

文章编号: 1000-1301(2011)01-0124-06

## 7 度区典型框架教学楼抗震加强措施效果对比

陆新征<sup>1,2</sup>, 马玉虎<sup>2</sup>, 陈浩宇<sup>2</sup>, 周 萌<sup>2</sup>, 叶列平<sup>2</sup>

(1. 上海建科院 上海市工程结构新技术重点实验室, 上海 200032 2. 清华大学土木工程系,  
清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 由于汶川地震导致大量中小学校建筑倒塌, 造成巨大伤亡, 住建部、中国工程院和中国地震局分别提出了不同的校舍抗震设计加强要求, 但这些加强措施的实际抗倒塌效果尚缺乏定量研究。本文采用纤维梁模型, 并选择合适的箍筋约束混凝土本构, 对汶川地震 7 度区典型钢筋混凝土框架结构教学楼进行了基于 IDA 的倒塌率分析, 研究了不同抗震加强措施的防倒塌效果, 进而给出了相应的设计建议。

**关键词:** 汶川地震; RC 框架结构; 倒塌率; 防倒塌对策; 抗震措施

中图分类号: TU 352

文献标志码: A

## Comparison among different strengthening methods for a typical RC classroom frame in zones with seismic intensity VII

LU Xinzheng<sup>1,2</sup>, MA Yuhu<sup>2</sup>, Chen Haoyu<sup>2</sup>, ZHOU Meng<sup>2</sup>, YE Lieping<sup>2</sup>

(1. Shanghai Key Laboratory of New Technology Research on Engineering Structure, SRIBS, Shanghai 200032, China  
2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Beijing 100084, China)

**Abstract** In the Wenchuan Earthquake, many school buildings collapsed, which caused serious casualties. So after the earthquake, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, China Academic of Engineering and China Earthquake Administrator proposed different strengthening methods to upgrade the seismic design of school buildings. However, the actual effects of these proposals have not been quantitatively evaluated. So in this work, fiber beam element model with validated stirrups confined concrete constitutive law is used to build the nonlinear finite element model of a typical reinforced concrete (RC) classroom frame in zones with seismic intensity VII during the Wenchuan Earthquake. The effects of different strengthening methods on collapse resistance are studied with collapse fragility analysis that is based on the incremental dynamic analysis (IDA). Further design suggestions are then proposed.

**Key words** Wenchuan earthquake; RC frame structure; collapse possibility; collapse prevention; strengthening method

收稿日期: 2010-08-03 修订日期: 2010-09-16

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2009BAJ28B01); 工程院重大咨询项目 (2010-ZD-4); 国家自然科学基金重点项目 (90815025); 上海市工程结构新技术重点实验室开放课题 (2010-KF04)

作者简介: 陆新征 (1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事防灾减灾和非线性计算研究. E-mail: lux@tsinghua.edu.cn

## 引言

2008 年的汶川 M 8.0 特大地震中, 不少地震区遭遇烈度远超过设防烈度, 导致大量建筑倒塌破坏, 特别是大量中小学建筑的倒塌造成重大人员伤亡。倒塌的建筑中不仅有大量的老旧建筑, 也有按 01 版《抗震规范》设计建造的新建筑<sup>[1]</sup>。例如, 位于汶川地震震中映秀镇附近的漩口中学, 其于 2007 年新建的教学楼群发生了严重破坏(图 1)<sup>[2]</sup>, 部分在余震中倒塌。因此, 在汶川地震后, 特大地震下校舍建筑抗倒塌能力引起工程抗震领域的高度重视。

针对汶川地震暴露出的校舍建筑抗震能力不足的问题, 我国不同部门先后提出了多个相关建议, 其规定的差异以及对 7 度(0.1g)地区的影响如表 1 所示。

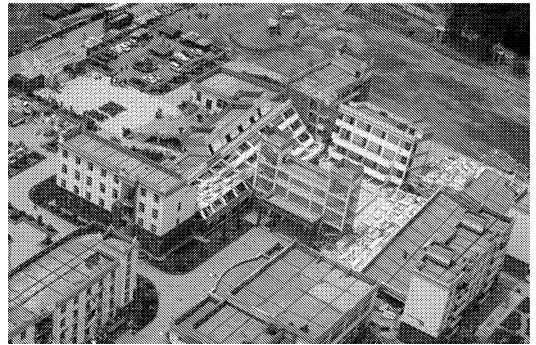


图 1 漩口中学建筑震害示意图(新华社照片)

Fig. 1 Seismic damage to buildings in Xuankou Middle School

表 1 不同部门建议的校舍抗震加强要求对比

Table 1 Comparison of seismic strengthening requirements for school buildings among different administrations

名称	《建筑工程抗震设防分类标准 GB50223-2008》(以下简称《设防标准》) <sup>[3]</sup>	《关于学校、医院等人员密集场所建设工程抗震设防要求确定原则的通知》(中震防发〔2009〕)(以下简称《通知》) <sup>[4]</sup>	《汶川地震建筑震害分析与重建研讨会建议书》(以下简称《建议书》) <sup>[5]</sup>
提出部门	住建部	中国地震局	中国工程院
要求	教育建筑中, 幼儿园、小学、中学的教学用房以及学生宿舍和食堂, 抗震设防类别不应低于重点设防类(乙类)	以国家标准《中国地震动参数区划图》为基础, 适当提高地震动峰值加速度取值, 特征周期分区值不作调整, 作为此类建设工程的抗震设防要求	对灾害发生时逃生能力差的人员的建筑, 包括如幼儿园、中小学、老人院等, 应达到大震可修的抗震设防目标
对抗震设计的影响 (以 7 度区(0.1g)为例)	地震力不提高, 抗震措施从丙类提高至乙类	地震动峰值加速度提高至 0.15g 相当于要求将抗震设防烈度提高半度	相当于要求将抗震设防烈度提高 1 度, 按照 8 度进行设计

由表 1 可见, 不同部门的规定差异甚大, 而相应的抗地震倒塌效果却尚未见系统研究, 工程人员在实践中也有很多困惑。因此, 本文以漩口中学典型钢筋混凝土(RC)框架教学楼为例, 采用动力增量分析方法(Incremental Dynamic Analysis, 简称 IDA), 以强震下结构的倒塌率作为评价指标, 研究不同抗震加强措施对校舍建筑抗地震倒塌能力的影响, 供工程设计参考。

## 1 箍筋约束混凝土模型

《设防标准》<sup>[3]</sup>将抗震措施从丙类提高到乙类, 对于框架结构而言, 主要是通过更严格的轴压比限制及更强的箍筋约束要求来提高其变形能力<sup>[6]</sup>。为定量研究相关抗震措施对结构抗震性能的影响, 需要在非线性模型中正确合理考虑箍筋约束与结构变形性能之间的关系<sup>[7]</sup>。因此, 必须对箍筋约束混凝土模型进行详细论证。箍筋约束混凝土国内外学者已经进行了大量的研究, 表 2 汇总了较为常用的 7 种适用于普通箍筋约束矩形混凝土构件的本构模型。

表 2 箍筋约束混凝土单轴模型

Table 2 Uniaxial stress-strain relations for stirrups confined concrete

模型	上升段	下降段	参数取值
SR <sup>[8]</sup>	$y = (2x - x^2)^{1/(1+K)}$	$f_c = f_{cc} - Z(\epsilon_c - \epsilon_{cc})$	$K = \frac{k_1 f_c'}{f_{cc}'}, Z = \frac{0.15 f_{cc}}{\epsilon_{gs} - \epsilon_{cc}}$
UC <sup>[9]</sup>	$y = \frac{kx}{k-1+x^k}$	$y = \exp[k_1(\epsilon_c - \epsilon_{cc})^{k_2}]$	$k = \frac{E_{ct}}{E_{ct} - f_{cc} / \epsilon_{cc}}, k_1 = \frac{\ln 0.5}{(\epsilon_{30} - \epsilon_{cc})^{k_2}}, k_2 = 1 + 25(L_{50})^2$
HKNT <sup>[10]</sup>	$f_c = E_c \epsilon_c (1 - \frac{1}{n} x^{n-1})$	$f_c = f_{cc} - E_{des}(\epsilon_c - \epsilon_{cc})$	$E_{des} = \frac{11.2 f_{cc}^2}{\rho_{sh} f_{yh}}$
BN <sup>[11]</sup>	$y = \frac{nx}{n-1+x^n}$	$f_c = f_{cc} - E_{soft}(\epsilon_c - \epsilon_{cc})$	$E_{soft} = 4f_{cc}^2 / k_e \rho_{sh} f_{yh}, n = \frac{E_c \epsilon_{cc}}{E_c \epsilon_{cc} - f_{cc}}$
Qian <sup>[12]</sup>	$y = ax + (3-2a)x^2 + (a-2)x^3$	$y = \frac{x}{(1-0.87\lambda_p^2)\alpha(x-1)^2+x}$	$a = 2.4 - 0.01f_{cu}, \alpha = 0.132f_{cu}^{758} - 0.905$
MPP <sup>[13]</sup>	$y = \frac{rx}{r-1+x^r}$		$r = \frac{E_c}{E_c - f_{cc} / \epsilon_{cc}}$
Park <sup>[14]</sup>	$y = 2x - x^2$	$y = 1 - Z_m(\epsilon_c - \epsilon_{cc})$	$Z_m = \frac{0.5}{(\frac{3+0.29f_c'}{145f_c' - 1000}) + \frac{3}{4}\rho_{sh} \sqrt{\frac{bc}{s} - \epsilon_{cc}}}$

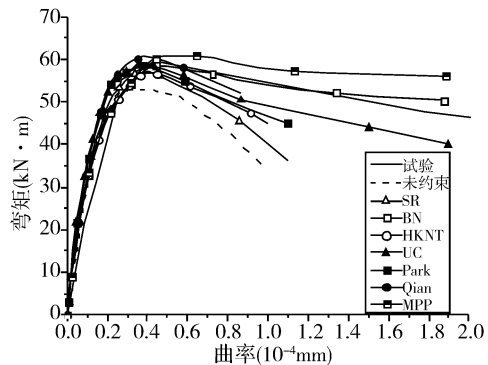
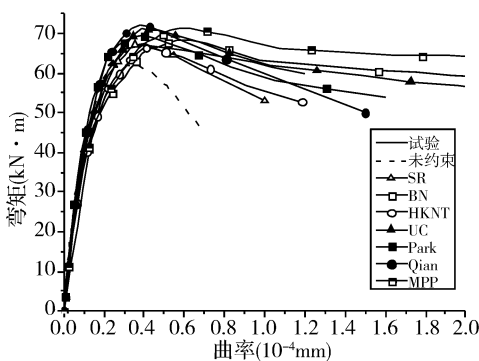
注: (1)  $y = f_c / f_{cc}, f_c$  和  $f_{cc}$  为箍筋约束混凝土的纵向应力和单轴峰值应力; (2)  $f_c'$  为混凝土圆柱体抗压强度;  $f_{c0}$  为未约束混凝土的单轴峰值应力;  $f_{yh}$  为箍筋屈服强度;  $\rho_{sh}$  为体积配箍率;  $l_c$  为箍筋约束混凝土核心区长宽;  $s$  为箍筋间距; (3)  $Z, k_1, k_2, E_{des}, E_{soft}, a, \alpha, r, Z_m$  等为各个模型的系数, 其值根据各模型具体参数确定。

基于上述箍筋约束混凝土模型, 采用钢筋混凝土纤维梁分析程序 THUFIBER<sup>[15]</sup>, 对文献 [16-17] 中 4 根不同加载条件和不同配箍情况的方形截面钢筋混凝土柱 (见表 3) 进行数值模拟, 分析结果与试验结果的比较见图 2 和图 3。从图中可以看出, 不同模型预测结果差异较为明显, 其中 MPP 模型<sup>[13]</sup> 的模拟结果普遍偏高, HKNT 模型<sup>[10]</sup> 的模拟结果普遍偏低, BN 模型<sup>[11]</sup> 的模拟结果相对最为准确。

表 3 钢筋混凝土柱试件基本信息表

Table 3 Basic information of RC column specimens

分组	试件	加载方式	$f_c'$	轴压比	截面宽度	纵筋配筋率	配箍率
文献 [15]	C4	偏压, 偏心距 75mm	35.0	—	210	1.8%	2.98%
	C10		27.4	—	210	1.8%	1.49%
文献 [16]	U3	压弯、循环	34.8	0.14	350	3.27%	1.69%
	U4		32.0	0.15	350	3.27%	2.54%



(a) 试件 C4 的弯矩 - 曲率关系曲线

(b) 试件 C10 的弯矩 - 曲率关系曲线

图 2 文献 [16] 中不同模型计算结果对比

Fig 2 Comparing different models for specimens in Ref [16]

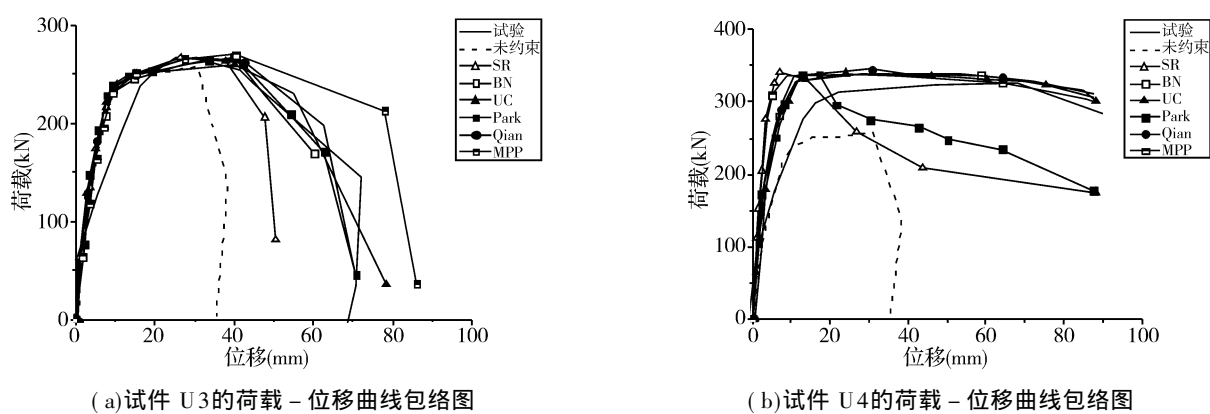


图 3 文献 [17] 中不同模型计算结果对比

Fig 3 Comp of different models for specimens in Ref [17]

## 2 结构计算模型

以渡口中学典型 RC 框架结构教学楼为分析对象, 其平面布置间见图 4 详细震害现象和结构信息参见文献<sup>[18]</sup>。在其发生倒塌的短轴方向, 采用 THUFIBER 程序<sup>[15]</sup>建立非线性结构分析模型。在 THUFIBER 程序中, 钢筋混凝土梁柱构件采用铁木辛柯梁单元模拟, 每根钢筋混凝土梁截面划分为 36 个混凝土纤维和 4 个钢筋纤维, 通过平截面假定保证纤维间的变形协调, 采用基于牛顿法和 Newmark- $\beta$  法的隐式计算。关于 THUFIBER 程序中公式和算法更详细的介绍参见文献 [19]。分析模型考虑了钢筋、混凝土的各种材料非线性行为和  $P-\Delta$  效应等几何非线性行为, 并考虑了基础和楼板的影响, 详见文献 [18]。其中, 箍筋约束混凝土采用上节整理的本构模型, 钢筋本构模型为文献 [19] 中汪训流等建议的钢筋本构模型。基于 THUFIBER 程序优异的非线性计算能力, 本文直接以“结构楼层丧失竖向承载力而不能维持保障人员安全的生存空间”<sup>[19]</sup>作为结构倒塌的判据。

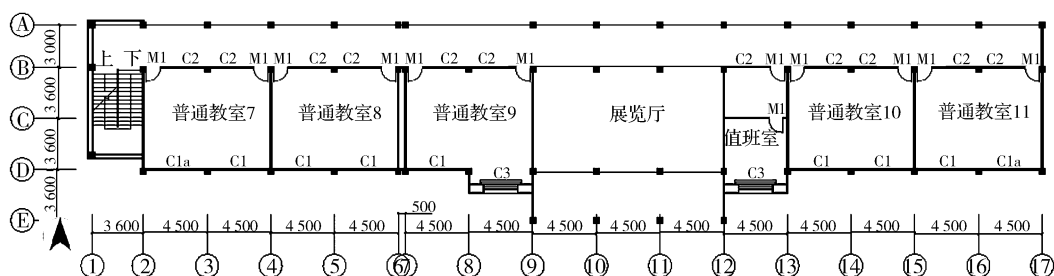


图 4 教学楼平面简图

Fig 4 Plan of the Classroom Building

根据《设防标准》<sup>[3]</sup>、《通知》<sup>[4]</sup>和《建议书》<sup>[5]</sup>的要求, 分别按照 7 度乙类、7.5 度丙类和 8 度丙类设防要求用 PKPM 设计软件对该结构进行了重新设计, 并与原结构 (7 度丙类) 一起进行基于 IDA 的倒塌易损性分析。按 7 度乙类标准, 框架抗震等级由 7 度丙类的三级提高到了二级, 主要效果是箍筋约束有所增强, 箍筋用量增加了 24%。7.5 度丙类框架的抗震等级和构件断面尺寸与 7 度丙类相同, 只是因地震力增大, 纵筋用量有所增加。8 度丙类因为地震力显著增大, 为满足小震变形要求, 底层柱子截面尺寸从 400 mm × 400 mm 增加到 550 mm × 550 mm, 同时框架抗震等级也从三级提高到了二级。

## 3 基于 IDA 的倒塌易损性分析

由于倒塌是结构整体动力行为, 故基于弹塑性时程计算的动力增量分析方法 (incremental dynamic analysis, IDA) 作为研究结构抗倒塌能力最为准确合理的计算方法, 近年来得到广泛关注<sup>[20 21]</sup>。IDA 分析通过选

择具有足够数量的典型地震动记录 (本文采用的地震动记录为美国 ATC-63 建议的 22 条远场地震动记录<sup>[22]</sup>, 再加上常用的 El Centro 地震动记录, 共 23 条), 并逐步增大地震动强度, 得到在不同地震动强度下结构的倒塌率 (如果在某一地面运动强度下, 有  $n$  条地震动记录发生了倒塌, 则倒塌率为  $n/23$ )。根据结构的倒塌率可对其抗地震倒塌能力进行定量评价。美国 ATC-63 报告<sup>[22]</sup>建议采用倒塌储备安全系数 (collapse margin ratio CMR) 作为结构抗倒塌能力评价的定量指标, CMR 值越大, 表示结构抗倒塌的储备越高, 即抗倒塌能力越大。其定义为:

$$CMR = M_{50\%} / M_{MCE} \quad (1)$$

式中,  $M_{50\%}$  为倒塌率为 50% 时对应的地面运动强度; 即如果结构在某一地面运动强度下, 有 50% 的地震动输入导致倒塌, 则该地震动强度就是结构体系的平均抗倒塌能力。 $M_{MCE}$  为规范建议罕遇地震下的地震动强度 (MCE: maximal considered earthquake, 设计大震)。本文采用第一周期谱加速度  $S_a(T_1)$  作为地震动强度指标, 根据文献 [19-20] 的研究, 该指标离散度较小且周期适用范围较广。

## 4 抗倒塌能力比较

采用 BN 约束混凝土模型, 计算得到原结构 (7 度丙类) 和按照《设防标准》<sup>[3]</sup>、《通知》<sup>[4]</sup> 和《建议书》<sup>[5]</sup> 的要求加强后的结构 (7 度乙类、7.5 度丙类和 8 度丙类) 的倒塌易损性曲线对比如图 5 所示。结构的 CMR 及在大震和特大地震下的倒塌率比较如表 4 所示。从图 5 和表 4 可以看出:

(1) 对于该教学楼而言, 按照 2008 年以前设防标准设计 (7 度丙类) 虽然可以基本满足设计罕遇地震下“大震不倒”的要求, 但是当遭遇到超过设防大震的特大地震时, 其倒塌率偏高。

(2) 按照《设防标准》<sup>[3]</sup> 将设防类别提高到乙类对抗倒塌能力有一定改善, 增加的箍筋改善了结构的极限变形能力, 特大地震下倒塌率降低了约一半。

(3) 按照《通知》提高 0.5 度设防, 其效果和按《设防标准》提高后的效果大致相当。而按照《建议书》提高 1 度设防, 则抗倒塌能力显著提高。其原因是: 虽然 7.5 度设防设计地震力有所提高, 但是因为该框架抗震能力的主要问题为变形能力不足<sup>[18]</sup>, 而 7.5 度丙类和 7 度丙类的轴压比和配箍率基本相同, 故而极限变形能力差别不大, 其抗倒塌能力也提高不多。而提高到按照 8 度丙类设计后, 因为设计地震作用显著提高, 且框架柱截面尺寸显著增大, 框架抗震等级也提高, 故而承载力、轴压比、配箍率都有较大改善, 故而抗倒塌能力提高显著。

## 5 结论

本文基于汶川地震中 7 度设防区典型教学楼框架, 分别按照《建筑工程抗震设防分类标准》、《关于学校、医院等人员密集场所建设工程抗震设防要求确定原则的通知》和《汶川地震建筑震害分析与重建研讨会建议书》的要求, 对其抗震加强措施的效果进行了研究, 结果表明, 《建议书》要求提高 1 度效果最好, 可以满足校舍建筑特大地震下的抗倒塌要求, 巨震下的倒塌率也处于适度的可接受范围。《设防标准》和《通知》的建议对校舍建筑的抗地震倒塌能力也有一定改善效果, 但其在巨震下的倒塌率仍较高。

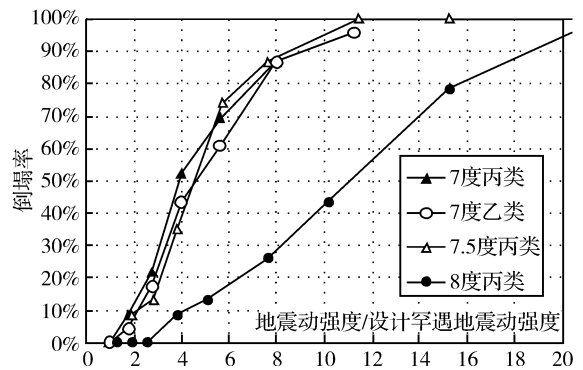


图 5 提高设防烈度对倒塌率的影响

Fig 5 Influence of upgrading seismic fortification level on the collapse possibilities

表 4 不同加强措施效果对比

Table 4 Comparison among the effects of different strengthening methods

提高措施	原设计 (7 度丙类)	《设防标准》(7 度乙类)	《通知》(7.5 度丙类)	《建议书》(8 度丙类)
		地震力不提高, 抗震措施 从丙类提高到乙类。	地震动峰值加速度 提高至 0.15g	将抗震设防烈度 提高 1 度
塌储备系数 CMR	4.0	4.6	4.5	11.2
设防罕遇地震下倒塌率	0%	0%	0%	0%
特大地震 (2 倍设防罕遇地震地震动强度) 下倒塌率	9%	4%	7%	0%
巨震 (4 倍设防罕遇地震地震动强度) 下倒塌率	53%	44%	37%	10%

## 参考文献:

- [ 1 ] 清华大学土木工程组, 西南交通大学土木工程组, 北京交通大学土木工程组. 汶川地震建筑震害分析 [ J ]. 建筑结构学报, 2008, 29 (4): 1- 9
- [ 2 ] 叶列平, 陆新征, 赵世春, 等. 框架结构抗地震倒塌能力的研究——汶川地震极震区几个框架结构震害案例的分析 [ J ]. 建筑结构学报, 2009, 30(6): 67- 76
- [ 3 ] GB50023- 2008 建筑工程抗震设防分类标准 [ S ].
- [ 4 ] 中国地震局. 关于学校、医院等人员密集场所建设工程抗震设防要求确定原则的通知 (中震防发 [2009]49 号) [ Z ], 2009
- [ 5 ] 中国工程院土木、水利与建筑学部等. 汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告 [ M ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008
- [ 6 ] GB50011- 2001 建筑抗震设计规范 [ S ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001
- [ 7 ] 周定松, 吕西林, 蒋欢军. 钢筋混凝土框架梁的变形能力及基于性能的抗震设计方法 [ J ]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(4): 60- 66
- [ 8 ] Saatcioglu M, Razvi S R. Strength and ductility of confined concrete [ J ]. Journal of Structural Engineering ASCE, 1992, 118(6): 1590- 1607.
- [ 9 ] Legeron F, Paulre P. Uniaxial confinement model for normal and high strength concrete columns [ J ]. Journal of Structural Engineering ASCE, 2003, 129(2): 241- 252
- [ 10 ] Hoshikuma J, Kawashin a K, Nagaya K, et al. Stress-strain model for confined reinforced concrete in bridge piers [ J ]. Journal of Structural Engineering ASCE, 1997, 123(5): 624- 633.
- [ 11 ] Bousalem B, Chikh N. Development of a confined model for rectangular ordinary reinforced concrete columns [ J ]. Materials and Structures, 2007, 40(6): 605- 613
- [ 12 ] 钱稼茹, 程丽荣, 周栋梁. 普通箍筋约束混凝土柱的中心受压性能 [ J ]. 清华大学学报, 2002, 42(10): 1369- 1373
- [ 13 ] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [ J ]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114 (8): 1804- 1826
- [ 14 ] Kent D C, Park R. Flexural members with confined concrete [ J ]. ASCE, 1971, 97(ST7): 1969- 1990
- [ 15 ] 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( sup II): 131- 140
- [ 16 ] Murat Saatcioglu, H. Salamat, Salim R. Razil. Confined columns under eccentric loading [ J ]. Journal of Structural Engineering ASCE, 1995, 121(11): 1546- 1556.
- [ 17 ] Guney Ozecebe, Murat Saatcioglu. Confinement of concrete columns for seismic loading [ J ]. ACI Structural Journal, 1987, 84(4), 308- 315
- [ 18 ] 马玉虎. 汶川地震典型框架结构震害分析和防倒塌对策研究 [ D ]. 北京: 清华大学, 2010
- [ 19 ] 陆新征, 叶列平, 缪志伟. 建筑抗震弹塑性分析 [ M ]. 中国建筑工业出版社, 2009
- [ 20 ] 陆新征, 叶列平. 基于 IDA 分析的结构抗地震倒塌能力研究 [ J ]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(1): 13- 18
- [ 21 ] 吕大刚, 于晓辉, 王光远. 基于单地震动记录 IDA 方法的结构倒塌分析 [ J ]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(6): 33- 39
- [ 22 ] Quantification of building seismic performance factors [ S ]. ATC- 63 Project Report FEMA P695 / June 2009.