

成都地铁基坑围护桩大变形原因分析及对策研究^{*}李 雪¹ 耿凤娟² 赵卫星³ 李方利³ 蒋 媛⁴

(1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 610500, 成都; 2. 中国航空集团建设开发有限公司, 101300, 北京;
3. 中国铁建昆仑投资集团有限公司, 610041, 成都; 4. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 610072, 成都)

摘 要 [目的] 周边环境及地质条件复杂的地铁基坑施工稍有不慎易导致基坑事故的发生。需分析基坑围护桩大变形原因, 并提出针对性加固措施。[方法] 以成都某近接老旧建筑物的桩锚支护结构地铁站基坑为工程背景, 分析了基坑施工过程中围护桩体发生大变形的原因, 提出控制围护桩变形的加固措施。通过 Harding-soil 二阶高级本构模型研究了围护桩发生变形后, 坑内采用反压堆载、基坑坑外坡体采用钢管桩及再次开挖前加强两道锚索措施的可行性。[结果及结论] 模拟计算结果及现场实测结果表明, 围护桩累计位移为 77.77 mm; 围护桩产生大变形后采用加固措施, 可将围护桩水平位移控制在 53 mm 以内; 根据模拟计算结果及现场实测结果, 二者桩体水平位移曲线变化规律一致。实际施工结果表明, 采取加固措施后, 基坑变形控制效果明显, 后续施工过程中未发生大范围变形。

关键词 地铁; 基坑工程; 围护桩变形; 桩锚支护

中图分类号 TU94⁺2; TU433

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.01.010

Cause Analysis and Countermeasure Study on Significant Deformation of Chengdu Metro Foundation pit Retaining Piles

LI Xue¹, GENG Fengjuan², ZHAO Weixing³, LI Fangli³, JIANG Yuan⁴

(1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, 610500, Chengdu, China; 2. China Aviation Corporation Construction and Development Co., Ltd., 101300, Beijing, China; 3. China Railway Construction Kunlun Investment Group Co., Ltd., 610041, Chengdu, China; 4. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, 610072, Chengdu, China)

Abstract [Objective] The complex environmental and geological conditions surrounding metro foundation pit construction can easily lead to accidents. It is necessary to analyze the reasons for significant deformation of foundation pit retaining piles and propose targeted reinforcement measures. [Method] Taking a metro station foundation pit of pile-anchor supporting

structure adjacent to old buildings in Chengdu as engineering background, the causes of significant deformation of the retaining piles during foundation pit construction are analyzed and reinforcement measures to control pile deformation are proposed. Using the Harding-soil second-order advanced constitutive model, the feasibility of following measures after retaining pile deformation such as counter-pressure surcharge within the pit, steel pipe piles for the outer slope of the pit, and reinforcement with two additional anchor cables before re-excavation are studied. [Result & Conclusion] Simulation results and field measurements indicate that the accumulated displacement of the retaining piles is 77.77 mm. After implementing reinforcement measures following significant deformation, the horizontal displacement of the retaining piles can be controlled within 53 mm. The consistency between the simulated and field-measured results of the pile horizontal displacement curve change law is evident. Actual construction results demonstrate that the deformation control effect of the foundation pit is significant after adopting reinforcement measures, with no widespread deformation occurring in subsequent construction processes.

Key words metro; foundation pit; retaining pile deformation; pile-anchor support

基坑在开挖过程中, 围护结构的侧向变形直接反映了基坑的稳定性和支护结构的内力变化。基坑中土体开挖将使围护结构前后的土体产生不平衡力而产生压力差, 岩土体在压力差的作用下将产生变形, 过大的岩土体变形会对基坑周边环境造成严重影响。因此, 我国基坑工程设计大多采用变形控制。

基坑开挖有效控制围护结构变形以保护周边环境。文献[1]发现几何形状、支护结构和支撑所在位置的影响是基坑变形的主要因素。文献[2]对处于软、中等硬度饱和土中的基坑进行了长期监测, 提出了基坑土体周围环境的变形规律。文献

^{*} 国家自然科学基金项目(51808469)

[3]利用 FLAC 模拟研究地铁换乘站深基坑围护结构变形规律。文献[4]结合变形监测研究北京地铁义和庄站基坑支护结构。文献[5]利用有限元软件着重分析了基坑开挖过程中围护结构的变形、基坑周围土体的沉降、基坑底部的隆起三方面。上述研究均探究了基坑开挖对基坑围护结构变形的影响。

在复杂环境、复杂地层条件下,基坑围护桩发生大变形后,针对如何进行快速安全地加固防止围护桩进一步变形及周边土体失稳方面的研究较为罕见。对此,本文针对成都地铁某基坑工程围护桩发生大变形后处理措施进行分析,并对加固方案进行数值计算。

1 工程背景

1.1 工程概况

成都地铁某基坑工程周边紧邻小区及主干道。该站建筑为地下一层、局部地下两层。基坑的南侧及东侧均采用桩锚支护体系。桩锚支护区基坑深度(自冠梁顶计算)为 9.8~17.8 m。东南侧紧邻的石油小区内 有 6 层砖混结构建筑,基坑计算深度约为 13.8 m。基坑与小区位置如图 1 所示。石油小区围墙距基坑约 20.0 m,石油小区 1 层配电房距基坑约为 21.0 m。

1.2 地质概况

场地内自冠梁向下的土层依次为中风化砂岩、强风化砾岩、强风化砂岩、中风化砂岩。土层分界

线整体呈东高西低走向。围护结构深度所涉土层大致为:① 中风化砂岩,深度范围为 0~2.0 m;② 强风化砾岩,深度范围为 2.0~6.0 m;③ 强风化砂岩,深度范围为 6.0~10.0 m;④ 中风化砂岩,深度范围为 10.0~28.8 m。各土层物理参数见表 1。

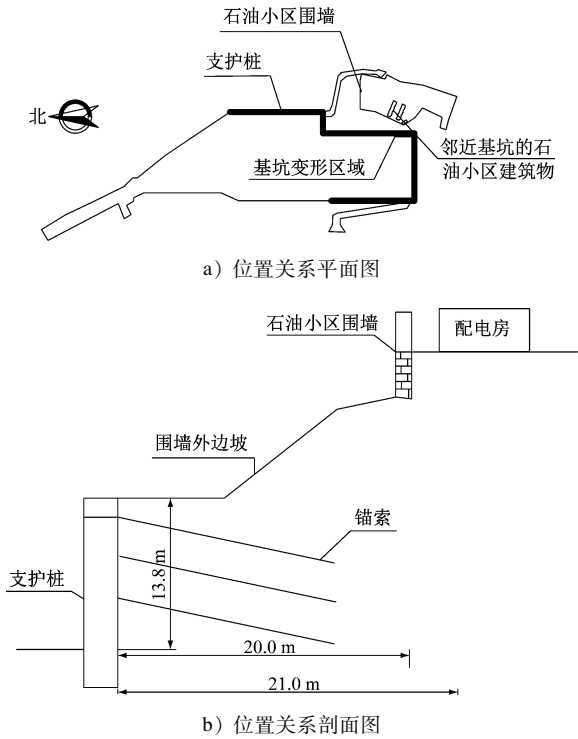


图 1 基坑与小区位置示意图

Fig. 1 Diagram of foundation pit and plot location

表 1 各土层物理参数表

Tab. 1 Physical parameters of each soil layer

土层	厚度/ m	天然重度/ (kN/m ³)	饱和重度/ (kN/m ³)	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ (kN/m ²)	三轴排水试验割线模量/ (kN/m ²)	固结仪切线模量/ (kN/m ²)	卸载或重加载模量/ (kN/m ²)
中风化砂岩	2.0	17	20	34	0	3.0×10 ⁴	3.0×10 ⁴	9.0×10 ⁴
强风化砾岩	4.0	18	20	40	0	3.5×10 ⁴	3.5×10 ⁴	10.5×10 ⁴
强风化砂岩	4.0	16	20	30	1	2.0×10 ⁴	2.0×10 ⁴	6.0×10 ⁴
中风化砂岩	18.8	17	20	34	0	3.0×10 ⁴	3.0×10 ⁴	9.0×10 ⁴

2 基坑围护桩变形发展情况分析

2018 年 9 月 8 日凌晨邻近石油小区的东南侧基坑开挖至第三道锚索施工作业面,发现基坑变形较大。此时该部位基坑开挖深度约为 10 m。选取基坑东南角监测点 ZQS16、ZQS17、ZQS18、ZQS19 的数据进行分析,相应围护桩监测点平面布置图(部分)如图 2 所示。监测数据如图 3 所示。由图 3 可知,ZQS16、ZQS18、ZQS19 的桩顶侧向位移均为

24 mm 左右,ZQS17 的桩顶侧向位移单日最大变化量达 49 mm;基坑变形部位的桩顶水平位移最大累积值已达 77.8 mm。

3 围护桩变形原因分析

施工期间雨水频繁,水分增加了土体颗粒间的润滑度,导致土体内摩擦角减小、黏聚力降低,进而使土体抗剪强度急剧下降,使土体丧失平衡。

在监测点 ZQS17 所在的 17 号基坑围护桩(以

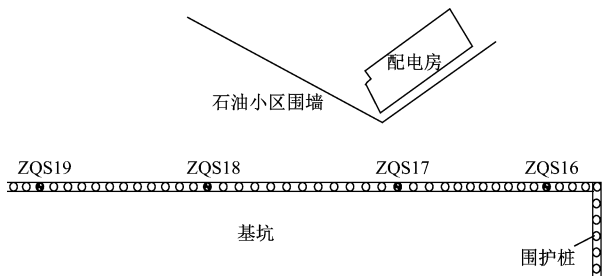


图2 围护桩监测点平面布置图(部分)

Fig. 2 Layout of retaining pile monitoring points (partial)

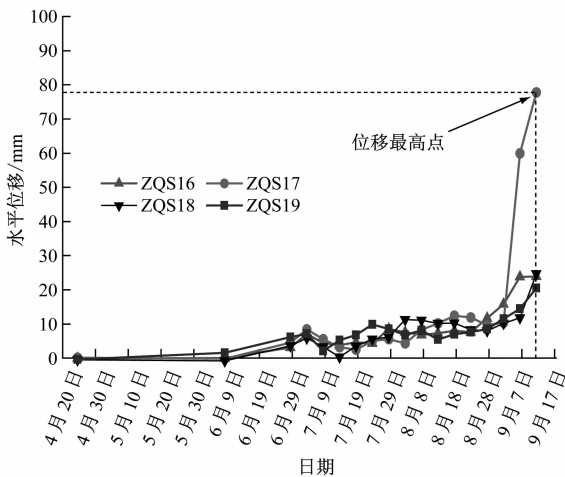


图3 ZQS16—ZQS19 处桩顶水平位移趋势图

Fig. 3 Diagram of pile top horizontal displacement trend at ZQS16 – ZQS19

下简称“17 号桩”),邻近石油小区围墙已产生裂缝,且电缆沟容易积水,故钻孔施工过程中围岩裂隙水不断渗出,导致大量雨水未及时排出就经裂缝渗入下方砂岩。据推测,砂岩的吸水微膨胀性会造成该处发生不均匀沉降,进一步引起围护桩侧方土体及小区边坡局部滑移^[6-7]。

4 处理方案

4.1 加固措施

基于基坑围护桩变形原因,提出现场加固措施。基坑围护桩加固措施示意图如图4所示。

1) 对边坡的挡墙的泄水孔进行疏通,使坡体含水量及其中的孔隙水压力降低,以增强抗滑力和减小下滑力。及时对坡顶硬化层有开裂的坡顶裂缝进行封闭,防止雨水下渗。

2) 在17号桩处的坑角处进行堆土反压,将土石堆于阻滑部位;反压堆土回填至第一道锚索和第二道锚索之间,使之既起到降低支护结构位移及内力又增加抗滑力的良好效果,有效抑制围护及土体变形。

3) 结合后续锚索施工方案,进行锚杆预应力补张,以提高滑动面上的法向应力,进而提高该面的抗滑力,改善剪应力的分布情况,增强面层整体性和强度。

4) 在石油小区围墙基础旁打设深度为22 m的微型钢管桩。微型钢管桩应贯穿砾岩层,并锚入下部砂岩层。通过压力注浆,提高钢管周围土体的强度指标,改善初始应力场,增强土体的自稳性,降低开挖瞬时土体次生力的变化,减小边坡变形量。钢管桩与其他结构构件共同作用稳固边坡。

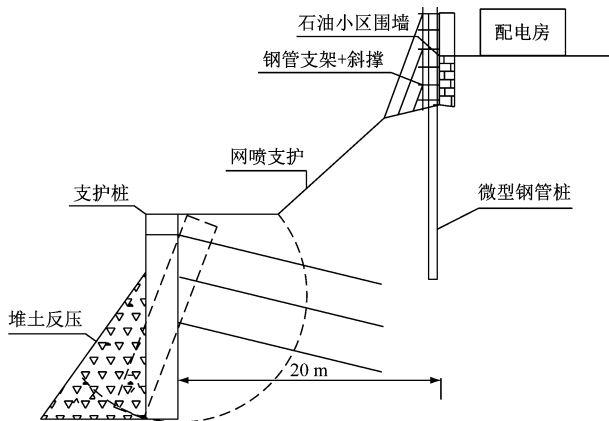


图4 基坑围护桩加固措施示意图

Fig. 4 Diagram of foundation pit retaining pile reinforcement measures

4.2 数值模拟

采用 PLAXIS 2D 软件建立平面应变模型,对基坑加固措施进行数值模拟分析。计算模型尺寸为 50 m × 70 m。围护桩及微型钢管桩采用板单元模拟。考虑围护结构与土体间的相互作用,板单元左右两侧创建强度折减系数 R_{inter} 为 0.7 的界面单元。地层锚杆采用点对点单元与 Embedded beam row 单元组合模拟,前者用于模拟自由段,后者模拟锚固段。基坑开挖至第三层底部时激活线荷载模拟堆土反压措施。采用 Harding-soil 二阶高级本构模型(以下简称“HS 本构模型”)来模拟砂石的土体变形行为。HS 本构模型的基坑计算模型及基坑网格模型分别如图5及图6所示。

HS 本构模型的有限元计算中,模型破坏准则采用摩尔-库伦准则。HS 本构模型主要强度参数取值见表1。

4.3 施工阶段模拟

为了反映初始应力状态及施工加固过程,模拟过程按实际的11个施工阶段分为11个计算步进行

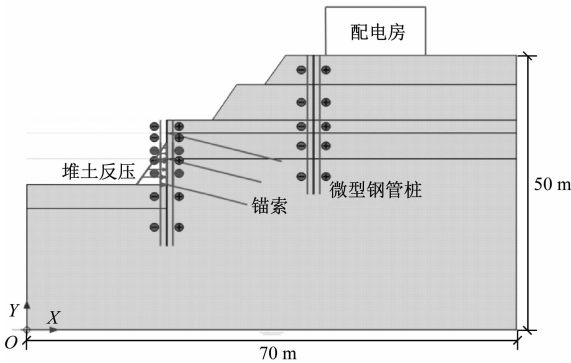


图 5 基坑计算模型

Fig. 5 Foundation pit calculation model

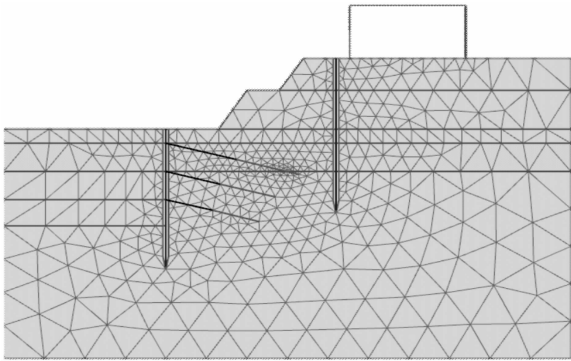


图 6 基坑网格模型

Fig. 6 Foundation pit grid model

模拟。初始阶段,利用“K0 过程”指令生成初始应力;其余阶段,依次激活地下连续墙、冻结开挖土体及锚杆激活施加预应力等。HS 本构模型模拟计算步及内容见表 2。

表 2 HS 本构模型模拟计算步及内容

Tab. 2 HS constitutive model simulation calculation steps and contents

计算步	计算步模拟内容
计算步 1	考虑既有建筑物的初始地应力平衡位移清零
计算步 2	激活地下连续墙及其两侧界面
计算步 3	将坑内第 1 层土(厚 2.0 m)冻结
计算步 4	施作 1 层锚杆,施加预应力
计算步 5	将坑内第 2 层土(厚 4.0 m)冻结
计算步 6	施作 2 层锚杆,施加预应力
计算步 7	将坑内第 3 层土(厚 4.0 m)冻结
计算步 8	堆土反压,施加侧向荷载
计算步 9	围墙外施作长 22 m 的微型钢管桩
计算步 10	施作 3 层锚杆,施加预应力
计算步 11	将坑内第 4 层土(厚 3.7 m)冻结

4.4 结果分析

模拟计算得到基坑总位移如图 7 所示。由图 7

可知:围护结构背侧土体沿滑动面有向左侧基坑滑动的趋势;最大水平位移约为 48 mm;基坑底部发生回弹隆起,隆起值约为 65 mm。模拟加固措施后,围护结构未产生变形破坏。

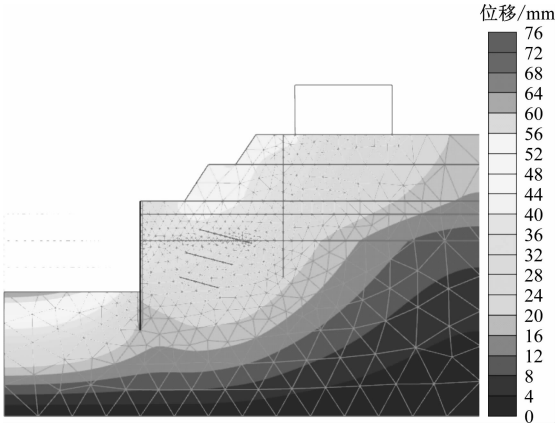


图 7 基坑总位移分布图

Fig. 7 Diagram of foundation pit total displacement

由模拟结果还可见,基坑外侧承受剪切应力,底部附加应力的增大,围护结构的变形主要体现在基坑中上部。由 HS 本构模型模拟得出各工况下的围护桩水平位移极值(以指向基坑内部为正,背离基坑方向为负),如表 3 所示。由表 3 可知,随基坑深度的增加,桩体侧向位移也逐渐增加。

表 3 各工况下的围护桩水平位移极值

Tab. 3 Retaining pile horizontal displacement extreme values under each working condition

工况	水平位移最小值/mm	水平位移最大值/mm
开挖 1 层土体	-12.80	-8.77
施作 1 层锚杆	-12.30	2.11
开挖 2 层土体	-14.90	-10.10
施作 2 层锚杆	-14.50	13.80
开挖 3 层土体	-48.00	-29.80
施加侧向荷载	-50.10	13.20
施作钢管桩	-51.20	14.30
施作 3 层锚杆	-53.20	17.90
开挖 4 层土体	-55.60	19.00

如图 8 所示,基坑开挖 3 层土体至深度为 10 m 处时,围护桩体中上部发生大变形(水平位移达 -48 mm),经过基坑角部堆土反压施加侧向荷载,对围护桩提供侧向抗滑力,阻止围护桩体进一步变形;在小区围墙外施作长为 22 m 的微型钢管桩阻止围护桩体向基坑内侧滑移,进而减缓围护桩体发生变形。由图 8 可知,锚索钻孔作业处,通过锚杆预应

力补张,可提高滑动面上的法向应力及抗滑力,进而改善剪应力的分布,减小桩体水平位移。

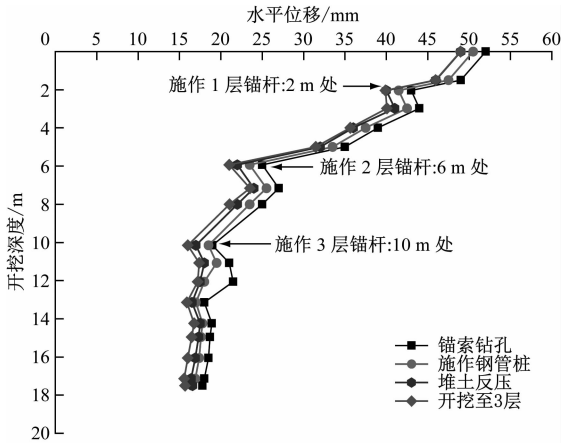


图8 桩体水平位移

Fig. 8 Pile horizontal displacement

4.5 现场监测

采取加固措施后,选取桩顶水平位移较大的17号桩,结合表3中工况对其重点监测。17号桩的桩顶水平位移变化如图9所示。

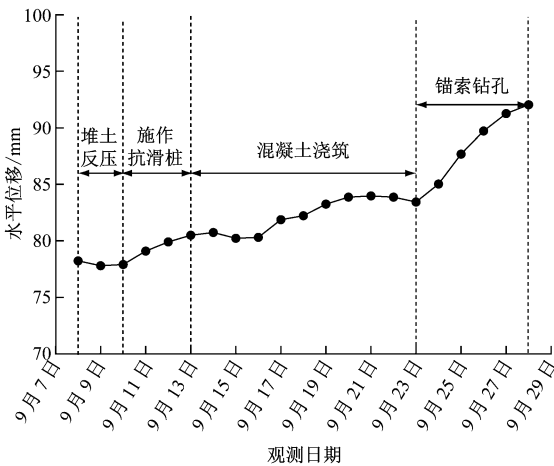


图9 17号桩的桩顶水平位移变化

Fig. 9 Diagram of pile No. 17 top horizontal displacement

由图9可知:2018年9月8日至10日采取堆土反压施工,监测点水平位移值无明显变化;2018年9月10日至13日进行抗滑桩施工,期间测点ZQS17的位移明显增加;2018年9月18日至23日进行混凝土注浆,测点受影响较小,混凝土灌注提高了结构完整性,并很好地控制了围护桩顶变形;9月22日以后,进行冠梁顶部锚索钻孔作业,监测点位移平均每天增加约1.6 mm。

由监测结果可知,对于桩锚支护体系,监测点

桩体水平位移累计值整体变化趋势是规律性增加,围护桩体水平位移趋于稳定。

对比 HS 本构模型模拟结果和监测数据可发现,二者的桩体水平位移曲线均随着加固措施的进行而呈现出一致的变化规律。

通过 HS 本构模型模拟石油小区的加固措施可知,采取加固措施后,桩体水平位移没有出现大幅度增长,水平位移规律性增加。表明抢险措施具有一定的有效性。基坑变形控制效果明显,后续施工过程中未发生大范围变形。

5 结语

以成都某地铁基坑为工程背景,结合现场监测数据分析了桩锚支护结构基坑的变形性状,制定加固措施,并采用 HS 本构模型模拟了基坑围护桩变形规律,得到了如下结论:

1) 基于砂砾岩层的土体情况分析,施工期间恰逢频繁降雨,基坑东南侧石油小区处砂岩吸水微膨胀后可能造成不均匀沉降,引起围护桩侧方土体滑移,进而导致基坑围护结构变形。桩顶水平位移最大累计值达到 77.77 mm。

2) 针对基坑围护桩变形及石油小区沉降,采用堆土反压、施作抗滑桩、施作微型钢管桩及补张锚索等加固措施,能有效减小土体下滑力并通过提供反向抗滑力,改善应力分布情况。

3) 通过 Plaxis 有限元软件模拟加固措施,分析围护桩侧移的影响。由模拟结果可知,围护结构产生大变形时及时采取加固措施能有效控制桩体变形,并将桩体的水平位移保持在控制值(53 mm)以内。桩体水平位移的仿真结果与监测结果变化规律一致。

参考文献

- [1] POTTS D M, FOURIE A B. The behaviour of a propped retaining wall: results of a numerical experiment[J]. Géotechnique, 1984, 34(3): 383.
 - [2] FINNO R J, ATMATZIDIS D K, PERKINS S B. Observed performance of a deep excavation in clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115(8): 1045.
 - [3] 任建喜, 高涛. 地铁换乘站深基坑围护结构变形规律 FLAC 模拟研究[J]. 铁道工程学报, 2008, 25(9): 80.
- REN Jianxi, GAO Tao. Research on the deformation law of deep excavation supporting structure in metro interchange station by FLAC simulation [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, 25(9): 80.

(下转第 60 页)

3) 针对局部节点,需因地制宜,进行管廊(井)与主体和附属结构的不同位置结合方式的方案比选,分析不同合建方案的用地、施工和协调难度等因素,选择合理的结合方案。

参考文献

- [1] 田强,薛国州,田建波,等.城市地下综合管廊经济效益研究[J].地下空间与工程学报,2015,11(增刊2):373.
TIAN Qiang, XUE Guozhou, TIAN Jianbo, et al. Economic benefits research of urban utility tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S2): 373.
- [2] 钱七虎,陈晓强.国内外地下综合管线廊道发展的现状、问题及对策[J].地下空间与工程学报,2007,3(2):191.
QIAN Qihu, CHEN Xiaoqiang. Situation, problems and countermeasures of utility tunnel development in China and abroad[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(2): 191.
- [3] 卜令方,汪明元,金忠良,等.我国城市综合管廊建设现状及展望[J].中国给水排水,2016,32(22):57.
BU Lingfang, WANG Mingyuan, JIN Zhongliang, et al. State-of-the-arts and outlook of urban utility tunnel construction in China[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(22): 57.
- [4] 谭忠盛,陈雪莹,王秀英,等.城市地下综合管廊建设管理模式及关键技术[J].隧道建设,2016,36(10):1177.
TAN Zhongsheng, CHEN Xueying, WANG Xiuying, et al. Construction management model and key technologies for underground utility tunnels in urban areas[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(10): 1177.
- [5] 徐奇,续元庆,王丽娟.城市综合管廊应用分析[J].石油规

划设计,2015,26(2):35.

XU Qi, XU Yuanqing, WANG Lijuan. Application analysis of the urban municipal tunnel[J]. Petroleum Planning & Engineering, 2015, 26(2): 35.

- [6] 梁宁慧,兰菲,庄炀,等.城市地下综合管廊建设现状与存在问题[J].地下空间与工程学报,2020,16(6):1622.
LIANG Ninghui, LAN Fei, ZHUANG Yang, et al. Current situation and existing problems of urban utility tunnel construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(6): 1622.
 - [7] 张忠宇,徐建,黄俊,等.综合管廊与地下工程协同建设的关键问题与对策[J].地下空间与工程学报,2018,14(增刊2):493.
ZHANG Zhongyu, XU Jian, HUANG Jun, et al. Key problems and countermeasures on collaborative construction of utility tunnel and underground engineering[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S2): 493.
 - [8] 何建军,张健君.城市综合管廊与轨道交通共建设计探讨[J].中国给水排水,2018,34(4):47.
HE Jianjun, ZHANG Jianjun. Discussion on design of urban utility tunnel and rail transit common construction[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(4): 47.
- 收稿日期:2022-12-13 修回日期:2023-02-27 出版日期:2024-01-10
Received:2022-12-13 Revised:2023-02-27 Published:2024-01-10
通信作者:农兴中,正高级工程师,NNongXingZhong@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54页)

- [4] 常江,张君.北京地铁义和庄站基坑支护结构及变形监测[J].中国安全生产科学技术,2009,5(3):149.
CHANG Jiang, ZHANG Jun. Support structure and deformation monitoring of excavation pit in Yihezhuang Station of Beijing Subway[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2009, 5(3): 149.
- [5] 秦会来,黄俊,李奇志,等.深厚淤泥地层深基坑变形影响因素分析[J].岩土工程学报,2021,43(增刊2):23.
QIN Huilai, HUANG Jun, LI Qizhi, et al. Influencing factors for deformation of deep foundation pits in thick mud stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2): 23.
- [6] 任建喜,谭牧凡.黄土地区地铁车站深基坑变形规律[J].城市轨道交通研究,2021,24(8):55.
REN Jianxi, TAN Mufan. Deformation pattern of deep foundation

pit of metro station in loess area[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(8): 55.

- [7] 程斌,刘国彬.基坑工程施工对邻近建筑物及隧道的相互影响[J].工程力学,2000,17(增刊3):486.
CHENG Bin, LIU Guobin. Impact of foundation pit engineering on adjacent buildings and tunnels[J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(S3): 486.

- 收稿日期:2022-03-11 修回日期:2022-03-11 出版日期:2024-01-10
Received:2022-03-11 Revised:2022-03-11 Published:2024-01-10
· 第一作者:李雪,副教授,jialixue521@163.com
通信作者:耿凤娟,硕士研究生,g1374052204@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