

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# HRB600 钢筋钢纤维混凝土梁柱边节点 抗震性能试验研究

张建新, 张标, 丁传林

(河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401)

**摘要:**为减小配置 HRB600 钢筋梁柱边节点的梁筋粘结退化,设计钢纤维整体增强或局部增强的梁柱边节点,进行两个配置 HRB600/HRB400 钢筋混凝土梁柱边节点和 2 个配置 HRB600 高强钢筋的钢纤维整体增强或局部增强的混凝土梁柱边节点的低周往复荷载试验,得到试件的破坏形态和滞回曲线,对比分析边节点的耗能能力、延性性能、核心区剪切变形和梁筋粘结退化。结果表明:往复荷载下 HRB600 钢筋混凝土节点具有较高的承载能力、耗能能力和延性性能,但 HRB600 钢筋与普通混凝土粘结退化过快;钢纤维整体增强或局部增强混凝土的措施可以减缓 HRB600 梁筋粘结退化,改善边节点的破坏形态,减小核心区的剪切变形,提高耗能能力;钢纤维整体增强的梁柱边节点具有更高的延性性能和耗能能力,其 HRB600 梁筋粘结退化更为缓慢。

**关键词:**梁柱边节点;HRB600 钢筋;钢纤维混凝土;抗震性能

**中图分类号:**TU375.4 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)04-0105-08

## Experimental analysis on seismic behavior of steel fiber concrete beam-column exterior joints with HRB600 reinforcement bars

Zhang Jianxin, Zhang Biao, Ding Chuanlin

(School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China)

**Abstract:** In order to reduce the bond degradation of beam reinforcement bars in beam-column exterior joints with HRB600 reinforcement bars, the beam-column exterior joints with overall or local steel fiber concrete were designed. The low-cycle loading tests were carried out on two ordinary concrete beam-column exterior joint with HRB600/HRB400 reinforcement bars, and two steel fiber concrete beam-column exterior joints with overall or local steel fiber concrete and HRB600 reinforcement bars. The failure modes, hysteresis curves, energy dissipation, ductility, shear deformation in the core zone and bond degradation of beam reinforcement bars were analyzed. The research results showed that the joints with HRB600 reinforcement bars exhibited higher bearing capacity, energy dissipation capacity and ductility under low-cycle loading, but the bond degradation between HRB600 reinforcement bar and ordinary concrete degraded

**收稿日期:**2019-10-14

**基金项目:**河北省自然科学基金(E2018202290、E2019202064);河北省高层次人才资助项目(B2017003003)

**作者简介:**张建新(1986-),女,博士,主要从事结构抗震研究,E-mail: zhangjianxin505@126.com。

**Received:**2019-10-14

**Foundation items:** Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2018202290, E2019202064); High-Level Talents Project of Hebei Province (B2017003003)

**Author brief:** Zhang Jianxin (1986-), PhD, main research interest: structure seismic, E-mail: zhangjianxin505@126.com.

too quickly. The exterior joint reinforced by overall or local steel fiber concrete exhibited slower bond degradation of HRB600 beam reinforcement bars, slighter failure mode, smaller shear deformation in the joint core area, and larger energy dissipation capacity. The beam-column exterior joint with overall steel fiber concrete had higher ductility and energy dissipation capacity compared with the beam-column exterior joint with local steel fiber concrete, and the bond degradation of HRB600 beam bars was slower.

**Keywords:** exterior beam-column joint; HRB600 reinforcement bars; steel fiber concrete; seismic behavior

随着高性能结构的发展,普通钢筋混凝土结构已经很难满足现代化结构的要求,许多学者关注高强钢筋高性能混凝土结构的研究<sup>[1-2]</sup>。作为混凝土结构关键部位的梁柱节点,其抗震需求较高,因此,需要配置足够数量的钢筋,由此导致节点区域钢筋密集。特别是梁柱边节点,梁纵筋在节点区域弯折锚固致使节点区域钢筋密集,浇筑混凝土容易拥堵而不容易密实<sup>[3-4]</sup>。采用 HRB600 高强钢筋可以减少钢筋用量,减少节点区域钢筋拥堵。学者们进行了配置 HRB600 高强钢筋混凝土梁柱节点构件的抗震性能试验与理论分析<sup>[5-7]</sup>。张建新等<sup>[8]</sup>发现应用 HRB600 高强钢筋高强混凝土节点具有良好的滞回性能。Hwang 等<sup>[9]</sup>进行配置 600 MPa 钢筋的梁柱节点拟静力试验,发现梁底部钢筋粘结滑移较为明显。为了解决高强钢筋梁筋粘结性能差的问题,可以采用纤维增强类混凝土。纤维增强类混凝土具有抑制裂缝发展、改善结构开裂性能等优势<sup>[10-13]</sup>,在工程中得到了广泛应用。学者们进行了纤维增强类混凝土梁柱节点的相关研究,取得了一定的研究成果<sup>[14-15]</sup>。韩建平<sup>[16]</sup>对混杂纤维增强的梁柱节点进行抗震性能试验研究。Qureshi 等<sup>[17]</sup>对掺加碳纤维和玻璃纤维的混凝土梁柱节点的剪切性能进行研究。以上纤维增强类混凝土梁柱节点中梁柱钢筋采用普通钢筋,梁筋在低应力水平下表现出较好的粘结性能。当梁纵筋采用 HRB600 高强钢筋时,节点段梁筋的应力水平会较高,与钢纤维混凝土在核心区域的粘结性能方面的研究尚

未涉及。

为研究 HRB600 高强钢筋在高应力水平下与钢纤维混凝土在梁柱边节点区域的粘结性能,笔者设计了改善 HRB600 梁筋粘结性能的钢纤维整体增强或局部增强的梁柱边节点。通过进行低周往复荷载试验,对比分析高强钢筋、钢纤维混凝土增强范围以及剪压比对梁柱边节点抗震性能的影响。

## 1 构件设计

共设计和制作 4 根梁柱边节点,分别为配置 HRB600 高强钢筋的普通混凝土梁柱边节点 BJ1、配置 HRB400 普通钢筋的普通混凝土梁柱边节点 BJ2、配置 HRB600 高强钢筋的钢纤维整体增强混凝土梁柱边节点 BJ3 和配置 HRB600 高强钢筋的钢纤维局部增强混凝土梁柱边节点 BJ4,构件 BJ3 和 BJ4 主要是为了分析钢纤维增强范围对节点破坏形态的影响,钢纤维体积百分含量为 1.2%。整个试验的主要参数变化为钢筋的强度等级、混凝土的种类、钢纤维混凝土的应用范围以及剪压比,各试件试验参数见表 1。剪压比  $\gamma$  为截面平均剪应力与混凝土轴心抗压强度设计值之比,按式(1)计算<sup>[18]</sup>。

$$\gamma = \frac{V_j}{f_c b_j h_j} \quad (1)$$

式中: $V_j$  为节点剪力,按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中公式 11.6.2-4 计算; $f_c$  为混凝土轴心抗压强度设计值; $b_j$  和  $h_j$  为节点核心区截面宽度和高度。

表 1 各试件参数

Table 1 Parameters of specimens

试件编号	纵筋强度等级	箍筋强度等级	混凝土种类	$V_j$ /kN	剪压比	轴压比
BJ1	HRB600	HRB400	普通混凝土	822	0.244	0.15
BJ2	HRB400	HRB400	普通混凝土	732	0.217	0.15
BJ3	HRB600	HRB400	整体钢纤维混凝土	822	0.244	0.15
BJ4	HRB600	HRB400	局部钢纤维混凝土	705	0.209	0.15

与构件 BJ4 相比,配置 HRB400 普通钢筋的边节点构件 BJ2 柱纵筋采用等面积代换以满足“强柱弱梁”的设计原则,梁纵筋采用近似等强代换以实现梁端弯矩近似相等。各试件的配筋图如图 1 所示,图中 E 代表 HRB600 钢筋。

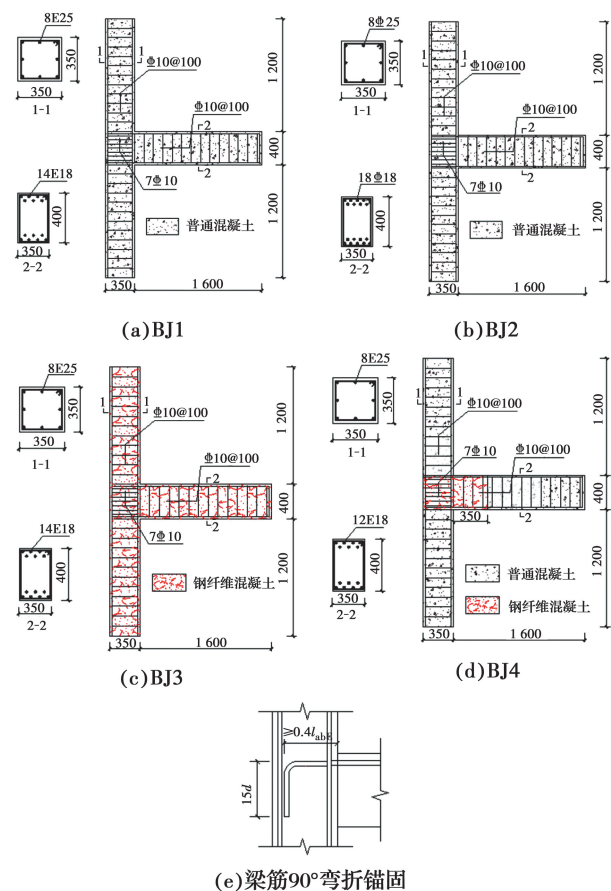


图 1 试件配筋详图

Fig. 1 Details of specimen reinforcement

混凝土强度等级为 C55,普通混凝土立方体抗压强度实测平均值为 55.6 MPa,钢纤维混凝土的为 57.3 MPa。试件梁柱纵筋为 HRB600/HRB400 钢筋,箍筋为 HRB400 钢筋,各钢筋的力学性能见表 2。

表 2 钢筋力学性能实测平均值

Table 2 Measured average mechanical properties of reinforcement bars

钢筋等级	直径/ mm	屈服强 度/MPa	极限强 度/MPa	弹性模 量/GPa	伸长 率/%
HRB600	18	615.47	785.04	212	15.17
HRB600	25	619.76	784.03	223	16.23
HRB400	10	467.08	662.42	218	17.91
HRB400	18	471.81	623.18	226	17.52
HRB400	25	507.68	645.82	219	17.52

构件采用梁端加载,加载装置如图 2 所示。先通过竖向千斤顶施加柱顶 505 kN 恒定荷载以模拟轴压力,试件屈服之前通过拉压千斤顶在梁端施加力,每级循环 1 次,屈服之后在梁端施加位移,每级循环 3 次,直至梁端荷载下降到极限荷载的 85% 时,认定试件破坏。

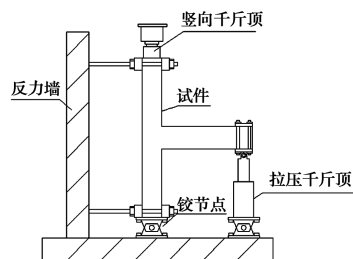


图 2 试验加载装置

Fig. 2 Test loading device

## 2 破坏形态

各试件的最终破坏形态如图 3 所示。

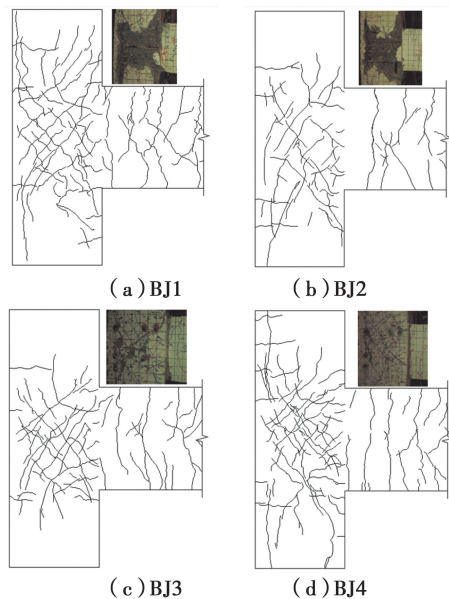


图 3 试件破坏形态

Fig. 3 Failure modes of specimens

配置 HRB400 普通钢筋的普通混凝土梁柱边节点试件 BJ2 和配置 HRB600 高强钢筋的普通混凝土梁柱边节点试件 BJ1 在破坏时,节点核心区均有大面积的混凝土剥落,试件 BJ1 核心区混凝土的剥落量稍高。这个结果在一定程度上与试件 BJ1 的剪压比比试件 BJ2 的剪压比大(约 12.4%)有关,在一定程度上加重了节点核心区剪切破坏程度。与普通混凝土边节点试件 BJ1、BJ2 相比,钢纤维增强

HRB600 高强钢筋混凝土试件 BJ3 和 BJ4 的裂缝数量多,破坏时核心区混凝土保护层未出现明显脱落,这主要是由于钢纤维限制了裂缝的开展与传播,从而有效控制了核心区混凝土剥落。相对于剪压比较小的钢纤维局部增强混凝土梁柱边节点试件 BJ4,剪压比较大的钢纤维整体增强混凝土梁柱边节点试件 BJ3 的开裂形式和裂缝分布规律基本相同,同时,试件 BJ3 核心区混凝土保护层出现轻微脱落,而剪压比较小的钢纤维局部增强混凝土梁柱边节点试件 BJ4 混凝土脱落不明显,表明在钢纤维增强混凝土梁柱边节点中,降低剪压比更有利于减少核心区混凝土的损伤。

### 3 试验数据结果及分析

#### 3.1 滞回曲线

各试件的实测荷载-位移滞回曲线如图 4 所示。

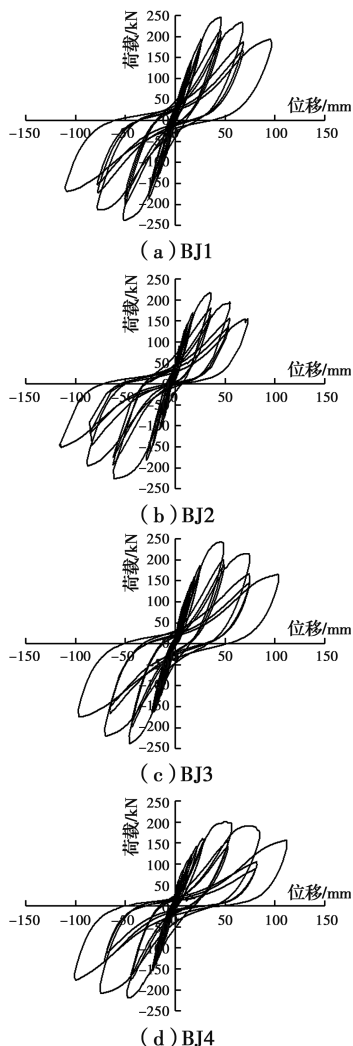


图 4 荷载-位移滞回曲线

Fig. 4 Load-displacement hysteresis curve

对比边节点试件 BJ1 和试件 BJ2 可以看出,采用 HRB600 高强钢筋的试件 BJ1 滞回环更加饱满,且极限承载力更高,说明应用 HRB600 高强钢筋可以提高试件的承载能力和耗能能力。对比边节点试件 BJ1、BJ3 和 BJ4 可以看出,采用钢纤维整体增强或局部增强的梁柱边节点试件 BJ3 和 BJ4,滞回环更为饱满,捏缩效应得到改善。相对于钢纤维混凝土整体增强的试件 BJ3,钢纤维混凝土局部增强的试件 BJ4 承载力稍有下降,滞回曲线饱满程度略差,说明钢纤维混凝土整体增强试件的滞回效果更好。

#### 3.2 刚度退化

刚度退化情况是分析节点抗震性能的另一个重要因素,刚度退化曲线如图 5 所示。刚度退化率为割线刚度与初始割线刚度的比值,割线刚度  $K_i$  按式(2)计算。

$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (2)$$

式中:  $+F_i$  和  $-F_i$  为第  $i$  循环的正向和负向荷载,  $+\Delta_i$  和  $-\Delta_i$  为第  $i$  循环对应的位移。

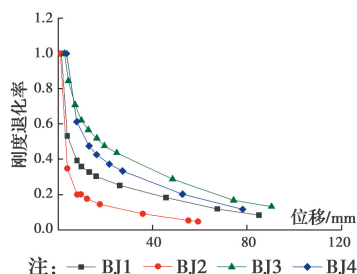


图 5 刚度退化曲线

Fig. 5 Stiffness degradation curve

试件的刚度退化经历陡降段、缓降段和近平台段。配置 HRB600 钢筋边节点试件 BJ1 比配置 HRB400 钢筋试件 BJ2 的刚度退化率较大,刚度退化较为缓慢,表明采用高强钢筋能够有效缓解节点的刚度退化。对比配置 HRB600 钢筋普通混凝土梁柱边节点试件 BJ1 和配置 HRB600 钢筋钢纤维整体增强混凝土梁柱边节点试件 BJ3,试件 BJ3 的刚度退化曲线更加平缓,这主要是因为钢纤维通过限制裂缝的发展最终保证了节点核心区的整体性,进而缓解节点的刚度退化。与剪压比较低的钢纤维局部增强 HRB600 钢筋混凝土梁柱边节点试件 BJ4 相比,剪压比较高的钢纤维整体增强 HRB600 钢筋混凝土梁柱边节点试件 BJ3 的刚度退化较为缓慢,表



明增大钢纤维混凝土的应用范围可以延缓节点的刚度退化。

### 3.3 耗能能力

结构的耗能能力是评判结构抗震性能的重要因素,取当前循环之前每个滞回环的面积之和为累积耗能,各个构件的累积耗能曲线如图 6 所示。

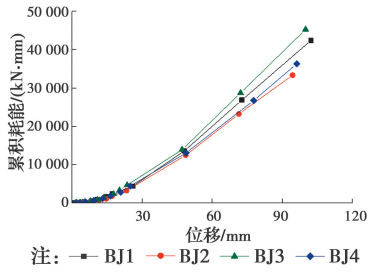


图 6 累积耗能曲线

Fig. 6 Cumulative energy dissipation curve

配置 HRB600 钢筋混凝土试件 BJ1 比配置 HRB400 钢筋混凝土试件 BJ2 的累积耗能值高,表现出更高的耗能能力,表明提高钢筋强度等级会增加结构的能量耗散。与配置 HRB600 钢筋普通混凝土梁柱边节点试件 BJ1 相比,钢纤维整体增强的 HRB600 钢筋混凝土梁柱边节点试件 BJ3 在加载中后期具有较高的累积耗能值,表明其具有较高的耗能能力。钢纤维局部增强的 HRB600 钢筋混凝土梁柱边节点试件 BJ4,由于其梁筋的配筋率较小,破坏时节点相应的承载能力较低,因此,滞回环的面积相对较小,致使其累积耗能值比未增强的 HRB600 钢筋混凝土边节点的略低。

### 3.4 承载能力和位移延性

各边节点荷载及位移见表 3,边节点的延性系数如图 7 所示。延性系数为破坏位移与屈服位移的比值。

表 3 各试件荷载及位移

Table 3 Load and displacement of specimens

构件	加载方向	开裂荷载/kN	屈服荷载/kN	极限荷载/kN	破坏荷载/kN	开裂位移/mm	屈服位移/mm	破坏位移/mm
BJ1	正向	92.45	170.76	246.19	209.26	7.99	21.46	85.11
	反向	63.33	189.11	238.06	202.35	6.81	27.93	85.24
BJ2	正向	90.08	156.29	217.07	184.22	3.89	14.95	59.24
	反向	83.98	187.46	225.87	191.99	11.72	33.30	89.64
BJ3	正向	87.71	176.58	243.14	203.79	7.19	22.87	90.41
	反向	62.31	171.23	237.73	202.07	8.59	24.67	90.34
BJ4	正向	85.34	134.93	187.61	159.47	7.89	19.63	78.17
	反向	82.29	161.00	206.23	175.30	10.59	25.58	76.29

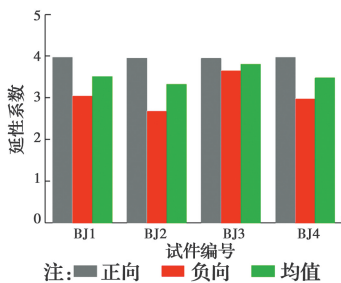


图 7 试件延性系数

Fig. 7 Ductility factor of specimens

相较于配置 HRB400 普通钢筋的普通混凝土梁柱边节点试件 BJ2,配置 HRB600 钢筋梁柱边节点试件 BJ1 的屈服、极限和破坏荷载平均值分别比试件 BJ2 高 4.7%、9.3%和 9.4%,说明在普通混凝土结构中,用 HRB600 钢筋的试件承载能力得到提

高。相比普通混凝土试件 BJ1,钢纤维整体增强的边节点试件 BJ3 的开裂、屈服、极限和破坏荷载相差不明显,钢纤维对试件的承载力贡献几乎可以忽略。与配置 HRB600 钢筋普通混凝土梁柱边节点试件 BJ1 相比,钢纤维整体增强 HRB600 钢筋的边节点 BJ3 和钢纤维局部增强 HRB600 钢筋试件 BJ4 的开裂位移平均值分别提高约 6.6%和 24.8%,表明采用钢纤维通过提高混凝土的抗拉性能和抗裂性能来提高节点的开裂位移。高强钢筋试件 BJ1、BJ3 和 BJ4 分别比普通钢筋混凝土试件 BJ2 的破坏位移平均值高 14.4%、21.4%和 3.7%,延性系数平均值分别比 BJ2 试件高 5.4%、14.4%和 4.5%,表明 HRB600 钢筋可以提高边节点的变形能力和延性性能。与钢纤维局部增强的 HRB600 钢筋混凝土梁柱

边节点试件 BJ4 相比,钢纤维整体增强的 HRB600 钢筋混凝土梁柱边节点 BJ3 的屈服位移、破坏位移和延性系数平均值分别高约 5.2%、17.0% 和 9.3%,说明采用钢纤维整体增强的 HRB600 钢筋混凝土边节点具有较高的变形能力和延性性能。钢纤维局部增强的 HRB600 钢筋混凝土梁柱边节点 BJ4 的反向屈服位移略大,破坏位移略小,其反向延性系数为 2.98,略小于 3.0,但正反向平均位移延性系数为 3.48,具有良好的延性性能。

### 3.5 节点核心区剪切变形

在梁柱边节点的核心区沿对角线方向布置两个位移计,通过测量变形来计算核心区的剪切变形<sup>[2]</sup>,各节点的剪切-转角滞回曲线如图 8 所示。

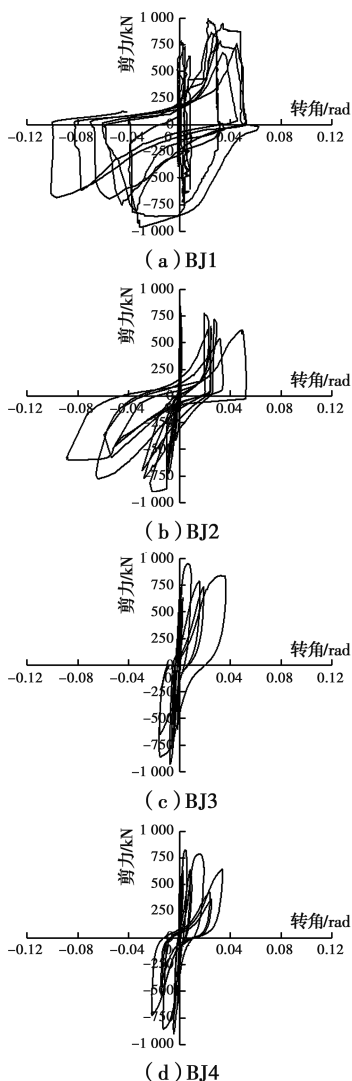


图 8 剪力-转角滞回曲线

Fig. 8 Shear-rotational hysteresis curve

配置 HRB600 钢筋的边节点试件 BJ1 比配置

HRB400 钢筋的试件 BJ2 的剪力高,节点核心区的剪切变形较大,这主要是由于配置 HRB600 钢筋试件 BJ1 的剪压比比配置 HRB400 钢筋试件 BJ2 的剪压比大约 12.4%,试件 BJ1 采用 HRB600 高强钢筋,试件的受剪承载力增加约 9.3%,在一定程度上增加了节点核心区剪切破坏程度。

钢纤维整体增强的 HRB600 钢筋混凝土梁柱边节点试件 BJ3 和钢纤维局部增强的 HRB600 钢筋混凝土梁柱边节点试件 BJ4 在整个试验过程中核心区的剪切变形较小,说明应用钢纤维混凝土通过改善节点核心区的破坏形态,从而限制节点核心区的剪切变形。

### 3.6 节点段的梁筋粘结退化

通过梁端 300 mm 及核心区的梁纵筋每隔 50 mm 粘贴应变片计算得到粘结应力与极限粘结应力比值<sup>[19]</sup>,绘制节点段的梁筋粘结退化曲线如图 9 所示。粘结应力  $\tau_b$  按式(3)计算。

$$\tau_b = \frac{T_{br} - C_{sl}}{h_c S_b} \quad (3)$$

式中:  $T_{br}$ 、 $C_{sl}$  分别为节点段梁筋所受的拉力和压力;  $h_c$  为水平锚固段长度;  $S_b$  为钢筋周长。

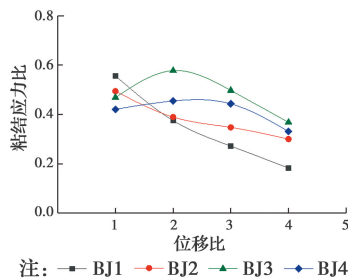


图 9 梁筋粘结退化曲线

Fig. 9 Beam reinforcement bond degradation curve

配置 HRB600 高强钢筋的边节点试件 BJ1 比配置 HRB400 钢筋的试件 BJ2 的节点段梁筋粘结退化快,主要是由于随着节点变形的增加,HRB600 梁筋的屈服渗透过快,从而导致梁筋粘结退化程度加快,这在一定程度上限制了 HRB600 高强钢筋的优良性能发挥。

钢纤维整体增强的 HRB600 钢筋混凝土梁柱边节点试件 BJ3 和钢纤维局部增强的 HRB600 钢筋混凝土梁柱边节点试件 BJ4 在加载中后期节点段梁筋的粘结应力比较大,其粘结退化较为缓慢,主要是因为钢纤维能够有效限制裂缝的发展,在构件破坏时,

节点核心区混凝土较完整,因此,梁筋具有较好的粘结条件,其粘结退化较为缓慢,HRB600 钢筋与钢纤维混凝土具有良好的协同工作能力。钢纤维整体增强的 HRB600 钢筋边节点试件 BJ3 梁筋的粘结条件优于钢纤维局部增强的边节点试件 BJ4,其粘结应力比较大,梁筋粘结退化程度较为缓慢。

## 4 结论

1)配置 HRB600/HRB400 钢筋混凝土梁柱边节点呈现较为严重的核心区剪切破坏,剪切变形较大,梁筋粘结退化较为严重。钢纤维整体增强或局部增强的措施可以改善 HRB600 钢筋边节点的破坏形态,节点核心区完整性较好,节点核心区的剪切变形得到有效控制,节点段的梁筋粘结退化得到有效减缓。

2)配置 HRB600 钢筋混凝土边节点表现出较高的承载能力、耗能能力和延性性能,刚度退化得到有效减缓。钢纤维整体增强或局部增强的 HRB600 钢筋混凝土边节点比未增强的边节点的耗能能力得到提高,刚度退化得到减缓。

3)钢纤维混凝土与高强钢筋协同工作能力优于普通混凝土,采用钢纤维整体增强的 HRB600 钢筋混凝土边节点表现出较高的延性性能和耗能能力,较为缓慢的刚度退化和梁筋粘结退化性能。综合考虑抗震性能与施工的便捷性,建议对配置 HRB600 钢筋边节点整体采用 1.2% 体积百分含量的钢纤维混凝土。

## 参考文献:

[1] 伍云天,付俊杰,李鑫,等. 不同设防烈度下配置高强度钢筋的混凝土框架结构非线性动力反应分析[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(Sup2): 84-91.

WU Y T, FU J J, LI X, et al. Nonlinear dynamic response of frame structures reinforced with high strength reinforcements under different seismic fortification intensities [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(Sup2): 84-91. (in Chinese)

[2] ALAEE P, LI B. High-strength concrete exterior beam-column joints with high-yield strength steel reinforcements [J]. Engineering Structures, 2017, 145: 305-321.

[3] ANNADURAI A, RAVICHANDRAN A. Seismic

behavior of beam-column joint using hybrid fiber reinforced high-strength concrete [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2018, 42(3): 275-286.

[4] 朱爱萍,肖从真,黄小坤. 配置 500 MPa 纵筋钢筋混凝土框架顶层节点抗震性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(4): 12-18.

ZHU A P, XIAO C Z, HUANG X K. Seismic behavior of knee joints of RC frame with 500MPa reinforcement [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(4): 12-18. (in Chinese)

[5] 郑文忠,李玲,张弛. HRB500/HRB600 钢筋作纵筋的混凝土框架梁端弯矩调幅试验研究[J]. 工程力学, 2019, 36(5): 76-91, 109.

ZHENG W Z, LI L, ZHANG C. Experimental study on the moment redistribution in reinforced concrete frames with HRB500/HRB600 steel bars [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(5): 76-91, 109. (in Chinese)

[6] ALAVI-DEHKORDI S, MOSTOFINEJAD D, ALAEE P. Effects of high-strength reinforcing bars and concrete on seismic behavior of RC beam-column joints [J]. Engineering Structures, 2019, 183: 702-719.

[7] WANG D H, JU Y Z, ZHENG W Z. Strength of reactive powder concrete beam-column joints reinforced with high-strength (HRB600) bars under seismic loading [J]. Strength of Materials, 2017, 49(1): 139-151

[8] 张健新,戎贤,吴海超. 配置 600 MPa 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 J X, RONG X, WU H C. Experimental research on hysteretic behavior of exterior joints with 600 megapascal reinforced bars [J]. Industrial Construction, 2017, 47(6): 30-33. (in Chinese)

[9] HWANG H J, PARK H G, CHOI W S, et al. Cyclic loading test for beam-column connections with 600 MPa (87 ksi) beam flexural reinforcing bars [J]. ACI Structural Journal, 2014, 111(4): 913-924.

[10] ABBAS A A, SYED MOHSIN S M, COTSOVOS D M. Seismic response of steel fibre reinforced concrete beam-column joints [J]. Engineering Structures, 2014, 59: 261-283.

[11] LU Y Y, LI N, LI S, et al. Experimental investigation

- of axially loaded steel fiber reinforced high strength concrete-filled steel tube columns [J]. *Journal of Central South University*, 2015, 22(6): 2287-2296.
- [12] 张健新, 丁传林, 戎贤, 等. 装配式高强钢筋钢纤维混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(2):
- ZHANG J X, DING C L, RONG X, et al. Experimental research on seismic behavior of the prefabricated frame joints with high strength reinforcement and steel fiber concrete [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(2): (in Chinese)
- [13] ZHANG J X, DING C L, RONG X, et al. Experimental seismic study of precast hybrid SFC/RC beam-column connections with different connection details [J]. *Engineering Structures*, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110295>.
- [14] GHOMI S K, EL-SALAKAWY E. Effect of joint shear stress on seismic behaviour of interior GFRP-RC beam-column joints [J]. *Engineering Structures*, 2019, 191: 583-597.
- [15] ABDELALALEEM B H, HASSAN A A A. Effect of combining steel fibers with crumb rubber on enhancing the behavior of beam-column joints under cyclic loading [J]. *Engineering Structures*, 2019, 182: 510-527.
- [16] 韩建平, 刘文林, 崔明. PVA-钢混杂纤维增强水泥基复合材料梁柱节点抗震性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(11): 32-40, 52.
- HAN J P, LIU W L, CUI M. Experimental investigation on seismic behavior of PVA-steel hybrid fiber reinforced cementitious composite beam-column assemblages [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(11): 32-40, 52. (in Chinese)
- [17] QURESHI L A, MUHAMMAD U. Effects of incorporating steel and glass fibers on shear behavior of concrete column-beam joints [J]. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 2018, 22(8): 2970-2981.
- [18] 崔钦淑, 杨俊杰, 康谷贻. 钢筋混凝土Z形截面柱框架节点抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(6): 86-95.
- CUI Q S, YANG J J, KANG G Y. Experimental research on seismic behavior of Z-shaped column joints in RC frame [J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(6): 86-95. (in Chinese)
- [19] 傅剑平, 刘晓, 白绍良. 抗震框架中间层中节点梁筋粘结退化试验研究[J]. *重庆建筑大学学报*, 2007, 29(4): 39-43.
- FU J P, LIU X, BAI S L. Experimental research on beam bar bond deterioration of the interior joint in earthquake-resistant frames [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2007, 29(4): 39-43. (in Chinese)

(编辑 胡玲)