

## 黑龙江省土动力学参数变异性研究

齐文浩<sup>1,2</sup>, 李林芳<sup>1,2</sup>, 陈方晓<sup>1,2</sup>, 张菟凯<sup>1,2</sup>

(1. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 土动力学参数是土层地震反应计算的必备参数。针对当前黑龙江省土动力学特性理论研究的不足, 基于黑龙江省 286 组不同埋深的粉质黏土、黏土和砂土的动剪切模量比和阻尼比数据, 反推得到每组土动力学参数的特征参数, 并统计给出特征参数随土体埋深变化的拟合公式。通过该公式, 推算了不同埋深下不同土类的动剪切模量比和阻尼比数据, 并验证了拟合公式的合理性。利用数据较为丰富的土类, 建立了 6 个土层地震反应模型, 输入黑龙江省的典型地震动, 分别计算了拟合公式的  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $E(\lambda_{\max})$ 、 $E(M)$  等拟合参数。通过放缩拟合参数研究了特征参数变异性对地表峰值加速度、地表反应谱特征周期和平台值的影响。结果表明, 随着  $a_1$  和  $E(\lambda_{\max})$  的增加, 阻尼比增大, 导致场地放大系数  $F_{\text{PGA}}$  减小, 特征周期  $T_g$  增大。 $a_2$  和  $E(M)$  的增加则会导致阻尼比减小, 进而导致  $F_{\text{PGA}}$  增大,  $T_g$  减小。平台值  $\beta$  离散性较大, 在某一范围内波动, 并无确定的增减趋势。变异性对  $F_{\text{PGA}}$  的影响最大,  $T_g$  次之, 对  $\beta$  的影响最小。土层地震反应对  $a_1$  变异最敏感。随着输入地震动强度的增加, 误差增大。本研究为黑龙江省土动力学参数研究做出了必要补充。

**关键词:** 土动力学参数; 变异性; 土层地震反应; 黑龙江省; 地震动参数

中图分类号: TU435

文献标志码: A

## Study on the variability of soil dynamic parameters in Heilongjiang Province

QI Wenhao<sup>1,2</sup>, LI Linfang<sup>1,2</sup>, CHEN Fangxiao<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiankai<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China)

**Abstract:** Soil dynamic parameters are crucial calculation parameters for the seismic response of soil. However, there is currently insufficient theoretical research on soil dynamic characteristics in Heilongjiang Province. To address this, we analyzed data on the dynamic shear modulus ratio and damping ratio of 286 groups of clay, clayey soil, and sandy soil at different burial depths in the region. We derived the characteristic parameters of each group of soil dynamic parameters and statistically obtained a fitting formula for the variation of these parameters with soil burial depth. Using this formula, we calculated the dynamic shear modulus ratio and damping ratio data of different soil types at different burial depths and verified the rationality of the fitting formula. We established six soil seismic response models using soil types with abundant data and input typical seismic motions in Heilongjiang Province. We calculated the fitting parameters  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $E(\lambda_{\max})$ ,  $E(M)$ , etc. of the fitting formula and studied the influence of the variability of characteristic parameters on peak ground acceleration, characteristic period, and plateau value of ground response spectrum by scaling the fitting parameters. Results show that with the increase of  $a_1$  and  $E(\lambda_{\max})$  the damping ratio increases, resulting in a decrease in the site amplification factor  $F_{\text{PGA}}$  and an increase in the characteristic period  $T_g$ . The increase of  $a_2$  and  $E(M)$  will lead to a decrease in the damping ratio, resulting in an increase in  $F_{\text{PGA}}$  and a decrease in  $T_g$ . The plateau value  $\beta$  has a large variability, fluctuating within a certain range without a definite increasing or decreasing trend. Variability has the greatest impact on  $F_{\text{PGA}}$ , followed by its impact

收稿日期: 2024-01-08; 修回日期: 2024-04-17

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2021C07); 黑龙江省科学基金项目(LH2021E121)

作者简介: 齐文浩(1979—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事场地地震动效应方面研究。E-mail: qwhky@163.com

on  $T_g$ , and then on  $\beta$ . The soil seismic response is the most sensitive to the variability of  $a_1$ . As the intensity of the input seismic motion increases, the error increases. Overall, this study provides necessary supplements to the research on soil dynamic parameters in Heilongjiang Province.

**Key words:** soil dynamic parameters; variability; soil layer seismic response; Heilongjiang Province; ground motion parameter

## 0 引言

土体动剪切模量比和动阻尼比是土动力学特性研究的重要参数,是场地土层地震反应分析和工程场地地震安全性评价工作中必不可少的内容。目前国内已有许多此类研究,石兆吉<sup>[1]</sup>给出了各类土壤的模量比和阻尼比,供无试验资料时参考选用;袁晓铭等<sup>[2]</sup>通过改进共振柱给出 10 m 以内和 10~20 m 之间常规土类动剪切模量比和阻尼比的推荐值,供实际工程参考使用。由于不同地区的土成因不同,导致了土非常鲜明的地域特征,不同区域的土的类型及其性质千差万别,因此不能用一组数来代表全国的土动力学参数。但在相似的成因类型下,土的性质也有相似的特点,王绍博等<sup>[3]</sup>建议把全国划分为若干区域,分别给出各个区域不同土类的土动力学参数。

迄今为止,众多学者<sup>[4-8]</sup>对不同区域的不同土类进行了土动力学试验研究;已有学者<sup>[9-14]</sup>利用不同地区的各种土动力学参数资料,统计分析了区域土动力学参数的取值。此外,还有学者利用其它方法得到不同区域的土动力学参数,根据土动力学参数不仅随剪应变变化,还与土体埋深(围压)有关,WU 等<sup>[15]</sup>开发了智能模型预测不同埋深和给定剪应变下海相黏土的动剪切模量比和阻尼比特性;LI 等<sup>[16]</sup>利用离心机数据识别土动力学特性,并应用于 Fontainebleau 砂。这些研究均为区域地震工程研究或工程建设等工作提供了参考和借鉴作用。

但是东北地区此类研究相对缺乏,且传统统计分析方法通常是将某一区域的不同土类按埋深划分后求平均值,每一埋深区间相互独立,所得的结果可能出现埋深大的位置动剪切模量比反而小的情况,动剪切模量比与剪应变并不完全满足双曲线关系。故本文拟利用统计的黑龙江省的动剪切模量比和阻尼比,首先得到确定每一组动剪切模量比和阻尼比的 3 个特征参数 ( $1/\gamma_r$ 、 $\lambda_{max}$ 、 $M$ ),按不同埋深划分后求得特征参数平均值,通过拟合得到这特征参数与埋深的变化关系,进而得到不同埋深的动剪切模量比和阻尼比,并与已有成果进行对比,验证了其合理性。进一步研究了特征参数与埋深关系式系数的变异性对土层地震反应的影响。

## 1 数据统计分析

随着黑龙江省地震安全性评价工作的不断积累,中国地震局工程力学研究所积累了大量的工程场地数据。本文通过整理场地钻孔的土动力学参数,统计了 286 组不同土类在不同埋深下的动剪切模量比和阻尼比。数据分布位置基本与人口聚集地一致,数据基本可以代表黑龙江省的大部分工程建设场地,如图 1 所示。将 286 组土体动力学参数按土性分为粉质黏土、黏土、砂土三类,其中粉质黏土 146 组、黏土 15 组、砂土 125 组。

已有大量研究表明,土的剪切应力幅值和剪应变幅值满足双曲线关系,表达式如式(1)所示<sup>[17]</sup>:

$$\tau_d = \frac{\gamma_d}{a + b\gamma_d} \quad (1)$$

由此可得动剪切模量:

$$G_d = \frac{\tau_d}{\gamma_d} = \frac{1}{a + b\gamma_d} \quad (2)$$

归一化后的无量纲表达式为

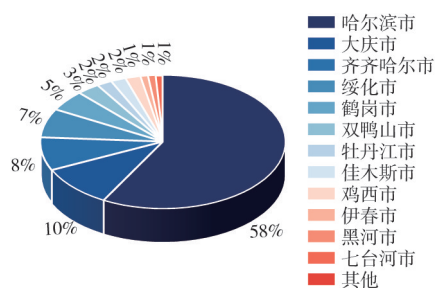


图 1 数据分布图

Fig. 1 Data distribution

$$G_d/G_{dmax} = \frac{1}{1+\gamma_d/\gamma_r} \tag{3}$$

式中:  $\tau_d$  为动剪应力;  $\gamma_d$  为动剪应变;  $\gamma_r = a/b$  为参考剪应变;  $a, b$  为试验参数, 由  $G_d$  为  $\gamma_d$  对应的动剪切模量;  $G_{dmax}$  为最大动剪切模量。

此外, 试验研究表明, 阻尼比存在关系为

$$\lambda = \lambda_{max} \left( 1 - \frac{G_d}{G_{dmax}} \right)^M \tag{4}$$

式中:  $\lambda$  为与  $G_d$  对应的阻尼比;  $\lambda_{max}$  为最大阻尼比;  $M$  为试验参数。  $\lambda_{max}$ 、 $M$  由试验数据确定。

由试验测得动剪应变对应的动剪切模量及阻尼比, 再利用式(2)~式(4)和最小二乘法进行回归分析可得到试样在 8 个典型剪应变时的剪切模量比和阻尼比。

令  $A = 1/\gamma_r$ , 将式(3)、式(4)改写为

$$\frac{G_{dmax}}{G_d} = 1 + A \cdot \gamma_d \tag{5}$$

$$\lg \lambda = \lg \lambda_{max} + M \cdot \lg \left( 1 - \frac{G_d}{G_{dmax}} \right) \tag{6}$$

显然式(5)、式(6)满足线性关系, 故已知阻尼比和模量比时可通过线性拟合确定  $A$ 、 $\lambda_{max}$  与  $M$ , 即每组动剪切模量比和阻尼比与  $A$ 、 $\lambda_{max}$ 、 $M$  这 3 个特征参数均可相互确定。

以粉质黏土为例, 通过以上方法得到特征参数  $A$ 、 $\lambda_{max}$ 、 $M$  与埋深  $H$  的散点图, 如图 2 所示。因土的动力性能受土的类型、土的状态、初始静应力、动荷载特性和排水条件等众多因素的影响, 其离散性较大, 以土体埋深为指标, 取 10 m 为一个区间, 得到区间的平均值, 并进行线性拟合。

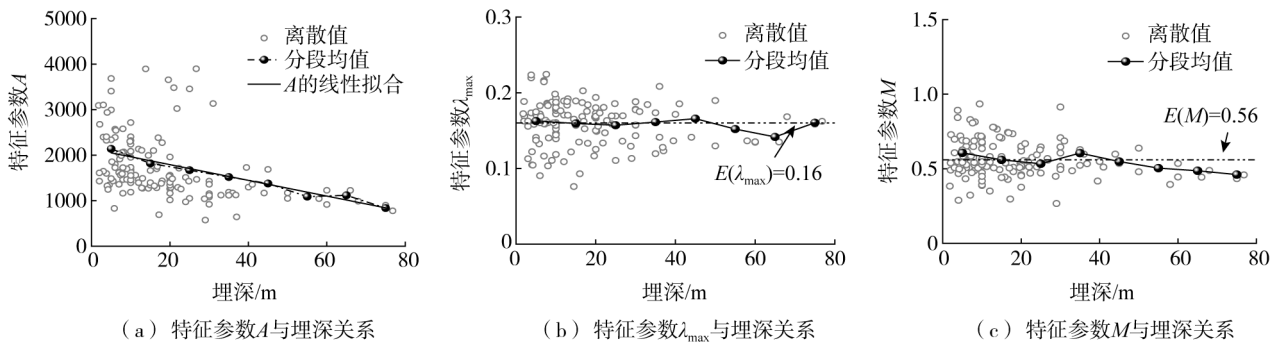


图 2 粉质黏土动力学特征参数与埋深关系

Fig. 2 Relationship between silty clay dynamic characteristic parameters and burial depth

由图 2 可知,  $A$  的均值随埋深增大线性降低;  $\lambda_{max}$  与  $M$  值随埋深无明显趋势, 基本位于均值附近。故变化关系可表示为:  $A = a_1 + a_2 \cdot H$ ,  $a_1, a_2$  为拟合参数,  $\lambda_{max}$  与  $M$  可用均值点直接确定, 拟合参数与均值如表 1 所示。由表中参数即可确定相应土类不同埋深下的动剪切模量比和阻尼比(简称拟合值)。显然, 随着土体埋深的增加, 动剪切模量比增大, 阻尼比减小<sup>[18-19]</sup>。

表 1 拟合参数

Table 1 Fitting parameters

参数	粉质黏土	黏土	砂土
$A = a_1 + a_2 \cdot H$			
$a_1$	2 138	1 625	1 810
$a_2$	-17.26	-8.13	-11.21
$R^2$	0.97	0.81	0.86
$E(\lambda_{max})$	0.16	0.16	0.14
$E(M)$	0.56	0.52	0.55

注:  $R^2$  为调整后的拟合优度。

## 2 拟合结果合理性验证

国内早期动剪切模量比和阻尼比的测定是由石兆吉完成, 他利用自研共振柱给出了全国范围内 12 种土壤的土动力学参数, 后被 DB001—94《工程场地地震安全性评价技术规范》作为参考值(简称规范值)。之后, 袁晓铭等<sup>[2]</sup>利用改进后的共振柱测定了全国不同地区多种土样的土动力学参数, 并给出推荐值(简称推荐值)。CHEN 等<sup>[20]</sup>给出了土动力学参数变异下的取值范围。孙静等<sup>[21]</sup>比较了规范值与推荐值的合理性,

指出规范值动剪切模量比过低,且在大应变时衰减过快,相比之下,推荐值更接近国内外结果,也更具合理性。以埋深 10 m 为一个深度区间,统计出三类土在不同区间的动剪切模量比和阻尼比的平均值(简称统计值)。以粉质黏土为例,其动剪切模量比和阻尼比的实测值、拟合值、推荐值和统计值的对比如图 3 所示。

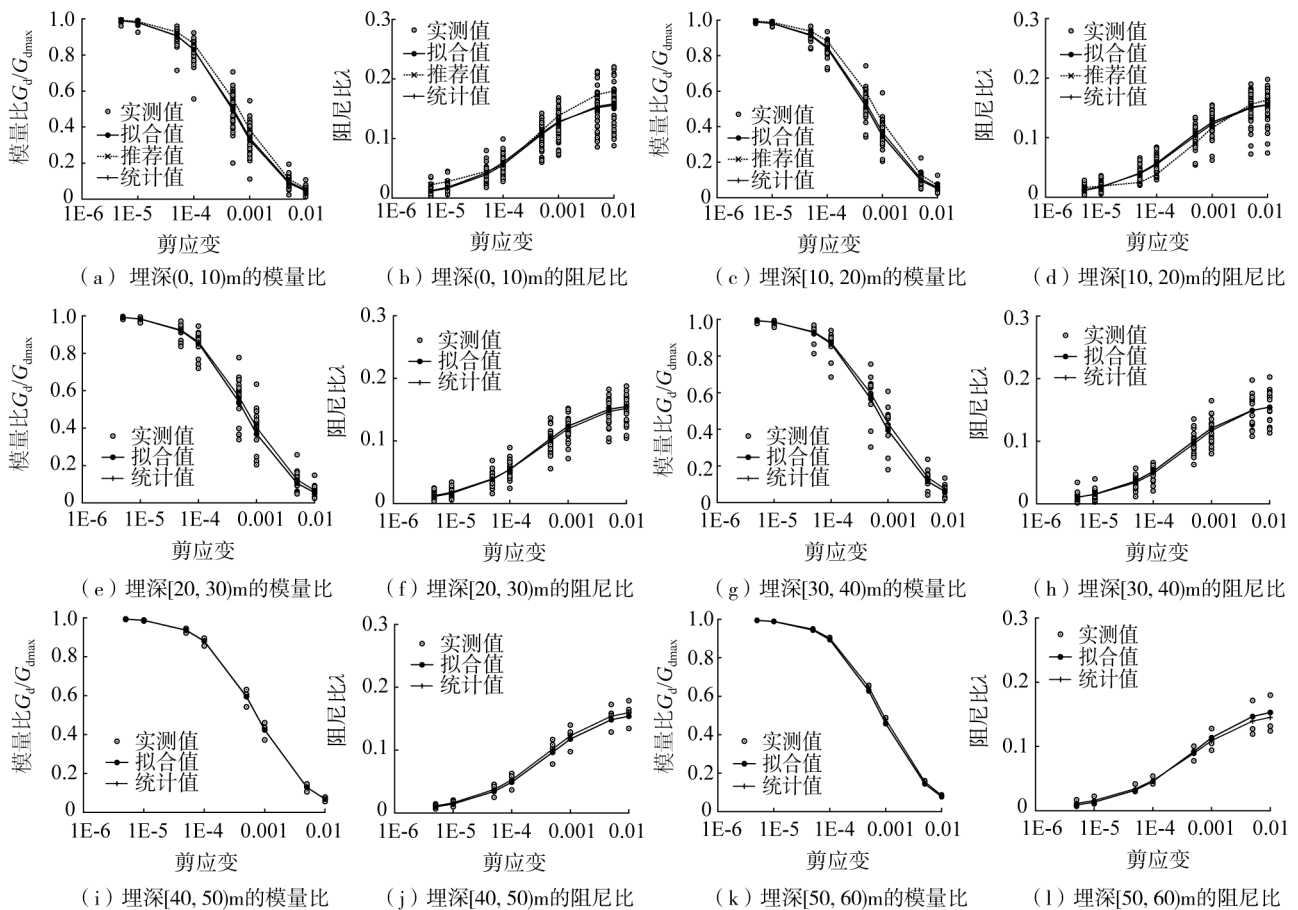


图 3 粉质黏土动剪切模量比、阻尼比曲线对比

Fig. 3 Comparison of dynamic shear modulus ratio and damping ratio curves of silty clay

由图 3 可知:①拟合值与统计值具有较好的一致性,均处于实测值分布的中心,说明先通过拟合得到参数,再计算出动剪切模量比和阻尼比的方法是合理的;②推荐值动剪切模量比、阻尼比同拟合值和统计值有明显差异,体现了土动力学参数的地域特征,表明推荐值在黑龙江省存在一定的局限性。

### 3 变异性对土层地震反应的影响

如前所述,特征参数  $A$  由截距  $a_1$ 、斜率  $a_2$  确定,特征参数  $\lambda_{\max}$ 、 $M$  由  $E(\lambda_{\max})$  和  $E(M)$  确定,通过拟合参数  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $E(\lambda_{\max})$  和  $E(M)$  即可确定特征参数,进而确定某一埋深下的动剪切模量比和阻尼比。考虑特征参数的变异性,分别以 10% 变异率为步长,逐级增减  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $E(\lambda_{\max})$  和  $E(M)$ ,增大为正向变异,减小为负向变异,分析动剪切模量比和阻尼比的变化趋势。以粉质黏土埋深 10 m 位置为例,如图 4 所示。

由图 4 可知,截距  $a_1$  影响明显, $a_1$  越大,动剪切模量比越小,在中等变形<sup>[17]</sup>时影响最为明显,如图 4(a) 所示,该阶段是土层地震反应中动剪切模量比最常出现的范围,对土层地震反应结果有重要影响<sup>[22]</sup>;斜率  $a_2$  影响较小,随埋深的增加而变大,但在 10 m 埋深处仍无明显差别,如图 4(b) 所示。与上述结果相似,阻尼比受截距  $a_1$  的影响明显如图 4(a) 所示,斜率  $a_2$  的影响较小如图 4(b) 所示, $\lambda$  随  $\lambda_{\max}$  的增大而增大如图 4(c) 所示,剪应变越大影响越明显;而参数  $M$  的影响正好相反, $\lambda$  随  $M$  的增大而变小如图 4(d) 所示,剪应变越小越明显。

结合式(5)、式(6)可知,动剪切模量比只与  $A$  值大小相关,随埋深而变化,阻尼比不仅与动剪切模量比相关,还受到  $\lambda_{\max}$  和参数  $M$  的影响。

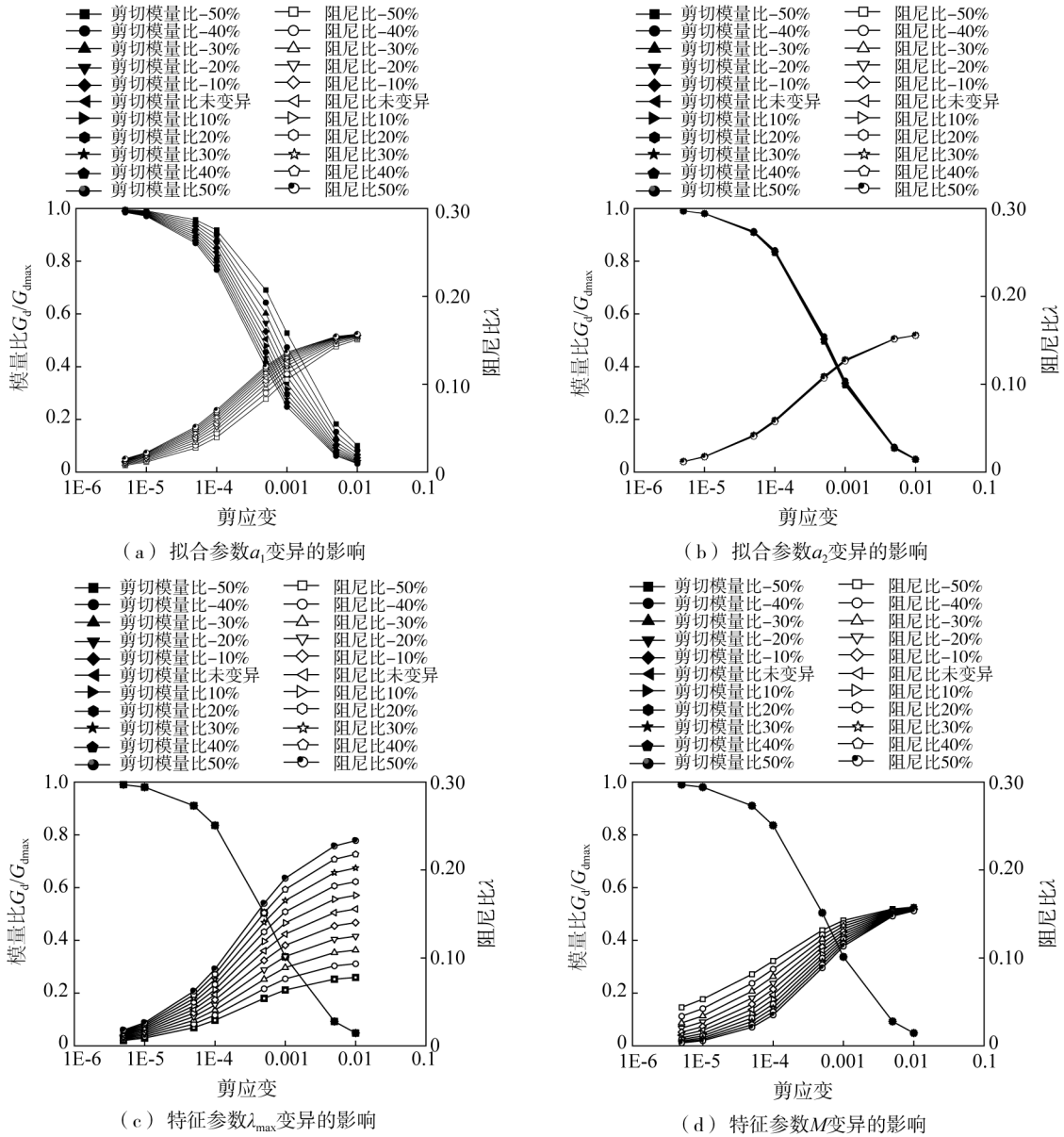


图 4 特征参数变异对土动力学参数的影响

Fig.4 Effect of variability of characteristic parameters on soil dynamics parameters

3.1 场地地震反应分析模型

场地地震反应分析模型采用单一土类构建,模型编号为:1-II、1-III、2-II、2-III、3-II、3-III,其中II、III表示场地类型,1、2、3分别为粉质黏土、黏土和砂土三类土,层厚均为5m,剪切波速与密度均由相应位置实测值统计整理,如表2所示。等效剪切波速计算深度为20m,等效剪切波速分别为249、243、238m/s。II类场地取1~4层,覆盖层厚度20m,场地周期分别为0.321、0.329、0.336s;III类场地取1~12层,覆盖层厚度60m,场地周期分别为0.779、0.764、0.763s。

表 2 土层模型参数

Table 2 Soil layer model parameters

层号	模型 1(粉质黏土)		模型 2(黏土)		模型 3(砂土)	
	$V_s/(m/s^2)$	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	$V_s/(m/s^2)$	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	$V_s/(m/s^2)$	密度/(g/cm <sup>3</sup> )
1	220	1.90	197	1.86	190	1.89
2	243	1.92	237	1.91	232	1.90
3	262	1.94	267	1.92	264	1.92
4	281	1.95	292	1.92	291	1.96
5	298	1.96	313	1.92	314	1.97

续表

层号	模型1(粉质黏土)		模型2(黏土)		模型3(砂土)	
	$V_s/(m/s^2)$	密度/( $g/cm^3$ )	$V_s/(m/s^2)$	密度/( $g/cm^3$ )	$V_s/(m/s^2)$	密度/( $g/cm^3$ )
6	315	1.97	332	1.93	335	1.97
7	331	1.98	350	1.93	355	1.98
8	346	1.98	367	1.94	373	1.98
9	362	1.99	382	1.94	390	1.98
10	376	1.99	396	1.95	406	1.98
11	390	2.00	410	1.96	421	1.99
12	405	2.01	423	1.97	436	1.99
基岩	520	2.20	520	2.20	520	2.20

注: $V_s$ 为剪切波速。

### 3.2 基岩地震动输入

地震动<sup>[23]</sup>是导致地震破坏的主要因素,通常用地震动幅值、频谱特性和持时来描述其特征。实际使用中,描述幅值特征以峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)和有效峰值加速度(effective peak ground acceleration, EPA)最为常用;频谱特性主要通过傅里叶谱、功率谱和反应谱来描述;持时主要包括绝对持时和相对持时两类。高德志等<sup>[24]</sup>对此做了详细阐述。本文采用人工合成地震动作为基岩输入加速度时程,给出3个不同概率水准(50 a超越概率63%、10%和2%)的加速度时程,目标反应谱如图5所示,每个概率水准下合成5条地震波,不同概率水准下的基岩水平峰值加速度分别为:22、77、141  $cm/s^2$ ,篇幅所限,仅给出超越概率50 a 63%的一条人工合成基岩加速度时程,如图6所示。

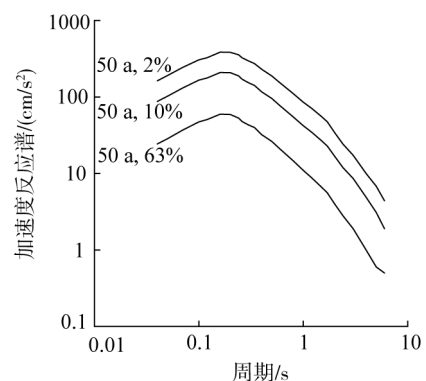


图5 人工合成基岩水平加速度时程目标反应谱  
Fig. 5 Time-history target response spectrum of horizontal acceleration of synthetic bedrock

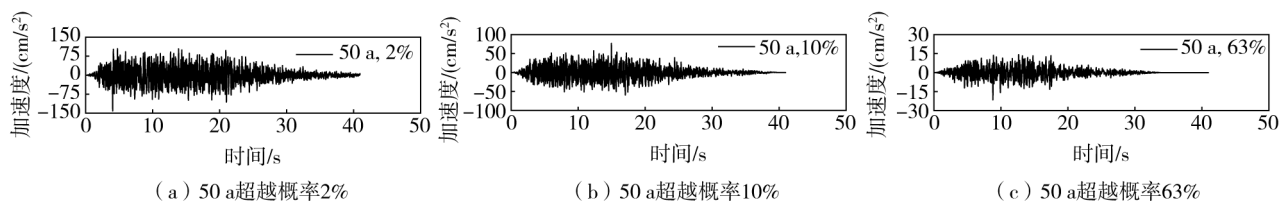


图6 人工合成基岩加速度时程

Fig. 6 Artificial bedrock acceleration time history

### 3.3 土层反应分析

综上所述,为研究特征参数参数 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $\lambda_{max}$ 、 $M$ 对Ⅱ、Ⅲ类场地的影响,构建6个土层模型,3个超越概率下分别合成5条地震动,选用土层地震反应程序LSSRLI-1,计算10个变异点与一个非变异点的土层反应,共计 $4 \times 6 \times 3 \times 5 \times 11 = 3960$ 种工况,得到每种工况的场地放大系数 $F_{PGA}$ (地表输出加速度峰值与基岩输入加速度峰值之比)。用牛洁等<sup>[25]</sup>提出的单纯形算法标定反应谱得到特征周期 $T_g$ 和平台值 $\beta$ 。因三类土的动力学参数均可由 $A$ 、 $\lambda_{max}$ 、 $M$ 得到,对土层地震反应的影响有一定的相似性,篇幅有限,以粉质黏土为例,进行具体分析。

#### 3.3.1 变异性对地表地震动参数的影响

在不同概率水准的地震作用下,粉质黏土地场 $F_{PGA}$ 、 $T_g$ 、 $\beta$ 与 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $\lambda_{max}$ 、 $M$ 变异性变化关系如图7所示。Ⅱ、Ⅲ类场地的规律类似,随着 $a_1$ 、 $\lambda_{max}$ 的增大或 $a_2$ 、 $M$ 的减小, $F_{PGA}$ 减小, $T_g$ 增大, $\beta$ 无明显规律。随着 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $\lambda_{max}$ 、 $M$ 的变化动剪切模量比减小和阻尼比呈相应的变化趋势,当动剪切模量比减小或阻尼比增大时, $F_{PGA}$ 减小 $T_g$ 增大,反之 $F_{PGA}$ 增大 $T_g$ 减小;随着地震强度的增大, $F_{PGA}$ 减小 $T_g$ 增大, $\beta$ 无明显规律<sup>[26]</sup>。因为动剪切模量比减小、阻尼比增大或地震强度增大时,土体快速进入非线性阶段,且非线性程度逐渐增强,场地特征容易发生改变,地震动的能量消耗增大,故 $F_{PGA}$ 减小 $T_g$ 增大。相比Ⅱ类场地,Ⅲ类场地覆盖层厚度更大,场地特征更容易发生改变,地震动经土层传播之后能量衰减较大,故相同地震动强度输入下,Ⅱ类场地的

$F_{PGA}$  大于 III 类场地<sup>[26-27]</sup>。 $\beta$  对动剪切模量比的变化更为敏感,即  $a_1$  变化时影响较大, $a_2$ 、 $\lambda_{max}$ 、 $M$  的变化对  $\beta$  影响较小。

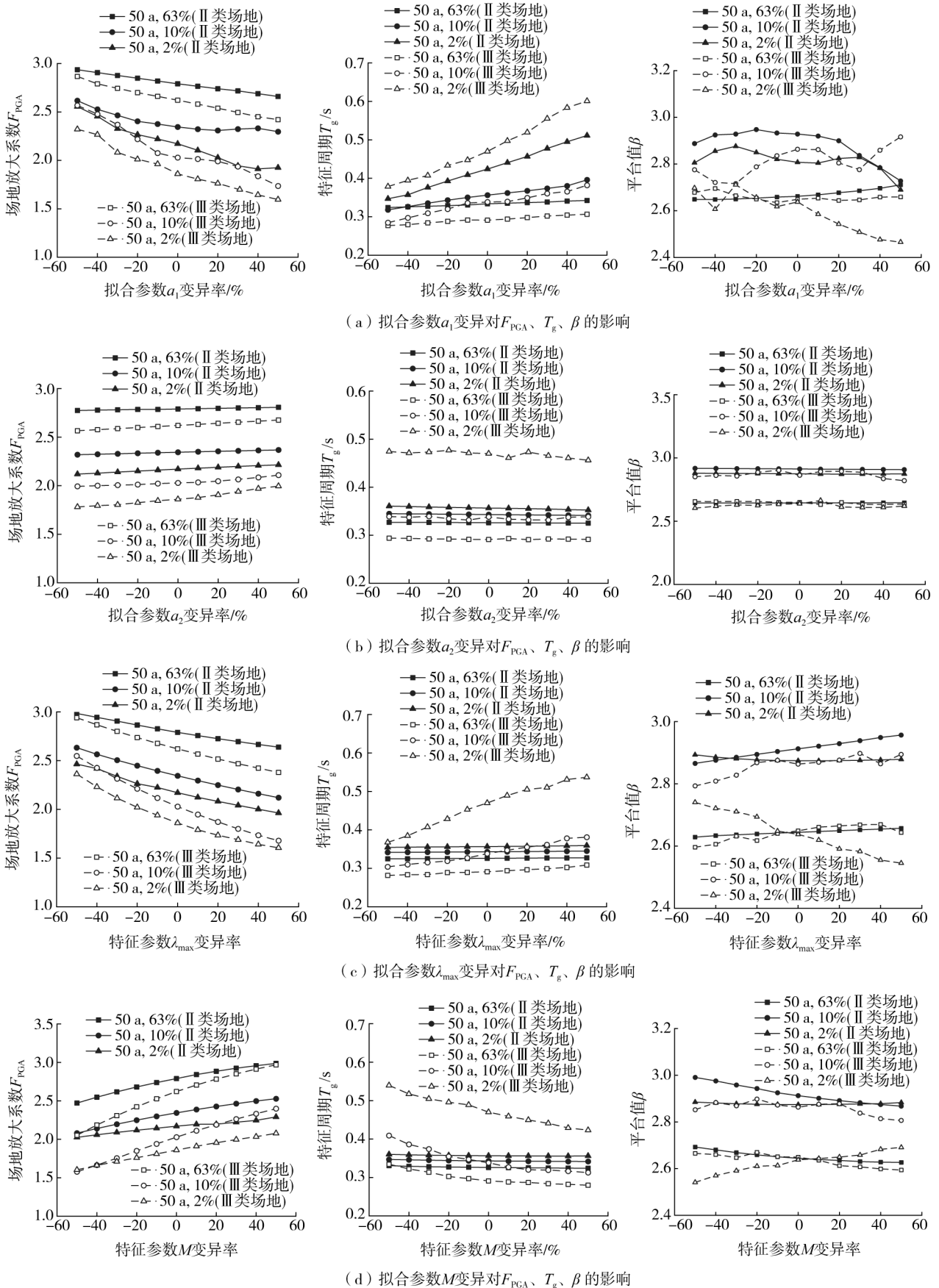


图 7 粉质黏土特征参数变异对  $F_{PGA}$ 、 $T_g$ 、 $\beta$  的影响

Fig. 7 Effect of characteristic parameters variation of silty clay on  $F_{PGA}$ ,  $T_g$  and  $\beta$

3.3.2 变异性导致地表地震动参数的误差

不同概率水准地震作用下,粉质黏土模型  $F_{PGA}$ 、 $T_g$ 、 $\beta$  的相对误差与  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $\lambda_{max}$ 、 $M$  变异性关系如图 8 所示。在 II、III 类场地中,均有相似的规律,随着  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $\lambda_{max}$ 、 $M$  的变异率增加或地震强度的增大,  $F_{PGA}$ 、 $T_g$ 、 $\beta$  的相对误差变大,其中  $F_{PGA}$  对此表现的最敏感,  $T_g$  次之,对  $\beta$  的影响最小。

总体而言,  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $\lambda_{max}$ 、 $M$  正、负向变异引起的误差近似, II 类场地误差小于 III 类场地,地震动强度越大误差越大,土层地震反应对  $a_1$  的变异最为敏感,  $\lambda_{max}$  和  $M$  次之,  $a_2$  影响最小<sup>[28]</sup>。不同概率水准地震作用下,  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $\lambda_{max}$ 、 $M$  变异引起的最大相对误差随变异程度的增大而变大,具体如表 3 所示。

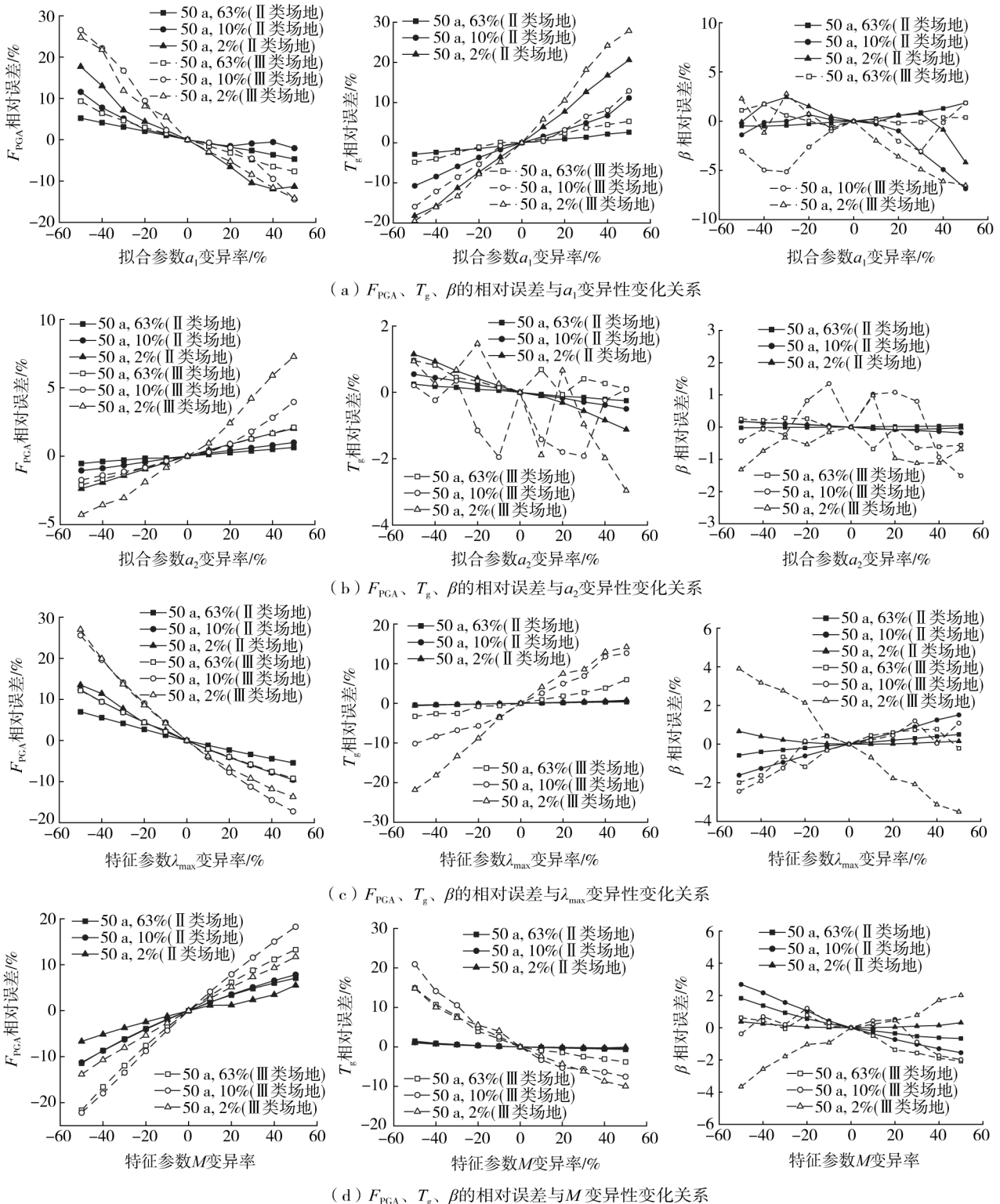


图 8 粉质黏土  $F_{PGA}$ 、 $T_g$ 、 $\beta$  的相对误差与特征参数变异性变化关系

Fig. 8 Relationship between relative errors of  $F_{PGA}$ 、 $T_g$ 、 $\beta$  and characteristic parameters variability of silty clay

表3 不同变异率对应的最大相对误差

Table 3 The maximum relative error corresponding to different variation rate

变异率/%	±10	±20	±30	±40	±50
最大相对误差/%	6	11	18	24	28

## 4 结论

基于黑龙江省的动剪切模量比和阻尼比资料,通过拟合分析可分别确定粉质黏土、黏土和砂土3种土类特征参数的拟合参数 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $\lambda_{\max}$ 、 $M$ ,计算出不同埋深的土动力学参数的特征参数,并与实测值、统计值和推荐值进行了比较,验证了通过拟合得到的土动力学参数的合理性,进一步讨论了特征参数的变异性对场地土层地震反应结果(场地放大系数 $F_{PGA}$ 、场地反应谱特征周期 $T_g$ 和平台值 $\beta$ )的影响,得到以下结论:

1) 基于已有的土动剪切模量比和阻尼比,通过先拟合再计算得到区域土动力学参数的方法和结果是合理的。

2) 土动剪切模量比随土体埋深的增加而增大,阻尼比与之相反<sup>[29]</sup>,土层地震反应对土动剪切模量比的变异更敏感。

3) 随着 $a_1$ 、 $\lambda_{\max}$ 的增大或 $a_2$ 、 $M$ 的减小, $F_{PGA}$ 减小, $T_g$ 增大。 $\beta$ 虽无明确的变化趋势,但变化范围小。

4) 随着 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $\lambda_{\max}$ 、 $M$ 的变化, $F_{PGA}$ 变化规律明显且变化范围大,造成的误差需得到重视, $T_g$ 次之, $\beta$ 造成的相对误差最小。

5) 土层地震反应结果误差与参数的变异率正相关,以10%为步长增加变异率至50%造成的最大相对误差分别为:6%、11%、18%、24%、28%。

## 参考文献:

- [1] 石兆吉. 土壤的动剪切模量和阻尼比,地震小区划-理论与实践[M]. 北京:地震出版社,1989.  
SHI Zhaoji. Dynamic shear modulus and damping ratio of soil, seismic microzonation[M]. Beijing: Seismological Press, 1989. (in Chinese)
- [2] 袁晓铭,孙锐,孙静,等. 常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2000,20(4):133-139.  
YUAN Xiaoming, SUN Rui, SUN Jing, et al. Laboratory experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of soils[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2000, 20(4): 133-139. (in Chinese)
- [3] 王绍博,丁海平. 土动力参数对土层动力反应的影响[J]. 地震工程与工程振动,2001,21(1):105-108.  
WANG Shaobo, DING Haiping. Effect of soil dynamic parameters on seismic responses of soil layers[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2001, 21(1): 105-108. (in Chinese)
- [4] LAN J Y, DIWAKAR K C, HU L B, et al. An experimental study of the dynamic shear modulus and damping ratio of calcareous sand in the South China Sea[J]. Journal of Coastal Research, 2021, 37(5): 964-972.
- [5] WAN X L, YANG D L. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of soft soils in Binhu new district of Hefei[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 405-408: 1957-1960.
- [6] LING X Z, ZHANG F, LI Q L, et al. Dynamic shear modulus and damping ratio of frozen compacted sand subjected to freeze-thaw cycle under multi-stage cyclic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 76: 111-121.
- [7] WU Q, MA W J, LIU Q F, et al. Dynamic shear modulus and damping ratio of rubber-sand mixtures with a wide range of rubber content[J]. Materials Today Communications, 2021, 27: 102341.
- [8] LI F D, SU L, WAN H P, et al. Experimental investigation on dynamic characteristics of sandy gravel in frozen region[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 185: 103251.
- [9] 王谦,马金莲,马海萍,等. 饱和黄土动剪切模量和阻尼比的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(9):1919-1927.  
WANG Qian, MA Jinlian, MA Haiping, et al. Dynamic shear modulus and damping ratio of saturated loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(9): 1919-1927. (in Chinese)
- [10] 施春花,吕悦军,彭艳菊,等. 北京地区粉质黏土土动力学参数的统计分析[J]. 震灾防御技术,2009,4(1):69-79.  
SHI Chunhua, LU Yuejun, PENG Yanju, et al. Statistical analysis of dynamic parameters of silty clay in Beijing area[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2009, 4(1): 69-79. (in Chinese)
- [11] 兰景岩,刘化涂,吕悦军,等. 渤海海域典型场地的动剪切模量比和阻尼比的统计值[J]. 地震研究,2012,35(2):260-267,296.  
LAN Jingyan, LIU Huadi, LV Yuejun, et al. Statistical value of dynamic shear modulus ratio and damping ratio of the soils in Bohai Sea[J]. Journal of Seismological Research, 2012, 35(2): 260-267, 296. (in Chinese)
- [12] 罗丹鹏,张忠利. 广西红粘土动力非线性参数统计分析[J]. 华南地震,2016,36(2):77-83.

- LUO Danpeng, ZHANG Zhongli. The statistical analysis of nonlinear dynamic parameters of Guangxi laterite [J]. South China Journal of Seismology, 2016, 36(2): 77-83. (in Chinese)
- [13] 孔宇阳, 廉超, 李井冈, 等. 武汉地区典型土类动力非线性参数的统计分析[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 832-837.  
KONG Yuyang, LIAN Chao, LI Jinggang, et al. Statistical analysis of dynamic nonlinear parameters of typical soils in Wuhan area [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 832-837. (in Chinese)
- [14] 史丙新, 周荣军. 四川盆地场地土动力学参数统计研究[J]. 四川地震, 2014(3): 1-5.  
SHI Bingxin, ZHOU Rongjun. Research on dynamic parameters of site soil in Sichuan basin [J]. Earthquake Research in Sichuan, 2014(3): 1-5. (in Chinese)
- [15] WU Q, WANG Z F, QIN Y, et al. Intelligent model for dynamic shear modulus and damping ratio of undisturbed marine clay based on back-propagation neural network [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(2): 249.
- [16] LI Z, ESCOFFIER S, KOTRONIS P. Using centrifuge tests data to identify the dynamic soil properties: Application to Fontainebleau sand [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 52: 77-87.
- [17] 张克绪. 岩土地震工程及工程振动[M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
ZHANG Kexu. Geotechnical earthquake engineering and engineering vibration [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [18] 付惠姣, 谭慧明, 高志兵. 考虑埋深影响的长江下游江苏地区粘性土动剪切模量与阻尼比试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(6): 872-877.  
FU Huijiao, TAN Huiming, GAO Zhibing. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio for cohesive soil in the downstream of the yangze river in the Jiangsu area considering the influence of embedment depth [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(6): 872-877. (in Chinese)
- [19] 谭慧明, 付惠姣, 梅涛涛, 等. 埋深对黏性土动剪切模量和阻尼比影响试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(6): 136-143.  
TAN Huiming, FU Huijiao, MEI Taotao, et al. Experimental study on the influence of buried depth on dynamic shear modulus and damping ratio of cohesive soil [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(6): 136-143. (in Chinese)
- [20] CHEN H J, SUN R, YUAN X, et al. Variability of nonlinear dynamic shear modulus and damping ratio of soils [C] // 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, 2008.
- [21] 孙静, 袁晓铭, 孙锐. 土动剪切模量和阻尼比的推荐值和规范值的合理性比较[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(2): 125-133.  
SUN Jing, YUAN Xiaoming, SUN Rui. Reasonability comparison between recommended and code values of dynamic shear modulus and damping ratio of soils [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2004, 24(2): 125-133. (in Chinese)
- [22] 王喆恺, 谭慧明, 陶小三. 土的动剪切模量比和阻尼比不确定性影响因素[J]. 水道港口, 2023, 44(2): 256-263.  
WANG Zhekai, TAN Huiming, TAO Xiaosan. Factors affecting uncertainty of dynamic shear modulus ratio and damping ratio of soil [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2023, 44(2): 256-263. (in Chinese)
- [23] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 2006.  
HU Yuxian. Earthquake engineering [M]. Beijing: Seismological Press, 2006. (in Chinese)
- [24] 高德志, 毕鹏, 刘艳. 各国规范关于时程分析中地震波选取方法的对比[J]. 建筑结构, 2022, 52(16): 67-73.  
GAO Dezhi, BI Peng, LIU Yan. Comparison of the selection methods of seismic waves in time-history analysis by national codes [J]. Building Structure, 2022, 52(16): 67-73. (in Chinese)
- [25] 牛洁, 薄景山, 王福昌, 等. 基于 Nelder-Mead 单纯形算法的设计反应谱标定方法[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(5): 165-175.  
NIU Jie, BO Jingshan, WANG Fuchang, et al. Calibration method for seismic design response spectrum based on the Nelder-Mead simplex algorithm [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(5): 165-175. (in Chinese)
- [26] 董亮, 夏峰. 天津地区土动力学参数变异性对地表地震动参数的影响[J]. 地震工程学报, 2017, 39(6): 1062-1069.  
DONG Liang, XIA Feng. Effect of variability in soil dynamic parameters on the ground motion parameters of a site surface in the Tianjin area [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6): 1062-1069. (in Chinese)
- [27] 孙静, 熊宏强, 公茂盛, 等. 土的动剪切模量非线性特性对地震动的影响研究[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(2): 28-34.  
SUN Jing, XIONG Hongqiang, GONG Maosheng, et al. Study on the influence of nonlinear characteristics of dynamic shear modulus of soil on surface ground motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(2): 28-34. (in Chinese)
- [28] HU Q, LI H, YANG G, et al. Effects of uncertainty of dynamic shear modulus ratio on design ground motion [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2019, 56(2): 82-90.
- [29] MAHESHWARI B K, KIRARB. Dynamic properties of soils at low strains in Roorkee region using resonant column tests [J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 13(5): 399-410.