

黄土地层地铁长大区间初步设计阶段增设车站 线站位及施工方法比选*

周丁恒¹ 朱振烈¹ 高生苗¹ 侯春山¹ 刘 健¹ 邹永祥²

(1. 中铁第五勘察设计院集团有限公司, 102600, 北京; 2. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 100082, 北京)

摘 要 [目的]为优化黄土地层地铁长大区间增设车站的线站位与施工工法,需开展经济性、安全性比选研究。[方法]以西安地铁15号线航天城站—东长安街站区间为背景,分析了地铁长大区间增设车站的影响因素,对增设车站的平面位置、纵断面进行了优化比选;在对比明挖法、暗挖法,以及明挖法+暗挖法等8种施工方法的基础上,从车站规模、使用功能、工程造价、施工风险等方面对比了地下三层全PBA(洞桩逆作)法和地下一、二层明挖法+地下三层CRD(交叉中隔壁)法方案,确定了最优施工方法;对新增车站进行了E3地震作用下的三维时程分析。[结果及结论]地铁长大区间增设车站需综合考虑两端车站、道路规划、风险源等因素,以确定线站位;采用PBA法施工深埋车站时地基承载力难以满足要求,推荐采用地下一、二层明挖法+地下三层CRD(交叉中隔壁)法结合的施工方法;深埋站厅与站台分离车站在E3地震作用下,结构变形率在规定范围内,但局部区域安全度较低,需采取加强构造措施。

关键词 地铁;黄土地层;长大区间;增设车站;线站位;施工方法

中图分类号 U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.20230575

Track Alignment and Construction Method Comparison for Adding Stations to Long Metro Intervals in Loess Strata during Preliminary Design Stage

ZHOU Dingheng¹, ZHU Zhenlie¹, GAO Shengmiao¹, HOU Chunshan¹, LIU Jian¹, ZOU Yongxiang²

(1. China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 102600, Beijing, China; 2. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., 100082, Beijing, China)

Abstract [Objective] To optimize the track-station alignment and construction methods for adding metro stations to long metro intervals in loess strata, a comparative study on economic efficiency and safety is required. [Method] An inter-

val between Hangtiancheng Station and Dongchang'anjie Station on Xi'an Metro Line 15 is taken as the research background, influencing factors related to the additional station in a long metro interval are analyzed, and the horizontal and vertical alignments of the newly added station are optimized and compared. Based on a comparison of eight construction methods including open excavation, mined tunneling, and combinations of open excavation with mined tunneling and so on, two schemes: a three-level underground station using the full PBA (pile-beam-arch) method and a combined method of open excavation for the first and second underground levels with CRD (cross diaphragm method) for the third level are further evaluated. A 3D time-history analysis under E3 seismic loading is conducted for the newly added station. [Result & Conclusion] The additional station in a long metro interval requires comprehensive consideration of adjacent stations, road planning, and risk sources to determine the optimal track-station alignment. When constructing the PBA method deep-buried stations, the foundation bearing capacity is often insufficient. Therefore, the combination of open excavation for the first and second underground levels and CRD for the third underground level construction method is recommended. For deep-buried stations with separate concourse and platform structures under E3 seismic loading, the structural deformation rate remains within the allowable range; however, certain local areas exhibit low safety margins, necessitating the adoption of structural reinforcement measures.

Key words metro; loess strata; long interval; adding station; track-station alignment; construction method

目前,针对地铁初步设计阶段长大区间条件下增设车站的研究较少^[1-2]。鉴于此,本文以西安地铁15号线(以下简称“15号线”)航天城站—东长安街站区间(以下简称“航东区间”)为例,结合近年来西安黄土地层暗挖法地铁车站的相关研究^[3-16],

* 国家重点研发计划项目(2018YFC0808704);中铁第五勘察设计院集团有限公司科研课题(T5Y2018-B03,T5Y2021-B03)

从线路走向、站位选址及施工方法等方面对区间增设车站方案进行了深入分析,并通过三维有限元模拟验证了最优方案下车站的抗震性能。研究结论可为类似地质与工程条件下的地铁车站增设提供参考。

1 15 号线航东区间现状

15 号线航东区间长 2.95 km,区间风井设置于 ZDK38+202.728 处。其中风井地下一层位于东长安街中间绿化带内,并布置有设备用房。区间风井明挖基坑内设置 3 个竖井,深度为 44~48 m,兼作活塞风井、电缆井、疏散通道井。轨行区破除竖井井壁暗挖横通道。风井两侧区间均采用盾构法施工,风井内盾构空推。航东区间纵断面示意图如图 1 所示。

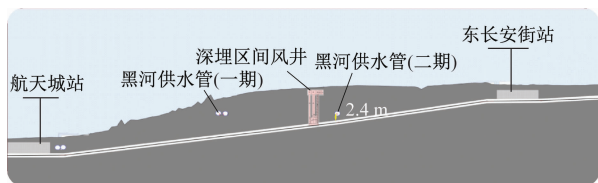


图 1 航东区间纵断面示意图

Fig. 1 Profile diagram of Hangtiancheng Station to Dongchang'an Street Station interval

2 增设车站的线站位选择

2.1 平面位置选择

航东区间共经过 4 个路口,自西向东分别为航天西路、神舟二路、雁塔南路、神舟三路。航天西路路口处上跨立交桥且道路为深路堑,黑河供水管下穿路口,若选择在此处增设车站,新增设的车站同航天城站和东长安街站的站间距分别为 1.0 km、1.95 km,站间距极不均衡,因此航天西路路口增设车站条件不合理;若选择在神舟二路路口处增设车站,新增设的车站同航天城站和东长安街站的站间距分别为 1.55 km、1.40 km,站间距较均衡,且在平面上已避开黑河供水管;若选择在雁塔南路路口处增设车站,因黑河供水管二期工程下穿路口西侧,新增设的车站与航天城站和东长安街站的站间距分别为 2.0 km、0.95 km,站间距极不均衡,因此雁塔南路路口增设车站条件不合理;若选择在神舟三路路口处增设车站,新增设的车站同航天城站和东长安街站的站间距分别为 0.65 km、2.30 km,站间距极不均衡,因此神舟三路路口增设车站条件不合理。综合上述因素分析,增设的车站只能设置于神

舟二路与东长安街路口附近。

2.2 纵断面比选优化

目前,影响航东区间纵断面的主要因素是两端车站埋深,以及对黑河供水管一、二期距离的保护要求。

1) 东长安街站在西安地铁 4 号线(已运营)已预留地下三层换乘节点,该换乘节点处轨面标高为 480.457 m。

2) 航天城站为地下三层岛式车站。航东区间下穿西安地铁 2 号线(已运营)某隧道,且与该隧道竖向净距为 2.0 m。15 号线和 2 号线叠落处 2 号线轨面标高为 415.234 m。航天城站与航东区间接口处轨面标高为 406.390 m。

3) 黑河供水管一、二期为西安市主供水管道,其产权方要求输水管道零沉降。经论证,航东区间与供水管的最小间距控制在 3.5 m 以上才能满足要求。

若将航东区间置于黑河供水管(二期)上方(见图 2),航天城站大里程方向区间的最大坡度为 44‰,东长安街站小里程方向区间的最大坡度为 10.34‰,最大坡度超过限值(一般地段为 30‰左右,困难地段为 35‰),因此不宜采该方案。本文采用航东区间置于黑河供水管下方的方案,以降低航天城站大里程方向区间的坡度。

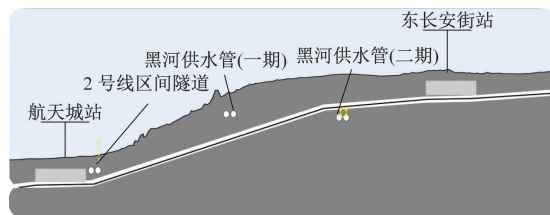


图 2 航东区间置于黑河供水管(二期)上方纵断面图

Fig. 2 Profile diagram of Hangtiancheng Station to Dongchang'an Street Station interval above Heihe water supply pipe (phase II)

根据增设车站后航东区间的平面位置,对该区间纵断面进行优化调整,如图 3 所示。航天城站大里程方向区间的最大坡度为 32.14‰,东长安街站小里程方向区间的最大坡度为 29.67‰,坡度满足要求,且航东区间与黑河供水二期输水管距离为 3.5 m。

3 施工方法比选

结合航天城站轨面埋深 47 m,东长安街南北侧

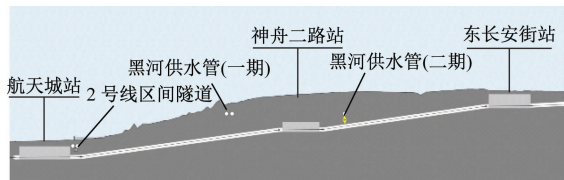


图3 航东区间置于黑河供水管下方纵断面图

Fig.3 Profile diagram of Hangtiancheng Station to Dongchang'an Street Station interval beneath Heihe water supply pipe

布置有多根深埋重力流管线,神舟二路站设置在40 m宽路中绿化带等情况,对拟选用的明挖法、暗挖法、明挖法+暗挖法等3种施工方法进行了详细比选。其中:暗挖法包括中洞法、侧洞法及PBA(洞桩逆作)法(包括洞桩法^[17-20]和柱洞法),明挖法+暗挖法包括地下一层明挖法+地下二、三层暗挖法、地下一、二层明挖法+地下三层CRD(交叉中隔壁)法、地下一、二、三层明挖法+地下四层暗挖法。神舟二路站具体施工方法比选过程如下。

3.1 明挖法

基坑最大开挖深度约50 m,采用明挖法分7层逐级开挖,总建筑面积约29 150 m²。土建投资约4.5亿元,施工风险大,投资高。车站内浪费建筑面积较多,公共区楼扶梯多次转换,使用功能差,基本不具备可实施性,不考虑推荐。

3.2 暗挖法

1) 中洞法:相关案例包括单拱单柱双层式的北京地铁5号线蒲黄榆站,双拱双柱双层式的北京地铁5号线磁器口站和天安门东站,北京地铁10号线劲松站等。中洞法开挖断面多,工序转换多,工期较长,地层沉降较难控制,不考虑推荐。

2) 侧洞法:相关案例包括北京地铁复八线西单站等。侧洞法开挖断面多,工序转换多,工期较长,地层沉降较难控制,不考虑推荐。

3) PBA法:相关案例包括北京地铁复八线天安门西站及东单站、北京地铁6号线朝阳门站、沈阳地铁2号线青年大街站。神州二路站覆土约33 m,覆土较厚,经初步核算中桩桩径为2 m,桩长超过60 m,施工困难,工期较长,投资较高,不考虑采用PBA法。

4) 柱洞法:相关案例包括北京地铁10号线苏州街站、北京地铁5号线崇文门站等。神州二路站覆土为6~10 m,覆土较厚,为满足地基承载力要求,拟采用上部四导洞+下部两大导洞方案。

3.3 明挖法+暗挖法

1) 地下一层明挖法+地下二、三层暗挖法:站台至站厅的提升高度为35 m,总建筑面积为19 410 m²,连接站厅和站台的电梯存在较大性能问题,紧急情况下消防疏散存在可靠性问题,不考虑推荐。

2) 地下一、二层明挖法+地下三层CRD法:车站总建筑面积为24 971 m²,出入口提升高度为18 m,站厅至站台提升高度为27 m,两者提升高度差异较小,空余面积较少,可考虑进行比选。

3) 地下一、二、三层明挖法+地下四层暗挖法:总建筑面积为27 809 m²,出入口提升高度为25 m,站厅至站台提升高度为20 m,明挖法围护桩与站厅层隧道间距较近(约13 m),施工风险大,空余面积较多,投资高,不考虑推荐。

4 柱洞法分析

神舟二路站采用地下两层和地下三层方案(见图4),两种方案均采用“上部四导洞+下部两大导洞”型式,拱顶距离地面分别为32.55 m、25.15 m。经验算,地下两层方案地基承载力不满足要求,地下三层方案修正后地基承载力特征值 $f_a = 860.05 \text{ kPa} > P_k$ (极限荷载) = 784.22 kPa, $1.2f_a = 1 032.06 \text{ kPa} < P_{k,\max}$ (地基反力最大值) = 1 829.85 kPa,不满足要求。

5 方案经济技术对比

分别从车站规模、使用功能、施工方法、工程造价、施工风险、交通疏解、管线迁改及工期对地下一、二层明挖法+地下三层CRD法及地下三层全PBA法两种施工方法进行详细分析,见表1。由表1可见:地下一、二层明挖法+地下三层CRD法在工程造价、施工风险、工期及可实施性方面均有优势,且车站使用功能较好;地下三层全PBA法工程造价高,施工风险大,工期长,且地基承载力需进一步核算。经综合比选,推荐采用地下一、二层明挖法+地下三层CRD法。

6 最优方案抗震性能时程分析

对于深埋站厅与站台分离车站,站厅与站台结构对地震作用的反应存在差异。因此,需对最优方案的抗震性能进行研究分析,从而验证车站结构的抗震可靠性。

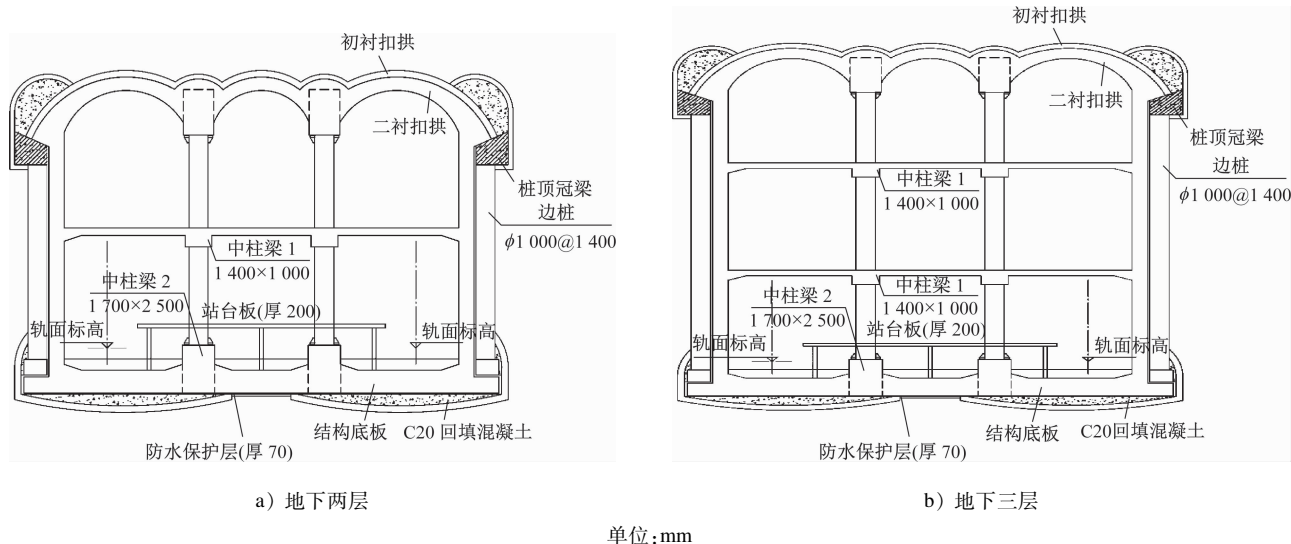


图4 神舟二路站柱洞法方案

Fig.4 PBA column hole method of Shenzhou Road Station

表1 神舟二路站施工方法对比

Tab.1 Comparison of construction methods for Shenzhou Road Station

项目	地下一、二层明挖法+地下三层 CRD 法	地下三层全 PBA 法
车站规模	明挖部分结构尺寸为 135 m×35 m,埋深为 19.5 m;暗挖部分站台全长 171.2 m,侧式站台宽 3.7 m;车站总建筑面积为 2 4971 m ²	车站全长 170 m,标准段宽 21.8 m、高 21.65 m,总建筑面积为 14 118 m ²
使用功能	车站出入口提升高度为 18.5 m,站台至站厅的提升高度为 27.0 m。地面、站厅、站台提升高度分布较均匀,可减小长大自动扶梯带来的空间压缩感与恐惧感,使用功能相对较好	车站出入口提升高度约 40 m,占地面积较大,使用功能一般
工程造价	4.12 亿元	约 6.00 亿元
施工风险	暗挖断面小,施工风险相对较低	暗挖断面大,施工风险高,地基承载力需进一步核算
交通疏解	车站明挖部分沿路中绿化带敷设,交通疏解难度小	交通疏解难度相对较小
管线迁改	管线多位于道路东侧,除路灯线临时废除外无其他管线需要迁改,管线迁改难度小	局部需临时废除地面路灯线,管线迁改难度小
工期	工期较短,约 30 个月,可满足盾构过站要求	工期较长

6.1 有限元模型的建立

建立车站结构-区间-地层三维有限元模型(见图5)。该模型 X 向为车站纵向, Y 向为车站横向, Z 向为竖直方向。在计算模型范围的选取上,依据 GB 50909—2014《城市轨道交通结构抗震设计规范》规定, X 向长度为 494.55 m, Y 向长度为 210.60 m, Z 向高度为 98.00 m。在该有限元模型中,地层采用实体单元,车站中柱采用梁单元,除中柱外其他车站结构均采用板单元;模型 4 个侧面采用黏-弹性人工边界,上表面为自由面,底面采用固定约束。

在该有限元模型中,地层共分为 15 层,主要为杂填土、新黄土、古土壤、老黄土。计算参数按照地勘报告取值。车站结构计算参数见表 2。

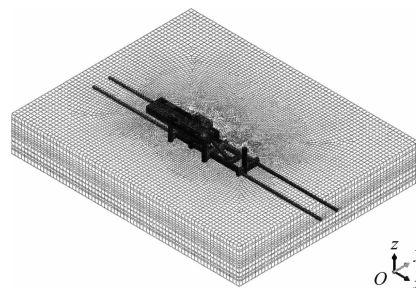


图5 车站结构-区间-地层三维有限元模型

Fig.5 3D finite element model of station structure-interval-stratum

6.2 计算结果分析

对神舟二路站进行了 E3 地震作用下三维时程分析。在 E3 地震荷载作用下,车站各部位结构变

表2 车站结构计算参数取值

Tab.2 Values of station structure calculation parameters

名称	重度/ (kN/m ³)	弹性模量/ GPa	泊松比
主体结构柱(C50 混凝土)	25.0	34.5	0.2
主体结构板、墙(C35 混凝土)	25.0	32.5	0.2
盾构管片(C50 混凝土)	25.0	34.5	0.2

形率分别为:站厅层扩大端 3.65‰,站厅层标准段 1.64‰,区间拱顶、拱腰 1.62‰,区间拱腰、拱底 1.66‰,站台层拱顶、拱腰 1.66‰,站台层拱腰、拱底 2.41‰。神舟二路站设防标准为重点设防类(乙类)。根据上述计算结果可知,车站结构在 E3 地震作用下,结构变形率小于规定的 4‰要求,满足 GB 50909—2014 中“性能要求Ⅱ”的相关要求。

7 结论

1) 地铁长大区间增设车站需要综合考虑区间两端车站情况、道路规划、沿线重要风险源、线路坡度限制等因素的影响,同时需对线路平面、纵断面进行合理优化,实现增设车站线站位的合理设置。

2) 在黄土地层条件下,深埋车站采用 PBA 法时,若地基承载力不足,可采用明挖法与暗挖法结合的施工方法。该方案需实现站厅层与站台层的分离,同时综合考虑建筑面积、建筑高度、消防疏散及施工风险等因素,以合理确定站厅层的层数。

3) 综合分析车站结构-区间-地层三维时程计算结果可知,车站结构变形率和层间位移角均满足限值要求,表明深埋站厅和站台分离式车站的抗震性能符合标准要求。但局部区域(如明挖站台层扩大端)的结构变形率安全裕度较低,需加强抗震构造措施。

参考文献

- [1] 冷晓雨,杨思谋. 地铁运营线上加站整体解决方案的设计研究[J]. 广东土木与建筑, 2015, 22(7): 47.
LENG Xiaoyu, YANG Simou. Design and study on the total solution of adding station in the operating metro line[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2015, 22(7): 47.
- [2] 阮小赛,刘晓毅. 既有成型盾构隧道上新增明挖车站施工技术[J]. 建筑技术, 2019, 50(11): 1284.
RUAN Xiaosai, LIU Xiaoyi. Open excavation technique for station above exiting finished shield tunnel[J]. Architecture Technology, 2019, 50(11): 1284.
- [3] 任建喜,曹西太郎. PBA 法地铁车站施工诱发地表变形规律研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(9): 88.
REN Jianxi, CAO Xitailang. Research on the surface settlement of subway station induced by PBA construction method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(9): 88.
- [4] 任建喜,刘田田,云梦晨,等. 边桩对 PBA 法黄土车站地表变形的影响分析[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(1): 109.
REN Jianxi, LIU Tiantian, YUN Mengchen, et al. Analysis of the influence of side-pile on the surface deformation of loess station by PBA method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(1): 109.
- [5] 王博. 黄土地区地铁车站 PBA 工法导洞形式优化分析[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(4): 117.
WANG Bo. Optimization analysis of heading form of PBA construction method for metro station in loess area[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(4): 117.
- [6] 赵文强,吴政. 黄土地区 PBA 工法地铁车站施工方案比选与分析[J]. 低温建筑技术, 2021, 43(1): 137.
ZHAO Wenqiang, WU Zheng. Comparison and analysis of subway station construction schemes using PBA method loess area[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2021, 43(1): 137.
- [7] 杨锋. 西安某地铁车站洞桩法施工的地表变形规律数值模拟分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(12): 43.
YANG Feng. Numerical simulation analysis of surface deformation law in certain Xi'an metro station with PBA construction[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(12): 43.
- [8] 陈武. 黄土地层洞桩法暗挖地铁车站设计施工关键技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
CHEN Wu. Key techniques for design and construction of metro station in loess strata using PBA method [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [9] 冯晓波. 广济街地铁车站 PBA 法施工地表沉降规律与控制技术[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
FENG Xiaobo. Surface deformation law and control technology of fully excavated construction of Guangjijie Subway Station by PBA method [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [10] 郭亮. 黄土地区地铁暗挖车站设计方案研究[J]. 铁道建筑, 2019, 59(12): 65.
GUO Liang. Research on design scheme of subway station excavated by mining method in loess area[J]. Railway Engineering, 2019, 59(12): 65.
- [11] 汪珂,刘奉银,李储军,等. PBA 工法暗挖关键步序对黄土地区车站地表沉降影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2022, 20(4): 182.
WANG Ke, LIU Fengyin, LI Chujun, et al. Influence of key steps of PBA underground excavation on land surface subsidence in loess area[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2022, 20(4): 182.
- [12] 李储军. 适用黄土暗挖车站的改进 PBA 工法研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(6): 97.
LI Chujun. Research on adaptability of PBA improved construction

- tion method for underground station in loess area[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(6): 97.
- [13] 孟立民, 王珂, 冯澄宇, 等. 富水厚砂层地铁车站洞桩法施工降水关键技术及监测分析[J]. 现代城市轨道交通, 2022(11): 42.
- MENG Limin, WANG Ke, FENG Chengyu, et al. Key technique of dewatering and monitoring analysis for pile-beam-arch-method (PBA method) construction of metro station in water-rich thick sand strata[J]. Modern Urban Transit, 2022(11): 42.
- [14] 张华, 商学旋, 雷奇, 等. 黄土区毗邻风道初期支护结构 PBA 洞群暗挖施工安全控制研究[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(21): 44.
- ZHANG Hua, SHANG Xuexuan, LEI Qi, et al. Research on safety control of the concealed excavation construction for PBA tunnel group adjacent to the air-duct's primary support structure in loess area[J]. Construction Technology, 2022, 51(21): 44.
- [15] 陈箐芮. 黄土地区洞桩法地铁车站扣拱施工力学特性研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2022.
- CHEN Qingrui. Research on mechanical properties of pile-beam-arch subway station buckle arch construction in loess area[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2022.
- [16] 杨康. 黄土地层洞桩法地铁车站沉降规律与力学行为研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2022.
- YANG Kang. Study on settlement law and mechanical behavior of pile-beam-arch method subway station in loess stratum[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2022.
- [17] 张振营, 孙玮泽. 地铁车站洞桩法暗挖施工对地表沉降及邻近构筑物变形的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(11): 14.
- ZHANG Zhenying, SUN Weize. Surface settlement and deformation law of existing structure influenced by metro station constructed with PBA method[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(11): 14.
- [18] 冯利华, 张洪军, 陈佳蕊, 等. 洞桩法在北京地铁 12 号线苏州桥站的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(6): 112.
- FENG Lihua, ZHANG Hongjun, CHEN Jiarui, et al. Application of hole pile method to Suzhouqiao Station on Beijing Metro Line 12[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(6): 112.
- [19] 孙玉辉, 张子真, 陈昌彦, 等. 单层洞桩法暗挖车站边桩结构受力及变形特征研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(9): 30.
- SUN Yuhui, ZHANG Zizhen, CHEN Changyan, et al. Study on stress and deformation characteristics of side pile structure of station excavated by single-storey hole-pile method[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(9): 30.
- [20] 张洪军, 冯利华, 周翠红, 等. 移动装配式模架在地铁站洞桩法施工中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(9): 157.
- ZHANG Hongjun, FENG Lihua, ZHOU Cuihong, et al. Application of movable assembled formwork in construction of metro station by PBA[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(9): 157.
- 收稿日期:2023-05-24 修回日期:2023-07-23 出版日期:2025-06-10
Received:2023-05-24 Revised:2023-07-23 Published:2025-06-10
• 第一作者:周丁恒,高级工程师,316517398@qq.com
通信作者:朱振烈,高级工程师,2479525642@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 124 页)

- [20] 何川, 封坤. 大断面盾构隧道结构整体化分析方法[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(11): 1827.
- HE Chuan, FENG Kun. Integrated analysis method for shield tunnel structure with large cross-section[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(11): 1827.
- Received:2023-04-29 Revised:2023-06-28 Published:2025-06-10
• 第一作者:张逸飞,硕士研究生,helloworld9984@163.com
通信作者:代聪,高级工程师,dc_526@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

• 收稿日期:2023-04-29 修回日期:2023-06-28 出版日期:2025-06-10