

土 力 学

实 验 指 导 书

温州大学教务处

2009-9-15

土力学实验指导书

土力学实验是土力学的重要组成部分之一，土力学实验的目的是通过实验测定土的物理、力学性质指标，加深了解土力学的基本理论。同时土力学实验又直接为生产服务，对工程设计施工提供基本计算数据和资料。也是学生学习科学的实验方法，培养实验技能的重要途径。

土力学在建筑水利、交通等部门都制定了一套完整的适应于本部门的实验规程。本讲义根据土木工程专业要求选择了六个实验。通过这些实验可对土的物理，力学特征有基本了解。并通过这些基本参数对土的工程地质特征做出初步评价，是理论与实践相结合的重要环节。

实验前首先要弄清测定每个指标的目的意义和方法原理。故在实验前要预习，实验中要细心操作，实验后认真总结。实验时必须按本指导书的测定方法和步骤进行。同时，要遵守实验室的有关规程。

本指导书对每项实验都附有思考题，供预习参考。

2009-9-15

目 录

实验一	土的物理性能实验	1
实验二	土的液、塑限实验	6
实验三	土的压缩（固结）实验	12
实验四	直接剪切实验	17
实验五	设计性实验	23
实验六	三轴剪切实验（演示实验）	25

实验一 土的物理性能实验

一、土的含水量测定

1、实验目的

土的含水量 (ω), 为土中所含水的质量 (m_w) 与土粒质量 (m_s) 的比值:

$$\omega = \frac{m_w}{m_s} \times 100\%$$

土的含水量是计算土的 ρ_d 、 e 、 s_r 等物理性质指标的数据之一, 土含水量与土的力学性质和工程性质有着密切的关系, 对同一种土, 含水量越大, 则 e 、 s_r 、 I_L (液性指数), 越大, 抗剪强度的 C 、 ϕ 值越小, 因而在压缩量越大, 承载力越低。

2、实验方法

本实验以烘干法完成, 为室内实验的标准方法, 烘干法是将一定数量土样称量 m 后放烘箱中在 $100^\circ\text{C} \sim 105^\circ\text{C}$ 恒温烘至恒重, 烘干后土重即为土粒重量 (m_s), 土样所失去的水量 (m_w) 为烘干前后土样质量差 $m_w = m - m_s$

按公式: $\omega = \frac{m - m_s}{m_s} \times 100\%$ 即算出含水量 ω

在野外如无烘箱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: 土样 3~5g 以纯度 95% 的酒精浸湿燃烧至恒重, 求其含水量。

(2) 比重法: 适用砂性土。

(3) 炒干法: 适用于含砾石较多的土。

(4) 实积法: 适用于粘性土。

注: 本实验 (烘干法) 适用于有机物 (泥、腐殖质、及其它有机质) 含量不超过干土质量 5% 的土。如果有机质含量在 5~10% 之间, 仍允许采用此法, 但

需注明有机质含量。

3、仪器设备

(1) 烘箱：电热烘箱或温度能保持 100~105℃的其它能源烘箱，或红外线烘箱等。

(2) 天平、称量 200g，最小分度值 0.01g。

(3) 其它：干燥器、称量盒、削土刀等。

4、实验步骤（烘干法）

(1) 取代表性试样 15~30g，放入称量盒内，立即盖好，称湿土加盒质量，准确至 0.01g。

(2) 揭开盒盖将试样放入烘箱，在温度 100~105℃下烘到恒重（烘干时间对粘土、粉土不得少于 8h，对砂土不得少于 6h）

(3) 将烘干后的试样和盒取出，盖好盒盖放入干燥器冷却到室温，称盒加干土质量，准确至 0.01g。（冷却时间不要过长，实验室代称重）。

(4) 按下式计算含水量

$$\omega = \frac{m - m_s}{m_s} \times 100\%$$

式中 m —湿土质量[（湿土+盒）质量—盒质量]（g）；

m_s —干土质量[（干土+盒）质量—盒质量]（g）。

本方法需进行两次平行测定，取两次结果的算术平均值作为土的含水量，准确至 0.1%，其两次平行差值按含水量的不同不得大于下列规定。

含水量 10%以下 允许平行差值 0.5%

含水量 40%以下 允许平行差值 1%

含水量 40%以上 允许平行差值 2%

5、实验记录格式

盒号	盒质量 (g)	盒+湿土质 量(g)	盒+干土质 量(g)	干土质量 (g)	水质量 (g)	含水量 (%)	平均含 水量(%)

6、影响含水量成果的因素

(1) 原土样状态，不同上、下层颗粒级配不同，密度不一及地下水位的影
响等，都会影响含水量的成果，故选取代表性试样，应根据实验目的和要求而
定。如果，只了解土层综合而概略的天然含水量时，可沿土层剖面竖向切取，
拌匀后取样，若为配合压缩、抗剪强度，渗透实验则应从试样环刀上，下面取
土样，这样有助于了解土层的真实情况和对实验成果的分析。

(2) 土样的取样，运输、存放、保护等因素影响。

(3) 实验方法，取样数量、温度及烘烤时间等均会影响实验精度。

7、思考题

①烘干法测定含水量时，为什么烘箱要保持 100~105℃？土样在这种情况
下，烘干后土样所失去的是哪些类型的水？高于或低于此温度将对测定结果产
生什么影响？

②用烘干法，如土中含有机物，将对测定结果产生什么影响？

③举例说明，测定 ω （含水量）的目的。

二、土的密度实验 ρ

1、实验目的

土的密度是单位体积的质量： $\rho = \frac{m}{v}$

测定土密度的计算土中应力、地基承载力、地基沉降、土压力及设计基础
等所必不可少的重要数据。此外，土的密度与含水量和土粒相对密度可用来计
算土的密实度指标——孔隙比和干密度等。

2、实验方法

常用方法有环刀法、腊封法、灌砂法等。对粘性土应用环刀法，对易碎土样采用腊封法，对难取样的砂样采用灌砂法。本实验采用环刀法测密度 ρ 。

通过测出环刀质量 m_2 、环刀加土质量 m_1 及土样体积 v ，按下式计算密度：

$$\rho = \frac{m_1 - m_2}{v}$$

式中 m_1 ——环刀加土质量 (g)

m_2 ——环刀质量 (g)

v ——土的体积 (cm^3)

3、仪器设备

环刀：内径 61.8mm 和 79.8mm，高 20mm，体积为 60cm^3 和 100cm^3 两种。

天平：称量 200g，最小分度值 0.01g

其它：切土刀、钢丝锯、凡士林

4、实验步骤

(1) 按工程需要取原状土或制备所需状盛装的扰动土样，整平其两端，将环刀内壁涂一层凡士林，刃口向下放在土样上。

(2) 用切土刀（或钢丝锯）将土样削成略大于环刀直径的土桩，然后将环刀垂直下压，边压边削，至土样伸出环刀为止，将两端余土削平取剩余的代表性土样测定含水量。

(3) 擦净环刀外壁称质量（若在天平放砝码的一端放一等质量环刀）可直接测出湿土质量。精确至 0.01g。

(4) 按下式计算密度及干密度

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{m_1 - m_2}{v}$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01\omega}$$

式中 ρ ——密度 (g/cm^3)；

ρ_d ——湿土质量 (g);

m_1 ——环刀密度土质量(g);

m_2 ——环刀质量(g);

ω ——含水量(%).

计算结果精确至 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$

(5) 本实验需进行二次平行测定, 其平行差值不得大于 $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ 取其算术平均值。

5、实验记录格式

环刀号	湿土+环刀质量(g)	环刀质量(g)	湿土质量(g)	密度(g/cm^3)	含水量(%)	干密度(g/cm^3)	平均干密度(g/cm^3)

6、操作注意事项:

用环刀切取试样, 为防止扰动, 应切削一个较环刀内径略大的土柱, 然后将环刀垂直下压, 为避免环刀下压时挤压四周土样, 应边压边, 直至土样伸出环刀, 然后将两端用直刀一次削平, 严禁用直刀在环刀土面上来回抹平, 如遇石子, 等其它杂物要尽量避开, 无法避开则视情况补上。

7、思考题:

①环刀法适用于测定那些土的密度?

②密度的定义是什么? 测定土的密度的目的?

实验二 土的液、塑限实验

一、实验目的

粘性土由于含水量不同，分别处于流动状态、可塑状态、半固态及固态。液限（ ω_L ）是粘性土呈可塑状态的上限含水量；塑限（ ω_p ）是粘性土呈可塑状态的下限含水量，缩限（ ω_s ）是从固态转到半固态（或相反）时的界限含水量，通过测试可知不同粘性土不同含水量时的状态。

塑性指数：液限与塑限的差值称为塑性指数（ I_p ）以下式表示

$$I_p = \omega_L - \omega_p$$

塑性指数愈大，表示土的可塑性范围愈大，它与土的矿物成分，颗粒级配等因素有关，因此能反映土的物理特性。

塑性指数是粘性土定名的依据，按照《地基基础设计规范》规定：

粘土 $I_p > 17$

粘质粘土 $10 < I_p \leq 17$

粉土 $3 < I_p \leq 10$

二、实验方法

1、液限实验

（1）圆锥仪法：形式有多种，主要是锥重，锥角不同，我国普遍采用瓦氏圆锥仪。

（2）蝶式仪法：主要是以材料弹性、划槽器形式不一样相区别。

2、塑限实验

国内外一般仍采用人工滚搓法，该法存在不少缺点，近年来一些实验单位提出过许多新方法，如压力法、压扁法，这两种方法采用的压力和时间两参数需视土类而异，无法统一。

3、液限塑限联合测定法

用 76g 圆锥测定土在不同含水量时的入土深度，在双对数坐标纸上绘制圆

锥入土深度与含水量的关系曲线(系一直线),在直线上查得圆锥入深度为 10mm 时相对应的含水量为液限,入土深度为 2mm 时相应含水量为塑限。

三、液限实验(瓦氏圆锥仪法)

1、仪器设备

(1) 圆锥仪:由锥身、手柄、平衡装置、试杯、底座组成。

(2) 其它:天平(称量 200g,最小分度值 0.001g)、烘箱、干燥缸、秒表、吹风机、调土刀、滴管、筛(孔径 0.5mm)、研钵(附带橡皮头的研杆)、刮刀、凡士林或润滑油、蒸馏水等。

2、实验步骤

(1) 液限实验原则上采用天然含水量的土进行制备,若土样相当干燥,允许用干土样进行制备。如天然土样中含有大于 0.5mm 颗粒时,亦应通过 0.5mm 筛或剥去粗颗粒。

(2) 取代表性土样约 180g,放在调土碗中加蒸馏水调成均匀浓糊状,放在保湿缸中静置一昼夜,天然含水量较高时,圆锥入土深度大于 5mm,可不用静置一昼夜。

(3) 用调土刀将制备好的试样调拌均匀,分层装入试样杯中,填装时勿使土内留有空隙,然后刮去多余的土,并用直刀刮平杯口,置于底座上,在刮平杯口时,不要用直刀在杯口地面上反复涂抹。

(4) 用布擦净锥式液限仪,并在锥尖上涂上一层凡士林,用两个手指提在手柄上,对准试样表面中心,至锥尖与试样表面接触时轻轻松开两手指,使锥深入土中,放锥要平稳,避免冲击或摇动。

(5) 锥体经约 5s 后沉入土中深度恰到刻度处(10mm)此时提起锥体,挖去粘有凡士林的土,在锥体周围取土 15g 左右称量测定含水量。如果锥体未沉入刻度处或者超过刻度处,这时要提起锥体,挖去粘有凡士林的土,取出全部土样,在土样中适当加水调配或风干。再重复(2)、(3)、(4)、(5)步骤至锥体

下沉恰为 10mm 为止。

3、按下式计算液限含水量， ω_L

$$\omega_L = \frac{m - m_s}{m_s} \times 100\%$$

式中 ω_L —液限含水量(%)；

m —湿土质量[(湿土+铝盒)质量—铝盒质量](g)；

m_s —干土质量[(干土+铝盒)质量—铝盒质量](g)。

本实验要做二次平行实验，取其算术平均值，二次平行差值不得大于 2%。

四、塑限实验（滚搓法）

1、实验设备

(1) 毛玻璃板 250×300mm

(2) 直径 3mm 的铁丝

(3) 其余同液限实验

2、实验步骤

(1) 取代表性样品 100g，加蒸馏水，静置一昼夜 ($d < 0.5\text{mm}$ 的土)。含水量高时可不静置，或从液限实验制备好的试样中取 30g 土样备用。

(2) 使实验前试样的含水量接近于塑限，可将试样在手中捏揉至不粘手，或用吹风机稍稍吹干，然后将试样捏扁，如出现裂缝，表示含水量已接近塑限。

(3) 取接近于塑限的试样的一小块，先用手搓成椭圆形，然后再用手掌在毛玻璃上无力滚动。土条长度不宜超过手掌宽度，滚动时手掌下不得产生中空。

(4) 土条搓成 3mm 时，仍未产生裂缝及断裂，表示试样的含水量高于塑限，应将其捏成一团，按 (1)、(2)、(3) 条重做，直至土条直径 3mm 时产生裂缝并开始断裂为止，如直径大于 3mm 即开始断裂，则表示试样含水量小于塑限，亦须重做。

(5) 取合格断裂土条 35g，放入称量盒内，盖紧盒盖，测定含水量，即为

塑限。

(6) 按下式计算塑限:

$$\omega_p = \frac{m - m_s}{m_s} \times 100\%$$

式中 ω_p — 塑限 (%) ;

m — 湿土质量 (g) ;

m_s — 干土质量 (g) 。

计算结果准确至 0.1%。

(7) 本实验需进行两次平行测定, 取算术平均值, 平行差值中, 高液限的粘质土 (CH、CI、MH) 不得大于 2%, 低液限粉质土 (CL、MI、ML) 不得大于 1%。

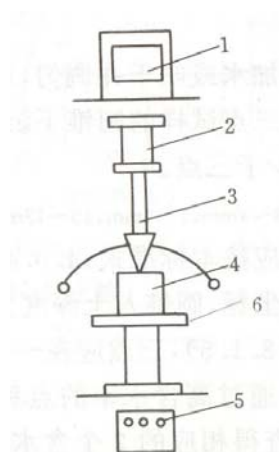
五、液、塑限联合测定法

1、仪器设备

(1) 液、塑限联合测定仪: 见图 2—1,

(2) 天平 (称量 200g, 最小分度值 0.01g),

(3) 其它: 吹风机、调土刀、滴管、刮刀、筛 (孔径 0.5mm)、研钵 (附带橡皮头的研杆)、保湿缸、凡士林或润滑油、蒸馏水等。



图

2—1 液、塑限联合测定仪

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

2、实验步骤:

(1) 液限实验原则上采用天然含水量的土进行制备,若土样相当干燥,允许用干土样进行制备。如天然土样中含有大于 0.5mm 颗粒时,应通过 0.5mm 筛或剥去粗颗粒。

(2) 取代表性土样约 180g,放在调土碗中加蒸馏水调成均匀浓糊状,放在保湿缸中静置一昼夜。

(3) 用调土刀将制备好的试样调拌均匀,分层装入试样杯中,填装时勿使土内留有空隙,然后刮去多余的土,并用直刀刮平杯口,置于底座上,在刮平杯口时,不要用直刀在杯口地面上反复涂抹。

(4) 将试样放在液、塑限联合测定仪的升降座上,并在锥尖上涂上一层凡士林,接通电源,使电磁铁吸住圆锥。

(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,测定含水量。

(6) 将全部试样再加水或吹干并调匀,重复本条 3—5 款的步骤分别测定第二、第三点试样的圆锥下沉深度及相应的含水量。液塑限联合测定不应少于三点。

(7) 以含水量为横坐标、圆锥入土深度为纵坐标,在双对数坐标纸上绘制关系曲线,三点应在一直线上,当三点不在一直线上时,通过高含水量的点和其余两点连成二条直线,在下沉为 2mm 处查得相应的两个含水量,当两个含水量差值小于 2% 时,应以两点含水量的平均值与高含水量的点连成直线,如两个含水量差值大于或等于 2% 时,应重做实验。

六、实验记录格式：

试样 编号	圆锥下沉 深度(mm)	盒号	盒质量(g)	湿土+盒质 量(g)	干土+盒质 量(g)	干土质量 (g)	含水量 (%)
1							
2							
3							

七、思考题

- ①测定 ω_L 与 ω_p 有什么实际用途？
- ②土的天然含水量与土的稠度状态有什么关系？
- ③ ω_L 与 ω_p 的对比标准是什么？
- ④测定 ω_L 时，如锥体下沉深度大于或小于 10mm 时，说明什么？
- ⑤测定 ω_p 时，如土条直径大于 3mm 就断裂或小于 3mm 才断裂，说明什么？

实验三 土的压缩（固结）实验

一、实验目的

土的压缩（固结）是土在压力作用下发生变形的过程，实验目的是测定试样在侧限轴向排水条件下的变形和压力的关系、及孔隙比和压力的关系及变形和时间的关系。从而计算土的单位沉降量 s_i 、压缩系数 a 、固结系数 C_v 、压缩模量 E_s 、压缩指数 C_c 等，测定项目视工程而定，本实验适用于细粒土，遇特殊地质条件或工程中有特殊要求时，须进行反映实际工作条件的压缩实验。

二、仪器设备

1、WI-2 型杠杆双联固结仪，杠杆比 1: 12，最大压力 200 kg，土样高 20mm，可供 30cm² 和 50cm² 两种面积使用；

2、环刀：内径 61.8mm，高 20mm，截面积 30cm²；

3、透水石：直径 61.8mm，高 10mm（或 20mm）；

4、量表：最大量距 10mm，精度 0.01mm；

5、其它：刮土刀、钢丝锯、天平等。

三、实验步骤

1、取土方法：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。如系原状土样，取土方向应与天然受荷方向一致，将环刀内壁涂一层凡士林，刃口向下放在土样上。

2、为了不扰动原状土的结构，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，边压边削，等土样伸出环刀为止，将两端余土削去刮平，刮平时不允许在土样上来回涂抹，取环刀两端余土测其含水量。

3、擦净环刀外壁，称环刀加土样合重，准确至 0.1g，求出其密度（环刀体积为 60cm³）。

4、将底板放入容器内，然后在试样上放上滤纸、透水石和传压活塞，置于

加压横梁正中，安装量表。

5、为了使试样与仪器上下各部件之间接触良好，应施加 1 kpa 的预压力，然后调整量表，使其指针为零。

6、压力等级一般为 12.5 、 25 、 50 、 100 、 200 、 400 、 800 、 1600 、 3200 kpa ，（最后一级压力应大于土层的自重压力和附加压力之和），因条件关系我们实验压力采用 50 、 100 、 200 、 300 kpa 。

7、施加第一级压力后一小时，记下该压力下量表读数，（即试样与仪器总变形量 Δh_i ），并立即施加第二级压力（ 100 kpa ）待间隔 1h 后记下第二级压力下量表读数，依次重复以上动作，分别求： 200 、 300 kpa 压力下 1h 时量表的读数，最后一级压力除记 1h 读数外还需记 24h 压缩稳定后的读数（ 24h 应以最后一级压力开始时算起）压缩稳定标准为量表读数每小时变化不大于 0.1mm 。（量表读数：短针一小格表示 1mm ；长针一小格表示 0.01mm ；读数时以逆时针读数为好，即可直接读出变形量 Δh_i 。）

8、实验结束后，迅速拆除仪器各部件，取出带环刀的试样，如系饱和土则用滤纸吸去试样两端表面水，并测定实验后整块试样的含水量。

四、计算及绘图

1、初始孔隙比 e_0

$$e_0 = \frac{\rho_w d_s (1 + 0.01\omega_0)}{\rho_0} - 1$$

式中 d_s — 土粒相对密度；

ρ_w — 水的密度（约等于 1g/cm^3 ）；

ω_0 — 试样实验前的含水量（%）；

ρ_0 — 试样实验前的密度（ g/cm^3 ）。

2、饱和度 S_r

$$S_r = \frac{\omega_0 d_s}{e_0}$$

式中符号同前

3、试样骨架净高 h_s

$$h_s = \frac{h_0}{1 + e_0}$$

h_0 —试样压缩前高度（本实验中 h_0 =环刀高=20mm）

4、按下式计算各级压力试样校正后的变形量

$$\Delta h_i = (h_i)_t \times \frac{(h_n)_T}{(h_n)_t} = K \times (h_i)_t \quad K = \frac{(h_n)_T}{(h_n)_t}$$

式中 Δh_i —某一压力下校正后的变形量；

$(h_i)_t$ —某一压力下压缩 1 小时的总变形量减去该压力下的仪器变形量；

$(h_n)_t$ —最后一级压力下压缩 1 小时的总变形量减去该压力下的仪器变形量；

$(h_n)_T$ —最后一级压力下压缩 24 小时的总变形量减去该压力下的仪器变形量。

5、某一压力下孔隙比 e_i

$$e_i = \frac{h}{h_s} - 1 \quad h = h_0 - \Delta h_i$$

式中 e_i —某一压力下压缩后试样的孔隙比；

h —某一压力下压缩后试样的高度（mm）；其余符号同前。

6、某一压力范围内压缩系数 a

$$a = \frac{e_1 - e_2}{P_2 - P_1}$$

式中 a —压力 p_1 至 p_2 间的压缩系数, (Mpa^{-1});

P_1 、 P_2 —规定的某一级压力 (如取 $P_1 = 100 \text{ kpa}$, $P_2 = 200 \text{ kpa}$);

e_1 、 e_2 —相应于压力 P_1 、 P_2 时的孔隙比。

根据建筑地基基础设计规范 (GB50007—2002) 规定用压力间隔 $P_1 - P_2$ 为 $100 - 200 \text{ kpa}$ 时的压缩系数 a_{1-2} 作为判断土的压缩性指标:

$a_{1-2} < 0.1$ 时属低压缩性

$0.1 \leq a_{1-2} < 0.5$ 属中压缩性

$a_{1-2} \geq 0.5$ 时属高压缩性

7、某一压力范围内的压缩模量 E_s

$$E_s = \frac{1 + e_0}{a}$$

式中 E_s —某一压力范围内的压缩模量 (Mpa); 其余符号同前。

8、实验记录格式

压缩实验

土 粒 相		试 样 原			试 样 情 况			实验前	实验后
对 密 度		孔 隙 比							
试 样 原		试样面积			含水量 ω	(%)			
始 高 度									
土骨架净高 $h_s = \frac{h_0}{1 + e_0} =$					密度 ρ	(g/cm ³)			
校正系数 $k = \frac{(hn)_T}{(hn)_t} =$					孔隙比 e_0				
					饱和度 S_r	(%)			
压力		25	50	100	200	300	400	800	1600
变形量									
土样总变形量 1h									
土样总变形量 24h									

仪器变形量								
校正前变形量								
校正后变形量 $\Delta h_i = k \times (h_i)_t$								
压缩后试样高度 h								
孔隙比 e_i								
压缩系数 a								

9、以孔隙比 e_i 为纵坐标，以压力 P 为横坐标，绘制 $e_i - P$ 关系曲线（如图 3—1）

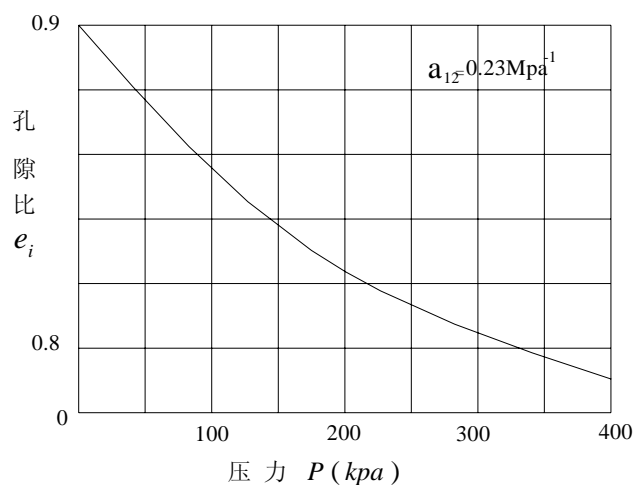


图 3—1 $e_i - P$ 关系曲线

五、思考题

- ①土的压缩系数 a_{1-2} 有什么实际用途？
- ②压缩系数的物理意义是什么？
- ③在某一级压力下，为什么一定要等压缩稳定后才能加下一级压力？压缩稳定的标准是什么？
- ④将同一种土的 ω_0 、 ρ_0 、 d_s 、 I_p 、 a 、 S_r 、 e_0 等结合起来，综合分析土的工程地质特征。（也可结合 C 、 ϕ 值等综合分析）

实验四 直接剪切实验

一、实验目的

土的抗剪强度 (τ_f) 是土对剪切破坏的极限抵抗能力。

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi + C$$

式中 φ ——土的内摩擦角 ($^\circ$);

σ ——剪切面上的法向应力 (kpa);

C ——土的内聚力 (kpa)。

土的抗剪强度指标 C 、 φ 是土建工程设计计算的重要基本数据, 计算地基承载力、土压力、土坡稳定、地基稳定都需直接用到。

二、实验方法

室内测定土的抗剪强度的方法, 由于仪器不同, 分为直接剪切实验三轴剪切实验和无侧限抗压强度实验等, 本章只介绍直接剪切实验。而直接剪切实验根据排水条件不同, 又可分为:

1、不固结、不排水实验 (q) 是在试样上施加垂直压力后, 立即施加水平剪切力。在剪切过程中, 不允许排水, 俗称快剪。

2、固结不排水剪实验 (Cq) 是在试样上施加垂直压力, 待排水固结稳定, 施加水平剪切力。在剪切过程中, 不允许排水俗称固结快剪。

3、固结排水剪实验 (S) 是试样上施加垂直压力及水平剪应力的过程中, 均应使试样排水, 俗称慢剪。

直接剪切实验是测定土的抗剪强度的常用方法, 通常采用四个试样, 分别在不同的垂直压力 P 下, 施加水平剪切力进行剪切, 获得破坏时的剪应力 S , 然后根据库仑定律确定土的抗剪强度系数, 内摩擦角 φ 和内聚力 C 。本实验采用固结快剪, 适用于土颗粒小 2mm 的粘性土。

三、仪器设备

1、剪切仪: 应变式直接剪切仪——通过量力环变形推算水平剪切力, 如图

4-1。

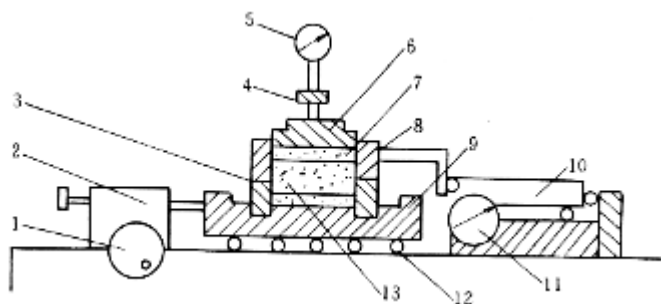


图 4-1 应变式直接剪切仪

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

2、其它：量表、天平（最小分度值 0.1g）环刀（内径 6.2cm，高 2.0cm）
削土刀，钢丝锯、秒表等。

四、试样制备和固结

1、取四个剪力环刀，分别称出环刀重，准确至 0.1g。

2、环刀内壁涂一薄层凡士林，整平土样两端，将环刀刃向下放在土样之上，
原状土样的取土方向应垂直于土的层面相反方向，然后用钢丝锯或削土刀削成
略大于环刀的土柱，边压边削至土样伸出环刀为止，修平土样两端，不允许在
土样面上往返涂抹。

3、擦净环刀外壁，称环刀和湿土质量，准确至 0.1g，测定其密度 ρ 与含
水量 ω 。

4、按 2、3 步骤重复制备四个试样，所用试样之间的密度差不大于
 $0.05\text{g}/\text{cm}^3$ ，含水量之差不大于 2%。

五、实验步骤

1、将直剪仪容器对准上下盒，插入固定销，在下盒内放入透水石一块，把
盛有试样的环刀平口向下，对准剪切盒，再在试样上放透水石一块，然后将试
样徐徐推入剪切盒内，移去环刀。

2、转动手轮，使上盒前端钢球刚好与量力环接触（量力环中量表微动，表示已接触），调整量力环中量表读数为零，顺次加上传压活塞、钢球、压力框架。

3. 安装垂直量表，测记初始读数，施加 50kpa 垂直压力，使其排水固结并测记垂直变形，如 1 小时垂直变形不超过 0.005mm，认为已达到固结稳定，记下稳定读数，拆去量表。

4、选择所需剪切速度（0.8mm/min，即 4 转/min），拔去固定销，开动马达，均匀速率进行剪切（若不是电动直剪仪，则开动秒表，匀速转动手轮），使试样在 3~5 分钟内剪损。如果量力环中的量表读数不再增大，或有显著后退，表示试样已剪，但一般宜剪至剪切变形达到 4mm（相当于 20 转）。若量表读数继续增大，则剪切变形达到 6mm 为止，手轮每转一转，同时记录量表读数，直至剪损为止。

5、剪切结束后，倒转手轮，尽快移去垂直压力、框架、钢球、加压活塞等。取出试样，测定剪切面附近的含水量。

6. 每组四个试样，在四种不同垂直压力 P 下进行重复 4、5 步骤，本实验分别在 50、100、200、300kpa 下进行，各个垂直压力可一次轻轻施加，若土质松软，也可分次施加，以防土样挤出。

7、但是实验室在实际操作时为了节省剪切时间，一般将制备的试样上下两面各放滤纸一张，在预压仪上分别用 50、100、200、300kpa 的压力预压至少 1 小时，让其固结，然后将试样取下，按照 2、4、5 的步骤进行剪切，不再测定其垂直变形。

六、计算及绘图

1、根据下式计算剪应力及剪切位移

$$\tau = CR \quad \Delta L = 20n - R$$

式中 τ —剪应力 (kpa)；

C —量力环率定系数 (kpa/0.01mm)；

R —量力环量表读数（0.01mm）；

ΔL —剪切位移（0.01mm）；

n —手轮转数（手轮每转一周，剪切位移为 0.2mm）。

2、实验记录格式

直接剪切实验剪切记录表格

环刀号		环刀质量=		g	密度 ρ =		g/ cm ³	
量力环系数 C =		$kpa/0.01mm$		环刀+湿土质量=		g	含水量 ω = %	
实验数据 及整理	垂直压力 50kpa				垂直压力 100kpa			
	n	R	τ	ΔL	n	R	τ	ΔL
			</					

3、以剪应力 τ 为纵座标，剪切位移 ΔL 为横纵标，绘 $\tau-\Delta L$ 关系曲线，图 4-2

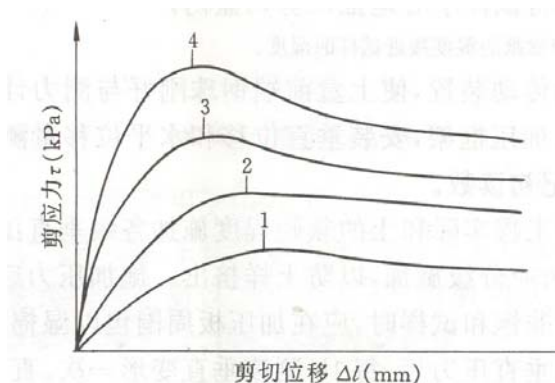


图 4-2 剪应力与剪切位移关系曲线

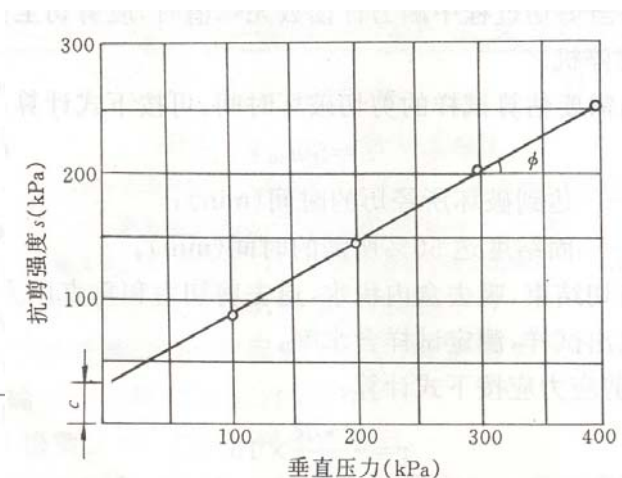


图 4-3 抗剪强度与垂直压力的关系曲线

4、选取剪应力 τ 与剪切位移 ΔL 关系曲线上的降点或稳定值为抗剪强度，如图 4-2 曲线上的箭头所示，如无明显降点，则取剪切位移 ΔL 等于 4mm 处的剪应力为抗剪强度。图中 1、2、3、4 为相应的垂直压力 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 （100、200、300、400 kpa）下对应的破坏点。

5、以抗剪强度 S 为纵座标，垂直压力 P 为横座标，绘制 $S-P$ 关系曲线如图 4-3 所示，根据图上各点绘一视测的直线，直线的倾角为土的内摩擦角 ϕ ，直线在纵座标轴的截距为土的内聚力 C 。

七、注意事项

1、由于同学们实际实验仅一组试样的数据，一般采用相邻三点连成三角形分别求出重心，点或者根据土样实际实验情况，删除误差较大点，目估联接。

2、作图时，纵横坐标比例应一致，否则所求 ϕ 值不准确，各种实验方法所测得的 C 、 ϕ 值由下列符号表示，快剪实验用 C_q 及 ϕ_q ；固结快剪实验用 C_{cq} 及 ϕ_{cq} ；慢剪实验用 C_s 及 ϕ_s 。

八、思考题

①抗剪强度指标 C 、 ϕ 值有什么用途？

- ② C 、 φ 值含义及来源？影响土的抗剪强度的因素有哪些？
- ③ 在做剪切实验的过程中应特别注意哪些事项？
- ④ 三轴仪与直剪仪主要区别有那些？各有哪些优缺点？
- ⑤ 剪切实验在什么情况下取原状土？什么情况下取重塑土？什么情况下土样应进行饱和剪切？

实验五 设计性实验

——确定土的灵敏度和软粘土 c 、 ϕ 值

一、基本理论

原状土的抗压强度与重塑土的抗压强度之比，称为灵敏度。灵敏度是反映土性的重要指标，对于基础设计较为重要，饱和粘性土的不固结不排水实验表明 ϕ_u 接近于 0° ，其抗剪强度包线为水平线。

二、实验的目的及要求

根据以上基本理论及已学土力学理论，通过学生自己设计实验方法，确定以下实验目的：

- ①通过实验得到试样的灵敏度
- ②通过实验得到不同扰动情况下土的灵敏度变化
- ③通过较为简单的实验获得饱和粘性土的 c 值

三、仪器设备

利用现有学院土力学实验室所有能够利用的设备，参考设备为：

- ①直剪仪、②三轴仪、③固结仪、④液塑限联合测定仪、⑤无侧限剪切仪

四、实验步骤

由学生自行确定，要求学生：

- ①写出实验方法步骤，以及采用的原理及公式
- ②自己设计实验记录表格

五、计算与绘图

根据自己设计的实验记录进行计算与绘图，要求学生：

- ①自己设计计算表格
- ②自己设计绘图表格

六、结论与思考

通过这次实验，要求学生写出如下小结：

①通过这次实验获得什么结论

②这次实验有哪些体会

实验六 三轴剪切实验（演示实验）

一、实验目的

三轴剪切实验是测定土的抗剪强度的一种方法，它通常用 3~4 个圆柱试样，分别在不同的恒定周围压力（即小主应力 σ_3 ）下，施加轴向压力（即主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ ），进行剪切直至破坏，然后根据摩尔-库仑理论，求得抗剪强度的参数。

本实验适用于测定粘性土和砂土的总抗剪强度参数和有效抗剪强度参数。

二、实验方法

根据排水条件不同，本实验分为不固结不排水剪（ UU ）固结不排水剪（ CU 或 \bar{CU} ）和固结排水剪（ CD ）等三种实验类型。

1、不固结不排水剪（ UU ）实验是在施加周围压力和增加轴向压力直至破坏过程中均不允许试件排水。本实验可以测得总抗剪强度参数 C_u 、 ϕ_u ，通常称为快剪。

2、固结不排水剪（ CU 或 \bar{CU} ）实验是使试样先在某一周围压力作用下排水固结，然后在保持水的情况下，增加轴向压力直至破坏。本实验可测得总抗剪强度参数 C_{cu} 、 ϕ_{cu} 或有效抗剪强度参数 C' 、 ϕ' 和孔隙压力系数 u ，常称固结快剪。

3、固结排水剪（ CD ）实验是使试样先在某一周围压力作用下排水固结，然后在允许试样充分排水情况下增加轴向压力直至破坏，可测得抗剪强度参数 C_{cd} 、 ϕ_{cd} 常称慢剪。

4、本实验为固结不排水实验。

三、仪器设备

常用的三轴剪切仪依横向轴向压力方式的不同，分为应变控制式和应力控制式两种。

1、应力控制式三轴剪切仪，除轴向加压设备与应变式三轴剪切不同外，其

余部分相同。

2、应变控制式三轴剪切仪（如图 4-4），有压力室、轴向加压设备、施加周围压力系统、体积变化和孔隙压力量测系统等。

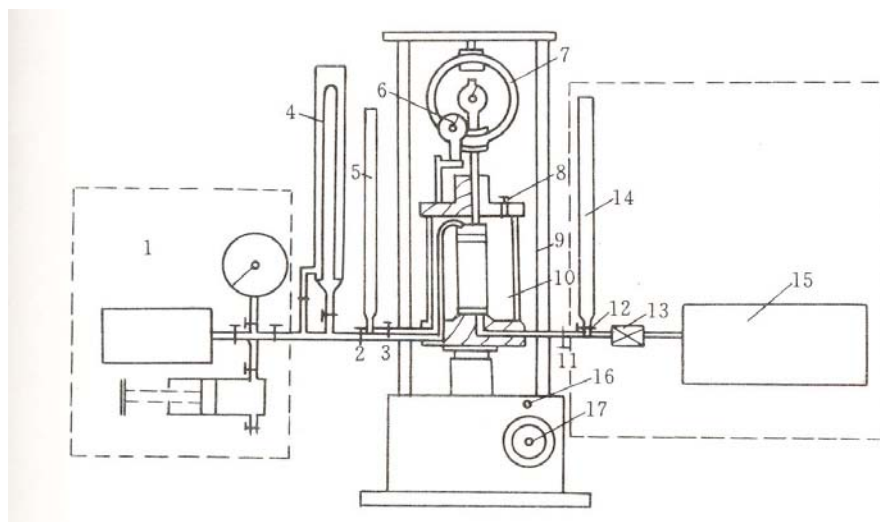


图 4-4 应变控制式三轴仪

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—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—孔压量测系统；16—离合器；17—手轮

3、附属设备有：切土盘、击实筒、饱和器、承膜筒、分样器、橡皮膜、透水石、滤纸、天平、铝盒、钢丝锯、扳手、秒表、毛笔等。

四、实验步骤

由于试样制备及实验方法多样，以下着重介绍常用饱和粘性土固结快剪的实验方法：

一、试样制作与安装

1、对较软的土样，先切削成稍大于规定尺寸的土柱，然后放在切土盘的上下圆盘之间，用钢丝锯紧靠切土盘的侧杆，由上往下细心切削，边切削边转动圆盘，直至达到规定的直径为止，然后按试样高度的要求，削平上下两端（常用试样尺寸 $D \approx 39.1mm$ ， $h \approx 80mm$ ）。

2、将切削好的试样称重，准确至 0.1g，用卡尺测量试样高度及直径，按

下式计算试样的平均直径:

$$D_0 = \frac{D_A + 2D_B + D_C}{4}$$

式中: D_A 、 D_B 、 D_C ——试样上、中、下三部分的直径,

求出其密度, 取切削下余土测定其含水量。

3、开孔隙压力阀和量管阀, 对孔隙水压力系统及压力室底座充水排气, 关孔隙压力阀和量管阀。

4、压力室底座上依次放上透水石、湿滤纸、试样、湿滤纸、透水石, 再用毛笔在试样四周贴上 7-10 条约 6 mm 宽湿滤纸条, 滤纸条两端与透水石连接。

5、将检查过的橡皮膜套在承膜筒内, 将两端翻出筒外, 用橡皮球从吸嘴处吸气, 使橡皮膜贴承膜筒内壁, 然后套在试样外。然后将橡皮膜套在底座下, 取出承膜筒, 用橡皮圈将橡皮膜下端扎紧在仪器底座上。

6、开孔隙压力阀和量管阀, 使水徐徐从试样底部流入, 用软毛刷自下而上轻刷试样, 以排除试样与橡皮膜之间的气泡, 气泡排尽后关孔隙压力阀和量管阀。打开排水阀, 使水从试样帽徐徐流出以排除管中气泡并将试样帽置于试样顶端, 排除顶端气泡, 用橡皮圈将橡皮膜扎紧在试样帽上下。

7、降低排水管, 使其水面到试样中心高程以下 20-40cm, 吸除试样与橡皮膜之间多余水份, 然后关排水阀。

二、压力室的安装

1、装上压力室, 安装时应先将活塞提高, 以防碰撞试样然后将活塞对准试样帽中心, 均匀旋紧压力室螺丝, 再将量力环对准活塞, 开顶部排气孔, 向压力室充水, 当压力室快注满水时, 降低进水速度, 水从排气孔溢出时, 关闭排气孔。

2、打开压力机升降开关, 使试样帽与活塞及量力环量表接近时, 降低升降速度, 当量力环量表指针发生偏转时, 表示试样帽与活塞及量力环量表接触好

了，关升降开关。

三、排水固结

1、将排水量管水面置于试样中心高度处，并测记其水面读数。开孔隙压力阀，使孔隙水压力等于大气压，关孔隙水压力，记下初始读数。

2、关孔隙压力阀和反压体变管阀，测记体变管读数。开周围压力阀，先对试样施加 20 kpa 的周围压力，开孔隙水压力阀，待孔隙水压力变化稳定后，测记读数，关孔隙水压力。

3、开体变管阀、反压阀，同时施加周围压力和反压力（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）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。

4、再施加下一级周围压力和孔隙水压力，周围压力和反压力的每级增量宜为 30 kpa 。计算每级周围压力下引起的孔隙水压力增量，当孔隙水压力增量与周围压力之比 $\Delta u / \Delta \sigma_3 > 0.98$ 时，认为试样饱和。记录稳定后的孔隙压力读数和体变管读数作为固结前起始读数。

5、打开排水阀排水，孔隙水压力消散，当孔隙水压力消散 95%以上，固结完成，关排水阀，测记孔隙水压力和排水管水面读数。

6、微调压力机升降台，使活塞与试样接触，此时轴向变形量表的变化值为试样固结时的高度变化 Δh ，依次算出试样高 h_c 然后将量力环量表和轴向变形量表都调至零。

四、试样剪切

1、开周围压力阀，施加所需的周围压力，周围压力大小应与工程的实际荷载相适应，也可按 100 、 200 、 400 kpa 压力施加。

2、开动马达，启动升降台，开始剪切（土的剪切应变速率应为 $0.4 \sim 0.8\text{ mm/min}$ ）。试样每产生 0.2 mm 的变形值，测记一次量力环量表的读数，当轴向变形大于 2 mm 时，试样每产生 0.5 mm 的变形值，测记一次量力环量表的读数。

3、当量力环量表的读数出现峰值时，剪切应继续进行到轴向变形为 10～14mm。

4、实验结束后，关马达，关孔隙压力阀和周围压力阀，使孔隙压力表退至零，倒转手轮，然后打开排水阀，排去压力室内的水，拆除压力室，揩干试样周围的余水，脱去试样外的橡皮膜，描述破坏后形态，称试样重量，将试样烘干测定实验后含水量。

5、对其余几个试样，在不同周围压力下按以上步骤进行实验。

六、计算和绘图

1、固结后试样高度 h_c

(1) 按实测固结下沉量 $h_c = h_0 - \Delta h_c$

(2) 按等应变公式计算 $h_c = h_0 \sqrt[3]{1 - \frac{\Delta h_c}{V_0}}$ 或 $h_c = h_0 (1 - \frac{\Delta V}{3V_0})$

2、固结后试样面积 A_c

(1) 按实测固结下沉量 $A_c = \frac{V_0 - \Delta V}{h_c}$

(2) 按等应变公式计算 $A_c = A_0 \sqrt[3]{(1 - \frac{\Delta h_c}{V_0})^2}$ 或 $A_c = A_0 (1 - \frac{2\Delta V}{3V_0})$

3、固结后体积 $V_c = A_c \cdot h_c$

4、轴向应变 $\varepsilon = \frac{\Delta h_i}{h_0} \times 100\%$

5、剪切时试样面积 $A_a = \frac{A_0}{1 - \varepsilon}$

式中 h_0 ——试样起始高度 (cm);

A_0 ——试样起始面积 (cm²);

V_0 ——试样起始体积 (cm³);

ΔV ——固结排水量，实测或实验前后试样体积差（ cm^3 ）；

Δh_i ——试样剪切时高度变化，由轴向变形量表测得（ cm ）。

6、主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 的计算

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{C \cdot R}{A_a}$$

式中 σ_1 ——大主应力（ kpa ）；

σ_3 ——小主应力（ kpa ）；

C ——量力环率定系数（ $\text{N}/0.01\text{mm}$ ）；

R ——量力环量表读数（ 0.01mm ）；

A_a ——试样剪切时面积（ cm^2 ）；

10——单位换算系数。

7、有效主应力比 $\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}$ 的计算

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

式中 $\sigma'_1 = \sigma_1 - u$ $\sigma'_3 = \sigma_3 - u$

σ_1 、 σ_3 ——大主应力和小主应力（ kpa ）；

σ'_1 、 σ'_3 ——有效大主应力和有效小主应力（ kpa ）；

u ——孔隙水压力（ kpa ）。

8、根据需要分别绘制主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与轴向应变 ε 的关系曲线（如图 4

—5）或有效主应力比 $\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}$ 与轴向应变 ε 的关系曲线（如图 4—6）。以 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 或

$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}$ 的峰值作为破坏点，若二者均无峰值，则取 15%应变时的应力差值。

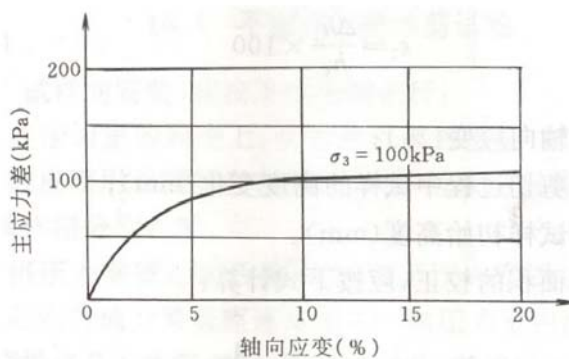


图 4-5 主应力差与轴向应变关系图

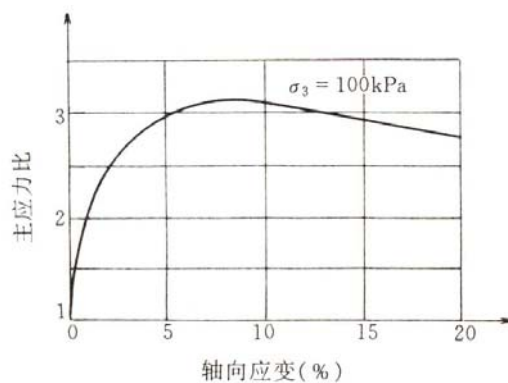


图 4-6 主应力比与轴向应变关系图

9、以法向应力 σ 为横坐标剪应力 τ 为纵坐标，在横坐标轴上以 $\frac{\sigma_{1f} + \sigma_{3f}}{2}$ 为圆心，以 $\frac{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}}{2}$ 为半径（注脚 f 表示破坏值），绘制破损时总应力圆后，作诸圆包线，该包线的倾角为内摩擦角 ϕ_{cu} ，包线在纵坐标轴上的截距为粘聚力 C_{cu} （如图 4-7）。

在固结不排水剪中测孔隙压力，则可确定试样破坏时的有效主应力。以有效主应力 σ' 为横坐标，剪应力 τ 为纵坐标，在横坐标轴以上以 $\frac{\sigma'_{1f} + \sigma'_{3f}}{2}$ 为圆心，以 $\frac{\sigma'_{1f} - \sigma'_{3f}}{2}$ 为半径，绘制不同周围压力下的有效破损应力圆后，作诸圆的包线，包线的倾角为有效内摩擦角 ϕ' 。包线在纵轴上的截距为有效粘聚力 σ' （如图 4-7）。

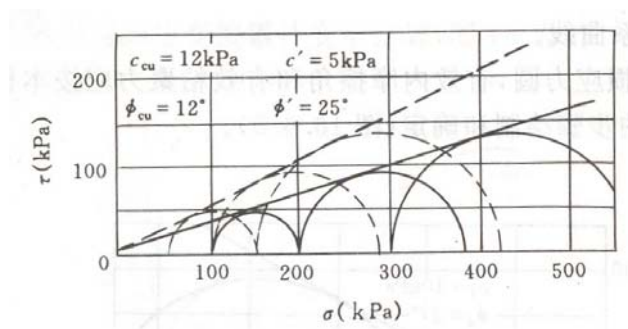


图 4-7 固结不排水剪强度包线

10、按下式计算孔隙压力系数 B

$$B = \frac{u}{\sigma_3}$$

按下式计算孔隙压力系数 A

$$A = \frac{u_d}{B(\sigma_1 - \sigma_3)}$$

式中 u ——试样在周围压力下产生的起始孔隙压力 (kpa)；

u_d ——试样在主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 下产生的孔隙压力 (kpa)。

11、实验记录格式

含水量实验

项目	盒号	盒+湿土 质量 (g)	盒+干土 质量 (g)	盒 质 量 (g)	水质量 (g)	干土质量 (g)	含水量 (%)	平均 值
		(1)	(2)	(3)	(4)=(1)-(2)	(5)=(2)-(3)	(6) = $\frac{(4)}{(5)} \times 100$	
实验前								
实验后								

密度实验

项目	试样高 度	试样体积(cm^3)	试样质量(g)	密度 (g/cm^3)	试样破坏描述	备注
实验前						
实验后						

反压力饱和实验

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

固结排水

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

固结不排水剪切

量力环系数_____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	轴 向 应 变	校 正 面 积	钢 环读 数	$\sigma_1 - \sigma_3$	孔 隙 压力	σ_1'	σ_3'	σ_1' / σ_3'	$\frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2}$	$\frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2}$
0.01mm	%	Cm ²	0.01mm	kpa	kpa	kpa	kpa		kpa	kpa

七、三轴剪切实验和直接剪切实验的比较

三轴剪切实验和直接剪切实验相比具有以下优点：能控制试样排水条件，受力状态明确，可以控制大小主应力，剪切面不固定，能准确地测定土的孔隙压力及体积变化，由于具有这些优点，因此三轴剪切实验自 50 年代来得到广泛应用，从而使抗剪强度的研究工作也获得很大进展，然而，三轴剪切实验也存在一些缺点，如操作复杂，所需试样较多，其次如主应力方向固定不变，以及实验是在令($\sigma_2 = \sigma_3$)的轴称情况下进行的，这是都是与实际情况有所不同。