

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1677

考虑土体动力特征参数相关性的工程场地 随机地震反应分析

钟紫蓝, 史跃波, 李锦强, 赵 密, 杜修力

(北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 研究等效线性化方法中土体动力参数不确定性对场地地震反应的影响, 提出了可考虑土体动力特征参数间相关性的土体动剪切模量和动阻尼曲线随机样本生成方法, 基于 Matlab 开发一维等效线性化场地地震反应分析计算程序, 用于开展场地地震反应随机动力分析。以 II 类成层场地为例建立一维自由场分析模型, 采用不同地震设防水准下露头基岩场地加速度反应谱为目标反应谱, 合成人工地震记录折半后作为场地下卧基岩处的输入。计算结果表明, 考虑土体动力特征参数不确定性对场地地震反应具有较大的影响, 且影响程度与地震动强度、频谱成分及场地基本周期均密切相关; 场地最大峰值加速度和地表加速度反应谱的波动范围随地震动强度等级的增加而变大, 且最大峰值应变和最大峰值加速度的波动范围可达 10% 和 14%; 目标反应谱平台段及场地基本周期处对应的场地地表加速度反应谱的波动范围超过 20%。

关 键 词: 场地地震反应分析; 土体动力参数; 不确定性; 相关性; 等效线性化

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 07-2015-11

Stochastic seismic response analysis of engineering site considering correlations of critical soil dynamic parameters

ZHONG Zi-lan, SHI Yue-bo, LI Jin-qiang, ZHAO Mi, DU Xiu-li

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing university of technology, Beijing 100124, China)

Abstract: This paper presents a method to generate random samples of soil dynamic shear modulus and dynamic damping curves with full consideration of the correlations of critical soil dynamic parameters to investigate the influence of their uncertainties on the engineering site seismic response in the implementation of equivalent linearization method. A one-dimensional (1D) equivalent linear site seismic response analysis program, which serves stochastic dynamic response analysis of the engineering site, has been developed in Matlab. A 1D free field model for the typical layered engineering sites of site class II is established in this study. The target response spectra, which are defined with spectra of the outcrop corresponding to different earthquake return periods based on the acceleration response, are employed to generate artificial seismic records. These records are scaled down by $\frac{1}{2}$ and referred to as input motions at the engineering bedrock for the 1D free field model. The numerical results show that the uncertainties of the critical soil dynamic parameters has significant influence on seismic response of engineering sites, which are highly related to the amplitude and the frequency aspects of the input ground motions as well as the fundamental periods of the engineering sites. The variations of the peak shear strain and the peak ground acceleration of the site, which reach 10% and 14%, respectively, increase with the amplitudes of the input ground motions. Besides, the variations of acceleration response spectra corresponding to the plateaus of the target response spectra and the fundamental periods of engineering sites exceed 20% with the consideration of the uncertainties of soil dynamic parameters.

Keywords: site seismic response analysis; soil dynamic parameters; uncertainty; correlation; equivalent linear method

收稿日期: 2021-10-04

修回日期: 2022-03-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 51978020); 国家自然科学基金联合基金项目 (No. U1839201); 广东省地震工程与应用技术重点实验室开放基金项目 (No. 2017B030314068)。

This work was supported by General Program of National Natural Science Foundation of China (51978020), the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (U1839201) and the Open Research Fund Program of Guangdong Key Laboratory of Earthquake Engineering and Application Technology (Guangzhou University) (2017B030314068).

第一作者简介: 钟紫蓝, 男, 1986 年生, 博士, 副研究员, 主要从事地下结构抗震研究。E-mail: zilanzhong@bjut.edu.cn

通讯作者: 赵密, 男, 1980 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土-结构相互作用研究。E-mail: zhaomi@bjut.edu.cn

1 引言

以往震害调查表明,场地效应对工程结构震害分布和破坏程度的影响显著,工程场地地震反应分析在工程结构抗震设计中起着至关重要的作用^[1-4]。由于场地地震反应分析中存在诸多不确定因素,如:Idriss^[5]将场地地震反应分析中的不确定性因素归结为分析方法、输入地震动、非线性动力土体参数及场地剪切波速剖面 4 个方面;Bradley^[6]将场地地震反应的不确定性归纳为场地特征、土体本构模型的参数、土体本构模型以及分析方法,从而导致实际工程场地的地震反应分析和预测往往具有较大不确定性。因此,量化诸多不确定因素对场地地震反应影响具有重要的实际工程意义。

近年来国内外诸多学者围绕场地地震反应分析中的不确定性因素展开了系列研究。Tsai 等^[7]将场地地震反应分析方法分为频域等效线性化,时域非线性及时域等效线性化 3 类,分别采用场地分析软件 DEEPSOIL 中的时域非线性方法和频域等效线性化方法以及 QUAD4M 软件中的时域等效线性化方法对 3 个典型场地进行地震反应分析。Kaklamanos 等^[8]选取 Kik-net 强震台网中的 6 个典型场地和 191 条地震记录,对比了线性、等效线性和非线性方法下的场地反应分析结果,建立了混合效应模型来量化不同方法与实际地震反应的差异。Andrade 等^[9]通过蒙特卡罗方法考虑了剪切模量,模量曲线和阻尼曲线的不确定性,分别采用边界面塑性模型和等效线性化方法对两个场地进行动力反应分析,通过场地地表的亚里斯强度及加速度反应谱来衡量参数的敏感性。陈国兴等^[10]以南京地铁沿线深软场地为研究对象,通过点估计法考虑了土层剪切波速变异性及动剪切模量比和阻尼比变异性对场地地表峰值加速度和反应谱的影响,研究表明,土层剪切波速的变异性对地表加速度和反应谱的影响比动剪模量比和阻尼比变异性的影响更为显著。Guzel 等^[11]采用随动硬化弹塑性土体本构模型来考虑土体的非线性,并采用蒙特卡罗方法考虑土体剪切模量、模量曲线和阻尼曲线的不确定性,通过对比两个不同幅值地震动下场地地表的加速度反应谱及峰值加速度和峰值剪应变分布的标准差来分析场地非线性地震反应分析的敏感参数,结果表明,在小幅值地震动下场地地震反应对初始剪切模量的敏感性更强,在较大幅值地震动下场地地震反应对模量曲线和阻尼曲线的敏感性更强。Boaga 等^[12]以地

表相对基岩的传递函数为衡量因素,考虑了小震中震条件下(中等应变)等效线性化方法中阻尼曲线的不确定性对场地地震反应分析的影响,研究结果表明,考虑阻尼曲线不确定性会使与场地基本周期相近的地表加速度反应的低频成分放大或缩小 20%;当场地的波阻抗较大时,地表加速度反应的高频成分变化达 60%。Griffiths 等^[13]考虑了场地剪切波速剖面不确定性对场地地震反应分析的影响,通过 3 种不同方法生成场地剪切波速剖面样本,对比了线弹性和等效线性化下地表加速度反应谱和地表加速度反应谱比,以面波频散反演场地的加速度反应谱均值为参考反应谱,计算各场地的频散曲线和加速度反应谱的均方根误差,探究场地剪切波速剖面不确定性和频散之间的关联。Darendeli^[14]对各种动力土体参数的影响进行了量化评估,给出了不同土体类型的均值曲线和上下界范围,最后考虑模量曲线和阻尼曲线的不确定性计算场地地震反应,计算结果表明,考虑土体动力参数的不确定性对场地地震反应分析结果影响显著。

以上诸多学者的研究中,主要关注地震动的不确定性和场地地震反应分析方法对场地地震反应的影响,而对土体动力参数不确定性的考虑上均不够充分,大多简单将土体动力参数视为随机独立变量且参数取值范围缺少必要试验依据,未考虑动力参数间的相关性,且均未对土体动力参数不确定性对场地地震反应的影响程度进行量化和深入讨论。综上所述,本文针对国内外学者关于土体动力参数不确定性场地地震反应分析方面的研究不足,基于频域等效线性化分析方法,采用不同抗震设防烈度下与露头基岩反应谱相吻合的人工地震动作为输入,考虑动剪切模量曲线和阻尼曲线的不确定性和相关性,量化评价土体非线性动力参数不确定性对场地地震反应分析的影响,为实际工程土体动力参数的合理选取及场地地震反应预测提供参考和指导。

2 分析方法和模型验证

2.1 频域等效线性化分析方法

本文采用 Matasovi^[15]基于在 Konder 和 Zelasko (1963) 的双曲线模型基础上修订的围压相关的土体动剪切模量模型(MKZ 模型)、骨架曲线公式和动剪切模量比分别为

$$\tau = \frac{G_{\max} \gamma}{1 + \beta \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^s} \quad (1)$$

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \beta \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^s} \quad (2)$$

式中： τ 为剪应力； β 和 s 为拟合参数，用于修正骨架曲线的形状； γ 为剪应变； γ_r 为参考剪应变，是与围压相关的参数，代表模量曲线 $G/G_{\max}$ 为 0.5 时的等效剪应变值； G 、 $G_{\max}$ 分别为动剪切模量和初始剪切模量。

根据骨架曲线和 Masing 法则构造动荷载下土体滞回曲线，并基于能量等效原则计算等效阻尼比。为避免按 Masing 法则求得的等效阻尼比与试验曲线相比产生大应变下过阻尼的现象，本文在软件 DEEPSOIL 中采用 Phillips 等^[16]提出的对滞回阻尼进行修正的折减系数法 (modulus reduction and damping curve fitting, 简称 MRDF)，消除大应变下的过阻尼现象；同时，本文程序选用陈国兴等^[17-18]在 Hardin 等^[19]的基础上改进的阻尼曲线经验公式，来直接拟合给定的试验曲线，如下式所示：

$$D = D_{\min} + D_{\max} (1 - G/G_{\max})^n \quad (3)$$

式中： D 为动阻尼比； $D_{\min}$ 为小应变阻尼； $D_{\max}$ 和 n 为拟合参数。

2.2 场地信息和输入地震动

本文选择北京通州某一典型场地剖面作为分析案例，场地由上及下依次由人工填土，粉质黏土，细中砂，细粉砂和卵石构成。根据《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB50909—2014)^[20]计算得到的等效剪切波速为 237 m/s，属于 II 类场地，场地基频按照传递函数方法^[21-22]计算为 1.65 Hz，即场地基本周期为 0.604 s，与齐文浩等^[22]提出的水平成层场地基本周期的估算公式计算结果 0.623 s 基本一致，本文计算的场地物理参数如表 1 所示。

表 1 II 类场地土层物理参数
Table 1 Type II site soil physical parameters

土层	土类	土层厚度 /m	密度 /(kg · m ⁻³)	剪切波速 /(m · s ⁻¹)	剪切模量 /MPa
1	人工填土	5.0	1 750	180	57.0
2	粉质黏土	10.0	1 900	250	118.8
3	细中砂	10.0	2 000	300	180.0
4	细粉砂	15.0	2 000	320	205.0
5	卵石	20.0	2 280	500	525.0

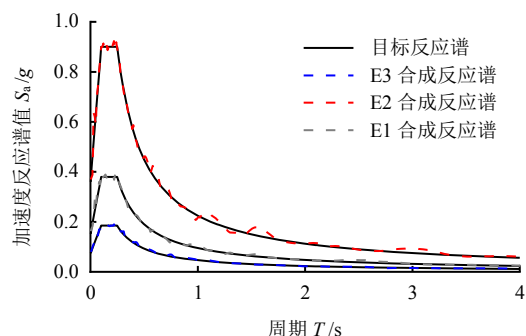
为了探究不同设防烈度下土体动力参数不确定性对场地地震反应的影响，并尽量消除地震动不确定性的干扰，本文采用与 I₀ 类场地设计反应谱作为目标加速度反应谱。基于《城市轨道交通结构抗

震设计规范》^[20]规定，I₀ 类场地等效剪切波速大于 800 m/s，加速度反应谱特征周期 T_g 为 0.25 s，可近似作为基岩露头地震动反应谱。本文分别以重现期为 100、475、2 450 a 3 个地震设防水准下 I₀ 类场地的设计反应谱作为目标加速度反应谱，设计地震动峰值加速度 $a_{\max}$ 分别为 0.074g、0.152g 和 0.360g。采用 Kaul^[23]提出的反应谱和成功率谱转换公式：

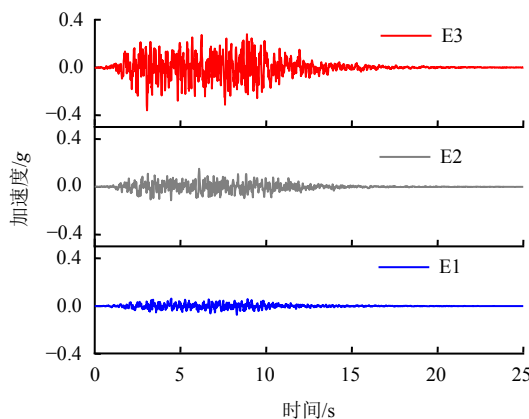
$$S(\omega) = \frac{\zeta}{\pi \omega} \left[S_a^T(\zeta, \omega) \right]^2 \frac{1}{\ln \left[-\frac{\pi}{\omega t} \ln(1-r) \right]} \quad (4)$$

式中： S_a 为加速度目标反应谱值； ω 为圆频率； ζ 为阻尼比，根据规范^[20]取为 0.05； t 为地震动持时； r 为超越概率，根据 Kaul 的建议取为 0.15。

通过三角波叠加法合成随机平稳地震动，并乘以分段包络函数 (Jennings 模型) 转为非平稳过程，采用迭代修正傅里叶谱的方法得到了与目标谱平均误差在 5% 以内的结果，具体流程细节可以参考文献^[24]；3 条不同抗震设防烈度下的人工地震动 (E1, E2 和 E3)，如图 1 所示。



(a) I₀ 类场地不同重现期下地震动加速度反应谱



(b) 人工合成加速度时程曲线

图 1 I₀ 类场地不同重现期下地震动加速度反应谱及对应的人工合成地震时程记录

Fig.1 Acceleration response spectra corresponding to different return periods in I₀ site and synthetic acceleration time histories corresponding to target spectra

根据弹性介质波动理论,假设基岩为均匀弹性半空间介质,则露头基岩地震加速度的幅值恒为下卧基岩入射地震加速度幅值的 2 倍^[1],将所生成的露头基岩人工地震动记录折半后作为工程覆盖场地下卧基岩的输入地震动。

2.3 一维场地动力分析模型验证

本研究基于 Matlab 开发了一维等效线性化场地地震反应分析计算程序,为了验证所开发的程序计

算的正确性和适用性,将 E1、E2 和 E3 地震动下的场地反应与 Hashash 团队研发的 DEEPSOIL^[7, 16, 25-26]中等效线性化分析结果进行对比。其中,本文及 DEEPSOIL 中的等效线性化土体动力参数采用如表 2、3 所示;图 2 为 Seed^[27-28]、Vucetic^[29]等分别针对砂土和黏土的大量土动力试验结果的统计均值曲线;本文动阻尼曲线参数则采用式(3)的拟合方式得到,拟合参数见表 3。

表 2 DEEPSOIL 中砂土和黏土动力特征参数^[15]

Table 2 Critical dynamic properties for sand and clay in DEEPSOIL^[15]

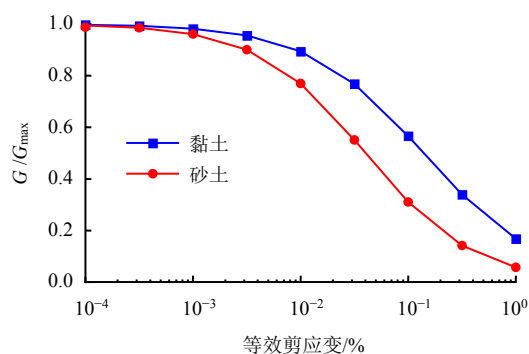
参考文献	土体类型	参数						
		β	s	$\gamma_t / \%$	$\xi_{small} / \%$	p_1	p_2	p_3
[27]	砂土-均值	1.000	0.870	0.040	0.381	0.980	0.380	1.850
[29]	黏土-均值	1.000	0.810	0.139	0.953	0.960	0.360	0.500

注: ξ_{small} 为小应变阻尼比; $p_1 \sim p_3$ 分别为 Deepsoil 中阻尼折减函数的拟合参数。

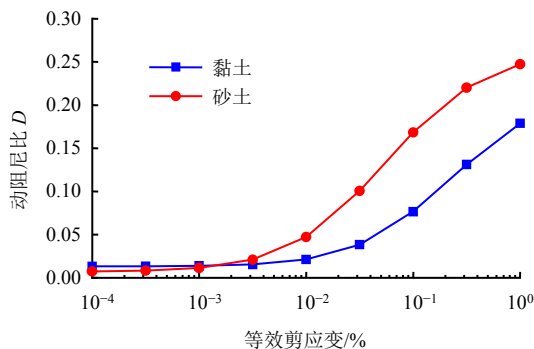
表 3 本文中砂土和黏土动力特征参数

Table 3 Critical dynamic properties for sand and clay in this study

参考文献	土体类型	参数						
		β	s	$\gamma_t / \%$	$D_{min} / \%$	$D_{max} / \%$	n	
[27]	砂土-均值	1.000	0.870	0.040	0.381	25.0	1.30	
[29]	黏土-均值	1.000	0.810	0.139	0.953	21.0	1.45	



(a) 模量曲线

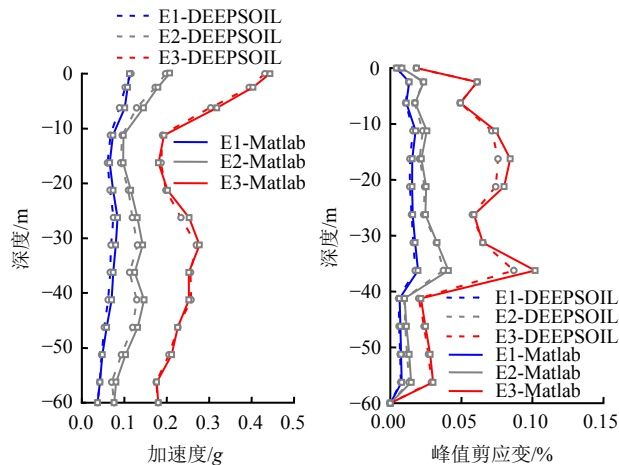


(b) 阻尼曲线

图 2 砂土和黏土的动剪切模量比和动阻尼比曲线

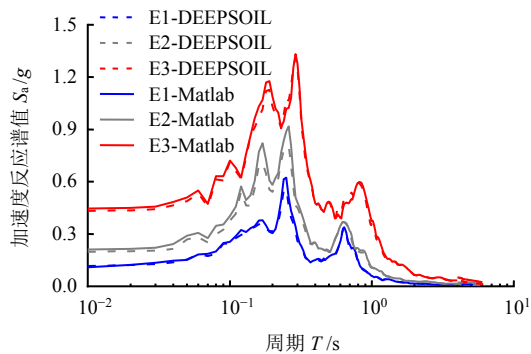
Fig.2 Dynamic shear modulus ratio and dynamic damping ratio of sand and clay

图 3 所示为 E1、E2 和 E3 地震动下本程序和 DEEPSOIL 计算结果对比。



(a) 峰值加速度沿埋深分布

(b) 峰值剪应变沿埋深分布



(c) 场地地表加速度反应谱

图 3 本程序和 DEEPSOIL 计算结果对比

Fig.3 Comparison of calculation results between the developed program and DEEPSOIL

从图 3 中的计算结果可以看出, 在 E1、E2 和 E3 地震作用下, 本文所开发的程序计算给出的峰值加速度和峰值剪应变沿埋深分布曲线及场地地表加速度反应谱与 DEEPSOIL 的计算结果均基本重合, 验证了本程序算例是正确合理的, 可以应用于后续场地土体参数不确定性的大规模计算分析。

3 土体动力参数不确定性模型建立

为考虑土体动力参数不确定性对场地地震反应

分析结果的影响, 本文基于 Seed^[27-28]、Vucetic^[29] 等分别针对砂土和黏土的大量土动力试验结果的统计分析, 给出了砂土和黏土模量曲线不确定性建模的各参数数字特征和概率分布形式, 如表 4 所示。表 5 为砂土和黏土参数相关性, 参数 s 和 γ_r 的相关系数根据砂土和黏土模量曲线形状而拟合得到, 根据动剪切模量和阻尼比的负相关关系, 参数 $D_{\min}$ 和 $D_{\max}$ 与 γ_r 的相关系数均取为-0.95。

基于已有论文研究, 表 4 中各土体关键参数均

表 4 砂土和黏土动力特征参数的统计特征和概率分布

Table 4 Statistical characteristics and probability distributions of dynamic properties for sand and clay

砂土								黏土							
s		γ_r		$D_{\min}$		$D_{\max}$		s		γ_r		$D_{\min}$		$D_{\max}$	
均值	变异系数	均值	变异系数	均值	变异系数	均值	变异系数	均值	变异系数	均值	变异系数	均值	变异系数	均值	变异系数
0.87 ^a	0.04 ^b	0.04 ^a	0.2 ^b	0.381 ^b	0.15 ^b	25 ^b	0.05 ^b	0.81 ^a	0.01 ^c	0.139 ^a	0.3 ^c	0.953 ^c	0.02 ^c	21 ^c	0.02 ^c

注: a 表示参考文献[16], b 表示参考文献[27-28]中数据拟合得到, c 表示参考文献[29]中数据拟合得到。表中未列出的参数按表 3 中的砂土黏土动力参数取均值。所有参数均为对数正态分布。

表 5 砂土和黏土关键动力参数间相关性

Table 5 Correlation between critical dynamic properties for sand and clay

参数	s	γ_r	$D_{\min}$	$D_{\max}$
砂土各参数与 γ_r 的相关性	0.95	1	-0.95	-0.95
黏土各参数与 γ_r 的相关性	0.00	1	-0.95	-0.95

服从对数正态分布^[11-12], 且与 γ_r 之间存在相关性, 即土体参数 s 、 γ_r 、 $D_{\min}$ 和 $D_{\max}$ 为相关非正态随机变量, 相关非正态随机样本生成的问题通过逆 Nataf 变换方法^[30-31]实现, 逆 Nataf 变换方法可以将独立正态随机变量转变成相关非正态随机变量。

图 4 给出了本文考虑土体动力参数相关性的随机样本生成流程, 主要分为如下几个步骤:

(1) 蒙特卡罗方法生成土体参数的独立标准正态随机变量 S^U 、 γ_r^U 、 $D_{\min}^U$ 和 $D_{\max}^U$ 。

(2) 根据表 5 已知参数间的相关系数, 通过 Liu 等^[32]提出的经验计算公式 $\rho' = F' \cdot \rho$, 计算得到各参数间的等效相关系数;

(3) 对等效相关系数矩阵 ρ' 进行 Cholesky 矩阵分解得到下三角形矩阵 L_0 ;

(4) 通过线性变换将独立标准正态随机变量转化为相关标准正态随机变量 S^Y 、 γ_r^Y 、 $D_{\min}^Y$ 和 $D_{\max}^Y$;

(5) 根据等概率边缘变换法则将相关标准正态随机变量的边缘分布转换到相应的对数正态边缘分布上, 得到相关非正态随机变量 S 、 γ_r 、 $D_{\min}$ 和 $D_{\max}$ 。

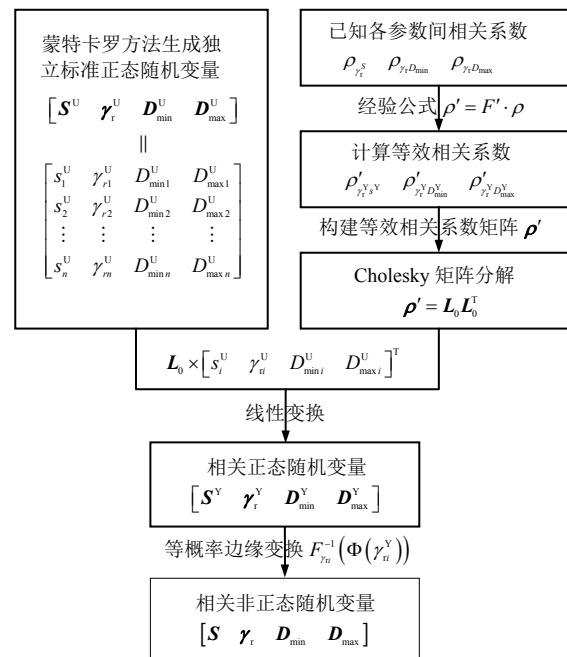


图 4 考虑土体参数间相关性的随机样本生成流程图

Fig.4 Flow chart of random sample generation considering the correlation among parameters

在砂土和黏土各关键动力参数的概率分布和相关系数已知的条件下, 本文按图 4 流程生成的砂土动模量曲线参数 γ_r 和 s 的频率分布直方图和样本如图 5(a)所示, 图 5(b)所示为黏土动模量曲线参数 γ_r 和动阻尼曲线参数 $D_{\max}$ 的频率分布直方图和样本, 从中可以看出该方法可以很好地考虑参数间的相关性, 且生成的各参数均满足给定的概率分布形式和

数值统计特征。将随机生成的土体参数样本代入式 (2) 和式 (3) 中便可得到动剪切模量比和动阻尼比的随机曲线。

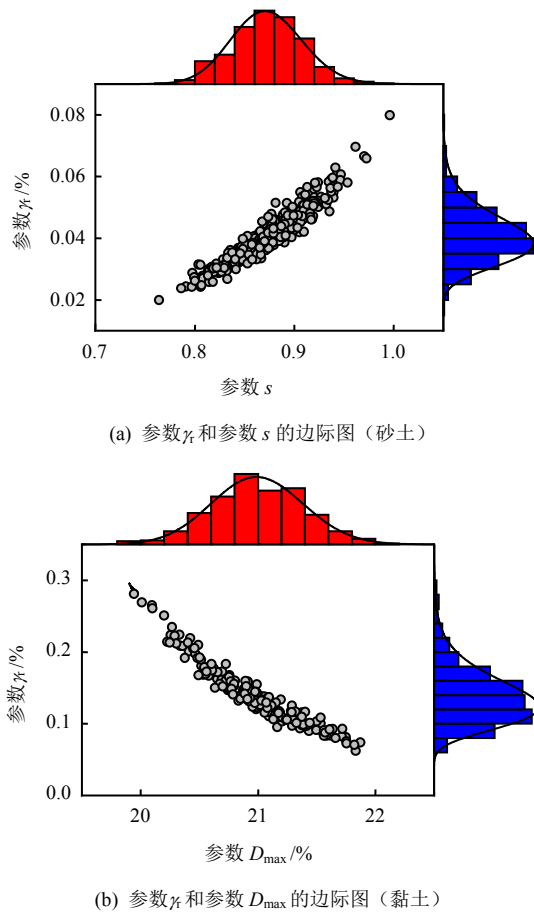


图 5 相关对数正态分布随机向量生成示意图
Fig.5 Correlated lognormal distribution of dynamic parameters for sand

图 6 给出了基于 400 次蒙特卡罗方法生成的砂土和黏土动剪切模量比和动阻尼比曲线。本文采用砂土和黏土的动剪切模量比和动阻尼比曲线以 Seed^[27-28]及 Vucetic^[29]等的试验所得砂土曲线和黏土曲线的均值和上下限作为参考,如图 6 虚线所示。可以看出,本文方法可以很好地考虑模量和阻尼曲线参数间的相关性,生成随机样本均值曲线也与已有试验统计所得的均值曲线较好吻合,且生成的随机曲线基本位于已有试验结果所给定范围内。

为了验证本研究蒙特卡罗分析随机样本数量是充分的,图 7 给出了不同地震动强度等级下,最大峰值剪应变均值和标准差的收敛性分析结果。

从图 7 中可以看出,对于本文研究当样本数量达到 300 次时,不同地震动作用下场地最大峰值剪应变的均值和标准差均收敛,故不同强度等级地震动下,400 次蒙特卡罗模拟是可以得到可靠的场地

动力反应统计特征的。

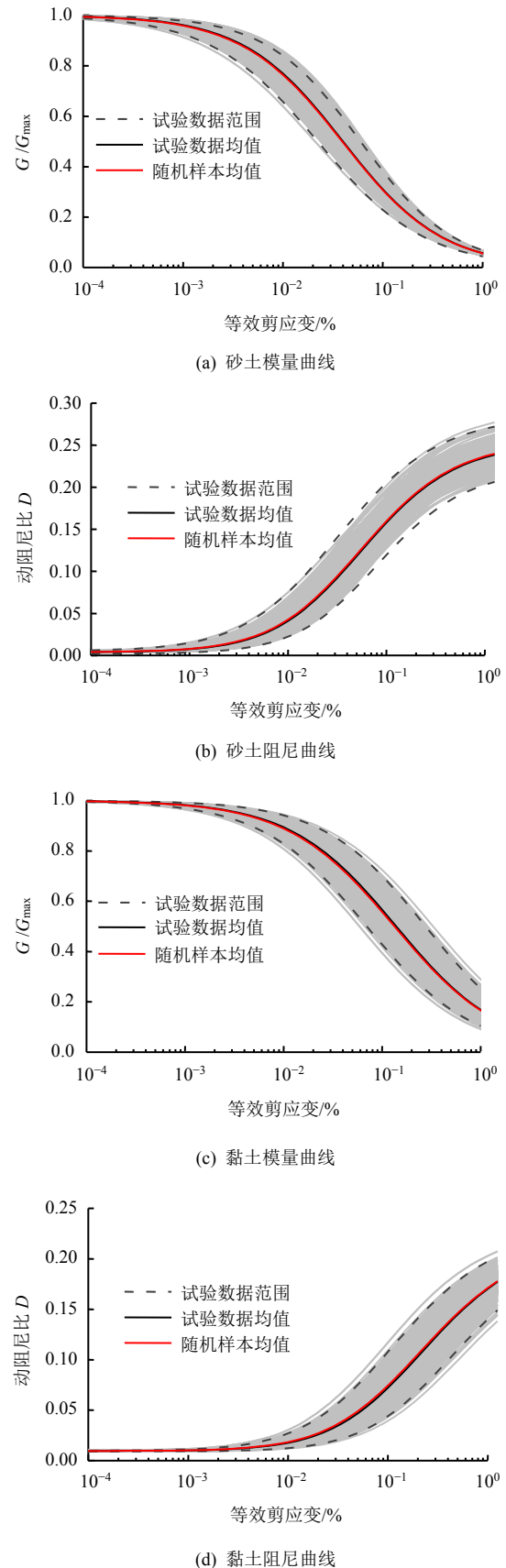


图 6 砂土和黏土动模量曲线和动阻尼曲线的不确定性
Fig.6 Uncertainty of dynamic modulus curves and dynamic damping curves of sand and clay

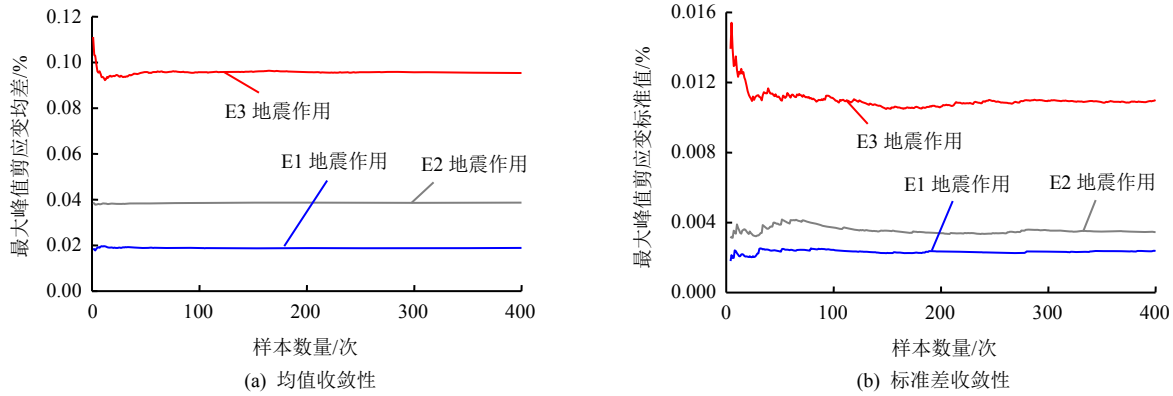


图 7 蒙特卡罗模拟方法得到的场地最大峰值剪应变均值和标准差的收敛性

Fig.7 Convergence of mean and standard deviation of maximum peak shear strain of engineering site obtained from Monte Carlo simulation method

4 场地地震反应分析结果

为评价不同设防烈度下，土体动力参数不确定性对场地地震反应影响，本文将所合成的露头基岩人工地震加速度时程记录 E1、E2 和 E3 折半后作为工程覆盖场地的下卧基岩输入地震动，开展大量一维等效线性场地反应分析，共计分析次数为 1 200

次，并对不同强度地震动下场地峰值反应沿埋深的分布及地表加速度反应谱进行了分析对比。

4.1 场地峰值加速度和峰值剪应变沿埋深分布

图 8、9 所示为 E1、E2 和 E3 地震动作用下考虑土体动力参数不确定性的场地峰值加速度剖面和峰值剪应变剖面反应计算结果的对比。

从图 8 中可以看出，蒙特卡罗计算结果的均值

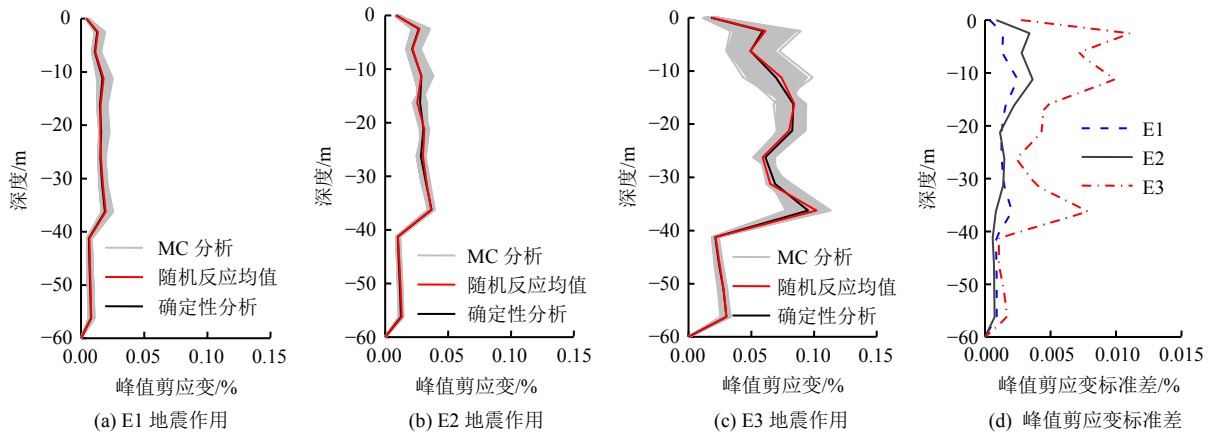


图 8 E1、E2 和 E3 地震作用下峰值剪应变计算结果对比

Fig.8 Calculated results of site peak shear strain profile under E1, E2 and E3 ground motions

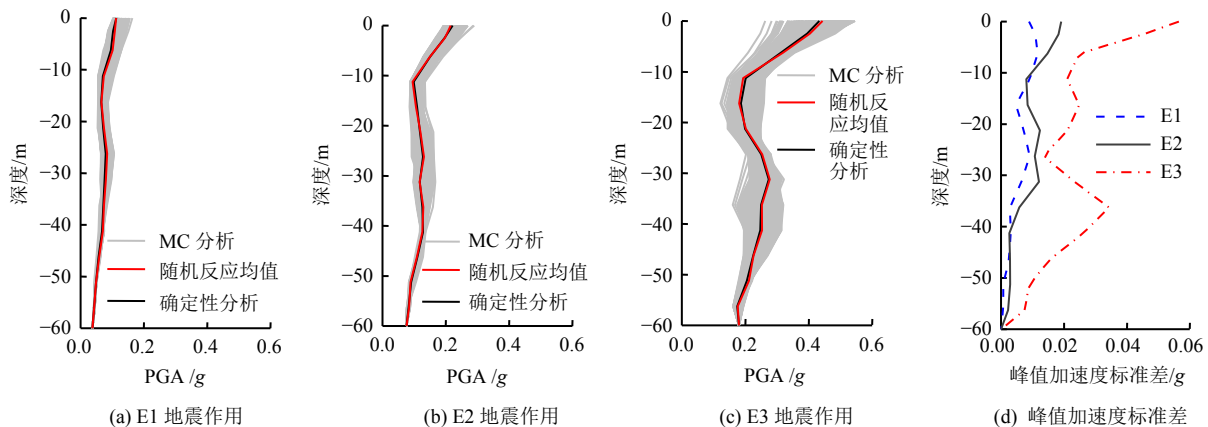


图 9 E1、E2 和 E3 地震作用下峰值加速度计算结果对比

Fig.9 Calculated results of site peak acceleration profile under ground motion of E1, E2 and E3

曲线与确定性分析的结果基本重合,场地的最大峰值剪应变出现在距地震作用面(基岩)为 22.5 m 处,E1、E2、E3 地震作用下,最大峰值剪应变的均值分别为 0.02%、0.04%以及 0.09%;考虑土体动力参数不确定性后,随着地震动强度的增加,相同埋深下的场地峰值反应的离散度逐渐增大(见图 8(d))。

图 9 中可以看出与图 8 相似的规律,蒙特卡罗计算结果的均值曲线与确定性分析的结果基本重合,最大峰值加速度出现在地表。E1、E2、E3 地震作用下,最大峰值加速度的均值分别为 0.12g、0.20g 以及 0.41g;考虑土体动力参数不确定性后,随着地震动强度的增加,场地的峰值反应沿着埋深分布的波动范围会逐渐增大,如图 9(d)所示。

将图 8 和图 9 中不同地震动强度等级下场地最大峰值剪应变和最大峰值加速度反应的均值及标准差进行了统计,如表 6 所示。

表 6 场地最大峰值加速度和最大峰值剪应变均值和标准差
Table 6 Mean and standard deviation of the maximum peak acceleration and the maximum peak shear strain of the site

场地反应	最大峰值剪应变均值/%	最大峰值剪应变标准差/%	最大峰值加速度均值/g	最大峰值加速度标准差/g
E1 地震作用	0.02	0.002 5	0.12	0.010
E2 地震作用	0.04	0.004 0	0.20	0.020
E3 地震作用	0.09	0.011 0	0.41	0.058

由不同强度地震动等级下场地最大峰值剪应变和最大峰值加速度的均值和标准差可计算得到最大峰值反应的变异系数,如图 10 所示。可以发现考虑土体动力参数不确定性后,E1、E2 和 E3 地震动作用下场地峰值剪应变波动范围均为 10%左右,场地峰值加速度的波动范围随地震动强度等级的增加而变大,分别为 8%、10%和 14%。

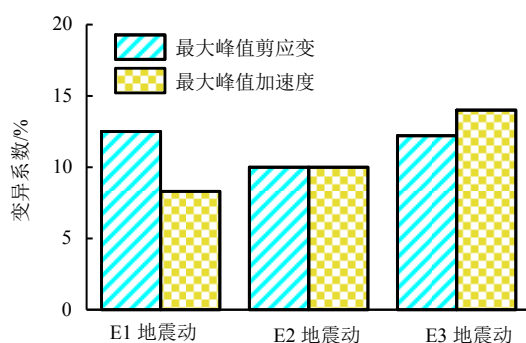


图 10 最大峰值剪应变和最大峰值加速度的变异系数

Fig.10 Coefficient of variation of the maximum peak shear strain and the maximum peak acceleration

4.2 场地地表加速度反应谱

图 11 所示为 E1、E2 和 E3 地震动作用下场地地表加速度反应谱计算结果。分析结果表明:蒙特卡罗计算得到的场地地表加速度反应谱的均值与确定性分析的均值基本重合;地表加速度反应谱的 0.10~0.25 s 以及 0.6~1.0 s 段相比其他周期处突出,对应于人工地震动反应谱的平台段和场地的基本周期处;随着地震动强度的增加,场地地表加速度反应谱的波动范围变大。

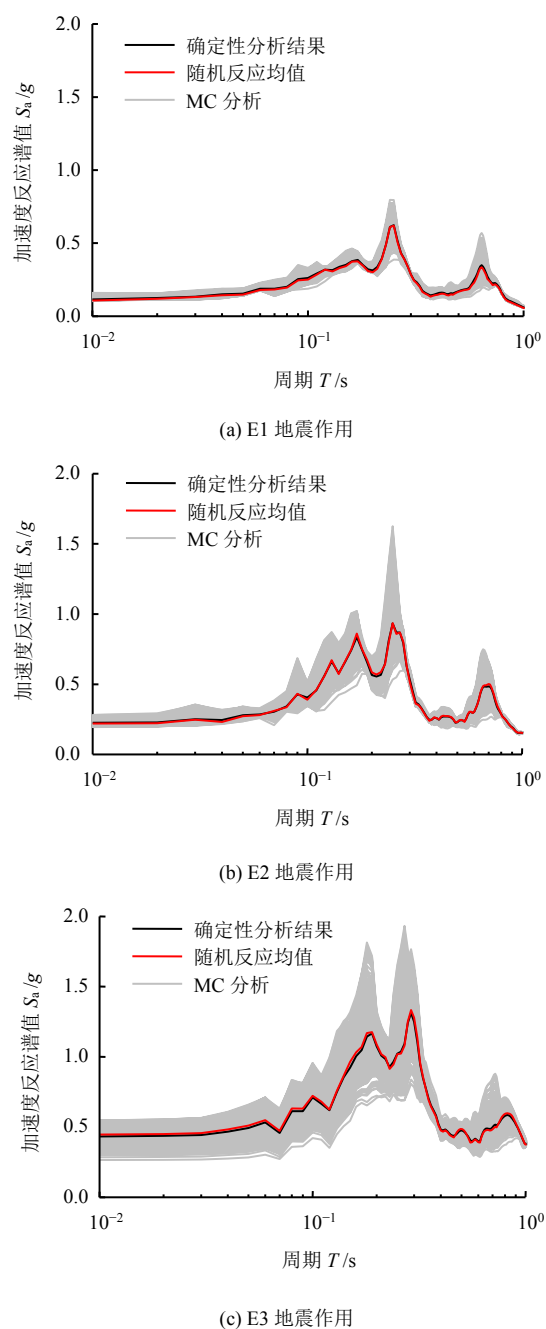


图 11 E1、E2 和 E3 地震动作用下场地地表加速度反应谱计算结果的对比

Fig.11 Comparison of acceleration response spectra at ground surface under E1, E2 and E3 ground motions

图 12 所示为 E1、E2 和 E3 地震作用下场地地表加速度反应谱的标准差。随着地震动强度的增加场地土层的峰值剪应变增加, 阻尼比曲线的不确定性越大, 场地地表加速度反应谱的标准差也越大。此外, 设计反应谱平台段 (0.10~0.25 s) 及场地基本周期处 (0.6~1.0 s) 处对应的场地地表加速度反应谱的不确定性程度要大于其他区间的不确定性, 波动范围为 10%~20%; 基本周期小于 0.1 s 区间的波动范围为 8%~15%。

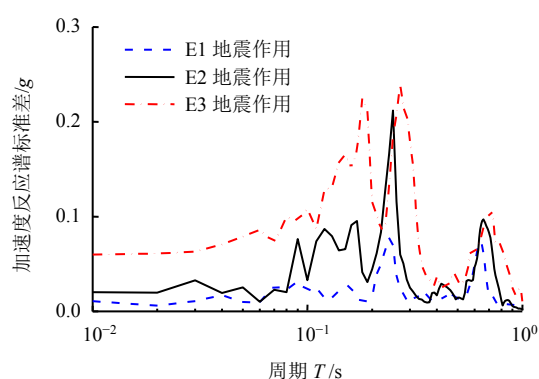


图 12 E1、E2 和 E3 地震作用下地表加速度反应谱标准差
Fig.12 Standard deviation of Surface acceleration response spectrum under E1, E2 and E3 earthquakes

5 结 论

(1) 基于已有土体动力参数试验统计结果和一维场地动力分析结果, 场地土体动力参数不确定性对场地地震反应具有较大的影响, 且影响程度与地震动强度、频谱成分及场地基本周期均密切相关。

(2) E1、E2 和 E3 地震动作用下场地峰值剪应变波动范围均为 10%, 场地峰值加速度的波动范围随地震动强度等级的增加而变大, 分别为 8%、10% 和 14%。

(3) 场地地表加速度反应谱的不确定性程度与地震动强度水平、地震动频率成分及场地基本周期有关。设计反应谱平台段 (0.10~0.25 s) 及场地基本周期处 (0.6~1.0 s) 处对应的场地地表加速度反应谱的不确定性程度要大于其他区间的不确定性, 波动范围为 10%~20%; 基本周期小于 0.1 s 区间的波动范围为 8%~15%。

参 考 文 献

[1] 李瑞山, 袁晓铭. 场地放大系数的理论解答[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 1066-1073.
LI Rui-shan, YUAN Xiao-ming. Theoretical solution of site amplification coefficient[J]. *Chinese Journal of*

Geotechnical Engineering, 2019, 41(6): 1066-1073.

- [2] CHEN Z Y, LIANG S B, HE C. Seismic performance of an immersed tunnel considering random soil properties and wave passage effects[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2018, 14(1): 89-103.
- [3] GRIFFITHS S C, COX B R, RATHJE E M. Challenges associated with site response analyses for soft soils subjected to high-intensity input ground motions[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 85: 1-10.
- [4] 刘中宪, 刘英, 孟思博, 等. 基于间接边界元法的近断层沉积谷地地震动模拟[J]. 岩土力学, 2021, 42(4): 1141-1155, 1169.
LIU Zhong-xian, LIU Ying, MENG Si-bo, et al. Near-fault ground motion simulation of alluvial valley based on indirect boundary element method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(4): 1141-1155, 1169.
- [5] IDRIS I M. Evolution of the state of practice[C]//Pacific International Workshop on the Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and Their Impact on Modeling Dynamic Soil Response. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, 2004.
- [6] BRADLEY B A. A framework for validation of seismic response analyses using seismometer array recordings[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, 31(3): 512-520.
- [7] TSAI C C, CHEN C W. Comparison study of one-dimensional site response analysis methods[J]. *Earthquake Spectra: The Professional Journal of the Earthquake Engineering Research Institute*, 2016, 32(2): 1075-1095.
- [8] KAKLAMANOS J, BAISE L G, THOMPSON E M, et al. Comparison of 1D linear, equivalent-linear, and nonlinear site response models at six KiK-net validation sites[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, 69: 207-219.
- [9] ANDRADE J E, BORJA R I. Quantifying sensitivity of local site response models to statistical variations in soil properties[J]. *Acta Geotechnica*, 2006, 1: 3-14.
- [10] 陈国兴, 刘雪珠, 王炳辉. 土动力参数变异性对深软场地地表地震动参数的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(1): 1-10.
CHEN Guo-xing, LIU Xue-zhu, WANG Bing-hui. Effect of variability of soil dynamic parameters on ground motion parameters for deep soft sites[J]. *Journal of*

- Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2007, 27(1): 1-10.
- [11] GUZEL Y, ROUAINIA M, ELIA G. Effect of soil variability on nonlinear site response predictions: application to the Lotung site[J]. **Computers and Geotechnics**, 2020, 121:103444.
- [12] BOAGA J, RENZI S, DEIANA R, et al. Soil damping influence on seismic ground response: a parametric analysis for weak to moderate ground motion[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2015, 79: 71-79.
- [13] GRIFFITHS S C, COX B R, RATHJE E M, et al. Mapping dispersion misfit and uncertainty in Vs profiles to variability in site response estimates[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2016, 142(11): 04016062.
- [14] DARENDELI M B. Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves[D]. Texas: The University of Texas at Austin, 2001.
- [15] MATASOVIC N. Seismic response of composite horizontally-layered soil deposits[D]. Los Angeles: University of California, 1993.
- [16] PHILLIPS C, HASHASH Y. Damping formulation for nonlinear 1D site response analyses[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2009, 29(7): 1143-1158.
- [17] 陈国兴, 刘雪珠, 朱定华, 等. 江苏长江以南地区新近沉积土动剪切试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 03(4): 745-750.
- CHEN Guo-xing, LIU Xue-zhu, ZHU Ding-hua, et al. A study on dynamic shear of recently deposited soils for southern Jiangsu province a long Yangtze river[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2007, 3(4): 745-750.
- [18] 陈国兴, 庄海洋. 基于 Davidenkov 骨架曲线的土体动力本构关系及其参数研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 860-864.
- CHEN Guo-xing, ZHUANG Hai-yang. Developed nonlinear dynamic constitutive relations of soils based on Davidenkov skeleton curve[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(8): 860-864.
- [19] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping of soils: measurement and parameter effects[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division**, 1972a, 98(SM6): 603-624.
- [20] 同济大学. GB50909—2014 城市轨道交通结构抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- Tongji University. GB50909—2014 Code for seismic design of urban rail transit structures[S]. Beijing: Beijing China Planning Publishing House, 2014.
- [21] 李瑞山, 袁晓铭. 成层场地基本周期简化计算方法研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3227-3235.
- LI Rui-shan, YUAN Xiao-ming. Simplified calculation method for the fundamental period of layered soil sites[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(8): 3227-3235.
- [22] 齐文浩, 薄景山, 刘红帅. 水平成层场地基本周期的估算公式[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 779-784.
- QI Wen-hao, BO Jing-shan, LIU Hong-shuai. Fundamental period formula for horizontal layered soil profiles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(4): 779-784.
- [23] KAUL M K. Stochastic characterization of earthquakes through their response spectrum[J]. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 1978, 6(5): 497-509.
- [24] 杨庆山, 田玉基. 地震地面运动及其人工合成[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- YANG Qing-shan, TIAN Yu-ji. Earthquake ground motions & artificial generation[M]. Beijing: Science Publishing House, 2014.
- [25] TSAI C C, PARK D, CHEN C W. Selection of the optimal frequencies of viscous damping formulation in nonlinear time-domain site response analysis[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2014, 67: 353-358.
- [26] HASHASH Y, PHILLIPS C, GROHOLSKI D. Recent advances in non-linear site response analysis[C]//Fifth International Conference on Recent advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics and Symposium in Honor of Professor I. M. Idriss. San Diego, California: [s. n.], 2010.
- [27] SEED H B, IDRIS I M. Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses[R]. Berkeley: College of Engineering, University of California Berkeley, 1970.
- [28] SEED H B, WONG R T, IDRIS I M, et al. Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1986, 112(11): 1016-1032.