

# 杭州湾粉质土动强度特性研究

叶银灿 来向华

(国家海洋局第二海洋研究所 杭州 310012)

**摘要** 通过对杭州湾海底浅层粉质土动强度的研究,发现动强度指标内摩擦角  $C_d$  为静强度的 39.7%左右,同时动强度与固结比  $K_c$ 、振动频率  $f$  关系密切。当  $K_c$  较小时,动强度随  $K_c$  的增大而增大,但  $K_c > 1.5$  后,动强度曲线平缓且有降低的趋势;在振动次数较小 ( $< 22$  次) 时,  $f = 0.2\text{Hz}$  的粉质土表现出较高的动强度,振动次数较大后,曲线变化复杂,这可能与试样两端的透水石发生共振有关,但均在 30~50 次振动范围内出现峰值后破坏。

**关键词** 粉质土,动强度,固结比,振动频率

**中图分类号** P642.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-3096(2003)02-0056-04

粉质土介于砂性土和粘性土之间,其性质既不同于砂性土也不同于粘性土,该类土既易冲刷侵蚀又易液化,对海底工程的危害极大,目前并未形成完整的动力响应理论。

杭州湾是钱塘江的河口外海滨,由于较强的水动力条件,发育了许多冲刷槽、潮流脊和沙波等地貌单元。粘土质粉砂是湾内主要的细颗粒沉积物,上部土层主要由粉质土组成,厚度一般大于 5 m<sup>[1]</sup>。粉质土在波浪、地震等动荷载作用下相应的动力学行为,对海上工程建设会产生较大影响,本文对其动强度变化规律进行研究,为海底工程设计和施工提供科学依据。

## 1 粉质土粒度成分和基本物理性质

试验选用杭州湾代表性沉积物样品,地处杭州湾中部,水深 5 m,深度 4.0~5.0 m,通过海上钻探获取。

### 1.1 粒度成分

根据筛分和吸液管联合测定方法对试样进行粒度分析试验,结果见图 1。

从图中可以看出,沉积物试样中大于 0.075 mm 的颗粒含量较低,约为 6.72%,粘粒含量 ( $< 0.005\text{mm}$ ) 为 6.61%,在工程上定名为粉土。而且由于其分选较好,级配较差,所以它是一种易冲刷、易液化的土层。

### 1.2 基本物理性质指标

同时对试样的物理性质指标进行测试,测的试样

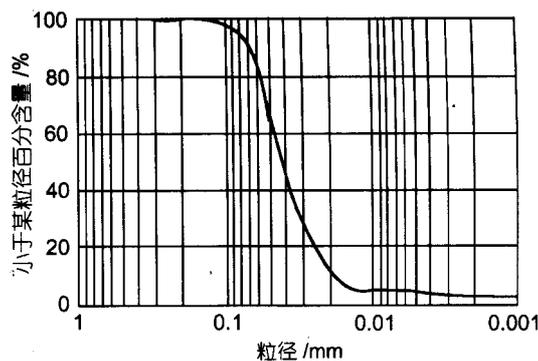


图 1 试样粒度级配曲线

Fig.1 Grain size distribution curve of sample

密度  $\rho = 19.4\text{ kN/m}^3$ ,干密度  $\rho_d = 14.9\text{ kN/m}^3$ ,含水量  $\omega = 29.9\%$ ,换算可知试样孔隙比  $e = 0.808$ ,孔隙率  $n = 44.7\%$ ,饱和度为 100%,处于中等密实状态。

## 2 粉质土的动强度

动强度是指在一定循环荷载作用次数  $N$  下产生某一指定破坏应变时所需的动应力,对于饱和土的不排水试验,也可以用孔压破坏标准<sup>[2]</sup>,在这里进行的

第一作者:叶银灿,出生于 1943 年,研究员,主要从事海洋工程地质研究工作,国家海洋局第二海洋研究所,杭州,310012, E-mail: yeyc@mail.lz.zj.cn

收稿日期:2002-08-30,修回日期:2002-11-10

动三轴试验即选用此破坏标准。

首先将试样制备成直径为 3.91 cm, 高为 8 cm 的圆柱, 进行静、动三轴的固结不排水剪切试验, 测其抗剪强度指标。

试验步骤: (1) 将试样安装到三轴压力室内; (2) 使用真空饱和和法使土样饱和; (3) 给试样施加围压, 然后使土样排水固结, 固结比  $K_c = 1$ 。试验中固结压力分别为 25, 50, 75 kPa; (4) 动三轴试验是沿土样轴向施加频率为 0.2 Hz 的正弦循环应力 (考虑杭州湾波浪作用周期为 5.15 s), 直到土样的累计孔压达到围压为止; 静三轴试验是直接施加轴向荷载, 直到试样破坏。

据此做出每个试样破坏时的极限应力圆, 画出抗剪强度包线, 见图 2。  $C_d, \phi_d$  分别为动强度指标的凝聚力和内摩擦角。  $C, \phi$  分别为静强度指标的凝聚力和内摩擦角。

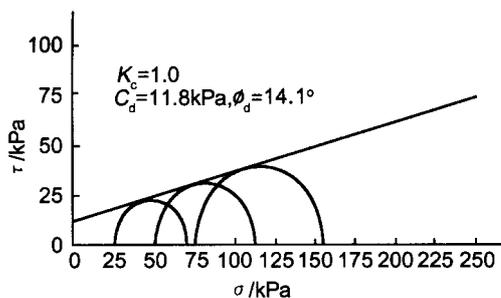


图 2 动三轴固结不排水剪切强度曲线

Fig. 2 Strength data from consolidated undrained cyclic triaxial test

从图上可以看出, 试验的动强度比静强度低许多, 内摩擦角仅是静强度的 39.7% 左右 (图 3)。这主

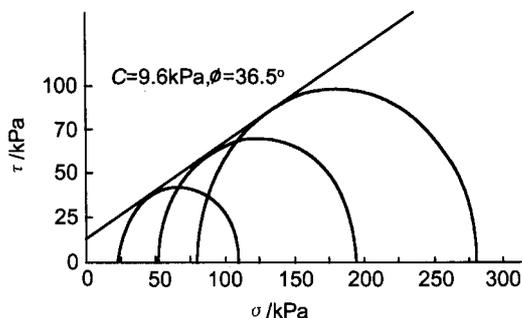


图 3 静三轴固结不排水剪切强度曲线

Fig. 3 Strength data from consolidated undrained triaxial test

要是因为在动荷载作用下, 在土中产生一个动孔隙水压力, 根据有效应力原理, 孔压的增大, 使土的有效应力减小, 从而导致动强度降低。因此在杭州湾工程设计选用岩土力学参数时, 应充分考虑动强度的变化规律, 否则将会发生构筑物失稳, 造成损失。

### 3 固结比对动强度的影响

固结比为土样固结时轴向压应力与侧向压应力的比值。

海底土的实际应力状态往往非常复杂, 主要有波流作用力、水的浮力、上部土体的压力以及周围土体的压力等, 而对于土固结起作用的是土体上覆有效应力和侧向有效压力, 而二者在原位土体中是不相等的。一般侧向压力等于侧压力系数与上覆有效应力的乘积, 侧压力系数均小于 1<sup>[3]</sup>, 因此实际土体在固结过程中所受垂直和横向的固结压力是不等的。因此在本文中按上述试验步骤, 分别选取固结比  $K_c = 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0$  进行固结不排水动三轴试验, 结果发现, 随着固结比的增大, 动强度指标内聚力变化不大, 内摩擦角明显增大; 但是当  $K_c > 1.5$  以后, 内摩擦角变化平稳, 且有减小的趋势, 见图 4。

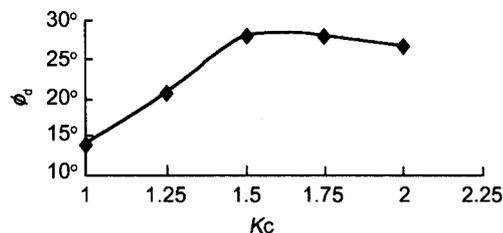


图 4 动内摩擦角与固结比关系

Fig. 4 Relationship between dynamic inter frictional angle and consolidation ratio

分析其原因, 主要是因为固结比增大, 对土样的压密程度高, 抵抗剪切破坏的能力就高, 其动强度指标则随之增大; 但固结比的增大, 即施加在土样上轴向压力增大, 当增大至某一高度后, 则相当于在轴向上施加一个剪应力, 它将会使土样的强度降低, 因此动强度指标也会出现降低的现象。由此可见, 在实际勘察中, 应首先测定侧压力系数, 利用合适的固结比进行动强度试验, 这样才能在工程设计时选取正确的设计参数, 避免工程事故发生。

#### 4 振动频率对动强度的影响

海底土常常受到波浪和地震的作用,波浪和地震是周期性荷载,加上波浪的随机性,作用周期变化较大,频率一般为 0.1 ~ 1.0 Hz。室内动三轴试验结果表明,频率由 1.0 Hz 变为 0.1 Hz 的周期荷载对砂土动力特性的影响不大<sup>[4]</sup>,当频率大于 1.0 Hz 对饱和砂土影响较大<sup>[5]</sup>。但是通过试验发现,振动频率在 0.1 ~ 1.0 Hz 之间变化时,粉土的动力响应还是比较明显的。

在试验中,利用上述粉土扰动样制备成与原状样相同含水率、密度的圆柱(高 8 cm,直径 3.91 cm)三个,在侧向压应力为 25 kPa,  $K = 1.25$  条件下固结,在排水条件下分别施加振动频率为 0.2, 0.5, 1.0 Hz 的动应力(考虑杭州湾波浪周期为 5.15 s),采用逐级加荷法进行动三轴试验,获得不同频率动应力与循环次数的关系曲线,见图 5。

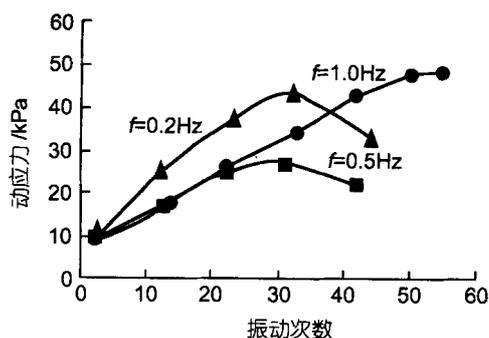


图 5 不同频率动应力与循环次数关系

Fig. 5 Relationship between dynamic stress and cyclic numbers under various frequencies

从图上可以看出,在振动次数较小时 (< 22 次),振动频率为 0.5, 1.0 Hz 曲线近重合,说明在 0.5 ~ 1.0 Hz 范围内的振动频率相同动应力作用下,粉土表

现出相近的动强度;而振动频率为 0.2 Hz 时,则有较大差异,表现出的动强度明显要高。这主要是因为振动频率小,即动荷载作用间隔时间长,动荷载产生的孔隙水压力就会有一定消散,根据有效应力原理,总应力不变时,孔压减小,有效应力则增大,其强度也将增大。随着振动次数的增加,至 30 ~ 50 次范围内,曲线均出现峰值,然后呈现下降趋势,即发生破坏。但在振动次数超过 30 后,粉土表现出的动强度变化复杂,这可能与试样两端的透水石发生共振有关,需要进一步进行探讨。

#### 5 结论

从上述试验结果可以得出以下结论:(1) 杭州湾海底土多为典型的砂质粉土,是一种既不同于砂性土,也有别于粘性土的过渡类型;(2) 在  $K = 1.0$  时,粉土的动强度明显低于静强度,内摩擦角仅为静强度的 44.8% 左右;(3) 粉土的动强度随固结比的增大而增大,但当固结比大于 1.5 时,又呈现平稳且有下降的趋势,因此在实际工程设计中应充分考虑固结比的影响;(4) 在振动频率小于 1 Hz 范围内,频率的变化对粉土的动强度有较大影响,尤其是频率较低的波浪荷载作用,将表现出高于地震作用时的动强度;机理有待于进一步探讨。

#### 参考文献

- 1 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志 (第五分册). 北京:海洋出版社,1992.189 - 190
- 2 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算. 第二版. 北京:中国水利水电出版社,1996.523 - 536
- 3 工程地质手册编写委员会. 工程地质手册. 第三版. 北京:中国建筑工业出版社,1992.45 - 51
- 4 顾小芸. 海洋工程地质的回顾与展望. 工程地质学报, 2000,8(1):40 - 45
- 5 张建民,王稳祥. 振动频率对饱和砂土动力特性的影响. 岩土工程学报,1990,12(1):89 - 97

研究报告 *REPORTS*

# DYNAMIC STRENGTH CHARACTERISTICS OF SILT IN THE HANGZHOU BAY

YE Yir Can      LAI Xiang Hua

( *Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou, 310012.* )

**Received:** Aug., 30, 2002

**Key Words:** Silt, Dynamic strength, Consolidation ratio, Vibration frequency

## Abstract

Through research on dynamic strength characteristics of silt in shallow layers of Hangzhou bay, we find that the inter frictional angle of dynamic strength is about 39.7 % on static strength' s. Dynamic strength has closed relation to consolidation ratio (  $K$  ) and vibration frequency (  $f$  ), when the value of  $K$  is below 1.5, with increasing of  $K$ , the dynamic strength of silt changes in the same trend, but when  $K > 1.5$ , the curves of dynamic strength present gently and decreasingly tendency; when vibration numbers are below 22, and  $f = 0.2$  Hz, dynamic strength gets higher; and when vibration numbers are more, the curves of dynamic strength are complex. This is likely because of the resonance of soil sample and the filters. But the samples are all failed when they are vibrated 30 to 50 times. ( 本文编辑:刘珊珊 )