

# 装配式混凝土梁柱节点抗震性能试验 和恢复力模型研究

丁克伟,陈 伟

(安徽建筑大学土木工程学院,安徽 合肥 230601)

**摘 要** 目的 研究由螺栓连接的装配式混凝土梁柱节点的抗震性能,基于试验结果提出一种针对此类节点的恢复力模型骨架曲线,为此类节点的工程实践提供试验依据,也为此类节点的弹塑性反应分析提供参考。**方法** 对两个由 8.8 级和 5.6 级不同等级螺栓连接的装配式混凝土梁柱节点进行拟静力试验,以不同螺栓等级为变化参数,研究分析两节点的破坏模式、滞回性能、承载力退化、刚度退化以及延性性能、耗能能力等抗震性能,并对荷载-位移试验散点数据拟合,建立一种针对此类节点的恢复力模型骨架曲线。**结果** 两试件在低周反复荷载作用下均出现梁端弯曲破坏;滞回曲线饱满,有明显的捏缩段;承载力、刚度退化缓慢,抗侧移能力较强;由于 5.6 级螺栓参与工作,5.6 级螺栓连接的节点延性性能、耗能能力略微高于 8.8 级螺栓连接节点;所建立的恢复力模型骨架曲线与试验值较为吻合。**结论** 基于螺栓连接的装配式混凝土梁柱节点抗震性能良好,可以用于装配式框架结构体系,建立的恢复力模型骨架曲线也可作为螺栓连接节点的弹塑性反应分析计算模型。

**关键词** 装配式混凝土梁柱节点;拟静力试验;抗震性能;恢复力模型

中图分类号 TU375.4

文献标志码 A

## Experimental Study and Restoring Force Modeling on Seismic Performance of Prefabricated Concrete Beam-column Joints

DING Kewei, CHEN Wei

(School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, China, 230601)

**Abstract:** Seismic performance of bolt-connected prefabricated concrete beam-column joints were experimentally studied. A skeleton curve of the restoring force model is proposed which can provide references for the analysis and calculation of elastoplastic analysis response. A Pseudo-test was carried out, using two kinds of specimens with bolt connection grades of 8.8 and 5.6 respectively, to analyze the seismic resistance performance of beam-column joints, including failure

收稿日期:2020-09-16

基金项目:“十三五”国家重点研发计划重点专项资助项目(2016YFC0701500);国家自然科学基金项目(11472005)

作者简介:丁克伟(1962—),男,教授,博士,主要从事空间数值计算等方面研究。

modes, hysteretic performance, bearing capacity degradation, stiffness degradation, ductility performance and energy dissipation capacity. The scatter diagram of load-displacement test was fitted and a skeleton curve of the restoring force model concerning this kind of joints was proposed. During the test, both specimens developed bending failures at the beam ends under low-cycled reversed loading. The hysteretic curves of both specimens are plump and obviously with pinching sections. The bearing capacity and the stiffness degrade slowly, showing its great resistance to lateral movement. Owing to the contribution of 5.6-grade bolt elastoplastic section, the ductility performance and energy consumption of the 5.6-grade bolt connection are slightly higher than that of 8.8-grade. Test results show that: the bolt-connected prefabricated concrete beam-column joints have good seismic performance, and can be used in prefabricated frame structure systems; the established skeleton curve of the restoring force model simulates the test value well, which can provide references for the analysis and calculation of elastoplastic response analysis of this kind of joints.

**Key words:** prefabricated concrete beam-column joints; pseudo-static test; seismic performance; restoring force model

装配式混凝土框架结构具有工业化程度高、施工速度快、构件质量好以及保护环境和节约资源的优点,是未来基准建筑物的方向<sup>[1]</sup>。梁柱节点的连接是装配式建筑的关键传力区域。因此,为避免节点在地震作用下发生严重破坏,设计出抗震性能优良,连接可靠的装配式混凝土梁柱节点具有重要意义。

国内外学者针对预制装配式混凝土框架节点、结构体系等不同连接方式的装配式节点的抗震性能做了大量的理论和试验研究。H. K. CHOI 等<sup>[2-3]</sup>制作了由螺栓连接的装配式梁柱节点,研究表明这种螺栓连接节点的耗能能力良好。N. GANESAN 等<sup>[4]</sup>和邓明科等<sup>[5]</sup>分别提出采用混合纤维增强型混凝土和局部采用高延性混凝土的梁柱节点来研究其在低周往复荷载作用下的力学性能,发现混合纤维增强型混凝土与高延性混凝土能提高节点核心区的抗震性能。在对不同连接形式的装配式梁柱节点的抗震性能试验研究中,陈庆军等<sup>[6]</sup>对由冷挤压套筒连接的节点与现浇混凝土节点进行足尺试验对比破坏模式和滞回性能,试验表明装配式节点的破坏形态多为梁端弯曲破坏。于建兵等<sup>[7]</sup>将在核心区设置附加钢筋的节点与现浇节点对

比足尺试验,结果表明加强核心区能实现梁端塑性较外移。随着消能减震技术的不断发展,很多学者试图将消能减震技术应用到混凝土框架节点中来。其中对加装阻尼器的梁柱节点的试验研究<sup>[8]</sup>表明阻尼器能有效延缓、控制节点区域裂缝的出现和开展。丁克伟等<sup>[9-12]</sup>对装配式混凝土框架结构中的叠合板、装配式梁柱螺栓连接节点和钢结构梁柱节点开展了试验研究,研究表明:提出的新型拼缝结构的叠合板力学性能和变形能力与现浇双向板基本相同;装配式螺栓连接节点和钢结构梁柱节点承载能力和综合抗震能力优良,连接可靠。上述文献虽采用试验研究的方法研究了装配式梁柱节点的抗震性能,但均未涉及装配式混凝土梁柱节点的恢复力模型理论研究。

对恢复力模型的研究常常针对特定的结构,管东芝等<sup>[13]</sup>对底筋锚入式节点的研究分析中,通过数据拟合构建了针对键槽梁的三折线骨架曲线恢复力模型,模型的各个阶段数据变化与试验研究中梁柱节点的受力特点吻合良好。曾磊<sup>[14]</sup>同样依据对型钢混凝土框架中节点的低周往复加载试验结果进行滞回性能分析,建立了考虑退化因素的三折线

型骨架曲线模型,试验基础上恢复力模型的建立,能为节点弹塑性非线性分析和动力响应分析提供有利的数据参考。目前国内学者对恢复力模型的研究多是以现浇构件试验研究为基础,对高强度高性能混凝土和对由螺栓连接的装配式混凝土构件的研究并不多见。

鉴于此,笔者对 2 个由 8.8 级和 5.6 级螺栓连接的装配式梁柱节点试件进行拟静力试验,通过试验结果对比分析得到其抗震性能相关曲线,并由拟静力试验结果建立了一种针对螺栓连接的装配式混凝土梁柱节点的恢复力模型骨架曲线,为此类节点的弹塑性反应分析、非线性分析和结构动力试验提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

设计两个由不同强度螺栓连接的预制装

配式混凝土框架半刚性梁柱节点试件,编号为 JD1 和 JD2,其中试件 JD1 由 8.8 级高强螺栓连接,试件 JD2 由 5.6 级普通螺栓连接,试件 JD1 和 JD2 除螺栓强度不同外,混凝土强度和钢筋布置相同。梁柱节点足尺试验取自中层框架边节点梁柱反弯点位置,梁柱构件采用 T 型梁、牛腿柱,按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)抗弯承载力验算,属于强柱弱梁型试件。柱高 4 200 mm,截面长×宽为 750 mm×750 mm;T 型梁长 3 800 mm,截面高×宽为 750 mm×450 mm。T 型梁翼缘部分和牛腿柱对应位置预留螺栓孔洞,孔洞外侧均预埋承压钢板保护混凝土不被压碎,具体试验布置见图 1 所示,试件尺寸和配筋方案见图 2 所示。其中, $t$  为承压钢板厚度,mm。

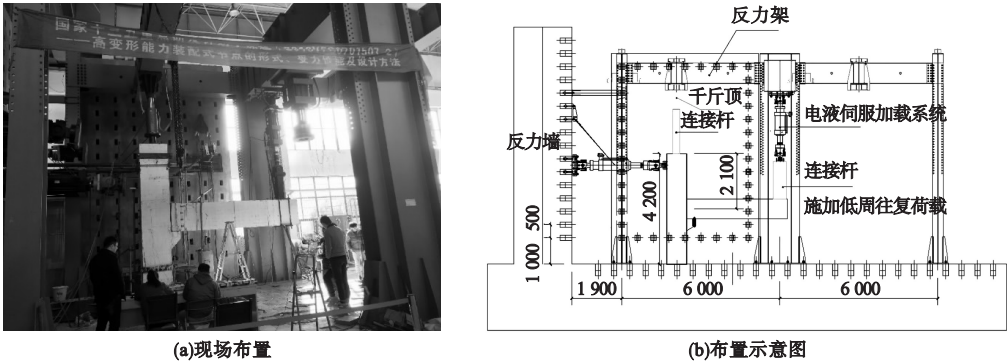


图 1 试验布置

Fig. 1 Test layout plan

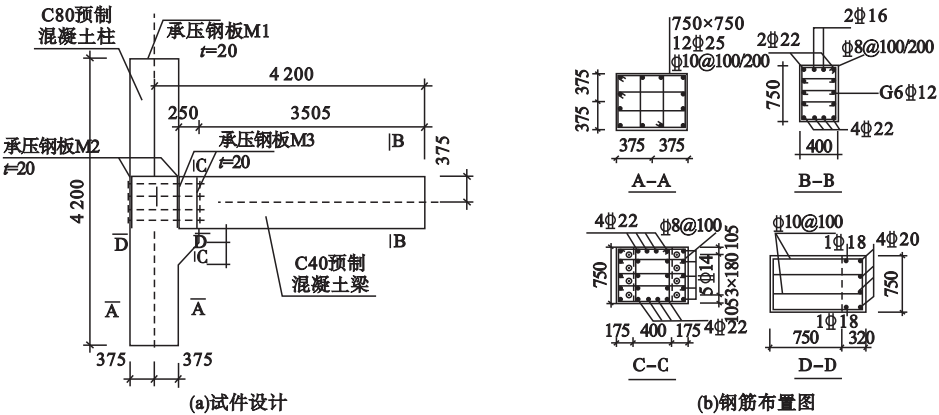


图 2 试件设计及钢筋布置

Fig. 2 Specimens design and reinforcement arrangement scheme

1.2 材料强度

在安徽省建筑结构与地下工程重点实验室对本次试验 T 型梁、牛腿柱和节点处的螺栓钢板采用的材料进行材料性能试验。本试验牛腿柱采用 C80 高强混凝土,T 型梁采用 C40 普通混凝土,螺栓采用 8.8 级、5.6 级 M30 承压型螺栓,梁柱节点两侧钢板采用 Q345 钢板。混凝土、钢筋、螺栓和钢板等试验材料的力学性能指标详见文献[10]。

1.3 加载方案

本次试验依据《建筑抗震试验规程》中拟静力试验方案,对试件 JD1、JD2 的试验节点施加低周反复荷载。试验前,由电液伺服控制系统控制柱顶的连接杆对柱顶施加 150 kN 轴向压力,并对梁端进行预加载,加载数值为屈服强度的 10%。本试验采用力和位移混合控制的加载方案:先采用力加载方案加载至构件达到屈服状态;达到屈服状态之后改用位移加载方案,具体的荷载类型与分级循环情况见图 3 所示。当试件出现明显损伤破坏、构件承载力下降到极限荷载的 85%,或是梁柱节点核心区螺栓破坏,试验结束。

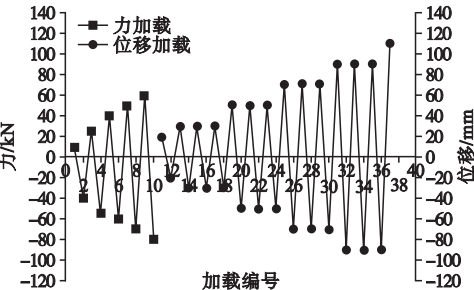


图 3 加载制度

Fig. 3 Loading test scheme

1.4 主要试验现象与破坏模式

1.4.1 主要试验现象

(1) 高强螺栓连接节点

当梁端力加载为 +10 kN(向下为正)、-40 kN(向上为负)时,试件 JD1 未出现明显裂缝。当力加载至 +25 kN 时,梁柱节点核心区 T 型梁梁端出现第一条裂缝,开裂荷载为 25 kN,裂缝宽度为 0.1 mm;当力反向加载至 -55 kN 时,T 型梁下表面产生与上表面对称裂缝,裂缝宽度为 0.1 mm。当力加载至 +40 kN 时,T 型梁翼缘部分承压板附近的裂缝宽度继续加大,梁侧面出现宽度为 0.1 mm 的裂缝,梁柱节点核心区裂缝宽度开展至 0.54 mm,根据数据采集仪显示受力钢筋的应变逐渐增大,翼缘部分的承压钢板和高强螺栓的应变相应增大。当力加载至 +75 kN 时,裂缝的宽度增加至 0.8 mm,而 T 型梁发生较大的位移,裂缝出现的位置向梁柱节点核心区靠近,在靠近 T 梁端节点核心区附近裂缝宽度增加至 0.75 mm,梁内纵筋屈服,由力加载转换成位移加载。位移荷载加载初期,T 型梁侧面不断出现细微新裂缝,顶部和底部裂缝缓慢开展,高强螺栓螺帽处可见轻微变形;当位移加载至 +70 mm 时,梁上部裂缝达到 5.3 mm。位移加载至 -90 mm 时,梁底部裂缝贯通,上部最大裂缝达到 8 mm,当位移加载至 +110 mm 时,节点核心区梁端裂缝宽度为 12 mm,T 型梁上出现大面积裂缝,T 型梁翼缘部分破坏,柱表面没有产生裂缝,高强螺栓的应变趋于稳定,螺栓未被拉断,试件 JD1 破坏现象见图 4 所示。

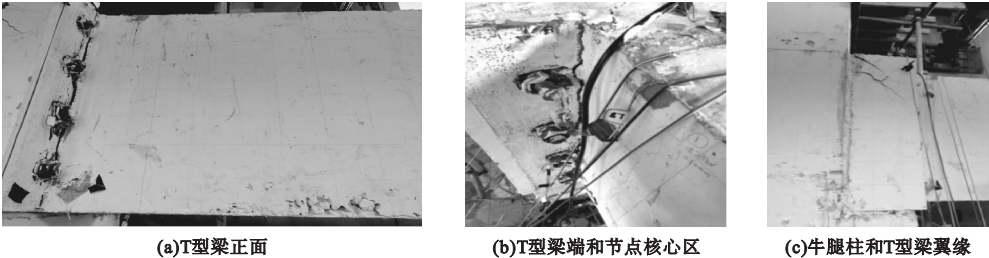


图 4 JD1 试件破坏现象

Fig. 4 Destruction phenomenon of JD1 specimen



(2)普通螺栓连接节点

当力加载至 + 25 kN (向下为正) 时, T 型梁顶部靠近节点核心区部分出现第一条裂缝, 裂缝宽度为 0.14 mm; 当力加载至 + 40 kN 时 T 型梁上表面出现裂缝, 宽度 0.1 mm; 当力加载至 + 50 kN 时, 梁侧面裂缝出现宽度 0.15 mm, 梁顶部开裂, 裂缝扩大到 0.47 mm, 受力钢筋和普通螺栓的应变逐渐增加。当力加载至 + 60 kN 时, 梁发生大位移变形, 节点核心区 T 型梁端裂缝扩大到 0.86 mm, 梁上受力钢筋应变突然增大, 受拉

钢筋屈服, 由施加力荷载转变为施加位移荷载。位移荷载加载初期, T 型梁侧面不断出现细微新裂缝, 顶部和底部裂缝缓慢开展; 当位移加载至 + 70 mm 时, 顶部裂缝持续增大, T 型梁端最大裂缝 5.3 mm, 裂缝开始向 T 型梁尾部开裂延伸; 当位移加载至 - 90 mm (向上为负) 时, 梁底翼缘端有深裂缝, 梁顶混凝土被压碎, T 型梁翼缘处发生破坏, 最上排螺栓应变超过极限值螺栓拉断, 试验结束。柱表面与牛腿处无裂缝, T 型梁尾部无裂缝, 试件 JD2 破坏现象见图 5 所示。

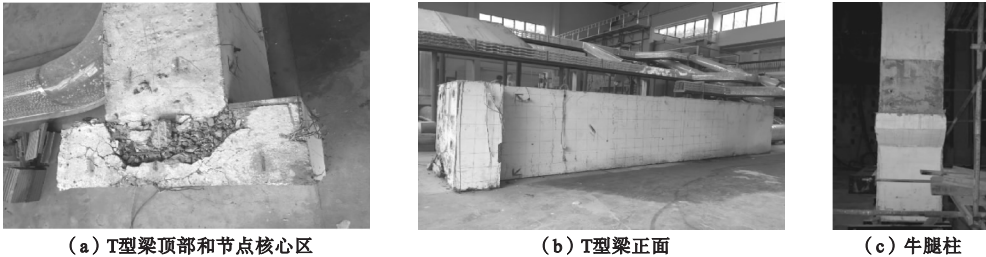


图 5 试件 JD2 破坏现象

Fig. 5 Destruction phenomenon of JD2 specimen

1.4.2 破坏模式

梁柱节点试件破坏主要呈现核心区剪切破坏模式和梁端弯曲破坏模式<sup>[15]</sup>。试件 JD1 与 JD2 构件破坏模式主要经过初裂阶段、屈服阶段和破坏阶段, 最终破坏主要裂缝出现在近 T 型梁端翼缘处, 裂缝为受弯垂直裂缝。试件 JD1 由高强螺栓连接, T 型梁屈服荷载较高, 破坏主裂缝出现在 T 型梁翼缘承压钢板处, 最终破坏梁上出现大面积裂缝, 高强螺栓未破坏; 试件 JD2 由普通螺栓连接, 破坏主裂缝出现在 T 型梁端翼缘上部,

最上排普通螺栓破坏, 垂直裂缝随着荷载幅值和循环次数的增加, 梁端纵筋屈服, 最终垂直裂缝开展上下裂缝贯通形成塑性铰, 试件 JD1 和 JD2 均呈现弯曲破坏特征。

2 试验结果分析

2.1 滞回曲线

滞回曲线是指结构构件在低周反复荷载作用下, 作用在结构构件上的力和对应位移之间的关系曲线<sup>[16]</sup>, 能综合反应结构构件的抗震性能, 试件 JD1 和 JD2 的滞回曲线见图 6 所示。

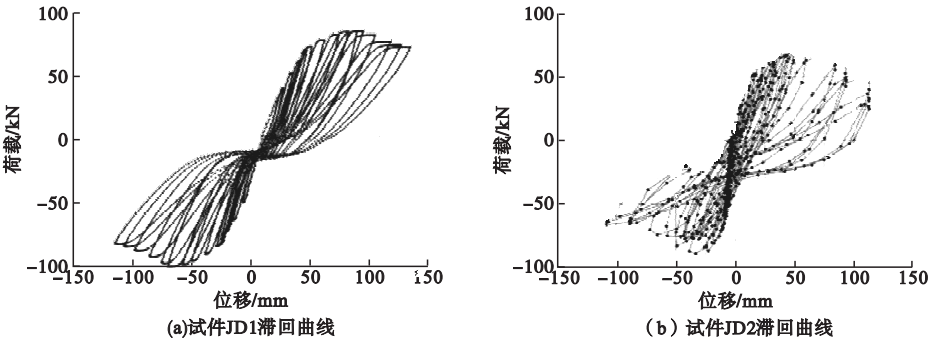


图 6 滞回曲线

Fig. 6 Hysteretic curves

由图6可以看出:①试件 JD1 和 JD2 在加载初期,滞回曲线加载路径和卸载路径基本重合为一条直线;T 型梁达到屈服状态前,滞回环面积小,耗散能量少,卸载后产生的残余变形并不明显,试件 JD1 和 JD2 均处于弹性阶段;持续加载至构件屈服,试件 JD1 和 JD2 进入弹塑性工作状态,加卸载后出现显著残余变形,产生的裂缝无法完全闭合,梁柱节点核心区出现内力重分布现象,滞回曲线斜率开始逐渐变小;继续加载,位移增速快于外力增速,滞回环面积逐渐变大,达到峰值荷载后,荷载随着位移的增大而减小,卸载后残余变形大。②试件 JD1 和 JD2 滞回曲线形状呈现大致相同形状,滞回曲线总体较为饱满,整体呈现出典型的弓形;滞回环整体趋势表现为先饱满后捏缩,随着垂直弯曲破坏裂缝和斜裂缝的开展,纵筋滑移量增大、压屈,逐渐由梭形转变为弓形;试件 JD1 梁上贯穿裂缝开展,内部损伤累计,梁端混凝土开裂,纵筋和箍筋外露,粘结滑移量大,故捏缩现象较试件 JD2 更为明显;试件 JD2 由于普通螺栓参加节点核心区抗弯,降低了部分纵筋的应力,从而延缓减小了纵筋的滑移;试件 JD1 和 JD2 整体依靠梁端弯曲破坏耗能,滞回曲线相对饱满,抗震性能良好。

## 2.2 承载力退化

在保持位移加载幅值不变的条件下,试件的承载力随施加荷载循环次数的增加而降低的性质,可表示为承载力退化系数。为了反映在整个加载周期内梁柱节点承载力的总体退化特征,引入整体承载力退化系数  $\lambda_i$ <sup>[17]</sup>,具体计算公式:

$$\lambda_i = Q_i / Q_m \quad (1)$$

式中:  $Q_i$  为屈服后第  $i$  次循环加载滞回环的峰值荷载;  $Q_m$  为整个加载周期内荷载-位移曲线的极限荷载。

试件 JD1 和 JD2 整体承载力退化系数-位移曲线如图7所示。由图可知,试件 JD1 和 JD2 的整体承载力退化趋势基本一

致,两试件的整体承载力退化系数均在 0.7 ~ 1.0,说明由螺栓连接的新型装配式混凝土框架梁柱节点试件在地震作用下能保持较高的承载力而不退化的优良性能,结构可靠。

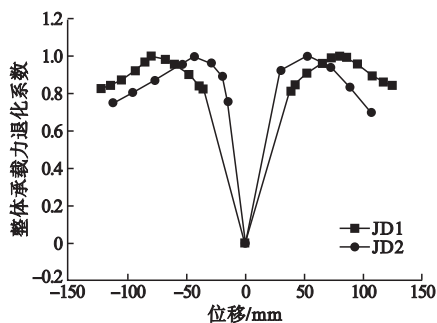


图7 整体承载力退化系数-位移曲线

Fig. 7 Overall bearing capacity degradation coefficient and displacement curves

试件 JD2 在加载中出现波动区段,加载前期承载力增长较快,但加载后期退化现象也更为明显,试件破坏时最小退化系数 0.70,较试件 JD1 降低 15.7%,这主要是因为加载后期试件 JD2 除了与试件 JD1 出现同样的混凝土压酥、纵筋屈服、混凝土裂缝不断开展,普通螺栓的破坏也在一定程度上降低了试件 JD2 的承载力。

## 2.3 刚度退化

引起试件 JD1 和 JD2 强度、刚度退化的根本原因为试件在低周往复荷载作用下,屈服后裂缝的开展和钢筋、螺栓塑性段延伸以及结构构件内部不断累计的塑性损伤<sup>[18]</sup>。T 型梁端和柱端的钢板能一定程度上延缓混凝土的压酥,增强节点的变形能力,从而降低了试件的承载力和刚度退化速度。

## 2.4 延性系数

延性是反应结构构件塑性变形能力的一个重要指标,结构构件的延性主要用延性系数来表示<sup>[19]</sup>。笔者采用位移延性系数来衡量节点延性,一般延性系数越大,延性越好。

据已有试验表明,钢筋钢混凝土框架结构的延性系数为 2.0 左右。笔者得出的位移延性系数表如表 1 所示。

表 1 位移延性系数表

Table 1 Displacement ductility coefficient table of components

构件编号	作用方向	屈服位移/mm	屈服荷载/kN	极限位移/mm	极限荷载/kN	延性系数	延性系数均值
JD1	正向	38.00	68.00	125.00	70.00	3.29	3.37
	负向	-35.50	-85.00	-122.00	-85.00	3.44	
JD2	正向	20.83	56.67	106.40	51.08	5.11	5.40
	负向	-19.80	-77.80	-112.77	-65.40	5.70	

由表 1 可知,试件 JD1 和 JD2 节点延性系数均大于 2.0,节点延性能力良好。试件 JD2 的延性系数大于试件 JD1 的延性系数,普通螺栓参与节点核心区耗能,试件 JD2 抵抗变形能力相对较好。试件 JD1 向上向下加载阶段延性系数不同,说明两试验节点延性性能在正负向加载具有不对称性,亦说明在计算恢复力模型时需要分别对正负向加载卸载情况分别计算。

2.5 耗能能力

在地震作用下结构只要能吸收足够由地震释放的能量就能保证不出现倾覆和倒塌。混凝土结构和节点抗震基本性能可以通过等效黏滞阻尼系数  $\xi$ , 能量耗散系数  $E$ , 功比指数  $I_w$  来衡量耗能能力的大小。笔者采用试件滞回耗能和等效黏滞阻尼系数来评定试件 JD1 和 JD2 的耗能能力。

试件 JD1 和 JD2 的滞回耗能与位移的关系曲线如图 8 所示。

能随着位移加载的增加而增大,说明两试件内逐渐形成塑性铰,消耗反复荷载的能力逐渐增强。在加载过程中,每一级位移对应的滞回耗能,试件 JD2 均明显大于试件 JD1。这是由于试件节点核心区开裂进入弹塑性阶段,普通螺栓的弹塑性阶段也参与工作,发挥了良好的滞回性能,耗能能力进一步提高。

试件 JD1 和 JD2 的等效黏滞阻尼系数与位移的关系曲线如图 9 所示。

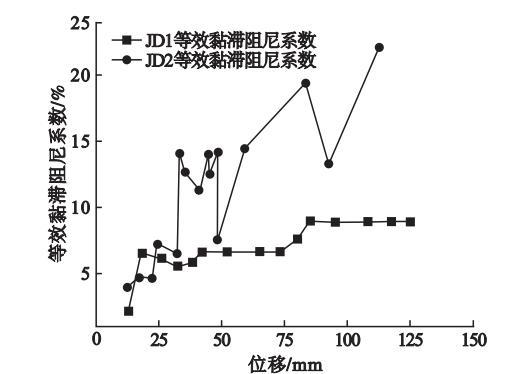


图 9 试件 JD1 和 JD2 等效黏滞阻尼系数 - 位移曲线对比

Fig. 9 Comparison of equivalent viscous damping coefficient of JD1 & JD2

由图 9 可知,试件 JD1 和 JD2 的等效黏滞阻尼系数随着位移加载的增加而增大,并且在试件进入弹塑性工作阶段等效黏滞阻尼系数发展趋势明显不同。研究表明,现浇钢筋混凝土节点在最大荷载作用下其等效黏滞阻尼系数一般在 0.1 左右;加载后期,试件 JD1 等效黏滞阻尼系数约为 0.089,略低于现浇节点;试件 JD2 等效黏滞阻尼系数约为 0.22,大于试件 JD1 等效黏滞阻尼系数和现浇节点一倍多,表现出更好的耗能能力。

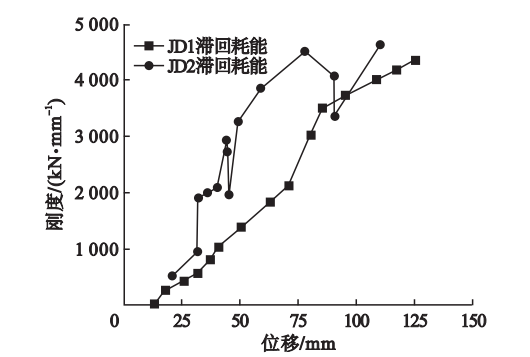


图 8 JD1 和 JD2 滞回耗能 - 位移曲线对比

Fig. 8 Comparison of hysteretic energy dissipation-displacement curves of JD1 & JD2

由图 8 可知,试件 JD1 和 JD2 的滞回耗

3 恢复力模型骨架曲线的建立

如图 6 所示滞回曲线,装配式构件的实际恢复力曲线比较复杂,因此,选用能在工程中应用的数学模型来反应结构构件的实际恢复力特性就显得尤为重要。

试件 JD1 和 JD2 的骨架曲线如图 10 所示。

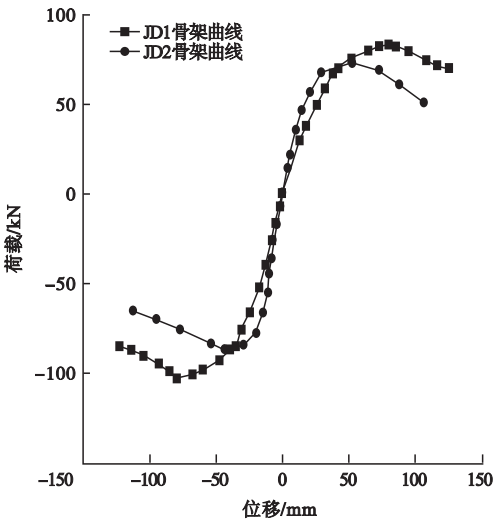


图 10 试件 JD1 和 JD2 骨架曲线  
Fig. 10 Skeleton curve of JD1 & JD2

骨架曲线均呈明显 S 型,表现出较好的抗震性能,试件 JD1 的承载力总体上高于试件 JD2。本试验恢复力模型骨架曲线采用考虑退化的三线型,因此要确定屈服点( $\Delta_y, P_y$ ),极限点( $\Delta_m, P_m$ )和破坏点( $\Delta_u, P_u$ )三个特征点。为应用方便,将试件 JD1 和 JD2 的骨架曲线进行无量纲化处理统一于坐标系中,用  $\Delta/\Delta_m$  表示骨架曲线的横坐标,  $P/P_m$  表示纵坐标,图 11 为无量纲化后的骨架曲线。

由图 11 可知,试件 JD1 和 JD2 无量纲化后的骨架曲线形状规律性相似。将各个试件无量纲化的数据以假定屈服点、极限点和破坏点为分界点,对无量纲化的骨架曲线进行曲线回归分析<sup>[20]</sup>,得到统一的骨架模型曲线如图 12 所示。

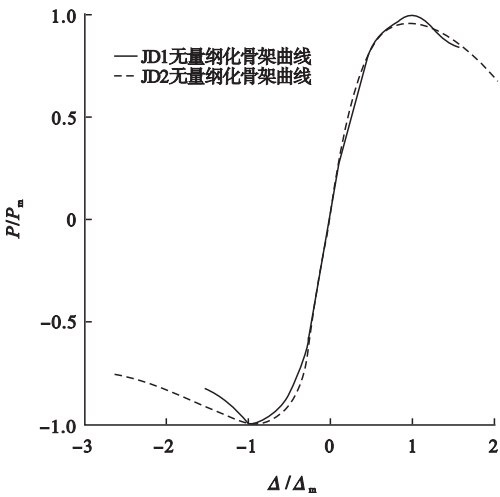


图 11 试件 JD1 和 JD2 无量纲化骨架曲线  
Fig. 11 Dimensionless skeleton curve of JD1 & JD2

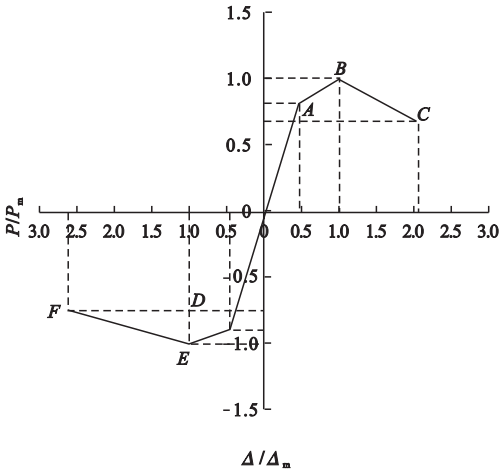


图 12 骨架曲线模型  
Fig. 12 Skeleton curve model

骨架曲线模型  $OA$ 、 $OD$  区段由梁柱节点达到屈服阶段前各试验数据点回归得到,其斜率表示由螺栓连接的新型梁柱节点初始阶段的弹性刚度;同理, $AB$ 、 $DE$  区段为节点在反复荷载作用下,由屈服点至极值点间试验数据点回归得到,其斜率代表由螺栓连接的新型梁柱节点屈服后强化阶段的弹塑性刚度; $BC$ 、 $EF$  区段由节点骨架曲线极值点与破坏点间试验数据点回归得到,其斜率代表考虑退化的弹塑性刚度。回归分析后骨架曲线模型的 6 条线段拟合公式见表 2 所示。



表 2 回归得到的三折线骨架曲线数据

Table 2 Tri skeleton curve data by regression

折线段	回归方程	角度/(°)	斜率
OA	$\frac{P}{P_m}=1.72\frac{\Delta}{\Delta_m}$	59.83	1.72
AB	$\frac{P}{P_m}=0.34\frac{\Delta}{\Delta_m}+0.66$	18.78	0.34
BC	$\frac{P}{P_m}=-0.31\frac{\Delta}{\Delta_m}+1.30$	-17.22	-0.31
OD	$\frac{P}{P_m}=1.94\frac{\Delta}{\Delta_m}$	62.73	1.94
DE	$\frac{P}{P_m}=0.20\frac{\Delta}{\Delta_m}-0.80$	11.31	0.20
EF	$\frac{P}{P_m}=-0.15\frac{\Delta}{\Delta_m}-1.15$	-8.53	-0.15

理论计算所得曲线与试验得到的骨架曲线结果接近,曲线吻合度较高,说明理论计算公式和试验现象符合,可以用来描述由螺栓连接的装配式混凝土框架梁柱节点在低周反复荷载作用下的力和位移的变化规律。

4 结 论

(1)基于螺栓连接的新型装配式梁柱节点在低周反复荷载作用下主要表现为 T 型梁弯曲破坏,螺栓连接可以提高节点的装配化程度;在整个加载过程中,柱均未出现明显裂缝,加载结束时,T 型梁和螺栓产生了一定的破坏,符合“强柱弱梁”的要求,梁柱节点核心区的破坏多集中在螺栓和承压钢板处,基本符合抗震设计的要求。

(2)试件 JD1 和 JD2 均表现出良好的抗震性能,骨架曲线呈明显 S 型。试件 JD1 极限承载力比试件 JD2 的极限承载力提高 13.8%;在整个加载过程中,两节点的整体承载力退化系数均在 0.7~1.0,刚度总体退化缓慢,具有较强的抗侧移能力,承载能力良好,节点可靠;与现浇钢筋混凝土框架节点相比,试件 JD1 和 JD2 的延性系数明显提高,延性性能良好;试件 JD2 等效黏滞阻尼系数最大为 0.22,高于试件 JD1 和现浇节点对应的等效黏滞阻尼系数,试件 JD1 和 JD2 的总体耗能能力均表现良好,能消耗反复荷载作

用下的能量。  
(3)结合骨架曲线特征点的计算、对荷载-位移试验散点数据拟合,笔者所提出的由螺栓连接的新型装配式梁柱节点恢复力模型与试验曲线吻合度较高,能充分反映试件的抗震性能,为此类节点的弹塑性反应分析和工程抗震分析提供参考,亦可以为接下来的对螺栓连接的装配式混凝土梁柱节点的拟动力、动力试验提供计算模型。

参考文献

[ 1 ] 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. )

[ 2 ] CHOI H K, CHOI Y C, CHOI C S. Development and testing of precast concrete beam-to-column connections [ J ]. Engineering structures, 2013, 56: 1820 - 1835.

[ 3 ] MIRZA O, UY B. Behavior of composite beam-column flush end-plate connections subjected to low-probability, high-consequence loading [ J ]. Engineering structures, 2011, 33 ( 2 ): 647 - 662.

[ 4 ] GANESAN N, INDIRA P V, SABEENA M V. Behavior of hybrid fiber reinforced concrete beam-column joints under reverse cyclic loads [ J ]. Materials & design, 2014, 54: 686 - 693.

[ 5 ] 邓明科, 马福栋, 叶旺, 等. 局部采用高延性混凝土装配式框架梁-柱节点抗震性能试验研究 [ J ]. 工程力学, 2019, 36 ( 9 ): 68 - 78.  
( DENG Mingke, MA Fudong, YE Wang, et al. Experimental study on aseismic behavior of locally used HDC assembled frame beam-column joints [ J ]. Engineering mechanics, 2019, 36 ( 9 ): 68 - 78. )

[ 6 ] 陈庆军, 潘忠尧, 蔡健, 等. 冷挤压套筒连接装配式梁柱节点抗震性能试验研究 [ J ]. 东南大学学报 ( 自然科学版 ), 2019, 49 ( 5 ): 918 - 925.  
( CHEN Qingjun, PAN Zhongyao, CAI Jian, et al. Experimental research on seismic behaviors of assembled beam-column joints with rebars spliced by pressed sleeves [ J ]. Journal of southeast university ( natural science edition ), 2019, 49 ( 5 ): 918 - 925. )

[ 7 ] 于建兵, 郭正兴, 管东芝, 等. 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.  
( YU Jianbing, GUO Zhengxing, GUAN Dongzhi, et al. Research on seismic behavior of a new style precast concrete beam-to-column connection [ J ]. Journal of Hu' nan university

- (natural sciences), 2015, 42(7): 42-47.)
- [8] 吴从晓, 赖伟山, 周云, 等. 新型预制装配式消能减震混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(9): 23-30.  
(WU Congxiao, LAI Weishan, ZHOU Yun, et al. Experimental study on seismic behaviors of new energy-dissipative prefabricated concrete frame structure joints[J]. China civil engineering journal, 2015, 48(9): 23-30.)
- [9] 丁克伟, 陈东, 刘运林, 等. 一种新型拼缝结构的叠合板受力机理及试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(10): 64-69.  
(DING Kewei, CHEN Dong, LIU Yunlin, et al. Theoretical and experimental study on mechanical behavior of laminated slabs with new type joints[J]. China civil engineering journal, 2015, 48(10): 64-69.)
- [10] 丁克伟, 韩苗兰, 李兴龙. 装配式半刚性梁柱螺栓连接节点抗震性能试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(6): 805-810.  
(DING Kewei, HAN Miaolan, LI Xinglong. Experimental research on seismic performance of semi-rigid bolted beam-column joints[J]. Journal of Hefei university of technology (natural science), 2020, 43(6): 805-810.)
- [11] DING Kewei, LIU Jianhua, REN Jianwei, et al. Dynamic responses of cellular metal-filled steel beam-column joint under impact loading[J]. Journal of Shanghai jiaotong university (science), 2020, 25(3): 384-393.
- [12] DING Kewei, MA Liang. Pseudo-static analysis of fabricated steel cage concrete frame structure[C]//2016 International conference on applied mechanics, mechanical and materials engineering (AMMME2016). [s. l.]: [s. n.], 2017: 332-336.
- [13] 管东芝, 郭正兴, 杨辉, 等. 键槽梁底筋锚入式预制梁柱连接恢复力模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(5): 821-827.  
(GUAN Dongzhi, GUO Zhengxing, YANG Hui, et al. Restoring force model of precast beam-column connections incorporating beams with grooves and anchored bottom longitudinal bars[J]. Journal of southeast university (natural science edition), 2018, 48(5): 821-827.)
- [14] 曾磊, 许成祥, 郑山锁, 等. 型钢高强高性能混凝土框架节点  $P-\Delta$  恢复力模型[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(9): 104-108.  
(ZENG Lei, XU Chengxiang, ZHENG Shansuo, et al. Research on restoring force model of SRHSHPC frame joints[J]. Journal of Wuhan university of technology, 2012, 34(9): 104-108.)
- [15] 阎石, 李康宁, 张曰果, 等. 翼缘削弱型钢筋混凝土框架梁柱节点受力性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(2): 219-227.  
(YAN Shi, LI Kangning, ZHANG Yueguo, et al. Experimental research on mechanical behavior of beam-column joints in reinforced concrete frame with weakened flanges[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(2): 219-227.)
- [16] 赵作周, 韩文龙, 钱稼茹, 等. 钢筋套筒挤压连接装配整体式梁柱中节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(4): 45-53.  
(ZHAO Zuozhou, HAN Wenlong, QIAN Jiaru, et al. Experimental study on seismic behavior of assembled monolithic beam-column interior joints with rebar spliced by pressed sleeve[J]. Journal of building structures, 2017, 38(4): 45-53.)
- [17] 刘记雄. T形钢管混凝土组合柱-钢筋混凝土梁边节点抗震性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.  
(LIU Jixiong. Study on earthquake resistance behavior of reinforced concrete beam to T-shaped concrete-filled rectangular composite tubular column exterior joint[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.)
- [18] 杨俊芬, 陈雷, 程锦鹏, 等. 一种新型装配式梁柱节点抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(12): 75-86.  
(YANG Junfen, CHEN Lei, CHENG Jinpeng, et al. Experimental study on seismic behavior of a new type of fully assembled beam-column joints[J]. Engineering mechanics, 2017, 34(12): 75-86.)
- [19] 闻洋, 管丽佩, 张宝锋. 不同形式钢管混凝土框架节点抗震性能对比试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(5): 821-828.  
(WEN Yang, GUAN Lipei, ZHANG Baofeng. Contrast experiments on seismic performances of different concrete-filled steel tube beam joints[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(5): 821-828.)
- [20] 赵培兰. 预制装配混凝土框架梁柱节点恢复力模型研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(6): 55-59.  
(ZHAO Peilan. Restoring force model of precast frame beam-to-column connection[J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2016, 38(6): 55-59.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)