

核设施一维土层地震反应分析中的 参数不确定性¹

荆 旭^{1, 2)}

1) 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2) 环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100082

摘要 本文概述了一维土层地震反应分析等效线性化方法评价结果不确定性研究的进展, 比较了中美两国核设施土层地震反应分析中参数不确定性的处理方法。基于实测数据, 令参数随机变化, 建立土层剖面模型, 采用随机振动理论方法, 分析了土层动力特性、剪切波速、基岩地震动输入界面人评价结果的影响。结果表明, 土层剪切波速的不确定性对评价结果影响最大, 主要表现为加速度反应谱平台段的延长。对比参数随机变化模型和最佳估计模型的计算结果可知, 随机振动理论反映了土层对基岩地震动的影响, 将随机模型分析结果的中值加减 1 倍标准差基本可以包络最佳估计模型的分析结果。

关键词: 场地响应 随机振动 核安全 不确定性

引言

为了确定工程的场地相关反应谱, 需要考虑场地条件对地震动的影响。对于横向性质变化较小的工程场地, 通常采用一维模型进行土层地震反应分析。核设施土层地震反应分析工作对地震动输入和土层模型的要求较高, 如自由基岩表面地震动反应谱应按确定性和概率方法的计算结果分别确定、地震动输入界面的剪切波速不小于 700m/s、应根据土力学性能测定结果确定模型参数等, 这些技术要求通过限制模型参数的不确定性, 提高了土层地震反应分析结果的可靠性。

考虑到土层地震反应分析中的不确定性, 我国的地震安全性评价规范要求进行多个钻孔场地力学模型和多个地震动时程样本的组合地震反应分析计算, 再综合评判多个钻孔场地力学模型和输入多个地震动组合时的计算结果, 以确定场地的地震动参数。综合评判通常采用对地震动反应谱值的平均拟合方法或者外包络法(卢寿德, 2006)。美国核电厂地震危险性分析工作基于工程场地的钻孔、原位测试和室内实验结果, 根据动力特性和波速分布的研究成果, 随机生成土层模型, 表征土层模型参数的不确定性; 采用调整天然地震动或利用随机振动理论方法, 确定自由地表基岩地震动输入进行土层地震反应分析; 对计算出的放大系数进行统计, 再以放大系数分布

1 基金项目 国家重大科技专项子课题“核电厂工程场地地震影响及其适应性评价技术研究”(2013ZX06002001-09), 科技部国家软科学研究计划(2013GXS4B075)共同资助

[收稿日期] 2016-11-08

[作者简介] 荆旭, 男, 生于 1983 年。在读博士研究生, 高工。主要从事核工程地震危险性研究。E-mail: jingxu@chinansc.cn

的均值乘以基岩地震动反应谱，确定工程的场地相关谱（Silva 等，1996；USNRC，2007）。

综上所述，中美两国核设施土层地震反应分析的总体思路是一致的，都是采用地震动-土层动力学模型组合的方式来考虑土层地震反应分析结果的不确定性。可能影响分析结果的参数包括基岩地震动、土层动力特性和土层剪切波速。

石玉成等（1999）采用 Monte Carlo 方法对影响土层地震反应分析结果的不确定因素进行了分析；王恒知等（2009）分析了时程拟合参数对土层地震反应分析结果的影响；施春花等（2009）统计分析了北京地区不同深度粘土的动力特性，采用等效线性化方法分析了统计结果的代表性，为北京地区难以取得原状土的工程场地地震安评工作提供了参考；王玉石等（2016）总结了强震动条件下土体非线性动力特性研究的发展历程和方向；沈建文等（2010，2011）分析了土体剪应变折减系数对土层地震反应分析结果的影响，提出了采用震级和距离参数修正土层反应的等效线性化方法，建议使用设定地震定义震级和距离；Robinson 等（2006）考虑了土层厚度和波速结构的不确定性，基于实测数据，随机生成土层模型，分析了悉尼港口地区的地震危险性及其不确定性。这些研究工作的地震动输入均为与目标谱匹配的地震动时程，加速度时程是地震动随机过程的实现。由于地震动随机过程的变异性较大，为了给出土层地表加速度反应谱的稳定估计值，需要采用多条时程进行多次分析。美国核管会（U. S. Nuclear Regulatory Commission, USNRC）的管理导则中推荐了随机振动理论（Random Vibration Theory, RVT）方法，该方法以幅值谱和持时作为输入，降低了分析工作的计算量和对地震动时程的依赖，可以快速准确地估计工程场地的地表地震动（Schneider 等，1991；Silva 等，1996；Boore，2003；Rathje 等，2006；Ozbey，2006；USNRC，2007；Rathje 等，2010；Boore 等，2015）。

本文以某核电厂址为例，采用随机振动理论方法确定基岩地震动输入，基于工程场地土力学和剪切波速测试数据，随机生成土层模型，进行土层地震反应分析，讨论土层波速剖面、动力特性、基岩地震动输入界面不确定性对土层地震反应分析结果的影响。

1 基岩地震危险性和土层模型

本文重点在于土层地震反应分析，因此不再详述厂址基岩地震危险性的评价过程，评价结果见图 1。图 1 中的数据为厂址特定基岩地表地震动（SL-2），是概率法和确定论方法评价结果的包络值，其中概率论方法的年平均超越概率为 1×10^{-4} 。

依据我国地震安全性评价工作的规范要求，在不同位置对工程场地进行了多个钻孔测试，将其中的控制孔分别命名为 zk1、zk2 和 zk3。钻孔岩石地层柱状图和剪切波速剖面图见图 2。

图 2（a）中从左至右依次为 zk1、zk2 和 zk3 的剖面。从图 2（a）可知，工程场地的主要地层包括粘土、粉质粘土、粉砂、玄武岩、火山角砾岩、粘土岩，其中 zk3 未见粘土岩。图 2（b）中的红色、蓝色和黑色曲线分别代表 zk1、zk2 和 zk3 中介质剪切波速随深度的变

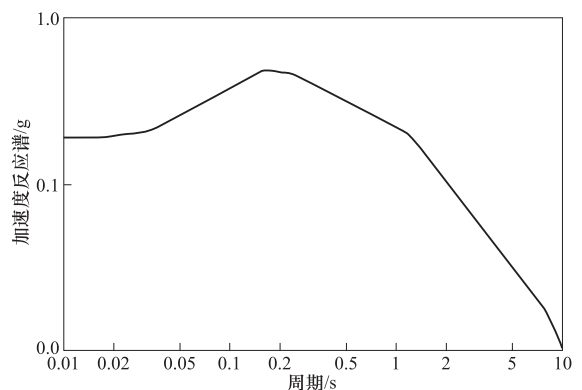


图 1 厂址特定基岩地表地震动（SL-2）

Fig. 1 Site specific earthquake ground motion (SL-2)

化。由图 2 (b) 可以看出, 粘土和砂土中的剪切波速随深度的增加逐渐变大, 玄武岩和火山角砾岩中的剪切波速与土壤中的剪切波速相比, 存在明显的突变, 其中玄武岩的剪切波速又明显高于火山角砾岩中的剪切波速。3 个钻孔位于同一场地中, 相互距离处在百米量级上。土壤中剪切波速随深度的变化趋势基本一致, 玄武岩和火山角砾岩中剪切波速随着风化程度的变化而变化, 但是都远远高于美国西部强地面运动记录中基岩的定义值 (760m/s), 因此可以据此对 zk3 的剖面进行波速延拓, 至国标定义的基岩地震动输入界面。

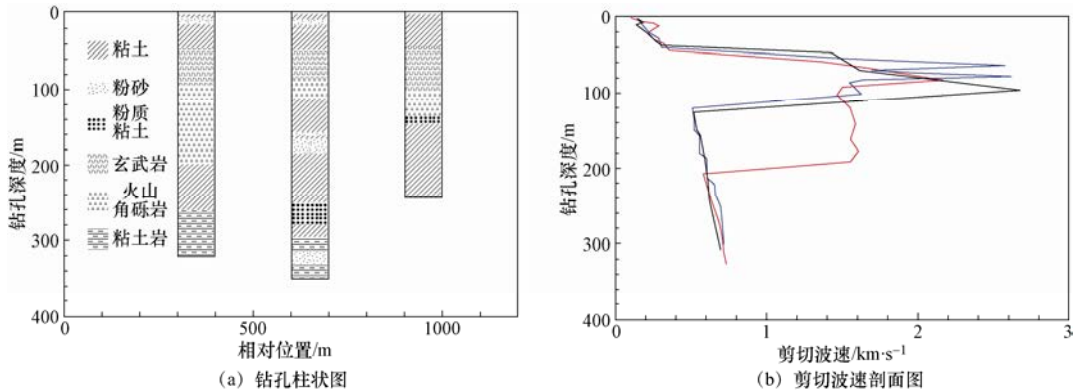


图 2 工程场地钻孔柱状图和剪切波速剖面图

Fig. 2 Log columns and profiles of shear wave velocity of site

为了确定土层的动力非线性特性, 对钻孔内各土层的典型样品分别进行了共振柱和动三轴实验, 综合确定了土层样品的动剪切模量比 (G/G_{max}) 和阻尼比 (λ) 随动剪应变 (γ) 的变化, 土层样品动力非线性特征见表 1, 剪切模量比和阻尼比与剪应变关系曲线如图 3 所示。

表 1 土层样品动力非线性特性

Table 1 The shear modulus and damping ratio vs. strain of soil samples

序号	土层名称	剪切模量比与阻尼比	剪应变 $\gamma/10^{-4}$							
			0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
1	粉质粘土	G/G_{max}	0.993	0.987	0.937	0.881	0.718	0.56	0.203	0.113
		λ	0.004	0.007	0.028	0.045	0.06	0.098	0.204	0.236
2	粉土	G/G_{max}	0.993	0.986	0.936	0.879	0.749	0.599	0.23	0.13
		λ	0.004	0.007	0.023	0.033	0.068	0.11	0.22	0.251
3	粉质粘土	G/G_{max}	0.996	0.992	0.96	0.924	0.661	0.493	0.163	0.089
		λ	0.005	0.009	0.032	0.047	0.065	0.103	0.192	0.215
4	粉质粘土	G/G_{max}	0.991	0.983	0.919	0.87	0.762	0.678	0.316	0.188
		λ	0.005	0.009	0.032	0.047	0.055	0.091	0.193	0.224
5	粉质粘土	G/G_{max}	0.99	0.98	0.905	0.827	0.702	0.601	0.232	0.131
		λ	0.005	0.009	0.032	0.047	0.061	0.099	0.198	0.226
6	粉砂	G/G_{max}	0.989	0.978	0.947	0.906	0.822	0.716	0.371	0.227
		λ	0.005	0.009	0.032	0.037	0.054	0.083	0.186	0.282
7	粉砂	G/G_{max}	0.991	0.982	0.936	0.892	0.802	0.704	0.336	0.202
		λ	0.005	0.009	0.032	0.047	0.067	0.091	0.189	0.219

续表

序号	土层名称	剪切模量比与阻尼比	剪应变 $\gamma/10^{-4}$							
			0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
8	粉质粘土	G/G_{\max}	0.992	0.985	0.938	0.896	0.801	0.703	0.321	0.191
		λ	0.005	0.009	0.032	0.044	0.063	0.085	0.172	0.208
9	粉质粘土	G/G_{\max}	0.992	0.984	0.923	0.884	0.703	0.611	0.239	0.136
		λ	0.005	0.009	0.032	0.047	0.071	0.088	0.175	0.206
10	粉质粘土	G/G_{\max}	0.993	0.986	0.935	0.886	0.713	0.624	0.249	0.142
		λ	0.002	0.005	0.022	0.038	0.075	0.093	0.198	0.242
11	粉质粘土	G/G_{\max}	0.99	0.98	0.907	0.862	0.712	0.607	0.236	0.134
		λ	0.021	0.032	0.061	0.078	0.118	0.143	0.179	0.198
12	粉质粘土	G/G_{\max}	0.992	0.984	0.924	0.859	0.633	0.463	0.147	0.079
		λ	0.019	0.03	0.046	0.058	0.092	0.112	0.169	0.184
13	粉质粘土	G/G_{\max}	0.996	0.991	0.958	0.919	0.813	0.685	0.303	0.179
		λ	0.002	0.004	0.018	0.03	0.05	0.083	0.18	0.211
14	粉质粘土	G/G_{\max}	0.989	0.978	0.913	0.876	0.782	0.701	0.413	0.262
		λ	0.017	0.025	0.041	0.044	0.053	0.066	0.128	0.189
15	粉砂	G/G_{\max}	0.992	0.984	0.925	0.861	0.664	0.497	0.165	0.09
		λ	0.004	0.007	0.025	0.036	0.074	0.12	0.239	0.273
16	粉质粘土	G/G_{\max}	0.994	0.989	0.946	0.897	0.728	0.572	0.211	0.118
		λ	0.005	0.009	0.03	0.041	0.062	0.086	0.189	0.228
17	粉质粘土	G/G_{\max}	0.993	0.986	0.943	0.905	0.834	0.763	0.439	0.281
		λ	0.005	0.01	0.034	0.048	0.068	0.081	0.157	0.179
18	粉质粘土	G/G_{\max}	0.995	0.991	0.955	0.915	0.746	0.595	0.227	0.128
		λ	0.002	0.004	0.018	0.031	0.056	0.094	0.203	0.238
19	粉细砂	G/G_{\max}	0.992	0.985	0.934	0.897	0.831	0.757	0.453	0.293
		λ	0.001	0.003	0.012	0.018	0.035	0.05	0.104	0.12

图 3 给出了表 1 中土样动力非线性特征测量值的拟合曲线，由图 3 (a) 可知，随着剪应变的增大，剪切模量比逐渐减小。由图 3 (b) 可知，随着剪应变的增大，阻尼比逐渐增大。需要注意的是，由于工程场地内采集的样品进行了动三轴和共振柱实验，剪应变的变化范围较大，使得阻尼比的最大值可达 20% 以上。

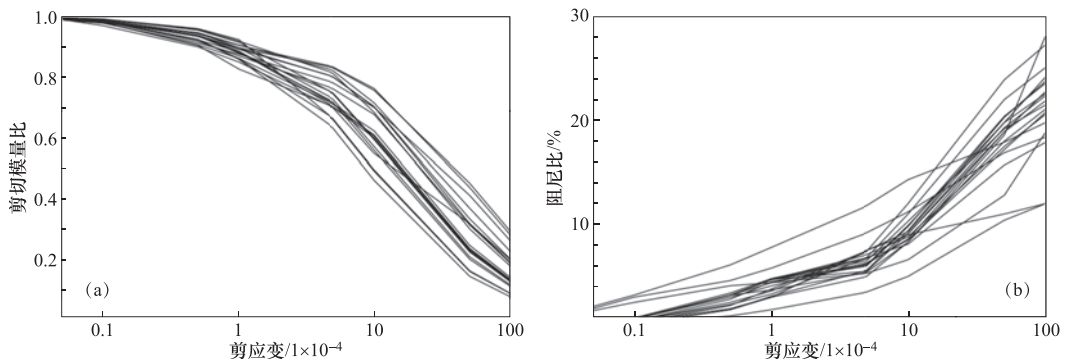


图 3 剪切模量-剪应变关系 (a) 和阻尼比-剪应变关系 (b)

Fig. 3 Plot of shear modulus vs. strain (a) and plot of damping ratio vs. strain (b)

2 随机振动理论方法 (RVT)

Schneider 等于 1991 年首次提出了采用随机振动理论方法进行场地响应分析的思路, RVT 方法的输入为傅立叶幅值谱 (FAS) 和持时 (T_{gm}), 不需要地震动时程, 可以通过一次分析就给出场地响应的分布特征 (Schneider 等, 1991)。Silva 等 (1996) 将 RVT 方法应用于核设施土层地震反应分析中, 研究了土层动力特性曲线不确定性的表征方式。Rathje 等 (2006) 验证了 RVT 方法对美国东部地区的适用性, Ozbey (2006) 进行了 RVT 方法和传统时程方法的对比研究。

RVT 方法中地震动输入的 FAS 可以根据地震学的震源理论给出, 也可以通过目标反应谱反算来确定 (Brune, 1970; Gasparini 等, 1976)。 T_{gm} 的定义可以采用震源理论计算或经验模型, Boore (2003) 给出了适用于美国西部的经验公式, Boore 等 (2015) 给出了适用于稳定大陆区域的地壳放大模型和持时模型。本文采用反应谱-幅值谱的相互关系, 计算幅值谱, 作为基岩地震动输入, 进行土层地震反应分析。

3 不确定性影响分析

为了分析土层模型中动力特性、剪切波速、基岩地震动输入界面位置对分析结果的影响, 将变量分离, 研究单个变量对评价结果的影响。首先, 固定所有参数, 以第 2 章中给出的基岩地震动和 zk1 的土层剖面模型作为输入, 采用 RVT 方法进行土层地震反应分析, 钻孔剖面模型 zk1 的加速度传递函数和土层地表加速度反应谱如图 4 (a) 和 (b) 所示。

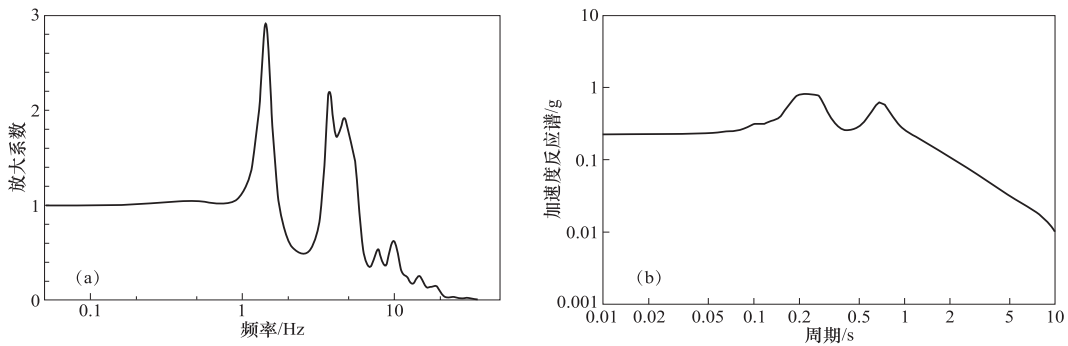


图 4 固定参数模型条件下钻孔 zk1 的加速度传递函数 (a) 和土层地表加速度反应谱 (b)

Fig. 4 Acceleration transfer function (a) and soil surface acceleration spectra (b) of zk1

由图 4 (a) 可知, zk1 的土层剖面模型改变了地震动的频谱特征, 1.4Hz 和 3.8Hz 左右的放大效应非常明显, 尤其是 1.4Hz 处, 幅值被放大了接近 3 倍; 高于 6Hz 部分的幅值降低明显, 低于 1.3Hz 的频段内的幅值基本没有变化, 说明 zk1 剖面模型的特征周期在 0.7s 左右, 0.26s 附近频谱的放大主要是近地表砂土层的影响。

由图 4 (b) 可知, 土层地表加速度反应谱在 2 个周期段内数值较高, 一个是 0.19—0.27s, 表现为较宽的平台段, 一个是 0.68s 附近, 呈尖峰状, 二者之间则是一个显著的“谷地”。加速度反应谱的特征与加速度传递函数的特征相似, 都说明了 zk1 所代表的土层模型对基岩地震动在 2 个频段内有明显的放大作用。

3.1 剪切波速

以 zk1 的剪切波速剖面为均值, 采用 Robinson 等 (2006) 提出的土层剪切波速不确定性

分布作为前提假设, 随机生成 30 个土层模型, 采用 RVT 方法进行土层地震反应分析。钻孔 zk1 的加速度传递函数和土层地表地震动反应谱如图 5 (a) 和 (b) 所示。

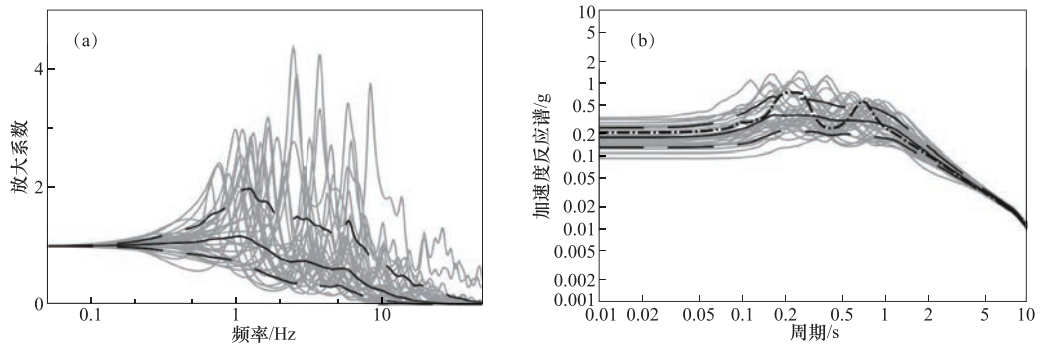


图 5 剪切波速随机变化条件下 zk1 的加速度传递函数 (a) 和地表加速度反应谱 (b)

Fig. 5 Acceleration transfer function (a) and soil surface acceleration spectrum (b) of zk1 through randomly variation on shear wave velocity

图 5 (a) 中的灰色曲线为每个随机模型的计算结果, 黑色实线为所有结果的中值, 黑色虚线为所有传递函数曲线的中值加减 1 倍标准差。将随机模型计算结果的幅值放大系数中值和中值加 1 倍标准差与剪切波速不变前提下的放大系数进行对比可知, 二者的整体趋势一致, 基岩上覆土层对低频部分基本没有影响, 明显地放大了特征周期频段附近的幅值, 降低了高频部分的幅值。不同的是, 随机模型的中值在 1.6Hz 之后迅速降低了基岩地震动的傅立叶幅值谱, 没有反映出近地表砂土对基岩地震动的影响。传递函数中值加 1 倍标准差的结果反映出了 2 个明显的放大频段, 与固定参数模型的传递函数相比, 2 个放大频段之间的放大系数虽然也相对较小, 但是其绝对值大于 1, 放大频段的上限也扩展到 8Hz 左右。

图 5 (b) 中的灰色曲线为每个随机模型的计算结果, 黑色实线为所有结果的中值, 黑色虚线为中值加减 1 倍标准差, 黑色点虚线为固定参数模型给出的土层地表加速度反应谱。与固定参数模型分析结果相比, 剪切波速随机变化模型给出的反应谱平台段较宽, 除了放大效应明显的顶峰频段以外, 中值加减 1 倍标准差反应谱基本能够包络固定参数模型分析给出的结果。

3.2 土层动力特性曲线

固定其他参数不变, 以图 3 给出的剪切模量比-剪应变和阻尼比-剪应变关系曲线作为中值, 采用 Silva 等 (1996) 提出的土层动力特性曲线不确定性分布作为前提假设, 随机生成 30 个土层剖面模型, 采用 RVT 方法进行土层地震反应分析。加速度传递函数和土层地表加速度反应谱如图 6 所示。

图 6 (a) 中的黑色曲线为土层动力特性曲线随机变化模型的加速度传递函数, 红色实线为传递函数的中值, 红色虚线为中值加减 1 倍标准差, 红色点虚线为固定参数模型的传递函数。从图中可以看出, 土层动力特性曲线随机变化模型的统计结果可以反映土层模型对基岩地震动的影响, 放大频段特征与固定参数的结果相似, 曲线形状非常相似。固定参数模型的传递函数与参数随机变化模型相比, 除了放大频段以外, 与两者的中值相近; 1.4Hz 附近明显高于中值, 略低于中值加 1 倍标准差; 3.8—4.8Hz 范围内介于中值和中值加 1 倍标准差之间。

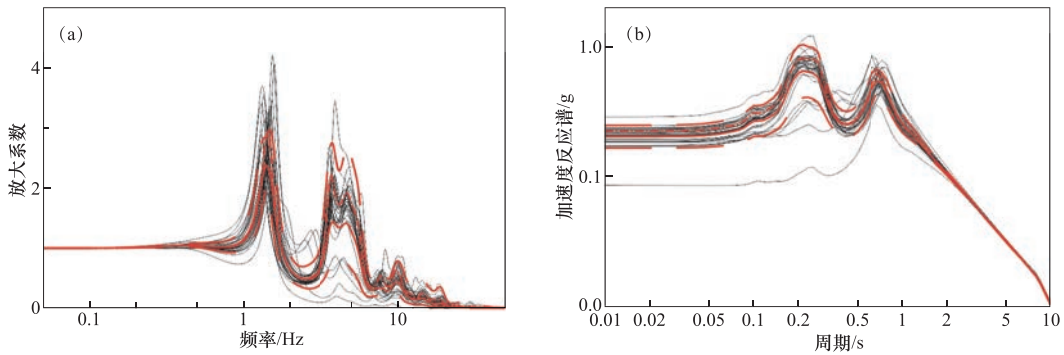


图 6 随机生成土层动力特性曲线条件下的加速度传递函数 (a) 和土层地表加速度反应谱 (b)

Fig. 6 Acceleration transfer function (a) and soil surface acceleration spectrum (b) of zk1 through randomly variation on soil dynamic character

图 6(b) 中的黑色曲线为每个土层动力特性曲线随机变化模型的土层地表加速度反应谱, 红色实线为反应谱的中值, 红色虚线为中值加减 1 倍标准差, 红色点虚线为固定参数模型的土层地表加速度反应谱。从图中可以看出, 随机模型的统计结果可以反映土层地表加速度反应谱的形状特征, 同样都是在 0.18—0.28s 范围内表现为明显的平台段, 在 0.70s 附近表现为明显的尖峰。数值上固定参数的反应谱在周期低于 0.36s 时介于中值和中值加 1 倍标准差之间, 高于 0.36s 时, 固定参数的反应谱基本上与随机模型反应谱的中值一致。

3.3 基岩地震动输入界面

本小节的思路与前 2 小节相同, 随机模拟基岩地震动输入界面的位置, 即固定土层波速结构模型, 令输入界面的深度在给定范围内均匀分布。加速度传递函数和土层地表加速度反应谱的对比结果如图 7 所示。

图 7 中的黑色曲线为基岩地震动输入界面深度随机变化模型的加速度传递函数和土层地表加速度反应谱, 红色实线为计算结果的中值, 红色虚线为中值加减 1 倍标准差, 红色点虚线为固定参数模型的传递函数。从加速度传递函数图中的对比情况可知, 固定参数模型的传递函数与地震动输入界面深度随机变化模型传递函数统计结果的形状相似, 在 1.5Hz 附近和 3.4—5.4Hz 之间高于随机模型传递函数统计结果的中值加 1 倍标准差。

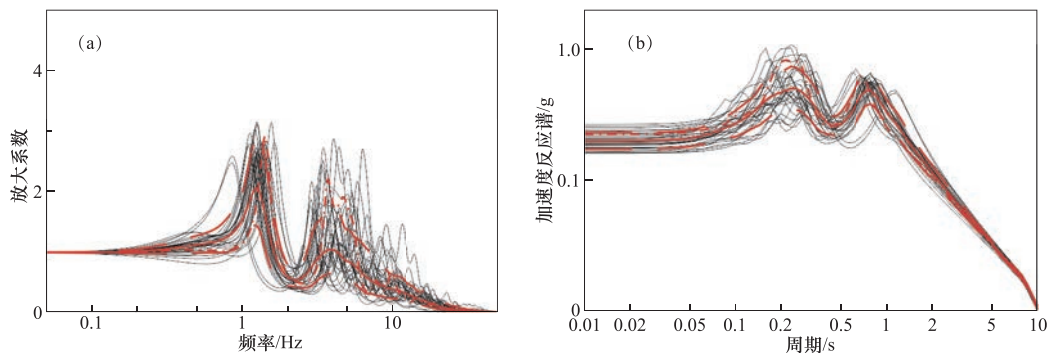


图 7 基岩地震动输入界面深度随机变化条件下的加速度传递函数 (a) 和土层地表加速度反应谱 (b)

Fig. 7 Acceleration transfer function (a) and soil surface spectrum (b) of zk1 under randomly variation on depth of hard rock surface

通过对比土层地表加速度反应谱可知, 固定参数模型的土层地表加速度反应谱与地震动输入界面深度随机变化模型反应谱统计结果的形状相似, 自振周期低 0.34s 时, 前者介于后者的中值和中值加 1 倍标准差之间, 高于 0.34s 时, 前者基本与后者的中值相一致。

3.4 综合影响

综合土层剖面模型的不确定性, 即参数随机变化模型中剪切波速、动力特性、基岩界面位置同时变化, 土层地震反应分析的结果如图 8 所示。

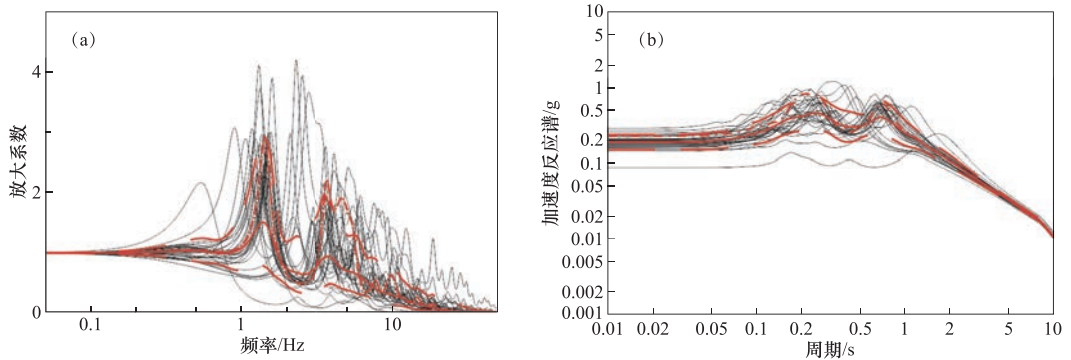


图 8 土层剖面随机模型与固定参数模型加速度传递函数 (a) 和地表加速度反应谱对比图 (b)

Fig. 8 Acceleration transfer function (a) and soil surface acceleration spectrum (b) of zk1 through randomly variation on shear wave velocity, soil dynamic character and depth of hard rock surface

图 8 中的黑色曲线为剪切波速、动力特性、基岩界面位置同时随机变化的加速度传递函数和反应谱, 红色实线为计算结果的中值, 红色虚线为中值加减 1 倍标准差, 红色点虚线为固定参数模型的传递函数和反应谱。从图 8 (a) 中可以看出, 参数随机变化模型分析结果的中值加 1 倍标准差可以反映场地对基岩地震动的影响, 在 1.4Hz 附近和 3.6Hz 附近明显放大了地震动幅值, 放大倍数与固定参数模型分析结果相一致。其余频段中, 固定模型放大倍数与随机模型分析结果的中值基本一致。

通过图 8 (b) 可知, 参数随机变化模型分析结果统计特征的平台段较宽, 中值加 1 倍标准差可以包络固定参数模型的分析结果。

4 结论

本文介绍了随机振动理论方法在核设施一维土层地震反应分析工作中的应用, 基于某核电厂工程场地实测数据和土层剖面模型参数的不确定性分布, 随机生成土层模型, 采用随机振动理论方法分析了剪切波速、土层动力特性和基岩地震动输入界面位置的不确定性对核设施一维土层地震反应分析结果的影响。

加速度传递函数结果表明, 与固定参数模型相比, 采用土层参数随机变化模型和随机振动理论方法可以反映工程场地对地震动的影响。

土层地表加速度反应谱结果表明, 土层剖面模型的不确定性中, 剪切波速的不确定性对评价结果影响最大, 使得加速度反应谱的平台段较宽, 随机模型评价结果的中值加 1 倍标准差, 除尖峰位置外, 可以包络固定参数模型的评价结果。

土层动力特性曲线和基岩地震动输入界面位置的不确定性对评价结果的影响相当, 固定

参数模型的分析结果介于土层参数随机变化模型分析结果的中值和中值加 1 倍标准差之间。

参考文献

- 卢寿德, 2006. GB17741-2005《工程场地地震安全性评价》宣贯教材. 北京: 中国标准出版社.
- 沈建文, 刘峥, 石树中, 2010. 用震级和距离参数修正土层反应的等效线性化方法. 地震学报, **32**(4): 466—475.
- 沈建文, 刘峥, 2011. 等效线性化地震反应的震级距离参数调整法及其在地震安全性评价中的应用. 震灾防御技术, **6**(3): 220—230.
- 施春花, 吕悦军, 彭艳菊等, 2009. 北京地区粉质粘土土动力学参数的统计分析. 震灾防御技术, **4**(1): 69—79.
- 石玉成, 蔡红卫, 徐晖平, 1999. 场地地震反应分析中的不确定性及其处理方法. 西北地震学报, **21**(3): 242—247.
- 王恒知, 石玉成, 卢育霞等, 2009. 人工拟合地震动时程参数对场地反应的影响分析. 西北地震学报, **31**(2): 126—130.
- 王玉石, 李小军, 兰日清等, 2016. 强震动作用下土体非线性动力特征研究发展与展望. 震灾防御技术, **11**(3): 480—492.
- Boore D. M., 2003. Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure and Applied Geophysics*, **160**(3—4): 635—676.
- Boore D. M., Thompson E. M., 2015. Revisions to some parameters used in stochastic-method simulations of ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **105**(2A): 1029—1041.
- Brune J. N., 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, **75**(26): 4997—5009.
- Gasparini D. A., Vanmarcke E. H., 1976. Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra. Technical Report R76-4. Cambridge, MA: MIT.
- Ozbey M. C., 2006. Site-specific comparisons of random vibration theory-based and traditional seismic site response analysis. Austin Downtown, Texas: The University of Texas at Austin.
- Rathje E. M., Ozbey M. C., 2006. Site-specific validation of random vibration theory-based seismic site response analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **132**(7): 911—922.
- Rathje E. M., Kottke A. R., Trent W. L., 2010. Influence of input motion and site property variabilities on seismic site response analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **136**(4): 607—619.
- Robinson D., Dhu T., Schneider J., 2006. SUA: a computer program to compute regolith site-response and estimate uncertainty for probabilistic seismic hazard analyses. *Computers & Geosciences*, **32**(1): 109—123.
- Schneider J. F., Silva W. J., Chiou S. J., et al, 1991. Estimation of ground motion at close distances using the band-limited white-noise model. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Seismic Zonation*. Stanford, CA: EERI, **4**: 187—194.
- Silva W. J., Abrahamson N., Toro G., et al, 1996. Description and validation of the stochastic ground motion model. Technical Report MCEER-08-0019, PG&E. Upton, New York: Engineering Research and Applications Division, Department of Nuclear Energy, Brookhaven National Laboratory, Associated Universities.
- USNRC, 2007. A performance-based approach to define the site-specific earthquake ground motion. NUREG-1.208. Washington D.C.: USNRC.

Uncertainty in One Dimensional Site Response Analysis for Nuclear Facilities

Jing Xu^{1, 2)}

1) Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China

2) Nuclear and Radiation Safety Center, MEP, Beijing 100082, China

Abstract After reviewing the recent research development of uncertainty in one dimensional site response analysis for nuclear facility, we compared the procedures to deal with uncertainty of input parameters by China and United States. We generated soil profile models by randomizing measured data, and analyzed site response per random vibration theory. The calculated results show that the most dominate parameter is the velocity of shear wave which extended the peak range of acceleration response spectra. Comparison between results of random models with the best estimated model demonstrates that random vibration theory could introduce the effect of soil on ground motion. The median plus one standard deviation and median minus one standard deviation response spectrum can approximately envelope the best estimated one.

Key words: Site response; Random vibration; Nuclear safety; Uncertainty