

# 中空型钢混凝土压弯构件的滞回性能

杨应华, 江 微, 郭生栋

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 中空型钢混凝土柱是一种适于预制装配结构的新型构件. 论文应用 ABAQUS 有限元对 9 个中空型钢混凝土压弯构件的滞回性能进行了参数分析, 讨论了轴压比、配箍率和配钢率三个参数对构件承载力、延性及耗能能力的影响. 结果表明, 中空型钢混凝土压弯构件具有较好的延性, 按现行型钢混凝土规范要求设计, 基本能满足框架柱的抗震要求.

**关键词:** 中空型钢混凝土柱; 滞回性能; 轴压比; 延性; 非线性数值分析

**中图分类号:** TU398.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7930(2015)03-0327-06

## Hysteretic behavior of SRC hollow beam-columns

YANG Yinghua, JIANG Wei, GUO Shengdong

(Xian university of architecture and technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** SRC hollow column is a new type of structural member fitting for prefabricated construction. Employing ABAQUS FEM 9 SRC hollow beam-columns under quasi-static cyclic bending are analyzed considering different parameters such as axial compression ratio, steel ratio and stirrup ratio. The influences of these parameters on the hysteretic behavior of SRC hollow beam-columns are fully discussed. It is shown that SRC hollow beam-columns designed to the current Chinese SRC structural code can basically fulfill the seismic requirements for frame columns.

**Keywords:** SRC hollow column; hysteretic behavior; axial compression ratio; ductility; nonlinear finite element analysis

型钢混凝土柱一般采用工字型钢或十字型钢等实腹截面作为核心型钢, 在工程实际中得到了广泛应用. 但是这种传统的型钢混凝土柱自重较大, 不便于装配式结构. 中空型钢混凝土柱<sup>[1]</sup>的提出很好的解决了这一难题, 它可以在工厂预制, 较方便地进行现场装配. 对于这种新型构件的受力性能, 须进行系统的研究, 以便指导实际应用. 作为该项研究的一部分, 本文拟就中空型钢混凝土柱在压弯作用下的滞回性能进行分析讨论.

目前国内外对一般实腹式型钢混凝土柱在往复荷载作用下的受力性能进行了较多的理论和实验研究<sup>[2-5]</sup>, 但是对中空型钢混凝土结构却鲜有研究, 中空型钢混凝土柱由于其构造异于一般型钢混凝土柱, 因此其滞回性能与传统的型钢混凝土柱有多大差别, 尚不清楚. 论文将对中空型钢混凝土压弯柱的滞回性能进行非线性 ABAQUS 有限元分析, 以期为其抗震设计提供参考.

### 1 构件参数设计

分析的构件模型如图 1 所示, 构件截面取工程中常用尺寸 400×400(mm), 长度取一般层高的一半即 1.5 m, 混凝土强度等级取 C35; 纵向受力钢筋采用 12 $\Phi$ 20, 相应配筋率为 1.18%>0.8%, 满足《型钢

混凝土组合结构技术规程》<sup>[6]</sup>的最小配筋率要求. 核心型钢采用边长为 200 的 Q345 方钢管, 改变其厚度, 以考察配钢率的影响, 具体为: 配钢率  $s_1=2.7\%$  (厚度  $t=4$  mm),  $s_2=4.0\%$  ( $t=6$  mm),  $s_3=5.3\%$  ( $t=8$  mm), 除  $s_1=2.7\%$  外都满足规范<sup>[6]</sup>对配钢率不宜小于 4% 和不宜大于 10% 的要求. 根据文献[4]对 8 个含钢率较低的核心型钢混凝土柱抗震性能的研究发现, 与配钢率为 3.2% 的构件相比, 配钢率为 1.6% 的构件具有更好的变形性能和延性, 故考虑配钢率为 2.7% 的构件, 以考察配钢率较低的情形. 箍筋采用八角复合箍筋, 按体积配箍率  $g_1=1.80\%$  ( $\Phi 10@100$ ),  $g_2=1.44\%$  ( $\Phi 8@80$ ),  $g_3=1.15\%$  ( $\Phi 8@100$ ) 选取, 以分析箍筋的影响. 同时, 变化轴压比以讨论轴压比的影响 (轴压比为施加的轴向力与构件抗压承载力的比值). 根据轴压比、配箍率和配钢率的上述取值共设计了 9 个中空型钢混凝土构件 (见表 1).

### 2 材料本构关系

#### 2.1 混凝土

混凝土的应力-应变关系依据《混凝土结构设计规范》<sup>[7]</sup>得到, 其中单轴受拉应力-应变关系为:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \rho_1 (1.2 - 0.2x_1^5) E_c \varepsilon & x_1 \leq 1 \\ \sigma_1 &= \frac{\rho_1}{\alpha_1 (x_1 - 1)^{1.7} + x_1} E_c \varepsilon & x_1 > 1 \end{aligned} \quad (1)$$

单轴受压应力-应变关系为:

$$\sigma_2 = \frac{\rho_c n}{n-1+x_2^n} E_c \varepsilon \quad x_2 \leq 1$$
$$\sigma_2 = \frac{\rho_c}{\alpha_c (x_2 - 1)^2 + x_2} E_c \varepsilon \quad x_2 > 1$$

(2)

参数中  $E_c$  为混凝土弹性模量,  $x_1 = \varepsilon / \varepsilon_{t,r}$ ,  $x_2 = \varepsilon / \varepsilon_{c,r}$ ,  $\varepsilon_{t,r}$  和  $\varepsilon_{c,r}$  分别为混凝土的峰值拉应变和压应变,  $\rho_t = f_{t,r} / (E_c \varepsilon_{t,r})$ ,  $\rho_c = f_{c,r} / (E_c \varepsilon_{c,r})$ ,  $f_{t,r}$  和  $f_{c,r}$  分别为混凝土单轴抗拉强度和抗压强度标准值,  $\alpha_t$  和  $\alpha_c$  分别为混凝土单轴受拉和受压应力-应变曲线下降段的参数值,  $n = E_c \varepsilon_{c,r} / (E_c \varepsilon_{c,r} - f_{c,r})$ , 各参数具体取值参见规范<sup>[7]</sup>.

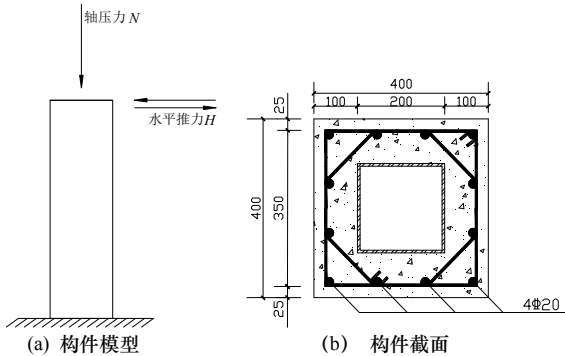


图 1 分析模型  
Fig.1 Analytical model

表 1 构件参数

Tab.1 Parameters of SRC hollow columns

构件编号	轴压比	箍筋	型钢
SRHC-1	0.2	Φ10@100	□200×4
SRHC-2	0.25	Φ10@100	□200×4
SRHC-3	0.3	Φ10@100	□200×4
SRHC-4	0.4	Φ10@100	□200×4
SRHC-5	0.3	Φ10@100	□200×6
SRHC-6	0.3	Φ8@80	□200×6
SRHC-7	0.3	Φ8@100	□200×6
SRHC-8	0.4	Φ10@100	□200×6
SRHC-9	0.4	Φ10@100	□200×8

2.2 混凝土塑性损伤模型

ABAQUS 采用混凝土塑性损伤模型模拟混凝土材料在往复荷载作用下由于损伤引起的不可恢复的刚度退化, 假定混凝土材料主要因拉伸开裂和压缩破碎而破坏. 当混凝土受轴向拉力作用时, 在达到峰值拉应力前不存在刚度退化, 卸载时刚度可恢复, 当达到峰值拉应力时, 混凝土开裂, 抗拉刚度降低, 材料按有效刚度 $(1-d_t) E_0$  卸载. 当混凝土受轴向压力作用时, 在应力达到峰值压应力的 75%之前取为线弹性, 之后抗压刚度降低, 材料按有效刚度 $(1-d_c) E_0$  卸载,  $E_0$  为初始无损弹性模量. 单轴拉压损伤变量  $d_t$  和  $d_c$  的具体计算方法详见规范<sup>[7]</sup>中 C.2.3-2 和 C.2.4-2 式.

2.3 钢材

钢材的应力-应变曲线采用理想三折线模型, 将钢材的应力应变关系分为弹性阶段、塑性阶段和强化阶段, 如图 2 所示, 泊松比均为 0.3, 取屈服平台对应的最大应变值  $\varepsilon_s = 11\varepsilon_y$ , 强化阶段的切线模量  $E_2 = 0.05E_1$ , 其他各参数见表 2.

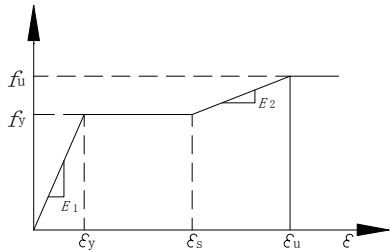


图 2 钢材应力-应变曲线  
Fig.2 Steel constitutive relation

表 2 型钢、钢筋材料参数表

Tab.2 Mechanical properties of steel

类型	型钢	Φ10 箍筋	Φ20 钢筋
弹性模量 $E_1$ /MPa	206 000	210 000	200 000
弹性模量 $E_2$ /MPa	10 300	105 00	10 000
屈服强度/MPa	345	300	400
极限强度/MPa	470	420	540
$\varepsilon_y$	0.001 67	0.001 43	0.002 00
$\varepsilon_s = 11\varepsilon_y$	0.018 25	0.015 71	0.022 00
$\varepsilon_u$	0.030 55	0.027 14	0.036 00

3 有限元分析模型

3.1 单元类型的选择和网格划分

型钢采用四节点减缩积分格式的壳单元 S4R, 为了提高计算精度, 壳单元厚度方向采用 9 个积分点的 Simpson 积分; 混凝土采用八节点减缩积分格式的三维实体单元 C3D8R; 纵向钢筋和箍筋采用两节点线性三维桁架单元 T3D2, 并且采用 ABAQUS 中的 Embed 技术进行模拟, 认为钢筋与混凝土协同工作; 考虑型钢与混凝土之间的粘结滑移, 其界面模型采用法向接触和切向接触, 选择硬接触作为型钢与混凝土的法向接触, 切向接触采用库仑摩擦模型来模拟, 摩擦系数  $\mu$  为 0.6. 网格划分过细或者过粗都会对计算时间及精度产生较大影响, 依据相关资料和实际试算, 取方核心钢管的网格尺寸为 25 mm, 混凝土和钢筋的网格尺寸为 30 mm, 采用结构化网格划分技术进行单元网格划分.

3.2 边界条件和加载方式

将柱底截面节点的 3 个平动自由度和 3 个转动自由度全部约束. 先施加竖向荷载, 水平加载采用荷载-位移控制法, 构件屈服前按荷载控制, 分级加载, 每级荷载循环一次; 屈服后按位移控制, 每级增加的位移为屈服位移的整数倍数, 每个控制位移

下循环一次. 屈服位移由静力分析按通用屈服弯矩法确定, 极限位移取荷载达到最大荷载后降至 85% 时所对应的位移. 为避免出现局部破坏, 在柱端和底部设置刚性垫片, 采用耦合加载.

### 3.3 有限元模型验证

为了验证有限元分析模型的有效性, 取文[8]中试件 SRC-1 进行分析. 该试件高 600 mm, 剪跨比  $\lambda=1.5$ , 轴压比  $n_0=0.42$ , 截面如图 3(a) 所示, 纵筋配筋率  $\rho=1.005\%$ , 箍筋采用直径为  $\Phi 6$ ,  $\Phi 8$  的矩形封闭式双肢箍筋, 配箍率  $\rho_v=0.63\%$ , 混凝土等级为 C30, 型钢采用 Q235, 工字钢的腹板高度  $h_w=120\text{ mm}$ , 腹板厚度  $t_w=5$ , 翼缘的宽度  $b_f=74\text{ mm}$ , 厚度  $t_f=8.4\text{ mm}$ . 采用上述方法建立有限元模型, 分析结果见图 3(c,d).

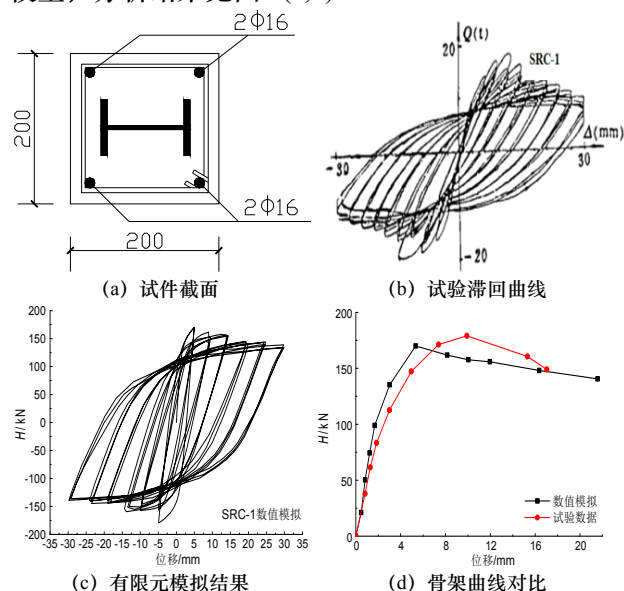


图3 有限元模型验证

Fig.3 The validation of FEM model

(1) 从滞回曲线的对比结果看, 有限元模拟得到的滞回曲线更加饱满, 这主要是因为有限元模拟了试件的理想情况, 而材料强度的离散性、试件加工质量、试验装置间的缝隙等因素都将对结构的性能产生影响.

(2) 从骨架曲线的对比结果来看, 试验屈服位移为 4.66 mm, 有限元模拟结果为 4.128 mm, 误差为 11.4%. 试验所得屈服荷载 143.69 kN, 有限元结果为 152.28 kN, 误差为 5.6%; 试验峰值荷载为 179.16 kN, 有限元结果为 170.65 kN, 误差为 4.7%; 有限元分析结果偏小, 这主要是因为有限元模拟的过程中, 采用无约束的混凝土本构关系模型, 并没有考虑工字钢对混凝土的约束作用. 总体来看, 有限元分析结果与试验结果比较吻合.

## 4 分析结果

### 4.1 轴压比对构件滞回性能的影响

图 4 给出了 SRHC-1、2、3、4 四个构件的滞回曲线, 这四个构件除轴压比不同外, 其他参数均相同. 可以看出, 轴压比为 0.2 和 0.25 的 SRHC-1、2 两构件, 滞回曲线形状类似, 强度、刚度稍有退化现象; 而轴压比为 0.3 和 0.4 的 SRHC-3、4 两构件, 强度、刚度退化非常明显, 特别是 SRHC-4 构件, 强度、刚度退化非常严重; 随着轴压比的增大, 构件滞回曲线所围的面积愈来愈小, 表明其耗能能力迅速下降.

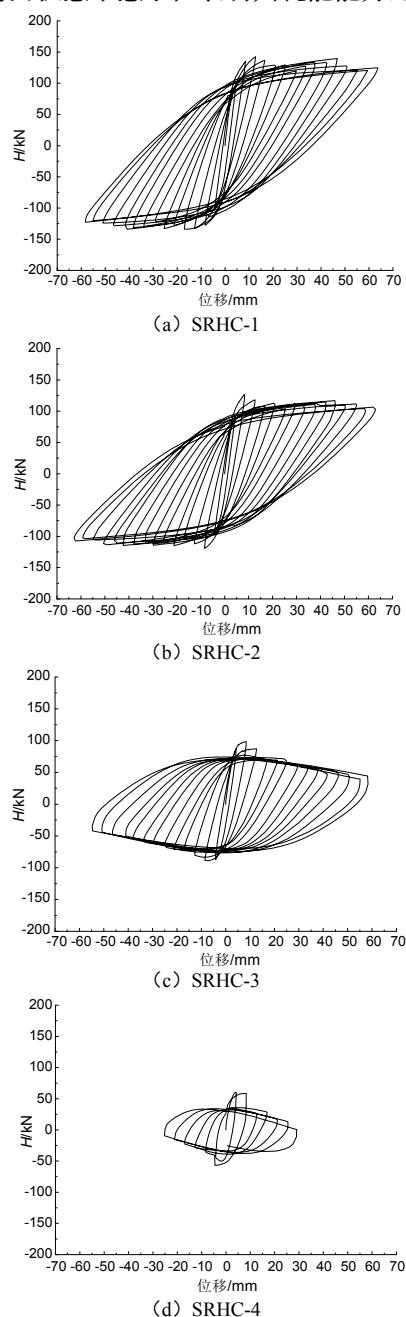


图4 SRHC-1、2、3、4 构件滞回曲线

Fig.4 Hysteretic curves of SRHC-1、2、3、4

图 5(a) 给出了四个构件的骨架曲线对比. SRHC-1、2 屈服荷载值分别为 109.00 和 100.72 kN,

与前者相比,后者只降低了 7.6%,相应屈服位移只减小了 2.36%(表 3).轴压比为 0.3 的 SRHC-3 构件,当柱顶侧移角达到  $1/60$  时,承载能力出现缓慢下降,其屈服荷载较轴压比为 0.2 的 SRHC-1 构件下降了 28.56%,屈服位移减小 21.93%.轴压比为 0.4 的 SRHC-4 构件,承载能力衰减严重,屈服荷载较轴压

比为 0.2 的 SRHC-1 构件下降了 55.24%,屈服位移减小 39.39%,达到极限荷载时,柱子底部混凝土压碎鼓出,方钢管向内凹曲(图 8),当柱顶侧移达到  $1/50$  时,计算结果因无法收敛而中断.总体上这四个构件都具有较好的延性,即使严重退化的 SRHC-4 构件的时延性系数也达 3.59.

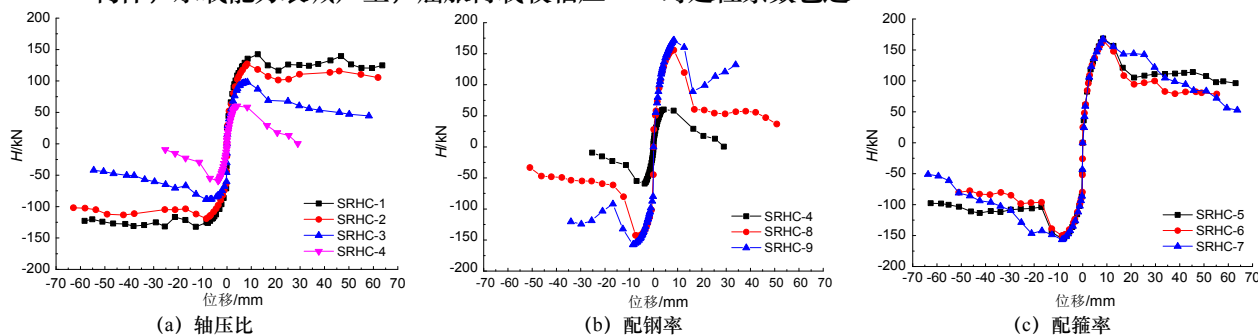


图 5 构件的骨架曲线

Fig.5 The skeleton curves of SRC hollow columns

#### 4.2 配钢率对滞回性能的影响

构件 SRHC-4、8、9 除核心型钢的厚度不同外,其余参数均相同,图 6 给出了此三构件的滞回曲线比较.从中可以看出,构件 SRHC-4、8(配钢率分别为 2.7%和 4.0%)的滞回曲线都表现出了严重的退化现象,而构件 SRHC-9(配钢率为 5.3%)的滞回曲线并无退化发生.构件 SRHC-4 的极限承载力比构件 SRHC-8 的极限承载力降低了 61.5%,而是构件 SRHC-9 极限承载力相比于 SRHC-8 只提高了 9.3%(表 3);构件 SRHC-4 的屈服荷载和屈服位移比构件 SRHC-8 的分别降低了 61%和 34.3%,而是构件 SRHC-9 的屈服荷载和屈服位移相比于 SRHC-8

分别也只提高了 8.4%和 10.3%(表 3).从对延性的影响来看,构件 SRHC-4 的延性系数为 3.59,均高于构件 SRHC-8 和 SRHC-9 的 2.86 和 3.07,和文献[4]在配钢率较小的情况下构件延性更好的结论一致.构件 SRHC-8 的配钢率、配筋率和配箍率都在规范规定的范围内,但其延性系数却小于一般框架结构要求的 3.0,对此需要做进一步的研究.

#### 4.3 配箍率对滞回性能的影响

构件 SRHC-5、6、7 的体积配箍率分别为 1.80%, 1.44%、1.15%,除此外其他参数均相同,它们的滞回曲线对比如图 7 所示.可以看出,这三个构件的滞回曲线基本相同,差异不大.

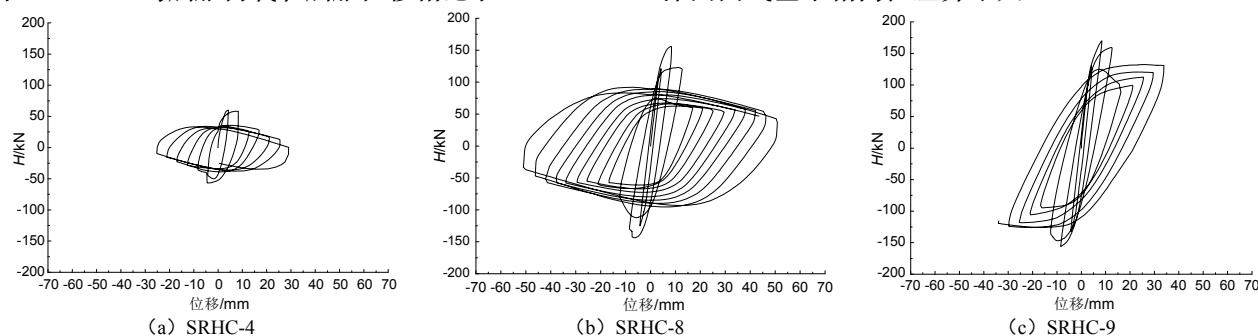


图 6 SRHC-4、8、9 构件滞回曲线

Fig.6 Hysteretic curves of SRHC-4、8、9

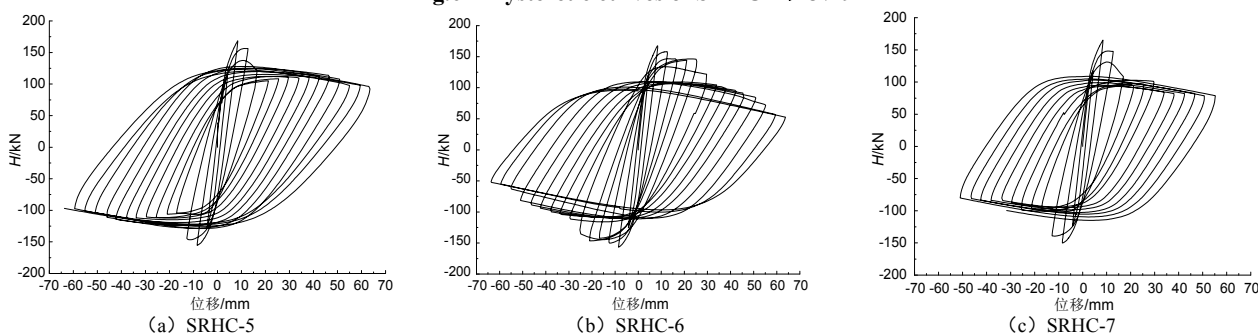


图 7 SRHC-5、6、7 构件滞回曲线

Fig.7 Hysteretic curves of SRHC-5、6、7



表 3 有限元分析结果  
Tab.3 Results of FEM analysis

影响 因素	构件 编号	屈服 位移/mm	屈服 荷载/kN	极限 位移/mm	极限 荷载/kN	延性 系数
轴压比	SRHC-1	4.24	109.00	18.66	121.15	4.40
	SRHC-2	4.14	100.72	17.21	107.95	4.16
	SRHC-3	3.31	77.88	13.48	83.57	4.07
	SRHC-4	2.57	48.78	9.23	50.99	3.59
配钢率	SRHC-4	2.57	48.78	9.23	50.99	3.59
	SRHC-8	3.91	125.01	11.18	132.49	2.86
	SRHC-9	4.36	136.50	13.39	146.17	3.07
配箍率	SRHC-5	4.21	130.61	14.92	143.29	3.55
	SRHC-6	4.14	130.33	25.72	142.35	5.91
	SRHC-7	4.12	129.49	12.98	140.14	3.15

从图 5(c)和表 3 进一步可以得到,三个构件的屈服荷载、极限荷载和屈服位移差别不大,在 2.2%之内. 构件 SRHC-6( $\phi 8@80$ )的延性系数为 5.91,和构件 SRHC-5( $\phi 10@100$ )和 SRHC-7( $\phi 8@100$ )相比,延性系数分别增加了 40%和 46.7%,表明配箍率对构件的承载力没有显著影响,但却是影响中空混凝土压弯构件延性的一个重要因素,加密箍筋间距能有效的提高对混凝土的约束作用,改善构件受力性能,

所以合理的配箍率可以大幅增加构件延性.

4.4 构件的破坏模式

图 8 为典型构件 SRHC-6 的混凝土、型钢和钢筋在不同阶段的应力云图. 可以看出,构件屈服时,柱根部部分受压区混凝土达到极限抗压强度,当荷载超过屈服荷载时,柱根部受压区混凝土开始出现局部的微凸鼓,随着水平位移的逐级增大,局部凸鼓范围不断增大且渐渐沿环向发展,到达极限荷载时柱脚受压区混凝土压碎鼓出;同样,在达到屈服荷载时,方钢管底部部分应力已经超过屈服强度达到极限强度,随着荷载的不断增大,受压区和部分受拉区的型钢完全屈服,方钢管向内凹曲破坏;当构件受到的水平力到达屈服荷载时,柱脚纵筋一侧受拉,一侧受压,纵筋的应力大于箍筋,但是都处于弹性状态,随着水平力的不断增加,受拉纵筋先屈服,受压区纵筋向外鼓出,增至极限荷载时,柱脚处箍筋屈服,纵筋屈服范围加大,进而柱脚钢筋全部屈服鼓出.

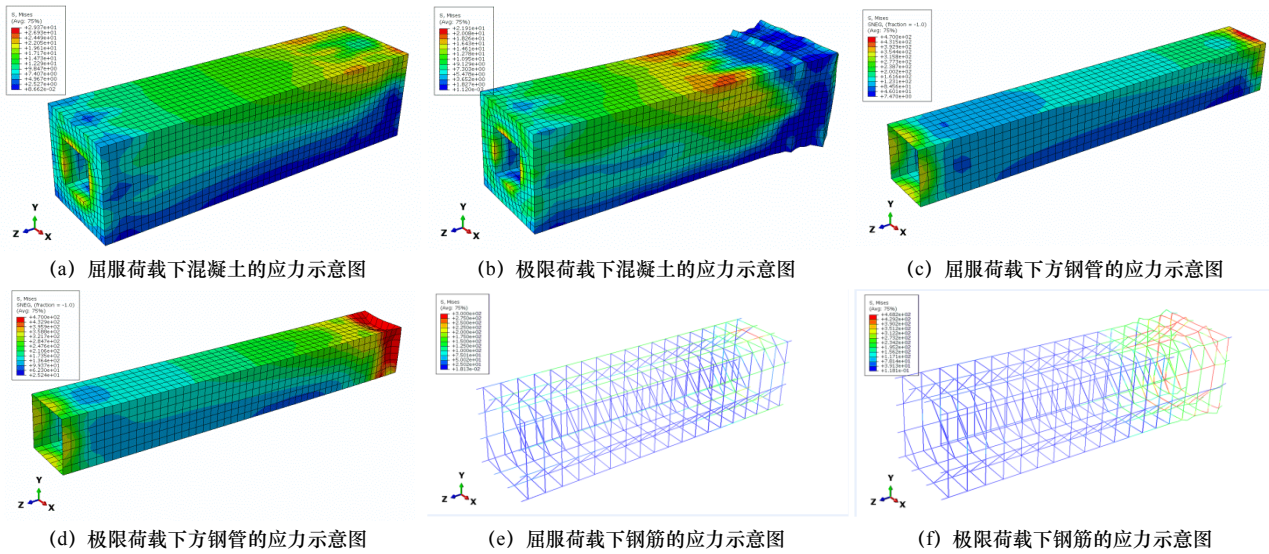


图 8 试件 SRHC-6 应力云图  
Fig.8 Stresses of SRHC-6

4.5 耗能能力

耗能能力是指构件吸收能量的能力,图 9 描述了不同位移加载等级下三个参数对滞回耗能的影响,(滞回耗能由滞回环正负两个方向面积的平均值  $E$  进行描述,  $\Delta / \Delta_y$  为构件的实际位移与屈服位移的比值)可以看出随着位移加载等级的增加,耗能值有不断增大的趋势,说明构件具有较好的耗能能力. 轴压比对构件耗能性能的影响见图 9(a),随着轴压比的增大,构件的耗能面积逐渐减小,延性变差,轴压比为 0.4 的构件 SRHC-4 因破坏而终止,耗能能力

差. 图 9(b)为配钢率对构件耗能性能的影响,在轴压比为 0.4 时,构件 SRHC-9 因计算结果中断而终止,从图中看出随着配钢率的增加,构件的耗能能力不断增强. 配箍率对构件的耗能性能影响见图 9(c),配箍率为 1.44%的构件 SRHC-6 在柱顶侧移角达到 1/43 之前表现出较好的耗能性能,这主要跟加密箍筋间距能延缓承载力衰减的幅度有关,随着配箍率从 1.15%增加到 1.8%,构件的耗能面积只增加了 17%,配箍率对构件的耗能能力影响较小.

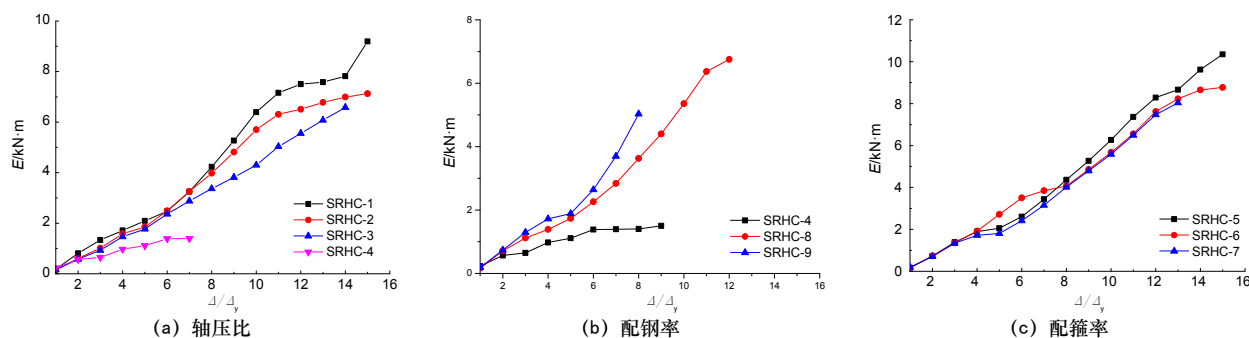


图9 构件的滞回耗能

Fig.9 The dissipated energy of SRC hollow columns

## 5 结论

通过以上9个中空型钢混凝土压弯构件的滞回性能有限元参数分析,可以得出以下结论:

(1) 中空型钢混凝土压弯构件具有较好的延性,按现行的型钢混凝土规范要求要求进行设计,基本都能满足框架结构延性系数大于3.0的要求;合理进行配箍,是提高构件延性的有效措施;

(2) 与一般实腹核心型钢混凝土柱类似,轴压比仍然是影响中空型钢混凝土压弯构件滞回性能的重要因素,其影响规律与对一般实腹核心型钢混

凝土柱的影响类似,因此现行规范有关轴压比的规定仍然适合于中空型钢混凝土柱;

(3) 配钢率是影响中空型钢混凝土压弯构件承载力和刚度的主要因素,提高配钢率可有效地提高构件的承载力和刚度,但对构件延性的作用上应考虑箍筋、轴压比等其他因素;

(4) 配箍率对中空型钢混凝土构件承载力和刚度的影响较小,但对构件延性影响较大,适宜的配箍率,可大幅增加构件延性。

## 参考文献 References

- [1] 郭生栋, 杨应华, 郭周周. 一种预制中空型钢混凝土柱及其拼接结构: 中国, ZL201320522997. 8[P]. 2014.  
GUO Shengdong, YANG Yinghua, GUO Zhouzhou. A new type of prefabricated SRC hollow column and splicing structure: China, ZL201320522997. 8[P]. 2014.
- [2] 王秋维, 史庆轩, 姜维山, 等. 新型截面型钢混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(11): 123-129.  
WANG Qiuwei, SHI Qingxuan, JIANG Weishan, et al. Experimental study on seismic behavior of steel reinforced concrete columns with new-type cross sections[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(11): 123-129.
- [3] 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.
- [4] JUNICHI Sakai, CHIAKI Matsui, KOUICHI Minami. Earthquake Resistant Properties of Core Steel Composite Column[C]//Proc. 12th World Conf. Earthquake Engineering, Sydney, 2000: 128-134.
- [5] EL-TAWIL S, DEIERLEIN G G. Strength and Ductility of Concrete Encased Composite Columns[J]. J. Struct. Eng. 1999, 125(9): 1009-1019.
- [6] JGJ138-2001 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, 2001.  
JGJ138-2001 Technical specification for steel reinforced concrete composite structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [7] GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
GB50010-2010 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.
- [8] 张素芳. SRC 框架短柱在低周反复荷载作用下的延性[J]. 西南交通大学学报, 1990, 76(2): 112-118.  
ZHANG Sufang. The ductility of SRC short columns under low cyclic reversed loading[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1990, 76(2): 112-118.

(编辑 桂智刚)