

土力学实验指导书

郭莹 唐洪祥 编

大连理工大学土木水利实验教学中心

2012年10月

前 言

大连理工大学土木水利学院针对土木水利学院各个专业开设的 68 学时“土力学”理论课程中设置有 12 个学时的试验课程学时，目前分别进行液、塑限联合测定试验、压缩试验、直剪试验和三轴演示试验。该试验课程需要配套的试验指导书。

另外，为了满足试验教学改革的需要，有必要在试验课程中设置一定学时、能够在更多种试验项目中选择的试验课程内容和试验项目，也需要配套的、全面的试验指导书，不仅有利于学生在理论课基础上掌握更详细的土工试验技术，也有利于学生课外预习。目前广泛开展的大学生创新试验计划项目，要求学生掌握基础试验方法，为了满足多种类型大学生创新试验计划项目进行试验创新研究的需要，也需要更加详细而全面的各种试验项目指导书。

为了满足上述试验教学改革的需要，特编制“土力学试验指导书”。鉴于不同专业土工试验依据的规程存在相当大的差异，而“土力学”课程面向土木、水利所有专业学生而开设，因此，本试验指导书主要依据国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123—1999，及中华人民共和国行业标准《土工实验规程》SL 237—1999 编制而成。为了显示本试验指导书的权威性，也便于回溯、查找，本指导书的试验过程编号依然保持与“土工试验方法标准”及“土工实验规程”一致。为了方便阅读，将原标准中附录表编在各章之中；标准中有些错误进行更正后加了“编者注”。为了保持与理论课程的有机联系，为了使学生更好地理解、掌握每一种试验项目，在每一个试验项目之前，添加了试验项目的基本地位与基本概念，便于学生学习、参考。

为了满足试验教学和理论教学的需求，试验指导书详细汇编了标准中与本科教学直接相关的试验项目共 7 个，包括了详细试验设备、试验方法和试验过程。本书所列试验项目全部包含在“土力学”理论课程教学内容之中，详细实验原理请参照《土力学》教材。

本试验指导书由郭莹、唐洪祥编制。

感谢大连理工大学教务处和土木水利学院的大力支持与帮助，感谢岩土工程研究所的支持与帮助。感谢研究生王跃新和王超在指导书编制过程中的协助。

敬请提出宝贵意见。

编者
2012 年 10 月

目 录

第一章 含水率试验	1
第二章 密度试验	3
第三章 界限含水率试验	5
第四章 固结试验	8
第五章 三轴压缩试验	13
第六章 直接剪切试验	27
第七章 无粘性土休止角实验	31
参考文献	33

第一章 含水率试验

“土力学”课程中在“土的物理性质和工程分类”一章中“土的物理性质指标”一节涉及这部分内容，含水率是土体的基本试验指标之一，该指标只能通过试验测定。与土粒比重、天然密度合称为土的直接试验指标，是确定土的其他物理指标的重要基础试验指标。在界限含水率试验中也需要利用该方法测定土体在不同条件下的含水率。

含水率的定义是土中水的含量与土粒质量的比值，常以百分数表示。是描述土体的干湿和软硬物理性质的指标。

含水率试验有多种试验方法，这里采用的是烘干法。

关于含水率试验在“土工试验方法标准”4中做出详细规定。摘录如下。

4 含水率试验

4.0.1 本试验方法适用于粗粒土、细粒土、有机质土和冻土。

4.0.2 本试验所用的主要仪器设备，应符合下列规定：

1 电热烘箱：应能控制温度为 105~110℃。

2 天平：称量 200g，最小分度值 0.01g；称量 1000g，最小分度值 0.1g。

4.0.3 含水率试验，应按下列步骤进行：

1 取具有代表性试样 15~30g 或用环刀中的试样，有机质土、砂类土和整体状构造冻土为 50g，放入称量盒内，盖上盒盖，称盒加湿土质量，准确至 0.01g。

2 打开盒盖，将盒置于烘箱内，在 105~110℃ 恒温下烘至恒量。烘干时间对粘土、粉土不得少于 8h，对砂土不得少于 6h，对含有有机质超过干土质量 5% 的土，应将温度控制在 65~70℃ 的恒温下烘至恒重。

3 将称量盒从烘箱中取出，盖上盒盖，放入干燥容器内冷却至室温，称盒加干土质量，准确至 0.01g。

4.0.4 试样的含水率，应按下式计算，准确至 0.1%。

$$w_0 = \left(\frac{m_0}{m_d} - 1 \right) \times 100 \quad (4.0.4)$$

式中 m_d ——干土质量 (g)；

m_0 ——湿土质量 (g)。

4.0.5 对层状和网状构造的冻土含水率试验应按下列步骤进行：用四分法切取 200~500g 试样（视冻土结构均匀程度而定，结构均匀少取，反之多取）放入搪瓷盘中，称盘和试样质量，准确至 0.1g。

待冻土试样融化后，调成均匀糊状（土太湿时，多余的水分让其自然蒸发或用吸球吸出，但不得将土粒带出；土太干时，可适当加水），称土糊和盘质量，准确至 0.1g。从糊

状土中取样测定含水率，其试验步骤和计算按本标准第 4.0.3、4.0.4 条进行。

4.0.6 层状和网状冻土的含水率，应按下式计算，准确至 0.1%。

$$w = \left[\frac{m_1}{m_2} (1 + 0.01w_h) - 1 \right] \times 100 \quad (4.0.6)$$

式中 w ——含水率 (%)；

m_1 ——冻土试样质量 (g)；

m_2 ——糊状试样质量 (g)；

w_h ——糊状试样的含水率 (%)。

4.0.7 本试验必须对两个试样进行平行测定，测定的差值：当含水率小于 40% 时为 1%；当含水率等于、大于 40% 时为 2%。取两个测值的平均值，以百分数表示。

4.0.8 含水率试验的记录格式如表 4.0.8 所示。

表 4.0.8 含水率试验记录

工程名称 _____ 试验者 _____
 工程编号 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

试样编号	盒号	盒质量 (g)	盒加湿土 质量(g)	盒加干土 质量(g)	湿土质量 (g)	干土质量 (g)	含水率 (%)	平均含水 率(%)

第二章 密度试验

“土力学”课程中在“土的物理性质和工程分类”一章中“土的物理性质指标”一节涉及这部分内容，密度也是土体的基本试验指标之一，只能通过试验测定，和土粒比重、含水率合称为土的直接试验指标。是确定土的其他物理指标的重要基础试验指标。土体天然状态下为非饱和状态，测定的密度常称为湿密度，在天然状态下为饱和状态，测定的密度即为饱和密度。

密度的定义是土体的质量与土体的体积的比值，即单位土体体积中土的质量，以 g/cm^3 为单位。是描述土体的轻重、松密等物理性质的指标。

密度试验有多种试验方法：环刀法、灌水法和灌砂法是常用的试验方法，这里仅摘录适用于细粒土的环刀法和适用于野外密度试验的灌水法。

关于密度试验的两种试验方法在“土工试验方法标准”5中做出详细规定。摘录如下。

5 密度试验

5.1 环刀法

5.1.1 本试验方法适用于细粒土。

5.1.2 本试验所用的主要仪器设备，应符合下列规定：

1 环刀：内径 61.8mm 和 79.8mm，高 20mm。

2 天平：称量 500g，最小分度值 0.1g；称量 200g，最小分度值 0.01g。

5.1.3 环刀法测定密度，应按本标准第 3.1.4 条 2 款的步骤进行。

5.1.4 试样的湿密度，应按下式计算：

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V} \quad (5.1.4)$$

式中 ρ_0 ——试样的湿密度 (g/cm^3)，准确到 0.01 g/cm^3 。

5.1.5 试样的干密度，应按下式计算：

$$\rho_d = \frac{\rho_0}{1 + 0.01w_0} \quad (5.1.5)$$

5.1.6 本试验应进行两次平行测定，两次测定的差值不得大于 $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ ，取两次测值的平均值。

5.1.7 环刀法试验的记录格式见表 5.1.7。

表 5.1.7 密度试验记录（环刀法）

工程名称_____ 试验者_____

工程编号_____ 计算者_____

试验日期_____ 校核者_____

试样 编号	环刀号	湿土质量 (g)	试样体积 (cm ³)	湿密度 (g/cm ³)	试样含水 率(%)	干密度 (g/cm ³)	平均干密度 (g/cm ³)

第三章 界限含水率试验

“土力学”课程中在“土的物理性质和工程分类”一章中“土的物理状态指标”一节涉及这部分内容。土体是三相介质，由固体颗粒、水和气所组成，尽管决定土体性质的是固体颗粒，但是水对土体特别是细颗粒土产生很大的影响。随着含水率的变化土体可能呈现固态、半固态、可塑态和流态，其中的分界含水率即为界限含水率，其中区别半固态与可塑态的界限含水率称为塑限，区别可塑态与流态的界限含水率称为液限，塑限和液限能够通过试验方法测定。

由液限和塑限能够确定塑性指数，进而进行细粒土的分类定名。根据天然含水率和液限、塑限能够确定土体的液性指数，进而能够判定粘性土的稠度状态，即软硬程度，因此液限和塑限是进行粘性土的分类定名和物理状态评价的重要指标。

界限含水率试验一般采用液、塑限联合测定法，此外也可以采用碟式仪测定液限，配套采用搓条法测定塑限，前者目前应用得更加普遍。

关于界限含水率试验在“土工试验方法标准”8中做出详细规定。摘录如下。

8 界限含水率试验

8.1 液、塑限联合测定法

8.1.1 本试验方法适用于粒径小于 0.5mm 以及有机质含量不大于试样总质量 5% 的土。

8.1.2 本试验所用的主要仪器设备，应符合下列规定：

1 液、塑限联合测定仪（图 8.1.2）：包括带标尺的圆锥仪、电磁铁、显示屏、控制开关和试样杯。圆锥仪质量为 76g，锥角为 30°；读数显示宜采用光电式、游标式和百分表式；试样杯内径为 40mm，高度为 30mm。

2 天平：称量 200g，最小分度值 0.01g。

8.1.3 液、塑限联合测定法试验，应按下列步骤进行：

1 本试验宜采用天然含水率试样，当土样不均匀时，采用风干试样，当试样中含有粒径大于 0.5mm 的土粒和杂物时，应过 0.5mm 筛。

2 当采用天然含水率土样时，取代表性土样 250g；采用风干试样时，取 0.5mm 筛下的代表性土样 200g，将试样放在橡皮板上用纯水将土样调成均匀膏状，放入调土皿，浸润过夜。

3 将制备的试样充分调拌均匀，填入试样杯中，填样时不应留有空隙，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。

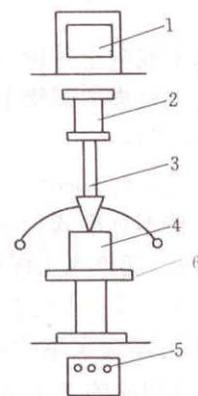


图 8.1.2 液、塑限联合测定仪示意图
1—显示屏；2—电磁铁；3—带标尺的圆锥仪；
4—试样杯；5—控制开关；6—升降座

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，使磁铁吸住圆锥。

5 调节零点，将屏幕上的标尺调在零位，调整升降座、使圆锥尖接触试样表面，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（显示在屏幕上），取出试样杯，挖去锥尖入土处的凡士林，取锥体附近的试样不少于 10g，放入称量盒内，测定含水率。

6 将全部试样再加水或吹干并调匀，重复本条 3 至 5 款的步骤分别测定第二点、第三点试样的圆锥下沉深度及相应的含水率。液塑限联合测定点应不少于三点。

注：圆锥入土深度宜为 3~4mm，7~9mm，15~17mm。

8.1.4 试样的含水率应按本标准式（4.0.4）计算。

8.1.5 以含水率为横坐标，圆锥入土深度为纵坐标在双对数坐标纸上绘制关系曲线（图 8.1.5），三点应在一条直线上，如图中 A 线。当三点不在一直线上时，通过高含水率的点和其余两点连成二条直线，在下沉为 2mm 处查得相应的 2 个含水率，当两个含水率的差值小于 2% 时，应以两点含水率的平均值与高含水率的点连一直线如图 B 线，当两个含水率的差值大于、等于 2% 时，应重做试验。

8.1.6 在含水率与圆锥下沉深度的关系图（见本标准图 8.1.5）上查得下沉深度为 17mm 所对应的含水率为液限，查得下沉深度为 10mm 所对应的含水率为 10mm 液限，查得下沉深度为 2mm 所对应的含水率为塑限，取值以百分数表示，准确至 0.1%。

8.1.7 塑性指数应按下式计算：

$$I_p = w_L - w_p \quad (8.1.7)$$

式中 I_p ——塑性指数；
 w_L ——液限（%）；
 w_p ——塑限（%）。

8.1.8 液性指数应按下式计算：

$$I_L = \frac{w_0 - w_p}{I_p} \quad (8.1.8)$$

式中 I_L ——液性指数，计算至 0.01。

8.1.9 液、塑限联合测定法试验的记录格式见表 8.1.9。

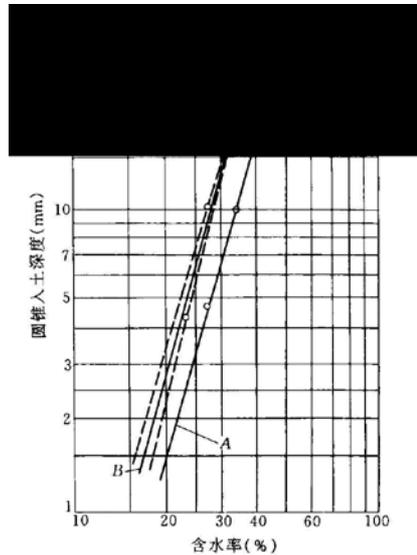


图 8.1.5 圆锥下沉深度与含水率关系曲线

表 8.1.9 界限含水率试验记录（液、塑限联合测定法）

工程名称 _____ 试验者 _____
 工程编号 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

试样编号	圆锥下沉深度 (mm)	盒 号	湿土质量	干土质量	含水率	液限	塑限	塑性
			(g)	(g)	(%)	(%)	(%)	指数
			(1)	(2)	$(3)=[(1)/(2)-1] \times 100$	(4)	(5)	$(6)=(4)-(5)$

第四章 固结试验

“土力学”课程中在“土的压缩性和基础沉降计算”一章中“压缩试验及压缩性指标”、“基础最终沉降量计算”和“饱和粘性土的单向渗透固结理论”等节均涉及这部分内容。土体是三相介质，具有孔隙，因此在外力的作用下将产生压缩变形。在一般工程荷载范围内，土颗粒和孔隙水本身的变形忽略不计，因此土体的压缩主要是因为土骨架重新排列、排水、排气。对于非饱和土体常称为压缩试验，对于饱和土体常称为固结试验。

土体的固结试验的主要成果是 $e-p$ 曲线和 $e-\lg p$ 曲线。

关于固结试验在“土工试验方法标准”14中做出详细规定。摘录如下。

14 固结试验

14.1 标准固结试验

14.1.1 本试验方法适用于饱和的粘土。当只进行压缩时，允许用于非饱和土。

14.1.2 本试验所用的主要仪器设备，应符合下列规定：

1 固结容器：有环刀、护环、透水板、水槽、加压上盖组成（图 14.1.2）。

1) 环刀：内径为 61.8mm 和 79.8mm，高度为 20mm。环刀应具有一定的刚度，内壁应保持较高的光洁度，宜涂一薄层硅脂或聚四氟乙烯。

2) 透水板：氧化铝或不受腐蚀的金属材料制成，其渗透系数应大于试样的渗透系数。用固定式容器时，顶部透水板直径应小于环刀内径 0.2~0.5mm；用浮环式容器时上下端透水板直径相等，均应小于环刀内径。

2 加压设备：应能垂直在瞬间施加各级规定的压力，且没有冲击力，压力准确度应符合现行国家标准《土工仪器的基本参数及通用技术条件》GB/T15406 的规定。

3 变形量测设备：量程 10mm，最小分度值为 0.01mm 的百分表或准确度为全程 2% 的位移传感器。

14.1.3 固结仪及加压设备应定期校准，并应做仪器变形校正曲线，具体操作见有关规定。

14.1.4 试样制备应按本标准第 3.1.4 条的规定进行。并测定试样的含水率和密度，取切下的余土测定土粒比重。试验需要饱和时，应按本标准第 3.2.4 条步骤的规定进行抽气饱和。

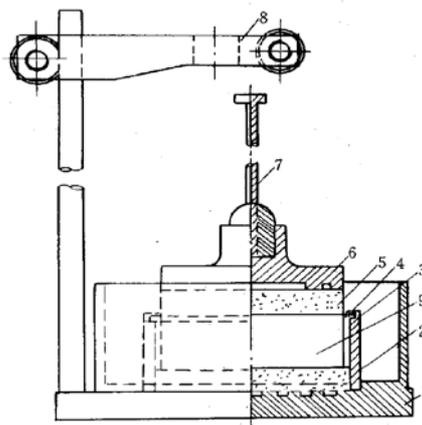


图 14.1.2 固结仪示意图

1—水槽；2—护环；3—环刀；4—导环；5—透水板；
6—加压上盖；7—位移计导杆；8—位移计架；9—试样

14.1.5 固结试验应按下列步骤进行:

1 在固结容器内放置护环、透水板和薄型滤纸,将带有试样的环刀装入护环内,放上导环、试样上依次放上薄型滤纸、透水板和加压上盖,并将固结容器置于加压框架正中,使加压上盖与加压框架中心对准,安装百分表或位移传感器。

注:滤纸和透水板的湿度应接近试样的湿度。

2 施加 1kPa 的预压力使试样与仪器上下各部件之间接触,将百分表或传感器调整到零位或测读初读数。

3 确定需要施加的各级压力,压力等级宜为 12.5、25、50、100、200、400、800、1600、3200kPa。第一级压力的大小应视土的软硬程度而定,宜用 12.5、25 或 50kPa。最后一级压力应大于土的自重压力与附加压力之和。只需测定压缩系数时,最大压力不小于 400kPa。

4 需要确定原状土的先期固结压力时,初始段的荷重率应小于 1,可采用 0.5 或 0.25,施加的压力应使测得的 $e \sim \log p$ 曲线下端出现直线段。对超固结土,应进行卸压、再加压来评价其再压缩特性。

5 对于饱和试样,施加第一级压力后应立即向水槽中注水浸没试样。非饱和试样进行压缩试验时,需用湿棉纱围住加压板周围。

6 需要测定沉降速率、固结系数时,施加每一级压力后宜按下列时间顺序测记试样的高度变化。时间为 6s、15s、1min、2min15s、4min、6min15s、9min、12min15s、16min、20min15s、25min、30min15s、36min、42min15s、49min、64min、100min、200min、400min、23h、24h,至稳定为止。不需要测定沉降速率时,则施加每级压力后 24h 测定试验高度变化作为稳定标准,只需测定压缩系数的试样,施加每级压力后,每小时变形达 0.01mm 时,测定试样高度变化作为稳定标准。按此步骤逐级加压至试验结束。

注:测定沉降速率仅适用饱和土。

7 需要进行回弹试验时,可在某级压力下固结稳定后退压,直至退到要求的压力,每次退压至 24h 后测定试样的回弹量。

8 试验结束后吸去容器中的水,迅速拆除仪器各部件,取出整块试块,测定含水率。

14.1.6 试样的初始孔隙比,应按下列式计算:

$$e_0 = \frac{(1 + w_0)G_s \rho_w}{\rho_0} - 1 \quad (14.1.6)$$

式中 e_0 ——试样的初始孔隙比。

14.1.7 各级压力下试样固结稳定后的单位沉降量,应按下列式计算:

$$S_i = \frac{\sum \Delta h_i}{h_0} \times 10^3 \quad (14.1.7)$$

式中 S_i ——某级压力下的单位沉降量 (mm/m);

h_0 ——试样初始高度 (mm);

$\sum \Delta h_i$ ——某级压力下试样固结稳定后的总变形量 (mm) (等于该级压力下固结稳定读数减去仪器变形量);

10^3 ——单位换算系数。

14.1.8 各级压力下试样固结稳定后的孔隙比，应按下式计算：

$$e_i = e_0 - \frac{(1 + e_0)}{h_0} \Delta h_i \quad (14.1.8)$$

式中 e_i ——各级压力下试样固结稳定后的孔隙比。

14.1.9 某一压力范围内的压缩系数，应按下式计算：

$$a_v = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i} \quad (14.1.9)$$

式中 a_v ——压缩系数 (MPa^{-1})；

p_i ——某级压力值 (MPa)。

14.1.10 某一压力范围内的压缩模量，应按下式计算：

$$E_s = \frac{1 + e_0}{a_v} \quad (14.1.10)$$

式中 E_s ——压缩模量 (MPa)。

14.1.11 某一压力范围内的体积压缩系数，应按下式计算：

$$m_v = \frac{1}{E_s} = \frac{a_v}{1 + e_0} \quad (14.1.11)$$

式中 m_v ——体积压缩系数 (MPa^{-1})。

14.1.12 压缩指数和回弹指数，应按下式计算：

$$C_c \text{ 或 } C_s = \frac{e_i - e_{i+1}}{\log p_{i+1} - \log p_i} \quad (14.1.12)$$

式中 C_c ——压缩指数；

C_s ——回弹指数。

14.1.13 以孔隙比为纵坐标，压力为横坐标绘制孔隙比与压力的关系曲线，见图 14.1.13。

14.1.14 以孔隙比为纵坐标，以压力的对数为横坐标，绘制孔隙比与压力的对数关系曲线，见图 14.1.14。

14.1.15 原状土试样的先期固结压力，应按下列方法确定。

在 $e-\log p$ 曲线上找出最小曲率半径 R_{\min} 的点 O (见本标准图 14.1.14)，过 O 点做水平线 OA ，切线 OB 及 $\angle AOB$ 的平分线 OD ， OD 与曲线下段的延长线交于 E 点，则对应于 E 点的压力值即为该原状土试样的先期固结压力。

14.1.16 固结系数应按下列方法确定：

1 时间平方根法：对某一级压力，以试样的变形为纵坐标，时间平方根为横坐标，绘制变形与时间平方根关系曲线 (图 14.1.16-1)，延长曲线开始段直线，交纵坐标于 d_s 为理

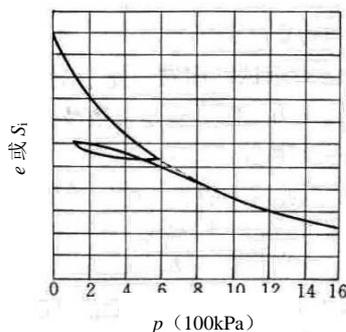


图 14.1.3 $e(S_v)-p$ 关系曲线

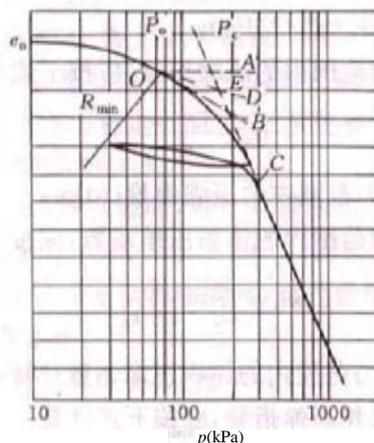
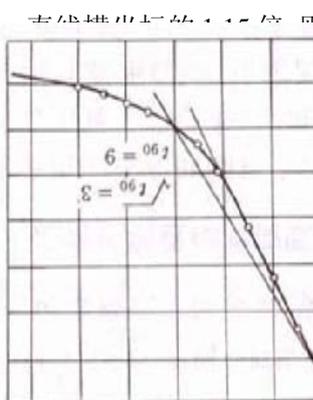


图 14.1.14 $e-\log p$ 曲线求 p_c 示意

论零点,过 d_s 做另一直线,令其横坐标为前
曲线交点所对应的的时间的平方即为试样固
数应按下式计算:



后一直线与 $d-\sqrt{t}$
该级压力下的固结系

C_v

(14.1.16-1)

式中 C_v ——固结系数 (cm^2/s);

$\overline{h^2}$ ——最大排水距离, 等于某

(cm)。

d

$d(\text{mm})$

t_{90}
 \sqrt{t} (min)

图 14.1.16-1 时间平方根法求 t_{90}

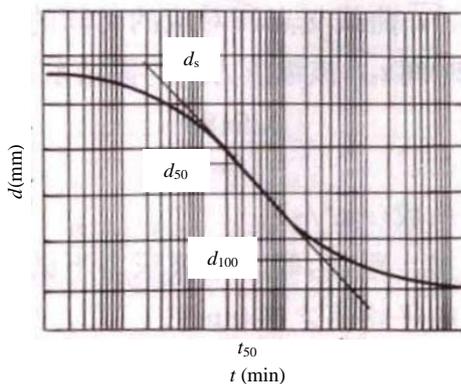


图 14.1.16-2 时间对数法求 t_{50}

2 时间对数法: 对某级压力, 以试样的变形为纵坐标, 时间的对数为横坐标, 绘制变形与时间对数关系曲线 (图 14.1.16-2), 在关系曲线的开始段, 选任一时间 t_1 , 查得相对应的变形值 d_1 , 再取时间 $t_2 = t_1 / 4$, 查得相对应的变形值 d_2 , 则 $2d_2 - d_1$ 即为 d_{01} ; 另取一时间依同法求得 d_{02} 、 d_{03} 、 d_{04} 等, 取其平均值为理论零点 d_s , 延长曲线中部的直线段和通过曲线尾部数点切线的交点即为理论终点 d_{100} , 则 $d_{50} = (d_s + d_{100}) / 2$, 对应于 d_{50} 的时间即为试样固结度达 50% 所需的时间 t_{50} , 某一级压力下的固结系数应按下列式计算:

$$C_v = \frac{0.197 \overline{h^2}}{t_{50}} \quad (14.1.16-2)$$

14.1.17 固结试验的记录格式见表 14.1.17。

表 14.1.17 固结试验记录

工程名称_____

试验者_____

工程编号_____

计算者_____

试验日期_____

校核者_____

经过 时间(min)	MPa									
	时间	变形 读数								
0										
0.1										
0.25										
1										
2.25										
4										
6.25										
9										
12.25										
16										
20.25										
25										
30.25										
26										
42.25										
49										
64										
100										
200										
23(h)										
24(h)										
总变形量(mm)										
仪器变形量(mm)										
试样总变形量(mm)										

第五章 三轴压缩试验

“土力学”课程中主要在“土的抗剪强度”一章中“三轴剪切试验测定土的抗剪强度”一节涉及这部分内容。如前所述，土体的抗剪强度受到试验设备和试验方法的影响，测定土体的抗剪强度的室内试验方法除了直接剪切试验（即直剪试验）和无侧限压缩试验以外，还有三轴压缩试验（或称三轴剪切试验）。三轴压缩试验由于能够对圆柱状土体施加两向应力增量，能够模拟轴对称条件下土体的应力状态的变化，在工程实践和科学研究领域不仅是获得土体抗剪强度参数的重要手段，而且由于能够获得土体的应力应变关系，对于研究土体的本构模型，获得土体的三向变形特性均具有很大的优势。三轴压缩试验能够克服直接剪切试验不能控制排水、不能测孔隙水压力的缺点，但是由于三轴压缩试验设备复杂、操作较繁复、排水路径长等缺点，在工程实践中直接剪切试验不能淘汰。

三轴压缩试验能够根据颗粒大小选择适用的试样尺寸，也有三种试验方法：不固结不排水剪切试验、固结不排水剪切试验、固结排水剪切试验。

关于三轴压缩试验在“土工试验方法标准”16中做出详细规定。摘录如下。

16 三轴压缩试验

16.1 一般规定

16.1.1 本试验方法适用于细粒土和粒径小于 20mm 的粗粒土。

16.1.2 本试验应根据工程要求分别采用不固结不排水剪(UU)试验、固结不排水剪(CU)测孔隙水压力(\overline{CU})试验和固结排水剪(CD)试验。

16.1.3 本试验必须制备 3 个以上性质相同的试样，在不同的周围压力下进行试验。周围压力宜根据工程实际荷重确定。对于填土，最大一级周围压力应与最大的实际荷重大致相等。

注：试验宜在恒温条件下进行。

16.2.1 本试验所用的主要仪器设备，应符合下列规定：

1 应变控制式三轴仪(图 16.2.1-1)：由压力室、轴向加压设备、周围压力系统、反压力系统、孔隙水压力测量系统、轴向变形和体积变化量测系统组成。

2 附属设备：包括击样器、饱和器、切土器、原状土分样器、切土盘、承膜筒和对开圆膜，应符合下图要求：

1) 击样器(图 16.2.1-2)，饱和器(图 16.2.1-3)。

2) 切土盘、切土器和原状土分样器(图 16.2.1-4)。

3) 承膜筒及对开圆膜(图 16.2.1-5 及图 16.2.1-6)

3 天平：称量 200g，最小分度值 0.01g；称量 1000g，最小分度值 0.1g。

4 橡皮膜：应具有弹性的乳胶膜，对直径 39.1 和 61.8mm 的试样，厚度以 0.1~0.2mm 为宜，对直径 101mm 的试样，厚度以 0.2~0.3mm 为宜。

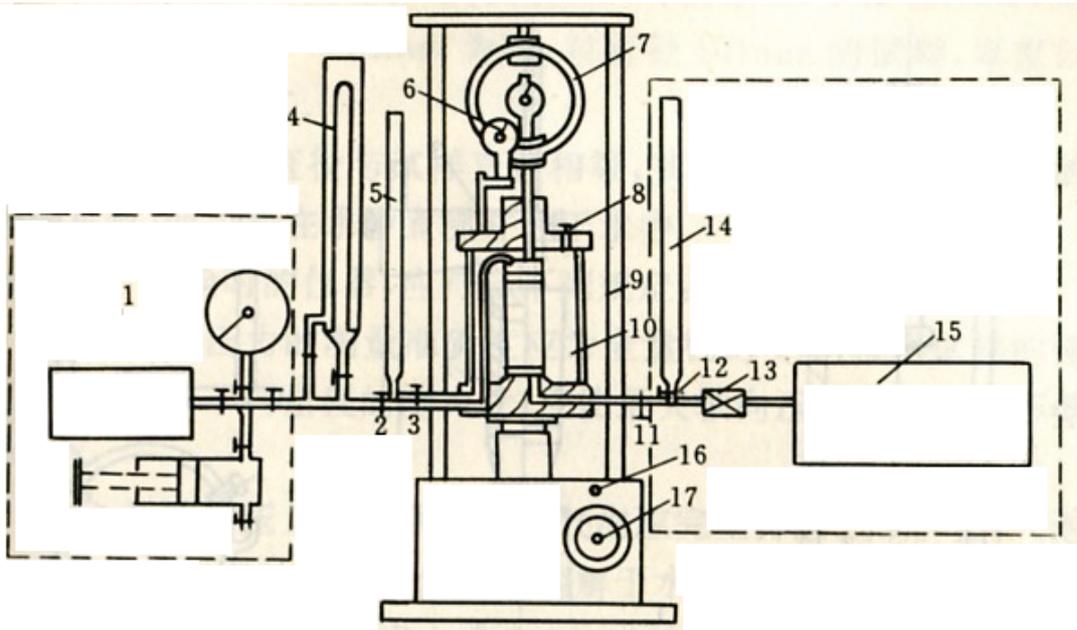


图 16.2.1-1 应变控制式三轴仪

- 1—周围压力系统；2—周围压力阀；3—排水阀；4—体变管；5—排水管；
 6—轴向位移表；7—测力计；8—排气孔；9—轴向加压设备；10—压力室；11—孔压阀；
 12—量管阀；13—孔压传感器；14—量管；15—孔压力量测系统；16—离合器；17—手轮

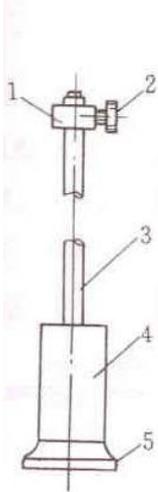


图 16.2.1-2 击样器

- 1—套环；2—定位螺丝；3—导杆；4—击锤；
 5—底板；6—套筒；7—击样筒；8—底座

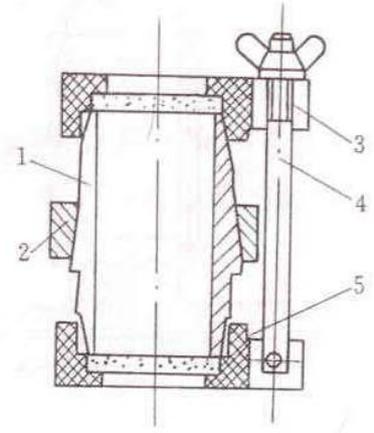
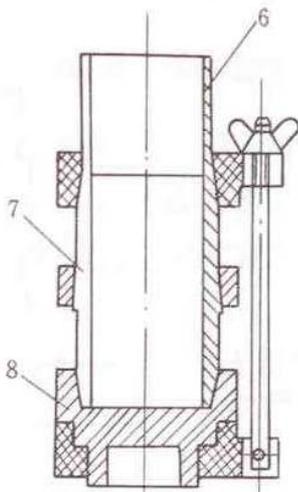
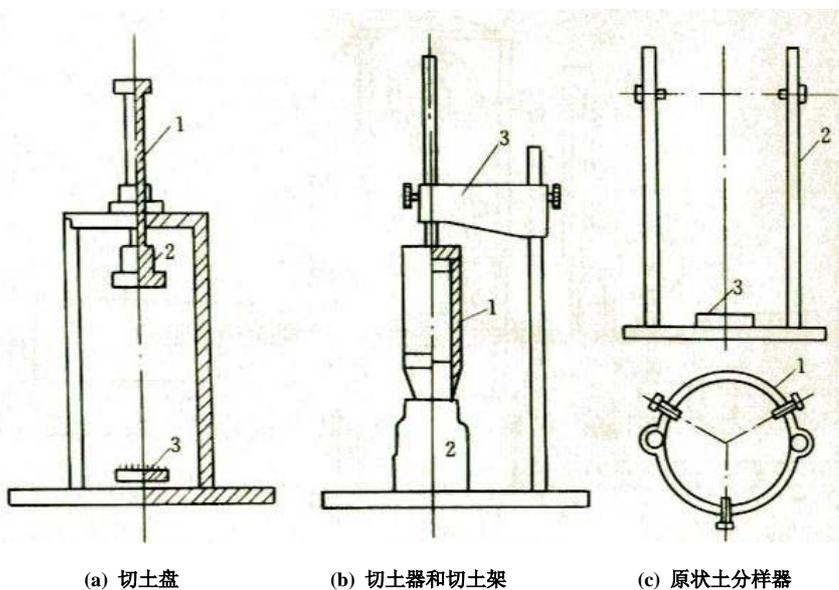


图 16.2.1-3 饱和器

- 1—圆模（3片）；2—紧箍；
 3—夹板；4—拉杆；5—透水板



(a) 切土盘

(b) 切土器和切土架

(c) 原状土分样器

图 16.2.1-4 原状土切土盘分样器

(a): 1—轴; 2—上盘; 3—下盘

(b): 1—切土器; 2—土样; 3—切土架 (c): 1—钢丝架; 2—滑杆; 3—底盘

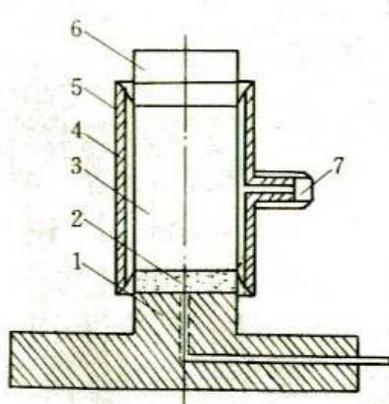


图 16.2.1-5 原状土切土盘分样器

1—压力室底座; 2—透水板;
3—试样; 4—承膜筒; 5—橡皮膜;
6—上帽; 7—吸气孔

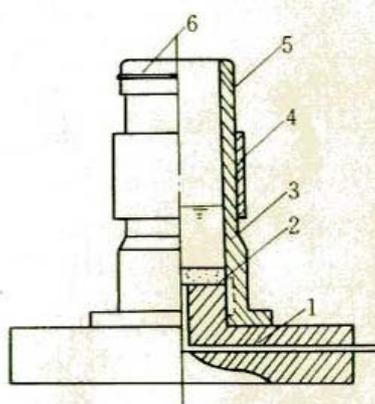


图 16.2.1-6 原状土切土盘分样器

1—压力室底座; 2—透水板;
3—制样圆模 (两片合成);
4—紧箍; 5—橡皮膜; 6—橡皮圈

5 透水板: 直径与试样直径相等, 其渗透系数宜大于试样的渗透系数, 使用前在水中煮沸并泡于水中。

16.2.2 试验时的仪器, 应符合下列规定:

1 周围压力的测量准确度应为全量程的 1%, 根据试样的强度大小, 选择不同量程的测力计, 应使最大轴向压力的准确度不低于 1%。

2 孔隙水压力量测系统内的气泡应完全排除, 系统内的气泡用纯水冲出或施加压力使气泡溶解于水, 并从试样底座溢出。整个系统的体积变化因数应小于 $1.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{kPa}$;

3 管路应畅通，各连接处应无漏水，压力室活塞杆在轴套内应能滑动。

4 橡皮膜在使用前应作仔细检查，其方法是扎紧两端，向膜内充气，在水中检查，应无气泡溢出，方可使用。

16.3 试样制备和饱和

16.3.1 本实验采用的试样最小直径为 $\phi 35\text{mm}$ ，最大直径为 $\phi 101\text{mm}$ ，试样的高度宜为试样直径的 2~2.5 倍，试样的允许最大粒径应符合表 16.3.1 的规定。对于有裂缝、软弱面和构造面的试样，试样直径宜大于 60mm。

表 16.3.1 试样的土粒最大粒径(mm)

试样直径	允许最大粒径
< 100	试样直径的 1/10
> 100	试样直径的 1/5

16.3.2 原状土试样制备应按本标准第 16.3.1 条的规定将土样切成圆柱形试样。

1 对于较软的土样，先用钢丝锯或切土刀切取一稍大于规定尺寸的土柱，放在切土盘上下圆盘之间，用钢丝锯或切土刀紧靠侧板，由上往下细心切削，边切削边转动圆盘，直至土样被削成规定的直径为止。试样切削时应避免扰动，当试样表面遇有砾石或凹坑时，允许用削下的余土填补。

2 对较硬的土样，先用切土刀切取一稍大于规定尺寸的土柱，放在切土架上，用切土器切削土样，边削边压切土器，直至切削到超出试样高度约 2cm 为止。

3 取出试样，按规定的高度将两端削平，称量。并取余土测定试样的含水率。

4 对于直径大于 10cm 的土样，可用分样器切成 3 个土柱，按上述方法切取 $\phi 39.1\text{mm}$ 的试样。

16.3.3 扰动土试样制备应根据预定的干密度和含水率，按本标准第 3.1.5 条的步骤备样后，在击样器内分层击实，粉土宜为 3~5 层，粘土宜为 5~8 层，各层土料数量应相等，各层接触面应刨毛。击完最后一层，将击样器内的试样两端整平，取出试样称量。对制备好的试样，应量测其直径和高度。试样的平均直径应按下式计算：

$$D_0 = \frac{D_1 + 2D_2 + D_3}{4} \quad (16.3.3)$$

式中 D_1 、 D_2 、 D_3 ——分别为试样上、中、下部位的直径(mm)。

16.3.4 砂类土的试样制备应先在压力室底座上依次放上不透水板，橡皮膜和对开圆模(见图 16.2.1-6)。根据砂样的干密度及试样体积，称取所需的砂样质量，分三等分，将每份砂样填入橡皮膜内，填至该层要求的高度，依次第二层、第三层，直至膜内填满为止。当制备饱和试样时，在压力室底座上依次放透水板，橡皮膜和对开圆模，在膜内注入纯水至试样高度的 1/3，将砂样分三等分，在水中煮沸，待冷却后分三层，按预定的干密度填入橡皮膜内，直至膜内填满为止。当要求的干密度较大时，填砂过程中，轻轻敲打对开圆模，使

所称的砂样填满规定的体积，整平砂面，放上不透水板或透水板，试样帽，扎紧橡皮膜。对试样内部施加 5kPa 负压力使试样能站立，拆除对开圆膜。

16.3.5 试样饱和宜选用下列方法：

1 抽气饱和：将试样装入饱和器内，按本标准第 3.2.4 条 2~4 款的步骤进行。

2 水头饱和：将试样按本标准第 16.5.1 条的步骤安装于压力室内。试样周围不贴滤纸条。施加 20kPa 周围压力。提高试样底部量管水位，降低试样顶部量管的水位，使两管水位差在 1m 左右，打开孔隙水压力阀，量管阀和排水管阀，使纯水从底部进入试样，从试样顶部溢出，直至流入水量和溢出水量相等为止。当需要提高试样的饱和度时，宜在水头饱和前，从底部将二氧化碳气体通入试样，置换孔隙中的空气。二氧化碳的压力以 5~10kPa 为宜，再进行水头饱和。

3 反压力饱和：试样要求完全饱和时，应对试样施加反压力。反压力系统和周围压力系统相同（对不固结不排水剪试验可用同一套设备施加），但应用双层体变管代替排水量管。试样装好后，调节孔隙水压力等于大气压力，关闭孔隙水压力阀、反压力阀、体变管阀、测记体变管读数。开周围压力阀，先对试样施加 20kPa 的周围压力，开孔隙水压力阀，待孔隙水压力变化稳定，测记读数，关孔隙水压力阀。反压力应分级施加，同时分级施加周围压力，以尽量减少对试样的扰动。周围压力和反压力的每级增量宜为 30kPa。开体变管阀和反压力阀，同时施加周围压力和反压力，缓慢打开孔隙水压力阀，检查孔隙水压力增量，待孔隙水压力稳定后，测记孔隙水压力和体变管读数，再施加下一级周围压力和孔隙水压力。计算每级周围压力引起的孔隙水压力增量，当孔隙水压力增量与周围压力增量之比 $\Delta u / \Delta \sigma_3 > 0.98$ 时，认为试样饱和。

16.4 不固结不排水剪试验

16.4.1 试样的安装，应按下列步骤进行：

1 在压力室的底座上，依次放上不透水板、试样及不透水试样帽，将橡皮膜用承膜筒套在试样外，并用橡皮圈将橡皮膜两端与底座及试样帽分别扎紧。

2 将压力室罩顶部活塞提高，放下压力室罩。将活塞对准试样中心，并均匀地拧紧底座连接螺母。向压力室内注满纯水，待压力室顶部排气孔有水溢出时，拧紧排气孔，并将活塞对准测力计和试样顶部。

3 将离合器调至粗位，转动粗调手轮，当试样帽与活塞及测力计接近时，将离合器调至细位，改用细调手轮，使试样帽与活塞及测力计接触，装上变形指示计，将测力计和变形指示计调至零位。

4 关排水阀，开周围压力阀，施加周围压力。

16.4.2 剪切试样应按下列步骤进行：

1 剪切应变速率宜为每分钟应变 1.5%~1.0%。

2 启动电动机，台上离合器，开始剪切。试样每产生 0.3%~0.4% 的轴向应变（或 0.2mm 变形值），测记一次测力计读数和轴向变形值。当轴向应变大于 3% 时，试样每产生 0.7%~0.8% 的轴向应变（或 0.5mm 变形值），测记一次。

3 当测力计读数出现峰值时，剪切应继续进行到轴向应变为 15%~20%。

4 试验结束，关电动机，关周围压力阀，脱开离合器，将离合器调至粗位，转动粗调手轮，将压力室降下，打开排气孔，排除压力室内的水，拆卸压力室罩，拆除试样，描述试样破坏形状，称试样质量，并测定含水率。

16.4.3 轴向应变应按下式计算：

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h_1}{h_0} \times 100 \quad (16.4.3)$$

式中 ε_1 ——轴向应变 (%)；

Δh_1 ——剪切过程中试样的高度变化 (mm)；

编者注：这里规范印刷有误，漏掉了 Δ ，本文已作修改

h_0 ——试样初始高度 (mm)。

16.4.4 试样面积的校正，应按下式计算：

$$A_a = \frac{A_0}{1 - \varepsilon_1} \quad (16.4.4)$$

式中： A_a ——试样的校正断面积 (cm^2)；

A_0 ——试样的初始断面积 (cm^2)。

16.4.5 主应力差应按下式计算：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{CR}{A_a} \times 10 \quad (16.4.5)$$

式中 $\sigma_1 - \sigma_3$ ——主应力差 (kPa)；

σ_1 ——大总主应力 (kPa)；

σ_3 ——小总主应力 (kPa)；

C ——测力计率定系数

(N/0.01mm 或 N/mV)；

R ——测力计读数 (0.01mm)；

10——单位换算系数。

16.4.6 以主应力差为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制主应力差与轴向应变关系曲线 (图

16.4.6)。取曲线上主应力差的峰值作为破坏点，无峰值时，取 15% 轴向应变时的主应力差值作为破坏点。

16.4.7 以剪应力为纵坐标，法向应力为横坐标，在横坐标轴

以破坏时的 $\frac{\sigma_{1f} + \sigma_{3f}}{2}$ 为圆

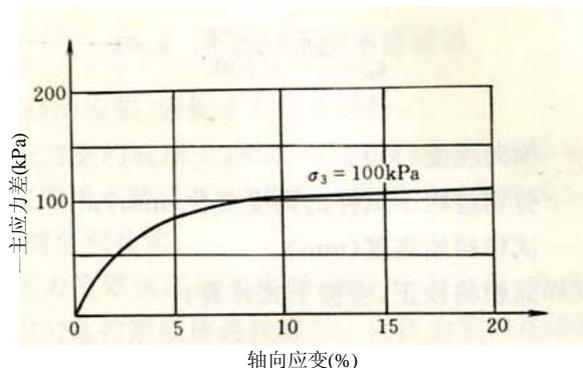


图 16.4.6 主应力差与轴向应变关系

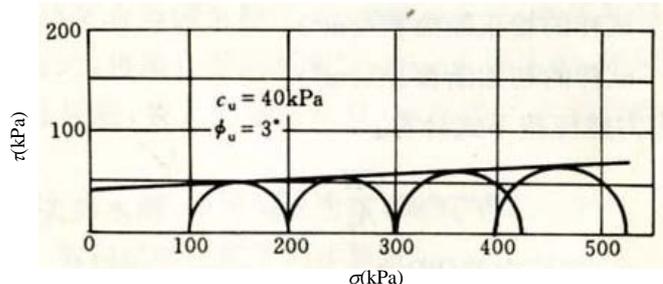


图 16.4.7 不固结不排水剪强度包线

心，以 $\frac{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}}{2}$ 为半径，在 $\tau \sim \sigma$ 应力平面上绘制破坏应力圆，并绘制不同周围压力下破坏应力圆的包线，求出不排水强度参数（图 16.4.7）。

16.4.8 不固结不排水剪试验的记录格式，见表 16.4.8。

表 16.4.8 不固结不排水剪三轴试验记录

工程编号 _____ 试验者 _____
 试样编号 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

(1) 含水率

盒号			
湿土质量(g)			
干土质量(g)			
含水率(%)			
平均含水率(%)			

试样 草图	
----------	--

试样 破坏 草图	
----------------	--

(2) 密度

试样面积(cm ²)	
试样高度(cm)	
试样体积 (cm ³)	
试样质量(g)	
密度(g/cm ³)	

钢环系数 _____ N/0.01mm
 剪切速率 _____ mm/min
 周围压力 _____ kPa

(3) 不排水剪

轴向变形	轴向应变	校正面积	钢环读数	$\sigma_1 - \sigma_3$
(0.01mm)	$\epsilon_1(\%)$	$A_0/(1 - \epsilon_1)(\text{cm}^2)$	(0.01mm)	(kPa)

16.5 固结不排水剪试验

16.5.1 试样的安装，应按下列步骤进行：

1 开孔隙水压力阀和量管阀，对孔隙水压力系统及压力室底座充水排气后，关孔隙水压力阀和量管阀。压力室底座上依次放上透水板、湿滤纸、试样、湿滤纸、透水板，试样周围贴浸水的滤纸条 7~9 条。将橡皮膜用承膜筒套在试样外，并用橡皮圈将橡皮膜下端与底座扎紧。打开孔隙水压力阀和量管阀，使水缓慢地从试样底部流入，排除试样与橡皮膜之间的气泡，关闭孔隙水压力阀和量管阀。打开排水阀，使试样帽中充水，放在透水板上，

用橡皮圈将橡皮膜上端与试样帽扎紧，降低排水管，使管内水面位于试样中心以下20~40cm，吸除试样与橡皮膜之间的余水，关排水阀。需要测定土的应力应变关系时，应在试样与透水板之间放置中间夹有硅脂的两层圆形橡皮膜，膜中间应留有直径为1cm的圆孔排水。

2 压力室罩安装、充水及测力计调整应按本标准第16.4.1条3款的步骤进行。

16.5.2 试样排水固结应按下列步骤进行：

1 调节排水管使管内水面与试样高度的中心齐平，测记排水管水面读数。

2 开孔隙水压力阀，使孔隙水压力等于大气压力，关孔隙水压力阀，记下初始读数。

当需要施加反压力时，应按本标准第16.3.5条3款的步骤进行。

3 将孔隙水压力调至接近周围压力值，施加周围压力后，再打开孔隙水压力阀，待孔隙水压力稳定测定孔隙水压力。

4 打开排水阀。当需要测定排水过程时，应按本标准第14.1.5条6款的步骤测记排水管水面及孔隙水压力读数，直至孔隙水压力消散95%以上。固结完成后，关排水阀，测记孔隙水压力和排水管水面读数。

5 微调压力机升降台，使活塞与试样接触，此时轴向变形指示计的变化值为试样固结时的高度变化。

16.5.3 剪切试样应按下列步骤进行：

1 剪切应变速率粘土宜为每分钟应变0.05%~0.1%；粉土为每分钟应变0.1%~0.5%。

2 将测力计、轴向变形指示计及孔隙水压力读数均调整至零。

3 启动电动机，合上离合器，开始剪切。测力计、轴向变形、孔隙水压力应按本标准第16.4.2条2、3款的步骤进行测记。

4 试验结束，关电动机，关各阀门，脱开离合器，将离合器调至粗位，转动粗调手轮，将压力室降下，打开排气孔，排除压力室内的水，拆卸压力室罩，拆除试样，描述试样的破坏形状，称试样质量，并测定试样的含水率。

16.5.4 试样固结后的高度，应按下列式计算：

$$h_c = h_0 \left(1 - \frac{\Delta V}{V_0}\right)^{1/3} \quad (16.5.4)$$

式中 h_c ——试样固结后的高度 (cm)；

ΔV ——试样固结后与固结前的体积变化 (cm³)。

16.5.5 试样固结后的面积，应按下列式计算：

$$A_c = A_0 \left(1 - \frac{\Delta V}{V_0}\right)^{2/3} \quad (16.5.5)$$

式中 A_c ——试样固结后的断面积 (cm²)。

16.5.6 试样面积的校正，应按下列式计算：

$$A_a = \frac{A_c}{1 - \varepsilon_1} \quad (16.5.6)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h_c}$$

编者注：上述两个公式规范印刷可能有误，编者依据《土工试验规程》SL237—1999作了修改，原公式分别采用 A_0 和 h_0 ，这里改为 A_c 和 h_c 。

16.5.7 主应力差按本标准式（16.4.5）计算。

16.5.8 有效主应力比应按下式计算：

1 有效大主应力：

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u \quad (16.5.8-1)$$

式中 σ'_1 ——有效大主应力（kPa）；

u ——孔隙水压力（kPa）。

2 有效小主应力：

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u \quad (16.5.8-2)$$

式中 σ'_3 ——有效小主应力（kPa）。

3 有效主应力比：

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = 1 + \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_3} \quad (16.5.8-3)$$

16.5.9 孔隙水压力系数，应按下式计算：

1 初始孔隙水压力系数：

$$B = \frac{u_0}{\sigma_3} \quad (16.5.9-1)$$

式中 B ——初始孔隙水压力系数；

u_0 ——施加周围压力产生的孔隙水压力（kPa）。

2 破坏时孔隙水压力系数：

$$A_f = \frac{u_f}{B(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (16.5.9-2)$$

式中 A_f ——破坏时的孔隙水压力系数；

u_f ——试样破坏时，主应力差产生的孔隙水压力（kPa）。

16.5.10 主应力差与轴向应变关系曲线，应按本标准第 16.4.6 款的规定绘制（图 16.4.6）。

16.5.11 以有效应力比为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制有效应力比与轴向应变曲线（图

16.5.11)

16.5.12 以孔隙水压力为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制孔隙水压力与轴向应变关系曲线（图 16.5.12）。

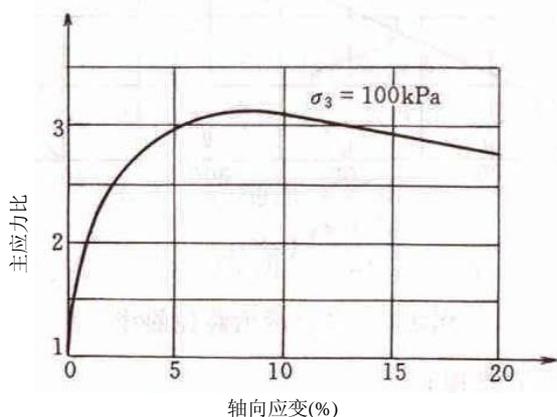


图 16.5.11 有效应力比与轴向应变关系曲线

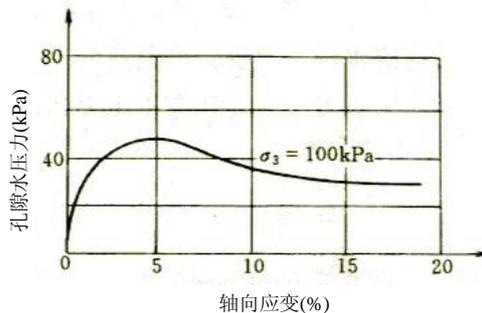


图 16.5.12 孔隙水压力与轴向应变关系曲线

16.5.13 以 $\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}$ 为纵坐标， $\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$ 为横坐标，绘制有效应力路径曲线（图 16.5.13）。并计算有效内摩擦角和有效粘聚力。

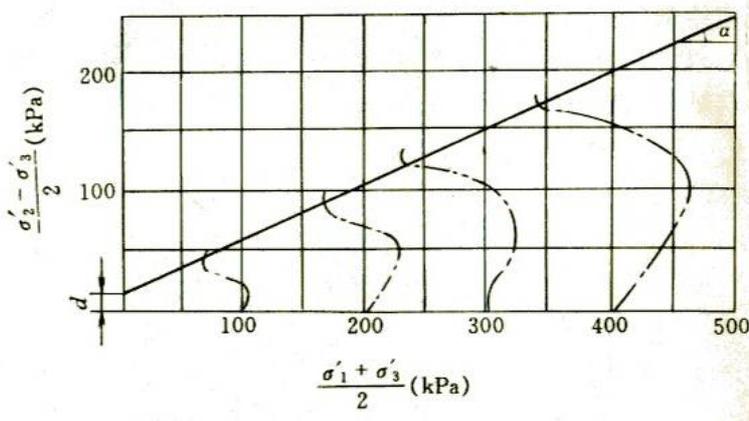


图 16.5.13 应力路径曲线

1 有效内摩擦角：

$$\varphi' = \sin^{-1} \tan \alpha \quad (16.5.13-1)$$

式中 φ' ——有效内摩擦角 ($^\circ$)；

α ——应力路径图上破坏点连线的倾角 ($^\circ$)。

2 有效粘聚力：

$$c' = \frac{d}{\cos \varphi'} \quad (16.5.13-2)$$

式中 c' ——有效粘聚力 (kPa);

d ——应力路径上破坏点连线在纵轴上的截距 (kPa)。

16.5.14 以主应力差或有效应力比的峰值作为破坏点, 无峰值时, 以有效应力路径的密集点或轴向应变 15% 时的主应力差值作为破坏点, 按本标准第 16.4.7 条的规定绘制破损应力圆及不同周围用力下的破损应力圆包线, 并求出单应力强度参数; 有效内摩擦角和有效粘聚力, 应以 $\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$ 为圆心,

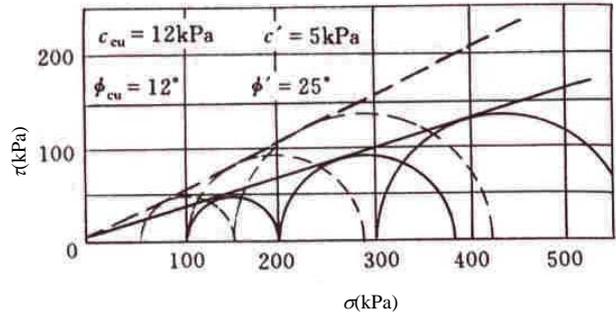


图 16.5.14 固结不排水剪强度包线

$\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}$ 为半径绘制有效破损应力圆确定 (图 16.5.14)。

16.5.15 固结不排水剪试验的记录格式见表 16.5.15。

表 16.5.15 固结不排水剪三轴试验记录

工程编号 _____ 试验者 _____
 试样编号 _____ 计算者 _____
 试验日期 _____ 校核者 _____

(1) 含水率

	试验前		试验后	
盒号				
湿土质量(g)				
干土质量(g)				
含水率(%)				
平均含水率(%)				

(3) 反压力饱和

周围压力 (kPa)	反压力 (kPa)	孔隙水压力 (kPa)	孔隙水压力增量 (kPa)

(4) 固结排水

周围压力 _____ kPa 反压力 _____ kPa
 孔隙水压力 _____ kPa

(2) 密度

试样高度(cm)	
试样体积 (cm ³)	
试样质量(g)	
密度(g/cm ³)	
试样草图 试样破坏描述	
备注	

经过时间 (h min s)	孔隙水压力 (kPa)	量管读数 (mL)	排出水量 (mL)

(5) 不排水剪切

钢环系数 _____ N/0.01mm 剪切速率 _____ mm/min 周围压力 _____ kPa
 反压力 _____ kPa 初始孔隙压力 _____ kPa 温度 _____ °C

轴向 变形 (0.01mm)	轴向 应变 ε_1 (%)	校正面积 $A_0/(1-\varepsilon_1)$ (cm^2)	钢环 读数 (0.01mm)	$\sigma_1-\sigma_3$ (kPa)	孔隙 压力 (kPa)	σ'_1 (kPa)	σ'_3 (kPa)	σ'_1/σ'_3	$\frac{\sigma'_1-\sigma'_3}{2}$ (kPa)	$\frac{\sigma'_1+\sigma'_3}{2}$ (kPa)

编者注：为了与文中符号规定统一，表 16.4.8 和表 16.5.15 中的轴向应变原标准采用 ε ，本文统一修改为采用 ε_1 表示。

16.6 固结排水剪试验

16.6.1 试样的安装、固结、剪切应按本标准第 16.5.1~16.5.3 条的步骤进行。但在剪切过程中应打开排水阀。剪切速率采用每分钟应变 0.003%~0.012%。

16.6.2 试样固结后的高度、面积，应按本标准式 (16.5.4) 和式 (16.5.5) 计算。

16.6.3 剪切时试样面积的校正，应按下列式计算：

$$A_a = \frac{V_c - \Delta V_i}{h_c - \Delta h_i} \quad (16.6.3)$$

式中 ΔV_i ——剪切过程中试样的体积变化(cm^3)；

Δh_i ——剪切过程中试样的高度变化 (cm)。

16.6.4 主应力差按本标准式(16.4.5)计算。

16.6.5 有效应力比及孔隙水压力系数，应按本标准式(16.5.8)和式(16.5.9)计算。

16.6.6 主应力差与轴向应变关系曲线应按本标准第 16.4.6 条规定绘制。

16.6.7 主应力比与轴向应变关系曲线应按本标准第 16.5.11 条规定绘制。

16.6.8 以体积应变为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制体应变与轴向应变关系曲线。

16.6.9 破损应力圆，有效内摩擦角和有效粘聚力应按本标准第 16.5.14 条的步骤绘制和确定 (图 16.6.9)。

16.6.10 固结排水剪试验的记录格式见表 16.6.10。

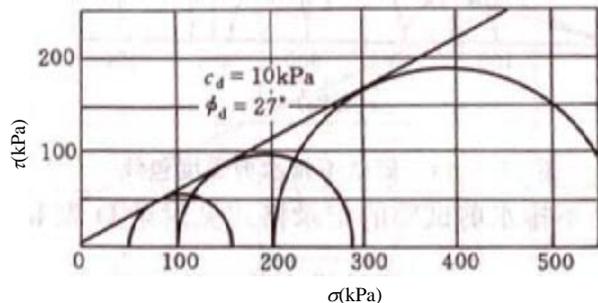


图 16.6.9 固结排水剪强度包线

16.7 一个试样多级加荷试验

16.7.1 本试验仅使用于无法切取多个试样、灵敏度较低的原状土。

16.7.2 不固结不排水剪试验，应按下列步骤进行：

表 16.6.10 固结排水剪三轴试验记录

工程编号_____

试验者_____

试样编号_____

计算者_____

试验日期_____

校核者_____

(3) 含水率

	试验前		试验后	
盒号				
湿土质量(g)				
干土质量(g)				
含水率(%)				
平均含水率(%)				

(3) 反压力饱和

周围压力 (kPa)	反压力 (kPa)	孔隙水压力 (kPa)	孔隙水压力增量 (kPa)

(4) 固结排水

周围压力_____kPa 反压力_____kPa

孔隙水压力_____kPa

(2) 密度

试样高度(cm)	
试样体积 (cm ³)	
试样质量(g)	
密度(g/cm ³)	
试样草图	
试样破坏描述	
备注	

经过时间 (h min s)	孔隙水压力 (kPa)	量管读数 (mL)	排出水量 (mL)

(5) 排水剪切

钢环系数_____N/0.01mm

剪切速率_____mm/min

周围压力_____kPa

反压力_____kPa

初始孔隙压力_____kPa

温 度_____°C

轴向 变形 0.01mm	轴向 应变 ε_1 (%)	校正面 积 $\frac{V_c - \Delta V_1}{h_c - \Delta h_1}$ (cm ²)	钢环 读数 0.01 mm	主应 力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	比值 $\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3}$ (kPa)	量管 读数 (cm ³)	剪切 排水 量 (cm ³)	体应变 $\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_c}$ (%)	径向应变 $\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_v - \varepsilon_1}{2}$ (%)	比 值 $\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1}$	应力 比 σ'_1 / σ'_3

编者注：上表中的轴向应变和径向应变写法为了和文中符号统一，这里分别修改采用 ε_1 、 ε_3 表示，与原标准采用 ε_a 、 ε_r 有所不同。

- 1 试样的安装，应按本标准第 16.4.1 条的步骤进行。
- 2 施加第一级周围压力，试样剪切应按本标准第 16.4.2 条 1 款规定的应变速率进行。

当测力计读数达到稳定或出现倒退时，测记测力计和轴向变形读数。关电动机，将测力计调整至零。

3 施加第二级周围压力，此时测力计因施加周围压力读数略有增加，应将测力计读数调至零位。然后转动手轮，使测力计与试样帽接触，并按同样方法剪切到测力计读数稳定。如此进行第三、第四级周围压力下的剪切。累计的轴向应变不超过 20%。

4 试验结束后，按本标准第 16.4.2 条 4 款的步骤拆除试样，称试样质量，并测定含水率。

5 计算及绘图应按本标准第 16.4.3~16.4.7 条的规定进行，试样的轴向应变累计变形计算（图 16.7.2）。

16.7.3 固结不排水剪试验，应按下列步骤进行：

1 试样的安装，应按本标准第 16.5.1 条的规定进行。

2 试样固结应按本规范第 16.5.2 条的规定进行。第一级周围压力宜采用 50kPa，第二级和以后几级周围压力应等于、大于前一级周围压力下的破坏大主应力。

3 试样剪切按本标准第 16.5.3 条的规定进行。第一级剪切完成后，退除轴向压力，待孔隙水压力稳定后施加第二级周围压力，进行排水固结。

4 固结完成后进行第二级周围压力下的剪切，并按上述步骤进行第三级周围压力下的剪切，累计的轴向应变不超过 20%。

5 试验结束后，拆除试样，称试样质量，并测定含水率。

6 计算及绘图应按本标准第 16.5.4~16.5.14 条的规定进行。试样的轴向变形，应以前一级剪切终了退去轴向压力后的试样高度作为后一级的起始高度，计算各级周围压力下的轴向应变（图 16.7.3）。

16.7.4 一个试样多级加荷试验的记录格式应与本标准第 16.4.8 和 16.5.15 条的要求相同。

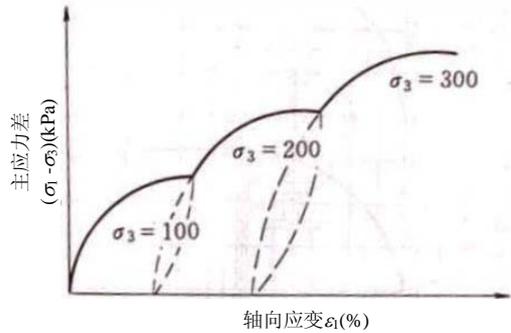


图 16.7.2 不固结不排水剪的应力-应变

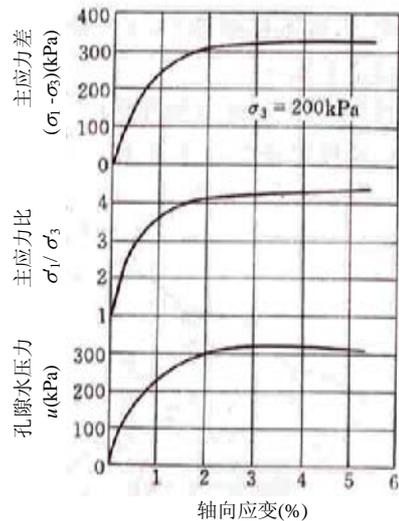


图 16.7.3 固结不排水剪应力应变关系

第六章 直接剪切试验

“土力学”课程中主要在“土的抗剪强度”一章中“直剪试验测定土的抗剪强度”一节涉及这部分内容。土体的抗剪强度受到试验设备和试验方法的影响，如前所述，测定土体的抗剪强度的室内试验方法主要有直接剪切试验（也称直剪试验）、三轴压缩试验和无侧限压缩试验，其中直接剪切试验和三轴压缩试验应用最为广泛，在工程和科学研究领域是获得土体的强度参数的实用手段。尽管直接剪切试验由于不能控制排水、不能测孔隙水压力没有三轴试验那样严密，但是由于直接剪切试验具有设备简单、操作简便、排水路径短在工程实践中具有较长久使用经验等优势，目前依然得到较广泛的应用。此外，由于在特定剪切面上剪坏的特点，在研究土与其他材料之间接触面的强度问题方面依然具有较大的优势。

直接剪切试验分别针对细粒土和砂类土论述试验过程，其中针对细粒土有三种试验方法：快剪、固结快剪、慢剪。

关于直接剪切试验在“土工试验方法标准”18中做出详细规定。摘录如下。

18 直接剪切试验

18.1 慢剪试验

18.1.1 本试验方法适用于细粒土。

18.1.2 本试验所用的主要仪器设备，应符合下列规定：

1 应变控制式直剪仪（图 18.1.2）：由剪切盒、垂直加压设备、剪切传动装置、测力计、位移量测系统组成。

2 环刀：内径 61.8mm，高度 20mm。

3 位移量测设备：量程为 10mm，分度值为 0.01mm 的百分表；或准确度为全量程 0.2% 的传感器。

18.1.3 慢剪试验，应按下列步骤进行：

1 原状土试样制备，应按本标准第 3.1.4 条的步骤进行，扰动土试样制备按本标准第 3.1.5、3.1.6 条的步骤进行，每组试样不得少于 4 个；当试样需要饱和时，应按本标准第

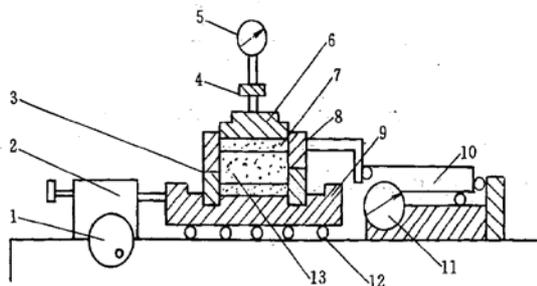


图 18.1.2 应变控制式直剪仪

- 1—剪切传动机构；2—推动器；3—下盒；4—垂直加压框架；
5—垂直位移计；6—传压板；7—透水板；8—上盒；
9—储水盒；10—测力计；11—水平位移计；12—滚珠；13—试样

3.2.4 条的步骤进行。

2 对准剪切容器上下盒，插入固定销，在下盒内放透水板和滤纸，将带有试样的环刀刃口向上，对准剪切盒口，在试样上放滤纸和透水板，将试样小心地推入剪切盒内。

3 移动传动装置，使上盒前端钢球刚好与测力计接触，依次放上传压板、加压框架，安装垂直位移和水平位移量测装置，并调至零位或测记初读数。

4 根据工程实际和土的软硬程度施加各级垂直压力，对松软试样垂直压力应分级施加，以防土样挤出。施加压力后，向盒内注水，当试样为非饱和和试样时，应在加压板周围包以湿棉纱。

5 施加垂直压力后，每 1h 测读垂直变形一次，直至试样固结变形稳定。变形稳定标准为每小时不大于 0.005mm。

6 拔去固定销，以小于 0.02mm/min 的剪切速度进行剪切，试样每产生剪切位移 0.2~0.4mm 测记测力计和位移读数，直至测力计读数出现峰值，应继续剪切至剪切位移为 4mm 时停机，记下破坏值，当剪切过程中测力计读数无峰值时，应剪切至剪切位移为 6mm 时停机。

7 当需要估算试样的剪切破坏时间，可按下式计算：

$$t_f = 50t_{50} \quad (18.1.3)$$

式中 t_f ——达到破坏所经历的时间 (min)；

t_{50} ——固结度达 50%所需的时间 (min)。

8 剪切结束，吸去盒内积水，退去剪切力和垂直压力，移动加压框架，取出试样，测定试样含水率。

18.1.4 剪应力应按下列式计算：

$$\tau = \frac{C \square R}{A_0} \times 10 \quad (18.1.4)$$

式中 τ ——试样所受的剪应力 (kPa)；

R ——测力计量表读数 (0.01mm)。

18.1.5 以剪应力为纵坐标，剪切位移为横坐标，绘制剪应力与剪切位移关系曲线 (图 18.1.5)，取曲线上剪应力的峰值为抗剪强度，无峰值时，取剪切位移 4mm 对应的剪应力为抗剪强度。

18.1.6 以抗剪强度为纵坐标，垂直压力为横坐标，绘制抗剪强度与垂直压力关系曲线 (图 18.1.6)，直线的倾角为摩擦角，直线在纵坐标上的截距为粘聚力。

18.1.7 慢剪试验的记录格式见表 18.1.7。

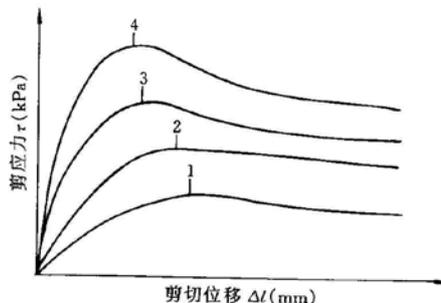


图 18.1.5 剪应力与剪切位移关系曲线

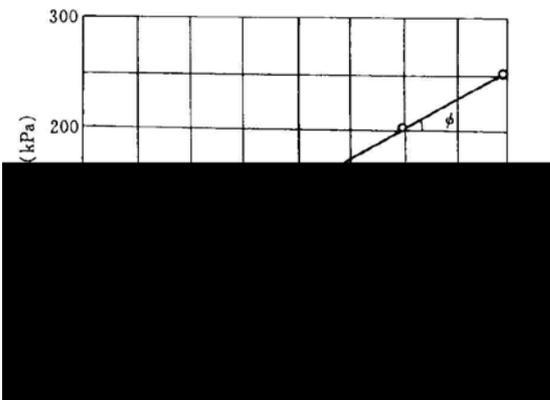


图 18.1.6 抗剪强度与垂直压力关系曲线

表 18.1.7 直剪试验记录

工程编号_____

试样编号_____

试验方法_____

试验日期_____

试验者_____

计算者_____

校核者_____

测力计系数_____kPa/0.01mm

仪器编号					剪切位移 (0.01mm)	量力环读数 (0.01mm)	剪应力 (kPa)	垂直位移 (0.01mm)
盒号					(1)	(2)	(3)=C(2)/A ₀	(4)
湿土质量(g)								
干土质量(g)								
含水率(%)								
试样质量(g)								
试样密度(g/cm ³)								
垂直压力(kPa)								
固结沉降量(mm)								

18.2 固结快剪试验

18.2.1 本试验方法适用于渗透系数小于 10^{-6} cm/s 的细粒土。

18.2.2 本试验所用的主要仪器设备，应与本标准第 18.1.2 条相同。

18.2.3 固结快剪试验，应按下列步骤进行：

1 试样制备、安装和固结，应按本标准第 18.1.3 条 1~5 款的步骤进行。

2 固结快剪试验的剪切速度为 0.8mm/min，使试样在 3~5min 内剪损，其剪切步骤应按本标准第 18.1.3 条 6、8 款的步骤进行。

18.2.4 固结快剪试验的计算应按本标准第 18.1.4 条的规定进行。

18.2.5 固结快剪试验的绘图应按本标准第 18.1.5、18.1.6 条的规定进行。

18.2.6 固结快剪试验的记录格式与本标准第 18.1.7 条相同。

18.3 快剪试验

18.3.1 本试验方法适用于渗透系数小于 10^{-6} cm/s 的细粒土。

18.3.2 本试验所用的主要仪器设备，应与本标准第 18.1.2 条相同。

18.3.3 快剪试验，应按下列步骤进行：

1 试样制备、安装应按本标准第 18.1.3 条 1~4 款的步骤进行，安装时应以硬塑料膜代替滤纸，不需安装垂直位移量测装置。

2 施加垂直压力，拔去固定销，立即以 0.8mm/min 的剪切速度按本标准第 18.1.3 条 6、8 款的步骤进行剪切至试验结束。使试样在 3~5min 内剪损。

18.3.4 快剪试验的计算应按本标准第 18.1.4 条的规定进行。

18.3.5 快剪试验的绘图应按本标准第 18.1.5、18.1.6 条的规定进行。

18.3.6 快剪试验的记录格式与本标准第 18.1.7 条相同。

18.4 砂类土的直剪试验

18.4.1 本试验方法适用于砂类土。

18.4.2 本试验所用的主要仪器设备，应与本标准第 18.1.2 条相同。

18.4.3 砂类土的直剪试验，应按下列步骤进行：

1 取过 2mm 筛的风干砂样 1200g，按本标准第 3.1.5 条的步骤制备砂样。

2 根据要求的试样干密度和试样体积称取每个试样所需的风干砂样质量，准确至 0.1g。

3 对准剪切容器上下盒，插入固定销，放干透水板和干滤纸。将砂样倒入剪切容器内，拂平表面，放上硬木块轻轻敲打，使试样达到预定的干密度，取出硬木块，拂平砂面。依次放上干滤纸、干透水板和传压板。

4 安装垂直加压框架，施加垂直压力，试样剪切应按本标准第 18.2.3 条 2 款的步骤进行。

18.4.4 砂类土直剪试验的计算，应按本标准第 18.1.4 条的规定进行。

18.4.5 砂类土直剪试验的绘图，应按本标准第 18.1.5、18.1.6 条的规定进行。

18.4.6 砂类土直剪试验的记录格式与本标准第 18.1.7 条相同。

第七章 无粘性土休止角实验

“土力学”课程中主要在“土坡稳定分析”一章中“无粘性土坡稳定分析”一节涉及这部分内容。土体的抗剪强度受到实验设备和实验方法的影响，如前所述，测定土体的抗剪强度的室内实验方法主要包括直接剪切实验、三轴压缩实验和无侧限压缩实验。但是对于无粘性土体，根据全干或全淹没土坡的稳定分析，天然休止角即为砂土的内摩擦角，因此天然休止角实验也能够确定砂土水上水下的内摩擦角。

关于无粘性土休止角实验在《土工实验规程》(SL237-023-1999)中做出详细规定。摘录如下。

1 定义和适用范围

1.0.1 休止角是无粘性土在松散状态堆积时其坡面与水平面所形成的最大倾角。

1.0.2 本规程适用于测定无粘性土在风干状态下或水下状态的休止角。

2 仪器设备

2.0.1 休止角测试仪：图 2.0.1 所示。圆盘直径为 10cm（适用于粒径小于 2mm 的无粘性土）及 20cm（适用于粒径小于 5mm 的无粘性土）。

2.0.2 附属设备：勺子、水槽等。

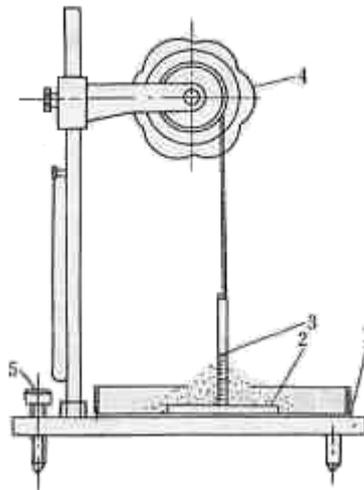


图 2.0.1 休止角测试仪

1—底盘；2—圆盘；3—铁杆；4—制动器；

5—水平螺丝

3 操作步骤

3.0.1 取代表性的充分风干试样若干，并选择相应的圆盘。

3.0.2 转动制动器，使圆盘落在底盘中。

3.0.3 用小勺细心地沿铁杆四周倾倒试样。小勺离试样表面的高度应始终保持在 1cm 左右，直至圆盘外缘完全盖满为止。

3.0.4 慢慢转动制动器，使圆盘平稳升起，直至离开底盘内的试样为止。测记锥顶与铁杆接触处得刻度 ($\tan \alpha_c$)。

3.0.5 如果测定水下状态的休止角，先将盛土圆盘慢慢地沉入水槽内。水槽内水面应达铁杆的 0 刻度处，然后按本规程 3.0.3 规定注入试样。按本规程 3.0.4 规定转动制动器，使圆盘升起。当锥体顶端达水面时，测记锥顶与铁杆接触处得刻度 ($\tan \alpha_m$)。

3.0.6 将测得的 $\tan \alpha_c$ 和 $\tan \alpha_m$ 值，在三角函数数表中查取休止角。

3.0.7 本试验需进行 2 次平行测定，取其平均值，以整数 ($^{\circ}$) 表示。

4 计算

4.0.1 按式 (4.0.1) 计算休止角 α_0 ：

$$\tan \alpha_0 = \frac{2h}{d} \quad (4.0.1)$$

式中 h —试样堆积圆锥高度，cm；

d —圆锥底面直径，cm。

5 记录

5.0.1 本实验记录如表 5.0.1

表 5.0.1 无粘性土休止角试验记录表

工程编号_____ 实验者
仪器编号_____ 计算者
土样说明_____ 校核者
试验方法_____ 实验日期

土样编号	充分风干状态休止角			水下状态休止角			备注
	读数		平均值	读数		平均值	
	$\tan \alpha_c$	($^{\circ}$)	($^{\circ}$)	$\tan \alpha_m$	($^{\circ}$)	($^{\circ}$)	

参考文献

- [1] 郭莹, 郭承侃, 陆尚谟. 土力学 (第二版). 大连: 大连理工大学出版社, 2003, 9.
- [2] 中华人民共和国国家标准. 土工试验方法标准(GB/T 50123—1999). 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [3] 中华人民共和国行业标准. 土工实验规程(SL 237—1999). 北京: 中国计划出版社, 1999.