

[文章编号] 1002-8412(2010)05-0026-10

柱轴压比对我国 RC 框架结构抗地震倒塌能力的影响

唐代远, 陆新征, 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] 首先用纤维模型和美国 ATC-63 委员会推荐的 IDA 方法, 对按照我国现行抗震规范设计的 24 个钢筋混凝土框架结构(7 度设防, 跨度、层高、层数不同)的抗地震倒塌能力进行了分析, 发现框架柱轴压比是影响框架结构抗地震倒塌能力的最主要因素, 轴压比和结构的倒塌储备系数 CMR 具有一定的线性负相关关系, 现行规范轴压比限值偏高是导致框架结构抗地震倒塌能力不足的主要原因。通过改变框架柱截面尺寸调整轴压比后的进一步分析表明, 控制轴压比可有效改善框架结构的抗地震倒塌能力。

[关键词] 框架结构; 抗倒塌能力; 增量动力分析; 倒塌概率; 轴压比

[中图分类号] TU352 [文献标识码] A

Influence of Axial Compression Ratio to the Seismic Collapse Resistance of RC Frame Structures

Tang Dai-yuan, Lu Xin-zheng, Ye Lie-ping, 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 collapse resistances of 24 reinforced concrete (RC) frame structures (in 7-degree seismic intensity zone, with different span, storey height and storey number) which are designed according to the Chinese Seismic Design Code are analyzed with fiber-beam element model and incremental dynamic analysis (IDA) that is recommended by ATC-63 Report. The results show that the axial compression ratio of columns is the most important factor affecting seismic collapse resistance of these structures and there is a negative linear correlation between axial compression ratio of columns and collapse margin ratio of structures. The upper limit of current seismic design code is too big which mostly results in the lack of collapse resistance of frame structures. Then, the axial compression ratio of all structures is unified by adjusting their column size and the modified structures are analyzed again, which show that by controlling the axial compression ratio, the seismic collapse resistance is obviously improved.

Keywords: frame structure; collapse performance; incremental dynamic analysis; collapse probability; axial compression ratio

E-mail: ylp@mail.tsinghua.edu.cn

1 引言

结构在大震下的抗倒塌能力是人民生命财产安全的重要保障。在 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, 但是仍有一些按照规范设计的结构发生倒塌破坏并造成严重人员伤亡^[1, 2], 除去地震烈度过大这一客观因素以外, 深入研究结构地震倒塌破坏机理, 对于改进和完善我国今后房屋结构抗震设计, 提高抗地震倒塌能

力具有重要意义。

由于国情国力所限, 我国结构抗震设防水准往往偏低, 全面提高我国房屋建筑结构的抗震设防水准, 目前还难以实现。因此, 分析按现行规范设计结构的抗地震倒塌能力, 发现其薄弱部位或不良结构体系, 并通过合理的概念设计和构造措施以提高其在大震和特大地震下的抗倒塌能力, 是目前抗震研究中非常有意义的研究方向。

本文通过对按照现行规范设计的 7 度设防, 跨度、层数、层高不同的 24 个钢筋混凝土框架的抗地震倒塌能力分析, 发现同样是按照规范设计的结构,

[收稿日期] 2009-08-26

[基金项目] 国家科技支撑计划项目(2009BAJ28B01)
国家自然科学基金重点项目(90815025)

其抗大震和特大地震的倒塌能力有着显著差异,而框架柱轴压比是影响结构抗倒塌能力的关键因素。通过调整框架柱尺寸,减小框架柱的轴压比,有效改善了结构的抗倒塌能力,相关成果可供改善框架结构抗地震倒塌设计参考。

2 基于 IDA 的结构抗倒塌能力分析

结构的倒塌破坏是一个非常复杂的非线性动力过程。由于工程结构体量庞大,因而,目前研究结构抗地震倒塌能力主要还是依赖于计算机数值分析。通过建立合理的结构非线性数值模型,并输入适当的地震荷载,对影响结构倒塌的机理和因素进行研究。

由于地震是一个往复动力过程,故而非线性时程分析是模拟结构地震行为最为准确的方法。但是,地震时程分析结果依赖于所输入地震波。为了实现基于时程分析全面合理评价结构的抗震性能,近年来基于大量地震波的增量动力分析方法(Incremental Dynamic Analysis,简称 IDA 方法)得到了广泛的研究和应用。

2.1 IDA 方法和地面运动强度指标

所谓 IDA 方法,就是通过输入逐步增大强度的地震记录对结构进行弹塑性时程分析,得到结构在不同强度地面运动下的破坏情况,进而可以对结构的抗震性能进行全面评价。因为 IDA 分析是基于动力弹塑性分析的,能够很好的考虑包括动力效应、损伤累积、结构倒塌全过程等诸多 Pushover 分析难以解决的问题,故而在结构的抗倒塌性能评价方面具有突出的优势。近年来,美国 ATC-63、ATC-76 计划^[3]等基于 IDA 方法的抗倒塌能力分析,代表了国际上结构抗倒塌研究的一个重要方向。

为了衡量地面运动的强度,国内外提出了很多指标,如地面峰值加速度(PGA),地面峰值速度(PGV)、结构弹性基本周期对应的有阻尼的谱加速度值 $S_a(T_1)$ 等。已有研究表明,PGA 指标很不完善^[4]。而 $S_a(T_1)$ 指标相对简单实用,与传统的 PGA 指标相比可以大大降低结构地震响应分析结果的离散性^[4,5],且和现行抗震规范有较好的衔接,因而 $S_a(T_1)$ 指标得到广泛应用^[3,5,6],包括美国 ATC-63 报告等^[3]。本文分析也以 $S_a(T_1)$ 作为地面运动强度指标。

2.2 大量地震波输入的统计分析

一次 IDA 分析只针对某一个具体地震记录,因

此地震记录的选取对计算结果至关重要。事实上,考虑到地震动的随机性,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。鉴于现在计算机强大的分析能力,采用基于大量地震记录的 IDA 分析结果进行统计已经成为可能。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。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地面的 27 条地面运动记录,具体参见文献[3]。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,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,倒塌概率也会不断增大,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),进而为评价结构的抗倒塌能力提供更科学的方法。

本文 IDA 分析采用的地震波数据库为 ATC-63 报告建议的 22 条远场地震波加上 El-Centro 波,一共 23 条。

2.3 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,美国 ATC-63 委员会建议了倒塌储备系数(Collapse Margin Ratio,简称 CMR)^[3],即比较结构的实际抗地震倒塌能力和设防需求之间的储备关系。如果结构在某一地面运动强度下(以 $S_a(T_1)$ 作为地面运动强度指标),有 50% 的地震波输入发生了倒塌,则该地面运动强度就是该结构的平均抗倒塌能力。将此地面运动强度与结构的设计大震强度比较,就可以得到结构的倒塌储备系数 CMR,即,

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

式中, $S_a(T_1)_{50\%}$ 为有 50% 地震输入出现倒塌对应的地面运动强度 $S_a(T_1)$; $S_a(T_1)_{大震}$ 为规范建议罕遇地震下的 $S_a(T_1)$,对于我国结构, $S_a(T_1)_{大震} = \alpha_{T_1,大震} \cdot g$, $\alpha_{T_1,大震}$ 为规范规定对应于周期 T_1 的大震水平地震影响系数,按照《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 是用概率表达的结构抗倒塌能力指标,考虑了地震动不确定性的影响,尽管 CMR 分析还有诸多问题(如地震波的代表性是否足够,倒塌

数值计算模型是否合理,多向地震动输入影响,设计与实际资料是否足够完备,场地特异性是否突出等),但就目前而言,CMR指标为评价不同结构的抗倒塌能力提供了一个比较科学的标准。

在CMR指标的基础上,ATC-63报告考虑到IDA分析中不可避免的会有诸多误差影响,建议了考虑不确定性因素影响的CMR可接受水准,具体可参阅文献[3]。需要强调的是,相比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,其合理性,特别是对于我国结构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比较足以说明其抗倒塌能力的差异。

2.4 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工具已经可以准确模拟结构倒塌的整个非线性过程,包括相应的材料非线性、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程序可以稳定的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^[7-9]。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。

3 结构模型及其分析

3.1 结构模型的设计参数

本文根据《建筑抗震设计规范》GB50011-2001^[10],采用PKPM软件设计了24个框架结构模型,场地类别为II类场地,设计地震分组为第二组,建筑类别为丙类,设防烈度为7度。框架结构的各跨跨度相等,各层层高相等,纵向柱距为6m。梁的混凝土强度等级为C30,梁、柱的纵向受力钢筋为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 7kN/m^2 (含楼板自重),活载标准值为 2kN/m^2 。24个结构方案的详细参数见表1。

由于结构平面规则,分析时取一榀平面框架建立THUFIBER模型,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。分析模型只考虑了框架梁柱等结构构件,暂未考虑楼板和隔墙等非结构构件。

3.2 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,框架梁基本都已出现塑性铰,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。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,8m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4m跨和6m跨的框架,故其抗倒塌能力最差。

3.3 倒塌概率曲线

计算得到不同结构的倒塌概率曲线如图2所示。根据ATC-63报告^[3],要保证结构达到在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2.30,如图2中竖虚线所示。由图2分析结果可知,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^[12,11]。此外,结构层高、层数对倒塌概率也有一定影响。研究分析表明,框架柱的轴压比是导致结构抗地震倒塌能力差异的主要原因,以下进一步进行分析。

3.4 倒塌储备系数CMR和柱轴压比的关系

根据获得的各结构的倒塌概率曲线,由式(1)可得到各结构的倒塌储备系数CMR,结果见表2。根据ATC-63报告,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2可知,跨度4m结构的CMR绝大多数大于2.30,满足抗倒塌能力要求;跨度6m、8m结构的CMR大多小于2.30,不满足抗倒塌能力要求。

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 (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 层~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 层~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 层~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 层~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 层~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 层~4 层 C40 5 层以上 C30	700 × 700	300 × 600	0.75

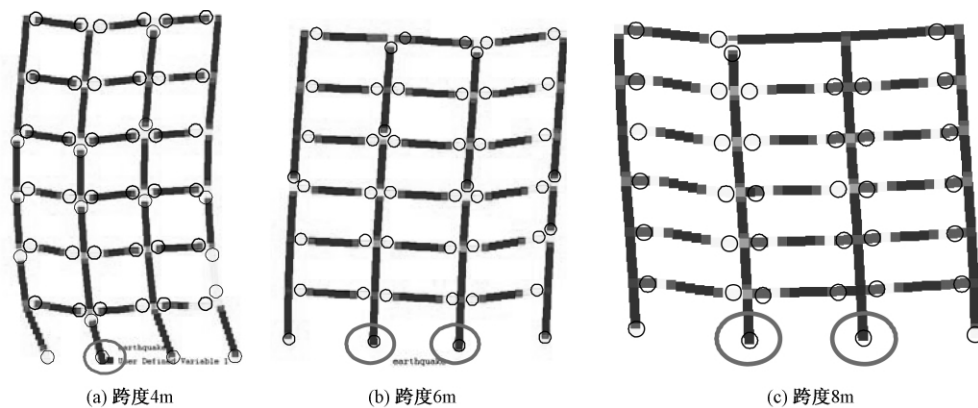


图1 典型结构倒塌时的变形情况和塑性铰分布(图中浅色区域为塑性铰区域)

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

表2 结构的倒塌储备系数 CMR

Table 2 Collapse margin ratios of structures

层数	层高 2.8m			层高 3.6m		
	跨度 4m	跨度 6m	跨度 8m	跨度 4m	跨度 6m	跨度 8m
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

图3反映了结构的倒塌储备系数 CMR 与结构最大设计轴压比(底层中柱的设计轴压比,本文中采用 PKPM 软件的计算值,即组合的柱轴压力设计值与混凝土轴心抗压强度设计值的比值)之间的关系,可以看到两者具有较好的线性负相关关系,即柱轴压比越大,框架结构的倒塌概率越大,CMR 越小。由此可见,轴压比是影响等跨框架结构抗倒塌能力的关键因素。对于 2.8m 层高结构,当设计轴压比 >0.48 时,结构倒塌储备系数 CMR 已不能满足要求;对于 3.6m 层高结构,当设计轴压比 >0.62 时,结构倒塌储备系数 CMR 也不能满足要求,这个结果均小于现行抗震规范 6.3.7 条规定的轴压比上限值(本文中抗震等级为二级的框架轴压比上限值为 0.8,抗震等级为三级的框架轴压比上限值为 0.9)。

4 轴压比的影响分析

为进一步研究轴压比对 RC 框架结构抗倒塌能力的影响,本文对前面设计的 24 个结构模型的柱截面尺寸进行了调整,将其轴压比统一调整到较低的水平,得到 24 个新的结构模型,用同样的 IDA 倒塌

概率分析方法进行了比较分析。

4.1 统一轴压比模型的设计参数

统一轴压比模型的分析有两个目标:①使得同一结构内各层柱子的平均轴压比近似相等,②使得不同结构之间相同位置的柱轴压比近似相等。为了实现每根柱的各个截面处轴压比近似相等的目标,不同楼层柱子的截面尺寸必然要发生改变。考虑到实际工程情况,设计中简化为柱截面尺寸每 3 层变化一次,截面尺寸的取值保证底层中柱和变截面层中柱的轴压比近似为 0.4 或 0.5(考虑到跨度 4m 框架的抗倒塌能力基本可以满足要求,故以表 1 中 4m 跨度结构的轴压比(3 层约为 0.4,6 层约为 0.42,9 层约为 0.53,12 层约为 0.52)为目标调整其他结构的轴压比)。考虑到构件尺寸模数,3 层和 6 层框架底层中柱的实际轴压比近似为 0.4,9 层和 12 层框架底层中柱轴压比近似为 0.5,各结构模型的柱截面尺寸和最大设计轴压比见表 3。柱的混凝土等级统一为 C30,梁的截面尺寸、混凝土等级以及抗震设计参数均与前面的原始模型相同。

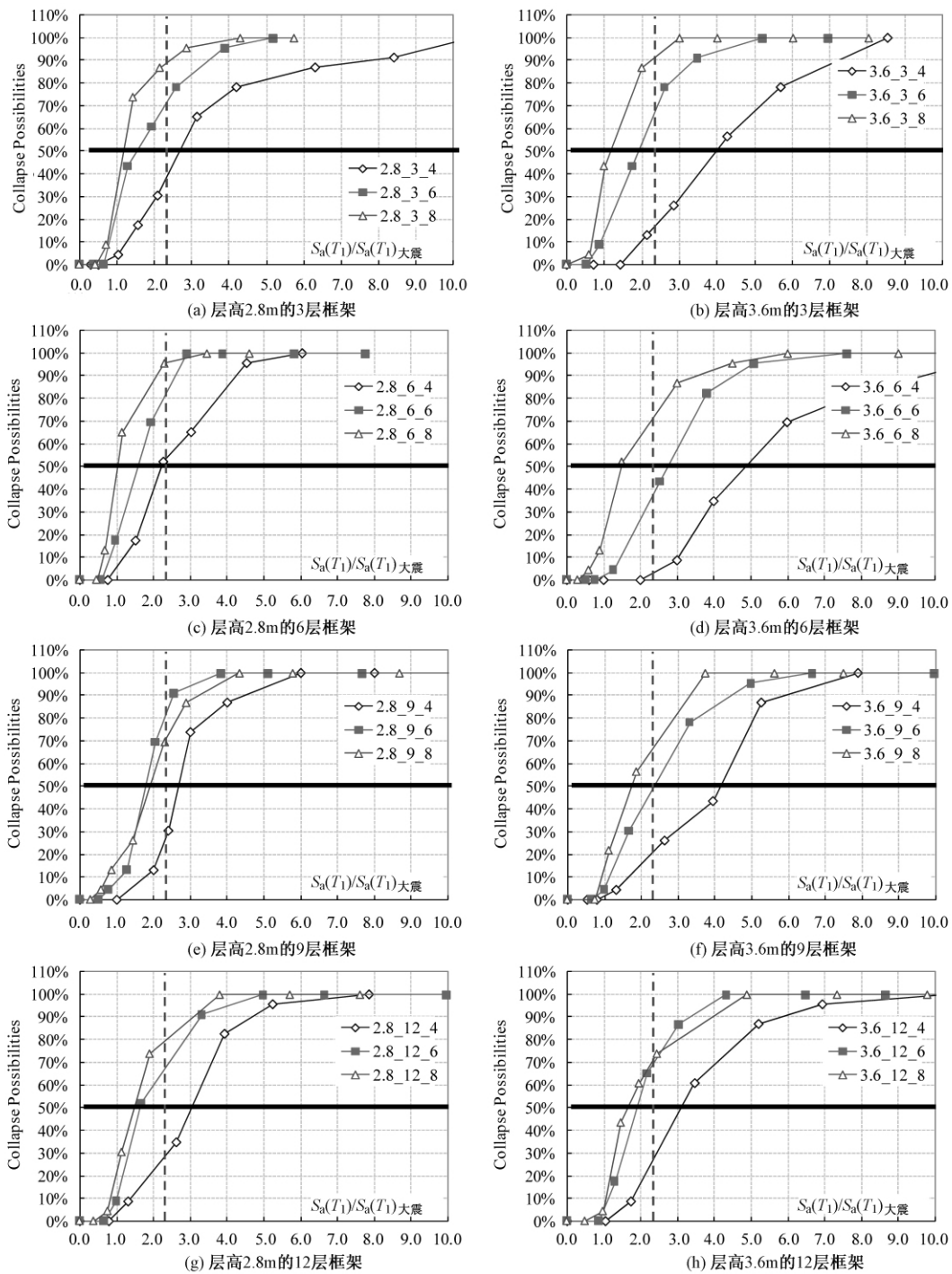


图 2 不同跨度结构倒塌概率曲线比较

Fig. 2 Comparison for collapse fragility curves of structures with different span

4.2 典型倒塌模式

按上述方法统一柱轴压比后,结构的典型倒塌模式如图 4 所示。从图中可以看出,根据轴压比调整后的框架开始倒塌时,除框架梁端基本出现塑性铰外,各层柱端也产生了一定数量的塑性铰,倒塌均

始于轴压比最大的底层中柱的小偏压破坏,结构的总耗能能力和倒塌机制有所改善。

4.3 倒塌储备系数 CMR

统一轴压比模型的 CMR 如表 4 所示。从表中可以看到,轴压比调整到较低水平后,所有结构的

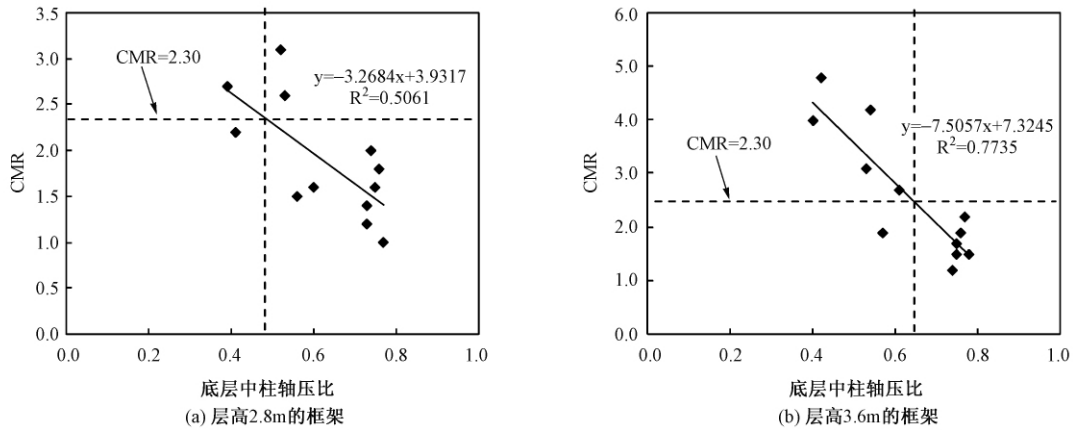


图3 CMR和底层中柱轴压比的关系

Fig.3 Relationship between CMR and axial compression ratio of the middle column of first floor

表3 统一轴压比模型柱截面尺寸(mm × mm)和最大设计轴压比

Tab.3 Column size and maximum designed axial compression ratio of models that unified axial compression ratios

跨度	楼层位置	3层框架	6层框架	9层框架	12层框架
4m	10~12层	-	-	-	400 × 400
	7~9层	-	-	400 × 400	550 × 550
	4~6层	-	400 × 400	550 × 550	600 × 600
	1~3层	400 × 400	550 × 550	600 × 600	700 × 700
	最大设计轴压比	0.40	0.42	0.52	0.52
6m	10~12层	-	-	-	500 × 500
	7~9层	-	-	500 × 500	650 × 650
	4~6层	-	500 × 500	650 × 650	750 × 750
	1~3层	500 × 500	650 × 650	750 × 750	850 × 850
	最大设计轴压比	0.37	0.44	0.50	0.53
8m	10~12层	-	-	-	550 × 550
	7~9层	-	-	550 × 550	750 × 750
	4~6层	-	550 × 550	750 × 750	850 × 850
	1~3层	550 × 550	750 × 750	850 × 850	1000 × 1000
	最大设计轴压比	0.39	0.43	0.52	0.51

CMR全部大于2.30,满足ATC-63报告建议CMR要求。另外可以看到统一调整轴压比后24个结构的CMR中最大值为5.1,最小值为2.7,最大值是最小值的1.88倍,24个结构CMR的标准差为0.61;而原24个结构模型的CMR中最大值为4.8,最小值

为1.0,最大值是最小值的4.80倍,24个结构CMR的标准差为1.00。可见统一调整轴压比后结构的CMR的离散性降低,这从另一个角度反映了轴压比和CMR的相关关系。

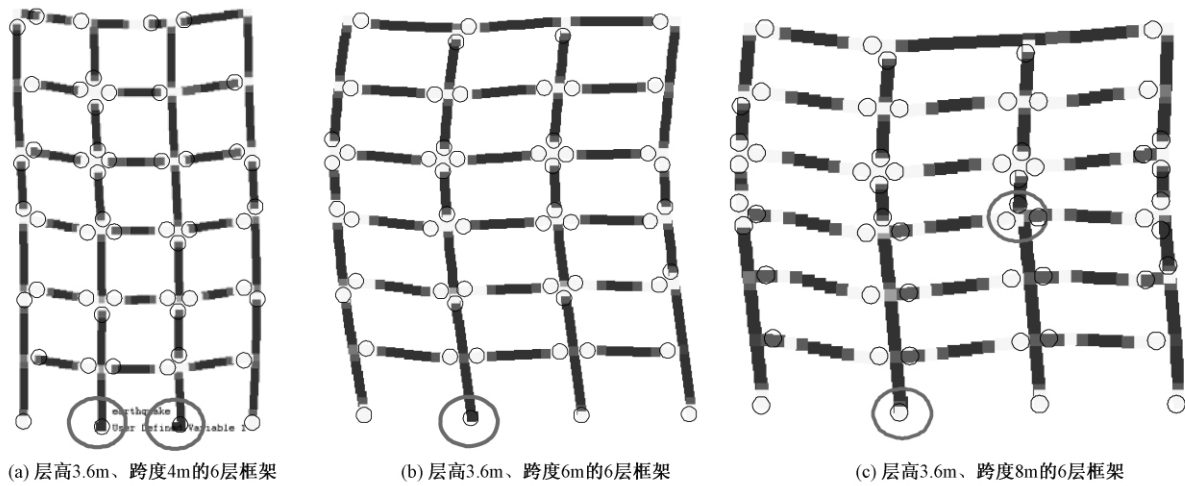


图 4 统一轴压比后典型结构倒塌时的变形情况和塑性铰分布(图中浅色区域为塑性铰区域)

Fig. 4 Deformation and plastic hinges of representative structures that unified axial compression ratios during collapse

表 4 统一轴压比结构的倒塌储备系数 CMR

Table 4 Collapse margin ratios of structures that unified axial compression ratios

层数	层高 2.8m			层高 3.6m		
	跨度 4m	跨度 6m	跨度 8m	跨度 4m	跨度 6m	跨度 8m
3 层	2.7	4.0	2.7	4.0	5.1	3.5
6 层	3.8	3.2	2.7	4.0	3.4	3.2
9 层	3.3	3.1	3.3	4.3	4.0	2.7
12 层	3.7	3.5	2.8	3.7	3.1	2.7

4.4 大震、巨震下的倒塌概率及其分析

统一轴压比前后结构在大震下的倒塌概率如表 5 所示。ATC-63^[3]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。从表中可以看到,原始 24 个结构模型中,跨度 4m 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 6m、8m 结构大震下的倒塌概率则大部分超过了 10%,其中跨度 8m 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。而统一轴压比后的 24 个结构模型在大震下的倒塌概率几乎全部为 0%,符合结构在大震下的抗倒塌要求。

由于经济发展水平的制约,我国的地震烈度取值往往偏低,房屋建筑在服务年限内有可能遭遇超越罕遇地震烈度水平的特大地震,简称“巨震”。例

如汶川地震大部分重灾区,设防烈度为 7 度,设计罕遇地震为 8 度,而这次地震的实际烈度部分地区竟达到了 9 度~11 度。因此有必要对结构在巨震下的抗倒塌性能进行分析研究,取巨震强度 $S_a(T_1)_{巨震} = 2.0S_a(T_1)_{大震}$ (相当于 9 度),则可从倒塌概率曲线中得到统一轴压比前后结构在巨震下的倒塌概率,见表 6。从表中可以看到,统一轴压比前的原 24 个结构模型中,跨度 4m 结构巨震下的倒塌概率多数在 20% 以内;而跨度 6m、8m 结构巨震下的倒塌概率则大部分超过了 50%,其中跨度 8m 结构的倒塌概率全部在 50% 以上,这在某种程度上反映了这次汶川地震遭遇巨震地区建筑倒塌的原因。而统一轴压比调整到较低水平后,巨震下的倒塌概率均在 30% 以下,大部分在 20% 以下,抗巨震倒塌能力得到显著提高。

表5 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 5 Collapse possibilities of structures under major earthquake (%)

模型	层数	层高 2.8m			层高 3.6m		
		跨度 4m	跨度 6m	跨度 8m	跨度 4m	跨度 6m	跨度 8m
原始模型	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
统一轴压比模型	3层	5	0	0	0	0	0
	6层	0	0	0	0	0	3
	9层	0	0	0	0	0	0
	12层	0	0	0	0	0	0

表6 巨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 6 Collapse possibilities of structures under great earthquake (%)

模型	层数	层高 2.8m			层高 3.6m		
		跨度 4m	跨度 6m	跨度 8m	跨度 4m	跨度 6m	跨度 8m
原始模型	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
统一轴压比模型	3层	28	10	22	10	0	10
	6层	5	16	25	0	5	18
	9层	0	16	16	9	12	25
	12层	7	15	22	10	18	30

5 结论及需进一步研究的问题

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、层数的钢筋混凝土框架结构和统一调整轴压比后的24个新结构进行了抗地震倒塌能力比较分析。分析结果表明:

(1) 按我国规范设计的跨度较大的框架结构抗地震倒塌能力不足。这是由于跨度较大导致轴压比较大,在地震下大多因底层中柱发生小偏压破坏而导致结构倒塌。

(2) 框架柱轴压比是影响框架结构抗倒塌性能的关键因素之一,降低框架柱轴压比可使得框架结构的倒塌概率显著降低。

(3) 框架的倒塌储备系数和柱轴压比有较好的线性负相关关系。

基于本文分析结果,我国现行规范规定的7度设防框架轴压比限值偏高,本文建议对于7度设防,抗震等级为二、三级的框架,轴压比限值可取为0.4~0.5,以提高结构在极端灾害下的安全水平。

由于影响结构地震倒塌的因素很多,也十分复杂,今后还需对以下问题进一步开展研究:

(1) 采用箍筋约束可改善框架柱的变形能力,也可提高结构的抗地震倒塌能力,需进一步研究箍筋约束柱后的抗倒塌能力。

(2) 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,这也需进一步研究。

(3) 本文采用平面框架模型进行分析,而实际结构为三维空间结构,分析结果可能与平面结构有一定差别。

(4) 双向或三向地震动影响。

(5) 填充墙等对结构承载力有一定贡献的非结构构件的影响。

(6) 结构规则性的影响,等等。

参考文献 (References):

- [1] 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 1~9
Analysis on Building Seismic Damage in Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 1~9 (in Chinese)
- [2] 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 L P, Qu Z, Lu X Z, 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)
- [3] Quantification of building seismic performance factors [S]. ATC-63 Project Report (90% Draft), FEMA P695/April 2008
- [4] 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
Ye L P, Ma Q L, Miao Z W. Study on earthquake intensities for seismic analysis of structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(4): 150~163 (in Chinese)
- [5] Vamvatsikos D, Cornell C A. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 2002, 31(3): 491~514
- [6] 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
- [7] 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 X L, Lu X Z, Ye L P. Numerical simulation for the hysteresis behavior of RC columns under cyclic loads [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(12): 76~81 (in Chinese)
- [8] 叶列平, 陆新征, 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. 2): 131~140
Ye L P, Lu X Z, et al. Seismic nonlinear analytical models, methods and examples for concrete structures [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(sup. II): 131~140 (in Chinese)
- [9] Lu X Z, Lin X C, Ma Y H, Li Y, Ye L P. Numerical simulation for the progressive collapse of concrete building due to earthquake [A]. Proc. the 14th World Conference on Earthquake Engineering [C]. October 12~17, 2008, Beijing, China, CDROM
- [10] GB50011-2001, 建筑抗震设计规范[S]
GB50011-2001, Code for seismic design of buildings [S] (in Chinese)
- [11] 叶列平, 陆新征, 赵世春, 李易. 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(已录用)
Ye L P, Lu X Z, Zhao S C, Li Y. Seismic collapse resistance of frame structures——Case studies on the seismic damages of several frame structures under extreme ground motion in Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Building Structures, Accepted (in Chinese)

[作者简介] 唐代远(1988~),男,北京人,硕士生,研究方向:混凝土结构抗震