

土工实验室 测定技术

窦 宜 盛树馨 马梅英

水利电力出版社

内 容 提 要

本书介绍土工试验的基本原理，土的工程性质的基本知识和试验的基本技能。一至三章叙述土工试验在岩土工程中的位置和作用，土的成分和结构，土力学的基本原理——有效应力原理；第四章至第十一章介绍物理和力学性试验，包括试验的目的和试验原理、试验方法、试验指标等。附录部分列有土工试验常用仪器系列型谱，试验中常用名词术语和符号，法定单位制及换算。

本书可供从事岩土工程的勘测、试验和设计人员参考，还可作为大专院校土工试验课及培训试验人员的教材。

土工实验室测定技术

寒 宜 盛树馨 马梅英

水利电力出版社出版

(北京三里河路8号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 11.75印张 253千字

1987年3月第一版 1987年3月北京第一次印刷

印数0001—5039册 定价2.40元

书号 15143·6211

目 录

第一章 概论	1
1.1 土工试验在岩土工程中的位置和作用	1
1.2 土工试验项目	3
第二章 土的组成和结构	6
2.1 概述	6
2.2 土的组成成分及其相互作用	6
2.3 土的结构和组构	13
2.4 结构特征在土的力学性质上的反映	17
第三章 土的应力和应变	19
3.1 定义	19
3.2 有效应力概念	20
3.3 土体中应力和莫尔应力圆	24
3.4 应力不变量	32
3.5 应力路径	38
第四章 含水量及界限含水比试验	42
4.1 概述	42
4.2 土水系统的性状	43
4.3 试验方法	49
4.4 试验成果的应用	66
第五章 密度和比重试验	75
5.1 概述	75
5.2 基本概念	76
5.3 密度试验	84
5.4 比重试验	88

5.5	相对密度试验	92
5.6	实际应用	105
第六章	颗粒大小测定	109
6.1	概述	109
6.2	试验方法的选择	112
6.3	筛分析法	114
6.4	悬液沉淀分析法	123
6.5	颗粒分析试验方法的准确性	133
6.6	颗粒分析在工程中的应用	135
6.7	粗粒土的孔隙大小分布	137
第七章	击实试验	140
7.1	概述	140
7.2	压实理论	141
7.3	击实试验方法	154
7.4	击实试验的影响因素	164
7.5	各种类型土的击实特性	178
7.6	击实土的工程性质	179
第八章	渗透试验	182
8.1	概述	182
8.2	渗流类型	182
8.3	达西定律	184
8.4	饱和土的渗透系数测定	190
8.5	影响土的渗透性的因素	199
8.6	试验中注意事项	206
第九章	固结试验	209
9.1	概述	209
9.2	土的压缩和固结机理	210
9.3	固结试验原理	212
9.4	固结试验方法	217

9.5	理论的理想化与实际的联系	241
9.6	固结试验中的影响因素	247
第十章	抗剪强度试验	255
10.1	概述	255
10.2	土的强度机理	255
10.3	破坏准则	259
10.4	抗剪强度试验原理	263
10.5	试验的排水条件与实际的联系	272
10.6	破坏值的选择和表示方法	281
10.7	影响抗剪强度的因素	287
10.8	抗剪强度参数的实际应用	298
10.9	土体强度的特殊试验	299
第十一章	土的动力特性试验	323
11.1	概述	323
11.2	土的动力特性	323
11.3	土的动力特性室内测定	325
附录 I	土工试验常用仪器系列型谱	348
附录 II	主要符号、单位和名词术语	352
附录 III	土工常用法定计量单位及换算	360
	主要参考文献	367

第一章 概 论

1.1 土工试验在岩土工程中的位置和作用

土是一种古老而又普通的建筑材料，并作为建筑物的天然地基和介质。如水坝、铁路、港口码头等工程以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，并利用土力学的理论设计计算，然后施工，并且还要对施工过程及使用时期进行监测。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作是土的实验力学，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之后，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）是一个关键问题。由此看来，土工试验无论对岩土工程，还是对土力学的发展均占有相当重要的地位。

从事土工测试工作有经验的人们都知道，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。就我们现在所掌握的知识和测试手段，要将多因子影响的土的性状正确地模拟尚不可能。因此，采用把握住主要因素给以理想化，并以此建立试验原理。

根据试验原理，在设计试验方法时，例如，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，或者经济方面不合算。因此，为了简便，或者便于进行试验资料的比较，将试验方法统一化、标准化。这样，作为设计计算依据的土的力学参数，是在高度简化条件下测定的。这种情况，对试验人员，特别是使用试验数据进行设计的人员都是要深刻了解的。

综合上述，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的不同，会有较大差别，这种差别远大于计算方法所引起的误差。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) 试验应获得那些数据，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。

具体地说，要求试验人员既要学习和理解试验原理，又

要训练和掌握试验方法，并能熟悉和使用仪器设备。综合成三句话，就是要具有基本理论，基本知识和基本技能。在此基础上，向测试技术的深度和广度发展。

1.2 土工试验项目

土工测试大致分两大部分：1）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，标准贯入试验，载荷试验，波速测定以及旁压仪试验等；2）从现场采取土样送至实验室的试验。

实验室试验可分为三类：

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、钾全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。

土的物理性试验，包括土的密度、湿度、粒度试验等。具体试验项目有：密度试验，比重试验，极限密度，即最大密度和最小密度试验；含水量试验，界限含水比，即液限、塑限、缩限试验；颗粒大小分析及孔隙大小分析试验。这些试验主要用于土的工程分类及判断土的状态。

土的力学性试验，包括渗透性、压缩性和强度试验等。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。

本书内容限于实验室内的物理性和力学性试验，关于原位测试及化学分析部分可参阅有关文献。现将物理性和力学性试验项目及其成果的应用列于表1-1。

表 1-1 土工试验项目一览表

种 类	试 验 项 目	试 验 成 果	成果的应用	备 注
	含水量试验	含 水 比 (w)	计算土的基本物理性指标	
土的物理性试验	界限含水量试验 液限试验 塑限试验 收缩试验	液限(w_L) 塑限(w_p) 塑性指数(I_p) 液性指数(I_L) 缩限(w_s) 收 缩 比 体 缩 线 缩	利用塑性图进行土的工程分类 判断土的状态	
	密度试验	土的密度(ρ) 土的干密度(ρ_d)	计算土的基本物理性指标及土的压实性	土的容重为 $\gamma = \rho g$
	比重试验	土粒比重(G_s)	计算土的基本物理性指标	
	相对密度试验 最大孔隙比 最小孔隙比	相对密度(D_r) 最小于密度(ρ_{dmin}) 最大干密度(ρ_{dmax})	判断砂砾土的状态	
	颗粒大小分析 筛 分 析 沉淀法分析	颗粒大小分布曲线 有效粒径(D_{10}) 不均匀系数(C_u) 曲率系数(C_c)	用于土的工程分类及作为材料的标准	
土的力学性试验	击实试验	含水比与干密度曲线 最大干密度(ρ_{dmax}) 最优含水比(w_{op})	用于填土工程施工方法的选择和质量控制	
	CBR试验		用于路面设计	

续表

种 类	试 验 项 目	试 验 成 果	成果的应用	备 注
土的力学 性 试 验	渗透试验 常水头试验 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 压缩系数(a_p) 体积压缩系数(m_v) 压缩指数(C_c) 回弹指数(C_s) 先期压力(P_s) 时间与压缩曲线 固结系数(C_v)	计算粘性土体的沉降量 计算粘性土体的沉降速率	
	剪切试验 直接剪切试验	抗剪强度参数 内摩擦角: $\varphi_q, \varphi_{cq}, \varphi_d$ 凝聚力: c_q, c_{cq}, c_d	计算地基、斜坡、挡土墙等的稳定性	
	无侧限抗压 强度 三轴剪切	抗压强度, q_u 灵敏度, S_t 应力~应变关系 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 $A, B,$ 应力~应变关系		

第二章 土的组成和结构

2.1 概 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。根据各种成份所占有的程度，分为两相土，三相土和四相土。两相土是完全饱和的土和完全干燥的土；三相土是由土粒、水和空气组成的湿土；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。农业科学有兴趣的是有机土；岩土工程的对象主要是无机土。由于组成土的各种成份具有各自的性质，它们之间就具有不同的物理-化学性质、物理-力学性质。本章简要阐述一些基本知识，以后各章节将根据这些基本知识，解释试验中的现象。

2.2 土的组成成分及其相互作用

2.2.1 土的固体颗粒

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。土粒表面的结合力具有电性质，它依赖于表面积、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，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。

2.2.2 粘土矿物

土粒主要是由晶体矿物组成。粗粒土的成份主要是构成岩石的原生矿物，它是经过物理风化后形成的。经过化学变化而形成的次生矿物，是构成粘土颗粒的主要成分，所以称为粘土矿物。

大多数粘土矿物有着很弱的层面节理，形成极薄的扁平形状，少数形成针状晶体。粘土颗粒的性质一般用三种类型的粘土矿物——高岭石类、伊利石类和蒙脱石类来说明。

粘土矿物一般是由两个基本晶格单元组成，即硅四面体单元和氢氧化铝八面体单元。这两种晶体单元的不同组合便形成上述三种类型的粘土矿物。

硅四面体是四个氧离子位于四面体的顶角处，一个硅离子位于四面体的中心。其几何模式如图2-1(a)。许多四面体可以结合成一种晶体结构，如图2-1(b)所示。一般用符号  表示，下部平面相当于四面体的底，上部平面相当于其顶部。

氢氧化铝八面体是六个氢氧离子在八面体顶部，一个铝离子位于八面体的中心。其几何模式如图2-2(a)。一些八面体单元结合成另一种晶体结构，如图2-2(b)所示。在某些条

件下，铁和镁可以代替铝。这种晶片结构可以认为在两层氢氧离子之间夹有一层铝原子、铁原子或镁原子。用符号 $\square$ 表示。

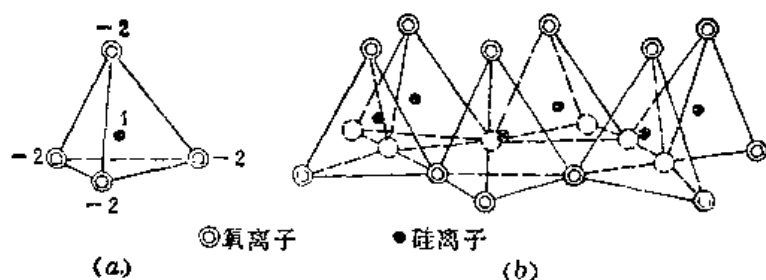


图 2-1 硅四面体及其结合体

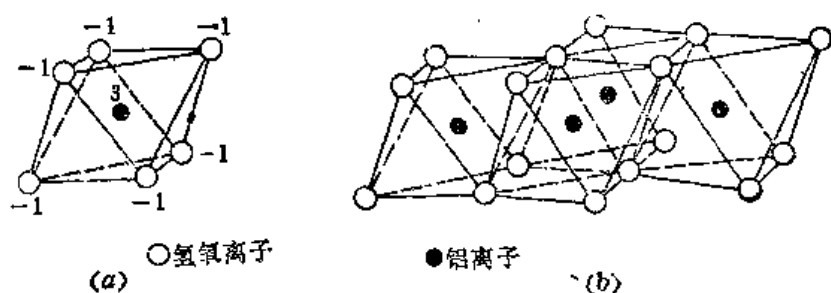


图 2-2 氢氧化铝八面体及其结合体

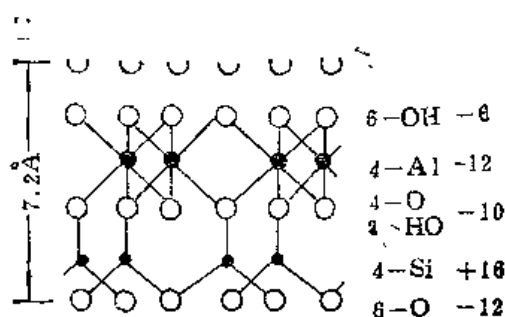


图 2-3 高岭石原子结构图

高岭石类是硅四面体单元顶处的氧离子和氢氧化铝八面体的氢氧离子由较强的氢键(离子键)结合成一个单元晶体,其厚度约为 $7.2\text{\AA}$ ($1\text{\AA}=10^{-8}\text{cm}$),以符号  表示,如图2-3。

蒙脱石类是由两个硅四面体中间夹一氢氧化铝八面体组成的晶片。由于添加了一个硅层,该晶片单元的负电荷比硅和氢氧化铝晶片单元要多。该单元晶片两面是带有负电荷的硅四面体,因而可使偶电极的水分子定向,并使单元晶片分开。这一结构叫膨胀晶格。这种晶片的厚度约为 $9.5\text{\AA}$,用图2-4的符号表示。

伊利石类是由蒙脱石单元和次价键及钾离子组成的非常稳定的三层单元。用图2-5的符号表示。其硅片中的硅原子约有20%被铝原子所代替。这种粘土矿物不象蒙脱石,其晶片单元结晶的不是水,而是由钾离子联结,所以,伊利石类遇水膨胀或失水收缩等性质不如蒙脱石类那样显著。

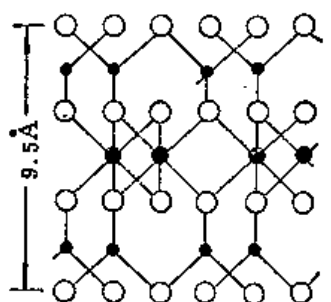


图 2-4 蒙脱石原子结构图

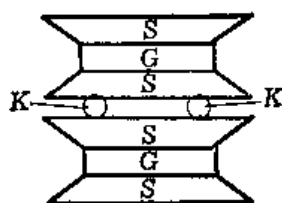


图 2-5 伊利石的结构示意图

以上简要的介绍了三种粘土矿物的结构状况,由于结晶构造的不同,其工程性质也很不同。一般来说,高岭石晶包之间间距小,具有很强的氢键联结,亲水性差,可塑性较低。蒙脱石晶包之间间距大,由很弱的键联结,亲水性大,易引

起膨胀和收缩，因而，其压缩性高，强度低。伊利石的工程性质介于两者之间。三类粘土矿物的工程性质如表2-1所列。

表 2-1 粘 土 矿 物 的 性 质

粘土矿物 类 型	平 均 比 面 积 (m^2/g)	阳 离 子 交 换 量	液 限 w_L (%)	塑性指数 I_P	活动性 d_c	压缩指数	排水摩 擦 角
高 岭 石	10	3	50	20	0.2	0.2	$20^\circ \sim 30^\circ$
伊 利 石	100	25	100~120	50~65	0.6	0.6~1	$20^\circ \sim 25^\circ$
蒙 脱 石	800	100	150~700	100~650	1~6	1~3	$12^\circ \sim 20^\circ$

注 阳离子交换量单位： $\text{m}\cdot\text{eq}/100\text{g}$ = 毫克当量/100克干土。

2.2.3 土粒和水及其吸附复合作用

就工程性质而言，水是较复杂的液体之一。水分子具有偶极性，与条形磁铁一样，所以，水分子之间具有吸力，一般称为静电引力或叫范德华力。当粘土矿物与水相混合，由于氢氧（高岭石）的离解和晶格中的同晶型替代（伊利石、蒙脱石），粘土矿物的各面具有剩余负电荷，如图2-6。这些电荷（在酸性溶液中，氢离子吸附时为正电荷，在碱性溶液中，八面体晶格的各边处氢氧离解作用是负电荷）与水中的可交换离子吸力相平衡，即静电引力和氢键结合力的作用，改变了土粒周围水分子的定向。这样，带电荷的土粒，其周围的水以及有关离子之间产生的力场对土的性质具有控制作用。

由于静电引力和氢键联结力的作用，水分子牢固的与粘土颗粒表面联结起来。这种水具有较大的密度，较高的粘度和具有一定的抗剪强度。随着远离粘土颗粒表面，由于水分子偶极性，使水分子定向排列，形成水化膜。离粘土颗粒表面

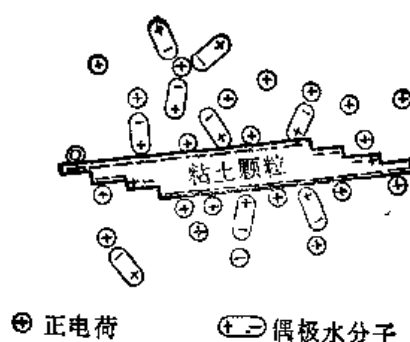


图 2-6 粘土颗粒与周围水溶液

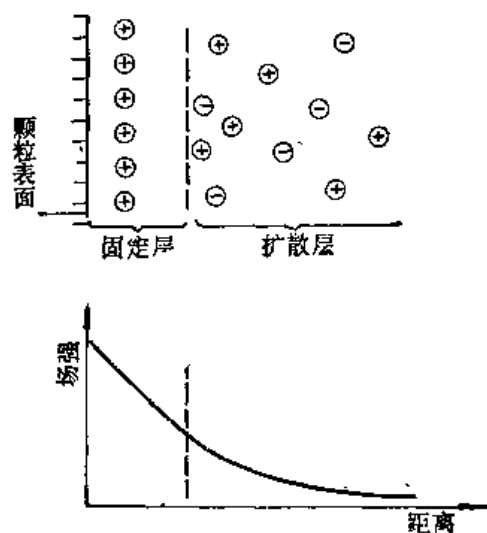


图 2-7 扩散双层模型

再远一点，水具有自由水形态。这种粘土颗粒与水溶液的相互作用形成扩散双层，其模式如图2-7所示。

在土体中，只要两个土粒之间的距离大于扩散双层厚度的两倍以上，则两组平衡离子互不干扰。如果两个土粒相互接近，则扩散双层离子要相互作用。由于各双层中的离子具

有同一符号，则土粒间作用着斥力。当相互接近时，双层的自由能增加，这说明对土粒要作功，才能减少它们之间的距离。这功等于克服斥力所需的力与距离变化的乘积。斥力与土粒之间的距离近似地按指数减少，如图2-8(a)所示。该曲线与电解中的离子价、浓度及土粒表面电荷、液体的介电常数等有关。

如上所述，在土水体系中，既有静电引力 (Ac)，也有扩散双层产生的斥力 (R)，吸力和斥力相互作用。因此，可以用颗粒之间的纯内应力描述粘土悬液的特性及稳定作用。纯内引力依赖于粘土粒分开的距离，故一定距离的纯力是斥力和吸力的代数和 ($R-Ac$)。

图2-8(b)所描述的是电介质浓度的增加对纯力随距离变化的影响。

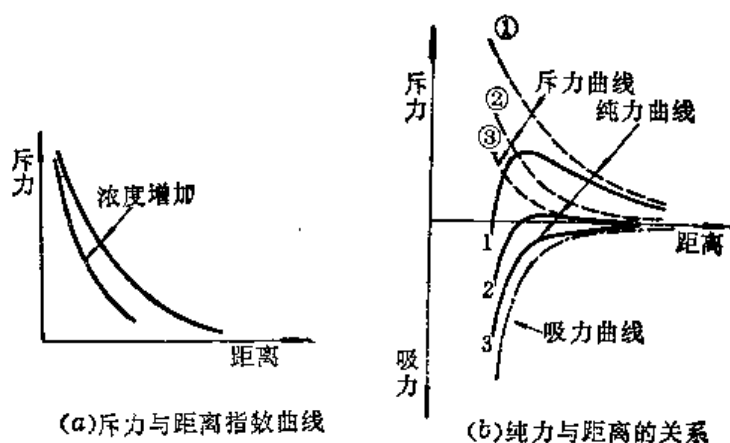


图 2-8 土粒间纯力随溶液浓度和距离的变化

这种土粒和水及其吸附复合作用，可以用于解释细粒土颗粒分析中分散剂的作用机理；土的电渗作用以及粘性土的塑性和凝聚等机理。