

基于一致风险谱的某核电安全壳地震风险分析

王晓磊¹, 阎卫东¹, 吕大刚², 马健³

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 3. 沈阳建筑大学工程训练与创新学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究基于一致风险谱的我国核电安全壳地震风险分析方法,为我国核电厂结构基于一致风险抗震设计方法修订提供参考。**方法** 通过推导地震风险解析模型,总结美国土木工程学会《核设施中结构、系统和部件的抗震设计准则》(ASCE/SEI 43)中一致风险谱生成理论和方法,生成场地一致危险谱和一致风险谱;采用安全系数法,生成算例厂址核电安全壳模型易损性曲线;采用解析风险函数,得到算例结构地震风险。**结果** 基于平动第一周期的风险大于基于平动第二周期的风险;平均值地震风险大于50%置信度地震风险,小于95%置信度地震风险,表明平均值地震风险结果与小于具有95%置信度地震风险相当;如果以95%为要求标准的风险进行鉴别筛选,平均值地震风险结果偏于不保守;对于核岛等抗震设计分组为5(SDC 5)的结构、系统和部件,两版ASCE/SEI 43规范给出的一致风险谱大多数情况下相同;一致风险谱地震作用下,我国安全壳风险水平远低于ASCE 43规范目标风险。**结论** 我国核电安全壳设计安全裕量较大,面临地震风险远小于ASCE 43规范中的目标风险。

关键词 地震风险区间评估;核电厂安全壳;置信度;风险解析函数;一致风险谱

中图分类号 TU244.8;TL364

文献标志码 A

Seismic Risk Analysis of a Nuclear Power Plant Containment Based on Uniform Risk Spectrum

WANG Xiaolei¹, YAN Weidong¹, Lü Dagang², MA Jian³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, 150090; 3. School of Engineering Training and Innovation, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to provide the reference for the revision of the consistent risk-based seismic design method for the structures of nuclear power plants in China, the seismic risk analysis method

收稿日期:2022-12-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51908379);辽宁省教育厅基本科研项目(LJKMZ20220943);辽宁省教育厅2020年度科学研究项目(lnqn202035)

作者简介:王晓磊(1986—),男,副教授,博士,主要从事工程结构一致风险抗震设计等方面研究。

for the containment of nuclear power plants in China based on the consistent risk spectrum was investigated. By deriving the analytical model of seismic risk and summarizing the theory and method of generating consistent risk spectra in the "Seismic Design Criteria for Structures, Systems, and Components in Nuclear Facilities" (ASCE/SEI 43) published by the American Society of Civil Engineers(ASCE), the uniform hazard spectra and the consistent risk spectra were generated; the seismic risk of the example structure was obtained by adopting the analytical risk function. The risk based on the first translation period is greater than the risk based on the second translation period; the mean seismic risk is greater than seismic risk with the 50% confidence and less than seismic risk with the 95% confidence, which indicates that the mean seismic risk results are well comparable to a seismic risk with less than the 95% confidence; the mean seismic risk results are on the unconservative side if the risk criterion is screened by using the seismic risk with 95% confidence; the consistent risk spectra given by the two editions of ASCE/SEI 43 are the same for structures, systems, and components that are in the seismic design subgroup 5 (SDC 5) such as nuclear islands; the risk level of Chinese containment is much lower than the target risk in ASCE 43 code under the consistent risk spectrum. The results show that Chinese nuclear power containment has large design safety margin and has the smaller seismic risk than the target risk in the ASCE 43 code.

Key words: interval assessment of seismic risk; nuclear power plant containment; confidence; risk analytical function; uniform risk spectrum

地震作用下核电厂安全性评估包括地震概率风险评估^[1]和抗震裕量评估^[2]两种方法,地震概率风险评估全面考虑了评估过程中多种不确定性,相较于抗震裕量评估,是更为精细化的核电厂地震安全评估方法。地震概率风险评估^[3]主要由地震危险性、地震易损性^[4-5]、系统分析和事故分析等组成。

目前,在建筑工程领域,已有规范采用一致风险抗震设计方法^[6];在核工程领域,2005 年美国土木工程学会(ASCE)发布了核电厂一致风险抗震设计规范^[7],之后,2019 年 ASCE 对上述规范进行了修订^[8]。目前我国核电厂抗震设计规范^[9]还没有采用一致风险的抗震设计方法。

基于上述分析,笔者总结了美国土木工程学会出版的《核设施中结构、系统和部件的抗震设计准则》(ASCE/SEI 43—05)^[7]和《核设施中结构、系统和部件的抗震设计准则》(ASCE/SEI 43—19)^[8]中一致风险谱生成方法,基于算例厂址一致风险谱,分析中国场地某核结构风险水平,为我国核电厂抗震设计规范未来基于一致风险抗震设计理论的

修订提供参考。

1 考虑置信度的地震风险解析模型

1.1 平均值地震风险解析函数

工程结构面临地震风险可表示为地震危险性与地震易损性卷积计算形式,地震风险可表示为^[10]

$$P_F = \int_0^\infty H(a) \frac{dF_C(a)}{da} da. \tag{1}$$

$$P_F = - \int_0^\infty F_C(a) \frac{dH(a)}{da} da. \tag{2}$$

式中: $H(a)$ 为危险性模型; $F_C(a)$ 为易损性模型。地震危险性函数 $H(a)$ 可表示为^[10]

$$H(a) = k_1 a^{-K_H}. \tag{3}$$

式中: k_1 为常数; K_H 为地震危险性曲线的斜率。

平均值易损性曲线可表示为对数正态累积分布函数形式:

$$F_C(a) = \Phi \left[\frac{\ln(a/a_c)}{\beta_c} \right]. \tag{4}$$

式中: a_c 为抗震能力中位值; β_c 为不确定性

标准差,由两类不确定性标准差综合计算得到,即 $\beta_C = \sqrt{\beta_R^2 + \beta_U^2}$, β_R 为考虑本质不确定性的标准差, β_U 为考虑知识不确定性的标准差。

综合式(1)、式(3)和式(4),可得到均值地震风险模型^[10]:

$$P_F = k_1(a_C)^{-K_H} \exp\left[\frac{(K_H \beta_C)^2}{2}\right]. \quad (5)$$

1.2 区间地震风险解析函数

考虑置信度的易损性函数可表示为^[11]

$$P'_f = \Phi\left[\frac{\ln\left(\frac{a}{a_C}\right) + \beta_U \Phi^{-1}(Q)}{\beta_R}\right]. \quad (6)$$

式中: a_C 为抗震能力中位值; β_U 和 β_R 为标准差,分别考虑知识和本质不确定性; Q 为置信度。

式(6)经过转化,可表示为

$$P'_f = \Phi\left[\frac{\ln\left(\frac{a}{a_{C,Q}}\right)}{\beta_R}\right] = \Phi\left[\frac{\ln\left(\frac{a}{a_C e^{-\beta_U \Phi^{-1}(Q)}}\right)}{\beta_R}\right]. \quad (7)$$

式中: $a_{C,Q}$ 为考虑置信度的中位值。

$$a_{C,Q} = a_C \exp(-\beta_U \Phi^{-1}(Q)). \quad (8)$$

将式(8)和式(3)代入式(5),可得到考虑置信度的地震风险解析函数,则考虑知识不确定性(易损性函数中的知识不确定性)的风险函数为

$$P_F = k_1(a_C)^{-K_H} \exp[\beta_U K_H \Phi^{-1}(Q) + \frac{1}{2}(K_H \beta_R)^2]. \quad (9)$$

2 规范(ASCE/SEI 43)一致风险谱

2.1 规范(ASCE/SEI 43—05)一致风险谱

规范(ASCE/SEI 43—05)一致风险谱可表示为^[7]

$$DRS = DF \times UHRS_{H_D}. \quad (10)$$

式中: DF 为设计系数; H_D 为目标危险性水平; $UHRS_{H_D}$ 为 H_D 危险性的一致危险谱。

规范(ASCE/SEI 43—05)中,设计参数

DF 可由式(11)确定^[7]:

$$DF = \text{Maximum}(DF_1, DF_2). \quad (11)$$

式中: DF_1 由表1确定; DF_2 可表示为^[7]

$$DF_2 = 0.6(A_R)^\alpha. \quad (12)$$

式中: A_R 为 $0.1H_D$ 和 H_D 概率水平的谱加速度的比值; H_D 为UHRS被定义的超越概率;系数 α 可由表1确定^[7]。

表1 设计响应谱参数

Table 1 The design parameters of response spectrum

抗震设计类别	H_D	P_F	R_p	DF_1	α
5	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-5}	10	1.0	0.80

2.2 规范(ASCE/SEI 43—19)一致风险谱

美国土木工程学会对规范(ASCE 43—05)^[7]进行了修订,发布了规范(ASCE/SEI 43—19)^[8],其中,一致风险谱可表示为

$$DRS = SF \times UHRS_{H_p}. \quad (13)$$

式中: H_p 为设计目标风险; $UHRS_{H_p}$ 为 H_p 危险性的一致危险谱。

规范(ASCE/SEI 43—19)中设计系数 SF 可表示为^[8]

$$SF = \text{Maximum}[SF_1, SF_2, SF_3]. \quad (14)$$

SF_1 、 SF_2 和 SF_3 可分别表示为^[8]

$$SF_1 = A_R^{-1.0}. \quad (15)$$

$$SF_2 = 0.6A_R^{-0.2}. \quad (16)$$

$$SF_3 = 0.45. \quad (17)$$

式中: A_R 为 $0.1H_D$ 和 H_D 概率水平的谱加速度的比值; H_D 为UHRS被定义的超越概率, H_p 为设计目标风险,可由表2确定^[8]。

表2 设计响应谱参数

Table 2 The design parameters of response

spectrum		
抗震设计类别	$H_D/10^{-4}$	$H_p/10^{-5}$
2	40	40
3	3	10
4	4	4
5	1	1

2.3 规范(ASCE/SEI 43)一致风险谱生成步骤

规范(ASCE/SEI 43)给出了一致风险谱

生成步骤:

Step 1. 基于场地危险性信息,进行概率地震危险性分析,分别生成年超越概率 H_D 和 H_P 的一致危险谱;

Step 2. 基于式(11)和(12)生成设计系数 DF ,或基于式(14)、(15)、(16)和(17)生成设计系数 SF ;

Step 3. 分别基于式(10)或式(13),生成一致风险谱。

3 基于一致风险谱的某核电厂安全壳地震风险区间评估

3.1 华南地区某核电厂厂址一致危险谱与一致风险谱

3.1.1 算例厂址地震危险性分析

我国华南地区某核电厂厂址具有1个地震统计区,地震统计区参数如表3所示,潜在震源区分布如图1所示。

表3 地震统计区参数值

最高震级 M_{max}	Gutenberg-Richter 公式参数 b	地震平均发生率 ν_4	震源深度 h/km
8.00	0.87	5.60	15

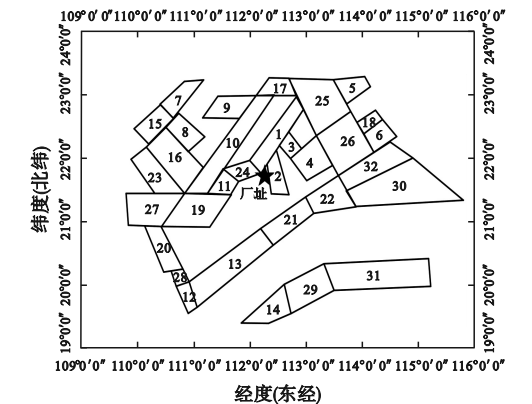


图1 潜在震源区分布图

Fig. 1 The distribution map of potential seismic zones
采用我国华南地区地震动预测方程^[12]:

$$\log(Y) = C_1 + C_2M + C_3\log(R + C_4\exp(C_5M)) + \sigma_{\log Y}\varepsilon.$$

式中: M 为震级; R 为距离; C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 和

C_5 为预测方程系数; $\sigma_{\log Y}$ 为标准差; ε 为中位值为0、标准差为1的误差。

采用基于蒙特卡洛模拟的地震危险性分析程序^[13],计算了算例厂址的危险性曲线,如图2所示。

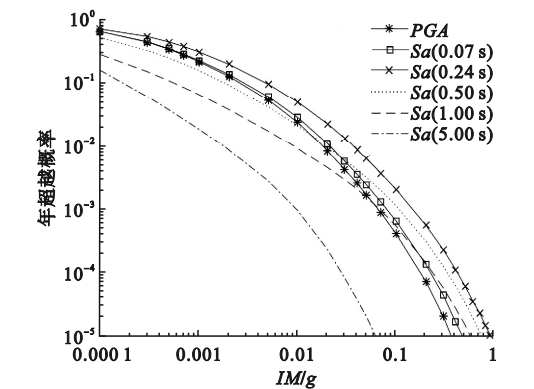


图2 地震危险性曲线

Fig. 2 The seismic hazard curves

3.1.2 华南地区某核电厂厂址一致危险谱和一致风险谱

一致危险谱是各个周期超越概率一致的场地相关谱,年超越概率0.0001和0.00001的一致危险谱如图3所示。针对本算例厂址相当于规范(ASCE/SEI 43)中地震设计分类为5(SDC 5)的结构、系统和部件的一致风险谱如图3所示。对于ASCE/SEI 43中地震设计分类为5(SDC 5)的结构、系统和部件,基于规范(ASCE/SEI43—05)和规范(ASCE/SEI 43—19)的一致风险谱是一致的。

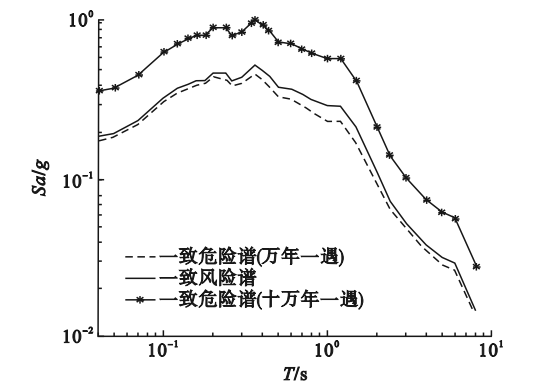


图3 一致危险谱和一致风险谱

Fig. 3 The uniform hazard spectrum and uniform risk spectrum

3.2 基于一致风险谱的我国某电厂安全壳地震易损性分析

3.2.1 易损性分析方法

安全壳地震易损性分析方法步骤:

Step 1. 基于场地概率地震危险性分析, 基于文中 2.3 节步骤, 生成场地一致风险谱;

Step 2. 建立安全壳有限元模型;

Step 3. 基于振型分解反应谱法, 得到一致风险谱作用下, 安全壳结构的地震响应, 得到易损性函数中 F_s 的中位值;

Step 4. 安全系数法中除了 F_s 中位值以外的其他安全系数取经验数值;

Step 5. 基于安全系数法, 确定安全壳结构地震易损性曲线。

3.2.2 我国某核电厂安全壳模型

核电厂安全壳模型为华南地区某核电厂安全壳集中质量梁单元模型^[14], 如图 4 所示, 具体模型节点、单元和材料等参数信息可参看文献[10]和文献[15], 经计算分析, 安全壳的前两阶平动周期分别为 0.23 s 和 0.07 s。

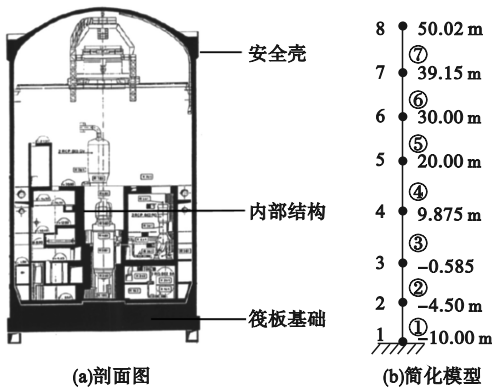


图 4 安全壳模型

Fig. 4 The model of the containment

3.2.3 我国某核电厂安全壳地震易损性分析

核电厂易损性可采用安全系数法进行分析, 安全系数基本原理^[15]如下。

核工程结构抗震能力为^[15]

$$A = A_m e_R e_U \quad (19)$$

式中: A_m 为中位值; e_R 和 e_U 为随机变量, 分

别表示本质不确定性和知识不确定性。

同时, 抗震能力可进一步表示为^[15]

$$A = F \cdot A_{SSE} \quad (20)$$

式中: A_{SSE} 为核电厂安全停堆能力; F 为安全系数。

安全系数可进一步表示为

$$F = F_s \cdot F_\mu \cdot F_{RS} \quad (21)$$

式中: F_s 为强度系数; F_{RS} 为响应系数; F_μ 为塑性能吸收系数。

F_s 可进一步表示为

$$F_s = \frac{S - R_N}{R_T - R_N} \quad (22)$$

F_μ 可进一步表示为

$$F_\mu = (\rho\mu - q)^r \quad (23)$$

F_{RS} 可进一步表示为

$$F_{RS} = F_{SA} \cdot F_\delta \cdot F_M \cdot F_{MC} \cdot F_{EC} \cdot F_{SSI} \cdot F_{SD} \quad (24)$$

式中: F_{SA} 为设计响应谱; F_δ 为阻尼影响; F_M 为建模影响; F_{MC} 为模态组合; F_{EC} 为部件组合; F_{SSI} 为土 - 结相互作用; F_{SD} 为不同深度地震动输入。

安全系数中位值参数可表示为

$$\bar{F} = \bar{F}_s \cdot \bar{F}_\mu \cdot \bar{F}_{RS} \quad (25)$$

安全系数标准差可表示为

$$\beta_F = \sqrt{\beta_{F_s}^2 + \beta_{F_\mu}^2 + \beta_{F_{RS}}^2} \quad (26)$$

响应系数中位值可表示为

$$\bar{F}_{RS} = \bar{F}_{SA} \cdot \bar{F}_\delta \cdot \bar{F}_M \cdot \bar{F}_{MC} \cdot \bar{F}_{EC} \cdot \bar{F}_{SSI} \cdot \bar{F}_{SD} \quad (27)$$

响应系数标准差可表示为

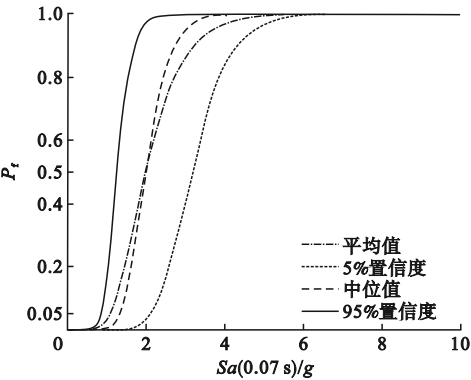
$$\beta_{F_{RS}} = \sqrt{\beta_{F_{SA}}^2 + \beta_{F_{SD}}^2 + \beta_{F_M}^2 + \beta_{F_{MC}}^2 + \beta_{F_\delta}^2 + \beta_{F_{EC}}^2 + \beta_{F_{SSI}}^2} \quad (28)$$

基于 3.2.1 节易损性分析方法, 经验数据采用表 4 中数据(来源于文献[16]经验数据的中位值), 得到我国某核电厂地震易损性分析结果, 分析得到的地震易损性曲线如图 5 所示, 采用强度参数周期与结构自振周期最近的谱加速度参数, 分别为 $Sa(0.24 \text{ s})$ 和 $Sa(0.07 \text{ s})$ 。

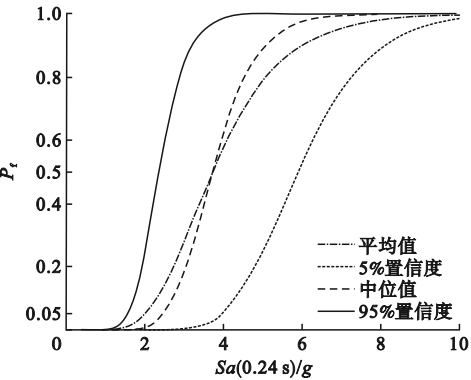
表4 经验地震易损性数据中位值

Table 4 The median data of empirical seismic fragility

系数	中位值	β_R	β_U
F_{SA}	1.2~1.4	0.16~0.22	0.08~0.11
F_{δ}	1.2~1.4	0.05~0.10	0.05~0.10
F_M	1.0	0	0.12~0.18
F_{MC}	1.0	0.10~0.20	0
F_{EC}	1.0	0.10~0.20	0
F_{SSI}	1.1~1.5	0.02~0.06	0.10~0.24
F_{SD}	1.0	0	0
F_S	1.2~2.5	0.06~0.12	0.12~0.18
F_{μ}	1.5~1.75	0.08~0.14	0.18~0.26



(a)以 $Sa(0.07s)$ 为参数



(b)以 $Sa(0.24s)$ 为参数

图5 安全壳地震易损性曲线

Fig. 5 Seismic fragility curves of the containment

3.3 基于一致风险谱的某核电安全壳地震风险区间评估

首先对地震危险性曲线进行近似拟合,得到拟合函数参数,如表5所示。采用式(9),可得到基于一致风险谱的某核电安全

壳地震风险区间评估结果,如表6所示。

表5 地震危险性参数

Table 5 Parameters of the seismic hazard

谱加速度参数	K_H	k_I
$Sa(0.07s)$	3.20	8.38×10^{-7}
$Sa(0.24s)$	2.93	7.98×10^{-6}

表6 安全壳地震风险结果

Table 6 Seismic risk results of the containment

参数	5%置信度/ 10^{-8}	中位值/ 10^{-7}	均值/ 10^{-7}	95%置信度/ 10^{-7}
URS $Sa(0.24s)$	5.64	2.20	3.10	8.58
URS $Sa(0.07s)$	2.87	1.27	1.91	5.61

由表可知:平均值地震风险远小于95%置信度地震风险结果,大于50%置信度地震风险,表明平均值地震风险结果与具有小于95%置信度地震风险相当,如果以95%为要求标准的风险进行鉴别筛选,平均值地震风险结果偏于不保守;我国核电厂安全壳模型安全裕量较大,在规范(ASCE/SEI 43)一致风险谱地震输入作用下,地震风险结果远小于规范(ASCE/SEI 43)的目标风险。

4 结 论

(1)平均值地震风险远小于95%置信度地震风险结果,大于50%置信度地震风险,如果以95%为要求标准的风险进行鉴别筛选,平均值地震风险结果偏于不保守。

(2)对于核岛等抗震设计分组为5(SDC 5)结构、系统和部件,规范(ASCE/SEI 43—05)和规范(ASCE/SEI 43—19)一致风险谱大多数情况下相同。

(3)采用算例厂址一致风险谱,计算得到的我国某核电厂安全壳地震风险水平远低于《核设施中结构、系统和部件的抗震设计准则》(ASCE/SEI 43)中的目标风险。

参考文献

[1] 王晓磊,吕大刚. 核电厂地震概率风险评估研

- 究综述[J]. 土木工程学报, 2016, 49(11): 52-68.
(WANG Xiaolei, Lü Dagang. Review of seismic probability risk assessment of nuclear power plants [J]. China civil engineering journal, 2016, 49(11): 52-68.)
- [2] 王晓磊, 吕大刚. 核电厂抗震裕量评估方法研究综述[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(12): 116-122.
(WANG Xiaolei, Lü Dagang. Research review of seismic margin assessment methods for nuclear power plants [J]. China safety science journal, 2015, 25(12): 116-122.)
- [3] 王晓磊, 阎卫东, 吕大刚. 基于中国场地相关谱的核电厂结构地震易损性与风险研究[J/OL]. (2023-04-17) [2023-07-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20230417.1410.012.html>.
(WANG Xiaolei, YAN Weidong, Lü Dagang. Study on seismic fragility and risk of a nuclear power plant structure based on Chinese site-specific spectra [J/OL]. (2023-04-17) [2023-07-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20230417.1410.012.html>.)
- [4] 王晓磊, 吕大刚, 阎卫东. 考虑竖向地震动影响的某核电安全壳地震易损性研究[J]. 原子能科学技术, 2022, 56(6): 1060-1068.
(WANG Xiaolei, Lü Dagang, YAN Weidong. Seismic fragility analysis of a nuclear power plant containment considering vertical ground motion effect [J]. Atomic energy science and technology, 2022, 56(6): 1060-1068.)
- [5] 王晓磊, 阎卫东, 吕大刚. 基于广义条件谱的某核电厂安全壳多元地震易损性分析[J]. 原子能科学技术, 2023, 57(1): 175-184.
(WANG Xiaolei, YAN Weidong, Lü Dagang. Multivariate seismic fragility analysis of a nuclear power plant containment based on generalized conditional spectra [J]. Atomic energy science and technology, 2023, 57(1): 175-184.)
- [6] Building Seismic Safety Council (BSSC). NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA P1050) [R]. Washington, D. C.: National Institute of Building Science, 2015.
- [7] ASCE. Seismic design criteria for structures, systems, and components in nuclear facilities; ASCE/SEI 43-05 [S]. The United States of America: American Society of Civil Engineering, 2005.
- [8] ASCE. Seismic design criteria for structures, systems, and components in nuclear facilities; ASCE/SEI 43-19 [S]. The United States of America: American Society of Civil Engineering, 2019.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 核电厂抗震设计标准: GB50267—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for seismic design of nuclear power plants; GB50267—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.)
- [10] 王晓磊, 吕大刚, 阎卫东. 核电厂安全壳地震概率风险评估[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(12): 2397-2403.
(WANG Xiaolei, Lü Dagang, YAN Weidong. Seismic probabilistic risk assessment of nuclear power plant containment [J]. Atomic energy science and technology, 2020, 54(12): 2397-2403.)
- [11] 王晓磊, 吕大刚. 考虑知识不确定性的核电厂地震易损性概率模型研究[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(1): 139-144.
(WANG Xiaolei, Lü Dagang. Study on seismic fragility probabilistic model of nuclear power plant considering epistemic uncertainty [J]. Atomic energy science and technology, 2017, 51(1): 139-144.)
- [12] 霍俊荣. 近场强地面运动衰减规律的研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 1989.
(HUO Junrong. Study on the attenuation laws of strong earthquake ground motion near the source [D]. Harbin: China Earthquake Administration, 1989.)
- [13] WANG X L, Lü D G. MCS-based PSHA procedure and generation of site-specific design spectra for the seismicity characteristics of China [J]. Bulletin of the seismological society of America, 2018, 108(5A): 2408-2421.
- [14] 李忠诚. 考虑土-结相互作用效应的核电厂地震响应分析[D]. 天津: 天津大学, 2006.
(LI Zhongcheng. Seismic response analysis of nuclear power plants considering soil-structure interaction effects [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.)
- [15] 王晓磊, 吕大刚, 阎卫东. 基于经验-解析数据的某核电安全壳地震易损性分析[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(5): 917-925.
(WANG Xiaolei, Lü Dagang, YAN Weidong. Seismic fragility analysis of a nuclear power plant containment based on empirical-analytical data [J]. Atomic energy science and technology, 2021, 55(5): 917-925.)
- [16] 王晓磊. 基于场地危险性和目标谱的核电安全壳概率地震风险分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
(WANG Xiaolei. Seismic probabilistic risk analysis for nuclear power plant containments based on site-specific hazard and target spectra [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.)
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)