

MJS 工法桩加固施工对运营隧道的影响研究

徐敏, 王敬敬, 徐国胜

(杭州市勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: 随着国内主要城市轨道交通的大规模建设, 建成线路越来越多, 运营里程成倍增加, 地铁的安全运营对一个城市的重要性不言而喻。近年来, 市政隧道上跨、下穿运营轨道交通的工程日益增多。上方基坑开挖卸载会使下方的盾构隧道产生形变, 为抑制这种变形, 软土地区采用 MJS 工法桩基底及门式加固的工程越来越多。利用徕卡 TM50/60 测量机器人及地铁自动化监测系统 (GeoMos-CN), 实时监测下方运营隧道的变形数据, 研究加固施工引起既有盾构隧道的变形特性尤为重要。本文结合杭州某软土地区上跨地铁基坑工程的实测数据, 分析 MJS 工法桩加固施工过程中不同工况下既有运营盾构隧道的道床沉降、水平位移、管片收敛的变形特性, 总结隧道变形规律, 以便及时发现安全隐患, 进而有效地保障人民群众的生命财产安全, 为后续同类工程实践提供参考借鉴。

关键词: MJS 工法桩; 运营隧道; 上方基坑; 粉砂土地层; 加固; 自动化监测; 隧道变形

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S1-0131-07

Influence study of MJS pile reinforcement construction on operational tunnel

XU Min, WANG Jing-jing, XU Guo-sheng

(Hangzhou Geotechnical Engineering and Surveying Research Institute with Limited Liability, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: With the significant expansion of rail transit construction in major cities in China, an increasing number of tunnel lines have been constructed. The operational mileage has multiplied. The importance of ensuring safe subway operations within city is self-evident. In recent years, the number of municipal-service tunnel projects overcrossing or undercrossing operating tunnels has been increasing. Excavation in the lower soft soil layer will lead to tunnel deformation. To mitigate deformation, an increasing number of projects utilize the MJS construction method, which involves pile foundation and portal reinforcement in soft soil areas. It is crucial to employ the Leica TM50/60 measuring robot and the Automated Metro Monitoring System (GeoMos-CN) for real-time monitoring of operating tunnel deformation data and studying the deformation characteristics of existing shield tunnels resulting from reinforcement construction. This work examines the deformation characteristics, including tunnel settlement, horizontal displacement and horizontal convergence, resulting from MJS pile reinforcement under varying conditions in the soft soil area of Hangzhou. It summarizes the laws governing tunnel deformation, which can facilitate the timely identification of safety hazards and ensure the safety of people and their property. Additionally, it serves as a valuable reference for future similar engineering practices.

Key words: MJS construction method pile; operating tunnel; overcrossing excavation; silty soil; reinforcement; GeoMos-CN; tunnel deformation

0 引言

近年来, 地铁建设高速发展, 城市地铁建设不可避免地进入繁华地区, 周边环境越来越复杂, 地铁周边的建设工程越来越多。为了控制周边基坑开挖卸土引起的地铁隧道变形, 需要对地铁隧道地层进行加固,

其中 MJS 工法 (全方位高压喷射技术)^[1] 得到了越来越广泛的应用。其施工的喷射流初始压力达 40 MPa, 喷射流能量大, 作用时间长, 成桩直径大 (可达 3 m 左右)^[2]。地内压力的稳定减小了施工过程中出现的各种变形, 减小对周边管线及建 (构) 筑物的影响^[3]。

MJS 工法引入我国十多年来, 很多学者开展了

大量的工程应用研究。赵香山等^[4]采用数值模拟方法对比 MJS 工法桩与传统喷射桩对周围环境的影响,结果表明 MJS 工法施工对周围土体的扰动和位移影响均较小。徐志恒^[5]以紧邻地铁周边基坑围护结构采用 MJS 及 RJP 工法加固为工程背景,发现采用新型 MJS 工法施工工艺对周边环境影响范围小,加固土体质量强度高且有效可靠,对既有地铁隧道的位移及受力影响在可控范围内。张文博等^[6]认为富水地层紧贴下穿工程中采用的水平 MJS 工法(全方位高压喷射工法)加固技术,可有效提高土体自稳能力,隔断承压水,减少对既有车站结构的影响。王岩^[7]结合模型试验与 Midas 有限元软件对近距离盾构下穿既有运营地铁隧道的变形进行研究,得出 MJS 加固可以有效提升软流塑土体的物理性质,加强其承载力。邵耀锋等^[8]采用有限元分析地铁隧道与出入口之间连接通道施工对拱顶和地表变形的影响,研究结果表明,加固宽度对隧道拱顶和地表变形影响较大,但当加固宽度超过一定值后,对减小拱顶和地表沉降的效果不明显。

近些年来,杭州软土地区涉及地铁保护区施工的项目越来越多地采用 MJS 工法桩进行加固或止水^[9-11]。本文结合杭州某上跨地铁基坑工程,根据 MJS 工法加固施工引起盾构隧道的变形数据,总结道床沉降、水平位移、管片收敛的变形规律。

1 MJS 加固设计概况

某市政过江隧道基坑宽度 47.9 m,深度 9.6~9.8 m,在 YK0+700 附近与已建杭州地铁 1 号线正

交。地铁 1 号线顶标高-9.821 m,位于拟建隧道工程下方约 5.2 m。地铁 1 号线云水站一下沙江滨站区间隧道于 2015 年 11 月开通运营,地铁隧道在节点处管片埋深约 15.6 m,管片采用深埋配筋型式。

盾构隧道上方基坑围护桩采用直径 800 mm 间距 1 000 mm 的钻孔灌注桩(地铁正上方采用双排桩),止水帷幕为 $\Phi 2 400@1 800$ MJS 旋喷桩。

盾构隧道旁侧基坑采用 $\Phi 800@1 000$ 钻孔灌注桩结合 $\Phi 2 400@1 800$ MJS 旋喷桩止水帷幕及 800 mm 地下连续墙结合三重管高压旋喷桩止水。坑底高压旋喷桩裙边及抽条加固,加固深度为基底以下 4 m。

基坑基底满堂加固,加固桩底标高为-7.7 m,地铁隧道上方围护桩/加固体底标高距离地铁隧道顶竖向净距约 2.06 m/1.76 m。

地铁 1 号线盾构隧道两侧采用门式体加固,加固深度基坑底至-21.2 m,加固方式 $\Phi 2 400@1 800$ MJS 旋喷桩半圆加固。

加固范围内土层主要为②₄砂质粉土、③₅粉砂、③₇砂质粉土夹淤泥质粉质黏土、⑥₂淤泥质粉质黏土夹粉土。其中盾构隧道处于③₅粉砂、③₇砂质粉土夹淤泥质粉质黏土。

$\Phi 2 400@1 800$ MJS 工法旋喷桩平面布置见图 1,加固剖面图见图 2。总桩数 1 362 根。距离地铁 5 m 范围内共 547 根,其中桩底标高到-21.2 m 的门式加固桩 218 根,基底满堂加固 329 根;距离地铁 5 m 范围外共 815 根,其中桩底标高到-21.2 m 的门式加固桩 166 根,基底满堂加固 649 根。

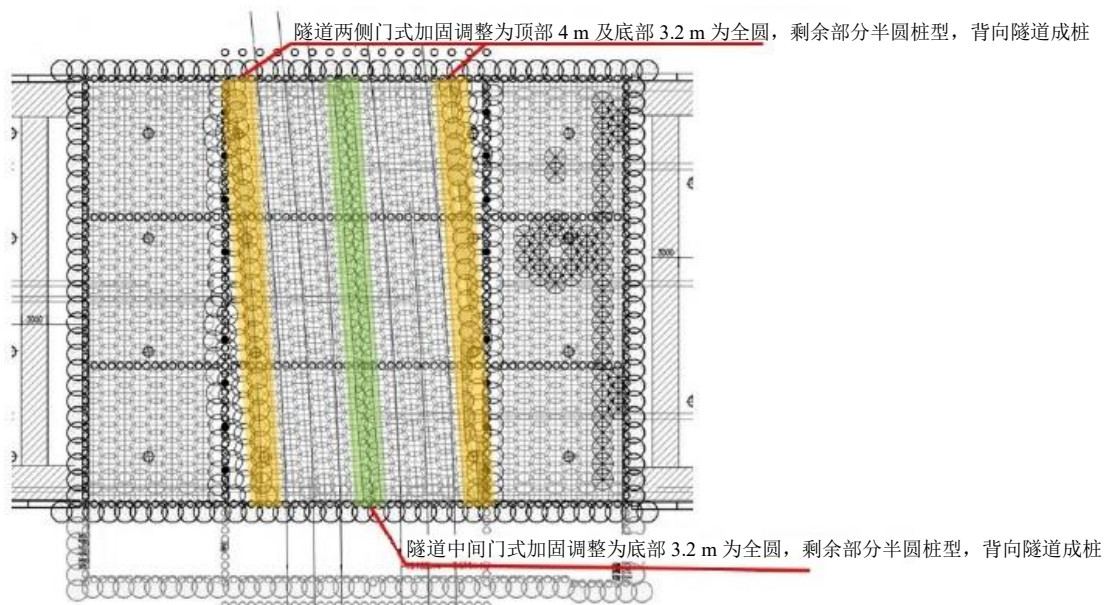


图 1 MJS 加固平面图

Fig. 1 Plan of MJS reinforcement

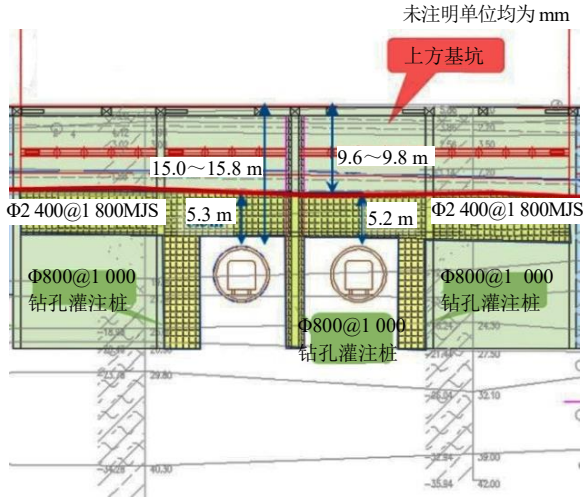


图 2 MJS 加固剖面图

Fig. 2 Profile of MJS reinforcement

MJS 加固技术要求如下, MJS 工法工艺示意图如图 3 所示:

- (1) 采用 42.5 级普通硅酸盐水泥, 水泥掺量不宜小于 40%。
- (2) 水泥浆压力宜为 40 MPa, 浆液流量宜为 160~180 L/min, 空气压力为 0.70~1.05 MPa, 空气流量为 1.0~2.0, 钻孔转速宜为 3 r/min, 提升速度约为 2.5 cm/s。
- (3) 桩身垂直度偏差不大于 1/200, 桩位偏差不大于 50 mm。
- (4) 施工期间必须根据监测结果实时调整注浆压力, 确保对周边环境影响尽量降低。
- (5) 应采取隔孔分序方式施工加固体。
- (6) MJS 加固体的 28 d 龄期无侧限抗压强度不应小于 1.0 MPa (40%水泥掺量)。

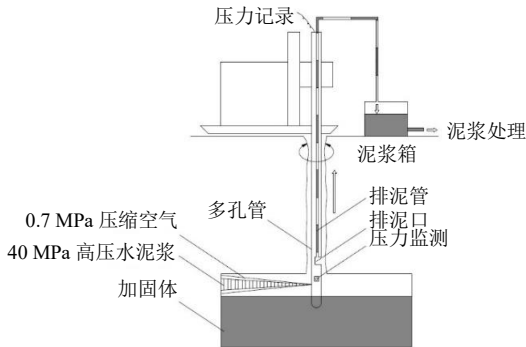


图 3 MJS 工法工艺

Fig. 3 Technological process of MJS

2 自动化监测系统设计

1 号线地铁保护监测的总里程范围为: K40+099~K40+269.4, 共计 170.4m。实际布设上行线 797~940 环 (172 m)、下行线 801~941 环 (168 m), 基坑开挖

范围正投影区域(上行线 846~891 环、下行线 847~892 环) 每 3 环布设 1 个监测断面, 两端外扩 40 环区域每 10 环布设一个监测断面。地铁 1 号线自动化监测项目包括: 道床沉降 (CJ), 水平位移 (WY), 管片收敛 (SL)。监测断面命名形式上、下行线以字母代号 “S (上行线)”、“X (下行线)” 来区分, 再加该区间断面编号及管片环号。例如: 下行线第 6 个监测断面位于地铁 844 环, 编号即为 “XDM6(844)”, “XDM6(844)” 道床沉降代号 “XCJ06”、水平位移代号 “XWY06”、管片收敛代号 “XSL06”。上、下行线各采用徕卡 TM50 测量机器人主站 1 台 (全断面)+辅站 1 台 (加密断面) 自动化监测系统。地铁保护监测点平面图见图 4。

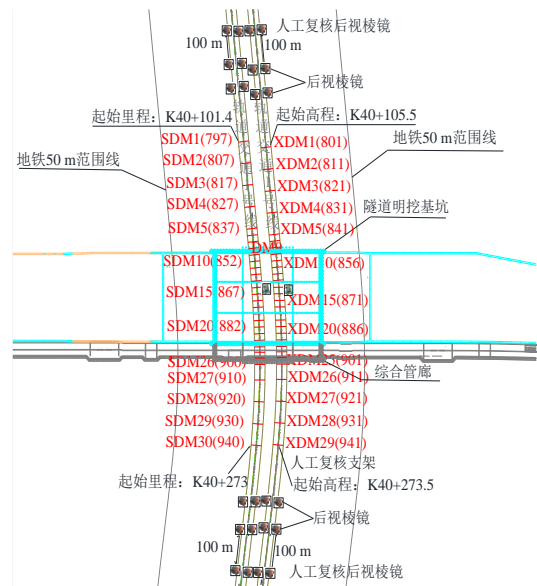


图 4 地铁保护监测点平面图

Fig. 4 Plan of tunnel protection monitoring

3 MJS 工法桩施工简况

本工程施工场地狭小, 施工总桩数多达 1 362 根, 工期紧, 施工风险大, 高峰期现场投入 5 台套 MJS 设备。具体施工节点见表 1。

表 1 施工工况

Table 1 Construction conditions

时间	工况
2020-09-19—2020-10-29	MJS 加固试桩施工
2020-10-30—2021-11-26	上行线数据突变现场暂停施工
2020-11-26—2020-12-24	过程评估阶段试桩
2020-12-24—2021-09-20	MJS 加固恢复施工
2021-09-20—2021-10-07	抗拔桩施工, 特别保护区内施工暂停
2021-10-07—2021-10-22	MJS 加固施工至完成

4 实测数据分析

(1) 道床沉降

以下行线道床沉降为例，典型断面的道床沉降时程曲线见图 5，累计量沿环号（里程）分布曲线见图 6。道床沉降的变化特征主要有：a) 从时程曲线上的变化规律来看，施工正常情况下，随着上方满堂基底加固及隧道两侧半圆摆喷的门式加固 MJS 工法桩的施工，地铁隧道的道床沉降呈明显下沉趋势，最大下沉量达 7.3 mm，超过预评估单位给定的控制值；b) 单根桩施工的影响范围一般在 5 倍桩径（10 环）范围内，施工采取隔 3 打 1 的跳打方式是可行的；c) 从环号（里程）分布曲线看，满堂加固 MJS 工法桩对道床沉降的最终影响范围主要在施工投影区域的正下方，外扩区域沉降明显收敛。

(2) 水平位移

以下行线水平位移为例，典型断面的水平位移

时程曲线见图 7，累计量沿环号（里程）分布曲线见图 8。水平位移的变化特征主要有：a) 隧道上方的 MJS 工法桩基底加固施工对隧道的水平位移影响很小；b) 隧道两侧半圆摆喷的门式加固 MJS 工法桩的施工，会对隧道水平位移有一定的影响，有往施工影响源的方向略微偏移的趋势。

(3) 管片收敛

以下行线管片收敛为例，典型断面的管片收敛时程曲线见图 9，累计量沿环号（里程）分布曲线见图 10。突变时管片收敛的变化特征主要有：a) 从时程曲线上的变化规律来看，施工正常情况下，随着上方满堂基底加固及隧道两侧半圆摆喷的门式加固 MJS 工法桩的施工，地铁隧道的管片收敛呈明显扩径趋势，最大外扩量达 7.7 mm，超过预评估单位给定的控制值；b) 从环号（里程）分布曲线看，满堂加固 MJS 工法桩对收敛的最终影响范围主要在施工投影区域的正下方，外扩区域明显收敛。

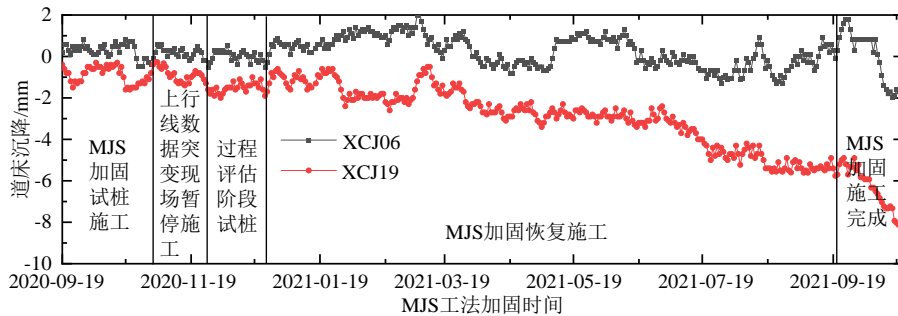


图 5 下行线道床沉降典型断面时程曲线图

Fig. 5 Typical section of downbound track bed settlement

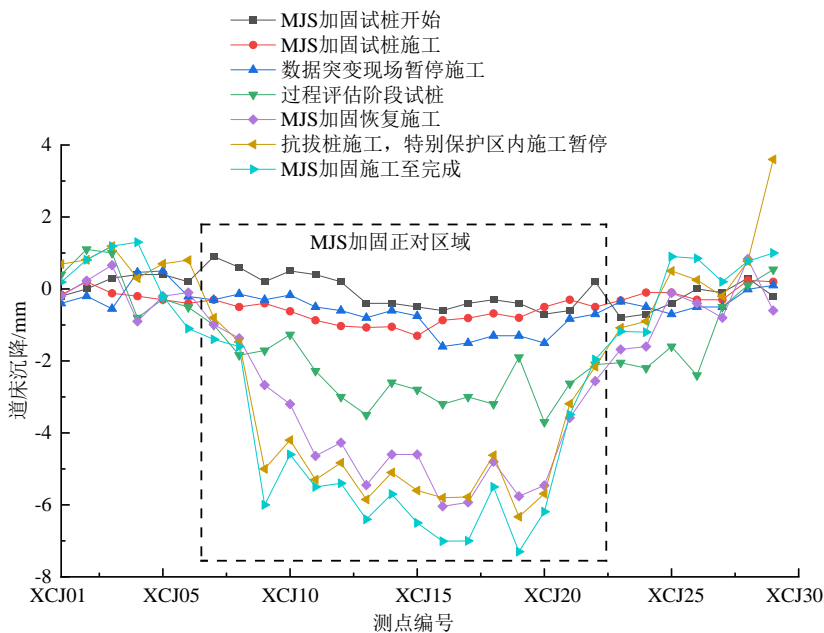


图 6 下行线道床沉降累计值分布图

Fig. 6 Distribution of cumulative settlement of the downbound track bed

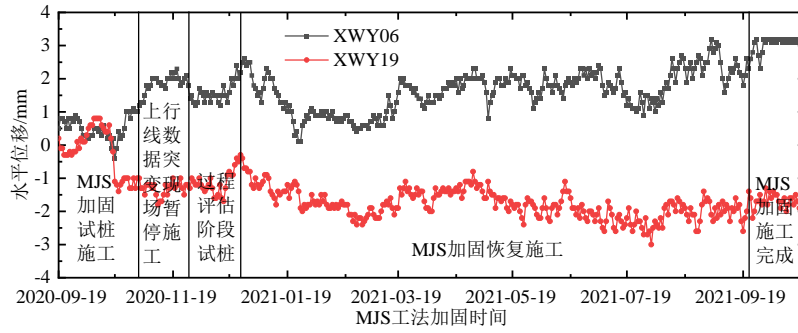


图 7 下行线水平位移典型断面时程曲线图

Fig. 7 Horizontal displacement with time in typical section of downbound

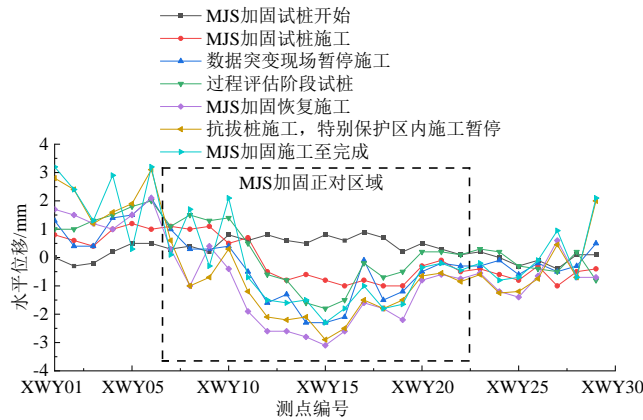


图 8 下行线水平位移累计值分布图

Fig. 8 Distribution of cumulative horizontal displacement of downbound

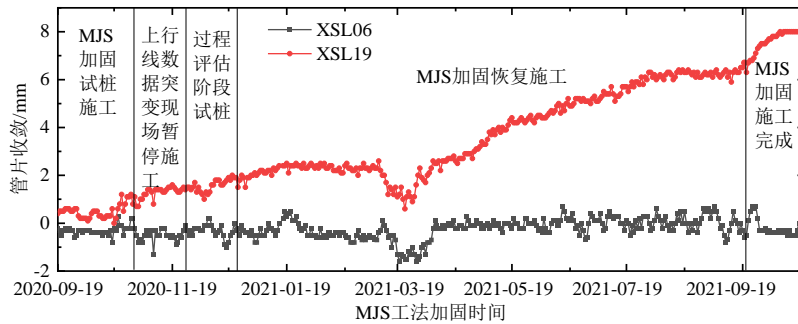


图 9 下行线管片收敛典型断面时程曲线图

Fig. 9 Horizontal convergence with time in typical section of downbound

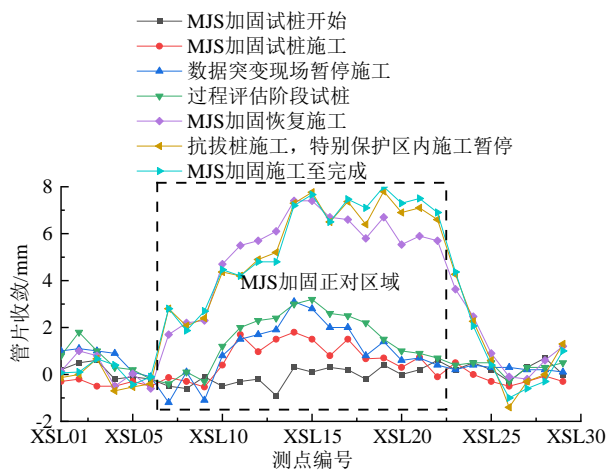


图 10 下行线管片收敛累计值分布图

Fig. 10 Distribution of cumulative convergence values of downbound segments

5 结论

上跨运营隧道基坑开挖采用 MJS 工法桩对盾构隧道上方及周边土体进行大面积加固处理,能有效减小后期基坑开挖对隧道的影响。但是加固体施工过程中,同时也会对隧道周边土体产生扰动,导致隧道周围的应力场发生改变,引起运营盾构隧道的变形:

(1) 对于软土地层,上方近距离(3 m 以内)大面积 MJS 工法桩基底满堂加固会对下方运营隧道的道床沉降及管片收敛影响相对较大,对隧道的水平位移影响相对较小。隧道道床沉降呈现缓慢下沉趋势,管片收敛呈扩径趋势,主要影响隧道范围在加固施工投影正对区域。

(2) 单桩施工的影响范围一般在 5 倍桩径(10 环),大面积满堂加固的群桩效应明显,应严格控制施工速度,控制跳桩施工顺序及间隔时间,以降低对运营地铁隧道的影响。

(3) 合理设定加密监测频率,加强施工跟自动化监测数据的联动,以便发现变形趋势并及时采取措施。

参考文献

- [1] 中国土木工程学会. 全方位高压喷射注浆技术规程: T/CCES 20—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
China Civil Engineering Society. Technical Code for Omnibearing High Pressure Jet Grouting: T/CCES 20—2021[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.
- [2] 孙克钦. 浅析 MJS 工法桩施工质量控制要点[J]. 城市道桥与防洪, 2019(4): 153-157, 20.
SUN Ke-qin. Elementary analysis on essentials of construction quality control of pile by MJS construction method[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2019(4): 153-157, 20.
- [3] 何拥军. 全方位高压旋喷注浆工法的工程试验[J]. 地下工程与隧道, 2010(1): 24-28, 53.
HE Yong-jun. Engineering test of omni-directional rotary high-pressure jet grouting construction method[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2010(1): 24-28, 53.
- [4] 赵香山, 李春涛, 王建华. 软土中 MJS 工法桩施工环境效应的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(5): 1315-1319.
ZHAO Xiang-shan, LI Chun-tao, WANG Jian-hua. Numerical analysis on the installation effect of MJS pile in soft clay[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(5): 1315-1319.
- [5] 徐志恒. MJS 及 RJP 高压旋喷注浆法加固地层技术试验[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(5): 140-144, 148.
XU Zhi-heng. MJS and RJP high pressure rotary jet grouting method to reinforce formation technology test[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2018, 40(5): 140-144, 148.
- [6] 张文博, 张康, 陈卫军. MJS 工法在富水砂层隧道密贴下穿既有车站工程中的应用[J]. 现代城市轨道交通, 2018(10): 35-38.
ZHANG Wen-bo, ZHANG Kang, CHEN Wei-jun. Application of MJS method in construction of rich water sand layer tunnel under existing station[J]. Modern Urban Transit, 2018(10): 35-38.
- [7] 王岩. 基于 MJS 工法地铁近接施工对既有隧道的影响研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
WANG Yan. Study on the influence of subway approaching construction on the existing tunnel based on MJS construction method[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [8] 邵耀锋, 何猷豪, 郭健宝, 等. MJS 加固范围对隧道和地表变形影响[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊 2): 1402-1406.
SHAO Yao-feng, HE You-hao, GUO Jian-bao, et al. Effect of MJS reinforcement extent on tunnel and ground deformation[J]. Building Structure, 2021, 51(S2): 1402-1406.
- [9] 董理. MJS 工法桩在上跨轨道交通中的应用[J]. 嘉兴学院学报, 2021, 33(6): 98-100.
DONG Li. The application of MJS pile construction method in overcrossing rail transit[J]. Journal of Jiaxing University, 2021, 33(6): 98-100.
- [10] 郑齐征, 袁军辉, 朱崇选, 等. 浙江大学邵逸夫医院五期工程用 MJS 工法桩施工[J]. 上海建设科技, 2020(6): 51-54, 64.
ZHENG Qi-zheng, YUAN Jun-hui, ZHU Chong-xuan, et al. Construction of MJS piles for the fifth phase project of run run shaw hospital of Zhejiang University[J]. Shanghai Construction Science & Technology, 2020(6): 51-54, 64.
- [11] 涂智溢, 郭洪雨, 孙飞, 等. 闹市区复杂环境下大直径

盾构小净距下穿运营地铁隧道的应对措施及分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2021, 3(4): 75-84.
TU Zhi-yi, GUO Hong-yu, SUN Fei, et al. Countermeasures and analysis of large diameter shield

tunneling under operating subway tunnel with small clear distance in downtown complex environment[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2021, 3(4): 75-84.



(上接第 117 页)

MA Jing-bao. Application of horizontal MJS method in reinforcement of ultra-deep disturbed soil portal[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2022(9): 169-172.

[6] 谢向进. 城市地铁水平位移测量方法及精度分析[J]. 城市勘测, 2013(4): 138-141.

XIE Xiang-jin. Horizontal displacement measurement method and accuracy analysis in urban subway[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2013(4): 138-141.

[7] 范亚军, 黄腾, 李东升, 等. 地铁隧道保护区水平位移监测方法的研究[J]. 测绘工程, 2013, 22(3): 88-92.

FAN Ya-jun, HUANG Teng, LI Dong-sheng, et al. Research on the horizontal displacement monitoring in the subway tunnel protected areas[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2013, 22(3): 88-92.

[8] 王建生, 钱陈栋. 地铁保护区自动化监测高程精度分析[J]. 江苏建筑, 2020(2): 69-71.

WANG Jian-sheng, QIAN Chen-dong. Analysis of elevation accuracy of automatic monitoring in metro protected areas[J]. Jiangsu Construction, 2020(2): 69-71.

[9] 陈喜凤, 黄腾, 刘岭, 等. GeoMoS 在地铁保护区自动化监测中的应用[J]. 测绘工程, 2013, 22(2): 64-69.

CHEN Xi-feng, HUANG Teng, LIU Ling, et al. Application of GeoMoS in automatic monitoring of the protected area of subway[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2013, 22(2): 64-69.

[10] 陈喜凤, 刘岭. 地铁保护区变形监测及数据处理系统设计[J]. 城市勘测, 2019(2): 147-151.

CHEN Xi-feng, LIU Ling. The deformation monitoring and data processing system design of protected subway area[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2019(2): 147-151.