

文章编号:1673-2049(2015)02-0071-06

高强箍筋约束高强混凝土柱的轴压比限值研究

杨 坤¹, 孟 和², 赵均海¹, 史庆轩³

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710032;
3. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:为了研究高强箍筋约束高强混凝土柱的抗震性能及轴压比限值,进行了 10 个高强箍筋约束高强混凝土柱在高轴压比下的低周反复水平加载试验。通过理论推导和对大量试验数据的回归分析,提出在不同抗震等级下高强箍筋约束高强混凝土柱的轴压比限值。研究表明:当体积配箍率大于 1.2% 时,高强复合箍筋约束高强混凝土柱在高轴压比(甚至轴压比超限)下,其位移延性系数均能满足大于等于 3 的抗震要求,即密配高强箍筋是保证高强混凝土框架柱在高轴压比下具有良好延性性能以及提高其轴压比限值的有效措施。

关键词:高强混凝土;高强箍筋;轴压比限值;低周反复水平加载试验;延性

中图分类号:TU375.3 **文献标志码:**A

Research on Axial Compression Ratio Limits of HSC Columns Confined with High-strength Stirrups

YANG Kun¹, MENG He², ZHAO Jun-hai¹, SHI Qing-xuan³

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, Shaanxi, China;

3. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the seismic behavior and axial compression ratio limits of high-strength concrete (HSC) columns confined with high-strength stirrups, the lateral low cyclic loading tests of ten HSC columns confined with high-strength complex stirrups under high axial compression ratio were carried out. Through theoretical deduction and regression analysis of large numbers of test data, the axial compression ratio limits of HSC columns at different seismic levels were proposed. The study results show that the displacement ductility coefficient of columns under high axial compression ratio, even excessive axial compression ratios, will meet the seismic requirements of being equal or greater than 3, when the volume stirrup ratio is greater than 1.2%. So using high-strength stirrups closely spaced is an effective measure to ensure the HSC columns good ductility and enhance the axial compression ratio limits.

Key words: high-strength concrete; high-strength stirrup; axial compression ratio limit; lateral low cyclic loading test; ductility

收稿日期:2014-09-27

基金项目:国家自然科学基金项目(50978215);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G1281076);
西安工业大学校长基金项目(XAGDXJJ1318)

作者简介:杨 坤(1982-),女,河南柘城人,讲师,工学博士,E-mail:yangkun8224@sina.com。

0 引言

为研究高强箍筋约束高强混凝土柱的抗震性能,史庆轩等^[1]进行了 10 个该类型柱在高轴压比下的低周反复水平加载试验,结果表明高强箍筋约束可明显改善高轴压比下高强混凝土框架柱的变形能力,且在保证一定延性要求下,该类型框架柱的轴压比限值可适当放宽。现行规范给出了框架柱的轴压比限值,但未考虑箍筋强度对抗震延性的影响,且其理论根据是基于普通强度混凝土,而对高强混凝土是否适用还缺乏试验验证。本文将在前述试验研究基础上,确定一个合适的轴压比限值,以使高强箍筋约束高强混凝土框架柱的抗震延性得到满足。

1 试验研究

试验^[1]共制作 10 个高强箍筋约束高强混凝土

悬臂柱试件,截面尺寸为 300 mm×300 mm,柱高 1 200 mm。试验变化参数为箍筋形式、箍筋间距和轴压比。试件设计参数见表 1,试件尺寸和配筋见图 1。箍筋采用西安建大特钢制品有限责任公司生产的高强碳素钢丝,直径为 6.5 mm;纵向钢筋为 12 根 HRB400 级钢筋,均匀分布在截面四周边。箍筋形式有井字形复合箍筋、八边形复合箍筋和井字形复合矩形螺旋箍筋 3 种,其中井字形复合箍筋、八边形复合箍筋均为由 1 根钢筋连续弯折而成的连续复合箍筋;井字形复合矩形螺旋箍筋则由 2 个矩形螺旋箍筋和 1 个方形螺旋箍筋叠套而成,如图 2 所示。高强箍筋的极限抗拉强度为 1 120 MPa,其条件屈服强度取残余应变为 0.002 时的应力,按中国现行规范中的规定^[2],可取其极限抗拉强度的 85%,见表 1;纵筋采用 HRB400 级钢筋,其屈服强度为 483 MPa。钢筋的物理力学性能实测值见表 2。

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Design Parameters of Specimens

试件编号	箍筋形式	长度/ mm	宽度/ mm	纵筋 型号	配筋 率/%	f_{cu} /MPa	箍筋间 距/mm	体积配箍 率 ρ_v /%	f_{yv} /MPa	配箍特 征值 λ_v	剪跨比	试验轴压 比 n_1
HSC-S1-1	八边形 复合箍筋	300	300	4 ￠16	2.98	72.0	50	1.92	952	0.394	4	0.572
HSC-S1-2		300	300	4 ￠16	2.98	74.0	80	1.20	952	0.240	4	0.572
HSC-S1-3		300	300	4 ￠16	2.98	80.5	50	1.92	952	0.362	4	0.450
HSC-S1-4		300	300	4 ￠16	2.98	86.4	80	1.20	952	0.210	4	0.450
HSC-S2-1	井字形 复合箍筋	300	300	4 ￠16	2.98	72.6	50	2.48	952	0.505	4	0.572
HSC-S2-2		300	300	4 ￠16	2.98	80.0	80	1.55	952	0.294	4	0.555
HSC-S2-3		300	300	4 ￠16	2.98	76.0	50	2.48	952	0.488	4	0.500
HSC-S2-4		300	300	4 ￠16	2.98	88.0	80	1.55	952	0.267	4	0.500
HSSC-S3-1	井字形复合 矩形螺旋箍筋	300	300	4 ￠16	2.98	76.2	50	2.48	952	0.487	4	0.500
HSSC-S3-2		300	300	4 ￠16	2.98	75.1	50	2.48	952	0.495	4	0.560

注: f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; f_{yv} 为箍筋强度。

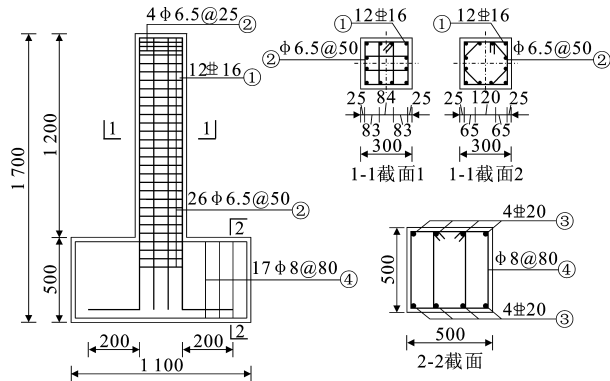


图 1 试件尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 1 Specimen Dimensions and Reinforcement (Unit:mm)

图 3 为本试验各试件的实测柱顶剪力(荷载)-水平位移滞回曲线,试验中一些典型情况,如保护层开始剥落、纵筋屈服以及箍筋屈服与拉断,均已在图

3 中标明。通过对比分析,发现它们存在以下共同特点和规律:试件屈服之前,滞回曲线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;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,同时每级控制位移下,后 2 次的承载力和刚度均比第 1 次略有降低;峰值荷载之后,由于较厚的保护层开裂、剥落,试件承载力略有下降,个别试件下降较为明显,刚度降低,滞回曲线面积继续增加;直至试件破坏,滞回曲线均比较饱满,呈稳定丰满的梭形,没有明显的捏拢现象,表现出较好的塑性变形和耗能能力。

比较图 3 中各试件的滞回曲线可知:在高轴压比的低周反复荷载下,高强复合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

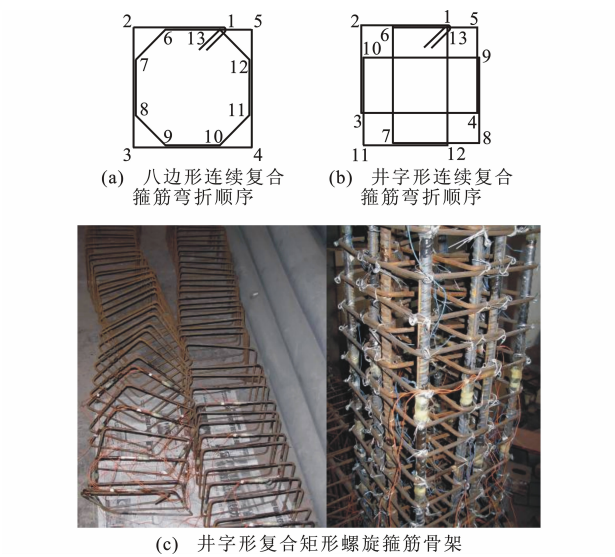


图 2 连续复合箍筋弯折顺序与井字形复合矩形螺旋箍筋骨架

Fig. 2 Bending Sequence of Continuous Complex Stirrup and Skeleton of Groined Complex Rectangular Spiral Stirrup

表 2 钢筋的物理力学性能实测值
Tab. 2 Measured Values of Physico-mechanical Property of Steel Bars

钢筋种类	直径 d / mm	屈服强度 f_y /MPa	极限强度 f_u /MPa	延伸率 δ /%	外形 特征
高强碳素钢丝	6.5	952	1 120	10.9	光面
HRB400	16.0	483	633	28.5	变形

注:高强碳素钢丝和HRB400对应的延伸率分别为试件拉伸前标距长度 $l_0=10d$ 和 $l_0=5d$ 时的延伸率, d 为钢筋直径。

的延性性能;轴压比和配箍率均对滞回曲线有显著的影响,其他条件相同时,轴压比较小或者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下降,即仍具有一定的承载力和耗能能力;当箍筋间距 s 较小($s=50\text{ mm}$)时,复合螺旋箍筋对高强混凝土的约束效果与连续复合箍筋相差不大。因此,采用密配高强复合箍筋约束高强混凝土柱是解决高轴压比下高强混凝土脆性破坏的有效措施之一,可以提高高强混凝土框架柱的轴压比限值。

根据低周反复加载试验得到各试件的开裂点、屈服点、极限点等特征点,并得到其相应的承载力、位移、延性系数及极限侧移角,结果见表 3,其中荷载与位移的正值表示推力方向的大小,负值表示拉力方向的大小;位移延性系数与极限侧移角的左列数值表示推拉 2 个方向各自的大小,右列表示推拉 2 个方向大小的平均值,由下式计算

$$\mu=(|\Delta_u^+|+|\Delta_u^-|)/(|\Delta_y^+|+|\Delta_y^-|) \tag{1}$$

$$\theta=(|\Delta_u^+|+|\Delta_u^-|)/(2H) \tag{2}$$

式中: Δ_u^+ 、 Δ_u^- 与 Δ_y^+ 、 Δ_y^- 分别为推、拉 2 个方向的屈服位移与极限位移。

由表 3 可见,大部分试件的位移延性系数均大于 3,且大部分试件的极限位移角均大于 $1/50$,这表明该类构件具有较好的延性和较强的抗倒塌能力,且随着轴压比的增加,构件的延性逐渐降低。表 3 中个别试件极限位移角小于 $1/50$,这是由于保护层过厚,保护层所占的截面比率过大,在保护层未剥落之前承受着较大比例的压力,保护层剥落对试件后期的承载力影响较大,峰值过后荷载下降较多,严重影响到构件的强度和延性性能。

2 轴压比之间的关系

在进行框架柱设计时,通常采用试验轴压比 n_t 、标准轴压比 n_k 和设计轴压比 n_d 三种,其表达式如下

$$n_t=\frac{N_t}{\mu_{f_c}A}, n_k=\frac{N_k}{f_{ck}A}, n_d=\frac{N_d}{f_cA} \tag{3}$$

式中: N_t 为轴向压力的试验值; N_d 为考虑地震作用效应组合的设计轴力; N_k 为轴向压力的标准值; μ_{f_c} 、 f_{ck} 、 f_c 分别为混凝土棱柱体抗压强度平均值、标准值和设计值; A 为柱横截面面积,取实测值。

一般情况下,试验中混凝土立方体试块的数量较少,且与试件同等环境条件和同期养护,为非标准养护,混凝土抗压强度的实测值离散程度不大,混凝土各抗压强度之间的关系为

$$f_{cu,k}\approx\mu_{f_{cu}}, f_{ck}=0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu,k} \tag{4}$$

$$f_{ck}=\mu_{f_c}, f_c=f_{ck}/\gamma_c=f_{ck}/1.4 \tag{5}$$

式中: $\mu_{f_{cu}}$ 、 $f_{cu,k}$ 分别为混凝土立方体抗压强度平均值和标准值; γ_c 为混凝土强度系数,取 1.4; α_{c1} 为棱柱体抗压强度与立方体抗压强度的比值; α_{c2} 为混凝土脆性折减系数。

在推导各轴压比之间的关系时,取 $N_t=N_k$, $\frac{N_d}{N_k}\approx 1.2$, $\gamma_c=1.4$,则由式(3)~(5)可得到

$$n_k\approx n_t \tag{6}$$

$$\frac{n_d}{n_k}=\frac{N_d f_{ck}}{N_k f_c}=1.68 \tag{7}$$

3 轴压比限值的确定

限制混凝土柱的轴压比主要是为了改善其延性,提高其抗震性能,希望柱发生大偏心受压的延性破坏。混凝土柱的轴压比限值可以根据大、小偏心

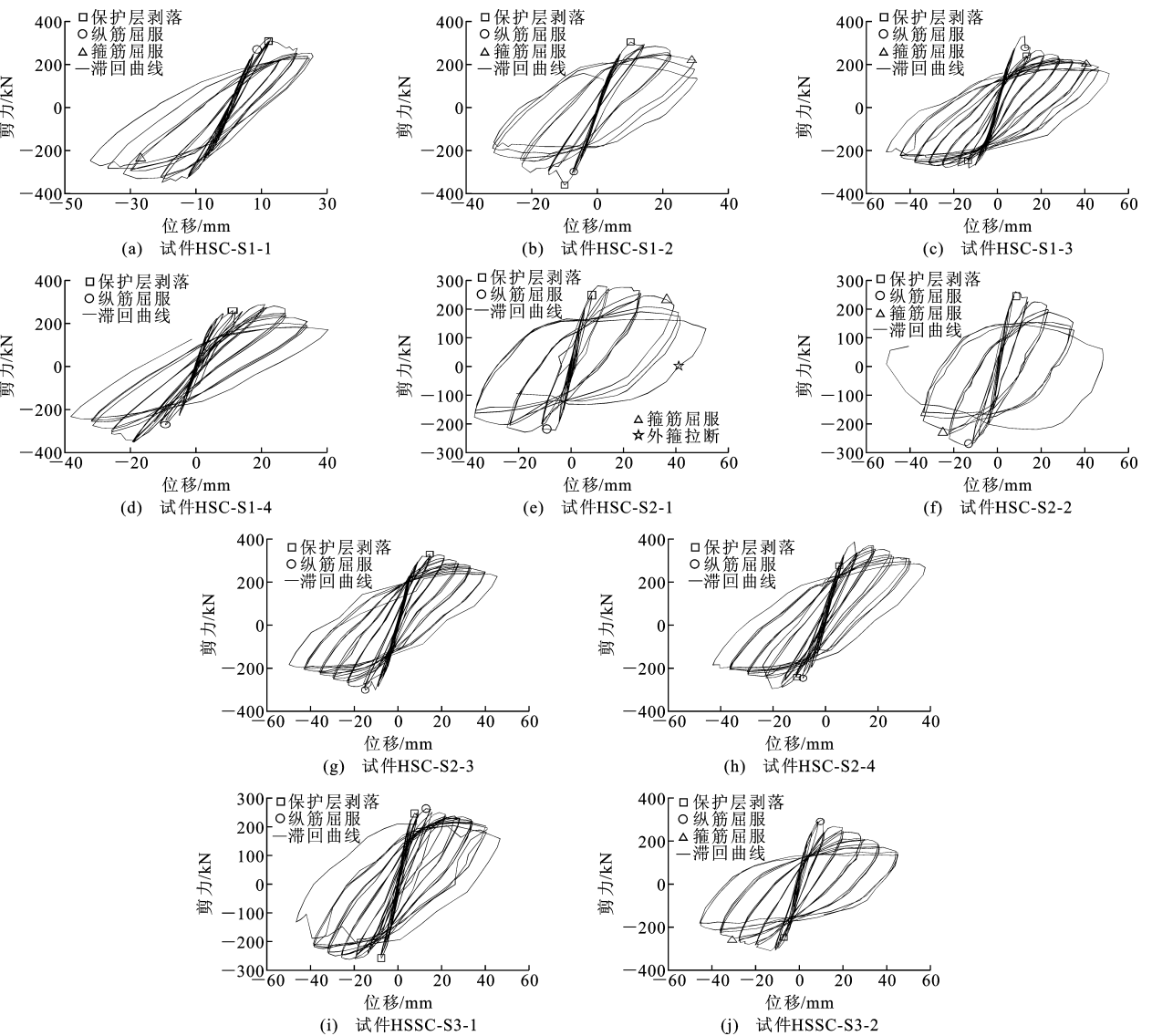


图 3 各试件的滞回曲线
Fig. 3 Hysteresis Curves of Specimens

受压界限破坏状态的条件进行推导,假定柱截面有效高度 $h_0=0.9h$,则设计轴压比计算公式为

$$n_d=1.68n_k=1.68 \frac{N_k}{f_{ck}bh}=1.68 \times 0.9\alpha_1\xi_b=1.512\alpha_1\xi_b \tag{8}$$

式中: h 为柱截面高度; b 为柱截面宽度; α_1 为混凝土受压区等效矩形应力图系数; ξ_b 为界限相对受压区高度。

按照平截面假定可得界限相对受压高度为

$$\xi_b=\beta_1/(1+\frac{f_y}{E_s\epsilon_{cu}}) \tag{9}$$

式中: β_1 为矩形应力图受压区高度与中和轴高度的比值; E_s 为钢筋的弹性模量; ϵ_{cu} 为素混凝土的极限压应变。

对于素混凝土,规范取 $\epsilon_{cu}=0.0033-(f_{cu,k}-$

$50)\times 10^{-5}$ 。保护层剥落后,核心混凝土由于箍筋的约束,其极限压应变将随着约束程度的增加而增大,甚至远远大于 0.0033,因此界限相对受压高度增大,轴压比限值亦提高。

假定高强箍筋约束高强混凝土柱的轴压比限值为 n_d^c ,界限相对受压高度为 ξ_b^c ,则其轴压比限值的提高倍数 η 为

$$\eta=\frac{n_d^c}{n_d}=\frac{\xi_b^c}{\xi_b}=(1+\frac{f_y}{E_s\epsilon_{cu}})/(1+\frac{f_y}{E_s\epsilon_{ccu}}) \tag{10}$$

式中: ϵ_{ccu} 为约束混凝土的极限压应变。

为了研究箍筋约束对轴压比限值的影响,需要求出约束混凝土的极限压应变 ϵ_{ccu} 与素混凝土极限压应变 ϵ_{cu} 的比值。根据文献[1],[3]~[10]中的试验结果,可回归得到高强箍筋约束高强混凝土的极限压应变与体积配箍率之间的关系,如图 4 所示,其

表 3 试件各阶段的实测荷载、位移和延性系数

Tab. 3 Measured Load, Displacement and Ductility Coefficients of Specimens at Various Stages

试件编号	开裂阶段		屈服阶段		极限阶段		位移延性系数		极限侧移角	
	开裂荷载 P_{cr}/kN	开裂位移 Δ_{cr}/mm	屈服荷载 P_y/kN	屈服位移 Δ_y/mm	$0.85P_u/\text{kN}$	极限位移 Δ_u/mm	μ	μ 均值	θ	θ 均值
HSC-S1-1	203	5.7	236.0	6.49				4.93		1/32.6
	-199	-5.0	-237.3	-7.01	-294.8	-34.55	4.93		1/32.6	
HSC-S1-2	200	5.0	214.8	5.36	258.8	22.10	4.12	3.11	1/50.9	1/66.0
	-205	-3.9	-256.8	-5.60	-306.1	-11.97	2.13		1/94.0	
HSC-S1-3	203	4.7	250.0	6.53	282.4	19.97	3.06	4.66	1/56.3	1/37.3
	-192	-5.6	-213.0	-6.41	-239.0	-40.30	6.29		1/27.9	
HSC-S1-4	198	4.9	240.9	7.73	245.0	27.87	3.61	3.33	1/40.4	1/41.4
	-198	-4.2	-265.2	-8.59	-297.9	-26.42	3.08		1/42.6	
HSC-S2-1	152	3.4	192.4	4.49	238.5	34.07	7.59	6.72	1/33.0	1/34.4
	-152	-3.0	-217.4	-5.25	-194.2	-31.35	5.97		1/35.9	
HSC-S2-2	149	4.0	190.8	5.35	220.8	23.03	4.30	4.70	1/48.8	1/43.9
	-149	-2.5	-209.1	-5.55	-234.1	-28.19	5.08		1/39.9	
HSC-S2-3	202	4.4	267.3	6.85	278.9	30.45	4.45	4.23	1/36.9	1/39.6
	-193	-4.6	-230.9	-6.57	-256.4	-26.38	4.01		1/42.6	
HSC-S2-4	200	3.7	300.0	5.79	328.1	25.37	4.38	3.26	1/44.3	1/47.1
	-195	-5.4	-243.7	-8.87	-249.1	-22.41	2.53		1/50.2	
HSSC-S3-1	202	4.7	228.2	5.79	222.8	33.40	5.77	5.20	1/33.7	1/32.4
	-202	-5.4	-245.5	-7.58	-222.6	-36.14	4.77		1/31.1	
HSSC-S3-2	148	2.3	213.0	4.82	257.1	22.56	4.68	5.36	1/49.9	1/41.2
	-154	-3.6	-232.6	-5.36	-259.3	-32.03	5.98		1/35.1	

注: μ 为位移延性系数, $\mu=\frac{\Delta_u}{\Delta_y}$; θ 为极限侧移角, $\theta=\Delta_u/H$, H 为柱高; P_u 为极限荷载。

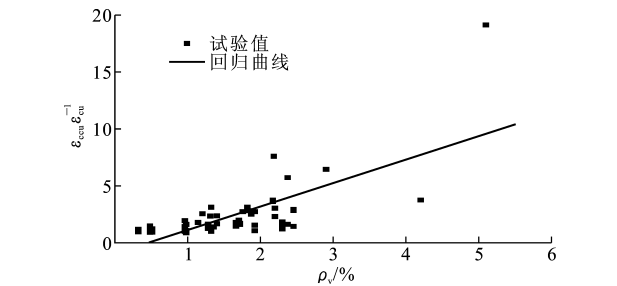


图 4 极限压应变与体积配箍率的关系

Fig. 4 Relation of Ultimate Compressive Strain and Volume Stirrup Ratio

中,定义 ϵ_{cu} 为约束混凝土应力下降至峰值的 85% 时所对应的应变值, ϵ_{cu} 取值为 0.003 3。

根据公式(10)和图 4 中的回归公式,可求得约束高强混凝土柱轴压比限值的提高倍数,如图 5 所示。当配箍率大于 1.2% 时,若纵筋为Ⅱ级钢筋,则高强箍筋约束高强混凝土柱的轴压比限值提高至少 12%,若纵筋为Ⅲ,Ⅳ级钢筋,则轴压比限值提高至少 14%;当配箍率大于 1.5% 时,则轴压比限值可提高至少 20%。确定轴压比限值是一个非常复杂的问题,其中关于位移延性系数限值的取值大小,即位

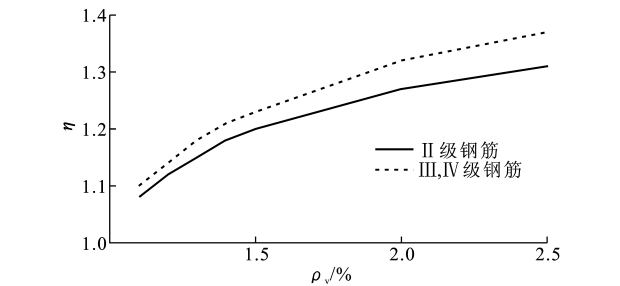


图 5 轴压比限值提高倍数与体积配箍率的关系

Fig. 5 Relation of Axial Compressive Ratio Limits Increase and Volume Stirrup Ratio

移延性系数取多大值时能保证框架柱的抗震性能,目前尚未有统一说法。文献[11]的研究表明,当框架柱位移延性系数大于 3 时,其极限位移角大都能满足抗震规范对钢筋混凝土框架结构弹塑性层间位移角 θ_u 限值的要求,即 $\theta_u \geq 1/50$ 。同时根据文献[11],[12]的研究,本文取位移延性系数 $\mu=3$ 作为限值。

同时,由上述试验结果可知,当体积配箍率大于 1.2% 时,高强复合箍筋约束高强混凝土柱在高轴压比(甚至轴压比超限)下,其位移延性系数均能满足

$\mu \geq 3$ 的抗震要求。如当设计轴压比为 0.96 且配箍率为 1.2% 时(试件 HSC-S1-2),其位移延性系数 $\mu = 3.11$ 。因此, $n_d \approx 0.96$ 且 $\rho_v \geq 1.2\%$ 时, $\mu \geq 3$, 根据文献[12],此轴压比可作为高强箍筋混凝土柱抗震等级为二级时轴压比限值的参考值,抗震一级、三级时设计轴压比分别减、增 0.1,即分别为 0.86, 1.06。

综合考虑上述理论分析和试验研究结果,本文建议高强箍筋约束高强混凝土柱的轴压比限值可比中国现行规范适当提高,见表 4。

表 4 高强箍筋约束高强混凝土柱的轴压比限值
Tab. 4 Compression Ratio Limits of HSC Columns
Confined with High-strength Stirrups

结构体系	不同抗震等级时的轴压比限值		
	一级	二级	三级
框架结构	0.8	0.9	1.0

4 结 语

通过理论分析和试验研究,得出结论:密配高强箍筋是保证高强混凝土框架柱在高轴压比下具有良好延性性能以及提高其轴压比限值的有效措施;在高轴压比下,该类型柱的滞回曲线仍呈稳定丰满的梭形,具有较好的延性性能、耗能能力和较强的抗倒塌能力;当体积配箍率大于 1.2% 时,高强复合箍筋约束高强混凝土柱在高轴压比(甚至轴压比超限)下,其位移延性系数均能满足 $\mu \geq 3$ 的抗震要求;建议高强箍筋约束高强混凝土柱的轴压比限值可比中国现行规范适当提高,对于抗震等级为一、二、三级的框架结构,其轴压比限值分别为 0.8,0.9,1.0。

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

[2] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].

[3] 史庆轩,杨 坤,刘维亚,等. 高强箍筋约束高强混凝土轴心受压力学性能试验研究[J]. 工程力学,2012, 29(1):141-149.

SHI Qing-xuan, YANG Kun, LIU Wei-ya, et al. Experimental Study on Mechanical Behavior of High Strength Concrete Confined by High-strength Stirrups Under Concentric Loading[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(1): 141-149.

[4] RAZVI S R, SAATCIOGLU M. Test of High-strength Concrete Columns Under Concentric Loading [R]. Ottawa: Ottawa Carleton Earthquake Engineering Research Centre, 1996.

[5] NAGASHIMA T, SUGANO S, KIMURA H, et al. Monotonic Axial Compression Test on Ultra-high-strength Concrete Tied Columns [C]//WCEE. Proceedings of 10th World Conference on Earthquake Engineering. Rotterdam: Balkema A A, 1992: 2983-2988.

[6] NISHIYAMA M, FUKUSHIMA I, WATANABE F, et al. Axial Loading Tests on High-strength Concrete Prisms Confined by Ordinary and High-strength Steel [C]//ACI. Proceedings of High-strength Concrete. Lillehammer: ACI, 1993: 322-329.

[7] CUSSON D, PAULTRE P. High-strength Concrete Columns Confined by Rectangular Ties[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(3): 783-804.

[8] 胡海涛,叶知满. 复合箍筋约束高强混凝土应力应变性能[J]. 工业建筑, 1997, 27(10): 23-28.
HU Hai-tao, YE Zhi-man. Stress-strain Behavior of High-strength Concrete Confined by Overlapping Hoops[J]. Industrial Construction, 1997, 27(10): 23-28.

[9] 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, 29(6): 820-830.

[10] HONG K M, HAN S H, YI S T. High-strength Concrete Columns Confined by Low-volumetric-ratio Lateral Ties [J]. Engineering Structure, 2006, 28(9): 1346-1353.

[11] 方鄂华,翁义军,沈聚敏. 轴压比和含箍率对框架柱延性的影响[J]. 建筑结构, 1983(3): 26-31.
FANG E-hua, WENG Yi-jun, SHEN Ju-min. Effect on the Ductility of Frame Columns of Axial Compression Ratio and Containing Hoop Rate [J]. Building Structure, 1983(3): 26-31.

[12] 贾金青,赵国藩. 钢骨高强混凝土短柱力学性能[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2006.
JIA Jin-qing, ZHAO Guo-fan. Mechanics Performance of Steel Reinforced High-strength Concrete Short Columns[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2006.