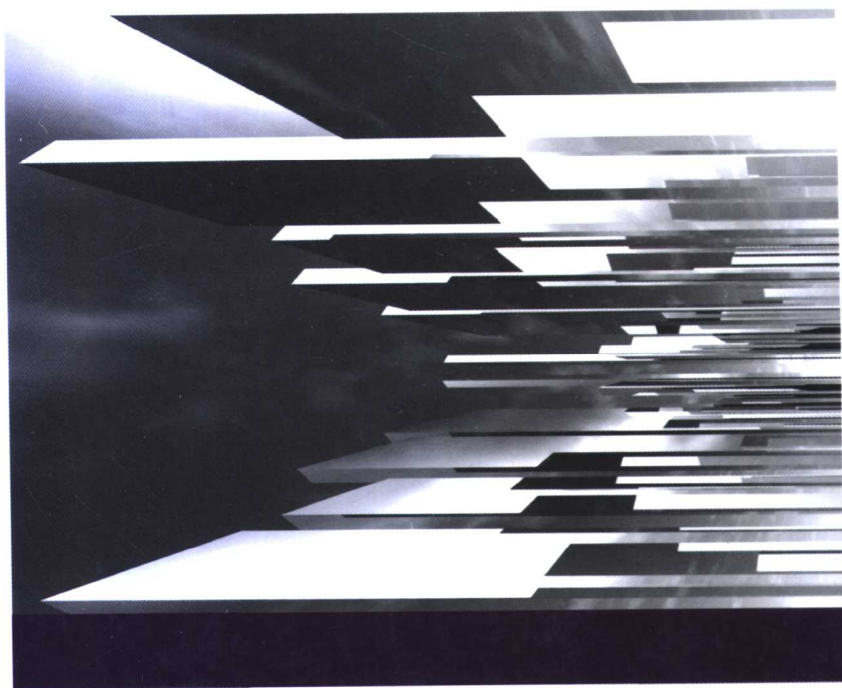


侍倩 编

土工试验与测试技术



Chemical Industry Press



化学工业出版社
环境科学与工程出版中心

土工试验与测试技术

侍 倩 编



化学工业出版社
环境科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

土工试验与测试技术/侍倩编. —北京:化学工业出版社, 2004. 8
ISBN 7-5025-6014-9

I. 土… II. 侍… III. 土工试验 IV. TU41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 075126 号

土工试验与测试技术

侍 倩 编

责任编辑:董 琳

文字编辑:刘维大 张燕文

责任校对:吴桂萍

封面设计:蒋艳君

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话:(010) 64982530

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

*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 20½ 字数 514 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6014-9/TU·49

定 价: 46.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

前 言

地基基础的设计与施工是一门实用性很强的工程技术学科,对于提高工程质量和降低工程造价的影响极大。近 20 年来,随着我国城市建设的发展,大量高层建筑和高等级道路以及一些城市地下铁道兴建,地基基础工程技术队伍不断扩大,有力地促进了地基设计、桩基技术、地基处理、基坑工程、土工试验技术和土工测试技术等领域的技术进步,出现了许多新的设计计算方法和施工技术,形成了新的技术热点,产生不少的技术成果,需要加以归纳总结和提高,以适应进一步发展的要求。

本教材是《土力学》、《基础工程》的补充教材,它既是独立的教材,又与《土力学》、《基础工程》的内容密切相关。我国改革开放以来,大规模现代化建设的需要以及国际上科学的发展和技术的进步,土工测试和试验领域取得了许多新的成就,涌现出许多新概念、新方法、新技术,本教材力图考虑学科发展的新水平,反映成熟的成果与观点,并且把理论和实践的理念贯穿于全书之中。

本书是根据“水利水电工程”、“土木工程”、“工程力学”、“岩土工程”、“结构工程”专业相关课程的教学内容,结合作者多年教学经验所编写的,为适应国内日益增长的高等级公路和铁路建设的需要,对内容进行了进一步充实,这就使得全书的结构更加合理、内容更加完善、实用性更加突出。

作者在写法上充分考虑了教学的要求,尽可能讲清基本概念、基本方法和工程应用,力求深入浅出,着重阐明基本原理和基本方法,取材方面以房屋建筑为主,但又兼顾水利、交通、铁道等方面的问题。因此,本书既可作为教材使用,也可作为工程技术人员的参考书。

在编写过程中,刘祖德教授、刘一亮教授、冯国栋教授、陆士强教授和俞季民教授提出了不少宝贵意见,其他同志也给予了很多支持和帮助,在此向他们表示衷心的感谢。

限于作者水平,书中一定有欠妥以及疏漏之处,敬请读者批评指正。

编者

2004 年 9 月

目 录

第一章 概论	1
第一节 土工试验在岩土工程中的地位和作用	1
第二节 土工试验项目	2
第三节 土的特性	3
第二章 土的组成和结构	5
第一节 概述	5
第二节 土的组成成分及其相互作用	6
第三节 土的结构和构造	13
第三章 土的应力和应变	19
第一节 基本概念	19
第二节 土体的变形特性	19
第三节 有效应力	27
第四节 土体中应力和莫尔应力圆	31
第五节 应力不变量	35
第六节 应力路径	40
第四章 界限含水量试验	46
第一节 概述	46
第二节 土水系统的性状	46
第三节 试验方法	48
第四节 w_L 和 w_p 标准的选定	53
第五节 试验中几个问题的说明	55
第六节 试验成果的应用	57
第五章 土的密度和土粒相对密度试验	62
第一节 土的密度试验	62
第二节 土粒相对密度试验	64
第三节 砂土的相对密度试验	69
第六章 颗粒分析试验	80
第一节 概述	80
第二节 试验方法的选择	84
第三节 筛分析法	85
第四节 悬液沉淀分析法	90
第五节 颗粒分析试验方法的准确性	100
第六节 颗粒分析在工程中的应用	100
第七章 击实试验	102
第一节 概述	102

第二节	压实理论·····	102
第三节	击实试验方法·····	108
第四节	击实试验的影响因素·····	114
第五节	各种类型土的击实特性·····	121
第六节	击实土的工程性质·····	122
第七节	击实试验在工程实践中的应用·····	123
第八章	渗透试验·····	126
第一节	概述·····	126
第二节	渗流类型·····	127
第三节	达西定律·····	128
第四节	饱和土的渗透试验·····	133
第五节	影响土的渗透性的因素·····	141
第六节	试验中的注意事项·····	144
第九章	固结试验·····	146
第一节	概述·····	146
第二节	土的压缩固结机理·····	147
第三节	固结试验原理·····	149
第四节	固结试验方法·····	157
第五节	固结试验中的影响因素·····	165
第六节	二维、三维渗流固结·····	169
第七节	比奥固结理论·····	171
第八节	土的流变·····	172
第九节	动力固结·····	173
第十章	土的抗剪强度试验·····	175
第一节	概述·····	175
第二节	黏性土的强度特征·····	176
第三节	砂土的强度特征·····	179
第四节	莫尔-库仑破坏理论·····	180
第五节	抗剪强度试验方法·····	186
第六节	土在剪切中的性状·····	195
第七节	试验的排水条件与实际的联系·····	200
第八节	三轴试验的应力路径和破坏取值标准·····	202
第九节	孔隙压力系数·····	205
第十节	影响抗剪强度的因素·····	207
第十一节	土体强度的特殊试验·····	208
第十一章	土的动力特性试验·····	210
第一节	土的动力特性·····	210
第二节	土的动力性质试验·····	212
第三节	激振和测振·····	213
第四节	动三轴试验·····	216

第五节	动单剪试验	224
第六节	共振柱试验	228
第七节	振动台试验	233
第十二章	地基土静力特性原位测试	235
第一节	概述	235
第二节	静载荷试验	237
第三节	静力触探	249
第四节	标准贯入试验	264
第五节	轻便触探试验	277
第六节	十字板剪切试验	279
第七节	现场直剪试验	285
第十三章	土与地基的原位动力测试	290
第一节	场地土波速测试	290
第二节	场地地震微振观测	307
第三节	循环荷载板试验	312
第四节	地基土刚度系数测试	312
第五节	振动衰减测试	316
第六节	其他测试方法简介	319
参考文献		320

第一章 概 论

第一节 土工试验在岩土工程中的地位和作用

土是一种古老而又普通的建筑材料，可作为建筑物的天然地基和介质，水坝、铁路、港口码头等工程及工厂和民用建筑物的兴建是否经济合理，大部分取决于土的工程性质。要成功地解决一个岩土工程问题，科学的程序是：勘探与测试、试验与分析、利用土力学的理论设计计算、施工并对施工过程及使用时期进行监测，用监测数据反过来再次指导设计计算。这是一个将试验和理论与实际现象相互联系的过程。因此，土工试验是岩土工程规划和设计的前期工作。

就土力学的发展来说，从某种意义上也可以看做是土的实验力学，如库仑强度理论、达西定律、普克特的压实理论以及描述土的应力-应变关系的双曲线模型等，无一不是通过试验（包括物理模型）而建立的。并且在试验的基础上，应用或结合相邻学科，如弹性力学、塑性力学、流体力学、工程地质学等学科理论，发展而形成一门应用学科。因此，土工试验又为土力学理论的发展提供依据。即使在大型电子计算机问世和计算技术高度发达、可以把土的复杂的弹塑性应力-应变关系纳入到岩土工程的变形与稳定计算中去的今天，从事岩土工程的专家和学者们都认为，测定土的工程性质的技术（包括现场勘察、室内试验和原型观测）仍是一个关键问题，由此看来，土工试验无论在岩土工程，还是在土力学的发展中，均占有相当重要的地位。

土是大自然的产物，不同于钢材、混凝土、合成塑料等人工材料，其性质受到密度、湿度、粒度以及孔隙水中化学成分等多种因素的影响，当土体与建筑物共同作用时，其力学性状又因受力状态、应力历史、加载速率和排水条件不同而变得更加复杂。现在的知识和测试手段，要将多种因素影响的土的性状正确地模拟尚不可能。因此，采用把主要因素给以理想化，并以此建立试验原理。根据试验原理，在设计试验（如测定土的剪切、压缩性状等）方法时，所预想的性状也是多种多样的。要进行适合全部性状的土工试验，在通常的技术条件下是有困难的，经济方面也不合算。因此，为了便于进行试验资料的比较，将试验方法统一化、标准化。作为设计计算依据的土的力学参数，是在高度简化的条件下测定的，这种情况，对试验人员，特别是对使用试验数据进行设计的人员都是要深刻了解的。

综上所述，正确地认识土工试验的作用及其局限性是非常重要的。同时也说明，土工试验成果因试验方法和试验技巧的熟练程度不同，会有较大差别，这种差别远大于计算方法引起的误差。为了使土工试验比较正确地反映实际土的性状，要求试验人员必须了解和掌握以下五方面的情况。

- ① 试验要达到什么目的，依据什么原理。
- ② 使用的仪器设备、方法步骤。
- ③ 试验应获得哪些数据，分析出什么结论。
- ④ 试验中的注意事项，误差的初步分析。
- ⑤ 分析试验设计与实际问题的联系。

第二节 土工试验项目

土工测试大致分为两大部分：在现场直接测定，一般叫做原位测试，包括十字板试验，静、动力触探，标贯，载荷试验，消速测定以及旁压仪等；从现场采取土样送至实验室的试验。

实验室试验可分为三大类。

(1) 土的化学性试验 包括土的矿物鉴定，易溶和难溶盐试验，有机质试验，酸碱度试验，硅、铁、铝、钙、镁、钾含量分析及阳离子交换量试验等。这些试验用于分析土的物质成分（化学成分、矿物组成）、土粒与介质溶液间的物理化学作用以及土的结构对其力学性质的影响。

(2) 土的物理性试验 包括土的密度试验、湿度试验、粒度试验等，具体试验项目有密度试验、比重试验、极限密度 (ρ_{min} , ρ_{max})、含水量试验、界限含水量 (w_L , w_p , w_s)、颗粒大小分析及孔隙大小分析试验等。这些试验主要用于土的工程分类及判断土的状态（见表 1-1）。

表 1-1 土的物理性试验

试验项目	试验成果	成果应用
含水量试验	含水量(w)	计算土的基本物理性指标
界限含水量试验	液限(w_L)	利用塑性图(w_L - I_p)进行土的工程分类 用 I_p 划分黏性土 判断土的状态
液限试验	塑限(w_p)	
塑限试验	塑性指数(I_p)	
液性指数试验	液性指数(I_e)	
收缩试验	液限(w_s) 收缩比、体缩、线缩	
密度试验	土的密度(ρ)	计算土的基本物理性指标 土的压实性 计算土的基本物理性指标
比重试验	土的干密度(ρ_d) 土粒相对密度(G_s)	
相对密度试验	相对密度(D_r)	
最大、最小孔隙比	最大、最小干密度(ρ_{dmax} , ρ_{dmin})	判断砂砾土状态
颗粒大小分析	颗粒大小分布曲线	用于土的工程分类及作为材料的标准
筛分析	有效粒径(d_w)、不均匀系数 c_u 、曲率系数 c_c	
沉淀法分析		

(3) 土的力学性试验 包括渗透性试验、压缩性试验和强度试验等，主要目的是直接提供设计参数，如渗透系数、变形参数、固结系数、抗剪强度指标、静止侧压力系数等（见表 1-2）。

在注意到室内试验作用的同时，应认识其局限性。

(1) 试样的数量有限 按规范要求，一层土只能取几个或几十个土样，试样总体积与其所代表的土层体积之比，相差数百万乃至数千万以上，同时，土层在其长期形成的过程中，受复杂环境条件变化的影响，使之不论是在垂直方向还是平面延续方向上，都是不均匀的，指标都有相当的变异性。

(2) 取样工具与方法对土样的扰动 运输所造成的影响，尤其是黏土更是不可忽视。试样切削成形以及操作仔细与否，也会导致某些扰动。这一扰动包括含水量、体积、土的结构、孔隙水压力等都会有所变化。

表 1-2 土的力学性试验

试 验 项 目	试 验 成 果	成 果 应 用
击实试验 CBR 试验	含水量与干密度曲线 最大干密度(ρ_{dmax}) 最优含水量(w_{op})	用于填土工程施工方法的选择和质量控制 用于路面设计
渗透试验 常水头、变水头试验	渗透系数(k)	用于有关渗透问题的计算
固结试验	孔隙比与压力曲线 a_v, m_v, c_c, c_s, p_c 时间与压缩曲线 固结系数(c_v)	计算黏性土体的沉降量 计算黏性土体沉降速率
剪切试验 直接剪切试验 无侧限抗压强度 三轴剪切	抗剪强度参数 $\varphi_q, \varphi_{cq}, \varphi_s$ 凝聚力 c_q, c_{cq}, c_s 抗压强度 q_d 灵敏度 S_t 内摩擦角 $\varphi_u, \varphi_{cu}, \varphi_d$ 凝聚力 c_u, c_{cu}, c_d 孔隙水压力系数 A, B 压力-应变关系	计算地基、斜坡、挡土墙等的稳定性

(3) 室内试验应力条件问题 室内试验的应力条件是较理想和单一化的，如压缩试验是一维垂直方向，一般三轴仪也只是轴对称的，而实际地基中应力条件相当复杂，三个主应力常常是各不相等，主应力方向，大小顺序也在变化。

因此，室内试验有其局限性，在通常情况下，应尽可能结合原位测试、地区经验或邻近工程的反演综合确定工程所需指标。

第三节 土 的 特 性

土是地壳表层母岩经受强烈风化（包括物理的、化学的和生物的风化作用）的产物，是各种矿物颗粒（土粒）的集合体。颗粒间的连接强度远比颗粒本身强度小，甚至没有连接。在一般情况下，土颗粒间有大量孔隙，而孔隙中通常有水和空气。因此，土与其他连续固体介质相区别的主要特征，就是它的多孔性和散体性。

土在地壳表面上分布极广，它与各种工程建筑的关系十分密切，特别在水工建筑中，土更是被广泛地利用，如在土层上修建坝堤、涵闸、渡槽、桥梁、码头等建筑物时，土就被用做地基（称基土）；如修筑土质堤坝、路基和其他土工建筑物时，土就被用做建筑材料（称土料）；此外，如修建运河、渠道、隧洞、地下厂房以及地下管道等，则常会遇到将土用做建筑物周围的介质或护层的情况，土的性质对于工程建筑的质量、性状，具有直接而又重大的影响。因此，对土的研究直接关系到工程的经济合理和安全使用问题。

土是各种矿物颗粒的集合体，在天然状态下，一般为三相系，即土系由固体颗粒、水和空气三相所组成，三者之间的相互作用以及它们之间的比例关系，反映出土的物理性质与构造的物理状态，这些指标又都与土的力学性质相关。

土不同于其他材料，不是真正的连续体，它是由三相组成的。土颗粒间的连接强度远低于土粒本身的温度，因而其特性既不同于刚体，也异于理想的弹性体或刚-塑性体，而具有特殊的属性，如压硬性、剪胀或剪缩性、时效性、结构性与触变性、以及反应性状受应力路径、应力历史的影响等，而某些参数与指标的定义多是基于线性变形理论。所以，岩土工程

师应认识上述特殊性与差异，特别对于重大工程应首先深入勘察场地，实地了解主要土层性状，分析场地中原始应力状态、应力历史，考虑工程施工过程中与竣工后可能造成应力场与边界条件的不利变化，从而对试验提出相应的要求，必要时，应提出特殊试验的要求，并注意试验方法-计算公式-安全系数的配套使用。

20 世纪 80 年代，我国工程建设标准开始逐步引入以概率论为基础的极限状态设计方法，岩土工程虽因其特殊性有所滞后，但也已提到日程上来了。室内试验数据整理，原本就应沿用数理统计的方法，现更为必要。数理统计必然要求计算机的应用，从试验条件的设定、数据采集、实时控制、资料整理等在试验仪器上系统地采用计算机，国内已引起了重视并有所进展。例如空军工程设计研究局研制的 KTG 固结试验检测处理系统（还能与直接剪切、三轴剪切联机）、中国建筑科学研究院研制的智能三轴等，当然，这些还有待进一步完善和发展。其次，国内许多试验室土工试验汇总表已采用计算机编制。从长远看，土工试验应逐步由手工试验改为半机械化，进而自动化，最终实现联机，使整个土工试验从试验操作、数据采集与处理、到最后打印成果的全过程计算机化。

第二章 土的组成和结构

第一节 概 述

在土木工程中,土是指覆盖在地表上碎散的、没有胶结或胶结很弱的颗粒堆积物。地球表面的整体岩石在大气中经受长期的风化作用而破碎后,形成形状不同、大小不一的颗粒。这些颗粒受各种自然力的作用,在各种不同的自然环境下堆积下来,就形成通常所说的土。堆积下来的土,在很长的地质年代中发生复杂的物理化学变化,逐渐压密、岩化,最终又形成岩石,就是沉积岩或变质岩。因此,在自然界中,岩石不断风化破碎形成土,而土又不断压密、岩化而变成岩石。这一循环过程,永无止境地重复进行着。

工程上遇到的大多数土都是在第四纪地质历史时期内所形成的。第四纪地质年代的土又可划分为全新世和更新世两类,如表 2-1 所列。其中在人类文化期以来所沉积的土称为新近代沉积土。

表 2-1 土的生成年代

纪(或系)	世(或统)		年代(距今)	纪(或系)	世(或统)		年代(距今)
第四纪 (Q)	全新世 (Q ₄)	Q ₄ ³ (晚期)	<0.25 万年	第四纪 (Q)	更新世 (Q _p)	晚更新世(Q ₃)	(12.8~1.3) 万年
		Q ₄ ² (中期)	(0.75~0.25) 万年			中更新世(Q ₂)	(71~12.8) 万年
		Q ₄ ¹ (早期)	(1.3~0.75) 万年			早更新世(Q ₁)	距今 71 万年以前

一、土的搬运和沉积

第四纪土,由于其搬运和堆积方式的不同,又可分为残积土和运积土两大类。残积土是指母岩表层经风化作用破碎成为岩屑或细小颗粒后,未经搬运,残留在原地的堆积物。它的特征是颗粒表面粗糙、多棱角、粗细不均、无层理。运积土是指风化所形成的土颗粒,受自然力的作用,搬运到远近不同的地点所沉积的堆积物。其特点是颗粒经过滚动和相互摩擦,具有一定的浑圆度,即颗粒因摩擦作用而变圆滑。在沉积过程中因受水流等自然力的分选作用而形成颗粒粗细不同的层次,粗颗粒下沉快,细颗粒下沉慢而形成不同粗细的土层。根据搬运的动力不同,运积土又可分为如下几类。

(1) 坡积土 残积土受重力和短期性水流(如雨水和雪水)的作用,被挟带到山坡或坡脚处聚积起来的堆积物。堆积体内土粒粗细不同,性质很不均匀。

(2) 洪积土 残积土和坡积土受洪水冲刷,挟带到山麓处沉积的堆积物。具有一定的分选性。搬运距离近的沉积颗粒较粗,力学性质较好;远的则颗粒较细,力学性质较差。

(3) 冲积土 由于江、河水流搬运所形成的沉积物。分布在山谷、河谷和冲积平原上的土都属于冲积土。这类土由于经过较长距离的搬运,浑圆度和分选性都更为明显,常形成砂层和黏性土层交叠的地层。

(4) 湖泊沼泽沉积土 在极为缓慢水流或静水条件下沉积形成的堆积物。这种土的特征,除了含有细微的颗粒外,常伴有由生物化学作用所形成的有机物,成为具有特殊性质的淤泥或淤泥质土,其工程性质一般都较差。

(5) 海相沉积土 由水流挟带到大海沉积起来的堆积物，其颗粒细，表层土质松软，工程性质较差。

(6) 冰积土 由冰川或冰水挟带搬运所形成的沉积物，颗粒粗细变化也较大，土质也不均匀。

(7) 风积土 由风力搬运形成的堆积物，颗粒均匀，往往堆积层很厚而不具层理。我国西北的黄土就是典型的风积土。

二、风化作用和土的主要特点

岩石和土在其存在、搬运和沉积的各个过程中都在不断风化。风化过程包括物理风化和化学风化。它们经常是同时进行而且是互相加剧发展的进程。

物理风化是指岩石和土的粗颗粒受各种气候因素的影响，如温度的昼夜和季节变化，降水、风、冬季水的冻结等原因，导致体积胀缩而发生裂缝，或者在运动过程中因碰撞和摩擦而破碎。于是岩体逐渐变成碎块和细小的颗粒，粗的粒径可以 m 计，细的粒径可以在 0.05mm 以下，但它们的矿物成分仍与原来的母岩相同，称为原生矿物。所以物理风化后的土可以当成只是颗粒大小上量的变化。但是这种量变的积累结果使原来的大块岩体获得了新的性质，变成了碎散的颗粒。颗粒之间存在着大量的孔隙，可以透水和透气，这就是土的第一个主要的特征——碎散性。

化学风化是指母岩表面和碎散的颗粒受环境因素的作用而改变其矿物的化学成分，形成新的矿物，也称次生矿物。环境因素如水、空气以及溶解在水中的氧气和碳酸气等。化学风化常见的反应如下。

(1) 水解作用 指矿物成分被分解，并与水进行化学成分的交换，形成新的矿物。例如正长石经过水解作用后，形成高岭石。

(2) 水化作用 指土中有些矿物与水接触后，发生化学反应。水按一定的比例加入矿物的组成中，改变矿物原有的分子结构，形成新的矿物。例如土中的 CaSO_4 （硬石膏）水化后成为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ （含水石膏）。

(3) 氧化作用 指土中的矿物与氧结合形成新的矿物，例如 FeS_2 （黄铁矿）氧化后变成 FeSO_4 （铁矾）。

其他还有溶解作用、碳酸化作用等。

化学风化的结果，形成十分细微的土颗粒，最主要的为黏土颗粒（ $<0.005\text{mm}$ ）以及大量的可溶性盐类。微细颗粒的表面积很大，具有吸附水分子的能力。因此，自然界的土一般都是由固体颗粒、水和气体三种成分所构成。这是土的第二个主要特征——三相体系。

在自然界中，土的物理风化和化学风化时刻都在进行，而且相互加强。由于形成过程的自然条件不同，自然界的土也就多种多样。同一场地，不同深度处土的性质也不一样，甚至同一位置的土，其性质还经常随方向而异。例如沉积土经常竖直方向的透水性小，水平方向的透水性大。因此，土是自然界漫长的地质年代内所形成的性质复杂、不均匀、各向异性且随时间而在不断变化的材料。这是土的第三个主要的特征——自然变异性。

由此可知，仅仅根据土的堆积类型远不足以说明土的工程特性。要进一步描述和确定土的性质，就必须具体分析和研究土的三相组成、土的物理状态和土的结构，并以适当的指标表示。

第二节 土的组成成分及其相互作用

如前所述，土是自然形成的产物，它是由地球表面的岩石经物理和化学分解作用而形成

沉积物或其他未固结的散粒集合体，其孔隙中由水或空气充填。在冻土地区，土内含有冰；在沼泽地区，含有大量有机质。根据各种成分所占有的程度，分为两相土、三相土和四相土。两相土是完全饱和土和完全干燥的土；三相土是由土粒、水和空气组成的湿土，称为非饱和土；四相土除土粒、水和空气外，含有冰的是冻土；含有有机质的是有机土。农业科学感兴趣的是有机土；岩土工程的对象主要是无机土。由于组成土的各种成分具有各自的性质，它们之间就具有不同的物理-化学性质、物理-力学性质等。

一、土的固体颗粒

固体颗粒构成土的骨架，它对土的物理力学性质起决定性的作用。研究固体颗粒就要分析粒径的大小及其在土中所占的百分比，称为土的粒级级配，这部分内容见本书第六章。另外，还要研究固体颗粒的矿物成分以及颗粒形状。这三者之间又是密切相关的，因此有必要深入研究。

土粒和它们之间的性质是由本身的体力确定的。与土粒有关的体力有颗粒的重力和颗粒的表面结合力。重力是土粒体积的函数，设想土粒是一个圆球形，那么重力与直径的三次方成比例。土粒表面结合力具有电性质，它依赖于表面面积，表面性质及周围介质的性质。这种表面效应的常用指标是土粒的比表面积，即每克土粒所具有的表面积，表面结合力与土粒表面面积成比例。若是等尺度的土粒，那么，表面结合力与土粒直径的平方成比例。

土粒的重力与土粒的表面结合力的比值直接与土粒的直径成比例。因此，对于粗粒土，体积对面积的比值很大，表面结合力的作用可以忽略。这样粗粒土的物理力学性质主要取决于其形状、粒度及相对密度，对于细粒土，由于粒径非常小，表面结合力对其性质起着重要的作用。

二、黏土矿物

土中固体部分的成分如图 2-1 所示，绝大部分是矿物质，另外或多或少有一些有机质。颗粒的矿物成分分两大类。一类是原生矿物，常见的如石英、长石和云母等，它是由岩石经过物理风化生成的。粗的土颗粒常是由一种或几种原生矿物颗粒所组成，很细的岩粉也仍然属于原生矿物。另一类是次生矿物，它是由原生矿物经过化学风化后所形成的新矿物，其成分与母岩完全不相同。土中的次生矿物主要是黏土矿物。此外

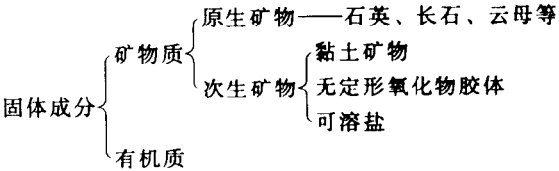


图 2-1 土中固体部分的成分

还有一些无定形的氧化物胶体（ Al_2O_3 ， Fe_2O_3 ）和可溶性盐类（ $CaCO_3$ ， $CaSO_4$ ， $NaCl$ 等）。黏土矿物具有与原生矿物很不相同的特性，它对黏性土性质的影响很大。下面对黏土矿物的性质作一简要的介绍。

1. 黏土矿物的晶体结构和分类

黏土矿物是一种复合的铝-硅酸盐晶体，颗粒成片状，是由硅片和铝片构成的晶包所组叠而成。硅片的基本单元是硅-氧四面体，它是由一个居中的硅离子和 4 个在角点的氧离子所构成，如图 2-2（a）所示。由 6 个硅-氧四面体组成一个硅片，如图 2-2（b）所示，硅片底面的氧离子被相邻两个硅离子所共有，简化图形如图 2-2（c）所示。铝片的基本单元则是铝-氢氧八面体，它是由 1 个铝离子和 6 个氢氧离子所构成，如图 2-3（a）所示。4 个八面体组成一个铝片。每个氢氧离子都被相邻 2 个铝离子所共有，如图 2-3（b）所示。简化图形如图 2-3（c）所示。黏土矿物依硅片和铝片的组叠形式的不同，可以分成高岭石、蒙脱石和

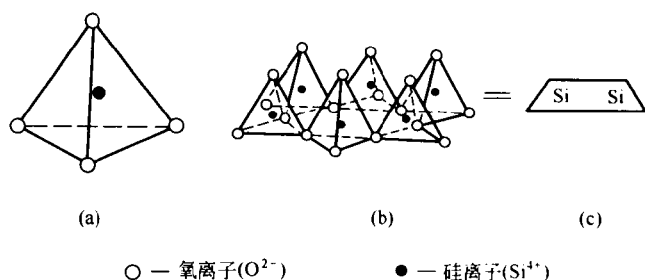


图 2-2 硅片的结构

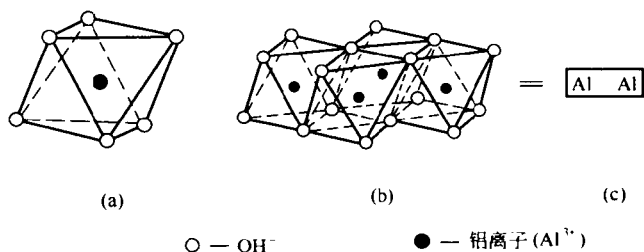


图 2-3 铝片的结构

伊利石三种类型。

(1) 高岭石 ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) 其晶层结构是由一个硅片和一个铝片上下组叠而成, 如图 2-4 (a) 所示。这种晶体结构称为 1:1 的两层结构。两层结构的最大特点是晶层之间通过 O^{2-} 与 OH^- 相互连接, 称为氢键连接。氢键的连接力较强, 致使晶格不能自由活动, 水难以进入晶格之间, 是一种遇水较为稳定的黏土矿物。因为晶层之间的连接力较强, 能组叠很多晶层, 多达百个以上, 成为一个颗粒。颗粒大小约 $0.3 \sim 3\mu m$, 厚约 $0.03 \sim 1\mu m$ 。所以高岭石的主要特征是颗粒较粗, 不容易吸水膨胀, 失水收缩, 或者说亲水能力差。

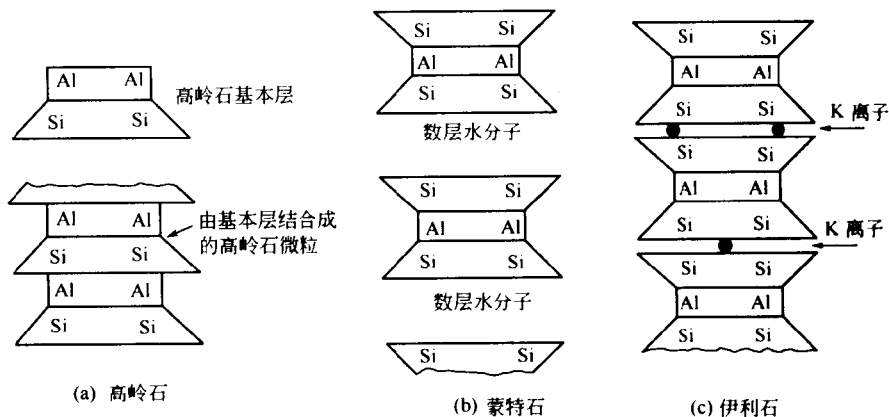


图 2-4 黏土矿物的晶格构造

(2) 蒙脱石 ($Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$) 晶层结构是由两个硅片中间夹一个铝片所构成, 如图 2-4 (b) 所示, 称为 2:1 的三层结构。晶层之间是 O^{2-} 对 O^{2-} 的连接, 连接力很弱, 水很容易进入晶层之间。每一颗粒能组叠的晶层数较少。颗粒大小约为 $0.1 \sim 1.0\mu m$, 厚约

0.001~0.01 μm 。因此蒙特石的主要特征是颗粒细微，具有显著的吸水膨胀、失水收缩的特征，或者说亲水能力强。

(3) 伊利石 ($\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 是云母在碱性介质中风化的产物。它与蒙特石相似，是由两层硅片夹一层铝片所形成的三层结构，但晶层之间有钾离子连接，如图 2-4 (c) 所示。连接强度弱于高岭石而高于蒙特石，其特征也介于两者之间。

三种黏土矿物的主要特征见表 2-2。

表 2-2 三类黏土矿物的主要特征

特征指标	高岭石	伊利石	蒙特石
长和宽/ μm	0.3~3.0	0.1~2.0	0.1~1.0
厚/ μm	$\frac{1}{3} \sim \frac{1}{10}$ 长(宽)	0.01~0.2	0.001~0.01
比表面积/(m^2/g)	10~20	80~100	800
流 限	30~110	60~120	100~900
塑 限	25~40	35~60	50~100
胀缩性	小	中	大
渗透性	大($<10^{-5}\text{cm/s}$)	中	小($<10^{-10}\text{cm/s}$)
强 度	大	中	小
压缩性	小	中	大
活动性	小	中	大

2. 黏土矿物的带电性质

1809 年莫斯科大学列伊斯 (Рейс) 教授完成一项很有趣的试验。他把黏土膏放在一个玻璃器皿内，将两个无底的玻璃筒插入黏土膏中。向筒中注入相同深度的清水，并将两个电极分别放入两个筒内的清水中，然后将直流电源与电极连接。通电后即可发现放阳极的筒中，水面下降，水逐渐变浑。放阴极的筒中水面逐渐上升，如图 2-5 所示。这种现象说明在电场中，土中的黏土颗粒泳向阳极，而水则渗向阴极。前者称为电泳，后者称为电渗。土颗粒泳向阳极说明颗粒表面带有负电荷。

研究表明，片状黏土颗粒的表面，由于下面的一些原因，常常带有不平衡的电荷，通常是负电荷。

(1) 离解 指晶体表面的某些矿物在水介质中产生离解。离解后，阳离子扩散于水中，阴离子留在颗粒表面。

(2) 吸附 指晶体表面的某些矿物把水介质中一些带电荷的离子吸附到颗粒的表面。

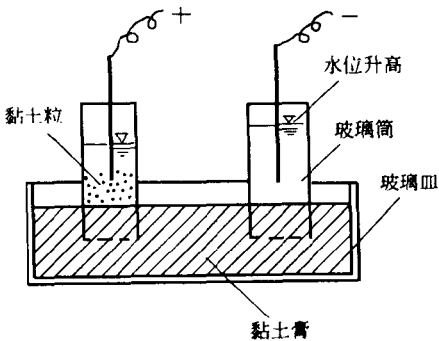


图 2-5 黏土膏的电渗、电泳试验

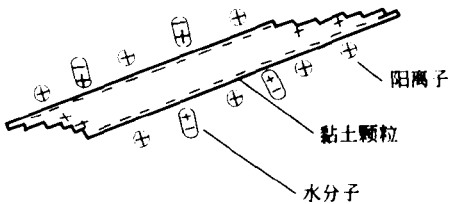


图 2-6 黏土颗粒的表面电荷分布

(3) 同晶型替换 例如黏土矿物中八面体的晶型保持不变,但内部的铝被镁或铁所替换。由于前者的电价比后者高,置换后,相当于晶体表面有不平衡的负电荷。研究还表明,在颗粒侧面断口处常带正电荷。这样黏土颗粒的表面电荷分布通常如图 2-6 所示。

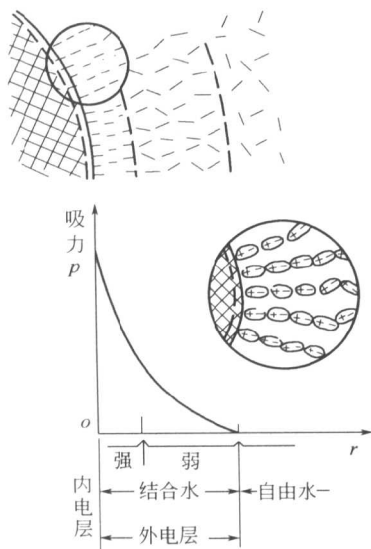


图 2-7 固体颗粒和水分子间电分子力的相互作用

由于表面带电荷,黏土颗粒四周形成一个电场。在电场的作用下,水中的阳离子被吸引分布在颗粒四周。水分子是一种极性分子,在电场中发生定向排列,形成图 2-7 所示的排列形式。颗粒表面的负电荷,构成电场的内层,水中被吸引在颗粒表面的阳离子和定向排列的水分子构成电场的外层,合称为双电层。

由此可知,黏土矿物的表面性质直接影响土中水的性质,从而使黏性土具有许多无黏性土所没有的特性。

3. 颗粒形状和比表面积

原生矿物一般颗粒粗,呈粒状,即三个方向的尺度基本上同一数量级,如图 2-8 所示。次生矿物颗粒细微,多呈片状或针状,如图 2-9 所示。土的颗粒越细,形状越扁

平,则表面积与质量之比值越大。单位质量土颗粒所拥有的表面积称为比表面积 A_s ,可表示为

$$A_s = \frac{\sum A}{m} \quad (2-1)$$

式中 $\sum A$ ——全部土颗粒的表面积之和, m^2 ;
 m ——土的质量, g。

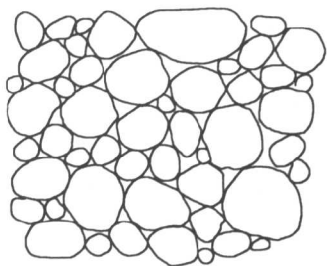


图 2-8 粗粒土的形状



图 2-9 黏土颗粒的形状

例如,当颗粒为直径 0.1mm 的圆球时,比表面积约为 $0.03m^2/g$ 。高岭石的比表面积为 $10 \sim 20m^2/g$,伊利石为 $80 \sim 100m^2/g$,而蒙特石高达 $800m^2/g$ 。

如前所述,黏土颗粒的带电性质都发生在颗粒的表面上,所以,对于黏性土,比表面积的大小直接反应土颗粒与四周介质,特别是水,相互作用的强烈程度,是代表黏性土特征的一个很重要的指标。

对于粗粒土,由于表面不具有带电性质,比表面积没有很大的意义。研究颗粒的形状应着重于研究颗粒的磨圆度,因为它影响到粒间的粗糙度,从而影响土的抗剪强度。