

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.S1.002

# 再生混凝土框架梁柱中间节点试验研究

许允志, 彭有开, 吴 徽

(北京建筑大学 工程结构与新材料北京市高等学校工程研究中心, 北京 100044)

**摘要:**对6个再生混凝土框架梁柱中间节点足尺构件进行低周反复荷载试验,研究低轴压比条件下再生混凝土节点区的粘结锚固性能。通过改变穿越节点核心区梁纵筋直径、强度来研究再生混凝土节点的最小相对锚固长度,同时研究新的构造措施对节点粘结锚固性能及核心区抗剪能力的影响。结果发现在低轴压比条件下,按照普通混凝土规范设计的再生混凝土框架梁柱中间节点发生粘结滑移破坏,减小梁纵筋直径或在贯穿节点区的梁纵筋上焊接横向锚固钢筋均可以提高节点区的粘结锚固性能。再生混凝土节点抗剪承载力应在普通混凝土节点计算公式的基础上进行折减。

**关键词:**再生混凝土; 中间节点; 低周反复; 荷载粘结; 锚固

**中图分类号:** TU4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2015)S1-0006-06

## Experimental research of interior recycled concrete beam-column joints

Xu Yunzhi, Peng Youkai, Wu Hui

(Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Civil Engineering Structure and Renewable Material, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, P. R. China)

**Abstract:** Six full-scale recycled concrete interior joints under cyclic loading to study the bond and anchorage property with low axial load ratios. The diameter, strength of the longitudinal bar across the core of the joint is different, aiming to find out the minimum relative anchorage length in recycled concrete joint. Besides, the effect of the new anchorage method of the bar to bond property and shear resisting property is still studied. The results show that with low axial load ratios, bond and anchorage failure will occur in the recycled concrete joints designed by recent codes. Using bars of small diameter and welding transverse reinforcement on the beam longitudinal reinforcement in joint zone will improve anchorage performance. The shear bearing capacity of the recycled concrete joints should be reduced by the calculation formula of common concrete joints.

**Key words:** recycled concrete; interior joints; seismic behavior; bond; anchorage

再生混凝土是将废旧混凝土经过破碎、筛分然后按照一定的比例混合后配制而成的混凝土<sup>[1]</sup>。与普通混凝土相比,再生混凝土因为其骨料上粘结有老旧砂浆,骨料与砂浆的粘结界面较差,同时骨料本身含有较多的孔隙和微小裂缝,导致其各项性能普

遍较差<sup>[2]</sup>。研究表明,通过合理配合比设计的再生混凝土可以在结构中使用,再生混凝土梁、柱、剪力墙在实验中均表现出了较好的抗震性能<sup>[3-5]</sup>。但是,对于结构中重要的节点位置,再生混凝土的研究结果并不能让人满意。实验发现,按照《混凝土结构设

收稿日期:2015-11-10

基金项目:国家自然科学基金(00881913003);北京市属高等学校创新团队建设与教师职业发展项目

作者简介:许允志(1990-),男,硕士生,主要从事混凝土及预应力结构理论与技术研究,(E-mail) xuyunzhi2014@163.com。

计规范》(GB50010—2010)设计的再生混凝土节点在模拟地震作用下发生了粘结滑移破坏,导致其延性性能和耗能能力较差,不能满足抗震设防的要求<sup>[6]</sup>。因此,提高节点核心区粘结锚固性能是研究再生混凝土应用的重点之一。本文通过对6个再生混凝土框架梁柱中间节点进行低周反复荷载试验,研究了梁纵筋直径、强度等级及不同的锚固措施对节点粘结锚固性能的影响,可以为再生混凝土节点的设计提供参考。

## 1 实验设计

### 1.1 试件设计

根据实验目的及研究内容,按照“强柱弱梁,强节点”的原则设计制作了6个再生混凝土框架中间节点足尺构件。试验以梁纵筋直径、强度等级、锚固措施以及是否掺加再生细骨料为变量,通过优化后的正交试验来对比研究各参量变化时对节点粘结锚固性能的影响。其中RJ-1为对照组,按照《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)进行设计<sup>[7]</sup>,梁纵

筋直径与柱截面尺寸之比为1/20.5,满足规范中不大于1/20的要求。RJ-2在节点区梁纵筋上焊接横向锚固筋,RJ-3将梁纵筋直径与柱截面尺寸之比减小为1/25,RJ-4提高梁纵筋强度,同时在梁纵筋上焊接横向锚固筋,RJ-5、RJ-6分别在RJ-2、RJ-4的基础上掺加再生细骨料。表1为构件参数对比,图1为节点构件尺寸和配筋。

表1 试件设计参数

试件	节点箍筋	梁纵筋	$f_c$ /MPa	$P_Q$ /kN	$P_u$ /kN	$n$
RJ-1	$\Phi 10@80$	3 $\Phi 22$	38.7	150	167	0.150
RJ-2	$\Phi 10@80$	3 $\Phi 22$	38.7	150	163	0.150
RJ-3	$\Phi 10@100$	3 $\Phi 18$	36.1	111	128	0.150
RJ-4	$\Phi 10@60$	3 $\Phi 22$	39.8	189	202	0.134
RJ-5	$\Phi 10@80$	3 $\Phi 22$	35.6	150	173	0.150
RJ-6	$\Phi 10@60$	3 $\Phi 22$	34.8	188	206	0.150

注:为同龄期棱柱体试块抗压强度平均值;为按照平截面假定及材料实测强度计算的梁端屈服力;为试验实测的梁端最大承载力;为试验轴压比。

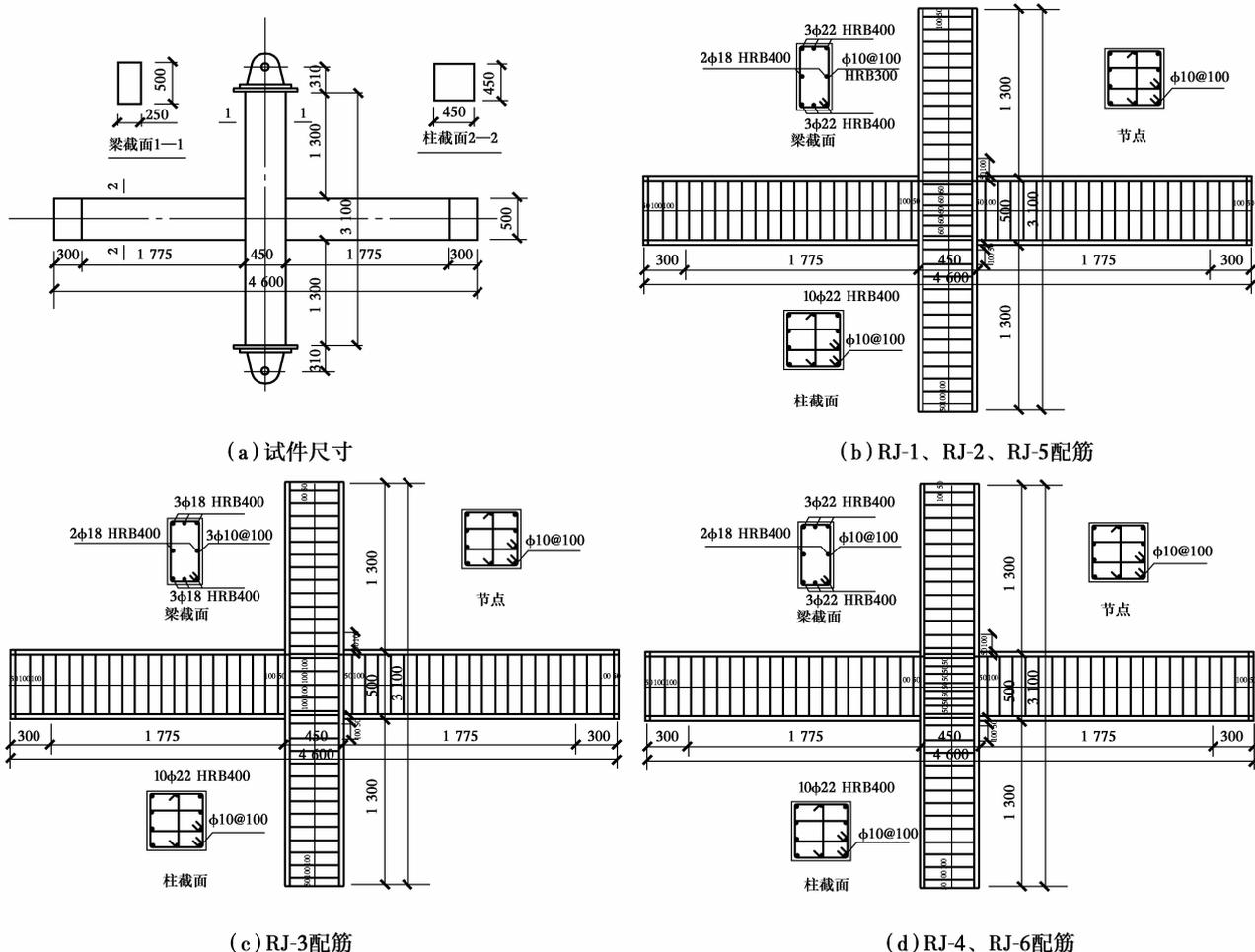


图1 试件尺寸与配筋图

### 1.2 试验材料

实验使用的再生骨料由河北省邯郸市全有生态建材有限公司生产,原材为废弃混凝土,废砖含量较少。将废弃混凝土破碎筛分,粒径大于 5 mm 的部分为再生粗骨料,粒径小于 5 mm 的为再生细骨料。再生混凝土在构件厂现场制备浇筑,采用两种配合比,设计强度均为 C40,其中配合比 1 再生粗骨料取代率为 50%,无再生细骨料;配合比 2 再生粗骨料取代率为 50%,再生细骨料取代率为 30%。再生混凝土浇筑前先进行试配,最终确定每方再生混凝土中各材料用量见表 2。实测混凝土同龄期强度见表 1。梁纵筋采用 HRB400 和 HRB500 种,其中 RJ-1、RJ-2、RJ-3、RJ-5 为 HRB400, RJ-4、RJ-6 为 HRB500,箍筋均采用 HPB300 级钢筋,实测钢筋强度见表 3。

表 2 混凝土配合比 kg/m

C40	水	水泥	天然石	天然砂	再生粗骨料	再生细骨料	粉煤灰	外加剂
配合比 1	178	341	508	700	508	0	114	3.3
配合比 2	188	341	508	490	508	210	114	3.3

表 3 钢筋力学性能

钢筋等级	钢筋直径	$E_s$ /MPa	$f_y$ /MPa	$f_n$ /MPa
HPB300	Φ10	212 197.1	501.8	658.0
HRB400	Φ18	181 307.3	447.6	620.2
HRB400	Φ22	200 489.8	452.3	645.0
HRB500	Φ22	193 618.1	603.1	768.2

注:为钢筋弹性模量;为钢筋屈服强度;为钢筋极限强度。

### 1.3 试验加载及测量

实验再生混凝土框架节点使用北京建筑大学结构实验室的自平衡节点加载实验装置进行低周反复荷载加载试验。节点约束条件为:柱上下端铰接,左右梁端自由。试验加载装置见图 2。构件加载制度根据《混凝土结构试验方法标准》(GB50152—92)中的规定,采用力-位移混合控制模式,即在节点构件屈服前采用力控制,每级荷载循环一次,构件屈服后转成位移控制,每级位移循环 3 次,当荷载降至低于构件极限承载力的 85%时视为构件已经破坏,停止试验。加载制度示意图见图 3。

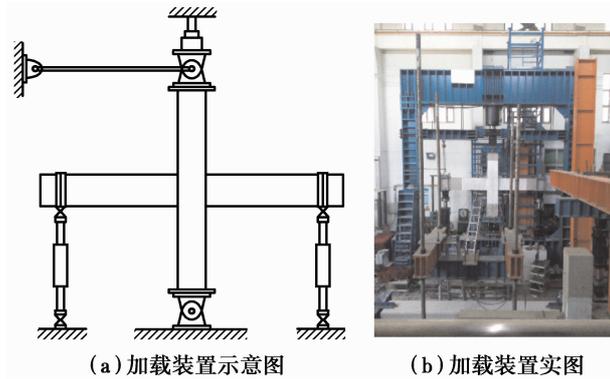


图 2 加载装置图

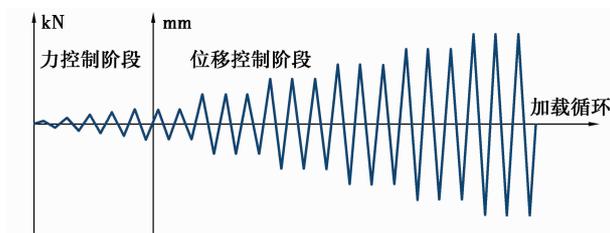


图 3 加载制度

## 2 实验现象及破坏形态

构件 RJ-1 加载至  $P = 30$  kN 时开始出现受弯破坏,受拉侧出现竖向裂缝。当  $P = 80$  kN 时,节点初裂,核心区表面出现斜裂缝。位移控制加载到  $3\Delta$  时,构件达到最大承载力,通过梁根部裂缝可以看到梁纵筋有从节点核心区拔出来的趋势,梁端塑性铰发育不明显。加载到  $4\Delta$  时,承载力下降非常明显,滞回曲线捏拢严重,呈反“S”形,最终破坏形式为粘结滑移破坏。

构件 RJ-2 在力控制阶段破坏与 RJ-1 相似。但是转到位移控制阶段后,梁端破坏程度发展缓慢,而节点核心区破坏程度发展迅速。位移加载到  $4\Delta$  时,构件达到最大承载力,之后节点核心区表面混凝土保护层出现大块的剥落,露出节点箍筋,最终节点发生剪切破坏。

构件 RJ-3 加载至  $P = 22.2$  kN 时出现受弯破坏,梁受拉侧出现竖向裂缝。 $P = 66.6$  kN 时节点初裂。位移加载到  $4\Delta$  时构件达到最大承载力。构件 RJ-3 裂缝的发展和构件破坏主要集中在梁端,节点核心区只是出现了数条较短的斜裂缝,最终破坏时梁端塑性铰发育明显,实现了理想的梁铰破坏机制。说明梁纵筋直径与柱截面尺寸之比为 1/25 时可以保证节点有效地粘结锚固性能。

构件 RJ-4、RJ-5 和 RJ-6 破坏形态与 RJ-2 类似,最终破坏形式为节点剪切破坏。其中 RJ-4 和 RJ-6 因为提高了钢筋的强度等级,其极限承载力较 RJ-2 提高大约 30%。

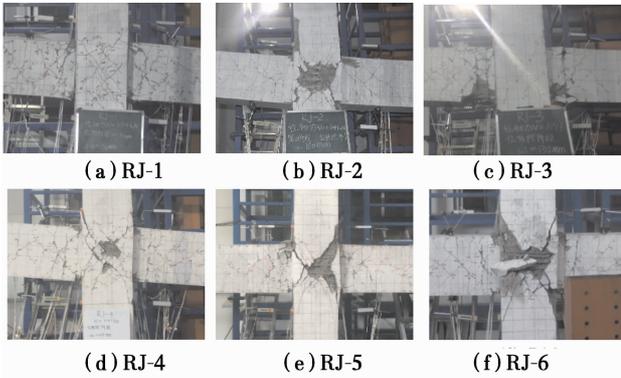


图 4 各试件最终破坏形态

对比实验现象可以看到,发生节点剪切破坏的构件 RJ-2、RJ-4、RJ-5 和 RJ-6 均经历了初裂-通裂-极限-破坏 4 个阶段,这与按照弱节点设计的普通混凝土节点破坏过程相似<sup>[8]</sup>,说明按照普通混凝土设计规范计算的再生混凝土节点抗剪能力偏弱。出现这种结果的原因有两点:一是再生混凝土本身脆性较大,在节点核心区复杂受力作用下容易挤压成破碎状(核心区表面混凝土剥落后可以看到箍筋内部

混凝土呈破碎状),混凝土所承担的抗剪能力大大削弱;二是梁纵筋上焊接的横向短筋使得纵筋中的力全部传递到节点核心区,导致节点核心区剪力增加。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 滞回曲线

图 5 所示为构件的梁端荷载-位移( $P-\Delta$ )曲线,即滞回曲线。其反应了节点构件在模拟地震力作用下的耗能能力。通过滞回曲线可以看出,各试件在力控制阶段基本处于弹性状态,滞回曲线包裹面积很小,耗能很少。位移控制阶段前期滞回曲线比较饱满,呈梭形。在达到最大承载力之前,每级位移下,第 2、3 循环峰值荷载与第 1 循环相比下降不大。在达到最大承载力以后,随着加载循环的进行,除了 RJ-3,其余构件承载力下降明显,滞回曲线捏拢,呈现出反“S”形,耗能能力下降。其中, RJ-1 滞回曲线出现捏拢的原因是节点区发生粘结滑移,在一个较大的位移范围内,梁纵筋在节点核心区处于滑移状态,导致构件整体刚度下降。RJ-2、RJ-4、RJ-5、RJ-6 滞回曲线捏拢是因为发生了节点核心区的剪切破坏。RJ-3 滞回曲线滞回曲线一直很饱满,在很大的位移范围内维持较高的承载力,表现出良好的耗能性能。

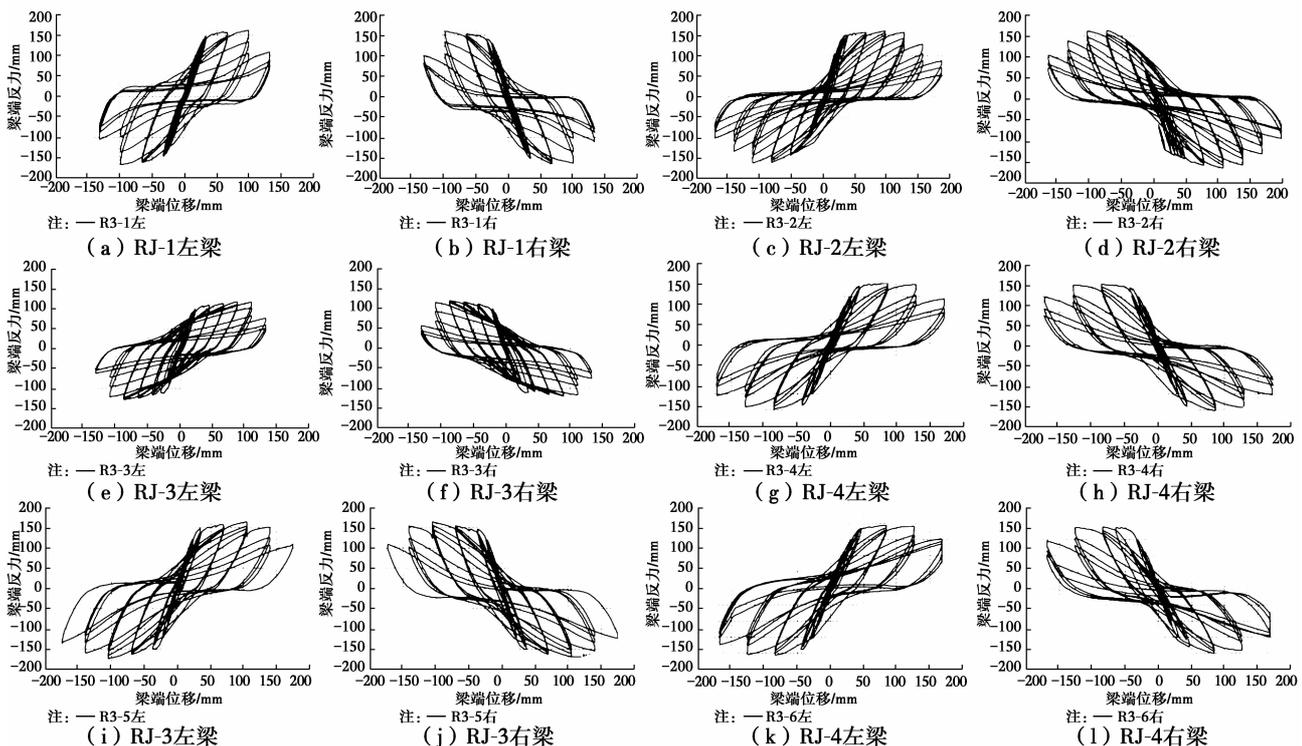


图 5 滞回曲线

### 3.2 骨架曲线和承载力退化曲线

图 6 所示为各试件骨架曲线和承载力退化曲线。RJ-1 和 RJ-2 在力控制阶段和位移控制阶段前期(到达极限承载力前)骨架曲线基本重合,说明此时还没有发生粘结滑移破坏。到达极限承载力后, RJ-1 承载力下降速度明显比 RJ-2 快很多,说明粘结滑移会降低节点构件的承载力,这是因为节点发生粘结滑移以后,处于受压区的梁纵筋由原来的受压变为受拉,导致受压区混凝土压应力急剧增大,混凝土提前达到其极限压应变而破坏<sup>[9]</sup>。RJ-2 和 RJ-5 (RJ-4 和 RJ-6)骨架曲线几乎重合,说明参加 30%再生细骨料对再生混凝土节点没有影响,再生细骨料

可以应用在节点部位。

承载力退化曲线中,横坐标为试件加载端位移,纵坐标为梁在该位移下的荷载与极限承载力之比。由图 6 可以看出,在达到极限承载力前,各试件承载力发展趋势与普通混凝土节点一致,均经历了弹性阶段和荷载缓慢增长的弹塑性阶段。达到最大承载力后, RJ-1 和 RJ-3 承载力出现突降,而其余构件(焊接了横向短筋)承载力下降相对平缓一些,这是因为后者在梁筋上焊接了横向锚固筋,在节点核心区提供了可靠地粘结锚固,梁纵筋没有发生粘结滑移,同时在达到最大承载力时,节点核心区剪切破坏并不严重,依然有一定的抗剪能力。

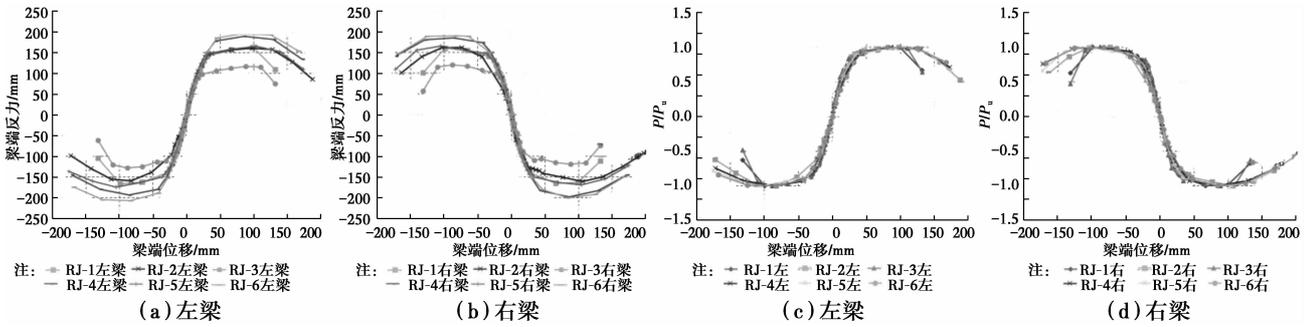


图 6 骨架曲线与承载力退化曲线

### 3.3 刚度退化曲线

从刚度退化曲线可以看出,试件在加载初期处于弹性,刚度较大。之后,随着荷载增加,混凝土裂缝逐渐发展,梁纵筋也开始进入塑性,试件的刚度迅速降低。RJ-1 和 RJ-2 刚度退化曲线重合程度较高,在任意时刻的刚度均介于 RJ-3 和 RJ-4(RJ-6)之间,这与各试件梁截面按照平截面假定计算的抗弯承载力相一致。对比 RJ-1、RJ-2 和 RJ-5 可以看到,后期 RJ-1 刚度下降速度较快,这是因为 RJ-1 发生了粘结滑移的缘故。

这两种破坏形式中并不起控制作用。

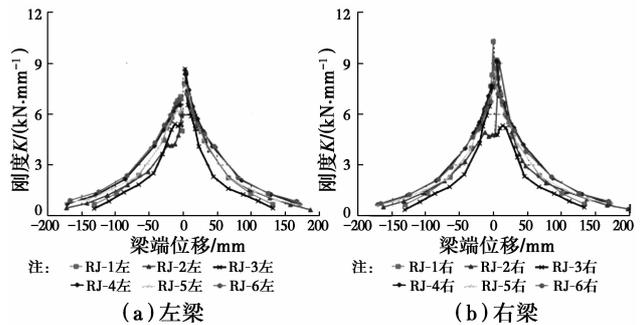


图 7 刚度曲线

### 3.4 剪切变形

节点核心区的剪切变形反映了节点在模拟地震作用下的破坏程度,通过测量节点两对角线长度的变化并按照计算公式求的。图 8 所示为各构件节点核心区剪切变形与梁端位移关系曲线,横坐标为梁加载端位移,纵坐标为节点核心区剪切变形。可以看出, RJ-2、RJ-5、RJ-6 在加载初期节点核心区剪切变形均很小,后期随着节点剪切破坏的增大,剪切变形迅速增加。RJ-1 和 RJ-3 节点剪切变形一直保持在一个较小的值,因为粘结滑移破坏和梁端塑性铰破坏对节点本身影响并不大,节点的抗剪承载力在

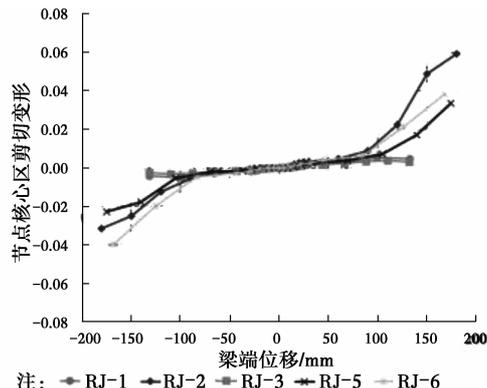


图 8 节点核心区剪切变形

### 3.5 延性系数

按照通用屈服弯矩法确定构件屈服点<sup>[10]</sup>。从表5可以看到,相同配筋的构件,其屈服荷载、屈服位移、极限荷载差别不大,焊接横向短筋的构件延性系数比没有焊接横向短筋的构件明显增大,说明良好的锚固对于提升节点构件的抗震性能有很大作用。

表4 特征荷载、特征位移与延性系数

试件		$P_y/kN$	$\Delta_y/kN$	$P_{max}/kN$	$\Delta_u/mm$	$u$
RJ-1	左梁	140.5	30.6	162.4	114.0	3.7
	右梁	139.9	33.6	159.9	112.1	3.3
RJ-2	左梁	148.4	30.3	160.3	148.5	4.9
	右梁	141.3	30.0	161.3	135.3	4.5
RJ-3	左梁	97.6	23.0	116.1	119.1	5.2
	右梁	98.1	21.5	119.9	114.7	5.3
RJ-4	左梁	179.4	42.6	192.9	147.6	3.5
	右梁	183.2	42.8	197.7	145.8	3.4
RJ-5	左梁	147.2	33.7	164.6	148.7	4.4
	右梁	147.0	36.5	164.7	151.2	4.1
RJ-6	左梁	188.6	41.9	-206.4	153.4	3.7
	右梁	180.9	46.9	-200.4	153.1	3.3

## 4 结 论

1)在低轴压比情况下,按照现行混凝土结构设计规范设计的再生混凝土节点在地震作用下将发生显著的粘结滑移破坏,导致梁端抗弯承载力和耗能能力大幅度降低,不符合抗震设计要求。

2)当梁纵筋直径与柱子截面尺寸之比 $\leq 1/25$ 时(现行规范要求不大于 $1/20$ ),可以满足节点区粘结锚固要求,节点不会发生粘结滑移破坏,梁铰机制发育比较理想。同时其耗能能力较好,延性系数可以达到 $5.2\sim 5.3$ 。

3)按照现有规范设计计算的再生混凝土节点抗

剪承载力偏弱,应该对其抗剪承载力进行折减方可在结构中使用。

4)在贯穿节点的梁纵筋上焊接横向短筋可以有效提高节点区的粘结锚固性能,但是这种锚固方式需要节点具有相对更大的抗剪承载力以抵抗锚固位置出现的应力集中。

### 参考文献:

- [1] 肖建庄,李佳彬,孙振平,等. 再生混凝土的抗压强度研究[J]. 同济大学学报,2004,12(32):1558-1561.
- [2] 宋少民,孙永梅. 建筑垃圾再生混凝土耐久性能的研究[J]. 商品混凝土,2009(3):34-36.
- [3] 蒋浩. 再生混凝土框架梁抗震性能试验研究[D]. 北京:北京建筑大学,2013.
- [4] 彭有开,吴徽,高全臣. 再生混凝土长柱的抗震性能试验研究[J]. 东南大学学报,2013,43(3):576-581.
- [5] 彭有开,吴徽,郭建东. 弯曲-斜压复合破坏的再生混凝土矮墙承载力计算[C]//第四节全国再生混凝土学术交流论文集,北京.
- [6] 彭有开,吴徽,梁能山. 低周反复荷载下再生混凝土框架中间节点的受力性能[J]. 世界地震工程,2014,30(3):86-92.
- [7] GB50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [8] 刘超,白国良,贾胜伟,等. 不同轴压比再生混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报,2013,6(46):21-28.
- [9] Zhu S C, James O J. A study of bond deterioration reinforced concrete beam-column joints[D]. USA: The University of Texas at Austin, 1983.
- [10] 姚谦峰. 土木工程结构试验[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.

(编辑 薛婧媛)