

TUGONG YUANLI

土工原理

殷宗泽 等 编著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

TUGONG YUANLI

土工原理

殷宗泽 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是土力学专著,系统地总结和介绍了国内外在土力学重要领域内的理论发展,重在阐述原理。

本书共分 11 章,内容包括:土的组成和基本性质,土的压缩性与沉降计算,土的强度,土体渗流原理与计算,土的三向变形与本构模型,有限单元法在土工中的应用,土的固结理论,土体的流变理论,土坡的稳定性,砂土液化与地震永久变形,城市环境岩土工程。

本书可供建筑、水利、铁路、交通等部门的工程技术人员和研究人员使用,也可作为高等院校岩土工程和相关专业研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

土工原理/殷宗泽等编著. —北京:中国水利水电出版社, 2007

ISBN 978-7-5084-4209-9

I. 土… II. 殷… III. 土力学 IV. TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 005288 号

书 名	土工原理
作 者	殷宗泽 等 编著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 34.75 印张 824 千字
版 次	2007 年 3 月第 1 版 2007 年 3 月第 1 次印刷
印 数	0001—3500 册
定 价	88.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

1980年水利出版社出版了《土工原理与计算》一书，主编署名为华东水利学院土力学教研室，实际主编为钱家欢和郭志平。当时受文化大革命的影响，主编不写个人，而用单位。10年后，该书作了较大修改，1994年出了第二版，主编为钱家欢和殷宗泽。现在，又十多年过去了，土力学发展迅速，该书又需要更新了。不少读者希望我们写第三版。考虑到第一主编钱家欢已故，绝大部分参编作者也都年逾古稀，不宜再参加编写，如果写成《土工原理与计算(第三版)》，将涉及版权问题，在与出版社商量后决定用新的书名：《土工原理》。一来，表示它与《土工原理与计算》一书的血统关系；二来，本书将更强调讲清原理。

所谓讲清原理，就是讲清楚土力学理论的来龙去脉。掌握理论应弄清：是在什么基础上提出来的？为什么要提出来？有何意义？作了什么假定？与其他理论有什么关系？在什么地方使用该理论？如何使用？存在什么问题？从哪些方面去改进等等。本书力求从这些方面去讲清原理。

所谓与《土工原理与计算》一书的血统关系，最主要的是本书继承该书的传统与风格，主要有如下几点：

(1) 它是一本较深层次的土力学专著，读者对象是从事土木、水利、交通工程、尤其是岩土工程的工程师、科研人员、大学教师和研究生。它也可以用作研究生的高等土力学教材。

(2) 它较系统地总结了当前土力学理论的新发展。这种总结，不是论文综述，不是发展水平报告，而是对学术界和工程界认可的较成熟理论的系统介绍。所谓新发展，也是相对的。本书并不强调最新发表的论文，而是着重于新的成熟理论。

(3) 这里的系统介绍，并不是按现有书刊材料作归并整理，而是作深层次的加工。有些常见的方法看起来似乎清楚，但从深层次上作剖析，还会发现问题，可提出新的见解，提出改进的思路和方法。这就不完全是“编”，而包含了“著”。本书中也含有一部分作者自己的研究成果，这部分成果已为同行所认可。

(4) 文字表达力求深入浅出。有读者反映,曾对一些新理论读了许多书都没有懂,甚至读原作者的论文也没有弄懂,读《土工原理与计算》才懂了。本书也希望继续保持这一点。

(5) 突出实用性。首先,在取材方面,力求实用。以本构模型为例,有些土体本构模型,在理论上是先进的,但过分复杂,不利于实用,本书便没有介绍,而仍然选用介绍了工程实用的模型。其次,在介绍和讲解理论中,力求与工程问题相结合,以达到学以致用。

希望以上这些特点也能在本书中体现出来。

本书介绍了一些新近发展的理论。其中,最突出的部分是关于非饱和土力学的有关知识和理论。这种介绍不是独立出来的,而是融入全书有关章节,如本构关系、强度、渗流、固结、坝坡稳定性等部分。非饱和土力学近一二十年来发展迅速,是土力学重要的前沿领域之一。本书系统地介绍其基本理论,希望引起读者的关注。

本书主要由殷宗泽编著,写第二章、第五章、第七章、第九章,以及第三章中的非饱和土强度部分,第四章中的非饱和土渗流部分,第六章的主要部分,第八章中的堆石料流变、软土次压缩、双屈服面流变模型等部分。参加编写的还有:王保田(第一章);余湘娟(第三章的大部分);王媛(第四章的大部分);朱俊高(第六章的一部分和第八章的大部分);刘汉龙(第十章);施建勇、钱学德(第十一章中垃圾填埋部分);张发明(第十一章中大面积地面沉降部分)。全书由殷宗泽组织、修改并定稿。

作 者

2006年10月

目 录

前言

第一章 土的组成和基本性质	1
第一节 土的来源与矿物成分	1
第二节 土的物理化学性质	13
第三节 土与水的相互作用	23
第四节 土的基本力学性质机理	28
第五节 土的工程分类	31
参考文献	43
第二章 土的压缩性与沉降计算	44
第一节 有效应力原理	44
第二节 土的压缩性	47
第三节 沉降计算基本方法	58
第四节 考虑侧向变形的沉降计算	63
第五节 砂土地基的沉降计算	71
第六节 考虑应力路径沉降计算	73
第七节 沉降随时间的变化	76
第八节 高速公路的沉降	78
参考文献	93
第三章 土的强度	94
第一节 土的抗剪强度理论与试验	94
第二节 三轴试验中的孔隙水应力系数及应力路径	102
第三节 粘性土的强度特性	107
第四节 无粘性土的强度特性	126
第五节 非饱和土强度	131
参考文献	145
第四章 土体渗流原理与计算	147
第一节 土体的渗流特性与渗透规律	148

第二节	土体中的渗流作用力与渗流破坏	159
第三节	饱和土体渗流场基本方程	162
第四节	饱和土体渗流问题的有限元解法	171
第五节	土体渗流反分析确定参数	181
第六节	非饱和土渗流	189
参考文献		199
第五章	土的三向变形与本构模型	200
第一节	应力和应变	200
第二节	土体三维变形的试验	205
第三节	土体三向变形的的主要规律	209
第四节	弹性非线性模型	218
第五节	弹塑性模型	231
第六节	非饱和土本构模型	262
参考文献		271
第六章	有限单元法在土工中的应用	273
第一节	概述	273
第二节	非线性有限元法	275
第三节	土体的非线性应力变形分析	283
第四节	接触面变形与接触面单元	293
第五节	土石坝应力变形计算	300
参考文献		310
第七章	土的固结理论	311
第一节	一维固结理论	312
第二节	太沙基三维固结理论	327
第三节	比奥固结理论	330
第四节	非饱和土固结	350
参考文献		364
第八章	土体的流变理论	366
第一节	土体的流变特性与流变试验	366
第二节	软土的次压缩	375
第三节	经验流变模型	387
第四节	元件流变模型	389
第五节	弹粘塑性模型	396

第六节 速率过程理论	404
第七节 流变问题有限元法计算	406
参考文献	409
第九章 土坡的稳定性	410
第一节 条分法	410
第二节 有限元法边坡稳定性分析	425
第三节 不同工作状态下的土坡稳定分析	434
第四节 考虑强度非线性的稳定性分析	446
第五节 非饱和土边坡的稳定性	449
参考文献	455
第十章 砂土液化与地震永久变形	456
第一节 饱和砂土的地震液化	456
第二节 土体地震永久变形	487
参考文献	506
第十一章 城市环境岩土工程	508
第一节 概述	508
第二节 垃圾填埋场的防渗系统	509
第三节 渗滤液的生成与收集	519
第四节 垃圾气的生成与收集	526
第五节 垃圾填埋场的最终覆盖系统	530
第六节 超采地下水诱发的地面沉降	532
参考文献	547

第一章 土的组成和基本性质

自然界中的土，是指分布在地球表面自然形成的松散堆积物。土的主要物质是岩石风化的产物，其次是地球生物残骸分解过程中的物质，它们组成土体的固体部分。土体孔隙一般由水或者气充填，从而形成由固相、液相、气相组成的三相分散系。大多数土体中，固相物质体积占土总体积的一半以上。土体中的孔隙绝大部分是相互连通的，孔隙水或气体可以流动。土中三相物质的含量比例不同，使土的状态和物理力学性质产生很大差异。不同成因类型的土，性质有很大差别。

土与岩石的主要区别在于土体的固体颗粒间联结很弱，并且土体的孔隙率比岩石的孔隙率高得多，因此其强度比岩石和其他固体材料要低得多，且极易受外界环境（湿度、温度等）的影响。但单从强度不能划分土和岩石，实际上有时坚硬的土体强度可能比软岩强度还高。由于土的成因类型、成土时间不同，其性质极其复杂多变。本章从土的来源、土的矿物成分、土颗粒的带电性、土中水和气、土的物理化学性质、土的力学性质机理及土的分类等方面，对土的性质进行全貌式概述，以便加深对土的物理力学性质多变性和规律的了解。

第一节 土的来源与矿物成分

一、土的来源

组成土的固体的主要成分——无机固体颗粒是岩石风化的产物。由于风化程度的差异，单个土粒的大小在很大范围内变化。土体的许多物理力学性质受土粒大小、形状和矿物成分控制。土体的矿物成分受形成土的母岩的矿物组成和风化过程控制，因此先简要介绍组成地壳岩石的基本类型、成岩矿物及其风化过程。

地质学中按照成因将岩石分成三类：火成岩、沉积岩和变质岩。图 1-1 给出了不同类型岩石和土的形成过程及其相互关系，一般称作岩土循环。该图大致反映了土体与岩体互为物质来源的关系。下面介绍岩石类型和循环过程的基本概念。

（一）火成岩

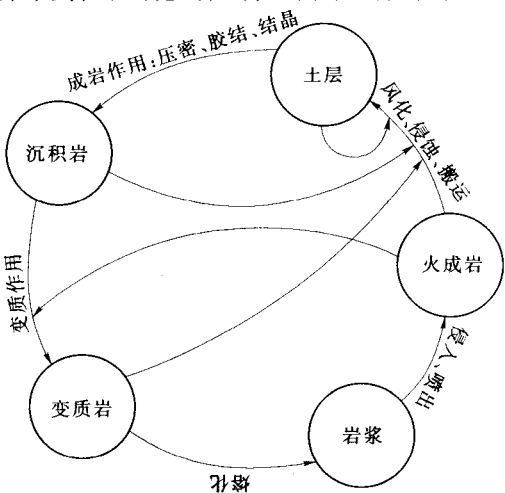


图 1-1 岩土循环过程示意图



火成岩是地幔中的岩浆侵入到地壳或喷发到地表后冷却形成的岩石。由岩浆冷却形成的火成岩的性质主要受岩浆成分和岩浆冷却速率控制。博闻 (Bowen, 1922) 通过室内试验成功解释了岩浆不同冷却速率与形成不同种类岩石的关系：在岩浆冷却过程中，矿物晶体不断长大，有些晶体沉积下来，有些晶体悬浮在液态岩浆中继续与岩浆反应，在较低温度时形成新的矿物再沉积下来，这个过程一直持续到所有岩浆都凝固为止。图 1-2 为博闻反应序列，表 1-1 为几种火成岩的矿物成分。由博闻反应序列可知，结晶温度高的暗色矿物抗风化能力弱，它们在土体中存在的可能性低；结晶温度低的浅色矿物抗风化能力强，为土体中原生矿物的主要矿物成分。

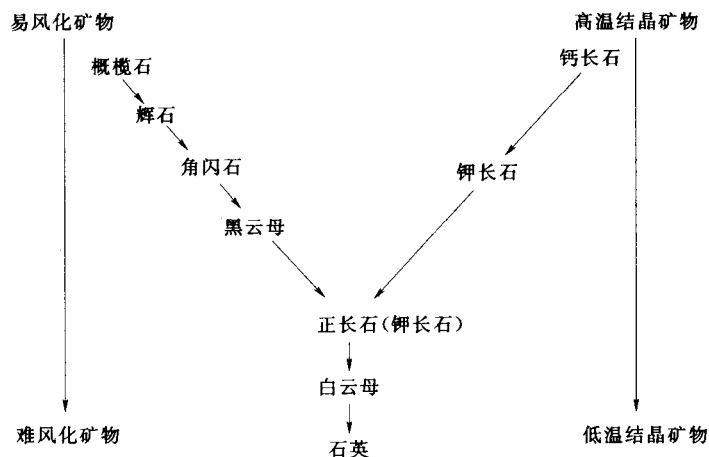


图 1-2 岩浆岩结晶与抗风化的博闻反应序列

表 1-1

博闻反应序列中矿物成分^[1]

矿物名称	化学成分
橄榄石	$(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$
辉石	$\text{Ca}, \text{Na}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})(\text{Al}, \text{Si}_2\text{O}_6)$
角闪石	含 $\text{Ca}, \text{Na}, \text{Mg}, \text{Ti}, \text{Al}$ 等复合铁镁硅酸盐矿物
黑云母	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
斜长石 { 钙长石	$\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$
钠长石	$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$
正长石(钾长石)	$\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$
白云母	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
石英	SiO_2

(二) 沉积岩

沉积岩是由母岩经风化、搬运、沉积后，其堆积体在地壳构造运动期间经高温、高压等营力作用，产生脱水、胶结、压密等成岩作用后形成的岩石。在第四系（包括第三系的一部分）沉积的，还没有经过强烈成岩作用的松散堆积物称为土。



(三) 变质岩

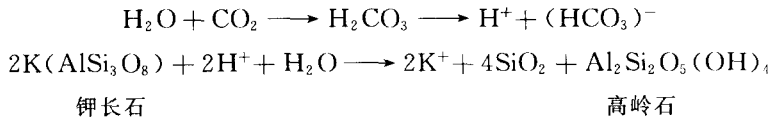
火成岩和沉积岩在岩浆入侵和地球强烈的构造运动期间,经受高温和(或)高压作用,使岩石的矿物成分发生明显的变化,形成新的矿物和结构形态。这种与母岩的矿物成分明显不同,经过了高温高压过程形成的岩石称作变质岩。

(四) 风化

地球表面的火成岩、沉积岩和变质岩的继续变化和相互转化过程中,风化、搬运和沉积等地球外动力地质作用起非常重要的作用。在岩石转变成土的过程中,风化是最关键的过程。风化是岩石在地球表面的机械和化学营力作用下,破碎成较细块体和土粒并生成新的矿物的过程,岩石的风化一般分为机械风化和化学风化两类。

机械风化主要是岩石在不断受热和失热过程中膨胀和收缩引起的。膨胀和收缩的反复变化使岩石变成岩块,岩块破碎成岩屑,岩屑进一步破碎成大小不同的土粒,这个过程是岩石无穷分解、颗粒不断变细的过程。水向岩石裂隙和岩石孔隙中的渗透加速了岩石的破碎过程。在机械风化过程中,仅岩石颗粒粒径不断减小,岩石矿物成分不发生变化。

化学风化是原生岩石矿物与大气和水中溶解的酸、碱、盐发生化学反应引起的,原生岩石矿物在化学风化过程中变化成新的矿物。例如,钾长石经化学风化作用生成粘土矿物、二氧化硅和可溶性钾盐的化学反应如下:



化学风化过程中生成的绝大部分钾盐被溶滤作用带走或被植物吸收。

图1-2给出了火成岩抵抗风化的能力大小排序,一般地,博闻反应序列中,低温条件下生成的矿物比高温生成的矿物抵抗风化能力强。但风化过程不仅存在于火成岩中,如图1-1所示的那样,沉积岩和变质岩也经受类似的风化作用,实际上这两类岩石抵抗风化作用的能力低于火成岩。

(五) 搬运和堆积作用

母岩风化后,形成尺寸较小的岩屑或矿物颗粒,经水流、风或冰川等动力搬运作用,在一定的环境条件下沉积下来,形成一个土层。由于搬运力周期性变化,在某地点沉积的土层上面可能再沉积性质不同的其他土层,也可以使原来沉积的土层重新搬运到新的地点沉积。不同时期的沉积物,经过自重压密,有时还经过生物作用,形成现在分布在地球表面的沉积土。

二、土的矿物成分

从前面的叙述知道,土中的无机矿物是岩石风化后的产物,它是土中矿物的主要部分。土中的有机质含量较低,并通常富集于局部土层,有机质含量超过5%的土我们称为有机质土,这时土中的有机质对土的性质产生显著影响。有机质含量低于5%的土称作无机土,其性质受土的矿物成分控制。由于母岩成分及风化程度不同,形成不同的矿物类型,按其成因和性质不同可将土中的无机矿物分为四大类。



(一) 原生矿物

原生矿物是母岩经物理风化后的产物，仅形状和颗粒大小发生变化，化学成分没有变化。实际上，由于岩石风化的速度很慢，在漫长的地质历史时期内，岩土实际上一直经受着物理、化学风化作用。土体中的原生矿物主要是由于他们的化学性质稳定或比较稳定，在岩石中含量丰富，硬度较高，不容易被完全化学风化。土体中的原生矿物主要是石英、长石、云母类矿物，其次为角闪石、磁铁矿等。这些矿物的化学性质稳定或较稳定，具有强或较强的抗水性和抗风化能力，亲水性弱或较弱。

(二) 次生矿物

土体中的次生矿物是岩石在风化成土过程中新生成的矿物，是原生矿物进一步氧化、水化、水解及溶解等化学作用而形成的。在自然界，最常见的次生矿物有粘土矿物、含水倍半氧化物及次生二氧化硅。粘土矿物是次生矿物中数量最多的矿物，主要是由各种硅酸盐类矿物分解形成的含水铝硅酸盐。粘土矿物的颗粒极细，一般粒径小于 $5\mu\text{m}$ ，是构成土中粘粒的主要矿物成分。它在土中的相对含量即使不大，对土的工程性质也有极大的影响，对此在本章后将单独讨论。

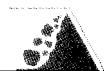
含水倍半氧化物常以 $\text{R}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 表示，R 主要是三价的铝和铁，如铝矾土 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) 和褐铁矿 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) 等，它们是各种硅酸盐矿物分解后残留的非溶性次生矿物。含水倍半氧化物大多呈凝胶状的非晶体结构或呈显微结晶，颗粒极细，粒径一般小于 $0.1\mu\text{m}$ ，亲水性强。次生二氧化硅，一般都含结晶水，分子式为 $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ，是由硅酸盐矿物解析出的次生矿物，也呈凝胶状。它的颗粒细小，形成土中的粘粒，亲水性较弱，性质稳定。次生氧化物在土体中含量较少，但对土的性质有重要影响，主要起粘土颗粒间的胶结作用，使土体呈团状结构。

(三) 水溶盐

水溶盐实际上是可溶性次生矿物，以固体形式存在于土体中，组成土体的固体部分。土体中的水溶盐根据其在水中溶解度的大小，可分为易溶盐、中溶盐及难溶盐三类。易溶盐包括全部氯盐及钾、钠的硫酸盐、碳酸盐，其溶解度为几十至几百克每升，最常见的有岩盐 (NaCl)、钾盐 (KCl)、芒硝 ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) 和苏打 ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) 等。中溶盐主要有石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)，溶解度约为 2g/L 。难溶盐主要是方解石 (CaCO_3) 和白云石 (MgCO_3)，溶解度极小，仅几十毫克每升。土中盐类的溶解和结晶会影响到土的工程性质，硫酸盐还对金属和混凝土有一定的腐蚀作用，故工程中对易溶盐和中溶盐的含量有一定限制。例如，土坝的填土要求总量不超过 8% ，铁路路堤填土不超过 5% ，其中硫酸盐应不超过 2% 。由于土中盐类的存在，对孔隙水中离子的浓度和类型会产生影响，这又是影响土的物理性质的因素。

(四) 有机质

土中的有机质由动植物残骸分解物组成，分解彻底的称为腐殖质。有机质的化学成分可以分为碳水化合物、蛋白质、脂肪、碳氢化合物及碳等五类，其中，碳水化合物以纤维素 ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_3$) 为主要成分。腐殖质的颗粒极细，粒径小于 $0.1\mu\text{m}$ ，呈凝胶状，带有电荷，具有极强的吸附性。有机质含量对土的性质影响巨大，比化学活性最强的粘土矿物——蒙脱石更大。例如，土中含有 $1\% \sim 2\%$ 有机质时，其对液限和塑限的影响相当于



10%~20%蒙脱石的影响。当土体的含水率较高时,有机质的存在将使土体产生随含水率的变化具有可逆转的膨胀收缩变形;但当含水率低于某界限后,土体的性质将发生不可逆变化。如含有机质的土,用烘干土做液塑限试验,较用天然含水率的土做液塑限试验,得到的液限和塑性指数要低很多。

土壤中的有机质是土壤矿物组成中性质最不稳定、最易变化的部分,一般将土壤中的有机质分为非腐殖质和腐殖质两大类。非腐殖质包括构成生物体的普通有机化合物,如各种低分子的有机酸、单糖、氨基酸、纤维、木质素、蛋白质、脂蜡和色素等;腐殖质为土壤泥炭、底泥(和煤)中所特有的化合物,它们呈黄棕到黑色,没有确定的物理性质和化学性质,到目前为止,腐殖质准确的化学成分也不清楚。非腐殖质和腐殖质两类物质之间无清楚界限,也无法将它们完全分别开来。一方面,它们在土壤中常是通过不同的力彼此结合在一起;另一方面,它们中的某些组分是相同的。在土壤中,它们大多通过物理的或(和)化学的力与土壤矿物部分相结合,有的结合得很牢,以至于难以将它们不加改变地与土壤矿物分离。

各种有机物质在土壤中处于不断变化中,植物残体中易于分解成分的半衰减期($t_{1/2}$)一般少于3个月。它们不断分解为 CO_2 、 H_2O 和各种中间产物,并转化为腐殖质和微生物体。腐殖质也在不断矿化和转化为微生物体,不过其分解速率较非腐殖质慢得多。

当土体中的有机质含量超过5%时,它对土的工程性质就会产生很大的影响。目前,对有机质的认识还远不及对粘土矿物的认识,但可知其一般规律是:随着有机质含量的增加,土的分散性加大,天然含水率增高(有机土的含水率可高达200%以上),干密度减小(有些有机土干密度可低于 $1\text{g}/\text{cm}^3$),胀缩性增加(有机土的胀缩性可大于50%),压缩性增大,强度减小,承载力降低,对工程极为不利。通常地表土的有机质含量较为丰富,修筑建筑物一般将有机质含量高的土层清除,工程上称为清基。作为堤坝等土工建筑物填筑用土的有机质含量也有限制,例如,我国的规范要求筑坝土料有机质含量不超过5%,防渗结构土料有机质含量不超过2%等。

三、粘土矿物

粘土矿物是组成土体的次生矿物中数量最多的一类,是由母岩内各种硅酸盐矿物分解形成的含水铝硅酸盐矿物。通常,粘土矿物颗粒都极细小,是粘粒组中的主要矿物成分。粘土矿物种类繁多,基本以晶体形式存在。所谓晶体矿物,是指组成矿物的原子、离子在空间有规律的排列,不同的几何排列形式形成不同的晶体结构。组成晶体结构的最小单元称为晶胞。

常见粘土矿物的晶胞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。硅氧四面体由4个氧原子堆积中心的空隙中充填1个硅原子构成一个等边四面体,如图1-3(a)所示。硅氧四面体首先形成硅氧四面体层,如图1-3(b)所示,常用一个梯形符号表示硅氧四面体层,如图1-3(c)所示。铝氢氧八面体如图1-4(a)所示,它的顶端是6个氢氧根,上下各3个,构成1个八面体,中心为铝原子或镁原子。铝氢氧八面体首先形成铝氢氧八面体层,如图1-4(b)所示,常用一个矩形符号表示铝氢氧八面体层,如图1-4(c)所示。

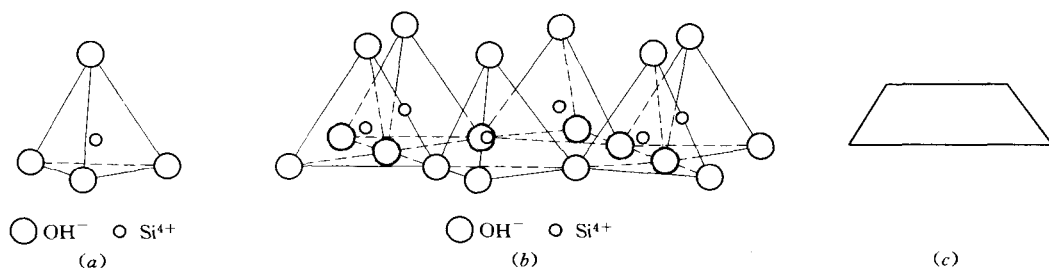


图 1-3 四面体和四面体层

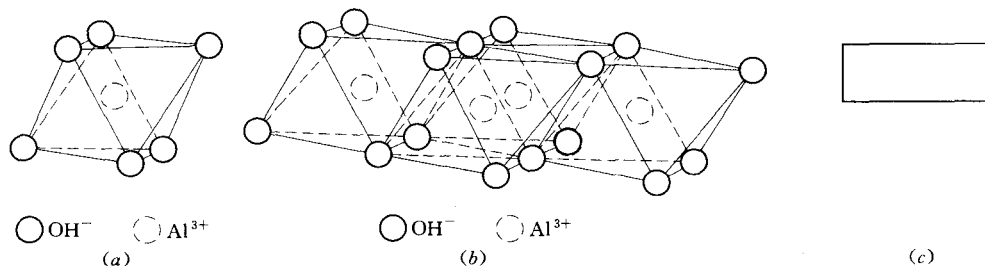


图 1-4 八面体和八面体层

不同的粘土矿物的结构都是由硅氧四面体层和铝氢氧八面体层两种基本结构单元不同组合而组成的。相同结构的不同粘土矿物，则是由于硅氧四面体中心的 Si 原子或铝氢氧八面体中心的 Al 原子被其他性质相近的原子如 Fe、Mg 等置换的结果。置换后，矿物的结构形式不变，但其物理化学性质发生了变化，形成新的矿物，这种现象叫同像置换或同形替代。

在自然界，无论是硅氧四面体还是硅氧四面体层都不能单独形成矿物晶胞。最简单的矿物是由八面体层构成的水铝矿，分子式为 $\text{Al}_2(\text{OH})_6$ ，结构形式如图 1-5 (a) 所示，铝处在八面体中心位置，只有 2/3 被占满，故称为二八面体。当中心的铝被镁所置换时，将全部占满中心位置，称为三八面体，成为水镁石，分子式为 $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$ ，结构形式如图 1-5 (b) 所示。

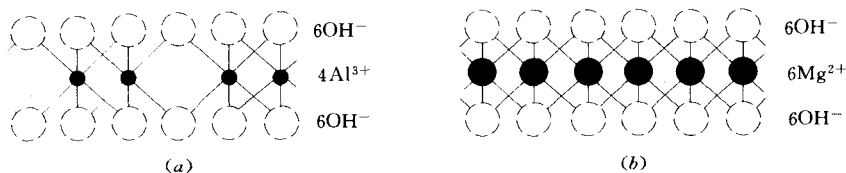
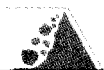


图 1-5 由八面体层组成的最简单层状矿物
(a) 水铝矿（二八面体）；(b) 水镁矿（三八面体）

由四面体层和八面体层相互叠接而成的矿物称为层状结构矿物，主要类型有高岭石、蒙脱石、伊利石、绿泥石等。



(一) 高岭石组

高岭石组实际上是一类矿物，以高岭石为代表。高岭石的名称来源于我国江西浮梁高岭山（景德镇附近），因为那里最早发现高岭石矿物。高岭石为两层结构，由一层硅氧四面体层和一层铝氢氧八面体层通过公共的氧原子连接成 1 个晶胞，晶胞的厚度为 $7.2\text{\AA}$ ($1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$)。晶胞内的电荷是平衡的，晶胞之间是氧原子和氢氧根连接，氢氧根中的氢与相邻晶胞中的氧形成氢键，起着连接作用，故性质是较稳定的，水分子不易进入晶胞间而发生膨胀。典型的高岭石晶体由 70~100 层晶胞组成，属三斜及单斜晶系，密度为 $2.58\sim 2.61\text{g/cm}^3$ ，它的水稳性好，可塑性低，压缩性低，亲水性差。

高岭石矿物产于酸性环境中，是花岗岩风化后的产物，通常来源于长石的水解，分子式为 $\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ ，其结构见图 1-6。

属于两层结构的晶体矿物还有埃洛石，它的晶胞间有水分子进入，呈结晶水状态存在，故亦称多水高岭石，分子式为 $\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 。由于晶胞间存在结晶水，埃洛石晶体常呈卷曲状或管状，含有此类矿物的土，其密度都较低。

(二) 蒙脱石组

蒙脱石组的晶胞属三层结构，它由两层硅氧四面体层夹一层铝氢氧八面体层构成，每个晶胞的厚度为 $14\text{\AA}$ 。作为单个粘土片的蒙脱石晶体一般仅由几层到十几层晶胞叠加而成，两层晶胞之间是以氧原子

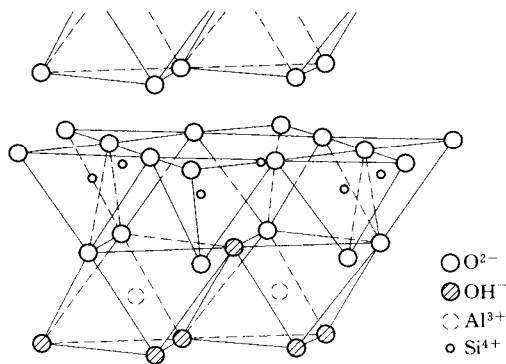


图 1-6 高岭石的晶胞结构

与氧原子相联，靠分子间相互作用力（范德华力）相互连接，连接力很弱，水分子容易进入晶胞之间，使晶胞之间的间距增大。因此，蒙脱石的晶格是活动的，吸水后体积会发生膨胀，体积可增大数倍，脱水后则可收缩。膨胀土就是组成它的粘土矿物中含有一定数量的蒙脱石组矿物的缘故。一般蒙脱石含量在 5% 以上，土体就会有明显的胀缩性。蒙脱石的结构见图 1-7。

蒙脱石的分子式为 $\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ，以氧化物表示为 $4\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ，相应的理论含量分别为 66.9%、28.3%、5.0%，它属斜方晶系。蒙脱石矿物呈灰白色、青色、桃红色，比重一般为 2.2~2.7，具有高塑性、高压缩性、低强度、低渗透性，液限可达 150%~170%，塑性指数可达 100~650。

蒙脱石常由火山灰、玄武岩在碱性和排水不良的环境里风化而成。蒙脱石的八面体层中同像置换非常发育，从而形成一系列类质同像矿物，如拜来石、囊脱石、皂石等。在湿润温暖的气候条件下，蒙脱石中的一部分 SiO_2 可能被溶滤析出而转变为伊利石、高岭石或其他粘土矿物。

(三) 伊利石组

伊利石是云母类水化物粘土矿物的统称，也是三层结构，晶胞厚为 $10\text{\AA}$ 。与蒙脱石的不同之处是，伊利石的类质同像置换现象主要发生在硅氧四面体中，约有 20% 的硅被铝、

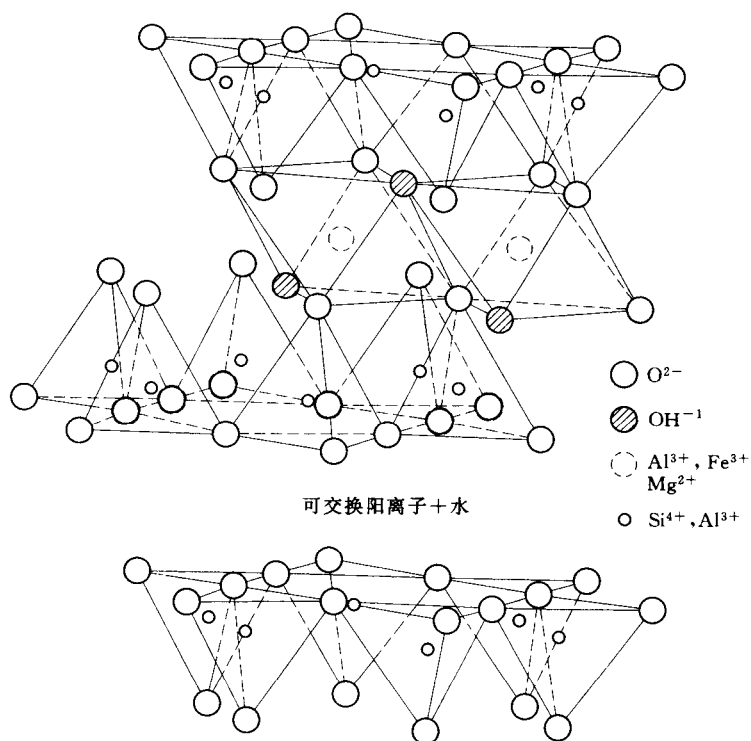


图 1-7 蒙脱石的晶胞结构

铁置换，由此而产生的不平衡电荷由进入晶胞之间的钾、钠离子（主要是 K^+ ）来平衡。钾离子与四面体层界面上的氧离子形成的钾键比较强，它起到晶胞与晶胞之间的连接作用。因此，水分子就不易进入，遇水膨胀，脱水收缩的能力低于蒙脱石。伊利石矿物晶体常由十几层到几十层晶胞组成，其力学性质介于高岭石与蒙脱石之间。

伊利石的分子式为 $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2 \cdot nH_2O$ ，典型的伊利石含 K_2O 6.3%，属斜方晶系，比重为 2.6~3.0，可塑性较低。伊利石是较不稳定的中间产物，形成条件是要有一定的钾离子。我国黄河、长江流域的沉积土以及沿海软粘土中，其粘土矿物大部分以伊利石为主，故其塑性指数较低。

上述高岭石、蒙脱石、伊利石是在自然界中最常见、最重要的粘土矿物，因为晶格结构的差异和同像置换，使他们的力学性质也有很大差别。例如，不同粘土矿物的液限、塑限和塑性指数明显不同，由他们组成的粘土的力学性质也不同。

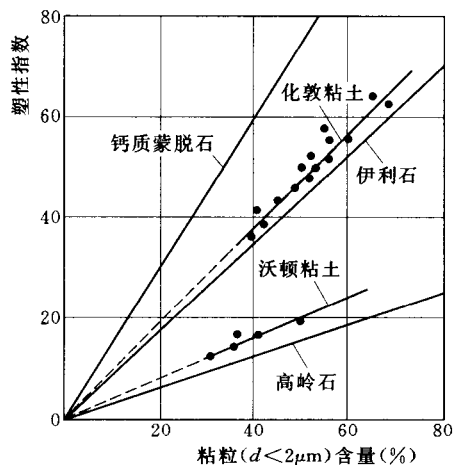


图 1-8 塑性指数与粘粒含量的关系

图 1-8 为塑性指数与粘粒 ($d < 2\mu m$) 颗粒百分含



量的关系图。同样的粘粒含量，塑性指数以蒙脱石最高，伊利石次之，高岭石最低，这些线的斜率也就是活动性指标。指标越大，表面力与水分子力之间的相互作用愈强烈，亲水性越强。

不同粘土矿物的力学强度有很大差别，如以残余内摩擦角 φ'_r 来看，高岭石的 φ'_r 为 12° ，伊利石的 φ'_r 为 10.2° ，蒙脱石的 φ'_r 为 $4^\circ \sim 10^\circ$ 。这种差别是粘土矿物的层状结构造成的，粘土矿物晶体的晶胞间联结强度不同，反映出来的抗剪强度不同。如蒙脱石的层间联结力最弱，它的抗剪强度也最低。

除此以外，在孔隙比相同时，不同粘土矿物组成的土体，渗透系数也有很大差别，图 1-9 给出了不同矿物的孔隙比与渗透系数的关系。从图中可以看出，蒙脱石的孔隙比变化范围最大，渗透系数则最小，高岭石的孔隙比变化范围最小，而渗透系数最大。即使是同一种粘土矿物，交换阳离子类型对渗透系数也有较大的影响，如孔隙比为 7 时，钠蒙脱石的渗透系数要比钾蒙脱石的大 300 倍左右。

(四) 其他粘土矿物

土体中的粘土矿物主要是高岭石、伊利石和蒙脱石，此外还有少量的绿泥石和水铝英石。绿泥石由三层结构中间再夹一层铝氢氧八面体连接起来，属 2:1:1 型的层状结构，晶胞间距为 $14\text{\AA}$ ，分子式为 $\text{Mg}_6[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_8 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 。它一般由变质岩风化而来，性质类似伊利石。水铝英石属非晶质矿物，X 衍射分析效果不佳，可用远红外光谱分析法鉴定，可以认为是四面体和八面体无规律排列组成的矿物。它常与多水高岭石伴生，在良好的排水条件下由火山灰风化而成。水铝英石在工程性质上的特点是：凡含有水铝英石的粘土，都具有很高的灵敏性和活动性，用静水沉降法进行颗粒分析时，一般分散剂往往不起作用，反而产生絮凝。含有水铝英石的粘性土进行液限、塑限试验时，和有机质土有类似特性，即用自然含水率的土做出的结果要比风干土的高得多，反映出含水率的变化对土的性质有不可逆的影响。

除了层状结构的粘土矿物外，还有链状结构的粘土矿物，如坡缕缟石和海泡石，但自然界中不多见。

四、粘土矿物鉴定

不同的粘土矿物，物理力学性质差别很大，而粘土层在地球表面分布广泛，与人们生活和工程建设关系密切。因此，有必要对粘土矿物成分进行鉴定，区分不同粘性土层中的粘土矿物，了解土的物理力学性质，为工程建设服务。鉴定粘土矿物成分的方法很多，但到目前为止，还没有一种方法能够比较准确地确定粘土中各种粘土矿物的含量。由于天然粘性土中往往存在几种不同的粘土矿物，常常需用几种方法进行综合分析，方能较准确地

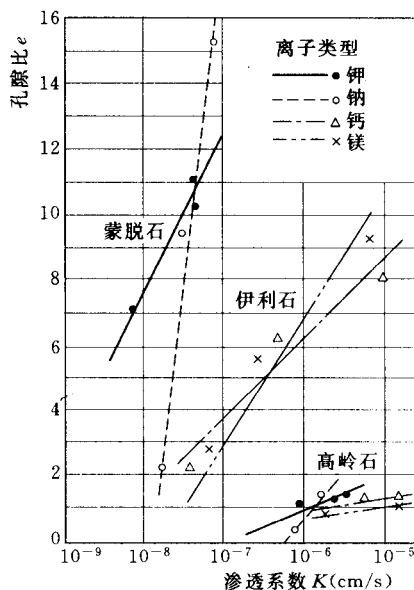


图 1-9 孔隙比与渗透系数的关系