

# 非饱和黄土动剪切模量和阻尼比共振柱试验研究

黄志全, 李 磊, 贾景超, 岳康兴, 孙 怡

(华北水利水电大学 资源与环境学院, 河南 郑州 450011)

**摘要:**土的动剪切模量  $G$  和阻尼比  $D$  是描述土体动力特性的两个主要参数。利用 GDS 共振柱试验系统对不同细粒含量的非饱和黄土开展了动力学参数试验研究。结果表明, 用 Hardin - Drnevich 双曲线模型能够较好地拟合  $G/G_{\max}$  随剪应变  $\gamma$  的变化趋势; 在其它条件相同时,  $G$  随细粒含量的增加而减小, 阻尼比  $D$  与细粒含量的变化关系表现为细粒含量越多, 阻尼比越小, 阻尼比与剪应变的关系可表示成  $G/G_{\max}$  的函数, 用含  $G/G_{\max}$  的二次多项式能较好地描述  $D$  与  $G/G_{\max}$  之间的关系。

**关 键 词:**非饱和黄土; 共振柱试验; 细粒含量; 动剪切模量; 阻尼比

中图法分类号: P642

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.05.016

黄土是第四纪地质历史时期干旱半干旱气候条件下形成的沉积物, 我国有 64 万  $\text{km}^2$  的黄土分布区, 主要集中在西北、华北地区。在西部大开发战略的实施过程中, 很多城市、工矿企业、交通干线和水利枢纽都分布在这些地区。同时, 上述地区地震多发且烈度较高, 在地震作用下易发生滑坡、震陷和地裂等灾害, 给当地人民的生命和财产造成巨大损失。因此, 对黄土的动力特性进行深入的研究, 既是黄土地区减灾防灾的需要, 也是西部大开发中基础设施建设的现实要求<sup>[1-3]</sup>。

王志杰等研究了预剪应力作用下重塑黄土的动力特性, 分析了干密度对预剪应力作用下重塑黄土动剪切模量和阻尼比的影响<sup>[4]</sup>。陈存礼等通过动三轴试验研究了饱和击实黄土的动模量、阻尼比、动强度、动孔压及抗液化特性<sup>[5]</sup>。田堪良等通过动扭剪试验研究了含水量、固结应力和固结比对非饱和黄土动力特性的影响<sup>[6]</sup>。骆亚生等研究了不同湿度条件下非饱和黄土的动剪切模量和阻尼比随剪应变的变化规律, 并分析了固结应力、含水率、结构状态及密实状态对动力学参数的影响<sup>[7]</sup>。从这些已有的研究成果可以看出, 针对细粒含量对非饱和黄土动力学特性影响的研

究很少, 针对这一现状, 本文以不同细粒含量黄土为试验材料, 利用 GDS 共振柱试验系统, 研究细粒含量对非饱和黄土动力学特性的影响。

## 1 试验方法

### 1.1 试验材料及试样制备

试验采用重塑样, 散土经过风干、碾碎, 依次过 2.00, 0.25, 0.075 mm 筛, 去除粒径大于 2 mm 的粗粒、杂质等, 选取粒径在 0.075 ~ 0.25 mm 范围内的砂粒作为骨架, 粒径小于 0.075 mm 的颗粒为细粒, 按质量配比法配制不同细粒含量的土样。以 FC40, FC50, FC60 分别表示细粒含量为 40%, 50%, 60% 的试样。

将配制的一定含水率的土样放保湿缸中静置 24 h, 按照一定的干密度将称好的土等分 3 小份。用液压千斤顶静力压实的方法一份一份将土压入试样模中, 层与层之间刮毛处理, 以保证土层间的整体性, 制成尺寸为 50 mm × 100 mm 的实心圆柱样。

### 1.2 试验仪器及方法

试验采用英国 GDS 公司生产的固定 - 自由型 Stokoe 共振柱仪 (RCA)。该仪器可研究小应变范围内

收稿日期: 2014-12-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51209093); 河南省科技创新人才计划

作者简介: 黄志全, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土力学、边坡与滑坡工程方面的研究与教学工作。E-mail: huangzhiquan@ncwu.edu.cn

( $10^{-6} \sim 10^{-4}$  mm)土的动力特性。仪器可以自动采集共振频率(Hz)、应变( $\gamma$ )、阻尼比( $D$ )等数据。

为了研究细粒含量对动力学参数的影响,将对3组不同细粒含量(40%, 50%, 60%)的试样在同等含水率(19%)及干密度( $1.65 \text{ g/cm}^3$ )条件下,分别进行围压50, 100, 200 kPa的共振柱及阻尼试验。

为确保黄土试样的非饱和状态,试样在固结前后及试验过程中含水量均保持不变。试验开始后,关闭与底座连接的阀门,打开与试样帽连接的阀门,让试样在设定的围压下排气固结24 h。待体积变形稳定后(内置的LVDT传感器测得竖向变形稳定后),关闭阀门,然后在不排水不排气的条件下进行共振试验和阻尼试验。

试样在每级围压下固结稳定后,先给激振器以较低的电压,然后逐级增加。在每一级电压下,通过宽频扫描和精确扫描,测得试样的共振频率。经过3 min待试样稳定后,在该级电压下给试样一个激振,然后切断电源,根据自由振动衰减曲线求出阻尼比。

2 试验结果

图1给出了3种围压条件下不同细粒含量试样的动剪切模量 $G$ 、阻尼比 $D$ 与剪应变 $\gamma$ 的关系曲线。

由图1可知,在同一稳定围压条件下,随着剪应变的增加,不同细粒含量非饱和黄土试样的动剪切模量均呈衰减趋势;当剪应变较小时,动剪切模量变化缓慢,当剪应变达到一定程度后,动剪切模量衰减梯度迅速变大。说明随着剪应变的增加,非饱和黄土的应力应变关系由线性向非线性过渡。

细粒含量对非饱和黄土动剪切模量的影响是比较显著的。同一应变水平下,动剪切模量随着细粒含量的增加而减小;细粒含量小(40%)的试样,动剪切模量在剪应变较大时才有明显的衰减,衰减的幅度也较小。细粒含量大(50%, 60%)的试样,从较小的应变就开始衰减,且在同样的应变幅度增量条件下,其衰减幅度比细粒含量为40%的试样大得多。

图1显示,在同一稳定围压条件下,阻尼比随动剪应变的增大而增大。随着剪应变的增加,阻尼比呈现出基本保持不变、快速增大、缓慢增大的3个阶段。这与骆亚生、王志杰研究的非饱和黄土阻尼比与剪应变在半对数坐标中的线性关系不同<sup>[7-8]</sup>。

细粒含量的变化对阻尼比同样存在影响。在同一应变水平下,阻尼比随细粒含量的增加而减小,这种减小的趋势在应变较大时更为明显。细粒含量的增多,土颗粒之间的接触点增多,应力波传播的路径变多,损耗的能量减少,表现为阻尼比减小。

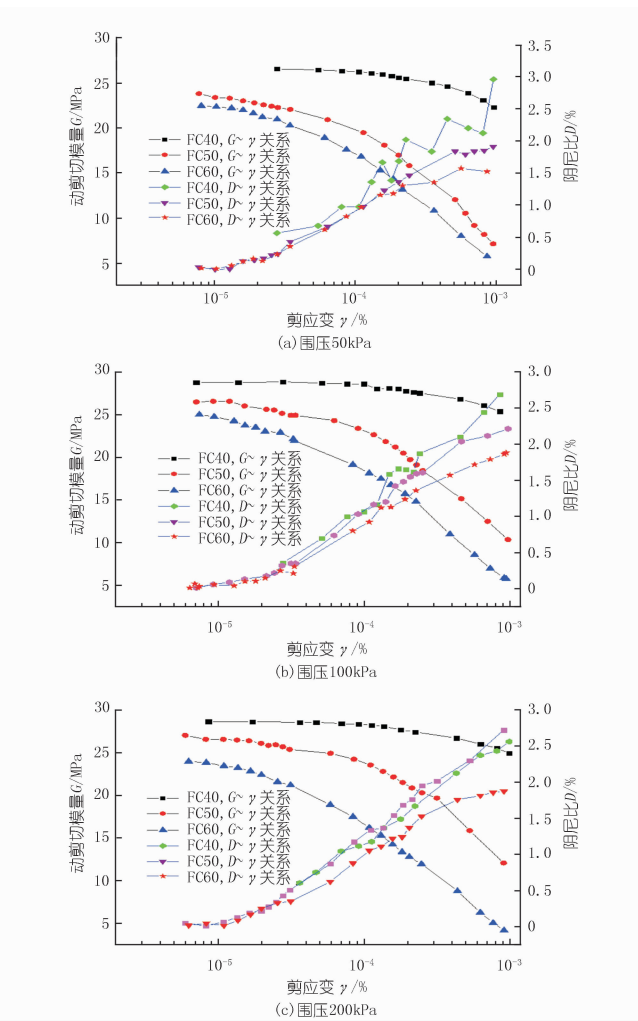


图1 不同围压、细粒含量试样 $G \sim \gamma$ 、 $D \sim \gamma$ 试验曲线

3 试验结果分析

试验结果具有很好的规律性,可采用Hardin - Drnevich双曲线模型来描述非饱和黄土的动剪切模量与剪应变的关系<sup>[9]</sup>,即在动荷载下土的动剪应力( $\tau$ )与剪应变( $\gamma$ )关系满足

$$\tau = \gamma / (a + b\gamma) \tag{1}$$

则土的动剪切模量为

$$G = \tau / \gamma = 1 / (a + b\gamma) \tag{2}$$

$$1/G = a + b\gamma \tag{3}$$

当 $\gamma \rightarrow 0$ 时,  $G_{\max} = 1/a$ , 则

$$G/G_{\max} = 1 / (1 + \gamma/\gamma_y) \tag{4}$$

式中,  $G_{\max}$  为最大动剪切模量;  $a, b$  为试验参数;  $\gamma_y$  为参考应变,  $\gamma_y = a/b$ 。从式(3)可以看出,  $1/G$  与  $\gamma$  呈直线关系,  $a$  为直线的截距,  $b$  为直线的斜率。

图2以围压50 kPa为例给出了不同细粒含量试样的 $1/G$ 与剪应变 $\gamma$ 的拟合关系曲线。可以看出,一定的围压条件下,  $1/G$ 与 $\gamma$ 呈良好的直线关系,细粒含量越大,直线的斜率越大,说明非饱和黄土动应力应变

曲线可以用双曲线模型很好地描述。用式(3)对3种围压条件下  $1/G \sim \gamma$  关系进行拟合,拟合结果见表1。从表1可以看出,同一细粒含量的试样,参数  $a, b$  均随着围压的增大而减小;在相同的围压下,参数  $a, b$  均随着细粒含量的增加而增大。

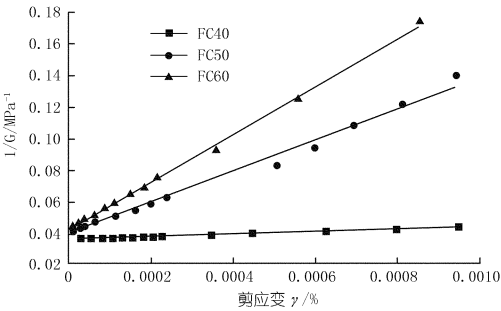


图 2 围压 50 kPa 条件下不同细粒含量  $1/G \sim \gamma$  试验曲线

表 1 试验参数和  $G_{max}$

细粒含量/ %	围压/ kPa	试验参数		$G_{max}$ / MPa
		$a$	$b$	
40	50	0.0373	7.5385	26.788
	100	0.0347	5.6500	28.843
	200	0.0297	4.3024	33.647
50	50	0.0409	98.0455	24.474
	100	0.0376	61.2368	26.631
	200	0.0317	36.6927	31.586
60	50	0.0431	149.7918	23.213
	100	0.0390	142.2662	25.615
	200	0.0354	123.0274	28.265

3.1 最大动剪切模量  $G_{max}$

图3给出了最大动剪切模量随细粒含量的变化关系。从图3可知,最大动剪切模量随细粒含量的增加而减小,二者具有良好的线性关系,用式(5)表示

$$G_{max} = A + B \cdot FC \tag{5}$$

式中,  $A, B$  为试验参数;  $FC$  为细粒含量, %。

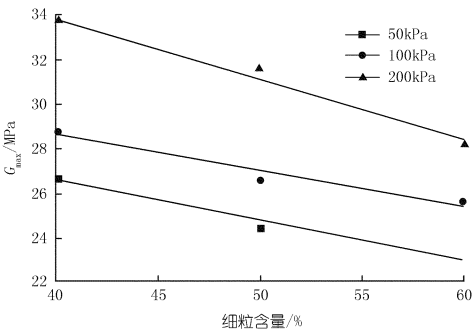


图 3  $G_{max}$  与细粒含量的关系

3.2  $D, G/G_{max}$  随剪应变的变化规律

归一化的动模量衰减曲线能更好地反映动模量随动应变水平增大的变化规律<sup>[10]</sup>。图4给出了  $G/G_{max} \sim \gamma$  的关系曲线,同一细粒含量不同围压的试验点落

在一较窄的范围内,说明非饱和黄土的动剪切模量  $G$  对  $G_{max}$  具有较好的归一性。 $G/G_{max}$  随剪应变的变化趋势与动剪切模量随剪应变的变化趋势一致。细粒含量对  $G/G_{max}$  的影响呈现出细粒含量越大,  $G/G_{max}$  越小,且  $G/G_{max}$  随  $\gamma$  衰减的幅度增大。用双曲线模型对同一细粒含量不同围压条件下的数据进行拟合,从图中拟合曲线可以看出,模型拟合曲线能够较好地反映试验结果的变化趋势。

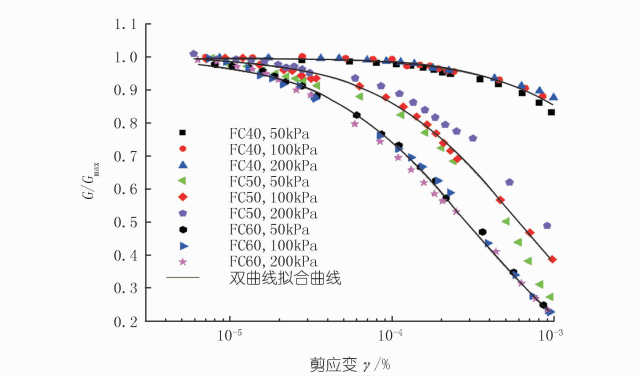


图 4 不同围压、细粒含量试样  $G/G_{max} \sim \gamma$  试验曲线

阻尼比与动剪切模量比均是动剪应变的函数,那么土的阻尼比  $D$  与剪应变的关系也可表示成  $G/G_{max}$  的函数。图5给出了3种围压条件下不同细粒含量试样的  $D \sim G/G_{max}$  的关系曲线。阻尼比  $D$  随着  $G/G_{max}$  的减小而增大,随着细粒含量增大,阻尼比减小。陈国兴等通过对粉质黏土的研究,提出了阻尼比与动剪切模量比的经验关系式<sup>[11]</sup>

$$D = D_{min} + D_o(1 - G/G_{max})^n \tag{6}$$

式中,  $D_{min}, D_o, n$  为与土性有关的参数;  $G_{max}$  为最大动剪切模量。

用式(6)拟合的曲线(图5虚线)显示,只有在细粒含量小(40%)时,拟合效果较好。用式(7)的多项式对试验数据进行拟合,从拟合曲线(实线)可以看出,用含  $G/G_{max}$  的二次多项式能够较好地描绘非饱和黄土阻尼比  $D$  与  $G/G_{max}$  之间的关系。

$$D = A \cdot (G/G_{max})^2 + B \cdot (G/G_{max}) + C \tag{7}$$

4 结论

(1) 非饱和黄土的动剪切模量随剪应变的增加而逐渐减小。用 Hardin - Drnevich 双曲线模型能够较好地描述非饱和黄土的动剪切模量  $G$  随剪应变  $\gamma$  的变化趋势。

(2) 细粒含量对非饱和黄土动剪切模量的影响较大。随着细粒含量的增加,动剪切模量减小,动剪切模量随剪应变的增加而衰减的幅度增大;随着细粒含量的增加,其对动剪切模量的影响程度也减小。 $G_{max}$  随细

粒含量的增加而减小， $G_{max}$  与细粒含量之间存在良好的线性关系。

基本保持不变，随着剪应变的增加，阻尼比快速增长，当剪应变达到一定程度后，增长速度变缓。动剪切模量  $G$  对  $G_{max}$  有较好的归一性，同一细粒含量不同围压条件下的  $G/G_{max}$  随剪应变的变化趋势符合双曲线模型。阻尼比  $D$  随着  $G/G_{max}$  的减小而增大，可采用含  $G/G_{max}$  的二次多项式来表达阻尼比  $D$  与剪应变  $\gamma$  的关系。

参考文献：

[1] 廖红建,肖正华,刘健. 动载下饱和和重塑黄土的骨干曲线变化研究[J]. 岩土力学,2011,32(2):375-379.

[2] 李又云,谢永利,刘保健. 路基压实黄土动力特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(5):1037-1046.

[3] 骆亚生,李瑞,田堪良. 非饱和黄土动力特性试验方法研究[J]. 地下空间与工程学报,2007,(6):1041-1046.

[4] 王志杰,骆亚生,谭东岳,等. 干密度对预剪应力下重塑黄土动力特性影响的试验研究[J]. 西北地震学报,2011,(4):349-353.

[5] 陈存礼,杨鹏,何军芳. 饱和击实黄土的动力特性研究[J]. 岩土力学,2007,28(8):1551-1556.

[6] 田堪良,张慧莉,张伯平. 动扭剪荷载作用下非饱和黄土动力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(24):4151-4155.

[7] 骆亚生,田堪良. 非饱和黄土的动剪模量与阻尼比[J]. 水利学报,2005,36(7):830-834.

[8] 王志杰,骆亚生,王瑞瑞,等. 不同地区原状黄土动剪切模量与阻尼比试验研究[J]. 岩土工程学报,2011,28(9):1464-1469.

[9] Hardin BO,Drnevich VP. Shear modulus and damping in soils; measurement and parameter effects (terzaghi lecture)[J]. Journal of the soil mechanics and foundations division,1972,98(6):603-624.

[10] 吕小飞,陈培雄,杨义菊. 海洋粉质粘土共振柱试验研究[J]. 世界地震工程,2010,(26):1-5.

[11] 陈国兴,刘雪珠,朱定华. 南京新近沉积土动剪切模量比与阻尼比的试验研究[J]. 岩土工程学报,2006,(8):1023-1027.

(编辑:郑 毅)

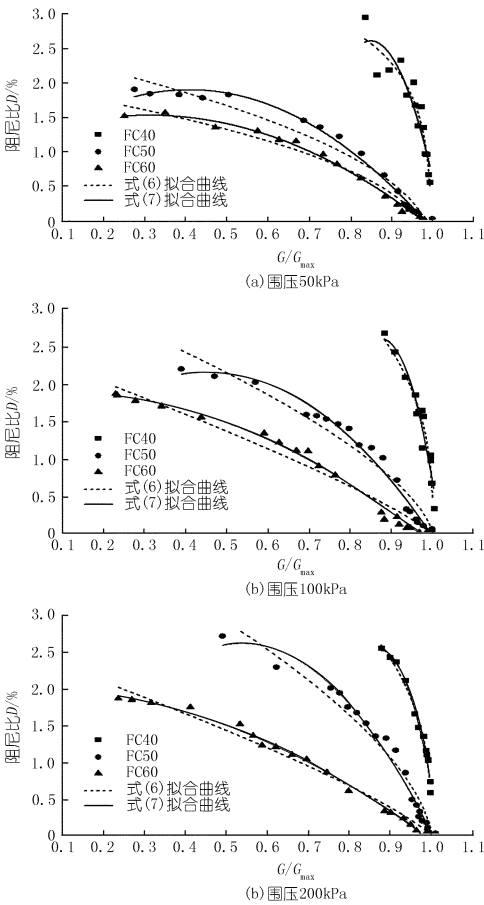


图 5 不同围压、细粒含量试样  $D \sim G/G_{max}$  试验曲线

(3) 细粒含量对阻尼比的影响表现为,随细粒含量增加,阻尼比减小,这种减小的趋势随着剪应变的增加更趋明显。在半对数坐标中,剪应变较小时,阻尼比

Study of resonant column experiment of dynamic shear module and damping ratio of unsaturated loess

HUANG Zhiquan, LI Lei, JIA Jingchao, YUE Kangxing, SUN Yi

(Institute of Resources and Environment, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China)

**Abstract:** Dynamic shear modulus  $G$  and damping ratio  $D$  are the two main parameters for describing the dynamic characteristics of soil. Some dynamic parameters tests on the unsaturated loess with different fine contents were performed by using GDS resonant column system. The test results show that the relation of  $G$ ,  $G/G_{max}$  and the dynamic shear strain  $\gamma$  can be well fitted by Hardin - Drnevich hyperbolic model; the dynamic shear modulus decreases with the increase of fine particle content when other conditions remain constant. The damping ratio  $D$  decreases with the increment of fine content, and the relation between  $D$  and  $\gamma$  can be represented by a function of  $G/G_{max}$ , while the relation of  $D$  and  $G/G_{max}$  can also be expressed by a quadratic polynomial of  $G/G_{max}$ .

**Key words:** unsaturated loess; resonant column test; fine particle content; dynamic shear modulus; damping ratio