

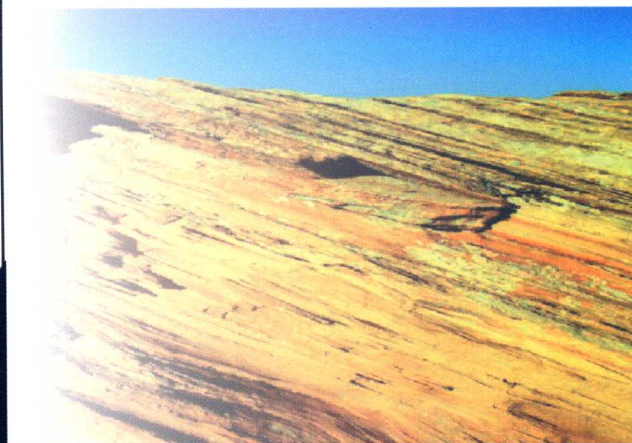


21世纪全国本科院校土木建筑类**创新型**应用人才培养规划教材

土力学

主 编 杨雪强

提供电子课件



教材预览、申请样书



微信公众号: pup6book



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校土木建筑类创新型应用人才培养规划教材

土 力 学

主 编	杨雪强		
副主编	史宏彦	李子生	张建龙
参 编	刘勇健	张丽娟	梁仕华
	杨 锐		



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书包括绪论、土的物理性质与工程分类、土的渗透性、土中应力计算、土的压缩特性和地基沉降计算、土的抗剪强度、土压力、土坡稳定分析及地基承载力等内容。本书在内容上深度与广度相适宜,循序渐进,尽可能把土力学的基本概念、基本原理和基本理论讲解清楚;同时密切结合室内试验和工程实践,完成理论性与实践性的综合基本训练,不断提高学生的专业知识水平。本书除第1章之外每章都含有大量的例题及详细的解题步骤,可以培养读者解决问题的能力;同时章后附有选择题、填空题、简答题和计算题等题型,并附有部分参考答案,是初学者自学提高的良师益友。

本书内容丰富、理论联系实际、图文并茂、实用性强、综合性强,可作为高等院校土木工程(含建筑工程、道路与桥梁工程、岩土工程、城市地下空间工程方向)、水利工程、测绘工程等专业的教材,也可作为相关专业工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

土力学/杨雪强主编. —北京:北京大学出版社, 2015. 6

(21世纪全国本科院校土木建筑类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-25781-4

I. ①土… II. ①杨… 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(2015)第 089577 号

书 名 土力学

著作责任者 杨雪强 主编

策划编辑 吴迪 王红樱

责任编辑 姜晓楠 伍大维

标准书号 ISBN 978-7-301-25781-4

出版发行 北京大学出版社

地 址 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址 <http://www.pup.cn> 新浪微博: @北京大学出版社

电子信箱 pup_6@163.com

电 话 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667

印 刷 者 北京富生印刷厂

经 销 者 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.5 印张 456 千字

2015 年 6 月第 1 版 2015 年 6 月第 1 次印刷

定 价 40.00 元

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题, 请与出版部联系, 电话: 010-62756370

前 言

本书是根据教育部颁布的专业目录和面向 21 世纪土木工程专业人才培养方案的要求,并结合培养具有较坚实理论基础的创新型与应用型复合本科人才的特点和需求编写的。

土力学是土木工程专业的主干课程,主要阐明土力学的基本概念、基本原理和基本理论,提供基本的力学分析方法和计算手段。土力学也是一门理论性与实践性都很强的综合性学科,本书在编写时注意两者的紧密结合,通过对工程问题的分析,有助于培养提高学生分析和解决实际工程问题的能力。

本书编者均是长期从事土力学教学与科研工作的一线教师,具有较丰富的本科教学经验,在内容编排上重在讲理,尽可能把道理表达清楚,在注意对学生进行基本概念、基本理论和基本试验技能培养的同时,密切结合工程实践,完成理论性与实践性的综合基本训练,不断提高学生的专业知识水平。

与本书配套的《土力学习题解答》教学辅导书,涵盖了土力学的重要概念、基本理论和常用的基本公式,是学生学习提高与复习考试的良好益友。

本书的绪论由杨锐教授编写,第 1 章由刘勇健副教授编写,第 2 章由梁仕华副教授编写,第 3 章由李子生副教授编写,第 4 章由史宏彦教授编写,第 5 章由杨雪强教授编写,第 6 章由张丽娟副教授编写,第 7 章由张建龙副教授编写,第 8 章由杨雪强教授编写。组稿过程中各章作者相互交叉审阅修改,全书由杨雪强教授统稿修改。

在本书的出版过程中,得到了北京大学出版社领导及王红樱编辑、姜晓楠编辑和伍大维编辑的大力支持,在此表示衷心的感谢!

由于编者的水平有限,能否达到预期目标尚无把握,敬请广大读者与教育界同行不吝批评指正。

编 者

2015 年 1 月

目 录

第 0 章 绪论 1

- 0.1 土力学的研究对象 1
- 0.2 土力学的发展与展望 1
- 0.3 土力学的主要研究内容和
学习方法 2

第 1 章 土的物理性质与工程分类 4

- 1.1 概述 5
- 1.2 土的形成 6
- 1.3 土的三相组成 8
- 1.4 土的结构和构造 21
- 1.5 土的三相比例指标 24
- 1.6 土的物理状态特性 30
- 1.7 土的压实性 36
- 1.8 土的工程分类 41
- 本章小结 57
- 习题 57

第 2 章 土的渗透性 60

- 2.1 概述 61
- 2.2 土的渗透性概述 63
- 2.3 二维流网的绘制及应用 71
- 2.4 渗透力及渗透破坏 75
- 本章小结 82
- 习题 82

第 3 章 土中应力计算 84

- 3.1 概述 85
- 3.2 土中自重应力的计算 88
- 3.3 地基附加应力 91
- 3.4 基底压力 114
- 3.5 有效应力原理 118

本章小结 122

习题 122

第 4 章 土的压缩特性和地基

沉降计算 125

- 4.1 概述 126
- 4.2 土的压缩性 126
- 4.3 地基最终沉降量的计算 135
- 4.4 地基变形与时间的关系 153
- 4.5 利用沉降观测资料推算地基
沉降 165

本章小结 167

习题 168

第 5 章 土的抗剪强度 170

- 5.1 概述 171
- 5.2 土的抗剪强度与极限平衡条件 172
- 5.3 土的抗剪强度试验方法及
强度指标 176
- 5.4 三轴压缩试验中的孔隙压力
系数 185
- 5.5 土在剪切过程中的性状 188
- 5.6 应力路径 200
- 本章小结 203
- 习题 203

第 6 章 土压力 205

- 6.1 作用在挡土墙上的土压力 206
- 6.2 朗肯土压力理论 208
- 6.3 库仑土压力理论 217
- 6.4 土压力计算的讨论 222
- 6.5 挡土墙设计 227
- 本章小结 240
- 习题 240

第7章 土坡稳定分析 242

7.1 概述	243
7.2 平面滑动分析法	244
7.3 黏性土坡的稳定性	248
7.4 土坡稳定分析的若干问题	263
7.5 滑坡的防治方法	271
本章小结	272
习题	272

第8章 地基承载力 274

8.1 概述	275
8.2 地基破坏模式及其变形过程	275
8.3 地基的临塑荷载与界限荷载	279
8.4 地基极限承载力	282
8.5 地基承载力的讨论	299
本章小结	301
习题	301

参考文献 303

第0章 绪论

0.1 土力学的研究对象

岩石是由一种或多种矿物组成的集合体。土是岩石经过物理风化、化学风化及生物风化等综合作用的产物，是岩石在表生作用带经风化、剥蚀、搬运、沉积而形成的松散堆积物。同时，土也是尚未固结的颗粒集合体，颗粒之间呈未胶结或弱胶结状态。在漫长的地质历史进程之中，土的形成及其性质随其形成过程和自然环境的不同而有所差异。

土力学研究的对象是分散土，它与岩石既有联系又有区别。土由固体颗粒(土粒)、水和气体三相组成。土的主要特征是分散性、复杂性和易变性，其性质将随外界环境(如温度、湿度)的变化而发生显著的变化，故对土的基本概念要有基本的认识与掌握。在对建(构)筑物设计之前，必须对建(构)筑场址的岩土层结构及成因、地形地貌、地质构造、不良地质现象、地下水状况等工程地质条件进行综合评判。否则，势必会影响建(构)筑工程的稳定安全、经济效益和环境效益。

土力学是一门研究与土的工程问题有关的学科，同时是土木工程类专业的一门重要的专业基础课程。土力学重点研究土的物理、力学、化学性质，以及土体在外界因素作用下的应力、应变、强度、稳定性及渗流规律。土力学属于力学的一个分支，并将固体力学和流体力学的定律和理论应用于土体研究，同时结合土工试验及土体微结构等相关现代科学技术，力图解决工程建设中与土相关的工程实际问题。因此，土力学是一门理论性与实践性都很强的学科。

0.2 土力学的发展与展望

土力学在人类的长期生产实践中应运而生，并不断向前发展的。从远古至18世纪中叶，与其他学科一样，土力学仅停留在感性的认识上，没有上升到理论层次。自18世纪工业革命以后，随着城市建设、水利工程及道路工程的兴建，推动了土力学的发展。

1773年，法国的库仑(C. A. Coulomb)根据试验提出了砂土的抗剪强度公式和土压力理论。19世纪中叶，大规模的桥梁、铁路和公路的建设，促进了桩基础理论和施工方法的发展。1857年，英国的朗肯(Rankine)根据土体塑形破坏提出了土压力理论。1885年，法国的布辛内斯克(Boussinesq)求出了半无限弹性体在垂直集中力作用下应力和变形的理论解答。1922年，瑞典的费伦纽斯(Fellenius)为解决铁路塌方问题，研究并提出了土坡稳定分析法。直到1925年，美国土力学专家太沙基(K. Terzaghi)集大成发表了世界上第一

本《土力学》专著,从此,土力学成为一门独立的学科。

此后,随着大量引用弹性力学的研究成果,土体变形和破坏问题的研究得到了迅速发展。1927—1955年,费伦纽斯、泰勒(D. W. Taylor)和毕肖普(Bishop)等建立与完善了土坡滑弧稳定分析方法;1936年,明德林(Mindlin)提出了桩基沉降的计算方法;1943年,太沙基进行了极限土压力的研究并提出了地基极限承载力公式;1941—1956年,比奥(Biot)固结理论的提出和完善等。

1963年,以罗斯科(Roscoe)为代表的剑桥学派提出了著名的剑桥模型,标志着现代土力学的开端。经过50多年的努力,现代土力学的研究成果已日趋丰富,并在下列几方面取得了重要进展:①非线性模型和弹塑性模型的深入研究和大量应用;②损伤力学模型的引入和结构性土体模型的深入研究;③非饱和土固结理论的研究及其应用;④砂土液化理论的研究;⑤剪切带理论及渐进破损问题的研究;⑥土的细观力学的研究及宏细观相结合的研究等。

我国学者对土力学的研究始于1945年黄文熙在中央水利试验处创立的第一个土工试验室,他在土的强度、变形及本构关系方面的研究颇具特色。另外,陈宗基在黏土微观结构和土体流变方面,钱家欢在土流变学及土工抗震方面,沈珠江在软土本构关系方面,均独具创新,成果凸显。自中华人民共和国成立至今60多年来,我国学者在土力学研究领域的各个方面均得到了长足的进展,取得了许多重要研究成果,为土力学的发展作出了积极的贡献。

土力学未来发展的趋势可归结为一个模型(即本构关系模型)、三个理论(即非饱和土固结理论、土的液化破坏理论和土的渐进破坏理论)和四个分支(理论土力学、计算土力学、试验土力学和应用土力学)。目前,土力学研究的前沿与新进展主要集中在以下方面:区域性土的分布和力学特性,多因素影响和符合工程实际的土体本构关系,不同介质相互作用及共同分析,土工试验技术和计算技术的发展等。

伴随着现代科学知识和计算技术的飞速发展,土力学的研究领域必将获得更显著、更广泛的拓展,如土动力学、冻土土力学、海洋土力学、月球土力学等均是新兴的土力学分支。所以,土力学学科的发展是永无止境的,人类在土力学面前要始终保持谦卑的心态,在敬畏它的同时更要大胆地开展探索研究工作。

0.3 土力学的主要研究内容和学习方法

0.3.1 土力学的主要研究内容

土力学通常包括土质学和土力学两大部分。

土质学是从工程地质观点即从工程建(构)筑物与自然地质体相互作用、相互制约的角度出发进行研究,主要包括土的工程地质性质(土的物理、化学和水理性质等)及其相应指标测试技术方法,土的工程地质性质的形成分布规律,土的物质组成、结构、构造及土中气体及水的状态,土的工程分类,特殊土的工程地质特征等。

土力学主要侧重于对土的力学与变形分析,重点研究土在荷载的作用下引起的应力、应变、强度和稳定性的一门学科。由于土是自然历史的产物,其性状变化很大。因此,在

土力学研究过程中,除运用一般连续体力学的基本原理外,还应考虑到土作为分散系特征去获得量的关系。在处理工程中的土力学问题时,不能单凭数学和力学的方法,必须通过土的现场勘察,结合室内土工试验及测定的土体计算参数,进而建立符合工程实际的力学计算模型。土力学的主要研究内容包括土的应力与应变的关系,土的压缩变形及与时间的关系,土的渗透性与固结理论,土的抗剪强度与地基承载力,土压力和土坡稳定,土在外部荷载作用下的稳定性计算等。

土力学尤其注重理论与实践的结合。在土木工程的兴建中,会遇到各种有关土的工程地质问题,包括土作为建筑物地基、用作填筑材料及作为建筑物的介质等几个方面,特别是软土地基,常会遇到土质改良、沉降及不均匀沉降等问题。为保证建筑物的安全可靠、经济合理和技术可行,必须很好地解决这些问题,也必须对地基土的物理力学性质有较深入的了解,从而提出合理的地基基础设计方案。例如,以土作为填筑材料的堤、坝,常用碾压的方法将填土压实,以提高填土的强度,增加填土的稳定性,这就要求研究动力作用下土的压实性状问题。

“基础工程”是在学习了“土力学”课程之后的专业主干课程。基础工程主要研究建(构)筑物地基与基础受到上部结构荷载作用后的力学状态与沉降稳定问题,主要包括地基的受力与变形性状、地基处理方法、基础形式等。由于基础工程属于建(构)筑物的隐蔽工程,一旦出现问题而导致工程失事,不仅损失巨大,且难以补救,因此人们通常赋予基础工程较大的安全系数储备。

0.3.2 土力学的学习方法与要求

土力学是一门综合性的基础课程,学习本课程必须具有工程地质学、材料力学、弹性力学及水力学等方面的知识基础。土力学知识则是土木工程学科各专业方向不可缺少的专业基础知识。根据土力学的研究内容,学习中力求掌握以下几点。

(1) 建立实际工程的理念和观点,重视学习土力学的基础理论,掌握相关的土工试验及其技术方法,重点要学会如何运用基本理论,有的放矢地分析解决具体工程问题。

(2) 土的种类繁多,工程特性极其复杂,应当首先搞清土力学的基本概念,明晰土的成因分类、特点及其意义,而不可硬性套用某些理论条文及指标数据,特别要密切结合室内外测试结果和工程师专家的经验。

(3) 在学习的过程中,必须自始至终围绕土体的有效应力原理这一灵魂思想,抓住土体的渗透、变形、强度和稳定性相互影响这一重要线索,特别注重认识土的分散性、易变性和三相性等特点。

(4) 土力学理论性较强,且偏于计算。许多计算公式的推导比较繁琐,所牵涉的数学问题也比较广泛。学习时要善于转变对问题求解的思维方式,注意弄清各计算公式的基本假定、应用范围及计算误差的修正等,力图学会对多种解答做综合评判。

(5) 认识地区差异,重视地区经验。学会运用土力学的经验公式,尤其是在土体力学参数选取、地基基础设计的过程中,不断提高地基处理及基础设计水平。

(6) 注重培养学生分析问题、解决问题的能力,理论是实践的基础,没有正确的理论,就没有正确的实践。通过对基本概念、基本理论和基本试验技能的培养,密切结合工程实践,不断提高学生的专业知识水平,完成未来作为土木工程师的基本训练。

第1章

土的物理性质与工程分类

教学目标

本章主要讲述土的形成、组成、物理性质与工程分类等土力学基础知识。通过本章的学习，应达到以下目标。

- (1) 了解土的形成、结构和构造，增加对土力学性质的渊源认识。
- (2) 掌握利用土的颗粒级配曲线评价土的工程性质。
- (3) 熟练掌握土的三相比例指标定义及计算。
- (4) 掌握土的物理状态特性的描述方法与评价指标。
- (5) 了解土的压实性原理及压实性原理的工程应用。
- (6) 熟悉土的工程分类原则和分类方法。

教学要求

知识要点	能力要求	相关知识
土的形成	了解土的形成过程	土的形成过程中的地质作用
土的组成	(1) 熟悉土的三相组成； (2) 熟悉颗粒分析试验； (3) 掌握利用土的颗粒级配曲线评价土的工程性质	(1) 土的三相组成； (2) 土粒的颗粒级配； (3) 单粒结构、蜂窝结构、絮状结构的特征
土的结构、构造	(1) 熟悉土的结构类型及对工程性质的影响； (2) 了解土的构造	(1) 土的结构； (2) 土的构造
土的三相比例指标	(1) 掌握土的三相比例指标的定义； (2) 了解直接指标的测定方法； (3) 熟练掌握三相比例指标的计算方法	(1) 土的三相草图及三相比例指标定义； (2) 直接指标的测定方法和间接指标的换算关系； (3) 三相指标的计算和应用
土的物理状态特性	(1) 掌握无黏性土的密实度及表示方法； (2) 掌握黏性土的物理特性及指标； (3) 熟悉界限含水量测定方法	(1) 无黏性土的密实度的评价方法； (2) 土的界限含水量和测定方法； (3) 塑性指数、液性指数； (4) 黏性土的稠度、塑性、物理状态特征
土的压实性	(1) 了解土的压实原理； (2) 学会土的压实原理的工程应用	(1) 土的压实性原理和压实性试验； (2) 填方工程压实效果评价指标

(续)

知识要点	能力要求	相关知识
岩土的工程分类	熟悉土的分类原则和分类方法	(1)《土的工程分类标准》分类法； (2)《建筑地基基础设计规范》分类法； (3)交通部规范分类法
特殊土	了解常见特殊土及其工程性质	(1)软土； (2)红黏土； (3)膨胀土； (4)黄土； (5)花岗岩残积土

 基本概念

土的结构(单粒结构、蜂窝结构、絮状结构)、土的构造、三相比比例指标、土的含水量、密度、重度、土粒的相对密度、孔隙比、饱和度、界限含水量(塑限、液限、缩限)、土的塑性、土的密实度、土的压实性

 引例

任何建(构)筑物都是建造在岩(土)层上。岩(土)的类型和工程性质将影响建(构)筑物的安全、造价、工期和施工方法。土的物理性质是土的基本性质，它与土的力学性质有密切关系。土是由固体颗粒、水和气体组成的三相分散体系，它不同于一般建筑材料，土的工程性质具有多变性和易变性。土的分类标准与方法是研究土力学性质的基础。在我国，不同行业关于土的分类方法略有不同，在学习土的工程分类时，需注意不同规范分类的差异。

1.1 概 述

土是自然界地质作用的产物。在天然状态下，土体是由构成土骨架的固体颗粒(固相)、土孔隙中的水(液相)和土孔隙中的气体(气相)三部分组成，简称土的三相体系，如图 1.1 所示。与一般固体材料不同，土具有不连续性、多变性和易变性。在外荷载作用下，表现为易压缩、易变形和易剪切破坏等力学特性。土的物理性质和力学性质有着密切联系，土的物理性质是土的基本性质，土的物理性质与土的形成、土的物质组成、土的三相比比例、土的结构和构造有着密不可分的联系。

本章首先介绍土的形成，然后重点阐述土的三相组成、土的结构、无黏性土的密实度和黏性土的物理特性，最后介绍土的工程分类。

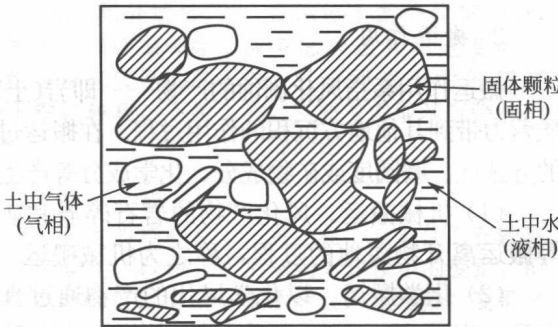


图 1.1 土的三相组成示意图

1.2 土 的 形 成

1.2.1 土的形成作用(地质作用)

覆盖在地壳表层的土绝大多数是第四纪形成的,因此,又将土称为第四纪沉积物。地壳表层的岩石(岩浆岩、沉积岩和变质岩)在外力地质作用下风化形成形状各异、大小不等的岩石碎屑和矿物颗粒,经过流水、冰川、风等不同的搬运方式,在一定的自然环境中堆积而形成的松散颗粒集合体,称之为土。土的形成通常要经过风化、搬运和沉积等地质作用过程。

1. 风化作用

地壳表层的岩石(岩浆岩、沉积岩和变质岩)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、破碎或发生化学和生物变化,经流水、风、冰川等动力搬运作用,在各种自然环境下形成松软堆积物,便形成土体。因此,土是岩石风化作用的产物。风化作用可分为下面三种类型。

(1) 物理风化。物理风化是指岩石或土颗粒受各种气候因素影响,如温度的昼夜变化和季节变化,水的冻胀、波浪冲击、地震等作用,使岩石或土颗粒崩解、碎裂的过程,这种作用使岩石或土颗粒逐渐变成细小的颗粒,但它们的矿物成分与母岩相同,称为原生矿物。物理风化的结果是只改变岩石或土颗粒的大小和形状,不改变其矿物成分。

(2) 化学风化。化学风化是指岩石或土颗粒受环境因素的影响而改变了矿物成分,形成新的矿物,即次生矿物。例如,正长石经过水解作用后,形成高岭石。环境因素包括水、空气及溶解在水中的氧气和二氧化碳等。化学风化的结果是形成十分细微的土颗粒,如黏粒及可溶性盐等矿物。黏粒的比表面积大,具有较强的吸附水分子的能力。

(3) 生物风化。生物风化是指受生物影响而产生的风化作用,包括生物物理风化和生物化学风化。生物风化作用既可引起岩(土)的机械和化学破坏,也能改变土的成分和有机质的含量,使土的工程性质产生变化。

上述风化作用常常同时存在、互相促进,但在不同的地区和自然条件下,风化作用又有主次之分。风化作用对岩土的工程性质影响很大,在同一地区和自然条件下,风化作用由地表向下逐渐减弱,达到一定深度后,风化作用基本消失。

2. 搬运作用

搬运作用系指风化剥蚀的产物——即岩(土)碎屑或其化合物离子,被流水、冰川、风等地质营力带到其他地方沉积的作用过程。在搬运过程中,对岩(土)体有一定的改造,从而引起土的分选性、磨圆度或矿物成分、化学成分等产生相应变化。搬运作用方式有如下两种形式。

(1) 机械搬运。风化产物的岩石碎屑和矿物颗粒(如泥、砂、砾等)被流水、冰川、风等搬运离开物源地的过程,称之为机械搬运。

(2) 化学搬运。以化学风化的产物通过真溶液或胶体溶液进行搬运。如石灰岩溶于水之后,以 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 离子形式搬运;长石风化后形成黏土矿物、二氧化硅在水中呈胶体质点被搬运。

3. 沉积作用

在搬运过程中，随着风或流水等地质营力的能量不断消耗，其搬运能力(风速或流速)下降，或随环境的生物、化学条件改变，造成被搬运物质从风或流水等介质中分离出来，形成沉积物，这些作用统称为沉积作用。如流水搬运物在河流转弯处、湖口或河口因流速减慢而沉积，风的搬运物因风力减弱或受阻拦而堆积。堆积下来的松散堆积物形成土体，随后经过漫长的地质作用过程，土体被逐渐压密、胶结，形成沉积岩。在自然界中，岩石不断风化破碎、搬运、沉积形成土，土又可以经过地质作用形成岩石，这个过程周而复始。

1.2.2 土的成因类型

根据搬运方式和沉积环境不同，土按成因可以分为残积土、坡积土、洪积土、冲积土、湖沼积土、海积土、冰川积土、风积土等类型。工程建设中常见土的成因类型和工程特性见表 1-1。

表 1-1 常见土的成因类型和工程特性表

名称	成因类型	特征与分布	工程特性
残积土	岩石风化所形成的碎屑，残留在原地的堆积物	颗粒粗细不均，多棱角，无分选性，无层理，其矿物成分与下伏母岩相同	残积土厚度变化大，作为建筑物地基时，应注意不均匀沉降问题
坡积土	风化产物在重力、水流等作用下，沿斜坡移动，沉积在坡面和坡脚的堆积物	坡积土自坡面至坡脚，颗粒由粗到细，表现出轻微的分选性，其矿物成分与下伏母岩无关。厚度变化大，薄者仅数厘米，厚者可达数十米	常沿下伏岩层斜面滑动，颗粒粗细变化大、土质不均，其强度及压缩性差异也较大，有时为不良地基土
洪积土	由山洪暴雨和大量融雪形成的暂时性洪水，把大量残积土、坡积土剥蚀、搬运到山谷或山麓平原沿途堆积而成	洪积土呈扇形分布，土颗粒从扇顶到扇缘由粗变细，表现出一定的分选性，因搬运距离不远，颗粒磨圆度较差，土中常有不规则交替层理构造，并具有夹层、尖灭或透镜体等。山洪不规则周期性暴发所形成的堆积物各不相同	一般离山前较近的洪积土强度较高，是较好的地基。离山前较远地段，洪积物颗粒较细，成分均匀，厚度大，是较好的地基。在过渡地段，常为宽广的沼泽，是不良地基
冲积土	河流流水的作用将两岸岩石及上覆残积、坡积、洪积土剥蚀后搬运、沉积在河流坡降平缓地带形成的堆积物	具有明显的层理构造和分选性，由于水中长距离搬运时的碰撞和摩擦，冲积土中的粗颗粒有较好的磨圆度。河流上游土颗粒较粗，下游的颗粒较细	在河流上游修建筑物时，应考虑渗透和渗透变形问题。对于河流下游的建筑物，需要考虑地基沉降和稳定等问题
风积土	由风力搬运形成的堆积物	我国西北地区广泛分布的黄土是一种典型的风积土。其主要特征是组成黄土的颗粒十分均匀，以粉粒为主，没有层理，有肉眼可以分辨的大孔隙，垂直裂隙发育，能形成直立的陡壁	黄土在干燥条件下有较高的承载力和较小的变形，但遇水后会产生湿陷，变形显著增大

1.3 土的三相组成

土是由固相、液相和气相组成的三相体系。固相部分为土粒,构成土的骨架。骨架间有许多孔隙,可为水和气体所填充组成土的液相、气相部分。土体的物质组成、三相比例关系、土的结构与构造决定着土的物理力学性质。因此,研究土的工程性质,首先必须研究土的三相组成。

1.3.1 土的固体颗粒(固相)

1. 土的矿物成分

土的固体颗粒构成土骨架,其大小和形态、矿物成分、土粒的相互搭配情况是影响土的物理力学性质的重要因素。组成土的矿物按其成因可分为原生矿物、次生矿物和有机质等。

1) 原生矿物

原生矿物是指岩浆在冷凝过程中形成的矿物,如石英、长石、角闪石、云母等。土中原生矿物是岩石风化过程中的产物,它保持了母岩的矿物成分和晶体结构。这些矿物是土中卵石、砾石、砂粒和某些粉粒的主要成分。原生矿物的主要特点是颗粒粗大,物理、化学性质比较稳定,抗水性和抗风化能力较强,亲水性弱或较弱。

2) 次生矿物

母岩的风化产物在搬运过程中,如果原来的矿物因氧化、水化、水解、溶解等化学风化作用而形成的新矿物,称次生矿物,其颗粒往往比原生矿物细小。在自然界中,土体中常见次生矿物可分为两种类型,即可溶性次生矿物和不可溶性次生矿物。

(1) 可溶性次生矿物。可溶性次生矿物又称溶盐矿物,通常以离子状态存在于土的孔隙水中。阳离子有 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 等,阴离子有 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 S^{2-} 等。当土中含水量降低或介质溶液的 pH 发生变化,这些矿物便会结晶析出在土颗粒表面,在土中起暂时性胶结作用。当外部条件发生变化,如土中含水量增加,结晶的盐类会重新溶解,先前的暂时性胶结将部分或全部丧失,土体结构将产生变化或破坏。

(2) 不溶性次生矿物。土中常见不溶性次生矿物包括游离氧化物和黏土矿物。

① 游离氧化物。这是由三价的 Fe^{3+} 、 Al^{3+} , 二价的 Si^{2+} 和 O^{2-} 、 OH^- 、 H_2O 等组成的矿物,如黄铁矿($Fe_2O_3 \cdot H_2O$)、褐铁矿($Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$)、三水铝石($Al_2O_3 \cdot 2H_2O$)、二氧化硅($SiO_2 \cdot nH_2O$)等。大多数情况下,游离氧化物仅为土的次要组分,但其作用却不容忽视。它们大多呈凝胶状,部分呈微结晶,颗粒极为细小,性质稳定,亲水性弱,胶结能力强。它们或是包裹在颗粒的表面,或是沉淀在贯通的孔隙壁上,将土粒牢固地胶结在一起。

② 黏土矿物。黏土矿物是原生矿物长石、云母等硅酸盐矿物经化学风化形成的,是一种复合的铝-硅酸盐晶体,颗粒呈片状,是由铝片和硅片两种晶片构成的晶胞组成。硅片的基本单元是硅-氧($Si-O$)四面体,铝片的基本单元是铝-氢氧($Al-OH$)八面体。

a. 硅-氧四面体。由一个硅原子和四个氧原子以相等距离堆成四面体形状, 硅居其中央, 氧占据四个顶点 [图 1.2(a)]。由六个硅-氧四面体组成一个硅片, 横向联结成六角形的网格 [图 1.2(b)]。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 1.2(c) 所示。

b. 铝-氢氧八面体。一个铝片由六个氢氧离子围绕一个铝离子构成的八面体晶片 [图 1.3(a)]。八面体中每个氢氧离子均为三个八面体共有, 许多八面体以这种方式联结在一起, 形成八面体单位的片状结构 [图 1.3(b)]。简化图形如图 1.3(c) 所示。

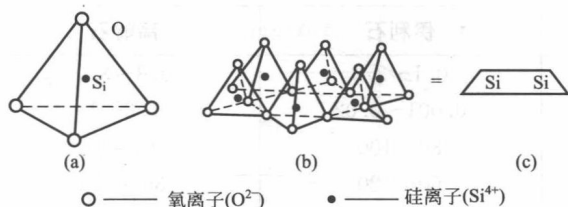


图 1.2 硅片结构示意图

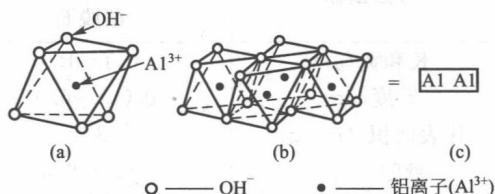


图 1.3 铝片结构示意图

(3) 主要黏土矿物。硅氧四面体和铝氢氧八面体这两种基本单元以不同的比例组合, 就形成了不同类型的黏土矿物。土中常见的黏土矿物有蒙脱石、伊利石和高岭石三大类。

① 蒙脱石($Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$)。其晶层结构是由两个硅片中间夹一个铝片构成, 如图 1.4(a)所示, 这种结构称为 2:1 的三层结构。晶层间是 O^{2-} 与 O^{2-} 氧离子相接, 这种联结弱且不稳固, 水分子很容易楔入其间, 每一颗粒能组叠的晶层数较少。颗粒大小为 $0.1 \sim 1.0 \mu m$ ($1 \mu m = 0.001 mm$), 厚度为 $0.001 \sim 0.01 \mu m$ 。故含蒙脱石矿物较多的土对环境的干湿变化比较敏感, 当土体湿度增高时, 体积膨胀并形成膨胀压力; 当土体失水时, 体积收缩并产生收缩裂隙。而且这种胀缩变形可随环境变化往复发生, 导致土的强度衰减。

② 伊利石($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 2H_2O$)。伊利石是含钾量高的原生矿物经化学风化的初期产物, 其晶格构造与蒙脱石相似, 也是两层硅片夹一层铝片所形成的三层结构, 不同的是四面体中 Si^{4+} 被 Al^{3+} 所替代, 如图 1.4(b)所示。伊利石相邻晶胞间由钾离子联结, 这种联结较之高岭石层间的氢键联结为弱, 但比蒙脱石层间的水分子联结要强, 所以它形成的片状颗粒大小处于蒙脱石和高岭石之间, 其工程性质也介于两者之间。

③ 高岭石($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$)。其晶层结构是由一个硅片与一个铝片上下组叠而成, 如图 1.4(c)所示, 这种结构称为 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-} 和 OH^- 相互联结, 称离子键(氢键)联结。高岭石晶胞间具有较强的氢键联结, 致使晶格不能自由活动, 水较难渗入其间, 是一种遇水较为稳定的黏土矿物。因为晶层之

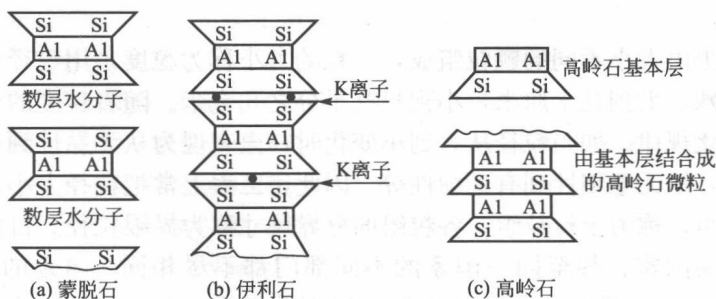


图 1.4 黏土矿物的晶格示意图

间联结力强，能组叠很多晶层，多达百层以上，成为一个颗粒。颗粒大小为 $0.3\sim3.0\mu\text{m}$ ，厚度约 $0.03\sim1\mu\text{m}$ 。所以高岭石的主要特征是颗粒较粗，不容易吸水膨胀，失水收缩，或者说亲水性弱。

三种黏土矿物的主要特征见表 1-2。

表 1-2 三类黏土矿物的特性

特征指标	矿 物		
	蒙脱石	伊利石	高岭石
长和宽/ μm	0.1~1.0	0.1~2.0	0.3~3.0
厚度/ μm	0.001~0.01	0.001~0.02	0.3~1
比表面积/ (m^2/g)	800	80~100	10~20
液限/(%)	100~900	60~120	30~110
塑限/(%)	50~100	30~60	25~40
胀缩性	大	中	小
渗透性	小($<10^{-10}\text{cm/s}$)	中	小($<10^{-5}\text{cm/s}$)
强度	小	中	大
压缩性	大	中	小
活动性	大	中	小

由于黏土颗粒是很细小的扁平颗粒，其表面与水相互作用能力很强。表面积越大，这种能力就越强。黏土矿物表面积的相对大小可用单位体积(质量)颗粒的总表面积，即比表面积来表示。例如，一个棱边为 1mm 的立方体颗粒，其体积为 1mm^3 ，比表面为 $6\text{mm}^2/\text{mm}^3=6\text{mm}^{-1}$ ；若将 1mm^3 的立方体颗粒分割为棱边为 0.001mm 的许多立方体颗粒，则比表面可达 $6\times10^3\text{mm}^{-1}/\text{mm}^3$ 。由此可见，由于土粒大小的变化引起土的比表面数值上的变化巨大，势必导致土的性质突变。因此，在土颗粒矿物成分一定的条件下，黏土的比表面是反映其特性的一个重要指标。

3) 有机质

土中有机质是动植物残骸和微生物以及它们的各种分解和合成产物。扫描电镜下腐殖质呈多孔海绵状，颗粒细小，这决定了它极具活性和亲水性。通常腐殖质并不单独存在，而是紧紧地吸附在矿物颗粒表面，形成有机质-矿物复合体。土体随着有机质含量(特别是分解完全的腐殖质)增高，土的塑性增强，压缩性增高，渗透性减小，强度降低。

2. 土的粒组划分及颗粒级配

1) 土粒粒组

自然界中的土由大小不同的颗粒组成，土粒的大小称为粒度，用粒径表示。通常土颗粒的大小相差悬殊，大到几十厘米，小到只有千分之几毫米。随着粒度的变化，土的工程性质呈一定的变化规律。如当粒径从大到小变化时，土表现为从无黏性到有黏性，从透水性强到透水性弱，从无毛细性到有毛细性等。因此，工程上常把粒径大小、性质相近的土粒合并为一个粒组，称为土粒粒组。各粒组的分界尺寸称为界限粒径。目前对粒组划分的界限尺寸在不同的国家、甚至同一国家的不同部门都不尽相同。《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)是我国较常用的土粒粒组划分标准，如表 1-3 所示，按界限粒径 200mm 、 60mm 、 2mm 、 0.075mm 和 0.05mm ，将土粒粒组先粗分为巨粒、粗粒和细粒

三个统称，再细分为六个粒组：漂石(块石)、卵石(碎石)、砾粒、砂粒、粉粒和黏粒。

表 1-3 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(块石)颗粒	$d > 200$	透水性极强，无黏性，无毛细水
	卵石(碎石)颗粒	$200 \sim 20$	
粗粒	圆砾(角砾)颗粒	$20 \sim 2$	透水性大，无黏性，毛细作用极弱，毛细水上升高度不超过粒径大小
	砂粒	$2 \sim 0.075$	易透水，无黏性，遇水不膨胀；干燥时松散，无塑性；毛细水上升高度不大，随粒径变小而增大
细粒	粉粒	$0.075 \sim 0.005$	透水性较弱，湿时稍具黏性，饱水易流动，无塑性和遇水膨胀小，干时稍有收缩；毛细水上升高度大而快，极易出现冻胀现象
	黏粒	$d < 0.005$	几乎不透水，黏性强，可塑性强；遇水膨胀，脱水收缩；毛细水上升高度大，但上升速度慢

2) 土的颗粒级配

在自然界中很难遇到单一粒组组成的土，绝大多数都是由几种粒组混合而成的。因此，为了说明天然土颗粒的组成情况，不仅要了解土颗粒的大小，还要了解各种粒组所占的比例。土中各个粒组的相对含量(即各粒组质量占土粒总质量的百分数)，称为土的颗粒级配。

(1) 颗粒分析试验。工程中，通过土的颗粒分析试验来了解土的颗粒级配情况，常用的分析方法有筛分法和沉降分析法两种。《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)(2007 版)中规定：筛分法适用于粒径在 $60 \sim 0.075\text{mm}$ 的粗粒土。沉降分析法适用于分析粒径小于 0.075mm 的细粒土。如果土中同时存含有大于等于 0.075mm 和小于 0.075mm 的土粒时，则须同时使用两种方法进行分析。

① 筛分法。试验时，将土风干后，取具有代表性土样放入一套孔径从上至下筛孔逐渐减小放置的标准筛中，孔径依次为 60mm 、 40mm 、 20mm 、 10mm 、 5mm 、 2mm 、 1mm 、 0.5mm 、 0.25mm 、 0.075mm ，经筛分机上下振动后，将土粒分开，称出留在各筛上土质量，求出占土粒总质量的百分含量，即得土的颗粒级配。

② 沉降分析法。沉降分析法有比重计法和移液管法等。沉降分析法的原理如图 1.5 所示，将一定量的土样与水在量筒中混合，经过搅拌，使各种粒径的土粒在悬液中均匀分布，此时悬液浓度(单位体积悬液内含有的土粒重量)在上、下不同深度处相等。但静置一段后，土粒在悬液中下沉，较粗的颗粒沉降较快，在液面以下深度 L_i 处以上的溶液中不会有大于 d_i 的颗粒(图 1.5)，如在深度 L_i 处考虑一小段 $m \sim n$ ，则 $m \sim n$ 内只含有粒径小于等于 d_i 的土粒。而且小于等于 d_i 的颗粒的浓度与开始时均匀悬浮液中小于等于 d_i 的颗粒的浓度相等。这样，任意时刻在 L_i 处悬浮液中 d_i 颗粒的浓度可用密度计法或移液管法测定，即可求得粒径小于等于 d_i 的累积百分含量。

当土粒简化为理想球体时，土粒的沉降速度可用斯托克斯(Stokes)定律计算