

# 钢筋混凝土梁柱节点的加固方式对力学性能的影响

胡超群, 胡良杰, 王玉喜, 袁冰涛, 王兵兵

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2023年11月3日; 录用日期: 2023年12月21日; 发布日期: 2023年12月29日

## 摘要

荷载、环境等因素的不断变化, 会使得混凝土柱的耐久性、强度和刚度引起下降。梁柱结构作为建筑中的主要承重部位, 由于建筑老化、自然灾害等原因, 梁柱结构可能受损, 导致其承载能力不足。因此, 采取适当的加固措施来增强梁柱结构的稳定性和承载力显得尤为重要。混凝土梁柱节点的加固方式有很多种, 其中采用粘贴钢板加固法和粘贴复合纤维材料加固的方法较多。利用Abaqus软件建立节点模型, 分析钢梁柱节点的滞回曲线、耗能曲线、骨架曲线和刚度退化曲线, 对粘贴钢板加固节点法和粘贴碳纤维加固节点法这两种方法进行合理的计算与建模, 将使用加固方式后的梁柱节点与未加固的试件进行抗震性能对比。研究发现, 采用两种加固方式的梁柱节点试件的抗震性能和抗剪能力不同程度的得到提高。采用不同加固方法的技术的可行性和优缺点。经过对相关技术性能指标对比分析, 优选其加固方案。结果表明: 增大截面加固法对梁柱节点承载力提高最大; 碳纤维布加固法对整体框架的屈服强度提高最大; 外包预应力钢带加固法对梁柱节点的耗能能力和延性性能有显著提高。对比分析认为, 外包预应力钢带加固法较其他方法效果更好, 应作为优选方案考虑。

## 关键词

粘贴钢板加固, 碳纤维加固, 抗震性能, 有限元分析, 梁柱节点

## Influence of Reinforcement Method of Reinforced Concrete Beam and Column Joints on Mechanical Properties

Chaoqun Hu, Liangjie Hu, Yuxi Wang, Bingtao Yuan, Bingbing Wang

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Nov. 3<sup>rd</sup>, 2023; accepted: Dec. 21<sup>st</sup>, 2023; published: Dec. 29<sup>th</sup>, 2023

文章引用: 胡超群, 胡良杰, 王玉喜, 袁冰涛, 王兵兵. 钢筋混凝土梁柱节点的加固方式对力学性能的影响[J]. 土木工程, 2023, 12(12): 1485-1492. DOI: 10.12677/hjce.2023.1212169

## Abstract

The constant change of load, environment and other factors will cause the durability, strength and stiffness of concrete columns to decrease. As the main load-bearing part of the building, it is particularly important to take reinforcement measures. There are many ways to reinforce concrete beam and column nodes, among which there are many methods of pasting steel plate reinforcement and pasting composite fiber materials. The joint model is established by Abaqus software, the hysteresis curve, energy dissipation curve, skeleton curve and stiffness degradation curve of steel beam and column nodes are analyzed, and the two methods of pasting steel plate reinforcement joint method and carbon fiber reinforcement joint method are reasonably calculated and molded, and the seismic performance of the beam and column joints after reinforcement is compared with the unreinforced specimens. It is found that the seismic performance and shear resistance of the beam and column joint specimens using two reinforcement methods are improved to varying degrees. Feasibility and advantages and disadvantages of technologies with different reinforcement methods. After the comparative analysis of relevant technical performance indicators, the reinforcement scheme is optimized. The results show that the increasing section reinforcement method increases the bearing capacity of the beam and column joints the most. The carbon fiber cloth reinforcement method improves the yield strength of the overall frame the most; the outer prestressed steel belt reinforcement method significantly improves the energy dissipation capacity and ductility performance of the beam and column joints. The comparative analysis shows that the outsourcing prestressed steel belt reinforcement method has better effect than other methods and should be considered as the preferred solution.

## Keywords

Paste Steel Plate Reinforcement, Carbon Fiber Reinforcement, Seismic Performance, Finite Element Analysis, Beam and Column Joints

Copyright © 2023 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

随着我国城市化程度的不断提高, 老旧建筑在使用过程由于环境、荷载的影响, 不可避免的导致梁柱节点承载能力的不足, 对结构的安全性产生影响。在地震作用下, 将导致结构严重破坏或坍塌。因此, 老建筑中的梁柱节点可以通过适当的加固方式来提高结构的受剪承载力, 从而避免节点未加固结构抗震性能不满足要求, 从而在强烈地震中倒塌。人们对房屋改造与修缮与研究越来越重视与深入。当前国内老旧房屋大多采用的是钢筋混凝土框架结构, 与此同时框架节点的应力比较集中, 结构侧向刚性也较小, 在发生抗震作用时结构所产生的水平位移也很大, 相应的易于引起非结构性损伤, 使得节点成为了房屋加固改造的优先加固对象。经过多年工程实践, 我国在节点抗震加固技术方面取得了较多成果, 许多学者也提出了诸多方法: 如杨翌[1]采用了外包角钢加固法对混凝土梁柱节点进行加固; 宁晨等[2]采用了采用多段钢环加固法对混凝土梁柱进行加固; 杨翌[3]等采用碳纤维布加固法对混凝土梁柱节点进行加固; 黄群贤[4]采用了 CFRP 碳纤维增强复合材料加固法对混凝土梁柱节点进行加固; Zhang 等[5]研究了地震作用下不同类型摇摆钢框架节点的抗震性能; Deylami 等[6]针对竖向肋板几何形状对钢梁上承箱柱节点

循环性能的影响进行了研究。由于建筑物梁柱节点受力特点与形式各有差异,采用不同加固方法对梁柱节点承载能力的提高效率有不同的影响,因此针对不同状况,优选加固方式显得格外重要。

## 2. 混凝土梁柱节点及材料特性

### 2.1. 试件设定

依据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T101-2015) [7]和《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010) [8],试验制作3个几何尺寸相同的装配式钢筋混凝土梁柱节点试件模型。梁的截面尺寸为150 mm × 250 mm,柱的截面尺寸为250 mm × 250 mm,梁柱内使用的纵筋为直径12 mm的HRB400,混凝土设计强度等级为C30。

### 2.2. 加固方案

试件编号依次为KJ1、KJ2、KJ3,模型的地震预损程度采用位移来表示,KJ1表示的是未加固形式的梁柱节点模型;KJ2表示的是外包角钢加固形式的梁柱节点模型;KJ3表示的是碳纤维布加固形式的梁柱节点模型。试验轴压比为0.4,试件具体预损情况及加固方案见表1。

**Table 1.** The degree of pre-loss and reinforcement of the specimen

**表 1.** 试件预损程度及加固

试件编号	轴压比/n	加固方式
KJ0	0.4	未加固
KJ1	0.4	外包角钢加固
KJ2	0.4	注浆修复后外包角钢加固
KJ3	0.4	碳纤维布加固

## 3. 有限元模型计算

### 3.1. 有限元模型

采用Abaqus软件进行模拟分析,为了研究采用不同的加固方式对混凝土梁柱节点力学性能的影响,因此在节点处细化了网格,节点部位以外放大网格。Abaqus软件梁柱之间、外包角钢与混凝土之间以及碳纤维布与混凝土之间使用“Tie”连接。由于柱底以及梁柱节点处施加荷载和约束不利于模型计算速度,故设置几个参考点与柱底和梁柱节点使用“Couple”连接。模型中梁柱的材料Q345,弹性模量设置为200 GPa,屈服应变设置为0.00167,极限强度与屈服强度依次为398 MPa、345 MPa。材料塑性采用线性随动硬化模型,屈服准则为米赛斯条件,屈服条件由等效应力判断。

### 3.2. 加载设计

本文采用线性静力分析,为防止平面外屈曲及失稳,对底部x、y、z方向线位移进行约束,对顶部y、z方向线位移也进行约束。对混凝土梁柱结构施加反复低周水平作用力与竖向恒定均布荷载作用。给低周往复加载制度使用等周期变幅的加载方式,对试件采用位移大小相等、方向相反方式加载,见图1。

加载实验装置如图2基于本模型,分别计算其梁柱节点的反作用力与位移、结构钢筋骨架整体的应力与应变以及加固材料的应力与应变。对柱端施加竖直向下的4MN恒定载荷。在极限承载力方面有限元结果与实验结果误差较小,故可用有限元模型进行模拟分析。

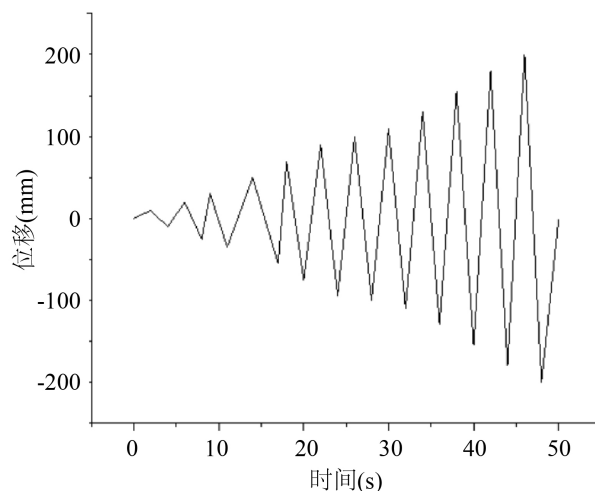


Figure 1. Low-week repeated loading system

图 1. 低周反复加载制度

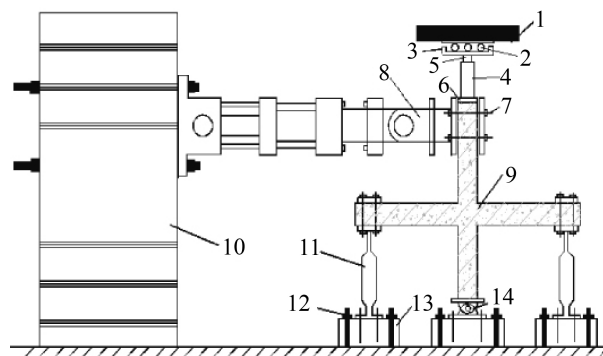


Figure 2. Loading experimental setup diagram

图 2. 加载实验装置图

## 4. 计算结果与分析

### 4.1. 滞回曲线分析

当 KJ1 试件的加载位移在 10 mm 以内其为弹性阶段；当加载位移达到 20 mm 以上时滞回曲线会显现比较明显的“捏拢”现象；当加载位移增大时，“捏拢”的更加明显，同时节点刚度也逐渐减小；出现“捏拢”现象的主要原因为梁端及核心区裂缝张开及闭合引起的残余变形导致。

通过仔细观察 3 个试件的滞回曲线的形态，可以看出 2 个加固试件的滞回曲线比未采用加固方式的试件更加饱满，采用各加固方法的滞回环面积明显比未加固时有所提升，说明采用外包角钢与碳纤维布的加固方法是有效的[9]。

### 4.2. 骨架曲线分析

如图 3 所示，KJ1 试件的骨架曲线体现出构件达到承载力最大值后随即下降，未出现屈服台阶现象；加固后的各节点达到极限承载力后位移仍有一定增长，承载力下降缓慢，有着屈服台阶现象，说明加固试件的延性得到明显的改善。由于加固材料的滞后性，从 KJ1 试件、KJ2 试件和 KJ3 试件的骨架曲线中可以得出，当位移小于 11 mm 时，碳纤维布和钢材的加固性能未有明显的体现。随着位移不断增大，梁端根部混凝

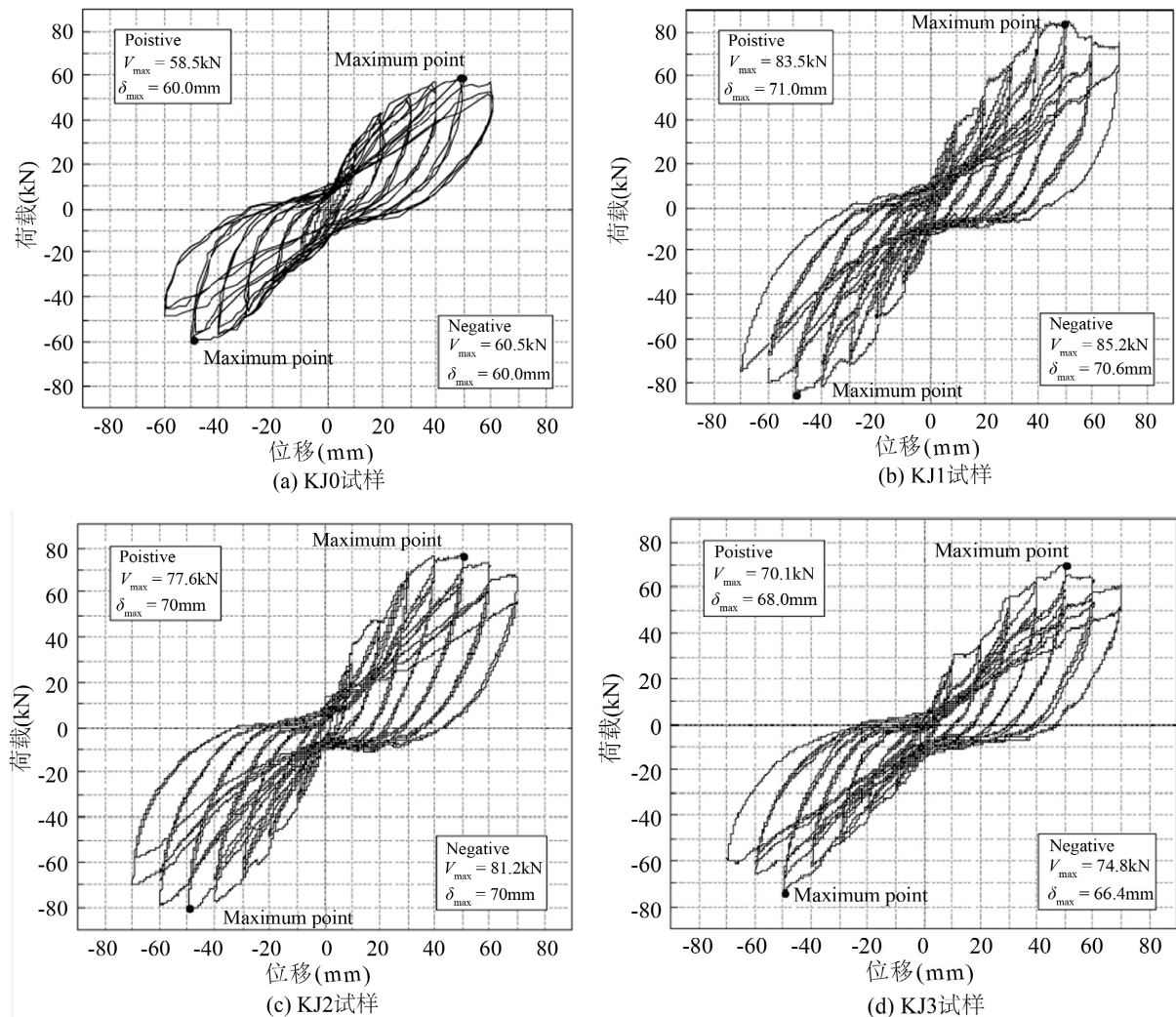


Figure 3. Horizontal load-displacement hysteresis curve of nodal specimens

图 3. 节点试件水平荷载 - 位移滞回曲线

土不断开裂，核心区混凝土产生较长裂缝，未加固构件的刚度显著下降。而 KJ2 试件和 KJ3 构件由于钢材和碳纤维布约束混凝土，限制了混凝土裂缝的发展，使得加固构件的承载力下降平缓[10]。由于梁柱端转角处 L 型钢和纤维布约束了混凝土使得试件的初始刚度得到提高，并且限制了梁柱端的相对转动。然而对于未加固试件，组合加固构件需要更大的水平荷载才能达到相同的位移。承载力高的原因在于纤维布和钢材有效限制了构件裂缝的发展，钢材和纤维布组合加固，避免了碳纤维布受力的滞后性，也更加充分利用了钢材良好的耗能性能，保证了组合加固的有效性[11]。

### 4.3. 承载力及延性性能

经过加固后的节点正负向平均屈服荷载提高了 25%~52%，正负向平均最大荷载提高了 30%~50%。由此可见，加固后的偏心梁柱节点承载力都得到了一定提升，分析原因一方面是钢板抗压和抗拉性能较好，在试件受压时替混凝土承受一部分压力，试件受拉时替混凝土受拉。另一方面在于纤维布约束混凝土的裂缝开展，限制了混凝土变形，从而提高了混凝土的强度。比较钢板和纤维布单独加固试件承载能力的变化，可以得出钢板加固节点承载力提高幅度为 37%，纤维布加固提高幅度为 26%。加固构件正负

向平均延性系数提高了 8%~43%，其中，钢板加固的屈服荷载以及延性系数提高十分明显，反映出对于延性和承载力钢板的效果优于碳纤维布，见图 4 和图 5。

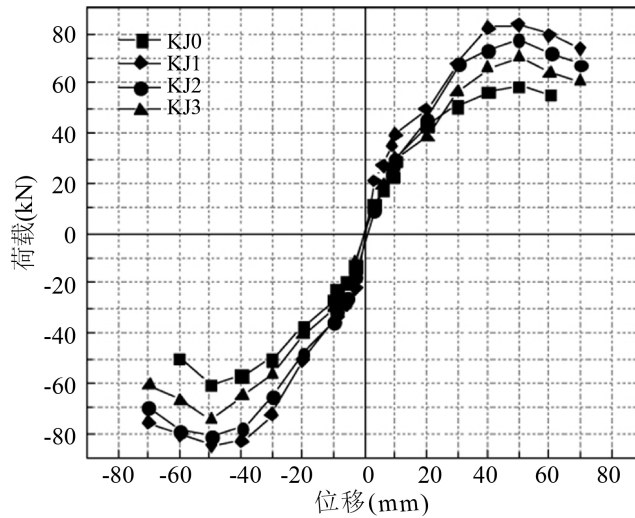


Figure 4. Skeletal curves  
图 4. 骨架曲线

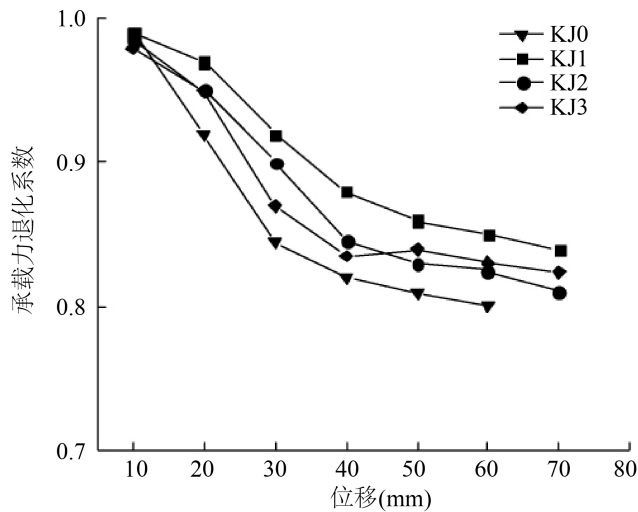


Figure 5. Degradation curve of bearing capacity of each specimen  
图 5. 各试件承载力退化曲线

#### 4.4. 加固方案优选

基于前述分析认识到，通过黏贴碳纤维布加固后，结构屈服强度大幅提高，弹性应变的幅度得到提升；在地震烈度不大的情况下，结构产生的变形能够自行恢复，抵抗小震的性能明显优于其他两种。而外包预应力钢带加固法耗能能力突出，且屈服强度增幅也比较明显，并且抵抗变形能力远优于其他两种加固方法。相较而言，外包角钢加固施工方便，加固完成后可立即投入使用，但是要求工人的施工技术高，钢带穿孔的位置要求十分精准才能达到预期效果。而碳纤维布加固法成本低廉，施工简单，但耐高温能力差，不适宜长期在高温工况下工作。综合上述，虽然外包角钢加固法的施工技术要求较高，但是

在加固后的效果使其更有优势，因此预应力加固法在本工程中应作为优选加固方案考虑。

## 5. 结论

试件多在核心区发生剪切破坏以及梁端发生弯曲，但使用弯折锚固的方式[12]可减少梁柱节点处核心区的裂缝数量。利用软件模拟钢筋混凝土框架梁柱节点地震状况下的性能[13]，对于钢筋混凝土框架梁柱边节点，按照规范设计的试件，在水平低周反复荷载作用下，节点核心区没有发生破坏[14]。通过对碳纤维布加固与外包角钢加固装配整体式节点试件开展低周往复加载试验[15]，分析了试件的滞回曲线、骨架曲线、延性等抗震性能指标[16]。得到下列结论：1) 与平行试件 KJ1 相比，KJ2、KJ3 两个采用外包角钢与碳纤维布加固的滞回曲线更加饱满，滞回曲线捏缩现象得到明显改善[17]；加固试件 KJ2、KJ3 的承载力和刚度退化得到明显的改善。2) 外包角钢加固可以对节点核心区进行有效约束，提高节点抗剪能力[18]。节点经加固后，破坏类型由核心区剪切破坏转变为梁端受弯破坏，实现了“强节点弱构件”的抗震设计理念[19]。3) 碳纤维布加固法对整个框架的屈服强度提升最大，外包角钢加固法对梁柱节点的耗能能力和延性性能均提升最大[20]。但是，碳纤维不易在高温环境下工作，考虑到各项指标以及实际工程中施工难度以及适用性，外包预应力钢板加固法相对其他两种是最优选项[21]。

## 参考文献

- [1] 杨翌, 刘锬, 凌之涵. 外包角钢加固震损装配整体式混凝土梁柱节点抗震性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(02): 137-145.
- [2] 宁晨, 王帆, 姚荣康, 赖泽荣, 黎协升. 钢环加固圆钢管混凝土柱-RC 梁角节点轴压性能有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(04): 81-93.
- [3] 杨翌, 凌之涵, 叶蛟龙, 刘锬, 杨泉, 周新. 碳纤维布加固震损装配整体式混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(7): 185-193.
- [4] 黄群贤, 刘洋, 施明峰. CFRP 环包加固 RC 梁柱边节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(8): 76-85.
- [5] Zhang, G.W., Fan, Q.Q., Lu, Z., Zhao, Z.W. and Sun, Z.S. (2020) Experimental and Numerical Study on the Seismic Performance of Rocking Steel Frames with Different Joints under Earthquake Excitation. *Engineering Structures*, **220**, Article ID: 110974. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110974>
- [6] Deylami, A. and Toloukian, A.R. (2011) Effect of Geometry of Vertical Rib Plate on Cycle Behavior of Steel Beam to Built-Up Box Column Moment Connection. *Procedia Engineering*, **14**, 3010-3018. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.379>
- [7] 中国建筑科学研究院. JGJ/T101-2015 建筑抗震试验规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [9] 吴武玄. CFRP-钢板加固梁柱节点抗震性能试验研究[J]. 福建建设科技, 2021(6): 12-16.
- [10] 赵侃. 预应力钢绞线-外包钢复合加固混凝土柱轴心受压试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [11] 秦佳俊, 谭平, 尚继英, 等. 模块化钢框架单元新型盒式连接节点及其设计方法[J]. 土木与环境工程学报, 2021, 43(3): 37-43.
- [12] 赵卫平, 程倩倩, 李雪菡, 朱彬荣, 吴丽丽. HRB400E 钢筋混凝土梁柱边节点的抗剪性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(10): 20-30.
- [13] 徐斐. 钢筋混凝土梁柱边节点抗震性能试验研究[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(13): 53-56.
- [14] 曾朝文. 钢筋混凝土梁柱边节点抗震性能参数分析[J]. 世界地震工程, 2015, 31(3): 204-210.
- [15] 贾连光, 李红超, 吴一红. 低周反复荷载下蜂窝式钢框架梁柱节点性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(1): 61-68.
- [16] 刘立新. 混凝土结构基本原理[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2004.
- [17] 郭子雄, 朱奇云, 刘阳, 等. 装配式钢筋混凝土柱-钢梁框架节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012(7): 98-105.

- [18] 李忠献, 郝永昶, 张建宇, 等. 钢筋混凝土分体柱框架梁柱中节点抗震性能的研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(4): 55-60.
- [19] 吴涛, 邢国华, 刘伯权, 等. 钢筋混凝土框架变梁中节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(10): 98-106.
- [20] 刘伯权, 邢国华, 吴涛, 等. 钢筋混凝土框架异型中节点抗裂性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(10): 67-73.
- [21] 余琼, 吕西林, 陆洲导. 框架节点反复荷载下的受力性能研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(10): 1376-1381.