

# 螺栓连接的装配式混凝土梁柱节点抗震性能研究综述

贾旭东, 董锦坤

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2025年3月16日; 录用日期: 2025年4月7日; 发布日期: 2025年4月18日

## 摘要

梁柱节点研究是装配式混凝土抗震性能研究的重要环节, 通过总结国内外装配式混凝土螺栓连接的实验及数值模拟研究, 在明晰装配式混凝土螺栓连接形式的基础上, 进一步深入分析了不同螺栓连接类型对结构的影响, 得出螺栓连接节点具有较好的抗震性能, 能有效提高结构的承载能力。最后, 对该研究进行了总结与展望。

## 关键词

装配式混凝土, 梁柱节点, 抗震性能, 螺栓连接

## Summary of Research on Seismic Performance of Prefabricated Concrete Beam-Column Joints Connected by Bolts

Xudong Jia, Jinkun Dong

School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: Mar. 16<sup>th</sup>, 2025; accepted: Apr. 7<sup>th</sup>, 2025; published: Apr. 18<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

The study of beam-column joints is an important link in the study of seismic performance of prefabricated concrete. By reviewing experimental and numerical studies on bolted connections in domestic and foreign research, this paper first clarifies the types of such connections. It then in-depth analyzes the impact of different bolted connections on structures, finding that these joints have good seismic performance and can effectively enhance load-bearing capacity. Finally, the paper

summarizes the research and provides prospects for future work.

## Keywords

Prefabricated Concrete, Beam-Column Joints, Seismic Performance, Bolted Connection

Copyright © 2025 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. 引言

近年来,装配式建筑凭借其工业化生产、高效施工和绿色环保的显著优势,已成为全球建筑行业转型升级的重要方向[1],但地震依旧对建筑结构带来巨大财产损失。

在地震频发的地区,建筑结构的抗震性能显得至关重要[2]。梁柱节点于装配式结构而言,是核心枢纽。在地震作用下,梁柱节点所表现出的抗震性能,直接决定了结构是否能够有效抵御地震波,从而保障结构在地震过程中维持应有的安全性和稳定性,避免因节点破坏而引发的结构整体性失效等严重问题[3]。因此对于节点的创新及设计优化决定了地震灾害中的损失。螺栓连接节点有着良好的连接性能,被广泛应用在装配式建筑结构中。本文就国内外不同螺栓连接的实验和有限元分析的发展现状进行阐述。

## 2. 螺栓连接形式

装配式混凝土结构的连接形式多样化,依据施工工艺的差异,在装配式混凝土框架结构里,梁柱节点的连接方式主要可划分为湿接与干接这两大类别[4]。

螺栓连接为干式连接的其中一种,是通过在预制构件预留螺栓孔洞或预埋型钢构件中开孔,然后利用螺栓将预制构件连接成一体的连接方式。见图1为螺栓连接示意图。

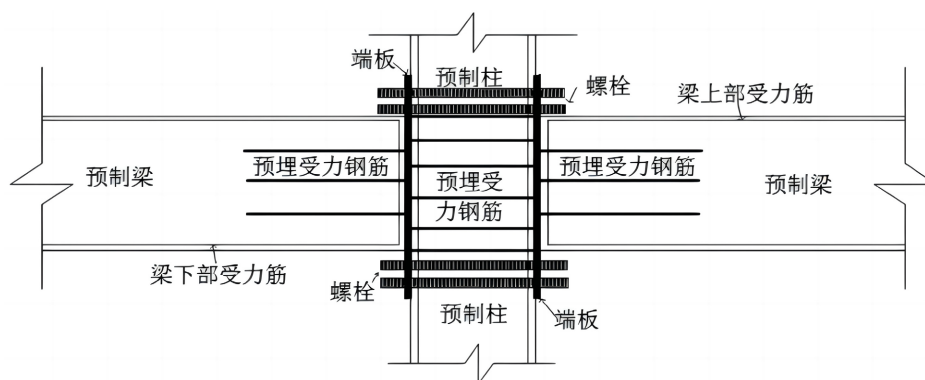


Figure 1. Schematic diagram of the bolt connection

图1. 螺栓连接示意图

## 3. 螺栓连接国外研究现状

国外在节点抗震性能的研究领域起步较早,在20世纪60年代,建筑物的损坏中梁柱节点的破坏尤为常见。为了解决因节点破坏引发的安全问题,各国的研究人员进行了大量实验以增强节点的抗震性能。为后续的研究者提供了丰富的经验和建议。

HE YX 等[5]介绍了一种用螺栓连接的预制部分包覆复合(PEC)梁与混凝土填充钢管(CFST)柱的节点。研究比较了两种不同的连接方式:端板连接和 $\pi$ 型连接。实验结果表明,两种连接方式均导致了 PEC 梁内部混凝土的压碎现象,并伴随着局部屈曲以及最终梁翼缘的断裂。端板连接方式因其优异的滞回性能和高延性而表现出色,而 $\pi$ 型连接件连接则由于连接件与梁之间的相对滑移,导致其刚度、延性和能量耗散能力有所降低。

HE ZF 等[6]提出了一种预制粘弹性阻尼螺栓连接(VDBJ),以解决预制混凝土梁柱连接采用螺栓连接时承载能力不足的问题,见图 2 粘弹性阻尼器连接图。VDBJ 利用粘弹性(VE)阻尼器提供能量耗散和额外刚度,提高了连接的抗震性能。研究比较了三个全尺度梁柱连接试件的行为:现浇连接、无 VE 阻尼器的预制螺栓连接以及带有 VE 阻尼器的预制螺栓连接。试验结果表明,所提出的 VDBJ 具有比现浇连接更强的极限承载能力和位移延性。

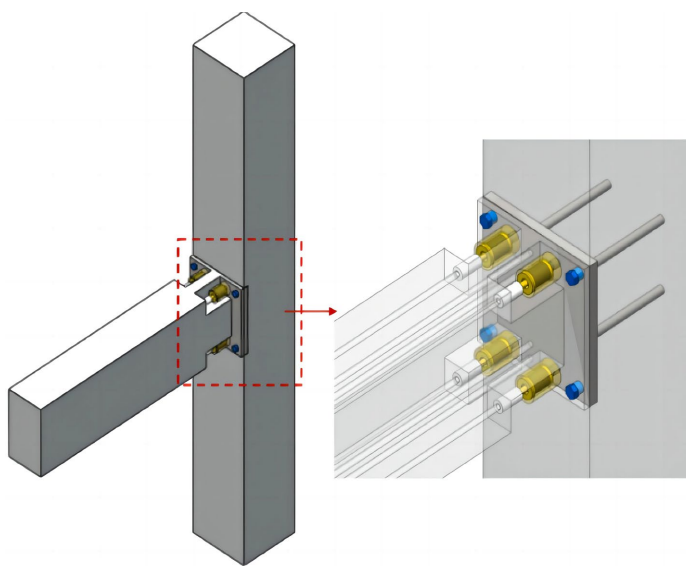


Figure 2. Viscoelastic damper connection diagram  
图 2. 粘弹性阻尼器连接图

JIANG HT [7]等针对一种新型的、位于预应力混凝土梁和高强度钢筋约束混凝土柱之间的端板螺栓连接节点,进行了抗震性能的测试与评估。通过与传统现浇节点的对比试验,系统剖析了试件的各项性能。实验结果揭示,所提出的新型预应力预制钢筋混凝土梁与高强度钢筋约束混凝土柱的端板螺栓连接节点,在实现“强柱弱梁”设计理念方面的有效性。该节点不仅展现出了优异的延性,而且在能量耗散和抗震性能方面均表现卓越。

XUE HY [8]等针对预应力预制钢筋混凝土梁柱节点的抗震性能及剪切承载力进行了深入探究,并提出了一种新型节点连接方式。该节点通过钢套管和高强度螺栓进行装配,以实现预应力预制钢筋混凝土梁与高强度钢筋约束混凝土柱的连接。实验结果揭示,相较于传统现浇钢筋混凝土(RC)节点,该新型节点在耗能性能、承载力以及自复位能力方面均展现出优越性。此外,研究还提出了一种预测采用钢套管组装的预应力预制 RC 节点剪切承载力的公式,为该新型连接节点的设计和应用提供了理论依据。

其计算公式如下:

$$V'_j = f_c A_c \cos \theta + 0.05 N_p \quad (1)$$

$$V'_{jACI} = 0.083 \gamma \sqrt{f_c} b_j h_j + 0.05 N_p \quad (2)$$

式中:  $f_c$  为混凝土的轴向抗压强度;  $A_c$  为斜压支柱的有效横截面积;  $\theta$  为斜压支柱与水平轴之间的夹角;  $N_p$  是预应力筋的有效预应力;  $N_c$  为柱端轴向荷载;  $h_j$  为有效高度;  $b_j$  有效宽度;  $\gamma$  为梁柱节点类型的影响系数。

ZHANG XZ 等[9]提出了一种梁顶部的纵向钢筋采用直螺纹套筒锚固到柱子上, 而底部的钢筋则焊接到一个螺栓固定在柱子上的钢制连接件上的新型节点。研究者对三个试件进行了循环加载试验, 其中包括两个采用新型节点和一个采用传统现浇节点的试件。实验结果表明, 所有梁柱节点均出现梁铰链破坏, 混凝土与钢制连接件之间未观察到滑移, 且现浇节点的承载能力和刚度低于新型节点。

GHAYEB HH [10]等提出了一种采用型钢、钢管及螺栓等连接的混合节点, 在反复循环加载下进行了测试。实验结果表明, 相较于整体连接, 混合连接在荷载、位移、偏移比、延性、强度、刚度和能量耗散等多个关键性能指标上均展现出更优的表现。尤为重要的是, 混合连接能够有效地将塑性铰区域转移至连接区域之外, 从而避免结构发生突发性坍塌, 提高了结构的整体安全性和抗震性能。

许多学者借用数值模拟软件来研究节点的抗震性能, 取得了丰富的成果。

XIAO Y 等[11]旨在探究螺栓和型钢连接的半刚性混凝土梁柱节点与传统现浇节点在承载能力和抗震性能方面的差异。为此, 研究者提出了一种新型的半刚性连接节点, 并利用有限元分析方法建立了两种节点的模型。在低周往复位移荷载作用下, 对这些模型进行了详细的分析。结果显示, 新型组合节点的极限承载能力提高了 31.7%, 延性提高了 7.23%, 能量耗散能力也显著提升, 相较于传统现浇节点, 在抗震性能方面展现出更优越的表现。

BARAN 等[12]为了研究钢组件的抗弯预制混凝土梁柱连接的抗震性能, 提出一种柱内预埋螺杆, 梁端预埋钢连接板, 通过螺栓和角钢连接的梁柱节点。对组件进行了反向循环荷载试验及线性有限元分析来模拟连接的行为, 实验结果表明, 破坏大部分发生在梁和钢构件上, 柱的损害被大大降低, 起到了“强柱弱梁”的设计理念, 预制连接的强度和刚度水平与整体式连接相当。

#### 4. 螺栓连接国内研究现状

我国的装配式研究晚于国外, 但近年来国内学者针对这一板块进行了广泛的研究, 涵盖了实验测试、数值模拟以及理论分析等多个层面。这些研究揭示了不同螺栓连接形式、材料特性和施工质量对节点抗震性能的影响, 为后续的设计和优化提供了重要参考。

丁克伟等[13]针对预制钢筋混凝土(RC)梁柱节点的抗震性能进行了深入剖析, 通过调整螺栓强度和柱体混凝土强度来优化节点性能。实验结果表明, 该节点展现出了优异的抗震性能, 符合“强柱弱梁”的设计原则。

李正英等[14]为了探究了预制混凝土框架中半刚性梁柱节点的抗震性能, 提出了一种通过端板和螺栓连接的梁柱节点, 见图 3 端板连接示意图。并进行了准静态试验。结果表明, 所设计的半刚性节点能够符合钢筋混凝土结构在耗能性能和延性方面的需求。

程蓓等[15]将钢构件嵌入预制混凝土梁柱中并用高强螺栓连接起来。在全尺度抗震性能对比实验中, 新型连接方式与传统现浇梁柱节点的表现相当, 均展现出了良好的耗能特性。此外, 新型连接方式在施工成本上相较于传统节点有所降低, 显示出其在工程应用中的潜力和经济效益。

马强强等[16][17]提出了由上钢柱、下钢柱、内套管、加强型伸长端板组件和复合螺栓连接的新型的预制梁柱连接。在进行低周往复荷载试验以评估装配式混凝土结构的抗震性能时, 对三个 1/2 比例的试件进行了测试。试验结果揭示, 该结构连接方式展现出了优异的能量耗散能力, 塑性变形集中在柱壁和延伸端板区域; 该节点还具有一定的转动刚度, 表现出半刚性行为; 进一步地, 通过改变套筒的厚度, 可以使连接核心剪切刚度发生变化。

国内数值模拟研究晚于国外,但也取得了满意的学术成果。

吴东平等[18][19]提出一种带有钢套筒和螺栓连接的预制梁柱节点设计,对节点试件进行了准静态试验与有限元模拟分析。实验数据与有限元分析结果之间的高度一致性验证了模型的准确性。研究进一步发现,通过增加纵向钢筋比例、增设加劲肋、优化端板厚度、提升螺栓等级以及调整轴压比等措施,可以有效提升节点的抗震性能。

王鸣[20]提出一种钢筋螺栓连接的新型节点。通过有限元分析表明,该节点改善了破坏模式,实现了塑性铰的外移,并表现出较高的承载能力、良好的能量耗散性和优异的抗震性能。此外,该节点设计能够适应不同混凝土强度等级的要求,与预制建筑工业化的发展趋势相契合。

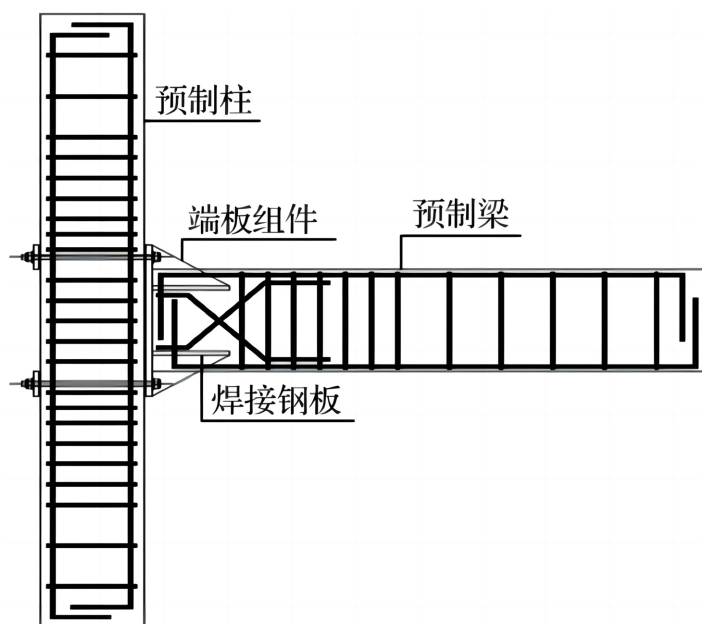


Figure 3. Schematic diagram of the end plate connection

图 3. 端板连接示意图

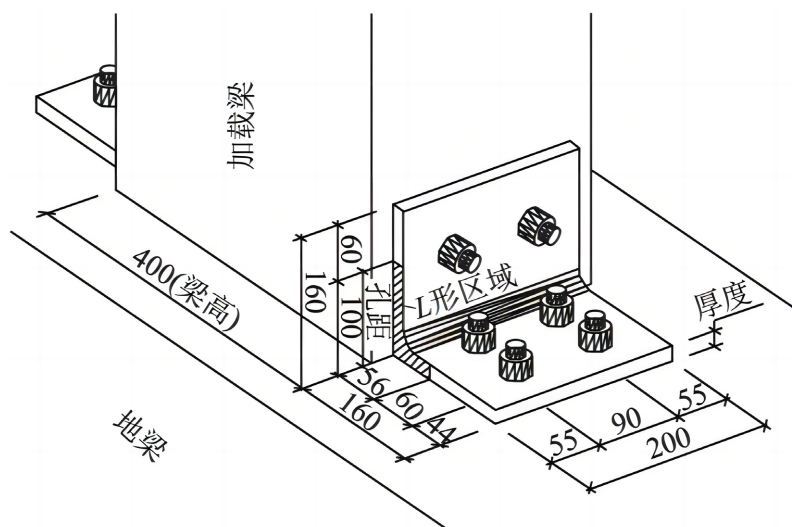


Figure 4. Schematic diagram of angle steel connection

图 4. 角钢连接示意图



范夕森等[21][22]深入剖析预制混凝土梁柱节点在塑性变形阶段的力学响应, 以及特殊形状柱框架侧向连接件的抗震特性, 这些分析均通过角钢与螺栓连接技术来实现, 见图 4 为角钢连接示意图。研究采用了实验验证与有限元分析相结合的方法。结果揭示, 利用双折线本构模型对角钢进行的有限元分析能够精确模拟实验结果, 从而明确区分结构的弹性与塑性行为。预制接头与现浇接头具有相同的梁铰链失效机理, 刚度略低但延性和耗能能力更好。进一步地, 本研究还提出了塑性变形阶段等效转动刚度的理论公式。

其转动刚度表达式为:

$$y = [(0.2 - 0.00125h)t + (0.013h - 2.945)]g_c + [(0.178h - 15.15)t + (223.667 - 1.74h)]x^{0.807} \quad (3)$$

式中:  $h$  为梁高;  $t$  为角钢厚度;  $g_c$  为顶角钢与梁翼缘的接触面至柱面相连肢上的螺栓孔中心之间的距离;  $x$  为转角。

赵茂[23]对使用高强螺栓连接的装配式节点进行抗震性能的探究, 设计了一种在梁端连接处预埋钢件然后通过高强螺栓把梁柱节点装配而成的新型节点形式。采用实验和有限元模拟系统地研究了制作的高强度螺栓连接的抗震性能, 结果表明, 与现浇框架结构相比, 预制框架结构整体性能略有优势, 具体表现为开裂荷载的提高和更好的延性。

## 5. 结论与展望

在地震作用下, 梁柱节点是结构中的关键部位, 其在梁与柱之间的内力传递过程中起着重要作用。因此, 确保梁柱节点设计的可靠性与有效性对于维系结构的整体安全至关重要。在装配式混凝土结构领域, 螺栓连接相较于传统的现浇钢筋混凝土节点, 在延性和耗能性能方面展现出显著优势, 同时在施工便利性、可调性以及维护方面也更为优越。但该领域仍需要注意以下几个问题。

(1) 地震事件中, 梁柱节点的螺栓连接将承受循环加载与卸载, 此过程可能诱发螺栓的疲劳破坏。需聚焦开发高强度、耐腐蚀的螺栓材料, 如钛合金复合材料螺栓, 以提升连接结构的承载能力和耐久性。

(2) 弹性材料作为连接部分, 可以在地震作用下吸收能量, 降低传递到结构主体的震动。故可采用金属屈服型阻尼器进行连接。

(3) 当前的抗震设计规范多集中于传统的连接技术, 而对于装配式混凝土结构中螺栓连接的具体要求和设计方法尚未形成完善的体系, 导致在工程实践中缺乏明确的指导原则。故迫切需要对装配式混凝土结构中螺栓连接的抗震设计规范进行补充和完善。

(4) 数值模拟在研究中扮演了重要角色, 但现有模型的准确性和可靠性仍需进一步验证。众多模型未能充分考虑材料非线性、粘结滑移等复杂因素, 导致模拟结果与实际情况存在偏差。因此, 有必要开发更精确的计算机模拟软件, 以缩小模拟结果与实际观测之间的差距。

## 基金项目

辽宁省教育厅创新人才培养项目(理工类) LJZZ222410154008。

## 参考文献

- [1] 易彬. “双碳”目标下装配式建筑绿色低碳发展路径分析[J]. 广州建筑, 2024, 52(2): 87-90.
- [2] 奚佳欢. 新型全钢防屈曲支撑钢结构梁柱节点抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 抚州: 东华理工大学, 2022.
- [3] 吴奇. 螺栓连接节点对钢框架动力特性的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2014.
- [4] 王珂. 装配式混凝土框架结构梁柱节点的抗震性能研究[J]. 混凝土世界, 2023(6): 81-84.
- [5] He, Y., Zhao, Y., Lin, S. and Zhang, Z. (2024) Prefabricated Bolted PEC Beam-to-CFST Column Joints: Development

- and Its Seismic Behavior. *Engineering Structures*, **314**, Article 118442. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118442>
- [6] He, Z., Huang, X., Xu, Z., Shi, Q., Guo, Y. and Kim, J. (2022) Experimental Study on Seismic Performance of Prefabricated Viscoelastic Damping Bolted Joints. *Engineering Structures*, **256**, Article 113933. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113933>
- [7] Jiang, H., Li, Q., Jiang, W. and Zhang, D. (2016) Study on Seismic Performance of Connection Joint between Prefabricated Prestressed Concrete Beams and High Strength Reinforcement-Confined Concrete Columns. *Steel and Composite Structures*, **21**, 343-356. <https://doi.org/10.12989/scs.2016.21.2.343>
- [8] Xue, H., Ashour, A., Ge, W., Cao, D., Sun, C. and Cao, S. (2023) Seismic Response of Prestressed Precast Reinforced Concrete Beam-Column Joints Assembled by Steel Sleeves. *Engineering Structures*, **276**, Article 115328. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115328>
- [9] Zhang, X., Hao, J., Duan, D., Xu, S., Zhang, S. and Yu, H. (2019) Experimental Study on Bolted and Anchored Beam-To-Column Joints of Prefabricated Concrete Frames. *Advances in Structural Engineering*, **23**, 374-387. <https://doi.org/10.1177/1369433219872432>
- [10] Ghayeb, H.H., Abdul Razak, H. and Ramli Sulong, N.H. (2020) Seismic Performance of Innovative Hybrid Precast Reinforced Concrete Beam-To-Column Connections. *Engineering Structures*, **202**, Article 109886. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109886>
- [11] Xiao, Y., Yu, M. and Liu, W. (2024) Finite Element Analysis of Prefabricated Semi-Rigid Concrete Beam-Column Joint with Steel Connections. *Applied Sciences*, **14**, Article 5070. <https://doi.org/10.3390/app14125070>
- [12] Baran, E., Mahamid, M., Baran, M., Kurtoglu, M. and Torra-Bilal, I. (2021) Performance of a Moment Resisting Beam-Column Connection for Precast Concrete Construction. *Engineering Structures*, **246**, Article 113005. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113005>
- [13] 丁克伟, 刘文杰, 陈伟. 预制装配式螺栓连接 RC 梁柱节点的滞回性能[J]. 兰州理工大学学报, 2023, 49(5): 134-141.
- [14] 李正英, 黄延铮, 鲁万卿, 何欢. 装配式混凝土梁柱半刚性节点的抗震性能[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(3): 55-64.
- [15] 程蓓, 苗小燕, 徐建伟. 一种新型装配式混凝土框架结构连接节点试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(12): 94-98+199.
- [16] 马强强, 王燕, 杨松森. 装配式梁柱内套筒组合螺栓连接节点的力学性能试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017, 50(S1): 131-139.
- [17] 杨松森, 王燕, 马强强. 装配式外套筒-加强式外伸端板组件梁柱连接节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(11): 76-86.
- [18] 吴东平, 裴明晓, 李成玉. 基于螺栓连接的装配式钢筋混凝土梁柱节点抗震性能研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(2): 178-184+212.
- [19] 吴东平, 裴明晓, 李成玉. 装配式钢筋混凝土梁柱螺栓连接节点抗震性能试验[J]. 工程抗震与加固改造, 2024, 46(3): 72-80.
- [20] 王鸣. 基于钢-栓连接的新型装配式混凝土梁柱节点抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023.
- [21] 范夕森, 贾文启, 张子健. 角钢连接的装配式异形柱框架边节点抗震性能研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(19): 25-32+24.
- [22] 范夕森, 张子健, 刘琪, 李莹. 角钢连接的装配式混凝土梁柱节点塑性阶段力学性能研究[J]. 四川建筑科学研究, 2022, 48(4): 1-9.
- [23] 赵茂. 高强螺栓连接装配式框架性能研究[D]: [硕士学位论文]. 开封: 河南大学, 2020.