



高等学校土建类专业“十二五”规划教材

土力学

周凤玺 主编

TU
LI
XUE



化学工业出版社

高等学校土建类专业“十二五”规划教材

土 力 学

周凤玺 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是根据《高等学校土木工程本科指导性专业规范》编写的土木工程专业系列教材之一，系统地介绍了土力学的基础理论知识、分析计算方法以及在工程实践中的应用等。教材紧密结合土木工程本科人才培养目标和要求，既重视学科基础理论和知识的阐述，又突出综合能力的培养。

全书共分为 10 章，内容包括绪论、土的形成及三相组成、土的物理性质及工程分类、土的渗透性、土中应力、地基变形、土的抗剪强度、土压力、地基承载力和土坡的稳定性分析等。各章后附有相应的思考题和习题。

本书主要作为普通高等学校本科、高职高专土木工程、工程管理专业的教学用书，也可供其他专业师生及工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

土力学/周凤玺主编. —北京: 化学工业出版社,
2014. 1

高等学校土建类专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-18733-8

I. ①土… II. ①周… 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 (2013) 第 247561 号

责任编辑: 陶艳玲

责任校对: 宋 玮

装帧设计: 杨 北

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 11½ 字数 285 千字 2014 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 25.00 元

版权所有 违者必究

前 言

土力学是土木工程专业的一门专业基础课，它在一般基础课和专业课之间起着承上启下的作用。随着科学技术的发展和生产实践的不断探索，土力学理论也日显重要。本书是根据《高等学校土木工程本科指导性专业规范》编写的土木工程专业系列教材之一，较系统地介绍了土力学的基本理论知识、分析计算方法以及在工程实践中的应用等。

本书在系统地介绍了土力学基本理论的基础上，主要利用力学知识和土工试验技术，来研究土的物理力学特性及工程分类、土的渗透性及渗流、地基中的应力、土的压缩性与地基沉降计算、土的抗剪强度和地基承载力、土压力与土坡稳定分析等。

本书力求内容充实、概念清楚、层次分明、覆盖面广、重点突出。全书共分为 10 章，内容包括绪论、土的形成及三相组成、土的物理性质及工程分类、土的渗透性、土中应力计算、地基变形、土的抗剪强度、土压力、地基承载力和土坡的稳定性分析等。各章后附有相应的思考题和习题。

本书参编单位、人员和分工如下：由兰州理工大学周凤玺编写第 1、3、5 章、来春景编写第 2、8 章、胡燕妮编写第 4、9 章、丑亚玲编写第 7 章、王立宪编写第 10 章。由西北民族大学王晓琴编写第 6 章。由兰州理工大学周凤玺负责统稿。

限于编者理论水平，书中不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者
2013 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1	3.6.2 影响压实效果的因素	31
1.1 土力学的概念及研究对象	1	3.7 土的胀缩性、湿陷性和冻胀性	33
1.2 土力学学科的发展概况	2	3.7.1 土的胀缩性	33
1.3 课程的特点和学习要求	3	3.7.2 土的湿陷性	34
第 2 章 土的形成及三相组成	4	3.7.3 土的冻胀性	34
2.1 概述	4	3.8 土的工程分类	35
2.2 土的成因类型	4	3.8.1 土的分类原则和类型	35
2.3 土的三相组成	5	3.8.2 国外土分类体系综述	37
2.3.1 土的固体颗粒	5	3.8.3 我国关于土的工程分类体系	38
2.3.2 土中水	11	思考题与习题	43
2.3.3 土中气	12	第 4 章 土的渗透性	44
2.4 土的结构和构造	13	4.1 概述	44
2.4.1 土的结构	13	4.2 饱和土的渗流规律——达西定律	44
2.4.2 土的构造	14	4.3 渗透系数的确定方法	46
思考题与习题	15	4.4 渗透性的影响因素	48
第 3 章 土的物理性质及工程分类	16	4.5 层状土的等效渗透系数	49
3.1 概述	16	4.6 流网理论简介	50
3.2 土的三相比例指标	16	4.7 渗透变形与控制	52
3.2.1 土的三相比例关系图	16	思考题与习题	54
3.2.2 指标的定义	17	第 5 章 土中应力计算	56
3.2.3 指标之间的关系	20	5.1 概述	56
3.3 无黏性土的密实度	23	5.1.1 应力-应变关系的假定	56
3.3.1 砂土的相对密度	23	5.1.2 地基中常见的几种应力状态	57
3.3.2 无黏性土密实度划分的其他 方法	24	5.1.3 土力学中应力符号的规定	58
3.4 粉土的密实度和湿度	25	5.2 土中自重应力	58
3.4.1 粉土的概念	25	5.2.1 竖向自重应力	58
3.4.2 粉土的密实度和湿度	26	5.2.2 水平向自重应力	59
3.5 黏性土的物理特征	26	5.2.3 地下水位升降时的土中自重 应力	59
3.5.1 黏性土的稠度	26	5.3 基底压力	60
3.5.2 黏性土的物理状态指标	28	5.3.1 基底压力的分布规律	60
3.5.3 黏性土的活动度、灵敏度和触 变性	29	5.3.2 基底压力的简化计算	61
3.6 土的压实性	30	5.3.3 基底附加压力	63
3.6.1 击实试验及压实度	30	5.4 地基附加应力	65
		5.4.1 竖向集中力下的地基附加	

应力	65	7.3.2 三轴剪切试验	116
5.4.2 矩形基础和圆形基础下的地基 附加应力	68	7.3.3 无侧限抗压强度试验	119
5.4.3 平面问题条件下的附加应力	74	7.3.4 十字板剪切试验	120
5.4.4 几个问题的讨论	79	7.4 饱和黏性土的抗剪强度	121
思考题与习题	82	7.4.1 不排水抗剪强度	121
第6章 土的压缩性与地基变形	83	7.4.2 固结不排水抗剪强度	122
6.1 概述	83	7.4.3 排水抗剪强度	123
6.2 土的压缩性	83	7.4.4 抗剪强度指标的选择	123
6.2.1 压缩试验及压缩性指标	83	7.5 抗剪强度的影响因素	124
6.2.2 土的静力载荷试验和变形 模量	87	7.5.1 土的抗剪强度机理	124
6.2.3 回弹曲线和再压缩曲线	88	7.5.2 影响土强度的因素	126
6.3 土的固结状态	88	思考题与习题	128
6.3.1 超固结比 OCR	88	第8章 土压力	130
6.3.2 先期固结压力	89	8.1 概述	130
6.4 地基最终沉降量	90	8.2 静止土压力	131
6.4.1 弹性理论计算式	90	8.3 朗肯土压力理论	133
6.4.2 分层总和法	92	8.3.1 基本原理及假定	133
6.4.3 《建筑地基基础设计规范》推荐的 方法	96	8.3.2 朗肯主动土压力	134
6.5 地基变形与时间的关系	100	8.3.3 朗肯被动土压力	136
6.5.1 基本假设(一维课题)	100	8.3.4 几种常见情况下的朗肯土压力 计算	137
6.5.2 微分方程的建立(竖向 固结)	101	8.4 库仑土压力理论	139
6.5.3 固结微分方程的解析解	102	8.4.1 库仑主动土压力计算	139
6.5.4 地基固结度	103	8.4.2 库仑被动土压力计算	142
6.6 地基变形特征及防治措施	105	8.5 朗肯理论与库仑理论的比较	143
6.6.1 地基变形特征	106	思考题与习题	143
6.6.2 地基变形防治措施	106	第9章 地基承载力	145
思考题与习题	106	9.1 概述	145
第7章 土的抗剪强度	108	9.2 浅基础的地基破坏模式	145
7.1 概述	108	9.2.1 地基的三种破坏模式	145
7.2 土的抗剪强度理论	109	9.2.2 地基破坏模式的影响因素	146
7.2.1 库仑公式及抗剪强度指标	109	9.3 原位测试确定地基承载力	147
7.2.2 莫尔-库仑强度理论	110	9.3.1 载荷试验	147
7.2.3 土中一点的应力极限平衡 条件	111	9.3.2 旁压试验	149
7.3 抗剪强度指标的测定	115	9.3.3 承载力特征值的深度和宽度 修正	150
7.3.1 直接剪切试验	115	9.4 理论方法确定地基承载力	151
		9.4.1 地基塑性变形区边界方程	151
		9.4.2 地基的临塑荷载和临界荷载	152
		9.4.3 地基极限承载力	153

9.5 有关地基承载力问题的讨论·····	157	10.3.6 折线滑动法·····	171
思考题与习题·····	158	10.3.7 各种方法的比较·····	172
第10章 土坡的稳定性分析 ·····	159	10.4 特殊情况下的土坡稳定性分析·····	172
10.1 概述·····	159	10.4.1 土体抗剪强度指标及稳定安全系数的选择·····	172
10.2 无黏性土坡稳定性分析·····	160	10.4.2 坡顶开裂时的土坡稳定性·····	174
10.2.1 无渗流作用时的无黏性土坡·····	160	10.4.3 土中水渗流时的土坡稳定性分析·····	174
10.2.2 有渗流作用时的无黏性土坡·····	160	10.5 土坡稳定分析的讨论·····	175
10.3 黏性土坡稳定性分析·····	161	10.5.1 基础连同地基一起滑动的稳定性·····	175
10.3.1 整体圆弧滑动法·····	161	10.5.2 土坡坡顶建(构)筑物地基的稳定性·····	176
10.3.2 瑞典条分法·····	163	思考题与习题·····	177
10.3.3 圆弧滑动面的毕肖普条分法·····	166	参考文献 ·····	178
10.3.4 规范圆弧条分法·····	168		
10.3.5 杨布条分法土坡稳定分析·····	170		

第 1 章 绪 论

1.1 土力学的概念及研究对象

土是地壳表层的岩石经过物理、化学、生物风化后，再经搬运、沉积作用而形成的松散堆积物。岩石成分和风化类型的不同，直接导致土体成分的差异。搬运和沉积过程中的自然条件和各种随机因素的作用，致使土体具有不同的结构和构造。从母岩到形成土，经历了很长的地质年代，其间的风化、搬运和沉积过程是交错进行的，并且每一过程都会对土的性质产生影响，因此土的类型及性质与其成因有直接关系。

自然状态下，土是由土颗粒、填充于土颗粒孔隙中间的水和气体组成的三相体。固体颗粒之间没有联接强度或联接强度远小于颗粒本身的强度是土有别于其他连续介质的一大特点。土颗粒是母岩风化的碎屑物，其矿物成分及粒径的大小，直接决定土的基本物理、化学和力学性质。土粒间的孔隙是连续的，因而土体具有渗透性。土中水的存在对土的性质特别是黏性土的力学性质有很大的影响，如可降低土的强度和地基承载力等。另外，同一种类型的土中，三相组成的比例不同，土的性质也会出现较明显的差别。

建筑物一般由上部结构和基础两部分组成。基础是连接上部结构和地基的桥梁。由于建筑物的修建而在基础以下一定范围内的原有应力状态发生了改变的地层，称为地基。如图 1.1 所示，上部结构、基础和地基三者之间相互联系、相互影响，共同构成一个整体。组成地基的介质可以是土，也可以是岩石。土力学所研究的对象是前者的“土”，而后者岩石将属于“岩石力学”所研究的内容。

在工程建设中，土与结构物之间有着极其密切的关系。在修建建筑物、桥梁、道路、堤坝及其他结构物时，下部的土层作为地基，其作用是支撑上部建筑物等传来的荷载，此时土的应力、变形和强度是需要研究的

主要问题；在修筑道路、堤坝时，堤坝内的土体若被用作建筑材料，则土的组成、渗流、压实性等物理力学性质是需要研究的主要内容；在建造隧道、涵洞、地铁及其他地下建筑时，土作为地下结构的周围介质或环境，其稳定性及其与结构的相互作用则成了主要的研究对象。

土力学是以传统的工程力学和地质学的知识为基础，研究与土木工程有关的土中应力、变形、强度和稳定性的应用力学的分支。此外，还要用专门的土工试验技术来研究土的物理化学特性以及土的强度、变形和渗透等特殊力学特性。总之，土力学的研究对象是土，它是研究土的基本物理特性以及土在结构物作用下的应力、变形、强度、稳定性、渗流以及土与结构物之间相互作用的一门力学学科。

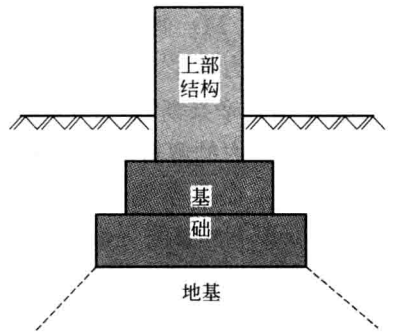


图 1.1 上部结构、地基与基础示意图

1.2 土力学学科的发展概况

土力学是随着人类土工实践活动的发展而兴起、且不断得到发展和完善的一门学科。土力学的发展大致可以划分成以下三个历史时期。

(1) 萌芽期

土力学和其他学科一样是人们长期生产实践的产物。人类自古以来就广泛利用土作为建筑物地基和建筑材料。如劳动人民很早就利用土来防治洪水，古代的大型建筑如埃及的金字塔、举世闻名的万里长城、南北大运河、黄河大堤、隋朝修建的河北省赵州桥以及宏伟的宫殿、寺庙、宝塔等的成功建造。这些工程无不体现出能工巧匠的高超技艺和创新智慧，这些都为土力学的形成积累了丰富的经验，具有重要的科学价值。然而这些还仅局限于工程实践经验，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。这一时期，人们对土力学的认识也只是萌芽状态。

(2) 古典土力学

土力学逐渐形成理论始于 18 世纪的欧洲。随着欧洲工业革命的兴起以及不断发展的城市建设，在大量兴建工业厂房、城市建筑、铁路、公路和水利工程中，出现了许多与土有关的问题，对这些问题的研究和解决，促使了土力学理论的产生。1773 年，法国科学家库伦 (Coulomb C. A) 发表了著名的滑动楔体理论，假定挡土墙后的土体出现一楔体，研究楔体上力的平衡而求取主动土压力和被动土压力。接着，库伦于 1776 年又发表了土的抗剪强度理论。进入 19 世纪 50 年代，很多学者致力于土压力和渗流方面的研究。1856 年法国工程师达西 (Darcy H) 在研究砂土透水性的基础上，提出了著名的达西定律。1857 年英国朗肯 (Rankine W. J. M) 假定挡土墙后土体为均匀的半无限空间体，应用塑性理论来解土压力问题。这一土压力理论与库伦土压力理论统称为古典土压力理论。在土体的应力分布与计算方面，1885 年布辛奈斯克 (Boussinesq J) 在研究半无限空间体表面作用有集中力的情况下，提出了土中应力的解析解，称为布辛奈斯克课题，它是各种竖直分布荷载下地基应力计算的基础。以后，很多学者对土力学的专门课题进行了研究，如 1916 年，由瑞典彼得森 (Pettersson K. E) 首先提出，继而由美国泰勒 (Taylor D. W) 和瑞典费伦纽斯 (Fellenius W) 等进一步发展的圆弧滑动法，该方法被广泛应用于土坡稳定问题的分析之中。1920 年法国普朗特 (Prandtl L) 发表了地基滑动面计算的数学公式，至今仍是计算地基承载力的基本原理。此后，太沙基 (Terzaghi K, 1943, 1967)、汉森 (Hansen J. B, 1961)、魏锡克 (Vesic A. S, 1970)、斯开普顿 (Skempton, 1951) 等相应提出了地基极限承载力的计算公式。这些古典的理论和方法，为土力学的诞生奠定了基础，至今仍不失其理论价值和实用价值。

1925 年，太沙基 (Terzaghi K) 总结和发展的以往的研究成果，提出了一维固结理论，阐述了有效应力原理，将土的应力、变形、强度等理论力学性质联系起来，发表了第一本《土力学》专著，也标志着土力学真正成为一门独立学科。

(3) 现代土力学

一方面，随着认识的深化，人们已越来越不满足于理想弹性介质和理想刚塑性介质这样简单化的描述；另一方面，现代电子计算技术的发展为采用复杂的模型提供了手段，从而为现代土力学的建立创造了客观条件。1963 年，Roscoe 发表了著名的剑桥模型，提出第一个

可以全面考虑土的压硬性和剪胀性的数学模型，因而可以看作现代土力学的开端。新的非线性应力、应变关系和应力应变模型的建立，土的微观结构的研究，费莱德伦德（Fredlund D. G）以及我国众多学者对非饱和土的研究，将土的基本特性、有效应力原理、固结理论、土的动力特性以及流变学的研究推向了新的阶段。

1.3 课程的特点和学习要求

土力学是一门专业基础课程，它所包含的知识即是土木工程专业的学生必须掌握的专业知识，又是其他专业课程的学习所必须的基础知识。土力学虽然是力学的一个分支，但由于研究对象的不同，使得土力学与其他连续介质力学有着不同的特点。

① 本课程涉及工程地质学、弹-塑性理论、流变理论、地下水动力学、计算机及数值计算方法等多个学科领域的知识，因此土力学的首要特点是内容广泛，综合性强。

② 与其他连续介质力学问题不同，岩土工程问题仅按纯数学、力学的观点是很难甚至无法解决的，这类问题的解决还往往需要结合以往的建设经验，并根据实际调查、必要的现场及室内试验、测试资料进行综合研究分析，以求得问题的正确解决。实践性强是土力学的另一主要特点。

通过本课程的学习，要求学生了解土的成因和分类方法，熟悉土的基本物理力学性质，掌握土的渗透性、土中应力、地基沉降、地基承载力、土压力计算方法和土坡稳定分析方法，并且掌握一般的土工试验方法，为能够应用土力学的基本原理和方法，解决实际工程中的变形、强度和渗流等问题打下良好的基础。

第 2 章 土的形成及三相组成

2.1 概述

岩石经过风化、剥蚀、搬运、沉积等过程后，所形成的各种疏松沉积物，在建筑工程上称为“土”。这是土的狭义的概念。广义的概念是将整体岩石也包括在内。但一般都使用土的狭义概念。

由于成土过程中各环节的交错反复，成土的自然地理环境的复杂多样，因此，土的类型与性质是千差万别的，但是在大致相同的地质年代及相似的沉积条件下形成的堆积物往往在成分和性质上是相近的。土的性质一方面取决于原始沉积条件所决定的土粒成分、结构、孔隙中水溶液的性质等，另一方面也取决于沉积以后的经历，如沉积年代的长短、自然地理条件的变迁等，都可以引起原始沉积物的成分或性质的某些改变。一般沉积年代越长，上覆土层重量越大，土越压得密实，由孔隙水中析出的化学胶结物也就越多。因此，老土层比新土层的强度、变形模量都要高，甚至由散粒体经过成岩作用又会变成整体岩石，如砂土成为砂岩，黏土变成页岩等。目前所见到的土大都是第四纪沉积层，一般都呈松散状态，但第四纪由距今有一百万年的时间，第四纪早期沉积的和近期沉积的土，在性质上就有着相当大的区别。这种影响对黏性土来讲尤为明显。

建筑工程中将土分为几大类，即碎石土、砂土、粉土、黏性土和人工填土。碎石土和砂土统称为无黏性土。粉土是既不同于黏性土，又区别于砂土，介于两者之间的土。不同的自然地理环境对土的性质有很大的影响。我国沿海地区的软土，严寒地区的永冻土、西北地区的湿陷性黄土，西南亚热带的红黏土等除具有一般土的共性外，还具有自己的特点。

本章着重讨论土的成因、组成、结构和构造的特征。

2.2 土的成因类型

在自然界，土的组成物质主要是岩石风化的产物，其次是生物体的分解物。土的形成过程是十分复杂的，其生成经历了风化、搬运和沉积 3 个过程。地壳表层的岩石在阳光、大气、水和生物等因素影响下，发生风化作用，使岩石崩解、破碎、经流水、风、冰川等动力搬运作用，在各种自然环境下沉积，形成土体。

风化作用主要包括物理风化和化学风化，它们经常是同时进行的，而且是互相加剧发展的。物理风化是指由于温度变化、水的冻胀、波浪冲击、地震等引起的物理力使岩体崩解、碎裂的过程，这种作用使岩体逐渐变成细小的颗粒。化学风化是指岩体（或岩块、岩屑）与空气、水和各种水溶液相互作用过程，这种作用不仅使岩石颗粒变细，更重要的是使岩石成分发生变化，形成大量细微颗粒（黏粒）和可溶盐类。化学风化常见的作用如下。

① 水解作用——指原生矿物成分被分解，并与水进行化学成分的交流，形成新的次生矿物，如正长石经水解作用后，形成高岭石；

② 水化作用——指水和某种矿物发生化学反应，形成新的矿物，如土中的 CaSO_4 （硬石膏）水化后成为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ （含水石膏）；

③ 氧化作用——指某种矿物与氧结合形成新的矿物，如黄铁矿氧化后第一阶段成为 FeSO_4 （铁矾），进一步氧化第二阶段变成 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ （硫酸铁），在氧和水的作用下进一步变成（褐铁矿）。

其他还有溶解作用、碳酸化作用等。

在自然界，岩石和土在其存在、搬运和沉积的各个过程中都在不断进行风化，由于形成条件、搬运方式和沉积环境的不同，自然界的土也就有不同的成因类型。

根据土的形成条件，常见的成因类型如下。

① 残积土——指岩石经风化后未被搬运而残留于原地的碎屑堆积物，它的基本特征是颗粒表面粗糙、多棱角、无分选、无层理；

② 坡积土——残积土受重力和暂时性流水（雨水、雪水）的作用，搬运到山坡或坡脚处沉积起来的土，坡积颗粒随斜坡自上而下呈现由粗而细的分选性和局部层理；

③ 洪积土——残积土和坡积土受洪水冲刷、搬运，在山沟出口处或山前平原沉积下来的土，随着离山由近及远有一定的分选性，颗粒有一定的磨圆度；

④ 冲积土——河流的流水作用搬运到河谷坡降平缓的地带沉积下来的土，这类土经过长距离的搬运，颗粒是有较好的分选性和磨圆度，常具有层理；

⑤ 湖积土——在湖泊及沼泽等极为缓慢水流或静水条件下沉积下来的土，或称淤积土，这类土除了含大量细微颗粒外，常伴有生物化学作用所形成的有机物，成为具有特殊性质的淤泥或淤泥质土；

⑥ 海积土——由河流流水搬运到海洋环境下沉积下来的土；

⑦ 风积土——由风力搬运形成的土，其颗粒磨圆度好，风选性好。我国西北黄土就是典型的风积土；

⑧ 冰积土——由冰川或冰水挟带搬运形成的沉积物，其颗粒粗细变化大，土质不均匀。

土的上述形成过程决定了它具有特殊的物理力学性质。与一般建筑材料相比，土具有三个重要特点：①散体性：颗粒之间无黏结或有一定的黏结，存在大量孔隙，可以透水透气；②多相性：土往往是由固体颗粒、水和气体组成的三相体系，相系之间质和量的变化直接影响它的工程性质；③自然变异性：土是在自然界漫长的地质历史时期演化形成的多矿物组合体，性质复杂，不均匀，且随时还在不断变化的材料。深刻理解这些特点，有利于掌握土力学性质的本质。

2.3 土的三相组成

在一般情况下，土是由三相组成的：固相——矿物颗粒和有机质；液相——水溶液；气相——空气。矿物颗粒构成土的骨架，空气与水则填充骨架间的孔隙。土的性质取决于各相的特性及其相对含量与相互作用。

2.3.1 土的固体颗粒

土的固相主要由矿物颗粒及有机质组成。矿物颗粒集合体的形式对土性的影响可以从粒度成分、矿物成分等方面来看。

2.3.1.1 土粒粒度与粒组

在自然界存在的土，都是由大小不同的土粒组成。土粒的粒径由粗到细逐渐变化时，土的性质相应地发生变化。土粒的大小称为粒度，通常以粒径表示。介于一定粒度范围内的土粒，称为粒组。各个粒组随着分界尺寸的不同，而呈现出一定质的变化。划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。目前土的粒组划分方法并不完全一致，表 2.1 是一种常用的土粒粒组的划分方法，表中根据界限粒径 200mm、60mm、2mm、0.075mm 和 0.005mm 把土粒分为六大粒组：漂石或块石颗粒、卵石或碎石颗粒、圆砾或角砾颗粒、砂粒、粉粒及黏粒。

表 2.1 土粒粒组的划分

粒组统称	粒组名称		粒径范围/mm	一般特征
巨粒	漂石或块石颗粒		>200	透水性很大,无黏性,无毛细水
	卵石或碎石颗粒		200~60	
粗粒	圆砾或角砾颗粒	粗	60~20	透水性很大,无黏性,毛细水上升高度不超过粒径大小
		中	20~5	
		细	5~2	
	砂粒	粗	2~0.5	易透水,当混入云母等杂质时透水性减小,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
		中	0.5~0.25	
		细	0.25~0.1	
		极细	0.1~0.075	
细粒	粉粒	粗	0.075~0.01	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较快,极易出现冻胀现象
		细	0.01~0.005	
	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,但速度较慢

土粒的大小及其组成情况，通常以土中各个粒组的质量占土粒总质量的百分数来表示，称为土的粒度成分或颗粒级配。

2.3.1.2 土粒粒度分析试验

土的粒度分析或颗粒级配是通过土的颗粒分析试验测定的。常用的测定方法有筛分法和沉降分析法。前者适用于粒径大于 0.075mm 的巨粒组和粗粒组，后者用于粒径小于 0.075mm 的细粒组。

(1) 筛分法

筛分法用 1 套孔径分别为 60mm、40mm、20mm、10mm、5mm、2.0mm、1.0mm、0.5mm、0.25mm、0.1mm、0.075mm 的标准圆孔筛来测定各粗粒组的相对含量。将事先称过质量且风干、分散的代表性土样充分过筛，称留在各筛盘上的土粒质量，然后通过计算可得到小于某一筛孔直径土粒的累积重量及累积百分含量。

(2) 沉降分析法

沉降分析法的理论基础是土粒在水中的沉降原理。当土样被分散于水中后，土粒下沉的速度与土粒形状、粒径、密度以及水的黏滞度有关。当土粒简化为理想球体时，土粒的沉降速度可以用斯托克斯 (Stokes, 1845) 定律来计算

$$v = \frac{g(\rho_s - \rho_w)}{1800\eta} d^2 \quad (2.1)$$

式中 v ——土粒在静水中的沉降速度, cm/s;

d ——土粒直径, mm;

g ——重力加速度, cm/s²;

ρ_s ——土粒密度, g/cm³;

ρ_w ——水的密度, g/cm³;

η ——水的动力黏滞系数 (10⁻⁶ kPa·s), 受水温变化的影响。

式(2.1)中水的密度与水的动力黏滞系数随液体的温度变化而变化, 对于某一种土的悬液来说, 当悬液温度不变时, 公式中 g 、 ρ_s 、 ρ_w 和 η 均为定值, 故 $\frac{g(\rho_s - \rho_w)}{1800\eta}$ 为一常数, 用 A 表示, 则式(2.1)变为

$$v = A \cdot d^2 \text{ 或 } d = \sqrt{\frac{v}{A}} = \sqrt{\frac{n}{A \cdot t}} \quad (2.2)$$

斯托克斯公式是在下列假定条件下推导出来的: 悬液的浓度很小, 使颗粒相互不碰撞而自由下沉; 悬液的黏滞系数是常数; 土粒密度相等; 土粒呈球形; 土粒直径远大于水分直径; 沉速很小; 土粒水化膜厚度等于零。

但在实际中除土粒远大于水分子外, 其他条件均无法满足, 在应用该原理时, 必须在试验技术上采用相应的措施: 采用悬液的浓度为 1%~3%; 悬液温度在试验过程中保持不变; 土粒密度取平均密度; 土粒为不规则形状, 可引用“等效直径”的概念, 所谓“等效直径”是指土粒沉降速度与某一粒径的球形颗粒的沉降速度相等, 那么这球形颗粒的直径即为该土粒的直径; 为保持土粒的沉速较小, 一般适用于小于 0.075mm 的土粒。

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。实验室常用比重计进行颗粒分析, 称为比重计法。根据式(2.1)和式(2.2), 可从测定不同时间内悬液的相对密度, 进而来换算土粒直径。同时也可以得到在同一深度悬浮着的颗粒质量对土样干重的百分数。

进行细颗粒组的测定, 是将制备好的悬液经充分搅拌、停止搅拌后, 可测得经某一时间, 土粒至悬液表面下沉至某一深度处所对应的颗粒直径, 这样就可以将大小不同的土粒分离开来或求得小于某粒径 d 的颗粒在土中的百分含量。虽然在试验技术上采取了相应的措施, 仍不免存在一些误差, 但一般均能满足实际生产上的精度要求。

2.3.1.3 粒度成分分布曲线

根据粒度成分分析试验成果, 常采用粒径累积曲线表示土的颗粒级配。该法是比较全面和通用的一种图解法, 其特点是可简单获得定量指标, 特别适用于几类土的级配好与差的相对比较。粒径累积曲线法的横坐标为粒径, 由于土粒粒径的值域很宽, 因此采用对数坐标表示; 纵坐标为小于(或大于)某粒径的土的质量累积百分比, 见图 2.1。

根据粒径累积曲线的坡度可以大致判断土粒均匀程度或级配是否良好。如曲线较陡, 表示粒径大小相差不多, 土粒较均匀, 级配不良; 反之, 曲线平缓, 则表示粒径大小相差悬殊, 土粒不均匀, 级配良好。

根据描述级配的粒径累积曲线, 可以简单地确定颗粒级配的两个定量指标名, 即不均匀系数 C_u 及曲率系数 C_c , 两者定义的表达式如下

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2.3)$$

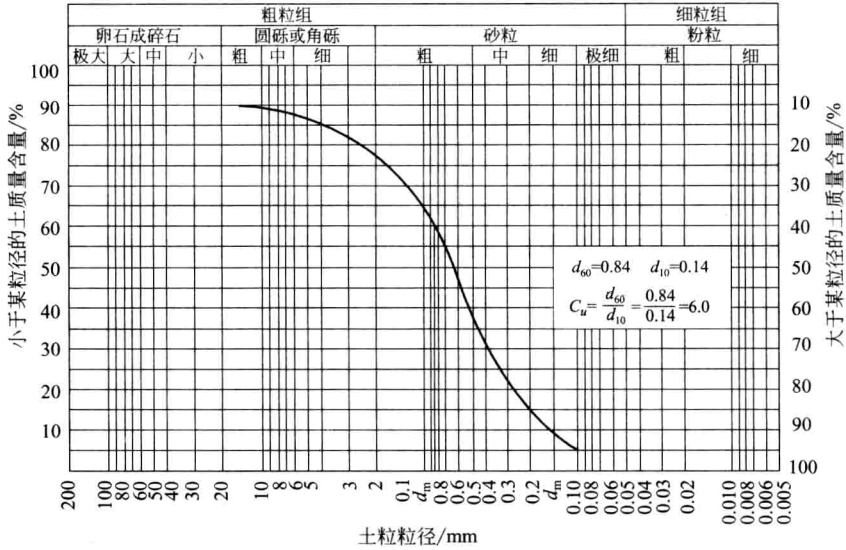


图 2.1 粒径累积曲线

$$C_c = \frac{d_{60}^2}{d_{10} \cdot d_{30}} \tag{2.4}$$

式中 d_{60} ——限定粒径，为小于某粒径的颗粒含量等于 60% 对应的粒径，mm；
 d_{30} ——平均粒径，为小于某粒径的颗粒含量等于 30% 对应的粒径，mm；
 d_{10} ——有效粒径，为小于某粒径的颗粒含量等于 10% 对应的粒径，mm。

不均匀系数 C_u 反映大小不同粒组的分布情况，即土粒大小或粒度的均匀程度。 C_u 越大，表示粒度的分布范围越大，土粒越不均匀，其级配越良好。曲率系数 C_c 描述的是累计曲线分布的整体形态，反映了限制粒径 d_{60} 与有效粒径 d_{10} 之间各粒组含量的分布情况。当 $C_c = 1 \sim 3$ 时，级配曲线顺滑，无平台。当 $C_c < 1$ 或 $C_c > 3$ 时，级配曲线局部会存在水平段。一般情况下，不均匀系数越大，土的级配越好。但存在某些例外，如图 2.2 所示 C 土的级配曲线存在平台，说明土的粒径缺失，尽管不均匀系数很大，级配还是不良的。可见仅用不均匀系数来评价土的级配是不够的，用 C_u 和 C_c 共同判定土的级配，则更加合理。一般认

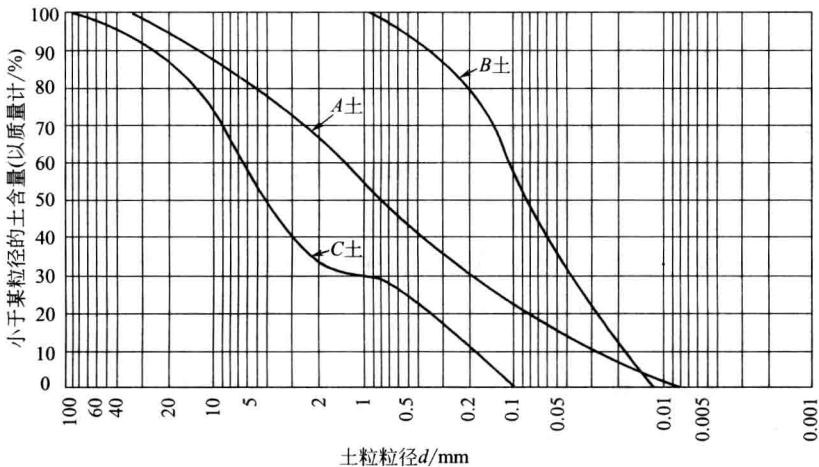


图 2.2 不同级配曲线的对比

为：砾类土或砂类土同时满足 $C_u \geq 5$ 和 $C_c = 1 \sim 3$ 两个条件时，则认为级配良好，如不能同时满足，则认为判定级配不良。很显然，在 C_u 相同的条件下， C_c 过大或过小，均表明土中缺少中间粒组，各粒组间孔隙的连锁充填效应降低，级配变差。

粒度成分的分布曲线可以在一定程度上反映土的某些性质。对于级配良好的土，较粗颗粒间的孔隙被较细的颗粒所填充，这一连锁充填效应，使得土的密实度较好。此时，地基土的强度和稳定性较好，透水性和压缩性也较好，而作为填方工程的建筑材料，则比较容易获得较大的密实度，是堤坝或其他土建工程良好的填方用土。此外，对于粗粒土，不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 也是评价渗透稳定性的重要指标。

2.3.1.4 土粒的矿物成分

土中固体部分的成分，绝大部分是各种矿物颗粒或矿物集合体组成的，另外或多或少有一些有机质，而土粒的矿物成分主要决定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，通常粗大土粒的矿物成分往往保持母岩未风化的原生矿物，而细小土粒主要是次生矿物等无机物质以及土生成过程中混入的有机质。因此，细粒土的矿物成分更为重要。

土的固体颗粒物质分为无机矿物颗粒和有机质。矿物颗粒的成分有两大类。

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，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。系原生矿物经化学风化作用后而形成新的矿物，例如黏土矿物。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，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，必然导致土的性质的突变。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，所谓的晶体是指原子、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，组成晶体结构的最小单元称为晶胞。黏土矿物的晶体颗粒呈片状，是由硅片和铝片构成的晶胞所组叠而成。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2.3(a)所示。由6个硅-氧组成1个硅片，如图2.3(b)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2.3(c)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

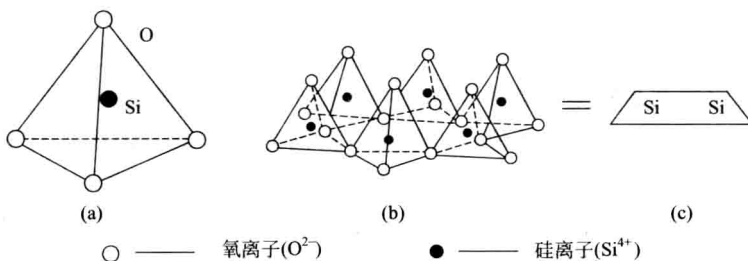


图 2.3 硅片的结构

个铝离子和 6 个氢氧离子所构成，如图 2.4(a) 所示，4 个八面体组成 1 个铝片。每个氢氧离子被相邻 2 个铝离子所共有，如图 2.4(b) 所示，简化图形见图 2.4(c)。大多数黏土矿物是由硅片和铝片构成的晶胞所组叠而成的，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。

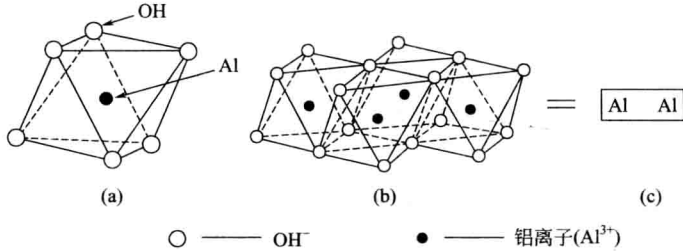


图 2.4 铝片的结构

① 蒙脱石，它的结晶格架示意图如图 2.5 所示，可见其晶胞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晶胞。由于晶胞之间是氧离子的联结，当非分子间的相互作用力（范德华力）相互联结，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，在晶胞之间出现多余的负电荷，它可以吸附其他氧离子（如 Na^+ 、 Ca^{2+} 等）来补偿，这种阳离子吸引极性水分子成为水化离子，充填于结构单位层之间，从而改变晶胞的距离，甚至达到完全分散到单晶胞为止。因此，蒙脱石的晶格是活动的，吸水后体积发生膨胀，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。另外，它还具有高塑性、高压缩性、低强度、低渗透性，液限可达 150%~700%，塑性指数可达 100~650。

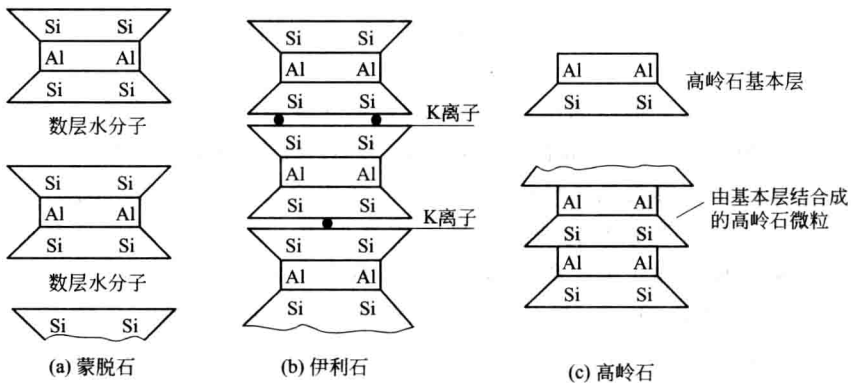


图 2.5 黏土矿物结晶格架示意图

② 伊利石，它的结晶格架示意图见图 2.5(b) 所示，与蒙脱石一样，同属 2 : 1 型结构单位层，晶胞之间键力也较弱。但是，与蒙脱石不同之处是离子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、钠离子来平衡，钾键增强了晶胞与晶胞之间的连接作用，水分子很难进入。所以遇水膨胀，失水收缩能力低于蒙脱石，其力学性质介于高岭石与蒙脱石之间。

③ 高岭石，结晶格架示意图如图 2.5(c) 所示，它是由一层硅氧晶片和一层铝氢氧晶片