



高等学校教材

土力学

(第二版)

西南交通大学 刘成宇 主编

LIXUE

中国铁道



高等学校教材

土 力 学

(第二版)

西南交通大学 刘成宇 主编
长沙铁道学院 华祖焜 主审

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书系统地介绍了土力学的基本知识,内容包括:土的组成和构造,土的物性指标及工程分类;土的渗透定律,流网计算;土中一点的应力状态,有效压力和孔隙压力,基底接触应力,弹性地基中应力的分布;土的压缩性,地基的沉降计算,一维固结理论;摩尔—库仑强度理论;砂土和黏性土的抗剪强度;地基承载力及理论近似解,原位测试方法,“规范”推荐方法;土压力类型,朗肯和库仑土压理论;土坡稳定检算,圆弧滑面的条分法,摩擦圆法;软弱地基加固措施,换填,预压,挤密桩;土的动力性质,在动力条件下土的强度和变形性质,饱和细砂土的震动液化等。

本书为高等学校土木工程各专业的教学用书,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

土力学/刘成宇主编. —2版. —北京:中国铁道出版社,2000
ISBN 7-113-03619-8

I. 土… II. 刘… III. 土力学 IV. TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 56872 号

书 名: 土力学 (第二版)

作 者: 西南交通大学 刘成宇

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)

责任编辑: 李丽娟

封面设计: 李艳阳

印 刷: 北京市燕山印刷厂

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 19.75 字数: 493 千

版 本: 1990 年 12 月 第 1 版 2000 年 2 月第 2 版 第 5 次印刷

印 数: 14 001~18 000 册

书 号: ISBN 7-113-03619-8/TU·614

定 价: 25.20 元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

第二版前言

本教材是根据国家教委批准的“九五”普通高等教育国家级重点教材立项选题的通知，在1990年由刘成宇主编，中国铁道出版社出版的高等学校教材《土力学》的基础上进行修订的。

第一版教材是按照当时的教学大纲编写的，选材内容符合当时的教学需要。但根据目前高校教学改革和专业调整的需要，及国家有关规范和标准的修订，有必要对第一版教材进行适当修改和补充，以满足大学本科土木工程专业拓宽知识面的需要。例如，在第一版教材中，对土的渗透性及渗流问题未能重视，考虑到它们是土力学的主要内容之一，不能偏颇，故在第二版教材中增加了土的渗透性及水的渗流一章，专门讨论土的渗透性和渗流问题。由于目前国家正在发展重载、高速铁路及高速公路，加上地震灾害频繁，因而有必要了解土的动力性质，以便研究土的动应力—动应变关系，为此修订时增加了土的动力性质一章。目前全国各行业都在采用可靠度理论来修订各自的地基基础设计规范，但修订工作尚未完成。为了使学生掌握一些可靠度理论知识，故在第六章天然地基承载力中，增加了用可靠度理论计算地基承载力的内容。其他各章基本保持原书的内容框架，只作局部的顺序修改和增删。为了便于学生自学和复习，每章后都编有例题和习题。

书中有☆号标出的内容可根据需要进行取舍。

本书由西南交通大学刘成宇主编，长沙铁道学院华祖焜主审。参加编写工作的有：西南交通大学陈禄生（第一章），夏永承（第二、九章），刘成宇（第三、四、五章），吴兴序（第六、八章），罗书学（第七章），李克钊（第十章）。在编写过程中，土力学教研室的赵善锐教授和周京华教授提出了很多宝贵意见，特予感谢。

编者

1999年10月

第一版前言

本教材是根据高等学校铁道工程专业“土力学和基础工程”课程教学大纲,在1980年刘成宇主编,中国铁道出版社出版的《土力学和基础工程》(上)试用教材的基础上进行修订的。修订后,上册改名为《土力学》,下册改名为《基础工程》。

《土力学和基础工程》试用教材的选材,基本上符合当时的教学需要,但近年来,土力学的基本理论及其运用的高速发展,并要使内容能覆盖更大的专业面,以扩大学生的视野,同时,按教学大纲要求,教材应适用于铁道建筑、桥梁、隧道、工业与民用建筑及工程地质等专业的本科生,故在内容上必须进行必要的补充和深化,使之不仅满足各专业的要求,而且也可作为工程技术人员的参考书,以适应四化建设的需要。

本着上述原则,修订后的教材与原试用教材相比较,在以下几方面作了补充和调整:第一章土的物理性质,深化了黏粒表面作用的阐述,在土的分类方面同时介绍了铁路和建筑部门新编地基设计规范的内容以及国际上常用的分类法;第二章土中应力及其分布,补充了孔隙压力系数及非饱和土中孔隙压力和有效压力的分布规律等;第三章土的变形性质和地基沉降计算,介绍了建筑部门新规范的沉降计算方法和多维固结理论;第四章土的抗剪强度,补充了应力路径及其影响,土的主要强度理论和屈服准则;第五章地基承载力,补充了建筑部门新规范提出的承载力计算方法,以及极限分析法;第六章土压力,主要补充了第二裂面土压力及静止压力;第七章边坡稳定,增加了常用的毕肖普简化边坡稳定分析法和传递系数法;最后增加了地基处理的新理论和处理方法。每章均编有算例和习题,以利于复习和自学。

书中,对非共同需要的内容均用☆号标出,以利读者按需要选择取舍。

本书由西南交通大学刘成宇主编,北方交通大学唐业清主审。参加编写的有:西南交通大学陈禄生(第一章),刘成宇(第二、三、四、五章),赵善锐(第六、七章),夏永承(第八章)。

编者

1988年12月

目 录

绪 论	1
第一章 土的物理性质	5
第一节 土的生成	5
第二节 土的粒径组成和矿物成分	7
第三节 土中的水和气体	14
第四节 黏粒与水溶液的表面作用	15
第五节 土的结构及其联结	18
第六节 土的三相含量指标	23
第七节 土的物理状态及其有关指标	26
第八节 土的膨胀、收缩及冻胀	33
第九节 土(岩)的工程分类	36
第二章 土的渗透性及水的渗流	42
第一节 土的渗透定律	42
第二节 渗透系数及其测定	45
第三节 渗透力及临界水力梯度	49
第四节 二维稳定渗流问题	52
第三章 土中应力和地基应力分布	59
第一节 土中一点的应力状态和应力平衡方程	59
第二节 饱和土的有效压力和孔隙水压力	61
第三节 部分饱和土的孔隙压力及有效压力	64
第四节 孔隙压力系数	65
第五节 在简单受力条件下地基中的应力分布	68
第六节 基底的接触应力	72
第七节 刚性基础基底压力简化算法	76
第八节 弹性半无限体内的应力分布	79
第四章 土的变形性质及地基沉降计算	93
第一节 土的弹性变形性质	93
第二节 土的压缩性	94
第三节 试验方法测定土的变形模量	98
第四节 地基沉降计算	102

第五节	沉降差和倾斜	110
第六节	饱和黏土的渗透固结和太沙基一维固结理论	117
第七节	确定固结系数 c_v	122
第八节	饱和黏土地基的沉降过程	124
☆第九节	多维固结理论简介	130
☆第十节	黏土的流变性质	132
第五章	土的抗剪强度	137
第一节	摩尔—库仑强度理论	137
第二节	土中一点应力极限平衡	139
第三节	抗剪强度试验	141
第四节	砂土的抗剪强度	146
第五节	黏性土的抗剪强度	148
第六节	应力路径及其影响	153
☆第七节	土的屈服条件和破坏准则	157
☆第八节	土的本构关系	159
第六章	天然地基承载力	166
第一节	概 述	166
第二节	地基临塑压力	168
第三节	浅基础地基极限承载力的理论近似解	170
第四节	深基础地基极限承载力实用解	174
第五节	按规范确定地基承载力	179
第六节	原位测试确定地基承载力	191
☆第七节	极限分析简介	197
第七章	土 压 力	203
第一节	概 述	203
第二节	静止土压力	205
第三节	朗肯土压力理论	205
第四节	库仑土压力理论	214
第五节	朗肯和库仑土压力理论的讨论	226
☆第六节	几种支挡结构简介	227
第八章	土坡稳定	238
第一节	概 述	238
第二节	直线滑面的土坡稳定检算	238
第三节	圆弧滑面的条分法分析	239
第四节	摩擦圆法	247
第五节	固定滑面的稳定检算——传递系数法	250

第六节 增加土坡稳定性的一些措施·····	251
第九章 地基处理·····	255
第一节 概 述·····	255
第二节 换 填·····	256
第三节 预 压·····	259
第四节 桩土复合地基·····	269
第五节 夯实及挤密桩·····	274
第六节 灌浆及加筋补强·····	278
☆第十章 土的动力性质·····	283
第一节 概 述·····	283
第二节 土的动应力—应变关系·····	285
第三节 土的动强度·····	291
第四节 饱和砂土的振动液化·····	301
参考文献·····	306

绪 论

一、土力学的研究对象

所有建筑物都是修建在地壳上的，建筑物的全部重量和所传递的荷载全由地壳支承。连接地表这部分的建筑物称为下部结构，或称为基础。它的作用是把上部结构的重量连同所传递的荷载，一并均匀分布到地壳上，而这部分地壳称为地基。组成地基的介质可能是分散的土或整体的岩石。土具有独特的力学性质，是本门学科的主要研究对象。

在进行地基强度和变形计算，以及土坡稳定检算时，必须先研究土中应力、强度和变形性质，研究土体在各种应力状态下的破坏形态和变形规律，只有弄清楚这些力学规律，才能较完善地解决工程实践中所遇到的各种问题。总之，本门学科将研究土的基本物理力学法则，提供地基基础和土工结构的设计计算方法及不良地基的处理措施。其所包含的主要内容有：

(1) 土的物理性质。指地基土的基本物理和物理化学等性质，如它的颗粒矿物成分、颗粒形状及组成，土的各相重量和体积的关系等。

(2) 土的渗透性。研究土中水的渗流规律，及由于渗流而产生的力学作用、流网计算等。

(3) 地基土的变形性质。研究在荷载作用下地基土的变形规律，用以预测在修建和使用阶段地基土的沉降量。

(4) 地基土的抗剪强度和稳定性。研究地基在外力作用下的破坏形态和规律，从而推导地基支承荷载的能力，即地基承载力问题；研究土堤、土坡在重力及其他外力作用下的滑动稳定问题。

(5) 土压力。在交通、水利、房屋建筑等工程中，大量遇到的是支挡结构的土压力计算问题，这是既古老而又未完全解决，且需要继续深入研究的问题。

(6) 土动力学。随着交通运输逐步向高速、重载方向发展，加上世界范围的频繁地震灾害，对研究土的动力性质提出了愈来愈高的要求，要求进一步研究在不同动力条件下，土的强度和变形性质的变化规律，以及饱和砂土的震动液化条件等。

(7) 其他问题。如不良地基的人工加固措施等。

由于土力学与基础工程有着不可分的内在联系，所以往往把它们合编为一本教材使用，但有时为了教学安排方便，又不得不分成两本教材。本教材就是按照这个原则分开编写的，故内容不涉及基础工程部分。

二、土力学理论的形成和发展

土力学理论有一个形成发展过程。以前，在土建工程中提出了许多土力学问题，由于缺乏理论，只能凭经验解决。到1773~1776年，库仑(Coulomb)提出了土的抗剪强度和滑动土楔的土压力理论，土力学才进入古典理论时期；其后，彭思莱(Poncelet, 1840年)对线性

滑动土楔作了更完善的解；朗肯（Rankine, 1857年）从塑性体应力场出发，建立了新的土压力理论，对土力学的发展产生了深远的影响；1885年布辛纳斯克（Boussinesq）提出在集中荷载下弹性半无限体的应力和位移的计算理论，为以后计算地基承载力和地基变形建立了理论根据；1856年达西（Darcy）通过试验建立了达西渗透公式，这为研究土中渗流和固结理论打下了理论基础；1922年费南纽斯（Fellenius）在处理铁路滑坡问题时，提出了土坡稳定分析方法。所有这些古典理论到现在还有着实用价值。

到1925年太沙基（Terzaghi）的《土力学》（《Erdbaumechanik》）德文版问世，土力学又发展到一个新时期（有人誉之为太沙基时期）。他所提出的有效压力理论、一维固结理论、地基承载力理论以及一系列研究成果，把土力学推向了一个新的高度，使其形成一门更完善、更系统的学科，因而太沙基被公认为现代土力学的奠基人。1936年国际土力学基础工程学会成立。初期，由太沙基亲自领导，推动了这门学科在世界范围的发展。

60年代以前，计算机还没有普及，复杂的土力学理论计算还不易解决，为了简化计算，不得不把土体当成弹性体和刚塑体等来对待，如土中应力和应变一律按弹性体公式计算，研究地基承载力常采用刚塑体的极限平衡理论等等。实际上，土的性质很复杂，不能用一个简单理论来表达。以1956年在美国科罗拉多州波德尔（Boulder, Colorado）举行的黏土抗剪强度学术会议和罗斯柯（Roscoe, 1963年）等对伦敦黏土的应力—应变关系的研究为标志，土力学已经得到进一步的发展，并进入到一个新的时期。自60年代以后，电子计算机的改进和推广，促使计算技术快速发展，因而有可能在地基计算中引入较复杂的弹塑性和黏弹（塑）性等本构模型，并对这些本构模型进行广泛而深入的研究，目前已经提出的不同类型模型就有百余种以上，但存在问题不少，应进一步研究改进。

土力学不单纯是一个理论问题，它离不开土的试验。随着理论研究的开展，试验方法和手段也必须改进和提高。50年代，土工试验方法和手段还很简单，近来却得已大幅度改进和提高。像三轴压力仪，在50年代国际上都少见，而现在一般土工试验室都有配备；精密的动三轴仪，国内都能生产；至于专用于研究工作的真三轴仪，由于技术问题较多，尚不能普及。关于原位测试设备如静力触探仪，已由单桥探头发展到双桥和带孔压的探头等；而旁压仪也由预钻式发展到自钻式。总之，试验设备在向高、精、尖方向发展。

三、土力学的发展方向

从现在发展趋势看，土力学的发展大致可分为如下几方面：

(1) 设计理论方面。考虑到地基土的非均匀性，土力学试验和监测数据的离散性，以及理论分析的不确定性，不得不用概率统计方法对地基设计进行可靠度分析。目前世界许多发达国家都在采用这套理论进行地基基础设计，并对旧的地基基础设计规范进行修改，我国各部门也在组织力量按各专业要求建立新的设计规范。

(2) 土的本构模型研究。地基设计计算在很大程度上取决于土的本构模型选择。近年来研究该模型已成为一大热点。到目前为止，已提出的各类模型已不下百余种，但能实用的不多。不是理论过于繁琐，运用不便，就是模型参数过多，测试不易，从而无法使用，所以还需要作进一步简化研究。

(3) 土动力学研究。由于地震对地基的破坏，高速重载铁路和高速公路的兴建，一般土体的静力学知识已不能阐明在各种动力条件下土的强度和变形性质，故必须研究土的动力性

质，研究它的动应力与动应变的关系，同时还要探讨饱和砂土地基的震动液化问题，这对防止地震灾害，提高抗震能力大有裨益。

(4) 土力学试验设备改进。试验设备的改进直接影响土力学的发展。以前研究土工结构和基础工程往往采用较小尺寸的模型试验，但是遇到的一个棘手问题就是如何模拟土的自重，目前较有效的办法是利用离心机，通过高速旋转产生离心力来模拟土的重力，所以近几十年土工离心机发展得很快，不仅用来研究高坝、深基在土重力作用下的应力状态，而且可以模拟地震力作用下的土和结构的相互作用和动力性质。

(5) 复合地基和复合土体的设计。在较软弱的地基中置入强度较高的其他材料，形成复合地基，如碎石桩、旋喷桩（水泥和土混合）等；在软土面铺设合成材料，其上填筑路基，以及在加筋土中铺设金属或钢筋混凝土筋条而构成复合土体等，这些利用新材料、新工艺而予以软弱土加固的方法，近年来得到逐步推广，已产生明显经济效益。现在的问题是设计理论未能跟上施工，对于复合体中的应力分布没完全搞清，对复合体的稳定和变形尚未找到一个合理的计算方法，尚需要深入研究。

四、土力学在我国的成就

中华人民共和国成立之前，土力学领域在我国还是一片空白，新中国成立后，一批留学国外的青年学者相继回国，他们中的一部分在大学或科研单位开设土力学课程或开展土力学研究，并建立土工试验室，为国家培养出一大批岩土工程技术人才，在教育、交通、水利、城市建设以及其他土建工程中发挥了重要作用。

1957年，我国土木工程学会开始组建全国土力学及基础工程学术委员会，并于当年参加了国际土力学及基础工程学会组织。1962年在天津召开了第一届全国土力学及基础工程学术会议，1966年在武昌召开了第二届学术会议。以后由于“文化大革命”而中断活动，直到1979年才在杭州召开第三届全国会议，以后差不多每四年召开一次全国会议，会后出版论文选集。对于国际会议，基本上每届都派代表或推选论文参加。为了提高学术水平，学会于1979年开始创办学术刊物《岩土工程学报》（双月刊），到现在已出刊一百余期，在国内外影响很大。

我国地域辽阔，地质、气候条件复杂。新中国成立后，国家积极进行基本建设，土建工程大量上马，这就为土力学发展开辟了广阔天地。以铁路建设为例，在河西走廊及青海修筑铁路时遇到盐渍土，路基春季翻浆，夏秋松胀，经过多次试验研究，提出了盐渍土地区铁路设计和施工规范，解决了此问题。在西北地区遇到湿陷性黄土，其特点是在干燥条件下，陡壁可直立数十米，而一旦遇水浸湿，则会坍塌滑坡，堵塞交通。经研究，提出关于黄土地层划分和路堑边坡设计标准的研究报告，为该地区的铁路设计找到了科学依据。在西南、中南地区广泛分布着膨胀土，当含水量不高时，土质坚实，路堑可挖成陡坡，一旦遇水，就会膨胀软化，引起路基边坡溜坍、坍塌，路基沉陷等病害。80年代开始对膨胀土研究并进行国际合作，找到了病害机理，提供了设计及施工指南。在东南沿海诸省及部分内地存在着软土地基，路基下沉和失稳一直是铁路建设的棘手问题，五六十年代国家投入了大量人力物力来研究这一问题，在计算理论及各种软土加固方面取得了不少成果；在新型支挡结构研究方面，也进行了大量试验研究工作，尤其是对锚杆结构和锚定板结构，提出了一系列研究成果，其中最有意义的是《锚定板挡土结构》一书，它不仅提出了全新的结构形式，而且还提供了新的设计理论。

总之，我国数十年来在土力学基本理论方面（如土的本构模型、非饱和土的强度理论研究等），在土力学先进仪器制造方面（如生产制造较复杂的静力三轴压力仪和动力三轴压力仪，各种原位测试仪等），在新材料和新工艺运用方面（如土工合成材料及粉煤灰在路基中的运用），在地基基础加固方面（如深层搅拌桩、钻孔桩桩端压浆加固）等，都取得了丰硕成果，有的已达到国际先进水平。

第一章 土的物理性质

任何工程材料的受力特性都同它本身的物理性质有关，土也不例外。但土与一般的致密和均匀材料又有很大的不同。它是自然生成的，是由不同的固体颗粒和水、气组成的千差万别的三相体，其组成之间的联系常是很复杂的，还会因外界条件的改变而发生变化。土在受力后是否会发生强度破坏或是发生很大变形，主要取决于它的物质成分、相互关系和相互作用，一般与它的固体颗粒本身的强度和变形关系不大。可以这样认为：对土的力学性质来说，其基础和本质的因素在于它的物理性质。

为了便于解决工程问题，我们要应用一系列指标来表征土的物理性质，并根据土的特征、有关指标值和形成年代等进行土的分类。

第一节 土的生成

天然土的三相物质成分、相互关系和作用是十分复杂和各不相同的。其主要原因是土的生成条件和生成历史等很不相同。

土是地壳表层的岩石长期经受风化作用和水流、冰川、风等自然力的剥蚀、搬运及堆积作用而生成的松散堆积物。其历史在地质年代中一般较短，多数是在一百万年内，即属于第四纪堆积。

一、风化作用

风化作用是由于气温变化、大气、水分及生物活动等自然条件使岩石产生破坏的地质作用。风化作用可分为物理风化、化学风化和生物风化三种类型。

物理风化作用的主要因素是气温变化。在昼夜、晴雨的气温变化中，岩石表面的温度变化比内部大，因而表里胀缩不均，加之所含不同矿物的膨胀系数不同，在气温变化时也削弱了矿物间的结合作用，久而久之，使岩石产生裂隙，由表及里遭到破坏。这种现象在大陆性干燥气候区表现最为显著。另外，在冷湿地区，渗入岩石裂隙中的水由于气温变化而不时地冻结和融化，导致裂隙逐渐扩大，岩石崩裂破碎。在干旱地区，大风挟带砂砾对岩石的打磨也可使岩面迅速剥蚀。

物理风化作用只引起岩石的机械破坏，其产物如砂、砾石和其他粗粒土的矿物成分与母岩相同。

化学风化作用是岩石在与水溶液和大气中的氧、二氧化碳等的化学作用下受到的破坏作用。化学风化作用有水化作用、水解作用、氧化作用、碳酸化作用及溶解作用等。化学风化作用不仅使岩石破碎，而且使其化学成分改变，形成性质不同的新矿物。

生物风化作用是指生物活动过程中对岩石产生的破坏作用，可分为物理生物风化和化学生物风化两种。如植物根部生长在岩缝中，使岩石产生机械破坏；动植物新陈代谢所排出的各种酸类、动植物死亡后遗体的腐烂产物以及微生物作用等，则使岩石成分发

生变化，遭到腐蚀破坏。

上述风化作用常常是同时存在、互相促进的。但在不同环境，会有不同的主次。风化作用对不同岩石成分和结构构造的破坏程度也会有很大差别。

二、按地质成因分土的堆积类型

常见的岩石风化产物因经受不同自然力的剥蚀、搬运和堆积作用而生成不同类型的土。不同地质成因的土具有不同的地质特征和工程性质。土的堆积类型主要有：

(1) 残积土——岩层表面经风化破坏后未被搬运带走而残留原地的碎屑堆积物。残积土未经分选和打磨作用，颗粒大小不均，多棱角。一般干寒地区残积土颗粒较粗，湿热地区颗粒较细。从地表以下到基岩，风化作用逐渐减弱至消失，无明显层理。残积土分布厚度变化较大，表层土质常是含有机质较多的土壤，比较疏松。

(2) 坡积土——由雨水和融雪将山坡高处的岩石风化产物洗刷、剥蚀、顺坡向下搬运的堆积物。其中有时还混杂有陡坡峭壁风化岩石的坠落破碎物。其矿物成分常与下面埋藏的基岩无关。坡积土一般由上而下厚度逐渐变大。新堆积的土质疏松。如基岩倾斜，则斜坡上的坡积土常处于不稳定状态。

(3) 洪积土——由暂时性山洪急流将其冲蚀地表时形成的大量泥砂和石块等挟带到沟谷口或山麓平原堆积而成的堆积物。离沟谷口近处堆积的是夹有泥砂的石块和粗粒碎屑，较远

处是分选较好的细粒泥砂。因山洪是周期性发生的，每次大小不同，故洪积土常呈不规则层理构造，如图 1-1 所示。土的力学性质以近山处较好。

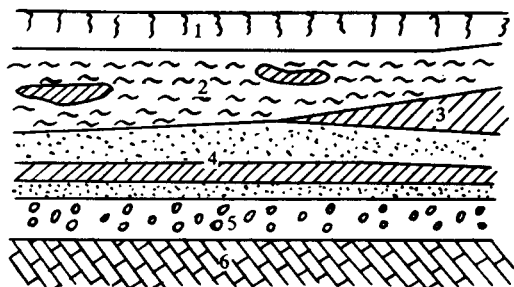


图 1-1 土的层理构造

- 1—表土层；2—淤泥夹黏土透镜体；
- 3—黏土尖灭层；4—砂土夹黏土层；
- 5—砾石层；6—石灰岩层。

(4) 冲积土——由江河水流搬运的岩石风化产物在沿途沉积而成的堆积物。这些被搬运的物质有的来自山区或平原，有的是江河剥蚀河床及两岸的产物。

冲积土分布范围很广，可分为山区河谷冲积土、山前平原冲积土、平原河谷冲积土、三角洲冲积土等类型。冲积土的特点是有明显的层理构造和分选现象，砂石有很好的磨圆度。从山区到平原，因河床坡度大致是由

陡转平，水的流速由急变缓，故堆积物厚度由小到大，粒度由粗变细，土的力学性质一般也逐渐变差。

(5) 湖沼积土——在湖泊或沼泽地的缓慢水流或静水中的堆积物。如由河流注入湖泊时带来的岩石碎屑、盐类、有机质和由湖浪剥蚀湖岸岸壁所产生的碎屑物质，在湖泊内不同位置沉积而成的，称为湖积土。淡水湖湖积土的粒度通常自湖边到湖心由粗变细，湖中间主要是黏性土、淤泥类土，常含较多的有机质，土质松软。盐湖湖积土主要是含盐分较多的黏性土和各种盐类。

在沼泽地的堆积物称为沼泽土，其主要成分是含有半腐烂的植物残余体的泥炭。其特点是含水量极高，土质十分松软。

(6) 海积土——由江河入海带来的或由海浪、潮汐等剥蚀海岸产生的各种物质以及海洋

中的生物遗体等沉积而成的堆积物。近海岸一带粒度较粗，土质尚好。离海岸越远，堆积物越细小。深海堆积物主要为有机质软泥等。

(7) 冰川积土——在严寒地区由冰川的地质作用生成的堆积物。其中由冰川剥蚀和搬运的碎屑到温度较高处因冰体融化而沉积的，称为冰碛土。如再经融化的冰水搬运后沉积的称为冰水堆积土。冰碛土成分复杂，层理不清，但一般较密实，土质尚好。冰水堆积土以砂砾为主，在山麓分布较广，厚度较大，可能有黏性土夹层和透镜体。

(8) 风积土——由于风力的地质作用，包括风夹带砂砾对岩石的打磨和风对岩石风化碎屑的吹扬、搬运及堆积作用而形成。主要有砂丘和原生黄土。砂丘是松散而不稳定的堆积物。黄土的主要特点是：① 大孔性；② 垂直节理发育；③ 由可溶盐胶结；④ 有不同程度的湿陷性等。

三、特殊土

在土的堆积过程中，自然地理环境对土的性质有重大影响。某些地区的特殊条件形成了土的特殊物质成分和结构，这些土称为特殊土。

如沿海地区的软土，以陕甘晋三省为主的西北、华北等地区的黄土，以黔滇桂等省为主的红黏土，分布在南部和中部不少地区的膨胀土(胀缩土、裂土)，严寒地区的冻土等。

除自然堆积物外，还有人类活动的堆积物，即人工填土，也日益受到人们的重视。

四、土的堆积年代的影响

不同堆积土，特别是黏性土的性质，不仅与生成的条件有关，也与生成的历史有关。一般生成年代越久，则上覆土层越厚，土被压得越紧密，受到的化学作用或胶结作用越大，土粒间的联结越强，因而强度也就越大，压缩性就越小。反之，新近堆积的土质较松软，工程性质较差。

现今的常见土绝大多数生成的地质年代为第四纪(符号为Q)。第四纪又可按年代早晚分为早更新世(Q₁)、中更新世(Q₂)、晚更新世(Q₃)和全新世(Q₄)。通常把Q₃及其以前时期堆积的土层称为老堆积土，把Q₄时期内文化期(有人类文化的时期)以前堆积的称为一般堆积土，把文化期以后堆积的称为新近堆积土。

第二节 土的粒径组成和矿物成分

土的粒径组成和矿物成分是土的主要物质成分，是决定土的物理性质的最基本的因素。

一、土的粒径组成

土的粒径组成是指土中不同大小颗粒的相对含量，也称土的颗粒级配或粒度成分。土的工程性质同它的粒径组成有密切关系，工程界常根据土的粒径组成对土(尤其是粗粒土)进行分类，并把粒径组成作为评估土工程性质的重要因素。

(一) 土粒粒组的划分

天然土中所含的固体颗粒是大小混杂的。为确定土的粒径组成，需要把大小相近的颗粒归入同一“粒组”或“粒级”。我国比较普遍采用的粒组划分办法示于图1-2中。图上粒组的大小用“粒径”(mm)表示，土粒被分成六大粒组，即漂(块)石、卵(碎)石、圆(角)砾、

砂粒、粉粒、黏粒。根据需要，各大粒组还可划分成若干亚组。

粒组划分法各国各部门不全相同。如砾组上限，我国建筑、铁路等部门采用20 mm，水利部门则采用60 mm，国外多采用60~75 mm；粉粒组上限，建筑、水利部门都采用0.075 mm，铁路部门还采用0.05 mm；黏粒组上限，我国一般采用0.005 mm，国外除0.005 mm外，还有采用0.002 mm的。

建筑、铁路等部门	漂石、块石	卵石、碎石		圆砾、角砾	砂粒 粗 中 细			粉粒	黏粒
水利部门	漂(块)石粒	卵(碎)石粒	粗砾	细砾	砂粒			粉粒	黏粒
分界粒径/mm	200	60	20	2	0.5	0.25	0.075	0.005	

图 1-2 粒组划分示意图

所谓粒径是指颗粒直径。但土粒形状与圆球相差很大，特别是黏粒，多呈薄片状，还有很少量是棒状、管状等。故土粒粒径有其特定含意，可从下面介绍的粒径分析方法中了解到。

(二) 粒径分析

对土的粒径组成的测定称为粒径分析或颗粒分析。粒径分析的方法，一般是用筛分法测定粒径小于或等于60 mm而大于0.074 mm的粗土粒，用沉淀法（一种水分法）测定粒径小于0.074 mm的细土粒。沉淀法用密度计（比重计）测定的称密度计法（比重计法）。然后把两部分测定结果合并整理，得到土的粒径组成全貌。

1. 筛分法

将烘干、分散后的试样放进一套标准筛的最上层。各层筛的筛孔自上而下是由大到小的，最下面接以底盘。经过摇筛机震摇，即可筛分出不同粒组的含量。由此可知，用筛分法得到的土粒粒径是指其刚好能通过筛孔的孔径。自然界存在的岩石碎屑由于生成条件不同，用筛分法得到相同粒径土粒的形状和体积常不相同。

2. 斯托克斯 (Stokes) 公式及密度计法

不同大小的土粒在水中下沉的速度是不同的。根据斯托克斯定律，一个直径为 d 的圆球状颗粒在黏滞系数为 η 的液体中以速度 v 垂直下沉时受到的阻力为 $3\pi\eta vd$ 。今假定土粒为圆球状，单位体积干土粒重为 γ_s ，当该阻力等于土粒在该液体（单位体积重为 γ_w ）中的重力时，土粒将以匀速 v 下沉。如取 d 、 η 、 v 的单位分别为 mm、Pa·s、cm/s， γ_s 及 γ_w 的单位为 kN/m³，则土粒在液体中的受力平衡条件为

$$3\pi\eta vd \times 10 = \frac{1}{6} \pi d^3 (\gamma_s - \gamma_w)$$

由此得

$$d = \sqrt{\frac{180\eta v}{\gamma_s - \gamma_w}} = \sqrt{\frac{180\eta h}{(\gamma_s - \gamma_w)t}} = K \sqrt{\frac{h}{t}} \quad (1-1)$$

此式即为斯托克斯公式。式中 t 、 h 分别为下沉时间(s)及下沉深度(cm)， K 为粒径计算系数(可制成表用)，其他符号的单位同前。土粒在液体中刚开始下沉时是加速的，但在极短时间内即达到匀速 v 的值，故可略去此影响。由斯托克斯定律可知，计算所得的土粒粒径是与之同速下沉的假想圆球直径，两者大小和形状可能都不相同。

斯托克斯公式也有其适用范围，当颗粒粒径过大时，其在液体中沉降时会产生非等速运

动,如颗粒直径过小,则微粒下沉会受到布朗运动的影响。一般认为斯托克斯公式可用于0.2~0.0002 mm颗粒。

现有一容器盛有均匀分布土粒的悬液[图 1-3(a)],由式(1-1)可知:在土粒开始下沉后 t

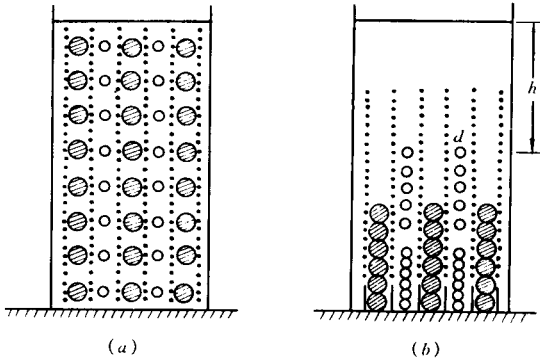


图 1-3 悬液中颗粒的下沉

时刻,悬液中深度 h 以上已没有大于粒径 d 的颗粒了[图 1-3(b)],但在 h 深度的微段内,等于及小于 d 粒径的颗粒数量不变,因从上面沉至该处的数量与该处沉下去的数量相等。如下沉前每单位均匀悬液体积内的土粒总重为 q_0 ($q_0 = Q_s/V_L$, Q_s 为全部土粒总重, V_L 为悬液体积),下沉开始后 t 时刻在 h 深处单位体积悬液中的土粒总重为 q 。则小于粒径 d 的土粒重占全部土粒重的百分数为 $p = q/q_0$ 。显然 p 也是小于 d 的土粒质量占总质量的百分数。

今在上述容器内在土粒开始下沉后的不同时刻 t 放入一密度计(图 1-4),测得密度计浮泡中心处悬液比重(相对密度)为 G_L ,浮泡中心离液面距离为 h ,则可将 h, t 代入式(1-1)求得 d ,并可如下计算相应于 d 的 p 值。

因测得悬液比重(相对密度)为 G_L 处的单位体积悬液重 γ_L 为

$$\gamma_L = q + \gamma_w(1 - q/\gamma_s)$$

故 $G_L = \gamma_L/\gamma_w = pq_0/\gamma_w + 1 - pq_0/\gamma_s = 1 + pq_0(1/\gamma_w - 1/\gamma_s)$

令 G_s 为土粒比重(土粒相对密度 d_s), $G_s = \gamma_s/\gamma_w$, 由上式可得 p 的算式为

$$p = \frac{\gamma_s V_L}{Q_s} \cdot \frac{G_L - 1}{G_s - 1} \times 100\% \quad (1-2)$$

上式中对试验量测到的 G_L 还要作若干校正。测悬液比重(相对密度)的密度计是乙种,如用甲种密度计,则可测悬液中干土重,计算式的形式稍有差别。

为保证试验质量,必须把土中细粒聚成的粒团彻底分散,常用方法是煮沸悬液并加六偏磷酸钠或氨水等进行离子交换(见本章第四节),以加厚土粒周围的扩散层,使土粒与土粒分开。

3. 粒径分布曲线(级配曲线)及应用

土的粒径组成情况可以用粒径分布(累计)曲线表示,也可用其他方法如表格法表示。表格法虽然制作简便,但粒径分布曲线便于评价粒径含量的组合情况——颗粒级配,应用较广。粒径分布曲线的绘制方法是将试样的粗粒和细粒两部分试验结果合在一起,算得小于各个已定粒径的土粒累计质量占土粒总质量的百分数,在半对数坐标纸上标出并连成曲线。因粒径变化范围很大,故通常是用对数标尺在横坐标上表示粒径,如图 1-5 所示。该图横坐标上的粒径被规定为逐渐减小(也有规定为增大),故四个土样中以土样①的细粒最多,基本上是粉粒及黏粒,其他几个土样粗粒较多,主要是各种砂粒。土样②的曲线陡峻,表明颗粒比较均匀,大部分集中在粒径变化不大的范围内。土样③的曲线中有一平坡段,表明该范围粒径的颗粒短缺。土样④的曲线坡度较平缓,表明颗粒不均匀,粒径变化范围较大。



图 1-4 密度计