



面向 21 世纪课程教材

Textbook Series for 21st Century

1007620

高校土木工程学科
专业指导委员会规划推荐教材

土力学

东南大学 浙江大学 湖南大学
苏州城建环保学院 编



中国建筑工业出版社

CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS

面向 21 世纪 课程 教材

高校土木工程学科专业指导委员会规划推荐教材

土 力 学

东南大学 浙江大学 湖南大学
苏州城建环保学院 编
张克恭 刘松玉 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

土力学/张克恭, 刘松玉主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2001. 6

面向 21 世纪课程教材. 高校土木工程学科专业指导委员会规划推荐教材

ISBN 7-112-04400-6

I. 土… II. ①张…②刘… III. 土力学-高等学校-教材 IV. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 028221 号

本教材是根据建设部高等学校土木工程专业教学指导委员会审定的该门课程教学大纲编写的。全书共分为 10 章, 主要内容有: 绪论, 土的物理性质及分类, 土的渗透性及渗流, 土中应力, 土的压缩性及固结理论, 地基沉降, 土的抗剪强度, 土压力, 地基承载力, 土坡和地基的稳定性, 土在动力荷载作用下的特性

本书可作为高校土木工程专业教材, 也可供相关专业师生学习和参考

面向 21 世纪课程教材

高校土木工程学科专业指导委员会规划推荐教材

土 力 学

东南大学 浙江大学 湖南大学

苏州城建环保学院 编

张克恭 刘松玉 王 编

*

中国建筑工业出版社出版 (北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京市彩桥印刷厂印刷

开本: 787×960 毫米 1/16 印张 15³/₁₆ 字数 318 千字

2001 年 6 月第一版 2001 年 6 月第一次印刷

印数 1-5 000 册 定价 22.00 元

ISBN 7-112-04400-

6/TU·3914 (986-)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址 <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店 <http://www.china-building.com.cn>

前 言

土力学是高等学校土木工程专业必修的一门课程。本教材编写大纲经建设部高校土木工程学科专业指导委员会审定，遵循高校土木工程专业培养方案，在教学改革和实践的基础上，对教学内容进行了拓宽，包括建筑工程、公路与城市道路、桥梁工程、地下建筑工程等在内的专业知识。原建设部审定的工业与民用建筑专业教材（华南理工大学、东南大学、浙江大学、湖南大学编）《地基及基础》（1981年版）曾获建设部优秀教材二等奖，第二版（1991年）审定为高等学校教学用书，第三版（1998年）审定为高等学校推荐教材；1997年经建设部批准列入“普通高等教育建设部‘九五’重点立项教材”。为了适应新设置的土木工程专业课程的需要，将《地基及基础》课程与教材分为《土力学》与《基础工程》两门课程和两本教材。

《土力学》课程与《基础工程》课程紧密相连。本教材《土力学》，它既是独立的一门土力学课程教材，又与《基础工程》教材内容密切结合，所选用的符号、术语和计量单位前后贯穿一致，便于学习。本书力图考虑学科发展新水平，结合新规范，反映土力学的成熟成果与观点。全书重点突出，深入浅出，加强了各章之间的相互衔接，各章还附有习题及思考题。限于水平，难免有欠妥之处，请读者不吝指正。

本书编写单位及编写人员分工如下：

东南大学——绪论（张克恭、刘松玉）、第1章（邵信发、石名磊）、第2章（刘松玉）、第3章（龚维明）、第4、5章（张克恭）；

浙江大学——第6、7章（张季容）、第8章（朱向荣）；

湖南大学——第9章（赵明华）；

苏州城建环保学院——第10章（陈魁）；

东南大学邵俐老师协助主编做了许多工作。

本书由东南大学张克恭教授、刘松玉教授主编，河海大学殷宗泽教授主审。

目 录

绪论	1
§ 0.1 土力学的概念及学科特点	1
§ 0.2 土力学的发展简史	2
§ 0.3 本课程的内容、要求和学习方法	4
第 1 章 土的物理性质及分类	7
§ 1.1 概述	7
§ 1.2 土的组成	8
§ 1.3 土的三相比例指标	19
§ 1.4 无粘性土的密实度	24
§ 1.5 粘性土的物理特征	27
§ 1.6 土的分类标准	33
§ 1.7 地基土的工程分类	36
习题	43
第 2 章 土的渗透性及渗流	45
§ 2.1 概述	45
§ 2.2 土的渗透性	46
§ 2.3 土中二维渗流及流网简介	54
§ 2.4 渗透破坏与控制	56
思考题及习题	59
第 3 章 土中应力	61
§ 3.1 概述	61
§ 3.2 土中自重应力	62
§ 3.3 基底压力(接触应力)	65
§ 3.4 地基附加应力	71
思考题与习题	88
第 4 章 土的压缩性及固结理论	90
§ 4.1 概述	90
§ 4.2 土的压缩性	91
§ 4.3 饱和土中的有效应力	101
§ 4.4 土的单向固结理论	104
思考题与习题	110

第5章 地基沉降	112
§ 5.1 概述	112
§ 5.2 地基的最终沉降量	113
§ 5.3 应力历史对地基沉降的影响	134
§ 5.4 应力路径法计算地基沉降简介	140
§ 5.5 地基沉降与时间的关系	142
思考题与习题.....	148
第6章 土的抗剪强度	150
§ 6.1 概述	150
§ 6.2 土的抗剪强度理论	151
§ 6.3 土的抗剪强度试验	155
§ 6.4 三轴压缩试验中的孔隙压力系数	160
§ 6.5 饱和粘性土的抗剪强度	162
§ 6.6 应力路径在强度问题中的应用	167
§ 6.7 无粘性土的抗剪强度	169
思考题与习题.....	170
第7章 土压力	172
§ 7.1 概述	172
§ 7.2 挡土墙侧的土压力	173
§ 7.3 朗肯土压力理论	174
§ 7.4 库伦土压力理论	182
思考题与习题.....	192
第8章 地基承载力	194
§ 8.1 概述	194
§ 8.2 浅基础的地基破坏模式	195
§ 8.3 地基临界荷载	197
§ 8.4 地基极限承载力	202
§ 8.5 地基容许承载力和地基承载力特征值	213
习题.....	215
第9章 土坡和地基的稳定性	216
§ 9.1 概述	216
§ 9.2 无粘性土坡的稳定性	217
§ 9.3 粘性土坡的稳定性	218
§ 9.4 地基的稳定性	228
思考题与习题.....	230
第10章 土在动荷载作用下的特性	231

目录

§ 10.1 概述.....	231
§ 10.2 土的压实性.....	232
§ 10.3 土的振动液化.....	236
§ 10.4 反复荷载下土的强度和变形特性.....	240
§ 10.5 土的动力特征参数简介.....	241
思考题与习题.....	244
参考文献	245

绪 论

§ 0.1 土力学的概念及学科特点

土力学是研究土体的一门力学，它是研究土体的应力、变形、强度、渗流及长期稳定性的一门学科。广义的土力学又包括土的生成、组成、物理化学、物理生物性质及分类在内的土质学。

在自然界中，地壳表层分布有岩石圈（广义的岩石包括基岩及其覆盖土）、水圈及大气圈。岩石是一种或多种矿物的集合体，其工程性质在很大程度上取决于它的矿物成分，而土是岩石风化的产物。土是由岩石经历物理、化学、生物风化作用以及剥蚀、搬运、沉积作用交错复杂的自然环境中所生成的各类沉积物。因此，土的类型及其物理、力学性状是千差万别的，但在同一地质年代和相似沉积条件下，又有其相近性状的规律性。强风化岩石的性状接近土性，也属于土质学与土力学的研究范畴。

土中固体颗粒是岩石风化后的碎屑物质，简称土粒。土粒集合体构成土的骨架，土骨架的孔隙中存在液态水和气体。因此，土是由土粒（固相）、土中水（液相）和土中气（气相）所组成的三相物质；当土中孔隙被水充满时，则是由土粒和土中水组成的二相体。土体具有与一般连续固体材料（如钢、木、混凝土及砌体等建筑材料）不同的孔隙特性，它不是刚性的多孔介质，而是大变形的孔隙性物质。在孔隙中水的流动显示土的透水性（渗透性）；土孔隙体积的变化显示土的压缩性、胀缩性；在孔隙中土粒的错位显示土内摩擦和粘聚的抗剪强度特性。土的密度、孔隙率、含水量是影响土的力学性质的重要因素。土粒大小悬殊甚大，有大于 60mm 粒径的巨粒粒组，有小于 0.075mm 粒径的细粒粒组，介于 0.075~60mm 的粒径为粗粒粒组。

工程用土总的分为一般土和特殊土。广泛分布的一般土又可分为无机土和有有机土。原始沉积的无机土大致上可分为碎石类土、砂类土、粉性土和粘性土四大类。当土中巨粒、粗粒粒组的含量超过全重 50% 时属于碎石类土或砂类土；反之，属于粉性土或粘性土。碎石类土和砂类土总称为无粘性土，其一般特征是透水性大，无粘性；粘性土的透水性小；而粉性土的性质介于砂类土和粘性土之间。特殊土有遇水沉陷的湿陷性土（如常见的湿陷性黄土）、湿胀干缩的胀缩性土（习称膨胀土）、冻胀性土（习称冻土）、红粘土、软土、填土、混合土、盐渍土、污染土、风化岩与残积土等。

综上所述,土的种类繁多,其工程性质十分复杂,在没有深入地了解土的力学性质的变化规律,而通过土工试验发现土的应力应变关系的非线性、非弹性特点,且没有条件进行繁复计算以前,不得不将土工问题计算做出必要的简化。例如,采用弹性理论解土中应力分布,用塑性理论解地基承载力,将土体变形和强度分别作为独立的求解课题。20世纪60年代以来,电子计算机的问世,已可将更接近于土本质的力学模型进行复杂的快速计算,现代科学技术的发展,也提高了土工试验的测试精度,发现了许多过去观察不到的新现象,为建立更接近实际的数学模型和测定正确的计算参数,提供了可靠的依据。但由于土的力学性质的复杂性,对土的本构模型(即土的应力-变形-强度-时间模型)的研究以及计算参数的测定,均远落后于计算技术的发展;而且计算参数的选择不当所引起的误差,远大于计算方法本身的精度范围。因此,对土的基本力学性质的研究和土的本构模型与计算方法验证,是土力学的两大重要研究课题。

在土木工程中,天然土层常被作为各种建筑物的地基,如在土层上建造房屋、桥梁、涵洞、堤坝等;或利用土作为构筑物周围的环境,如在土层中修筑地下建筑、地下管道、渠道、隧道等;还可利用土作为土工建筑物的材料,如修筑土堤、土坝等。因此,土是土木工程中应用最广泛的一种建筑材料或介质。

“高楼万丈平地起,建筑屹立基础始”。平地指的是地基,没有地基的安全稳定,一般的土木工程也难以建成,更不用说高楼大厦、大桥、高塔;基础是建筑物的一个实体部分,基础的安全稳定是上部结构(或桥梁的上、下部结构)安全屹立的保证;而整个场地的稳定,又是个别建筑物地基基础稳定的根本保证。因此地基基础与场地稳定性是密切关联的。要对场地稳定性进行评价,进行建筑群选址或道路选线的可行性方案论证,对建筑物地基基础或路基进行经济合理的设计,还须具备工程地质学、岩体力学等学科的基本知识,这也是土力学学科的一个特点。

§ 0.2 土力学的发展简史

古代许多宏伟的土木工程,如我国的万里长城、大型宫殿、大庙宇、大运河、开封塔、赵州桥等,国外的大皇宫、大教堂、古埃及金字塔、古罗马桥梁工程等,屹立至今,体现了古代劳动人民丰富的土木工程经验。

18世纪欧美国家在产业革命推动下,社会生产力有了快速发展,大型建筑、桥梁、铁路、公路的兴建,促使人们对地基土和路基土的一系列技术问题进行研究。1773年法国科学家C. C. 库伦(Coulomb)发表了《极大极小准则在若干静力问题中的应用》,介绍了刚滑楔理论计算挡土墙背粒料土压力的计算方法;法国学者H. 达西(Darcy, 1855)创立了土的层流渗透定律;英国学者W. T. M. 朗肯(Rankine, 1857),发表了土压力塑性平衡理论;法国学者J. 布辛奈斯克(Boussinesq,

1885) 求导了弹性半空间半无限体表面竖向集中力作用时土中应力、变形的理论解。这些古典理论对土力学的发展起了很大的推进作用, 一直沿用至今。

20 世纪 20 年代开始, 对土力学的研究有了迅速的发展。瑞典 K. E. 彼得森 (Pettersen, 1915) 首先提出的, 后由瑞典 W. 费兰纽斯 (Fellenius) 及美国的 D. W. 泰勒 (Taylor) 进一步发展的土坡稳定分析的整体圆弧滑动面法; 法国学者 L. 普朗德尔 (Prandtl, 1920) 发表了地基剪切破坏时的滑动面形状和极限承载力公式; 1925 年美籍奥地利人 K. 太沙基 (Terzaghi) 写出第一本《土力学》专著, 他是第一个重视土的工程性质和土工试验的人, 他所创导出的饱和土的有效应力原理, 将土的主要力学性质, 如应力-变形-强度-时间各因素相互联系起来, 并有效地用于解决一系列的土工问题, 从此土力学成为一门独立的学科。

在土力学论著和土力学 (或土力学与地基基础) 教材方面, 象雨后春笋般地蓬勃发展, 例如苏联学者 H. M. 格尔谢万诺夫 (Герсеванов, 1931) 出版了《土体动力学原理》专著; 苏联学者 H. A. 崔托维奇 (Цытович, 1935, 1940, 1951, 1963) 写出了《土力学》教材; L. 伦杜利克 (Rendulic, 1936) 发现了土的剪胀性, 土的应力-应变非线性关系, 土具有加工硬化与软化的性质; 苏联学者 B. B. 索科洛夫斯基 (Соколовский, 1954) 出版了《松散介质静力学》一书; 美籍华人吴天行 1966 年写出了《土力学》专著并于 1976 年出第二版; 英国的 C. R. 斯科特 (Scott, 1969, 1974, 1980) 出版了《地基及基础》大学本科教材; 美国 H. F. 温特科恩 (Winterkorn, 1975) 和方晓阳主编《基础工程手册》一书, 由 7 个国家 27 位岩土工程界著名专家编写而成, 该书 25 章内容包括地基勘察、土力学、基础工程三大部分, 取材新颖, 成为当时比较系统论述土力学与基础工程的一本有影响的著作。1993 年 D. G. 弗雷德隆德 (Fredlund) 和 H. 拉哈尔佐 (Rahardjo) 发表了《非饱和土土力学》一书, 日益引起国内外土力学界的注意。

我国学者早在 20 世纪 50 年代, 陈宗基教授对土的流变学 (该学科研究物质或材料的流动变形, 即土具有弹性、塑性和粘滞性构成的粘弹塑性) 和粘土结构的研究; 黄文熙院士对土的液化的探讨以及提出考虑土侧向变形的地基沉降计算方法, 他在 1983 年主编一本理论性较强的土力学专著《土的工程性质》, 书中系统地介绍国内外有关的各种土的应力应变本构模型的理论 and 研究成果。钱家欢、殷宗泽教授主编的《土工原理与计算》, 较全面地总结土力学的新发展, 很多高等院校用作为研究生高等土力学课程的教材, 在国内有较大的影响。沈珠江院士在土体本构模型、土体静动力数值分析、非饱和土理论等方面取得了令人瞩目的成就, 2000 年出版了《理论土力学》专著, 较全面总结了近 70 年来国内外学者的研究成果。

1936 年第一届国际土力学及基础工程学术会议在美国麻州坎布里奇召开以来, 二至十四届会议的召开地点分别在鹿特丹 (1948, 二届)、瑞士 (1953, 三届)、伦敦 (1957, 四届)、巴黎 (1961, 五届)、加拿大 (1965, 六届)、墨西哥

(1969, 七届)、莫斯科 (1973, 八届)、东京 (1977, 九届)、斯德哥尔摩 (1981, 十届)、旧金山 (1985, 十一届)、里约热内卢 (1989, 十二届)、新德里 (1994, 十三届)、汉堡 (1998, 十四届)。第十四届改名为土力学及岩土工程学术会议。

中国土木工程学会 1957 年起设立了土力学及基础工程委员会, 由茅以升主持开展工作, 并于 1978 年成立了土力学及基础工程学会。1962 年在天津召开第一届土力学及基础工程学术会议以来, 第二至八届会议的召开地点分别在武汉 (1966, 二届)、杭州 (1979, 三届)、武汉 (1983, 四届)、厦门 (1987, 五届)、上海 (1991, 六届)、西安 (1994, 七届)、南京 (1999, 八届), 第八届改名为土力学及岩土工程学术会议。还有欧洲、美洲、亚洲、东南亚等地区历届会议, 这些学术会议的召开大大促进了土力学学科的发展。预计 21 世纪土力学理论与实践在非饱和土力学、环境土力学、土破坏理论等方面将取得长足的发展。

§ 0.3 本课程的内容、要求和学习方法

本课程第 1 章内容为土的物理性质及分类。首先阐明土是岩石风化产物, 从地质学观点, 土是没有胶结或弱胶结的松散沉积物, 或是三相组成的分散体, 而从土质学观点, 土是无粘性或有粘性的具有土骨架孔隙特性的三相体或二相体; 然后详细介绍在自然界中广泛分布的原始沉积的无机土, 大致上可划分为无粘性土 (包括碎石类土和砂类土)、粉性土和粘性土三种特征的土, 粉性土的特征介于砂类土和粘性土之间, 土的轻重、松密、湿干、软硬等一系列的物理性质在一定程度上决定了土的力学性质; 此外, 对于区域分布的特殊土, 只介绍了胀缩性土、湿陷性土、冻胀性土的概念, 实际上都是粘性土普遍具有的特征, 但胀缩性土的粘粒成分主要是强亲水性的粘土矿物 (蒙脱石), 其胀缩性较大, 湿陷性土具有大孔隙, 其湿陷性较大, 而冻胀性土主要分布在我国西部高原和北部地区, 沿天津、保定、石家庄、山西长治、陕西铜川、甘肃天水以北地区以及拉萨以北、以西地区的标准冻深才有超过 0.6m (基础的最小埋置深度为 0.5m)。本章要求了解土的物理性质的变化规律, 掌握各种物理性质指标的定义及其测定方法以及三相比例指标之间的换算关系, 熟悉土的分类方法。

第 2 章内容为土的渗透性及渗流。首先阐明土的渗透性是土的重要力学性质之一, 然后主要介绍土的层流渗透定律、渗透性指标的测定方法及影响因素。本章要求熟悉土的层流渗透定律, 并掌握渗透性指标的测定方法和渗流时渗水量的计算, 了解二维渗透的概念以及渗透破坏与渗流控制问题。

第 3 章内容为土中应力。首先阐明土中自重应力可分为不再引起和会引起土体 (或地基) 变形的两种情况; 地基附加应力是引起地基变形的主要原因, 地基附加应力是由建筑物基础 (或堤坝) 底面的附加压力产生的, 而基底附加压力为基底压力与基底处建前土中自重应力之差值, 还有桥台前后填土引起的基底附加

压力,地基附加应力的计算公式都是只考虑柔性荷载作用下导得的。本章要求熟悉土中自重应力、地基附加应力、基底附加压力的概念,并掌握其计算方法,了解非均质或各向异性地基与均质各向同性地基的附加应力分布规律的差异。

第4章内容为土的压缩性及固结理论。首先阐明土的压缩和固结(压密)的定义,土的压缩性也是土的重要力学性质之一,土的力学性质主要取决于有效应力;然后详细介绍室内、现场试验测定土的压缩性指标,土的有效应力原理和单向固结理论。本章要求熟悉土的压缩性指标及其测定方法,掌握饱和土的有效应力原理和单向固结理论,了解二维、三维固结的概念。

第5章内容为地基沉降。首先阐明建筑物和土工建筑物荷载通过基础或路堤底面传递到地基上,使天然土层原有的应力状态发生变化,导致地基中各点产生竖向和侧向变形,地基表面的竖向变形,称为地基沉降或基础沉降。地基沉降是工程施工和使用时期土与结构物相互作用(变形协调)的综合反映,地基变形特征一般可分为四种:沉降量、沉降差、倾斜、局部倾斜,建筑物的地基变形计算值不应大于地基变形允许值;然后主要介绍地基最终沉降量的各种计算方法及讨论等。本章要求掌握地基最终沉降量(竖向变形)计算的分层总和法和弹性理论法,熟悉地基沉降随时间变化的规律以及应力历史的影响,了解考虑侧向变形的概念,了解应力路径法计算地基沉降。

第6章内容为土的抗剪强度。首先阐明土的抗剪强度也是土的重要力学性质之一,剪切破坏是土的强度破坏的重要特点,四种与土的强度破坏有关的工程问题:①建筑物地基承载力;②土工建筑物土坡稳定性;③挡土墙地基稳定性;④基坑土壁稳定性;然后详细介绍土的抗剪强度理论和试验方法,饱和粘性土的三组抗剪强度指标等。本章要求掌握土的抗剪强度理论,粘性土抗剪强度指标的测定和选择,熟悉无粘性土的剪胀性(剪缩称为负剪胀)、临界孔隙比和天然休止角,了解土体在等向压缩应力状态和偏差应力状态时分别产生的孔隙压力增量,应力路径、应力历史对土体强度指标的影响。

第7章内容为土压力。首先阐明挡土墙侧的土压力根据墙背土体所处的应力状态,可分为三种土压力,挡土墙是防止土体坍塌的构筑物;然后详细介绍两种古典理论公式计算主动土压力和被动土压力。本章要求掌握两种古典理论计算土压力及其实际应用,熟悉挡土墙背填土面上有超载、车辆荷载时以及非均质填土的土压力计算,了解挡土墙抗倾覆、抗滑稳定的概念。

第8章内容为地基承载力。首先阐明地基承载力问题是土力学中一个重要研究课题,其目的是为了掌握地基的承载规律、发挥地基的承载能力、合理确定地基承载力,确保地基不致因荷载作用而发生剪切破坏,产生变形过大而影响建筑物或土工建筑物的正常使用,地基容许承载力和地基承载力特征值的概念;然后详细介绍理论公式法确定浅基础的地基承载力,平面应变问题地基承载力公式用于空间问题偏于保守。本章要求掌握理论公式法确定地基承载力,熟悉载荷试验

法确定地基承载力，了解规范表格法和当地经验法确定地基承载力的概念。

第9章内容为土坡和地基的稳定性。首先阐明土坡稳定性是高速公路、铁路、机场、高层建筑深基坑开挖等土木工程建设中十分重要的问题，虽有各种成熟的土坡稳定分析方法，但有待研究的不定因素较多；然后详细介绍整体圆弧滑动法、毕肖普条分法、杨布普遍条分法粘性土坡稳定分析。本章要求掌握这三种粘性土坡稳定分析法，熟悉土体抗剪强度指标及稳定安全系数的选择，了解坡顶开裂时，地下水渗流时的粘性土坡稳定性，了解无粘性土坡稳定性和地基稳定性。

第10章内容为土在动荷载作用下的特性。首先阐明土体在动荷载作用下强度和变形特性都将受到影响，可造成土体的破坏，也可利用改善不良土体的性质，动荷载可分为冲击荷载、不规则荷载和周期荷载三种类型；然后主要介绍土的压实性和振动液化现象。本章要求掌握土的压实和振动液化机理及影响因素，了解反复荷载下土的变形、强度特性；土的动力特征参数。

本课程的学习方法，首先了解土力学是土木工程专业的必修课，属于专业基础课，它所包含的知识是本专业学生必须掌握的专业知识，又是为后续课程学习所必备的基础知识。全书内容广泛，各章从不同角度阐述土的变形、强度、渗流及稳定问题，抓住这一线索，特别是土的有效应力原理、将土的本构模型即土的应力、变形、强度、渗流关系，贯穿起来，重视室内土工试验，加深对土力学的学习目的和兴趣。通过本课程的学习，要求熟悉土的基本物理力学性质和分类方法，掌握浅基础的地基承载力、地基沉降、挡土墙侧土压力和土坡稳定性的计算方法，掌握常规土工试验方法，达到能识别各类天然土样，能应用土力学的基本原理和方法解决实际工作中的地基稳定、变形和渗流问题。

第 1 章 土的物理性质及分类

§ 1.1 概 述

土是由连续、坚固的岩石在风化作用下形成的大小悬殊的颗粒，经过不同的搬运方式，在各种自然环境中生成的没有粘结或弱粘结的沉积物。土经历压缩固结、胶结硬化，也可再生成岩石（指沉积岩类）。在漫长的地质年代中，由于各种内力和外力地质作用形成了许多类型的岩石和土。基岩经历风化、剥蚀、搬运、沉积生成各类覆盖土。所谓基岩是指原位的各类岩石，其在水平和竖直两个方向延伸很大；所谓覆盖土是指岩石风化产物覆盖于基岩之上的各类土的总称。

土的物质成分包括作为土骨架的固态矿物颗粒、土孔隙中的液态水及其溶解物质以及土孔隙中的气体。因此，土是由颗粒（固相）、水（液相）和气（气相）所组成的三相体系。各相的性质及相对含量的大小直接影响土体的性质。各种土的颗粒大小和矿物成分差别可以很大，土的三相间的数量比例也不尽相同，而且土粒与其周围的土中水又发生了复杂的物理化学作用。土粒形成土体的骨架，土粒大小和形状、矿物成分及其排列和联结特征是决定土的物理力学性质的重要因素。土粒的矿物成分与土粒大小有密切关系，通常，粗大土粒其矿物成分往往保持母岩未被风化的原生矿物，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物质。土粒的形状与土粒大小也有很大关系，粗大土粒其形状都是块状或柱状，而细小土粒主要呈片状。粗大土粒具有松密的结构特征，细小土粒则与土中水相互作用呈现软硬的结构特征。因此，土粒大小是影响土的性质最主要的因素。土粒大小含量的相对数量关系是土的分类依据，当土样中巨粒（土粒粒径 $>60\text{mm}$ ）和粗粒（ $60\sim 0.075\text{mm}$ ）的含量超过全重 50% 时属无粘性土（包括碎石类土和砂类土），反之不超过 50% 时属粉性土和粘性土，粉性土的性质介于无粘性土和粘性土之间。土中水与细粒（土粒粒径 $<0.075\text{mm}$ ）有着复杂的相互作用，影响粉性土和粘性土的可塑性、胀缩性、湿陷性、冻胀性等物理特征。土中封闭气体对土的性质亦有较大影响。所以，要研究土的性质就必须了解土的三相组成以及在天然状态下土的结构和构造等特征。

土的三相组成物质的性质、相对含量以及土的结构构造等各种因素，必然在土的轻重、松密、湿干、软硬等一系列物理性质上有不同的反映。土的物理性质又在一定程度上决定了它的力学性质，所以物理性质是土的最基本的工程特性。

在处理与土相关的工程问题和进行土力学计算时，不但要知道土的物理特性

指标及其变化规律,从而了解各类土的特性,还必须掌握各物理特性指标的测定方法以及三相比例指标间的相互换算关系,并熟悉土的分类方法。

本章主要介绍土的组成、土的三相比例指标、无粘性土和粘性土的物理特征、土的结构性及分类。

§ 1.2 土的组成

1.2.1 土中固体颗粒(简称土粒)

土粒分为无机矿物颗粒与有机质,无机矿物颗粒由原生矿物和次生矿物组成。原生矿物是指地壳岩浆在冷凝过程中形成的矿物,常见的如石英、长石、云母等,原生矿物颗粒是原岩经物理风化(机械破碎的过程)形成的,其物理化学性质较稳定,其成分与母岩完全相同。原生矿物经化学风化(成分改变的过程)后形成次生矿物,主要有粘土矿物、无定形的氧化物胶体(如 Al_2O_3 、 Fe_2O_3)和盐类(如 CaCO_3 、 CaSO_4 、 NaCl 等)。粘土矿物通常是指蒙脱石、伊利石和高岭石三类。次生矿物颗粒成分与母岩成分完全不同。微生物参与风化过程,在土中产生有机质成分,如多种复杂的腐殖质;此外,土中的植物残骸体等有机残余物,形成土中泥炭。

粗大土粒往往是岩石经物理风化作用形成的原岩碎屑,是物理化学性质比较稳定的原生矿物颗粒,一般有单矿物颗粒和多矿物颗粒两种形态。细小土粒主要是化学风化作用形成的次生矿物颗粒和生成过程中有机物质的介入,次生矿物的成分、性质及其与水的作用均很复杂,是细粒土具有塑性特征的主要因素之一,对土的工程性质影响很大。有机质同样对土的工程性质有很大的影响。

1.2.2 土粒粒度分析方法

在自然界中存在的土,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。界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。土的粒组划分方法各行业部门并不完全一致,表1-1是一种常用的土粒粒组的划分方法,表中根据国标《土的分类标准》(GBJ145—90)新规定的界限粒径200、60、2、0.075和0.005mm把土粒粒组分为巨粒、粗粒和细粒三个统称,再分为六大粒组:漂石或块石颗粒、卵石或碎石颗粒、圆砾或角砾颗粒、砂粒、粉粒及粘粒。

土粒的大小及其组成情况,通常以土中各个粒组的相对含量(是指土样各粒组的质量占土粒总质量的百分数)来表示,称为土的颗粒级配或粒度成分。

土粒粒组的划分

表 1-1

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, 无粘性, 无毛细水	
	卵石或碎石颗粒	200~60		
粗 粒	圆砾或角砾颗粒	粗	透水性大, 无粘性, 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; 无粘性, 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	0.25~0.075		
细 粒	粉 粒	0.075~0.005	透水性小, 湿时稍有粘性, 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	
	粘 粒	<0.005	透水性很小, 湿时有粘性、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	

注: 1. 漂石、卵石和圆砾颗粒均呈一定的磨圆状 (圆形或亚圆形); 块石、碎石和角砾颗粒均呈棱角状。

2. 粉粒或称粉土粒, 粉粒的粒径上限 0.075mm 相当于 200 号筛的孔径。

3. 粘粒或称粘土粒, 粘粒的粒径上限也有采用 0.002mm 为标准的。

1. 颗粒分析试验

土的颗粒级配或粒度成分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。前者是用于粒径小于等于 60mm、大于 0.075mm 的粗粒组, 后者用于粒径小于 0.075mm 的细粒组。当土内兼含大于和小于 0.075mm 的土粒时, 两类分析方法可联合使用。沉降分析法有密度计法 (比重计法)、移液管法等。

筛分法试验是将风干、分散的代表性土样通过一套自上而下孔径由大到小的标准筛 (例如 60、20、2、0.5、0.25、0.1、0.075mm), 称出留在各个筛子上的干土重, 即可求得各个粒组的相对含量。通过计算可得到小于某一筛孔直径土粒的累积重量及累计百分含量。

沉降分析法的理论基础是土粒在水中的沉降原理, 见图 1-1 所示, 将定量的土样与水混合倾注量筒中, 悬液经过搅拌, 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) 在上下不同深度处是相等的。但静置后, 土粒在悬液中下沉, 较粗的颗粒沉降较快, 图中在深度 L_i 处只含有 $\leq d_i$ 粒径的土粒, 悬液浓度降低了。如在 L_i 深度处考虑一小区段 mn , 则 mn 段悬液的浓度 (t_i 时) 与开始浓度 ($t=0$) 之比, 即可求得 $\leq d_i$ 的累计百分含量。关于 d_i 的计算原理,

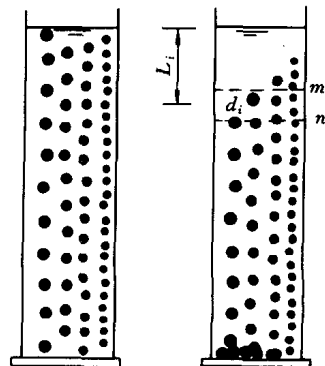


图 1-1 土粒在悬液中的沉降

土粒下沉时的速度与土粒形状、粒径、质量密度以及水的粘滞度有关。当土粒简化为理想球体时，土粒的沉降速度可以用 G. G. 斯笃克斯 (Stokes, 1845) 定律计算：

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18\eta} g d^2 \quad (1-1)$$

式中 v ——土粒在水中的沉降速度，cm/s；

g ——重力加速度，0.0981cm/s²；

ρ_s 、 d ——土粒的密度，g/cm³ 和直径，cm；

ρ_w 、 η ——水的密度，g/cm³ 和粘滞度，10⁻³Pa·s。

进一步考虑将速度 v 和土粒密度 ρ_s 可表达为：

$$v = \frac{\text{距离}}{\text{时间}} = \frac{L}{t} \text{ 和 } \rho_s = G_s \rho_w \approx G_s \rho_w$$

代入 (1-1) 式，可变换为 $d = \sqrt{\frac{18\eta}{(G_s - 1) \rho_w g}} \sqrt{\frac{L}{t}}$ (1-2)

水的 η 值由温度确定 (见 § 2.2 中表 2-1)，斯笃克斯定律假定：①颗粒是球形的；②颗粒周围的水流是线流；③颗粒大小要比分子大得多。理论公式求得的粒径并不是实际的土粒尺寸，而是与实际土粒在液体中具有相同沉降速度的理想球体的直径 (称为水力当量直径)。此时，土粒沉降距离 L 处悬液密度，可采用密度计法 (即比重计法) 或移液管法测得，并可由此计算出小于该粒径 d 的累计百分含量。采用不同的测试时间 t ，即可测得细颗粒各粒组的相对含量。

2. 颗粒级配累计曲线

根据颗粒分析试验结果，常采用累计曲线法表示土的颗粒级配或粒度成分。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，特别适用于几种土级配好坏的相对比较。累计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) 某粒径的土重 (累计百分) 含量，见图 1-2。由累计曲线的坡度可以大致判断土粒的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，即级配良好。

根据描述级配的累计曲线，可以简单地确定土粒级配的两个定量指标，即：不均匀系数 C_u 及曲率系数 C_c ，其定义分别见表达式 (1-3) 和式 (1-4)。

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1-3)$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (1-4)$$

式中， d_{60} 、 d_{30} 及 d_{10} 分别相当于小于某粒径土重累计百分含量为 60%、30% 及 10% 对应的粒径，分别称为限制粒径、中值粒径和有效粒径，对一种土显然有 $d_{60} > d_{30} > d_{10}$ 的关系存在。