

# 十字板剪切试验在软土地基勘察中的应用

刘亚洲 权 锋 黄 兴

(武汉市市政工程设计研究院有限责任公司 武汉市 430023)

**提 要** 十字板剪切试验(VST)是原位测试手段之一,对测定饱和软粘性土的抗剪强度和残余抗剪强度、地基承载力、判断软土固结程度、灵敏度、计算路基稳定性等方面有很好的效果。该文结合武汉四新地区工程实践来具体介绍十字板剪切试验在软土地基勘察中的应用。

**关键词** 饱和软粘性土 抗剪强度 固结程度 灵敏度 路基稳定性

## Application of VST in Soft Subsoil Investigation

Liu Yazhou Quan Feng Huang Xing

(Wuhan Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd.)

**Abstract** VST is one of in-situ tests methods, and it has good effect for saturated soft clay to test shear strength, residual shear strength, bearing capacity of foundation, judgment of consolidation degree, sensitivity and calculation of subgrade soil stability. Combined with Sixin engineering practice in Wuhan, the application of VST in the investigation of soft subsoil is introduced.

**Keywords** saturated soft clay; shear strength; degree of consolidation; sensitivity; stability of subgrade

### 1 前言

《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)把天然孔隙比大于或等于 1.0,且天然含水量大于液限的细粒土判定为软土,包括淤泥、淤泥质土、泥炭、泥炭质土。《公路桥涵地基与基础设计规范》JTGD63-2007 提出其鉴别指标:天然含水量  $\geq 35\%$  或液限,天然孔隙比  $e \geq 1.0$ ,直剪内摩擦角  $\varphi$  宜小于  $5^\circ$ ,十字板剪切强度  $C_u < 35\text{kPa}$ ,压缩系数  $a_{1-2}$  宜大于  $0.5\text{ MPa}^{-1}$ 。软土是一种特殊性土,在静水或缓慢的流水环境中沉积,一般具有触变性、流变性、高压缩性、低强度、低透水性及不均匀性等特点,对工程危害性较大,常造成地基破坏、沉降过大、边坡失稳等,是工程勘察需要重点查明的对象。

目前软土地区勘察使用较多的原位测试方法包括静力触探(CPT)、十字板剪切试验(VST)、扁铲侧

胀试验、旁压试验、螺旋板载荷试验则相对使用较少。野外十字板剪切试验长期以来被认为是一种对于饱和软粘土极为适用的原位测试方法,可用来测定饱和软粘性土的抗剪强度和残余抗剪强度;可提供承载力、判断软土固结程度、软土灵敏度,计算路基稳定性等。该方法经验较多,理论较完善,数据可靠。在公路、铁路勘察设计中使用较多,房屋建筑勘察中使用较少。

武汉四新地区是古时云梦大泽所在地,原为北太子湖水域,广泛分布湖泊相厚层淤泥及淤泥质粘土软土,平均厚度为 8~15m,最深达到 20m,低承载力(30~60kPa)、高压缩性,对市政道路排水工程、建筑工程的地基稳定性及沉降有很大影响。本文结合四新地区工程实例分析野外十字板剪切试验在软土地基工程勘察中的具体应用。

### 2 武汉四新地区软土物理力学性质

武汉四新地区上层淤泥及下层淤泥质粘土的性质见表 1。

作者简介:刘亚洲(1968-),男,高级工程师、注册岩土工程师,主要从事岩土工程勘察设计工作。

收稿日期:2012-04-26

表1 土的主要物理、力学指标统计

岩土名称	$\omega/\%$	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	$e$	$\omega_L/\%$	$\omega_P/\%$	$I_P$	$I_L$	$P_s/MPa$	$f_{ak}/kPa$	$S_u/kPa$	$a_{1-2}/MPa^{-1}$	$E_{S1-2}/MPa$
2-1 淤泥	66.7	15.9	1.845	58.3	30.1	28.4	1.32	0.29	30~40	14.7	1.59	2.0
2-3 淤泥质粘土	46.6	17.3	1.284	45.2	23.9	21.8	1.06	0.51	50~70	28.8	0.80	3.1

### 3 试验值 $S_u$ 的修正

十字板抗剪强度  $C_u$  主要由破坏面上的有效应力控制。十字板试验速度较快,规定的  $0.1^{(^\circ)}/s$  剪切速率下仍存在着排水的可能性,而且这种剪切速率远比实际建(构)筑物的加荷速率要快,因此十字板试验不是严格意义上的不排水试验,所得的“不排水抗剪强度”偏大,需修正后方可使用。

$$C_u = \mu S_u \quad (1)$$

式中  $\mu$  为修正系数。

目前修正主要有以下几个方式:

1) Bjerrum(1973) 提出修正系数曲线,见图1。

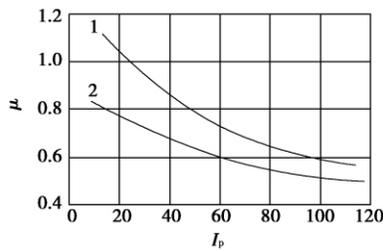


图1 修正系数曲线

图中曲线2适用于液性指数大于1.1的土,曲线1适用于其它软粘土。

2) Johnson等(1998)根据墨西哥海湾的深水软土十字板剪切试验的经验,提出  $\mu$  值按下式确定。

$$\mu = 1.29 - 0.0206I_p + 0.000156I_p^2 \quad (2)$$

$(20 \leq I_p \leq 80)$

或

$$\mu = 10^{-(0.07 + 0.098I_p)} \quad (3)$$

3) 上海地区经验,修正系数  $\mu$  与  $I_p$  存在如下统计关系:

对各向异性土:  $\mu \approx 1.06 - 0.035I_p^{1/2} \quad (4)$

对各向同性土:  $\mu \approx 1.05 - 0.045I_p^{1/2} \quad (5)$

4) 《铁路工程地质原位测试规程》(TB10041-2003)(以下简称铁路规程)考虑到国内软粘土的  $I_p$  值多在30以内,故当  $I_p > 20$  时统一取修正系数  $\mu = 0.9$ 。

武汉四新地区软土采用不同方法的修正系数  $\mu$  计算汇总见表2。

表2 修正系数  $\mu$  计算对比

计算方法	(2-1) 淤泥	(2-3) 淤泥质粘土	备注
Bjerrum	0.75	1.0	
Johnson	0.83	0.91	
上海地区经验	0.81	0.84	按各向同性
	0.87	0.90	按各向异性
铁路规程	统一取0.9		$I_p > 20$

从表2中可以看出,按不同公式计算得到的修正系数有一定差异,(2-1)淤泥用Bjerrum方法得到的  $\mu$  值最小为0.75,用铁路规程方法得到的  $\mu$  值最大为0.9,相差0.15;(2-3)淤泥质粘土用上海地区经验(对各向同性土)方法得到的  $\mu$  值最小为0.84,用Bjerrum方法得到的  $\mu$  值最大为1.0,相差0.16。

四新地区软土的  $I_p$  均大于20,软土各向同性较明显。为安全起见,本区的修正系数按上海地区经验取值,取值如下:(2-1)淤泥  $\mu$  取0.81,(2-3)淤泥质粘土  $\mu$  取0.84。修正后的抗剪强度(2-1)淤泥  $C_u = \mu S_u = 0.81 \times 14.7 = 11.9kPa$ ;(2-3)淤泥质粘土  $C_u = \mu S_u = 0.84 \times 28.8 = 24.2kPa$ 。

### 4 十字板剪切试验在工程中的应用

#### 4.1 推求软土承载力

根据《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2002)5.2.5式求承载力。

当偏心距  $e \leq 0.033$  倍基础底面宽度时,根据土的抗剪强度指标确定地基承载力特征值可按下式计算,并应满足地基变形特征验算的要求:

$$f_a = M_b \gamma b + M_d \gamma_m d + M_c C_k$$

式中  $f_a$  为由土的抗剪强度指标确定的地基承载力特征值;  $M_b$ 、 $M_d$ 、 $M_c$  为承载力系数,按表5.2.5确定(由标准值  $C_k$  查得);  $b$  为基础底面宽度,大于6m时按6m取值,对于砂土小于3m时按3m取值;  $C_k$  为基底下1倍短边宽深度内的土的粘聚力标准值;  $\gamma$  为基础底面以下土的天然重度,水位以下用有效重度;  $\gamma_m$  为基础底面以上土的加权平均重度。

采用十字板抗剪强度时,软土内摩擦角为0,  $M_b = 0$ ,  $M_d = 1.0$ ,  $M_c = 3.14$ ,承载力公式  $f_a =$

3.14C<sub>u</sub>。

以此推算(2-1)淤泥  $f_a = 3.14C_u = 3.14 \times 11.9 = 37.3$  kPa (2-3) 淤泥质粘土  $f_a = 3.14C_u = 3.14 \times 24.2 = 76$  kPa。

根据地方经验含水量、比贯入阻力查得承载力特征值比较接近 (2-1) 层淤泥的承载力特征值小于 40kPa (2-2) 层淤泥质粘土的承载力特征值在 60kPa 左右。利用十字板抗剪强度推求的承载力与地区经验比较吻合。

#### 4.2 判断软土的固结应力历史

利用土工试验、十字板抗剪强度指标,采用不同方法计算超固结比。

1) 土工试验计算超固结比。(2-1) 层淤泥超固结比 0.85 ~ 0.93, 平均值 0.91; (2-3) 层淤泥质粘土的超固结比 0.30 ~ 0.99, 平均值 0.74。超固结比均小于 1。

2) 利用十字板测试结果 根据《岩土工程手册》中公式:  $OCR = 4.3(C_u / \sigma'_{vc})^{1.05}$ , 计算得到(2-1) 层淤泥超固结比 0.55 ~ 1.16, 平均值 0.85; (2-3) 层淤泥质粘土超固结比 0.39 ~ 1.05, 平均值 0.62。除局部少量点大于 1 外, 绝大部分测试点超固结比均小于 1。

根据铁路规程中推荐梅恩(Mayne, 1988) 公式

$$OCR = 22S_u (I_p)^m / \sigma'_{nc}$$

式中  $m$  为与地区土质特性有关的经验指数, 一般可取 -0.48;  $\sigma'_{nc}$  为土的有效自重压力。

计算得到(2-1) 层淤泥超固结比 0.62 ~ 1.27, 平均值 0.90; (2-3) 层淤泥质粘土超固结比 0.53 ~ 1.30, 平均值 0.86。除局部少量点大于 1 外, 绝大部分测试点超固结比均小于 1。

不同方法计算的超固结比汇总于表 3。

表 3 软土的超固结比计算结果

土类	土工试验	十字板试验	
		岩土工程手册	铁路规程
(2-1) 淤泥	0.91	0.85	0.90
(2-3) 淤泥质粘土	0.74	0.62	0.86

土工试验及原位测试结果均说明本地区软土是欠固结状态, 尚未完成自重作用下的沉降。在自重或地面堆载情况下将继续压缩沉降, 对桩体将形成负摩阻力, 降低桩基础承载力。设计、施工应考虑其不利影响。

#### 4.3 软粘土灵敏度

受扰动后软土强度降低情况可以用软土的灵敏度表示:

$$S_i = S_u / S'_u \quad (6)$$

式中  $S_i$  为灵敏度;  $S_u$  为原状土的抗剪强度, kPa;  $S'_u$  为扰动土的抗剪强度 kPa。

将土工试验和十字板抗剪强度分别计算灵敏度, 结果列于表 4 中。

表 4 软土灵敏度统计

试验方法	(2-1) 淤泥			(2-3) 淤泥质粘土		
	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值
土工试验	4.5	1.6	3.1	3.7	1.7	2.4
十字板试验	12.0	1.6	4.1	11.9	2.3	4.7

从表 4 中可以看出以下几点:

1) 本场区软土的灵敏度多在 4.0 左右, 属于中等灵敏 ~ 灵敏为主的粘土, 局部为不灵敏和极灵敏。灵敏度最大值达到 12 左右, 说明局部软土结构性很强, 受扰动后强度降低很大。

2) 土工试验得到的软土灵敏度要明显低于十字板现场试验值 (2-3) 淤泥质粘土相差近 1 倍。

3) 土工试验反映的(2-1) 淤泥的灵敏度较(2-3) 淤泥质土的灵敏度高, 而十字板试验统计结果恰恰相反。

灵敏度反映的是粘性土的结构性, 中等灵敏和灵敏说明土的结构性较强, 即粘性土由于某些原因导致结构破坏后其强度丧失很快。野外十字板现场剪切试验减少了室内试验土样扰动带来的影响, 所求指标可靠, 方法简便、快速, 可以认为十字板测试结果更准确反映实际状况。因此, 在求软土灵敏度的方法中, 应首推野外十字板现场剪切试验。

#### 4.4 路基稳定性评价

当软粘土深厚(地基部分的软粘土厚度与土坡部分的高度之比大于 3 时), 根据费兰纽斯(Fellenius) 公式估算临界高度(天然软土地基的极限承载力所能承受最大荷载的换算高度):

$$H_c = 5.52C_u / \gamma \quad (7)$$

式中  $H_c$  为临界高度;  $C_u$  为地基软土的不排水抗剪强度;  $\gamma$  为填土的重度。

临界高度  $H_c$  主要取决于软土的极限承载力。若在天然地基上填筑土高度超过  $H_c$  值, 则路堤将失去稳定, 发生路堤滑移。

四新地区(2-1) 淤泥  $C_u = 11.9$  kPa,  $\gamma = 19.8$  kN/m<sup>3</sup>, 临界高度估算结果为 3.32m, 若在天然地基上填筑 4 ~ 6m 高的设计路堤显然是不稳定的, 地基须处理。

有研究人员用不同测试资料计算极限填土高度, 结果见表 5。可以看出, 室内快剪值计算得到的

极限高度显然是偏低的,而利用现场原位测试静力触探、十字板测试指标计算要高。所以稳定计算中

采用直剪资料其结果可能会过于安全,用原位测试结果可能更加接近实际。

表5 用不同测试资料计算极限填土高度

测试方法	室内快剪	三轴	静力触探	现场十字板	现场附近料场堆载堆放最低值
极限填土高度/m	1.80	2.83	4.00	6.00	3.00

4.5 估算单桩承载力

负摩阻力实质上等同于土的抗剪强度,魏汝龙建议软土负摩阻力取不排水抗剪强度  $C_u$ 。

美国石油协会(1980)(API-RP2A)建议桩侧极限摩阻力  $P_f$  按下式取值:

$$P_f = \mu C_u$$

式中  $\mu$  为折减系数。

当  $C_u \leq 25$  kPa  $\mu = 1.0$

$C_u \geq 75$  kPa  $\mu = 0.5$

25 kPa <  $C_u$  < 75 kPa  $\mu$  在 0.5 ~ 1.0 间内插。

由此估算四新地区(2-1)淤泥极限摩阻力  $P_f$  约 12 kPa,(2-3)淤泥质粘土极限摩阻力  $P_f$  约 24 kPa,与武汉地区经验值比较吻合。

十字板剪切试验还可用于检验地基处理效果等,不再赘述。

5 结论

十字板剪切试验是一种现场原位测试手段,特别适用于测定软土抗剪强度和残余抗剪强度,可提供承载力、判断软土固结程度、软土灵敏度,计算路基稳定性等。该方法经验较多,理论较完善,数据可靠,可在软土地基勘察中应推广使用,并积累当地经验,以提供准确的地质参数,提高勘察质量。

参考文献

[1] 孙更生,郑大同. 软土地基与地下工程. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987  
 [2] 廖红建,赵树德,等. 岩土工程测试. 北京: 机械工业出版社, 2007  
 [3] 魏汝龙. 软粘土的强度和变形. 北京: 人民交通出版社, 1987

(上接第7页)

利用本文编写的粒子群算法程序成功地求解了含有2个含水层参数和4个非线性特征参数的函数优化问题,计算结果见表2。

表2 使用PSO反求水文地质参数的结果

	$T$ /( $m^2 \cdot s^{-1}$ )	$S$	$a$ /( $min \cdot m^{-1}$ )	$b$ /( $min^{-2} \cdot m^2$ )	$n$	$r_c$ /m
精确解	0.0041	0.0681	1.3	1117	1.8	3.8
优化解	0.0041	0.0650	1.23	1113	1.8419	3.8267
相对误差	0%	4.52%	5.38%	0.36%	2.33%	0.7%

5 结束语

在已有非稳定井流问题解析解的基础上,经过推导和简化,得到了能够方便应用的非线性渗流区域上降深的数值表达式,并应用粒子群优化算法,针对抽水试验数据,确定了含水层参数与非线性特征参数。但在多次试验结果中6个参数很难同时达到最优,但整体优化解和精确解还比较接近。在以后的研究中,有待进一步的研究试验,以便得出各个参数间变化的规律,制定更科学的优化目标函数,为地下水资源的分析和评价及非线性模型中参数的反演提供更好更可靠的方法。

参考文献

[1] Sen Z. Type curve for two-regime well flow. J. Hydro. Engrg. . 1988 ,114( 12) :1461 ~ 1484  
 [2] 薛禹群,朱学愚. 地下水动力学原理. 北京: 地质出版社, 1986: 136 ~ 140  
 [3] 常安定,郭建青,王洪胜. 两种流态区域条件下的井流问题的解析解. 水利学报, 2000( 6) : 49 ~ 53  
 [4] 范娜,云庆夏. 粒子群优化算法及其应用. 信息技术, 2006( 1) : 53 ~ 56  
 [5] 张全兴,常安定. 用粒子群算法反求隔离井公式中的水文地质参数. 西北农林科技大学学报(自然科学版) 2009( 2) : 219 ~ 212  
 [6] 张鹤志,郭建青. 粒子群优化算法在确定越流含水层参数中的应用. 水利水电科技进展, 2011( 6) : 13 ~ 16  
 [7] 刘元会,常安定,邓秋霞. 线性非线性流并存区域井流问题的水头降深研究. 西北农林科技大学学报,自然科学版, 2005( 3) : 113 ~ 115  
 [8] Sen Z. Non-linear flow toward wells. J. Hydro. Engrg. . ASCE ,1989 ,115( 2) :193 ~ 209  
 [9] 封建湖,车刚明,聂玉峰. 数值分析原理. 北京: 科学出版社, 2001  
 [10] R Srivastava. Implications of using approximation expressions for well function. Journal of Irrigation and Drainage Engineering ,1995 ,121( 6) ,459 ~ 462