

多高层建筑结构层间位移和层剪力的动力可靠度计算^①

刘齐茂^{1,2}, 燕柳斌²

(1. 广西工学院土木建筑系, 广西 柳州 545006; 2. 广西大学土木建筑学院, 广西 南宁 530004)

摘要:在虚拟激励法的基础上推导了多高层建筑结构剪切层模型在地震作用下层间相对位移和层地震剪力的自动功率谱密度函数的解析表达,通过数值积分获得层间相对位移和层地震剪力的各阶谱矩和标准差,基于随机动力响应过程跨越安全界限次数为泊松过程和两态马尔可夫过程的假设,计算了层间相对位移和层地震剪力的动力可靠度,并用 Matlab 语言编制了动力可靠度的计算程序。算例表明该方法是高效的和有效的。

关键词: 动力可靠度; 虚拟激励法; 多高层建筑结构; 层间位移; 层剪力

中图分类号: TU311.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2009)03-0248-06

Dynamic Reliability Calculation of Interstorey Drift and Storey Shearing Force for Multi-storey and High Building Structures

LIU Qi-mao^{1,2}, YAN Liu-bin²

(1. Department of Civil Engineering, Guangxi University of Technology, Guangxi Liuzhou 545006, China;

2. College of Civil and Architecture Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The auto-PSD function analytic solutions of interstorey drift and storey shearing force of multi-storey and high building structural storey model are derived on the basis of pseudo-excitation algorithm. The auto-PSD function moments and standard deviation of interstorey drift and storey shearing force are calculated by numerical integral method. Supposed that the number of random dynamic response passing safe limitation is poison process or two states Markov process, the dynamic reliabilities of interstorey drift and storey shearing force are achieved by the computation program made with the Matlab language. The numerical results indicate that the approach is efficient and effective.

Key words: Dynamic reliability; Pseudo-excitation algorithm; Multi-storey and high building structures; Interstorey drift; Storey shearing force

0 引言

在地震响应分析中多高层建筑结构计算简图通常简化为剪切层模型^[1]。剪切层模型是将质量集中于各楼层,并将整个结构的竖向承重构件合并成一根总的竖向杆,从而形成一个悬臂梁似的串联质点系模型。按剪切层模型计算只能求出层间相对位移和层地震剪力,而不能求出各杆件的内力和变形。结构的动力可靠性是指在动力随机荷载的作用下,结构在规定的时间内和规定的条件下,完成预定功

能的可能性。结构动力可靠性用结构动力可靠度来度量,即结构在规定的时间内和规定的条件下,完成预定功能的概率。结构动力可靠性分析的基础是随机振动理论,与随机振动相关的结构失效准则主要有首次超越失效准则和疲劳失效准则。其中基于首次超越失效准则的结构动力可靠性分析已经取得了重要的进展,形成了过程跨越分析方法和扩散过程理论方法^[2-3]。在基于过程跨越分析的动力可靠度

① 收稿日期:2008-10-21

基金项目:广西青年科学基金(桂科青 0832015);广西工学院青年科学资金(500204)

作者简介:刘齐茂(1972-),男(汉族),博士研究生,副教授,从事结构抗震设计及动力响应优化设计的研究。

计算中,由于结构响应在给定的时段内首次跨越安全界限的概率的计算非常困难,通常假定随机动力响应过程跨越安全界限次数符合某个特殊过程,如泊松过程^[4],两态马尔可夫过程^[5]等,通过随机动力响应过程跨越概率或峰值跨越次数的统计特性来评价结构的动力可靠度。目前跨越分析方法得到了较为广泛的应用^[6-7]。基于 FPK 方程的扩散过程理论方法虽然原则上可给出更为精确的解答,但是由于求解的困难,目前仅能求解单自由度体系中的某些特殊情况^[8]。近年来,李杰等^[9]发展了随机结构动力可靠度分析的概率密度演化方法,可应用于一般多自由度结构体系的动力反应分析并得到结构反应的概率密度函数,通过对随机结构反应的概率密度演化方程施加与首次超越失效准则相应的吸收边界条件,利用数值方法进行求解和积分,得到结构的动力可靠度。但上述的动力可靠度分析方法均采用传统的随机振动分析方法,因此存在分析效率极其低下的问题,难于在实际工程结构中应用。虚拟激励法^[10]是林家浩等提出的一种随机振动分析方法,比传统的随机振动分析方法效率高,计算步骤大为简化,并且保持了理论的精确性,故虚拟激励法在风工程^[11-12]、地震工程^[13-14]等工程中得到广泛的应用。

本文在随机振动的虚拟激励法的基础上推导多高层建筑结构剪切层模型在地震作用下层间相对位移和层地震剪力的自功率谱密度函数的解析表达,通过数值积分获得层间相对位移和层地震剪力的各阶谱矩和标准差,基于随机动力响应过程跨越安全界限次数为泊松过程和两态马尔可夫过程的假设,计算层间相对位移和层地震剪力的动力可靠度。

1 用虚拟激励法计算自功率谱密度

多高层建筑结构剪切层模型计算简图如图 1 所示。

在地面水平加速度时程 $\ddot{x}_g$ 激励下运动微分方程组用矩阵的形式表示为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = -\mathbf{M}\mathbf{E}\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

其中, $\mathbf{M}$ 为 $n \times n$ 阶质量矩阵; $\mathbf{K}$ 为 $n \times n$ 阶刚度矩阵; $\mathbf{C}$ 为 $n \times n$ 阶阻尼矩阵; $\mathbf{x}$ 为 $n \times 1$ 阶集中质量(质点)相对于地面的位移向量; $\mathbf{E}$ 为 $n \times 1$ 阶单位向量。其中的 $x, \dot{x}, \ddot{x}$ 为集中质量相对于地面的位移向量、集中质量相对于地面的速度向量和集中质量相对于地面的加速度向量。用振型分解法求解,求结构前 p 阶特征对 $\omega_j^2, \varphi_j (j=1, 2, \dots, p)$, 令

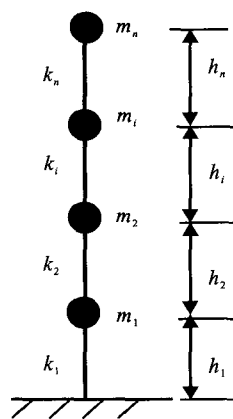


图1 多高层建筑结构的剪切层模型计算简图

Fig. 1 Shear storey model of multi-storey and high building structure.

$$\mathbf{x} = \mathbf{\Phi} \mathbf{q} = \sum_{j=1}^p \mathbf{\Phi}_j \varphi_j \quad (2)$$

其中 $\mathbf{\Phi}$ 为振型矩阵; $\mathbf{q}$ 为广义坐标向量。

构造虚拟地面加速度激励为

$$\ddot{x}_g(t) = \sqrt{S_{\ddot{x}_g}(\omega)} e^{i\omega t} \quad (3)$$

其中, $S_{\ddot{x}_g}(\omega)$ 为地面加速度功率谱密度模型, 可分为平稳模型和非平稳模型, 平稳模型主要有 Kanai-Tajimi 的过滤白噪声模型、胡聿贤一周锡元的 Kanai-Tajimi 修正模型、Clough 和 Penzien 建议的修正过滤白噪声模型等模型。我国学者根据现行的《建筑抗震设计规范》(2001) ^[15] 分别确定了 Kanai-Tajimi 的过滤白噪声模型参数的取值^[16] 及 Clough 和 Penzien 建议的修正过滤白噪声模型的参数的取值^[17], 因此可采用 Kanai-Tajimi 模型或 Clough 和 Penzien 建议的修正模型。参考文献^[17] 的成果可方便确定对应于各种设计条件的 Clough 和 Penzien 建议的修正模型的参数, 准确求得与现行的《建筑抗震设计规范》相吻合的结构随机地震响应, 因此本文采用 Clough 和 Penzien 建议的修正的随机模型。该模型如下式

$$S_{\ddot{x}_g}(\omega) = \frac{1 + 4\zeta_g^2(\omega/\omega_g)^2}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + 4\zeta_g^2(\omega/\omega_g)^2} \cdot \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_f^2\omega_f^2\omega^2} \cdot S_0 \quad (4)$$

式中, ω_g 和 ζ_g 分别为场地土的卓越角频率和阻尼比; S_0 为基岩加速度(白噪声)自谱密度; ζ_f, ω_f 两参数的配合可模拟地震动低频能量的变化, 通常取 $\zeta_f = \zeta_g, \omega_f = 0.1 - 0.2\omega_g$ ^[18]。模型参数 ω_g, ζ_g 和 S_0 的取值由参考文献^[17] 确定。

假定 C 为比例阻尼,如下式

$$C = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K} \quad (5)$$

其中

$$\alpha = \frac{2(\zeta_j - \zeta_{j+1})}{\frac{1}{\omega_j^2} - \frac{1}{\omega_{j+1}^2}}, \quad \beta = \frac{2(\zeta_{j+1}\omega_{j+1} - \zeta_j\omega_j)}{\omega_{j+1}^2 - \omega_j^2} \quad (6)$$

振型阻尼比 ζ_j 一般只能通过试验或实测获得,对于普通钢筋混凝土结构可取 $\zeta_1 - \zeta_2 = 0.05$,钢结构可取 $\zeta_1 = \zeta_2 = 0.02$,将第一阶固有频率 ω_1 第二阶固有频率 ω_2 代入式(6)即可求 α, β 。

将 Φ^T 左乘以式(1)各项,并将式(2)和式(3)代入式(1),得

$$\Phi^T \mathbf{M} \Phi \ddot{\mathbf{q}} + \Phi^T \mathbf{C} \Phi \dot{\mathbf{q}} + \Phi^T \mathbf{K} \Phi \mathbf{q} = -\Phi^T \mathbf{M} \mathbf{E} \sqrt{S_{x_g}(\omega)} e^{i\omega t} \quad (7)$$

$$\bar{\mathbf{M}} \ddot{\mathbf{q}} + \bar{\mathbf{C}} \dot{\mathbf{q}} + \bar{\mathbf{K}} \mathbf{q} = -\Phi^T \mathbf{M} \mathbf{E} \sqrt{S_{x_g}(\omega)} e^{i\omega t} \quad (8)$$

将式(8)分解为 p 个相互独立的单自由度方程:

$$\ddot{q}_j + 2\zeta_j \omega_j \dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = -\gamma_j \sqrt{S_{x_g}(\omega)} e^{i\omega t} \quad (j = 1, 2, \dots, p) \quad (9)$$

其中, ω_j 为第 j 阶振型的圆频率, $\omega_j = \sqrt{\frac{K_{jj}}{M_{jj}}}$; ζ_j 为

第 j 阶振型的阻尼比, $\zeta_j = \frac{\bar{C}_{jj}}{2\omega_j M_{jj}}$; γ_j 为第 j 阶振型参与系数, $\gamma_j = \Phi^T \mathbf{M} \mathbf{E}$ 。式(9)的稳态解为

$$\tilde{q}_j = -\gamma_j H_j \sqrt{S_{x_g}(\omega)} e^{i\omega t} \quad (10)$$

其中 $H_j = (\omega_j^2 - \omega^2 + 2i\zeta_j \omega_j \omega)^{-1}$ 。

集中质量相对于地面的虚拟位移响应为

$$\tilde{x}(t) = \sum_{j=1}^p \tilde{q}_j \varphi_j = -\sum_{j=1}^p \gamma_j H_j \varphi_j \sqrt{S_{x_g}(\omega)} e^{i\omega t} \quad (11)$$

则第 j 层相对于第 i 层的虚拟层间相对位移为

$$\tilde{x}_{ij}(t) = \tilde{x}_j(t) - \tilde{x}_i(t) \quad (j = i+1, i = 0, 1, 2, \dots, n-1) \quad (12)$$

其中 $\tilde{x}_0(t) = 0$ 。

第 j 层相对于第 i 层的层间相对位移 $x_{ij}(t)$ 的自功率谱密度为

$$S_{x_{01}}(\omega) = \tilde{x}_1^* \tilde{x}_1 \quad (13)$$

$$S_{x_{ij}}(\omega) = \tilde{x}_{ij}^* \tilde{x}_{ij} = (\tilde{x}_j - \tilde{x}_i)^* \cdot (\tilde{x}_j - \tilde{x}_i) =$$

$$(\tilde{x}_j^* \tilde{x}_j + \tilde{x}_i^* \tilde{x}_i - \tilde{x}_i^* \tilde{x}_j - \tilde{x}_j^* \tilde{x}_i) \quad (j = i+1, i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (14)$$

其中“*”表示取复共轭。

第 j 层相对于第 i 层的层间相对位移 x_{ij} 响应的第 r 阶谱矩为

$$\lambda_{r,ij}^x = 2 \int_0^{+\infty} \omega^r S_{x_{ij}}(\omega) d\omega \quad (15)$$

层间相对位移自功率谱密度 $S_{x_{ij}}(\omega)$ 可通过 matlab 的符号运算获得解析表达。一般解析表达式中仍含有时间参数 t , 通过化简可消去 t , 但由于化简的困难一般仍保留, 在进行数值积分计算各阶谱矩时只要令 t 等于常数即可。本文采用梯形法进行数值积分。由于能量主要分布在结构的前几阶固有频率, 故积分上限可取振型分解法的截断频率 ω_p 。

第 j 层相对于第 i 层的层间相对位移 x_{ij} 响应的标准差 $\sigma_{x_{ij}}$

$$\sigma_{x_{ij}} = \sqrt{\lambda_{0,ij}^x} \quad (16)$$

质点 m_j 的虚拟地震力为

$$\tilde{F}_j = m_j (\tilde{x}_j + \tilde{x}_g) \quad (17)$$

质点 m_j 的虚拟地震力自功率谱密度为

$$S_{F_j}(\omega) = \tilde{F}_j^* \tilde{F}_j = m_j (\tilde{x}_j + \tilde{x}_g)^* \cdot m_j (\tilde{x}_j + \tilde{x}_g) =$$

$$m_j^2 (\tilde{x}_j^* \tilde{x}_j + \tilde{x}_g^* \tilde{x}_g + \tilde{x}_j^* \tilde{x}_g + \tilde{x}_g^* \tilde{x}_j) \quad (18)$$

其中, $\tilde{x}_j = \omega^2 \tilde{x}_j$; $\tilde{x}_g$ 见式(3)。

第 j 层虚拟层地震剪力为

$$\tilde{Q}_j = \sum_{i=j}^n \tilde{F}_i \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (19)$$

第 j 层地震剪力自功率谱密度为

$$S_{Q_j}(\omega) = \tilde{Q}_j^* \tilde{Q}_j \quad (20)$$

第 j 层地震剪力的第 r 阶谱矩为

$$\lambda_{r,j}^Q = 2 \int_0^{+\infty} \omega^r S_{Q_j}(\omega) d\omega \quad (21)$$

层地震力自功率谱密度 $S_{Q_j}(\omega)$ 可通过 matlab 的符号运算获得解析表达。同样地, 对一般解析表达式中含有时间参数 t , 在进行数值积分计算各阶谱矩时令 t 等于常数。本文采用梯形法进行数值积分, 积分上限取振型分解法的截断频率 ω_p 。

第 j 层地震剪力 Q_j 响应的标准差为

$$\sigma_{Q_j} = \sqrt{\lambda_{0,j}^Q} \quad (22)$$

2 动力可靠度计算

本文分别采用泊松过程和两态马尔可夫过程假设来计算层间相对位移及层地震剪力的动力可靠度。

2.1 层间相对位移动力可靠度

假定层间相对位移 $x_{ij}(t)$ 响应为零均值的随机过程; x_{ij}^e 为层间相对位移 $x_{ij}(t)$ 响应的极值(绝对最大值); $\sigma_{x_{ij}}$ 为随机过程层间相对位移 x_{ij} 的标准差。

定义无量纲参数

$$\eta_{ij} = \frac{x_{ij}^e}{\sigma_{x_{ij}}} \quad (23)$$

$$\vartheta_{ij} = \frac{h_j[\theta_e]}{\sigma_{x_{ij}}} \quad (24)$$

其中, h_j 为 j 层对 i 层的楼层层高; $[\theta_e]$ 为弹性层间位移角限值; $h_j[\theta_e]$ 为 j 层对 i 层层间相对位移限值。

根据在地震作用的时间内层间相对位移跨越层间相对位移限值 $h_j[\theta_e]$ 次数是 Poisson 过程的假定, 求得层间相对位移 x_{ij} 动力可靠度为

$$P_s(\eta_{ij} \leq \vartheta_{ij}) = \exp[-\nu T \exp(-\vartheta_{ij}^2/2)] \quad (25)$$

其中 T 为地震的持续时间,

$$\nu = \frac{1}{2\pi} (\lambda_{2\vartheta}^2 / \lambda_0^2)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{对于单边跨越}) \quad (26)$$

$$\nu = \frac{1}{\pi} (\lambda_{2\vartheta}^2 / \lambda_0^2)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{对于双边跨越}) \quad (27)$$

又根据两态 Markov 过程的假定, 求得层间相对位移 x_{ij} 动力可靠度为

$$P_s(\eta_{ij} \leq \vartheta_{ij}) = \left[1 - \exp\left(-\frac{\vartheta_{ij}^2}{2}\right) \right] \cdot \exp\left[-\nu T \frac{1 - \exp(-\sqrt{\pi/2} q^{1.2} \vartheta_{ij})}{\exp(\vartheta_{ij}^2/2) - 1}\right] \quad (28)$$

其中, T 为地震的持续时间; 带宽参数

$$q = [1 - (\lambda_1^2 / \lambda_0^2) / (\lambda_0^2 \lambda_{2\vartheta}^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

ν 的表达同式(26)和式(27)。

2.2 层地震剪力的动力可靠度

假定层地震剪力 $Q_j(t)$ 响应为零均值的随机过程; Q_j^e 为层地震剪力 $Q_j(t)$ 响应的极值(绝对最大值), σ_{Q_j} 为随机过程层间地震剪力 Q_j 的标准差。定义无量纲参数

$$\kappa_j = \frac{Q_j^e}{\sigma_{Q_j}} \quad (30)$$

$$o_j = \frac{[Q]_j}{\sigma_{Q_j}} \quad (31)$$

其中 $[Q]_j$ 为第 j 层地震剪力限值。

根据在地震作用的时间内层地震剪力跨越层地震剪力限值 $[Q]_j$ 次数是 Poisson 过程的假定, 求得层地震剪力 Q_j 动力可靠度为

$$P_s(\kappa_j \leq o_j) = \exp[-\nu T \exp(-o_j^2/2)] \quad (32)$$

其中 T 为地震的持续时间,

$$\nu = \frac{1}{2\pi} (\lambda_0^2 / \lambda_{o_j}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{对于单边跨越}) \quad (33)$$

$$\nu = \frac{1}{\pi} (\lambda_0^2 / \lambda_{o_j}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{对于双边跨越}) \quad (34)$$

又根据两态 Markov 过程的假定, 求得层地震

剪力 Q_j 动力可靠度为

$$P_s(\kappa_j \leq o_j) = \left[1 - \exp\left(-\frac{o_j^2}{2}\right) \right] \cdot \exp\left[-\nu T \frac{1 - \exp(-\sqrt{\pi/2} q^{1.2} o_j)}{\exp(o_j^2/2) - 1}\right] \quad (35)$$

其中 T 为地震的持续时间; 带宽参数

$$q = [1 - (\lambda_1^2 / \lambda_0^2) / (\lambda_0^2 \lambda_{o_j}^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (36)$$

ν 的表达同式(33)和式(34)。

3 算例

某钢筋混凝土框架结构的综合办公楼, 其结构由 8 层主体结构 and 1 层塔楼构成, 图 2 为该结构的剪切层模型计算简图。第一第二阶振型阻尼比 $\zeta_1 = \zeta_2 = 0.05$ 。该结构位于设防烈度为 VIII 度的 IV 类场地上(设计基本地震加速度值为 $0.2g$)设计地震分组为第一组。根据参考文献[17]计算 Clough 和 Penzien 建议的修正过滤白噪声模型的输入参数: $\omega_g = 9.67 \text{ rad/s}^{-1}$, $\zeta_g = 0.9$, $S_0 = 2.5572 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$, $\zeta_f = 0.9$, $\omega_f = -1.834 \text{ rad/s}^{-1}$ 。地震的持续时间 $T = 10 \text{ s}$ 。试计算该框架结构层间相对位移和层地震剪力的动力可靠度。

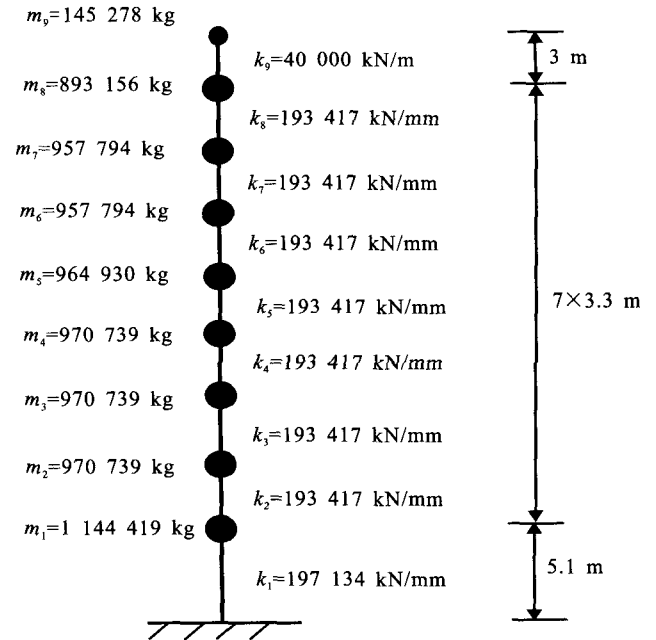


图 2 9 层剪切层模型

Fig. 2 Shear storey model of 9-storey structure.

计算结果整理如下:

算例(为 9 自由度体系)在一台 CPU 为赛扬 1G 的台式电脑上, 计算时间为 14.456316 S 即可获得表 1 和表 2 的动力可靠度计算结果。其中通过数值积分计算层间相对位移和层地震剪力 0~2 阶

谱矩所消耗的计算时间为 12.058793 S。说明本文在虚拟激励法基础上提出多高层建筑结构层间位移和层剪力的动力可靠度计算方法具有非常高的计算效率,完全可应用于复杂的多自由度的工程结构的动力可靠度计算。该方法的主要计算工作量消耗在求 0~2 阶谱矩的计算。

表 1 层间位移动力可靠度

层次	层间位移限值/mm *	Poisson 过程法	两态 Markov 过程法
8	6.6	1.00	1.00
7	6.6	1.00	1.00
6	6.6	1.00	1.00
5	6.6	0.99	0.99
4	6.6	0.99	0.99
3	6.6	0.90	0.90
2	6.6	0.85	0.85
1	10.2	0.99	0.99

* 层间位移限值根据《建筑抗震设计规范》(2001)计算。

表 2 层地震剪力动力可靠度

层次	层剪力限值/kN	Poisson 过程法	两态 Markov 过程法
8	171428571	0.98	0.98
7	285714285	0.88	0.88
6	428571428	0.94	0.94
5	571428571	0.98	0.97
4	714285714	0.99	0.99
3	714285714	0.93	0.93
2	771428571	0.92	0.92
1	857142857	0.97	0.97

表 1 和表 2 的动力可靠度计算结果保留了两位小数。由表 1 和表 2 可见,Poisson 过程法和两态 Markov 过程法获得的层间相对位移及层地震剪力动力可靠度完全一致,因此在实际工程结构的动力可靠度的计算中选任一种方法均可。Poisson 过程法只需要计算 0 阶和 2 阶谱矩,两态 Markov 过程法需要计算 0 阶、1 阶和 2 阶谱矩,因此 Poisson 过程法的计算效率高于两态 Markov 过程法,故在实际工程中建议优先采用 Poisson 过程法。

层间位移动力可靠度从变形的角度可揭示多高层建筑结构中在地震的作用下哪一层最不可靠。如表 1 中,该结构的第 2 层最不可靠,变形可能最大。层地震剪力动力可靠度从强度的角度揭示多高层建筑结构中在地震的作用下哪一层最不可靠,如表 2 中的第 7 层最不可靠,该层可能先于其它层被剪断。

4 结论

(1) 本文在虚拟激励法基础上提出多高层建筑结构层间位移和层剪力的动力可靠度计算方法具有非常高的计算效率,主要计算工作量消耗在求 0~2 阶谱矩的计算。

(2) 本文方法导出基础为振型分解虚拟激励法及 Clough 和 Penzien 建议的修正过滤白噪声模型,因此提出多高层建筑结构层间位移和层剪力的动力可靠度计算方法仅适用于线性结构及输入为平稳过程的情况,对非线性结构、输入为非平稳过程的情况是作者进一步研究的方向。

(3) 自功率谱密度可通过 matlab 的符号运算获得解析表达,一般解析表达式中仍含有时间参数 t ,通过化简可消去 t ,但由于化简的困难一般仍保留时间参数 t ,在进行数值积分计算各阶谱矩时只要令 t 等于常数即可(如果不令 t 等于常数则不能进行数值积分)。

(4) Poisson 过程法和两态 Markov 过程法获得的层间相对位移及层地震剪力动力可靠度几乎完全一致,因此在实际工程结构的动力可靠度的计算中选任一种方法均可。但 Poisson 过程法的计算效率高于两态 Markov 过程法,故在实际工程结构的动力可靠度的计算中建议优先采用 Poisson 过程法。

(5) 本文提出多高层建筑结构层间位移和层剪力的动力可靠度计算方法具有非常高的计算效率,故可推广到多高层建筑结构的其他力学模型,如杆系模型。

【参考文献】

- [1] 王松涛,曹资.现代抗震设计方法[M].北京:中国建筑业出版社,1997:14-22.
- [2] 李桂青,曹宏,李秋胜,等.结构动力可靠性理论及其应用[M].北京:地震出版社,1993:48-61.
- [3] 朱位秋.随机振动[M].北京:科学出版社,1998:474-510.
- [4] Davenport A G. Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading[J]. Proc. Inst. Civil Eng., 1961, 28: 187-196.
- [5] Vanmarcke E H. Properties of spectral moments with application to random vibration[J]. J. Eng. Mech. Div. Proc. ASCE, 1972, 98(EM2).
- [6] Chen J J, Duan B Y, Zeng Y G. Study on dynamic reliability analysis of the structures with multidegree-of-freedom[J]. Computers and Structures, 1997, 62(5): 877-881.
- [7] Kawano K, Venkataramana K. Dynamic response and reliability analysis of large offshore structures[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1999, 168: 255-272.
- [8] Spencer B F Jr, Elishakoff I. Reliability of uncertain linear and nonlinear systems[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1988, 114(1): 135-149.
- [9] 李杰,陈建兵.随机结构动力可靠度分析的概率密度演化方法[J]. 振动工程学报, 2004, 17(2): 121-125.

- [10] 林家浩,张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京:科学出版社,2004:42-184.
- [11] Y L Xu, W S Zhang, J M Ko, et al.. Pseudo-excitation method for vibration analysis of wind-excited structures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999,83: 443-454.
- [12] 陈贤川,赵阳,董石麟. 基于虚拟激励法的空间网格结构风致抖振响应分析[J]. 计算力学学报,2006,23(6):684-689.
- [13] Y L Xu, Q He, J M Ko. Dynamic response of damper-connected adjacent buildings under earthquake excitation[J]. Engineering Structures,1999,21:13-148.
- [14] 赵岩,林家浩,郭杏林. 桥梁滞变非线性随机地震响应分析[J]. 计算力学学报,2005,22(2):145-182.
- [15] 建筑抗震设计规范(GB50011·2001)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [16] 白国良,朱丽华. 基于现行抗震规范的 Kanai-Tajimi 模型参数研究[J]. 世界地震工程,2004,20(3): 114-118.
- [17] 薛素铎,王雪生,曹资. 基于新抗震规范的地震动随机模型参数研究[J]. 土木工程学报,2003,36(5):5-10.
- [18] 陈国兴,金永彬,宰金珉. 高层建筑随机地震反应的简捷计算[J]. 南京建筑工程学院学报,1999,(1):29-37.

(上接 230 页)

- [7] Lasserre C, Morel P H Gaudem Y, et al.. Post-glacial left slip-rate and past occurrence of $M>8$ earthquakes on the western Haiyuan fault (Gansu, China) [J]. J. Geophys. Res., 1999,104(B4):17633-17651.
- [8] Lasserre C, Tapponnier P, Gaudem Y, et al.. Fast late Pleistocene slip-rate on the Leng Long Ling segment of the Haiyuan fault, Qinghai, China[J]. J Geophys. Res., 2002,107(B11): ETG 4-1-4-15.
- [9] 袁道阳,刘百箴,吕太乙. 利用黄土剖面的古土壤年龄研究毛毛山断裂的滑动速率[J]. 地震地质,1997,19(1):1-7.
- [10] 何文贵,刘百箴,吕太乙,等. 老虎山断裂带的分段性研究[J]. 西北地震学报,1994,16(3):67-72.
- [11] 何文贵,刘百箴,袁道阳,等. 毛毛山断裂带晚第四纪活动特征[A]//海原断裂带研究(5)[G]. 北京:地震出版社,1996:63-77.
- [12] 何文贵,刘百箴,袁道阳,等. 冷龙岭活动断裂的滑动速率研究[J]. 西北地震学报,2000,22(1):91-96.
- [13] 袁道阳,张培震,刘百箴,等. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换[J]. 地质学报,2004,78(2):270-278.
- [14] 田勤俭,丁国瑜,申旭辉. 拉分盆地与海原断裂带新生代水平位移规模[J]. 中国地震,2001,17(2):167-175.
- [15] 王敏,沈正康,牛之俊,等. 现今中国大陆地壳运动与活动块体模型[J]. 中国科学(D辑),2003,33(增刊): 21-32.
- [16] 张希,江在森,王琪,等. 青藏块体东北缘弹性块体边界负位错反演与强震地点预测[J]. 地震学报,2005,27(6):622-628.
- [17] 陈兵,江在森,马文静,等. 青藏块体东北缘断层形变与中强地震[J]. 大地测量与地球动力学,2002,22(4):49-55.
- [18] 闵伟,张培震,邓起东,等. 海原活动断裂带破裂行为特征研究[J]. 地质论评,2001,47(1):75-81.
- [19] 张培震,闵伟,邓起东,等. 海原活动断裂带的古地震与强震复发规律[J]. 中国科学(D辑),2003,33(8):705-713.
- [20] Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1985,75(94): 1135-1154.
- [21] 甘卫军,程朋根,周德敏,等. 青藏高原东北缘主要活动断裂带 GPS 加密观测及结果分析[J]. 地震地质. 2005,27(2):177-187.
- [22] 郭晓,张元生,莘海亮,等. 祁连山中东段地区非弹性衰减系数、震源参数和场地相应研究[J]. 西北地震学报,2007,29(4):319-325.