

箍筋约束对典型 RC 框架教学楼 抗地震倒塌能力影响分析

陆新征 马玉虎 周萌 陈浩宇 叶列平

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: 箍筋约束可增强核心区混凝土的变形能力, 提高钢筋混凝土框架结构的抗地震倒塌能力。本文首先对现有箍筋约束混凝土模型进行了整理, 并通过与试验对比, 分析了不同箍筋约束混凝土模型的精度。在此基础上, 通过选择合适的箍筋约束混凝土模型, 并基于动力增量分析 (IDA), 对汶川地震中典型钢筋混凝土框架教学楼的抗地震倒塌能力进行了定量评价, 讨论了箍筋约束对钢筋混凝土框架抗倒塌能力的影响。

关键词: 箍筋约束混凝土 本构模型 纤维杆单元模型 倒塌 动力增量分析

中图分类号: TU352 **文献标识码:** A

Study on the Influence of Stirrups Confinement to the Collapse Resistance of Typical RC Frame in Wenchuan Earthquake

Lu Xinzheng, Ma Yuhu, Zhou Meng, Chen Haoyu, Ye Lieping

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Beijing 100084)

Abstract: The lateral confinement of steel stirrups can improve the deformation capacity of kernel concrete, which will increase the global collapse resistance of the reinforced concrete (RC) frames. Existing stress-strain models of stirrups confined concrete are summarized and compared with test results to validate their accuracies. Then with validated stirrups confined concrete models and incremental dynamic analysis (IDA), the collapse resistance of a typical RC frame in Wenchuan Earthquake is quantitatively evaluated. The influence of stirrups confinement to the collapse resistance is discussed.

Key words: stirrups confined concrete, constitutive models, fiber beam model, collapse resistance, Incremental Dynamic Analysis

Email: luxz@tsinghua.edu.cn

引言

由于混凝土材料自身脆性较大, 故混凝土结构常采用箍筋约束改善塑性变形能力, 以增强其抗震能力。我国《建筑抗震设计规范 GB50011-2001》(以下简称 2001 版《抗震规范》) 根据结构的抗震等级和轴压比等, 规定了各类混凝土框架柱的最小体积配箍率要求^[1]。汶川地震后, 针对大量教学楼倒塌破坏问题^[2], 《建筑工程抗震设防分类标准 GB 50223-2008》提高了校舍建筑的抗震设防类别, 即

从丙类提高到了乙类, 其变化主要体现在增加最小体积配箍率^[3,4]。但是, 上述抗震措施增强后的实际效果如何, 特别是对于改善结构抗倒塌能力的效果如何, 目前尚未见相关的研究。

鉴于汶川、玉树地震大量建筑倒塌, 特别是不少按照按 2001 版《抗震规范》设计建造的结构也因遭遇到远超过设防烈度的地震而倒塌并造成严重人员伤亡, 建筑结构的抗地震塌能力引起工程界的重视^[5]。由于抗地震倒塌能力是结构的整体行为, 箍

筋约束虽然可以提高单个构件的塑性变形能力, 但是显然单个构件的受力行为和结构整体抗倒塌能力之间并非简单的线性关系, 故而有必要对箍筋约束后结构的整体抗倒塌能力进行专门研究, 近年来得到广泛关注的基于动力增量分析 (IDA) 的倒塌易损性分析方法, 为评价不同结构体系的抗倒塌能力提供了相对客观的评价标准^[6]。IDA 方法通过选取一组具有足够代表性的地震动记录 (超过 20 条), 对结构进行弹塑性动力时程分析, 通过不断增大地震动强度直至结构发生倒塌, 获得不同地面运动强度下结构倒塌的易损性, 进而对整体结构的抗地震倒塌能力进行定量评价。

本文首先对现有主要箍筋约束混凝土本构模型进行收集整理, 而后通过与试验数据对比, 分析现有箍筋约束混凝土本构模型的精度, 据此选择适当的箍筋约束混凝土模型。在此基础上, 对汶川地震中倒塌的典型钢筋混凝土 (RC) 框架结构教学楼进行基于 IDA 的倒塌易损性分析, 以定量研究箍筋约束对 RC 框架结构教学楼抗地震倒塌能力的影响。

1 箍筋约束混凝土模型

从 1929 年 Richart 等^[7]的钢筋混凝土螺旋箍筋柱试验研究开始, 研究者们对箍筋约束混凝土进行了大量的试验和理论研究, 提出了许多箍筋约束混凝土的本构模型。表 1 汇总了应用较广的 7 种适用于普通混凝土矩形构件的箍筋约束混凝土本构模型及其所考虑的参数情况, 各模型的应力-应变全曲线公式见表 2。

由表 1、表 2 可以看出, 这 7 个模型有一定差异。为清楚展示各模型之间的差别, 本文以表 3 的典型混凝土柱参数为例, 给出了不同模型预测的箍筋约束混凝土应力-应变曲线对比 (见图 1)。可以看出, 这 7 个模型的预测结果差异很大, 故首先需要通过试验数据对这些模型的准确性进行检验。

2 模型准确性的验证

2.1 试件的选取

上述箍筋约束混凝土本构模型基本都是基于轴压试验回归得到, 而实际结构中混凝土构件多为压弯构件, 故为验证上述各模型在压弯构件中的适用性, 本文选取文献^[15、16]中 4 根不同加载条件下不同配箍的方形截面钢筋混凝土柱进行模拟, 以比较上述各模型在压弯条件下的准确性。试件基本信息见表 4、5。

表 1 常用箍筋约束混凝土本构模型

Tab. 1 Commonly used constitutive models for stirrups confined concrete

模型	适用截面	考虑的参数		
		箍筋形式	配箍率	纵筋参数
SR ^[8]	矩形 圆形	√	√	
UC ^[9]	矩形 圆形	√	√	√
HKNT ^[10]	矩形 圆形	√	√	
BN ^[11]	矩形	√	√	√
Qian ^[12]	矩形	√	√	
MPP ^[13]	矩形 圆形	√	√	√
Park ^[14]	矩形 圆形	√	√	

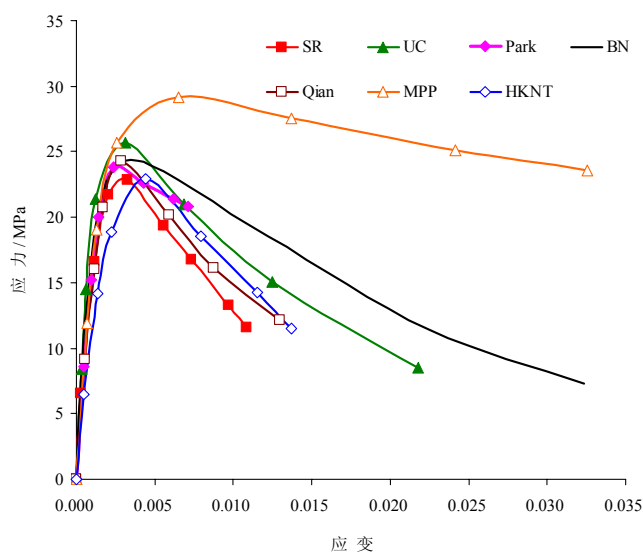


图 1 典型工况下模型计算结果对比

Fig. 1 Comparison of different models for a typical specimen

表 2 箍筋约束混凝土单轴应力-应变关系

Tab. 2 Uniaxial stress-strain relations for stirrups confined concrete

模型	上升段	下降段	参数取值
SR	$y = (2x - x^2)^{1/(1+2K)}$	$f_c = f_{cc} - Z(\varepsilon_c - \varepsilon_{cc})$	$K = \frac{k_1 f_{le}}{f_{c0}}$ $Z = \frac{0.15 f_{cc}}{\varepsilon_{85} - \varepsilon_{cc}}$
UC	$y = \frac{kx}{k-1+x^k}$	$y = \exp[k_1(\varepsilon_c - \varepsilon_{cc})^{k_2}]$	$k = \frac{E_{ct}}{E_{ct} - f_{cc} / \varepsilon_{cc}}$ $k_1 = \frac{\ln 0.5}{(\varepsilon_{50} - \varepsilon_{cc})^{k_2}}$ $k_2 = 1 + 25(I_{e50})^2$
HKNT	$f_c = E_c \varepsilon_c \left(1 - \frac{1}{n} x^{n-1}\right)$	$f_c = f_{cc} - E_{des}(\varepsilon_c - \varepsilon_{cc})$	$E_{des} = \frac{11.2 f_{co}^2}{\rho_{sh} f_{yh}}$
BN	$y = \frac{nx}{n-1+x^n}$	$f_c = f_{cc} - E_{soft}(\varepsilon_c - \varepsilon_{cc})$	$E_{soft} = 4 f_{co}^2 / k_e \rho_{sh} f_{yh}$ $n = \frac{E_c \varepsilon_{cc}}{E_c \varepsilon_{cc} - f_{cc}}$
Qian	$y = ax + (3-2a)x^2 + (a-2)x^3$	$y = \frac{x}{(1-0.87\lambda_v^{0.2})\alpha(x-1)^2 + x}$	$a = 2.4 - 0.01 f_{cu}$ $\alpha = 0.132 f_{cu}^{0.785} - 0.905$
MPP	$y = \frac{rx}{r-1+x^n}$		$r = \frac{E_c}{E_c - f_{cc} / \varepsilon_{cc}}$ 0.5
Park	$y = 2x - x^2$	$y = 1 - Z_m(\varepsilon_c - \varepsilon_{cc})$	$Z_m = \frac{\left(\frac{3+0.29f'_c}{145f'_c-1000}\right) + \frac{3}{4}\rho_{sh}\sqrt{\frac{bc}{s}} - \varepsilon_{cc}}$

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, ρ_{sh} 为体积配箍率, b, c 为箍筋约束混凝土核心区的长宽, 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。

表 3 典型工况具体参数

Fig. 3 Details of the typical specimen

混凝土 ($f_c=20.1\text{MPa}$)		纵筋 ($f_y=300\text{MPa}$)		箍筋 ($f_y=210\text{MPa}$)			工况
外轮廓 (mm)	核心区 (mm)	数量和尺寸 (mm)	配筋率 (%)	箍筋 形式	间距 (mm)	配箍率 (%)	
250×250	200×200	4Φ25	3.1	矩形箍	100	1.01	轴压

表 4 文献[15]试件具体参数

Tab. 4 Specimen details in Ref. [15]

试件 编号	截面宽度 (mm)	混凝土强度 (MPa)	纵筋 ($f_y=517\text{MPa}$)		箍筋 ($f_y=410\text{MPa}$)			偏心距 (mm)	加载方式
			配筋率 (%)	形式	间距 (mm)	配箍率 (%)			
C4	210	35.0	8Φ11.3	1.81	矩形箍	50	2.98	75	偏压
C10	210	27.4	8Φ11.3	1.81	矩形箍	100	1.49	75	偏压

表 5 文献[16]试件具体参数

Tab. 5 Specimen details in Ref. [16]

试件 编号	截面宽度 (mm)	混凝土强度 (MPa)	纵筋 ($f_y=438\text{MPa}$)		箍筋 ($f_y=470\text{MPa}$)		轴压 比	加载方式	
			配筋率 (%)	形式	间距 (mm)	配箍率 (%)			
U3	350	34.8	8Φ25.2	3.27	矩形箍	75	1.69	0.14	压弯、循环
U4	350	32.0	8Φ25.2	3.27	矩形箍	50	2.54	0.15	压弯、循环

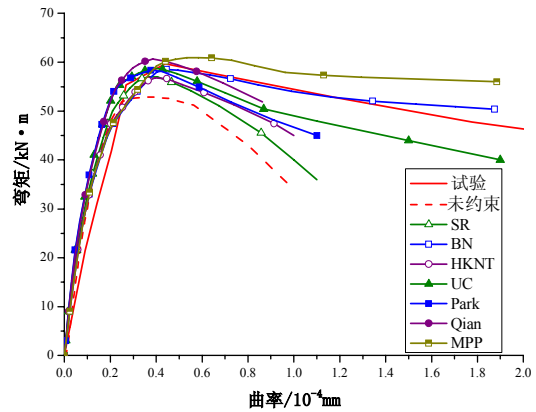
2.2 有限元分析模型

采用 THUFIBER 纤维梁模型建立上述压弯构件的数值模型^[17]。在纤维梁模型中, 构件的截面被划分成 36 个混凝土纤维和 8 个纵向钢筋纤维。纤维模型中的核心区混凝土纤维采用上述箍筋约束混凝土模型, 保护层混凝土采用《混凝土结构设计规范 GB50010-2002》^[1]附录 C 建议的单轴应力—应变本构模型, 纵向钢筋纤维采用文献[18]中建议的钢筋本构模型。

2.3 结果对比

不同模型计算结果与试验结果的对比见图 2 和 3。从图中可以看出, 不同模型计算结果的差异还是比较大的。MPP 模型的模拟结果普遍偏高, HKNT 模型的模拟结果普遍偏低, BN 模型的模拟结果相对最为准确, UC 模型的精度也可接受。

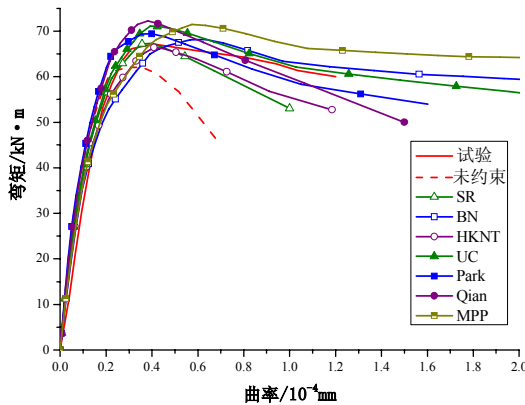
考虑到实际上箍筋约束混凝土试验结果本身的离散性也较大, 再加上箍筋约束效果对各种施工误差 (包括箍筋间距、弯钩角度和长度等) 较为敏感, 为科学评价箍筋约束混凝土对抗倒塌能力的影响效果, 本文以下以 BN 模型和 UC 模型为主, 并以 MPP 模型作为上限取值、以 HKNT 模型为下限取值, 进行抗倒塌能力分析。



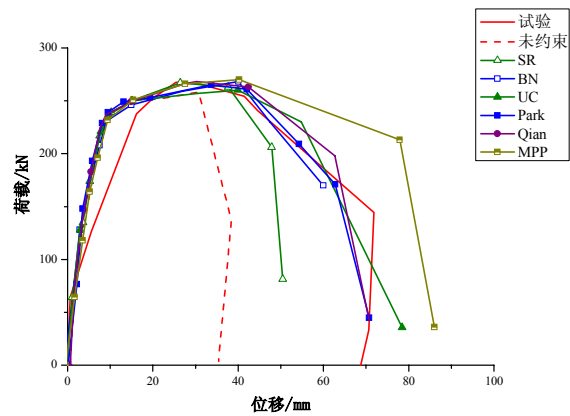
(b) 试件 C10 的弯矩-曲率关系曲线

图 2 文献[15]中不同模型计算结果对比

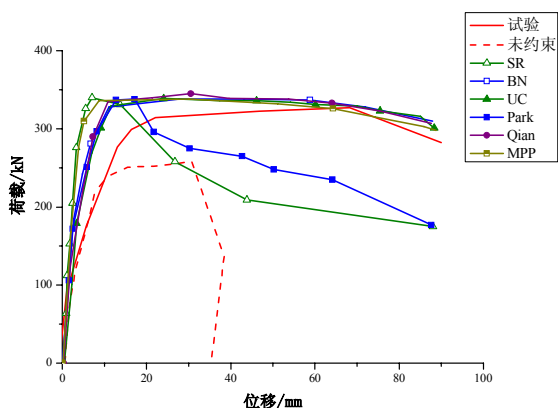
Fig. 2 Comparison of different models for specimens in Ref. [15]



(a) 试件 C4 的弯矩-曲率关系曲线



(a) 试件 U3 的荷载—位移曲线包围图



(b) 试件 U4 的荷载—位移曲线包络图
图 3 文献[16]中不同模型计算结果对比

Fig. 3 Comparison of different models for specimens in Ref. [16]

3 箍筋约束对框架结构抗地震倒塌能力的影响

3.1 计算模型

本文选取的框架结构为汶川地震震中附近漩口中学的典型 RC 框架结构教学楼，其详细震害现象和结构信息参见文献[19]。在其发生倒塌的短轴方向，采用 THUFIBER 程序^[17]建立非线性结构分析模型，分析模型考虑了材料非线性、 $P-\Delta$ 效应、地基基础和楼板的影响，详见文献[19]。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”^[20]作为结构倒塌的判据。

3.2 基于 IDA 的倒塌易损性分析

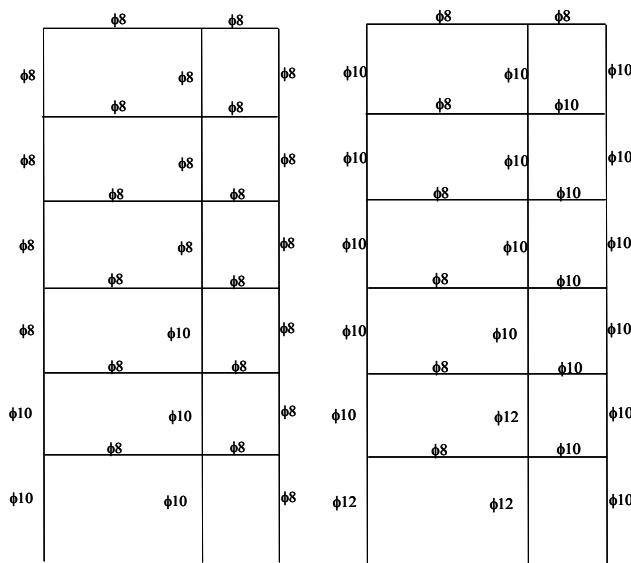
由于倒塌是结构整体动力行为，故而基于弹塑性时程计算的增量分析方法（Incremental Dynamic Analysis, IDA）作为研究结构抗倒塌能力最为准确合理的计算方法，近年来得到广泛关注^[6]。IDA 分析通过选择具有足够数量的典型地震动记录（本文采用的地震动记录为美国 ATC-63 报告^[21]建议的 22 条远场地震动记录，再加上常用的 El-Centro 地震动记录，共 23 条），并逐步增大地震动强度，得到在不同地震动强度下结构的倒塌率（如果在某一地面运动强度下，有 n 条地震动记录发生了倒塌，则倒塌率为 $n/23$ ）。通过结构的倒塌率可对其抗地震倒塌能力进行定量评价。美国 ATC-63 报告^[21]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：

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

式中， $IM_{50\%}$ 为有 50% 地震动输入出现倒塌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。 IM_{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 [20], [21] 的研究，该指标离散度较小且周期适用性较广。

根据教学楼建筑布置，分别按照丙类和乙类设防，用 PKPM 设计软件设计框架配筋^[19]。当按丙类设防时，该框架等级为三级，按乙类设防时，该框架等级为二级。框架柱采用矩形箍，箍筋屈服强度 $f_{yh} = 235\text{MPa}$ ，柱端加密区箍筋间距为 100mm，箍筋直径见图 4。基于以上配箍信息，采用上述箍筋约束混凝土本构模型，分别对丙类和乙类框架结构进行基于 IDA 的抗倒塌能力分析。



(a) 丙类设防（三级框架） (b) 乙类设防（二级框架）
图 4 教学楼配箍示意图

Fig. 4 Stirrups design of the Classroom Building

计算得到按照丙类设防（三级框架，图 4a）倒塌易损性曲线如图 5 所示，除 MPP 模型外，其他三个约束混凝土本构模型分析得到的倒塌率计算结果差距并不显著。以 BN 模型计算结果为例，与不考虑箍筋约束相比，考虑箍筋约束后结构的抗倒塌能

力有显著提高, 在比设防大震高一倍的特大地震下 (地震动强度/设计罕遇地震动强度=2.0), 倒塌率由 20% (不考虑箍筋约束) 降至 9% (考虑箍筋约束), 而当经历类似汶川地震这样超过设计大震烈度 4 倍左右 (地震动强度/设计罕遇地震动强度=4.0) 的巨震时, 丙类框架结构教学楼的倒塌率由 80% (无箍筋约束) 降至 52% (考虑箍筋约束) 左右, 相应 CMR 值如表 6 所示。

表 6 不同约束情况下 CMR 值
Tab. 6 CMR values of buildings with different confinements

约束混凝土模型		CMR
丙类设防 (三级框架)	未约束	2.7
	HKNT	3.9
	UC	4.1
	BN	4.0
	MPP	5.1
	乙类设防 (二级框架)	BN

如按照汶川地震后新的教学楼抗震标准来设计, 按照乙类设防标准, 则框架抗震等级由三级提高为二级, 配箍量显著增加, 箍筋用钢量提高约 24%, 具体配箍情况见图 4b。计算得到的 IDA 倒塌曲线如图 6 所示。从图中可以看出, 在加强箍筋约束后, 结构的抗倒塌能力有一定的提高。在比设防大震高一倍的地震下 (地震动强度/设计罕遇地震动强度=2.0), 倒塌率由 9% (按三级框架配箍) 降至 4% (按二级框架配箍), 而当经历类似汶川地震这样超过设计大震烈度 4 倍左右 (地震动强度/设计罕遇地震动强度=4.0) 的巨震作用时, 教学楼的倒塌概率由 52% (按三级框架配箍) 降至 43% (按二级框架配箍) 左右, 其 CMR 也从 4.0 提高到了 4.6。但是提高幅度仍很有限, 不能完全满足教学楼等乙类建筑特大地震抗倒塌的需求。所以, 建议今后应进一步加强对重点设防类建筑抗地震倒塌措施的研究。

4 结论

本文对已有箍筋约束混凝土本构模型进行了总结, 并通过与试验结果的对比, 选择了合理的模型。通过对考虑箍筋约束后的典型 RC 框架结构教学楼抗地震倒塌能力分析, 得到以下结论:

1) 不同的箍筋约束混凝土本构模型差异较大。文

献[11]提出的 BN 模型相对较好。

2) 考虑箍筋约束后, 框架结构抗地震倒塌能力得到提高。但现行乙类设防标准尚不足以完全满足教学楼特大地震抗倒塌要求。

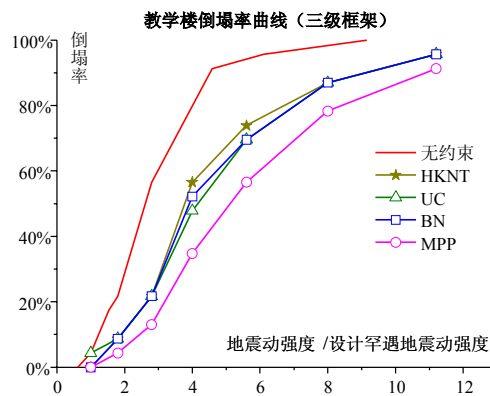


图 5 不同约束模型对抗倒塌能力的影响

Fig. 5 Collapse possibility curves of different stress-strain models

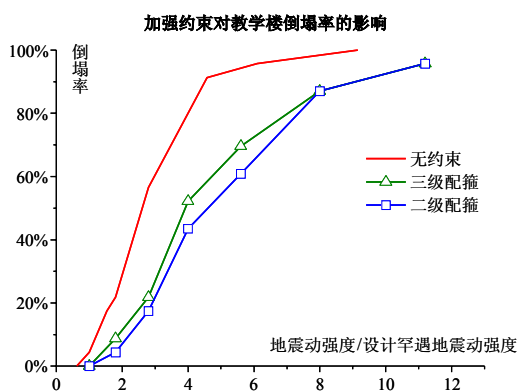


图 6 加强约束对教学楼倒塌率的影响

Fig. 6 Collapse possibility curves of different confinement situations

参考文献

[1] 混凝土结构设计规范[S], GB50010-2002, 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
Code for RC structure design [S]. GB 50010-2002, Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.(in Chinese)

[2] 清华大学土木结构组, 西南交通大学土木结构组, 北京交通大学土木结构组. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 1-9.
Civil and Structural Groups of Tsinghua University, Xinan Jiaotong University and Beijing Jiaotong University.

- Analysis on seismic damage of buildings in the Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 1-9. (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国标准. 建筑工程抗震设防分类标准 (GB50023-2008) [S], 2008.7
National Standard of PR China, Standard for classification of seismic protection of building constructions (GB50023-2008) [S], 2008.7. (in Chinese)
- [4] 建筑抗震设计规范 GB50011-2001, 2008 年局部修订版 [S], 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Code for seismic design of buildings [S]. GB 50011-2001, Beijing: China Architecture and Building Press, 2001. (in Chinese)
- [5] 叶列平, 曲哲, 陆新征, 冯鹏, 提高建筑结构抗地震倒塌能力的设计思想与方法[J], 建筑结构学报, 2008, 29(4): 42-50.
Ye LP, Qu Z, Lu XZ, Feng P, Collapse prevention of building structures: a lesson from the Wenchuan earthquake[J], Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 42-50. (in Chinese)
- [6] 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.
Lu XZ, Ye LP, Study on the seismic collapse resistance of structural system [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(1): 13-18. (in Chinese)
- [7] Richart F E, Brandtzaeg A, Brown R. L., A study of the failure of concrete under combined compressive stresses [R], Engineering Experimental Station, University of Illinois, Bulletin No.185, 1928.
- [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., Paultre 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, Kawashima K, Nagaya K, Taylor A W. 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.
Qian JR, Cheng LR, Zhou DL, Behavior of axially loaded concrete columns confined with ordinary hoops[J]. J Tsinghua Univ (Sci&Tech), 2002, 42(10):1369-1373. (in Chinese)
- [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] Murat Saatcioglu, Salamat H, Salim R Razil. Confined columns under eccentric loading[J], Journal of Structural Engineering, ASCE, 1995, 121(11): 1546-1556.
- [16] Guney Ozcebe, Murat Saatcioglu. Confinement of concrete columns for seismic loading [J]. ACI Structural Journal, 1987, 84(4), 308-315.
- [17] 叶列平, 陆新征, 马千里, 汪训流, 缪志伟, 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.
Ye LP, Lu XZ, Ma QL, Wang XL, Miao ZW, Seismic nonlinear analytical models, methods and examples for concrete structures[J], Engineering Mechanics, 2006, 23(sup. II). 131-140. (in Chinese)
- [18] 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 XL, Lu XZ, Ye LP, Numerical simulation for the hysteresis behavior of RC columns under cyclic loads[J], Engineering Mechanics, 2007, 24(12): 76-81. (in Chinese)
- [19] 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]. 清华大学, 2010.
Ma YH. Seismic damage simulation and collapse resistance strategies of typical RC frames during the Great Wenchuan Earthquake [D]. Tsinghua University, 2010(in Chinese)
- [20] 陆新征, 叶列平, 缪志伟. 建筑抗震弹塑性分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Lu XZ, Ye LP, Miao ZW. Elastic-plastic analysis of buildings against earthquake [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [21] Quantification of building seismic performance factors [S]. ATC-63 Project Report, FEMA P695 / June 2009