

文章编号: 0258-0926(2016)03-0043-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2016.03.0043

# 基于统计的核电厂地震裕量分析建议反应谱

王玉石<sup>1</sup>, 李小军<sup>1,2\*</sup>, 赵 雷<sup>3</sup>, 侯春林<sup>3</sup>

1. 中国地震局地球物理研究所, 北京, 100081; 2. 北京工业大学建筑工程学院, 北京, 100124;  
3. 国家环保总局核与辐射安全中心, 北京, 100082

**摘要:** 基于美国新一代地震动衰减关系 (NGA) 数据库中 350 条基岩强震动加速度记录数据, 以及我国汶川  $M_w$ 7.9 地震和芦山  $M_w$ 6.6 地震中获取的 14 条基岩强震动加速度记录, 获得可用于核电厂地震裕量分析的基岩水平向加速度反应谱谱型。获得的反应谱充分考虑了地震规模 (震级) 对地震动反应谱频率成分的显著影响, 在核电厂地震裕量分析中可以考虑厂址所处地震构造环境对输入地震动反应谱谱型的影响。相对于 RG1.60 谱, 给出的反应谱能够更加可靠地反映近场中强地震产生的地震动高频成分。

**关键词:** 核电厂; 地震裕量分析; 强震动; 加速度反应谱

**中图分类号:** P315 **文献标志码:** A

## Suggested Spectral Accelerations for Seismic Margin Assessments of Nuclear Power Plants Based on Statistics

Wang Yushi<sup>1</sup>, Li Xiaojun<sup>1,2\*</sup>, Zhao Lei<sup>3</sup>, Hou Chunlin<sup>3</sup>

1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing, 100081, China;  
2. The College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China;  
3. Nuclear and Radiation Safety Centre, Ministry of Environmental Protection of China, Beijing, 100082, China

**Abstract:** Based on the statistics of 350 sets of strong-motion acceleration records on bedrock in Next Generation Attenuation(NGA) database of the US and 14 sets of strong-motion acceleration records on bedrock in Wenchuan  $M_w$ 7.9 earthquake and Lushan  $M_w$ 6.6 earthquake, normalized horizontal spectral accelerations on bedrock for seismic margin assessments of nuclear power plants were suggested. The effects of earthquake magnitude on frequency contents of strong-motions were adequately taken into account in this suggested spectral acceleration, which could help evaluate the effects of different seismic tectonic environments on normalized spectral acceleration inputs in the seismic margin assessments of different nuclear power plants. In comparison to the normalized spectral accelerations suggested in RG1.60, this suggested spectral acceleration could reflect the high frequency contents of strong-motions induced by medium-strong earthquakes in near field more reliably.

**Key words:** Nuclear power plant, Seismic margin assessment, Strong-motion, Spectral accelerations

## 0 引 言

核电厂多位于地震危险性相对较弱的地区, 已有震例表明, 尽管概率很小, 但超过核电厂安全停堆地震 (SSE) 的地震动还是有可能发生。特别是在 2011 年日本 3·11 地震引发的海啸造成

福岛核事故后, 国际社会更加关注核电厂抵御超出 SSE 地震动的能力。因此, 需要对核电厂及其设备进行地震裕量分析, 找出限制核电厂安全承受大于 SSE 事件能力的薄弱环节并加以改进, 从而提高核电厂系统的抗震能力。

收稿日期: 2015-08-28; 修回日期: 2016-03-15

基金项目: 环保公益性行业科研专项 (201309056); 国家自然科学基金项目 (51578514, 51208475)

作者简介: 王玉石 (1982—), 男, 副研究员, 现从事强震动观测数据分析与应用研究

\*通讯作者: 李小军, E-mail: beerli@vip.sina.com

地震裕量分析首先需要确定地震动输入反应谱的谱型,美国电力研究协会(EPRI)和美国核管会(NRC)建议了不同的确定方法<sup>[1]</sup>,但不同方法给出的反应谱谱型差异很大。如, RG1.60 谱<sup>[2]</sup>长周期成分非常丰富, NUREG/CR-0098 谱<sup>[3]</sup>中频段谱值却很低。对于我国大部分厂址, 概率法给出的谱型中频段谱值较高。我国核电厂厂址所处的地震构造环境与美国西部地区(地震活动性强, 适用 RG1.60 谱)或美国中东部地区(地震活动性弱, 适用 NUREG/CR-0098 谱)均存在差异, 有必要探求适合我国核电厂地震构造环境的裕量分析地震反应谱确定方法。

本文基于对实测基岩强震动加速度记录数据的统计分析, 提出通过震级与距离考虑厂址地震构造环境的裕量分析地震反应谱谱型确定方法。

## 1 统计数据

本次统计主要选取了美国新一代地震动衰减关系(NGA)计划数据库中全球 350 条基岩强震动加速度记录数据; 其矩震级( $M_w$ )不小于 6.0, 地面峰值加速度(PGA)不小于  $75 \text{ cm/s}^2$ , 对应场地覆盖层剪切波速不小于  $700 \text{ m/s}$ 。NGA 计划是由美国太平洋地震工程研究中心(PEER)、美国地质调查局(USGS)、南加州地震中心(SCEC)联合实施的科学研究合作计划, 旨在通过地震动衰减关系研究提高工程设防地震动输入的可靠性。强震动加速度记录作为 NGA 数据库中的基础数据颇受重视, 有专门团队逐条记录进行人工分析处理, 其可靠性得到广泛认可。此外, 本项研究还增加了汶川  $M_w 7.9$  地震和芦山  $M_w 6.6$  地震中获取的 14 条基岩强震加速度记录, 参与统计的记录数据总计 364 条。

统计所用记录数据的震级-距离关系如图 1 所示; 其中距离参数采用观测点到破裂面地表投影的最小水平距离。从图 1 可以看出, 所用数据在震级  $M_w 6 \sim 7.9$ 、距离  $1.5 \sim 80 \text{ km}$  之间均有分布, 其中  $M_w 6.2$ 、 $M_w 6.9$ 、 $M_w 7.62$  地震对应的记录数量最多。

## 2 基岩反应谱统计

分别计算水平分量记录数据的加速度反应谱  $S_a$  (阻尼比 5%), 并用 PGA 对反应谱进行归一化处理。图 2 和图 3 分别为不同震级段和不同

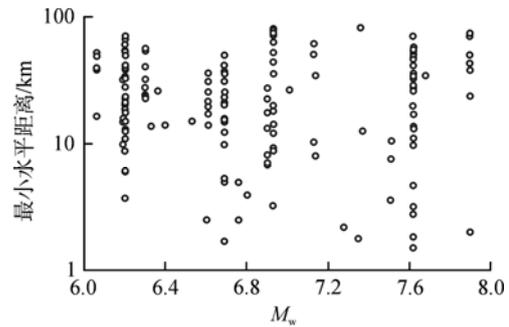


图 1 统计数据的地震级-距离分布  
Fig. 1 Magnitude-Distance Distribution of Data

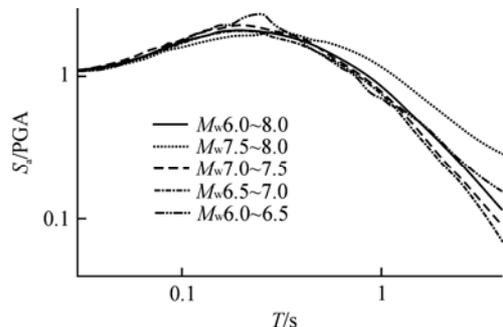


图 2 不同震级段反应谱平均值比较  
Fig. 2 Comparison of Average Normalized Spectral Accelerations in Different Magnitude Intervals

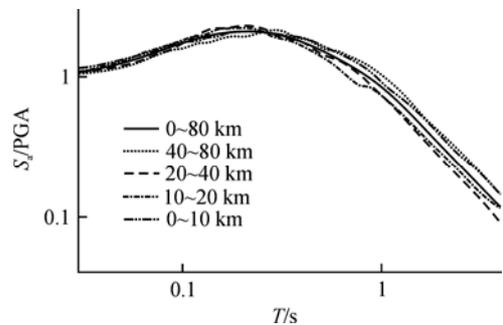


图 3 不同距离段反应谱平均值比较  
Fig. 3 Comparison of Average Normalized Spectral Accelerations in Different Distance Intervals

距离段地震动反应谱的平均值。

从图 2 可看出, 随着震级的增大, 周期  $T > 0.5 \text{ s}$  的反应谱谱值明显增大, 其中因样本量的限制  $M_w 7.0 \sim 7.5$  反应谱平均值平滑度较差, 但并不影响总体趋势。图 3 则表明, 反应谱谱型与距离相关性很弱, 不同距离段反应谱的区别并无明显规律性, 特别是在  $T > 0.5 \text{ s}$  的反应谱部分,  $0 \sim 10 \text{ km}$  反应谱平均值与  $40 \sim 80 \text{ km}$  反应谱平均值非常接近, 但远大于  $10 \sim 20 \text{ km}$  与  $20 \sim 40 \text{ km}$  反应谱平均值。这与之前的认识“距离越远, 地震动长周期成分越丰富”的规律不同, 其原因可能是早期

统计数据中，震中距较大的基岩记录稀缺，多以大震土层场地上记录经土层效应调整后参与统计有关。震中距较大时地震动持续时间会更长，厚的软弱土层会明显放大地震动的长周期成分，使反应谱长周期成分更加丰富。如果土层效应调整系数未能完全消除地震动长周期部分的土层放大效应，则会直接影响据此统计得到的基岩远场反应谱谱型，造成长周期反应谱谱值畸高。因此，本次统计工作认为在 80 km 范围内基岩反应谱谱型对距离参数的依赖性很弱，无明显的规律性，在反应谱谱型统计过程中不予考虑。

以矩震级  $M_w$  为自变量，归一化的水平向反应谱为因变量，利用最小二乘法进行线性回归，得到震级相关的归一化反应谱如下：

$$\lg[S_a(T)] = a(T) + b(T)M_w \pm \delta$$

$$6.0 \leq M_w \leq 8.0$$

式中， $a$ 、 $b$  为与周期相关的回归系数； $\delta$  为标准差。各回归系数值见表 1。

### 3 与标准谱比较

根据式 (1) 和表 1 中系数，得到  $M_w=6.0$ 、6.5、7.0、7.5、8.0 时的反应谱谱型，如 4 所示。由图 4 可以看出，在  $T > 0.2$  s 的频段，RG1.60 给出的谱型与本次统计给出的  $M_w 8.0$  地震的反应谱谱型较为接近，远高于本次统计给出的  $M_w 6.0$  地震的反应谱谱型；但在频率较高的  $T < 0.2$  s 部分，RG1.60 谱型稍高，与本次统计给出的  $M_w 6.0$  地震的反应谱谱型更接近一些。从总体上看，RG1.60 谱可以认为是本次统计给出的  $M_w 6.0 \sim 8.0$  地震反应谱谱型的外包线。

表 1 基岩反应谱回归系数值

Table 1 Coefficients of Spectral Accelerations on Bedrock

$T/s$	$a$	$b$	$\delta$	$T/s$	$a$	$b$	$\delta$
0.000	0.000	0.0000	0.126	0.280	0.096	0.0305	0.152
0.030	0.052	-0.0016	0.158	0.300	0.021	0.0401	0.142
0.035	0.108	-0.008	0.165	0.320	-0.019	0.0447	0.140
0.040	0.138	-0.0102	0.178	0.340	-0.048	0.0476	0.139
0.044	0.197	-0.0166	0.186	0.360	-0.091	0.0524	0.146
0.047	0.235	-0.0208	0.191	0.380	-0.139	0.0576	0.149
0.050	0.247	-0.0211	0.195	0.400	-0.186	0.0628	0.150
0.055	0.279	-0.0237	0.199	0.450	-0.311	0.0763	0.156
0.060	0.321	-0.0274	0.208	0.500	-0.442	0.0911	0.172
0.065	0.333	-0.0265	0.215	0.550	-0.551	0.1030	0.182
0.070	0.347	-0.0264	0.220	0.600	-0.628	0.1103	0.190
0.075	0.353	-0.025	0.220	0.650	-0.721	0.1199	0.200
0.080	0.351	-0.0228	0.224	0.700	-0.847	0.1345	0.209
0.085	0.368	-0.0238	0.225	0.750	-0.942	0.1445	0.217
0.090	0.408	-0.0282	0.221	0.800	-1.002	0.1499	0.224
0.095	0.451	-0.0327	0.221	0.850	-1.022	0.1497	0.227
0.100	0.518	-0.0406	0.222	0.900	-1.092	0.1563	0.229
0.110	0.534	-0.0399	0.226	1.000	-1.310	0.1803	0.228
0.120	0.504	-0.0334	0.225	1.100	-1.399	0.1856	0.236
0.130	0.564	-0.0399	0.226	1.200	-1.598	0.2075	0.235
0.140	0.577	-0.0403	0.227	1.300	-1.805	0.2296	0.235
0.150	0.549	-0.0350	0.222	1.400	-1.921	0.2399	0.237
0.160	0.528	-0.0319	0.214	1.500	-2.090	0.2562	0.234
0.170	0.494	-0.0258	0.206	1.700	-2.422	0.2935	0.235
0.180	0.453	-0.0193	0.199	2.000	-2.845	0.3376	0.252
0.200	0.433	-0.0158	0.187	2.500	-3.312	0.3866	0.263
0.220	0.398	-0.0105	0.170	3.000	-3.782	0.4360	0.273
0.240	0.318	0.0006	0.167	3.500	-4.139	0.4738	0.286
0.260	0.186	0.0183	0.162	4.000	-4.435	0.5047	0.301

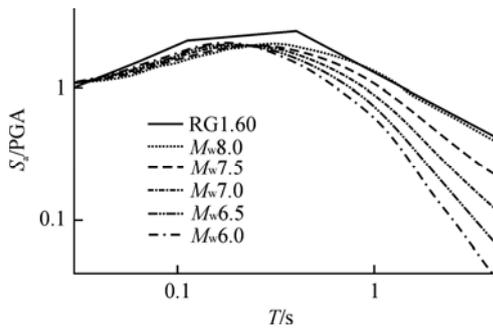


图4  $M_w=6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0$  时反应谱谱型与 RG1.60 谱比较

Fig. 4 Comparison of Normalized Spectral Accelerations when  $M_w=6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0$  and Spectral Accelerations Suggested in RG1.60

#### 4 在某核电厂裕量分析地震确定中的应用

我国东南地区某核电厂厂址地震危险性较弱, 利用确定性方法得到的厂址地震动反应谱如图 5 所示。其中, 主要发震构造和弥散地震在厂址处产生的 PGA 由在我国核电厂地震危险性分析中得到广泛承认的基岩水平向峰值加速度衰减关系<sup>[4-5]</sup>获得, 反应谱谱型由本文统计结果给出。由图 5 可以看出, 此厂址可能遭受的最强地震动源自弥散地震, 但 250 km 之外的一条可发生 8 级地震的活动断裂也有可能在此厂址处产生较强的长周期地震动。因此, 可取所有活动断层和弥散地震在厂址处产生地震动反应谱的外包线作为裕量分析地震动输入。从图 5 中还可以看出, PGA

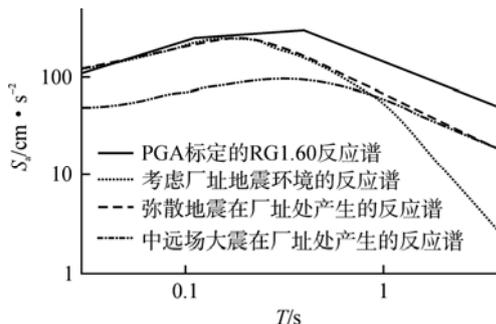


图5 确定性方法给出的某核电厂厂址反应谱

Fig. 5 Spectral Accelerations at a Nuclear Power Plant Site Given by Deterministic Method

标定的 RG1.60 谱在  $T > 0.3$  s 的长周期部分相对过于保守。

本方法在确定裕量分析地震 SME 时, 采用了震级相关反应谱谱型, 且考虑了不同距离的活动断层对厂址地震动反应谱频率成分的影响, 可以认为在一定程度上考虑了厂址相关的地震构造环境对裕量分析地震反应谱谱型的影响。

#### 5 结论与展望

基于对基岩强震动记录数据的统计分析, 发现基岩水平向反应谱谱型对震级依赖显著, 而与距离参数的相关性并不强, 并据此得到了震级相关的 PGA 归一化基岩水平向反应谱 (阻尼比 5%)。此反应谱与 RG1.60 谱相比较, RG1.60 谱为基于统计的  $M_w 6.0 \sim 8.0$  地震反应谱谱型的外包线。对于我国地震活动性较弱的东南地区, 地震危险性主要来自于强度较小的弥散地震, 直接利用 RG1.60 谱作为地震裕量分析的地震动输入在长周期部分相对过于保守。

本文建议的核电厂裕量分析地震动输入确定方法, 在一定程度上考虑了厂址地震构造环境对反应谱谱型的影响, 但其有效性尚需在更多核电厂地震裕量分析中予以验证。

#### 参考文献:

- [1] ASME/ANS. Standard for level 1/large early release frequency probabilistic risk assessment for nuclear Power plant applications. ASME/ANS RA-SA-2009 [S]. 2009.
- [2] USNRC. design response spectra for seismic design of nuclear power plants. Regulatory Guide 1.60 [S]. 1973.
- [3] N.M. Newmark, W.J. Hall. Development of criteria for seismic review of selected nuclear power plants. NUREG/CR-0098 [R]. 1978.
- [4] 霍俊荣. 近场强地面运动衰减规律的研究[D] 哈尔滨: 国家地震局工程力学研究所论文, 1989.
- [5] 俞言祥, 汪素云. 中国东部和西部地区水平向基岩加速度反应谱衰减关系[J]. 震灾防御技术, 2006, 1(3): 206-217.

(责任编辑: 马 蓉)