

文章编号: 1000 - 1301(2011)05 - 0013 - 08

我国 7 度设防等跨 RC 框架抗地震倒塌能力研究

陆新征, 唐代远, 叶列平, 施 炜

(清华大学 土木工程系, 清华大学结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 我国建筑结构抗震设计主要采用基于小震下的构件承载力计算保证结构的抗震承载能力, 配合抗震构造措施保证结构的变形能力, 缺乏大震抗倒塌定量计算。而实际地震震害表明, 即使是同类结构, 其结构体系参数对其抗地震倒塌能力也有很大影响。为此, 本文依据《建筑抗震设计规范》GB50011-2001, 按照 7 度抗震设防设计了 24 个不同跨度、层数和层高的 RC 框架结构, 采用多个地震输入下的逐步增量弹塑性动力时程分析方法 (IDA 方法) 对其抗地震倒塌能力进行了分析研究。结果表明, 结构体系参数对其抗地震倒塌能力有重要影响, 其中跨度和层数的影响最为显著。

关键词: 框架结构; 抗倒塌能力; 增量动力分析; 弹塑性动力时程分析; 倒塌概率

中图分类号: TU352 **文献标志码:** A

Study on the seismic collapse resistance of RC frame structures with equal spans in zones with seismic intensity VII

LU Xinzheng, TANG Daiyuan, YE Lieping, SHI Wei

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

Abstract: The seismic design of Chinese building structures is mostly depended on the structural elemental loading capacity design under minor earthquake and the detailed design to ensure the deformation capacity. However, it is lack of quantitative analysis of seismic collapse resistance under severe earthquake. And the actual seismic damage shows that even for the same structural types, the global structural parameters will greatly influence the seismic collapse resistances. Therefore, this paper designs 24 RC frame structures in zones with seismic intensity VII according to the Chinese Seismic Design Code, which have different spans, storey heights and storey number. Incremental dynamic analysis is performed for the structures to assess their seismic collapse resistance. The result shows that global structural parameters, especially the span and the storey number, have a great influence on the seismic collapse resistance.

Key words: frame structure; collapse resistance; incremental dynamic analysis; elasto-plastic dynamic analysis; collapse probability

概述

房屋建筑在特大地震下具有足够的抗倒塌能力, 是保障人民生命财产安全的最重要目标。2008 年发生的汶川特大地震中, 虽然经过抗震设计的结构震害明显减轻, 但仍有一些按照规范设计的结构发生倒塌破

收稿日期: 2010-03-27; 修订日期: 2011-06-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90815025, 51178249, 51178250); 国家科技支撑计划项目(2009BAJ28B01)

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

坏^[1]。目前,我国抗震规范采用“三水准两阶段”设计,但对“大震不倒”缺乏定量计算规定,主要是根据以往震害经验和试验研究通过抗震构造措施来落实,结构抗震计算主要是按小震下构件承载力设计^[3]。然而,影响结构抗地震倒塌性能的因素十分复杂,需从结构整体角度,如结构体系、构件的层次性、合理倒塌模式等角度进行考虑^[2],但目前有关研究还很不够。如汶川地震中漩口中学建筑群破坏等^[4],同样按照现行规范设计的框架结构,但不同结构方案 and 不同层数的结构,抗地震倒塌能力有较大差异。因此,建筑结构抗震安全性不能仅依赖于构件层次的承载力和延性,对于一些不合理的结构方案,可能会因为某些薄弱构件的失效破坏而导致倒塌。因此有必要从结构体系的角度来评价符合我国规范结构的抗倒塌能力,进而研究能反映结构抗地震倒塌能力的量化指标,从而完善我国规范的抗震设计方法。

本文依据《抗震规范 GB50011-2001》^[3],按照 7 度设防,设计了 24 个不同跨度、层数和层高的钢筋混凝土框架结构,采用美国 ATC-63 委员会推荐的采用多个地震输入下的逐步增量弹塑性动力时程分析方法 (IDA 方法) 获得这些结构在不同强度地震下倒塌概率,研究不同结构参数对结构抗倒塌能力的影响。

1 基于 IDA 的倒塌概率分析

第一代性能化抗震设计规范,如 FEMA-273/274^[7]和 ATC-40^[5]等,虽然在结构性能化设计方面作出了重要的开拓,但是它将结构的“性能点”具体到各个构件,无法回答整体结构的安全水平。另外,第一代性能化设计所依赖的重要分析手段——pushover 分析,存在着理论缺陷,特别是在结构接近倒塌时, pushover 近似的静力分析存在很多问题。随着结构非线性分析技术的发展和有限元软件及计算机运算能力的提高,可以更好地模拟结构地震倒塌的 IDA 分析方法开始得到广泛应用。

1.1 IDA 方法简介

增量动力分析方法 (Incremental Dynamic Analysis, 简称 IDA 方法) 是近年来基于弹塑性动力时程分析方法发展起来的一种能够更全面的评价结构弹塑性地震反应的分析方法。该方法早在 1977 年就被 Bertero 提出^[6],现已被美国联邦紧急管理署 (FEMA) 归纳到结构抗震设计和评估规程中^[7]。

IDA 方法是通过输入逐步增大强度的地震记录,对直至倒塌的整个结构的弹塑性性能的分析,因而非常适用于分析整体结构的抗地震倒塌能力。然而,一次 IDA 分析只针对某一个具体地震记录进行,所以地震记录的选取对计算结果至关重要。事实上,由于地震的随机性,用确定性的分析结果来评价结构抗地震倒塌能力也有其缺陷。考虑到现在计算机强大的分析能力,采用基于大量地震记录的 IDA 分析结果,对结构的地震响应特征进行统计分析已经成为可能,从而可更科学合理评价结构的抗震性能和抗震能力。如美国 ATC-63 计划就建议通过大量地震记录 (不少于 20 条) 计算,来考虑不同地震动输入的差异影响。为此, ATC-63 委员会推荐了相应的地震记录数据库,包括近场的 22 条地面运动记录和远场的 27 条地面运动记录,具体参见文献 [8]。对这些地震记录 (总地震动数记为 N_{total}) 逐步增大地震动强度 (ATC-63 建议以结构第一周期地震影响系数 $S_a(T_1)$ 作为地面运动强度指标,该指标由 Bazzurro^[9] 提出,文献 [10-12] 也认为用 $S_a(T_1)$ 作为地震动强度指标较合适),记在某一地震动强度下有 $N_{collapse}$ 个地震记录发生倒塌,则 $N_{collapse}/N_{total}$ 称为该地震动强度下结构的倒塌概率 (collapse Possibility)。随着地震强度不断增大,倒塌概率会不断增大,由此可以获得地震强度与结构倒塌概率的关系曲线,该曲线称为结构的地震易损性曲线 (collapse fragility curve),这为定量评价结构抗倒塌能力提供了更科学的依据。

1.2 结构的倒塌储备系数

为了比较不同结构抗地震倒塌能力的差异,近年来美国 ATC 委员会组织了一系列有关倒塌储备系数 (collapse margin ratio, 简称 CMR) 的研究^[8]。所谓倒塌储备系数,就是比较结构抗地震倒塌能力和设防需求之间的储备关系。如果基于 IDA 方法分析得到结构在某一地面运动强度下的倒塌概率为 50%, 则该地面运动强度就是该结构的平均抗倒塌能力,并记为 $S_a(T_1)_{50\%}$ 。将 $S_a(T_1)_{50\%}$ 与结构设计大震强度 $S_a(T_1)_{大震}$ 比较,得到以下结构倒塌储备系数 CMR, 即

$$CMR = \frac{S_a(T_1)_{50\%}}{S_a(T_1)_{大震}} \quad (1)$$

对于我国结构,设计大震强度 $S_a(T_1)_{大震}$ 可以按下式计算:

$$S_a(T_1)_{大震} = \alpha_{T_1, 大震} \cdot g \quad (2)$$

其中 α_{T_1} 为我国规范规定对应于周期 T_1 的大震水平地震影响系数,按《建筑抗震设计规范》表 5.1.4-1 取值; g 为重力加速度。

由于 CMR 是基于概率理论得到的抗倒塌评价指标,考虑了地震动不确定性的影响,因此尽管 CMR 分析还有诸多问题(如地震动的代表性是否足够,倒塌数值计算模型是否合理,多向地震动输入影响,设计资料和结构实际状况是否一致,场地特异性是否突出等),但就目前而言,CMR 指标为不同结构的抗倒塌能力评价提供了一个比较科学的标准。

此外,考虑到 IDA 分析中不可避免地会有诸多误差影响,因此 ATC-63 报告[8]建议应根据不同地面运动响应的不确定性(RTR)、设计资料的不确定性(DR)、试验数据的不确定性(TD)和数值模型不确定性(MDL)适当提高 CMR 的可接受水准,以保证结构的抗倒塌能力。ATC-63 报告建议了各类不确定性的量化标准和 CMR 可接受水准的判断方法,具体可参阅文献[8]。需要强调的是,就 CMR 指标本身的定义而言,CMR 的可接受水准就带有更强的主观色彩,特别是对我国的适用性还需要进一步开展研究。不过对于同样的分析模型和流程,不同结构的 CMR 比较能够反映其抗倒塌能力的差异。

1.3 THUFIBER 程序和倒塌判断准则

由于结构倒塌是一个非常复杂的非线性动力过程。以往受到计算手段的限制,一般以间接手段,如层间位移角超过 1/50 等,来作为结构倒塌的判据,然而这并不科学,不同国家(如中、美)结构极限层间位移角的规定甚至会相差几倍。随着计算手段的发展,先进的结构非线性分析模型和分析方法已经可以准确模拟结构倒塌的整个非线性过程,包括考虑率效应的材料非线性、几何非线性、接触非线性等。本文采用清华大学在 MSC.MARC 软件上开发的 THUFIBER 系列程序进行结构倒塌模拟。THUFIBER 程序可以稳定地实现复杂钢筋混凝土杆系结构在地震下倒塌全过程的模拟,有关该程序的情况和分析结果的验证参见文献[13-15]。因此,本文直接以倒塌的真实物理定义“结构丧失竖向承载力而不能维持保障人员安全的生存空间”作为倒塌的判据。

2 结构模型和分析参数

本文根据《建筑抗震设计规范》GB50011-2001,采用 PKPM 软件设计了 24 个等跨 RC 框架结构模型,设防烈度为 7 度,建筑类别为丙类,场地类别为 II 类,设计地震分组为第二组。框架各跨跨度相等,各层层高相等,梁的混凝土强度等级为 C30,梁柱纵筋为 HRB335 级,箍筋为 HPB235 级,材料强度取标准值。楼面、屋面恒载标准值均取为 7 kN/m^2 (含楼板自重),活载标准值为 2 kN/m^2 。24 个结构方案的详细参数见表 1,主要考察跨度、层数、层高三个结构参数对 RC 框架抗地震倒塌能力的影响。由于结构平面规则,分析时取一榀平面框架建立结构分析模型,模型只考虑框架梁柱等结构构件,暂未考虑楼板和隔墙等非结构构件。楼层重量按(1.0 恒载 + 0.5 活载)折算,并参照 PKPM 程序荷载导出结果等效为梁上均布荷载和柱顶集中荷载。

本文 IDA 分析采用的地震动数据库为 ATC-63 报告建议的 22 条远场地震动加上 El Centro 波,一共 23 条。ATC-63 报告选取的地震动已经过仔细考虑,充分考虑了强地震动的离散性和代表性。

3 计算结果及其讨论

3.1 典型倒塌模式

计算得到结构进入倒塌时的典型倒塌模式如图 1 所示,塑性铰区域如图中浅色区域,塑性铰位置如图中 ○ 示意。由图可见,结构在倒塌破坏时,框架梁基本都已出塑性铰,也即对于不考虑楼板增强作用和梁内钢筋超配的纯框架结构,基本能够实现“强柱弱梁”屈服机制。随着地震强度的不断增大,框架柱也出现塑性铰,倒塌均始于轴压比最大的底层中柱小偏压破坏(图中红圈位置)。比较图 1(a)、(b)、(c)可以看出,柱端塑性铰数量随跨度增大而减少,8 m 跨框架只在底层柱脚出现了塑性铰,上部楼层的柱基本未出塑性铰,框架柱的总耗能能力小于 4 m 跨和 6 m 跨的框架,故其抗倒塌能力最差。

表1 各结构方案详细参数

Table 1 Parameters of each structural model

模型 编号	层高 (m)	层数	跨度 (m)	结构总高度 (m)	抗震 等级	柱混凝土 强度等级	柱截面尺寸 (mm × mm)	梁截面尺寸 (mm × mm)	最大设计 轴压比
2.8_3_4	2.8	3	4	8.4	三	C30	400 × 400	300 × 550	0.39
2.8_3_6	2.8	3	6	8.4	三	C30	400 × 400	300 × 550	0.56
2.8_3_8	2.8	3	8	8.4	三	C30	400 × 400	300 × 550	0.73
2.8_6_4	2.8	6	4	16.8	三	C30	550 × 550	300 × 550	0.41
2.8_6_6	2.8	6	6	16.8	三	C30	550 × 550	300 × 550	0.60
2.8_6_8	2.8	6	8	16.8	三	C30	550 × 550	300 × 550	0.77
2.8_9_4	2.8	9	4	25.2	三	C30	600 × 600	300 × 600	0.53
2.8_9_6	2.8	9	6	25.2	三	C30	600 × 600	300 × 600	0.76
2.8_9_8	2.8	9	8	25.2	三	C30	700 × 700	300 × 600	0.74
2.8_12_4	2.8	12	4	33.6	二	1~4层 C40 5层以上 C30	600 × 600	300 × 600	0.52
2.8_12_6	2.8	12	6	33.6	二	1~4层 C40 5层以上 C30	600 × 600	300 × 600	0.75
2.8_12_8	2.8	12	8	33.6	二	1~4层 C40 5层以上 C30	700 × 700	300 × 600	0.73
3.6_3_4	3.6	3	4	10.8	三	C30	400 × 400	300 × 550	0.40
3.6_3_6	3.6	3	6	10.8	三	C30	400 × 400	300 × 550	0.57
3.6_3_8	3.6	3	8	10.8	三	C30	400 × 400	300 × 550	0.74
3.6_6_4	3.6	6	4	21.6	三	C30	550 × 550	300 × 550	0.42
3.6_6_6	3.6	6	6	21.6	三	C30	550 × 550	300 × 550	0.61
3.6_6_8	3.6	6	8	21.6	三	C30	550 × 550	300 × 550	0.78
3.6_9_4	3.6	9	4	32.4	二	C30	600 × 600	300 × 600	0.54
3.6_9_6	3.6	9	6	32.4	二	C30	600 × 600	300 × 600	0.77
3.6_9_8	3.6	9	8	32.4	二	C30	700 × 700	300 × 600	0.75
3.6_12_4	3.6	12	4	43.2	二	1~4层 C40 5层以上 C30	600 × 600	300 × 600	0.53
3.6_12_6	3.6	12	6	43.2	二	1~4层 C40 5层以上 C30	600 × 600	300 × 600	0.76
3.6_12_8	3.6	12	8	43.2	二	1~4层 C40 5层以上 C30	700 × 700	300 × 600	0.75

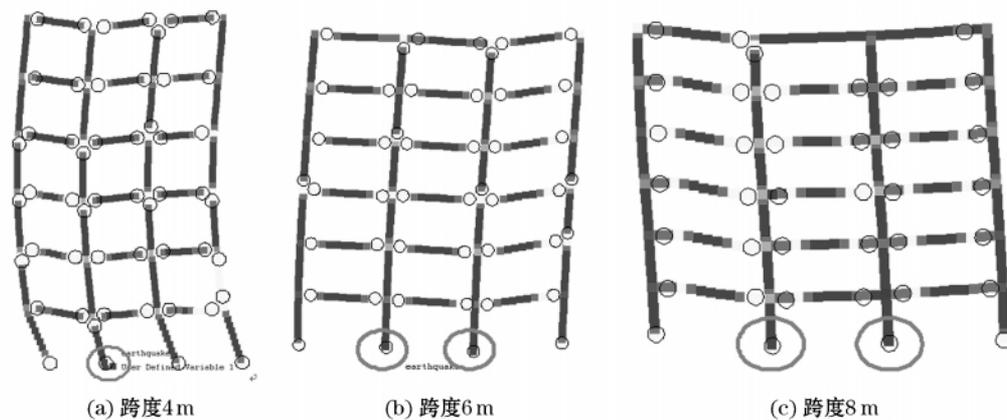


图1 层高3.6m的6层框架结构倒塌时的变形情况和塑性铰分布(图中浅色区域为塑性铰区域)

Fig. 1 Deformation and plastic hinges of representative structures during collapse

3.2 倒塌概率曲线

计算得到不同结构的倒塌概率曲线如图2~图4所示。根据ATC-63报告[8]建议,要保证结构在7度大震下倒塌概率小于10%的目标,则本文结构可接受的倒塌储备系数值为 $CMR = 2.30$,如图2~图4中竖虚线所示。

3.2.1 不同跨度结构倒塌概率曲线比较

为了比较不同跨度结构的倒塌概率曲线差异,将结构分成8组,整理得到各组的倒塌概率曲线如图2。

由图可见 框架结构的倒塌概率随跨度的增大而增大。这是由于跨度增大 单柱荷载增加 柱子的轴压比增加(见表 1) 柱子更容易发生脆性的小偏压破坏,导致轴压比最大的柱(底层中柱)在结构延性没有充分发挥时先行破坏,引发结构产生连续倒塌(图 1)。汶川地震中许多柱距较大的教学楼发生倒塌,而柱距较小的住宅、办公楼却破坏较小,与此有一定关系^[1 2 4]。

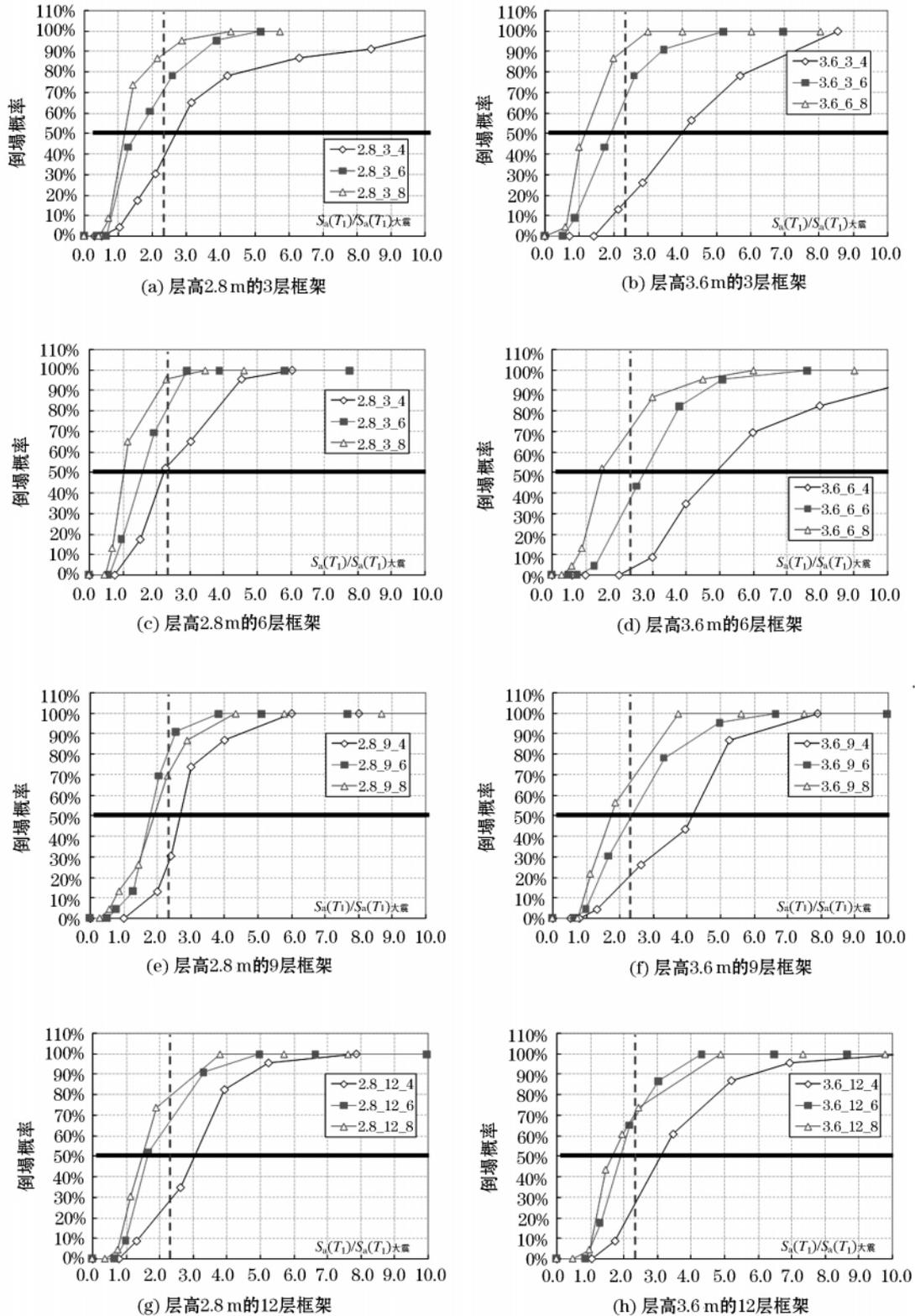


图 2 不同跨度结构倒塌概率曲线比较

Fig. 2 Comparison of collapse fragility curves among structures with different spans

3.2.2 不同层数结构倒塌概率曲线比较

为了便于比较不同层数结构的倒塌概率曲线,将结构分成6组,整理得到各组的倒塌概率曲线如图3。由图可见,同样是按照规范设计的结构,不同层数结构抗倒塌能力也存在较大差别。不过由表1可知,随层数增加,结构的柱子截面尺寸也有所增大,且为了满足模数等条件,故而最大轴压比不是随层数增加而单调增大。因此,层数对倒塌率的影响相对比较复杂。不过基本规律仍然是,轴压比越大,抗地震倒塌能力越低。

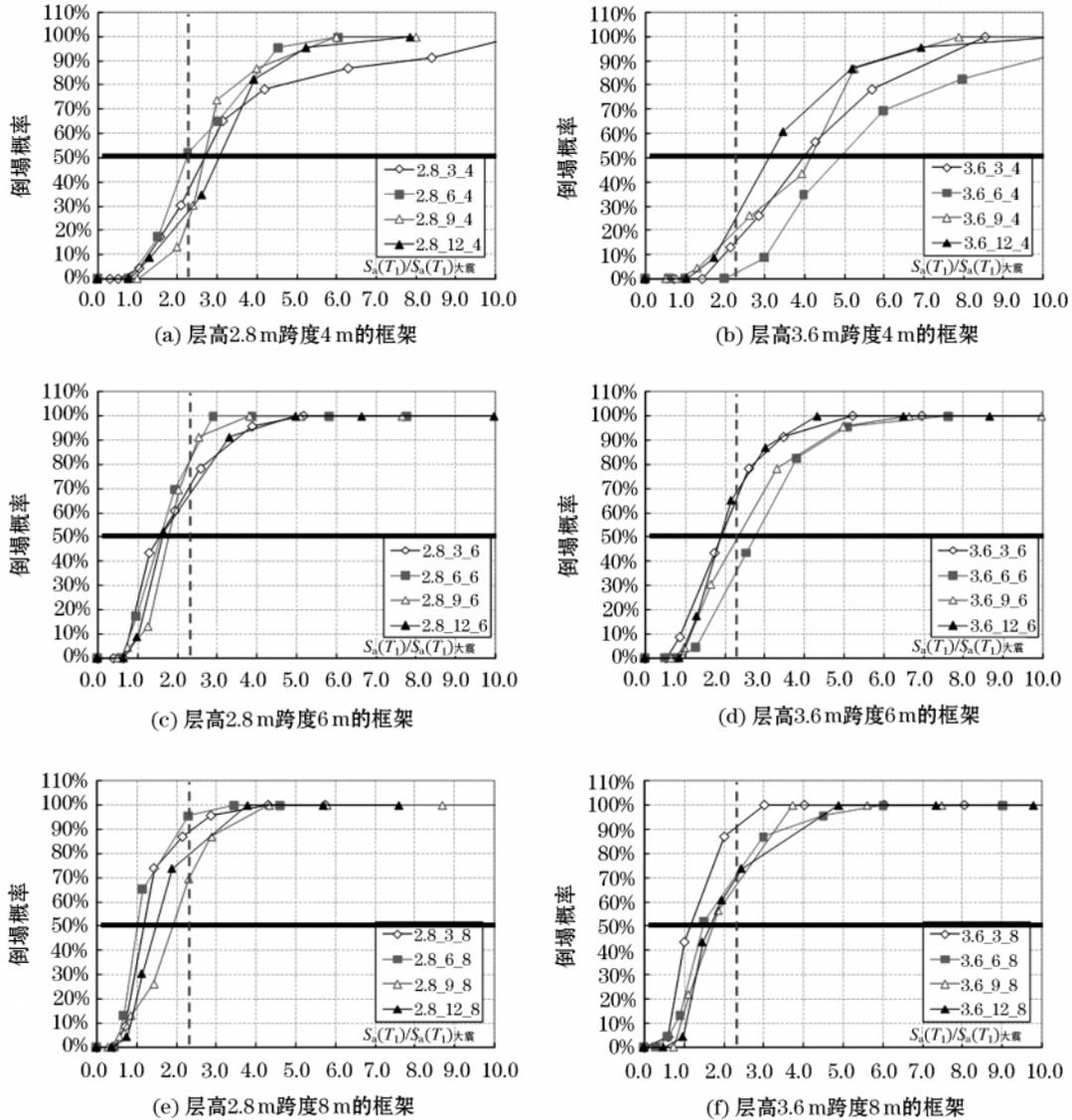


图3 不同层数结构倒塌概率曲线比较

Fig. 3 Comparison of collapse fragility curves among structures with different storey number

3.2.3 不同层高结构倒塌概率曲线比较

为了便于比较不同层高结构的倒塌概率曲线,将结构分成4组,整理得到各组的倒塌概率曲线如图4。由图可见,大部分3.6 m层高结构的抗倒塌能力要优于2.8 m层高结构,对于层数较少、跨度较小的结构尤其明显。这是因为框架层高对结构抗倒塌能力的影响主要体现在两方面:(1)有利因素:由于不同层高结构的柱轴压比基本相同,柱端塑性铰极限转动能力相近,因此层高增大,在同样柱端塑性铰极限转动情况下,柱的极限变形更大,结构的绝对耗能值要大一些,结构的抗倒塌能力有所提高;(2)不利因素:当层高增加显著时,结构侧移增大,整体结构的P-Δ效应增大,局部单柱的P-δ效应也增大,结构的抗倒塌能力下降。对于层数较少、跨度较小的结构,有利因素较为明显,而对于层数较多、跨度较大、轴压比较大的结构,则不利因素抵消了有利因素的影响。

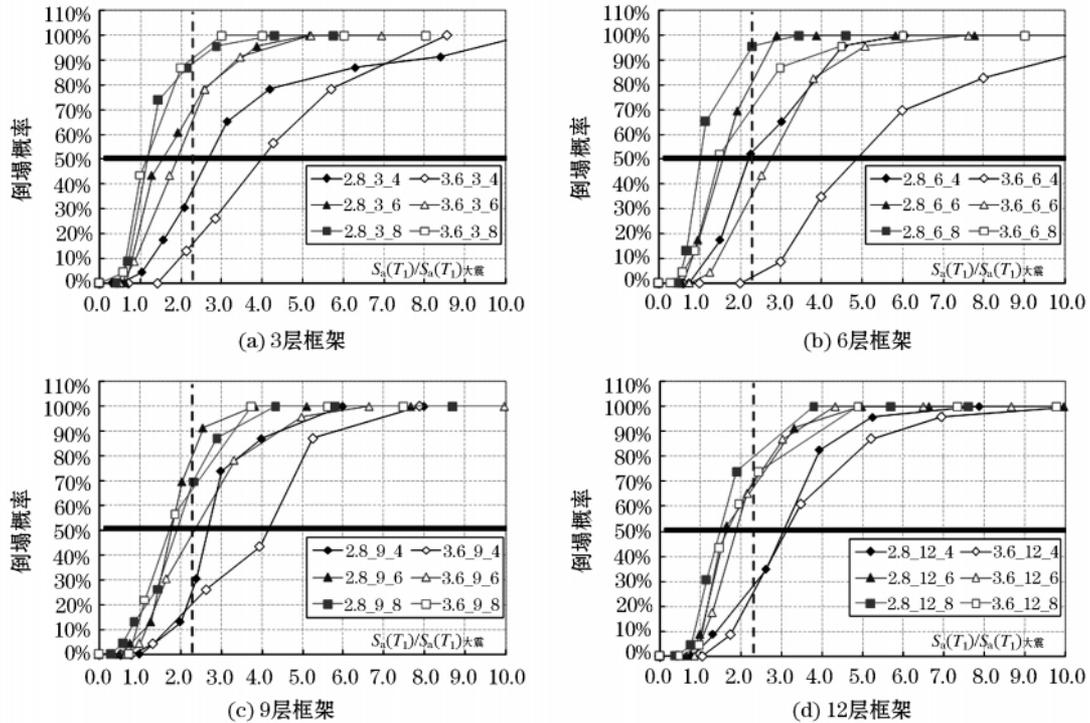


图 4 不同层高结构倒塌概率曲线比较

Fig. 4 Comparison of collapse fragility curves among structures with different storey heights

3.3 大震、巨震下的倒塌概率及其分析

各结构在大震(罕遇烈度地震)下的倒塌概率如表 2 所示。ATC-63^[8]建议以结构在大震下倒塌概率小于 10% 作为评价结构抗倒塌能力是否合格的标准。从表 2 可以看到,跨度 4 m 结构大震下的倒塌概率全部在 10% 以内,可以认为较好地满足了“大震不倒”的要求;跨度 6 m、8 m 结构大震下的倒塌概率则大部分超过了 10%,其中跨度 8 m 结构大震下的倒塌概率几乎全部超过 10% 许多,其抗倒塌能力均不满足要求。

表 2 大震下结构的倒塌概率(地面运动水平 $S_a(T_1) = S_a(T_1)_{大震}$)

Table 2 Collapse possibilities of structures under major earthquakes

	层高 2.8 m			层高 3.6 m		
	跨度 4 m	跨度 6 m	跨度 8 m	跨度 4 m	跨度 6 m	跨度 8 m
3 层	4%	24%	34%	0%	14%	43%
6 层	6%	19%	48%	0%	2%	19%
9 层	0%	8%	16%	2%	4%	15%
12 层	4%	9%	21%	0%	5%	6%

由于经济发展水平的制约,我国的地震设防烈度取值往往偏低,房屋建筑在服务年限内有可能遭遇超越大震烈度水平的特大地震。例如汶川地震大部分重灾区,设防烈度为 7 度,设计大震为 8 度,而这次地震部分地区的实际烈度竟达到了 9~11 度。因此有必要对结构在特大地震下的抗倒塌性能进行分析研究,对于 7 度设防,特大地震强度约相当于 9 度,近似取 $S_a(T_1)_{巨震} = 2.0 S_a(T_1)_{大震}$,由此从倒塌概率曲线中得到特大地震下的倒塌概率如表 3 所示。从表中可以看到,跨度 4 m 结构在特大地震下的倒塌概率大多在 20% 以内;而跨度 6 m、8 m 结构在特大地震下的倒塌概率则大部分超过了 50%,其中跨度 8 m 结构的倒塌概率全部在 50% 以上。为此,有必要开展相关研究,适当提高我国结构抵御特大地震的抗倒塌能力。

3.4 倒塌储备系数 CMR

根据公式(1)和所获得的各结构的倒塌概率曲线,可得到各结构的倒塌储备系数 CMR,如表 4 所示。根据 ATC-63 报告要求,考虑本文分析中各种不确定性影响,保证设计大震下倒塌概率小于 10% 的最小 CMR 限值为 2.30。从表 4 中可以看到,跨度 4 m 结构的 CMR 绝大多数大于 2.30,抗倒塌能力满足要求;跨度 6 m、8 m 结构的 CMR 大多小于 2.30,抗倒塌能力不满足要求。

表3 特大地震下结构的倒塌概率(地面运动水平 $S_a(T_1) = 2.0S_a(T_1)$ 大震)

Table 3 Collapse possibilities of structures under great earthquake

	层高 2.8 m			层高 3.6 m		
	跨度 4 m	跨度 6 m	跨度 8 m	跨度 4 m	跨度 6 m	跨度 8 m
3 层	28%	61%	85%	5%	52%	87%
6 层	40%	70%	90%	0%	27%	67%
9 层	13%	52%	65%	18%	40%	60%
12 层	20%	61%	75%	19%	58%	62%

表4 结构的倒塌储备系数 CMR

Table 4 Collapse margin ratios of structures

	层高 2.8 m			层高 3.6 m		
	跨度 4 m	跨度 6 m	跨度 8 m	跨度 4 m	跨度 6 m	跨度 8 m
3 层	2.7	1.5	1.2	4.0	1.9	1.2
6 层	2.2	1.6	1.0	4.8	2.7	1.5
9 层	2.6	1.8	2.0	4.2	2.2	1.7
12 层	3.1	1.6	1.4	3.1	1.9	1.5

4 结论

本文对按照我国规范设计的 24 个 7 度设防的不同跨度、层高和层数的 RC 框架结构进行抗地震倒塌能力分析。分析结果表明,虽然是同样按照规范设计,但是不同结构参数对结构在大震和特大地震的抗倒塌能力影响非常显著。导致结构倒塌的原因大多是跨度较大或层数较多而导致柱轴压比较大,首先在底层中柱发生柱脚小偏压破坏,进而引起结构连续倒塌,使整个结构的耗能能力不能得到充分发挥。因此,建议今后进一步加强结构的抗倒塌能力研究,对影响结构抗倒塌能力的关键部位采取适当的加强,以有效地提高结构在大震和巨震下的抗倒塌能力。

此外,本文分析中未考虑楼板影响。由于楼板会增强框架梁的刚度和承载力,这将会进一步改变结构的破坏模式,使得框架梁的耗能作用不能得到充分发挥,因此有可能会使得结构的抗地震倒塌能力降低。

参考文献:

- [1] 清华大学土木工程结构专家组,西南交通大学土木工程结构专家组,北京交通大学土木工程结构专家组,叶列平,陆新征. 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,曲哲,陆新征,等. 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.
- [3] 中华人民共和国建设部. GB50011-2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [4] 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.
- [5] Applied Technology Council, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings[S]. ATC-40, 1996.
- [6] Bertero V V. Strength and deformation capacities of buildings under extreme environments [M]. Structural Engineering and Structural Mechanics, NJ: Prentice-Hall, 1977: 211-215.
- [7] FEMA273, FEMA274, FEMA356, NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings[S]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 1996.
- [8] Quantification of building seismic performance factors [S]. ATC-63 Project Report (90% Draft), FEMA P695 / April 2008.
- [9] Bazzurro P, Cornell C A, Shome N et al. Three proposals for characterizing MDOF non-linear seismic response [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1998, 124(11): 1281-1289.
- [10] Vamvatsikos D, Cornell C A. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 2002, 31(3): 491-514.
- [11] Shome N, Cornell C A. Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures [R]. Report No. RMS-35, Reliability of Marine Structures Program, Department of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 1999.
- [12] 叶列平,马千里,缪志伟. 抗震分析用地震动强度指标的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(4): 150-163.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Lu XZ, Lin XC, Ma YH et al. Numerical simulation for the progressive collapse of concrete building due to earthquake[C]//Proc the 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China, CDROM.