

文章编号: 1000-5013(2009)02-0195-05

型钢混凝土柱的 ANSYS 数值模拟技术

王妙芳, 郭子雄

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 利用 ANSYS 有限元分析程序, 对已有的型钢混凝土(SRC) 试验柱的受力性能进行非线性数值模拟. 介绍 SRC 柱单元建模和分析的方法, 重点考虑 SRC 柱截面混凝土的区域划分及相应的应力-应变本构关系. 通过对 ANSYS 的骨架曲线的讨论和分析, 最终形成考虑不同混凝土约束区域的 SRC 柱数值模拟技术. 采用提出的模型分析不同轴压比试件的 $P-\Delta$ 曲线, 结果表明, 除轴压比较大试件的分析结果与试验结果存在较大差异外, 其他试件的 $P-\Delta$ 曲线与试验骨架曲线均吻合良好.

关键词: 型钢混凝土柱; 数值模拟; 应力; 应变; 本构关系

中图分类号: TU 398⁺. 101 **文献标识码:** A

型钢混凝土(SRC) 结构, 是钢-混凝土组合结构的一种形式. 与传统的钢结构或混凝土(RC) 结构相比, SRC 结构具有很强的性能优势和经济优势, 在国内外被广泛应用^[1-2]. 我国现有的型钢混凝土结构设计规程尚不完善, 型钢混凝土结构计算理论还存在较多简化^[2]. 因此, 为了较为准确、全面地了解型钢混凝土结构构件受力性能, 需采用有限元方法等数值模拟技术进行结构理论分析研究. 大型商业通用有限元分析程序 ANSYS 在前后处理、模型建立、运算功能和操作界面方面均表现出较强功能^[1]. ANSYS 中内含的单元类型 Solid 65 和混凝土材料模型为型钢混凝土结构有限元数值模拟提供了基础, 正逐渐成为型钢混凝土结构理论研究和工程应用的常用工具软件. 目前, 在关于型钢混凝土结构的 ANSYS 数值模拟中, 对 SRC 混凝土截面都是采用统一的材料本构模型^[1, 3]. 这与真实情况还存在一定差距. 本文利用大型通用软件 ANSYS, 建立型钢混凝土柱试件的数值模拟模型并进行验证.

1 SRC 柱的构件

1.1 构件参数

以文[4] 试验构件为例, 介绍 SRC 柱的 ANSYS 程序数值模拟方法, 并对 ANSYS 的数值模拟技术进行验证. 构件参数: 柱的剪跨比为 1.5, 试件高度为 600 mm, 保护层厚度为 20 mm, 采用对称配筋. 柱截面尺寸和构件参数, 如图 1 和表 1 所示. 表 1 中, $n_0 = N / f'_c b h$; ρ 为纵向受拉钢筋配筋率(对称配筋构件为单侧配筋率), $\rho_{s,v}$ 为配箍率, $\rho_{s,s}$ 为配筋率; $A_{s,s}$ 为型钢截面面积; b_t , t_t 分别为翼缘的宽度与厚度, t_w , h_w 分别为腹板的宽度与高度.

1.2 单元类型^[1]

(1) 砼单元: ANSYS 程序单元库中的 Solid 65 单元. (2) 纵筋和箍筋: Pipe 20. (3) 型钢: Soild 45.

1.3 材料性质

1.3.1 砼材料 根据模拟构件的试验数据, 砼材料性质的具体参数及加载参数如表 2 所示. 表 2 中,

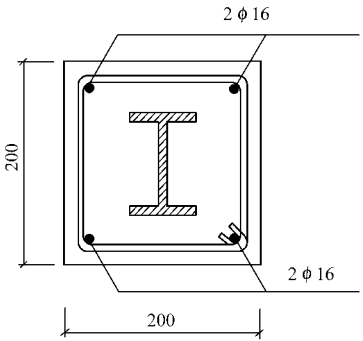


图 1 SRC 柱构件截面图(单位: mm)
Fig. 1 Sections of SRC specimens(unit: mm)

收稿日期: 2008-04-19

通信作者: 郭子雄(1967-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事工程结构抗震的研究. E-mail: guozxcy@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50478120); 教育部优秀人才支持计划资助项目(NCEP-06-0571); 福建省

重大科技专项前期研究项目(2005YZ1017)

表 1 试验构件参数
Tab. 1 Parameters of SRC specimens

序号	n_0	$\rho_l / \%$	$\rho_{s,v} / \%$	$\rho_{s,s} / \%$	$A_{s,s} / \text{mm}^2$	b_t / mm	t_t / mm	t_w / mm	h_w / mm
SRC1	0.42	2Φ16/1.01	Φ8@80/0.63	4.45	1 780	74	8.4	5.0	120
SRC2	0.87	2Φ16/1.01	Φ8@80/0.63	4.45	1 780	74	8.4	5.0	120
SRC3	1.11	2Φ16/1.01	Φ8@80/0.63	4.45	1 780	74	8.4	5.0	120
SRC4	0.17	2Φ16/1.01	Φ8@80/0.63	4.45	1 780	74	8.4	5.0	120
SRC5	0.42	2Φ16/1.01	Φ8@80/0.63	4.45	1 780	74	8.4	5.0	120

$\varepsilon_{c,u}$ 为约束区砼的极限应变, 其余意义同前. N 为施加的轴力计算值, 单位为 kN; F^m 为轴力计算值与横截面积的比值, 即面力, 其单位为 Pa; 泊松比为 0.2.

表 2 砼材料参数及加载参数
Tab. 2 Mechanical performance of concrete and loading parameters

序号	E_0 / GPa	$\varepsilon_{c,c}$	$\varepsilon_{c,u}$	f'_c / MPa	$f'_{c,c} / \text{MPa}$	f_r / MPa	β_l	β_c	N / kN	F^m / MPa
SRC1	32.0	0.002 7	0.009 8	26.8	31.0	3.22	0.35	0.8	450	11.26
SRC2	32.0	0.002 7	0.009 9	26.2	30.4	3.19	0.35	0.8	912	22.79
SRC3	30.5	0.002 8	0.011 0	22.6	26.8	2.96	0.35	0.8	1 004	25.09
SRC4	32.0	0.002 7	0.010 0	25.9	30.1	3.17	0.35	0.8	176	4.40
SRC5	33.0	0.002 6	0.009 2	29.4	33.6	3.38	0.35	0.8	494	12.35

将 SRC 柱截面砼划分为箍筋外无约束区和箍筋内约束区, 如图 2 所示. 箍筋外认为砼处于单轴受压应力状态, 而箍筋内认为砼处于多轴受力状态, 可等效为等效单轴受压应力状态. 在 ANSYS 程序分析中, 需要给出砼单轴(和等效单轴)受压下的应力-应变(σ - ε)曲线. 在单轴(和等效单轴)受压情况下, 将砼的应力-应变曲线按照非线性弹性材料输入. 在输入过程中, 先将应力-应变曲线简化成多段折线, 再将关键点依次输入. 该模型能较好地反映砼的下降段. 其中, 无约束区采用 Saenz 模型, 且取 $\varepsilon_{c,0}=0.002\ 0$, $\varepsilon_c=0.003\ 3$, 有

$$\sigma = \frac{E_0 \varepsilon}{1 + (E_0/E_s - 2)(\varepsilon/\varepsilon_{c,0}) + (\varepsilon/\varepsilon_{c,0})^2}.$$

约束区采用类 Saenz 和 Sargin 模型(图 3), 即

$$\sigma = k_3 f'_{c,c} \frac{A(\varepsilon/\varepsilon_{c,c}) + (D-1)(\varepsilon/\varepsilon_{c,c})^2}{1 + (A-2)\varepsilon/\varepsilon_{c,c} + D(\varepsilon/\varepsilon_{c,c})^2}.$$

上式中, $A = E_0/E'_s$, $E'_s = f'_{c,c}/\varepsilon_{c,c}$, $f'_{c,c} = k_3 f'_c$, $\varepsilon_{c,c} = k_2 \varepsilon_{c,0}$. 其中, $f'_{c,c}$, $\varepsilon_{c,c}$ 按 CEB FIP MC90 模型建议的公式计算. 即当 $k_1 \leq 0.05 f'_c$ 时, 有

$$f'_{c,c} = k_3 f'_c = (1 + 5k'_1) f'_c;$$

而当 $k_1 \geq 0.05 f'_c$ 时, 则有

$$f'_{c,c} = k_3 f'_c = (1.125 + 2.5k'_1) f'_c.$$

此外, 由于 $\varepsilon_{c,c} = (f'_{c,c}/f'_c)^2 \times 2 \times 10^{-3}$, $\varepsilon_{c,u} = 0.2k'_1 + 3.5 \times 10^{-3}$, 则有

$$k_2 = \varepsilon_{c,c}/\varepsilon_{c,0}.$$

其中, $k_1 = \frac{1}{2} \alpha_n \alpha_s \chi'_{c,c}$, $k'_1 = \frac{1}{2} \alpha_n \alpha_s \lambda$, $\alpha_n = 1 - \frac{8}{3n}$, $\alpha_s = 1 -$

$$\frac{s}{2b^n}, \lambda = \rho \frac{f_{y,1}}{f'_{c,c}}, \rho = \frac{A_{s,t} L'}{A_{cor s}}, L' = n_1 b'' + n_2 d''.$$

以上的参数中, E_0 为初始弹性模量, E_s, E'_s 分别为无约束和约束混凝土应力最高点的割线弹性模量; $f'_{c,c}$, $\varepsilon_{c,c}$ 分别为受约束砼应力-应变曲线上峰值应力与峰值应力对应的峰值应变, f'_c , $\varepsilon_{c,0}$ 为无约束区砼的峰值应力和相应的应变; k_3, k_2 分别表示考虑约束作用后峰值应力和应变的提高系数; f'_c 为砼

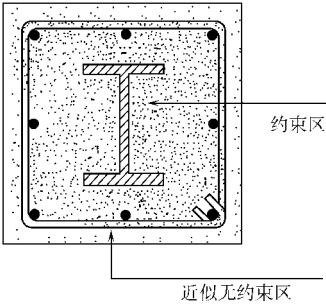


图 2 截面约束砼区域的划分
Fig. 2 Division of confined concrete sections

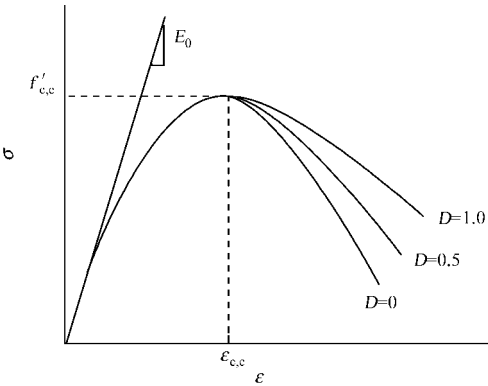


图 3 类 Saenz 和 Sargin 模型
Fig. 3 Model of materials

的单轴抗压强度(一般指圆柱体或棱柱体的抗压强度),取 $f'_c = 0.85f_{cu}$, 而 f_{cu} 为砼立方体抗压强度; L' 指箍筋约束区的周长; $f_{y,t}$ 为箍筋的抗拉强度, n 为箍筋围住的纵筋数量; b^n, d^n 分别为从箍筋外皮量测的约束核芯区的宽度和高度; b_{cor}, d_{cor} 分别为箍筋内皮两侧的约束核芯区的宽度和高度; n_1, n_2 分别代表两个方向箍筋的数量; d, s 分别为箍筋的直径和间距; $A_{s,t}$ 为箍筋的截面面积; ρ 为箍筋的体积配箍率; A_{cor} 为约束核心区的面积, 对于矩形截面箍, $A_{cor} = d_{cor} b_{cor}$. 为简化计算, 下降段的影响参数 D 取值为 1.

对于 RC 结构, k_3, k_2 与配箍率(包括影响配箍率的各个因素)、配箍形式及配筋率有关; 对于 SRC 结构, k_3, k_2 与内置型钢型式及配钢率等有关, k_2 的取值一般介于 1.0~2.0 之间, k_3 的取值一般介于 1.0~1.3 之间.

1.3.2 钢材 实际上, 当 SRC 构件形成塑性铰以后, 由于塑性区段砼的极限变形很少超过 $5\varepsilon_s$, 即为 0.006 (以 IV 级钢为例). 因此, 钢筋受拉以后的变形即使超过屈服平台进入强化段, 也只能达到不大的范围. 强化段可以简化为直线(这里坡度取为 $E_2 = 0.05E_1$, 如图 4 所示), 屈服平台对应的最大应变即假设为 $\varepsilon_s = 5\varepsilon_y$, 受拉钢筋和型钢翼缘的极限拉应变根据 f_y, f_u, E_1, E_2 及图 4 的几何关系求得.

本算例中, 纵筋、箍筋和型钢均采用多折线性随动强化模型(MKIN), 泊松比均为 0.25, 根据试验参数, 其他计算输入参数如表 3 所示.

表 3 钢材材料性质一览表

Tab.3 Mechanical performance of steel

类型	E_1 / GPa	E_2 / GPa	ε_y	$\varepsilon_s = 5\varepsilon_y$	ε_u	f'_y / MPa	f_u / MPa
Φ8(箍筋)	200	100	0.001 74	0.008 7	0.021 4	348.0	475
Φ16(纵筋)	206	103	0.001 33	0.006 7	0.018 8	275.0	400
型钢	200	100	0.001 99	0.009 9	0.021 2	397.5	510

2 模型的建立

2.1 实体建模及单元划分

依据试验试件的几何尺寸和配筋、配钢特征, 建立实体模型. 对 SRC 柱构件截面砼的划分区域及型钢的位置, 必须分别按箍筋内外及型钢翼缘和腹板所在位置分别建立实体模型, 如图 5 所示. 然后, 运用布尔操作将几个实体 Gue 成整体, 再对实体进行六面体单元划分. 在已划分单元的砼节点中选择需要布置钢筋的节点, 建立纵筋和箍筋单元, 钢筋与砼间共用节点, 不考虑钢筋、型钢与砼间的粘结滑移. 钢筋与型钢单元模型, 如图 6(a) 所示.

2.2 边界条件及加载方式

结合试验中试件的实际约束边界及加载方式是, 将柱底砼节点的 3 个平动自由度和 3 个转动自由度全部约束. 加载方式采用静力加载方案, 第 1 个荷载步施加轴向压力并保持定值, 第 2 个荷载步对柱顶位移单调加载, 位移加载方向使 SRC 柱绕强轴弯曲. 其中, 轴压力通过对柱顶砼面施加均匀面压力 F^m 模拟, 采用此加载形式能够保证轴向荷载始终垂直柱顶平面, 这与试验过程轴向压力加载方式完全相同. 各试件对应加载参数, 如表 2 所示.

水平荷载直接施加在柱头节点可能会出现局部应力集中, 且运算不收敛. 因此, 在水平位移施加之前, 对柱顶所有节点耦合水平加载方向的平动自由度. 加载过程仅对耦合后的主节点位移加载, 这种加载形式能够很好避免应力集中, 且操作简便. 图 6(b) 为耦合后单元模型. 分析中, 每个荷载步取 100 个子步. 此外, 为加速收敛, 打开线性搜索和预测器, 在位移控制加载过程中采用位移的无穷范数控制收

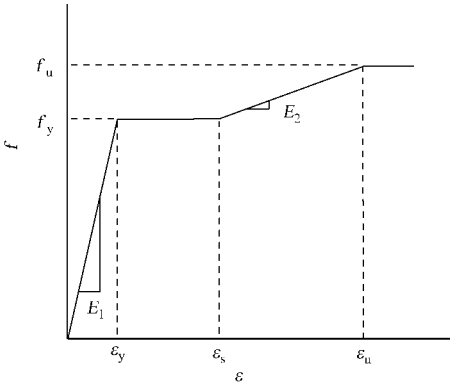


图 4 钢材应力-应变关系曲线
Fig.4 σ - ε curve of steel

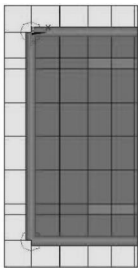


图 5 模型截面单元
Fig.5 FEM model of SRC specimens

敛,力控制加载过程中则用残余力的二范数控制收敛^[5].

2.3 计算结果及分析

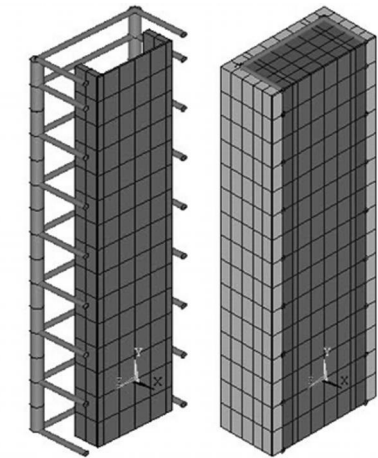
数值模拟结果与试验结果的骨架曲线对比,如图 7 所示. ANSYS 程序分析结果与试验结果对比,如表 4 所示.表 4 中, P ,

表 4 ANSYS 程序结果与试验结果对比

Tab.4 The comparison between the ANSYS results and the experimental ones

序号	$P_{t,max}/\text{kN}$	$P_{c,max}/\text{kN}$	$\Delta_{t,u}/\text{mm}(\varphi_{t,u}/(^{\circ}))$	$\Delta_{c,u}/\text{mm}(\varphi_{c,u}/(^{\circ}))$
SRC1	182.1	187.4	17.0(1/34)	18.0(1/33)
SRC2	165.1	164.9	12.0(1/50)	13.5(1/44)
SRC3	125.7	148.9	12.0(1/50)	13.3(1/45)
SRC4	173.0	163.6	24.0(1/25)	20.0(1/30)
SRC5	191.6	173.8	20.4(1/29)	18.2(1/33)

Δ 分别代表荷载与位移, φ 为构件转角, 下标 u, t, c 分别表示极限、试验值与计算值.



(a) 钢材模型 (b) 耦合后模型
图 6 单元模型

Fig.6 FEM model of SRC columns

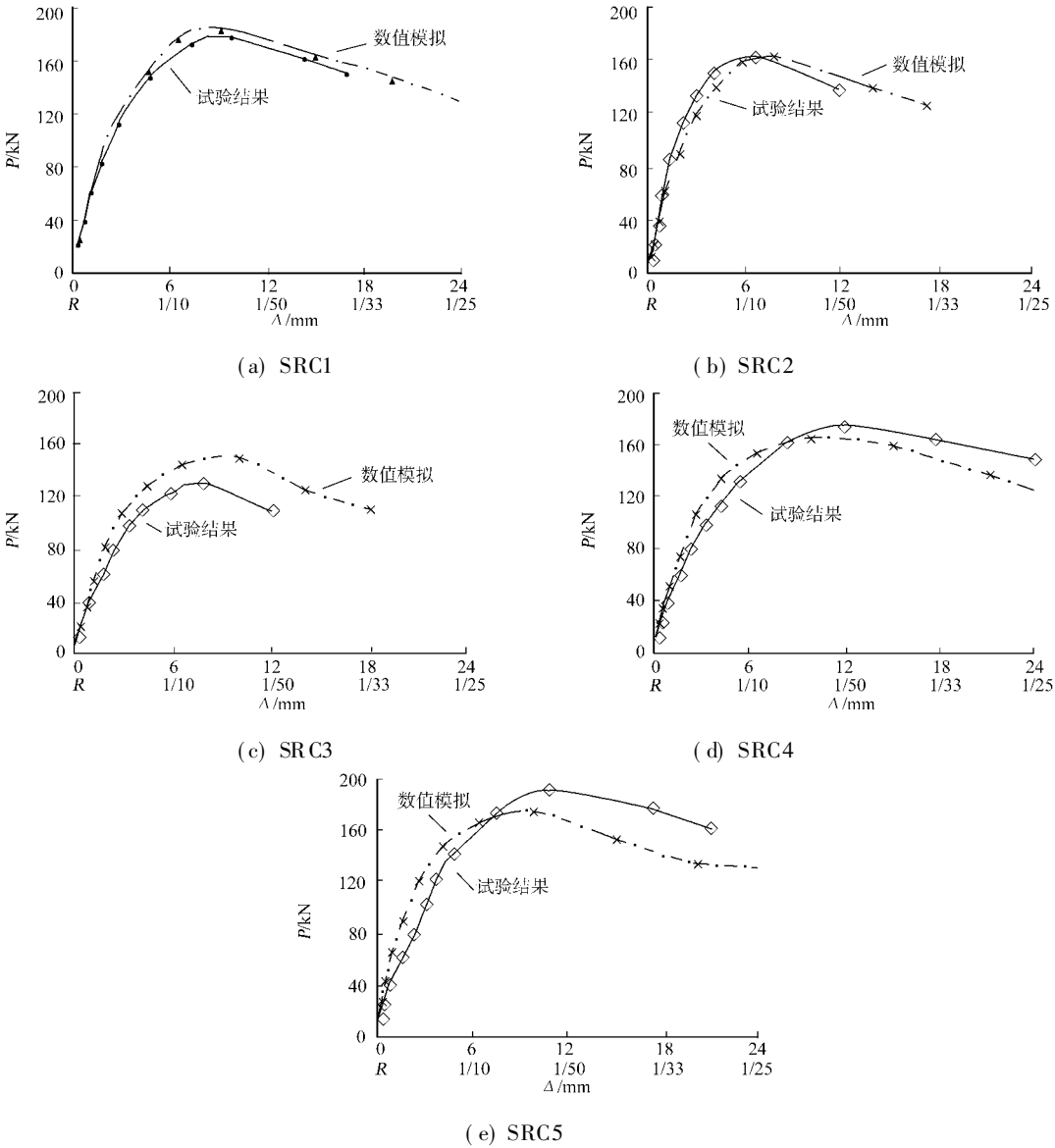


图 7 试验与模拟结果对比

Fig.7 Comparison between the experimental results and simulation ones

表 4 列出了 SRC 柱有限元数值分析的 $P-\Delta$ 曲线特征点与试验结果的对比, 可以看出程序分析结果与试验结果总体吻合较好, 且与试验表现出一致的规律. 由图 7(c) 可知, SRC3 最大荷载的试验值与数值模拟值相差较远. 这主要是因为, 在大轴压比(> 0.9) 下, 在受拉钢筋尚未屈服时, 受压钢筋已经压屈, 且混凝土压碎破坏, 属于脆性破坏, 钢筋强度没有强化而且混凝土的应力也未能充分发挥. 这些破坏现象在材料本构尚难以合理模拟, 因而造成理论计算与试验结果存在较大差异. 模拟结果的承载能力普遍比试验值高, 原因可能是数值模拟不考虑粘结滑移而造成的.

此外, 由于试验时柱子的破坏是由柱端附近两条竖向粘结裂缝间的混凝土剥落, 内埋工字钢发生侧向失稳所致, 而在实际模拟中不考虑粘结滑移, 因此极限位移会比试验值稍大.

3 结束语

数值分析结果表明, 本文数值模拟方法能够较好反应箍筋外砼的剥落与箍筋对曲线峰值点和极限点的影响. 建议的型钢混凝土结构 ANSYS 数值模拟技术合理、可行, 可适用于基于 ANSYS 程序的型钢混凝土结构有限元数值模拟分析和受力性能的理论研究.

参考文献:

[1] 杨 勇. 型钢混凝土粘结滑移基本理论及应用基础研[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.
[2] 赵鸿铁. 钢与混凝土组合结构[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
[3] 杨 勇, 郭子雄, 聂建国, 等. 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.
[4] 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: 自然科学版, 1990(2): 112-118.
[5] 段 进. ANSYS 10.0 结构分析从入门到精通[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2006

Study on Numerical Simulation Technology of Steel Reinforced Concrete Columns Using Ansys Software

WANG Miaofang, GUO Zixiong

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

Abstract: Nonlinear finite element analysis of five steel reinforced concrete (SRC) columns using the ANSYS software is conducted, and the mechanical behaviors of these columns are analyzed, which mainly focus on the numerical simulation of concrete stress-strain curves of these SRC columns and the division of SRC section. Based on the discussion of ANSYS skeleton curves, the technology to simulate SRC structures is finally established, which considers the different confined region of concrete. The $P-\Delta$ curves with various axial compression ratios are analyzed. The numerical simulation results are in good agreement with the experimental results except for the specimen with large axial compression ratios.

Keywords: steel reinforced concrete columns; numerical simulation; stress; strain; constitutive relationship

(责任编辑: 钱 筠 英文审校: 方德平)