

文章编号: 1000-4750(2017)01-0069-07

基于易损性指数的钢筋混凝土框架结构 地震损伤评估

于晓辉^{1,2}, 吕大刚^{1,2}, 范 峰^{1,2}

(1. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 黑龙江, 哈尔滨 150090; 2. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江, 哈尔滨 150090)

摘 要: 在传统地震易损性分析的基础上, 提出了易损性指数的概念, 并用其来评估结构的地震损伤。通过引入群体结构震害评估中震害指数的概念, 结合解析地震易损性分析得到的结构破坏状态概率, 将震害指数的数学期望作为单体结构的易损性指数。选择8层和10层两组考虑不同抗震设防水平的钢筋混凝土框架结构为研究对象, 分析得到结构的地震易损性曲线、破坏状态概率曲线、易损性指数曲线以及结构在小震、中震和大震作用下的易损性指数。分析结果表明: 按我国抗震规范设计的钢筋混凝土框架结构基本可以满足“小震不坏”、“中震可修”和“大震不倒”的性能要求。在大震作用下, 结构可以较好地控制较严重破坏的发生。随着抗震设防水平的提升, 结构的抗震能力得到了加强, 但结构在小震、中震和大震作用下的易损性指数却发生了增加。

关键词: 地震易损性; 地震损伤; 易损性指数; 钢筋混凝土框架; 抗震设防水平

中图分类号: TU375.4 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.09.0731

SEISMIC DAMAGE ASSESSMENT OF RC FRAME STRUCTURES BASED ON VULNERABILITY INDEX

YU Xiao-hui^{1,2}, LÜ Da-gang^{1,2}, FAN Feng^{1,2}

(1. Key Lab of structures Dynamic Behavior and control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Heilongjiang, Harbin 150090, China;

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Heilongjiang, Harbin 150090, China)

Abstract: An index in terms of vulnerability index is proposed to assess structural damage due to earthquake based on conventional seismic fragility analysis. The methodology of assessing earthquake consequences at the regional scale using the damage index is adopted and the numerical expectation of the damage index is calculated to quantify the vulnerability index of an individual building, where the damage state probability is derived through analytical seismic fragility analysis. Two groups of RC frames of 8- and 10-story height are considered as study cases, each of which includes frames designed to various seismic fortification levels. Seismic fragility curves, damage state probability curves, vulnerability index curves and vulnerability indices at frequent earthquake (FE), design-based earthquake (DBE) and maximum consider earthquake (MCE) intensities are computed separately. The results show that the RC frames designed according to the current Chinese codes can basically satisfy the performance requirements of “no damage under FE”, “no unreparable damage under DBE” and “no collapse under MCE”. At MCE intensities, the reference frames illustrate good performance of controlling the occurrence of severe damages. Structural resistance against earthquake is enhanced due to the increase of seismic fortification

收稿日期: 2015-09-06; 修改日期: 2016-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378162, 51178150); 国家科技支撑计划课题项目(2013BAJ08B01); 中国博士后科学基金面上项目(2014M551251); 黑龙江省博士面上基金项目(LBH-Z14114)

通讯作者: 吕大刚(1970—), 男, 黑龙江铁力人, 教授, 博士, 博导, 副院长, 从事地震可靠性、易损性和鲁棒性研究(E-mail: ludagang@hit.edu.cn).

作者简介: 于晓辉(1982—), 男, 辽宁丹东人, 助理研究员, 博士, 从事地震易损性和概率风险分析的研究(E-mail: yxhhit@126.com);

范 峰(1971—), 男, 安徽人, 教授, 博士, 博导, 院长, 从事大跨空间结构方面的研究(E-mail: fanf@hit.edu.cn).

level; however the conditional seismic vulnerability indices upon FE, DBE and MCE are increased accordingly.

Key words: seismic fragility; seismic damage; vulnerability index; RC frame structures; seismic fortification level

准确而定量地评估结构在地震作用下的损伤一直是地震工程领域的研究重点。从研究范畴来看,地震损伤分析是评估地震损失的关键环节。由于地震动和工程结构均存在不可忽视的随机性和不确定性,因此如何考虑这些随机性和不确定性的影响,客观地评价结构在地震作用下的损伤演化规律就显得尤为重要。

近年来,基于全概率思想的基于性能地震工程(Performance-based Earthquake Engineering, PBEE)已经成为了地震工程领域发展的一个重要研究方向。美国太平洋地震工程研究中心已经率先提出了基于全概率表达式的新一代 PBEE 概率决策框架^[1]。该框架以概率地震风险为研究目标,将地震危险性、地震易损性和地震损失作为主要研究内容。其中,地震易损性分析作为核心研究模块,表征了工程结构(系统)在不同强度地震作用下发生不同破坏状态的概率。它从概率的意义上定量地刻画了工程结构(系统)的抗震性能,从宏观的角度描述了地震动强度与结构破坏程度之间的关系^[2]。针对量大面广的钢筋混凝土框架结构,我国学者以地震易损性为抗震性能评估工具开展了一系列的研究。如:吴巧云等^[3]分别选择近场和远场地震动作为输入,基于易损性分析讨论了不同地震动输入对结构性能的影响。张耀庭等^[4]研究了弯矩增大系数对钢筋混凝土框架结构地震易损性的影响。周靖等^[5]基于地震易损性分析研究了脉冲地震作用下,楼层承载力及刚度突变对竖向不规则 RC 框架结构抗震性能的影响。吕大刚和于晓辉^[6]对地震易损性分析及地震风险评估的数学基础进行了深入研究,并对一栋按我国规范设计的 RC 框架结构的抗震性能进行了概率评估^[7]。于晓辉等^[8]提出了考虑倒塌概率修正的 RC 框架结构地震易损性分析方法。

尽管地震易损性研究已经取得了大量的成果。然而,由于地震易损性结果存在以下两个特点,限制了其在工程领域的广泛应用:1) 地震易损性结果的概率性。地震易损性函数(曲线)均表示为超越概率的形式,这虽然客观地考虑地震动和工程结构的不确定性对结构抗震性能的影响,但这种概率表达方式并不容易被工程人员所接受;2) 地震易损性结

果的多水准性。地震易损性函数(曲线)通常表示为多性能水准下的结构失效概率,这虽然满足基于性能地震工程的需求,但从结构地震损伤评估的角度,工程人员更倾向于采用单个量值来评价结构的损伤程度,而非多个破坏状态的失效概率。上述两点局限并非意味着地震易损性本身存在缺陷。事实上,地震易损性为研究人员提供了全面和客观的结构性能评价结果。为使得传统地震易损性分析结果更具适用性,要求研究人员对地震易损性分析结果进行更加深入的理解。那么,如何基于传统地震易损性分析,进一步获得更容易被工程人员所接受的地震损伤评估结果,将是相关研究人员所要面对的一个非常实际而重要的问题^[9]。

针对这一问题,本文提出“易损性指数”的概念来评估结构的地震损伤。通过引入我国在震后调查中通常采用的震害指数来定义结构的破坏状态^[10],利用地震易损性曲线计算结构发生不同破坏状态的失效概率,并将震害指数的数学期望定义为易损性指数。由于震害指数位于 0~1,因此易损性指数也表示为一个 0~1 的参数。易损性指数借鉴了震害指数的概念^[11],两者之间最大的不同在于:震害指数通常用作区域层次的震害评估,通过计算一个区域内群体结构的平均震害指数来评估震害后果;而易损性指数则是用作单体结构的震害评估,结合基于易损性分析获得的结构破坏状态失效概率,计算得到单体结构的震害指数的数学期望来定量评估该结构的地震损伤。作为传统地震易损性分析的拓展,地震易损性指数将基于概率表达形式的多水准易损性曲线转变为基于易损性指数的非概率单参数描述形式。这将有利于地震易损性分析结果在工程实际中的广泛应用。为说明本文提出方法,对 8 层和 10 层两组按我国规范设计的钢筋混凝土框架结构开展了基于易损性指数的地震损伤分析。

1 基本原理

地震易损性函数可表示为^[12]:

$$P(\text{LS} | S_a) = 1 - \Phi \left(\frac{\lambda_C - \lambda_{D|S_a}}{\sqrt{\beta_C^2 + \beta_{D|S_a}^2 + \beta_M^2}} \right) =$$

$$\Phi \left(\frac{\ln m_{D|S_a} - \ln m_C}{\sqrt{\beta_C^2 + \beta_{D|S_a}^2 + \beta_M^2}} \right) \quad (1)$$

式中： $P(LS|S_a)$ 表示在强度为 S_a 的地震作用下，结构达到及超越某极限状态的概率(在文献[6]中被称为“极限状态概率”)； S_a 为谱加速度； $\Phi[\cdot]$ 是正态分布函数； $\lambda_C=\ln m_C$ 是抗震能力 C 的对数平均值，等于抗震能力中位值 m_C 的对数； $\lambda_{D|S_a} = \ln m_{D|S_a}$ 表示在强度为 S_a 的地震作用下，地震需求 D 的对数平均值，等于需求中位值 $m_{D|S_a}$ 的对数； β_C 和 $\beta_{D|S_a}$ 分别表示抗震能力和地震需求的对数标准差(离差)； β_M 表示模型不确定性，按文献[13]取为 0.2。

式(1)所示的地震易损性函数是假设地震需求 D 和结构抗力 C 均服从对数正态分布所推导获得^[6]。其中，地震需求参数 $m_{D|S_a}$ 和 $\beta_{D|S_a}$ 一般可采用“云图法”^[14]，通过对结构的非线性时程分析结果进行对数线性回归得到^[15]：

$$\ln m_{D|S_a} = \beta_0 + \beta_1 \ln S_a \quad (2)$$

$$\beta_{D|S_a} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{RTR}} [\ln D_i - \ln(m_{D|S_a})]^2}{N_{RTR} - 2}} \quad (3)$$

式中： β_0 和 β_1 是回归参数； N_{RTR} 为地震动记录的数目，以考虑地震记录对记录(record-to-record, RTR)的变异性； D_i 表示第 i 条地震动作用下的结构需求。

确定结构抗震能力参数 m_C 和 β_C 的方法主要有两种：一是选择规范中的经验限值作为 m_C ，同时基于经验假设能力对数标准差 β_C ^[12]。二是采用非线性随机有限元分析方法获得抗震能力 C 的中位值和对数标准差，如文献[16-17]曾提出采用随机 Pushover 方法分析结构的抗震能力。本文在研究中采用规范限值进行抗震能力的定义。

将上述需求参数、能力参数及模型不确定性参数代入式(1)中，可计算极限状态概率 $P(LS|S_a)$ ，获得结构的地震易损性曲线。进一步计算得到结构的破坏状态概率 $P(DS_j|S_a)$ ^[6]，表示为相邻极限状态概率的差值：

$$P(DS_j | S_a) = \begin{cases} 1 - P(LS_1 | S_a), & j = 0 \\ P(LS_{j-1} | S_a) - P(LS_j | S_a), & j = 1, 2, \dots, N-1 \\ P(LS_N | S_a), & j = N \end{cases} \quad (4)$$

式中， N 为极限状态个数。根据极限状态和破坏状态的关系， N 个极限状态将结构划分为 $N+1$ 个破坏

状态。

本文采用轻微破坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏 4 个极限状态，它们将结构划分为：完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏 5 个破坏状态。参考我国地震烈度表^[10]，给出不同破坏状态对应的震害指数，如表 1 所示，其中包括震害指数上下限及平均值。

表 1 破坏状态及相应的震害指数范围及平均值
Table 1 Damage states and corresponding damage factor range and means

震害指数	破坏状态				
	完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	完全破坏
上下限/(%)	[0,10]	[10,30]	[30,55]	[55,85]	[85,100]
平均值/(%)	5	20	42.5	70	92.5

基于地震易损性分析得到的结构破坏状态概率，计算震害指数的数学期望并以此来定义结构的“易损性指数 (VI, Vulnerability Index)”：

$$VI = \sum_{j=0}^4 DF_j \times P(DS_j | S_a) \quad (5)$$

式中， $DF_j(j=0,1,\dots,4)$ 为完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏五个破坏状态所对应的震害指数。

采用 $DF_{j,L}$ 、 $DF_{j,U}$ 和 $DF_{j,M}$ 分别代表震害指数 DF_j 的下限值、上限值和平均值(见表 1)，将其代入式(5)中可得到结构的易损性指数曲线，如图 1 所示。图中， VI_L 、 VI_U 和 VI_M 分别表示结构易损性指数的下限、上限和平均值。在地震损伤曲线上，可针对特定的地震强度 $S_{a,c}$ 计算相应的易损性指数区间，通过与表 1 中的震害指数经验值进行对比，定量地评价结构的损伤程度。

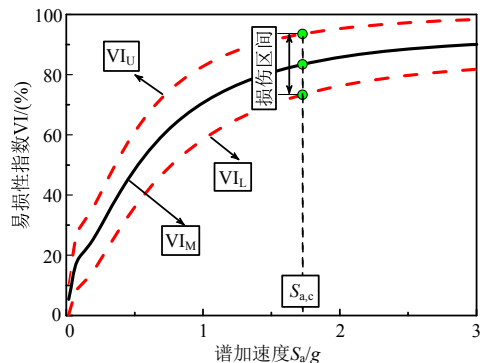


图 1 地震易损性指数曲线
Fig.1 Seismic fragility factor curves

2 结构的设计与建模

本文提出的基于易损性指数评估结构地震损

伤的方法是一种一般性方法,适用于任何单体建筑结构。为说明该方法,本文选取两组按我国规范设计的具有不同高度的钢筋混凝土框架结构作为研究对象,其中,一组为8层结构,另一组为10层结构。每一组结构均考虑了不同抗震设防水平,设计地震峰值加速度分别为:0.05 g、0.10 g、0.20 g和0.30 g。各结构简化命名为:F-数字-设防水平,其中数字项为8或10表示楼层数,设防水平从低到高依次对应“VL(very low)”、“L(low)”、“M(medium)”和“H(high)”。例如:F-8-VL代表8层结构,设计加速度为0.05 g。两组结构的设计采用相同的平面布置,如图2(a)所示。由于结构平面对称,选取一榀框架进行研究,框架的立面布置如图2(b)所示。

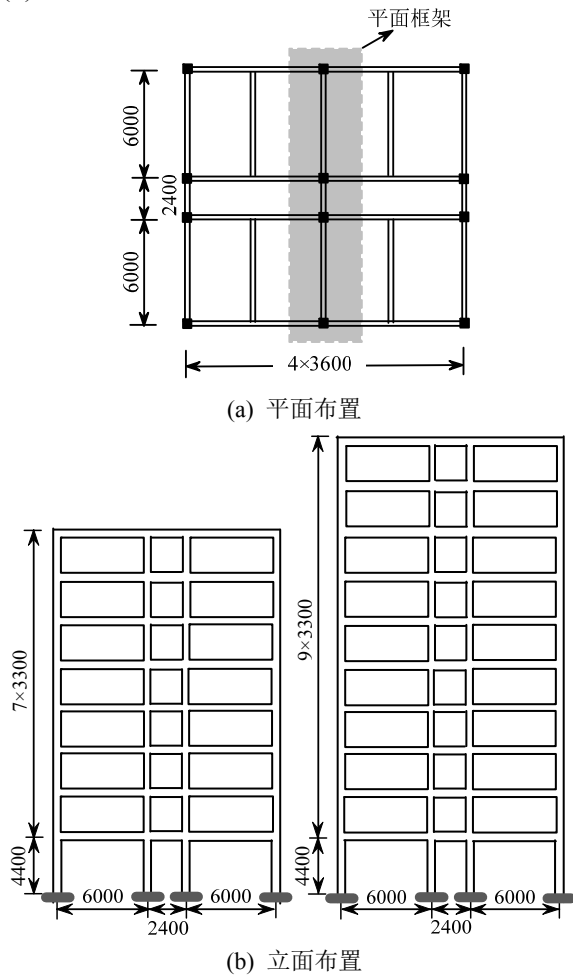


图2 算例结构 /mm

Fig.2 Case structures

结构的设计基本风压为 0.4 kN/m^2 ,地面粗糙度为C类,设计基本雪压为 0.30 kN/m^2 。标准层活荷载为 2.0 kN/m^2 ,标准层恒荷载为 4.5 kN/m^2 。不上

人屋面的板厚为 120 mm ,屋面恒荷载为 7.0 kN/m^2 。设计地震动分组为第1组,设计场地类别为II类,场地特征周期为 0.35 s 。梁、柱主筋等级为HRB335,箍筋等级为HPB235。混凝土等级为C35,梁柱截面的具体配筋见文献[18]。采用OpenSees作为非线性有限元分析平台,有限元建模原则可参见文献[19],文献[18]对该建模原则的有合理性进行了验证。

3 地震易损性分析

3.1 概率地震需求分析

本文选择100条真实地震动作为输入,地震动的详细选择过程参见文献[15]。按照云图法的基本原理,采用所选择的真实地震动对结构开展非线性时程分析。以结构最大层间位移角 θ_{\max} 作为需求参数,以谱加速度 S_a 作为地震动强度参数,对 θ_{\max} 和 S_a 开展对数线性拟合(见式(2)),并得到概率地震需求模型参数,如表2所示。

表2 概率地震需求模型参数

Table 2 Probabilistic seismic demand model parameters

框架结构	β_0	β_1	$\beta_{\theta_{\max} S_a}$
F-8-VL	-3.555	0.804	0.411
F-8-L	-3.677	0.784	0.395
F-8-M	-3.691	0.856	0.382
F-8-H	-3.712	0.950	0.226
F-10-VL	-3.499	0.766	0.339
F-10-L	-3.537	0.772	0.345
F-10-M	-3.605	0.786	0.346
F-10-H	-3.699	0.862	0.298

3.2 概率抗震能力分析

本文依次定义轻微破坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏所对应的能力中位值为: $\theta_{\max}=1/550$ 、1%、2%(1/50)和4%。其中,1/550和1/50被我国抗震规范^[20]用来定义结构的弹性极限和塑性极限; $\theta_{\max}=1\%$ 、2%和4%被FEMA273^[21]用来定义立即居住(IO)、生命安全(LS)和倒塌预防(CP)极限状态。针对不同极限状态,本文假设^[22]:轻微破坏的能力对数标准差为 $\beta_c=0.2$;中等破坏和严重破坏的能力对数标准差为 $\beta_c=0.3$;完全破坏对应的能力对数标准差为 $\beta_c=0.4$ 。该假设考虑了能力不确定性随结构损伤程度的加深而逐渐增强。上述极限状态及其对应的概率抗震能力模型参数,如表3所示。

表3 结构极限状态及其概率抗震能力模型参数

Table 3 Structural limit states and corresponding parameters of probabilistic seismic capacity models

能力参数	极限状态			
	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	完全破坏
m_C/θ_{max}	1/550	1%	2%	4%
β_C	0.2	0.3	0.3	0.4

3.3 地震易损性分析

将需求参数(表 2)、能力参数(表 3)及模型不确定性参数 $\beta_M=0.2$ 代入式(1)中, 分别得到 8 层结构和 10 层结构的地震易损性曲线, 如图 3 和图 4 所示。采用式(4)进一步计算得到结构在不同地震强度下的破坏状态概率曲线, 如图 5 和图 6 所示。由此可见: 结构的破坏状态概率曲线并非如地震易损性曲线(极限状态概率曲线)一样随地震动强度的增加而单调增加, 而是存在下降段。这说明结构在不同强度地震作用下, 破坏状态是不断变化的。

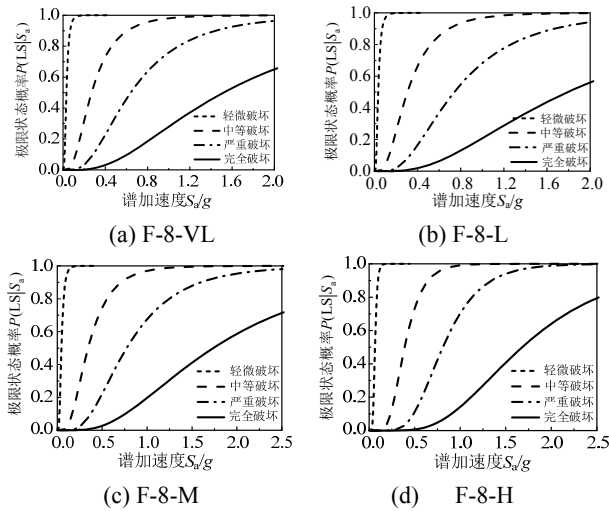


图3 8层结构的地震易损性曲线

Fig.3 Seismic fragility curves of 8-story frames

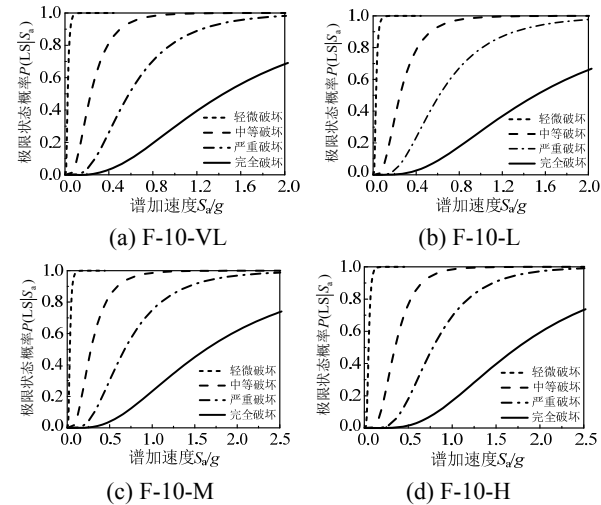


图4 10层结构的地震易损性曲线

Fig.4 Seismic fragility curves of 10-story frames

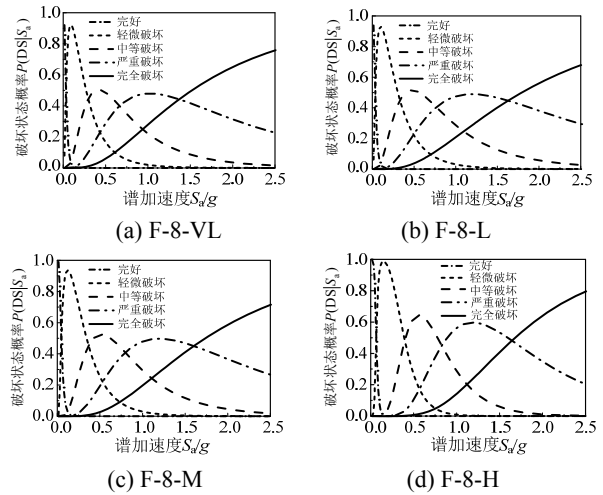


图5 8层结构的破坏状态概率曲线

Fig.5 DS probability curves of 8-story frames

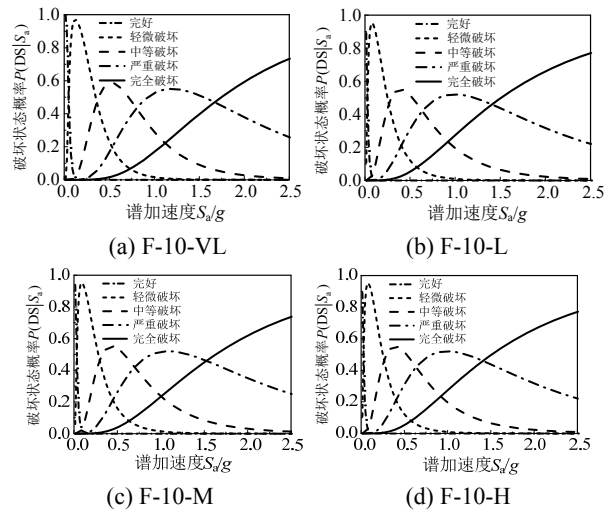


图6 10层结构的破坏状态概率曲线

Fig.6 DS probability curves of 10-story frames

4 基于易损性指数的结构损伤评估

基于结构的破坏状态概率(图 5 和图 6), 按式(5) 计算得到结构的易损性指数曲线, 如图 7 和图 8 所示。为了更加全面地评估结构的抗震性能, 本文计算结构在我国抗震规范^[20]规定的小震(Frequent Earthquake, FE)、中震(Moderate Earthquake, ME)和大震(Maximum Considered Earthquake, MCE)作用下的易损性指数区间, 如图 9 和图 10 所示。表 4 给出了算例结构的自振周期及其对应的小震($S_{a,FE}$)、中震($S_{a,DBE}$)和大震($S_{a,MCE}$)的谱加速度强度。上述谱加速度强度是根据我国地震影响系数曲线确定。

综合图 9 和图 10 的分析结果可知, 结构在小震作用下的易损性指数不超过 30%, 在中震作用下的易损性指数不超过 40%, 在大震作用下的易损性指数不超过 50%。对比表 1 中的经验震害指数, 可

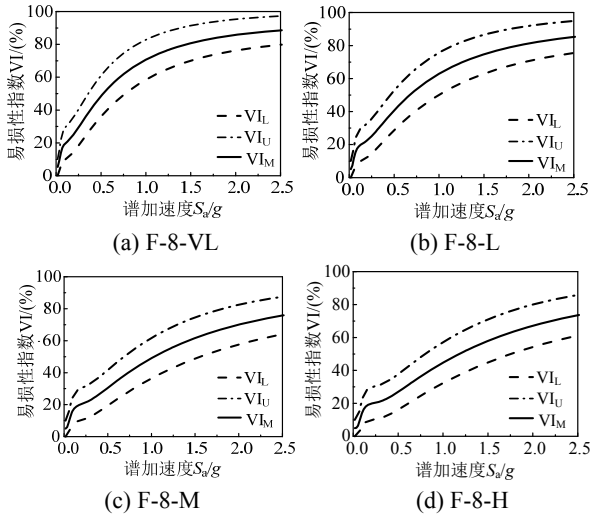


图7 8层结构的易损性指数曲线

Fig.7 Vulnerability index curves of 8-story frames

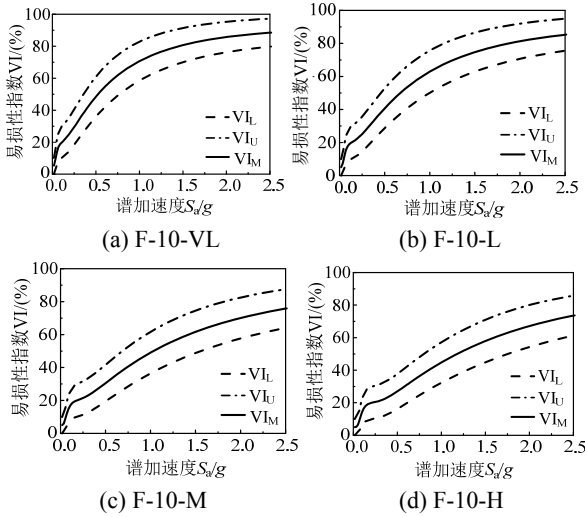


图8 10层结构的易损性指数曲线

Fig.8 Vulnerability index curves of 10-story frames

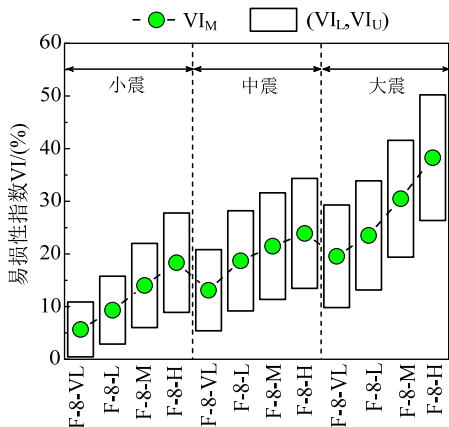


图9 小震、中震和大震作用下8层结构的易损性指数

Fig.9 Vulnerability indices conditioned on FE, DBE and MCE intensities for 8-story frames

可以发现：在小震作用下，结构的地震损伤不超过轻微破坏水平；在中震作用下，结构的地震损伤基本

控制在中等破坏水平；在大震作用下，结构的地震损伤基本控制在中等破坏，并未发生更为严重的破坏。基于上述分析结果，可见：按我国规范设计的钢筋混凝土结构可以基本满足我国抗震规范中“小震不坏”、“中震可修”和“大震不倒”的性能要求。尤其是在大震作用下，结构体现出良好的控制发生较严重损伤的性能。

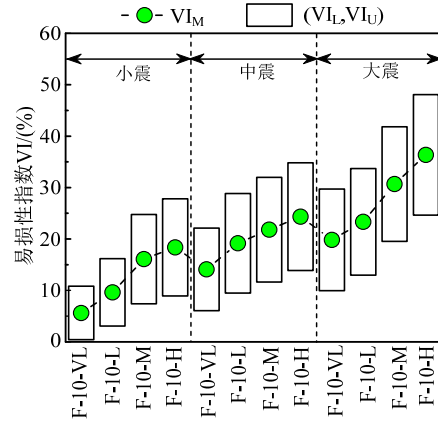


图10 小震、中震和大震作用下10层结构的易损性指数

Fig.10 Vulnerability indices conditioned on FE, DBE and MCE intensities for 10-story frames

表4 结构自振周期及小震、中震和大震谱加速度强度
Table 4 Structural natural periods and corresponding FE, DBE and MCE intensities

结构	F-8-VL	F-8-L	F-8-M	F-8-H
周期/s	1.30	1.25	1.19	0.97
$S_{a,FE}/g$	0.01	0.03	0.05	0.10
$S_{a,DBE}/g$	0.03	0.07	0.15	0.27
$S_{a,MCE}/g$	0.08	0.16	0.30	0.48

结构	F-10-VL	F-10-L	F-10-M	F-10-H
周期/s	1.56	1.52	1.46	1.18
$S_{a,FE}/g$	0.01	0.02	0.04	0.08
$S_{a,DBE}/g$	0.03	0.06	0.12	0.23
$S_{a,MCE}/g$	0.07	0.13	0.25	0.40

由图9和图10还可以看出：随着结构抗震设防水平的提高，结构对应小震、中震或大震的易损性指数并未减小，而是呈现了逐渐上升的趋势。主要原因为：结构抗震设防水平的提高一方面提高了结构自身的抗震能力，但也同时增加了结构的整体刚度，减少了结构的自振周期，造成了结构所对应的小震、中震和大震的强度增加(见表4)。换言之，结构设防水平的提高一方面增强了结构的抗震能力，另一方面也引起了结构所承受地震力的增加。根据本文研究结果来看：由抗震设防水平提升所带来的结构抗震能力的提高，无法抵消由此带来的地

震力的提升。因此,设防水平的提升无法减少结构在小震、中震或大震作用下的损伤,相反引起了损伤的增加。

5 结论

本文基于传统的地震易损性分析,提出了“易损性指数”的概念。基于地震易损性分析得到的结构破坏状态概率,通过计算结构的震害指数数学期望来定义地震易损性指数,并用其来评价单体结构的地震损伤程度。采用易损性指数,对按我国抗震规范设计的8层和10层两组钢筋混凝土框架结构开展了地震损伤评估,得到以下结论:

(1) 按我国规范设计的钢筋混凝土框架结构基本可以满足“小震不坏”、“中震可修”和“大震不倒”的性能要求。尤其在大震作用下,结构可以较好地控制严重损伤的发生。

(2) 结构设防水平的提升虽然提高了结构自身的抗震能力,但其无法抵消由此带来的结构自身所受地震作用的提升,因此结构在各自对应小震、中震或大震作用下的损伤并未得到相应降低反而发生了增加。

参考文献:

- [1] Cornell C A, Jalayer F, Hamburger R O, et al. The probabilistic basis for the 2000 SAC/FEMA steel moment frame guidelines [J]. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(4): 526—533.
- [2] 于晓辉,吕大刚,王光远. 土木工程结构地震易损性分析的研究进展[C]. 大连: 第二届结构工程新进展国际会议论坛论文集, 2008: 763—774.
Yu Xiaohui, Lü Dagang, Wang Guangyuan. Seismic fragility analysis of civil engineering structures: state-of-the-art [C]. Dalian: Proceedings of the Second International Forum on Advances in Structural Engineering, 2008: 763—774. (in Chinese)
- [3] 吴巧云,朱宏平,樊剑. 基于性能的钢筋混凝土框架结构地震易损性分析[J]. *工程力学*, 2012, 29(9): 117—124.
Wu Qiaoyun, Zhu Hongping, Fan Jian. Performance-based seismic fragility analysis of RC frame structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(9): 117—124. (in Chinese)
- [4] 张耀庭,马超,郭宗明,等. 不同弯矩增大系数钢筋混凝土框架结构地震易损性分析[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(2): 29—37.
Zhang Yaoting, Ma Chao, Guo Zongming, et al. Seismic fragility analysis for RC frame structures with various moment magnifying coefficients [J]. *Journal of Building Structures*. 2014, 35(2): 29—37. (in Chinese)
- [5] 周靖,罗高杰,方小丹. 强震作用下竖向不规则 RC 框架结构抗震易损性分析[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(11): 134—142.
Zhou Jing, Luo Gaojie, Fang Xiaodan. Fragility analysis of vertical irregular reinforced concrete frame structures subjected to pulse-like ground motion [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(11): 134—142. (in Chinese)
- [6] 吕大刚,于晓辉. 基于地震易损性解析函数的概率地震风险理论研究[J]. *建筑结构学报*, 2013, 34(10): 41—48.
Lü Dagang, Yu Xiaohui. Theoretical study of probabilistic seismic risk assessment based on analytical functions of seismic fragility [J]. *Journal of Building Structures*, 2013, 34(10): 41—48. (in Chinese)
- [7] 于晓辉,吕大刚. 基于地震易损性解析函数的概率地震风险应用研究[J]. *建筑结构学报*, 2013, 34(10): 49—56.
Yu Xiaohui, Lü Dagang. Application study of probabilistic seismic risk assessment based on analytical functions of seismic fragility [J]. *Journal of Building Structures*, 2013, 34(10): 49—56. (in Chinese)
- [8] 吕大刚,金国庆,于晓辉. 考虑倒塌概率修正的钢筋混凝土框架结构地震易损性分析[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(9): 26—32.
Lü Dagang, Jin Guoqing, Yu Xiaohui. Modified seismic fragility analysis of reinforced concrete frame structures in consideration of collapse probability [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(9): 26—32. (in Chinese)
- [9] 于晓辉,吕大刚. 基于易损性的钢筋混凝土框架结构抗震性能裕度评估[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(9): 53—60.
Yu Xiaohui, Lü Dagang. Fragility-based assessment of seismic performance margin for RC frame structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(9): 53—60. (in Chinese)
- [10] GB/T 17742-2008, 中国地震烈度表[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
GB/T 17742-2008, The Chinese seismic intensity scale [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)
- [11] 薄景山,张建毅,孙平善,等. 震害指数及有关问题的讨论[J]. *自然灾害学报*. 2012, 21(6): 37—42.
Bo Jingshan, Zhang Jianyi, Sun Pingshan, et al. Discussion on seismic damage index and relevant problems [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2012, 21(6): 37—42. (in Chinese)
- [12] Wen Y K, Ellingwood B R, Bracci J M. Vulnerability function framework for consequence-based engineering [R]. Technical Report No. DS-4; US: Mid-America Earthquake Center (MAE), University of Illinois at Urbana-Champaign, 2004.
- [13] 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.

(参考文献[14]—[22]转第100页)

- [10] 南波, 武岳, 孙浩田. 拉挤型 CFRP 管轴压性能[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(6): 779—783.
Nan Bo, Wu Yue, Sun Haotian. Buckling behavior of pultruded carbon fiber reinforced polymer pipes under axially compressive load [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(6): 779—783. (in Chinese)
- [11] 李俭, 温卫东. 基于细观尺度模型的缠绕复合材料结构有限元分析方法[J]. 航空学报, 2009, 30(7): 1236—1242.
Li Jian, Wen Weidong. Finite element method for structure analysis of filament-wound composite based on micro stiffness model [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2009, 30(7): 1236—1242. (in Chinese)
- [12] 王登峰, 曹平周. 考虑焊缝几何缺陷影响时整体与局部轴向压力共同作用下薄壁圆柱壳稳定性分析[J]. 工程力学, 2009, 26(8): 65—73.
Wang Dengfeng, Cao Pingzhou. Stability of thin-walled cylindrical shells under combined loading of overall and local axial compression considering weld geometrical imperfection [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(8): 65—73. (in Chinese)
- [13] 赵阳, 滕锦光. 轴压圆柱钢薄壳稳定设计综述[J]. 工程力学, 2003, 20(6): 116—120.
Zhao Yang, Teng Jinguang. Stability design of axially compressed thin steel cylindrical shells [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(6): 116—120. (in Chinese)
- [14] Fang Guodong, Liang Jun. Progressive damage and nonlinear analysis of 3D four-directional braided composites under unidirectional tension [J]. Composite Structures, 2009, 89(1): 126—133.

(上接第 75 页)

- [14] 吕大刚, 于晓辉, 王光远. 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, 20(1): 7—15.
Lü Dagang, Yu Xiaohui, Wang Guangyuan. Probabilistic seismic demand analysis of structures based on an improved cloud method [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 20(1): 7—15. (in Chinese)
- [15] 于晓辉, 吕大刚, 王光远. 关于概率地震需求模型的讨论[J]. 工程力学, 2013, 30(8): 172—179.
Yu Xiaohui, Lü Dagang, Wang Guangyuan. Discussions on probabilistic seismic demand models [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(8): 172—179. (in Chinese)
- [16] 于晓辉, 吕大刚. HAZUS 相容的钢筋混凝土框架结构地震易损性分析[J]. 工程力学, 2016, 33(3): 152—160.
Yu Xiaohui, Lü Dagang. HAZUS-compatible seismic fragility analysis for RC frame structures [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(3): 152—160. (in Chinese)
- [17] 于晓辉, 吕大刚, 王光远. 多级力控制随机 pushover 方法[J]. 工程力学, 2010, 27(增刊 I): 6—10.
Yu Xiaohui, Lü Dagang, Wang Guangyuan. Multi-level force controlled random pushover analysis [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(Suppl I): 6—10. (in Chinese)
- [18] 于晓辉. 钢筋混凝土框架结构的概率地震易损性与风险分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 155—156.
Yu Xiaohui. Probabilistic seismic fragility and risk analysis of RC frame structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 155—156. (in Chinese)
- [19] 于晓辉, 吕大刚, 郑浩琴. 基于典型失效模式的地震侧向倒塌易损性分析[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(8): 8—15.
Yu Xiaohui, Lü Dagang, Zheng Haoqin. Seismic sideway collapse fragility analysis based on typical failure modes [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(8): 8—15. (in Chinese)
- [20] GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB50011-2010, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [21] Federal Emergency Management Agency, FEMA273. NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings [R]. California, US: Federal Emergency Management Agency, 2009.
- [22] Yu Xiaohui, Lü Dagang, Li Bing. Estimating uncertainty in limit state capacities for reinforced concrete frame structures through pushover analysis [J]. Earthquakes and Structures, 2016, 10(1): 141—161.