

# 海上原位十字板剪切试验方法介绍\*

姚首龙, 郑喜耀

(中海油田服务股份有限公司, 天津 塘沽 300451)

**摘 要:**在海洋工程地质勘察中,海上原位十字板剪切试验能够获得海底原位土体的剪切强度,其测试成果已成功应用于工程实践,本文主要从原位十字板剪切的试验原理、设备种类、测试机理、进行剪切试验所具备的若干技术要求、影响剪切试验的几个因素、测试数据进行室内处理的原理及工程实际应用等方面做简要的介绍,最后总结得出进行原位十字板剪切试验时若严格按照试验的技术要求进行试验,并掌握影响试验结果的若干因素,得到的黏性土的不排水抗剪强度值,可应用于实际工程设计并提供可靠的岩土设计参数。

**关键词:**海上原位十字板;剪切试验;试验原理;不排水抗剪强度

**中图分类号:** P642

**文献标识码:** A

海上原位十字板剪切试验(Offshore in-situ Vane Shear Test, VST)<sup>[1]</sup>是针对饱和黏土进行的一项现场原位不排水抗剪强度的测试试验,是海洋工程地质勘察中非常重要的原位测试方法之一。这种方法最初是由瑞典人在 1919 年提出来的,一直到 40 年代得到了巨大发展。在此期间,英国 Skempton 等人结合  $\varphi=0$  原理的概念及其应用上作了很大的贡献<sup>[2]</sup>。此后,这种方法在国外的海洋工程地质勘察中得到了非常广泛的应用。但是,在我国受技术、设备的限制等原因,在 50 年代才由南京水利科学院引进,至 60 年代在沿海诸省及多条河流的冲积平原软黏土地区得到了广泛应用。历时十余年的工作奠定了原位十字板剪切试验在我国应用的基础。此后,我国很多陆地勘察院所在设备的改进和应用实验方面做了大量工作,该项技术的应用已经相当成熟,但在海洋工程地质勘察中,此种试验由于受海上风浪、潮流等多种客观因素的影响,其应用还是很少。近年来,中国海洋石油勘探开发项目部与国外公司合作,在南海进行了几个场址的钻孔内原位十字板剪切试验,获得了宝贵的海底饱和黏土原位抗剪强度的测试资料,开辟了我国海上应用原位十字板剪切试验的历史。本文主要介绍海上原位十字板剪切试验的方法及在海洋工程地质勘察中的应用。

## 1 原位十字板剪切试验的原理、设备及机理

### 1.1 试验原理

海上原位十字板剪切试验是一种通过在海底钻孔内对插入孔底黏土中的规定形状和

\* 收稿日期:2015-01-22

作者简介:姚首龙(1983-),男,工程师,学士,主要从事海洋工程地质方面研究. E-mail: yaoshl3@cosl.com.cn

(王 燕 编辑)

尺寸的十字板头施加扭矩,使十字板头在土体中匀速扭转形成圆柱状破坏面,通过换算、评价黏土不排水抗剪强度及其灵敏度等指标的现场原位测试方法<sup>[1]</sup>。这种原位试验方法所获得的抗剪强度值,等同于目的测试深度处天然黏土在原位压力下的不排水抗剪强度,而且它不需要从海底取土样,避免了取样对土的扰动及天然应力状态的改变,是一种有效的原位测试方法。

### 1.2 试验设备

原位十字板剪切试验所需设备包括试验所用的轴杆、驱动装置、测力与记录单元和十字板等试验设备。

通常使用的轴杆材质一般为不锈钢型,直径约为 20 mm。十字板头由两块相互垂直相交的高强度薄金属板构成(图 1),图中  $D$  为十字板的直径, $L$  为扭力杆的长度,一般为 10 倍的十字板直径, $H$  为十字板的高度,一般为 2 倍的十字板直径。十字板厚一般为 2 mm,常见的有矩形十字板和锥形十字板两种<sup>[2]</sup>,其高径比通常为 2.0~2.5。轴杆与十字板头之间通过焊接的方式连接。驱动装置是通过给轴杆施加扭矩,让轴杆带动十字板头以一定速度往同一方向旋转,测力与记录单元是通过扭力传感器将十字板头与轴杆相连接,测出十字板旋转的扭转力矩,并实时记录所测力矩值和旋转角度的关系。

### 1.3 试验机理

使用时将十字板插入土中,通过驱动装置施加扭力于轴杆上,使十字板在土中转动,形成圆柱剪切面,如图 2 所示, $D$  为十字板的直径, $H$  为十字板的高度, $T$  为扭矩。通过测力与记录单元测出最大扭转力矩,由此得出土的抗剪强度。

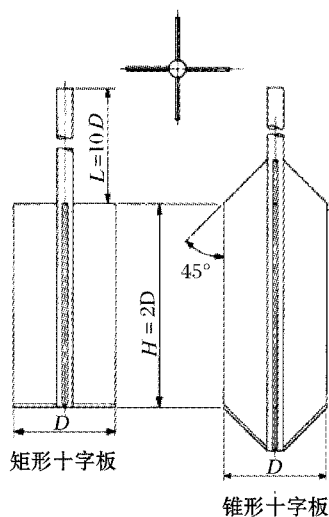


图 1 十字板截面和俯视图

Fig. 1 Vane section and top view chart of rectangular vane and tapered vane

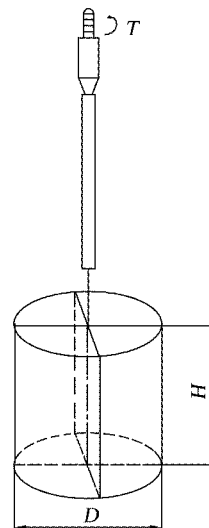


图 2 十字板转动形成的圆柱剪切面

Fig. 2 Cylindrical shear surface formed by rotation of vane

设剪切破坏时所施加的扭矩为  $T$ ,则其等于剪切破坏圆柱面(包括侧面和上下面)上土的抗剪强度所产生的抗扭力矩,即

$$S_u = \frac{T}{K} \quad (1)$$

式中,  $S_u$  为现场测定的十字板强度,单位为  $\text{kN}/\text{m}^2$ ;  $T$  为剪切破坏时的扭矩,单位为  $\text{kN} \cdot \text{m}$ ;  $K$  为常数,取决于十字板的尺寸和形状,单位为  $\text{m}^3$ ,计算  $K$  值的公式如下:

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

式中,  $H$  为十字板的高度(m);  $D$  为十字板的直径(m)。若  $H/D=2$ ,则公式(2)可简化为

$$K = 3.665D^3 \quad (3)$$

由上可知,推算十字板强度过程中有两个假定:①剪破面为一圆柱面,圆柱的直径和高度等于十字板的宽度和高度;②圆柱侧面和上、下底面的强度相等,且在圆柱侧面和上、下底面同时响应<sup>[1]</sup>。

## 2 原位十字板剪切试验的技术要求

1) 钻孔原位十字板剪切试验时,十字板头插入孔底以下的深度不应小于 5 倍钻孔直径<sup>[6]</sup>,以保证十字板能在未扰动土中进行剪切试验,且在插入十字板时不应在十字板钻杆上施加扭力,尽量避免钻杆摆动等对十字板剪切时的影响<sup>[1]</sup>。

2) 一般情况下,在同一孔内进行不同深度点的剪切试验时,十字板试验深度间距不小于  $0.5 \sim 1.0 \text{ m}$ <sup>[1]</sup>。

3) 为保证十字板头旋转时不发生摆动,试验所用探杆必须平直,十字板与探杆之间通常连接有固定作用的限位十字叶片。

4) 十字板头插入土中试验深度后,应静置  $2 \sim 5 \text{ min}$ <sup>[1]</sup>,方可开始剪切试验。因为插入时在十字板头四周产生超孔隙水压力,静置时间过长,孔隙压力消散会使有效应力增长,使不排水抗剪强度增大;若静置时间过短,土稍稍被扰动还来不及恢复,测出的强度值可能偏低。

5) 扭剪速率需均匀,并控制在一定值。剪切速率过慢,由于排水导致强度增长。剪切速率过快,对于饱和软黏土,由于黏滞效应,也使强度增长。扭剪速率宜采用  $(0.1^\circ \sim 0.3^\circ)/\text{s}$ ,以此作为统一的标准速率,以便能在不排水条件下进行剪切试验,峰值强度应在  $2 \sim 5 \text{ min}$  时间内测得。可每秒记录一个扭矩值,当扭矩出现峰值或稳定值后要继续测读  $1 \text{ min}$ ,以便确认峰值或稳定扭矩<sup>[1]</sup>。

6) 在峰值强度或稳定值强度出现后,将十字板顺剪切扭转方向快速连续转动 10 圈<sup>[1]</sup>,使十字板头周围土体充分扰动,然后在原深度位置处按上述方法测定重塑土的不排水强度。

7) 对于原位十字板剪切仪的标定,主要是扭力传感器的标定,应定期标定,一般应 3 个月标定一次,如使用过程中出现异常,也应重新标定。值得注意的是标定时所用的传感器、导线和测量仪器应与试验时相同。

## 3 原位十字板剪切试验的影响因素

1) 十字板头规格的影响。十字板头的规格是指十字板的高度( $H$ )、直径( $D$ )、板厚及

轴杆直径。这些尺寸对总扭矩值、对周围土体扰动程度都有直接影响。目前,国内外已有较统一的规格。一般  $H/D$  为 2.0~2.5,板厚约为 2~3 mm<sup>[1]</sup>。此外,十字板及轴杆都采用高强度钢,以保证十字板头具有足够的刚度。

2) 十字板旋转速率的影响。旋转速率对剪切试验结果影响很大。一般对于高塑性黏土,抗剪强度随剪切速率的增大而增大,而且增长得很快;对于低塑性黏土,抗剪强度值随剪切速率变化的幅度不大。目前,国内外大多采用  $(0.1^\circ\sim 0.3^\circ)/s$  的旋转速率,此时黏性土基本属于不排水状态。

3) 土的各向异性的影响。所谓土的各向异性是指土在不同方向上的力学参数、结构特性及应力-应变关系的不同,即抗剪强度和变形规律在不同方向上的不同<sup>[2]</sup>。产生各向异性的原因在于土的成层性和土中应力状态的不同。对各向异性的影响应如何考虑,曾有不少学者进行过研究,其中最具代表性的测试技术为英国发展的钻石型十字板头(或称三角形十字板)<sup>[2]</sup>,使用时,可求出不同方向上土的抗剪强度<sup>[3]</sup>。

4) 十字板插入时对土层扰动的影响。十字板厚度愈大、轴杆愈粗,则插入时对土引起的扰动愈大。一般用十字板面积比  $R_A$  来衡量这种扰动的大小。

$$R_A = A_V + A_C \quad (4)$$

式中,  $A_V$  为十字板头(包括轴杆)的横截面积;  $A_C$  为受剪土圆柱体的横截面积。所以在实际应用中,应在不影响十字板的刚度和强度的前提下,尽可能取  $R_A$  的较小值。

5) 十字板测试过程中对土层破坏机理的影响。当十字板在土中旋转时,不但板头上下两端面上应力和位移不均匀,而且圆柱体侧向剪切力和剪应变也不均匀。所以,在剪切面上各点土的峰值强度不可能在向同一旋转方向时发挥出来,会首先在板缘土体薄弱位置产生应力集中,出现局部破坏。随着扭矩增大,剪切面逐渐向前方扩展,最终在整个圆柱体侧面形成完整的圆柱形剪切面。因此,试验所得的扭矩峰值并不能反映土的真正峰值强度,仅仅是一种平均抗剪强度。

总之,影响十字板剪切试验的因素很多,所有这些因素的影响程度都与土类、土的塑性指数和灵敏度有密切关系。

在实际应用十字板剪切试验过程中,我们能做的就是尽量减少或降低上述提到的各种因素的影响程度,具体的措施包括选择合适的十字板头参数、操作过程要严格遵循规范以及测试土层的选择要合理。一般来说,我们需要从上述各个方面来降低这些因素对十字板剪切试验结果的影响,从而获得更为合理的不排水强度值。

## 4 原位十字板剪切试验的室内处理及应用

### 4.1 原位十字板测试结果实例

根据南海某孔原位十字板测试结果,可分别绘制出剪切试验深度的不排水抗剪强度与旋转角度曲线,见图 3 和图 4,图中所示测试结果水深均为 1 021 m,所用的十字板类型为 I-VANE75,十字板的直径为 75 mm,高为 150 mm,其中图 3 中测试深度为泥面下 15 m 处,图 4 中测试深度为泥面下 5 m 处。从图中可以很直观地读出不同深度处黏土的抗剪强度值,进而推算出黏土的灵敏度。

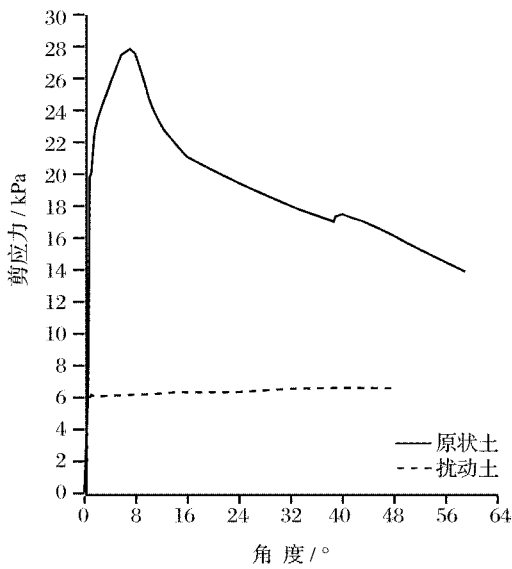


图 3 南海某 A 孔泥面下 15.0 m 试验记录结果  
Fig. 3 Result from the vane test at 15.0 m below the seabed in Borehole A in South China Sea

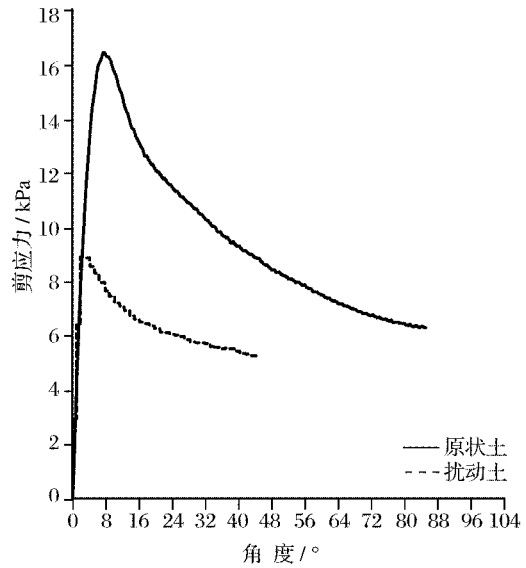


图 4 南海某 B 孔泥面下 5.0 m 试验记录结果  
Fig. 4 Result from the vane test at 5.0 m below the seabed in Borehole B in South China Sea

#### 4.2 原位十字板测试结果的室内处理

原位十字板测试结果的室内处理主要是对十字板试验测得的不排水抗剪强度的修正。

$$Su' = \mu Su \tag{5}$$

式中,  $Su'$  为修正后的不排水抗剪强度;  $\mu$  为修正系数。

Bjerrum<sup>[6]</sup> 在 1972 年发现土的十字板抗剪强度受土的稠度的影响, 需要进行修正, 提出了修正系数  $\mu$ <sup>[6]</sup>。后来, Azzouz 认为此修正系数  $\mu$  偏大, 重新分析了 Bjerrum 提出的  $\mu-I_p$  线, 并提出了新的修正系数  $\mu$ <sup>[7]</sup>,  $\mu$  可依据图 5 取值。

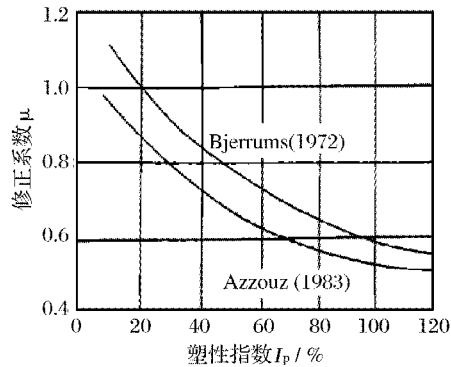


图 5 修正系数  $\mu$ <sup>[6-7]</sup>

Fig. 5 Correction factor  $\mu$ <sup>[6-7]</sup>

Johnson 根据墨西哥海湾的深水软土十字板剪切试验得出的经验<sup>[2]</sup>,取  $\mu$  值如下:

$$\text{当 } 20 \leq I_p \leq 80 \text{ 时, } \mu = 1.29 - 0.0206I_p + 0.00015I_p^2 \quad (6)$$

或

$$\text{当 } 0.2 \leq I_L \leq 1.3 \text{ 时, } \mu = 10^{(0.077+0.098I_L)} \quad (7)$$

式中,  $I_p$  为塑性指数;  $I_L$  为液性指数。

从上述图 5 和公式(6)和(7)可知,修正系数  $\mu$  需根据土的塑性指数和液性指数来确定。

#### 4.3 原位十字板测试结果的应用

用原位十字板测试结果得到的黏性土不排水抗剪强度,经修正后,可以得到更为合理的黏性土不排水抗剪强度值,能更好地反映黏性土的原位不排水抗剪强度,可以为桩基础设计、管线路由、水下基础等海上工程提供可靠的岩土设计参数。

## 5 结 语

1)海上原位十字板剪切试验原理成熟,是一种有效的原位测试方法,设备相对简单,一般有矩形十字板和锥形十字板两种,机理易于理解和掌握;

2)在进行原位十字板剪切试验时,严格按照试验的技术要求进行试验,保证测试结果的可靠性;

3)原位十字板剪切试验时,充分了解并掌握影响试验结果的若干因素,尽量减少或降低各种因素的影响程度,使所测数据客观反映海底土体的力学性质;

4)对获得的原位十字板剪切试验结果,在后期经过室内试验处理时,会得到相对合理的黏性土的不排水抗剪强度值,可为海上实际工程设计提供可靠的岩土设计参数;

5)对我国南海软土中现场实测的原位十字板强度,文中修正系数的适用性及其合理值的选取,还需要积累大量实践经验,作进一步的研究。

#### 参考文献:

- [1] D 2573-94 Standard test method for field vane shear test in cohesive soil[S]. America: American Society For Testing And Materials, 1994.
- [2] BISHOP A W. The strength of soils as engineering material[J]. Geotechnique, 1966, 16: 91-128.
- [3] 顾晓鲁,钱鸿绪,刘惠珊,等. 地基与基础[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [4] 闫澍旺,封晓伟,侯晋芳,等. 用十字板强度推算软黏土抗剪强度指标的方法及应用[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1805-1810.
- [5] SY/T 6707-2008 海洋井场调查规范[S]. 北京:石油工业出版社,2008.
- [6] BJERRUM L. Embankmentso on seft ground[C]//Proceedings of ASCE specialty conference on performance of earth and earth supported structures. Purdue Univeristy: ASCE, 1972:1-54.
- [7] AZZOUZ A S, BALIGH M M, LADD C C. Corrected field vane strength for embankment design [J]. Journal of Geotechnical Engineering-ASCE, 1983, 109(5): 730-734.

## Introduction of Offshore In-situ Vane Shear Test

YAO Shou-long, ZHENG Xi-yao

(*China Oilfield Services Limited*, Tanggu 300451, China)

**Abstract:** Offshore in-situ vane shear test can obtain the in-situ soil shear strength of seabed and the results from the test have been successfully applied in the engineering practice. Herein, principle of in-situ vane shear test, types of equipment used, testing mechanism, technical requirements for the test, factors influencing the test, principle of data processing in the laboratory and actual engineering applications are introduced. It can be summarized that to do the offshore in-situ vane shear test should be strictly in accordance with the technical requirements and know well the factors influencing the test results. The undrained shear strength of cohesive soils thus obtained can be used for the actual engineering design and provide reliably geotechnical design parameters.

**Key words:** offshore in-situ vane; shear test; test principle; undrained shear strength