

# 用动单剪仪进行南海海底原状 粘土动强度的试验研究

中国科学院力学研究所 黄永男 顾小芸

**【摘要】** 本文用动单剪仪试验研究了南海海底原状粘土的动力强度特性。尽管土样具有不同的物性指标和固结压力,试验结果中得到了比较一致的规律。周期荷载下的平均孔隙压力 $\bar{u}$ 和周期次数 $N$ 间具有良好的线性对数函数关系。周期荷载下应力比 $\tau_c/\tau$ 与破坏时的周期次数 $N$ 间的关系曲线落在一个狭小范围内,反映了粘土的动力强度特性,并存在一个临界应力比值。周期荷载引起静强度的下降值约为30%,其原因主要归结于孔压的上升。用有效应力强度理论估算周期荷载后的静强度可能得到满意的结果。

**【Abstract】** The strength behaviors of the undisturbed marine clay from the South China Sea are investigated by dynamic simple shear tests. In spite of different index properties and consolidation pressures of the soil specimen, rather consistent relationships have been obtained from the experimental results. In the cyclic tests, a linear semi-logarithmic correlation exists between average pore pressure  $\bar{u}$  and number of cycle  $N$ . The narrow band of the curve for the stress ratio and number of cycle at failure reflects the dynamic strength behaviors of the marine clay, and which shows the existence of a critical stress ratio. The cyclic loading reduces the static strength by some 30%, and the reason for that may be attributed to the increase in pore pressure. Had the effective strength theory been used to evaluate the static strength after cyclic loading, it would be possible to obtain more satisfactory results.

## 一、前言

在海洋工程中,海洋波浪力是主要的环境荷载之一,在波浪作用下,海底土体和海工结构物的地基受到周期荷载,引起孔隙压力的上升和强度的衰减,甚至导致海底土体的滑动或地基的失稳,造成海工结构物的破坏。在海底土体稳定性以及海工结构物地基变形和稳定性的分析过程中,其结果的合理与否很大程度上取决于对海洋土力学特性的系统研究和其力学参数的正确选定。

用动三轴仪和动单剪仪模拟海洋波浪的作用,研究海洋土的动力特性是常见的有效方法。动三轴仪和动单剪仪能模拟现场中出现的不同应力状况,且各有优缺点。

对于研究自由场中的土体滑动,单剪仪的应力条件比较接近。此外,动单剪试验所需土样数量较少,对于取样困难、价格昂贵的海洋原状土,无疑的是一大优点。本文作者基于上述原因用动单剪仪测定南海海底原状粘土的动力强度特性。

在海洋粘土的动力特性方面,特别应该指出的是挪威土工研究所自1971年以来进行的工作。他们对Drammen粘土进行了大量的系统的实验研究,其中包括许多单剪试验,积累了丰富的资料,为人们提供了不少规律性的知识,大大推动了海洋土动力特性的研究工作。除此以外,还有不少学者也从事过海洋土动力强度特性的研究,但发表的

土样的主要物性指标

表 1

土样编号 №	海底以下深度 Z(m)	含水量 W(%)	液限 W <sub>L</sub> (%)	塑限 W <sub>P</sub> (%)	塑性指数 I <sub>P</sub> (%)	浮容重 γ'(mg/m <sup>3</sup> )	超固结比 OCR
1	13.6	49	41	23	18	0.75	1.1
2	30.5	30	45	19	26	0.94	1.1
3	41.8	32	45	19	26	0.96	1.7
4	46.5	42	45	22	23	0.99	1.3
5	71.6	20	34	17	17	0.97	1.8
6	98.8	30	34	23	11	0.92	0.9

多数文章是用动三轴仪进行的结果。近年来,这方面的工作在我国也正蓬勃发展,周湘渝同志曾用自制的动单剪仪对重塑海洋粘土进行试验,得到了可喜的结果。

本文通过对南海海底6组29个原状土样的单剪试验,分析了海洋土周期荷载作用下的应变和孔隙压力的变化规律,动强度特性,以及周期荷载对不排水静强度的影响等问题,得到了几点有意义的结论。

## 二、试验方法

### 1. 土样描述

试验用粘性土样取自海底以下13.6m至98.8m。土样的主要物性指标示于表1,绝大多数土样处于正常压密状态,只有个别土样呈极轻微超压密土。

### 2. 试验仪器及试验步骤

试验是采用美国生产的动单剪仪。试验中饱和、固结、剪切以及数据采集等过程都是由计算机加以控制,其试验结果经计算机处理后,由打印机将曲线打印出来。由于仪器自动化程度高,人为的干扰因素小,试验结果比较准确可靠。

试样为直径50mm,高度20mm的扁圆柱体。试样安装完毕后,首先进行反压饱和,反压大小一般达50kPa时,B值就大于0.96(实际上,绝大多数的土样B值都超过0.98)。当B值达到要求后,进行等向固结,有效固结压力等于土覆有效压力。随后进行不排水剪切试验或周期加载试验。

每组试验视土样多少由3~6个试样组

成。第一个试样做静载剪切试验,加载率为5kPa/min,求出土样的不排水强度 $\tau_f$ 。随后几个试样在不同的应力比值 $\sigma_c/\tau_f$ 条件下进行周期加载试验,周期为10秒。当试样的剪应变达到±3.0%或周期次数达到1500次时,即停止周期荷载,再施加静载剪切,以求出周期荷载以后的土样静强度 $\tau_{fc}$ 。

## 三、试验结果分析

### 1. 剪应变和孔隙压力的变化规律

图1表示动单剪试验过程中,剪应力 $\tau$ 、剪应变 $\gamma$ 以及孔隙压力 $u$ 随时间变化的典型曲线。由图1看出,试验是在等剪应力情况下进行的。剪应变幅值在试验的初始阶段增加得比较缓慢,其增加率随时间增加(即周数增加)而逐渐变大。当达到一定时间以后,剪应变幅值开始急速增加,很快达到±3.0%。与此相反,试样的平均孔隙压力 $\bar{u}$ 在试验初始阶段增加得很快,随后以越来越小的增长率随时间的增加而增加。在6组动单剪试验中,应力比 $\sigma_c/\tau_f$ 在0.4~0.6范围内,剪应变幅值和平均孔隙压力随时间的变化趋势都与图1相似。

在粘土中孔隙压力的平衡需要一定时间,在测量上有一定困难,因此在所有孔隙压力试验结果中我们只考虑平均孔压 $\bar{u}$ 。

如果在半对数坐标系中表示平均孔压和周期次数间的关系,则发现在应力比一定时,它们间存在着良好的线性关系(图2)。平均孔压 $\bar{u}$ 和周期次数 $N$ 间的关系可表示为:

$$\bar{u} = \bar{u}_1 + a \log N \quad (1)$$

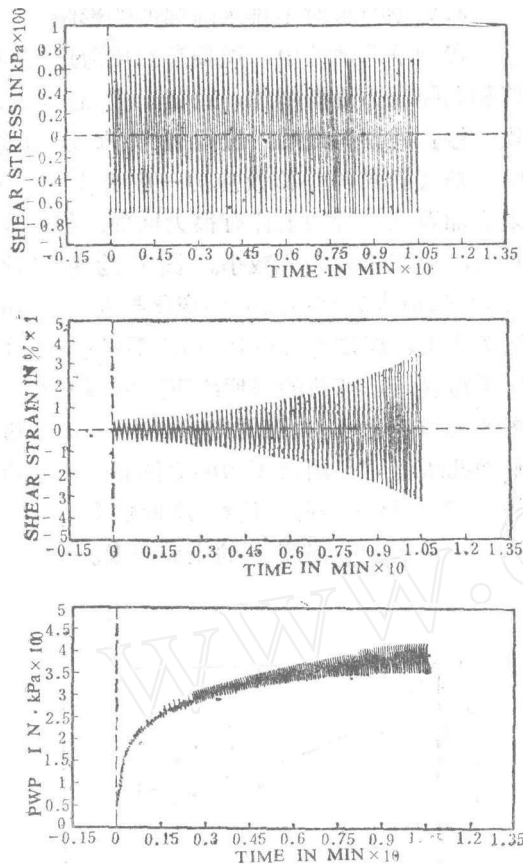


图1 剪应力、剪应变和孔隙压力随时间的变化曲线

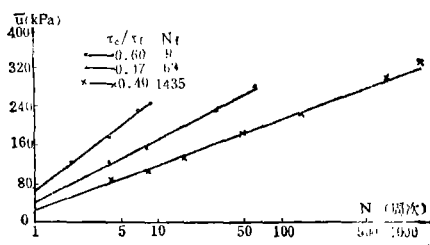


图2 平均孔压和周期次数间的关系

式(1)中的参数 $u_1$ 和 $a$ 随应力比 $\tau_0/\tau_f$ 的大小而变化,其变化规律也是线性的(图3)。Van Eekelen曾认为周期荷载试验中,试样的平均孔压和周期次数间的关系接近直线关系。作者认为,半对数的线性关系更符合图1所示孔压随时间变化的规律。当然,式

(1)是否适合于其它粘性土的周期荷载试验结果,有待进一步验证。

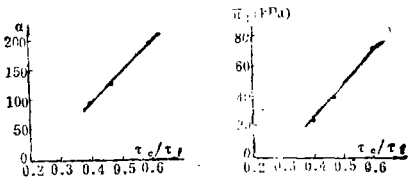


图3 参数 $\bar{u}$ 和 $a$ 与应力比 $\tau_0/\tau_f$ 的关系

### 2. 动强度特性

在周期荷载试验中,土的破坏标准通常采用以下三种之一:(1)选用一定的应变值;(2)有效应力极限平衡条件;(3)取应变幅值随周期次数的增加率最大的点。本试验中采用了第一种破坏标准。当剪应变 $\gamma = \pm 3.0\%$ 时,认为试样达到破坏状态。图4给出了应力比 $\tau_0/\tau_f$ 与破坏时的周期次数 $N_f$ 间的关系。当 $\tau_0/\tau_f$ 由大变小时, $N_f$ 明显增加。 $\tau_0/\tau_f = 0.6$ 时, $N_f$ 约为8次,而 $\tau_0/\tau_f = 0.4$ 时, $N_f$ 达到1400左右。 $\tau_0/\tau_f$ 和 $N_f$ 间的这种变化趋势对各种粘性土是相似的。由图4看出,尽管土样的物性指标和固结压力不同, $\tau_0/\tau_f$ 与 $N_f$ 间的关系,除个别点外,其它点均落在一个狭小的范围内,似乎 $\tau_0/\tau_f$ 与 $N_f$ 间存在唯一的的关系。

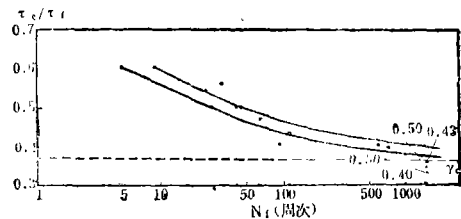


图4 应力比 $\tau_0/\tau_f$ 与破坏时周期次数 $N_f$ 间的关系

试验结果表明,动单剪试验中应力比 $\tau_0/\tau_f$ 存在一个临界值 $(\tau_0/\tau_f)_0$ 。当 $\tau_0/\tau_f > (\tau_0/\tau_f)_0$ 时,试样在周期荷载作用下发生破坏。当 $\tau_0/\tau_f < (\tau_0/\tau_f)_0$ 时,试验不发生破坏(图5)。作者认为这种现象与土的应

力—应变关系的弹塑性特点有着密切关系。在周期荷载试验中，当应力水平小于一临界值时，试样的应变几乎不含塑性应变，荷载的重复循环对应变幅值影响甚微，剪应变幅值随周期次数的增加极其缓慢，以致不能使试样发生破坏。但是 $\tau_c/\tau_r > (\tau_c/\tau_r)_c$ 时，试样的应变包含了塑性应变的组成部分。 $\tau_c/\tau_r$ 值越大，塑性应变所占的比例就越大，而且荷载的重复循环引起塑性应变的累积，使剪应变幅值随周期次数的增加而增加，最终导致试样的破坏。

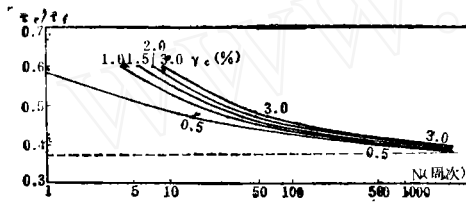


图5 应力比 $\tau_c/\tau_r$ 、周期次数 $N$ 和剪应变幅值 $r$ 三者间的关系

图6表示动单剪试验过程中试样的有效应力路径变化情况以及有效应力强度包线。随着试验的进行，试样的应力状态越来越向强度包线靠近。当剪应变 $r = \pm 3.0\%$ 时，应力状态非常接近极限平衡状态。因此可以认为，粘性土的动单剪试验中，取剪应变 $r = \pm 3.0\%$ 的破坏标准与有效应力极限平衡条件的破坏标准是极为接近的。

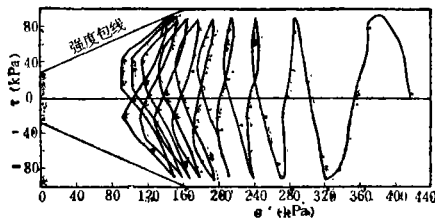


图6 试样的有效应力路径曲线

### 3. 周期荷载对不排水静强度的影响

在动单剪试验中，周期荷载使剪应变幅值和孔隙压力逐渐增加，致使土样逐渐软化。停止周期荷载后，进行不排水剪切试验，则其静强度 $\tau_{fc}$ 以及应力—应变关系与未施加周期荷载的土样有很大区别：静强度降低，剪切模量大大减小。图7为强度比 $\tau_{fc}/\tau_r$ 随最大周期剪应变的变化趋势图。由图7看出，周期剪应变达3%以后的静强度比不施加周期荷载的强度约下降30%左右。图8为强度比 $\tau_{fc}/\tau_r$ 随周期荷载引起的最终平均孔压 $u^*$ 与固结压力 $\sigma_c$ 之比的变化趋势。 $u^*/\sigma_c$ 越大，静强度 $\tau_{fc}$ 降低越多。显然孔压 $u^*$ 是影响静强度 $\tau_{fc}$ 的主要因素。

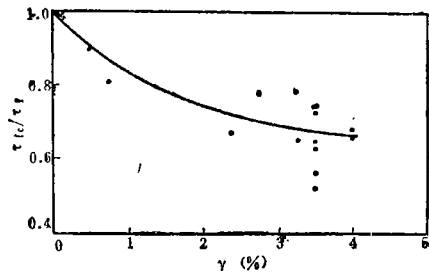


图7 强度比 $\tau_{fc}/\tau_r$ 随最大周期剪应变的变化趋势

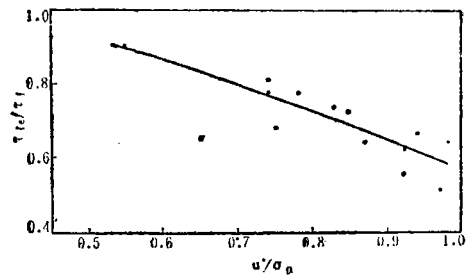


图8 周期荷载引起的最终平均孔压 $u^*$ 对不排水强度 $\tau_{fc}$ 的影响

如何估算周期荷载以后的静强度 $\tau_{fc}$ ，现有许多不同的方法。作者认为用有效应力极限平衡原理计算 $\tau_{fc}$ 会得到满意的结果。

因为周期荷载以后的不排水剪切试验中, 试样的有效应力路径类似于超固结土的路径, 而且破坏时的有效应力状态落在有效应力强度包线上。图9中的实线为不加周期荷载的不排水剪切试验, 其中  $a$  线为固结压力等于上覆压力的情况,  $b$  线为固结压力等于上覆压力之半的情况; 虚线为周期加载以后的不排水剪切试验。如果试样的固结压力为  $\sigma_0$ , 周期荷载引起的孔压为  $u^*$ , 则静强度  $\tau_{fc}$  近似等于超固结比为  $\sigma_0/(\sigma_0 - u^*)$  的试样的强度。

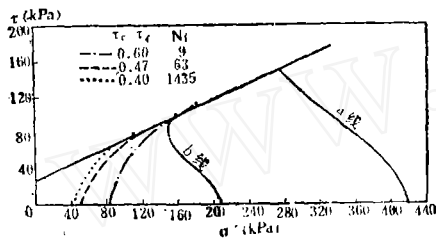


图9 加与不加周期荷载的不排水静剪试验中的有效应力路径

#### 四、结论

1. 本文用动单剪仪对南海海底原状粘土

进行了动力强度特性试验。尽管土样的物性指标和固结压力不同, 试验得到了较为一致的规律性。

2. 在动单剪试验中, 平均孔隙压力  $\bar{u}$  与周期次数  $N$  间具有良好的对数函数关系, 即

$$\bar{u} = \bar{u}_1 + a \log N$$

其中, 参数  $\bar{u}_1$  和  $a$  随应力比  $\tau_0/\tau_f$  而线性变化。

3. 应力比  $\tau_0/\tau_f$  与破坏时的周期次数  $N_f$  间的关系落在一个狭小的范围内, 较好地反映了粘性土的动强度特性, 且粘性土存在一个临界应力比值  $(\tau_0/\tau_f)_0$ 。如何确定临界应力比以及其影响因素有待进一步的研究。

4. 动单剪试验中, 周期荷载引起的静强度的降低量约为30%, 周期荷载引起的孔压上升是影响静强度的主要因素。周期荷载以后的不排水剪切试验中, 试样的有效应力路径类似于超固结土的路径, 且破坏时的有效应力状态落在有效应力强度包线上。用有效应力强度理论估算周期荷载后的静强度可能得到比较满意的结果。

#### 参 考 文 献 (略)

(上接第26页)

在节理模型基础上, 根据岩块和节理面力学强度及天然应力等不定因素, 建立了斜坡剪切强度的概率模型, 进而搜索出危险路径。但这仅仅是开端, 离应用尚有一段差距。

(2) 节理几何特征模型与块体理论 (Block Theory) 相结合, 研究工程岩体稳定性。块体理论 (石根华, R. E. Goodman, 1985) 的核心归结为寻找开挖临空面上的关键块体 (Key block), 节理模

型为此提供了依据。

(3) 在节理连贯网络基础上, 建立裂隙岩体水文地质模型。运用张量法、线素法或有限元法估算岩体的渗透系数和水流速度。

总之, 节理几何特征模型为我们研究岩体的力学性质和渗透性提供了有力的依据, 并有广泛的应用前景。今后, 应着重三维节理几何特征模型和应用的研究。

#### 参 考 文 献 (略)