

# 循环荷载下钢筋混凝土柱滞回性能数值模拟\*

孙广俊<sup>1,2</sup>, 蒋雯<sup>1</sup>, 李鸿晶<sup>1</sup>

(1. 南京工业大学土木工程学院 南京, 210009)

(2. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室 南京, 210096)

**摘要** 基于 OpenSees 平台, 分别采用梁柱纤维单元和带塑性铰梁柱纤维单元建立了钢筋混凝土单柱的纤维模型和纤维铰模型, 对循环荷载下的钢筋混凝土单柱非线性滞回反应进行了数值模拟。通过与试验结果的对比, 验证了两种模型的模拟效果, 并对模拟结果进行了分析讨论。研究表明, 采用纤维模型可以较真实地模拟循环荷载下钢筋混凝土柱的非线性滞回性能, 模拟结果能够较好地反映钢筋混凝土柱在反复加载过程中刚度和强度退化及捏拢现象, 材料本构参数、积分点数目及纤维铰模型中的塑性铰长度对模拟效果有着重要的影响。

**关键词** 钢筋混凝土; 循环荷载; 数值模拟; 纤维模型; 纤维铰; 抗倒塌; OpenSees

**中图分类号** TU375; TH113.2<sup>+1</sup>

## 引言

在强烈地震中, 结构倒塌是造成人员伤亡和财产损失的主要原因, 结构抗倒塌技术已成为近年来国内外的热点研究问题。以数值模拟手段为核心的结构抗倒塌分析是正确认识结构强非线性响应行为和倒塌机理、改进抗震设计与加固方法、提出抗倒塌措施等工作的基础, 但数值模拟分析结果的正确性与可靠性却是需要亟待验证的问题。近年来, 基于材料层次本构关系的杆系纤维模型日益受到研究人员的密切关注<sup>[1-10]</sup>。为了检验钢筋混凝土构件在往复荷载下的弹塑性滞回性能数值模拟的效果与可靠性, 笔者基于 OpenSees 开放程序平台, 分别采用基于有限单元刚度法理论的 DBBC 纤维单元 (displacement-based beam-column fiber element) 和基于有限单元柔度法理论的 BHE 纤维单元 (beam with hinges fiber element)<sup>[11]</sup> 建立了钢筋混凝土单柱的纤维模型和纤维铰模型, 利用位移控制循环加载方式对钢筋混凝土柱的滞回反应进行了数值模拟和分析比较, 验证了两种模型的正确性和可靠性, 并对数值模拟结果进行了分析讨论, 得到了模拟钢筋混凝土柱在循环荷载作用下非线性滞回反应的几点共识。

## 1 钢筋混凝土柱杆系纤维模型

纤维模型将杆件截面划分成若干纤维, 每个纤

维均为单轴受力, 不同的纤维可以用于定义不同的材料本构关系。纤维模型假定构件的截面在变形过程中始终保持为平面, 因此只要知道构件截面的弯曲应变和轴向应变就可以得到截面每一根纤维的应变, 从而得到截面的刚度。

### 1.1 DBBC 纤维单元

DBBC 纤维单元是一种分布塑性单元, 纤维单元模型如图 1 所示。该单元允许刚度沿构件长度变化, 首先, 通过结点位移得到相应的单元杆端位移; 然后, 根据位移插值函数求得截面的变形, 再根据截面的本构关系确定截面抗力与截面切线刚度矩阵; 最后, 按照 Gauss-Legendre 积分沿杆长积分计算出整个单元的抗力与切线刚度矩阵。

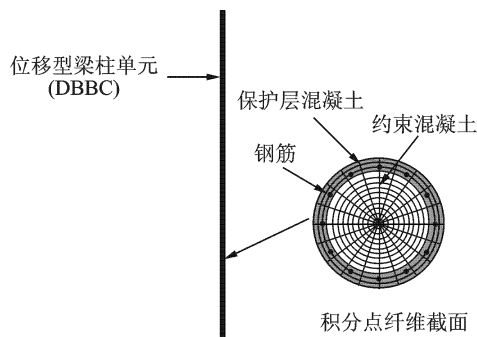


图 1 DBBC 纤维单元模型

\* 地震行业科研专项经费资助项目 (200808081); 江苏省高校自然科学研究重大资助项目 (10KJA560012); 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室开放课题基金资助项目 (CPCSME2011-04)

收稿日期: 2012-02-25; 修改稿收到日期: 2012-07-05

如果只考虑材料非线性, DBBC 纤维单元的刚度矩阵可以表示为

$$\mathbf{k}^e = \int_L \mathbf{B}^T(x) \mathbf{k}^s(x) \mathbf{B}(x) dx \quad (1)$$

其中:  $\mathbf{B}(x)$  为单元位移插值型函数矩阵;  $\mathbf{k}^s(x)$  为截面切线刚度矩阵。

## 1.2 BHE 纤维单元

BHE 纤维单元模型由端部的塑性铰单元和非塑性铰区的线弹性杆单元构成, 如图 2 所示。其中, 塑性铰单元可以模拟钢筋混凝土框架柱的非线性性态(包括剪切效应及钢筋混凝土黏结-滑移效应), 线弹性杆单元可以模拟钢筋混凝土柱的弹性反应, 而混凝土和钢筋的应力-应变关系则反映在各纤维束中。BHE 纤维单元的主要参数为塑性铰单元几何长度  $L_p$  与线弹性杆单元的等效刚度  $EI_{eff}$ 。

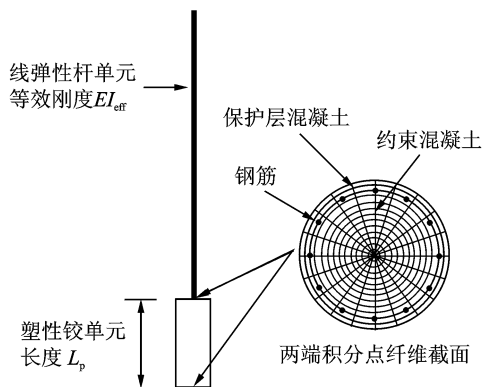


图2 钢筋混凝土框架柱BHE纤维单元模型

如果只考虑材料非线性, BHE 纤维单元的柔度矩阵可以表示为

$$\mathbf{f}^e = \mathbf{f}_p + \mathbf{f}_e \quad (2)$$

其中:  $\mathbf{f}_p$  为塑性铰区的柔度矩阵;  $\mathbf{f}_e$  为弹性区的柔度矩阵。

$\mathbf{f}_p, \mathbf{f}_e$  可以分别表示为

$$\mathbf{f}_p = \int_0^{L_p} \mathbf{b}^T(x) \mathbf{f}^s(x) \mathbf{b}(x) dx \quad (3)$$

$$\mathbf{f}_e = \int_{L_p}^L \mathbf{b}^T(x) \mathbf{f}_e^s(x) \mathbf{b}(x) dx \quad (4)$$

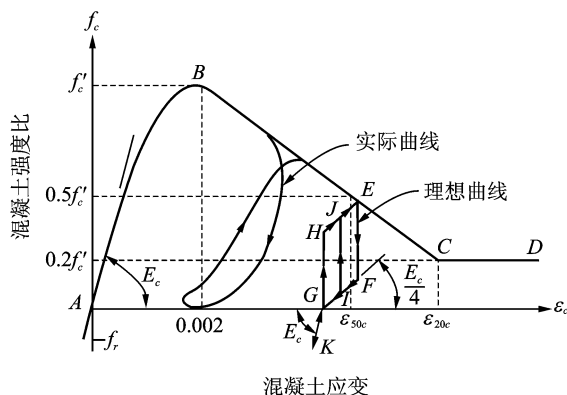
其中:  $\mathbf{b}(x)$  为单元力插值型函数矩阵;  $\mathbf{f}^s(x), \mathbf{f}_e^s(x)$  分别为塑性区和弹性区截面切线柔度矩阵。

## 2 材料本构关系

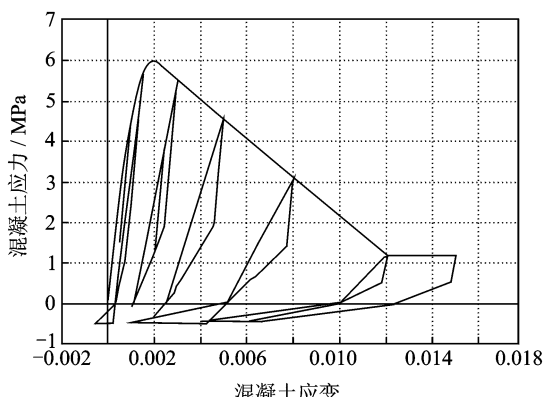
### 2.1 混凝土材料本构

混凝土纤维采用修正后的 Kent-Park<sup>[12]</sup> 模型,

其应力-应变关系如图 3 所示。



(a) 单轴抗压加载曲线



(b) 往复加载曲线

图3 混凝土应力-应变关系曲线

该模型可以通过改变混凝土受压骨架曲线的峰值应力、峰值应变以及软化段斜率来研究横向箍筋对混凝土的约束影响, 并且可以考虑混凝土的剩余强度的影响。混凝土受拉时的上升段和下降段均为直线, 可以考虑混凝土的初始开裂。其受压应力-应变关系可以表示为

$$\sigma_c = \begin{cases} Kf'_c [2\epsilon_c/\epsilon_0 - (\epsilon_c/\epsilon_0)^2] & (\epsilon_c < \epsilon_0) \\ Kf'_c [1 - Z_m(\epsilon_c - \epsilon_0)] & (\epsilon_0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{20}) \\ 0.2Kf'_c & (\epsilon_c > \epsilon_{20}) \end{cases} \quad (5)$$

$$\epsilon_0 = 0.002K \quad (6)$$

$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{yh}}{f'_c} \quad (7)$$

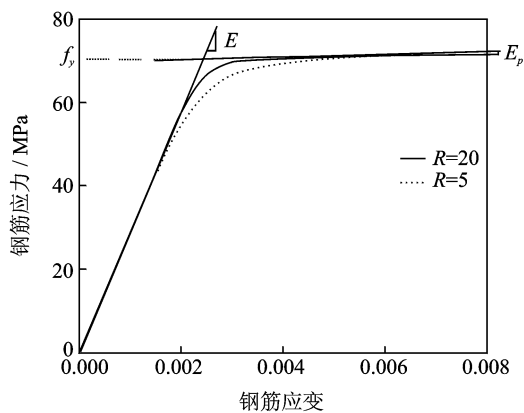
$$Z_m = \frac{0.5}{\frac{3 + 0.29f'_c}{145f'_c - 1000} + 0.75\rho_s \sqrt{\frac{h'}{s_h}} - 0.002K} \quad (8)$$

其中:  $K$  为约束所引起的混凝土强度增大系数;  $\epsilon_0$  为峰值应变;  $Z_m$  为应变软化段斜率;  $f'_c$  为混凝土圆柱体抗压强度;  $f_{yh}$  为箍筋屈服强度;  $\rho_s$  为体积配箍率;  $h'$  为核心混凝土宽度;  $s_h$  为箍筋间距。

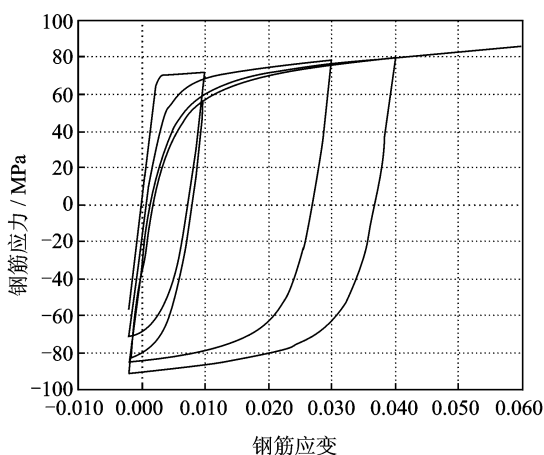
### 2.2 钢筋材料本构

钢筋纤维采用 Giuffrè-Menegotto-Pinto<sup>[13]</sup> 钢筋

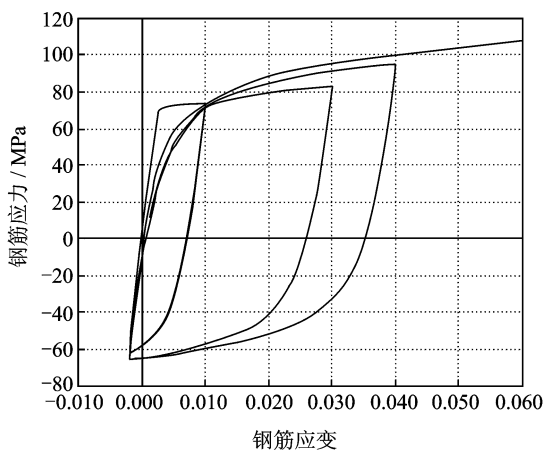
本构关系,其应力-应变关系如图4所示。



(a) 单轴加载曲线



(b) 压缩端往复加载曲线



(c) 拉伸端往复加载曲线

图4 钢筋应力-应变关系

钢筋骨架曲线为双折线型,该模型由于采用了应变显函数表达形式,因而计算方便,并且保持了与钢筋反复加载试验结果较好的一致性,可以反映钢筋的Bauschinger<sup>[14]</sup>效应。模型在数学上可以表示为

$$\sigma^* = b\varepsilon^* + \frac{(1-b)\varepsilon^*}{(1+\varepsilon^{*R})^{1/R}} \quad (9)$$

$$\sigma^* = (\sigma - \sigma_r) / (\sigma_0 - \sigma_r) \quad (10)$$

$$\varepsilon^* = (\varepsilon - \varepsilon_r) / (\varepsilon_0 - \varepsilon_r) \quad (11)$$

$$R = R_0 - \frac{a_1 \xi}{a_2 + \xi} \quad (12)$$

$$b = E_0 / E_1 \quad (13)$$

其中: $\sigma_0$ 与 $\varepsilon_0$ 分别为钢筋屈服点处的应力与应变; $\sigma_r$ 与 $\varepsilon_r$ 分别为钢筋反向点处的应力与应变; $b$ 为钢筋的硬化刚度 $E_1$ 与原点切线模量 $E_0$ 的比值; $R$ 为反映Bauschinger效应的参数; $R_0, a_1$ 与 $a_2$ 均为材料常数; $\xi$ 为上一循环塑性应变的绝对值。

### 3 钢筋混凝土单柱数值模拟算例

#### 3.1 模型试验概况

对中国建筑学会抗震防灾分会建筑结构抗倒塌专业委员会官方网站公布的钢筋混凝土框架单柱试验进行数值模拟。试验轴压力为140.78 kN,混凝土立方体强度 $f_{cu,150} = 30.1$  MPa,构件的详细尺寸和其他相关参数分别如图5和表1所示,试验的位移加载历程如图6(a)所示。

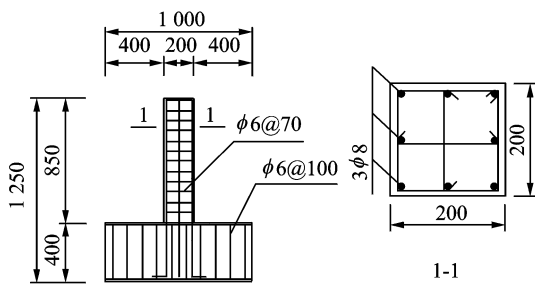


图5 钢筋混凝土框架柱配筋图(单位:mm)

表1 钢筋相关参数

材料类型	参数	平均值	材料类型	参数	平均值
纵筋 $\phi 8$	屈服强度/MPa	582	箍筋 $\phi 6$	屈服强度/MPa	441
	极限强度/MPa	855		极限强度/MPa	529
	屈服应变	0.002 0		屈服应变	0.002 2
	弹性模量/MPa	289 850		弹性模量/MPa	203 941
	伸长率/%	28.8		伸长率/%	34.2

#### 3.2 数值模拟

OpenSees 是应用于结构和岩土方面地震反应模拟的一个完全开放并不断发展的程序平台,可用于静力弹塑性分析、静力反复循环分析、动力时程分析等多个方面<sup>[15-16]</sup>。分别采用OpenSees 中的DBBC

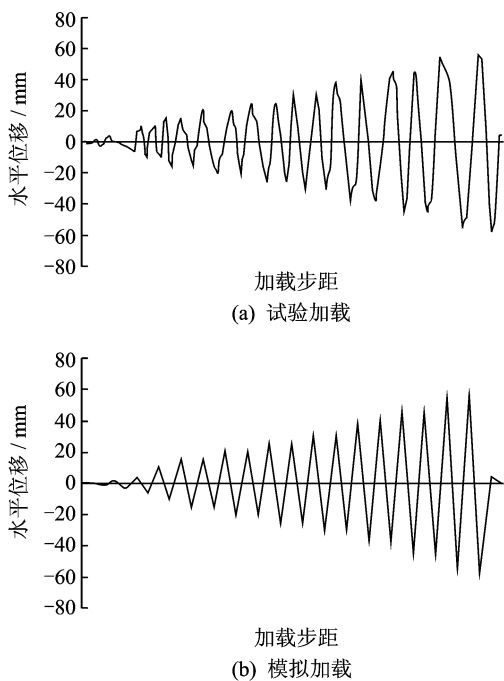


图6 位移加载历程

纤维单元模型和BHE纤维单元模型对该钢筋混凝土框架单柱拟静力试验进行数值模拟。将构件简化为一底部固定、上端自由的悬臂杆,分别如图7(a)和(b)所示。截面网格化为纤维模型,如图7(c)所示。计算时,先施加竖向集中荷载,进行相应的静力状态分析,再进行水平往复加载,同时保持上一步中已施加的竖向荷载作用的量值不变。加载采用位移控制的循环加载方式,以试验数据为参考,简化后的位移加载历程如图6(b)所示。数值模拟中混凝土和钢筋初始参数取值分别如表2和表3所示。

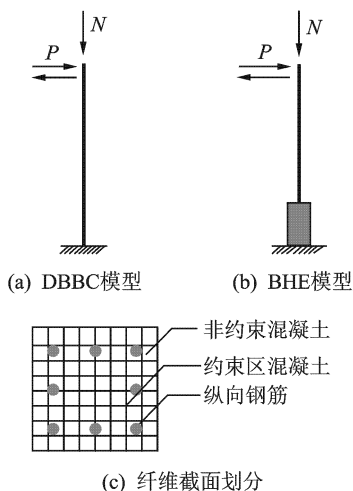


图7 数值模拟示意

在进行非线性数值分析时,将DBBC纤维单元和P-Delta转换器结合使用,考虑结构侧移引起的

2阶弯矩效应,以达到更好模拟梁柱构件实际变形的目的。采用BHE纤维单元进行数值模拟时,塑性铰长度分别为0.05,0.1,0.18和0.3 m,弹性区等效刚度取值为 $3.99 \times 10^4$  (kN·m<sup>2</sup>)。

表2 混凝土参数取值

混凝土	$f_c$ /MPa	$\epsilon_c$	$f_u$ /MPa	$\epsilon_u$	$\lambda$	$f_t$ /MPa	$E_{ts}$
非约束区	-23.78	-0.002 0	-4.76	-0.003 3	0.1	2.48	0.26
约束区	-28.53	-0.006 6	-5.71	-0.015 0	0.1	3.09	0.37

$f_c$ -轴心抗压强度; $\epsilon_c$ -达到轴心抗压强度时的应变; $f_u$ -极限抗压强度; $\epsilon_u$ -极限压应变; $\lambda$ -达到极限压应变时卸载刚度与初始弹性模量之比; $f_t$ -轴心受拉强度; $E_{ts}$ -受拉软化模量

表3 钢筋参数取值

$f_y$ /MPa	$E$ /MPa	$b$	$R_0$	$R_1$	$R_2$
582	289 850	0.01	10.0	0.925	0.15

$f_y$ -轴心抗压强度; $E$ -弹性模量; $b$ -屈服后刚度与弹性模量之比; $R_0, R_1, R_2$ -控制从弹性过渡到塑性的参数

分别将DBBC纤维单元模拟结果以及BHE纤维单元模拟结果与试验结果进行比较,如图8和图9所示。

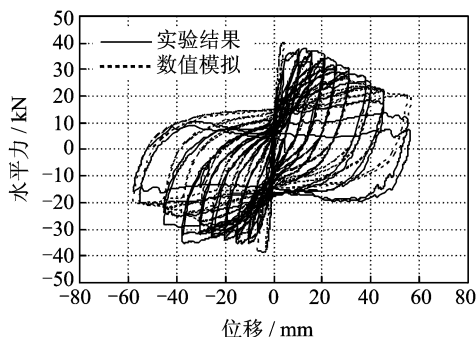
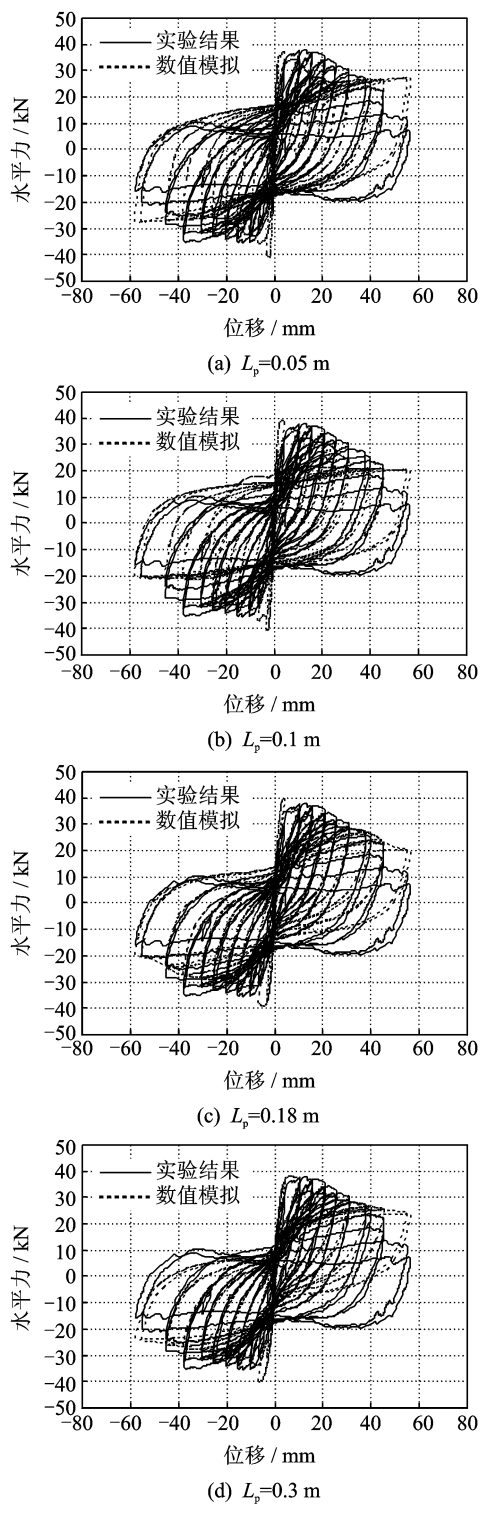


图8 DBBC模拟结果

## 4 计算结果讨论

试验结果显示,在钢筋混凝土柱加载后期,随着侧向位移的增大、荷载循环次数的增多,柱脚区混凝土压碎脱落,纵筋屈曲,钢筋混凝土柱侧向承载力及刚度不断降低。由图8和图9(c)可以看出,滞回曲线的模拟结果与试验结果吻合较好,这说明采用考虑P-Delta效应的DBBC纤维单元和带塑性铰的BHE纤维单元,对钢筋混凝土柱在循环荷载下的承载力和变形均有良好的预测效果,能够准确模拟循环荷载下钢筋混凝土柱的刚度与强度退化、卸载过程、捏拢现象等滞回特性。此外,纤维单元模型与实体单元

图9 不同 $L_p$ 下BHE模拟结果

模型相比自由度少,加上OpenSees分析模块具有灵活多样的非线性方程组求解方式和收敛迭代法则,用于低周反复水平荷载的静力非线性分析,都能达到较好的收敛,并且计算效率高、时间短。

模拟分析表明,对于DBBC纤维单元模型而言,构件反应的模拟效果受到构件单元离散数目的影

响。这主要是因为构件进入非线性阶段后,构件反应受到软化单元长度的控制,而软化单元长度又和单元离散数目有关;因此,单元离散数目是数值模拟需要考虑的一个关键问题。对于BHE纤维单元模型而言,选取不同的塑性铰长度对数值模拟的结果会产生较大的影响。这是由于进入非线性阶段后,单元的非线性变形将主要集中于一个积分点上,而这一个积分点的位置可以认为是塑性铰的长度;因此,选择合适的塑性铰长度对于建立钢筋混凝土柱有限元分析模型显得十分重要。

在对结构进行非线性数值模拟时,需要设定大量的材料本构参数,这些参数之间可能会相互影响,其中有些参数很难由试验直接测得,如果选取不当会导致分析结果的不可靠甚至分析失败。对于参数的取值问题,一方面需要数值模拟经验的积累,另一方面在于其中一些问题。例如,混凝土的本构关系在复杂应力状态下的破坏准则和应力应变关系理论等还不够成熟,有待于进行更加深入的研究。

## 5 结束语

基于OpenSees程序平台,采用DBBC和BHE两种纤维单元模型对循环荷载作用下的钢筋混凝土柱的非线性滞回反应进行了数值模拟,并和试验结果进行了比较。研究表明,纤维单元模型可以通过比较少的自由度建立构件整体结构模型,能够较真实地模拟钢筋混凝土柱在轴向力和侧向往复水平位移共同作用下的非线性行为,模拟结果较好地反映了钢筋混凝土柱在反复加载过程中刚度、强度退化和捏拢现象。材料本构关系中初始参数、DBBC中单元离散数目、BHE中的塑性铰长度等参数取值对数值模拟的可靠性和精度有着重要的影响,正确的参数设置能更真实、更准确地反映试件在实际工作中存在的各种非线性因素。

## 参 考 文 献

- [1] Spacone E, Filippou F, Taucer F. Fiber beam column modeling for nonlinear analysis of RC frames [J]. Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996,25:711-725.
- [2] Ambrisi D A, Filippou F. Modeling of cyclic shear behavior in RC members [J]. Journal of Structural Engineering, 1999,125(10):1143-1149.
- [3] Li Kangning. 3D analysis of RC frame wall building damaged in the 1995 Hyogoken Nanbu Earthquake

- [C]// Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering (CD-ROM). Auckland: [s. n.], 2000.
- [4] 叶列平, 陆新征, 马千里, 等. 混凝土结构抗震非线性分析模型、方法及算例[J]. 工程力学, 2006, 23(S2): 131-140.  
Ye Lieping, Lu Xinzhen, Ma Qianli, et al. Nonlinear analytical models, methods and examples for concrete structures subject to earthquake loading[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(S2): 131-140. (in Chinese)
- [5] 汪训流, 陆新征, 叶列平. 往复荷载下钢筋混凝土柱受力性能的数值模拟[J]. 工程力学, 2007, 24(12): 76-81.  
Wang Xunliu, Lu Xinzhen, Ye Lieping. Numerical simulation for the hysteresis behavior of RC columns under cyclic loads[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(12): 76-81. (in Chinese)
- [6] 何利, 叶献国. 钢筋混凝土柱滞回性能的数值模拟[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2010, 12(33): 1819-1823.  
He Li, Ye Xianguo. Numerical simulation on hysteresis performance of RC columns[J]. Journal of Hefei University of Technology: Edition of Natural Science, 2010, 12(33): 1819-1823. (in Chinese)
- [7] 秦从律, 张爱晖. 基于截面纤维模型的弹塑性时程分析方法[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2005, 39(7): 1003-1007.  
Qin Conglü, Zhang Aihui. Nonlinear time history analysis based on section fiber model[J]. Journal of Zhejiang University: Edition of Engineering Science, 2005, 39(7): 1003-1007. (in Chinese)
- [8] 宋国森, 李贵乾. 单柱墩拟静力试验仿真计算案例[J]. 公路交通科技, 2010, 27(4): 39-43.  
Song Guoseng, Li Guiqian. Simulation calculation for pseudo-static test of reinforced concrete single-column bridge piers[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(4): 39-43. (in Chinese)
- [9] 李贵乾, 郑罡, 高波. 基于OpenSees的钢筋混凝土桥墩拟静力试验数值分析[J]. 世界地震工程, 2011, 27(1): 110-114.  
Li Guiqian, Zheng Gang, Gao Bo. Numerical analysis for pseudo-static tests of reinforced concrete bridge columns based on OpenSees[J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(1): 110-114. (in Chinese)
- [10] 潘志宏, 李爱群. 基于纤维模型的外粘型钢加固混凝土柱静力弹塑性分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(3): 552-556.  
Pan Zhihong, Li Aiqun. Nonlinear static analysis on RC column strengthened with externally bonded steel frame based on fiber model[J]. Journal of Southeast University: Edition of Natural Science, 2009, 39(3): 552-556. (in Chinese)
- [11] Mazzoni S, McKenna F, Fenves G L, et al. Open system for earthquake engineering simulation user manual[EB/OL]. [2009-10-30]. <http://www.opensees.berkeley.edu>.
- [12] Kent D C, Park R. Flexural members with confined-concrete[J]. Journal of the Structural Division, 1971, 97(7): 1969-1990.
- [13] Menegotto M, Pinto P E. Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending [C]// Proceedings of the Conference on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads. Lisbon: International Association for Bridge and Structural Engineering, 1973: 15-22.
- [14] Filippou F C. Effects of bond deterioration on seismic response of reinforced concrete frame[D]. Berkeley, CA: University of California, 1983.
- [15] Silvia M, Frank M, Michael H S, et al. OpenSees command language manual[EB/OL]. [2008-11-12]. <http://opensees.berkeley.edu>.
- [16] Silvia M, Frank M, Michael H S, et al. OpenSees examples primer [EB/OL]. [2008-11-12]. <http://opensees.berkeley.edu>.



第一作者简介: 孙广俊, 男, 1979年10月生, 博士后, 讲师。主要研究方向为工程抗震与减震。曾发表《首都机场AMECO-A380六机位机库动力测试与分析》《《振动、测试与诊断》2010年第30卷第2期》等论文。

E-mail: gjsun2004@163.com