

装配式混凝土结构连接设计优化与抗震性能研究

李月肖

中土大地国际建筑设计有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]装配式混凝土结构因其工业化程度高、施工周期短和资源利用效率高等优势,在我国建筑现代化进程中获得广泛关注。然而,连接部位作为装配式结构的关键受力环节,其力学行为复杂、破坏模式多样,易成为结构薄弱点,从而影响整体受力性能与抗震能力。研究表明,装配式混凝土连接节点性能的优化是提升结构整体性和抗震可靠性的核心。文中从连接类型与力学机制入手,系统分析影响节点性能的材料特性、几何构造和受力路径因素,并对连接设计优化与抗震性能提升策略进行深入探讨。在此基础上,进一步研究施工质量对连接可靠性的影响机制,提出全过程质量控制措施。研究结果表明,通过构造优化、材料改进、性能化设计以及施工质量提升,可以显著提高装配式混凝土结构的整体表现与抗震韧性。文中旨在为装配式混凝土结构的工程应用与规范完善提供技术参考和理论支撑。

[关键词]装配式混凝土结构;连接设计;节点抗震性能;延性;构造优化

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18628

中图分类号: TU323.5

文献标识码: A

Optimization of Connection Design and Seismic Performance Research for Prefabricated Concrete Structures

LI Yue Xiao

Zhongtu Dadi International Architectural Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: Prefabricated concrete structures have gained widespread attention in China's modernization process due to their high degree of industrialization, short construction period, and high resource utilization efficiency. However, as a key load-bearing link in prefabricated structures, the connecting parts have complex mechanical behavior and diverse failure modes, which can easily become weak points in the structure, thereby affecting the overall load-bearing performance and seismic resistance. Research has shown that optimizing the performance of prefabricated concrete connection nodes is the core of improving structural integrity and seismic reliability. Starting from the types of connections and mechanical mechanisms, this article systematically analyzes the material properties, geometric structures, and force path factors that affect node performance, and explores in depth the optimization of connection design and strategies for improving seismic performance. On this basis, further research is conducted on the impact mechanism of construction quality on connection reliability, and measures for quality control throughout the entire process are proposed. The research results indicate that the overall performance and seismic toughness of prefabricated concrete structures can be significantly improved through structural optimization, material improvement, performance-based design, and construction quality enhancement. The purpose of this article is to provide technical reference and theoretical support for the engineering application and specification improvement of prefabricated concrete structures.

Keywords: prefabricated concrete structure; connection design; seismic performance of nodes; ductility; structural optimization

引言

作为推动建筑工业化和绿色建造的重要技术路径,装配式混凝土结构在我国建筑领域的应用规模持续扩大。与传统现浇结构相比,装配式结构在施工工序组织、建造效率、环保节能等方面具有显著优势。然而,装配式构件之间依靠连接节点形成整体受力体系,而节点的性质决定结构整体的延性与可靠性。由于节点往往处于多种内力与地震作用共同影响下,且构件拼装使其力学性质与现浇节点存在显著差异,因此节点设计优化与抗震性能提升成为结构工程研究的重点问题之一。近年来,我国建筑抗震设计规范不断更新,对装配式结构在地震区的应用提出更高要求,这进一步推动了连接设计理论与抗震性能机制研究的

发展。在此背景下,本文将从材料特性、连接构造、受力模式、施工质量控制等方面对装配式混凝土结构中连接节点的设计优化与抗震性能提升进行系统研究,以期对装配式混凝土结构的安全应用提供支持。

1 装配式混凝土结构连接的基本特性分析

1.1 装配式结构连接的主要类型与性能特点

装配式混凝土结构的连接形式多样,依据传力方式与构造手段可分为湿式连接、干式连接与混合式连接三大类。湿式连接通过灌浆、现浇层等方式使连接区域形成类似现浇混凝土的整体性,其延性和刚度较高,是目前应用最为广泛的方式。干式连接以螺栓、钢板、焊接等金属构件完成力传递,施工便捷、装配速度快,但节点延性较低,往

往用于可拆卸或轻型装配式结构中。混合式连接兼具两种方式的优势,通过钢构件提供初期刚度,通过灌浆提高最终强度与整体性,是现代装配式结构发展趋势之一。不同连接形式在抗震性能、受力稳定性以及适用工程类型上差异明显,需根据设计需求合理选择。

1.2 连接部位力学性能的主要影响因素

连接性能受钢筋布置、灌浆材料强度、节点混凝土标号、构造尺寸和预应力状态等多种因素影响。节点区的钢筋锚固长度显著影响其抗拉承载力;灌浆层的密实程度和强度决定连接整体性能;节点核心区混凝土若强度不足,容易出现压碎破坏。此外,构件安装误差、节点几何偏差、钢筋对位不准等施工因素也可能导致节点受力不均。外荷载作用下,节点需承受剪力、弯矩及拉压作用,其内部应力路径复杂,因此构造设计的合理性对于节点安全性至关重要。

1.3 连接性能对结构整体性的影响机制

装配式结构连接性能直接关系到结构整体受力协调性。在多层框架或剪力墙结构中,节点刚度水平会影响整体侧移、振动周期和受力分布。若节点过于柔弱,则会导致构件间变形不协调,形成应力集中;若节点延性不足,在地震中可能出现脆性破坏,从而失去能量消耗能力,造成结构整体性能下降。研究表明,连接性能越接近传统现浇节点,装配式结构整体性越强,抗震能力越高。因此,连接设计应充分考虑结构整体性,确保节点性能满足抗震需求。

2 装配式混凝土结构连接设计优化策略

2.1 基于传力机制的连接设计原则

连接设计的核心是保证内力传递路径清晰、构造可靠、承载性能稳定。设计需遵循强节点弱构件原则,使节点区强度高于构件本体,以避免节点先行破坏。此外,设计需考虑节点受弯、受剪及受拉等不同作用,合理配置钢筋结构,确保节点变形能力满足地震作用需求。对于承受反复荷载的节点设计,应重点关注延性指标,使节点能够在地震中保持足够塑性发展空间,从而有效耗散能量。

2.2 节点构造设计优化方法

节点构造需通过钢筋锚固改善、附加钢筋配置、节点过渡区域加强和几何形状优化等方式提高性能。例如,通过延长锚固长度或采用机械锚固方式提高钢筋连接可靠性;在节点核心区配置附加箍筋以提高开裂后的约束能力;优化节点混凝土浇筑区域形状以避免应力集中。此外,采用高强度钢筋、超高性能混凝土(UHPC)等新材料也可显著改善节点构造性能,使节点在承载极限状态下具备更好的延性与韧性。

2.3 连接延性与耗能能力的提升途径

延性是节点抵抗地震力的关键性能。提升节点延性的方法包括:采用带有塑性铰的构造形式,使节点在地震中

具有足够塑性发展空间;配置耗能构件如伸臂钢板或替代性耗能芯材;采用具有高延性特征的钢筋或纤维材料;通过节点几何调整增强局部塑性区分布能力。同时,为提升节点耗能能力,可在节点设计阶段引入耗能机制分析,通过非线性模拟预测节点滞回曲线特性,为设计提供优化依据。

3 装配式混凝土结构的抗震性能研究

3.1 地震作用下装配式结构的动力响应特征

装配式结构在地震作用下表现出与现浇结构不同的动力特性。节点刚度不均可能引起结构周期变化,使结构受到的地震作用发生差异。此外,装配式构件之间的相对位移需通过节点传递,节点的耗能能力直接影响结构整体的抗震表现。研究显示,若节点性能良好,装配式结构在地震中能保持较高的整体协调性;反之,节点若发生提前破坏,结构可能出现局部失效甚至倒塌风险。

3.2 节点破坏模式分析与薄弱环节识别

节点破坏模式主要包括剪切破坏、拉拔破坏、压碎破坏、灌浆层破坏和金属构件失效。剪切破坏多发生于核心区抗剪能力不足时;拉拔破坏与钢筋锚固不足有关;压碎破坏常见于混凝土强度与约束不足的区域;灌浆不密实会导致节点松动;金属构件失效可能因焊缝或螺栓承载不足造成。识别节点薄弱环节有助于精准优化设计,提高结构抗震性能。

3.3 提升结构抗震能力的设计方法

提高装配式结构抗震性能的策略包括:合理布置结构体系,使受力路径明确;加强节点区构造约束,提高其抗剪强度;采用强柱弱梁设计,使结构形成可控的塑性铰机制;配置具有延性优势的材料提高耗能能力;通过模拟分析预测地震下节点性能并优化设计参数。综合采用这些策略可显著提升装配式结构在强震下的安全性。

4 装配式混凝土结构连接施工质量保障措施

4.1 施工质量对连接性能的影响机制

装配式结构施工控制应围绕连接节点这一关键部位展开,通过多环节协同管理保障结构受力性能与施工质量。钢筋套筒连接作为节点受力传递的重要方式,其施工质量直接关系到结构安全,需要对套筒位置、钢筋插入深度与连接状态进行逐一检查,确保连接可靠。灌浆材料的性能对节点整体性具有重要影响,通过优化配合比并严格控制施工工艺,可提升灌浆体的流动性与密实性。灌浆过程中应保持压力稳定、材料分布均匀,以减少空鼓与气泡等缺陷。构件吊装环节对定位精度要求较高,采用精确定位装置可保证构件就位准确,避免安装偏差累积。

4.2 节点施工关键工艺控制措施

装配式结构施工控制应围绕连接节点这一关键部位展开,通过多环节协同管理保障结构受力性能与施工质量。钢筋套筒连接作为节点受力传递的重要方式,其施工质量

直接关系到结构安全,需要对套筒位置、钢筋插入深度与连接状态进行逐一检查,确保连接可靠。灌浆材料的性能对节点整体性具有重要影响,通过优化配合比并严格控制施工工艺,可提升灌浆体的流动性与密实性。灌浆过程中应保持压力稳定、材料分布均匀,以减少空鼓与气泡等缺陷。构件吊装环节对定位精度要求较高,采用精确定位装置可保证构件就位准确,避免安装偏差累积。节点混凝土浇筑需采用分层方式并配合充分振捣,以确保混凝土密实并避免形成弱界面。

4.3 全过程施工质量管理体系构建

施工质量保障需要构建覆盖施工前、施工中与施工后的全过程管理体系,使各环节形成连续衔接的质量控制链条。施工准备阶段,通过系统化技术交底与施工方案审查,可统一施工标准并明确关键控制要点,为后续作业奠定基础。施工实施过程中,对材料性能、节点施工工艺与构件安装精度进行持续监测,有助于及时发现偏差并加以纠正。灌浆饱满度与密实性直接关系节点受力性能,应通过专项记录与监控手段加以严格控制。构件安装偏差的实时检测,可保障结构整体受力协调性。借助数字化施工管理技术,对施工参数、过程数据与检测结果进行实时采集与存储,可提升质量管理的透明度与可追溯性。通过制度化管理与信息化技术的协同应用,连接节点质量能够得到系统保障,从而提升装配式结构的整体性能与安全水平。

5 装配式混凝土结构连接与抗震性能的工程应用方向

5.1 性能化连接设计的发展趋势

随着性能化设计理念在工程领域中的不断深化,装配式结构节点设计正逐步由依赖经验与规范限值的传统模式,转向以明确性能目标为导向的科学设计方法。该理念以结构在不同地震作用水平下的实际表现作为评价依据,将节点延性、耗能能力与变形协调性作为关键控制指标。通过对受力路径的合理组织与关键部位破坏模式的预先设定,节点能够在强震条件下形成稳定、可预测的受力与破坏过程,避免突发性失效对整体结构造成不利影响。性能化设计为节点构造优化提供了更加灵活的技术空间,使设计方案能够在满足安全要求的基础上兼顾经济性与施工可行性。这种以性能为核心的设计思路,有助于提升装配式结构在极端荷载作用下的安全储备与可靠性,推动结构设计水平向更高层次发展。

5.2 新材料、新技术在节点中的应用前景

高性能材料在装配式结构节点中的应用,为提升节点承载能力与延性水平提供了重要技术支撑。超高性能混凝土、高延性钢筋及纤维复合材料具备优异的力学性能与耐久特性,将其应用于节点关键受力区域,可有效改善应力分布,增强耗能能力,并降低脆性破坏风险。数字建造技术的发展,为节点设计与实施提供了更加精准的技术手段。

依托建筑信息模型与数字孪生技术,可对节点构造形式与受力行为进行可视化模拟与分析,提高设计方案的合理性与可靠性。在施工管理过程中,数字模型能够辅助工序安排与质量控制,提升装配精度与施工可控性。智能传感技术的引入,使节点在服役期间的应力、变形与损伤状态得以持续监测,为结构安全评估与维护决策提供实时数据支持。这种材料创新与数字技术协同应用的模式,为装配式结构性能提升与长期安全运行奠定了坚实基础。

5.3 装配式结构抗震体系的发展方向

未来装配式结构的发展将更加关注抗震韧性的提升与综合性能的协调,以适应复杂多变的工程需求与环境条件。结构设计理念将从单一承载能力控制转向对延性、耗能能力及震后可恢复性的综合考量,使建筑在地震作用下具备更高的安全储备。节点构造在这一过程中扮演着关键角色,其设计形式将逐步向模块化与标准化方向演进,有利于提升构件装配精度,缩短施工周期并降低质量波动风险。结构体系层面,将更加重视多样化与适应性,通过不同体系组合满足功能、抗震与使用需求的平衡。面向可持续发展目标,装配式结构在材料选择与构造方式上将更加注重资源节约与环境友好,实现经济效益、安全性能与生态价值的协调统一,为建筑工业化与高质量发展提供有力支撑。

6 结论

连接设计与抗震性能是装配式混凝土结构安全与可靠性的关键所在,其合理性直接影响结构整体受力传递与变形能力。通过对连接构造形式进行系统优化,并结合高性能材料的应用,可有效增强节点承载力与耗能能力,使结构在地震作用下保持良好的整体性与稳定性。节点延性水平的提升,有助于结构在强震条件下形成合理的破坏机制,避免脆性失效。施工阶段对连接节点加工精度与安装质量的严格控制,是设计目标得以实现的重要保障。研究表明,节点性能与结构整体抗震表现密切相关,需要在设计、施工及后期管理各阶段协同推进。随着性能化设计理念、新型材料技术及智能化管理手段的不断发展,装配式混凝土结构的抗震性能将得到进一步提升。本文提出的连接优化与抗震性能提升思路,可为相关工程实践提供有价值的技术参考。

[参考文献]

- [1]李国强,马志强.装配式混凝土结构连接性能与设计方法研究[J].土木工程学报,2021,54(4):92-101.
- [2]张晓东,王海军.装配式结构节点抗震性能分析与优化设计[J].建筑结构,2020,50(8):33-40.
- [3]陈伟,刘亮.装配式混凝土结构连接施工技术及其质量控制研究[J].建筑施工,2019,41(6):57-63.

作者简介:李月肖(1983.5—),女,汉族,毕业院校:河北工业大学,现就职单位:中土大地国际建筑设计有限公司。