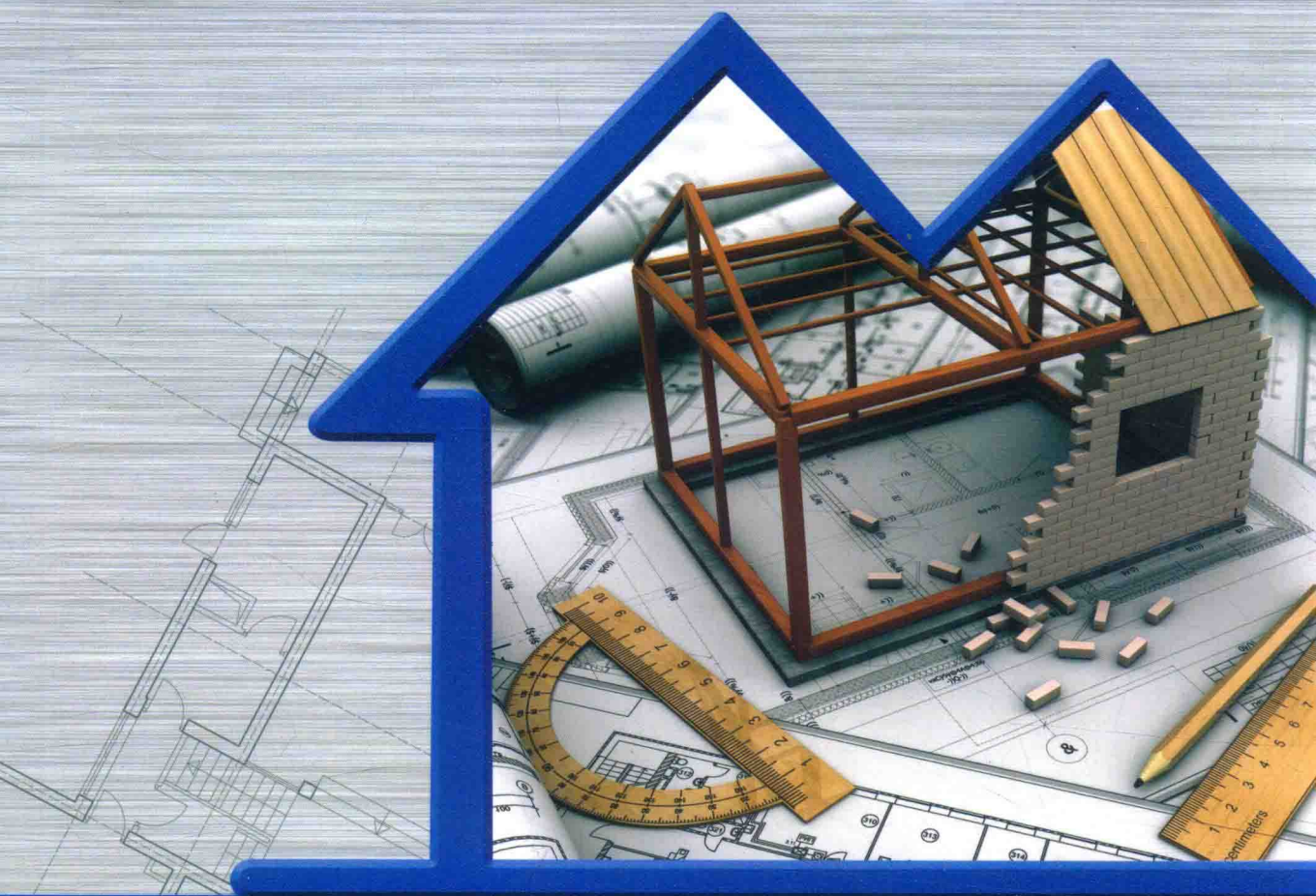


全国高等院校土木与建筑专业创新规划教材



# 土力学

刘熙媛 徐东强 主编

赠送  
电子课件



清华大学出版社

全国高等院校土木与建筑专业创新规划教材

# 土 力 学

刘熙媛 徐东强 主 编

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书系统阐述了土力学的基本原理、土的基本特性和分析计算方法,结合长期教学与实践的研究成果,讲解了土力学在工程中的应用。

全书共 8 章,主要内容包括土的物理性质及工程分类,土中的应力计算,土中水的运动规律,土的压缩性与地基沉降计算,土的抗剪强度理论,土压力计算,土坡稳定分析和地基承载力。

本书可作为普通高等院校土木工程专业的教材和其他专业报考土木工程专业硕士研究生人员的参考书,亦可作为土木工程勘察、设计、施工技术人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。  
版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

土力学/刘熙媛,徐东强主编. —北京:清华大学出版社,2017  
(全国高等院校土木与建筑专业创新规划教材)  
ISBN 978-7-302-44914-0

I. ①土… II. ①刘… ②徐… 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(2016)第 213050 号

责任编辑:桑任松

装帧设计:刘孝琼

责任校对:周剑云

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62791865

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:16.25 字 数:390千字

版 次:2017年3月第1版 印 次:2017年3月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:36.00元

产品编号:067255-01

# 前 言

“土力学”是高等学校土木工程专业必修的一门专业基础课。本教材遵循中华人民共和国住房和城乡建设部高等学校土木工程学科专业指导委员会编制的《高等学校土木工程本科指导性专业规范》，并综合不同院校土木工程专业的土力学与基础工程教学大纲，在教学改革和实践的基础上编写而成。同时，根据新的专业目录要求对教学内容进行了拓宽，涉及与建筑工程、道路与桥梁工程、地下工程等有关的专业知识。

为了适应我国“卓越工程师教育培养计划”的实施以及土木工程专业应用型人才培养的需要，本书在编写中主要遵循以下原则。

(1) 强调基本概念、基本原理和计算方法。力图准确地阐述土力学的基本概念和基本原理，通过有针对性的例题，学生在理解基本原理的基础上掌握土力学的基本计算方法。

(2) 注重理论与实践的结合，通过对特定工程问题的分析，帮助学生理解公式推导中一些假设的工程实际意义，有助于培养学生分析与解决实际问题的能力。

(3) 反映我国土木工程国家标准及行业标准编制建设的最新成果。在涉及规范处，强调我国设计规范在基本原则和基本规定方面内容的变化及其与土力学基本原理的关系。

(4) 适当吸收国内外土力学比较成熟的新内容，注意反映土力学学科发展水平和新方向。

本教材内容可分为两大部分：第一部分(第1~5章)主要介绍了土的物理性质及分类、土中的应力计算、土中水的运动规律，土的压缩性与地基沉降计算及土的抗剪强度理论；第二部分(第6~8章)重点介绍了土力学的三大工程应用，即土压力理论、土坡稳定分析及地基承载力理论。

本书由河北工业大学刘熙媛和徐东强担任主编，负责大纲编写和统稿。各章编写人员及分工如下：河北工业大学刘熙媛编写绪论、第1章、第2章、第5章及第8章，河北工业大学徐东强编写第3章和第7章，河北工业大学韩红霞编写第4章和第6章。

本书在编写过程中引用了相关的国家及行业标准，参阅了一些院校优秀教材的内容及相关研究成果，在此向有关作者谨表谢意。

由于编者的知识水平和实践能力有限，书中疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

# 目 录

绪论.....	1	思考题.....	41
0.1 土力学研究的意义.....	1	习题.....	41
0.2 土力学的发展概况.....	2	<b>第2章 土中的应力计算.....</b>	<b>43</b>
0.3 土力学研究的内容和研究方法.....	3	2.1 概述.....	43
0.4 土力学课程的特点及学习方法.....	3	2.2 土中自重应力.....	45
<b>第1章 土的物理性质及工程分类.....</b>	<b>5</b>	2.2.1 均质土体中的自重应力.....	46
1.1 土的生成.....	5	2.2.2 成层土体中的自重应力.....	46
1.2 土的三相组成.....	6	2.2.3 土层中有地下水时的 自重应力.....	46
1.2.1 土中固体颗粒.....	7	2.3 基础底面压力及其简化计算.....	49
1.2.2 土中水.....	13	2.3.1 基底压力的分布规律.....	49
1.2.3 土中气体.....	14	2.3.2 基底压力的简化计算.....	51
1.3 土的三相比例指标.....	14	2.3.3 基底附加压力.....	53
1.3.1 指标的定义.....	15	2.4 地基附加应力.....	53
1.3.2 指标的换算.....	17	2.4.1 竖向集中力作用下的地基 附加应力计算.....	54
1.4 土的物理状态指标.....	21	2.4.2 局部荷载作用下的地基附加 应力计算.....	58
1.4.1 无黏性土的密实度.....	21	2.4.3 线荷载作用下的地基附加 应力计算.....	66
1.4.2 黏性土的软硬状态.....	22	2.4.4 条形荷载作用下的地基附加 应力计算.....	67
1.4.3 黏性土的灵敏度和触变性.....	25	2.4.5 非均质和各向异性地基中的 附加应力.....	72
1.4.4 黏性土的胀缩性、湿陷性 和冻胀性.....	26	2.4.6 荷载作用面积对地基土中附加 应力的影响.....	74
1.5 土的结构与构造.....	29	2.5 有效应力.....	75
1.5.1 土的结构.....	29	2.5.1 有效应力原理.....	75
1.5.2 土的构造.....	31	2.5.2 按有效应力原理计算土中的 自重应力.....	76
1.6 土的工程分类.....	31	思考题.....	78
1.6.1 土的分类原则.....	31	习题.....	78
1.6.2 土的分类标准.....	32		
1.6.3 地基土的工程分类.....	34		
1.7 土的压实性.....	37		
1.7.1 土的压实原理.....	38		
1.7.2 击实试验.....	38		
1.7.3 影响击实效果的因素.....	39		
1.7.4 压实特性在现场填土中的 应用.....	40		

第 3 章 土中水的运动规律.....81	
3.1 土的毛细性.....81	
3.1.1 土层中毛细水的分布.....81	
3.1.2 毛细水上升机理、上升高度及上升速度.....82	
3.1.3 表面张力效应.....84	
3.1.4 土的毛细现象对工程的影响.....84	
3.2 土的渗透性.....85	
3.2.1 渗流模型.....85	
3.2.2 土的层流渗透定律.....86	
3.2.3 土的渗透系数.....89	
3.2.4 成层土的等效渗透系数.....92	
3.2.5 影响土渗透性的因素.....94	
3.3 二维渗流与流网.....95	
3.3.1 二维渗流基本微分方程.....95	
3.3.2 二维稳定渗流问题的流网解法.....96	
3.4 渗流力及渗流稳定分析.....101	
3.4.1 渗流力的计算公式.....101	
3.4.2 渗流力的作用特点及渗流稳定分析.....102	
3.5 渗流情况下的孔隙水压力与有效应力.....104	
3.5.1 饱和土体的有效应力原理.....104	
3.5.2 土中水渗流时(一维渗流)的有效应力与孔隙水压力.....105	
思考题.....107	
习题.....107	
第 4 章 土的压缩性与地基沉降计算.....109	
4.1 概述.....109	
4.2 土的压缩性试验及压缩性指标.....110	
4.2.1 室内压缩试验.....110	
4.2.2 现场载荷试验.....115	
4.2.3 室内三轴压缩试验.....119	
4.3 地基最终沉降量的计算方法.....120	
4.3.1 单向分层总和法计算地基最终沉降量.....120	
4.3.2 《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)推荐的分层总和法.....125	
4.3.3 考虑不同变形阶段的沉降计算方法.....131	
4.3.4 考虑应力历史的影响用原位压缩曲线计算地基最终沉降.....134	
4.4 太沙基一维固结理论.....139	
4.4.1 饱和土的渗流固结模型.....140	
4.4.2 太沙基一维渗流固结理论.....142	
4.4.3 利用实际沉降观测曲线估算地基最终沉降量的方法.....150	
思考题.....153	
习题.....153	
第 5 章 土的抗剪强度理论.....155	
5.1 概述.....155	
5.2 土的抗剪强度理论.....156	
5.2.1 库仑定律.....156	
5.2.2 莫尔—库仑抗剪强度理论.....157	
5.3 土的抗剪强度试验.....160	
5.3.1 直接剪切试验.....161	
5.3.2 三轴压缩试验.....163	
5.3.3 无侧限抗压强度试验.....165	
5.3.4 十字板剪切试验.....166	
5.3.5 抗剪强度的有效应力原理.....168	
5.3.6 土的抗剪强度指标的选择.....168	
5.4 三轴压缩试验中的孔隙压力系数.....169	
5.4.1 等向压缩应力状态——孔隙压力系数 $B$ .....170	
5.4.2 偏差应力状态——孔隙压力系数 $A$ .....172	
5.4.3 土的剪胀性.....173	
5.5 饱和黏性土的抗剪强度.....175	
5.5.1 不固结不排水剪(UU)试验.....175	

5.5.2	固结不排水剪(CU)试验	176	6.6	关于土压力的讨论	207
5.5.3	固结排水剪(CD)试验	178	6.6.1	朗肯和库仑理论比较	207
5.6	应力路径在土的强度问题中的 应用	180	6.6.2	破裂面形状	208
5.6.1	直剪试验的应力路径	181	6.6.3	土压力强度分布	209
5.6.2	三轴试验的应力路径	181		思考题	209
5.6.3	土木工程中的应力路径 问题	182		习题	210
	思考题	183	<b>第7章 土坡稳定分析</b>		211
	习题	184	7.1	概述	211
<b>第6章 土压力计算</b>		185	7.2	无黏性土土坡的稳定分析	212
6.1	概述	185	7.2.1	一般情况下的无黏性土 土坡	212
6.1.1	土压力的概念	185	7.2.2	有渗流作用时的无黏性土 土坡	212
6.1.2	挡土结构及其类型	185	7.3	黏性土土坡的稳定分析	213
6.1.3	土压力类型及关系	186	7.3.1	圆弧滑动体的整体稳定性 分析	213
6.2	静止土压力计算	188	7.3.2	圆弧滑动体的条分法	214
6.3	朗肯土压力理论	188	7.4	非圆弧滑动面土坡的稳定分析	223
6.3.1	基本假设	188	7.4.1	简布普通条分法	224
6.3.2	基本原理	189	7.4.2	不平衡推力传递法	225
6.3.3	主动土压力计算	189	7.5	土坡稳定分析的几个问题讨论	228
6.3.4	被动土压力计算	190	7.5.1	土的抗剪强度指标选用	228
6.4	库仑土压力理论	192	7.5.2	稳定安全系数的确定	228
6.4.1	基本假设	192	7.5.3	坡顶开裂时的稳定计算	229
6.4.2	主动土压力计算	192		思考题	229
6.4.3	被动土压力计算	197		习题	230
6.4.4	黏性土的库仑土压力	198	<b>第8章 地基承载力</b>		231
6.4.5	库尔曼图解法	200	8.1	浅基础的地基破坏模式	231
6.5	几种常见情况的土压力计算	201	8.1.1	整体剪切破坏	231
6.5.1	墙后填土表面有超载(朗肯 理论: 墙背竖直和墙后填土 表面水平)	201	8.1.2	局部剪切破坏	232
6.5.2	成层填土及墙后填土有 地下水	202	8.1.3	冲剪破坏	232
6.5.3	墙后填土表面有连续均布 荷载(库仑理论: 墙背倾斜 和墙后填土表面倾斜)	203	8.1.4	地基破坏模式的影响因素	232
6.5.4	异形挡土墙	205	8.2	地基临塑载荷与临界载荷	233
			8.2.1	临塑载荷 $p_{cr}$	233
			8.2.2	临界载荷 $p_{1/4}$ 和 $p_{1/3}$	235
			8.3	地基的极限承载力	237





8.3.1 普朗特极限承载力理论.....	237	特征值.....	246
8.3.2 按假定滑动面确定极限承载力.....	238	8.4.4 载荷试验确定地基承载力特征值.....	247
8.4 地基承载力的确定.....	244	思考题.....	249
8.4.1 地基承载力的概念.....	244	习题.....	249
8.4.2 地基承载力的确定原则.....	245	参考文献.....	250
8.4.3 理论公式计算确定地基承载力			





# 绪 论

## 0.1 土力学研究的意义

土力学是研究土体的一门力学，它主要研究土体的应力、变形、强度、渗流以及稳定性。

在土木工程中，各种建筑物和构筑物都是修建在地表或埋置于地层之中。用于承受建筑物和构筑物荷载的那部分地层称为地基。地层是自然界的产物，包括岩层和土层。

土层中的土是岩石经过物理、化学、生物风化作用以及剥蚀、搬运、沉积作用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的沉积环境中又有其相近性状的规律性。由于土是自然历史的产物，因此与其他材料相比，土体具有以下三个重要特点。

### 1) 碎散性

土体是由各种不同粒径的矿物颗粒集合组成的，颗粒间的黏结强度远比颗粒本身强度小得多。因此，土在变形、强度等力学性质上与固体连续介质力学根本不同，仅靠材料力学、弹性力学等连续介质力学知识不能描述土体在受力后所表现出来的性状及由此所引起的工程问题。土力学是利用上述力学的基本知识，考虑散体介质特性(压缩性、渗透性、颗粒间接触强度特性)的理论所建立的一门独立学科。

### 2) 土是三相体系

土是由固体颗粒构成土的骨架，土骨架的孔隙中存在液态水与气体，因而可将土看作固相(土颗粒)、液相(水)和气相(气体)所组成的三相体系。土的三相之间在质量和体积上的比例关系，尤其是孔隙水的作用，将对土的物理和力学性质有很大的影响。

### 3) 土的自然变异性

因沉积年代和地质历史条件不同，土的工程性质不仅具有分层性，而且还具有地域的差异。如黄土为干旱、半干旱地区的沉积物，而软土则多为沿海地区海相或湖相沉积物；在黄土地区，表层是形成历史较短的新近堆积近期  $Q_4$  黄土，深层可能为沉积历史较长的更新世  $Q_3$  的黄土，它们的物理力学性质有较大的差别。

由此可知，土具有与一般连续固体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。土中孔隙体积的变化显示土的压缩性、胀缩性等变形特性；在孔隙中土粒的错位显示土的内摩擦和黏聚的抗剪强度特性；水在土孔隙中的流动显示土的渗透特性。因此，只有将土力学作为一门独立的学科，深入研究土的变形、强度及渗透特性，才能了解其复杂的物理、力学及工程性质，解决土木工程建设中的有关问题。

## 0.2 土力学的发展概况

自远古以来,人类广泛利用土作为建筑地基和建筑材料。如我国著名的万里长城、大运河、宫殿庙宇和世界闻名的古埃及金字塔、古罗马桥梁工程的修建,体现了古代劳动人民丰富的土木工程经验。但是由于社会生产力和技术条件的限制,直到18世纪,人们对土的认识基本上还处于感性认知阶段。

土力学的研究始于18世纪欧洲工业革命时期,由于工业发展的需要,大型建筑、公路、铁路的兴建,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,法国科学家库仑(C. A. Coulomb)根据试验创立了砂土抗剪强度公式,提出了挡土墙土压力的滑楔体理论。

1856年,法国工程师达西(H. Darcy)研究了砂土的渗透性,提出了层流运动的达西定律。

1857年,英国学者朗肯(W. J. M. Rankine)发表了挡土墙土压力塑性平衡理论,对土体强度理论的发展起到了很大的作用。

1885年,法国学者布辛奈斯克(J. Boussinesq)求得半无限弹性体在竖向力作用下的应力和变形的理论解答。

这些古典理论对土力学的发展起了很大的推动作用,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。1915年,由瑞典学者彼德森(K. E. Petterson)首先提出,后来由瑞典费伦纽斯(W. Fellenius)及美国的泰勒(D. W. Taylor)进一步发展了土坡稳定分析的整体圆弧滑动面法。

1920年,法国学者普朗特(L. Prandtl)发表了地基剪切破坏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(K. Terzaghi)出版了第一本《土力学》专著,他重视土的工程性质和土工试验,建立了饱和土的有效应力原理,将土的主要力学性质,如应力-变形-时间各因素相互联系起来,并应用于解决一系列的土工问题。从此,土力学成为一门独立的科学。

1936年在美国召开了第一届国际土力学与基础工程会议,此后世界各国相继举办了各种学术会议,促进了不同国家与地区之间土力学研究成果的交流。中国土木工程学会于1957年起设立了土力学及基础工程委员会,并于1978年成立了土力学及基础工程学会。

伴随着世界各国超高层建筑、超深基坑、超高土坝、高速铁路等的兴建,土力学得到了进一步发展。许多学者积极研究土的本构模型(即土的应力-变形-强度-时间模型)、土的弹塑性与黏弹性理论和土的动力特性。20世纪60年代以来,电子计算机的问世可将更接近于土本质的力学模型进行复杂的快速计算;同时,现代科学技术的发展,也提高了土工试验的测试精度,土力学进入了一个新的发展时期。1993年D.G.弗雷德隆德(Fredlund)和H.拉哈尔佐(Rahardjo)出版了《非饱和土力学》一书,日益引起国内外土力学界的关注。

在20世纪50年代,我国学者陈宗基教授对岩石的流变学和黏土结构进行了研究。黄文熙院士对土的液化进行探讨,提出考虑土侧向变形的地基沉降计算方法,他在1983年编写了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的各种土的

应力-应变本构模型的理论和研究成果。沈珠江院士在土体本构模型、土体静动力数值分析、非饱和土理论研究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，较全面地总结了近70年来国内外学者的研究成果。

21世纪，土力学理论与实践在非饱和土力学、环境土力学、土的破坏理论等方面将取得长足的发展。

### 0.3 土力学研究的内容和研究方法

土力学的主要研究内容包括：土的颗粒组成、黏土的物理化学性质和土的分类；土的渗透性和渗流分析(渗透特性)；在上部结构荷载及土的自重作用下土体中应力的计算；土的压缩性和地基变形(变形特性)；土的力学性质及强度理论(强度特性)；土的工程应用，包括挡土墙土压力理论、土坡稳定分析和地基承载力理论等。

土力学属于工程力学范畴，注重对土体的自然现象的观察和描述是土力学的重要特点。由于土具有碎散性、三相体性和自然变异性，要很确切地描述土体的受力条件、施工过程以及环境的影响等，还存在许多的困难。因此，不能单凭数学和力学的方法进行研究。在研究土工问题时，既要运用一般连续力学的基本原理和方法，将土的性质、加载条件和边界条件理想化，对土工问题的解决办法作一定程度的简化，又要借助现场勘察、土工测试技术、试验等手段获取计算参数进行计算。在工程施工中，通过不断采集监测数据进行分析，以避免理论计算出现的误差或工程地质条件变化对工程造成危害。

由于土的力学性质的复杂性，对于土的本构关系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对土的本构模型与计算方法的验证是土力学的两大主要研究课题。

### 0.4 土力学课程的特点及学习方法

土力学是土木工程专业的专业基础课。土力学以连续介质力学如材料力学、弹性力学等为基础，又与工程地质、水力学等学科密切相关。建筑物、桥梁和水坝等工程的基础设计与施工、道路路基设计、挡土结构的土压力计算、地基承载力计算、边坡的稳定性分析、软土地基处理等都需要应用土力学理论。

土力学还是一门发展中的学科。由于土体的复杂性，对于许多的复杂工程问题，需要做近似处理，因而应用土力学解决实际问题时常带有许多的条件约束。另外，有些章节之间的相对独立性较强，逻辑系统性和依赖关系不太紧密。因此，学习土力学一般应注意以下几点。

(1) 牢固而准确地掌握土的三相性、碎散性等基本特点。土的三相性是理解和掌握土的其他物理特性的基础。

(2) 掌握土力学的基本计算方法，注意土力学引用其他学科理论的基本假定和适用范围。

围,分析土力学在利用这些理论解决土的力学问题时又增加了什么假定,以及这些假定与实际问题相符的程度如何。

(3) 注重理论联系实践,注意综合利用土性知识和土力学理论解决岩土工程实际问题。土力学问题一般是根据土的基本力学性质,应用数学及力学的计算得出最后结果。学习中一方面应避免陷于单纯的理论推导,而忽略了推导中引用的条件和假设,另一方面还要分析解题中给定的条件在实际中怎样具体体现,改变这些条件可能导致哪些工程后果。

(4) 掌握土工试验的基本方法和技能。岩土工程问题计算中,岩土计算参数的选取对计算的精度有重要影响。因此,掌握土的室内和现场试验测试方法,准确确定土的物理力学参数,对土力学计算有重要意义。

(5) 在土力学的学习中,要善于转变对问题求解的思维方式。由于土的复杂性和易变性,对许多工程问题需要做简化假定,因而必然带来一定的误差;对同一问题的求解,往往会因为假定不同而求解的方法不同,结果也不相同。习惯于通过高等数学求唯一解的思维方式往往不适于解决工程力学问题。要逐渐接受和掌握多种方法求解一个问题,对多种解答做出综合评判的思维方式。

土力学学习要点



# 第1章 土的物理性质及工程分类

## 学习要点

熟悉土的物质组成、颗粒特征以及土的结构和构造；掌握土的颗粒级配含义及颗粒级配累积曲线的绘图和用处，重点掌握土的三相比比例指标及其换算关系、无黏性土的相对密度、黏性土的塑性指数及液性指数的物理意义；熟悉土的分类方法；掌握土的压实原理、击实试验以及压实特性在分层压实处理地基中的应用意义；了解土的湿陷性、冻胀性和黏性土的胀缩性。

## 1.1 土的生成

土(soil)是岩石在地质作用下经风化、破碎、剥蚀、搬运、沉积等过程的产物。土经过压密固结、胶结硬化也可再生成岩石。岩石与土构成地壳。土作为建筑物及构筑物的地基，是土力学的主要研究对象。

岩石的风化一般可分为物理风化、化学风化和生物风化。物理风化就是指岩石经受风、霜、雨、雪的侵蚀，或受波浪的冲击、地震等引起各种力的作用，温度的变化、冻胀等因素使整体岩石产生裂隙、崩解碎裂成岩块、岩屑的过程。例如，岩体冷却时引起的温度应力或地表附近日常的气温变化都可导致岩体开裂，雨水渗入这些裂缝后冻胀将促使裂缝张开，最后岩体崩解成岩块。通过同样的过程，这些岩块又可进一步碎裂成岩屑。在干旱地区，大风刮起的砂、砾相互摩擦并撞击岩体，引起岩体剥落和岩块碎裂。这种风化作用只改变颗粒的大小与形状，不改变岩石的矿物成分。化学风化是指岩体与水溶液和气体等发生溶解作用、水化作用、水解作用、碳酸化作用和氧化作用，形成新的矿物。化学风化不仅改变岩石的物理状态，同时也改变其化学成分。例如，正长石 $[K(AlSi_3O_8)]$ 经水解作用后，开始形成的 $K^+$ 与水中 $OH^-$ 离子结合，形成 $KOH$ 随水流失；析出一部分 $SiO_2$ 可呈胶体溶液随水流失，或形成蛋白石 $[SiO_2 \cdot nH_2O]$ 残留于原地；其余部分可形成难溶于水的高岭石 $[Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8]$ 而残留于原地。生物风化是指岩石在动、植物及微生物影响下所受到的破坏作用。

目前土木工程主要研究地球表面覆盖的第四纪沉积物，它是由原岩风化产物经各种地质作用而成的沉积物，距今有 100 万年的历史。由于沉积的历史不长，第四纪沉积物尚未

胶结岩化，因此第四纪形成的各种沉积物通常是松散软弱的多孔体，与岩石的性质有很大的差别。不同成因的第四纪沉积物也具有不同的工程特性。根据成因类型，第四纪沉积物可分为残积物、坡积物、洪积物、冲积物和风积物等。

(1) 残积物也称为残积土，是残留在原地未被搬运的那一部分原岩风化剥蚀后的产物，它的分布受地形控制。由于风化剥蚀产物是未经搬运的，颗粒磨圆度或分选性较差，没有层理构造。

(2) 坡积物也称为坡积土，是雨雪流水的地质作用将高处原岩风化剥蚀后的产物缓慢地洗刷剥蚀，顺着斜坡逐渐向下移动，沉积在较平缓的山坡上而形成的沉积物。一般坡积土土质不均，且其厚度变化很大，尤其是新近堆积的坡积土，土质疏松，压缩性较高。

(3) 洪积物也称为洪积土，是由于暴雨或大量融雪集聚而成的山洪急流，它冲刷地表并夹带大量的碎屑物质堆积于山谷冲口或山前平缓地带而形成洪积土。靠近沟口的洪积土颗粒较粗，地下水位埋藏较深，土的承载能力一般较高，是良好的天然地基；离山较远的地段是洪积层外围的细碎屑沉积段，其成分均匀，厚度较大，通常也是良好的地基。

(4) 冲积物也称为冲积土，是河流流水的地质作用将两岸基岩及其上部覆盖的坡积物、洪积物剥蚀后搬运、沉积在河流坡降平缓地带形成的沉积物。冲积土分布范围很广，其主要类型有山区河谷冲积土、山前平原冲积土、平原河谷冲积土、三角洲冲积土等，其特点是具有明显的层理构造。碎屑物质常呈圆形或亚圆形颗粒，其搬运的距离越长，则沉积的物质越细。

(5) 风积物也称为风积土，是由风力带动土粒经过一段搬运距离后沉积下来的堆积物，主要有砂土和黄土，分布在西北、华北各省。风积土没有明显的层理，颗粒以带角的细砂粒和粉粒为主，同一地区颗粒较均匀。干旱地带粉质土粒细小，土粒之间的联结力很弱。典型的风积土，如黄土(或黄土类土)具有肉眼可见的竖直细根孔，颗粒组成以带角的粉粒为主，常占干土总质量的60%~70%，并含有少量的黏土和盐类胶结物。由于黄土天然孔隙比一般在1.00左右，具有一些大孔隙，因而密度很低。黄土分布在干旱地区，含水率很低，一般为10%左右，干燥时胶结强度较大，可是一经遇水，土体结构即遭破坏，胶结强度迅速降低，黄土地基会在自重或建筑物荷载作用下急剧下沉，黄土的这种性质称为湿陷性。在黄土地区修建建筑物时一定要充分注意到黄土的这一性质。

除上述五种成因类型的沉积物外，还有湖泊沉积物、海洋沉积物、冰川沉积物等。

## 1.2 土的三相组成

土是由固体土颗粒、水和气体组成的三相分散系。固体颗粒是三相分散系中的主体，构成土的骨架，颗粒大小及其搭配是影响土性质的基本因素。土粒的矿物成分与土粒大小有密切的关系，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。土中水体是溶解各种离子的溶液，其含量多少也明显影响土的性质，如含水率高的土往往比较软，特别是由细小颗粒组成的黏性土，含水多少直接影响土的强度。土中气体可以与大气相连，也可以

以气泡形式存在，对土性影响相对较小。土的性质一方面取决于每一相的特性，另一方面取决于土的三相比例关系。由于气体易被压缩，水能从土体流进或流出，土的三相相对比例会随时间和荷载条件的变化而变化，土的一系列性质也随之改变。土在形成过程中所经历的每一个环节以及在形成后沉积时间的长短、外界环境的变化都对土的性质有显著的影响。

土的三相组成物质、相对含量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，所以土的三相组成是土的最基本的工程特性。

## 1.2.1 土中固体颗粒

### 1. 粒组的划分

自然界中的土都是由大大小小不同粒径的土粒组成的。土粒的大小称为粒度，通常以粒径表示。介于一定粒度范围内的土粒称为粒组，划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。各个粒组随着分界尺寸的不同，土的主要性质也相应呈现出一定质的变化。例如，当粒径从大到小变化时：可塑性、黏性将从无到有；透水性从大变小；而毛细水将从无到有。

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《土的分类标准》(GB/T 50145)土粒粒组的划分方法。

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)颗粒		$d > 200$	透水性很大，无黏性，无毛细水
	卵石(碎石)颗粒		$60 < d \leq 200$	
粗粒	圆砾 (角砾) 颗粒	粗	$20 < d \leq 60$	透水性大，无黏性，毛细水上升高度不超过粒径大小
		中	$5 < d \leq 20$	
		细	$2 < d \leq 5$	
	砂粒	粗	$0.5 < d \leq 2$	易透水，无黏性，遇水不膨胀，干燥时松散，毛细水上升高度不大
		中	$0.25 < d \leq 0.5$	
		细	$0.075 < d \leq 0.25$	
细粒	粉粒		$0.005 < d \leq 0.075$	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而快，易冻胀
	黏粒		$\leq 0.005$	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. 粉粒也称粉土粒，粉粒的粒径上限 0.075 相当于 200 号筛的孔径。

3. 黏粒也称黏土粒，黏粒的粒径上限也有采用 0.002mm 为标准的。



## 2. 土的颗粒级配

工程土通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(grain grading)或称土的粒度成分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。为了解各粒组的相对含量，需要进行颗粒分析，颗粒分析的方法有筛分法和沉降分析法。

《土工试验方法标准》(GB/T 50123)规定：筛分法适用于粒径为 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，如图 1-1 所示。标准筛的孔径依次为 60mm、40mm、20mm、10mm、5mm、2mm、1mm、0.5mm、0.25mm、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。

对于粒径小于 0.075mm 的土可用沉降分析法。沉降分析法有密度计法、移液管法等。沉降分析法的原理是土粒在水中的沉降原理，如图 1-2 所示，将定量的土样与水混合倾注于量筒中，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，在深度  $L_i$  处只含有粒径  $\leq d_i$  的土粒，悬液浓度降低了。如在深度  $L_i$  处考虑一小区段  $mn$ ，则  $mn$  段悬液的浓度( $t_i$ 时)与开始( $t=0$ )浓度之比，即可求得  $\leq d_i$  的累计百分含量。关于  $d_i$  的计算原理，土粒下沉时的速度与土粒形状、粒径、质量密度以及水的黏滞度有关。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，981cm/s<sup>2</sup>；

$\rho_s$ ——土粒的密度(g/cm<sup>3</sup>)；

$d$ ——直径(cm)；

$\rho_w$ ——水的密度(g/cm<sup>3</sup>)；

$\eta$ ——水的黏滞度(10<sup>-3</sup>Pa·s)。

进一步考虑，将速度  $v$  和土粒密度  $\rho_s$  表示为  $v = \frac{\text{距离}}{\text{时间}} = \frac{L}{t}$  和  $\rho_s = G_s \rho_{w1} \approx G_s \rho_w$ ，代入

式(1-1)，可变换为



图 1-1 筛分法用标准筛

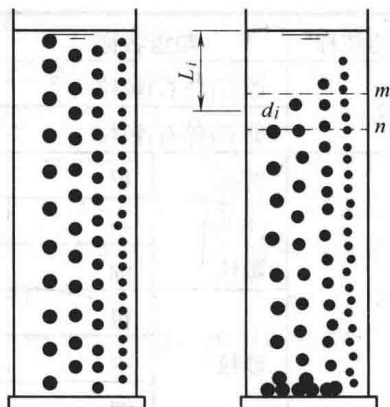


图 1-2 土粒在悬液中的沉降



$$d = \sqrt{\frac{18\eta}{(G_s - 1)\rho_w g}} \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (1-2)$$

水的 $\eta$ 值由温度确定,斯笃克斯假定: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。

颗粒分析的结果常用两种方式表达:列表法、级配曲线法。

(1) 列表法:列出表格,直接表达各粒组的百分含量。

(2) 级配曲线法:根据筛分试验结果,采用级配曲线法表示土粒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。半对数坐标的颗粒级配曲线如图1-3所示,横坐标代表粒径,以对数坐标表示;纵坐标表示小于(或大于)某粒径的土重累计百分含量。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,级配良好。

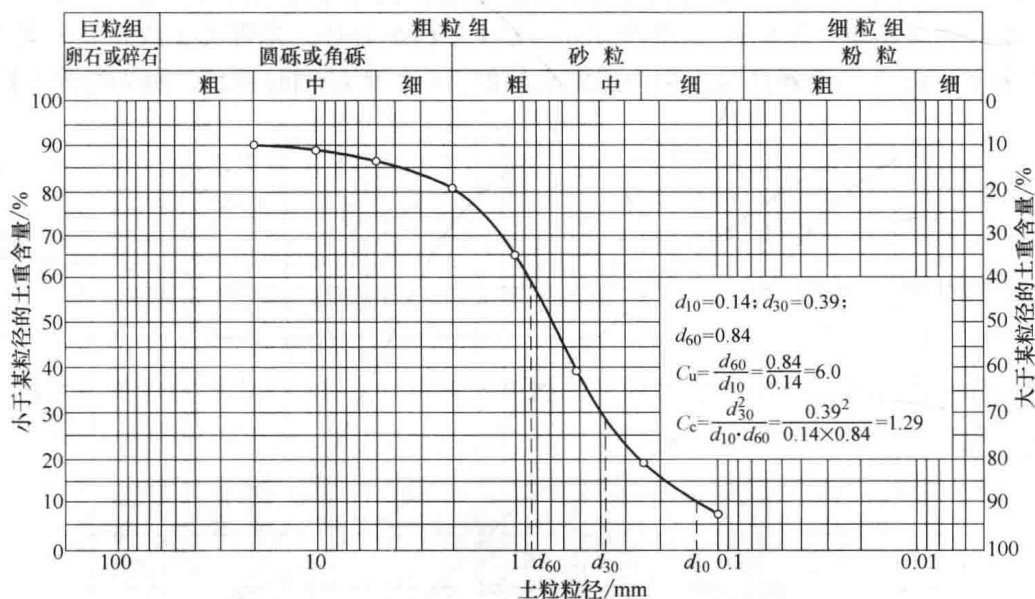


图 1-3 颗粒级配累计曲线

常用两个级配指标描述土的级配特征:不均匀系数 $C_u$ 和曲率系数 $C_c$ 。

不均匀系数(coefficient of uniformity)用来反映土颗粒粒径分布均匀性,表达式如下:

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

曲率系数(coefficient of curvature)用来反映土颗粒粒径分布曲线形态,表达式如下:

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

式中: $d_{10}$ ——有效粒径,在级配曲线上小于该粒径的土粒质量累计百分数为10%;