

设计性能目标下 RC 框架结构抗倒塌能力研究

岳茂光¹, 王东升², 王亚勇³, 李宏男⁴

(1. 奥雅纳工程咨询有限公司, 北京 100020; 2. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁大连 116026;
3. 中国建筑科学研究院, 北京 100013; 4. 大连理工大学 海岸及近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

摘要:针对小震丙类、小震乙类、中震不屈服和中震弹性 4 个性能目标,采用增量动力时程分析方法 (IDA)对钢筋混凝土框架结构的抗倒塌能力进行了分析。以小震丙类建筑为基准,研究表明:抗震措施和地震作用是影响结构抗震性能的重要因素;严格按照抗震规范设计的框架结构,具有较高的安全储备,基本上能够达到“大震不倒”的性能目标;6 度设防时,按乙类建筑提高抗震措施或按中震性能目标提高设计地震作用,对结构的抗倒塌能力影响不大;7 度设防时,按中震性能目标设计能显著提高结构的抗倒塌能力;8 度设防时,提高抗震措施等级和提高设计地震作用都能够大幅提高结构的抗倒塌能力,尤其按中震设计的钢筋混凝土框架结构能够抵御加速度峰值 1 000 gal 以上的地震作用。

关键词:RC 框架结构;性能目标;设防烈度;增量动力分析;抗倒塌能力

中图分类号:TU375.401 **文献标志码:**A

Study on seismic performance of RC frame structure under four performance objectives

YUE Maoguang¹, WANG Dongsheng², WANG Yayong³, LI Hongnan⁴

(1. ARUP, Beijing 100020, China;
2. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
3. China Academic of Building Research, Beijing 100013, China;
4. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The seismic resistance capability of RC frame structure was studied with incremental dynamic analysis (IDA) method in terms of the 4 performance objectives (frequent seismic design of class C, frequent seismic design of class B, non-yielding design under moderate earthquake and elastic design under moderate earthquake). Taking frequent seismic design of class C as basis, results of IDA analysis indicate that both seismic measures and seismic design force are very important influencing factors on seismic performance. The RC frame structures that are designed strictly conforming to the Chinese seismic design code have enough safety margins and the performance level of ‘non-collapse under rare earthquake’ can be reached. When the fortification intensity is 6, improving seismic measures for frequent seismic design of class C or increasing seismic design force for moderate seismic design has little influence on seismic performance. When the fortification intensity is 7, the collapse resistance capability of RC structures designed under moderate seismic force can be improved obviously. When the fortification intensity is 8, both improving seismic measures and increasing seismic design force can significantly raise the seismic resistance capability of RC frame structure. Especially, designed under moderate earthquake, the RC frame structure can withstand PGA of 1 000 gal without collapse.

Keywords: RC frame structure; performance objective; fortification intensity; incremental dynamic analysis; collapse resistance capability

基金项目:国家自然科学基金项目(50878033),中央高校基本科研业务费项目(2102TD015)。

作者简介:岳茂光(1979—),男,山东潍坊人,工学博士,结构工程师。E-mail:yymg2004@126.com

通讯作者:王东升(1974—),男,内蒙古库伦旗人,工学博士,教授。E-mail:dswang@dlmu.edu.cn

收稿日期:2011年10月

0 引言

我国现行建筑抗震设计规范以“三水准-两阶段”设计为基本方法,即以小震(多遇烈度地震)、中震(基本烈度地震)和大震(罕遇烈度地震)为3个设防水准,满足“小震不坏,中震可修,大震不倒”的抗震设防目标。在结构设计方面,采用“两阶段”设计,以小震弹性强度设计为基础,通过地震作用调整和各种构造措施保证主要构件大震作用下的抗震设防目标,并对大震作用下结构的整体抗倒塌能力进行验算,如层间位移角、薄弱层的验算等,而中震设计涉及内容不多。20世纪90年代美国学者提出基于性能的抗震设计理念^[1],基本思想就是根据结构的重要性和震害产生的影响程度确定不同的抗震设防目标,即不同风险水平地震作用下可以接受的最大破坏程度,设计出具有最佳“投资-效益”比的建筑。目前基于性能的抗震设计理论和方法已逐渐被各国建筑抗震设计规范所采纳,内容较为丰富^[2-4]。部分规范给出了多级性能目标的建议并提供了设计方法,如1995年美国加州结构工程师协会对新建建筑提出了基于性能抗震设计的要求^[5],1996—1997年对既有建筑的鉴定和评估规定了多级性能目标^[6-7],随后又陆续颁发了关于性能抗震设计的文件^[8-10]。2001年日本也将性能抗震设计思想加入到设计规范和加固标准中^[11],并由建筑研究所制定了性能标准。2003年欧洲标准化协会(CEN)也在结构抗震设计规范中增加了基于位移设计的内容^[12]。

我国2010版抗震规范^[13]增加了性能抗震设计的内容,规定了地震动水准、性能目标和设计指标,并且给出了性能设计的具体方法。在复杂及超限工程设计中,建议提高结构的重要部位、关键及重要构件的设计性能目标(如钢筋混凝土框-剪结构的底部加强区剪力墙,柱、框支结构的框支层、框支柱及大悬臂结构的支座部位等)。中震不屈服和中震弹性的性能目标在抗震设计中已被广泛采用^[14-15]。

本文主要分析按小震丙类、小震乙类、丙类中震不屈服和丙类中震弹性性能目标设计的钢筋混凝土框架结构的抗倒塌能力。

1 设计性能目标的荷载组合效应

根据2010版抗震规范^[13]的规定和中震设计的定义^[16],可以列出设计性能目标对应的地震作用组合效应的表达式,为了减少其它参数的影响,只考虑重力作用和水平地震作用的组合。

1.1 荷载组合效应

(1) 小震丙类设计和小震乙类设计

小震作用组合效应与截面承载力的关系式为:

$$S_s = \eta(\gamma_G S_G + \gamma_E S_{E_s}) \leq R/\gamma_{RE} \quad (1)$$

式中: S_s 为小震作用的组合效应; η 为按照抗震规范考虑抗震等级、强柱弱梁等的内力调整系数,见GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[13] 6.2.2~6.2.3条; γ_G 为重力荷载分项系数,取1.2; S_G 为重力荷载代表值的效应; γ_E 为地震作用分项系数,取1.3; S_{E_s} 为弹性反应谱小震作用标准值的效应; R 为构件截面承载力设计值; γ_{RE} 为构件截面抗震承载力调整系数,在0.75~0.85之间,见JGJ 3—2002《高层建筑混凝土结构技术规程》^[17]表4.7.2。

乙类建筑和丙类建筑的作用组合效应表达式相同,区别是乙类建筑的内力调整系数和抗震措施应符合本地区抗震设防烈度提高一度的要求。文献[18]总结了钢筋混凝土框架结构和抗震剪力墙结构的抗震设计基本要求,以及不同抗震等级构件所对应的抗震措施。

(2) 中震弹性设计

中震弹性设计是在中震作用下结构满足弹性设计要求,计算中考虑荷载分项系数和承载力抗震调整系数,不考虑地震作用下内力调整,材料强度取设计值。地震作用组合效应与承载力的关系为:

$$S_{me} = (\gamma_G S_G + \gamma_E S_{E_m}) \leq R/\gamma_{RE} \quad (2)$$

式中: S_{me} 为中震弹性性能目标对应的地震作用组合效应; S_{E_m} 为弹性反应谱中震作用标准值的效应,通常取小震弹性作用效应的2.85倍;其它参数与小震作用组合相同。

相对于小震弹性设计,中震弹性设计提高了设计地震作用,取消强柱弱梁、强剪弱弯等延性要求。

(3) 中震不屈服设计

中震不屈服设计是在中震作用下结构薄弱部位或关键构件达到不屈服的设计要求,计算中荷载分项系数和承载力抗震调整系数均取1.0,不考虑地震内力调整,材料强度取标准值。地震作用组合效应与承载力的关系为:

$$S_{mp} = (S_G + S_{E_m}) \leq R_k = \gamma_M R \quad (3)$$

式中: S_{mp} 为中震弹性性能目标对应的地震作用组合效应; R_k 为材料强度标准值,是材料强度设计值的1.05~1.40倍; γ_M 为材料标准强度与设计强度的比值,一般情况下,对于混凝土取1.4,钢材取1.1。

相对于中震弹性设计,中震不屈服设计取消了荷载组合的影响,忽略了不同结构类型的安全度影响,并且采用材料强度标准值。

1.2 设计性能目标下荷载组合效应的比较

以小震弹性设计为基准,将 S_{mp}/S_s 和 S_{me}/S_s 分别

定义为中震不屈服性能指标系数和中震弹性性能指标系数,则有:

$$S_{mp}/S_s = \frac{1 + S_{Em}/S_G}{(\gamma_G + \gamma_E S_{Es}/S_G) \eta \gamma_M \gamma_{RE}} = \frac{1 + 2.85 S_{Es}/S_G}{(\gamma_G + \gamma_E S_{Es}/S_G) \eta \gamma_M \gamma_{RE}} \quad (4)$$

$$S_{me}/S_s = \frac{\gamma_G + \gamma_E S_{Em}/S_G}{(\gamma_G + \gamma_E S_{Es}/S_G) \eta} = \frac{\gamma_G + 2.85 \gamma_E S_{Es}/S_G}{(\gamma_G + \gamma_E S_{Es}/S_G) \eta} \quad (5)$$

以钢筋混凝土框架柱为例,中震组合性能指标系数 (S_{mp}/S_s 或 S_{me}/S_s) 与 S_{Es}/S_G 的关系见图 1 和表 1 (表中仅给出了 S_{Es}/S_G 在 0~1 范围内的数值);图中 η 对于一、二和三级框架柱分别近似取 1.7、1.5 和 1.3。

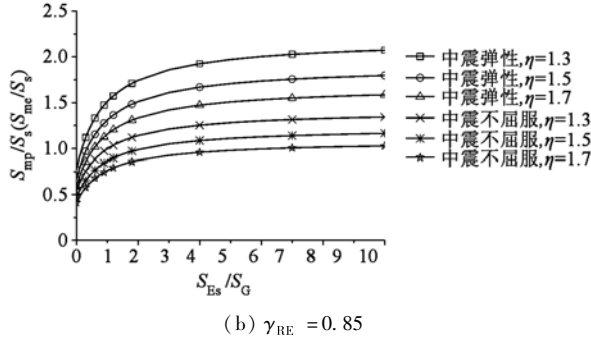
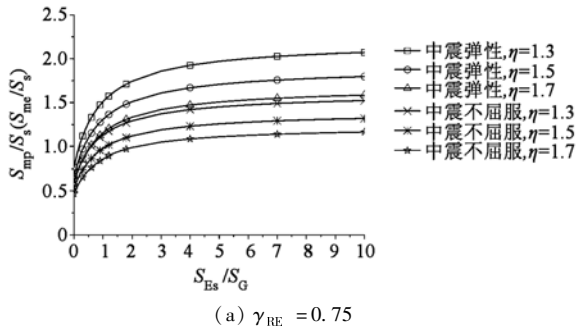


图 1 钢筋混凝土框架柱的中震组合性能指标系数

Fig. 1 Moderate earthquake performance ratio of columns for RC frame structure

从图 1 和表 1 可以看出,当地震作用不起控制作用时,中震指标低于小震弹性指标。对于一级框架柱,当 $S_{Es}/S_G < 2.2$ ($\gamma_{RE} = 0.75$) 或 $S_{Es}/S_G < 6.5$ ($\gamma_{RE} = 0.85$) 时中震不屈服目标低于小震弹性目标,当 $S_{Es}/S_G < 0.6$ 时中震弹性目标低于小震弹性目标;对于二级框架柱,当 $S_{Es}/S_G < 1.2$ ($\gamma_{RE} = 0.75$) 或 $S_{Es}/S_G < 2.2$ ($\gamma_{RE} = 0.85$) 时中震不屈服目标低于小震弹性目标,当 $S_{Es}/S_G < 0.4$ 时中震弹性目标低于小震弹性目标;对于三级框架柱,当 $S_{Es}/S_G < 0.6$ ($\gamma_{RE} = 0.75$) 或 $S_{Es}/S_G < 1.1$ ($\gamma_{RE} = 0.85$) 时中震不屈服目标低于小震弹性目标,当 $S_{Es}/S_G < 0.2$ 时中震弹性目标低于小震弹性目标。

表 1 钢筋混凝土框架柱的部分中震组合性能指标系数
Table 1 Moderate earthquake performance ratio of columns for RC frame structure

γ_{RE}	S_{Es}/S_G	S_{me}/S_s			S_{mp}/S_s		
		$\eta = 1.3$	$\eta = 1.5$	$\eta = 1.7$	$\eta = 1.3$	$\eta = 1.5$	$\eta = 1.7$
0.75	0.0	0.77	0.67	0.59	0.61	0.53	0.47
	0.1	0.91	0.79	0.69	0.71	0.61	0.54
	0.2	1.02	0.89	0.78	0.79	0.68	0.60
	0.3	1.12	0.97	0.86	0.85	0.74	0.65
	0.4	1.20	1.04	0.92	0.91	0.79	0.70
	0.5	1.27	1.10	0.97	0.96	0.83	0.73
	0.6	1.33	1.15	1.02	1.00	0.87	0.77
	0.7	1.38	1.20	1.06	1.04	0.90	0.80
	0.8	1.43	1.24	1.09	1.07	0.93	0.82
	0.9	1.47	1.28	1.13	1.10	0.96	0.84
1.0	1.51	1.31	1.15	1.13	0.98	0.86	
0.85	0.0	0.77	0.67	0.59	0.54	0.47	0.41
	0.1	0.91	0.79	0.69	0.62	0.54	0.48
	0.2	1.02	0.89	0.78	0.70	0.60	0.53
	0.3	1.12	0.97	0.86	0.75	0.65	0.58
	0.4	1.20	1.04	0.92	0.80	0.70	0.62
	0.5	1.27	1.10	0.97	0.85	0.73	0.65
	0.6	1.33	1.15	1.02	0.88	0.77	0.68
	0.7	1.38	1.20	1.06	0.92	0.80	0.70
	0.8	1.43	1.24	1.09	0.95	0.82	0.72
	0.9	1.47	1.28	1.13	0.97	0.84	0.74
1.0	1.51	1.31	1.15	1.00	0.86	0.76	

中震弹性指标最大值约为中震不屈服指标最大值的 1.35 倍 ($\eta = 1.7$) 到 1.55 倍 ($\eta = 1.3$),中震弹性指标最大值约为小震弹性指标最大值的 1.63 倍 ($\eta = 1.7$) 到 2.13 倍 ($\eta = 1.3$),中震不屈服指标最大值约为小震弹性指标最大值的 1.05 倍 ($\eta = 1.7$) 到 1.56 倍 ($\eta = 1.3$)。

总体上看,中震性能指标系数随 S_{Es}/S_G 的增大而逐渐增大,中震弹性性能目标高于中震不屈服性能目标。当地震作用相对于自重较小时,中震性能目标并不一定能提高构件的抗震性能。 $S_{Es}/S_G > 5$ 时,相对于小震弹性目标,中震弹性性能目标提高幅度较大。本文只分析了钢筋混凝土框架柱的作用组合效应,实际设计中需要考虑的因素众多,是否符合这些规律,还需要进一步研究。

2 框架结构超强能力评价

2.1 工程概况

工程计算实例为七层钢筋混凝土框架结构,首层层高 3.3 m,其余层高 3.0 m,总高度 21.3 m。平面尺寸为 30.0 m × 25.2 m,结构的平面布置见图 2。其它详细信息见文献[18]。

为了使结构在各个性能目标下具有可比性,按下列原则设计构件截面:①同一根柱至少三层内不

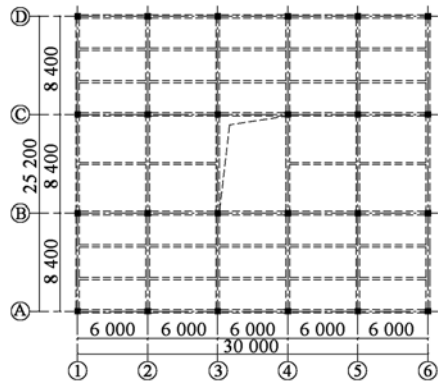


图2 框架结构平面布置

Fig. 2 Plan layout of frame structure

改变截面;②同一楼层内混凝土柱最多选用3种截面尺寸,最小截面尺寸为350 mm × 350 mm;③同一轴线上梁尽量取相同截面;④在满足受力的情况下,各层对应的梁尽量取相同截面。

根据上述性能目标对应的不同抗震设防烈度,共设计了12个钢筋混凝土框架结构,用SATWE进行受力分析和截面设计,结构前3阶基本周期和构件截面变化见表2。

表2 设计性能目标下框架结构的自振周期

Table 2 Natural periods of frame structure designed by designated performance objectives

抗震设防烈度	性能目标	自振周期/s			相对于丙类建筑截面变化
		1阶	2阶	3阶	
6度	小震丙类	1.45	1.43	1.42	—
	小震乙类	1.38	1.35	1.34	部分柱增大
	丙类中震不屈服	1.45	1.43	1.42	不变
	丙类中震弹性	1.45	1.43	1.42	不变
7度	小震丙类	1.38	1.35	1.34	—
	小震乙类	1.32	1.29	1.28	部分柱增大
	丙类中震不屈服	1.33	1.33	1.30	部分梁增大
	丙类中震弹性	1.18	1.18	1.17	部分梁、柱增大
8度	小震丙类	1.32	1.29	1.28	—
	小震乙类	1.22	1.19	1.18	部分柱增大
	丙类中震不屈服	0.91	0.91	0.89	部分梁、柱增大
	丙类中震弹性	0.84	0.83	0.79	部分梁、柱增大

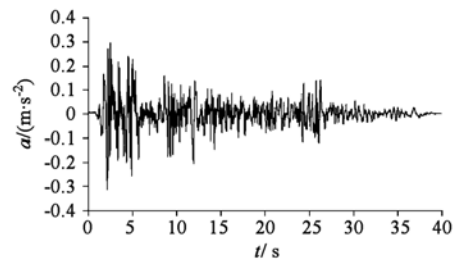
下面着重分析以上4个性能目标下钢筋混凝土框架结构的抗倒塌能力,分析方法采用增量动力分析(IDA)技术。

2.2 分析程序和输入地震波

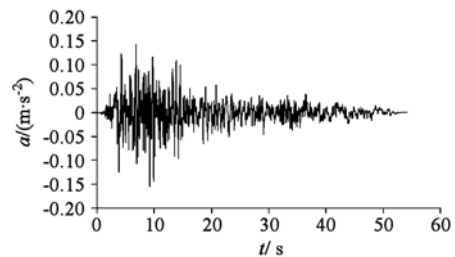
对于框架结构弹塑性时程分析,当采用相同材料本构关系时,EPDA与通用大型有限元软件ABAQUS具有非常好的一致性^[19]。但EPDA的计算速度快很多,因此选用EPDA进行IDA分析。混凝土采用按照GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》^[20]中等能量方法得到的三折线滞回本构关系,可以考虑材料的受拉开裂、裂缝闭合、压碎退出工作等混凝土材料所特有的复杂特性,具有较高的精度。

钢筋采用钢塑性本构关系,退化系数取0.1。对于混凝土梁,一般仅考虑弯矩屈服产生塑性铰;对于混凝土柱,考虑由轴力和双向弯矩相关作用产生塑性铰。

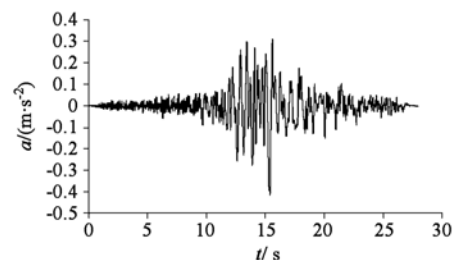
根据结构的自振周期和场地类别,按弹性反应统计一致原则在文献[16]建立的数据库中选择3条强震记录(I-ELC180分量、TAF021分量和CLW-TR分量),作为IDA分析的输入地震波。地震波选择时采用平台段反应谱的均值误差和对结构影响较大的前几阶周期附近反应谱的均值误差的加权平均进行控制^[16],分析时对加速度峰值归一化。图3给出了3条强震记录的加速度时程和反应谱与规范谱比较,可以看出,在结构周期0.84~1.50s范围内地震反应



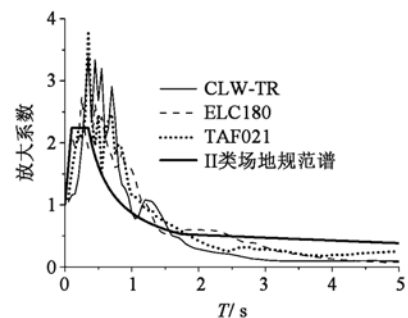
(a) I-ELC180



(b) TAF021



(c) CLW-TR



(d) 地震波放大系数谱与规范II类场地放大系数谱的比较

图3 加速度时程和反应谱曲线

Fig. 3 Acceleration history and response spectra

谱均值与规范 II 类场地反应谱较为接近。

2.3 抗震规范要求的抗震能力分析

依据 GB 50011—2010 规范分析结构在大震作用下的弹塑性层间位移角。6 度大震的加速度峰值近似按中震的 2.5 倍取值,即 125 gal。表 3 给出了大震作用下 12 个框架结构的最大层间位移角,数值为 3 条地震波时程计算结果的平均值。

表 3 大震作用下结构层间位移角
Table 3 Inter-story drift ratio under rare earthquake

设防烈度	层间位移角			
	小震丙类	小震乙类	丙类中震不屈服	丙类中震弹性
6 度(125 gal)	1/213	1/210	1/212	1/215
7 度(220 gal)	1/106	1/114	1/120	1/120
8 度(400 gal)	1/60	1/66	1/108	1/108

由表 3 可见:

(1) 抗震设防烈度为 6 度时,4 个抗震性能目标下结构的最大层间位移角差别不大。

(2) 抗震设防烈度为 7 度时,相对于小震丙类建筑,小震乙类、丙类中震不屈服和丙类中震弹性目标下结构的层间位移角减小了 7%~12%。

(3) 抗震设防烈度为 8 度时,相对于小震丙类建筑,小震乙类、丙类中震不屈服和丙类中震弹性目标下结构的层间位移角分别减小 9.1%、44.4% 和 44.4%。

(4) 12 个钢筋混凝土框架结构在大震作用下的层间位移角均小于抗震规范 1/50 的限值,满足要求。

因此,低烈度区(6 度),抗震措施对结构抗震性能的影响较大,采取一定的抗震措施即可达到提高设计地震作用的性能目标。在高烈度区(8 度),提高设计地震作用能显著提高结构的抗震性能。

2.4 结构的抗倒塌(超强)能力评价

增量动力分析(IDA)又被称为“动力推覆分析”,与静力推覆分析(Pushover)类似,将静力分析改为动力时程分析。采用 1 条或多条与规范谱一致的地震记录对结构进行激励,计算中按一定比例调整地震加速度峰值,使地震强度逐渐增大,直到结构丧失承载能力(破坏),从而获得结构在不同地震作用下的抗震性能^[21]。相对于静力 Pushover 分析,IDA 方法的优点是能够充分把握结构的非线性反应特性,可以较好地估计结构的整体性能状态以及大震作用下结构的倒塌能力。本文钢筋混凝土框架结构分析中,结构倒塌用双重指标来判断,即结构能力曲线(地震加速度-最大层间位移角)出现明显拐点且接近水平或者层间位移角达到抗震规范规定的大震作用下的限值。

图 4~6 给出了 3 条地震波作用下按不同性能目

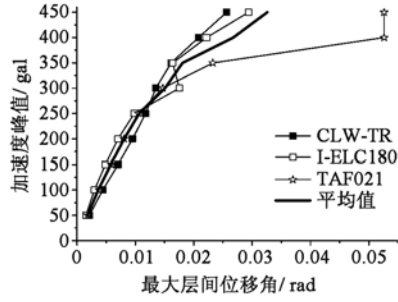
标设计的钢筋混凝土框架结构的抗震能力曲线,对应的抗震设防烈度为 6~8 度。分析 3 条地震波作用下结构能力曲线的平均值,可以看出:①6 度设防时,按小震丙类和小震乙类建筑设计的结构的抗倒塌能力在 350 gal 附近,按丙类中震不屈服和丙类中震弹性设计的结构的抗倒塌能力达到 400 gal;②7 度设防时,按小震丙类和小震乙类设计的结构的抗倒塌能力在 400 gal 左右,按丙类中震不屈服和丙类中震弹性设计的结构的抗倒塌能力在 550 gal 附近;③8 度设防时,按小震丙类建筑设计的结构的抗倒塌能力达到 600 gal,乙类达到 750 gal;按丙类中震不屈服和丙类中震弹性设计的结构具有良好的抗震性能,在加速度 1 000 gal 的范围内没有明显的倒塌迹象。

结构的抗震能力曲线表明,随着加速度峰值的增大,结构最大层间位移角有时会突然减小,这是因为输入地震动强度增大后,结构构件出现塑性铰的先后顺序及位置发生变化,改变了传力路径所致。

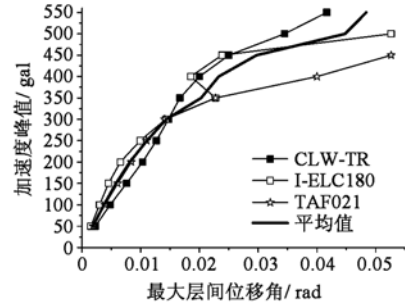
图 7 为小震丙类、小震乙类、丙类中震不屈服和丙类中震弹性 4 个性能目标下结构的抗震能力比较。从图 7 可以看出:①6 度设防时,按 4 个性能目标设计的钢筋混凝土框架结构的抗震能力差别不大,当地震动加速度峰值大于 250 gal 时,中震性能设计的结构的抗震能力略有提高;②7 度设防时,地震动加速度峰值小于 200 gal 时,按 4 个性能目标设计的钢筋混凝土框架结构的抗震能力差别不大,但是按中震设计的结构的整体抗倒塌能力比按小震设计的结构高 200 gal 以上;③8 度设防时,按照小震乙类、中震不屈服和中震弹性设计的建筑的抗震能力比小震丙类建筑均有显著提高,且按中震设计的结构的抗倒塌能力提高最多。

综上所述,一般严格按照抗震规范设计的钢筋混凝土框架结构具有很高的安全储备,抗震设防烈度为 6、7 度区框架结构的超强能力通常会达到 350 gal 以上,接近 8 度区大震水准(我国部分 6、7 度抗震设防地区有时会遭遇 9 度甚至 11 度地震作用,由于 6、7 度抗震设防区域建筑的抗震能力相对较低,因此遭遇 9~11 度地震作用时震害特别严重);8 度抗震设防区框架结构的超强能力通常会达到 600 gal 以上,接近 9 度抗震设防区大震水准。这保证了结构在强震中不倒塌,即抗震规范中“大震不倒”的性能目标。对于 6 度设防地区按照中震设计的意义不大,提高抗震措施对增强结构的抗倒塌能力更为经济有效;7 度和 8 度抗震设防区按中震设计的结构,其抗倒塌能力会明显提高,尤其设防烈度为 8 度时,即使加速度峰值达到 1 000 gal,结构仍没有倒塌的迹象。

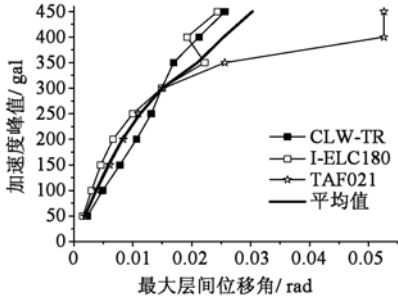
总体上看低烈度区(6 度)抗震措施对框架结构抗倒塌能力的影响较大,采取一定的抗震措施即能



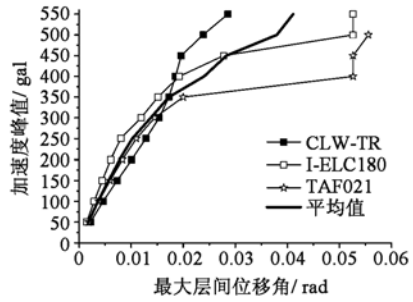
(a) 小震丙类建筑



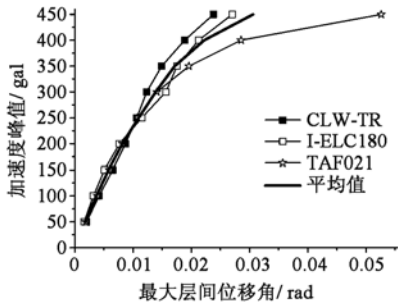
(a) 小震丙类建筑



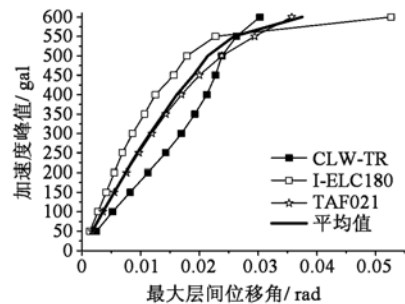
(b) 小震乙类建筑



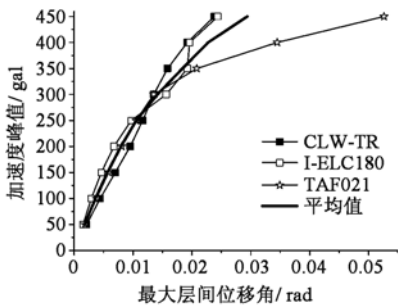
(b) 小震乙类建筑



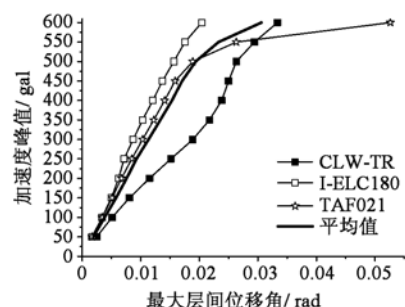
(c) 丙类中震不屈服



(c) 丙类中震不屈服



(d) 丙类中震弹性



(d) 丙类中震弹性

图4 6度设防时框架结构的能力曲线

Fig. 4 Capacity envelopes of frame structures for seismic intensity 6

图5 7度设防时框架结构的能力曲线

Fig. 5 Capacity envelopes of frame structures for seismic intensity 7

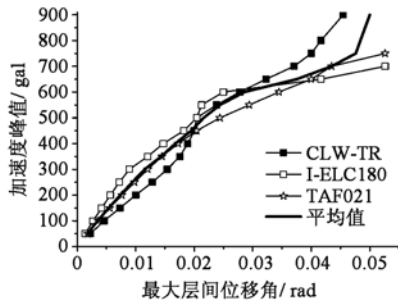
够达到与中震设计相当的性能目标。高烈度区(8度),提高设计地震作用比提高抗震措施更能增强框架结构的抗倒塌能力。

3 结论

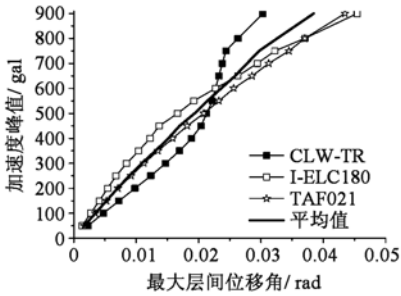
设防水准和性能目标的确定是结构抗震设计的

重要基础性工作,本文以多层钢筋混凝土框架结构为例,对小震丙类、小震乙类、丙类中震不屈服和丙类中震弹性4个性能目标进行了分析,主要得到了以下结论:

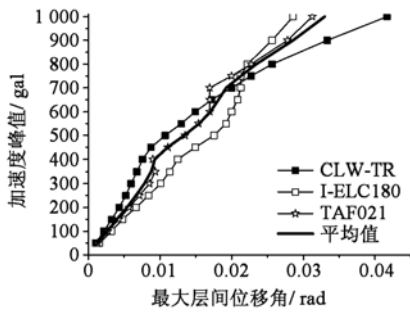
(1)严格按照抗震规范设计的钢筋混凝土框架结构具有较好的超强能力,可保证“大震不倒”的设防目标。



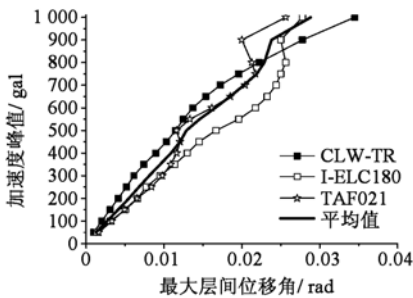
(a) 小震丙类建筑



(b) 小震乙类建筑



(c) 丙类中震不屈服



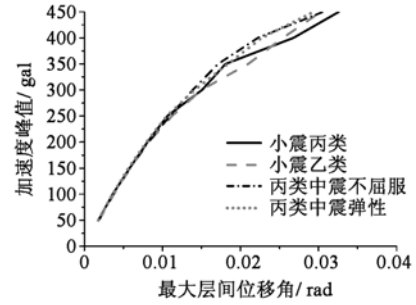
(d) 丙类中震弹性

图6 8度设防时框架结构的抗震能力曲线

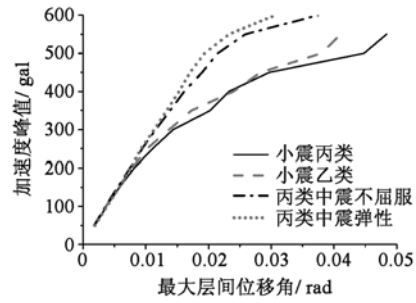
Fig.6 Capacity envelopes of frame structures for seismic intensity 8

(2) 构件小震和中震的地震作用组合效应比较表明,当地震作用效应相对于重力效应较小时,中震性能目标并不一定能提高构件的抗震能力。

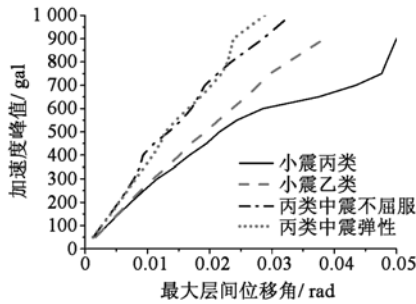
(3) 抗震设防烈度为6度区域按中震设计并不能明显提高结构的抗倒塌能力,而抗震设防烈度为7度和8度区域按中震性能目标设计的结构的抗倒塌



(a) 抗震设防烈度6度



(b) 抗震设防烈度7度



(c) 抗震设防烈度8度

图7 各性能目标下框架结构的抗震能力比较

Fig.7 Seismic capacity comparison of frame structure among four performance objectives

能力会明显提高。但高烈度区(8度及以上)结构整体按中震设计时,工程量增加很多,所以应特别注意(8度设防建筑的绝对抗震能力已较强,可只对关键构件或非常重要的构件按中震设计)。

(4) 低烈度区(6度),抗震措施等级和设计地震作用对框架结构的抗倒塌能力影响不大(6度设防的结构绝对抗震能力较小,提高设计地震作用是主要途径);高烈度区(8度)提高抗震措施等级或设计地震作用都能提高框架结构的抗倒塌能力,尤其是提高设计地震作用。

本文着重于小震和中震作用下钢筋混凝土框架结构的抗倒塌能力分析,另外,倒塌标准的确定、结构抗倒塌能力的影响因素及如何与性能设计相结合等方面还需深入研究。

参考文献

[1] Moehle J P. Displacement-based design of RC

- structures subjected to earthquakes [J]. *Earthquake Spectra*, 1992, 8(3): 403-428.
- [2] 王亚勇. 我国 2000 年工程抗震设计模式规范基本问题研究综述[J]. *建筑结构学报*, 2000, 21(1): 2-4. (WANG Yayong. Summarize on basic problems in 2000 year's engineering aseismic design mode [J]. *Journal of Building Structures*, 2000, 21(1): 2-4. (in Chinese))
- [3] Priestley M J N, Kowalsky M J. Direct displacement-based design of concrete buildings [J]. *Earthquake Engineering*, 2000, 33(4): 421-440.
- [4] 周锡元. 抗震性能设计与三水准设防[J]. *土木水利*, 2003, 30(5): 21-32. (Zhou Xiyuan. Seismic performance design and three levels protection [J]. *Journal of Civil and Hydraulic Engineering*, 2003, 30(5): 21-32. (in Chinese))
- [5] SEAOC Vision 2000 committee. A framework for performance-based engineering[R]. California: Structure Engineering Association of California, 1995.
- [6] Applied Technology Council. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings[R]. ATC 40. California: Applied Technology Council, 1996.
- [7] ASCE. NEHTP Guidelines for seismic rehabilitation of buildings[R]. FEMA 273. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 1997.
- [8] ASCE. State of the art report on connection performance [R]. FEMA 355. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [9] ASCE. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings[R]. FEMA 356. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [10] ASCE. NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures[R]. FEMA 368. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [11] Otani S, Hiraishi H. New seismic design provisions in Japan[C]// Proceeding of International conference on Advanced Technologies in Design, Construction and Maintenance of Concrete Structures. Hanoi: ICCMC/IBST, 2001: 1-10.
- [12] EN 1998-1 Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance[S]. London: European Committee for Standardization, 2004.
- [13] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))
- [14] 周颖, 吕西林. 中震弹性设计与中震不屈服设计的理解及实施[J]. *结构工程师*, 2008, 24(6): 1-5. (Zhou Ying, Lu Xilin. Interpretation and implementation of elastic and non-yielding design under moderate earthquake [J]. *Structural Engineers*, 2008, 24(6): 1-5. (in Chinese))
- [15] 扶长生, 张小勇, 朱凤涛. 对中震不屈服设防目标的讨论[J]. *建筑结构*, 2010, 40(8): 117-120. (Fu Changsheng, Zhang Xiaoyong, Zhu Fengtao. Discussion on the target objective of design-earthquake-unyielding [J]. *Building Structures*, 2010, 40(8): 117-120. (in Chinese))
- [16] 岳茂光. 场地-结构体系基于性能抗震设计分析方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009: 13-42. (Yue Maoguang. Studies on analysis method of performance-based seismic design of site-structure system [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009: 13-42. (in Chinese))
- [17] JGJ 3—2002 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (JGJ 3—2002 Technical specification for concrete structures of tall building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese))
- [18] 王亚勇, 岳茂光, 李宏男, 等. 基于不同性能目标的 RC 结构抗震设计的效益分析[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(3): 37-45. (Wang Yayong, Yue Maoguang, Li Hongnan, et al. Benefit analysis of RC structures designed under different performance objectives [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(3): 37-45. (in Chinese))
- [19] 王雁昆, 杨志勇, 黄吉锋. 框架结构 ABAQUS 与 EPDA/PUSH 的弹塑性分析对比[J]. *建筑结构*, 2008, 38(增刊 1): 13-15. (Wang Yankun, Yang Zhiyong, Huang Jifeng. Comparison of elastoplastic analysis on frame structure by ABAQUS and EPDA/PUSH [J]. *Building Structure*, 2008, 38(Suppl. 1): 13-15. (in Chinese))
- [20] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (GB 50010—2002 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese))
- [21] 韩建平, 吕西林, 李慧. 基于性能的地震工程研究的新进展及对结构非线性分析的要求[J]. *地震工程与工程振动*, 2007, 27(4): 15-23. (Han Jianping, Lu Xilin, Li Hui. State-of-the-art of performance-based earthquake engineering and need for structural nonlinear analysis [J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2007, 27(4): 15-23. (in Chinese))