

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.]

## 广西红粘土动力非线性参数统计分析

罗丹鹏, 张忠利

(广西壮族自治区地震局, 南宁 530022)

**摘要:** 运用数理统计方法研究广西区内 189 个红粘土样品自振柱试验成果, 发现广西红粘土动剪切模量比中应变范围( $5 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$ )变异性大, 阻尼比变异性无明显规律; 在 R 软件中, 运用 Davidenkov 模型对试验数据进行非线性拟合, 对比统计数据表明拟合效果好, 可作为广西红粘土动力非线性参数推荐值; 同国内公开发表的粘性土动剪切模量比和阻尼比推荐值进行对比分析, 表明广西红粘土具有动剪切模量比处于中等水平而阻尼比整体偏小的特征。

**关键词:** 统计分析; 红粘土; 动剪切模量比; 阻尼比; 动力非线性

**中图分类号:** TU435      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-8662 (2016) 02-0077-07

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2016.02.012

## The Statistical Analysis of Nonlinear Dynamic Parameters of Guangxi Laterite

LUO Danpeng, ZHANG Zhongli

(Earthquake Administration of Guangxi Zhuang Autonomous Region,  
Nanning 530022, China)

**Abstract:** The paper studies the free resonance vibration column test results of 189 Guangxi laterite samples by mathematical statistic methods. The results show that the variation of dynamic shear modulus ratio of Guangxi laterite in the middle strain range ( $5 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$ ) is great with no law in damping ratio variability; in R software, the paper fits the experimental data in nonlinear way by using the Davidenkov model, and statistical data show good fitting effect, which can be used as recommended values for the dynamic nonlinear parameter of Guangxi laterite; it was indicated that the dynamic shear modulus ratio of Guangxi laterite was at middle level and the damping ratio of Guangxi laterite was smaller by comparing with the recommended value of cohesive soils in published articles.

**Keywords:** Statistical analysis; Laterite; Dynamic shear modulus ratio; Damping; Dynamic nonlinear

**收稿日期:** 2015-08-21

**基金项目:** 广西壮族自治区地震局科研项目“广西红粘土动力非线性特征研究”(2014008)

**作者简介:** 罗丹鹏(1983-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事岩土工程抗震与地震安评领域的工作与研究。

**E-mail:** 704383278@qq.com.

## 0 引言

广西气候炎热多雨, 碳酸岩大量分布, 属红粘土典型分布区。红粘土是经红土化作用而成, 具有高含水率、高塑性、高孔隙比、低密度、压实性差等不良物理性质, 但却具有高强度、中低压缩性的力学特性<sup>[1]</sup>。土的动力非线性参数与土的性质密切相关, 故红粘土动力特性极有可能具有其特殊性。

国内学者对于不同地区不同岩性土的动力学参数进行了大量的试验研究, 给出了特定地区不同工程地质条件的岩土层动力特性经验值<sup>[2-6]</sup>, 但是针对广西红粘土的研究鲜有报道。

为了研究广西红粘土的动力非线性参数特征, 本文搜集了 81 个地震安评项目的 189 个土样试验结果, 场地分布于柳州、来宾、贵港等红粘土地区。样品测试单位为黑龙江震工科技有限公司和南京震科工程技术有限公司, 均采用自振柱实验方法测定  $G/G_{max-\gamma}$  和  $\lambda-\gamma$ 。

通过对数据进行数理统计分析, 得到 144 个统计量, 发现广西红粘土试验数据统计规律性明显; 用非线性模型拟合并对比统计值, 论证了拟合效果, 进而给出推荐值, 可作为土层地震反应分析提供参考; 与其他粘性土推荐值对比, 得到了广西红粘土动力非线性参数特征, 填补了对广西红粘土非线性特性认识的空白。

## 1 实验方法原理

试样尺寸: 直径  $D=3.91$  cm, 高  $L=8.00$  cm。试样均为原状样。

共振柱仪自由扭转振动试验直接测定土样的动剪切模量  $G$ 、阻尼比  $\lambda$ 。根据波在杆件(试件)中传播理论, 利用一维波动方程

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \nu_s^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (1)$$

式(1)中,  $G$ : 土样的动剪切模量;  $\nu_s = \sqrt{G/\rho}$ ;  $\rho$ : 土样的质量密度;  $\theta$ : 土样振动引起的扭转位移。

对式(1)结合边界条件:  $Z=0$  时,  $\theta=0$ ;  $Z=L$  处利用虎克定律关系式进行求解, 确定剪切模量  $G$ ,

$$G = \rho \left( \frac{2\pi f H}{\beta} \right)^2 \quad (2)$$

式(2)中,  $f$ : 扭转振动共振频率;  $H$ : 土样的

高度;  $\beta$ : 扭转振动频率方程的特征值。

阻尼测定方法为: 当试样发生振动时, 切断动力, 使试样在无干扰力的条件下自由振动, 并测其衰减曲线, 作出的振次  $N$  与相对振幅  $A$  之间的曲线, 按下式计算阻尼比  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{1}{2\pi} \times \frac{1}{m} \ln \frac{A_N}{A_{N+m}} \quad (3)$$

式(3)中,  $A_N$ : 第  $N$  次振幅;  $A_{N+m}$ : 第  $(N+m)$  次振幅;

## 2 试验数据统计分析

### 2.1 箱线图分析

为了观察 189 组数据的整体分布情况, 绘制各主应变值对应的动剪模量比和阻尼比箱线图如图 1, 箱线图中矩形箱体的顶部和底部分别表示上四分位数( $Q_3$ )和下四分位数( $Q_1$ ), 箱体中粗实线为中位数, 箱线图上下虚线端部短线分别为  $Q_3+1.5R_1$ 、 $Q_1-1.5R_1$  ( $R_1$  为半极差  $R_1=Q_3-Q_1$ ), 箱体外边线至箱线图短边线的虚线范围表征数据值的散布情况, 超出散布区域的圆点是异常值。为表述方便, 将  $5 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-2}$  等 8 个主应变值从小到大依次定义为第一、第二...第八主应变。

从图 1 可知数据具有如下特征:

(1) 动剪切模量比数据分布特征: 第一、第二主应变的箱体极窄, 数据集中; 第三、第四主应变的箱体较窄, 异常值几乎没有, 测试数据较为集中, 但虚线拉长, 数据分布范围变大, 不确定性增加; 第五和第六主应变下数据的离散性最大, 异常值最多, 且均分布于箱体上方; 第七、第八主应变值的测试值范围收窄, 但异常点依然较多, 数据较为离散。总体而言, 中间主应变值 ( $5 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$  应变范围) 对应的数据分布范围大, 异常值多, 数据离散性强, 两头主应变值处数据集中, 异常值较少。

(2) 阻尼比数据分布特征: 各主应变值处阻尼比异常值较少, 但阻尼比值分布范围较大, 从第一至第八主应变值阻尼比箱体逐渐变大, 虚线变长, 表明阻尼比随应变增大, 离散性变大, 不确定性增加。

### 2.2 统计柱状图分析

为进一步明确各主应变值处的试验数据分布情况, 绘制各主应变值的统计柱状图如下, 从图 2 可知, 数据统计规律性好, 第一至第四主应变处

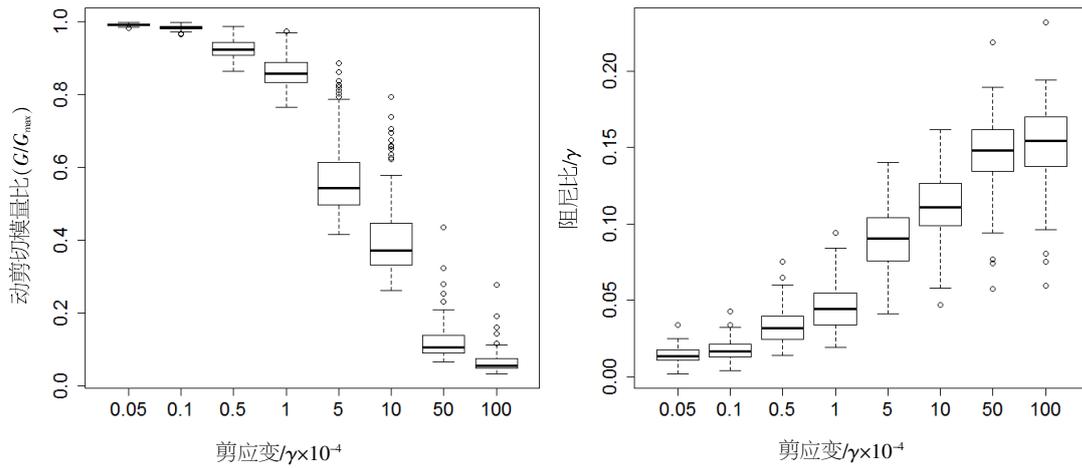


图 1 试验数据箱线图

Fig.1 Box plot of experimental data

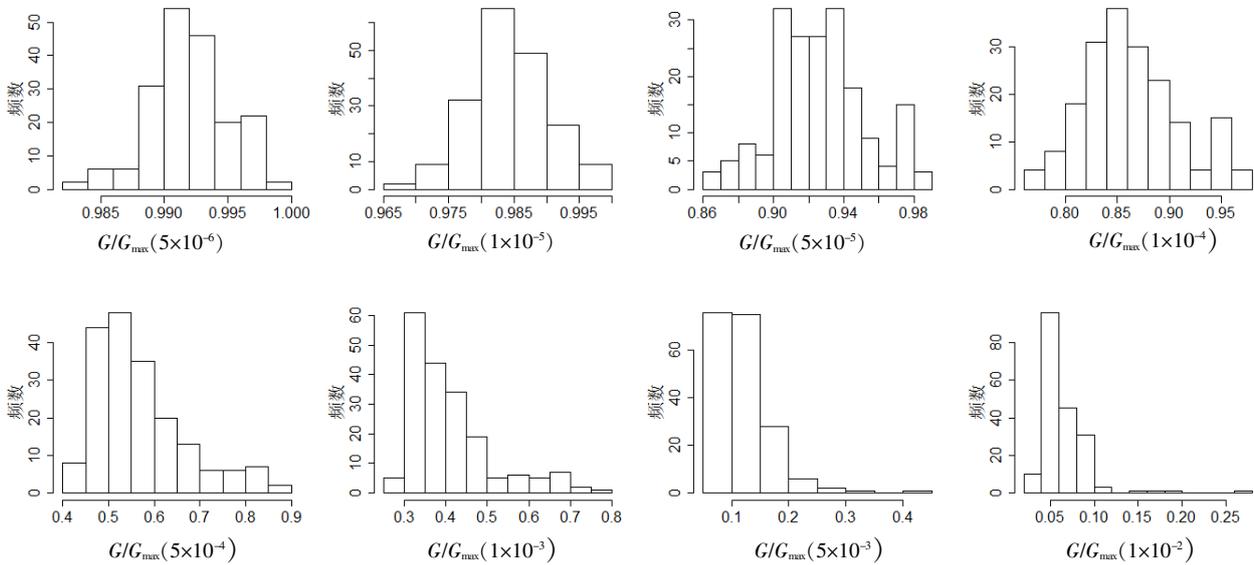


图 2 动剪切模量比统计柱状图

Fig.2 Histogram of dynamic shear modulus ratio

动剪切模量比基本呈正态分布，略微偏右分布；第五至第八主应变呈左偏态分布，且右侧分散数据较少。

从阻尼比统计柱状图 3 可知，数据统计规律明显，第五、第六主应变阻尼比大致呈正态分布，第一~四主应变阻尼比分布呈右侧偏态分布，第七、八主应变阻尼比分布呈左侧偏态分布。

### 2.3 统计量分析

对 8 个典型主应变点的动剪切模量比和阻尼比依次计算出平均值、中位数、标准差、变异系数、极差、半极差、偏度系数、峰度系数等。计算结果分别见表 1 和表 2。

从表 1 可知，动剪切模量比平均值与中位数

较为接近，测试数据多数分布在平均值附近，平均值的代表性较好；变异系数随应变值变大逐渐变大，应变  $5 \times 10^{-6} \sim 10^{-4}$  范围变异系数小于 10%，表明测试数据集中；应变  $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-2}$  范围变异系数为 17.5%~41.0%，表明该范围内的数据离散程度较大；极差与半极差差别约为 4 倍及以上，说明数据样本中的异常值偏离众值水平较大，半极差与平均值的比值随应变逐渐增大，第八主应变时最大，为 41.9%。

从表 2 可知，阻尼比平均值与中位数极接近，平均值对整体数据的代表性好；变异系数 10%~35%，无明显变化趋势，第七主应变对应的阻尼比变异系数最小；极差与半极差相差 4~5 倍，半极差与平均值的比值介于 18%~48%。

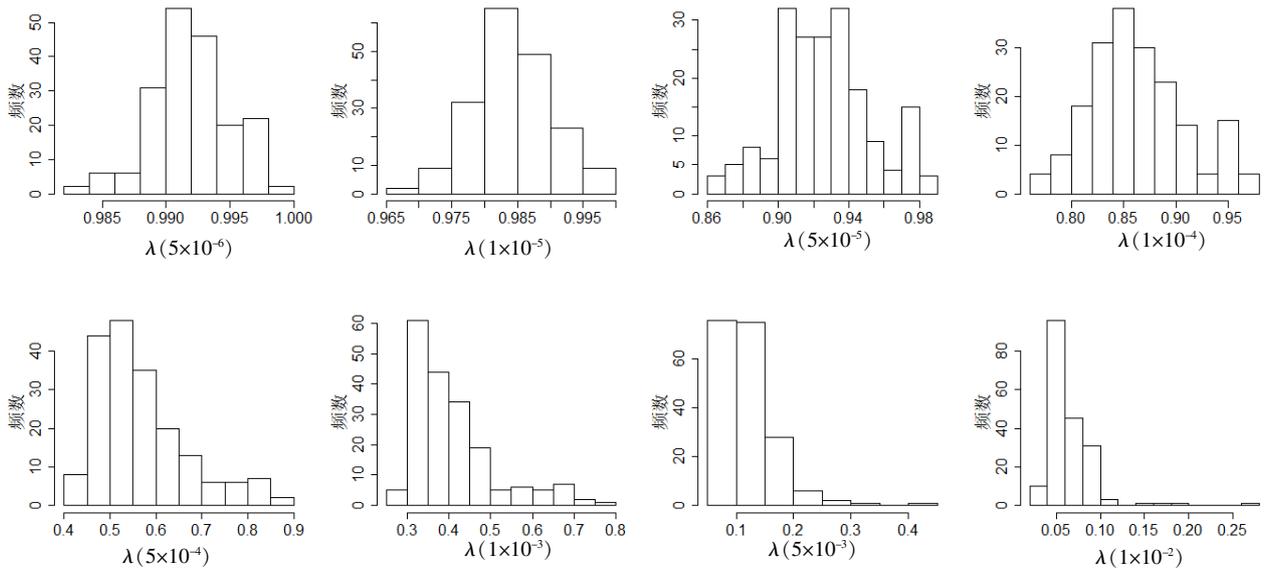


图3 阻尼比统计柱状图

Fig.3 Histogram of damping ratio

表1 动剪切模量比统计量表

Table 1 Statistics of dynamic shear modulus ratio

主应变统计参数	平均值	中位数/M	标准差/S	变异系数/CV	极差/R	半极差/R <sub>1</sub>	偏度系数	峰度系数	半极差/平均值
5×10 <sup>-6</sup>	0.992 2	0.992 0	0.003 1	0.3%	0.016 9	0.003 8	-0.153 7	0.400 4	0.4%
10 <sup>-5</sup>	0.984 4	0.984 0	0.006 0	0.6%	0.031 8	0.007 4	-0.033 8	0.151 8	0.8%
5×10 <sup>-5</sup>	0.926 4	0.924 0	0.026 1	2.8%	0.123 5	0.034 0	0.207 0	-0.174 5	3.7%
10 <sup>-4</sup>	0.864 0	0.858 0	0.045 1	5.2%	0.210 0	0.056 4	0.393 8	-0.191 5	6.5%
5×10 <sup>-4</sup>	0.570 7	0.544 3	0.100 0	17.5%	0.469 3	0.116 0	1.084 6	0.710 7	20.3%
10 <sup>-3</sup>	0.406 1	0.373 0	0.103 2	25.4%	0.531 7	0.113 0	1.424 5	1.752 6	27.8%
5×10 <sup>-3</sup>	0.122 3	0.106 7	0.046 34	37.90v	0.369 0	0.048 0	2.702 8	12.337 7	39.2%
10 <sup>-2</sup>	0.064 4	0.057 0	0.026 4	41.0%	0.244 3	0.027 0	3.977 2	25.821 3	41.9%

表2 阻尼比统计量表

Table 2 Statistics of damping ratio

主应变统计参数	平均值	中位数	标准差	变异系数	极差	半极差	偏度系数	峰度系数	半极差/平均值
5×10 <sup>-6</sup>	0.014 2	0.013 5	0.004 6	32.2%	0.032 0	0.006 8	0.444 7	1.034 2	47.9%
10 <sup>-5</sup>	0.017 6	0.016 9	0.005 7	32.3%	0.039 0	0.008 2	0.803 2	1.475 9	46.6%
5×10 <sup>-5</sup>	0.033 2	0.031 6	0.011 5	34.7%	0.061 0	0.015 1	0.681 5	0.200 2	45.5%
10 <sup>-4</sup>	0.045 6	0.044 5	0.014 7	32.3%	0.074 5	0.021 2	0.486 4	-0.220 3	46.5%
5×10 <sup>-4</sup>	0.090 4	0.090 5	0.019 7	21.8%	0.098 6	0.028 1	0.097 2	-0.440 8	31.1%
10 <sup>-3</sup>	0.112 5	0.110 8	0.020 3	18.1%	0.114 6	0.027 7	-0.038 8	0.035 3	24.6%
5×10 <sup>-3</sup>	0.147 2	0.147 9	0.023 3	10.2%	0.161 2	0.027 0	-0.540 5	1.297 5	18.3%
10 <sup>-2</sup>	0.153 9	0.154 3	0.024 9	16.2v	0.172 0	0.032 3	-0.577 4	1.214 6	21.0%

### 3 数据拟合

目前 G/G<sub>max</sub>~γ 关系计算模型非常多, 国外学者 Hardin 和 Drnevich<sup>[7]</sup> 的“H-D 模型”以双曲线函

数表达剪切模量 G 与剪应变 γ 之间的变化关系, 并给出 G<sub>max</sub> 的经验公式; 通过分析大量的粘性土动力试验资料, Sun 和 Seed<sup>[8]</sup> 考虑孔隙比 e、塑性指数 I<sub>p</sub>、有效围压及超固结比 OCR 等影响因

素，给出不同粘性土动剪切模量比和阻尼比随剪应变变化曲线（以下简称“Sun-Seed 方法”）；Martin 和 Seed<sup>[9]</sup>采用 Davidenkov 模型描述了土的剪应力-剪应变关系；国内学者陈国兴等<sup>[10]</sup>分析已有的土动应力-应变试验结果和经验公式，对比了 H-D 模型和 Davidenkov 模型，发现 Davidenkov 模型的拟合结果优于 H-D 模型。

由于统计样本没有孔隙比  $e$ 、塑性指数  $I_p$ 、超固结比  $OCR$  等资料，故放弃“Sun-Seed 方法”，采用目前国内使用较为广泛的 Davidenkov 模型进行拟合，该模型有三个拟合参数，模型公式如下：

$$G = G_{max} [1 - H(\gamma)], \quad H(\gamma) = \left[ \frac{\left(\frac{\gamma_d}{\gamma_0}\right)^{2B}}{1 + \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_0}\right)^{2B}} \right]^A \quad (1)$$

式(1)中， $\gamma_d$  为土的动剪切应变； $A$ 、 $B$  为土的试验参数。

国内外学者普遍认可将阻尼比的计算模型同

动剪切模量比( $G/G_{max}$ )相关联<sup>[11]</sup>，即  $\lambda = f\left(\frac{G}{G_{max}}\right)$ ，本文拟采用  $\lambda = K_1\left(\frac{G}{G_{max}}\right)^2 + K_2\left(\frac{G}{G_{max}}\right) + K_3$  模型进行拟合。使用 R 软件工作空间进行非线性拟合，拟合结果见表 3。

#### 4 广西红粘土动力非线性参数推荐值

为了检查拟合结果的可靠性，将拟合值和统计平均值进行比较，见下表 4。

从表 4 可知，动剪切模量比拟合值和平均值相差不大，阻尼比在小应变时，拟合值与平均值相差 6.4~23.5%，这是因为红粘土阻尼比离散性在  $5 \times 10^{-6} \sim 10^{-4}$  应变范围内较大。从统计值和拟合值比较图图 4 可知，拟合值与平均值、中位值整体上差异不明显，说明拟合效果较好，故本文采用拟合值作为广西红粘土动剪切模量比和阻尼比的推荐值。

表 3 拟合参数及标准差

Table 3 Fitting Parameters and standard deviation

$A$	$2B$	$\gamma_0$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$\sigma(G/G_{max})$	$\sigma(\lambda)$
0.971 4	0.987 4	0.000 701	-0.057 163	-0.083 707	0.157 709	0.057 19	0.017 56

表 4 拟合值和统计平均值对比分析

Table 4 Comparative analysis of fitted value and statistical average

$\gamma$	$G/G_{max}$		$\lambda$		(拟合值-平均值)/ 拟合值
	拟合值	平均值	拟合值	平均值	
$5 \times 10^{-6}$	0.991 3	0.992 2	0.0186	0.0142	23.5%
$10^{-5}$	0.983 3	0.984 4	0.0201	0.0176	12.6%
$5 \times 10^{-5}$	0.925 9	0.926 4	0.0312	0.0332	-6.4%
$10^{-4}$	0.864 7	0.864 0	0.0426	0.0456	-7.1%
$5 \times 10^{-4}$	0.572 1	0.570 7	0.0911	0.0904	0.8%
$10^{-3}$	0.404 2	0.406 1	0.1145	0.1125	1.8%
$5 \times 10^{-3}$	0.122 3	0.122 3	0.1466	0.1472	-0.4%
$10^{-2}$	0.065 7	0.064 4	0.1520	0.1539	-1.3%

#### 5 比较其他粘性土推荐值

对比袁晓铭推荐值<sup>[12]</sup>、94 规范推荐值<sup>[13]</sup>、张明等<sup>[14]</sup>的粘性土统计值、上海地区粘土⑧-1<sup>[15]</sup>、苏州第四纪沉积土<sup>[16]</sup>中的粘土、天津滨海场地<sup>[17]</sup>粘土等总计 9 种粘性土推荐值见下表 5，并将上述值统一绘制于对比图 5，图中实线所示为广西红粘土推荐值，从图 5 和表 5 可知，广西红粘土动剪切模量比处于中等水平，略小于袁晓铭推荐值(埋深  $\leq 10$

m)；阻尼比值与苏州第四纪沉积粘土（埋深 30~100 m）相近，整体值偏小，仅  $5 \times 10^{-6} \sim 10^{-3}$  应变范围内略大于上海地区粘土⑧-1。

#### 6 结语

(1) 广西红粘土动力非线性参数试验数据具有如下特征：①动剪切模量比中主应变值( $5 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$ )对应的数据分布范围大，异常值多，两头

表 5 同其它公开发表粘性土推荐值对比分析  
Table 5 Comparative analysis with published recommended value of other cohesive soil

主应变 $\gamma$	广西红粘土 推荐值	袁晓铭粘土推荐 值埋深 $\leq 10$ m	袁晓铭粘土推荐 值埋深 10~20 m	94 规范推荐值	张明等粘性土 统计值	上海地区粘土⑧- 粘土(埋深 0~30m)	苏州第四纪沉积粘 土(埋深 30~100m)	天津滨海粘 土(埋深 0~50m)	天津滨海海 粘性土 (埋深 50~120 m)											
$5 \times 10^{-6}$	0.991 3	0.018 6	0.995 4	0.034 2	0.995 9	0.031 7	0.980	0.012	0.983 8	0.020 1	0.992	0.009	0.987	0.019 6	0.989	0.019 8	0.996 8	0.030 0	0.997 4	0.026 9
$10^{-5}$	0.983 3	0.020 1	0.989 7	0.040 8	0.990 9	0.037 1	0.960	0.015	0.970 4	0.025 2	0.986	0.009	0.977	0.021 6	0.979	0.021 2	0.993 9	0.037 2	0.994 7	0.033 7
$5 \times 10^{-5}$	0.925 9	0.031 2	0.946 5	0.060 8	0.952 4	0.052 9	0.825	0.037	0.894 0	0.047 2	0.936	0.015	0.907	0.034 3	0.911	0.031 2	0.970 0	0.061 8	0.974 2	0.056 7
$10^{-4}$	0.864 7	0.042 6	0.897 5	0.071 6	0.908 5	0.061 2	0.710	0.056	0.829 3	0.063 0	0.882	0.020	0.836	0.046 5	0.842	0.041 3	0.942 8	0.076 3	0.949 8	0.071 0
$5 \times 10^{-4}$	0.572 1	0.091 1	0.634 7	0.128 4	0.663 2	0.110 1	0.300	0.130	0.595 1	0.114 2	0.605	0.061	0.530	0.097 5	0.545	0.085 1	0.791 9	0.120 9	0.794 3	0.111 0
$10^{-3}$	0.404 2	0.114 5	0.464 7	0.170 3	0.495 8	0.147 4	0.200	0.165	0.475 7	0.138 8	0.433	0.105	0.367	0.123 7	0.388	0.108 1	0.667 0	0.142 5	0.662 7	0.136 8
$5 \times 10^{-3}$	0.122 3	0.146 6	0.147 8	0.240 2	0.164 2	0.212 3	0.050	0.235	0.237 8	0.186 4	0.128	0.247	0.109	0.164 8	0.128	0.146 3	0.297 2	0.184 5	0.291 3	0.179 5
$10^{-2}$	0.065 7	0.152 0	0.079 8	0.254 3	0.089 5	0.225 9	0.025	0.254	0.166 6	0.200 5	0.067	0.262	0.058	0.172 7	0.073	0.154 4	0.175 5	0.196 7	0.172 5	0.192 3

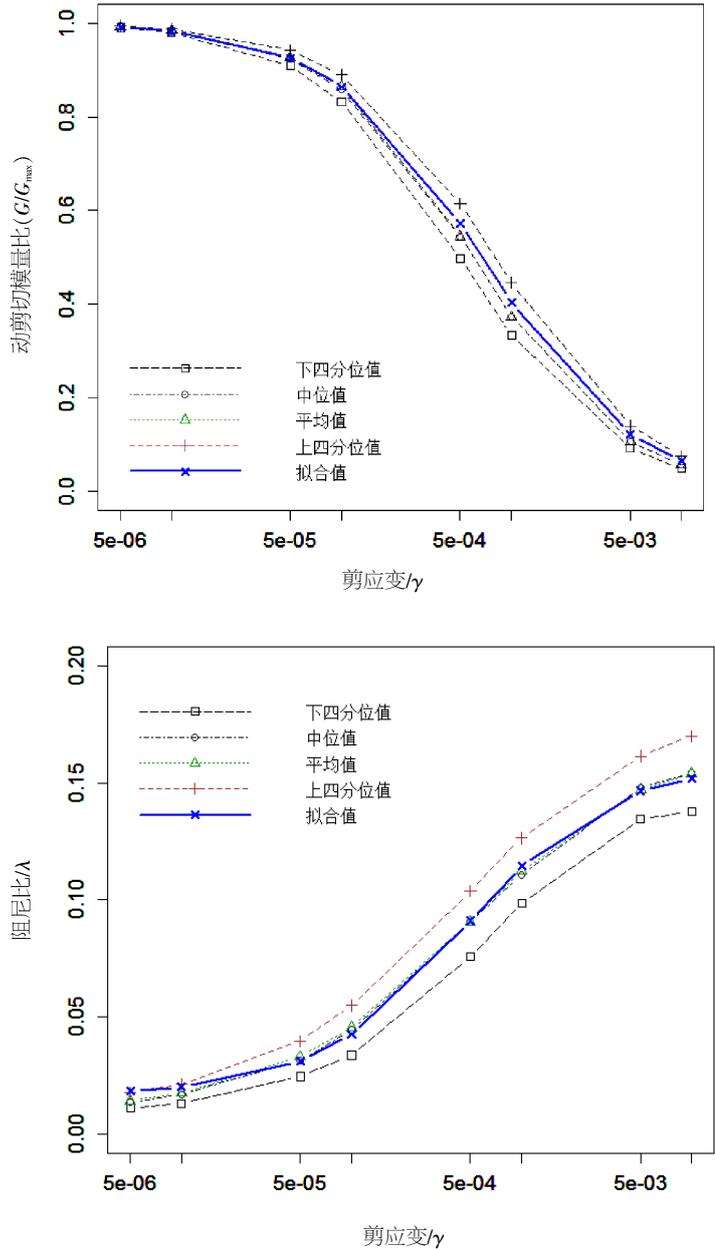


图 4 拟合值与统计值比较图  
Fig. 4 The comparison chart of fitted value and statistical value

数据集中，异常值较少；变异系数随应变值增大而增大， $5 \times 10^{-6} \sim 10^{-4}$  应变范围变异系数小于 10%，数据集中； $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-3}$  应变范围变异系数为 17.5%~41.0%，数据较为离散；②阻尼比随应变增大离散性变大，平均值与中位数极接近，变异系数 10%~35%，无明显变化趋势， $5 \times 10^{-3}$  对应的阻尼比变异系数最小。

(2) 广西红粘土  $5 \times 10^{-6} \sim 10^{-4}$  主应变值处动剪切模量比基本呈正态分布，略微偏右， $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-2}$  主应变值处呈左偏态分布，右侧数据较为分散；阻尼比在  $5 \times 10^{-4}$ 、 $10^{-3}$  主应变值处大致呈正态分

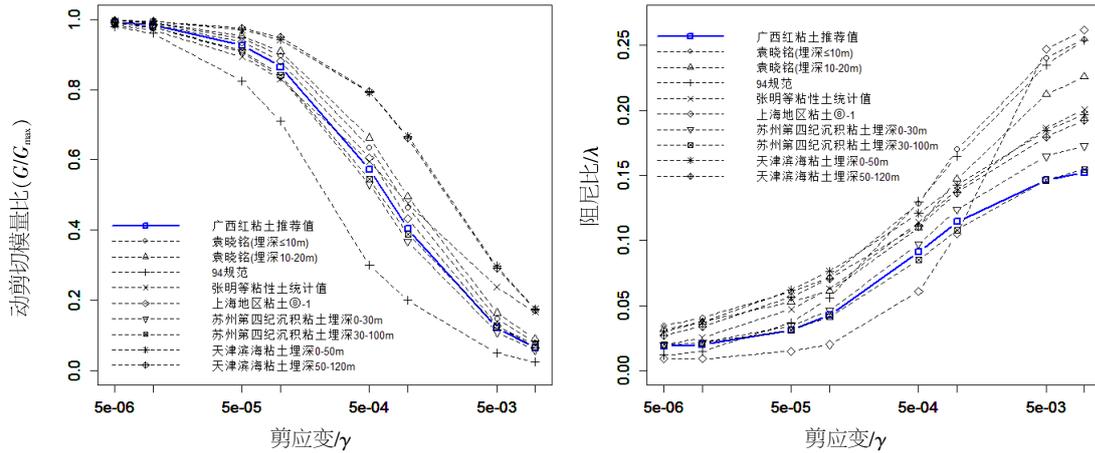


图 5 广西红粘土推荐值与其他粘土推荐值对比图

Fig.5 The comparison chart of recommended value of Guangxi Laterite and other cohesive soil

布,  $5 \times 10^{-6} \sim 10^{-4}$  主应变值处阻尼比分布呈右侧偏态分布,  $5 \times 10^{-3}$ 、 $10^{-2}$  应变阻尼比分布呈左侧偏态分布。

(3) 采用 Davidenkov 模型对广西红粘土动剪切模量比进行拟合, 使用多项式对阻尼比进行拟合, 对比统计量分析发现效果较好, 采用拟合值作为广西红粘土动力非线性参数推荐值。

(4) 广西红粘土动力非线性参数与其他粘性土相比, 具有如下特征: 动剪切模量比处于中等水平, 阻尼比整体偏小。

参考文献:

[1] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 广西原状红粘土力学性状与水敏性特征[J]. 岩土力学, 2003, 24 (4): 568-572.  
 [2] 施春花, 吕悦军, 彭艳菊, 等. 北京地区粉质粘土土动力学参数的统计分析[J]. 震灾防御技术, 2009, 4 (1): 69-79.  
 [3] 栾茂田, 聂影, 郭莹, 等. 大连饱和粘土动力特性研究[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49 (6): 907-912.  
 [4] 蔡辉腾, 金星. 福州市区粉质粘土动剪切模量与阻尼比试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44 (增): 110-113.  
 [5] 兰景岩, 刘化涤, 吕悦军, 等. 渤海海域典型场地土的动剪切模量比和阻尼比的统计值[J]. 地震研究, 2012, 35 (2): 260-266.  
 [6] 陈党民, 田伟新, 段蕊. 西安地区典型土动剪切模量比和阻尼比的统计研究[J]. 世界地震工程, 2012, 28 (3): 136-142.  
 [7] Hardin, B.O., Drnevich. Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects [J]. Journal of the soil mechanics and foundations division, 1972, 98 (6): 603-624.

[8] Sun J.I, Seed H.B. Dynamic moduli and damping ratios for cohesive soils[M]. Berkeley: University of California, 1988: UCB/EERC-88/15.  
 [9] Martin P.P, Seed H Bolton. One-dimensional dynamic ground response analyses[J]. Journal of the geotechnical engineering division, 1982, 108 (7): 935-952.  
 [10] 陈国兴, 谢军斐, 张克绪. 土的动模量和阻尼比的经验估计[J]. 地震工程与工程振动, 1995, 15 (1): 73-84.  
 [11] 王志佳. 土及岩石动力学参数的统计与分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.  
 [12] 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.  
 [13] 国家标准化委员会. GB 17741-2005 工程场地地震安全性评价[S]. 北京: 地震出版社, 1994.  
 [14] 张明, 廖蔚茗, 王志佳, 等. 粘性土的动剪切模量比和阻尼比与剪应变关系的统计分析[J]. 地震工程与工程动, 2013, 33 (4): 256-262.  
 [15] 张亚军, 兰宏亮, 崔永高. 上海地区土动剪切模量比和阻尼比的统计研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26 (2): 171-175.  
 [16] 战吉艳, 陈国兴, 杨伟林, 等. 苏州第四纪沉积土动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34 (3): 559-566.  
 [17] 史丙新, 张力方, 吕悦军, 等. 天津滨海场地土动力学参数研究[J]. 震灾防御技术, 2010, 5 (3): 288-298.