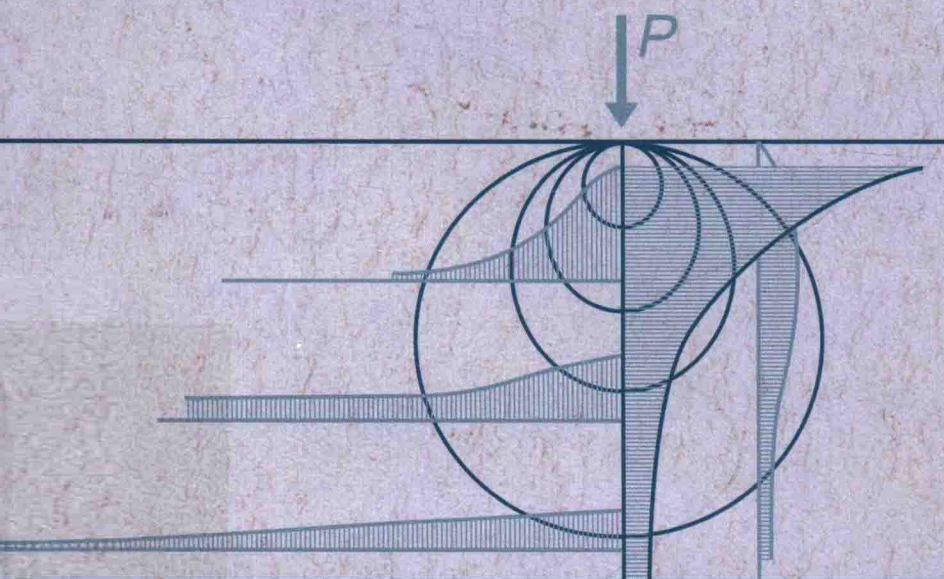


主编◇刘俊芳

土力学



土力学

主编 刘俊芳

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

土力学 / 刘俊芳主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2017.5

ISBN 978-7-5643-5394-0

I. ①土… II. ①刘… III. ①土力学 IV. ①TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 083485 号

土力学

主编 刘俊芳

责任编辑	杨 勇
封面设计	墨创文化
	西南交通大学出版社
出版发行	(四川省成都市二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	四川森林印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	10.75
字 数	242 千
版 次	2017 年 5 月第 1 版
印 次	2017 年 5 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-5394-0
定 价	29.80 元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

自参加工作以来，编者一直承担着“土力学”课程的教学工作，细数已有10年之久。课堂教学一直以讲为主，故教材的选择以老师为主体。但随着土木工程专业的“华约”认证，新一轮培养方案的修订，各学科包括土力学的教学学时锐减，以我校为例，由原来的40学时，降为32学时，但教学效果有明确的达标度要求。1. 应用力学知识解决土木工程专业的复杂工程问题；2. 采用科学方法对土木工程专业的复杂工程问题进行研究。如何提高教学效果，从教材角度出发，应更多地适合学生自学，即教材应以学生为主，故编写该教材。

该教材的特点：

1. 适合学生自学，每一章都有导学思路。
2. 内容浅显易懂，适合初次接触土力学的学生或技术工人。

在教材编写过程中，借鉴了各个优秀教学团队的精品课程内容，如清华大学的土力学精品课程，以及其他优秀教材的内容安排等，在此衷心感谢。

本书共10章，其中前8章由内蒙古工业大学土木工程学院道交系刘俊芳老师编写，第9章和第10章由内蒙古工业大学土木工程学院实验中心郭莹莹老师编写。另外，在本书编写过程中编者得到了李驰老师的鼓励和指点，深表感谢！

编 者

2017年2月



目 录

绪 论	001
第 1 章 土的物理性质和工程分类	002
1.1 土的形成	002
1.2 土的组成	005
1.3 土的三相比比例指标	010
1.4 土的结构	012
1.5 土的物理状态表征	014
1.6 土的分类标准和地基土的工程分类	015
第 2 章 土的渗透性及渗透规律	018
2.1 概 述	018
2.2 土的渗透性及渗透规律	019
2.3 渗透力与渗透变形	027
2.4 二维渗流及流网	029
第 3 章 土中应力分析	032
3.1 一点应力状态的表示方法	032
3.2 土中应力分析	037
3.3 基底压力	044
第 4 章 土的压缩性及固结理论	047
4.1 侧限压缩试验	047
4.2 侧限压缩试验指标	049
4.3 现场载荷试验及变形模量	051
4.4 地基最终沉降量计算	054
4.5 饱和土体渗流固结理论	063
第 5 章 土的抗剪强度	069
5.1 概 述	069
5.2 库仑公式	069
5.3 莫尔库仑抗剪强度理论	070

5.4	土的抗剪强度指标的试验方法	071
5.5	基于三轴试验的孔隙压力系数	075
5.6	抗剪强度指标的选择	076
第6章	土压力	078
6.1	土压力的类型	078
6.2	静止土压力	079
6.3	朗肯土压力理论	080
6.4	库仑土压力理论	083
6.5	两种土压力的比较	086
第7章	土坡稳定分析	087
7.1	无黏性土坡的稳定性分析	087
7.2	黏性土坡的稳定性分析	088
7.3	关于土坡稳定分析的几个问题	092
第8章	地基承载力	093
8.1	概 述	093
8.2	按塑性区开展范围确定地基承载力	094
8.3	按极限荷载确定地基极限承载力	096
8.4	按原位测试成果确定地基承载力	097
8.5	按地基规范确定地基承载力	098
第9章	土工试验	099
9.1	室内土工试验	099
9.2	原位测试技术	136
第10章	桩的检测技术	146
10.1	桩的承载力检测	146
10.2	桩身完整性检测	153
参考文献		162
附录 I	高应变法传感器安装	163
附录 II	试打桩与打桩监控	165
II.1	试打桩	165
II.2	桩身锤击应力监测	165

绪 论

“普天之下，莫非王土”，“温柔的人有福了，因她必将承载以土地”，故不管是帝王之争，还是基督的教义，都将土地作为至宝，土地对于我们何等重要，可见一斑。生活中的我们也是与土息息相关的，土地是人类赖以生存的根本，“衣食住行”都离不开土地。土力学正是人类从“住，行”角度出发研究土体力学性质的一门学科。居住的房屋，奔驰的汽车都以大地为支撑，故从有了人类以来，就有了对土的力学“研究”，只是未形成学科而已。

土，不同于钢筋，也不同于混凝土，是天然形成的，是岩石在地质大循环的过程中形成的。岩石到土的过程经历了风化、沉积、搬运等地质作用，故形成过程不同，土性截然不同。岩石风化后的固体颗粒堆积在一起，其孔隙中填充水或气体便是土体，故土体不是匀质材料，是由固体颗粒、水、气三种介质组成的三相体，其土性复杂即源于此。

土力学是以土为研究对象的一门学科，其作为一门正式的学科，是以 1925 年太沙基出版的《土力学》一书作为标志点。卡尔·太沙基，被誉为土力学之父，他是从工程技术人员逐渐成为一名专家乃至学者的。正如他自己谦逊地提到，土力学的诞生，不是个人的力量，而是时代的力量，是时代的需求。工程实践的需求是土力学发展的最大动力，故土力学应该是“从实践中来，到实践中去”的一门学科。

土力学，作为一门力学课程，由于土性的复杂，其分析方法与其他力学不同。土力学借鉴了连续体力学的分析方法，结合工程实践经验和试验，形成了其独特的分析方法，故在很多文章中看到土力学是一门“伪力学”的论述，实际上应该无视其真伪，只要能够为工程实践做到良好的服务就是“真”。故土力学的研究或学习应始终秉承为工程实践服务的理念。

本书的主要内容包括：第 1 章 土的物理性质及工程分类；第 2 章 土的渗透性及渗透规律；第 3 章 土中应力计算；第 4 章 土的压缩性及固结理论；第 5 章 土的抗剪强度；第 6 章 土压力；第 7 章 土坡稳定分析；第 8 章 地基承载力；第 9 章 土工试验；第 10 章 桩的检测技术。即囊括了土力学的三大理论（土的渗透性理论、变形理论和强度理论），以及土力学的工程应用问题（沉降计算问题、地基承载力问题、土压力问题、土坡稳定问题）和土力学的基础知识。

第 1 章 土的物理性质和工程分类

【导 学】

该章节的内容是开启土力学学习之旅的起点，土力学的研究对象是土体，所以要对土体有一个清楚的认识。该章节包含了 6 小节的内容，即 6 个知识模块。这 6 个知识模块是我们对土进行认识的 6 个窗口。对于一种土体的完整表述要包括以下几个方面：

- (1) 形成过程。
- (2) 土体颗粒特征，包括固体颗粒大小搭配情况、颗粒形状、颗粒矿物成分等。
- (3) 液相的存在状态。
- (4) 三相之间的比例关系，可以用 9 个三相比例指标中的几个来表示。
- (5) 土的结构。
- (6) 土的物理状态。
- (7) 工程分类。

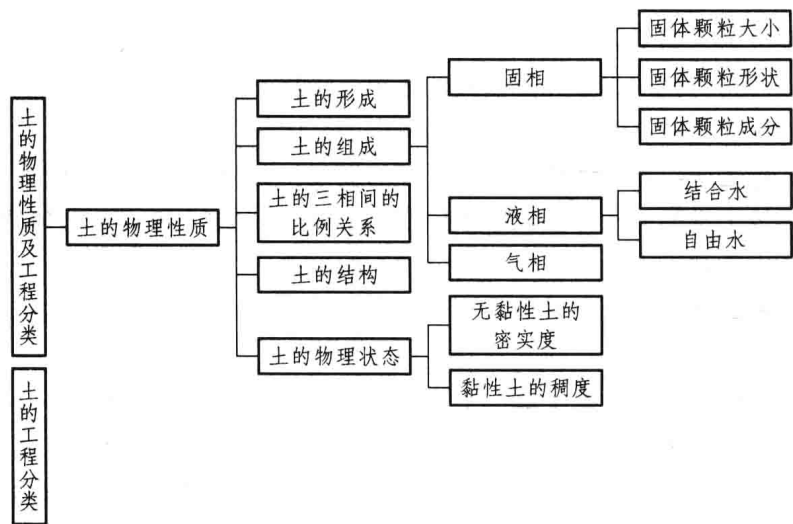


图 1.1 导学图

该章节的知识点多且较为分散，所以将导学图纳入心中，对各个小知识点进行归类，是学习的有效方法。

1.1 土的形成

在土木工程中，土是指岩石风化后形成的碎散的、覆盖于地表的、由矿物颗粒和岩

石碎屑组成的堆积体。地球表面的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。堆积下来的土，在很长的地质年代中发生复杂的物理化学变化，逐渐压密、岩化，最终又形成岩石，就是沉积岩。因此，在自然界中，岩石不断风化破碎形成土，而土也会不断压密、岩化变成岩石。这一循环过程重复地进行着。工程上遇到大多数土都是在第四纪地质历史时期内所形成的。第四纪地质年代的土又可化为更新世和全新世两类。其中第四纪全新世中晚期沉积的土，亦即在人类文化期以来所沉积的土称为新近代沉积土，一般为欠固结土，强度较低。

按形成土体的地质作用力和沉积条件（沉积环境），可将土体划分为若干成因类型，如残积、坡积、洪积、冲积等。不同的成因类型决定了土体的性质成分及其工程地质特征。

1.1.1 残积土

残积土体是由基岩风化而成，未经搬运留于原地的土体。它处于岩石风化壳的上部，是风化壳中剧风化带。残积土一般形成剥蚀平原。

影响残积土工程地质特征因素主要是气候条件和母岩的岩性：

1. 气候因素

气候影响着风化作用类型，从而使得不同气候条件不同地区的残积土具有特定的粒度成分、矿物成分、化学成分。

（1）干旱地区：以物理风化为主，只能使岩石破碎成粗碎屑物和砂砾，缺乏黏土矿物，具有砾石类土和工程地质特征。

（2）半干旱地区：在物理风化的基础上发生化学变化，使原生的硅酸盐矿物变成黏土矿物；但由于雨量稀少，蒸汽量大，故土中常含有较多的可溶盐类，如碳酸钙、硫酸钙等。

（3）潮湿地区：①在潮湿而温暖，排水条件良好的地区，由于有机质迅速腐烂，分解出 CO_2 ，有利于高岭石的形成。②在潮湿温暖而排水条件差的地区，则往往形成蒙脱石。

可见：从干旱、半干旱地区至潮湿地区，土的颗粒组成由粗变细；土的类型从砾石类土过渡到砂类土、黏土。

2. 母岩因素

母岩的岩性影响着残积土的粒度成分和矿物成分；酸性火成岩，含较多的黏土矿物，其岩性为粉质黏土或黏土；中性或基性火成岩，易风化成粉质黏土；沉积岩大多是松软土经成岩作用后形成的，风化后往往恢复原有松软土的特点，如：黏土岩形成黏土；细砂岩形成细砂土等。

残积物的厚度在垂直方向和水平方向变化较大；这主要与沉积环境、残积条件有关（山丘顶部因侵蚀而厚度较小；山谷低洼处则厚度较大）。残积物一般透水性强，以致残积土中一般无地下水。

1.1.2 坡积土

坡积土体是残积物经雨水或融化了的雪水的片流搬运作用，顺坡移动堆积而成的，

所以其物质成分与斜坡上的残积物一致。坡积土体与残积土体往往呈过渡状态，其工程地质特征也很相似。

(1) 岩性成分多种多样。

(2) 一般见不到层理。

(3) 地下水一般属于潜水，有时形成上层滞水。

(4) 坡积土体的厚度变化大，由几厘米至一二十米，在斜坡较陡处薄，在坡脚地段厚。一般当斜坡的坡角越陡时，坡脚坡积物的范围越大。

1.1.3 洪积土

洪积土体是暂时性、周期性地面水流——山洪带来的碎屑物质，在山沟的出口地方堆积而成。洪积土体多发育在干旱半干旱地区，如我国的华北、西北地区。其特征为：距山口越近颗粒越粗，多为块石、碎石、砾石和粗砂，分选差，磨圆度低、强度高，压缩性小（但孔隙大，透水性强）。距山口越远颗粒越细，分选好，磨圆度高，强度低，压缩性高。

此外：洪积土体具有比较明显的层理（交替层理、夹层、透镜体等）；洪积土体中地下水一般属于潜水。

1.1.4 湖积土

湖积土体在内陆分布广泛，一般分为淡水湖积土和咸水湖积土。淡水湖积土：分为湖岸土和湖心土两种。湖岸多为砾石土、砂土或粉质砂土；湖心土主要为静水沉积物，成分复杂，以淤泥、黏性土为主，可见水平层理。咸水湖积物以石膏、岩盐、芒硝及 RCO_3 岩类为主，有时以淤泥为主。总之，湖积土体具有以下工程地质特征：

(1) 分布面积有限，且厚度不大。

(2) 具独特的产状条件。

(3) 黏土类湖积物常含有机质、各种盐类及其他混合物。

(4) 具层理性，具各向异性。

1.1.5 冲积土

冲积土体是由于河流的流水作用，将碎屑物质搬运堆积在它侵蚀成的河谷内而形成的。

冲积土体主要发育在河谷内以及山区外的冲积平原中，一般可分为三个相，即河床相、河漫滩相、牛轭湖相。

(1) 河床相：主要分布在河床地带，冲积土一般为砂土及砾石类土，有时也夹有黏土透镜体，在垂直剖面上土粒由下到上，由粗到细，成分较复杂，但磨圆度较好。

山区河床冲积土厚度不大，一般为 10 米左右；而平原地区河床冲积土则厚度很大，一般超过几十米，其沉积物也较细。

河床相物质是良好的天然地基。

(2) 河漫滩相冲积土是由洪水期河水将细粒悬浮物质带到河漫滩上沉积而成的。一般为细砂土或黏土，覆盖于河床相冲积土之上。常为上下两层结构，下层为粗颗粒土，上层为泛滥的细颗粒土。

(3) 牛轭湖相冲积土是在废河道形成的牛轭湖中沉积下来的松软土。由含有大量有机质的粉质黏土、粉质砂土、细砂土组成, 没有层理。

(4) 河口冲积土: 由河流携带的悬浮物质, 如粉砂、黏粒和胶体物质在河口沉积的一套淤泥质黏土、粉质黏土或淤泥, 形成河口三角洲。往往作为港口建筑物的地基。

另外, 还有很多类型: 冰川、崩积、风积、海洋沉积、火山等。

【复习思考题】

1. 为何要了解土的形成过程?
2. 土是如何形成的? 常见的地基土形成于哪个年代?
3. 不同形成环境形成的土层的工程地质特性有何差异?

1.2 土的组成

土是由固相、液相、气相组成的三相分散系。固相物质包括多种矿物成分组成土的骨架, 骨架间的空隙为液相和气相填满, 这些空隙是相互连通的, 形成多孔介质。液相主要是水(溶解有少量的可溶盐类)。气相主要是空气、水蒸气, 有时还有沼气等。土中三相物质的含量比例不同, 其形态和性状也就不同, 自然界的土的固相物质约占土体积的一半以上。不同成因类型的土, 即使达到相同的三相比比例关系, 但由于其颗粒大小、形状、矿物成分类型及结构构造上的不同, 其性质也会相去甚远。土与岩石的主要区别在于固体颗粒间的联结很弱, 因此, 其强度较其他固体材料要低得多, 且极易受外界环境(湿度、温度)的影响。由于土的成因类型、形成历史不同, 其性质及性状极其复杂多变。为了对土性的复杂的工程特性做到基本了解, 首先要对其组成中的三相各自进行分析。

1.2.1 固体颗粒

固体颗粒构成土骨架, 它对土的物理力学性质起决定性的作用。研究固体颗粒就要分析粒径的大小及不同尺寸颗粒在土中所占的百分比, 称为土的粒径级配。另外, 还要研究固体颗粒的矿物成分以及颗粒的形状。这三者之间又是密切相关的。例如粗颗粒的成分都是原生矿物, 形状多呈单粒状; 而颗粒很细的土, 其成分多是次生矿物, 形状多为针片状。

1. 固体颗粒大小分析——粒径级配

由于颗粒大小不同, 土可以具有很不相同的性质。例如: 粗颗粒的砾石, 具有很强的透水性, 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。颗粒的大小通常以粒径表示。由于土颗粒形状各异, 所谓颗粒粒径, 在筛分试验中用通过的最小筛孔的孔径表示。在水分法中用在水中具有相同下沉速度的当量球体的直径表示。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, 如图 1.2 所示。以砾石和砂粒为主要组成的土, 称为无黏性土, 以粉粒、黏粒和胶粒为主要粒径的土称为黏性土。

工程中, 实用的粒径级配分析方法有筛分法和水分法两种。

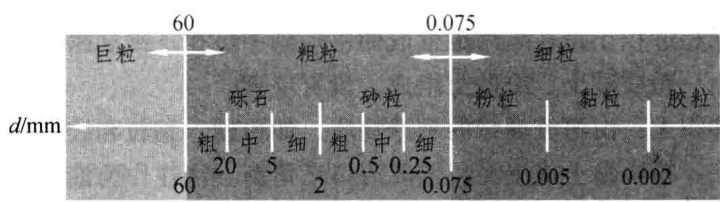


图 1.2 粒组图

筛分法适用于土颗粒大于 0.075 mm 的部分。它是利用一套孔径大小不同的筛子，将事先称过重量的烘干土样过筛，分别称留在各筛上的土重，然后计算相应的百分数。

水分法用于分析土中粒径小于 0.075 mm 的部分。根据斯托克斯 (Stokes) 定理，球状的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，按下沉速度进行颗粒粗细分组。基于这种原理，实验室常用密度计进行颗粒分析，称为密度计法。

筛分法和水分法的试验结果可以处理为如图 1.3 所示的粒径级配曲线。常用半对数坐标系画图。其中横坐标为粒径，纵坐标为小于某粒径的颗粒含量占总质量的百分比。粒径级配曲线的任意两点之间联系的斜率代表了某粒径范围的颗粒含量，曲线越陡，相应的粒组含量多，曲线缓相应的粒组含量少，如果曲线有平台，则相应粒组缺乏。为了进一步对土体粒径大小进行分析，定义小于某粒径的颗粒含量占总质量的百分比为 60% 时对应的粒径即为 d_{60} ，称为控制粒径；同理定义 d_{50} ，称为平均粒径； d_{10} ，有效粒径和 d_{30} 。土样的不均匀程度用不均匀系数 C_u 来表示， $C_u = d_{60} / d_{10}$ ； $C_u \geq 5$ ，称为不均匀土，反之称为均匀土。为了反映粒径的连续性，定义曲率系数 C_c ， $C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}}$ ； $C_c = 1 \sim 3$ 为连续级配， $C_c < 1$ 或 $C_c > 3$ 为不连续级配。不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 用于判定土的级配优劣： $C_u \geq 5$ 且 $C_c = 1 \sim 3$ 为级配良好的土；如果 $C_u < 5$ 或 $C_c > 3$ 或 $C_c < 1$ 为级配不良的土。

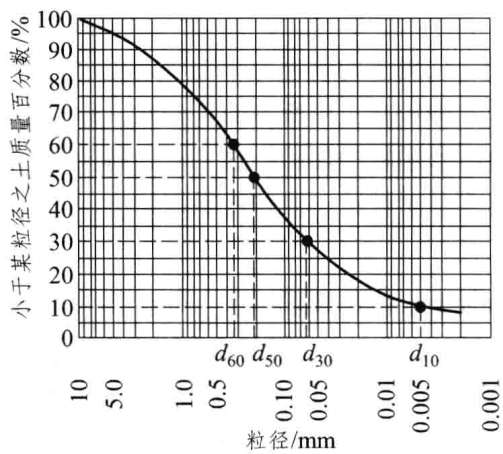


图 1.3 粒径级配累积曲线

2. 土体颗粒成分分析

土中固体部分的成分如图 1.4 所示，绝大部分是矿物质，另外或多或少有些有机质。

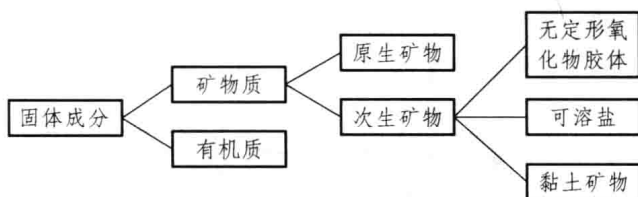


图 1.4 固体颗粒成分

原生矿物，是由岩石经过物理风化生成的，粗的土颗粒通常是由一种或多种原生矿物所组成的岩粒或岩屑，即使很细的岩粉也仍然是原生矿物。

次生矿物是由原生矿物经化学风化后形成的新的矿物成分。土中的最主要的次生矿物是黏土矿物。黏土矿物具有不同于原生矿物的复合层状的硅酸盐矿物，它对黏性土的工程性质影响很大。次生矿物还有倍半氧化物和次生二氧化硅。它们除以晶体形式存在以外，还常以凝胶的形式存在于土粒之间，增加了土体的抗剪强度。

可溶岩是第三种次生矿物，它们包括 CaCO_3 、 NaCl 、 MgCO_3 等。它们可能以固体形式存在，也可能溶解在溶液中，它们也可增加颗粒间的联结，增强土的抗剪强度。

黏土矿物是一种复合的铝-硅盐晶体，颗粒呈片状，是由硅片和铝片构成的晶包所组叠而成，可分成高岭石、伊利石和蒙脱石三种类型。

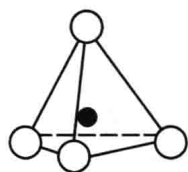


图 1.5 硅氧四面体

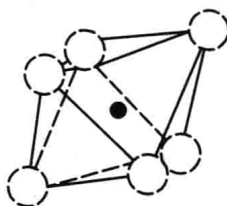


图 1.6 铝氢氧八面体

高岭石是两层结构，由一层硅氧四面体层和一层铝氧八面体层通过公共的氧原子连接成一个晶胞，其四面体层可以用一个等腰梯形表示。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。典型的高岭石有 70~100 层，属三斜及单斜晶体，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。

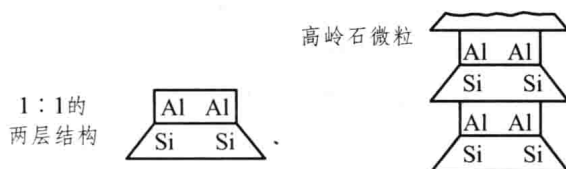


图 1.7 高岭石结构图

蒙脱石组属三层结构。它由两层硅氧四面体层夹一层氢氧化铝八面体层构成。

作为单个黏土片的蒙脱石只有几层，其特点是两层之间以氧原子与氧原子相联，靠分子间的相互作用力（范德华力）相互连接，连接力很弱，水分子容易进入晶胞之间，使晶胞距离增大。因之，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。膨胀土就是由于黏粒中含有一定数量的这类矿物的缘故。一般含量在 5% 以上，就会有明显的膨胀性。



图 1.8 蒙脱石结构图

伊利石是云母类黏土矿物的统称，亦为三层结构，与蒙脱石的不同之处是类质同像置换主要发生在硅四面体中，约有 20% 的硅被铝、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，钾键起到晶胞与晶胞之间的连接作用，连接力较强。因此，水分子就不易进入，通水膨胀、脱水收缩的能力低于蒙脱石，单片厚为十几层，其力学性质介于高岭石与蒙脱石之间。



图 1.9 伊利石结构图

研究表明，片状黏土颗粒表面常带有电荷，净电荷通常为负电荷，此即为黏土矿物的带电性质。1809 年，莫斯科大学列伊斯教授完成一项很有趣的试验——电渗电泳现象。他在潮湿的黏土块中，插入两根玻璃管，管内撒上一层净砂，注入清水至同样高度，再放入电极通以直流电经过一段时间后出现了如图所示的现象：正极玻璃管内的水慢慢混浊起来，同时水位逐渐下降，这说明极细小的黏粒本身带有一定量的负电荷，在电场作用下向正极移动，这种现象称为电泳。负极的玻璃管内，水仍然是清澈透明的，但水位逐渐升高，这说明水分子在电场作用下向负极移动，由于水中含有一定量的阳离子（ K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等），故水的移动实际是水分子随这些水化了的阳离子一起移动，这种现象称为电渗。电泳、电渗是同时发生的，统称为电动现象。电动现象可以用来加固软黏土地基，使软土的含水量降低，强度提高，在国内已有实际应用的例子。但因耗电量很大，费用较高，一般只用于已成建筑物的加固。

3. 固体颗粒形状和比表面积

颗粒形状和比表面积，原生矿物：一般颗粒较粗，呈粒状。有圆状、浑圆状、棱角状等。次生矿物：颗粒较细，多呈针状、片状、扁平状。比表面积：单位质量土颗粒所拥有的总表面积。对于黏性土，其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。高岭石的比表面积为 $10 \sim 20 \text{ m}^2/\text{g}$ ，伊利石为 $80 \sim 100 \text{ m}^2/\text{g}$ ，蒙脱石为 $800 \text{ m}^2/\text{g}$ 。

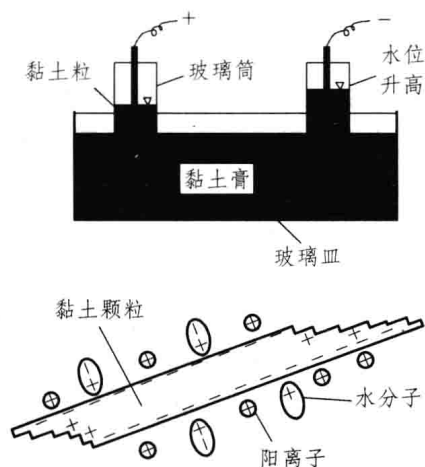


图 1.10 列伊斯电渗电泳试验

1.2.2 土中水

组成土的第二种主要成分是土中水。土中水除了一部分以结晶水的形式存在于固体颗粒内部的矿物中以外，可以分成结合水和自由水两大类。

结合水是受颗粒表面电场作用力吸引而包围在颗粒四周，不传递静水压力，不能任意流动的水。结合水根据土粒对其吸引力的强弱又分为强结合水和弱结合水。

强结合水排列致密，密度 $> 1 \text{ g/cm}^3$ ；冰点处于零下几十摄氏度；完全不能移动，具有固体的特性；温度略高于 100°C 时可蒸发。

弱结合水受电场引力作用，为黏滞水膜，外力作用下可以移动，不因重力而流动，有黏滞性。

自由水是不受颗粒电场引力作用的孔隙水。自由水分为毛细水和重力水。毛细水由于土体孔隙的毛细作用升至自由水面以上的水。毛细水承受表面张力和重力的作用；重力水是自由水面以下的孔隙自由水，在重力作用下可在土中自由流动。

1.2.3 土中气

自由气体是与大气连通的气体。对土的性质影响不大。

封闭气体则是指被土颗粒和水封闭的气体，其体积与压力有关。它的特点：会增加土的弹性；阻塞渗流通道，降低渗透性；溶解在水中的气体；吸附于土颗粒表面的气体。

【复习思考题】

1. 何谓黏粒、黏性土、黏土、黏土矿物？
2. 土中黏土矿物对土的性质有何影响？
3. 何谓粒径级配累积曲线？工程中如何应用粒径级配曲线分析土体？
4. 为何水对砂性土影响小而对黏性土的影响较大？

1.3 土的三相比例指标

土的三相之间的比例关系是土的工程力学性质表现的基石，为了对三相之间的比例关系做一个定量的描述，将土体简化为如下的三相比例简图。简图定义了 9 个物理量。

V ——总体积；

V_v ——孔隙体积； V_s ——固体颗粒体积； V_a ——气相体积； V_w ——液相水的体积；

m_s ——固体颗粒质量； m_w ——液体水的质量； m_a ——气相质量； m ——总质量。

在此 9 个物理量的基础上定义了 9 个三相比例指标用来表征土体三相之间的比例关系。

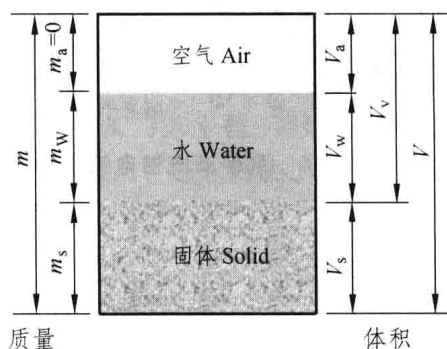


图 1.11 三相比例简图

1.3.1 基本试验指标

1. 土的密度 ρ

土的密度指的是土单位体积的质量，用 ρ 来表示。

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_s + m_w}{V_s + V_w + V_a} \quad (1.1)$$

单位：kg/m³ 或 g/cm³，一般范围：1.60 ~ 2.20 g/cm³。

相关指标：土的容重 $\gamma = \rho g$ ；单位 kN/m³。

2. 土粒比重 G_s

土粒比重指的是土粒的密度与 4 °C 时纯蒸馏水密度的比值。

$$G_s = \frac{m_s}{V_s(\rho_w^{4\text{ }^\circ\text{C}})} = \frac{\rho_s}{\rho_w^{4\text{ }^\circ\text{C}}} \quad (1.2)$$

单位：无量纲。一般范围：黏性土 2.70 ~ 2.75，砂土 2.65。

3. 土的含水量 W

土的含水量是土中水的质量与土粒质量之比，用百分数表示。

$$w(\%) = \frac{m_w}{m_s} = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (1.3)$$

单位：无量纲。一般范围：变化范围大。

1.3.2 其他换算指标

1. 孔隙比 e

土中孔隙体积与固体颗粒体积之比，为无量纲。

$$e = V_v / V_s \quad (1.4)$$

2. 孔隙率（孔隙度） n

土中孔隙体积与总体积之比，用百分数表示。

$$n(\%) = V_v / V \quad (1.5)$$

砂类土：28% ~ 35%。黏性土：30% ~ 50%，有的可达 60% ~ 70%。

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (1.6)$$

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (1.7)$$

3. 饱和度

土中水的体积与孔隙体积的比值；饱和度表示孔隙中充满水的程度：

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (1.8)$$

对于土： $S_r = 0$ ；对饱和土： $S_r = 1$ 。

4. 干密度

干密度是土被烘干时的密度。

$$\rho_d = m_s / V \quad (1.9)$$

干容重 $\gamma_d = \rho_d g$

5. 饱和密度

饱和密度是土被饱和时的密度。

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + \rho_w V_v}{V} \quad (1.10)$$

饱和容重 $\gamma_{\text{sat}} = \rho_{\text{sat}} g$

6. 浮容重

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \quad (1.11)$$

【复习思考题】

1. 何谓试验指标？何谓换算指标？
2. 九个三相比指标的工程应用是怎样的？
3. 试验室已有土样 50 kg，含水率 48.2%，而试验试样需要含水率为 12.5%，如何配制？