

密置焊接高强复合箍筋约束 高强混凝土柱的试验

徐鑫, 李升才

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 在低周反复荷载作用下,对 9 根焊接环式箍筋约束高强混凝土柱以及 1 根绑扎环式箍筋约束高强混凝土柱进行试验.通过对比研究试件的破坏过程以及实验的结果,分析了配箍率、轴压比对混凝土柱约束的影响.各个构件的滞回曲线和骨架曲线表明:在高轴压比下的复合焊接环式箍筋均有较好、较饱满的滞回曲线,体现了其具有良好的延性和抗震性能;在同等条件下焊接环式箍筋对混凝土的约束作用要比绑扎的好;在一定配筋范围内,随着钢筋配筋率的增加,混凝土柱承受低周反复承载的能力、屈服强度有所提高,滞回曲线饱满,包络面积增大,延性提高.

关键词: 箍筋约束;轴压比;低周反复作用;滞回曲线

中图分类号: TU 375.3

文献标志码: A

高强箍筋约束混凝土除了拥有普通混凝土所具有特性外,还具有高强度、经济性、高耐久性、高工作性能和高体积稳定性等良好性能.高强度可以减小构件的截面尺寸,减少混凝土用量,降低结构自重,增加使用空间,有着良好经济效益.其良好的工作性可以减少劳动强度,加快施工速度,进而减少成本.国内外对高强箍筋约束混凝土进行比较多的研究^[1-3],美国、日本等^[4-6]对高强箍筋约束高强混凝土柱的抗震性能进行较多的研究,日本已开始将高强箍筋应用于钢筋混凝土结构的梁、柱中,并取得较好的效果.在国内对其研究也取得一定的成果,齐虎等^[7]研究了箍筋约束混凝土单轴滞回本构模型,利用 ABAQUS 有限元软件的二次开发功能,对 6 种典型模型进行计算分析,提出腾-邹模型.史庆轩等^[8]通过对 10 个高强箍筋约束高强混凝土柱在高轴压比下低周反复水平地进行加载试验,研究其抗震性能.本文通过对 9 个焊接环式箍筋约束高强混凝土柱以及 1 个绑扎环式箍筋约束高强混凝土柱进行试验,分析研究高轴压比下,焊接环式箍筋在低周反复荷载作用下对混凝土柱的约束作用.

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

1.1.1 试件的设计 按照 JGJ 101—1996《建筑抗震试验方法规程》^[9]的相关要求,以及华侨大学试验室的相关试验设备能力,选取原型的几何比例为 1:2 的模型作为试件.对 10 个高宽比为 5 的棱柱体试件进行了低周反复试验,其中 HRC-1~HRC-9 为焊接环式箍筋约束高强混凝土柱,HRC-10 为绑扎环式箍筋约束高强混凝土柱.10 个棱柱体试件尺寸相同,变化因素有轴压比、箍筋间距及箍筋类型,混凝土强度等级为 C50.采用 425 号普通硅酸盐水泥,粗骨料为粒径不大于 20 mm 的碎石,细骨料为普通中砂,其配合比设计为水:水泥:砂:石=220:500:536:1 194.水灰比 0.44.箍筋为 $\Phi 8$,强度等级为 HRB 400,试件截面尺寸为 200 mm \times 200 mm,柱高为 1 000 mm,柱下是设底座梁.HRC-1~HRC-9

收稿日期: 2013-12-18

通信作者: 李升才(1960-),男,教授,主要从事结构抗震方面的研究. E-mail:lsc50605@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50948036);福建省科技计划重点项目(2012H0028);福建省自然科学基金资助项目(2013J01192);福建省泉州市科技计划重点项目(2013Z37)

的箍筋采用焊接环式复合箍筋是由两个矩形螺旋箍筋组成,HRC-10 采用两个矩形螺旋箍筋绑扎而成.试件的配筋和尺寸,如图 1 所示.

1.1.2 材料力学性能及基本参数计算 试件所采用的箍筋和纵筋均采用 HRB 400 级,屈服强度为 483 MPa.为测试混凝土强度,按箍筋间距分为 3 组,每组试件制作过程中预留 3 个边长为 150 mm 的标准立方体试块.

混凝土轴心抗压强度实测值可根据混凝土立方体抗压强度实测值得,二者之间关系为

$$f_c = \alpha_{c1} \alpha_{c2} f_{c,u}.$$
 (1)

式(1)中: α_{c1} 为棱柱体抗压强度与立方体抗压强度的比值; α_{c2} 为混凝土考虑脆性的折减系数; α_{c1} , α_{c2} 取值均按现行规范计算^[10]; f_c 为混凝土轴心抗压强度实测值; $f_{c,u}$ 为混凝土立方体抗压强度实测值.

柱的实验轴压比 n_t 为

$$n_t = N_t / f_c A.$$
 (2)

式(2)中: N_t 为轴向压力的试验值; f_c 为混凝土轴心抗压强度实测值; A 为柱横截面面积.

配箍特征值 λ_v 为

$$\lambda_v = \rho_v f_{y,v} / f_c.$$
 (3)

式(3)中: ρ_v 为体积配箍率; $f_{y,v}$ 为箍筋的条件屈服强度.材料的基本参数,如表 1 所示.

表 1 试件参数表

Tab. 1 Specimen parameters

试件编号	A/mm	N_t	$f_{c,u}$ /MPa	N_t /kN	d /mm	ρ_v /%	λ_v	设计轴压比	实验轴压比	剪跨比
HRC1	200×200	6 Φ 25	54.5	640	8 Φ @55	4.24	0.52	0.8	0.49	4
HRC2	200×200	6 Φ 25	51.8	715	8 Φ @55	4.24	0.52	0.9	0.55	4
HRC3	200×200	6 Φ 25	52.6	795	8 Φ @55	4.24	0.52	1.0	0.61	4
HRC4	200×200	6 Φ 25	52.5	640	8 Φ @70	3.33	0.41	0.8	0.49	4
HRC5	200×200	6 Φ 25	53.4	715	8 Φ @70	3.33	0.41	0.9	0.55	4
HRC6	200×200	6 Φ 25	54.2	795	8 Φ @70	3.33	0.41	1.0	0.61	4
HRC7	200×200	6 Φ 25	51.9	640	8 Φ @90	2.59	0.32	0.8	0.49	4
HRC8	200×200	6 Φ 25	51.7	715	8 Φ @90	2.59	0.32	0.9	0.55	4
HRC9	200×200	6 Φ 25	52.3	795	8 Φ @90	2.59	0.32	1.0	0.61	4
HRC10	200×200	6 Φ 25	53.2	715	8 Φ @70	3.33	0.41	0.9	0.55	4

本实验采用电液伺服加载结构试验机,低周反复荷载拟静力加载,加载装置如图 2 所示.水平荷载采用柱端加载方式,竖向荷载由电动液压千斤顶作用于柱顶,并通过稳压控制,以保证柱轴力在试验中恒定,保证在系统加载过程中可随上部低摩擦滑动的小车水平移动.实验中试件纵筋与箍筋上布置应变片,如图 3 所示.通过应变片,来测定应变的屈服和破坏过程.通过改变竖向轴力,来控制每组试件的轴压比.水平反复荷载是通过 1 000 kN 的 MTS 作动器进行加载.实验时先控制竖向荷载,达到所需的轴压比后稳住,并在此后的加载中保持不变.

本实验在水平加载过程中采取的是位移控制方法.试验前,在柱顶施加 1/6 的预定轴向荷载,通过对柱身同一截面处纵筋应变的观测,判断其是否处于轴心受力状态,并检查仪器设备是否正常工作.试件未屈服时,各位移幅值循环加载一次;当试件屈服后,各位移幅值循环加载 3 次;当试件的承载力达到最大荷载值 85%时,加载结束.加载过程控制,如图 4 所示.加载过程主要测试的内容有:水平位移、水平荷载、采用电子位移计测

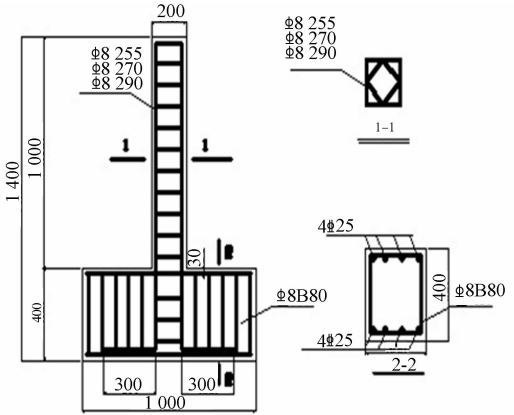


图 1 试件尺寸及配筋图(单位:mm)

Fig. 1 Cross-section size and reinforcement of specimen(unit:mm)

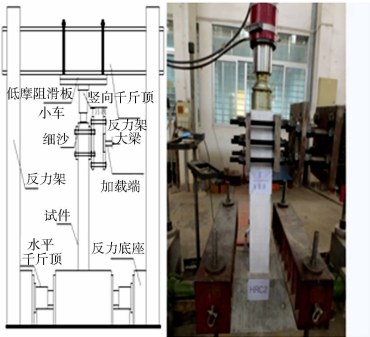


图 2 加载装置

Fig. 2 Loading setup

量整个柱子的侧移、采用电阻应变片分别测量柱内纵筋、箍筋的应变。

2 试验结果与分析

通过观察以及实验仪器记录,将各个试件加载过程的各个阶段记录下来.当各试件的承载力达到最大荷载值 85% 时,停止加载所对应的荷载,位移定义为破坏荷载及破坏位移。

2.1 试件破坏过程

以试件 HRC-1 为例,简述其从加载开始到破坏的各阶段过程及破坏形态.开始加载阶段,试件还处于弹性工作阶段,其加载与卸载曲线基本重合且为一条直线.试件在位移角为 1/250 之前,外表无破坏现象;当加载至位移角为 1/250 时,试件根部边缘开始出现水平的微缝;当加载至位移角为 1/100 时,试件的裂缝数量开始大量增多,裂缝宽度开始变大;试件加载至 1/50 时,正背面之间开始形成通缝,根部混凝土开始剥落;当加载至 1/35 时,试件根部混凝土进一步剥落,裂缝数目加多,裂缝变宽.当位移角到达 1/25 时,加载力达到了最大值 182.56 kN,根部混凝土大面积剥落;当位移角为 1/20 时,加载力不再增加,试件已达到屈服状态,保护层已大量剥落钢筋外露.各个试件破坏过程与 HRC-1 所述的破坏过程基本相似.不同的是,随着轴压比的增加,弯曲裂缝出现滞后,受压区竖向裂缝增多;随着箍筋间距增大,裂缝开展加快,这表明箍筋间距较大将导致对核心混凝土约束作用不足。

2.2 滞回曲线

试件在低周反复荷载作用下的过程用荷载-位移图进行描述,即为滞回曲线图.用曲线图来反映试件的承载力、刚度、刚度、延性的退化规律和耗能性能.焊接环式箍筋约束高强混凝土柱的三组轴压比在下不同箍筋间距的滞回曲线图,如图 5(a),(b),(c)所示.轴压比为 0.55,配筋率为 3.33% 时,焊接环式箍筋与绑扎环式箍筋的滞回曲线图,如图 5(d)所示。

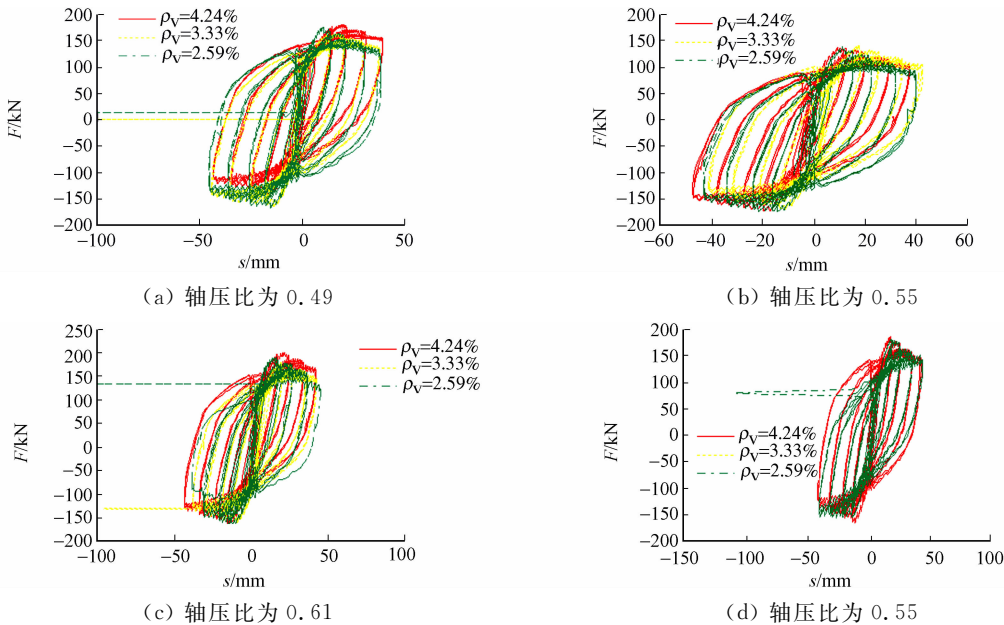


图 5 滞回曲线

Fig.5 Hysteresis curve

由图 5 可知:在试件屈服之前,滞回曲线都表现为狭窄细长且残余变形很小,包围的面积较小,耗能较少,整体刚度变化不大;但是屈服之后,曲线开始偏向位移轴,滞回环的面积逐渐增大,耗能逐渐增加,同时在每级控制位移下后一次的承载力和刚度均比第一次略有降低;所有试件的滞回曲线都很饱

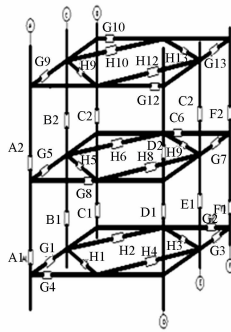


图 3 应变片布置图
Fig.3 Strain gauge arrangement

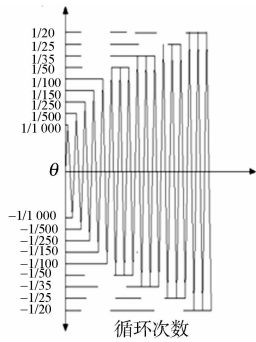


图 4 加载制度
Fig.4 Schematic diagram of loading system

满,都无明显捏拢现象.在一定的轴压比下,试件的滞回曲线随着箍筋间距的减小(体积配箍率的增加),侧向承载力和屈服力的提高,滞回曲线饱满,包络面积增大,缓解了捏拢现象.最大水平荷载后曲线下降段越平缓,试件在荷载作用下的变形能力越好,在同一轴压比下,试件随着配箍率的增加,其延性越好.

由图 5(a)可知:在同轴压比下,体积配箍率越大,滞回曲线越饱满.图 5(b)比图 5(a)的饱满程度优势更加明显,体积配箍率更大,下降段更为平缓.图 5(b)中: $\rho_v=4.24\%$ 的滞回曲线的饱满程度相对于 $\rho_v=3.33\%$ 的滞回曲线更加明显.同样,图 5(c)比图 5(a),(b)的优势也更加明显.因此,在一定的轴压比范围内,滞回曲线会随着轴压比的增大,更加饱满,极限荷载值也有所的提高.以 $\rho_v=4.24\%$ 的配箍为例,在轴压比为 0.49 下其极限荷载值为 175 kN;在轴压比为 0.55 时,其极限荷载值为 182 kN;在轴压比为 0.61 时,其极限荷载值为 186 kN,分别提高 4%,2.19%.由实验数据结合图 5(a),(b),(c)可得:在低轴压比下高配筋的滞回曲线的饱满程度并不明显;但随着轴压比的提高(在一定限值范围内),滞回曲线的饱满程度、曲线下降段平缓会更加明显.

由图 5(d)可知:在轴压比和配筋率相同的情况下,焊接环式箍筋柱的滞回曲线明显比绑扎的更饱满、面积更大,体现了焊接环式箍筋对混凝土的约束要比绑扎的好.

试件在高轴压的低周反复荷载下,环式箍筋约束高强混凝土柱的滞回曲线仍呈稳定丰满的梭形,具有较好的延性性能;轴压比、配箍率及箍筋的链接类型均对滞回曲线有显著的影响.在其他条件相同时,轴压比较大的试件,在荷载达到最大值前,其滞回曲线比轴压比小的试件更为饱满.但轴压比较小或箍筋间距较小的试件,达到最大荷载后曲线下降较为缓慢,循环次数多,强度衰减慢,变形能力大,且达到极限位移之后滞回曲线仍较为稳定,承载力没有出现明显的较大幅度的下降,即仍具有一定的承载力和耗能能力.

2.3 骨架曲线

骨架曲线是每次循环加载达到的水平力最大峰值的轨迹,反映了构件受力与变形的各个不同阶段的特性(强度、刚度、延性、耗能及抗倒塌能力等),也是确定恢复力模型中特征点的重要依据.轴压比为 0.49,0.55,0.61 时,不同箍筋间距骨架曲线,如图 6(a),(b),(c)所示.轴压比为 0.55,配筋率为 3.33% 时,焊接环式箍筋与绑扎环式箍筋的骨架曲线,如图 6(d)所示.

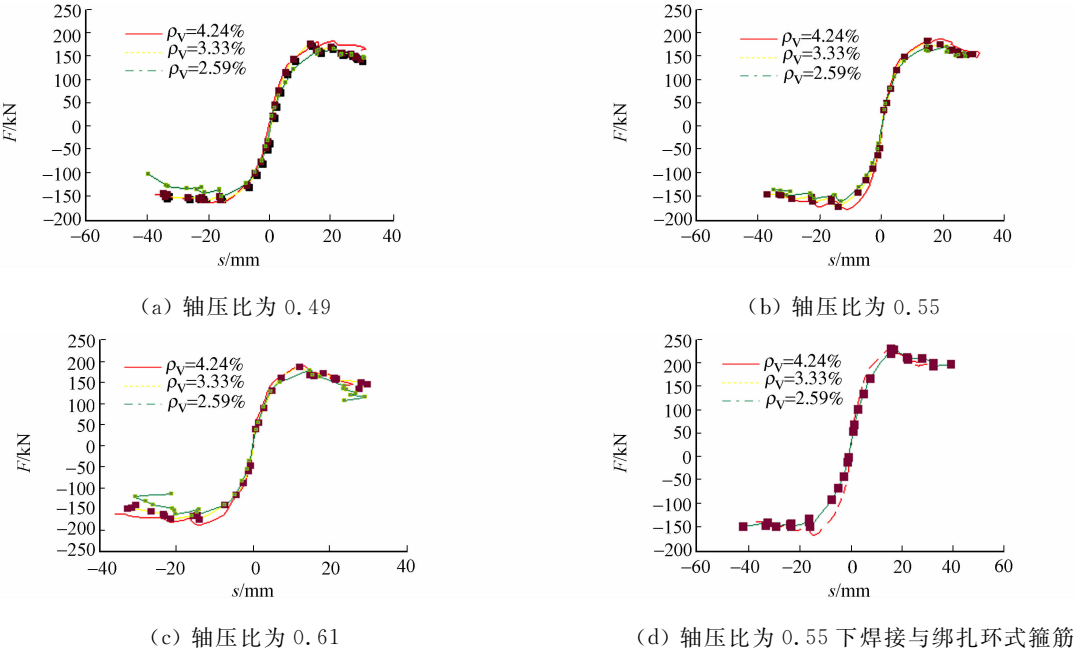


图 6 骨架曲线

Fig. 6 Skeleton curve

由图 6(a)可知以下两点.1)在同一轴压比下,配箍率越大的试件,其所加最大荷载值越大,在轴压比为 0.49 时,配箍率为 $\rho_v=4.24\%$ 所加的荷载最大值为 182.56 kN;配箍率为 $\rho_v=3.33\%$ 所加荷载最大值为 175.36 kN;配箍率为 $\rho_v=2.59\%$ 所加荷载最大值为 162.04 kN.荷载最大值比较后一个分别增

加了 4.11%,8.22%;荷载最大值分别增加了 2.57%,7.38%.试件所承受的荷载,会随着配箍率增加而增加,但这种增加趋势逐渐减小(可预测具有一定的限值).这也说明当配箍率增加到一定程度时,对构件的最大承载力提高有限.2)在同一轴压比下,配箍率越大的试件,峰值后下降的趋势越为平缓.轴压比为 0.55 时, $\rho_v=4.24\%$,试件的下降率为 11.28%; $\rho_v=3.33\%$,试件的下降率为 19.9%; $\rho_v=2.59\%$ 试件的下降率为 21.17%.因此,配箍率越大的试件,试件的极限承载力有一定的提高,且其达最大荷载后的极限变形能力增大,下降段趋于平缓.

对比图 6(a),(b),(c)可以看出:当 $\rho_v=4.24\%$ 时,轴压比为 0.49 荷载最大值为 182.56 kN;轴压比为 0.55 荷载最大值为 187.65 kN;轴压比为 0.61 荷载最大值为 190.83 kN,分别增加 2.79%,1.67%;当 $\rho_v=3.33\%$ 时,依次增加 4.28%,2.03%;当 $\rho_v=2.59\%$ 时,依次增加 4.7%,4.19%.因此,在同一配箍率下,荷载峰值会随着轴压比的增加而有所增加,而且所增加的趋势也是逐渐减少的.

从图 6(d)可知:焊接环式箍筋的混凝土柱子早期刚度比绑扎环式箍筋的混凝土柱子强,焊接环式箍筋的混凝土柱子所能承受的最大荷载值也大于绑扎环式箍筋的混凝土柱.

3 试验结果

通过对 9 个焊接环式箍筋的混凝土柱以及 1 个绑扎环式箍筋的混凝土柱的研究,结合试验的结果分析得到:跟普通钢筋混凝土柱相比,焊接环式箍筋柱的箍筋约束能力更高,所承受的荷载能力更强.结合试验结果分析,它的影响因素有配筋率、轴压比.

3.1 配箍率的影响

在一定的轴压比下,配箍率越高的滞回曲线越饱满,骨架曲线中相同位移下所能加的荷载值越大,最大水平荷载后曲线下降段越平缓.这是由于配筋率的增加,提高了箍筋对核心混凝土的约束作用,从而提高试件的变形能力.在相同的荷载下,高配箍率的试件具有更好的延性和变形能力,所以其滞回曲线也更加饱满.对核心混凝土的约束力提高了,也使构件承受荷载的能力提高了.因此,骨架曲线中在相同位移下所加的荷载值更大,下降段也更为平缓.

3.2 轴压比的影响

随着轴压比提高,试件前期的滞回曲线变得更饱满.原因是轴压比的增大,使混凝土柱的应变增大,混凝土柱中被箍筋约束住的核心混凝土因泊松比增大而向外膨胀,对箍筋施加径向压应力.箍筋对核心混凝土的反作用应力使核心混凝土处于三轴受压应力状态.而且这种作用随着轴压比增大,柱子应变也继续增大.加大核心混凝土横向膨胀,使箍筋更多参与进去,箍筋约束也更好,其应力也不断加大直到箍筋应力达到屈服强度.所以在箍筋应力达到屈服前,柱子的滞回曲线会随着轴压比增大变得更加饱满,骨架曲线中相同位移下所加的荷载值也会提高,延性也更好.但在荷载到达峰值后,较小轴压比的混凝土柱中箍筋约束的混凝土由于受到的轴压较小,混凝土横向膨胀也比较大轴压的混凝土柱小.因此,较小轴压比的混凝土柱达到峰值荷载后曲线下降较为缓慢,循环次数多,强度衰减慢,变形能力大.

4 结论

对 9 个焊接环式复合箍筋混凝土柱以及 1 个绑扎环式复合箍筋混凝土柱的实验过程、实验结果进行分析,对其箍筋的约束作用得出了以下 3 个结论.

- 1) 随着箍筋配筋率的增加,混凝土柱承受低周反复承载的能力有所提高,屈服强度有所提高,滞回曲线饱满,包络面积增大,耗能能力增加.
- 2) 随着钢筋配筋率的增加,骨架曲线中在相同位移下所能承受的荷载值更大,下降段也更为平缓,延性变得更好.
- 3) 当其他条件相同时,轴压比较大的试件,在荷载达到峰值前,其滞回曲线比轴压比小的试件更为饱满.但轴压比较小或箍筋间距较小的试件,达到峰值荷载后曲线下降较为缓慢,循环次数多,强度衰减慢,变形能力大,且达到极限位移之后滞回曲线仍较为稳定,承载力没有出现明显的较大幅度的下降,仍具有一定的承载力和耗能能力.

参考文献：

[1] 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,2003:90-97.

[2] 李升才,罗小庆,章炯. 焊接环式箍筋约束高强砼柱裂缝开裂[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2010,31(4):458-462.

[3] 孟繁录,李升才. 焊接环式箍筋高强砼大偏心受压柱试验研究[J]. 武汉理工大学学报,2009,31(23):276-482.

[4] CHUNG H S, YANG K H, LEE Y H, et al. Strength and ductility of laterally confined concrete columns [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2002, 93(7):18-25.

[5] LEE D H, ELNASHAI A S. Seismic analysis of RC bridge columns with flexure-shear interaction[J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 2001, 127(5):546-553.

[6] 青山博之. 现代高层钢筋混凝土结构设计[M]. 张川,译. 重庆:重庆大学出版社,2006:45-51.

[7] 齐虎,吕西林. 箍筋约束混凝土单轴滞回本构实用模型[J]. 工程力学, 2011, 28(9):20-26.

[8] 史庆轩,杨坤. 高强箍筋约束高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(12):141-148.

[9] 中国建筑科学研究院. JGJ 101—1996 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1996:13-14.

[10] 中华人民共和国建设部. GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002:15-19.

Experiment on the Stirrup Restrain Effect of High-Strength Concrete Columns with Welding Ring Stirrups under High Axial Load Ratio

XU Xin, LI Sheng-cai

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The experiment was conducted to investigate 9 high-strength concrete columns with welding ring stirrups and 1 high-strength concrete columns with binding ring stirrup under the low cyclic loading. Based on the failure process of specimen and the experimental results, the influence of stirrup ratio, axial compression ratio on confined concrete column was analyzed. The hysteretic curves and skeleton curves of components shows the hysteretic curves of columns with the high axial compression ratio is more plump under the welding ring stirrups, indicating the good ductility and seismic resistant performance. The welding ring stirrups can confine the concrete more efficiently than the binding ring under the same condition. With increasing the stirrup ratio in a certain range, the concrete columns have better low cyclic bearing capacity, yield strength, plump hysteretic curve, envelope area and ductility.

Keywords: stirrup constraints; axial compression ratio; low cyclic loading; hysteresis curve

(责任编辑：陈志贤 英文审校：方德平)