

基于性能设计方法的钢筋混凝土柱构件分析

万海涛¹, 韩小雷^{1,2}, 季静^{1,2}

- (1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州, 510640;
2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州, 510640)

摘要:采用软件 ABAQUS 对一批钢筋混凝土柱试验进行有限元模拟, 模拟时对混凝土和钢筋的材料本构进行设置, 模拟结束后即可获得该批柱的荷载-位移骨架曲线, 并将试验结果和模拟结果进行对比。然后, 采用软件 ABAQUS 模拟不同类型的钢筋混凝土框架柱, 并获得该批柱的荷载-位移骨架曲线或弯矩-转角曲线。参考基于性能设计方法, 将曲线按照不同因素进行分类, 并由这些曲线得出柱的塑性转角限值。研究结果表明, 有限元模拟可以较准确地模拟试验情况, 柱的性能参数能为柱的性能评估提供定量参考指标。

关键词:有限元模拟; 钢筋混凝土柱; 荷载-位移骨架曲线; 塑性转角限值

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2010)04-1584-06

Analyses of reinforced concrete columns by performance-based design method

WAN Hai-tao¹, HAN Xiao-lei^{1,2}, JI Jing^{1,2}

- (1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The software ABAQUS was used to perform the finite element simulation of a group of reinforced concrete column tests, the material constitutive of concrete and reinforcement were set up in simulation. The load-displacement skeleton curves of the columns were obtained after the completion of the simulation. Test results and simulation results were compared. Then, the software ABAQUS was also used to simulate different types of reinforced concrete frame columns, and load-displacement skeleton curves or moment-rotation curves of the columns were obtained. Referenced to the performance-based design method, the curves were classified according to different factors. The performance parameters of columns including the plastic rotation limits were obtained from the curves. The results show that the finite element simulation can accurately simulate the test situation. Performance parameters can provide quantitative reference index for the column performance evaluation.

Key words: finite element simulation; reinforced concrete columns; load-displacement skeleton curves; plastic rotation limits

钢筋混凝土框架结构是我国使用非常广泛的建筑结构类型,而在钢筋混凝土框架结构中,钢筋混凝土柱是特别重要的抗震构件,它作为竖向承重构件,承载着整个结构的全部竖向荷载和由水平力引起的附加

荷载,一旦破坏就会危及整栋建筑的安全。国内外对钢筋混凝土柱进行了大量的研究^[1-5],但研究者大多主要关注构件承载力等因素^[6-11],而对柱构件仍停留在基于承载力的研究,并没有对柱本身的结构性能进行

收稿日期: 2009-12-01; 修回日期: 2010-05-17

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAJ04A12); 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室自主研究项目(2008ZA08, 2009ZA04)

通信作者: 万海涛(1979-),男,江西临川人,博士研究生,从事结构抗震性能研究;电话: 13129369187, 020-87113349; E-mail: wht110119040@163.com

深入研究。本文作者采用基于性能设计方法, 结合我国自身的地震水平等因素对不同破坏类型的柱构件进行性能分析, 并且对不同破坏类型的柱构件采用不同的性能参数, 将传统的基于力的研究方法转化成基于构件性能的研究方法。

1 试验的有限元模拟

采用大型通用软件 ABAQUS^[12-13]对 6 根钢筋混凝土柱试验结果^[14]进行有限元模拟, 以验证有限元模拟的正确性。

1.1 试验试件尺寸和材料参数描述

试件截面采用对称配筋, 保护层厚度取 25 mm, 柱的尺寸(长 × 宽 × 高)为 250 mm × 150 mm × 800 mm, 基础的尺寸(长 × 宽 × 高)均为 1 000 mm × 500 mm × 400 mm。试件材料参数如表 1 所示。

表 1 试验试件材料参数

Table 1 Material parameters of test specimen

试件	混凝土强度等级	柱纵筋	箍筋	竖向荷载/kN
Z4F-1	C30	2Φ ^F 16	Φ ^F 8@100	131
Z4F-2	C30	2Φ ^F 16	Φ ^F 8@60	262
Z4F-3	C50	2Φ ^F 16	Φ ^F 8@60	211
Z4F-4	C50	2Φ ^F 16	Φ ^F 8@100	422
Z4-5	C30	2Φ16	Φ8@100	139
Z4-6	C50	2Φ16	Φ8@60	447

注: Φ^F代表 400 MPa 细晶粒碳素钢筋; Φ代表 HRB400 级钢筋; Φ代表 HRB335 级钢筋。

1.2 ABAQUS 建模中材料的本构关系

1.2.1 混凝土单轴受压应力-应变关系

Hognestad 表达式是目前描述混凝土单轴受压应力-应变关系最为广泛的曲线之一, 其形式简单, 易于使用。ABAQUS 模型中混凝土单轴受压时采用 Hognestad 的上升段二次抛物线和下降段直线的应力-应变关系曲线。其曲线形状如图 1 所示, 其关系式如下。

当 $\varepsilon_c < \varepsilon_o$ 时(上升段),

$$\sigma_c = f_c \left[2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right)^2 \right] \quad (1)$$

当 $\varepsilon_o < \varepsilon_c < \varepsilon_u$ 时(下降段),

$$\sigma_c = f_c \left[1 - \gamma \left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_o}{\varepsilon_u - \varepsilon_o} \right) \right] \quad (2)$$

式中: ε_o 为峰值应变, 一般取 0.002; f_c 为峰值应力, 本模型选用棱柱体抗压强度, 它来自于实测的试块强度; ε_u 为极限压应变, 取 0.003 8; 分项系数 γ 取 0.15。

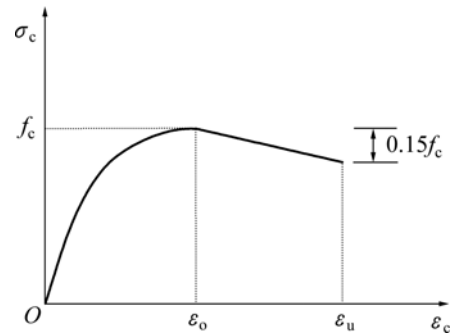


图 1 混凝土受压应力-应变全曲线

Fig.1 Stress-strain curve of concrete under uniaxial compression

1.2.2 混凝土单轴受拉应力-应变关系

ABAQUS 模型中混凝土单轴受拉的应力-应变关系采用二折线, 如图 2 所示。其关系式如下:

当 $\varepsilon_c < \varepsilon_{cr}$ 时,

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c \quad (3)$$

当 $\varepsilon_{cr} < \varepsilon_c < \varepsilon_{tu}$ 时,

$$\sigma_c = f_t \left(1 - \alpha_t \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{cr}}{\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{cr}} \right) \quad (4)$$

式中: E_c 为混凝土初始弹性模量; f_t 为混凝土的抗拉强度(在缺乏试验数据的条件下, 一般取抗压强度的 1/10); ε_{cr} 为对应于抗拉强度的开裂应变; ε_{tu} 为极限拉应变, 本模型中取 0.01; α_t 为极限拉应力与抗拉强度之比, 本模型中取 0.9。

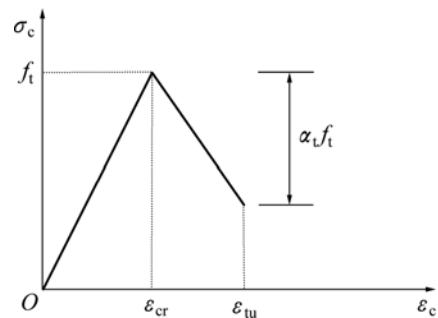


图 2 混凝土受拉应力-应变全曲线

Fig.2 Stress-strain curve of concrete under uniaxial tension

1.2.3 钢筋的应力-应变关系

对于柱构件中所有钢筋的应力-应变关系都采用双线性强化模型,如图 3 所示。其关系式如下:

当 $\varepsilon < \varepsilon_y$ 时,

$$\sigma_s = E_s \varepsilon \quad (5)$$

当 $\varepsilon_y < \varepsilon < \varepsilon_u$ 时,

$$\sigma_s = f_y + \frac{f_u - f_y}{\varepsilon_u - \varepsilon_y} (\varepsilon - \varepsilon_y) \quad (6)$$

式中: E_s 为钢筋的弹性模量; f_u 和 ε_u 分别为极限抗拉强度和极限抗拉应变; f_y 和 ε_y 分别为屈服强度和屈服应变。上述参数均取试验所测得的实际值。

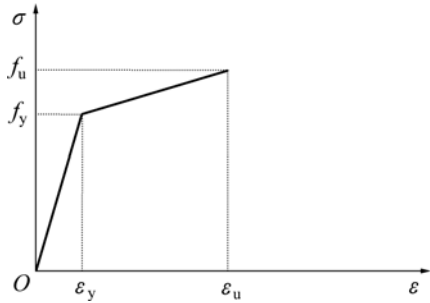


图 3 钢筋应力-应变全曲线
Fig.3 Stress-strain curve of reinforcement

1.3 建立有限元模型的简单说明

建模原理基于静力弹塑性分析(PUSHOVER)方法,用位移单向加载对柱构件进行推覆分析。柱构件和基础为混凝土材料,采用三维实体单元 C3D8R,加载板采用厚度为 30 mm,长×宽为 300 mm×300 mm 的钢板,也采用三维实体单元 C3D8R,钢筋采用三维空间杆单元 T3D2。图 4 所示为柱构件 Z4F-1 有限元模型。

2 模拟结果和试验结果对比分析

文献[14]中的试验先对试件施加竖向荷载且保持一定的时间,再施加水平低周反复荷载,并将仪器记录的力和位移数据转化成荷载-位移($F-\Delta$)滞回曲线,最后将滞回曲线的特征点连起来拟合出试验 $F-\Delta$ 骨架曲线。而 ABAQUS 模拟是单调位移推覆,能够直接得到 $F-\Delta$ 骨架曲线。将试验拟合的 $F-\Delta$ 骨架曲线和 ABAQUS 模拟的 $F-\Delta$ 骨架曲线绘于同一坐标系中,如图 5 所示。两者的荷载-位移骨架曲线在屈服点、峰值点、极限点这些特征点上的荷载和位移可用

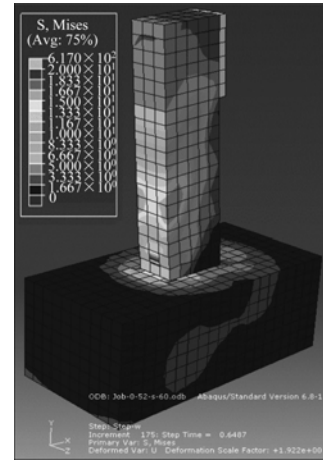
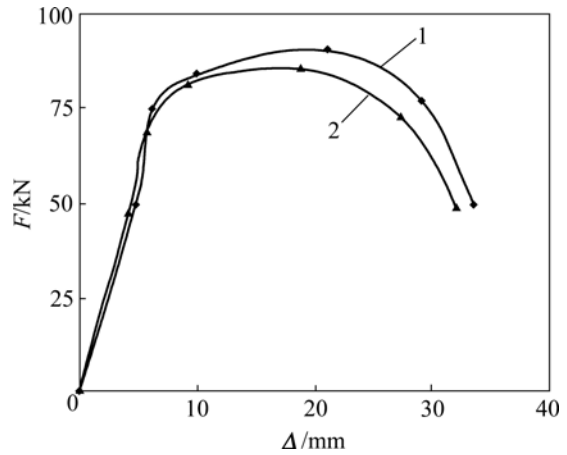


图 4 柱 Z4F-1 有限元模型

Fig.4 Finite element model of Z4F-1 column



1—试验拟合; 2—ABAQUS 模拟

图 5 柱 Z4F-1 骨架曲线的对比
Fig.5 Comparison of skeleton curve for column Z4F-1

于对比分析。文献[14]中的试验是从正、反两面水平低周反复加载,分析其特征点上的荷载和位移,发现:试验反向加载时的结果较为合理。反向加载时的结果和 ABAQUS 模拟结果对比如表 2 所示。

由图 5 可知:试验拟合的骨架曲线与 ABAQUS 模拟的骨架曲线形态类似,数值接近。由表 2 可知,两者的荷载-位移骨架曲线在屈服点、峰值点、极限点这些特征点上的荷载和位移也很接近,均在允许差值范围内。由此可知:ABAQUS 建立的分析模型可以较准确地模拟试验情况。因此,通过软件 ABAQUS 同样可以获取其他不同类型柱的荷载-位移骨架曲线。

3 柱的性能参数分析

试验研究和理论分析结果表明^[15]:当柱的剪跨比

表 2 骨架曲线上特征点的对比

Table 2 Comparison of feature points in skeleton curve

试件	试验拟合(反向加载)			ABAQUS 模拟(单调加载)			
	屈服点	峰值点	极限点	屈服点	峰值点	极限点	
Z4F-1	水平位移/mm	6.19	21.08	29.20	5.87	18.99	27.33
	水平荷载/kN	74.90	90.62	77.03	68.98	85.62	72.78
Z4F-2	水平位移/mm	5.40	16.18	37.66	5.51	15.02	35.34
	水平荷载/kN	79.60	97.15	82.58	75.33	89.71	76.25
Z4F-3	水平位移/mm	4.20	7.92	39.11	4.26	7.64	36.14
	水平荷载/kN	78.77	103.95	88.36	73.69	97.91	83.22
Z4F-4	水平位移/mm	4.27	7.97	22.20	3.92	7.21	21.61
	水平荷载/kN	108.18	133.20	113.22	99.65	128.85	109.52
Z4-5	水平位移/mm	8.37	21.22	42.22	7.72	20.09	39.66
	水平荷载/kN	52.75	63.66	56.22	50.18	60.80	51.68
Z4-6	水平位移/mm	5.40	10.17	26.92	5.37	9.88	25.67
	水平荷载/kN	152.41	183.82	156.25	146.92	177.70	151.05

注: 试验荷载和 ABAQUS 中的荷载极限均取荷载峰值的 0.85 倍。

$\lambda > 4$ 时, 柱构件破坏形态是弯曲破坏, 属于延性破坏; 当 $\lambda < 2$ 时, 柱构件破坏形态是剪切破坏, 属于脆性破坏; 当 $2 < \lambda < 4$ 时, 柱构件破坏形态是弯剪破坏。要对柱构件进行性能参数分析, 可先将柱按剪跨比分为如下三大类: 弯曲破坏型($\lambda > 4$); 弯剪破坏型($2 < \lambda < 4$); 剪切破坏型($\lambda < 2$)。

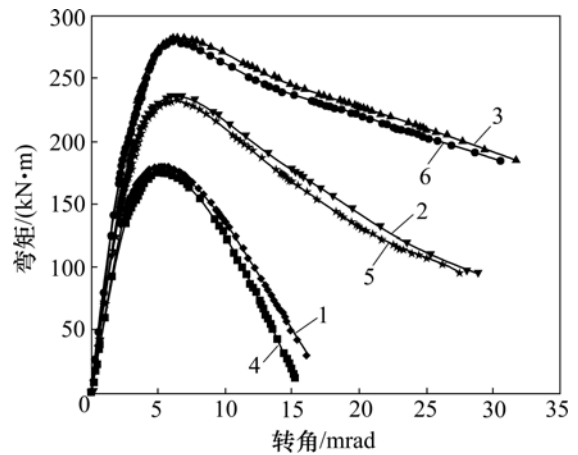
我国规范对柱构件的抗震性能分析仍是一种基于承载力的分析, 本文参考基于性能设计方法, 将柱构件变形作为研究柱抗震性能的主要物理量, 这样就可将传统的基于力的研究方法转化为基于构件性能的研究方法。构件变形的性能参数可按柱的破坏类型采用不同的参数, 对于弯曲破坏型的柱, 采用构件弯曲塑性转角来进行性能参数分析; 对于剪切破坏型的柱, 采用构件剪切塑性转角对性能参数进行分析; 对于弯剪破坏型的柱, 这种介于弯压破坏和剪切破坏的柱, 为了保证柱构件的有足够的安全度, 也采用构件剪切塑性转角对性能参数进行分析。

3.1 $\lambda > 4$ 时钢筋混凝土柱的性能参数

为了研究弯曲破坏型柱($\lambda > 4$)的抗震性能, 设计剪跨比 $\lambda=4$ 的一批柱来进行性能参数分析。

利用软件 ABAQUS 通过求截面应力和应变获得柱的弯矩-转角($M-\theta$)的骨架曲线, 并将这些曲线按照按照轴压比 $n=0.1, 0.2, \dots, 0.9$ 分类绘制于同一坐标中。当 $n=0.9$ 时, 试验柱 C-49~C-54 的弯矩-转角关系如图 6 所示。

由上述柱构件的弯矩-转角($M-\theta$)曲线可获取柱



1—C-49; 2—C-50; 3—C-51; 4—C-52; 5—C-53; 6—C-54

图 6 $n=0.9$ 时柱的弯矩-转角曲线

Fig.6 Moment-rotation curves of column with $n=0.9$

构件在屈服荷载、峰值荷载、极限荷载时所对应的截面转角。柱构件处于屈服状态时的屈服荷载相当于构件处于小震时的受力状态, 柱构件处于极限状态时的极限荷载相当于构件在大震时的受力状态。从柱构件低周反复试验中可发现: 当构件处于峰值荷载时, 构件破坏不是很严重, 可视柱构件达到峰值荷载时相当于构件处于中震时的受力状态。因此, 每个柱构件在小震、中震、大震时的截面转角可由柱的弯矩-转角($M-\theta$)曲线获取, 并选出同类型柱构件(n 相同的柱)分别在小震、中震、大震时的截面转角最小值, 将这些最小值作为该类柱分别在小震、中震、大震时的截面

转角限值。对于弯曲破坏型的柱，采用弯曲塑性转角作为性能参数，因此，中震时的塑性转角为中震时的截面转角减去小震的截面转角；大震时的塑性转角为大震时的截面转角减去小震的截面转角；小震时构件处于弹性构件，塑性转角为 0 rad。综上所述，弯曲破坏类型柱的性能参数如表 3 所示。

表 3 λ = 4 时钢筋混凝土柱的性能参数

Table 3 Performance parameters of reinforced concrete columns when λ = 4

柱的轴 压比	箍筋是否 符合规范	弯曲塑性转角限值/mrad		
		小震	中震	大震
0.1	是	0	15.5	19.9
0.2	是	0	13.1	16.8
0.3	是	0	11.6	14.9
0.4	是	0	10.6	13.8
0.5	是	0	9.5	12.6
0.6	是	0	8.3	11.8
0.7	是	0	6.8	9.5
0.8	是	0	5.2	7.3
0.9	是	0	4.0	6.4

注：当数值超出表中规定范围时，可以采用线性插值方法确定对应值。

3.2 2 < λ < 4 的钢筋混凝土柱性能参数

为了研究弯剪破坏型柱(2 < λ < 4)的抗震性能，设计剪跨比λ=3 的一批柱来进行性能参数分析。对于弯剪破坏型柱，构件的剪切变形角的计算公式如下：

$$\theta = \frac{\Delta}{l} \tag{7}$$

式中：Δ 为构件顶端在水平荷载作用下产生的位移，可由荷载-位移骨架曲线得到；l 为构件的净高。

由 ABAQUS 直接获得柱的荷载-位移骨架曲线，与上述做法类似，将荷载-位移骨架曲线按轴压比先分类，并选出同类型柱构件(n 相同的柱)分别在小震、中震、大震时的位移最小值。将这些位移最小值除以相应的构件的净高，就可得到该类柱分别在小震、中震、大震时的剪切变形角最小值，将这些最小值分别作为该类柱在小震、中震、大震时的剪切变形角限值。中震和大震的剪切塑性转角是将中震和大震的剪切变形角分别减去小震的剪切变形角。弯剪破坏型柱的性能参数如表 4 所示。

表 4 2 < λ < 4 时钢筋混凝土柱的性能参数

Table 4 Performance parameters of reinforced concrete columns when 2 < λ < 4

柱的轴 压比	箍筋是否 符合规范	剪切塑性转角限值/mrad		
		小震	中震	大震
0.1	是	0	15.2	19.2
0.2	是	0	14.3	17.6
0.3	是	0	13.5	16.4
0.4	是	0	11.3	14.1
0.5	是	0	9.2	12.1
0.6	是	0	7.8	10.3
0.7	是	0	6.1	9.5
0.8	是	0	4.6	8.2
0.9	是	0	3.7	6.7

注：当数值超出表中规定范围时，可以采用线性插值方法确定对应值。

3.3 λ = 2 时钢筋混凝土柱的性能参数

为了研究剪切破坏型柱(λ = 2)的抗震性能，设计剪跨比λ=2 的一批柱来进行性能参数分析。对于剪切破坏型柱，采用剪切塑性转角作为性能参数。具体做法和前面一样。剪切破坏型柱的性能参数如表 5 所示。

表 5 λ = 2 时钢筋混凝土柱的性能参数

Table 5 Performance parameters of reinforced concrete columns when λ = 2

柱的轴 压比	箍筋是否 符合规范	剪切塑性转角限值/mrad		
		小震	中震	大震
0.1	是	0	14.6	17.3
0.2	是	0	13.9	15.2
0.3	是	0	12.3	13.8
0.4	是	0	10.9	12.5
0.5	是	0	9.2	11.7
0.6	是	0	6.1	9.8
0.7	是	0	5.5	8.7
0.8	是	0	3.7	6.1
0.9	是	0	2.2	5.6

注：当数值超出表中规定范围时，可以采用线性插值方法确定对应值。

4 结论

(1) 采用软件ABAQUS进行一系列柱构件的有限元模拟可以较准确地模拟试验情况,并且可以得到不同类型柱的荷载-位移骨架曲线和弯矩-转角骨架曲线。

(2) 将不同类型柱按不同的破坏类型(不同剪跨比)进行分类,对不同类型的柱给出不同的性能参数:对弯曲破坏类型柱采用弯曲塑性转角作为性能参数,对弯剪破坏类型和剪切破坏类型的柱都采用剪切塑性转角作为性能参数,可得到这些柱构件在不同地震水准下的性能参数限值。

(3) 柱构件的性能参数能为今后既有的、在建的框架结构中柱构件的性能评估提供定量参考指标。

参考文献:

- [1] 薛伟辰,程斌,李杰. 双层双跨高性能混凝土框架抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(3): 58-65.
XUE Wei-chen, CHENG Bin, LI Jie. Study on the seismic performance of double-story and double-span HPC frames[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(3): 58-65.
- [2] 郭子雄,吕西林. 高轴压比框架柱恢复力模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(5): 32-38.
GUO Zi-xiong, LÜ Xi-lin. Experimental study on the hysteretic model of RC columns with high axial compressive ratio[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(5): 32-38.
- [3] 刘伯权,白国良,张国军. 高轴压比高强混凝土框架柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 45-50.
LIU Bo-quan, BAI Guo-liang, ZHANG Guo-jun. An experimental study on the seismic behavior of high strength reinforced concrete frame columns with high axial compression ratio[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(1): 45-50.
- [4] Michael B, Myles P, Marc E. PEER structural performance database[EB/OL]. [2004-12-12]. <http://nisee.berkeley.edu>.
- [5] Thomsen J, Wallace J. Lateral load behavior of reinforced concrete columns constructed using high-strength materials[J]. ACI Structural Journal, 1994, 91(5): 605-615.
- [6] Xiao Y, Yun H W. Experimental studies on full-scale high-strength concrete columns[J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(2): 199-207.
- [7] Sezen H, Moehle J P. Seismic behavior of shear-critical reinforced concrete building columns[C]//Seventh U.S.National Conference on Earthquake Engineering. Boston, Massachusetts, 2002: 21-25.
- [8] Xiao Y, Martirosyan A. Seismic performance of high-strength concrete columns[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(3): 241-251.
- [9] Soesianawati M T, Park R, Priestley M J N. Limited ductility design of reinforced concrete columns[R]. Christchurch: University of Canterbury. Department of Civil Engineering, 1986: 1-8.
- [10] 白绍良,张友为,黄宗明. 不同轴压比下钢筋混凝土柱的低周疲劳性能[J]. 重庆建筑大学学报, 1997, 19(3): 1-6.
BAI Shao-liang, ZHANG You-wei, HUANG Zong-ming. Cyclic fatigue behaviors of reinforced concrete columns with various axial force ratios[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1997, 19(3): 1-6.
- [11] 杨君. 钢筋混凝土框架结构基于位移的抗震设计理论和方法[D]. 西安: 西安建筑科技大学土木工程学院, 2007: 20-28.
YANG Jun. Displacement-based design theory and method of reinforced concrete frame structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology. School of Civil Engineering, 2007: 20-28.
- [12] 庄茁,张帆,由小川,等. ABAQUS非线性有限元分析与实例[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 52-58.
ZHUANG Zhuo, ZHANG Fan, YOU Xiao-chuan, et al. Nonlinear finite element analysis and examples of ABAQUS[M]. Beijing: Science Press, 2005: 52-58.
- [13] 石亦平,周玉容. ABAQUS有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 9-25.
SHI Yi-ping, ZHOU Yu-rong. Finite element analysis and example explanation of ABAQUS[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 9-25.
- [14] 徐伟栋. 配置高强钢筋的混凝土柱抗震性能研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2007: 18-36.
XU Wei-dong. Seismic behavior of concrete columns with high strength steel bars[D]. Shanghai: Tongji University. School of Civil Engineering, 2007: 18-36.
- [15] 周靖. 钢筋混凝土框架结构基于性能系数抗震设计法的基础研究[D]. 广州: 华南理工大学土木与交通学院, 2006: 103-105.
ZHOU Jing. Basic research of behaviour factor-based seismic design method of RC frame structure[D]. Guangzhou: South China University of Technology. School of Civil Engineering and Transportation, 2006: 103-105.

(编辑 赵俊)