

型钢混凝土异形柱滞回性能分析

薛建阳, 薛 皓, 刘祖强

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 基于试验研究, 采用 OpenSees 系统对型钢混凝土(SRC)异形柱的滞回性能进行有限元模拟, 计算结果与试验结果吻合较好. 根据计算结果, 获得了柱端的弯矩-曲率滞回曲线, 分析了 $P-\Delta$ 效应的影响和耗能能力. 结果表明: SRC 异形柱的滞回曲线饱满对称; $P-\Delta$ 效应使 SRC 异形柱的承载力降低 3.2%~12.4%, 延性变差; 与钢筋混凝土异形柱相比, SRC 异形柱的能量耗散系数大, 耗能能力强; 实腹式配钢试件的滞回性能优于空腹式配钢试件. 研究为 SRC 异形柱的工程应用提供参考.

关键词: 型钢混凝土; 异形柱; 滞回性能; 低周反复加载; 有限元

中图分类号: TU398.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)06-0780-05

型钢混凝土 (SRC) 异形柱是指异形截面 (L 形、T 形、Z 形、十形等) 中主要配置型钢并配有适量纵向钢筋和箍筋的新型结构柱, 它不仅保持了异形柱结构的优点, 同时还秉承了 SRC 结构的优越性, 是进一步推广应用的异形柱理想形式^[1]. 目前, 国内外学者对 SRC 异形柱的正截面承载力、斜截面承载力以及抗震性能等进行了研究^[2-5], 而关于 SRC 异形柱滞回性能方面的研究较少, 尤其是有限元模拟方面尚属空白. 因此, 本文基于 OpenSees 系统的数值模拟, 对 SRC 异形柱的滞回性能进行分析, 为该新型结构柱的科学研究及工程应用提供参考.

1 有限元模型

1.1 试验概况

根据课题组进行的 SRC 异形柱的低周反复加载试验, 选取其中的 4 个试件进行有限元分析, 包括 2 个 T 形柱、1 个 L 形柱、1 个十形柱. 试件具体的截面尺寸及配钢如图 1 所示, 设计参数如表 1 所示. 采用的混凝土及钢材的材性试验结果分别如表 1 和表 2 所示.

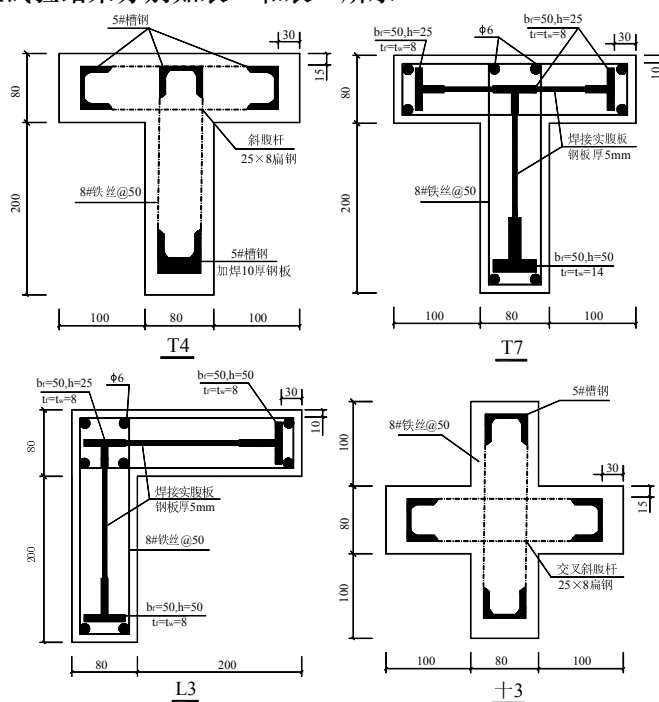


图 1 试件的截面尺寸及配钢
Fig.1 Geometry and steel details of specimens

收稿日期: 2014-01-30

修改稿日期: 2014-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51308444); 陕西省教育厅科研计划项目 (2013JK0979); 西安建筑科技大学人才科技基金 (RC1245)

作者简介: 薛建阳 (1970-), 男, 博士, 教授, 主要从事型钢-混凝土组合结构及其抗震性能等研究. E-mail: jianyang_xue@163.com

表 1 试件的设计参数
Tab.1 Design parameters of specimens

试件编号	配钢形式	加载角	轴压比 n	剪跨比 λ	配钢率 $\rho_{ss}/\%$	纵筋配筋率 $\rho_s/\%$	混凝土立方体抗压强度 f_{cu}/MPa
T4	槽形型钢	沿翼缘	0.5	2.5	8.49	0	24.88
T7	实腹钢板	沿翼缘	0.7	2	11.21	0.588	28.09
L3	实腹钢板	沿工程轴	0.7	2	7.55	0.588	24.88
十 3	槽形型钢	沿工程轴	0.7	2.5	7.18	0	28.09

注: $n=N/(f_cA)$, N 为轴向压力, f_c 为混凝土轴心抗压强度, A 为截面面积; $\lambda=L/(2h)$, L 为试件高度, h 为截面高度.

表 2 钢材材料性能
Tab.2 Properties of steel

钢材类型	型号	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	弹性模量 E/MPa
型钢	5#槽钢腹板	542.5	667.5	1.952×10^5
	5#槽钢翼缘	440.0	640.0	2.13×10^5
	25×8 扁钢	385.0	566.7	2.379×10^5
	50×8 扁钢	290.0	435.0	2.162×10^5
	50×10 扁钢	387.5	600.0	1.848×10^5
	50×14 扁钢	277.5	457.5	2.33×10^5
钢板	5mm 厚钢板	352.5	470.0	2.046×10^5
钢筋	φ6	360.0	545.0	2.465×10^5

1.2 模型建立

采用 OpenSees 系统对试验模型进行建模. 截面对象采用纤维模型. 划分截面时首先将其进行合理分区, 然后将混凝土、型钢和钢筋按不同的位置划分为不同的纤维, 其中混凝土根据其受约束程度不同可进一步划分为约束混凝土和保护层混凝土. 不同的纤维在计算过程中采用不同的本构关系. 单元对象采用基于位移的梁柱单元 (Displacement-Based Beam-Column element) [6].

混凝土纤维采用 Scott 等修正后的 Kent-Park 模型的骨架曲线[7]以及 OpenSees 中 Concrete02 的滞回规则, 该模型通过改变混凝土受压应力-应变曲线的峰值应力、峰值应变以及软化段斜率来考虑型钢和横向箍筋的约束作用. 钢筋和型钢纤维采用 Mohle-Kunnath 模型 (Reinforcing Steel Material) [8], 该模型可以考虑钢材的 Bauschinger 效应、低周疲劳效应以及准确预测钢材的断裂.

为模拟“建研式”加载装置[5]的约束条件, 杆件的底端进行固接, 顶端进行转角约束. 加载时, 首先在杆件顶端施加轴向荷载, 然后施加低周水平荷载. 水平加载采用位移控制, 每级位移循环一次.

2 计算结果验证

图 2 给出了有限元模拟和试验得到的各试件滞回曲线的对比情况. 由图可知, 计算结果与试验结果吻合较好. 特别是实腹式配钢试件 (T7、L3), 加载曲线和卸载曲线的趋势均较为接近. 对于空腹式配钢试件 (T4、十 3), 有限元模拟比试验的滞回曲线更加饱满, 这可能与建模过程中没有考虑粘结滑移有关, 也可能与纤维模型不能模拟剪切变形而试件在试验过程中发生少量剪切变形有关.

分析 SRC 异形柱的滞回曲线, 可以得出:

(1) 加载开始阶段, 滞回曲线包围的面积比较小, 荷载随位移基本呈线性变化; 随着荷载的增大, 滞回环逐渐向位移轴倾斜, 包围的面积逐渐增大, 试件的刚度退化明显; 在位移加载控制阶段, 由于累积损伤的影响, 试件的强度和耗能能力出现退化, 在同一位移量级的三次循环中, 后两次循环的荷载值和滞回环的面积均较第一次减小.

(2) 由于试件发生的为弯曲破坏 (具体破坏形态如图 3 所示), 因此滞回曲线呈饱满对称的梭形或弓形, 表明 SRC 异形柱的耗能能力较强.

(3) 与空腹式配钢试件 (T4、十 3) 相比, 实腹式配钢试件 (T7、L3) 的滞回曲线更加饱满, 说明其滞回性能更为优越.

表 3 所示为试验和有限元模拟得到的荷载和位移值在屈服点和峰值点处的对比情况, 表中的试验值和计算值均取正负加载方向的平均值. 由表可知, 荷载的计算值与试验值差距较小, 尤其是峰值荷载的误差在 10%以内, 而位移的计算值与试验值相差较大, 尤其是屈服位移的误差较大, 说明加载初期有限元模型

的刚度与试验试件的刚度有较大偏差,这可能还是与没有考虑粘结滑移相关.

总体而言,采用本文方法建立的有限元模型能够较好地模拟 SRC 异形柱的滞回性能.

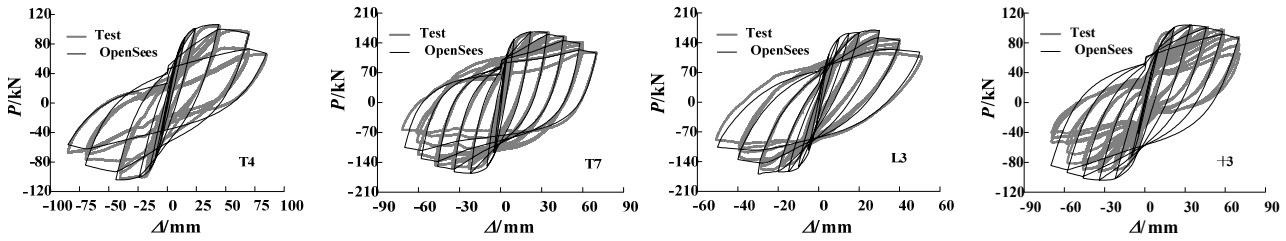


图 2 滞回曲线的试验结果与有限元计算结果
Fig.2 Hysteretic loops by test and calculation

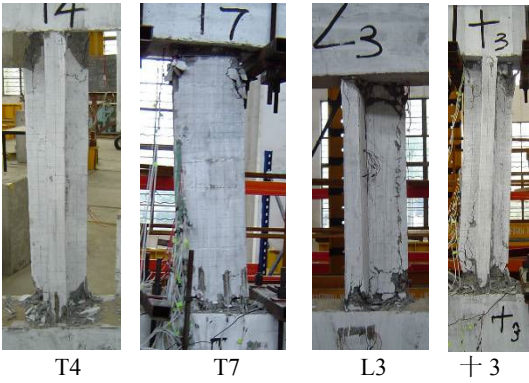


图 3 破坏形态
Fig.3 Failure pattern

表 3 特征点处计算结果与试验结果的对比

Tab.3 Comparison of calculated results and experimental results at characteristic points

试件 编号	屈服荷载/kN			屈服位移/mm			峰值荷载/kN			峰值位移/mm		
	试验值	计算值	误差	试验值	计算值	误差%	试验值	计算值	误差%	试验值	计算值	误差%
T4	85.5	90.0	5.3%	14.39	16.60	15.3	103.5	106.3	2.7	40.71	44.00	8.1
T7	131.1	136.5	4.1%	9.68	8.20	15.2	159.3	166.4	4.5	29.08	22.00	24.3
L3	125.5	140.0	11.6%	10.78	8.70	19.3	163.3	169.0	3.5	25.59	30.00	17.2
+3	75.4	87.8	16.4%	8.49	11.20	31.9	95.0	103.8	9.3	40.43	34.00	15.9

3 计算结果分析

3.1 弯矩-曲率滞回曲线

根据计算结果,得到各试件底端和顶端的弯矩-曲率滞回曲线,如图 4 所示.由图可以看出,各试件端部弯曲变形明显,且均发生屈服,进入塑性阶段;滞回曲线基本对称,且试件顶端和底端的滞回曲线呈反对称;在顶端水平位移相同时,由于 T7 和 L3 的高度较小(剪跨比较小),导致其端部的截面变形比其他两个试件大.

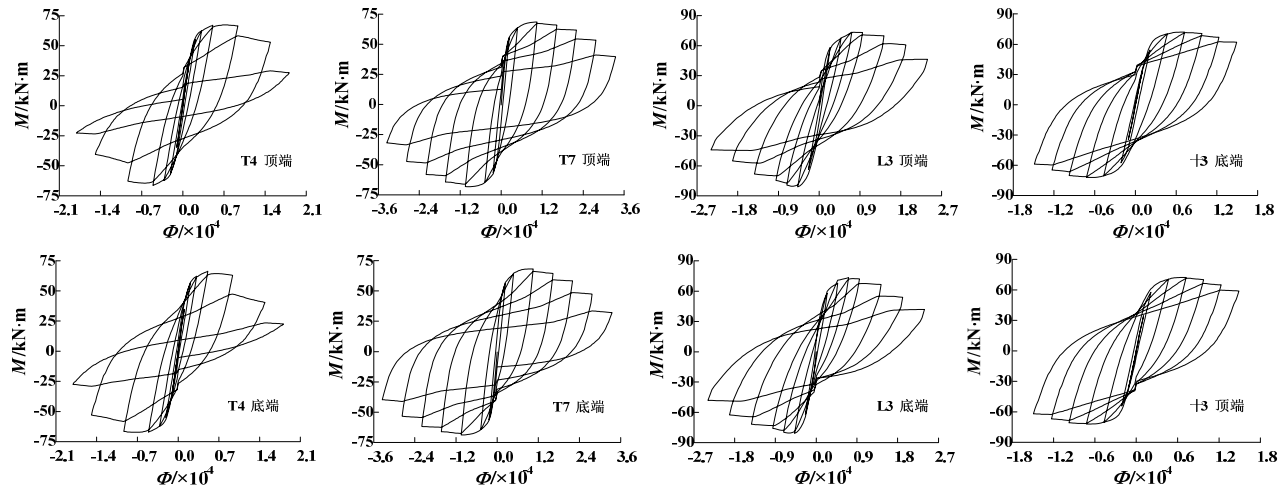


图 4 柱端弯矩-曲率滞回曲线
Fig.4 Bending moment-curvature hysteretic loops of column end

3.2 P-Δ效应影响分析

OpenSees 系统中可以通过设置局部坐标与整体坐标的转换方式确定是否考虑 $P-\Delta$ 效应, 若采用 P -Delta 转换, 则考虑 $P-\Delta$ 效应; 若采用 Linear 转换, 则不考虑 $P-\Delta$ 效应. 本文分别对 4 个试件进行相应计算, 以考察 $P-\Delta$ 效应对 SRC 异形柱滞回性能的影响, 结果如图 5 所示. 同时, 表 4 列出了两种情况下荷载值的对比情况. 由图 5 及表 4 可以看出, $P-\Delta$ 效应使 SRC 异形柱的承载力降低, 降低幅度介于 3.2%~12.4%, 曲线的下降段更加陡峭, 延性变差.

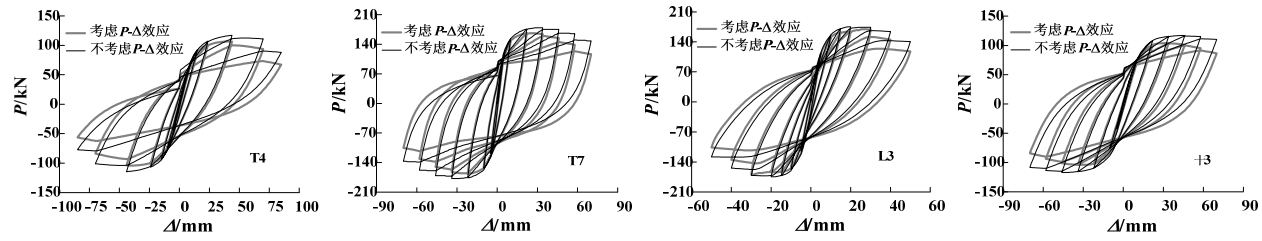


图 5 $P-\Delta$ 效应对 SRC 异形柱滞回曲线的影响
Fig.5 Influence of $P-\Delta$ effect on hysteretic loops of SRC special-shaped columns

表 4 考虑 $P-\Delta$ 效应和不考虑 $P-\Delta$ 效应的计算结果对比
Tab.4 Influence of $P-\Delta$ effect on calculated results

试件编号	加载方向	考虑 $P-\Delta$ 效应			不考虑 $P-\Delta$ 效应			P_{cm2}/P_{cm1}	β_2/β_1
		P_{cm1}/kN	P_{cu1}/kN	β_1	P_{cm2}/kN	P_{cu2}/kN	β_2		
T4	正	106.3	67.3	0.367	117.1	88.0	0.249	1.102	0.678
	负	104.1	56.5	0.457	114.7	77.3	0.326	1.102	0.713
T7	正	166.0	116.3	0.299	179.0	148.6	0.170	1.078	0.569
	负	166.4	105.3	0.367	178.0	137.2	0.229	1.070	0.624
L3	正	169.7	117.8	0.306	175.2	140.5	0.198	1.032	0.647
	负	169.5	106.4	0.372	174.9	128.1	0.268	1.032	0.720
十 3	正	103.8	86.3	0.169	116.7	110.2	0.056	1.124	0.331
	负	104.0	84.5	0.188	116.8	108.4	0.072	1.123	0.383

注: P_{cm} 为计算的峰值荷载, P_{cu} 为计算最大位移对应的荷载, $\beta=(P_{cm}-P_{cu})/P_{cm}$

3.3 耗能能力

根据滞回曲线计算得到各试件的能量耗散系数 $E^{[9]}$, 如图 6 所示. 由图可知, 试件处于弹性阶段时, 能量耗散系数较小, 耗能较少, 随着纵向钢筋和型钢的屈服, 试件逐渐进入弹塑性和塑形阶段, 能量耗散系数不断增大, 耗能逐渐增多; SRC 异形柱的能量耗散系数大于钢筋混凝土异形柱^[10], 耗能能力较强; 在相对位移相同的情况下, 实腹式配钢试件 (T7 和 L3) 的能量耗散系数大于空腹式配钢试件 (T3 和 十 3). 对比试验结果和计算结果可知, 能量耗散系数的整体变化趋势比较吻合; T3 和 十 3 的计算结果与试验结果差别相对较大, 主要是因为计算滞回曲线未能准确模拟捏拢现象.

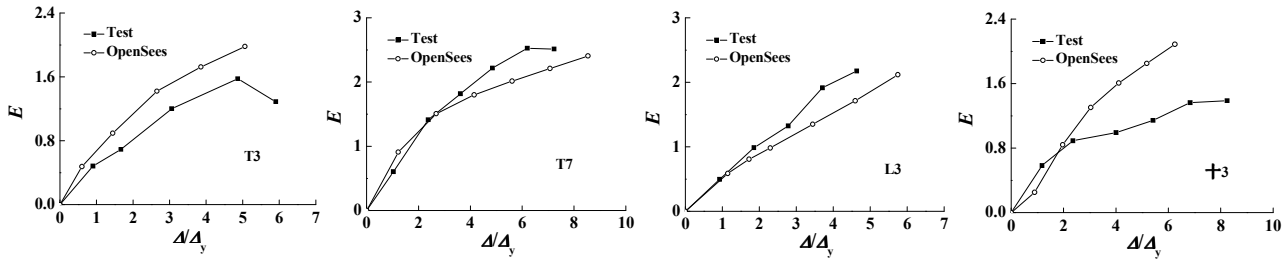


图 6 能量耗散系数
Fig.6 Energy dissipation coefficient

4 结论

本文通过有限元模拟对 SRC 异形柱的滞回性能进行研究, 得到以下主要结论:

(1) 采用 OpenSees 系统对低周反复荷载作用下 SRC 异形柱的受力性能进行有限元模拟, 计算结果与试验结果符合较好; 根据计算结果得到柱端的弯矩-曲率滞回曲线.

(2) SRC 异形柱的滞回曲线饱满对称, 体现出良好的抗震性能; 实腹式配钢试件的滞回性能比空腹式配钢试件更为优越.

(3) $P-\Delta$ 效应使 SRC 异形柱的承载力降低, 延性变差.

(4) SRC 异形柱的能量耗散系数大于钢筋混凝土异形柱, 显示出较强的耗能能力.

参考文献 References

- [1] TOKGOZ S, DUNDAR C. Test of eccentrically loaded L-shaped section steel fibre high strength reinforced concrete and composite columns [J]. Engineering Structure, 2012, 38(5): 134-141.
- [2] 徐亚丰, 刁晓征, 郭健, 等. 十字形钢骨混凝土异形柱双向偏心受压试验[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2009, 25(1): 100-105.
XU Yafeng, DIAO Xiaozheng, GUO Jian, et al. Experimental study on the biaxial eccentric pressure bearing capacity of cross-shaped steel reinforced concrete columns[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science Edition, 2009, 25(1): 100-105.
- [3] 李哲, 张小锋, 郭增玉, 等. 钢骨混凝土 T 形截面短柱力学性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(1): 1-5.
LI Zhe, ZHANG Xiaofeng, GUO Zengyu, et al. Experimental study on the mechanical property of steel reinforced concrete short columns of t-shaped cross-section [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(1): 1-5.
- [4] 陈宗平, 薛建阳, 赵鸿铁, 等. 型钢混凝土异形柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(3): 53-61.
CHEN Zongping, XUE Jianyang, ZHAO Hongtie, et al. Experimental research on seismic behavior of steel reinforced concrete special-shaped columns [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(3): 53-61.
- [5] 朱雁茹, 郭子雄. 基于 OpenSEES 的 SRC 柱低周反复加载数值模拟[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2010, 35(4): 555-559.
ZHU Yanru, GUO Zixiong. Numerical simulation of SRC column under low-cyclic loading based on OpenSEES [J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2010, 35(4): 555-559.
- [6] KENT D C, PARK R. Flexural members with confined concrete [J]. Journal of the Structural Division, 1971, 97(7): 1969-1990.
- [7] MAZZONI S, MCKENNA F, SCOTT M H, et al. OpenSees command language manual [R]. Berkeley, CA: University of California, 2006.
- [8] 辛立民. 钢筋混凝土异形柱结构抗震性能试验研究与弹塑性时程分析[D]. 天津: 天津大学, 2007.
XIN Limin. Experimental research and elastoplastic time-history analysis of the seismic performance of RC structure with specially shaped columns [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [9] 王铁成, 郝贵强, 赵海龙, 等. 反复荷载作用下纤维增强异形柱的抗震性能试验[J]. 天津大学学报, 2010, 43(11): 957-963.
WANG Tiecheng, HAO Guiqiang, ZHAO Hailong, et al. Test on seismic behavior of special-shaped columns reinforced by fiber under cyclic loading [J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(11): 957-963.

Analysis on hysteretic behavior of steel reinforced concrete special-shaped column

XUE Jianyang, XUE Hao, LIU Zuqiang

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Based on the experimental study, the finite element simulation of the hysteretic behavior of steel reinforced concrete (SRC) special-shaped column was conducted by OpenSees. The moment-curvature hysteretic loops of column end were obtained, and the influence of $P-\Delta$ effect and energy dissipation were analyzed. Results show calculated that the hysteretic loops of SRC special-shaped columns are symmetric and plump. $P-\Delta$ effect results in that the load bearing capacity of SRC special-shaped column reduces by 3.2%~12.4%, and the ductility turns worse. Compared with the reinforced concrete special-shaped column, the energy dissipation coefficient is large, showing the strong capacity of energy dissipation. The hysteretic performance of the column with solid steel is superior to that of the column with lattice steel. This study can provide reference for practical engineering application of SRC special-shaped column.

Key words: steel reinforced concrete (SRC); special-shaped column; hysteretic behavior; low cyclic reversed loading; finite element analysis

(本文编辑 吴海西)