

文章编号:1673-2049(2013)02-0021-07

高强螺旋箍筋约束混凝土柱抗震性能试验

张兴虎¹, 郑晓龙¹, 潘树宾², 姜维山¹, 李青宁¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 隆基泰和实业有限公司, 河北 高碑店 074000)

摘要:为了研究高强螺旋箍筋约束混凝土柱的抗震性能, 完成了2个普通箍筋混凝土柱及2个高强螺旋箍筋约束混凝土柱足尺模型的低周反复荷载试验, 描述了高强螺旋箍筋约束混凝土柱的破坏过程及破坏形态, 分析了高强螺旋箍筋约束混凝土柱的滞回曲线、骨架曲线、延性性能和耗能能力。结果表明: 轴压比是影响试件延性性能的主要因素之一; 高强螺旋箍筋约束混凝土柱在高轴压比作用下对框架柱延性性能及耗能能力提高的效果非常明显; 在轴压比相同的条件下, 高强螺旋箍筋约束混凝土柱滞回曲线饱满且无捏缩现象, 量纲一的骨架曲线下降段平稳, 延性性能较好。

关键词:约束混凝土; 高强螺旋箍筋; 低周反复荷载; 抗震性能

中图分类号: TU375.4 **文献标志码:** A

Experiment on Seismic Behavior of Concrete Columns Confined with High-strength Spiral Stirrups

ZHANG Xing-hu¹, ZHENG Xiao-long¹, PAN Shu-bin², JIANG Wei-shan¹, LI Qing-ning¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China; 2. Longjitaihe Industrial Co., Ltd, Gaobeidian 074000, Hebei, China)

Abstract: In order to study the seismic behavior of the concrete columns confined with high-strength spiral stirrups, the low cyclic loading tests of two ordinary stirrup concrete columns and two concrete columns confined with high-strength spiral stirrups full scale model were finished, and the failure process and failure pattern of concrete columns confined with high-strength spiral stirrups were described. Meanwhile, the hysteresis curves, skeleton curves, ductility performance, and energy dissipation capacity were analyzed. The results show that the axial compressive ratio is one of the main factors to impact specimen ductility performance. The improvement effect of concrete columns confined with high-strength spiral stirrups under high axial compression ratio on frame column ductility performance and energy dissipation capacity is very obvious. In the same axial compression ratio, the concrete columns confined with high-strength spiral stirrups show the advantages including full hysteresis curves and no pinch phenomenon, smooth nondimensional skeleton curve decline period, good ductility performance.

Key words: confined concrete; high-strength spiral stirrup; low cyclic loading; seismic behavior

0 引言

约束混凝土已经成为工程中改善压弯剪构件或

结构力学性能的重要措施, 它是利用外部约束改善混凝土自身原有压弯剪特性, 以提高其抗压抗剪强度及变形性能。混凝土受到的侧向压力越大, 限制

收稿日期: 2013-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(10572107); 河北省科技计划项目(2011188)

作者简介: 张兴虎(1956-), 男, 陕西凤翔人, 教授级高级工程师, E-mail: zhangxinghu@126.com。

或约束其横向变形的能力也越大。采用普通箍筋约束混凝土,箍筋会过早屈服而丧失对混凝土的约束能力。采用高强螺旋箍筋约束混凝土,可以使箍筋对混凝土起到更有效的约束作用,提高其强度和延性,同时又节约钢材,便于施工^[1-2]。

本文中笔者通过拟静力低周反复荷载试验,与普通箍筋混凝土柱进行对比,研究在不同轴压比下密置高强复合螺旋箍筋约束混凝土柱的抗震性能,从而为高强螺旋箍筋在实际工程中的应用提供一些可靠的依据。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

共设计 4 个 1:1 缩尺比例足尺模型,其中 2 个普通箍筋混凝土柱作为对比试件,其余 2 个作为高强螺旋箍筋约束混凝土柱,试件尺寸及构造如图 1 所示。试件的剪跨比均为 4.5,长细比为 9,截面尺寸均为 400 mm×400 mm,形状为“⊥”。实际柱高 2 000 mm,理论柱高(实际加载点高)1 800 mm。每个柱的混凝土强度设计等级均为 C40,纵筋均为 8 根直径 22 mm 的 HRB400 级钢筋,普通箍筋混凝土柱的箍筋采用直径为 10 mm 的 HPB300 级钢筋,箍筋间距非加密区为 200 mm,加密区为 100 mm 及 80 mm,加密区长度为 500 mm,箍筋形式为复合箍;高强螺旋箍筋约束混凝土柱的箍筋采用中国钢铁研究院提供的强度 1 100 MPa、直径 5 mm 的高强箍筋,箍筋间距为 50 mm,为防止柱顶受压破坏,设置 200 mm 高箍筋加密区,加密区箍筋间距 30 mm,箍筋形式为复合螺旋箍,试件下端的梁截面尺寸为 500 mm×700 mm。试件尺寸及构造见图 1,试件主要设计参数见表 1。

试件分 2 批进行浇筑,均采用商品混凝土一次浇筑成型,2 批试件根据《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—2012)^[3]各预留 3 组边长 150 mm 的标准立方体试块,与试件同等条件养护至加载开始,根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[4]计算轴心抗压强度标准值,混凝土及钢材材料力学性能见表 2、3。

1.2 试验装置

试验在西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室进行,试件通过压梁固定在试验台上,采用美国 MTS100t 电液伺服作动器对试件进行低周反复荷载试验,竖向荷载由 500 t 液压千斤顶及杠杆放大稳压系统施加,加载装置如图 2 所示,试验

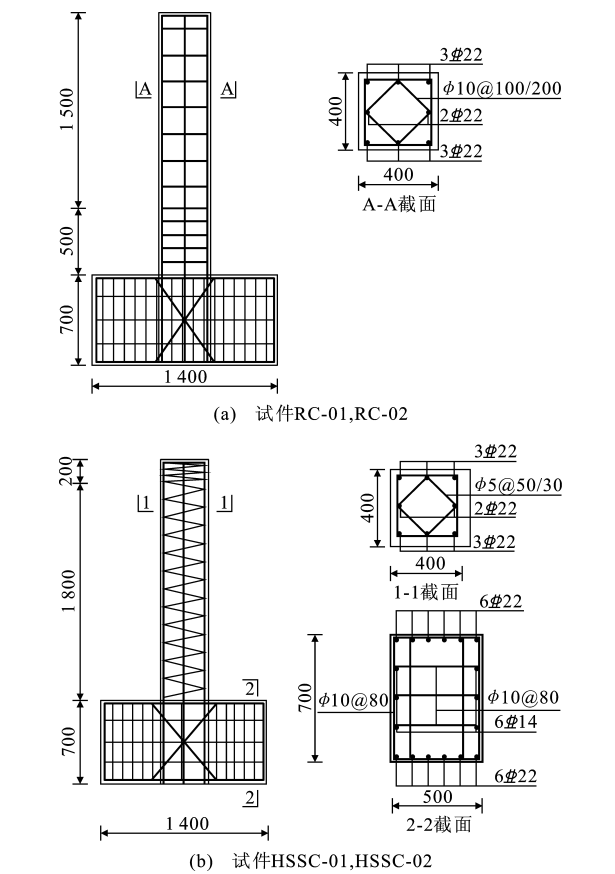


图 1 试件尺寸及构造(单位:mm)
Fig. 1 Dimensions and Configurations of Specimens (Unit:mm)

表 1 试件主要参数

Tab. 1 Main Parameters of Specimens					
试件编号	箍筋间距 <i>s</i> /mm	体积配箍 率 ρ_v /%	配箍特 征值 λ_v	n_t	剪跨比 λ
RC-01	100,200	1.650	0.233	0.20	4.5
RC-02	80,200	2.060	0.291	0.50	4.5
HSSC-01	50,30	0.785	0.320	0.18	4.5
HSSC-02	50,30	0.785	0.320	0.55	4.5

注:RC 表示普通箍混凝土柱;HSSC 表示高强螺旋箍筋约束混凝土柱; n_t 为试验实际轴压比。

表 2 混凝土的力学性能

Tab. 2 Mechanical Behaviors of Concretes			
混凝土 种类	混凝土强 度等级	立方体抗压强度标 准值 $f_{cu,k}$ /MPa	轴心抗压强度标 准值 f_{ck} /MPa
RC	C40	54.9	36.7
HSSC	C40	43.8	29.3

数据通过日本产 TDS-630 数据采集仪采集。

1.3 加载制度

首先,在柱顶由液压千斤顶施加竖向荷载至设计轴压比,并在整个试验过程中保持稳定不变。竖向荷载施加完毕后,再由电液伺服作动器开始施加

表 3 钢材的力学性能
Tab. 3 Mechanical Behaviors of Steel

钢材种类	屈服强度 f_y /MPa	极限抗拉强度 f_u /MPa	伸长率 δ /%
HRB400	490	663	23.5
螺旋箍筋	1 052	1 177	5.8
普通箍筋	310	475	28.0

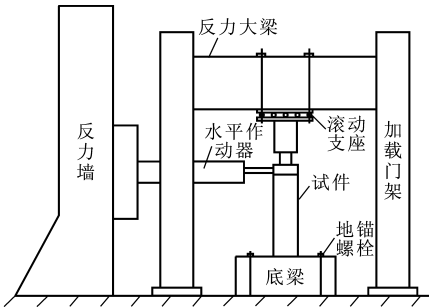


图 2 试验加载装置
Fig. 2 Test Loading Equipment

水平荷载。水平荷载的施加采用荷载-位移双控制方法:试件屈服前,采用荷载控制分级加载,每级荷载 50 kN,每级循环 1 次,直至试件屈服;试件屈服后,采用位移控制,按屈服位移的倍数进行控制加载,每级循环 3 次^[5]。

2 试验结果与分析

2.1 试验过程及破坏形态

图 3 为加载方向与柱面标志。荷载垂直作用面为 A、B 面,C、D 面为侧面。作动器推出方向为正,即 A 面受拉,B 面受压;作动器回缩方向为反,即 A 面受压,B 面受拉。

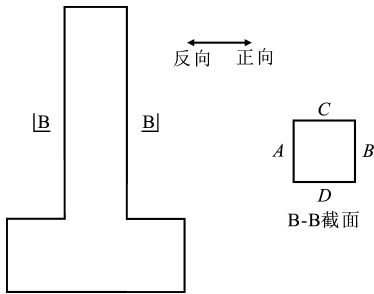


图 3 加载方向与柱面标志

Fig. 3 Loading Directions and Sign of Column Surfaces

试件 RC-01 为普通箍筋混凝土柱,试验轴压比为 0.20,属于大偏心受压。当水平荷载达到 80 kN 时,D 面距根部 20 mm 处出现 1 条水平裂缝,随荷载及加载循环次数增加,水平裂缝继续开展并有斜裂缝产生。当水平荷载达到 200 kN 时,已有受拉纵筋屈服,进入位移控制阶段。控制位移达到 2Δ(Δ 为柱顶位移)时,A 面根部混凝土出现受压脱落,C、

D 面均出现竖向劈裂裂缝;控制位移达到 4Δ 时,A、B 面根部混凝土保护层剥落,箍筋、纵筋外露;控制位移达到 5Δ 时,根部纵筋压屈,试验终止。试件 RC-01 破坏形态如图 4(a),(b)所示。

试件 RC-02 为普通箍筋混凝土柱,试验轴压比为 0.50,属于小偏心受压。当水平荷载达到 200 kN 时,C 面距根部 40 mm 处出现水平裂缝,随荷载及加载循环次数增加,水平裂缝继续开展并有斜裂缝产生。当水平荷载达到 250 kN 时,已有受拉纵筋屈服,改为位移控制加载。控制位移为 Δ 循环过程中,A、C 面角部存在少量混凝土被压碎。控制位移为 3Δ 循环过程中,柱根部混凝土不断脱落,纵筋外露。控制位移达到 4Δ 时,根部纵筋受压屈服,试验终止。试件 RC-02 破坏形态如图 4(c),(d)所示。

试件 HSSC-01 为高强螺旋箍筋约束混凝土柱,试验轴压比为 0.18,属于大偏心受压。水平荷载达到 100 kN 前,试件处于弹性阶段,未出现裂缝。当水平荷载达到 100 kN 时,柱根部 B 面出现 150 mm 水平裂缝。随荷载及加载循环次数增加,裂缝继续开展并且增加。当水平荷载达到 195 kN 时,纵向受拉钢筋屈服,试件改为位移控制加载。控制位移为 Δ 循环过程中,裂缝增加且出现大量贯通裂缝,C、D 面出现大量剪切斜裂缝。在 1.5Δ 循环过程中,柱根部 200 mm 高度以内出现纵向劈裂裂缝,保护层开始脱落,控制位移达到 3Δ 时,B、C 面角部箍筋外露。控制位移达到 6Δ 时,柱根部 250 mm 高度的混凝土保护层完全脱落,纵筋外露,试件水平承载力下降较大,试验终止。试件 HSSC-01 破坏形态如图 4(e),(f)所示。

试件 HSSC-02 为高强螺旋箍筋约束混凝土柱,试验轴压比为 0.55,属于小偏心受压。水平荷载达到 200 kN 前,试件处于弹性阶段,未出现裂缝。当水平荷载达到 200 kN 时,柱根部 A、B 面均出现水平贯通裂缝。随荷载及加载循环次数增加,裂缝继续开展并且增加。当水平荷载达到 250 kN 时,已有受拉纵筋屈服,试件改为位移控制加载。控制位移为 Δ 循环过程中,D 面出现大量剪切斜裂缝,柱根部出现纵向劈裂裂缝,开始有保护层退出工作。在 2Δ 循环过程中,混凝土破坏加剧,保护层脱落区域增加,控制位移达到 3Δ 时,箍筋、纵筋外露。控制位移达 5Δ 时,柱根部 250 mm 高度的混凝土保护层完全脱落,纵筋外露,试件水平承载力明显下降,试验终止。试件 HSSC-02 破坏形态见图 4(g),(h)。

从图 4 可以看出,高轴压作用下柱根部破坏比

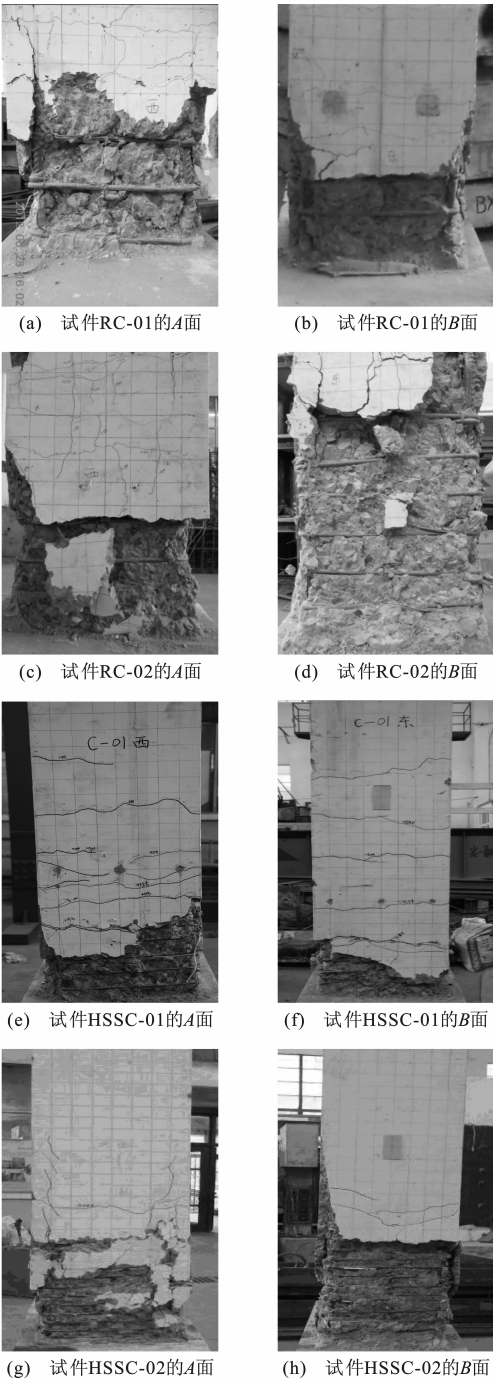


图 4 试件破坏形态

Fig. 4 Failure Modes of Specimens

低轴压作用下更为严重,混凝土保护层脱落范围更大,试件 RC-02 比试件 HSSC-02 保护层脱落情况更严重,箍筋内部混凝土也存在一定程度的脱落,由于没有高强螺旋箍筋约束作用,根部纵筋压屈,导致试件 RC-02 承载力下降速度增加且加载循环次数少于试件 HSSC-02;试件 RC-01 比试件 HSSC-01 根部破坏范围更大,也由于没有高强螺旋箍筋的约束作用,根部纵筋压屈,加快了试件承载力的下降。

2.2 滞回曲线

图 5 为本次试验实测的各试件荷载-位移($P-\Delta$)滞回曲线。

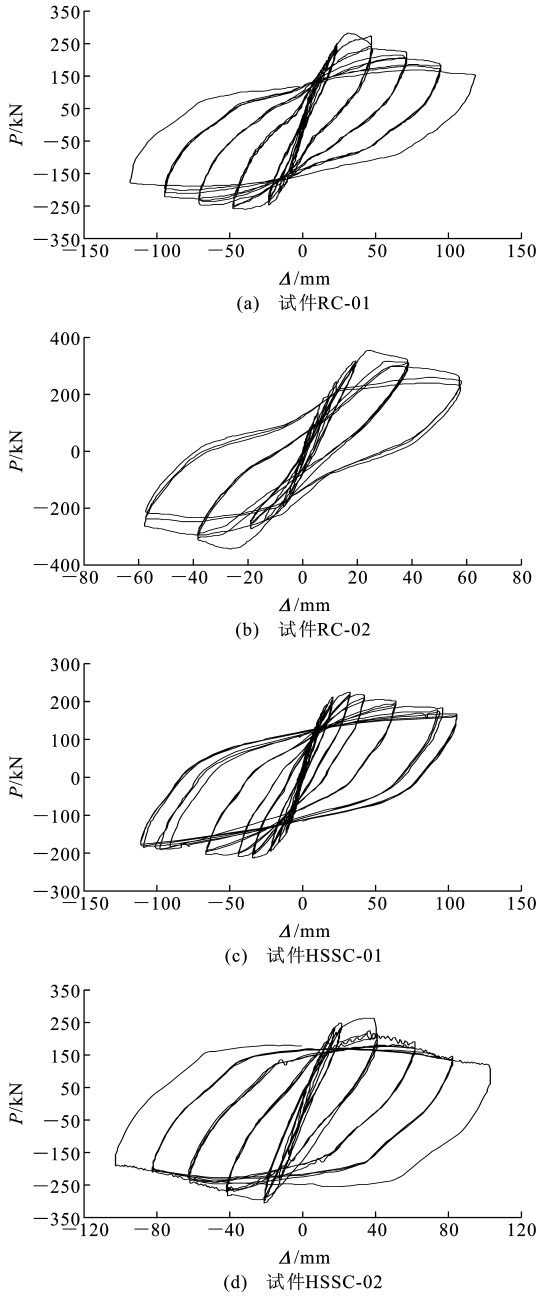


图 5 试件 $P-\Delta$ 滞回曲线

Fig. 5 $P-\Delta$ Hysteretic Curves of Specimens

从图 5 可以看出:

(1)轴压比对试件滞回曲线的影响较大,轴压比低的柱,滞回曲线呈较饱满的梭形,耗能能力及延性较好,其中试件 HSSC-01 曲线的下降段非常平缓,表现出高强螺旋箍筋对混凝土柱的延性及耗能能力均有提高。

(2)轴压比大的试件比轴压比小的试件滞回曲

线相对狭小,下降段比较陡,延性相对较差,其中试件 RC-02 存在较为明显的捏缩现象,但试件 HSSC-02 曲线基本呈梭形,滞回环比较饱满,表现出高强螺旋箍筋对混凝土的约束作用,从而提高了延性及耗能能力。试件的水平峰值荷载随轴压比的增大而增大。

2.3 骨架曲线

在低周反复荷载试验中,将荷载-位移曲线的各级第一循环的峰值点所连接起来的包络线称作骨架曲线。对试件的骨架曲线进行量纲一化处理,便于更好地反映出试件的抗震性能。图 6 为试件的量纲一化骨架曲线对比,其中 P_u 为峰值荷载。

通过量纲一化骨架曲线可以很明显地看出试件的强度增加和退化情况,试件 RC-01 与试件 HSSC-01 有明显的屈服点,在达到峰值荷载后,下降段较为平缓。试件 RC-02 与试件 HSSC-02 在达到峰值荷载后,荷载下降速度较快。轴压比较小,试件的极限变形能力相对较强。

2.4 延性性能

本文中采用位移延性系数 μ 来分析高强螺旋箍筋约束混凝土柱的延性性质。试件的位移延性系数 μ 按下式计算

$$\mu = \frac{|\Delta_u^+| + |\Delta_u^-|}{|\Delta_y^+| + |\Delta_y^-|} \quad (1)$$

式中: Δ_u^+ , Δ_u^- 分别为正、反向水平极限荷载对应的极限位移; Δ_y^+ , Δ_y^- 分别为正、反向屈服时水平荷载对应的位移。

通过试件的骨架曲线,取水平峰值荷载的 85% 时所对应的位移作为极限位移,按能量等效法确定屈服位移。极限位移角 θ 可由下式计算

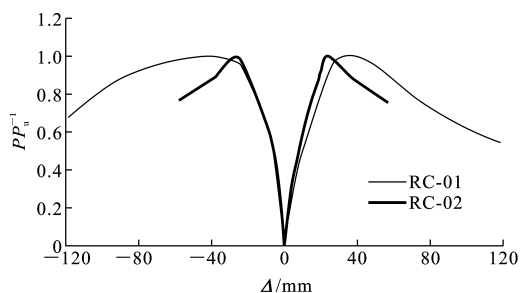
$$\theta = \frac{|\Delta_u^+| + |\Delta_u^-|}{2H} \quad (2)$$

式中: H 为计算柱高。

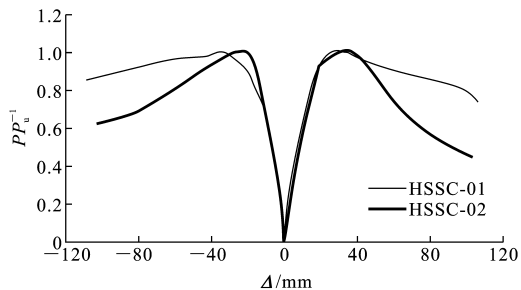
由此确定的试件屈服位移 Δ_y 、极限位移 Δ_u 及延性系数 μ 见表 4。从表 4 可以看出,轴压比是影响柱延性的主要因素。轴压比越高,柱延性越小,在较低轴压比下,试件 HSSC-01 的延性明显高于试件 RC-01 的延性,在较高轴压比下,试件 HSSC-02 仍然比试件 RC-02 的延性好,但是两者差距已不如低轴压比明显。

2.5 耗能能力

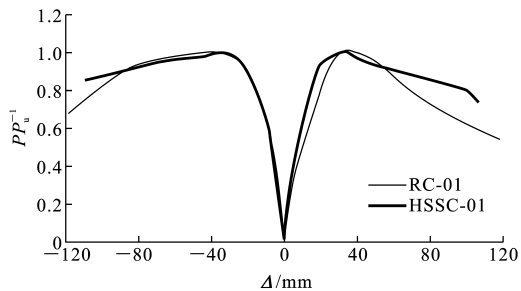
耗能能力是指试件在地震作用下通过自身的塑性变形消耗地震能量的能力^[6],应以试件的滞回曲线包围的面积来衡量。采用等效粘滞阻尼系数 h_e



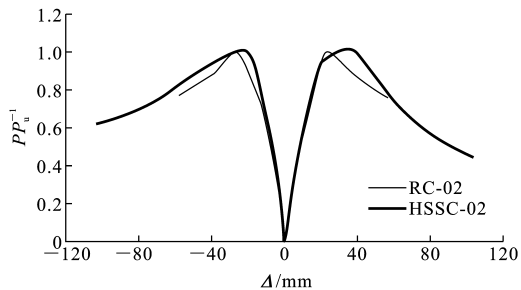
(a) 试件RC-01,RC-02骨架曲线对比



(b) 试件HSSC-01,HSSC-02骨架曲线对比



(c) 试件RC-01,HSSC-01骨架曲线对比



(d) 试件RC-02,HSSC-02骨架曲线对比

图 6 试件骨架曲线对比

Fig. 6 Comparisons of Skeleton Curves of Specimens

来判别构件耗能能力的大小,可由下式计算

$$h_e = \frac{S_{ABC+CDA}}{2\pi S_{\triangle OBE+\triangle ODF}} \quad (3)$$

式中: $S_{ABC+CDA}$ 为滞回环的面积; $S_{\triangle OBE+\triangle ODF}$ 为与滞回环上下定点相对应的三角形面积。

从表 4 还可以看出:在极限荷载作用下,高强螺旋箍筋约束混凝土柱的等效粘滞阻尼系数均高于普通箍筋混凝土柱,低轴压比试件 RC-01 的等效粘滞阻尼系数为试件 HSSC-01 的 83%,高轴压比试件 RC-02 的等效粘滞阻尼系数为试件 HSSC-02 的

表 4 试验结果
Tab. 4 Experiment Results

试件编号	加载方向	P_{cr}/kN	P_y/kN	Δ_y/mm	P_u/kN	$0.85P_u/\text{kN}$	Δ_u/mm	μ	θ 试验值	θ 平均值	h_e
RC-01	正向	81.1	235.16	22.35	281.14	238.97	65.45	3.99	1/22	1/19.0	0.258
	反向	-83.8	-229.72	-18.01	-258.44	-219.67	-95.60		1/16		
RC-02	正向	197.9	301.18	18.06	356.54	303.06	41.39	2.44	1/35	1/33.5	0.254
	反向	-196.8	-275.95	-16.70	-343.10	-291.64	-43.31		1/34		
HSSC-01	正向	100.0	195.72	17.28	224.43	190.77	82.13	5.43	1/30	1/29.0	0.308
	反向	-100.0	-181.52	-18.30	-213.35	-181.35	-111.58		1/28		
HSSC-02	正向	200.0	244.36	19.81	263.58	224.02	50.63	2.90	1/30	1/30.5	0.320
	反向	-200.0	-266.26	-16.26	-306.03	-260.13	-53.21		1/31		

注： P_{cr} 、 P_y 分别为开裂荷载、屈服荷载。

79%，这说明高强螺旋箍筋约束混凝土柱的耗能能力比普通箍筋混凝土柱更好。

2.6 抗力衰减

抗力衰减用抗力衰减系数 ξ 表示, ξ 指相同控制位移下第 i 次循环的最大荷载与第 1 次循环时荷载之比^[7]。试件抗力衰减系数 ξ 与水平位移的关系如图 7 所示。从图 7 可以看出, 抗力衰减与控制位移及加载循环次数有关, 控制位移越大, 抗力衰减越明显, 加载循环次数越多, 衰减幅度越大。这主要是因为随着位移和加载循环次数的增加, 混凝土裂缝变多, 并且裂缝宽度有所增加, 伴随混凝土保护层的脱落退出工作, 试件的有效受力面积减小, 试件损伤加剧, 承载力不断下降。通过对比可知, 普通箍筋混凝土柱随位移及加载循环次数的增加, 抗力衰减幅度逐渐增加, 而高强螺旋箍筋约束混凝土柱却表现出不同的规律, 衰减幅度减小。

2.7 箍筋用量及约束效应

配置高强螺旋箍筋可以显著地减少钢材用量。本文中对箍筋用量进行对比发现, 试件 HSSR-01, HSSR-02 比试件 RC-01 节省 29.8% 的钢材, 比试件 RC-02 节省 38% 的钢材。

此外, 高强螺旋箍筋在节约钢材的同时, 又可以有效地约束核心区混凝土, 改善混凝土的受力特性。通过对试验过程裂缝开展的观察, 发现配置普通箍筋的试件均在试件进入位移控制加载阶段前产生斜裂缝, 而配置了高强螺旋箍筋的试件, 其斜裂缝的出现都在试件进入位移控制加载阶段后, 且当混凝土剥落后, 核心区并未产生明显的斜裂缝。由此可见, 高强螺旋箍筋对试件起到了明显的约束效果, 且限制了斜裂缝向核心区混凝土开展。

2.8 设计建议

高强螺旋箍筋对混凝土的约束效果比普通箍筋

有了本质的提高, 其对框架柱延性的改善与轴压比和配箍率有很大关系, 文献[8]中的研究表明, 高强螺旋箍筋的轴压比限值与最小配箍率的大小相关, 见表 5。

通过上述分析可知, 当设计配置密置(箍筋间距 30~80 mm)的高强螺旋箍筋时, 可在规范基础上将其轴压比限值适当放宽 0.1, 且其最小配箍率不应低于规范要求, 以保证框架柱具有足够的延性。

3 结 语

- (1) 高强螺旋箍筋约束混凝土柱比普通箍筋约束混凝土柱的滞回曲线更饱满并呈梭形, 且循环加载次数更多, 在高轴压比下未出现捏缩现象, 耗能能力得到很大提高。
- (2) 高强螺旋箍筋约束混凝土柱量纲一的骨架曲线下降段更加平缓, 变形能力更强, 且高强螺旋箍筋约束混凝土柱的延性有很大提高。
- (3) 高强螺旋箍筋约束混凝土柱的抗力衰减速度及幅度比普通箍筋混凝土柱更慢、更小。
- (4) 采用高强螺旋箍筋约束混凝土设计框架柱时, 可以适当提高轴压比限值, 而其最小配箍率不宜减小。
- (5) 高强螺旋箍筋约束混凝土是作为框架柱改善其抗震性能的有效措施, 工程中可以考虑通过采用高强螺旋箍筋达到相应的抗震要求。

参考文献:

References:

[1] 史庆轩, 杨 坤, 白力更, 等. 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): 9-17.
SHI Qing-xuan, YANG Kun, BAI Li-geng, et al. Experiments on Seismic Behavior of High-strength Con-

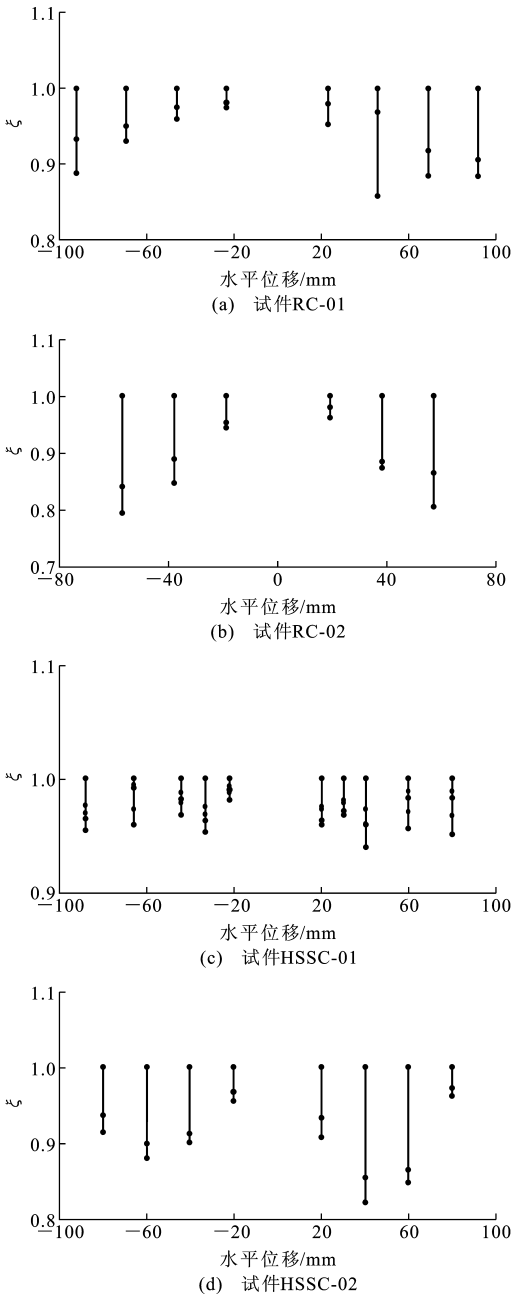


图 7 试件抗力衰减系数 ξ 与位移的关系
Fig. 7 Relations of Strength Degradation Coefficient ξ and Displacement for Specimens

crete Columns Confined with High-strength Stirrups [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44 (12): 9-17.

[2] 史庆轩,侯 炜,张兴虎,等. 箍筋约束混凝土结构及其

表 5 最小配箍率与轴压比限值的关系
Tab. 5 Relations of Minimum Reinforcement Ratio and Axial Compression Ratio Limit Value

最小配箍率/%	1.0	1.2	1.4	1.6
轴压比限值	0.7	0.8	0.9	1.0

发展展望[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(增 2): 109-114.

SHI Qing-xuan, HOU Wei, ZHANG Xing-hu, et al. Development and Prospects of Hoop Reinforcement Confined Concrete[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(S2): 109-114.

[3] GB 50152—2012, 混凝土结构试验方法标准[S].

GB 50152—2012, Testing Methods of Concrete Structure[S].

[4] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].

GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].

[5] 齐 岳, 郑文忠. 低周反复荷载下核心高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2009, 36(12): 6-12.

QI Yue, ZHENG Wen-zhong. Experimental Study of the Seismic Behavior of Concrete Columns with High Strength Core Under Low Cyclic Loading[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(12): 6-12.

[6] ZHENG Wen-zhong, JI Jing. Dynamic Performance of Angle-steel Concrete Columns Under Low Cyclic Loading— I : Experimental Study [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 7 (1): 67-75.

[7] 齐 岳. 核心高强混凝土柱力学性能试验与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

QI Yue. Experiment and Analysis on Mechanical Behavior of Columns with High Strength Concrete Core [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

[8] 姜维山, 白国良. 配复合箍、螺旋箍、X 形钢筋混凝土短柱的抗震性能及抗震设计[J]. 建筑结构学报, 1994, 15(1): 2-16, 38.

JIANG Wei-shan, BAI Guo-liang. Seismic Behavior and Structural Design of RC Stub Columns with Tied Stirrups, Spiral Stirrups and X-shape Bars[J]. Journal of Building Structures, 1994, 15(1): 2-16, 38.