

文章编号: 1001-4888(2016)05-0617-07

配矩形螺旋箍筋型钢高强混凝土 短柱轴压性能试验研究^{*}

柯晓军^{1,2}, 伍小萍¹, 陈宗平^{1,2}, 杨震¹

(1. 广西大学 土木建筑工程学院 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 南宁 530004;

2. 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 南宁 530004)

摘要: 为研究配矩形螺旋箍筋型钢高强混凝土短柱轴压性能, 以混凝土强度、体积配箍率和配箍形式为变化参数设计 6 个试件进行轴心受压加载试验。试验结果表明, 所有试件的破坏形态和荷载—轴向位移曲线相似, 配螺旋箍筋的试件变形性能要优于配普通箍筋试件, 配矩形螺旋箍筋的试件极限承载力随混凝土强度、体积配箍率的增加而提高。在试验基础上, 采用基于叠加理论的计算方法对配矩形螺旋箍筋型钢高强混凝土短柱轴压承载力进行计算, 给出了相关设计建议, 研究结果可为配矩形螺旋箍筋型钢高强混凝土短柱的工程应用提供科学依据。

关键词: 型钢混凝土; 高强混凝土; 螺旋箍筋; 轴压试验; 极限承载力

中图分类号: TU398

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-15-237

0 引言

型钢高强混凝土结构是指在钢筋高强混凝土截面中配置适量型钢而得到的一种组合结构, 是现代钢结构和混凝土结构发展的新方向。与钢筋高强混凝土结构相比, 型钢高强混凝土结构由于截面内配置了型钢, 具有承载力高、刚度大、抗震能力强的特点, 适合在高层建筑及抗震设防高烈度区进行推广应用。目前, 有关型钢高强混凝土竖向构件的研究多集中于配普通箍筋型钢高强混凝土柱, 但已有研究中构件延性仍不够理想, 主要在于高强混凝土脆性显著, 后期横向变形迅速增加, 保护层混凝土剥落, 箍筋出现弯钩松动、拉直等现象, 不能约束核心混凝土, 导致承载力降低速率加快, 变形能力减弱^[1-8]。

为了进一步改善型钢高强混凝土柱的变形性能, 诸多学者基于螺旋箍筋研究成果, 提出配置螺旋箍筋的优化方案, 即充分利用其具有无弯钩、连续整体的特性, 有效约束核心混凝土, 节约钢材、方便施工。目前, 翁正强等人^[9,10]对配五螺旋和星形螺旋的新型复合螺旋箍筋混凝土柱进行轴压和反复荷载抗震试验, 研究表明螺旋箍筋对混凝土约束良好, 能够有效提高混凝土柱的强度和变形能力。本课题组^[11]为研究配矩形螺旋箍筋型钢高强混凝土短柱的抗震性能, 设计 12 个试件进行低周反复荷载试验, 研究表明, 采用配矩形螺旋箍筋的构造措施能有效提高型钢高强混凝土柱的抗震承载力和变形能力。但配螺旋箍筋型钢高强混凝土属于一种新型组合结构, 相关研究资料缺乏, 设计方法不够成熟^[9-11], 亟需进行更多的试验研究, 以全面掌握配螺旋箍筋型钢高强混凝土柱在不同应力状态下的破坏机理和受力性能, 并提出相关设计方法。因此, 本文在前期抗震性能试验研究基础上, 对 5 个配矩形螺旋箍筋的型钢

^{*} 收稿日期: 2015-12-14; 修回日期: 2016-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578163, 51508112), 广西自然科学基金资助项目(2015GXNSFBA139210), 广西科学研究与技术开发计划项目(桂科转 14124005-1-2), 广西教育厅中青年教师基础能力提升项目(KY2016YB027), 广西重点实验室系统性研究项目资助(2016ZDX02)

通讯作者: 陈宗平(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢与混凝土组合结构、异形柱结构及再生混凝土结构的研究。Email: zpch@gxu.edu.cn

高强混凝土柱和 1 个普通箍筋型钢高强混凝土柱对比试件进行轴心加载试验,以期揭示配矩形螺旋箍筋的型钢高强混凝土柱的受压机理和破坏形态,分析承载力、变形能力等力学性能,为研究配矩形螺旋箍筋型钢高强混凝土柱轴压承载力计算理论提供试验依据。

1 试验概况

以混凝土强度、箍筋间距和配箍形式为变化参数,设计 5 个配矩形螺旋箍筋型钢高强混凝土柱试件 (SRHC-1~SRHC-5)和 1 个普通箍筋型钢高强混凝土柱对比试件 (SRHC-6)进行轴心受压加载试验。所有柱截面尺寸 $b\times h$ 为 $120\text{mm}\times 120\text{mm}$,高度 l_0 为 360mm ;工字型钢采用强度为 Q235 的 3 块扁钢 (60×3.5) 焊接而成,纵筋采用 4 根直径为 12mm 的 HRB400 级钢筋,箍筋采用直径为 6mm 的 HRB335 级钢筋。试件设计参数如表 1 所示,试件截面配筋及应变布置情况(中部截面)如图 1 所示,应变片 1~4 用于量测纵筋应变值,应变片 5 和 6 用于量测箍筋应变值,应变片 7 和 8 用于量测型钢应变值,此外,在试件中部截面还布置了混凝土应变片以量测混凝土应变值。试验采用 300t 的液压试验机按照位移控制加载制度进行加载,加载速率为 0.01mm/s 。

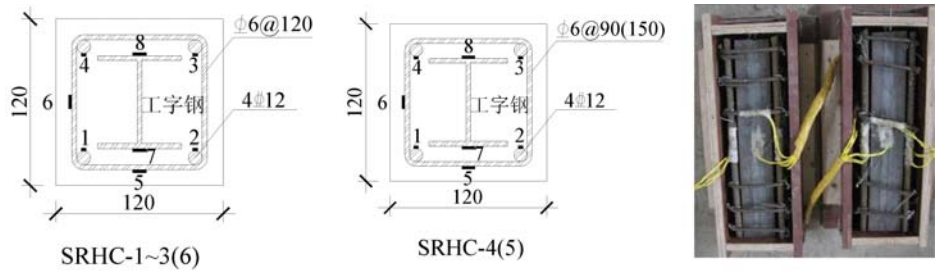


图 1 试件截面配筋及应变片布置

Fig. 1 Sections and strain gauge arrangement of specimens

表 1 试件设计参数及峰值荷载

Tab. 1 Design parameters and bearing capacity of specimens

试件编号	混凝土强度	箍筋间距	箍筋形式	峰值荷载 $N_u(\text{kN})$
SRHC-1	C60	$\Phi 6@120$	螺旋箍筋	887.37
SRHC-2	C70	$\Phi 6@120$	螺旋箍筋	1037.28
SRHC-3	C80	$\Phi 6@120$	螺旋箍筋	936.37
SRHC-4	C70	$\Phi 6@90$	螺旋箍筋	1110.80
SRHC-5	C70	$\Phi 6@150$	螺旋箍筋	903.18
SRHC-6	C70	$\Phi 6@120$	普通箍筋	1070.19

配制高强混凝土所需材料有:42.5R 海螺牌普通硅酸盐水泥,天然黄砂,粒径为 $5\sim 20\text{mm}$ 的连续级配碎石,自来水,AF-C 聚羧酸高效减水剂。混凝土配合比及 150mm 立方体试块抗压强度 f_{cu} 见表 2。钢筋和型钢都按照现行国家标准《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T228—2002) 预留样品进行材性试验,实测力学性能指标如表 3 所示。

表 2 混凝土配合比及性能指标

Tab. 2 Design mix proportion and performance index of concrete

混凝土 强度等级	材料用量($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)				矿渣(%)	硅灰(%)	减水剂(%)	$f_{cu}(\text{MPa})$
	水泥	砂	碎石	水				
C60	408	576	1283	163	15	10	1.0	70.52
C70	482	664	1097	160	15	10	1.5	75.01
C80	533	745	1117	160	15	10	1.5	79.44

表 3 钢材力学性能指标

Tab. 3 Mechanical performance indexes of steels

钢材类型	屈服强度 f_y (MPa)	极限强度 f_u (MPa)	弹性模量 E_s ($\times 10^5$ MPa)
$\Phi 6$	277	380	1.677
$\Phi 12$	502	639	2.336
扁钢	304	363	2

2 主要试验结果及分析

2.1 试验主要破坏过程

所有试件在加载初期的弹性阶段,型钢、钢筋和混凝土的应变较小,能协同工作。随着荷载的增加,试件中部出现细微纵向裂缝,并且裂缝逐渐增多和扩展,延伸贯通整个试件。由于型钢腹板侧面混凝土的约束力薄弱,出现的裂缝相对较多。当加载至约为峰值荷载的 80% 时,型钢翼缘处对应的混凝土表面产生明显的纵向裂缝,可能是因为型钢与混凝土界面发生滑移所引起的。峰值荷载过后随着位移的增加,裂缝变宽并将柱身划分为若干个小柱体,同时伴有脆裂的声响,最终因混凝土发生劈裂、压酥、剥落而停止加载。



图 2 试件破坏形态(依次为 SRHC-1~SRHC-6)

Fig. 2 Failure mode of specimens (from SRHC-1 to SRHC-6 respectively)

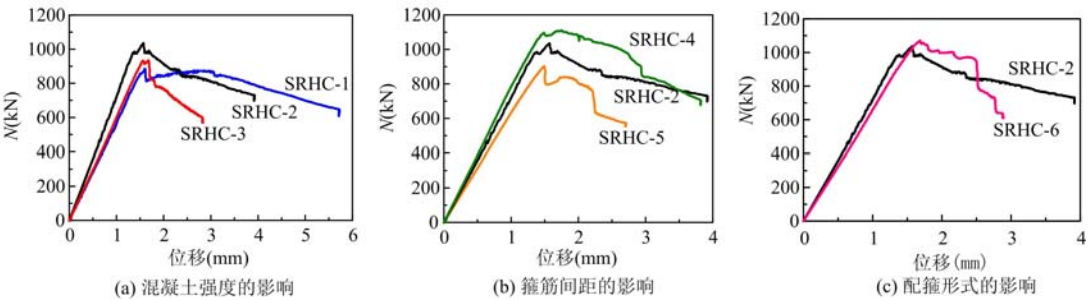


图 3 试件荷载—轴向位移曲线

Fig. 3 Load-axial displacement curves of specimens

2.2 荷载—轴向位移曲线

图 3 给出了试验机自动采集的荷载—轴向位移全过程变化曲线。由图 3 可见,所有试件的荷载—位移曲线变化趋势相似,先后经历上升段和下降段两个历程。加载初期,试件的荷载与轴向变形近似呈线性关系增长,轴压刚度变化稳定,但下降段变化差异较大。由图 3(a),对比试件 SRHC-1、SRHC-2 和 SRHC-3 发现,混凝土强度越高,试件曲线下下降段越陡峭,极限位移越小,说明提高混凝土强度,试件变形能力降低;由图 3(b),对比试件 SRHC-5、SRHC-2 和 SRHC-4 发现,随着螺旋箍筋间距的减小,试件极限承载力增大,变形能力增强,这是因为加密螺旋箍筋能提高其对核心混凝土的横向约束力,抑制或延缓混凝土微裂缝的产生;由图 3(c)可知,与配普通箍筋的试件 SRHC-6 相比,配螺旋箍筋试件 SRHC-

2 的曲线达到峰值荷载后,下降段平缓,极限位移增加,表明配置螺旋箍筋后能有效提高型钢高强混凝土柱的变形能力。

2.3 荷载—应变曲线

图 4 给出了试件中部截面各受力部分应变随荷载的变化关系曲线。

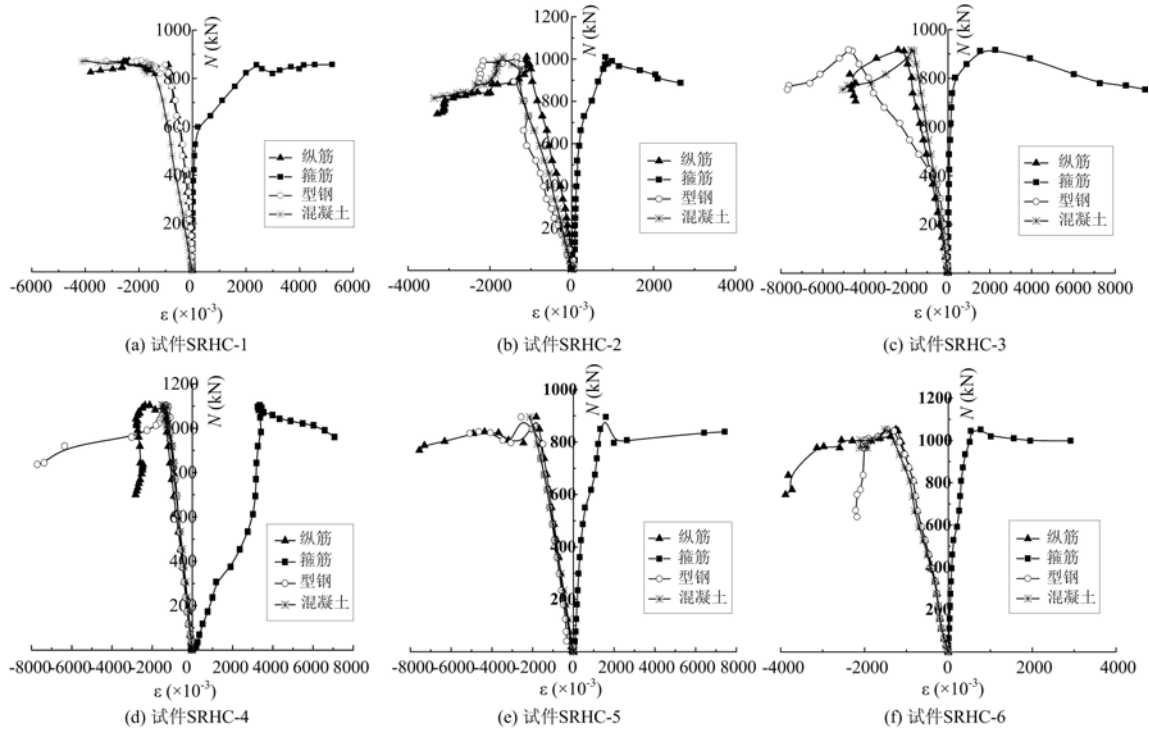


图 4 试件荷载—应变曲线

Fig. 4 Load-strain curves of specimens

对比配螺旋箍筋的试件 SRHC-2 和配普通箍筋的试件 SRHC-6,在达到峰值荷载的 70% 前,两者箍筋应变变化都较小,对混凝土的约束作用较弱,但随后加载至峰值荷载的过程中,配螺旋箍筋试件的箍筋应变明显大于配普通箍筋试件,说明螺旋箍筋对混凝土具有更好的约束作用;对比试件 SRHC-5、SRHC-2 和 SRHC-4,随着箍筋间距的减小,峰值荷载对应的箍筋应变值逐渐增大,说明适量提高体积配箍率,可增强对核心混凝土的约束作用,从而提高试件极限承载力。从整个试验结果来看,加载初期直至峰值荷载前,箍筋应变的增长缓慢,且绝大多数试件没有屈服,但破坏前都已超过屈服应变,表明箍筋约束作用对试件后期的变形能力影响更加突出。

对比配螺旋箍筋的试件 SRHC-2 和配普通箍筋的试件 SRHC-6,配螺旋箍筋试件达到峰值荷载时对应的混凝土峰值应变值与极限应变值明显大于配普通箍筋试件,表明配置螺旋箍筋试件变形性能更好,其主要原因是螺旋箍筋具有整体连续的特性,较普通箍筋能更好地延缓或抑制核心混凝土受压开裂,改善混凝土的延性;对比试件 SRHC-5、SRHC-2 和 SRHC-4 发现,加密螺旋箍筋可以提高混凝土的极限应变值,从而改善构件变形性能。

随着荷载的增加,型钢和纵筋应变逐渐增大。当达到峰值荷载时,各试件中型钢和纵筋的应变值几乎都已达到或超越屈服应变值,表明型钢和纵筋的承载能力得到充分发挥。

3 影响因素分析

3.1 箍筋类型的影响

图 5(a) 给出了在混凝土强度和箍筋间距相同的情况下,不同配箍形式的型钢高强混凝土短柱试件极限承载力。由图 5(a) 可见,配螺旋箍筋型钢高强混凝土试件的极限承载力与配普通箍筋型钢高强混凝土试件极限承载力相近,两者分别为 1037.28kN 和 1070.19kN,表明配箍形式对试件极限承载力影

响不明显。

3.2 箍筋间距的影响

图 5(b)给出了在混凝土强度相同条件下,不同箍筋间距对配螺旋箍筋型钢高强混凝土试件极限承载力的影响。由图 5(b)可见,与试件 SRHC-4($s=90\text{mm}$, $N_u=1110.8\text{kN}$)相比,试件 SRHC-2($s=120\text{mm}$, $N_u=1037.28\text{kN}$)和 SRHC-5($s=150\text{mm}$, $N_u=903.18\text{kN}$)的降幅分别为 6.62%和 18.69%,表明在相同的混凝土强度等级下,配螺旋箍筋型钢高强混凝土试件极限承载力随箍筋间距的增大而降低,这是由于螺旋箍筋间距增大会削弱箍筋对核心混凝土的约束作用。

3.3 混凝土强度的影响

图 5(c)给出了在体积配箍率相同条件下,不同混凝土强度对配螺旋箍筋型钢高强混凝土试件极限承载力的影响。由图 5(c)可见,随混凝土强度的增加,配螺旋箍筋型钢高强混凝土试件的极限承载力提高,与试件 SRHC-1($f_{cu}=70.52\text{MPa}$, $N_u=887.37\text{kN}$)相比,试件 SRHC-2($f_{cu}=75.01\text{MPa}$, $N_u=1037.28\text{kN}$)和 SRHC-3($f_{cu}=79.44\text{MPa}$, $N_u=936.37\text{kN}$)的增幅分别为 16.9%和 5.5%。

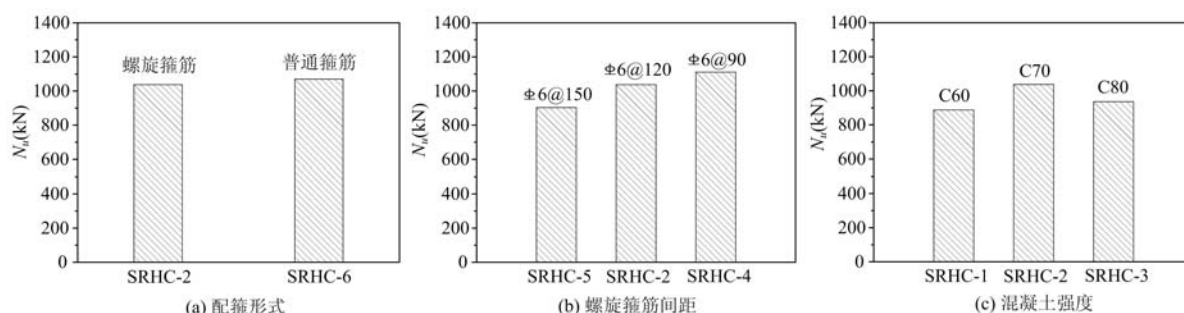


图 5 不同设计参数对极限承载力的影响

Fig. 5 Influence of difference design parameters on bearing capacity

4 轴压承载力计算

目前,我国颁布的《型钢混凝土组合结构技术规程》(JGJ 138—2001)和《钢筋混凝土结构技术规程》(YB 9082—2006)均未对型钢混凝土柱轴心受压承载力计算进行具体说明,也没有相关的计算公式。但赵鸿铁^[12]、刘维亚^[13]等学者在大量试验研究基础上,提出了基于叠加理论的型钢混凝土柱轴心受压承载力计算方法,但该理论方法是否适用于配矩形螺旋箍筋型钢高强混凝土柱的极限承载力计算,还有待验证。

赵鸿铁在文献[12]中提出以下计算公式:

$$N = \varphi(f_c A_c + f_y A_s + f_a A_a) \quad (1)$$

式中, N 为轴向荷载; A_c 、 f_c 分别为混凝土的截面面积、轴心抗压强度; A_s 、 f_y 分别为纵向钢筋的截面面积、屈服强度; A_a 、 f_a 分别为型钢截面面积、屈服强度; φ 为稳定系数,取值原则:当 $l_0/i < 28$ 时, $\varphi=1$;当 $28 \leq l_0/i < 120$ 时, $\varphi=1.15-0.005(l_0/i)$;当 $l_0/i \geq 120$ 时, $\varphi=1.03-0.0004(l_0/i)$ 。其中 i 为换算最小回转半径,可按式计算:

$$i = \sqrt{I_{src}/A_{src}}, I_{src} = I_c + \alpha_{ac} I_a + \sigma_{sc} I_s, A_{src} = A_c + \alpha_{ac} A_a + \alpha_{sc} A_s, \quad (2)$$

$$\alpha_{ac} = E_a/E_c, \alpha_{sc} = E_s/E_c, E_c = \frac{10^5}{2.2 + (33/f_{cu})}$$

式中, I_{src} 、 A_{src} 分别为柱的换算截面惯性矩和换算截面面积; E_a 、 E_s 、 E_c 分别为型钢、钢筋和混凝土的弹性模量。

刘维亚在文献[13]中提出以下计算公式:

$$N = 0.9\varphi(f_c A_c + f_y A_s + f_a A_a) \quad (3)$$

式中参数符号的物理意义同前。

表 4 给出了上述两种计算方法对配矩形螺旋箍筋型钢高强混凝土轴压短柱极限承载力计算的结

果。由表 4 可见,采用公式(1)所得计算结果与试验值相比的均值为 1.073,方差为 0.105;采用公式(3)所得计算结果与试验值相比的均值为 0.967,方差为 0.094。公式(3)的计算结果偏于安全,且与试验结果更加吻合,建议实际工程中采用该式来预测配矩形螺旋箍筋型钢高强混凝土短柱的轴压承载力。

表 4 试件轴压承载力计算值与试验值比较

Tab. 4 Comparison of the ultimate bearing capacity of theoretical and experimental values

试件编号	试验值 N_u (kN)	公式(1)理论计算值		公式(3)理论计算值	
		计算值 N_c (kN)	N_c/N_u	计算值 N_c (kN)	N_c/N_u
SRHC-1	887.37	1014.80	1.14	913.32	1.03
SRHC-2	1037.28	1052.49	1.01	947.24	0.91
SRHC-3	936.37	1110.43	1.19	999.38	1.07
SRHC-4	1110.80	1052.49	0.95	947.24	0.85
SRHC-5	903.18	1052.49	1.17	947.24	1.05
SRHC-6	1070.19	1052.49	0.98	947.24	0.89

5 结论

通过对 6 个试件受力破坏过程的认真观察和试验数据的细致分析,得到以下结论:

(1) 在轴向荷载作用下,配矩形螺旋箍筋型钢高强混凝土短柱与普通箍筋型钢高强混凝土短柱的破坏形态相似,均为纵向劈裂破坏。

(2) 所有型钢高强混凝土短柱试件荷载—轴向变形曲线的变化趋势类似,都经历上升段和下降段,但配螺旋箍筋试件的曲线下下降段平缓,变形较大,表明配置螺旋箍筋能提高试件的变形能力。

(3) 配矩形螺旋箍筋型钢高强混凝土短柱的极限承载力与普通箍筋型钢高强混凝土短柱相近,随混凝土强度和体积配箍率的提高而增加。

(4) 在试验基础上,采用基于叠加法的计算理论进行分析,给出能够有效预测配矩形螺旋箍筋型钢高强混凝土短柱轴压承载力的现有计算方法,该方法可用于指导工程应用。

参考文献:

- [1] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京:清华大学出版社, 2013:158—178 (GUO Zhenhai. Principle of reinforced concrete [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013:158—178 (in Chinese))
- [2] El-Tawil S, Deierlein G G. Strength and ductility of concrete encased composite columns [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(9):1009—1019.
- [3] Xiao Y, Anderson J G, Yaprak T T. Seismic behavior of high-strength steel reinforced concrete composite columns [C]// Xiao Y, Mahin S. Composite and Hybrid Structures—Proceedings of 6th ASCS International Conference, Los Angeles; International Association for Cooperation and Research of Steel-Concrete Composite Structure, 2000:382—392.
- [4] 李俊华, 王新堂, 薛建阳 等. 低周反复荷载下型钢高强混凝土柱受力性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(7):11—18 (LI Junhua, WANG Xintang, XUE Jianyang, et al. Experimental study on the performance of steel reinforced high-strength concrete columns under low cyclic reversed loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(7):11—18 (in Chinese))
- [5] 闫长旺, 贾金青, 余芳 等. 钢骨高强混凝土短柱抗震性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008(S1):234—238 (YAN Changwang, JIA Jinqing, YU Fang, et al. Experimental research on steel reinforced high-strength concrete short columns in seismic performance [J]. Journal of Building Structures, 2008(S1):234—238 (in Chinese))
- [6] 郑山锁, 张亮, 李磊 等. 型钢高强混凝土框架柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(5):124—131 (ZHENG Shansuo, ZHANG Liang, LI Lei, et al. Experimental research on seismic behavior of steel high strength and high performance reinforced concrete frame columns [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(5):124—131 (in Chinese))

- [7] 殷小波, 吕西林, 卢文胜. 大比尺高含钢率型钢混凝土柱滞回性能试验[J]. 土木工程学报, 2012, 45(12):91—98 (YIN Xiaowei, LV Xilin, LU Wensheng. Experimental study on hysteretic properties of large-size SRC columns with high ratio of encased steel [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(12):91—98 (in Chinese))
- [8] 马辉, 薛建阳, 刘云贺 等. 型钢再生混凝土组合柱水平承载力试验及计算方法研究[J]. 实验力学, 2015, 30(4):455—468 (MA Hui, XUE Jianyang, LIU Yunhe, et al. Analysis on the calculation methods of the horizontal bearing capacity for steel reinforced recycled concrete columns [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(4):455—468 (in Chinese))
- [9] 翁正强, 伊衍梁, 王瑞祯 等. 预铸五螺箍矩形 SRC 柱之轴压与反复载重抗震试验[J]. 建筑钢结构进展, 2007, 9(6):12—19 (WENG Chengchiang, YIN Yenliang, WANG Juichen, et al. Axial compression and seismic behavior of precast rectangular SRC columns with 5-spirals [J]. Progress in Steel Building Structures, 2007, 9(6):12—19 (in Chinese))
- [10] 翁正强, 伊衍梁, 王瑞祯 等. 预制星形螺箍 SRC 柱的轴压与反复荷载抗震性能[J]. 建筑钢结构进展, 2010, 12(1):1—9 (WENG Chengchiang, YIN Yenliang, WANG Juichen, et al. Axial and cyclic loading tests on the seismic performance of precast SRC columns confined with star spiral [J]. Progress in Steel Building Structures, 2010, 12(1):1—9 (in Chinese))
- [11] 陈宗平, 柯晓军, 陈宇良. 配矩形螺旋箍筋型钢高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(7):41—49 (CHEN Zongping, KE Xiaojun, CHEN Yuliang. Experimental study on seismic behavior of steel reinforced concrete high-strength concrete columns confined by square spiral stirrups [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(7):41—49 (in Chinese))
- [12] 赵鸿铁. 组合结构设计原理[M]. 北京:高等教育出版社, 2005 (ZHAO Hongtie. Design principles of composite structures [M]. Beijing: Higher Education Press, 2005 (in Chinese))
- [13] 刘维亚. 钢与混凝土组合结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008 (LIU Weiya. Steel & concrete composite structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008 (in Chinese))

Experimental Study of Axial Compression Performance of SRHC Short Column Confined by Square Spiral Stirrup

KE Xiao-jun^{1,2}, WU Xiao-ping¹, CHEN Zong-ping^{1,2}, YANG Zhen¹

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to study the axial compression performance of steel reinforced high-strength concrete (SRHC) short columns confined by square spiral stirrups, taking concrete strength, stirrup volume ratio and stirrup type as variable parameters, six specimens were designed for axial compression experiment. Test results indicate that all SRHC specimens' failure mode is similar to load-axial displacement curves; the deformation performance of SRHC specimens with square spiral stirrups is better than that of SRHC specimen with normal stirrups; the ultimate bearing capacity of SRHC specimens with square spiral stirrups increases along with the increase of concrete strength and stirrup volume ratio. Based on experimental results, the axial compression bearing capacity calculation of SRHC short column specimens with square spiral stirrups was carried out based on superposition theory; relative design suggestion was presented. Above results may provide scientific evidence for engineering application of steel reinforced high-strength concrete short column confined by square spiral stirrups.

Keywords: steel reinforced concrete; high-strength concrete; spiral stirrup; axial compression test; ultimate bearing capacity