

固有各向异性对动剪切模量的影响

孙德安 姜 朴 卢盛松

(河海大学土力学教研室, 南京)

一、前 言

天然沉积的土具有各向异性, 这早为人所知。但在土力学中深入地对土的各向异性问题加以研究是近20年来的事。通常, 把土的各向异性分成两类, 一类是由应力引起而产生的组构各向异性, 称为应力引起的各向异性(*stress induced anisotropy*); 另一类是受外力以前土本来就具有的组构各向异性, 称为固有各向异性(*inherent anisotropy*)。

各向异性对土的强度、刚度、承载力、渗透性和动力性质等均有影响。一般认为各向异性对强度和承载力影响不太大, 但对刚度和渗透性影响较大; 而各向异性对土动力性质的影响目前尚不清楚, 但这一课题最近已受到重视。

1977年施默特曼(Schmertman)^[1]对用撒布成型的砂层施加等压固结压力, 改变波传播方向与沉积方向的夹角, 以测定砂的固有各向异性对波速的影响。尽管试验结果比较离散, 但从统计观点来看, 波的传播方向与沉积方向一致时测得的S波和P波速度最小; 而波传播方向与沉积方向垂直时测得的S波和P波速度最大; 其余方向的波速介于上述两者之间。1978年萨达(Saada)等^[2]和1981年比奇尼(Bianchini)等^[3]用大型固结仪使高岭土和伊利土的泥浆在 K_0 条件下固结, 然后切取垂直方向和水平方向的试样, 在等压固结状态下进行竖直向共振柱试验, 得到了水平向弹性模量比垂直向大5—10%的结论。本文介绍了利用共振柱对三种天然或室内人工制备的沉积粘性土进行动力特性各向异性研究的试验方法和结果, 并对试验结果进行了分析。旨在明确固有各向异性对小应变幅值时的动剪切模量的影响。

二、试 验 概 述

固有各向异性对土动力特性影响的研究方法与通常对土静力性质各向异性的研究方法差不多。对于粘性土, 通常用切取与沉积方向成不同倾角的试样进行试验(图1); 对于砂土, 一般先冻结, 然后切取与沉积方向成不同倾角的试样, 把试样装在仪器上, 慢慢解冻。研究土的固有各向异性对土动力特性的影响时, 往往施加各向等压的固结应力, 固结完成之后施加动荷载(图2)。本文着重利用共振柱对图2(b)情况进行较多的试验研究。

(一) 试验仪器和试验材料

试验所用的仪器是日本诚研舍制造的DTC-158型共振柱。该共振柱试样底端固定, 顶端为弹簧-阻尼连接, 可对试样施加不等压固结压力, 最大侧压力可达800kPa, 试验应变范围

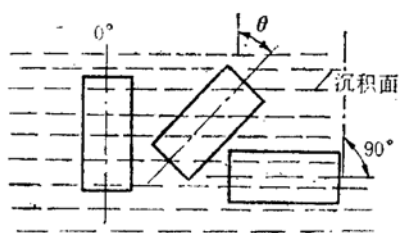


图1

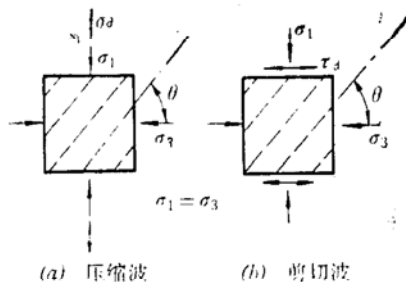


图2

为 10^{-6} — 10^{-3} ，本次试验所用试样的尺寸是 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ 。

试验所用的土样是三种粘性土，其主要物理指标如表1所示。

表1 试验用土的主要物理指标

土名	比重	液限(%)	塑限(%)	塑性指数
大桥粘土	2.70	50	25	25
尾矿砂	2.74	25	17	8
淤泥质亚粘土	2.70	40	23	17

(二) 试样制备

大桥粘土为原状土，土样是从南京长江大桥附近取来的，在原位开挖试坑，用 $20 \times 20 \times 20\text{cm}$ 铁皮盒取土，取土深度为1 m左右，由于基本上属于静水相沉积，从外表上看具有明显的层理性。淤泥质亚粘土亦为原状土，土样是从上海金山取来的，取土盒尺寸为 $80 \times 30 \times 30\text{cm}$ ，取土深度1.20—1.45m。

尾矿砂试样是在室内制备的。在 $60 \times 40 \times 40\text{cm}$ 的有机玻璃盒子里装满水，把研磨过的尾矿砂通过细筛均匀分布在水中，静放一段时间后施加 9.8kPa 的压力，以加快固结。固结一定时间后，就可按试验要求切取试样。

(三) 试验研究方法

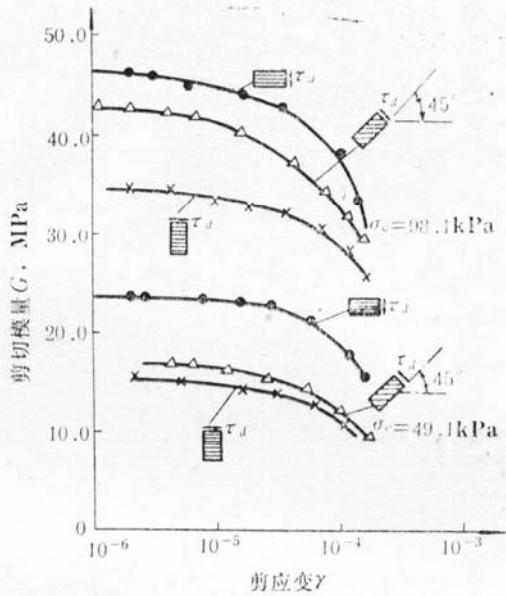
大桥粘土和淤泥质亚粘土的塑性指数较大，渗透系数小，完成主固结时间较长，每级固结压力的固结时间均定为12小时，尾矿砂塑性指数小，透水性好，完成主固结时间较短，故每级压力的固结时间均为3小时。

对大桥粘土和淤泥质亚粘土，进行了三种不同倾角(0° , 45° , 90°)的共振柱试验，对尾矿砂进行了五种不同倾角(0° , 30° , 45° , 60° , 90°)的共振柱试验。

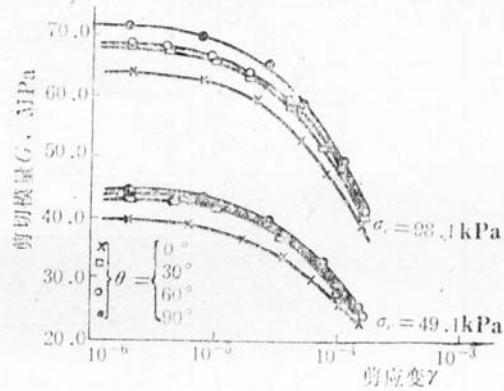
三、试验结果与分析

(一) 试验结果

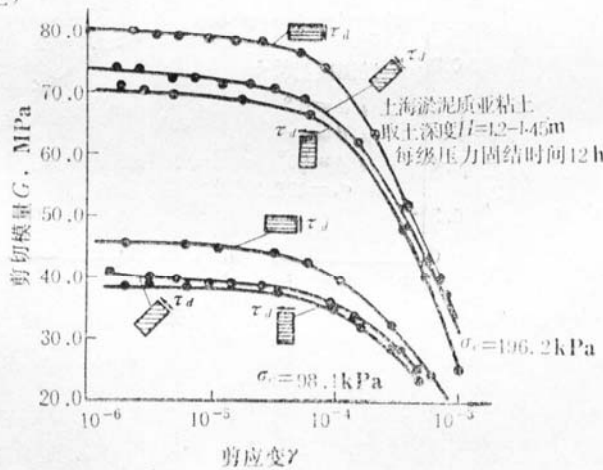
试验结果主要包括小应变剪切模量和阻尼比随倾角 θ 变化关系。图3(a)、(b)、(c)表示了大桥粘土、尾矿砂和淤泥质亚粘土的剪切模量在不同等压固结压力和不同倾角条



(a) 各向异性对小应变剪切模量的影响 (大桥粘土)



(b) 剪切模量与应变、倾角之间的关系 (尾矿砂)



(c) 土的固有各向异性对剪切模量的影响 (上海淤泥质亚粘土)

图3

件下，随应变变化的试验曲线。

通常做共振柱试验是竖直取样的(在此处相当于 $\theta = 0^\circ$)。也就是说，一般共振柱试验所得到的剪切模量是 $\theta = 0^\circ$ 时的剪切模量，以 $\theta = 0^\circ$ 时的剪切模量为基准进行归一化，可得到图4(a)、(b)、(c)。图5表示了在不同倾角和固结压力下淤泥质亚粘土的 G/G_{\max} 与应变的关系曲线。

由图3，4可以明显地看到以下几点：

1. $G_{\theta=0^\circ} > G_{\theta^\circ}$ (此处 G 的下标代表倾角的角度)，即垂直于沉积面内的小应变动剪切模量大于平行于沉积面内的剪切模量，其差值为剪切模量的5—25%，此值与土的种类、固结应力、应变、超固结比以及试样是否经抽气饱和等因素有关。一般来说，当固结应力较小时，

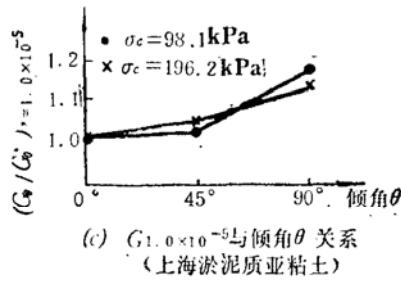
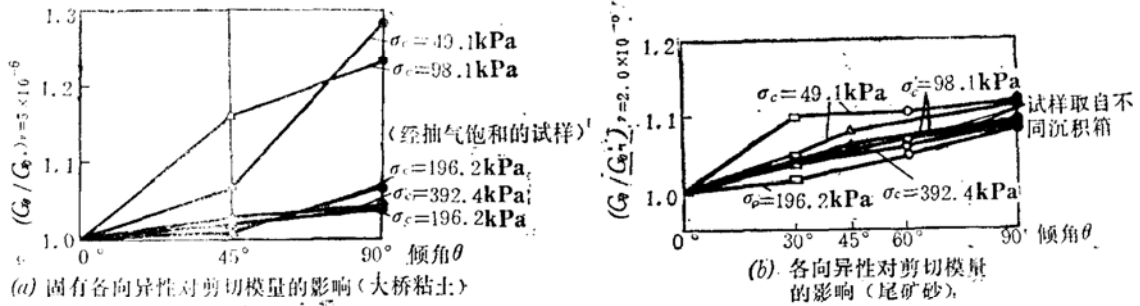


图 4

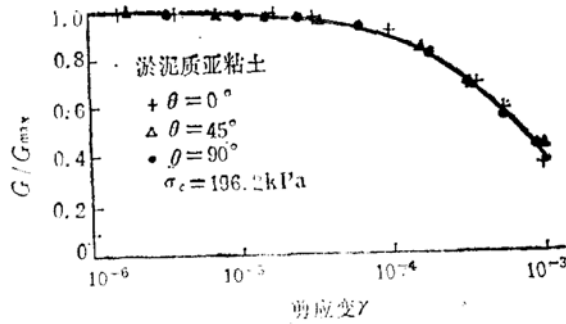


图 5

两者差别较大。

2. 倾角为30°, 45°, 60°试样的剪切模量小于倾角为90°试样的剪切模量, 而大于倾角为0°试样的剪切模量。从五种不同倾角试样的剪切模量来看, 以倾角为0°试样的剪切模量最小, 在倾角0°—90°范围来看, 倾角增大时, 剪切模量亦增大。

3. 抽气饱和使小应变剪切模量的各向异性明显减小(图4(a))。

4. 不同倾角时, G/G_{max} 与 γ 关系曲线有较好的归一性(图5)。

(二) 试验结果分析

有关粘土微观结构的研究表明: 大多数粘土颗粒是片状的, 薄片厚度与其它宽度和长度相比极小。天然土层中片状颗粒的排列和定向主要取决于粘土的沉积环境和沉积后的应力历史。海相粘土的组构大多属于凝絮型“片架”组构, 片状颗粒杂乱定向; 而在淡水沉积环境中, 组构有分散性, 片状颗粒一般具有某种程度的平行定向。土颗粒沉积时有一种倾向, 即颗粒薄片面总与沉积时的水平层面相平行。此外, 片状颗粒在沉积后的固结过程中趋向平行大主应力定向, 并且其平行定向的程度将随固结压力的增长而加大。

我们试验所用的粘土是在淡水下天然或室内人工沉积的粘土,这些土都是自重作用(或稍加垂直压力)下沉积的,完成固结(不是指试验时)的大主应力均是垂直向。根据前面说法,试验所用的粘土组构应该是分散型片堆组构(如图6)。

粘土颗粒在沉积过程中互相碰撞形成大的集合体。颗粒之间按相互接触的部位不同可分为边角-面(EF)、边角-边角(EE)和面-面(FF)三种不同接触方式。其中面-面(FF)连接是三者中最弱的。



图6

根据上述粘性土的组构和接触方式的概念,我们就可以解释为什么与沉积面相垂直面内的动剪切模量大于沉积面内的剪切模量。沉积面内($\theta = 0^\circ$)主要是以面-面接触为主,其连接是最弱的。故在该面内受到动剪切应力时,其抗剪切能力自然要小,即在同样的剪切应力作用下发生较大的剪切变形,导致了剪切模量比较小。反之,在与沉积面相垂直的面内($\theta = 90^\circ$),主要是以边角-边角(EE)和边角-面(EF)接触方式为主,其连结较强,故在该面内受到动剪应力时,其抗剪能力较强,即发生较小的剪切变形,这就导致了剪切模量较大。这样我们就解释了为什么 $G_{\theta=90^\circ} > G_{\theta=0^\circ}$ 的原因。当然这种解释还只是根据目前对土的微观结构的认识和本文试验结果设想的,有待进一步研究。

(三)试验结果的归纳

本试验所用的正常固结粘土最大动剪切模量的经验公式为

$$G_{\max} = A \cdot \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} p_a^{(1-n)} \sigma_0'^n \quad (1)$$

式中 p_a 为大气压力; σ_0' 为有效平均固结应力; A , n 为参数; e 为孔隙比。

需要注意:由式(1)计算得到的剪切模量是 $\theta = 0^\circ$ 时的试验结果。正如试验结果部分所指出的,由于试样的切取方向不同而使剪切模量不同,故在用经验公式表示剪切模量时,若能考虑不同倾角对剪切模量的影响似乎更为合理一些,即

$$(G_{\max})_\theta = \frac{A}{F(e)} \cdot p_a^{(1-n)} \sigma_0'^n f(\theta) \quad (2)$$

式中 $f(\theta) = \frac{(G_{\max})_\theta}{(G_{\max})_{0^\circ}}$, $(G_{\max})_\theta$ 是倾角为 θ 时的最大动剪切模量, $(G_{\max})_{0^\circ}$ 是倾角为 0° 时的最大动剪切模量,也就是通常做共振柱试验所得到的应变为 1.0×10^{-6} 时的剪切模量。

$f(\theta)$ 的数值随着土的种类、固结应力、倾角、超固结比、孔隙比等因素而变。对于本试验所采用的三种土来说,大桥粘土的 $f(\theta)$ 就是图4(a)的纵坐标;尾矿砂的 $f(\theta)$ 就是图4(b)的纵坐标;淤泥质亚粘土的 $f(\theta)$ 就是图4(c)的纵坐标。由图4可见, $f(\theta)$ 的数值在1.0—1.25之间变动,在倾角 $0-90^\circ$ 范围内, $f(\theta)$ 与 θ 基本上成直线关系。 $f(\theta)$ 随着 θ 增大而增大。

(四)试验结果的应用

根据有关用现场波速法所测得的剪切模量与室内共振柱试验测得的剪切模量(指应变为

1.0×10^{-6} 时的剪切模量)的比较,一般现场的结果高于室内试验的结果,特别是粘性土。人们一般认为产生差异的原因有土样的扰动、室内人工制备土样与原位的差异、应力状态的不同以及次固结效应。笔者认为如果考虑到粘性土的剪切模量的各向异性和本试验的结果 $G_{90^\circ} > G_0^\circ$, 将更有助于解释为什么用现场波速法测得的剪切模量高于用共振柱测得的剪切模量。

通常我们做共振柱试验所用的试样都是垂直方向取来的,如图7(a)。因此振动剪切面(即颗粒振动方向)与土层的沉积面相同,所测的剪切模量用本文的符号表示的话,就是 G_0° 。

现场波速法测量剪切模量一般用跨孔法,如图7(b)。波传播方向(x 方向)与土颗粒沉积方向(y 方向)相垂直,也就是土颗粒剪切振动面(x 面)与土的沉积面(y 面)相垂直。用本文所采用的符号,则这种振动方向测出的剪切模量应为 G_{90° 。

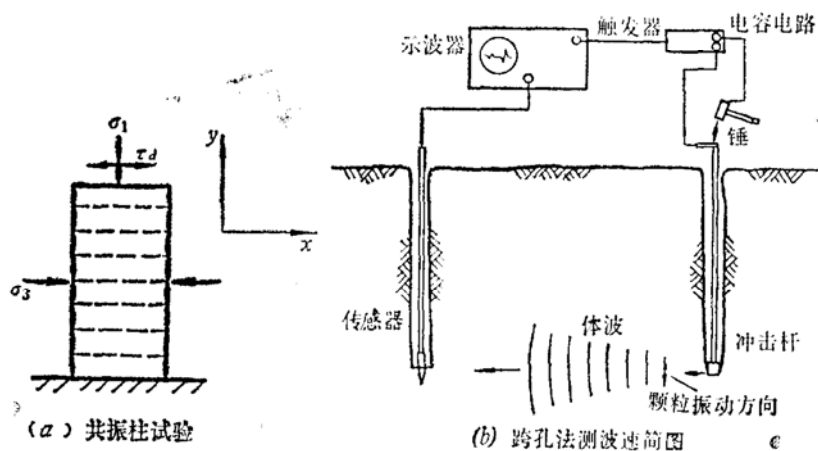


图7

本文前面已指出 $G_{90^\circ} > G_0^\circ$, 一般 G_{90° 比 G_0° 大5—25%, 考虑到这一点,自然就容易理解为什么通常共振柱测得的剪切模量小于用现场波速法测得的剪切模量。因此,由于共振柱试验和现场波速法的波传方向与沉积方向的夹角不一致,至少是导致两者结果不一致的原因之一。

四、结 语

利用共振柱对三种天然或人工制备的沉积粘性土进行了固有各向异性的试验研究,得到了沉积面的小应变剪切模量小于与沉积面相垂直面内的数值这一结论。这一结果与静力各向异性试验结果和用波速法测定固有各向异性对剪切波速影响的试验结果相一致,可以用粘土结构理论加以解释。从试验结果来看,对于一般天然沉积的粘性土,两个主方向的小应变剪切模量相差可达5—25%。其余各面的剪切模量数值在上述两面内的剪切模量之间。此结论有助于解释现场波速法测定的剪切模量高于室内试验的结果这一现象。

参 考 文 献

- [1] Setmertman, J.H., Effect of Shear Stress on the Dynamic bulk Modulus of Sand, Final Report to Waterways Experiment Station, Corps of Engrs. U.S.A.

Army.1977.

- [2] Saada, A.S., Bianchini, G. F., Shook, L. P., The Dynamic Response of Normally Consolidated Anisotropic Clay, Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Vol.2, 1978.
- [3] Bianichini, G.F., Saada, A.S., Effect of Anisotropy on the Dynamic Response of Clay Soils, Proc. of 10th ICSMFE, Vol. III, 1981.