

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.12.030

# 昆明泥炭质土动剪切模量与阻尼比的试验研究

丁祖德<sup>1</sup>, 黄娟<sup>2</sup>, 袁铁映<sup>2</sup>, 彭立敏<sup>2</sup>, 王志良<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘 要:** 利用 DDS-70 型动三轴仪开展了昆明盆地泥炭质土的动力学参数试验研究, 分析了不同围压、固结比、振动频率对泥炭质土的最大剪切模量  $G_{\max}$ 、动剪切模量  $G_d$ 、剪切模量比  $G_d/G_{\max}$  及阻尼比  $\lambda$  的影响规律。试验结果表明: 泥炭质土的  $G_{\max}$  随围压和固结比呈线性增大。随着剪应变  $\gamma_d$  的增大, 泥炭质土的  $G_d$  减小,  $\lambda$  增大, 当剪应变较小时, 变化幅度较小, 剪应变增大到一定程度后, 变化速率加快。相同剪应变下,  $G_d$  随着围压和固结比的增大而提高。不同围压、固结比及振动频率下的  $G_d/G_{\max}$  变化较小。围压、振动频率对  $\lambda$  的影响较为明显, 而固结比对  $\lambda$  的影响没有明显的倾向性。根据试验结果, 建立了考虑围压和固结比影响的  $G_{\max}$  回归方程, 采用 Davidenkov 模型及依据阻尼比与剪应变的经验关系, 得到了泥炭质土的动剪切模量比及阻尼比模型, 拟合结果显示, 建立的模型能较好地描述泥炭质土的模量阻尼比随剪应变的变化规律。进一步对比分析了不同地区泥炭质土以及不同土类的模量阻尼比特性的差异性。

**关 键 词:** 泥炭质土; 动剪切模量; 阻尼比; 动三轴试验

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 12-3627-08

## Experimental study of dynamic shear modulus and damping ratio of peaty soil in Kunming

DING Zu-de<sup>1</sup>, HUANG Juan<sup>2</sup>, YUAN Tie-ying<sup>2</sup>, PENG Li-min<sup>2</sup>, WANG Zhi-liang<sup>1</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

**Abstract:** Dynamic properties of peaty soils from Kunming basin are investigated through a series of undrained cyclic triaxial testing. The effects of confining pressure, consolidation ratio, and loading frequency on the maximal shear modulus  $G_{\max}$ , dynamic shear modulus  $G_d$ , normalized shear modulus  $G_d/G_{\max}$ , and damping ratio  $\lambda$  are analyzed. Test results indicate that  $G_{\max}$  of Kunming peaty soil increases linearly with increasing confining pressure and consolidation ratio.  $G_d$  decreases as well as  $\lambda$  increases with increasing shear strain amplitude  $\gamma_d$ . When shear strain amplitude is small,  $G_d$  and  $\lambda$  change slightly. As shear strain increases to a certain degree, they change rapidly.  $G_d/G_{\max}$  is weakly influenced by confining pressure, consolidation ratio and loading frequency, the damping behavior is significantly influenced by confining pressure and loading frequency and is weakly influenced by consolidation ratio. A regression model considering confining pressure and consolidation ratio is developed. Meanwhile, the relations are provided for  $G_d/G_{\max}$  and  $\lambda$  versus  $\gamma_d$  by using the Davidenkov model. The results show that the fitting models can describe the variation for peaty soil well. The difference of dynamic shear modulus and damping ratio characteristics for peaty soils in other regions and different soils is analyzed as well.

**Keywords:** peaty soil; dynamic shear modulus; damping ratio; cyclic triaxial test

## 1 引 言

泥炭质土是由已分解的腐殖质、尚未完全分解的植物残体及矿物质组成的一种特殊土, 其含水率

高、孔隙比大、天然密度小、有机质含量高, 呈多级团粒结构特征, 泥炭质土的含水率可高达 600%, 孔隙比甚至可达 7.0 以上。受高原气候和湖相沉积环境作用, 我国昆明滇池盆地广泛分布着泥炭质土,

收稿日期: 2015-12-30

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51768028, No.51308270, No.51408284); 云南省应用基础研究计划项目 (No.2013FB015); 国家重点基础研究发展计划项目 (973 计划) (No.2011CB013802)。

This work was supported by the National Natural Science of China (51768028, 51308270, 51408284), the Applied Basic Research Foundation of Yunnan Province of China (2013FB015) and the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2011CB013802).

第一作者简介: 丁祖德, 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 主要从事土动力学、隧道及地下工程抗震方面的研究工作。E-mail: dzdvsdt@163.com

由于其工程性质差,而昆明城市建设中有大量深基坑工程、城市轨道交通等地下工程在建或拟建,泥炭土层中的地下工程日益增多,给工程建设带来了诸多问题,已受到岩土工程界的重视,学者对泥炭质土的物理力学性质、加固改良以及实际工程应用等方面开展了一些研究<sup>[1-6]</sup>。蒋忠信<sup>[1]</sup>、熊恩来<sup>[2]</sup>、刘伟<sup>[3]</sup>等对滇池泥炭质土的工程性质进行了大量的试验,深入分析了泥炭质土的静力学特征。徐杨青<sup>[4]</sup>、王家权<sup>[5]</sup>等分别探讨了泥炭土深基坑工程中的支护结构及施工工艺,郭俊<sup>[6]</sup>分析了泥炭土层盾构隧道衬砌结构的受力特性。

然而,上述研究均是针对泥炭质土静力学方面,而对泥炭质土动力学性质的研究较少,仅有的一些工作也都是由国外学者针对当地泥炭土开展的,如 Kramer<sup>[7]</sup>、Boulanger<sup>[8]</sup>、Wehling<sup>[9]</sup>以及 Kishida<sup>[10]</sup>等工作。国内对泥炭质土的动力特性研究还相当缺乏<sup>[11]</sup>,目前,尚未有系统研究泥炭质土动剪切模量和阻尼比的文献报道。土的动剪切模量和阻尼比是表征土动力特性的两个重要参数,是进行地震响应分析与地震安全评价的重要依据。因地质年代、沉积环境等的不同,不同地区、不同类型土体所反映的动力特性各不相同,土的动力学参数变化规律显示出很强的区域差异性,对土体动剪切模量、阻尼比的研究也呈现区域化<sup>[12-19]</sup>。

由于昆明地区处于高烈度地震区,新城建设中又存在大量泥炭土层中的地下工程,这些工程结构在地震和列车振动荷载作用下的工程问题日益突出,开展泥炭质土的动力特性研究显得尤为迫切。因此,本文利用动三轴仪进行一系列动力试验,研究昆明地区泥炭质土的动剪切模量、阻尼比变化特征,比较分析围压、固结比和频率对泥炭质土动力学参数的影响规律,建立泥炭质土的动剪切模量比和阻尼比计算模型,并与不同地区泥炭质土、一般黏性土的动剪切模量、阻尼比进行对比分析。

## 2 试验方案

### 2.1 试验土样

试验所用土样取自云南省昆明市西山区草海片区某基坑开挖现场,取土深度为 6.0~6.2 m,属  $Q_4$  湖相积泥炭质土。采用机械开挖后人工切取的块状及薄壁取土器静力压入取得原状土样。土样呈黑、灰黑色,饱和,可塑~软塑状态;含水草腐植物,有机质含量为 40.59%,质轻,切面稍有光泽。试验土样如图 1 所示。试样的物理性质指标见表 1。

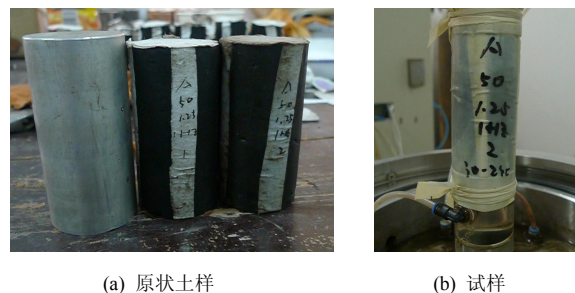


图 1 试验土样  
Fig.1 Peaty soil samples

表 1 泥炭质土样的物理性质指标  
Table 1 Physical properties of peaty soil

土样	$\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	$w / \%$	$e$	$w_L / \%$	$w_p / \%$	$I_p$	$I_L$
泥炭质土	1.21	176.5	3.86	272.8	67.8	205.0	0.52

注:  $\rho$  为土的天然密度;  $w$  为含水率;  $e$  为孔隙比;  $w_L$  为液限;  $w_p$  为塑限;  $I_p$  为塑性指数;  $I_L$  为液性指数。

### 2.2 试验方法和试验内容

试验在 DDS-70 型微机控制式电磁振动三轴仪上进行。在块状样上切取直径为 39.1 mm、高为 80.0 mm 的圆柱体试样,放入保护容器内抽气饱和,再装入压力室进行反压饱和(确保饱和度不低于 98%);施加设定的围压和轴压完成固结;分级递增施加设定的振动荷载。试验时,循环荷载采用正弦波波形,在不排水条件下分级施加动荷载,每级循环 10 次。为了消除上一级动荷载产生的孔压对下一级的影响,在每级动荷载完成后开关排水阀门一次。当试样动应变幅值达到 10%或达到设定加载级数时,试验终止。动力试验考虑了围压、固结比、振动频率 3 个影响因素,根据现场勘察资料,本次取土范围内的围压约为 60~100 kPa,因此,试验选取了 50~200 kPa 之间的 5 种不同围压,选取了考虑等压固结和偏压固结下的 4 种不同固结比,而振动频率的选择主要是借鉴了前人的研究成果,具体试验方案见表 2。

表 2 动三轴试验方案  
Table 2 Dynamic triaxial testing program

组别	围压/ kPa	固结比 $K_c$	频率/ Hz
1	50, 80, 100, 150, 200	1.25	1
2	80, 100	1.0, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00	1
3	80	1.25	1, 2, 5

## 3 动剪切模量、阻尼比的计算原理

通过动三轴试验得到循环动应力-动应变的滞回圈曲线后,可得到动弹性模量,而动剪切模量是在假定泊松比的基础上换算而来。其中,动弹性模

量  $E_d$  采用割线模量的形式, 具体表达式为

$$E_d = \frac{\sigma_{d\max} - \sigma_{d\min}}{\varepsilon_{d\max} - \varepsilon_{d\min}} \quad (1)$$

进一步, 动剪切模量  $G_d$  可表示为

$$G_d = \frac{E_d}{2(1 - \mu_d)} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{d\max}$ 、 $\sigma_{d\min}$  分别为同一循环荷载下的最大和最小动应力;  $\varepsilon_{d\max}$ 、 $\varepsilon_{d\min}$  分别为相对应的最大和最小轴向动应变;  $\mu_d$  为动泊松比, 根据勘察报告和文献[3]的结果, 取为 0.45。

根据弹性理论, 动剪应变  $\gamma_d$  为

$$\gamma_d = (1 + \mu_d)\varepsilon_d \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon_d$  为轴向动应变。

根据阻尼比  $\lambda$  的定义, 可表示为

$$\lambda = \frac{W}{4\pi W_T} \quad (4)$$

式中:  $W$  滞回圈面积;  $W_T$  为 1/4 滞回圈与  $x$  轴线所包围的三角形面积。

根据轴向动应力和动应变的试验结果, 利用式 (2) ~ (4) 可以得到不同动剪应变下的  $G_d$  和  $\lambda$ 。

## 4 试验结果及分析

### 4.1 最大剪切模量 $G_{\max}$

$G_{\max}$  是指土体动应变幅值趋于 0 时对应的剪切模量值。根据动三轴试验数据, 可由 Hardin-Drnevich 等效线性模型计算得到, 但结果误差较大, 也可选取动应力-应变平均值进行计算得到, 但结果会偏小<sup>[20]</sup>, 故本处借鉴文献[20]的方法, 选取滞回圈的顶点连线值的动应力-应变来计算。

不同围压  $\sigma_3$  和固结比  $K_c$  下泥炭质土  $G_{\max}$  的散点图及线性拟合分别见图 2、3。由图可知, 泥炭质

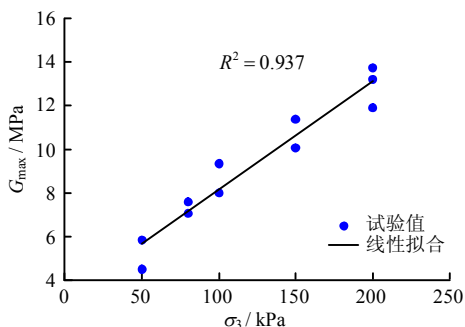
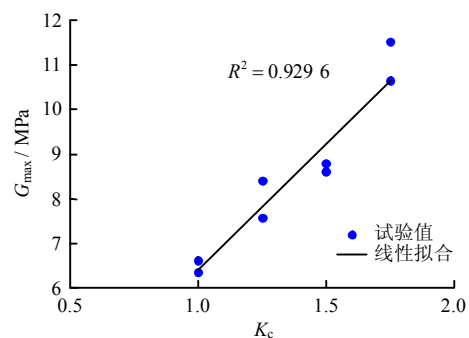
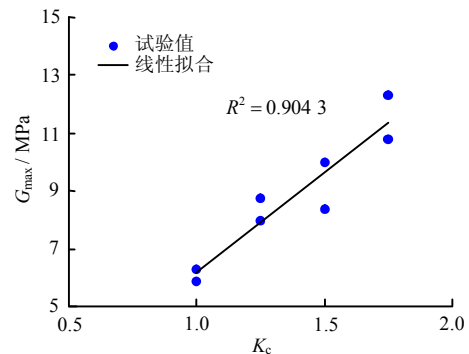


图 2  $G_{\max}$  与  $\sigma_3$  的关系

Fig.2 Relationship between  $G_{\max}$  and  $\sigma_3$



(a)  $\sigma_3 = 80$  kPa



(b)  $\sigma_3 = 100$  kPa

图 3  $G_{\max}$  与  $K_c$  的关系

Fig.3 Relationship between  $G_{\max}$  and  $K_c$

土的  $G_{\max}$  随  $\sigma_3$  和  $K_c$  呈线性增长, 线性拟合效果较好。在其他条件相同情况下, 随着  $\sigma_3$  和  $K_c$  的增大, 土样被压密, 孔隙比减小, 弹性波在土中传播速度更快, 表现为在相同动应力水平下, 动应变越小, 其  $G_{\max}$  越大。

考虑围压和固结比的影响, 建立  $G_{\max}$  的回归方程如下:

$$\frac{G_{\max}}{P_a} = C_0 \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n (K_c)^m \quad (5)$$

式中:  $P_a$  为大气压力, 取值 101.3 kPa;  $C_0$ 、 $m$ 、 $n$  分别为试验拟合参数。

由二元回归分析可得到拟合参数  $C_0 = 66.9$ 、 $m = 1.0$ 、 $n = 0.6$ ,  $R^2 = 0.91$ 。拟合结果表明, 选用的回归方程能较好地描述  $G_{\max}$  随围压和固结比的变化规律。

### 4.2 围压对动剪切模量、阻尼比的影响

试验考虑了 50、80、100、150、200 kPa 5 种围压, 不同围压下泥炭质土  $G_d$ 、 $G_d/G_{\max}$  以及  $\lambda$  随  $\gamma_d$  的变化如图 4 所示。

从图可知,  $G_d$  随着  $\gamma_d$  的增大而减小,  $\gamma_d$  较小时,  $G_d$  的减小幅度不大, 曲线较为平缓, 当  $\gamma_d$  增大到一定程度后,  $G_d$  的减小幅度加快。  $\sigma_3$  越高, 这

种变化规律越明显。 $G_d$  随  $\gamma_d$  的这种变化趋势,反映了泥炭质土动剪切模量的非线性变化规律。 $\lambda$  随  $\gamma_d$  的增大而增大,  $\gamma_d$  较小时, 曲线较为平缓, 当  $\gamma_d$  增大到一定程度后,  $\lambda$  的增速加快。

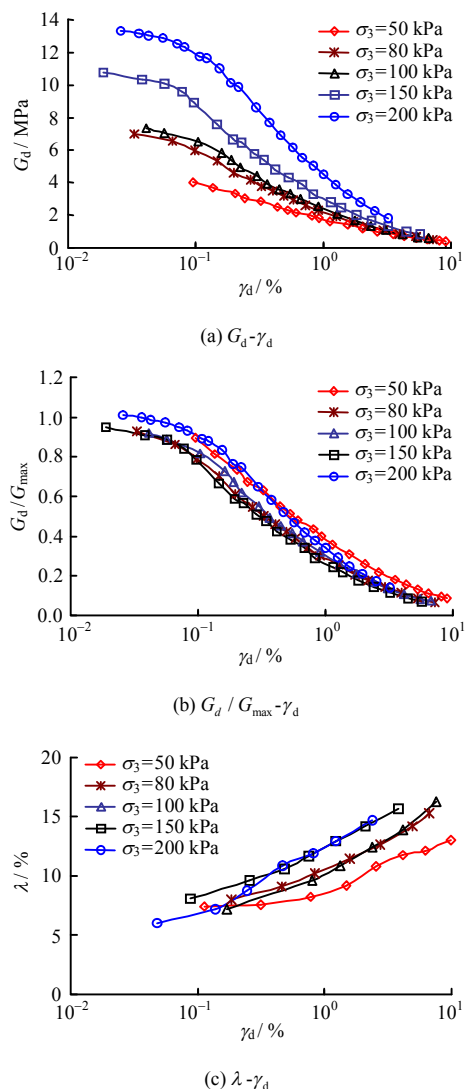


图4 不同围压的泥炭质土  $G_d$ 、 $G_d/G_{\max}$  及  $\lambda$  试验结果  
Fig.4 Effects of  $\sigma_3$  on  $G_d$ 、 $G_d/G_{\max}$  and  $\lambda$  for peaty soils

比较 5 种围压下的试验结果可知,  $G_d$  随  $\sigma_3$  的增大而增大, 表现为  $G_d$ - $\gamma_d$  曲线随围压的增大而上移, 说明由于围压的压密作用, 提高了土样抵抗剪切变形的能力。不同围压下  $G_d/G_{\max}$  随动剪应变的变化曲线差别较小, 没有明显表现出模量比随围压的增大而增大的趋势。围压对  $\lambda$  的影响较为复杂, 在较低剪应变情况下,  $\lambda$  随着  $\sigma_3$  的增大而减小, 但在较高剪应变情况下,  $\lambda$  随  $\sigma_3$  增加反而增大, 这是因为在加载前期, 动应变幅值较小, 土样本身的累积变形也较小, 此时土样的阻尼比主要是来自其体体积变形引起的能量耗散, 围压越大, 土样越密实,

消耗能量就越小, 所以围压越高, 阻尼比越小。但在加载后期, 动应变幅值和土样累积变形均较高, 土样结构逐渐破坏, 围压越高, 需要消耗的能量越大, 土样越发松散, 阻尼比也就越大, 这与文献[14]试验结果相一致。

#### 4.3 固结比对动剪切模量、阻尼比的影响

试验采用的固结比  $K_c$  分别为 1.00、1.25、1.50、1.75、2.00, 考虑了 80、100 kPa 两种围压。由于固结比为 2.00 时在静力加载阶段发生了破坏, 故只得到前 4 种固结比的结果。不同固结比下泥炭质土  $G_d$ 、 $G_d/G_{\max}$  以及  $\lambda$  随  $\gamma_d$  的变化散点图分别见图 5、6。

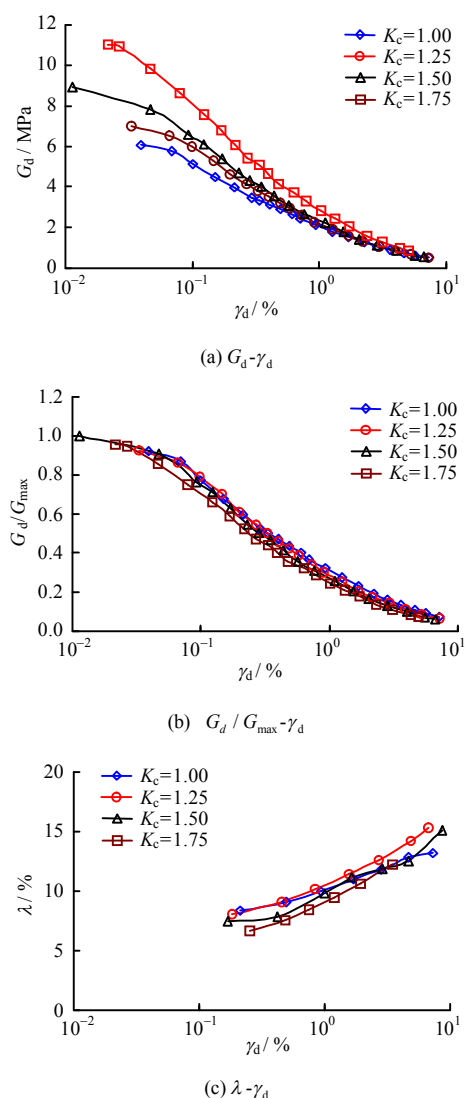


图5 不同固结比的  $G_d$ 、 $G_d/G_{\max}$  及  $\lambda$  试验结果 ( $\sigma_3 = 80$  kPa)

Fig.5 Effects of  $K_c$  on  $G_d$ 、 $G_d/G_{\max}$  and  $\lambda$  ( $\sigma_3 = 80$  kPa)

从图 5、6 可看出, 固结比越大, 相同剪应变下的动剪切模量越大, 而不同固结比下的  $G_d/G_{\max}$  变

化很小,  $\lambda$  的变化亦不明显。随着围压的增加, 固结比对动剪切模量和阻尼比的影响有所增大。可见, 固结比对泥炭质土动剪切模量和阻尼比的影响依赖于围压, 围压越大, 影响相对越大。总体而言, 固结比对动剪切模量比衰减规律和阻尼行为的影响没有明显的倾向性, 即  $G_d/G_{\max}$  和  $\lambda$  对  $K_c$  的变化不敏感, Kramer<sup>[7]</sup>、Boulanger<sup>[8]</sup>等在进行泥炭土动力试验时也观察到了相同的现象。

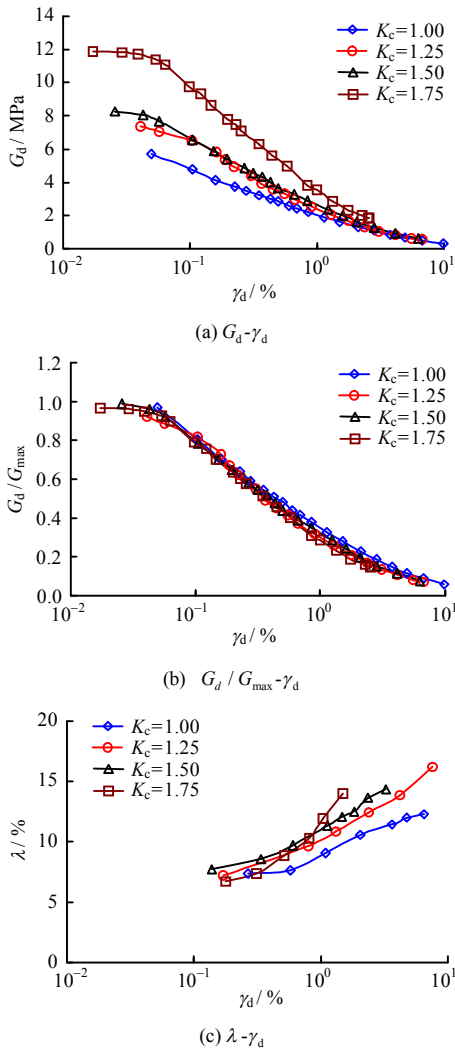


图 6 不同固结比的  $G_d$ 、 $G_d/G_{\max}$  及  $\lambda$  试验结果 ( $\sigma_3 = 100$  kPa)

Fig.6 Effects of  $K_c$  on  $G_d$ ,  $G_d/G_{\max}$  and  $\lambda$  ( $\sigma_3 = 100$  kPa)

#### 4.4 频率对动剪切模量、阻尼比的影响

图 7 为 3 种不同频率下泥炭质土动剪切模量、阻尼比试验结果。

图示结果表明, 3 种频率下的  $G_d$  及  $G_d/G_{\max}$  变化较小, 由此可见, 泥炭质土动应力-动应变的关系受振动频率的影响小。而频率越大, 同一剪应变下的  $\lambda$  越小, 说明加载速度越快, 土样动应变发展越不充分, 能量耗散越少, 所以表现为阻尼比愈小,

这体现了循环荷载下泥炭质土的速率效应。

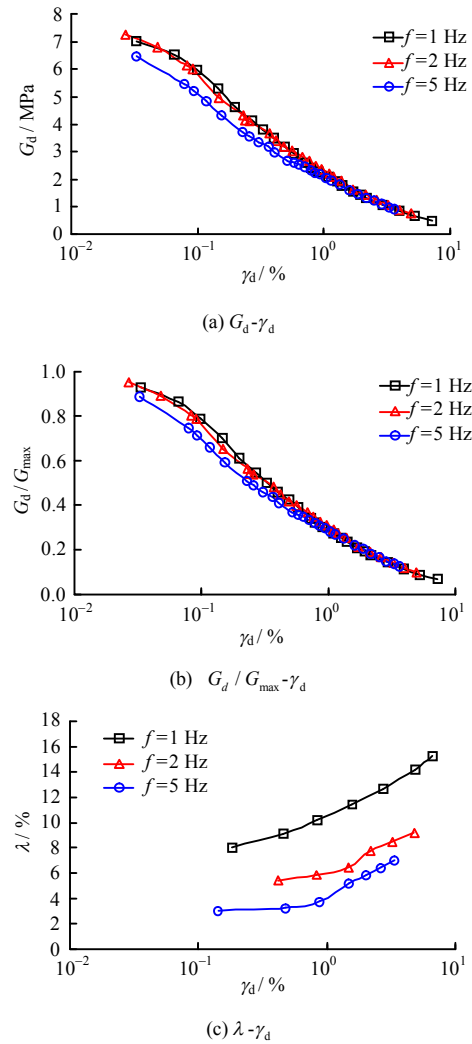


图 7 不同频率的泥炭质土  $G_d$ 、 $G_d/G_{\max}$  及  $\lambda$  试验结果

Fig.7 Effects of  $f$  on  $G_d$ ,  $G_d/G_{\max}$  and  $\lambda$  for peaty soils

## 5 泥炭质土动剪切模量、阻尼比模型

### 5.1 动剪切模量比模型

国内外常用的动剪切模量比计算模型主要有 Hardin-Drnevich 模型、Davidenkov 模型和 Ramberg-Osgood 模型<sup>[21-22]</sup>。其中, Hardin-Drnevich 模型是 Davidenkov 模型的特例, 而 Ramberg-Osgood 模型中含有剪应力部分, 较为复杂, 故本处采用 Davidenkov 模型对泥炭质土动剪切模量比的试验数据进行拟合, 其具体表达式为

$$\frac{G_d}{G_{\max}} = 1 - \left[ \frac{\left( \frac{\gamma_d}{\gamma_0} \right)^{2B}}{1 + \left( \frac{\gamma_d}{\gamma_0} \right)^{2B}} \right]^A \quad (6)$$



式中:  $A$ 、 $B$ 、 $\gamma_0$  为土的试验参数。

泥炭质土  $G_d/G_{\max}$  随  $\gamma_d$  变化的散点图及拟合曲线如图 8 所示, 拟合参数见表 3。

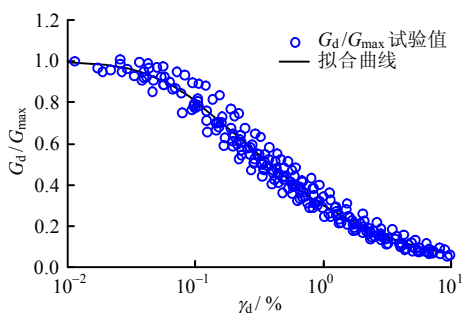


图 8 泥炭质土的  $G_d/G_{\max}$  随  $\gamma_d$  的变化关系  
Fig.8 Relationship of  $G_d/G_{\max}$  and  $\gamma_d$  for peaty soils

表 3 泥炭质土动剪切模量比的拟合参数  
Table 3 Fitting parameters of dynamic shear modulus for peaty soil

土样	$A$	$B$	$\gamma_0$
泥炭质土	5.102	0.361	0.000 26

拟合得到的相关系数  $R^2 = 0.976$ , 由此可见, 拟合结果的相关性好, 采用 Davidenkov 模型能较好地描述昆明泥炭质土的动剪切模量比随剪应变的变化规律。

## 5.2 阻尼比模型

国内外常用的阻尼比计算模型如 H-D 模型、Ishibashi 和 Zhang 模型、Zhang 和 Andrus 模型、陈国兴模型等<sup>[21-22]</sup>, 这些模型均采用  $G_d/G_{\max}$  的二次多项式函数来表示阻尼比, 而  $G_d/G_{\max}$  又可由剪应变  $\gamma$  表示, 故采用下式来表示泥炭质土的阻尼比为

$$\lambda = K_1 \left( \frac{G_d}{G_{\max}} \right)^2 + K_2 \left( \frac{G_d}{G_{\max}} \right) + K_3 \quad (7)$$

式中:  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  为土的试验参数。

泥炭质土的  $\lambda$  随  $\gamma_d$  变化的散点图及拟合曲线如图 9 所示, 拟合参数见表 4。

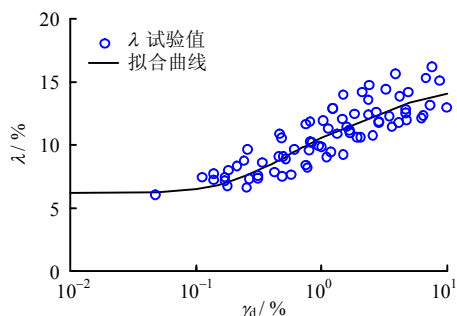


图 9 泥炭质土的  $\lambda$  随  $\gamma_d$  的变化关系  
Fig.9 Relationship of  $\lambda$  and  $\gamma_d$  for peaty soils

表 4 泥炭质土阻尼比的拟合参数

Table 4 Fitting parameters of  $\lambda$  for peaty soil

土样	$K_1$	$K_2$	$K_3$
泥炭质土	0.094	-0.184	0.152

拟合得到的相关系数  $R^2 = 0.750$ 。从图 9 及拟合结果可知, 昆明泥炭质土的阻尼比模型可描述为动剪切模量比的二次多项式函数, 但相比动剪切模量比, 阻尼比的离散性明显大些, 拟合的相关系数偏低, 这是由阻尼比的计算原理及试验条件决定的。

## 5.3 对比分析

为分析昆明泥炭质土与其他地区泥炭质土的一般黏性土模量、阻尼比的差异性, 进一步收集美国加州地区泥炭土的动力特性试验数据并进行拟合, 将两个地区泥炭土动剪切模量比和阻尼比的拟合结果与黏性土的规范值和推荐值<sup>[23]</sup>进行对比, 得到动剪切模量比和阻尼比的比较结果如图 10、11 所示。

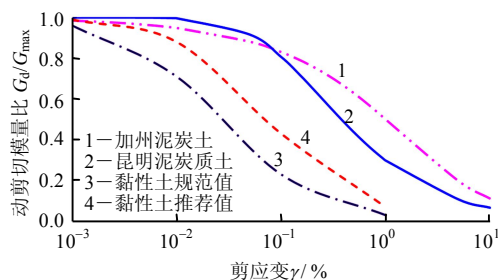


图 10 泥炭土与黏性土动剪切模量比变化曲线  
Fig.10 Relationships of shear modulus and strain for peaty and clay soils

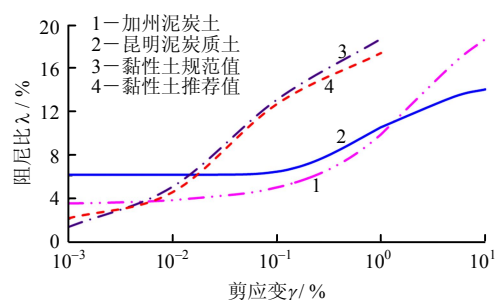


图 11 泥炭土与黏性土的阻尼比变化曲线  
Fig.11 Relationships of damping ratio and strain for peaty and clay soils

从图 10、11 可知, 不同地区和类型土的动剪切模量比和阻尼比差异明显。与美国加州地区泥炭土相比, 昆明地区泥炭质土的动剪切模量、阻尼比在较小剪应变时偏大, 在较高剪应变时偏小。昆明泥炭质土动剪切模量、阻尼比变化曲线与黏性土的曲线形态明显不同, 表现为动剪切模量比明显偏大, 阻尼比明显偏小, 说明泥炭土的弹性性能较好, 但

吸能较弱。

## 6 结 论

(1) 泥炭质土的最大动剪切模量随围压和固结比呈线性增大, 随着围压的升高和固结比的增大, 土样的最大剪切模量越大。建立的最大剪切模量回归方程能较好地描述其随围压和固结比的变化规律。

(2) 随着剪应变的增大, 泥炭质土的动剪切模量减小, 阻尼比增大。当剪应变较小时, 变化幅度较小, 剪应变增大到一定程度后, 变化加速。随着围压和固结比的增大, 相同剪应变下的动剪切模量越大。不同围压、固结比及振动频率下的动剪切模量比变化较小。围压、振动频率对阻尼比的影响较为明显, 而固结比对阻尼行为的影响没有明显的倾向性。

(3) 采用 **Davidenkov** 模型能较好地描述昆明泥炭质土的动剪切模量比随剪应变的变化规律, 而阻尼比模型可表述为动剪切模量比的二次多项式函数。相比动剪切模量, 泥炭质土阻尼比的离散性大些。

(4) 不同地区泥炭质土的动剪切模量、阻尼比差异明显。泥炭土的动力学参数曲线分布形态与黏性土明显不同, 表现为动剪切模量比明显偏大, 阻尼比明显偏小, 若将泥炭土作为一般软黏土来对待, 可能引起较大误差甚至导致工程误判。

## 参 考 文 献

- [1] 蒋忠信. 滇池泥炭土[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1994.  
JIANG Zhong-xin. Dianchi peaty soil[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1994.
- [2] 熊恩来, 阮永芬, 刘文连. 昆明泥炭、泥炭质土的力学特性研究[J]. 土工基础, 2006, 20(1): 53—56.  
XIONG En-lai, RUAN Yong-fen, LIU Wen-lian. Experimental study and analysis of normalized behavior on the mechanical characteristics of peat & peaty soils in Kunming[J]. **Soil Engineering and Foundation**, 2006, 20(1): 53—56.
- [3] 刘伟, 赵福玉, 杨文辉, 等. 安嵩线草海段泥炭质土的特征及性质[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 671—674.  
LIU Wei, ZHAO Fu-yu, YANG Wen-hui, et al. Features and properties of peaty soil in Caohai section of Anning-Sonming line[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(Supp.2): 671—674.
- [4] 徐杨青, 顾凤鸣, 武继红. 环梁支撑结构在泥炭土深基坑中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊): 319—323.  
XU Yang-qing, GU Feng-ming, WU Ji-hong. Application of circle beam supporting structure in deep excavation of peaty soft soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(Supp.): 319—323.
- [5] 王家权, 王维, 李文平, 等. 泥炭土深基坑支护工程高压旋喷扩体锚索施工工艺[J]. 施工技术, 2015, 44(7): 99—101, 109.  
WANG Jia-quan, WANG Wei, LI Wen-ping, et al. Construction technology of high pressure jet grouting anchor cable of deep foundation excavation in peat soil[J]. **Construction Technology**, 2015, 44(7): 99—101, 109.
- [6] 郭俊. 泥炭(质)土地层盾构隧道结构力学行为研究[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(2): 58—65.  
GUO Jun. On the structural mechanical behavior of a shield tunnel in a peat soil stratum[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2013, 50(2): 58—65.
- [7] KRAMER S. L. Dynamic response of Mercer slough peat[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2000, 126(6): 504—510.
- [8] BOULANGER R W, ARULNATHAN R, HARDER L F, et al. Dynamic properties of Sherman Island peat[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1998, 124(1): 12—20.
- [9] WEHLING T M, BOULANGER R W, ARULNATHAN R, et al. Nonlinear dynamic properties of a fibrous organic soil[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2003, 129(10): 929—939.
- [10] KISHIDA T, WEHLING T M, BOULANGER R W, et al. Dynamic properties of highly organic soils from montezuma slough and clifton court[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2009, 135(4): 525—532.
- [11] 黄娟, 丁祖德, 袁铁映, 等. 循环荷载作用下泥炭质土的动变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2551—2558.  
HUANG Juan, DING Zu-de, YUAN Tie-ying, et al. Experimental study of dynamic deformation properties of peaty soil under cyclic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(9): 2551—2558.
- [12] 蔡辉腾, 李英民, 欧秉松. 福州地区典型土动剪切模量

- 与阻尼比的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 361—365.
- CAI Hui-teng, LI Ying-min, OU Bing-song. Testing study of dynamic shear modulus and damping ratio of typical soils in Fuzhou area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(2): 361—365.
- [13] 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.
- ZHAN Ji-yan, CHEN Guo-xing, YANG Wei-lin, et al. Experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of Suzhou quaternary sedimentary soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(3): 559—566.
- [14] 汪明元, 单治钢, 王亚军, 等. 应变控制下舟山岱山海相软土动弹性模量及阻尼比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1503—1512.
- WANG Ming-yuan, SHAN Zhi-gang, WANG Ya-jun, et al. Dynamic elastic moduli and damping ratios of marine sediments at Zhoushan Daishan based on dynamic triaxial tests under strain control[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(7): 1503—1512.
- [15] 张宇, 余飞, 陈善雄, 等. CAS-1 模拟月壤动剪切模量与阻尼比的试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 74—82.
- ZHANG Yu, YU Fei, CHEN Shan-xiong, et al. Experimental study of dynamic shear modulus and damping ratio of CAS-1 lunar soil simulant[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(1): 74—82.
- [16] 黄斌, 傅旭东, 张本蛟, 等. 动弹模量阻尼比测试技术与归一化特性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 659—666.
- HUANG Bin, FU Xu-dong, ZHANG Ben-jiao, et al. Test technology and normalized characteristics of dynamic elastic modulus and damping ratio[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(4): 659—666.
- [17] 尹松, 张先伟, 孔令伟, 等. 海洋沉积土动剪切模量与阻尼比的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 459—464.
- YIN Song, ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei, et al. Testing study of dynamic shear modulus and damping ratio of seabed sediment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(Supp.1): 459—464.
- [18] 罗飞, 何依婷, 赵淑萍, 等. 分级加载下冻土阻尼比的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3143—3149.
- LUO Fei, HE Yi-ting, ZHAO Shu-ping, et al. Experimental study of damping ratio of frozen soil under stepwise loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(11): 3143—3149.
- [19] 刘方成, 陈璐, 王海东. 橡胶砂动剪模量和阻尼比循环单剪试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 1903—1913.
- LIU Fang-cheng, CHEN Lu, WANG Hai-dong. Evaluation of dynamic shear modulus and damping ratio of rubber-sand mixture based on cyclic simple shear tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(7): 1903—1913.
- [20] 骆俊晖, 缪林昌, 石文博. 软土初始动剪切模量及函数计算分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(8): 1193—1198.
- LUO Jun-hui, MIAO Lin-chang, SHI Wen-bo. Calculation and analysis of original dynamic shear modulus and function of soft clay[J]. **Journal of Northeastern University(Natural Science)**, 2015, 36(8): 1193—1198.
- [21] 彭盛恩, 王志佳, 廖蔚茗, 等. 土的动剪切模量比和阻尼比的经验模型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(3): 566—572.
- PENG Sheng-en, WANG Zhi-jia, LIAO Wei-ming, et al. A study on empirical models of dynamic shear modulus ratio and damping ratio of soil[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2014, 10(3): 566—572.
- [22] 张明, 廖蔚茗, 王志佳, 等. 黏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]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(4): 256—262.
- ZHANG Ming, LIAO Wei-ming, WANG Zhi-jia, et al. Statistical analysis of the relationship of shear modulus ratio and damping ratio to shear strain for cohesive soil[J]. **Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2013, 33(4): 256—262.
- [23] 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 Xiao-ming, SUN Rui. Reasonability comparison between recommended and code values of dynamic shear modulus and damping ratio of soils[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2004, 24(2): 125—133.