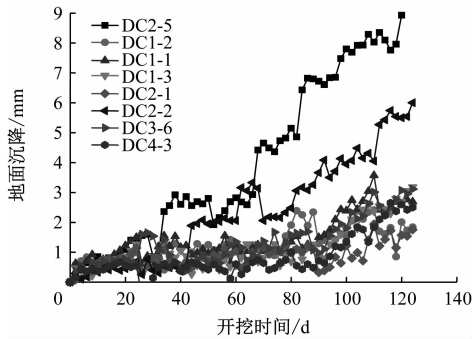


图8 开挖至第4道支撑时地面沉降-开挖时间变化曲线

Fig. 8 Relation curves of surface settlement-excavation time when excavating to the fourth support

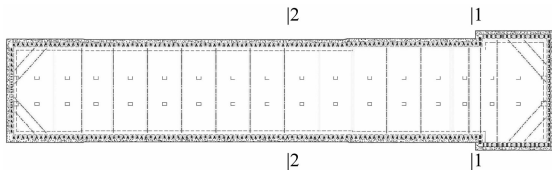


图9 基坑纵向监测断面位置图

Fig. 9 Longitudinal monitoring section map of the foundation pit

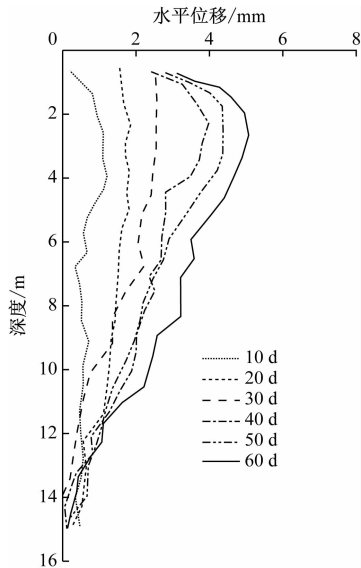


图10 围护桩1-1截面水平位移-深度变化曲线

Fig. 10 Variation curves of horizontal displacement and depth for 1-1 retaining pile cross-section

对后两道支撑施工过程中的影响较显著。

围护桩 2-2 截面水平位移-深度变化曲线见图 11。由图 11 可见:围护桩顶部第一道混凝土支撑施工完成后,水平位移变化很小,围护桩中间位置水平位移变化较大。由于基坑的空间效应,侧斜管离基坑两端支撑越远,围护桩顶部的水平位移变化越大。基坑开挖到每一层支撑底至支撑安装完成之前,围护桩深层水平位移均出现较大幅度的增长。

随着时间推移,围护桩顶部水平位移出现较大变化,且深度越大,水平位移变化越小,最终水平位移趋于不变。

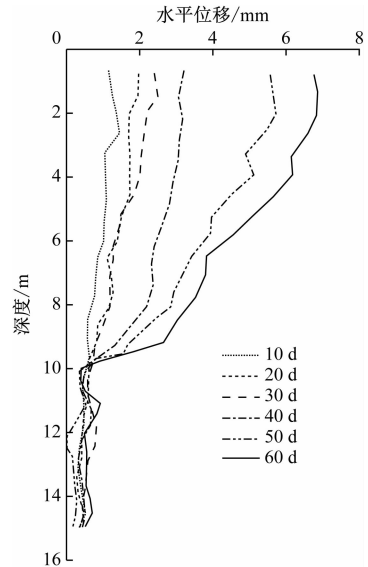


图11 围护桩2-2截面水平位移-深度变化曲线

Fig. 11 Variation curves of horizontal displacement and depth for 2-2 retaining pile cross-section

4.2.3 支撑轴力分析

图 12 和图 13 分别为混凝土支撑和钢支撑轴力-开挖时间关系曲线。由图 12—图 13 可知:随着开挖深度的不断增加,支撑轴力出现先升高后降低的趋势,其变化情况与围护桩水平位移基本同步;部分支撑安装完成后,支撑轴力出现了一个缓慢下降的过程,究其原因为土层蠕变和支撑应力调整的结果。刚开始施加轴力时,土体受到水平挤压作用会产生挤密变形,但随着时间的增加周围土体变形

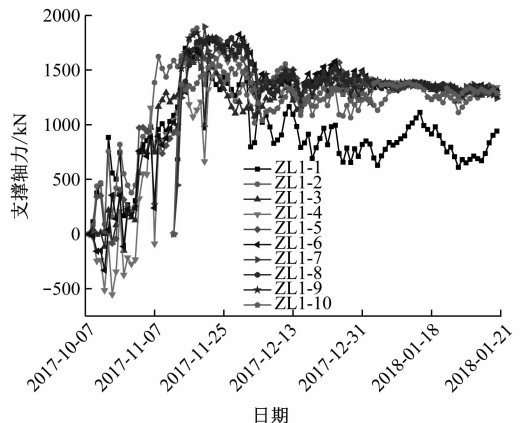


图12 第1道混凝土支撑轴力-开挖时间关系曲线

Fig. 12 Relation curves of the axial force of the first concrete support and excavation time

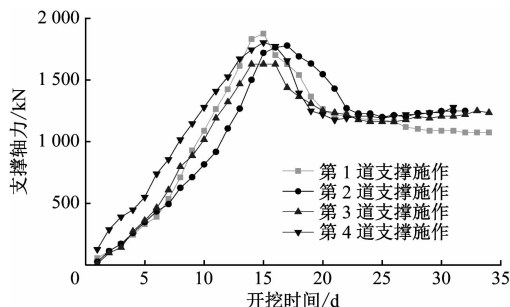


图13 钢支撑轴力-开挖时间关系曲线

Fig. 13 Relation curves of the axial force of steel support and excavation time

会产生蠕变而向周围扩散转移,这样会造成土体局部的应力消散,使得支撑轴力减小。而土方的继续开挖和下一道支撑的架设,又会使轴力慢慢趋于稳定,并最终保持在一个合理的范围内波动。

5 结语

1) 双轴高压旋喷桩止水帷幕的良好应用,不仅对滨海地区深大基坑防水起到重要作用,也对软弱地层进行了一定的加固,从两方面保障了工程的顺利施工。

2) 数值模拟计算表明:未施工双轴高压旋喷桩时,端头井东墙、西墙及南墙均发生侧向位移,且侧向位移方向均为向基坑内部移动方向,最大侧向位移为2.19 mm,发生在南墙中部;施工双轴高压旋喷桩时,基坑端头井一侧旋喷桩加固过程中,端头井侧墙变形量出现峰值,最大变形量为2.21 mm。未施工双轴高压旋喷桩时,地连墙内力变化峰值出现在其腰部,最大值为101 kN;施工双轴高压旋喷桩时,端头井旋喷桩加固地层侧的地连墙结构内力变化明显,其内力变化峰值出现在地连墙腰部,最大值为96 kN。由此可见,双轴高压旋喷桩对基坑各施工工况下的地连墙的内力有一定的减小作用,但对基坑变形影响不大。

3) 现场监测数据分析结果与数值模拟分析结果较为接近,但由于施工现场地面存在许多临时荷载,地下水、温度等因素会对基坑及地层变形造成影响,数值模拟方法无法考虑周全,这将成为进一步完善的方向。本次研究验证了数值模拟方法能够准确地预测施工中车站基坑地连墙结构的变形量,对类似工程具有良好的普适性。

参考文献

[1] 赵顺廷, 刘海宁, 李华杰. 青岛国际帆船中心大型深基坑开

挖技术[J]. 施工技术, 2006, 35(2): 36.

ZHAO Shunting, LIU Haining, LI Huajie. Excavation technology of Qingdao international sailboat center deep foundation pit[J]. Construction Technology, 2006, 35(2): 36.

[2] 邓舒, 姜振泉, 王艳萍, 等. 青岛地铁双山站深基坑开挖支护综合分析[J]. 铁道建筑, 2014, 54(2): 41.

DENG Shu, JIANG Zhenquan, WANG Yanping, et al. Comprehensive analysis of deep foundation pit excavation support in Shuangshan Station of Qingdao metro line[J]. Railway Engineering, 2014, 54(2): 41.

[3] 杨金华, 夏元友, 刘毅, 等. 狭长土岩组合基坑支护结构变形与受力变化规律的现场测试[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(12): 78.

YANG Jinhua, XIA Yuanyou, LIU Yi, et al. Field test of deformation behavior and stress mechanism for long-narrow type and soil-rock composition excavation[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(12): 78.

[4] 陈春梅. 某文化中心深基坑优化设计探讨[J]. 建设科技, 2017(10): 54.

CHEN Chunmei. Discussion on optimal design of deep foundation pit for a cultural center[J]. Construction Science and Technology, 2017(10): 54.

[5] 于江浩. 深基坑桩撑支护结构变形模拟分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.

YU Jianghao. Deformation simulation analysis of rowed piles and internal supporting structure for deep foundation pit[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.

[6] 陶颂, 程康, 沈伟. 地铁车站深基坑开挖现场监测与理正软件分析[J]. 土工基础, 2018, 32(5): 470.

TAO Song, CHENG Kang, SHEN Wei. Construction monitoring and analysis of metro station supporting system[J]. Soil Engineering and Foundation, 2018, 32(5): 470.

[7] 白海峰, 徐成成. 地铁车站深基坑开挖及围护结构变形模拟分析[J]. 大连交通大学学报, 2019, 40(5): 92.

BAI Haifeng, XU Chengcheng. Deformation simulation analysis of deep foundation pit excavation and supporting structure of metro station[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2019, 40(5): 92.

[8] 吴昌长. 桩锚与桩撑联合支护下深基坑开挖变形数值模拟研究[D]. 昆明: 云南大学, 2014.

WU Changchang. Numerical simulation study on deep foundation pit excavation with combined supporting structure of pile-anchor and pile-brace[D]. Kunming: Yunnan University, 2014.

[9] 汪彪. 深基坑二次开挖桩锚支护结构计算程序及数值模拟: 以长沙运达深基坑加固工程为例[D]. 武汉: 中国地震局地震研究所, 2013.

WANG Biao. The analysis and numerical simulation of the secondary excavation in deep foundation pit supported with pile anchor[D]. Wuhan: Institute of Seismology, China Earthquake Administration, 2013.

(下转第192页)

2) 在基坑施工期间,钻孔桩变形呈现先增大后减小的趋势,最大值出现在中部基坑(基坑 C 和基坑 D)开挖期间。钻孔桩越靠近高铁桥墩水平变形越大,同时外侧钻孔桩的水平位移要大于内侧钻孔桩。

3) 采用本文提出的多排钻孔桩+斜撑的加固方案后,基坑施工期间桥墩竖向位移和水平位移均小于 2 mm 限值的要求,证明该加固方案能够有效控制既有高铁桥墩的变形,满足高铁安全运营的要求。

参考文献

- [1] 李晓龙. 基坑开挖对邻近高铁桥墩的影响分析[J]. 现代城市轨道交通, 2016(2): 42.
- LI Xiaolong. Analysis on influence of excavation on adjacent bridge pier under high speed railway bridge[J]. Modern Urban Transit, 2016(2): 42.
- [2] 张仲宇, 李兆平, 杨航, 等. 并行基坑施工对邻近桥梁影响及保护措施[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(3): 68.
- ZHANG Zhongyu, LI Zhaoping, YANG Hang, et al. Study on in-

fluence of parallel foundation pit construction on adjacent bridge and protection measures[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(3): 68.

- [3] 何晟亚, 王志杰, 王恒一. 地铁基坑下穿城际铁路高架加固措施研究[J]. 现代城市轨道交通, 2022(2): 38.
- HE Shengya, WANG Zhijie, LI Hengyi. Study on reinforcement measures of metro foundation pits under intercity railway viaducts[J]. Modern Urban Transit, 2022(2): 38.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑变形测量规范: JGJ 8—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 58.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for deformation measurement of building and structure: JGJ 8—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016: 58.

· 收稿日期:2023-06-28 修回日期:2023-09-12 出版日期:2024-03-10
Received:2023-06-28 Revised:2023-09-12 Published:2024-03-10

· 作者:李晓龙,高级工程师,514704364@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 181 页)

- [23] TAO Y, VANTYGHM G, LESAGE K, et al. Adhesion properties of printable polymer-modified concrete for rock tunnel linings[J]. ACI Materials Journal, 2021, 118(6): 61.
- [24] KACI A, BOURAS R, PHAN V T, et al. Adhesive and rheological properties of fresh fibre-reinforced mortars[J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(2): 218.
- [25] MOHAMED ABDELHAYE Y O, CHAUCHE M, VAN DAMME H. The tackiness of smectite muds. 1. The dilute regime[J]. Applied Clay Science, 2008, 42(1/2): 163.

- [26] MOHAMED ABDELHAYE Y O. Tackiness and cohesive failure of granular pastes: mechanistic aspects[J]. The European Physical Journal E, 2012, 35(6): 1.

· 收稿日期:2023-10-23 修回日期:2023-11-20 出版日期:2024-03-10
Received:2023-10-23 Revised:2023-11-20 Published:2024-03-10

· 作者:瞿锋,高级工程师,1323951174@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 187 页)

- [10] 刘涛, 刘红军. 青岛岩石地区基坑工程设计与施工探讨[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊1): 499.
- LIU Tao, LIU Hongjun. Design and construction of foundation pits in rock area in Qingdao[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 499.
- [11] 王江荣, 梁永平, 赵振学. 基于有限元分析的地铁车站明挖深基坑边坡稳定性分析[J]. 工程质量, 2019, 37(1): 54.
- WANG Jiangrong, LIANG Yongping, ZHAO Zhenxue. Slope stability analysis of open cut deep foundation pit of subway station based on finite element analysis[J]. Construction Quality, 2019, 37(1): 54.
- [12] 翟永亮. 地铁车站基坑桩撑支护体系 m 法设计参数研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.
- ZHAI Yongliang. Study on the M-method design parameter of

pile-internal bracing strut support system in subway station pit[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.

- [13] 王仁杰. 某桩锚支护深基坑三维有限元模拟及性状分析[D]. 衡阳: 南华大学, 2013.
- WANG Renjie. Three-dimensional finite element simulation and behavior analysis of a deep foundation pit supported by pile and anchor[D]. Hengyang: University of South China, 2013.

· 收稿日期:2021-12-10 修回日期:2022-03-18 出版日期:2024-03-10
Received:2021-12-10 Revised:2022-03-18 Published:2024-03-10

· 第一作者:杜岩,高级工程师,187276691@qq.com
通信作者:殷建国,高级工程师,yjgkyo@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