



# 疏浚岩土抗剪强度指标应用

张 勇, 殷瑞林, 程 瑾, 曹 凯, 张更生

(中交(天津)生态环保设计研究院有限公司, 天津 300202)

**摘要:** 基于土力学有效应力原理、表征参数的物理意义和土工试验指标边界条件的分析, 得出可使用上覆土层天然密度、通过直剪试验确定的强度指标计算土层抗剪强度的结论, 并给出试验指标修正方法的建议, 从而可以准确计算疏浚黏性土抗剪强度, 对疏浚工程岩土分级有重要意义。

**关键词:** 疏浚分级; 有效应力原理; 试验指标修正

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)S2-0141-04

## Application of shear strength index of dredged rock and soil

ZHANG Yong, YIN Rui-lin, CHENG Jin, CAO Kai, ZHANG Geng-sheng

(CCCC( Tianjin) Eco-Environmental Protection Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300202, China)

**Abstract:** On the basis of the principle of effective stress in soil mechanics, the physical meanings of characterization parameters, and the analysis of the boundary conditions for geotechnical test indices, it is concluded that the shear strength of cohesive soil can be calculated using the natural density of the overlying soil layer and the shear strength of the soil layer determined by the direct shear test. This paper also put forward suggestions on the modification method of test indices for the accurate calculation of the shear strength of dredged cohesive soil. The research is of great significance to the classification of rock and soil in dredging engineering.

**Keywords:** dredging classification; effective stress principle; test index modification

## 1 疏浚分级

疏浚工程施工前需对疏浚土层进行疏浚分级, 疏浚土层抗剪强度是进行疏浚分级的判别指标<sup>[1]</sup>, 土的抗剪强度指土体抵抗剪切破坏的能力, 与其应力组合密切相关, 即土的抗剪强度不是固定不变的数值, 而是与土的应力状态有关, 土体破坏时的应力组合关系即破坏准则<sup>[2]</sup>。前人根据对试验的分析提出了不同的假设, 出现各种不同的破坏理论, 工程上最常用的是摩尔-库仑理论, 其中土体的破坏公式为:

$$\tau = C + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中:  $\tau$  为土的抗剪强度 (kPa);  $\sigma$  为土的正应力 (法向应力) (kPa), 根据上覆土层分层计算, 土层

的深度取该层厚度的中间值;  $\varphi$  为内摩擦角 (°);  $c$  为黏聚力 (kPa)。

按照  $\tau$  的数值将疏浚黏性土分级。JTS 181-5—2012《疏浚与吹填工程设计规范》条文说明中也是采用式(1)计算土体的抗剪强度。

## 2 土的正压力计算

岩土疏浚一般为水下工程, 施工时作用于刀具上的力有 2 种: 一种为土壤和刀具的作用力; 另一种是水的压力<sup>[3]</sup>。JTS 181-5—2012《疏浚与吹填工程设计规范》中规定土的正压力根据上覆土层分层计算, 没有给出具体的算法。按公式计算正压力时是否把上覆水作为特殊土层来考虑;

JTS 147—2017《水运工程地基设计规范》中进行土应力计算时,水下土层的计算多采用浮密度,本文从有效应力原理的角度对抗剪强度计算公式加以分析。

有效应力原理是太沙基在发表渗透固结理论时同时提出的,他认为施加在土体上的压力可以分为2部分,一部分由孔隙水承受,一部分由土体骨架承受,根据此理论,总应力中只有作用于土体骨架的部分才能有效影响土体的密度和强度,这部分力称为有效应力。

有效应力计算公式为:

$$\sigma' = \sigma_{\text{总}} - \mu \quad (2)$$

式中:  $\sigma'$  为有效应力;  $\sigma_{\text{总}}$  为上覆土和上覆水的重力之和;  $\mu$  为孔隙水压力。

有效应力理论下土的强度公式为:

$$\tau = c + (\sigma_{\text{总}} - \mu) \tan \varphi \quad (3)$$

疏浚土层位于水下,土层处正压力为自重压力,即上覆土层与上覆水的重力之和:

$$\sigma_{\text{总}} = \sigma + \sigma_{\text{水}} \quad (4)$$

疏浚条件水下有效应力理论下土的强度公式为:

$$\tau = c + (\sigma + \sigma_{\text{水}} - \mu) \tan \varphi \quad (5)$$

当孔隙水与环境水连通时,  $\sigma_{\text{水}} = \mu$ , 计算公式与式(1)相同。

由此可见, JTS 181-5—2012《疏浚与吹填工程设计规范》中土的强度计算公式是有效应力原理中计算公式的变形,公式中的  $\sigma$  根据上覆土层分层

计算,不应计算上覆水的重力,计算时取上覆土层的天然密度进行计算。

疏浚规范基于有效应力原理得出的黏性土抗剪强度计算公式的前提应该是土层处于饱和状态,孔隙水与环境静水具有力学意义上的连通性,静水压力与孔隙水压力相等的情况下该公式是适用的。

对于非饱和的黏性土,如坚硬状态的土液性指数  $I_L \leq 0$  时,土处于固体状态,土中自由水受到土颗粒间结合水膜的阻碍不能传递静水压力,计算疏挖土层抗剪强度时应考虑静水压力的影响;当疏浚施工(铰刀切割的压剪作用可能在黏土表面形成致密不透水面)或其他原因破坏了孔隙水与环境水的力学连通的情况下,静水压力与土层内孔隙水压力不一致,如水深较大,建议计算疏挖土层抗剪强度时适度考虑静水压力的影响。

### 3 抗剪强度试验方法的选择

疏浚刀具对土体的切割属于剪切破坏,疏浚土的抗剪强度可以通过室内剪切试验来确定。刀具切割破坏的速度很快,土体内孔隙水来不及消散,切割过程就已经完成,因此疏挖刀具切割土体的剪切形式属于不排水条件的快速剪切破坏。

JTS 181-5—2012《疏浚与吹填工程设计规范》中抗剪强度公式未明确抗剪强度的试验方法,但在“5.4 节疏浚区勘查与试验”的 5.4.12 条规定了疏浚黏性土的基本和附加试验项目,见表 1。

表 1 疏浚岩土试验项目

岩土名称	标贯 击数	比重	颗粒 分析	天然 密度	天然 含水量	界限 含水率	抗剪强度		动力 触探	岩石抗 压强度	相对 密度	有机质 含量	附着 力	碳酸盐 含量	矿物 成分	吸水 率	流变 特性	渗透 性	压实 特性	超固 结比	灵敏 度
							直剪	固结 快剪													
黏土	△	△	√	△	△	△	△	√	-	-	-	√	√	-	√	-	-	-	-	√	√
粉质黏土	△	△	√	△	△	△	△	√	-	-	-	√	√	-	√	-	-	-	-	√	√

注:“△”表示必须做,“√”表示根据情况选做,“-”表示一般不做。

由试验项目分析,直剪快剪强度试验是必选项,同时可参考固结快剪的试验结果。通过分析各类土工试验的机理和使用条件,说明规范中土工试验指标选取的原因。

直剪试验是目前使用最多的测定土的抗剪强度的试验方法,一般用于测定细粒土的  $c$  和  $\varphi$  值,通常每组取 4 个试样,在 4 种不同垂直压力(一般在 100~400 kPa)下进行剪切试验,测得剪应力与

位移关系曲线, 取曲线上的峰值剪应力(若无峰值取剪切位移达 4 mm 时的强度值)作为该垂直压力下的抗剪强度, 以同样的方法求得不同垂直应力下的抗剪强度。以剪应力  $\tau$  为纵坐标, 垂直应力  $\sigma$  为横坐标, 绘制  $\tau-\sigma$  关系曲线。黏性土的抗剪强度直线在纵坐标上的截距即为土的黏聚力  $c$ , 此直线的倾角为土的内摩擦角  $\varphi$ 。

直剪试验具有仪器简单、制备和安装方便等优点, 但仪器构造决定了该试验具有试样非岩土样中最薄弱部分、剪切面上的剪应力分布不均匀、排水条件不能有效控制等缺点, 直剪试验多用于二、三类普通工程, 直剪设备<sup>[4]</sup>见图 1。

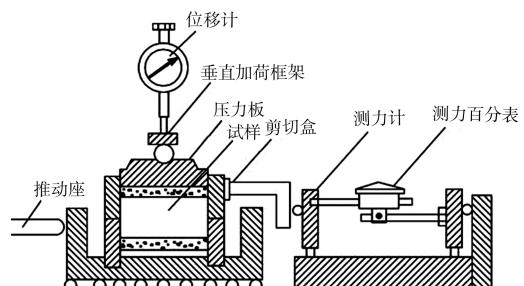
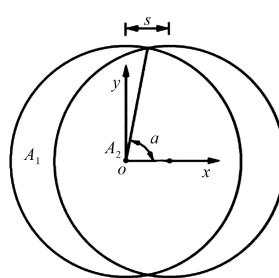
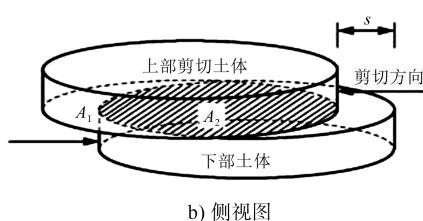


图 1 应变控制式直剪仪结构

剪切过程中的基本假设: 1) 剪切面贯通且平直; 2) 压力板和透水石施加的压力均匀分布; 3) 忽略剪切侧壁左端与试样之间的作用力; 4) 有效剪切面和非有效剪切面上的应力均匀分布。对上部剪切土样进行受力分析, 其受力物理模型<sup>[5]</sup>见图 2。



a) 平面图



b) 侧视图

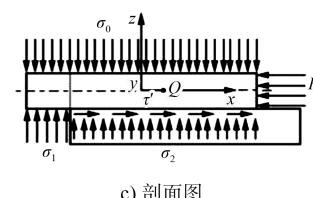


图 2 直剪过程土样受力物理模型

不排水条件下的直剪试验又可分为以下 2 种常用的试验方法:

1) 直剪快剪试验: 适用于渗透系数小于  $10^{-6}$  cm/s 的细粒土, 是在试样施加垂直压力后立即快速剪切, 一般用 0.8 mm/min 的速度在 3~5 min 内剪损, 目的是在剪切过程中尽量避免排水, 使试验前后的含水率接近。当土体透水性较差、排水不良时可采用这种方法。

2) 固结快剪试验: 是在试样上施加垂直压力待排水固结稳定后, 再快速施加水平剪切力进行剪切, 剪切过程同样避免排水。通过不同的剪切速率控制试样的排水条件, 但渗透性大的土类在快剪中仍会排水, 所以这种方法同样只适用于渗透系数小于  $10^{-6}$  cm/s 的土样, 所测结果比快剪稳定。

疏浚工程中疏挖刀具切割土体的剪切形式属于不排水条件的快速剪切破坏。考虑到疏浚过程中黏性土处于水压之下, 在疏浚环境下土体在变化的围压环境中处于相对稳定状态, 与固结快剪的试验条件更接近, 建议在取值时考虑采用直剪试验结果计算抗剪强度。

#### 4 试验指标的修正

通过土工试验可以得到多组对应土层的抗剪强度试验数据, 由于土层的非均质性, 试验指标差异在所难免, 如果采用平均值计算土体的抗剪强度, 将有约 50% 的地段实际强度大于计算强度值, 据此判定疏浚岩土分级, 会导致配备的疏浚机具可能无法满足生产需要; 如选用试验指标的最大值计算土体的抗剪强度, 并判定疏浚岩土分级, 配备的疏浚机具则可能造成浪费。需要找到一个合理的指标来表征土体的强度, 合理指导生

产。建议采用抗剪强度标准值作为计算土体抗剪强度的计算值, 步骤如下:

1) 按下列公式计算变异系数、某一土性指标的试验平均值和标准差:

$$\delta = \sigma / \mu \quad (6)$$

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n} \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n u_i^2 - n\mu^2}{n-1}} \quad (8)$$

式中:  $\delta$  为变异系数;  $\mu$  为某一土性指标的试验平均值;  $\sigma$  为标准差;  $n$  为样本个数。

2) 按下列公式计算内摩擦角和黏聚力的统计修正系数:

$$\Psi_\varphi = 1 + \left( \frac{1.704}{\sqrt{n}} + \frac{4.678}{n^2} \right) \delta_\varphi \quad (9)$$

$$\Psi_c = 1 + \left( \frac{1.704}{\sqrt{n}} + \frac{4.678}{n^2} \right) \delta_c \quad (10)$$

式中:  $\Psi_\varphi$  为内摩擦角的统计修正系数;  $\Psi_c$  为黏聚力的统计修正系数;  $\delta_\varphi$  为内摩擦角的变异系数;  $\delta_c$  为黏聚力的变异系数。

3) 计算抗剪强度指标标准值:

$$\varphi_k = \Psi_\varphi \varphi_m \quad (11)$$

$$c_k = \Psi_c c_m \quad (12)$$

式中:  $\varphi_k$  为内摩擦角的标准值;  $\varphi_m$  为内摩擦角的试验平均值;  $c_k$  为抗剪强度标准值;  $c_m$  为黏聚力

(上接第 140 页)

4) 对场地吹填土地基处理后的参数进行预测, 当采用真空预压方式处理吹填土地基时, 在不采取其他措施的情况下, 吹填土的极限含水率为 44%, 孔隙比为 1.23, 密度为  $1.78 \text{ g/cm}^3$ 。

## 参考文献:

- [1] 杜东菊, 杨爱武, 刘举, 等. 天津滨海吹填土 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 孙立强. 超软吹填土地基真空预压理论及模型试验的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [3] 吴春勇. 真空联合堆载预压软土路基稳定控制与沉降

的试验平均值。

## 5 结语

1) JTS 181-5—2012《疏浚与吹填工程技术规范》中关于黏性土抗剪强度计算公式中正应力的计算应取上覆土层的天然密度进行计算。

2) 通过室内试验取得土层抗剪强度指标的土工试验方法宜采用直剪快剪试验方法, 并参考固结快剪试验成果。

3) 建议采用修正后的抗剪强度指标标准值计算土层的抗剪强度。

## 参考文献:

- [1] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 中交天津港航勘察设计研究院有限公司. 疏浚与吹填工程设计规范: JTS 181-5—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [2] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [3] MIEDEMA S A. New developments of cutting theories with respect to offshore applications [C] // International offshore and polar engineering conference, Beijing: [ s. n. ], 2010: 694-701.
- [4] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [5] 余凯, 姚鑫, 张永双, 等. 基于面积和应力修正的直剪试验数据分析 [J]. 岩石力学与工程学报. 2014, 33 (1): 118-124.

(本文编辑 王传瑜)

预测 [D]. 长春: 吉林大学, 2007.

- [4] 岑仰润. 真空预压加固地基的试验及理论研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [5] 邹燃. 天津滨海新区吹填土固结前期微观特征及沉降过程模拟研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [6] 张云冬, 张乾, 程瑾, 等. 真空预压地基土体沉降及强度增长特征 [J]. 水运工程, 2015 (12): 148-152, 160.
- [7] 程瑾, 张云冬, 张乾, 等. 真空预压法处理高液限黏土适用性模型试验研究 [J]. 水运工程, 2015 (11): 155-159.
- [8] 鲍树峰, 董志良, 莫海鸿, 等. 高黏粒含量新吹填淤泥加固新技术室内研发 [J]. 岩土力学, 2015, 36 (1): 61-67.

(本文编辑 王传瑜)