

文章编号:1673-2049(2013)02-0042-07

# 地震灾区既有混凝土框架结构的抗震性能研究

吴迪<sup>1,2</sup>, 谭平<sup>1</sup>, STIEMER S F<sup>2</sup>

(1. 广州大学 广东省地震工程与应用技术重点实验室, 广东 广州 510405;

2. 不列颠哥伦比亚大学 土木工程系, 不列颠哥伦比亚 温哥华 V6T 1Z4)

**摘要:**以汶川县威州镇一幢既有典型混凝土框架结构房屋为研究对象,分析了当地现有混凝土结构的抗震安全水平。采用《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)设定的设防烈度及地震水平,对混凝土结构进行非线性时程分析,建立了该结构的概率地震需求模型。依据该模型确定结构地震易损性水平,建立继续使用、严重破坏和倒塌3种状态下结构的地震易损性曲线,以此研究汶川县此类结构设计的抗震安全水平。研究结果表明:此类既有混凝土框架结构不能完全满足《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)中不同抗震设防等级关于房屋破坏和倒塌的基本要求。

**关键词:**抗震性能;概率地震需求模型;地震易损性分析;混凝土框架结构

中图分类号:TU318.1

文献标志码:A

## Research on Seismic Performance of Existing RC Frame Structure in Seismic Disaster Areas

WU Di<sup>1,2</sup>, TAN Ping<sup>1</sup>, STIEMER S F<sup>2</sup>

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Earthquake Engineering and Advanced Technology,

Guangzhou 510405, Guangdong, China; 2. Department of Civil Engineering, University of

British Columbia, Vancouver V6T 1Z4, British Columbia, Canada)

**Abstract:** A typical existing reinforced concrete (RC) frame structure in Weizhou Town, Wenchuan County was studied to review the seismic safety levels of local RC frame building. The adopted assessment levels of earthquake ground motions were produced according to the local fortification intensity in Chinese *Code for Seismic Design of Buildings* (GB 50011—2010). By using nonlinear finite element method, probabilistic seismic demand model (PSDM) for RC frame structure was built. The seismic fragility curves for immediate occupancy, significant damage, and collapse prevention damage levels of the RC frame building were analyzed. Then, the seismic fragility assessment of the RC frame was discussed to assess the safety levels of the actual RC frame structure of design in Wenchuan County. The research results indicate that the existing RC frame structure in Wenchuan County would unlikely meet the structural damage and collapse prevention performance objectives in related earthquake hazard levels that are found in guidelines for performance-based earthquake engineering in *Code for Seismic Design of Buildings* (GB 50011—2010).

**Key words:** seismic performance; probabilistic seismic demand model; seismic fragility analysis;

收稿日期:2012-12-31

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2011CB013606,2012CB723304);

“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAJ07B02);亚热带建筑科学国家重点实验室开放基金项目(2011KB15);

国家自然科学基金项目(51108105);住房和城乡建设部科研开发项目(K2201219)

作者简介:吴迪(1978-),男,江西南昌人,广州大学讲师,工学博士,博士后,E-mail:wudiwdzooo@gmail.com。

RC frame structure

## 0 引 言

根据中国国家地震台网测定,2008 年 5 月 12 日(北京时间),在四川省汶川县境内的映秀镇附近发生了面波震级  $M_s 8.0$  地震。汶川地震使位于龙门山断裂带附近上百座城镇遭受严重破坏,大量房屋损毁,公路桥梁坍塌,造成了近 9 万人死亡或失踪<sup>[1]</sup>。此次汶川地震的震级高、震源浅,极震区位于高山峡谷地貌反差大的特殊地区,产生了一些具有特征性的地震破坏现象,其极震区的设防烈度达到 5~6 度,主要位于北川县城(6 度)和周边以及映秀(5 度)等地。6 度区民房全部倒塌,钢筋框架楼房全部损毁,倒塌 80% 以上;5 度区楼房全部损毁破坏,倒塌 50% 以上,少量钢筋框架楼房倒塌;山体滑坡严重;地表和道路变形明显,桥梁坍塌;出现地表断层破裂带;5 度与 6 度区破坏的主要区别是有部分楼房虽然破坏或损毁,但不倒塌<sup>[2]</sup>。

汶川地震是新中国成立以来最为强烈的一次地震。在此次地震中,钢筋混凝土框架结构的主要震害现象有:围护结构和填充墙严重开裂和破坏;填充墙设置不合理(或错层)造成短柱剪切破坏;柱剪切破坏,梁柱节点区破坏;填充墙设置不合理造成结构实际层刚度不均匀,导致底部楼层侧移过大,并导致倒塌,或导致结构实际刚度偏心使结构产生扭转地震响应;柱端出现塑性铰,未实现“强柱弱梁”屈服机制<sup>[3]</sup>。部分地区如汶川县,房屋倒塌较少,伤亡人数较少,但据统计显示,该地区房屋破坏程度较严重,超过中等破坏的房屋栋数占总鉴定房屋栋数的 91.57%<sup>[4]</sup>。对汶川地震灾区各类房屋建筑震害的调查发现:在高烈度区,理论上抗震性能较好的钢筋混凝土结构发生倒塌,而抗震性能相对较差的砌体结构却“裂而不倒”;抗震设计要求钢筋混凝土结构的“梁铰机制”没有出现,而是出现了大量的“柱铰”;高层建筑剪力墙结构连梁发生了不同的破坏形态;抗震缝设置带来的问题等。诸如此类现象,值得人们深思<sup>[5]</sup>。

易损性分析是根据地震动的强度对房屋易损性进行评估的分析方法,它是结构可靠性分析的重要分支<sup>[6-7]</sup>。易损性曲线和破坏概率矩阵可以准确地反映不同地震动水平条件下结构抵抗能力的概率水平<sup>[8]</sup>。Yin 等<sup>[9]</sup>利用地震反应谱方法研究未来地震损失能力、地震区划参数联系和房屋的易损性。El-

lingwood<sup>[10]</sup>重点研究了房屋抗震性能评估方法中内在随机性和模型不确定性因素的影响。易损性曲线求解方法包括 3 种:经验方法<sup>[11-12]</sup>、分析方法<sup>[13-16]</sup>和试算法<sup>[17]</sup>。在概率地震需求分析中,通常将非线性需求估计过程称为“云分析”过程。文献<sup>[18]</sup>中基于 Latin 超立方抽样技术,提出一种考虑地震动不确定性和结构不确定性的改进云图法。

《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)<sup>[19]</sup>制定过程中,中国发生了有史以来破坏最严重的地震之一——汶川地震<sup>[20-27]</sup>,因此在新规范下,对此次地震灾区既有房屋的抗震安全水平研究显得尤为重要。根据 GB 50011—2010,汶川县威州镇属于设防烈度 8 度地区,城区主要建筑物的场地类别属于 II 类。2008 年汶川地震发生以后,虽然汶川的抗震设防烈度被提高为 8 度,但是仍有相当一部分房屋建设于该规范颁布之前。因此,笔者针对汶川地震重灾区典型的既有钢筋混凝土框架房屋进行抗震性能评估,主要在地震作用下对结构进行非线性弹塑性分析和数据统计,从而研究该地区混凝土框架结构房屋的抗震性能和地震易损性状况,最后,通过概率地震需求模型对结构进行地震易损性评估。

## 1 地震易损性模型

在某地震荷载水平条件下,地震易损性水平可表示为地震需求  $D$  超越结构抗震能力  $C$  的概率  $P_{C|I}$ 。地震易损性水平是在一定地震荷载水平  $I$  下的条件概率,可表示为

$$P_{C|I} = P(D > C | I) \quad (1)$$

式中: $P$  为概率。

要得到结构的易损性函数,首先需要确定结构的需求分布模型。

采用云分析方法<sup>[28]</sup>,在非线性动力分析结果的基础上建立结构的概率地震需求模型。该方法的优点是只需采用实际地震记录对结构进行分析,而对所选记录不需要特别的规定。通过研究地震记录(10~30 条地震记录)作用下结构的响应,确定结构的地震需求参数,再通过回归可得地震荷载水平  $I$  与地震需求  $D$  的关系,从而确定结构概率地震需求模型的参数  $a, b$ 。Cornell 等<sup>[29]</sup>提出地震需求的估计参数  $\hat{D}$ ,可表示为

$$\hat{D} = aI^b \quad (2)$$

地震需求  $D$  可以采用不同的参数,在本次研究

中地震需求  $D$  采用层间最大位移角,地震荷载水平  $I$  采用结构固有周期  $T_1$  所对应的概率一致反应谱  $S_a(T_1)$  值。在随机需求模式下,易损性可表示为目标达到极限状态的概率<sup>[30]</sup>。根据以往不同领域的研究显示<sup>[31-32]</sup>,易损性一般采用不同灾害值  $x$  的对数正态分布建模。此时,易损性  $F_R(x)$  可表示为

$$F_R(x) = \Phi \frac{\ln(x/m_R)}{\beta_R} \quad (3)$$

式中:  $m_R$  为抵抗能力的平均值;  $\beta_R$  为正态分布标准差,其大致等于抵抗能力的偏差;  $\Phi[\cdot]$  为正态分布概率积分。

根据地震易损性正态累计分布函数可将地震易损性曲线表示为

$$P_{C|I} = 1 - \Phi \frac{\ln(\hat{C}) - \ln(aI^b)}{\sqrt{\beta_{D|I}^2 + \beta_C^2 + \beta_M^2}} \quad (4)$$

式中:  $\beta_{D|I}$ ,  $\beta_C$  分别为在一定地震荷载水平  $I$  条件下,地震需求  $D$  和结构抗震能力  $C$  对其均值的标准差;  $\hat{C}$  为结构抗震能力的中值;  $\beta_M$  为模型的认知偏差,假设模型计算结果与实际响应之间的相对误差在  $\pm 30\%$  以内,取置信度为  $90\%$ ,则  $\beta_M$  为  $0.2$ 。

## 2 输入地震动选择与框架结构的基本参数

笔者根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)中主要城镇抗震设防烈度、设计基本地震加速度和设计地震的分组,采用设防烈度 8 度及 II 类场地条件,并根据其地震影响系数曲线确定概率一致反应谱。按照 50 年超越概率为  $2\% \sim 3\%$ ,  $10\%$ ,  $63\%$  三个设防等级确定目标反应谱,其所对应的重现期分别为  $1\,600 \sim 2\,400$  年,  $475$  年和  $50$  年。

为了选择合适的地震波进行非线性时程分析,采用世界范围内地震记录比较丰富和准确的太平洋地震工程研究中心(NGA)数据库,选择 30 条有代表性的地震记录。这些地震记录的选择范围:矩震级为  $M_w 4.0 \sim M_w 9.0$ ,震源距  $r$  为  $0 \sim 200$  km,场地  $30$  m 土壤深度的剪切波速为  $140 \sim 500$   $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,地震距离包括远场、中场和近场。根据以上研究的基本条件,采用 Abrahamson<sup>[33]</sup> 和 Hancock 等<sup>[34]</sup> 提出的小波算法,按照目标反应谱对所选取的 30 条地震波进行修正,该修正过程预设的最大相对误差为  $0.1$ ; 设防烈度 8 度及 II 类场地条件下,周期  $T$  在  $0 \sim 4$  s 时概率一致反应谱与所采用反应谱的平均值比较见图 1,其中,  $g$  为重力加速度。

本文中的研究对象是汶川县威州镇一幢既有典

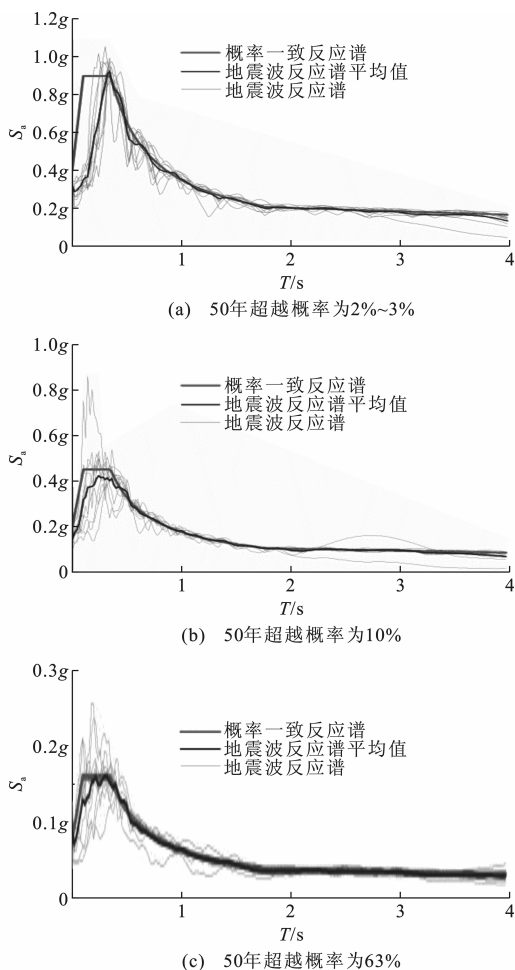


图 1 设防烈度 8 度及 II 类场地条件下的概率一致反应谱与所采用的反应谱平均值的比较

Fig. 1 Comparisons of Median Response Spectra with Probability-consistent Response Spectrum in Fortification Intensity 8 Area on Soil Site Condition II

型的混凝土框架结构房屋,该房屋建成于 2006 年,主体结构以现浇钢筋混凝土柱、梁及板承重,楼面板及屋面为钢筋混凝土现浇板,基础为独立基础。柱、梁及板的混凝土强度均为 C25,围护采用 240 mm 厚烧结粘土砖墙。纵筋采用 HRB335,箍筋采用 HRB235。该房屋楼平面形状为矩形,轴线总长度为 83 m,总宽度为 13.2 m,共 6 层,总建筑面积为  $6\,467$   $\text{m}^2$ ,首层和第 2 层层高均为  $3.5$  m,第 3~6 层层高均为  $3.3$  m<sup>[35]</sup>。本次结构计算中框架梁恒载为  $24$   $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ ,活载为  $12$   $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ ,结构的阻尼比采用  $5\%$ 。结构的第一自振周期为  $0.98$  s,第一振型参与系数为  $0.84$ 。混凝土框架结构立面结构布置见图 2。

采用 SAP2000 第 14 版程序建立整体结构模

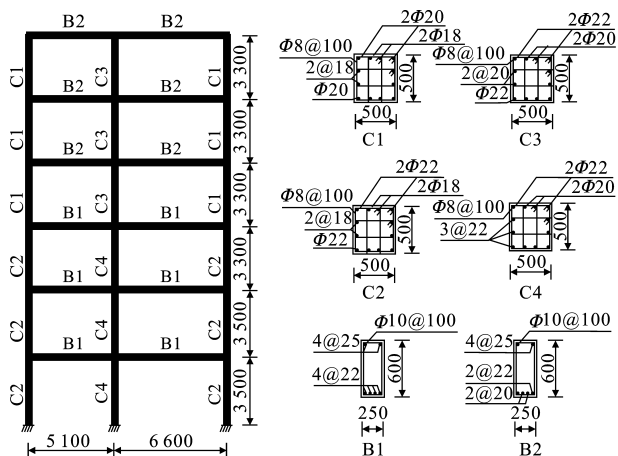


图 2 混凝土框架结构立面结构布置(单位:mm)

**Fig. 2 Elevation Structure Configuration of RC Frame Structure (Unit:mm)**

型,将结构简化为平面框架结构,考虑柱截面纵向钢筋和箍筋对核心混凝土轴向承载能力的提高,仅考虑沿一个方向水平地震动的影响。框架结构柱采用SAP2000 程序中的纤维塑性铰模型,混凝土材料模型采用混凝土单轴拉-压的应力-应变曲线方程<sup>[36]</sup>,纵向钢筋采用拉-压对称的应力-应变模型,模拟柱在弯矩和轴力作用下的变形情况。框架梁采用SAP2000 程序中的弯矩铰模型,模拟配筋梁在地震荷载作用下的弯曲变形情况。

### 3 混凝土框架结构的易损性分析

采用最大层间位移角  $\theta_{\max}$  作为地震需求  $D$ 。将结构抗震能力按照结构抗震性能划分为:继续使用(IO)、严重破坏(SD)和倒塌(CP)。这 3 种水平的基本状态为:继续使用状态(IO 状态)是指主体结构受轻微损坏且不需修理可继续使用状态,取楼层内最大弹性层间位移角  $\theta_{\max}$  作为其临界点;严重破坏状态(SD 状态)是指房屋结构已经进入弹塑性阶段,发生严重破坏,但远未达到结构倒塌的状态;倒塌状态(CP 状态)是由一控制点所确定,该控制点是指房屋结构由于构件和节点的严重破坏或显著的荷载位移( $P-\Delta$ )效应引起较大附加重力荷载而导致结构倒塌的临界控制点。

在《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)中规定以 1/550 和 1/50 分别作为弹性和弹塑性层间位移角限值。本文中依据抗震规范和部分学者<sup>[37]</sup>关于层间位移角限值的讨论,设定结构的 IO 状态、SD 状态和 CP 状态的层间位移角分别为 0.3%, 2.0%, 4.0%, 以此作为结构抗震性能划分标准。根

据文献[35]中的房屋安全鉴定报告和相关规范,计算并建立该房屋的非线性有限元模型,计算得到结构在地震作用下的非线性时程分析结果;按照 50 年超越概率 2%~3%,10%,63% 设防等级的概率一致反应谱  $S_a$  值(设防烈度 8 度及 II 类场地)(表 1),确定概率地震需求模型,如图 3 所示,建立混凝土框架结构的 IO 状态、SD 状态和 CP 状态的易损性曲线,如图 4 所示。

表 1 设防烈度 8 度及 II 类场地条件下的概率一致反应谱  $S_a$  值

**Tab. 1 Probability-consistent Response Spectrum  $S_a$**   
**Values in Fortification Intensity 8**  
**Area on Soil Site Condition II**

50 年超越概率/%	$S_a$
63	$0.06g$
10	$0.19g$
2~3	$0.36g$

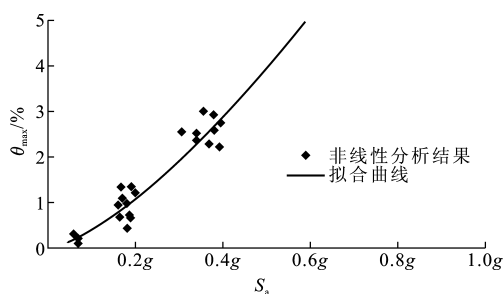


图 3 汶川县某 6 层混凝土框架结构的地震需求

**Fig. 3 Seismic Demand on 6-story RC Frame Structure in Wenchuan County**

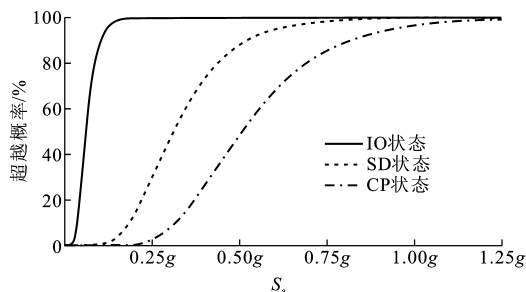


图 4 汶川县某 6 层混凝土框架结构的易损性曲线

**Fig. 4 Fragility Curves of 6-story RC Frame Structure in Wenchuan County**

由图 3 可以看出,按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)中设防烈度 8 度及 II 类场地设防等级,部分结构最大层间位移角已经超过规范所规定的限值。根据混凝土框架结构的易损性曲线确定的此类房屋的破坏水平见图 5。由图 5 可以看出:在 50 年超越概率 63% 设防等级下,结构发生轻微破坏或基本未发生破坏,结构基本能够继续使用;

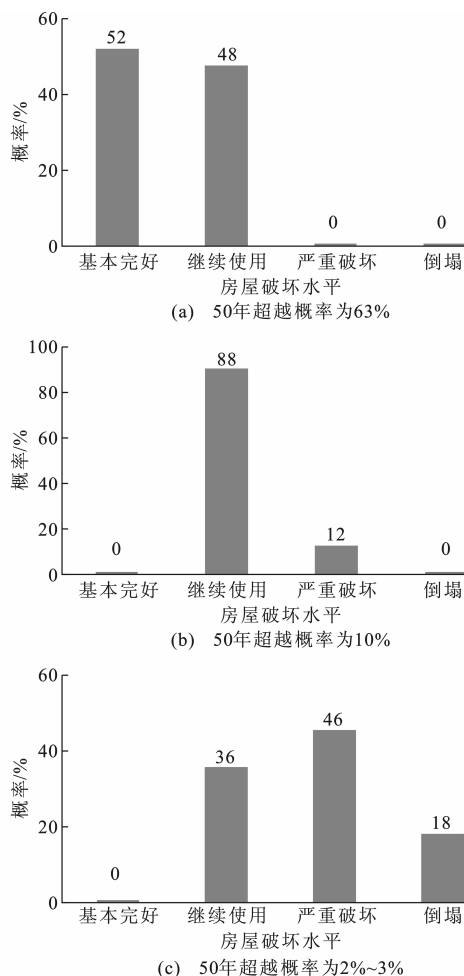


图5 房屋破坏水平

Fig. 5 Damage State Probabilities of Buildings

在 50 年超越概率 10% 设防等级下,部分结构的主要受力构件已经进入弹塑性状态,此时,结构发生严重破坏的概率为 12%;在 50 年超越概率 2%~3% 设防等级下,该结构发生严重破坏的概率为 46%,并且发生倒塌的概率达到 18%。

汶川地震发生后,Wang 等<sup>[38]</sup>对 2008 年汶川地震灾害情况进行了详细的调查和研究,并建立了灾区混凝土房屋倒塌率和速度峰值反应谱的统计回归关系式。其研究结果认为,当周期在 0.1~0.5 s 范围的加速度反应谱值达到  $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  时,房屋的倒塌率还不到 10%;当加速度反应谱值达到  $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  时,倒塌率达到 50%。通过研究可知,当周期为 0.98 s 的加速度反应谱值达到  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  时,该混凝土框架结构房屋倒塌的概率达到 50%。根据地震反应谱周期与谱值的基本规律,周期在 0.1~0.5 s 范围的加速度反应谱值高于周期在 0.98 s 时的结果。因此,考虑到反应谱周期与谱值的相关规律,本文研究结果与文献[38]中的研究结果基本一致。

## 4 结 语

以汶川地震灾区一幢典型混凝土框架结构房屋安全鉴定报告(文献[26])为基础,研究灾区既有混凝土结构的地震易损性水平,建立继续使用、严重破坏和倒塌 3 种状态下结构的地震易损性曲线,并确定该类混凝土结构房屋的地震安全水平。当遭受相当于本地区抗震设防烈度的地震时,结构发生损坏,并有少数发生严重破坏;当遭受高于本地区抗震设防烈度的罕遇地震时,有一部分结构甚至发生倒塌或发生危及生命的严重破坏。根据对灾区既有混凝土框架结构的抗震性能研究,可以初步认为该类混凝土结构不能完全满足 GB 50011—2010 所规定的此地区抗震设防烈度下设防目标所提到关于房屋破坏和倒塌的基本要求,因此,该类房屋的抗震能力有待进一步提高。综上所述,灾区既有混凝土框架结构严格执行 GB 50011—2010 对于其抗震性能的提高有重要的意义,有利于预防和减少未来板内地震对中国地震灾区的影响。

## 参考文献:

## References:

- [1] 张 勇,冯万鹏,许力生,等. 2008 年汶川大地震的时空破裂过程[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,2008,38(10):1186-1194.  
ZHANG Yong, FENG Wan-peng, XU Li-sheng, et al. Spatial and Temporal Rupture Process of 2008 Wenchuan Earthquake [J]. Science in China Series D, 2008, 38(10): 1186-1194.
- [2] 杨主恩,邓志辉,马文涛,等. 汶川 8 级强震极震区破坏情况与烈度[J]. 地震地质,2008,30(2):349-354.  
YANG Zhu-en, DENG Zhi-hui, MA Wen-tao, et al. Some Destruction and Its Seismic Intensity in Meizoseismal Region of Wenchuan Earthquake with Magnitude 8, Sichuan, China [J]. Seismology and Geology, 2008, 30(2): 349-354.
- [3] 叶列平,曲 哲,马千里,等. 从汶川地震框架结构震害谈“强柱弱梁”屈服机制的实现[J]. 建筑结构,2008,38(11):52-59,67.  
YE Lie-ping, QU Zhe, MA Qian-li, et al. Study on Ensuring the Strong Column-weak Beam Mechanism for RC Frames Based on the Damage Analysis in the Wenchuan Earthquake [J]. Building Structure, 2008, 38(11): 52-59, 67.
- [4] 吴 迪,熊 焱,崔 杰,等. 汶川 8.0 级地震中汶川县城房屋震害及其加固情况分析[J]. 地震研究,

- 2010,33(2):216-221.
- WU Di,XIONG Yan,CUI Jie,et al. The Analysis of Building Damage and Reinforcement in Wenchuan County Caused by the May 12,2008 Earthquake[J]. Journal of Seismological Research,2010,33(2):216-221.
- [5] 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 Ya-yong. Lessons Learnt from Building Damages in the Wenchuan Earthquake—Seismic Concept Design of Buildings [J]. Journal of Building Structures,2008,29(4):20-25.
- [6] ZHANG J H,HU S D. State of the Art of Bridge Seismic Vulnerability Analysis Research[J]. Structural Engineers,2005,21(5):76-80.
- [7] DENG H S. Research on Building Structure Seismic Fragility Assessment Method[J]. China Water Transport,2010,10(5):140-141.
- [8] SINGHAL A,KIREMIDJIAN A S. Method for Probabilistic Evaluation of Seismic Structural Damage[J]. Journal of Structural Engineering,1996,122(12):1459-1467.
- [9] YIN Z Q,ZHAO Z,YANG S W. Relation Between Vulnerability of Buildings and Earthquake Acceleration Spectra[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2003,23(4):195-200.
- [10] ELLINGWOOD B R. Earthquake Risk Assessment of Building Structures [J]. Reliability Engineering and System Safety,2001,74(3):251-262.
- [11] ROSSETTO T,ELNASHAI A. Derivation of Vulnerability Functions for European-type RC Structures Based on Observational Data[J]. Engineering Structures,2003,25(10):1241-1263.
- [12] SHINOZUKA M,FENG M Q,LEE J,et al. Statistical Analysis of Fragility Curves [J]. Journal of Engineering Mechanics,2000,126(12):1224-1231.
- [13] CELIK O C,ELLINGWOOD B R. Seismic Risk Assessment of Gravity Load Designed Reinforced Concrete Frames Subjected to Mid-America Ground Motions[J]. Journal of Structural Engineering,2009,135(4):414-424.
- [14] ELLINGWOOD B R,CELIK O C,KINALI K. Fragility Assessment of Building Structural Systems in Mid-America[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,2007,36(13):1935-1952.
- [15] ROSSETTO T,ELNASHAI A. A New Analytical Procedure for the Derivation of Displacement-based Vulnerability Curves for Populations of RC Structures [J]. Engineering Structures,2005,27(3):397-409.
- [16] HWANG H,LIU J B. Seismic Fragility Analysis of Reinforced Concrete Bridges [J]. China Civil Engineering Journal,2004,37(6):47-51.
- [17] ATC. Earthquake Damage Evaluation Data for California[R]. Redwood City: Applied Technology Council,1985.
- [18] 吕大刚,于晓辉,潘峰,等.基于改进云图法的结构概率地震需求分析[J].世界地震工程,2010,26(1):7-15.
- LU Da-gang,YU Xiao-hui,PAN Feng,et al. Probabilistic Seismic Demand Analysis of Structures Based on an Improved Cloud Method [J]. World Earthquake Engineering,2010,26(1):7-15.
- [19] GB 50011—2010,建筑抗震设计规范[S].
- GB 50011—2010,Code for Seismic Design of Buildings[S].
- [20] 董建华,朱彦鹏,马巍,等.框架预应力锚杆边坡支护结构抗震简化设计方法[J].中国公路学报,2012,25(5):38-46.
- DONG Jian-hua,ZHU Yan-peng,MA Wei,et al. Simplified Seismic Design Method of Frame Supporting Structure with Prestressed Anchors for Slope Stability [J]. China Journal of Highway and Transport,2012,25(5):38-46.
- [21] 陆新征,马玉虎,唐代远,等.汶川地震典型RC框架结构抗倒塌加固效果分析[J].建筑科学与工程学报,2011,28(2):21-27.
- LU Xin-zheng,MA Yu-hu,TANG Dai-yuan,et al. Strengthening Effect Analysis of Seismic Collapse Resistance of Typical RC Frame Structures in Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2011,28(2):21-27.
- [22] 王毅红,卜永红,韩岗,等.中国村镇民居的建造习惯与抗震性能评析[J].长安大学学报:自然科学版,2011,31(3):60-67.
- WANG Yi-hong,BU Yong-hong,HAN Gang,et al. Assessing on Construction Habituation and Seismic Behavior of Village and Town Buildings in China [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2011,31(3):60-67.
- [23] 宋一凡,贺拴海,曹继伟.基于能量原理的框架桥墩地震力分析[J].长安大学学报:自然科学版,2002,22(1):36-40.
- SONG Yi-fan,HE Shuan-hai,CAO Ji-wei. Analysis for Transverse Seismic Forces of the Frame Bridge Piers Based on Energy Principle [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2002,

- 22(1):36-40.
- [24] 周果行.“5·12”汶川地震震区建筑受损的内在原因分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(2): 109-115.
- ZHOU Guo-xing. Analysis of Internal Factors of Damaged Buildings in “5·12” Wenchuan Earthquake Zone[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(2): 109-115.
- [25] 郭婷婷, 徐锡伟, 于贵华, 等. 川西地区农村民居建筑物震害调查与分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(3): 59-64.
- GUO Ting-ting, XU Xi-wei, YU Gui-hua, et al. Investigation and Analysis of Earthquake Disasters for Rural Residential Buildings in Western Sichuan Areas [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(3): 59-64.
- [26] 刘伯权, 潘元. 框架-抗震墙结构抗震墙抗弯刚度的优化研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 55-57, 63.
- LIU Bo-quan, PAN Yuan. Study on Optimum Bending Rigidity of Seismic Wall in Frame-shear Wall Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 55-57, 63.
- [27] 易伟建, 张颖. 混凝土框架结构抗震设计的弯矩增大系数[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(2): 46-51.
- YI Wei-jian, ZHANG Ying. Moment Magnification Factor in Anti-seismic Design of Concrete Frame Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(2): 46-51.
- [28] JALAYER F, FRANCHIN P, PINTO P E. A Scalar Decision Variable for Seismic Reliability Analysis of RC Frames[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(13): 2050-2079.
- [29] CORNELL A C, JALAYER F, HAMBURGER R O, et al. Probabilistic Basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency Steel Moment Frame Guidelines [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(4): 526-533.
- [30] CASCIATI F, FARAVELLI L. Fragility Analysis of Complex Structural Systems [M]. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [31] ELLINGWOOD B. Validation Studies of Seismic PRAs[J]. Nuclear Engineering and Design, 1990, 123(2): 189-196.
- [32] SINGHAL A, KIREMIDJIAN A S. Method for Probabilistic Evaluation of Seismic Structural Damage[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(12): 1459-1467.
- [33] ABRAHAMSON N A. Non-stationary Spectral Matching[J]. Seismological Research Letters, 1992, 63(1): 30.
- [34] HANCOCK J, WATSON-LAMPREY J, ABRAHAMSON N A, et al. An Improved Method of Matching Response Spectra of Recorded Earthquake Ground Motion Using Wavelets [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2006, 10(1): 67-89.
- [35] 张卓然. 汶川县双河市场房屋安全鉴定报告[R]. 广州: 广州市房屋鉴定事务所, 2009.
- ZHANG Zhuo-ran. Report of Shuanghe Market Building Safety Inspection in Wenchuan County Town[R]. Guangzhou: Guangzhou Building Identification Office, 2009.
- [36] GB 50010—2002, 混凝土结构设计规范[S].
- GB 50010—2002, Concrete Structure Design Code [S].
- [37] CELIK O C, ELLINGWOOD B R. Seismic Fragilities for Non Ductile Reinforced Concrete Frames Role of Aleatoric and Epistemic Uncertainties[J]. Structural Safety, 2010, 32(1): 1-12.
- [38] WANG X, MASAKI K, IRIKURA K. Building Damage Criteria from Strong Ground Motion Characteristics During the 2008 Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2011, 15(7): 1117-1137.