

往复荷载下钢筋混凝土柱受力性能的数值模拟

汪训流, 陆新征, *叶列平

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘要: 准确预测地震荷载下钢筋混凝土柱的受力性能, 对评估震后混凝土框架结构及桥梁结构的安全性和震害损失具有重要意义。由于复杂的材料性能和受力行为, 地震作用下钢筋混凝土柱受力性能的准确计算目前仍需主要借助数值模拟, 并且对数值模型中混凝土和钢筋材料的滞回本构关系提出了更高的精度要求。本文基于纤维分析模型, 采用更加完善的反复荷载下钢筋和混凝土的本构, 编制了可精确分析钢筋混凝土杆系结构及构件在往复荷载下受力性能的计算程序, 并对不同轴压比和不同配筋率的 2 根压弯柱试件进行了数值模拟, 计算结果与试验结果吻合良好。

关键词: 纤维模型; 往复荷载; 混凝土柱; 滞回关系; 数值分析

中图分类号: TU375 文献标识码: A

Numerical Simulation for the Hysteresis Behavior of RC Columns under Cyclic Loads

WANG Xunliu, LU Xinzheng, YE Lieping

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Precise prediction for the hysteresis behaviors of reinforced concrete (RC) columns under seismic loads is important to assess the safety of RC frames and bridges during severe earthquake. Due to the complicated material behavior and complex external force during the earthquake, an accurate simulation of the behaviors under seismic loads currently mainly depends on numerical method, and more precisions are demanded for the hysteresis constitutive laws of concrete and steel reinforcement. In this paper, a fiber model program is developed with more precise hysteresis constitutive laws of concrete and steel reinforcement. Two columns, which are under cyclic compressive-bending loads, with different axial load ratios and reinforcement ratios are analyzed and the simulation results are found agreed well with test results.

Key words: fiber model; cyclic load; concrete column; hysteretic relation; numerical analysis

钢筋混凝土柱作为混凝土框架结构及桥梁结构的主要承重构件, 在地震作用下受到反复水平地震力作用, 并表现为显著的弹塑性受力特性^[1]。准确预测地震作用下钢筋混凝土柱的受力性能及其震后残余变形, 对评估结构的震害程度和安全性具有重要意义。由于材料和结构受力的复杂性, 目前对于反复荷载下钢筋混凝土柱的受力性能和残余变形的数值模拟还存在欠缺, 主要表现在混凝土和钢筋的滞回本构关系不能全面准确的反映其复杂的受力行为。

对于长细比较大的杆系结构(例如框架梁柱或桥柱), 可以采用基于杆系结构力学方法^[2]和一维材料本构的纤维模型进行数值模拟。所谓纤维模型,

就是将杆件截面划分成若干纤维, 每个纤维均为单轴受力, 并用单轴应力应变关系来描述该纤维材料的特性, 纤维间的变形协调则采用平截面假定。本文基于纤维模型程序^[3], 引入更加完善的钢筋和混凝土本构, 并将所编制的材料本构模型嵌入通用商用程序 MSC.MARC 结构分析软件, 用于复杂受力状态下钢筋混凝土杆系结构及构件受力的数值分析。通过对文献[9]中的钢筋混凝土桥柱和文献[10]中框架柱试验的数值模拟, 计算结果与试验结果吻合良好, 表明本文所采用的材料本构模型及其分析方法能够较全面准确的反映钢筋混凝土柱在反复地震作用下的复杂受力行为。

收稿日期: 2006-05-11; 修改日期: 2006-08-04

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20040003095)

作者简介: 汪训流(1977), 男, 湖北阳新人, 博士研究生; 陆新征(1978), 男, 安徽芜湖人, 讲师; *叶列平(1960), 男, 浙江温州人, 教授, 博士生导师 (E-mail: ylp@mail.tsinghua.edu.cn)。

1 混凝土本构

能否合理反映受压混凝土的约束效应、在循环往复荷载下的滞回行为（包括刚度和强度退化）以及受拉混凝土的“受拉刚化效应^[7]”，是检验一个单轴混凝土本构是否足够准确的重要标志。本文混凝土本构的受压单调加载包络线选取 Légeron&Paultre 模型^[4]，同时考虑了钢筋混凝土中纵、横向配筋对混凝土约束效应的影响，程序根据有无配筋自动确定是否为约束混凝土。为反映反复荷载下混凝土的滞回行为，采用二次抛物线模拟混凝土卸载及再加载路径的主体部分，并合理考虑反复受力过程中的刚度和强度退化。为模拟混凝土裂缝闭合带来的裂面效应，在混凝土受拉、受压过渡区，采用线性裂缝闭合函数模拟混凝土由开裂到受压时的刚度恢复过程。在受拉区，采用江见鲸模型^[7]模拟混凝土受拉开裂及软化行为，以考虑“受拉刚化效应”。各受力分区的力学模型介绍如下：

1.1 受压部分

受压区混凝土的本构主要包括：①骨架线加载；②卸载及再加载；③拉压过渡区，即裂缝闭合区等三部分。

1.1.1 单调加载曲线

骨架线加载应能反映约束效应和软化行为，本文采用以下 Légeron&Paultre 模型^[4]：

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_{c0} \left[\frac{s(\varepsilon/\varepsilon_{c0})}{s-1+(\varepsilon/\varepsilon_{c0})^s} \right], & \varepsilon \leq \varepsilon_{c0} \\ \sigma_{c0} \exp \left[s_1 (\varepsilon - \varepsilon_{c0})^{s_2} \right], & \varepsilon > \varepsilon_{c0} \end{cases} \quad (1)$$

式中， σ 、 ε 分别为混凝土的受压应力和应变； σ_{c0} 、 ε_{c0} 分别为混凝土的受压峰值应力和峰值应变； s 、 s_1 、 s_2 为控制参数，按文献[4]计算。其中，文献[4]建议 σ_{c0} 、 ε_{c0} 取值如下：

$$\begin{cases} \sigma_{c0} = \sigma_{c0}^0 (1 + 2.4 I_{e0}^{0.7}) \\ \varepsilon_{c0} = \varepsilon_{c0}^0 (1 + 35 I_{e0}^{1.2}) \end{cases} \quad (2)$$

式中， σ_{c0}^0 、 ε_{c0}^0 分别为无约束混凝土（素混凝土）受压峰值应力和峰值应变； I_{e0} 为混凝土受压应变等于峰值应变 ε_{c0}^0 时的有效约束指标，是一个与纵筋配筋率和配箍率均有关的参数，按文献[4]计算，当混凝土无约束时（素混凝土） $I_{e0} = 0$ 。由此可以

分别模拟无约束混凝土和约束混凝土（见图1）。

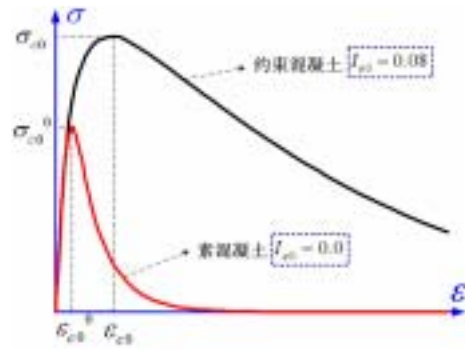


图1 受压混凝土单调加载曲线

Fig.1 Monotonic frame curve of concrete in compression

注：图中横坐标 ε 为应变；纵坐标 σ 为应力，后面图同。

1.1.2 卸载及再加载曲线

卸载及再加载曲线应能反映材料在反复受力下的滞回和刚度退化的特性。首先，按文献[5]由下式确定卸载至零应力点时的残余应变 ε_z 和再加载达到骨架线时的应变 ε_{re} 。

$$\begin{cases} \varepsilon_z = \varepsilon_{um} - \frac{(\varepsilon_{um} + \varepsilon_{ca}) \sigma_{um}}{\sigma_{um} + E_c \varepsilon_{ca}} \\ \varepsilon_{re} = \varepsilon_{um} + \frac{\sigma_{um} - \sigma_{new}}{E_r \left(2 + \frac{\sigma_{c0}}{\sigma_{c0}^0} \right)} \end{cases} \quad (3)$$

式中， ε_z 为受压混凝土卸载至零应力点时的残余应变； ε_{re} 为受压混凝土再加载至骨架线时的应变； σ_{um} 、 ε_{um} 分别为受压混凝土从骨架线开始卸载时的应力和应变； ε_{ca} 、 σ_{new} 及 E_r 分别为附加应变、与 ε_{um} 等应变的更新应力和更新割线模量，均按文献[5]计算。

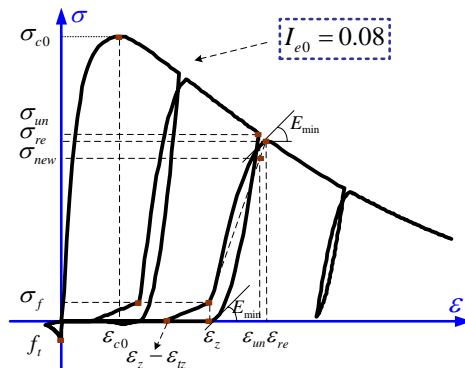


图2 混凝土应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve of concrete

其次, 分别用过两点 $(\varepsilon_{un}, \sigma_{un})$ 、 $(\varepsilon_z, 0)$ 和 $(\varepsilon_z, \sigma_f)$ 、 $(\varepsilon_{re}, \sigma_{re})$ 并指定沿线最小切线斜率 E_{min} (即路径终点斜率) 的抛物线, 来模拟受压混凝土的卸载及再加载应力应变关系, 整个卸载和再加载循环考虑了加卸载时的刚度退化和滞回行为, 如图 2 所示。其中, σ_f 为混凝土拉压过渡区终点应力, 按文献[8]的建议取为 $\sigma_f = \sigma_{c0}/10$; σ_{re} 为受压混凝土再加载路径达到骨架线时的应力, 由混凝土受压单调加载曲线 (即式(1)) 代入 ε_{re} 计算所得。

1.1.3 拉压过渡区

在拉压过渡区, 混凝土存在一个刚度恢复过程, 本文采用了线性裂缝闭合函数。过渡区起点的相对应变大小为最大名义受拉应变 ε_{tz} (即混凝土第一次开裂后再次进入受拉区时据平截面假定所得到的最大“虚假”应变), 且限定 $\varepsilon_{tz} \leq \varepsilon_{tu}$, 相应应力为 0; 终点的应变为 ε_z , 相应应力为 σ_f , 如图 2 所示。

1.2 受拉部分

受拉混凝土单调加载曲线的上升段取为直线, 软化段采用江见鲸模型^[7] (如图 2):

$$\sigma = \begin{cases} E_t \varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_{t0} \\ f_t \exp[-\alpha(\varepsilon - \varepsilon_{t0})], & \varepsilon > \varepsilon_{t0} \end{cases} \quad (4)$$

式中, σ 、 ε 分别为受拉混凝土的应力和应变; f_t 为混凝土抗拉强度; ε_{t0} 为受拉混凝土峰值应变, 且 $\varepsilon_{t0} = f_t/E_t$; E_t 为混凝土抗拉弹性模量 (原点切线模量); α 为控制参数, 可以按文献[7]的建议取值, 本文取 $\alpha = 1000$ 。通过参数 α 的适当取值, 曲线型受拉软化段可以较好考虑混凝土的“受拉刚化”效应。受拉混凝土的卸载及再加载路径为指向应力正负转折点型 (如图 2 所示)。

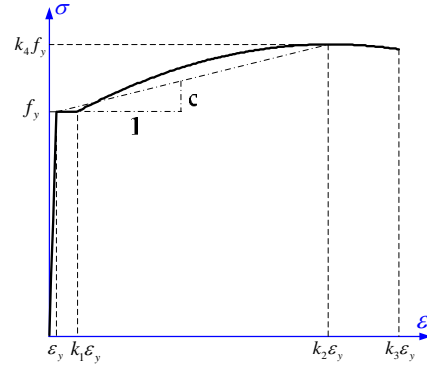
2 钢筋本构

本文钢筋本构基于 Légeron 等模型^[6], 该模型在再加载路径上合理考虑了钢筋的 Bauschinger 效应, 并与钢筋的材性试验结果吻合良好^[6]。为反映钢筋单调加载时的屈服、硬化和软化现象, 并使钢筋本构更加通用, 本文在 Légeron 等模型^[6]的基础上作以下修正 (见图 3):

(1) 单调加载曲线取自 Esmaily&Xiao 模型^[8], 分别引入钢筋的屈服点、硬化起点、应力峰值点和

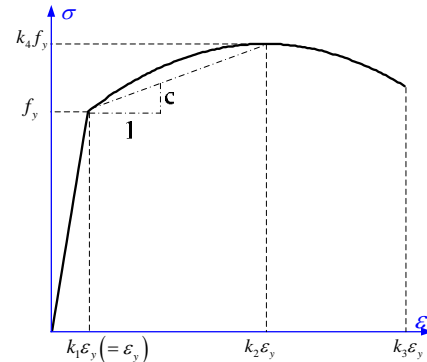
极限点;

(2) 引入代表钢筋拉压屈服强度之比的参数 k_5 , 即 $k_5 = f_y/f_y'$ (f_y 为钢筋的抗拉屈服强度, f_y' 为钢筋的抗压屈服强度), 将钢筋本构扩展为可以分别模拟拉压等强的具有屈服台阶的普通钢筋和拉压不等强的没有屈服台阶的高强钢筋或钢绞线的通用模型。



(a) 普通钢筋

(a) Regular reinforcement



(b) 硬钢或钢绞线

(b) Hard steel & strand

图 3 钢筋单调受拉加载曲线

Fig.3 Monotonic frame curve of steel in tension

2.1 单调加载曲线

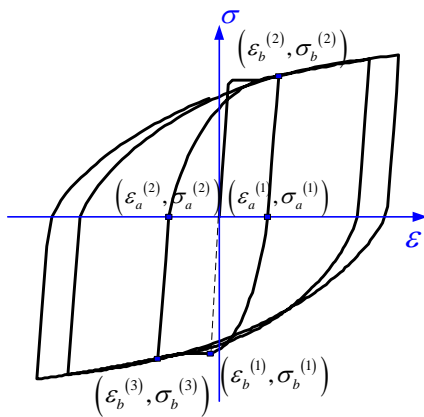
钢筋单调加载曲线为 Esmaily&Xiao 模型^[8], 以受拉段为例 (见图 3):

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ f_y, & \varepsilon_y < \varepsilon \leq k_1 \varepsilon_y \\ k_4 f_y + \frac{E_s (1 - k_4)}{\varepsilon_y (k_2 - k_1)^2} (\varepsilon - k_2 \varepsilon_y)^2, & \varepsilon > k_1 \varepsilon_y \end{cases} \quad (5)$$

式中, σ 、 ε 分别为钢筋的应力和应变; E_s 为钢筋的弹性模量; f_y 、 $\varepsilon_y = f_y / E_s$ 分别为钢筋的屈服强度和屈服应变; 参数 k_1 为钢筋硬化起点应变与屈服应变的比值; 参数 k_2 为钢筋峰值应变与屈服应变的比值; 参数 k_3 为钢筋极限应变与屈服应变的比值; 参数 k_4 为钢筋峰值应力与屈服强度的比值。整个曲线由双直线段加抛物线段三部分组成, 通过参数 k_1 的不同取值, 可以分别模拟有明显屈服台阶的软钢和无屈服台阶的硬钢。

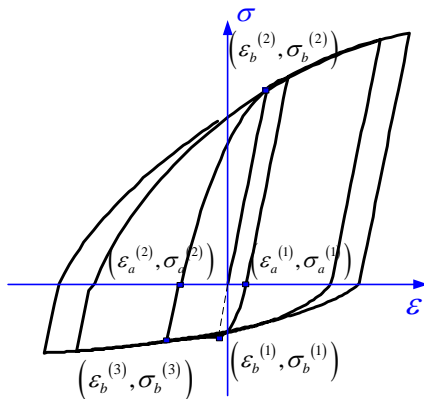
2.2 卸载及再加载曲线

钢筋加卸载曲线取 Légeron 等模型^[6], 即卸载为直线, 反向再加载曲线采用以下方程 (见图 4):



(a) 普通钢筋

(a) Regular reinforcement



(b) 硬钢或钢绞线

(b) Hard steel & strand

图 4 钢筋应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curve of steel

$$\sigma = [E_s (\varepsilon - \varepsilon_a) + \sigma_a] - \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \right)^p \times [E_s (\varepsilon_b - \varepsilon_a) - (\sigma_b - \sigma_a)] \quad (6)$$

$$p = \frac{E_s (1 - c/E_s) (\varepsilon_b - \varepsilon_a)}{E_s (\varepsilon_b - \varepsilon_a) - (\sigma_b - \sigma_a)} \quad (7)$$

式中, c 为等效硬化直线的斜率, 取为过屈服点和峰值点直线的斜率 (见图 3); σ_a 为再加载路径起点应力, 按文献[6]取 $\sigma_a = 0$; 其他符号的意义参见图 4。

3 分析方法及程序

本文将所编制的材料本构模型, 基于文献[3]的纤维模型程序 THUFIBER, 通过 Ubeam 用户子程序接口嵌入通用有限元分析软件 MSC.MARC, 利用 MARC 强大的前、后处理功能及非线性计算能力, 采用位移增量加载法实现钢筋混凝土杆系结构或构件在复杂受力状态下的计算分析。分析方法及流程示意简图见图 5。

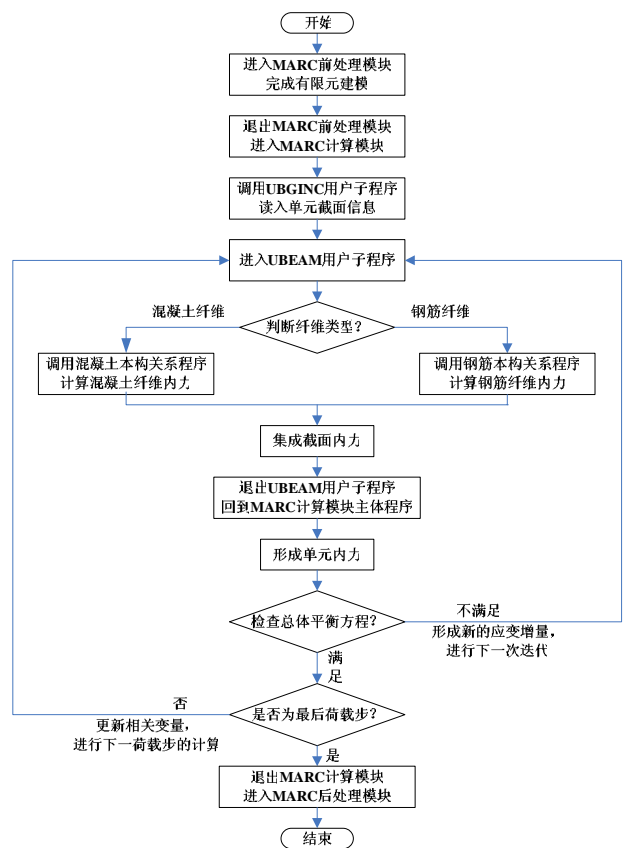


图 5 分析方法及流程示意图

Fig.5 Analysis method and flow diagrammatic sketch

4 混凝土压弯柱试件的数值模拟

对文献[9]和[10]的 2 根压弯柱试件(S-1、YW0)

采用以上方法进行往复荷载下的数值模拟。其中，S-1 为高配筋率（2.65%）、低轴压比（0.03）试件，钢筋混凝土桥柱多为此类构件^[9]；YW0 为低配筋率（1.29%）、高轴压比（0.44）试件，多见于高层框架结构柱^[10]。两试件的尺寸及相关参数见表 1。之所以选择这两个构件是因为：S-1 配筋较多，钢筋本构对柱子的滞回行为影响显著，因而可以验证钢筋本构的精度；YW0 配筋较少，柱子的滞回特性主要受混凝土本构的影响，因而可以验证混凝土本构的精度。

计算时，先施加竖向荷载，再进行水平往复加载；同时采用严格的力和位移收敛准则（0.5%）；每个截面划分成 6×30 根混凝土纤维（沿水平荷载方向为 30 根纤维）和同纵筋数目相同的钢筋纤维。

试件 S-1 计算结果与试验结果的对比见图 6。由图可见，本文采用的钢筋本构合理地考虑了钢筋的硬化特性和 Bauschinger 效应^[6]，对试件在反复荷载下的承载力和变形均有良好预测，准确模拟了往复荷载下钢筋混凝土柱的滞回特性，并对残余变形的预测有较高精度。

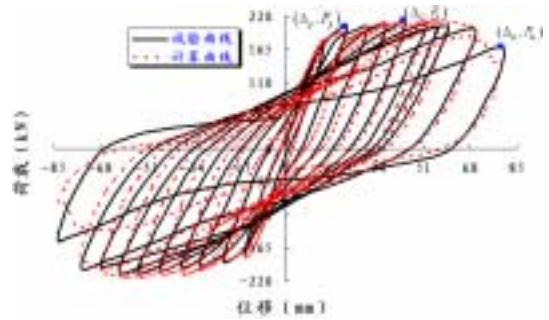


图 6 S-1 计算结果与试验结果比较

Fig.6 Comparison between simulation and test result of S-1

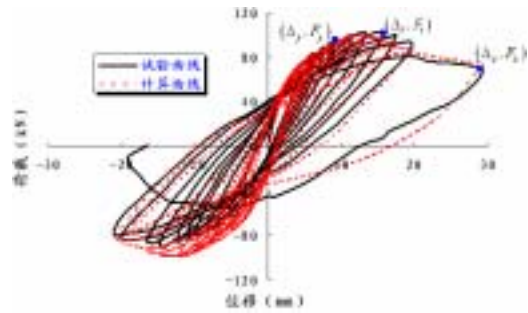


图 7 YW0 计算结果与试验结果比较

Fig.7 Comparison between simulation and test result of YW0

表 1 柱子尺寸及相关参数

Table 1 Dimensions and related parameters of column specimens

试件名	截面形状及尺寸	混凝土参数	钢筋参数	纵筋/配筋率	箍筋/配筋率	水平荷载作用点	轴压力/轴压比
S-1 ^[9]	矩形 400×400×1650	$\sigma_{c0}^0 = 35$	$k_1 = 4, k_2 = 25$	32 ϕ 13 / 2.65%	ϕ 6@30 / 0.47%	距离柱底 1500	160 / 0.03
		$\varepsilon_{c0}^0 = 0.002$	$k_3 = 45$				
		$\varepsilon_{cu} = 0.01$	$k_4 = 1.2, k_5 = 1$				
		$f_t = 3.5$	$f_y = 374$				
		$\varepsilon_{tu} = 0.001$	$E_s = 206000$				
		$E_c = E_t = 34400$	$f_{yh} = 387$				
		$E_{min} = 0$	$f_{uh} = 566$				
$a_s = a_s' = 35$							
YW0 ^[10]	矩形 250×250×1200	$\sigma_{c0}^0 = 27.7$	$k_1 = 4, k_2 = 25$	4 ϕ 16 / 1.29%	ϕ 6@100 / 0.23%	距离柱底 1085	760 / 0.44
		$\varepsilon_{c0}^0 = 0.002$	$k_3 = 30$				
		$\varepsilon_{cu} = 0.01$	$k_4 = 1.5, k_5 = 1$				
		$f_t = 2.77$	$f_y = 378$				
		$\varepsilon_{tu} = 0.001$	$E_s = 200000$				
		$E_c = E_t = 34400$	$f_{yh} = 317$				
		$E_{min} = 0$	$f_{uh} = 465$				
$a_s = a_s' = 25$							

注：表 1 中，长度单位为 mm、强度单位为 MPa、力单位为 kN，下标中带 h 的为箍筋参数

试件 YW0 计算结果与试验结果的对比见图 7。由图可见，本文数值分析程序的混凝土本构考虑了混凝土的“受拉刚化效应”、加卸载时的刚度退化及滞回行为，并对往复荷载下混凝土拉压过渡区进行了模拟，较好反映了复杂受力状态下混凝土的实

际受力变形特性，从而对试件在反复荷载下的承载力和变形均有良好预测，合理模拟了往复荷载下钢筋混凝土柱的滞回特性，尤其对残余变形的预测有较高精度。

表 2 比较了本文数值模拟对 S-1、YW0 不同阶

段残余变形的预测精度。可见本文分析结果对于残余位移，对于两根试件的预测误差均小于 1%。残余变形的预测误差较小，特别是对应峰值荷载的残余

表2 不同阶段残余变形的预测误差

Table 2 Error in prediction of residual deformations within various stage

试件名	试验或程序名	从屈服点卸载		从峰值点卸载		从极限位移点卸载	
		残余位移	相对误差	残余位移	相对误差	残余位移	相对误差
S-1 ^[9]	TEST	5.66	/	23.60	/	60.50	/
	本文分析结果	6.33	11.8%	23.70	0.4%	56.67	6.3%
YW0 ^[10]	TEST	1.31	/	2.85	/	12.48	/
	本文分析结果	1.28	2.2%	2.83	0.7%	16.50	32.2%

注：表 2 中，长度单位为 mm

5 结语

本文基于纤维模型，采用更加完善的钢筋和混凝土本构，并将所编制的材料本构模型嵌入通用商用程序 MARC 结构分析软件，用于复杂受力状态下钢筋混凝土杆系结构及构件受力的数值分析。通过对文献[9]中的钢筋混凝土桥柱和文献[10]中框架柱试验的数值模拟表明，本文所采用的材料本构模型及其分析方法能够较全面准确的反映钢筋混凝土柱在反复地震作用下的复杂受力行为，且对残余变形的预测达到较高的精度，可以用于复杂受力状态下钢筋混凝土杆系结构及构件的数值模拟和受力行为预测。

参考文献

[1] 叶列平, 赵作周. 混凝土结构 (第 2 版 下册) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
Ye Lieping, Zhao Zuozhou. Concrete structures (Edition 2, Volume 2) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)

[2] 江见鲸, 何放龙, 何益斌, 陆新征. 有限元法及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006
Jiang Jianjing, He Fanglong, He Yibin, Lu Xinzheng. Finite element method and its application [M]. Beijing: China Machine Press, 2006. (in Chinese)

[3] 陆新征, 缪志伟, 黄羽立, 叶列平. 静力和动力荷载作用下混凝土高层结构的倒塌模拟[A]. 2005 年 MSC. Software 中国用户年会议论文集[C]. 成都: 2005. 1-10.
Lu Xinzheng, Miao Zhiwei, Huang Yuli, Ye Lieping. Simulation for the collapse of concrete tall building under

static and dynamic load [A]. MSC. Software 2005 annual symposium of users in China [C]. Chengdu: 2005. 1-10. (in Chinese)

[4] Légeron F, Paultre, P. Uniaxial confinement model for normal and high-strength concrete columns [J]. Struct Eng, 2003, 129(2): 241-252.

[5] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Struct Eng, 1988, 114(8): 1804-1825.

[6] Légeron F, Paultre P, Mazar J. Damage mechanics modeling of nonlinear seismic behavior of concrete structures [J]. Struct Eng, 2005, 131(6): 946-954.

[7] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
Jiang Jianjing, Lu Xinzheng, Ye Lieping. Finite element analysis of concrete structures[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)

[8] Esmaeily A, and Xiao Y. Behavior of reinforced concrete columns under variable axial loads: analysis [J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(5): 736-744.

[9] Zatar W, Mutsuyoshi H. Residual displacements of concrete bridge piers subjected to near field earthquakes [J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(6): 740-749.

[10] 李静. 矩形截面 FS 约束混凝土柱抗震性能的试验研究与理论分析[D]. 北京: 清华大学博士论文, 2003.
Li Jing. Experimental investigation and theoretical analysis on seismic behavior of FS confined concrete columns [D]. Beijing: PhD thesis of Tsinghua University, 2003. (in Chinese)