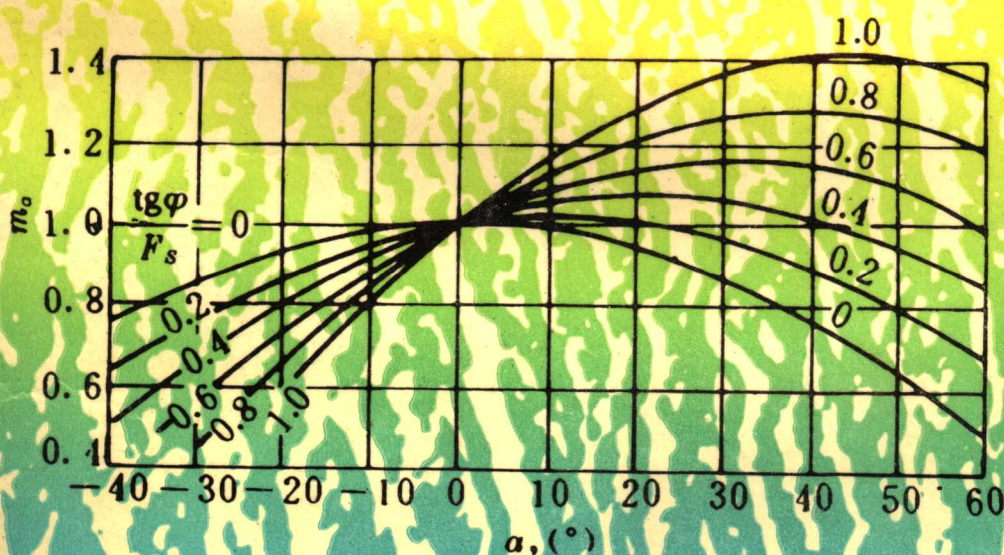


土质学及土力学

许惠德 马金荣 姜振泉 编



中国矿业大学出版社

高等学校规划教材

土质学及土力学

许惠德 马金荣 姜振泉 编

中国矿业大学出版社

前 言

本教材是根据全国煤炭高等院校教材编审委员会会议审定的以中国矿业大学水文地质与工程地质专业四年制本科教学大纲为依据,参考其它院校的相应教学大纲编写的。在编写过程中,广泛吸取和选用了近年来国内外出版的优秀教材内容和有关文献资料及图件,特别是蔡伟铭、唐大雄、陈希哲、史如平、杨英华、高国瑞、郭继武等教授、专家的著作和论文,体现了最新的科学成果,为教材的质量提供了坚实的基础,在此表示衷心的感谢。近年来国内颁布的有关规程规范的基本内容已融合于教材的有关章节之中,并沿用了新规程规范规定的名词、术语和单位制,加强了理论与实践的联系。根据编者的教学经验和学科发展的趋势,还增加了微观测试内容,土的弹塑性理论知识,井巷土压力理论和补强土的概念。每章之后,视需要附有习题,书后附有土工实验指导书,便于学习练习和实验。

参加本书编写的有:中国矿业大学许惠德(绪论,第四、五、六、七、八章)、马金荣(第一、九章)、姜振泉(第二、三、十章,实验指导书)。许惠德为本书主编。

本教材是煤炭高等院校水文地质与工程地质专业本科四年制学生的专业课用书,教学时数为80学时。当学时少时,可适当减少土的动力强度概述、特殊土的工程地质特征、地基变形与时间关系,以及根据地基承载力理论确定容许承载力、井巷土压力和地基处理概述等中的部分内容。本教材也适合岩土工程、地质工程、环境地质专业应用,并可供工业与民用建筑,建井工程,采矿工程,煤田地质等的勘察、勘探、设计、施工部门的科研、工程技术人员和高等院校有关专业的师生参考。

编 者

1994年4月15日

目 录

绪 论	(1)
第一章 土的物质组成和结构	(3)
第一节 土的多相组成	(3)
第二节 土的颗粒特征	(4)
第三节 土的矿物成分	(10)
第四节 土的化学成分	(16)
第五节 土中的水和气	(17)
第六节 粘土-水-电解质系统	(23)
第七节 土的结构、构造	(36)
第二章 土的物理性质	(43)
第一节 土的重量	(43)
第二节 土的含水性	(45)
第三节 土的孔隙性	(46)
第四节 物理性质指标的换算	(48)
第三章 土的水理性质	(51)
第一节 土的透水性	(51)
第二节 土的毛细性	(54)
第三节 粘性土的稠度和可塑性	(56)
第四节 粘性土的抗水性	(62)
第四章 土的力学性质	(69)
第一节 土的变形特性	(69)
第二节 土的压缩性	(72)
第三节 土的抗剪性	(83)
第四节 土的动力强度概述	(97)
第五节 影响土的力学性质的因素	(104)
第五章 土的工程地质分类及一般土的工程地质特征	(108)
第一节 土的工程地质分类	(108)
第二节 一般土的工程地质特征	(111)
第六章 特殊土的工程地质特征	(113)
第一节 黄土类土	(113)
第二节 红粘土	(120)
第三节 软土	(122)
第四节 填土	(124)
第五节 冻土	(125)

第六节	膨胀土	(129)
第七节	盐渍土	(137)
第八节	混合土和污染土	(139)
第七章	地基中的应力和地基土的沉降计算	(141)
第一节	地基中的应力分布	(141)
第二节	地基最终沉降量的计算	(158)
第三节	地基变形与时间的关系	(169)
第四节	建筑物沉降观测和地基允许变形值	(176)
第八章	地基土承载力计算	(179)
第一节	地基承载力和地基容许承载力	(179)
第二节	土的极限平衡条件	(179)
第三节	根据载荷试验的 p - S 曲线确定容许承载力	(182)
第四节	根据地基承载力理论公式确定容许承载力	(183)
第五节	根据《建筑地基基础设计规范》确定容许承载力	(195)
第九章	土坡稳定和土压力计算	(202)
第一节	土坡稳定分析	(202)
第二节	挡土墙土压力	(217)
第三节	井巷土压力	(240)
第十章	地基处理概述	(253)
第一节	地基处理方法的分类和处理方案的选择	(253)
第二节	软土地基处理	(254)
第三节	特殊土地基处理	(261)
第四节	补强土工法简介	(264)
土工实验指导书		(274)
实验一	土的颗粒分析	(274)
实验二	土的重度测定	(283)
实验三	土的含水量测定	(286)
实验四	土的塑限、液限试验	(287)
实验五	粘性土的渗透试验	(290)
实验六	土的压缩试验	(294)
实验七	土的直剪试验	(296)
实验八	土的三轴剪切试验	(298)
参考文献		(302)

绪 论

一、土质学及土力学在工程地质学中的地位

人类的工程建设活动是在各种地质环境中进行的,它们彼此间相互关联又相互制约。地质环境能影响工程建筑物的安全稳定和正常使用或提高工程造价,因此必须根据实际需要去研究和评价工程建筑区的地质条件。人类的工程建设活动又能促使地质环境的变化,产生出一些新的地质问题,这些新的地质问题在一定条件下又会影响到工程建筑物的安全稳定和正常使用。因此人们必须预见到工程建筑和地质环境两者相互制约的基本形式和规律,这样才能合理有效地开发利用并妥善保护地质环境。研究这种与工程建筑有关的地质条件的学科,称为工程地质学。土质学是工程地质学的理论基础之一,也是其重要的组成部分;而土力学是土质学的延伸和发展。

二、土质学、土力学的研究对象和研究内容

土质学、土力学都是研究土的学科,目的是解决工程建筑中有关土的工程技术问题。

土的形成经历了漫长的地质历史过程,它是地质作用的产物,是一种矿物集合体,为由多种成分组成的多相分散系统。其主要特征是分散性、复杂性和易变性,极易受到外界环境(温度、湿度等)的变化而发生变化。由于土的形成过程不同,加上自然环境的不同,使土的性质有着极大的差异,而人类工程活动又促使土的性质发生变异。因此在进行工程建设时,必须密切结合土的实际性质进行设计和施工,要预测到因土性质的变异带来的危害,并加以改良,否则会影响工程的经济合理性和安全使用。

土质学是一门属于地质学范畴的科学,是从工程地质观点(即从工程建筑物与自然地质体相互作用、相互制约角度出发)去研究土的,它是地质学观点和力学观点的有机结合,其理论性和实践性很强。土质学研究的内容包括以下几个方面:

(1) 土的工程地质性质,包括物理性质、水理性质和力学性质,如密度、干湿状况、孔隙特征、与水相互作用表现出的性质及在外力作用下表现出的变形和强度特征。

(2) 土的工程地质性质的形成和分布规律;土的物质组成、结构构造对土的工程地质性质的影响。

(3) 土的工程地质性质指标的测试方法和测试技术。

(4) 土的工程地质分类。

(5) 土的工程地质性质在自然因素或人为因素作用下的变化趋势和变化规律,预测这种变化对各种建筑物的危害。

(6) 土的改良原则和方法。

土力学是属于工程力学范畴的科学,是运用力学原理,同时考虑到土作为分散系特征来求得量的关系,其力学计算模型必须建立在现场勘察和实测土的计算参数(即工程地质性质指标)的基础上,因此土力学也是一门理论性和实践性很强的学科。它研究的内容包括以下几个方面:

- (1) 土的应力与应变的关系。
- (2) 土的强度及土的变形和时间的关系。
- (3) 土在外荷作用下的稳定性计算。

土质学与土力学虽各属不同学科范畴,但彼此间关系十分密切。随着科学的不断发展,这两门学科的相互结合已成为必然的发展趋势。土质学需吸取土力学中运用数学、力学等最新理论去研究土的工程地质性质的本质;土力学将吸取土质学从成因及微观结构等认识土的性质本质的研究成果去研究与工程建筑有关的土的应力、应变、强度和稳定性等力学问题。本书把土质学与土力学结合在一起就是顺应了科学发展的这种趋势,显示了完整性和系统性,它定能更好地解决实际工程中有关土的问题。

第一章 土的物质组成和结构

土是地壳表层广泛分布的物质,约占地球表面的 2/5。它是最新地质时期的沉积物,是由岩石经过物理和化学风化作用后的产物。土的工程地质性质及其在天然和人为因素作用下的变化,将直接影响工程建筑物的稳定和安全。

第一节 土的多相组成

一、相的概念及其组成

土是由各种大小不同的土粒按各种比例组成的集合体。土粒构成了土的最重要组成部分,称为固态相部分,构成土的骨架。土粒间的连结是比较微弱的,土粒间存在着孔隙。一般情况下,土体孔隙中为水和空气所充填,后二者和土粒统称为土的三相组成(三相体系),即固相、液相和气相。土的三相物质组成很复杂。

1) 土的固相物质 分无机矿物颗粒和有机质,构成土的骨架。矿物颗粒由原生矿物和次生矿物组成。

原生矿物是指岩浆在冷凝过程中形成的矿物,如石英、长石、云母等。次生矿物是原生矿物经过化学风化,成分发生化学变化而形成的新矿物,如 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、次生 SiO_2 、粘土矿物、碳酸盐等。次生矿物的成分和性质均较复杂,对土的工程性质影响也较大。

在风化过程中往往有微生物参与,在土中产生有机质成分,如多种复杂的腐殖质矿物;此外,在土中还会有动植物残骸体等有机残余物,如泥炭等。有机质对土的工程地质性质影响很大,但目前对土的有机质组成的研究还很不够。

2) 土的液相物质 指土孔隙中存在的水。一般把土中的水看成中性,且无色、无味、无嗅,其密度为 $1\text{g}/\text{cm}^3$ 、重度 $9.81\text{kN}/\text{m}^3$,冰点为 0°C 、沸点 100°C 。但实质上土中水是成分复杂的电解质水溶液,它与土粒间有着复杂的相互作用,这将在本章第五节中叙述。

3) 土的气相物质 主要指土孔隙中充填的空气。土的含气量和含水量有密切关系,直接影响土的性质。

土中气体的主要成分为 O_2 、 CO_2 、 N_2 等。与大气相比,土中气体含有更多的 CO_2 ,较少的 O_2 ,较多的 N_2 。土中气体与大气的交换愈困难,两者差别就愈大。因此,可把土中的气体分为与大气连通和不连通两类。

二、土的相系组成

土体中存在孔隙,当土体孔隙中全部充满气相物质——空气时,形成干土。干土有的坚硬,有的松散。当孔隙中全部充满液相物质——水时,形成饱和土,性质松软或松散。饱和土和干土均由二相物质组成,称为二相体系。孔隙中既有液相的水,又有气相的空气,则成为湿土,其性质介于干土和饱和土之间,是三相体系。湿土中液相的水在合适的温度下,可以部分地结成固态的冰。“冰”作为一种特殊“相”有别于固相的土粒和液相的水,这样含冰的湿土就成为四相体系的土了,这称为“冻土”。冻土是一种特殊土,性质比较复杂。

从上述讨论可知,土可以是二相体系、三相体系,也可以是四相体系,但自然状态下的土一般由固相、液相和气相构成的三相体系。不同的相系构成,以及单相在土中所占的比例不同,土表现出不同的状态和工程地质性质。

第二节 土的颗粒特征

土由土粒集合体组成,粒间的连结关系决定了土的工程地质性质,而连结的形式主要是由土粒直径起着主导作用。所以,研究土的工程地质性质,应首先研究土粒及粒度成分。

一、粒组及其划分

土是由不同粒径的土颗粒组成,自然界中同一个粒径组成的土属少数。土的许多工程地质性质与土颗粒的性质有密切的关系。天然土体土颗粒大小变化很大,由直径 $1 \times 10^{-6} \text{mm}$ 的极细粘土颗粒,一直变化到有几米大小的岩石碎块,土粒的大小称为粒度。由于土中各种颗粒的含量和相互之间的比例关系不等,它影响着土的一系列的工程地质性质,所以需要归并和分类。在工程上常把大小相近的土粒合并为组,称为粒组。粒组间的分界线是人为确定的,划分粒组一般有下列两种方式:

1) 任意划分的方式 按一定的比例递减关系划分粒组的界限值。

2) 考虑土粒性质变化的方式 使划分的粒组界限值与粒组性质(如矿物成分、物理性质、水理性质、力学性质等)的变化相适应,服从量变到质变的辩证规律。

对粒组的划分,各个国家甚至一个国家的各个部门有不同的规定,这与各个部门的工程性质和研究目的不同有关。国家标准《土的分类标准》(GBJ 145—90),给出了粒组划分标准(表 1-1)。

表 1-1 粒 组 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	$60 \geq d > 20$
	粗砾	$20 \geq d > 2$
	细砾	$2 \geq d > 0.075$
细 粒	砂粒	
	粉粒	$0.075 \geq d > 0.005$
	粘粒	$0.005 \geq d$

自然界中的土很少仅有一个粒组,大多数的土由几个粒组组成。每个粒组在土中的含量又不等,其百分含量的不同,使土的工程地质性质亦不同。所以,将土划分粒组是不够的,还需按其所含粒组成分的百分含量进行分类,称为土的粒度分类。

依国家标准《土的分类标准》(GBJ 145—90)中的通用分类标准,将土分为一般土和特殊土两大类。一般土分为巨粒土、含巨粒土、粗粒土和细粒土;特殊土分为黄土、膨胀土和红粘土等。

试样中巨粒组质量多于总质量的 50% 的土称为巨粒土(表 1-2);巨粒组质量为总质量的 15%~50% 的土称为巨粒混合土。

试样中粗粒组质量多于总质量的 50% 的土称为粗粒土(表 1-3)。其中,砾粒组质量多于总质量的 50% 的土称为砾类土;砾粒组质量少于或等于总质量的 50% 的土称为砂类土。

表 1-2

巨粒土和含巨粒的土分类表

土的名称及其代号			粒 组 含 量 %	
			巨粒(>60mm)	漂石粒(>200mm)
巨 粒 土	漂石	B	100~75	>50
	卵石	C _b		≤50
混合巨粒土	混合土漂石	BSL	75~50	>50
	混合土卵石	CBSL		≤50
巨粒混合土	漂石混合土	SLB	50~15	>卵石
	卵石混合土	SLCB		≤卵石

表 1-3

粗粒土和细粒土的分类表

土 的 名 称 及 代 号					粗粒含量 %	细粒含量 %	塑性图位置
粗 粒 土 (粗粒含量超过50%)	砾类土 (砾粒含量>50%)	砾	级配良好砾	GW	95~100	<5	(注 1)
			级配不良砾	GP			(注 2)
		含细粒土砾	含细粒砾	GF	85~95	5~15	
		细粒土质砾	粘土质砾	GC	50~85	15~50	A 线以上和 $I_P \geq 10$
			粉土质砾	GM			A 线以下和 $I_P < 10$
	砂类土 (砾粒含量≤50%)	砂	级配良好砂	SW	95~100	<5	(注 1)
			级配不良砂	SP			(注 2)
		含细粒土砂	含细粒砂	SF	85~95	5~15	
		细粒土质砂	粘土质砂	SC	50~85	15~50	A 线以上和 $I_P \geq 10$
			粉土质砂	SM			A 线以下和 $I_P < 10$
细 粒 土 (细粒含量超过50%)	细粒土 (粗粒含量<25%)		高液限粘土	CH	<25	75~100	A 线以上, B 线以右
			低液限粘土	CL			A 线上, B 线左, $I_P \geq 10$
			高液限粉土	MH	<25	75~100	A 线以下, B 线以右
			低液限粉土	ML			A 线下, B 线左, $I_P < 10$
	含粗粒的细粒土 (粗粒含量 25~50%) (注 3)		含砾(砂)高液限粘土	CHG(CHS)	25~50	50~75	A 线以上, B 线以右
			含砾(砂)低液限粘土	CLG(CLS)			A 线上, B 线左, $I_P \geq 10$
			含砾(砂)高液限粉土	MHG(MHS)	25~50	50~75	A 线以下, B 线以右
			含砾(砂)低液限粉土	MLG(MLS)			A 线上, B 线左, $I_P < 10$
	有机质土 (含部分有机质)		有机质高液限粘土	CHO	<50	>50	A 线以上, B 线以右
			有机质低液限粘土	CLO			A 线上, B 线左, $I_P \geq 10$
			有机质高液限粉土	MHO	<50	>50	A 线以下, B 线以右
			有机质低液限粉土	MLO			A 线下, B 线左, $I_P < 10$

注: 1. $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$, $C_u \geq 5$; $C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \times d_{60}}$, $C_c = 1 \sim 3$ 。

2. 不同时满足 $C_u \geq 5$ 和 $C_c = 1 \sim 3$ 。

3. 砾粒含量多于砂粒为含砾, 砂粒多于砾粒为含砂。

试样中细粒质量多于或等于总质量的 50% 的土称为细粒土。其中,粗粒组质量少于总质量的 25% 的土称为细粒土;粗粒组质量为总质量的 25%~50% 的土称为含粗粒的细粒土;试样中含部分有机质的土称为有机质土。

细粒土在塑性图上的位置,要根据测定液限所用的规定选用(图 1-1)。图中土的代号可参见表 1-3。

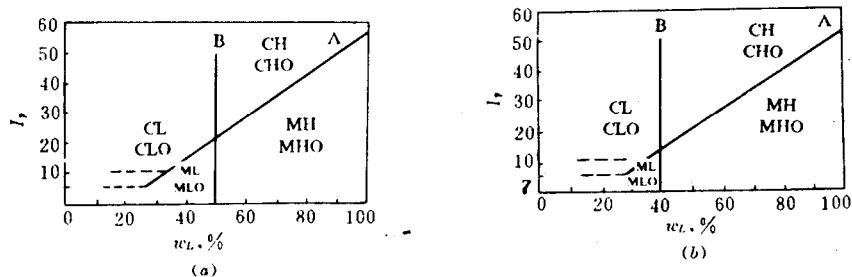


图 1-1 塑性图

- a—液限仪锥尖入土深度为 17mm,对应的含水量为液限时,
A 线 $I_P=0.73(W_L-20)$, B 线 $W_L=50\%$;
- b—液限仪锥尖入土深度为 10mm,对应的含水量为液限时,
A 线 $I_P=0.63(W_L-20)$, B 线 $W_L=40\%$

对黄土、膨胀土和红粘土的初步判别,也要根据测定液限所用规定选用(图 1-2、图 1-3 及表 1-4、表 1-5)。

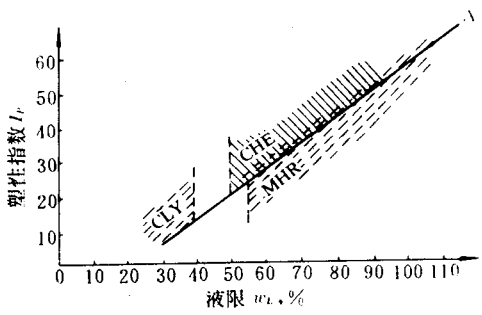


图 1-2 液限仪锥尖入土深度 17mm 时规定为液限的特殊土塑性图

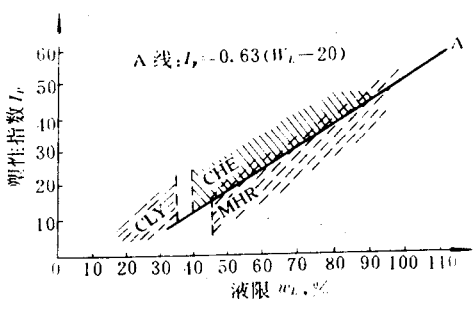


图 1-3 液限仪锥尖入土深度 10mm 时规定为液限的特殊土塑性图

表 1-4 黄土、膨胀土和红粘土的判别

土的塑性指标在塑性图中的位置		土代号	土 名 称
塑性指数 I_P	液限 $W_L, \%$		
$I_P \geq 0.73(W_L - 20)$	$W_L < 40$	CLY	低液限粘土(黄土)
	$W_L > 50$	CHE	高液限粘土(膨胀土)
$I_P < 0.73(W_L - 20)$	$W_L > 55$	MHR	高液限粉土(红粘土)

注:用于液限仪锥尖入土深度 17mm 时初步判别。

表 1-5

黄土、膨胀土和红粘土的判别

土的塑性指标在塑性图中的位置		土 代 号	土 名 称
塑性指数 I_P	液限 W_L		
$I_P \geq 0.63(W_L - 20)$	$W_L < 35\%$	CLY	低液限粘土(黄土)
	$W_L > 40\%$	CHE	高液限粘土(膨胀土)
$I_P < 0.63(W_L - 20)$	$W_L > 45\%$	MHR	高液限粉土(红粘土)

注:用于液限仪锥尖入土深度 10mm 时初步判别。

对黄土、膨胀土和红粘土等特殊土的最终分类定名要遵照相应的专门规范来确定,这将在第六章特殊土的工程地质特征中叙述。

二、土的粒度成分及其表示方法

土的粒度成分(机械成分、级配)是指土中各种不同颗粒的相互比例关系,通常以各粒组的质量百分率来表示,可用来描述土的各种不同粒径土颗粒的分布特性。

常用的粒度成分的表示方法有:表格法、级配曲线法和三角形坐标法。

1) 表格法 以列表形式直接表达各粒组的百分含量,它用于粒度成分分类十分方便,列表时粒组粒径范围界限值应与表 1-1 一致。

2) 级配曲线法 又称累积曲线法,或累计曲线法。土的颗粒级配是一多项数据的指标,其表示方法常用粒径的对数值为横坐标,小于某一粒径以下的颗粒占总土重的百分数称为累计百分含量为纵坐标,此线称为级配曲线(图 1-4a)。

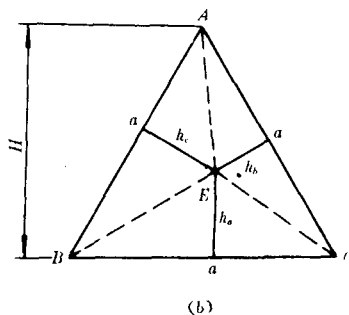
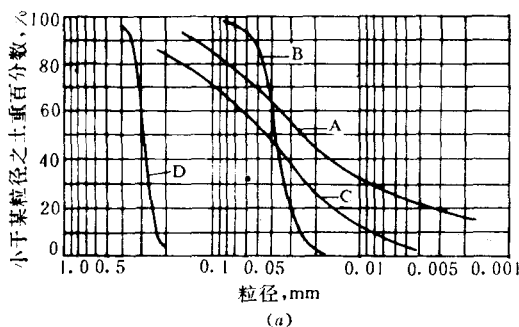


图 1-4 粒度成分表示法

a—级配曲线法; b—三角图法

由级配曲线可以直观地判断土中各粒组的分布情况。图中, A 线代表一种颗粒大小很不均匀的土; B 线代表一种颗粒较为均匀的土, 其形式近似于一反 S 形曲线; C 线同样代表一种颗粒不均匀的土。但根据同一粒径颗粒所占重量百分比进一步观察, 可以发现 C 线较 A 线的土颗粒为粗; D 线为标准砂的级配曲线, 所示粒径全部局限于某一极小的范围。

此法比较完善, 所以应用最广。

3) 三角图法 又称三角坐标法。在一等边三角形中, 以一点表示一个土样的粒度成分, 这样可以把大量的土样粒度成分表示在一张图上, 克服了曲线法的不足。三角图法的原理是在等边三角形中, 任一点对三边的垂高之和恒等于等边三角形本身的垂高。设三角形的高为

H , 三角形中任意一点到各边的垂高分别为 h_a, h_b, h_c , 将 H 分为 100 等分, 即令 $H=100$, 则 h_a, h_b, h_c 就可以代表三大粒组的百分含量。任一个土所含的三大粒组百分含量的总和等于 100%, 这样三角图中的每一点就代表某一土样的粒度成分(图 1-4b)。

用三角图表示的粒度成分, 其中心问题是将土粒划分为三大粒组, 分别用三角形的三个顶点表示。建议以 0.075mm 及 0.005mm 为两个界限值, 将全部土粒划分为巨粗粒组(卵砾砂粒组)、粉粒组、粘粒组等三大粒组。该方案适合于细粒土的分类。对于巨粗粒土, 建议以 2mm 和 0.075mm 为界限值, 将全部土粒划分为卵砾组、砂粒组、粉粘粒组。这样三角形图就可把自然界的和人工的所有土类表示出来。

三、粒径参数和级配特征参数

在研究颗粒级配曲线时, 定义曲线上的某些特征点作为表示颗粒大小及其分配比例的指标。

1) 有效粒径 d_{10} 指颗粒级配曲线上小于某粒径的颗粒质量百分率为 10% 的颗粒直径。由曲线上纵轴 10% 处画一水平线与曲线相交, 该交点的横轴粒径即为所求之点。如不相交时, 则用末端粒径或延线求之。 d_{10} 在一定程度上反映了砂土的性质, 即 d_{10} 越小, 砂土的透水性越低。

2) 不均匀系数 C_u 和曲率系数(级配系数) C_c 两个指标被分别用来描述粒径曲线的坡度和形状。

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1-1)$$

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} d_{10}} \quad (1-2)$$

式中 C_u ——不均匀系数;

C_c ——曲率系数;

d_{10} ——有效粒径, 表示累计百分含量为 10% 时的粒径;

d_{30} ——中间粒径, 表示累计百分含量为 30% 时的粒径;

d_{60} ——界限粒径, 表示累计百分含量为 60% 时的粒径。

不均匀系数反映了土中所含土粒在大小方面的均匀程度。 C_u 越大, 表示粗细颗粒混杂, 颗粒大小越不均匀, 级配良好; C_u 小, 表示 d_{60} 和 d_{10} 差别小, 颗粒大小均匀, 级配不好。根据工程经验, 当土的 $C_u \leq 5$ 时, 属于级配不好的土或称匀粒土(均粒土); $C_u > 5$ 时, 称为不匀粒土; $C_u > 10$ 时, 称为级配良好的土。曲率系数 C_c 是反映土的粒度分布范围的宽窄, 当 $C_u > 5$ 、 $C_c = 1 \sim 3$ 时, 认为是级配良好的土; 当不同时满足时, 则为级配不良的土。

不均匀系数和曲率系数只对砂土以上的土有意义, 对粉土、粘性土来说意义不大。这是因为还有更重要的性质影响着土的性质, 如水理性质。此外, 还有一个平均粒径 d_{50} 指标, 它常应用于地震研究中。

四、土的粒度成分分析方法

分析土的工程地质性质时, 需要首先对土进行粒度分析, 分离出土中各个粒组, 并测定其相对含量。对于不同类型的土采用不同的方法, 砾粒和砂粒组类土采用筛分法, 粉粒和粘粒组类土采用静水沉降分析法。

1) 筛分法 系指分析土的颗粒最简单而直接的方法, 一般适用于粒径小于或等于

60mm、大于 0.075mm 的土。将土样通过逐级减小的各种不同孔径的筛子,将大小颗粒按筛的孔径大小逐级加以分组(对通过筛孔的颗粒,可以认为其粒径恒小于该筛的孔径;反之,遗留在筛上的颗粒,可以认为其粒径恒大于筛的孔径),再根据分组数据对土进行分类。分析含有粘土颗粒的砂性土时,由于细粒土在粘结水作用下易粘聚成集粒,应将其制成悬液,而后过 2mm 的筛,筛上土烘干进行逐级筛分,筛下土用带橡皮头的研杆研磨,过 0.075mm 筛,再将筛上土进行逐级筛分析。当粒径小于 0.075mm 的试样质量大于试样总质量的 10% 时,应按静水沉降方法测定小于 0.075mm 的颗粒组成。

2) 静水沉降分析法 它一般适用于粒径小于 0.075mm 的土。首先将土中的集合体分散制备成悬液,然后根据不同粒径的土粒在静水中沉降速度不同的原理,分离粒径小于 0.075mm 的土粒,之后测定各粒组的百分含量。土粒在静水中的沉降原理是土粒在静水中下沉时,受到土粒的有效重力和液体的阻力两种力作用。前者是促使土粒下沉的力,而后者是阻止土粒下沉的力。土粒在这两种力作用下匀速下沉,并用式(1-3)表示之,该式称为斯托克斯公式。

$$d = \sqrt{\frac{1800\eta}{(G_s - G_{wT})\rho_{w4}g}} \times \frac{L}{t} \quad (1-3)$$

式中 d ——试样颗粒直径,mm;

η ——纯水的动力粘滞系数, $10^{-6}\text{kPa}\cdot\text{s}$;

ρ_{w4} ——温度 4°C 时水的密度, g/cm^3 ;

L ——某一时间内的土粒沉降距离,cm;

t ——沉降时间,S;

$\frac{L}{t}$ ——土粒沉降速度,cm/s;

g ——重力加速度, cm/s^2 ;

G_s ——土粒的比重;

G_{wT} ——不同温度时水的比重(查阅有关物理手册)。

由式(1-3)可知,在一定温度下,土粒密度相等的颗粒,其沉降速度与土粒的直径平方成正比。

导出斯托克斯公式的假定条件是:悬液的浓度很小,悬液的粘滞系数为常数;土粒的密度相等;土粒呈球形;土粒的直径远远大于水分子的直径;沉速很小;土粒水化膜的厚度等于零。斯托克斯公式的实质是基于一个主要的条件,即颗粒在液体中必须是等速下沉。由上述条件可知,斯托克斯公式有其一定的使用范围。1934 年凡尔赛国际土壤物理学代表会议规定,斯托克斯公式只适用于直径为 0.02~0.002mm 的颗粒。当颗粒直径过大时,其沉降速度将大,则颗粒在液体中下沉时,就会出现紊乱现象,而不是等速下沉;如颗粒直径过小,则胶体颗粒遇水后成为悬浮物,由于水分子力的作用而相互撞击,永不停止,产生布朗运动,从而改变了原颗粒在液体中的沉降特性。因此,试验分析结果与实际情况肯定会有一定的误差,要获得较准确的实验资料,在应用斯托克斯原理时,应在实验技术上尽量采取一些措施,以减小误差。

目前常用的静水沉降分析方法有密度计法、移液管法、虹吸比重瓶法。各种方法的仪器各有自身的特点,而它们的基本原理均建立在斯托克斯定律的基础上。具体试验分析方法,

详见附篇土工试验指导书。

第三节 土的矿物成分

一、土中矿物成分的类型

土的固体相部分,实质上都是矿物颗粒,所以土也是一种多矿物体系。土的矿物成分及其相对含量是决定土的工程性质的基本性质,也是决定土颗粒尺寸、形状和物理、化学性质的主要因素。组成土的矿物成分,按其成因可分为原生矿物和次生矿物。

原生矿物是直接由岩浆冷凝而形成的。土中的原生矿物保留着受风化作用前存在于母岩中的矿物,包括:硅酸盐类矿物(如钾长石、钙长石、白云母、黑云母、普通辉石、普通角闪石等)、氧化物类矿物(如石英、赤铁矿、磁铁矿、针铁矿等)、硫化物类矿物(如铁的硫化物等)、磷酸盐类矿物(如磷灰石等)。次生矿物是原生矿物在一定的温度和压力条件下,经过化学风化而形成的新矿物。次生矿物包括:可溶性次生矿物(如 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子, Cl^- 、 S^{2-} 等酸根离子)、不可溶次生矿物(如次生二氧化硅 SiO_2 、倍半氧化物 R_2O_3 、粘土矿物——蒙脱石、伊利石、高岭石等)、有机质(如分解不完全的植物残骸、完全分解的腐殖质)。这类矿物的成分和性质较为复杂,它们对土的物理力学性质影响很大。例如,当含有蒙脱石类粘土矿物时,土的亲水性极强,膨胀性和压缩性极高,透水性弱和抗剪强度低;当含有高岭石类粘土矿物时,土的亲水性要差些,膨胀性和压缩性较小,透水性较好和抗剪强度较高;当含有有机质时,土的亲水性很强,压缩性很大,透水性和抗剪强度极低。

二、土的矿物成分与粒度成分的关系

在一定的地质作用和生成条件下形成一定成因类型的土,其粒度成分与矿物成分间存在着一定的内在联系。土粒的大小取决于矿物的力学强度和化学稳定性。在粒径大于 0.5mm 的颗粒中,其粉碎程度主要取决于矿物的强度;粒径小于 0.5mm 的颗粒中,主要取决于矿物的化学稳定性。

砾石、卵石粒组($d > 2mm$) 这种粒径多是由母岩风化崩解后的碎屑物所组成,其成分大多和母岩一致,保留原有的多矿物结构。

砂粒组($d = 2 \sim 0.075mm$) 主要由抗风化能力强的单矿物组成,如石英。在近代沉积的砂土中,也可以找到抗风化能力较弱的矿物,如长石、云母等,有时还可能由石膏、碳酸盐等次生矿物组成。

粉粒组($d = 0.075 \sim 0.005mm$) 在近代堆积的粉土中,除石英外,还包含有长石及云母颗粒。在干旱区有时有白云石、方解石等难溶碳酸盐矿物。

粘粒组($d < 0.005mm$) 主要由不可溶次生矿物及高亲水性的腐殖质组成。

三、粘土矿物的类型及其基本特征

粘土矿物是指具有片状或链状结晶格架铝硅酸盐,它是由原生矿物长石及云母等硅酸盐矿物经化学风化而成。粘土矿物若按化学元素的组成分类,对工程建筑来说价值不大,而按矿物的原子排列来分类却十分有用。颗粒多呈鳞片状,其颗粒尺寸一般均小于 $2\mu m$,当与少量水混合时,有可塑性和粘性。大多数粘土矿物是结晶质的,但也有非晶质粘土矿物(如水铝英石)。最常见的粘土矿物有高岭石、伊利石(水云母)、蒙脱石、绿泥石、蛭石等。

随着现代试验手段的日益完善,对粘土矿物的认识亦有长足的发展。用 X-衍射法、电子

显微镜法、差热分析法及电子探针法等对粘土矿物进行了大量的研究,现已查明粘土矿物的晶体结构主要由两个基本结构单元组成,即硅氧四面体和氢氧化物八面体,又称氢氧铝石、三水铝石八面体(图 1-5)。

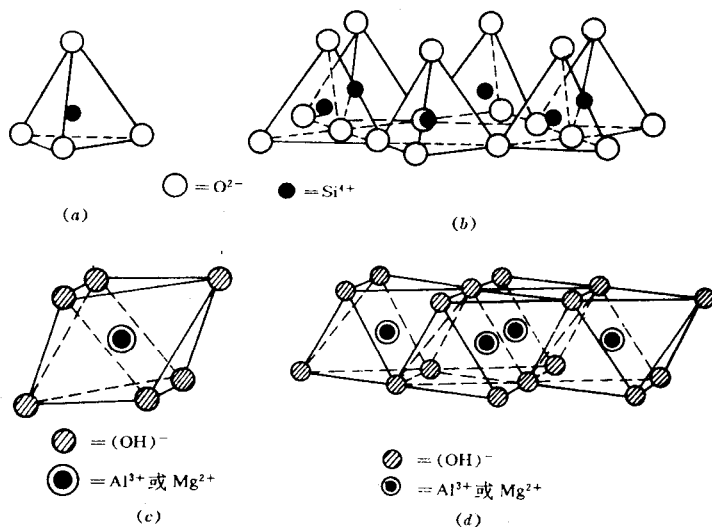


图 1-5 硅氧四面体和氢氧化物八面体构造示意图

a ——一个硅氧四面体单元; b ——一个四面体层;
 c ——一个氢氧化物八面体单元; d ——一个八面体层

硅氧四面体的中心是硅离子 Si^{4+} ,四个氧离子分布于四面体的四个顶角,四面体的四个面均为等边三角形(图 1-5a)。当四面体的底面落在同一平面上,并以三角尖顶彼此联结,第四个尖顶指向同一方向,则四面体在平面上组成六角形网状结构,构成四面体层(图 1-5b)。氢氧化物八面体由六个氧和氢氧离子以相等的距离排列而成,铝离子居中(图 1-5c)。八面体中每个氢氧离子均为三个八面体共有,许多八面体以这种方式联结起来,形成八面体层(图 1-5d)。

四面体层与八面体层的不同组合堆叠重复,形成了大多数粘土矿物的各种层状结构。由一个四面体层和一个八面体层重复堆叠的称为 1:1 型结构单元层,又称二层型(如高岭石等);由二个四面体层与一个八面体层重复堆叠的称为 2:1 型结构单元层,又称三层型(如蒙脱石、伊利石等)。

由于不同层状结构的层间联结的不同,使所构成的粘土矿物具不同的特征。

1) 高岭石类粘土矿物 结构单元层间为 O 与 OH 联结,层间除了范德华键外,还有氢键,具有较强的联结,故高岭石浸水后,晶格活动性小,使高岭石的膨胀性及压缩性都较小,可塑性较低。

高岭石组中其它矿物(如地开石、珍珠陶土),一般来说仅是叠接上有些不同,与工程性质无关。埃洛石却例外,一层水分子将每一片分离,故无正规的叠接,两层的基本间隔尺寸稍有不同,使晶体成弯曲,土粒看起来成管形。从工程观点来说,埃洛石的重要特点是从低于 60°C 起晶体中失去一部分晶隙水而形成间位埃洛石,其性质迥异,且这个过程是不可逆的。处理埃洛石土样作试验用时,必须小心谨慎。

在高岭石中,同晶代替作用很少发生,故其近于属惰性矿物。

2) 蒙脱石类粘土矿物 结构单元层间由 O 和 O 联结,故联结力极弱,易于为具有氢键的强极化水分子所分开。此外,蒙脱石中同形置换比较普遍,一般发生在八面体中,也发生于四面体中,因此吸附有交换阳离子,这种阳离子吸附水分子成水化离子,充填于单元层间,故蒙脱石的晶格活动性大,层间可吸附大量水分子,使蒙脱石的膨胀性及压缩性极高、可塑性大,且层间能完全分散而成高度分散的横向延伸很大的薄膜片状。所以,含有多量蒙脱石的粘土是极差的地基土,在干季与湿季之间显示出大量的体积应变,在这种土上的浅基础出现失稳问题比较普遍。

3) 伊利石类粘土矿物 伊利石类与蒙脱石类粘土矿物同属于 2:1 型结构单元层,但在单元层间嵌有钾离子。天然伊利石在层间是 O 与 O 联结,但由于钾离子的联结作用,使它的层间联结介于高岭石和蒙脱石之间,故伊利石的晶格活动性、膨胀性及压缩性均介于高岭石和蒙脱石之间。

4) 绿泥石类粘土矿物 由三层八面体云母片与单层镁石八面体片间隔组成。四面体层中有 $1/4 \sim 1/2$ 的硅离子被铝所代替,使云母片中的电荷不足,这就由镁石片中由于 Al^{3+} 代替 Mg^{2+} 所得过剩电荷来补充。属于该类的各种矿物,在连续片体的叠接方面和在代替离子的位置与数目方面,相互间有所差异。晶体良好的绿泥石具有平衡的电荷,故具惰性。在所有的粘土矿物中,绿泥石的结晶可能不算好,它们会有杂乱的叠接,晶体也许已有某些水化作用。几种主要粘土矿物的基本特征见表 1-6。

表 1-6 几种主要粘土矿物的基本特征

型	类	矿物	八面体 阳离子	四面体 阳离子	层间 联结	大 小	形状	阳离子交 换容量 me/100g	比重	比表面 m ² /g	在土中 存在情况
	水铝 英石	水铝 英石				0.05~1μm	不规则, 有些圆				
1:1	高岭 石类	高岭石	Al ₄	Si ₄	O-OH 氢键,强	(0.1~4μm)× (0.05~2μm)单粒, 到 3000×4000 叠片	六边形 片 状	3~15	2.60~ 2.68	10~20	极常见
		埃洛石	Al ₄	si ₄	O-OH 氢键,强	外径 0.07μm 内径 0.04μm 长 1μ	管 状	5~10	2.55~ 2.56		偶 有
2:1	蒙脱 石类	蒙脱石	Al _{3.34} Mg _{0.66}	Si ₈	O-O 极弱, 可膨胀	>1nm×<10μm (>1nm×10μm)	片 状	80~150	2.35~ 2.7	50~120 700~840	极常见
	皂石类	皂 石	Mg, Fe	Si _{7.34} Al _{0.66}	O-O 极弱, 可膨胀	同蒙脱石	片 状	70~90	2.24~ 2.30		少 见
	伊利 石类	伊利石	(Al,Fe, Mg) ₄₋₆	(Al,Si) ₈	K ⁺ ,强	0.003~0.1μm ×<10μm	片 状	10~40	2.60~ 3.0	65~100	很常见
2:1:1	绿泥 石类	绿泥石	(Mg,Fe) ₆ (Mg,Al) ₆	(Si,Al) ₈		1μ	片 状	10~40	2.6~ 2.96		常见