

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201812034

复合螺旋箍筋约束混凝土柱偏压性能试验

李明翰¹, 周 威^{1,2,3}, 刘明建¹, 刘广义^{1,2,3}, 张 松⁴

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室 (哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090; 3. 土木工程智能防灾减灾工业和信息化部重点实验室 (哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090; 4. 中国人民解放军61905部队, 沈阳 110005)

摘 要: 采用复合螺旋箍筋约束混凝土柱, 能在提高混凝土核心强度的同时, 实现高延性, 可支撑高地震设防烈度区重要结构的设计建造. 以箍筋间距与轴向力偏心距为基本参数, 完成了6根复合螺旋箍筋约束混凝土柱偏心受压试验, 并与同条件下两类常规复合箍筋柱进行对比. 获得了轴向力-侧向变形关系、轴向力-箍筋应变关系及轴向力-压区边缘混凝土压应变关系等, 发现不同螺距/间距及偏心距下试验柱先后出现纵筋屈服与混凝土压碎的破坏模式. 试验结果表明, 破坏时采用不高于80 mm螺距/间距的复合螺旋箍筋柱正截面承载力及以柱高中点侧移定义的位移延性系数较常规螺旋箍筋柱有一定提高. 结合试验结果, 发现偏压复合螺旋箍筋柱破坏机制与螺旋箍筋强核心约束和外围方形箍筋次约束的复合作用明显相关, 破坏主要是核心螺旋箍筋约束失效后混凝土压碎引起, 而外围复合箍筋在峰值荷载后对混凝土仍具有一定约束作用. 基于破坏机制, 区分了两类约束区对柱承载力贡献, 提出了复合螺旋箍筋柱偏压承载力计算方法.

关键词: 复合螺旋箍筋; 约束混凝土; 偏压承载力; 延性

中图分类号: TU375.3

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)12-0113-08

Experimental investigation of reinforced concrete columns with composite spiral stirrups under eccentric loading

LI Minghan¹, ZHOU Wei^{1,2,3}, LIU Mingjian¹, LIU Guangyi^{1,2,3}, ZHANG Song⁴

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China; 3. Key Lab of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters (Harbin Institute of Technology), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150090, China; 4. 61905 Troop of People's Liberation Army, Shenyang 110005, China)

Abstract: The application of composite spiral stirrups confined reinforced concrete columns can improve the core concrete strength and realize high ductility, which can be utilized to design and construct important structures in seismic zones of high intensity. A total of 6 concrete columns confined by composite spiral stirrups were tested under eccentric loading with different stirrup spacing and axial force eccentricities, and the results were compared with other two conventional composite stirrups confined columns under the same condition. The relationships of axial force with lateral deformation, stirrup strain, and compressive strain at the edge of the compression zone were obtained. Failure modes of longitudinal reinforcement yield and concrete crushing of the columns occurred successively under different spacing and eccentricities. Test results indicate that when the spacing is smaller than 80 mm, the composite spiral stirrups confined columns exhibited higher bearing capacity than conventional columns, the strength of the confined concrete is increased, and the defined displacement ductility is improved. Furthermore, the dual-confinement to the concrete consisted of core confinement by spiral stirrups and surrounding confinement by rectangular stirrups had significant effects on failure modes. The failure of the specimen was mainly caused by crushing and spalling of the concrete after buckling of longitudinal reinforcement. It was observed in the tests that the rectangular stirrups continuously provided a superior confinement effect on concrete even after the peak load while the spiral stirrups lost its efficacy. Based on the failure mechanism and the contribution of two different transverse reinforcement, spiral stirrups and rectangular stirrups, a calculation formula for eccentric bearing capacity of composite spiral stirrups confined concrete columns was proposed.

Keywords: composite spiral stirrups; confined reinforced concrete; eccentric bearing capacity; ductility performance

收稿日期: 2018-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(51778186)

作者简介: 李明翰(1993—), 男, 硕士研究生;

周 威(1977—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 周 威, zhouwei-hit@163.com

高地震设防烈度区混凝土建筑应使抗侧混凝土结构保证高延性, 而高层建筑中满足轴压比等抗震措施要求的框架柱截面尺寸通常较大, 在层高受限的情况下, 强震时容易发生柱剪切破坏而出现“薄弱

层”,不利于“强柱弱梁”的实现.为此,高设防烈度区的混凝土结构对高延性混凝土柱提出了客观需求.

在螺旋箍筋外部密布复合箍筋,组合形成的复合螺旋箍筋约束混凝土柱,提高混凝土强度和极限压应变的同时,更能通过外围复合箍筋与芯柱螺旋箍筋的复合约束作用有效提高变形能力^[1],可利用普通混凝土与普通钢筋实现受压构件的高延性,具有较好的经济性与施工合理性^[2].以往的研究多对螺旋箍筋或复合箍筋独立约束的混凝土柱开展试验与分析,针对复合螺旋箍筋约束混凝土柱的研究较少,且尚未涉及本文提出的复合螺旋箍筋柱.因此,研究复合螺旋箍筋约束混凝土柱的静、动力性能,进而提出这种高延性结构构件设计方法,对推广高性能混凝土抗震结构在高烈度设防区的应用具有重要意义.

此前,国内外学者较早注意到螺旋箍筋的约束对于混凝土强度的提高效应,及其对构件塑性铰转动能力的改善作用.在材料、构件和结构 3 个层次开展了大量试验、分析、模拟和理论工作,相关研究成果已体现在现行国家标准、设计规范和规程中.

Richart 等^[3]以箍筋种类与间距为参数完成了螺旋箍筋混凝土圆柱轴压试验,发现在弹塑性阶段螺旋箍筋对横向变形约束效应明显,且明显提高了混凝土强度,提出螺旋箍筋约束混凝土轴压强度为混凝土圆柱体抗压强度与径向约束应力的 4.1 倍之和;Ahmad 等^[4]以混凝土强度、箍筋强度和间距为参数,通过大量轴压试验结果拟合得到螺旋箍筋约束混凝土的应力-应变曲线,发现混凝土应力峰值时螺旋箍筋应力随混凝土抗压强度的增大而减小,且不受箍筋屈服强度的影响;Mander 等^[5]通过方形、圆形和矩形箍筋约束柱轴压试验,提出了不同截面约束混凝土的有效约束面积计算方法,以有效约束效应系数来考虑箍筋约束“拱效应”引起约束应力不均匀分布的问题,提出了一种适用于不同配箍形式约束不同截面的统一约束混凝土本构关系;Bing 等^[6]基于 William 等^[7]提出的五参数多轴失效准则推导约束混凝土峰值应力,并给出了能够预测圆形螺旋箍筋和方形复合箍筋约束混凝土柱的本构关系模型;为了增强混凝土柱核心约束,West 等^[8]在 2016 年通过 21 根配置交叉螺旋箍筋柱的试验,发现通过交叉配箍可大幅度改善单肢箍约束混凝土的轴压性能.

史庆轩等^[9]对配置方形高强螺旋箍筋的高强混凝土棱柱体试件进行了轴压试验,发现约束混凝土达到峰值应力时高强箍筋尚未屈服,应采用箍筋的实际应力来计算侧向约束力大小,优化了高强螺旋

箍筋约束高强混凝土峰值应力、峰值应变及极限应变公式;郑文忠等^[10-11]结合高强箍筋约束高强混凝土圆柱轴压试验及他人数据分析,建立了圆形约束混凝土柱螺旋箍筋屈服与其体积配箍率的关系,提出了混凝土峰值应力时约束箍筋拉应变的计算公式.

虽然已有研究对螺旋箍筋约束混凝土提出了较多的本构模型,分析了约束机理,但国内外主要成果仍是基于单独布置螺旋箍筋或复合箍筋的约束混凝土柱.针对复合螺旋箍筋约束混凝土柱,应有针对性地开展承载能力研究,特别是结合实际情况普遍存在的偏心受压,应着重考察箍筋间距与初始偏心距的影响,开展单调受压静力性能试验,获得承载力、极限压应变及静力延性系数等,进而结合试验结果对复合螺旋箍筋约束混凝土柱破坏机理和约束效应进行分析,从而为高烈度区混凝土结构合理设计提供有效理论支撑.

1 偏压试验

1.1 试件设计

复合螺旋箍筋柱的钢筋骨架由复合螺旋箍筋与纵筋组成.复合螺旋箍筋通过在圆形螺旋箍筋外布置等间距的方形箍筋实现,纵筋沿螺旋箍筋内周长均匀布置 4 根,其余 12 根沿方形箍筋内边缘均匀布置.相同条件下,偏心荷载下复合螺旋箍筋约束混凝土柱的受力性能与两个参数直接相关:1) 体积配箍率,决定着复合螺旋箍筋约束效果,因此将箍筋间距/螺距作为第一个基本参数;2) 轴向力偏心距,由于偏心受压柱端的轴力和弯矩会影响构件的破坏形式,所以偏心距作为第二个基本参数.其中,箍筋间距/螺距分别取 60 和 80 mm,偏心距分别取 50、100 及 150 mm.同时,为定性和定量确定复合螺旋箍筋柱的约束效果,设计制作了同条件的井字形复合箍筋和复合菱形螺旋箍筋两种传统配箍形式的各 1 个对比试件,即复合螺旋箍筋柱试件为 6 个,对比试件为 2 个.试验柱的截面均为 400 mm×400 mm,柱高 1500 mm,则长细比为 3.75,为短柱.试验柱上下两端布置了牛腿且对牛腿区箍筋加密,以便于偏心荷载的施加.各试件箍筋的混凝土保护层厚度均为 25 mm,试件配筋见图 1,配箍形式见图 2,试验参数见表 1.

1.2 材料性能

在偏压构件试验前,对同条件制作养护的 11 组 100³ mm³ 混凝土立方体试块进行实测,获得了试验柱混凝土立方体抗压强度实测平均值,通过换算公式计算混凝土棱柱体轴心抗压强度代表值为 28.1 N/mm².试件纵筋采用公称直径 14 mm 的 HRB400 级钢,纵筋配箍率 1.76%;箍筋采用公称直

径 8 mm 的 HPB300 级钢筋。钢筋物理力学性能由 WDW-100L 电子万能试验机测试,见表 2。

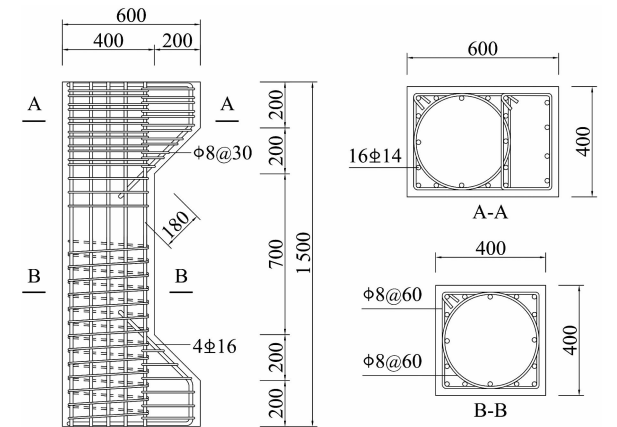


图 1 试件尺寸及配筋 (mm)

Fig. 1 Size and reinforcement details of the specimens (mm)

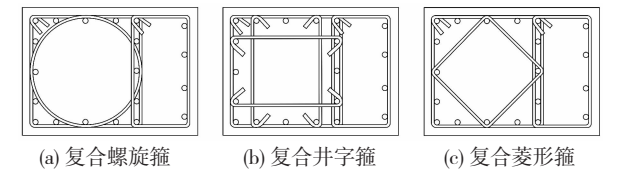


图 2 试件的配箍方式

Fig. 2 Stirrup methods of the specimens

编号	箍筋形式	体积配箍率	间距/螺距	偏心距
		$\rho_{sv}/\%$	s/mm	e_0/mm
YE1S1	复合螺旋箍	1.82	60	50
YE2S1	复合螺旋箍	1.82	60	100
YE3S1	复合螺旋箍	1.82	60	150
YE1S2	复合螺旋箍	1.36	80	50
YE2S2	复合螺旋箍	1.36	80	100
YE3S2	复合螺旋箍	1.36	80	150
LE2S3	复合菱形箍	1.82	62	100
JE2S4	复合井字箍	1.81	68	100

注:试件编号中 Y、L、J 分别表示螺旋箍、菱形箍及井字箍;E 代表偏心距,其后的数字代表偏心距水平;S 代表箍筋螺距/间距,其后的数字代表箍筋水平。

表 2 钢筋力学性能实测值

钢筋类别	公称直径	屈服强度	极限强度	弹性模量
	d/mm	f_y/MPa	f_{st}/MPa	$E_s/10^5 \text{ MPa}$
HRB400	14	420	575	1.97
HPB300	8	335	495	2.08

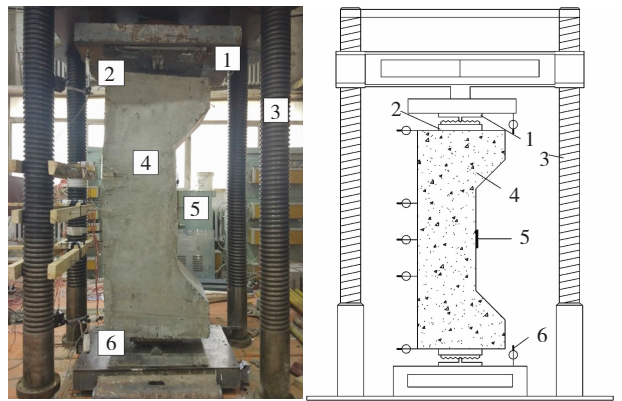
注: f_y 为钢筋抗压/抗拉屈服强度, f_{st} 为钢筋抗压/抗拉极限强度, E_s 为钢筋弹性模量。

1.3 试验方案

偏压试验采用 5 000 kN 四轴液压试验机,偏心轴向力通过相关标准^[12]要求的刀口铰支座施加,上

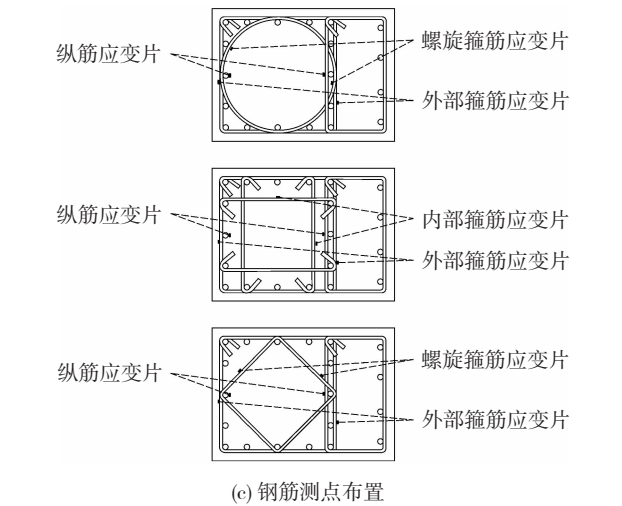
方刀口板用螺栓固定在压力机顶板,下方刀口承压钢板布置在试件顶部,刀口铰可保证偏心压力下顶面及底面转动和不同偏心距的加载条件。

试件加载装置及测点布置见图 3,柱身侧移由沿柱高方向布置的 5 个位移计测试,柱的压缩变形由试件上下两端布置的位移计测试,在试验柱柱高中点受压侧设置 2 个混凝土应变片,由其应变平均值得到混凝土压应变,在相对应纵筋、螺旋箍筋及外围方形箍筋上均布置了钢筋应变片,以实测纵筋应变发展及两类箍筋的约束效果。



(a) 加载装置 (b) 混凝土测点布置

1- 刀口铰;2- 锯齿板;3- 四轴液压试验机;
4- 偏压试件;5- 混凝土应变片;6- LVDT 位移计



(c) 钢筋测点布置

图 3 加载装置及测点布置

Fig. 3 Loading device and arrangement of strain gauges

试验时先对中后进行预加载,待加载装置与构件充分接触后正式加载,按分级单调加载方式进行,每级施加预估极限荷载的 10%,当试件的承载力下降至峰值荷载 70% 时,认为试件破坏。

1.4 试验现象

偏压试件的试验现象随着轴向力偏心距的不同而有明显区别,偏心距直接影响着试验柱的破坏模式,相同条件下不同偏心距试件破坏时主要以受拉纵筋是否屈服予以区分,但均表现为压区混凝土压

碎. 并且不同箍筋间距/螺距的试件, 破坏程度和极限压应变也有所不同. 试验柱典型破坏情况见图 4, 荷载 - 轴向变形曲线见图 5.

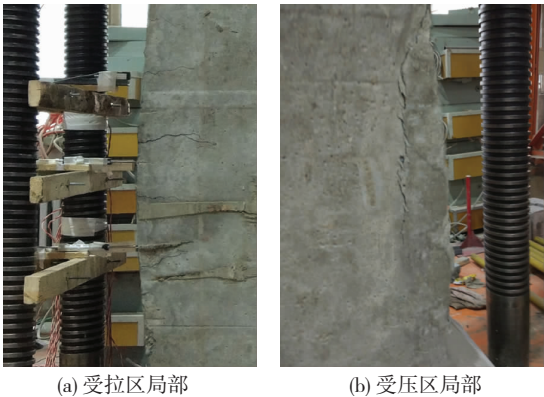


图 4 试验柱典型破坏

Fig. 4 Typical failure of column specimen

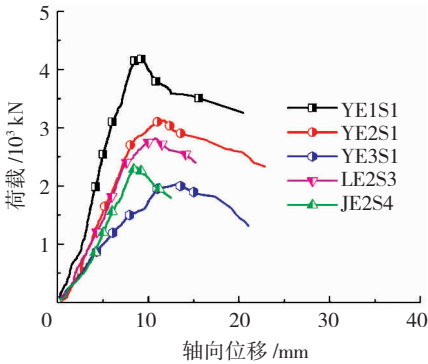


图 5 试件的荷载 - 轴向变形曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of the specimens

对比相同条件的不同螺距/箍筋间距的偏压柱, 较小螺距/箍筋间距试件到达峰值荷载和试件破坏的时间相对滞后. 较大螺距/箍筋间距的试件在进入塑性工作阶段后侧向挠度增长更为迅速, 受压区裂缝开展和受压区混凝土剥落也更为明显. 对比两种常规配箍的试件, 复合圆形螺旋箍筋柱在进入塑性发展时的荷载变形曲线斜率更大, 加载后期在保护层已剥落的情况下仍保持一定承载力, 其荷载变形曲线下降更加平缓, 可见内圆外方的箍筋形式约束效果更佳.

较大偏心距($e_0 = 150\text{ mm}$)的试件, 加载初期处于弹性阶段, 当荷载达到 50% 的峰值荷载后, 受拉区边缘出现第一条水平裂缝, 随着荷载增加, 受拉区出现多条水平裂缝, 且裂缝宽度不断增大. 当承载力达到 70% 的峰值荷载时, 受压区混凝土出现竖向裂缝, 此后继续增大荷载, 受压区保护层逐步剥落并发出噼啪声响, 最终形成三角形裂缝区, 受拉区的主裂缝逐步向受压区延伸, 试件水平侧移随之加大. 在达到极限承载力前, 受拉区纵筋屈服, 试件破坏时压区混凝土被压碎.

较小偏心距的试件($e_0 = 50\text{ mm}$)加载初期挠度

随荷载线性增长, 当荷载达到峰值荷载约 60%, 受拉区混凝土开裂. 当达到 80% 的峰值荷载时, 压区混凝土出现细微竖向裂缝, 此后继续加载, 竖向裂缝宽度增大并向上下延伸, 破坏时受拉纵筋未屈服, 压区混凝土保护层大量剥落, 试件中部压区被压碎.

而中等偏心距试件($e_0 = 100\text{ mm}$), 破坏形式与小偏心距的试件相似, 其裂缝发展状态则介于较大偏心距和较小偏心距试件之间.

2 试验结果与讨论

2.1 承载力与延性

复合螺旋箍筋柱的极限承载力和延性系数如表 3 所示. 试件承载力随偏心距的增加而降低, 随配箍率的增大而增大; 当配箍率和偏心距相同时, 复合螺旋箍筋柱承载力较井字形和菱形箍筋柱分别提高幅度可达 35% 和 18%; 对比不考虑约束提升效果的常规偏压极限承载力计算结果, 在 50、100 和 150 mm 偏心距下的承载力有所提高.

以偏压柱屈服和极限两种状态下柱高中点侧移比定义的位移延性系数($\mu = \Delta_y / \Delta_u$)来考察延性, 图 6 给出了典型试件的荷载 - 柱中挠度曲线, 可通过能量等效法确定该曲线上的屈服点. 具体作法为过极限承载力做水平线, 与过原点直线相交成双折线, 当双折线与原 $P - \Delta$ 曲线下方包围面积相等时, 定义双折线的转折点横坐标为屈服位移, 通过计算发现试件的屈服荷载一般为峰值荷载的 85%. 将试件承载力降至峰值 85% 时定义为极限状态, 由 $P - \Delta$ 曲线可确定极限位移.

由图 6、7 可见, 试件延性分别与配箍率和偏心距成正相关, 配置复合螺旋箍筋的荷载 - 柱中挠度曲线下降段较为平缓, 延性较常规配箍有所提高. 通过表 3 的极限位移和延性系数可知, 减小箍筋间距, 提升了柱子的变形能力, 即复合螺旋箍筋为核心混凝土提供了更强的约束作用. 随着偏心距的增加, 受拉区纵筋发挥作用增大, 也改善了试件延性.

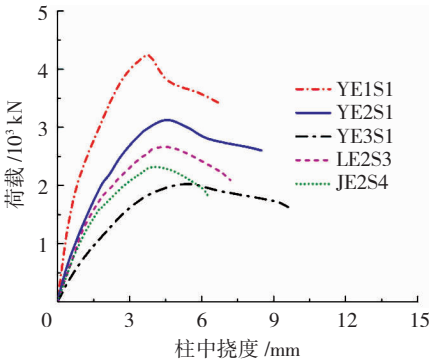


图 6 试件的荷载 - 柱中挠度曲线

Fig. 6 Load-column deflection curves of the specimens

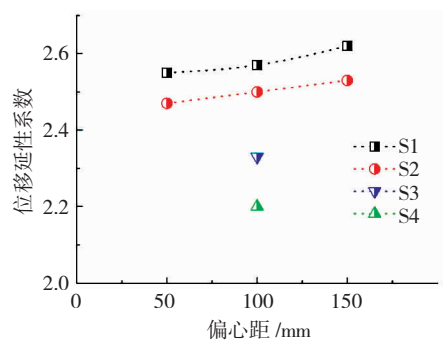


图 7 不同配箍率试件的位移延性系数 - 偏心距曲线

Fig. 7 Displacement ductility factor-eccentricity curves of the specimens with different stirrup ratios

表 3 承载力及位移延性系数

Tab.3 Load-bearing capacity and displacement ductility parameters

编号	承载力 N_u^t/kN	屈服位移 Δ_y/mm	极限位移 Δ_u/mm	位移延性 系数 μ
YE1S1	4 217	2.33	5.93	2.55
YE2S1	3 125	3.07	7.94	2.57
YE3S1	2 025	3.48	9.13	2.62
YE1S2	3 986	2.23	5.51	2.47
YE2S2	2 984	3.03	7.57	2.50
YE3S2	1 912	3.46	8.75	2.53
LE2S3	2 644	2.89	6.74	2.33
JE2S4	2 315	2.72	5.97	2.20

2.2 侧向变形

通过沿柱高分布的 5 个位移计分别采集了试件 0、500、750、1 000 和 1 500 mm 高度的侧向变形，挠度

实测值沿柱高分布见图 8。在受压过程中,不同高度的侧向变形沿柱高中点基本上对称发展。图 8 中虚线为以柱中挠度为峰值点的正弦半波曲线,沿柱高的侧向变形基本符合正弦半波曲线。在加载初期,各试件侧向变形呈线性增长,当试件达到屈服状态后挠度增长明显加快。此外,通过对比不同偏心距和不同配筋形式的侧向变形可得出,试件侧向变形随偏心距增加而提升,复合螺旋箍筋柱的下降段侧向变形较两种常规配筋柱增长更多,可见复合螺旋箍筋对柱的变形能力有所提升。

2.3 应变发展

图 9 所示为典型试件 YE2S1 受压区混凝土、纵筋和箍筋各自应变随荷载的发展情况,可划分为 5 个阶段:1) 在加载初期的弹性阶段,混凝土压区和钢筋应变均呈现线性增长;2) 在拉压区开裂后压区纵筋应变随之加快增长;3) 当荷载加至 80% 的峰值荷载后,荷载 - 挠度曲线斜率明显变缓,螺旋箍筋和复合箍筋对受压区的约束作用持续增强;4) 达到峰值荷载后试件受压纵筋和压区螺旋箍筋屈服,而受拉螺旋箍筋应变水平较低,外围的复合箍筋未屈服,拉区纵筋应变水平较低;5) 进入下降段,随着变形增加,压区混凝土被压碎,试件破坏。破坏时试件约束核心区仍保持较好整体性,普通复合箍筋应力持续增长,已接近屈服,说明复合箍筋对核心混凝土约束作用一直持续到加载结束,这也是复合螺旋箍筋柱良好延性的主要原因之一。

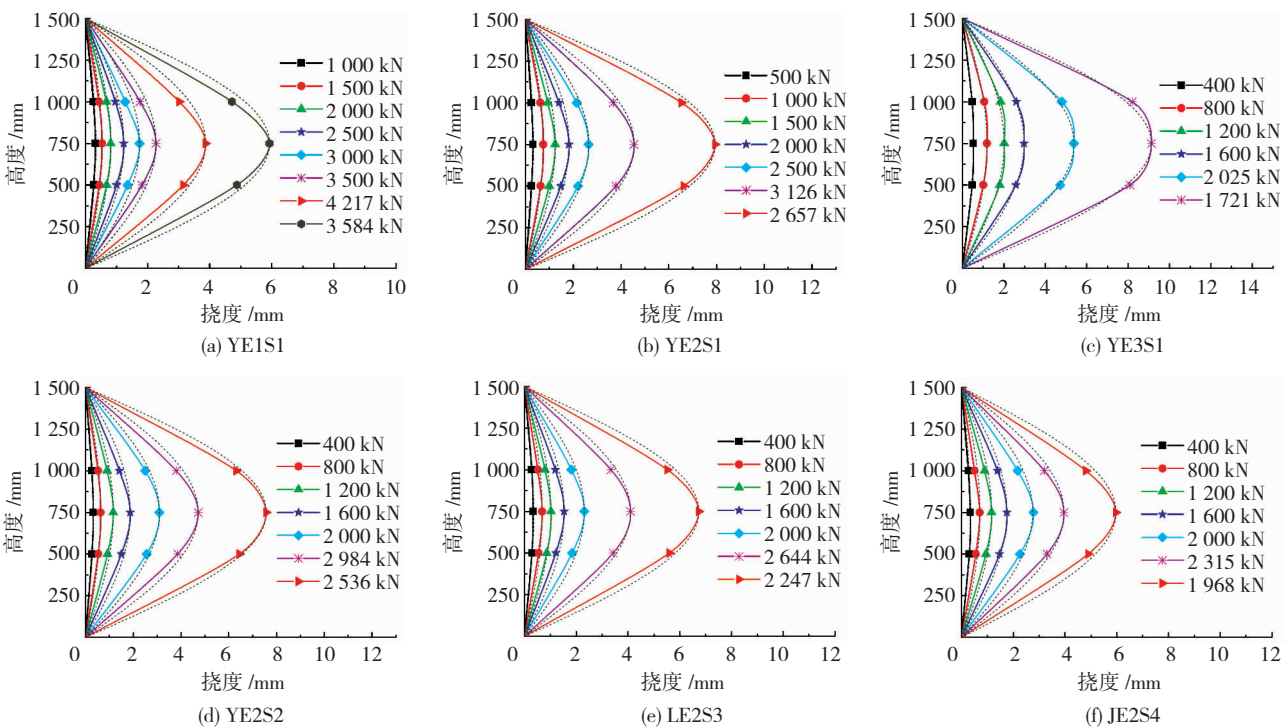


图 8 构件的侧向变形沿柱高分布

Fig. 8 Lateral deformation along the height of the specimens

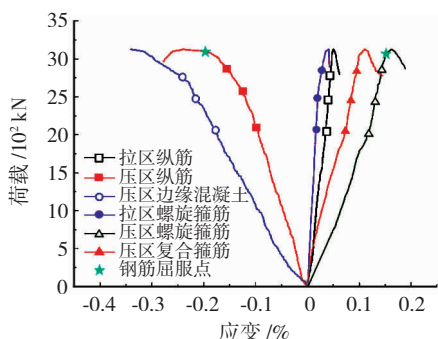


图 9 典型试件荷载-应变曲线

Fig. 9 Load-strain curves of a typical specimen

综上,复合螺旋箍筋对混凝土柱可以有效发挥约束作用.在试件进入塑性后螺旋箍筋约束其内部的混凝土,而外围的复合箍筋除了对方形箍筋与螺旋箍筋之间的混凝土起到约束作用外,更主要是对螺旋箍筋内的核心混凝土起到复合约束作用,这种约束形式主导了偏压柱在保持较高承载能力的同时变形能力也有显著提升.

3 偏压承载力计算方法

3.1 约束混凝土峰值应力

Mander 等^[5]给出了考虑约束混凝土“拱效应”的 k_e 计算公式,用于计算螺旋箍筋或方形复合箍筋对核心混凝土的有效侧向约束力,考虑到复合螺旋箍筋的双重约束效应是通过内部的螺旋箍筋先屈服、外部方形箍筋可能屈服为主要特征的,为简化分析,可通过复合箍筋 k_r 折减系数,即试验测得的峰值荷载下复合箍筋应力与屈服应力比值,评价在峰值荷载下复合箍筋未屈服导致的侧向约束力折减效应.同时考虑到箍筋约束力随混凝土强度的提高而降低,随配箍率的增大而提高,可取 $E_c \rho_v / f_{co}$ 为基本参数,确定其与折减系数 k_r 的关系,按试验的数据点,可知二者近似图 10 所示的线性关系. k_r 拟合表达式为

$$k_r = 0.041 \frac{E_c \rho_v}{f_{co}} - 0.064. \quad (1)$$

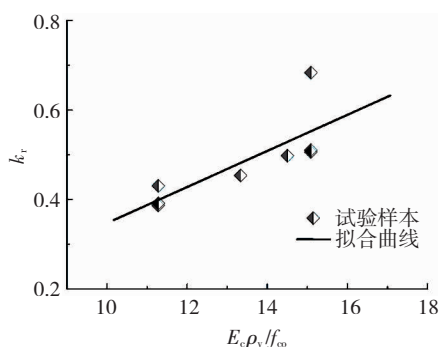


图 10 峰值荷载时复合箍筋折减系数拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve of the composite stirrup at peak load

基于 Mander 的“拱效应”理论机制,提出两种箍筋提供的侧向约束力分别为:

$$\text{螺旋箍筋侧向约束力 } f_{l1} = \frac{1}{2} k_{el} \rho_{st} f_{yv}, \quad (2)$$

$$\text{复合箍筋侧向约束力 } f_{l2} = \frac{1}{2} k_{e2} k_r \rho_r f_{yv}. \quad (3)$$

为考虑复合螺旋箍筋的约束对混凝土偏压承载力的影响,认为圆形螺旋箍筋约束区内的核心混凝土侧向约束力由螺旋箍筋和外围方形箍筋共同提供,其中方形箍筋约束力应按圆形占方形面积比折减;螺旋箍筋与外围方形箍筋之间的混凝土,仅由外围方形箍筋提供侧向约束力 f_{l2} .

按 William 等^[7]提出的混凝土五参数多轴失效准则来描述三轴受压混凝土的理论极限强度面,压缩子午线公式为

$$\frac{\tau_{oct}}{f_{co}} = b_0 + b_1 \frac{\sigma_{oct}}{f_{co}} + b_2 \left(\frac{\sigma_{oct}}{f_{co}} \right)^2. \quad (4)$$

假设复合螺旋箍筋在核心约束区提供的侧向约束力 f_l 各方向相等,则

$$\sigma_1 = \sigma_2 = -f_l, \sigma_3 = -f_{cc}. \quad (5)$$

将应力从笛卡尔坐标系转化为八面体坐标系,根据以下公式进行坐标变换:

$$\sigma_{oct} = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = -\frac{f_{cc}}{3} - \frac{2}{3} f_l, \quad (6)$$

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{1}{3} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - \sigma_{oct}^2} = \frac{\sqrt{2}}{3} (f_{cc} - f_l), \quad (7)$$

完成坐标变换的核心约束混凝土峰值应力:

$$f_{cc} = f_{co} \left(\frac{3(b_1 + \sqrt{2})}{2b_2} + \sqrt{\left(\frac{3(b_1 + \sqrt{2})}{2b_2} \right)^2 - \frac{9b_0}{b_2} - \frac{9\sqrt{2}f_l}{b_2 f_{co}} - 2 \frac{f_l}{f_{co}}} \right), \quad (8)$$

对于公式中的待定系数,采用 Bing 等^[6]基于 Khalou 等^[13]试验结果提出的核心约束混凝土峰值应力表达式:

$$f_{cc} = f_{co} \left(-0.413 + 1.413 \sqrt{1 + 11.4 \frac{f_l}{f_{co}}} - 2 \frac{f_l}{f_{co}} \right), \quad (9)$$

据此,确定复合螺旋箍筋混凝土不同约束区的峰值应力.

3.2 偏压承载力

按两类箍筋将柱截面划分成两类不同的约束区域,可采取强度叠加法^[14-15],分别计算螺旋箍筋约束混凝土和外层方形箍筋约束混凝土提供的承载力,大偏心计算公式为

$$\begin{cases} N = N_c + N_e + F_{sc}, \\ N_e = \alpha_1 f_{ce} A_e, \\ F_{sc} = \sum \sigma_{sci} A_{sci}, \\ N_c = \alpha_1 f_{cc} A_c, \\ N_e = f_y A'_s (h_0 - a'_s) + N_e \left(\frac{h_0 - a'_s}{2} + x_e \right) + \\ N_c \left(\frac{h_0 - a'_s}{2} + x_e \right) + F_{sc} \frac{h_0 - a'_s}{2}. \end{cases} \quad (10)$$

式中: N 为复合螺旋箍筋柱偏压承载力; N_c 为螺旋箍筋约束区域混凝土承载力; N_e 为复合箍筋单独约束区域混凝土承载力; f_{cc} 为螺旋箍筋约束区域混凝土抗压强度; f_{ce} 为复合箍筋单独约束区域混凝土抗压强度; A_c 为螺旋箍筋约束区域混凝土面积; A_e 为复合箍筋单独约束区域混凝土面积; x_e 为螺旋箍筋约束区域混凝土形心到中心点的长度; x_e 为复合箍筋单独约束区域混凝土形心到中心点长度; e 为轴线压力作用点至受拉钢筋合力点距离; F_{sc} 为中部钢筋合力; σ_{sci} 为第*i*排的钢筋应力,可根据平截面假定和钢筋应力应变关系确定; A_{sci} 为其对应钢筋面积; α_1 为换算参数,普通混凝土取 1.0.

图 11 中, r 为螺旋箍筋内径; α 表示图中所示半径与水平线的夹角.可以按照三角函数关系据此推导约束混凝土面积和形心距离中心的表达式(11). x 为受压区高度; b_0 为复合箍筋内径.由于试件达到承载力前压区保护层就已经开始剥落,故不考虑其对承载力的影响.另外,当受压区覆盖面积超过中心时,三角函数表示法同样适用.

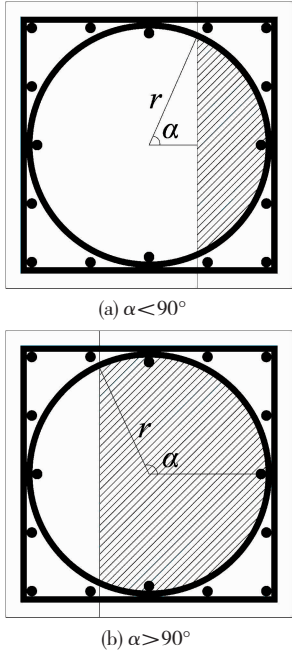


图 11 大偏压承载力计算简图

Fig. 11 Calculation diagram of large eccentric bearing capacity

同理,在合理考虑受拉纵筋应变后,可按相同的思路确定小偏心受压承载力的计算公式.按上述思路确定的试验柱承载力计算值和试验实测值如表 4 所示,可见所提出的复合螺旋箍筋柱承载力计算方法具有良好的精度,且偏于安全.

$$\begin{cases} x_e = \frac{4r \sin^3 \alpha}{3(2\alpha - \sin 2\alpha)}, \\ A_c = \frac{r^2 (2\alpha - \sin 2\alpha)}{2}, \\ x_e = \frac{2b_0 x (r \cos \alpha + x/2) - 4r \sin^3 \alpha / 3}{2b_0 x - r^2 (2\alpha - \sin 2\alpha)}, \\ A_e = b_0 x - A_c. \end{cases} \quad (11)$$

表 4 实测值与计算值对比

Tab. 4 Comparison between test and computational results			
编号	N_u^t 试验/kN	N_u^c 计算/kN	$((N_u^c - N_u^t)/N_u^t)/\%$
YE1S1	4 217	4 016.7	-4.7
YE2S1	3 125	2 968.3	-5.0
YE3S1	2 025	1 964.2	-3.0
YE1S2	3 986	3 738.9	-6.2
YE2S2	2 984	2 840.5	-4.8
YE3S2	1 912	1 868.3	-2.3

4 结 论

- 1)复合螺旋箍筋相比于传统配箍形式可有效提高约束混凝土柱的偏心受压承载力,提出以柱高中点侧移比定义的偏压柱位移延性系数,发现复合螺旋箍筋柱延性有较大改善.
- 2)在相同偏心距下,复合螺旋箍筋柱偏压承载力随着箍筋间距的减小而提高,核心受压区混凝土峰值应变和复合箍筋应力也随之增加;配置相同箍筋的构件,偏心距对其破坏模式、承载力起控制作用,随偏心距增加,其破坏模式呈现承载力降低但曲线更加平缓,延性发展更好的趋势.
- 3)试验研究发现,复合螺旋箍筋可有效发挥约束作用,结合试验结果拟合出复合箍筋应力折减系数表达式,区分了螺旋箍筋和方形箍筋划分的两类约束区峰值应力的计算方式,提出了复合螺旋箍筋约束混凝土柱偏心受压承载力计算方法.

参考文献

[1] 张松. 配置圆形复合螺旋箍筋的钢筋混凝土方柱力学性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016: 58

ZHANG Song. Research on mechanical properties of reinforced concrete square columns with circular compound spiral stirrup[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 58

[2] 张谦,姜维山,于庆荣,等. 高强连续复合螺旋箍施工技术及应用[J]. 施工技术,2014,43(3): 24

- ZHANG Qian, JIANG Weishan, YU Qingrong, et al. Manufacturing technology and engineering application of high-strength continuous compound spiral hoop [J]. Construction Technology, 2014, 43(3): 24
- [3] RICHART F E, BRANDTZAEG A, BROWN R L. Failure of plain and spirally reinforced concrete in compression [J]. University of Illinois Bulletin, 1929, 26: 52
- [4] AHMAD S H, SHAH S P. Stress-strain curves of concrete confined by spiral reinforcement [J]. ACI Structural Journal, 1982, 79(6): 490
- [5] MANDER J B, PRIESTLEY M J, PARK R. Theoretical stress strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1809
- [6] BING L, PARK R, TANAKA H. Stress-strain behavior of high-strength concrete confined by ultra-high-and normal-strength transverse reinforcements [J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(3): 403
- [7] WILLIAM K L, WARNKE E P. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete [C]// Proceedings of International Association for Bridge and Structural Engineering. Bergamo, Italy: [s. n.], 1975, 19: 22
- [8] WEST J, IBRAHIM A, HINDI R. Analytical compressive stress-strain model for high-strength concrete confined with cross-spirals [J]. Engineering Structures, 2016, 113: 369
- [9] 史庆轩,王南,田园,等. 高强箍筋约束高强混凝土轴心受压应力-应变全曲线研究 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34(4): 148
- SHI Qingxuan, WANG Nan, TIAN Yuan, et al. Study on stress-strain relationship of high-strength concrete confined with high-strength stirrups under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(4): 148
- [10] 郑文忠,侯狮驰. 不同强度等级箍筋约束混凝土柱设计方法 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37(12): 81
- ZHENG Wenzhong, HOU Chongchi. Design method for confined concrete column with different yield strength stirrups [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(12): 81
- [11] 郑文忠,侯狮驰,常卫. 高强钢棒螺旋箍筋约束混凝土圆形截面柱受力性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2018, 39(6): 29
- ZHENG Wenzhong, HOU Chongchi, CHANG Wei. Experimental study on mechanical behavior of circular concrete columns confined by high-strength spiral stirrups [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(6): 29
- [12] 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012
- Standard for test method of concrete structures: GB/T 50152—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012
- [13] KHALOU A R, AHMAD S H. Behaviour of high strength concrete under torsional triaxial compression [J]. ACI Materials Journal, 1989(6): 557
- [14] 李惠. 高强混凝土及其组合结构 [M]. 北京: 科学出版社, 2004
- LI Hui. High-strength concrete and composite structures [M]. Beijing: Science Press, 2004
- [15] 刘明建. 复合螺旋箍筋约束的钢筋混凝土柱偏压力学性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 45
- LIU Mingjian. Research on eccentric compression performance of reinforced concrete columns with circular composite spiral stirrups [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 45

(编辑 赵丽莹)

封面图片说明

封面图片来自本期综述文章“钢-混凝土组合巨型框架柱抗震研究进展”,是北京工业大学建筑工程学院曹万林教授课题组基于完成的大量试验研究和理论分析,提出的一种基于“统一理论”的异形截面多腔钢管混凝土柱轴压承载力计算方法示意图.该方法基于钢管混凝土“统一理论”成果及部分试验结果,通过划分混凝土有效与非有效约束区,折减约束效应,采用统一的圆形截面计算公式进行计算,回归分析得到了正多边形钢管混凝土截面几何形状内角角度与混凝土约束区划分的关系.考虑截面几何形状不规则影响,给出了约束效应折减计算方法;引入复杂多腔体钢管混凝土截面拆分规则,叠加各腔体钢管混凝土柱承载力得到了整个截面的轴压承载力.该方法适用于各类不规则截面单腔体及多腔体钢管混凝土柱轴压承载力计算,具有较好的通用性;但需要说明的是,该方法是基于回归分析初步提出的,由于相关试验样本数量不充足,今后仍需更多试验验证工作.

(图文提供:曹万林,武海鹏,周建龙.北京工业大学建筑工程学院)