



普通高等教育应用型本科创新教材

主 编 温淑莲
副主编 张庆洪 葛颜慧
张建国 姜春林

土工试验与原位测试

Soil Test
and In-situ Test

非外借



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



普通高等教育应用型本科创新教材

Soil Test
and In-situ Test

土工试验与原位测试

主 编 温淑莲
副主编 张庆洪 葛颜慧
张建国 姜春林



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书为“土力学”课程的试验教学教材,主要包括土的室内试验与现场原位测试两部分,其中土工试验包括土的物理性质、土的水理性质、土的力学性质和土的特殊性质四部分内容;原位测试主要介绍岩土工程原位测试技术,每个试验测试项目均详细介绍试验操作步骤及结果整理方法,且增加了工程应用方面的内容。

本书体系完整,内容简洁,具有很好的操作性和实践性,既可作为土木工程、地下工程、港航工程等专业的试验教学用书,也可供从事岩土工程勘察、设计和试验的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土工试验与原位测试 / 温淑莲主编. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019. 1

ISBN 978-7-114-13493-7

I. ①土… II. ①温… III. ①土工试验②土体—原位试验 IV. ①TU41②TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 016720 号

书 名: 土工试验与原位测试

著 作 者: 温淑莲

责任编辑: 李 坤 卢 珊

责任校对: 赵媛媛

责任印制: 张 凯

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京印匠彩色印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 12.5

字 数: 290 千

版 次: 2019 年 1 月 第 1 版

印 次: 2019 年 1 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-13493-7

定 价: 36.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

前 言

土工试验与原位测试是岩土工程、地质工程的重要工作内容之一。近 20 年来,随着我国土木工程的发展,大量高层建筑、高等级公路以及机场、铁路、隧道等的兴建,有力地促进了土工试验与原位测试技术的进步,产生了许多成果,需要加以归纳总结和提高,以适应技术进一步发展的要求。而工程项目及相关技术都与它们赖以存在的岩土体有着密切的关系。我国地域辽阔,自然地理环境各不相同,岩土体的种类繁多,其物理性质与工程性质也千变万化,因此,如何正确测定岩土体的物理性质与工程性质,并提供可靠的参数指标,是工程项目建设首要解决的问题,它往往决定着工程项目建设成功与否。

本书是为配合高等院校进行土工试验与原位测试教学而编写的试验用书。书中反映了作者多年的教学心得以及实践经验。根据土工试验和原位测试的特点,本书强调指导性和实用性,力求详细、易懂和完整,每个试验和测试项目不仅有试验测试原理,更有详尽的操作步骤,便于学生开展和完成土工试验和原位测试的操作流程。

本书系统地介绍了土工试验与原位测试的基本原理、试验仪器及测试方法,主要包括:绪论、土的物理性质试验、土的水理性质试验、土的力学性质试验、土的特殊性质试验以及原位测试。

本书由山东交通学院教师编写,其中绪论、第五章由温淑莲编写,第一章由张建国编写,第二章由姜春林编写,第三章由葛颜慧编写,第四章由张庆洪编写。

本书在编写过程中,引用了许多专家、学者在教学、科研、试验和原位测试中积累的资料,以及有关规范、规程条文,在此一并表示感谢。

本书主要作为高等院校土木工程、地下工程、港航工程、地质工程等专业的试验教学用书,也可供从事岩土工程设计、勘察和试验的技术人员参考。

限于作者水平,书中难免存在不当之处,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1
第一章 土的物理性质试验	3
第一节 含水率试验	3
第二节 密度试验	7
第三节 土的比重试验	18
第四节 颗粒分析试验	25
第五节 界限含水率试验	34
第二章 土的水理性质试验	42
第一节 土的渗透性	42
第二节 常水头渗透试验	42
第三节 变水头渗透试验	47
第四节 湿化试验	49
第三章 土的力学性质试验	51
第一节 土的压缩性试验	51
第二节 土的击实试验	60
第三节 土的承载比(CBR)试验	65
第四节 土的直接剪切试验	72
第五节 土的三轴压缩试验	80
第六节 土的无侧限抗压强度试验	96
第四章 土的特殊性质试验	100
第一节 黄土湿陷试验	100
第二节 土的膨胀性试验	112
第三节 冻土试验	122
第五章 原位测试	135
第一节 载荷试验	135
第二节 静力触探试验	141
第三节 圆锥动力触探试验	151
第四节 标准贯入试验	159

第五节 十字板剪切试验	165
第六节 旁压试验	172
第七节 波速测试	179
参考文献	194

绪 论

一、土工试验与原位测试的作用

土体是自然界的产物,其形成过程、物质成分以及工程特性是极为复杂的,并且随受力状态、应力历史、加载速率和排水条件等的不同而变得更加复杂。所以,在进行各类工程项目设计和施工之前,必须对工程项目所在场地的土体进行土工试验及原位测试,以充分了解和掌握岩土的物理和力学性质,从而为现场岩土工程条件的正确评价提供必要的依据。

土工试验是对岩土试样进行测试,并获得岩土的物理性质指标、力学性质指标、渗透性指标以及特殊性质指标等的试验工作,从而为工程设计与施工提供参数,是正确评价工程地质条件不可缺少的依据。

所有的工程建设项目,包括高层建筑、高速公路、机场、铁路、隧道等的建设,都与它们赖以存在的岩土体有着密切的关系,在很大程度上取决于岩土体能否提供足够的承载力,取决于工程结构不至于遭受超过允许的地基沉降和差异变形等,而地基承载力和地基变形计算中的参数又主要是土工试验来确定的,因此,土工试验对于各类工程项目建设是不可缺少的。

原位测试是指在保持岩土体天然结构、天然含水率以及天然应力状态的条件下,测试岩土体在原有位置上的工程性质的测试手段,原位测试不仅是岩土工程勘察的重要组成部分,而且还是岩土工程施工质量检验的主要手段。

采用原位测试方法对岩土体的工程性质进行测定,可不经钻孔取样,直接在原位测定岩土体的工程性质,从而可避免取土扰动和取土卸荷回弹等对试验结果的影响。它的试验结果可以直接反应原位土层的物理力学性状。某些不易采取原状土样的土层(如深层的砂)只能采用原位测试的方法,原位测试还可在较大范围内测试岩土体,故其测试结果更具有代表性,并可在现场重复进行验证。目前,各种原位测试方法已受到越来越广泛的重视和应用,并向多功能和综合测试方面发展。

二、土工试验与原位测试对比

室内试验与原位测试的对比如表 0-1 所示。

室内试验与原位测试对比 表 0-1

试 验 类 别	原 位 测 试	室 内 试 验
试验对象	1. 测定土体范围大,能反映微观、宏观结构对土性的影响,代表性好; 2. 测试土体边界条件不明显; 3. 测试设备进入土层对土有一定扰动; 4. 对难以取样的土层仍能试验; 5. 有的能给出连续的土性变化剖面,可用以确定分层界线	1. 试样尺寸小,不能反映宏观结构、非均质性对土性的影响,代表性差; 2. 试验土样边界条件明显; 3. 无法避免钻进取样对土样的扰动; 4. 对难以或无法取样的土层无法试验,只能人工制备土样进行试验; 5. 只能对有限的若干点取样,点间土样变化是推测的,土层界线不清楚

续上表

试 验 类 别	原 位 测 试	室 内 试 验
应力条件	1. 基本上在原位应力条件下进行试验,但原位应力条件不是很明确; 2. 试验应力路径无法很好控制; 3. 排水条件不能很好控制; 4. 试验时主应力方向与实际工程不一致	1. 在明确、可控制的应力条件下进行试验; 2. 试验应力路径可以预定; 3. 可模拟实际工程的主应力方向进行试验
应变条件	应变场不均匀,应变速率大于实际	应变场均匀,应变速率可以控制
岩土参数	多建立在经验公式或半经验半理论公式的基础之上	可直接测定
试验周期	周期短,效率高	周期较长,效率较低

从表中可见,土工试验与原位测试的优缺点是互补的,它们是相辅相成的。

室内土工试验结果会由于试样扰动而受到影响,因此,在利用室内试验得出的岩土参数时必须小心对待。原位测试可避免取土扰动对试验结果的影响,但是,原位测试也有其难以克服的局限性:首先,原位测试的应力条件复杂,一般很难直观地测定岩土体的某个参数,因此在选择计算模型和确定边界条件时将不得不采取一些简化假设,由此引起的误差也可能使所得出的岩土体参数不能理想地表征实际土体的性状,特别是当原位测试中土体变形和破坏模型与实际工程不一致时,例如十字板剪切试验的剪切和破坏模式与土坡或地基的实际破坏形式是大相径庭的,事实上已有资料表明十字板剪切试验得出的强度高于室内无侧限压缩试验结果。其次,原位测试一般只能测定现场荷载条件下的岩土体参数,而无法预测荷载变化过程中的发展趋势。因此,对于岩土体参数的测定,仅仅依靠原位测试也是不行的。

关于对室内试验结果影响最大的取土扰动,现有的取土技术,已经足以使现场取土扰动的影响降到最小限度。目前,取土技术已经引起足够的重视,在软土中采用薄壁取土器可以取得质量最好的原状土,但是,由于其操作过于繁琐,在推广过程中遇到一定困难。至于取土时无法避免的应力释放引起的土样扰动,可采取室内再固结等方法予以减轻甚至消除。

三、土工试验与原位测试项目

室内土工试验大致可以分为以下 4 类。

(1) 土的物理性质试验:包括土的含水率试验、密度试验、比重(相对密度)试验、颗粒分析试验、界限含水率试验。

(2) 土的水理性质试验:土的渗透试验、湿化试验。

(3) 土的力学性质试验:土的压缩试验、击实试验、承载比试验、直剪试验、三轴试验、无侧限抗压强度试验。

(4) 土的特殊性质试验:黄土湿陷试验、土的膨胀性试验、冻土试验、有机质试验等。

原位测试可分为定量方法和半定量方法。定量方法是指在理论上和方法上能形成完整体系的原位测试方法,例如,静力载荷试验、旁压试验、十字板剪切试验、渗透试验等;半定量方法是指由于试验条件限制或方法本身还不具备完整的理论用以指导试验,因此必须借助于某种经验或相关关系才能得出所需成果的原位测试方法,例如,静力触探试验、圆锥动力触探试验、标准贯入试验等。

第一章 土的物理性质试验

土是由三相组成的体系,土的物理性质主要讨论土的物质组成以及定性、定量描述其物质组成的方法,包括土的颗粒特征,土的三相比例指标,黏质土的界限含水率以及砂土的密实度等。这些土的物理性质需要一定的指标表示,而土的物理性质指标的数值需要通过土工试验进行测定,具体试验包括:土的颗粒分析试验、含水率试验、密度试验、土的颗粒比重(相对密度)试验、界限含水率试验等。

第一节 含水率试验

一、概述

土的含水率是试样在 $105 \sim 110^{\circ}\text{C}$ 下烘至恒量时,所失去的水的质量与干土质量的比值,用百分数表示。含水率是土的基本物理性质指标之一,也是土的实测指标之一。它反映土的状态,它的变化将使土的一系列物理力学性质随之变化。这种影响表现在各个方面:反映在土的稠度方面,使土成为坚硬的、可塑的或流动的;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少、紧密或疏松,造成压缩性及稳定性的变化。因此,土的含水率是研究土的物理力学性质必不可少的一项指标。含水率还是计算土的干密度、孔隙比、饱和度、液性指数等项指标的依据。同时,土的含水率也是土工建筑物施工质量控制的依据,例如在路堤、土坝等施工中为控制土的最大且经济的压实程度,必须事先了解土的含水率与密度的关系。

测定土中含水率相对大小的具体数值,以了解土中含水情况,说明土的干湿程度,为工程设计和施工提供指标。

二、试验方法

目前测定含水率的方法有烘干法、酒精燃烧法、比重法等,其中以烘干法为室内试验的标准方法。

(一) 烘干法

1. 目的和适用范围

烘干法试验适用于测定黏质土、粉质土、砂类土、砂砾土、有机质土和冻土体类的含水率。

2. 仪器设备

(1) 烘箱:可采用电热烘箱或温度能保持 $105 \sim 110^{\circ}\text{C}$ 的其他能源烘箱。

(2) 天平:称量 200g ,感量 0.01g ;称量 1000g ,感量 0.1g 。

(3)其他:干燥器,称量盒[为简化计算手续,可将盒质量定期(3~6个月)调整为恒质量值]等。

3. 试验步骤

(1)取具有代表性试样,细粒土 15~30g,砂类土、有机质土为 50g,砂砾土为 1~2kg,放入称量盒内,立即盖好盒盖,称质量。称量时,可在天平一端放上与该称量盒等质量的砝码,移动天平游码,平衡后称量结果减去称量盒质量即为湿土质量。

(2)揭开盒盖,将试样和盒放入烘箱内,在温度 105~110℃ 恒温下烘干。烘干时间对细粒土不得少于 8h,对砂类土不得少于 6h。对含有有机质超过 5% 的土或含石膏的土,应将温度控制在 60~70℃ 的恒温下,干燥 12~15h 为好。

(3)将烘干后的试样和盒取出,放入干燥器内冷却(一般只需 0.5~1h 即可)。冷却后盖好盒盖,称质量,精确至 0.01g。

4. 试验记录

试验记录见表 1-1。

含水率试验记录(烘干法) 表 1-1

工程编号_____

土样说明_____

试验日期_____

试验者_____

计算者_____

校核者_____

名 称	代 号	盒 号			
		1	2	3	4
盒质量(g)	(1)				
盒 + 湿土质量(g)	(2)				
盒 + 干土质量(g)	(3)				
水分质量(g)	(4) = (2) - (3)				
干土质量(g)	(5) = (3) - (1)				
含水率(%)	(6) = $\frac{(4)}{(5)}$				
平均含水率(%)	(7)				

5. 结果整理

按下式计算含水率:

$$w = \frac{m - m_s}{m_s} \times 100$$

(1-1)

式中: w ——含水率(%),计算至 0.1;

m ——湿土质量(g);

m_s ——干土质量(g)。

6. 精密度与允许差

本试验需进行两次平行测定,取其算术平均值,允许平行差值应符合表 1-2 规定。

含水率测定的允许平行差值

表 1-2

含水率(%)	允许平行差值(%)
5 以下	0.3
40 以下	≤1
40 以上	≤2

注:对于层状和网状构造的冻土,允许平行差值 <3%。

7. 试验说明

(1)含水率是土的基本物理指标之一,它反映土的状态,它的变化将使土的一系列力学性质随之改变;它又是计算土的干密度、孔隙比、饱和度等项指标的依据,是土工构筑物施工质量的重要指标。鉴于目前国内各行业和国家标准将含水量改名为含水率,因此,本标准也改为含水率。含水率试验的烘干法精度高,应用广。

(2)烘干法一般采用能保持恒温的电热烘箱。

(3)鉴于目前国内外主要土工试验标准多数以 105 ~ 110℃ 为标准,故规定烘干温度为 105 ~ 110℃。

试样烘至恒量所需的时间与土类及取土数量有关。本试验规定土量为 15 ~ 30g,对砂类土宜烘 6 ~ 8h,黏质土宜烘 8 ~ 10h。砂类土、砾类土因持水性差,颗粒大小相差悬殊,水分变化大,所以试样应多取一些,本试验取 50g。对有机质含量超过 5% 的土,因土质不均匀,采用烘干法时,除注明有机质含量外,也应取 50g。

有机质土在 105 ~ 110℃ 温度下经长时间烘干后,有机质特别是腐殖酸会在烘干过程中逐渐分解而不断损失,使测得的含水率比实际的含水率大,土中有机质含量越高,误差越大。故对有机质含量超过 5% 的土,应在 60 ~ 70℃ 的恒温下进行烘干。

某些含有石膏的土在烘干时会损失其结晶水,用此方法测定其含水率有影响。每 1% 的石膏对含水率的影响约为 0.2%。如果土中有石膏,则试样应该在不超过 80℃ 的温度下烘干,并可能要烘更长的时间。

(二)酒精燃烧法

1. 目的和适用范围

酒精燃烧法试验适用于快速简易测定细粒土(含有机质的土除外)的含水率。

2. 仪器设备

(1)称量盒。

(2)天平:称量 200g,感量 0.01g;称量 1000g,感量 0.1g。

(3)酒精:纯度 95%。

(4)滴管、火柴、调土刀。

3. 试验步骤

(1)取代表性试样(黏质土 5 ~ 10g,砂类土 20 ~ 30g),放入称量盒内,称湿土质量 m ,准确至 0.01g。

(2)用滴管将酒精注入放有试样的称量盒中,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。

(3) 点燃盒中酒精, 燃至火焰熄灭。

(4) 将试样冷却数分钟, 重新燃烧两次。

(5) 待第三次火焰熄灭后, 盖好盒盖, 立即称干土质量 m_s , 精确至 0.01g。

4. 试验记录

同烘干法记录表(表 1-1)。

5. 结果整理

按式(1-1)计算含水率:

$$w = \frac{m - m_s}{m_s} \times 100$$

6. 精密度与允许差

本试验需进行两次平行测定, 取其算术平均值, 允许平行差值应符合表 1-2 的规定。

7. 注意事项

(1) 在试样中加入酒精, 利用酒精在土上燃烧, 使土中水分蒸发, 将土样烘干, 是快速简易测定且较准确的方法之一; 适用于在没有烘箱或土样较少的条件下, 对细粒土进行含水率测定。

(2) 酒精纯度要求达 95%。

(3) 取代表性试样时, 砂类土数量应多于黏质土。

(三) 比重法

1. 目的和适用范围

本试验方法仅适用于砂类土。

2. 仪器设备

(1) 玻璃瓶: 容积 500mL 以上。

(2) 天平: 称量 1000g, 最小分度值 0.5g。

(3) 其他: 漏斗、小勺、吸水球、玻璃片、土样盘及玻璃棒等。

3. 试验步骤

(1) 称取代表性砂类土试样 200 ~ 300g, 放入土样盘中。

(2) 向玻璃瓶中注入清水至 1/3 左右, 然后通过漏斗将土样盘中试样倒入瓶中, 并用玻璃棒搅拌 1 ~ 2min, 直到试样内所含气体完全排出为止。

(3) 向玻璃瓶中加清水至瓶内容积全部充满, 静置 1min 后用吸水球吸去瓶中的泡沫, 然后再加清水至瓶内容积全部充满, 盖上玻璃片, 将瓶外壁擦干净, 称盛满混合液的玻璃瓶质量, 精确至 0.5g。

(4) 将玻璃瓶中的混合液全部倒去, 并将玻璃瓶洗干净, 然后再向玻璃瓶中加清水至瓶内容积全部充满, 盖上玻璃片, 将瓶外壁擦干, 称盛满清水的玻璃瓶质量, 精确至 0.5g。

4. 试验记录

试验记录见表 1-3。

含水率试验记录(比重法)表 1-3

土样编号	瓶 号	湿土质量 (g)	瓶、水、土、玻璃片 总质量(g)	瓶、水、玻璃片 总质量(g)	土样比重	含水率 (%)	平均值 (%)

5. 结果整理

试样的含水率应按下式计算(精确至0.1%)：

$$w = \left[\frac{m(G_s - 1)}{G_s(m_1 - m_2)} - 1 \right] \times 100$$

(1-2)

式中： w ——砂类土的含水率(%)，计算至0.1；

- m ——湿土质量(g)；
- m_1 ——瓶、水、土、玻璃片总质量(g)；
- m_2 ——瓶、水、玻璃片总质量(g)；
- G_s ——砂类土的比重。

6. 精密度与允许差

本试验必须对两个试样进行平行测定，并取其算术平均值，允许平行差值同表1-2。

7. 试验说明

(1)通过本法试验，测定湿土体积，估计土粒比重，间接计算土的含水率。由于试验时没有考虑温度的影响，所得结果准确度较差。土内气体能否充分排出，直接影响试验结果的精度，故比重法仅适用于砂类土。

(2)本试验需用的主要设备为容积为500mL以上的玻璃瓶。

(3)土样倒入未盛满水的玻璃瓶中后，用玻璃棒充分搅拌悬液，使空气完全排出，因土内气体能否充分排出会直接影响试验结果的精度。

第二节 密度试验

一、概述

土的密度 ρ 是指土的单位体积质量，是土的基本物理性质指标之一，也是土的实测指标之一，用于了解土体内部结构的密实情况。用此指标可以换算土的干密度、孔隙比、孔隙率及饱和度等指标。土在天然状态下的密度称为天然密度。所谓天然状态有两个方面的含义：其一是保持土的原始结构，也就是颗粒排列的相对位置未经扰动；其二是保持原有的水分。土的密度取决于土粒的密度、孔隙体积的大小和孔隙中水的质量多少，它综合反映了土的物质组成和结构特征。当结构密实时，一定物质成分的单位体积土中固相质量较大，土的密度值就大，当土的结构较疏松时，其值较小。在结构相同的情况下，土的天然密度值随孔隙中水分含量的增减而增减。工程中常以重度值来表示。由土的质量产生的单位体积的重

力称为重力密度 γ ,简称重度,单位是 kN/m^3 。重度由密度值乘重力加速度 g 求得,即 $\gamma = \rho g$ 。重度是挡土墙土压力计算、人工及天然斜坡稳定设计和验算、地基承载力以及沉降计算的重要指标。

土的密度一般是指土的天然密度即湿密度 ρ ,相应的重度称为天然重度 γ ,除此以外,还有土的干密度 ρ_d 、饱和密度 ρ_{sat} ,相应的有干重度 γ_d 、饱和重度 γ_{sat} 以及有效重度 γ' 。

二、试验方法

土的密度试验是分别测量试样质量及其体积,然后计算土的密度。质量一般采用一定精度的天平测定。但测定土体积的方法和技术却因土质条件和试验状态的不同,而选用不同的方法。对于细粒土,宜采用环刀法;对于易碎裂、难以切削的土,可采用蜡封法;对于现场粗粒土,可采用灌砂法或灌水法。

(一) 环刀法

1. 目的和适用范围

本方法适用于细粒土。

2. 仪器设备

(1) 环刀:内径 $6 \sim 8\text{cm}$,高 $2 \sim 5.4\text{cm}$,壁厚 $1.5 \sim 2.2\text{mm}$ 。

(2) 天平:感量 0.1g 。

(3) 其他:修土刀、钢丝锯、凡士林等。

3. 试验步骤

(1) 按工程需要取原状土或制备所需状态的搅动土样,整平两端,环刀内壁涂一薄层凡士林,刀口向下放在土样上。

(2) 用修土刀或钢丝锯将土样上部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,至土样伸出环刀上部为止。削去两端余土,使土样与环刀口面齐平,并用剩余土样测定含水率。

(3) 擦净环刀外壁,称环刀与土总质量 m_1 ,精确至 0.1g 。

4. 试验记录

试验记录见表 1-4。

密度试验记录(环刀法)

表 1-4

工程编号 _____

试验者 _____

土样说明 _____

计算者 _____

试验日期 _____

校核者 _____

土样编号			1		2		3	
环刀号			1	2	1	2	1	2
环刀容积(cm^3)	(1)							
环刀质量(g)	(2)							
土 + 环刀质量(g)	(3)							
土样质量(g)	(4)	(3) - (2)						

续上表

土样编号			1		2		3	
环刀号			1	2	1	2	1	2
湿密度(g/cm³)	(5)	$\frac{(4)}{(1)}$						
含水率(%)	(6)							
干密度(g/cm³)	(7)	$\frac{(5)}{1 + 0.01(6)}$						
平均干密度(g/cm³)	(8)							

5. 结果整理

土样密度按下式计算：

$$\rho = \frac{m_1 - m_2}{V} \tag{1-3}$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w} \tag{1-4}$$

式中： ρ ——湿密度(g/cm³)，精确至0.01；

m_1 ——环刀与土总质量(g)；

m_2 ——环刀质量(g)；

V ——环刀体积(cm³)；

ρ_d ——干密度(g/cm³)，精确至0.01；

w ——含水率(%)。

6. 精密度和允许差

本试验需进行两次平行测定，取其算术平均值，其平行差值不得大于0.03g/cm³。

7. 试验说明

(1)密度是土的基本物理性指标之一，用它可以换算土的干密度、孔隙比、孔隙率、饱和度等指标。无论在室内试验或野外勘察以及施工质量控制中，均需测定密度。

环刀法只能用于测定不含砾石颗粒的细粒土的密度。环刀法操作简便而准确，在室内和野外普遍采用。

(2)在室内做密度试验，考虑到与剪切、固结等项试验所用环刀相配合，规定室内环刀容积60~150cm³，施工现场检查填土压实度时，由于每层土压实度上下不均匀，为提高试验结果的精度，可增大环刀的容积，一般采用环刀容积为200~500cm³。

环刀高度与直径之比，对试验结果是有影响的。根据钻探机具、取土器的筒高和直径的大小，确定室内试验使用的环刀直径为6~8cm，高2~3cm；野外采用的环刀规格尚不统一，径高比一般以1~1.5为宜。

环刀壁越厚，压入时土样扰动程度也越大，所以环刀壁越薄越好。但环刀压入土中时，要承受相当的压力，壁过薄，环刀容易破损和变形。因此，建议壁厚一般用1.5~2mm。

(3)根据工程实际需要，采取原状土或制备所需状态的扰动土。

(二) 蜡封法

1. 适用范围

本方法适用于易破裂土和形态不规则的坚硬土。

2. 仪器设备

(1) 天平:感量 0.01g。

(2) 烧杯、细线、石蜡、针、削土刀等。

3. 试验步骤

(1) 用削土刀切取体积大于 30cm³ 的试件,削除试件表面的松、浮土以及尖锐棱角,在天平上称量,精确至 0.01g。取代表性土样进行含水率测定。

(2) 待石蜡加热至刚过熔点,用细线系住试件浸入石蜡中,使试件表面覆盖一薄层严密的石蜡。若试件蜡膜上有气泡,需用热针刺破气泡,再用石蜡填充针孔,涂平孔口。

(3) 待冷却后,将蜡封试件在天平上称量,精确至 0.01g。

(4) 用细线将蜡封试件置于天平一端,使其浸浮在盛有蒸馏水的烧杯中,注意试件不要接触烧杯壁,称蜡封试件的水下质量,精确至 0.01g,并测量蒸馏水的温度。

(5) 将蜡封试件从水中取出,擦干石蜡表面水分,在空气中称其质量。将其与步骤(3)中所称质量相比;若质量增加,表示水分进入试件中;若浸入水分质量超过 0.03g,应重做。

4. 试验记录

试验记录见表 1-5。

密度试验记录(蜡封法)

表 1-5

工程编号 _____

土样说明 _____

试验日期 _____

试验者 _____

计算者 _____

校核者 _____

土样编号	试件质量 (g)	蜡封试件 质量(g)	蜡封试件水 中质量(g)	温度 (℃)	水的密度 (g/cm ³)	蜡封试件 体积(cm ³)	蜡体积 (cm ³)	试件体积 (cm ³)	湿密度 (g/cm ³)
	(1)	(2)	(3)		(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
						$\frac{(2)-(3)}{(4)}$	$\frac{(2)-(1)}{\rho_n}$	(5)-(6)	$\frac{(1)}{(7)}$
平均									

5. 结果整理

土样密度按以下公式计算:

$$\rho = \frac{m}{\frac{m_1 - m_2}{\rho_{wt}} - \frac{m_1 - m}{\rho_n}}$$
$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w}$$

(1-5)

式中: ρ ——土的湿密度(g/cm³),精确至 0.01;

ρ_d ——土的干密度(g/cm^3),精确至0.01;
 m ——试件质量(g);
 m_1 ——蜡封试件质量(g);
 m_2 ——蜡封试件水中质量(g);
 ρ_{wt} ——蒸馏水在 $t(^{\circ}\text{C})$ 时密度(g/cm^3),精确至0.001;
 ρ_n ——石蜡密度(g/cm^3),应事先实测,精确至 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$,一般可采用 $0.92\text{g}/\text{cm}^3$;
 w ——含水率($\%$)。

6. 精密度和允许差

本试验需进行两次平行测定,取其算术平均值,其平行差值不得大于 $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ 。

7. 试验说明

(1) 不能用环刀切削的坚硬易碎、含有粗粒、形状不规则的土,可用蜡封法测定密度。

(2) 蜡封试样在水中的质量,系指试样在水中的重力与浮力之差,蜡封试样的质量和蜡封试样在纯水中的质量之差,与纯水在 $t(^{\circ}\text{C})$ 时的密度的比值,即为蜡封试样的体积,当再减去试样上蜡的体积之后,即得风干土样的体积。

密度试验中使用的石蜡,选用55号石蜡为宜,其密度以实测为准。如无条件实测,可采用其密度近似值 $0.92\text{g}/\text{cm}^3$ 进行计算。测定石蜡的密度,应根据阿基米德原理,采用静水力学天平称量法或采用500~1000mL广口瓶比重法进行。

封蜡时,为避免易碎裂土的扰动和蜡封试样内气泡的产生,采用一次徐徐浸蜡方法。

(三) 灌水法

1. 适用范围

本试验方法适用于现场测定粗粒土和巨粒土的密度。

2. 仪器设备

(1) 座板:座板为中部开有圆孔,外沿呈方形或圆形的铁板,圆孔处设有环套,套孔的直径为土中所含最大石块粒径的3倍,环套的高度为其粒径的5%。

(2) 薄膜:聚乙烯塑料薄膜。

(3) 储水筒:直径应均匀,并附有刻度。

(4) 台秤:称量50kg,感量5g。

(5) 其他:铁镐、铁铲、水准仪等。

3. 试验步骤

(1) 根据试样最大粒径宜按表1-6确定试坑尺寸。

试坑尺寸

表 1-6

试样最大粒径 (mm)	试坑尺寸	
	直径(mm)	深度(mm)
5~20	150	200
40	200	250
60	250	300
200	800	1000