

型钢混凝土异形柱框架角节点的承载力及其有限元分析

赵鸿铁^{1,2}, 武启明¹, 薛建阳^{1,2}, 刘 义¹

(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:为了研究型钢混凝土异形柱框架角节点的抗震性能,进行了四个模型试件的低周反复荷载试验.结果表明,型钢混凝土异形柱框架角节点的滞回曲线饱满,抗震性能良好.在试验研究的基础上,通过有限元软件 ABAQUS 对试件进行了模拟分析,并与试验结果进行对比.二者符合较好.进而对承载力的影响因素进行了分析.结果表明:在一定范围内,轴向压力能提高试件的抗剪承载力;随着配钢率的增大,试件的抗剪承载力逐渐增大,在轴压比较小时,抗剪承载力增幅较大,当轴压比较大时,抗剪承载力增幅较小;水平荷载合力作用点的位置对试件的抗剪承载力影响较小.

关键词:型钢混凝土;异形柱;节点;有限元分析;承载力

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)01-0001-06

钢筋混凝土异形柱的截面主要采用 L 形、T 形和十字形,其柱肢厚度与框架填充墙一致.然而,特殊的柱截面形状导致了钢筋混凝土异形柱结构受力情况更为复杂,承载能力低,抗震性能较差.文献[1]中对钢筋混凝土异形柱结构适用的房屋最大高度的规定值较小.这些都限制了其在抗震设防高烈度区及高层建筑中的应用.在钢筋混凝土异形柱结构中配置型钢,形成型钢混凝土异形柱结构就可以很好的克服上述缺点,明显改善结构的受力性能与抗震性能.梁柱节点是异形柱框架结构的关键部位.国内对型钢混凝土异形柱框架节点的研究还处于起步阶段.广西大学^[4-5]和西安建筑科技大学^[6]等高校对型钢混凝土异形柱框架边节点进行了试验研究和抗剪承载力分析.对于受力更为复杂的角节点则研究较少.为了研究型钢混凝土异形柱框架角节点的抗震性能,本文进行了四个模型试件的低周反复荷载试验,并通过 ABAQUS 有限元软件进行了模拟分析.

1 试验简介

1.1 试件设计及制作

设计了 LJ-1、LJ-2、LJ-3 和 LJ-4 共 4 个试件,以肢厚均为 240 mm 的异形柱框架节点为原型,按 1/2 缩尺比制作.其中试件 LJ-1、LJ-2 和 LJ-3 为型钢混凝土异形柱与型钢混凝土梁组成的节点,试件 LJ-4 为型钢混凝土异形柱与钢筋混凝土梁组成的节点.试件尺寸及配钢、配筋形式如图 1 所示(其中括号内数值对应于试件 LJ-1 和 LJ-4).柱中配置的纵向钢筋均为 $\Phi 6$ 的圆钢,箍筋采用 8# 铁丝.箍筋间距为 100 mm,在靠近核心区 200 mm 范围内加密,间距为 50 mm.柱截面配槽钢的试件,槽钢和槽钢之间通过 $\Phi 8$ 圆钢进行连接,节点核心区采用 $\Phi 12$ 圆钢进行连接.梁中箍筋均为 $\Phi 8$ 圆钢,间距为 100 mm,且在梁根部和梁端部加密,间距为 50 mm.节点核心区中和梁翼缘对应高度处焊接厚度为 16 mm 的加劲肋.试件 LJ-1、LJ-3 中梁纵筋分别采用 $\Phi 18$ 和 $\Phi 12$ 钢筋,试件 LJ-2 和 LJ-4 中梁纵筋采用 $\Phi 20$ 钢筋.实测混凝土立方体抗压强度为 43.7 MPa.试件设计参数见表 1.钢筋和钢板材料性能见表 2.

收稿日期:2009-09-21 修改稿日期:2010-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50978217)

作者简介:赵鸿铁(1939-),男,教授,主要从事钢筋混凝土结构、组合结构、工程结构抗震、古建筑等领域方面研究.

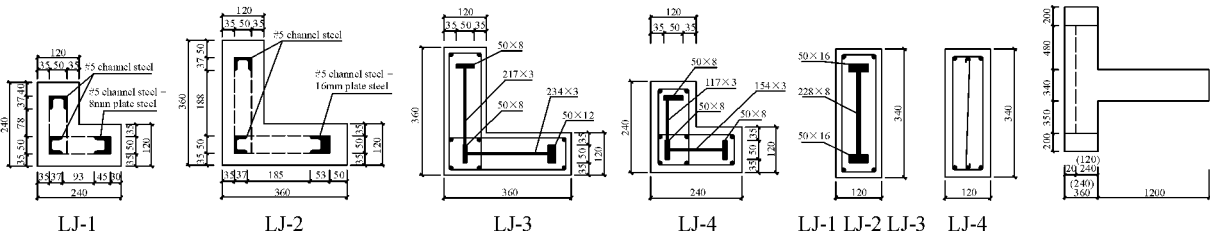


图 1 试件尺寸及配筋配钢形式

Fig. 1 Details of specimens

表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of specimens

Specimen ID	n	h/b	$\rho_{ss}/\%$	Beam type
LJ-1	0.2	2	6.1	SRC
LJ-2	0.4	3	5.0	SRC
LJ-3	0.2	3	3.9	SRC
LJ-4	0.4	2	4.4	RC

Notes: ① Axial compression ratio $n = N/(f_c A)$, N —axial compression force, A —cross section area. ② h/b —Ratio of limb length to thickness. ρ_{ss} —section steel rate of longitudinal shape steel.

表 2 钢材材料性能

Tab. 2 Mechanical property of reinforcement and steel

Steel ID/mm	E_s/MPa	f_y/MPa	f_u/MPa
6	1.944×10^5	551	674
8	1.921×10^5	441	543
12	1.970×10^5	295	440
—3.5	1.676×10^5	296	407
—8	1.579×10^5	363	503

Notes: ① E_s —modulus of elasticity. ② f_y —yield stress. ③ f_u —ultimate stress.

1.2 加载制度

为了更好地模拟构件真实的受力情况,采用柱顶加载方案.柱两端为铰接,两铰间的距离为 1 637.5 mm.梁端采用竖向链杆约束,梁端铰到下柱铰的水平距离为 1 328 mm.首先施加竖向荷载至预定值,竖向力的合力作用点均沿 L 形截面形心.然后施加水平反复荷载,试件 LJ-1 和 LJ-4 的水平力沿着 L 形截面形心,而试件 LJ-2 和 LJ-3 的水平力沿着 L 形截面形心.试件屈服前采用力控制加载,试件屈服后采用位移分级加载.

1.3 试验结果

由试验测得的荷载-柱顶位移滞回曲线如图 2 所示.可以看出,型钢混凝土异形柱框架角节点的抗剪承载力较高而且滞回曲线饱满,耗能能力良好.由于施加竖向荷载时梁端存在约束,使得试件在施加水平荷载之前梁中已有一定的荷载作用,所以可以看到试件正向加载和反向加载的极限承载力有一定差异.在同为空腹式配钢的柱与同为型钢混凝土梁组成的节点中,肢高肢厚比大的试件 LJ-2 的极限承载力较肢高肢厚比小的试件 LJ-1 提高幅度较大.还可以看到,试件 LJ-3 的极限承载力较 LJ-4 提高幅度较小.试验结束后,砸开 LJ-3 节点核心区混凝土,发现加劲肋与柱翼缘的焊缝拉裂,导致加劲肋传力能力下降.

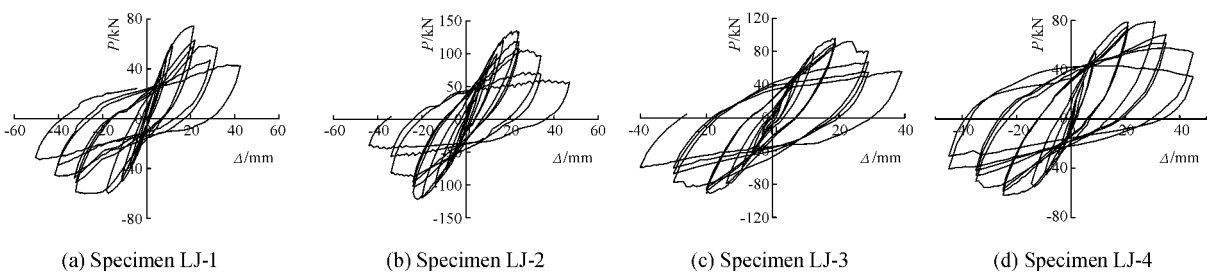


图 2 试件的滞回曲线

Fig. 2 Load-displacement hysteretic curves

2 有限元分析

2.1 模型建立

采用 ABAQUS 非线性有限元软件对试验试件进行了分析. 混凝土采用 C3D20R 实体单元, 型钢采用在厚度方向上分布了 9 个 Simpson 积分点的 S4R 壳单元, 梁柱中的纵向钢筋和箍筋采用 B31 梁单元. 型钢和钢筋采用 embed 方式嵌入混凝土中. 由于节点区翼缘框对混凝土具有较强的约束, 因此不考虑混凝土和型钢以及钢筋之间的滑移^[7]. 在计算过程中, 型钢和钢筋单元的节点位移通过与其相连的外围混凝土单元节点的位移插值得到. 混凝土采用塑性损伤本构模型, 应力-应变关系采用《混凝土结构设计规范》(GB50010-2002)推荐的应力-应变曲线, 型钢和钢筋采用理想弹塑性本构模型. 为防止应力集中, 分别在柱顶、柱底和梁端设置传力垫板. 边界条件和荷载均施加在与传力垫板建立耦合约束的参考点上. 整个分析过程分为两个分析步, 第一步在柱顶施加竖向压力, 第二步在柱头施加水平位移荷载. 通过提取柱顶传力垫板参考点的水平位移和水平反力, 得到整个受力过程模型的荷载-位移曲线.

2.2 有限元分析结果

滞回曲线各峰值点相连得到的曲线称为骨架曲线. 通过有限元分析的结果与试件骨架曲线的对比 (如图 3 所示) 可以看出, 试件分别受正向荷载和反向荷载时有限元分析的极限承载力略有差异. 由试验和有限元分析得到的极限荷载如表 3. 试件 LJ-3 在试验的过程中加劲肋焊缝拉裂导致承载能力下降, 所以实测的极限承载力无论是正向加载还是反向加载都比有限元分析的结果稍低. 以上表明有限元分析的结果较为合理. 由有限元分析结果还可看到, 随着水平位移的增大, 试件水平荷载下降的趋势不太明显. 这是因为试验的过程中核心区混凝土在反复加载作用下损伤明显, 而有限元分析时采用的是单向加载, 没有考虑混凝土的损伤. 这就造成有限元分析的荷载-位移曲线的下降段与试验结果的差异.

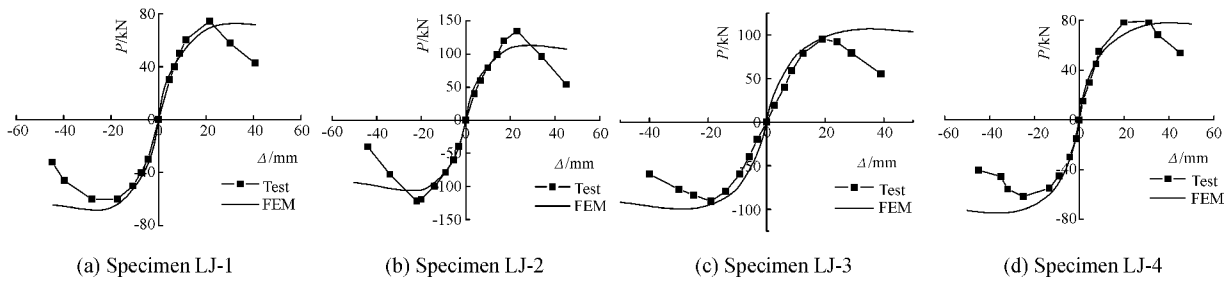


图 3 荷载-位移曲线对比
Fig. 3 Comparison of load-displacement curves

表 3 极限荷载实测值与有限元分析值的比较
Tab. 3 Comparison of testing results with FEM results

Specimen ID	Direction of loading	P_u^{exp} / kN	Average value / kN	P_u^{cal} / kN	Average value / kN	$\frac{P_u^{cal} - P_u^{exp}}{P_u^{exp}} \times 100 / \%$
LJ-1	positive	74.4	67.3	72.5	70.5	4.8
	negative	60.1		68.4		
LJ-2	positive	135	128.5	113.3	109.7	14.6
	negative	122		106.1		
LJ-3	positive	95.7	93.4	107.4	103.6	10.9
	negative	91.0		99.8		
LJ-4	positive	79.2	70.5	78.0	76.5	8.5
	negative	61.7		74.9		

Notes: ① P_u^{exp} —experimental ultimate load. ② P_u^{cal} —calculating ultimate load.

经有限元分析得到的试件 LJ-3 的变形图如图 4 所示. 因为水平荷载作用在试件 LJ-3 的 L 形截面的形心处而不是作用在截面的剪心, 所以试件变形时柱子会伴有一定的扭转, 这与试验实测试件 LJ-3

的变形情况相一致. 以上说明有限元模型的约束施加正确.

图 5(a),(b)给出了试件 LJ-3 达到极限荷载时节点核心区混凝土和型钢的主应力矢量图,用它可以分析节点核心区的受力机理. 图(a)用红色代表混凝土的最小主应力. 由图可见,核心区对角线及其两侧的混凝土最小主应力方向基本一致,形成了一个有一定分布宽度的斜向压杆. 由于在试件达到极限荷载时,节点核心区对角线的混凝土变形较大,其应力已经超过了所选用的应力-应变曲线上的峰值应力,而对角线两侧的混凝土逐渐达到峰值应力. 所以斜向压杆两边的最小主应力比中间的稍大. 图 5(b)为核心区型钢腹板的主应力图. 由于型钢采用壳单元,所以图中 S, Max. Principal 代表最大主应力,S, Mid. Principal 代表最小主应力. 由图可以看出主应力方向与加载方向基本成 45°且相互垂直,说明型钢腹板受剪明显. 图 5(c)为试件 LJ-3 节点核心区型钢腹板的 von mises 应力云图. 节点核心区型钢腹板的屈服强度为 296MPa. 在试件达到极限荷载时,节点核心区型钢腹板已完全屈服,而其他部分型钢应力较小,证明有限元模型在达到极限荷载时节点核心区破坏严重. 以上可以表明有限元模型正确,能够客观反映节点核心区受力状态,可以用于其他工况下的模拟.

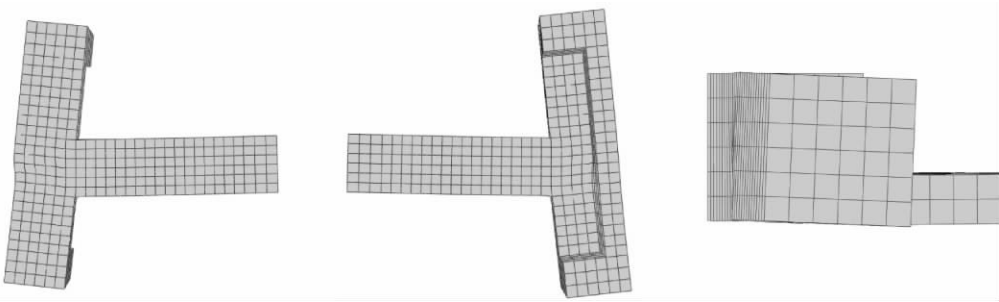


图 4 试件 LJ-3 变形图
Fig. 4 Deformation of specimen LJ-3

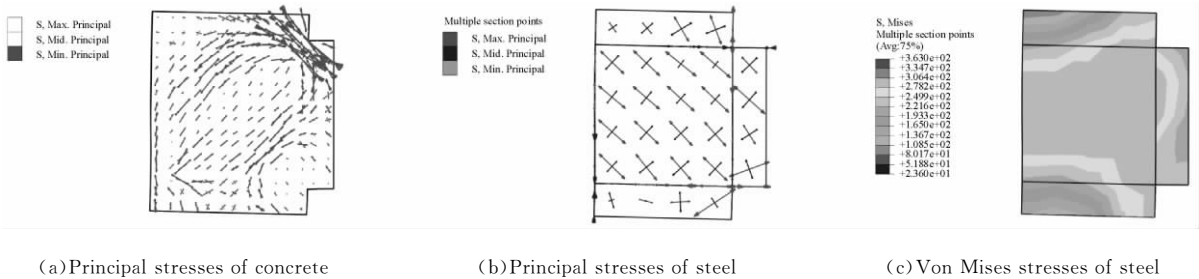


图 5 试件 LJ-3 应力图
Fig. 5 Stresses of specimen LJ-3

3 参数分析

为了分析节点核心区配钢率和轴压比对节点抗剪承载力的影响,分别对四个试件在轴压比为 0.2、0.4、0.6、0.8 和试件 LJ-3 和 LJ-4 节点核心区型钢腹板为 3 mm、5 mm 和 7 mm 的情况进行了分析. 结果见图 6. 图中极限荷载代表正向加载与反向加载有限元分析结果的平均值.

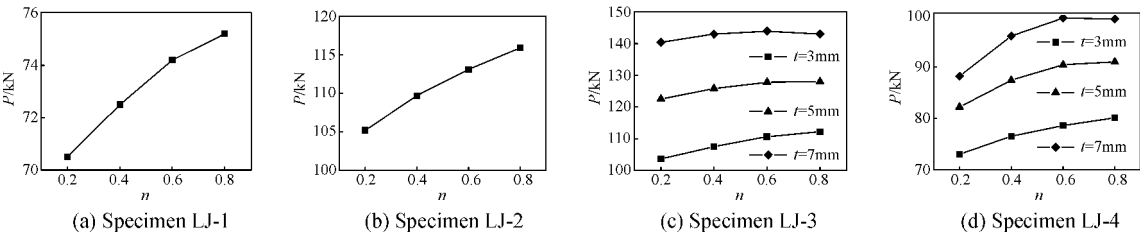


图 6 参数分析
Fig. 6 Parameter analysis

3.1 轴压比

由图 6 可见,随着轴压比的提高,试件的极限荷载均有所提高.但是在轴压比一定范围内,极限荷载随轴压比的增大增长较小,甚至在轴压比超过 0.6 时极限荷载还会下降.

3.2 配钢率

同样由图 6 可见,对于试件 LJ-3 和 LJ-4,增大节点核心区的配钢率均可以大幅提高节点的抗剪承载力.这表明,对于配实腹式型钢的型钢混凝土异形柱框架节点,核心区主要通过型钢腹板承担剪力.随着节点核心区配钢率的增加,试件抗剪承载力的提高程度略有减小.

3.3 水平荷载合力作用点位置

为了研究水平荷载合力作用点位置对节点抗剪承载力的影响,分别对四个试件施加经过截面形心和截面剪心的水平荷载的情况进行了分析.有限元分析的结果见表 4.

表 4 水平荷载合力作用点位置对节点极限承载力的影响
Tab. 4 The influence of horizontal load position on ultimate capacity

Specimen ID	Direction of loading	P_u^i /kN	P_u^s /kN	$\frac{P_u^i - P_u^s}{P_u^i} \times 100/\%$
LJ-1	Positive	72.5	71.5	1.4
	Negative	68.4	66.0	3.5
LJ-2	Positive	114.4	113.3	1.0
	Negative	109.6	106.1	3.2
LJ-3	Positive	108.6	107.4	1.1
	Negative	102.8	99.8	2.9
LJ-4	Positive	78.0	77.6	0.5
	Negative	74.9	72.7	2.9

Notes: ①—horizontal load along shear center, ②—horizontal load along section center.

由表 4 可以看到,试件的水平荷载通过截面形心时的抗剪承载力略小于水平荷载通过截面剪心时的抗剪承载力.这是由于试件在遭受经过截面形心的水平荷载时,节点核心区受剪的同时伴随有扭转的发生.在剪力和扭矩的共同作用下,节点核心区的抗剪承载力略有下降.总体来说,正向加载时试件抗剪承载力下降的幅度比反向加载时抗剪承载力的下降要大.

4 结 论

本文通过对四个型钢混凝土异形柱框架角节点试件的试验研究和有限元模拟,得到以下结论:

- 1)型钢混凝土异形柱框架角节点滞回曲线饱满,抗震性能较好.
- 2)通过对试验结果与有限元结果的对比,证明了有限元模型的正确性.它能客观反映节点核心区的实际受力情况,可以用于各种工况下的模拟.
- 3)分析了轴压比、配钢率以及水平荷载合力作用位置对节点核心区抗剪承载力的影响.结果表明,轴压比在一定范围内能提高试件的抗剪承载力,但是当轴压比超过 0.6 时试件的抗剪承载力会下降;随着配钢率的增大,试件的承载力逐渐增大.当低轴压比较低时,承载力增幅较大,当轴压比较高时,承载力增幅较小;水平荷载合力作用点的位置对抗剪承载力影响较小.

参考文献 References

[1] JGJ 149-2006, 混凝土异形柱结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
JGJ149-2006, Technical specification for concrete structures with speaially shaped columns[S]. Beijing: China Building Press, 2006.

[2] 李中立. 反复荷载作用下钢筋混凝土异形柱框架节点抗剪强度研究[D]. 天津: 天津大学, 1994.
LI Zhong-li. Research on shear strength of reinforced concrete hetero-column frame joint under cyclic loading[D]. Tianjin: Tianjin University, 1994.

- [3] 曹祖同,陈云霞,吴 戈,等.钢筋混凝土异形柱框架节点强度的研究[J].建筑结构,1999,29(1):42-46.
CAO Zu-tong, CHEN Yun-xia, WU Ge, et al. Research on shear strength of reinforced concrete beam to special-shaped column joints[J]. Building structure, 1999, 29(1): 42-46.
- [4] 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 behavior of joints between SRC special-shaped columns and reinforced beams under low cyclic reversed loading[D]. Nanning: Guangxi University, 2006.
- [5] 向 平.钢骨混凝土异形柱钢筋混凝土梁节点低周反复荷载试验研究[D].南宁:广西大学,2006.
XIANG Ping. Experiment research on joints of steel reinforced concrete special-shaped column and reinforced concrete beam under low cyclic reversed loading[D]. Nanning: Guangxi University, 2006.
- [6] 百中山.型钢混凝土异形柱框架节点抗剪受力性能理论研究[D].西安:西安建筑科技大学,2008.
BAI Zhong-shan. Theoretical study on shearing properties of SRC special-shaped column frame joint[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2008.
- [7] 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 and concrete composite structure [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [8] 胡秀杰.型钢混凝土异形柱框架角节点抗震性能试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2009.
HU Xiu-jie. Experimental study on the seismic behaviors of corner joint in steel reinforced concrete special-shaped column frame[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2009.
- [9] 赵鸿铁,姜维山,周小真,等.劲性配筋混凝土梁柱节点[J].西安冶金建筑学院学报,1988,20(2):31-39.
ZHAO Hong-tie, JIANG Wei-shan, ZHOU Xiao-zhen, et al. Column-Beam joint in steel reinforced concrete[J]. Journal of Xi'an Institute of Metallurgy and Construction Engineering, 1988, 20(2): 31-39.
- [10] 庄 苗,张 帆,岑 松,等.ABAQUS 非线性有限元分析与实例[M].北京:科学出版社,2005.
ZHUANG Zhuo, ZHANG Fan, CEN Song, et al. Nonlinear finite element analysis and instance with ABAQUS [M]. Beijing: Science Press, 2005.

Finite element analysis on shear capacity of SRC special-shaped column corner joint

ZHAO Hong-tie, WU Qi-ming, XUE Jian-yang, LIU Yi

(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: In order to study the seismic performance of corner joint in SRC(steel reinforced concrete) special-shaped column frame, tests were carried out on four specimens under low cyclic reversed loading. It is shown that load-displacement hysteretic curves of corner joint in SRC special-shaped column frame are plump. The joint has good seismic performance. Based on the experimental research, finite element analysis software ABAQUS was used to simulate the properties of specimens and the calculating results proved consistent with those of the test. Further more, the factors affecting the shear capacity of specimens have been researched. Results show that the shear capacity of specimens increases with the axial compression ratio in certain extent and the steel ratio in core zone of the joint. The increase of shear capacity of the specimen with lower axial compression ratio is larger than the specimen with higher axial compression ratio. The position of horizontal load point has a minor effect on the shear capacity of specimens.

Key words: steel reinforced concrete; special-shaped column; joint; finite element analysis; shear capacity