

中华人民共和国海洋行业标准

HY/T XXXXX—XXXX

海洋饱和软黏土强度的测定 微型十字板
剪切仪法

Determination of shear strength of saturated marine soft clay—miniature shear vane
apparatus method

(报批稿)

XX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

中华人民共和国自然资源部 发布

目 次

前言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 仪器及组件要求.....	3
4.1 仪器组成.....	3
4.2 十字板板头组件.....	3
4.3 扭矩测量组件.....	3
4.4 数据记录或显示组件.....	5
5 仪器标定.....	5
5.1 标定时间要求.....	5
5.2 标定器具要求.....	5
5.3 机械式微型十字板剪切仪标定.....	5
5.4 电测式微型十字板剪切仪标定.....	6
6 剪切试验.....	7
6.1 试验土样准备及要求.....	7
6.2 试验流程.....	7
7 抗剪强度计算.....	8
8 试验数据记录、计算及整理.....	9
附录 A（资料性）抗剪强度计算.....	11
附录 B（资料性）试验记录表.....	13
参考文献.....	15

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由自然资源部提出。

本文件由全国海洋标准化技术委员会（SAC/TC283）归口。

本文件起草单位：自然资源部南海发展研究院、中国海洋大学、华南理工大学、国家海洋标准计量中心、南京土壤仪器厂有限公司。

本文件主要起草人：王亮、张民生、周密、袁玲玲、茅加峰、严金辉、郑兆勇。

海洋饱和软黏土强度的测定 微型十字板剪切仪法

1 范围

本文件规定了微型十字板剪切仪测定饱和软黏土不排水抗剪强度的仪器及组件要求、仪器标定方法、试验步骤与要求和试验数据采集与处理方法等。

本文件适用于海洋原状或重塑饱和软黏土的不排水抗剪强度和灵敏度的室内或野外现场测定。其它饱和软黏土的不排水抗剪强度和灵敏度可参照本文件执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款，其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 4934.2-2008 土工试验仪器 剪切仪 第2部分：现场十字板剪切仪

GB/T 50279-2014 岩土工程基本术语标准

3 术语和定义

GB/T 50279-2014界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

微型十字板剪切仪 miniature shear vane apparatus

一种利用十字板板头测量土样不排水抗剪强度的仪器设备，应由十字板板头组件、扭矩测量组件、数据记录或显示组件等组成。

注：微型十字板剪切仪按扭矩测量原理分为机械式和电测式两种。

3.2

机械式微型十字板剪切仪 miniature mechanical shear vane apparatus

扭矩测量组件为扭力弹簧的微型十字板剪切仪。

3.3

电测式微型十字板剪切仪 miniature electrical shear vane apparatus

扭矩测量组件为扭矩传感器的微型十字板剪切仪。

3.4

原状土不排水抗剪强度 undrained shear strength of intact soil

c_u

原状土不排水条件下受剪时产生的最大剪切强度。

3.5

重塑土不排水抗剪强度 undrained shear strength of remolded soil

c_{ur}

重塑土不排水条件下受剪时产生的最大剪切强度。

3.6

土样灵敏度 sensitivity of soil

S_t

原状土抗剪强度 c_u 与该土样重塑之后的不排水抗剪强度 c_{ur} 之比。

[来源：GB/T 4934.2-2008，3.3，有修改]

3.7

扭力弹簧 torque spring

用于测量扭矩的弹性弹簧。

注：扭矩大小与弹簧的扭转度（°）成正比。

3.8

扭矩传感器 torque transducer

用于测量扭矩的电子测量元件。

注：扭矩传感器将扭力的物理变化转换成精确的电信号。

3.9

十字板面积比 area ratio of vane

十字板板头和轴杆的横截面积与十字板旋转所形成圆柱面的横截面积之比。

注：十字板面积比以A表示，其计算公式如下：

$$A = \frac{8e(D-d) + \pi d^2}{\pi D^2} \times 100\%$$

式中：

A—十字板面积比，%；

e—十字板板头厚度，单位为毫米（mm）；

D—十字板板头宽度，单位为毫米（mm）；

d—轴杆直径，单位为毫米（mm）。

[来源：GB/T 4934.2-2008，3.4，有修改]

4 仪器及组件要求

4.1 仪器组成

本方法所使用的微型十字板剪切仪应由十字板板头组件、扭矩测量组件、数据记录或显示组件等组成。

4.2 十字板板头组件

十字板板头组件由两片正交的矩形金属板组成，应满足以下要求：

——表面光滑，粗糙度小于Ra100；

——板的高宽比（H:D）有2:1与1:1两种规格，十字板结构示意图如图1所示；

——十字板的宽度宜为12.7 mm~25.4 mm；

——十字板面积比（A）应小于15%，十字板面积比计算示意图如图2所示。

4.3 扭矩测量组件

扭矩测量组件包括扭矩传感器和扭力弹簧。

扭矩传感器应满足以下要求：

- 精度应优于 $\pm 0.5\% \text{ F S}$;
- 线性误差应小于 $\pm 0.2\% \text{ F S}$;
- 重复性应小于 $\pm 0.2\% \text{ F S}$;
- 零漂误差应小于 $\pm 0.2\% \text{ F S}$ 。

扭力弹簧的剪切应力误差应控制在仪器量程的5%以内。

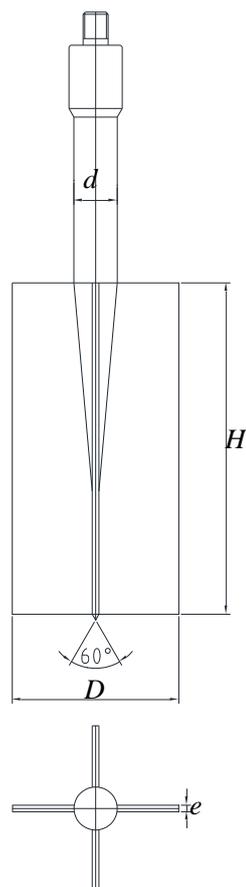


图1 十字板结构示意图

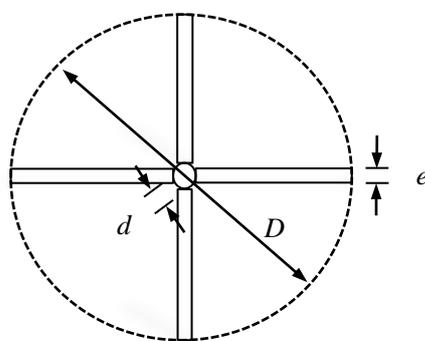


图2 十字板面积比计算示意图

4.4 数据记录或显示组件

数据记录仪采样率应不低于10次/s，采样精度应大于12位（将量程分为 2^{12} ）且带有滤波功能。

仪器可显示或记录试验过程中电子扭矩传感器的扭矩或强度、十字板的旋转角度。显示组件应显示至少小数点后1位有效数字。

5 仪器标定

5.1 标定时间要求

为确保微型十字板剪切仪的规范操作和扭力弹簧或电子扭矩传感器的可重复性，应定期标定扭力弹簧或电子扭矩传感器。每次标定的使用时效宜不超过1年，在使用过程中出现异常应重新标定，标定时所用的传感器、导线和测量仪器应与试验时相同。

5.2 标定器具要求

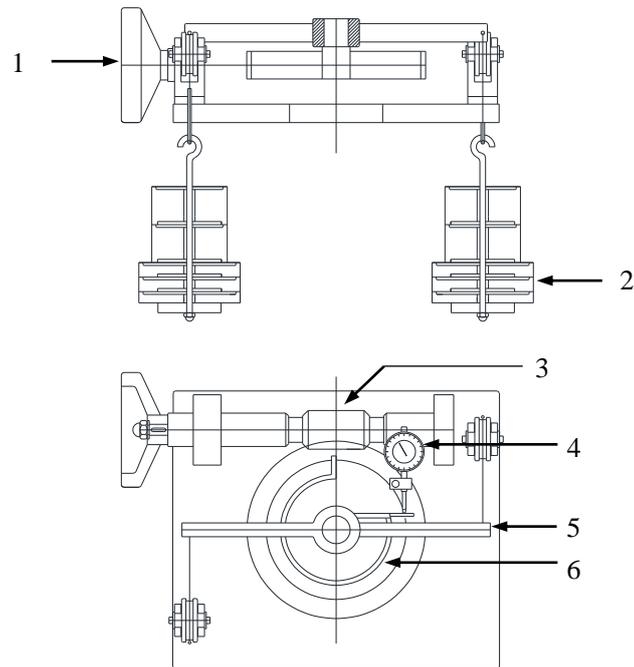
标定器具应满足以下要求：

- 砝码质量误差应小于0.2%；
- 标准力臂长度误差应小于0.2%；
- 具有滚动轴承的滑轮；
- 导引线应为柔性、满足刚度要求的钢丝绳；
- 满足百分表检定要求、量程5 mm的百分表。

5.3 机械式微型十字板剪切仪标定

牢固安装标定器具，在已知的扭矩作用下测定扭力弹簧的变形量，建立扭矩与变形量的关系。将满量程分为8~10个等级，依次在两个力臂端同时施加砝码，读取百分表读数。

机械式微型十字板剪切仪标定示意图如图3所示。



说明：

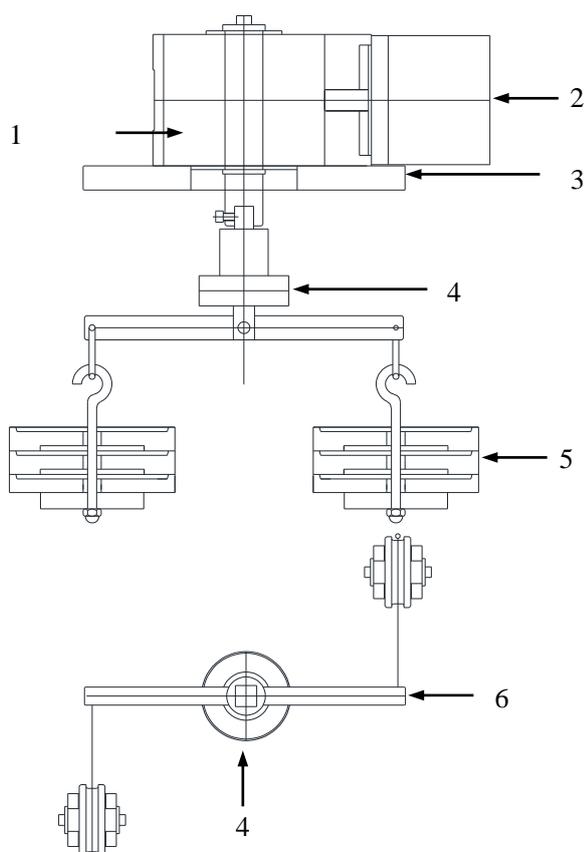
1—手轮 2—砝码 3—蜗轮蜗杆付 4—百分表 5—标定力臂 6—扭力弹簧

图3 机械式微型十字板剪切仪标定示意图

5.4 电测式微型十字板剪切仪标定

牢固安装标定器具，在已知的扭矩作用下测定扭矩传感器的数显值，建立扭矩与数显值的关系。将满量程分为 8~10 个等级，依次在两个力臂端同时施加砝码，读取数显值。

电测式微型十字板剪切仪标定示意图如图4所示。



说明：

1—减速机 2—步进电机 3—固定架 4—扭矩传感器 5—砝码 6—标定力臂

图4 电测式微型十字板剪切仪标定示意图

6 剪切试验

6.1 试验土样准备及要求

一般情况下，十字板剪切试验是十字板插入到取样管中对土样进行测试。土样高度应大于6倍十字板板头宽度($6D$)，十字板板头顶端与上一深度的土样剪切面底面距离应大于2倍十字板板头宽度($2D$)。如有需要，同一土样可在同一高度的不同位置进行平行剪切试验测试，任意十字板剪切面与其水平相邻十字板剪切面和土样外边缘间的距离应大于1倍十字板板头宽度($1D$)。试验前，用削土刀整平土样表面，并将其固定在十字板板头正下方，依据土样软硬程度选用相应尺寸和规格的十字板板头，并与十字板剪切仪连接。

6.2 试验流程

试验流程如下：

- a) 试验前检查各部件连接是否正常可靠；
- b) 将十字板板头对准土样中心，垂直插入土样直至十字板板头顶端距离土样表面至少2倍十字板板头宽度，然后静置2 min ~3 min；
- c) 将采集仪或刻度表调零或读取初始读数；
- d) 顺时针方向以6 r/min ~12 r/min转速旋转十字板（速率误差10%以内）。可每转1°记录扭转度和扭矩读数1次，当扭矩读数出现峰值或稳定值（波动不超过5 %）后，记录扭转度和扭矩读数，再继续旋转测记一段时间（宜1 min左右）。该扭矩峰值或稳定值即为原状土剪切破坏时的扭矩值；
- e) 在上述剪损土样基础上，立即进行重塑土抗剪强度的测定。将十字板板头按顺时针方向快速旋转6 圈后，重复上一步操作测定重塑土抗剪强度；
- f) 剖开土样，对破坏面进行描述，选破坏面处土样测定含水率，并对破坏面拍照；
- g) 如需测量较深处土样的抗剪强度，除按照本条第b) ~e) 项规定外，还应修正轴杆与土样之间的摩阻力影响，以减小试验误差。方法是将未安装十字板板头的轴杆插入同样深度的土样中测量轴杆的扭矩，将十字板板头实际测试扭矩减去该轴杆的扭矩即为土样的扭矩。

7 抗剪强度计算

抗剪强度计算的相关推导信息参见附录A。

根据十字板剪切的原理，原状土抗剪强度 c_u 按公式（1）计算：

$$c_u = \frac{M_{\max}}{\frac{\pi D^2}{2} \left(H + \frac{D}{3} \right)} \quad (1)$$

式中：

c_u —— 原状土抗剪强度，单位为千帕（kPa）。

M_{\max} —— 外力施加在十字板板头上的最大扭矩，单位为牛米（N·m）；

D —— 十字板板头宽度，单位为米（m）；

H —— 十字板板头高度，单位为米（m）。

与十字板板头尺寸相关的常数 k 的定义为公式（1）中与十字板的剪切面积有关的部分，即：

$$k = \frac{1}{\frac{\pi D^2}{2} \left(H + \frac{D}{3} \right)} \quad (2)$$

式中：

k —— 十字板板头尺寸相关的常数。

把 k 值代入公式 (1) 可得：

$$c_u = kM_{\max} \quad (3)$$

由公式 (3) 可知，原状土抗剪强度与最大扭矩之间存在一一对应的关系，只要测得最大扭矩即可计算出对应的原状土抗剪强度。

重塑土抗剪强度 c_{ur} 按公式 (4) 计算：

$$c_{ur} = kM_r \quad (4)$$

式中：

c_{ur} —— 重塑土抗剪强度，单位为千帕 (kPa)；

M_r —— 重塑试验扭矩，单位为牛米 (N·m)。

土样灵敏度 S_t 按公式 (5) 计算：

$$S_t = \frac{c_u}{c_{ur}} \quad (5)$$

式中：

S_t —— 土样灵敏度。

8 试验数据记录、计算及整理

8.1 按照第7章的规定对试验数据进行记录、计算及整理。

8.2 试验记录表和试验成果汇总表应包含如下信息：

- a) 试验者、计算者、校核者、试验日期和试验环境 (温度和湿度)；
- b) 工程名称、钻孔编号、样品编号、样品深度、土样类型和含水率；
- c) 十字板剪切仪仪器型号、扭力弹簧类型、十字板尺寸、与十字板板头尺寸相关的常数 k 值和十字板剪切速率；
- d) 百分表读数、最大扭矩读数、原状土抗剪强度 (c_u)、根据需要记录中间扭转度和扭矩读数和绘制各试验点的十字板抗剪强度与旋转角度的关系；

- e) 百分表读数、重塑试验扭矩读数和重塑土抗剪强度 (c_{ur});
- f) 记录与标准试验步骤不同的地方;
- g) 对样品及破坏面、试验过程拍彩照。

8.3 试验记录表和试验成果汇总表, 参见表B.1~表B.4。

附录 A
(资料性)
抗剪强度计算

当转动插入土样中的十字板板头时，在土样中产生的破坏状态与圆柱体类似，如图A.1所示。

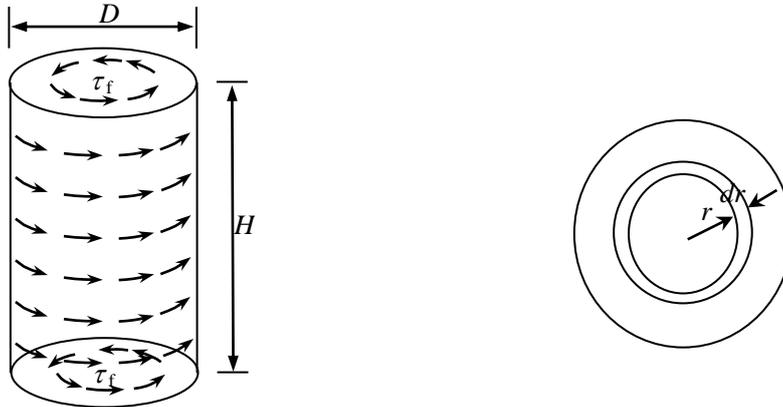


图 A.1 十字板圆柱形破坏面的强度分布图

在推算强度时假定：

- (1) 剪切破坏面为圆柱面，圆柱面的直径和高度分别等于十字板板头的宽度和高度。
- (2) 圆柱面的侧面和上下端面上的抗剪强度 τ_f 为均匀分布并相等，且同时发挥。

根据外力施加在十字板板头上的最大扭矩等于圆柱侧面上的抗剪力对轴心的抵抗扭矩和上下端面上的抗剪力对轴心的抵抗扭矩之和的原理计算土样的抗剪强度，公式如下：

$$M_{\max} = M_1 + M_2 \quad (\text{A.1})$$

式中：

M_{\max} ——外力施加在十字板板头上的最大扭矩，单位为牛米 (N·m)；

M_1 ——圆柱侧面上的抵抗扭矩，单位为牛米 (N·m)

M_2 ——上下端面上的抵抗扭矩，单位为牛米 (N·m)

圆柱侧面上的抵抗扭矩为

$$M_1 = \tau_f \pi D H \frac{D}{2} \quad (\text{A.2})$$

式中：

τ_f ——土样的抗剪强度，单位为千帕 (kPa)；

D ——十字板板头宽度，单位为米 (m)；

H ——十字板板头高度，单位为米 (m)。

上下端面上的抵抗扭矩为

$$M_2 = 2 \int_0^{\frac{D}{2}} r \tau_f 2\pi r dr = \tau_f \frac{\pi D^2}{2} \frac{D}{3} \quad (\text{A.3})$$

式中：

r ——微分单元到端面中心的距离，单位为米（m）。

将公式（A.2）和公式（A.3）代入公式（A.1），可得

$$M_{\max} = \tau_f \frac{\pi D^2}{2} H + \tau_f \frac{\pi D^2}{2} \frac{D}{3} \quad (\text{A.4})$$

经整理，土样的抗剪强度 τ_f 为

$$\tau_f = \frac{M_{\max}}{\frac{\pi D^2}{2} \left(H + \frac{D}{3} \right)} \quad (\text{A.5})$$

饱和土样在不固结不排水剪切试验中 $\varphi_u = 0$ ，所以 $\tau_f = c_u$ ，则原状土抗剪强度 c_u 按公式（A.6）计算：

$$c_u = \frac{M_{\max}}{\frac{\pi D^2}{2} \left(H + \frac{D}{3} \right)} \quad (\text{A.6})$$

式中：

c_u ——原状土抗剪强度，单位为千帕（kPa）。

表B.3 电测式微型十字板剪切试验记录表

工程名称： 钻孔编号：
 仪器型号： 十字板尺寸： $D =$ mm； $H =$ mm
 与十字板板头尺寸相关的常数 k 值： 十字板剪切速率：
 试验者： 试验日期： 试验环境：

样品 编号	样品深度 (顶部-底部) (m)	土样 类型	原状土		重塑土		备注
			最大扭矩读数 M_{\max} (N·m)	抗剪强度 c_u (kPa)	重塑试验扭 矩读数 M_r (N·m)	抗剪强度 c_{ur} (kPa)	

表B.4 电测式微型十字板剪切试验成果汇总表

工程名称： 钻孔编号：
 试验者： 计算者： 校核者： 试验日期： 试验环境：

样品 编号	样品深度 (顶部-底部) (m)	土样 类型	土样含水率 (%)	原状土	重塑土	灵敏度 S_t	备注
				抗剪强度 c_u (kPa)	抗剪强度 c_{ur} (kPa)		

参 考 文 献

- [1] ASTM Standard D 4648-05 Standard test method for laboratory miniature vane shear test for saturated fine-grained clayey soil
- [2] British Standard 1377-7 Methods of test for soils for civil engineering purposes
- [3] GB/T 15406-2007 岩土工程仪器基本参数及通用技术条件
- [4] GB/T 50123-2019 土工试验方法标准
-