

## 基于设定地震确定非基岩场地弹塑性验算输入地震动探讨<sup>①</sup>

荆 旭<sup>1,2</sup>

(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:** 对非基岩场地的甲类建筑弹塑性验算输入地震动中存在的问题进行讨论, 探讨基于设定地震确定弹塑性验算输入地震动的方法。以某设施厂址为例, 采用修改后的概率地震危险性公式计算潜源对工程厂址的影响。按照震级( $M$ )-距离( $R$ )-衰减关系标准差系数( $\epsilon$ )组合, 对概率地震危险性分析结果进行分解, 将三元变量( $M, R, \epsilon$ )的均值或众值计算的反应谱定义为设定地震动, 并根据设定地震及其反应谱, 选取实际地震动记录近似模拟地震动的离散; 采用随机生成的土层模型进行地震响应分析, 最终给出土层地表设定地震动的期望值作为输入地震动。

**关键词:** 概率地震危险性分析; 设定地震; 场地响应; 不确定性

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)03-0890-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.03.0890

## Determination of Input Ground Motion at a Non-rock Site for Elastoplastic Analysis Based on a Scenario Earthquake

JING Xu<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China; 2. Nuclear and Radiation Safety Center, MEP, Beijing 100082, China)

**Abstract:** Acceleration time histories have a significant impact on the safety evaluation of key structures because earthquake duration and loading process contribute significantly to uncertainty in structural analysis. Thus, determining acceleration time histories for time history response analysis is a significant practical problem, particularly for non-rock sites. Epsilon ( $\epsilon$ ) is the number of standard deviations by which the ground motion is above or below the median-predicted motion for the attenuation relationship. This study clarified the role of  $\epsilon$  in determining a scenario earthquake to obtain acceleration time histories. As an example, the seismic hazard at a real site is disaggregated into its contributions from discrete variables ( $M, R, \epsilon$ ) to determine a scenario earthquake.  $M$  is the surface wave magnitude and  $R$  is the projected epicentral distance along the minor axis of the equivalent ellipse. The target peak ground acceleration (PGA) and a consistent spectrum for the rock site with a 2% probability of exceedance in 50 years using probabilistic seismic hazard analysis were obtained. As the earthquake ground motion at the site increased, the number of potential seismic sources contributing to the probability of exceedance decreased. The fifth potential seismic source dominated the seismic hazard at the real site, given that the target probability of exceedance in 50 years is 2%, so the scenario earthquake was located in this potential seismic source. A sample space formed of  $M, R$ , and  $\epsilon$  that may generate a PGA greater than or equal to the target PGA at the site was constructed. Thus, the normalized probability of the exceedance of the target PGA is the joint distribution of  $M, R$ , and  $\epsilon$ . The mean and mode of  $M, R$ , and  $\epsilon$  are the expected and the most likely event in the sample space, respectively. As the site is located near the geometrical center of the fifth potential seismic source, high-magnitude, near-field seismic events are a major contribution to the seismic hazard at the site. The predictive PGA of the mean and mode of  $M, R$ , and

① 收稿日期: 2014-08-11

基金项目: 国家重大科技专项子课题 (2013zx06002001-09); 科技部国家软科学研究计划 (2013GXS4B075)

作者简介: 荆旭 (1983-), 男, 北京顺义人, 在读博士研究生, 工程师, 主要从事核工程地震危险性分析研究。

E-mail: jingxu@chinansc.cn.

$\epsilon$  were computed using an attenuation relationship; the values are significantly larger than those of the target  $PGA$ . The difference between the mean/mode response spectra of  $M$ ,  $R$ , and the target spectrum is obvious, especially for the acceleration response at low natural frequencies. For the computed response spectrum of the scenario earthquake fitted to the target  $PGA$  and consistent spectrum, the sample space was adapted so that the  $PGA$  of  $M$ ,  $R$ , and  $\epsilon$  computed from the attenuation relationship was approximately the same as the target  $PGA$ . Strong ground motion records were obtained from the NGA database based on the scenario earthquake for use in simulating aleatory uncertainty in rock ground motion. Stochastically generated soil profiles were used to investigate the uncertainty of the dynamic characteristics of soil and shear-wave velocity testing results. The strong ground motion records were combined with the soil profiles to create input files that were used to perform an equivalent linear site response analysis, which included an assessment of uncertainty in the amplification factor. Here, the amplification factor is the ratio between the response spectrum of soil surface acceleration and that of rock acceleration time histories. Thus, the distribution of the amplification factor of the spectrum was obtained. The response spectrum of the scenario earthquake was multiplied by the estimated amplification factor to act as the soil surface acceleration response spectrum. Although the scenario earthquake is neither the expected nor most probable event, its seismic influence field at the site exceeds the target  $PGA$ . By taking into account both the target  $PGA$  and consistent spectrum, in which all of the events in the fifth potential seismic source will generate ground motion at the site, the safety of important structures can be achieved.

**Key words:** probabilistic seismic hazard analysis (PSHA); scenario earthquake; site response; uncertainty

## 0 引言

输入地震动对结构的抗震设计影响显著,根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)的要求,甲类建筑需要采用弹塑性时程分析方法计算罕遇地震下结构的变形<sup>[1-2]</sup>。在确定非基岩场地甲类建筑的输入地震动时程时,需要同时考虑基岩地震动和场地性质的不确定性。控制工程场地基岩地震危险性的地震称为设定地震(Scenario earthquake),通常以震级( $M$ )及其与工程场地的距离( $R$ )来表示。确定设定地震的基准可以是烈度、有效峰值加速度( $EPA$ )、峰值加速度( $PGA$ )或加速度反应谱( $S_a(f, \zeta)$ )<sup>[3-4]</sup>。

在我国的水电工程实践中,通常以选择贡献最大的潜源和最高的发生概率为原则,综合考虑发震构造的分布特征,从满足峰值加速度( $PGA$ )条件的震级( $M$ )-距离( $R$ )组合中选择设定地震<sup>[5-6]</sup>。由于一致概率谱综合了区域内不同震级-距离组合对场点的影响,单个地震的反应谱可能无法在整个周期范围内都不低于一致概率谱。也有专家建议以  $S_a(1 \text{ Hz}, 0.05)$  和  $S_a(10 \text{ Hz}, 0.05)$  为基准,以各自的超越概率为权重,取其加权平均值作为设定地震<sup>[7]</sup>。但在上述研究中,均未考虑衰减关系不确定性的影响,或者说仅采用了衰减关系的中值进行设定地震影响评价。对此,陶夏新<sup>[8]</sup>在相关研究中提出衰减关系不确定性校正对概率地震危险性(PSHA)结果存在较大影响,并建议选择与设防加速度对应的未校正加速度,以其地震危险性贡献分布为依据来确定设定地震,但该研究仍未完全说明衰减关系不确定性校正对设定地震的影响。McGuire 和 Bazzurro<sup>[9-10]</sup>在研究设定地震时,以震级( $M$ )-距离( $R$ )-衰减关系标准差系数( $\epsilon$ )组合的超越概率为权重,建议取加权平均值或众值作为设定地震,能够保证用衰减关系计算的  $S_a(f, \zeta)$  不低于目标  $S_a(f, \zeta)$ <sup>[9-10]</sup>。Barani<sup>[11]</sup>在意大利地震动区划图项目中应用了该

方法,确定了不同区域场点的设定地震。

本文拟对确定设定地震的方法进行探讨,为了合理估计衰减关系不确定性校正对设定地震的作用和影响,提出采用直接校正的方法,对于给定的地震动水平,选择对该地震动超越概率贡献起控制作用的潜源,以该潜源内的  $M$ - $R$ - $\epsilon$  组合的超越概率为依据来确定基岩设定地震动。根据基岩设定地震动从 NGA 数据库中选择实际记录,反映地震动的不确定性;为了表征土层动力特性和剪切波速的不确定性,根据动力特性和剪切波速的分布,随机生成土层剖面模型。结合地震动记录和土层剖面模型进行场地响应分析,获取反应谱放大系数的分布。

## 1 地震危险性分解

弹塑性验算输入地震动的年平均超越概率是较低的(约  $4e-4$ )。在这一前提下,潜源内发生的地震对工程场点的影响  $A$ , 超过给定地震动水平  $a$  的年平均概率  $P$  可以近似表达为:

$$P(A \geq a) = \sum_{i,j,k} I(A \geq a | M \in M_i, R \in R_j, \epsilon \in \epsilon_k) * P(M \in M_i, R \in R_j, \epsilon \in \epsilon_k) \quad (1)$$

其中:  $I$  为示性函数;  $M_i, R_j, \epsilon_k$  分别为变量  $M, R, \epsilon$  的不同分布区间;  $P(M \in M_i, R \in R_j, \epsilon \in \epsilon_k)$  是三元变量  $(M, R, \epsilon)$  的离散分布函数。

需要说明的是,变量  $R$  为表征地震到工程场点的距离,不同衰减关系中采用了多种不同的定义。地震动衰减关系的一般形式如下:

$$\lg(A) = c_1 + c_2 * M + c_3 * M^2 + c_4 * \lg(R + c_5 * e^{c_6 * M}) + \epsilon\sigma \quad (2)$$

其中:  $A$  是地震动参数;  $c_1 \sim c_6$  为回归系数;  $\sigma$  为  $\lg(A)$  的标准差;  $\epsilon$  为  $\sigma$  的系数,服从标准正态分布。

在我国的地震危险性分析工作中,衰减关系多采用椭圆模型。在计算地震对工程场点的影响时,除震级和震中距以外还需要考虑长短轴方向。因此, $R$  定义为震中距在短轴方向的投影, $M$  为面波震级  $M_S$ 。

令  $P_{i,j,k}$  为归一化后的超越概率,由式(1)可知,在由对场点影响不小于给定地震动的  $M-R-\epsilon$  组合形成的样本空间上, $P_{i,j,k}$  是变量  $M,R,\epsilon$  的联合分布。利用联合分布函数就可以导出二元变量和单变量的边际分布,观察边际分布的特征可以直观地了解场点地震危险性的来源。同时,三元变量  $(M,R,\epsilon)$  的期望或众值计算的地震动均不低于目标地震动,可作为确定设定地震的参考。

## 2 设定地震确定

随着地震动水平的增大,对其超越概率有贡献的潜在震源区会逐渐减少。图 1 为某一工程场点在预定  $PGA$  为 50 gal 时,对其超越概率有贡献的潜在震源区分布图。其中 1~3 号潜在震源区属于祁连山—六盘山地震带,4~6 号潜在震源区属于龙门山地震带。地震带的地震活动性参数见表 1,各潜在震源区的空间分布函数见表 2。

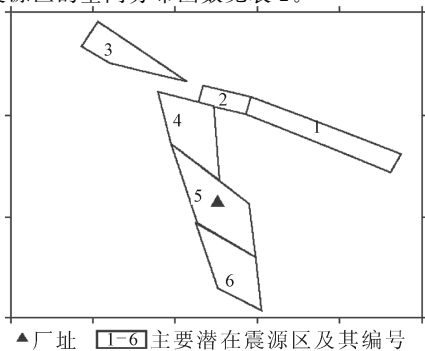


图 1 厂址和潜在震源区划分方案  
Fig.1 Site and seismic source zones

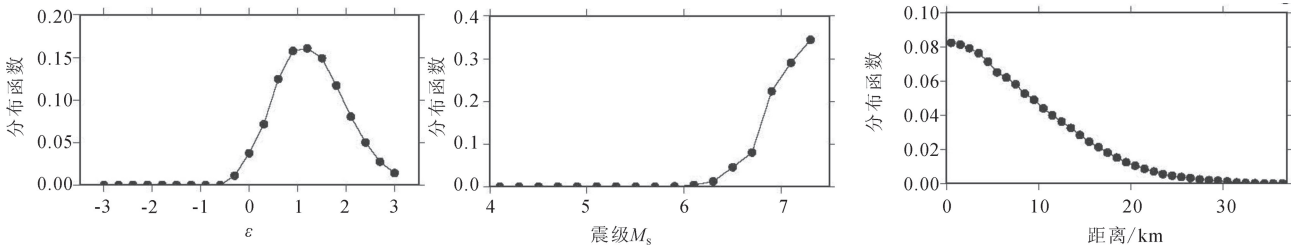


图 2 变量  $\epsilon, M, R$  的边际分布  
Fig.2 Margin distribution of  $\epsilon, M$  and  $R$

(7.06, 7.3)、(8.03, 0.5)、(1.29, 1.2)。将单变量  $M,R,\epsilon$  的均值和众值组合代入衰减关系,计算出的  $PGA$  分别为 865 gal 和 1 698 gal。

满足对场点影响不低于目标  $PGA$  值的二元变量  $(M,R)$  的边际分布如图 3 所示。由图 3 可知,二元变量  $(M,R)$  主要分布在平面  $[6.3, 7.5] \times [0, 30]$  内,根据边际分布可知,二元变量  $(M,R)$  的均值和众值分别为 (6.6, 8.0)、(5.9, 0.5)。为了使  $PGA$  近似等于目标值 327 gal,则相应的  $\epsilon$  值

表 1 地震带地震活动性参数

地震带	$b$	$V_4$	$M_u$
祁连山—六盘山带	0.540	2.10	8.5
龙门山带	0.728	4.76	8.0

表 2 主要潜在震源区的空间分布函数

潜在震源 区编号	震级档						$M_u$
	4.0~5.5	5.5~6.0	6.0~6.5	6.5~7.0	7.0~7.5	>7.5	
1	0.026 0	0.026 0	0.020 1	0.028 9	0.057 3	0.269 5	8.5
2	0.018 1	0.018 1	0.016 2	0.022 9	0.074 8	0.000 0	7.5
3	0.032 3	0.032 3	0.025 7	0.036 8	0.054 6	0.234 3	8.0
4	0.026 4	0.026 6	0.030 1	0.047 9	0.000 0	0.000 0	7.0
5	0.029 8	0.030 0	0.035 1	0.055 1	0.095 3	0.000 0	7.5
6	0.026 0	0.026 2	0.030 2	0.043 1	0.000 0	0.000 0	7.0

采用西部地区地震动衰减关系,其中  $PGA$  衰减的回归系数和对数标准差见表 3 [12]。

表 3 基岩水平向峰值加速度 ( $PGA$ ) 衰减关系系数

Table 3 Coefficient of attenuation relationship for horizontal $PGA$							
$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$\sigma$	备注
2.206	0.532	0	-1.954	2.018	0.406	0.24	长轴
1.01	0.501	0	-1.441	0.34	0.521	0.24	短轴

某工程场点 50 年超越概率 2% 的  $PGA$  为 327 gal,各潜源的超越概率分别为  $4.37e-7, 0, 0, 9.91e-9, 4.03e-4, 1.02e-7$ 。显然,5 号潜源对工程场点的地震动影响起控制作用。在计算 5 号潜源对工程场点的影响时, $dM$  为 0.2  $M_S, dR$  为 1 km,  $d\epsilon$  为 0.3,  $\epsilon$  的取值范围为  $[-3.15, 3.15]$ 。满足对场点影响不低于目标  $PGA$  值的  $M,R,\epsilon$  的边际分布如图 2 所示。

由图 2 可知,  $\epsilon$  主要分布在区间  $[0.45, 1.95]$  内,  $M$  主要分布在区间  $[6.8, 7.5]$  ( $M_S$ ) 内,  $R$  主要分布在区间  $[0, 21]$  (km) 内。根据边际分布可知,  $M,R,\epsilon$  的均值和众值分别为

分别为 0.12 和 -0.66。

将二元变量  $(M,R)$  的均值和众值代入衰减关系,根据目标  $PGA$  值调整  $\epsilon$ ,其 5% 阻尼比的反应谱与一致概率谱 (UHRS) 的对比情况如图 4 所示。其中二元变量  $(M,R)$  的均值 (6.6, 8.0),在  $\epsilon$  等于 0.12 的条件下,代入衰减关系计算出的反应谱为二元均值 (Bimean) 谱;二元变量  $(M,R)$  的众值 (6.6, 8.0),在  $\epsilon$  等于 -0.66 的条件下,代入衰减关系计算出的反应谱为二元众值 (Bimode) 谱。由图 4 可知,各反应谱

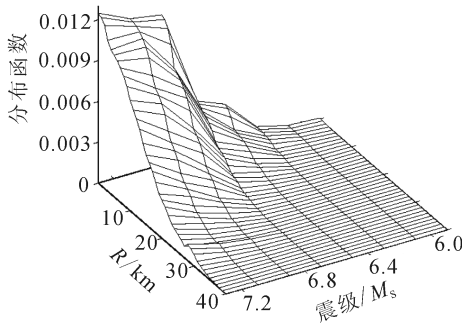


图 3 二元变量(M,R)的边缘分布

Fig.3 Margin distribution of binary variables (M,R)

之间存在明显差异。Bimean 谱和 Bimode 谱在高频部分略高于 UHRS,自振频率低于 5 Hz 时,Bimean 谱和 Bimode 谱均低于 UHRS,尤其是 Bimode 谱,在低频部分远低于 UHRS,Bimean 谱则介于二者之间。

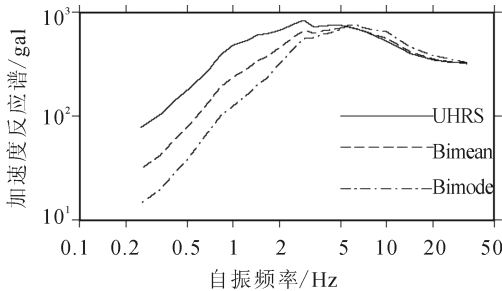


图 4 二元变量(M,R)的均值和众值的反应谱与一致概率谱对比图

Fig.4 Comparison between UHRS,Bimean spectrum and Bimode spectrum of variables (M,R)

根据三元变量(M,R,ε)的分布函数,其均值和众值分别为(7.06,8.04,1.29)、(6.9, 0.5, 0.6)。将三元变量(M,R,ε)的均值和众值代入衰减关系计算出的 PGA 分别为 860 gal 和 1 027 gal。

工程场地位于 5 号潜源内,并且 5 号潜源内 6 级以上各震级区间的年平均发生率均在同一量级上(1e-7/km<sup>2</sup>),使得根据单变量组合和三元变量的均值或众值所计算出的 PGA 值都远远大于目标值,不适用于工程抗震验算。而根据 PGA 目标值和二元变量(M,R)的均值或众值,调整 ε 值,带入衰减关系计算出的加速度反应谱,在自振频率低于 5 Hz 时小于一致概率谱,且差异显著。若将这样的设定地震动应用于结构抗震验算,可能会引起偏于不安全的结果。因此,为了使设定地震动与目标地震动尽量接近,将式(1)中的“≥”修改为“=”,实际计算中通过限定计算值与目标值之间差异的绝对值小于 10 gal 来实现。

按照修改后的式(1)计算 5 号潜源对工程场点的地震动影响,三元变量(M,R,ε)的均值和众值分别为(7.16,29.6,1.22)、(7.30,29.7,0.99),采用衰减关系计算 5%阻尼比的反应谱,与一致概率谱的对比如图 5 所示。其中,将三元变量(M,R,ε)的均值代入衰减关系,计算出的加速度反应谱为三元均值(Trimean)谱;将三元变量(M,R,ε)的众值代入衰减

关系,计算出的加速度反应谱为三元众值(Trimode)谱。由图 5 可知,三者之间的差异很小,Trimean 谱和 Trimode 谱仅在低频部分略低于 UHRS,二者均可以作为场点 50 年超越概率 2% 条件下的基岩设定地震动。

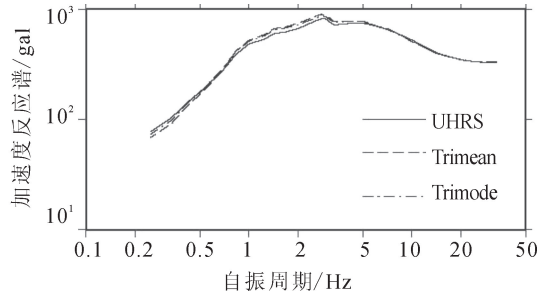


图 5 满足目标 PGA 的(M,R,ε)的均值和众值的反应谱与一致概率谱对比图

Fig.5 Comparison of UHRS,Trimean spectrum and Trimode spectrum of variables (M, R, ε) matched to target PGA

### 3 场地响应和土层地表谱

工程场地为非基岩场地,地形比较平整,土层分布也比较均匀,土层的剪切波速(V<sub>s</sub>)和动力特性在水平向变化较小,可用一维模型表征基岩上覆土层,并采用适用于水平土层的等效线性化波动解法进行场地地震反应分析<sup>[13]</sup>。由于基岩地震动输入包络线参数、基岩条件、土层结构等因素均会影响场地地震反应分析结果,石玉成等<sup>[14-18]</sup>采用蒙特卡洛方法研究了一维场地地震反应分析结果的不确定性来源、分布和特征。

基于土层模型参数的中值和标准差,随机生成土层模型,辅以根据设定地震选取的实际记录作为基岩地震动,分析工程场地土层对地震动的影响。

根据上节确定的设定地震及其反应谱(Trimean 谱),从 NGA 数据库中选择实际强震记录,表征基岩地表加速度时程。在选择过程中,限定震级区间为(6.5, 7.5),距离区间为(5, 30)(km),并且要求 V<sub>s30</sub> ≥ 500 m/s,加速度时程的反应谱如图 6 所示。其中,μ+3σ 和 μ-3σ 是由采用衰减关系计算的设定地震(M=7.16M<sub>s</sub>,R=29.6 km,ε=0)的反应谱乘以和除以常数 e<sup>3σ</sup> 得来的加速度反应谱。由图 6 可知,加速度时

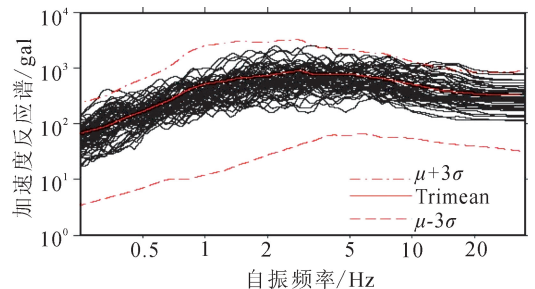


图 6 基岩地表加速度时程反应谱与基岩设定地震反应谱对比图

Fig.6 Comparison between response spectrum of bedrock surface acceleration time history and that of scenario earthquake

程的反应谱分布在  $\mu + 3\sigma$  和  $\mu - 3\sigma$  之间, 近于均匀分布在 Trimean 谱上下两侧, 可以用来近似模拟实际地震动的离散现象。

工程场地土层由上至下分为三个单元, 分别为黏土、卵石和泥岩。为了表征土层模型中剪切波速 ( $V_s$ ) 的不确定性,

表 4 土层模型参数

Table 4 Model parameters of soil layer

土层编号	类别	层厚均值/m	密度/ ( $g \cdot m^{-3}$ )	层厚标准差/m	$V_s$ 斜率均值	$V_s$ 斜率标准差	$V_s$ 截距均值/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$V_s$ 截距标准差/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	小层厚度/m
1	黏土	10	1.8	0.5	11	2	180	20	2
2	卵石	4	2.2	0.2	45	10	290	30	0.5
3	泥岩	4	2.39	0.5	12.5	3	470	20	0.5

加速度反应谱放大系数(土层地表/基岩地表)的分布如图 7 所示, 其中  $\mu$ 、 $\mu + 1\sigma$ 、 $\mu - 1\sigma$  分别为其几何均值, 均值加减一倍标准差。

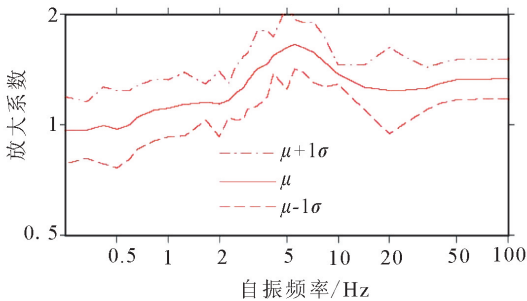


图 7 加速度反应谱放大系数

Fig.7 Amplification factors of acceleration response spectra

用设定地震反应谱乘以放大系数的几何均值作为土层地表加速度反应谱, 见图 8。其中, 基岩反应谱为设定地震反应谱, 土层反应谱为土层地表加速度反应谱。人工拟合加速度时程, 使其与土层地表加速度反应谱相匹配的过程, 与传统安评方法一致, 不再赘述。

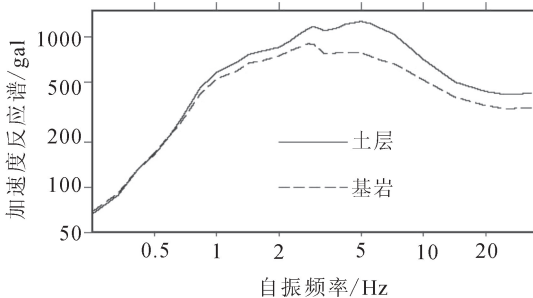


图 8 土层地表加速度反应谱

Fig.8 Acceleration response spectra of soil surface

## 4 讨论

根据对设定地震的讨论可知, 将单变量组合和三元变量 ( $M, R, \epsilon$ ) 的均值或众值带入衰减关系, 计算出的  $PGA$  与目标  $PGA$  之间差异显著。在潜源内部地震空间均匀分布的前提假设条件下, 影响工程场点的震级分布范围中, 各震级区间内单位面积上的年平均发生率在同一数量级上。根据式

假定不同单元中的  $V_s$  随深度增加而线性增大, 截距和斜率服从正态分布, 随机生成 60 个波速模型, 用于生成波速模型的参数见表 4。每个单元按表 4 中的小层厚度划分为多个小层, 作为实际计算中的土层。

(1), 给定目标  $PGA$  及变量  $M$  和  $\epsilon$  后, 不低于目标  $PGA$  的概率取决于以场点为中心的等效椭圆与潜源相交部分的面积。由于工程场点位于 5 号潜源内, 在相同震级条件下, 随着  $\epsilon$  的增大, 等效椭圆的半轴长逐渐增大, 与潜源相交部分的面积也逐渐增大。因此, 距场点距离较近的区域, 参与累加计算总年平均超越概率的次数较多, 即变量  $R$  的边际分布偏向数值较小的方向。所以震级较高的直下型或近场地震的贡献量较大, 带入衰减关系后计算出的  $PGA$  就远远超过了目标  $PGA$ 。

修改式(1), 即只在与目标值接近的三元变量 ( $M, R, \epsilon$ ) 的分布空间中确定设定地震, 原来的等效椭圆变成了等效椭圆环。由于目标  $PGA$  较高, 在  $\epsilon$  较小(如一 2)时, 即使  $M$  为震级上限 7.5 $M_s$ , 距离  $R$  为 0.5 km, 代入衰减关系计算出的  $PGA$  为 316 gal, 仍略小于目标  $PGA$ ; 当增大至 -1.8 时, 计算出的  $PGA$  为 352 gal。因此, 与修改前的样本空间相比, 新的样本空间中缺失了大部分超过目标  $PGA$  值的 ( $M, R, \epsilon$ ), 如 ( $M, R, \epsilon \geq 1.8$ ); 增加了略小于目标  $PGA$  值的 ( $M, R, \epsilon$ )。这样的处理方式虽然保留了部分大震近场事件, 却忽略了大部分可能超过目标  $PGA$  的 ( $M, R, \epsilon$ )。为了使设定地震动尽量与一致概率谱相匹配, 作为一种折衷方案, 本文所定义的设定地震并不是所有可能地震事件的期望或其中的最可能事件(众值)。但是在确定目标  $PGA$  和一致概率谱时, 纳入了所有可能的 ( $M, R, \epsilon$ ), 使得目标  $PGA$  和一致概率谱满足安全目标。因此, 设定地震动作为工程弹性验算的输入, 若分析结果满足验收准则, 仍然能够保证结构符合规范要求的安全目标。

## 5 结论

本文的分析和计算结果表明:

(1) 在 50 年超越概率 2% 的前提下, 厂址所在的 5 号潜源对工程场点的地震危险性起控制作用。

(2) 对于衰减关系不确定性, 采用直接校正的方式计算 5 号潜源对场点的地震影响。地震危险性分解结果说明, 只考虑二元变量 ( $M, R$ ) 确定设定地震, 其反应谱与一致概率谱差异显著, 用于结构抗震验算可能会引起偏于不安全的后果; 由于场点位于潜源几何中心附近, 单变量组合和三元变量所确定的设定地震动, 震级较高的直下型或近场地震的贡

献量较大, 带入衰减关系后, 所计算出的  $PGA$  就远远超过了目标  $PGA$ , 也不适用于结构抗震验算。

(3) 采用修改后的公式, 通过分解场地地震危险性所给出的设定地震, 其反应谱与一致概率谱比较接近。虽然忽略了大部分可能超过目标  $PGA$  的  $(M, R, \epsilon)$ , 但是由于在确定目标  $PGA$  和一致概率谱时纳入了所有可能的  $(M, R, \epsilon)$ , 用于结构抗震验算仍能保证结构的安全目标。

## 参考文献 (References)

- [1] 李林. 罕遇地震下空心薄壁高墩大跨 T 形刚构桥弹塑性地震反应分析[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 56-61.  
LI Lin. Elastic-plastic Seismic Response Analysis of Hollow Thin-walled High-piper Large-span T-shaped Rigid Frame Bridge Under High-level Earthquake Conditions [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 56-61. (in Chinese)
- [2] 刘晶波, 王文晖, 赵冬冬, 等. 循环往复加载的地下结构 Push-over 分析方法及其在工程损伤分析中的应用[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 21-28.  
LIU Jing-bo, WANG Wen-hui, ZHAO Dong-dong, et al. Push-over Analysis Method of Underground Structures Under Reversal Load and Its Application in Seismic Damage Analysis [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 21-28. (in Chinese)
- [3] Meng-Tan Gao. Expected Magnitude and Distance of Potential Source Area and the Estimating Method[J]. Acta Seismologica Sinica, 1994, 7(3): 441-446.
- [4] 易立新, 胡晓, 钟菊芳. 基于 EPA 的重大工程设计地震动确定[J]. 地震研究, 2004, 27(3): 271-276.  
YI Li-xin, HU Xiao, ZHONG Ju-fang. Determination of Design Ground Motion Based on EPA for Vital Engineering Project [J]. Journal of Seismological Research, 2004, 27(3): 271-276. (in Chinese)
- [5] 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): 1399-1404.  
CHEN Hou-qun, LI Min, SHI Yu-cheng. Determination of Design Response Spectrum for Important Structures Based on Scenario Earthquake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(12): 1399-1404. (in Chinese)
- [6] 石玉成. 基于设定地震的重大水利水电工程抗震设防研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2007.  
SHI Yu-cheng. Research of Seismic Design for Major Hydroelectric Structure Based on Scenario Earthquake [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2007. (in Chinese)
- [7] 韩竹君. 设定地震方法研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 1997.  
HAN Zhu-jun. Research of Scenario Earthquake [D]. Beijing: Institute of Geology, CEA, 1997. (in Chinese)
- [8] 陶夏新, 陶正如, 师黎静. 设定地震——概率地震危险性评估和确定性危险性评估的连接[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(4): 101-109.  
TAO Xia-xin, TAO Zheng-ru, SHI Li-jiang. Scenario Earth-

quake——Link of Probabilistic Seismic Hazard Assessment and Deterministic Seismic Hazard Assessment[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(4): 101-109. (in Chinese)

- [9] McGuire R K. Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquakes: Closing the Loop[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1995, 85(5): 1275-1284.
- [10] Bazzurro P, C Allin Cornell. Disaggregation of Seismic Hazard [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1999, 89(2): 501-520.
- [11] Barani S, D Spallarossa, P Bazzurro. Disaggregation of Probabilistic Ground-motion Hazard in Italy [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2009, 99(5): 2638-2661.
- [12] 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.  
YU Yan-xiang, WANG Su-yun. Attenuation Relations for Horizontal Peak Ground Acceleration and Response Spectrum in Eastern and Western China [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2006, 1(3): 206-217. (in Chinese)
- [13] Robinson D, T Dhu, J Schneider. SUA: A Computer Program to Compute Regolith Site-response and Estimate Uncertainty for Probabilistic Seismic Hazard Analyses [J]. Computers & Geosciences, 2006, 32(1): 109-123.
- [14] 王恒知, 石玉成, 卢育霞, 等. 人工拟合地震动时程参数对场地反应的影响分析[J]. 西北地震学报, 2009, 31(2): 126-130.  
WANG Heng-zhi, SHI Yu-cheng, LU Yu-xia, et al. Analysis on the Influence of Artificial Fitting Time-history Parameters of Seismic Ground Motion to Site Earthquake Response [J]. Northwestern Seismological Journal, 2009, 31(2): 126-130. (in Chinese)
- [15] 曾金艳, 李自红, 陈文. 基岩输入参数对场地地震反应的影响分析[J]. 西北地震学报, 2009, 31(2): 110-114.  
ZENG Jin-yan, LI Zi-hong, CHEN Wen. Analysis on Influence of the Input Parameters of Bedrock on Site Earthquake Response [J]. Northwestern Seismological Journal, 2009, 31(2): 110-114. (in Chinese)
- [16] 薄景山, 李秀领, 刘红帅. 土层结构对地表加速度峰值的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(3): 35-40.  
BO Jing-shan, LI Xiu-ling, LIU Hong-shuai. Effects of Soil Layer Construction on Peak Accelerations of Ground Motions [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(3): 35-40. (in Chinese)
- [17] 姜慧, 高孟潭, 俞言祥, 等. 用数字地震资料确定软基岩场地放大和衰减的联合效应[J]. 地震学报, 2004, 26(增刊 1): 148-153.  
JIANG Hui, GAO Meng-tan, YU Yan-xiang, et al. Determination of Combined Effect of Amplification and Attenuation of Soft Rock Site Using Digital Seismic Data [J]. Acta Seismologica Sinica, 26(Supp 1): 148-153. (in Chinese)
- [18] 石玉成, 蔡红卫, 徐晖平. 场地地震反应分析中的不确定性及其处理方法[J]. 西北地震学报, 1999, 21(3): 242-247.  
SHI YU-cheng, CAI Hong-wei, XU Hui-ping. Uncertainties in Site Earthquake Response and the Way of Its Processing [J]. Northwestern Seismological Journal, 1999, 21(3): 242-247. (in Chinese)