

GUIDE TO
SOIL MECHANICS TESTING

《土力学》实验指导书

◆编写：张建龙 刘勇健

广东工业大学土木与交通工程学院

二〇一八年六月印刷

目 录

序 论.....	2
渗透实验.....	4
界限含水量实验.....	13
固结实验.....	17
含水量实验.....	22
密度实验.....	27
抗剪强度实验.....	30
附录 1 电子天平使用方法介绍.....	36
附录 2 土工试验项目一览表.....	37
附录 3 试验数据的有效位数.....	38
参 考 文 献.....	39

序 论

一、土工试验在岩土工程中的位置和作用

土是一种古老而又普通的建筑材料，并作为建筑物的天然地基和介质。建筑物的兴建是否合理、经济，在相当程度上取决于它的工程性质。要成功地解决一个岩土工程问题，科学的程序是：勘探与测试，试验与分析，并利用土力学的理论进行设计计算，然后施工，同时还要根据需要对施工过程及使用期进行监测，并根据监测结果修订方案。这是一个将试验和理论与实际现象相互联系的过程。因此，土工试验是岩土工程规划和设计的前期工作。

就土力学的发展来说，从某种意义上也可以看作是土的试验力学，如库仑强度理论、达西定律、土的压实理论以及描述土的应力~应变关系的双曲线模型等，无一不是通过试验而建立的。因此，土工试验又为土力学理论的发展提供依据。即使在大型电子计算机问世和计算技术高度发达之后，可以把土的复杂的弹塑性应力~应变关系纳入到岩土工程的变形与计算中去的今天，从事岩土工程的专家和学者们都认为，测定土的工程性质的技术（包括现场勘察、室内试验和原型观测）依然是一个关键问题。由此看来，土工试验无论是对岩土工程，还是对土力学的发展均占有相当重要的地位。

从事土工测试工作有经验的人们都知道，土是大自然的产物，不同于钢材、混凝土、合成塑料等人工材料，其性质受到密度、湿度、粒度以及孔隙水中化学成分等多种因素的影响；天然地层的性质和分布，不但因地而异，而且在较小范围内也可能有很大的变化。在进行地基基础设计和土力学计算之前，必须通过勘察和测试取得有关土层分布以及土的物理力学性质指标的充分的可靠的资料。因此，了解室内土工试验方法也是学习土力学地基及基础这门课程的一个重要方面。实际上，这也是科学地认识土的工程特性的入门之阶和掌握地基基础科学实验基本手段的必由之路。

二、土工试验项目

土工测试大致分为两大部分：（1）在现场直接测定，称为原位测试，包括十字板剪切试验，静、动触探，标准贯入试验，载荷试验，波速测定以及旁压试验等；（2）从现场采取土样送至实验室的试验，称为室内土工试验。

室内土工试验一般可分为三类：

(1) 土的化学性试验，包括土的矿物鉴定，易溶和难溶盐试验，有机质试验，酸碱度试验，硅、铁、铝、钙、镁、钾全量分析及阳离子交换量试验等。这些试验用于分析土的物质成分（化学成分、矿物成分）、土粒与介质溶液间的物理化学作用以及土的结构对其力学性质的影响。

(2) 土的物理性试验，包括土的密度、湿度、粒度试验等。具体试验项目有：密度试验；比重试验；极限密度，即最大密度和最小密度试验；含水量试验；界限含水量试验，即液限、塑限、缩限试验；颗粒大小分析及孔隙大小分析试验。这些试验主要用于土的工程分类及判断土的状态。

(3) 土的力学性质试验，包括渗透性、压缩性和强度试验等。主要目的是直接为工程设计提供参数，如渗透系数、变形参数、固结系数、抗剪强度指标、静止侧压力系数等。

本书内容仅限于实验室内的部分物理性和力学性试验，实验教学学时可根据教学大纲的要求进行选做。土的物理性和力学性试验项目及其成果的应用参见附录2。

三、实验的目的和要求

课堂理论教学对土力学课程当然是占主导地位，但土力学地基基础又是一门实践性很强的课程，它的兼容理论性与实践性的特点，使得历来的教学要求都是既重视基础理论原理和概念，又注重实践环节和联系工程实际。土工实验是认识土体基本性质的有效手段，是必不可少的教学环节。通过土工实验课，可以使学生对课堂教学中所学土力学基本原理和概念的理解，并对土的物理、力学性质、概念及各种计算指标有一个较完整的了解。另一方面也是培养学生自学能力、分析问题和解决问题能力、独立工作能力和动手能力的重要手段。通过实验课，使学生掌握或了解土工常规测试方法、原理及其仪器设备的使用。进行实验基本操作技能的训练，锻炼学生处理实验数据，分析实验结果，编写实验报告的能力。培养学生严肃认真、实事求是的科学作风。

因此，要求学生在上实验课时，要做到以下几点：

- (1) 认真预习实验内容，了解实验的基本原理、实验方法及实验步骤等；
- (2) 实验课上认真听讲，掌握实验的关键内容与注意事项等；
- (3) 严格按照实验规程进行实验操作，并做好实验记录；
- (4) 根据实验记录进行数据处理，并对实验结果进行分析，最后填写出实验报告。

渗透实验

实验项目名称：渗透实验

实验项目性质：普通实验

所属课程名称：土力学

实验计划学时：2

常水头渗透实验

一、实验目的

测定无粘性土的渗透系数 k ，以便了解土的渗透性能大小，用于土的渗透计算和供建造土坝时选土料之用。

二、实验内容和要求

采用常水头渗透实验测定所给土样的渗透系数，并较适用于砂土的渗透系数的测定。本试验采用的纯水，应在试验前用抽气法或煮沸法脱气，试验时的水温宜高于试验室温度 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ 。当进行不同的孔隙比下的渗透试验时，应以孔隙比的为纵坐标，渗透系数的对数为横坐标，绘制关系曲线。

三、实验主要仪器设备和材料

(1) 常水头渗透仪：如图 1 所示

(2) 土样；

(2) 天平：称量 200g，感量 0.01g；

称量 1000g，感量 0.1g；

(3) 其它：木击锤、秒表、温度计、量杯等。

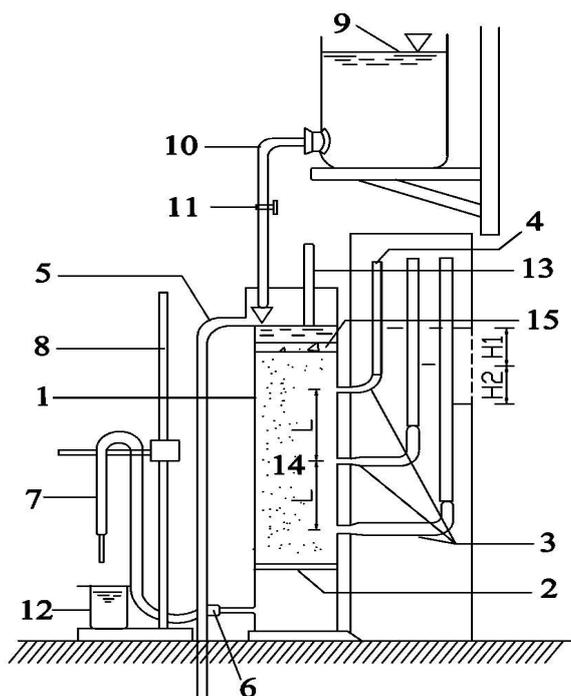


图 1 常水头渗透装置

1—试样筒；2—金属孔板；3—测压孔；4—玻璃测压管；5—溢水孔；6—渗水孔；7—调节管；8—滑动支架；9—容量为 5000ml 的供水管；10—供水管；11—止水夹；12—容量为 500ml 的量筒；13—温度计；14—试样；15—砾石层

四、 实验方法、步骤及结果测试

1、按本标准图 1 装好仪器，量测滤网至筒顶的高度，将调节管和供水管相连，从渗水孔向圆筒冲水至高出滤网顶面。

2、取具有代表性的风干土样 3~4kg，测定其风干含水率。将风干土样分层装入圆筒内，每层 2~3cm，根据要求的孔隙比，控制试样厚度。当试样中含粘粒时，应在滤网上铺 2cm 厚的粗砂作为过滤层，防止细粒流失。每层试样装完后从渗水孔向圆筒充水至试样顶面，最后一层试样应高出测压管 3~4cm，并在试样顶面铺 2cm 砾石作为缓冲层。当水面高出试样顶面时，应继续充水至溢水孔有水溢出。

3、量试样顶面至筒顶高度，计算试样高度，称剩余土样的质量，计算试样质量。

4、检查测压管水位，当测压管与溢水孔水位不平时，用吸球调整测压管水位，直至两者水位齐平。

5、将调节管提高至溢水孔以上，将供水管放入圆筒内，开止水夹，使水由顶部注入圆筒，降低调节管至试样上部 1 / 3 高度处，形成水位差使水渗入试样，经调节管流出。调节供水管止水夹，使进入圆筒的水量多于溢出的水量，溢水孔始终有水溢出，保持圆筒内水位不变，试样处于常水头下渗透。

6、当测压管水位稳定后，测记水位。并计算各测压管之间的水位差。按规定时间记录渗出水量，接取渗出水量时，调节管口不得浸入水中，测量进水和出水处的水温，取平均值。

7、降低调节管至试样的中部和下部 1 / 3 高度处，按本步骤 5、6 重复测定渗出水量和水温，当不同水力坡降下测定的数据接近时，结束试验。

8、根据工程需要，改变试样的孔隙比，继续试验。

9、按下式计算常水头渗透系数：

$$k_T = \frac{QL}{AHt}$$

式中 k_T —水温为 $T^{\circ}\text{C}$ 时试样的渗透系数 (cm/s)；

Q —时间 t 秒内的渗出水量 (cm³)；

L —两侧压管中心间的距离 (cm)；

A —试样的断面积 (cm²)；

H —平均水位差 (cm)；

t —时间 (s)。

注：平均水位差 H 可按 $(H_1+H_2)/2$ 公式计算。

五、 实验报告要求

本试验记录格式如下：

常水头渗透试验

班级_____组别_____学号_____姓名_____

试验日期_____土样说明_____试样高度_____

干土重_____试样面积_____孔隙比_____

测孔压间距_____土粒比重 G_s _____

常水头渗透试验记录

试验次数	经过时间	测压管水位 (cm)			水位差			水力坡降	渗水量 cm	渗透系数 cm/s	水温 °C	校正系数	水温 20°C 时的渗透系数 cm/s	平均渗透系数 cm/s
	s	I	II	III	H_1	H_2	平均							
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)							
					(2)-(3)	(3)-(4)	$\frac{(5)+(6)}{2}$	$\frac{1}{(7) \cdot L}$	$\frac{(9)}{A \cdot (8) \cdot (1)}$	$\frac{\eta_T}{\eta_{20}}$	(10) × (12)			

水的动力粘滞系数、粘滞系数比、温度校正值

温度 (℃)	动力粘滞系数 η [(kPa·s (10^{-6})]	η_T / η_{20}	温度校正值 T_p	温度 (℃)	动力粘滞系数 η [(kPa·s (10^{-6})]	η_T / η_{20}	温度校正值 T_p
5.0	1.516	1.501	1.17	17.5	1.074	1.066	1.66
5.5	1.498	1.478	1.19	18.0	1.061	1.050	1.68
6.0	1.470	1.455	1.21	18.5	1.048	1.038	1.70
6.5	1.449	1.435	1.23	19.0	1.035	1.025	1.72
7.0	1.428	1.414	1.25	19.5	1.022	1.012	1.74
7.5	1.407	1.393	1.27	20.0	1.010	1.000	1.76
8.0	1.387	1.373	1.28	20.5	0.998	0.988	1.78
8.5	1.367	1.353	1.30	21.0	0.986	0.976	1.80
9.0	1.347	1.334	1.32	21.5	0.974	0.964	1.83
9.5	1.328	1.315	1.34	22.0	0.968	0.958	1.85
10.0	1.310	1.297	1.36	22.5	0.952	0.943	1.87
10.5	1.292	1.279	1.38	23.0	0.941	0.932	1.89
11.0	1.274	1.261	1.40	24.0	0.919	0.910	1.94
11.5	1.256	1.243	1.42	25.0	0.899	0.890	1.98
12.0	1.239	1.227	1.44	26.0	0.879	0.870	2.03
12.5	1.223	1.211	1.46	27.0	0.859	0.850	2.07
13.0	1.206	1.194	1.48	28.0	0.841	0.833	2.12
13.5	1.188	1.176	1.50	29.0	0.823	0.815	2.16
14.0	1.175	1.168	1.52	30.0	0.806	0.798	2.21
14.5	1.160	1.148	1.54	31.0	0.789	0.781	2.21
15.0	1.144	1.133	1.56	32.0	0.773	0.765	2.3
15.5	1.130	1.119	1.58	33.0	0.757	0.750	2.34
16.0	1.115	1.104	1.60	34.0	0.742	0.735	2.39
16.5	1.101	1.090	1.62	35.0	0.727	0.720	2.43
17.0	1.088	1.077	1.64				

变水头渗透实验

一、 实验目的

测定无粘性土的渗透系数 k ，以便了解土的渗透性能大小，用于土的渗透计算和供建造土坝时选土料之用。

二、 实验内容和要求

细粒土由于孔隙小，且存在粘滞水膜，若渗透压力较小，则不足以克服粘滞水膜的阻滞作用，因而必须达到某一起始比降后，才能产生渗流。变水头渗透试验适用于细粒土。

三、 实验主要仪器设备和材料

- (1) 变水头渗透仪：如图 2 所示
- (2) 其它：100ml 量筒、秒表、温度计、凡士林等。

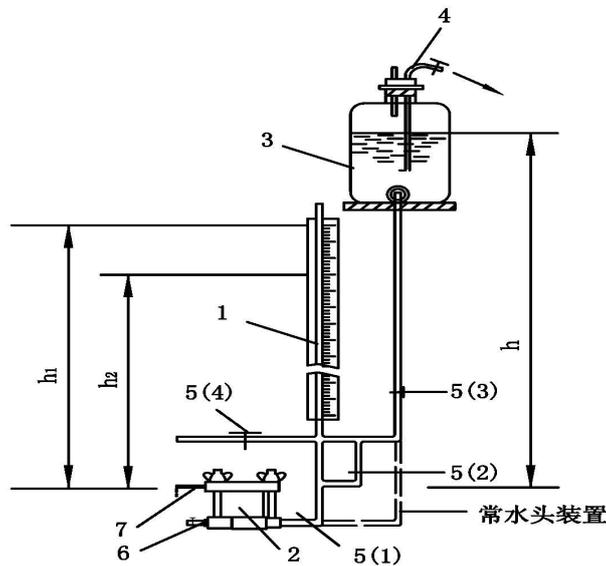


图 2 变水头渗透装置

1—变水头管；2—渗透容器；3—供水瓶；4—接水源管；5—进水管夹；
6—排气管；7—出水管

四、 实验方法、步骤及结果测试

- 1、 装土：将装有试样的环刀推入套筒内并压入止水垫圈。装好带有透水石和垫圈的上下盖，并用螺丝拧紧，不得漏气漏水。
- 2、 供水：把装好试样的容器进水口与供水装置连通，关止水夹，向供水瓶注满水。
- 3、 排气：把容器侧立，排气管向上，并打开排气管止水夹。然后开进水口夹，排除容器底部的空气，直至水中无气泡溢出为止。关闭排气管止水夹，平放好容器。在不大于 200cm 水头作用下，静置某一段时间，待容器出水口有水溢出后，则认为试样已达饱和。
- 4、 测记：使变水头管充水至需要高度后，关止水夹，开动秒表，同时测记开始水头 h_1 ，经过时间 t 后，再测记终止水头 h_2 ，同时测记试验开始与终止时的水温。如此连续测记 2~3 次后，再使变水头管水位回升至需要高度，再连续测记数次，前后需 6 次以上。
- 5、按下式计算变水头渗透系数：

$$k_T = 2.3 \frac{aL}{A(t_1 - t_2)} \log \frac{H_1}{H_2}$$

式中 k_T —水温为 $T^\circ\text{C}$ 时试样的渗透系数 (cm / s)；

a —变水头管截面积 (cm²)；

L —渗径，即试样高度 (cm)；

2.3—ln 和 log 的变换因数；

H_1, H_2 —起始和终止水头 (cm)；

t_1, t_2 —分别为测读水头的起始和终止时间 (s)。

五、 实验报告要求

本试验记录格式如下：

变水头渗透试验

班级_____组别_____学号_____姓名_____

试验日期_____ 土样说明_____ 试样高度_____

干土重_____ 试样面积_____ 孔隙比_____

测孔压间距_____ 土粒比重 G_s _____

变水头渗透试验记录

开始 时间	终了 时间	经过 时间	开始 水头	终了 水头	$2.3 \frac{aL}{At}$	$\lg \frac{h_1}{h_2}$	水温 $T^\circ\text{C}$ 时的渗 透系数 k_T	水 温	校正 系数 μ_T/μ_{20}	渗透 系数 k_{20}	平均渗透 系数 k_{20}
t_1	t_2	t	h_1	h_2	10^{-4}	10^{-2}	10^{-6} (cm/s)	$^\circ\text{C}$		10^{-6} (cm/s)	10^{-6} (cm/s)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
		(2)-(1)				$\lg \frac{(4)}{(5)}$	(6) × (7)			(8) × (10)	

六、 思考题

- 1、什么是土的渗透性？
- 2、如何测定土的渗透系数？概括下常水头渗透试验和变水头试验各适合什么类型的土样？
- 3、在施工坝体工程中，如何参照土的渗透系数来选取合适的填土？

界限含水量实验

实验项目名称：界限含水量实验

实验项目性质：普通实验

所属课程名称：土力学

实验计划学时：2

一、实验目的

土的液限、塑限、塑性指数不仅表征了土的稠度状态，而且反映了土质的差异，即反映了土的颗粒成分，矿物成分以及土的胶体化学性质等，是这些因素的综合反映。目前国内外普遍采用塑性指数或塑性指数与液限进行土的分类。由于土的稠度界限与土的物理力学性质存在密切的关系，根据这些简单的物理指标可以分析、判断土的物理力学特征。因此，正确测定土的界限含水量具有重要的实际意义。

需要说明的是，土从流动状态到可塑状态，从可塑状态到半固体状态的性质变化都是渐变的。因此，在两者之间确定的界限都带有一定的任意性。

二、实验内容和要求

采用液限、塑限联合测定仪测定土样的液限和塑限，计算该土样的塑性指数，并对土样进行分类。

液、塑限联合测定法适用于粒径小于 0.5mm 以及有机质含量不大于试样总质量 5% 的土。

三、 实验主要仪器设备和材料

- 1、光电式液、塑限联合测定仪。
- 2、天平：称量 200g，感量 0.01g。
- 3、其它：筛（0.5mm）、铝盒、秒表、调土杯、调土刀、刮土刀、滴管、凡士林、蒸馏水等。

四、 实验方法、步骤及结果测试

1、试样宜采用风干土样和天然含水量土样。当试样中含有粒径大于 0.5mm 的土粒或杂物时，应过 0.5mm 的筛。

2、取 0.5mm 筛下的代表性土样 200g，分成三份，放入盛土器中，加不同数量的纯水，制成不同稠度的试样。试样的含水量分别接近液限、塑限和二者的中间状态。将试样调匀，密封静置 18h 以上。

3、将制备的试样搅拌均匀，填入试样杯中，对较干的试样应充分搓揉，密实地填入试样杯中，填满后刮平表面。

4、将试样杯放在联合测定仪的升降座上，在圆锥上抹一薄层凡士林，接通电源，使电磁铁吸住圆锥。

5、调整零点，调整升降座，使圆锥尖接触试样面，指示灯亮时圆锥在自重下沉入试样，经 5s 后测读圆锥下沉深度，取出试样杯，取部分试样测定含水量。

6、以相同步骤分别测定三个试样的圆锥下沉深度和含水量。

结果整理

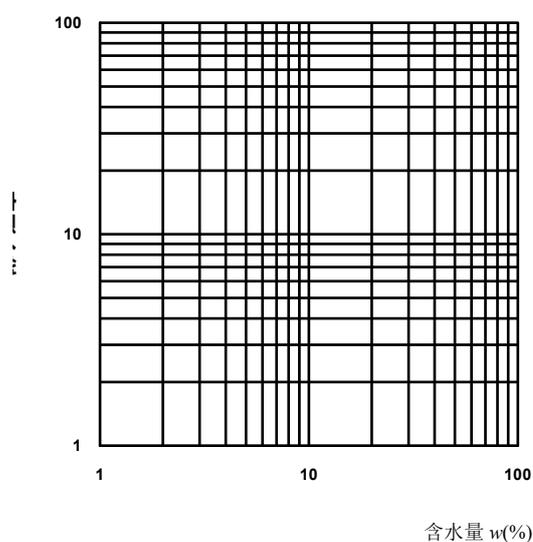
- 1、首先将测定的圆锥下沉深度和含水量记录在表中。
- 2、以含水量为横坐标，圆锥下沉深度为纵坐标，在双对数坐标

纸上绘制关系曲线，三点应在一直线上。当三点不在一直线上时，通过高含水量的点与其余两点连成两条直线，在下沉深度为 2mm 处查得相应的二个含水量，当两个含水量的差值小于 2% 时，应以该点含水量的平均值与高含水量的点连一直线，当两个含水量的差值 $\geq 2\%$ 时，应重做试验。

3、在含水量与圆锥下沉深度的关系图上，查得下沉深度为 17mm 所对应的含水量为 17mm 液限，查得下沉深度为 2mm 所对应的含水量为塑限，取直至整数。

五、实验报告要求

1、根据实验结果画图：



锥入深度与含水量($h \sim w$)关系图

2、塑限指数应按下式计算：

$$I_p = w_L - w_p$$

式中 I_p —塑限指数；

w_L 、 w_p —液限、塑限，% ；

3、由计算结果对土样进行分类。

六、 思考题

- 1、土的液限、塑限的物理意义是什么？
- 2、什么是塑性指数？其大小与颗粒粗细有何定性关系？塑性指数大的土具有哪些特点？
- 3、用什么指标来判别粘性土的软硬状态？

固结实验

实验项目名称：固结实验

实验项目性质：综合性实验

所属课程名称：土力学

实验计划学时：2

一、实验目的

固结实验是研究土体以维变形特性的测试方法。它是测定土体在压力作用下是压缩特性，所得的个项指标用以判断土的压缩性和计算土工建筑物于地基的沉降。土体的压缩性实际上表示孔隙体积随压力的增加而减小，固结实验成果整理成 $e\sim p$ 曲线或 $e\sim \lg p$ 曲线。

固结实验的目的是测定试样在侧限条件与轴向排水条件下的变形与压力关系，以便计算土的压缩系数等压缩性指标。

二、实验内容和要求

采用固结仪测定土样在不同荷载下的变形量，根据试样的变形与压力关系，计算土样的压缩系数并判断土的压缩性。同时用环刀法测定土样的湿密度，用烘干法测定土样的含水量。

三、实验主要仪器设备和材料

1、固结容器：由环刀（ 30cm^2 或 50cm^2 ）、护环、透水石、水槽、加压上盖等组成。

2、加荷设备：应能垂直地在瞬间施加各级荷重，且没有冲击力。

3、变形量测设备：采用量程 10mm ，最小分度为 0.01mm 的百分

表。

4、其它：天平、秒表、烘箱、铝盒等。

四、 实验方法、步骤及结果测试

1、根据工程需要切取原状土样或制备所需湿度的扰动土样。切取原状土样时，应注意使土样在试验时的受压方向与天然土层受荷方向一致。

2、用钢丝锯将土样修成略大于环刀直径的土柱。然后用手轻轻将环刀垂直下压，边压边修，直至环刀装满土样为止。然后用刮土刀修平两端。注意刮平试样时，不得用刮刀往复涂抹。

3、擦净环刀外壁，称环刀与土合重，准确至 0.1g，并取环刀两面修下的土样测定其含水量。

4、在固结容器内装上切土环刀（刀口向下），土样两端应贴上洁净而湿润的滤纸，再将导环置于固结容器，然后放上透水石和传压活塞以及定向钢球。

5、将固结容器置于加压框架正中，安装量表。

6、为保证试样与仪器上下各部分之间接触良好，应施加 1.0kPa 的预压荷载，然后调整量表，使指针读数为零。

7、去掉预压荷载，施加第一级荷载。加砝码时应避免冲击和摇晃，在加上砝码的同时，启动秒表。

8、荷载加上 10 分钟时，测记量表读数，读数精确至 0.01mm。测记固结变形读数后，施加第二级荷载。依次逐级加压至试验结束。

荷载等级一般规定为 50、100、200、300、400kPa 。

9、试验结束后，迅速拆除仪器各部件，取出试样，并将仪器擦干净。

成果整理：

1、计算试验开始前的试样初始孔隙比

$$e_0 = \frac{G_s(1+w_0)}{\rho_0} - 1$$

2、计算各级荷载下变形后的孔隙比

$$e_i = e_0 - \frac{\sum \Delta h_i}{h_0} (1 + e_0)$$

3、计算某一荷载范围的压缩系数

$$a = 1000 \times \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i}$$

式中 e_0 —初始孔隙比；

G_s —土粒比重；

w_0 —初始含水量（%）；

ρ_0 —初始密度（g/cm³）；

h_0 —土样初始高度（mm）；

$\sum \Delta h_i$ —某级压力下试样的总变形量（mm）。等于该级压力下试样变形读数减去仪器变形量。

e_i —某一级荷载作用下的孔隙比；

a —压缩系数（MPa⁻¹）；

p_i —某一级荷重值（kPa）。

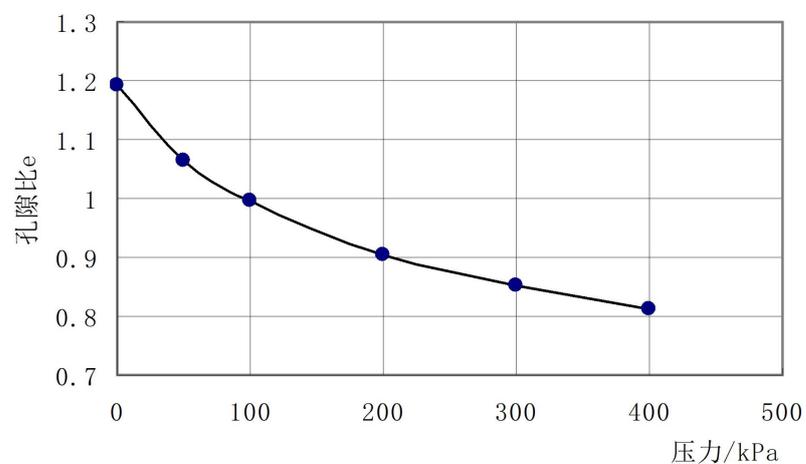
五、 实验报告要求

实验报告中按下表记录：

环刀质量	环刀加土质量	土的质量	环刀体积	土样初始密度	试样初始高度	初始含水量	土粒比重
(g)	(g)	(g)	(cm ³)	(g/cm ³)	(mm)	(%)	—

压力 KPa	试样+仪器总变形量 (mm)	仪器变形量 (mm)	试样总变形量 (mm)	孔隙比	压缩系数 (MPa ⁻¹)
p_i	(1)	(2)	(1) - (2) = $\sum \Delta h_i$	$e_i = e_0 - \sum \Delta h_i (1 + e_0) / h_0$	$a = \Delta e / \Delta p \times 1000$
50					
100					
200					
300					
400					

根据试验结果，可绘制 $e \sim p$ 关系曲线：



孔隙比 e 与压力 p 关系曲线

六、 思考题

- 1、通过固结试验可以得到哪些压缩性指标？
- 2、如何制备试样？
- 3、如何求得压缩系数？工程上如何根据压缩系数的大小来判别土的压缩性？
- 4、为什么说土的压缩变形实际上是土的孔隙体积的减小？

含水量实验

(综合实验内容之二)

土的含水量是指土在温度 $100\sim 105^{\circ}\text{C}$ 下烘至恒重时，失去的水分重量与恒重时干土重之比值，用百分数表示。

一、 实验目的

土的含水量是土的基本物理性质指标之一。它反映土的状态，它的变化将使土的一系列力学性质随之而异；它又是计算土的干密度、孔隙比、饱和度等项指标的根据，亦是检测土工构筑物施工质量的重要指标。

二、 试验方法

目前国内外测定含水量的方法有多种。但能确保质量，操作简便又能符合含水量定义的试验方法仍以烘干法为主，所以国家标准是以烘干法为室内试验的标准方法。在野外如无烘干设备或要求快速测定含水量时，可依土的性质和工程情况分别采用下列方法：

- (1) 酒精燃烧法；
- (2) 比重法：适用于砂性土；
- (3) 炒干法：适用于含砾较多的土；
- (4) 红外线照射法等。

由于学时数的限制，我们采用酒精燃烧法，以快速测定土的含水量。这里只介绍酒精燃烧法和烘干法。

三、酒精燃烧法

3.1 仪器设备

- (1) 天平：称量 500g，感量 0.01g ；
- (2) 酒精：浓度 95%以上；
- (3) 其它：铝盒、滴管、火柴等。

3.2 操作步骤

- (1) 称取铝盒；
- (2) 取代表性土样（5~10g，砂性土 20~30g），放入铝盒内。
盖上盒盖，称重；
- (3) 打开盒盖，用滴管将酒精注入试样内，直至盒中出现自由液面为止。为使酒精在试样中充分混合均匀，可将盒底在桌面上轻轻敲击；
- (4) 点燃盒中酒精，烧至火焰熄灭；
- (5) 待冷却数分钟后，按上述步骤再重复燃烧两次，当第三次火焰熄灭后，盖好盒盖待至常温时即可称干土重；

3.3 成果整理

- (1) 试样的含水量，应按下式计算，精确至 0.1% 。

$$w = \frac{g_1 - g_2}{g_2 - g_0} \times 100(\%)$$

式中， w —含水量，%；

g_0 —铝盒重，g ；

g_1 —铝盒加湿土重，g ；

g_2 —铝盒加干土重，g 。

(2) 本试样需进行二次平行测定，取二者的算术平均值。其平行差值依含水量不同，不得大于下列规定：

含水量 (%)	容许平行差值 (%)
5 以下	0.3
40 以下	1
40 以上	2

3.4 记录表格

本试验记录表格如下：

含水量试验记录

铝 盒 编 号					
盒+湿土重	g	(2)			
盒+干土重		(3)			
盒 重		(4)			
水 重		(5)=(2)-(3)			
干 土 重		(6)=(3)-(4)			
含 水 量	%	(7)=(5)/(6)			
平均含水量		(8)			

3.5 注意事项

- (1) 使用铝盒时，应注意检查盒盖与盒的号码是否一致，并注意将铝盒揩擦干净；
- (2) 本试验称重应精确至 0.01g ；
- (3) 注意在试验中不要用火柴或笔等物去搅动试样，以免将试样丢失；
- (4) 注意安全，防止火灾。

3.6 思考题

(1) 当土中含有有机质时,用酒精燃烧法测定含水量是否合适?为什么?

(2) 取样太多或太少会使试验结果怎样?

四、 烘干法

本试验适用于粘性土、砂性土和有机质土类。

4.1 仪器设备

(1) 烘箱:可采用电热烘箱或温度能保持 $100\sim 105^{\circ}\text{C}$ 的其它能源烘箱,也可用红外线烘箱。

(2) 天平:称量 500g ,感量 0.01g ;

(3) 其它:干燥器、铝盒等。

4.2 操作步骤

(1) 取具有代表性试样 $15\sim 30\text{g}$,放入铝盒内,盖上盒盖,称湿土质量,精确至 0.01g 。

(2) 打开盒盖,将盒置于烘箱内,在 $105\sim 110^{\circ}\text{C}$ 下烘干。烘干时间对粘性土不得少于 8h ,对砂性土不得少于 6h 。对含有有机质超过 5% 的土,应将温度控制在 $65\sim 70^{\circ}\text{C}$ 的恒温下烘干。

(3) 将铝盒从烘箱中取出,盖上盒盖,放入干燥容器内冷却至室温,称干土质量,精确至 0.01g 。

4.3 成果整理

计算方法及允许平行差值与酒精燃烧法相同。

4.4 记录

与酒精燃烧法相同。

4.5 思考题

- (1) 为什么规定烘干温度为 $105\sim 110^{\circ}\text{C}$?
- (2) 为什么粘性土烘干的时间要长?
- (3) 当土中有机质含量高时，为什么测得的含水量比实际的含水量要大？如何减少误差？

密度实验

(综合实验内容之三)

土的密度即土的单位体积的质量，通常以 g/cm^3 或 T/m^3 计。在天然含水量情况下的密度称为天然密度。

一、 实验目的

测定土的密度，借与土的比重、含水量实验配合，可以换算土的其它物理性质指标。工程中需要以容重（重度）值表示时，将实测密度值乘以换算系数即可。

二、 实验方法

测定密度的方法常用的有环刀法、蜡封法、灌砂法、灌水法等。它们适用于不同的土质情况。环刀法操作简便而准确，在室内和野外普遍采用，不能用环刀切削的坚硬、易碎、含有粗粒、形状不规则的土可用蜡封法。对粗粒土，可用灌砂法和灌水法在野外应用。这里只介绍环刀法，它适用于粘性土，是最常用的实验室方法。

三、 仪器设备

环刀法常用下列仪器设备：

- (1) 环刀：内径 6~8cm，高 2~3cm；
- (2) 天平：称量 500g，感量 0.1g；
- (3) 其它：切土刀、钢丝锯、凡士林等。

四、 操作步骤

- 4.1 取一环刀并称其重量，准确至 0.1g；

4.2 按工程需要取原状土或制备所需状态的扰动土样，整平其两端，将环刀内壁涂一层凡士林，刀口向下放在土样上。

4.3 用切土刀（或钢丝锯）将土样削成略大于环刀直径的土柱。然后将环刀垂直下压，并边压边削，至土样伸出环刀为止。将环刀两端余土削去修平。

4.4 擦净环刀外壁，称环刀及其土重，精确至 0.1g 。

4.5 按下式计算密度：

$$\rho = \frac{g_2 - g_1}{V}$$

式中， ρ —密度， g/cm^3 ；

g_1 —环刀重，g；

g_2 —环刀加土重，g；

V —环刀体积， cm^3

计算至 0.01g/cm^3 。

4.6 本试验需进行二次平行测定，其平均差值不得大于 0.03g/cm^3 。取其算术平均值。

五、记录

本试验记录表格如下：

密度试验（环刀法）

环刀编号		(1)				
环刀重	g	(2)				
环刀加土重		(3)				
土重		(4)=(3)-(2)				
环刀体积	cm^3	(5)				
密度	g/cm^3	(6)=(4)/(5)				
平均密度		(7)				

六、说 明

环刀法测密度是密度试验中的基本方法，试样的密度，应取土的单位体积质量。进行固结试样和直剪试验的试样，可以利用环刀切取试样直接测定，不必另取试样专门测定。

七、思考题

- 1、环刀法、蜡封法、灌水法和灌砂法各适用于什么土质条件？
- 2、简述环刀法测试密度的方法步骤。
- 3、平行试验的允许差值是多少？

抗剪强度实验

实验项目名称：抗剪强度实验

实验项目性质：普通实验

所属课程名称：土力学

实验计划学时：2

一、实验目的

土的抗剪强度是土的重要力学性质之一，建筑物地基和路基的承载力，挡土墙和地下结构的土压力，堤坝、基坑、路堑以及各类边坡的稳定性均由土的抗剪强度所控制。在土木工程建设工作中，对于土体稳定性的计算分析而言，抗剪强度是最重要的计算参数。能否正确测定土的抗剪强度，往往是设计质量和工程成败的关键所在。直接剪切实验是测定土体强度的一种常用方法。通过几个试样的抗剪强度确定强度包线，求出抗剪强度参数 c 、 φ 。

二、实验内容和要求

采用直接剪切仪测定土样在不同荷载下的抗剪强度，由此确定土样的强度与剪切面上的正应力的关系，从而确定土样的抗剪强度参数 c 、 φ 。

三、实验主要仪器设备和材料

- 1、应变控制式直剪仪；
- 2、百分表；
- 3、其它：环刀、秒表、修土刀、铝盒、天平等。

四、 实验方法、步骤及结果测试

实验方法：

直接对试样施加剪力的设备叫直接剪力仪（或简称为直剪仪），常用的直剪仪根据施加剪应力的特点分为应力控制式和应变控制式两种。应力控制式是分级施加等量水平剪力于土样使之受剪，测定其相应的位移；应变控制式是等速推动剪切容器使土样受剪产生一定位移，测定其相应的水平剪应力。应变控制式直剪仪的优点是能较准确地测定剪应力和剪切位移曲线上的峰值和最后值，且操作方便。本试验采用应变控制式直剪仪。

仪器的主要部分剪切容器是由固定的上盒和活动的下盒等部件组成。试样置于上下盒之间，在试样上先施加预定的法向压力，然后以一定速率施加水平力使试样受剪，直至试样被剪破为止。为求得土的抗剪强度参数 c 、 φ 值，一般至少用 3~4 个试样，以同样的方法分别在不同的法向压力的作用下测出相应的 τ 值，根据这些 τ 值，即可在直角坐标图中绘出抗剪强度曲线。

无论是饱和粘性土的抗剪强度试验，还是天然粘性土地基加荷过程中，孔隙水压力的消散，即荷载在土体中产生的应力全部转化为有效应力，需要一定的固结时间来完成。因此，土的固结过程，实质上也是土体强度不断增长的过程。对同一种土，即使在同一法向压力下，由于剪切前试样的固结过程和剪切试样的排水条件不同，其强度指标也是各异的。为了近似地模拟现场土体的剪切条件，即按剪切前的固结过程、剪切时的排水条件以及加荷快慢情况，将直剪试验分为快剪、

固结快剪和慢剪三种试验方法。

快剪试验

快剪试验就是在对试样施加法向压力和剪力时，都不允许试样产生排水固结。由于在直剪仪上下盒之间存在缝隙，要严格控制不排出一点水分是不可能的。为了尽量使之不排水，一般在试样上下放置不透水膜，以阻止水分排出。待施加预定的法向压力后，随即施加水平推力，并用较快的速度在 3~5min 内使试样剪破。对于某些渗透性较强的土，甚至要求在更短的时间内剪破。

此试样方法一般用来模拟现场土体的土层较厚，渗透性较小，施工速度较快，基本上来不及固结就加载剪破的情况。

固结快剪试验

先使试样在法向压力作用下达到完全固结，然后施加水平荷载进行剪切，在剪切时不让孔隙水排出，即不允许试样在剪切过程中发生固结，因此，在剪切时采用较快的速度。

固结快剪试验一般用来模拟现场土体在自重和正常荷载作用下已达到完全固结状态，以后又遇到突然施加荷载或因土层较薄、渗透性较小、施工速度较快的情况。

慢剪试验

先使试样在法向压力作用下达到完全固结，之后施以慢速剪切，要求在剪切过程中土中水能充分排出，即孔隙水压力能完全消散，直至土样被剪破为止。

这种试验方法一般用来模拟现场土体充分固结后才开始逐步缓

慢地承受荷载的情况。一般工程的正常施工速度都不符合这样的情况，所以在工程实际中较少采用。但此法所测定的强度指标，可用于有效应力的分析。

此外，由于无粘性土的渗透性大，即使快剪试验也会排水固结，所以规定对于无粘性土，可允许用一种剪切速率试验。

对于正常固结的粘性土，无论在法向压力或剪应力作用下都是压缩的，所以在一般情况下，快剪试验的抗剪强度最小，固结快剪的抗剪强度增大，而慢剪试验的抗剪强度最大。

由于教学时数所限，本试验只做快剪试验一种方法。

操作步骤：

1、试样制备，方法及步骤与土的密度试验相同。每组试样不得少于4个，分别做垂直压力为100、200、300和400kPa的剪切试验。

2、对准剪切容器上下盒，插入固定销，在下盒放透水石和不透水膜一张。

3、将装有土样的环刀，平口朝下，对准剪切盒口，在试样上放不透水膜和透水石，然后将试样小心地推入剪切盒内，再移去空环刀。

4、顺次加上传压活塞、钢球，然后安装量力环，并在环中水平向安装百分表，慢慢转动手轮，使下盒前端钢珠刚好与量力环接触（即量力环中百分表的指针刚转动时），调整量力环中百分表读数为零。

5、加上框架。将所需垂直压力一次轻轻加上。然后立即拔去插销，随即均匀转动手轮，同时开动秒表。手轮转速对一般粘性土规定

为 5~10s 旋转一周（可按每 10s 一周）。

6、观测量力环中的百分表读数，当指针不再前进或出现后退时，可认为土样已经剪破，记录此时百分表读数（精确至 0.01mm）。若量力环中百分表指针随手轮的继续旋转而不断前进，则规定以 5mm 作为最大剪切变形的控制峰值。即可停止剪切（如需要时，可测记手轮转数与量力环中百分表的相应的读数，以便绘出每级剪力下的应力应变曲线）。

7、顺次取下砝码、加压框架、钢球及传压活塞，将手轮倒退回原位，然后将上盒取下将土样取出，再依照步骤 1~6 做其它垂直压力下的剪切。

成果整理：

按下式计算每一试样的抗剪强度：

$$\tau_f = C_d \cdot R$$

式中 τ_f —相应于某一垂直压力下的抗剪强度（kPa）；

C_d —量力环率定系数（kPa/0.01mm）；可按量力环编号查得（量力环率定系数由实验室提供）。

R —量力环中百分表读数（0.01mm）。

绘制抗剪强度与垂直压力的关系图：

以垂直压力为横坐标，抗剪强度为纵坐标，将每一试样的抗剪强度点绘在坐标图上，连成一直线。此直线的倾角即为土样的内摩擦角，其在纵坐标上的截距为。

若各点不在一条直线上，可画出一条直线使之尽量靠近每一个

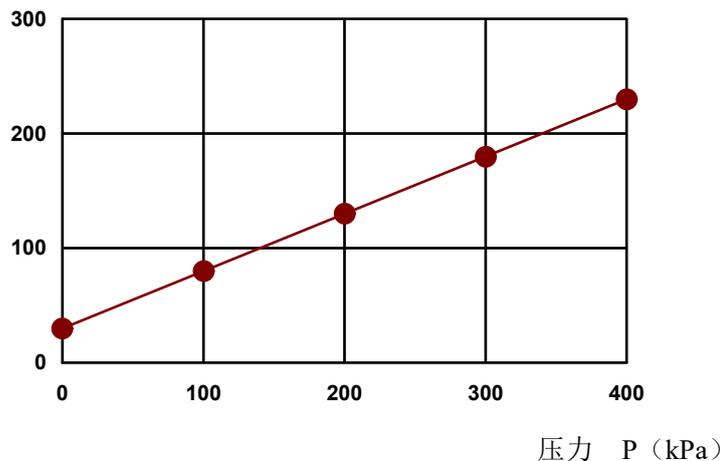
点，即采用最小二乘法的原则来处理。

五、实验报告要求

实验报告中按下表记录：

仪器编号：			钢环率定系数：	
土样面积：			百分表初始读数：	
试样	经过时间	垂直压力 (kPa)	百分表读数 (0.01mm)	抗剪强度 (kPa)
1				
2				
3				
4				

根据试验结果，可绘制压力~抗剪强度关系曲线，并由量角器确定该土样的内摩擦角 φ ，由曲线的截距确定土样的粘聚力 c 值。



压力与抗剪强度关系曲线

六、思考题

1、三种直剪试验方法各有何特点？如何根据工程实际情况来确定试验方法？

2、如何考虑剪切破坏标准？若百分表无峰值出现，为什么规定以 5mm 作为最大剪切变形的控制峰值？

3、快剪试验为什么要求在 3~5min 内剪破？

附录 1 电子天平使用方法介绍

电子天平可以直接显示被称物的质量，与传统的机械天平相比可大大提高效率，同时还可大大减少人为误差。

一、安装

- 1、将天平放在工作台上，调整水平旋钮，使天平处于水平状态；
- 2、接通电源，开机预热至天平稳定后使用。

二、校准

天平开机预热后，在进行首次称量之前应进行校准，为了提高称量的准确性，以后应定期用标准码进行检查，如有误差应立即进行校准。校准方法如下：

- 1、按去皿键，使天平显示值为 0.00；
- 2、按校准键，此时天平显示“[”和占用符“0”，（如果显示 CE，表示出错则须按去皿键，再重新进行校准）。
- 3、将相应校准码置于秤盘上，等待天平显示校准砝码值并发“嘟”声；
- 4、天平校准完毕自动回复到称重状态取下校准砝码即可进行称量。

三、称量

- 1、去皿称量：
 - （1）按去皿键，使天平显示值为 0.00g，将物品放在秤盘上，显示值即为该物品的重量；
 - （2）按去皿键，显示值即回复到 0.00g，再将第二种物品放在秤盘上，显示值即为第二种物品的重量；
 - （3）再按去皿键，显示值又回复到 0.00g，天平可在称量范围内连续去皿，当秤盘上的总重量超过报警值时，天平显示承载报警符号“H”，此时应将物品拿去。
- 2、稳定指示信号：当稳定信号“g”出现时，表示显示读数已进入稳定状态。
占用符号：天平显示占用符号“0”，表示天平内电脑正在进行处理工作，请耐心等待。
- 3、信号输出：天平可带有 RS232C 串行数据输出接口可与计算机、打印机等外设联用。

四、维护与保养

- 1、天平应保持清洁，谨防灰尘等物钻入，天平应放在无腐蚀性气体、无振动、无气流、无热辐射、无强磁场的环境中。工作台必须稳定坚固，输入电源必须有良好的接地。
- 2、根据天平的使用程序，应作周期性的检查校准。
- 3、在搬动天平和拆卸外围设备前，一定要关掉电源，以免损害天平。

附录 2 土工试验项目一览表

种类	试验项目	试验成果	成果的应用	备注
土的物理性试验	含水量试验	含水量	计算土的基本物理性指标	
	界限含水量试验 液限试验 塑限试验	液限、塑限 塑性指数、液性指数	利用塑性图进行土的工程分类，判断土的状态。	
	密度试验	土的密度及干密度	计算土的基本物理性指标及土的压实性	
	比重试验	土粒比重	计算土的基本物理性指标	
	相对密度试验 最大孔隙比 最小孔隙比	相对密度 最小干密度 最大干密度	判断砂砾土的状态	
	颗粒大小分析 筛分析 沉淀法分析	颗粒大小分布曲线 不均匀系数 曲率系数	用于土的工程分类及作为材料的标准	
土的力学性试验	击实试验	含水量与干密度曲线 最大干密度 最优含水量	用于填方工程施工方法的选择和质量控制	
	渗透试验 常水头试验 变水头试验	渗透系数	用于有关渗透问题的计算	
	固结试验	孔隙比与压力曲线：压缩系数、体积压缩系数、压缩指数、回弹指数、先期压力 时间与压缩曲线：固结系数	计算土体的沉降量 计算土体的沉降速率	
	剪切试验 直剪试验 三轴试验 无侧限抗压强度	抗剪强度参数： 内摩擦角、凝聚力 内摩擦角、凝聚力 孔压系数、应力应变关系 抗压强度、灵敏度、应力应变关系	计算地基、斜坡、挡土墙等的稳定性	

附录3 试验数据的有效位数

项 目	单 位	有 效 位 数	允 许 误 差
天 然 密 度	g/cm ³	0.01	0.03
天 然 含 水 量	%	0.1	2(最大)
颗 粒 比 重		0.01	0.02
天 然 孔 隙 比		0.001	2
相 对 密 度		0.01	
液 限 、 塑 限	%	0.1	
液 性 指 数		0.01	
颗 粒 分 析	%	0.1	
不 均 匀 系 数		0.1	
渗 透 系 数	cm/s	0.1×10^{-2}	
压 缩 系 数	MPa ⁻¹	0.001	
凝 聚 力	KPa	0.01	
内 摩 擦 角	°	0.5	
无侧限抗压强度	KPa	0.1	

参 考 文 献

- 1 国标《土工试验方法标准》(GB/T50123-1999)及条文说明,中国计划出版社,1999。
- 2 国标《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2002)及条文说明,中国建筑工业出版社,1989。
- 3 水利电力部,土工试验规程(SD 128-84),水利电力出版社,1984。
- 4 王锺琦等,岩土工程测试技术,中国建筑工业出版社,1986。
- 5 窦宜等,土工实验室测定技术,水利电力出版社,1987。
- 6 国标《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)及条文说明,中国建筑工业出版社,2002。
- 7 杨迎晓,土力学试验指导,浙江大学出版社,2007。