

普通高等学校岩土工程（本科）规划教材

# 土力学

黄志全 主编

TU LI XUE



黄河水利出版社

普通高等学校岩土工程(本科)规划教材

# 土 力 学

主 编 黄志全  
副主编 毕庆涛 贾景超 王江锋  
杨永香 李 幻

黄河水利出版社

· 郑 州 ·

## 内 容 提 要

本书系统地介绍了土力学的基本概念、原理和计算方法,是高等工科院校土木、水利等相关专业的土力学课程教材。本书的内容是基础工程、地基处理、基坑设计等课程的准备知识。

全书共分10章。首先在绪论部分交代土力学这门学科的主要内容、产生背景和历史,然后分章节依次阐述土的物理性质与工程分类、土的渗透性与渗流问题(如流土、管涌)、土体的应力状态与变形问题(如地基沉降计算)、土的强度规律与强度问题(如挡土墙压力计算、边坡稳定性分析、地基承载力等)。最后,为了拓展教学,介绍了土动力学基础知识、非饱和土力学基础知识。

本书为高校本科生教材,亦可作为土木、水利等相关专业的研究生参考书,以及供从事有关工程勘察、设计、施工的技术人员阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

土力学/黄志全主编. —郑州:黄河水利出版社,  
2011.12

普通高等学校岩土工程(本科)规划教材

ISBN 978-7-5509-0156-8

I. ①土… II. ①黄… III. ①土力学-高等学校-  
教材 IV. ①TU43

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第249543号

策划编辑:王志宽 电话:0371-66024331 E-mail:wangzhikuan83@126.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:15.25

字数:350千字

印数:1—3 100

版次:2011年12月第1版

印次:2011年12月第1次印刷

定价:30.00元

# 普通高等学校岩土工程(本科)规划教材

## 编审委员会

主 任 刘汉东

副主任 王复明 肖昭然 勾攀峰 杨小林

委 员 李广慧 祝彦知 郭院成 乐金朝

黄志全 姜宝良 孙文怀 闫富有

李化敏 姜 彤 孔德志

# 前 言

土力学是岩土工程学科的重要组成部分,用以研究土的应力、变形、强度和稳定性以及与此相关的工程问题。土力学是土木、交通、水利、港口、地质、工程力学类等专业的专业基础课程,甚至也是农业、工程管理类等有关专业的专业基础课程,它在学生的专业课程体系里,占据着重要的位置,是学生学习后续专业课程的重要基础。

本教材编写时,遵循如下几个原则:

(1)知识的逻辑结构性。土力学头绪繁多,内容庞杂,有150多个概念、200多个公式。从教学反馈来看,初学者普遍反映土力学内容分散,感觉杂乱无章,抓不住重点,不太好学。所以教材编写时,将本着脉络清晰的原则,力求将核心知识点按照学生易懂、易理解的逻辑方式给出,让学生能够明显感觉到土力学的知识结构。

(2)相关规范的最新性。土力学是一门应用性很强的学科,它对工程实践的价值体现在各类工程标准与规范上。本教材编写时,将结合最新规范来组织内容,例如《土的分类标准》(GBJ 145—90)、《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)、《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)等。

(3)研究成果的前沿性。作为拓展知识,教材编写时,将介绍土力学研究的最新成果:非饱和土力学基础。虽然作为初等土力学,让它完成高等土力学的内容,有点勉为其难,然而让学生看到土力学的全貌,有利于拓展学生的思路。

教材内容共分10章。首先在绪论部分交代土力学这门学科的主要内容、产生背景和历史,然后分章节依次阐述土的物理性质和工程分类,土的渗透性与渗流稳定问题(如流土、管涌)、土体的应力状态与变形问题(如地基沉降计算)、土的强度规律与强度问题(如挡土墙压力计算、边坡稳定性分析、地基承载力等)。最后,为了拓展教学,介绍了土动力学基础知识、非饱和土力学基础知识。

本书由华北水利水电学院黄志全教授担任主编,参加编写的人员有毕庆涛博士、贾景超博士、王江锋博士、杨永香博士、李幻博士。在教材的编写过程中,得到了河南工业大学、河南理工大学、华北水利水电学院同仁们的大力帮助和支持。

教材的编写借鉴了前人的工作,参考了同类优秀教材的内容,谨呈感谢!限于作者水平,书中定有欠妥甚至错误之处,敬请专家、学者、读者不吝指出!

编 者

2011年6月

# 目 录

## 前 言

|           |     |
|-----------|-----|
| 绪 论 ..... | (1) |
|-----------|-----|

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 第一章 土的物理性质与工程分类 ..... | (3) |
|-----------------------|-----|

|                |     |
|----------------|-----|
| 第一节 土的形成 ..... | (3) |
|----------------|-----|

|                  |     |
|------------------|-----|
| 第二节 土的三相组成 ..... | (4) |
|------------------|-----|

|                |      |
|----------------|------|
| 第三节 土的结构 ..... | (13) |
|----------------|------|

|                    |      |
|--------------------|------|
| 第四节 土的物理性质指标 ..... | (15) |
|--------------------|------|

|                    |      |
|--------------------|------|
| 第五节 土的物理状态指标 ..... | (22) |
|--------------------|------|

|                 |      |
|-----------------|------|
| 第六节 土的压实性 ..... | (26) |
|-----------------|------|

|                  |      |
|------------------|------|
| 第七节 土的工程分类 ..... | (28) |
|------------------|------|

|           |      |
|-----------|------|
| 习 题 ..... | (36) |
|-----------|------|

|                      |      |
|----------------------|------|
| 第二章 土的渗透性与渗流问题 ..... | (38) |
|----------------------|------|

|               |      |
|---------------|------|
| 第一节 概 述 ..... | (38) |
|---------------|------|

|                  |      |
|------------------|------|
| 第二节 土的渗流理论 ..... | (39) |
|------------------|------|

|                   |      |
|-------------------|------|
| 第三节 渗透系数的测定 ..... | (43) |
|-------------------|------|

|                   |      |
|-------------------|------|
| 第四节 二维渗流与流网 ..... | (48) |
|-------------------|------|

|                    |      |
|--------------------|------|
| 第五节 渗透力与渗透变形 ..... | (50) |
|--------------------|------|

|                  |      |
|------------------|------|
| 第六节 有效应力原理 ..... | (55) |
|------------------|------|

|           |      |
|-----------|------|
| 习 题 ..... | (58) |
|-----------|------|

|                    |      |
|--------------------|------|
| 第三章 土体的应力与变形 ..... | (60) |
|--------------------|------|

|               |      |
|---------------|------|
| 第一节 概 述 ..... | (60) |
|---------------|------|

|                |      |
|----------------|------|
| 第二节 自重应力 ..... | (62) |
|----------------|------|

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 第三节 基底压力与基底附加应力 ..... | (64) |
|-----------------------|------|

|                      |      |
|----------------------|------|
| 第四节 地基中的附加应力计算 ..... | (68) |
|----------------------|------|

|           |      |
|-----------|------|
| 习 题 ..... | (84) |
|-----------|------|

|                   |      |
|-------------------|------|
| 第四章 土的压缩与固结 ..... | (86) |
|-------------------|------|

|               |      |
|---------------|------|
| 第一节 概 述 ..... | (86) |
|---------------|------|

|                  |      |
|------------------|------|
| 第二节 土的压缩特性 ..... | (86) |
|------------------|------|

|                     |      |
|---------------------|------|
| 第三节 地基最终沉降量计算 ..... | (90) |
|---------------------|------|

|                        |      |
|------------------------|------|
| 第四节 应力历史对地基沉降的影响 ..... | (97) |
|------------------------|------|

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| 第五节 地基沉降量与时间的关系——土的单向固结理论 ..... | (103) |
|---------------------------------|-------|

|           |       |
|-----------|-------|
| 习 题 ..... | (108) |
|-----------|-------|

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| <b>第五章 土的抗剪强度</b>           | (110) |
| 第一节 概 述                     | (110) |
| 第二节 土的抗剪强度理论                | (110) |
| 第三节 抗剪强度试验方法                | (114) |
| 第四节 砂性土的强度特性                | (119) |
| 第五节 饱和黏土的抗剪强度性状             | (121) |
| 第六节 土的孔隙压力系数                | (128) |
| 第七节 土的应力路径                  | (130) |
| 思考题                         | (132) |
| 习 题                         | (132) |
| <b>第六章 土压力理论</b>            | (134) |
| 第一节 概 述                     | (134) |
| 第二节 静止土压力                   | (136) |
| 第三节 朗肯土压力理论                 | (138) |
| 第四节 库仑土压力理论                 | (146) |
| 第五节 土压力问题的讨论                | (152) |
| 习 题                         | (156) |
| <b>第七章 土坡稳定分析</b>           | (158) |
| 第一节 概 述                     | (158) |
| 第二节 无黏性土土坡稳定分析              | (158) |
| 第三节 黏性土边坡稳定分析基本方法           | (161) |
| 第四节 瑞典条分法                   | (164) |
| 第五节 简化毕肖普条分法                | (170) |
| 第六节 非圆弧滑动面土坡稳定分析            | (172) |
| 第七节 讨 论                     | (176) |
| 习 题                         | (179) |
| <b>第八章 地基承载力</b>            | (180) |
| 第一节 概 述                     | (180) |
| 第二节 临塑荷载和临界荷载               | (184) |
| 第三节 极限承载力计算                 | (187) |
| 第四节 地基承载力的应用——浅基础设计         | (194) |
| 思考题                         | (196) |
| 习 题                         | (197) |
| <b>第九章 土的动力特性</b>           | (198) |
| 第一节 概 述                     | (198) |
| 第二节 动荷载下土的应力应变关系和阻尼特性及其测定方法 | (201) |
| 第三节 土的动强度                   | (208) |
| 第四节 土的振动液化                  | (216) |

---

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 思考题 .....                    | (220) |
| 第十章 非饱和土土力学简介 .....          | (221) |
| 第一节 非饱和土简介 .....             | (221) |
| 第二节 基质吸力和毛细作用 .....          | (221) |
| 第三节 非饱和土的应力状态变量及有效应力理论 ..... | (223) |
| 第四节 基质吸力的量测方法 .....          | (226) |
| 第五节 土—水特征曲线 .....            | (228) |
| 参考文献 .....                   | (233) |



# 绪 论

## 一、土力学的内容

土力学是研究土的物理性质、渗透性质以及在荷载作用下的变形和强度规律,从而解决工程中土体渗流、变形和稳定问题的一门学科。土力学的研究对象是土,而土是自然、历史的产物,土体形成年代、形成环境和形成条件等均对其物理、力学性质有着较大的影响,正是这一特点决定了土力学明显区别于其他力学分支。材料力学、结构力学和弹性力学均有严密的理论体系,对研究对象作统一的假设,通过演绎推理得出结论。而土力学主要依靠试验研究,与具体工程结合紧密,没有统一的力学体系,对不同问题的土作不同的假设,并采用不同的研究方法。

人类从事的工程建设几乎都是在地球表面,所以会涉及土力学课题。地基土破坏引起的建筑物倒塌,挡土墙滑移与倾覆,工程边坡的失稳,地质灾害的滑坡与泥石流,地震液化失稳等属于土体强度不足导致的稳定问题;建筑物的倾斜开裂,路基沉降与桥头跳车,土石坝的变形,湿陷、膨胀、冻融等引起的工程问题属于土体变形问题;土是散碎颗粒的堆积体,颗粒孔隙间充满了流体,在不等势的情况下,将会发生流体的运动。挡水、输水与储水土工构造物的渗漏、渗流造成的渗透变形会成为堤坝溃决、基坑倒塌、隧道矿井失事的主要原因,等等,都属于土体渗流问题。

土力学中解决上述土体工程问题的理论是三个重要定律,它们组成了土力学的核心内容。强度理论是揭示土的破坏机理的理论,解决稳定问题。莫尔-库仑强度理论描述了剪切面上剪应力与该面上正应力之间的关系,表现了土作为散体材料的摩擦强度的基本特点,是一个简明实用的强度理论。固结理论给出了土的变形与时间的关系,其中太沙基单向固结理论已被广泛应用于工程中的工后沉降变形计算。另外,作为固结理论中的重要概念,有效应力原理被看做是土力学学科的奠基石。达西定律是关于土中水渗流的理论,它揭示了单位面积渗流量与水力坡降成正比,是解决土工问题和渗流分析的基础理论。

## 二、土力学的发展简史

土力学是一门既古老又年青的工程技术学科。远在 18 世纪,个别学者就已经开始探索与土力学相关的问题,例如铁路路基问题。进入 21 世纪,土力学理论取得了众多进展,但依然不能满足工程实践的需要。

在 18 世纪的欧洲,为了满足工业化的需要,工业厂房、城市建筑、公路铁路等大规模的建设,提出了许多与土力学相关的问题,这为土力学的萌芽提供了良好的环境,一批工程师开始探索土体的力学问题。根据历史资料,最早发表研究成果的是法国学者库仑(Coulomb),他于 1773 年发表了砂土剪切强度公式,接着又提出了计算挡土墙土压力的

理论。

进入 19 世纪,土力学的研究依然在进行,但发展缓慢,而且多数是研究土体的破坏问题。有代表性的成果是 1857 年英国学者朗肯(Rankine)依据强度理论,创立了计算挡土墙土压力的又一理论。

20 世纪初,随着高层建筑的大量涌现,沉降变形问题开始突出,同时与土力学紧密相关的学科——弹性力学的发展为沉降问题的研究提供了必要的手段。1923 年奥地利学者太沙基(Terzaghi)提出了土体一维固结理论,阐述了有效应力原理,并于 1925 年发表了第一本土力学专著,标志着土力学作为一门独立的学科已经创立。此后,变形问题的研究越来越成为重要的内容,众多研究成果有力地推动了土力学学科的发展。

土力学发展至 20 世纪 60 年代,进入了另一个崭新的时期。1963 年,英国学者罗斯科(Roscoe)等根据大量试验成果创建了著名的剑桥弹塑性模型(Cam-Clay Model),标志着人们对土性质的认识和研究突破了刚塑性理论模型的框架。

我国对土力学的研究始于 1945 年黄文熙在中央水利实验处创立的第一个土工实验室,但是,大规模的研究则是在中华人民共和国成立以后,随着一批国外留学人员回国和 50 年代初大批青年学者参加工作以后才开始的。60 余年来,各方面都取得了长足的进展,取得了许多重要成果,为土力学的发展和完善作出了积极的贡献。

# 第一章 土的物理性质与工程分类

## 第一节 土的形成

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。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,故称为第四纪沉积物。

岩石的风化一般可分为物理风化和化学风化两个过程。

物理风化是指岩石经受风、霜、雨、雪的侵蚀,或受波浪的冲击、地震等引起各种力的作用,温度的变化、冻胀等因素使整体岩石产生裂隙、崩解,或者在运动中因碰撞和摩擦而碎裂成岩块、岩屑的过程。于是岩体逐渐变成碎块和细小的颗粒,但它们的矿物成分仍与原来的母岩相同,称为原生矿物。

化学风化是指岩体(或岩块、岩屑)与氧气、二氧化碳等各种气体、水和各种水溶液等物质相接触,经氧化、碳化和水化作用,使这些岩石或岩屑逐渐产生化学变化,分解为极细颗粒的过程。这些极细颗粒是新形成的矿物,也称次生矿物。在自然界,物理和化学这两种风化作用是同时或交替进行的,所以任何一种天然土既是物理风化的产物,又是化学风化的产物。

土由于搬运和堆积方式的不同,又可分为残积土和运积土两大类。

残积土是指岩石经风化后仍留在原地未经搬运的堆积物。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:

冲积土——由江、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。

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。

冰积土——由冰川或冰水挟带搬运所形成的沉积物,颗粒粗细变化较大,土质不均匀。

沼泽土——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的存在,称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。

## 第二节 土的三相组成

如前所述,土是由固体颗粒和颗粒之间的孔隙所组成的,而孔隙中通常又存在着水和空气两种物质,因此土是由固体颗粒、水和空气三部分所组成的三相体系。其中土的颗粒称为固相,土体孔隙中的水称为液相,而孔隙中的空气则称为气相。固相中除矿物颗粒外,有时还含有胶结物和有机质。这一部分构成土的骨架,称为土骨架。当土骨架的孔隙全部被水占满时,这种土称为饱和土;如果孔隙一部分被水占据,另一部分被气体占据,称为非饱和土;当骨架的孔隙仅含空气时,就称为干土。

土的三种组成部分本身的性质以及它们之间的比例关系和相互作用决定土的物理力学性质。因此,研究土的性质,首先必须研究土的三相组成。

### 一、土的固相

固体颗粒构成土的骨架,其大小和形状、矿物成分及组成情况是决定土的物理力学性质的重要因素。

#### (一) 成土矿物

形成土粒的矿物成分各不相同,主要取决于成土母岩的矿物成分及其风化作用。成土矿物分为两大类:一类为原生矿物,常见的有石英、长石、云母、角闪石与辉石等。它是由岩石经物理风化生成的,其颗粒一般较粗,多成浑圆形、块状或板状,吸附水的能力弱,性质比较稳定,无塑性。另一类为次生矿物,它是由原生矿物经化学风化作用而形成的矿物,其成分与母岩完全不同。次生矿物主要是黏土矿物,常见的黏土矿物有高岭石、伊利石和蒙脱石三类。由于次生矿物构成的土粒极细,且多呈片状或针状,其性质较不稳定,有较强的吸附水能力,含水率的变化易引起体积胀缩,具塑性。

#### (二) 黏土矿物

##### 1. 黏土矿物的晶体结构

黏土矿物种类繁多,其结构可分为晶体和非晶体两大类,以晶体矿物为主,非晶体矿物很少。所谓晶体,是指原子、离子在空间有规律的排列,不同的几何排列形式称为晶体结构,组成晶体的最小单元称为晶胞或晶层。

黏土矿物通常是一种复合的铝-硅酸盐晶体,颗粒呈片状,其矿物颗粒由晶胞组叠而成。黏土矿物晶胞主要是由硅-氧四面体和铝-氢氧八面体两种基本结构单元组成的。硅-氧四面体是由一个居中的硅原子和四个在角点的氧原子所构成的,如图 1-1(a) 所示。四面体底面的每个氧原子为两个相邻单元内的硅原子所共有,因此六个硅-氧四面体组成了底面具有六边形的硅片,如图 1-1(b) 所示,常用一个梯形符号表示硅片,如图 1-1(c) 所示。铝-氢氧八面体是由一个居中的铝原子和六个在角点的氢氧离子组成的,如图 1-2(a) 所示。当每个氢氧离子为两个相邻单元内的铝原子所共有时,四个八面体组成一个铝片,

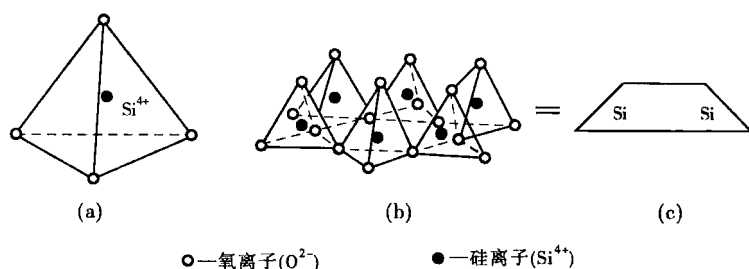


图 1-1 硅片的结构

如图 1-2(b)所示,常用一个矩形符号表示铝片,如图 1-2(c)所示。

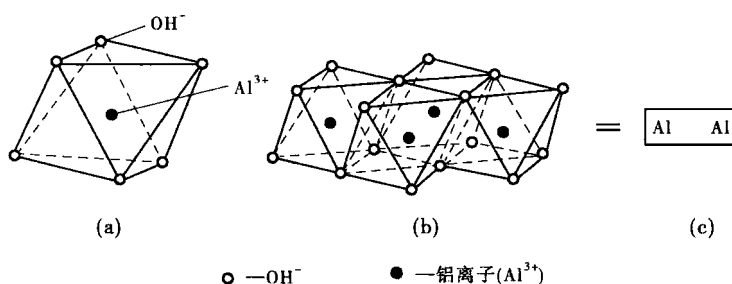


图 1-2 铝片的结构

黏土矿物根据硅片和铝片的组叠形式的不同,可以分为高岭石、蒙脱石和伊利石三种类型。

**高岭石** 其晶胞或晶层是由一个硅片和一个铝片上下组叠而成的,如图 1-3(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  $OH^-$  相互联结,称为氢键联结。氢键的联结力较强,致使晶层不能自由活动,水难以进入晶层之间,是一种遇水较为稳定的黏土矿物。因为晶层之间的联结力较强,能组叠上百个晶层,成为一个颗粒。颗粒大小为  $0.3 \sim 3.0 \mu m$ ,厚为  $0.03 \sim 1.0 \mu m$ 。所以,高岭石的主要特征是颗粒较粗,亲水能力差。

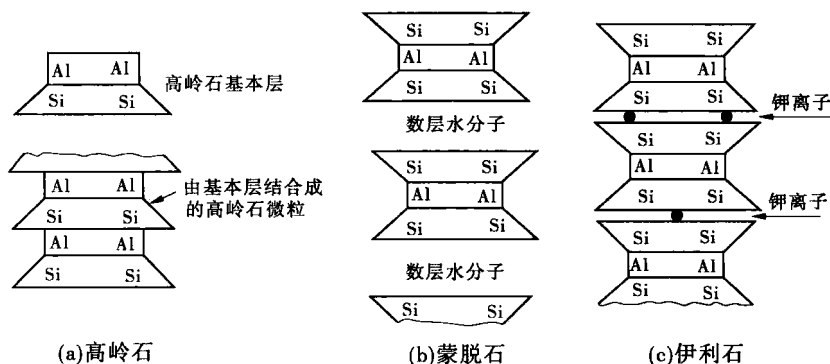


图 1-3 黏土矿物的晶格构造

**蒙脱石** 其晶胞是由两个硅片中间夹一个铝片所构成的,如图 1-3(b)所示,称为 2:1 的三层结构。晶胞之间是  $O^{2-}$  对  $O^{2-}$  的联结,联结力很弱,水很容易进入晶胞之间。每一

颗粒能组叠的晶胞数较少,一般仅几个到十几个。颗粒大小为  $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ , 厚为  $0.001 \sim 0.01 \mu\text{m}$ 。因此,蒙脱石的主要特征是颗粒细微,具有显著的吸水膨胀、失水收缩的特性,或者说亲水能力强。

**伊利石** 它与蒙脱石相似,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 1-3(c)所示。联结强度弱于高岭石而高于蒙脱石,其特征也介于两者之间。

三种黏土矿物的特性见表 1-1。

表 1-1 三种黏土矿物的特性

| 特征指标                          | 矿物                           |            |                               |
|-------------------------------|------------------------------|------------|-------------------------------|
|                               | 高岭石                          | 伊利石        | 蒙脱石                           |
| 长和宽( $\mu\text{m}$ )          | 0.3 ~ 3.0                    | 0.1 ~ 2.0  | 0.1 ~ 1.0                     |
| 厚( $\mu\text{m}$ )            | 0.03 ~ 1.0                   | 0.01 ~ 0.2 | 0.001 ~ 0.01                  |
| 比表面积( $\text{m}^2/\text{g}$ ) | 10 ~ 20                      | 80 ~ 100   | 800                           |
| 液限(%)                         | 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

莫斯科大学的列依斯教授于 1807 年通过试验证明黏土颗粒是带电的。他把潮湿的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。向桶中注入相同深度的清水,并将两个电极分别放入两个桶内的清水中,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 1-4 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,黏土颗粒带有负电荷主要是由同晶置换引起的。同晶置换是指黏土矿物晶体结构保持不变,但内部的高价阳离子被低价阳离子所替换。由于前者的电价比后者的高,置换后,相当于晶体表面带有负电荷。

## 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 1-5 所示。黏土矿物颗粒细微,多呈片状或针状,如图 1-6 所示。土的颗粒愈细,形状愈扁平,则表面积与质量之比值愈大。单位质量土颗粒所拥有的表面积称为比表面积  $A_s$ ,可用下式表示:

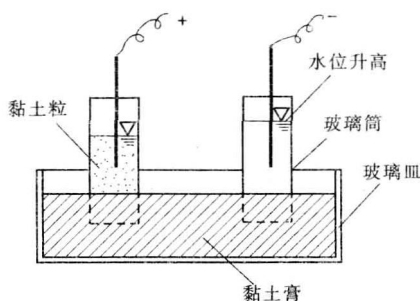


图 1-4 黏土膏的电渗、电泳试验

$$A_s = \frac{\sum A}{m} \tag{1-1}$$

式中  $\sum A$ ——全部土颗粒的表面积之和,  $m^2$ ;

$m$ ——土颗粒的质量,  $g$ 。

高岭石的比表面积为  $10 \sim 20 \text{ m}^2/g$ , 伊利石为  $80 \sim 100 \text{ m}^2/g$ , 而蒙脱石高达  $800 \text{ m}^2/g$ 。

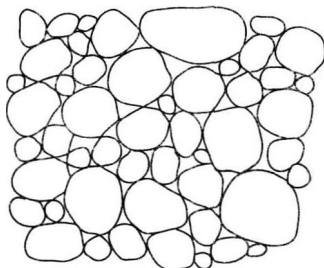


图 1-5 粗粒土的形状

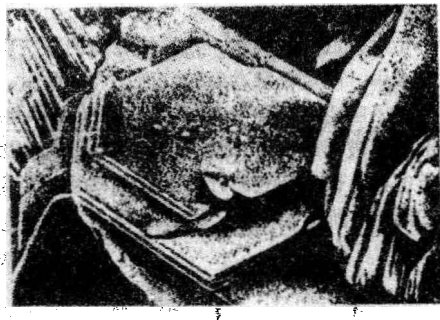


图 1-6 黏土颗粒的形状

由于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。

**(三) 土粒的大小和土的级配**

随着颗粒大小的不同, 土可以具有很不相同的性质。例如, 粗颗粒的砾石具有很大的透水性, 完全没有黏性和可塑性; 而细颗粒的黏土则透水性很小, 黏性和可塑性较大。通常, 粒径越大, 承载力越高, 粒径越小, 土颗粒间的孔隙比就越大, 越容易产生沉降和变形, 承载力也就越小。颗粒的大小通常以粒径表示。工程上按粒径大小分组, 称为粒组, 即某一级粒径的变化范围。广泛采用的粒组有漂石粒、卵石粒、砾粒、砂粒、粉粒、黏粒和胶粒。表 1-2 为我国水利部《土工试验规程》(SL 237—1999) 中规定的粒组划分情况。

实际上, 土常是各种大小不同颗粒的混合物, 较笼统地说, 以砾石和砂粒为主要组成的土称为粗粒土, 也称为无黏性土。以粉粒、黏粒和胶粒为主的土, 称为细粒土, 也称为黏性土。土的具体的工程分类见本章第七节。很显然, 土的性质取决于土中不同粒组的相

对含量。土中各粒组的相对含量就称为土的粒径级配。土的级配的好坏将直接影响到土的工程性质。级配良好的土,压实时能达到较高的密实度,因而该土的透水性小,强度高,压缩性低;反之,级配不良的土,其压实密度小,强度低,透水性强而渗透稳定性差。为了解各粒组的相对含量,必须先将各粒组分离开,再分别称重。这就是粒径级配的分析方法。

表 1-2 水利部标准规定的粒组划分

| 粒组统称 | 粒组划分    |    | 粒径( $d$ )的范围(mm)       |
|------|---------|----|------------------------|
| 巨粒组  | 漂石(块石)组 |    | $d > 200$              |
|      | 卵石(碎石)组 |    | $200 \geq d > 60$      |
| 粗粒组  | 砾粒(角砾)  | 粗砾 | $60 \geq d > 20$       |
|      |         | 中砾 | $20 \geq d > 5$        |
|      |         | 细砾 | $5 \geq d > 2$         |
|      | 砂粒      | 粗砂 | $2 \geq d > 0.5$       |
|      |         | 中砂 | $0.5 \geq d > 0.25$    |
|      |         | 细砂 | $0.25 \geq d > 0.075$  |
| 细粒组  | 粉粒      |    | $0.075 \geq d > 0.005$ |
|      | 黏粒      |    | $d \leq 0.005$         |

### 1. 粒径级配的分析方法

工程中,实用的粒径级配分析方法有筛分法和比重计法两种。

筛分法适用于粒径大于 0.075 mm 的土。它是利用一套孔径由大到小的筛子,将事先称过质量的烘干土样过筛,称留在各筛上的土重,然后计算这些土粒质量占总土粒质量的百分数。

比重计法用于分析粒径小于 0.075 mm 的土。根据斯托克斯(Stokes)定理,球状的细颗粒在水中的下沉速度与颗粒直径的平方成正比。因此,可以利用粗颗粒下沉速度快、细颗粒下沉速度慢的原理,把颗粒按下沉速度进行粗细分组。基于这种原理,实验室常用比重计进行颗粒分析,称为比重计法。该法的具体操作方法,可参阅土工试验操作规程,本章不予详述。

【例题 1-1】 从干砂样中称取质量为 1 000 g 的试样,放入如图 1-7 所示的标准筛中,经充分摇振后,称得各级筛上留存的上粒质量,见表 1-3 中的第二行,试求土内各粒组的土粒含量。

解:留在孔径 2.0 mm 筛上的土粒质量为 100 g,则小于该孔径的土粒含量为  $900/1\,000 = 90\%$ 。同样可算得小于其他孔径的土粒含量,见表 1-3 中的第三行。

由小于 2.0 mm 和 1.0 mm 孔径的土粒含量 90% 和 80% 可得到从 2.0 mm 到 1.0 mm 粒组的土粒含量为 10%。同样可算得其他粒组的土粒含量,见表 1-3 中的第四行。

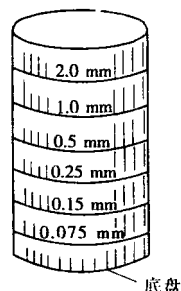


图 1-7 筛子示意图



表 1-3 筛分试验结果

| 筛孔孔径 (mm)         | 2.0 | 1.0 | 0.5 | 0.25 | 0.15 | 0.075 | 底盘  |
|-------------------|-----|-----|-----|------|------|-------|-----|
| 各级筛上的土粒质量 (g)     | 100 | 100 | 250 | 300  | 100  | 50    | 100 |
| 小于各级筛孔孔径的土粒含量 (%) | 90  | 80  | 55  | 25   | 15   | 10    |     |
| 各粒组的土粒含量 (%)      | 10  | 10  | 25  | 30   | 10   | 5     | 10  |

2. 土的级配曲线

根据颗粒大小分析试验,可以得到以下两种表示形式的曲线。

(1) 粒径级配曲线:以土粒粒径为横坐标(对数比例尺),以小于某粒径土质量占试样总质量的百分数为纵坐标绘制而成。由于土中的粒径相差悬殊,因此横坐标用对数坐标表示,以突出显示细小颗粒粒径。

(2) 粒组频率曲线:以各粒组的平均粒径为横坐标(对数比例尺),以各粒组的土粒含量为纵坐标绘得。

图 1-8 为例题 1-1 筛分试验成果图。图中实线为粒径级配曲线,虚线为粒组频率曲线。

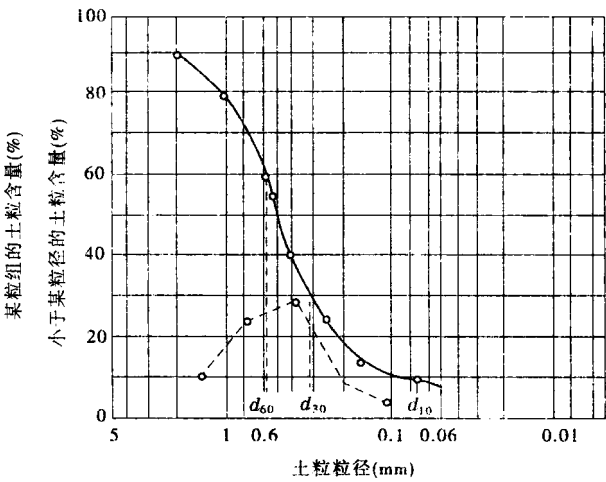


图 1-8 颗粒分析试验曲线

必须指出,实际土粒的形状是各式各样的,很少呈球形,这里所说的土粒粒径是名义粒径,在筛分法中是以筛孔孔径代表的,而在密度计法中是以与实际土粒在水中沉降速度相同的同样物质的球的直径代表的。

3. 粒径级配曲线的应用

土的粒径级配曲线是土工上最常用的曲线,从这曲线可以直接了解土的粗细、粒径分布的均匀程度,以及级配的优劣。为了判别土的颗粒级配是否良好,常用不均匀系数  $C_u$  和曲率系数  $C_c$  两个指标来分别描述级配曲线的坡度与形状。

定义土的不均匀系数  $C_u$  为