

高等学校新体系土木工程系列教材

土力学

廖红建 柳厚祥 主 编
肖正华 夏 雄 副主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

014C09620

TU43-43
49

高等学校新体系土木工程系列教材

土力学

Tulixue

廖红建 柳厚祥 主 编

肖正华 夏 雄 副主编



责任编辑：王 强 封面设计：李 强 印刷：北京航空航天大学印刷厂 纸张：787mm×1092mm 1/16 印张：17.5 字数：430千字 定价：35.00元

出版发行：清华大学出版社 地址：北京市西城区德胜大街甲7号 邮编：100030 印刷：北京航空航天大学印刷厂 纸张：787mm×1092mm 1/16 印张：17.5 字数：430千字 定价：35.00元

高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING



北航

C1696224

TU 43-43
49

内容提要

本书是高等学校新体系土木工程系列教材之一,根据高等学校土木工程学科专业指导委员会2011年编制的《高等学校土木工程本科指导性专业规范》,以强化工程实践能力、工程设计能力和工程创新能力为核心,以加强复合型人才的培养为目标编写而成。本书内容丰富,既重视阐述土力学的基本理论和知识,又强化了其在工程实际中的应用。

本书共分8章,内容包括土的物理性质及分类、地下水与土的渗透性、地基土中应力分布与计算、土的压缩性与地基沉降计算、土的抗剪强度理论、土压力计算与挡土墙设计、土坡稳定分析以及地基承载力。每章均设例题介绍,章后附思考题和习题。附录中给出了习题参考答案和土力学专业名词中英文对照表,便于使用者查阅和学习。

本书可作为高等学校土木工程专业教材,也可作为相关专业(水利水电工程、采矿工程、交通运输工程等)的土力学课程教材和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

土力学 / 廖红建, 柳厚祥主编. -- 北京: 高等教育出版社, 2013.11

新体系土木工程专业系列教材
ISBN 978-7-04-038614-1

I. ①土… II. ①廖… ②柳… 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(2013)第 242691 号

策划编辑 水 渊 责任编辑 单 蕾 封面设计 李卫青 版式设计 王艳红
插图绘制 尹 莉 责任校对 刘 莉 责任印制 田 甜

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京宏伟双华印刷有限公司
开 本 787 mm × 1092 mm 1/16
印 张 17.5
字 数 430 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2013 年 11 月第 1 版
印 次 2013 年 11 月第 1 次印刷
定 价 27.60 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 38614-00

序

随着高等学校土木工程学科专业指导委员会 2011 年编制的《高等学校土木工程本科指导性专业规范》的实施,同时,为及时将各高校精品课程建设与教学改革成果吸收固化到教材中去,向高校土木工程专业人才培养提供优质教学资源,高等教育出版社于 2012 年 8 月在桂林组织召开了“新体系土木工程系列教材组稿会”,邀请到西安建筑科技大学、西安交通大学、兰州理工大学、沈阳建筑大学、长沙理工大学、石家庄铁道大学等近 20 所高校的专家和教师参加了会议。

会上交流研讨了《高等学校土木工程本科指导性专业规范》的实施经验和新体系土木工程专业系列教材的编写原则与特色:以行业企业需求为导向,以工程实际为背景,以工程技术为主线,着力提升学生的工程素养,培养学生的工程实践能力、工程设计能力和工程创新能力。对系列教材的出版达成一致意见,希望通过各高校与我社的共同努力,出版一套符合新的专业规范,新体系的偏向“大土木”的系列化教材,更好地满足高校土木工程专业课程教学需求,对土木工程专业教材建设、资源建设起到积极的推动作用。

本系列教材的编写经过了编委会的审阅,以求教材质量更臻完善。如有疏漏之处,恳请读者批评指正!

高等教育出版社
建筑与力学分社
2013 年 9 月

前言

本书根据《高等学校土木工程本科指导性专业规范》和“桂林会议”精神，重构了土力学课程体系和教学内容，夯实基础，拓宽口径，加强了跨专业、跨学科的复合型人才的培养要求和目标，由多年从事土力学教学工作的教师编写。在编写过程中，充分吸收国内外优秀教材的特点和近年来本学科的新进展，采用了国家及有关行业的最新技术规范与规程。

本书由西安交通大学廖红建教授、长沙理工大学柳厚祥教授担任主编，新疆大学肖正华副教授、常州大学夏雄副教授担任副主编，西安建筑科技大学刘小军讲师、西安交通大学李杭州讲师参加编写。全书内容共分8章，廖红建教授编写第2章、第7章、附录1、附录2；柳厚祥教授编写绪论、第5章、第6章；夏雄副教授编写第3章；肖正华副教授编写第4章；刘小军讲师编写第1章；李杭州讲师编写第8章；全书由廖红建教授整理统稿。西安建筑科技大学王铁行教授审阅全稿并提出了许多宝贵意见和建议，西安交通大学岩土工程研究生郝东瑞、田呈林协助做了不少工作，在这里表示衷心感谢。

限于编者的水平，书中难免有不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编者

2013年6月

清华大学出版社

北京 100084

010-62770175

主要符号表

A	面积
a	压缩系数
C_c	土的压缩指数
C_e	土的回弹指数
C_v	竖向渗透固结系数
C_v	孔隙的体积压缩系数
c	粘聚力
D_r	相对密实度
d	基础埋深
d_s	土粒相对密度
d_{10}	有效粒径
d_{60}	限制粒径
d_c, d_q, d_γ	基础埋深修正系数
E	弹性模量
E_s	侧限压缩模量
E_0	变形模量
e	孔隙比
f_{ak}	地基承载力特征值
f_a	修正后的地基承载力特征值
G_d	动水压力
g	重力加速度
H	坡高
H_{cr}	土坡临界高度
h	水位差
I_p	塑性指数
I_L	液性指数
i	水头梯度
i_{cr}	临界水头梯度
i_c, i_q, i_γ	荷载倾斜修正系数
J	单位土体内的渗流力
k	渗透系数
K_a	主动土压力系数

K_0	静止土压力系数
K_p	被动土压力系数
K_s	安全系数
m	质量
M_s	滑动力矩
M_R	抗滑力矩
N_s	稳定数
n	孔隙率
n_d	深度系数
N_γ, N_q, N_c	承载力系数
OCR	超固结比
p	基底压力
p_a	主动土压力
p_0	静止土压力
p_p	被动土压力
p_{cr}	临塑荷载
p_u	极限荷载
Q	流量
q_u	无侧限抗压强度
S_r	饱和度
S_t	灵敏度
s	地基最终沉降量
S_c, S_q, S_γ	基础形状修正系数
U	固结度
u	孔隙水压力
V	体积
v	渗透速度
w	含水量
w_s	缩限
w_p	塑限
w_L	液限
α_i	竖向附加应力系数
β	坡角
γ_{sat}	饱和重度
γ_G	基础及回填土的平均重度
δ	墙背与填土间的摩擦角
η_b, η_d	地基承载力修正系数
μ	土的泊松比

ρ	密度
σ'	有效应力
σ_c	自重应力
σ_z	附加应力
σ	法向应力
σ_1	大主应力
σ_2	中主应力
σ_3	小主应力
τ_f	抗剪强度
φ	内摩擦角
ψ_c	主动土压力增大系数
ψ_i	推力传递系数

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

应力-应变关系

有机质土

有效法向应力

有效粒径

有效内摩擦角

有效凝聚力

有效应力

有效应力路径

有效应力原理

有效重量

有效主应力

淤泥

淤泥质土

圆弧滑动面

原始压缩曲线

原位试验 组试验

原状土样

Z:

真三轴试验仪

02



北航

C1696224

目 录

主要符号表

0 绪论	1
0.1 土力学概述	1
0.2 土力学课程的内容	4
0.3 课程特点及学习要求	4
第1章 土的物理性质及分类	6
1.1 概述	6
1.2 土的三相组成	7
1.3 土的三相比例指标	12
1.4 无粘性土的密实度	18
1.5 粘性土的物理特征	18
1.6 地基土的分类	22
思考题	25
习题	26
第2章 地下水与土的渗透性	27
2.1 概述	27
2.2 地下水的存在及分类	28
2.3 土的渗透性与达西定律	30
2.4 土的渗透系数	33
2.5 动水压力与临界水头梯度	37
2.6 地下水及渗流的工程问题	39
2.7 计算实例	44
思考题	47
习题	47
第3章 地基土中应力分布与计算	49
3.1 土体应力状态	49
3.2 有效应力原理	50
3.3 基底压力的计算	52
3.4 地基中自重应力的分布与计算	57
3.5 地基中附加应力的分布与计算	60
3.6 平面问题中地基附加应力计算	71
3.7 计算实例与分析	75

思考题	78
习题	79
第4章 土的压缩性与地基沉降计算	81
4.1 概述	81
4.2 土的压缩性指标及测定	81
4.3 地基沉降量计算	92
4.4 计算实例与分析	102
4.5 应力历史对地基沉降的影响	109
4.6 饱和土的渗透固结与一维固结理论	115
思考题	125
习题	125
第5章 土的抗剪强度理论	127
5.1 概述	127
5.2 土的抗剪强度理论	128
5.3 土的抗剪强度指标测定	139
5.4 孔隙水压力系数	151
5.5 土的抗剪强度特征	154
5.6 工程实例与分析	161
5.7 应力路径	168
思考题	171
习题	171
第6章 土压力计算与挡土墙设计	172
6.1 土压力产生条件	172
6.2 静止土压力的分布与计算	178
6.3 朗肯土压力理论与计算实例	181
6.4 库仑土压力理论与计算实例	194
6.5 土压力理论的比较分析	203
6.6 挡土墙设计	206
思考题	211
习题	211
第7章 土坡稳定分析	213

7.1 概述	213	8.1 地基的变形特征	237
7.2 边坡与滑坡体基本特征	213	8.2 地基的临塑荷载和临界荷载	239
7.3 影响土坡稳定因素及工程措施	216	8.3 地基极限承载力	242
7.4 无粘性土边坡稳定分析	218	8.4 按规范确定地基承载力	250
7.5 粘性土边坡稳定分析	220	8.5 工程实例与分析	254
7.6 稳定数法与图解法	227	思考题	255
7.7 不平衡推力传递法	230	习题	255
7.8 计算实例与分析	232	参考文献	257
思考题	235	附录1 习题参考答案	259
习题	236	附录2 土力学专业名词中英文 对照表	261
第8章 地基承载力	237		

0 绪 论

0.1 土力学概述

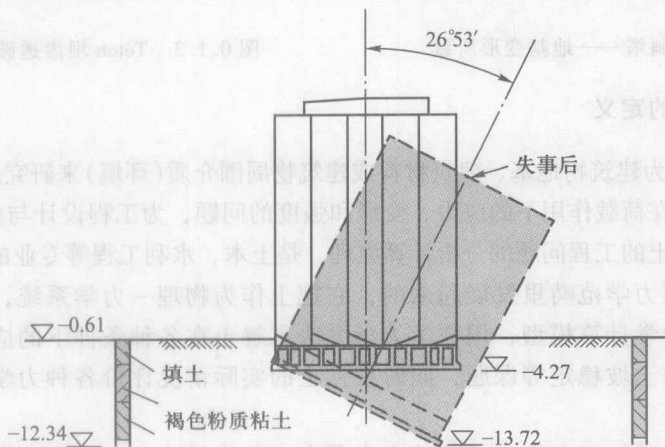
0.1.1 土体

地壳表层的岩石经过强烈风化(包括物理、化学及生物风化作用)后所产生的碎散矿物集合体,经过搬运(或挟持),伴随进一步破碎、沉积下来,在交错复杂的自然环境中所形成的具有一定结构和构造的松散颗粒的集合体,称为土。土的固相主要是由大小不同、形状各异的多种矿物颗粒构成的,对有些土来讲除矿物颗粒外还含有有机质。土包括颗粒间互不联结、完全松散的无粘性土,以及颗粒间虽有联结、但联结强度远小于颗粒本身强度的粘性土。土最主要的特点是它的碎散性和三相性,这是它在变形、强度等力学性质上与连续介质有本质不同的内在原因。

一般情况下,颗粒间有孔隙,孔隙中有水和气体,因此土是一种由矿物颗粒、水和空气组成的三相体系。由于土是孔隙松散介质体,具有可压缩性大、强度低等特性,因此不管哪一类情况,研究弄清土的这些力学性质对于保证建筑物的安全运行是非常重要的,直接关系到工程的经济合理和安全使用。土的基本特性有分散性(散体性)、多孔性、复杂性和易变性。

0.1.2 土体工程问题

由于人类活动大多在地球表层,故土与工程建设有着密切的关系,如图 0.1.1—0.1.3 所

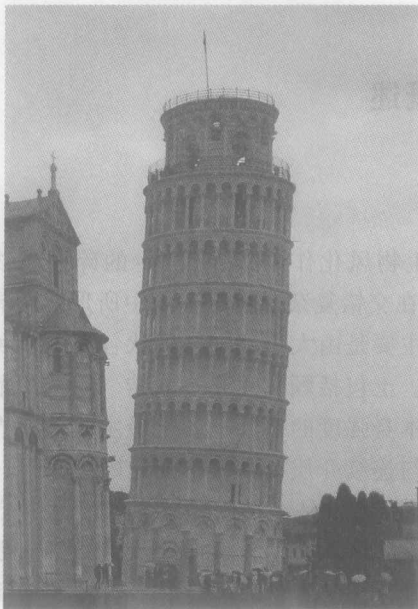


谷仓地基土事先未进行调查研究,据邻近结构物基槽开挖试验结果,计算地基承载力为 352 kPa,应用到此谷仓。1952 年经勘察试验与计算,谷仓地基实际承载力为 193.8 ~ 276.6 kPa,远小于谷仓破坏时发生的压力 329.4 kPa,因此,谷仓地基因超载发生强度破坏而滑动。

图 0.1.1 加拿大特朗斯康谷仓地基因超载发生强度破坏而滑动

示。土木工程中遇到的各种与土有关的问题，可分为三类：

- ① 作为建筑物的地基，如修建房屋、桥梁、道路、水库大坝等，可用土作为地基；
- ② 作为建筑材料，如用土来填筑路基、堤坝及其他土工构筑物；
- ③ 作为建筑物周围介质或环境，如在修建运河、渠道、隧道、挡土墙、地下建筑、地下管线等构筑物时，土被用来作建筑物周围介质或环境。



比萨斜塔之所以会倾斜，是由于它地基下面土层的特殊性造成的。比萨斜塔下有好几层不同性质的土层，由各种软质粉土的沉淀物和非常软的粘土相间形成，而在深约一米的地方则是地下水层。

图 0.1.2 比萨斜塔——地基变形所致



当库水由岩石裂缝流至齿槽时，高压水就会对齿槽土体产生劈裂而通向齿槽下游岩石裂隙，造成土体管涌或直接使槽底松土产生管涌。

图 0.1.3 Teton 坝渗透破坏——水力劈裂

0.1.3 土力学的定义

土力学是把土作为建筑物地基、建筑材料或建筑物周围介质(环境)来研究的一门学科，主要研究土的工程性质及土在荷载作用下的应力、变形和强度的问题，为工程设计与施工提供土的工程性质指标与评价方法及土的工程问题的分析计算原理，是土木、水利工程等专业的技术基础课。

土力学是从工程力学范畴里发展起来的，它把土作为物理 - 力学系统，根据土的应力 - 应变 - 强度关系提出力学计算模型，用数学力学方法求解土在各种条件下的应力分布、变形及土压力、地基承载力与土坡稳定等课题，同时根据土的实际情况评价各种力学计算方法的可靠性与适用条件。

土力学是利用力学知识和土工试验技术来研究土的渗透、变形和强度特性及与其有关的工程问题和土体受力后强度、体积变化规律的一门学科。换言之，它是以力学为基础，研究土的渗透、变形和强度特性，并据此进行土体的变形和稳定性计算的学科。

土力学的研究对象——土，具有特殊的力学特性。

0.1.4 土力学的发展简史及意义

土力学是一门既古老又年轻的学科。为了生活的需要和生产的发展,人类很早就懂得利用地壳表层的风化产物——土,作为建筑物的地基和建筑材料。古代许多伟大的建筑,如公元前开始修建的万里长城,随后的南北大运河、黄河大堤及宏伟的宫殿、寺院、宝塔都有坚固的地基和基础,并长时期经历地震、强风的考验保存至今。隋朝所建赵州石拱桥把桥台砌筑在密实的粗砂层上,基底压力约为 $500 \sim 600 \text{ kPa}$,至今沉降很小。公元 989 年建造开封开宝寺木塔时,预见到塔基会出现不均匀沉降,施工时特意做成斜塔,沉降稳定后塔身自动复正。世界上许多著名的建筑物如比萨斜塔、金字塔等的修建,也都说明了当时人们在工程实践中积累了丰富的有关土的知识 and 经验。但与其他学科一样,受到当时生产规模和科学水平的限制,人们对于土的特性的认识还停留在经验积累的感性认识阶段。

18 世纪产业革命后,城市、道路、水利建设的发展总结了不少成功的经验,也提出了大量与土力学有关的工程问题,特别是一些工程事故的教训,迫使人们在经验积累的基础上寻求理论解释。如 17 世纪末欧洲各国大修城堡推动了建筑学的发展,其中城墙背后土压力问题引起了人们的关注,许多工程技术人员发表了计算土压力的公式,这为法国科学家库仑(Coulomb)在 1773 年提出著名的土压力理论公式和土的抗剪强度公式打下了基础。1856 年法国工程师达西(Darcy)通过室内试验建立了有孔介质中水的渗透理论。1857 年美国学者朗肯(Rankine)借助土的极限平衡分析建立了朗肯土压力理论,该理论与库仑土压力理论共同形成了古典土压力理论。法国学者布辛奈斯克(Boussinesq)和弗拉曼(Flamant)分别在 1885 年和 1892 年提出了均匀的、各向同性的半无限体表面在竖向集中力和线荷载作用下的位移和应力分布理论。这些早期的著名理论奠定了土力学的基础。因此,该时期属于经验积累基础上的理论提高阶段。

20 世纪初期以来,随着生产建设深度和广度的不断增大,建筑物的规模更大,所遇到的工程地质条件更复杂,迫使人们对土的性质作全面、系统的理论和实践研究。特别是 20 世纪初出现的一些重大的工程事故,进一步激发了土力学研究的热潮。普朗特尔(Prandtl)在 1920 年根据塑性平衡原理,研究了坚硬物体压入较软的、均匀的、各向同性材料的过程,导出了著名的地基极限承载力公式;在此基础上,太沙基(Terzaghi)、梅耶霍夫(Meyerhof)、魏锡克(Vesic)和汉森(Hansen)等分别对普朗特尔理论进行了修正、补充和发展,提出了各种地基极限承载力公式;由彼德森(Peterson)在 1915 年提出,费伦纽斯(Fellenius)、泰勒(Taylor)等分别在 1936 年、1937 年发展了计算边坡稳定性的圆弧滑动法等。特别是太沙基建立了饱和土的有效应力原理和一维固结理论,比奥(Biot)建立了土骨架压缩和渗透耦合理论,为近代土力学的发展提供了理论依据。美国土力学家太沙基在 1925 年出版的《土力学》是最早系统地论述土力学体系的著作,也是土力学形成一门独立学科的标志。1932 年苏联学者崔托维奇出版了《普通土力学》教程,对土力学作了系统叙述。

20 世纪中叶,太沙基的《理论土力学》及太沙基和派克(Peck)合著的《工程实用土力学》是对当时土力学的全面总结,该书 1996 年由派克和梅斯里(Mesri)修订为第三版,进一步概括了 19 世纪和 20 世纪土力学研究和发展的主要成果。

土力学发展为一门独立学科以来,可分为两个发展阶段。第一阶段从 20 世纪 20 年代到

60 年代,称为古典土力学阶段。这一阶段的特点是在不同的课题中分别把土看作线弹性体或刚塑性体,又根据课题需要把土视为连续介质或分散体。第二阶段从 20 世纪 60 年代开始,称为现代土力学阶段。这一阶段最重要的特点是把土的应力、应变、强度、稳定等受力变化过程统一用一个本构关系加以研究,改变了古典土力学中把各受力阶段人为割裂开来的情况,从而更符合土的真实性。

在与生产实践的结合过程中,土力学又产生了不同的分支学科,如土动力学、高等土力学、环境土力学、冻土力学、海洋土力学、月球土力学等。

0.2 土力学课程的内容

为满足夯实基础、拓宽口径,以强化工程实践能力、工程设计能力与工程创新能力培养为核心,重构课程体系和教学内容,加强跨专业、跨学科的复合型人才培养的要求。在目前的专业目录中,原来的工业与民用建筑、桥梁工程、道路工程、地下建筑工程、岩土工程等专业均已合并为土木工程专业,这要求学生必须有更宽的知识面,毕业后能适应土木工程中各个行业技术工作的需要,因此本书在编写过程中相应地扩大了内容的覆盖面,主要向读者系统地介绍土力学的基本原理和分析计算方法。

土力学是研究与工程建筑有关的土的应力、应变、强度和稳定性等力学问题的一门学科,它是随着经济建设发展的应用力学之一。土力学包括的内容有一个基础(土的基本性质)、一个预备知识(土中应力计算)、三个核心内容(土的渗透特性、变形特性和强度特性)及三类工程问题(挡土墙的土压力、土坡稳定和地基承载力)。其基本内容包括:土的物理性质及分类、地下水与土的渗透性、地基土中应力分布与计算、土的压缩性与地基沉降计算、土的抗剪强度理论、土压力计算与挡土墙设计、土坡稳定分析和地基承载力共 8 章。在每一章中都有工程应用的内容及实例分析。

0.3 课程特点及学习要求

土力学是研究土的工程问题的学科,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。土是一种自然地质的历史产物,是一种特殊的变形体,它既服从连续介质力学的一般规律,又有其特殊的应力-应变关系和特殊的强度、变形规律,因此土力学形成了不同于一般固体力学的分析方法和计算方法,所以在学习本课程以前必须具备工程地质、水文地质、材料力学和弹性力学等预备知识。土力学的基本理论与分析计算方法又是学习土木工程专业课程及从事土木工程技术工作必需的基础知识,是土木工程专业中一门重要的技术基础课。

在道路工程、桥梁工程、岩土工程、隧道工程、水利工程中,会遇到大量与土有关的工程技术问题,学习本课程是为了更好地学习专业课,也是为了今后更好地解决有关土的工程技术问题。在学习本课程时,要求:

- ① 了解土的基本性质与工程特性,以及这些性质与土的组成和结构的关系。
- ② 通过与其他材料对比,注意土的基本特点,设立一个理论主线,掌握土力学的学科特点和分析方法,能真正地把该课程的知识用于解决实际问题。

③ 牢固掌握土力学的基本原理和理论，如土的抗剪强度理论、有效应力原理、渗透理论、固结理论、土压力理论等，需要理解它们的本质概念。

④ 掌握土力学主要的计算方法,如三相比例指标的换算、强度计算、变形计算、土压力计算、边坡稳定性计算和地基承载力计算等,了解它们在工程实践中的应用。

⑤ 通过现场观察与试验,注重理论联系实际,掌握土工试验方法和成果整理分析,了解原位测试技术的应用。

第 1 章 土的物理性质及分类

1.1 概 述

土是指覆盖在地表的没有胶结或弱胶结的松散颗粒堆积物，是岩石在风化作用下形成的。岩石的风化作用主要有物理风化和化学风化两种形式。物理风化是指岩石经受风、霜、雨、雪的侵蚀，或者受波浪冲击、地震等各种力的作用和温度的变化、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；而化学风化是指岩体(或岩块、岩屑)与氧气、二氧化碳等各种气体、水和水溶液等物质相接触，经氧化、碳化和水化作用，使这些岩石或岩屑逐渐产生化学变化，分解为极细颗粒的过程。

岩石风化成的颗粒在各种地质条件下沉积，形成土层。沉积过程中土颗粒之间相互排列和连接的形式称为土的结构。土的结构形式分为三种：

(1) 单粒结构

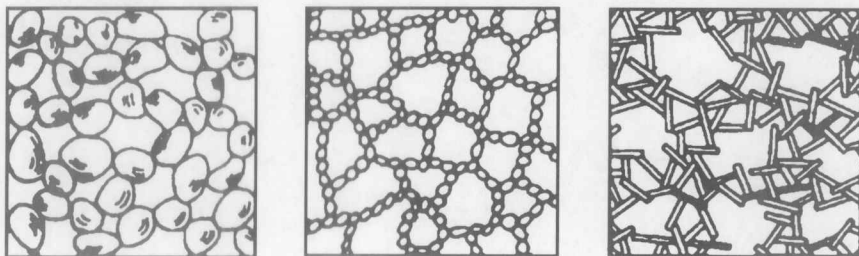
粗颗粒土(如卵石和砂土等)在沉积过程中，每一个颗粒在自重作用下单独下沉并达到稳定状态，颗粒之间几乎无联系力，只是在重力作用下的简单堆积，如图 1.1.1a 所示。

(2) 蜂窝结构

当较细土颗粒(粒径在 0.02 mm 以下)在水中单个下沉，碰到已沉积的土粒，因土粒之间的分子引力大于土粒自重，则下沉的土粒被吸引不再下沉，依次一粒粒被吸引，形成具有很大孔隙的蜂窝状结构，如图 1.1.1b 所示。

(3) 絮状结构

那些粒径极细的粘土颗粒(粒径小于 0.005 mm)在水中长期悬浮，这种土粒在水中运动，相互碰撞而吸引逐渐形成小链环状的土集粒，质量增大而下沉，当一个小链环碰到另一小链环时相互吸引，不断扩大形成大链环状，称为絮状结构。因小链环中已有孔隙，大链环中又有更大孔隙，形象地称为二级蜂窝结构，此种絮状结构在海相沉积粘土中常见，如图 1.1.1c 所示。



(a) 单粒结构

(b) 蜂窝结构

(c) 絮状结构

图 1.1.1 土的结构