

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.06.007



十字形截面钢-混凝土组合异形柱的抗震性能

李艳艳, 张玮天

(河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401)

摘要:为研究十字形截面钢-混凝土组合异形柱的抗震性能,对 5 个不同轴压比、配钢形式的试件进行低周反复加载试验。研究了滞回曲线、骨架曲线、延性性能、刚度退化、耗能性能等抗震性能,对比分析了轴压比和配钢形式对抗震性能的影响。结果表明,轴压比较大的试件具有更高的承载能力,但延性降低、刚度退化速率加快;与普通钢筋混凝土异形柱相比,在异形柱内配置型钢可改善滞回性能、增强刚度、延性性能、承载能力和耗能性能,减轻破坏程度,从而提高抗震性能。配钢形式为 T 形钢加方钢管的试件除刚度退化外,其他性能均优于实腹型配钢试件。

关键词:十字形截面;组合异形柱;抗震性能;轴压比;配钢形式

中图分类号:TU398 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)06-0054-07

Seismic behavior of steel reinforced concrete cross-shaped columns

Li Yanyan¹, Zhang Weitian¹

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

Abstract: To investigate the seismic behavior of steel reinforced concrete cross-shaped columns, five specimens with different axial compression ratio and form of steel layout were tested under low cyclic loading. Hysteretic curves, skeleton curves, ductility performance, rigidity degeneration, and energy dissipation capacity were analyzed. The effects of axial compression ratio and form of steel layout to specimens were compared and analyzed. The results showed that with axial compression ratio increasing, the bearing capacity of specimens became higher, but the ductility and energy dissipation capacity turn to be lower, and the rate of rigidity degeneration trended to be quicker. Compared with ordinary reinforced concrete cross-shaped columns, the hysteretic behavior of concrete cross-shaped columns reinforced when shape steel was improved, the rigidity, ductility performance, bearing capacity and energy dissipation capacity were enhanced, the degree of failure were alleviated. Therefore, the seismic behavior of steel reinforced concrete cross-shaped columns was improved significantly. The seismic behavior of specimens of T-shaped steel combined with square steel tube was superior to solid-web steel reinforced concrete cross-shaped column except rigidity degeneration.

Keywords: cross-shaped section; steel reinforced concrete columns; seismic behavior; axial compression ratio; form of steel layout

收稿日期:2017-02-05

基金项目:河北省自然科学基金(E2015202035)

作者简介:李艳艳(1979-),女,博士,教授,主要从事工程结构抗震研究,(E-mail)nicole_820@163.com

Received:2017-02-05

Foundation item:Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2015202035)

Author brief:Li Yanyan(1979-), PhD, associate professor, main research interests: earthquake resistance of engineering structure,(E-mail)nicole_820@163.com.

异形柱结构体系是一种新型结构体系,在建筑实体中可根据具体位置的不同而被制作成不同形状,如十字形、T形、L形或其他组合形状,可避免柱子棱角的突出,精简截面尺寸,增加房屋使用面积,同时又继承了普通钢筋混凝土柱布置灵活的优点,中外学者对其的研究已取得一些成果^[1-3]。但在实际应用中,由于减小截面面积,普通钢筋混凝土异形柱常伴有刚度小、承载能力低、抗震性能差等弊端,故近年来中国提出研究钢-混凝土组合异形柱(SRC异形柱),有效的将型钢和混凝土结合在了一起,具有刚度大,延性好,承载能力强,抗震性能好的特点,应用前景良好。目前,对 SRC 异形柱的研究在抗震性能方向已取得了一系列的成果^[4-6],同时,在正截面承载力^[7]、抗剪性能^[8]、刚度^[9-10]、粘结滑移性能^[11]等方面也有研究。而其他国家对钢与混凝土组合结构柱的研究多集中于对钢-混凝土组合矩形柱或圆形柱的加强改进方面,如使用宽翼缘型钢^[12]、对型钢实施混凝土部分包裹^[13-14]等,另外,对偏压^[15]和抗火^[16-17]也有研究。但目前,学者们对多变量下的 SRC 与 RC 十字形截面异形柱抗震性能做对比研究的并不多。鉴于此,有必要开展十字形截面钢-混凝土组合异形柱抗震性能的研究,为工程应用提供理论分析和试验支持。

1 试验概况

设计 5 个 1/2 缩尺的柱肢高为 900 mm 的十字形截面钢-混凝土组合异形柱试件,编号为 SRC1—SRC5。混凝土的设计强度等级为 C40,采用商品混凝土进行一次立浇筑后振捣均匀,预留立方体试块的平均实测抗压强度为 41.1 MPa。纵筋和箍筋均使用 HRB400 级钢筋,配箍特征值均为 0.203,纵筋配筋率均为 3.36%。试验参量为配钢形式和轴压比,试件截面和配筋如图 1 所示,各试件基本信息如表 1 所示,钢筋和钢板材料性能如表 2 所示。

试件由两根锚固螺杆穿过底梁固定在地面上,轴向压力由柱顶的小型液压千斤顶施加,该千斤顶和反力梁之间设有钢板和滚轴,使柱顶能够在被推拉时自由水平运动。水平荷载通过水平固定于反力墙上的液压千斤顶对试件施加。夹具由 4 根螺杆挤压固定于加载端上,活塞与夹具之间由球铰连接。并规定推为正向,拉为负向。试验加载装置如图 2 所示。

表 1 各试件基本信息和配筋、配钢明细

Table 1 Basic design information, bar and steel details of specimens

试件编号	配钢形式	轴压比	型钢含钢率/%	钢板	厚度×宽度
SRC1	普通异形柱	0.24	0		
SRC2	T形钢+方钢管	0.19	5.14	B1	6 mm×60 mm
				B3	6 mm×55 mm
SRC3	T形钢+方钢管	0.24	5.14	B1	6 mm×60 mm
				B3	6 mm×55 mm
SRC4	T形钢+方钢管	0.34	5.14	B1	6 mm×60 mm
				B3	6 mm×55 mm
SRC5	实腹型配钢	0.24	6.26	B1	6 mm×60 mm
				B2	6 mm×258 mm

表 2 钢筋及钢板材料性能

Table 2 Material properties of bar and steel

钢材	直径(厚度)	屈服强度	极限强度
	d/mm	f_y/MPa	f_u/MPa
钢筋	8	440	657
	16	453	628
钢板	5.76	405	538

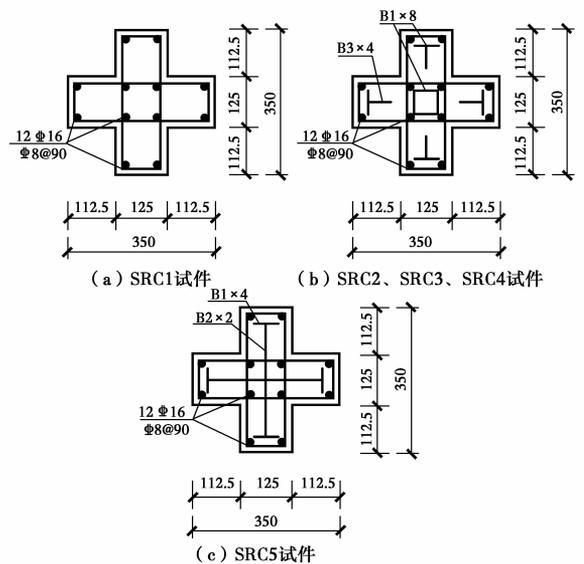


图 1 试件截面

Fig. 1 Sectional view of specimens

2 加载制度

根据《建筑抗震试验方法规程》(GBJ 101—96)规定,试验采用低周反复加载模式,加载制度采用荷载-位移联合控制,加载端的荷载、位移和所有应变

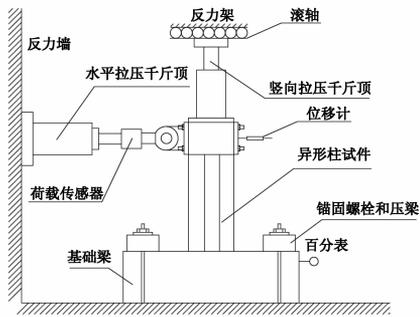


图 2 试验装置

Fig. 2 Test setup

片的应变均由 DH3816 静态电阻应变采集系统进行定时采样而得到。加载制度如图 3 所示。在试验的前期采取力控制加载,荷载步长为 60 kN,循环进行正负向反复加载卸载。直至试件达到屈服点,确定屈服位移 Δy 后,采用位移控制加载,每级增幅为 Δy ,且每级循环 3 次,按此顺序进行分级循环正负向反复加卸载,直至荷载下降到峰值荷载的 85%,即可认为试件破坏。

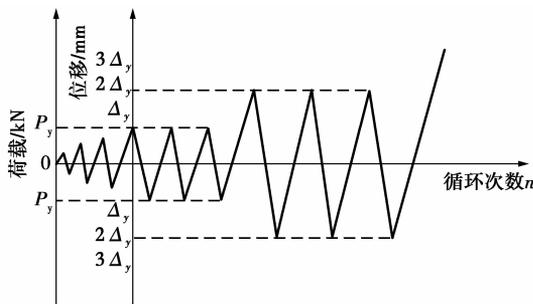


图 3 加载制度

Fig. 3 loading system

3 试验现象

各试件的破坏状态如图 4 所示。

5 个试件均为弯曲破坏。其中, SRC1 试件在 60 kN 处出现第一条微裂缝,屈服后裂缝沿柱高向上出现及延伸较快,并逐渐横向贯通至翼缘,后期柱表面混凝土脱落区高度很大,柱根部钢筋外露及变形严重。试件的最终破坏由纵筋控制,整个破坏过程用时较短。在 SRC2~SRC5 试件中,加载初期试件处于弹性阶段,裂缝出现前,混凝土、钢筋和型钢作为一个整体共同受力,均在 60 kN 左右于柱根处出现第 1 条微裂缝,之后沿柱高向上不断出现横向新裂缝,并形成贯通裂缝并由腹板延伸至翼缘,同时,在柱根部形成塑性铰。荷载继续增加,混凝土逐渐被压溃而退出工作,应力转由纵筋和型钢承担,随后纵

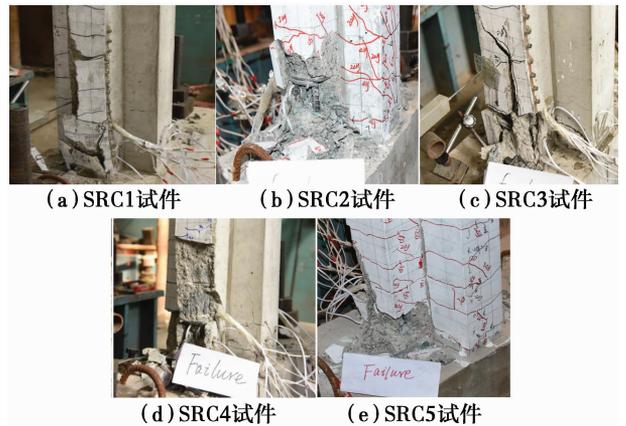


图 4 破坏状态

Fig. 4 Failure pattern

筋先于型钢屈服,柱根部混凝土大面积脱落,箍筋及纵筋外露,并有脆响,应力全部由型钢承担,随着型钢的屈服,不久后试件破坏。型钢对试件破坏起控制作用。各试件破坏时翼缘根部有裂缝,但未见混凝土掉落,柱肢基本完整。

4 试验结果分析

4.1 滞回曲线

滞回曲线是试件抗震性能的综合体现,也是评价抗震性能的重要参考。各钢-混凝土组合异形柱试件的滞回曲线如图 5 所示。

从图 5 可分析出以下结论:

1) 除 SRC1 试件外, SRC2~SRC5 四个配置型钢的试件的滞回曲线基本都呈饱满的梭形并较为对称。试件屈服前为弹性阶段和弹塑性阶段,加卸载曲线所围面积很小,残余变形也很小。随着荷载的增大,试件达到屈服,承载力持续增大,加卸载曲线所围形状逐渐变饱满,残余变形相应增大。达到峰值后,承载力逐渐下降,直至破坏,留下明显的残余变形。随着位移水平和循环次数的增加,加卸载曲线斜率随之减小,表现出刚度退化的特征。对比同一位移水平下的 3 个循环的滞回环,首次循环时试件的强度最大,之后随循环次数的增加而减小,但降低幅度不大,残余变形也未见明显变化。反观 SRC1 普通钢筋混凝土异形柱试件,循环次数、滞回环饱满程度、峰值荷载、残余变形等都明显不及 SRC2~SRC5 试件。

2) 对比 SRC2、SRC3 和 SRC4 试件可知,随着轴压比的增大,试件极限变形能力下降,残余位移减小,循环次数减少,但峰值荷载逐渐增大,滞回曲线逐渐饱满。

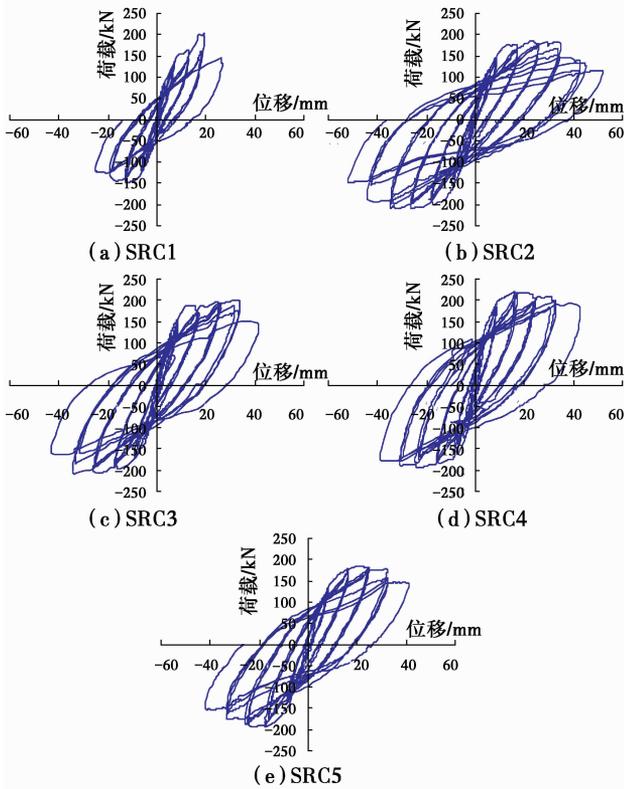


图 5 滞回曲线

Fig. 5 Hysteretic curves

3)与普通钢筋混凝土异形柱 SRC1 相比, SRC3 和 SRC5 试件内部添加了型钢,故具有更高的承载

能力、屈服位移和破坏位移,循环次数、滞回曲线饱满程度和残余变形明显增加,达到破坏所用时间也相应延长。SRC5 的峰值荷载不及 SRC3,但二者的滞回环饱满程度和残余变形相差不多。

4.2 承载力、位移及延性

骨架曲线是滞回曲线中每次循环的峰值点的包络线。骨架曲线的对比如图 6 所示。

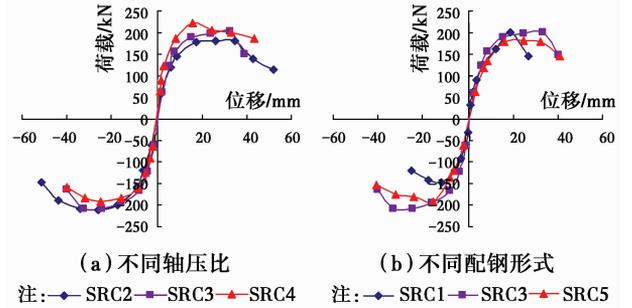


图 6 骨架曲线

Fig. 6 skeleton curves

通过等面积法确定各试件的屈服位移 Δ_y , 该点所对应的荷载为屈服荷载 P_y 。按照峰值点的 85% 确定破坏点,得到相应的破坏位移 Δ_u 和破坏荷载 P_u 。各试件的极限承载力和位移延性系数如表 3 所示,结合图 6,经对比可知:

表 3 各试件承载力、位移及延性

Table 3 Bearing capacity, displacement and ductility of specimens

编号	方向	屈服点			峰值点			破坏点			位移延性系数	
		P_y/kN	Δ_y/mm	Δ_y/L	P_m/kN	Δ_m/mm	Δ_m/L	P_u/kN	Δ_u/mm	Δ_u/L	Δ_u/Δ_y	均值
SRC1	正	159.88	11.54	1/91	199.09	18.28	1/57	169.21	22.53	1/45	1.95	2.61
	负	-125.26	-7.10	1/148	-148.88	-11.94	1/88	-126.54	-23.22	1/45	3.27	2.61
SRC2	正	154.35	11.38	1/92	181.17	34.86	1/30	153.99	40.33	1/26	3.54	3.56
	负	-177.68	-12.80	1/82	-210.32	-26.08	1/40	-178.72	-45.7	1/29	3.57	3.56
SRC3	正	171.81	11.05	1/95	201.54	32.58	1/32	171.39	35.78	1/29	3.24	3.28
	负	-176.84	-11.53	1/91	-208.91	-32.80	1/32	-177.54	-38.38	1/27	3.33	3.28
SRC4	正	189.82	9.20	1/114	221.56	15.94	1/66	187.76	42.40	1/25	4.60	4.58
	负	-162.46	-8.73	1/126	-192.77	-24.98	1/42	-158.00	-38.15	1/27	4.56	4.58
SRC5	正	152.79	11.96	1/88	181.97	24.14	1/44	154.70	37.22	1/28	3.11	3.14
	负	-162.56	-11.72	1/90	-191.62	-15.52	1/68	-162.87	-37.28	1/28	3.18	3.14

1)各试件的骨架曲线总体较为对称,个别试件的正负向峰值有一定差距。SRC2~SRC4 试件的平均峰值荷载分别为 195.75、205.32 和 207.17 kN,呈上升趋势。轴压比增大时,竖向约束增强,初始刚度增大,试件更不易发生变形,欲达到目标位移,需施加更大荷载,故试件承载能力增大。

2)SRC1、SRC3 和 SRC5 试件的平均峰值荷载分别为 173.98、205.23 和 186.80 kN。可见 SRC3 试件的承载能力比 SRC1 试件提高了约 18%,比 SRC5 试件提高了约 10%。说明 T 形钢加方钢管的配钢形式的承载能力最强,实腹型配钢次之,未配型钢的试件最差。SRC5 试件在纵筋屈服、混凝

土被压溃后不久便破坏,由于配钢率较大且分布集中,破坏时型钢并未屈服,型钢性能没有得到充分有效利用,从而造成材料的浪费。SRC3 试件中,在纵筋及混凝土退出工作时型钢已经屈服,仍可继续承担荷载的增加,将型钢的性能充分发挥,有效延缓了试件的整体破坏。

3)除 SRC1 试件外,其余试件的位移延性系数均达到 3 以上。在 SRC2~SRC4 试件中,除 SRC4 试件外,轴压比增大时,试件的屈服位移呈递减趋势。观察骨架曲线,将 SRC4 试件下的初始刚度最大且下降段最为平缓,从而屈服位移明显减小,破坏位移增大。导致其位移延性系数也急剧增大。在配钢形式不同的试件中,SRC5 试件中含钢率较大,达到屈服和破坏时所需位移也较大,但位移延性系数却不及 SRC3 试件。同时,SRC1 试件的负向延性好于 SRC5 试件,但屈服位移和破坏位移远不及后者,故试件的位移和延性之间并不存在正相关的关系。

4)《混凝土异形柱结构技术规程》(JGJ 149—2006)中规定,在罕遇地震作用下,钢筋混凝土异形柱结构弹塑性层间位移角限值为 $1/60$ 。SRC2~SRC5 试件的在破坏点位移角均大于 $1/30$,且相对于 SRC1 试件有较大提高,说明添加型钢可大幅提高异形柱的塑性变形能力。

4.3 刚度退化

由滞回曲线可知在持续加载过程中,试件刚度是不断退化的。刚度退化的进程如图 7 所示。

经对比可知:

1)刚度退化趋势为非线性,在试件屈服之前退化很快,屈服之后纵筋及型钢进入强化阶段,抗拉能力提高,刚度退化速率随位移的增大而减慢。最后,各个试件破坏时的刚度约为初始刚度的 10%左右。

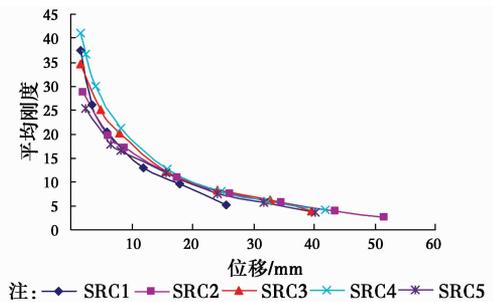


图 7 刚度退化曲线

Fig. 7 Curves of rigidity degeneration

2)轴压比增高时,刚度初值增大,在克服竖向约束反复加卸载的过程中,材料需要提供更强的抗力,荷载对材料的损伤及混凝土与钢筋、型钢之间的磨损都会增强。随着位移角的加大,其裂缝发展分布更加充分、密集,使钢材和混凝土更容易滑移脱离,丧失共同作用的基础,累积损伤更加严重,刚度退化速率更快。

3)对比配钢形式,未配置型钢的 SRC1 试件刚度初值最小,且只由混凝土和钢筋承担荷载,刚度退化速率明显快于配置型钢的试件。由于实腹型配钢的试件中含钢率较高,整体刚度较大,在轴压比相同时,SRC5 试件比 SRC3 试件的刚度退化速率稍小。可知添加型钢或增大配钢率均可不同幅度得提高刚度。

4.4 耗能能力

耗能能力是评价一个试件抗震性能的重要参考指标,通常通过滞回曲线所包围的面积大小来判断,各试件在每级循环中的滞回环面积如表 4 所示。试验通过等效黏滞阻尼系数 h_e 来衡量钢-混凝土组合异形柱的耗能性能,系数值越大,试件耗能能力越强。

表 4 各试件滞回环面积

Table 4 Hysteretic loop area of specimens

SRC1		SRC2		SRC3		SRC4		SRC5	
位移/mm	滞回环面积/ (kN·mm)								
0.54	17.00	2.09	102.84	1.75	79.84	1.57	87.14	2.42	125.75
1.62	66.20	6.10	496.35	4.89	387.82	2.49	183.32	6.65	561.02
3.47	215.33	8.86	780.24	8.04	871.40	4.10	404.87	8.05	541.48
6.07	535.87	17.54	3 337.42	15.58	3 167.56	8.24	1 287.75	15.68	2 920.38
11.91	1 978.15	26.11	5 804.91	24.18	5 876.44	15.85	3 551.44	24.07	5 633.57
17.97	3 887.31	34.64	9 302.41	32.69	9 036.97	24.75	6 691.05	31.71	8 525.98
25.62	4 638.53	43.43	11 286.85	39.58	10 680.97	32.46	9 356.45	40.16	9 008.88
		51.55	11 078.24			41.73	13 557.32		

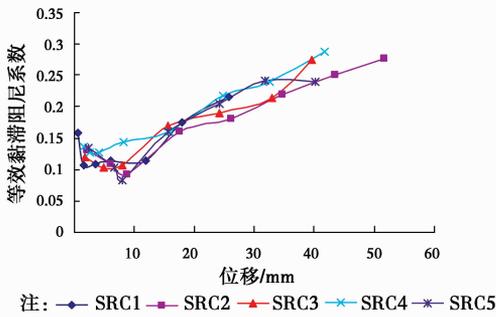


图8 等效黏滞阻尼系数

Fig. 8 Equivalent viscous damping coefficient

各试件的等效黏滞阻尼系数随位移的变化趋势如图8所示,结合表4,经对比可知:

1)各试件的等效黏滞阻尼系数在加载初期较小,均在0.15左右,之后均经历先少许下降后上升的过程,在屈服之后材料性能得到充分发挥,耗能能力逐渐加强,系数增长较快。

2)根据滞回环总面积和总等效黏滞阻尼系数,试件耗能能力随轴压比的增大有所下降的趋势。

3)配置型钢的SRC2~SRC5试件具有更高的承载能力和破坏位移,循环次数显著增多,整个加载过程中所耗散的能量也随着循环次数的增多而明显增长。通过各滞回环面积之和可判断, SRC3试件的滞回环总面积大于SRC5的总面积,故T形钢加方钢管的配钢形式在耗能方面优于实腹型配钢。

5 结论

1)钢-混凝土组合异形柱的滞回性能、承载能力、延性性能、变形能力、耗能能力以及刚度退化速率都明显优于普通钢筋混凝土异形柱,抗震性能得到大幅提高。

2)轴压比对钢-混凝土组合异形柱的抗震性能有较大影响。相同条件下,随着轴压比的增大,试件的承载能力提高,但同时残余变形减小、循环次数减少、延性降低、刚度退化速率加快。

3)T形钢加方钢管的配钢形式除刚度退化稍快外,其滞回性能、承载能力、延性性能、耗能能力优于实腹型配钢。

参考文献:

[1] FENG X, L, SHEN M, SUN C, et al. Research on flexural stiffness reduction factor of reinforced concrete column with equiaxial shaped section [J]. Procedia-Social and Behavioral Science, 2013, 96:168-174.

[2] SUMPTER M S, RIZKALLA S H, et al. Behavior of

high-performance steel as shear reinforcement for concrete beams [J]. ACI Structural Journal, 2009, 106 (2):171-177.

[3] OUSALEM, HASSANE, TAKATSU, et al. Use of high-strength bars for the seismic performance of high-strength concrete columns [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2009, 7(1):123-134.

[4] 张波,方林,金国芳,等.实腹式型钢混凝土异形柱抗震性能试验及参数分析[J].同济大学学报(自然科学版),2015,43(9):1301-1307.

ZHANG B, FANG L, JIN G F, et al. Experimental study and parametric analysis on seismic behavior of solid-web steel reinforced concrete cross-shaped column [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2015, 43(9):1301-1307. (in Chinese)

[5] 薛建阳,薛皓,刘祖强.型钢混凝土异形柱滞回性能分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2014,46(6):780-784.

XUE J Y, XUE H, LIU Z Q. Analysis on hysteretic behavior of steel reinforced concrete special-shaped columns [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2014, 46(6):780-784. (in Chinese)

[6] 李凯文,刘国华,万鑫,等.型钢高性能混凝土十字形异形柱抗震性能试验研究[J].工程抗震与加固改造,2015,37(6):8-14.

Li K W, Liu G H, Wan X, et al. Research on seismic behavior of high-performance steel reinforced concrete cross-shaped column [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2015, 37(6):8-14. (in Chinese)

[7] 陈宗平,王妮,钟铭,等.型钢混凝土异形柱正截面承载力试验及有限元分析[J].建筑结构学报,2013,34(10):108-119.

CHEN Z P, WANG N, ZHONG M, et al. Experimental study and finite element analysis on normal section bearing capacity of steel reinforced concrete special-shaped columns [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(10):108-119. (in Chinese)

[8] 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 Z P, XUE J Y, ZHAO H T, 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. (in Chinese)

- [9] 伍凯,薛建阳,赵鸿铁. SRC-RC 竖向混合结构转换柱刚度退化全过程分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2013,14(2):207-212.
WU K, XUE J Y, ZHAO H T. Analysis of stiffness degradation process of transfer column in SRC-RC hybrid structure[J]. The PLA University of Science and Technology Journal (Natural Science Edition), 2013, 14(2) :207-212. (in Chinese)
- [10] 曾磊,吴园园,周琴,等. 循环荷载作用下非对称配钢型钢混凝土柱性能退化试验[J]. 兰州理工大学学报, 2014,40(6):124-130.
ZENG L, WU Y Y, ZHOU Q, et al. Experiment of performance deterioration of shape steel reinforced concrete columns with unsymmetrical steel reinforcing under cyclic load[J]. Journal of Lan Zhou University of Technology, 2014, 40(6) :124-130. (in Chinese)
- [11] 柯晓军,陈宗平,薛建阳,等. 反复荷载下型钢混凝土异形柱粘结滑移性能研究[J]. 工程力学,2013,30(2): 211-217.
KE X J, CHEN Z P, XUE J Y, et al. Study on bond slip behavior of SRC special-shaped columns under cyclic reversed loading [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(2) :211-217. (in Chinese)
- [12] CHEN C C, CHEN C C, HOANG T T. Role of concrete confinement of wide-flange structural steel shape in steel reinforced concrete columns under cyclic loading[J]. Engineering Structures, 2016, 110 :79-87.
- [13] CAMPIAN C, NAGY Z, POP M. Behavior of fully encased steel-concrete composite columns subjected to monotonic and cyclic loading[J]. Procedia Engineering, 2015, 117(1) :439-451.
- [14] DUNDAR C, TOKGOZ S, TANRIKULU A K, et al. Behaviour of reinforced and concrete-encased composite columns subjected to biaxial bending and axial load[J]. Building and Environment, 2008, 43(6) :1109-1120.
- [15] YOUNG B, ELLOBODY E. Performance of axially restrained concrete encased steel composite columns at elevated temperatures [J]. Engineering Structures, 2011, 33(1) :245-254.
- [16] PIQUER A, HERNANDEZ-FIGUIRIDO D. Protected steel columns vs partially encased columns: Fire resistance and economic considerations[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 124 :47-56
- [17] RODRIGUES J P C, CORREIA A J M, PIRES T A C. Behaviour of composite columns made of totally encased steel sections in fire [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 105 :97-106.

(编辑 胡玲)