

高校土木工程专业规划教材

GAOXIAO TUMU GONGCHENG ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI

土力学

郭莹 主编

TULIXUE

中国建筑工业出版社

014057502

TU43-43

54

高校土木工程专业规划教材

土 力 学

郭 莹 主编

郭 莹 王忠涛 唐洪祥 编著



TU43-43

54

中国建筑工业出版社



北航

C1742212

01402720410

图书在版编目 (CIP) 数据

土力学/郭莹主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2014.7

高校土木工程专业规划教材

ISBN 978-7-112-17000-5

I. ①土… II. ①郭… 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 (2014) 第 135475 号

本书根据作者多年长期教学改革的实践经验编写而成, 内容编排科学、合理, 侧重于土力学的基本内容、基本概念、基本原理和基本方法的介绍, 不过分依赖于专业规范, 是编写本书的基本思路。

本书共分 8 章, 主要内容包括: 绪论、土的物理性质及工程分类、土的渗透性与土中应力计算、土的压缩性质与地基变形计算、土的抗剪强度、土压力、土坡稳定分析、地基承载力、土的本构关系简介等。为便于学生学习, 本书在每一章前增加“本章提要”、“本章内容”、“本章重点”, 在每章内容之中增加了“问题讨论”、“例题讨论”等环节, 在与工程密切相关的内容中增加了工程实例及分析, 每章结束都附有思考题、习题以及习题部分参考答案。

本书可作为土木工程(含道路、桥梁工程)、水利工程、港海与航道工程、海洋工程、交通工程、工程管理等各专业教材, 具有相当广泛的适用性, 也可供从事土力学研究和工程实践的技术人员参考使用。

* * *

责任编辑: 吉万旺

责任设计: 张虹

责任校对: 张颖 关健

高校土木工程专业规划教材

土力学

郭莹 主编

郭莹 王忠涛 唐洪祥 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 15¼ 字数: 370 千字

2014 年 8 月第一版 2014 年 8 月第一次印刷

定价: 30.00 元

ISBN 978-7-112-17000-5

(25758)

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)

前 言

《土力学》教材面向土木工程（含道路、桥梁工程）、水利工程、港海与航道工程、海洋工程、交通工程、工程管理等各专业，具有相当广泛的适用性，不仅内容全面，具有相当的广度，而且具有相当的深度，为各专业学生进一步深入学习专业课程打下良好的基础。《土力学》教材侧重于土力学的基本内容、基本概念、基本原理、基本方法。

尽管在我国与各个专业相关的岩土工程问题各具特点，所采用的“土工试验规程”与“地基基础设计规范”、“土的分类标准”也存在很大差异，短时间内不可能统一，有关的岩土工程问题具有一定的专业特点。但是，土力学的基本原理是相同的。国家和行业规范经常修订，特别是不同专业规范的修订都是不同步的，教材不过多依赖于规范，就能够保持长久的适用性，土力学课程体系不应过分依赖于专业规范，是我们编写本教材的基本思路。在教材中不过多涉及规范内容，有关“土的工程分类”和“承载力表格法”在附录中摘录了国内现行规范的相关内容供学生学习时参考和了解。有关附加应力计算表格也放在附录中，另外将倾斜土坡的朗肯土压力计算和均布荷载的库仑土压力计算放在附录中。

教材吸收了多年长期教学改革的实践经验，内容编排更加科学、合理，更加有利于教学活动。为便于学生学习，本书在每一章前增加“本章提要”、“本章内容”、“本章重点”，在每章内容之中增加了“问题讨论”、“例题讨论”等环节，在与工程密切相关的内容中增加了工程实例及分析，每章结束都附有思考题、习题以及习题部分参考答案。本书特别对有效应力和有效应力原理进行了全新的解读。

本书由郭莹主编，邵龙潭主审。除第3章由唐洪祥编写、第4章由王忠涛编写外，其余章节均由郭莹编写，郭莹负责统稿。

限于时间和作者水平，书中错误和不当之处敬请批评指正！

使用本书讲课时数 56 左右。

非常感谢大连理工大学各部门的大力支持与帮助。

编者

2014 年 5 月

目 录

绪论	1
0.1 土及土的成因	1
0.2 土与实际工程的联系	1
0.3 土力学的方法、内容和特点	2
0.4 发展简史	5
0.5 学习要求	6
第1章 土的物理性质及工程分类	7
1.1 土的三相组成和土的结构	7
1.2 土的物理性质指标	16
1.3 土的物理状态指标	23
1.4 土的工程分类	27
1.5 土的击实特性	30
思考题	33
习题	33
第2章 土的渗透性与土中应力计算	37
2.1 土的渗透性	37
2.2 孔隙水压力	41
2.3 有效应力及有效应力原理	43
2.4 自重应力	45
2.5 稳定渗流条件下的有效应力	47
2.6 附加应力与超孔隙水压力	52
2.7 基底压力与基底附加压力	59
2.8 地基附加压力	62
思考题	72
习题	72
第3章 土的压缩性质与地基变形计算	77
3.1 侧限压缩试验及压缩性指标	77
3.2 膨胀曲线、再压缩曲线与先期固结压力的概念	81
3.3 天然饱和黏性土层的固结状态	82
3.4 先期固结压力及现场压缩曲线的确定	84
3.5 地基最终变形计算	85
3.6 饱和黏性土的单向渗透固结理论	93
3.7 工程实例分析	103

思考题	104
习题	105
第4章 土的抗剪强度	109
4.1 概述	109
4.2 直剪试验测定土的抗剪强度	110
4.3 土的极限平衡条件	119
4.4 三轴剪切试验测定土的抗剪强度	123
4.5 测定抗剪强度的其他方法	133
4.6 实际工程中强度指标的选用	134
4.7 影响抗剪强度的其他因素	138
思考题	140
习题	140
第5章 土压力	144
5.1 概述	144
5.2 静止土压力计算	145
5.3 朗肯土压力理论	146
5.4 库仑土压力理论	153
5.5 关于土压力计算的讨论	156
思考题	159
习题	159
第6章 土坡稳定分析	162
6.1 概述	162
6.2 均质土坡的稳定分析	163
6.3 圆弧滑动面条分法	166
6.4 天然土坡的稳定分析	174
6.5 土坡稳定分析的讨论	175
思考题	177
习题	177
第7章 地基承载力	179
7.1 地基破坏形式与地基承载力概念	179
7.2 地基容许承载力的确定	181
7.3 影响地基承载力的因素及工程实例分析	190
思考题	192
习题	192
第8章 土的本构关系简介	193
8.1 线性弹性模型	193
8.2 非线性弹性模型	194
8.3 弹塑性本构模型	197
思考题	200

附录	201
附录 1-1 《建筑地基基础设计规范》GB 50007—2011 分类法 (节选)	201
附录 1-2 《土的工程分类标准》GB/J 50145—2007 分类法 (节选)	203
附录 1-3 《港口工程地基规范》JTS 147-1—2010 土的分类法 (节选)	209
附录 1-4 《公路桥涵地基与基础设计规范》JTG D63—2007 地基岩土 分类 (节选)	213
附录 1-5 《岩土工程勘察规范》GB 50021—2001 土的分类法 (节选)	216
附录 2-1 矩形基底受竖直均布荷载作用时角点下的竖向附加应力系数 K_c 值	219
附录 2-2 矩形基底受三角形荷载作用时零荷载角点下的竖向附加应力 系数 K_T 值	220
附录 2-3 矩形基底受水平均布荷载作用时角点下的竖向附加应力系数 K_h 值	221
附录 2-4 条形基底受竖直均布荷载作用时的附加应力系数 K^* 值	222
附录 2-5 条形基底受三角形分布荷载作用时的附加应力系数 K^T 值	223
附录 2-6 条形基底受水平均布荷载作用时的附加应力系数 K_h 值	224
附录 3-1 矩形基底均布荷载作用时角点下的平均附加应力系数值	225
附录 3-2 矩形基底三角形分布荷载作用时角点下的平均附加应力系数值	227
附录 4-1 无黏性土倾斜填土面的朗肯土压力公式	228
附录 4-2 倾斜填土表面作用连续均布荷载时库仑主动土压力计算	230
附录 5-1 《港口工程地基规范》JTS 147-1—2010 查表法验算地基承载力 (附录 E)	231
附录 5-2 《公路桥涵地基与基础设计规范》JTG D63—2007 地基承载力的 确定	233
参考文献	238

绪 论

【本章提要】 土对于我们来说熟悉又陌生，从工程的角度而言土具有自然性、三相性、碎散性，与我们接触过的其他材料比较土是一种相当复杂的材料。因此，不能期待像传统力学那样通过严密的理论和精确的计算就可以准确地解决土工问题，需要根据所要解决的具体问题做具体的假定，采用具体问题具体分析的方法。

学习中你会发现，土力学与其他经典力学完全不同，土力学的理论并不是放之四海而皆准的绝对精确，均包含了大胆的假设、适用条件和应用范围，需要了解其适用性、误差范围和不确定性，因而需要我们带着怀疑、批判的态度来学习土力学课程，而不是全盘肯定和接受。

土力学是建筑工程勘察、设计与施工的重要基础。在开始学习这门课程前，需要了解为什么要学习这门课程？在建筑工程中作用和地位如何？土力学包含哪些内容？方法和特点如何？学科发展历程如何？如何学好本课程？

【本章内容】 在介绍土的成因后，介绍了土与建筑工程的联系，然后介绍了土力学的方法、内容和特点，接着介绍了学科发展简史，最后提出了学习要求。

【本章重点】 土的成因，土与建筑工程的联系，土力学的特点和主要内容。

0.1 土及土的成因

关心土、研究土的人很多，但由于所关心的问题不同，所以对土的定义不同，所形成的学科也不同，如土质学、土力学、土壤学等学科。

土力学是为工程建设服务的，它从工程的角度来看待土。土力学中所研究的土是指由不同成因的岩石，在长期的自然历史过程中，经各种风化作用后，以不同的搬运方式，在不同地点沉积下来，以固体颗粒为骨架内含孔隙水和气的分散集合体。这既可作为土的定义，也说明了土的生成过程。这样生成的土称为无机土。此外，土中还含有由动、植物残骸分解成的有机质，如有机质含量高到一定程度，则称为有机土。可见，土是自然历史的产物，是一种极其复杂的工程材料。

土对于我们熟悉又陌生，日常生活中所说的土，往往是指细颗粒的。而按上述定义规定的土力学中所研究的土，除细颗粒的以外，还包括粗颗粒的，如砂土、碎石土等，是从工程角度研究的土这种材料。

0.2 土与实际工程的联系

土在各种不同的建筑工程中所起的作用不同。它可能作为建筑物地基、土工建筑物构筑材料以及某些建筑物的周围介质。因此，土与实际工程有着相当密切的联系。

在地面或地面以下一定深度处修建建筑物，将使一定范围内的地层改变其原有的应力

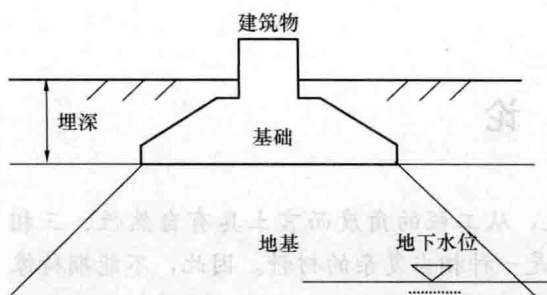


图 0-1 地基与基础

状态，这一范围的地层称为地基。所以地基就是对建筑物起支撑作用的那部分土体或岩体。与地基接触的建筑物的最下部分称为基础，如图 0-1 所示。基础把建筑物的上部结构与地基连接起来，把建筑物自重及所承受的荷载传给地基。可见，安全可靠的地基是保证建筑物正常工作的必要条件。

土石坝、铁路与公路的路堤、江河堤岸等建筑物，是以土作为工程材料填筑起来的，称为土工建筑物。因此，土的工程性质决定了土工建筑物本身的安全与稳定。

土是挡土墙、桥梁的桥台、建筑地下室外墙、船闸与水闸、码头等建筑物的周围介质，土与建筑物之间的相互作用力——土压力，是建筑物设计的主要荷载。

围绕着上述问题而展开的有关土这种工程材料的物理、力学性质及其工程应用就构成了本课程的核心内容。

0.3 土力学的方法、内容和特点

0.3.1 土力学的方法

土这种材料相当复杂，从工程的需要出发来研究土的学科有土质学与土力学。

土质学是从地质学的范畴里发展起来的，它从土的成因与成分出发，研究土的工程性质的本质与机理。对土在荷载、温度及湿度等因素作用下发生的变化作出数量上的评价，并根据土的强度、变形机理提出改良土质的有效途径。

土力学是从工程力学的范畴里发展起来的，它首先将土作为物理-力学系统，通过试验的手段获得宏观的应力-应变-强度关系，这一关系非常复杂，需要经过简化处理建立供力学分析的模型，再采用数学手段求解土在各种条件下的应力分布、变形及有关强度的各类具体问题。这种方法和材料力学是类似的。简化不同获得的解决问题的具体方法就有所不同，因此，土力学是利用力学知识和土工试验技术，在简化的条件下获得解决问题的具体方法。

近几十年来，土质学某些问题的研究与土力学的研究正在互相渗透。土力学中常引用土质学的研究成果，以解释土的宏观工程性质，对理解土力学内容很有帮助。

0.3.2 土力学的主要内容

土力学所研究的问题，可分为三类，即变形问题、强度问题与渗透稳定问题。

1. 变形问题

在地面或地面以下一定深度处修建建筑物，将使地基土体应力状态发生改变，从而产生土体变形，各深度土体变形的积累，即为建筑物基础的沉降。沉降可能是均匀的，也可能是不均匀的。若沉降（或不均匀沉降）超过各类建筑物的容许沉降值，将导致建筑物倾斜、开裂等事故或由于建筑物高程降低而影响其发挥正常功能，影响正常使用。

意大利比萨斜塔由于持续不断的倾斜而闻名于世，如图 0-2 所示。1838 年开始意大利就不断投入巨资纠倾，但收效甚微，1990 年曾不得不关闭，预计不修复将会倒塌，其纠倾问题得到了世界范围内的广泛关注，采用了很多新技术纠斜，直到 2003 年才基本停

止继续倾斜并对游人开放。

图 0-3 是广州武广客运专线高铁隧道施工时由于大量抽排地下水导致的地面沉降，由于地下水流场在附近形成明显的降落漏斗，致使多个小区楼房出现明显裂缝。

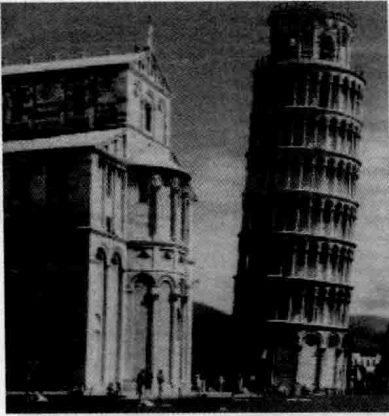


图 0-2 意大利著名的比萨斜塔



图 0-3 某隧道施工降低地下水导致的地面沉降

围绕变形问题，土力学课程中将研究土中应力计算、土的压缩变形性质、地基最终变形计算以及变形随时间变化的固结计算等相关内容。

2. 强度问题

由于土的强度不足而引起的事故，往往比变形引起的事故后果更为严重，危害更大。

地基土体强度不足将使地基没有足够的承载能力以支撑建筑物，导致建筑物突然下陷、倾倒直至破坏等事故，如发生在 1913 年 10 月的加拿大特朗斯康大谷仓的整体破坏事故，经调查发现实际加谷物后的基底压力已达到了 320kPa，而地基承载力只有 250kPa，是由于采用其他附近地区的勘探资料确定地基承载力导致的严重后果。再比如，发生在 2009 年 6 月上海闵行区 13 层高层住宅整体倾倒事故，如图 0-4 所示，是由于楼房建成以后在附近进行不恰当施工而导致的严重后果。

土坡土体强度不足将出现土坡塌滑事故，如发生在 1972 年 7 月的香港宝城滑坡导致整座楼整体倒塌，致使 67 人死亡，因为该山坡上残积土本身强度较低，连续暴雨过后，雨水入渗使其强度进一步降低，使得土体滑动力超过土的强度。2009 年 5 月发生在兰州的山体滑坡造成了 32 户居民房屋被毁事故，如图 0-5 所示。



图 0-4 上海 13 层楼房整体倾倒事故



图 0-5 兰州滑坡事故导致楼房被毁

路堤由于降雨、渗流等原因导致土体强度不足将出现大段路堤塌滑、毁坏事故，从而影响道路交通正常运行；挡土墙后土体由于降雨导致强度降低，将加大土体对挡土墙的推力，导致挡土墙出现失稳破坏。

围绕强度问题，土力学课程中将介绍土的强度性质、土压力计算、土坡稳定分析和地基承载力确定等相关内容。

3. 渗透问题

土是以固体颗粒为骨架内含孔隙水和气的分散集合体，当水通过颗粒孔隙发生渗流时，对土颗粒产生作用力，因而可能导致土体的变形甚至破坏，如图 0-6 为发生在 1993 年的青海沟后水坝的溃口，图 0-7 为 1998 年洪灾中九江大堤的溃口，都是因为渗透破坏导致的坡体失稳。



图 0-6 1993 年青海沟后水坝溃口



图 0-7 1998 年九江大堤决口

另外，土体本身所具有的渗透性影响土体的固结变形过程，决定饱和土体的渗透固结的速度。围绕渗透问题，土力学课程中将学习土的渗透性质以及有关渗透固结等相关知识。

土力学的主要内容包括：

- (1) 土的物理性质和工程分类；
- (2) 土的渗透性和土中应力计算（含土的渗透变形）；
- (3) 土的压缩性与地基变形计算（含渗透固结问题）；
- (4) 土的抗剪强度分析；
- (5) 土压力；
- (6) 土坡稳定分析；
- (7) 地基承载力。

0.3.3 土力学的特点

1. 研究介质复杂

土力学是在工程力学的范畴里发展起来的，但它与其他工程力学比起来又有明显的特殊性，这是因为土力学所研究的材料——土与其他材料相比较，有其特殊性和复杂性。

(1) 土的碎散性

土是由不同大小、矿物、形状、级配的土颗粒所组成的分散集合体，是一种非连续的离散材料，最明显的特征是土颗粒间的联结强度远远小于颗粒本身的强度，而联结强度决

定土体的强度，因为存在孔隙会产生变形和渗透。因而与钢材、混凝土等建筑材料相比强度很低、变形很大、渗透性差异很大。

(2) 土的多相性

土体一般由三相组成，受力后由固体颗粒、孔隙水和气共同承担，它们之间存在复杂的相互作用和力的转化。孔隙中充填的水和气（尤其是孔隙水的存在）影响着土的应力与变形，这是钢材、混凝土等其他建筑材料所没有的。

(3) 土的变异性

因为土是长期地质历史的产物，具有原状性、区域性、不均匀性和各向异性。在设计之前要具有足够数量的勘探、野外和室内试验资料，还要对获得资料根据工程经验进行判断，才能获得比较合理的结果。此外，在应力、温度、水分等条件变化时，土的工程性质也会发生变化。在工程设计中应尽可能估计到这种变化，考虑最不利的因素。

2. 实践性强

从上面所介绍的土的特点可以看到，土比之在其他工程力学课程中所熟悉的固体和流体材料都更为复杂。因此，不能期待像其他经典力学那样通过严密的理论和精确的计算就可以准确地解决工程问题。目前，在土力学中，还没有一种理论能够概括土的全部力学性质，适用于各种实际工程中的所有土力学问题，而是根据不同的问题，采取不同的简化模型。比如，在工程设计中计算变形时，把土体看成是线弹性体，利用弹性理论计算应力，采用叠加原理计算变形；分析土压力、土坡稳定、地基承载力时，把土体看成是理想刚塑性体，利用极限平衡理论解决强度问题等。也就是说，采取“具体问题具体分析”的方法。不同假定提出的力学计算模型，必须通过土的现场勘察与室内土工试验测定参数。

由于学科理论上不很严密，处理问题时包含了大胆的假设、经验方法，在解决实际问题时常带有较多的条件性和经验性，因此，土力学是一门实践性很强的学科，依赖于勘察、测试、试验基础上的工程经验积累和准确判断。

0.4 发展简史

土力学既是一门古老的工程技术，又是一门新兴的应用学科。如我国都江堰水利工程、秦代万里长城、隋朝南北大运河和赵州石拱桥、古埃及金字塔等古老建筑，至今仍保存完好，表明古代人民进行工程建设已经取得了丰富的实践经验，由于较好地利用了土力学知识，这些巨大建筑历经数千载仍屹立至今。但是，那时候土力学尚未形成完整的理论。

18世纪工业革命的兴起，大规模的城市建设和水利、铁路的兴建，遇到了许多与土有关的力学问题，伴随着这些问题的解决，土力学的理论开始逐渐产生和发展。1773年，库仑（Coulomb）根据试验提出了砂土抗剪强度公式和挡土墙土压力计算的滑楔理论；1856年，达西（Darcy）在经过大量的试验后，提出在土体中的水流渗透的 Darcy 定律；1857年，朗肯（Rankine）提出了挡土墙土压力计算的另一理论——朗肯土压力理论，并对后来土体强度理论的建立起到了推动作用；1885年布辛奈斯克（Bossinesq）给出在竖向集中荷载作用下地基中任一点的应力、应变的弹性理论经典解答；1915年瑞典的彼德森（Pettersson）首先提出了土坡稳定分析的整体圆弧法。这些理论和方法至今依然作为



图 0-8 土力学奠基人——太沙基

土力学的基本原理和方法被广泛应用。

1925 年太沙基 (Terzaghi) (图 0-8) 创造性地提出了著名的有效应力原理和渗透固结理论并出版了《土力学》专著, 土力学才作为一门独立学科而发展。

近几十年来, 世界范围内超高土石坝、超高层建筑、核电站等巨型工程的兴建, 世界范围内多次强烈地震的发生, 促进了本学科的发展。我国土力学及岩土工程方面的研究工作, 也已经进入较快发展阶段, 青藏铁路、三峡大坝、南水北调、高速铁路客运专线等重大工程建设, 在勘察、设计、施工等各个阶段, 全面、系统地应用土力学的专业知识和相关施工技术, 取得了大量突破性的具有世界先进水平的研究成果。在 2008 年 5 月四川汶川大地震中 (烈度达到 12 度), 震中的水利工程经受住大地震

的考验, 坝体基本安全, 未出现溃坝事件, 有力地证明了我国的岩土工程科学研究与实践达到国际先进水平。

随着计算机科学与现代试验技术的不断发展, 土力学学科得到迅猛发展。对于过去无法解决的理论及工程问题, 通过数值模拟技术, 可较好地予以解决; 而且新的土工试验仪器得到充分开发, 在实验室可完成较为复杂应力条件的模拟试验研究; 土工离心机可通过模型试验模拟现场原型的力学状态, 同时可预测较长时间下的各种状况等。

继续将土力学基本概念和原理应用于工程实践, 在此基础上发展和创新, 是土力学学科发展的必由之路。

0.5 学 习 要 求

土力学方面的知识是学习土木与水利工程各种专业课程所不可缺少的。

要求在学习土力学时, 重视概念的建立和理解; 对土的物理、力学性质的学习应给予特别的重视; 掌握基本实用技能; 了解各种试验方法的特点、获得的参数、工程应用及局限性; 了解各种计算方法的基本假定、适用条件及误差范围; 带着怀疑、批判的态度了解存在的问题和发展空间。只有这样才能不断提高分析、解决实际工程问题的能力。

对于土木工程和水利工程专业来说, 土力学是一门专业基础课, 学习课程之前应具有工程地质、材料力学、弹性力学、水力学等方面的知识。

第 1 章 土的物理性质及工程分类

【本章提要】 土是由固体颗粒（固相）、水（液相）和气（气相）组成的三相分散体系。三相之间的相互作用以及它们之间的比例关系，反映了土的物理性质和物理状态，如轻重、干湿、松密和软硬等。土的物理性质又与力学性质（强度、压缩性和渗透性等）有着密切的联系，如土湿、软、松散则强度低、压缩性大；土颗粒大则渗透性好；土粒大小不均匀（级配良好）则易压实等。在土力学计算中，不仅要知道土的物理性质的特征及其变化规律，了解各类土的特性，还必须熟练掌握土的物理性质和物理状态指标的定义、试验方法或计算方法以及应用，并掌握按照土的有关特性和指标进行土的工程分类的方法。最后有必要了解土的击实特性。

【本章内容】 首先介绍土的三相组成和结构，其次介绍土的物理性质和物理状态的各项指标以及应用，然后介绍土的工程分类方法，最后阐述土的击实特性。

本章内容看起来零散，新概念多、杂，应注意各节之间的内在联系以及各节内容的层次。

【本章重点】 土的颗粒级配分析，土的物理性质指标，土的物理状态指标。

1.1 土的三相组成和土的结构

1.1.1 土的三相组成

土是由固相、液相和气相三相所组成的松散颗粒集合体。固相部分即为土粒，由矿物颗粒或有机质组成。颗粒之间有许多孔隙，而孔隙可为液体（相）或气体（相），也可为二者共同填充。水及其溶解物为土中的液相。空气及其他一些气体为土中的气相。当土内孔隙全部为水所充满时，称为饱和土；当孔隙全部为气体所充满时，则称为干土；当孔隙中同时存在水和空气时，则称为湿土，即非饱和土。饱和土和干土都是二相系，湿土则为三相系。这些组成部分的相互作用和数量上的比例关系，将决定土的物理、力学性质。

土的固相是土的主体，决定着土的性质，是一种土区别于另一种土的重要依据。土力学中习惯上把土区分为黏性土与无黏性土两大类，就是根据固体颗粒的大小与矿物成分来区分的。这两类土的变形性质、强度性质、渗透性质有极明显的差别。学习中应特别注意加以区分，实际工程应用中应注意区别对待。

1.1.2 土的固相及颗粒级配分析

固相即土中的固体颗粒、粒间胶结物和有机质，表达固体颗粒的基本特征可以采用颗粒大小、矿物成分和颗粒的形状等三要素，这些特征共同决定土体的物理性质、物理状态和力学性质。

颗粒大小的变化、矿物成分的不同以及颗粒形状的差异，都可使土具有完全不同的性质。但三者之间存在一定的联系，这种联系是在土的生成过程中自然形成的。例如，粗粒的卵石、砾石和砂，大多为浑圆或棱角状的石英颗粒，强度高且具有较大的透水性，没有

黏性；细粒中的黏粒，则是片状或针状的黏土矿物，具有黏性、可塑性，透水性很低。其中颗粒大小是评价固体颗粒的最重要因素。

1. 土粒粒组和分界粒径

实际上很难对土粒逐粒测量它的大小，而在大小相近的粒径范围内土粒常表现出相似的物理、力学性质，可将该范围内的土颗粒划分为一个土粒粒组。所谓土粒粒组是指相邻两分界粒径之间性质相近的土颗粒。分界粒径则是土粒在性质上表现出明显差异的粒径，是划分土粒粒组的依据。

表 1-1 是我国目前普遍采用 6 个粒组的分界粒径，表中还列出了各粒组的粒径范围和一般特征。在我国颗粒从大到小分成如表 1-1 中的六个粒组是没有争议的。但各专业的分界粒径不尽相同。

粒 组 划 分

表 1-1

粒组	颗粒名称		粒径范围 (mm)	一般特征
巨粒组	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	
粗粒组	圆砾或 角砾颗粒	粗砾	60~20	透水性大，无黏性，毛细水上升高度不超过粒径大小
		中砾	20~5	
细砾		5~2		
	砂粒	粗砂	2~0.5	易透水，当混入云母等杂质时透水性较小，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
中砂		0.5~0.25		
细砂		0.25~0.075		
细粒组	粉粒		0.075~0.005	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
	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

注：1) 漂石、卵石和圆砾颗粒均呈一定的磨圆形状（圆形或亚圆形）；块石、碎石和角砾颗粒都带有棱角。

2) 黏粒或称黏土粒；粉粒或称粉土粒。

3) 黏粒的粒径上限也有采用 0.002mm 的。

2. 土的颗粒级配分析

自然界的土是由多个不同粒组组成的混合物，显然，土的性质取决于各不同粒组的相对含量。土中各个粒组的相对含量，称为土的颗粒级配，以各粒组占土粒总质量的百分数来表示。为了确定土的颗粒级配，实验室采用颗粒分析试验，将各粒组区分开。在土工试验中，最常用的颗粒分析试验方法有筛分法和密度计法两种。密度计法又称比重计法或水分法。

筛分法适用于粒径大于0.075mm的土粒。采用一套孔径不同的标准筛由上到下按照由粗到细的顺序排列好，将一定数量（取样数量取决于土中最大颗粒粒径的大小）的干土样装入顶层，盖上盖子在摇筛机上摇10~15min以后，各筛上将留存土颗粒，依次称出留在各筛上的土粒质量，就可以算出这些土粒质量占总土粒质量的百分数。摇筛机和标准筛如图1-1所示。



图1-1 摇筛机和标准筛

密度计法适用于粒径小于0.075mm的土粒。根据大小不同的土粒在水中下沉的速度各不相同，大颗粒下沉快而小颗粒下沉慢，Stokes定理指出：球状的细颗粒在水中下沉速度与粒径的平方成正比。试验中采用密度计测量不同时刻的溶液密度，可以计算小于某一粒径的土粒质量占总土质量的百分数。若土中同时含有粒径大于和小于0.075mm的土粒时，则需联合采用筛分法和密度计法进行试验。现举例说明如何整理和描述颗粒分析试验的成果。

【例1-1】 取某场地烘干土500g，筛分法得到的筛分试验结果见表1-2。由于小于0.075mm的颗粒超过总质量的10%，需要进行密度计法试验，取小于0.075mm的颗粒30g，密度计法试验结果如表1-3所示。试计算并绘出颗粒级配曲线。

【例1-1】筛分法试验结果 表1-2

筛孔直径 d (mm)	留筛土质量 (g)
10	0
5	25.0
2	35.0
1	40.0
0.5	35.0
0.25	60.0
0.075	110

【例1-1】密度计法试验结果 表1-3

颗粒直径 d (mm)	小于该粒径土的质量 (g)
0.075	30
0.05	23.5
0.02	12.5
0.005	3.3
0.002	2.0

【解】 (1) 计算筛分法的试验结果

土粒总质量为500g，先由500g减去各粒径累计留筛质量计算各筛下土粒质量，见表1-4第三列，即为小于各粒径的土粒质量。

再将各粒径筛下土粒质量分别除以500g获得小于该粒径土质量占总质量的百分数，见表1-4最后一列。可见小于0.075mm的土粒占总质量的39%。

(2) 计算密度计法的试验结果

密度计法总土粒质量为 30g，先由小于各粒径土粒质量分别除以 30g，获得小于该粒径的土粒质量占 30g 土质量的百分数，见表 1-5 第三列，再将第三列数据乘以 39%，得到小于该粒径土粒质量占总质量 500g 的百分数，见表 1-5 最后一列。

(3) 绘出颗粒级配曲线

将表 1-4 与表 1-5 的第一列的粒径 d 值和最后一列的百分数值分别合并，构成一组数据。以颗粒直径 d 为横坐标，采用对数坐标，以小于该粒径的土粒质量占总质量的百分数为纵坐标，采用普通坐标，点绘所有试验数据点，再过所得数据点绘成一条曲线，即得到颗粒级配曲线，如图 1-2 所示。

【例 1-1】筛分法的计算结果

表 1-4

筛孔直径 d (mm)	留筛土粒质量 (g)	筛下土粒质量 (g)	小于该孔径土粒质量占总质量的百分数 (%)
10	0	500	100
5	25.0	475	95
2	35.0	440	88
1	40.0	400	80
0.5	35.0	365	73
0.25	60.0	305	61
0.075	110	195	39

【例 1-1】密度计法的计算结果

表 1-5

颗粒直径 d (mm)	小于该粒径土粒质量 (g)	小于该粒径的土粒质量占 30g 土粒质量的百分数 (%)	小于该粒径的土粒质量占总质量的百分数 (%)
0.075	30	100	39.0
0.05	23.5	78.3	30.5
0.02	12.5	41.7	16.3
0.005	3.3	11.0	4.3
0.002	2.0	6.7	2.6

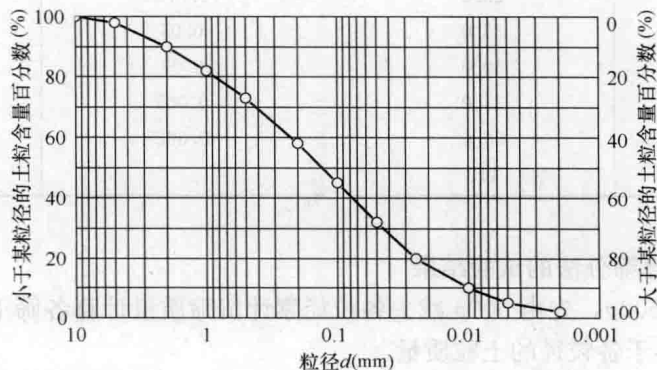


图 1-2 【例 1-1】的颗粒级配曲线

【例题讨论】

整理试验结果时，应注意最大粒径的选取，应对应标准筛的尺寸，且土中所有颗粒均