

钢制安全壳的抗震可靠性计算研究

李晓蒙

(国核华清(北京)核电技术研发中心有限公司, 北京 102209)

摘要: 随着我国工业、民生对电能日益增高的要求,核电站也朝着大功率方向发展,而体积扩大后的钢制安全壳能否抵御强震作用,是我们所关注的焦点。目前,安全壳的抗震分析多基于确定论方法,而实际工程中,结构的尺寸、材料参数等往往具有随机性,并且地震载荷本身就具有复杂的统计性变化。因此,传统的确定论方法难以验证结构的安全性。文章以大功率钢制安全壳为工程背景,基于随机地震动模型建立了有不同发生保证概率的随机地震反应谱,根据我国现行的抗震规范确定了随机地震动模型参数。分别从基于确定性地震强度和基于确定性发生保证概率两方面进行抗震可靠性分析,最终通过蒙特卡洛模拟得到了安全壳的敏感性参数。研究成果可为今后钢制安全壳的抗震可靠性设计提供参考与借鉴。

关键词: 钢制安全壳; 可靠性; 抗震分析

中图分类号: TM756.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)03-0079-06

Study on the Seismic Reliability of Steel Containment

LI Xiaomeng

(State Nuclear Power Technology Corporation Research & Development Center Co., Ltd., Beijing 102209)

Abstract: In recent years, more and more high-power nuclear power plants were constructed in China to meet the increasing needs of electricity. The volume of the containments in nuclear power plants increases with the increase of the power level. Therefore, assessing the ability of steel containment to resist strong earthquakes has attracted more attention recently. So far, the most seismic analysis methods are based on deterministic methods. In fact, the parameters in the engineering projects, such as geometry, material and load value, are usually uncertain. The seismic loads also have a complex statistical change, which is one of the natural properties of seismic wave. Therefore, the traditional deterministic methods are difficult to verify the safety of the structure. In this article, the seismic reliability of the large steel containment was studied. The random seismic response spectrum under different probabilities was established according to the stationary stochastic model. The parameters of the stationary stochastic model were obtained from Chinese seismic code. Two methods of seismic reliability analysis were considered. One is under deterministic seismic intensity, the other is under the certainty probabilities. Finally, the sensitivity parameters were calculated based on the Monte Carlo method. This article will provide some references for the seismic reliability design of the steel containment.

Key words: steel containment; reliability; seismic analysis

压水堆核电厂以往大多采用混凝土安全壳,而且只承担安全屏障功能。在第三代核电厂 AP1000 设计中增加了一层钢制安全壳,它既承担

安全屏障功能,又是非能动冷却系统的重要载出热量环节。然而,目前国内对于这种安全壳的设计以及扩容后的设计经验还很缺乏,还需要投入大量的精力进行研究。

另外,对于核电站设备的抗震分析大多基于确定论方法,而工程实践中,不可避免的会出现各种随机因素,如结构的物理参数、几何尺寸的随机性,载荷的随机性等。显然,常规的确定性结构在确定性载荷作用下的分析模型和方法已经不适

收稿日期: 2016-07-22

基金项目: 国家大型先进压水堆核电站重大专项关键设备设计分析技术研究课题(2012ZX06004-012)

作者简介: 李晓蒙(1988),女,北京市人,工程师,硕士,主要从事核反应堆结构力学计算和流致振动试验(e-mail) lxmcau@126.com。

用^[1]。为了向核电站设计、施工单位提供更为可信、真实的数据,必须借助基于概率论的可靠性分析方法对核电站关键设备进行研究。

本文基于随机地震动模型,利用现行抗震规范获得部分模型参数,建立了随机地震反应谱,并应用于大容积钢制安全壳的抗震可靠性分析中。同时还利用蒙特卡洛模拟法对钢制安全壳进行了可靠性及敏感性计算。

1 随机地震动模型及其参数

1.1 随机地震动的平稳随机模型

目前,一般将地震动加速度过程视为平稳随机过程,则可用功率谱函数来描述结构随机地震反应计算的输入模型。可通过假定功率谱模型,再根据地震动参数确定模型中待定参数的方法将地震动基本参数转换成相应的功率谱^[2]。

自1947年Housner^[3]首次提出地震动加速度过程的白噪声模型至今,国内外学者在白噪声模型的基础上已提出了多种地震动模型。如过滤白噪声模型即金井清谱^[3]、过滤有色白噪声模型^[4]等。本文选取另外一种杜修力模型^[5],这种模型考虑震源机制,将地震学中低频模拟方法和工程学中高频模拟方法相结合,其功率谱密度为:

$$S_A(\omega) = \frac{1 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2} \cdot \frac{1}{1 + (D\omega)^2} \frac{\omega^4}{(\omega^2 + \omega_0^2)} S_0 \quad (1)$$

式中: S_0 为基岩地震波的功率谱密度,大小要根据地震强度来定; ω_g 为场地土卓越频率; ξ_g 为场地土阻尼比; D 为反映基岩特性的谱参数,一般取0.04 s; ω_0 为低频拐角频率, $\omega_0 = 2\pi/T_r$; T_r 为断层的破裂持时, T_r 与震级 M 的统计关系:

$$\lg T_r = d_1 + d_2 M \quad (2)$$

式中: $d_1 = -1.325$, $d_2 = 0.353$ 。该模型综合了两种模型的优点,而且反映了人们对震源机制的理解。

1.2 场地参数

根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306 - 2015)^[6],可以给出考虑设计特征周期分区的各类场地特征卓越频率和阻尼比如表1所示。

1.3 地震持时

地震持时不仅对结构的累积破坏有很大的影响,而且与地震反应的最大值分布密切相关。根据

国内外大量强震记录进行统计回归分析,与震级、震中距和场地类别有关的按90%能量持时定义的地震动持时 T_s 的回归公式见式(3)^[7]。

表1 场地土动力特性

Tab. 1 Dynamic characteristics of site soil

场地土类型	I	II	III	IV
	基岩	中硬	中软	软弱
1区	25.13	17.95	13.96	9.67
ω_g	2区	20.94	15.71	11.42
	3区	17.95	13.96	9.67
ξ_g	/	0.64	0.72	0.80
		0.72	0.80	0.90

$$\lg T_s = a_1 + a_2 M + a_3 \lg(R + 30) + a_4 T_g \quad (3)$$

式中: M 是震级、 R 是震中距, T_g 是场地土卓越周期, $a_1 \sim a_4$ 是回归系数,值如表2所示。

表2 回归系数

Tab. 2 Regression coefficients

回归系数	a_1	a_2	a_3	a_4
水平方向	-1.555	0.165	0.831	0.148
竖直方向	-1.340	0.104	0.982	0.184

1.4 谱强度因子 S_0

谱强度因子 S_0 与地面最大加速度均值之间的关系为^[8]:

$$S_0 = \frac{E(A_m)^2}{r^2 \beta_A} \quad (4)$$

$$\beta_A = \frac{4\xi_g^2 \omega_0 + 2\xi_g \omega_g + \omega_0}{\omega_0^2 + 2\xi_g \omega_g \omega_0 + \omega_0^2} \cdot \frac{\pi \omega_g \omega_0}{2\xi_g} \quad (5)$$

$$r = \sqrt{2 \ln(v_A T_d)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(v_A T_d)}} \quad (6)$$

$$v_A = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\omega_g \omega_0 (8\xi_g^3 \omega_0 + 4\xi_g^2 \omega_g + \omega_0)}{4\xi_g^2 \omega_0 + 2\xi_g \omega_g + \omega_0}} \quad (7)$$

式中: r 为峰值因子; T_d 为固有周期; A_m 为地面最大加速度均值,取中国地震动参数区划图中的值。

2 随机地震反应谱的建立

2.1 随机地震作用下的最大反应分布

根据反应谱定义,单质点振子在地震作用下的最大反应为^[9]:

$$u_{\max}(T, \zeta) = \max[u(t, T, \zeta)] \quad (8)$$

式中: ζ 和 T 分别是振子阻尼比和固有周期; T_s 是地震持续时间。基于随机振动理论和泊松近似,在

持续时间 τ 内, 谱值 $u_{\max}(T, \zeta)$ 不超过 u 的概率分布函数表达式为:

$$F_{ym}(u) = \exp\left[-v\tau \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{u^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \quad (9)$$

最大反应的均值和标准差分别为:

$$\bar{y}_m = \left(\sqrt{2\ln v\tau} + \frac{0.5772}{\sqrt{2\ln v\tau}}\right)\sigma_y \quad (10)$$

$$\sigma_{ym} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \frac{1}{\sqrt{2\ln v\tau}}\sigma_y \quad (11)$$

式中: v 是反应过程 $y(t)$ 向上和向下的期望越零率; ω, T 分别为系统的固有圆频率和周期; σ_y 是随机地震反应过程 $u(t, T, \zeta)$ 的均方差。

$$\sigma_y^2 = \frac{\pi\omega S_A(\omega)f^2(t)}{4\zeta} [1 - \exp(-2\zeta\omega t)] \quad (12)$$

2.2 随机地震反应谱

根据上面 $u_{\max}(T, \zeta)$ 的概率分布函数公式(8) 可得到最大反应发生概率为 P 的概率地震反应谱 $u_{\max}^P(T, \zeta)$ 为^[10]:

$$u_{\max}^P(T, \zeta) = \gamma_P(T)\sigma_y \quad (13)$$

式中: $\gamma_P(T)$ 称为概率峰值因子, 按下式计算:

$$\gamma_P(T) = \sqrt{2\ln(2T_s/T) - 2\ln\ln(1/P)} \quad (14)$$

随机地震反应谱的均值成为平均地震反应谱, 其计算式为:

$$R(T, \zeta) = \left(\sqrt{2\ln(2T_s/T)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2\ln(2T_s/T)}}\right) \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 MS_A(2\pi/T)}{2\zeta T}} \quad (15)$$

图1为基本加速度为0.3g的各类场地第2特征周期分组^[6]的平均反应谱和15%、50%、85%的概率反应谱。从图中可以看出, 平均反应谱略大于50%的概率反应谱, 但两者十分接近。据国内外大量试验研究^[10], 平均反应谱大概是57%的概率反应谱。而《核电厂抗震设计规范》中的反应谱^[12]的概率保证在局部区段低于保证概率为50%的反应谱, 说明低估了地震对结构的影响。

3 基于随机地震反应谱的抗震可靠性分析

3.1 有限元模型

文章以大容积钢制安全壳为研究对象, 建立三维模型。采用三维壳单元 Shell181 来模拟安全壳的封头和圆筒段部分; 三维实体单元 Solid185 来模拟钢制安全壳的环吊梁及加强肋部分。壳单元与实体

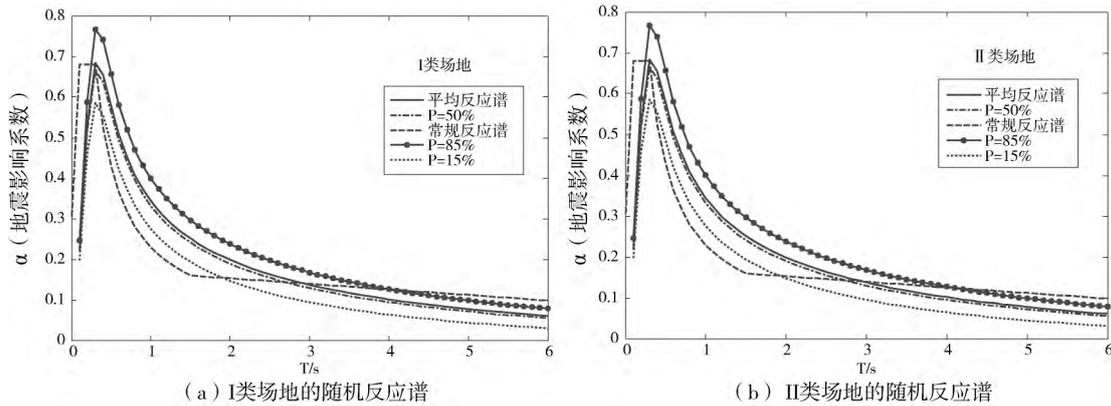


图1 平均加速度反应谱与不同概率反应谱的对比 ($a_g=0.3g$, 第2组)

Fig. 1 Average acceleration response spectrum comparison with response spectrum of different probabilities

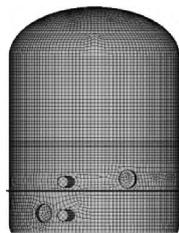


图2 钢制安全壳有限元模型

Fig. 2 Finite element model of steel containment vessel

表3 附加质量表

Tab. 3 Additional mass

设备	标高/m	单位附加质量/(kg·m ⁻²)
空气导板	▽ 46~83	96.529
通道线路	▽ 50~53	301.620
混凝土加强肋	▽ 40	172.855
设备闸门	▽ 43	503.992
人员闸门	▽ 42	601.924

单元通过 MEARGE 操作实现共结点。模型共划分 21 051 个单元, 13 117 个结点。图 2 为钢制安全壳有限元模型。

通过定义模型的表面附加质量来模拟加强肋、环吊梁、空气导流板、通道管线、闸门等结构的重量, 具体附件质量及位置如表 3 所示。模型边界条件为底部固定约束。

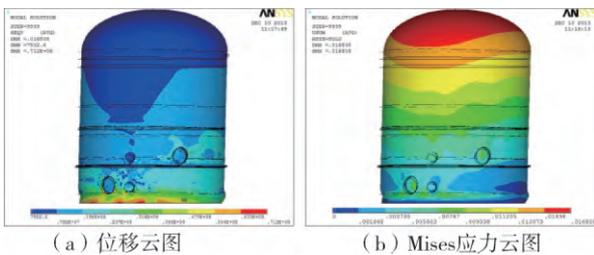
表 4 结构自振频率和振型参与系数(X方向)

Tab. 4 Structural natural frequencies and mode participation coefficient

阶数	频率/Hz	周期/s	振型参与系数	比率
1	4.734	0.211	1 644.9	1.000
2	4.735	0.212	-822.55	0.500
3	5.331	0.188	-10.472	0.006
4	5.334	0.187	-1.074	0.000
5	5.417	0.185	-9.136	0.006
6	5.420	0.184	-2.845	0.002
7	5.433	0.183	5.283	0.003
8	5.435	0.182	-8.076	0.005
9	5.675	0.176	-0.155	0.000
10	5.677	0.175	4.570	0.003

3.2 抗震分析

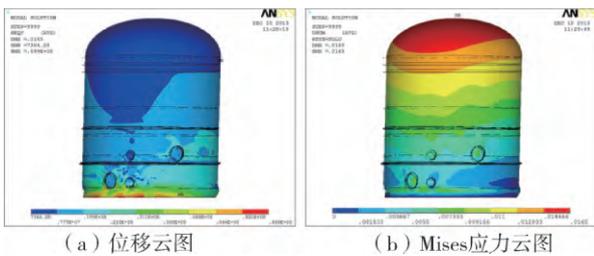
对钢制安全壳进行不同发生保证概率的反应谱计算, 即基于确定性地震强度下的条件抗震可靠度分析。图 3 ~ 图 7 为在不同保证概率的反应谱下钢制安全壳的位移及 Mises 应力云图。



(a) 位移云图 (b) Mises应力云图

图 3 平均地震反应谱下的结构响应图

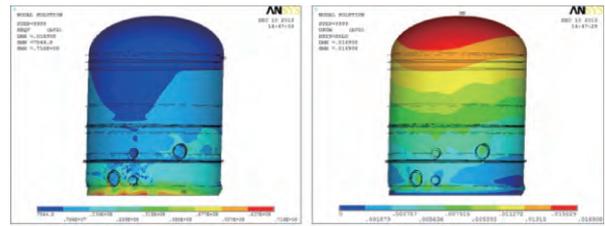
Fig. 3 The seismic response of the steel containment with the average response spectrum



(a) 位移云图 (b) Mises应力云图

图 4 保证概率 $P=50\%$ 反应谱下的结构响应图

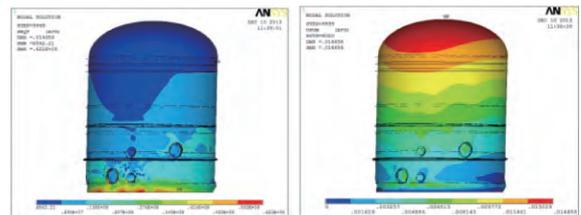
Fig. 4 The seismic response of the steel containment with the $P=50\%$ response spectrum



(a) 位移云图 (b) Mises应力云图

图 5 规范反应谱下的结构响应图

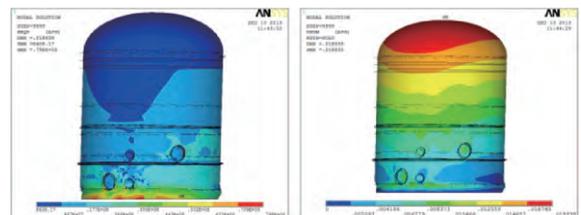
Fig. 5 The seismic response of the steel containment with standard response spectrum



(a) 位移云图 (b) Mises应力云图

图 6 保证概率 $P=15\%$ 反应谱下的结构响应图

Fig. 6 The seismic response of the steel containment with the $P=15\%$ response spectrum



(a) 位移云图 (b) Mises应力云图

图 7 保证概率 $P=85\%$ 反应谱下的结构响应图

Fig. 7 The seismic response of the steel containment with the $P=85\%$ response spectrum

结果显示, 结构抗震分析后的位移、应力图的分布都基本相同。最大位移出现在上封头处, 最大应力出现在上封顶部。另外采用规范反应谱、平均反应谱及保证概率为 50% 的反应谱计算出的结构位移和应力较为接近, 但规范反应谱的计算结果略大于平均反应谱结果, 而保证概率为 50% 的反应谱计算结果为三者中最小。而用保证概率为 15% 和 85% 两种反应谱计算出的结果则与其他三种相差较多, 保证概率越大, 结构的抗震响应越大。因此, 对核电厂安全壳的抗震分析必须针对具体的厂址、统计搜集当地的地震历史, 充分考虑当地的地震频率, 这样才能建立真实的反应谱, 得出可靠性高的结果。

表 5 计算结果对比

Tab. 5 The comparison of the calculation

随机地震 反应谱	$P = 15\%$	$P = 85\%$	$P = 50\%$	平均 反应谱	规范 反应谱
结构位移/mm	14.6	18.8	16.5	16.8	16.9
Mises 应力/MPa	62.1	79.8	69.9	71.2	71.6

4 基于蒙特卡洛模拟的抗震可靠性分析

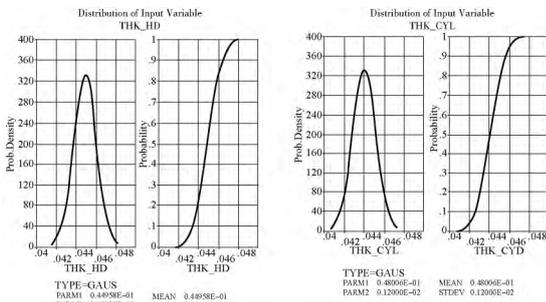
4.1 分析步骤

本章基于一定期限对结构的抗震性能进行可靠度分析,即考察一定期限内所有地震发生的可能性进行全概率分析。将结构几何、材料、地震特征参数等作为随机输入变量,定义最大位移及最大 Mises 应力为状态变量,结构总重量为随机输出变量,借助有限元软件的蒙特卡洛模拟进行抗震可靠性分析。

分析的主要步骤有^[11]: (1) 创建 PDS 分析文件,即仿真循环 mac 文件; (2) 运行分析文件,执行初始化的分析过程; (3) 定义输入输出参数及其概率分布; (4) 选择抽样方法,确定抽样点数; (5) 执行概率设计循环仿真计算; (6) 敏感性参数判断。

4.2 计算结果

通过观察随机参数的抽样过程及样本值的均值、标准差等,可以看出程序基本按照所假定的参数概率分布进行抽样,样本均值、标准差逐步趋向平稳,说明抽样次数足够,如图 8~图 9 所示。

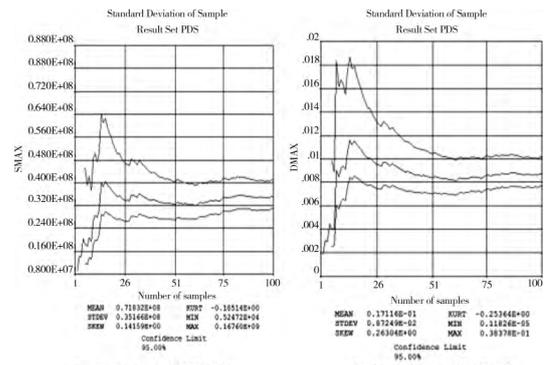


(a) 上封头壁厚概率分布图 (b) 圆筒段壁厚概率分布图

图 8 随机输入参数的概率分布图

Fig. 8 Probability distribution of the random input parameters

通过表 6 可以看出不管是最大位移还是最大 Mises 应力值均没有超过设计范围。因此在假设的随机变量分布及平均地震反应谱作用下,根据可靠性计算,钢制安全壳最大位移小于 18 mm 的概率是 99.4%,最大 Mises 应力小于 60 MPa 的概率是



(a) SMAX标准差 (b) DMAX标准差

图 9 状态变量的标准差

Fig. 9 Standard deviation of state variables and output parameters

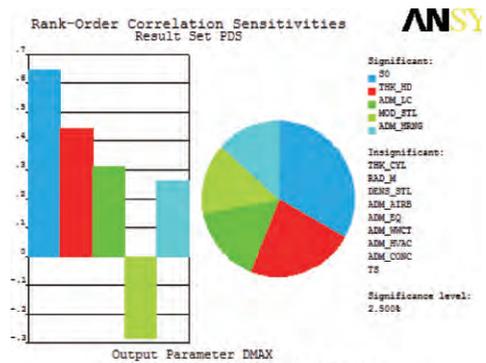
99.7%, 结构是可靠的。

表 6 可靠性分析结果

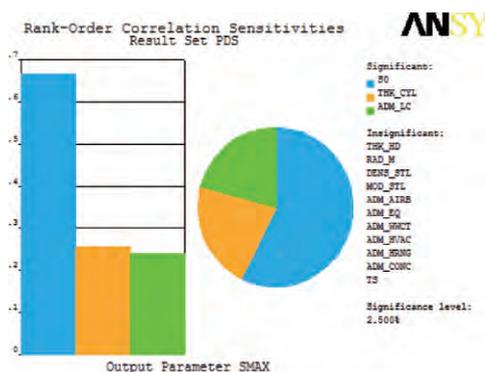
Tab. 6 The results of the reliability analysis

输出随机变量	最大值	最小值	均值
DMAX/mm	38.3	1.18	17.1
SMAX/MPa	167.6	0.005	71.8
WT/10 ⁶ kg	7.57	7.17	7.39

对钢制安全壳的 16 个输入随机变量进行敏感性分析,得到的结果如图 10 所示:



(a) DMAX的敏感性分析比例图



(b) SMAX的敏感性分析比例图

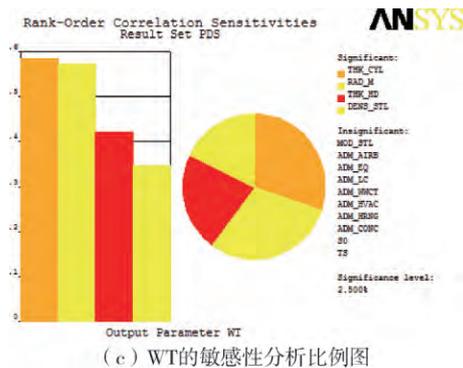


图10 敏感性参数识别图

Fig. 10 Sensitivity parameter identification chart

可以看出对结构最大位移量敏感的参数有5个,其中影响最大的是地震谱强度因子。对结构最大Mises应力敏感的参数有2个,分别是地震谱强度因子以及人员操作平台的附加荷载。对结构总体质量敏感的参数分别为圆柱段壁厚等。

通过上述敏感性分析可以看出多种随机参数对输出随机变量均有不同程度的影响,其中地震谱强度因子对结构抗震可靠性影响最大。除了谱强度因子(地震强度)的影响外,结构尺寸参数、附加质量的影响也较大,因此可以对结构进行优化设计,提高可靠性。

5 结论

本文主要以大容积钢制安全壳为研究背景,分别从基于确定性地震载荷及基于确定性保证概率两方面出发,对其抗震可靠性进行了研究。获得了具有不同发生保证概率的随机地震反应谱,并利用有限元软件的蒙特卡洛模拟方法进行了敏感性参数计算。本文从条件概率以及全概率的角度所提出的两种可靠性分析方法,可为今后我国的钢制安全壳抗震可靠性设计提供参考。

参考文献:

- [1] 孙广俊,李鸿晶. 平稳随机地震地面运动过程模型及其统计特征[J]. 地震工程与工程振动,2004,6(24): 21-26.
SUN G J, LI H J. Stationary models of random earthquake ground motion and their statistical properties [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 6(24): 21-26.
- [2] Housner G W. Characteristics of strong motion earthquakes [J]. Bull. of Seism. Soc. Of Am., 1947, 37(1): 19-31.
- [3] Tajimi H. A statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake [A]. 2nd ed. WCEE, Tokyo, Japan, 1960.
- [4] 欧进萍,牛荻涛,杜修力. 设计用随机地震动的模型及其参数确定 [J]. 地震工程与工程振动,1991,11(3): 45-54.
OU J P, NIU D T, DU X L. Random earthquake ground motion model and its parameter determination used in a seismic design [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1991, 11(3): 45-54.
- [5] 杜修力,胡晓,陈原群. 强震地运动随机过程模拟 [J]. 地震学报,1995,17(1): 103-109.
DU X L, HU X, CHEN Y Q. The simulation of random earthquake ground motion [J]. ACTA Seismologica Sinica, 1995, 17(1): 103-109.
- [6] GB 18306-2015, 中国地震动参数区划图 [S].
- [7] 欧进萍,刘会仪. 基于随机地震动模型的结构随机地震反应谱及其应用 [J]. 地震工程与工程振动,1994,14(1): 14-22.
OU J P, LIU H Y. Random seismic response spectrum and its application based on the random seismic ground motion [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 1994, 14(1): 14-22.
- [8] 洪峰,江近仁,李玉亭. 地震地面运动的功率谱模型及其参数的确定 [J]. 地震工程与工程振动,1994,14(2): 46-52.
HONG F, JIANG J R, LI Y T. Determination of the model of earthquake ground motion power spectrum and its parameters [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1994, 14(2): 46-52.
- [9] 王亚勇,李虹. 考虑场地特征的强震地面运动参数的统计分析 [J]. 地震工程与工程振动,1986,6(3): 11-19.
WANG Y Y, LI H. Statistical analysis of the seismic ground motion parameters considering with the site characterization [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 1986, 6(3): 11-19.
- [10] 刘会仪. 结构随机地震反应谱理论与应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑工程学院,1993.
- [11] 叶勇,郝艳华,张昌汉. 基于ANSYS的结构可靠性分析 [J]. 机械工程与自动化,2004,12(6): 63-66.
YE Y, HAO Y H, ZHANG C H. Structure reliability analysis in ANSYS [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2004, 12(6): 63-66.
- [12] GB 50267-1997. 核电厂抗震设计规范 [S].

(责任编辑 林希平)