

上海轨道交通车站暗挖技术应用与探索

毕湘利 王秀志 吴 迪

(上海申通地铁集团有限公司, 201103, 上海)

摘 要 [目的] 上海的城市轨道交通经过多年发展, 现已面临极其复杂和严苛的工程建设环境, 地下车站大开挖导致的交通拥堵、房屋拆迁和管线搬迁等问题已逐渐成为社会舆论的焦点。针对地铁建设与周边环境的冲突与矛盾, 上海轨道交通通过持续科技攻关和试验论证, 提出了多项软土地层暗挖技术。[方法] 介绍了暗挖技术的发展历史和应用现状; 基于上海轨道交通建设的特点, 介绍了上海轨道交通暗挖技术中顶管法、冻结法和管棚法的具体内涵及应用情况; 探讨了大断面顶管法、超长特大断面管幕法、超浅埋大断面冻结法和束合管幕法等新型暗挖车站建造技术的研究和试点应用情况。[结果及结论] 上海轨道交通暗挖技术主要包括盾构法、顶管法、冻结法、管棚法以及其他特殊暗挖工法, 已广泛应用于地下区间工程、区间联络通道工程、车站附属结构工程以及车站局部改造工程等; 新型暗挖车站建造技术能够有效应对新条件下上海轨道交通建设的特点和面临的挑战。

关键词 上海轨道交通; 车站; 软土地层; 复杂环境; 暗挖技术

中图分类号 U231.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.001

Application and Exploration of Underground Excavation Technology in Shanghai Rail Transit Stations

BI Xiangli, WANG Xiuzhi, WU Di

(Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China)

Abstract [Objective] With years of development, Shanghai urban rail transit is now facing an extremely complex and demanding construction environment. Issues such as traffic congestion, housing demolition, and pipeline relocation caused by large-scale open excavation of underground stations have gradually become the focal points of public concern. In response to the conflicts and contradictions between metro construction and surrounding environment, Shanghai rail transit proposes several underground excavation technologies for soft soil stratum through continuous technological breakthroughs and experimental validation. [Method] The development history and current application status of underground excavation

technology are introduced. Based on the characteristics of Shanghai rail transit construction, the specific connotations and application scenarios of pipe jacking method, freezing method, and pipe roofing method in Shanghai rail transit underground excavation technology are introduced. Furthermore, the research and pilot applications of new underground excavation station construction technologies such as large-section pipe jacking, ultra-long and extra-large-section pipe curtain method, ultra-shallow buried large-section freezing method, and bundled pipe curtain method are explored. [Result & Conclusion] Shanghai rail transit underground excavation technology primarily include shield tunneling method, pipe jacking method, freezing method, pipe roofing method, and other special underground excavation methods. These techniques are widely applied in various projects such as underground interval engineering, interval connecting passage engineering, station auxiliary structure engineering, and partial station renovation engineering. New underground excavation station construction technology effectively address the unique characteristics and challenges of Shanghai rail transit construction under new conditions.

Key words Shanghai rail transit; station; soft soil stratum; complex environment; underground excavation technology

上海是我国城市轨道交通建设和发展最早的城市之一,截至2022年年底,上海轨道交通网络规模已超过800 km,迈上了高质量发展的新征程。但随着轨道交通在城市中的快速建设,在交通和建筑密集区域建造轨道交通车站的环境问题日益显现。

地铁车站往往设置在繁华的都市核心区域,受建筑拆迁、道路翻交、管线搬迁等的限制,传统的明挖法施工与社会环境、居民生活的矛盾日益凸出^[1]。例如,上海轨道交通10号线交通大学站建设时封闭了上海“三纵三横”主干道的华山路,极大影响了上海的道路交通,为此暗挖工艺逐渐成为在复杂环境下修建地下结构的首选。而现有的暗挖方法难以满足大客流车站功能性、软弱地层环境微变形控制以及运营期耐久性保障,饱和软土地区暗挖法修建地铁车站成为行业共性难题。

为此,本文基于上海轨道交通建设,介绍暗挖技术的发展历史和应用现状,对新条件下地铁车站建设面临的问题及暗挖技术的新需求进行了探讨,总结了上海轨道交通目前在地铁车站暗挖技术领域中的探索和实践。相关技术和经验可为同类地层中的地铁车站建设提供一定借鉴和参考。

1 暗挖技术发展与应用现状

暗挖技术,即不开挖路面直接暗挖形成地下空间的施工技术。早期的暗挖技术主要用于各种类型山岭隧道的修建^[2],其代表工法有新奥法或新意法。1984年,王梦恕院士在经典新奥法基本原理的基础上提出了浅埋暗挖工法,并成功应用于北京复兴门站地铁折返线工程^[3]。此后,以浅埋暗挖法为代表的各种暗挖技术在北京市政管道及地下隧道施工中得到了广泛应用,并推广至广州、重庆等城市。当地层条件允许时,甚至可以采用大断面暗挖并辅以相应超前加固措施直接修建地铁车站,从而避免了直接开挖地面造成的交通拥堵和扰民等不良社会影响。以浅埋暗挖法施工的北京地铁西单站效果图如图1所示。

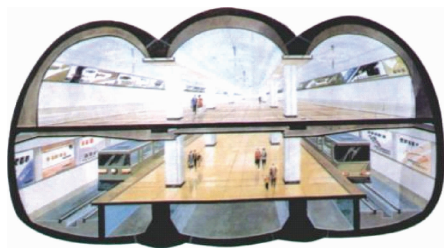


图1 北京地铁西单站(双侧壁导坑)施工效果图

Fig.1 Construction rendering of Beijing Subway Xidan Station (double sidewall guide pit)

上海位于我国典型的饱和软土地区,工程场地内的软土因强度低、灵敏性高为暗挖法施工带来诸多挑战。上海轨道交通自1990年1号线开工建设以来,经过30多年的发展,通过改进相关的暗挖工法及工艺,已解决了饱和软土地区部分轨道交通建设与周边环境冲突的问题,形成了成套技术体系。上海轨道交通暗挖技术主要包括盾构法、顶管法、冻结法、管棚法以及其他特殊暗挖工法,已广泛应用于地下区间工程、区间联络通道工程、车站附属结构工程以及车站局部改造工程等。

1.1 顶管法

顶管法适用于车站附属结构施工,可有效避免

城市主干道交通导改与管线搬迁,对于掘进通道距离短、施工场地小、相邻通道施工间距小等情况,该方案具有较大优势,可在一定程度上节约工程前期费用。上海轨道交通最早的顶管法工程为1999年2号线陆家嘴站5号出入口工程,工程全长62m,采用尺寸为3 800 mm×3 800 mm的矩形顶管。此后,采用顶管法成功实施的地铁出入口工程近20多项^[4],矩形顶管断面尺寸也逐步增大至4 200 mm×6 900 mm。目前,车站附属结构暗挖技术已经相对成熟,主体结构暗挖将是下一步研究的重点。

1.2 冻结法

冻结法因其良好的止水和封水效果在饱和软土地层得到了广泛应用。上海轨道交通区间联络通道工程全部采用冻结法施工。此外,针对车站局部复杂穿越节点,也曾采用冻结法辅助施工^[5],如4号线下穿1号线既有车站工程(2005年)和13号线大渡河路站3号口下穿金沙江路主干道工程(2012年),如图2所示。新一轮建设中,冻结法也被应用于多项车站局部暗挖工程,如14号线浦东大道站下穿大连路隧道、18号线江浦路站下穿8号线既有车站等。

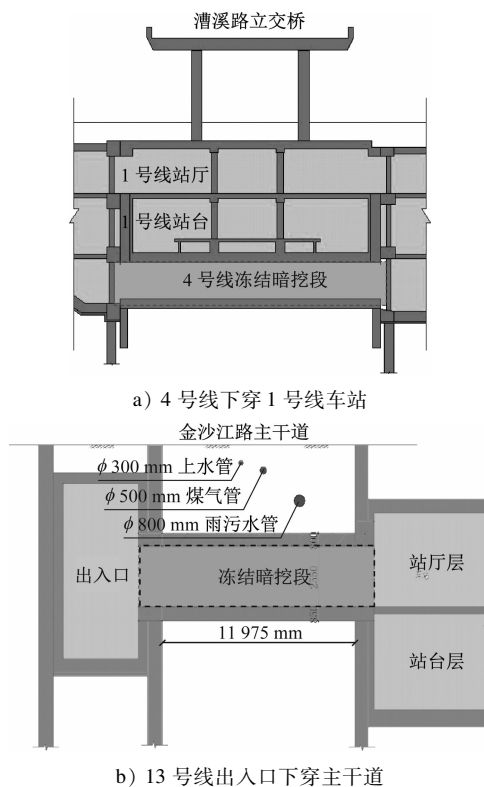


图2 上海轨道交通采用冻结法施工的关键节点工程

Fig.2 Freezing method constructed key node projects of Shanghai rail transit

1.3 管棚法

管棚法适用于车站附属结构施工。管棚主要承担暗挖空帮范围内上部的土压力,并且还能起到一定的止水效果。管棚法施工水平定向精准,施工效率高^[6]。2007年,上海轨道交通采用管棚法修建的8号线鞍山新村站3号出入口是最早采用浅埋暗挖工法在饱和软土地层进行大断面暗挖工程的案例之一,如图3所示。由于管棚法在该工程项目中取得成功,管棚法的设计和施工理念开始被学界和工程界所接受,管棚法也被逐步完善,现已广泛应用于各种浅覆土、超浅覆土的小变形下穿工程。

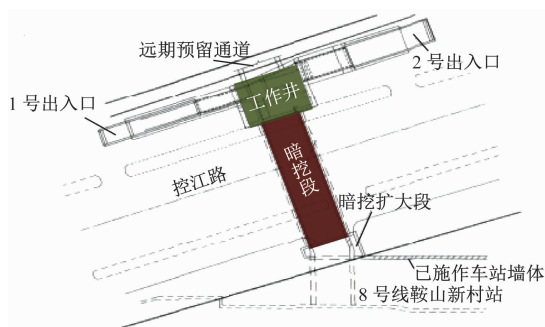


图3 上海轨道交通8号线鞍山新村站暗挖工程

Fig. 3 Underground excavation project at Shanghai Rail Transit Line 8 Anshan Xincun Station

2 新型暗挖车站建造技术的探索研究及试点应用

随着上海城市化的不断推进和轨道交通建设的迅速发展,上海既有暗挖技术已开始面临新的挑战:常规暗挖工法目前只能解决车站局部问题,如何在饱和软土地层实施大断面、长距离暗挖车站仍是国际上尚未攻克的难题。为确保轨道交通建设和保障城市环境与市民需求,近年来上海轨道交通在暗挖技术领域进行了不断探索和尝试,主要涉及车站主体结构暗挖技术。

2.1 大断面顶管法车站建造技术

14号线静安寺站位于以千年古刹静安寺为核心的商务和文化活动区域,这是上海最为繁华的地区,如图4所示。车站为地下三层结构,长230 m、宽21 m、深26 m,沿华山路南北向布置,并穿越延安路。车站所处地层为承载力低、灵敏度高的饱和软土层,且周边环境复杂,既有承载了上海记忆的石库门建筑群、老上海天桥,也有最摩登的摩天大楼。车站穿越的延安路为上海唯一的一条沿东西向穿

越市中心的城市快速路,包括双向6车道的高架桥及双向14车道的地面道路,日均车流达30万辆,公交线路45条。道路下方有水、电、煤气等各类市政管线54根,直接影响300万居民的日常生活。延安路桥下老上海天桥净空高仅5.6 m,桥墩下部桩基至车站最小净距仅5.3 m。受上述因素的影响,静安寺站主体结构不具备明挖施工条件。



图4 静安寺站主体结构上方复杂城市环境

Fig. 4 Complex urban environment above the main structure of Jing'an Temple Station

为此,针对上海城市密集区地上地下复杂环境条件,提出了以分离阵列式多顶管隧道群穿越延安路作为车站主体结构的建设方案,如图5所示。车站以延安路为界分为3段:路北106 m和路南42 m采用明挖法施工;延安路下方82 m采用3个大断面矩形顶管施工,其中下部2个并行的9.9 m(宽)×8.7 m(高)顶管隧道为站台层,上部1个9.5 m(宽)×4.9 m(高)顶管隧道为站厅层,3个隧道与路北、路南明挖段共同形成车站整体结构。完美解决了城市密集区复杂受限空间条件下地铁暗挖车站的建设难题,有效解决了中心城区地铁车站建设对交通和环境的影响,节省管线搬迁费用1.6亿元,节省施工工期20个月,沉降控制达到了毫米级。

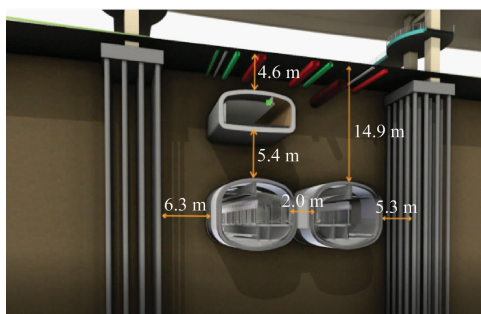
2.2 超长特大断面管幕法车站建造技术研究

面对上海越来越严苛的建设环境,为丰富软土地区地铁车站设计手段,确保未来规划线路的顺利实施,上海轨道交通对超长、特大断面管幕法暗挖

车站建造技术进行了探索研究与试点应用,以期作为远期地铁建设的技术储备。试点车站选取在建 14 号线桂桥路站。管幕段全长 100 m,为地下一层结构,如图 6 所示。桂桥路站周边场地条件宽松,测点布置方便,有利于新型工法的测试和验证。



a) 已有结构与新建结构的空间位置关系



b) 已有结构与新建结构的尺寸

图 5 顶管法静安寺站工程实施示意图

Fig. 5 Implementation diagram of pipe jacking method Jing'an Temple Station engineering

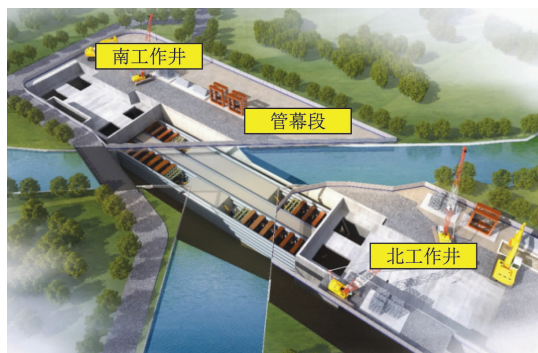


图 6 管幕法桂桥路站工程实施示意图

Fig. 6 Implementation diagram of pipe roofing method Guiqiao Road Station engineering

管幕现场排布如图 7 所示。管幕段上部采用 1.0 m 顶管,中间及下部采用 1.6 m 顶管。管节之间采用凹凸榫槽及油脂止水。针对软土地层顶管施工各项关键技术,上海轨道交通在顶管顶进、地层加固及暗挖施工等多个方面进行了测试与论证。

顶管施工偏差最终控制在 3 cm (管幕段总长 100 m),地面影响控制在 5 mm 以内,并开发了软土地层随挖随撑施工装备,如图 8 所示。



图 7 管幕现场排布

Fig. 7 Pipe curtain on-site layout



a) 管节防水设计



b) 现场顶进施工

图 8 管节防水设计与现场顶进施工

Fig. 8 Waterproof design of pipe joints and on-site jacking construction

2.3 超浅埋大断面冻结法车站建造技术研究

18 号线江浦路站周边建(构)筑物较多,站位东北侧地块现状为迈玛瑞大酒店;东南侧地块现状为信息技术大厦、东方星座及居民住宅等;西北侧地块现状是紫荆广场,为地面 8 层、地下 3 层商业建筑物;西南侧地块现状是新华医院,其住院大楼(地面 14 层、地下 2 层)距车站主体 6.24 m,楼外景观电梯距离车站主体仅 3.31 m。暗挖段车站上方管线众多,难以迁改,江浦路站主体结构不具备明挖施工条件。暗挖段如图 9 所示。

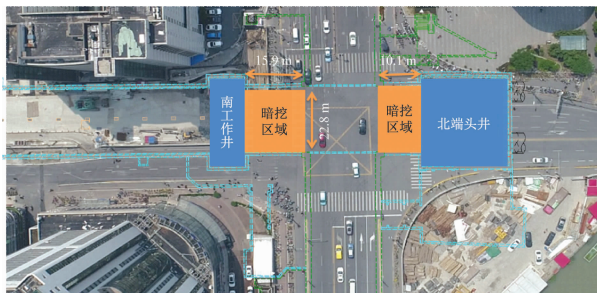


图 9 江浦路站区位置示意图

Fig. 9 Position diagram of Jiangpu Road Station

为解决江浦路站“十”字换乘管线难以改迁问题,采用“管棚法+冻结法+MJS法”(MJS工法——全方位高压喷射工法)复合工法进行主体结构修建。江浦路站沿江浦路南北走向、跨控江路路口设置,与已通车的8号线江浦路站“十”字换乘,为地下二层岛式车站。站台中心处顶板覆土厚度约为2.476 m,底板埋深约为14.976 m。

江浦路站超浅埋大断面暗挖形成了如图10所示“管棚法+冻结法+MJS法”复合围护体系。在“管棚法+冻结法+MJS法”复合围护体系中,各措施位置相互交替,措施效果也相互叠加,但各自主要作用有主有次、有所侧重。底部及两侧采用冻结法为主、MJS法加固为辅的复合围护体系,负二层和负一层顶部均采用管棚为主、冻结止水和MJS法加固为辅的复合围护体系。管棚的主要作用为承担暗挖空帮范围内上部土压力;冻结加固体的主要作用为承担底部及两侧水土压力,作为大断面暗挖期间主要受力体系;水平MJS法加固主要作用为减少冻胀融沉,防止对地面产生过大影响,保护周边重要管线和建筑物,同时,减少底部土体隆起,减少后期融沉,加快融沉注浆工期。

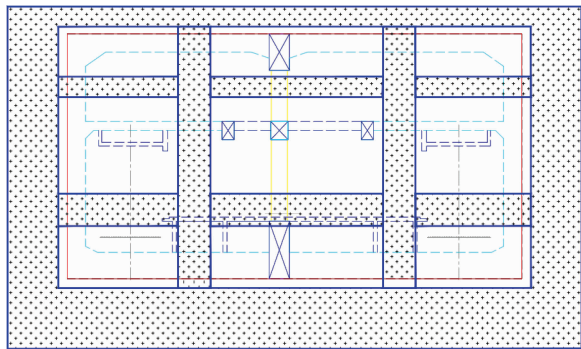


图 10 江浦路站暗挖段复合围护体系示意图

Fig. 10 Composite enclosure system diagram of Jiangpu Road Station underground excavated section

2.4 束合管幕法(U-Bit工法)车站建造技术

14号线工程武定路站沿武宁南路走向,骑跨武定路,车站总长295 m,标准段净宽19.64 m,为地下二层单柱车站,如图11所示。其中,1号口为标准独立出入口,位于车站主体中部,从武宁南路武定路交叉点东南象限出地面。周边交通流量大,管线众多,施工场地、周边环境极为复杂,为避让无法搬迁的电力管廊,1号出入口采用U-Bit束合管幕结构暗挖法施工穿越交叉口。

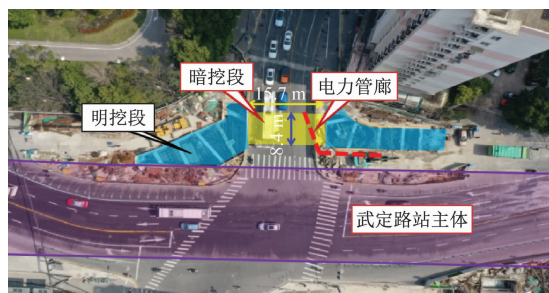


图 11 武定路站1号口总平面示意图

Fig. 11 General plan diagram of Wuding Road Station Exit 1

暗挖通道断面宽6.4 m、高4.2 m,总长15.7 m,图12为束合管幕法车站出入口剖面图。图13为管幕张拉示意图。整个管幕由4根1.4 m×1.4 m矩形钢管和16根1.0 m×1.0 m矩形钢管组成,形成外径8.4 m(长)×6.2 m(宽)封闭的水平管幕围护,管幕段全长15.3 m。管节之间采用C-T锁扣及油脂止水。针对软土地层矩形顶管施工各项关键技术,上海轨道交通在微扰动顶管顶进及预应力张拉施工等多个方面进行了测试与论证,顶管施工精度控制优异,管幕顶进偏差控制在了25 mm以内。

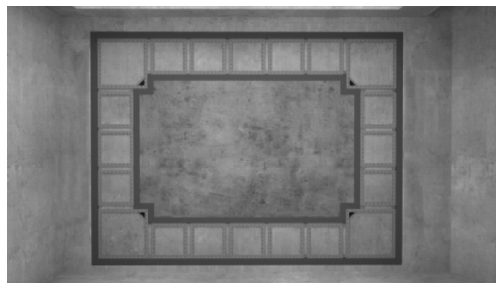


图 12 武定路站暗挖段横剖面图

Fig. 12 Cross-section diagram of Wuding Road Station underground excavated section

束合管幕法能够较好地解决初期支护兼作永久结构和无泥浆暗挖作业的难题,并且束合结构可

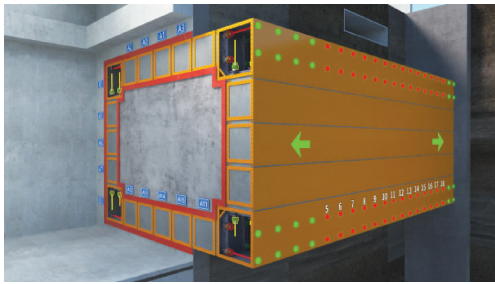
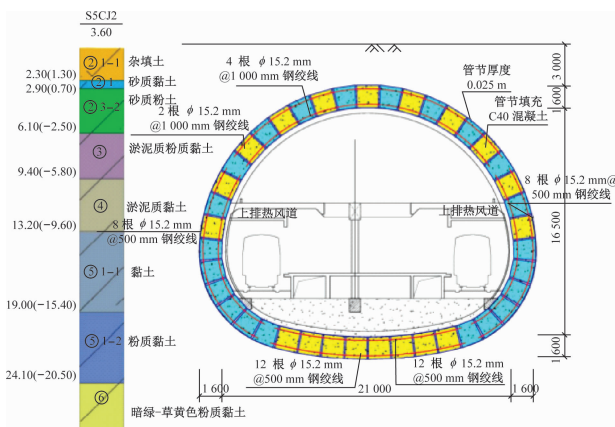


图 13 武定路站管幕张拉示意图

Fig. 13 Diagram of Wuding Road Station pipe curtain stretching

视作暗挖空间的“最小单元”。通过对管幕外轮廓进行分块设计,采用不同内外尺寸差的梯形管节,优化刀盘和铲刀的组合,可将顶进拼装拟合成不同高度、不同宽度的结构断面,最终适用于不同应用场景的暗挖车站断面形式,满足经济合理、安全可靠、快速高效和环境友好的施工需求,推广应用潜力巨大。

上海市轨道交通新一轮建设中,20 号线平利路站、共青森林公园站以及 12 号线西延伸洞泾站等多座车站的建设方案中对束合管幕法进行了进一步优化和比选。以平利路站为例,优化后的断面采用的是马蹄形束合管幕结构形式,其断面最大内净宽 21.0 m,最大内净高 16.5 m,外包高度为 24.2 m,管节尺寸高 1.6 m,如图 14 所示。平利路站结构断面面积高达 275 m²(现阶段同类工艺断面面积最大为日本相铁东急直通线新纲岛站隧道工程,断面尺寸为 224 m²),其成功实施将会进一步加强我国束



尺寸单位:mm

注:图左侧括号中的数值为高程,括号外的数值为埋深,单位均以 m 计。

图 14 平利路站马蹄形束合管幕结构断面图

Fig. 14 Section drawing of Pingli Road Station horseshoe-shaped bundled pipe curtain structure

合管幕法的技术储备。

3 结语

软土地层暗挖技术是现代城市管理和高质量发展必须解决的难题,也是城市轨道交通可持续发展的需要。本文阐述了新条件下上海轨道交通建设的特点和面临的挑战,介绍了上海轨道交通在暗挖技术领域中的探索和实践,相关技术和经验可为同类地层中的城市轨道交通建设提供借鉴和参考。上海轨道交通将继续致力于这项技术的攻关与探索,并乐于与同行合作交流,共同推进城市轨道交通建造技术不断进步。

参考文献

- [1] 毕湘利,周顺华,刘万兰.城市轨道交通工程建设施工的风险识别[J].城市轨道交通研究,2004,7(4):36.
BI Xiangli, ZHOU Shunhua, LIU Wanlan. Risk identification in the construction of urban rapid transit[J]. Urban Mass Transit, 2004, 7(4): 36.
- [2] 王梦恕.中国铁路、隧道与地下空间发展概况[J].隧道建设,2010,30(4):351.
WANG Mengshu. An overview of development of railways, tunnels and underground works in China[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(4): 351.
- [3] 王梦恕,罗琼.北京地铁浅埋暗挖法施工:复兴门折返线工程[J].铁道工程学报,1988,5(4):107.
WANG Mengshu, LUO Qiong. Construction of Beijing Subway by shallow burying and undermining method—Fuxingmen turn-back line project[J]. Journal of Railway Engineering Society, 1988, 5(4): 107.
- [4] 王善根.上海地铁2号线区间隧道的联络通道及泵站的顶管法施工[J].世界隧道,2000,37(5):18.
WANG Shangen. Top tube construction of link line and pump station of section tunnel on No. 2 Line of Shanghai Metro[J]. Modern Tunnelling Technology, 2000, 37(5): 18.
- [5] 周晓敏,王梦恕.人工地层冻结技术在我国城市地下工程中的兴起[J].都市快轨交通,2004,34(增刊1):77.
ZHOU Xiaomin, WANG Mengshu. AGF Technology rises in the urban underground engineering of China[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2014, 34(S1): 77.
- [6] 周顺华.软弱地层浅埋暗挖施工中管棚法的棚架原理[J].岩石力学与工程学报,2005,24(14):2565.
ZHOU Shunhua. Principles of pipe roof applied to shallow-buried tunnels in soft ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2565.

· 收稿日期:2023-03-31 修回日期:2023-04-26 出版日期:2024-08-10
Received:2023-03-31 Revised:2023-04-26 Published:2024-08-10
· 第一作者:毕湘利,正高级工程师,bixiangli1@163.com
通信作者:吴迪,高级工程师,wd_mtr@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