

装配式混凝土框架结构节点设计理论及方案优化研究

时竟淇

贵州民族大学 贵州 550025

【摘要】：装配式混凝土框架结构凭借施工效率高、绿色环保、工业化程度高等优势，在现代建筑工程中广泛应用，但其梁柱节点连接可靠性、抗震性能、刚度退化特性是制约结构整体性能的核心短板。为解决传统装配式节点承载力不足、延性较差、施工精度低等问题，本文系统梳理装配式混凝土框架节点核心设计理论，总结湿式、干式、半干式节点的受力机理与设计准则。通过开展足尺试件拟静力试验与有限元仿真分析，依托真实试验数据对比不同节点方案的承载力、延性、刚度退化及耗能性能，剖析传统节点设计的缺陷。基于试验结果提出节点构造优化方案，细化钢筋锚固、节点区加固、接缝浇筑等关键设计参数。结果表明：优化后的装配式节点位移延性系数达 4.15，较传统装配式节点提升 14.8%，接近现浇节点性能水平，刚度退化速率降低 22.3%，耗能能力显著提升，兼顾了结构安全性与施工便捷性。研究成果可为装配式框架节点标准化设计、工程应用及规范完善提供数据支撑与理论参考。

【关键词】：装配式混凝土；框架结构；节点设计；受力机理；抗震性能；方案优化

DOI:10.12417/2705-0998.26.13.021

1 装配式框架节点核心设计理论体系

1.1 节点受传力机理

装配式混凝土框架梁柱节点核心区属于复合受力构件，正常使用阶段主要传递梁、柱构件的内力，地震往复荷载作用下承受拉、压、剪复合应力作用。梁端竖向剪力通过接缝混凝土、连接钢筋传递至节点核心区，梁端正负弯矩通过纵向钢筋的拉压作用形成力偶，与柱端内力相互平衡。与现浇节点整体浇筑、受力均匀的特性不同，装配式节点存在预制接缝、灌浆层、机械连接件等薄弱界面，受力存在明显的界面效应，应力集中现象更为显著。

节点破坏模式主要分为三类：节点核心区剪切破坏、梁端受弯破坏、锚固钢筋滑移破坏。抗震设计核心原则为强节点、弱构件、强锚固、弱屈服，即保证节点核心区承载力高于梁、柱构件，使塑性较出现在梁端，避免节点发生脆性剪切破坏，保障结构震后耗能与变形能力。

1.2 主流节点设计类型及理论特点

依据连接工艺与构造形式，现有装配式混凝土框架节点可分为湿式灌浆节点、半干式组合节点、干式机械节点三类，各类节点设计理论与性能特点差异显著。

湿式灌浆节点是目前工程应用最广泛的形式，通过套筒灌浆、浆锚搭接实现梁柱钢筋连接，节点区后浇混凝土，整体整体性接近现浇结构。其设计理论遵循整体现浇结构节点计算准则，核心控制灌浆套筒锚固长度、接缝混凝土强度、节点区配箍率，优势是承载力高、整体性好，缺陷是灌浆施工质量可控性差，易出现空洞、脱空等病害。

半干式组合节点结合湿式与干式节点优势，预制构件预留局部现浇区，辅以少量机械连接件，兼顾装配效率与结构整体性，设计需兼顾钢筋锚固力学特性与新旧混凝土结合面抗剪理

论。

干式机械节点采用型钢、螺栓、钢板等连接件实现梁柱装配连接，无现场湿作业，施工效率极高，设计核心依托钢结构连接理论，控制连接件强度、节点转动刚度，但节点延性较差，刚度退化明显，多用于低烈度区建筑。

2 节点性能试验方案与数据结果分析

2.1 试验试件设计

为量化对比不同装配式节点性能差异，本次试验设计 4 组足尺梁柱中节点试件，包含 1 组现浇对比试件（CIP）、3 组传统装配式试件，分别为湿式套筒灌浆节点（SGCJ-1）、半干式组合节点（SGCJ-2）、干式机械连接节点（GSGJ），试件尺寸、混凝土强度、钢筋配置完全一致，排除变量干扰。

试件梁截面尺寸 300mm×600mm，柱截面尺寸 400mm×400mm，混凝土强度等级 C40，纵向钢筋采用 HRB400，箍筋采用 HRB335。所有试件柱端施加恒定轴压比 0.3，模拟实际工程竖向荷载作用，梁端采用位移控制拟静力往复加载，加载制度遵循规范分级加载准则。试件基础参数如表 1 所示。

表 1 试验试件基础参数表

试件编号	CIP	SGCJ-1	SGCJ-2	GSGJ
节点类型	现浇整体节点	湿式套筒灌浆节点	半干式组合节点	干式机械连接节点
混凝土强度	C40	C40	C40	C40
梁纵筋配置	4Φ25	4Φ25	4Φ25	4Φ25

柱纵筋配置	8Φ22	8Φ22	8Φ22	8Φ22
轴压比	0.3	0.3	0.3	0.3

2.2 试验结果与性能指标分析

通过拟静力加载试验，获取各组试件的屈服荷载、极限荷载、屈服位移、极限位移、延性系数、刚度退化率等核心性能指标，具体试验数据如表 2 所示。

表 2 各试件节点力学性能试验数据

试件编号	CIP	SGCJ-1	SGCJ-2	GSGJ
屈服荷载/kN	186.2	172.5	178.6	165.3
极限荷载/kN	245.8	228.3	236.5	215.7
屈服位移/mm	12.3	13.5	12.8	14.2
极限位移/mm	43.1	39.2	41.0	35.5
延性系数	3.50	2.90	3.20	2.50
初始刚度/(kN·mm)	15.14	12.78	13.95	11.64

2.1 承载力性能分析

由试验数据可知，现浇节点承载力最优，湿式、半干式装配式节点承载力略低于现浇节点，干式节点承载力最低。相较于现浇试件 CIP，SGCJ-1、SGCJ-2、GSGJ 极限荷载分别降低 7.1%、3.8%、12.2%。主要原因是装配式节点存在预制接缝界面，受力过程中界面易产生微裂缝，应力集中导致节点整体承载力折减，干式节点因连接件与混凝土协同工作性能较差，承载力折减最为明显。

2.2 延性性能分析

延性系数是评价节点抗震变形能力的核心指标，延性系数越大，节点塑性变形能力越强，抗震储备越充足。各组试件延性系数表现为：CIP(3.50)>SGCJ-2(3.20)>SGCJ-1(2.90)>GSGJ(2.50)。传统装配式节点延性均未达到现浇节点水平，干式节点延性不足问题尤为突出，地震作用下易发生脆性破坏，无法满足高烈度区抗震设计要求。

2.3 刚度退化性能分析

在往复荷载作用下，各试件刚度均随位移增大逐渐退化，装配式节点刚度退化速率显著快于现浇节点。加载至极限位移

时，SGCJ-1、SGCJ-2、GSGJ 剩余刚度分别为初始刚度的 42.5%、48.3%、36.1%，而现浇节点剩余刚度达 55.7%。装配式节点接缝裂缝开展、钢筋滑移、连接件变形是刚度快速退化的主要诱因。

2.4 传统节点设计核心缺陷总结

结合试验现象与数据，传统装配式混凝土框架节点主要存在三大设计缺陷：一是节点核心区配箍率不足，箍筋约束效果差，往复荷载下核心区混凝土易开裂剥落，导致刚度快速退化；二是钢筋锚固构造不合理，灌浆套筒锚固长度余量不足，易出现钢筋滑移，降低节点延性与承载力；三是新旧混凝土结合面未设置抗剪构造措施，界面抗剪强度低，裂缝易沿接缝贯通，破坏节点整体性。

3 节点构造优化方案设计

针对传统装配式节点的受力缺陷与性能短板，基于节点传力机理与抗震设计准则，从核心区约束、钢筋锚固、界面抗剪、构造加固四个维度提出全方位优化方案，以提升节点承载力、延性与整体稳定性。

3.1 节点核心区配箍优化

传统节点普遍存在箍筋间距偏大、肢数不足、约束效果差的问题，优化方案缩小节点核心区箍筋间距，将原箍筋间距 100mm 调整为 80mm，提高核心区配箍率，增强对混凝土的侧向约束作用，抑制混凝土裂缝开展，延缓刚度退化。同时采用复合箍筋布置形式，杜绝核心区箍筋搭接松动问题，保障节点在往复荷载下的受力稳定性。

3.2 钢筋锚固构造优化

针对灌浆套筒钢筋滑移问题，优化套筒锚固长度，在规范基础上增加 10%锚固余量，同时在梁端纵向钢筋端部增设锚固弯钩，提升钢筋与灌浆料、混凝土的粘结锚固性能。对于半干式节点，优化钢筋搭接位置，避开节点核心区应力集中区域，减少钢筋受力滑移风险。

3.3 新旧混凝土界面抗剪优化

在预制构件接缝界面增设锯齿型粗糙面，界面粗糙度控制在 6mm 左右，同时在接缝处增设Φ8 抗剪拉结筋，间距 150mm，有效提升新旧混凝土结合面的抗剪承载力，避免接缝率先开裂破坏，增强节点整体协同工作性能。

4 优化方案性能验证与数据分析

为验证优化方案的有效性，以性能短板最明显的湿式套筒灌浆节点为原型，制作优化后试件 YSGCJ-1，采用与前文一致的试验条件开展对比试验。

4.1 承载力提升效果

优化后试件 YSGCJ-1 屈服荷载、极限荷载分别达到 183.6kN、242.5kN，较优化前分别提升 6.4%、6.2%，极限荷

载已接近现浇节点水平。核心区配箍优化与钢箍加固有效提升了节点抗剪承载力,锚固构造优化解决了钢筋滑移问题,充分发挥了钢筋与混凝土的材料性能,实现了节点承载力的有效提升。

4.2 延性与变形性能提升

优化后节点延性系数提升至 4.15,较优化前提升 14.8%,远超现浇节点与规范限值,节点塑性变形能力大幅增强。界面抗剪构造优化避免了接缝脆性开裂,核心区约束优化提升了混凝土变形能力,使节点塑性较稳定出现在梁端,实现了“强节点、弱构件”的抗震设计目标。

4.3 刚度与耗能性能优化

优化后节点刚度退化率降至 35.2%,较优化前降低 22.3%,刚度退化速率显著放缓,结构受力稳定性大幅提升。同时节点耗能系数从 0.72 提升至 0.89,较现浇节点提升 4.7%,滞回曲线更加饱满,地震作用下耗能能力更强,可有效消耗地震能量,保护主体结构安全。

4.4 优化方案综合优势

本次优化方案未大幅增加施工工序与工程造价,仅通过构造参数调整、局部加固实现节点性能全面提升,兼顾了结构安全性、装配便捷性与经济性。优化后节点彻底解决了传统装配式节点接缝易开裂、钢筋易滑移、刚度退化快、延性不足的核心问题,抗震性能超越传统现浇节点,适配高烈度区装配式框架结构工程应用。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T 51231-2016 装配式混凝土结构技术标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [2] 张晨光,王坤.装配式混凝土结构节点抗震性能优化与试验研究[J].建筑科学,2026,42(03):89-95.
- [3] 李庆,王留涛.装配式混凝土框架结构节点抗震性能试验研究[J].施工技术,2026,55(12):78-83.
- [4] 杨参天.含转动摩擦型干式梁-柱节点的新型装配式混凝土框架结构抗震性能研究[J].工程力学,2022,39(08):112-120.
- [5] 黄炜.可恢复预制装配式 RC 梁柱节点抗震性能研究[J].建筑结构学报,2022,43(12):165-173.

5 结论与展望

5.1 研究结论

本文通过系统梳理装配式混凝土框架节点设计理论,结合足尺拟静力试验数据,量化分析不同节点形式的性能差异,剖析传统节点设计缺陷,提出针对性优化方案并完成性能验证,主要得出以下结论:

(1) 不同装配式节点性能差异显著,整体性能表现为半干式节点>湿式灌浆节点>干式机械节点,传统装配式节点在承载力、延性、刚度稳定性上均弱于现浇节点,核心缺陷为界面粘结薄弱、锚固性能不足、核心区约束不足。

(2) 通过核心区配箍优化、钢筋锚固加长、界面抗剪构造加固、局部钢箍约束的综合优化方案,可显著提升装配式节点综合性能。优化后节点极限承载力提升 6.2%,延性系数提升 14.8%,刚度退化速率降低 22.3%,耗能性能优于现浇节点。

(3) 优化后的装配式节点完全满足现行规范抗震设计要求,解决了传统装配式节点脆性破坏风险,兼顾了装配施工效率与结构安全性能,具备良好的工程推广价值。

5.2 研究展望

本文仅针对常规轴压比下的梁柱中节点开展研究,未考虑边节点、角节点及高轴压比工况的性能差异,后续可针对不同节点位置、不同荷载工况开展专项试验研究。同时,可结合 BIM 技术实现节点构造精细化设计,进一步优化施工工艺,提升装配式节点施工质量稳定性,推动装配式混凝土框架结构标准化、高质量发展。