

文章编号: 1000-5013(2011)01-0072-05

# 核心型钢混凝土柱抗震性能试验及数值模拟

刘阳, 郭子雄, 叶勇

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 在低周反复荷载作用下,对 1 个钢筋混凝土柱和 8 个核心型钢混凝土柱进行试验,研究核心型钢配钢率和轴压比对试件抗震性能的影响. 研究表明,试件抗震性能随着核心型钢配钢率的增加得到显著改善. 采用有限元软件 ADINA 对试件进行非线性有限元全过程分析,计算得到的试件骨架曲线、应力应变分布和裂缝发展情况与试验结果吻合良好.

**关键词:** 核心型钢混凝土柱; 抗震性能; 配钢率; 有限元分析

**中图分类号:** TU 375.303; TU 311.41

**文献标识码:** A

核心型钢混凝土(CSRC)柱是一种新型的组合作用形式,可提高重载钢筋混凝土(RC)框架柱的抗震性能,突破相关规范规定的 RC 框架柱轴压比限值. CSRC 柱是指在普通 RC 柱截面核心部位设置含钢率较低(2%~3%)的实腹式型钢,核心型钢截面高度一般不大于柱截面高度的 1/3~1/2. 文[1-6]的研究成果表明,CSRC 柱具有优越的变形能力和滞回耗能能力,是一种提高 RC 结构重载柱抗震性能的合理组合结构形式. 为深入研究 CSRC 柱的受力机理,本文采用有限元软件 ADINA 对试验完成的 8 个 CSRC 柱和 1 个 RC 柱试件进行全过程非线性有限元模拟.

## 1 试验部分

### 1.1 试件设计

共制作 8 个 CSRC 柱试件和 1 个 RC 柱对比试件. 试件纵筋均采用 8 $\Phi$ 12HRB335 级钢筋,屈服强度为 345 MPa;箍筋采用 $\Phi$ 6@100 菱形复合箍,体积配箍率为 0.88%,屈服强度为 346.7 MPa. 除试件 CSRC2-6 核心型钢采用热轧钢管外,其他试件型钢均采用 10 mm 厚普通热轧钢板焊接 H 型钢,屈服强度为 393 MPa.

试件的截面尺寸、配筋,以及相关参数分别如图 1,表 1 所示. 表 1 中: $f_{ck}$ 为实测混凝土轴心抗压强度; $\rho_a$ 为核心型钢配钢率; $h_w$ , $b_f$ 和  $t$  分别为核心型钢腹板高度,翼缘宽度和厚度; $n$  为设计轴压比. 其中,试件 CSRC2-6 的核心钢管外径为 89 mm.

### 1.2 加载装置及量测方案

首先,通过液压千斤顶施加竖向荷载至试件预定轴压力并保持恒定;然后,采用 MTS 伺服作动器施加水平荷载. 水平加载采用低周往复静力加载(位移控制),试件屈服前每个位移幅值循环 1 次,试件屈服后每个位移幅值循环 3 次. 试验加载装置如图 2 所示.

水平荷载和竖向荷载通过压力传感器直接测量. 电子位移计主要用于量测柱端水平位移、试件轴向

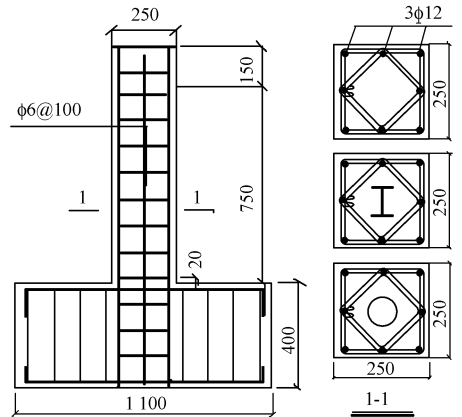


图 1 试件截面尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 1 Size and reinforcement of section(unit:mm)

收稿日期: 2010-03-23

通信作者: 刘阳(1982-),男,讲师,主要从事工程结构抗震减灾的研究. E-mail: lyliuyang@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50478120);福建省自然科学基金资助项目(2010J05117);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0571);华侨大学科研基金资助项目(09BS620)

表 1 试件参数表  
Tab.1 Parameters of specimens

试件	$f_{ck}/\text{MPa}$	$n$	$N_k/\text{kN}$	$\rho_a/\%$	$h_w/\text{mm}$	$b_t/\text{mm}$	$t/\text{mm}$
RC2-1	19.61	0.79	484	—	—	—	—
CSRC2-2	19.61	1.08	666	2.40	70	50	10
CSRC2-3	19.61	0.99	609	2.40	70	50	10
CSRC2-4	18.09	1.01	571	2.40	70	50	10
CSRC2-5	23.56	0.96	708	2.40	70	50	10
CSRC2-6	18.09	1.08	609	2.50	—	—	6
CSRC2-7	23.56	1.13	837	3.52	100	70	10
CSRC2-8	23.56	1.04	692	3.52	100	70	10
CSRC2-9	18.09	1.11	629	3.52	100	70	10

变形和地梁可能产生的滑移。钢筋、型钢应变采用 3 mm×5 mm 的电阻应变片及应变花测量。纵筋应变片布置在梁端塑性铰区域,箍筋应变片用来测量可能发生的剪切变形和侧向膨胀。所有力、位移和应变信号均通过 MTS-GT 控制系统和 DH3816 数据采集仪自动采集。

1.3 主要试验结果

1.3.1 破坏现象 试件的破坏发展过程及试验现象基本相似,均经历了柱根初裂、纵筋屈服、核心型钢屈服、保护层破坏剥落、纵筋压屈几个阶段,最终由于承载力降低至最大荷载的 80%而停止试验加载。典型试件的破坏状态,如图 3 所示。

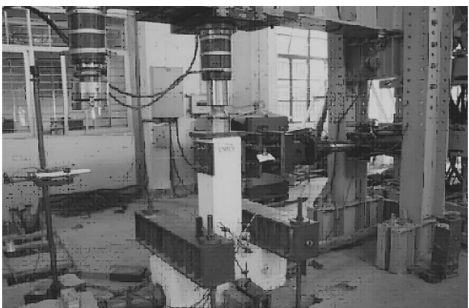
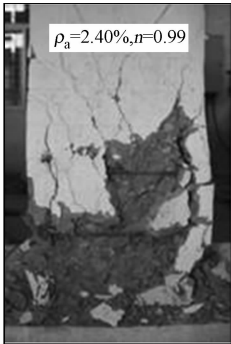


图 2 试验加载装置  
Fig.2 Test setup



(a) RC2-1



(b) CSRC2-2



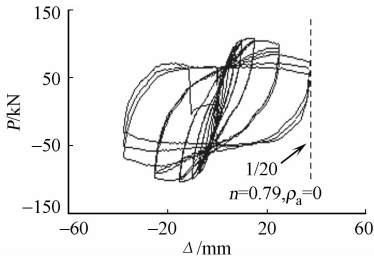
(c) CSRC2-6

图 3 试件最终破坏形态

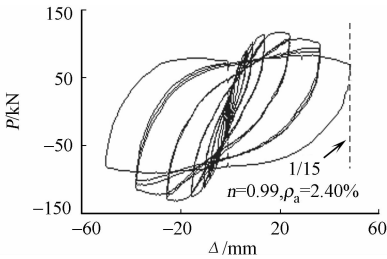
Fig.3 Ultimate failure modes of specimens

混凝土对比试件 RC2-1 在 1/20 rad 位移角下最终发生轴向压溃,而所有 CSRC 柱试件始终保持稳定的轴向承载能力,说明设置核心型钢可以有效提高结构的抗倒塌能力。

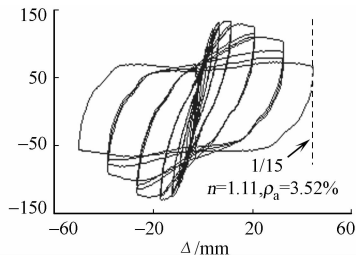
1.3.2 滞回曲线 试件典型的荷载-位移滞回曲线,如图 4 所示。由图 4 可见,与试件 RC2-1 相比,试件



(a) RC2-1



(b) CSRC2-3



(c) CSRC2-9

图 4 荷载-位移滞回曲线

Fig.4 Hysteretic curves of load-displacement

CSRC2-3 和 CSRC2-9 的轴压比分别增加了 0.20 和 0.32,但其强度衰减速度慢、滞回耗能面积大,抗震性能明显优于 RC 柱试件.说明设置核心型钢可以有效提高重载 RC 柱的的变形性能和滞回耗能性能,且提高效果随核心型钢配钢率的增加而渐趋明显.

1.3.3 骨架曲线 典型试件的骨架曲线,如图 5 所示.取柱纵筋受压屈服时的位移为屈服位移,取下降段上最大荷载的 85%对应点为试件的极限点,所有试件的骨架曲线特征点试验结果,如表 2 所示.表 2 中: $P_y$  和  $\Delta_y$  分别为试件屈服荷载和屈服位移; $P_m$  和  $\Delta_m$  分别为最大荷载和对应位移; $P_u$  和  $\Delta_u$  分别为极限荷载和极限位移; $\mu$  为位移延性比, $\mu=\frac{\Delta_u}{\Delta_y}$ .

表 2  $P-\Delta$  骨架曲线特征点试验结果

Tab. 2 Test results of characteristic points of  $P-\Delta$  skeleton curves

试件	$P_y/\text{kN}$	$\Delta_y/\text{mm}$	$P_m/\text{kN}$	$\Delta_m/\text{mm}$	$P_u/\text{kN}$	$\Delta_u/\text{mm}$	$\mu$
RC2-1	87	6	104	15	85	27.2	4.5
CSRC2-2	112	6	136	15	115	25.8	4.3
CSRC2-3	87	7	122	25	104	38.6	5.5
CSRC2-4	103	7	116	25	99	38.9	5.6
CSRC2-5	102	6	131	10	111	30.1	5.0
CSRC2-6	108	7	123	15	114	31.2	4.5
CSRC2-7	121	6	168	15	143	31.0	5.2
CSRC2-8	103	7	167	25	142	31.1	4.4
CSRC2-9	107	6	126	15	107	29.0	4.9

由图 5 和表 2 可以得知,试件极限变形能力随着轴压比的增大和型钢配钢率的减小而相应减小.设计轴压比从 0.96 增加到 1.08,则试件位移延性系数从 5.0(CSRC2-5)减小为 4.5(CSRC2-6);其配钢率从 2.40%增加到 3.52%,则试件延性系数从 4.3(CSRC2-2)增加到 4.9(CSRC2-9).

虽然 CSRC 柱试件的轴压比不同程度地高于 RC 对比试件,但所有 CSRC 柱试件的变形能力均不低于或不同程度地优于 RC 对比试件.说明设置核心型钢可以有效提高重载 RC 柱的变形能力.

2 有限元模型的建立

混凝土及核心型钢采用 8 节点 3-D Solid 单元.钢筋采用 ADINA 8.0 版本以后专门开发的 Rebar 单元模拟,是分离式的建模方法.

2.1 混凝土本构模型

混凝土是一种拉压性能有较大差异的复杂材料<sup>[7]</sup>.ADINA 中自带的混凝土材料模型包含以下 3 个基本内容:(1) 非线性的应力应变关系,模拟混凝土材料在较大压应变下的损伤;(2) 采用破坏包络面来定义混凝土材料在拉压状态下的破坏;(3) 材料拉裂或压碎后的性能模拟.该模型为复杂的混凝土材料的模拟提供了一条简单而有效的途径. ADINA 采用的典型的单轴应力-应变关系,如图 6 所示.

2.2 有限元模型

为提高计算效率,编制 ADINA 命令流文件(INP 文件),采用“自下而上”的建模方式,先生成节点,再通过节点生成块体.

由于划分网格的需要,将试件截面分割成若干体块,并在加载端部设置刚性垫块,以消除应力集中的不利影响.最后,建立不考虑核心型钢与混凝土相对滑移的有限元(FEM)模型,如图 7 所示.

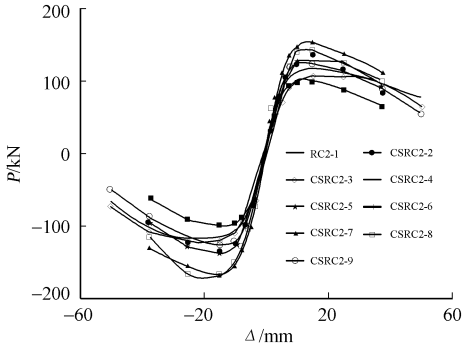


图 5 试件骨架曲线

Fig. 5 Skeleton curves of specimens

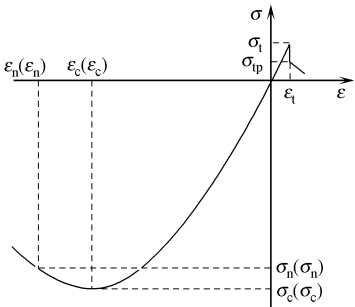


图 6 混凝土单轴应力应变曲线  
Fig. 6 Uniaxial stress-strain curve of concrete

3 有限元模拟结果验证

3.1 骨架曲线对比

采用开发的有限元模型,对完成的 8 个 CSRC 柱试件和 1 个 RC 柱试件试件进行数值模拟. 计算得到的典型试件的骨架曲线与试验骨架曲线的对比,如图 8 所示.

由图 8 可见,有限元计算所得到的试件骨架曲线与试验结果整体吻合良好. 然而,计算结果和试验结果仍存在一定差异,其主要原因有如下 3 点.

- (1) 有限元模型的简化. 如不考虑混凝土与核心型钢的相对滑移、纵筋与混凝土之间的粘结滑移关系等与实际情况存在差异.
- (2) 有限元模型边界条件与实际试验设备之间的差异.
- (3) 材料本构与实际的差异等.

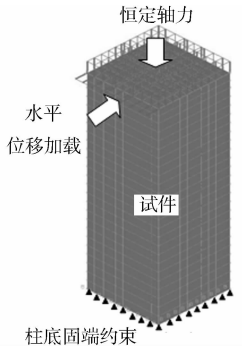


图 7 有限元模型  
Fig. 7 FEM model

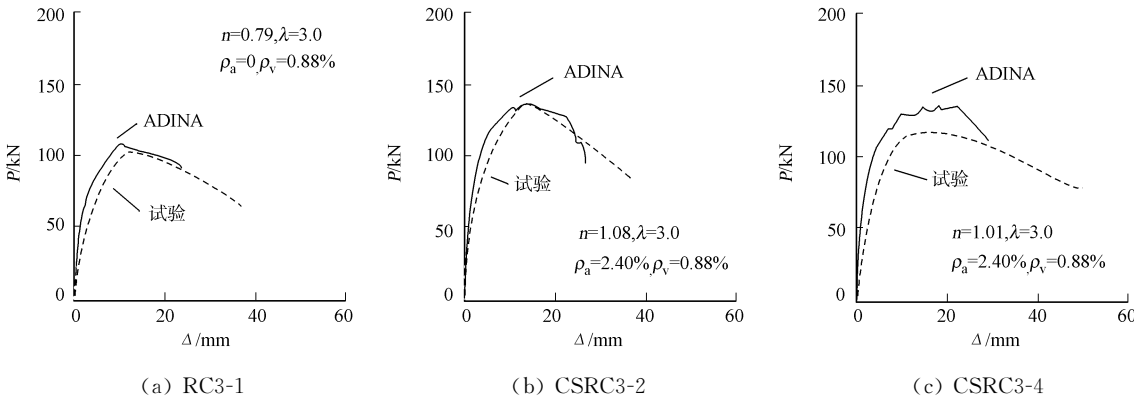


图 8 ADINA 计算骨架曲线与试验结果对比

Fig. 8 Comparison between skeleton curves calculated by ADINA and test results

3.2 其他计算结果

3.2.1 核心型钢应力应变分布 在试件极限状态下,核心型钢对应的应力和应变分布情况,如图 9 所示. 由图 9 可见,有限元计算结果显示,核心型钢屈服区域的高度约为 200 mm,这与试验中应变片屈服的范围大致相当. 说明有限元模型可以合理地反映核心型钢的实际受力状态.

3.2.2 纵筋应力分布状态 在屈服状态下,试件纵筋的应力应变分布如图 10 所示. 图 10 中:深色表示拉应力;浅色表示压应力. 由图 10 可见,有限元计算结果可以合理地计算并显示纵筋的受力状态,计算结果与试验吻合良好.

3.2.3 裂缝发展情况 在初裂和屈服状态下,试件对应的裂缝开展情况如图 11 所示. ADINA 通过计算单元积分点的应力状态来判断单元的开裂状态. 图 11 中:圆圈表示张开裂缝(Open cracks),叉表示

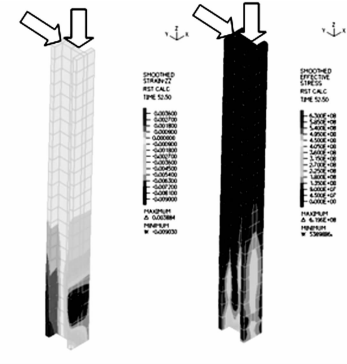


图 9 核心型钢应力应变分布(极限状态)  
Fig. 9 Stress and strain distributions of core steel (ultimate state)

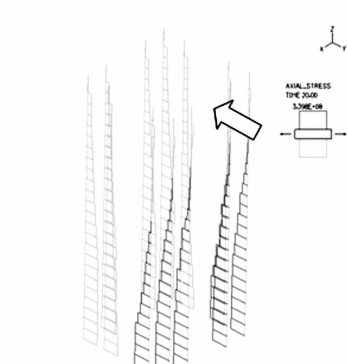


图 10 纵筋应力分布状态  
Fig. 10 Stress distribution of longitudinal reinforcement

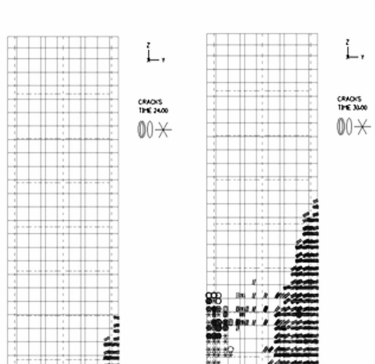


图 11 试件裂缝发展图  
Fig. 11 Development of cracks

混凝土的压碎(Crashed). 由图 11 可见,ADINA 可以合理地计算试件裂缝的产生和发展趋势,与试验现象吻合良好. 但由于程序采用的是弥散裂缝模型,无法反应裂缝的宽度和间距.

4 结 论

- 采用有限元软件 ADINA,模拟试验完成的 8 个 CSRC 柱和 1 个 RC 柱试件,得到以下 3 点结论.
- (1) 设置核心型钢可有效提高 RC 柱的变形能力、滞回耗能能力和抗倒塌能力.
  - (2) 采用的有限元模型可以合理地反映 CSRC 柱的应力应变分布、裂缝开展规律等受力特征,可为 CSRC 结构的后续研究提供参考.
  - (3) 有限元计算结果与试验的差异主要是由于边界条件、材料本构和界面关系的简化所造成的.

参考文献:

[1] 郭子雄,刘阳,黄秋来. 高轴压比核心型钢混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(S2): 167-171.

[2] JUNICHI S,CHIAKI M,KOUICHI M. Earthquake resistant properties of core steel composite columns[C]//Proc 12th World Conf on Earthquake Engrg. Auckland;New Zealand Earthquake Commission,2000.

[3] 刘阳,郭子雄,欧阳文俊,等. 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.

[4] 谢增波,郭子雄,刘阳. CSRC 柱轴压性能试验及非线性全过程分析[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2008,29(4): 584-587.

[5] 欧阳文俊,郭子雄,刘阳. 利用 ADINA 的 CSRC 柱轴压性能数值模拟[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2009,30(6):681-685.

[6] 刘阳,郭子雄,黄群贤. 核心型钢混凝土柱恢复力模型试验研究[J]. 建筑结构学报,2009,30(S2):196-201.

[7] 岳戈,陈权. ADINA 应用基础与实例详解[M]. 北京:人民交通出版社,2008.

Experimental Investigation and Numerical Simulation of  
Seismic Behavior of CSRC Columns

LIU Yang, GUO Zi-xiong, YE Yong

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** One reinforced concrete (RC) column and eight core steel reinforced concrete (CSRC) columns are tested under low-cycle reversed load to investigate the effect of core steel ratio and axial compression ratio to the seismic behaviors of specimens. It is indicated that the seismic behaviors of specimens are remarkably improved with the increase of core steel ratio. Nonlinear numerical simulation of CSRC columns is carried out with finite element method software ADINA, the calculation results agree well with the test results, such as the skeleton curves, stress and strain distributions, the development of cracks.

**Keywords:** core steel reinforced concrete columns; seismic behavior; steel ratio; finite element method analysis

(责任编辑: 钱筠      英文审校: 方德平)