

压剪工况下型钢混凝土柱轴力分配规律试验

王梓懿^{1,2}, 刘 阳^{1,2}, 郭子雄^{1,2}, 贾磊鹏^{1,2}, 陈庆猛³

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021;
3. 厦门特房建设工程集团有限公司, 福建 厦门 361021)

摘要: 为研究型钢混凝土柱在压剪工况下各部分轴力分配比例随位移角的发展情况,利用已完成的 21 个比例为 1:2 的型钢混凝土(SRC)柱试件的低周往复加载试验数据,计算得到试件中型钢、混凝土及纵筋承担的轴力随位移角变化的规律.研究表明:随位移角的增大,型钢承担的轴力先减小后增大,在大位移角下型钢承担的轴力可占总轴力的 20%~40%.

关键词: 型钢混凝土柱;轴力;轴压力系数;型钢
中图分类号: TU 398 **文献标志码:** A

型钢混凝土(steel reinforced concrete, SRC)是将型钢和钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)按一定方式组合而形成的一种新型组合结构,具有强度刚度大、抗震性能好等优点,是高层建筑常用的结构形式之一.近年来,国内外学者针对 SRC 基本构件的抗震性能开展了大量试验研究^[1-7],取得了丰硕的成果.目前, SRC 结构的正截面承载力计算有 3 种思路:1) 基于外包混凝土折算刚度,并按钢结构设计方法计算^[8];2) 考虑钢骨应力分布的影响,截面应变分布基本符合平截面假定,承载能力近似按照钢筋混凝土结构设计方法计算^[9];3) 叠加方法.我国行业标准 YB 9082—2006《钢骨混凝土结构技术规程》中对 SRC 柱的正截面承载力计算采用了叠加方法^[10].王海荣等^[11]采用条带法对 SRC 柱达到正截面承载力时的钢骨和 RC 部分承担的轴力进行了计算,在此基础上还提出了一种简化计算方法.这些方法的关键是确定型钢和钢筋混凝土部分的轴力分配规律,但均是针对某一特定状态而言.在水平地震作用下, SRC 柱处于压剪往复作用受力状态,不同位移角下,型钢和钢筋混凝土部分承担的轴力比例会发生变化.目前这方面的研究工作很少,因此,有必要对压剪工况下 SRC 柱截面的轴力分配规律进行研究,为 SRC 柱承载力的简化计算提供参考.本文基于已完成的 21 个 SRC 柱实测数据,对其轴力分配规律进行分析.

1 试验概况

1.1 试件设计

已完成的 21 个比例为 1:2 的 SRC 柱试件试验加载装置示意图,如图 1 所示,试验参数如表 1 所示.表 1 中: n_k 为试验轴压力系数,取 $n_k=N_k/(f_{c,k}A_c+f_{a,y}A_a)$, N_k 为试验轴力, A_c, A_a 分别为混凝土部分和型钢部分的截面积, $f_{c,k}$ 为混凝土棱柱体抗压强度,取 $f_{c,k}=0.76f_{c,u}, f_{c,u}, f_{a,y}$ 分别为混凝土立方体抗压强度和型钢屈服强度; l 为试件边长; ρ_a, ρ_s ,

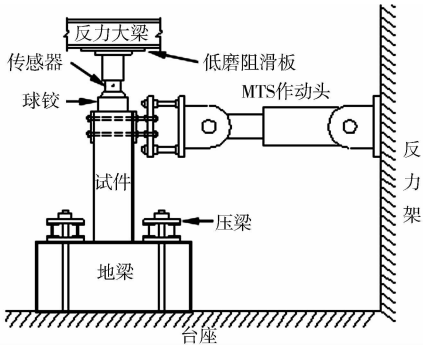


图 1 试验加载装置
Fig. 1 Test setup

ρ_v 分别为配钢率、配筋率和体积配筋率; $f_{s,y}$ 为纵筋屈服强度实测值.

表 1 试件参数汇总表
Tab.1 parameters of columns

| 编号 | n_k | N_k/kN | l/mm | $\rho_a/\%$ | $\rho_s/\%$ | $\rho_v/\%$ | $f_{a,y}/\text{MPa}$ | $f_{s,y}/\text{MPa}$ | $f_{c,u}/\text{MPa}$ |
|-------|-------|-----------------|---------------|-------------|-------------|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| RC1 | 0.39 | 484 | 250 | 0 | 1.45 | 0.88 | 393.0 | 345.0 | 25.8 |
| SRC1 | 0.20 | 697 | 300 | 3.95 | 0.75 | 1.55 | 272.4 | 339.9 | 34.3 |
| SRC2 | 0.20 | 697 | 300 | 3.95 | 0.75 | 2.42 | 272.4 | 339.9 | 34.3 |
| SRC3 | 0.20 | 697 | 300 | 3.95 | 0.75 | 1.61 | 272.4 | 339.9 | 34.3 |
| SRC4 | 0.20 | 697 | 300 | 3.95 | 0.75 | 2.27 | 272.4 | 339.9 | 34.3 |
| SRC5 | 0.20 | 697 | 300 | 3.95 | 0.75 | 1.61 | 272.4 | 339.9 | 34.3 |
| SRC6 | 0.20 | 697 | 300 | 3.95 | 0.75 | 1.61 | 272.4 | 339.9 | 34.3 |
| SRC7 | 0.20 | 697 | 300 | 3.95 | 0.75 | 1.61 | 272.4 | 339.9 | 34.3 |
| SRC8 | 0.20 | 697 | 300 | 3.95 | 0.75 | 1.55 | 272.4 | 339.9 | 34.3 |
| SRC9 | 0.39 | 666 | 250 | 2.40 | 1.45 | 0.88 | 393.0 | 345.0 | 25.8 |
| SRC10 | 0.36 | 609 | 250 | 2.40 | 1.45 | 0.88 | 393.0 | 345.0 | 25.8 |
| SRC11 | 0.35 | 571 | 250 | 2.40 | 1.45 | 0.88 | 393.0 | 345.0 | 23.8 |
| SRC12 | 0.38 | 609 | 250 | 2.40 | 1.45 | 0.88 | 393.0 | 345.0 | 23.8 |
| SRC13 | 0.38 | 837 | 250 | 3.52 | 1.45 | 0.88 | 393.0 | 345.0 | 31.0 |
| SRC14 | 0.32 | 692 | 250 | 3.52 | 1.45 | 0.88 | 393.0 | 345.0 | 31.0 |
| SRC15 | 0.11 | 411 | 300 | 4.53 | 0.75 | 1.19 | 309.6 | 513.4 | 25.9 |
| SRC16 | 0.23 | 882 | 300 | 4.53 | 0.75 | 1.19 | 309.6 | 513.4 | 25.9 |
| SRC17 | 0.29 | 1 096 | 300 | 4.53 | 0.75 | 1.19 | 309.6 | 513.4 | 25.9 |
| SRC18 | 0.22 | 877 | 300 | 4.53 | 0.75 | 0.78 | 309.6 | 513.4 | 29.0 |
| SRC19 | 0.23 | 877 | 300 | 4.53 | 0.75 | 1.86 | 309.6 | 466.1 | 29.0 |
| SRC20 | 0.35 | 1 316 | 300 | 4.53 | 0.75 | 1.86 | 309.6 | 466.1 | 29.0 |

1.2 试验结果

1.2.1 破坏形态 所有试件均在控制截面区域发生弯曲破坏,且在承载力达到峰值以前具有相似的试验现象.加载至 1/250 位移角时,柱的根部出现弯曲裂缝,并随位移角的增大而不断发展;在 1/100 位移角时,纵筋屈服,受拉区混凝土弯曲裂缝贯通;在 1/50~1/25 位移角时,受压区混凝土保护层开始出现压酥剥落,试件强度开始出现明显退化;在 1/20~1/15 位移角时,混凝土保护层全部剥落,纵筋压屈,承载力降至峰值荷载的 80%以下,试验终止.

典型试件的最终破坏形态,如图 2 所示.

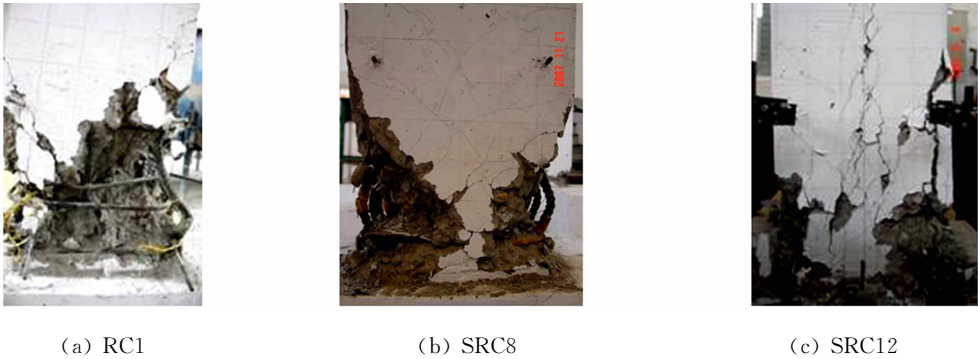


图 2 典型试件最终破坏形态
Fig.2 Typical failure modes

1.2.2 滞回曲线 典型试件的荷载-位移滞回曲线,如图 3 所示.由图 3 可知:在屈服荷载以前,滞回曲线基本为直线,且残余变形较小;在屈服荷载以后,随着位移角的增加,滞回环的面积逐渐增大,强度和刚度开始逐渐出现退化现象.比较几个试件的滞回曲线可以发现:SRC 柱具有比 RC 柱更优越的抗震性能;随着配钢率的增加,滞回环变得越来越饱满,耗能能力增强.

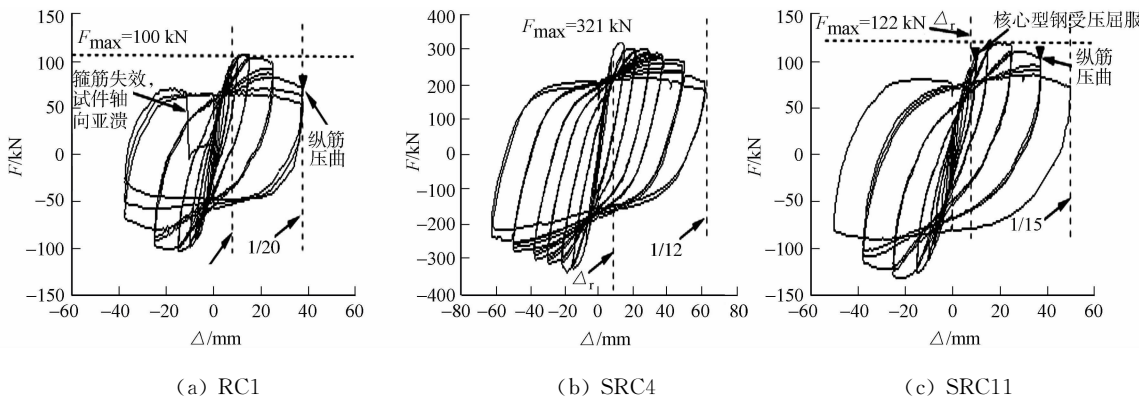


图 3 典型荷载-位移滞回曲线

Fig. 3 Typical $F-\Delta$ hysteretic curves

2 SRC 柱轴力分配计算过程

2.1 基本假定

在计算型钢混凝土柱各部分轴力时作以下基本假定：

- 1) 试件截面应变分布符合平截面假定；
- 2) 不考虑混凝土部分的抗拉强度；
- 3) 型钢及纵筋采用理想弹性塑性本构关系。

2.2 型钢承担轴力的计算

型钢的受力可分为 4 种情况：

- 1) 型钢全截面受压；
- 2) 上翼缘受压，下翼缘受拉，腹板部分受压部分受拉；
- 3) 上翼缘受压，下翼缘受拉，腹板全截面受压；
- 4) 上翼缘受压，下翼缘部分受拉部分受压，腹板全截面受压。

由型钢应变的实测值可知，型钢的受力为前两种情况。型钢截面受力，如图 4 所示。当型钢全截面受压时，根据型钢实测应变判断，此时位移角还较小，型钢截面的几何特征和受力分布如图 4(a)和 4(b)所示。型钢所受合力为

$$N_a = (t_f b_f \epsilon_1 + t_f b_f \epsilon_2 + \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} t_w b_w) E_s. \tag{1}$$

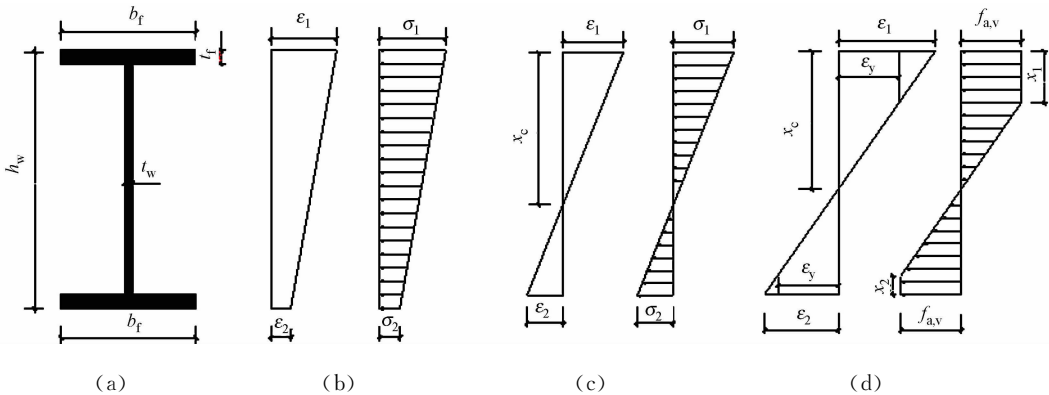


图 4 型钢截面受力简图

Fig. 4 Stress diagram of the shaped steel

当上翼缘受压，下翼缘受拉，腹板部分受压部分受拉时，在较小位移角下型钢尚未达到屈服，此时型钢的受力分布如图 4(c)所示。随着位移角增大，型钢应变达到屈服应变，此时型钢的受力分布如图 4(d)所示。型钢承担轴力 N_a 的公式为

$$N_a = N_{a,y} + N_{a,1}, \tag{2}$$

$$N_{a,y} = \begin{cases} t_f b_f \epsilon_1 E_s + \frac{\epsilon_1}{2} (\frac{h \epsilon_1}{\epsilon_1 + \epsilon_2} - t_f) t_w E_s, & \epsilon_2 < \epsilon_y, \\ t_f b_f \epsilon_y E_s + (x_1 - t_f) t_w \epsilon_y E_s + \frac{t_w \epsilon_y E_s}{2} (\frac{h \epsilon_1}{\epsilon_1 + \epsilon_2} - y_1), & \epsilon_2 \geq \epsilon_y, \end{cases} \quad (3)$$

$$N_{a,1} = \begin{cases} t_f b_f \epsilon_2 E_s + \frac{\epsilon_2}{2} (\frac{h \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} - t_f) t_w E_s, & \epsilon_2 < \epsilon_y, \\ t_f b_f \epsilon_y E_s + (x_2 - t_f) t_w \epsilon_y E_s + \frac{t_w \epsilon_y E_s}{2} (\frac{h \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} - y_2), & \epsilon_2 \geq \epsilon_y, \end{cases} \quad (4)$$

$$x_1 = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_y}{\epsilon_1 + \epsilon_2} h, \quad x_2 = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_y}{\epsilon_1 + \epsilon_2} h. \quad (5)$$

式(2)~(4)中, $N_{a,y}$ 和 $N_{a,1}$ 分别为型钢受压区的合力和受拉区的合力; ϵ_y 为型钢屈服应变; x_1 为型钢受压翼缘应变超出屈服应变 ϵ_y 的值; x_2 为型钢受拉翼缘应变超出屈服应变 ϵ_y 的值; h 为型钢截面高度。

纵筋所承担的轴力 N_s ,由纵筋的实测应变值和纵筋本构关系求得,混凝土部分所承担的轴力 N_c ,可由总的轴力减去纵筋及型钢承担的轴力求得。

3 结果分析

由以上计算公式可求得在不同位移角下各部分所分配的轴力,典型试件的轴力分配比例随位移角的发展而变化的情况,如图 5 所示.采用 YB 9082—2006《钢骨混凝土结构技术规程》建议方法所求得的型钢部分及钢筋混凝土部分轴力分配比例,分别如图 5 中用虚线和实线所示。

由图 5 可知:由于规范采用的计算方法未考虑不同位移角的影响,故为一条水平直线;且由于个别试件轴压比较小,计算所得型钢部分承担轴力为负值,最小可达-60%。

文中采用的方法可以更全面,随试件位移角的发展,试件各部分承担轴力的比例是变化的,在位移角为 1/250,1/50 和 1/25(1/20)时,各部分轴力分配比例汇总,如表 2 所示.表 2 中: $\delta_c, \delta_s, \delta_{st}$ 分别为混凝土部分、型钢部分及纵筋部分所分配的轴力百分比.由于 Δ 在大位移角下纵筋发生较大变形,其上应变片应变超出量程,故 $\theta=1/25(1/20)$ 时,表 2 内存在无效数据。

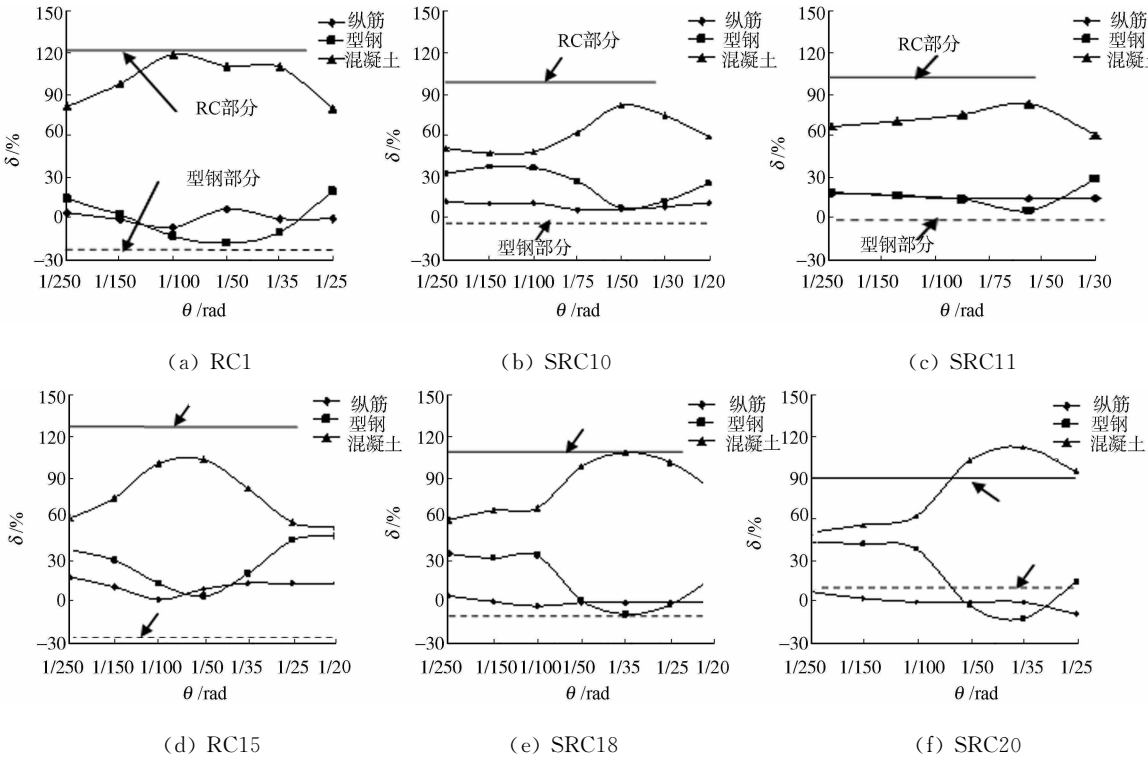


图 5 轴力分配结果

Fig. 5 Result of axial force distribution

表 2 轴力分配计算结果汇总表
Tab. 2 Calculation results of the axial force distribution

| 编号 | $\rho_n/\%$ | n_k | $\theta=1/250$ | | | $\theta=1/50$ | | | $\theta=1/25(1/20)$ | | |
|-------|-------------|-------|----------------|------------|------------|---------------|------------|------------|---------------------|------------|------------|
| | | | δ_c | δ_a | δ_s | δ_c | δ_a | δ_s | δ_c | δ_a | δ_s |
| RC1 | 0 | 0.39 | 86.13 | 0 | 13.87 | 83.89 | 0 | 16.11 | — | — | — |
| SRC1 | 3.95 | 0.20 | 81.50 | 14.22 | 4.28 | −17.80 | 7.00 | 79.97 | 20.03 | 0 | |
| SRC2 | 3.95 | 0.20 | 80.73 | 13.78 | 5.49 | 114.75 | −7.97 | −6.78 | 76.80 | 23.20 | 0 |
| SRC3 | 3.95 | 0.20 | 85.85 | 12.25 | 1.90 | 116.19 | −11.57 | −4.62 | 88.68 | 11.32 | 0 |
| SRC4 | 3.95 | 0.20 | 90.79 | 13.92 | −4.71 | 109.07 | −14.23 | 5.16 | 95.02 | 4.98 | 0 |
| SRC5 | 3.95 | 0.20 | 80.74 | 17.32 | 1.94 | 118.82 | −12.94 | −5.88 | 81.84 | 18.16 | 0 |
| SRC6 | 3.95 | 0.20 | 81.85 | 14.86 | 3.29 | 147.55 | −49.08 | 1.53 | — | — | — |
| SRC7 | 3.95 | 0.20 | 74.90 | 18.31 | 6.79 | 101.10 | −15.70 | 14.60 | 83.24 | 16.76 | 0 |
| SRC8 | 3.95 | 0.20 | 87.78 | 11.82 | 0.40 | 118.90 | −14.22 | −4.68 | 92.19 | 7.81 | 0 |
| SRC9 | 2.40 | 0.39 | 81.17 | 5.10 | 13.73 | 74.37 | 13.82 | 11.81 | — | — | — |
| SRC10 | 2.40 | 0.36 | 52.21 | 34.02 | 13.77 | 82.81 | 9.25 | 7.94 | 60.50 | 26.70 | 12.80 |
| SRC11 | 2.40 | 0.35 | 60.21 | 21.04 | 18.75 | 81.43 | 4.91 | 13.66 | — | — | — |
| SRC12 | 2.40 | 0.38 | 78.55 | 9.46 | 11.99 | 86.12 | 6.79 | 7.09 | — | — | — |
| SRC13 | 3.52 | 0.38 | 53.24 | 31.69 | 15.07 | 63.40 | 26.25 | 10.35 | — | — | — |
| SRC14 | 3.52 | 0.32 | 55.76 | 37.51 | 6.73 | 92.26 | 10.86 | −3.12 | — | — | — |
| SRC15 | 4.53 | 0.11 | 63.11 | 31.70 | 5.19 | 119.82 | −13.27 | −6.55 | 54.98 | 45.02 | 0 |
| SRC16 | 4.53 | 0.23 | 49.46 | 44.70 | 5.84 | 104.05 | −4.05 | 0 | 77.93 | 22.07 | 0 |
| SRC17 | 4.53 | 0.29 | 49.80 | 42.64 | 7.56 | 97.53 | 2.47 | 0 | — | — | — |
| SRC18 | 4.53 | 0.22 | 60.09 | 35.12 | 4.79 | 98.56 | 1.44 | 0 | 81.32 | 18.68 | 0 |
| SRC19 | 4.53 | 0.23 | 51.94 | 40.92 | 7.14 | 110.43 | −10.43 | 0 | 87.57 | 12.43 | 0 |
| SRC20 | 4.53 | 0.45 | 50.16 | 42.48 | 7.36 | 102.81 | −2.81 | 0 | 85.44 | 14.56 | 0 |

3.1 不同位移角对轴力分配影响

轴力主要由混凝土和型钢两部分承担,由于拉压部分相互抵消,纵筋所承担的轴力较小,占总轴力的比例一般在 10%以内.在 1/100 位移角以前,型钢所分配的轴力约占总轴力的 20%~40%;随着位移角的增大,型钢分配的轴力有所降低,但是变化不大;在位移角大于 1/100 后,混凝土的抗压能力逐渐得到发挥,型钢参与抗弯,拉压应力相互抵消,导致分担的轴力逐渐减少;位移角在 1/50 左右的时候,型钢承担的轴力达到最小值,对于轴压力系数较小且配钢率较大的试件,此时混凝土部分承担的轴力甚至超过了总轴力;当位移角大于 1/50 后,混凝土部分开始压酥破碎并逐步退出工作,型钢承担的轴力逐渐增大;在位移角超过 1/20 之后,由于型钢柱塑性铰区变形较大,应变量测数据大部分超过有效度数范围.试件 SRC15 的型钢所承担轴力的比例最大与最小的差值达到 58%,说明不同位移角下,型钢与钢筋混凝土部分直接的轴力分配规律变化很大.

3.2 轴压力系数对轴力分配影响

在其他条件相同的情况下,对比轴压力系数不同的试件 SRC15, SRC18, SRC20 可以发现:对于轴压力系数较小的试件 SRC15,在位移角为 1/100 时,型钢部分便已处于整体受拉状态,混凝土分配的轴力较早达到峰值,随着位移角的增加,曲线的下降段较为平缓,最终在 1/25~1/20 位移角时,型钢承担的轴力达到总轴力的 40%以上;对于轴压力系数中等的试件 SRC18,在小位移角下型钢和混凝土分配的轴力基本不变,随着位移角的增加,型钢分配的轴力逐渐降低,当位移角达到 1/35 时,混凝土分配的轴力达到峰值,占总轴力的 108%;对于轴压力系数较大的试件 SRC20,在小位移角下混凝土与型钢承担了基本相同的轴力,由于试件在 1/25 位移角时破坏便已较为严重,之后的数据已无法量测.随着轴压力系数的增加,试件 SRC10 在整个加载过程中型钢都承担了一定比例的轴力,混凝土部分所承担轴力的最大值仅占总轴力的 82%.因此,在高轴压力系数下,型钢对试件的抗压承载力具有较大的贡献.

3.3 配钢率对轴力分配影响

对典型试件的轴力分配图进行对比分析后发现:虽然试件的配钢率有所不同,但轴力分配曲线的规律基本相同,而且对于不同配钢率的试件,型钢所承担轴力的百分比也相差不大.配钢率最小的试件

SRC10,在整个加载过程中承担了 10%~35%的轴压力.

4 结 论

1) SRC 柱中型钢承担了一定比例的轴向力,相当于降低了钢筋混凝土部分的实际轴压比,提高了试件的变形能力和滞回耗能能力.当混凝土压碎退出工作时,型钢承担的轴力比例逐渐增大,保证了试件的轴向承载力,提高了结构的抗倒塌能力.

2) 型钢与钢筋混凝土部分的轴力分配规律随结构层间位移角的增大不断变化,型钢承担的轴力先减小后增大,最大的比例差值超过 50%,设计时应考虑轴力分配规律的变化.

3) 大位移角下,型钢承担轴力比例随轴压比的增加和配钢率的增加而增加;小位移角下,型钢承担轴力比例随轴压比和配钢率的变化规律性不明显.

参考文献:

[1] RICLES J,PABOOJIAN S. Seismic performance of steel-encased composite columns[J]. Journal of Structural Engineering (ASCE),1994,120(8):2474-2494.

[2] LI Li,MATSUI C. Effects of axial force on deformation capacity of steel encased reinforcedconcrete beam-columns [C]//Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering. Sydney:[s. n.],2000:1075-1082.

[3] 叶列平,方鄂华. 钢筋混凝土构件的受力性能研究综述[J]. 土木工程学报,2000,33(5):1-11.

[4] 李俊华,王新堂,薛建阳. 低周反复荷载作用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.

[5] 郭子雄,林煌,刘阳. 不同配箍形式型钢混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2010,31(4):110-115.

[6] 刘阳,郭子雄. 核心型钢混凝土柱抗震性能及轴压比限值试验研究[J]. 土木工程学报,2010,43(6):57-66.

[7] 刘阳,郭子雄,林煌. SRC 柱塑性铰区域变形性能试验研究[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2011,31(1): 48-53.

[8] ECCS. Composite structures[M]. London and New York:The Construction Press,1981:34-89.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 138—2001 型钢混凝土组合结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011:25-30.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. YB 9082—2006 钢骨混凝土结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2006:113-122.

[11] 王海龙,江见鲸,李中立,等. 钢骨混凝土柱正截面强度计算中的轴力分配[J]. 清华大学学报:自然科学版,1999,28(9):108-111.

Experimental Study on the Axial Force Distribution of SRC Columns under Bearing Axial and Lateral Loads

WANG Zi-yi^{1,2}, LIU Yang^{1,2}, GUO Zi-xiong^{1,2},
JIA Lei-peng^{1,2}, CHEN Qing-meng³

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Key Laboratory for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province, Xiamen 361021, China;

3. Xiamen Tefang Construction Engineering Group Company Limited, Xiamen 361000, China)

Abstract: Twenty-one 1 : 2 scale steel reinforced concrete (SRC) columns were tested under cyclic loading to investigate the component of axial force at different story-drift angles. The axial forces carried by the shaped steel, the concrete, and the reinforcement were calculated separately based on the test results. It is indicated that: the axial force carried by the shaped steel decreases initially and then increases with the increase of story-drift angle. The proportion of the axial force carried by the shaped steel is 20%-40% of the total axial force.

Keywords: steel reinforced concrete column; axial force; axial compression ratio; shaped steel