

基于随机模拟一致危险性谱的核电厂抗震性能分析

张学明¹, 闫维明^{1,*}, 何浩祥¹, 孙运轮², 宋林琳¹, 陈适才¹

(1. 北京工业大学 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124;

2. 中核能源科技有限公司, 北京 100193)

摘要:为改善概率地震危险性分析对震源传播特性考虑的不足, 提出采用随机模拟与概率地震危险性分析结合的方法, 充分考虑反应谱生成中震源机制、传播路径和场地效应等影响, 生成更为精确的一致危险性谱。结合核电厂具体场地条件对场地近两千年的历史地震进行模拟, 并生成同一超越概率下的一致危险性谱(UHS)。为了比较已有的厂址谱(SL-2)和安评报告中的UHS及美国RG1.60谱所生成的地震动对结构抗震性能的影响, 以某核电结构为例, 建立三维有限元模型, 进行动力时程分析。结果表明: 不同反应谱对结构的动力响应差别较大, UHS与SL-2对结构的响应较为接近, 且略大于SL-2, 但小于美国RG1.60谱。基于随机模拟方法生成的一致危险性谱可为核电厂抗震设计提供参考。

关键词:地震动模拟; 一致危险性谱; 概率地震危险性分析; 核电厂抗震

中图分类号: TL48 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2018)08-1459-09

doi: 10.7538/yzk.2017.youxian.0720

Seismic Performance Analysis in Nuclear Power Plant Based on Stochastic Simulation Uniform Hazard Spectrum

ZHANG Xueming¹, YAN Weiming^{1,*}, HE Haoxiang¹, SUN Yunlun²,
SONG Linlin¹, CHEN Shicai¹

(1. *Beijing Key Lab of Earthquake Engineering and Structural Retrofit,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;*

2. *Chinergy Co., Ltd., Beijing 100193, China*)

Abstract: In order to consider the propagation characteristics of the source in the probabilistic seismic hazard analysis, the method of combining stochastic simulation with probabilistic seismic hazard analysis was proposed, considering the effect of source mechanism, path and site effect, and could get more accurate uniform hazard spectrum (UHS). A method to simulate the historical earthquake in the site-specific of the nuclear power plant (NPP) and develop the UHS with an equal rate of being exceeded was proposed. To compare the NPP seismic performance of different ground motions generated by existing site spectrum (SL-2), the UHS generated by the safety evaluation report

收稿日期: 2017-11-21; 修回日期: 2018-01-08

基金项目: 国家科技重大专项大型先进压水堆及高温气冷堆核电站项目资助(2014ZX0690201)

作者简介: 张学明(1988—), 男(满族), 河北围场人, 博士研究生, 从事核电厂减隔震及安全性评价研究

* 通信作者: 闫维明, E-mail: yanwm@bjut.edu.cn

网络出版时间: 2018-04-09; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20180408.1501.008.html>

and the US RG1.60 spectrum, three-dimensional finite element model was created to dynamic analysis. The results show that the response of different spectra to the structure is quite different. The response of UHS is closer to SL-2 and slightly larger than the SL-2, but UHS is less than US RG1.60 spectrum. The UHS based on stochastic simulation method can provide a reference for the seismic design of NPP.

Key words: ground motion simulation; uniform hazard spectrum; probabilistic seismic hazard analysis; nuclear power plant earthquake

对于重大工程,科学合理地进行抗震设防一直是设计关注的重大技术问题之一^[1]。随着世界上近年大地震的频繁发生及核电厂抗震安全的特殊性要求,核电设计谱的理论及确定方法等问题得到更多的关注。美国核管理委员会在1973年制定的Regulatory Guide 1.60(简称RG1.60)^[2]设计谱在核电厂设计中得到广泛应用,但其无法反映特定场地的地震动特点,且过于保守。2007年推出的Regulatory Guide 1.208^[3]采用概率地震危险性分析的方法获得特定场地的一致危险性谱,使具有不同周期的结构和系统所受到的地震加速度均具有相同的目标概率水准,因此,就当前核电厂等重大工程如何通过合理的概率地震危险性分析,获得一致危险性谱指导工程设计,将是未来反应谱领域的重点和发展方向。

我国进行概率地震危险性分析始于对二滩电站的地震危险性分析^[4]。周克森等^[5]综合地震活动时空不均匀性及不确定性的因素,提出地震危险性分析多维不确定性的符合概率模型。胡聿贤^[6]通过中长期地震预测与地震危险性分析方法的结合,提出了地震分析的综合概率法。然而,目前我国在核电厂的地震动安全性评价报告中,基岩地震动衰减关系一般采用胡聿贤等^[7]提出的缺乏强震资料区地震动参数确定的转换方法,该方法的优点在于简单、便于应用,但也存在震源和传播介质特性考虑不够充分的问题^[8]。

强地面运动随机模拟方法能较为客观地将指定地区的震源特性、传播路径等影响充分考虑,且对强震资料数量要求不高,适用于缺乏强震记录的国家 and 地区。Atkinson^[9]在1984年用随机模拟方法估计了加拿大的地震动衰减关系,并用该方法在2006年得到北美东部地区场地运动预测方程^[10]。姜慧^[8]利用该方法对厚

覆盖土层的场地效应进行了研究,对该方法在我国地震工程中的应用提供一些指导意义。

综上,鉴于我国缺乏强震记录,在一致危险性谱的生成中对地震动的传播和衰减考虑比较简单的不足,本文力求引入强地面随机模拟的方法生成地震动,在此基础上合成一致危险性谱,并采用有限元模拟进行核电结构的动力分析,探讨基于随机模拟一致危险性谱在核电抗震分析中的可行性。

1 随机模拟方法

随机模拟方法是一种半经验、半理论的方法,其广泛应用于模拟工程上所关注的频率范围内的场地运动,在频域内,强地面运动随机模拟方法的场地地震动傅里叶幅值谱 Y 通常受震源机制、地震波传播路径、场地效应等影响,简化为下式^[11]:

$$Y(M_0, R, f) = E(M_0, f)P(R, f)G(f) \quad (1)$$

式中: f 为频率; R 为震源距; M_0 为地震矩; $E(M_0, f)$ 为震源机制; $P(R, f)$ 为传播路径; $G(f)$ 为场地效应。下文将对各分项的计算理论和依据进行详细阐述。

1.1 震源机制

震源谱的形状和幅值是地震动大小的函数,也是随机方法在应用中最为关键的部分,其不仅表示与震级大小有关的地震强度,且通过震源谱的形态表示震源特性,因此强震的震源谱是强地面运动随机模拟方法中的关键参数之一。Aki^[12]提出了单拐点频率模型,适合对中强地震的震源谱估计,最简化和普遍应用的模型为单拐点频率模型,忽略乘常数,傅里叶加速度谱 A 可表示为:

$$A \propto \frac{M_0 f^2}{1 + (f/f_c)^2} \quad (2)$$

式中, f_c 为拐点频率,高频部分可表示为:

$$A_{\text{HF}} \propto M_0 f_c^2 \quad (3)$$

f_c 可由下式求得:

$$f_c = 4.906 \times 10^6 \beta (\Delta\delta/M_0)^{1/3} \quad (4)$$

其中: β 为震源处的剪切波速; $\Delta\delta$ 为应力降。

Boore等^[13]提出一般化的双拐角频率模型,该模型采用相乘或相加两种方式,低频部分由地震矩控制,高频部分由地震矩和应力参数共同控制,适用于缺乏强震资料观测区模拟。鉴于相加关系的双拐点频率模型在南加州地震中心的宽带平台对40多个国家的地震记录模拟得到较好的效果,本文采用相加关系的双拐点频率模型来进行地震动的模拟,设加速度震源谱正比于下式:

$$A \propto \frac{M_0 f^2 (1-\epsilon)}{[1+(f/f_a)^{p_f^a}]^{p_d^a}} + \frac{M_0 f^2 \epsilon}{[1+(f/f_a)^{p_f^a}]^{p_d^a}} \quad (5)$$

式中: f_a 和 f_b 分别为两拐点处的频率; ϵ 为权重参数; p_f^a 和 p_d^a 分别为频率和分母的幂指数,对于高频部分($f \gg f_a$ 且 $f \gg f_b$),式(5)则变为:

$$A_{\text{HF}} \propto \left(\frac{M_0 f^2}{f_a^{p_f^a \cdot p_d^a}} \right) (1-\epsilon) f_a^{p_f^a \cdot p_d^a} + \left(\frac{M_0 f^2}{f_b^{p_f^b \cdot p_d^b}} \right) \epsilon f_b^{p_f^b \cdot p_d^b} \quad (6)$$

若保证高频部分为平台段,需满足:

$$p_f^a \cdot p_d^a = p_f^b \cdot p_d^b = 2 \quad (7)$$

则式(6)变为:

$$A_{\text{HF}} \propto M_0 (1-\epsilon) f_a^2 + M_0 \epsilon f_b^2 \quad (8)$$

将式(8)同式(3)联合,可得:

$$f_b = f_a \sqrt{\frac{(f_c/f_a)^2 - (1-\epsilon)}{\epsilon}} \quad (9)$$

对于给定的 $\Delta\delta$ 和 M_0 ,指定 f_a 和 ϵ 即可得到 f_b ,根据Atkinson等^[14]对美国加州的场地运动模拟结果, f_a 和 ϵ 可采用以下经验公式进行计算:

$$\lg f_a = 2.181 - 0.496M \quad (10)$$

$$\lg \epsilon = 0.605 - 0.255M \quad (11)$$

式中, M 为震级。

1.2 传播路径

地震动的衰减主要受几何衰减和非弹性衰减影响,目前我国在实际工作中通常将非弹性衰减项合并至几何衰减项,但这种近似在远场会产生较大的误差^[15]。本文对两个参数分开考虑,简化的传播路径 P 包括全路径几何衰减因子 $Z(R)$ 和全路径非弹性衰减因子 Q ,其公式为:

$$P(R, f) = Z(R) \exp[-\pi f R / Q(f) \beta] \quad (12)$$

其中,几何衰减因子主要表示地震波的几何扩散,本文采用目前最常用且争议较少的Atkinson^[16]三段几何衰减模型:

$$Z(R_{ij}) = \begin{cases} R^{-b_1} & R \leq R_{01} \\ R_{01}^{-b_1} R_{01}^{b_2} R^{-b_2} & R_{01} < R \leq R_{02} \\ R_{01}^{-b_1} R_{01}^{b_2} R_{02}^{-b_2} R_{02}^{b_3} R^{-b_3} & R > R_{02} \end{cases} \quad (13)$$

式中; R_{01} 和 R_{02} 分别为3段几何衰减中第1段和第2段转折点到震源的距离; b_1 、 b_2 和 b_3 为幂指数。

Q 表示地震波的吸收特性,Atkinson和Boore^[17]通过场地运动关系进行分析,取北美东部地区的衰减公式为 $Q = 670 f^{0.33}$,Atkinson和Boore^[18]在2014年对北美东部地区的基岩场地进行分析,推导 $Q = 525 f^{0.45}$,我国在这方面起步较晚,石玉燕等^[19]采用Atkinson方法,基于遗传算法对山东地震台网的8个台站记录中的166条地震进行计算,得出 $Q = 297.4 f^{0.558}$,但受观测资料的局限,还需进一步研究。

1.3 场地效应

随机理论进行模拟多用于一般岩石场地及岩土场地,这时可用简化的公式表示频域相关地震反应谱修正,包括场地放大项 $A(f)$ 和衰减项 $D(f)$:

$$S(f) = A(f)D(f) \quad (14)$$

场地放大项可采用平方根阻抗方法^[20]进行计算,假设场地运动幅值在传播过程中与局部地震阻抗 Z 平方根呈反比,其中,阻抗 Z 可表示为:

$$Z = \rho \beta \quad (15)$$

式中, ρ 为场地土的密度。Joyner等^[21]提出对于任意速度模型,场地放大系数 A 可表示为:

$$A = \sqrt{\frac{Z_R}{Z} \frac{\cos \theta_R}{\cos \theta}} = \sqrt{\frac{\rho_R \beta_R}{\rho \beta} \frac{\cos \theta_R}{\cos \theta}} \quad (16)$$

式中: θ 为地震波相对于竖向的角度;下标 R 为参考深度;上划线为表层附近的值;有效入射角 $\bar{\theta}$ 可由斯涅尔定律求得:

$$\bar{\theta} = \sin^{-1}[(\beta/\beta_R) \sin \theta_R] \quad (17)$$

对于衰减项 $D(f)$,可采用 κ_0 滤波:

$$D(f) = \exp(-\pi \kappa_0 f) \quad (18)$$

对 κ_0 的取值,根据Campbell等^[22]对一般

岩石场地的分析结果,可取 0.04 进行计算。

随机模拟方法能客观反映地区震源和传播路径特性和场地效应的差异,对场地地震动估计较为全面,能更好地用于场地结构进行危险性分析,得到较为合理的一致危险性谱来进行抗震验算。

2 一致危险性谱的生成

传统的一致危险性谱通过概率地震危险性分析获得,对于单一震源,计算其地震动超越某一数值的概率为:

$$P(\text{IM} > x) = \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} \int_0^{r_{\max}} P(\text{IM} > x | m, r) \cdot f_M(m) f_R(r) dr dm \quad (19)$$

式中:IM 为地震动强度水平; m 和 r 分别为震级和距离; $P(\text{IM} > x | m, r)$ 由场地运动模型得到; $f_M(m)$ 和 $f_R(r)$ 分别为震级和距离的概率密度函数。考虑地震重现期和所有点源后,式(19)变为:

$$P(\text{IM} > x) = \sum_{i=1}^{n_{\text{sources}}} \lambda(M > m_{\min}) \cdot \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} \int_0^{r_{\max}} P(\text{IM} > x | m, r) f_M(m) f_R(r) dr dm \quad (20)$$

式中: $\lambda(M > m_{\min})$ 为发生震级大于 m_{\min} 的地震的比率; n_{sources} 为点源数量。

本文采用基于随机地震动模拟的结果生成一致危险性谱,与传统的概率地震危险性分析(PSHA)不同,不用进行复杂的积分运算,仅进行统计分析运算,通过对随机振动模拟生成各地震的反应谱曲线进行概率地震危险性分析,首先假设各周期点处的谱加速度峰值(PSA)服从对数正态分布,对各周期点处求 PSA 的对数均值 $\lambda_{S_a(T_j)}$ 和标准差 $\zeta_{S_a(T_j)}$:

$$\lambda_{S_a(T_j)} = \ln(\overline{S_a(T_j)} / \sqrt{1 + \delta_{S_a(T_j)}^2}) \quad (21)$$

$$\zeta_{S_a(T_j)} = \sqrt{\ln(1 + \delta_{S_a(T_j)}^2)} \quad (22)$$

式中: $\delta_{S_a(T_j)}$ 为 PSA 的变异系数; $\overline{S_a(T_j)}$ 为 T_j 时刻地震动的谱值,则超越概率^[23]可表示为:

$$P(S_a(T_j) > S_{a_i}(T_j)) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln S_{a_i}(T_j) - \lambda_{S_a(T_j)}}{\zeta_{S_a(T_j)}}\right) \quad (23)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布的累积概率密度函数;下标 i 表示第 i 条。

通过计算不同周期下的超越概率,计算出

每个周期条件下每个反应谱值所对应的超越概率,然后找到相对应特定超越概率的谱值,最后将各周期相对应的谱值连成线,即得到 1 条对应某一超越概率的一致危险性谱。

3 特定场地一致危险性谱的生成算例

为研究本文提出的基于随机模拟方法得到的一致危险性谱对核电厂的动力响应,并比较不同反应谱对结构响应的差异,本文选取我国东部地区某高温气冷堆核电站的反应堆、乏燃料室及其辅助厂房结构进行研究,该结构在平面布置和竖向布置均为不规则结构,其中,平面为 L 型,反应堆位于 L 型转角处,乏燃料厂房与核辅助厂房位于反应堆两侧。

厂址所在区域地处地震活动较强的华北地震区内。北东向包括郯庐地震带活动水平最为强烈的沂沭段和渤海段以及北西向的燕山-渤海地震带的东南段。厂址所在区域位于较强的地震活动背景中。根据其场地地震安全性评价(简称安评)报告中的资料,采用随机方法模拟场地运动,对该区域两千年的强震记录进行历史重现,得到超越概率为 10^{-4} 的一致危险性谱。

3.1 地震动的生成

根据场地安评报告,该区域范围(118.5°E~124.0°N)内自公元前 70 年—公元 2006 年 5 月共记录到 $M > 4.7$ 级地震 43 次。其中:7.0~7.9 级地震 5 次;6.0~6.9 级地震 6 次;5.0~5.9 级地震 17 次;4.7~4.9 级地震 15 次。各点源与厂址位置的分布如图 1 所示。

取震源处剪切波速为 3.5 km/s,地壳密度

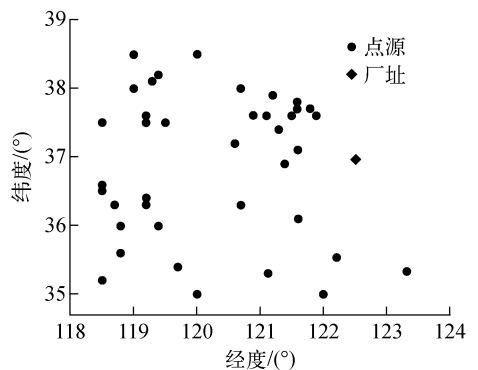


图 1 点源与厂址位置

Fig. 1 Location of seismic source and site

为 2.6 kg/m^3 。本算例根据山东地区地壳厚度,参考山东地震台网的文献数据^[24],计算取 $b_1=1.0, b_2=0.0, b_3=0.5, R_{01}=50 \text{ km}, R_{02}=90 \text{ km}$,则生成的山东地区几何扩散函数如图 2 所示。

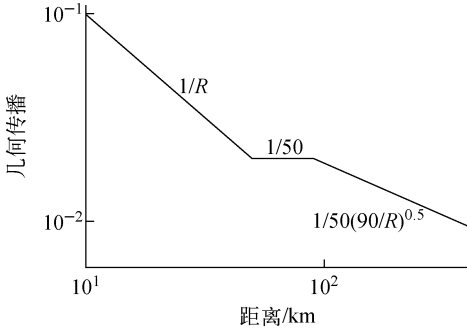


图 2 几何扩散函数曲线

Fig. 2 Geometrical spreading function curve

对于 Q ,由于该核电厂处于基岩场地,本文选用 Atkinson 和 Boore^[18]2014 年对北美东部岩石场地作为输入参数。由场地勘察报告可知,核电厂反应堆基岩体平均剪切波速为 2540 m/s ,采用平方根阻抗方法,假设地震波入射角 $\theta_R=0^\circ$,得场地的放大系数曲线如图 3 所示,考虑衰减项 $D(f)$ 的场地放大系数如图 4 所示,取 $\kappa_0=0.04$ 进行计算。

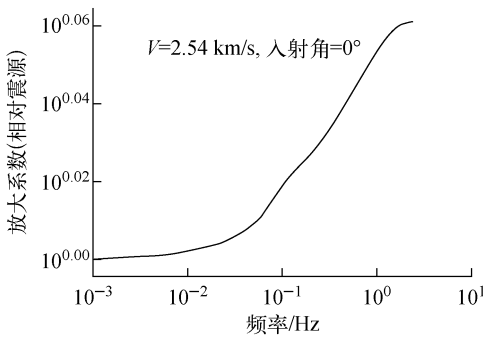


图 3 场地放大系数随频率的变化

Fig. 3 Amplification factor vs. frequency

通过随机模拟分析程序 SMSIM^[11],输入上述参数,假设阻尼比为 0.05 ,生成区域历史地震加速度反应谱如图 5 所示。

3.2 场地一致危险性谱的合成

对该区域的历史地震动进行统计分析,对

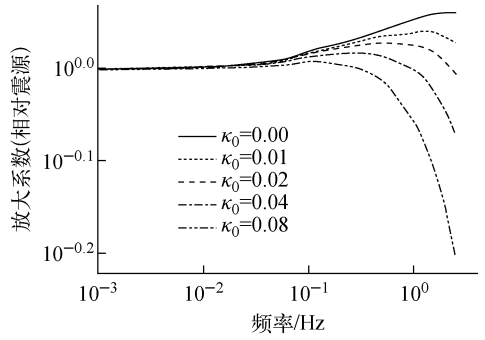


图 4 考虑衰减项的场地放大系数

Fig. 4 Site amplification factor considering diminution term

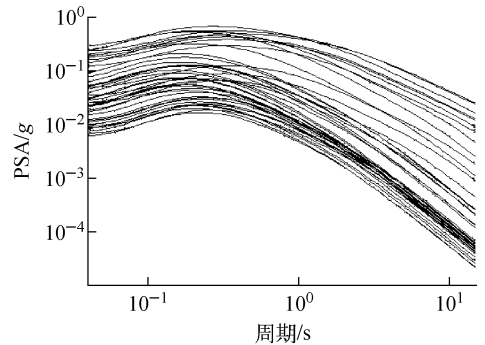


图 5 区域历史地震动生成

Fig. 5 Generation of regional history ground motion

于反应谱中的任意周期点,PSA 均服从对数正态分布,通过对概率密度函数的求解,得出各周期下超越概率曲线(图 6),通过整合所有周期下的超越概率曲线,得到超越概率为 10^{-4} 的一致危险性谱(UHS),并与 $0.2g$ 标定的美国 RG1.60 标准反应谱、安评报告中的 UHS 和 SL-2 谱进行比较,如图 7 所示,其中安评 UHS 和厂址谱(SL-2)均取自场地地震动安全性评价报告,安评 UHS 是采用我国传统的概率地震危险性分析方法,通过转换方法得到衰减关系,其超越概率为 10^{-4} ,厂址谱(SL-2)则是概率地震危险性分析法和确定性方法综合的结果。由图 7 可知,通过不同方法合成的一致危险性谱差别较大,本文所生成的 UHS 幅值介于 SL-2 与 RG1.60 之间,远大于安评中的 UHS 谱,其中,本文方法所生成的 UHS 与 SL-2 在 0.16 s 之前曲线较为接近,长周期段则相差较大,但新的 UHS 与 RG1.60 谱在短周期处相差较大,长周期曲线下降段幅值较为接近,RG1.60

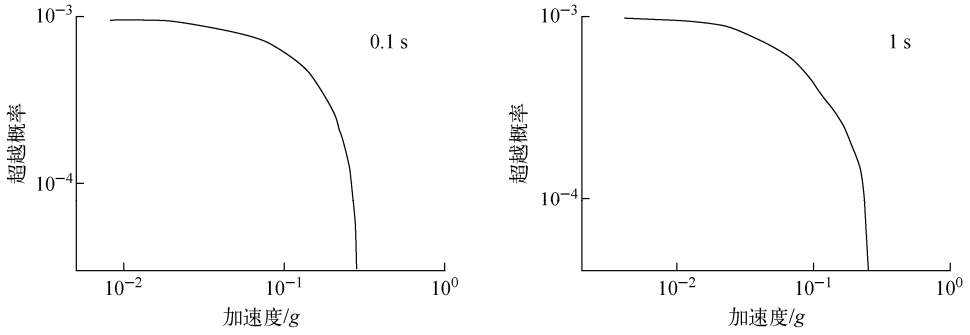


图6 不同周期处的超越概率曲线

Fig. 6 Annual rate of exceeding of different periods

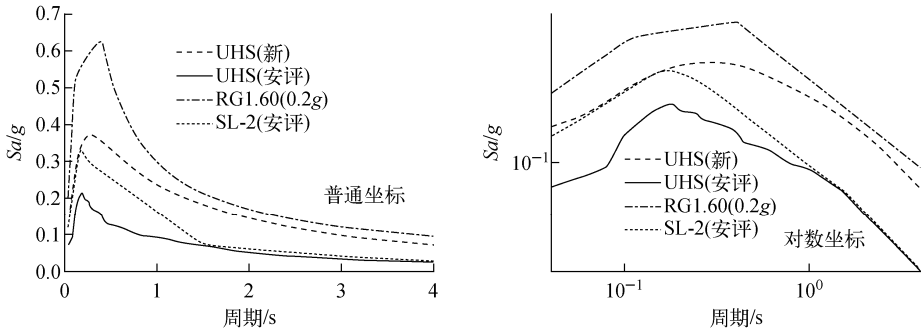


图7 一致危险性谱

Fig. 7 Uniform hazard spectrum

谱相对比较保守,安评 UHS 与 SL-2 谱在长周期处相差较小,这是由于 SL-2 在长周期处由安评 UHS 包络产生,短周期则采用确定性地震进行包络。

4 核电结构有限元模型时程分析

4.1 有限元模型的建立及计算

为验证一致危险性谱对结构的动力响应影响,本文采用 SAP2000 对该核电厂的反应堆、乏燃料室以及核辅助厂房结构进行建模。结构基础标高为 -15.55 m,其中,反应堆厂房屋面标高为 44.1 m,共 8 层,乏燃料厂房屋面标高为 36.08 m,辅助厂房屋面标高为 21.6 m。该核电厂主要构件为剪力墙及楼板,剪力墙和楼板厚度较大,且楼板开洞较多并不规则,因此选用 SAP2000 中的厚壳单元来模拟核电结构的剪力墙和楼板的线性行为,整体模型示于图 8。根据图 7 的反应谱,生成各反应谱的人工加速度时程曲线,并对结构水平双向输入地震动进行分析,其中,水平双向采用同 1 条谱生成不同

的加速度时程,满足互相关系数小于 0.3 ,本文定义反应堆-辅助厂房方向为水平 x 向,反应堆-乏燃料厂房方向为水平 y 向,图 9 为水平 x 向输入的加速度时程曲线。

4.2 结果分析

由模态分析结果可知,该核电厂的基本周期为 0.22 s,限于篇幅,本文对 x 向结果进行分析



图8 核电厂三维有限元模型

Fig. 8 Three-dimensional finite element model of NPP

析。图 10 为反应堆厂房的层间位移角,对于不同反应谱所生成的地震波,最大层间位移角出现的楼层有所不同,RG1.60 在 3 层处层间位移角最大,其他工况下位移角的最大值出现在 6 层处。整体趋势为 1 到 3 层位移角逐渐增大,4 层位移角变小,在 3 层出现明显的拐点,5 层和 6 层出现小幅增加,6 层到顶层则是逐渐减小。本文所生成的 UHS 与 SL-2 谱层间位移角较为接近,且底层相差较小,中间层相差较大,RG1.60 层间位移角较其他工况的明显偏大。选择标高为 7.5、28.1 m 和结构顶点 44.1 m 的最大位移进行比较,如图 11 所示,位移随标高增加而增大,在同一标高处,RG1.60 谱的位移最大,取顶点标高 44.1 m 处进行比较,RG1.60 谱的位移为 7.24 mm,较新 UHS 大 2.02 mm,新 UHS、SL-2 与安评 UHS 之间的差值分别为 0.76、1.37 mm,新 UHS 与 SL-2 谱位移峰值较为接近。

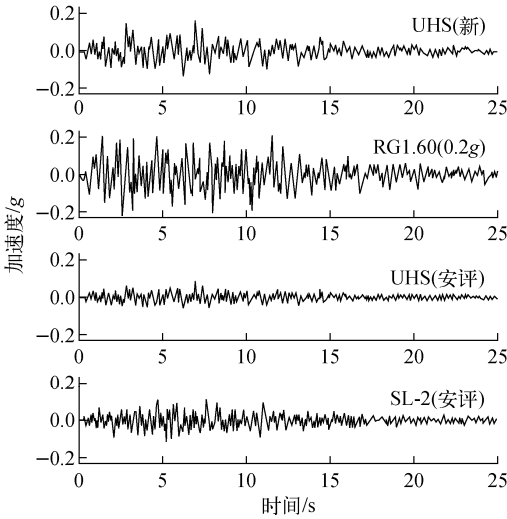


图 9 x 向加速度时程曲线

Fig. 9 Acceleration time-history curve of x direction

图 12、13 分别为结构的层间剪力和层间弯矩,除 RG1.60 在 3 层处表现异常外,各工况下结构的剪力和弯矩变化趋势相近。本文 UHS 与 SL-2 剪力和弯矩值较为接近,且 UHS 稍大于 SL-2,但随高度的增加,两条曲线的差值变小。

本文选择一回路压力释放及吸收球停堆系统底板(标高 7.5 m)处的加速度时程及其傅氏谱进行分析,如图 14 所示, RG1.60 谱加速度

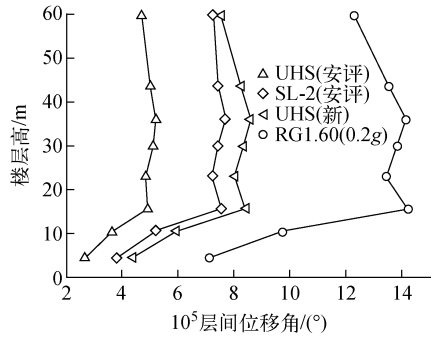


图 10 反应堆厂房的层间位移角

Fig. 10 Interlayer displacement angle of reactor plant

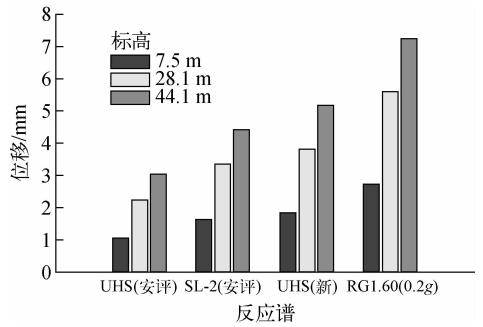


图 11 楼层位移峰值

Fig. 11 Displacement peak in different layers

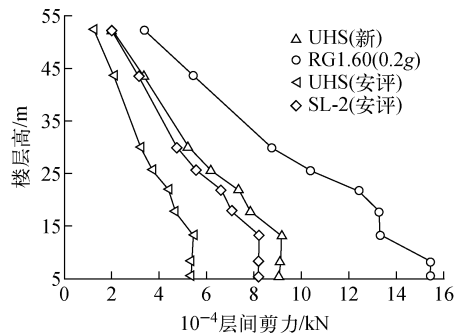


图 12 层间剪力

Fig. 12 Interlayer shear force

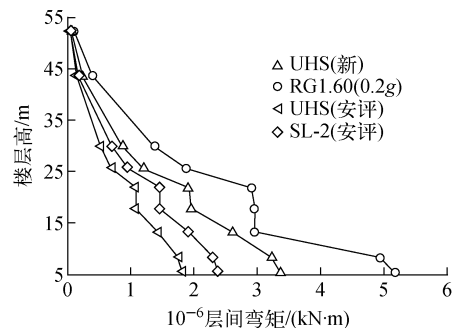


图 13 层间弯矩

Fig. 13 Interlayer bending moment

峰值最大,接近 $0.4g$,安评 UHS 最小,峰值为 $0.14g$ 。图 15 为对应图 14 的傅氏谱图,从图中可看出,新 UHS 和 RG1.60 在 7 Hz 以下较为丰富,新 UHS 较 SL-2 频谱分布更为均匀,从峰值来看,RG1.60 谱峰值最高。

结果表明不同反应谱对结构的响应差别较大,本文所生成的 UHS 对结构的动力响应略大于 SL-2 谱,且远大于安评中的一致概率谱。这是由于 RG1.60 作为标准设计谱,适用于除软土之外的各类场地,而该厂址在选址过程中避免了强震多发区,历史近场地震较小,因此一致危险性谱与标准谱比较小,而厂址 SL-2 谱和本文所生成的一致危险性谱在该结构第 1 周期 0.22 s 处较为接近,因此两者对结构的动力响应相差较小。

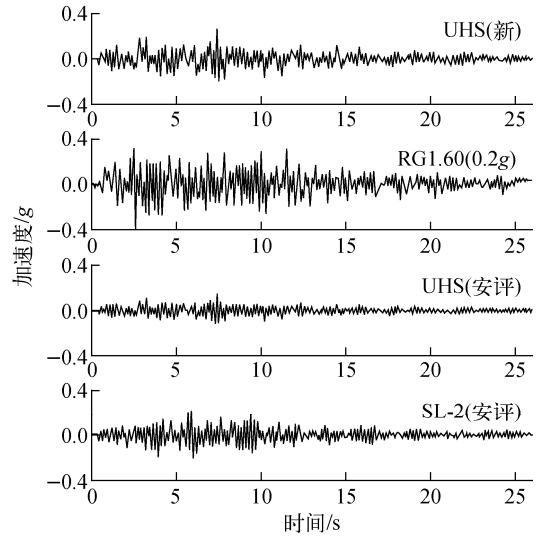


图 14 标高 7.5 m 处的加速度时程曲线

Fig. 14 Acceleration time-history curve in 7.5 m

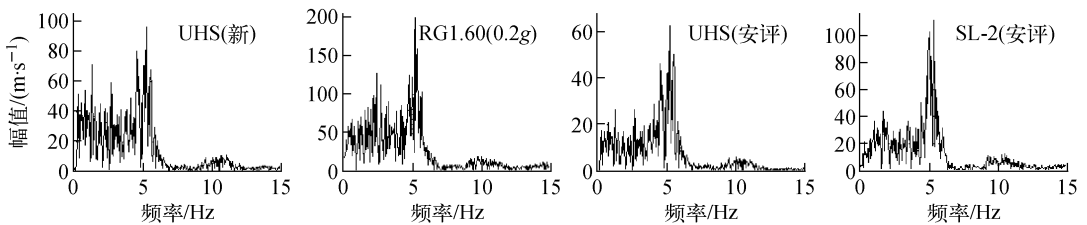


图 15 标高 7.5 m 处的傅氏谱

Fig. 15 Fourier spectrum in 7.5 m

5 结论

本文采用强地面随机模拟地震动与概率方法相结合,生成万年一遇的一致危险性谱。与之前的研究相比,本文较为充分地考虑了反应谱生成中的各种参数影响,如震源机制、传播路径和场地效应,并对关键参数的取值进行了探讨,最终得到同一超越概率下的一致危险性谱。结合具体的核电厂场地条件,通过算例进行求解,并与已有的 SL-2 谱和概率谱及 RG1.60 谱进行比较。结果表明充分考虑各参数生成的 UHS 和通过简化衰减关系得到的 UHS 在谱形和幅值上有较大差别,新 UHS 与 SL-2 较为接近,且略大于 SL-2 谱,但小于美国 RG1.60 谱。随后建立核电厂三维有限元模型,并对其进行动力时程分析。结果表明不同反应谱对结构的动力响应差别较大,基于随机模拟方法生成的一致危险性谱可为核电厂抗震设计和校核验算提供必要的参考。

参考文献:

- [1] 陈厚群,李敏,石玉成. 基于设定地震的重大工程场地设计反应谱的确定方法[J]. 水利学报, 2005,36(12):1 399-1 404.
CHEN Houqun, LI Min, SHI Yucheng. Determination of design response spectrum for important structure based on scenario earthquake[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36 (12): 1 399-1 404(in Chinese).
- [2] Regulatory guide 1.60 Design response spectra for seismic design of nuclear power plants[S]. 2nd ed. Washington D. C.: NRC, 2014.
- [3] Regulatory guide 1.208 Performance-based approach to define the site-specific earthquake ground motion[S]. Washington D. C.: NRC, 2007.
- [4] 章在壖,陈达生. 二滩水电站坝区场地地震危险性分析[J]. 地震工程与工程振动, 1982(3): 1-15.
ZHANG Zaiyong, CHEN Dasheng. Seismic haz-

- ard analysis of Dam Area of Ertan Hydropower Station[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1982(3): 1-15(in Chinese).
- [5] 周克森,吴鹏,王东霞. 地震危险性分析多维不确定性的复合概率模型(I):地震活动的非均匀性[J]. *地震工程与工程振动*, 1991(1):19-29. ZHOU Kesen, WU Peng, WANG Dongxia. A combined probability model for multidimensional uncertainty in seismic hazard analysis: The non-uniformity of seismic activity[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1991(1): 19-29(in Chinese).
- [6] 胡聿贤. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京:地震出版社,1999.
- [7] 胡聿贤,张敏政. 缺乏强震观测资料地区地震动参数的估算方法[J]. *地震工程与工程振动*, 1984(1):1-11. HU Yuxian, ZHANG Minzheng. Estimation method of ground ground motion parameters in earthquake observation data[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1984(1): 1-11(in Chinese).
- [8] 姜慧. 地震动随机模拟方法中的场地效应研究[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所,2005.
- [9] ATKINSON G M. Attenuation of strong ground motion in canada from a random vibrations approach[J]. *Bulletin of The Seismological Society of America*, 1984, 74(6): 2 629-2 653.
- [10] ATKINSON G M, BOORE D M. Earthquake ground-motion prediction equations for eastern north America[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006, 96(6): 2 181-2 205.
- [11] BOORE D M. Simulation of ground motion using the stochastic method[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2003, 160(3-4): 635-676.
- [12] AKI K. Scaling law of seismic spectrum[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1967, 72(4): 1 217-1 231.
- [13] BOORE D M, di ALESSANDRO C, ABRAHAMSON N A. A generalization of the double-corner-frequency source spectral model and its use in the SCEC BBP validation exercise[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2014, 104(5): 2 387-2 398.
- [14] ATKINSON G M, SILVA W. Stochastic modeling of california ground motions[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2000, 90(2): 255-274.
- [15] 吴健. 设定地震确定方法研究[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所,2013.
- [16] ATKINSON G M. Attenuation of strong ground motion in Canada from a random vibrations approach[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1984, 74(6): 2 629-2 653.
- [17] ATKINSON G M, BOORE D M. Ground-motion relations for eastern north America[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1995, 85(1): 17-30.
- [18] ATKINSON G M, BOORE D M. The attenuation of Fourier amplitudes for rock sites in eastern north America[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2014, 104(1): 513-528.
- [19] 石玉燕,郑斯华,胡旭辉,等. 山东地区地震动衰减和场地响应的研究[J]. *华南地震*, 2008(1): 92-100. SHI Yuyan, ZHENG Sihua, HU Xuhui, et al. A study on seismic attenuation and site response in Shandong area[J]. *South China Journal of Seismology*, 2008(1): 92-100(in Chinese).
- [20] BOORE D M. The uses and limitations of the square-root-impedance method for computing site amplification[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2013, 103(4): 2 356-2 368.
- [21] JOYNER W B, WARRICK R E, FUMAL T E. The effect of quaternary alluvium on strong ground motion in the Coyote Lake, California, earthquake of 1979[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1981, 71(4): 1 333-1 349.
- [22] CAMPBELL K W, BOORE D M. Evaluation of six NEHRP B/C crustal amplification models proposed for use in western north America[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016, 106(2): 673-686.
- [23] 朱瑞广. 基于地震动模拟的一致危险性谱与条件均值谱研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [24] 蔡寅,林秀娜,穆娟,等. 山东数字地震台站场地响应估算[J]. *地震地磁观测与研究*, 2013(Z3): 98-103. CAI Yin, LIN Xiuna, MU Juan, et al. Calculation of site response of digital seismic station in Shandong Province[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2013(Z3): 98-103(in Chinese).