

引用本文: 阎西康, 谢函霖, 梁琳霄, 等. 拼接缝对装配式 RC 结构节点抗震性能的影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(1): 85-94.
YAN Xikang, XIE Hanlin, LIANG Linxiao, et al. Effect of splicing joints on seismic performance of prefabricated RC structural nodes[J].
Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(1): 85-94.

DOI: 10.19815/j.jace.2021.10058

拼接缝对装配式 RC 结构节点抗震性能的影响

阎西康^{1,2}, 谢函霖¹, 梁琳霄³, 郭博深⁴

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 河北工业大学 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401;
3. 北华航天工业学院 建筑工程学院, 河北 廊坊 065000; 4. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊 065000)

摘要:为研究拼接缝对装配式 RC 结构节点抗震性能的影响, 提高结构抗震能力, 设计并制作了 6 个节点试件, 通过低周反复荷载试验测出节点的破坏形态和滞回曲线。在此基础上用 ABAQUS 有限元软件, 分析拼接缝对不同节点抗震性能的影响和拼接缝在节点梁上的最优位置。结果表明: 设置拼接缝对边节点的抗震性能影响大于中节点, 拼接缝在梁上的位置变化对中节点的抗震性能影响大于边节点; 相同工况下中节点峰值承载力比边节点高 30%, 破坏位置的位移比边节点大约 32%, 耗能能力显著强于边节点; 节点梁上的拼接缝位置变化对节点承载力、刚度退化、延性、耗能能力存在影响; 拼接缝在梁上的最优位置为拼接缝距核心区约 2/9 梁跨长, 最不利位置为距核心区约 1/3 梁跨长, 在实际工程中应尽量合理设置拼接缝位置; 装配节点梁上的拼接缝随着距离节点核心区长度的增加, 节点主裂缝的位置逐步由核心区梁端变成拼接缝界面处, 破坏方式逐步由梁端弯曲破坏变为梁端剪切破坏。

关键词: 拼接缝; 装配式 RC 结构节点; 抗震性能; 低周往复荷载试验

中图分类号: TU973.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)01-0085-10

Effect of splicing joints on seismic performance of prefabricated RC structural nodes

YAN Xikang^{1,2}, XIE Hanlin¹, LIANG Linxiao³, GUO Boshen⁴

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
2. Hebei Civil Engineering Technology Research Center, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
3. School of Civil Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, Hebei, China;
4. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang 065000, Hebei, China)

Abstract: In order to study the effect of splicing joints on the seismic performance of prefabricated RC structural nodes, and to improve the seismic capacity of the structure, six node specimens were designed and produced, and the failure forms and hysteresis curves of the nodes were measured through low-cycle repeated load tests. On the basis, ABAQUS finite element software was used to analyze the influence of splicing joints on the seismic performance of different types of nodes and the optimal position of the splicing joints on the joint beams. The results show that the effect of splicing joints on the seismic performance of edge nodes is greater than that of mid-node,

收稿日期: 2021-10-17

基金项目: 河北省自然科学基金项目(E2017202111)

作者简介: 阎西康(1966-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, E-mail: yjssyk@163.com。

通信作者: 梁琳霄(1990-), 女, 工学博士, 讲师, E-mail: lianglinxiao@yeah.net。

and the position changes of splicing joints on the beam have greater impact on the seismic performance of mid-node than that of edge node. Under the same working conditions, the peak bearing capacity of the mid-node is 30% higher than that of the edge node, and the displacement of the damage position is about 32% higher than that of the edge node, and the energy consumption capacity is significantly stronger than that of the edge node. The position change of the splicing joint on the joint beam has an impact on the node bearing capacity, stiffness degradation, ductility, and energy consumption capacity. The optimal position of the splicing joint on the beam is that the splicing joint is about 2/9 of the beam span from the core area, and the most unfavorable position is about 1/3 of the beam span from the core area. In the actual project, the position of the splicing joint should be set reasonably as far as possible. As the length of the splicing joint on the assembled node beam from the core area of the node increases, the position of the main crack of the node gradually changes from the beam end of the core area to the interface of the splicing joint. The failure mode gradually changes from bending failure at the beam end to shear failure at the beam end.

Key words: splicing joint; prefabricated RC structural node; seismic performance; low-cycle repeated load test

0 引言

近年来,装配式 RC 框架结构因绿色、高效的優勢被大力推广,然而其暴露出的安全问题也不容忽视。多次事故表明^[1]结构在地震作用下往往会因整体性问题发生破坏。整体性问题的重点在于拼接部分,拼接部分为方便工程施工往往设置在节点附近。节点拼接方式主要分为两种:干式^[2]和湿式连接。考虑装配构件连接时的质量、效率、成本等问题,目前应用较多的还是技术成熟的后浇式套筒灌浆的连接方法^[3]。后浇式的方法在拼接位置处会产生拼接缝,故研究拼接缝对后浇式装配 RC 节点抗震性能的影响具有重要意义。

当前国内外学者对后浇式节点和拼接缝已经进行了一定深度的研究。部分学者^[4-5]对单一类型的整浇节点和装配式 RC 框架结构的后浇节点进行静力试验,结果表明装配节点的抗震性能较好,虽然后浇节点比现浇节点抗震性能低,但相差不大,安全性可以保证。Popa 等^[6]将后浇式连接运用在装配式柱-柱节点上,并与现浇试件进行比较,结果表明装配试件具有与现浇试件相似的滞回曲线和耗能能力。Khoo 等^[7-8]采用理论加模拟的方式改变装配节点梁端的拼接位置,测量节点的抗震性能,结果显示节点拼接位置改变会影响拼接处的变形和节点的抗震性能,但结论缺少试验数据的支撑且有限元模型数量过少。随着施工技术的发展,杨辉等^[9-10]改进工艺,将后浇式连接方法和其他连接方法结合,推出

新型节点,结果表明新型节点达到了设计要求,在某些性能参数的数值上略优于整浇节点,但新型节点成本和对施工技术要求过高,不能在实际工程中大量应用。阎西康等^[11]对装配节点的拼接缝进行研究,结果表明拼接缝是节点的薄弱部位,存在拼接缝会对节点抗震性能产生不利影响,且拼接缝使带缝框架的 $P-\Delta$ (荷载-位移)效应加剧。

可以看出,目前针对后浇式装配 RC 节点的安全性和拼接缝的弱化效应的研究已经较为成熟,而在拼接缝对不同类型节点的抗震性能影响程度、装配式 RC 框架节点梁上的拼接缝最优位置等领域的研究尚不深入。为此,本文设计了 6 个试件,通过静力试验检测节点的破坏方式和滞回曲线,并用 ABAQUS 有限元软件增设模型,研究拼接缝对边、中节点的抗震性能影响程度,讨论拼接缝在节点梁上的最优位置。

1 试验概况

1.1 试件设计及制作

节点分为 2 组,一组为边节点,一组为中节点,取自一榀框架标准层中的梁柱节点,共计 6 个 1/2 缩尺试件,试件基本信息^[12-13]如表 1 所示。试件所用材料相同,采用的混凝土强度等级为 C30;钢筋为 HRB400 级钢筋;套筒材质为球墨铸铁;灌浆料以水泥为基础,配以添加剂和矿物掺合料组成。试件轴压比为 0.4,梁、柱保护层厚度分别为 15 mm 和 20 mm;材料的力学性能通过实测得出。为减小连接处

表 1 试件基本信息

Table 1 Basic information of specimen

试件编号	节点类型	制作方式	拼接缝位置
X-1	边节点	整浇	无
X-2	边节点	预制拼接	核心区梁端
X-3	边节点	预制拼接	距核心区梁端 320 mm
H-1	中节点	整浇	无
H-2	中节点	预制拼接	核心区梁端
H-3	中节点	预制拼接	距核心区梁端 320 mm

钢筋与灌浆料的滑移,防止钢筋被拔出,试验测得套筒的安全锚固长度为 65 cm。节点尺寸如图 1 所示。

1.2 试验加载方案

采用拟静力加载试验研究节点的抗震性能^[14-15]。试验加载装置如图 2(a)所示。轴压力设为 240 kN,在柱顶截面中心线上稳定加载。试件屈服前,采用荷载加载。每次荷载增加 4 kN,每级荷

载循环一次。试件屈服后改用位移控制加载。位移以屈服位移 Δ_y 值的 20%为级差分级加载。当试件承载力首次下降到峰值荷载的 85%时,停止加载,构件达到破坏状态。加载方案如图 2(b)所示。

1.3 试验破坏现象

将节点的主裂缝位置和发展方向、最终破坏情况进行统计,如表 2 所示。试验现象如图 3 所示。可以看出:节点主裂缝多在节点屈服后产生;最终破坏是由于主裂缝的开裂扩展所致。试件最终破坏分为两种形态:X-1、H-1、X-2、H-2 为梁端弯曲破坏;X-3、H-3 为梁端剪切破坏。

整浇节点 X-1、H-1 首裂缝会逐渐变为主裂缝,破坏时核心区会出现“X”形裂缝;节点梁上裂缝多为竖直向。装配节点主裂缝在拼接缝附近,破坏时核心区“X”形裂缝的宽度比整浇节点小,节点梁上斜裂缝较多,混凝土脱落量多于整浇节点。拼接缝

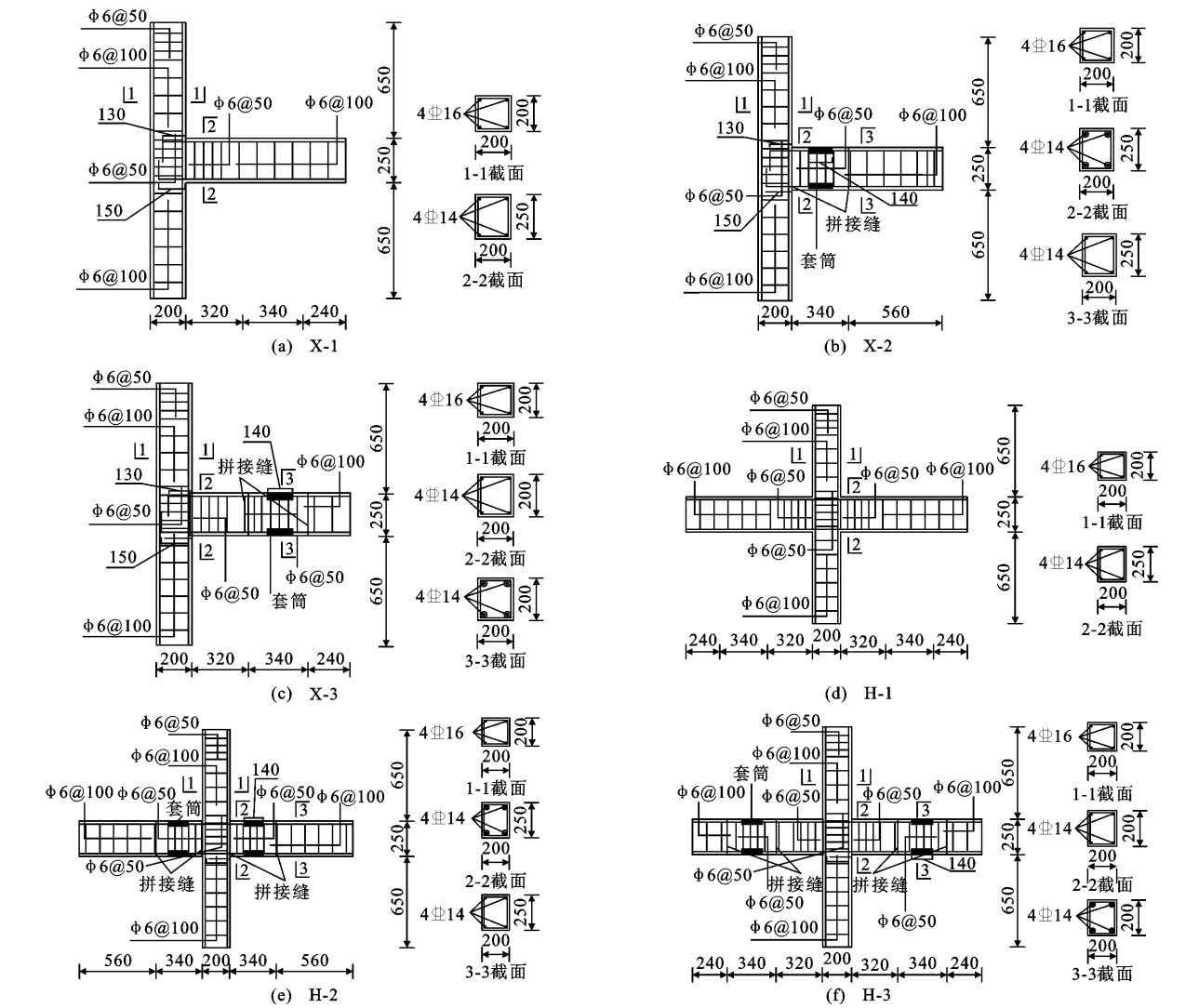


图 1 节点尺寸和配筋(单位:mm)

Fig. 1 Node size and reinforcement (unit:mm)

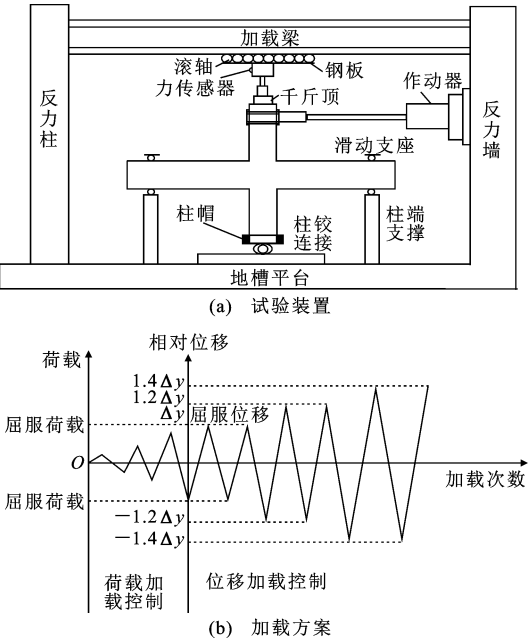


图 2 试验装置和加载方案

Fig. 2 Test device and loading scheme

表 2 试件裂缝破坏情况

Table 2 Specimen crack damage condition

试件编号	主裂缝位置	主裂缝发展方向	最终破坏情况
X-1	核心区梁端梁下侧	由梁端下侧向节点核心区对角线方向发展	梁柱交界面出现较大的裂缝,裂缝宽度较宽
X-2	位于梁柱交界面梁端,靠近拼接缝	裂缝自下而上沿着拼接缝开裂	梁柱交界面处梁上部裂缝贯通,混凝土部分脱落
X-3	梁左侧拼接缝处	主裂缝与中性轴呈 45°角向斜上方开裂	主裂缝从下向上延伸一定长度,下部宽度大,混凝土少量脱落。
H-1	距核心区 30 mm 右梁端	一支向核心区,对角线方向发展,一支向梁柱交界面处延伸	开裂程度不大,核心区混凝土掉落较少,破坏程度较轻
H-2	距核心区 50 mm 处左梁(加载末期距核心区 10 mm 右梁形成宽度较大裂缝)	主裂缝向中性轴方向竖向发展	主裂缝开裂严重,拼接缝同样发生破坏
H-3	距核心区 260 mm 处左梁(加载末期距核心区 400 mm 处右梁形成宽度较大裂缝)	主裂缝斜向剪切发展	拼接缝和核心区开裂,伴有少许混凝土脱落

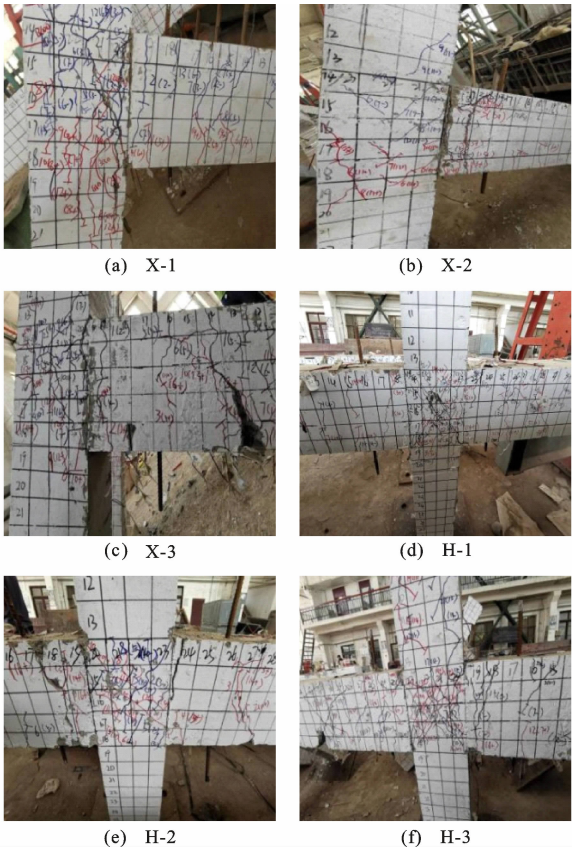


图 3 试件破坏裂缝

Fig. 3 Failure cracks of specimens

在梁上时,边、中节点的主裂缝存在差异。边节点主裂缝出现后,主裂缝宽度不断扩大,其他裂缝发展较慢。中节点先在一侧梁上出现主裂缝,继续加载至即将破坏阶段,另外一侧梁也会出现一条裂缝,且宽度迅速增长到与主裂缝宽度一致,最终双侧梁上裂缝扩展至试件破坏。

同类型节点的拼接缝在梁上不同位置的破坏形态不同。拼接缝距核心区 100 mm 的节点破坏时梁端混凝土被压溃,梁纵筋发生屈服,属于弯曲破坏。拼接缝距核心区 320 mm 的节点破坏时出现主斜裂缝并伴有其他斜裂缝,属于剪切破坏。

1.4 试验滞回曲线分析

试件滞回曲线^[16-17]如图 4 所示。可以看出,相同工况和加载条件下,边、中节点屈服后的滞回曲线差异较大。中节点的承载力比边节点高约 30%,位移变形比边节点高约 35%。荷载加载阶段中节点承载力上升幅度高于边节点。试件屈服后,由于中节点的核心区约束和整体刚度强于边节点,故中节点主裂缝发展较慢,新增裂缝少,曲线承载上升较快。在试件即将破坏的阶段,边节点由于核心区约束弱,裂缝扩展和变形更严重,强度下降快。

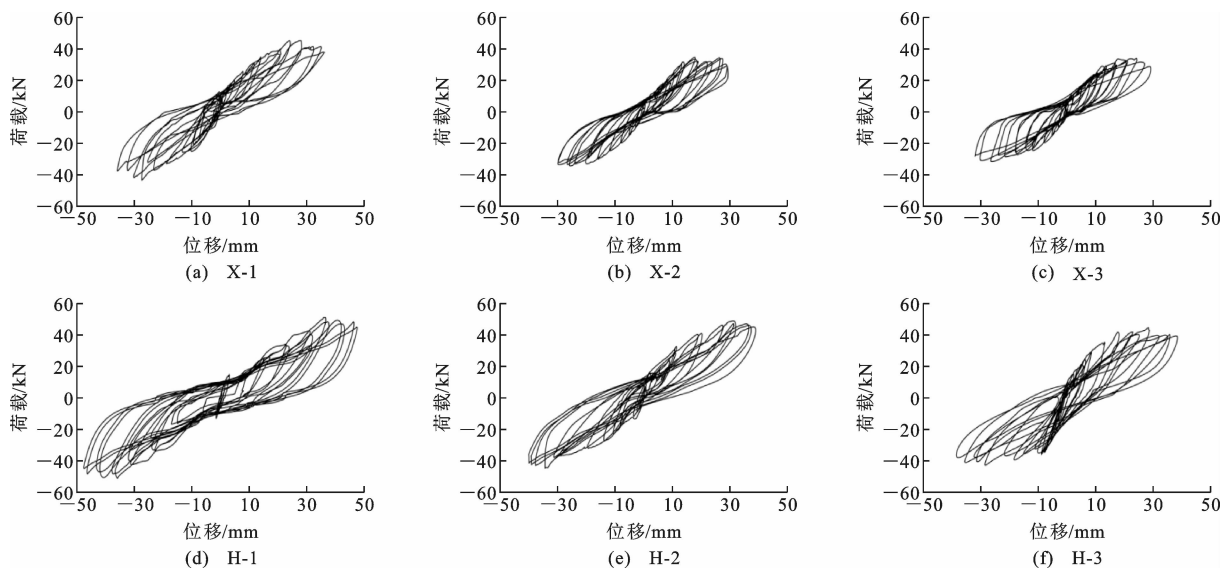


图 4 试件滞回曲线

Fig. 4 Hysteretic curves of specimens

同类型节点中,整浇节点比装配节点的峰值荷载和破坏荷载高,曲线对称性好,塑性变形能力强。X-1 双向峰值荷载高于 X-2、X-3 约 23%,破坏荷载高约 21%。H-1 比 H-2 正向峰值荷载高 2.51%,负向峰值荷载高 8.3%,破坏荷载相差不大。H-1 比 H-3 正向峰值荷载高 11.4%,负向峰值荷载高 8.5%,正向破坏荷载高 6.1%,负向破坏荷载高 4.7%。

装配节点的拼接缝在梁上不同位置时的滞回曲线变化幅度不同。拼接缝位于核心区梁端时,节点主裂缝出现较慢,峰值荷载和位移、破坏荷载和位移高于拼接缝位于距核心区 320 mm 的节点,如 X-3 比 X-2 先达到峰值承载状态,峰值荷载比 X-2 低 4%,破坏荷载与 X-2 基本相同。继续加载时,由于 X-3 主裂缝发展较快,新增裂缝较多,极限位移小。X-3 比 X-2 双向平均极限位移低 4%。

2 节点有限元模拟

2.1 有限元模型建立

由于试验样本数量偏少,故采用数值模拟^[18-19]的方式增设试件,进一步探究拼接缝对不同类型节点抗震性能的影响,讨论拼接缝在节点梁上的最优位置。

有限元模型采用实体建模方式,尺寸与试验节点尺寸一致。钢筋和套筒本构关系采用双折线弹性强化模型,混凝土、灌浆料本构模型采用损伤塑性模型。钢筋采用 T3D2 单元,套筒采用 S4R 壳单元,混凝土和灌浆料采用 C3D8R 单元。根据相关文献试验结果^[12],本文将拼接缝周围 30 mm 厚度的后

浇混凝土段强度下降 65% 用于体现拼接缝的弱化作用。由于钢筋与新旧混凝土交界面处、钢筋与灌浆料间会产生环向应力,出现黏结滑移现象。为模拟该现象,采用非线性弹簧单元,将后浇区拼接缝前后 60 mm、套筒前后 160 mm 的钢筋作为区段端点连接,弹簧属性自由度为 1,弹簧刚度为 $1\,000\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。初次计算完成后,将得到的文件修改弹簧部分的内容,并代入重新运算。灌浆料和套筒之间约束比较稳定,采用“Tie”约束方式连接。新旧混凝土交界面采用面-面接触的方式,接触属性的法相方向设为“硬接触”;切向方向上设置“罚”函数,摩擦因数为 0.6。为使荷载加载均匀,在柱顶、柱底设置耦合点,耦合截面为柱顶面和底面。轴向压力和水平荷载作用在柱顶耦合点上,柱底设置为铰接;梁上设置耦合点,耦合截面为梁上最边侧面。

2.2 有限元模型验证

2.2.1 破坏结果对比

为验证模型的准确性,选取 4 个典型节点,以 X-1、X-3、H-1、H-3 为例,对其数值分析结果与试验结果进行对比。

模型用等效塑性应变(PEEQ)云图反映节点破坏状态。PEEQ 数值由大到小的发展方向近似为试验主裂缝发展方向。模拟破坏结果如图 5 所示。X-1、H-1 应变较大区域为梁柱交界面处,并向核心区斜向发展;X-3、H-3 在拼接缝处发生破坏,产生了斜向裂缝,说明拼接缝界面处是试件抗剪和抗弯的薄弱部位。通过对比发现数值分析云图的主裂缝位置、破坏情况、破坏形式和试验结果基本一致。

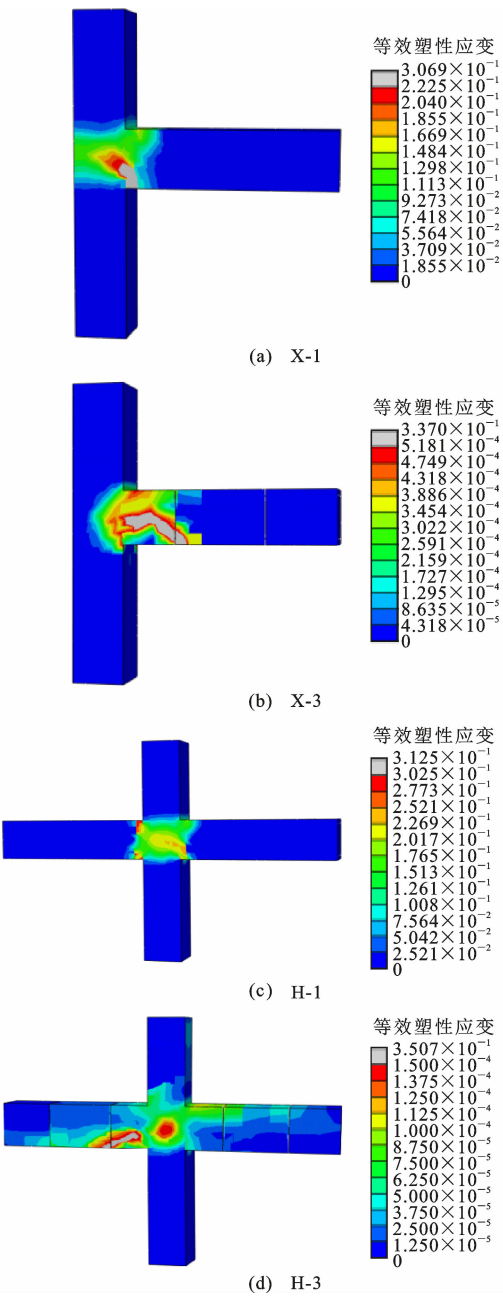


图5 模型破坏结果

Fig. 5 Model damage results

2.2.2 模型荷载-位移滞回曲线

为检验模拟数据与试验数据的一致性,将两者滞回曲线绘出并对比,如图6所示。可以看出:模拟滞回曲线与试验滞回曲线轮廓线基本一致;模拟滞回曲线中部比较饱满,是由于定义预制部分的钢筋与混凝土一起参与受力,忽略滑移;模拟节点由于没有混凝土压溃脱落,故滞回曲线正反方向比较对称。通过比较可以看出,模型滞回曲线在峰值和破坏位置的荷载、位移值与试验数据误差较小,建立的模型比较准确。

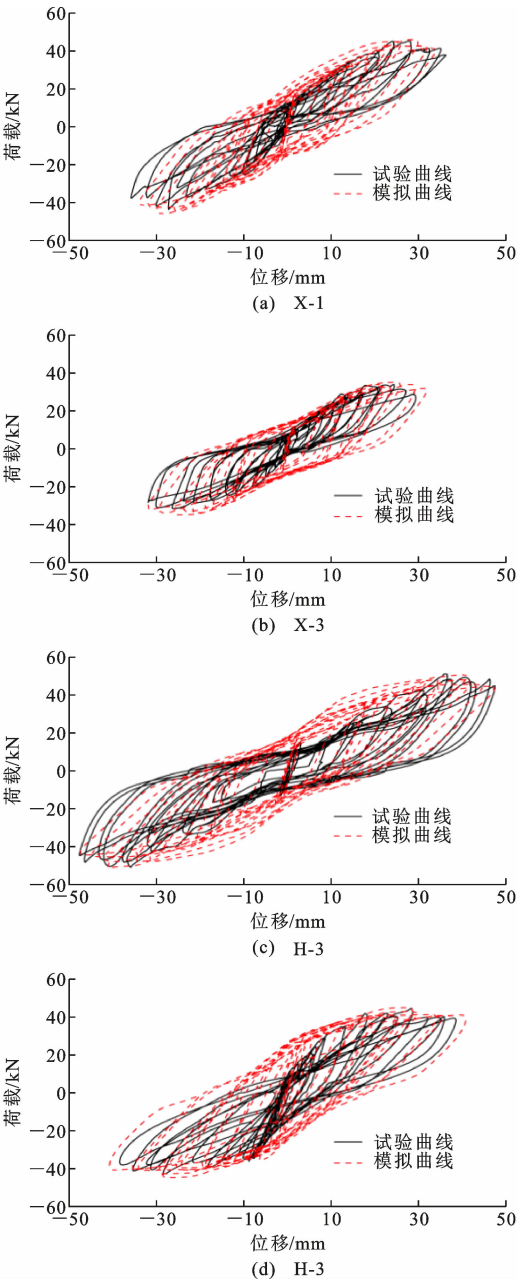


图6 模拟曲线与试验曲线对比

Fig. 6 Comparison of simulation curves and test curves

3 拼接缝对节点的抗震性能影响

3.1 模型设计

拼接缝会降低节点刚度,使节点的强度和延性小于整浇节点,其在梁上的位置变化会改变节点性能。为研究拼接缝在同一位置对不同类型节点的影响程度和拼接缝在节点梁上的最优位置,以拼接缝距核心区梁端距离为变量,用软件增设模型^[20-21],试件编号如表3所示。比较拼接缝位置不同时节点的承载力、刚度退化曲线、延性、耗能能力,分析拼接缝对节点抗震性能的影响。

表 3 模拟节点试件编号

Table 3 Number of simulated node specimen

节点类型	边节点试件编号	中节点试件编号
整浇节点	MX-1	MH-1
核心区梁端	MX-2	MH-2
距核心区梁端 320 mm	MX-3	MH-3
距核心区梁端 100 mm	MX-4	MH-4
距核心区梁端 200 mm	MX-5	MH-5
距核心区梁端 433 mm	MX-6	MH-6

3.2 承载力分析

通过数值模拟得到试件的骨架曲线,根据骨架曲线分析节点承载力变化。节点的屈服荷载、峰值荷载、破坏荷载见图 7。边节点试件组中,整浇节点比装配节点屈服荷载高 0.5%~13.3%,峰值荷载高 17.9%~27.3%,破坏荷载高 16.3%~22.8%;装配节点间曲线差值不大,MX-5 承载能力最佳,MX-4 较差,MX-5 比 MX-4 峰值荷载高 4.2%,破坏荷载高 4.2%。中节点试件组中,整浇中节点比装配中节点峰值荷载高 4.8%~14.5%,极限荷载高 0.9%~6.1%。装配中节点间曲线波动较大,MH-5 承载显著优于其他装配节点,MH-3 与 MH-6 曲线相近,承载均较差。MH-5 比 MH-3 峰值荷载高 9.3%,极限荷载高 7.1%。

通过数据对比得出,设立拼接缝对边节点承载影响大,拼接缝在梁上的位置对中节点的承载影响大。拼接缝存在时,边节点荷载变化幅度比中节点高约 13%,原因为边节点和中节点相比,核心区约束弱,受拼接缝影响较大。当拼接缝位置变换时,中节点承载变化率高于边节点。原因是中节点先在一侧梁出现主裂缝,加载后期会在另一侧梁上出现宽度较大裂缝,由于出现的时间和扩展程度不同,节点间承载力相差较大。装配式边、中节点套筒距核心区梁端 200 mm 时,试件承载力较好。

3.3 刚度退化曲线分析

采用等效刚度 k_i 分析试件组的刚度退化程度, k_i 计算公式为

$$k_i = \frac{F_i}{\Delta_i}$$
 (1)

式中: F_i 为每一次循环荷载作用下第一滞回环的荷载极值; Δ_i 为每一次循环荷载作用下第一滞回环的荷载极值点对应的位移。

正向位移下试件的节点刚度退化曲线模拟结果如图 8 所示。可以看出,对于同类型节点,整浇节点与装配节点刚度相差不大。在 0~10 mm 位移区间内,整浇节点刚度下降速率快于装配节点。原因是

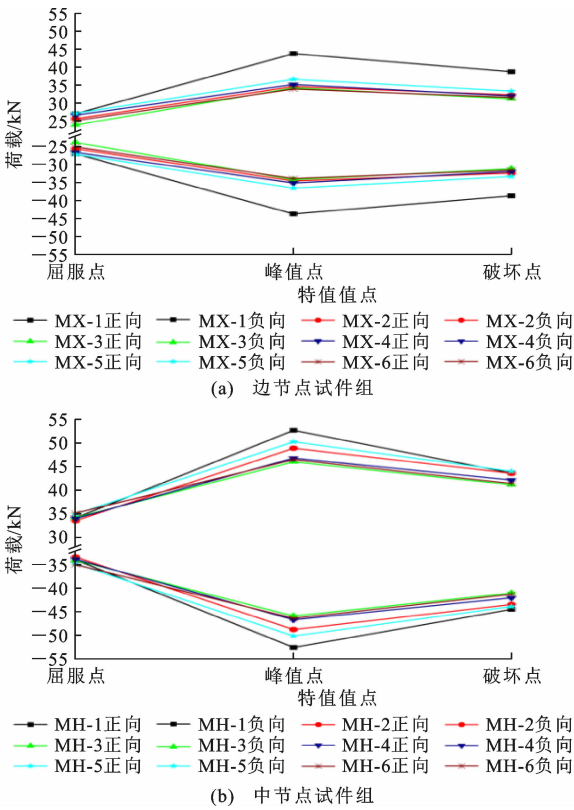


图 7 节点承载力模拟结果

Fig. 7 Simulation results of node bearing capacity

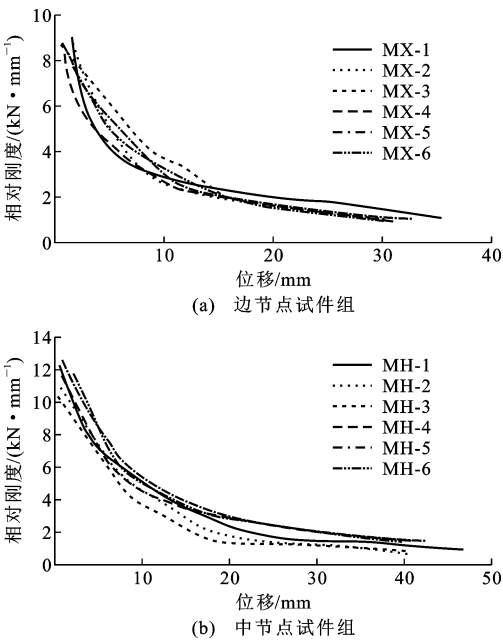


图 8 节点刚度退化曲线模拟结果

Fig. 8 Simulation results of node stiffness degradation curves

装配节点此时主裂缝宽度尚小,套筒、灌浆料可分担部分荷载,减缓拼接缝处破坏程度,使刚度下降慢于整浇节点。

相同工况下,中节点初始相对刚度比边节点高约 21%。由于节点材料、加载方式、接触条件和破坏机理相似,试件加载至屈服后,刚度退化曲线重合度高。边节点模型组中,整浇节点初始刚度最大。模型在荷载加载下刚度下降较快,位移加载下曲线差异不明显。中节点模型组中,在位移达到 20 mm 后,模型曲线间差值较小。

3.4 延性和变形能力分析

延性是衡量节点抗震性能的重要参数,拟采用位移延性系数来体现节点延性性能。位移延性系数计算公式为

$$\mu=\frac{\Delta_u}{\Delta_y} \tag{2}$$

式中: μ 为位移延性系数; Δ_u 为试验的极限位移。

将节点的正向位移列出并运算,见表 4。相同工况下,中节点延性系数高于边节点。边节点试件组中,MX-1 由于没有拼接缝,延性较强,位移延性系数比装配节点高 2.5%~4.9%;装配边节点中,位移延性系数相差不大;MX-5 位移延性系数较高,MX-2 与 MX-4 位移延性系数相近,MX-3 位移延性系数最低。中节点试件组中,MH-1 位移延性系数高于装配节点 2.75%~8.38%,说明中节点间位移延性系数波动幅度大于边节点,拼接缝位置对其影响程度更大。MH-3 位移延性系数最低,MH-5 变形能力最强。

表 4 试件位移

Table 4 Displacement of specimen

试件 编号	屈服位移/ mm	峰值位移/ mm	极限位移/ mm	位移延性 系数
MX-1	11.13	27.12	35.31	3.18
MX-2	10.17	25.50	30.94	3.04
MX-3	9.87	23.50	29.66	3.02
MX-4	10.24	26.01	31.26	3.05
MX-5	10.55	26.52	32.72	3.10
MX-6	9.97	24.42	30.21	3.03
MH-1	13.90	35.86	46.71	3.36
MH-2	12.54	33.11	40.64	3.24
MH-3	12.89	29.17	40.22	3.12
MH-4	12.92	33.17	41.22	3.19
MH-5	13.00	34.91	42.53	3.27
MH-6	12.81	28.42	39.74	3.10

通过数据对比看出:装配式边、中节点拼接缝距核心区梁端 200 mm 时,模型延性和变形能力较好;拼接缝的存在对边节点延性影响大,拼接缝的位置对中节点的延性影响大。

3.5 耗能能力分析

耗能能力是衡量节点在地震作用下承担能量大小的重要指标。采用等效黏滞阻尼系数 h_{eq} 和功比系数 I_w 来体现模型的耗能能力。等效黏滞阻尼系数计算示意图如图 9 所示,计算公式为

$$h_{eq}=\frac{1}{2\pi}\frac{S_{ADCB}}{S_{OAF}+S_{OCE}} \tag{3}$$

式中: S_{ADCB} 为曲线 ADCB 围成的面积; S_{OAF} 、 S_{OCE} 为 $\triangle OAF$ 、 $\triangle OCE$ 的面积。

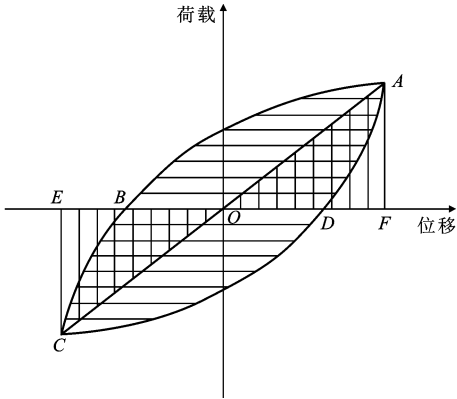


图 9 等效黏滞阻尼系数计算示意图

Fig. 9 Calculation diagram of equivalent viscous damping coefficient

等效黏滞阻尼系数反映的是一次加载周期的试件耗能能力。为更好表达节点总耗能强度,引入功比系数 I_w ,计算公式为

$$I_w=\sum_{i=1}^n\frac{P_i}{P_y}\frac{\Delta_i}{\Delta_y} \tag{4}$$

式中: n 为循环总次数; i 为当前循环次数; P_i 为峰值荷载; P_y 为屈服荷载; Δ_i 为峰值位移。

模型加载过程中,从弹性阶段到破坏阶段,耗能能力不断增加,列出特征位置的 h_{eq} 进行比较,如图 10 所示。中节点和边节点的 h_{eq} 均在 0.1 左右;从峰值点到极限点,整浇节点比装配节点 h_{eq} 下降更快,主要是装配节点在试件屈服后,套筒和灌浆料仍可以分担能量,增大结构耗能。装配节点中,MX-5、MH-5 的 h_{eq} 高于其他装配节点,MX-3、MH-3 的 h_{eq} 最低。

节点的功比系数如图 11 所示。可以看出:相同工况下,同类型节点的整浇节点总耗能能力优于装配节点;中节点功比系数比边节点高 5%~40%;拼接缝位置不同时,装配式边节点功比系数差值在 0.3~3 之间,MX-5 功比系数高,耗能能力强;装配式中节点功比系数差值在 1.1~9.5 之间,波动幅度较大,MH-5 功比系数最高。通过比较,MX-5、MH-

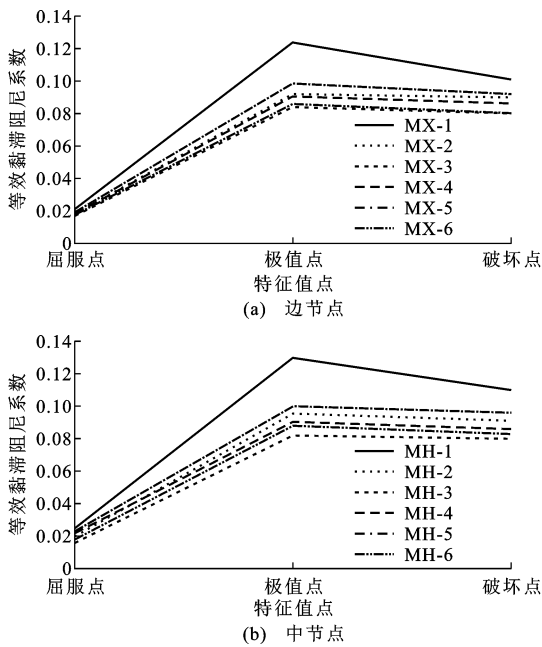


图 10 试件等效黏滞阻尼系数

Fig. 10 Equivalent viscous damping coefficient of specimen

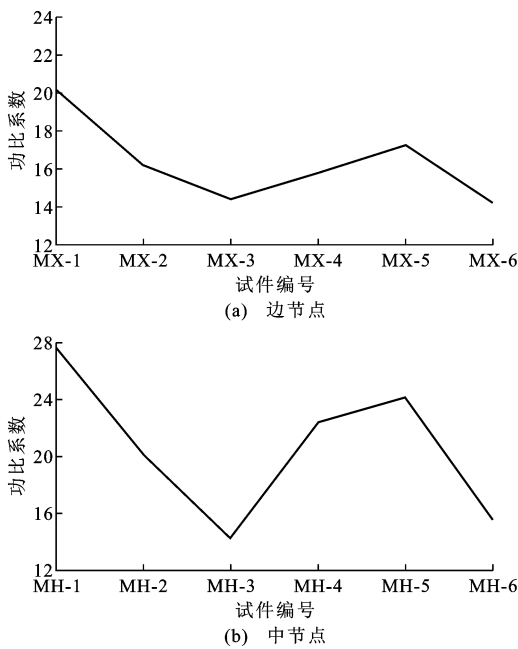


图 11 试件功比系数

Fig. 11 Work ratio coefficient of specimen

5 的耗能能力较好, MX-3、MH-3 耗能能力较差; 拼接缝的存在对边节点耗能能力影响大, 拼接缝的位置对中节点的耗能能力影响大。

4 结 语

(1) 拼接缝的存在对边节点抗震性能影响大, 梁端拼接缝位置的变化对中节点的抗震性能影响大。拼接缝界面处是试件抗剪和抗弯的薄弱部位, 装配

式节点会因拼接缝而降低试件的抗震性能。

(2) 相同工况下, 中节点的承载力比边节点高约 30%, 破坏时的变形能力高约 32%, 耗能能力优于边节点, 刚度退化程度两者相差不大。

(3) 装配式节点梁上拼接缝最优位置是拼接缝距核心区 $2/9$ 梁跨长, 最不利位置为 $1/3$ 梁跨长。装配式节点上的梁端拼接缝随着距离节点核心区长度的增加, 节点主裂缝的位置逐步由核心区梁端变成拼接缝界面处。

参考文献:

References:

- [1] 杨小威, 许文杰, 黎加纯. 中国、日本、新加坡装配式建筑技术差异分析[J]. 建筑技术, 2020, 51(12): 1483-1486.
YANG Xiaowei, XU Wenjie, LI Jiachun. Prefabricated construction technical differences among China, Japan and Singapore [J]. Architecture Technology, 2020, 51(12): 1483-1486.
- [2] 丁克伟, 叶 培. 装配式混凝土梁柱节点抗震性能试验与数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(4): 24-32.
DING Kewei, YE Yu. Experiment and numerical simulation on seismic performance of new type of prefabricated concrete beam-column joint [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(4): 24-32.
- [3] 高培楠, 邓 扬, 李爱群, 等. 装配式混凝土框架结构连接节点抗震性能研究进展[J]. 工业建筑, 2021, 51(2): 171-185, 152.
GAO Peinan, DENG Yang, LI Aiqun, et al. Review on seismic performance of connection joints of prefabricated concrete frame structures [J]. Industrial Construction, 2021, 51(2): 171-185, 152.
- [4] 孙岩波, 李晨光, 杨 旭. 装配式混凝土框架结构梁板-柱节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(7): 23-26.
SUN Yan-bo, LI Chen-guang, YANG Xu. Experimental study on seismic behavior of beam-slab-column joints of prefabricated concrete frame structure [J]. Building Structure, 2018, 48(7): 23-26.
- [5] 高 林, 刘英利, 张啸驰, 等. 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.
GAO Lin, LIU Yingli, ZHANG Xiaochi, et al. Experimental study on grouting sleeve node of prefabricated frame structure [J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(1): 75-80.

- [6] POPA V, PAPURCU A, COTOFANA D, et al. Experimental testing on emulative connections for precast columns using grouted corrugated steel sleeves [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2015, 13(8): 2429-2447.
- [7] KHOO J H, LI B, YIP W K. Tests on precast concrete frames with connections constructed away from column faces [J]. ACI Structural Journal, 2006, 103(1): 18-27.
- [8] 章一萍, 隗 萍, 张春雷, 等. 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.
ZHANG Yiping, WEI Ping, ZHANG Chunlei, et al. Study on new cast-in-situ monolithic beam-column connections for precast frame structure [J]. Sichuan Building Science, 2017, 43(3): 110-115.
- [9] 杨 辉, 郭正兴, 许傲逸, 等. 局部后张预应力装配式混凝土框架梁柱节点抗震试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(6): 1101-1108.
YANG Hui, GUO Zhengxing, XU Aoyi, et al. Experimental study on seismic behavior of local post-tensioned precast concrete beam-to-column connections [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(6): 1101-1108.
- [10] 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.
YANG Zhao, LYU Wei, BAO Liang. Experimental research on seismic behavior of new RC frame assembly joints based on bolted connection [J]. Industrial Construction, 2019, 49(8): 93-99.
- [11] 阎西康, 陈育苏, 常璐平, 等. 轴压比对带施工缝框架延性影响的试验研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(5): 128-130, 170.
YAN Xikang, CHEN Yusu, CHANG Luping, et al. Experimental study on the effect of axial compression ratio on the ductility of frame with construction joint [J]. Industrial Construction, 2016, 46(5): 128-130, 170.
- [12] 阎西康, 侯小磊, 陈 培, 等. 基于 ABAQUS 的带施工缝钢筋混凝土框架抗震性能研究[J]. 施工技术, 2014, 43(4): 12-16.
YAN Xikang, HOU Xiaolei, CHEN Pei, et al. Study on seismic behavior of reinforced concrete frame with construction joints based on ABAQUS [J]. Construction Technology, 2014, 43(4): 12-16.
- [13] 建筑结构设计荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Load code for the design of building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [14] 刘 健. 现浇钢筋混凝土框架施工缝有限元分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
LIU Jian. The finite element analysis on cast in situ reinforced concrete frame structure with construction joints [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [15] 吴从晓, 周 云, 赖伟山, 等. 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.
WU Cong-xiao, ZHOU Yun, LAI Weishan, et al. Experiment on seismic performance of cast-in-situ and prefabricated concrete frame structure joints [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(3): 60-66.
- [16] HA S S, KIM S H, LEE M S, et al. Performance evaluation of semi precast concrete beam-column connections with U-shaped strands [J]. Advances in Structural Engineering, 2014, 17(11): 1585-1600.
- [17] EOM T S, PARK H G, HWANG H J, et al. Plastic hinge relocation methods for emulative PC beam-column connections [J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 142(2): 04015111.
- [18] PARK S C, HONG W K, KIM S, et al. Mathematical model of hybrid precast gravity frames for smart construction and engineering [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 2014: 916951.
- [19] 吴成龙. 模块化预制钢骨混凝土柱-钢梁组合节点抗震性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2020.
WU Chenglong. Seismic behavior of modular prefabricated steel-reinforced concrete column-steel beam composite joints [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2020.
- [20] 马丹阳. 钢管混凝土加劲混合柱-RC 梁连接节点抗震性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2019.
MA Danyang. Seismic Performance of concrete-encased concrete-filled steel tubular column to RC beam Joint [D]. Beijing: Tsinghua University, 2019.
- [21] 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.