

# 高层 RC 框架-剪力墙结构抗倒塌能力初步研究\*

岳茂光<sup>1</sup>, 万怡秀<sup>1</sup>, 王东升<sup>2</sup>, 柏长玉<sup>1</sup>, 赵继承<sup>1</sup>, 郑同亮<sup>1</sup>

(1 北京富力城房地产开发有限公司, 北京 100022;

2 大连海事大学道路与桥梁工程研究所, 大连 116026)

**[摘要]** 分别按设防烈度为 6 度、7 度、7 度(0.15g)、8 度和 8 度(0.30g) 时规范最低要求设计了 5 个高层框架-剪力墙结构, 作为分析实例, 采用增量动力分析方法(IDA) 初步研究了其在大震作用下的抗倒塌能力。得到以下结论: 构件形成塑性铰或破坏的顺序符合概念设计思想, 满足多道抗震设防的理念; 框架-剪力墙结构具有明显的屈服点; 符合规范要求的高层框架-剪力墙结构基本满足“大震不倒”的设防目标。

**[关键词]** 框架-剪力墙结构; 抗倒塌能力; 设防烈度; 增量动力分析; 塑性铰

中图分类号: TU973.1+6 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2013)11-0033-05

## Preliminary study on collapse resistant capability of tall RC frame-shear wall structures

Yue Maoguang<sup>1</sup>, Wan Yixiu<sup>1</sup>, Wang Dongsheng<sup>2</sup>, Bai Changyu<sup>1</sup>, Zhao Jicheng<sup>1</sup>, Zheng Tongliang<sup>1</sup>

(1 Beijing R&F Properties Co., Ltd., Beijing 100022, China;

2 Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** Taking 5 tall frame-shear wall structures which were designed according to minimum requirements of fortification intensity 6, 7, 7(0.15g), 8 and 8(0.3g) respectively in design code as examples, collapse resistant capability was studied preliminarily under rare earthquake by incremental dynamic analysis method. Conclusions have been reached as follows: the order of structural member's plastic development(plastic hinge or collapse) fits the conception of displacement-based seismic design and multi-line seismic resistance, frame-shear wall structures have clear yielding point, structures which conform to design code can basically satisfy the fortification objectives of no-collapse under rare earthquake.

**Keywords:** frame-shear wall structure; collapse resistant capability; fortification intensity; incremental dynamic analysis; plastic hinge

## 0 引言

地震的频繁发生造成了巨大的生命和财产损失, 表 1 给出了近年来部分大地震及其造成的损失情况<sup>[1]</sup>。

近年来部分大地震及损失 表 1

时间	地点	震级/Ms	伤亡情况
2011. 3. 11	日本宫城县东北部	9.0	1.5 万人死亡, 9 506 人失踪
2010. 4. 14	青海玉树县	7.1	死 2 698 人, 失踪 270 人, 经济损失 28 亿元
2010. 1. 12	海地	7.3	死 27 万人, 有 48 万人流离失所, 370 万人受灾
2009. 5. 28	洪都拉斯北部海域	7.1	死 8 人, 数千房屋倒塌, 近万人受灾, 直接经济损失 1 亿美元
2008. 5. 12	四川汶川县	8.0	死 69 227 人, 伤 374 643 人, 失踪 17 923 人, 经济损失 8 451 亿元
2008. 3. 21	新疆和田	7.3	民房倒塌 16 间, 损坏 400 多间
2005. 10. 8	巴基斯坦克什米尔	7.8	死 7.3 万, 伤 13 万
2004. 12. 26	印度苏门答腊岛	8.8	引发海啸, 23.9 万人死亡

经历了无数次震害后, 虽然我们仍然不能够准确预测地震, 但是随着抗震设计方法逐步完善, 很大程度上减少了地震造成的损失。总结 1976 年唐山地震的经验教训, 建筑抗震设计规范提出了“小震不坏、中震可修、大震不倒”的设防目标, 增加了扭转计算和变形计算方法, 补充了抗震构造措施, 设防烈度为 6 度区的建筑工程被纳入抗震设防范围<sup>[2]</sup>。经过地震的检验, 按照现行抗震规范设计的结构已经能够满足“小震不坏”的设防目标。然而重大的震害损失往往是由于低烈度区发生了较大地震, 因此大震下结构的抗倒塌能力不容忽视。汶川 5.12 地震后, 激发了抗震工程师和学者对大震下结构抗倒塌能力研究的热情<sup>[3-6]</sup>。

笔者对多层钢筋混凝土框架结构的抗倒塌能力研究表明<sup>[7, 8]</sup>, 严格按照规范设计并采取抗震措施的结构具有较高的安全储备, 能够满足“大震不倒”的目标。本文以某工程为例, 进一步对高层框架-剪

\* 国家自然科学基金(50878033), 教育部新世纪优秀人才项目(NCET-12-0751)。

作者简介: 岳茂光, 博士, 工程师, Email: ymg2004@126.com。

力墙结构的抗倒塌能力进行研究。

1 工程概况

参考某工程,按照现行《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)<sup>[9]</sup>(简称抗规)和《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)<sup>[10]</sup>(简称高规),针对设防烈度为6度、7度、7度(0.15g,本文简称7.5度)、8度和8度(0.30g,本文简称8.5度)设计了5个高层框架-剪力墙结构。通过调整构件尺寸、混凝土强度等级和剪力墙数量,使其满足相应设防烈度下高规设计的要求。主要控制指标有周期比、位移比、刚度比、最小剪重比、位移角、轴压比、配筋率和框架承担的剪力等。除设防烈度为6~7度时,底部2层或3层的最小剪重比略小于规范限值外,其他指标均满足高规最低要求或按高规要求进行了调整。

结构总高度均为99.9m(对8.5度为B级高度)地下2层地上28层。结构层高:地下2层~5层为4.2m,6~20层为3.5m,21~27层为3.2m,顶层为4m。平面尺寸为58.71m×25.9m,标准层平面布置如图1所示。梁、柱、墙混凝土保护层厚度分别为25,25,20mm,抗震等级按高规表3.9.3和表3.9.4采用。混凝土梁均采用C35,主要梁截面尺寸为:300×600,300×700,400×600,400×700,400×800,400×900,400×1000,500×800,500×900。其他相关信息见表2~4。钢筋均采用HRB400级,结构阻尼比取5%。

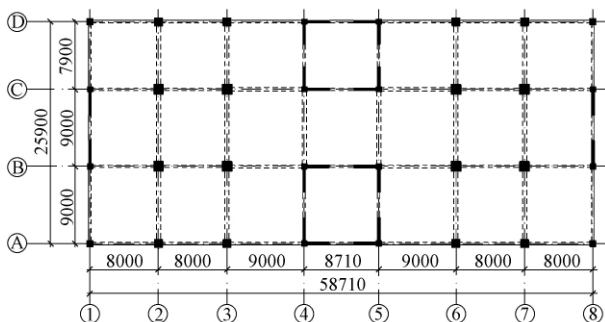


图1 结构平面布置图

竖向构件的混凝土强度等级 表2

楼层	6度		7度	7.5度	8度	8.5度
	墙	柱	墙和柱	墙和柱	墙和柱	墙和柱
1~5	C45	C45	C45	C45	C45	C50
6~10	C40	C45	C45	C45	C45	C50
11~15	C40	C40	C40	C40	C40	C45
16~20	C40	C40	C40	C40	C40	C45
21~25	C35	C35	C40	C40	C40	C40
26~28	C35	C35	C35	C40	C40	C40

结构前3阶周期/s 表3

设防烈度	T <sub>1</sub> (X向)	T <sub>2</sub> (Y向)	T <sub>3</sub> (扭转)	T <sub>3</sub> /T <sub>1</sub>
6度	3.88	3.76	3.38	0.87
7度	3.33	3.32	3.01	0.90
7.5度	2.72	2.78	2.22	0.82
8度	2.53	2.59	1.95	0.77
8.5度	2.02	1.71	1.36	0.67

主要竖向构件尺寸/mm 表4

楼层	1~5	6~10	11~15	16~20	21~25	26~28
6度	墙	300	250	250	200	200
	柱	600/900 /1100	500/800 /1000	400/750 /900	400/600 /800	400/500 /650
7度	墙	350	350	250	250	200
	柱	700/1000 /1150	650/850 /1050	650/750 /950	650/700 /800	400/500 /650
7.5度	墙	400	400	300	250	200
	柱	700 /1100	600 /1000	500 /900	500 /800	400 /600
8度	墙	400/450	400/450	350	300	300
	柱	800 /1200	650 /1100	500 /1000	400 /850	400 /700
8.5度	墙	600	500	500	400	300
	柱	800 /1100	600 /1000	500 /900	500 /800	400 /800

注:混凝土柱截面尺寸为方柱的边长。

楼面和屋面附加恒载为2.0kN/m<sup>2</sup>,楼面和屋面活载为4.0kN/m<sup>2</sup>。设计地震分组为第二组,II类场地,场地特征周期为0.4s,周期折减系数取0.85。基本风压取0.5kN/m<sup>2</sup>,地面粗糙度类别为B类。

2 计算程序和输入地震波

2.1 计算程序

采用三维弹塑性动力时程分析程序EPDA,可以直接读取PKPM模型和SATWE配筋结果进行计算,计算速度比通用有限元程序快几倍。当采用相同材料本构关系时,EPDA与通用大型有限元软件ABAQUS具有较好的一致性<sup>[11]</sup>。

混凝土采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[12]</sup>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、压碎退出工作等复杂特性,具有较高的精度。塑性铰按截面刚度退化比例确定,当构件端部的刚度退化系数为0.3时,即认为出现塑性铰。塑性铰的位置设在梁、柱杆件的两端。钢筋的塑性刚度退化系数取0.01,材料强度按标准值计算。考虑P-Δ效应,动力微分方程采用Wilson-θ法求解,非线性叠代计算采用Newton-Raphson方法。梁、柱等一维构件采用纤维束模型模拟,具有较高的精度;剪力墙采用非线性二维壳单元模拟,能够较真实地分析和显示剪力墙的弹塑性状态。

### 2.2 输入地震动

根据每个结构的自振周期和场地类别,按弹性反应统计一致原则,在强震记录数据库中选择 3 组强震记录,作为抗倒塌分析的输入地震波<sup>[13]</sup>,分析时对加速度峰值归一化,主要信息见表 5。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。表 6 的弹性时程计算结果表明所选地震波满足抗规的要求。限于篇幅只给出了地震波主分量反应谱与规范谱的对比,见图 2。

输入地震波信息 表 5

编号	地震	震级/Ms	X/Y 向峰值加速度/g
BLD	Northridge	6.7	0.24/0.17
CCN	Northridge	6.7	0.26/0.22
CHI	Imperial Valley	6.9	0.27/0.25
CHY	ChiChi ( CHY036)	7.6	0.21/0.29
ELC	Imperial Valley	7.2	0.31/0.21
SVL	Loma Prieta	7.1	0.21/0.21
TAF	Kern County	7.7	0.16/0.18
TCU	ChiChi ( TCU042)	7.6	0.20/0.24
YER	Landers	7.4	0.25/0.15

### 3 抗倒塌能力分析

为了研究高层框架-剪力墙结构的抗倒塌能力,采用了较为先进的双向增量动力分析(IDA)方法。通过连续调整一组(或多组)地震动记录的强度,对结构进行一系列非线性动力时程分析,直到结构达到倒塌状态<sup>[14]</sup>。相对静力 Pushover 分析,IDA 方法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

基底剪力/kN 表 6

设防烈度	编号	X 向剪力	Y 向剪力	比值 X	比值 Y
6 度	SVL	3 306.7	3 785.5	1.07	1.22
	YER	2 744.0	3 192.7	0.89	1.03
	CHY	4 640.1	3 753.4	1.50	1.21
	规范	3 095.6	3 105.5	-	-
7 度	YER	5 320.9	6 743.7	0.81	1.02
	CHY	8 819.8	7 659.2	1.34	1.16
	TCU	9 541.0	7 437.7	1.45	1.13
	规范	6 598.0	6 582.8	-	-
7.5 度	CCN	10 734.7	10 768.6	0.97	0.97
	CHI	10 673.4	9 610.5	0.97	0.87
	ELC	10 481.4	10 021.3	0.95	0.90
	规范	11 039.3	11 082.1	-	-
8 度	CCN	15 680.8	13 566.1	0.96	0.83
	YER	14 967.3	20 065.8	0.92	1.23
	TAF	14 649.2	14 491.8	0.90	0.89
	规范	16 326.9	16 253.3	-	-
8.5 度	BLD	29 338.3	41 902.3	0.92	1.13
	ELC	32 678.4	41 426.2	1.02	1.12
	TAF	28 442	42 553.8	0.89	1.15
	规范	31 984.3	37 039.9	-	-

注:比值 X, Y 分别为该方向的时程波与该方向规范谱计算出的基底剪力之比。

倒塌能力。本文将地震动强度与结构最大层间位移角的关系曲线作为“IDA 曲线”,将结构倒塌定义为结构能力曲线出现明显拐点且接近水平或者层间位移角达到抗规规定的最大塑性变形值。

#### 3.1 构件屈服和破坏顺序

以设防烈度 7 度为例,分析构件屈服和破坏发生的过程。图 3 给出了结构发生最大层间位移角时对应的塑性铰和剪力墙裂缝分布情况,加速度峰值

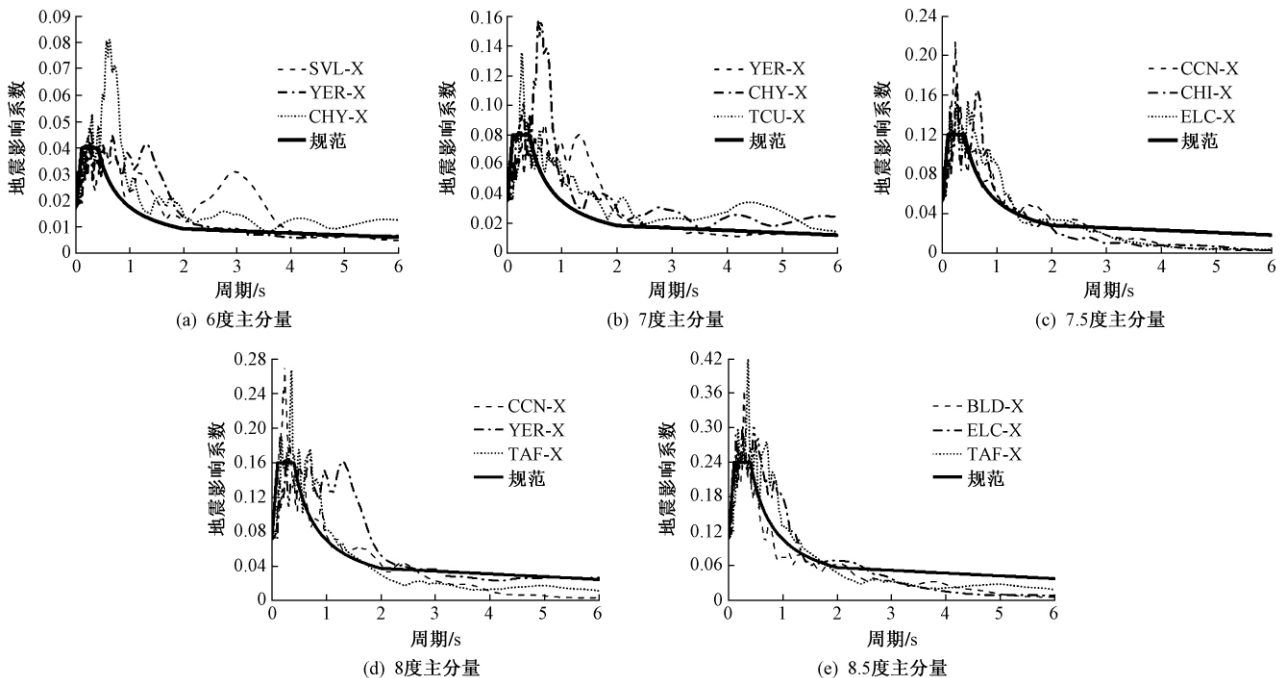


图 2 各设防烈度下地震波主分量反应谱与规范谱的比较

(PGA) 分布为 50 ,100 ,150 ,200gal。当  $PGA = 50gal$  时 部分连梁屈服 ,出现塑性铰 ,其他构件基本保持完好;当  $PGA = 100gal$  时 ,大部分连梁出现塑性铰 ,部分梁屈服 梁端出现塑性铰 底部和中上部剪力墙出现受拉裂缝 框架柱完好;当  $PGA = 150gal$  时 ,连梁和框架梁损伤加重 塑性铰增多 ,剪力墙裂缝进一步发展 ,中上部受拉裂缝增多 底部出现拉、压裂缝 ,框架柱仍保持完好;当  $PGA = 200gal$  时 ,接近 7 度大震水平 ,大量连梁和框架梁的端部形成塑性铰 ,剪力墙裂缝增加 底部和中上部都出现拉、压裂缝 ,底部边跨框架柱屈服 ,出现塑性铰。

从整个分析过程看 构件屈服和破坏的顺序是连梁首先屈服 然后框架梁端形成塑性铰 剪力墙出现受拉裂缝、拉压裂缝 底部部分框架柱屈服。构件形成塑性铰或破坏的顺序符合概念设计思想 满足多道抗震设防的理念。

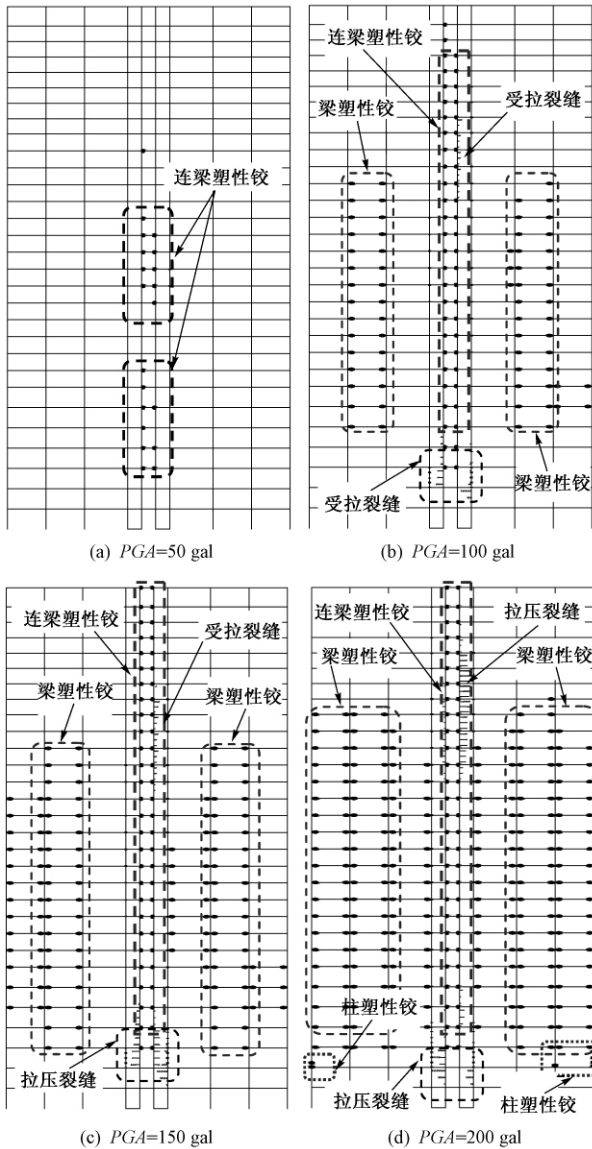


图3 B轴塑性铰和裂缝分布

### 3.2 抗倒塌能力分析

图 4 给出了设防烈度分别为 6 ~ 8.5 度时 ,高层

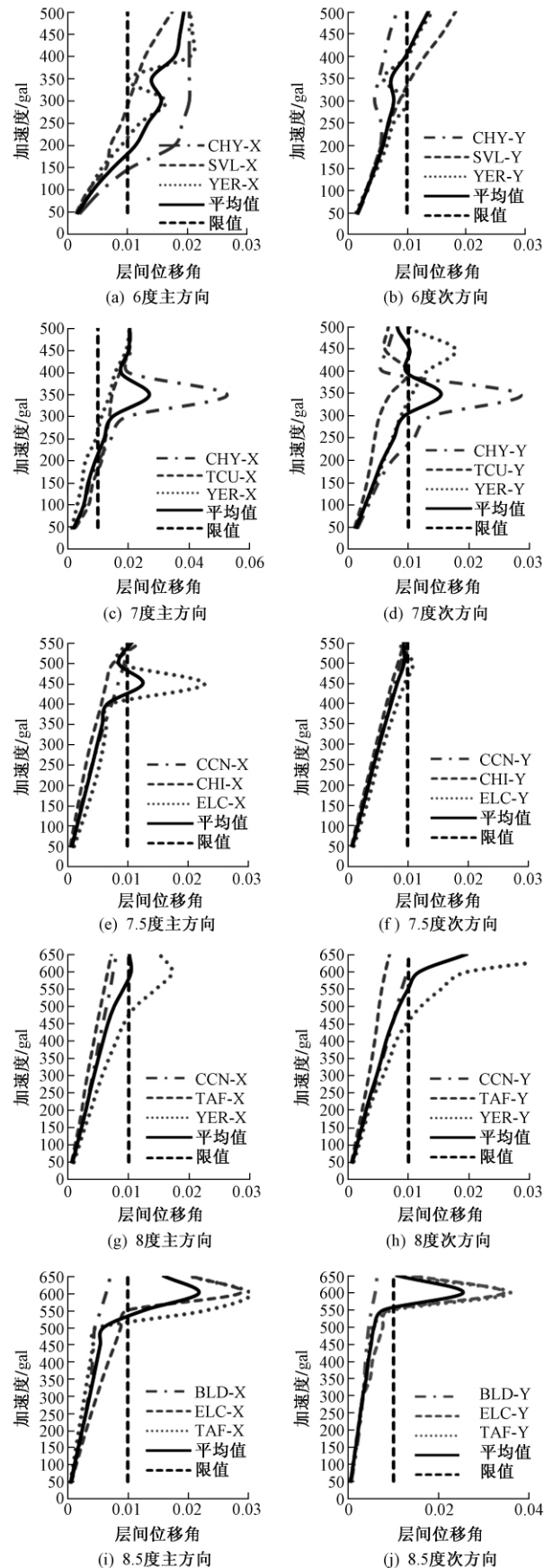


图4 高层框架-剪力墙结构的能力曲线

框架-剪力墙结构的抗倒塌能力曲线。分析3条地震波作用下结构能力曲线的平均值,可以看出:1)6度时结构主方向的抗倒塌能力约为170gal,次方向的抗倒塌能力约为300gal。两个方向均大于125gal,满足“大震不倒”的设防目标,且有一定富余。6度时,设计地震力较小,结构的反应通常由风荷载控制,一定程度上加大了结构的抗震富余度。按规范考虑抗震措施后,结构在大震下具有较好的抗倒塌能力;2)7度时结构主方向的抗倒塌能力约为210gal,次方向的抗倒塌能力约为300gal。主方向接近大震加速度峰值220gal,基本满足“大震不倒”的设防目标,次方向抗倒塌能力有一定富余;3)7.5度时结构主方向的抗倒塌能力约为380gal,次方向的抗倒塌能力约为500gal。两个方向均大于310gal,满足“大震不倒”的设防目标;4)8度时结构两个方向的抗倒塌能力均为550gal左右,大于400gal,抗倒塌能力有一定富余;5)8.5度时结构两个方向的抗倒塌能力均为500gal左右,接近510gal,基本满足“大震不倒”的设防目标,没有富余度;6)IDA曲线有比较明显的屈服点。

按规范设计的高层框架剪力墙结构,基本能够满足“大震不倒”的设防目标。因为文中算例是按照高规最低要求设计的,所以抗倒塌能力的富余度不大。实际工程设计时,构件尺寸、配筋量、设计地震力等都会有一定的富余,因此实际工程的抗倒塌能力更强,安全度更大。对于中高烈度区(7度及以上)结构竖向构件的关键控制指标(轴压比、剪压比等)应留有适当富余度。从分析结果看,低烈度区(6度)结构抗倒塌能力的富余度较大,烈度越高富余度越小。

#### 4 结论

本文分析了一个工程算例在不同设防烈度下的抗倒塌能力,针对本项目初步得到以下几点结论:

(1) 构件形成塑性铰或破坏的顺序是先连梁,然后框架梁和剪力墙,最后框架柱,符合概念设计思想,满足多道抗震设防的理念。

(2) IDA分析表明框架-剪力墙结构具有较明显的屈服点。

(3) 按高规设计的高层框架剪力墙结构能够抵抗高规大震变形验算所规定的加速度值,即满足“大震不倒”的设防目标。

影响结构抗倒塌能力的因素很多,包括工程材料、结构体系、倒塌标准的判定等,有待进行更加深入地研究。

#### 参 考 文 献

- [1] 蔡晓光,薄涛,薄景山等. 1950年以来亚洲大地震及震害分析[J]. 世界地震工程 2011 27(3): 8-16.
- [2] 王亚勇,戴国莹. 建筑抗震设计规范疑问解答[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [3] BAO YIHAI, KUNNATH S K. Simplified progressive collapse simulation of RC frame-wall structures [J]. Engineering Structures, 2010, 32(10): 3153-3162.
- [4] MIAO ZHIWEI, YE LIEPING, GUAN HONG. Evaluation of modal and traditional pushover analyses in frame-shear-wall structures [J]. Advances in Structural Engineering, 2011, 14(5): 815-836.
- [5] 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和方法[J]. 建筑结构学报 2008, 29(4): 42-50.
- [6] 左琼. 基于冗余度理论的钢筋混凝土框架结构抗地震倒塌能力评估[D]. 北京:中国建筑科学研究院,2012.
- [7] 岳茂光,王东升,王亚勇等. 设计性能目标下RC框架结构抗倒塌能力研究[J]. 建筑结构学报 2012, 33(6): 8-15.
- [8] 岳茂光,王东升,孙治国等. 汶川地震下框架结构的抗倒塌能力分析[J]. 工程力学 2012, 29(11): 250-256.
- [9] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [10] JGJ 3—2010 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,2011.
- [11] 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(S1): 13-15.
- [12] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [13] 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.
- [14] 吕大刚,于晓辉,王光远. 单地震动记录随机增量动力分析[J]. 工程力学 2010, 27(S1): 53-58.



建筑结构微信



建筑结构微博