

反复荷载作用下型钢混凝土异形柱框架边节点力学性能试验研究

薛建阳^{1,2}, 王 玮¹, 刘 义¹, 刘祖强¹, 赵鸿铁^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055)

摘 要:通过对9个型钢混凝土(SRC)异形柱框架边节点进行低周反复加载试验, 观察了不同配钢形式、不同轴压比条件下 SRC 异形柱框架边节点的受力过程及破坏形态, 得出了 SRC 异形柱框架边节点的荷载—位移滞回曲线和骨架曲线。根据试验结果, 分析了节点承载力、延性、耗能以及刚度退化等性能。研究表明, SRC 异形柱框架边节点的滞回曲线比较饱满, 承载力高, 耗能能力强, 位移延性系数平均值可达到 3.60, 具有较好的抗震性能。

关键词:型钢混凝土; 异形柱; 边节点; 拟静力试验; 力学性能

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)03-0323-07

型钢混凝土(SRC)异形柱结构结合了型钢混凝土结构承载力高、抗震性能好的优点, 以及异形柱结构在房间内不凸出柱楞的长处, 具有广阔的应用前景^[1-3]。

梁柱节点是框架结构抗震设计的重要部位^[4], 目前国内对型钢混凝土异形柱框架节点的研究还处于探索阶段。广西大学进行了6个型钢混凝土 T 形截面边节点的拟静力试验^[5], 结果表明, 该类型节点承载能力高, 延性好。本文通过对9个 SRC 异形柱框架边节点进行拟静力加载试验, 获得了节点的承载能力、延性、耗能能力以及刚度退化规律等力学性能^[6], 为异形柱结构的推广应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

共设计了9个缩尺比为1:2的中间层边节点试件。试件采用正交设计法, 主要考虑配钢形式、轴压比、截面肢高肢厚比以及节点中水平腹杆的配钢率等因素的影响。试件形式见图1, 具体参数见表1。

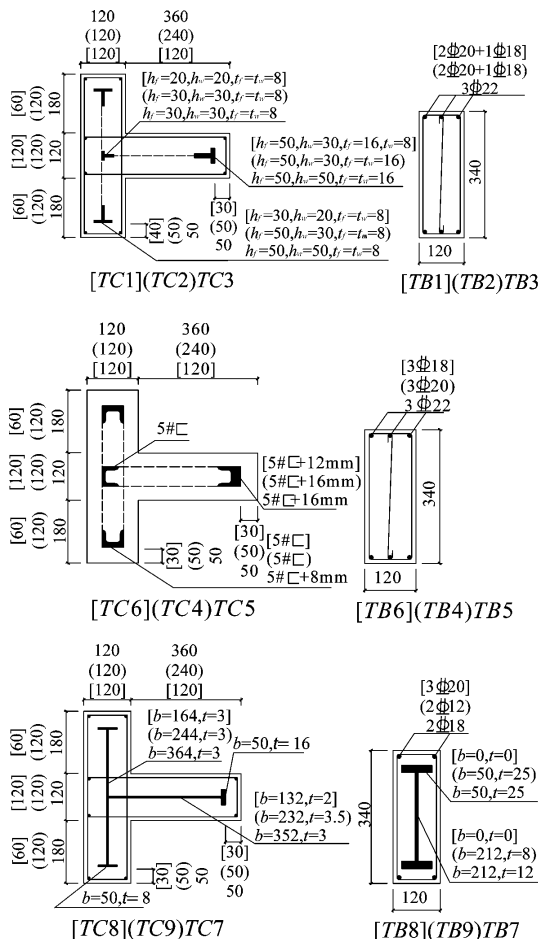


图1 试件配钢形式

Fig. 1 Steel layout of specimens

收稿日期: 2010-09-20 修改稿日期: 2011-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978217); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20096120110005); 教育部留学回国人员科研基金资助项目(教外司留[2007]1108号); 中建股份有限公司科技研发课题资助项目(CSECE-2009-Z-31)

作者简介: 薛建阳(1970-), 河南洛阳人, 工学博士, 教授, 主要从事钢与混凝土组合结构、古建筑结构及其抗震性能研究。

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Experimental parameters of specimens

Specimen label	Column			Panel zone				Beam		
	Steel layout fashion	n	h/b	s_{sw} (or t)	$\rho_{sw}/\%$	s_{sv}	$\rho_{sv}/\%$	Type	$\rho_s/\%$	$\rho_{ss}/\%$
TJ1	T-shape	0.16	2.0	$\phi 6@40$	0.51	$2\phi 4@100$	0.21	RC	4.32	—
TJ2	T-shape	0.24	3.0	$\phi 6@56$	0.34	$2\phi 4@100$	0.21	RC	4.94	—
TJ3	T-shape	0.33	4.0	$\phi 6@92$	0.17	$2\phi 4@100$	0.21	RC	5.58	—
TJ4	Channel	0.16	3.0	$2\phi 6@140$	0.17	—	0	RC	4.62	—
TJ5	Channel	0.24	4.0	$2\phi 6@70$	0.51	—	0	RC	5.58	—
TJ6	Channel	0.28	2.0	$2\phi 6@94$	0.34	—	0	RC	3.74	—
TJ7	Solid plate	0.16	4.0	3 mm	2.92	$2\phi 4@100$	0.21	SRC	2.50	12.36
TJ8	Solid plate	0.23	2.0	2 mm	2.50	$2\phi 4@100$	0.21	RC	4.62	—
TJ9	Solid plate	0.32	3.0	3.5 mm	3.33	$2\phi 4@100$	0.21	SRC	1.10	10.28

Note: n —Axial compression ratio, $n=N/(f_c(A_c+\alpha_E A_{s*}))$; h/b —Ratio of column limb height to thickness; s_{sw} —Ratio of horizontal web member; t —Thickness of steel plate; ρ_{sw} —Steel ratio of web member; s_{sv} —Stirrup spacing; ρ_{sv} —Stirrup ratio; ρ_s —Reinforcement ratio; ρ_{ss} —Steel ratio of longitudinal shape steel.

1.2 试验装置和加载制度

试验在西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点试验室进行, 加载装置采用电液伺服程控结构试验系统(MTS793), 由电液伺服作动器施加柱顶水平往复荷载, 如图 2 所示. 加载方式采用《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—92)建议的方法, 节点屈服前, 采用荷载控制加载, 每级荷载反复一次, 加载过程中控制级差, 接近开裂和屈服荷载前减小级差; 节点屈服后, 采用位移控制加载, 每级位移反复三次, 至荷载下降到极限承载力的 85 %时认为试件破坏, 停止加载.

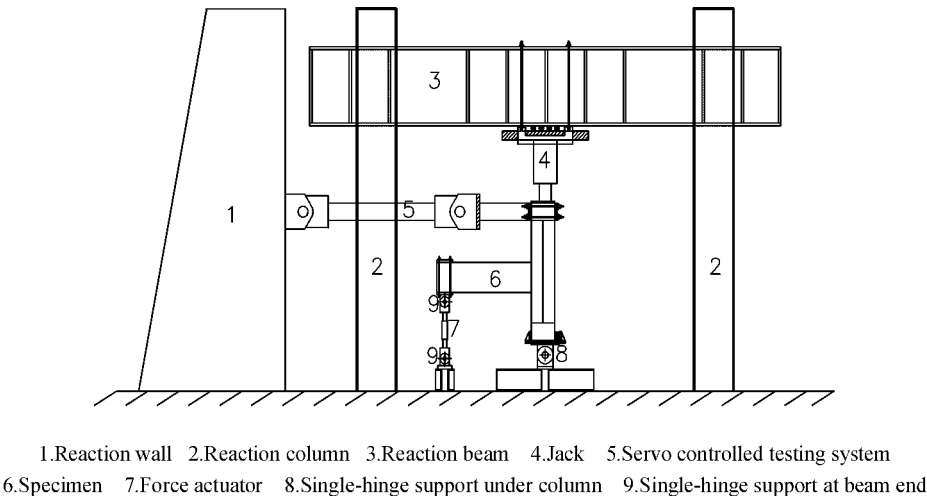


图 2 加载装置示意图

Fig. 2 Test set-up

2 试验结果及其分析

本次试验测试的主要内容有: 柱顶的竖向荷载和每次循环中各级水平荷载值; 各级荷载下试件柱端及梁端的水平位移值; 节点核心区区的剪切变形值; 节点核心区型钢、钢筋、梁根部纵向钢筋以及柱根部型钢的应变值等. 最终构件的破坏形态有三种: 节点核心区发生剪切斜压破坏、梁端弯剪破坏, 以及节点区焊缝拉裂导致梁根部失效破坏^[7].

2.1 滞回曲线

本次试验获得了 9 个中间层边节点试件的水平荷载 P —柱顶位移 Δ 滞回曲线, 如图 3 所示. 由图可以看出, 在加载初期荷载较小, 滞回曲线基本呈直线, 滞回环包围面积近似为零, 卸载时无残余变形, 试

件处于弹性工作阶段. 随着荷载逐渐增大, 滞回环开始呈曲线形, 包围面积也增大, 构件逐渐进入屈服阶段. 试件屈服以前, 滞回环大致呈梭形, 卸载时残余变形较小, 刚度退化也较慢. 试件屈服以后, 随着加载位移的增大, 构件的变形也逐渐增大, 且变形增长速度也较加载初期更快, 滞回环更趋饱满, 残余变形较初期有所增大, 刚度退化明显. 当构件达到极限荷载后, 承载能力逐渐下降, 变形继续增加, 直至构件最后破坏.

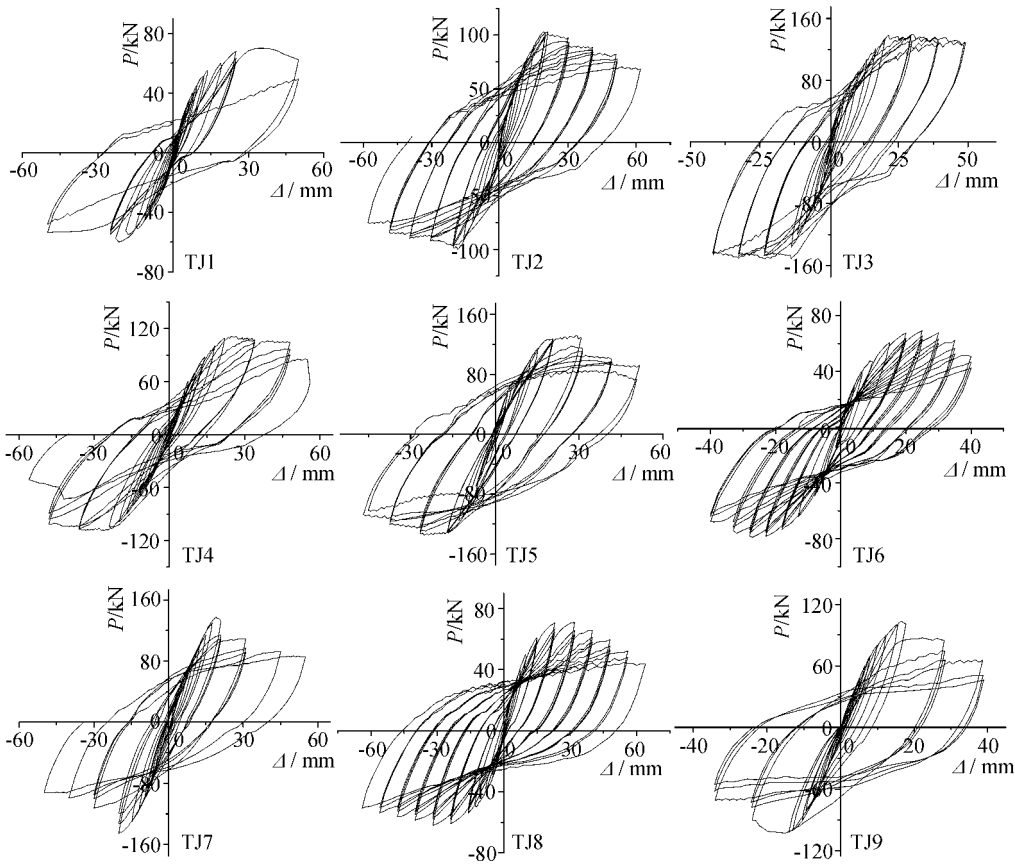


图 3 试件荷载-位移滞回曲线

Fig. 3 Loading-displacement hysteretic loops of specimens

通过比较可见, 配实腹钢板的 TJ8 节点试件的核心区发生了剪切斜压破坏, 其滞回曲线明显较空腹式配钢节点试件 TJ1 和 TJ6 的滞回曲线饱满, 并且配实腹钢板节点的滞回曲线类似于纯钢构件, 但由于滑移的存在, 其形状介于梭形与倒 S 形之间. 总体而言, 型钢混凝土异形柱框架节点的滞回曲线要较普通混凝土异形柱节点^[8]的滞回曲线饱满, 说明其耗能能力较强, 具有较好的抗震性能.

2.2 骨架曲线

骨架曲线是 $P-\Delta$ 滞回曲线中每一级荷载的第一次循环的峰点所连成的外包线. 各试件的骨架曲线如图 4 所示. 从图中可以看出, SRC 异形柱框架节点骨架曲线的下降段较为平缓, 说明其变形能力较强, 延性好. 另外由于型钢的存在, SRC 异形柱节点的骨架曲线上没有明显的拐点, 其屈服是一个从局部到整体逐渐发展的过程. 虽然配实腹钢板试件的轴压比较空腹式配钢的试件大, 但其下降段更为平缓, 后期变形能力较空腹式配钢试件明显要好, 即延性优于后者. 说明 SRC 异形柱节点中钢材的配置对其延性起非常重要的作用.

2.3 承载力及延性

试验所得各试件的承载力及相应的位移列于表 2, 其中 P_{cr} 表示开裂荷载, P_y 表示屈服荷载, P_u 表示极限荷载, P_m 表示破坏荷载 (取荷载下降到 85% 极限荷载时对应的值), Δ_{cr} 、 Δ_y 、 Δ_u 、 Δ_m 分别为相应的位移.

结构或构件要通过其塑性变形来消耗地震能量以达到抗震的目的. 延性是衡量结构或构件变形能力的重要指标. 通常用延性系数来反映延性的大小. 位移延性系数 μ 的计算公式如下:

$$\mu=\frac{\Delta_m}{\Delta_y}$$

(1)

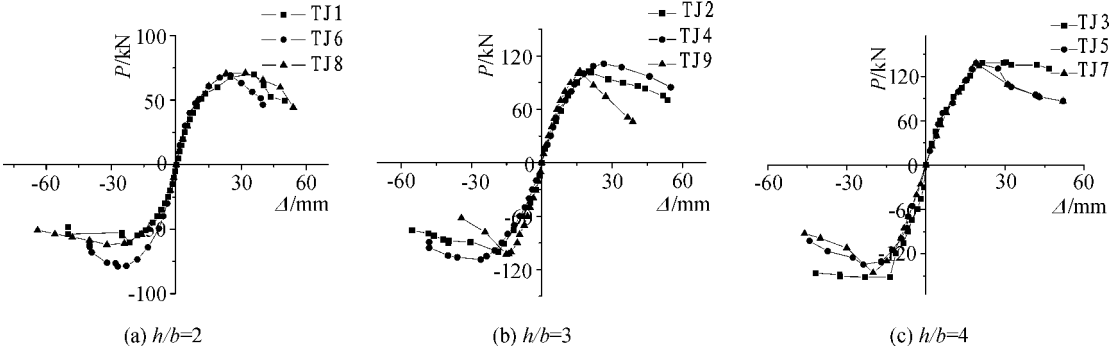


图 4 试件骨架曲线 (h/b 表示柱截面肢高肢厚比)

Fig. 4 Skeleton curves of specimens
(h/b —the ratio of the column limb height to thickness)

计算所得本次试件的延性系数列于表 2.

表 2 各受力阶段试件的荷载、位移和延性系数

Tab. 2 Load, displacement and ductile coefficient of specimens at different stages

Specimen label	Loading direction	P_{α}/kN	$\Delta_{\alpha}/\text{mm}$	P_{β}/kN	Δ_{β}/mm	P_{γ}/kN	$\Delta_{\gamma}/\text{mm}$	P_m/kN	Δ_m/mm	μ
TJ1	Positive	30.0	5.12	53.9	13.2	79.2	31.0	59.6	43.1	3.26
	Negative	30.0	5.28	46.0	11.4	60.1	21.6	51.1	50.0	4.38
TJ2	Positive	60.0	8.32	85.2	13.5	102.7	21.1	87.3	43.2	3.19
	Negative	60.0	8.51	73.8	11.7	100.1	18.5	85.1	48.0	4.11
TJ3	Positive	75.0	7.65	94.2	11.0	138.6	21.3	127.2	48.1	4.37
	Negative	75.0	5.29	95.6	7.46	147.6	14.6	144.0	42.0	5.63
TJ4	Positive	40.0	4.92	85.9	13.6	111.1	25.0	94.4	50.0	3.70
	Negative	40.0	5.41	82.2	15.0	108.8	26.0	92.5	49.4	3.27
TJ5	Positive	55.0	4.60	96.4	12.3	131.4	28.8	111.7	36.9	3.00
	Negative	55.0	5.10	104.6	10.5	134.6	25.2	114.4	41.8	3.97
TJ6	Positive	40.0	6.30	46.5	9.49	69.3	25.0	58.9	36.2	3.82
	Negative	40.0	6.00	58.5	11.1	78.4	23.0	68.0	39.0	3.51
TJ7	Positive	55.0	5.59	96.6	9.54	137.9	16.8	117.2	25.2	2.68
	Negative	55.0	5.11	117.3	11.1	145.7	18.8	123.9	25.4	2.29
TJ8	Positive	35.0	6.09	58.5	13.8	71.0	32.0	60.4	47.2	3.42
	Negative	35.0	6.18	50.0	12.6	60.2	32.0	52.7	59.0	4.68
TJ9	Positive	40.0	4.26	80.8	10.1	102.9	16.3	87.8	26.6	2.64
	Negative	40.0	3.53	76.4	8.63	102.8	15.1	87.4	24.3	2.82

由表 2 可以看出, 本次试验中 9 个节点试件位移延性系数的平均值为 3.60, 高于普通钢筋混凝土节点位移延性系数的平均值 2.0^[9]. 这主要是由于型钢的存在改善了构件的延性. 但又由于 T 形柱截面面积减小, 其延性系数略低于普通矩形截面型钢混凝土节点的延性系数 4.0^[1]. 同时可以看出, 试件的延性与配钢形式有很大关系, 配置实腹钢板的试件较其他构件的延性系数要高. 但 TJ7、TJ9 试件在制作时由于焊接质量问题, 导致构件在加载过程中因焊缝拉裂而破坏, 故其延性系数较其他构件低得多.

2.4 耗能能力

结构或构件的耗能能力是指其在反复荷载作用下吸收能量的大小, 它可以用结构或构件的荷载-变形曲线所包围的面积来衡量. 试件的耗能能力通常用等效粘滞阻尼系数 h_e 表示:

$$h_e=\frac{S_{(AB\bar{C}D\bar{A})}}{2\pi\cdot S_{(OBE+ODF)}}$$

(2)

其中: $S_{(AB\bar{C}D\bar{A})}$ 表示滞回环面积; $S_{(OBE+ODF)}$ 表示与滞回环上下顶点相对应的三角形面积, 如图 5 所示. 利用 Origin 数据分析软件及 AutoCAD 绘图软件计算出滞回环面积并计算出各试件屈服、极限、破坏阶段的等效粘滞阻尼系数 h_{ey} 、 h_{eu} 、 h_{em} , 结果列于表 3.

表 3 型钢混凝土异形柱框架边节点等效粘滞阻尼系数

Tab. 3 Equivalent viscous damping coefficient for T-shaped column-beam joints

Specimen label	TJ1	TJ2	TJ3	TJ4	TJ5	TJ6	TJ7	TJ8	TJ9
h_{ey}	0.089	0.091	0.104	0.069	0.090	0.082	0.070	0.093	0.067
h_{eu}	0.218	0.131	0.217	0.184	0.199	0.124	0.130	0.160	0.121
h_{em}	0.202	0.294	0.269	0.198	0.293	0.208	0.231	0.256	0.276

由表 3 可以看出, 在极限荷载时, 等效粘滞阻尼系数在 0.15 左右, 破坏荷载时, 等效粘滞阻尼系数基本都大于 0.2, 部分接近 0.3, 而普通钢筋混凝土节点的等效粘滞阻尼系数在 0.1 左右^[9], 由此可以说明, SRC 异形柱框架节点具有较好的耗能能力.

2.5 刚度退化规律

构件的刚度退化是指刚度随着加载循环次数的增加以及位移接近限值而不断下降. 根据试验得到的滞回曲线可知, 加载和卸载刚度都会随位移的增加而逐渐退化. 为研究构件的刚度退化规律, 定义每级滞回环正向卸载点与卸载到荷载为零点连线的斜率即为卸载刚度 K , 卸载时对应的位移为 Δ , K_1 为正向卸载刚度, K_2 为负向卸载刚度; Δ_1 为正向卸载位移点, Δ_2 为负向卸载位移点. 为便于比较, 将坐标系无量纲化^[10], 以卸载刚度 K 与构件初始加载刚度 K_0 的比值作为纵坐标, 以卸载位移 Δ 与构件的极限位移 Δ_u 的比值作为横坐标. 通过回归分析得出正向卸载刚度 K_1 与负向卸载刚度 K_2 的退化规律, 以及 K/K_0 与 Δ/Δ_u 的关系曲线图, 如图 6 和图 7 所示.

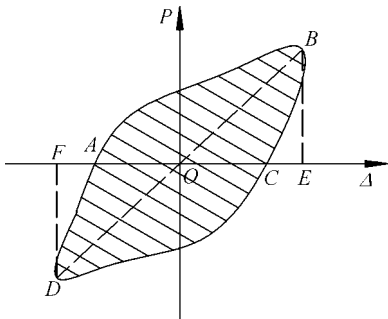


图 5 P-Δ 滞回环
Fig. 5 P-Δ hysteretic loop

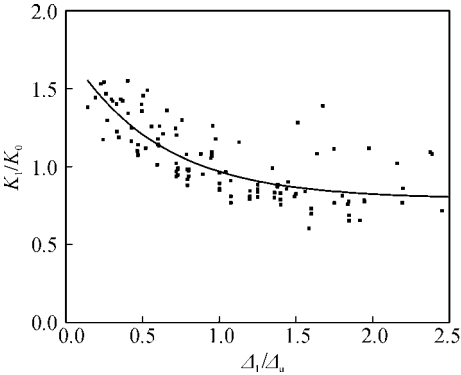


图 6 正向卸载刚度 K_1 退化规律曲线
Fig. 6 Degeneration of stiffness K_1

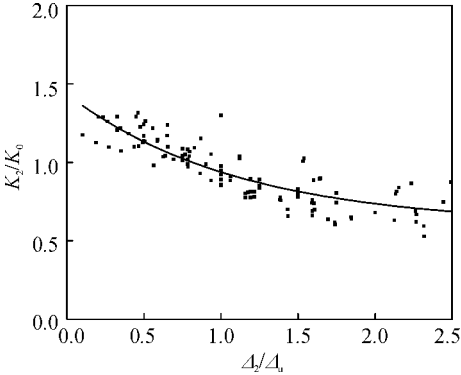


图 7 负向卸载刚度 K_2 退化规律曲线
Fig. 7 Degeneration of stiffness K_2

采用 Origin 数据处理软件可以得到指数拟合的回归方程. 其中正向卸载刚度 K_1 退化方程的方差为 0.021 9, 负向卸载刚度 K_2 退化方程的方差为 0.010 3.

正向卸载刚度退化曲线为:

$$K_1/K_0=0.790\,58+0.969\,29e^{(-1.688\,96\Delta_1/\Delta_u)}$$

(3)

负向卸载刚度退化曲线为:

$$K_2/K_0=0.599\,46+0.835\,99e^{(-0.903\,80\Delta_2/\Delta_u)}$$

(4)

2.6 节点剪切变形分析

节点核心区的变形主要为剪切变形, 它与节点的配箍率、混凝土强度、轴压比等因素有关, 对于型钢

混凝土结构,还与试件的配钢形式有关.节点剪切变形的大小以节点区的剪切角 γ 来表示.通过测量核心区对角线长度的变化可以计算出剪切角:

$$\gamma=\alpha_1+\alpha_2=\frac{\sqrt{a^2+b^2}}{2ab}(a_1+a_2+b_1+b_2)$$

(5)

式中, a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 分别为节点核心区两对角线的伸长量或缩短量,如图 8 所示.其中 a_1 、 a_2 伸长时为正, b_1 、 b_2 缩短时为正,反之为负.

图 9 给出了采用空腹式配钢的试件 TJ5 和采用实腹式配钢试件 TJ9 两个较典型节点的荷载—剪切变形滞回曲线.从中可以看出,在初裂前,节点核心区剪切变形较小.初裂过后,核心区所受约束变小,变形发展较快,裂缝集中,特别是型钢屈服以后,核心区剪切变形迅速增大.一方面,由于实腹式配钢的 SRC 异形柱框架边节点 TJ9 内不仅有型钢翼缘框,还配置了箍筋,对混凝土的约束较强且能承担部分剪力,这样就限制了核心区剪切变形的发展;而空腹式配钢的 SRC 异形柱框架边节点 TJ5 内只有槽钢和钢缀条,节点核心区初裂以后,钢缀条对混凝土的约束较小,变形发展较快,造成加载后期核心区混凝土大块剥落,因此 TJ5 试件的剪切变形能较 TJ9 试件大.另一方面,由于采用空腹式配钢的 TJ5 试件发生的是梁端弯剪破坏,其滞回环较为丰满,甚至所包围的面积略大于配实腹钢板.因节点区焊缝拉裂导致梁根失效破坏的 TJ9 试件,显示出较好的抗剪性能.

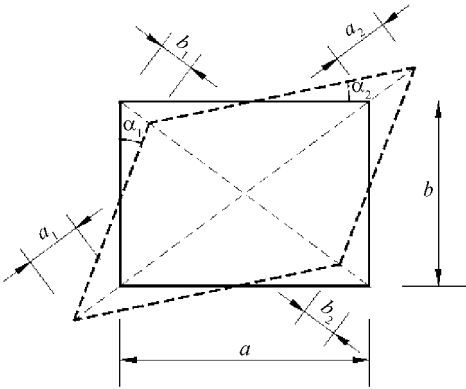


图 8 节点核心区剪切变形
Fig. 8 Shear deformation of joint core

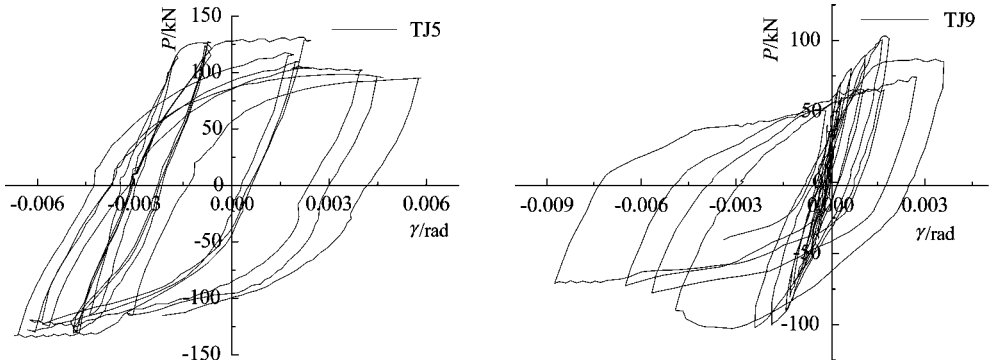


图 9 水平荷载-剪切变形滞回曲线
Fig. 9 Load-shear deformation of joint core

3 结 论

- 通过 9 个 SRC 异形柱框架边节点的低周反复荷载试验及其综合分析,得出以下主要结论:
- (1) SRC 异形柱框架边节点的滞回曲线正反方向对称,滞回环较饱满.骨架曲线下降比较平缓,强度降低较小.
 - (2) 试件承载力高,延性好,耗能力强,各项指标均优于普通钢筋混凝土节点,表明型钢混凝土异形柱节点的抗震性能好.
 - (3) 通过对试验数据进行回归分析,得到了刚度退化曲线方程,为建立 SRC 异形柱框架边节点的恢复力模型奠定了基础.
 - (4) 空腹式配钢的型钢混凝土异形柱框架边节点核心区受约束小,其剪切变形比实腹式配钢节点的大.

参考文献 References

[1] 赵鸿铁. 钢与混凝土组合结构[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
ZHAO Hong-tie. Steel-concrete Composite Structures[M]. Beijing: Science Press, 2001.

- [2] 陈宗平, 薛建阳, 赵鸿铁, 等. 低周反复荷载作用下型钢混凝土异形柱的抗剪承载力分析[J]. 土木工程学报, 2007, 40(7): 30-36.
CHEN Zong-ping, XUE Jian-yang, ZHAO Hong-tie, et al. Analysis on the shear capacity of irregularly-shaped steel reinforced concrete columns under cyclic reversed loading[J]. China civil engineering journal, 2007, 40(7): 30-36.
- [3] 陈宗平, 薛建阳, 赵鸿铁. 型钢混凝土异形柱的受剪机理及承载力影响因素分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(4): 450-456.
CHEN Zong-ping, XUE Jian-yang, ZHAO Hong-tie. Analysis on the mechanism and shearing capacity influence factors of steel reinforced concrete special-shaped columns[J], J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2008, 40(4): 450-456.
- [4] CHEN Wai-Fah. Tests of beam to column web moment connections[J]. Journal of ASCE, 1985, 106(5): 764-771.
- [5] 万云芳. 低周反复荷载作用下钢骨混凝土 T 形柱节点抗震性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2006.
WAN Yun-fang. Study on the seismic behaviors of SRC T-shaped column-beam joint under low cyclic reversed loading[D]. Nanning: Guangxi University, 2006.
- [6] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. Principles and analysis of reinforced concrete[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [7] 刘义. 型钢混凝土异形柱框架节点抗震性能及设计方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
LIU Yi. Research on seismic performance and design method of steel reinforced concrete special-shaped column-beam joints[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.
- [8] 陈昌宏, 单建, 马乐为, 等. 钢筋混凝土异形柱框架节点抗震性能试验[J]. 工业建筑, 2007, 37(2): 6-10.
CHEN Chang-hong, SHAN Jian, MA Le-wei et al. Aseismic Performance Experiment on the Special-Shaped Column Frame Structures Joints of Reinforced Concrete. Industrial Building[J]. 2007, 37(2): 6-10.
- [9] 唐九如. 钢筋混凝土框架节点抗震[M]. 南京: 东南大学出版社, 1989.
TANG Jiu-ru. Seismic Behavior of Reinforced Concrete Joints[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1989.
- [10] 郭子雄, 张志伟, 黄群贤, 等. 型钢混凝土柱恢复力模型试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(5): 79-85.
GUO Zi-xiong, ZHANG Zhi-wei, HUANG Qun-xian, et al. Experimental study on hysteretic model of SRC column[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 79-85.

Study on mechanical behaviors of steel reinforced concrete T-shaped column-beam joints

XUE Jian-yang^{1,2}, WANG Wei¹, LIU Yi¹, LIU Zu-qiang¹, ZHAO Hong-tie^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China (XAUAT), Xi'an 710055, China)

Abstract According to the experimental study on 9 specimens of steel reinforced concrete (SRC) T-shaped column-beam joints under low cyclic reversed loading, the influence of the steel layout and the axial compression ratio on the failure process and patterns were analyzed, and the load-displacement hysteretic loops and skeleton curves are obtained. Based on the experimental results, the mechanical properties of the joints such as the load bearing capacity, ductility, energy dissipation, and the stiffness degeneration are studied. It is shown that the hysteretic hoops of the steel reinforced concrete T-shaped column-beam joints are plump. The joints have high bearing capacity, good ductility and energy dissipation capacity, which perform excellent seismic behaviors.

Key words: steel reinforced concrete; special-shaped column; edge joint; quasi-static test; mechanical behavior