

近零距离深基坑施工保护 盾构隧道关键技术研究

顾歆甜¹, 金浩², 沈晓伟¹, 李奎³

(1. 南京地铁集团有限公司, 南京 210008; 2. 东南大学交通学院, 南京 210096;
3. 城盾隧安地下工程有限公司, 上海 201108)

摘要: 为保证近零距离深基坑施工过程中既有盾构隧道的结构安全, 解决低净空条件下围护结构、地基加固施工难题, 以长江漫滩地区基坑项目为实例, 采用 MJS 工法桩内插 H 型钢的支护方式, 通过高频液压免共振锤实现 H 型钢的静压插入, 采取纵向拉条、复合腔体等措施完成盾构隧道内部的同步预加固, 经深基坑施工前、后三维数值模拟分析和现场实测数据对比验证, 挤土效应和时空效应对盾构隧道结构的影响得到有效控制, 可为类似基坑工程设计、施工提供参考。

关键词: 近零距离深基坑; 盾构隧道; 低净空; 免共振锤; MJS 工法桩; 复合腔体

中图分类号: U231; U455.43

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2025)03-0108-06

Key Technologies for Shield Tunnel Protection in Near-Zero Distance Deep Excavation Construction

GU Xintian¹, JIN Hao², SHEN Xiaowei¹, LI Kui³

(1. Nanjing Metro Co., Ltd., Nanjing 210008; 2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096;
3. Cheng Dun Sui An Underground Engineering Co., Ltd., Shanghai 201108)

Abstract: To ensure the structural safety of existing shield tunnels during near-zero distance deep excavation and address the challenges of retaining structure construction and ground reinforcement under low clearance conditions, this paper presents a case study of a pump station excavation project in the Yangtze River floodplain area. The protection measures include Metro Jet System (MJS) piles with H-steel insertion using high-frequency hydraulic resonance-free hammer, and synchronous pre-reinforcement inside the shield tunnel using longitudinal braces and filament wound profiles. Through comparative analysis of three-dimensional numerical simulation and field monitoring data before and after deep excavation, the soil squeezing effect and time-space effect on the tunnel structure were effectively controlled. These findings can provide valuable reference for the design and construction of similar excavation projects.

Keywords: near-zero distance deep excavation; shield tunnel; low clearance; resonance-free hammer; Metro Jet System (MJS) method; filament wound

随着城市的快速化发展, 地铁线路纵横成网、四通八达, 地铁周边的深基坑项目数量也与日俱增。深基坑施工可能会对地铁结构产生不利影响, 造成变形、

破损、渗漏水等病害, 尤其是对相较于明挖结构更为柔性的盾构隧道结构。因此, 深基坑与地铁盾构隧道的距离控制及有效的保护措施一直是地铁结构保护管

收稿日期: 2024-09-11 修回日期: 2025-01-27

第一作者: 顾歆甜, 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事地下工程和轨道交通结构保护的研究和管理工作, guxintian@outlook.com

基金项目: 江苏省自然科学基金(面上)(BK20211173)

引用格式: 顾歆甜, 金浩, 沈晓伟, 等. 近零距离深基坑施工保护盾构隧道关键技术研究[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(3): 108-113.

GU Xintian, JIN Hao, SHEN Xiaowei, et al. Key technologies for shield tunnel protection in near-zero distance deep excavation construction[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(3): 108-113.

理工作的重点。

南京某地铁建设过程中,需对沿线一处雨水泵井进行改迁,由于临近市政交通枢纽和货运铁路,新建泵井周边环境限制条件极为严苛,不仅与既有市政通道、地铁盾构隧道密贴,而且位于低净空市政公路桥下方,同时为保障货运铁路正常运行,作业时间有严格限制。

本文基于地铁盾构隧道安全保护要求,对近零距离深基坑设计、施工关键技术进行剖析,通过采用高频液压免共振锤、MJS 工法桩、复合腔体管片加固等外控与内治兼具的保护手段,保证了泵井基坑的顺利实施和已建地铁的结构安全。

1 项目概况

新建雨水泵井长 11.2 m、宽 4.2 m、深 12.1 m,结构底板厚度 0.8 m、侧墙及顶板厚度 0.6 m。泵井主体结构预留雨水管连接洞口,在结构完成后破除围护桩与既有管道连接。

1.1 周边环境

新建泵井基坑位于市政公路桥下方两座桥墩承台之间,桥下净空为 8.0 m。泵井东侧紧邻地铁盾构隧道,坑底与隧道拱腰齐平;西侧紧邻市政通道,与市政通道共用围护;北侧为碎石道床基础货运铁路支线。泵井结构与地铁盾构隧道结构外边线最小水平距离约为 1.8 m。

1.2 工程地质

泵井所处地层隶属长江漫滩平原区,地质条件差,对周边施工活动极为敏感。场地地基土层自上而下主要为杂填土、素填土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土及淤泥质粉质黏土、粉砂^[1]。泵井基坑底位于淤泥质粉质黏土层,支护桩底进入粉质黏土及淤泥质粉质黏土层。

地铁盾构隧道主要穿越淤泥质粉质黏土层、流塑~软塑的粉质黏土及淤泥质粉质黏土层,见图 1。

2 设计方案

基坑围护结构采用 MJS 工法桩,其中东侧采用一排 $\phi 2\ 000\ \text{mm}@900\ \text{mm}$ MJS 桩摆喷 180° 形成隔离,西侧在既有市政通道 $\phi 1\ 000\ \text{mm}@1\ 200\ \text{mm}$ 钻孔灌注桩外侧打设 MJS 桩止水帷幕,其余侧沿基坑打设 $\phi 2\ 000\ \text{mm}@900\sim 1\ 200\ \text{mm}$ MJS 井内插 HN 700 \times 300 型钢形成封闭围护,围护桩进入基坑底以下 15 m。坑底加固采用 MJS,实施范围为坑底以下 10 m,坑内不降水。

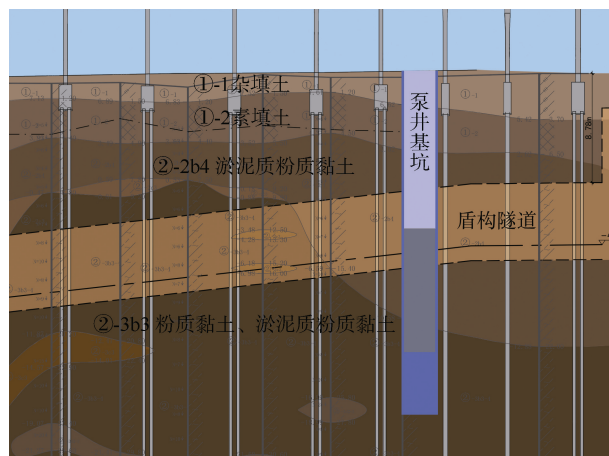


图 1 土层分布情况

Figure 1 Distribution of soil layers

基坑竖向设置 3 道支撑+1 道换撑,第一道采用 600 \times 800 mm 混凝土支撑,第二道、第三道、换撑采用 $\phi 609\ \text{mm}$ 厚 16 mm 钢支撑。冠梁尺寸为 800 mm \times 1 400 mm,腰梁采用双拼 HW400 \times 400 \times 13 \times 21 mm 组合钢构件。

型钢边线与地铁盾构隧道结构外边线最小水平距离约为 1.1 m, MJS 桩边线紧贴地铁隧道,水平距离仅为 0.1 m。基坑与周边环境相对关系如图 2 所示。

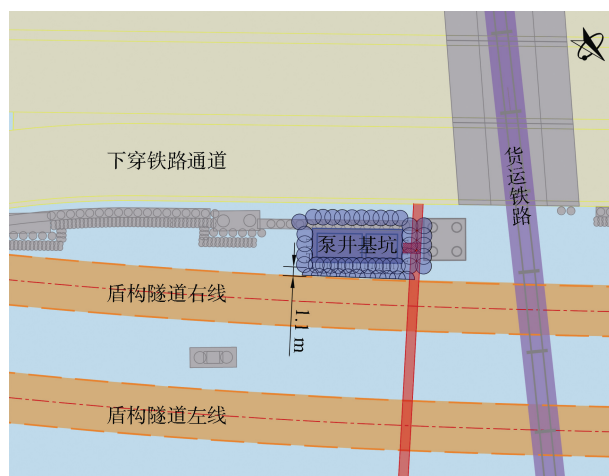


图 2 泵井基坑平面

Figure 2 Plan of deep excavation

3 地铁隧道加固方案

盾构隧道顶覆土约为 9.4 m,隧道外径 6.2 m、内径 5.5 m,壁厚 0.35 m,环宽 1.2 m,衬砌环采用错缝拼装。

在新建泵井实施前,为控制 H 型钢插拔产生的挤土效应、MJS 旋喷造成的土体扰动以及泵井基坑开挖

过程中时空效应对地铁盾构隧道的影响,需提前对地铁进行预加固处理,主要措施如下。

3.1 纵向拉紧条

在隧道管片上设置5根纵向拉紧条,加强管片纵向连接刚度,防止盾构隧道环与环之间出现松动、错台、不均匀沉降等。

拉紧条采用14B槽钢经SA2.5级抛丸除锈,并喷涂0.3mm厚防锈漆,采用M20化学锚栓安装固定,在布置时需避开管片主筋、隧道内管线及设备、预留注浆孔等。

3.2 复合腔体

在隧道管片上环向设置复合腔体(见图3)进行加固,单环采取3圈复合腔体构件,提高隧道整体刚度和承载力^[2],防止隧道出现收敛变形。

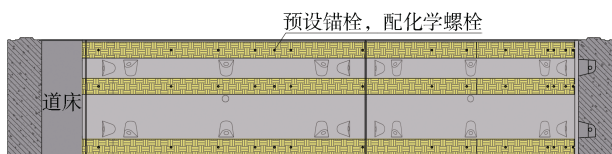


图3 复合腔体构造

Figure 3 Filament wound profile arrangement plan

这种复合材料较传统钢内衬加固具有自重轻、加固周期短、占用空间小的特点,加固前预先用钢管制成含有4个腔室的空腔体,将碳纤维通过特殊工艺包裹在空腔体外侧,安装时先将复合空腔体与隧道管片用结构胶黏结,再固定化学锚栓,安装完成后在腔体内注入C50高强度砂浆填充^[3]。加固完成效果见图4。



图4 复合腔体加固完成情况

Figure 4 Photo of shield tunnel equipped with filament wound profiles

3.3 道床预埋管

在隧道道床上提前开孔,注浆孔每2环布置一排,每排对称布置2个,采用2次开孔方式,首次开孔不打穿底板,预留100mm保护层,开孔后预埋注浆套管。一旦隧道突发沉降,可在隧道底部进行应急

填充注浆。

4 施工方案

考虑到泵井基坑工序转换过程中施工时间和施工空间的限制,邻地铁侧支护结构施工采用先插型钢、后注浆工艺^[4-5],施工工序为H型钢插入→施作半圆MJS桩兼做隔离桩→施作全圆MJS止水桩→施作MJS坑底加固。

其中围护桩H型钢共计21根,长27m,受市政公路桥下8m净空限制,考虑到型钢吊装及插入作业空间,需分节打入,每节3m,共9节,单节质量0.5t,接头处采用气体保护双面焊。

4.1 ICE高频液压免共振锤

由于传统打拔型钢对周边环境影响较大,为保护盾构隧道,基坑型钢插入采用ICE 20RF高频免共振锤和600液压动力站^[6],其中免共振锤仅重3.65t,采用履带吊吊装;600液压动力站具备噪声小、振感低、动力大的特点。动力站泵出的液压油驱动免共振锤的锤头马达,通过马达旋转带动偏心块转动,产生相应的偏心力矩,使免共振锤产生振动。

为了避免工作频率与土壤产生共振,免共振锤的转速非常高,最大转速能达到2300rpm,大幅超过土壤的固有频率。型钢周边土壤颗粒可以迅速液化、摩擦力降低,从而使型钢高速下沉。相比传统静压植桩机,免共振锤的功效可达其6~10倍,沉桩速度为4~10m/min。

型钢插入时采用跳桩方式实施(见图5),在远离地铁隧道侧原位试桩。型钢上预埋声测管,采用声波检测和全站仪测量型钢垂直度,一旦发现偏差及时纠偏。

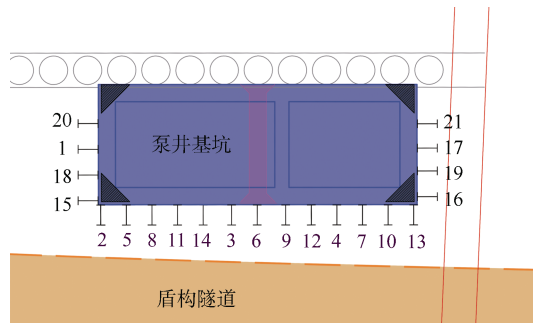


图5 H型钢插入顺序示意

Figure 5 Diagram of steel H-piles driving order

4.2 MJS工法桩

MJS工法桩又称全方位高压喷射工法,使用独

特的多孔管和前端吸浆装置,实现了孔内强制排浆,同时通过对地内泥浆压力进行监测,稳定了水泥浆液压力,成桩稳固且高效,大幅降低了对周边环境的影响,给地下空间开发提供了更多的可能和选择^[7-8]。

MJS 施工工序采用桩位放样→引孔钻机就位→引孔钻进→MJS 喷射钻机就位→MJS 喷射→旋喷提升→钻机移位。引孔钻机采用 HDL-160D1 型钻机, MJS 喷射钻机采用 MJS-65CVH 型钻机。施工参数如表 1 所示。

表 1 MJS 施工参数

Table 1 Metro Jet System parameters

施工参数	水泥掺量/%	水灰比	水泥强度	空气压力/MPa	水泥浆压力/MPa	提升速度/(min/m)	垂直度
取值	40	1:1	42.5 级	0.5~0.7	≥40	20 半圆 40 全圆	1/100

施工时优先实施邻地铁侧半圆 MJS 桩,同时兼做隔离桩。由于围护结构型钢先放置,型钢间 MJS 晚于型钢实施,将型钢周围完全封闭是项目成功的关键,需将钻杆孔位准确定位于两根型钢中间,确保围护止水的可靠性。MJS 桩施打均采用跳桩施工,施打顺序如图 6 所示。

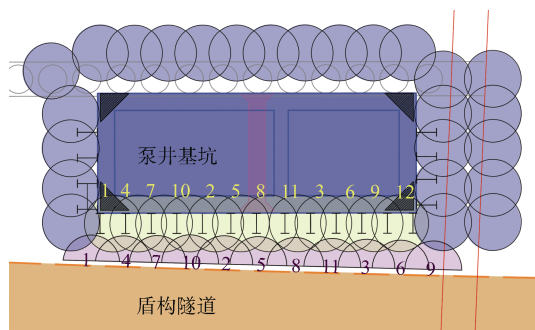


图 6 MJS 桩施打顺序示意

Figure 6 Diagram of Metro Jet System jetting order

4.3 开挖回筑及管道连接

基坑累计土方量约为 570 m³ 且作业面受限,采用 1 台小型挖机进行坑内挖方,配合 1 台长臂挖机进行地面开挖,挖至支撑高程后及时架设支撑,施工过程中尽量减少基坑暴露时间,及时浇筑底板,减小时空效应影响,基坑从土方开挖至底板浇筑共用时 7 d。

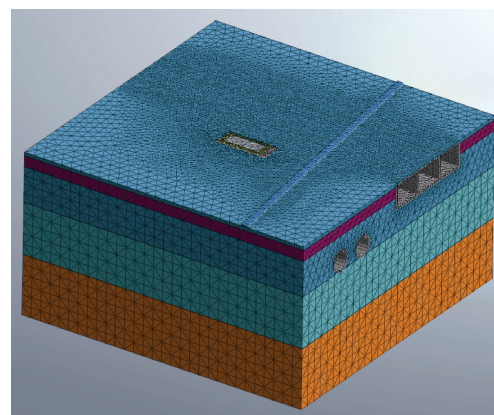
泵井内部结构包含底板、衬墙、梁和顶板,分 4 次浇筑。回筑结构时及时实施倒换撑,确保水平力顺利转换。侧墙设置 3 道环向水平暗梁,以利于后续主体结构与既有雨水管连通施工。

连通作业采用暗挖法,沿暗挖段均匀布设一排超前小导管,再依次掏挖泵井结构、MJS 围护桩,掏挖时及时安装钢拱架,与小导管形成联合支护。到达雨水管位置后截断既有管,采用钢套筒进行连接,连接完成后将连通道用混凝土填充密实。

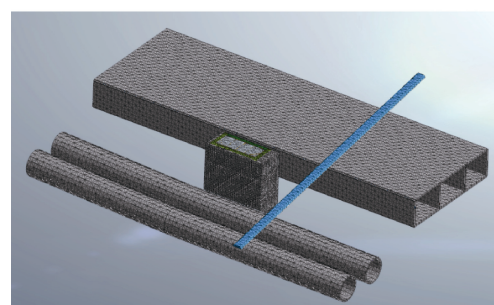
5 数值分析

5.1 计算模型及参数

采用 MIDAS GTS 岩土与隧道仿真分析软件,通过全工况三维数值模型分析工程建设对地铁盾构隧道的影。根据工程经验,所取土体范围为 90 m×90 m×60 m,模型网格划分按照近密远疏的原则,共计 68 864 个节点、438 859 个单元,采用自动生成边界作为模型边界条件,整体模型及相对位置关系如图 7 所示。



(a) 整体模型



(b) 相对位置关系

图 7 三维有限元计算模型

Figure 7 3D finite element model

通过激活和钝化方式模拟土方开挖和回筑,采用接触单元对隧道结构与土体之间的接触进行模拟,隧道、基坑围护结构采用弹性本构模拟,土体采用摩尔-库伦理想弹性-塑性本构模型模拟,土层物理力学性能指标如表 2 所示。

表2 土层物理力学性能指标

Table 2 Physico-mechanical parameters of soil layers

层号	名称	μ/m	$\gamma/(kN/m^3)$	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	$K_s/(cm/s)$	E_s/MPa
1	杂填土	0.33	19.0	5	5	5×10^{-4}	4.4
2	素填土	0.38	19.0	12	12	3×10^{-7}	4.4
3	淤泥质粉质黏土	0.43	17.6	14	14	4×10^{-7}	3.3
4	淤泥质粉质黏土	0.38	17.7	15	18	9×10^{-7}	3.7
5	粉砂	0.23	18.8	8	32	1×10^{-4}	10.6

5.2 计算结果

通过三维数值计算模拟,在基坑工程施工影响下,地表沉降为4.0 mm,地表朝基坑内水平位移最大为2.6 mm;基坑最大竖向位移为12.3 mm,最大水平位移为13.6 mm;地铁隧道最大隆起为1.2 mm,最大水平位移为1.6 mm,最大收敛为1.3 mm。

5.3 变形控制标准

根据《城市轨道交通结构安全保护技术规范》^[9]、《城市轨道交通结构安全保护技术规程》^[10]、数值模拟分析结果和地铁结构现状,确定项目结构变形控制值如表3所示。

表3 盾构隧道变形控制值

Table 3 Deformation tolerances of shield tunnel

安全监测项目	控制值/mm
竖向位移	-10, +5
水平位移	±10
水平收敛	±10

6 监测数据分析

泵井基坑实施期间地铁盾构隧道各监测点位累计沉降多在4 mm左右,最大沉降量为5.7 mm(见图8)。数值分析中地铁隧道竖向位移主要考虑的是基坑开挖卸载工况,计算结果为隆起^[11];实际施工中,受施工荷载影响,隧道竖向位移表现为下沉。

泵井基坑实施期间地铁盾构隧道各监测点位累计水平位移多在3 mm左右,最大水平位移为5.7 mm(见图9)。其中紧邻基坑的右线隧道在型钢插入期间受挤土效应影响水平位移出现负值,左线由于距离较远无明显变化。

施工期间隧道水平收敛值较为可控,收敛变化值多在2~3 mm,最大收敛值为6.8 mm,相对于标准圆最大水平收敛约为34 mm^[12]。数值分析与施工实测结果对比如表4所示。

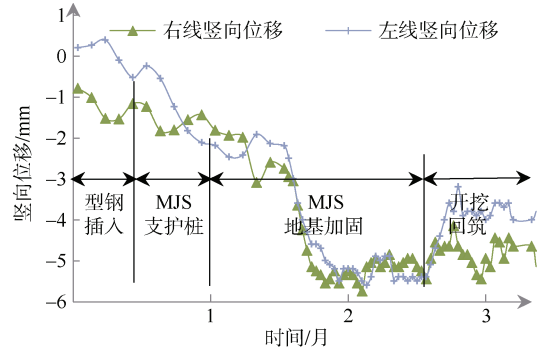


图8 地铁盾构隧道典型沉降曲线

Figure 8 Typical settlement curve of subway tunnel

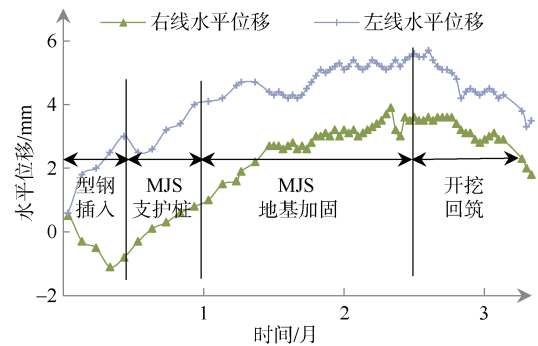


图9 地铁盾构隧道典型水平位移

(-为向基坑外、+为向基坑内)

Figure 9 Typical vertical displacement of subway tunnel

表4 地铁盾构隧道数值分析及实测结果对比

Table 4 Comparison between numerical simulation analysis and deformation monitoring

监测项目	数值分析结果/mm	实测结果/mm
最大竖向位移	1.2	-5.7
最大水平位移	1.6	5.7
最大水平收敛	1.3	6.8

通过对比发现,除实测中竖向位移受施工荷载影响呈下沉趋势以外,两者的变化规律是一致的,实测数据较数值分析数值略大,但仍处于盾构隧道变形的可控范围。两者互为印证证明数值分析结果是可靠的,深基坑采取的保护手段是有效的。

7 结论

本文以新建雨水泵井基坑为实例,围绕设计方案优化、盾构隧道预加固、基坑施工工艺选择、三维数值模拟、现场数据实测多个维度研究了近距离深基坑施工对盾构隧道的保护策略,得到以下结论。

1) 根据“外控内治”的指导原则,通过MJS工法桩内插型钢复合基坑支护型式、施工前盾构隧道内

纵向拉紧条及复合腔体管片预加固相结合的手段, 外部施工期间地铁盾构隧道结构变形得到了有效控制, 其中最大竖向位移 -5.7 mm 、最大水平位移 5.7 mm 、最大水平收敛 6.8 mm , 未达到变形控制值。

2) MJS 工法桩内插 H 型钢不仅满足了深基坑围护结构的整体刚度需求, 解决了低净空条件下深基坑开挖可行性问题, 而且对周边环境更为友好。型钢插入采用高频液压免共振锤, 功效高、影响小, 插入阶段盾构隧道的竖向位移、水平位移和水平收敛均控制在 3 mm 以内。

3) 受工序转换期间施工时间、空间的限制, 如先实施 MJS、后插 H 型钢, 可能影响型钢插入深度。本项目采用先插型钢、后喷浆工艺可以避免这一问题, MJS 桩同时承担型钢桩间的挡土和止水作用, 喷浆时需确保钻杆孔位居中, 将型钢周围完全封闭。

4) 盾构隧道的变形主要发生在竖向支护和坑底加固实施阶段, 为大型施工机械、材料设备堆放等施工附加荷载叠加影响所致; 基坑开挖及回筑阶段由于施工周期短、基坑体量小, 产生变形较小。

参考文献

- [1] 蔡宗洋, 张戈, 潘毫. 软土地区地铁区间两侧深基坑对称开挖影响分析[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(4): 93-98.
CAI Zongyang, ZHANG Ge, PAN Hao. Influence of adjacent subway tunnel on deformation due to bilateral deep excavations in soft-soil area[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(4): 93-98.
- [2] 张磊, 柳献. 盾构隧道加固用复合型材承载力计算方法研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(5): 169-176.
ZHANG Lei, LIU Xian. Bearing capacity calculation method for shield tunnel reinforcing filament wound profiles[J]. Urban mass transit, 2023, 26(5): 169-176.
- [3] 邓世舜, 沈张勇, 柳献, 等. 地铁盾构隧道复合腔体构件性能试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(6): 31-36.
DENG Shishun, SHEN Zhangyong, LIU Xian, et al. Experimental study on the mechanical performance of metro shield tunnel filament wound profile[J]. Urban mass transit, 2022, 25(6): 31-36.
- [4] 徐晓兵, 姜叶翔, 童磊, 等. 邻近地铁基坑后插型钢 MJS 工法桩试桩研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S2): 854-860.
XU Xiaobing, JIANG Yexiang, TONG Lei, et al. Field Tests on MJS Piles of Post-inserted H-shaped Steel in Soil Excavation Adjacent to the Subway[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2021, 17(S2): 854-860.
- [5] 周蓉, 杨兰强, 王国权, 等. MJS 工法桩内插 H 型钢在超低净空下应用研究[J]. 土工基础, 2021, 35(5): 539-543.
ZHOU Rong, YANG Lanqiang, WANG Guoquan, et al. MJS column with H beam insertion installed under very low head room[J]. Soil engineering and foundation, 2021, 35(5): 539-543.
- [6] 王卫东, 魏家斌, 吴江斌, 等. 高频免共振法沉桩对周围土体影响的现场测试与分析[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(4): 131-138.
WANG Weidong, WEI Jiabin, WU Jiangbin, et al. Field test and analysis on effects of pile driving with high-frequency and resonance-free technology on surrounding soil[J]. Journal of building structures, 2021, 42(4): 131-138.
- [7] 陈璞, 吴勇, 杨康, 等. MJS 联合微扰动注浆在地铁隧道收敛变形整治中的应用研究[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(4): 86-92.
CHEN Pu, WU Yong, YANG Kang, et al. Application of MJS combined with micro-disturbance grouting in renovation of convergence deformation of subway tunnel[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(4): 86-92.
- [8] 李汛, 张海银, 张声宇. 多条既有轨道交通区间隧道上方近距离深大基坑围护方案设计及研究[J]. 中国市政工程, 2024(5): 132-135.
LI Xun, ZHANG Haiyin, ZHANG Shengyu. Design & research on the support scheme of close distance deep & large foundation pit above multiple existing rail transit interval tunnels[J]. China municipal engineering, 2024(5): 132-135.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通结构安全保护技术规范: CJJ/T 202—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for protection structures of urban rail transit: CJJ/T 202—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [10] 江苏省市场监督管理局, 江苏省住房和城乡建设厅. 城市轨道交通结构安全保护技术规程: DB32/T 4351—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
Jiangsu Provincial Administration for Market Regulation, Jiangsu Housing and Urban-Rural Development Department. Technical code for projection structures of urban rail transit: DB32/T 4351—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [11] 尚国文, 李飒, 翟超, 等. 基坑开挖与邻近地铁结构变形相关性的实测分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(1): 107-115.
SHANG Guowen, LI Sa, ZHAI Chao, et al. Monitoring data analysis on deformation correlation between foundation pit and adjacent metro structure[J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2020, 40(1): 107-115.
- [12] 余才高, 张存, 王怀东, 等. 软土错缝拼装盾构隧道横断面变形控制限值研究[J]. 都市轨道交通, 2021, 34(5): 119-127.
SHE Caigao, ZHANG Cun, WANG Huaidong, et al. Control limit value of cross section deformation of shield tunnel structures with staggered joints[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(5): 119-127.

(编辑: 傅依萱)