

装配式混凝土结构节点连接研究综述

崔容¹, 李宇杰²

¹河北工程大学, 河北 邯郸

²邯郸城市发展投资集团有限公司, 河北 邯郸

收稿日期: 2022年9月25日; 录用日期: 2022年10月15日; 发布日期: 2022年10月26日

摘要

随着国家大力发展绿色建筑和建筑节能, 装配式建筑迎来了更好的发展机遇。节点的连接设计是装配式混凝土结构设计中的关键, 其性能将影响整个结构的强度、刚度和稳定等性能。本文首先对装配式混凝土结构的发展状况进行介绍, 其次对装配式混凝土结构梁柱节点常见连接方式及优缺点进行概括总结, 并介绍梁柱节点连接方式的研究现状, 为我国装配式混凝土结构节点的研究与应用提供参考。

关键词

装配式混凝土结构, 梁柱节点, 连接方式

Summary of Research on Joint Connection of Prefabricated Concrete Structures

Rong Cui¹, Yujie Li²

¹Hebei University of Engineering, Handan Hebei

²Handan City Development Investment Group Co., Ltd., Handan Hebei

Received: Sep. 25th, 2022; accepted: Oct. 15th, 2022; published: Oct. 26th, 2022

Abstract

With the national efforts to develop green buildings and building energy conservation, prefabricated buildings ushered in better development opportunities. The node design is the key to prefabricated concrete structure design. The node performance will affect the strength, stiffness and stability of the whole structure. In this paper, firstly, the development of prefabricated concrete structures is introduced. Secondly, the common connection modes, advantages and disadvantages of beam-column joints in prefabricated concrete structures are summarized, and the research status of the connection modes of beam-column nodes is introduced. And it will provide a refer-

ence for the research and application of assembly nodes in China.

Keywords

Prefabricated Concrete Structure, Beam-Column Joint, Connection Method

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 装配式混凝土结构梁柱节点发展状况

长期以来,传统的建筑行业存在能耗高、资源大量浪费的问题。为了改变这一现状,建筑工业化成为了解决这一现状的有效途径之一。装配式混凝土技术是建筑工业化的生产方式之一,相较于传统的现浇混凝土施工技术,该技术可以有效缩短施工工期、减少能耗、节约材料,此外还可提高工程施工质量,对社会效益和经济效益带来积极影响,在各国家得到快速发展和广泛应用。

我国装配式混凝土结构开始于 20 世纪 50 年代,主要应用于工业厂房中。20 世纪 80 年代装配式混凝土结构的应用发展到顶峰,但唐山大地震的发生,使人们对装配式混凝土结构失去信心,在唐山大地震中,大量装配式混凝土结构建筑出现了不同程度的倒塌和破坏,给人们留下了不好的印象,装配式建筑进入低迷期,逐渐被现浇混凝土建筑所代替[1]。

近年来,随着装配式建筑的需求不断增加,装配式混凝土结构在全国范围内得到广泛研究,关于装配式混凝土结构梁柱节点的各种节点类型及其构造方法的研究也日渐丰富。2018 年,陈家燊[2]设计了一种叠合装配式梁柱连接结构,通过对叠合梁柱节点和现浇梁柱节点的抗压、抗剪试验,试验结果表明,总体上叠合梁柱节点与现浇梁柱节点在变形特征及受力性能上具有一定的一致性。叠合梁柱节点在抗变形性能、抗压性能和抗剪强度相比于现浇梁柱节点具有一定的提升。2019 年,周航[3]等人以装配式混凝土梁柱节点为例,分别对预应力节点、后浇整体式节点、螺栓和焊接节点四种节点形式进行分析研究,并根据对比四种节点优劣,得出螺栓连接形式更适用于装配式建筑,螺栓连接节点更具发展前景,并提出多种连接方式进行组合的设计思路。2020 年,曹永红[4]等人基于套筒灌浆连接、螺栓连接和混合连接,提出一种新型梁柱节点,通过对 4 组实验方案进行有限元数值模拟分析,得出当轴压比相同时,新型节点的承载力和延性较现浇节点高,耗能能力和刚度退化比现浇低。2021 年,李飞涛[5]对插销式梁柱节点连接进行有限元分析,设计 5 组实验方案,得出插销式节点在位移荷载下为受弯破坏,破坏点在梁柱核心区外侧梁上,通过控制插销强度,可以使破坏点外移,有利于破坏修复工作。通过对不同装配式梁柱节点连接方式的研究,学者们所提出的连接方式的抗震性能相比于现浇节点都有一定的提高,或抗震性能相当。

2. 装配式混凝土结构梁柱节点连接方式

梁柱节点的连接方式的设计是装配式混凝土结构设计的重要组成部分,梁柱节点连接方式是否安全合理将直接影响结构的整体性和可靠度,常见的构件连接方式有两种,分别是“湿”式连接和“干”式连接[6],“湿”式连接的节点是后浇而成,相当于与现浇混凝土连接相同,具有承载能力高等优点,“干”式连接不需要在施工现场进行混凝土浇筑工作,施工速度快,有效缩短施工工期并且具有工业化程度高的优点。梁柱节点连接常见方式及优缺点如表 1 所示。

Table 1. Common beam column joint connection and its advantages and disadvantages**表 1.** 常见梁柱节点连接及优缺点

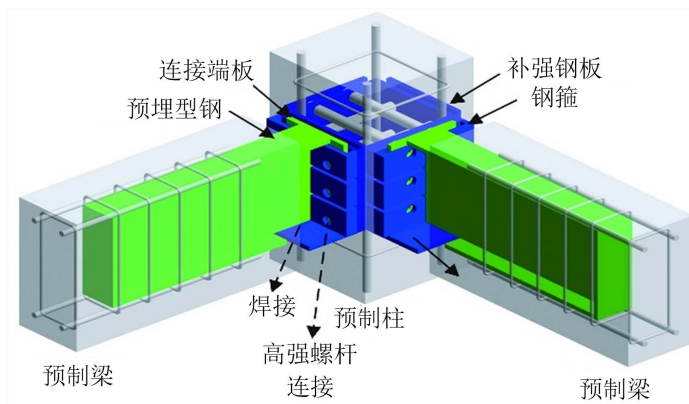
类型	连接方式	优点	缺点
干式连接	焊接连接	缩短工期, 节省养护时间	无法设置明显塑性铰, 抗震性能差, 易发生脆性破坏
	牛腿连接	承载力大, 节点刚性好, 吊装方便	连接方式整体性差, 不美观
	螺栓连接	安装速度快, 抗震性能好	构件精度要求高, 运输和安装要求严格
湿式连接	套筒灌浆连接	节点整体好, 能够承受较大荷载	材料质量要求高
	后浇整体式连接	整体性好	施工进度慢
	浆锚搭接	成本低	应用于低烈度地区

2.1. 干式连接梁柱节点

2.1.1. 焊接连接

焊接连接主要通过焊接的方式将预埋在预制构件中的钢板连接在一起, 不进行现场混凝土浇筑工作, 是预制构件中常用的连接方式之一。

高向玲[7]等人提出了一种改进的梁柱节点, 将梁内的纵筋和 I 字型钢焊接, 通过实验表明, 该节点抗震性能良好, 承载力和刚度比现浇节点高, 骨架曲线更加饱满, 可作为预制混凝土框架结构梁柱节点的连接方式。Ketiyo[8]等人提出了一种 T 型截面型钢嵌入预制混凝土梁和节点核心区的梁柱节点, 结果表明带有双钢 T 型截面的预制试件具有更好的抗震性能, 但连接到钢板的销钉栓太短, 无法形成粘合, 影响了结构的整体强度。郭震[9]等设计了一种插接式的梁柱节点, 节点连接如图 1 所示。通过低周往复试验和有限元模拟分析。研究结果表明, 该节点的承载力高于现浇节点。

**Figure 1.** Plug in beam column joint connection**图 1.** 插接式梁柱节点连接

李虎[10]等人为研究装配式混凝土梁柱节点的抗震性能, 提出了一种钢节点连接方式, 钢节点连接部件由上下连接钢板、钢筒和栓钉焊接构成, 对节点模型试件进行低周往复加载试验, 结果表明, 与整浇节点相比具有更好的承载力、刚度和耗能能力。胡习兵[11]参考钢结构构件连接方式, 提出一种型钢连接的装配式混凝土梁柱节点, 在预制梁、柱的连接部位和节点核心区通过焊接进行连接, 连接方式如图 2 所示。研究结果表明, 该连接方式显著改善了节点的力学性能和破坏形态, 为装配式混凝土构件的连接方式提供参考。

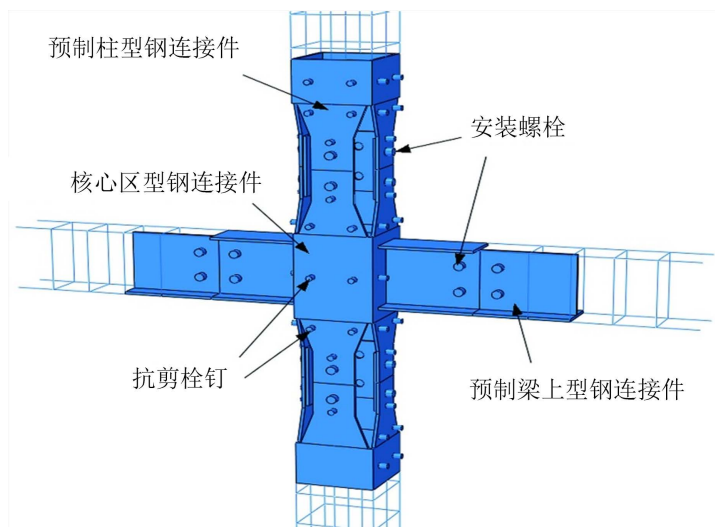


Figure 2. Section steel connection beam column node
图 2. 型钢连接梁柱节点

各学者对焊接节点的研究如表 2 所示。

Table 2. Performance comparative analysis of welded joints
表 2. 焊接节点性能对比分析

新型焊接节点连接方式	性能分析
I 字型钢与纵筋焊接	节点抗震性能良好, 承载力和刚度比现浇节点高
T 型截面型钢嵌入梁柱节点	抗震性能好, 但销钉栓太短, 影响整体强度
连接端板型钢与补强钢板焊接	承载力高于现浇节点
钢板、钢筒和栓钉焊接	承载力、刚度和耗能能力高于现浇节点
核心区型钢焊接	改善了节点的力学性能和破坏形态

综上, 焊接连接可以缩短施工工期, 具有良好的承载力, 是装配式混凝土结构节点连接的重要发展方向之一, 但目前焊接连接仍存在焊接区域温度较高, 容易对混凝土造成损伤, 并且存在尺寸偏差的问题。

2.1.2. 螺栓连接

螺栓连接是指在构件连接处预留孔洞或预埋螺母, 再通过螺栓来连接到一起的一种连接方式。

Ghayeb [12]等提出了一种新型预制构件干式连接节点, 设计 4 组低周反复荷载下的梁柱节点试验, 结果表明, 这种新型节点连接具有稳定的荷载 - 位移循环, 并消耗较高的能量, 节点最大结构位移角 9.0%, 当位移角为 4.5%时节点发生破坏, 具有良好的抗震性能。俞忠[13]提出了一种新型的螺栓梁柱节点, 通过有限元软件进行建模分析, 结果表明该节点具有很好的抗震性能和承载性能, 并且可以有效提高施工效率。王丰磊[14]提出一种干式连接方法的梁柱节点, 通过 ABAQUS 有限元软件进行数值仿真分析和拟静力试验探索不同轴压比和螺栓预紧力对梁柱节点性能的影响, 结果表明这种节点连接方式能够满足强柱弱梁的设计原则, 螺栓预应力加大时对刚度、变形等没有太大的影响, 但轴压比增大时, 构件的耗能性能比较大, 在高轴压比下, 构件发生破坏。杨洪渭[15]等将钢结构节点连接与钢筋混凝土结构结合起来, 提出了一种新型的装配式梁柱节点, 如图 3 所示。预制梁、柱通过焊接和高强度螺栓进行连接,

试验结果表明, 新型梁柱节点具有更高承载力和变形能力, 并且滞回性能得到改善, 节点抗震性能提高。

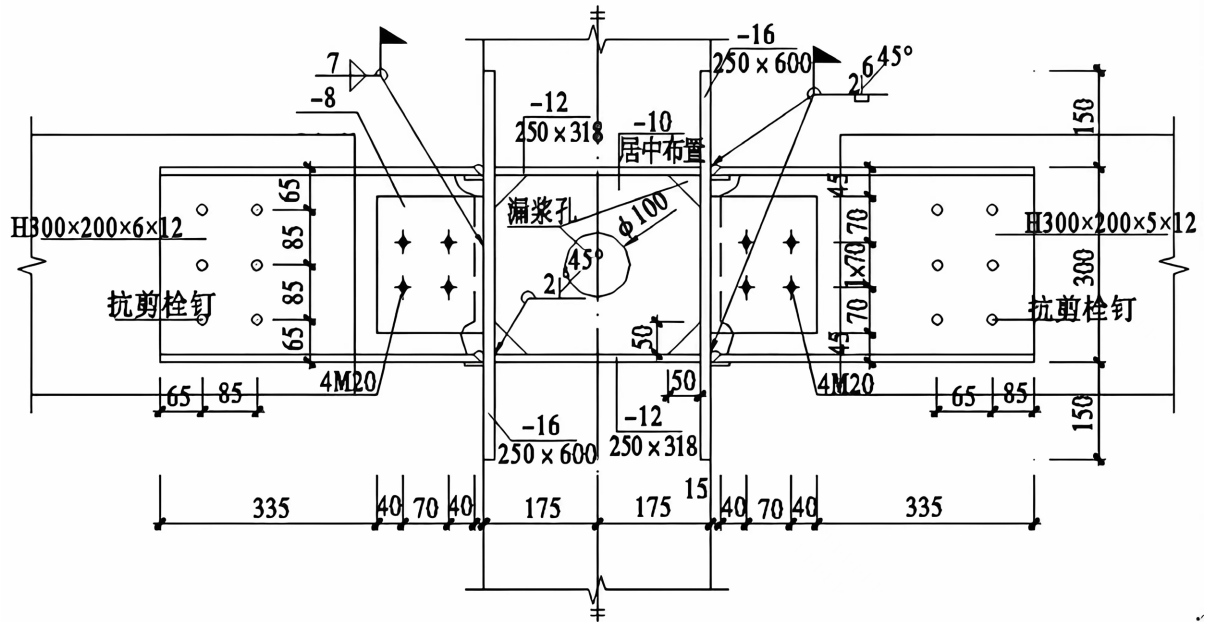


Figure 3. Node connection diagram
图 3. 节点连接图

杨翌[16]等人设计了一种新型的螺栓连接梁柱节点, 通过拟静力实验对节点抗震性能进行研究。实验结果表明, 该新型节点的刚度和承载力虽然有所降低, 但符合“强柱弱梁, 强剪弱弯”的设计原则。各学者所提出的新型螺栓连接方式概括如表 3 所示。

Table 3. New type of bolt connection
表 3. 新型螺栓连接方式

新型螺栓节点连接方式	性能分析
切节点连接多为螺栓连接	抗震性能和承载性能, 可提高施工效率
分析轴压比和螺栓预紧力对节点性能影响	满足强柱弱梁的设计原则, 轴压比对节点性能影响较大
预制梁柱通过焊接高强螺栓连接	节点抗震性能提高, 滞回曲线得到改善
上、下柱整浇, 柱内预定位置预埋螺栓	刚度和承载力虽有所降低, 但符合“强柱弱梁, 强剪弱弯”的设计原则

综上, 螺栓连接安装速度快, 抗震性能良好, 传力途径明确, 具有更好的应用前景。但螺栓连接构件精度要求高并且安装运输要求严格, 避免螺栓在安装时出现问题。

2.1.3. 牛腿连接

牛腿连接是将预制构件通过铰接或焊接在牛腿上的一种连接方式, 牛腿连接分为明牛腿连接和暗牛腿连接。明牛腿一般用于对外观要求不高的工业厂房, 暗牛腿一般用于外观要求高的建筑。

为研究装配式混凝土梁柱节点在地震作用下的构件抗震性能, 丁克伟[17]等提出了一种新型的梁柱连接节点, 将牛腿柱与 T 型梁进行连接, 通过试验和数值分析得出节点具有良好的抗震力学性能。Vidjeapriya [18]等对明牛腿连接预制梁柱节点和现浇梁柱在反向循环荷载作用下进行试验研究, 试验结果表明, 新型

的明牛腿连接的能量耗散和延性高于现浇梁柱节点。黄祥海[19]提出一种新型的钢板焊接暗牛腿柱节点, 通过实验发现, 与现浇混凝土梁柱节点的承载力相当, 但变形能力大于现浇节点。这种新型的钢板焊接暗牛腿柱节点如图4所示。

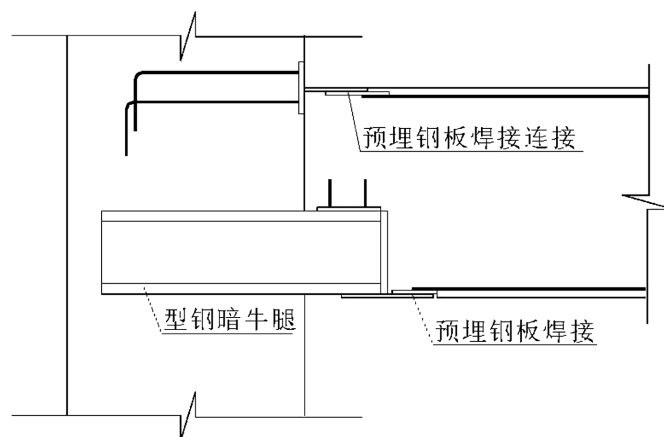


Figure 4. Steel plate welded concealed corbel column node
图4. 钢板焊接暗牛腿柱节点

李晓[20]提出一种新型的装配式阶梯型干式和法兰盘型干式暗牛腿梁柱节点连接方式, 与现浇梁柱节点进行抗震性能对比试验。结果表明, 三者均具有良好的延性, 在极限承载力方面, 装配式法兰盘型节点最差, 现浇节点与阶梯型干式承载力相当。王宇[21]等提出一种新型暗牛腿连接梁柱节点, 研究混凝土强度对牛腿连接梁柱节点受力性能的影响, 结果表明, 新型装配式混凝土试件比现浇混凝土试块具有更好的塑性变形能力, 抗震性能更好。新型暗牛腿柱梁柱连接如图5所示。

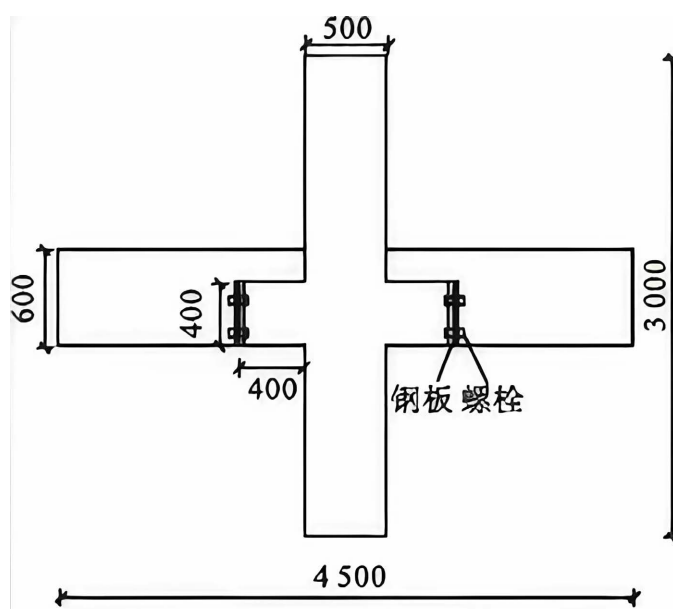


Figure 5. Assembled concealed corbel column beam column joint
图5. 装配式暗牛腿柱梁柱节点

对各学者所提出的装配式牛腿柱连接方式概括如表4所示。

Nerio [24]等和高林[25]等对装配式灌浆套筒连接梁柱节点进行低周反复荷载试验, 研究节点的抗震性能。结果表明, 装配式灌浆套筒连接节点具有与现浇节点相似的抗震性能, 可用于实际工程。

综上, 套筒连接的抗震性能与现浇节点相当, 抗震性能良好, 学者们所提出的新型套筒连接方式能够满足抗震设防要求, 可在实际工程应用。

2.2.2. 后浇整体式连接

后浇整体式连接是指局部通过二次浇筑混凝土的方式而成的连接方式, 具有操作简单, 整体性好等特点, 经过合理的设计, 其性能与现浇相似, 因此在我国得到广泛应用。

吴从晓[26]为研究梁柱节点的抗震性能, 将现浇式与后浇整体式进行实验对比, 结果表明, 虽然二者抗震性能相近, 但后浇整体式梁柱节点的退化速度较快。章一萍[27]等人从构件划分和钢筋连接两个方面对节点进行阐述, 基于此, 提出了三种新型后浇整体式梁柱节点, 通过低周往复试验发现这三种新型的节点在强度和刚度方面等同现浇节点, 三种新型节点连接方式如图7所示。

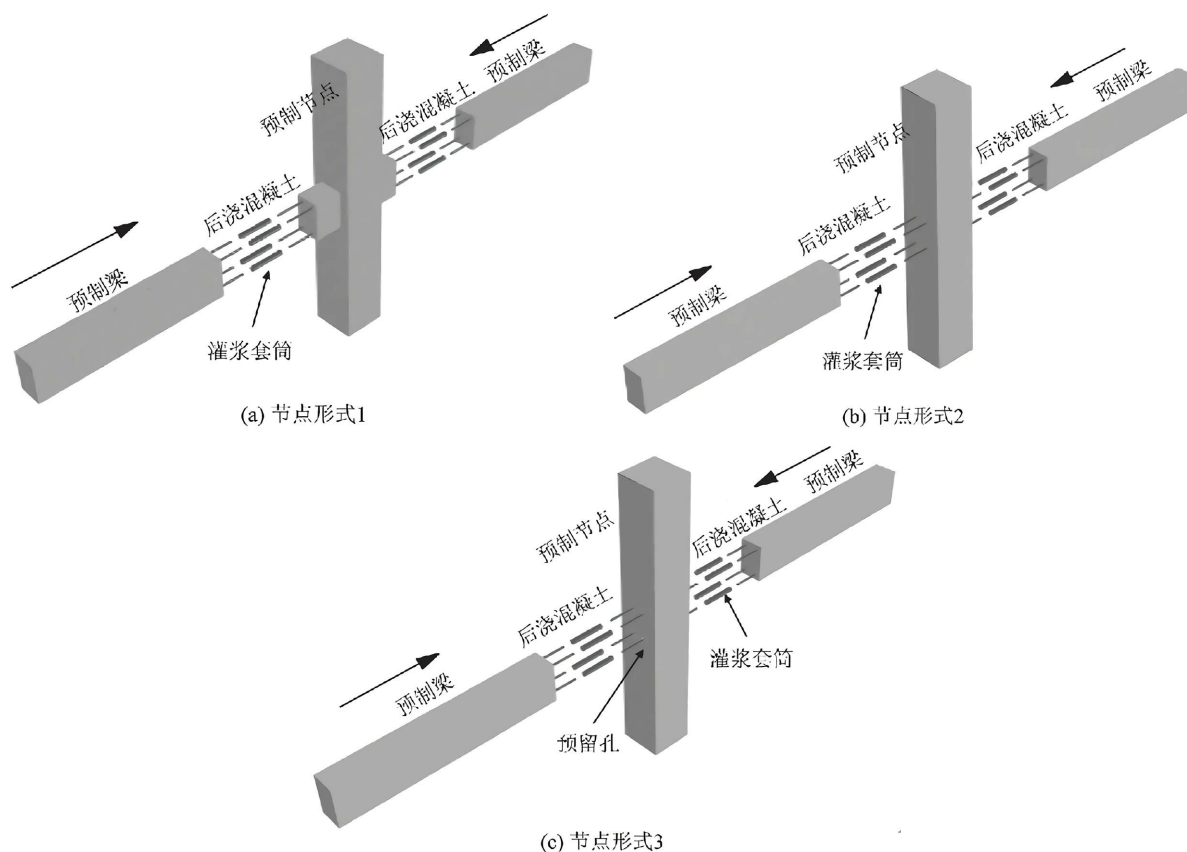


Figure 7. Schematic diagram of three new types of post cast integral beam column joints
图7. 三种新型后浇整体式梁柱节点示意图

赵斌[28]等对高强预制混凝土结构后浇整体式梁柱节点与现浇高强预制混凝土梁柱节点的抗震性能指标进行系统的研究, 结果表明, 二者具有相同的抗震能力。Guan [29]等设计了一种新型装配后浇整体式梁柱节点, 通过抗震性能试验表明, 该连接节点在反向循环荷载作用下表现良好, 符合“强柱弱梁”。

综上, 学者们所提出的后浇整体式连接的抗震性能与现浇节点相当, 符合“强柱弱梁”的要求, 装配式后浇整体式连接施工技术比较成熟, 但存在机械化程度低、不经济等问题。

2.2.3. 钢筋锚固或搭接

钢筋锚固是指预制梁、柱节点核心区钢筋采用锚固或搭接的方式进行连接, 然后通过现场浇筑的方式形成整体。

于建兵[30]等提出一种新型钢筋锚固连接方式, 将预制梁底部钢筋用钢绞线进行代替, 并且将其端部压成散弯压花锚状, 连接方式如图 8 所示。试验研究表明, 新型节点具有较好的耗能能力, 能满足抗震规范要求。

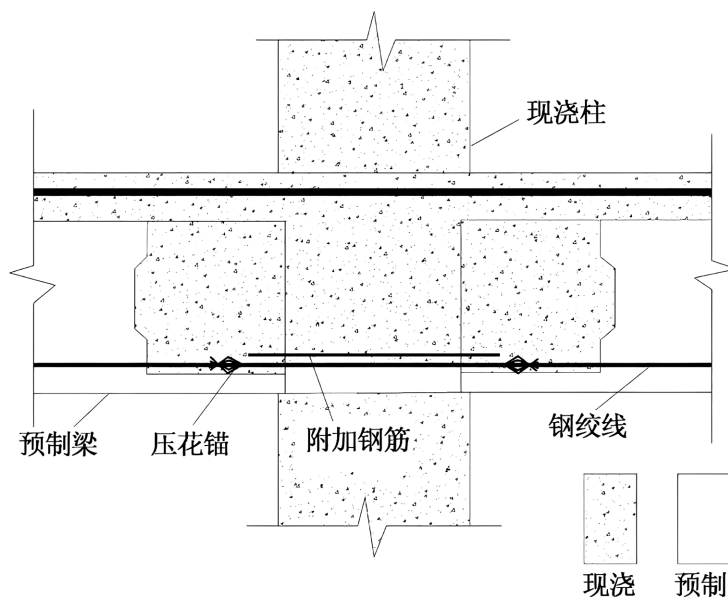


Figure 8. Schematic diagram of new reinforcement anchorage connection
图 8. 新型钢筋锚固连接示意图

Lee [31]等完成了六个梁柱节点的低周反复荷载试验, 其中三个中节点、三个边节点, 通过试验对比梁下部纵筋在节点处分别采用弯锚、锚头连接对节点性能的影响。试验结果表明, 该连接方式与现浇混凝土节点抗震性能相近。Girgin [32]等提出一种改进的混合梁柱连接, 设计 6 组试样进行实验, 实验结果表明, 在套筒内取消焊接钢筋的粘合可以降低连接附近的应变需求, 表现出更好的延展性。

综上, 装配式混凝土节点连接多采用预制梁纵筋在节点处锚固, 钢筋锚固方式多为直线锚固、弯锚等, 使得节点区域钢筋密集, 增大混凝土浇筑的难度, 但陈宜虎等[33]人提出一种钢筋 U 型环扣连接的装配式混凝土新型连接节点, 构造简单, 可以很好的解决后浇整体式梁柱核心区钢筋锚固复杂的问题。

3. 结论

我国装配式建筑起步较晚, 对装配式混凝土结构节点连接的研究还不够完善, 节点连接是制约装配式建筑发展的主要因素之一。但随着技术的不断完善和经验的不断积累, 多种新型节点连接方式层出不穷, 给装配式混凝土结构节点的研究发展带来了新的希望。本文对装配式混凝土结构梁柱节点主要连接方式进行了概括总结, 并对目前装配式梁柱节点的研究现状进行介绍, 为我国装配式混凝土结构节点的研究与应用提供了参考。

基金项目

河北省自然科学基金资助项目(E2020402079); 河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2019114)。

参考文献

- [1] 陈建伟, 苏幼坡. 预制装配式剪力墙结构及其连接技术[J]. 世界地震工程, 2013, 29(1): 38-48.
- [2] 陈家桑. 叠合装配式梁柱连接结构及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
- [3] 周航, 裘卫明, 汪清磊, 张芳. 装配式混凝土框架梁柱节点连接方法研究[J]. 工程技术研究, 2019, 4(24): 21-22.
- [4] 曹永红, 金豪, 蒋豪. 全预制装配式混凝土框架结构新型梁柱节点研究[J]. 施工技术, 2020, 49(5): 29-33+84.
- [5] 李飞涛. 装配混凝土结构插销式梁柱节点受力性能有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.
- [6] 刘琼, 李向民, 许清风. 预制装配式混凝土结构研究与应用现状[J]. 施工技术, 2014, 43(22): 9-14+36.
- [7] 高向玲. 预制混凝土梁柱节点试验及框架受力性能分析[J]. 湖南大学学报, 2017, 44(7): 97-103.
- [8] Ketiyot, R. and Hansapinyo, C. (2018) Seismic Performance of Interior Precast Concrete Beam-Column Connections with T-Section Steel Inserts under Cyclic Loading. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **17**, 355-369. <https://doi.org/10.1007/s11803-018-0446-9>
- [9] 郭震, 贾笑岩, 丁嘉慧, 宋隽, 严旻, 刘毅, 李富民. 插接装配式混凝土梁柱节点抗震性能[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(2): 256-264.
- [10] 李虎, 杜永峰, 李芳玉. 装配式混凝土梁柱节点抗震性能试验研究及参数分析[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(S1): 88-97.
- [11] 胡习兵, 陈瑞, 曾裕林, 王心意, 毛健宇, 李清山. 型钢连接装配式混凝土梁柱节点力学性能研究[J]. 建筑科学, 2021, 37(11): 8-14.
- [12] Ghayeb, H.H., Razak, H.A. and Ramli Sulong, N.H. (2017) Development and Testing of Hybrid Precast Concrete Beam-to-Column Connections under Cyclic Loading. *Construction and Building Materials*, **151**, 258-278. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.073>
- [13] 俞忠, 黄慎江. 预制装配式钢骨接头钢筋混凝土边节点抗震性能有限元分析[J]. 工程与建设, 2018, 32(3): 377-382.
- [14] 王丰磊. 新型装配式混凝土框架结构整体式梁柱节点研究[J]. 建材与装饰, 2018(24): 94.
- [15] 杨洪渭, 戎贤, 张健新. 装配式钢筋混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. 世界地震工程, 2019, 35(4): 68-73.
- [16] 杨翌, 吕伟, 包亮. 基于螺栓连接的新型钢筋混凝土框架装配式节点抗震性能研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(8): 93-99.
- [17] 丁克伟, 李为. 一种新型装配式梁柱节点力学性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2021, 47(1): 31-41.
- [18] Vidjeapriya, R. and Jaya, K.P. (2013) Experimental Study on Two Simple Mechanical Precast Beam-Column Connections under Reverse Cyclic Loading. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **27**, 402-414. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000324](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000324)
- [19] 黄祥海. 新型全预制装配式混凝土框架节点的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2006.
- [20] 李晓. 预制装配式混凝土框架梁柱节点受力性能分析[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
- [21] 王宇, 王立志, 李峥, 刘铁林. 低周反复荷载下新型装配式梁柱节点力学性能分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(2): 245-253.
- [22] 刘洪涛, 闫秋实, 杜修力. 钢筋混凝土框架梁柱节点灌浆套筒连接抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(9): 54-61.
- [23] 罗翼锋. 冷挤压套筒连接装配式再生混凝土梁柱节点抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [24] Tullini, N. and Minghini, F. (2016) Grouted Sleeve Connections Used in Precast Reinforced Concrete Construction—Experimental Investigation of a Column-to-Column Joint. *Engineering Structures*, **127**, 784-803. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.09.021>
- [25] 高林, 刘英利, 张啸驰, 秦童. 预制装配框架结构灌浆套筒式节点试验研究[J]. 世界地震工程, 2016, 32(1): 75-80.
- [26] 吴从晓, 周云, 赖伟山, 张玉凤, 邓雪松. 现浇与预制装配式混凝土框架节点抗震性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(3): 60-66.
- [27] 章一萍, 隗萍, 张春雷, 冯波, 熊峰, 王初翀, 周练. 新型装配式混凝土框架结构后浇整体式梁柱节点研究[J]. 四川建筑科学研究, 2017, 43(3): 110-115.
- [28] 赵斌, 吕西林, 刘丽珍. 全装配式预制混凝土结构梁柱组合件抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(4): 101-108.

2005(1): 81-87.

- [29] Guan, D.Z., Jiang, C., Guo, Z.X., *et al.* (2018) Development and Seismic Behavior of Precast Concrete Beam-to-Column Connections. *Journal of Earthquake Engineering*, **22**, 234-256.
<https://doi.org/10.1080/13632469.2016.1217807>
- [30] 于建兵, 郭正兴, 管东芝, 袁晨迪. 新型预制装配框架混凝土梁柱节点抗震性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(7): 42-47.
- [31] Lee, H.-J., Chen, H.-C. and Syu, J.-H. (2017) Seismic Performance of Emulative Precast Concrete Beam-Column Connections with Alternative Reinforcing Details. *Advances in Structural Engineering*, **20**, 1793-1806.
<https://doi.org/10.1177/1369433217693633>
- [32] Girgin, S.C., Misir, I.S. and Kahraman, S. (2017) Experimental Cyclic Behavior of Precast Hybrid Beam-Column Connections with Welded Components. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **11**, 229-245.
<https://doi.org/10.1007/s40069-017-0190-y>
- [33] 陈宜虎, 卢旦, 张敏, 谢光信. 装配式混凝土梁柱节点 U 型钢筋环扣连接性能研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(6): 1552-1561.