

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.02.013



# X 形配筋增强高强钢筋异形柱边节点 抗震性能试验研究

戎贤<sup>1,2</sup>, 王胜男<sup>1</sup>, 张建新<sup>1,2</sup>

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401)

**摘要:**通过对核心区应用 X 形配筋增强的高强钢筋异形柱边节点和同等条件下未被增强的高强钢筋异形柱边节点进行拟静力试验研究, 对比分析异形柱边节点的破坏特征、滞回曲线、承载能力、位移及延性、刚度退化、耗能能力等抗震性能指标。研究表明, 配置 HRB500 高强钢筋异形柱边节点比配置 600 MPa 级的边节点承载能力低, 但滞回性能好, 变形能力强, 刚度退化推迟, 耗能能力强; 在核心区加入 X 形配筋, 均可以改善高强钢筋异形柱边节点的破坏特征, 使边节点抗剪能力、变形能力、耗能能力增强, 刚度退化推迟, 提高异形柱边节点抗震性能, 配置 HRB500 高强钢筋的试件核心区应用 X 形配筋加强后抗震性能提高效果更好。

**关键词:** 高强钢筋; 边节点; 异形柱; X 形配筋; 抗震性能

**中图分类号:** TU375.4    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2017)02-0100-06

## Experimental analysis of seismic behavior of exterior joints of specially shaped columns with high-strength reinforcement and X-shaped reinforcement

Rong Xian<sup>1,2</sup>, Wang Shengnan<sup>1</sup>, Zhang Jianxin<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China;  
2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, P. R. China)

**Abstract:** The exterior joints of specially shaped columns with high-strength reinforcement, and with or without X-shaped reinforcement were tested under low cyclic loading. The damage characteristic, hysteretic curve, bearing capacity, displacement, ductility, stiffness degradation and energy dissipation capacity were compared. The results showed that for the exterior joints of specially shaped columns, the bearing capacity of the HRB500 joint was lower, but the hysteretic behavior, deformability, energy dissipation capacity were increased, the stiffness degradation was postponed. When X-shaped high-strength reinforcement added to the joints, the failure characteristics of the joint was improved, the stiffness degradation was postponed, the deformability, shear capability and energy dissipation capacity were increased, the seismic behavior of specially shaped column joints was improved significantly, and the seismic

**收稿日期:** 2016-08-25

**基金项目:** 天津建委科技项目(2015-2); 河北省现代海洋化工技术协同创新中心项目(HYHG201502)

**作者简介:** 戎贤(1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事结构抗震研究, (Email) wangsn0619@163.com。

**Received:** 2016-08-25

**Foundation item:** Science and Technology Project for Tianjin Construction Committee (No. 2015-2); Collaborative Innovation Center Project for Hebei Modern Marine Chemical Technology (No. HYHG201502)

**Author brief:** Rong Xian (1965-), PhD, professor, main research interest: structural earthquake-resistant research, (Email) wangsn0619@163.com.

behavior of the HRB500 joint was improved more.

**Keywords:** high-strength reinforcement; exterior joint; specially shaped column; X-shaped reinforcement; seismic behavior

相对于普通截面柱结构,异形柱结构体系由于具有节省室内空间、平面布置灵活等特点,可以较好地满足中国居民的居住要求<sup>[1-2]</sup>,学者们做了许多关于异形柱结构体系各类试验研究及分析<sup>[3-10]</sup>,中国学者也对异形柱结构进行了大量的研究,戎贤等<sup>[11]</sup>指出,增大配箍率可以提高异形柱试件的延性,改善其滞回特性。雷敏等<sup>[12]</sup>提出了 T 形钢管混凝土单向偏压柱承载力的计算方法。同时有学者针对异形柱节点薄弱问题,进行了节点增强的探讨。戎贤等<sup>[13-14]</sup>指出,在节点核心区混凝土中加入钢纤维,可以改善异形柱节点滞回性能。曾磊等<sup>[15]</sup>提出,提高钢骨混凝土异形柱钢梁节点核心区的配箍率,可以提高试件的延性,改善耗能能力。

高强钢筋的应用可以节约钢材的使用量,降低工程造价,节约生产钢材所消耗的能源与资源,但是《混凝土异形柱结构技术规程》(JGJ 149—2006)尚未纳入此类钢筋,对于高强钢筋异形柱边节点核心区配置 X 形配筋的增强作用,相关研究也较少。通过将 X 形配筋加入高强钢筋混凝土异形柱边节点核心区,进行低周往复荷载试验,根据实验现象及数据分析 X 形配筋的增强效果,针对高强钢筋异形柱边节点的薄弱问题,提供理论指导,为规范的修订提供资料支持。

## 1 设计概况

试验设计 4 个 1/2 缩尺的异形柱节点,各试件尺寸相同,梁柱纵筋、X 形筋、箍筋位置及直径一致,配筋强度等级情况如表 1 所示,其模型配筋情况以 JTX2 为例,如图 1 所示。在试件制作的过程中,对于核心区有 X 形配筋的试件,注意先仅固定下柱部分和核心区的箍筋,由此确定柱纵筋位置并绑扎,随后将 2 对(共 4 根)X 形筋分别通过核心区箍筋,柱纵筋随 X 形筋弯曲变化情况调整穿入路线,最终将其放置在核心区并绑扎固定。之后在规定位置绑扎梁纵筋,此时事先经过斜边长度计算的 X 形筋恰位于梁柱纵筋的内侧且斜边长度贯穿于节点核心区,最后进行其他钢筋的绑扎。经试验测得,混凝土强度等级为 C50,立方体抗压强度为 55.7 MPa,轴心抗压强度 37.3 MPa,试件梁柱纵筋及箍筋性能指标实测值如表 2 所示。

表 1 各试件配筋情况

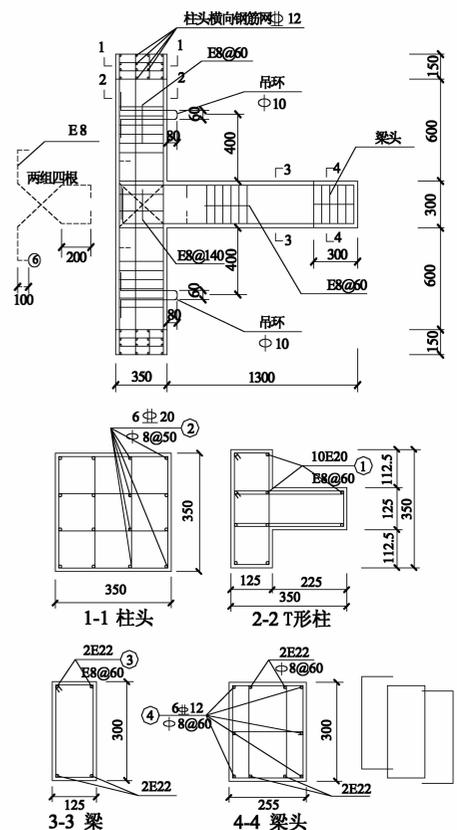
Table 1 Matching bar conditions

试件编号	配筋等级	X 形配筋情况
JT1	600 MPa	无
JTX2	600 MPa	600 MPa 级
JT3	HRB500	无
JTX4	HRB500	HRB500

表 2 钢筋性能指标

Table 2 Material properties of steel

钢筋种类	直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
HRB500	8	468.67	625.33
HRB500	20	539.67	696.33
HRB500	22	547.00	732.33
600 MPa	8		738.00
600 MPa	20	625.00	791.33
600 MPa	22	621.67	786.00



注:图中“E”表示600 MPa级钢筋。

图 1 JTX2 模型配筋情况

Fig. 1 Details of JTX2

试验模型原型分别取节点上下柱和梁的反弯点之间的部分,使用梁端加载方案,在梁端用拉压千斤顶控制施加竖向荷载,并将力的大小通过力传感器传送到计算机,实现低周往复加载,同时柱底放在位于静力台座的球铰支座上,柱顶利用夹梁与钢锚杆将构件固定在反力墙上,并用液压千斤顶施加恒定竖向荷载,大小为 250 kN。在梁头加载端的形心处利用位移计测量梁端变形,并将位移计固定在牢固的架子上,确保整个试验过程位移计不会受到扰动,加载装置如图 2 所示。试验加载为荷载-位移联合控制,即试件屈服前,对试件梁端荷载实施由力控制,以每 20 kN 为一级,试件屈服后,由试件屈服位移的整数倍控制梁端荷载;“加载、卸载、反向加载、反向卸载”为一个荷载控制的过程,屈服前进行 1 次荷载控制循环,屈服后进行 3 次循环,比较每个循环中的梁端最大竖向荷载,先升高后下降,下降到最大荷载的 85%,试件破坏。

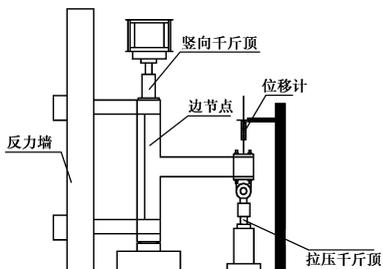


图 2 试验装置

Fig. 2 Test loading equipment

将规格为 2 mm×3 mm 的应变片粘贴在钢筋上,并用绝缘胶带和防水胶保护,应变片通过导线编号,并与 DH3818 静态电阻应变测量系统相连,对计算机采集到的钢筋应变片数据进行记录处理,进而得到试验过程中的钢筋应变。当位于梁端塑性铰区应变片的测量数据达到钢筋屈服应变时,将力加载控制转为位移加载控制。由于下文重点分析箍筋应变和 X 形配筋应变,故仅表达箍筋和 X 形配筋应变片的粘贴位置,将最接近节点核心区中间部位的一对箍筋和任选其中一组 X 形配筋贴应变片如图 3 所示。

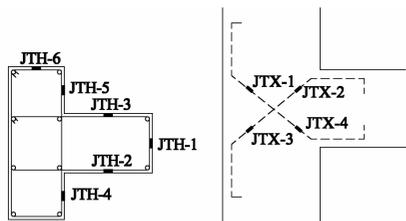


图 3 节点钢筋应变片位置

Fig. 3 Layout of strain gauge of steel in joint

## 2 破坏特征

试件的破坏特征如图 4 所示。

加载初期,竖向弯曲裂缝先出现于试件梁端,随后试件核心区腹板出现数条斜向弯曲裂缝,继续加载,斜裂缝由腹板经翼缘侧面延伸至翼缘正面。试件 JT3、JTX4 的破坏程度分别比试件 JT1、JTX2 严重;试件 JTX2、JTX4 破坏时梁端混凝土脱落严重,出现贯通裂缝,试件核心区腹板内较多的细微斜裂缝,破坏时梁端及核心区混凝土均脱落;试件 JT1 核心区腹板斜裂缝宽度达到 2.2 mm,而试件 JTX2 核心区腹板斜裂缝宽度仅为 1.5 mm。这说明配置 HRB500 高强钢筋异形柱边节点的破坏程度比配置 600 MPa 级高强钢筋异形柱边节点严重,在高强钢筋异形柱边节点核心区配置 X 形筋进行增强,剪切裂缝发展得到明显限制,边节点核心区的破坏特征随混凝土表层开裂和剥落现象的减轻而改善。

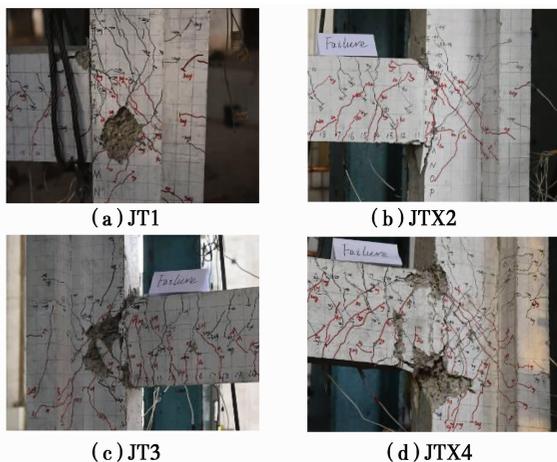


图 4 破坏特征

Fig. 4 Failure characteristics

## 3 试验结果分析

### 3.1 滞回特性

根据试验得到的异形柱节点荷载-位移滞回曲线如图 5 所示。滞回曲线在加载的正反方向基本对称。加载初期,试件变形及残余变形较小,滞回曲线几乎成直线。加载至试件屈服后,试件的变形随荷载的增加而增加,滞回曲线也趋于饱满。综合来看,试件 JT3、JTX4 的滞回曲线饱满程度分别比 JT1、JTX2 好;同时,试件 JTX2、JTX4 的滞回曲线分别与 JT1、JT3 相比,加载后期曲线更加饱满,变形能力增强,承载力下降慢,且 JTX4 的变形能力和滞回曲线饱满程度增强效果较明显。这表明对于配置高

强钢筋的异形柱边节点试件,配置 HRB500 高强钢筋的试件滞回性能比配置 600 MPa 级高强钢筋的试件滞回性能好,在核心区加入 X 形配筋进行增

强,高强钢筋异形柱边节点后期变形能力增大,滞回性能改善。

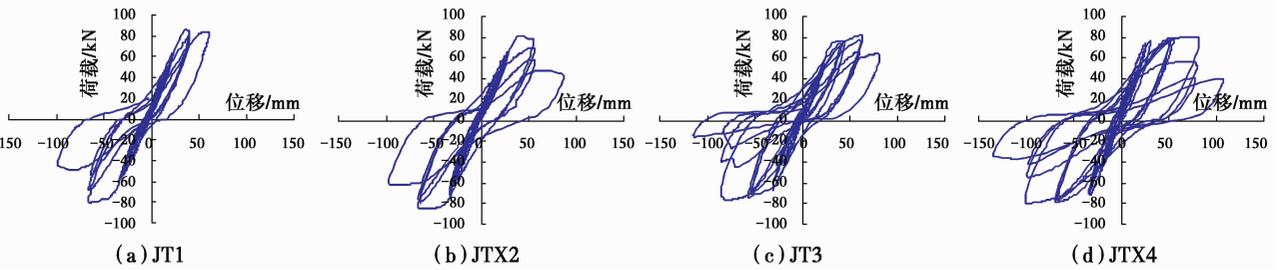


图 5 荷载—位移滞回曲线

Fig. 5 Hysteretic curves

### 3.2 承载力、位移及延性

试件的荷载、位移及延性系数如表 3 所示。

表 3 边节点承载力、位移及延性

Table 3 Bearing capacity, displacement and ductility coefficient

试件 编号	加载 方向	荷载				位移				位移延性 系数 $\mu_{\Delta}$
		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	极限位 移/mm	破坏位 移/mm	
JT1	正向	20.37	59.15	84.97	72.23	2.38	15.87	31.54	58.86	3.71
	负向	20.37	65.52	80.76	68.64	8.59	30.89	51.42	59.80	1.94
	均值	20.37	62.34	82.86	70.43	5.48	23.38	41.48	59.33	2.82
JTX2	正向	40.38	59.33	76.90	65.36	10.72	19.30	43.55	51.92	2.69
	负向	41.43	70.98	82.86	70.43	14.66	28.80	51.20	64.36	2.23
	均值	40.91	65.16	79.88	67.90	12.69	24.05	47.38	58.14	2.46
JT3	正向	42.13	61.94	81.81	69.54	13.35	23.51	51.17	60.95	2.59
	负向	41.78	64.72	71.63	60.88	14.94	25.48	45.65	73.65	2.89
	均值	41.96	63.33	76.72	65.21	14.14	24.50	48.41	67.30	2.74
JTX4	正向	40.38	72.79	79.00	67.15	8.46	20.78	65.56	71.66	3.45
	负向	40.73	72.66	79.70	67.75	13.77	31.51	80.78	88.12	2.80
	均值	40.55	72.73	79.35	67.45	11.12	26.15	73.17	79.89	3.12

从表 3 中可知, JTX4 的位移延性系数比 JTX2 提高了 26.83%, JTX4 的延性系数比 JT3 提高了 13.87%; 对于开裂荷载、开裂位移, JTX2 比 JT1 显著提高; 对于屈服荷载、屈服位移、极限位移, JT3 比 JT1 略有增大, JTX2 比 JT1 分别提高 4.52%、2.87%、14.22%, JTX4 比 JT3 分别提高 14.84%、6.73%、8.72%, 但 JTX2、JTX4 的极限荷载分别与 JT1、JT3 比较, 没有明显变化。JTX2 延性比 JT1 小, 可能是由于外在原因造成构件平面外失稳, 使构件提前破坏, 进而延性系数减少。表中屈服荷载是根据骨架曲线结合“等面积法”求得, 虽然 JT1 的屈

服荷载比 JT3 的屈服荷载略小, 但 JT1、JTX2 的极限承载能力分别大于 JT3、JTX4, 故这样的试验结果可能是试验误差引起的。JTX2 的正向屈服荷载过小, 且正负向屈服荷载相差较大, 可以推测此组数据可能是由于试验过程中, 力传感器的短期接触不良导致计算机采集数据不准确, 导致骨架曲线的局部与实际情况略有偏差, 进而影响了 JTX2 屈服荷载的计算。因此个别数据只反映了试验的局部偏差, 综合试件的极限荷载来看, 仍然可以判断出试件的承载能力。

总体来看, 配置 HRB500 的高强钢筋异形柱边

节点比配置 600 MPa 级高强钢筋的边节点变形能力强;在核心区配置 X 形配筋加强,可以延缓高强钢筋混凝土异形柱节点的斜裂缝产生,提高高强钢筋混凝土异形柱边节点的开裂荷载、屈服荷载和变形能力,配置 HRB500 高强钢筋的试件提高效果更明显,同时核心区配置 X 形配筋对配置 HRB500 高强钢筋的试件的延性和承载能力有明显增强作用。

### 3.3 骨架曲线

试验得到的骨架曲线如图 6 所示。

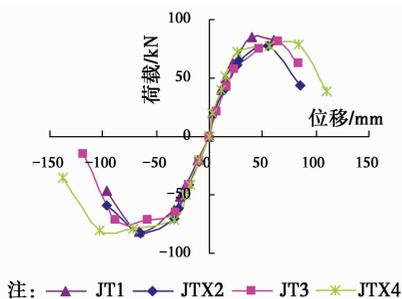


图 6 骨架曲线  
Fig. 6 Skeleton curve

由图 6 可以看出,试件 JTX4 的骨架曲线最为饱满;试件 JT1、JTX2 的最大承载力分别比 JT3、JTX4 略高,但变形能力均分别明显减小;试件 JTX2、JTX4 的变形能力分别比 JT1、JT3 明显提高,后期承载力下降速度慢;JTX2、JTX4 的最大承载力分别与 JT1、JT3 比较来看,没有明显区别。这说明配置 600 MPa 级高强钢筋异形柱节点最大承载力比配置 HRB500 的试件高,变形能力差;在 600 MPa 级高强钢筋异形柱边节点核心区配置 X 形配筋,可以提高试件变形能力和承载能力,后期承载力下降速度减慢,试件的抗震能力相应提高。

### 3.4 刚度退化

根据试验得到的刚度退化曲线如图 7。

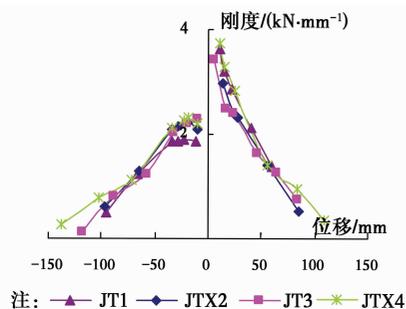


图 7 刚度退回曲线  
Fig. 7 Curves of rigidity degradation

从 4 个构件的刚度退化曲线可以看出,试件 JT3、JTX4 的刚度退化曲线分别比试件 JT1、JTX2

平缓,且变形能力强;试件 JTX2、JTX4 的后期变形能力比试件 JT1、JT3 明显增强,刚度退化曲线平缓,但 JTX2 对于 JT1 的刚度退化延缓程度、变形提高程度不如 JTX4 相对于 JT3 明显。这说明配置 HRB500 的高强钢筋异形柱边节点与配置 600 MPa 级的边节点相比,刚度退化推迟,变形能力强;在核心区配置 X 形配筋,高强钢筋异形柱节点的变形能力提高,刚度退化推迟,配置 HRB500 高强钢筋的试件刚度退化延缓程度与变形提高程度更明显。

### 3.5 耗能能力

试件在各级位移下的等效粘滞阻尼系数见图 8。

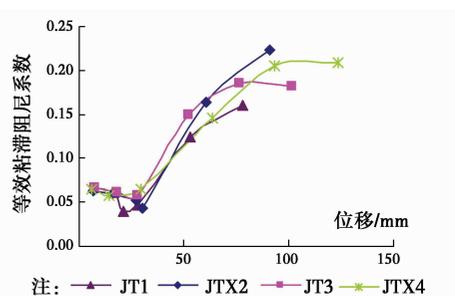


图 8 等效粘滞阻尼系数

Fig. 8 Coefficient of equivalent viscous damping

由图 8 可知,在达到屈服状态前,未增强试件和增强试件的等效粘滞阻尼系数接近,达到屈服荷载之后, JT3 的等效粘滞阻尼系数远大于 JT1,同时 JTX2、JTX4 的等效粘滞阻尼系数分别比 JT1、JT3 提高 37.5%、16.7%, JTX2、JTX4 的等效粘滞阻尼系数相差不大。这说明配置 HRB500 高强钢筋混凝土异形柱节点的耗能能力强于配置 600 MPa 级高强钢筋的边节点,在核心区配置 X 形筋进行加强,可以提高高强钢筋异形柱边节点的耗能能力。

### 3.6 箍筋应变及 X 形筋应变

由于 JTH-2 与 JTH-3、JTH-4 与 JTH-5、JTX-1 与 JTX-3、JTX-2 和 JTX-4 分别对称,故分析其一即可。根据异形柱边节点破坏形态和箍筋应变实测值大小可知,异形柱翼缘端面没有明显破坏,且箍筋、X 形筋应变极小,故不再进行分析。根据试验得到的 JTH-1、JTH-2、JTH-4、JTX-2 的应变如图 9。

由图中可以看出, JTH-1 与 JTH-4 通过约束核心区混凝土来承担边节点剪力,试验加载初期时,由于混凝土承担主要的剪力,其箍筋应变值较小;随着节点核心区逐渐开裂,箍筋应变也逐渐增加。腹板侧面箍筋 JTH-2 的应变最大,对比各构件来看, JTX2、JTX4 中 JTH-2 的应变比 JT1、JT3 小很多,

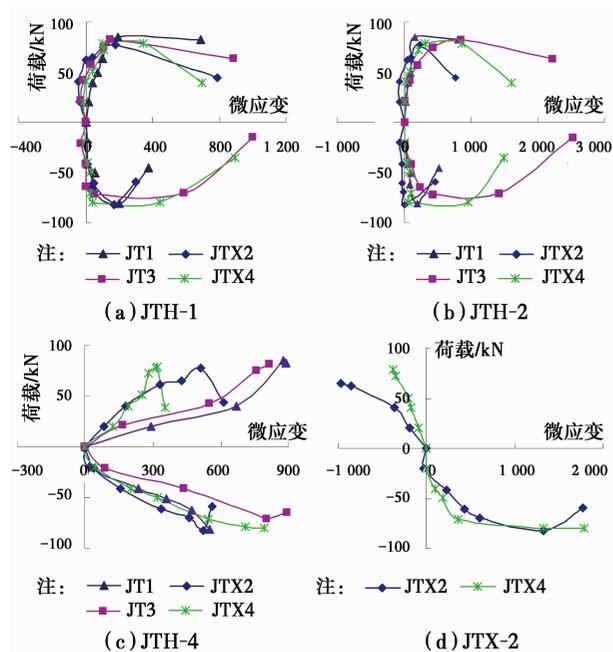


图 9 边节点荷载-钢筋应变

Fig. 9 Load-steel strain of exterior joint

这说明核心区有 X 形筋增强的节点, X 形筋能承担一部分剪力, 进而提高试件抗剪能力, 改变试件破坏形态。由 JTX-2 的应变可以看出, 试件 JTX2 和 JTX4 中 X 形筋均发挥作用, 加载后期, JTX2、JTX4 中的 X 形筋接近于屈服, 表示配置高强钢筋的异形柱边节点, 核心区加入 X 形筋可以充分发挥作用, 提高节点抗剪能力, 改善节点的薄弱问题。

图 9 中可以看出, 对比几个试件中的钢筋测点, 发现 JT3 的 JTH-2 测点处钢筋达到了屈服应变, 而其余试件相应测点钢筋应变未达到屈服应变, 这可以证明对于配置 HRB500 高强钢筋异形柱边节点, X 形筋可以降低核心区箍筋应变, 使核心区箍筋充分发挥强度作用, 进而改善节点核心区混凝土破坏形态; 对比试件 JTX2、JTX4 中的 X 形筋, 发现不同试件的 X 形筋应变有所不同, 但均未达到屈服应变。然而以上两个方面的屈服应变情况, 只是针对钢筋应变片粘贴位置相应测点的反映, 旨在对比分析相同测点下, 不同试件钢筋应变的差异, 对于在节点核心区全部箍筋、X 形筋中, 是否有屈服应变, 以及屈服应变的大小, 会在接下来的有限元软件模拟研究中有整体的反映。总之, 虽然测点处钢筋少有屈服应变, 并不能根据图 9 得到“核心区钢筋没有有效发挥强度作用”的结论。

## 4 结论

通过对高强钢筋混凝土异形柱边节点核心区配

置 X 形配筋进行拟静力试验研究, 得出结论:

1) 配置 HRB500 高强钢筋异形柱边节点比配置 600 MPa 级高强钢筋的边节点破坏程度严重, 承载能力低。

2) 配置 HRB500 高强钢筋异形柱边节点比配置 600 MPa 级高强钢筋的边节点滞回性能好, 变形能力与耗能能力强, 刚度退化推迟。

3) 在核心区配置 X 形筋, 可以提高配置 HRB500 高强钢筋异形柱边节点的延性及承载能力, 分别提高配置 HRB500、600 MPa 级高强钢筋异形柱边节点的耗能能力, 提高高强钢筋异形柱节点的抗剪能力, 改善高强钢筋异形柱边节点的破坏形态, 使边节点的变形能力提高, 承载能力下降速度减慢, 刚度退化推迟, 进而提高高强钢筋异形柱边节点的抗震能力。

4) 综合考虑高强钢筋异形柱节点变形能力、延性系数、刚度退化等, 配置 HRB500 的试件核心区应用 X 形筋加强后抗震性能提高效果更明显。在今后的工程应用中, 对于高强钢筋异形柱边节点, 尤其是配置 HRB500 的构件, 可以通过在节点核心区增加 X 形筋改善其薄弱状态, 提高其抗震性能。具体施工方法参照之前的有关专利<sup>[6]</sup>, 并需在实际工程经验中探索最适宜方法。

## 参考文献:

- [1] 王铁成, 白锡庆, 赵海龙. T 形柱抗震性能的纤维增强作用对比[J]. 世界地震工程, 2015(4): 1-6.  
WANG T C, BAI X Q, ZHAO H L. Comparison on seismic behavior of T-shaped columns reinforced by fiber [J]. World Earthquake Engineering, 2015(4): 1-6. (in Chinese)
- [2] 林盼盼. 某异形柱框架结构抗震性能分析[J]. 世界地震工程, 2014(04): 229-233.  
LIN P P. Seismic performance analysis of RC frame structure with special-shaped columns [J]. World Earthquake Engineering, 2014(4): 229-233. (in Chinese)
- [3] CHENG T, HSU T. L-shaped reinforced concrete compression members under biaxial bending [J]. ACI Structural Journal, 1987, 84(3): 201-211.
- [4] SHEN Z Y, LEI M, LI Y Q, et al. Experimental study on the seismic behavior of concrete filled L-shaped steel tube columns [J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(7): 1235.
- [5] ZUO Z L, CAI C. Axial load behavior of L-shaped CFT stub columns with bind bars [J]. Engineering

- Structures, 2012, 37(5):88.
- [6] XUE J Y, CHEN Z P, ZHAO H T, et al. Shear mechanism and bearing capacity calculation on steel reinforced concrete special-shaped columns [J]. Steel and Composite Structures, 2012, 13(5):473-487.
- [7] TOKGOZ S, DUNDAR C. Test of eccentrically loaded L-shaped section steel fibre high strength reinforced concrete and composite columns [J]. Engineering Structures, 2012, 38(5):134-141.
- [8] RONG X, ZHANG J X, LI Y Y. Experimental research on seismic behavior of interior joints of specially shaped columns reinforced by fiber [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 94 (6): 551-555.
- [9] WANG W. Capacity analysis on T-shaped exterior joints of reinforcement concrete column [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(8):186-189.
- [10] DUNDAR C, SAHIN B. Arbitrarily shaped reinforced concrete members subject to biaxial bending and axial load [J]. Computer and Structures, 1993, 49 (4): 1245-1256.
- [11] 戎贤, 张健新, 李艳艳. 配置 HRB500 钢筋的混凝土异形柱滞回性能试验研究 [J]. 建筑科学, 2012, 28(7): 35-38.  
RONG X, ZHANG J X, LI Y Y. Experimental research on hysteretic behavior of HRB500 RC specially shaped columns [J]. Building Science, 2012, 28(7): 35-38. (in Chinese)
- [12] 雷敏, 沈祖炎, 李元齐, 等. T形钢管混凝土单向偏压长柱力学性能分析 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016 (02):207-212.  
LEI M, SHEN Z Y, LI Y Q, et al. Analysis of Behavior of concrete-filled T-shaped steel tube tall column subjected to uniaxial eccentric load [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016(2):207-212. (in Chinese)
- [13] 戎贤, 张健新, 李艳艳. 钢骨及纤维增强混凝土异形柱中节点滞回性能 [J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35 (12):207-212.  
RONG X, ZHANG J X, LI Y Y. Hysteretic behavior of specially shaped column interior joints with steel or fiber [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(12):207-212. (in Chinese)
- [14] 戎贤, 康丽华, 李艳艳. 钢纤维增强十字形异形柱中节点的抗震性能试验 [J]. 世界地震工程, 2012(2): 142-147.  
RONG X, KANG L H, LI Y Y. Experimental research on seismic performance of nodes in cross shaped column with steel fiber [J]. World Earthquake Engineering, 2012(2):142-147. (in Chinese)
- [15] 曾磊, 吴园园, 张地, 等. 钢骨混凝土异形柱-钢梁节点抗震性能试验研究 [J]. 振动与冲击, 2016(4): 224-229, 240.  
ZENG L, WU Y Y, ZHANG D, et al. Test for aseismic behavior of frame joints between a steel reinforced concrete special column and a steel beam [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016(4):224-229, 240. (in Chinese)
- [16] 王铁成, 赵海龙, 戎贤, 等. 一种改善异形柱节点抗震性能的 X 形配筋增强方法: 中国, 201310756413. 8 [P]. 2014-04-23.  
WANG T C, ZHAO H L, RONG X, et al. The method with X -Shaped Reinforcement to improve the seismic behavior of specially shaped column joints: China, 201310756413. 8 [P]. 2014-04-23. (in Chinese)

(编辑 胡玲)