

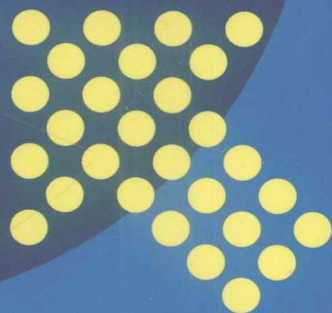
21世纪高等学校规划教材



TULIXUE

土力学

仲崇梅 刘丽华 主 编
刘 娜 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

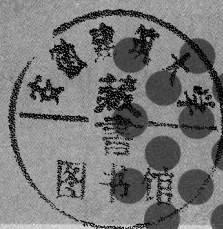
21世纪高等学校规划教材



TULIXUE

土力学

主 编 仲崇梅 刘丽华
副主编 刘 娜
编 写 冷毅飞
主 审 张 利



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材,是根据普通高等学校土木工程专业人才培养目标、人才培养方案及教学大纲编写的。全书共分八章,主要内容包括土的物理性质和工程分类、土的渗透性和渗流、地基中的应力、土的压缩性与地基沉降计算、土的抗剪强度、地基承载力、土坡稳定性分析、土压力和挡土墙设计等。本书在基本原理和方法的选用上以工程实用为主,按照国家和行业最新规范,反映土力学基本理论,有利于培养学生的工程实践能力。全书内容由浅入深、概念清晰、层次分明、重点突出,各章末均附有思考题和习题。

本书可作为普通高等院校土木工程及相关专业的教材,也可作为高职高专院校建筑工程技术及相关专业的教材,还可作为土木工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

土力学/仲崇梅,刘丽华主编. —北京:中国电力出版社,2011.6
21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 1878 - 6

I. ①土… II. ①仲…②刘… 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 127990 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 6 月第一版 2011 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.25 印张 272 千字

定价 20.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

土力学是土木工程专业的专业基础课,是将固体力学和流体力学等学科的基本原理应用于土体的一门应用学科,是力学的一个重要分支。

本书为 21 世纪高等学校规划教材,是根据普通高等学校土木工程专业人才培养目标,遵循人才培养方案及教学大纲编写的。

本书在基本原理和方法的选用上以工程实用为主,结合国家和行业最新规范,反映土力学的研究成果和基本理论,有利于培养学生的工程实践能力。全书内容由浅入深、概念清晰、层次分明、重点突出,各章末均附有思考题和习题。

土力学课程与基础工程课程紧密相连。本书既是独立的一门土力学课程的教材,又与基础工程课程的内容密切结合,便于学生以后的学习。

本书由长春工程学院仲崇梅、刘丽华担任主编,长春工程学院刘娜担任副主编,具体编写分工:绪论、第五、第六、第八章由仲崇梅编写,第一章由刘丽华编写,第三、第四章由刘娜编写,第二、第七章由仲崇梅和吉林大学冷毅飞共同编写。长春工程学院张利教授认真审阅全书,提出了许多宝贵的建议,在此表示感谢!

限于编者的水平有限,对于错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

2011 年 5 月

目 录

前言	
绪论	1
第一章 土的物理性质和工程分类	3
第一节 概述	3
第二节 土的成因与结构	3
第三节 土的三相组成	5
第四节 土的三相比例指标	10
第五节 无黏性土的密实度	16
第六节 黏性土的物理特性	17
第七节 土的工程分类	20
思考题与习题	25
第二章 土的渗透性和渗流	27
第一节 概述	27
第二节 土的渗透性和渗流定律	27
第三节 流网及其应用	36
第四节 渗流破坏与控制	40
思考题与习题	44
第三章 地基中的应力	45
第一节 概述	45
第二节 土中的自重应力	45
第三节 基底压力	48
第四节 地基中的附加应力	51
第五节 有效应力原理	68
思考题与习题	70
第四章 土的压缩性与地基沉降计算	72
第一节 概述	72
第二节 土的压缩性	72
第三节 地基最终沉降量的计算	77
第四节 应力历史对地基沉降的影响	86
第五节 地基沉降和时间的关系	89
思考题与习题	95
第五章 土的抗剪强度	97
第一节 概述	97
第二节 土的抗剪强度理论	98

第三节	土的抗剪强度试验·····	102
第四节	饱和黏性土的抗剪强度·····	108
第五节	无黏性土的抗剪强度·····	116
思考题与习题	·····	117
第六章	地基承载力·····	119
第一节	概述·····	119
第二节	地基的破坏模式·····	119
第三节	地基的临塑荷载和临界荷载·····	121
第四节	地基极限承载力·····	125
思考题与习题	·····	130
第七章	土坡稳定性分析·····	131
第一节	概述·····	131
第二节	无黏性土土坡的稳定性分析·····	132
第三节	黏性土土坡的稳定性·····	132
第四节	圆弧滑动面条分法土坡稳定分析·····	135
第五节	非圆弧滑动面土坡稳定分析·····	140
第六节	土坡稳定分析中的一些问题·····	143
思考题与习题	·····	146
第八章	土压力和挡土墙设计·····	147
第一节	概述·····	147
第二节	静止土压力·····	149
第三节	朗肯土压力理论·····	149
第四节	库伦土压力理论·····	157
第五节	挡土墙设计·····	163
思考题与习题	·····	171
参考文献	·····	173

绪 论

一、土力学的概念及学科特点

土力学的研究对象是地球表面地层中的土体。土是由不同的岩石在物理的、化学的、生物的风化作用下,又经流水、冰川、风力等搬运及沉积作用而形成的自然历史产物。土的组成及其工程性质与母岩成分、风化作用和搬运沉积的环境条件有极其密切的关系。土是多相体,由固相、液相和气相三部分组成。

土力学是利用力学的一般原理,研究土的物理、化学和力学性质及土体在荷载、水、温度等外界因素作用下工程性状的应用科学,是力学的一个分支。从上述分析可知土力学的研究对象是非常复杂的,是以矿物颗粒组成骨架的松散颗粒集合体,其物理、化学和力学性质与一般刚性或弹性固体及流体等都有所不同。土力学创始人太沙基(K. Terzaghi)晚年曾指出:土力学不仅是一门科学,也是一门艺术,这一特点是其研究对象土的特性决定的。

二、土力学的发展简史

18 世纪中叶至 20 世纪 20 年代是土力学理论和方法逐渐形成的阶段,欧洲产业革命时期,随着大型建筑物的兴建和科学的发展,提出了许多与土力学相关的问题,许多学者是土力学理论创立的奠基人。1773 年库伦(C. A. Coulomb)发表了土的抗剪强度和土压力理论,1869 年朗肯(W. J. M. Rankine)发表了土压力理论,这两种土压力理论至今仍被广泛应用。1869 年卡尔洛维奇发表了世界上第一本地基与基础著作。1885 年布辛奈斯克(Boussinesq)根据弹性理论求出了在集中力作用下地基中的三维应力解析解。1900 年莫尔(Mohr)提出了土的强度理论。20 世纪初,人们在工程实践中积累了大量的经验和资料,对土的强度、变形和渗透性质进行了理论探讨,土力学逐渐形成了一门独立学科。20 世纪 20 年代,普朗德尔(Prandtl)发表了地基承载力理论,这一时期在边坡理论方面也有很大发展,费兰纽斯(W. Fellenius)完善了边坡圆弧滑动法。1925 年太沙基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,出版了第一本《土力学》专著,从此土力学有了自身的理论体系,形成一门独立的学科。

现代土力学的概念最早出现在 20 世纪 50 年代,随着土力学理论的发展和工程实践的不断深入,人们已经越来越不满足于将土体视为理想弹性介质或理想刚塑性介质这样简单化的描述。1963 年,罗斯科(K. H. 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开始进入一个崭新的阶段——现代土力学理论发展阶段。土的基本特性、有效应力原理、固结理论、变形理论、土体稳定问题、动力特性、土流变学等在土力学中的应用得到进一步完善。

土力学未来的发展趋势可归结为一个模型,三个理论,四个分支。一个模型即本构关系模型,三个理论即非饱和土固结理论、土的液化破坏理论、土的渐进破坏理论,四个分支即理论土力学、计算土力学、实验土力学、应用土力学。

三、本课程的内容和学习方法

本课程的基本研究内容有:①土的有效应力原理;②土的应力分布理论;③渗透固结理

论；④强度破坏理论；⑤地基变形计算；⑥地基承载力计算；⑦土坡稳定性验算；⑧挡土结构物上的土压力计算。

其中有效应力原理、应力分布理论、渗透固结理论和强度破坏理论是土力学的基本理论，而地基变形计算、地基承载力计算、土坡稳定性验算和土压力计算是与工程实践直接相关的应用课题。

土力学的研究必须注意土的本质特性。土的松散性是区别于整体岩石的主要特性，这种特性是创立土力学的主要原因。土是自然历史的产物，必须查明土的生成环境和历史过程，结合土的微观结构、宏观土层的边界条件及自然环境的变化进行研究。应对场地的地质和水文地质条件进行详细的勘测和分析。因而，土力学与工程地质学有着极为密切的关系。在各类土体的形成和变化过程中，有着各自相应的物质组成和结构，表现出不同的工程地质性质。只有采用地质学的自然历史分析法，才能正确地认识土体工程性质形成的原因和演变历史、目前的状态及今后的变化趋势。土力学应研究土的物质组成成分，土的物理、化学、力学性质及它们之间的相互关系，并以此为基础，进一步探讨在自然和人为因素的作用下，土的成分和性质的变化趋势。土力学应以土的成因、成分和结构等内在因素的研究成果作为解释土的物理与力学性质的根据，根据工程需要评价和改善土的性状，以保证建筑工程的合理设计、顺利施工、安全运行。

土力学的研究必须注意实践性。除运用一般力学原理外，还要重视专门的土工试验技术的应用。根据室内和原位试验获得的物理力学指标和各种参数来研究土的工程性质。土的变形固结和强度理论，就是在这些试验研究的基础上建立和发展起来的。

土力学的研究必须注意工程实用性，必须考虑建筑物本身的结构特点和使用要求。各种建筑物因设计要求不同，对土体变形和稳定性的要求也有很大差别。应从工程实际出发，对具体工程项目的地基土体和建筑土料规定具体的土工试验项目和试验方法，运用土力学的理论进行地基基础的设计计算和施工，以解决实际工程问题。

土力学是一门偏于计算的学科，因而，数学、力学是建立土力学计算理论和方法的重要基础。土力学作为力学计算问题，与理论力学有所不同，不能用纯数学、力学的观点，必须根据实际的地质调查、现场和室内的试验资料来进行分析研究，然后才能对研究资料进行力学计算。电子计算机技术和新的计算技术的飞速发展，为土力学理论计算提供了重要手段。

土力学是土木工程专业的一门专业基础课程，它是定量分析评价工程地质问题和进行岩土工程设计计算的重要理论基础之一。学习土力学必须具有良好的数学基础知识和一定的理论力学、材料力学、弹性力学和塑性力学知识。在研究土的特性时，涉及的关联学科有工程地质学、第四纪地质学和地貌学。在研究土体中水的运动问题时，还涉及水力学、地下水动力学和水文地质学的有关知识。各学科的相互综合与渗透是现代土力学发展的总趋势。

第一章 土的物理性质和工程分类

第一节 概 述

在漫长的地质岁月中,经内、外力地质综合作用形成了各种类型的岩石和土。岩石历经风化、剥蚀、搬运、沉积生成土,土是一种集合体,土粒之间的孔隙中包含着水和气体,这三部分常被称为土的三相,因此土是一种三相体,如图 1-1 所示。土历经压密固结、结晶硬化又可再生成岩石,这一过程循环往复地进行着。作为建筑物地基的土,是土力学研究的主要对象。

土的工程特性包括土的物理状态、物理性质及力学性质,它直接决定了建筑物地基的工程特性及建筑物的稳定与安全。而土的成因、土的组成与级配、土中水与气体、土的结构与构造等一系列土质学的内容又是研究土的工程特性的基础。这些内容是学习土力学所必需的基本知识,是评价土的工程性质、分析与解决土的工程技术问题的基础。

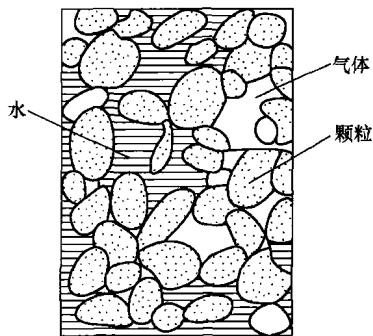


图 1-1 土的三相组成示意图

第二节 土的成因与结构

一、土的成因

自然界中的大多数土都是在第四纪地质历史时期形成的,因此也称为第四纪沉积物。由于其搬运和堆积方式的不同,可以分为残积土和运积土两大类。残积土是指岩石经风化作用残留在原地的堆积物。残积土从地表向深处由细变粗,多棱角,与原岩之间没有明显的界限,其成分与原母岩相同,一般无层理。运积土是指风化所形成的土颗粒受自然力的作用,搬运到不同地点所沉积的堆积物。颗粒经过滚动和相互摩擦具有一定的浑圆度。根据搬运的动力不同,运积土可分为如下几类:

(1) 坡积土:坡积土是指残积土受重力和暂时性水流(如雨水和雪水)的作用,被携带到山坡或坡脚处聚积起来的堆积物。堆积物内土粒粗细不同,性质很不均匀。

(2) 洪积土:洪积土是指残积土和坡积土受洪水冲刷,携带到山麓处沉积的堆积物。洪积土具有一定的分选性,搬运距离近的颗粒较粗,力学性质较好;距离远的则颗粒较细,力学性质较差。

(3) 冲积土:冲积土是指由于江、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均为冲积土。由于经过较长距离的搬运,浑圆度和分选性都较好,具有明显的层理构造。

(4) 湖泊沼泽沉积土:湖泊沼泽沉积土是指在极为缓慢水流或静水条件下沉积形成的堆积物。这种土的特点是除了含有细小的颗粒外,常伴有由生物化学作用所形成的有机物存在,成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。

(5) 海相沉积土：海相沉积土是指由水流挟带到大海沉积的堆积物，其颗粒较细，表层土质松软，工程性质较差。

(6) 冰积土：冰积土是指由冰川或冰水携带、搬运所形成的堆积物，颗粒粗细变化较大，土质不均匀。

(7) 风积土：风积土是指由风力搬运形成的堆积物，一般堆积层很厚而不具层理。如我国西北的黄土就是典型的风积土。

图 1-2 所示为其中几种土的示意图。

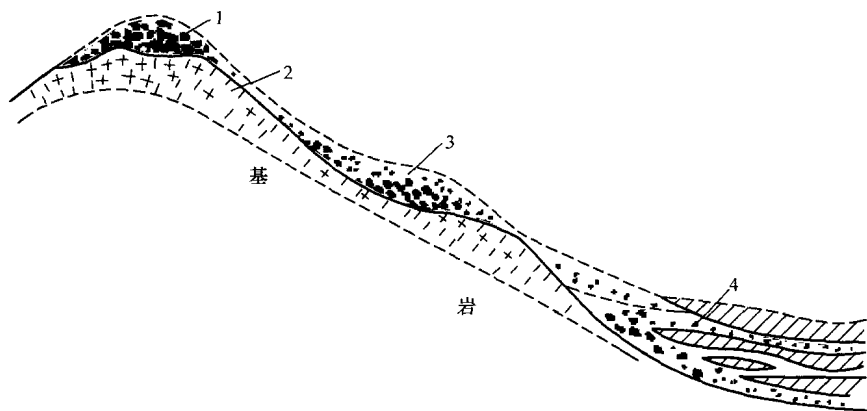


图 1-2 几种土的示意图

1—残积土；2—风化带；3—坡积土；4—洪积土

二、土的结构和构造

土的结构是指土粒的相互排列方式和颗粒间的联结特征，是在土的形成过程中逐渐形成的。它与土的矿物成分、颗粒形状和沉积条件有关。通常土的结构可归纳为单粒结构、蜂窝结构和絮状结构三种基本类型。

(1) 单粒结构。单粒结构是粗粒土如碎石土、砂土的结构特征，由较粗的土颗粒在其自重作用下沉积而成。每个土粒都为已经下沉稳定的颗粒所支承，各土粒互相依靠重叠，如图 1-3 (a) 所示。土粒的紧密程度随着形成条件而不同，可分为密实的或疏松的状态。呈密实状态的单粒结构的土，由于其土粒排列紧密，比较稳定，力学性能较好。在动、静荷载作用下都不会产生较大的沉降，所以强度较大，压缩性较小，是较为良好的天然地基。而具有疏松单粒结构的土，其骨架不稳定，当受到振动或其他外力作用时，土粒易于发生移动，土中孔隙剧烈减少，引起土体较大的变形，因此，这种土层如未经处理一般不宜作为建筑物的地基。

(2) 蜂窝结构。较细的土粒在自重作用下沉落时，碰到其他正在下沉或已沉稳的土粒，由于土粒细而轻，颗粒间接触处的引力大于下沉土粒重量，土粒就被吸引着不再改变它们的相对位置，逐渐形成孔隙较大的蜂窝状结构，如图 1-3 (b) 所示。蜂窝状结构常见于粉土中。

(3) 絮状结构。土的黏粒大都呈针状或片状，土粒极小（粒径 $<0.005\text{mm}$ ）而重量极轻，多在水中悬浮，下沉极为缓慢。有些小于 0.002mm 的土粒，具有胶粒特性，因土粒表面带有同号电荷，故悬浮于水中作分子热运动，难以相互碰撞结成团粒下沉。当悬浮液发生变化时，如加入电解质、运动着的黏粒互相聚合等，黏粒将凝聚成絮状物下沉，形成具有很

大孔隙的絮状结构，如图 1-3 (c) 所示。絮状结构是黏性土的结构特征。

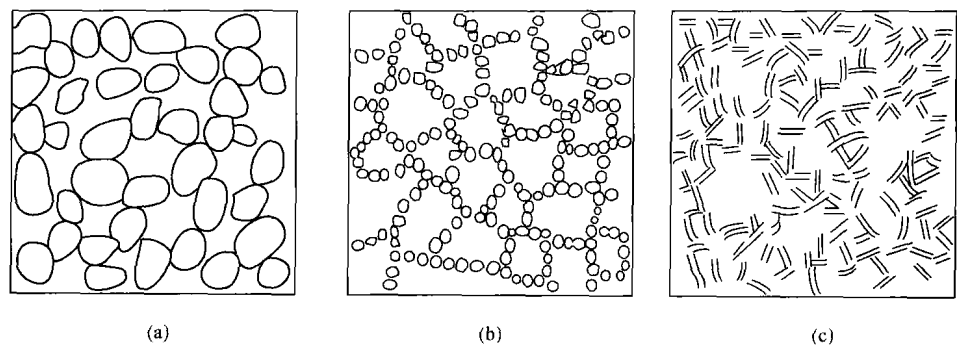


图 1-3 土的结构
(a) 单粒结构；(b) 蜂窝结构；(c) 絮状结构

天然条件下任何一种土类的结构并不像上述基本类型那样简单，而常呈现出以某种结构为主，与其他结构混合的复合形式。蜂窝结构和絮状结构的黏性土一般不稳定，在很小的外力作用下（如施工扰动）就可能破坏，当土的结构受到破坏或扰动时，不仅改变了土粒的排列情况，也不同程度地破坏了土粒间的联结，从而影响土的工程性能。所以，研究土的构造类型及其变化情况对理解和进一步研究土的工程特性很有必要。在同一土层中的物质成分和颗粒大小等都相近的各部分之间的相互关系的特征称为土的构造。土的构造最主要的特征就是成层性，即层理构造，如图 1-4 所示。它是在土的形成过程中，由于不同阶段沉积的物质成分、颗粒大小或颜色不同，而沿竖向呈现的成层特征。土的构造的另一特征是土的裂隙性，如黄土的柱状裂隙。裂隙的存在大大降低土体的强度和稳定性，增大透水性，对工程不利。此外，也应注意到土中有无包裹物（如腐殖物、贝壳、结核体等）及天然或人为的孔洞存在。这些构造特征都造成土的不均匀性。

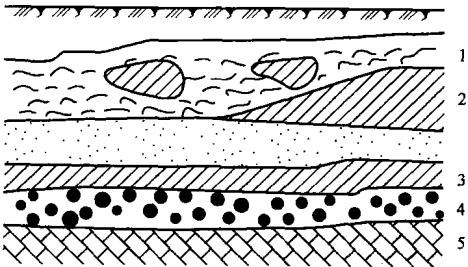


图 1-4 土的层理构造
1—淤泥夹黏土透镜体；2—黏土尖灭层；3—砾土夹黏土层；4—砾石层；5—基岩

第三节 土的三相组成

土是固体颗粒、水和气体三部分组成的三相体。固体颗粒由矿物颗粒组成，有时也含有有机质，构成土的骨架。水和气体充填在土颗粒间相互贯通的孔隙中。土的三相组成比例并不是恒定的，它随着环境的变化而变化，三相比例不同，土的状态和工程性质也随之各异。

一、土的固体颗粒

固体颗粒是土的主要成分，构成土的骨架。固体颗粒的大小、形状、矿物成分及组成对土的物理力学性质起决定作用。研究土的固体颗粒应了解其矿物成分与土颗粒的组成情况。

1. 土粒的矿物成分

土是岩石风化的产物，也是多种矿物的集合体。土粒矿物成分不同则表现不同的特性，

从而影响土的性质。根据岩石风化的方式和矿物形成的先后，土粒的矿物成分可分为原生矿物和次生矿物。

(1) 原生矿物。岩石由于温度变化、裂隙水的冻结及盐类结晶膨胀而逐渐破碎崩解为碎块的过程称为物理风化。物理风化所形成的碎屑物的物理化学性质较稳定，成分与母岩相同，这种矿物称为原生矿物，常见的原生矿物有石英、长石和云母等。碎石土和砂土主要由原生矿物组成。

(2) 次生矿物。岩石在水溶液、大气及有机物的化学作用或生物化学作用下引起的破坏过程称为化学风化。化学风化不仅破坏了岩石的结构，而且使其化学成分发生改变形成新的矿物，这种矿物称为次生矿物，如黏土矿物、铁铝氧化物等。其中黏土矿物主要有高岭石、蒙脱石和伊利石，是构成黏性土的主要成分。黏土矿物颗粒很微小，在电子显微镜下观察呈鳞片状或片状，颗粒比表面积很大，与水的作用能力很强，即亲水性强，能发生一系列复杂的物理、化学变化。图 1-5 所示为两种基本黏土矿物晶片，一种是硅氧晶片，它的基本单元是 Si-O 四面体，另一种是铝氢氧晶片，它的基本单元是 Al-OH 八面体。由于晶片结合情况的不同，便形成了具有不同性质的各种黏土矿物。其中主要有蒙脱石、伊利石和高岭石三类，图 1-6 所示为黏土矿物构造单元。

蒙脱石是化学风化的初期产物，其结构单元（晶胞）是两层硅氧晶片之间夹一层铝氢氧晶片所组成的，如图 1-6 (a) 所示。由于晶胞的两个面都是氧原子，其间没有氢键，因此联结力很弱，水分子可以进入晶胞之间从而改变晶胞之间的距离，甚至达到完全分散到单晶胞为止。蒙脱石的主要特征是颗粒细小，具有较大的吸水膨胀和脱水收缩的特性。

伊利石的结构单元类似于蒙脱石，如图 1-6 (b) 所示。不同的是硅氧四面体中的 Si^{4+} 可以被 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 所取代，因而在相邻晶胞间将出现若干一价正离子 (K^+)。所以伊利石的结晶构造没有蒙脱石那样活跃，其吸水能力低于蒙脱石。

高岭石的结构单元如图 1-6 (c) 所示，是由一层铝氢氧晶片和一层硅氧晶片组成的晶胞。高岭石的矿物就是由若干重叠的晶胞构成的，这种晶胞一面露出氢氧基，另一面则露出氧原子。晶胞之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，因此晶胞之间的距离不易改变，水分子不能进入。高岭石的主要特征是颗粒较粗，其亲水性不及伊利石强。

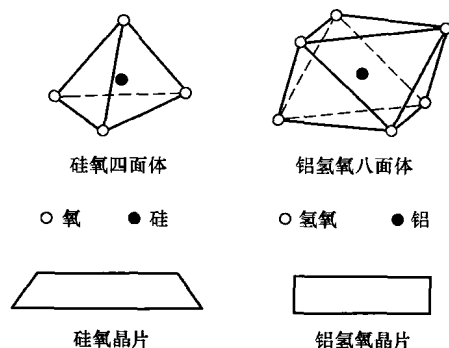


图 1-5 黏土矿物的晶片示意图

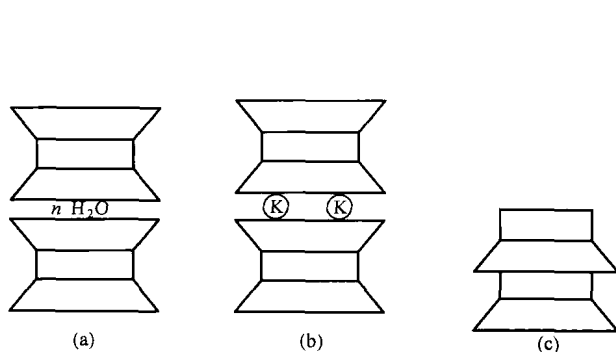


图 1-6 黏土矿物构造单元示意图

(a) 蒙脱石；(b) 伊利石 (b) 高岭石

除黏土矿物外，黏粒组中还包括有氢氧化物和腐殖质等胶态物质。如含水氧化铁，它在土层中分布很广，是地壳表层的含铁矿物质分解的最后产物，使土呈现红色或褐色。土中胶态腐殖质的颗粒更小，能吸附大量水分子（亲水性强）。由于土中胶态腐殖质的存在，使土具有高塑性、膨胀性和黏性，这对工程建设是不利的。

2. 土粒粒组

天然土体土粒大小变化很大，大的有几十厘米，小的只有千分之几毫米，形状也不一样，有块状、粒状、片状等。这与土的矿物成分有关，也与土粒所经历的风化、搬运过程有关。土粒的大小称为粒度。在工程中，粒度不同、矿物成分不同，土的工程性质也就不同。例如颗粒粗大的卵石、砾石和砂，大多数为浑圆和棱角状的石英颗粒，具有较大的透水性而无黏性；颗粒细小的黏粒则属针状或片状的黏土矿物，具有黏滞性而透水性低。因此工程上常将大小、性质相近的土粒合并为一组，称为粒组。

划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。对于粒组的划分方法目前并不统一。表 1-1 为一种常用的土粒粒组的划分方法。按照界限粒径的大小，将土粒划分为漂石（块石）、卵石（碎石）、砾粒、砂粒、粉粒和黏粒六个粒组。

表 1-1 土 粒 粒 组 的 划 分

粒组名称	粒径范围 (mm)	特 征
漂石或块石	>200	透水性大，无黏性，无毛细水
卵石或碎石	200~20	透水性大，无黏性，无毛细水
圆砾或角砾	20~2	透水性大，无黏性，毛细水上升高度不超过粒径大小
砂粒	2~0.075	易透水，当混入云母等杂物时透水性减小，而压缩性增加；无黏性，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
粉粒	0.075~0.005	透水性小；湿时稍有黏性，遇水膨胀小，干时稍有收缩；毛细水上升高度较大，极易出现冻胀现象
黏粒	<0.005	透水性很小；湿时有黏性，可塑性，遇水膨胀大，干时收缩显著；毛细水上升高度大且速度较慢

3. 土的颗粒级配

在自然界中很难遇到单一粒组所组成的土，绝大多数都是由几种粒组混合组成，其性质取决于各种不同粒组的相对含量。土的颗粒级配是土中各粒组的相对含量，用各粒组土粒质量占土粒总质量的百分数表示。

(1) 颗粒成分分析试验。土的颗粒成分或颗粒级配是通过土的颗粒分析试验测定的，常用的方法有筛分法和沉降分析法。

1) 筛分法。适用于粒径大于 0.075mm 的土。它用一套孔径不同的标准筛（如图 1-7 所示，孔径 200、20、2、0.5、0.25、0.075mm），将风干且分散了的有代表性的试样倒入标准筛内摇振，然后分别称出留在各筛子上的土重，并计算出各粒组的相对含量即得土的颗粒级配。

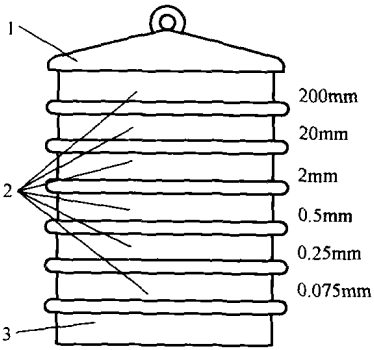


图 1-7 标准筛

1—筛盖；2—筛盘；3—筛底

2) 沉降分析法适用于粒径小于 0.075mm 的土。该方法将过筛风干了的少量细粒土放入水中, 根据大小不同的土粒在水中下沉速度不同的原理, 利用比重计测定不同时间土粒和水混合悬液的密度, 确定各粒组的相对含量百分数。如土同时含有粒径大于和小于 0.075mm 的土粒时, 则须联合使用上述两种方法进行试验。

(2) 颗粒级配曲线。根据颗粒分析试验结果, 表 1-2 列举了三种土的粒度构成。为了直观起见, 通常以图 1-8 所示的颗粒级配曲线表示。曲线的纵坐标表示小于某土粒径的累计重量百分比, 横坐标则是用对数值表示的土的粒径, 这样可以将粒径相差上千倍的粗、细颗粒含量都表示出来, 尤其能将占总重量小, 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。

表 1-2 土的 粒 度 成 分

土粒组成 (%) 土样编号	粒径 (mm)	10~2	2~0.05	0.05~0.005	<0.005	d_{60}	d_{10}	d_{30}	C_u	C_c
A		0	99	1	0	0.65	0.11	0.15	1.5	1.24
B		0	65	30	4	0.115	0.012	0.044	9.6	1.40
C		44	56	0	0	3.00	0.15	0.25	20	0.14

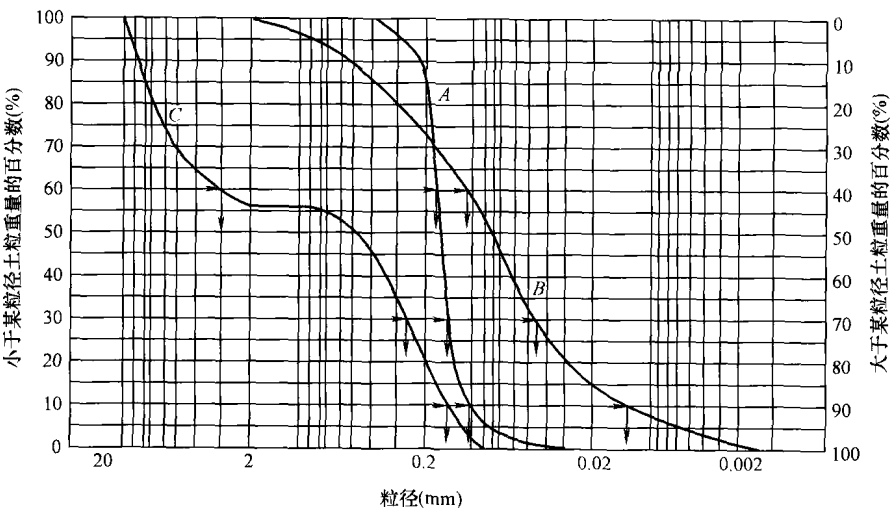


图 1-8 土的颗粒级配曲线

(3) 颗粒级配曲线的应用。土的颗粒级配曲线是最常用的曲线。从该曲线可以直接了解土粒的粗细、粒径分布的均匀程度及颗粒级配的优劣。如图 1-8 所示, 曲线 A 和 B 所代表的两种土的颗粒大小分布都是连续的, 这样的级配称为连续级配或正常级配, 曲线 C 中间出现水平段说明所代表的土缺少某些粒径范围的土粒, 这样的级配称为不连续级配。与曲线 A 比较, 曲线 B 形状平缓, 表示土粒大小分布范围广, 土粒大小不均匀, 土粒级配良好; 曲线 A 形状较陡, 表示粒径相差不大, 土粒较均匀, 土粒级配不良。

为了判别土粒级配是否良好, 常用不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 分别描述级配曲线的坡度和形状, 即

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

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

式中 d_{60} ——限定粒径，小于某粒径的土粒重量占土总重 60% 的粒径；

d_{10} ——有效粒径，小于某粒径的土粒重量占土总重 10% 的粒径；

d_{30} ——小于某粒径的土粒重量占土总重 30% 的粒径。

不均匀系数反映曲线的坡度，表明土粒的不均匀程度。 C_u 值越大，表明粒径分布曲线的坡度越缓，土粒越不均匀；反之 C_u 值越小，表明曲线越陡，土粒均匀。曲率系数 C_c 反映级配曲线的形状是否连续。工程上对土的级配是否良好可按如下规定判断：

1) 级配良好的土，大多数颗粒级配曲线主段呈光滑凹面向上的形式，坡度较缓，土粒大小连续，曲线平顺且粒径之间有一定的变化规律，能同时满足 $C_u > 5$ 及 $C_c = 1 \sim 3$ 的条件，如图 1-8 中 B 线所示。

2) 级配不良的土，土粒大小比较均匀，其颗粒级配曲线坡度较陡；或者土粒大小虽然较不均匀，但也不连续，颗粒级配曲线呈阶梯状（有缺粒段）。它们不能同时满足 $C_u > 5$ 及 $C_c = 1 \sim 3$ 两个条件，如图 1-8 中 A、C 线所示。工程中用级配良好的土作为填土用料时，比较容易获得较大的密实度。

二、土中水

土中水按其所处状态分为液态、气态和固态，水的数量和存在形式直接影响土的状态和性质。存在于土粒矿物的晶体格架内部或是参与矿物构造中的水称为矿物内部结合水，它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，可以将矿物内部结合水当作矿物颗粒的一部分。气态水对土的性质影响不大，因此，本节仅讨论土中液态水。

土中液态水可以分为结合水与自由水两大类。

1. 结合水

结合水是指受电分子引力吸附于土粒表面呈薄膜状的土中水。

研究表明，土粒（矿物颗粒）表面一般带有负电荷，围绕土粒形成电场。在土粒电场影响范围内的水分子及水溶液中的阳离子（如 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 等）一起被吸附于土颗粒周围。由于水分子是极性分子，受电场影响而定向排列，如图 1-9 所示，越靠近土粒表面吸附越牢固，随着距离增大，电分子引力将减小，按其离土粒表面的距离远近，结合水又可分为强结合水和弱结合水。

(1) 强结合水。强结合水是指紧靠土粒表面的结合水，又称吸着水。强结合水受到的电分子引力最大，在重力作用下不会流动，不传递静水压力，无溶解能力，温度在 105℃ 以上时才能蒸发，冰点为 -78℃，密度为 1.2~2.4g/cm³。这种水牢固地结合在土粒表面，其性质接近于固体，具有极大的黏滞性、弹性及抗剪强度。黏

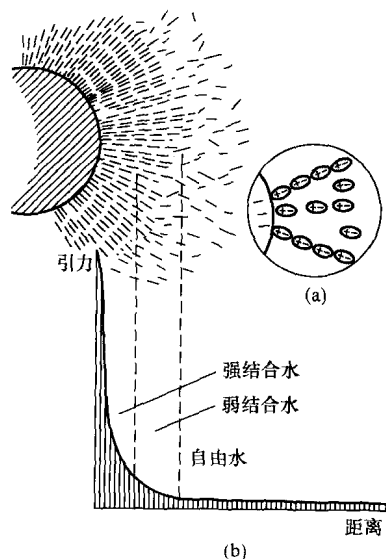


图 1-9 结合水分子定向排列力及其所受电分子变化的简图

土只含强结合水时呈固体状态，磨碎后成粉末状态；砂土的强结合水很少，仅含强结合水时呈散粒状。

(2) 弱结合水。弱结合水是指紧靠于强结合水外围的结合水膜，也称为薄膜水。弱结合水距离土粒表面稍远，仍然受到电分子引力影响但强度较小。弱结合水不能传递静水压力，具有较高的黏滞性和抗剪强度，但水膜较厚的弱结合水能向较薄的水膜缓慢转移。弱结合水的存在使土具有可塑性。

随着水分子与土粒距离的不断增大，电分子吸引力逐渐减小，弱结合水就逐步过渡为自由水。

2. 自由水

自由水是存在于土粒电场影响范围以外不受电场引力作用的土中水，性质与普通水相同，即传递静水压力，冰点为 0°C ，具有溶解盐类的能力。

自由水按其所受作用力的不同可分为重力水和毛细水。

(1) 重力水。重力水是在土孔隙中受重力作用能自由流动的水，一般存在于地下水位以下的透水层中，对土颗粒有浮力作用。当存在水头差时它将流动，产生动水压力，可将土中细小的颗粒带走。工程实践中的流砂、管涌、冻胀、渗透固结、渗流时的边坡稳定等问题，都与土中水的运动有关。建筑施工时重力水对基坑开挖、排水等均产生较大影响。

(2) 毛细水。毛细水是受水与空气表面的张力作用而存在于细小孔隙中的自由水，通常存在于地下水位以上的透水层中。由于表面张力的作用，地下水沿不规则的毛细孔上升，形成毛细水上升带，其上升高度视孔隙大小而定。毛细水一般存在于 $0.002\sim 0.5\text{mm}$ 的孔隙中，砂土、粉土及粉质黏土中毛细水含量较大。

实际工程中常需研究毛细水的上升高度和速度，因为土的毛细现象在以下几个方面对工程有影响：①在严寒、寒冷地区毛细水的上升是引起路基冻害的因素之一。②毛细水的上升会使土湿润，强度降低，变形量增大。对于房屋建筑，毛细水的上升会引起地下室过分潮湿。③在干旱地区，若毛细水上升至地表，地下水中的可溶盐随毛细水上升后不断蒸发，盐分便积聚于靠近地表处而使地表土盐渍化。

三、土中气体

土中气体存在于未被水占据的土孔隙中，对土的影响相对居次要地位。土中气体以两种形式存在，即流通气体和封闭气体。流通气体是指与大气连通的气体，常见于粗粒土中，一般不影响土的性质。封闭气体是指与大气隔绝的以气泡形式存在的气体，常见于细粒土中。它不易逸出，在受到外力作用时，随着压力的增大这种气泡可能压缩或溶解于水中；压力减少时，气泡会恢复原状或重新游离出来，使土在外力作用下的弹性变形增加，透水性降低。在淤泥质土和泥炭土中，由于微生物分解有机物在土层中产生了一些可燃性气体（如硫化氢、甲烷等），使其在自重作用下不易压密，成为高压缩性土层。可见，封闭气体对土的工程性质影响较大。

第四节 土的三相比例指标

同一种土密实时强度高，松散时强度低。对于细粒的黏性土，含水少时则硬，含水多时则软。这说明土的性质不仅取决于三相组成本身的性质，而且也取决于三相之间数量的比例

关系。土力学中,使用各相之间在质量和体积上的比例关系作为反映土的物理性质与物理状态的指标,称为土的三相比比例指标。利用这些指标衡量土最基本的物理性质,并间接地评定土的工程性质。

为了求得土的三相比比例指标和说明问题方便起见,可将土中本来交错分布的固体颗粒、水和气体三相分别集中起来,构成理想的三相关系图,如图 1-10 所示。固相集中于下部,液相居中部,气相集中于上部,图 1-10 左边标出各相的质量,右边标明各相的体积,图中各符号意义如下:

V ——土的总体积;

V_s ——土的固体颗粒体积;

V_v ——土的孔隙体积;

V_a ——土中气体体积;

V_w ——土中水的体积;

m ——土的总质量;

m_w ——水的质量;

m_s ——固体颗粒的质量。

气体的质量相对很小,可以忽略不计。

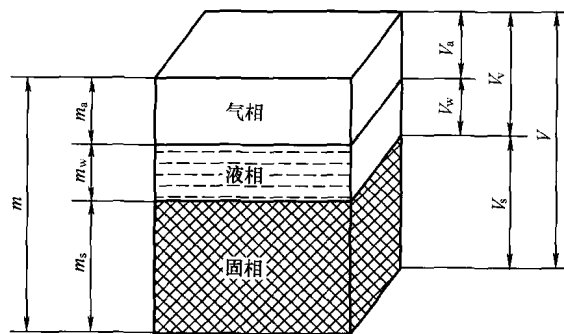


图 1-10 土的三相关系示意图

一、三个基本的三相比比例指标

1. 土的密度 ρ

土单位体积的质量称为土的密度,以 ρ 表示,单位为 g/cm^3 或 t/m^3 ,即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-3)$$

天然状态下土的密度变化范围很大,一般为黏性土 $\rho=1.8\sim 2.2\text{g}/\text{cm}^3$;砂土 $\rho=1.6\sim 2.0\text{g}/\text{cm}^3$;腐殖土 $\rho=1.5\sim 1.7\text{g}/\text{cm}^3$ 。土的密度一般采用“环刀法”测定,用一个圆环刀(刀刃向下)放置于削平的原状土样面上,垂直边压边削至土样伸出环刀口为止,削去两端余土,使其与环刀口面齐平,称出环刀内土的质量,求得它与环刀容积之比即为土的密度。

2. 土的天然含水量 w

土中水的质量与土粒质量之比称为土的天然含水量,以 w 表示,用百分数计,即

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (1-4)$$

含水量是表示土湿度的一个重要指标。含水量越小,土越干;反之土很湿或饱和。一般来说,同一类土当其含水量增大时,则其强度就降低。土的含水量对黏性土、粉土的性质影响较大,对粉砂、细砂稍有影响,而对碎石土等没有影响。土的含水量一般采用“烘干法”测定,即将天然土样的质量 m 称出,然后置于电烘箱内,在温度 $100\sim 105^\circ\text{C}$ 烘至恒重,称得干土质量 m_s ,湿土与干土质量之差即为土中水的质量 m_w ,与干土质量的比值就是土的含水量。

3. 土粒相对密度(又称比重) d_s

土的固体颗粒质量与同体积 4°C 时纯水的质量之比称为土粒相对密度(或比重),以 d_s 表示,即

$$d_s = \frac{m_s}{V_s \rho_{w1}} = \frac{\rho_s}{\rho_{w1}} \quad (1-5)$$