

高等职业教育规划教材

# 土质学 与 土力学

张求书 主 编  
姜仁安 高 峰 副主编

Tuzhixue Yu Tulixue



人民交通出版社

China Communications Press

要 容 内

高等职业教育规划教材

# 土质学 与土力学

张求书 主 编  
姜仁安 高 峰 副主编



人民交通出版社

China Communications Press

ISBN 978-7-114-07107-2  
定价: 28.00元  
0001-3000册  
2008年6月第1版  
2008年6月第1次印刷  
印张: 329  
字数: 787千字  
北京人民交通出版社  
地址: 北京人民交通出版社  
电话: 010-67931116  
http://www.ccp.com.cn  
010-67931116

## 内 容 提 要

本书为高等职业技术教育规划教材,按照2007年交通部颁布的新规范和规程进行编写,内容包括土质学和土力学两部分。考虑工程实践需要和高职教材的特点,土质学部分包括土的物理性质及工程分类,土中水的运动规律;土力学部分包括土中应力、土的压缩和地基沉降、土的抗剪强度、地基承载力计算、土压力计算、土坡稳定分析的基本方法、土的动力特性和土工试验的方法。各章前后分别列有学习目标和思考题与习题。

本教材可作为高等职业技术学院公路与城市道路、桥梁工程专业的教学用书,也可供交通中等职业教育师生及各类培训人员学习使用,还可供从事公路监理、施工的工程技术人员参考使用。

### 图书在版编目 ( C I P ) 数据

土质学与土力学/张求书主编. —北京:人民交通出版社,  
2008.6  
ISBN 978-7-114-07107-2

.I .土... II .张... III .①土质学②土力学 IV .P642.1  
TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 053266 号

书 名: 土质学与土力学

著 者: 张求书

责任编辑: 尤晓晔

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.cpress.com.cn>

销售电话: (010)59757975, 85285977

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 13.25

字 数: 329 千

版 次: 2008年6月 第1版

印 次: 2008年6月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-07107-2

印 数: 0001 - 3000 册

定 价: 26.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



## Q IANYAN

我国公路事业发展迅速,对交通职业教育提出了更高的要求。为满足交通高等职业技术教育培养实用型人才对土质学与土力学基本知识的需求,根据2007年12月实施的《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63—2007)和2007年10月实施的《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)编写了本教材。

本书编写中体现以职业能力为本位,以应用为核心,以实用、实效为原则,紧密联系工程实际,及时反映交通行业对工程专业技术人员的要求。内容力求做到:适应当前高等职业学院毕业生的工作需要,加强内容针对性;适应宽口径复合型人才培养的需要,结合高等职业教育特点,围绕交通高等职业技术教育专业培养目标,理论和实践并重,注重学生综合素质的提高。

本书在编写过程中,结合多年教学实践经验,综合考虑目前道路桥梁专业的教学内容体系;为加强高职学生的实际操作能力,在书中第九章编写了土工试验内容;为适应工程实践的需要,加强实用性技能的培养,在土工试验中增加土的承载比试验,同时对本学科中与其他专业课程重复的内容进行适当调整,侧重路桥工程中土质土力学应用性强的内容;在地基沉降计算和地基容许承载力部分按照新规范中规定的计算方法编写教学内容、例题和习题。

本书重点突出,主次分明,深浅适度。为了便于学生学习,每章后附有习题与思考题,以便学生更好地掌握教学内容。考虑到我国国情和地区性差异,并结合各院校具体情况,教师在教学过程中可对本书内容进行适当增删。教学中应积极使用现代化教学手段,配备相应的教学辅件,促进教学效果。

本书由吉林交通职业技术学院张求书任主编,姜仁安、高峰担任副主编。编写人员有:吉林交通职业技术学院张求书编写绪论、第四章、第五章,高峰编写第一章,姜仁安编写第二章,朱春风编写第七章,王东杰编写第八章,郭梅编写第九章第一节至第四节,申建编写第九章第五节至第八节;山西交通职业技术学院何雄刚编写第六章;长春工程学院刘娜编写第三章。

由于编者水平和经验有限,书中难免有谬误和疏漏,敬请读者批评指正。

编者  
2008年3月

绪论	1
第一章 土的物理性质	3
第一节 土的三相组成	4
第二节 土的结构	13
第三节 土的物理性质指标	14
第四节 土的物理状态指标	21
思考题	25
习题	25
第二章 土的工程分类及野外简易鉴别	27
第一节 概述	27
第二节 土的工程分类	28
第三节 土的野外简易鉴别	35
第四节 特殊土的工程地质特性简介	38
思考题	41
习题	41
第三章 土中水的运动规律	42
第一节 土的毛细性	42
第二节 土的渗透性	45
第三节 冻土	52
思考题	54
习题	55
第四章 土中应力	56
第一节 概述	56
第二节 土中自重应力计算	57
第三节 基础底面的压力分布与计算	59
第四节 土中附加应力的计算	62
第五节 建筑物基础下地基应力的计算	74
思考题	76
习题	76
第五章 土的压缩性与沉降计算	78
第一节 概述	78
第二节 土的压缩性	79
第三节 地基沉降量计算	84

第四节	地基沉降与时间的关系 .....	93
思考题	.....	99
习题	.....	100
第六章	土的抗剪强度与地基承载力 .....	101
第一节	概述 .....	101
第二节	土的抗剪强度理论 .....	102
第三节	土的强度测定与抗剪强度指标 .....	105
第四节	地基容许承载力的确定 .....	109
思考题	.....	121
习题	.....	121
第七章	土压力与土坡稳定 .....	122
第一节	概述 .....	122
第二节	静止土压力计算 .....	125
第三节	朗金土压力理论 .....	127
第四节	库伦土压力理论 .....	135
第五节	土坡稳定分析 .....	145
思考题	.....	154
习题	.....	154
第八章	土的动力特性 .....	156
第一节	概述 .....	156
第二节	砂土和粉土的振动液化 .....	156
第三节	土的压实性 .....	160
思考题	.....	166
习题	.....	166
第九章	土工试验 .....	167
第一节	土的含水率试验 .....	167
第二节	土的密度与比重试验 .....	168
第三节	颗粒分析试验 .....	174
第四节	液限和塑限联合测定界限含水率 .....	181
第五节	土的击实试验 .....	184
第六节	土的承载比(CBR)试验 .....	186
第七节	土体固结试验 .....	190
第八节	土的直接剪切试验 .....	191
附录	.....	195
参考文献	.....	205

# 绪 论

## 一、土质学与土力学研究的内容

土质学与土力学将土作为研究的对象,主要研究土的工程性质以及土在荷载作用下的应力、变形和强度问题,为工程设计、施工提供土的工程性质指标和评价方法,是道路桥梁工程专业的技术基础课。

土质学属于地质学科的一个分支,它是从土的成因出发,研究土的物理、化学性质和影响土的性质变化的主要原因,并根据土的主要工程特性进行科学的分类。土力学属于工程力学的一个分支,它是从土的力学性能(或称工程特性,包括土的压缩性、渗透性和抗剪强度)角度,研究土在外荷载作用下引起的力学方面的变化规律,讨论地基的承载力、基础的沉降量和作用在建筑物上的土压力等工程实际问题。土质学和土力学是关系非常密切的学科,在发展中相互渗透和结合,以解决复杂的工程问题。

由于土的非均质性,各向异性因地而异,所以本课程具有综合性、经验性和地区性的特点。研究中不得不通过建立多种力学模型,并借助大量土工试验来获取对工程实践有用的计算参数或经验公式,因此,土质学与土力学又是一门实践性很强的学科。

## 二、研究土质学与土力学的意义和方法

建造各类建筑几乎都涉及土质学与土力学的课题,土无论是作为土工建筑物本身的构筑材料,还是作为支承建筑物荷载的地基或作为建筑物周围的建筑介质,都具有十分重要的作用。土质学与土力学是土建工程、地质工程、环境工程、路桥工程、港口工程的基础课程之一,是解决工程问题的有力工具。

在道路工程中,路基一般是用土填筑而成。土作为构筑材料,为了满足行车的要求,保证路基的强度及稳定性,必须得到充分的压实。因此需要研究土的压实性,包括土的压实机理、压实方法和压实指标。另外,自然环境的变化将影响路基的稳定性。如我国北方地区的道路,由于温度的强烈变化常常发生冻胀及翻浆现象;而南方地区的道路,由于雨水的侵袭,常常发生坍塌和滑坡破坏。因此需要研究土的冻胀机理,进行边坡的稳定分析,并制订出防治措施。路基是承受车辆荷载重复作用的结构物,因此需要研究土在重复荷载作用下的变形特性。还有作用于路基挡墙上的土压力,需要计算出符合实际的值,从而保证挡土墙的稳定。

在桥梁工程中,土作为支承建筑物荷载的地基具有非常重要的地位。例如我国苏州的虎丘塔和意大利的比萨斜塔,都是因为基础的不均匀沉降造成塔身的严重倾斜,危及了塔的安全。因此需要计算出不同时间的基础沉降量,还需确定地基容许承载力,特别是对于超静定结构的桥梁更为重要。另外,桥台台背后的土压力问题等,也需要应用土力学的方法进行计算。

在学习本课程时,应注意结合理论学习培养进行各种物理力学试验的技能,通过试验深化

理论学习,理解和掌握确定计算参数的方法。另外,在学习过程中应注意在分析例题的基础上进行一定量的练习,了解相关的工程地质知识、建筑结构和施工知识及其他课程与本课程相关的知识。本课程各章有相对独立性,但整体课程内容的关联性和综合性很强。学习中要突出重点,兼顾全面。要做到融会贯通,学会由此及彼、由表及里的学习方法,培养抓住问题实质从而解决实际问题的能力。

### 三、学科发展简介

土质学与土力学是既古老又年轻的应用学科,我国古代劳动人民创造了灿烂的文化,留下了令人叹为观止的工程遗产,如恢弘的宫殿寺院,灵巧的水榭楼台,巍峨的高塔,蜿蜒万里的长城,大运河等。这些工程无不体现出能工巧匠的高超技艺和创新智慧。然而这些还仅局限于工程实践经验,由于受到当时生产力水平的限制,未能形成系统的土力学和工程建设理论。

18世纪兴起了工业革命的欧洲为满足资本主义工业化的发展和市场向外扩张的需要,工业厂房、城市建筑、铁路等大规模的兴建,提出了许多与土力学相关的问题,例如铁路路基问题、建筑物地基承载力问题等。1773年,法国的库伦(Coulomb)发表了著名的砂土抗剪强度公式和土压力的滑楔理论。其后,英国的W. J. M 朗金(Rankine)又从强度理论方面提出能应用于黏性土中的土压力理论。此外,法国的布辛奈斯克(Boussinesq)得出了半无限弹性体在竖向集中力作用下的应力与变形理论。1922年,瑞典的W. 费兰纽斯(Fellenius)为解决铁路塌方问题,提出了土坡稳定分析方法。这些古典的理论和方法的确定影响着后人,为土力学成为独立学科奠定了坚实的理论基础。1925年,K. 太沙基(Terzaghi)归纳了以往的研究成果,提出了一维固结理论,阐述了有效应力原理,发表了第一本《土力学》专著,标志着近代土力学学科的形成。1963年,罗斯科(Roscoe)等人创建发表了著名的剑桥弹塑性模型,标志着人们对土性质的认识和研究进入了一个崭新的阶段。

回顾新中国成立后近60年的历史,围绕着解决工程建设中提出的问题,土力学学科在我国得到了广泛的传播和发展。尤其是改革开放以后,国家大规模的建设促进了本学科的发展。在土力学理论和工程实践方面均取得了令世人瞩目的划时代的进步,为国民经济发展做出贡献。许多大型水利水电工程、核电站工程、绵延万里的高速公路、大型桥梁、万吨级码头、大型厂房、林立的高楼大厦、地下空间开发利用等都呈现了本学科理论和实践的巨大成就。工程建设需要学科理论,学科理论的发展更离不开工程建设。21世纪人类将面对资源和环境这一严酷生存问题的挑战,有各种各样岩土工程问题需要解决,这恰恰是青年学生将来要肩负的任务。



# 第一章

## 土的物理性质

### 学习目标

1. 了解土的粒度、粒组、粒度成分的概念及粒度成分的分析与表示方法；
2. 了解土的物理性质指标和物理状态指标的定义；
3. 能利用绘制土的三相草图,进行指标换算；
4. 能完成土的三大指标的测定和液塑限测定试验。

地壳中的岩石长期暴露地表,经过风化、剥蚀、搬运和沉积,形成固体矿物、水和气体的集合体称为土。所以说土是地壳母岩经强烈风化作用的产物,主要包括岩石碎块(如漂石)、矿物颗粒(如石英砂)和黏土矿物(如高岭石)。

风化作用有物理风化和化学风化两种主要形式,两者经常是同时进行而且相互影响发展的进程。物理风化是在地表或接近地表条件下,岩石在原地发生机械破碎而不改变其化学成分的过程。引起岩石发生物理风化作用的因素主要是岩石释重和温度的变化。此外,岩石裂隙中水的冻结与融化、盐类的结晶与潮解等,也能促使岩石发生物理风化作用。岩石在这些因素的作用下逐渐变成岩石碎块和细小的颗粒,其粒径大小差别很大,但它们的矿物成分仍与母岩相同,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的过程,其中新形成的矿物,也称次生矿物。引起岩石发生化学风化作用的因素主要是水和氧气。化学风化的结果是形成十分细微的土颗粒,最主要是黏土颗粒( $<0.002\text{mm}$ )以及大量的可溶性盐类。微小颗粒的比表面积很大,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——多相性。

在自然界中,土的物理风化和化学风化时刻都在进行,而且相互影响。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,其性质还往往随方向而异。例如,沉积土往往垂直方向的透水性小,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,且随时间在不断变化的材料。这是土的第三个主要特征——自然变异性。

由此可知,要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、土的结构和土的物理状态,并以适当的指标进行表示。

## 第一节 土的三相组成

土是由三相(固、液、气)所组成的体系,如图 1-1 所示。土中固体矿物构成土的骨架,骨架之间贯穿着大量孔隙,孔隙中充填着液体和气体。相系组成之间的变化,将导致土的性质的改变。土的相系之间的质和量的变化是鉴别其工程地质性质的一个重要依据。随着环境的变化,土的三相比例也发生相应的变化,土体三相比例不同,土的状态和工程性质也随之各异。

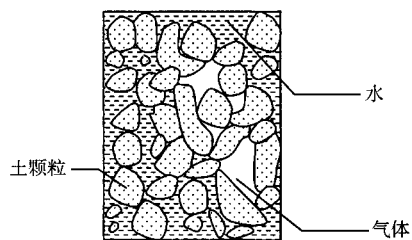


图 1-1 土的三相组成

由固体和气体(液体为零)组成的土为干土。干燥状态的黏土呈干硬状态,干燥状态的砂土呈松散状态。

由固体、液体和气体三相组成的土为湿土。湿黏土多为可塑状态。

由固体和液体(气体为零)组成的土为饱和土。此时,粉细砂或粉土遇强烈地震,可能产生液化,而使工程遭受破坏;黏土地基受建筑荷载作用发生沉降需几十年才能稳定。

由此可见,研究土的各项工程性质,首先需从最基本的、组成土的三相(固相、液相和气相)本身开始研究。

### 一、土中固体颗粒

土中固体颗粒是土的三相组成中的主体,其粒度成分、矿物成分决定着土的工程性质。

#### 1. 粒度成分

土粒组成土体的骨架。本节仅介绍组成土的土粒特征,它是土的工程性质的重要内容之一。

##### 1) 土颗粒的大小

自然界中的土是由大小不同的颗粒组成的,土粒的大小称为粒度。土颗粒大小相差悬殊,有大于几十厘米的漂石,也有小于几微米的胶粒。天然土的粒径一般是连续变化的,为便于研究,工程上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划定的,划分时使粒组界限与粒组性质的变化相适应,并按一定的比例递减关系划分粒组的界限值。每个粒组的区间内,常以其粒径加上、下限给粒组命名,如砾粒、砂粒、粉粒与黏粒等。各组内还可细分为若干亚组。我国《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)中的粒组方案如图 1-2 所示。

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 1-2 粒组划分图

关于划分粒组的粒径界限,不同国家、不同部门有不同规定,但总的来看大同小异。

#### 2) 粒度成分及粒度成分的分析方法

土的粒度成分是指土中各种不同粒组的相对含量(以干土质量的百分比表示)。或者说

土是由不同粒组以不同数量的配合,故又称为“颗粒级配”。例如某种土,经分析,其中含黏粒 55%、粉粒 35%、砂粒 10%,即为该土中各粒组干质量占该土总质量的百分比含量。粒度成分可用来描述土的各种不同粒径土粒的分布特征。

为了准确地测定土的粒度成分,所采用的各种手段统称为粒度成分分析或颗粒分析。其目的在于确定土中各粒组颗粒的相对含量。

目前,我国常用的粒度成分分析方法有:对于粗粒土,即粒径大于 0.075mm 的土,用筛分法直接测定;对于粒径小于 0.075mm 的土,用沉降分析法。当土中粗细粒兼有时,可联合使用上述两种方法。

### (1) 筛分法

将所称取的一定质量干土样放在筛网孔逐级减小的一套标准筛上摇振,然后分层测定各筛中土粒的质量,即为不同粒径粒组的土质量,并计算出每一粒组占土样总质量的百分数,并可计算小于某一筛孔直径土粒的累计质量及累计百分含量。

有关筛分试验的详细内容,请参见第九章第三节有关内容。

### (2) 沉降分析法

沉降分析法就是根据土粒在液体中沉降的速度与粒径的平方成正比的关系由司笃克斯(Stokes)定理确定。土粒越大,在静水中沉降速度越快;反之,土粒越小,沉降速度越慢。设有一个圆球形颗粒在无限大的不可压缩的黏滞性液体中,它在重力作用下产生的稳定沉降速度  $v$  可以用司笃克斯公式计算。

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\eta} d^2 \quad (1-1)$$

式中: $v$ ——球形颗粒在液体中的稳定沉降速度(m/s);

$d$ ——球形颗粒的直径(m);

$\gamma_s$ 、 $\gamma_w$ ——分别为土粒及液体的重度(kN/m<sup>3</sup>);

$\eta$ ——液体的黏度(Pa·s)。

若近似地取  $\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$  (水溶液),  $\eta = 0.00114 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  (15℃时水溶液的黏度),  $\gamma_s = 26 \text{ kN/m}^3$ ,则代入式(1-1)得:

$$d = 0.001126 \sqrt{v} \quad (\text{m}) \quad (1-2)$$

式(1-2)表明:粒径与沉降速度的平方根成正比。应当指出,实际土粒并不是刚性的圆球形颗粒,因此,用司笃克斯公式求得的颗粒直径并不是实际土粒的尺寸,而是与实际土粒有相同沉降速度的理想球体的直径,称为水力直径。

在进行粒度成分分析时,取一定质量的干土  $m_s$  (g) 制成一定体积的悬液,搅拌均匀后,在刚停止搅拌的瞬间,各种粒径的土粒在悬液中是均匀分布的,即各种粒径的土粒在悬液中的浓度(单位体积悬液内含有的土粒重量)在不同深度处都相等。静置一段时间  $t_i$  (s) 后,悬液中粒径为  $d_i$  的颗粒以相应的沉降速度在水中下沉。较粗的颗粒在悬液中沉降较快,较细的颗粒则较慢。如图 1-3 所示,在深度  $L_i$  (m) 处,沉降速度  $v_i = L_i/t_i$  的

颗粒,其直径相当于  $d_i = 1.126 \sqrt{\frac{L_i}{t_i}}$  (mm)。所有大于  $d_i$  的土粒,其沉降速度必然大于  $v_i$ ,因此,在深度  $L_i$  范围内,肯定已没

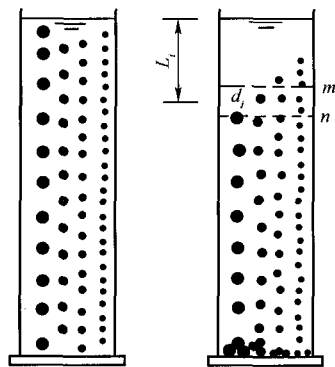


图 1-3 土粒在悬液中的沉降

有大于  $d_i$  的土粒。如在  $L_i$  深度处考虑一个小段  $m \sim n$ , 则  $m \sim n$  段内的悬液中只有小于及等于  $d_i$  的土粒, 而且小于及等于  $d_i$  的浓度与开始均匀悬液中小于及等于  $d_i$  的颗粒的浓度相等。

如果悬液体积为  $1000\text{cm}^3$ , 其中所含小于及等于  $d_i$  的土粒质量为  $m_{si}$  (g), 那么在  $m \sim n$  段的悬浊液的密度为:

$$\rho_i = \frac{1}{1000} \left[ m_{si} + \left( 1000 - \frac{m_{si}}{\rho_{s0}} \right) \rho_{w0} \right] \quad (1-3)$$

式中:  $\rho_i$ ——悬液密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$m_{si}$ ——悬液含小于及等于  $d_i$  的土粒质量;

$\rho_{s0}$ ——土粒密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\rho_{w0}$ ——水的密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

则

$$m_{si} = 1000 \frac{\rho_i - \rho_{w0}}{\rho_{s0} - \rho_{w0}} \rho_{s0} \quad (1-4)$$

悬液含小于及等于  $d_i$  的土粒质量占总质量百分比为:

$$P_i = \frac{m_{si}}{m_s} \times 100\% \quad (1-5)$$

在具体试验时, 只要将悬液搅拌均匀后, 放入比重计 (密度计), 隔不同时间  $t_i$  (min), 读比重计读数, 就能求出相应于不同时间的一系列  $d_i$  和  $P_i$  值。具体参见第九章第三节内容。

另外, 也可按规定时间用移液管把土样吸出 (通常是 10cm 深度处吸出 25mL 左右), 然后烘干, 记录土颗粒质量。具体参见《公路土工试验规程》。

比重计法的优点是操作简便, 不需多次烘干称重; 而移液管法则比较麻烦, 但对于细砂及黏土, 它是可靠的方法。

### 3) 粒度成分的表示方法

常用的粒度成分的表示方法主要有表格法、累计曲线法和三角坐标法。

#### (1) 表格法

以列表形式直接表达各粒组的相对含量, 它用于粒度成分的分类是十分方便的。表格法有两种不同的表示方法: 一种是以累计含量百分比表示的, 见表 1-1 所列; 另一种是以粒组的粒度成分表示的, 见表 1-2 所列。累计百分含量是直接由试验求得的结果, 粒组的粒度成分是由相邻两个粒径的累计百分含量之差求得的。

粒度成分的累计百分含量表示法

表 1-1

粒径 $d_i$ (mm)	粒径小于等于 $d_i$ 的累计百分含量 $P_i$ (%)		
	A 土样	B 土样	C 土样
10		100.0	
5	100.0	75.0	
2	98.8	55.0	
1	92.9	42.7	
0.5	76.5	34.7	
0.25	35.0	28.5	100.0

续上表

粒径 $d_i$ (mm)	粒径小于等于 $d_i$ 的累计百分含量 $P_i$ (%)		
	A 土样	B 土样	C 土样
0.10	9.0	23.6	92.0
0.075		19.0	77.6
0.010		10.9	40.0
0.005		6.7	28.9
0.001		1.5	10.0

粒度成分分析结果

表 1-2

粒组 (mm)	A 土样	B 土样	C 土样
10 ~ 5		25.0	
5 ~ 2	1.1	20.0	
2 ~ 1	6.0	12.3	
1 ~ 0.5	16.4	8.0	
0.5 ~ 0.25	41.5	6.2	
0.250 ~ 0.100	26.0	4.9	8.0
0.100 ~ 0.075	9.0	4.6	14.4
0.075 ~ 0.010		8.1	37.6
0.010 ~ 0.005		4.2	11.1
0.005 ~ 0.001		5.2	18.9
< 0.001		1.5	10.0

### (2) 累计曲线法

累计曲线法是一种图示的方法,通常用半对数坐标纸绘制,横坐标(按对数比例尺)表示粒径  $d_i$ ,纵坐标表示小于某一粒径的土粒的累计百分数  $P_i$  (注意:不是某一粒径的百分含量)。采用半对数坐标,可以把细粒的含量更好地表达清楚,若采用普通坐标,则不可能做到这一点。

图 1-4 是根据表 1-2 提供的资料,在半对数坐标纸上点出各粒组累计百分数及粒径对应的点,然后将各点连成一条平滑曲线,即得该土样的累计曲线。

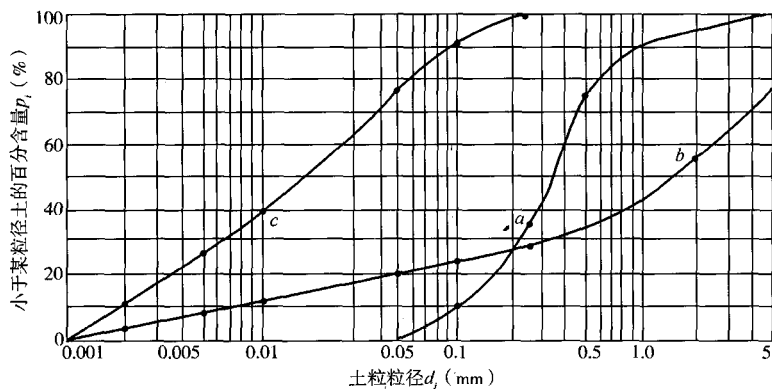


图 1-4 粒度成分累计曲线

累计曲线的用途主要有以下两个方面：

①由累计曲线可以直观地判断土中各粒组的分布情况。曲线  $a$  表示该土绝大部分是由比较均匀的砂粒组成的；曲线  $b$  表示该土是由各种粒组的土粒组成，土粒极不均匀；曲线  $c$  表示该土中砂粒极少，主要是由粉粒和黏粒组成。

②由累计曲线可确定土粒的级配指标。

不均匀系数  $C_u$ ：

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1-6)$$

曲率系数  $C_c$ ：

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \times d_{10}} \quad (1-7)$$

式中， $d_{10}$ 、 $d_{30}$ 、 $d_{60}$  分别相当于累计百分含量为 10%、30%、60% 的粒径。 $d_{10}$  称为有效粒径； $d_{60}$  称为限制粒径； $d_{30}$  称为中间粒径。

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大，颗粒大小越不均匀，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。

曲线系数  $C_c$  表示的是累计曲线的分布范围，反映累计曲线的整体形状，或称反映累计曲线的斜率是否连续。

在一般情况下：①工程上把  $C_u \leq 5$  的土看作是均粒土，属级配不良；当  $C_u > 5$  时，称为不均粒土。②经验证明，当级配连续时， $C_c$  的范围约为 1~3。因此当  $C_c < 1$  或  $C_c > 3$  时，均表示级配线不连续。

从工程上看  $C_u \geq 5$  且  $C_c = 1 \sim 3$  的土，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。

### (3) 三角坐标法

三角坐标法也是一种图示法。可用来表达黏粒、粉粒和砂粒三种粒组的百分含量。它是利用几何上等边三角形中任意一点到三边的垂直距离之和恒等于三角形的高的原理，即  $h_1 + h_2 + h_3 = H$  来表达粒度成分。如取三角形的高  $H$  为 100%， $h_1$  为黏土颗粒的含量， $h_2$  为砂土颗粒的含量， $h_3$  为粉土颗粒的含量，则图 1-5 中  $m$  点即表示土样的粒度成分中黏粒、粉粒及砂粒的百分含量，分别为 23%、47% 和 30%。

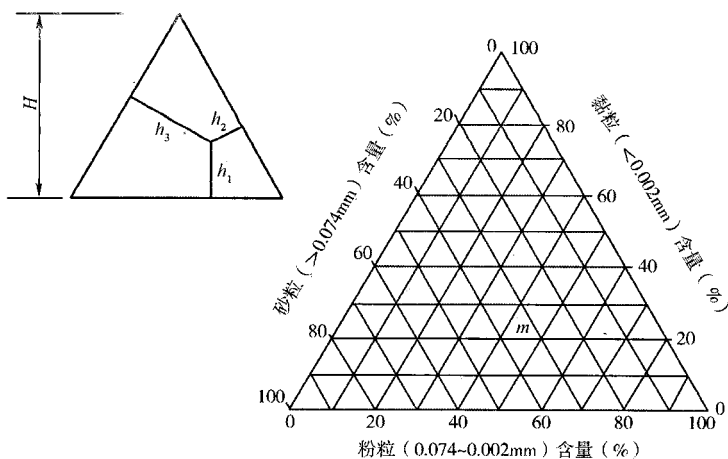


图 1-5 三角坐标表示粒度成分

上述三种方法各有其特点和适用条件。表格法能很清楚地用数量说明土样的各粒组含量,但对于大量土样之间的比较就显得过于冗长,且无直观概念,使用比较困难。累计曲线法能用一条曲线表示一种土的粒度成分,而且可以在一张图上同时表示多种土的粒度成分,能直观地比较其级配状况。三角坐标法能用一点表示一种土的粒度成分,在一张图上能同时表示许多种土的粒度成分,便于进行土料的级配设计。

## 2. 矿物成分

土的矿物成分主要取决于母岩的成分及其所经受的风化作用。不同的矿物成分对土的性质有着不同的影响。

土的固体颗粒物分为无机矿物颗粒和有机质。矿物颗粒的成分主要有两大类:

(1)原生矿物。即岩浆在冷凝过程中形成的矿物,如石英、长石、云母等。由它们构成的粗粒土,例如漂石、卵石、圆砾等,都是岩石的碎屑,其矿物成分与母岩相同。由于其颗粒大,比表面积小(单位体积内颗粒的总表面积),与水的作用能力弱,其抗水性和抗风化作用都强,故工程性质比较稳定。若级配好,则土的密度大,强度高,压缩性低。

(2)次生矿物。即原生矿物经化学风化作用后而形成的新矿物(如黏土矿物)。它们颗粒细小,呈片状,是黏性土固相的主要成分。由于其粒径非常小(小于 $2\mu\text{m}$ ),具有很大的比表面积,与水的作用能力很强,能发生一系列复杂的物理、化学变化。例如一个棱边为 $1\text{cm}$ 的立方体,其体积为 $1\text{cm}^3$ ,总表面积只有 $6\text{cm}^2$ ,比表面积为 $6\text{cm}^2/1\text{cm}^3 = 6\text{cm}^{-1}$ ;若将 $1\text{cm}^3$ 立方体颗粒分割成棱边为 $0.001\text{mm}$ 的许多立方体颗粒,则其总表面积可达 $6 \times 10^4\text{cm}^2$ ,比表面积可达 $6 \times 10^4\text{cm}^{-1}$ 。由此可见,由于土粒大小不同而造成比表面积数值上的巨大变化,必然导致土的性质突变,这种结果是可以想像的。另外,对土的工程性质影响较大的,还有土粒粒间各种相互作用力的影响。而粒间的相互作用力又与矿物颗粒本身的结晶结构特征有关,也就是说,与组成矿物的原子和分子的排列有关,与原子分子间的键力有关。

下面以三种主要黏土矿物为例,介绍其结构特征和基本的工程特性。

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单元体所组叠而成。硅片的基本单元是硅—氧四面体。它是由1个居中的硅离子和4个在角点的氧离子所构成,如图1-6a)所示。由6个硅—氧四面体组成一个硅片,如图1-6b)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1-6c)所示,梯形的底边表示氧原子面。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1-7a)所示。4个八面体组成一个铝片。每个氢氧离子被相邻两个铝离子所共有,如图1-7b)所示。简化图形如图1-7c)所示。黏土矿物依硅片和铝片的组叠形式的不同,可以分为蒙脱石、伊利石和高岭石三种主要类型。

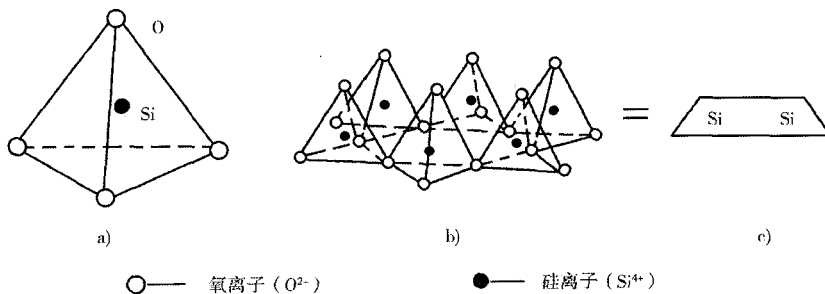


图1-6 硅片结构示意图

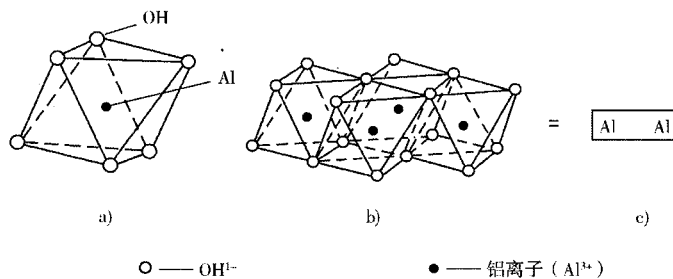


图 1-7 铝片结构示意图

(1) 蒙脱石的结构示意图如图 1-8a) 所示, 可见其结构单元(单位结构层)是由两层硅氧晶片之间夹一层铝氢氧晶片所组成, 称为 2:1 型结构单位层或三层型单位结构层。由于单位结构层之间是  $O^{2-}$  对  $O^{2-}$  的联结, 故其键力很弱, 很容易被具有氢键的水分子楔入而分开。另外, 夹在硅片内的  $Al^{3+}$  常为低价的其他离子(如  $Mg^{2+}$ ) 所替换, 在结构层之间出现多余的负电荷, 它可以吸附其他阳离子(如  $Na^{1+}$ 、 $Ca^{2+}$  等)来补偿。这种阳离子吸引极性水分子成为水化离子, 充填于结构层之间, 从而改变结构层的距离。因此, 当土中蒙脱石含量较大时, 则该土可塑性和压缩性高, 强度低, 渗透性小, 具有较大的吸水膨胀和脱水收缩的特性。

(2) 伊利石的结构示意图如图 1-8b) 所示, 与蒙脱石一样, 同属 2:1 型结构单位层, 层之间同样键力较弱。但是, 伊利石在构成时, 部分硅片中的  $Si^{4+}$  被低价的  $Al^{3+}$ 、 $Fe^{3+}$  等所取代, 因而在相邻结构层间将出现若干正价阳离子  $K^{1+}$  以补偿正电荷的不足。嵌入的  $K^{1+}$  离子, 增强了伊利石层间的联结作用。所以伊利石层间结构优于蒙脱石。其膨胀性和收缩性都较蒙脱石小。

(3) 高岭石结构示意图如图 1-8c) 所示, 它是由一层硅氧晶片和一层铝氢氧晶片组成的单位结构层, 属于 1:1 型结构单位层或两层型。高岭石矿物就是由若干重叠的单位结构层构成的。这种结构层一面露出氢氧基, 另一面则露出氧原子。单位层间的联结是氧原子与氢氧基之间的氢键, 它具有较强的联结力, 因此层间的距离不易改变, 水分子不能进入, 单位结构层活性较小, 使得高岭石的亲水性、膨胀性和收缩性均小于伊利石, 更小于蒙脱石。

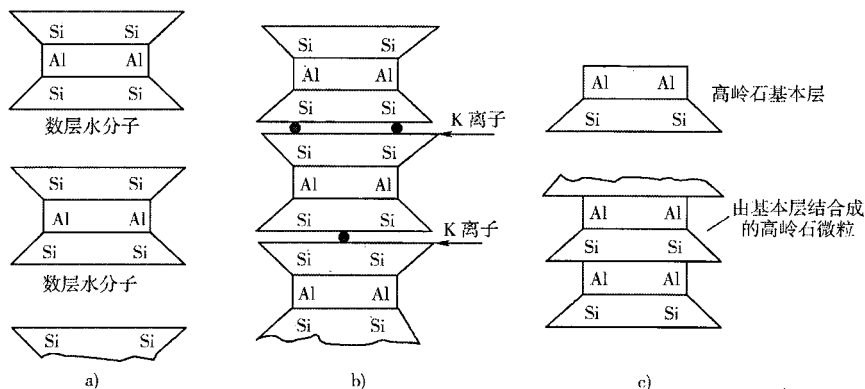


图 1-8 黏土矿物晶格结构图

a) 蒙脱石; b) 伊利石; c) 高岭石



除上述矿物质外,土中还常含有生物形成的腐殖质、泥炭和生物残骸,统称为有机质。其颗粒很细小,具有很大的比表面积,对土的工程地质性质影响也很大。

## 二、土中的水

土中的水是以不同形式和不同状态存在着,它们对土的工程性质的形成,起着不同的作用和影响。

### 1. 结合水

黏土颗粒与水相互作用,在土粒表面通常是带负电荷的,在土粒周围就产生一个电场。水溶液中的阳离子一方面受土粒表面的静电引力作用,另一方面又受到布朗运动(热运动)的扩散力作用。这两个相反趋向作用的结果,使土粒周围的阳离子呈不均匀分布,其分布与地球周围的大气层分布相仿。在土粒表面所吸附的阳离子是水化阳离子,土粒表面除水化阳离子外,还有一些水分子也为土粒所吸附,吸附力极强。土粒表面被强烈吸附的水化阳离子和水分子构成了吸附水层(也称为强结合水或吸着水)。在土粒表面,阳离子浓度最大,随着离土粒表面距离的加大,阳离子浓度逐渐降低,直至达到孔隙中水溶液的正常浓度为止。从土粒表面直至阳离子浓度正常为止,这个范围称为扩散层。当然,在扩散层内阴离子则为土粒表面的负电荷所排斥,随着离土粒表面距离的加大,阴离子浓度逐渐增高,最后阴离子也达水溶液中的正常浓度。土粒表面的负电荷和扩散层合起来称为双电层,如图 1-9 所示。

土粒表面的负电荷为双电层的内层,扩散层为双电层的外层。扩散层是由水分子、水化阳离子和阴离子所组成,形成土粒表面的弱结合水(也称为薄膜水)。

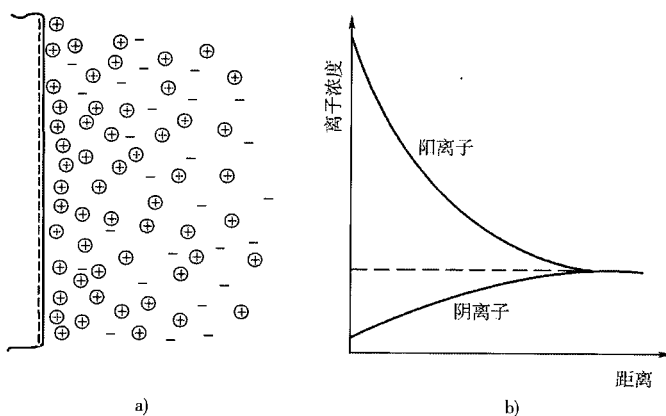


图 1-9 双电层示意图

强结合水紧靠土粒表面,厚度只有几个水分子厚,小于  $0.0031\mu\text{m}$  ( $1\mu\text{m} = 0.001\text{mm}$ ),受到约  $1000\text{MPa}$  (1 万个大气压) 的静电引力,使水分子紧密而整齐地排列在土粒表面不能自由移动。强结合水的性质与普通水不同,其性质接近固体。它的特征是:①没有溶解盐类的能力;②具有很大的黏滞性、弹性和抗剪强度,不能传递静水压力;③只有吸热变成水蒸气时才能移动,  $-78^\circ\text{C}$  低温才冻结成冰。

当黏土只含强结合水时呈固体坚硬状态,将干燥的土移在天然湿度的空气中,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。土粒越细,土的比表面积越大,则最大吸着度就越大。