文章编号:1000-4750(2012)11-0250-07

汶川地震下框架结构的抗倒塌能力分析

岳茂光¹, 王东升², 孙治国², 苏志彬³

(1. 奥雅纳工程咨询(上海)有限公司,北京分公司,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. 聊城大学建筑工程学院,山东,聊城 252059)

摘 要:从震害统计和数值模拟两个方面研究了按现行抗震规范设计的钢筋混凝土框架结构的抗倒塌能力。汶川 地震大量钢筋混凝土框架结构震害统计表明,按7度抗震设防的结构在地震烈度达到9度或加速度峰值达到 400gal,开始出现倒塌破坏(占1%~2%);当地震烈度达到11度或加速度峰值达到800gal以上时,出现大量的倒 塌破坏(占60%以上)。进一步以汶川强震记录为输入,对两个典型的钢筋混凝土框架结构进行了增量动力分析。 结果表明:7度抗震设防时可抵御300gal~500gal加速度峰值作用(地震烈度近似9度);按8度抗震设防时可抵御 400gal~600gal加速度峰值作用(地震烈度近似10度)。总体上看按现行抗震规范设计的钢筋混凝土框架的超强系 数基本大于2。

关键词:汶川地震;钢筋混凝土框架;抗倒塌能力;超强系数;增量动力分析 中图分类号:TU352 文献标志码:A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.04.0215

ANALYSIS ON COLLAPSE RESISTANT CAPABILITY OF REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURE UNDER WENCHAN EARTHQUAKE

YUE Mao-guang¹, WANG Dong-sheng², SUN Zhi-guo², SU Zhi-bin³

(1. Arup International Consultants (Shanghai) Co. Ltd, Beijing Branch, Beijing 100020, China;

2. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China;

3. School of Architecture & Civil Engineering, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China)

Abstract: By seismic hazard investigation and numerical simulation, the collapse resistant capability of a reinforced concrete frame structure designed according to active seismic design code is studied. The seismic damage statistics indicate that RC frame structures designed to comply with seismic fortification intensity of 7 commence to collapse (account for 1%~2%) when earthquake intensity reach to 9 or peak ground acceleration (PGA) exceeds 400 gal. Large numbers of RC frame structures (over 60%) will collapse when the earthquake intensity reach to 11 or PGA greater than 800 gal. The further incremental dynamic analysis under Wenchuan earthquake waves shows that frame structure designed according to seismic intensity 7 can overcome PGA from 300gal to 500gal (approach to seismic intensity 9) without collapse, and it can overcome PGA from 400gal to 600gal (nearly seismic intensity 10) while designed according to seismic intensity of 8. As a result, it is found that the overstrength coefficient of a RC frame structure strictly conform to the current seismic code is larger than 2 usually.

Key words: Wenchan earthquake; RC frame structure; collapse resistant capability; over-strength coefficient; incremental dynamic analysis

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(2012TD015, 2011JC034);山东省高等学校科技计划项目(J12LG10) 通讯作者:王东升(1974),男,内蒙古库伦人,教授,博士,主要从事桥梁及结构抗震研究(E-mail: dswang@dlmu.edu.cn).

通讯TF有:土东开(1974),方,内家古件化人,教授,博士,土安从事桥朱及结构机展研充(E-mail: aswang@dimu.edu.cn).

收稿日期:2011-04-12;修改日期:2011-11-02

作者简介:岳茂光(1979),男,山东潍坊人,工程师,博士,主要从事结构设计、抗震加固设计及结构抗震研究(E-mail: ymg2004@126.com);

孙治国(1980),男,山东德州人,博士生,主要从事桥梁及结构抗震研究(E-mail: szg_1999_1999@163.com);

苏志彬(1981), 男,河北衡水人,硕士,主要从事结构设计及抗震研究(E-mail: zhibinsu@126.com).

2008 年 5 月 12 日我国四川省汶川县发生 8.0 级大地震,造成较多工程结构破坏及重大人员伤 亡,很多学者和专家对震害情况进行了考察与研 究^[1 6],这些文献主要从震害方面分析了结构在强 震下的破坏原理并提出了震后修复建议。从震害 看,严格按抗震规范设计的钢筋混凝土建筑结构(7 度设防)经受了强震考验,表现了较好的抗震性能。 叶列平^[7]等分析了结构抗倒塌能力的因素和评价指 标,并提出提高结构整体承载力储备和变形能力, 增加结构的冗余度和整体性等措施能显著提高结 构的抗倒塌能力。林旭川^[8]等采用数值模拟,分析 了框架结构形成"强梁弱柱"破坏的原因,研究了 现浇混凝土楼板和填充墙对框架结构破坏形式的 影响。Villaverde R^[9]总结了 2007 年以前地震所反映 的结构抗震问题,包括抗震规范的欠缺、如何评价 结构的倒塌、结构抗倒塌的安全系数以及如何增强 结构的安全储备等,同时分析了目前评价结构抗倒 塌能力各类方法的优缺点,认为仍需要进一步研究 结构的抗倒塌能力。英国 Elwood K J^[10]通过振动台 试验与动力时程分析比较研究了影响钢筋混凝土 框架结构侧向位移和侧向抗震承载力的因素。 Elnashai A S^[11]通过 12 个混凝土结构 Pushover 分析 和动力时程分析,研究了结构抗侧能力、设计承载 力折减系数、延性水平和超强系数的关系,分析了

符合现代设计规范的结构的水平超强能力,提出以 结构超强能力与强度折减系数的比值评价结构的 抗倒塌能力。

本文以抗震设防的钢筋混凝土框架结构为例, 从震害统计和数值分析两个方面研究了结构的抗 倒塌能力。

1 钢筋混凝土框架地震倒塌统计

汶川地震震害涉及四川、甘肃及陕西等广大区 域,为利用统计方法分析钢筋混凝土框架地震抗倒 塌能力提供了很好的素材。本文选择的代表性城镇 如表1所示,其中断层距离和加速度峰值按参考文 献[12]估计。钢筋混凝土框架结构破坏及统计情况 如表2所示。比较表1和表2可以看出,按7度抗 震设防的钢筋混凝土框架结构在地震烈度达到9 度,或加速度峰值达到400gal以上始出现倒塌破坏 (占1%~2%);当地震烈度达到11度或加速度峰值 达到800gal以上时,将出现大量倒塌破坏(占60% 以上)。

表1 代表性城镇及地震情况

Table 1 Typical towns and its seismic environments

城镇	距离断层/km	设防烈度	汶川地震实际烈度	加速度峰值/gal
北川	临近	7	11	>800
青川	较近	7	10	600
都江堰	10	7	9	400~600
绵竹	20	7	8-9	200~350
江油	20	7	8	200~350
绵阳	45	6	7	150~170

表 2 钢筋混凝土框架结构破坏统计

Table 2 Damage statistics of RC frame structure

城镇	破坏统计			
北川	郭迅等 ^[13] 调查 24 栋(总体为 7 层~9 层):整体倒塌 8 栋,部分			
	倒塌7栋,未倒塌9栋。倒塌指数大于0.5的比例为62.5%			
青川	李建中等[14]调查认为抗震性能表现良好,主体结构基本完好,			
	只是局部损伤或填充墙破坏比较严重。无统计数据			
	张敏政等[15]调查 139 栋:基本完好 72%,轻微破坏 12%,中			
都江堰	等破坏 8%,严重破坏 7%,倒塌 1%。			
	刘国兴和杨庆山等[16]调查 242 栋: 122 栋(50%)基本完好,75			
	栋(31%)轻微破坏,31栋(13%)中等破坏,10栋(4%)严重破坏,			
	4 栋(2%)倒塌。			
	林迟和侯爽等[17]调查结果:基本完好 46%,轻微破坏 33%,			
	中等破坏 12%,严重破坏 4%,倒塌 2%。			
4月九九	刘伟庆等 ^[18] 调查结果(倒塌级别未列入统计):基本完好 18%,			
纬门	轻微破坏 39%,中等破坏 26%,严重破坏 16%			
江油	陈代果和姚勇等 ^[19] 调查 110 栋:45 栋(41%)基本完好,40 栋			
	(36%)轻微破坏,25栋(23%)中等破坏,无严重破坏及倒塌			
绵阳	褚云朋和姚勇等 ^[20] 调查 32 栋:基本完好 23 栋(72%),轻微破			
	坏9栋(28%)			
注:	表中直接采用调查者的描述及评价指标。			

2 RC 框架结构抗倒塌能力数值分析

以三组汶川地震波为输入,利用增量动力分析 方法对两个按照 2001 版抗震规范设计的钢筋混凝 土框架结构的抗倒塌能力进行了研究。汶川主震区 大部建筑抗震设防烈度为7度(0.1g) 震后中国地震 局将震害严重地区的设防烈度提高 0.5 度~1 度。为 此,本文对按照规范7度和8度设计的丙类钢筋混 凝土框架结构进行了分析,以充分反映地震前后抗 震设防对框架结构抗倒塌能力的影响。

2.1 输入地震波

采用汶川地震主震加速度峰值最大的卧龙、绵 竹清平和什邡八角3组强震记录作为输入(表3)。

表 3 汶川地震的三组地震记录信	恴
------------------	---

rable 5 Information of the 5 groups of wenchuan records					
台站名称	分量	断层距/km	场地	$PGA/(m/s^2)$	
	EW			9.58	
汶川卧龙	NS	19	近似 类均	汤地 6.53	
	UD			9.48	

				(续表)
台站名称	分量	断层距/km	场地	$PGA/(m/s^2)$
	EW			8.24
绵竹清平	NS	3	近似 类场地	8.03
	UD			6.23
	EW			5.56
什邡八角	NS	10	近似 类场地	5.82
	UD			6 33

为了更好地分析汶川强震记录的近断层地震 动特征,将水平记录分解为平行断层分量、垂直断 层分量。汶川地震断层走向近似取北偏东45°。图1 给出了汶川强震记录的放大系数谱和规范^[21] 类 场地(第二组)放大系数谱的比较。通过3组波反应 谱平均值的分析可以看出:1)平行断层分量的反应 谱均值,在平台段周期范围内比规范 类场地的谱 值大,放大系数可达到2.5~3以上,其他周期范围 内比规范谱略小;2)垂直断层分量,在小于0.5s 的周期范围内,与规范谱接近,但大于0.5s以后谱 值比规范谱小;3)平台段,以及0.8s~1.8s的周期 范围内,平行断层分量的谱值比垂直断层分量大, 其他情况下两水平分量相差不大;4)在小于0.15s 的短周期范围内,汶川地震动的竖向反应谱比规范 水平谱大;长周期范围内,谱值比规范谱小很多。



Fig.1 Response spectra of near fault earthquake records

另外,将汶川地震记录与台湾集集强震记录进 行了比较,如图3所示,台湾集集地震反应谱由具 有明显速度脉冲效应的16组强震记录反应谱平均 得到^[22]。图2(a)中水平放大系数谱的比较表明,周 期小于0.3s时汶川地震动的放大系数谱大于集集地 震动的谱值;周期大于0.5s时汶川地震的放大系数 谱小于集集地震动的谱值。即汶川地震动比集集地 震动具有更丰富的高频成分,而集集地震动具有更 丰富的低频分量,原因除震源外,场地条件可能是 重要影响因素,汶川场地近似为规范 类场地,而 台湾集集介于 类和 类场地之间。图 2(b)中竖向 谱的变化规律与水平谱类似,周期小于 0.2s 时汶川 地震波的放大系数谱大于集集地震波的谱值;周期 大于 0.2s 时汶川地震波的放大系数谱小于集集地震 波的谱值。



目前汶川强震记录已经公布,其地震动特性仍 有待深入研究。

2.2 分析模型与程序

采用楼板刚性假定的层间模型进行分析。分析 程序采用三维非线性分析程序(EPDA),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^[23]。混凝土采用按照混凝土结构设计规 范^[24]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。因楼板刚性仅对混 凝土柱考虑由轴力和双向弯矩相关作用产生塑性 铰。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,即认为出现塑性较。塑 性铰的位置设在柱杆件的两端。钢筋的刚塑性蜕化 系数取 0.1,材料强度按标准值计算。在结构分析 中,将结构倒塌定义为结构能力曲线(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最大塑性变形值 以上。

2.3 实例1

2.3.1 实例1概况

该工程为七层钢筋混凝土框架结构,首层层高 3.3m,其他层层高3m,建筑总高度21.3m。平面尺 寸为 30m×25.2m,结构的平面布置如图 3 所示。梁、 柱的混凝土强度等级分别为 C30 和 C35,保护层厚 度分别为 25mm 和 35mm,纵向受力钢筋采用 II 级 钢,箍筋用 I 级钢。构件抗震等级,7 度时为三级, 8 度时为二级。结构阻尼比取 5%。

楼面恒载:4.2kN/m²,屋面横载:5kN/m²,楼 面和屋面活载:2.0kN/m²。梁间恒载:13.5kN/m; 屋顶 900mm 高女儿墙荷载:4.7kN/m。基本风压 0.45kN/m²,地面粗糙度类别为 B 类。设计地震分 组为第二组, 类场地。





2.3.2 计算结果及超强能力分析

1) 单向水平汶川波作用。

图 4 给出了单向地震动作用下,分别按 7 度和 8 度设防进行抗震设计时,钢筋混凝土框架结构的 抗震能力曲线。可以看出:1)7度设防时,绵竹波 和什邡波作用下结构的超强能力分别为 500gal 和 400gal;8度设防时,相应的超强能力分别为 850gal 和 700gal。什邡记录对结构具有更大的破坏性。2) 卧龙波作用下,结构没有明显的倒塌迹象,即使加 速度峰值达到 1000gal,结构最大层间位移角也没 有超过规范规定的 1/50 的限值。分析卧龙波的放大 系数谱,1s 以后长周期段的谱值很小(图 1),而该



结构的基本自振周期大于 1.3s;3) 三条强震记录作 用下结构超强能力的均值表明,按7度设防和8度 设防设计的结构的超强能力分别约为 450gal 和 800gal。按照抗震规范,7度和8度时罕遇地震的 设计加速度峰值分别为 220gal 和 400gal,因此本文 框架结构的超强系数 2,这与翟长海等^[25]的研究 结论一致。

2) 双向水平汶川波作用。

下面分析双向水平地震作用下,分别按7度和 8 度设防设计的钢筋混凝土框架结构的抗倒塌能力 (图 5)。分析表明:1)双向地震下框架结构主方向 的抗震能力曲线与单向地震作用趋势类似,只是结 构的超强能力降低 20%左右。7 度设防时,绵竹波 和什邡波作用下结构主方向的超强能力为 450gal 和 350gal;8 度设防时,相应的超强能力分别为 600gal和 500gal;2)7度设防时,绵竹波和什邡波 作用下结构次方向的超强能力分别为 450gal 和 300gal;8 度设防时,结构相应的超强能力分别为 600gal和 400gal。什邡波下结构次方向层间位移角 达到一定值后突然减小,是由于地震强度增大使结 构改变了破坏路径,塑性铰出现在不同位置导致。





图 6 给出了单向、双向水平地震激励下框架结 构主方向超强能力的比较(三组地震波的平均值), 可以看出:当加速度峰值小于 300gal(7 度设防)和 400gal(8 度设防)时,单向激励、双向水平激励框架 结构的超强能力几乎没有差别;此后随加速度峰值 增长二者差异逐渐变大,即双向地震激励对结构倒



2.4 实例2

2.4.1 实例 2 概况

对于长条形的办公楼、教学楼结构,两个方向 结构刚度差别较大,实例2研究此类结构的抗倒塌 能力。该结构为六层钢筋混凝土框架结构,层高均 为3.6m,平面尺寸为31m×13.5m,平面布置如图7 所示。梁、柱的混凝土强度等级分别为C25和C35, 保护层厚度分别为25mm和35mm,纵向受力钢筋 采用 III 级钢,箍筋用 I 级钢。结构阻尼比取5%。 荷载信息、场地类别及地震动参数与实例一相同。



图 7 平面布置图(B)



2.4.2 计算结果分析

图 8 为实例 2 在单向水平汶川地震波作用下主 方向的抗震能力曲线,图 9 为双向水平汶川地震波 作用下结构主、次方向的抗震能力曲线。



Fig.8 Seismic capacity of frame structure at main direction under unidirectional seismic excitation





从图形变化趋势可以看出,实例2与实例1的 主要结论较为一致。因为该结构刚度主次方向差别 较大,所以两个方向结构的抗震能力也差别较大, 主方向的抗震能力较强。由图9可知:按7度设计 时,结构主方向和次方向的超强能力分别约为 450gal和350gal;按8度设计时,结构主方向和次 方向的超强能力分别约为500gal和400gal。

3 结论

本文从震害统计和数值分析两个方面讨论和 研究了按现行抗震规范设计的钢筋混凝土框架结 构(丙类)的抗倒塌能力。以汶川强震记录为输入, 两座典型钢筋混凝土框架结构增量动力分析结果 表明:

(1) 按规范 7 度抗震设防,可抵御 300gal 到 500gal 加速度峰值作用(近似地震烈度 9 度),不致 倒塌。这与汶川地震中框架结构的整体震害表现 一致。

(2) 按规范 8 度抗震设防,可抵御 400gal 到 600gal 加速度峰值作用(近似为地震烈度 10 度),不 致倒塌。

总体上认为,按照现行抗震规范设计的钢筋混 凝土框架结构的超强系数大于 2。

参考文献:

[1] 李英民, 刘立平. 汶川地震建筑震害与思考[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2008:1 105.

Li Yingmin, Liu Liping. Building seismic hazard

investigation and consideration of Wenchuan quake [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2008: 1 105. (in Chinese)

[2] 孙治国, 王东升, 李宏男, 等. 汶川地震钢筋混凝土框 架震害及震后修复建议[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(4):
 114 123.

Sun Zhiguo, Wang Dongsheng, Li Hongnan, et al. Damage investigation of the RC frames in Wenchuan earthquake and suggestions for repair and strengthening [J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(4): 114 123. (in Chinese)

 [3] 霍林生,李宏男,肖诗云,等. 汶川地震钢筋混凝土框 架结构震害调查与启示[J].大连理工大学学报,2009, 49(5):718 723.

Huo Linsheng, Li Hongnan, Xiao Shiyun, et al. Earthquake damage investigation and analysis of reinforced concrete frame structures in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(5): 718 723. (in Chinese)

- [4] 王亚勇. 汶川地震建筑震害启示——抗震概念设计[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 20 25.
 Wang Yayong. Lessons learnt from building damages in the Wenchuan earthquake—seismic concept design of buildings [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 20 25. (in Chinese)
- [5] Zhang Minzheng, Jin Yingjie. Building damage in Dujiangyan during Wenchuan Earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 7(3): 263 269.
- [6] Zhao Bin, Taucer F, Rossetto T. Field investigation on the performance of building structures during the 12 May 2008 Wenchuan earthquake in China [J]. Engineering Structures, 2009, 31(8): 1707 1723.
- [7] 叶列平,陆新征,赵世春,等.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分析[J].建筑结构学报,2009,30(6):67 76.
 Ye Lieping, Lu Xinzheng, Zhao Shichun, et al. Seismic collapse resistance of RC frame structures—case studies on seismic damages of several RC frame structures under extreme ground motion in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(6): 67 76. (in Chinese)
- [8] 林旭川, 潘鹏, 叶列平, 等. 汶川地震中典型 RC 框架
 结构的震害仿真与分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(5):
 13 20.

Lin Xuchan, Pan Peng, Ye Lieping, et al. Analysis of the damage mechanism of a typical RC frame in Wenchan earthquake [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(5): 13 20. (in Chinese)

- [9] Villaverde R. Methods to assess the seismic collapse capacity of building structures: state of the art [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2007, 133(1): 57 66.
- [10] Elwood K J, Moehle J P. Dynamic collapse analysis for a reinforced concrete frame sustaining shear and axial

failures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2008, 37(7): 991 1012.

- [11] Elnashai A S, Mwafy A M. Overstrength and force reduction factors of multistory reinforced-concrete buildings [J]. The Structural Design of Tall Buildings, 2002, 11(5): 329 351.
- [12] 于海英, 王栋, 杨永强, 等. 汶川 8.0 级地震强震动加 速度记录的初步分析[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 49(5):1 13.

Yu Haiying, Wang Dong, Yang Yongqiang, et al. The preliminary analysis of strong ground motion records from the Ms 8.0 Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 49(5): 1 13. (in Chinese)

- [13] 郭迅. 汶川地震震害与抗倒塌新认识[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(增刊): 28 29.
 Guo Xun. New investigation and consideration of seismic hazard and collapse resistant of Wenchuan quake
 [J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(Suppl): 28 29. (in Chinese)
 [14] 李建中, 吕西林, 李翔, 等. 汶川地震中钢筋混凝土框
- [14] 少建平, 百百杯, 少病, 守. 次所起展平钠游花旗工程
 架结构的展害[J]. 结构工程师, 2008, 24(3): 9 11.
 Li Jianzhong, Lü Xilin, Li Xiang, et al. Seismic damage
 of reinforced concrete frame structures in Wenchuan
 earthquake [J]. Structural Engineers, 2008, 24(3): 9 11.
 (in Chinese)
- [15] 张敏政. 汶川地震中都江堰市的房屋震害[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(6):1 6.
 Zhang Minzheng. Building damage in Dujiangyan during Ms 8.0 Wenchuan earthquake [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(6):1 6. (in Chinese)
- [16] 刘国兴,杨庆山,温军. 汶川地震都江堰市建筑结构 震害详查与分析[J]. 建筑结构, 2009, 39(增刊 2): 227 231.
 Liu Guoxing, Yang Qingshan, Wen Jun. Survey and analysis on seismic damage of structures of Dujiangyan in the Wenchuan earthquake [J]. Building Structure, 2009, 39(Suppl 2): 227 231. (in Chinese)
- [17] 林迟,侯爽,欧进萍.汶川地震中都江堰市多龄期建 筑震害特征[J].大连理工大学学报,2009,49(5):748 753.

Lin Chi, Hou Shuang, Ou Jinping. Seismic damage characteristics of multi-aged buildings in Dujiangyan City subjected to Wenchuan earthquake [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(5): 748 753. (in Chinese)

 [18] 刘伟庆,陆伟东,胡夏闽,等. 512 汶川地震绵竹市房 屋震灾评估与分析[J].南京工业大学学报,2009,31(1):
 9 14.

Liu Weiqing, Lu Weidong, Hu Xiamin, et al. Emergency evaluation of buildings in Mianzhu City after 512 Wenchuan earthquake [J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2009, 31(1): 9 14. (in Chinese)

[19] 陈代果,姚勇,郭莹. 汶川地震中江油市区及乡镇房

屋震调查与分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(1): 133 137.

Chen Daiguo, Yao Yong, Guo Ying. Building damage survey and analysis in urban and rural of Jiangyou City Cause by Wenchuan Earthquake [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 33(1): 133 137. (in Chinese)

[20] 褚云朋,姚勇,贾斌,等.房屋震害分析与加固措施研究[C]//房贞政.防震减灾工程理论与实践新进展(纪念汶川地震一周年)——第四届全国防震减灾工程学术研讨会会议论文集,2009:38 43.

Chu Yunpeng, Yao Yong, Jia Bin, et al. Building damage analysis and research on reinforcement measures in Mianyang [C]// Fang Zhenzheng. Development of earthquake risk mitigation in theory and engineering (The proceeding of the 4th national earthquake disaster prevention), 2009: 38 43. (in Chinese)

- [21] GB50011-2001, 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001.
 GB50011-2001, Code for seismic design of buildings [S].
 Beijing: China Architecture & Building Press, 2001. (in Chinese)
- [22] 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.

Yue Maoguang. Studies on Analysis method of performance-based seismic design of site-structure system [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)

[23] 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) [24] GB50010-2002, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国

建筑工业出版社, 2002. GB50010-2002, Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese)

[25] 翟长海,谢礼立.钢筋混凝土框架结构超强研究[J]. 建筑结构学报,2007,28(1):101 106.

Zhai Changhai, Xie Lili. Study on overstrength of RC frame structures [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(1): 101 106. (in Chinese)

(上接第 242 页)

- [8] Lin W-H, Chopra A K. Understanding and predicting effects of supplemental viscous damping on seismic response of asymmetric one-storey systems [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2001, 30: 1475 1494.
- [9] Goel R K, Booker C A. Inelastic seismic response of asymmetric systems [J]. Earthquake Engineering &Structural Dynamics, 2001, 30: 411 430.
- [10] 郑久建,魏琏. 多高层建筑采用粘滞阻尼器减震结构 的扭转分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2004(2):1 5. Zheng Jiujian, Wei Lian. Analysis of torsional response of multi-story and tall buildings by applying viscous damper to mitigate earthquake effect [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2004(2):1 5. (in Chinese)
- [11] De La Llera J C, Almazan J L, Vial I, Ceballos V, Garcia M. Analytical and experimental response of asymmetric structures with friction and visco-elastic dampers [J]. Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004: 516 531.
- [12] De La Llera J C, Almazan J L, Vial I. Torsional balance of plan-asymmetric structures with frictional dampers: Analytical results [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2005, 34: 1089 1108.
- [13] Garcia M, De la Llera J C, Almazan J L. Torsional balance of asymmetric structures with viscoelastic dampers [J]. Engineering Structure, 2007, 29: 914 932.

[14] 陆伟东, 蓝宗建, 刘伟庆. 采用消能支撑减小结构扭转效应的参数分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(2): 62 67.

Lu Weidong, Lan Zongjian, Liu Weiqing. Parameter analysis for torsional responses mitigation of the structure with damped bracings [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(2): 62 67. (in Chinese)

- [15] Wen-Hsiung Lin, Anil K Chopra. Asymmetric one-storey elastic systems with non-linear viscous and viscoelastic dampers: Earthquake response [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2003, 32: 555 557.
- [16] 闫锋,吕西林.粘滞阻尼墙耗能减震结构的研究进展
 [J].结构工程师,2004(1):43 48.
 Yan Feng, Lu Xilin. State of the art of research on structures with viscous damping wall [J]. Structural Engineers, 2004(1):43 48. (in Chinese)
- [17] 杜东升,王曙光,刘伟庆,章征涛.基于粘滞流体阻尼 墙的高层结构减震研究与工程应用[J].建筑结构学报, 2010, 31(9): 87 94.
 Du Dongsheng, Wang Shuguang, Liu Weiqing, Zhang Zhengtao. Analysis research and application of a typical energy dissipation high-rise structure using viscous wall dampers [J]. Journal of Building Structure, 2010, 31(9): 87 94. (in Chinese)