

土木工程实验系列教材

TULIXUE JICHU SHIYAN JIAOCHENG

土力学基础实验教程

陈立宏 主编



● 土木工程实验系列教材

土力学基础实验教程

陈立宏 主编

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

土力学基础实验教程/陈立宏主编. —北京:中国科学技术出版社,2011.5

土木工程实验系列教材

ISBN 978-7-5046-5849-4

I. ①土… II. ①陈… III. ①土力学-实验-高等学校-教材 IV. ①TU4-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第059122号

本社图书贴有防伪标志,未贴为盗版

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街16号 邮政编码:100081

电话:010-62173865 传真:010-62179148

<http://www.kjpbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京长宁印刷有限公司印刷

*

开本:787毫米×1092毫米 1/16 印张:10.25 字数:200千字

2011年5月第1版 2011年5月第1次印刷

定价:16.00元

ISBN 978-7-5046-5849-4/TU·86

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

内 容 提 要

本书系统地介绍了土的基本物理特性实验、物理状态实验、压缩固结与强度等力学特性实验、渗透实验等最基础和最常用的土工实验,内容涵盖了土工实验的原理、实验仪器、操作过程、要点、技巧和数据处理方法等各个方面。

本书是在作者讲授土力学实验的讲义基础上,参考了国内外多部理论和实验教材,结合作者多年从事土力学实验研究的经验最终形成的。本书是为土木工程及相关专业本科生进行土力学实验而编写的教材,也可作为岩土工程相关领域专业技术人员和高等院校教师的参考用书。

《土木工程实验系列教材》编辑委员会

主 编	魏庆朝			
副主编	汪越胜	夏 禾		
编 委	朱尔玉	王正道	刘维宁	季文玉
	李 进	李久义	姚谦锋	杨庆山
	石志飞	杨松林	王连俊	高 亮
	赵成刚	朋改非	安明喆	贺少辉
	陈立宏	白 雁	张 桦	

责任编辑	崔 玲
封面设计	中文天地
正文设计	孙 俐
责任校对	凌红霞
责任印制	张建农

总 序

随着我国国民经济的高速发展,大规模的基础设施建设呈现出日新月异的局面,这将需要大量的基础设施建设人才。土木工程专业是培养这些建设人才的主要渠道。

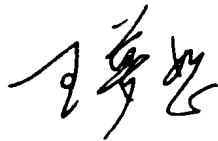
土木工程专业覆盖学科范围非常广泛,需要综合运用工程地质、工程测量、土力学、工程力学、工程设计、建筑材料、建筑设备、建筑经济等学科和施工技术、施工组织等领域的知识。

同时,土木工程又是实践性非常强的专业,实验和实习是培养高水平土木工程专业人才的必不可少的重要环节和手段。

北京交通大学土木工程专业在其 50 余年的发展历史中,始终重视实验、实习、课程设计、毕业设计等实践教学过程,从建立之初即建设了较为齐全的实验室。今天,实验教学设备和手段更加完善,实验技术和实验内容随着科技的发展不断更新。北京交通大学的教师根据多年来实验教学的经验,组织编写了土木工程专业的实验系列教材。

相信本套系列教材的出版,不仅对北京交通大学的实验教学有很好的促进作用,也会受到兄弟院校的欢迎。

中国工程院院士



前 言

岩土工程问题是任何土木工程首先需要面对和解决的问题。在土木工程中,岩土体大多作为承载的地基、荷载或建筑材料,而随着地下工程的发展,岩土体也越来越多地以周围环境的形式出现。随着社会的发展,近年来土木工程的规模和难度不断攀升,出现了高达 818m 的迪拜塔、超过 300m 的大坝、时速 350km/h 的高速铁路、长大跨海越江隧道,而密密麻麻的城市高楼、地下工程和其他土木工程更是比比皆是。要安全经济合理地解决这些工程中的岩土问题,准确的土木工程实验成果、正确的理论分析以及合理的工程判断与实践缺一不可。

由于土是自然界在漫长的地质历史中的产物,是具有时空变异性的三相颗粒堆积物。不同地区、不同场地、不同深度、不同时间的土的形成过程、组成成分各不相同,工程特性极其复杂,不均匀,各向异性。而且土的物理力学特性随着加载过程会发生变化,并受到初始条件、边界条件、加卸载速率等的影响。因此要掌握土的物理、力学性质,正确地评价土的工程特性,合理解决土木工程问题,土工实验是首要任务和关键性工作。

除了在工程实践中为工程规划、设计、施工提供土力学参数外,土力学实验还是科学研究中理论探索与验证的最有效手段。土工实验包括室内实验、原位测试、现场观测和模型实验等四种基本类型。通过钻孔或其他方法取样进行室内实验是最常规的手段,室内实验可以较好地控制实验的边界条件和初始条件,提供土的各种基本物理力学

参数;原位测试在现场进行,能直接反映地层中土的真实情况和整体特性;现场观测是对工程施工期和运行期的变形、应力、孔压等进行监测,为信息化施工、安全评价和运行管理服务,同时也是积累工程经验的重要措施。模型实验包括离心模型实验和比例模型实验,离心模型实验通过土工离心机施加的加速度形成离心力来模拟自然界土的自重,从而可将模型的几何尺寸降为原型的 $1/n$ 。模型实验主要用于设计方案比选和科学研究。

各种类型的实验都各有优缺点,室内实验历史悠久,实验设备与方法经过多年的使用与改进,大部分已经非常成熟,而且实验过程具有条件可控、实验操作相对简单、可重复进行等优点,而且所测得的数据也取得了大量的使用经验。室内实验最大的问题在于试样尺寸较小、试样可能无法反映其所代表土层的整体情况,另一方面取样扰动不可避免,室内实验结构与原位情况存在差异,对于粗粒土,取样非常困难。原位测试则恰好相反,它可以避免取样扰动对实验结果的影响,实验结果直接反映原位情况,像静力触探一类实验还能连续反映土层的特性。但是原位实验的进行往往比较复杂,而且排水等边界条件无法控制。室内实验与原位实验是优缺点互补、相辅相成的两类实验。实际工作中往往需要综合使用这两种实验手段来为设计提供合理可靠的参数。

土力学实验历来为大家所重视,也是土力学学科发展的一个基础。我国的土力学泰斗黄文熙先生在国内创建土力学学科时,最先着手的就是建立实验室,在南京水利水电科学研究所和清华大学都建立了一流的实验室。沈珠江院士将实验土力学列为土力学的四大方向之一,其他三个方向为理论土力学、计算土力学和应用土力学。

要正确进行土力学实验,人、机(仪器)、料(试样)、法(方法、规范)、环(环境)这五个环节缺一不可。人是最关键的因素,实验人员

必须具备充足的理论知识、熟练的仪器维护和操作能力。仪器设备必须完好,而且仪器的测量系统经过检定或校准;测试样品要合格,符合测试要求,对于土样而言,最关键的是必须减少扰动,满足不同实验对土样质量的要求;实验方法要正确、符合规范;实验环境符合相应的实验测试要求和仪器使用要求,例如温度、湿度等。除此之外,实验数据的整理归纳、不合理数据项的处理、实验结果的使用也都是土力学实验的重要环节,所有这些都需要在不断的实验、学习和实践中积累。

室内土工实验,包括土的化学特性实验、土的物理特性实验、土的力学特性实验、渗透实验、动力特性实验以及特殊土的实验。本书主要着眼于土的基础性实验,简要介绍了土力学实验的作用和各类实验的特点。

第1章阐述了土的分类标准,介绍了实验室分类法和简易分类法。第2章介绍了取样、试样制备、试样饱和这三个实验先期的关键步骤。首先从取样的标准出发阐述了取样要求及取样方法;然后介绍了粗粒土和细粒土的扰动样制备方法以及原状样的制备方法。最后介绍了浸水饱和法、毛管饱和法及真空抽气饱和法这三种试样饱和方法。第3章介绍了密度、比重、含水率、颗粒分析这四种土的基本物理量在室内测试的各种实验方法。为了帮助读者更好地理解和使用各种土的基本物理指标,详细描述了假设土颗粒体积为“1”的三相草图的使用方法。第4章包括界限含水率实验和相对密度实验,着重介绍了现在国内使用最多的液塑限联合测定方法。第5章以土的压缩性及固结理论为基础介绍了相关的压缩性指标及固结系数,介绍了常规的压缩实验和固结实验的实验操作及数据的处理方法。第6章是本书的一个重点章节,三轴实验是土力学中最为复杂的实验,本章详细介绍了三轴实验的分类、试样制备与饱和、不同实验的操作过程,以及如何通过电子表格来处理实验数据,获得莫尔圆及抗剪强度参数。第

7 章简单介绍了直剪实验的仪器、方法与操作步骤。第 8 章分细粒土和粗粒土介绍了其压实性的工程特点,介绍了通过击实仪进行的室内击实实验。第 9 章介绍了常水头、变水头测定的原理和实验方法。

本书的一个重要特点是,为了便于读者更好地理解各个实验的特点,把握实验的主要步骤,书中的多数实验操作步骤都有标题,大部分实验还绘制了操作流程图。这种做法就是为了避免把书写成规范,采用标题或流程图使得操作步骤十分清晰,便于理解。另一个特点是以 Excel 电子表格作为数据处理的工具,重点介绍了基于电子表格法的三轴压缩实验的数据整理、图形绘制及抗剪强度求解方法。

本书在编写过程中得到了北京交通大学唐松涛、张清林、张洪涛、邵安东、陈飞、张振等人的大力帮助,在此表示衷心的感谢。

作 者

2010 年 12 月

目 录

第1章 土的工程分类标准	(1)
1.1 粒组划分	(1)
1.2 塑限与液限	(3)
1.3 土类代号	(3)
1.4 土的实验室分类法	(4)
1.5 土的简易鉴别法分类	(9)
1.6 土样描述	(11)
第2章 试样制备和饱和	(12)
2.1 取样	(12)
2.2 试样制备	(19)
2.3 试样饱和	(24)
第3章 土的基本物理特性实验	(27)
3.1 三相指标与三相草图	(27)
3.2 密度实验	(30)
3.3 比重实验	(40)
3.4 含水率实验	(46)
3.5 颗粒分析实验	(50)
第4章 土的物理状态实验	(68)
4.1 概述	(68)
4.2 界限含水率实验	(69)
4.3 相对密度实验	(76)
第5章 土的压缩固结实验	(80)
5.1 概述	(80)
5.2 基本原理	(80)
5.3 实验仪器及实验步骤	(83)
5.4 实验记录及结果整理	(86)

5.5	注意事项	(92)
5.6	其他固结实验	(93)
第6章	土的三轴压缩实验	(94)
6.1	概述	(94)
6.2	仪器设备	(96)
6.3	实验前的检查与准备	(101)
6.4	试样制备	(102)
6.5	试样饱和	(106)
6.6	试样的安装、固结与剪切	(108)
6.7	数据记录与处理	(110)
6.8	三轴实验数据处理的电子表格法	(121)
6.9	三轴实验中的一些问题	(125)
第7章	直接剪切实验	(127)
7.1	实验原理与类型	(127)
7.2	仪器设备	(127)
7.3	实验步骤	(128)
7.4	数据记录与处理	(130)
7.5	注意事项	(132)
第8章	击实实验	(134)
8.1	压实原理	(134)
8.2	仪器设备	(136)
8.3	操作步骤	(137)
8.4	数据记录与处理	(139)
第9章	渗透实验	(142)
9.1	渗透实验的概述	(142)
9.2	渗透系数的测定原理	(143)
9.3	常水头渗透实验	(144)
9.4	变水头渗透实验	(147)
9.5	注意事项	(149)
附表	水的动力黏滞系数	(150)
附录	线性回归的计算公式	(151)
参考文献		(152)

第1章 土的工程分类标准

土的工程分类是根据土的粒径、界限含水率、有机质存在情况等基本特性,将性质相近的土分成一类。目的是方便描述土体,评价土的性质,便于岩土工程的设计与施工,同时也是科学研究和相互交流的共同基础。

我国涉及土的工程分类规范主要有:国家标准 GB/T50145 - 2007《土的工程分类标准》;水利行业标准 SL237 - 1999《土工实验规程》中的 SD128 - 001 - 《土的工程分类》;《公路土工实验规程》JTGE40 - 2007 中的《土的工程分类》;《建筑地基基础设计规范》GB50001 - 2007 中关于地基土的分类。

这些规范和标准中土的工程分类体系和思想都是相同的,包括:①先依据土中有机质存在情况分为有机土和无机土;②对于无机土,按照土的平均粒径大小确定是巨粒土、粗粒土还是细粒土;③巨粒土按照巨粒含量分类,粗粒土根据土的粒径与级配分类,细粒土则按塑性指数与液限进一步分类。

土的分类根据指标确定方法的不同有实验室分类法和简易鉴别分类法。实验室分类法主要是用颗分实验、液塑限实验等方法来确定相关的分类指标。简易鉴别分类法则用目测代替筛分析,确定土颗粒组成及特征;用干强度实验、手捻、搓条、韧性和摇震反应等简便定性方法,代替用仪器测定土的塑性等特性,从而判别土类别。

不同的规范由于行业的特点不一,对土的分类存在一定的侧重。因此,根据不同规范进行分类的标准可能略有区别,在具体使用中要注意。本文主要介绍国家标准《土的工程分类标准》GB/T50145 - 2007 中的内容。

1.1 粒组划分

土是大小不等的散粒体的集合。为了便于描述和分类,工程中将大小相近、性质相似的颗粒分为一组,称为粒组。粒组的划分是人为确定的,不同国家、不同行业可能都有不同的规定。表 1 - 1 是国家标准《土的工程分类标准》GB/T50145 - 2007 关于粒组的规定,该划分用图 1 - 1 来表示更为清晰。

表 1-1 土颗粒粒径范围划分

粒组统称	粒组名称		粒组粒径 d 的范围 (mm)
巨粒	漂石(块石)粒		$d > 200$
	卵石(碎石)粒		$200 \geq d > 60$
粗粒	砾粒	粗砾	$60 \geq d > 20$
		中砾	$20 \geq d > 5$
		细砾	$5 \geq d > 2$
	砂粒	粗砂	$2 \geq d > 0.5$
		中砂	$0.5 \geq d > 0.25$
		细砂	$0.25 \geq d > 0.075$
细粒	粉粒		$0.075 \geq d > 0.005$
	黏粒		$0.005 \geq d$

200		60		20	5	2	0.5	0.25	0.075	0.002(mm)
巨粒组		粗粒组						细粒组		
漂石 (块石)	卵石 (小块石)	砾(角砾)			砂			粉粒	黏粒	
		粗	中	细	粗	中	细			

图 1-1 土的粒组划分图

土颗粒的大小及其组成情况通常用土中各个粒组质量占土粒总质量的百分比来表示,称为土的级配。土的级配通过筛分法和水分法测定,实验方法详见第3章。土的级配常用土的粒径级配累积曲线表示。粒径级配累积曲线如图1-2所示,横坐标是对数坐标,为土的粒径,纵坐标为小于某粒径之土的质量百分数 $P(\%)$ 。

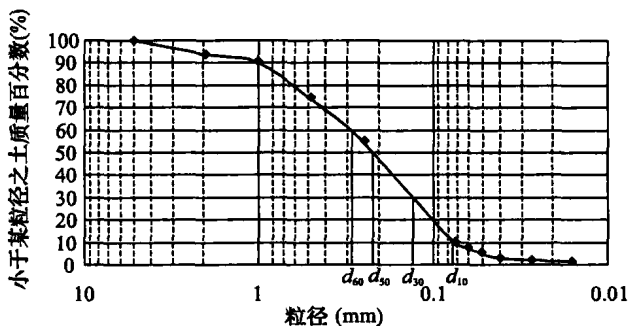


图 1-2 土的粒径级配累积曲线

从级配曲线上可以得到土的平均粒径 d_{50} , 根据 d_{50} 是否大于 0.075mm 可以判断土是粗粒土还是细粒土。从曲线上还可以得到 d_{60} 、 d_{30} 和 d_{10} , 从而求得土的

不均匀系数(C_u)与曲率系数(C_c):

不均匀系数按下式计算:

$$C_u = d_{60}/d_{10}$$

式中, d_{60} 是在土的粒径分布曲线上的某粒径, 小于该粒径的土粒质量为总土粒质量的 60%, 又称为控制粒径; d_{10} 是在土的粒径分布曲线上的某粒径, 小于该粒径的土粒质量为总土粒质量的 10%, 又称为有效粒径。

曲率系数 C_c 按下式计算:

$$C_c = (d_{30} \times d_{30}) / (d_{60} \times d_{10})$$

式中, d_{30} 是在土的粒径分布曲线上的某粒径, 小于该粒径的土粒质量为总土粒质量的 30%。

不均匀系数 C_u 用于判定土的不均匀程度:

$C_u \geq 5$, 不均匀土; $C_u < 5$, 均匀土

曲率系数 C_c 用于判定土的连续程度:

$C_c = 1 \sim 3$, 级配连续土; $C_c > 3$ 或 $C_c < 1$, 级配不连续土

不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 用于判定土的级配优劣:

如果 $C_u \geq 5$ 且 $C_c = 1 \sim 3$, 级配良好的土

如果 $C_u < 5$ 或 $C_c > 3$ 或 $C_c < 1$, 级配不良的土

1.2 塑限与液限

细粒土的状态是由其含水率决定的, 由于含水率的不同, 细粒土处于不同的状态。液限 w_L 是细粒土呈可塑状态的上限含水率, 塑限 w_p 是细粒土呈可塑状态的下限含水率。换言之, 含水率小于塑限, 土体中没有弱结合水, 将是固态或半固态的状态, 含水率大于液限, 则土中将出现自由水, 呈现流动状, 含水率在液限和塑限之间, 土中有弱结合水, 呈现塑态。液限减去塑限的差值称为塑限指数 I_p , I_p 表示了黏土吸附弱结合水的能力, 弱结合水是使土具有可塑性的原因。黏性和可塑性是细粒土的重要属性, 因此 I_p 常用来作为细粒土工程分类的依据。

1.3 土类代号

土类代号由基本代号组合而成, 基本代号包括土类代号与特征代号, 其含义与相应的符号如表 1-2 和表 1-3 所示。

表示土类的代号按下列规定构成:

(1) 一个代号,表示土的名称。

(2) 由两个基本代号构成时,第一个基本代号为土类代号,表示土的主成分;第二个基本代号表示副成分,或土的级配(粗粒土),或土的液限高低(细粒土)。

(3) 由三个基本代号构成时,第一个基本代号表示土的主成分,第二个基本代号表示液限高低,第三个基本代号表示土中所含次要成分。

表 1-2 工程用土的土类代号

名称	漂石 (块石)	卵石 (碎石)	砾	砂	粉土	黏土	细粒土 (C 和 M 合称)	混合土 (粗、细粒土合称)	有机 质土
符号	B	Cb	G	S	M	C	F	Sl	O

表 1-3 工程用土的特征代号

特征	级配良好	级配不良	高液限	低液限
符号	W	P	H	L

1.4 土的实验室分类法

土的分类体系如图 1-3 所示,这是国标 2007 版新增的内容。特殊土包括黄土、膨胀土和红黏土等或按其塑性指标在塑性图上的位置初步判别,或依据其他规范,例如《公路土工实验规程》划分。

工程用土分为无机土和有机土两大类。土中有机质的含量大于 5% 的为有机质土。土中有机质应根据未完全分解的动植物残骸和无定形物质判定。有机质呈黑色、青黑色或暗色,有臭味,有弹性和海绵感,可采用目测、手摸或嗅感判别。当不能判别时,可采用下列方法:将试样放入 100 ~ 110℃ 的烘箱中烘烤,当烘烤后试样的液限小于烘烤前试样液限的 3/4 时,试样为有机质土。

无机土按其不同粒组的相对含量可划分为巨粒类土、粗粒类土和细粒类土三大类。这三大类土根据不同的特点还可以进一步细分:①巨粒类土根据巨粒含量多少进一步划分;②粗粒类土按粒组、细粒含量大小和级配情况分类;③细粒类土按塑性图、所含粗粒类别划分。

1.4.1 巨粒类土的分类

试样中粒径大于 60mm 的巨粒组质量大于总质量 15% 的土称为巨粒类土。巨粒类土按粒组进一步分为三类:土中巨粒组质量超过总质量的 75% 的称为巨粒土;巨粒组质量为总质量的 50% ~ 75% 的称为混合巨粒土;试样中巨粒组质量为总质量的 15% ~ 50% 的土称巨粒混合土。

试样中巨粒组质量小于总质量 15% 的土,可扣除巨粒,按粗粒土或细粒土的相应规定分类定名;当散布在土内的巨粒,其体积对土的总体性状有影响时,可不扣除巨粒,然后按粗粒土或细粒土的相应规定分类定名,并予以注明。巨粒类土分类的详细规定如表 1-4 所示。

表 1-4 巨粒类土的分类

土类	粒组含量		土名称	土代号
巨粒土	巨粒含量 100% ~ 75%	漂石含量 > 50%	漂石	B
		卵石含量 $\geq$ 50%	卵石	Cb
混合巨粒土	巨粒含量 75% ~ 50%	漂石含量 > 50%	混合土漂石	BS1
		卵石含量 $\geq$ 50%	混合土卵石	CbS1
巨粒混合土	巨粒含量 50% ~ 15%	漂石含量 > 卵石含量	漂石混合土	SB1
		漂石含量 $\leq$ 卵石含量	卵石混合土	S1Cb

