

文章编号: 1000-5013(2008)04-0584-04

CSRC 柱轴压性能试验及非线性全过程分析

谢吓弟, 郭子雄, 刘 阳

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 进行 6 个核心型钢混凝土(CSRC)柱试件的轴压性能试验,并利用有限元分析软件对试件进行非线性全过程数值模拟. 研究配置核心型钢和不同配箍特征,及其对混凝土柱轴心抗压承载力和轴向变形性能的影响. 试验结果表明,设置配钢率为 2.88 % 的核心型钢,试件的轴压强度可提高约 30 %,轴向变形能力可提高约 1 倍. 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. 把试件截面混凝土划分成约束区与非约束区,采用不同的混凝土本构建立有限元模型,ANSYS 分析结果与试验结果对比分析表明,程序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; 试验研究; 有限元分析

中图分类号: TU 375.03; TU 311.41

文献标识码: A

核心型钢混凝土结构(Core Steel Reinforced Concrete, CSRC)是指在普通钢筋混凝土柱截面核心,设置含钢率较低(2 % ~ 4 %)的实腹式型钢所形成的新型结构形式. CSRC 结构形式可有效地提高大轴压比混凝土结构(RC)柱的抗震性能,突破规范规定的 RC 柱轴压比限值,从而减小高轴压比柱截面尺寸并避免出现短柱. CSRC 与钢混凝土结构(SRC)柱相比,具有施工方便、造价低等优点^[1-3]. 采用核心型钢配钢是提高 RC 重载柱抗震性能的主要组合结构形式之一. 为深入了解 CSRC 柱的轴向抗压性能,很有必要进行相关试验研究与有限元模拟. 混凝土材料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. 目前组合结构的有限元模拟多采用单一的混凝土本构,然而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. 本文通过 6 个 RC 和 CSRC 柱试件的轴压试验,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.

1 CSRC 柱轴压试验

1.1 试验方案

试验共 3 组试件,每组 2 个相同的试件,共 6 个. 截面尺寸($l \times b$)为 200 mm \times 200 mm,高度(h)为 600 mm. 试件截面配筋均为 4 12 HPB335 级钢筋,截面配筋率(ρ_s)为 1.13 %. 箍筋分 6 @75 和 6 @125,其体积配箍率(ρ_v)分别为 0.53 %,0.32 %. 试件两端箍筋加密配置 3 道 6 @25 的箍筋,并在上端柱头加载部位处设置 1 个 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. 试件参数如表 1 所示,材料性能参数如表 2 所示,试验加载装置如图 1 所示. 表 2 中, f_y 为屈服强度, ϵ_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⁻¹ 的速度连续而均匀的加载.

收稿日期: 2008-04-08

作者简介: 谢吓弟(1981-),男; **通信作者:** 郭子雄(1967-),男,教授,博士生导师,主要从事结构工程的研究. E-mail: guozxcy@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50478120);福建省重大专项前期研究项目(2005 YZ1017)

表 1 试件参数表

Tab. 1 The parameters of specimen					
试件	f / MPa	配箍	v / %	$b \times l \times h$ / mm \times mm \times mm	s / %
RC-75	34.04	6 @75	0.53	-	-
CSRC-125	34.04	6 @125	0.32	100 \times 70 \times 5	2.88
CSRC-75	34.04	6 @75	0.53	100 \times 70 \times 5	2.88

当荷载位移曲线出现明显的拐点后,转为由位移控制加载,绘制轴力-轴向变形($P-\Delta$)曲线.

1.2 试验结果

1.2.1 破坏现象分析 RC 柱与 CSRC 柱在加载初期现象相同,基本处于弹性状态.当达到极限荷载 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,轴向荷载增加减慢,而轴向位移则增加较快,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如 CSRC-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如 CSRC-125 有明显的剪切破坏面,试件的最终破坏形态如图 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 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.对比核心型钢混凝土试件与混凝土试件,承载力方面试件 CSRC-75 和 CSRC-125 分别比试件 RC-75 高

表 2 材料性能参数表

Tab. 2 The parameters of material property				
材料	D / mm	f_y / MPa	μ_y	f_b / 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



图 1 试验装置图
Fig. 1 Test setup

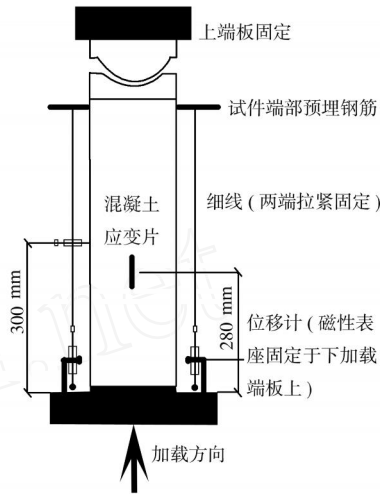
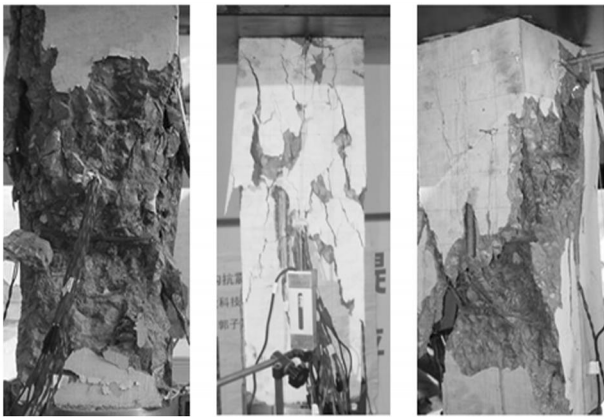


图 2 位移计及应变片布置图
Fig. 2 Layout of gages



(a) RC-75 (b) CSRC-75 (c) CSRC-125
图 3 试件最终破坏形态
Fig. 3 Final failure of specimen

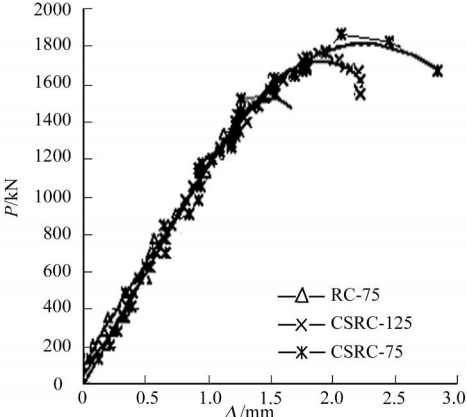


图 4 试件轴力-轴向变形曲线
Fig. 4 Axial load-deformation curve

33.0 %和 22.8 %.最大荷载对应的轴向变形,试件 CSRC-75 比试件 RC-75 高 1 倍左右.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(CSRC-75)与配箍率较小的试件(CSRC-125)相比,承载力高 8.3%,极限变形能力也有较大的提高.可见,增加核心型钢混凝土试件体积配箍率可有效提高核心型钢混凝土试件的承载力和变形能力.

2 有限元分析

2.1 有限元模型的建立

混凝土本构即混凝土在多种荷载作用下的应力-应变关系的某种数学表达式,不少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,构造出门类繁多的混凝土本构关系^[4].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^[4].

在 ANSYS 软件中,混凝土材料本构关系可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-应变模型即张秀琴-过镇海模型.约束区混凝土可认为处于多轴受力状态,等效为单轴受力状态,采用文[6]中提出的混凝土应力-应变模型即 Mander 模型.

混凝土单元类型采用 SOLID 65 单元,弹性属性选择各向同性材料,破坏准则采用 William-Warnke 五参数破坏准则;钢筋单元类型采用 LINK 8 单元,塑性属性选用多线性随动强化材料模型(MKIN);型钢单元类型采用 SOLID 45 单元,屈服准则选择 Von Mises 屈服准则.由于试验中实测得到的核心型钢与混凝土应变显示,试件达到极限承载力前核心型钢与混凝土应变较为协调,所以可以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,划分网格,连接相应的节点建立分离式纵筋与箍筋单元,沿试件轴向耦合柱顶节点并固定试件底部节点的自由度,最后得到的有限元模型如图 6 所示.

2.2 计算结果及分析

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(NROPT, FULL)处理方法,求解有限元模型,得到 P -曲线的有限元模拟值与试验值如图 7 所示.对比图 7 中各组 P -曲线的有限元模拟值与试验值可以看出,采用本文的方法建立的 RC 与 CSRC 柱的有限元模型能够较好的

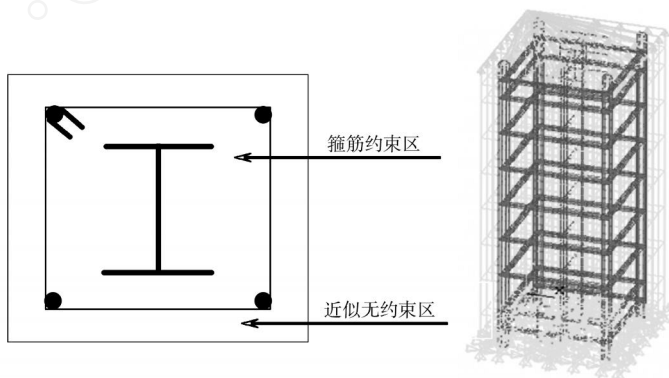


图 5 试件截面混凝土区域划分

图 6 试件的有限元模型

Fig. 5 The division of section

Fig. 6 Finite element model

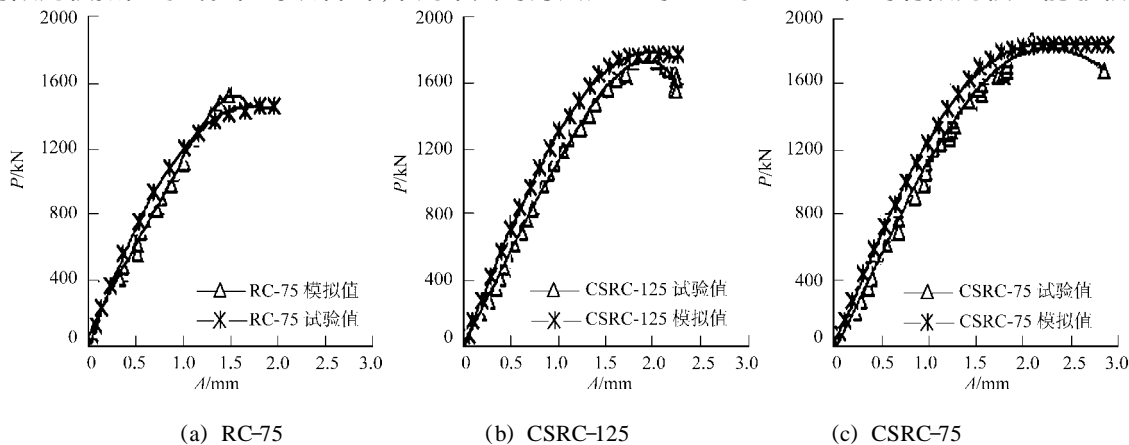


图 7 P -曲线的有限元模拟值与试验值

Fig. 7 P -curves of numerical and experimental results

模拟其轴向受力过程.有限元模拟得到 P -曲线的初始刚度与试验结果存在一定差异,模拟初始刚度

值要大于试验值.

这种差异随着轴压力的增大而有所减小,当轴压力接近试件的极限轴压力时,两条曲线吻合的较好.这是因为试验装置各连接之间存在一定间隙,导致固定在试件加载端板的电子位移计测量得到的轴向位移有一定的虚位移成分,致使在试验初期的分析刚度与试验刚度值存在一定的差异.当承载力达到极限值之后,试验得到的 $P-\Delta$ 曲线下降较快,这是试验设备本身的不足.试验机在加载过程中发生变形,存储了很大的应变能.当试件承载力突然下降时,试验机因受力减小而恢复变形,即刻释放能量,将试件极速压坏,所以试件达到极限承载力后 $P-\Delta$ 曲线下降段较陡.

4 结束语

通过6个RC和CSRC柱试件的轴压试验,分析了核心型钢与箍筋的体积配箍率对核心型钢混凝土柱轴压性能的影响.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.计算结果与试验结果吻合较好,说明该ANSYS模型适合于CSRC轴压柱的计算分析.

参考文献:

- [1] 孙苍柏. 钢管高强混凝土柱抗震性能的研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2004.
- [2] 杨勇,郭子雄. 型钢混凝土结构 ANSYS 数值模拟技术研究[J]. 工程力学,2006,23(4):79-85.
- [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.

Experimental Study and Finite Element Analysis of CSRC Columns Under Axial Compression

XIE Xia-di, GUO Zi-xiong, LIU Yang

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

Abstract: Six core steel reinforced concrete (CSRC) columns are tested under axial compression, and a nonlinear numerical analysis simulating the whole test process is carried out by the finite element analysis software ANSYS. The effect of core steel and transverse reinforcement to the axial strength and axial deformation capacity are investigated. The test results indicate that axial strength of the specimens is increased by 30 % approximately and the axial deformation capacity almost doubles when the ratio of the core steel area to the section area is 2.88 %. 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 ductile integral failure mode. The sections of the specimens are divided into constrained region and unconstrained region with different constitutive relations of concrete to establish the numerical mode. The results of calculation agree well with the test results.

Keywords: core steel reinforced concrete columns; axial compressive performance; experimental study; finite element analysis

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)