

海底粘土的剪切模量

顾尧章

(浙江大学土木系, 杭州 310027)

文摘 海底粘土的室内自振柱试验研究表明, 其剪切模量不仅与剪应变的幅值有关, 而且还随固结特性的变化而变化。试验结果得出了海底粘土剪切模量与固结度的关系曲线, 建立了剪切模量与固结压力关系表达式。本文对认识土的动力特性以及与粘性土剪切模量有关的岩土工程问题有所帮助。

关键词 海底粘土, 自振柱试验, 剪切模量, 固结。

1 前言

土是岩土工程学科的研究对象之一。土体是什么? 到目前为止岩土工程界的认识尚未一致。有的把土体视为(或者说假定为)弹性体, 利用弹性力学方法和成果解决岩土工程问题; 有的把土当成塑性体, 于是就有了土的塑性力学。经典的土力学考虑变形问题时往往把土体当作线弹体, 而考虑强度问题时则把土体视为刚塑体。现代非线性土力学的观念, 把这两机械分隔的两者有机地融合在一起, 把土力学推到了一个新的发展阶段。究竟土体是什么? 笔者认为土就是土, 不是别的什么。土体既不是弹性体, 也不是塑性体。不过, 土体有时会呈现线弹性的力学性状, 也会呈现弹塑性和塑性体的性状。众所周知, 土是由母岩风化而成的, 经过多种地质作用以及搬运作用形成了现存的各种各样的土。土的性质取决于它的组成因素和环境因素, 而土的力学性状在很大程度上又取决于这两个因素以及外界荷载作用下的应力水平。对于密实的砂性土或者稠度较小的硬塑粘土, 在应力水平较低时它的应力、应变性状接近于线弹体。换句话说, 在这种特定条件下可以把土体视为弹性体。可是当应力水平进一步增加时, 密实砂土或硬塑粘土的上述性状就会发生变化。这在平板载荷试验曲线上就可以明显地看到: 随着荷载的逐渐增加, 荷载-变形曲线由开始的直线逐渐变为曲线, 具有弹塑性体的力学性状。同样, 对密实度较小的松砂或稠度较大的软土, 与密砂或硬塑粘土相比, 它的线弹体性状明显减少, 甚至消失, 而弹塑性和塑性体的性状就比较明显。由此可见, 土体与其他材料不同之处是, 在工程常见荷载下, 判断土体性状不仅仅是物理性质所决定的, 而且随应力水平的不同而不同, 可以具有线弹性的性状, 也可以呈现弹塑性甚至是塑性体。这是现代土力学非线性分析的主要观点之一。

经过近几十年的努力, 已经提出了几十种用来描述土体应力与应变关系的数学模型。在这许多数学模型中, 比较简单而实用的要推 Duncan-Chang 模型^[9]。Duncan 等人用一个变形模量随固结压力而变化的参数来描述土的非线性应力应变性状。由于该参数值可以在常用

三轴剪力仪确定,所以在国内应用较为广泛。笔者最近在 Duncan 等人工作的基础上做了一些研究工作,把变形模量直接用应力水平来表达,同时还提出了用原位螺旋板载荷试验和平板载荷试验确定非线性变形模量的方法^[8,10]。

剪切模量是描述土体在剪应力作用下应力应变关系的一个参数,也是研究土动力学的一个重要方面。长期来人们从不同的角度和方法去认识并测定土的剪切模量。结合地震工程,海洋工程以及基础工程对土的剪切模量进行了广泛研究,获得了十分有益的成果,特别对于砂性土基本上搞清了剪切模量与孔隙比以及固结压力的关系,建立了大家认可的关系式^[1,2]。对于粉煤灰,在早几年笔者及其合作者通过自振柱试验,曾提出了剪切模量与孔隙比及固结压力的关系式^[3]。虽然对粘性土剪切模量的研究也做过了不少工作,但由于粘性土的试验要比砂性土的难度大一些,特别是对含水量较高的软粘土,人们的认识没有砂性土剪切模量那样深入。本文介绍的内容是结合工程实际的一系列试验研究结果,研究海底原状粘土的剪切模量在固结过程中的剪切模量变化,研究海底原状粘土剪切模量与固结压力(包括加荷、卸荷)之间的关系。最后提出了估算不同固结压力下的剪切模量表达式。这对进一步认识粘性土的剪切模量,对土体动力分析和设计也许会有所帮助。

2 土样及试验

试验所用的土样取自某海域的大陆架。土样共 4 个,存于 1m 长的不锈钢取土筒内,分别由两个钻孔(B-2)和(B-3)得到。土样的编号分别为(B-3, S-9), (B-3, S-12), (B-2, S-21)以及(B-3, S-26)。各土样相应的埋深分别为海床下 12m, 18m, 56m, 87m。土样的主要物理性指标如表 1 所示。而图 1 是相应土样的颗粒级配曲线。试验土样的天然含水量在 30%左右,由界限含水量可知属低塑性粉质粘土。由取土筒推出的土样呈暗灰色。由于在(B-2, S-21)取土筒中的土样含有较多数量的贝壳,土样推出取土筒后自行散开,不能成型。所以,实际上本试验研究只利用了三个取土筒的土样。

表 1 土样的主要物理性指标

土样编号	埋深 h (m)	天然含水量 w (%)	天然容重 γ (kN/m ³)	干容重 γ_d (kN/m ³)	界限含水量		
					w_L (%)	w_p (%)	I_L (%)
B-3, S-9	12	33	18.8	14.1	31	26	5
B-3, S-12	18	31	17.5	13.4	32	25	7
B-2, S-21	56						
B-3, S-26	87	27	18.5	14.9	34	26	8

试验是在计算机控制的自振柱试验装置上进行的。自振试验的原理和方法参见文献^[4,5,3]。试样几何尺寸与常规共振柱试验相同,即直径 3.91cm,高 8cm。试样用 CO₂ 并反压饱和。为了确保固结过程的正常进行,对于较高固结压力下的试样,除了对橡皮膜及其上下两端采取特殊处理外,还用染色水监视作用在试样外包橡皮膜四周的压力水是否渗入试样内部。为了测定固结过程中土样剪切模量的变化,试验前预先编制好计算机操作程序,在各个不同的固结时刻设定相应的自振柱激振次序。这样就可以得到土样在某固结压力下的固结

曲线的同时，获得相应的固结过程剪切模量变化曲线。因为自振柱试验装置能够把每次激振时的参数通过计算机记录、运算并贮存其中，待试验结束即可打印读出试样在固结过程中各固结时刻的剪切模量值。而主固结结束时的土样剪切模量值代表某一固结压力下的剪切模量值。

试验还对取自三个取土筒的土样进行了不同固结压力下的剪切模量测定。如同常规的土的压缩试验程序一样，先由低压开始，对同一个试样分级增加固结压力并测定各固结压力下的剪切模量，达到预定的固结压力后，再逐渐减少固结压力（卸载），在相应递减的固结压力下也测定土在回弹时的剪切模量。表 2 是本次试验研究的主要成果汇总。

表 2 试验的主要成果汇总

土样编号	加荷方式	固结压力 σ_3'	剪切模量 $G_{\max}$
		(kPa)	(MPa)
B-3, S-9	加荷	50	25
		150	50
		390	100
		780	160
	卸荷	390	115
		200	80
B-3, S-12	加荷	50	38
		150	63
		490	128
		980	195
	卸荷	490	148
		250	110
B-3, S-26	加荷	50	30
		150	100
		390	148
		590	178
		1190	248
	卸荷	590	190
		300	165

自振柱试验在固结过程的某一时刻激振所得到的剪切模量是一组值，即与剪应变相对应的一组值，可以根据计算机控制系统打印读出一组剪切应变-剪切模量值，把这相应的一组值绘成曲线，就得到如图 2 所示的关系。为了进行比较，取最大值即曲线起始段延长线与纵座标相交得出所谓最大剪切模量 $G_{\max}$ 。下一节提到的最大剪切模量其含义均如图 2 所示。

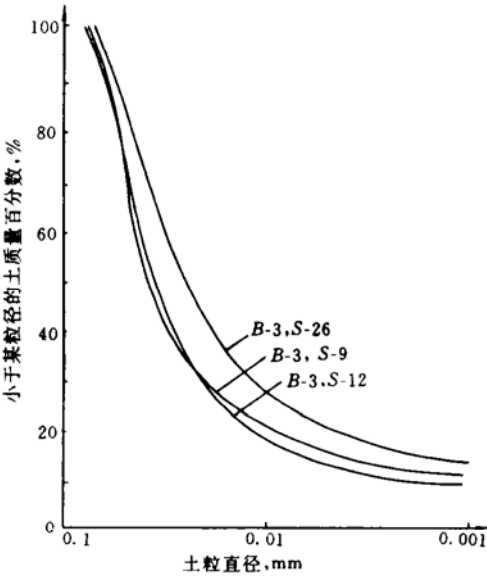


图1 土样颗粒级配曲线

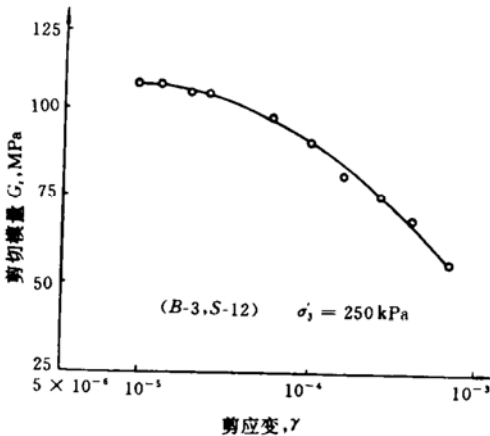


图2 剪切模量随剪应变水平的变化

3 固结、压缩与剪切模量

自振柱试验是一种非破损性试验，测定土的剪切模量时仅对土样作用一次激振力。在一次激振力下土样按照它的固有性质作自由振动，计算机把该次自由振动的振幅和周期采集后进行自动运算就得出相应的剪切模量。与共振柱试验相比，自振柱试验对土样的扰动较小。另外，由于受计算机控制的自振柱试验采集数据较快，而且储存量大。因此自振柱试验可以把土样在整个固结过程中土样的剪切模量的变化过程加以测定。

本试验研究的海底粘土的固结是在自振柱压力筒内进行的，土样尺寸与常用三轴试验的土样相同。固结压力通过压力筒内的液体施加，体积变化由量水管测读。在某一级固结压力下的固结过程的记录顺序与常规固结试验相同，在测读每时刻固结引起的体积变化的同时，计算机自动激振并采集计算剪切模量所需的数据。这样，一个固结过程就相应有一个剪切模量随固结时间的变化过程。当前一级固结压力下土样主固结完成后（以 24h 为准），则施加后一级固结压力，在该后一级固结压力下同样可以得到固结曲线和剪切模量随固结时间变化的过程线。图 3 是（B-3，S-12）土样的一组固结曲线和相应的剪切模量过程线。图中为了简洁起见，省略了各级固结压力下的固结曲线（ $\frac{\Delta V}{V} - t$ ），仅用一条典型的固结曲线来代表。

由图 3 可以看出，在某一级固结压力下，随着固结度的增加，土的剪切模量逐渐增加，当接近或达到主固结时剪切模量增加趋势减缓，在本试验测到的时间范围内，土体在主固结后剪切模量的增加不明显。剪切模量随固结度的增长而增加的幅度因固结压力而异，固结压力愈大，剪切模量增加的幅值也就愈大。如图所示，对应固结压力为 150kPa 的剪切模量增加值为 10MPa，而固结压力为 780kPa 的剪切模量增加值则为 36MPa。对于含水量较高的粘

性土, 固结对它的影响是比较大的, 这一点在土力学研究方面引起了较大的注意, 特别对饱和软粘土, 固结意味着土体强度的提高, 固结也意味着压缩性的减少。从某种意义上讲固结给土体贮存了能量, 贮存了抵抗压缩和剪切破坏的能量。土体的剪切模量是衡量抵抗剪切破坏的一种能力。所以固结使土体的剪切模量增加, 这是很容易被人们所接受的一个概念。利用这个概念可以使岩土工程技术人员在设计和施工中更加明白: 在设计近海工程也好, 设计设备基础也好, 都应该考虑饱和粘土的固结能使土的剪切模量增加的因素。

图4是根据表2所列(B-3, S-26)土样的试验结果, 参照土体压缩曲线的形式绘制的剪切模量与固结压力的关系曲线。以剪切模量为纵坐标, 固结压力为横坐标。其中剪切模量为每一固结压力下主固结完成后的最大剪切模量值。固结压力由0.05MPa开始, 逐渐增加到1.19MPa, 然后模拟压缩试验卸载到0.59MPa及至0.3MPa。图4印证了土的剪切模量随着固结压力的增加而增加这个基本事实。不论是砂性土还是粘性土, 海底原状饱和粘土的试验结果进一步表明了这个事实。图中还可以发现, 卸载会使土的剪切模量下降, 下降的路径并不沿加载的原应力路径, 而是比较偏高些, 这就是说, 土体在卸载时它的剪切模量会随着固结压力的减少而降低, 降低的坡率要比加载时的小。

为了寻找海底粘土剪切模量随固结压力的变化规律, 可以把图4的坐标分别改换成双对数坐标。于是就得到图5。由图5可以有趣地发现, 在双对数图内剪切模量与固结压力成良好的线性关系。据此就可以写成海底粘土剪切模量与固结压力的表达式

$$G_s = G_{\infty}(\sigma_3')^n \quad (1)$$

式中 G_s 为相应于固结压力(σ_3')的最大剪切模量($G_{\max}$), 为了表达上的简洁, 把 $G_{\max}$ 写成 G_s 。该 G_s 值表示剪应变刚刚发生时的最大剪切模量值。 G_{∞} 为相对 σ_3' 接近于零的剪切模量值, 在图5上要找到 σ_3' 等于零是不可能的。因为在对数坐标上要找到起始点是不可能的。但是从工程观点看足够小的 σ_3' 值与 σ_3' 等于零值是相当的。另外, 如果要知道土体在现有状态下施加某一固结压力 σ_3' 之后的剪切模量值, 则可以直接把现有状态下测到的剪切模量值代替式中的 G_{∞} 值, 由式(1)得到相应固结压力(σ_3')的剪切模量值(G_s)。式中 n 是一个参数, 在图5双对数图中表示剪切模量与固结压力的变化率, 与土的性质有关, 对图中表示的(B-3, S-26)海底粘土土样来说, $n=0.53$ 。而同一个土样卸载时 n 值为0.45。可见 n 值还与土的超固结有关。

式(1)是海底粘土剪切模量随固结压力变化的数学描述, 也是剪应力作用下土体非线性力学性状的简明表达式。式(1)表示着土的剪切模量随固结压力成指数关系而增长。这个表达式可以与 Duncan 等人关于土的变形模量随固结压力成指数关系变化的表达式^[9,10]相呼应。表征土体力学性状的这两个重要参数都对固结压力成非线性变化。都是随固结压力的

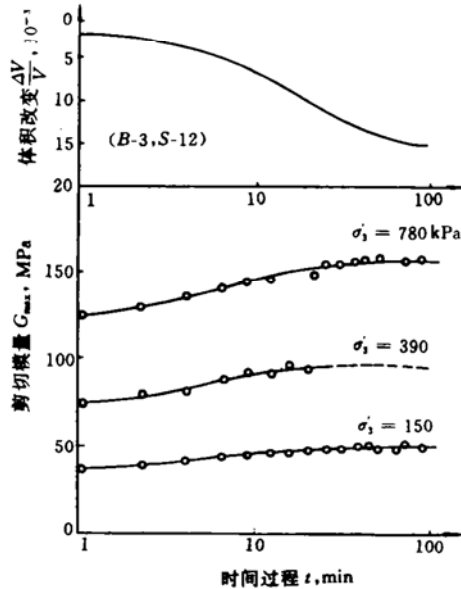


图3 固结过程粘性土剪切模量的变化

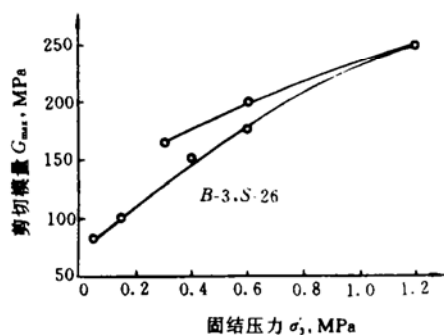
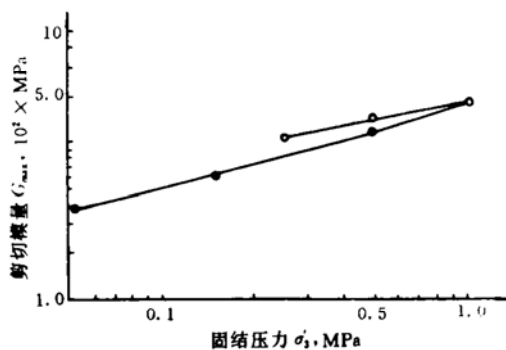


图4 剪切模量与固结压力的关系

图5 用双对数坐标表示的 $G_{\max} - \sigma'_3$ 关系

指数关系而变化,虽然具体的参数有所不同。这是十分有趣而十分有意义的。

利用式(1)可以估算饱和粘土地基在外荷载作用下剪切模量的变化。譬如,在修建构筑物前用波速法获得了天然地基土层的剪切模量值(G_w),则就可以估算构筑物建成若干年(主固结完成)后地基土的剪切模量值。利用式(1)还可以估算天然地基土剪切模量随土层深度的变化。假如土层是均匀的,则只要知道浅部土层的剪切模量(G_w),就可以估算不同深度处土的剪切模量(G_s),或是剪切模量(G_s)沿土层深度的分布(只要沿土层深度各点的固结压力已知)。式中的唯一参数 n 值的测定尚有不少研究工作可做。但从本研究结果看, n 值约在 0.5 上下,作为粗略估算不妨借用 $n = 0.5$ 一试。把式(1)代入动力分析中也许更加实际,更加合理些。

4 结 论

通过取自某海域海床下不同深度的饱和粘性土的大量自振柱试验研究,得出如下结论:

(1) 在某一固结压力下,粘性土的剪切模量随着固结度的增加而逐渐增加。当主固结结束后,剪切模量随着时间的增长就不明显(长时间的次固结作用对剪切模量的影响除外)。

(2) 当固结压力依次增加时,粘性土的剪切模量相应增加。卸载时剪切模量相应减少,但减少的幅度要比加载时增加的幅值为小。剪切模量随固结压力的变化与超固结比有关。

(3) 固结压力与剪切模量在双对数坐标图呈良好的线性关系。可以用固结压力的指数关系来表达剪切模量的非线性变化(式(1))。这与 Duncan 等人用固结压力表达变形模量的关系相似。用式(1)可以估算不同固结压力下的剪切模量,可以估算剪切模量沿天然土层剖面的分布,也可以用式(1)进行简单的非线性动力分析。

参 考 文 献

- 1 Richart F E. Dynamic Stress - Strain Relations for Soils. State of the Art Report, Proc 9th ICSMFE. Tokyo. 1977, 2: 605~612.
- 2 Iwasaki T, Tatsuoka F. Dynamic Soil Properties with Emphasis on Comparison of Laboratory Tests with Field Measurements. Proc. 6th World Conference on Earthquake Engineering. New Delhi. 1977, 1: 153~158.

- 3 曾国熙, 顾尧章, 吴建平. 粉煤灰的动剪切模量. 岩土工程学报, 1985, 7 (5) .
- 4 顾尧章, 沈智刚, 李相崧. 土动力学中的自振柱试验. 土木工程学报, 1984, 17 (2) .
- 5 Shen C K, Li X S, Gu Y Z. Microcomputer Based Free Torsional Vibration Test. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE. 1985, 111 (GT8) .
- 6 Prakash S. Soil Dynamics. McGraw-Hill book company, 1981. 114~115.
- 7 孙德安, 姜 朴, 卢盛松. 固有各向异性对动剪模量的影响. 全国土工建筑物及地基抗震学术讨论会, 西安, 1986.
- 8 顾尧章, 余祖国. 用螺旋板荷载试验确定土的非线性变形模量. 岩土工程学报. 1993, 15 (3) .
- 9 Duncan J M, Chang C Y. Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils. Proc ASCE Journal of Geotechnical Engineering 1970, 96 (SM5): 1629~1653.
- 10 顾尧章, 徐 萍. 复合地基的变形模量及其非线性表达式. 浙江省第五届土力学及基础工程学术讨论会论文集, 宁波. 浙江大学出版社. 1992. 229~233.

Shear Modulus of the Marine Clay

Gu Yao - zhang

(Zhejiang University, Hangzhou)

Abstract It is shown by the results of free vibration column tests on clay taken from different depth below the ocean bed that the shear modulus of clay is not a constant. It changes not only with shear strain level but also with degree of consolidation and preconsolidated pressure. The relations between shear modulus and degree of consolidation and between shear modulus and preconsolidation pressure are established.

Key words marine clay, free vibration column test, shear modulus, consolidation.