

装配整体式梁柱节点的抗震性能对比研究

刘卫东^{1,2}, 许攀熊^{1,3}, 张学伟³, 霍涛³, 蒙圣荣², 覃智泽²

(1. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 广西城市职业大学建筑工程学院, 广西 崇左 532100;
3. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200122)

摘要 目的 研究预制柱纵筋间距放大后装配整体式T型节点和十字型节点的抗震性能, 为工程设计提供依据。方法 对5个足尺梁柱节点试件进行低周往复荷载试验, 通过对比各试件的滞回曲线、骨架曲线和位移延性等, 研究了节点类型、柱纵筋间距和轴压比对梁柱节点抗震性能的影响。结果 装配式节点均发生梁端弯曲破坏, 预制柱和节点核心区未见明显破坏, 破坏主要是预制梁端底部纵筋屈服和梁端底部混凝土压碎脱落; 楼板加强了叠合梁的抗负弯矩能力, 叠合梁上部现浇混凝土和预制混凝土交界面出现明显的水平剪切裂缝; 柱纵筋间距放大后, 与对比试件相比, T型节点的承载力提高了9.2%, 十字型节点的承载力提高了1.3%。结论 柱纵筋间距放大试件的延性和耗能能力与对比试件相差不大, 柱纵筋间距放大对梁柱节点的抗震性能影响不大; 十字型节点和T型节点位移延性系数相差不大。

关键词 装配混凝土节点; 抗震性能; 足尺试件; 低周往复荷载试验

中图分类号 TU395.4

文献标志码 A

引用格式: 刘卫东, 许攀熊, 张学伟, 等. 装配整体式梁柱节点的抗震性能对比研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(5): 839-847. (LIU Weidong, XU Panxiong, ZHANG Xuewei, et al. Comparative study on seismic performance of highly efficient assembled beam-column joints [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(5): 839-847.)

Comparative Study on Seismic Performance of Highly Efficient Assembled Beam-Column Joints

LIU Weidong^{1,2}, XU Panxiong^{1,3}, ZHANG Xuewei³, HUO Tao³, MENG Shengrong², QIN Zhize²

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, 200093; 2. College of Architecture and Engineering, Guangxi City Vocational University, Chongzuo, China, 532100; 3. China Construction Eighth Engineering Division Co. Ltd., Shanghai, China, 200122)

Abstract: The seismic performance of precast T-shaped joints and cross-shaped joints after the longitudinal bar spacing of prefabricated column is enlarged is studied, which provides a basis for

收稿日期: 2023-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808338); 广西省住建厅科技计划项目(GJK202402H202369403/04)

作者简介: 刘卫东(1961—), 男, 教授, 主要从事混凝土结构的抗震防灾等方面研究。

practical engineering. low cyclic reversed loading tests were carried out on five full-size beam-column joint specimens. By comparing the hysteretic curve, skeleton curve and displacement ductility of each specimen, the effects of three parameters, joint type, longitudinal bar spacing of prefabricated column and axial force ratio, on the seismic performance of the beam-column joint were studied. The beam end bending failure occurred in all the prefabricated joints, but no obvious failure was found in the core area of the prefabricated column and the joint. The main failure was the buckling of the longitudinal bar at the bottom of the prefabricated beam end and the crushing of the concrete at the bottom of the beam end. The floor slab strengthens the negative moment resistance of the superimposed beam, and obvious horizontal shear cracks appear at the interface of cast-in-place concrete and precast concrete in the upper part of the superimposed beam. The bearing capacity of T-shaped joints and cross-shaped joints is increased by 9.2% and 1.3% respectively. The ductility and energy dissipation capacity of the specimens amplified by column longitudinal bar spacing are not much different from those of the contrast specimens. The amplification of the longitudinal bar spacing of prefabricated column has little effect on the seismic performance of beam-column joints. There is little difference in the displacement ductility coefficient between the T-shaped joint and the cross-shaped joint.

Key words: precast joint; seismic performance; full size specimen; low cyclic reversed loading test

装配式混凝土建筑由于生产条件好、施工效率高和绿色环保等优势得到了大力推广,然而震害表明,预制梁柱连接节点是结构的薄弱环节^[1-4]。同时,梁柱节点又是传递和分配梁柱端弯矩的核心受力部位,因此国内外诸多学者对影响装配式梁柱节点抗震性能的因素进行了试验研究。C. L. Ma 等^[5]研究一种灌浆螺旋约束搭接的钢筋连接方法,试验表明该方法可以显著缩短钢筋搭接长度。Luo Xiaoyong 等^[6]对灌浆套筒连接的节点进行了数值模拟研究,结果表明灌浆套筒连接可靠。陈适才等^[7-8]通过拟静力试验对比发现装配式节点的抗震性能和现浇节点总体上相当。张健新等^[9]对配置 600 MPa 级钢筋的梁柱节点进行了试验研究,结果表明高强钢筋提高了边节点的承载力。赵勇等^[10-11]对大直径高强钢筋装配式柱和中节点做了试验研究,研究发现装配式柱和中节点均有足够的抗震性能。刘璐等^[12]采用的大直径、大间距高强钢筋梁柱节点的柱纵筋间距达 468 mm,试验节点并未发生锚固破坏,节点整体性能良好。裘煜等^[13]对各种箍筋形式的梁柱节点进行了试验,研究发现强

结点试件发生梁端弯曲破坏。

T 型节点和十字型节点的位置虽然不同,但当地震荷载施加于结构时,所受的水平位移相同。因此,对于相同位移作用下的 T 型节点和十字型节点的抗震性能进行对比是有必要的。此外,为提高装配式施工效率,工程中常将预制柱纵筋集中布置于四角,此类预制柱的纵筋间距和箍筋肢距将加大。《装配式混凝土建筑技术标准》(GB/T 51231—2016)^[14]规定:预制柱纵筋间距不宜大于 200 mm,且不应大于 400 mm,预制柱纵筋间距放大后会可能会对节点的抗震性能有不利影响。为此,笔者设计了 5 个足尺装配式梁柱节点,研究轴压比、预制柱纵筋布置方式以及节点型式对节点抗震性能的影响,通过拟静力试验分析两类节点的抗震性能,为预制混凝土建筑的抗震设计和工程应用提供依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验制作了 5 个足尺梁柱节点试件,包括 3 个十字型节点,试件编号 J1、J2、J3;两个

T型节点试件,编号 J4、J5;其中 J1 和 J4 为对比试件。所有试件上下层预制柱纵筋通过上层柱内预埋的灌浆套筒连接。十字型节点两侧叠合梁顶纵筋贯通核心区,梁底纵筋采用锚固板锚固,而 T 型节点梁顶纵筋和梁底纵筋均采用 90°弯钩锚固。柱截面宽×高为 600 mm×600 mm,梁截面宽×高为 250 mm×500 mm,板厚×宽×长为 110 mm×1 500 mm×1 600 mm。各试件叠合梁和叠合板的混凝土强度等级为 C30,主筋和箍筋均为 HRB400E 级钢筋。预制柱和核心区后浇混凝土强度等级为 C50,主筋和箍筋均为 HRB400E 级钢筋。各试件配筋率相同,但预制柱的纵筋布置有所不同,对比试

件 J1 和 J4 的预制柱纵筋均匀布置四周(纵筋间距 163 mm),试件 J2、J3 和 J5 的预制柱纵筋集中布置四角(最大纵筋间距为 305 mm)。此外,试件 J3 设计轴压比为 0.37,其余试件设计轴压比均为 0.25。试件主要参数和配筋情况见表 1 和图 1。

表 1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of specimens

试件编号	节点型式	梁底纵筋锚固	轴压比	柱纵筋间距/mm
J1	十字型	锚固板	0.25	163
J2	十字型	锚固板	0.25	305
J3	十字型	锚固板	0.37	305
J4	T 型	90°弯钩	0.25	163
J5	T 型	90°弯钩	0.25	305

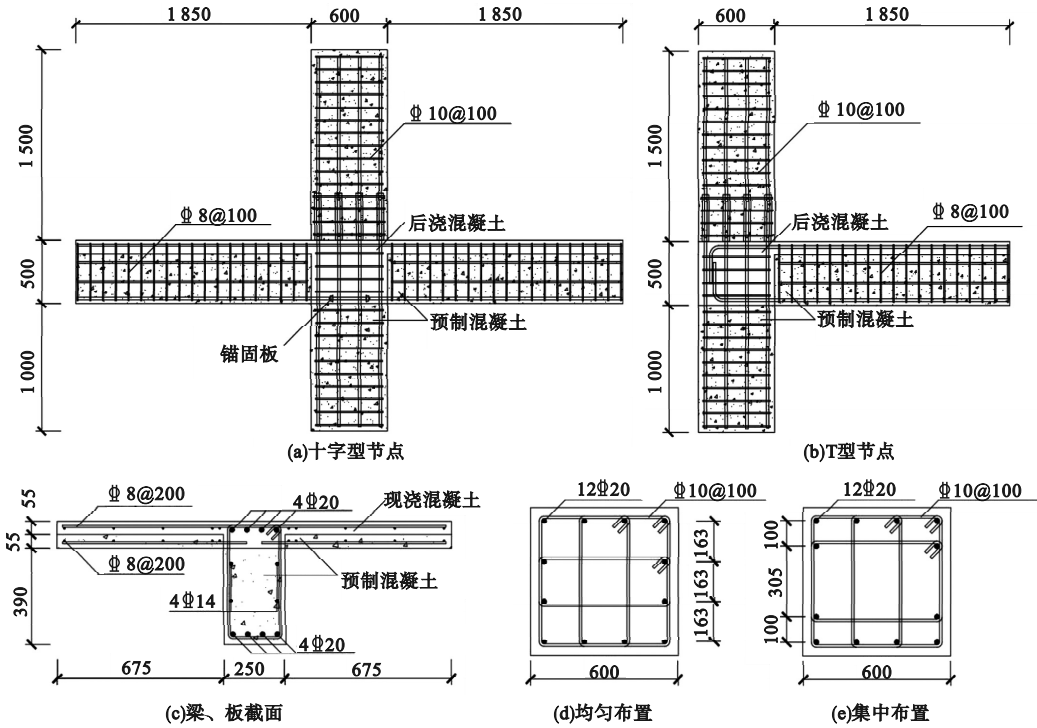


图 1 试件尺寸及配筋

Fig. 1 Dimensions and details of specimens

1.2 材性试验

在现浇混凝土时,同时制作了 3 组边长 150 mm 的立方体混凝土试块,根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)^[15],进行同等条件养护下的混凝土立方体抗压强度测试,结果见表 2。

表 2 混凝土力学性能

Table 2 Mechanical properties of concrete

混凝土等级	立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	弹性模量/10 ⁴ MPa
C30	28.8	20.1	2.98
C50	52.1	34.9	3.52

按照《金属材料 拉伸试验第一部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[16],对不同直径钢筋进行拉伸试验,测得钢筋力学性能结果见表3。

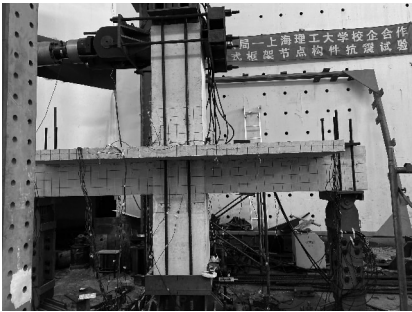
表3 钢筋力学性能

Table 3 Mechanical properties of steel bars

钢筋直径/ mm	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa
8	451	656
10	432	659
20	419	601

1.3 加载方案

采用拟静力试验方法,试验装置见图2。



(a)十字型节点



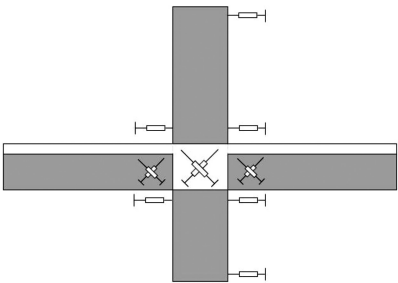
(b)T型节点

图2 试验装置

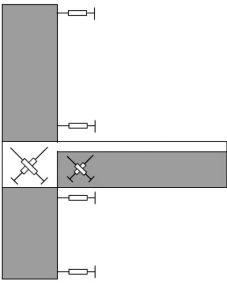
Fig. 2 Test setup

试件梁端和柱底均布置铰支座,通过千斤顶和钢绞线在柱顶施加轴压力,通过作动器在柱顶施加水平往复荷载。加载过程中柱端位移由线位移计测得,位移计布置情况如图3所示。采用位移控制的加载制度(见图

4),按照《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)^[17]要求,具体加载过程:首先施加轴向荷载,然后进行预加载消除试件与装置间的空隙,随后逐级增大位移,加载位移幅值分别为6 mm、7.5 mm、10.5 mm、15 mm、22.5 mm、30 mm、45 mm、60 mm、82.5 mm、105 mm、127.5 mm,对应位移角依次为0.2%、0.25%、0.35%、0.5%、0.75%、1%、1.5%、2%、2.75%、3.5%、4.25%,每级往复循环三次,最后当荷载下降至峰值荷载85%时,认为试件破坏,停止加载。



(a)十字型节点



(b)T型节点

图3 位移计测点布置

Fig. 3 Arrangements of displacement meters

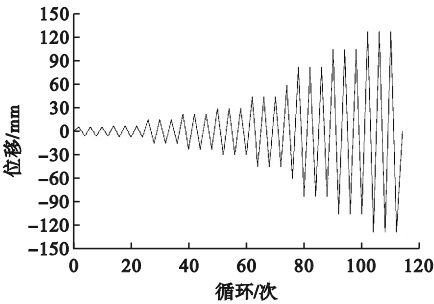


图4 加载制度

Fig. 4 Loading regime

2 结果与分析

2.1 破坏形态

所有试件均按“强柱弱梁”设计,试件的裂缝发展和破坏特征基本相似,最后破坏为梁柱结合面处梁端钢筋屈服且梁端混凝土被压碎而破坏,而节点核心区混凝土只出现少量细微裂缝,叠合梁和叠合板的交界面处出现明显滑移现象。各试件的破坏形态如图5所示。



(a)试件J1



(b)试件J2



(c)试件J3



(d)试件J4



(e)试件J5

图5 试件破坏形态及裂缝分布

Fig. 5 Failure modes and fractures distribution of specimens

各试件的破坏过程相似,笔者以试件J5为例,阐述试件的裂缝发展过程。试件J5加载至水平位移6 mm时,梁柱结合面处梁端底部出现细微的贯穿竖向裂缝,继续加载,梁底裂缝向梁侧扩展,梁底出现新裂缝;加载至水平位移10.5 mm时,梁侧原有裂缝垂直发展,并且有新裂缝从梁底延伸出来;加载至水平位移15 mm时,叠合板与叠合梁交界面处出现水平裂缝,并且梁侧有斜裂缝从梁板交界面处产生,叠合板和核心区交界面处的板面出现竖向裂缝,并且裂缝延伸至板翼缘,靠近铰支座的板面出现八字裂缝;继续加载,梁与核心区结合面处出现裂缝,梁侧上下斜裂缝交叉,核心区出现细微裂缝,新裂缝增长迅速,原有裂缝继续拓展和延伸;水平位移继续增大时,靠近核心区的梁端底部裂缝宽度迅速增大,而且贯通至梁与核心区结合面处,叠合板面上靠近核心区处为均布的竖向裂缝,靠近铰支座处为密集的八字裂缝;加载至水平位移60 mm时,靠近核心区的梁底混凝土开口,小部分混凝土脱落;加载至水平位移82.5 mm时,叠合梁与叠合板交界面混凝土小部分脱落,梁侧出现竖向贯通裂缝;加载至水平位移150 mm时,随着往复荷载施加,梁底纵筋凸起,混凝土压碎,大面积脱落,板和梁之间有明显的滑移痕迹。

2.2 破坏机理及分析

T型节点和十字型节点主要区别是只有一端有梁,因此十字型节点刚度大于T型节

点,相同柱端水平位移需要更大水平荷载。在地震荷载和竖向荷载共同作用下,节点核心承担柱传递的轴力、弯矩及剪力和梁传递的剪力及弯矩。一方面,梁、柱钢筋的力通过粘结效应传递给节点核心区,其产生的主压应力和主拉应力分别由节点区混凝土和节点水平箍筋及柱筋承担;另一方面,节点边缘承受着梁柱端受压区混凝土的压力。由于T型节点和十字型节点的核心区剪压比偏小,且柱相对梁的抗弯能力偏大,所以所有试件破坏均发生在梁端,节点破坏不明显。

叠合板对梁端抗负弯矩有较大的贡献,板上与梁纵轴平行的两层钢筋参与受力,使得梁顶钢筋未屈服,破坏时板上裂缝最大约1 mm。叠合梁顶纵筋受拉时,纵筋拉力传递到叠合梁上部现浇混凝土中,预制叠合梁上部现浇混凝土和预制混凝土交界面处有较大剪力,当该剪力大于新旧混凝土界面的最大剪应力时,预制梁上部现浇混凝土和预制混凝土交界面处出现水平剪切裂缝和相对滑移。上述现象说明楼板导致了预制梁顶剪力键和粗糙面构造措施失效,需要增强新旧混凝土界面的粘结强度。

2.3 滞回曲线

试件滞回曲线如图6所示。

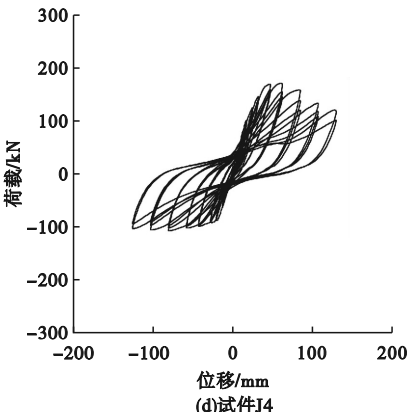
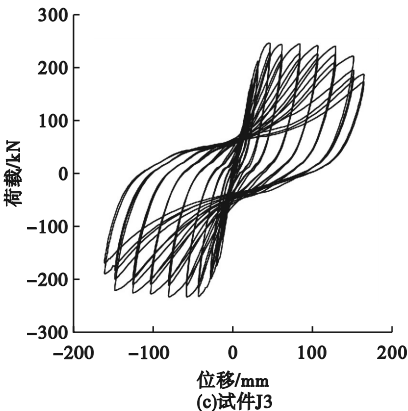
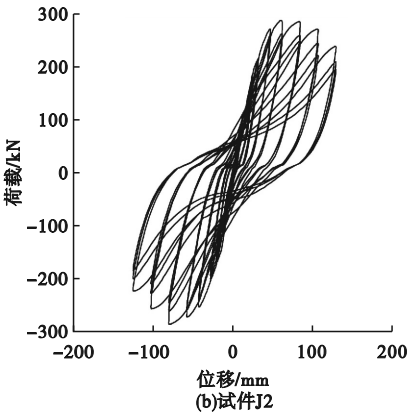
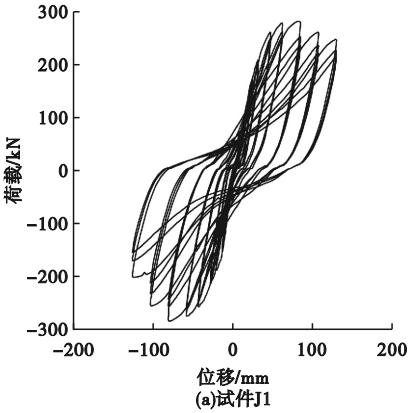
由图6可知:

(1)由于叠合板起到了梁翼缘的作用,T型节点正向加载和负向加载滞回曲线不对称,而十字型节点表现出较好的对称性。加载前期,各试件刚度大,残余变形小,滞回环呈尖梭型;随着加载位移增大,试件混凝土开裂至钢筋屈服,残余变形增大,滞回环向弓型发展;加载位移继续增大,滑移现象明显,各试件的滞回曲线呈反S型。

(2)试件 J1 和试件 J2 滞回曲线基本相同,试件 J4 和试件 J5 滞回曲线基本相同,说明加大柱纵筋间距对节点整体性影响不大。

(3)试件 J3 和试件 J2 相比,滞回环更加均匀饱满,表明增大轴压比能改善节点的滞

回性能。



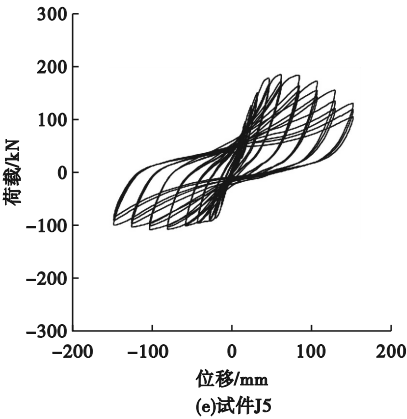


图6 滞回曲线

Fig. 6 Hysteretic loops of specimens

2.4 骨架曲线

各试件的骨架曲线如图7所示。各试件骨架曲线中的特征点试验结果见表4,其中屈服荷载和屈服位移由能量法^[18]确定。

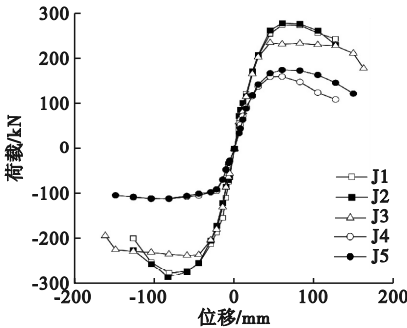


图7 骨架曲线

Fig. 7 Skeleton curves

表4 节点延性系数

Table 4 Ductility coefficients of joints					
节点 编号	屈服点		破坏点		μ
	P_y/kN	Δ_y/mm	P_u/kN	Δ_u/mm	
J1	243.4	41.2	237.9	138.8	3.4
	-231.1	-36.6	-241.6	-109.6	3.0
J2	244.0	39.6	240.6	121.3	3.1
	-253.7	-38.4	-245.9	-112.7	2.9
J3	211.0	33.2	203.5	153.6	4.6
	-208.5	-32.5	-202.6	-159.2	4.9
J4	139.9	31.0	139.4	91.7	3.0
	-97.5	-32.8	—	—	—
J5	153.5	36.3	151.2	122.5	3.4
	-97.6	-35.6	—	—	—

注: P_y 为屈服荷载; Δ_y 为屈服位移; P_u 为破坏荷载;
 Δ_u 为破坏位移; μ 为位移延性系数。

由图7和表4可知:

(1)试件J1和试件J2骨架曲线基本重合,只在负向加载后期略有不同,试件J2的峰值荷载相比试件J1提高了1.3%,说明柱纵筋间距放大对十字型节点的承载力影响不大。

(2)试件J3为大轴压比试件,但在试验加载过程中,梁端支座处混凝土出现压碎现象,因而试件J3梁端夹具出现较明显的滑移现象,导致其峰值荷载较小,且延性系数较大。

(3)试件J5的峰值荷载相比试件J4提高了9.2%,在正向加载后半段,相同水平位移作用下试件J5的荷载均大于试件J4;而对于负向加载,两试件破坏时梁底部受拉,荷载无明显下降段。分析原因为梁端底部钢筋屈服后,叠合板混凝土没有达到屈服,可见T型节点负向变形能力较大。

(4)除试件J3以外,所有试件位移延性系数均在2.9~3.4,表明各试件具有较好的延性。

2.5 刚度退化分析

采用割线刚度来表征试件的刚度退化规律,按照《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)计算,得到刚度退化系数随位移的变化曲线如图8所示。

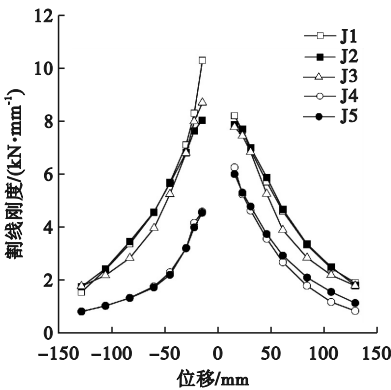


图8 刚度退化曲线

Fig. 8 Stiffness degradation curves

由图8可知,十字型节点刚度大于T型

节点,T型节点正向刚度大于负向刚度。各试件的刚度退化比较相似,在弹性阶段,刚度退化速率较快;试件屈服后,刚度退化相对较缓慢。柱纵筋间距放大的试件 J2 和 J5 分别与 J1 和 J4 对比试件相比,刚度总体相差不大,表明增大柱纵筋间距对节点的整体性能影响不大。

2.6 耗能能力分析

采用能量耗散系数 E 来表征节点的耗能能力, E 越大,表明节点消耗的能量越多,结构的抗震性能越好^[19],计算如下:

$$E = \frac{S_{(\text{弧} \widehat{ACD} + \text{弧} \widehat{AFD})}}{S_{(\Delta ABO + \Delta DEO)}} \quad (1)$$

式中面积如图 9 所示,分子为弧 \widehat{ACD} 和弧 \widehat{AFD} 包围的图形面积,分母为 ΔABO 和 ΔDEO 面积之和。

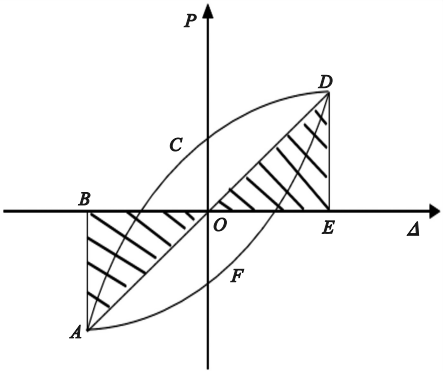


图 9 一次循环滞回曲线图

Fig. 9 One single cycle hysteresis loop curve

各试件能量耗散系数对比如图 10 所示。由图 10 可知,加载初期,各试件耗能能力比较小;随着加载位移增大,各试件耗能能力逐渐提高,且柱纵筋间距放大的试件耗能能力总体高于对比试件,说明其有更好的抗震性能。加载最后,对比试件 J1 和 J4 都有耗能能力下降的现象,而试件 J2 和 J5 没有下降,分析原因是柱纵筋间距放大的试件节点核心区内梁底钢筋被混凝土包裹的更好,对比试件节点核心区的纵筋滑移更严重。

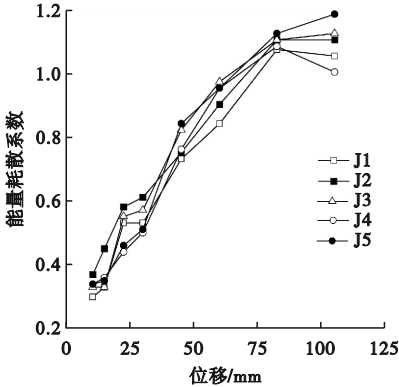


图 10 能量耗散系数曲线

Fig. 10 Energy dissipation coefficient curves

3 结 论

- (1) 装配式节点均发生梁端弯曲破坏,叠合板和预制柱以及节点未见明显破坏。破坏主要是靠近节点梁端底部纵筋屈服和梁端底部混凝土压碎脱落。
- (2) 柱纵筋间距放大的梁柱节点和正常柱纵筋间距梁柱节点的极限承载力、延性和耗能能力相差不大,柱纵筋间距放大后对梁柱节点的抗震性能影响不大。
- (3) 轴压比增大能改善梁柱节点的滞回性能,但节点叠合梁和叠合板的交界面处滑移更严重,需要更强的构造措施;十字型节点和 T 型节点位移延性系数相差不大。

参考文献

[1] SAVOIA M, BURATTI N, VINCENZI L. Damage and collapses in industrial precast buildings after the 2012 Emilia earthquake [J]. Engineering structures, 2017, 137: 162 - 180.

[2] 吴刚,冯德成. 装配式混凝土框架节点基本性能研究进展[J]. 建筑结构学报, 2018, 39 (2): 1 - 16.

(WU Gang, FENG Decheng. Research progress on fundamental performance of precast concrete frame beam-to-column connections [J]. Journal of building structures, 2018, 39 (2): 1 - 16.)

[3] 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 on seismic performance

- of prefabricated RC structural nodes [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2003, 40(1): 85–94.)
- [4] GUAN Dongzhi, JIANG Cheng, GUO Zhengxing, et al. Development and seismic behavior of precast concrete beam-to-column connections [J]. Journal of earthquake engineering, 2018, 22(2): 234–256.
- [5] MA C L, JIANG H, WANG Z Y. Experimental investigation of precast RC interior beam-column-slab joints with grouted spiral-confined lap connection [J]. Engineering structures, 2019, 196: 109317.
- [6] LUO Xiaoyong, LONG Hao, OU Ya, et al. Study on finite element model of the prefabricated reinforced concrete beam-column joints with grouted sleeves [J]. Advances in civil engineering, 2021, 2021: 1–15.
- [7] 陈适才, 闫维明, 王文明, 等. 大型预制混凝土结构梁-柱-叠合板边节点抗震性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 60–67.
(CHEN Shicai, YAN Weiming, WANG Wenming, et al. Seismic behavior of exterior beam to column joints with layered slab of large precast concrete structures [J]. Journal of building structures 2011, 32(6): 60–67.)
- [8] 闫维明, 王文明, 陈适才, 等. 装配式预制混凝土梁-柱-叠合板边节点抗震性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2010, 43(12): 56–61.
(YAN Weiming, WANG Wenming, CHEN Shicai, et al. Experimental study of the seismic behavior of precast concrete layered slab and beam to column exterior joints [J]. Journal of building structures, 2010, 43(12): 56–61.)
- [9] 张健新, 戎贤, 吴海超. 配置 600MPa 级钢筋混凝土框架边节点滞回性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2017, 47(6): 30–33.
(ZHANG Jiangxin, RONG Xian, WU Haichao. Experimental research on hysteretic behavior of exterior joints with 600 megapascal reinforced bars [J]. Industrial construction, 2017, 47(6): 30–33.)
- [10] 赵勇, 李锐, 王晓锋, 等. 大直径高强钢筋套筒灌浆连接预制柱抗震性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2017, 50(5): 27–35.
(ZHAO Yong, LI Rui, WANG Xiaofeng, et al. Experimental research on seismic behaviors of precast concrete columns with large-diameter and high-yield strength reinforcements splicing by grout-filled coupling sleeves [J]. China civil engineering journal, 2017, 50(5): 27–35.)
- [11] 赵勇, 时林, 田春雨, 等. 装配整体式混凝土框架梁柱组合体抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2021, 42(7): 133–143.
(ZHAO Yong, SHI Lin, TIAN Chunyu, et al. Experimental study on seismic performance of beam-column sub-assembly in monolithic precast concrete frame [J]. Journal of building structures, 2021, 42(7): 133–143.)
- [12] 刘璐, 黄小坤, 田春雨, 等. 配置大直径大间距 HRB500 高强钢筋的装配整体式钢筋混凝土框架节点抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37(5): 247–254.
(LIU Lu, HUANG Xiaokun, TIAN Chunyu, et al. Experimental study on seismic performance of precast RC frame joints with HRB500 high strength rebars of large diameter and spacing [J]. Journal of building structures, 2016, 37(5): 247–254.)
- [13] 裴煜, 邹小舟, 罗运海, 等. 新型箍筋装配式混凝土梁柱节点抗震性能研究 [J]. 工业建筑, 2022, 52(12): 72–79.
(QIU Yu, ZHOU Xiaozhou, LUO Yunhai, et al. Research on seismic performance of prefabricated concrete beam-to-column joints with new stirrups [J]. Industrial construction, 2022, 52(12): 72–79.)
- [14] 中国建筑标准设计研究院. 装配式混凝土建筑技术标准: GB/T 51231—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
(China Institute of Building Standard Design & Research. Technical standard for assembled buildings with concrete structure: GB/T 51231—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.)
- [15] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
(China Academy of Building Research. Standard for test method of mechanical on ordinary concrete: GB/T 50081—2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.)
- [16] 中国钢铁工业协会. 金属材料 拉伸试验第一部分: 室温试验方法: GB/T 228. 1—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
(China Iron and Steel Association. Metallic material-tensile testing-part1: method of test at room temperature: GB/T 228. 1—2021 [S]. Beijing: China Standards Press, 2021.)
- [17] 中国建筑科学研究院. 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.
(China Academy of Building Research. Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.)
- [18] XUE Weichen, BAI Haoyang, DAI Lingjie, et al. Seismic behavior of precast concrete beam column connections with bolt connectors in columns [J]. Structural concrete, 2021, 22(3): 1297–1314.
- [19] WANG Zhun, FENG Decheng, WU Gang. Experimental study on seismic behavior of precast bolt-connected steel-members end-embedded concrete (PBSEC) beam-column connections [J]. Buildings, 2022, 12: 1652.
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)