

带有参数非确定性的单层厂房结构的地震响应

杜成斌¹, 苏擎柱¹, 曾国洪²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098 2. 湖南省凤滩水力发电厂, 湖南 沅陵 419021)

摘要 将材料参数非确定性和输入外荷载非确定性等的影响用结构的自振圆频率和响应的屈服位移的非确定性来表征, 采用 Monte-Carlo 模拟方法对自振圆频率和结构响应的屈服位移考虑为非确定性参数时结构的非线性最大位移响应、最大恢复力响应进行计算分析, 并对结构抗力与外荷载效应的相对比值对非线性结构系统可靠指标的影响进行初步研究. 结果表明, 非确定性参数对结构最大响应有显著影响, 不同的非确定性对结构响应的影响程度不同, 在非线性结构动力分析中区分各种非确定性因素的贡献是非常重要的.

关键词 非线性动力响应 非确定性 地震作用 Monte Carlo 模拟 可靠指标

中图分类号: TV223.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1980(2002)05-0075-04

在强地震区设计各种建筑物, 地震动力荷载常常起着控制作用. 由于地震荷载具有随机性, 其动力响应通常用随机振动的方法进行分析计算. 近年来, 许多研究者在该领域探索并提出许多有价值的成果^[1,2]. 这些研究成果对随机地震作用下结构可靠指标的计算有一定的参考意义. 当结构响应具有非线性时, 等价线性化方法常被用来计算其随机响应^[3]. 如果结构能被简化为单自由度这样的简单系统, 则分析可大大得到简化. 这种方法的结果通常依赖于系统的确定性参数如结构的自振圆频率、临界阻尼比和输入的地震地面运动的强度等. 一次二阶矩方法(FOSM)常用来计算结构随机问题的可靠指标^[4], 由于其极限状态函数是通过泰勒级数展开(取一次)并使之线性化得到的, 当系统为非线性时, 它很难处理非确定性参数对非线性响应的影响. 对于简单的非线性系统, 等价线性化方法在某些情况下可给出较合理的结果, 但对于带有非确定性参数的复杂非线性系统, 它的运用有一定的局限. Monte-Carlo 模拟方法是目前处理此类问题的最有效的手段之一^[5], 它完全从数值试验角度去求解结构的响应分布规律. 由于 Monte-Carlo 方法需要进行大量的模拟计算, 因此应努力提高其模拟效率. 本文采用 Monte-Carlo 法对带有非确定性参数的非线性系统的自振圆频率和最大屈服位移对系统最大响应的影响进行了研究, 结构的滞回非线性采用三次线性模型, 并对非确定性参数对结构可靠指标的影响进行了探讨.

1 分析模型和研究思路

众所周知, 地震作用下的结构动力响应可分解为许多主振型的叠加, 现行抗震规范的反应谱法地震荷载计算也是按每一个主振型进行的, 每一个主振型的分析类似一个广义单自由度系统的分析. 有时为了重点考察振动系统的基本特征, 也可将结构的主要动力特性简化为单自由度系统来表征. 为此, 本文以单层工业厂房结构受地震作用的响应分析为背景, 系统的非线性恢复力模型为三次线性形式. 图 1 为单层工业厂房结构的计算简图. 单层工业厂房结构为单自由度系统, 其控制方程为

$$\ddot{y} + 2\zeta_0\omega_0\dot{y} + k(\dot{y}, y) = -\ddot{u}_g(t)$$
$$2\zeta_0\omega_0 = c/m \quad \omega_0^2 = k_0/m$$

(1)

式中: $k(\dot{y}, y)$ ——具有三次线性特征的非线性恢复力函数; m, c, k_0 ——单层厂房结构的质量、阻尼和弹性阶段的刚度; ζ_0, ω_0 ——初始状态的临界阻尼比和结构的自振圆频率.

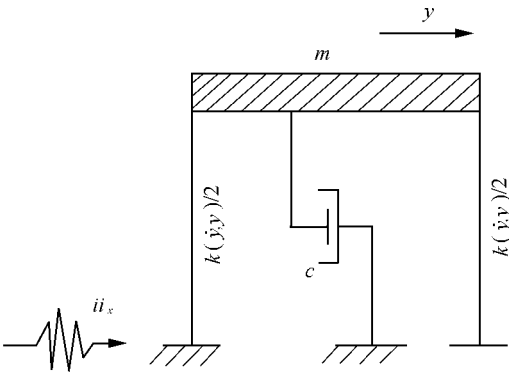


图1 单层工业厂房计算简图

本文中假定结构自振圆频率 ω_0 和最大屈服位移 y_y 为非确定性参数,二者可表示成

$$\omega_0 = \bar{\omega}_0(1.0 + \epsilon_1 \delta_1) \tag{2}$$

$$y_y = \bar{y}_y(1.0 + \epsilon_2 \delta_2) \tag{3}$$

式中 $\bar{\omega}_0, \bar{y}_y$ ——结构自振圆频率和最大屈服位移的均值;
 ϵ_1, ϵ_2 ——具有正态概率分布的随机变量; δ_1, δ_2 ——二变量的变异系数. 给定一个随机变量的确定值,则与随机变量和变异系数有关的最大响应即可确定:

$$R_{j\max} = |R(\epsilon_i, \delta_i)|_{\max} \tag{4}$$

$R_{j\max}$ 表示最大位移响应或最大恢复力响应等,可通过 MCS 法求出最大响应的均值和方差. 结构的非线性地震响应计算在结构抗震可靠度计算中起着非常重要的作用. 可靠指标是评价结构安全度的一个重要指标. 为了计算可靠指标,首先必须给出与结构抗力和动荷载效应有关的极限状态函数. 由此也可研究非确定性因素对可靠指标的影响. 对于属于正态分布的两个随机变量,其可靠指标可表示为

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \tag{5}$$

式中 $\bar{R}, \bar{S}$ ——结构抗力和地震荷载作用效应的均值; σ_R, σ_S —— R, S 的标准方差. 可以通过改变 $\bar{R}/\bar{S}$ 比值来研究非确定量对可靠指标的影响.

2 结果分析与讨论

研究中采用人工地震波,其波形见图 2. 加速度最大峰值为 500 cm/s^2 ,当地面加速度峰值在 200 cm/s^2 以下时,系统为线弹性响应. 结构自振圆频率和屈服位移的变异系数均取 5%.

图 3 给出了两个典型样本的位移响应时程. 由图 3 可知,自振圆频率的非确定性对位移响应的影响比屈服位移的影响要大一些.

图 4 和图 5 给出了用 MCS 法求出的最大位移响应和最

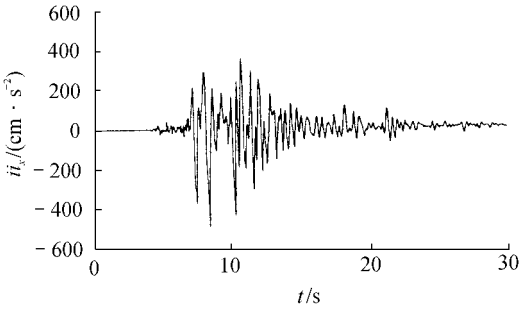


图2 地面输入加速度

Fig.2 Seismic acceleration adopted in the study

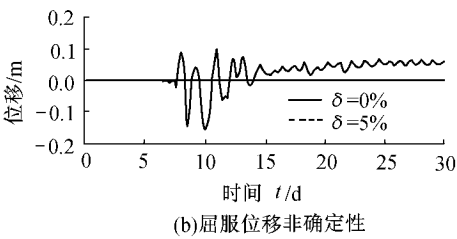
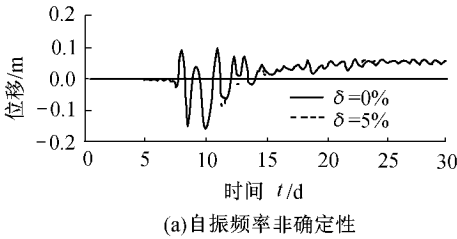


图3 非线性位移响应时程

Fig.3 Time histories of nonlinear displacement response

大恢复力响应的概率密度. 线弹性状态下结构自振周期为 0.5 s , 临界阻尼比取 5%, 由图 4 可知, 考虑自振圆频率不确定性比考虑屈服位移不确定性的最大位移响应的范围要窄. 由图 5 可知, 最大恢复力分布的概率密度函数与正态分布结果很类似, 但两种不确定性对恢复力统计结果的影响有较大差异, 见图 5.

图 6 和图 7 给出了最大位移响应和恢复力响应的累积分布概率密度函数. 其中每种变量的变异系数取 5%. 比较起来, 无论最大位移还是最大恢复力, 自振圆频率的不确定性对累积分布概率密度函数的影响较小, 但屈服位移给出的累积分布概率密度函数具有较大的变异(图 6(b)).

图 8 给出了非确定性参数对结构可靠指标的影响, 其中变异系数仍取 5%. 由图 8 可知, 可靠指标随比值

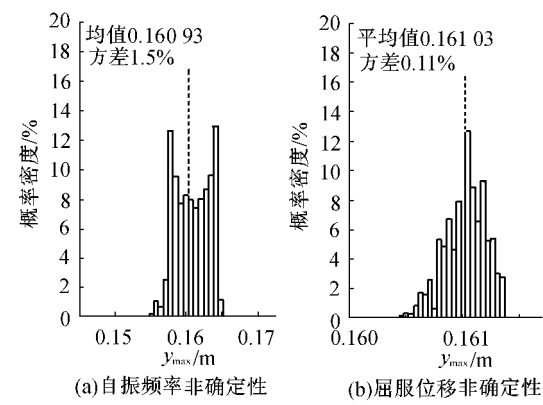


图 4 考虑非确定性时最大位移概率密度分布

Fig.4 Histograms of maximum displacement for uncertainty

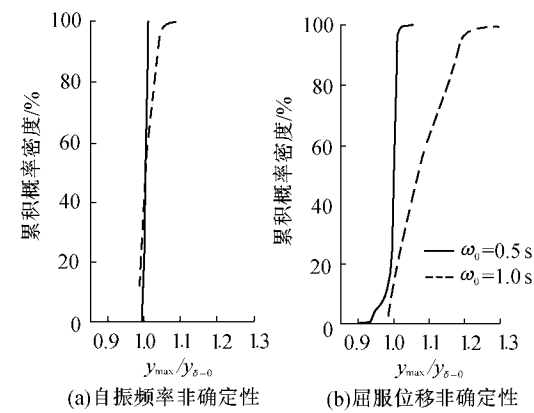


图 6 最大位移的累积分布函数

Fig.6 Cumulative distribution functions of maximum displacement

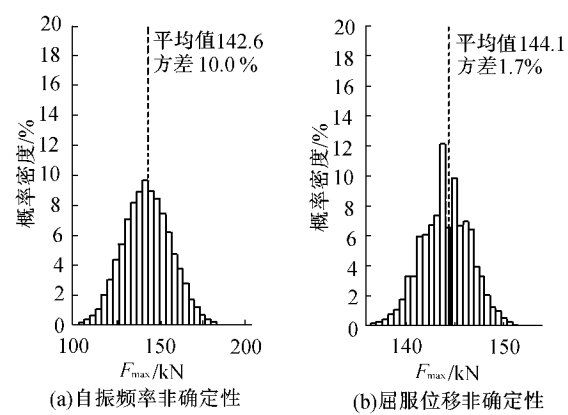


图 5 考虑非确定性时最大恢复力概率密度分布

Fig.5 Histograms of restoring force for uncertainty

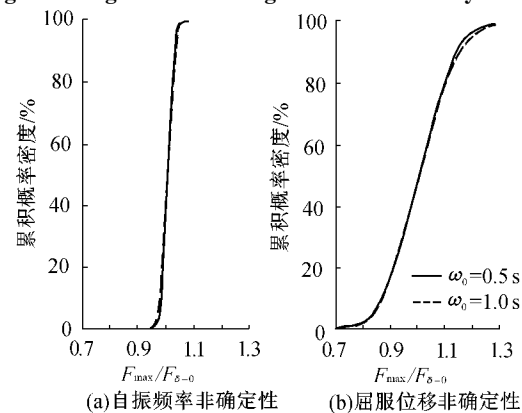


图 7 最大恢复力的累积分布函数

Fig.7 Cumulative distribution functions of maximum restoring forces

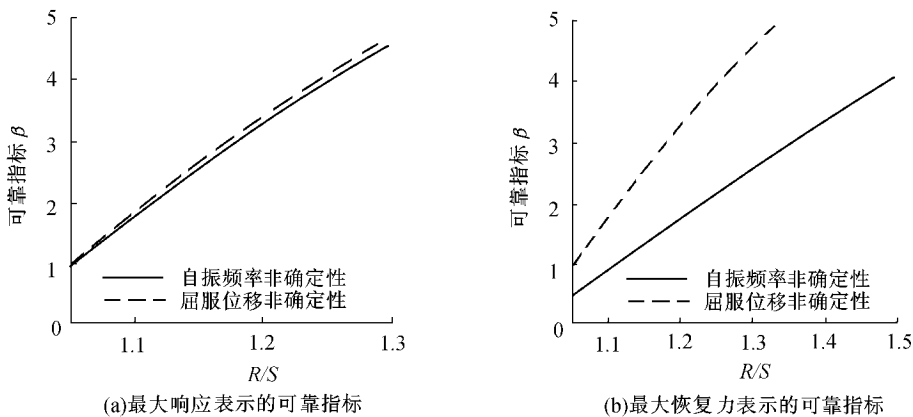


图 8 非线性动力响应的可靠指标

Fig.8 Reliability index of nonlinear dynamic response

的增大而增大,而且不同的非确定性参数对不同意义下的可靠指标的影响有较大差别.

3 结 论

- a. 对于非线性系统的动力响应,区分各种非确定性的影响是非常重要的.
- b. MCS 法是求解非确定性系统非线性动力响应最有效、最简便的方法.
- c. 自振圆频率的不确定性和屈服位移的不确定性对非线性系统动力响应有重要影响,不同的非确定性参数对不同意义下可靠指标的影响有较大差别.

参考文献：

- [1] Cheng R H ,Wen Y K. Reliability of uncertain nonlinear trusses under random excitation[J] . J E M,1994,120 :733 ~ 747.
- [2] Er Guo-Kang . Multi-gaussian closure method for randomly excited non-linear systems[J] . Int J Non-Linear Mech,1997,33 (2) :201 ~ 214.
- [3] 杜成斌,赵光恒. 求解非线性随机振动的一种新的加权等价线性化方法[J] . 工程力学,1992,9(2) :12 ~ 22.
- [4] Marek P. Sensitivity analysis simulation based reliability assessment of structure [A] . In : Shiraish, et al, eds. Structural safety and reliability [C] . Balkema : Rotterdam,1998. 715 ~ 721.
- [5] Pradlwarter H J, Schuë ller G I. On advanced Monte Carlo simulation procedures in stochastic structural dynamics[J] . Int J Non-Linear Mech, 1997,32(4) :735 ~ 744.

Seismic response of single story structures with uncertain parameters

DU Cheng-bin¹, SU Qing-zhu¹, ZENG Guo-hong²

- (1. College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098, China ;
2. Fengtan Hydropower Plant of Hunan Province , Yuanling 419021, China)

Abstract : A study is performed on the nonlinear seismic response of structures with uncertain parameters subjected to severe seismic loads. The uncertainty of structural parameters and input loads is expressed in terms of the uncertainty of the natural frequency and yield displacement of structures. The uncertain effects on the maximum displacement response and maximum restoring force are evaluated with the Monte Carlo simulation method, and the effect of the ratio of the structural resistance to external load effect on the reliability index of nonlinear structural systems is analyzed. It is indicated that the uncertainty of parameters plays a significant role in the evaluation of maximum response, and it is also shown that different degrees of uncertainty have different effects, and that it is very important to clarify the contribution of each uncertain factor in the analysis of nonlinear dynamic responses.

Key words : nonlinear dynamic response ; uncertainty ; seismic action ; MCS method ; reliability index