

21世纪高等学校土木建筑类
创新型应用人才培养规划教材

土力学

(第三版)

主编 侍倩



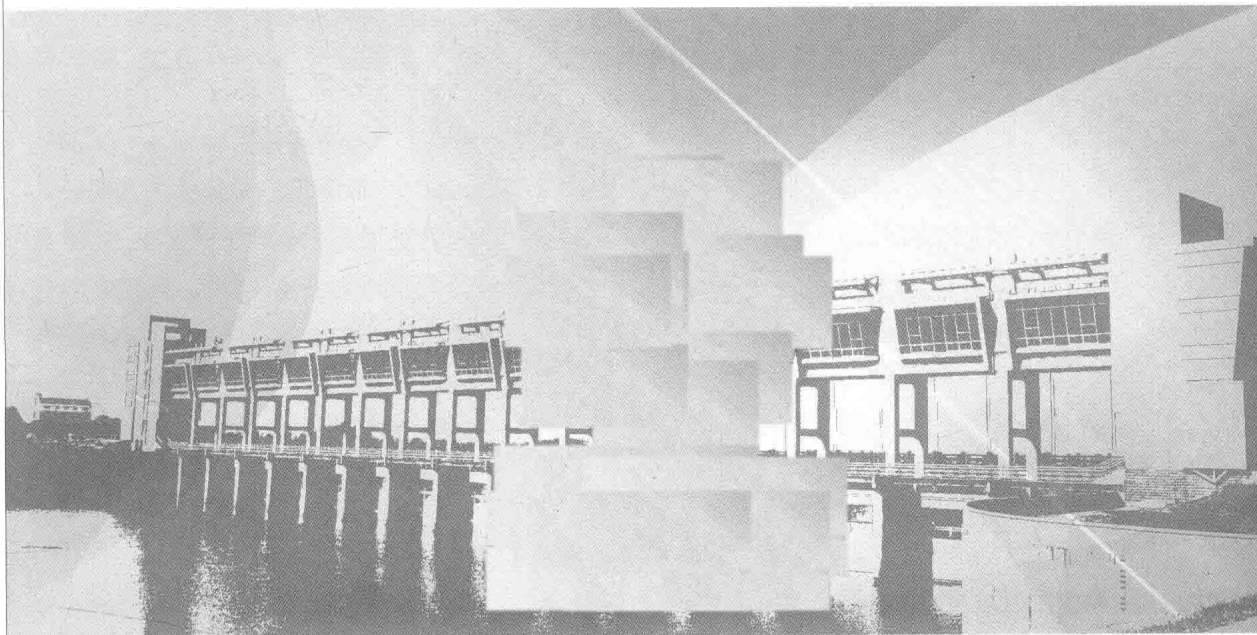
WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

21世纪高等学校土木建筑类
创新型应用人才培养规划教材

土力学 (第三版)

主编 侍倩



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

土力学/侍倩主编. —3 版. —武汉:武汉大学出版社,2017. 9
21 世纪高等学校土木建筑类创新型应用人才培养规划教材
ISBN 978-7-307-19538-7

I. 土… II. 侍… III. 土力学—高等学校—教材 IV. TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 188599 号

责任编辑:胡 艳

责任校对:李孟潇

版式设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:湖北睿智印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:19.75 字数:482 千字 插页:1

版次:2004 年 10 月第 1 版

2010 年 9 月第 2 版

2017 年 9 月第 3 版

2017 年 9 月第 3 版第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-19538-7

定价:39.00 元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

再版前言

《土力学》第一版于2001年10月出版发行，是高等学校土木建筑工程类系列教材，经过十几年来使用，历经两版的修正，积累了丰富的经验，也发现了不少问题，特此修订。本次修订，加强土质学内容，适当引进国内外教材新内容，以基本理论为主，兼顾实践知识，结合现行规范标准，反映成熟观点，力求达到系统性，深入浅出，便于教和学。主要修订内容如下：

第1章“土的物理性质”第7节“土的工程分类”进行了重新编写；

第2章“土的渗透及工程问题”进行了重新编排；

第3章“土中的应力”调出“各向异性地基情况”、“均质土中附加应力的量测”；

第4章“土的变形性质和地基沉降计算”第3节“土的应力历史”调至第2节，调出“用 e - $\lg p$ 曲线法或压缩指数 C_c 计算沉降量”；

第6章“土压力”第1节修改为“产生土压力的条件”；第4节“库仑土压力理论”进行了改写，内容更丰富、编排更合理；

第7章“地基稳定性”，在第2节对“汉森公式”内容进行了修正；对第5节进行了重新编写；

第8章“土坡的稳定性分析”，在第2节增加了“简布法”和“有限元法”的内容；

第9章“地基设计、桩基础和地基处理”内容进行了重新编写；

本教材由武汉大学冯国栋教授和刘祖德教授主审，遗憾的是，刘祖德教授没有等到正式出版就不幸逝世，在此表示沉痛的悼念和由衷的感激。在此也特别感谢冯国栋教授对本书的悉心指导和详细审阅。

编者

2017年6月

目 录

第 1 章 土的物理性质	1
1.1 土的组成	1
1.2 土的三相比例指标	14
1.3 无黏性土的密实度	22
1.4 黏性土的物理状态	24
1.5 土的结构	30
1.6 土的击实性	33
1.7 土的工程分类	39
1.8 黏性土的物理化学性质	45
习题 1	49
第 2 章 土的渗透及工程问题	52
2.1 达西定律及其适用范围	53
2.2 渗透系数及其确定方法	55
2.3 渗流作用下土的应力状态	60
2.4 渗透变形	64
习题 2	69
第 3 章 土中的应力	70
3.1 土体中的自重应力	70
3.2 基底压力(接触压力)	74
3.3 地基中的附加应力	81
3.4 非均质和各向异性地基中的附加应力	108
习题 3	114
第 4 章 土的变形性质和地基沉降计算	117
4.1 土的压缩性	117
4.2 地基最终沉降量的计算	124
4.3 饱和土的渗透固结理论	133
习题 4	148
第 5 章 土的抗剪强度	150
5.1 土的抗剪强度规律和极限平衡条件	150

5.2	土的剪切试验	154
5.3	总应力强度指标与有效应力强度指标	162
5.4	土在剪切过程中的性状	169
5.5	三轴试验中试样的应力路径	179
	习题 5	185
第 6 章	土压力	186
6.1	产生土压力的条件	187
6.2	静止土压力计算	190
6.3	朗肯土压力理论	192
6.4	库仑土压力理论	198
6.5	影响土压力计算值的因素及减小主动土压力的措施	208
6.6	挡土墙稳定性验算及新型挡土结构	212
	习题 6	217
第 7 章	地基稳定性	220
7.1	地基失稳破坏型式及破坏过程	220
7.2	按极限荷载确定地基承载力	224
7.3	按极限平衡区发展范围确定地基承载力	235
7.4	用原位测试成果确定地基承载力	240
7.5	按《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)确定地基承载力	244
	习题 7	247
第 8 章	土坡的稳定性分析	249
8.1	无黏性土土坡的稳定性分析	250
8.2	黏性土土坡的稳定性分析	252
8.3	任意滑面的不平衡推力传递法及圆弧滑面的泰勒图表法	265
8.4	影响土坡稳定的因素	268
8.5	土坡稳定有关问题的讨论	273
	习题 8	276
第 9 章	地基设计、桩基础与地基处理	278
9.1	地基基础设计	279
9.2	桩基础概述	285
9.3	地基处理	294
	参考文献	310

第1章 土的物理性质

土是各种矿物颗粒的集合体，在天然状态下，一般为三相系，即土是由固体颗粒、水（水溶液）和气体三相所组成。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物理状态，可以用来对土进行分类和鉴定。同时，这些指标又都与土的力学性质有关。

地壳表层的岩石长期受自然界的风化作用，因而大块岩体不断地破碎与分解，再经搬运、堆积而成为大小、形状和成分都不相同的松散颗粒集合体——土。

物理风化只能引起岩块的机械破碎，其产物基本上保持与母岩相同的成分，称为原生矿物，如石英、长石和云母等；砂、砾石和其他粗粒的土，主要是物理风化的产物。化学风化则使岩石发生质变，改变其原有的矿物成分，形成了次生矿物；各种组成黏性土的黏土矿物（蒙脱石、伊利石和高岭石等）都属次生矿物。生物风化则是动物和植物的活动对岩石的破坏。这三种风化作用往往是同时或相互交替进行的。在自然界中，土是从岩体经过长期风化作用而逐渐形成的自然产物。因此，评价土的工程性质时，必须重视土的形成历史、环境及存在条件对土性的影响。

大部分的土是岩石风化的产物，通常称为无机土。但在自然界中，常有动、植物残骸等有机质混入土中，由于有机质易于分解变质，故土中含有过量的有机质时，对土的物理力学性质将产生不利影响。因而在实际工程中，常对所用土料的有机质含量提出一定的限制。

1.1 土的组成

1.1.1 土的三相组成

土是由固相、液相和气相三相组成的松散颗粒集合体。固相部分即为土粒，由矿物颗粒或有机质组成，构成土的骨架。骨架之间有许多孔隙，而孔隙可以被液体或气体或二者共同填充；水及其溶解物为土中的液相；空气及其他一些气体为土中的气相。如果土中的孔隙全部被水所充满，称为饱和土；如果孔隙全部被气体所充满，称为干土；如果孔隙中同时存在水和空气，称为湿土。饱和土和干土都是二相系。湿土为三相系。这些组成部分的相互作用和它们在数量上的比例关系，将决定土的物理力学性质。

1.1.2 土的固相

土的固相物质包括无机矿物颗粒和有机质，它们组成了土的骨架。土的组成成分对土的物理力学性质起着决定性的作用。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,称为土的颗粒级配;另外,还要研究固体颗粒的矿物成分及颗粒的形状。这三者是密切相关的。

1. 矿物成分

土中的矿物成分可以分为原生矿物和次生矿物两大类。

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。

次生矿物是指由原生矿物经过风化作用后形成的新矿物,如三氧化二铝、三氧化二铁、次生二氧化硅、黏土矿物以及碳酸盐等。次生矿物按其在水中的溶解程度,可以分为易溶的、难溶的和不可溶的,次生矿物的水溶性对土的性质有极其重要的影响。黏土矿物的主要代表性矿物为高岭石、伊利石和蒙脱石,由于其亲水性不同,当其含量不同时,土就显示出不同的工程性质。

在以物理风化为主的风化过程中,岩石破碎而并不改变其成分,岩石中的原生矿物得以保存下来;但在化学风化的过程中,易风化的矿物,如长石、云母等,就分解成次生的黏土矿物,石英等难风化的矿物得以保存下来。黏土矿物是很细小的扁平颗粒,表面具有极强的和水相互作用的能力。颗粒愈细,比表面积愈大,这种亲水的能力就愈强,对土的工程性质的影响也愈大。

风化过程中,在微生物作用下,土中产生复杂的腐殖质矿物,此外还会有动、植物残骸等有机物,如泥炭等。有机质颗粒紧紧地吸附在矿物颗粒的表面,形成了颗粒之间的连接,但是这种连接的稳定性较差。

从外表上看到的土的颜色,在很大程度上反映了土的固相的不同成分和不同含量。红色、黄色和棕色一般表示土中含有较多的三氧化二铁,说明氧化程度较高;黑色表示土中含有较多的有机质或锰的化合物;灰蓝色和灰绿色的土一般含有亚铁化合物,是在缺氧条件下形成的;白色或灰白色则表示土中有机质较少,主要含石英或高岭土等黏土矿物。当然,湿度也会影响土的颜色深浅,风干的土颜色较浅。一般描述的是土在潮湿状态下的颜色。

2. 土的粒度成分

天然土是由大小不同的颗粒组成的,土粒的大小称为粒度,土颗粒的大小相差悬殊,从大于几十厘米的漂石到小于几微米的胶粒。由于土粒的形状往往是不规则的,很难直接测量其大小,只能用间接的方法来测量土粒的大小及各种颗粒的相对含量。常用的方法有两种,对粒径大于 0.075 mm 的粗粒常用筛分析的方法,而对小于 0.075 mm 的细粒则用沉降分析的方法。实际工程中常用不同粒径颗粒的相对含量来描述土的颗粒组成情况,这种指标称为颗粒级配。

1) 土粒粒组划分

颗粒大小和矿物成分的不同,可以使土具有不同的性质。例如颗粒粗大的卵石、砾石和砂,大多数为浑圆或棱角状的石英颗粒,具有较大的透水性,不具粘性。颗粒细小的黏粒,则是针状或片状的黏土矿物,具有粘性,且透水性较低。

为了描述方便,也为了实际工程应用中更加科学和简便,常常把土粒在性质上表现出明显差异的分界粒径作为划分粒组的依据。所谓粒组,是指相邻两分界粒径之间性质相近的土粒。可以说,粒组之间的分界粒径的确定带有人为划定的性质,划分时应力求使粒组界限与粒组性质的变化相适应,并按一定的比例递变。

对粒组的划分，各个国家，甚至某个国家的各个部门都有不同的规定。我国习惯采用的粒组划分标准见表 1-1-1。同一个粒组的颗粒具有相近的特性。

表 1-1-1 我国习惯采用的粒组划分标准

粒组名称	粒组范围 (mm)
漂石(块石)粒组	>200
卵石(碎石)粒组	60~200
砾石粒组	2~60
砂粒粒组	0.075~2
粉粒粒组	0.005~0.075
粘粒粒组	<0.005

过去的粒组划分标准中，砂粒与粉粒的划分界限是 0.05mm，这一粒径需要用沉降分析方法(比重计法)测定，试验不太方便，从 20 世纪 70 年代末到 80 年代末这 10 年中，我国的粒组划分标准有了一些变化。《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2011)和《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)[2009 版]在编制和修订过程中经充分论证，将砂粒粒组与粉粒粒组之间的界限从0.05mm改为 0.075mm。这一粒径和欧美一些国家的 200 号筛是一致的，便于与国际接轨，同时我国也生产出筛孔直径为 0.075mm 的筛，可以用筛分法测定，比沉降分析方法方便。《土的工程分类标准》(GBT 50145—2007)和《土工试验规程》(SL237—1999)在砂粒粒组与粉粒粒组的界限上取与上述规范相同的标准，但将卵石粒组与砾石粒组的界限改为 60mm，其粒组划分标准见表 1-1-2 所示。

2) 颗粒分析试验方法

实际上，土体常常是多种不同粒组的混合物。较笼统地说，以砾石和砂粒为主要成分的土称为粗粒土，也称为无黏性土。以粉粒、粘粒和胶粒为主的土，称为细粒土。显然，土的性质取决于各不同粒组的相对含量。为了确定各粒组的相对含量，必须用试验的方法将各粒组区分开来，这种试验方法统称为颗粒分析试验。颗粒分析试验法分为筛分法和沉降分析法(或称为比重计法)，粗粒土应采用筛分法，而细粒土则应当用沉降分析法。粗粒土和细粒土的分界粒径为 0.075mm。

(1) 筛分法。该方法适用于粒径大于 0.075mm 的土。用一套不同孔径的标准筛，从上到下，筛孔逐渐减小，将事先称过重量的干土样过筛，称出留存在各筛子上的土粒的重量，然后标出这些土粒重量占总重量的百分数。

筛分法和建筑材料的粒径级配筛分试验是一样的。但很细的粒组却无法用筛分法分离出来，这是因为很细的土粒较易互相联结在一起的缘故。按我国原有的标准，最小孔径的筛是0.1mm,但是新的筛孔标准已改为 0.075mm(即现行的粗、细粒土的分界粒径)，这相当于美国 ASTM 标准的 200 号筛(即在 1 平方英寸面积上有 200 个孔)。这是在国际上比较通用的标准，因此我国也采用了这一标准。在采用最小孔径的筛作筛分试验时，应采用水筛的方法，用水冲方法把联结在一起的细颗粒分开，才能正确地测定细颗粒的含量。

表 1-1-2 土粒粒组的划分

粒 组 名 称		粒径范围 (mm)	一 般 特 征
漂石或块石颗粒		>200	透水性很大, 无粘性, 无毛细水
卵石或碎石颗粒		200~60	
圆砾或角砾颗粒	粗	60~20	透水性大, 无粘性, 毛细水上升高度不超过粒径大小
	中	20~5	
	细	5~2	
砂 粒	粗	2~0.5	易透水, 当混入云母等杂质时透水性减小, 而压缩性增加; 无粘性; 遇水不膨胀, 干燥时松散; 毛细水上升高度不大, 随粒径变小而增大
	中	0.5~0.25	
	细	0.25~0.1	
	极细	0.1~0.075	
粉 粒	粗	0.075~0.01	透水性小; 湿时稍有粘性, 遇水膨胀小, 干时稍有收缩; 毛细水上升高度较大较快, 极易出现冻胀现象
	细	0.01~0.005	
粘 粒		<0.005	透水性很小, 湿时有粘性、可塑性; 遇水膨胀大, 干时收缩显著; 毛细水上升高度大, 但速度较慢

注: 1. 漂石、卵石和圆砾颗粒均呈一定的磨圆形状(圆形或亚圆形); 块石、碎石和角砾颗粒都带有棱角;

- 2. 黏粒或称黏土粒; 粉粒或称粉土粒;
- 3. 黏粒的粒径上限也有采用 0.002mm 的;
- 4. 粉粒的粒径上限也有直接以 200 号筛的孔径 0.074mm 为准的;
- 5. 卵石或碎石颗粒范围下限: 国标水利类为 60mm; 建筑、勘察、地方标准类为 20mm。

(2) 比重计法。该方法是将少量细粒土放入水中, 大小不同的土粒在水中下沉的速度各不相同, 大粒下沉快而小粒下沉慢, 根据土粒在水和土粒混合悬液中沉降的速度与粒径的平方成正比的关系来确定各粒组相对含量。

设有一个球形颗粒在无限大的、不可压缩的粘滞性液体中, 在重力作用下产生沉降, 其沉降速度可以用司托克斯(Stokes)公式计算:

$$v = \frac{2}{g} \cdot r^2 \cdot \frac{\rho_s - \rho_w}{\eta}$$

(1-1-1)

式中: v ——球形颗粒在液体中的稳定沉降速度, cm/s;
 g ——重力加速度, cm/s²;
 r ——球形颗粒的半径, cm;
 ρ_s 、 ρ_w ——分别为颗粒和液体的密度, g/cm³;
 η ——液体粘滞系数, Pa。

实际上, 土粒并不是球形颗粒, 因此公式(1-1-1)计算中所用的并不是实际的土粒的尺寸, 而是与实际土粒有相同沉降速度的理想球体的等效直径, 称为水力直径。

在进行土粒粒度分析时, 把一定质量的干土加水制成一定体积的悬液, 搅拌均匀后静置, 悬液中不同粒径的颗粒以不同速度下沉, 在不同的深度处悬液的密度就不同。经过时间 t , 在深度 L 处, 最大的粒径为 d , 则三者的关系式为

$$d=\sqrt{\frac{18\eta\cdot L}{(\rho_s-\rho_w)\cdot t}}$$

(1-1-2)

上式表明，粒径为 d 的土粒经历时间 t 正好从悬液表面沉到深度 L 处。由于假定土粒在悬液中匀速下沉，因此在深度 L 范围内已经没有粒径大于 d 的土粒了，或者说粒径大于 d 的土粒已经沉到 L 深度以下了。在深度 L 附近一个小范围内粒径等于及小于 d 的土粒分布密度与开始时均匀悬液中粒径等于及小于 d 的土粒分布密度是一样的。这个密度可以表达为

$$\rho=\frac{1}{1000}\left[M_s+\left(1000-\frac{M_s}{\rho_s}\right)\rho_w\right]$$

(1-1-3)

式中： ρ ——深度 L 处的悬液密度， g/cm^3 ；
 M_s ——土样中粒径等于及小于 d 的土粒质量， g ；
其余符号意义同前。

只要能测得深度 L 处的悬液密度 ρ ，便可以按式 (1-1-3) 求得 M_s ，并可以按下式计算土样中粒径等于及小于 d 的土粒质量占总质量的百分比：

$$x=\frac{M_s}{M}\times 100\%$$

(1-1-4)

式中： M ——土总重量， g 。

3) 土的颗粒级配

土中各种粒组的相对含量，用土粒总重的百分比表示，称为土的颗粒级配。颗粒级配的表达可以用三种方式，即表格法、曲线法、三角法。下面简要介绍表格法和曲线法。

(1) 颗粒级配表格法，是以列表的形式直接表达各个粒组的相对含量的方法。该方法用于粒度成分的分类十分方便，表 1-1-3 给出了 3 种土样的颗粒级配，根据第 1.7 节的方法可以进行土的分类和定名。

表 1-1-3 颗粒级配的表格法

粒径 (mm)	土样 A		土样 B		土样 C	
	粒组含量 (%)	累计含量 (%)	粒组含量 (%)	累计含量 (%)	粒组含量 (%)	累计含量 (%)
10~5	0		0		29	100
5~2	0		0		14	71
2~0.5	0		12	100	7	57
0.5~0.25	8	100	13	88	20	50
0.25~0.075	88	92	27	75	30	30
0.075~0.005	4	4	44	48	0	0
<0.005	0	0	4	4	0	0
d_{60}	0.165		0.115		3.00	
d_{10}	0.11		0.012		0.15	
d_{30}	0.15		0.044		0.25	
C_u	1.5		9.6		20.0	
C_c	1.24		1.40		0.14	

(2) 颗粒级配曲线法,可以更直观地表达土粒的级配。通常用半对数纸绘制,横坐标(按对数比例尺)表示土的粒径,纵坐标表示小于某一粒径的土粒质量累计百分含量,采用这种横坐标,可以把粒径相差数千倍的粗、细粒含量都表示出来,尤其能把占总重量小,但对土的性质可能有重要影响的微小土粒部分清楚地表达出来。土的颗粒级配曲线是岩土工程中最常用的曲线,从这种曲线上可以直接了解土粒的粗细、粒径分布的均匀程度和级配的优劣。

表 1-1-3 中的三种土的颗粒级配曲线示于图 1-1-1 中,三种土的粒度成分不同,粒径曲线的形态不同。为了定量地描述颗粒级配曲线,需要引入能反映曲线特征的指标。

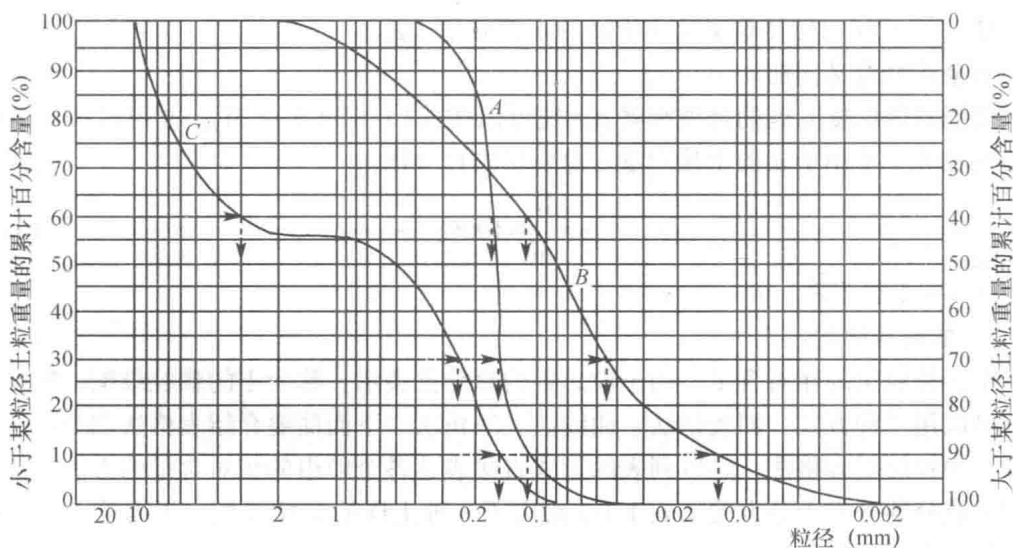


图 1-1-1 土的颗粒级配曲线

图 1-1-1 中曲线 A 及曲线 B 所代表的两种土的颗粒大小分布都是连续的,曲线坡度是渐变的,这样的级配称为连续级配或正常级配。曲线 C 所代表的土则缺乏某些粒径的土粒,曲线出现水平段,这样的级配不连续。与曲线 A 相比较,曲线 B 形状平缓,土粒大小分布范围广,表示土粒大小不均匀,因而各级粒组均有,级配良好。曲线 A 形状较陡,土粒大小分布范围窄,表示土粒均匀,级配不良。这样,在颗粒级配曲线上,可以确定如下两个描述土的级配的指标:

$$\text{不均匀系数} \quad C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1-1-5)$$

$$\text{曲率系数} \quad C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \times d_{10}} \quad (1-1-6)$$

式中: d_{60} , d_{10} , d_{30} ——分别为颗粒级配曲线纵坐标上小于某粒径的累计含量为 60%、10%、30%时所对应的粒径; d_{10} 称为有效粒径; d_{60} 称为控制粒径。

不均匀系数 C_u 反映大小不同粒组的分布情况。 C_u 越大,表示土粒大小的分布范围越

广,其级配越良好,作为填方工程的土料时,则比较容易获得较大的密实度。曲率系数 C_c 描述的是颗粒级配曲线是否连续,反映曲线的整体形状。

在一般情况下,实际工程中把 $C_u < 5$ 的土看做匀粒土,属级配不良; $C_u > 10$ 的土属级配良好。实际上,单独只用一个指标 C_u 来确定土的级配情况是不够的,要同时考虑颗粒级配曲线的整体形状,所以还需参考曲率系数 C_c 。从实际工程观点来看,土的级配不均匀 ($C_u \geq 5$) 且级配曲线连续 ($C_c = 1 \sim 3$) 的土,方可称为级配良好的土。不能同时满足上述两个要求的土,称为级配不良的土。

颗粒级配可以在一定程度上反映土的某些性质。对于级配良好的土,较粗颗粒之间的孔隙被较细的颗粒所充填,因而土的密实度较好,相应的地基土的强度和稳定性也较好,透水性和压缩性较小,也可以作为堤坝或其他土建工程的填方土料。

【例 1-1-1】 如图 1-1-1 和表 1-1-3 所示, A、B、C 表示三种不同粒径组成的土。试问: 每种土中的砾石、砂粒、粉粒及粘粒等粒组的含量各为多少? 它们的不均匀系数 C_u 及曲率系数 C_c 各为多少? 对各曲线所反映的土的级配特征加以分析。

【解】 (1) 按曲线 A 得知:

砂粒占 $88+8=96(\%)$;

粉粒占 4% 。

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0.165}{0.110} = 1.5 < 5, \text{土粒大小均匀};$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \cdot d_{10}} = \frac{(0.15)^2}{0.165 \times 0.11} = 1.24, \text{在 } 1 \sim 3 \text{ 之间}。$$

虽然 C_c 在 $1 \sim 3$ 之间,但曲线的不均匀系数 $C_u < 5$,故为级配不良的土。

(2) 按曲线 B 得知:

砂粒占 $12+13+27=52(\%)$;

粉粒占 44% ;

黏粒占 4% 。

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0.115}{0.012} = 9.6 > 5, \text{土粒大小不均匀};$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \cdot d_{10}} = \frac{(0.044)^2}{0.115 \times 0.012} = 1.4, \text{在 } 1 \sim 3 \text{ 之间}。$$

C_u 和 C_c 同时满足条件,故为级配良好的土。

(3) 按曲线 C 得知:

砾粒占 $29+14=43(\%)$;

砂粒占 $7+20+30=57(\%)$ 。

$$C_u = \frac{3}{0.15} = 20 > 5, \text{土粒大小不均匀};$$

$$C_c = \frac{(0.25)^2}{3 \times 0.15} = 0.14, \text{不在 } 1 \sim 3 \text{ 之间}。$$

虽然 $C_u > 5$,但因缺乏中间颗粒, C_c 不在 $1 \sim 3$ 之间,故为级配不良的土。

1.1.3 土的液相

在自然条件下，土中总是含水的，土的液相就是指水及水溶液。土中水可以处于液态、固态或气态。土中细粒愈多，即土的分散度愈大，水对土的性质的影响也愈大。研究土中的水，必须考虑水的存在状态及其与土粒的相互作用。

土中水可以分为下列各类：



1. 结晶水

存在于矿物的晶体格架内部或是参与到矿物构造中的水，称为结晶水。结晶水只有在比较高的温度(80~680℃，随土粒的矿物成分不同而异)下，才能化为气态水而与土粒分离。从土的工程性质上分析，可以把结晶水当做矿物颗粒的一部分。

2. 结合水(吸附水)

1) 双电层

结合水是指受电分子吸引力吸附于土粒表面的土中水。这种电分子吸引力高达几千到几万个大气压，使水分子和土粒表面牢固地粘在一起。

黏土矿物颗粒具有较强的与水相互作用的能力，称为亲水性。实验证明，这种亲水性的土粒表面一般带有负电荷，电荷大小直接与土粒表面积大小有关。常用比表面积(单位质量的土粒总表面积)来表示电荷对土粒性能的相对影响。原生矿物一般颗粒较粗，呈粒状，即颗粒的3个方向的尺度基本上是同一数量级，如图1-1-2所示。黏土颗粒细微，多呈片状，如图1-1-3所示。单位质量土颗粒所拥有的表面积之和称为比表面积 A_s ，比表面积与颗粒大小及形状有关，可用下式表示：

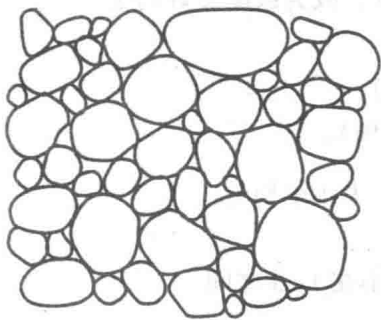


图 1-1-2 粗粒土的颗粒

$$A_s = \frac{\sum A_i}{m}$$

(1-1-7)

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

例如，当颗粒都是直径 0.1mm 的圆球时，比表面积约为 $0.02m^2/g$ 。而高岭石的比表面积为 $10\sim 20m^2/g$ ，伊利石为 $65\sim 100m^2/g$ ，蒙脱石可高达 $800m^2/g$ 。

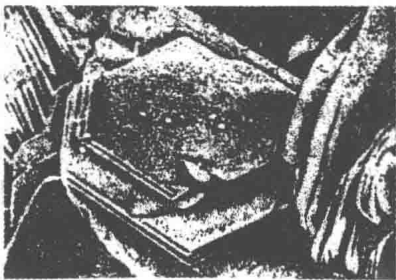


图 1-1-3 黏土的颗粒(显微镜下)

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映土颗粒与四周介质(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其中针片状颗粒的比例和颗粒的磨圆度，因为它们影响到颗粒间的排列和粗糙度，从而影响土的抗剪强度。

比表面积越大，电荷的作用就越强。土粒表面的负电荷围绕土粒形成电场，在土粒电场范围内的水分子和水溶液中的阳离子(如 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 等，统称为水化阳离子)被一起吸附在土粒表面。因为水分子是极性分子(氢原子端显示正电荷，氧原子端显示负电荷)，水分子受土粒表面电荷或水溶液中离子电荷的吸引而定向排列。如图 1-1-4 所示。

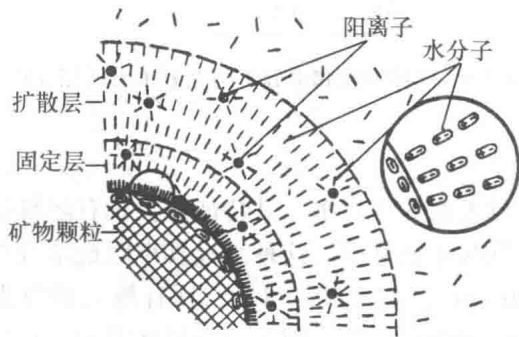


图 1-1-4 结合水分子定向排列简图

土粒周围水溶液中的阳离子，一方面受到土粒所形成电场的静电引力作用，另一方面

又受到布朗运动(热运动)的扩散力作用。在最靠近土粒表面处,静电引力最强,把水化阳离子和极性水分子牢固地吸附在颗粒表面上形成固定层。在固定层外围,静电引力比较小,因此水化阳离子和极性水分子的活动性比在固定层中大一些,形成扩散层。固定层和扩散层中所含的阳离子(反离子)与土粒表面负电荷一起即构成双电层(见图 1-1-4)。

水溶液中的反离子(阳离子)的原子价愈高,离子与土粒之间的静电引力愈强,则扩散层厚度愈薄。在实践中可以利用这种原理来改良土质,例如用三价及二价离子(如 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})处理黏土,使得离子的扩散层变薄,从而增加土的稳定性的,减少膨胀性,提高土的强度;有时,可以用含一价离子的盐溶液处理黏土,使扩散层增厚,而大大降低土的透水性。

从上述双电层的概念可知,反离子层中的结合水分子和交换离子,愈靠近土粒表面,则排列得愈紧密和整齐,活动性也愈小。因而,结合水又可以分为强结合水和弱结合水两种。强结合水是存在于反离子层的内层(固定层)中的水,而弱结合水则是存在于扩散层中的水。如图 1-1-5 所示。

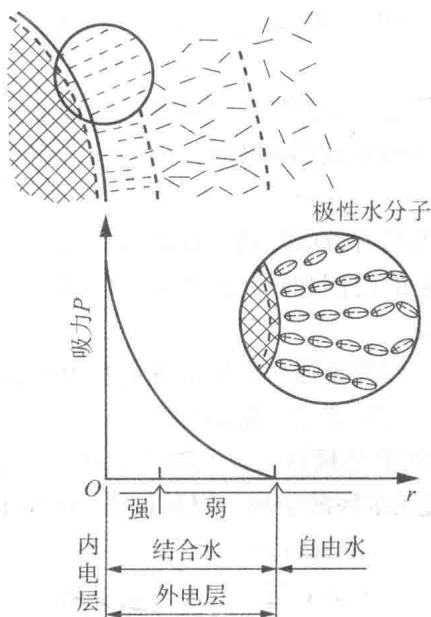


图 1-1-5 固体颗粒和水分子间电分子力的相互作用

2) 强结合水

强结合水是指紧靠土粒表面的结合水。其特征是:没有溶解盐类的能力,不能传递静水压力,只有吸热变成蒸汽时才能移动。这种水极其牢固地结合在土粒表面,其性质接近于固体,密度为 $1.2 \sim 2.4 \text{ g/cm}^3$,冰点为 -78°C ,具有极大的黏滞度、弹性和抗剪强度。如果将干燥的土移至天然湿度的空气中,则土的质量将增加,直到土中吸着的强结合水达到最大吸着度为止。土粒愈细,土的比表面积愈大,则最大吸着度就愈大。砂土的最大吸着度约占土粒质量的 1%,而黏土则可达 17%。黏土中只含有强结合水时,呈固体状态,磨碎后则呈粉末状态。强结合水与结晶水的差别在于,当温度略高于 100°C 时可以蒸发。

3) 弱结合水

弱结合水紧靠于强结合水的外围形成一层结合水膜。这种水膜仍然不能传递静水压力，但水膜较厚的弱结合水能向邻近的较薄的水膜缓慢转移。当土中含有较多的弱结合水时，土则具有一定的可塑性。砂土比表面积较小，几乎不具有可塑性，而黏性土的比表面积较大，其可塑性范围就大。

当两土粒之间被弱结合水所分隔时，由于受到表面引力的作用，因而在土粒之间表现出一定的联结强度。弱结合水愈薄，土粒间距愈小，引力愈高，这时联结性就愈强，土粒就愈不容易发生相对移动；反之，弱结合水愈厚，引力降低，联结性减弱，土粒就易于相对移动。因此，弱结合水膜厚度的变化，就会使土的物理力学性质发生改变。

3. 自由水

弱结合水距离土粒表面愈远，其受到的电分子引力愈小，并逐渐过渡到自由水。自由水的性质和普通水一样，能传递静水压力，冰点为0℃，有溶解能力。

自由水按其移动所受作用力的不同，可以分为重力水和毛细水。

1) 重力水

重力水是存在于地下水位以下的透水土层中的地下水，是在重力或压力差作用下运动的自由水，对土粒有浮力作用。重力水对土中的应力状态、开挖基槽、基坑以及修筑地下构筑物时所应采取的排水、防水措施有重要的影响。

2) 毛细水

分布在土粒内部的相互贯通的孔隙，可以看成是许多形状不一、直径各异、彼此连通的毛细管，如图 1-1-6 所示。按物理学概念，在毛细管管壁，水膜与空气的分界处存在着表面张力 T ，其作用方向与毛细管壁成夹角 α 。由于表面张力的作用，毛细管内的水被提升到自由水面以上高度 h_c 处。分析高度为 h_c 的水柱的静力平衡条件，因为毛细管内水面处即为大气压，若以大气压力为基准，则该处压力 $p_a=0$ ，即

或

$$\pi r^2 h_c \gamma_w = 2 \pi r T \cos \alpha$$
$$h_c = \frac{2 T \cos \alpha}{r \gamma_w} \tag{1-1-8}$$

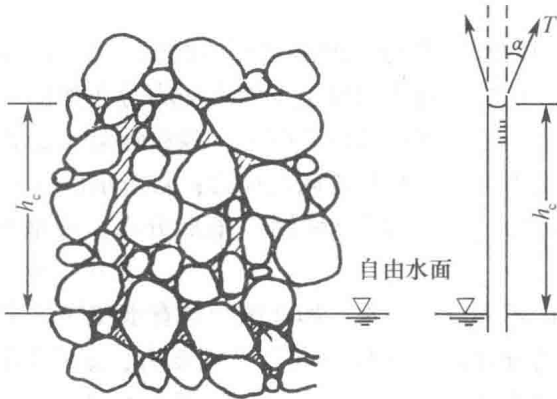


图 1-1-6 土中的毛细水上升高度