

装配式地铁预制构件连接方式研究综述*

丁先立 咎子卉 王 冉

(广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州)

摘 要 [目的] 预制钢筋混凝土构件的连接方式对装配式地铁的安装便捷性和结构稳定性至关重要。然而, 目前相关研究多为局部分析, 缺乏对连接方式的系统性综述与比较。因此, 有必要对装配式地铁预制构件连接方式的研究现状和技术进展进行全面总结, 为技术选择与优化设计提供科学依据。[方法] 系统梳理了现浇连接、钢筋灌浆套筒连接、螺栓连接、焊接连接及钢构件快速连接等5种主流连接方式在国内外的研究进展。结合具体工程案例, 深入分析了这些连接方式的优缺点及其适用场景。[结果及结论] 现浇连接和钢筋灌浆套筒连接作为湿连接方式, 展现出较高的承载能力和可靠性, 但它们的施工周期较长, 工艺相对复杂, 特别是现浇连接易受施工环境限制, 影响效率; 钢筋灌浆套筒连接虽减少了浇注工作量, 但对技术要求严苛且成本较高。螺栓连接、焊接连接与钢件快速连接作为干连接方式, 无需湿作业, 施工相对简便。然而, 螺栓连接工序繁琐, 承载能力有限; 焊接连接对工艺水平要求较高, 且对工况敏感; 而钢件快速连接则以其施工快捷、质量可靠及承载能力强的综合优势, 在复杂工况和空间受限环境中尤为适用。

关键词 装配式地铁; 预制混凝土构件; 连接方式; 湿连接; 干连接

中图分类号 TU761.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.03.004

Review of Connection Methods for Assembled Metro Prefabricated Components

DING Xianli, ZAN Zihui, WANG Ran

(Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China)

Abstract [Objective] The connection methods of prefabricated concrete components are crucial for the installation efficiency and structural stability of assembled metro systems. However, current research predominantly focuses on localized analyses, lacking a systematic review and comparison of these connection methods. Therefore, it is essential to comprehensively summarize the current research status and technological advancements in connection methods for prefabricated metro components, providing a scientific basis for technological se-

lection and design optimization. [Method] The research progress in China and abroad is systematically sorted, focusing on five mainstream connection methods: cast-in-place connection, steel grouting sleeve connection, bolted connection, welded connection, and steel component quick connection. Specific engineering cases are examined to analyze the strengths, weaknesses, and applicable scenarios of each connection method.

[Result & Conclusion] Cast-in-place and steel grouting sleeve connections, as a wet connection method, exhibits high load-bearing capacity and reliability. However, these methods involve longer construction cycles and relatively complex processes. Cast-in-place connection is particularly sensitive to construction environment constraints, affecting efficiency. Although steel grouting sleeve connection reduces the amount of casting work, it is technically demanding and has higher costs. Bolted connections, welded connections, and steel component quick connection, as dry connection methods, eliminate the need for wet operations and offer relatively simpler construction. Bolted connection, however, is labor-intensive and has limited load-bearing capacity; welded connection requires high technical proficiency and is sensitive to working conditions. Steel component quick connection, with its advantages of fast construction, reliable quality, and strong load-bearing capacity, is particularly suitable for complex working conditions and space-constrained environments.

Key words prefabricated metro; prefabricated concrete component; connection method; wet connection; dry connection

1 装配式地铁发展概况

装配式钢筋混凝土建筑是指将所需的钢筋混凝土构件在工厂内或施工现场预制, 然后在施工现场将预制钢筋混凝土构件(以下简称“预制构件”)拼装成整体的建筑^[1]。相较于现浇整体式钢筋混凝土结构, 装配式钢筋混凝土构件具有经济、质量和环境等方面的优点^[2], 尤其在人流密集的交通枢

* 广东省住房和城乡建设厅科学技术计划项目(2021-K9-063330)

组施工时,这些优势更为突出。

1950 年以来,欧洲率先引入了装配式钢筋混凝土结构技术。随后,前苏联及其他国家也开始采用此技术^[3],并于 1980 年后逐渐走向成熟。在此期间,这些结构的设计和施工方法不断创新,从而推动了装配式建筑技术的整体发展。在中国,预制装配式技术在城市轨道交通车站结构的应用尚处于初期阶段^[4],但随着我国经济快速发展,该技术已在我国各地获得广泛应用^[5-6]。长春地铁 2 号线袁家店站标志着我国首例装配式地铁车站的诞生^[7]。该车站结构有 7 种预制构件,各构件通过榫槽与榫头的稳固连接机制确保整体结构的稳定性。

在装配式地铁建造过程中,各预制构件之间的连接牢固性与可靠性对于整体结构的稳定性和安全性至关重要。因此,装配式地铁预制构件的连接设计应满足力学承载、抗震性能、防水要求、施工便捷性及节约成本等多方面的要求^[8-9]。

2 预制构件连接方式发展现状

目前,装配式地铁预制构件的主要连接方式有 5 种,即现浇连接、钢筋灌浆套筒连接、螺栓连接、焊接连接及钢结构快速连接。

2.1 现浇连接

现浇连接是通过直接在预制构件连接节点处设置的现浇带内浇注混凝土的方式实现构件的连接,包括传统现浇与预应力整浇 2 种形式^[10]。前者强度较高,但存在工作量大、施工时间长及后浇混凝土易收缩开裂等问题。而后者是通过在连接节点处采用后张预应力筋、使预制构件产生预压应力的方式实现连接,其节点性能更优和抗震性更强^[11-12]。

文献[13]通过试验证明现浇连接裂纹产生在塑性铰区,节点核心区与柱上没有裂纹,且连接节点还受到了混凝土收缩与蠕变的影响。文献[14]提出了搭接长度和抗剪元件对节点强度和延性的影响。文献[15]提出了一种新型的环形钢筋搭接接头,在环形钢筋搭接区域内设置横向加强筋,用于承受垂直于环形钢筋搭接平面的拉应力,同时在现浇混凝土内加入钢丝以起到纤维增韧的作用(见图 1)。上述研究为现浇连接方式的应用提供了参考和支持。现浇连接可通过适当优化施工工艺,从而降低施工时间,减少收缩开裂的风险。

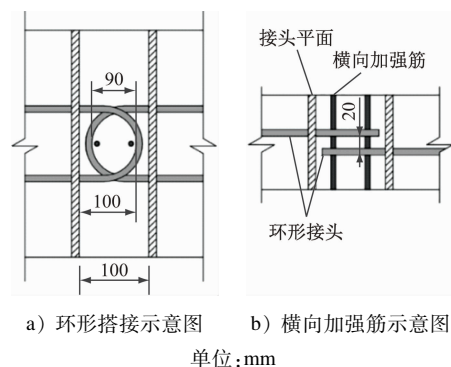


图 1 环形搭接纤维增韧接头

Fig. 1 Ring-lapped fiber-toughened joint

2.2 钢筋套筒连接

钢筋套筒连接技术涉及在预制构件中预先埋置的金属套筒内插入带肋钢筋,随后向套筒与钢筋间隙灌注高强度、无收缩性的水泥基灌浆料,以此实现预制构件的有效连接。该连接方式的性能核心在于钢筋与套筒的力学性能,以及灌浆料的强度指标,并已被我国装配式建筑领域广泛推荐^[16]。其连接节点展现出与现浇连接相近的力学性能,然而,该技术的应用伴随着工艺流程复杂、施工挑战性高、成本昂贵、组织管理需求严格及检测难度大的挑战^[17]。文献[18]中对钢筋灌浆套筒连接的预制构件进行了全面的力学性能测试:拉伸试验揭示裂纹主要出现在远离节点的位置,断裂特性与现浇结构相似;偏心弯曲载荷试验表明,尽管节点局部变形能力显著提升,但整体结构的变形性能与现浇结构相近;剪切试验则验证了节点剪切破坏强度大致等同于套筒内钢筋的剪切强度。此外,文献[19]创新性地设计了圆台形套筒,其顶面与底面直径不等,这一设计有效提升了连接的抗震性能。针对钢筋灌浆套筒连接的改进,可从 3 个方面着手:优化灌浆材料的性能、提高套筒与预制构件的生产精度,以及优化安装施工的组织与管理流程。

2.3 螺栓连接

预制构件螺栓连接技术涉及在预制构件中预先埋置螺栓连接器,并于施工现场将其与另一构件中的预埋锚固螺栓进行连接,并灌浆填实以形成刚性连接节点。此类螺栓连接节点在承载能力、延性、刚度、耗能能力及抗震性能等方面均与现浇连接节点表现相近,但同时也面临着结构复杂,以及在运输和安装过程中螺栓易受损等问题^[20-21]。

文献[22]开展了针对地铁盾构隧道衬砌管片的直螺栓接头与弯螺栓接头在正、负弯矩作用下的

参数测量,结果表明,在承受负弯矩时,弯螺栓接头的极限承载力约为直螺栓接头的1.5倍。文献[23]通过模拟分析与理论计算,揭示了地铁盾构管片安装过程中采用临时螺栓连接能够有效通过拉应力约束相邻管片,从而减小安装完成后在连接平面可能产生的法向角度偏差。文献[24]则对螺栓连接的盾构管片进行了承载能力测试与破坏机理的深入研究,发现于管片拼接内壁增设增强钢板能显著提升连接强度,且钢板与管片间的黏接状态对强化效果具有最大影响。当前,针对螺栓连接技术的改进策略包括提升预制构件的制造精度,以及加强螺栓在运输和安装过程中的保护措施等。

2.4 焊接连接

焊接连接技术基于电流热效应、电弧放电或气体燃烧产生的热量,使两个待连接的预制构件钢制接头熔化,随后施加一定压力促使熔融钢融合,冷却后形成稳固的刚性连接。该技术具备成本低廉、操作灵活、施工周期短等优势。然而,焊接节点缺乏明显的塑性铰区,在承受地震加速度载荷时更易发生脆性破坏,且对施工工艺水平要求较高。因此,在装配式建筑领域,焊接连接技术的实际应用仍需进一步完善。

文献[25]对预制构件焊接接头实施了横向周期载荷测试,结果显示,在模拟最大地震载荷的条件下,预制构件焊接框架结构的安全性存在不足,失效模式表现为脆性断裂,故不推荐在抗震性能要求较高的装配式建筑中采用。文献[26]对装配式复合墙体进行了低周反复加载试验,发现采用焊接连接的水平缝试件施工难度大且焊接质量难以保证。文献[27]则通过数值模拟手段,探究了地铁盾构隧道T型管片(焊接连接)焊接节点的应力分布特征,模拟结果与实地监测数据相吻合,表明该模拟计算方法能够较为准确地预测焊接节点的强度。针对焊接连接的改进,可从选用具有高韧性和良好延展性的材料以降低脆性破坏风险,以及设计合理的连接方式确保焊接连接具备足够的塑性变形能力两方面着手。

2.5 钢件快速连接

钢件快速连接也称为机械连接,是通过钢件与预埋连接件的机械咬合实现预制构件的连接和力传递^[28]。连接形式包括插入式、插销式和柔性接头等3种类型^[29]。

2.5.1 插入式接头

插入式接头由凸接头与凹接头构成,在装配过程中,凸接头被推入凹接头内部,并通过锁扣机构实现紧固。其中,摩擦式插入接头作为一类常见的插入式接头,其凹端与凸端结合部位设计有特殊摩擦结构,以实现锁紧功能,该类型接头通常应用于纵向连接场景(见图2)。插入式接头展现出高强度、易于安装、优良的密封性能以及强大的防腐能力等优势,但同时制作和安装的精度提出了较高要求,且一旦遭受损坏,维修与更换难度较大。

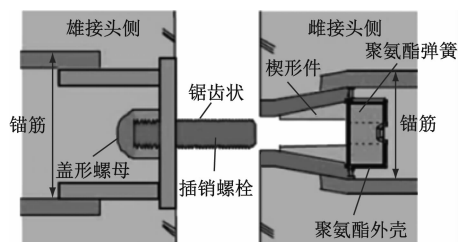
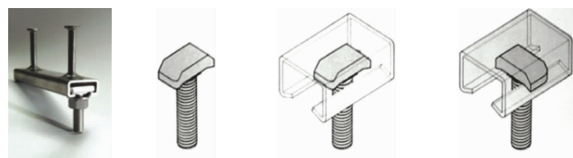


图2 摩擦式插入接头

Fig.2 Friction type insertion joint

文献[30]设计了一种插入式CH型接头,该接头通过H型螺纹凸端先滑入C型滑轨,随后旋转卡紧并使用螺母进行紧固(见图3)。研究对该接头进行了有限元分析,计算得出了其极限载荷以及失效模式,并据此构建了相应的承载能力与破坏机理模型。文献[31]则针对侧向插入式接头拼装的构件实施了弯曲试验,测定了这些构件在高拉力作用下的承载机制与断裂行为,并归纳总结了该类型接头的应用形式及特点。



a) 实物图 b) 放大图 c) 工作原理图1 d) 工作原理图2

图3 插入式CH型接头

Fig.3 Plug-in CH style connector

2.5.2 插销式接头

插销式接头常被应用于横向连接的关键部位(见图4),具有抗剪和抗弯强度高、连接操作简便快捷、对自动化施工具有良好的适应性等优点。然而,由于插销的尺寸、强度及其位置存在差异,接头的力学性能也会相应变化。此外,楔形块插入端与插槽之间为便于装配而留有的间隙,导致接头在防

水性能上存在一定的不足。同时,插销式接头的制造成本较高,且后期维护相对困难。

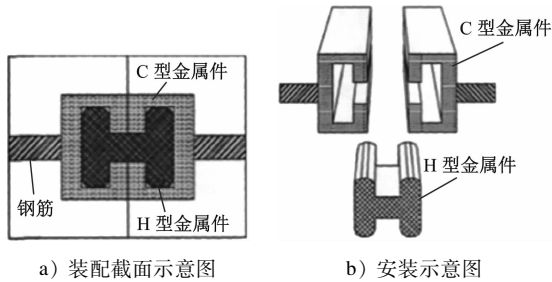


图4 插销式接头

Fig. 4 Pin connector

2.5.3 柔性接头

柔性接头作为一种新兴的接头形式,通过在钢件快速接头内部设置弹性元件或机械结构,实现了接头内部配合零件间的相对运动。这种设计在保持刚性连接优势的同时,赋予了接头更高的容差能力和耗能特性。日本研发的新型 one-pass 滑动锁定接头已被应用于日本富山市轨道交通 13 号线,有效减少了人工需求,提升了作业安全性、施工效率及施工质量。此外,由日本鹿岛株式会社开发的蜗轮蜗杆 WW 型接头,采用蜗轮蜗杆机械结构,通过传动机构引入并调节拧紧力(见图 5)。

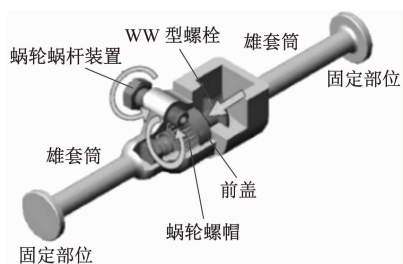


图5 WW 型接头

Fig. 5 WW style connector

钢构件快速接头在保持施工装配高效性的基础上,通过巧妙的结构设计,实现了与预制构件现浇连接节点相当的力学性能。然而,其制造成本与装配精度要求远高于其他接头类型。例如,在常用地铁盾构隧道中,管片跨度通常约为 10 m,而此类接头要求两管片间的装配误差小于 10 mm,角度误差小于 5° ,这对于刚性接头构件的装配施工而言极为严苛。因此,钢件快速接头未来的改进方向之一在于实现刚性接头结构的柔性化,以自适应安装误差,从而降低对装配精度的要求,充分展现此类接头在装配简捷、快速方面的优势。

综上所述,5 种连接方式的性能对比已汇总于表 1。现浇连接与钢筋灌浆套筒连接均归类为湿连接。现浇连接展现出最优的力学性能,具备高承载能力和相对较高的质量可靠性,且价格低廉。然而,其施工周期长,且施工环境较为恶劣。钢筋灌浆套筒连接则通过减少浇注工作量,保持了质量可靠性和承载力,但仍面临工艺复杂、技术要求高、造价昂贵以及浇筑工期较长等挑战。对于位于城市中心区域且地下作业空间受限的装配式地铁项目,湿连接方式因其施工周期长和工艺复杂的缺陷而应用受限。

表 1 预制构件连接形式的优缺点对比

Tab. 1 Comparison of advantages and disadvantages of prefabricated component connection forms

项目	施工便捷性	质量可靠性	承载力	造价
现浇连接	低	高	强	低
钢筋套筒连接	一般	高	强	高
螺栓连接	高	高	一般	一般
焊接连接	低	一般	强	高
钢件快速连接	高	高	强	高

螺栓连接、焊接连接与钢件快速连接则属于干连接范畴,无需湿作业,施工相对简便。焊接连接的质量直接依赖于焊接工艺的质量,属于对操作工艺及工况较为敏感的连接方式。螺栓连接与钢件快速连接均属于机械连接类型,但螺栓连接存在工序复杂、施工难度大以及承载能力相对较低的问题。相比之下,钢件快速连接展现出最为快捷方便的施工特性,兼具施工便捷、质量可靠和高承载能力的优点,能够适用于多种工况与场合,尤其适用于装配式地铁的连接需求。

3 结语

本文基于我国装配式地铁快速发展的实际需求,对预制构件连接方式的现状进行了详尽的综述与分析。重点探讨了现浇连接、钢筋套筒连接、螺栓连接、焊接连接以及钢件快速连接等连接方式。其中,钢件快速连接在满足装配式地铁发展需求方面展现出显著优势,但同时也面临着刚性连接特性以及对安装误差敏感等问题。因此,为满足装配式地铁在安装施工及长期使用中的需求,连接方式的发展应当遵循以下要求:

1) 施工操作需方便快捷,以适应装配式地铁全

自动化拼装的需求;

2) 应具备六方向全自由度容差能力,能够有效消除预制件在制造和安装过程中产生的误差,并实现锁紧;

3) 需具有高承载能力,以满足不同位置预制件在高承载条件下的密封防水要求;

4) 应支持大批量、标准化生产,以满足装配式地铁高速发展的广泛应用需求。

参考文献

- [1] 周顺华, 孙玉永. 城市轨道交通工程结构 20 年发展历程[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(5): 69.
ZHOU Shunhua, SUN Yuyong. 20 years development of urban rail transit engineering structure in China[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(5): 69.
- [2] 曹诗定, 王伟. 装配式建筑优点、技术难点剖析与监管重点探索[J]. 工程质量, 2015, 33(11): 24.
CAO Shiding, WANG Wei. Advantages and technical difficulties and emphases of supervision of assembly building projects[J]. Construction Quality, 2015, 33(11): 24.
- [3] 张中勇, 王永吉. 预制装配式技术在地铁工程中的应用[J]. 建筑技术, 2017, 48(8): 812.
ZHANG Zhongyong, WANG Yongji. Application of prefabricated technology on subway construction[J]. Architecture Technology, 2017, 48(8): 812.
- [4] 张建芳. 城市轨道交通装配式车站混凝土结构造价影响因素及投资分析[J]. 铁路工程技术与经济, 2021, 36(1): 25.
ZHANG Jianfang. Cost factors and investment analysis about the prefabricated concrete structure of station for urban rail transit projects[J]. Railway Engineering Technology and Economy, 2021, 36(1): 25.
- [5] 彭冲. BIM+装配式在广州地铁六号线二期机电设备安装中的应用[J]. 通讯世界, 2018, 25(12): 214.
PENG Chong. Application of BIM+ assembly in the installation of mechanical and electrical equipment of Guangzhou Metro Line 6 phase II[J]. Telecom World, 2018, 25(12): 214.
- [6] 刘毅, 潘清, 郭正兴, 等. 新型装配叠合整体式地下车站关键技术研究[J]. 现代城市轨道交通, 2021(5): 68.
LIU Yi, PAN Qing, GUO Zhengxing, et al. Research on key technologies of new type assembly and overlap integrated underground station[J]. Modern Urban Transit, 2021(5): 68.
- [7] 谢轶轩. 预制装配式地铁车站拼装技术研究[J]. 科技与企业, 2015(1): 255.
XIE Yuanxuan. Research on assembly technology of prefabricated subway station[J]. Science and Technology and Enterprise, 2015(1): 255.
- [8] 齐新, 卢永成, 周海峰, 等. 桥墩预制装配连接技术特点与应用[J]. 城市道桥与防洪, 2020(8): 89.
QI Xin, LU Yongcheng, ZHOU Haifeng, et al. Characteristics and application of pier precast assembly connection technology[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2020(8): 89.
- [9] 裴行凯, 麦家儿, 何冠鸿, 等. 装配式地铁车站二次结构构件连接节点性能研究[J]. 广东土木与建筑, 2019, 26(11): 101.
PEI Xingkai, MAI Jiaer, HE Guanhong, et al. Research on performance of connection nodes of secondary structural members in prefabricated metro stations[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2019, 26(11): 101.
- [10] 阎利, 吴庭鸿, 拓万永, 等. 预制装配式结构连接节点研究进展综述[J]. 建筑科学, 2020, 36(5): 126.
YAN Li, WU Tinghong, TUO Wanyong, et al. Research progress review on connection joints of the prefabricated structures[J]. Building Science, 2020, 36(5): 126.
- [11] 陈燕友. 探究预制装配整体式混凝土结构梁柱节点技术[J]. 智能城市, 2019, 5(4): 91.
CHEN Yanyou. Probe into precast and assembled beam-column joint technology of integral concrete structure[J]. Intelligent City, 2019, 5(4): 91.
- [12] 柯善杰. 新型后张预应力装配式混凝土框架梁柱节点消能减震性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
KE Shanjie. Study on energy dissipation and shock absorption performance of beam-column joints of new post-tensioned prestressed assembled concrete frames[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [13] NOORHIDANA V A. Experimental study of precast concrete beam-to-column connection under sustained loading[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 669(1): 012034.
- [14] VELLA J P, VOLLUM R L, JACKSON A. Investigation of headed bar joints between precast concrete panels[J]. Engineering Structures, 2017, 138: 351.
- [15] DE LIMA ARAÚJO D, CURADO M C, RODRIGUES P F. Loop connection with fibre-reinforced precast concrete components in tension[J]. Engineering Structures, 2014, 72: 140.
- [16] 杜智亮. 预制装配式建筑套筒灌浆连接技术[J]. 建材与装饰, 2020(3): 28.
DU Zhiliang. Grouting connection technology of prefabricated building sleeve[J]. Construction Materials & Decoration, 2020(3): 28.
- [17] 姜泰. 预制装配式建筑施工中的灌浆套筒连接技术[J]. 建筑施工, 2018, 40(9): 1516.
JIANG Tai. Joint technology of grouting sleeve for prefabricated building construction[J]. Building Construction, 2018, 40(9): 1516.
- [18] TULLINI N, MINGHINI F. Grouted sleeve connections used in precast reinforced concrete construction experimental investigation of a column-to-column joint[J]. Engineering Structures, 2016, 127: 784.
- [19] ARAGON T C, KURAMA Y C. A type III tapered-cylindrical grouted splice for energy dissipation bars in seismic precast con-

- crete joints [C] // Structures Congress 2015. Portland, Oregon. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2015: 1999.
- [20] 钟春玲, 李雷. 全预制装配式车站节点的连接方式研究[J]. 吉林建筑大学学报, 2015, 32(6): 1.
- ZHONG Chunling, LI Lei. Exploration of prefabricated station [J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2015, 32(6): 1.
- [21] GIL LORENZO S. The role of temporary spear bolts in gasketed longitudinal joints of concrete segmental linings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 105: 103576.
- [22] 朱瑶宏, 柳献, 张晨光, 等. 地铁盾构隧道纵缝接头螺栓形式对比试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(6): 1427.
- ZHU Yaohong, LIU Xian, ZHANG Chenguang, et al. Contrast test research on longitudinal joint with different forms of bolts in metro shield tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(6): 1427.
- [23] 薛伟辰, 胡翔. 预制混凝土框架结构体系研究进展[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(9): 1241.
- XUE Weichen, HU Xiang. Research progress on precast concrete frame structures[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(9): 1241.
- [24] LIU X, JIANG Z, YUAN Y, et al. Experimental investigation of the ultimate bearing capacity of deformed segmental tunnel linings strengthened by epoxy-bonded steel plates[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2018, 14(6): 685.
- [25] RODRÍGUEZ M E, TORRES-MATOS M. Seismic behavior of a type of welded precast concrete beam-column connection[J]. PCI Journal, 2013, 58(3): 81.
- [26] 苗欣蔚, 黄炜, 凌柯, 等. 干式连接装配式复合墙体抗震性能试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 36.
- MIAO Xinwei, HUANG Wei, LING Ke, et al. Experimental study on seismic behavior of fabricated composite wall based on different horizontal joints dry connection[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(2): 36.
- [27] SUN L F, CHEN Z L, LI J C, et al. Weld strength analysis of T-joint segments of the metro crossing passage by the shield method based sub-model[J]. Materials Science Forum, 2019, 971: 27.
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 装配式混凝土建筑技术标准: GB/T 51231—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for prefabricated concrete buildings: GB/T 51231—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [29] KURAMA Y C, SRITHARAN S, FLEISCHMAN R B, et al. Seismic-resistant precast concrete structures: state of the art[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(4): 03118001.
- [30] ABOUHAMDAH I S, AL-OSTA M A, BALUCH M H. Structural behavior of cast - in C - channel anchors in precast concrete under uniaxial tension[J]. 2017. 10.
- [31] ISHIGAKI H, SAWAKAMI S, MORI M, et al. An expermental study on design method for segment joint of shield tunnel which is subject to high tensile force[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, 2016, 72(3): 136.
- 收稿日期:2022-11-18 修回日期:2023-05-05 出版日期:2025-03-10
Received:2022-11-18 Revised:2023-05-05 Published:2025-03-10
• 第一作者:丁先立,正高级工程师,dingxianli@dsjy.com
通信作者:王冉,工程师,wangran2@gmdi.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 18 页)

- [5] 裘金真. 刚性悬挂弓网系统的动态仿真研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- XI Jinzhen. Study on dynamic simulation of rigid suspension pantograph-catenary system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [6] 周韬. 不同列车运行速度下架空刚性接触网跨距的选择[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(6): 158.
- ZHOU Tao. Selection of overhead rigid catenary span based on different train operating speeds[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(6): 158.
- [7] 《建筑结构静力计算手册》编写组. 建筑结构静力计算手册: 第二版[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- Editorial Committee of Static Calculations for Building Structures. Static calculations for building structures: 2nd ed[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001.
- [8] 关金发. 受电弓与刚性接触网动力相互作用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- GUAN Jinfa. Study on dynamic interaction between pantograph and rigid catenary[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- 收稿日期:2022-11-25 修回日期:2023-02-24 出版日期:2025-03-10
Received:2022-11-25 Revised:2023-02-24 Published:2025-03-10
• 通信作者:代洪宇,工程师,315586546@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