

# 常规土类动剪切模量阻尼比超越概率计算方法

孙锐<sup>1,2</sup>, 袁晓铭<sup>2</sup>, 陈红娟<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工程大学, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080;  
3. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124)

**摘要:**土的动剪切模量比和阻尼比是土层地震反应分析、工程场地地震安全性评价和地震小区划工作中的必备参数,但其不确定性显著,对地震动和抗震设计影响很大。本文以我国常规土类动剪切模量比和阻尼比与剪应变非线性关系试验为基础,研究考虑这两个动力参数变异性下其超越概率的计算方法。方法包括了试验数据的整理、超越概率的计算以及两个动力参数和超越概率关系模拟等几个步骤,最后给出了我国常规土类动剪切模量比和阻尼比超越概率的计算公式,为我国基于概率和可靠度思想的工程地震安全风险评估提供了一定基础。

**关键词:** 常规土类; 动剪切模量比; 阻尼比; 超越概率; 计算方法

中图分类号: P315.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2010)03-0209-06

## Calculation Method for the Exceedance Probabilities of Dynamic Shear Modulus Ratio and Damping Ratio of Conventional Soils

SUN Rui<sup>1,2</sup>, YUAN Xiao-ming<sup>2</sup>, CHEN Hong-juan<sup>3</sup>

(1. Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;

3. The College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The dynamic shear modulus ratio and damping ratio are the necessary parameters for analysis of ground motion, seismic safety evaluation of engineering sites, and seismic microzonation. But the uncertainty of two parameters is great and have remarkable effects on the ground motion and design spectrum. In this paper, basing on the testing results of nonlinear relationship between shear strain and dynamic shear modulus ratio, damping ratio for conventional soils, the calculation method of their exceedance probabilities is presented. The method includes the statistics of testing data, calculation of the exceedance probability and the curve fitting process. The calculation equation for the exceedance probabilities of the dynamic shear modulus ratio and damping ratio are proposed and the results may lay the foundation for seismic safety risk assessment basing on probability and reliability theory.

**Key words:** Conventional soil; Dynamic shear modulus ratio; Damping ratio; Exceedance probability; Calculation method

## 0 前言

鉴于各种因素的不确定性,基于概率和可靠度概念的风险评估理论逐渐成为工程抗震设计的主导思想。土层作为地震波传播媒介其动力性能对地震

动有显著影响,从而对工程结构抗震设计和加固方法产生很大影响<sup>[1-2]</sup>。土的非线性动力性能分析中最重要的两个参数是土的动剪切模量比和阻尼比

收稿日期:2010-03-16

基金项目:黑龙江省自然科学基金(E200603);国家科技支撑计划(2006BAC13B01);国家重点基础研究发展计划(973计划)(2007CB714201)

作者简介:孙锐(1972-),女(汉族),黑龙江哈尔滨人,研究员,主要从事土动力学研究。

(简称动模量阻尼比,下同),二者也是土层地震反应分析、工程场地地震安全性评价和地震小区划工作中必备参数<sup>[3-4]</sup>。

岩土材料的重要特征之一是其有强烈的变异性和不确定性。目前的试验结果表明<sup>[5]</sup>,土的动模量阻尼比随剪应变的变化曲线具有明显的离散性,说明这两个参数变异性显著。同时,现有的理论计算结果表明<sup>[6]</sup>,土的动模量阻尼比随剪应变的变化曲线对地面运动影响显著。例如,三类场地 0.1 g 地震输入时动剪切模量比 6% 的差别就对反应谱产生不可忽视的,会对工程结构抗震设计方法和工程造价产生明显影响的变化。

一般来说,土性指标变异性影响远大于计算方法误差带来的影响,因此研究土性变异性并考虑其影响问题具有重要的理论意义和工程应用价值。土的静力参数的不确定性分析方面已有一些成果发表<sup>[7]</sup>,但因问题的复杂性,目前土动力学参数的研究还主要局限在一些试验工作上<sup>[8]</sup>,没有给出具有概率意义的土动力学参数不确定性的分析方法和计算公式。在抗震设计和地震安全的风险评估中,工程安全可接受的风险水准一般是以超越概率的形式表达,与此匹配的土动力参数亦需采用同一超越概率的参数,这样常规土类动模量阻尼比超越概率的计算就成为工程地震安全风险评估中必要的工作。但目前还缺少相应的方法和计算公式的研究工作和成果发表。

目前我国抗震设计使用的标准设计谱代表着实际情况的一种平均结果,具有很大的不确定性,其中就包含了土动力非线性变异性的影响。平均(概率)意义上土动力非线性变异性对设计谱的影响程度及如何得到(超越)概率设计谱,对于我国基于概率和可靠度思想的工程地震安全风险评估技术的发展很有意义,而回答这些问题的基础是土动力非线性变异性(超越)概率的计算。注意到这里动模量阻尼比变异性含义应为一般意义的结果,即需包括全部可能的影响因素。本文以我国常规土类动模量阻尼比试验为基础,提出其超越概率的计算方法和计算公式。

## 1 试验设备和数据

### 1.1 试验设备及试验方法

本文中土的动模量阻尼比与剪应变非线性关系数据来源于原状土样试验(部分砂土为重塑土),试验采用我国第一台共振柱仪及其改进型仪器,其可

靠性已经得到检验<sup>[9]</sup>。

共振柱试验机在微机的操纵下,土柱首先作一扭转,然后突然释放,使之作自由振动,根据自由振动频率求得模量比,根据衰减的振幅值计算相应的阻尼比。试验按相关规范进行<sup>[10]</sup>。

### 1.2 试验数据

本文试验针对的是粘土、粉土、粉质粘土、砂土等四种常规土类,来源于我国 41 个城市或地区的 554 组土样,其中粘土、粉质粘土、粉土和砂土分别为 112 组、209 组、95 组和 138 组。此外,本文取每个土样试验结果代表一个样本,则每次试验对变异性的贡献均等。

试验中土样的固结压力在 49 ~ 294 kPa 之间。以往研究<sup>[11]</sup>表明固结压力对动模量阻尼比与剪应变非线性关系有影响,随固结压力增加动模量阻尼比均有一定增大。因此本文动模量阻尼比的不确定性含有土固结压力的因素,体现了埋深的影响。但研究表明固结压力的影响要明显小于土性,因此本文关于动模量阻尼比与剪应变非线性关系的变异性主要体现了土性及地区差异这两方面的不确定因素。

同时,动模量阻尼比随剪应变  $\gamma$  的变化表现为双曲线关系,而目前提供给工程使用的是在 8 个典型剪应变  $5 \times 10^{-6}$ 、 $10^{-5}$ 、 $5 \times 10^{-4}$ 、 $10^{-4}$ 、 $5 \times 10^{-3}$ 、 $10^{-3}$ 、 $5 \times 10^{-2}$  和  $10^{-2}$  下的结果。本文也以此 8 个典型应变研究动模量阻尼比的变异性和超越概率计算问题。

### 1.3 试验结果

针对 4 种典型土类,将试验结果均按标准整理到 8 个典型剪应变上,结果如图 1,各图中的五条线分别为两个参数的外包线、95% 参考值范围和均值。

由图 1 可见几种土类的动模量阻尼比随剪应变变化的形态是一致的。动剪切模量比随剪应变增大而明显减小;而阻尼比随剪应变增大而显著增大,且变化范围均有很大的离散性。但各种土的均值和外包线大小有差异,特别是在砂土和其它粘性土之间差异显著,砂土动模量阻尼比的均值和外包线明显小于其它土类。

## 2 超越概率计算方法

所谓动模量阻尼比的超越概率指的是剪切模量比(阻尼比)大于等于某一给定值的可能性大小。反之,某一超越概率下的剪切模量比(阻尼比)表示剪切模量比(阻尼比)大于等于(超越)此值的可能

性大小。

设  $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$  为有  $n$  个原始数据, 从小到大大排列成数列, 则对数据  $x_i$  的超越概率为

$$P = \frac{n - i + 1}{n} \times 100\% \quad (1)$$

换言之, 对应某一指定超越概率  $P$  相应的模量比 (阻尼比) 在数列中的序数为

$$i = n - p \times n + 1 \quad (2)$$

粘土模量比与阻尼比超越概率曲线如图 2, 以此为例进行说明分析。如图 2 所示, 对应 8 个典型应变点都有一系列动模量阻尼比的试验数据, 对每

个应变点按式(2)求出指定超越概率的动模量阻尼比, 将 8 个点连接成线, 则有图 2 中不同超越概率的动模量阻尼比随剪应变的变化曲线。图 2 中曲线自上而下分别代表超越概率为 1%, 10%, 35%, 50%, 75%, 90%, 100%, 而 1% 表示模量比和阻尼比的最大值, 100% 则代表其最小 (下限) 值。例如图 2 中超越概率 10% 的模量比和阻尼比, 表示剪切模量比 (阻尼比) 大于等于 (超越) 此值的可能性大小为 10%。

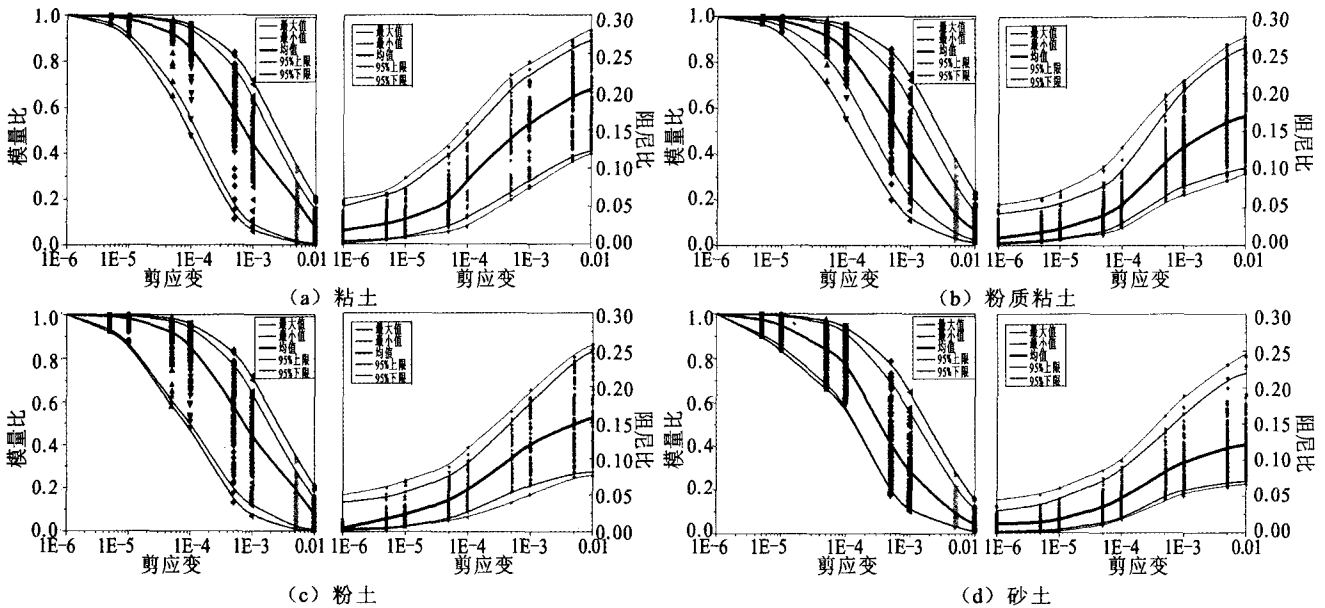


图 1 常规土类动模量阻尼比基本试验结果

Fig. 1 Standard results of the dynamic shear modulus ratio and damping ratio vs. shear strain for the conventional soils.

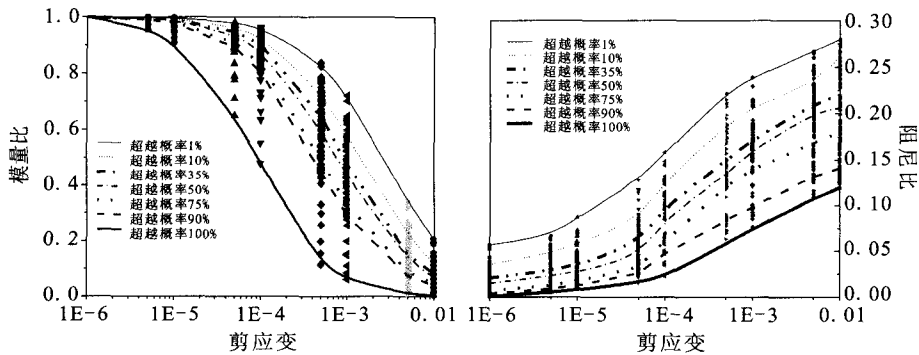


图 2 粘土模量比与阻尼比超越概率曲线

Fig. 2 Exceedance probability curves of shear modulus ratio and damping ratio for cohesive soil.

由图 2 可见, 粘性土动模量阻尼比的超越概率分布很不均匀, 超越概率较小和较大时均变化明显。对于粉质粘土、粉土和砂土也有类似结果。

### 3 两个动力参数超越概率计算公式

#### 3.1 动剪切模量比超越概率计算公式

由试验得到的常规土动剪切模量比的极值由表 1 给出。

分析表明,几种常规土类不同剪应变下动剪切模量比与其超越概率之间满足 Boltzmann 方程:

$$y = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{-(x-x_0)/dx}} \quad (3)$$

其中参数可由表2给出,以此参数拟合的8个剪应变下动剪切模量比与超越概率关系曲线如图3。注意到图3和式(3)表示的是不同超越概率下动剪切

模量比的大小。需说明的是,图3中曲线拟合时所使用的数据量与图2一致,但为观察方便这里仅标注了15个典型概率(1%、2.5%、10%、17.5%、25%、35%、45%、50%、55%、65%、75%、82.5%、90%、97.5%和100%)的结果,下同。

表1 常规土类动剪切模量比极值

土类	统计量	剪应变 $\gamma(10^{-4})$							
		0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
粘土	极大值	0.998 4	0.996 5	0.981 3	0.963 0	0.837 7	0.720 5	0.340 0	0.204 8
	极小值	0.957 8	0.909 3	0.649 9	0.478 8	0.113 3	0.060 0	0.008 0	0.004 0
粉质粘土	极大值	0.998 7	0.997 0	0.983 9	0.967 9	0.856 8	0.749 3	0.373 9	0.229 9
	极小值	0.968 8	0.932 5	0.717 3	0.556 7	0.199 5	0.110 7	0.024 3	0.012 3
粉土	极大值	0.999 0	0.997 6	0.987 3	0.928 3	0.719 9	0.562 1	0.204 1	0.113 6
	极小值	0.923 0	0.872 0	0.577 0	0.480 0	0.130 0	0.069 0	0.003 8	0.001 9
砂土	极大值	0.997 8	0.995 2	0.974 2	0.949 2	0.787 5	0.649 3	0.270 0	0.156 1
	极小值	0.900 0	0.837 0	0.660 0	0.594 0	0.174 0	0.103 1	0.031 0	0.010 8

表2 动剪切模量比超越概率拟合参数

参数	土类	剪应变 $(\times 10^{-4})$							
		0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
$A_1$	粘土	98.39	98.44	98.53	98.62	99.59	100.97	104.82	106.34
	粉粘	98.29	98.33	98.49	98.73	100.42	102.12	106.88	108.22
	粉土	95.66	96.51	97.45	99.47	103.00	110.45	119.52	124.11
	砂土	103.55	105.191	106.281	113.119	144.57	157.38	186.34	218.96
$A_2$	粘土	-39.87	-36.85	-30.18	-24.51	-8.67	-3.90	0.58	1.11
	粉粘	-11.94	-11.93	-10.37	-8.72	-3.08	-1.11	0.81	1.07
	粉土	-58.53	-79.31	-44.87	-48.61	-6.00	-4.04	0.78	1.25
	砂土	-21.69	-19.15	-18.09	-17.318	-4.679 5	-1.353	-0.666 5	1.386
$X_0$	粘土	0.996 0	0.990 8	0.949 4	0.898 9	0.611 5	0.432 0	0.128 2	0.067 8
	粉粘	0.994 4	0.987 3	0.934 4	0.874 0	0.573 5	0.398 5	0.114 2	0.060 2
	粉土	0.996 3	0.994 5	0.945 9	0.898 7	0.530 5	0.350 3	0.089 9	0.044 8
	砂土	0.965 4	0.950 1	0.870 0	0.783 1	0.292 6	0.165 6	0.031 1	0.006 7
dx	粘土	0.002 3	0.005 1	0.024 2	0.041 6	0.085 7	0.084 1	0.038 7	0.022 5
	粉粘	0.001 8	0.004 0	0.019 1	0.033 0	0.069 0	0.067 1	0.029 9	0.017 1
	粉土	0.004 6	0.011 1	0.047 4	0.084 6	0.112 8	0.114 9	0.048 4	0.027 9
	砂土	0.020 0	0.030 0	0.060 2	0.091 1	0.143 7	0.111 5	0.041 3	0.022 3

表3 常规土类阻尼比极值

土类	统计量	剪应变 $\gamma(10^{-4})$							
		0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
粘土	极大值	0.066 8	0.087 0	0.128 0	0.158 0	0.222 0	0.238 8	0.267 0	0.280 0
	极小值	0.005 0	0.008 0	0.016 1	0.022 4	0.058 2	0.074 4	0.108 2	0.119 2
粉质粘土	极大值	0.062 0	0.072 0	0.099 0	0.129 3	0.199 2	0.216 8	0.264 0	0.273 3
	极小值	0.004 0	0.007 0	0.013 3	0.023 7	0.058 1	0.066 9	0.086 0	0.094 3
粉土	极大值	0.060 1	0.070 0	0.089 0	0.116 0	0.165 2	0.195 2	0.240 5	0.257 0
	极小值	0.003 0	0.006 0	0.015 2	0.019 2	0.038 7	0.050 6	0.075 0	0.077 0
砂土	极大值	0.052 0	0.061 0	0.086 0	0.099 0	0.161 3	0.189 3	0.232 0	0.246 4
	极小值	0.001 0	0.002 0	0.010 0	0.018 0	0.045 0	0.050 3	0.062 7	0.066 4

3.2 阻尼比超越概率计算公式

阻尼比极值可由试验得出,如表3所示。

分析表明,几种常规土类不同剪应变下阻尼比与其超越概率间也满足 Boltzmann 方程,公式表达

同式(3),其中参数可由表4给出。以此参数拟合的阻尼比与超越概率关系曲线如图4。注意到图4表示了不同超越概率下阻尼比的大小。

从图3、4中模拟曲线和试验点的对比可见,采

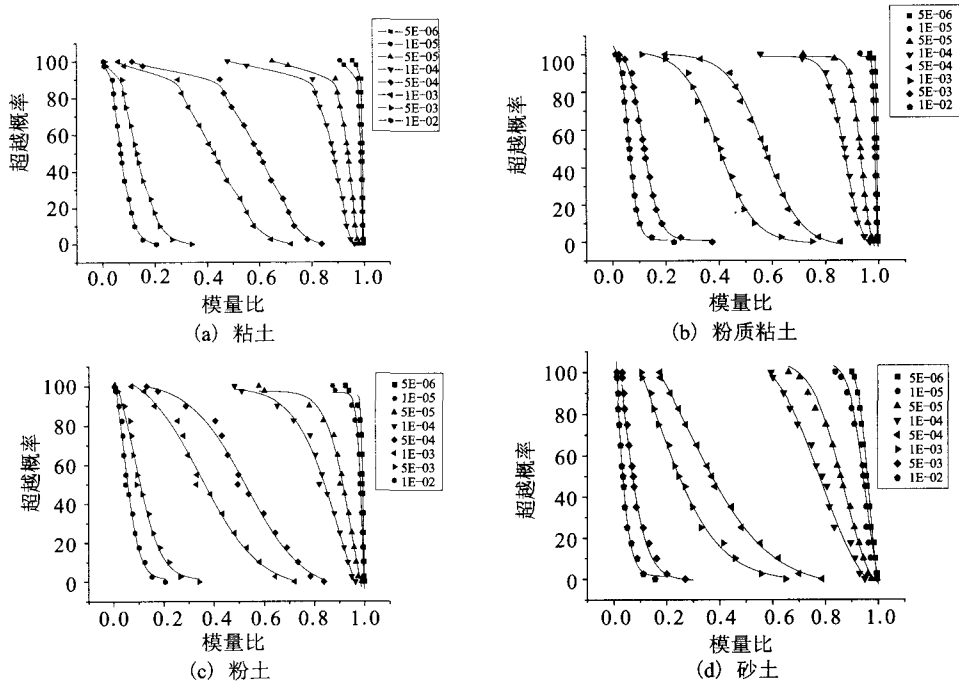


图3 动剪切模量比与超越概率关系曲线

Fig. 3 Relation between dynamic shear modulus and exceedance probabilities.

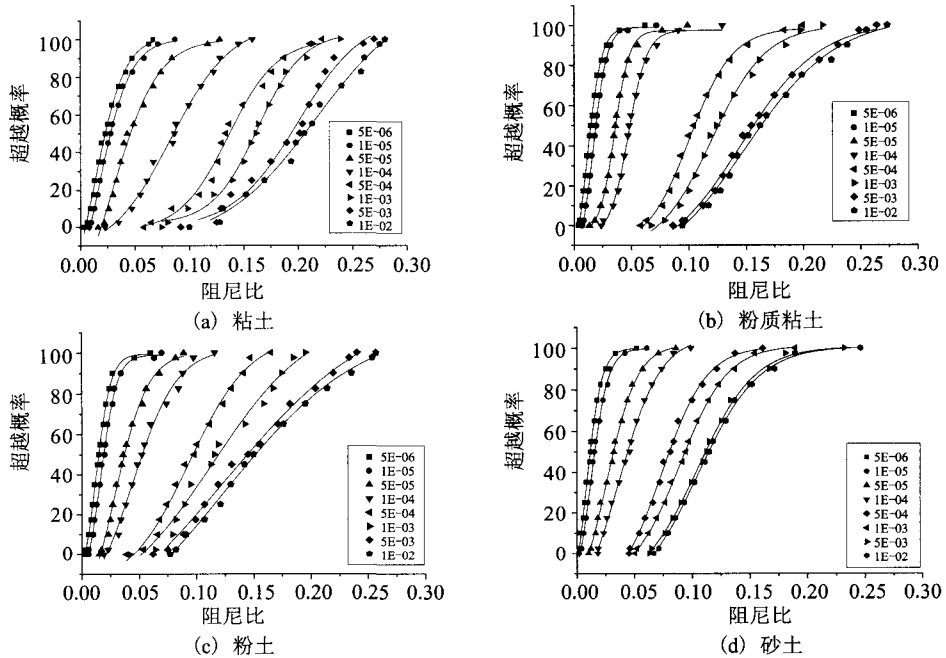


图4 阻尼比与超越概率关系曲线

Fig. 4 Relation between damping ratios and exceedance probabilities.

用 Boltzmann 方程模拟两个动力参数与超越概率的关系合理可行,具有良好的精度。

这样,通过式(3)、表2和表4就可以计算出指定超越概率下动模量阻尼比,以此作为抗震设计和地震安全风险评估中指定超越概率下的土动力学计算参数。

### 4 结论和讨论

本文以我国常规土类动模量阻尼比与剪应变非线性关系试验为基础,研究考虑这两个动力参数变异性条件下其超越概率的计算方法,方法包括试验数据的整理、变异性分布形态的确定、概率参考值的计算和超越概率与两个动力参数关系的模拟等几个

方面,最后给出了我国常规土类动模量阻尼比超越概率的计算公式。本文的方法和公式为我国基于概率和可靠度思想的工程地震安全风险评估奠定了一

定基础。但需注意的是,这里两个动力参数的变异性主要来源于土性本身及地区差异。

表4 阻尼比超越概率拟合参数

参数	土类	剪应变( $\times 10^{-4}$ )							
		0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
$A_1$	粘土	-53.48	-60.16	-58.69	-15.11	-2.40	1.72	-1.27	-9.31
	粉粘	-30.13	-20.35	-4.20	-5.71	-11.99	-13.89	-20.14	-28.43
	粉土	-22.80	-20.628	-43.45	-31.74	-17.70	-27.94	-54.30	-53.16
	砂土	-38.56	-28.37	-32.01	-37.07	-23.44	-14.78	-17.88	-23.61
$A_2$	粘土	101.84	100.31	100.12	108.94	99.92	103.41	112.95	124.49
	粉粘	99.10	99.14	97.46	97.51	98.58	99.84	101.49	104.27
	粉土	99.48	98.91	100.42	102.25	108.47	117.69	125.53	114.11
	砂土	100.03	99.85	101.69	105.71	100.87	101.23	100.64	100.71
$x_0$	粘土	0.013 2	0.016 2	0.029 9	0.082 8	0.136 1	0.162 8	0.200 0	0.216 4
	粉粘	0.011 5	0.016 9	0.035 4	0.047 5	0.100 6	0.120 1	0.146 1	0.148 5
	粉土	0.012 2	0.016 6	0.028 4	0.044 0	0.093 2	0.113 5	0.123 2	0.123 3
	砂土	0.007 7	0.012 1	0.025 5	0.035 9	0.073 1	0.089 0	0.104 4	0.104 7
$dx$	粘土	0.013 8	0.014 6	0.020 7	0.028 3	0.022 4	0.020 9	0.030 5	0.043 9
	粉粘	0.006 3	0.006 1	0.006 6	0.008 2	0.018 9	0.023 7	0.034 2	0.040 4
	粉土	0.006 5	0.007 0	0.014 4	0.019 4	0.026 5	0.042 9	0.066 7	0.059 7
	砂土	0.006 7	0.007 4	0.013 3	0.018 2	0.019 5	0.020 7	0.024 7	0.026 1

需要说明的是,本文结论的基础数据是共振柱实验结果。目前还没有哪种试验设备能直接给出从小应变到大应变范围的动模量阻尼比的试验结果。相比之下共振柱仪是目前能提供此类结果的较为可靠的仪器设备。原因有以下几个方面:一是在试验精度和试验的可重复性上,动三轴仪试验人为干扰因素影响较为显著,共振柱仪则有显著优势;其次,由共振柱仪直接得到的是动剪切模量,而由动三轴仪试验得到的是动压缩模量,需要用泊松比转换才能得到所需结果,但泊松比是应变的函数,其如何变化目前还没有定论;同时,动扭剪仪虽然能给出动剪切模量,但针对的是大应变下的结果,而动模量阻尼比非线性函数在剪应变 $10^{-4}$ 处最为敏感,由于动扭剪仪一般是从剪应变 $5 \times 10^{-4}$ 开始才有试验数据,那么从其推导出的小应变下的动模量阻尼比误差较为显著;另外,共振柱仪虽然得到的是有限应变下的结果,但大应变下的数据可以采用双曲线模型延伸得到,并且在敏感剪应变 $10^{-4}$ 处有试验数据,能较好地控制模型参数,得到的从小应变到大应变范围的动模量阻尼比结果相对可靠。

同时应注意的是,对于重大工程动模量阻尼比非线性曲线需要实测。这时动模量阻尼比的离散性主要是由试验误差造成的,如果考虑其影响则需要依据专门的试验考虑。对于指定地区动模量阻尼比非线性超越概率的计算,需要依据地区性土的专门试验。对以上两种情况,本文求解土动力非线性超

越概率的方法和模式可以借鉴,公式在无试验资料时也可以参考,但原则上不能照搬。

#### [参考文献]

- [1] 吴志坚,王兰民,马巍,等. 地震荷载作用下冻土的动力学参数试验研究[J]. 西北地震学报,2003,25(3):210-214.
- [2] 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.
- [3] 何丽君,石玉成,杨惠林,等. 地震动作用下黄土边坡稳定性分析[J]. 西北地震学报,2009,31(2):142-147.
- [4] 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.
- [5] 孙静,袁晓铭. 土的动模量和阻尼比研究述评[J]. 世界地震工程,2003,19(1):88-95.
- [6] 孙锐,袁晓铭,刘晓健. 土动力非线性试验误差标准初探[A]//第二十五届全国土工测试学术研讨会论文集[C]. 杭州:浙江大学出版社,2008:161-165.
- [7] 马军平,单仁亮,韩友强,等. 土体抗剪强度参数 $c$ 与 $\varphi$ 的随机-模糊分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(增1):4343-4346.
- [8] 兰青龙,贺明华,安卫平. 太原地区场地土动力性能的统计分析[J]. 山西地震,1997,(3):6-11.
- [9] 祝龙根,杜坚. 不同类型共振柱仪对比实验[J]. 水电自动化与大坝监测,1990,(3):26-32.
- [10] 中华人民共和国国家标准. 地基动力特性测试规范,GB/T 50269-97[S]. 北京:中国计划出版社,1998:44-47.
- [11] 袁晓铭,孙静. 非均等固结下砂土最大动剪切模量的增长模式及Hardin公式的修正[J]. 岩土工程学报,2005,27(3):264-269.