



# 十字板剪切试验在港珠澳大桥 岛隧工程勘察中的应用

谢焰云, 王 强

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 饱和软黏土是水运工程建设中最常遇到的土层, 十字板剪切试验已广泛地应用于测定饱和软黏土的抗剪强度。结合港珠澳大桥岛隧工程的岩土工程勘察实例, 对电测式十字板的测试技术进行改进, 并对试验成果的应用进行探讨。

**关键词:** 饱和软黏土; 抗剪强度; 电测式十字板; 原状土强度; 重塑强度; 超固结比

中图分类号: TU 413

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)07-0039-04

Application of vane shear test in island and tunnel project of Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge

XIE Yan-yun, WANG Qiang

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** Saturated soft clay is most commonly encountered in the construction of waterway engineering, and vane shear test has been widely used for the determination of shear strength of saturated soft clay. Combining with the geotechnical investigation of island and tunnel project of Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge, this paper discusses the technology improvement and application of results analysis for electrical measuring vane shear test.

**Key words:** saturated soft clay; shear strength; electrical measuring vane shear test; shear strength of undisturbed soil; shear strength of remodeling soil; OCR

港珠澳大桥岛隧工程处在珠江口伶仃洋海域, 该项目的岩土工程勘察揭示其表层分布有厚度约20 m的淤泥-淤泥质土。为获得该软土层的设计参数, 采用电测式十字板试验测定其抗剪强度指标。

电测式十字板剪切试验对试验条件的要求较高, 由于该场地水流湍急、风浪较大, 为获得准确可靠的数据, 需对试验条件和工艺进行改进。

本文在十字板剪切试验结果的修正、根据剪切试验结果判断软土的固结历史及推算固结快剪的内摩擦角等方面进行了分析, 并将原位试验和室内CAU试验的结果进行了对比。本次勘察获得了大量高精度的现场十字板试验数据, 对珠江三角洲的软土层具有一定的参考意义。

## 1 试验条件和工艺的改进

采用电测式十字板进行试验时, 要求始终保持机座处于水平状态, 并应保证试验孔不产生偏斜和探杆不弯曲, 其中探杆弯曲应小于0.05%~0.1%, 探杆同轴公差 $\phi < 1 \text{ mm}^{[1]}$ 。

由于本次勘察水域风浪较大, 水流湍急, 且软土层厚度较大, 常规的水上钻探平台及试验工艺难以满足要求。为获得准确可靠的试验数据, 本次勘察对试验条件和工艺进行了以下几点改进:

1) 考虑到钻探作业水域的风浪较大, 海况条件复杂, 本次勘察采用1 000~2 000吨位的平底方驳搭建钻探平台。锚定系统采用质量600~1 000 kg的锚进行固定钻探船, 船首及船尾各抛八字锚,

收稿日期: 2013-05-06

作者简介: 谢焰云(1984—), 男, 工程师, 主要从事岩土工程勘察。

锚绳为 24 mm 钢丝绳，长约为 200 m，采用电动绞锚机进行收放锚绳。

2) 试验平台为框架结构，采用 8 条长 12 m 的 30b 型工字钢为主要的材料，焊接在方驳或铁船船舷上形成框架，在框架上面铺设厚 30 mm 的杂木板，并以角铁焊接固定木板，工作平台宽 6 m，长约 8 ~ 10 m，面积约 50 ~ 60 m<sup>2</sup>。

3) 作业现场水流湍急，为保证试验过程中套管的垂直，同时套管不能接触平台，采用了两层套管护壁。外面采用专用的海床式十字板套管夹，将 600 cm 的套管稳定在距海床面约 1 m 位置，里面再采用 127 cm 薄壁套管逐渐跟管到底。

4) 由于软土层厚度较大，为消除粘附在板头上的软土对试验结果的影响并保证压入探杆垂直垂直度，试验过程中每 3 m 进行一次清孔作业。

5) 试验操作过程中，严格按照规范执行，保证探杆不碰套管，控制齿轮的转速。

6) 根据软土层的强度采用 2 种板头，一种为 75 mm × 150 mm，用于不排水强度小于 25 kPa 的软土层；一种为 50 mm × 100 mm 的板头，用于不排水强度大于 25 kPa 的软土层。

## 2 软土层主要物理力学性质及原位试验指标

### 2.1 软土层的主要物理力学指标

根据室内试验得到该软土层的主要物理力学指标：含水率  $\omega_0=61.3\%$ ，饱和密度  $\rho=1.63 \text{ g/cm}^3$ ，塑性指数  $I_p=32.3$ ，液性指数  $I_L=1.06$ ，粘聚力  $c=10.9 \text{ kPa}$ ，内摩擦角  $\varphi=15.9^\circ$ ，室内 CAU 试验  $C_u=23.0 \text{ kPa}$ ，超固结比  $OCR=0.94$ 。

### 2.2 不排水抗剪强度及灵敏度与深度的关系

在东西人工岛及隧道段内 39 个钻孔的软土层进行了原位十字板试验，共计进行了 477 次原状试验和重塑试验十字板试验。为使统计结果更具合理性，采用了孔口高程为 -9.65 ~ -11.59 m 的 22 个钻孔的数据进行计算统计，所得的软土层不排水抗剪强度、灵敏度随深度的变化关系见图 1 和 2。

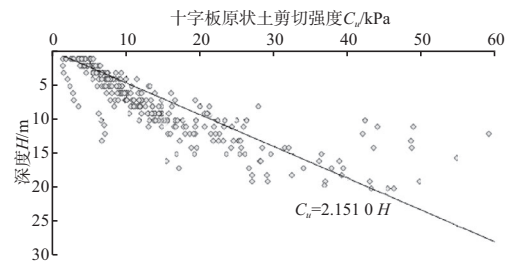


图1 原状土剪切强度与深度的关系

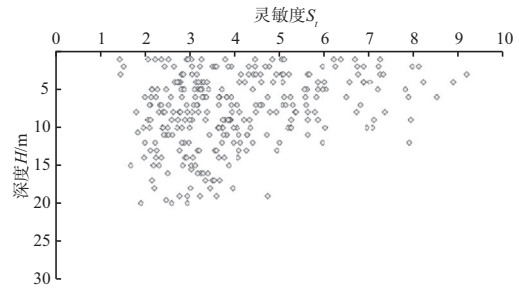


图2 灵敏度与深度的关系

由图 1 可知：不排水抗剪强度随深度的增加成线性增大关系。

由图 2 可知：表层 10 m 以内的软土的灵敏度变化较大，主要集中在 2 ~ 8，为中等灵敏度 ~ 高灵敏度；10 ~ 20 m 范围内的灵敏度较集中，主要为分布在 2 ~ 4，为中等灵敏度。表层的软土其本身强度较低，稍微的扰动都可能引起结果的变化；强度越低的土，其灵敏度也越大。

## 3 试验结果分析与应用

### 3.1 试验结果的修正

一般认为软土层不排水抗剪强度的长期强度只有十字板测得的峰值强度的 60% ~ 70%，因此设计使用时应对其进行修正。

Bjerrum<sup>[2]</sup>提出，应按式对试验结果进行修正：

$$C_{u(\text{使用值})} = \mu C_u \tag{1}$$

式中： $\mu$  为修正系数，随土的塑性指数  $I_p$  而异。Johnson 等<sup>[2]</sup>根据墨西哥海湾的深水软土十字板剪切试验的经验，提出修正系数  $\mu$  可用下式确定：

当  $20 < I_p < 80$  时，

$$\mu = 1.29 - 0.020 6 I_p + 0.000 15 I_p^2 \tag{2}$$

或，当  $0.2 < I_L < 1.3$  时，

$$\mu = 10^{-(0.007 7 + 0.098 I_L)} \tag{3}$$

取室内试验结果的 $I_p=32.3$ 计算得 $\mu=0.7811$ ; 取 $I_L=1.06$ 计算得 $\mu=0.7734$ , 两者相差不大。本文取 $\mu=0.78$ 对试验结果进行修正。

修正前后各深度的不排水抗剪强度 $C_u$ 值见表1。

表1  $C_u$ 的修正情况及OCR计算

试验深度/ m	$C_u$ /kPa		上覆土压 力 $P$ /kPa	超固结比 $OCR$
	修正前	修正后		
1	3.23	2.53	6.30	1.64
2	4.80	3.75	12.60	1.20
3	6.15	4.80	18.90	1.02
4	7.46	5.83	25.20	0.92
5	8.33	6.51	31.50	0.82
6	9.75	7.61	37.80	0.80
7	11.11	8.68	44.10	0.78
8	13.12	10.25	50.40	0.80
9	14.33	11.19	56.70	0.78
10	17.27	13.49	63.00	0.85
11	21.19	16.55	69.30	0.95
12	24.81	19.38	75.60	1.03
13	25.94	20.26	81.90	0.99
14	27.83	21.74	88.20	0.98
15	28.87	22.55	94.50	0.95
16	29.24	22.84	100.80	0.90
17	30.88	24.12	107.10	0.90
18	31.83	24.86	113.40	0.87
19	37.02	28.92	119.70	0.96
20	44.87	35.05	126.00	1.12
平均值	19.90	15.55		0.96

### 3.2 评价软土的固结历史

按深度统计后得该软土层十字板剪切强度随深度的变化关系见图3。

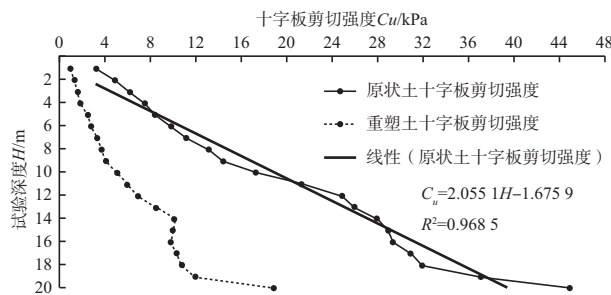


图3 十字板剪切强度与深度回归曲线

由图3可知, 抗剪强度随深度成线性关系, 该趋势线与深度相交于约0.8 m处, 故该软土层为稍微欠固结<sup>[3]</sup>。

另外根据文献[2], 对于不同固结程度的地基土, 可利用下式计算其超固结比OCR:

$$\left(\frac{C_u}{P}\right) = 0.25(OCR)^{0.95} \quad (4)$$

式中:  $P$ 为上覆土压力。

该软土层为表层土, 且处于海面以下, 试验得其饱和密度为 $\rho_{sr}=1.63 \text{ g/cm}^3$ , 故计其上覆土压力时应取有效密度, 即

$$P = \rho' h = (\rho_{sr} - \rho_w) h \quad (5)$$

计算结果见表1, 该软土的OCR为0.96, 室内试验的OCR为0.94, 两者相吻合, 该软土层为稍微欠固结。

### 3.3 推算固结快剪内摩擦角

现场十字板能较好地反映土体在原位的试验结果, 原位状态下试验土层在其自重应力下已经发生固结, 而十字板剪切试验又是以快剪法进行, 这样其性质和形式就类似室内的固结快剪试验。于是可以通过不同深度点的不排水抗剪强度 $C_u$ 与自重应力 $P$ 的关系曲线推求土的内摩擦角, 即可认为相当于室内固结快剪的内摩擦角<sup>[4]</sup>。

根据表1中原 $C_u$ 和上覆压力 $P$  (自重应力等于上覆压力) 的数据, 画出 $C_u-P$ 关系曲线 (图4)。

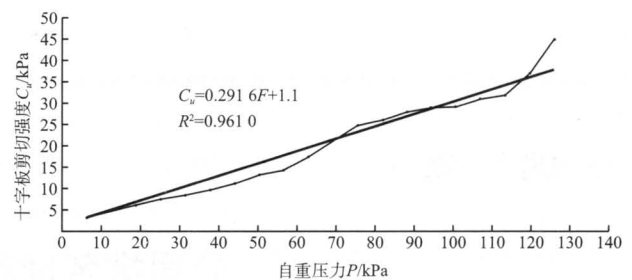


图4  $C_u-P$ 关系曲线

$$\tan \varphi = \frac{\Delta C_u}{\Delta P} \quad (6)$$

式中:  $P$ 为土的自重应力。

由图4中的 $C_u$ 与 $P$ 的线性关系式

$$C_u = 0.2916P + 1.1000 \quad (7)$$

及式(6)可推算得到内摩擦角:  $\tan \varphi = 0.2916$ ,  $\varphi = 16.2^\circ$ , 与表1中固结快剪的内摩擦角 $\varphi = 15.9^\circ$ 基本吻合。

用 $C_u-P$ 曲线推算的抗剪强度角 (软黏土) 可作为挡土结构的土压力的计算指标。

3.4 十字板剪切强度与室内CAU试验结果对比分析  
 为获得可靠的岩土设计参数，本次勘察采用了固定式活塞取土器对软土层进行取样，并将样品送往浙江大学的试验室进行异向固结不排水三轴剪切试验（CAU），试验后得原位状态下的不排水剪切强度 $C_u$ 为23.02 kPa。

另外通过对所有试验数据按深度统计，再求平均值得该软土层现场十字板试验原状土剪切强度 $C_u$ 的平均值为19.90 kPa。两者较接近。

表2列出了现场十字板试验与室内CAU试验结果的对比情况。

表2 十字板试验与室内CAU试验的对比

试验方法	超固结比 <i>OCR</i>	固结快剪 $\phi/ (^{\circ})$	不排水剪切强度 $C_u/kPa$	固结历史
十字板	0.96	16.2	19.9	稍微欠固结
室内试验	0.94	15.9	23.0	稍微欠固结

#### 4 结语

1) 针对电测式十字板的试验条件要求和海上岩土工程勘察的特殊性，对可能影响试验精度的方面进行了改进。除了文中提到的措施外，还可考虑采用液压升降平台进行作业。

2) 现场十字板剪切试验所得的不排水抗剪强

度 $C_u$ 为峰值强度，必须经过修正后才能用于设计计算。

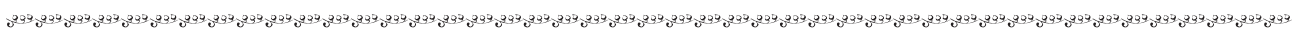
3) 可通过十字板不排水抗剪强度 $C_u$ 判定软黏土的固结历史、计算 $OCR$ 等指标，也可以利用不排水抗剪强度 $C_u$ 跟上覆土压力 $P$ 的关系推算固结快剪的内摩擦角。通过计算和对比分析，本工程用 $C_u$ 推算的 $OCR$ 和固结快剪的内摩擦角与室内试验所得的数据基本吻合。

4) 此次勘察获得了大量高精度的现场十字板试验数据，对珠江三角洲的软土层具有一定的参考意义。

#### 参考文献：

[1] TB 10018—2003 铁路工程地质原位测试规程[S].  
 [2] 袁聚云, 徐超, 赵春风, 等. 土工试验与原位测试[M]. 上海: 同济大学出版社, 2004.  
 [3] 常士骠, 张苏民. 工程地质手册[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
 [4] 袁浩清. 以十字板抗剪强度 $C_u$ 及静探比贯入阻力 $P_s$ 评价软黏土地基承载力及强度指标[J]. 工程勘察, 1981(6): 68-72.

( 本文编辑 武亚庆 )



## · 消 息 ·

### 公司排名世界500强第213位

北京时间7月8日，美国《财富》杂志公布了2013年世界500强排行榜，中交集团以473.33亿美元的营业收入位列第213位，继续保持在世界500强企业的中前列位置；在入选的中国企业（包括香港、台湾）中排名第31位，在国务院国资委监管的中央企业中排名第20位。

“十二五”时期，是中交集团贯彻落实科学发展观，加快转型升级，着力做强做优的关键时期。中交集团将按照国资委“做强做优、全面建设具有国际竞争力世界一流企业”的总体要求，深入贯彻党的十八大精神，认真落实“十二五”规划要求，以提高发展质量和效益为中心，牢牢把握“改革、创新、调整、提升”发展主题，以“保基础、强主业，调结构、促转型，走出去、拓市场”为发展重点，为率先建成世界一流企业而努力奋斗。

摘编自《中国交通建设网》