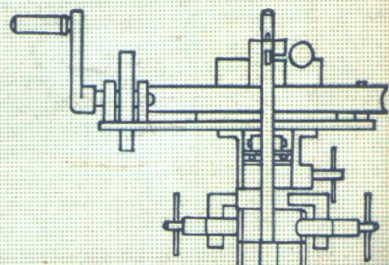


十字板测试技术

周筱滨 编



SHIZIBAN CESHI JISHU

人民铁道出版社



P213

1360

十字板测试技术

周筱滨 编

人民铁道出版社

1979年·北京

内 容 简 介

十字板是原位测试软土抗剪强度的一种工具。本书比较详细地叙述了普通十字板和电测十字板的构造及工作原理，测试技术的理论及方法，资料的计算、整理及应用。

本书可供工程地质勘测人员参考。

十字板测试技术

周筱滨 编

人民铁道出版社出版

责任编辑 郭允康

封面设计 赵敬宇

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张：3.5 字数：77 千

1979年9月第1版 1979年9月第1次印刷

印数：0001—7,500册

统一书号：15043·6181 定价：0.30元

前 言

十字板剪力试验是在钻孔内直接测定软土抗剪强度的方法。此法比采取原状土样，运至试验室测定抗剪强度的方法优越：能基本保持土样所处的自然状态，防止取样、运输和制样对土的扰动；能测定不能取得土样的极软粘土的抗剪强度；能及时提供土的抗剪强度指标。多年实践证明，这是一种经济有效的现场测试方法。所测得的抗剪强度相当于内摩擦角 $\varphi=0$ 的内聚力 C_u ，也就是不排水剪的强度。试验深度不能超过30米。

十字板仪最早是由瑞典的卡尔逊 (Carlson·I) 在1948年提出的，很快就得到广泛的应用。1954年我国南京水利实验处 (即现在的南京水利科学研究所) 首先根据美国垦务局资料设计成现已广泛使用的斯开普顿 (Skempton) 式普通十字板仪，由南京水电仪表厂制造。这种普通十字板仪是利用蜗杆蜗轮旋转插入软土层中，借开口钢环测出土的抵抗力矩，再换算成抗剪强度。多年来使用效果良好，为广大勘察单位普遍使用。

交通部第一航务工程局设计研究院制作的闭口钢环式十字板剪力仪 (其原理同开口钢环式十字板仪) 使用效果也很好。

轻便型十字板仪于1964年由南京水利科学研究所制成，在一些中小型工程、地方性工程中颇受欢迎，实践证明，它和普通十字板仪有基本相同的效果。

十字板测头，随着实践经验的丰富，随着国家工业水平的提高，结构不断得到改进。开始是光杆式，后来发展为套筒式、离合式。目前一般都认为离合式比较合理。前两种已

淘汰。交通部一航局设计研究院研制的牙嵌式板头，应用也十分方便。1960年以来有些单位开始试制和应用电测十字板头，并做了一些比较试验。它的基本原理是当板头剪损土样时，传至轴杆的扭力使贴在轴杆底部的电阻应变片变形，然后在电阻应变仪上测读十字板头上的应变值，再把它换算成抗剪强度。计算土的抗剪强度时可以不考虑土对轴杆的摩擦力，试验时不必进行轴杆校正。无疑，这种十字板头比上述应力环式的十字板头优越得多。

1976年四川省建筑研究所研制了一套用静力触探仪来进行电测十字板试验的设备，将电测十字板和静力触探设备结合起来使用，不仅省去了沉重的钻探设备，而且可以连续贯入进行不同深度的十字板测试，工效提高了5~6倍。它具有轻便、快速、连续贯入、成果稳定等许多优点。这使十字板测试技术发展到了一个崭新的阶段。华东电力设计院、广东省水利电力勘测设计院从1977年开始把它应用到生产实践中去，效果非常满意。广东省建委已组织成批生产。可以相信，随着实践经验的不断丰富，设备将进一步完善，理论将进一步提高。

为了推广和普及十字板测试技术，本人根据手头搜集到的各兄弟单位及个人的有关资料，并吸取1978年2月水电部在武汉召开的《十字板操作规程》征求意见会议上许多代表的宝贵意见和经验，编写了这本小册子。承广东省电力勘测设计院曾为民、夏文良、彭非常三位同志作了审校。由于编者水平低，书中难免有缺点、错误和引用资料不当之处，恳请读者给予批评指导。

编 者

1978年12月

目 录

第一章 软土的特性及剪切试验方法	1
第一节 概述	1
第二节 软土的分布及成因	1
第三节 软土的特性	3
第四节 软土抗剪强度的物理意义	5
第五节 剪切试验的仪器和试验方法	9
第二章 十字板测试理论	15
第一节 概述	15
第二节 几何尺寸	18
第三节 板头系数 K 值	23
第四节 转径校正	26
第五节 轴杆校正	27
第六节 剪切速率	28
第七节 长期剪切强度	30
第八节 系统误差的分析	31
第九节 抗剪强度与深度的关系	33
第十节 十字板抗剪强度与其它抗剪强度的关系	39
第十一节 十字板测试与静力触探的关系	38
第十二节 资料整理内容	44
第三章 机械式十字板	46
第一节 十字板的类型	46
第二节 普通十字板	47

第三节	轻便型十字板	53
第四章	连续贯入式电测十字板	60
第一节	概述	60
第二节	电测十字板的工作原理	62
第三节	传感器的结构	67
第四节	应变片	69
第五节	应变片的粘贴工艺	75
第六节	板头的率定	79
第七节	旋转装置	83
第八节	连续贯入系统	84
第九节	量测记录仪器	88
第十节	现场操作步骤	94
第五章	十字板测试成果的应用	98
参考资料		105

第一章 软土的特性及剪切试验方法

第一节 概 述

研究土的抗剪强度在工程设计中具有很重要的意义。因为在计算路堑、路堤的稳定性，建筑物地基的强度和稳定性，作用在挡土墙上的压力，都必须知道土的抗剪强度。

土的抗剪强度，是在极限状态下，土的一部分和另一部分相对滑动（剪切）时发生的抵抗力。

十字板抗剪强度只是其中的一种。它只适用于软土。严格来说它只适用于内摩擦角 $\varphi=0$ 的饱和软粘土，但 φ 不可能是零，因此，事实上只适用于内摩擦角接近于零的饱和软粘土。同时，在应用十字板测试成果时，还要根据当地的工程地质、水文地质、建筑经验、各种土工试验的成果及实测资料加以综合分析。各地区的条件不同，对十字板实测资料作的取值往往也不同。因此十字板适用的范围，即哪些土适用，哪些土不适用，要根据 $\varphi \approx 0$ 的原则，再结合经验加以确定。

第二节 软土的分布及成因

软土在我国分布极为广泛，沿海、内陆平原和山区都广泛分布着软土。沿海软土主要位于各河流的入海口处，例如：渤海及津塘地区，浙江的温州、宁波，长江三角洲，珠江三角洲及闽江口平原等地。内陆软土主要分布在洞庭湖、洪泽湖、太湖流域及昆明的滇池地区。山区软土则分布于多雨的山谷、冲沟、河滩阶地和各种洼地里；与平原不同

的是山区软土分布零星，范围不大，但厚度及深度变化悬殊，多呈透镜体，土质不均，土的强度和压缩性变化很大。

在平原地区，软土的表面往往有1~3米厚的表土层（又称硬壳层），其承载力较好，压缩性也较小，常作浅基础的持力层。

软土的类型、分布及特征见表1—1。从表中可以看出：在进行十字板试验时，要充分了解软土层的特征，如硬层及其含量，砂夹层，交错薄砂层，透镜体，贝壳，海生物的残

软土的成因类型、分布和特征 表1—1

	类 型	分 布 情 况	厚 度	特 征
海洋沿岸沉积	三角洲相沉积	东海，黄海，渤海等沿海岸地区。		分选性差，结构不稳定，粉砂薄层多，有交错层理、不规则尖灭层及透镜体夹层，结构疏松。含有贝壳等海生物残骸。表面有硬壳层。
	滨海相沉积		大于60米，可达200米。	面积广，厚度大，夹有粉砂薄透镜体，孔隙大。
	溺谷相沉积			孔隙大，结构疏松，含水量高，分布范围窄。
	泻湖相沉积		2~25米，可达60米。	颗粒细，孔隙比大，强度低，常夹有薄层泥炭。
内陆湖盆地沉积	湖相沉积	洞庭湖、太湖、鄱阳湖、洪泽湖周边。	小于20米。	粉土成分高，呈放射状分布，层理均匀清晰，表面有硬壳层。
	上陵谷地相沉积	西南、南方山区或丘陵区。	7~10米。	呈片状、带状分布，靠山边线、谷中心深，具有较大的横向坡，颗粒由山前到谷中心逐渐变细。
河滩沉积	河床相沉积	长江中下游，珠江下游，韩江下游及河口，海河平原，松辽平原，闽江下游。	小于20米。	成层情况不均一，以淤泥与软粘土为主，含中细砂交错层，呈透镜体分布。
	河漫滩相沉积 中砾湖相沉积			

骸，粘土层，泥炭层等对十字板强度的影响。一般来说，都有增大抗剪强度，出现异常数值的情况。在做十字板试验时，有时十字板有一半在砂层中，一半在软土中，显然所得的强度不是真实的。因此我们在分析十字板资料时，要考虑这些影响因素。

此外，在泥沼地区分布着泥炭土。泥炭土同样具有软土的某些特征，但也有它自己的特征：孔隙比 $e > 3$ ；抗剪强度 $C_u < 0.04 \text{ kg/cm}^2$ ；渗透系数为 $1.1 \times 10^{-3} \sim 1.1 \times 10^{-4}$ 厘米/秒。在这些地区许多单位也用十字板仪来测定泥炭土的抗剪强度。对于这类土的十字板试验要根据钻探资料充分了解含有物的成分和性质。在泥炭土中往往含有许多植物残余纤维，这对十字板结果影响较大。泥沼按沉积稳定程度的分类见表 1—2。

泥沼按沉积稳定程度的分类

表 1—2

类 别	泥沼内充填物	特 征
第 一 类	完全充填紧密稳定的泥炭，含大量矿物颗粒。	不论含水量多少，温度在 0°C 以上，2 米深的试坑，垂直边坡能保持五昼夜。相对稳定。
第 二 类	由不稳定的软泥炭所构成，含有大量的矿物颗粒。	不论含水量多少，温度在 0°C 以上，2 米深的试坑，垂直边坡不能保持五昼夜。钻孔机具在轻压、旋转下能下沉。相对不稳定。
第 三 类	带有泥炭皮，充满水和流动的泥炭或淤泥。	泥沼很烂，呈流塑状态，钻孔机具在自重作用下能下沉。极不稳定。

第三节 软土的特性

1. 天然含水量高，孔隙比大

软土的天然含水量接近或大于液限，而孔隙比接近或大于 1。自然状态软土一般呈灰色或黑色，多为软塑或半流塑

状态。据统计含水量一般都大于30%，有时达70%，甚至200%。

软土的天然含水量高，孔隙比大，这就带来了软土地基变形大，强度低的特点。

2. 高压缩性

软土孔隙比大，具有高压缩性的特点。压缩系数 $a_{1-3} > 0.05\text{cm}^2/\text{kg}$ ，最大可达 $0.2\text{cm}^2/\text{kg}$ 。如其它条件相同，则软土的液限愈大，压缩性也愈大。

3. 抗剪强度低

软土的抗剪强度很低，并与排水固结程度有密切的关系，在不排水剪切时软土的内摩擦角接近于零，抗剪强度主要是内聚力，而内聚力一般小于 $0.3\text{kg}/\text{cm}^2$ 。经过排水固结后软土的抗剪强度便能提高。但由于其透水性差，当应力改变时孔隙水渗透相当缓慢，因此抗剪强度增长也很缓慢。

4. 透水性差

渗透系数小于 $1 \times 10^{-6}\text{cm}/\text{sec}$ 。由于软土地层中存在着带状夹砂层，所以垂直和水平方向的渗透系数不一样，一般垂直方向小，因此固结的时间需要相当长。由于渗透系数小，在剪切时来不及排水压密，故饱和软土一般取不排水快剪强度作为设计依据。

5. 触变性

软土的触变性常用灵敏度 K_L 来表示，即用土的结构在破坏前和破坏后的强度之比来表示灵敏度的大小。一般软土的灵敏度在3~4之间，个别可达8~9。对于灵敏度大的软土若在钻孔中取样，往往会发生触变现象，以致取出的土样不能完全反映土的实际情况。因此用十字板在原位测定土的触变性是比较好的方法。用十字板仪来测定灵敏度也很简单。设原状土的抗剪强度为 C_u ，重塑土的抗剪强度为 C'_u ，则

灵敏度即可用下式表达:

$$K_u = \frac{C_u}{C'_u} \quad (1-1)$$

室内土工试验, 可用无侧限抗压强度试验来求得灵敏度, 即用原状土的无侧限抗压强度 q_u 和重塑土的无侧限抗压强度 q'_u 之比来表示灵敏度:

$$K_u = \frac{q_u}{q'_u} \quad (1-2)$$

灵敏度对于研究土的强度及稳定性具有重要意义。一般总是假定土体的极限强度可以发挥, 然而实际上可以有这样的情况, 土体内某一部分土首先达到强度极限, 因而引起局部破坏, 首先破坏部分的强度将有降低, 但习惯上采用的设计和计算方法并不考虑这样的强度损失, 这就可能使理论计算偏于不安全。如何在设计和计算中考虑土的灵敏度的影响业已引起了大家的重视。

6. 流变性

软土具有流变性, 即在剪应力的作用下, 土体发生缓慢而长期的剪切变形。由于土的流变特征, 因此它的长期强度小于瞬时强度。考虑到软土的流变特性, 用一般剪切试验方法求得的抗剪强度值不宜全部用足, 应作必要的修正。

我国各种成因类型的软土的物理力学性质指标统计值见表1—3。我国主要软土地区软土的主要物理力学性质指标见表1—4。

第四节 软土抗剪强度的物理意义

粘性土的抗剪强度按库伦公式可表达为:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + C \quad (1-3)$$

当为软土时, $\varphi = 0$, 则上式相当于十字板的抗剪强度

各类软土的物理力

类 型	容 重 γ (g/cm ³)	天然含水量 W (%)	天然孔隙比 e
滨海淤积软土	1.5~1.8	40~100	1.0~2.3
河滩淤积软土	1.5~1.9	30~60	0.8~1.8
湖泊淤积软土	1.5~1.9	35~70	0.9~1.8
谷地淤积软土	1.4~1.9	40~120	0.52~1.5

我国主要软土地区软土的主

地 指 标 区	土层埋 深或范 围 (m)	含 水 量 W (%)	容 重 γ (g/cm ³)	孔 隙 比 e	饱 和 度 S_r (%)
天 津	7~14	34	1.82	0.97	95
塘 沽	8~17	47	1.77	1.31	99
	0~8				
	17~24	39	1.81	1.07	96
上 海	6~7	50	1.72	1.37	98
	1.5~6				
	>20	37	1.79	1.05	97
杭 州	3~9	47	1.73	1.34	97
	9~19	35	1.84	1.02	99
宁 波	2~12	50	1.70	1.42	97
	12~28	38	1.86	1.08	94
舟 山	2~14	45	1.75	1.32	99
	17~32	36	1.80	1.03	97
温 州	1~35	63	1.62	1.79	99
福 州	3~19	68	1.50	1.87	98
	1~3				
	19~25	42	1.71	1.17	95
广 州	0.5~10	73	1.60	1.82	99
贵 州	软粘土	53~93	1.58~1.76	1.42~2.38	99~100
	泥 炭	139~563	1.16~1.57	1.60~10.92	96~121
昆 明	软粘土 泥 炭	41~299	1.10~1.80	1.10~7.00	

学性质指标统计表

表 1—3

抗 剪 强 度		灵 敏 度	压 缩 系 数 α_{1-2} (cm^2/kg)
内 摩 擦 角 φ (度)	内聚力 C (kg/cm^2)		
1~7	0.02~0.2	2~7	0.12~0.35
0~10	0.05~0.3		0.08~0.3
0~11	0.05~0.25	4~8	0.08~0.3
0	0.05~0.19	2~10	>0.05

要物理力学性质指标

表 1—4

液 限 W_L (%)	塑 限 W_P (%)	塑 性 指 数 I_P	渗透系数 K (cm/sec)	压缩系数 α_{1-2} (cm^2/kg)	内 聚 力 C (kg/cm^2)	内摩 擦角 φ (度)
34	19	17	1×10^{-7}	0.051		
42	20	22	2×10^{-7}	0.097		
34	19	15		0.065		
43	23	20	6×10^{-7}	0.124		
34	21	13	2×10^{-6}	0.072		
41	22	19				
33	18	15		0.117		
39	22	17	3×10^{-8}	0.095		
36	21	15	7×10^{-8}	0.072		
37	19	18	7×10^{-8}	0.110		
34	20	14	3×10^{-7}	0.065		
53	23	30		0.193		
54	25	29	8×10^{-8}	0.203	0.01~0.15	10~15
41	20	21	5×10^{-7}	0.070		
46	27	19	3×10^{-6}	0.118		
56~71	26~34	26~38	$i \times 10^{-4} \sim 7$	0.06~0.26	0.06~0.63	3~21
77~263	48~236	26~246	$i \times 10^{-3} \sim 7$	0.21~1.29	0.02~0.42	9~23
		27~62				

$C_u = C$ ， C 为软土的内聚力。

内聚力按成因不同可分为原始内聚力、加固内聚力和毛细内聚力三种。

1. 原始内聚力

由土粒间的分子引力产生的内聚力叫原始内聚力。带有相同电荷的土粒，相互间有吸力也有斥力作用。斥力是由同符号电荷产生的，吸力则是土粒间的分子吸力。它们都和距离有关。土粒间的距离较远（约二倍扩散层厚度），土粒间斥力占优势；一旦由于某种原因（例如土层愈来愈厚，自重增大），土粒被迫趋近，越近斥力的峰值（它的位置与溶液的性质等因素有关），吸力就占优势。颗粒愈近，吸力愈大。

带不同符号电荷的土粒，或虽带同号电荷，但颗粒的边角处有局部异性电荷时，土粒就因静电吸力而聚拢。土粒间的公共水膜也能起连接作用，水膜愈薄则粘性愈大。这些都属于原始内聚力的范畴。

原始内聚力的大小主要取决于土粒的矿物成分、扩散层中的离子成分及土的密度。原始内聚力与土的密度有很大关系，密度愈大，内聚力愈强，当土粒间的距离小于扩散层厚度时，吸引力急剧增大。原始内聚力与土的结构是否扰动无关，扰动土如果夯实到原状土的密度则可恢复其原先的原始内聚力。

2. 加固内聚力

由于化学胶结作用形成的内聚力称为加固内聚力。加固内聚力是在很长的地质年代中逐渐形成的。土的生成年代愈久，加固内聚力一般也愈大。形成加固内聚力的化学胶结作用大体包括下列几个方面：（1）由于孔隙水中析出氢氧化铝、氢氧化铁、碳酸钙和氧化硅等物质，使土粒胶结；（2）

由于上覆土层的巨大压力，使土粒长期接触而产生再结晶作用；（3）胶体凝聚后，随时间的延长和脱水的不断进行，粒间联系加强，胶体老化，形成具有化学键的晶体。

加固内聚力在土的结构受到破坏后就丧失了，且不能立即恢复，因为长期形成的结晶不能在短期内再生。

3. 毛细内聚力

由于孔隙中毛细水的毛细压力产生的内聚力称为毛细内聚力。毛细内聚力在砂中可以起一些作用，如湿砂可以手捏成团，但因其数值微小且受湿度变化的影响大，一般均忽略不计。至于在软土中，毛细内聚力的影响是微不足道的。

第五节 剪切试验的仪器和试验方法

剪切试验的结果，往往因为使用的仪器及采用的试验方法不同而不同。因此，正确选择试验仪器及试验方法是十分重要的。

现简单介绍一下目前常用的仪器和试验方法。

剪切试验的仪器可分为室内和现场两大类。

第一类，室内试验仪器：

1. 直接剪切仪（简称直剪仪）

是把土样放在匣内直接施加垂直压力和水平力进行剪切试验的仪器。土样不仅在垂直压力 P 作用下发生压密作用，而且在剪切过程中，在剪应力 τ 作用下发生压密作用。

这种剪力仪构造简单，操作方便，原理也容易理解，我国目前已广泛采用。但也存在着如下缺点：在剪切过程中，试样内应力分布不均匀，试样的密度及含水量不易控制，有效剪切面积不断减小；此外，剪切面是限制在一定平面内的，这可能不与试样的最弱平面吻合。例如在进行带状粘土的抗剪强度试验时，就可能因剪切平面在粘土层内或粉砂夹

层内而有很不相同的结果。

2. 三轴剪力仪

三轴剪力试验的优点是：（1）试验中能严格控制排水条件及测定孔隙水压力的变化；（2）不需硬性规定剪裂面；（3）测样中应力情况较简单明确；（4）除抗剪强度指标外，尚可测定灵敏度、孔隙水压系数及侧压力系数指标。三轴剪力试验的缺点是仪器构造复杂，操作复杂，所需试件尺寸较大。

3. 单轴压力仪（无侧限压缩仪）

把一个圆柱体的土样，在没有侧向限制的条件下压缩，测定其抗压强度 q_u ，这里最大及最小主应力各为：

$$p_1 = q_u, \quad p_3 = 0$$

根据粘性土的极限平衡条件方程式：

$$p_1 = 2c \operatorname{ctg} \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$$

单轴压力仪只适用于粘性土，一般假设 $\varphi = 0^\circ$ ，故得，

$$q_u = 2C$$

或
$$C = -\frac{1}{2} q_u$$

单轴压力仪操作方便，仪器构造简单，在野外工地上也能进行试验。测得的强度 $-\frac{1}{2}q_u$ 和十字板测得的 C_u 值基本上是一致的。

第二类，现场试验仪器：

1. 大面积直剪试验

适用于各类土层。试验方法的基本原理与室内剪力试验相同，即利用大面积的直剪仪，测定土样在不同垂直压力下的抗剪强度值，以求得土的摩擦角和内聚力。由于土样的受剪面积较室内试验大得多，且又是在天然地基上直接进行