

基于概率密度演化理论的地震概率安全评估

宁超列

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 基于概率密度演化理论,通过引入随机地震动模型,可以获得某一场地在一定时期内遭遇不同地震动强度的超越概率,并且有望解决地震易损性分析中如何选择地震动的关键问题.在此基础上,通过调幅随机地震动模型的基底幅值参数,并与地震易损性研究中的增量调幅思想相结合,可以获得工程结构在遭遇不同超越概率的地震作用时,结构性能达到各极限状态的超越概率.这一将地震易损性曲线的地震动强度度量指标赋予概率意义的工作,可以避免以往采用不同地震动强度度量指标时,由于计算方法的不同,生成的地震易损性曲线具有较大不同的缺点.这一工作,进一步与基于性能的地震工程全概率决策框架相结合,可为工程结构的地震概率安全评估提供坚实的理论基础.

关键词: 地震危险性; 地震易损性; 概率密度演化; 全概率决策框架; 随机地震动模型

中图分类号: TU311.2

文献标志码: A

Seismic Probabilistic Safety Assessment Based on Probability Density Evolution Method

NING Chaolie

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: By introducing the stochastic ground motion model based on the probability density evolution method, the exceedance probability of engineering structures at different peak ground acceleration in a certain site and period can be assessed and presented, and the key problem of selecting the ground motion in seismic fragility assessment can be solved. Furthermore, when the structures encounter the earthquake ground motion in a different exceedance probability, the basal amplitude parameter of the stochastic ground motion model will be increased to calculate the failure probability of engineering structures at each limit state, which is consistent to the increment dynamic analysis of the seismic fragility analysis. The research that assigns the probability to the measurement of the ground motion intensity for the seismic

fragility curves avoids the difference between the different methodologies used in the seismic fragility analysis. The proposed methodology should integrate with the total probability decision framework of performance-based earthquake engineering to provide a solid theoretical foundation for the seismic probabilistic safety assessment of engineering structures.

Key words: seismic risk; seismic fragility; probability density evolution; total probability decision framework; stochastic ground motion model

工程结构的地震风险评估对于制定相应的防灾减灾应对措施,或在灾害发生时迅速评估工程结构的破坏程度以减少各方的地震损失具有十分重要的作用.当前,国际上通用的地震风险评估理论有两类^[1]:抗震裕度评估理论和地震概率安全评估理论.抗震裕度评估理论是指对工程结构规定一个或多个功能路径,评估或证明当工程结构处于强烈地震作用时有恰当的裕度执行所要求的功能,这一理论广泛应用于核电厂的地震概率安全评估中,相应的方法有基于事件树或故障树的模型法和成功路径建模法^[2].地震概率安全评估理论则是以概率论为基础的风险量化评价技术,这一理论通过辨识工程结构在各个水平的损害与其他并不期望的后果,获得地震损害的定量数据.

地震概率安全评估理论包括两大核心内容:地震危险性分析和地震易损性分析^[3].地震危险性分析是指评估工程建设场地在未来不同年限可能遭受到的不同地震影响程度的概率水平.地震影响程度一般用地震动加速度峰值表示.地震危险性分析有定数法和概率法两种思路.定数法通过确定各类潜在震源区,以震级和震中距为参数,利用地震动衰减关系给出某一场地在今后一定时期内可能遭受到的最大地震动加速度峰值,因此是一种确定性的处理

方式;概率法则认为地震发生是一种随机事件,通过地震动发生概率模型、震级和频度关系以及地震动参数衰减关系,给出某一场地在今后一定时期内遭遇不同地震动加速度峰值的超越概率.另一方面,地震易损性分析是指评估工程结构在不同强度的地震作用下,结构性能达到各极限状态的超越概率.这一工作从概率意义上定量地刻画了工程结构的抗震性能,从宏观角度描述了地震动强度和工程结构破坏程度之间的关系.地震易损性分析一般用地震易损性曲线表述.目前主要有两种方法建立工程结构的地震易损性曲线:经验易损性分析和解析易损性分析.经验易损性分析基于以往的震害调查数据建立,一般用于群体建筑的抗震性能评估;解析易损性分析基于工程结构的抗震可靠度分析建立,一般用于单体建筑的抗震性能评估.

工程结构地震概率安全评估的这两大核心内容,统一于美国太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)提出的基于性能的地震工程全概率决策框架下^[4].该框架包括地震危险性分析、结构分析、破坏分析、损失分析和风险决策等 5 个依次进行的阶段.目前,该框架蕴含的概率度量思想和系统研究思想已成为地震工程领域的研究热点.然而,蕴含在该框架下的地震危险性分析和地震易损性分析,在当前工程结构的地震概率安全评估中尚存在一定程度的脱节.这是因为根据 PEER 的全概率决策公式,地震易损性分析是在地震危险性分析基础上的条件概率分析,即

$$v(V) = \iiint G(V | M) dG(M | D) dG(D | I) d\lambda(I) \quad (1)$$

式中: $v(V)$ 为决策变量 V 超过某一设定值的年平均概率; $G(V|M)$ 为给定损失量 M 的条件下决策变量 V 的条件概率; $dG(M|D)$ 为给定工程需求参数 D 的条件下损失量 M 的条件概率密度; $dG(D|I)$ 为给定地震动强度 I 的条件下工程需求参数 D 的条件概率密度; $d\lambda(I)$ 为地震危险性函数的密度.然而,在当前的地震概率安全评估中,研究者在基于地震危险性分析获得某一场地在今后一定时期内遭遇不同超越概率的地震动强度后,往往需要重新选择地震波以建立工程结构的地震易损性曲线,因此难以直接满足全概率决策公式中的条件概率,并且使地震易损性分析中如何选择地震波成为一个长期的悬而未决的难题.因此,本文将概率密度演化理论引入到工程结构地震概率安全评估的研究中,通过建立背景物

理量与目标物理量之间的概率密度联系途径,以随机地震动模型为基础,建立起地震危险性分析与地震易损性分析的桥梁.这一工作可为工程结构的地震概率安全评估提供坚实的理论基础.

1 概率密度演化理论

概率密度演化理论基于概率守恒原理建立,即在保守的概率转移过程中,状态空间中单位体积的概率增量等于通过此单元边界的概率流入量^[5],因此

$$\frac{\partial p_{\mathbf{x},\Theta}(x,\theta,t)}{\partial t} + \dot{\mathbf{X}}(\theta,t) \frac{\partial p_{\mathbf{x},\Theta}(x,\theta,t)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

式中: $p_{\mathbf{x},\Theta}(x,\theta,t)$ 为随机向量 (\mathbf{X},Θ) 的联合概率密度函数; \mathbf{X} 为结构的响应; Θ 为随机参数向量.方程的初始条件为

$$p_{\mathbf{x},\Theta}(x,\theta,t_0) = \delta(x-x_0) p_{\Theta}(\theta) \quad (3)$$

式中, $p_{\Theta}(\theta)$ 为随机参数向量的联合概率密度函数.结构响应的时变概率密度函数为

$$p_{\mathbf{x}}(x,t) = \int_{\Omega_{\Theta}} p_{\mathbf{x},\Theta}(x,\theta,t) d\theta \quad (4)$$

式中, Ω_{Θ} 为随机参数向量的分布空间.由式(2)可知,由于方程中的随机参数向量是一个参数而非变量,因此可以对其进行离散,从而使得概率密度演化方程的求解过程为:① 在空间 Ω_{Θ} 离散随机参数向量,生成离散代表点与相应的赋得概率;② 针对每个离散代表点求解物理方程,获取方程系数 $\dot{\mathbf{X}}(\theta,t)$;③ 求解式(2)获得随机向量的联合概率密度函数 $p_{\mathbf{x},\Theta}(x,\theta,t)$;④ 对式(4)积分,计算结构响应的时变概率密度函数.这样,结合地震危险性分析和地震易损性分析,本文将概率密度演化理论应用于工程结构的地震概率安全评估中,提出的地震概率安全评估流程如图 1 所示.

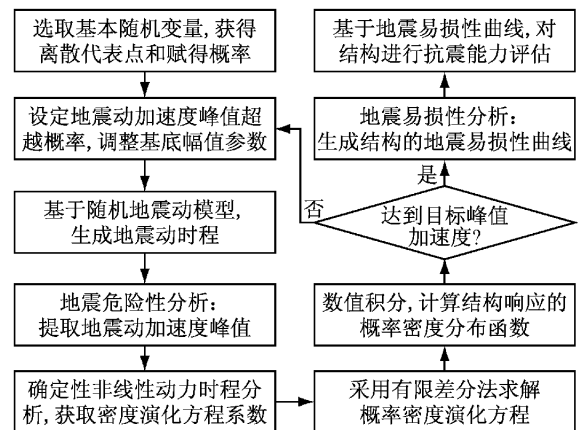


图 1 基于概率密度演化理论的地震概率安全评估

Fig.1 Seismic probabilistic safety assessment based on the probability density evolution method

2 随机地震动模型

随机地震动模型一般采用功率谱密度函数表达,但是功率谱密度函数无法刻画地震动的细部概率结构.因此,李杰等人通过在描述地震动传播过程的物理方程中引入若干具有物理意义的随机变量来表述地震动^[6],即

$$F(\omega) = \frac{\omega_0^2 + 2i\xi\omega_0\omega}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\xi\omega_0\omega} F_0 \quad (5)$$

式中: $F(\omega)$ 为地震动绝对加速度频率谱; ω 为地震动频率; ω_0 为场地基本圆频率; ξ 为场地等价阻尼比; F_0 为反映基岩输入的有限带宽白噪声谱,且

$$F_0 = \begin{cases} S_g f, & 0 < f < f_1 \\ S_g, & f_1 \leq f \leq f_2 \\ -\frac{S_g}{f_e - f_2} (f - f_e), & f_2 < f < f_e \end{cases} \quad (6)$$

式中: f_1 和 f_2 为转折频率,一般取 0.6 Hz 和 14.4 Hz; f_e 为截断频率,一般取 15 Hz; S_g 为表征基底谱幅值的随机变量.根据随机过程功率谱与样本均值谱的关系,地震动绝对加速度频率谱和地震动功率谱之间存在如下转换关系:

$$S(\omega) = (1/T)E[|F(\omega)|^2] \quad (7)$$

式中: $S(\omega)$ 为地震动功率谱; T 为地震动持续时间; $E[\cdot]$ 为函数的期望.在此基础上,根据地震动功率谱即可采用谱表现方法人工合成地震动^[7]

$$X(t) = \sqrt{2} \sum_{i=0}^{N-1} A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (8)$$

式中: N 为频率分量的个数; $A_i = \sqrt{2S(\omega_i)\Delta\omega}$ 为第 i 个频率分量的幅值; $S(\omega_i)$ 为功率谱密度函数对应于各个频率分量的离散值; ω_i 为第 i 个频率分量的频率; φ_i 为地震动相位谱值,一般被处理为 $(0, 2\pi)$ 区间上均匀分布的相互独立的随机数.为提高谱表现方法人工合成地震动的效率,可引入快速傅里叶变换技术,将式(8)改写为

$$X(p\Delta t) = \operatorname{Re} \left(\sum_{n=1}^M B_n \exp[i(n-1)\Delta\omega(p-1)\Delta t] \right) \quad (9)$$

式中: $M=2^\lambda$, λ 为正整数,且 $M>2N$; Re 表示取复数的实部; $B_n = \sqrt{2}A_n e^{i\varphi_n}$, $n=1,2,\dots,M$; $A_n = (2S[(n-1)\Delta\omega])^{1/2}$; $\Delta\omega$ 为频率间距.由于地震动相位谱的均匀分布特性,根据式(9)生成的地震动加速度时程是一个平稳过程,因此需要在其基础上乘以一强度包络函数以体现地震动的强度非平稳.然而,如果假

设地震动相位差谱的分布符合对数正态分布,由其合成的地震动时程可直接反映地震动的强度非平稳而不需乘以一强度包络函数.因此,采用对数正态分布描述地震动的基本相位差谱:基本相位差谱可以采用随机数发生器生成,也可以根据确定性的函数产生.由于采用随机数发生器生成存在样本随机性的问题,因此本文采用确定性的函数,首先生成服从均匀分布的伪随机数列

$$\varphi_i = \varphi_{i-1} + i^A, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式中: φ_0 为一较小值,本文取 0.01; A 为指数参数,本文取为 3.考虑谱表现方法合成地震动的周期特性,将生成序列 φ_i 取余后再取负并归一到 $[0, -2\pi]$ 区间,进一步按照均匀分布的随机数生成对数正态分布随机数的方法,将标准相位差谱按下式变换为服从对数正态分布的数列:

$$\begin{cases} u = \sqrt{-2 \ln \varphi_i} \cos(\pi\varphi_{i+1}) \\ v = \sqrt{-2 \ln \varphi_i} \sin(\pi\varphi_{i+1}) \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

获得的 u 和 v 即为相互独立且服从标准正态分布的随机数,然后将 u 和 v 再转换为服从对数正态分布的数列(对数正态分布的均值取 π ,标准差取 0.8π),并将生成的数列通过取负后再取余的方式归一到 $[0, -2\pi]$ 区间,最后将此生成的数列与初始相位角叠加,即可获得式(8)中所需的地震动相位谱值.整个随机地震动生成流程如图 2 所示.

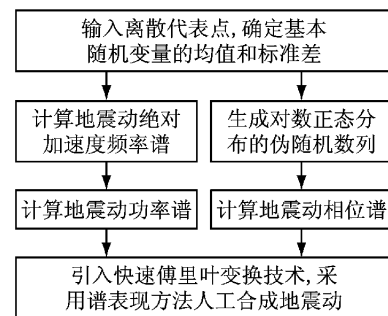


图 2 随机地震动生成流程

Fig.2 Flowchart of stochastic ground motion generation

3 地震危险性分析

随机地震动模型包含 4 个基本随机变量:场地基本圆频率 ω_0 、场地等价阻尼比 ξ 、基底幅值 S_g 和初始相位角.各基本随机变量的均值和变异系数均需根据实测地震动记录并将其规格化后,结合函数优化算法识别给出.根据已有研究结果^[6]:当实测地震

动记录的加速度峰值调整为 $0.1g$ 后,通过参数识别方法获得二类场地条件下 ω_0, ξ 和 S_g 的均值分别为 15.0, 0.70 和 0.25, 变异系数分别为 0.40, 0.30 和 0.50(初始相位角的均值为 0, 标准差为 3.77). 因此,根据基本随机变量的参数值,结合离散代表点生成方法^[8]和采用上述随机地震动模型,本文最终生成 202 条具有不同超越概率的随机地震波时程. 将每条随机地震波时程的加速度峰值提取出来作为响应输入,同时引入虚拟随机过程求解概率密度演化方程(2),即可获得地震动加速度峰值的概率密度分布,如图 3 所示. 可见,基于随机地震动模型生成的地震动样本可以从概率意义上描述地震动加速度峰值的随机特征,其概率密度分布不同于已有的地震危险性分析结论:地震动加速度峰值的概率密度分布具有极值 I 型分布的特征.

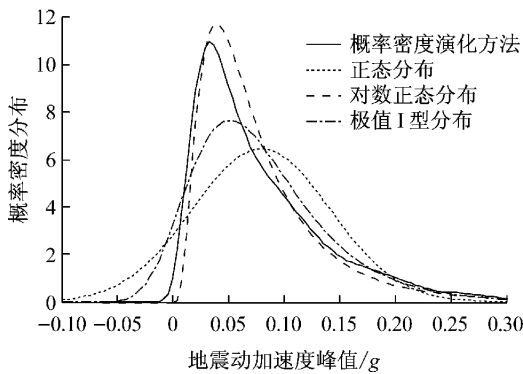


图 3 地震动加速度峰值的概率密度分布

Fig.3 Probability density distribution of peak ground acceleration

由于随机地震动模型通过 4 个具有物理意义的参数来反映地震动的随机特征,因此针对某一类场地,可以结合参数分离的思想,通过保持其他参数不变,对基底输入能量进行调幅,从而获得一系列具有相同超越概率但地震动加速度峰值不同的地震波时程. 在此基础上,对工程结构进行非线性动力时程响应分析,即可建立工程结构具有地震动强度概率特征的地震易损性曲线. 这一处理,事实上也为当前地震易损性分析中两大关键难题的解决提供了契机: ① 地震波的选择或生成. 采用何种方法选择或生成地震波组以便能更合理地评估结构的抗震性能,是地震易损性研究中一直尚未得到较好回答的关键问题. 随机地震动模型的引入,由因到果,与震源机制、传播途径、场地条件有关,与结构类型无关,因此相比基于反应谱的选择或生成地震波方法,更为直接和客观,也容易避免陷入对复杂选波方法的研究. ② 地震易损性评估方法的选择. 当前地震易损性研究

具有多种评估方法,不同评估方法获得的地震易损性曲线具有较大不同,其原因一方面在于这些评估方法没有把握住非线性与随机性相互耦合的特点,另一方面在于传统的地震易损性曲线横坐标代表的地震动强度是一系列确定性的值,而纵坐标代表的结构响应超越概率是一系列具有随机特征的分位值. 因此,随机地震动模型的引入,可将地震动强度度量指标赋予概率意义,即取地震易损性曲线的横坐标为具有不同超越概率的地震动强度,取地震易损性曲线的纵坐标为结构响应超越某一给定限值的概率,由此建立的地震易损性曲线,对于不同的地震动强度度量指标具有十分相似的形状. 整个地震动增量调幅流程如图 4 所示.

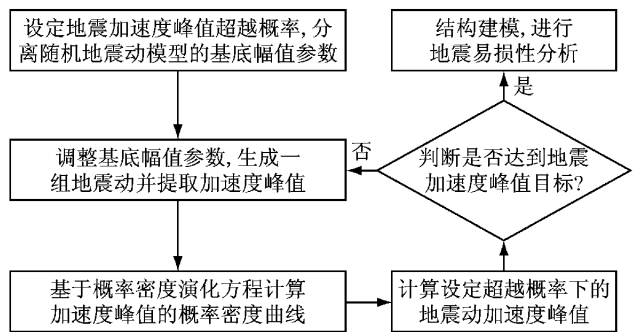


图 4 基于设定超越概率的地震动增量调幅流程

Fig.4 Flowchart of increment amplitude of ground motion based on the prescribed exceedance probability

由于我国《建筑抗震设计规范(GB 50011—2010)》的三水准设防标准——小震不坏、中震可修和大震不倒,分别代表在结构设计基准期内,工程场地可能遭遇到超越概率分别为 63.2%, 10.0% 和 2.0% 的地震烈度值或地震动参数值,因此基于随机地震动模型,计算获得与 7~9 度抗震设防烈度相对应的基底幅值参数值,如表 1 所示.

表 1 基底幅值参数

Tab.1 Basal amplitude parameter

地震类型	7 度		8 度		9 度	
	加速度峰值/g	基底幅值参数	加速度峰值/g	基底幅值参数	加速度峰值/g	基底幅值参数
多遇地震	0.035	0.116	0.079	0.261	0.140	0.463
罕遇地震	0.220	1.873	0.400	3.409	0.620	5.299

4 框架结构设计

基于我国现行《建筑抗震设计规范(GB 50011—2010)》和《混凝土结构设计规范(GB 50009—2010)》设计 3 层钢筋混凝土框架结构,采用软件 PKPM 对

其进行内力计算和配筋计算. 主要设计参数为: 建筑场地 II 类, 抗震设防烈度 7 度, 设计地震分组第 2 组, 场地特征周期 0.40 s. 选取其中的一榀平面框架建立非线性有限元数值模型, 结构的立面图与梁柱截面尺寸、配筋如图 5 所示. 结构层高为 3 m, 跨度为 6 m. 截面尺寸为梁 250 mm×500 mm, 柱 450 mm×450 mm. 混凝土材料强度等级为 C30, 纵筋为 HRB 350, 箍筋为 HPB 235. 楼板恒载 3 kN·m⁻², 活载 2 kN·m⁻²; 顶层恒载 5 kN·m⁻², 活载 0.5 kN·m⁻²; 填充墙 8 kN·m⁻¹. 采用软件 OpenSees 对框架结构进行非线性动力时程响应分析: 梁、柱构件采用基于力型函数插值的非线性梁柱单元模拟, 单元中的混凝土材料采用 Kent-Scott-Park 模型, 钢筋材料采用 Giuffre-Menegotto-Pinto 模型, 模型采用瑞利比例阻尼, 结构的基本自振周期为 0.55 s.

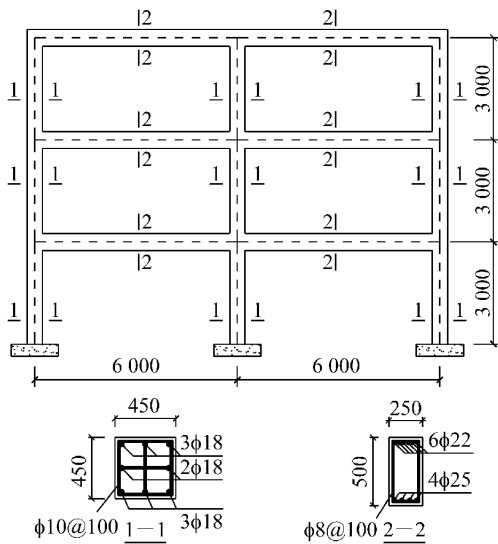


图 5 钢筋混凝土框架结构的尺寸与配筋 (单位: mm)
Fig.5 Configuration and reinforcement of reinforced concrete frame structure (unit: mm)

5 地震易损性分析

基于随机地震动模型, 对基底幅值参数按 0.4 的间隔由 0 依次调幅到 8.0, 生成 20 组地震动, 然后输入这 20 组地震动, 对钢筋混凝土框架结构进行非线性动力时程响应分析, 并以结构的最大层间位移角作为结构性能的评估指标. 设定地震动强度的超越概率分别为 63.2% 和 2.0%, 根据前文所述, 即可基于概率密度演化方程求解这些超越概率下的地震动加速度峰值, 以此作为地震易损性分析中地震动强度的度量指标. 由于在地震易损性的研究中, 一般

假定结构的最大层间位移角为对数正态分布^[9-11], 为验证这种假设的合理性, 提取每条地震动所对应的最大层间位移角, 同时引入虚拟随机过程, 求解概率密度演化方程, 获得最大层间位移角的概率密度分布, 如图 6 所示. 可见, 随着地震动强度的增加, 最大层间位移角的概率密度分布逐渐偏移且趋于平缓, 真实的概率密度分布与假定的对数正态分布之间具有明显的区别.

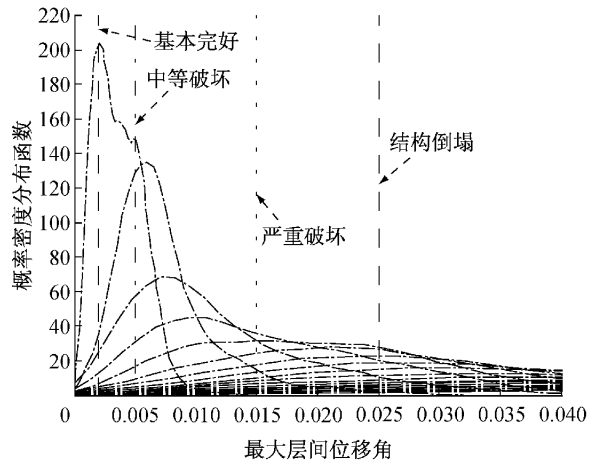


图 6 最大层间位移角的概率密度分布函数
Fig.6 Probability density distribution function of maximum inter-storey drift ratio

定义最大层间位移角的 4 个极限状态值^[12]: 当最大层间位移角为 0.002 时, 结构为基本完好状态; 当最大层间位移角为 0.005 时, 结构为中等破坏状态; 当最大层间位移角为 0.015 时, 结构为严重破坏状态; 当最大层间位移角为 0.025 时, 结构为倒塌极限状态. 在此基础上, 建立结构的地震易损性曲线, 所得结果如图 7 所示. 可见, 最大层间位移角真实的概率密度分布与假定的对数正态分布虽然具有明显的不同, 但建立的地震易损性曲线在地震动加速度峰值较小时差别不大, 表明在钢筋混凝土框架结构地震易损性的研究中, 当地震动强度较小时, 采用对数正态分布假定近似估计响应的概率密度分布是合理的.

取与 7~9 度抗震设防烈度相对应的多遇和罕遇地震动加速度峰值, 计算结构在各极限状态点的超越概率, 所得结果如表 2 所示. 可见, 罕遇地震作用下结构的破坏概率大于多遇地震作用下结构的破坏概率; 结构的破坏概率由大到小依次为基本完好、中等破坏、严重破坏、结构倒塌. 由于该钢筋混凝土框架结构的抗震设防烈度为 7 度, 因此在结构设计基准期 50 年内, 当结构遭遇超越概率为 63.2% 的地震作用时, 该结构基本完好的超越概率为 20.98%,

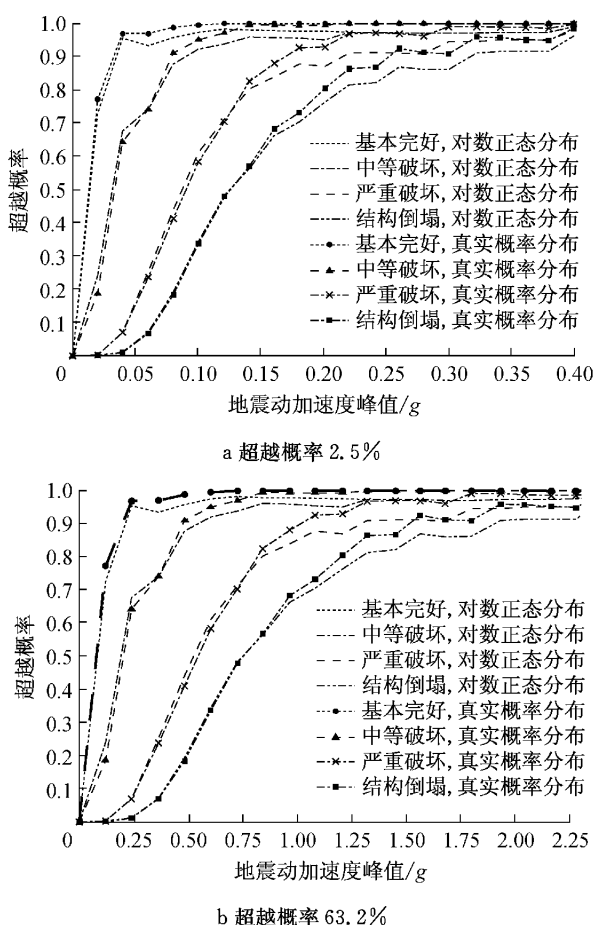


图 7 不同地震动超越概率下的地震易损性曲线

Fig.7 Seismic fragility curves at different exceedance probability of ground motions

表 2 7~9 度抗震设防烈度下 3 层钢筋混凝土框架结构的超越概率

Tab.2 Exceedance probability of 3 storey reinforced concrete frame in 7 to 9 seismic fortification intensity

抗震设防烈度	破坏程度	超越概率	
		多遇地震	罕遇地震
7 度	基本完好	0.209 8	0.894 2
	中等破坏	0.069 4	0.560 7
	严重破坏	0.000 2	0.050 7
	结构倒塌	0	0.008 0
8 度	基本完好	0.473 6	0.955 1
	中等破坏	0.156 7	0.866 0
	严重破坏	0.000 4	0.423 2
	结构倒塌	0	0.182 3
9 度	基本完好	0.761 6	0.979 4
	中等破坏	0.308 4	0.959 1
	严重破坏	0.011 2	0.797 8
	结构倒塌	0.001 7	0.558 8

中等破坏的超越概率为 6.94%，严重破坏的超越概率为 0.02%，结构不会发生倒塌；当结构遭遇超越概率为 2% 的地震作用时，该结构基本完好的超越概率为 89.42%，中等破坏的超越概率为 56.07%，严重破坏

的超越概率为 5.07%，倒塌的超越概率为 0.8%。

若地震动强度的度量指标采用绝对加速度反应谱值，也可采取与地震动加速度峰值度量指标类似的步骤建立结构的地震易损性曲线，即：① 采用随机地震动模型生成 20 组地震动，并基于结构的基本自振周期，计算每条地震波的绝对加速度谱值；② 引入虚拟随机过程，对每组地震动生成的绝对加速度谱值进行概率密度演化，获得每组地震动绝对加速度谱值的概率密度分布；③ 输入 20 组地震动，对结构进行非线性动力时程分析，提取结构的最大层间位移角；④ 引入虚拟随机过程，对结构的最大层间位移角进行概率密度演化，获得每组地震动对应的结构最大层间位移角的概率密度分布；⑤ 设定超越概率，基于地震动绝对加速度谱值的概率密度分布获得地震动强度的度量值；⑥ 设定结构的极限状态点，根据结构最大层间位移角的概率密度分布获得结构的破坏概率；⑦ 以获得的震动强度度量值为横坐标，以结构的破坏概率为纵坐标，建立结构的地震易损性曲线，所得结果如图 8 所示。可见，将地

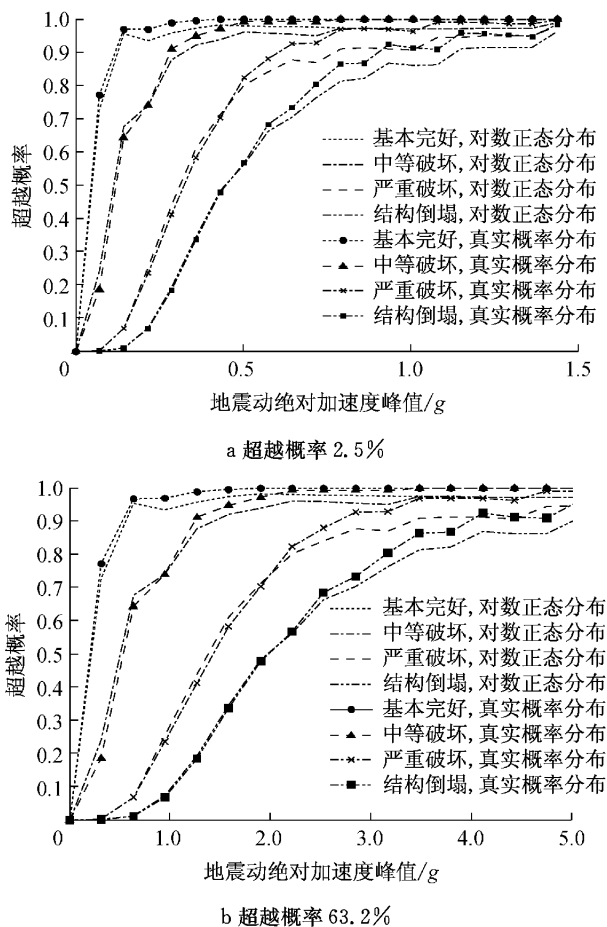


图 8 基于绝对加速度谱值的地震易损性曲线

Fig.8 Seismic fragility curves based on the absolute response spectral acceleration

震易损性曲线的地震强度度量指标赋予概率意义后,采用绝对加速度谱值度量的地震易损性曲线与采用地震加速度峰值度量的地震易损性曲线具有类似的形状.这表明若将概率密度演化理论引入到工程结构地震概率安全的评估中,可以避免地震易损性分析采用不同的计算方法时,生成的地震易损性曲线具有较大不同的缺点.

6 结论

(1) 基于随机地震动模型生成的地震动组可以从概率意义上描述地震动的随机特征,基于概率密度演化理论获得的地面加速度峰值的概率密度分布不同于已有的地震危险性分析的结论:地震动加速度峰值的概率密度分布具有极值 I 型分布的特点.

(2) 结构最大层间位移角真实的概率密度分布不同于假定的对数正态分布,但两者建立的地震易损性曲线差别不大.因此,在钢筋混凝土框架结构地震易损性的研究中,当地震动强度较小时,可以近似采用对数正态分布估计结构响应的概率密度分布.

(3) 通过分离并调整随机地震动模型的基底幅值参数,且与地震易损性分析相结合,可以获得结构在遭遇不同超越概率的地震作用时,结构性能达到各极限状态点的超越概率.因此,结合概率密度演化理论与基于性能的地震工程全概率决策框架,这种将地震动强度指标和结构性能指标同时赋予概率意义的工作,可为工程结构的地震概率安全评估提供坚实的理论基础.

参考文献:

- [1] 徐磊磊, 张恣隽, 张琴芳. 地震概率安全评价方法研究 [C]// 中国核科学技术进展报告(第二卷). 北京: 中国核学会, 2011: 262-267.
XU Leilei, ZHANG Minjun, ZHANG Qinfang. Study of seismic probabilistic safety assessment methodology [C]// Progress Report on China Nuclear Science and Technology (Vol. 2). Beijing: Chinese Nuclear Society, 2011: 262-267.
- [2] 白晋华, 赵树峰, 谌登华, 等. 运行核电厂抗震裕度评价研究 [J]. 原子能科学技术, 2012, 46(12): 1446.
BAI Jinhua, ZHAO Shufeng, CHEN Denghua, *et al.* Research on seismic margin analysis of operation nuclear power plant [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(12): 1446.
- [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.
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.
- [4] Cornel C A, Jalayer F, Hamburger R O, *et al.* The probabilistic basis for the 2000 SAC/FEMA steel moment frame guidelines [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(4): 526.
- [5] Chen J B, Li J. Dynamic response and reliability analysis of nonlinear stochastic structures [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2005, 20(1): 33.
- [6] 李杰, 艾晓秋. 基于物理的随机地震动模型研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(5): 21.
LI Jie, AI Xiaoqi. Study on random model of earthquake ground motion based on physical process [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(5): 21.
- [7] Shinozuka M, Deodatis G. Simulation of stochastic process by spectral representation [J]. Applied Mechanics Rev, 1991, 44(4): 191.
- [8] 陈建兵, 李杰. 结构随机响应概率密度演化分析的数论选点法 [J]. 力学学报, 2006, 38(1): 134.
CHEN Jianbing, LI Jie. Strategy of selecting points via number theoretical method in probability density evolution analysis of stochastic response of structures [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(1): 134.
- [9] 周靖, 罗高杰, 方小舟. 强震作用下不规则 RC 框架结构抗震易损性分析 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11): 134.
ZHOU Jing, LUO Gaojie, FANG Xiaozhou. Fragility analysis of vertically irregular reinforced concrete frame structures subjected to pulse-like ground motion [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 134.
- [10] 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.
WU Qiaoyun, ZHU Hongping, FAN Jian. Performance-based seismic fragility analysis of RC frame structures [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(9): 117.
- [11] 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.
HE Yibin, LI Yan, SHEN Pusheng. Performance-based seismic fragility analysis of tall hybrid structures [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(8): 142.
- [12] Ghobarah A. Performance-based design in earthquake engineering: State of development [J]. Engineering Structures, 2001, 23: 878.