

文章编号: 1000-4750(2016)08-0024-08

减震设计与抗震设计RC框架结构 抗地震倒塌能力对比

缪志伟, 宋前恩, 李爱群

(东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096)

摘 要: 与传统抗震设计不同, 结构的消能减震设计通过在结构上设置减震装置以消耗地震输入能量, 达到减轻主体结构地震响应的目的, 在满足相同的设计要求下, 减震设计结构由于阻尼器的耗能作用, 其截面尺寸或配筋较抗震设计结构有一定的优化。根据我国抗震规范, 按传统抗震方法和消能减震方法分别设计了一组钢筋混凝土框架结构。采用基于动力增量时程分析方法的抗倒塌易损性分析流程, 对不同设计方法所设计的框架结构的抗地震倒塌能力和抗倒塌安全储备进行了定量评价, 并对计算结果进行了对比分析。根据分析结果提出了提高高烈度区减震设计框架结构抗倒塌能力的相关措施, 并通过算例验证了所提措施的有效性。

关键词: RC 框架结构; 抗震设计; 消能减震设计; 抗倒塌易损性分析; 抗地震倒塌能力; 抗倒塌安全储备

中图分类号: TU375.4 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.04.0302

COMPARISON OF COLLAPSE-RESISTANCE CAPACITIES OF RC FRAMES WITH AND WITHOUT DAMPERS

MIAO Zhi-wei, SONG Qian-en, LI Ai-qun

(Key Laboratory of Concrete and Pre-stressed Concrete Structures of China Education Ministry, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Different from conventional seismic design methods, seismic damping design method adds dampers in a structure which can dissipate input energy to control the structural seismic response. As a result, the member section sizes or the amount of reinforcement in the structure with dampers may be reduced from those without dampers. A series of reinforced concrete frame structures with nonlinear viscous fluid dampers as well as those ordinary frames without dampers are designed based on the current Chinese seismic design code for different seismic hazard levels. The seismic collapse-resistance capacity and safety margin of all these frames are calculated and compared through a collapse fragility analysis based on an incremental dynamic analysis approach. According to the results, a suggestion is proposed to enhance the collapse-resistance capacity of damping designed structures for high seismic hazard levels, and the effectiveness of the suggestion is verified.

Key words: RC frame structure; seismic design; seismic damping design; collapse fragility analysis; collapse-resistance capacity; safety margin against collapse

传统抗震技术采用加强结构、加大构件截面尺寸、加多构件配筋, 提高结构刚度等“硬抗”的方法来抵抗地震作用, 而减震控制则通过在结构上设

置减震装置, 消耗地震能量、调整结构动力特性, 达到减轻结构地震响应的目的^[1]。由于减震控制方法概念简单、减震机理明确、减震效果显著、安全

收稿日期: 2015-04-16; 修改日期: 2016-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008078); 东南大学-海达股份隔震技术联合研发中心项目

通讯作者: 缪志伟(1981—), 男, 江苏南通人, 副教授, 博士, 从事建筑结构抗震设计研究(E-mail: zhiweiseu@sina.com)。

作者简介: 宋前恩(1990—), 男, 江苏徐州人, 硕士生, 从事结构抗震减震分析研究(E-mail: songqianen@sina.cn);

李爱群(1962—), 男, 湖南耒阳人, 教授, 博士, 博导, 从事工程防灾减灾研究(E-mail: aiqunli@seu.edu.cn)。

可靠且不需要外部能源的输入^[2],近年来取得了很大的发展,并研究出一系列的消能减震装置,如金属阻尼器、摩擦阻尼器、黏滞流体阻尼器和粘弹性阻尼器,其中,黏滞流体阻尼器由于对结构不附加刚度、对温度不敏感、且产生的阻尼力与位移具有 $\pi/2$ 的相位差等优点,被广泛应用于既有建筑的抗震加固及新建建筑的抗风与抗震设计中^[3]。

当黏滞流体阻尼器应用于既有建筑的抗震加固时,在地震作用下,由于黏滞流体阻尼器对结构不附加刚度而只附加阻尼,所以不会增大原结构所受的地震作用,而且附加阻尼可以耗散大量能量,减弱主体结构的地震响应,加固后结构的抗震性能必然优于原结构^[4]。

当黏滞流体阻尼器应用于新建建筑物的抗震设计时,考虑阻尼器的消能减震作用,主体结构可以适当降低地震力进行设计(在我国的工程实践中,大多按降低半度地震作用进行减震结构的主体结构设计)。这样常常能够有效解决常规抗震设计中的主体结构构件尺寸过大或截面配筋超筋等问题。但从另一个角度看,附加黏滞流体阻尼器的减震设计结构,其截面或配筋与相同烈度地震作用下对应的常规抗震设计结构相比,是有一定的削弱的。

此外,地震是一种突发性的自然灾害,具有极大的随机性,在我国发生的多次大震中,极震区及其周边区域的实际烈度往往比设防烈度大得多^[5],例如2008年的汶川地震,地震区的设防烈度大多为6度~7度,而极震区实际烈度达到8度~11度,大量建筑结构发生倒塌破坏。不论是减震设计结构还是抗震设计结构不仅需要满足设防烈度下的抗震要求,还需要足够的抗倒塌安全储备来抵抗可能遭遇的大震和特大震的倒塌破坏^[6]。

因此,在遭遇大震甚至强度更高的特大震时,在同样满足规范设计要求前提下,减震设计结构由于截面/配筋的削弱,其抗震性能相较于常规抗震设计结构究竟如何,仍需要深入研究。本文以RC框架结构为例,通过基于IDA方法^[7]的结构抗倒塌易损性分析,对减震设计结构的抗倒塌能力进行了相关研究,定量地对比分析了减震设计结构和抗震设计结构的抗倒塌性能。

1 结构抗地震倒塌能力评价

结构抗倒塌易损性是指结构遭遇不同强度地震作用下发生倒塌的概率,抗倒塌易损性分析主要

采用IDA方法,主要分析步骤见文献[8]。这一分析中的关键问题在于数值模型的建立、地震动记录以及地震动强度的选择和结构发生倒塌的判据。

本文分析在通用有限元软件MSC.MARC上进行,利用52号梁单元及清华大学二次开发的钢筋混凝土结构分析程序—THUFIBER进行框架梁、柱的建模和分析^[9];该程序采用基于材料层次的本构模型和“单元生死”技术进行结构构件的数值模拟。大量算例分析表明,该程序可以对钢筋混凝土框架结构在强震作用下直至倒塌的非线性行为进行较好的模拟。对于黏滞流体阻尼器,利用软件中的Spring单元,并合理设置刚度和阻尼参数进行模拟。

对于地震动记录,则以ATC-63计划^[10-11]推荐的22条远场地震动记录加上常用的EI-Centro地震动记录,共23条地震动记录作为IDA分析所用地震动组;采用第一周期地震影响系数 $S_a(T_1)$ 作为地震动强度指标对该组地震动进行归一化处理。在具体的计算分析中,当任意构件坠落超过1m时视为结构已不能维持保障人员安全的生存空间,倒塌已经充分发展。

我国现阶段抗震设计采用两阶段的设计方法,要求结构满足“小震不坏,中震可修,大震不倒”的三水准抗震设防目标^[12],结构在设防罕遇地震作用下不应发生倒塌破坏。结构的抗倒塌易损性曲线实质上是结构在地震动连续变化下的倒塌概率曲线,因此在抗倒塌易损性曲线上对应设防罕遇地震(maximum considered earthquake,简称MCE)强度 $S_a(T_1)_{MCE}$ 的点的倒塌概率值即为结构在罕遇地震下可能发生的倒塌概率(collapse ratio,简称CR) CR_{MCE} ,为评价结构是否满足“大震不倒”要求,本文采用ATC-63报告建议,认为“结构在设防大震下倒塌概率 CR_{MCE} 小于10%即认为结构达到大震下的性能要求”。

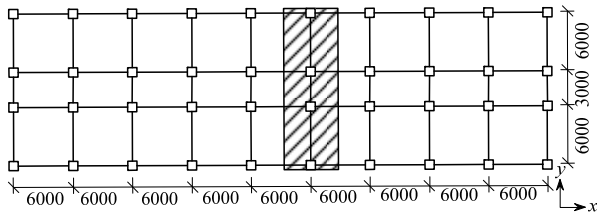
为了比较不同结构抗地震倒塌能力的差异,美国ATC计划建议采用“结构抗地震倒塌储备系数”CMR(collapse margin ratio)作为评价指标,CMR系数的定义为:结构抗地震倒塌能力与结构设防抗震能力之比,其概念相当于安全系数^[13]。将抗地震倒塌易损性曲线上对应50%倒塌概率的地震动强度指标 $S_a(T_1)_{50\%collapse}$ 作为结构抗地震倒塌能力指标,结构设防大震的地震动强度指标 $S_a(T_1)_{MCE}$ 作为结构设防抗震能力指标,则:

$$CMR = S_a(T_1)_{50\%collapse} / S_a(T_1)_{MCE} \quad (1)$$

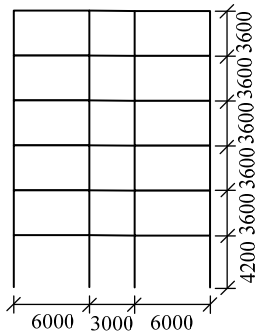
2 算例设计

根据我国抗震设计规范,按设防烈度 7.5 度、8 度和 8.5 度(对应的设计基本地震加速度分别为 0.15 g、0.2 g 和 0.3 g)分别设计了一组 6 层和 9 层的钢筋混凝土框架结构算例。在设计过程中,对于同一个算例,均采用常规抗震设计方法和粘滞阻尼器减震设计方法分别进行设计。6 层抗震设计框架结构编号为: KZ6-7.5、KZ6-8、KZ6-8.5; 6 层减震设计框架结构编号为: JZ6-7.5、JZ6-8、JZ6-8.5; 9 层抗震设计框架结构编号为: KZ9-7.5、KZ9-8、KZ9-8.5; 9 层减震设计框架结构编号为: JZ9-7.5、JZ9-8、JZ9-8.5。

所有结构均按照 III 类场地,第一设计分组的丙类结构进行设计。各结构平面布置相同(图 1(a)),6 层结构立面见图 1(b),9 层结构在 6 层结构上增加上部三层。各结构底层层高 4.2 m,其余层高 3.6 m,6 层结构总高 22.2 m,9 层结构总高 33 m。楼面恒荷载标准值取 4.5 kN/m²,活荷载统一取 2.5 kN/m²,屋面恒荷载取 6.0 kN/m²,活荷载取 2 kN/m²,雪荷载取 0.5 kN/m²; 外墙荷载标准值为 6 kN/m,内墙荷载标准值为 4 kN/m,女儿墙荷载标准值为 2 kN/m。



(a) 结构平面布置



(b) 6 层结构立面布置

图 1 结构布置

Fig.1 Structural layout

各框架算例的具体设计过程按我国现行抗震设计规范^[12]进行设计,通过 PKPM 软件实现。对于常规抗震设计的框架结构,各构件的截面尺寸信息

见表 1。为了使各设防烈度下的算例具有可比性,框架柱尺寸是在满足抗震规范轴压比限值要求的前提下,主要由规范规定的多遇地震下结构弹性层间位移角限值(1/550)来确定的(表 2)。基于表 1 的尺寸信息进行了常规抗震设计框架的截面配筋设计。KZ6-7.5、KZ6-8、KZ6-8.5 的一阶自振周期分别为 1.20 s、0.93 s、0.65 s。KZ9-7.5、KZ9-8、KZ9-8.5 的一阶自振周期则分别为 1.43 s、1.18 s、0.81 s。

表 1 截面尺寸与材料强度

Table 1 Cross-section dimensions and material strengths

结构编号	KZ6-7.5	KZ9-7.5	KZ6-8	KZ9-8	KZ6-8.5	KZ9-8.5
1 层~3 层柱 截面尺寸/mm	500×500	550×650	600×600	600×700	750×750	800×900
4 层~6 层柱 截面尺寸/mm	450×450	550×550	500×500	600×700	650×650	800×850
7 层~9 层柱 截面尺寸/mm	—	550×550	—	600×700	—	800×850
边梁截面 尺寸/mm	250×500	250×500	300×550	300×550	400×650	400×700
中梁截面 尺寸/mm	250×450	250×450	300×500	300×500	400×600	400×600
1 层~3 层 混凝土强度	C30	C30	C30	C40	C30	C40
4 层~6 层 混凝土强度	C30	C30	C30	C30	C30	C40
7 层~9 层 混凝土强度	—	C30	—	C30	—	C30
梁柱纵筋	HRB400					
梁柱箍筋	HPB300					

表 2 抗震设计结构最大轴压比和小震下最大层间位移角
Table 2 Largest column axial ratio and maximum story drift ratio under frequent earthquake

结构编号	KZ6-7.5	KZ9-7.5	KZ6-8	KZ9-8	KZ6-8.5	KZ9-8.5
柱最大轴压比	0.57	0.62	0.46	0.46	0.36	0.41
《规范》轴压比 限值	0.85	0.75	0.75	0.65	0.75	0.65
小震下 x 向 最大层间位移角	1/596	1/590	1/596	1/562	1/595	1/587
小震下 y 向 最大层间位移角	1/586	1/593	1/583	1/580	1/571	1/580

对于减震设计框架,本文设定其构件尺寸和相应抗震设计框架的构件尺寸相同。这是由于文献[14]通过研究发现,框架结构底层柱的轴压比对其抗倒塌能力和抗倒塌安全储备有着决定性的影响,因此,本文研究中为避免减震设计框架由于截面削弱导致抗倒塌能力的过分降低,采用了上述设计原

则。在确定了减震设计框架的尺寸后，基于地震作用降半度的消能减震设计目标对其主体结构构件进行截面配筋设计。即对设防烈度分别为 7.5 度、8 度和 8.5 度的算例，分别按相当于 7 度、7.5 度和 8 度的地震作用进行主体框架内力计算和配筋。需要强调的是，本文减震框架的算例设计中，对主体结构包括最小配箍率在内的抗震构造措施要求相对于抗震设计框架并未降低。

基于地震作用降半度的设计目标，计算出阻尼器所需要附加给主体结构的等效阻尼比。然后根据实际工程中常用的阻尼器型号，通过一定的试算并优化阻尼器布置，实现上述附加阻尼比(经时程分析确认多遇地震作用下的减震效果)。本文算例中的阻尼器沿结构平面、立面均匀布置，阻尼器支撑采用人字型撑，具体附设阻尼器的参数信息见(表 3)。本文针对抗震能力相对较弱的短轴(y 向)方向上一榀平面框架(图 1(a)中阴影部分)进行建模、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。各模型单榀框架的梁柱配筋见图 2 和图 3，图中标注的数字为梁、柱单侧配筋，单位为 mm^2 。由于阻尼器均匀布置，在单榀框架平面模型中，保持阻尼指数不变，而将阻尼器的阻尼系数按实际三维结构中所布置的阻尼器数目与框架总榀数的比例进行折减，例如对于 JZ6-7.5 的平面模型，其 1 层阻尼器的阻尼系数的数值应设定为 $700 \times 3/10=210$ 。

表 3 阻尼器布置

Table 3 Arrangement of dampers

	JZ6-7.5	JZ6-8	JZ6-8.5	JZ9-7.5	JZ9-8	JZ9-8.5
9 层	—	—	—	2VD1	2VD1	8VD3
8 层	—	—	—	2VD1	2VD1	8VD3
7 层	—	—	—	2VD1	2VD1	8VD3
6 层	—	—	—	4VD1	3VD1	10VD3
5 层	2VD1	2VD1	4VD2	4VD1	3VD1	10VD3
4 层	2VD1	2VD1	4VD2	4VD1	3VD1	10VD3
3 层	2VD1	2VD1	4VD2	6VD1	3VD1	10VD3
2 层	3VD1	2VD1	4VD2	6VD1	3VD1	10VD3
1 层	3VD1	2VD1	4VD2	6VD1	3VD1	10VD3

注：VD1(viscous damper 1)阻尼系数 $C=700 \text{ kN}/(\text{m/s})^{0.4}$ ，阻尼指数 $\alpha=0.4$ ，VD1 前的数字表示该层该型号阻尼器的数目，下同；
 VD2(viscous damper 2)阻尼系数 $C=1000 \text{ kN}/(\text{m/s})^{0.3}$ ，阻尼指数 $\alpha=0.3$ ；
 VD3(viscous damper 3)阻尼系数 $C=1000 \text{ kN}/(\text{m/s})^{0.4}$ ，阻尼指数 $\alpha=0.4$ 。

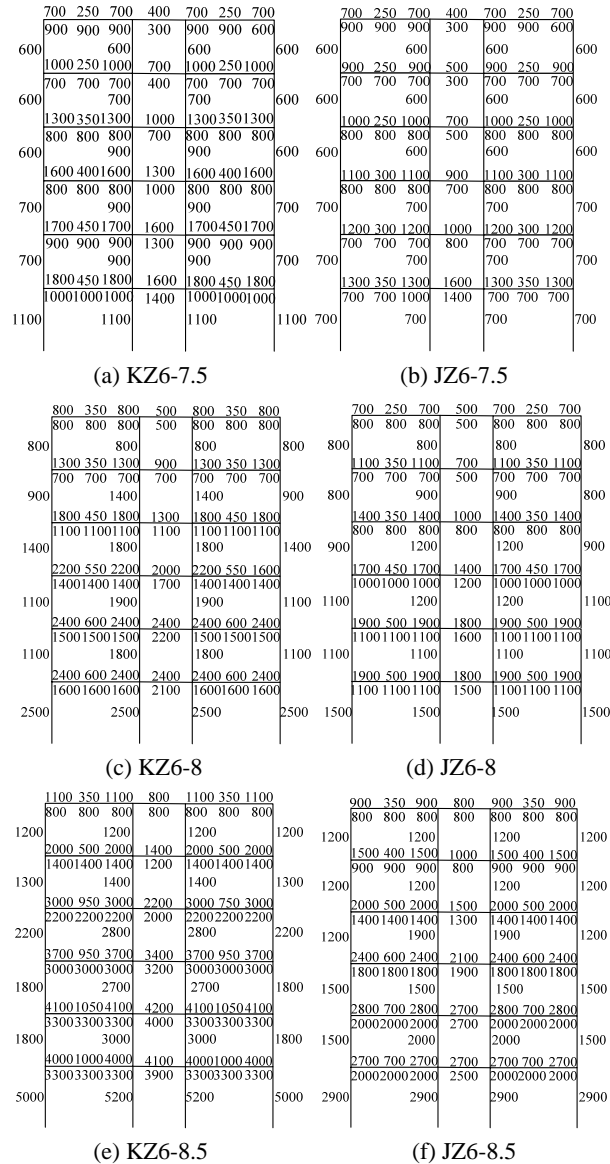
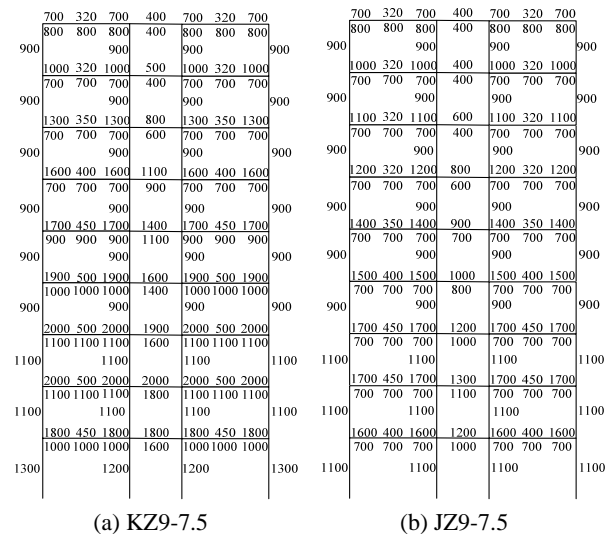


图 2 6 层结构梁柱配筋

Fig.2 Reinforcement of 6-story structures



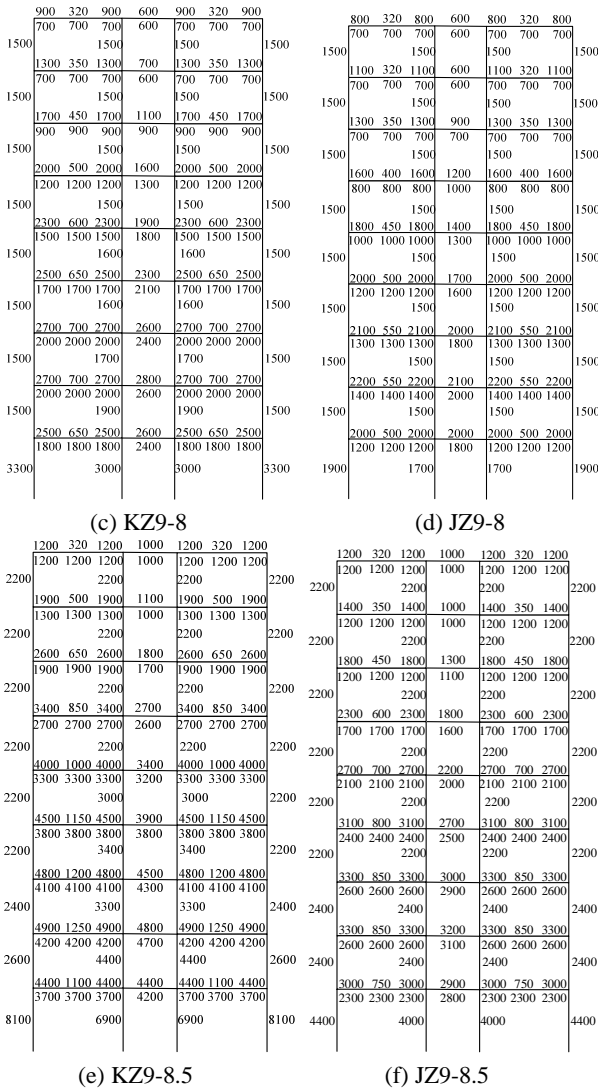


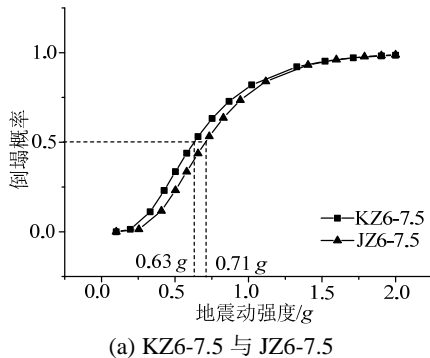
图3 9层结构梁柱配筋

Fig.3 Reinforcement 9-story structures

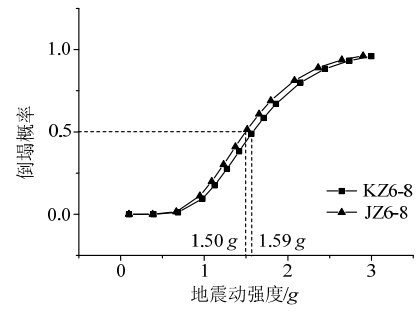
3 结构抗倒塌易损性分析

3.1 计算结果

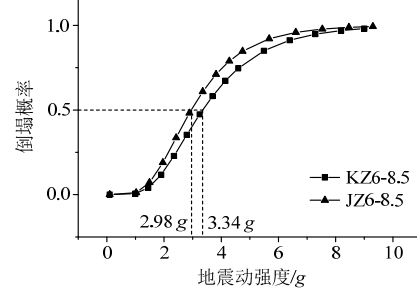
按前述方法对各算例进行IDA分析,得到各算例对应不同地震动强度下的倒塌概率,按对数正态分布对这些数据进行拟合,得到各算例的抗倒塌易损性曲线。图4给出了6层和9层结构不同设防烈度下抗震设计结构与减震设计结构抗倒塌易损性曲线。



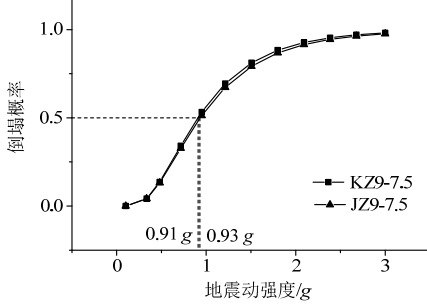
(a) KZ6-7.5 与 JZ6-7.5



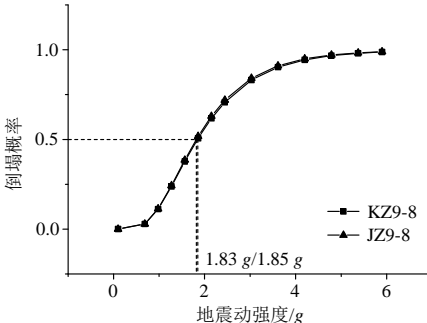
(b) KZ6-8 与 JZ6-8



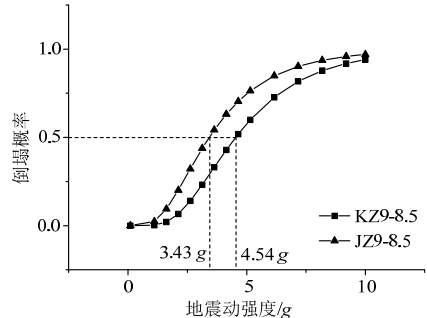
(c) KZ6-8.5 与 JZ6-8.5



(d) KZ9-7.5 与 JZ9-7.5



(e) KZ9-8 与 JZ9-8



(f) KZ9-8.5 与 JZ9-8.5

图4 各算例抗倒塌易损性曲线结果

Fig.4 Results of collapse fragility curves

基于结构倒塌易损性曲线得到不同设防烈度下抗震设计结构和减震设计结构在相应罕遇地震下的倒塌概率 CR_{MCE} ，并由式(1)计算出各结构的抗倒塌安全储备系数 CMR ，如表 4 和表 5 所示。由表 4 和表 5 可知，所有结构在罕遇地震下的倒塌概率都小于 10%，满足“大震不倒”要求。当设防烈度为 7.5 度时，6 层和 9 层抗震设计结构在大震下的倒塌概率均大于相应的减震设计结构，抗震设计结构的抗倒塌储备系数均低于减震设计结构，可知设防烈度 7.5 度时，抗震设计结构的抗倒塌能力弱于减震设计结构。

表 4 6 层结构的 CR_{MCE} 和 CMR 结果Table 4 CR_{MCE} and CMR of 6-story structures

结构编号	KZ6-7.5	JZ6-7.5	KZ6-8	JZ6-8	KZ6-8.5	JZ6-8.5
$CR_{MCE}/(\%)$	9.17	4.38	0.11	0.22	0.44	0.76
CMR	1.97	2.22	3.09	2.91	3.50	3.13

表 5 9 层结构的 CR_{MCE} 和 CMR 结果Table 5 CR_{MCE} and CMR of 9-story structures

结构编号	KZ9-7.5	JZ9-7.5	KZ9-8	JZ9-8	KZ9-8.5	JZ9-8.5
$CR_{MCE}/(\%)$	2.01	2.00	0.22	0.22	0.03	0.49
CMR	3.27	3.35	4.45	4.40	5.84	4.41

当设防烈度增至 8 度时，6 层减震设计结构与抗震设计结构相比，其在罕遇地震作用下更容易倒塌，抗倒塌储备能力也稍弱；对于 9 层框架，减震设计结构的抗倒塌能力也没有高于抗震设计结构，只是基本相当。而当设防烈度增至 8.5 度时，6 层和 9 层减震设计结构在大震下的倒塌概率均大于相应的抗震设计结构，且抗倒塌储备系数也低于抗震结构。可见随着设防烈度升高，减震设计框架的抗倒塌能力相对于抗震设计框架在降低。在高烈度设防条件下，这一现象更为明显。

3.2 结构损伤耗能需求与抗倒塌能力分析

计算结果表明，23 条地震波作用下，对于抗震设计结构和减震设计结构，底层柱的破坏是引起结构倒塌的主要原因。在强震作用下，各算例底层柱柱脚塑性变形过大导致混凝土压碎破坏，进而引起结构的整体倒塌破坏。下面通过耗能需求的统计来分析底层柱的损伤情况。

减震设计结构中阻尼器通过自身的耗能来吸收一部分地震能量，从而减少主体结构总累积耗能需求(即各层框架梁、柱构件的耗能需求之和)。表 6 以 9 层框架的分析结果为例，给出了在临倒塌时，分别针对梁柱总累积耗能和底层柱的累积耗能这

两项指标，减震设计框架相对于抗震设计框架的减少率(取 23 条地震波结果的平均值)。

表 6 耗能需求结果

Table 6 Results of energy demand

	7.5 度	8 度	8.5 度
梁柱总累积耗能减少率/(%)	58.2	33.4	47.7
底层柱累积耗能减少率/(%)	45.6	17.8	-28.8

由表 6 可以看出，由于黏滞流体阻尼器的耗能作用，就结构的梁柱总塑性损伤耗能而言，减震设计框架与抗震设计框架相比明显降低；但单就底层柱的塑性耗能而言，减震设计框架相对于抗震设计框架的降低幅度要小一些，甚至 8.5 度设计条件下的算例出现了减震框架相对于抗震框架反而增大的情况(减小率为-28.8%，表示实际上是增大)。这反映了减震设计框架的累积耗能和塑性损伤更加集中于底层柱部位，而且抗震设防烈度越高，这种现象越明显。

造成这一现象的原因有两方面。一方面，设防烈度较高时，结构的配筋计算由水平地震作用控制。如前所述，抗震框架与减震框架主体结构水平地震作用相差半度，导致减震框架底层柱配筋与抗震框架相比减少明显，而上部楼层由于要满足柱的最小配筋率要求，减震设计框架与抗震框架相比配筋相差没有底层柱那么大(在图 2 和图 3 中可以看到此现象)，因此减震设计框架中沿楼层不均匀减少的配筋结果显然会导致其塑性耗能损伤相对于抗震框架更集中于底层柱。

另一方面，附加的阻尼器也使得减震设计框架的塑性耗能和损伤更趋向集中于底层柱。这可以通过另设一个算例作对比得到。将算例结构 KZ9-8.5 直接加阻尼器(所加阻尼器的数量、布置与减震结构 JZ9-8.5 相同)，记为 KZ9-8.5-str。通过 IDA 分析后，计算其塑性耗能并与算例 KZ9-8.5 对比，发现：算例 KZ9-8.5-str 与 KZ9-8.5 相比，截面配筋完全相同，梁柱总塑性耗能减少 47.1%，而底层柱塑性耗能只减少 7.8%。可见在仅附加阻尼器的情况，框架结构的塑性耗能和损伤也有向底层柱集中的趋势。

综上所述，减震设计框架中存在的这种塑性损伤更集中于底层柱的现象导致其底层柱更容易发生破坏，从而影响整体结构的抗倒塌能力。因此，对于高烈度区减震设计结构，阻尼器对减震设计结构抗倒塌能力的提升并不一定能够弥补结构因配筋减少(特别是底层柱配筋)导致的抗倒塌能力的削

弱。故而建议对于设防烈度 8.5 度的减震设计框架,其底层柱配筋应予以加强,可采用不考虑阻尼器作用时的计算结果。

3.3 底层柱配筋加强的效果分析

将 6 层和 9 层设防烈度 8.5 度减震设计结构的底层柱配筋采用不考虑阻尼器作用的计算结果以进行加强,分别记为 JZ6-8.5-str 和 JZ9-8.5-str。对加强后减震设计结构进行 IDA 分析,得到各结构在不同地震动强度下的倒塌概率,按照对数正态分布进行拟合,得到加强后减震设计结构的倒塌概率曲线。加强后减震设计结构与原减震设计结构和抗震设计结构抗倒塌能力对比见图 5。

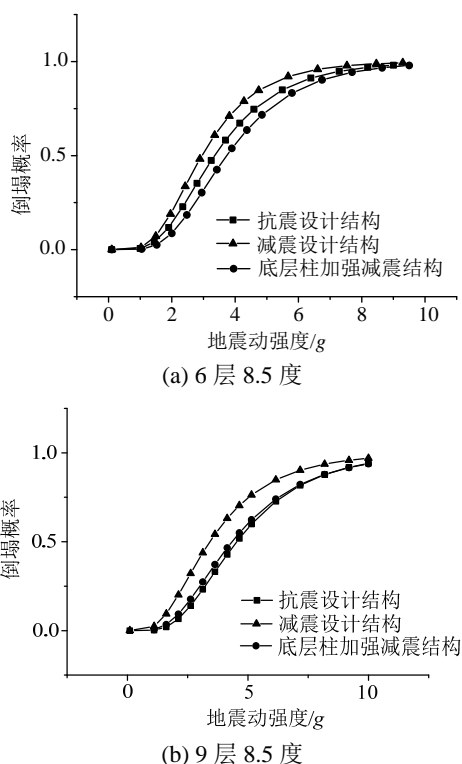


图 5 加强后减震设计结构的抗倒塌能力对比
Fig.5 Comparison of collapse-resistance capacities among different structures

基于结构倒塌易损性曲线得到加强后减震设计结构在相应罕遇地震下的倒塌概率 CR_{MCE} ,并由式(1)计算出各结构的抗倒塌安全储备系数 CMR ,如表 7 所示。

表 7 加强后的减震设计结构计算结果

Table 7 Results of strengthened damping structures

	JZ6-8.5-str	JZ9-8.5-str
$CR_{MCE}/(\%)$	0.14	0.08
CMR	3.92	5.59

对比表 4 和表 7 可知,JZ6-8.5-str 相比 JZ6-8.5,在罕遇地震作用下的倒塌概率有所降低,抗倒塌储

备系数则由 3.13 提升至 3.92,提高了 25.2%,可见对于 6 层减震设计结构,加强底层柱配筋可以明显提高其抗倒塌能力。而且,对比 JZ6-8.5-str 与 KZ6-8.5 的相关结果可知,加强后减震设计结构的抗倒塌能力还要略强于抗震设计结构。同样,对比表 5 和表 7 可知,JZ9-8.5-str 相比 JZ9-8.5 的抗倒塌储备系数也大幅提升(提高了 26.7%)。此外,对比 JZ9-8.5-str 与 KZ9-8.5 的相关结果可知,此时加强后减震设计结构抗倒塌能力与抗震设计结构基本相当。

因此,对于高烈度区减震设计结构,增强底层柱配筋后,可以显著提高其抗倒塌能力,使得加强后的减震设计结构抗倒塌能力不低于相应的抗震设计结构。

4 结论

本文应用基于 IDA 方法的抗地震倒塌易损性分析对不同设防烈度下的抗震设计与减震设计 RC 框架结构的抗地震倒塌能力进行了对比研究。结果表明:

(1) 不同设防烈度下抗震设计和减震设计 RC 框架结构在大震下均能够满足“大震不倒”要求。

(2) 设防烈度为 7.5 度时,减震设计框架抗倒塌能力强于抗震设计框架;随着设防烈度升高,减震设计框架的抗倒塌能力相对于抗震设计框架在降低。在高烈度设防条件下,这一现象更为明显。

(3) 高烈度设防条件下的减震设计框架构件配筋的不均匀削弱是造成其抗倒塌能力弱于相应抗震设计框架的主要原因。因此建议设计时对高烈度区减震设计框架的底层柱配筋予以加强。

(4) 对于高烈度区减震设计框架增强底层柱配筋后,其抗倒塌能力与原减震设计框架相比提高明显,抗倒塌储备能提高 25% 以上。

参考文献:

- [1] 李爱群. 工程结构减振控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 3-5.
Li Aiqun. Structural vibration control [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 3-5. (in Chinese)
- [2] 翁大根, 张超, 吕西林, 彭林海, 徐斌, 丁孙玮, 周红卫. 附加黏滞流体阻尼器减震结构实用设计方法研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(21): 80-88.
Weng Dagen, Zhang Chao, Lü Xilin, Peng Linhai, Xu Bin, Ding Sunwei, Zhou Hongwei. Practical design procedure for an energy-dissipated structure with viscous

- dampers [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(21): 80–88. (in Chinese)
- [3] 张志强, 李爱群, 贾洪, 何建平, 王建磊. 粘滞流体阻尼器对电视塔的风振响应控制[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2007, 37(6): 1018–1022.
- Zhang Zhiqiang, Li Aiqun, Jia Hong, He Jianping, Wang Jianlei. Wind-induced vibration control of TV tower with fluid viscous damper [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2007, 37(6): 1018–1022. (in Chinese)
- [4] 黄镇, 李爱群, 秦新刚. 南京五台山体育馆消能减振加固设计研究[J]. *工程抗震与加固改造*, 2006, 28(1): 72–75.
- Huang Zhen, Li Aiqun, Qin Xin'gang. Structure design and research of seismic retrofitting with energy dissipation devices for Nanjing Wutaishan gymnasium [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2006, 28(1): 72–75. (in Chinese)
- [5] 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: 1–12.
- 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: 1–12. (in Chinese)
- [6] 施炜, 叶列平, 陆新征, 唐代远. 不同抗震设防 RC 框架结构抗倒塌能力研究[J]. *工程力学*, 2011, 28(3): 41–48.
- Shi Wei, Ye Lieping, Lu Xinzheng, Tang Daiyuan. Study on the collapse-resistant capacity of RC frames with different seismic fortification levels [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(3): 41–48. (in Chinese)
- [7] Vamvatsikos D, Cornell C A. Incremental dynamic analysis [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2002, 31(3): 491–514.
- [8] 缪志伟, 宋前恩, 裘赵云. 强震作用下附设粘滞流体阻尼器 RC 框架结构的耗能机制与抗倒塌性能研究[J]. *工程力学*, 2014, 31(7): 36–44.
- Miao Zhiwei, Song Qianen, Qiu Zhaoyun. Study on energy distribution and collapse-resistant capacity of RC frames with nonlinear viscous dampers under strong earthquake [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(7): 36–44. (in Chinese)
- [9] 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: 179–190.
- Lu Xinzheng, Ye Lieping, Miao Zhiwei. Elastic-plastic analysis of buildings against earthquake [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 179–190. (in Chinese)
- [10] Applied Technology Council, Federal Emergency Management Agency. Quantification of building seismic performance factors [R]. Washington D C, America: FEMA, 2008.
- [11] Kircher C A, Heintz J A. The ATC-63 project [J]. *Building Safety Journal*, 2008, 61(1): 40–43.
- [12] GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 2010.
- CB50011-2010, Code for seismic design of buildings [S]. 2010. (in Chinese)
- [13] 汤保新, 叶列平, 陆新征. 丙类与乙类设防 RC 框架结构抗地震倒塌能力对比[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(10): 30–38.
- Tang Baoxin, Ye Lieping, Lu Xinzheng. Comparison of collapse-resistant capacities of RC frames with seismic fortification categories B and C [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(10): 30–38. (in Chinese)
- [14] 唐代远, 陆新征, 叶列平, 施炜. 柱轴压比对我国 RC 框架结构抗地震倒塌能力的影响[J]. *工程抗震与加固改造*, 2010, 32(5): 26–35.
- Tang Daiyuan, Lu Xinzheng, Ye Lieping, Shi Wei. Influence of axial compression ratio to the seismic collapse resistance of RC frame structures [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2010, 32(5): 26–35. (in Chinese)