

文章编号: 1000-4750(2016)03-0152-09

HAZUS 相容的钢筋混凝土框架结构 地震易损性分析

于晓辉, 吕大刚

(哈尔滨工业大学, 结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘 要: HAZUS 作为一款多灾害损失评估软件, 在世界范围内得到了广泛应用。确定结构的地震易损性函数是 HAZUS 软件进行地震损失评估的关键。然而, 现有的传统地震易损性分析结果无法满足 HAZUS 的格式要求。为此, 该文提出一种与 HAZUS 相容的地震易损性分析的简化方法, 该方法直接利用传统的地震易损性分析结果, 通过能力谱方法确定地震动记录的谱位移作为其参数, 转化得到满足 HAZUS 格式要求的地震易损性结果。为说明该文提出的方法, 选择 4 个不同高度的钢筋混凝土框架结构作为算例, 并将该文方法的分析结果与 HAZUS 软件提供的地震易损性曲线进行对比。结果表明: 由于分析方法和分析对象的不同, HAZUS 相容的地震易损性结果与 HAZUS 软件所提供的地震易损性结果之间存在较为明显的差异。

关键词: 地震易损性; HAZUS; 钢筋混凝土框架结构; 地震损失; 能力谱方法

中图分类号: TU375.4 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.08.0685

HAZUS-COMPATIBLE SEISMIC FRAGILITY ANALYSIS FOR RC FRAME STRUCTURES

YU Xiao-hui, LÜ Da-gang

(Harbin Institute of Technology, Key Laboratory of Structures Dynamic Behavior and Control of the Ministry of Education, Harbin 150090, China)

Abstract: As a kind of multi-disaster loss assessment software, HAZUS is world-widely used. Determining the seismic fragility functions of structures is the key issue of HAZUS to conduct seismic loss assessment. However, traditional seismic fragility results cannot match the format requirement of HAZUS. In light of this, this paper presents a simplified approach to derive the HAZUS-compatible seismic fragility curves. This method directly uses the traditional seismic fragility results and transforms them to the HAZUS format through employing the capacity-diagram method to determine parameters in terms of spectral displacements for used ground motion records. To illustrate the proposed method, four RC frame structures of various heights are selected as study cases, and the results by the proposed method and those by the HAZUS-provided fragility curves are compared. Results show that the HAZUS-compatible seismic fragility results have significant difference from HAZUS-provided seismic fragility curves since they adopt different analysis methods and face to different study objectives.

Key words: seismic fragility; HAZUS; RC frame buildings; seismic loss; capacity-spectrum method

地震易损性(seismic fragility)是指在不同强度地震作用下工程结构(系统)发生不同状态破坏的概率, 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^[1]。随着基于性能地震工程的不断发展, 地震易损性研究得到了工程人员的广

收稿日期: 2014-08-06; 修改日期: 2014-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378162, 51408155); 国家科技支撑计划课题项目(2013BAJ08B01); 黑龙江省博士后面基金项目(LBH-Z14114); 中国高校基本科研业务费专项资金项目(HIT.NSRIF.2015099); 中国博士后科学基金面上项目(2014M551251)

通讯作者: 吕大刚(1970—), 男, 黑龙江铁力人, 教授, 博士, 博导, 副院长, 从事抗震可靠性、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研究(E-mail: yxhit@126.com).

泛关注。在美国太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research, PEER)提出的新一代基于性能的地震工程(Performance-Based Earthquake Engineering, PBEE)中^[2],地震风险被拆解为:地震危险性分析、地震易损性分析和地震损失估计3部分^[3]。其中,地震易损性分析作为核心环节,起着连接地震危险性分析和地震损伤估计的桥梁作用。

近年来,我国研究人员针对不同工程结构开展了地震易损性研究,并对其抗震性能进行了评估。如:吕大刚和于晓辉^[3]基于解析表达式,对地震易损性分析及地震风险评估的数学基础进行了详细推导,同时将其应用到钢筋混凝土框架结构的抗震性能评估中^[4]。吴巧云等^[5]分别选择近场地震动和远场地震动对钢筋混凝土框架结构进行了地震易损性分析。张耀庭等^[6]在地震易损性研究中考虑了不同弯矩增大系数对钢筋混凝土框架结构抗震性能的影响。针对钢框架结构,徐龙河等^[7]通过对比结构优化设计前后的地震易损性曲线,进行了基于易损性的结构优化方案评价。郑山锁等^[8]考虑了钢材锈蚀的影响,开展了考虑锈蚀的钢结构地震易损性分析。针对一些特殊结构体系,地震易损性作为一种评价结构抗震性能的手段也得到了广泛应用。如:吴轶等^[9]基于地震易损性分析,对带耗能腋撑型钢混凝土转换框架结构的抗震性能进行了研究。何益斌等^[10]对高层钢框架-混凝土核心筒这一复杂混合结构体系进行了地震易损性研究。此外,地震易损性研究还被应用于阀门结构^[11]、矮塔斜拉桥结构^[12]、土石坝^[13]、供热管道^[14]以及大型变电站主厂房结构^[15]的抗震性能评估中。

国外学者针对地震易损性的研究开展时间更长,取得的成果也更多^[16]。地震易损性研究的核心问题是如何合理定量地考虑结构和地震作用中的不确定性。为此,国外众多学者不再仅仅满足利用地震易损性分析对不同工程结构(体系)的抗震性能进行评估,也关注如何更好地将统计学和概率论的相关理论应用到地震易损性的研究中,以合理地考虑不确定性的影响。如: Celik 和 Ellingwood^[17]在地震易损性的研究中,同时考虑了本质(aleatory)不确定性和知识(epistemic)不确定性的影响。Vamvatsikos 和 Fragiadakis^[18]在地震易损性研究中,基于增量动力分析,分别采用 Monte Carlo 模拟法、一次二阶矩方法(FOSM)以及点估计法作为不确定

性传递的手段。Sudret 等^[19]采用核密度估计和再抽样的方法处理地震易损性研究中的不确定性,并提出了无参数化的地震易损性表达式。

事实上,地震易损性研究的根本目的是要为地震损失和风险评估提供必要的结构损伤概率评估结果,最终为城市的防震减灾提供必要的技术支持。从该角度而言,地震易损性研究的对象必将从单体结构过渡到群体结构,地震易损性研究的方法必将从复杂过渡到简单。美国联邦紧急事务管理署(Federal Emergency Management Agency, FEMA)^[20]开发的 HAZUS 软件是一款用于社会经济损失估计、紧急情况预警以及灾害恢复的多灾害损失估计软件,它使用简便、分析快速、结果合理,因此得到了广泛的应用。我国也正在开发类似的但具有中国特色的震害损失评估软件 HAZ-China^[21]。作为地震损失评估的核心模块,如何给出不同类型结构的地震易损性曲线一直是 HAZUS 等类似软件研发过程中所面临的一个重要问题。由于 HAZUS 软件中地震易损性曲线的产生过程与传统的地震易损性分析过程不同,因此,传统的地震易损性分析结果无法满足 HAZUS 等类似软件的格式要求。对于已经取得的大量地震易损性分析数据,这无疑会造成巨大的计算资源和试验数据的浪费。为此,本文通过转变地震易损性函数的参数,直接利用已有的地震易损性分析结果获得与 HAZUS 相容的地震易损性曲线。为说明本文的方法,选择四个钢筋混凝土框架结构作为算例进行研究。

1 传统的地震易损性分析

根据文献[3],地震易损性函数包括:基于地震动强度的函数和基于位移的函数。其中,基于地震动强度的易损性函数 $F_{R,IM}(x)$ 为:

$$F_{R,IM}(x) = \Phi \left[\frac{\ln(x/m_R)}{\beta_R} \right] \quad (1)$$

式中: $\Phi[\cdot]$ 是标准正态分布函数; m_R 和 $\beta_R = \sigma_{\ln R}$ 是地震易损性函数的中位值和对数标准差。

基于位移的易损性函数 $F_{R,D}(x)$ 为:

$$F_{R,D}(x) = \Phi \left[\frac{\ln m_{D|IM} - \ln m_C}{\sqrt{\beta_{D|IM}^2 + \beta_C^2}} \right] \quad (2)$$

式中: $m_{D|IM}$ 和 $\beta_{D|IM}$ 分别表示在给定地震动强度 $IM=x$ 作用下,结构需求 D 的中位值和对数标准差; m_C 和 β_C 分别表示对应不同极限状态的结构抗震能

力 C 的中位值和对数标准差。在实际的工程应用中, 由于结构损伤与变形之间紧密相关, 因此基于位移的地震易损性函数在实际工程中得到更为广泛的应用, 本文将采用式(2)进行地震易损性研究。

由式(2)可知, 基于位移的易损性函数表现为对数正态分布函数的形式, 其基本假设是地震需求和抗震能力均服从对数正态分布。其中, 概率地震需求模型 $G_{D|IM}(d|x)$ 为:

$$G_{D|IM}(d|x) = P[D \geq d | IM = x] = 1 - \Phi \left[\frac{\ln(d / m_{D|IM=x})}{\beta_{D|IM}} \right] \quad (3)$$

式中: $m_{D|IM}$ 和 IM 一般假设服从对数线性关系^[2]:

$$\ln m_{D|IM} = \beta_0 + \beta_1 \ln IM \quad (4)$$

式中: β_0 和 β_1 为回归参数, 可通过“云图法”^[22] 获得, 而模型的参数 $\beta_{D|IM}$ 可通过下式获得:

$$\beta_{D|IM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{RTR}} [\ln D_i - \ln(m_{D|IM})]^2}{N_{RTR} - 2}} \quad (5)$$

式中: N_{RTR} 为云图法中输入的地震动记录的数目, 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。上述基于云图法所建立的概率地震需求模型, 如图 1 所示^[23]。

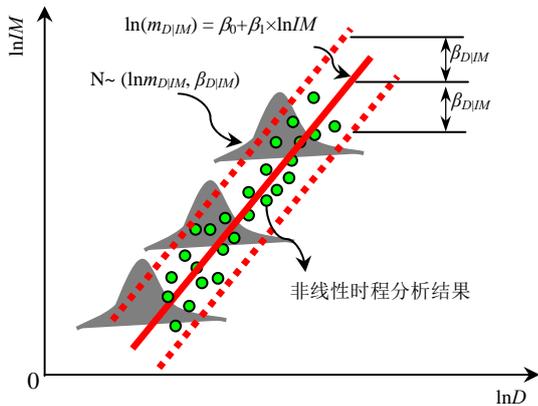


图 1 概率地震需求模型

Fig. 1 Probabilistic seismic demand model

确定概率抗震能力参数(m_C 和 β_C)的方法主要有两种: 第一种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的对数标准差 β_C 。另外一种方法是采用随机非线性有限元分析方法获得 C 的统计参数。本文作者曾提出基于随机 Pushover 方法的概率抗震能力分析思想, 该方法可以定量地考虑结构不确定性对结构抗震能力的影响^[24], 如图 2 所示。

图中, 四个极限状态依次为轻微破坏(slight damage, SD)、中等破坏(moderate damage, MD)、严重破坏(extensive damage, ED)和完全破坏(complete damage, CD)。

将地震需求参数($m_{D|IM}$ 和 $\beta_{D|IM}$)和抗震能力参数(m_C 和 β_C)代入式(2)中, 可得到结构的地震易损性曲线, 如图 3 所示。

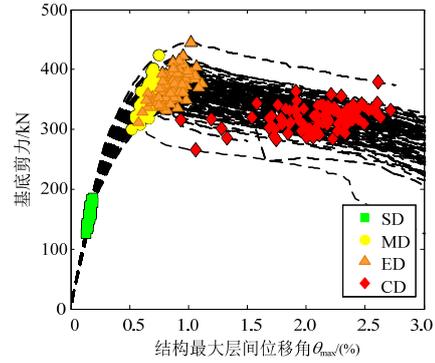


图 2 基于随机 Pushover 方法的概率抗震能力分析

Fig. 2 Probabilistic seismic capacity analysis based on random Pushover analysis

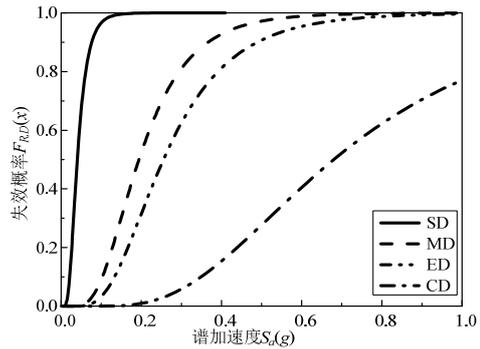


图 3 地震易损性曲线

Fig. 3 Seismic fragility curves

将式(4)代入式(2)中, 整理可得:

$$F_{R,D}(x) = \Phi \left(\frac{\beta_0 + \beta_1 \ln x - \ln m_C}{\sqrt{\beta_{D|IM}^2 + \beta_C^2}} \right) = \Phi \left[\frac{\ln x + \frac{\beta_0 - \ln m_C}{\beta_1}}{\frac{\sqrt{\beta_{D|IM}^2 + \beta_C^2}}{\beta_1}} \right] = \Phi \left[\frac{\ln(x / m_{RR})}{\beta_{RR}} \right] \quad (6)$$

式中:

$$m_{RR} = \exp \left(\frac{\ln m_C - \beta_0}{\beta_1} \right) = \left(\frac{m_C}{\exp(\beta_0)} \right)^{1/\beta_1} \quad (7)$$

$$\beta_{RR} = \frac{\sqrt{\beta_{D|IM}^2 + \beta_C^2}}{\beta_1} \quad (8)$$

经过上述简单推导可以发现:式(1)和式(2)两种易损性函数本质上是一致的。它们之间形式的差异源于推导方法的不同。 $F_{R,M}(\cdot)$ 是建立在“地震动强度”层面的“需求—能力”概率干涉模型,而 $F_{R,D}(\cdot)$ 则是建立在“结构位移”层面的“需求—能力”概率干涉模型^[25-26]。

2 HAZUS 相容的地震易损性分析

根据文献[16]可知,HAZUS 软件提供的地震易损性函数是以谱位移 S_d 作为单位:

$$F_{R,HAZ}(x) = \Phi \left[\frac{\ln(x / m_{R,S_d})}{\beta_{R,S_d}} \right] \quad (9)$$

式中: $F_{R,HAZ}(x)$ 为 HAZUS 的地震易损性函数,表示在谱位移 $S_d=x$ 条件下,结构发生不同状态破坏的概率; m_{R,S_d} 和 β_{R,S_d} 分别表示谱位移表示的地震易损性函数的中位值和对数标准差。

对比式(1)和式(9)不难发现:HAZUS 软件提供的地震易损性函数实际上是基于地震动强度的地震易损性函数,其表达形式与式(1)一致,不同之处在于:传统的地震易损性函数多采用谱加速度 $S_a(T_1)$ 或峰值加速度 PGA 作为函数参数,其中 T_1 为结构的基本周期。而 HAZUS 的地震易损性函数则是以谱位移 $S_d(T_c)$ 作为函数参数。其中, $S_d(T_c)$ 需利用能力谱法,通过确定能力曲线(Pushover 曲线)与需求谱的交点获得, T_c 为交点所对应的结构等效周期。

基于上述可知,将基于传统方法获得的地震易损性曲线转换成与 HAZUS 相容的地震易损性曲线的关键是将传统地震易损性函数中的地震动强度参数转换为 $S_d(T_c)$ 。然而,传统地震易损性函数所采用的地震动强度参数 $S_a(T_1)$ (或 PGA)与 $S_d(T_c)$ 之间并不存在简单的转换关系,因此需要通过能力谱方法进行变换。ATC-40^[27]中提供了两种能力谱方法:方法 A 和方法 B。根据 Chopra 和 Geol 的研究发现^[28]:相比于方法 A 而言,方法 B 更容易收敛,故本文在研究中采用了方法 B。一旦获得了地震易损性分析用的不同地震动记录的谱位移参数 $S_d(T_c)$,就可以按照第 1 部分所介绍的传统地震易损性分析流程,获得形如式(8)的与 HAZUS 相容的地震易损性结果,分析流程如下:

1) 选择平均 Pushover 曲线作为能力谱曲线。其中,平均 Pushover 曲线是指分析结构的参数均为其平均值;

2) 挑选 N_{RTR} 条地震动作为输入以考虑地震的 RTR 不确定性,并生成所采用每一条地震动的需求谱曲线;

3) 采用 ATC40 建议的能力谱方法中的方法 B 获得能力谱与需求谱的交点 $S_d(T_c)$,将所采用每一条地震动用 $S_d(T_c)$ 来定义其强度;

4) 按照云图法的基本原理,将所挑选的地震动输入结构,并对结构进行非线性时程分析,同时回归 $\ln S_d(T_c) - \ln D$ 之间的线性关系,建立基于 $S_d(T_c)$ 的概率地震需求模型,获得模型参数为:

$$\ln m_{D|S_d} = \beta_{0,S_d} + \beta_{1,S_d} \ln S_d(T_c) \quad (10)$$

$$\beta_{D|S_d} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{RTR}} [\ln D_i - \ln(m_{D|S_d})]^2}{N_{RTR} - 2}} \quad (11)$$

式中, $m_{D|S_d}$ 和 $\beta_{D|S_d}$ 表示以 $S_d(T_c)$ 为地震动强度参数的地震需求中位值和对数标准差。

5) 采用随机 Pushover 分析方法获得概率抗震能力模型参数: m_C 和 β_C 。

6) 将步骤 4) 中的 PSDA 研究结果与步骤 5) 中的 PSCA 研究结果相结合,获得以 $S_d(T_c)$ 为参数的地震易损性函数:

$$F_{R,HAZ}(x) = \Phi \left[\frac{\ln m_{D|S_d} - \ln m_C}{\sqrt{\beta_C^2 + \beta_{D|S_d}^2}} \right] = \Phi \left[\frac{\ln x - \ln m_{R,S_d}}{\beta_{R,S_d}} \right] \quad (12)$$

式中,函数参数按式(7)和式(8)计算得到:

$$m_{R,S_d} = \left(\frac{m_C}{\exp(\beta_{0,S_d})} \right)^{1/\beta_{1,S_d}} \quad (13)$$

$$\beta_{R,S_d} = \frac{\sqrt{\beta_{D|S_d}^2 + \beta_C^2}}{\beta_{1,S_d}} \quad (14)$$

总结上述步骤可以发现:生成与 HAZUS 相容的地震易损性曲线所利用的分析数据均为传统地震易损性的分析数据,只需通过能力谱方法确定分析用地震动记录的谱位移作为其参数,并重新建立结构的概率地震需求模型即可。这种简单的处理方法一方面可以将已获得的传统地震易损性分析结果进行再利用,另一方面可以将基于精细化分析获得地震易损性曲线与 HAZUS 软件中提供的地震易损性曲线进行对比,从而更加清晰地把握结构的抗震性能。值得注意的是,上述方法的主要目的为利

用已有的地震易损性分析结果，转换生成满足 HAZUS 软件格式要求的地震易损性函数。由于与 HAZUS 软件在分析方法上存在较大差异，因此转换得到的地震易损性函数与软件提供的地震易损性函数之间必然存在一定的差异，这在以后的算例分析结果中将得到体现。

3 算例分析

3.1 结构的设计与建模

本文选取文献[23]中所采用的四个不同高度、不同设防烈度的钢筋混凝土框架结构作为研究对象。包括：3层结构，设防烈度为 VI 度，设计基本加速度为 0.05 g；5层结构，设防烈度为 VII 度，设计基本加速度为 0.10 g；8层结构，设防烈度为 VIII 度，设计基本加速度为 0.20 g；10层结构，设防烈度为 VIII 度，设计基本加速度为 0.30 g。结构设计的基本资料详见文献[23]。上述框架结构采用同样的平面布置，由于平面布置形式对称，故在每一框架结构中分别选取一榀平面框架进行研究。结构的平面布置和立面布置，如图 4 所示。其中，平面框架的计算单元宽度为 7.2 m，分布荷载的负载宽度为 3.6 m，其余以集中荷载的形式传给计算框架。

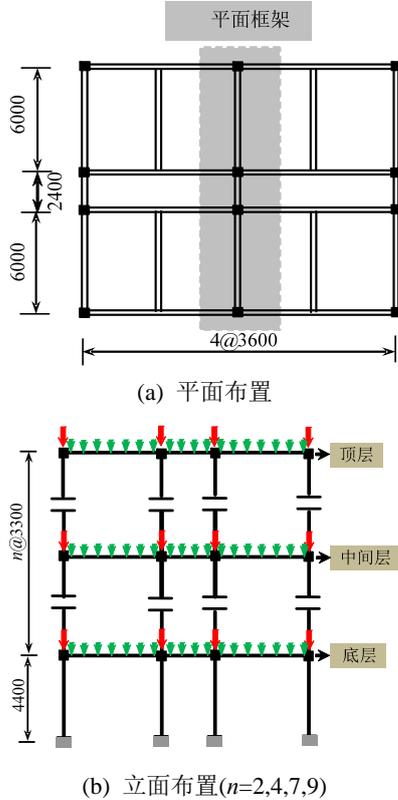


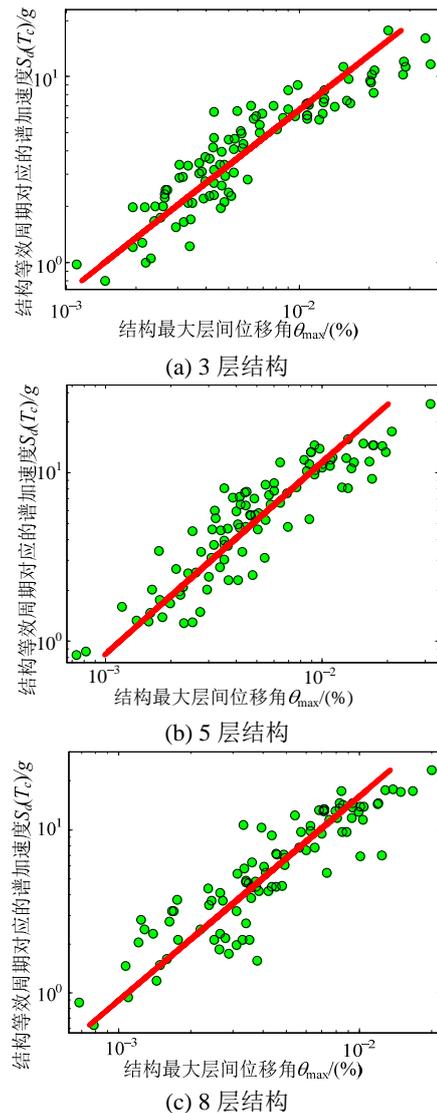
图 4 算例结构 /mm

Fig.4 Case structures

本文选择 OpenSees 软件作为有限元分析平台。建模过程中，采用杆系模型来模拟钢筋混凝土框架结构，取梁、柱作为基本单元。不考虑填充墙和楼板的影响，也未对梁-柱节点进行特殊定义，仅按 OpenSees 默认的设置，梁-柱节点按刚接处理。具体的 OpenSees 建模原则详见文献[23]。

3.2 概率地震需求分析

本文选择 100 条实际地震动记录作为输入，地震动记录的详细选择过程，参见文献[23]。按照云图法的基本原理，将选择的 100 条实际地震动记录分别输入到不同结构中并开展非线性时程分析。以结构最大层间位移角 θ_{max} 作为地震需求参数，按照 ATC-40^[27]中的步骤 B 获得不同地震动记录对应不同结构的谱位移 $S_d(T_c)$ ，并将其作为地震动强度参数。按照式(10)，拟合获得 $S_d(T_c)$ 和 θ_{max} 的对数线性关系，并建立不同算例结构的概率地震需求模型，如图 5 所示。模型参数如表 1 所示。



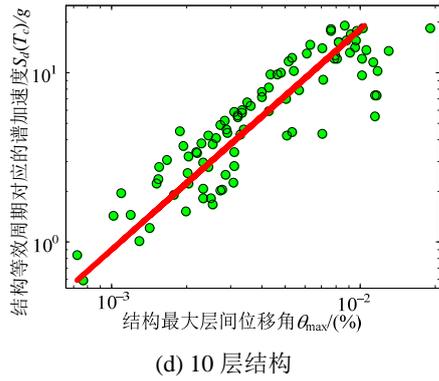


图5 概率地震需求分析结果

Fig.5 Probabilistic seismic demand analysis results

表1 概率地震需求模型参数

Table 1 Probabilistic seismic demand model parameters

结构	概率地震需求模型参数		
	β_{0,S_d}	β_{1,S_d}	β_{D,S_d}
3层	-6.53	1.02	0.31
5层	-6.75	0.88	0.32
8层	-6.82	0.80	0.33
10层	-6.88	0.77	0.33

3.3 概率抗震能力分析

本文采用控制相关性的拉丁超立方体抽样，基于随机 Pushover 方法进行概率抗震能力分析^[4]。根据文献[29]的研究：相比于传统拉丁超立方体抽样方法，控制相关性的拉丁超立方体抽样具有更高的精度和计算效率。考虑的结构不确定性因素包括荷载和材料在内的共 10 个结构参数，它们的概率分布特征以及随机变量之间的相关性信息，可参见文献[4]。考虑四个极限状态为轻微破坏(SD)、中等破坏(MD)、严重破坏(ED)和完全破坏(CD)。

从 Pushover 曲线上定义极限状态的基本原则为：以结构首个构件出现钢筋屈服在 Pushover 曲线上的映射点来定义结构轻微破坏。钢筋出现屈服可理解为构件出现塑性铰，而结构首个构件出现塑性铰可认为结构开始进入非弹性阶段。以结构等效屈服点在 Pushover 曲线的映射点作为结构中等破坏的定义点。当结构处于极限承载力(Pushover 曲线峰值点)时，认为结构达到严重破坏。而以 Pushover 的终点或 Pushover 曲线上承载力下降 20%的点作为完全破坏的定义点，上述定义原则如图 6 所示^[4]。

在随机 Pushover 分析中，考虑结构随机性的影响，利用控制相关性的拉丁超立方体抽样技术对每一结构进行抽样，并生成 100 个结构样本。针对每一样本结构进行 Pushover 分析，获得结构的

Pushover 曲线并按图 6 所示的原则在每一条 Pushover 曲线上定义极限状态 SD、MD、ED 和 CD，如图 2 所示。进一步统计不同极限状态的能力值样本，获得结构的概率抗震能力模型参数，如表 2 所示。

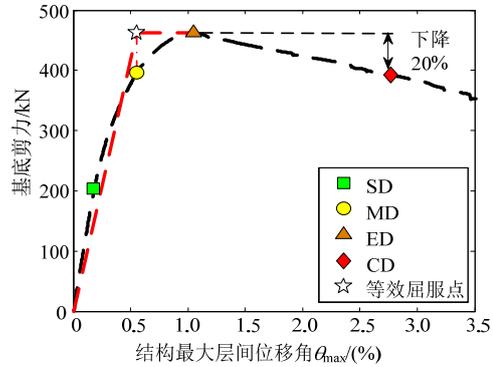


图6 基于 Pushover 曲线的极限状态定义

Fig.6 Identification of limit states on a Pushover curve

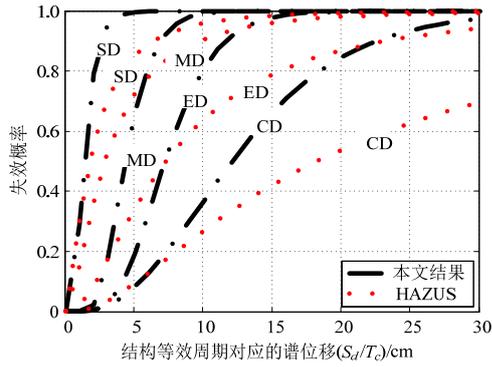
表2 概率抗震能力模型参数

Table 2 Probabilistic seismic capacity model parameters

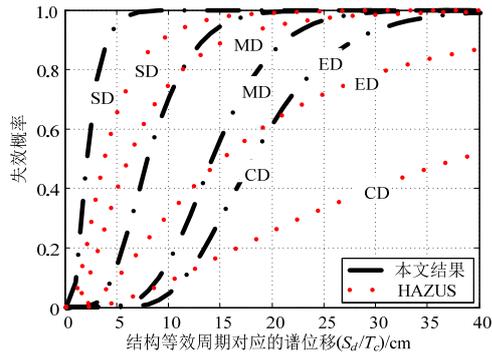
结构	SD		MD		ED		CD	
	m_c	β_c	m_c	β_c	m_c	β_c	m_c	β_c
3层	0.21	0.31	0.68	0.07	1.25	0.18	3.77	0.26
5层	0.23	0.16	0.73	0.05	1.42	0.08	2.54	0.15
8层	0.30	0.10	0.75	0.08	1.70	0.17	4.07	0.16
10层	0.26	0.09	0.66	0.10	2.00	0.12	3.21	0.27

3.4 对比分析

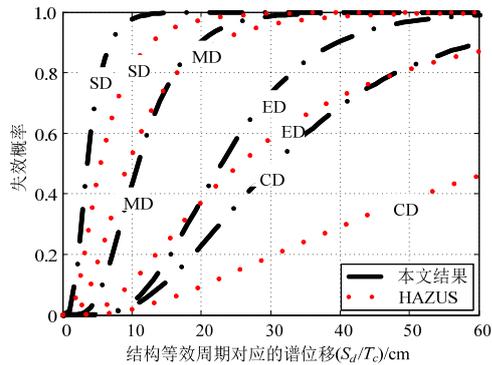
本文根据算例结构的楼层数和设防烈度水平，选择 HAZUS 软件中四种类型结构与本文结构相对应，包括：C1L+Pre-code、C1M+Low-code、C1H+Moderate-code 和 C1H+High-code。其中，C1 代表混凝土框架结构，L、M 和 H 依次代表低层(1层~3层)，中层(4层~7层)和高层结构(8层以上)。Pre-、Low-、Moderate-和 High-code 表示结构设计水平的高低。按照 HAZUS 软件的规定，本文 3 层结构属于低层结构，5 层结构属于中层结构，而 8 层和 10 层结构属于高层结构。由于本文四个算例结构的设防烈度(基本设计加速度)依次为：6 度(0.05 g)、7 度(0.10 g)、7 度(0.15 g)和 8 度(0.2 g)，本文近似将算例结构的设防水平与 Pre-code、Low-code、Moderate-code 和 High-code 相对应。本文获得的与 HAZUS 相容的地震易损性曲线与 HAZUS 软件提供的地震易损性曲线相对比，如图 7 所示。其中，HAZUS 软件提供的易损性函数参数(中位值和对数标准差)，如表 3 和表 4 所示。



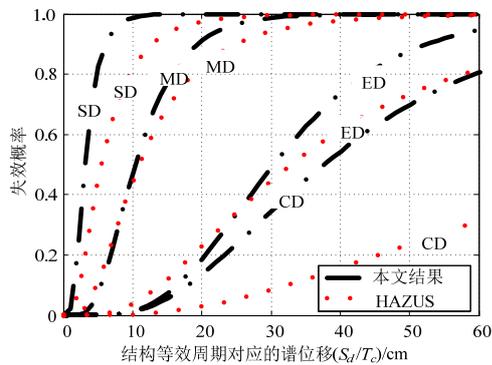
(a) 3层结构



(b) 5层结构



(c) 8层结构



(d) 10层结构

图 7 HAZUS 相容的地震易损性曲线与 HAZUS 易损性曲线的对比

Fig. 7 Comparisons of HAZUS-compatible with HAZUS fragility curves

表 3 HAZUS 软件提供的易损性函数参数：中位值

Table 3 Selected HAZUS fragility function parameters: median values

结构类型	设计水准	$S_d(T_c)/cm$			
		SD	MD	ED	CD
C1L	Pre-code	1.83	2.92	7.32	18.29
C1M	Low-code	3.81	6.10	15.24	38.10
C1H	Moderate-code	5.49	9.50	25.60	65.84
C1H	High-code	5.49	10.97	32.92	87.78

表 4 HAZUS 软件提供的易损性函数参数：对数标准差

Table 4 Selected HAZUS fragility function parameters: standard deviation

结构类型	设计水准	SD	MD	ED	CD
C1L	Pre-code	0.98	0.94	0.90	0.97
C1M	Low-code	0.70	0.74	0.86	0.98
C1H	Moderate-code	0.66	0.66	0.76	0.91
C1H	High-code	0.66	0.64	0.67	0.78

由图 7 可见：本文获得的地震易损性曲线与 HAZUS 软件提供的地震易损性曲线存在较为明显的差别。相比于本文获得的结果，HAZUS 软件提供的地震易损性曲线估计得到的结构失效概率较小，估计结果较为保守。此外，HAZUS 软件提供的地震易损性函数的对数标准差较大，造成地震易损性曲线的倾斜度较大。造成上述差异的主要原因：1) 研究方法上，本文是基于精细化的有限元分析和细致的不确定性分析，而 HAZUS 软件则是考虑一类结构的共性，通过简单的反应谱方法，同时结合专家经验来确定易损性函数的参数；2) 研究对象上，本文研究是面向单体结构，而 HAZUS 软件则是面向群体结构。因此，HAZUS 软件中提供的地震易损性函数的对数标准差包含的不仅仅有结构自身的不确定性，还包含有群体结构中各个结构彼此之间的变异性。正如 Ellingwood 等^[30]的研究表明：HAZUS 提供的地震易损性曲线并不适用于具体的单体建筑易损性评估中。

4 结论

本文提出了一种生成与 HAZUS 软件相容的地震易损性曲线的方法，该方法通过能力谱法确定输入地震动记录的谱位移作为参数，将传统的地震易损性分析结果转化为满足 HAZUS 软件要求的结果，这使得已有的海量地震易损性研究结果可以得到有效的再利用，从而满足我国决策人员对地震灾害损失快速评估的迫切需求。为说明本文提出方法，选择按我国规范设计的 3 层、5 层、8 层和 10

层 RC 框架结构作为算例。选择 100 条实际地震动记录作为输入。通过能力谱方法确定地震动记录的谱位移作为参数,利用云图法建立结构的概率地震需求模型。采用随机 Pushover 方法建立结构的概率抗震能力模型。最终生成与 HAZUS 相容的地震易损性曲线,并与 HAZUS 软件中提供的地震易损性曲线进行了对比。结果表明:由于研究方法和研究对象上存在着较大差异,因此本文分析结果与 HAZUS 软件中提供的分析结果存在较为明显的差异。但是,本文提出的方法主要是针对单体结构,同时基于精细化有限元分析和细致不确定性分析,这对于面向群体结构基于简化分析方法的 HAZUS 易损性函数将是个有益的补充。

参考文献:

- [1] 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.
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. (in Chinese)
- [2] Cornell C A, Jalayer F, Hamburger R O, Foutch D A. The probabilistic basis for the 2000 SAC/FEMA steel moment frame guidelines [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 2002, 128(4): 526—533.
- [3] 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).
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] 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,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, 35(2): 29—37. (in Chinese)
- [7] 徐龙河,单旭,李忠献.强震下钢框架结构易损性分析及优化设计[J].工程力学,2013,30(1): 175—179.
Xu Longhe, Shan Xu, Li Zhongxian. Vulnerability analysis and optimization design for steel frame structure under strong earthquakes [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 175—179. (in Chinese)
- [8] 郑山锁,田进,韩言召,等.考虑锈蚀的钢结构地震易损性分析[J].地震工程学报,2014,36(1): 1—6.
Zheng Shansuo, Tian Jin, Han Yanzhao, et al. Seismic fragility analysis of steel structures considering steel corrosion [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(1): 1—6. (in Chinese)
- [9] 吴轶,何铭基,蔡健,黄炎生,杨春.带耗能腋撑型钢筋混凝土转换框架结构地震易损性分析[J].工程力学,2012,29(10): 184—192.
Wu Yi, He Mingji, Cai Jian, Huang Yansheng, Yang Chun. Seismic fragility analysis of steel reinforced concrete transfer frame with energy dissipation haunch brace [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(10): 184—192. (in Chinese)
- [10] 何益斌,李艳,沈蒲生.基于性能的高层混合结构地震易损性分析[J].工程力学,2013,30(8): 142—147.
He Yibin, Li Yan, Shen Pusheng. Performance-based seismic fragility analysis of tall hybrid structures [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(8): 142—147. (in Chinese)
- [11] 陆祝贤,吴轶,杨春,等.基于 IDA 的阀厅结构地震易损性分析[J].土木工程学报,2012,45(增刊 I): 263—267.
Lu Zhuxian, Wu Yi, Yang Chun, et al. Seismic fragility analysis of valve hall structure based on IDA [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(Suppl I): 263—267. (in Chinese)
- [12] 谷音,钟华,卓卫东.基于性能的矮塔斜拉桥结构地震易损性分析[J].土木工程学报,2012,45(增刊 I): 218—222.
Gu Yin, Zhong Hua, Zhuo Weidong. Lower-tower cable-stayed bridge seismic vulnerability analysis [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(Suppl I): 218—222. (in Chinese)
- [13] 王笃波,刘汉龙,于陶,等.基于变形的土石坝地震易损性分析[J].岩土工程学报,2013,35(5): 814—819.
Wang Dubo, Liu Hanlong, Yu Tao, et al. Seismic fragility analysis for earth-rock-fill dams based on deformation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 814—819. (in Chinese)
- [14] 刘智,郭恩栋,胡少卿,高霖,洪广磊.供热管道地震易损性分析[J].工程力学,2013,30(7): 187—192.

- Liu Zhi, Guo Endong, Hu Shaoqing, Gao Lin, Hong Guanglei. Seismic vulnerability analysis of heat supply pipeline [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(7): 187—192. (in Chinese)
- [15] 文波, 牛获涛. 大型变电站主厂房地震易损性研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(2): 19—23.
Wen Bo, Niu Ditao. Seismic vulnerability analysis for the main building of the large substation [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(2): 19—23. (in Chinese)
- [16] Calvi G M, Magenes G, Bommer J J, et al. Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years [J]. *ISET Journal of Earthquake Technology*, 2006, 43(3): 75—104.
- [17] 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.
- [18] Vamvatsikos D, Fragiadakis M. Incremental dynamic analysis for estimating seismic performance sensitivity and uncertainty [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2010, 39(2): 141—163.
- [19] Mai C V, Sudret B, Mackie K R, et al. Non-parametric fragility curves for bridges using recorded ground motions [C]// *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, Eurodyn. Porto Portugal, European Association for Structural Dynamics (EASD)*, 2014: 2831—2838.
- [20] Federal Emergency Management Agency. Multi-hazard loss estimation methodology. Earthquake model [R]. Washington, DC: HAZUS-MH MR1 Technical Manual, 2003.
- [21] 陈洪富, 孙柏涛, 陈相兆, 等. HAZ-China 地震灾害损失评估系统研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(增刊 2): 294—300.
Chen Hongfu, Sun Baitao, Chen Xiangzhao, et al. HAZ-China earthquake disaster loss estimation system [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(Suppl 2): 294—300. (in Chinese)
- [22] 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)
- [23] 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 Da-gang, Wang Guangyuan. Discussions on probabilistic seismic demand models [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(8): 172—179. (in Chinese)
- [24] 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).
- [25] Lü Dagang, Yu Xiaohui, Jia Mingming, Wang Guangyuan. Seismic risk assessment of a RC frame designed according to Chinese codes [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2014, 10(10): 1295—1310.
- [26] 吕大刚. 结构抗震可靠度的二种简化解析表达式及其一致性证明[J]. *地震工程与工程振动*, 2009, 29(10): 59—65.
Lü Dagang. Verification of consistency of two simplified analytical formulations for structural seismic reliability [J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2009, 29(10): 59—65. (in Chinese)
- [27] Applied Technology Council (ATC). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings: Volume 1 [R]. Redwood City, California: California Seismic Safety Commission, ATC 40.
- [28] Chopra A K, Goel R K. Capacity-demand-diagram methods for estimating seismic deformation of inelastic structures: SDF systems [R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1999, PEER-1999/02.
- [29] Olsson A M J, Sandberg G E. Latin hypercube sampling for stochastic finite element analysis [J]. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 2002, 128(1): 121—125.
- [30] 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.