

装配式车站结构榫槽式预应力螺栓接头抗弯性能

臧延伟¹ 刘长宝¹ 章天杨¹ 严佳佳¹ 王博川² 狄宏规²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 311122, 杭州;

2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海)

摘 要 [目的]合理的接头结构对车站安全至关重要,因此有必要研究附加预应力措施对装配式车站结构接头抗弯性能的提升效果。[方法]建立了采用预应力螺栓连接的榫槽式预应力接头精细化有限元模型,通过四点弯曲的加载方式,分析了不同螺栓设计参数对接头抗弯承载性能的影响。[结果及结论]在弯矩加载过程中,采用预应力螺栓连接的接头构件表现出较好的整体性,凹侧构件受拉侧手孔位置的应力集中引起了附近混凝土的受拉破坏;预应力螺栓接头构件的竖向位移及接缝张开量均随着螺栓直径、螺栓长度的增加而逐渐减小,其减小幅度随着螺栓直径、螺栓长度的增大而逐渐递减;设置螺栓预紧力能够显著提升接头的抗弯能力,其对接缝张开量的变形控制效果十分明显;提出了预应力螺栓直径、长度、预紧力等设计参数的优选建议。

关键词 地铁; 车站; 装配式结构; 预应力螺栓接头

中图分类号 U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.027

Flexural Performance of Mortise-tenon Prestressed Bolt Joints in Prefabricated Station Structure

ZANG Yanwei¹, LIU Changbao¹, ZHANG Tianyang¹, YAN Jiajia¹, WANG Bochuan², DI Honggui²

(1. Power China Huadong Engineering Co., Ltd., 311122, Hangzhou, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

Abstract [Objective] The rationality of joint structures is crucial for station safety. Therefore, it is necessary to study the enhancement effect of additional prestressing measures on the flexural performance of prefabricated station structure bolt joints. [Method] A refined finite element model of mortise-tenon prestressed joints using prestressed bolts is established. Through four-point bending loading, the influence of different bolt design parameters on the flexural bearing capacity of joints is analyzed. [Result & Conclusion] During the bending moment loading process, joints connected by prestressed bolts exhibit good overall integrity. Stress concentration on the hand-

hole position on the concave-side component tension side leads to tensile failure of nearby concrete. The vertical displacement and joint-seam opening of prestressed bolt joints gradually decrease with increasing bolt diameter and length, and the reduction amplitude decreases as the bolt diameter and length increase. Setting bolt preload force can significantly improve the flexural capacity of the joints, with a noticeable effect on controlling the deformation of joint-seam opening. Recommendations to optimize design parameters for prestressed bolt diameter, length and preload force are proposed.

Key words metro; station; prefabricated structure; prestressed bolt joint

建设城市轨道交通是提高城市居民出行效率、缓解交通拥堵情况的有效措施之一。截至2022年底,我国城市轨道交通运营总里程首次突破1万km,其中地铁运营里程达到总里程的78%^[1-2]。目前,我国大部分地铁车站的钢筋混凝土结构一般采用全现浇施工技术,而这种施工技术存在粉尘污染严重、模板材料消耗大、工程质量控制难等缺点^[3]。近年来,预制装配建造技术已逐渐应用于地铁车站,该技术不仅能保证混凝土质量,还能缩短施工时间、减少污染,是推动轨道交通产业向智慧化、绿色化方向发展的新途径。

对于装配式车站结构,接头是最为薄弱的部位,其力学性能在很大程度上制约着结构整体的承载能力。1995年的日本阪神大地震中,大开地铁车站的顶板与中柱接头结构最先发生破坏,从而造成大面积坍塌破坏^[4]。因此,合理的接头结构对车站安全至关重要。

为了探究预制装配地铁车站科学合理的接头形式,学者们通过模型试验、足尺试验、数值模拟等多种方法进行了研究。文献[5]搭建了1:25整环地铁车站模型,通过振动台试验对比分析了装配式和现浇式地铁车站结构的抗震性能差异,并给出了接头最易发生破坏的薄弱部位。文献[6-7]采用立

坑式反力加载试验系统对榫槽接头进行了足尺试验研究,分析了不同的受力条件、榫槽尺寸、接缝填充材料和范围等工况对接头抗弯性能的影响。文献[8]采用整体式模型考虑钢筋与混凝土的关系,假定混凝土与钢筋完全黏结且不产生相对滑移,模拟了不同压弯作用下单榫连接节点各部位的应力变化及结构开裂情况。文献[9]借助 Voigt 并联分析模型对榫槽接头部位的注浆料、混凝土、钢筋骨架等材料组合成的复合材料进行了等效建模,并与试验数据进行了对比验证。文献[10]对深圳地铁采用的型钢-混凝土组合接头进行了抗弯足尺试验,总结了接头构件钢筋应力变化、裂缝分布及破坏状态规律。文献[11]对比分析了采用不同接头形式(铰接、变刚度、刚性、现浇)的整环车站数值模型中各构件的内力和变形规律,讨论了高拱和坦拱结构对接头承载性能的影响。

已有相关研究大多仅仅关注接头本身的尺寸参数及构造形式对其受力性能的影响,往往忽略了附加预应力措施对装配式车站结构接头抗弯承载能力及车站结构整体性的提升效果。本文基于某地铁车站装配式结构单榫长接头尺寸参数^[7],将凹、凸侧构件通过高强预应力螺栓连接,借助 ABAQUS 软件建立预应力螺栓接头的精细化有限元模型,分析预应力螺栓不同设计参数对接头抗弯承载性能的影响,并给出了优选方案。本文研究可为类似装配式车站接头的设计提供参考。

1 预应力螺栓接头模型

假定装配式地铁车站结构侧墙厚度为 0.7 m,预应力螺栓接头模型试件沿车站纵向截取 0.8 m,沿竖向截取 2.7 m。榫槽部位的榫头长度和深度均为 200 mm,榫宽为 300 mm,本文不考虑接缝间注浆的影响。以螺栓长度为 600 mm 的工况为例,预应力螺栓接头构件有限元模型及网格划分示意图如图 1 所示。

1.1 材料本构模型

混凝土本构采用混凝土塑性损伤模型,其采用各向同性弹性损伤模型,并结合受拉或受压塑性来模拟混凝土的非弹性行为,同时考虑了由于拉、压塑性应变导致的弹性刚度退化,以及循环荷载作用下的刚度恢复^[12]。因此,塑性损伤模型可以模拟复杂的混凝土力学特性,且适用于混凝土的各种荷载分析,符合本次试验情况的要求。

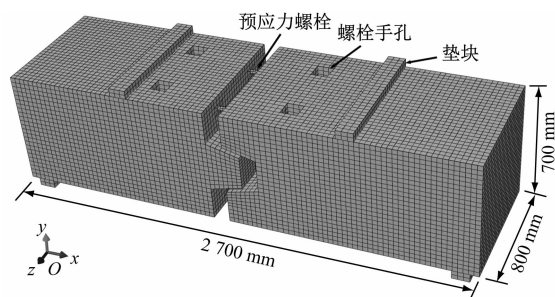


图1 预应力螺栓接头构件有限元模型及网格划分示意图
Fig. 1 Diagram of finite element model and mesh division of a prestressed bolt joint component

C50 混凝土塑性损伤模型的主要力学性能参数取值如表 1 所示。其中: σ_b/σ_c 为双轴极限抗压强度与单轴受压极限强度之比; K_c 为拉伸子午面上与压缩子午面上的第二应力不变量之比。

表 1 C50 混凝土塑性损伤模型主要力学性能参数

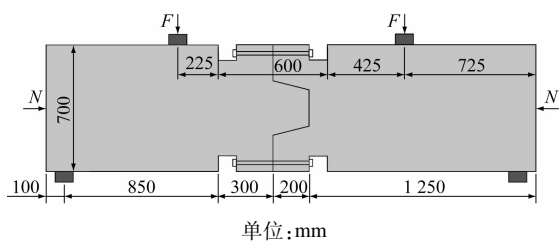
Tab. 1 Main mechanical property parameters of C50 concrete plastic damage model

参数	取值
密度/(kg/m ³)	2 500
弹性模量/GPa	34.5
泊松比	0.2
膨胀角/(°)	38
偏心率	0.1
σ_b/σ_c	1.16
K_c	0.666 7
黏性系数	0.000 5

预应力螺栓采用理想弹塑性本构模型,不考虑钢材料达到强度极限后的下降段,简化为双折线本构模型。为施加足够大的螺栓预紧力并满足相关规范要求,本文采用 8.8 级高强预应力螺栓,其材料屈服强度为 640 MPa,极限抗拉强度为 800 MPa。钢筋材料采用弹塑性硬化模型,参数同 HRB400 钢筋。垫块采用线弹性模型,弹性模量取为 2 000 GPa,泊松比取为 0.3。

1.2 加载方式与边界条件

接头构件采用四点弯曲加载方式,其示意图如图 2 所示。其中:轴力由横向力 N 提供;弯矩由垂直于 N 方向的竖向力 F 提供;螺栓的预应力通过螺栓载荷功能实现。加载竖向力 F 时,在模型中约束一侧垫块下表面 x 和 z 方向的位移,约束另一侧垫块下表面 x 、 y 、 z 方向的位移。



注: N 为横向力; F 为竖向力。

图2 接头构件四点弯曲加载方式示意图

Fig. 2 Diagram of four-point bending loading method for joint components

混凝土间的摩擦因数取为 0.5,混凝土与螺栓接触部位之间的摩擦因数取为 0.3。垫块与接头构件之间、预应力螺栓与预埋钢管之间均采用 Tie 绑定约束,钢筋采取 Embedded 嵌入约束。

2 螺栓参数对接头的影响分析

2.1 加载工况设计

为研究在不同预应力螺栓结构参数下接头构件的抗弯性能,设置预应力螺栓接头构件加载工况,如表 2 所示,其详细参数取值均符合 GB/T 3098.1—2010《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》、GB/T 5782—2016《六角头螺栓》等相关规范要求。此外,对接头构件两侧预先施加轴力 1 000 kN,以模拟车站结构拼装成环且上覆土厚 3 m 的工况。

表 2 预应力螺栓接头构件加载工况

Tab. 2 Loading conditions of prestressed bolt joint components

工况	螺栓预紧力/kN	螺栓直径/mm	螺栓长度/mm
1	60	20	200
2	60	20	400
3	60	20	600
4	60	20	800
5	30	24	400
6	60	24	400
7	120	24	400
8	150	24	400
9	0	16	400
10	0	20	400
11	0	24	400
12	0	30	400

由于接头构件破坏形式主要表现为混凝土受拉破坏,且接头构件变形大小能够在一定程度上反

映其抗弯承载能力,故仅提取接头构件接缝位置的竖向位移、接缝张开量及等效塑性拉应变 γ_{PEEQT} (当 $\gamma_{PEEQT} > 0$ 时,表明受拉区混凝土超过抗拉强度极限^[8])的数值模拟结果进行分析。其中,接缝张开量分别提取构件受拉区边缘和榫头根部两处位置(见图 3)的张开量数据,以综合判断不同螺栓参数对接头抗弯承载性能的提升效果。

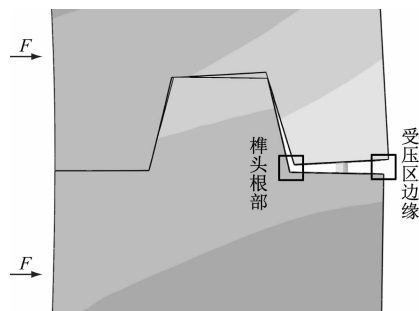


图3 接头构件接缝张开位置示意图

Fig. 3 Diagram of joint component joint-seam opening position

2.2 计算结果分析

以工况 2 为例,当弯矩加载至 420 kNm 时,预应力螺栓接头受拉区的混凝土已开始出现受拉损伤,此时接头构件的竖向位移、水平位移及等效塑性拉应变分布云图如图 4 所示。由于实际变形较小,将图中变形比例因子设置为 50。由图 4 可知:接头构件竖向位移在受拉区边缘接缝位置处均表现为下沉,且下沉量随着与接缝距离的增加逐渐减小,并在左右两个垫块附近呈轻微上升趋势;接头构件水平位移最大值发生在凹侧构件受拉区边缘的手孔位置附近,此处等效塑性拉应变亦超过了 0,可以判断手孔位置的应力集中现象引起了附近混凝土的受拉破坏,但由于接头采用预应力螺栓连接,凹、凸侧构件表现出较好的整体性,接缝张开量在预应力螺栓连接和受拉区边缘位置始终控制较好。

2.2.1 螺栓长度

工况 1—工况 4 中,不同螺栓长度条件下,接头最大竖向位移、榫头根部及受拉区边缘的接缝张开量随弯矩的变化情况如图 5 所示。由图 5 可知:接头构件最大竖向位移及接缝张开量均具有随着螺栓长度的增加逐渐减小的趋势;工况 1—工况 4 对应的接头结构受拉开裂(等效塑性拉应变 $\gamma_{PEEQT} > 0.01$)时的临界弯矩分别为 331.5 kNm、405.0 kNm、445.0 kNm、514.0 kNm;当螺栓长度大于 600 mm 时,继续增加螺栓长度对接头抗弯刚度的提升

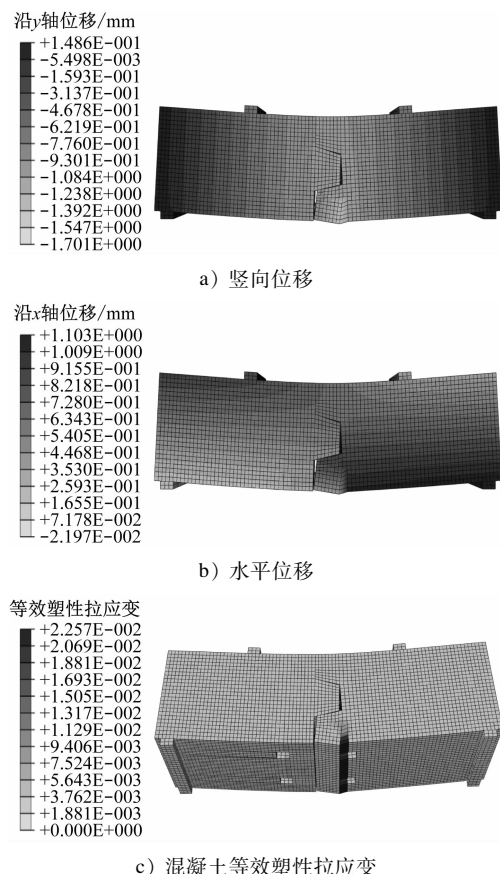


图4 预应力螺栓接头构件结构位移及等效塑性拉应变云图
Fig. 4 Nephogram of structural displacement and equivalent plastic tensile strain of prestressed bolt joint components

效果不明显;当螺栓长度为 600 mm、800 mm 时,接头位移量随弯矩增加的变化量基本相同。

综上所述,当螺栓长度较小时,增加预应力螺栓长度对提升接头抗弯刚度作用较为显著;当螺栓长度较大时(大于 600 mm),增加螺栓长度对接缝张开量的变形控制效率逐渐降低。

2.2.2 螺栓预紧力

工况 5—工况 8,以及工况 11 中,不同螺栓预紧力条件下,接头最大竖向位移、榫头根部及受拉区边缘的接缝张开量随弯矩的变化情况如图 6 所示。由图 6 可知:设置螺栓预紧力对接头抗弯刚度的提升十分明显;当弯矩为 378 kNm 时,相比于无螺栓预紧力工况,对螺栓施加 60 kN 预紧力后的接头最大竖向位移、榫头根部及受拉区边缘的接缝张开量分别减少了 28.2%、50.0%、52.7%;当螺栓预紧力为 150 kN 时,接头最大竖向位移随弯矩增加的变化量与螺栓预紧力为 60 kN 时的变化量差异不大;受拉区边缘接缝张开量在弯矩加载全过程中均没有

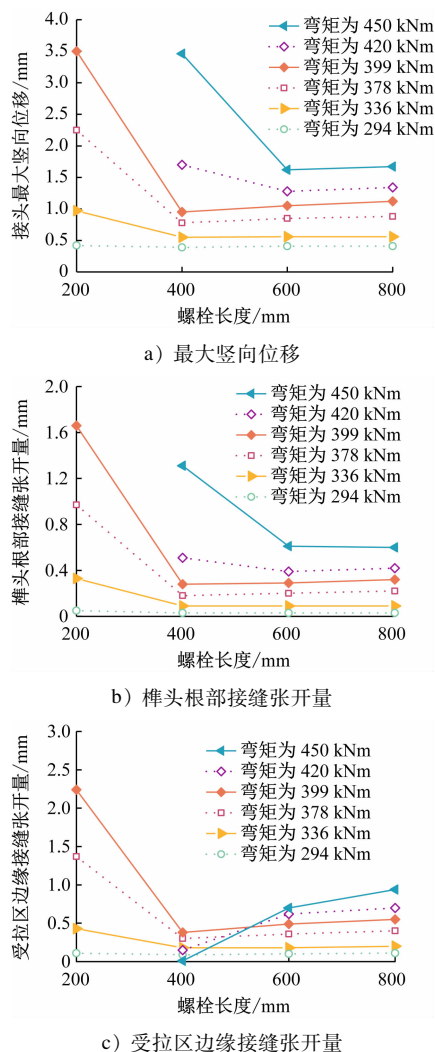


图5 不同螺栓长度条件下的接头最大竖向位移、榫头根部及受拉区边缘的接缝张开量随弯矩变化情况(工况 1—工况 4)

Fig. 5 Joint maximum vertical displacement, joint-seam opening of tenon-root, and tensile zone edge changing with bending moment under different bolt length conditions (working conditions 1 to 4)

超过 0.01 mm,榫头根部接缝张开量也控制在了 0.20 mm 以内,说明较大的螺栓预紧力能够进一步提升接头构件的整体性及其抗弯承载能力。

2.2.3 螺栓直径

工况 9—工况 12 中,不同螺栓直径条件下,接头最大竖向位移随弯矩的变化情况如图 7 所示(由于此工况下,接缝张开量随弯矩的变化规律与最大竖向位移类似,且限于篇幅,故未给出相关曲线)。由图 7 可知:①接头构件最大竖向位移随着螺栓直径的增加逐渐减小。②螺栓直径为 20 mm 是一个关键节点,当螺栓直径小于此数值时,增加螺栓直径

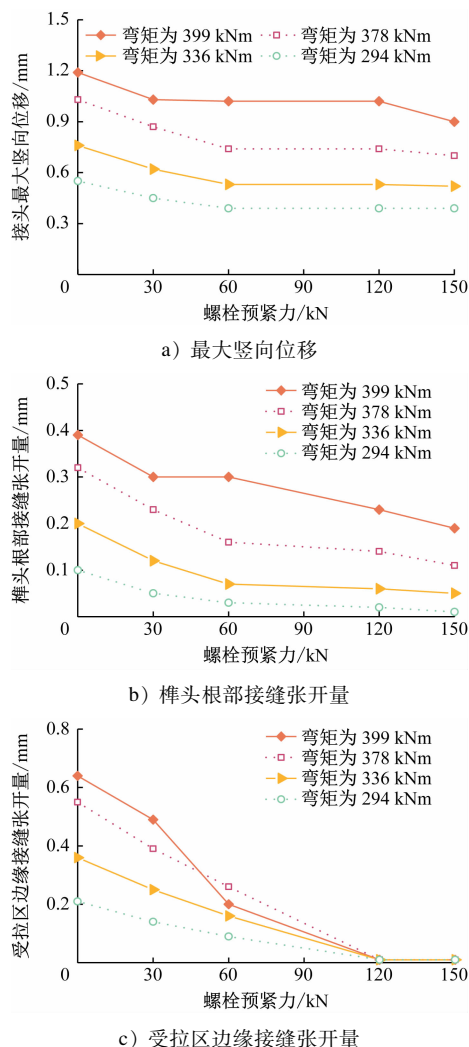


图6 不同螺栓预紧力条件下的接头最大竖向位移、榫头根部及受拉区边缘的接缝张开量随弯矩变化情况(工况5—工况8、工况11)

Fig. 6 Joint maximum vertical displacement, joint-seam opening of tenon-root, and tensile zone edge changing with bending moment under different bolt preload conditions (working conditions 5 to 8, and 11)

对最大竖向位移量的减小幅度更大。③当弯矩为 378 kNm 时,螺栓直径在 16 ~ 20 mm 之间每增加 4 mm,接头最大竖向位移减少了 0.26,等效塑性拉应变值由 0.003 减小到 0.002;螺栓直径在 20 ~ 30 mm 之间每增加 4 mm 时,接头位移减少量均小于 0.10 mm,而等效塑性拉应变值则没有明显变化。综上所述,增加螺栓直径能够有效提升接头的抗弯刚度,但提升幅度逐渐衰减。

3 结语

本文建立了通过预应力螺栓连接的装配式车

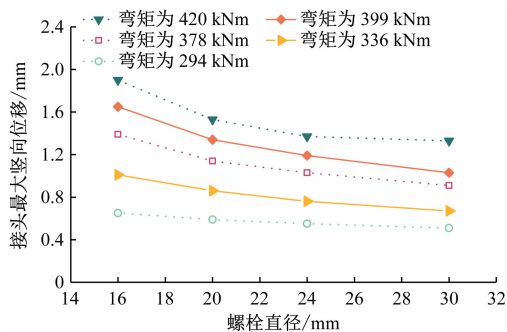


图7 不同螺栓直径条件下的接头最大竖向位移随弯矩变化情况(工况9—工况12)

Fig. 7 Joint maximum vertical displacement changing with bending moment under different bolt diameter conditions (working conditions 9 to 12)

站结构榫槽式接头的精细化有限元模型,采用四点弯曲的加载方式对预应力螺栓的设计参数进行优化,得到的主要结论如下:

1) 预应力螺栓接头构件竖向位移及接缝张开量均随着螺栓长度的增加而逐渐减小。当预应力螺栓长度小于 600 mm 时,增加螺栓长度对提升接头抗弯刚度效果较显著,继续增加螺栓长度对接缝张开量的变形控制效率逐渐降低。

2) 预应力螺栓接头构件位移具有随着螺栓直径的增加逐渐减小的趋势,且位移量的减小幅度逐渐递减。当弯矩大于 350 kNm 时,每增加 4 mm 螺栓直径,直径小于 20 mm 的螺栓接头位移减小量约为直径大于 20 mm 工况的 2.5 ~ 5.0 倍。

3) 设置螺栓预紧力能够显著提升接头的抗弯能力,螺栓预紧力 60 kN 的接头构件相比无预应力工况接缝张开量最多减小约 50%。因此,在满足相关规范标准和施工工艺允许的条件下,应尽量设置较大的螺栓预紧力。

4) 本文提出了装配式车站结构榫槽式预应力螺栓接头采用的螺栓直径、螺栓长度、螺栓预紧力等设计参数优选建议。针对各变量组合工况下的变形控制效果,仍应根据实际工况及相关设计手册的要求综合比选确定。

参考文献

- [1] 王福文, 冯爱军. 2022 年我国城市轨道交通数据统计与发展分析[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(3): 521.
WANG Fuwen, FENG Aijun. Statistics and development analysis of urban rail transit in China in 2022[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(3): 521.
- [2] 侯秀芳, 冯晨, 左超, 等. 2022 年中国内地城市轨道交通线

- 路概况[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(1): 9.
- HOU Xiufang, FENG Chen, ZUO Chao, et al. Statistical analysis of urban rail transit in Chinese mainland in 2022[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(1): 9.
- [3] 路清泉, 苏立勇, 张志伟, 等. 地铁车站装配式站台板拆分设计与连接方法研究[J]. 施工技术, 2021, 50(4): 12.
- LU Qingquan, SU Liyong, ZHANG Zhiwei, et al. Research on the disassemble and connection design of prefabricated platform slab in subway station[J]. Construction Technology, 2021, 50(4): 12.
- [4] 杜修力, 李洋, 许成顺, 等. 1995 年日本阪神地震大开地铁车站震害原因及成灾机理分析研究进展[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 223.
- DU Xiuli, LI Yang, XU Chengshun, et al. Review on damage causes and disaster mechanism of Daikai Subway Station during 1995 Osaka-Kobe Earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(2): 223.
- [5] TAO L, DING P, YANG X, et al. Comparative study of the seismic performance of prefabricated and cast-in-place subway station structures by shaking table test[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2020, 105: 103583.
- [6] 杨秀仁, 黄美群, 林放, 等. 地铁车站预制装配式结构注浆式榫槽接头试验方案研究[J]. 都市轨道交通, 2019, 32(5): 83.
- YANG Xiuren, HUANG Meiqun, LIN Fang, et al. Experimental method of grouted mortise-tenon joint for prefabricated metro station structure[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(5): 83.
- [7] 杨秀仁, 林放, 黄美群. 地铁车站预制装配式结构注浆式单榫长接头抗弯承载性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(4): 111.
- YANG Xiuren, LIN Fang, HUANG Meiqun. Research on flexural bearing capability of long grouted single mortise-tenon joints for prefabricated metro station structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(4): 111.
- [8] 张学龙, 高向宇, 杨秀仁, 等. 装配式地铁车站结构榫槽接头压弯性能研究[J]. 特种结构, 2018, 35(5): 73.
- ZHANG Xuelong, GAO Xiangyu, YANG Xiuren, et al. Mechanical performance of tongue and groove joints in assembled metro stations[J]. Special Structures, 2018, 35(5): 73.
- [9] 章玉伟, 杨桃, 励吾千. 基于接触面非线性分析的榫槽拼装接头的数值分析[J]. 公路, 2021, 66(2): 281.
- ZHANG Yuwei, YANG Tao, LI Wukuan. Numerical analysis of tenon-groove assembled joint based on nonlinear analysis of contact surface[J]. Highway, 2021, 66(2): 281.
- [10] 叶亮, 丁先立, 项宝, 等. 装配式地下车站 CHC 型钢-混凝土组合接头受弯性能分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(4): 120.
- YE Liang, DING Xianli, XIANG Bao, et al. Bending performance of CHC steel-concrete combined joint in underground prefabricated metro station [J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(4): 120.
- [11] 林放, 彭智勇. 装配式地铁车站不同结构型式对注浆式榫槽接头的力学性能影响[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(3): 420.
- LIN Fang, PENG Zhiyong. Influence of different structure types of prefabricated metro station on mechanical properties of grouted mortise-tenon joint [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(3): 420.
- [12] 秦浩, 赵宪忠. ABAQUS 混凝土损伤因子取值方法研究[J]. 结构工程师, 2013, 29(6): 27.
- QIN Hao, ZHAO Xianzhong. Study on the ABAQUS damage parameter in the concrete damage plasticity model [J]. Structural Engineers, 2013, 29(6): 27.
- 收稿日期:2023-08-14 修回日期:2023-09-14 出版日期:2024-07-10
Received:2023-08-14 Revised:2023-09-14 Published:2024-07-10
- 第一作者:藏廷伟,正高级工程师,zang_yw@hdec.com
通信作者:王博川,博士研究生,2310180@tongji.edu.cn
- ©《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 157 页)

- [4] 丁智, 张霄. 桩基施工对邻近既有地铁隧道影响的数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(2): 390.
- DING Zhi, ZHANG Xiao. Numerical analysis of influence of pile foundation construction on adjacent metro tunnel[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(2): 390.
- [5] 陕耀, 肖蔚雄, 马伟叁, 等. 软土地区钢套管钻孔灌注桩施工对临近高速铁路基变形影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(7): 2372.
- SHAN Yao, XIAO Weixiong, MA Weisan, et al. Influence of developed Benoto piling on deformation of adjacent high-speed railway subgrade in soft soil area[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(7): 2372.
- 收稿日期:2023-10-15 修回日期:2023-11-14 出版日期:2024-07-10
Received:2023-10-15 Revised:2023-11-14 Published:2024-07-10
- 通信作者:朱兆斌,高级工程师,zhuzb@hztlsjy.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