

# 富水砂层中盾构始发穿越既有地铁线路的结构稳定性研究<sup>\*</sup>

麻凤海 张强强

(大连大学建筑工程学院, 116622, 大连)

**摘要** [目的] 富水砂层地质条件下,新建地铁线路盾构始发穿越既有地铁线路时,对既有地铁线路结构稳定性的研究较为鲜见,需总结类似工程的相关规律。[方法] 以新建的郑州地铁 7 号线黄河迎宾馆站—英才街站区间盾构始发穿越既有地铁 2 号线结构工程为依托,根据实际工况采用有限元软件 MIDAS GTS NX 建立了施工区间的三维数值模型,并利用软件的结果提取功能得到了该工程对应模型的模拟结果。选取现场 2 个监测点位,将 2 个测点的现场实测值与模拟计算值进行对比,证实了该模型的准确性。在此基础上,进一步研究了盾构始发穿越、一般下穿施工两种穿越方式下对既有地铁线路结构稳定性的影响,以及始发洞门与既有地铁结构间竖向距离  $d$  的 4 个取值对既有地铁线路结构稳定性的影响。[结果及结论] 所建三维模型在一定程度上可反映实际工况。在既有地铁线路结构、材料、加固方式等因素均不变的情况下,既有地铁线路结构的稳定性因穿越方式的不同而有所差异,与一般下穿施工相比,采用盾构始发下穿方式时对既有地铁线路结构的影响较小。采用盾构始发下穿方式时, $d$  的取值不同,对既有地铁线路结构稳定性的影响有较大差异。 $d=2.00$  m 对既有地铁线路结构的影响较小,工程成本也较小。建议在工程条件允许下采用盾构始发下穿方式,且推荐  $d$  值取 2.00 m。

**关键词** 地铁;盾构施工;富水砂层;盾构始发穿越;结构稳定性

**中图分类号** U211.2

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.04.028

## Study on Structural Stability of Shield Launching and Crossing Existing Metro Line in Water-rich Sandy Stratum

MA Fenghai, ZHANG Qiangqiang

(College of Civil Engineering and Architecture, Dalian University, 116622, Dalian, China)

**Abstract** [Objective] In geological conditions with water-rich sandy stratum, research on the structural stability of existing metro lines with new metro line shield launching crossing is

relatively scarce. It is essential to summarize relevant patterns for similar projects. [Method] Leveraging the structural engineering of shield launching crossing the existing Line 2 at Huanghe Yingbinguan Sta.-Yingcai Road Sta. interval on Zhengzhou Metro Line 7 as basis, according to actual working conditions, a 3D numerical model of the constructed interval is established using finite element software MIDAS GTS NX, and simulation results for the project corresponding model are obtained using the software result-extraction function. Two monitoring points are selected at the site, and the field-monitored values of them are compared with the simulated values to confirm the model accuracy. On this basis, the influence on existing metro line structural stability under shield launching and conventional under-passing two tunneling methods are further studied. The influence of four values of the vertical distance  $d$  between launching portal and existing metro structure is explored. [Result & Conclusion] The established 3D model, to a certain extent, reflects the actual working conditions. Keeping factors such as the structure, material, and reinforcement method of the existing metro line unchanged, the structural stability of existing metro line varies depending on the tunneling methods. Compared to conventional under-passing construction method, the shield launching crossing causes less influence on the existing metro line structure. When this method is adopted, different  $d$  values cause different degrees of impact on existing metro line structural stability. In the case of  $d=2.00$  m, its influence on existing metro line structure is minimal, and the engineering cost is relatively low. It is recommended to adopt shield launching under-passing method under permissible engineering conditions, and the suggested value is  $d=2.00$  m.

**Key words** metro; shield construction; water-rich sandy stratum; shield launching and crossing; structural stability

随着城市轨道交通的发展,新建地铁线路穿越工程的数量逐年攀升。穿越工程施工难免对既有地

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(51474045,51174038)

铁线路结构的稳定性形成影响,可能会危及地铁的正常运营及周边环境的安全<sup>[1]</sup>。国内外许多学者在新建地铁线穿越既有地铁线施工领域进行了大量的分析研究<sup>[2]</sup>。

针对穿越工程的研究虽多,但盾构“零距离”始发穿越既有地铁线路结构的研究<sup>[3-5]</sup>较为少见。本文主要依托郑州地铁 7 号线(以下简称“7 号线”)黄河迎宾馆站—英才街站区间(以下简称“黄英区间”)盾构始发穿越既有郑州地铁 2 号线(以下简称“2 号线”)工程,对现场进行了监测。同时,采用 MIDAS GTS NX 软件,模拟分析盾构始发穿越对既有地铁线路结构稳定性的影响,总结相关规律,以期为本工程及类似地质或工况的设计施工项目提供参考。

### 1 工程概况及地质条件

#### 1.1 工程简介

7 号线黄英区间左线设计起点里程为 ZDK1+663.764,终点设计里程为 ZDK2+418.680;其右线起于 YDK1+660.712,止于 YDK2+418.680。左、右线总长度为 1 512.799 m。该盾构法施工的管片内径为 5.5 m,外径为 6.2 m,厚度为 0.35 m,采用 C50 混凝土预制件。7 号线黄英区间与既有 2 号线黄河迎宾馆站的纵断面位置关系如图 1 所示。

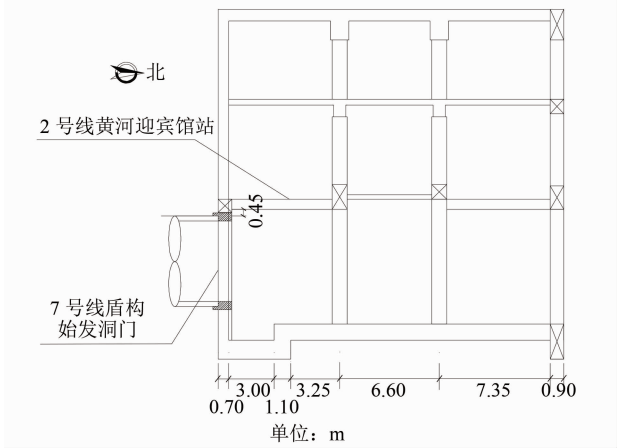


图 1 7 号线黄英区间与既有 2 号线黄河迎宾馆站的纵断面位置关系图

Fig. 1 Longitudinal profile location relation diagram of Line 7 Huang-Ying interval and existing Line 2 Huanghe Yingbingguan Station

盾构从既有 2 号线黄河迎宾馆站负三层换乘节点内始发,始发洞门与既有 2 号线车站结构的净距为 0.45 m。施工时采用水平冷冻法加固,加固区域采用环形布置,端头处的加固长度为 3.50~4.54 m,

加固区域沿线路长 12 m,环形区域的加固厚度为 2 m。水平冷冻法加固后土层的受拉、受压、弯曲强度均需达到相应规定。

#### 1.2 工程地质条件

由地质勘探资料可知,该工程位于黄河冲洪泛滥平原(I 区)内,地形基本无起伏,地面标高为 89.48~90.14 m。黄英区间隧道从左到右依次穿越细砂层、粉砂、黏质粉土及粉质黏土层。隧道下卧于细砂层和粉砂层中,地基承载力分别为 270 kPa 和 190 kPa。地下水位埋深为 8.3 m。因此,盾构始发处为全断面富水砂层,属稳定性较差场地,其土层的主要物理力学指标如表 1 所示。

表 1 7 号线黄英区间土层的主要物理力学指标

Tab. 1 Main physical and mechanical indexes of soil layer in Line 7 Huang-Ying interval

土层名称	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	渗透系数/ (m/d)	弹性模 量/MPa	泊松 比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
杂填土	17.0	0.5	3.2	0.30	9	5.0
黏质粉土	18.6	0.5	6.5	0.40	13	23.3
粉质黏土② <sub>22</sub>	19.0	0.4	6.7	0.45	20	9.3
粉砂	20.0	7.0	15.0	0.35	3	28.0
细砂	20.0	15.0	35.0	0.30	0	32.0
粉质黏土② <sub>33</sub>	19.2	0.4	6.7	0.45	20	9.3

### 2 三维数值模型的建立

本文采用 MIDAS GTS NX 软件建立三维有限元模型。依据该工程的施工测量数据,以及现场基础结构、附属建筑分布情况,确定模型的三维尺寸为 90 m(7 号线沿线方向)×90 m(2 号线沿线方向)×45 m(埋深方向),如图 2 所示。

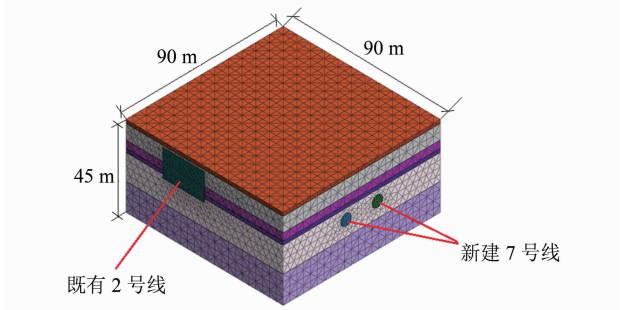


图 2 7 号线黄英区间的三维有限元模型

Fig. 2 Three-dimensional finite element model of Line 7 Huang-Ying interval

为保证所建模型运算顺畅,考虑土体及结构本身的多样性,本文将周围岩土视为弹塑性材料,基于

摩尔-库伦模型进行计算;模型四周采用法向约束,上部无约束,底部固定。既有 2 号线结构和土层采用三维建模;隧道管片采用板单元进行模拟。既有 2 号线车站主体和车站柱的相关材料参数如下:采用 C50 混凝土,弹性模量为 34.5 MPa,泊松比为 0.2,重度为 25 kN/m<sup>3</sup>。

在盾构隧道施工前,该项目已完成了换乘节点的建设,冻结加固措施也已实施到位,故本文不考虑相应施工对既有 2 号线结构的扰动,仅研究 7 号线黄英区间盾构始发穿越施工对加固后既有 2 号线结构稳定性的影响。

图 3 为 7 号线黄英区间的竖向位移图。由图 3 可知:新建 7 号线始发穿越既有 2 号线后,既有 2 号线结构竖向位移变形整体呈现“双凹槽型”,总体表现为隧道上方沉降、下部隆起;始发洞门正上方、既有 2 号线结构负二层底板处的竖向位移达到最大值(16.1 mm),该值在风险控制标准范围内。

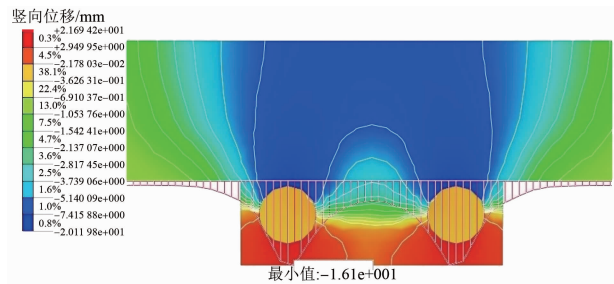


图 3 7 号线黄英区间竖向位移云图

Fig. 3 Vertical displacement of nephogram Line 7 Huang-Ying interval

### 3 模拟数据与实测数据的对比分析

该盾构施工位置处于富水砂层地质条件下,且距离既有 2 号线结构负二层中板底面仅 0.45 m,施工风险较大。为安全起见,对该盾构施工整个过程进行了实时监测,监测内容包括地面沉降、车站结构竖向位移、车站结构水平位移及轨道结构变形等。依据 GB 50911—2013《城市轨道交通工程监测技术规范》,在 7 号线盾构始发洞门上方、既有 2 号线结构处布置了监测点,如图 4 所示。图 4 中:在盾构始发洞门上方、既有 2 号线结构位置处依次布置了 10 个沉降监测点位(DBC-1-2 至 DBC-1-11)。取 7 号线左线中心线与 2 号线结构交点(测点编号为 DBC-1-5)、7 号线右线中心线与 2 号线结构交点(测点编号为 DBC-1-9)的实际监测值,并在 MIDAS GTS NX 结果中依次提取这 2 个位置处的模拟计算结果。

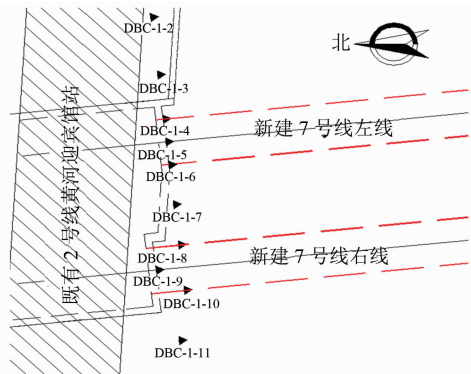


图 4 现场监测点布置图

Fig. 4 Layout diagram of site monitoring points

把盾构施工过程按管片拼接分为 20 步,图 5 为测点 DBC-1-5、DBC-1-9 处竖向位移模拟值与实测值的对比情况。由图 5 可知:①7 号线左线开挖(施工步为第 1 步和第 2 步)时,测点 DBC-1-5 处竖向位移大幅增加,其模拟计算得到的最大值达 -16.03 mm;后续盾构施工中,其竖向位移仅发生轻微变化。②测点 DBC-1-9 处在左线施工时的竖向位移接近于 0;在实施第 11 步(即右线洞门始发时),其模拟计算得到的竖向位移为 -21.18 mm,后续施工步引起的竖向位移变化较小。③盾构施工全过程中,实测的最大竖向位移发生在测点 DBC-1-5 处,达到 -24.80 mm。

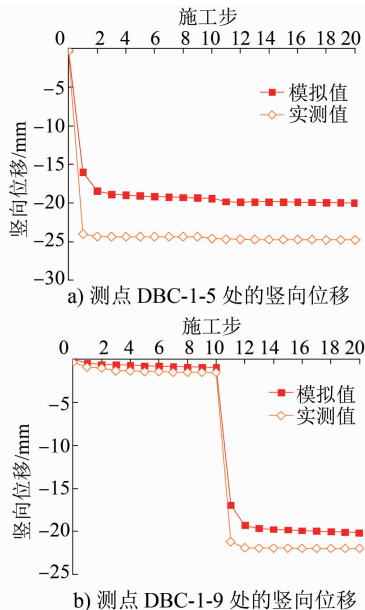


图 5 测点 DBC-1-5、DBC-1-9 处竖向位移模拟值与实测值的对比情况

Fig. 5 Comparison between simulated and field-measured vertical displacement values at measuring points DBC-1-5 and DBC-1-9



综上所述,在 7 号线盾构始发穿越既有 2 号线的结构施工过程中,洞门始发位置处既有地铁线路结构受到的影响最大,易对既有地铁线路的结构稳定性造成影响。随着盾构施工向前推进,结构的竖向位移波动幅度较小。虽然实测值与模拟值间存在差异,但仍可看出随着盾构的推进,测点 DBC-1-5、DBC-1-9 处模拟值与实测值的竖向位移曲线整体趋势基本一致,由此认为该模型可在一定程度上反映实际工况。基于此,本文就 7 号线盾构始发对 2 号线的结构稳定性作进一步分析研究。

## 4 7 号线盾构始发对 2 号线结构稳定性的影响

### 4.1 不同穿越方式对既有 2 号线结构稳定性的影响

7 号线盾构从既有 2 号线黄河迎宾馆站负三层换乘节点内始发,始发洞门与既有 2 号线负二层中板底面的竖向距离仅为 0.45 m。本文进一步研究在既有 2 号线结构、材料、加固方式等多种因素不变的情况下,仅改变施工方式,即:对一般下穿施工、盾构始发穿越两种不同穿越方式进行分析。两种穿越方式下既有 2 号线结构竖向位移模拟值与现场实测值的对比情况如图 6 所示。

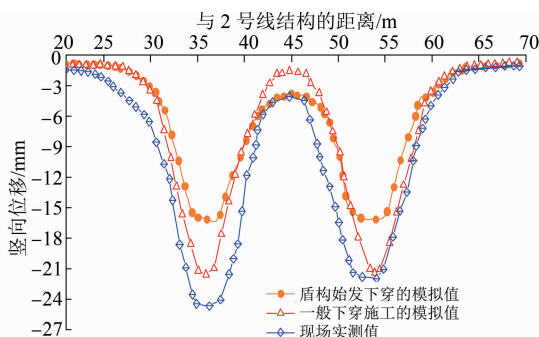


图 6 两种穿越方式下既有 2 号线结构竖向位移模拟值与现场实测值的对比

Fig. 6 Comparison between the vertical displacement simulated and field-measured values of in two crossing modes existing Line 2 structure

由图 6 可知:两种穿越方式下,既有 2 号线结构竖向位移变化的趋势大体相同;采用盾构始发下穿时,其最大竖向位移模拟值为 -16.11 mm;采用一般下穿施工时,其最大竖向位移模拟值为 -21.54 mm;与一般下穿施工相比,盾构始发下穿的竖向位移模拟值明显减小。

综上所述,在既有地铁线路结构、材料及加固方式等多种因素均相同的情况下,两种穿越方式对既

有地铁线路结构稳定性的影响有一定差异,盾构始发下穿比一般下穿施工引起既有地铁线路结构竖向位移小。

### 4.2 始发洞门与既有地铁线路结构间不同竖向距离对既有 2 号线结构稳定性的影响

在既有地铁线路结构、材料、加固方式均不变的情况下,分析 7 号线采用盾构始发下穿时,始发洞门与既有 2 号线结构负二层中板底面的竖向距离  $d$  取不同数值(分别为  $d=0.45$  m、 $d=1.00$  m、 $d=2.00$  m、 $d=4.00$  m)的情况下,盾构始发下穿对既有 2 号线结构的稳定性影响。图 7 为  $d$  的四个取值下既有 2 号线竖向位移模拟值与现场实测值的对比情况。

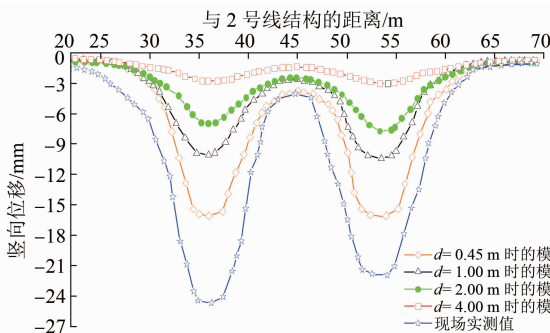


图 7  $d$  的四个取值下既有 2 号线竖向位移模拟值与实测值的对比情况

Fig. 7 Comparison of existing Line 2 vertical displacement simulated and field-measured values under four values of  $d$

由图 7 可知:在不同的  $d$  下,既有 2 号线结构的竖向位移模拟值曲线走向大体一致,均呈现双凹槽状; $d=4.00$  m 时,其竖向位移最小(竖向位移模拟值为 -3.03 mm); $d=0.45$  mm 时,其竖向位移最大(竖向位移模拟值为 -16.11 mm); $d=1.00$  m、 $d=2.00$  m 时,其竖向位移模拟值分别为 -10.41 mm、-7.58 mm。

综上所述,既有地铁线路结构的最大竖向位移随  $d$  的增大而减小,当  $d=4.00$  m 时,采用盾构始发下穿方式,其对既有地铁线路结构的影响可忽略不计。但增大  $d$  会造成前期换乘节点施工困难,工程成本剧增,故建议在工程允许条件下采用盾构始发下穿方式,推荐采用  $d=2.00$  m。

## 5 结语

1) 基于本文所建三维模型得到竖向位移的模拟值与现场实测值在走向趋势上大体相同,由此可认为所建模型可在一定程度上反映实际工况。

2) 在既有地铁线路结构、材料、加固方式等因素

均不变的情况下,既有地铁线路结构的稳定性因穿越方式的不同而有所差异,与一般下穿施工相比,采用盾构始发下穿时对既有地铁线路结构的影响较小。

3) 采用盾构始发下穿方式情况下,始发洞门与既有地铁线路结构间的竖向距离  $d$  不同时,对既有地铁线路结构稳定性的影响有较大差异。 $d=2.00\text{ m}$  对既有地铁线路结构的影响较小,工程成本也较小。故建议在工程条件允许情况下,施工采用盾构始发下穿方式, $d$  取  $2.00\text{ m}$ 。

## 参考文献

- [1] 孙会良, 胡盛斌, 肖鹏飞, 等. 地铁曲线接收段盾构近距离斜穿既有车站施工风险控制: 以南宁轨道交通 5 号线下穿既有 1 号线广西大学站为例[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(7): 1206.
- SUN Huiliang, HU Shengbin, XIAO Pengfei, et al. Construction risk control of a metro shield tunnel in a curved receiving section obliquely crossing an adjacent existing station: a case study on Nanning Rail Transit Line 5 crossing underneath Guangxi University Station on existing Line 1[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(7): 1206.
- [2] 刘士海, 贺美德, 刘继尧. 新建隧道斜交下穿既有盾构隧道的变形分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 263.
- LIU Shihai, HE Meide, LIU Jiayao. Deformation analysis on the existing shield tunnel obliquely crossed by new tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(1): 263.
- [3] 许有俊, 孟贞, 李志成, 等. 盾构隧道近距下穿既有地铁车站
- (上接第 149 页)
- [4] 高林, 郭凯旋, 肖娴, 等. 预制装配式型钢混凝土剪力墙试验对比研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(4): 59.
- GAO Lin, GUO Kaixuan, XIAO Xian, et al. Comparative study of experiments on the prefabricated section steel concrete shear walls[J]. China Concrete and Cement Products, 2020(4): 59.
- [5] 淡浩, 吴体, 肖承波, 等. 预制混凝土构件结合面抗剪性能试验及分析[J]. 建筑科学, 2020, 36(3): 100.
- DAN Hao, WU Ti, XIAO Chengbo, et al. Test and analysis on shear behavior of precast component interface[J]. Building Science, 2020, 36(3): 100.
- [6] 杨勇, 陈阳, 张锦涛, 等. 部分预制装配型钢混凝土构件斜截面抗剪承载力试验研究[J]. 工程力学, 2019, 36(4): 109.
- YANG Yong, CHEN Yang, ZHANG Jintao, et al. Experimental study on the oblique section shear capacity of partially prefabricated steel reinforced concrete(PPSRC) members[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(4): 109.
- [7] 米鹏, 谭平, 张亚飞, 等. 装配式容差剪力墙及其推复性能分析[J]. 土木工程学报, 2021, 54(5): 46.
- MI Peng, TAN Ping, ZHANG Yafei, et al. Pushover analysis of the precast tolerance concrete shear wall[J]. China Civil Engi-

neering Journal, 2021, 54(5): 46.

XU Youjun, MENG Zhen, LI Zhicheng, et al. Study on settlement control measures for shield tunnel closely crossing underneath existing subway station[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science), 2018, 49(6): 1044.

- [4] 张庆闯, 戴志仁, 时亚昕, 等. 新建隧道近接穿越既有运营地铁隧道关键技术[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(6): 58.
- ZHANG Qingchuang, DAI Zhiren, SHI Yaxin, et al. Key technologies for newly-built tunnel tunnelling through operated tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(6): 58.
- [5] 李世辉. 新建车站零距离穿越既有地铁车站的施工保护措施及效果分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(4): 81.
- LI Shihui. Protection measures and effect analysis of new station construction crossing the existing subway station at zero distance[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(4): 81.
- [6] 江华, 张晋勋, 江玉生, 等. 新建盾构隧道近距离下穿既有车站诱发结构变形特征研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1): 159.
- JIANG Hua, ZHANG Jinxun, JIANG Yusheng, et al. Characteristics of existing station deformation induced by the approaching construction of a new underlying shield tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(1): 159.
- 收稿日期:2021-09-30 修回日期:2022-01-05 出版日期:2024-04-10  
Received:2021-09-30 Revised:2022-01-05 Published:2024-04-10  
· 通信作者:麻凤海,教授, xkb@vip.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

neering Journal, 2021, 54(5): 46.

- [8] 杜修力, 刘洪涛, 路德春, 等. 装配整体式地铁车站侧墙底节点抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(4): 38.
- DU Xiuli, LIU Hongtao, LU Dechun, et al. Study on seismic performance of sidewall joints in assembled monolithic subway station[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(4): 38.
- [9] 张锡治, 李军委, 李福林, 等. 接缝处理方式对复合齿槽连接预制剪力墙抗震性能的影响[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(6): 575.
- ZHANG Xizhi, LI Junwei, LI Fulin, et al. Effect of joint treatment on the seismic performance of prefabricated shear wall with composite alveolar[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2021, 54(6): 575.

- 收稿日期:2022-10-19 修回日期:2023-04-10 出版日期:2024-04-10  
Received:2022-10-19 Revised:2023-04-10 Published:2024-04-10  
· 作者:周华海,高级工程师,18075532@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