

土力学

实验指导教程

赵洋毅 段旭 熊好琴◎主编



Tulixue
Shiyan Zhidao Jiaocheng

非
外
借

中国农业出版社



土力学实验指导教程

TULIXUE SHIYAN ZHIDAO JIAOCHENG

赵洋毅 段旭 熊好琴 主编

图书在版编目 (CIP) 数据

土力学实验指导教程 / 赵洋毅, 段旭, 熊好琴主编

· —北京: 中国农业出版社, 2018. 1

ISBN 978-7-109-22303-5

I. ①土… II. ①赵… ②段… ③熊… III. ①水利工程—岩土力学—实验—高等学校—教学参考资料 IV.

①TV223. 3 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 110023 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区麦子店街 18 号楼)

(邮政编码 100125)

策划编辑 廖宁

文字编辑 李兴旺

北京中兴印刷有限公司印刷 新华书店北京发行所发行

2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月北京第 1 次印刷

开本: 700mm×1000mm 1/16 印张: 7.5

字数: 200 千字

定价: 38.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

编 写 人 员

主 编 赵洋毅 段 旭 熊好琴

副 主 编 杨桂英 赵占军

编写人员 (按姓氏笔画排序)

刘 楠 (太原理工大学)

杨 坤 (西南林业大学)

杨桂英 (西南林业大学)

赵占军 (吉林农业大学)

赵洋毅 (西南林业大学)

段 旭 (西南林业大学)

曹光秀 (西南林业大学)

曹向文 (西南林业大学)

韩姣姣 (西南林业大学)

熊好琴 (西南林业大学)

薛 杨 (西南林业大学)

前 言

《土力学实验指导教程》为高等学校水土保持与荒漠化防治专业基础课程——土力学的配套实验教学用书。土力学具有理论性强、实践性强的特点，而土力学实验是土力学课程的重要组成，通过实验教学，可加强学生对理论知识的理解，使学生熟悉实验相关仪器设备操作，掌握土力学实验基本技术和技能，同时培养学生的动手能力、分析问题和解决问题的能力。

本书介绍了常用的土力学实验的原理、实验仪器设备、实验方法及步骤等。全书共有 11 个实验，书后附 2 个附录。内容包括土的基本物理、力学性质指标实验和设计性实验，分别为土的密度、土的含水率、土的相对密度、土的颗粒级配、粗粒土的休止角、土的界限含水率、土的击实性、土的渗透性、土的压缩性、无侧限抗压强度和土的抗剪强度的测定。同时，提出设计性实验的思路和方法，主要是与水土保持关联密切的植物固土力学特性指标，分别为根系抗拉强度和根-土复合体抗剪强度测定。每个实验内容后均附有思考题，以便学生加深对相关内容的理解。本书的实验项目可以根据课时情况选择。

本书编写人员的分工如下：实验一由韩姣姣编写，实验二由熊好琴编写，实验三由赵占军、杨桂英编写，实验四由刘楠编写，实验五由赵洋毅编写，实验六和实验八由段旭编写，实验七由曹向文编写，实验九由曹光秀编写，实验十由赵占军编写，实验十一由薛杨、杨坤负责编写，附录一由赵洋毅、薛杨、杨坤编写，附录二由

赵洋毅编写。全书由赵洋毅、段旭、熊好琴、赵占军、杨桂英统稿。

本书在出版过程中，得到“云南省一流建设学科（生态学）建设项目”“云南省高校优势特色重点学科（生态学）建设项目”的资助。由于编者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请读者提出宝贵意见和建议。

编者

2017年10月

目 录

前言

实验一	土的密度测定	1
实验二	土的含水率测定	8
实验三	土的相对密度测定	11
实验四	土的颗粒级配的测定	14
实验五	粗粒土的休止角测定	24
实验六	土的界限含水率测定	28
实验七	土的击实性测定	41
实验八	土的渗透性测定	46
实验九	土的压缩性测定	53
实验十	无侧限抗压强度测定	61
实验十一	土的抗剪强度测定	66
附录	81
附录一	设计实验	81
附录二	实验报告	89
主要参考文献	108

实验一 土的密度测定

一、实验目的

本实验的目的在于测定土在天然状态下单位体积的质量，以便了解土的疏密状态及与其他实验配合计算土的干密度、孔隙比及饱和度等物理性质指标和工程设计与控制施工质量。

二、实验原理

土的密度是质量密度的简称，指土的湿密度，即土的总质量 m 与其体积 V 之比，以符号 ρ 表示，除此以外还有土的干密度 ρ_d 、饱和密度 ρ_{sat} ，单位为 g/cm^3 ；相应的重度称为湿重度 γ 、干重度 γ_d 、饱和重度 γ_{sat} 和有效重度 γ' ，由于涉及作用于质量上的重力，所以表示为单位体积的力，以符号 γ 表示（重度原称容重），单位为 kN/cm^3 。两者换算关系见式（1-1）：

$$\gamma = g \times \rho = 9.81 \times \rho \approx 10 \times \rho \quad (1-1)$$

三、实验内容

土的密度是单位体积土的质量。单位体积土中固体颗粒的质量称为土的干密度；土体孔隙中充满水时的单位体积质量称为土的饱和密度；在计算自重应力时，须采用土的重力密度，即重度，是指单位体积土的质量。

四、实验方法

测定土的密度常用的方法主要有：①环刀法，适用于黏性土；②蜡封法，适用于易破碎、形状不规则的坚硬土；③灌沙法，适用于砾类土等粗粒土；④核子射线法，适用于沙类土、黏性土。

下面分别介绍环刀法、蜡封法、灌沙法、核子射线法。

（一）环刀法

环刀法就是采用一定体积环刀切取土样使土灌满环刀，并称量土的质量的

方法，从而达到测定密度的目的。环刀内土的质量与环刀体积之比即为土的密度。环刀法操作简单、准确，在室内和野外均普遍采用。

1. 实验器具

(1) 环刀。目前常用的环刀内径有 (61.8 ± 0.15) mm 和 (79.8 ± 0.15) mm 两种，高度为 (20 ± 0.016) mm。环刀的质量、容积须定期校验。

(2) 天平。称量 500g，分度值 0.1g；称量 200g，分度值 0.01g。

(3) 其他。切土刀、钢丝锯、烘箱、环刀托、干燥器等。

2. 实验步骤

(1) 量测环刀。调整天平平衡，取出环刀，称量环刀质量，并涂一薄层凡士林。

(2) 制备土样。按工程需要取原状或制备所需状态的扰动土样，土样的直径及高度均应大于环刀，整平其两端放在玻璃片上。

(3) 切取土样。将环刀的刀口向下放在土样上，然后用切土刀将土样削成略大于环刀直径的土柱，将环刀垂直下压，边压边削使土样上端伸出环刀为止，然后将环刀两端的余土削平，直至土样上表面伸出环刀，将两端面盖上平滑的玻璃片，以免水分蒸发。

(4) 土样称量。擦净环刀外壁，称环刀加湿土的质量，精确到 0.1g，查环刀质量表。

(5) 本实验需进行两次平行测定，其平行差值不得大于 $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ ，求其算术平均值。

3. 数据记录及分析

按式 (1-2) 计算土的湿密度：

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_1 - m_2}{V} \quad (1-2)$$

式中： ρ 为密度，计算至 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ ； m 为湿土质量 (g)； m_1 为环刀加湿土质量 (g)； m_2 为环刀质量 (g)； V 为环刀体积 (cm^3)。

密度实验需进行两次平行测定，其平行差值不得大于 $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ ，取其算术平均值，密度实验记录在表 1-1 中。

表 1-1 密度实验记录

土样编号	环刀号	环刀+湿土质量 m_1/g	环刀质量 m_2/g	湿土质量 m/g	环刀体积 V/cm^3	密度/ (g/cm^3)	
						单值	平均值
1							
2							
3							

(二) 蜡封法

蜡封法是将一定质量的土样浸入融化的石蜡中，然后分别称其在空气中和水中的质量，根据阿基米德原理——物体在水中减少的质量等于其排开同体积的质量，计算被排开水的体积，从而测得土的密度。本方法适用于易破裂土、形状不规则的坚硬土。在野外未用环刀取样，但采有原状土，可用此法。

1. 实验器具

- (1) 石蜡及熔蜡加热器（锅和酒精炉等）。
- (2) 天平。称量 200g，感量 0.01g。
- (3) 其他。烧杯、杯托、切土刀、细线、针、滤纸、温度计、干燥器等。

2. 实验步骤

- (1) 采取土样。将野外采取的原状土样带回室内。
- (2) 切取土样。从原状土中切取大于 30cm^3 、具有代表性的块状土样，用刀清除削去表面浮土及尖锐棱角，用细线系住，土样的直径及高度均应大于环刀，整平其两端放在玻璃片上，称重（精确到 0.01g）。
- (3) 浸蜡封土。持细线将土样徐徐浸入刚过熔点的蜡液（ 60°C 左右）中，待土样全部浸没后立即提出，使土样周围包着一层石蜡薄膜。然后检查土样周围的蜡膜是否完全封闭，当有气体时用针刺破，再用热蜡液涂封孔口。待冷却后称蜡封土样质量（精确到 0.01g）。
- (4) 称取试样。持冷却后的蜡封试样的一端，浸没在盛有纯水的烧杯中，测定蜡封试样在纯水中的质量，并测定纯水的温度。
- (5) 取出试样。擦干蜡面上的水分，称其质量。当浸水后的试样质量增加时，应另取试样重做实验。

3. 数据分析

按式（1-3）计算土的密度：

$$\rho = \frac{m}{\frac{m_w - m'}{\rho_{wT}} - \frac{m_w - m}{\rho_n}} \quad (1-3)$$

式中： ρ 为土样的天然密度（ g/cm^3 ）； m 为土样的质量（g）； m_w 为蜡封试样质量（g）； m' 为蜡封试样在纯水中质量（g）； ρ_{wT} 为纯水在温度为 T 时的密度（ g/cm^3 ）； ρ_n 为蜡的密度（ g/cm^3 ）。

蜡封法实验应进行两次平行测定，两次测定的差值不得大于 $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ ，取两次算术平均值。

(三) 灌沙法

利用在确定的灌入状态下，沙的密度（可以在相同灌入条件下事先测得）

不会发生变化的原理，测定试坑中沙子质量，从而计算试坑的体积，达到测定土体密度的目的。

1. 实验器具

(1) 灌沙法密度测定仪。

(2) 天平。称量 10kg，分度值 5g；称量 500g，分度值 0.1g。

(3) 其他。小铁锹、小铁铲、盛土容器等。

2. 实验步骤

(1) 标准沙密度测定。①选取一定量的粒径为 0.25~0.50mm、密度为 1.47~1.61g/cm³ 的洁净干燥沙。②称量组装好的密度测定仪质量 m_1 。③将密度测定仪竖立（漏斗向上），向容沙瓶内注满清水（用小玻璃板封口，以玻璃板下气泡最小为准），称测定器和水的质量 m_2 ，同时测记水温。再重复测定两次。将三次测定结果换算为该温度下水的体积，三次结果最大差值不得大于 3mL，取三次测定值的平均值作为密度测定仪容沙瓶的体积。④按上述步骤将水换为标准沙，测定标准沙充满容量瓶后密度测定仪和标准沙的质量 m_3 。⑤按式（1-4）计算容沙瓶的容积：

$$V_r = (m_2 - m_1)V_w \quad (1-4)$$

式中： V_r 为容沙瓶体积（mL）； m_2 为密度测定仪和水的质量（g）； m_1 为密度测定仪的质量（g）； V_w 为每克水的体积（mL/g）。

不同温度下，水的密度不同，在计算密度测定仪容沙瓶容积时，要根据测定时的温度使用不同的 V_w ，其值见表 1-2。

表 1-2 不同温度下每克水的体积

水温/℃	12	14	16	18	20	22
每克水体积/mL	1.000 48	1.000 73	1.001 03	1.001 38	1.001 77	1.002 21
水温/℃	24	26	28	30	32	
每克水体积/mL	1.002 68	1.003 20	1.003 75	1.004 35	1.004 97	

按式（1-5）计算标准沙的密度：

$$\rho_s = \frac{m_3 - m_1}{V_r} \quad (1-5)$$

式中： ρ_s 为标准沙的密度； m_3 为测定仪和标准沙的质量（g）。

(2) 测定灌满漏斗所需标准沙的质量。①将标准沙灌满容沙瓶，称测定器和标准沙的质量 m_3 。将测定器倒置于洁净的平面上（漏斗朝下），打开阀门，待沙停止流动后迅速关闭阀门，称剩余沙和测定器质量 m_4 ，计算流失沙的质

量 m_5 。②按式 (1-6) 计算灌满漏斗所需标准沙的质量:

$$m_5 = m_3 - m_4 \quad (1-6)$$

式中: m_4 为剩余沙和测定器质量 (g); m_5 为灌满漏斗所需标准沙质量。

(3) 实验要点。①将测定仪倒置 (漏斗朝下) 于整平的地面上, 沿灌沙漏斗外缘画一轮廓线, 在所画轮廓线内挖坑, 试坑大小应根据土的最大粒径确定。②将挖出的土全部装入容器, 称出湿土总质量, 同时取代表性试样测定含水率。③将沙充满容沙瓶, 称标定器和标准沙质量 m_3 , 将测定仪倒置 (漏斗朝下) 于挖好的坑口上 (如坑口土质较松软, 要采用底板。当使用底板时, 应把底板空洞视为灌沙漏斗的一部分), 打开阀门, 使标准沙流入试坑, 当沙停止流动时关闭阀门, 称测定器和剩余沙质量 m_6 。试样土规格和试坑尺寸见表 1-3。

表 1-3 最小体积和测定含水率试样质量

土的最大粒径/mm	试坑尺寸/mm		测定含水率应取试样质量/g
	直径	高度	
5~25	150	200	100
25~50	200	250	300

(4) 充满试坑所需沙质量按式 (1-7) 计算:

$$m_7 = m_3 - m_5 - m_6 \quad (1-7)$$

式中: m_6 为灌满试坑后测定测定仪和剩余沙质量 (g); m_7 为灌满试坑所需标准沙质量 (g)。

(5) 密度和干密度按式 (1-8)、式 (1-9) 计算:

$$\rho = \frac{m}{m_7} \times \rho_s \quad (1-8)$$

式中: m 为试坑内土的质量 (g)。

$$\rho_d = \frac{m}{m_7(1+0.01\omega)} \times \rho_s \quad (1-9)$$

式中: m 为试坑内土的质量 (g); ω 为土壤含水率 (%)。

(四) 核子射线法

核子射线法广泛用于路基填土压实工程中检测土的密度。核子湿度密度仪的原理是根据不同密度的土对 γ 射线 (铯 137- γ 源, 半衰期为 33.2 年) 的反射, 间接地求出该材料的密度。

1. 实验器具 核子湿度密度仪由主机和附件组成。①主机由放射源、探测器、微处理器、测深定位装置等组成。放射源: 铯 137- γ 源, 辐射活性

3.7×10^8 Bq 镭 241/铍中子源, 辐射活性 1.85×10^9 Bq。②附件有标准块、导板、钻杆、充电器。③技术指标。测量范围: 含水量 $0 \sim 0.64 \text{ g/cm}^3$, 密度 $1.12 \sim 2.73 \text{ g/cm}^3$ 。准确度: 含水量 $\pm 0.004 \text{ g/cm}^3$, 密度 $\pm 0.004 \text{ g/cm}^3$ 。

2. 实验步骤

(1) 标准计数和统计实验。将标准块放在坚硬的材质表面, 按规定将仪器放置在标准块上, 仪器手柄设置在安全位置。周围 10m 以内无其他放射源, 3m 以内的地面上不得堆放其他材料。按下启动键, 开始进行标准计数或统计实验。操作人员应退到离仪器 2m 以外区域。当仪器发出结束信号后, 检查密度的标准计数或统计分析结果, 如果其数值在规定的范围, 即可开始检测。

(2) 输入设定参数。①测量计数时间 (不宜小于 30s); ②选择计量单位 g/cm^3 或 kg/cm^3 ; ③密度的偏移量, 当无偏移量时输入“0”; ④测点记录号。

(3) 平整被测材料表面, 必要时可用少量细粉颗粒铺平, 然后用导板或钻杆造孔。孔深必须大于测试深度, 孔应垂直, 孔壁光滑, 不得坍塌。

(4) 按规定方法将仪器就位, 并将放射源定位到预定的测试深度, 按下启动键开始测试, 操作人员退到离仪器 2m 以外的区域。

(5) 当仪器发出结束信号后, 储存或记录检测结果, 并将放射源退回到安全位置。

(6) 实验误差应满足以下规定要求。本实验在同一测点, 仪器在初始位置进行第一次读数, 然后将仪器绕测孔旋转 180° 进行第二次读数, 密度应分别取两次读数的平均值。密度的平行差值不应大于 0.03 g/cm^3 。如果两次测定的平行差值超过允许差值, 则应将仪器再绕测孔旋转到 90° 和 270° 的位置进行两次读数, 取其四次读数的算术平均值。

3. 数据记录及分析 干密度计算按式 (1-10) 计算:

$$\rho_d = \rho - \rho_{sw} \quad (1-10)$$

式中: ρ 为湿密度 (g/cm^3); ρ_d 为干密度 (g/cm^3); ρ_{sw} 为含水量 (单位体积土中水的质量, g/cm^3)。

五、注意事项

1. 当土样坚硬、易碎或含有粗颗粒不易修成规则形状, 采用环刀法有困难时, 可采用蜡封法, 即将需测定的土样称重后浸入融化的石蜡中, 使土样表面包上一层蜡膜, 分别称 (蜡+土) 在空气及水中的质量, 已知蜡的密度, 通过计算便可求得土的密度。

2. 环刀法切取试样时, 应垂直静压, 边压边削, 不要使环刀内壁与试样

间留有空隙。

3. 切取试样时，一般不应填补，如确需填补，填补部分不得超过环刀法体积的 1%。

4. 用蜡封法时，因石蜡燃点较低，熔蜡时湿度不宜过高。若湿度过高，对土样的含水量和结构都会产生一定的影响，使密度及含水量偏低；若湿度过低蜡皮不易封好，易形成气泡或针眼，因而熔蜡温度一般控制在 50~60℃。

5. 防止石蜡进入土孔隙内部，以免影响测试结果。

6. 称量土样时，应考虑系土样细线的质量。

7. 此外，当现场测定原状沙和砾质土的密度时，用灌水法或灌沙法测定，具体步骤详见《土工实验方法标准》(GB/T 50123)。

六、思考题

1. 简述土粒密度、土壤容重和土壤孔隙度之间的关系。
2. 测定土壤密度时，为什么要用环刀采集土壤结构未破坏的原状土壤？
3. 天然密度的测量方法是什么？
4. 土粒密度和土壤容重测定的原理分别是什么？并说明测定方法。
5. 标准小环刀体积是多少？
6. 说明土壤孔隙度的计算方法。
7. 密度和干密度的区别是什么？

实验二 土的含水率测定

一、实验目的

测定土的含水率，以了解土的含水情况，是计算土的孔隙比、液性指数、饱和度及其他物理力学性质不可缺少的一个基本指标。

二、实验原理

含水率反映土的状态，含水率的变化将使土的一系列物理力学性质指标随之而异。这种影响表现在各个方面，如反映在土的稠度方面，使土成为坚硬、可塑或流动的；反映在土内水分的饱和程度方面，使土成为稍湿、很湿或饱和的；反映在土的力学性质方面，能使土的结构强度增加或减小，紧密或疏松，构成压缩性及稳定性的变化。

三、实验内容

土的含水率是指土中水的质量与干土质量的比值，也称土的含水量。适用范围为粗粒土、细粒土、有机质土和冻土。

四、实验方法

烘干法是根据加热后水分蒸发的原理，将已知质量的土样放入烘干箱，在 $100\sim 105^{\circ}\text{C}$ 温度条件下烘干至恒重时，失去的水的质量与干土质量的比值，即含水率，用百分数表示。

五、实验器具

1. 烘箱 采用温度能保持在 $105\sim 110^{\circ}\text{C}$ 的电热烘箱。
2. 电子分析天平 称量 200g ，感量 0.01g ；称量 $1\ 000\text{g}$ ，感量 0.1g 。
3. 其他 干燥器、铝盒、切土刀等。

六、实验步骤

1. **湿土称量** 选取具有代表性的试样 10~20g, 沙性土、有机质土 50g, 放入已知重量 g_0 的铝盒中, 立即盖好盒盖, 称盒盖、盒身及湿土的质量, 精确至 0.01g, 将数值 g_1 填入表 2-1。

2. **烘干冷却** 打开盒盖, 放入烘箱, 在温度 105~110℃ 下烘至恒重, 烘干时间对黏性土、粉土不得少于 8h, 对沙土不得少于 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。取出土样, 盖好盒盖, 放入干燥器冷却, 一般冷却 20min 左右称重并记录干土及铝盒的重量, 称干土质量, 精确至 0.01g, 将数值 g_2 填入表 2-1。

表 2-1 密度实验记录

土样 编号	盒号	铝盒质 量 g_0/g	铝盒加湿土 质量 g_1/g	铝盒加干土 质量 g_2/g	水质量 $g_1 - g_2/g$	干土质量 $g_2 - g_0/g$	含水率/%	
							单值	平均值
1	1-1							
	1-2							
2	2-1							
	2-2							
3	3-1							
	3-2							
∴	∴							
	∴							

七、数据记录及分析

含水率按式 (2-1) 计算:

$$W = (g_1 - g_2) / (g_2 - g_0) \times 100\% \quad (2-1)$$

式中: W 为含水率 (%); g_0 为铝盒质量 (g); g_1 为铝盒加湿土的质量 (g); g_2 为铝盒加干土的质量 (g)。

八、注意事项

1. 天然含水量实验, 应在打开土样后立即取样测定, 以免水分改变。烘

干冷却后应立即称干土质量，以免吸水分，影响实验结果。

2. 烘箱温度以 $105\sim 110^{\circ}\text{C}$ 为宜，温度过高，土壤有机质易碳化散逸。烘箱中，一般土壤烘干 6h 即可烘至恒重，一般沙土需 1~2h，粉质土需 6~8h，黏土约 10h，风干土及含水量低的土，可适当缩短烘干时间；湿土量较多或块状土，应延长烘样时间；质地较轻的土壤烘干时间可较短，在 5~6h。

3. 若土的有机质含量在 $5\%\sim 10\%$ ，以采用真空干燥箱低温 ($70\sim 80^{\circ}\text{C}$) 烘干试样为宜。当有机质含量超过 10% 时，必须采用真空干燥箱。

4. 烘干恒重的标准与试样数量有关，通常前后两次称量之差不大于称样天平的精度即为恒温。

5. 干燥器内的干燥剂（氯化钙或变色硅胶）要经常更换和处理。

6. 本实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% ；当含水率等于或大于 40% 时为 2% 。取两个侧值的平均值，以百分数表示。

九、思考题

1. 测定含水率的目的是什么？
2. 土壤吸湿水与自然含水率有什么区别和联系？各应用于哪些方面？
3. 测定含水率常见的方法有哪几种？
4. 土样含水率在工程中有何价值？