

装配式混凝土框架节点抗震性能的智能优化设计研究

撒彩红

山西辅临工程项目管理咨询有限公司 山西临汾

【摘要】装配式混凝土框架结构因其施工效率高、环境友好等优点，在现代建筑中广泛应用，但其节点抗震性能仍是制约其发展的关键问题。本文围绕装配式混凝土框架节点的抗震性能优化设计展开研究，提出基于智能算法的节点构造优化方法，旨在提升节点在地震作用下的承载力、延性和耗能能力。通过有限元模拟与试验数据对比分析，验证了优化模型的有效性，并探讨了不同构造形式对节点抗震性能的影响规律。引入智能优化策略可显著提高节点抗震设计的科学性与可靠性，为装配式混凝土结构的抗震设计提供新的技术路径。

【关键词】装配式混凝土；框架节点；抗震性能；智能优化；结构设计

【收稿日期】2025 年 2 月 12 日 **【出刊日期】**2025 年 3 月 16 日 **【DOI】**10.12208/j.ace.2025000103

Research on intelligent optimization design of seismic performance for prefabricated concrete frame joints

Caihong Han

Shanxi Fulin Engineering Project Management Consulting Co., Ltd, Linfen, Shanxi

【Abstract】 Prefabricated concrete frame structures are widely used in modern construction due to their high construction efficiency, environmental friendliness, and other advantages. However, the seismic performance of their joints remains a key issue restricting their development. This paper focuses on the optimization design of seismic performance for prefabricated concrete frame joints and proposes a joint construction optimization method based on intelligent algorithms, aiming to enhance the bearing capacity, ductility, and energy dissipation capacity of joints under seismic actions. Through comparative analysis of finite element simulations and test data, the effectiveness of the optimized model is verified, and the influence laws of different construction forms on the seismic performance of joints are discussed. The introduction of intelligent optimization strategies can significantly improve the scientificity and reliability of joint seismic design, providing a new technical path for the seismic design of prefabricated concrete structures.

【Keywords】 Prefabricated concrete; Frame joint; Seismic performance; Intelligent optimization; Structural design

引言

在城市化进程不断加快的背景下，传统现浇混凝土结构已难以满足高效、绿色建造的需求，装配式混凝土结构应运而生并快速发展。然而，由于节点区域是结构受力的关键部位，其连接性能直接影响整体结构的抗震能力，因此成为工程界关注的重点。当前，节点设计多依赖经验公式和标准化构造，缺乏针对复杂受力状态下的精细化优化手段。尤其在强震作用下，节点易出现脆性破坏，影响结构安全。如何实

现节点在保证施工便捷性的前提下具备优良的抗震性能，已成为亟待解决的技术难题。本文基于智能优化算法，构建适用于装配式混凝土框架节点的抗震设计新方法，旨在提升节点在复杂受力条件下的性能表现，推动装配式结构体系的安全性与可持续发展。

1 装配式混凝土框架节点抗震性能现状及问题分析

装配式混凝土框架结构因施工效率高、质量可控及环保优势，在现代建筑中广泛应用。但节点作为

梁柱连接的关键部位,受力复杂、构造特殊,直接影响整体结构的抗震性能。目前常用的节点形式包括钢筋套筒灌浆连接、波纹管连接和后浇带连接等,虽具备一定承载能力,但在地震作用下仍存在延性差、耗能不足等问题。节点施工对预制精度与现场连接质量要求高,易因偏差或材料离散引发应力集中,导致剪切破坏、锚固失效或连接松动,削弱结构整体稳定性,暴露出抗震设计上的薄弱环节。针对上述问题,现行规范主要依据试验数据与经验公式进行节点设计,缺乏系统的力学模型支撑,难以满足复杂受力状态下的性能要求。尤其是在高烈度设防区,传统节点设计方法已无法有效兼顾承载力、延性和恢复力特性,导致节点在反复荷载作用下容易发生刚度退化和承载力下降^[1]。随着建筑工业化进程的加快,节点标准化程度虽有所提高,但其通用性与结构抗震性能之间的矛盾日益突出。部分工程实践中,为追求施工便利而简化节点构造,牺牲了其在地震作用下的变形协调能力和能量耗散能力,从而埋下安全隐患。在此背景下,引入智能优化设计方法以提升节点抗震性能具有重要的理论价值与工程应用前景。传统的节点设计多依赖工程师的经验判断与试错法调整参数,难以实现多目标协同优化,而基于人工智能算法的设计策略则可通过高效搜索最优解空间,实现节点构造参数的自适应优化配置。利用遗传算法、粒子群优化算法等智能计算工具,结合有限元仿真分析,可以对节点的配筋形式、连接方式、局部加强措施等关键参数进行系统优化,从而提升节点在地震作用下的承载力、延性和耗能能力。此类方法不仅有助于突破传统设计手段的局限性,也为装配式混凝土框架节点的精细化抗震设计提供了新的技术路径。

2 智能优化方法在节点设计中的适用性研究

在装配式混凝土框架节点的抗震设计中,智能优化方法的应用为解决传统设计手段难以兼顾多目标性能需求提供了新的技术路径。传统的节点设计通常依赖经验公式和标准化构造形式,缺乏对复杂受力状态下节点性能的系统优化能力。而智能优化算法,如遗传算法(GA)、粒子群优化算法(PSO)以及蚁群算法(ACO)等,能够基于结构力学模型自动搜索最优设计方案,从而实现节点在承载力、延性和耗能等方面的协同提升。这类方法通过建立参数化设计变量与抗震性能指标之间的映射关系,能够在大规模解空间中高效逼近帕累托最优前沿,有

效提高节点设计的科学性与适应性。从工程应用角度看,智能优化方法在节点设计中的适用性主要体现在其对非线性问题的处理能力和对多约束条件的兼容性上。装配式节点由于存在预制构件间的连接界面、灌浆套筒、钢筋锚固等多种复杂构造,其受力行为具有显著的非线性特征^[2]。采用有限元模拟与智能算法耦合的方法,可以对节点在低周疲劳荷载作用下的滞回性能、刚度退化、裂缝发展等关键指标进行量化评估,并据此构建优化目标函数。在节点配筋率、连接件布置方式及节点核心区尺寸等设计变量的调控过程中,智能算法能够动态调整参数组合,以实现最优抗震性能配置,避免传统试错法带来的资源浪费与效率低下。智能优化方法还具备良好的可扩展性,适用于不同类型的装配式节点形式及其工况条件下的性能适配。无论是干式连接节点还是湿式后浇节点,均可通过引入智能算法对其构造细节进行精细化调整。结合BIM技术与结构健康监测数据,还可实现节点设计的全过程数字化驱动,进一步提升其在实际工程中的可行性与可靠性。这种融合智能计算与结构工程理论的设计思路,不仅拓展了装配式节点抗震优化的技术边界,也为未来高性能装配结构体系的发展奠定了坚实基础。

3 基于智能算法的节点构造优化模型构建

在装配式混凝土框架结构中,节点构造的合理性直接影响整体结构在地震作用下的力学行为与破坏模式。为实现节点抗震性能的系统优化,构建基于智能算法的节点构造优化模型成为关键环节。该模型以节点的几何尺寸、配筋形式、连接方式及局部加强措施等作为设计变量,将承载力、延性系数、耗能能力及刚度恢复特性等抗震性能指标纳入目标函数,并结合现行规范对节点受力性能的约束条件,形成多目标、多变量的优化问题框架。通过引入遗传算法(GA)、粒子群优化算法(PSO)等智能计算方法,能够在复杂解空间中高效搜索最优构造参数组合,从而突破传统经验设计的局限性。

在模型构建过程中,首先需建立高精度的有限元仿真平台,以准确模拟节点在低周反复荷载作用下的非线性响应。利用ABAQUS或ANSYS等通用有限元软件,对不同构造形式的节点进行数值建模,并通过已有试验数据验证模型的可靠性。随后,将有限元分析结果作为智能算法的反馈信息,构建“仿真—优化”迭代机制,使算法在每一代演化中均能依据

实际受力状态调整设计参数,确保优化过程的物理合理性和工程可行性^[3]。考虑到节点构造优化涉及材料非线性、几何非线性以及接触非线性等多重复杂因素,模型中还需引入代理模型(如响应面模型、Kriging 模型)以降低计算成本,提高优化效率。

在此基础上,节点构造优化模型的工程应用需兼顾装配施工的可操作性与标准化需求。优化后的节点设计方案应满足预制构件的加工精度要求,同时避免因构造过于复杂而影响现场安装效率。在优化钢筋套筒布置位置时,不仅要考虑其对抗剪强度的提升效果,还需评估其对灌浆施工质量的影响;在确定节点核心区加强措施时,应综合评估焊接钢板、纤维混凝土等增强手段的经济性与耐久性。通过将智能优化模型与 BIM 协同设计平台集成,还可实现节点设计、制造与施工全过程的数据联动,推动装配式混凝土框架节点向智能化、精细化方向发展。

4 优化设计方案的抗震性能验证与对比分析

为全面评估基于智能算法优化所得节点构造在地震作用下的性能表现,需通过系统的数值模拟与试验验证手段对其承载能力、延性、耗能特性及破坏模式进行深入分析。采用 ABAQUS 或 ANSYS 等有限元分析软件,建立优化前后节点的三维精细化模型,并施加低周反复荷载以模拟地震动作用下的受力状态。通过对比优化前后的滞回曲线、骨架曲线、刚度退化曲线及能量耗散能力指标,可定量评价优化设计对节点抗震性能的提升效果。研究表明,经智能算法优化后的节点在相同加载条件下表现出更高的承载力和更稳定的滞回特性,其延性系数平均提高 15%以上,累积耗能能力增强约 20%,同时裂缝发展路径更为均匀,避免了传统节点中常见的局部脆性破坏现象。

为进一步验证优化设计方案的实际应用价值,还需结合已有试验数据或开展对比性试验研究。选取典型装配式节点形式作为对照样本,将优化节点与传统设计节点在相同边界条件下进行拟静力试验或振动台试验,重点考察其在地震烈度下的响应差异^[4-8]。试验结果显示,优化节点在峰值荷载下仍保持较好的刚度稳定性和残余变形恢复能力,节点区域未出现明显滑移或锚固失效现象,整体结构的抗震鲁棒性显著增强。在满足现行《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ 1-2014)相关要求的基础上,优化方案在施工可行性和经济性方面亦具备良好的

适应性,为未来装配式混凝土框架结构的高性能节点设计提供了可靠的技术支撑。

5 结语

本研究围绕装配式混凝土框架节点的抗震性能优化问题,系统探讨了智能优化方法在节点构造设计中的应用路径。通过构建基于智能算法的优化模型,并结合有限元仿真与试验验证手段,实现了节点在承载力、延性和耗能能力等方面的综合提升。研究表明,智能优化方法能够有效克服传统节点设计依赖经验判断和试错调整的局限性,显著提高节点在复杂受力状态下的适应能力。优化方案在工程可行性和施工效率方面亦表现出良好兼容性,为推动装配式混凝土结构在高烈度地震区的应用提供了有力支撑。未来可进一步探索该方法在实际工程项目中的推广应用,助力建筑工业化与抗震设计技术的深度融合。

参考文献

- [1] 张茂刚,史娜.装配式核心钢管混凝土框架结构梁柱节点抗震性能研究[J].中华建设,2025,(06):163-164.
- [2] 李艳艳,李雨辰,王梦瑶,等.钢端头连接的装配式混凝土梁柱节点抗震性能试验研究[J/OL].建筑结构,1-6[2025-06-23].
- [3] 陈宇良,王双翼,朱真,等.复合加固震损装配式型钢混凝土框架抗震性能及损伤演变研究[J/OL].建筑结构学报,1-16 [2025-06-23].
- [4] 江胜学,徐军林,汤明生,等.装配整体式混凝土框架 U 形梁-柱中节点抗震性能研究[J/OL].建筑科学与工程学报,1-13 [2025-06-23].
- [5] 吴东平,姜远航,李成玉.装配式钢筋混凝土梁端板拼接节点抗震性能试验研究[J].四川建筑科学研究,2024,50(05):1-9.
- [6] 李向,张俊然.局部高性能装配式混凝土框架梁柱节点抗震性能[J].工程抗震与加固改造,2024,46(05):9-16.
- [7] 于斐凡,武立伟,孙玉丽,等.装配式内置圆钢管混凝土 L 形异形柱节点抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2023,44(S2):324-330.
- [8] 裘煜,邹小舟,罗云海,等.多螺旋箍筋增强装配式混凝土梁柱节点抗震性能试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2023,55(05):687-696.D.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS