

文章编号: 1000-5013(2009)06 0681-05

# 利用 ADINA 的 CSRC 柱轴压性能数值模拟

欧阳文俊, 郭子雄, 刘 阳

( 华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021 )

摘要: 通过 6 个核心型钢混凝土 CSRC 柱试件的轴压性能试验, 并利用高级结构非线性及流固耦合计算系统(ADINA)进行 10 个试件的有限元数值模拟试验, 研究不同配箍特征和配钢率对混凝土柱轴心抗压承载力及轴向变形性能的影响. 试验结果表明, 混凝土轴压柱试件配置的配钢率分别为 1.63%, 2.88%, 4.02%, 核心型钢的极限承载力可分别提高 11.9%, 26.8%, 40.7%, 极限变形可分别提高 32.3%, 52.0%, 75.8%. 增加试件体积配箍率可有效提高试件的轴向变形能力, 并改变试件的脆性剪切破坏形态为整体压溃. 采用不同的混凝土本构建立有限元模型, 对比分析表明, 计算结果与试验结果吻合较好.

关键词: 核心型钢混凝土柱; 轴压性能; 配钢率; 体积配箍率; 有限元分析

中图分类号: TU 375.3; TU 311.41

文献标识码: A

核心型钢混凝土结构(Core Steel Reinforced Concrete, CSRC)是一种新型结构形式<sup>[1,2]</sup>, 即在普通钢筋混凝土柱截面核心设置含钢率较低(2%~4%)的实腹式型钢. CSRC 结构形式可有效地提高大轴压比混凝土(RC)柱的抗震性能, 突破规范规定的 RC 柱轴压比限值, 从而减小高轴压比和柱截面尺寸, 并避免出现短柱. 在 RC 柱配置小截面型钢是提高 RC 重载柱抗震性能的主要组合结构形式之一<sup>[3]</sup>. 混凝土材料力学性能的模拟, 是混凝土及其组合结构有限元分析的关键问题. CSRC 构件非线性全过程分析结果的可靠性, 很大程度上依赖混凝土的模拟, 主要包括强度准则和本构关系模型的建立. 目前, 组合结构的有限元模拟多采用单一的混凝土本构, 但组合结构的混凝土截面往往有多个约束条件不同的区域. 因此, 有必要对 CSRC 柱截面不同区域采用不同混凝土应力-应变模型. 本文在 6 个 RC 柱和 CSRC 柱试件的轴压试验和有限元模拟分析基础上, 以配钢率和配箍率为参数, 利用 ADINA 通用软件对 CSRC 柱的轴压性能进行非线性全过程数值分析.

## 1 CSRC 柱轴压试验

### 1.1 试验方案

试验有 3 组试件, 每组 2 个相同的试件, 其截面尺寸( $l \times b$ )为 200 mm  $\times$  200 mm, 高度( $h$ )为 600 mm. 试件的截面配筋均为 4 $\Phi$ 12 HRB335 级钢筋, 截面配筋率( $\rho_s$ )为 1.13%. 箍筋分  $\Phi$ 6@75 和  $\Phi$ 6@125 两种, 其体积配箍率( $\rho_v$ )分别为 0.78%, 0.47%. CSRC 试件配钢率( $\rho_a$ )为 2.88%.

试件两端箍筋加密配置 3 道  $\Phi$ 6@25 的箍筋, 并在上端柱头加载部位处设置 1 个  $\Phi$ 6 钢筋网片, 以防止柱头发生局部压坏; 在型钢下端焊有平整钢板, 以保证浇捣试件的垂直度. 表 1 为试件参数, 表 2 为材料的性能参数, 试验加载装置, 如图 1 所示. 表 2 中,  $f_y$  为屈服强度,  $\varepsilon_y$  为屈服应变,  $f_b$  为极限强度.

钢筋和型钢的应变采用 3 mm  $\times$  5 mm 电阻应变片测量, 混凝土应变由 3 mm  $\times$  100 mm 混凝土应变片测量. 加载过程中, 柱的轴向变形由固定在端板的电子位移计测量. 试件的位移计及应变片布置, 如图 2 所示. 加载制度采用力和位移混合控制, 加载初期按 0.3~0.5 MPa  $\cdot$  s<sup>-1</sup> 的速度连续而均匀地加载. 当荷载位移曲线出现明显的拐点后, 转为由位移控制加载, 并绘制轴力-轴向变形( $P-\Delta$ )曲线.

收稿日期: 2008-12-23

通信作者: 郭子雄(1967-), 男, 教授, 主要从事结构工程抗震防灾的研究. E-mail: guozxey@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50478120)

表 1 试件参数表

Tab.1 Test parameters

试件	$f / \text{MPa}$	$\rho_v / \%$	$b \times l \times h / \text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm}$	$\rho_a / \%$
RG-75	34.04	0.78	—	—
CSRG-125	34.04	0.47	100×70×5	2.88
CSRG-75	34.04	0.78	100×70×5	2.88

表 2 材料的力学性能

Tab.2 Property of material

材料	$D / \text{mm}$	$f_y / \text{MPa}$	$\epsilon_s / \mu\epsilon$	$f_b / \text{MPa}$
纵筋	12	356.9	1 784	545.4
箍筋	6	410.4	2 052	605.3
型钢	5	363.7	1 818	587.2

1.2 试验结果

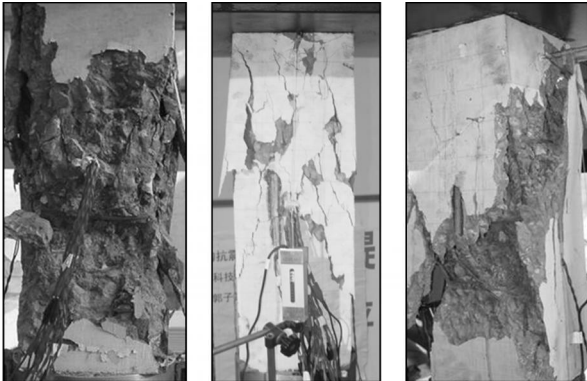
1.2.1 破坏现象分析 加载初期, RC 柱与 CSRC 柱现象基本相同, 处于弹性状态. 当达到极限荷载为 80% 时, 试件中部出现纵向裂缝, 试件刚度开始下降; 随后, 纵向钢筋屈服, 轴向位移增加较快, 纵向裂缝不断延伸, 宽度增大, 并在主裂缝周围产生大量的微裂缝.

RC 柱的外围混凝土出现纵向裂缝后, 在很短的时间内大面积剥落, 箍筋向外鼓出, 破坏时爆裂声明显. 最终破坏形态, 如图 3(a) 所示. CSRC 柱纵筋屈服后, 试件刚度进一步下降, 保护层外围混凝土被压碎呈劈裂状. 核心型钢承担了部分轴力, 试件还具备一定的轴向承载力, 体积配箍率较大的试件 CSRG-75 仍然保持较好的整体性, 破坏形态表现为整体压溃. 最终破坏形态, 如图 3(b) 所示. 体积配箍率较小的试件 CSRG-125 有明显的剪切破坏面, 其最终破坏形态如图 3(c) 所示.

CSRC 试件从出现纵向裂缝到破坏比 RC 试件持续的时间较长, 试件破坏时, 中部箍筋屈服, RC 柱的箍筋应变较大, CSRC 柱中部箍筋应变则相对较小.

1.2.2  $P-\Delta$  曲线及试验主要结论 根据试验实测得到的试件轴向力与轴向位移绘制而成的  $P-\Delta$  曲线, 如图 4 所示. 试件 CSRG-75 和 CSRG-125 的承载力分别比试件 RG-75 高 33.0% 和 22.8%; 试件 CSRG-75 的极限变形(最大荷载对应的轴向变形)比试件 RG-75 增大约一倍左右. 由此可见, 在混凝土柱中设置核心型钢, 可以显著提高其承载能力和变形能力.

对比不同配箍率的核心型钢混凝土试件可知, 配箍率较大的试件 CSRG-75 与配箍率较小的试件 CSRG-125 相比, 承载力高约 8.3%, 极限变形能力也有较大的提高. 由此可见, 增加核心型钢混凝土试件的体积配箍率, 可在一定程度上提高核心型钢混凝土试件的承载力和变形能力.



(a) RG-75      (b) CSRG-75      (c) CSRG-125

图 3 试件最终破坏形态

Fig.3 Ultimate failure mode



图 1 试验装置图

Fig.1 Test setup

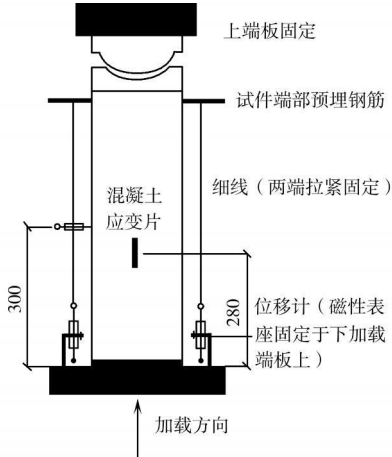


图 2 位移计和应变片布置图

Fig.2 Layout of gages

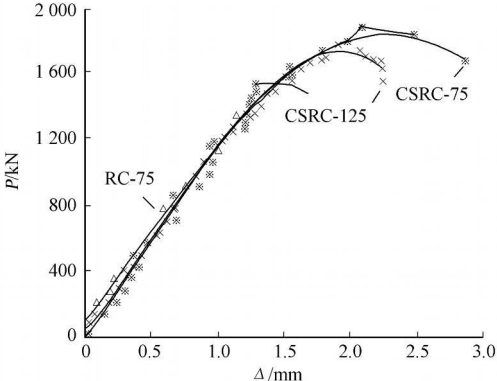


图 4 试件轴力-轴向变形曲线

Fig.4 Axial load deformation curve

## 2 有限元分析全过程分析

### 2.1 有限元模型的建立

许多学者在已有的连续介质力学的各种理论框架下,结合混凝土的材料特性,提出了相应的混凝土本构关系<sup>[4]</sup>.在混凝土结构非线性有限元分析中,应用较多的是非线性弹性理论和弹塑性理论.在 ADINA 软件中,混凝土材料本构关系可以采用各向同性的非线性本构关系.

将 CSRC 轴压柱截面混凝土划分为两个区域,即箍筋约束区域和箍筋以外无约束区域,如图 5 所示.无约束区混凝土处于单轴受压应力状态,采用文[5]中的混凝土应力-应变模型.约束区混凝土认为处于多轴受力状态,等效为单轴受力状态,可以采用文[6]中提出的混凝土应力-应变模型,即 Mander 模型.

混凝土采用 ADINA 软件自带的 Concrete 模型,需要设置的主要参数,有泊松比、初始弹性模量、抗压强度最大值及对应应变、极限压应变及极限抗压强度、抗拉强度及对应应变和混凝土的破坏包络面.其中,泊松比选常量 0.2;无约束区混凝土轴心抗压强度取材性试验结果,对应应变取 0.002,极限压应变取 0.003 3,极限抗压强度采用 Seanzé 模型确定.

核心区混凝土考虑箍筋的约束作用、约束混凝土本构关系的相应指标,如抗压强度、极限压应变等,采用能够考虑箍筋约束作用的 Mander 模型确定.单元类型采用 3D 单元,混凝土的破坏包络面用来定义混凝土在三轴受力下的破坏准则,采用程序自带的 Kupfer 准则.

钢筋和型钢采用 Bilinear 模型,需要输入的主要参数包括泊松比、弹性模量、初始屈服强度和强化段刚度等,可根据材性试验确定.钢筋单元类型采用 Rebar 单元,型钢单元类型采用 3D 单元.

由试验中实测得到的核心型钢与混凝土应变可知,试件达到极限承载力前核心型钢与混凝土应变较为协调,可忽略核心型钢与混凝土的粘结与滑移.建立试件的实体模型,赋予实体对应单元的属性.沿试件轴向固定试件底部节点的自由度,建立试件的有限元计算模型,如图 6 所示.

### 2.2 模型求解和计算结果分析

采用强迫位移加载方式对柱顶施加轴向荷载,模拟实验中的轴向力效应.在位移控制加载过程中,采用位移的无穷范数控制收敛,非线性分析选用完全牛顿-拉普森处理方法.计算得到 3 种试件的  $P-\Delta$  曲线有限元模拟值与试验值,如图 7 所示.

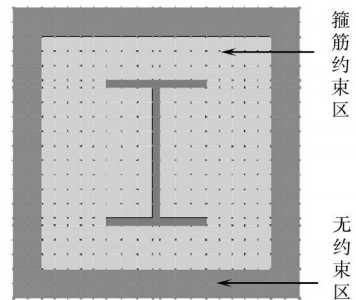


图 5 试件截面混凝土区域划分  
Fig.5 The section compartment

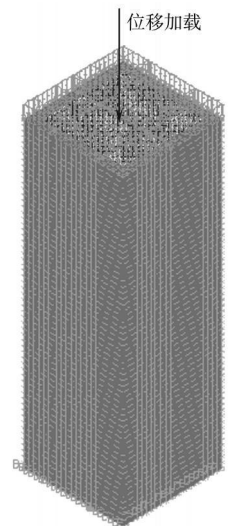


图 6 试件的有限元模型  
Fig.6 Finite element model

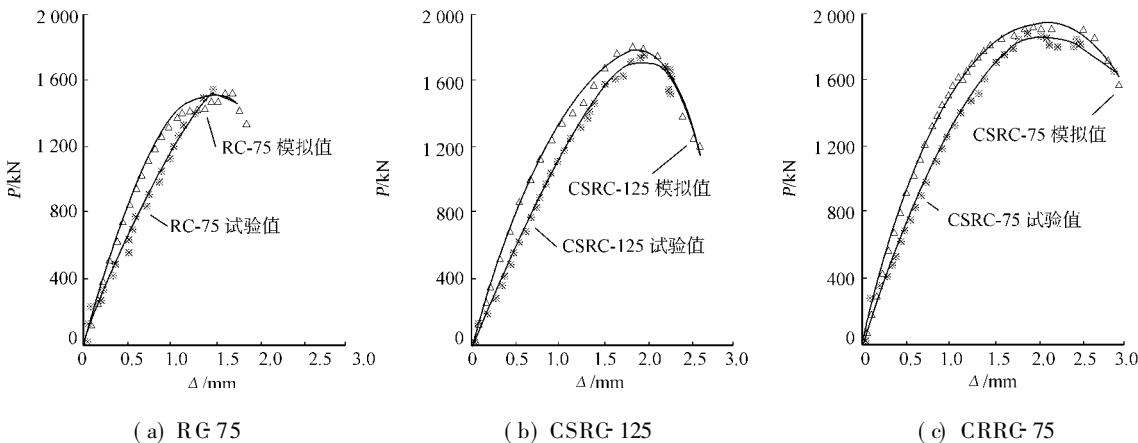


图 7  $P-\Delta$  的有限元模拟与试验结果比较

Fig.7  $P-\Delta$  curves of analytical and experimental results

从图 7 可知,采用建立的 RC 与 CSRC 柱的有限元模型,能够较好地模拟其轴向受力过程.有限元模拟得到  $P-\Delta$  曲线的初始刚度与试验结果存在一定差异,可能存在以下 3 种主要原因.(1) 试验本身误差,包括轴力的对中、仪器间的间隙等.(2) 有限元模型边界条件与实际试验的差异.(3) 材料本构的简化与实际材料性能的区别.

3 参数数值模拟

3.1 参数设计

通过上述分析可知,ADINA 软件可以较好地应用于 CSRC 柱的轴心受力性能模拟.所以,设计了 2 个不同配钢率的试件 CSRC-75-1( $\rho_a=1.63\%$ ),CSRC-75-2( $\rho_a=4.02\%$ ),以及 2 个不同配箍率的试件 CSRC-100,CSRC-50 进行数值模拟试验,研究配钢率和配箍率的变化对 CSRC 柱轴压承载力和变形能力的影响.试件 CSRC-75-1,CSRC-75-2 除配钢率外,其他参数与试件 CSRC-75,RC-75 均相同;试件 CSRC-100,CSRC-50 除配箍率外,其他参数与试件 CSRC-125,CSRC-75 均相同.

3.2 分析结果

用上述有限元建模方法,进行上述试件的数值模拟计算.RC 试件和不同配钢率、不同配箍率的 CSRC 试件的  $P-\Delta$  曲线,如图 8 所示;试验数据结果,如表 3 所示.表 3 中, $\rho_a$  为配钢率, $P_{max}$  为极限强度, $\Delta_{max}$  为极限位移, $\eta_p$  和  $\eta_\Delta$  分别为 CSRC 试件相对 RC 试件极限荷载和极限位移的提高比例.极限位移取极限强度的 85% 时对应的位移.

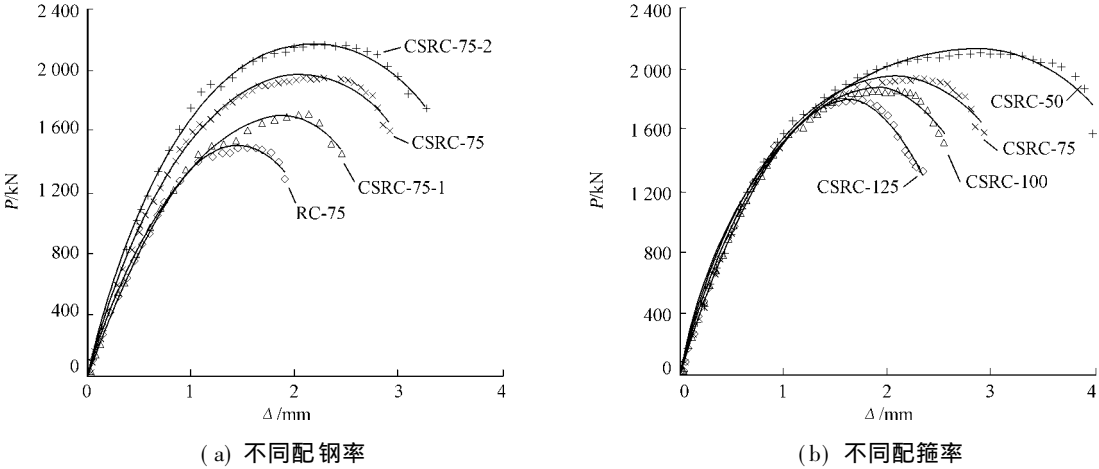


图 8 试件的  $P-\Delta$  曲线  
Fig. 8  $P-\Delta$  curves of specimens

表 3 试件的试验结果表  
Tab. 3 Test results of specimens

试件	不同配钢率					试件	不同配箍率				
	$\rho_a/\%$	$P_{max}/\text{kN}$	$\eta_p/\%$	$\Delta_{max}/\text{mm}$	$\eta_\Delta/\%$		$\rho_a/\%$	$P_{max}/\text{kN}$	$\eta_p/\%$	$\Delta_{max}/\text{mm}$	$\eta_\Delta/\%$
RC-75	—	1 530	—	1.86	—	CSRC-125	0.47	1 811	—	2.30	—
CSRC-75-1	1.63	1 712	11.9	2.46	32.3	CSRC-100	0.59	1 867	3.1	2.51	9.1
CSRC-75	2.88	1 940	26.8	2.83	52.0	CSRC-75	0.78	1 940	3.9	2.83	12.7
CSRC-75-2	4.02	2 125	40.7	3.27	75.8	CSRC-50	1.18	2 111	8.8	3.94	39.2

对比不同配钢率的 CSRC 试件与 RC 试件,可知配置 1.63%, 2.88%, 4.02% 的核心型钢,对 RC 柱承载力的相对提高量分别为 11.9%, 26.8%, 40.7%,对 RC 柱极限变形的相对提高量分别为 32.3%, 52.0%, 75.8%. 对比不同配箍率的 CSRC 试件可知,配箍量的增加可明显提高 CSRC 柱的轴压性能.

4 结论与建议

通过 6 个 RC 和 CSRC 试件的轴压试验和 10 个试件的有限元模拟分析,研究了箍筋的体积配箍率及型钢配钢率对 CSRC 柱轴压性能的影响.根据箍筋对混凝土的约束作用,把试件截面的混凝土划分约

束区域与非约束区域建立有限元模型. 对核心型钢混凝土轴压柱进行非线性全过程有限元模拟分析, 得到如下 3 点主要结论.

(1) 试验和数值模拟结果均表明, 核心型钢配置量对 CSRC 柱的轴向极限承载力和变形性能有明显影响.

(2) 增加体积配箍率, 可以有效提高核心型钢混凝土柱试件的承载能力和变形能力.

(3) 采用不同混凝土约束区域和相应本构模型, 所建立的 CSRC 轴压柱有限元模型, 可以较好地考虑箍筋和核心型钢的置配量对 RC 轴压柱性能的影响. 计算结果与试验结果吻合较好.

参考文献:

[ 1 ] 刘 阳, 郭子雄, 谢吓弟. 核心型钢混凝土柱轴压试验研究[ J ]. 哈尔滨工业大学报, 2007, 39(S2): 137-141.  
[ 2 ] 谢吓弟, 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.  
[ 3 ] 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.  
[ 4 ] 吕西林, 金国芳, 吴晓涵. RC 非线性有限元理论与应用[ M ]. 上海: 同济大学出版社, 1996.  
[ 5 ] 过镇海. 混凝土的强度和变形 试验基础和本构关系[ M ]. 北京: 清华大学出版社, 1997.  
[ 6 ] MANDER J B, PRIESTLEY M J, PARK R. Observed stress strain behavior of confined concrete[ J ]. Journal of Structural Engineering ( ASCE ), 1986, 114(8): 1827-1849.

Finite Element Analysis of CSRC Columns Under  
Axially Loading Based on ADINA

OU YANG Wen-jun, GU O Zi-xiong, LIU Yang

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

**Abstract:** Six core steel reinforced concrete (CSRC) columns were tested under axially loading, and a nonlinear numerical analysis simulating the whole test process of ten specimens is carried out by the finite element method software ADINA, to investigate the effect of core steel, transverse reinforcement and steel ratio to the axial strength and axial deformation capacity. The test results indicate that axial strength of the specimens is increased by 11.9%, 26.8% and 40.7% respectively, and the axial deformation capacity is increased by 32.3%, 52.0% and 75.8% respectively, when the ratio of core steel area to the section area is 1.63%, 2.88% and 4.02% respectively. Increasing the volume ratio of stirrups can effectively increase the axial deformation capacity, and the brittle shear failure modes of the specimens can also be changed into a more ductile way. The sections of the specimens are divided into constrained region and unconstrained region with different constitutive relationships of concrete to establish the analytical mode. The analysis results indicate that the results of calculation agree well with the test results.

**Keywords:** core steel reinforced concrete columns; axial compressive performance; ratio of core steel; volume ratio of stirrup; finite element analysis

( 责任编辑: 钱 筠 英文审校: 方德平 )