

文章编号: 1000-4750(2011)03-0041-08

不同抗震设防 RC 框架结构抗倒塌能力的研究

施 炜, *叶列平, 陆新征, 唐代远

(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: 地震作用下建筑结构的抗倒塌能力是基于性能抗震设计的核心目标。建筑结构需要足够的抗倒塌安全储备, 以避免大震或特大地震的倒塌破坏。我国现行抗震设计尚缺乏大震抗倒塌定量设计方法和抗地震倒塌能力的定量评价指标。该文基于 IDA 的结构抗倒塌易损性分析方法, 定量评价了按现行规范设计的不同抗震设防烈度多层 RC 框架结构的抗地震倒塌能力和抗倒塌安全储备, 讨论了轴压比和倒塌机制对 RC 框架结构抗地震倒塌能力的影响, 并根据分析结果提出了有关建议。

关键词: 框架结构; 动力增量时程分析; 抗震设防烈度; 倒塌机制; 抗倒塌安全储备

中图分类号: TU375.4 **文献标识码:** A

STUDY ON THE COLLAPSE-RESISTANT CAPACITY OF RC FRAMES WITH DIFFERENT SEISMIC FORTIFICATION LEVELS

SHI Wei, *YE Lie-ping, LU Xin-zheng, TANG Dai-yuan

(Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry,

Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Collapse safety is the most important objective of performance-based aseismic design. Buildings should have an enough safety margin to avoid collapse subjected to a severe or mega earthquake. However, current Chinese seismic design code for building structures does not provide an explicit design or a quantitative evaluation method for collapse-resistant capacity. In this paper, the collapse-resistant capacities and safety margins against collapse of multi-story reinforced concrete (RC) frames with different seismic fortification levels are quantitatively evaluated, with a collapse fragility analysis based on an incremental dynamic analysis (IDA). The influences of the axial compression ratio and the failure mode to the collapse-resistant capacity are discussed, and suggestions are proposed to improve the current design.

Key words: frame structure; incremental dynamic analysis; seismic fortification intensity; collapse mechanism; safety margin against collapse

建筑结构抗地震倒塌能力是基于性能抗震设计的核心目标^[1]。我国在唐山地震后就提出了“小震不坏, 中震可修, 大震不倒”的三水准抗震设防目标, 并采用两阶段设计方法^[2]。但目前我国现行抗震规范第二阶段抗地震倒塌验算一般仅针对少

数重要建筑结构进行^[2]; 而对大量一般房屋建筑, 则主要依赖结构抗震概念设计和抗震构造措施来保证结构的抗倒塌能力, 缺乏抗地震倒塌的定量计算方法和抗地震倒塌能力的定量评价指标^[1]。

地震是一种突发性自然灾害, 具有极大的随机

收稿日期: 2009-07-17; 修改日期: 2010-01-29

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2009BAJ28B01); 国家自然科学基金重大研究计划重点项目(90815025); 国家科技支撑计划课题(2006BAJ03A02)

作者简介: 施 炜(1986—), 男, 上海人, 博士生, 从事混凝土结构抗震研究(E-mail: shi-w05@mails.tsinghua.edu.cn);

*叶列平(1960—), 男, 扬州人, 教授, 博士, 博导, 从事混凝土结构与结构抗震研究(E-mail: ylp@tsinghua.edu.cn);

陆新征(1978—), 男, 芜湖人, 副教授, 博士, 从事数值模拟与防灾减灾研究(E-mail: luxz@tsinghua.edu.cn);

唐代远(1988—), 男, 北京人, 硕士生, 从事混凝土结构抗震研究(E-mail: tdy05@mails.tsinghua.edu.cn).

性和不确定性。一个国家或地区抗震设防水准,是社会财富投入能力与灾害损失后果风险博弈的结果^[3-4]。由于国家经济发展水平所限,我国的抗震设防水准普遍低于美国、欧洲、日本等发达地区的抗震设防水准^[4-6]。我国发生的多次大震中,极震区及其周边区域的实际地震烈度往往比设防烈度大得多^[4],例如1978年唐山地震,实际的地震烈度达到9度—11度,与震前规定的当地设防烈度6度相比大3度—5度。2008年汶川地震也有类似之处,地震区的设防烈度大多为6度—7度,而极震区实际达到8度—11度。因此建筑结构不仅应当满足设防烈度下的抗震要求,还需要具备足够的抗倒塌安全储备来抵抗可能遭遇大震和特大震的倒塌破坏,避免造成重大生命财产损失,这就要求对结构抗地震倒塌能力和抗倒塌安全储备加以量化评估。2008年汶川地震的震害调查结果表明^[3],按照我国现行抗震规范^[2]设计的建筑结构,抗大震和特大地震的倒塌能力还有待进一步提高,为此需开展结构抗地震倒塌能力评价方法、大震抗倒塌定量设计方法和特大地震倒塌能力的研究。

本文以钢筋混凝土框架结构为例,设计了一组不同抗震设防烈度的多层RC框架结构,通过基于动力增量时程分析方法(Incremental Dynamic Analysis,简称“IDA方法”)的结构抗倒塌易损性分析,给出了结构抗地震倒塌能力和抗倒塌安全储备的定量表达,并对结构抗地震倒塌能力的影响因素进行了分析。

1 结构抗地震倒塌能力评价

1.1 结构抗地震倒塌易损性分析

结构抗地震倒塌易损性是指在未来可能遭遇的不同强度地震下发生倒塌的概率。近年来基于IDA方法的结构抗倒塌易损性分析成为目前基于性能抗震设计研究的一个热点方向^[7-8]。其主要步骤为:

1) 建立能够模拟建筑结构地震响应特性的数值模型。

2) 选择一组地震动纪录(记为 N_{total}),这些纪录能够反映结构所在场地的地震动特性,且地震记录数量足够多以反映地震动随机性,并选择合适的地震动强度指标IM(Intensity Measure)对该组地震记录进行归一化处理。

3) 在某一地震动强度下,对结构输入上述地震

记录进行弹塑性动力时程分析,得到该地震动强度下结构发生倒塌的地震动数(记为 $N_{collapse}$),由此得到该地震动强度下结构的倒塌概率($N_{collapse}/N_{total}$)。

4) 单调增加地震动强度IM,重复上一步骤,得到结构在不同地震动强度输入下的倒塌概率。

5) 以地震动强度为随机变量,按照一定的概率模型(如对数正态分布模型等)进行参数估计,获得结构在地震动强度连续变化下的倒塌概率曲线,即结构易损性曲线(Fragility Curve)。

需说明的是,上述结构抗地震倒塌易损性分析,未包括结构自身的离散性。因为与地震的随机性相比,结构自身的离散性是非常小的,也即结构地震倒塌易损性主要取决于地震动的随机性。如果引入结构自身的离散性,会使问题变得十分复杂。因此,本文分析中暂不考虑结构自身的离散性影响。

1.2 ATC-63计划与抗倒塌储备系数CMR

近年来,美国应用技术委员会(ATC, Applied Technology Council)开展了一项名为“建筑结构抗震性能指标评估”的研究计划(ATC-63计划)^[9-10],其核心是建议了一个相对标准化的结构抗倒塌易损性分析流程和评价准则,包括建议了相应的地震动数据库和各种不确定性(含结构模型的不确定性)的评价方法,结构可接受大震倒塌概率指标和计算方法等等。“抗倒塌储备系数(CMR, Collapse Margin Ratio)”也是ATC-63计划的核心内容。所谓抗倒塌储备系数CMR,就是利用结构倒塌易损性曲线,将对应50%倒塌概率的地震动强度指标 $IM_{50\%倒塌}$ 作为结构抗地震倒塌能力指标,与结构设计大震的地震动强度指标 $IM_{设防大震}$ 之比作为结构的抗倒塌安全储备指标,即:

$$CMR = IM_{50\%倒塌} / IM_{设防大震} \quad (1)$$

1.3 地震动强度指标IM

结构抗倒塌易损性分析需要选用合适的地震动强度指标IM对地震动输入进行归一化处理。已有研究表明,用PGA作为地震动强度指标很不完善^[11-12],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^[13]提出,文献[11-12,14]也认为用 $S_a(T_1)$ 作为地震动强度指标较合适。与传统的PGA指标相比,采用 $S_a(T_1)$ 指标可大大降低结构地震响应分析结果的离散性,且与现行抗震规范具有较好的衔接。故本文也选用 $S_a(T_1)$ 作为地震动强度指标。

1.4 地震动输入

结构抗倒塌易损性分析需要采用大量地震动输入进行 IDA 分析,以反映地震动的随机特性影响。ATC-63^[10]建议按以下规则选择地震动输入:

- 1) 震级 $M_s \geq 6.5$ 。
- 2) 震源位于走滑断层或逆冲断层。
- 3) 观测场地为基岩或硬土场地,场地土剪切波速 $V_s \geq 180\text{m/s}$ 。
- 4) 近场地震断层距 $R \leq 10\text{km}$,远场地震断层距 $R > 10\text{km}$ 。
- 5) 同一地震事件不超过两条记录。

- 6) 强震记录, $\text{PGA} > 0.2\text{g}$ 且 $\text{PGV} > 15\text{cm/s}$ 。
- 7) 观测对象为自由地表或者低层建筑的首层地面。
- 8) 强震仪的有效频率范围至少达到 4s。

根据上述地震动选取原则,ATC-63 推荐了相应的地震记录数据库,包括远场的 22 条地面运动记录和近场的 27 条地面运动记录。本文抗倒塌易损性分析采用的地震波数据库为 ATC-63 报告建议的 22 条远场地震动记录,另外增加常用的 El-Centro 地震动记录,一共 23 条,如表 1 所示。

表 1 地震动输入
Table 1 Ground motion records

震级	发生年份	名称	地震台	分量	
1	6.7	1994	Northridge, USA	Beverly Hills-Mulhol	NORTHR/MUL279
2	6.7	1994	Northridge, USA	Canyon Country-WLC	NORTHR/LOS270
3	7.1	1999	Duzce, Turkey	Bolu	DUZCE/BOL090
4	7.1	1999	Hector Mine, USA	Hector	HECTOR/HEC090
5	6.5	1979	Imperial Valley, USA	Delta	IMPVALL/H-DLT352
6	6.5	1979	Imperial Valley, USA	EI Centro Array #11	IMPVALL/H-E11230
7	6.9	1995	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	KOBE/NIS090
8	6.9	1995	Kobe, Japan	Shin-Osaka	KOBE/SHI090
9	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Duzce	KOCAELI/DZC270
10	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Arcelik	KOCAELI/ARC090
11	7.3	1992	Landers, USA	Yermo Fire Station	LANDERS/YER360
12	7.3	1992	Landers, USA	Coolwater	LANDERS/CLW-TR
13	6.9	1989	Loma Prieta, USA	Capitola	LOMAP/CAP090
14	6.9	1989	Loma Prieta, USA	Gilroy Array #3	LOMAP/GO30090
15	7.4	1990	Manjil, Iran	Abbar	MANJIL/ABBAR-T
16	6.5	1987	Superstition Hills, USA	EI Centro Imp. Co.	SUPERST/B-ICC090
17	6.5	1987	Superstition Hills, USA	Poe Road (temp)	SUPERST/B-POE360
18	7.0	1992	Cape Mendocino, USA	Rio Dell Overpass	CAPEMEND/RIO360
19	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	CHY101	CHICHI/CHY101-N
20	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	TCU045	CHICHI/TCU045-N
21	6.6	1971	San Fernando, USA	LA-Hollywood Stor	SRERNPEL180
22	6.5	1976	Friuli, Italy	Tolmezzo	FRIULI/A-TMZ270
23	7.0	1940	Imperial Valley, USA	EI Centro Array #9	IMPVALL/I-ELC180

1.5 结构数值模型

准确有效的数值模型是结构抗倒塌易损性分析的基础。本文采用清华大学土木系基于 MSC.MARC 分析软件开发的钢筋混凝土杆系结构纤维模型 ThuFiber 程序进行建模和分析。文献[15-17]对 ThuFiber 程序的适用性和准确性进行了验证,表明在模拟钢筋混凝土构件和整体结构行为方面都具有相当的准确度,对分析结构倒塌过程具有很好的收敛性。

1.6 结构倒塌判断准则

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^[15-17]已经可以准确模拟直至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。故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。当结构进入倒塌阶段后,位移会不断增大。在计算分析中,当结构构件坠落(竖向位移)超过 1/3 层高,视为倒塌已经充分发展。

2 结构设计

本文设计了一组抗震设防烈度不同而其他设计条件均相同的钢筋混凝土框架结构。所有结构均按照Ⅱ类场地、第2设计地震分组的丙类结构进行设计,抗震设防烈度分别为6度(0.05g)、7度(0.10g)、7.5度(0.15g)、8度(0.20g)和8.5度(0.30g)共5个结构模型,编号分别为SF1-6、SF1-7、SF1-7.5、SF1-8

和SF1-8.5。结构平面见图1(a)所示具有代表性的内廊式平面布置,常见于学校和医院;结构立面见图1(b),共6层,除底层层高4.1m外,其他层高均3.7m,总高22.6m。楼面恒荷载标准值取 6kN/m^2 ,房间活荷载标准值取 2kN/m^2 ,走廊活荷载标准值取 3.5kN/m^2 ;屋面恒荷载标准值取 7kN/m^2 ,屋面活荷载取雪荷载 0.4kN/m^2 ;隔断墙与维护墙荷载标准值取 8kN/m 。

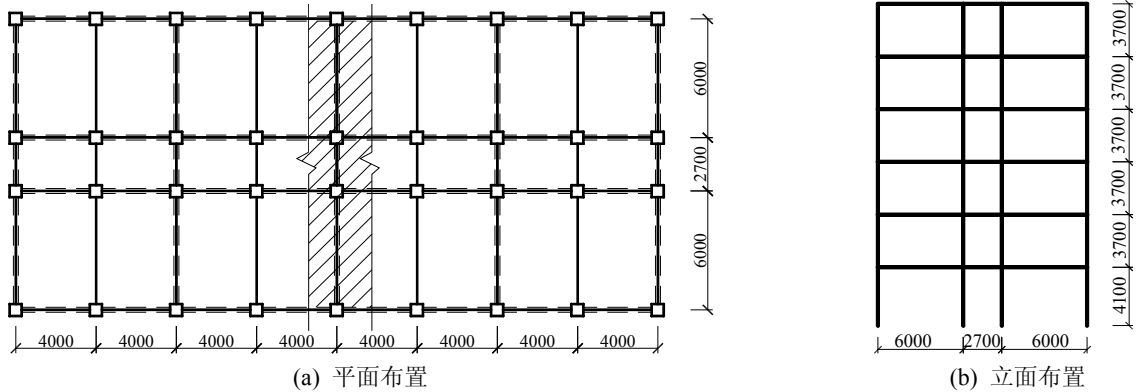


图1 结构布置

Fig.1 Structural layout

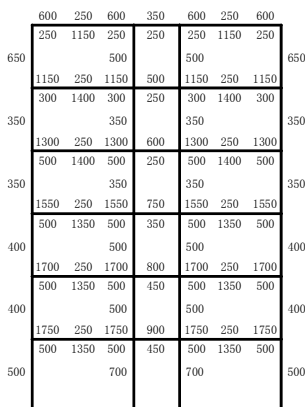
对中间榀框架(图1(a)中阴影部分)进行设计、建模和分析。弹塑性分析的竖向荷载取阴影范围内所有恒载和50%的活载。按我国现行建筑抗震设计规范^[2]进行设计,梁柱截面见表2,梁柱配筋由PKPM软件计算结果、并按构造配筋和规范^[2]规定

限值给出,参见图2。本文所设计的框架结构,柱截面尺寸主要由小震下最大层间位移角限值控制,随着抗震设防烈度的提高,柱截面尺寸也随之增加。由于结构自重变化不大,故最大柱轴压比逐渐减小,如表3。

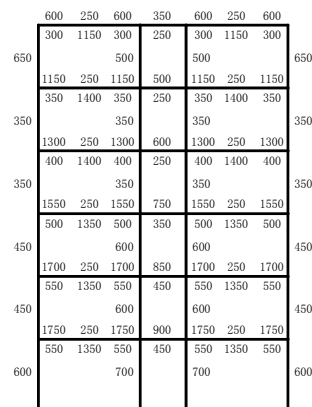
表2 截面尺寸与材料强度

Table 2 Cross-section sizes and material strengths

结构编号	SF1-6	SF1-7	SF1-7.5	SF1-8	SF1-8.5
边梁截面尺寸/mm	200×450	200×450	300×500	300×500	300×500
中梁截面尺寸/mm	200×300	200×300	300×300	300×300	300×300
1层-3层柱截面尺寸/mm	400×400	400×400	600×600	600×600	800×800
4层-6层柱截面尺寸/mm	300×400	300×400	400×600	400×600	600×800
梁柱混凝土等级	C30				
梁柱纵筋种类	HRB335				



(a) SF1-6



(b) SF1-7

600	250	600	350	600	250	600
400	800	400	250	400	800	400
850		700		700		850
1050	250	1050	650	1050	250	1050
450	950	450	450	450	950	450
500		500		500		500
1350	250	1350	950	1350	250	1350
600	950	600	700	600	950	600
500		500		500		500
1750	250	1750	1250	1750	250	1750
750	950	750	1000	750	950	750
900		900		900		900
1950	250	1950	1450	1950	250	1950
850	950	850	1200	850	950	850
900		900		900		900
1800	250	1800	1300	1800	250	1800
800	950	800	1050	800	950	800
1000		950		950		1000

(c) SF1-7.5

750	350	750	450	750	350	750
500	850	500	350	500	850	500
1000		1000		1000		1000
1300	350	1300	800	1300	350	1300
500	1000	500	550	500	1000	500
500		600		600		500
1900	500	1900	1150	1900	500	1900
800	1000	800	900	800	1000	800
500		500		500		500
2350	600	2350	1500	2350	600	2350
1050	1000	1050	1200	1050	1000	1050
1000		1000		1000		1000
2600	650	2600	1700	2600	650	2600
1200	1000	1200	1400	1200	1000	1200
1000		1000		1000		1000
2300	600	2300	1450	2300	600	2300
1050	1000	1050	1200	1050	1000	1050
1250		1150		1150		1250

(d) SF1-8

1100	350	1100	700	1100	350	1100
500	750	500	650	500	750	500
1300		1300		1300		1300
1700	450	1700	950	1700	450	1700
650	950	650	750	650	950	650
1300		1300		1300		1300
2150	550	2150	1300	2150	550	2150
850	950	850	1100	850	950	850
1300		1300		1300		1300
2500	650	2500	1600	2500	650	2500
1600		1600		1600		1600
2500	650	2500	1600	2500	650	2500
1600		1600		1600		1600
1150	950	1150	1350	1150	950	1150
1600		1600		1600		1600
2000	500	2000	1200	2000	500	2000
1850	950	850	1000	850	950	850
		1650		1650		1850

(e) SF1-8.5

(说明: 1. 框架梁分三段配筋, 框架柱通长配筋; 2. 图中标注的数字为梁或柱单侧配筋, 单位 mm²; 3. 框架均满足“强剪弱弯”要求, 不会发生剪切破坏, 因而纤维梁模型中不必专门考虑箍筋的抗剪行为。箍筋的约束效果由纤维模型中混凝土的应力-应变关系来体现)

图2 梁柱配筋

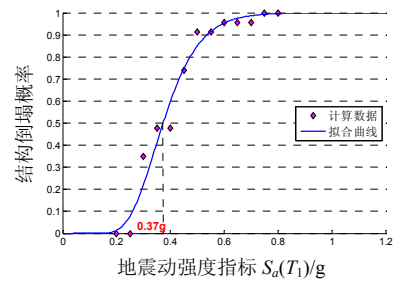
Fig.2 Reinforcement in columns and beams

表3 结构最大柱轴压比和小震下最大层间位移角
Table 3 Largest column axial compression ratio and maximum story drift ratio under frequent earthquake

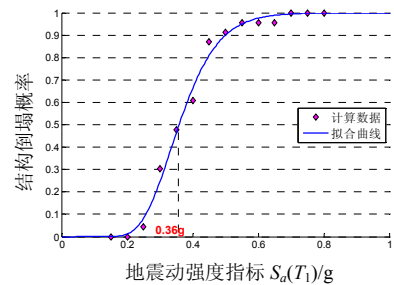
结构编号	SF1-6	SF1-7	SF1-7.5	SF1-8	SF1-8.5
最大柱轴压比	0.64	0.65	0.34	0.32	0.21
《规范》轴压比限值 ^[2]	—	0.9	0.9	0.8	0.8
小震下最大层间位移角	1/1416	1/708	1/835	1/577	1/648

3 结构抗倒塌易损性分析结果

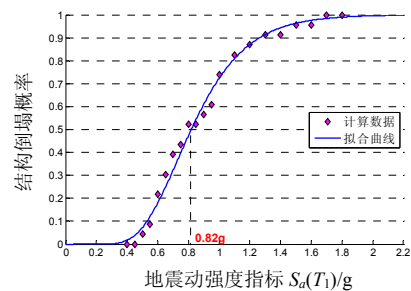
根据前述方法分析得到的上述不同设防烈度框架结构算例的倒塌概率(图3中数据点), 按对数正态分布进行拟合^[8,10], 得到各算例的倒塌概率曲线(图3中曲线), 即结构易损性曲线。由此得到不同设防烈度框架结构在相应罕遇地震时的倒塌概率如表4所示, 分别为0%、4%、0%、0%和0%。ATC-63 报告建议: “在设防大震下倒塌概率小于10%即认为达到大震性能的要求”^[10], 可见本文按照现行抗震规范^[2]设计的框架能够满足要求, 即满足“大震不倒”的设防目标。



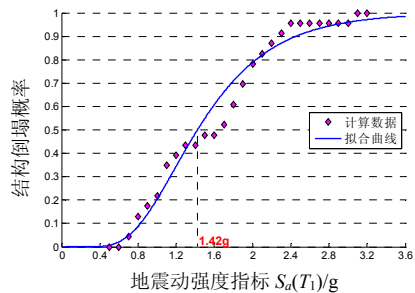
(a) SF1-6



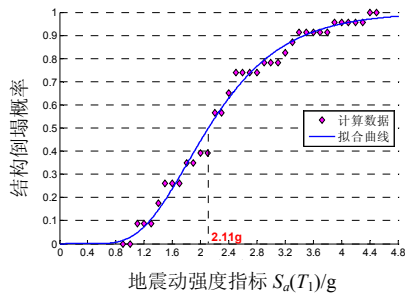
(b) SF1-7



(c) SF1-7.5



(d) SF1-8



(e) SF1-8.5

图 3 结构倒塌易损性曲线

Fig.3 Structural fragility curves

表 4 不同设防烈度 RC 框架结构的倒塌率和 CMR

Table 4 Collapse probabilities and CMR for RC frame with different seismic fortification levels

结构编号	SF1-6	SF1-7	SF1-7.5	SF1-8	SF1-8.5
罕遇地震下倒塌率	0%	4%	0%	0%	0%
巨震下倒塌率	0%	65%	4%	13%	0%
CMR	3.29	1.60	2.06	2.70	2.82

考虑到遭遇特大地震的可能性，本文建议“特大地震”烈度取值如表 5 所示。表 4 也给出不同设防烈度框架算例在特大地震的倒塌概率，分别为 0%、65%、4%、13%和 0%，可见 7 度设防结构在特大地震下的抗倒塌能力明显大于其它设防结构，这与汶川地震中 7 度设防区框架结构震害严重和倒塌率较大的现象是一致的。

当以 $S_a(T_1)$ 作为地面运动强度指标时，式(1)结构抗倒塌储备系数 CMR 可以写作：

$$CMR = S_a(T_1)_{50\%倒塌} / S_a(T_1)_{大震} \quad (2)$$

表 5 对应不同抗震设防烈度各个地震水准的烈度水平

Table 5 Corresponding intensities at variant earthquake levels for different seismic fortification levels

设防烈度	6	7	7.5	8	8.5	9
多遇地震 PGA /gal	18	35	55	70	110	140
频遇地震 PGA /gal	50	100	150	200	300	400
罕遇地震 PGA /gal	110	220	310	400	510	620
特大地震 PGA /gal	220	400	400	620	620	800
PGA 罕遇地震/PGA 频遇地震	2.2	2.2	2.1	2.0	1.7	1.55
PGA 特大地震/PGA 频遇地震	4.4	4.0	2.7	3.2	2.1	2.0

不同设防烈度框架结构的抗倒塌储备系数 CMR 指标比较如表 4 和图 4。除 6 度设防的 SF1-6 外，其余结构的 CMR 指标随着抗震设防烈度的提

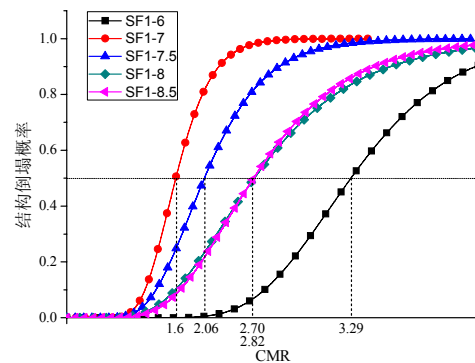
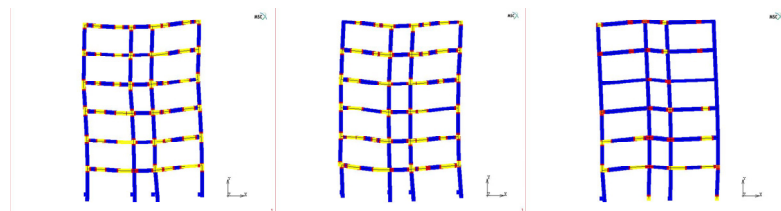
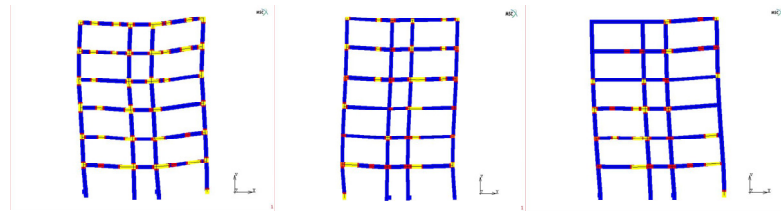


图 4 不同抗震设防烈度 RC 框架结构的 CMR 比较

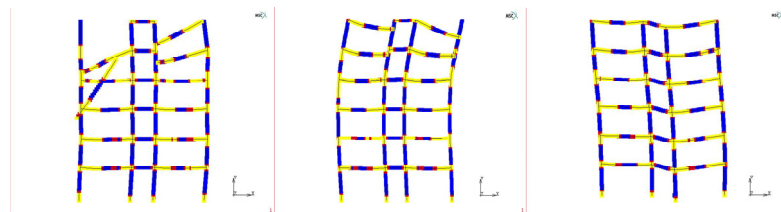
Fig.4 Comparison of CMR of RC frames with different seismic fortification levels



(a) SF1-6(PGA=1.0g)



(b) SF1-7(PGA=1.5g)



(c) SF1-7.5(PGA=2.0g)

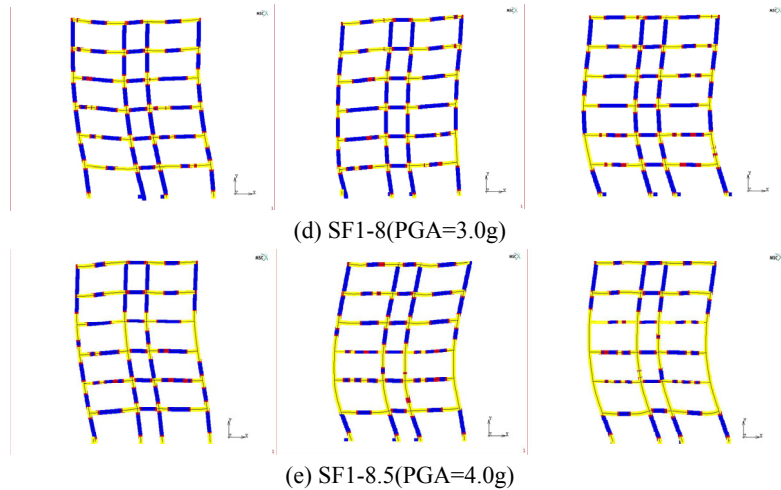


图 5 不同抗震设防烈度 RC 框架结构临界倒塌时的典型状态

Fig.5 Typical critical states of collapse of RC frames with different fortification levels

高而增大。其中，7 度(0.10g)设防的 SF1-7 结构的 CMR 最低，仅为 1.6，是 SF1-7—SF1-8.5 四个结构中抗倒塌能力最低的。SF1-6 由于设计地震力很小，配筋主要由重力荷载或构造确定，实际抗侧承载力相对于设计地震力有较大的储备，所以其 CMR 指标也较高。

4 结构破坏模式分析

通过上述框架结构算例的抗倒塌易损性分析发现，同样是按照规范设计的结构，其抗倒塌安全储备和抗大震、特大地震倒塌能力存在显著差异。为了研究造成上述差异的原因，以下进一步对结构的破坏模式进行分析。图 5 给出了不同设防烈度框架结构算例在表 1 地震动 1、地震动 2、地震动 23 输入下的临界倒塌状态，图 5 中浅色区域为屈服塑性区。由图 5 可见，由于地震动的随机性，同一结构在不同地震输入下的倒塌失效模式存在差异。但基本变化规律是，随着结构设防烈度的提高，结构临界倒塌时发生屈服的塑性区越来越多，塑性变形

发展程度也越来越大，即全部或大部分构件均参与抵抗地震作用，耗散地震输入能量。

由于结构设计受多种设计条件控制，结构中存在大量按照构造配筋的框架柱，而由抗震计算配筋的框架柱多集中于底层和顶层，如图 6 所示。在地震作用下，相对于底层由抗震计算配筋的框架柱，其它由构造配筋柱的承载力储备较高，屈服出现较晚，塑性程度较小。只有当结构底层框架柱具有足够的塑性变形能力时，由构造配筋柱的承载力、延性和耗能能力才能得以发挥。各框架模型的最大设计柱轴压比均在底层，其值见表 3。由于轴压比对柱子的延性影响至关重要，故底层柱轴压比对框架结构的抗倒塌能力和抗倒塌安全储备有着决定性影响。结构抗倒塌安全储备指标 CMR 与最大设计柱轴压比存在负相关性很好地证明了这一点，见图 7。由此可知，合理控制柱最大设计轴压比，尤其是合理控制底层框架柱的设计轴压比，可保证框架结构的抗地震倒塌能力。

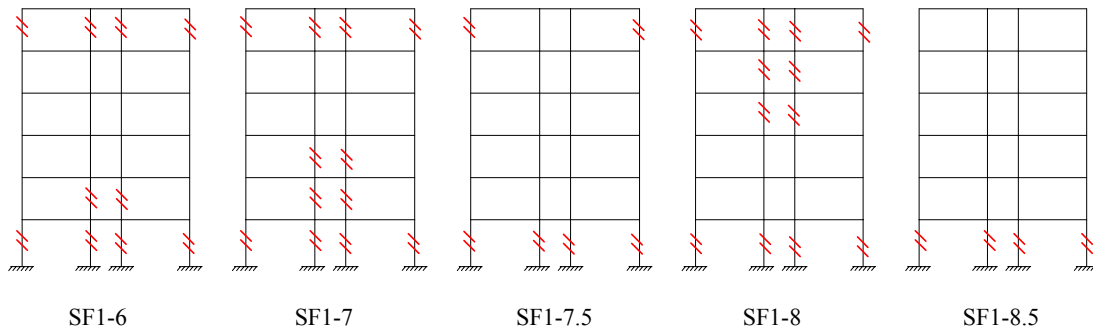


图 6 不同设防烈度 RC 框架中由抗震计算配筋柱的分布(\\表示)

Fig.6 Distribution of columns with calculated reinforcement of RC frames with different fortification levels (illustrated with \\)

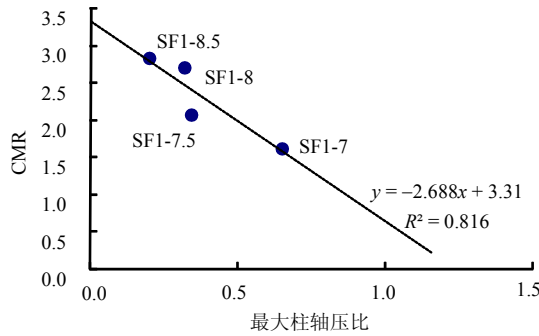


图7 最大柱轴压比和 CMR 的关系

Fig.7 Relation between largest column axial compression ratio and CMR

5 结论

本文按我国现行抗震规范设计了一组不同抗震设防烈度的多层 RC 框架结构,应用基于 IDA 方法的结构抗倒塌易损性分析,对按我国抗震规范设计的 RC 框架结构的抗地震倒塌能力和抗倒塌安全储备进行了分析研究。分析结果表明:

(1) 在大震作用下基本能够满足抗倒塌要求,但在遭遇特大地震时,7 度(0.10g)设防框架的抗倒塌能力明显存在不足。

(2) 柱轴压比是影响结构抗地震倒塌能力的重要因素。设防烈度低(6 度,7 度(0.10g))的结构往往柱截面尺寸较小,底层柱轴压比较大,缺乏足够的变形能力,是导致结构倒塌的薄弱部位。随着设防烈度的提高,柱截面尺寸相应增大,柱轴压比减小,底层柱的变形能力增强,遭遇强震时结构中有更多的其它楼层构件参与抵抗地震作用、耗散地震能量的能力增大,抗地震倒塌能力的抗倒塌安全储备相对较高。

(3) 建议规范可考虑更严格控制轴压比,或增加底层框架柱的箍筋约束,来提高低设防烈度(尤其是 7 度设防)框架结构的底层柱抗震性能,提高其抗地震倒塌能力。

参考文献:

- [1] 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 Lieping, Qu Zhe, Lu Xinzhen, Feng Peng. Collapse prevention of building structures: A lesson from the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 42—50. (in Chinese)
- [2] GB 50011-2001, 建筑抗震设计规范[S]. 2001.

- GB 50011-2001, Code for seismic design of buildings [S]. 2001. (in Chinese)
- [3] 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.
Civil and structural groups of Tsinghua University, Xinan Jiaotong University, Beijing Jiaotong University. Analysis on building seismic damage in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 1—9. (in Chinese)
- [4] 陈肇元. 跋——汶川地震教训与震后建筑物重建、加固策略[C]. 汶川地震——建筑震害调查与灾后重建分析报告. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Chen Zhaoyuan. Postscrip: lessons from Wenchuan earthquake and strategies for post-earthquake reconstruction and retrofit [C]. Wenchuan earthquake: Report of Building Seismic Damage Survey and Post-earthquake Reconstruction Analysis. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese)
- [5] 欧进萍, 李惠, 吴斌, 郭安新. 地震工程灾害与防御(II)——建筑抗震设防规范分析与比较[C]. 汶川地震——建筑震害调查与灾后重建分析报告. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Ou Jinping, Li Hui, Wu Bin, Guo Anxin. Earthquake engineering disaster and fortification (II): analysis and comparison of seismic design code [C]. Wenchuan earthquake: Report of Building Seismic Damage Survey and Post-earthquake Reconstruction Analysis. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese)
- [6] 潘鹏, 曹海韵, 潘振华, 钱稼茹. 中日建筑抗震设防标准和抗震设计方法比较[C]. 汶川地震——建筑震害调查与灾后重建分析报告. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Pan Peng, Cao Haiyun, Pan Zhenhua, Qian Jiaru. Comparison of seismic fortification level and seismic design between China and Japan [C]. Wenchuan earthquake: Report of Building Seismic Damage Survey and Post-earthquake Reconstruction Analysis. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese)
- [7] Baker J W, Cornell C A. A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 2005, 34: 1193—1217.
- [8] Zareian F, Krawinkler H. Assessment of probability of collapse and design for collapse safety [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 2007, 36: 1901—1914.
- [9] Kircher C A, Heintz J A. The ATC-63 Project [J]. Building Safety Journal, 2008: 40—43.

(参考文献[10]—[17]转第 68 页)

- seismic countermeasures of timber houses in villages and towns [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2006, 28(6): 94—101. (in Chinese)
- [7] 孟萍, 潘文, 黄海燕. 云南地区村镇木结构房屋震害分析及补救措施[J]. *工程抗震与加固改造*, 2005, 27(S1): 196—199.
Meng Ping, Pan Wen, Huang Haiyan. The analyze of the building with wood framework in the villages and small towns in yunnan spacious region and the measures of remediation. *earthquake resistant engineering and retrofitting* [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2005, 27(S1): 196—199. (in Chinese)
- [8] 潘兴庆, 陶忠, 潘文. 云南宁洱 6.4 级地震村镇民居震害分析[J]. *四川建筑科学研究*, 2007, 33(S1): 21—25.
Pan Xingqing, Tao Zhong, Pan Wen. Damage analysis of rural houses from earthquake on June 3, 2007, Ning'er, Yunnan province [J]. *Sichuan Building Science*, 2007, 33(S1): 21—25. (in Chinese)
- [9] Chang K C, Soong T T, Oh S-T, Lai M L. Seismic Response of a 2/5 Scale Steel Structure with Added Viscoelastic Dampers [R]. Technical Report NCEER-91-0012, Department of Civil Engineering State University of New York at Buffalo, Buffalo, New York 14260, 1991.
- [10] Inaudi J A. Time-domain analysis of linear hysteretic damping [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1996, 25: 529-545.
- [11] 周燕. 砖木结构 1/4 模型振动台试验与理论研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
Zhou Yan. The shaking test and theory investigation for 1/4 scale half-timbered model [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007. (in Chinese)
- [12] 周云. 粘弹性阻尼减震结构设计[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2006.
Zhou Yun. Design of aseismic structures with viscoelastic damper [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2006. (in Chinese)

(上接第 48 页)

- [10] Applied Technology Council, Federal Emergency Management Agency. Quantification of building seismic performance factors [R]. America: FEMA, 2008.
- [11] 叶列平, 马千里, 缪志伟, 陆新征. 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): 9—22.
Ye Lieping, Ma Qianli, Miao Zhiwei, Lu Xinzheng. Study on earthquake intensities for seismic analysis [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2009, 29(4): 9—22. (in Chinese)
- [12] 马千里. 钢筋混凝土框架结构基于能量抗震设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
Ma Qianli. Study on energy-based seismic design methodology and application for RC frames [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese)
- [13] Bazzurro P, Cornell C A, Shome N. Three proposals for characterizing MDOF non-linear seismic response [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1998, 124(11): 1281—1289.
- [14] Vamvatsikos D, Cornell C A. Incremental dynamic analysis [J]. *Earthquake Engineering and Structure Dynamics*, 2002, 31(3): 491—514.
- [15] 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 Xunliu, Lu Xinzheng, Ye Lieping. Numerical simulation for the hysteresis behavior of RC columns under cyclic loads [J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(12): 76—81. (in Chinese)
- [16] 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(增刊 II): 131—140.
Ye Lieping, Lu Xinzheng, Ma Qianli, Wang Xunliu, Miao Zhiwei. Seismic nonlinear analytical models, methods and examples for concrete structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(Sup. II): 131—140. (in Chinese)
- [17] 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 [C]. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China, CDROM, 2008.