

水利部农水司推荐

全国中等职业教育农业水利工程类精品教材
全国农村水利员培训新概念规划教材

土力学

吴玲洪 主编



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

全国中等职业教育农业水利工程类精品教材
全国农村水利员培训新概念规划教材

土力学

吴玲洪 主 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

土力学是农业水利工程重要的专业基础课,也是土木建筑类专业的学生必须掌握的一门自然科学技术。本书共分10章,主要包括土的物质组成和结构,土的物理性质和工程分类,土的渗透性和渗流问题,土体中的应力计算,土的压缩性和地基沉降计算,土的抗剪强度,挡土结构物上的土压力,地基承载力,基础设计、地基处理和特殊土的工程性质等内容。

本书系统地阐述了土的形成和应用的全过程,讲清理论,说透知识点,突出重点,重在常见土工问题的解决。本书内容详实,语言通俗,较多地采用图表和条理性的步骤表达,配合适当的实例,将复杂枯燥的知识作了简明而清楚的表述,深入浅出地阐述了农业水利工作者所需的土力学基础理论和基础知识。

本书既可作为农村水利工作者及其他土建工程类基层工作人员的培训和自学教材,也可以作为相关专业中专学校的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

土力学 / 吴玲洪主编. —北京:中国水利水电出版社, 2005

全国中等职业教育农业水利工程类精品教材. 全国农村水利员培训新概念规划教材

ISBN 7-5084-3172-3

I. 土... II. 吴... III. 土力学—专业学校—教材
IV. TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 096545 号

书 名	全国中等职业教育农业水利工程类精品教材 全国农村水利员培训新概念规划教材 土力学
作 者	吴玲洪 主编
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	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 9 印张 213 千字
版 次	2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—5000 册
定 价	21.00 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

序

我国历来十分重视水利工作，把治水看作治国安邦的基本方略。当前正处于社会体制转型和经济快速发展的新时期，治水思路由工程水利向资源水利、传统水利向现代水利和可持续发展水利转变。水利事业的发展需要一大批具备岗位技能、独当一面的基础人才。广大基层水利技术员，长年累月战斗在水利建设的第一线，是各级水利部门和地方政府的得力助手。他们担负着乡镇区域（流域）内水利工程建设管理、防汛抗旱抢险、水政执法、水资源配置、农田水利实用技术推广等任务，为推动整个水利建设、管理和改革，加快农业农村现代化建设执着奉献。

进一步提高农村防洪排涝能力，保障农村饮水安全、粮食生产安全和农村生态安全，推进水资源的高效利用，促进农业增效、农民增收、农村发展和全面实现小康社会，是新时期赋予农村水利的主要任务。为此，加强以基层水利员为重点的水利行业基础人才专业培训，进一步提高他们的业务素质和专业技能，更好地肩负起历史重任，是新形势下水利职业教育的一项重要工作。

教材建设是职业教育的基础。针对基层农村水利技术人员培训及水利中等职业教育的教材建设相对滞后的现状，浙江省率先组织编写了全国农村水利员培训新概念规划教材，即全国中等职业教育农业水利工程类精品教材。该套教材由15分册组成，各分册在内容的组织和编排上体现了适用基层水利人员中职教育及水利行业职工培训的特点，把握了以应用为目的，以能用、够用为度的原则，并注重介绍和引入目前的新技术、新工艺、新标准和新规范。该套教材有较好的实用性、针对性、适用性，具有一定的创新特点，既可作为基层农村水利技术人员的岗位培训教材、中等职业学校水利工程技术专业通用教材，也可供广大水利技术人员参考阅读。

该套教材的出版，是对水利行业职业教育、教材建设的一次有益探讨，相信它会给新时期农村水利职业技能应用型人才培养和中等职业教育带来帮助。

水利部农村水利司司长



2005年8月

前 言

全国农村水利员培训新概念规划教材，即全国中等职业教育农业水利工程类精品教材是根据水利部对全国农村水利技术人员的培训要求和全国农业水利工程类专业中职教学特点，总结多年教学和行业培训的经验，吸取同类教材的优点，以适应 21 世纪将水利行业的职工技术培训与中职教育融为一体的教育改革新思维编写而成。本套教材针对中职教育、水利行业职工培训和专业人员自学的特点，在内容的选择和编排上进行了认真探索和尝试性改革。编写过程本着“淡化设计，充实图例，突出概念，反映最新”的原则，追求“实用性、针对性、通用性”。本套教材尽量采用最新的行业技术、规范和标准，力求通俗易懂、简单实用，使读者学为所用，学以致用。

本套教材首批推出 15 分册，本书为《土力学》。该书是农业水利工程重要的专业基础课，也是土木建筑类专业的学生必须掌握的一门自然科学技术。本书共分 10 章：主要包括土的物质组成和结构、土的物理性质和工程分类土的渗透性和渗流问题、土体中的应力计算、土的压缩性和地基沉降计算、土的抗剪强度、挡土结构物上的土压力、地基承载力、基础设计、地基处理和特殊土的工程性质等问题。

本书系统阐述了土的形成、应用的全过程，重在常见土工问题的解决。本书较多地采用图表和条理性的步骤表达，配合适当的实例，深入浅出地阐述了农业水利工作者所需的土力学基础理论和基础知识。

本书由吴玲洪主编，并编写绪论和第一章至第七章；彭晓兰编写第八章至第十章，本书由吴昉审稿。

本套教材在编写过程中，得到了水利部农水司、浙江省水利厅有关处室、浙江水利水电高等专科学校、贵州省水利水电学校、吉林省水利水电学校、云南省水利水电学校、新疆水利水电学校、河南省郑州水利学校等单位的领导和同志们的指导和帮助，在此表示深深的谢意。同时，得到了相关教材、专著的专家们的帮助与指教。对所有参考文献的作者（包括因时间及其他原因联系不上的作者），表示衷心的感谢，并欢迎联系和交流。

由于编写时间仓促，编者水平有限，本套教材在内容选择、文字表述、图文体例等各方面可能存在疏漏。热忱欢迎读者批评指正。

编 者

2005 年 8 月

【 目 录 】

序

前言

绪论	1
第一章 土的物质组成和结构	4
第一节 土的形成	4
第二节 土的三相组成	7
第三节 土的结构与构造	10
第二章 土的物理性质和工程分类	12
第一节 土的物理性质指标	12
第二节 土的物理状态指标	16
第三节 土的工程分类	19
第三章 土的渗透性和渗流问题	23
第一节 土的渗透定律和渗透系数	23
第二节 渗透力和渗透变形	26
第四章 土体中的应力计算	30
第一节 土体的自重应力计算	30
第二节 基底压力计算	31
第三节 地基中的附加应力计算	34
第五章 土的压缩性和地基沉降计算	43
第一节 土的压缩性	43
第二节 地基最终沉降量的计算	47
第三节 地基变形随时间变化计算	55
第六章 土的抗剪强度	62
第一节 土的抗剪强度和破坏理论	62
第二节 土的抗剪强度试验	66
第三节 剪切试验方法的分析与选用	70
第七章 挡土结构物上的土压力	72
第一节 静止土压力	73
第二节 朗肯土压力理论	74
第三节 几种常见情况下的土压力计算	77

第四节	库伦土压力理论	80
第五节	挡土墙的设计	84
第六节	土坡稳定	88
第八章	地基承载力	92
第一节	概述	92
第二节	地基的临塑荷载与临界荷载	93
第三节	按极限荷载确定地基承载力	96
第四节	按原位测试成果确定地基承载力	102
第五节	按工程规范确定地基容许承载力	104
第九章	基础设计和地基处理	109
第一节	浅基础设计	109
第二节	深基础概述	115
第三节	地基处理	119
第十章	特殊土的工程性质	123
第一节	软粘土	123
第二节	湿陷性黄土	124
第三节	膨胀土	128
第四节	季节性冻土	130
第五节	红粘土	131
参考文献		133



绪 论

一、土的定义与作用

关于土的定义,最常见的是从成因角度,认为土是地壳表层的岩石在风化作用后,经搬运、堆积而成的自然历史产物。用一句话概括,就是说土是岩石风化的产物。

从不同的观察角度出发,可对土作出不同的定义。从物质组成角度认为,土是由固体颗粒、水和气体组成的一种三相体。从分布位置和结构、变形性态角度认为,土是覆盖于地壳最表面的一种松散的或松软的颗粒状堆积物。从形成的历史时期角度认为,土是第四纪沉积物。

土与工程建设的关系非常密切。土由于就地取材而广泛用作建筑材料,例如作为土石坝的坝身材料,作为混凝土的组成材料,作为地下输水管道周围填土;而更常见的是土作为地基存在,承受了上部建筑物的荷载。

但是,作为地基和建筑材料的土的问题若处理不当,将带来生命财产的巨大损失。印度的纳纳克萨加坝,是一座高 15.9 m 的土坝,1967 年 9 月 7 日,由于坝基发生管涌,使坝体决口冲毁,造成 32 个村庄的人民流离失所,损失惨重。

美国的圣·弗兰西斯拱形重力坝,由于坝基砾岩为粘土质胶结并含有石膏夹层,被渗透水流浸湿、软化、溶解,导致坝体沉陷、开裂、滑坡崩溃,造成 400 多人伤亡。再有,1882~1914 年,历时 32 年开凿成的巴拿马运河,耗资 4 亿多美元,建成后第二年在分水岭地段发生了大规模岩崩,堵塞了运河。处理此事故又用了 5 年的时间,加挖了 5400 万 m^3 土石方,相当于此段开挖总量的 40% 以上。仅停航 5 年,损失就达 10 亿美元。

上海展览馆位于上海市区延安中路北侧。展览馆中央大厅为框架结构,箱形基础,展览馆两翼采用条形基础,地基为高压缩性淤泥质软土。展览馆于 1954 年 5 月开工,当年年底实测地基平均沉降量为 60cm;到 1957 年 6 月,中央大厅四周的沉降量最大达 146.55cm,最小为 122.8cm。当时,有关专家在仔细观察展览馆内严重的裂缝情况,分析沉降观测资料并研究展览馆勘察报告和设计图纸后,作出展览馆将裂缝修补后可以继续使用的结论。至 1979 年 9 月,经测量展览馆中央大厅的累计平均沉降量为 160cm。从 1957~1979 年共 22 年的沉降量仅 20 多 cm,不及 1954 年下半年沉降量的一半,说明沉降已趋向稳定,展览馆开放使用情况良好。但是,由于地基严重下沉,不仅使散水倒坡,而且建筑物内外网之间的水、暖、电管道断裂和重新连接等,使上海展览馆付出了相当大的代价。

二、土力学的研究内容与学习要求

土力学是运用力学知识和土工测试技术,研究土的生成、组成、结构和与质量有关、与水有关的物理性质,以及土的应力、变形、强度、稳定性等力学性质的一门学科。其中:



第一章, 土的物质组成和结构——要求了解土的形成机制, 掌握土的工程特性, 掌握土的三相组成, 特别是固体颗粒的粒径级配的基本概念和判断方法, 了解土的结构与构造。

第二章, 土的物理性质和工程分类——要求掌握土的物理性质指标及物理状态指标的基本概念、计算公式, 熟练掌握土的物理性质指标的三相换算, 了解土的工程分类方法。

第三章, 土的渗透性和渗流问题——要求了解土的渗透性与渗透定律的基本内容, 掌握渗透系数的基本概念及其确定方法, 掌握渗透力的基本概念和计算方法, 了解渗透变形的类型、判断方法、防治措施。

第四章, 土体中的应力计算——要求掌握土的自重应力、基底压力和附加应力的分布规律和计算方法。

第五章, 土的压缩性和地基沉降计算——要求掌握土的压缩性指标的测定方法, 了解两种常用的地基沉降计算方法, 能够计算地基的最终沉降量, 了解饱和土的单向固结理论和地基沉降与时间的关系。

第六章, 土的抗剪强度——要求了解土的抗剪强度的意义与土的强度在工程中的应用。掌握土的抗剪强度的影响因素, 掌握土的极限平衡的概念和条件, 了解测定土的抗剪强度的各种方法与应用。

第七章, 挡土结构物上的土压力——要求了解影响土压力大小的因素, 掌握静止土压力、主动土压力和被动土压力产生的条件, 计算方法和工程应用。掌握朗肯和库仑土压力理论的联系与区别, 了解挡土墙设计的主要内容和土坡稳定分析的基本方法。

第八章, 地基承载力——学会计算地基的临塑荷载、临界荷载和极限荷载, 掌握这三种荷载的物理意义和工程应用。了解按原位测试成果确定地基承载力的方法, 掌握按工程规范确定地基允许承载力的方法。

第九章, 基础设计和地基处理——要求了解浅基础设计的基本步骤和深基础设计的基本原理, 各类加固地基方法的原理、适用条件。

第十章, 特殊土的工程性质——要求了解软粘土、湿陷性黄土、膨胀土、季节性冻土和红粘土的特性及其工程措施。

本课程牵涉的自然科学范围很广, 在学习数学、水力学、工程力学的基础上讲授, 是后续水工建筑物、农田水利学、水利工程施工等课程的专业基础课。

本课程的学习要求: 掌握土的物理力学性质的基本概念和基本原理, 学会简单土工问题的设计计算。

三、土力学学科发展简介

从新石器时代半坡村遗址的土台和石基到春秋战国时代至秦朝的万里长城、隋朝的郑州超化寺、南北大运河、黄河大堤, 从中国宏伟的宫殿、寺院到埃及古老的金字塔、雅典的神庙, 无一不体现着人类与土打交道进行工程建设的丰富实践经验和高超的工程技术水平。隋朝修建的河北省赵州桥, 为世界最早最长的石拱桥, 全桥仅一孔石拱横越汶河, 净跨达 37.02m。此石拱桥两端主拱肩部设有两对小拱, 结构合理, 造型美观, 节料减重, 简化桥台, 增加稳定性, 桥宽 8.4m, 桥下通航, 桥上行车。桥台落在粉土天然地基上, 基底压力约达 500~600kPa, 从 1390 年以来沉降与位移甚微, 至今安然无恙。1991 年美



国土木工程师学会选定赵州桥为“国际历史土木工程第12个里程碑”。

18世纪欧洲工业革命的兴起,大规模的城市、水利和道路、铁路的兴建,遇到了很多与土力学有关的问题,随着这些问题的解决,土力学的理论逐步地产生和发展了。1773年,法国学者库仑根据实验提出了砂土抗剪强度公式和挡土墙土压力的滑楔理论,即库仑理论;1856年,法国学者达西创立了砂土的渗透定律,即达西定律;1869年,英国学者朗肯从另一途径建立了挡土墙的朗肯土压力理论;1885年,法国学者布辛奈斯克求得半无限弹性体在垂直集中力作用下,应力和变形的理论值;1922年,瑞典学者费兰纽斯提出了解决土坡稳定的瑞典条分法;1925年,美国著名科学家太沙基归纳了前人的成就,发表了《土力学》专著,使土力学成为了一门独立的学科,他本人也被称作土力学的奠基人。

我国也有不少专家学者对土力学理论作出宝贵的贡献,如中国科学院院士、全国土力学及基础工程学会前任理事长、清华大学黄文熙教授,早在1957年就研究提出了非均质地基考虑土侧向变形影响的沉降计算方法,并于20世纪60年代初期研制成功第一台振动三轴仪,在国际学术会议上发表了砂土液化理论。

近年来,世界各国超高土坝(坝高超过200m)、超高层建筑与核电站等巨型工程的兴建,各国多次强烈地震的发生,促进土力学进一步发展。同时,各国研制成功多种多样的工程勘察、试验与地基处理的新设备,为土力学理论研究和地基加固提供了良好的条件。计算机的应用和实验测试技术自动化程度的提高,促使本学科进入一个全新时期。

我国一些学者将土力学的发展划分为三个阶段:①奠基阶段,此阶段从库仑、朗肯、费兰纽斯等人建立的土力学理论到太沙基的《土力学》专著出版之前;②土力学的建立与发展阶段,此阶段的标志是太沙基的专著《土力学》一书的出版,有效应力原理、一维固结理论的应用与发展;③土力学的新时期,此阶段标志是20世纪60年代以后,计算机的出现、计算方法的改进与发展、测试技术的发展、本构模型的建立与发展等。



第一章 土的物质组成和结构

工程实践表明,土的工程性质不仅与土的矿物成分、形成原因、地质历史有关,而且与土的物质组成、土粒大小、结构和构造有很大关系。

第一节 土 的 形 成

地球外层是由岩石与土构成的地壳。地壳中的化学元素随着自然环境的改变而不断变化,这些元素在一定地质条件下形成为具有一定化学成分和物理性质的单质或化合物,也就是矿物。矿物的自然集合体又构成岩石。坚硬岩石风化破碎成为松散土层,而松散土层又不断沉积形成新的岩石。土是指覆盖在地表的没有胶结和弱胶结的颗粒堆积物。土与岩石的区分仅在于颗粒间胶结的强弱。

一、土的矿物成分

土中固体部分的成分,绝大部分是矿物质,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,其中以细粒组的矿物成分尤为重要。

1. 原生矿物

原生矿物是由母岩经物理风化形成的,化学成分并未改变。这类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,是组成粗粒土的主要矿物成分,其对土的性质影响主要由这些矿物本身的性质反映出来,如颗粒组成、大小形状、表面特征、矿物类型、硬度等。这类矿物主要有石英、长石、云母类矿物,其次为角闪石、磁铁矿等。

2. 次生矿物

次生矿物是原生矿物进一步因溶解、水化、水解及氧化等化学风化作用而形成的新的矿物成分。其成分与母岩不同,颗粒较细。在自然界,常见的有粘土矿物如蒙脱石、伊利石(水云母)、高岭石,以及易溶于水的次生矿物如石膏和岩盐。

粘土矿物是次生矿物中数量最多的矿物,其颗粒极细,一般粒径小于 0.005mm ,是构成土中粘粒的主要矿物成分。即使它在土中的相对含量不大,也对土的工程性质有极大的影响,表现出明显的控制作用。

二、地质作用

地球形成至今,经历了46亿万年以上的发展历史,而地壳一直是处在运动和变化之中。例如,高山不断遭受剥蚀夷为平地,沧海又不断被泥土充填变成桑田,火山爆发、地震、山洪等。这种使地壳的组成物质、地壳构造和地表形态等发生变化的各种作用,统称为地质作用。

按引起地质作用能源的不同,地质作用可分为内力地质作用和外力地质作用。内力地质作用的能源来自地球内部,主要是地球自转产生的动能和放射性元素蜕变产生的热能。



内力地质作用主要表现为地壳运动、岩浆活动、变质作用和地震等。

外力地质作用主要是太阳的辐射能引起的，并有重力能参加。外力地质作用主要通过地面流水、海洋、湖泊、冰川、风和生物活动等形式，作用于地壳表层。外力地质作用主要表现为风化作用、剥蚀作用、搬运作用、沉积作用和硬结成岩作用等。

内力地质作用和外力地质作用在促使地壳演化过程中，是相互联系又是相互矛盾的。

三、风化作用

地表的岩石在太阳辐射热、水、大气和生物等因素的作用下，其结构会逐渐疏松破碎，或矿物成分发生改变，这种作用称作风化作用。

(一) 风化作用类型

风化作用按产生的原因和特征，可分为物理风化、化学风化和生物风化作用三种类型。

1. 物理风化作用

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、碎裂成岩块、岩屑的作用，称作物理风化作用。物理风化使岩石产生量的变化。

岩石是一种传热的不良导体，当温度发生变化时，岩石产生热胀冷缩，表里胀缩不一，导致岩石产生裂缝而逐渐破碎，由表及里一层层遭受破坏，如图 1-1 所示。

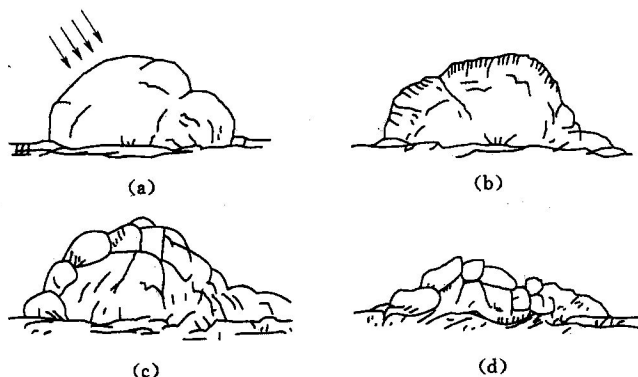


图 1-1 温度变化导致岩石表面物理风化

渗入岩石裂隙中的水分发生冰冻和融解现象时，水结冰后体积膨胀，可以产生很大的压力，促使裂隙扩大；当温度上升，冰又融化成水，水便继续向内渗透，这样冻与融反复进行，产生冰劈作用，使岩石崩裂。

另外，当水中溶解有盐类物质时，水分蒸发后盐类便在裂隙中结晶，对岩石产生撑胀作用，也会使岩石裂隙扩大，导致岩石崩解。

2. 化学风化作用

化学风化作用是指岩石与空气、水和各种水溶液相接触，经溶解、水化、水解和氧化作用分解为新矿物的作用。化学风化使岩石产生质的变化。

在自然界中，大多数矿物都能不同程度的溶解于水，当水中二氧化碳含量增加或温度



增高时,便增大了水的溶解能力,如岩盐、石膏等溶于水并随水带走,使岩石孔隙率增加,裂隙加大,削弱了岩石的坚固性。

有些矿物与水作用时,能吸收水分形成新的化合物,如硬石膏水化后成为石膏。当水化作用生成新的矿物时,往往体积膨胀,对周围岩石产生很大压力,促使岩石破碎。

在水中常有一部分 H^+ 和 OH^- 离子与矿物中的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子进行化学反应,形成新的化合物。使岩石成分发生改变,结构破坏,从而降低岩石的物理力学性质。

还有一些矿物由于氧化作用,在空气和水中游离氧的作用下,破坏岩石和矿物。

3. 生物风化作用

生物风化作用是指生物活动对岩石产生的破坏作用。这些作用一方面可引起岩石的机械破坏,如植物根系的生长,穴居地下的蚯蚓、鼠类等挖洞穴;另一方面可引起岩石的化学分解,如动植物的新陈代谢和遗体腐烂分泌出来有机酸、硝酸等,可使岩石分解破坏。

上述三种风化作用,在自然界并不是孤立进行的,而是相互联系、相互影响的统一过程。如物理风化作用使岩石逐渐破碎,这些破碎岩石又扩大了风化作用的接触面积,给化学风化作用提供了有利条件。而岩石的化学风化作用,使岩石变得松软,有些矿物水化后体积膨胀产生了很大的压力,又促进了物理风化作用的进行。

(二) 残积物(层)及其工程地质特征

岩石经风化作用后,其矿物成分、结构构造等发生了变化。岩石中裂隙增多,块体变小,一些不稳定矿物发生分解,溶解的物质随水流失,但大部分则残留在原地,形成与原岩性质完全不同的松散堆积物,称为残积物,也就是土。

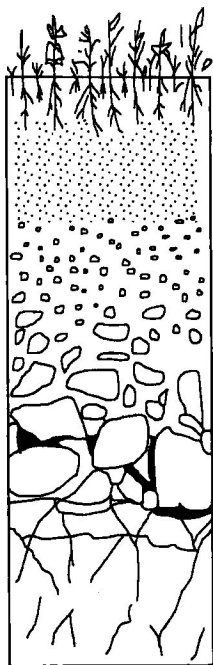


图 1-2 残积层与下伏岩层风化示意图

残积层的矿物组成和化学成分与下伏原岩有着密切的关系。碎屑物质颗粒大小很不均一,颗粒形状多具棱角,磨圆度很差;一般无层理,但有时保存有原岩的残余构造;残积层与下伏新鲜岩石没有明显的界线,而是逐渐过渡的。残积层的工程地质性质与原岩有很大的差别,它具有较多的孔隙和裂隙,易被水冲刷,强度和稳定性低;含粘土矿物较多时,压缩性高,透水性一般不大,残积层与下伏岩层风化情况见图 1-2。

四、土的工程特性

由于土的形成原因在根本上决定了土的物理力学性质,也决定了土的特点是复杂的。土的多孔性和散体性是土区别于其他固体材料的本质特征。因此,土的工程特性即土的力学性质与其他固体材料完全不同,主要体现在以下三方面。

1. 压缩性

当应力数值相同,材料厚度一样时,根据反映材料压缩性高低的指标弹性模量来比较,卵石的压缩性为钢筋压缩性的 4200 倍,饱和的压缩性比 C20 混凝土的压缩性高 1600 倍,足以证明土的压缩性极高。软塑或流塑状态的粘性土往往比饱和细砂的压缩性还要高。

2. 抗剪性



无粘性土的强度来源于土粒表面粗糙不平产生的摩擦力；粘性土的强度除摩擦力外，还有粘聚力。无论摩擦力和粘聚力，均远远小于建筑材料本身的强度，也就是说，土的强度不是指抗压强度或抗拉强度，而是指抗剪强度。土的强度比其他建筑材料（如钢材、混凝土等）都低得多，土在失去稳定时表现为局部的滑动失稳，而不是整体失稳。

3. 透水性

土的形成原因决定了土的多孔性，这给水的渗流提供了通道，土的透水性比木材、混凝土等固体材料都大，尤其是粗颗粒的卵石或砂土，其透水性极大。

上述土的三个工程特性即压缩性高、抗剪性低、透水性大与建筑工程设计和施工关系密切，被称为土的三大力学性质，需高度重视。

第二节 土的三相组成

土是由固体颗粒、水和气体组成的一种三相体。天然土一般是三相土，又称作湿土。固体颗粒一般由矿物质组成，有时还有粒间的胶结物和有机质，这构成为土的骨架。液体水和气体则填充在固体颗粒的孔隙中。在一些特殊时候，土将处于二相土状态。当土骨架中的孔隙被水充满时，称为饱和土；当土骨架中的孔隙不含水时，称为干土。

一、土的固相——固体颗粒

土的固体颗粒对土的物理力学性质起到决定性作用，其颗粒大小、形状及其在土中所含的比例对土的影响是我们研究的对象。

（一）土的粒组

土是粒径大小不同的固体颗粒相互掺混的产物。为了准确了解土的物理力学性质，往往将粒径不同、性质相近的土颗粒划分为一个粒组，而每个粒组随着分界尺寸的不同，其矿物成分和物理力学性质呈现出一定变化。目前，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根据用途不同都有不同的规定。表 1-1 提供的是 GBJ 145—90《土的分类标准》土粒粒组的划分方法，共分为 6 个粒组。

表 1-1

土粒粒组的划分

粒组统称	粒 组 名 称		粒径范围 (mm)	一 般 特 性
巨粒	漂石（块石）粒		$d > 200$	随粒组粒径的减小，其力学性质表现为：透水性变小；压缩性变大，抗剪性越来越小
	卵石（碎石）粒		$200 \geq d > 60$	
粗粒	砾粒	粗	$60 \geq d > 20$	
		中	$20 \geq d > 5$	
		细	$5 \geq d > 2$	
	砂粒	粗	$2 \geq d > 0.5$	
		中	$0.5 \geq d > 0.25$	
		细	$0.25 \geq d > 0.075$	
细粒	粉粒		$0.075 \geq d > 0.005$	
	粘粒		$d \leq 0.005$	



(二) 土的颗粒级配

工程土常常是不同粒组的混合物，而土的性质主要取决于不同粒组的相对含量。土的颗粒级配是指大小土粒的搭配情况，通常以土中各个粒组干土的相对含量的百分比来表示。为了了解各粒组的相对含量，就需进行颗粒分析。

1. 颗粒分析的方法

(1) 筛分法。GBJ 145—90《土的分类标准》规定：筛分法适用于粒径在 60~0.075mm 的土。试验时，将风干的均匀土样放入一套孔径不同的标准筛，标准筛的孔径依次为 60mm、40mm、20mm、10mm、5mm、2mm、1.0mm、0.5mm、0.25mm、0.1mm、(或 0.075mm)，经筛析机上下振动，将土粒分开，称出留在每个筛上的土重，即可求出留在每个筛上土重的相对含量。

(2) 比重计法。比重计法适用于粒径小于 0.075mm 的土。该法利用颗粒在水中的下沉速度与粒径的平方成正比的原理，粗颗粒下沉速度快，细颗粒下沉速度慢。土粒大小相当于在密度计中与实际土粒有相同沉降速度的理想圆球体的直径。

当土中既含有粒径在 60~0.075mm 的土，又含有粒径小于 0.075mm 的土时，应同时使用上述两种方法。

2. 颗粒分析的结果

颗粒分析的结果常用列表法、级配曲线法两种方式表达。

(1) 列表法：列出表格直接表达各粒组的百分含量，某干土的具体表示见表 1-2。

表 1-2 某干土的筛分法颗粒分析统计表

1	筛孔直径 (mm)	2.0	1.0	0.5	0.25	0.15	0.075
2	筛上土的质量 (g)	165	120	100	35	80	
3	各粒组土粒含量占总土样的比例 (%)	33	24	20	7	16	
4	小于各粒径的土粒占总土样的百分数 (%)	67	43	23	16		

注 1. 表中筛上土的质量就是各粒组的土粒含量，该土总土重 500g。

2. 各粒组土粒含量占总土样的比例 = $\frac{\text{筛上土的质量}}{\text{总土质量}} \times 100\%$ 。

(2) 级配曲线法：绘制颗粒级配曲线来表达。颗粒级配曲线是根据颗粒分析的方法，通过筛分及比重计试验结果绘制而成。横坐标表示粒径，因粒径范围从 0.005mm 以下到 200mm 以上，跨度很大，以对数坐标表示；纵坐标表示小于某粒径的土粒占总土重的百分含量。

颗粒级配曲线的作用：一是利用颗粒级配曲线可以计算出各粒组的含量，作为土的工程分类定名的依据；二是利用颗粒级配曲线定性和定量地分析判断土的级配好坏。

利用颗粒级配曲线判断土的级配好坏时，定性地分析，颗粒级配曲线若土样含的土颗粒粒径范围广，粒径大小相差悬殊，若曲线较平缓并光滑连续，则级配良好；反之，颗粒级配曲线若土样含的土颗粒粒径范围窄，土颗粒粒径大小差不多，曲线较陡或出现平台的，则级配不良。如图 1-3 所示，从图中 3 条级配曲线①、②和③可看出，曲线②级配良好，曲线①、③则级配不良。

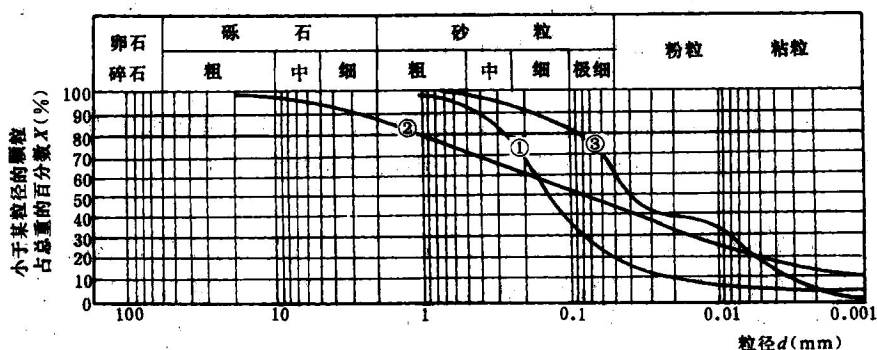


图 1-3 颗粒级配曲线图

定量地分析常用两个级配指标不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 来描述土的级配特征。

不均匀系数 C_u 为

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

曲率系数 C_c 为

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

式中 d_{60} ——土的控制粒径或限定粒径，是指小于某粒径的颗粒占总重百分数为 60% 时对应的粒径；

d_{10} ——土的有效粒径，是指小于某粒径的颗粒占总重百分数为 10% 时对应的粒径；

d_{30} ——土的控制粒径，是指小于某粒径的颗粒占总重百分数为 30% 时对应的粒径。

不均匀系数 C_u 反映大小不同粒组的分布情况。 C_u 越大表示土颗粒粒径范围广，粒径大小相差悬殊，颗粒大小越不均匀，其级配越良好，作为填方工程的土料时，则比较容易获得较大的密实度。曲率系数 C_c 则反映曲线的整体形状是否连续。

从工程上看： $C_u \geq 5$ 且 $C_c = 1 \sim 3$ 的土，称为级配良好的土；不能同时满足上述两个要求的土，称为级配不良的土。

二、土的液相——土中的水

土中的水存在形式不同，直接影响土的性质。土中水可分为结合水和自由水两种。

(一) 结合水

结合水是指被土颗粒表面吸引，在其周围形成的一层薄膜状的水，常又分为强结合水与弱结合水两类。因粘土颗粒具有较强的与水相互作用的能力，称为亲水性。这种亲水性主要是由于土粒表面常带负电荷引起的，土粒表面的负电荷吸引着周围的极化水分子，并在靠近土粒处引力最大，因此，使土粒周围的水分子被牢固地吸附在土粒的表面上，通常称这层水为强结合水。如果将干燥的土移在天然湿度的空气中，则土的质量将增加，直到土中吸着的强结合水达到最大吸着度为止。

由于土粒表面上的引力随着距离的增大而减小，位于强结合水外围的一层水膜，因引力减小，与土粒表面的结合就不如强结合水紧密。因此，这种水可能由较厚水膜移向较薄水膜的地方；这种移动不受重力影响，这层水不传递静水压力，所以常称为弱结合水。当土中含有较多的弱结合水时，土则具有一定的可塑性。砂土的比表面积较小，几乎不具可

塑性，而粘土的比表面积较大，其可塑性范围较大。弱结合水离土粒表面积愈远，其受到的电分子吸引力愈弱小，并逐渐过渡到自由水。

(二) 自由水

自由水是指不受土粒表面引力作用，而受重力作用，能传递静水压力的一种普通水。它按其移动所受到作用力的不同，可以分为毛细水与重力水两种。

1. 毛细水

土中的水从地下水位因受表面张力的作用而沿土的毛细孔隙上升，形成毛细水。毛细水上升高度和速度取决于土粒的粒径、孔隙大小和形状等。一般粘土上升高度较大可达几米，而砂土的上升高度很小仅几厘米至几十厘米，卵砾石的毛细水上升高度几乎接近为零。毛细水的上升还能引起建筑物或构筑物地基冻害，甚至破坏其上的建筑物或构筑物。

2. 重力水

位于土中地下水位以下的土颗粒引力范围以外的水称为重力水。这种水在重力或压力差作用下运动，对土粒有浮力作用。

三、土的气相——土中的气体

土中的气体有两类：一类是与大气连通，其成分与空气相似，在压力作用下，容易排出土体外，对土的工程性质影响很小；另一类是不与大气连通的封闭气体，在压力作用下可被压缩或溶解于水，而当压力减小时又可能复原，使土的渗透性减小，弹性增大，显然对工程具有一定影响。

第三节 土的结构与构造

一、土的结构

土的结构是指土颗粒之间排列与联结特征，通常可分为单粒结构、蜂窝状结构和絮状结构等三种基本类型。

1. 单粒结构

单粒结构是由土粒在自重作用下单独下沉达到稳定状态形成的。颗粒之间是点接触，几乎没有联结，粒间相互作用的影响较重力作用的影响可忽略不计，如图 1-4 (a) 所示。砂土和砾石土等粗颗粒土，一般都属于单粒结构。这种结构的土可能是紧密的，也可能是疏松的。

2. 蜂窝状结构

这种结构是粒径在 $0.005 \sim 0.02\text{mm}$ 范围的细颗粒土，在沉积过程中土粒之间的引力作用大于土粒自重，使颗粒互相联结形成的。由于土粒之间的引力作用为主导作用，土粒不下沉，而是依次被吸引形成蜂窝状结构，如图 1-4 (b) 所示。其主要特点是孔隙大，在荷载作用下常产生较大变形，同时强度也较低。

3. 絮状结构

粒径小于 0.005mm 的粘土颗粒在水中长期悬浮而不下沉，当这些粘粒在水中相互碰撞而吸引凝聚形成小链环下沉时，在小链环之间形成类似蜂窝状而孔隙特大的结构，称为絮状结构，如图 1-4 (c) 所示。这种结构在荷载作用下，特点是变形大、强度小。