

# 土力学原理

## PRINCIPLE OF SOIL MECHANICS

主编 张孟喜

普通高等院校土木专业“十一五”规划精品教材

Civil Professional Textbooks for the 11th Five-Year Plan

主审 王建华

普通高等院校土木专业“十一五”规划精品教材

# 土力学原理

Principle of Soil Mechanics

## 丛书审定委员会

王思敬 彭少民 石永久 白国良  
李 杰 姜忻良 吴瑞麟 张智慧

本书主编 张孟喜

本书副主编 秦爱芳 肖丽萍 程国勇

本书主审 王建华

## 本书编写委员会

张孟喜 秦爱芳 肖丽萍 程国勇  
孙德安 臧秀平 武亚军



华中科技大学出版社  
中国·武汉

**图书在版编目(CIP)数据**

土力学原理/张孟喜 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2007 年9 月  
ISBN 978-7-5609-4079-3

I. 土… II. 张… III. 土力学-高等学校-教材 IV. TU43

中国版本图书馆CIP 数据核字(2007)第086651 号

**土力学原理**

**张孟喜 主编**

责任编辑:陈丽君

封面设计:张 璐

责任校对:刘 竣

责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:天津市南智科技文化发展有限公司

印 刷:湖北新华印务有限公司

开本:850mm×1065mm 1/16

印张:22.25

字数:439 000

版次:2007 年9 月第1 版

印次:2007 年9 月第1 次印刷

定价:39.80 元

ISBN 978-7-5609-4079-3/TU·160

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

## 总 序

教育可理解为教书与育人。所谓教书,不外乎是教给学生科学知识、技术方法和运作技能等,教学生以安身之本。所谓育人,则要教给学生做人的道理,提升学生的人文素质和科学精神,教学生以立命之本。我们教育工作者应该从中华民族振兴的历史使命出发,来从事教书与育人工作。作为教育本源之一的教材,必然要承载教书和育人的双重责任,体现两者的高度结合。

中国经济建设高速持续发展,国家对各类建筑人才需求日增,对高校土建类高素质人才培养提出了新的要求,从而对土建类教材建设也提出了新的要求。这套教材正是为了适应当今时代对高层次建设人才培养的需求而编写的。

一部好的教材应该把人文素质和科学精神的培养放在重要位置。教材不仅要from内容上体现人文素质教育和科学精神教育,而且还要从科学严谨性、法规权威性、工程技术创新性来启发和促进学生科学世界观的形成。简而言之,这套教材有以下几个特点:

一方面,从指导思想来讲,这套教材注意到“六个面向”,即面向社会需求、面向建筑实践、面向人才市场、面向教学改革、面向学生现状、面向新兴技术。

二方面,教材编写体系有所创新。结合具有土建类学科特色的教学理论、教学方法和教学模式,这套教材进行了许多新的教学方式的探索,如引入案例式教学、研讨式教学等。

三方面,这套教材适应现在教学改革发展的要求,提倡“宽口径、少学时”的人才培养模式。在教学体系、编写内容和课时数量等方面也做了相应考虑,而且教学起点也可随着学生水平做相应调整。同时,在这套教材编写中,特别重视人才的能力培养和基本技能培养,注重适应土建专业特别强调实践性的要求。

我们希望这套教材能有助于培养适应社会发展需要的、素质全面的新型工程建设人才。我们也相信这套教材能达到这个目标,从形式到内容都成为精品,为教师和学生,以及专业人士所喜爱。

中国工程院院士 王思敬

2006年6月于北京

# 前 言

土力学是研究土的力学、工程性质和土体及其相关结构受力变形的一门科学,是土木工程专业的一门重要技术基础课,广泛应用于建筑、交通、水利、港口工程等领域。本土力学教材的主要内容包括土的物理性质、土中的应力计算、土的渗透性和渗流问题、土的压缩性及地基沉降计算、土的抗剪强度及本构关系、土压力及挡墙设计、土坡稳定分析、天然地基承载力、非饱和土等。

本书在编写过程中,注重以下的特色:①作为立体化教材策划,充分利用多媒体、网络资源,并与纸质教材配合使用,将有关计算图表、视频与动画资料、程序设计、实验演示等放在网络资源(<http://elearning.shu.edu.cn/tlx/>);②突出重点、侧重应用,在三相指标计算、土中应力计算、沉降与固结、土压力与挡墙设计、土坡稳定等方面集成开发“土力学求解器”,并将相关程序介绍附在本书第10章;③在传统的土力学经典内容基础上,增加现代土力学内容,如第5章的本构关系、第9章的非饱和土等内容,作为选学内容(以“\*”注明),让读者对这些内容有一定了解;④为使读者更深入地理解本书主要内容,更好地运用土力学知识解决实际工程问题,本书第4章、第7章及第8章结合上海宝钢马迹山港矿石堆场这一工程实例,分别就软土地基加固前后的地基沉降、沉降与时间关系、地基稳定性与地基承载力进行分析,以期读者能借此分析与处理具体工程问题的能力。

本书由张孟喜担任主编,秦爱芳、肖丽萍、程国勇担任副主编,王建华担任主审。本书共10章,其中绪论、第1章、第5章由张孟喜编写;第2章及案例教学部分由秦爱芳编写;第3章和第4章由肖丽萍编写;第6章和第8章由程国勇编写;第7章由臧秀平编写;第9章由孙德安编写;第10章由张孟喜、武亚军编写。全书由张孟喜负责统稿。

限于作者水平及时间,书中难免存在错误和不当之处,敬请读者批评指正。

编 者

2007年7月

# 目 录

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 绪论 .....                | ( 1 ) |
| 第 1 章 土的物理性质及工程分类 ..... | ( 5 ) |
| 1.1 土的形成 .....          | ( 5 ) |
| 1.2 土的结构与构造 .....       | ( 7 ) |
| 1.3 土的组成 .....          | ( 9 ) |
| 1.4 土的三相比比例指标 .....     | (17)  |
| 1.5 土的物理状态 .....        | (24)  |
| 1.6 土的压实原理 .....        | (29)  |
| 1.7 土的工程分类 .....        | (32)  |
| 【本章要点】 .....            | (39)  |
| 【思考与练习】 .....           | (39)  |
| 第 2 章 土中应力 .....        | (41)  |
| 2.1 概述 .....            | (41)  |
| 2.2 土中自重应力 .....        | (43)  |
| 2.3 基底压力及基底附加压力 .....   | (47)  |
| 2.4 地基中的附加应力 .....      | (53)  |
| 2.5 地基中附加应力的讨论 .....    | (77)  |
| 【本章要点】 .....            | (80)  |
| 【思考与练习】 .....           | (80)  |
| 第 3 章 土的渗透性 .....       | (83)  |
| 3.1 概述 .....            | (83)  |
| 3.2 土的渗流理论 .....        | (84)  |
| 3.3 渗透力及渗透破坏类型 .....    | (93)  |
| 3.4 有效应力原理 .....        | (97)  |
| 【本章要点】 .....            | (102) |
| 【思考与练习】 .....           | (102) |
| 第 4 章 土的压缩、固结与沉降 .....  | (105) |
| 4.1 概述 .....            | (105) |
| 4.2 土的压缩性 .....         | (108) |
| 4.3 土的侧压力系数与变形模量 .....  | (117) |
| 4.4 地基沉降量计算 .....       | (121) |

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 4.5 饱和土的单向固结理论 .....         | (137) |
| 【本章要点】 .....                 | (156) |
| 【思考与练习】 .....                | (157) |
| <b>第5章 土的抗剪强度及本构关系</b> ..... | (159) |
| 5.1 概述 .....                 | (159) |
| 5.2 土的抗剪强度理论 .....           | (160) |
| 5.3 土中一点的应力极限平衡条件 .....      | (163) |
| 5.4 抗剪强度试验 .....             | (169) |
| 5.5 三轴压缩试验中的孔隙压力系数 .....     | (178) |
| 5.6 应力路径的概念及其在强度问题中的应用 ..... | (180) |
| 5.7 三轴试验中土的剪切性状 .....        | (184) |
| 5.8 土的屈服与破坏 *                | (200) |
| 5.9 土的本构模型 *                 | (206) |
| 【本章要点】 .....                 | (213) |
| 【思考与练习】 .....                | (213) |
| <b>第6章 土压力与挡墙设计</b> .....    | (217) |
| 6.1 概述 .....                 | (217) |
| 6.2 静止土压力 .....              | (218) |
| 6.3 朗肯土压力理论 .....            | (221) |
| 6.4 库伦土压力理论 .....            | (232) |
| 6.5 朗肯理论与库伦理论的比较 .....       | (243) |
| 6.6 库尔曼图解法 .....             | (243) |
| 6.7 重力式挡土墙设计 .....           | (245) |
| 6.8 加筋土的基本原理及强度特性 *          | (252) |
| 6.9 加筋土挡墙设计原理 *              | (256) |
| 【本章要点】 .....                 | (260) |
| 【思考与练习】 .....                | (261) |
| <b>第7章 边坡稳定性</b> .....       | (263) |
| 7.1 概述 .....                 | (263) |
| 7.2 无黏性土土坡的稳定性分析 .....       | (264) |
| 7.3 黏性土土坡的稳定性 .....          | (265) |
| 7.4 圆弧条分法土坡稳定分析 .....        | (268) |
| 7.5 非圆弧滑动面土坡稳定分析 .....       | (276) |
| 7.6 土坡稳定性问题的讨论 .....         | (281) |
| 【本章要点】 .....                 | (290) |

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| 【思考与练习】 .....               | (290) |
| 第 8 章 地基承载力 .....           | (292) |
| 8.1 概述 .....                | (292) |
| 8.2 地基的变形和破坏过程 .....        | (293) |
| 8.3 临塑荷载与临界荷载 .....         | (295) |
| 8.4 地基极限承载力的计算 .....        | (299) |
| 8.5 按规范确定地基承载力 .....        | (308) |
| 【本章要点】 .....                | (314) |
| 【思考与练习】 .....               | (314) |
| 第 9 章 非饱和土力学基础 * .....      | (316) |
| 9.1 毛细管作用和吸力 .....          | (316) |
| 9.2 非饱和土的渗透性,水和气的运动规律 ..... | (319) |
| 9.3 非饱和土的强度 .....           | (323) |
| 9.4 非饱和土的变形特性 .....         | (325) |
| 9.5 非饱和土的水力特性 .....         | (329) |
| 【本章要点】 .....                | (331) |
| 【思考与练习】 .....               | (331) |
| 第 10 章 土力学求解器简介 * .....     | (332) |
| 10.1 求解器简介 .....            | (332) |
| 10.2 应力计算 .....             | (333) |
| 10.3 沉降计算 .....             | (339) |
| 10.4 边坡稳定性分析 .....          | (340) |
| 参考文献 .....                  | (345) |

# 绪 论

## 1. 土力学的研究对象及作用

土力学是一门研究与土的工程问题有关的学科,它既是工程力学的一个分支学科,又是土木工程学科的一部分,是土木、水利等专业的一门重要的技术基础课。

承受建筑物、构筑物荷载的地层为地基,与地基接触并传递荷载给地基的结构物为基础,地基、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。保证地基、基础的安全、稳定,土力学学科需研究和解决两大类问题:一是土体稳定问题,这就要研究土体中的应力和强度,当土体的强度不足时将导致地基、基础及上部结构失稳;二是土体变形问题,即使土体具有足够的强度能保证自身稳定,如果土体变形尤其是沉降或不均匀沉降超过允许值,轻则影响使用,重则酿成事故。此外,对于土工、水工结构物地基及其他挡土挡水结构,除了在荷载作用下,土体要满足上述的稳定及变形要求,还要考虑渗流对土体变形和稳定的影响。土力学主要研究土体的物理性质及土体在外荷载或工程活动影响下的应力、变形、强度及稳定性和渗透性,找到它们的内在规律,作为解决土体稳定和变形问题的基本依据。

“高楼万丈平地起”,任何建筑物、构筑物都不能是没有地基的“空中楼阁”,更不用说高楼大厦、大桥、高塔等超高、复杂的建筑物。即使发射宇宙飞船时,所用的发射塔也建造在稳固的地基上,同样宇宙飞船返回时也需要在地基表面着陆,保证土体在荷载作用下的安全、稳定至关重要,土力学在现代土木工程建设事业中发挥着举足轻重的作用。

通过网络教学内容,可了解一些有关土力学方面的国内外工程事故实例,如意大利比萨斜塔的倾斜、地基滑动造成加拿大特朗斯康谷仓的整体倾覆、滑坡引起香港宝城大厦倒塌、广州中山 8 路富力广场基坑塌方、苏州虎丘塔的倾斜、上海地铁 4 号线发生渗水、坍塌事故等【见网络教学“工程事故实例”内容】。国内外工程事故实例说明,掌握并正确运用土力学理论具有重要的意义。

## 2. 土力学的发展概况

### 1) 理论提高阶段

——1773 年,库伦(C. A. Coulomb, 法国)根据试验创立了著名的砂土抗剪强度理论。

——1776 年,库伦根据土的楔体平衡提出了挡土墙土压力理论。

——1855 年,达西(Darcy, 法国)创立了土的渗透定律。

——1857 年,朗肯(W. J. M. Rankine, 英国)根据土中一点的极限平衡提出了另一种土压力理论。

——1885年,布辛内斯克(J. Boussinesq, 法国)求得了弹性半无限空间在竖向集中力作用下的应力和变形的理论解。

——1922年,费兰纽斯(W. Fellenius, 瑞典),为解决铁路塌方问题提出了土坡稳定分析法。

### 2) 形成独立学科阶段

——1925年,太沙基(K. Terzaghi, 美国)发表了《土力学》(Erdbaumechanik)专著,标志着土力学这门学科的诞生,他因此被认为是土力学的奠基人。1943年,他还出版了《理论土力学》(Theoretical Soil Mechanics)专著。之后,他与Peck合著的《工程实用土力学》(Soil Mechanics in Engineering Practice)是对土力学的全面总结。

1936年,在美国召开的第一届国际土力学与基础工程会议(1st (ICSMFE) International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering)。

### 3) 快速发展阶段

——1957年,D. C. Drucker提出了土力学与加工硬化塑性理论,对土的本构模型研究起了很大的推动作用。

——1963年,英国Cambridge大学的Roscoe等人提出了著名的剑桥模型(Cam Model),创建了临界状态土力学,为现代土力学的诞生和发展作出了重要贡献。

——20世纪60年代后,随着电子计算机的出现和计算技术的高速发展,使土力学的研究进入了一个全新的阶段。

——1993年,弗雷德隆德(D. C. Fredlund)和拉哈尔佐(H. Bahardjo)发表了《非饱和土土力学》(Unsaturated Soil Mechanics)一书,引起国内外土力学界的注意,非饱和土力学研究进入了一个新的历史时期。

作为岩土力学界四年一届的盛会——国际土力学与岩土工程会议(1999年前称土力学与基础工程会议),至2005年(日本,大阪),已召开了16届。【各届大会情况见网络教学相关内容】。1999年国际土力学与基础工程协会(ISSMFE—International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering)更名为国际土力学与岩土工程协会(ISSMGE—International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, <http://www.issmge.org/>)。

### 4) 我国的发展

我国学者早在20世纪50年代,陈宗基教授就对土的流变学和黏土结构进行了研究;黄文熙院士于1983年主编了有较大影响的土力学专著《土的工程性质》,书中系统地介绍有关的各种土的本构模型的理论 and 研究成果。钱家欢、殷宗泽教授主编的《土工原理与计算》(第1版1980年,第2版1996年),较全面地总结土力学的新发展,被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。

1957年在北京设立了全国性的中国土力学及基础工程学会学术委员会,并于1978年成立了中国土木工程学会土力学及基础工程学会(为与国际土协的名称相应,1999年改为中国土木工程学会土力学及岩土工程学会)。1962年在天津召开第

一届土力学及基础工程学术会议以来,至2003年(北京),已召开了九届,第十届将于2007年11月在重庆召开。以上国内外学术会议的召开,大大促进了土力学学科在我国的发展。

#### 5) 主要刊物介绍

①Géotechnique(1948—),英国土木工程师协会(Institution of Civil Engineer)主办, <http://www.thomastelford.com/journals/>

②Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,美国土木工程师协会(ASCE—American Society of Civil Engineers)主办, <http://scitation.aip.org/gto/>

③Canadian Geotechnical Journal,加拿大国家研究委员会(the National Research Council)主办, [http://pubs.nrc-cnrc.gc.ca/cgi-bin/rp/rp2\\_desc\\_e?cgj](http://pubs.nrc-cnrc.gc.ca/cgi-bin/rp/rp2_desc_e?cgj)

④岩土工程学报(1979—),由中国水利学会、中国土木工程学会等6个学会联合主办 <http://www.cgejournal.com/>

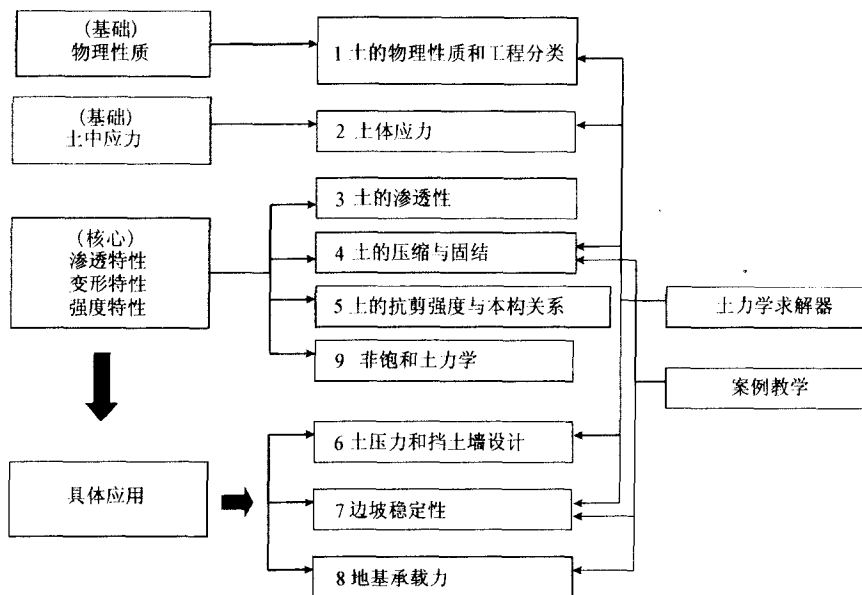
⑤岩土力学(1979—),中国科学院武汉岩土力学研究所主办, <http://ytlx.chinajournal.net.cn/>

### 3. 土力学的学科特点

土是天然介质材料,由土颗粒、水、空气三相体组成,由于问题的复杂性,许多土力学的计算理论和公式是在作出某些假设和忽略某些因素的前提下建立的,如土中应力计算、土的压缩变形与地基固结沉降计算方法、土的抗剪强度理论等。一方面,我们应当了解这些理论难以模拟、概括地基土各种力学性状全貌的不完善之处,注意这些理论在工程实际使用中的适用条件;另一方面,这些理论和公式仍然是我们目前解决工程实际问题的理论依据,它们在长期的工程实践中发挥着无可替代的作用,并且在不断取得完善与发展。学习土力学时应该全面掌握这些基本理论,并学会将它们应用到合适的工程实际中。本课程中的计算公式较多,要求掌握公式的来源、意义和应用,但对公式的推导或方程的建立过程,只要求作一般性了解即可。

解决岩土工程问题的关键之一是计算指标和参数的确定,即土的工程性质指标的测定。土的工程性质指标包括物理性质指标和力学性质指标两类。物理指标是指用于定量描述土的组成、土的干湿、疏密与软硬程度的指标;力学性质指标主要是用于定量描述土的变形规律、强度规律和渗透规律的指标。通常只有通过试验才能得出土的工程性质指标,测定这些指标的试验方法包括室内试验和原位测试两类,它们各有其特点和适用条件。学习土力学的理论知识的同时必须重视学习与掌握这些指标的试验测定方法,了解这些指标的适用条件,对主要的试验指标,应掌握其土工试验的操作方法与数据整理方法。

在土力学的研究中,除采用理论分析方法外,试验乃至工程经验是非常重要的手段,这是土力学与理论力学、材料力学、结构力学等所不同的,学习时应特别注意到这一特点。在学好理论知识的同时,有意识地培养自己的动手能力并重视工程知识的



积累,学习中应将基本理论、工程应用、实验技能相结合,具体的知识体系结构图见下图。

#### 4. 土力学的主要内容及学习要求

通过本课程的学习,要求学生掌握土的分类、形成及基本工程特性,能够进行常规的室内土工试验和原位测试,牢固掌握土的应力、变形、强度和稳定计算等土力学基本原理和方法,并且能够应用这些原理和方法,分析和解决实际工程中的地基稳定、变形和渗流等问题。同时,为进一步学习基础工程、地基处理、路基工程、深基坑工程、地下工程等有关专业课打好基础。本课程将通过基本知识学习、试验、案例教学、习题、课程设计几个环节完成。

本书充分利用多媒体、网络资源(<http://elearning.shu.edu.cn/tlx/>),并与纸质教材配合使用,突出重点、侧重应用;在传统的土力学经典内容基础上,增加现代土力学内容,作为选学内容,书中以“\*”标记;为使读者更深入地理解土力学的主要内容,更好地运用土力学知识解决实际工程问题,本书结合上海宝钢马迹山港矿石堆场这一工程实例,分别对软土地基加固前后的地基沉降、沉降与时间关系、地基稳定性与地基承载力进行了分析。

本书注重基本理论、工程应用、试验的互相贯通,每一章均列出了本章应重点掌握的学习内容及相关习题,学习时可供参考。

# 第 1 章 土的物理性质及工程分类

## 1.1 土的形成

工程界中的土(soils),从广义角度来讲,包含天然土(naturally occurring soils)和人造土(man-made soils),土与岩石的主要区别在于土是没有胶结的颗粒堆积物。粉煤灰、矿渣等工业废料(waste materials)、污染土(contaminated and polluted soils)等都属于人造土。而地球表层的整体岩石在大气中经受长期的风化作用后形成形状各异、大小不同的颗粒,这些颗粒在不同的自然环境条件下形成的堆积物,就是天然土,可以说天然土是岩石经风化后形成的松散颗粒的堆积物。土力学主要研究对象是天然土,为方便起见,以下将天然土简称为土。

### 1.1.1 风化作用

岩石形成之后,在漫长的地质历史中长期暴露于自然环境中,受各种各样的自然力的作用,其物理、化学性质常常会发生改变。这就是岩石的风化。风化作用分为以下三种类型。

#### 1) 物理风化

岩石中发生的只改变颗粒的大小与形状,而不改变原来的矿物成分的变化过程称为物理风化(mechanical weathering)。物理风化一般包括岩石在经受风、霜、雨、雪等自然力的影响下而发生的机械破碎作用、周围环境的温度和湿度发生变化引起的不均匀膨胀与收缩而产生破裂作用等。

#### 2) 化学风化

岩石与周围环境中的水、氧气和二氧化碳等物质的长时接触,其内部的化学成分逐渐发生变化,从而导致其组成矿物成分发生改变的过程称为化学风化(chemical weathering)。由化学风化而产生的一些新的矿物成分称为次生矿物。

#### 3) 生物风化

动植物和人类活动对岩石的破坏作用称为生物风化(biological weathering)。例如,树在岩石缝隙中生长时树根伸展使岩石缝隙扩展开裂,人类开采矿石、修建隧道时的爆破工作,对周围岩石产生的破坏等。生物风化的方式又可分为物理生物风化和化学生物风化两种形式。

### 1.1.2 不同形成条件下的土

土的工程特性与其形成条件有很大的关系。根据土的形成条件可以将土分为两

大类,一类为残积土,另一类为运积土。

### 1) 残积土

岩石风化后产生的碎屑物质,一部分被风和降水带走,一部分保留在原地。保留在原地的风化碎屑物质所构成的土称残积土(residual soils),它的特征是颗粒表面粗糙、多棱角、粗细不均、无层理。

### 2) 运积土

运积土(transported soils)是指风化所形成的土颗粒,受自然力的作用,被搬运到远近不同地点所沉积的堆积物。其特点是颗粒经过滚动和摩擦作用而变圆滑。在沉积过程中因受水流等自然力的分选作用而形成颗粒粗细不同的层次,由于粗颗粒下沉快、细颗粒下沉慢而形成不同粒径的土层。搬运和沉积过程对土的性质影响很大,下面将根据搬运的动力不同,介绍几类运积土。

(1)坡积土(colluvial debris)——残积土受重力和暂时性流水(雨水、雪水)的作用,搬运到山坡或坡脚处沉积起来的土,坡积颗粒随斜坡自上而下呈现由粗而细的分选性和局部层理。

(2)洪积土(diluvial soils)——残积土和坡积土受洪水冲刷、搬运,在山沟出口处或山前平原沉积下来的土,随离山远近有一定的分选性,颗粒有一定的磨圆度。

(3)冲积土(alluvial soils)——河流的流水作用搬运到河谷坡降平缓的地带沉积下来的土,这类土经过长距离的搬运,颗粒具有较好的分选性和磨圆度,常形成砂层和黏性土层交叠的地层。

(4)风积土(aeolian deposits)——由风力搬运形成的土,其颗粒磨圆度好,分选性好。我国西北地区黄土就是典型的风积土。

(5)湖泊沼泽沉积土(marsh deposits)——在湖泊及沼泽等极为缓慢水流或静水条件下沉积下来的土,或称淤积土,这类土除了含大量细微颗粒外,常伴有生物化学作用所形成的有机物,成为具有特殊性质的淤泥或淤泥质土。

(6)海相沉积土(marine deposits)——由河流流水搬运到海洋环境下沉积下来的土。

(7)冰积土(glacial deposits)——由冰川或冰水夹带搬运形成的沉积物,其颗粒粗细变化大,土质不均匀。

### 3) 土的特点

土的上述形成过程决定了它具有特殊物理力学性质。与一般建筑材料相比,土具有三个重要特点。

①散体性:颗粒之间无黏结或一定的黏结,存在大量孔隙,可以透水、透气。

②多相性:土往往是由固体颗粒、水和气体组成的三相体系,相系之间质和量的变化直接影响它的工程性质。

③自然变异性:土是在自然界漫长的地质历史时期演化形成的多矿物组合体,性质复杂,不均匀,且随时间还在不断变化的材料。

## 1.2 土的结构与构造

### 1.2.1 土的结构

很多试验表明,对于同一种土,原状土样和重塑土样的力学性质有很大差别。这就是说,土的组成成分并不完全决定土的性质,土的结构和构造对土的性质也有很大影响。

土的结构包含微观结构和宏观结构两层概念。土的微观结构,常简称为土的结构,或称为土的组构(fabric),是指土粒的原位集合体特征,是由土粒单元的大小、矿物成分、形状、相互排列及其联结关系、土中水的性质及孔隙特征等因素形成的综合特征。土的宏观结构,常称之为土的构造(structure),是同一土层中的物质成分和颗粒大小等都相近的各部分之间的相互关系的特征,表征了土层的层理、裂隙及大孔隙等宏观特征。

#### 1. 单粒结构(single grain fabrics)

单粒结构是砂、砾等粗粒土在沉积过程中形成的代表性结构。由于砂、砾的颗粒较粗大,其比表面积小,在沉积过程中粒间力的影响与其重力相比可以忽略不计,即土粒在沉积过程中主要受重力控制。当土粒在重力作用下下沉时,一旦与已沉稳的土粒相接触,就滚落到平衡位置形成单粒结构,如图 1-1(a)所示。这种结构的特征是土粒之间以点与点的接触为主。根据其排列情况,又可分为紧密和疏松两种情况。

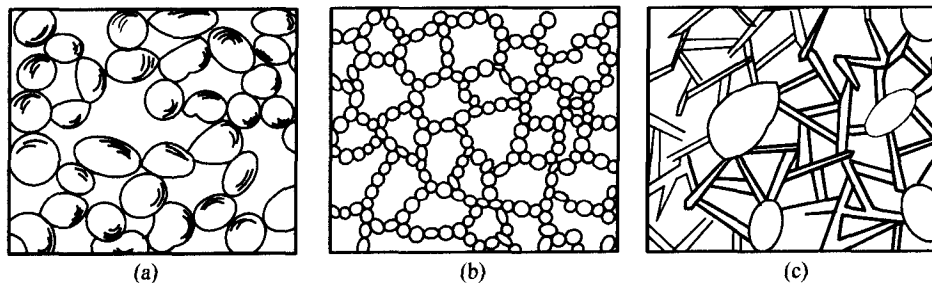


图 1-1 土的结构示意图

(a) 单粒结构; (b) 蜂窝结构; (c) 絮状结构

#### 2. 蜂窝结构(honeycomb fabric)

蜂窝结构主要是由粉粒或细砂组成的土的结构形式。据研究,粒径为  $0.005 \sim 0.075 \text{ mm}$  (粉粒粒组) 的土粒在水中沉积时,基本上是以单个土粒下沉,当碰上已沉积的土粒时,由于它们之间的相互引力大于其重力,因此土粒就停留在最初的接触点上不再下沉,逐渐形成土粒链。土粒链组成弓架结构,形成具有很大孔隙的蜂窝状结构,如图 1-1(b)所示。

虽然具有蜂窝结构的土有很大孔隙,但由于弓架作用和一定程度的粒间联结,使得其可以承担一般应力水平的静力荷载。然而,当其承受高应力水平的静荷载或动力荷载时,其结构将破坏,并可导致严重的地基变形。

### 3. 絮状结构(flocculated fabric)

由于极细小的土颗粒(粒径小于 $0.005\text{ mm}$ )在咸水中沉积时常处于悬浮状态,当悬浮液的介质发生变化,如细小颗粒被带到电解质较大的海水中,土粒在水中作杂乱无章的运动时一旦相互接触,粒间力表现为净引力,彼此容易结合在一起逐渐形成小链环状的土粒集合体,使质量增大而下沉。当一个小链环碰到另一个小链环时相互吸引,不断扩大形成大链环,称为絮状结构,又称絮凝结构。由于土粒的角、边常带正电荷,面带负电荷,因此角、边与面接触时净引力最大,所以絮状结构的特征表现为土粒之间以角、边与面的接触或边与边的搭接形式为主,如图 1-1(c)所示。这种结构的土粒呈任意排列,具有较大的孔隙,因此其强度低,压缩性高,对扰动比较敏感。但土粒间的联结强度会由于压密和胶结作用而逐渐得到增强。

天然沉积土的结构极为复杂。通常土粒总是成团存在,称为粒团。粒团及土粒的排列,既有粒团内土粒的任意或定向排列,又有粒团之间的任意或定向排列,由于粒团及粒团内的土粒排列方式上的差异,土体将呈现不同的各向异性(anisotropy)。

具有絮状结构的黏性土,其土粒之间的联结强度(结构强度),往往由于长期的固结作用和胶结作用而得到加强。因此,(集)粒间的联结特征,是影响这一类土木工程性质的主要因素之一。

一般说来,上述三种结构中,呈现密实的单粒结构的土,由于其土粒排列紧密,在动、静荷载作用下都不会产生较大的沉降,所以强度较大,压缩性较小,一般是良好的天然地基。而疏松状态单粒结构、蜂窝结构及絮状结构的土,其骨架是不稳定的,当受到震动及其他外力作用时,天然结构易遭到破坏,其强度降低,引起土的很大变形。因此,这种土层如未经处理一般不宜作为建筑物的地基或路基。

## 1.2.2 土的构造

土的构造实际上是土层在空间的赋存状态,主要表现为土层的层理、裂隙及大孔隙等宏观特征。层理构造,即土的成层性,是其构造的最主要特征。它是在土的形成过程中,由于不同阶段沉积的物质成分、颗粒大小或颜色不同,而沿竖向呈现的成层特征,常见的有水平层理构造和交错层理构造。土的裂隙性是土的构造的另一特征,如黄土的柱状裂隙,膨胀土的收缩裂隙等。裂隙的存在大大降低土体的强度和稳定性,增大透水性,对工程不利,往往是工程结构或土体边坡失稳的原因。此外,还注意土中是否有包裹物(如腐殖物、贝壳、结核体等)以及天然或人为的孔洞存在。土的构造特征造成土的不均匀性。

## 1.3 土的组成

### 1.3.1 土的固体颗粒

土的固体颗粒、矿物成分及其与水的相互作用和气体在孔隙中的相对含量是决定土的物理力学性质的主要因素。土的固体颗粒对土的物理力学性质起决定性作用。研究固体颗粒首先要分析粒径的大小及各种粒径所占的百分比。此外,还要搞清固体颗粒的矿物成分及形状。一般粗颗粒的成分都是原生矿物,形状多为粒状;而颗粒很细的土,其成分大多是次生矿物,形状多为片状或针状。

#### 1. 土的颗粒大小与级配

自然界中的土由无数大小不同的土粒混合而成,其颗粒相差很大。例如,有粒径大于 200 mm 的漂石,还有粒径小于 0.005 mm 的黏粒。造成颗粒大小悬殊的原因主要与土的矿物成分密切相关,也与土所经历的风化作用和搬运过程有关。一般地,随着颗粒大小的不同,土表现出不同的工程性质。土颗粒的大小通常以粒径表示(但需要注意,这里的粒径并非土颗粒的真实直径,而是与筛孔直径(筛分法)或与实际土粒有相同沉降速度的理想球体的直径(密度计法)等效的名义粒径)。自然界的土一般都是由各种不同粒径土粒构成的混合土,单一粒径的土可以说不存在。为了研究的方便,工程上通常把性质和粒径大小相接近的土粒划分为一组,称为粒组。表 1-1 列出了目前国内常用的粒组划分方法及各粒组土的主要特性。

为了定量描述土颗粒的组成情况,不仅要了解土颗粒的粗细,而且要了解各种颗粒所占的比例,特别是不同粒组在混合土中所占的比例。混合土的性质不仅取决于

表 1-1 土的粒组划分方法及各粒组土的主要特性

| 粒组统称 | 粒组划分   | 粒径范围 $d/\text{mm}$       | 主要特性                                                     |
|------|--------|--------------------------|----------------------------------------------------------|
| 巨粒组  | 漂石(块石) | $d > 200$                | 透水性大,无黏性,无毛细水,不易压缩                                       |
|      | 卵石(碎石) | $200 \geq d > 60$        | 透水性大,无黏性,无毛细水,不易压缩                                       |
| 粗粒组  | 砾粒     | 粗砾 $60 \geq d > 20$      | 透水性大,无黏性,不能保持水分,毛细水上升高度很小,压缩性较小                          |
|      |        | 中砾 $20 \geq d > 5$       |                                                          |
|      |        | 细砾 $5 \geq d > 2$        |                                                          |
|      | 砂粒     | 粗砂 $2 \geq d > 0.5$      | 易透水,无黏性,毛细水上升高度较大,饱和松细砂在振动荷载作用下会产生液化,一般压缩性较小,随颗粒减小,压缩性增大 |
|      |        | 中砂 $0.5 \geq d > 0.25$   |                                                          |
|      |        | 细砂 $0.25 \geq d > 0.075$ |                                                          |
| 细粒组  | 粉粒     | $0.075 \geq d > 0.005$   | 透水性小,湿时有微黏性,毛细管上升高度较大,有冻胀现象,饱和并松动时在振动荷载作用下会产生液化          |
|      | 黏粒     | $d \leq 0.005$           | 透水性差,湿时有黏性和可塑性,遇水膨胀,失水收缩,性质受含水量的影响较大,毛细水上升高度大            |