

21

世纪高等职业技术教育规划教材

土木工程类

李连生 王东亮 主编
王晓谋 主审

土力学

Tulixue



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

21 世纪高等职业技术教育规划教材——土木工程类

土 力 学

李连生 王东亮 主编
王晓谋 主审

道
中
反
七
出
1

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

土力学 / 李连生, 王东亮主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2006.7

21 世纪高等职业技术教育规划教材. 土木工程类
ISBN 7-81104-282-7

I. 土... II. ①李...②王 III. 土力学—高等学校: 技术学校—教材 IV. TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 050205 号

21 世纪高等职业技术教育规划教材——土木工程类

土 力 学

李连生 王东亮 主编

*

责任编辑 张 波

责任校对 李 梅

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbsxx@swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 11.25

字数: 280 千字 印数: 1—3 000 册

2006 年 7 月第 1 版 2006 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 7-81104-282-7

定价: 16.50 元

图书如有印装问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

本书是根据高职高专铁道工程技术专业、道路桥梁工程技术专业教学的基本要求并结合目前教学改革发展的需要编写的。

本书共分七章，主要内容包括土的物理性质、土的渗透性、土中应力、土的压缩性与地基变形计算、土的抗剪强度与地基承载力、土压力及土工试验。结合高职高专教育的特点，本书的基础知识较为全面，系统性较强，避免了有关公式的繁琐推导，注重实用性和针对性。编写中采用的主要规范有：《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB10002.5—99)、《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ024—85)、《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2002)、《铁路工程土工试验规程》(TB10102—2004 J338—2004)、《公路土工试验规程》(JTJ051—93)。

本书由陕西铁路工程职业技术学院李连生和郑州交通职业学院王东亮主编，长安大学王晓谋主审。参加编写的有：陕西铁路工程职业技术学院李连生（绪论、第一章、第五章、第六章、附录）；郑州交通职业学院王东亮（第二章、第三章）；陕西铁路工程职业技术学院郭亚宇（第四章）。全书由李连生统稿。

教师和学生可以根据专业、学时等具体情况对本书的内容进行取舍。

限于编者的理论水平和实践经验，本书缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2006年4月

目 录

绪 论	1
第一章 土的物理性质	4
第一节 土的成因和工程特性	4
第二节 土的组成和结构构造	7
第三节 土的物理性质指标	13
第四节 土的物理状态指标	20
第五节 土的工程分类	26
思考题	32
习 题	33
第二章 土的渗透性	34
第一节 土的渗透定律	34
第二节 渗透力与临界水力梯度	38
思考题	41
习 题	41
第三章 土中应力	43
第一节 自重应力	43
第二节 基底压力分布与计算	45
第三节 附加应力	48
思考题	60
习 题	61
第四章 土的压缩性与地基变形计算	63
第一节 土的压缩性	63
第二节 基础的最终沉降量	68
第三节 基础沉降与时间的关系	75
思考题	79
习 题	80
第五章 土的抗剪强度与地基承载力	82
第一节 土的抗剪强度	82
第二节 抗剪强度指标的测定	87
第三节 地基的变形阶段与破坏形态	92

第四节	按理论公式确定地基承载力	94
第五节	按规范确定地基承载力	99
第六节	按原位测试确定地基承载力	106
思考题		113
习 题		114
第六章	土 压 力	116
第一节	土压力的概念	116
第二节	朗肯土压力理论	119
第三节	库伦土压力理论	124
第四节	特殊情况下土压力的计算	128
第五节	挡土墙设计	131
思考题		140
习 题		140
附录	土工试验	141
参考文献		173

绪 论

一、土力学的研究对象

土力学是以土为研究对象,依据力学的一般原理,研究土的特性及其受力后的应力、应变、强度或稳定和渗流规律的学科。

土是岩石在长期风化作用下产生的大小不同的松散颗粒,经过各种地质作用而形成的沉积物。土体具有不同于一般理想刚体和连续固体的特性——松散性、孔隙性和多相性。土颗粒之间的联系微弱,甚至没有联结,土体强度一般比土颗粒强度小得多,这就是土的松散性;土中的水和气体存在于颗粒之间的孔隙中,这是土的孔隙性;土一般是由土颗粒、水和空气所组成的三相系,这是土的多相性。

土在地球表面的分布很广,它与工程建筑的关系十分密切,自然界中的土被广泛用作各种工程建筑物的地基。一般工程建筑要么修建在地表,要么埋置于岩土之中,如桥梁、隧道、道路、工业及民用建筑,等等。此外,土自身作为建筑材料可用来修筑堤坝、路基以及其他土工建筑物。

任何建筑物都支承于地层上,受建筑物荷载影响的那一部分地层称为地基。建筑物的下部通常要埋入地下一定的深度,使之置于较好的地层上,建筑物向地基传递荷载的下部结构称为基础。基础一般埋在地面以下,起着承上启下传递荷载的作用。

土力学是一门实践性很强的学科,它是进行地基基础设计和计算的理论依据。地基和基础是建筑物的根基,又属于地下隐蔽工程,是否能正确应用土力学理论知识直接关系到建筑物的安危。实践证明:许多建筑物的地基基础事故,均涉及土力学的理论问题,而且一旦事故发生,补救是非常困难的。例如,意大利的比萨斜塔,从1173年动工兴建,当建造至24 m高时发现倾斜,限于当时技术水平,找不出原因而被迫停工,100年后续建至塔顶(高约55 m)。至今塔身北向沉降了1 m多,南向沉降了约3 m,倾斜5.8°。1932年曾于塔基灌注了1 000 t水泥,也未奏效,以后数十年内该塔每年下沉约11 mm,1990年被迫关闭。该塔已成为世界上最著名的基础工程难题。又例如苏州名胜虎丘塔,共7层,高47.5 m,底层直径13.7 m,呈八角形,全为砖砌,在建筑艺术风格上有独特的创意,被国务院公布为全国重点文物保护单位。1980年的调查表明,该塔向东北方向倾斜严重,塔顶偏离中心线2.31 m。经勘探发现,该塔位于倾斜基岩上,覆盖层一边深3.8 m,另一边为5.8 m。由于在1 000余年前建造该塔时,没有采用扩大基础,直接将塔身置于地基上,造成了不均匀沉降,引起塔身倾斜,危及安全。这两个例子均为基础不均匀沉降的实例。再有一地基滑动破坏的实例:建于1941年的加拿大特朗斯康谷仓由65个圆柱形筒仓组成,高31 m,底面长约59 m,宽约23 m。其下为钢筋混凝土片筏基础,厚0.61 m,埋深3.66 m。谷仓自重20万kN,当装谷27万kN后,发现谷仓明显失稳,24 h内西端下沉7.32 m,东端上抬1.52 m,整体倾斜约27°。事后进行勘察分析,发现基底之下为厚10余m的淤泥质软黏土层。地基的实际承载力为

194~277 kPa, 而谷仓的基底压力已超过 300 kPa, 从而造成地基的整体滑动破坏。基础底面以下一部分土体滑动, 向侧面挤出, 使东端地面隆起。为了处理这一事故, 在地基中做了 70 多个支承于深 16 m 基岩上的混凝土墩, 使用了 388 个 500 kN 的千斤顶和支承系统, 才把仓体逐渐纠正过来, 然而谷仓位置比原来降低了 4 m。

国内外类似上述地基事故的实例很多, 大量事故充分说明: 对土力学理论缺乏研究, 对地基基础处理不当, 就会造成巨大的经济损失。

为了保证建筑物的安全和正常使用, 经济合理地进行地基基础设计, 必须应用土力学的基本理论, 结合地基土和上部结构的具体条件, 合理地设计基础, 以满足地基的强度和变形要求。如果土体受力超过了它的承受能力, 土体就要被破坏, 建筑物将不能使用。土体的破坏, 也称稳定性丧失, 研究土体是否会破坏这一类问题称为稳定问题。土体的稳定性取决于它的强度, 稳定问题的本质是土的强度问题。土和其他材料一样, 受力后将发生变形。如果这种变形超过了一定的限度, 就会使建筑物损坏或不能正常使用, 这类问题在土力学中叫做变形问题。

二、土力学的发展史

土力学既是一门古老的工程技术, 又是一门年轻的应用科学。古人修建的宫殿、庙宇、堤坝、大运河、桥梁等为本学科的发展积累了丰富的经验, 奠定了古典土力学的基础。然而, 这些仅限于工程实践经验, 未能形成系统的理论。

18 世纪的欧洲兴起了工业革命。随着城市建设、水利、铁路的兴建, 遇到了许多与土有关的力学问题, 促使人们对土进行研究, 并对已积累的经验进行理论解释。1776 年, 法国的库仑 (C. A. Coulomb) 根据试验提出了著名的砂土抗剪强度公式和挡土墙土压力的滑动楔体理论; 1856 年, 法国的达西 (H. Darcy) 研究砂土的透水性, 建立了达西定律; 1857 年, 英国的朗肯 (W. J. M. Rankine) 又从另一途径建立了土压力理论, 并对后来土体强度理论的建立起了推动作用; 1885 年, 法国的布辛奈斯克 (J. Boussinesq) 提出了半无限弹性体在竖直集中力作用下的应力与变形的理论解答; 1922 年, 瑞典的费伦纽斯 (W. Fellenius) 为解决铁路塌方提出了土坡稳定分析方法。至今这些理论与方法仍在广泛使用着。在这一阶段中, 人们在经验积累的基础上, 从不同角度进行了有益的探索, 在理论上有了些突破, 但当时尚未形成独立的理论学科。

1925 年, 美国的太沙基 (Terzaghi) 出版了专著《土力学》一书, 首次系统地论述了土力学的若干重要课题, 提出了著名的有效应力原理和渗透固结理论。该书的出版标志着土力学这一学科的诞生。随后世界许多学者, 如泰勒 (D. W. Taylor)、斯开普敦 (A. W. Skempton)、贝伦 (L. Bjerrum)、毕肖甫 (A. W. Bishop) 等, 对土的抗剪强度、变形、渗透性、应力应变关系和破坏机理进行了大量的研究工作, 并逐渐将土力学的基本理论用于解决各种不同条件下的工程问题。1936 年成立了国际土力学和基础工程学会, 并举行了第一次国际学术会议, 至 2005 年已召开过 16 届国际会议。许多国家和地区也召开了专业会议, 交流和总结本学科的新成果, 这对本学科的发展起到了积极的推动作用。

20 世纪 60 年代, 由于电子计算机的应用、计算方法的改进, 现代化测试手段的引入, 土力学进入了一个全新的发展时期。在基本理论方面, 提出了各种应力—应变模型以及各种黏弹性理论模型等, 使土的本构关系逐渐符合实际, 并将土的变形和强度问题统一起来考虑;

在计算方法方面,广泛采用计算机,用数值计算方法,如有限元法、差分法等解决以往无法解决的复杂边界、初始条件以及不均匀土层问题;在试验技术和设备方面,采用动、静三轴仪,触探仪,旁压仪,离心模型机等,广泛使用计算机程序自动采集和加工试验数据。

从1958年开始至今,我国已先后召开了9届土力学与基础工程学术会议,并且建立了许多地基基础研究机构、施工队伍和土工实验室,培养了大量的地基基础专业人才。我国数十年来在土力学基本理论方面,如土的本构模型、非饱和土的强度理论研究等,在土力学先进仪器制造方面,如生产制造较复杂的静力三轴压力仪和动力三轴压力仪,各种原位测试仪等,在新材料和新工艺运用方面,如土工合成材料及粉煤灰在路基中的运用,在地基基础加固方面,如深层搅拌桩、钻孔桩桩端压浆加固等,都取得了丰硕成果,有的已达到国际先进水平。

在土力学学科的发展趋势中以下几个方向是值得注意的:

(1) 室内和原位测试技术和仪器设备的研究。大力引进和发展现代测试技术,使试验结果更符合现场的实际情况。

(2) 土的本构关系(土的应力、应变、强度和时间的关系)的研究。将应力与应变问题统一起来考虑,研究应力应变关系的非线性问题。

(3) 计算技术的研究。利用统计数学方法处理试验数据,探求统计规律。

(4) 模型试验和现场观测。其结果是验证理论计算和实际工程设计正确性的有力手段。

(5) 加强土力学的基础性研究,宏观和微观研究相结合。注意工程地质学与力学的结合,运用数学、力学、物理、化学等学科的最新理论成果来研究土的力学特性的本质。

三、本课程的基本内容和学习方法

土力学的基本研究内容包括:土的物理性质与工程分类,土的渗透性与渗流,地基中的应力计算,土的压缩性、有效应力原理、渗透固结理论和地基沉降计算,土的强度理论和地基承载力,土压力和挡土墙设计。其中有效应力原理、应力分布理论、渗透固结理论和强度理论是土力学的基本理论,而地基变形计算、地基承载力计算和土压力计算是与工程实践直接相关的应用课题。

本课程的基本要求如下:

(1) 掌握有关土的物理性质的基本知识,能进行土的工程分类;

(2) 掌握有效应力原理的本质及其在土力学中的应用;

(3) 掌握土体应力分布理论、渗透固结理论和强度理论的实质及其工程应用;

(4) 掌握土体变形与强度指标的测定方法及在工程实践中的应用;

(5) 掌握土工试验操作技术,为工程设计、施工打下良好的基础。

学习土力学必须具备良好的数学知识和相关的理论力学、材料力学、弹性力学、工程地质知识。应着重于理解概念的物理意义和应用条件,学会计算方法,一般只直接引用结论,不把注意力放在公式的推导和证明上。在学习过程中,还要特别注意土的工程特性,理论联系实际,重视现场勘测和室内试验的成果,对大多数土工问题来说,选择一个正确的试验指标比选择一种好的计算方法更重要。对于重要工程,无论在施工期或施工以后,都要加强实地观测,并借以验证理论计算的正确程度。应用土力学解决工程问题要重视理论、室内外测试和工程经验三者相结合。

第一章 土的物理性质

第一节 土的成因和工程特性

一、土的成因

土是岩石在长期风化作用下产生的大小不同的松散颗粒，经过各种地质作用而形成的沉积物。它是各种矿物颗粒的疏松集合体。

岩石和土形成了地球外表——地壳。在漫长的地质历史中，地壳的成分、形态和构造都在不断地发生变化，导致这种变化的原因是各种地质作用。按能量的来源不同，地质作用可分为内力地质作用和外力地质作用。前者是由于地球自转动能和放射性元素蜕变产生的热能引起地壳升降、海陆变迁、岩石断裂等使地壳内部构造、外表形态和物质成分发生变化，如断层、地震、火山；后者是由于太阳辐射能和地球重力位能引起，如昼夜的气温变化，风、霜、雨、雪、河流、山洪、冰川及生物等对岩石产生的剥蚀、搬运、沉积作用。

风化作用是由于温度变化、大气、水及生物活动等自然条件使岩石产生破坏的地质作用。它可分为物理风化、化学风化和生物风化 3 种类型。

物理风化是指在风、霜、雨、雪的作用下，由于温度、湿度的改变，岩石产生不均匀膨胀和收缩，发生了开裂、崩解等机械破坏而成为碎屑和颗粒。物理风化只是物质的大小与形状发生了改变，但仍然保持原来岩石（母岩）的矿物成分——原生矿物，如石英、长石和云母等。由物理风化生成的土为粗粒土，如碎石、砾石和砂土等。

化学风化是指原生矿物成分的碎屑和颗粒与氧气、二氧化碳、水等物质相接触时，逐渐发生化学变化，原来的矿物成分发生了改变，产生了一种新的成分——次生矿物，如高岭石、伊利石、蒙脱石等。由化学风化生成的土为细粒土，具有黏聚力，如黏土。

生物风化是指动、植物和人类活动对岩石产生的破坏作用，可分为物理生物风化和化学生物风化两种。如植物根部生长在岩缝中，使岩石产生机械破碎；开山、打隧道等人类活动对岩石产生机械破坏；动植物新陈代谢的分泌排泄物、死亡后遗体的腐烂产物以及微生物等会对岩石产生化学侵蚀，使岩石成分发生变化。

上述三种风化作用并不是孤立进行的，常常是同时存在、互相促进的，如物理风化使岩石逐渐破碎、增大孔隙率和表面积，为化学、生物风化创造条件，而生物、化学风化使岩石松软，体积膨胀，从而促进物理风化的进行。三种风化作用在不同的环境，会有不同的主次，风化作用对不同岩石成分和结构构造的破坏程度也会有很大差别。

岩石和土的性质与其生成的地质年代有关。一般生成年代越久，则上覆土层越厚，土被压得越紧密，受到的化学作用或胶结作用就越大，土粒间的联结越强，因而强度也就越大，压缩性就越小。与此相反，新近堆积的土质较松软，工程性质较差。

在地质年代里，离我们最近的是新生代第四纪（符号为 Q），距今也已有 100 万年的历史。现今常见的土绝大多数生成的地质年代为第四纪。因为沉积的历史不长，第四纪沉积物尚未胶结岩化，所以第四纪形成的各种沉积物通常是松散软弱的多孔体，它与岩石的性质有很大的差别。我们常见的“土”即为第四纪沉积物，见表 1.1。通常把 Q₄ 及其以前时期堆积的土层称为老堆积土；把 Q₄ 时期内文化期（有人类文化的时期）以前堆积的称为一般堆积土；把文化期以后堆积的称为新近堆积土。

表 1.1 第四纪地质年代

纪（系）	世（统）		距今年代/万年
第四纪（系）Q	全新世（统）Q ₄ 或 Q ₄		2.5
	更新世（统）Q _p	晚更新世（上更新统）Q ₃	15
		中更新世（中更新统）Q ₂	50
		早更新世（下更新统）Q ₁	100

土根据地质成因的条件不同，其主要堆积类型见表 1.2。

表 1.2 土的堆积类型

类 型	堆积方式及条件	堆积物地质特征和工程性质
残积土	岩石经风化作用而残留在原地的碎屑堆积物，如图 1.1 (a) 所示	从地表以下到基岩，风化作用逐渐减弱到消失，一般无明显层理，碎块是棱角状，土质不均，具有大孔性，厚度在山顶部较薄，低洼处较厚，作为建筑物地基时，应注意不均匀沉降和土坡稳定问题
坡积土	雨水或雪水将山坡高处的岩石风化物缓慢冲刷、剥蚀，顺斜坡搬运至较平缓的山坡或坡脚处，如图 1.1 (b) 所示	土颗粒从坡上往下呈现由粗而细分布，厚度变化较大，在斜坡较陡处厚度较薄，坡脚地段较厚，矿物成分与基岩无直接关系，孔隙大，压缩性高，作为建筑物地基时，应注意不均匀沉降和地基的稳定性
洪积土	由暂时性洪流将山区或高地的大量地表风化碎屑物挟带至沟口或山前平原地带堆积而成，如图 1.1 (c) 所示	颗粒具有一定的分选性，靠近山区或高地，土颗粒较粗，远处则细，因山洪是周期性发生的，每次大小不同，土层呈不规则的层理结构，常存在透镜体及黏性土夹层，作为建筑物地基时，应注意不均匀沉降
冲积土	由江河流搬运岩石风化物在平原河谷或山区河谷沉积而成，如图 1.1 (d) 所示	颗粒在河流上游较粗，向下游逐渐变细，分选性和磨圆度均好，层理清楚，厚度较稳定
淤积土	在静水或缓慢的水流中沉积而成	以粉粒、黏粒为主，且含有机质，一般土质松软，具有层理结构，压缩性高，强度低
冰积土	由冰川或冰川融化后的冰下水搬运堆积而成	由巨大块石、碎石、砂、黏性土混合组成，一般分选性极差，无层理结构，当为冰水沉积时，常有斜层理，颗粒一般有棱角，巨大块石上常有冰川擦痕
风积土	因风力作用，碎屑物被吹扬、搬运、堆积而成	主要由粉粒或砂粒组成，一般颗粒小而均匀，孔隙大，结构松散

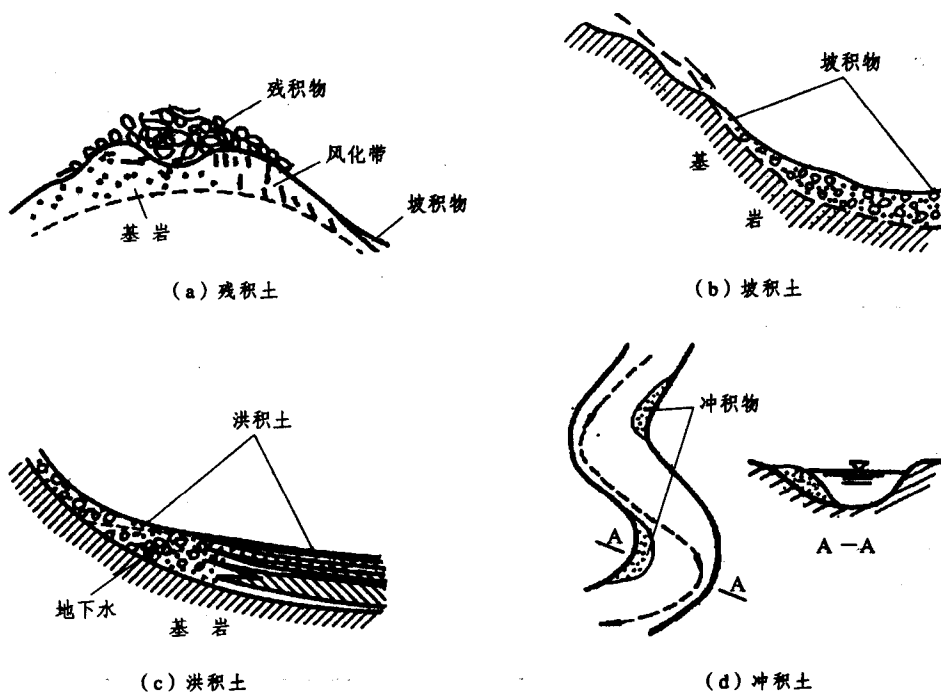


图 1.1 土的堆积类型示意图

二、土的工程特性

与其他连续介质的建筑材料相比，土明显具有以下 3 个工程特性：

1. 压缩性高

在力学中以弹性模量来描述材料的压缩变形性质，土因为不是弹性体而以压缩模量来衡量。由试验数据可知：HPB235 级钢筋的 $E=2.1 \times 10^5$ MPa，C20 混凝土的 $E=2.6 \times 10^4$ MPa，饱和细砂土的 $E=8 \sim 16$ MPa。这说明土的压缩性远远高于钢筋和混凝土。因为土是一种松散的集合体，受压后孔隙显著减小，而钢筋属于晶体，混凝土属于胶凝体，它们不存在孔隙被压缩的条件。

2. 承载力低

土的强度就是指抗剪强度，而非抗压强度或抗拉强度。土是一种松散的颗粒集合体，颗粒之间的联结强度远远小于颗粒本身的强度，颗粒之间在受到外力作用后具有较大的相对移动性，这说明土的抗剪强度很差。土体的承载力实质上取决于土的抗剪强度，因此土的承载力较低。

3. 渗透性强

土不是连续介质，颗粒之间存在着孔隙，因此土的渗透性比其他材料大，特别是粗粒土具有很强的渗透性。

以上土的 3 个工程特性与土木工程的设计与施工关系密切，值得高度重视。

第二节 土的组成和结构构造

一、土的组成

土一般是由固体颗粒(土粒)和颗粒之间孔隙中的水和气体所组成,可以把土看成是一种三相分散系,即由固相、液相和气相所组成的分散体系。只有在特殊情况下才由两相组成:当土粒间的孔隙全部被水充满时,就形成了饱和土,由固相和液相组成;当土粒间的孔隙中只有空气时,就形成了干土,由固相和气相组成。

1. 土 粒

土粒是指土中的固体颗粒,它构成了土体的骨架,其矿物成分、形状和大小是决定土的工程性质的主要因素。

(1) 土粒的矿物成分。土中颗粒的矿物成分包括原生矿物、次生矿物和腐殖质 3 部分,见表 1.3。

表 1.3 土粒的矿物成分表

土中最常见矿物		特 性
原生矿物	单矿物颗粒(如石英、长石、云母、角闪石、辉石)	岩石经物理风化而成,其化学成分与母岩相同,性质比较稳定。颗粒以粗粒为主含粉粒
	母岩碎屑(多矿物结构)	
次生矿物	次生二氧化硅(SiO_2)	岩石经化学风化或生物化学风化作用而产生的新矿物,其化学成分与母岩不同。黏土矿物是最重要的次生矿物。颗粒为细粒(以黏粒为主)
	黏土矿物(高岭石、伊利石、蒙脱石)	
	倍半氧化物(Al_2O_3 , Fe_2O_3)	
	难溶盐(CaCO_3 , MgCO_3)	
腐殖质(泥炭、有机酸及其盐类)		可能有强烈的吸水性,相当高的可塑性,明显的湿胀和干缩性以及低强度和高压缩性

(2) 粒径和粒组。天然土都是由大小不同的土颗粒混杂组成的,土粒的直径大小称为粒径。土粒由粗到细逐渐变化时,土的工程性质也相应发生变化,如黏性从无到有、可塑性从无到有、渗透性由大变小、毛细水现象从无到有。粒径大小在一定范围内的土粒,其工程性质也比较接近,可将土中不同粒径的土粒按适当的粒径范围分成若干组,即粒组。划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。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。

《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB10002.5—99)采用的分组界限粒径为 200, 20, 2, 0.05, 0.005 mm,把土粒分为六大粒组,即漂石或块石、卵石或碎石、圆砾或角砾、砂粒、粉粒和黏土粒粒组。粒组划分及特性列于表 1.4 中。

表 1.4 土的颗粒分类

颗粒分类		粒径/mm	一般特性
漂石(浑圆或圆棱)或块石(尖棱)	大	>800	透水性很大, 无黏性, 毛细水上升高度极微, 不能保持水分
	中	800~400	
	小	400~200	
卵石(浑圆或圆棱)或碎石(尖棱)	大	200~60	
	中	60~40	
	小	40~20	
圆砾(浑圆或圆棱)或角砾(尖棱)	大	20~10	
	中	10~5	
	小	5~2	
砂 粒	粗	2~0.5	易透水, 无黏性, 毛细水上升高度不大, 遇水不膨胀, 干燥时不收缩且松散, 不表现可塑性, 压缩性甚微
	中	0.5~0.25	
	细	0.25~0.05	
粉 粒		0.05~0.005	透水性小, 湿润时能出现微黏性, 遇水膨胀和干缩都不明显, 毛细水上升速度较快, 上升高度较大
黏土粒		<0.005	几乎不透水, 潮湿时呈可塑性, 黏性大, 遇水膨胀和干缩都较显著, 压缩性大

在《公路土工试验规程》JTJ051—93中, 土的颗粒根据表 1.5 所列粒组范围划分粒组。在《土的分类标准》GBJ145—90中, 土的粒组根据表 1.6 规定的土颗粒粒径范围划分。

表 1.5 粒 组 划 分

200		60		20		5		2		0.5		0.25		0.074		0.002 mm	
巨粒组				粗粒组										细粒组			
漂石 (块石)	卵石 (小块石)	砾 (角砾)						砂						粉粒	黏粒		
		粗		中		细		粗		中		细					

表 1.6 粒 组 划 分

粒组统称	粒组名称		粒组粒径 d 的范围 /mm	一般特性
巨 粒	漂石(块石)粒		$d > 200$	透水性大, 无黏性, 无毛细水, 不易压缩
	卵石(碎石)粒		$200 \geq d > 60$	
粗 粒	砾粒	粗砾	$60 \geq d > 20$	透水性大, 无黏性, 不能保持水分, 毛细水上升高度不超过粒径大小, 压缩性较小
		细砾	$20 \geq d > 2$	
	砂 粒		$2 \geq d > 0.075$	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, 饱和松细砂在振动荷载作用下会产生液化

续表 1.6

粒组统称	粒组名称	粒组粒径 d 的范围 /mm	一般特性
细 粒	粉 粒	$0.075 \geq d > 0.005$	透水性小, 湿时有微黏性, 遇水膨胀小, 干时稍有收缩, 毛细管上升高度较大, 易冻胀, 饱和并很松时在振动荷载作用下会产生液化
	黏 粒	$0.005 \geq d$	透水性差, 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

(3) 土的颗粒级配。天然土常常是由各种不同大小的土粒组成的混合物, 它包含着几种粒组的土粒。不同粒组在土中的相对含量, 在很大程度上决定着土的工程特性, 因此, 工程上常以土中各粒组的相对含量表示土中颗粒的组成情况。各粒组的质量占土粒总质量的百分数叫做颗粒级配。

对土的颗粒组成的测定称为粒径分析或颗粒分析。根据土颗粒的粒径大小, 采用下列颗粒分析试验 (见附录): ① 筛析法, 适用于粒径小于或等于 60 mm, 大于 0.075 mm 的土; ② 密度计法和移液管法, 适用于粒径小于 0.075 mm 的土。当土中含有粒径大于和小于 0.075 mm 的颗粒, 各超过总质量的 10% 时, 应联合使用筛析法及密度计法或移液管法。

颗粒级配的表示方法有表格表示法和级配曲线表示法。前者虽然制作简便, 但是后者更加便于评价粒径含量的组合情况。以下对应用较广的级配曲线表示法作一说明:

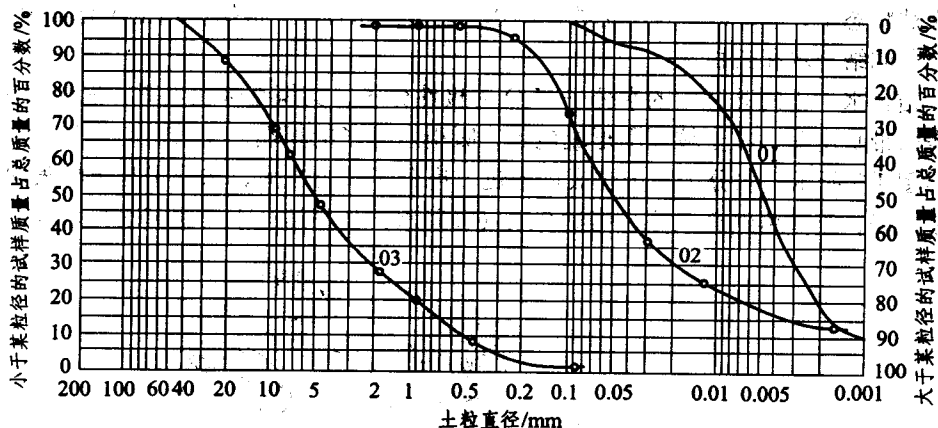


图 1.2 颗粒级配曲线 (粒径大小分布曲线)

根据颗粒大小分析试验结果, 在半对数坐标纸上, 以纵坐标表示小于某粒径的土颗粒含量占总质量的百分数 (注意是累计百分数, 不是某一粒径的百分含量), 对数横坐标则表示粒径的大小 (因为土颗粒的粒径变化范围很大, 适宜用对数比例尺), 绘出颗粒级配曲线 (图 1.2)。根据曲线的陡缓大致可判断出土的级配良好程度: 若曲线较陡 (图 1.2 中 01 线), 则表示粒径大小相差不多, 土粒均匀, 即级配不良, 压实时不易获得较大的密实度, 但透水性好; 若曲线平缓 (图 1.2 中 02 线), 则表示粒径大小相差悬殊, 土粒不均匀, 即级配良好。级配良好的土, 粗粒间的孔隙被细粒所填充, 压实时容易获得较大的密实度, 这样土的承载力高, 压缩性低, 适合路基填方。

在工程中,对于粗粒土常采用不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 来评价土的颗粒级配情况,其定义为

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1.1)$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (1.2)$$

式中 C_u ——不均匀系数,计算至 0.01;

d_{60} ——限制粒径,分布曲线上小于该粒径的试样含量占总试样质量 60% 的粒径;

d_{10} ——有效粒径,分布曲线上小于该粒径的试样含量占总试样质量 10% 的粒径;

C_c ——曲率系数,计算至 0.01;

d_{30} ——连续粒径,分布曲线上小于该粒径的试样含量占总试样质量 30% 的粒径。

不均匀系数 C_u 越大,说明粒径分布曲线越平缓,土粒大小分布范围较大,土粒越不均匀,土的级配良好。 C_u 越小,粒径分布曲线越陡,土粒大小分布范围较小,颗粒越均匀,级配不良。若曲率系数 C_c 在 1~3 之间时,反映粒径分布曲线形状没有突变,各粒组含量的配合使该土容易实现密实状态。根据工程经验可按如下标准估计土的级配是否良好: $C_u \geq 5$ 且 $C_c = 1 \sim 3$ 时,土粒不均匀,级配良好; $C_u < 5$ 且 $C_c \neq 1 \sim 3$ 时,土粒均匀,级配不良。

2. 土中水

在天然状态下,土中常含有一定数量的水。在常温条件下,根据水和土粒有无相互作用,土中水可分成结合水和自由水。

(1) 结合水。土的孔隙中的水分子 H_2O 为极性分子,其氢端带正电荷,氧端带负电荷。黏土粒表面带负电荷,在土粒周围形成电场,吸引水分子的氢端,使其定向排列,形成结合水膜,如图 1.3 所示。水分子距土粒表面越近,电分子引力越大,水分子与土粒表面结合的紧密程度越强,于是将结合水分为强结合水(吸着水)与弱结合水(薄膜水)两类。

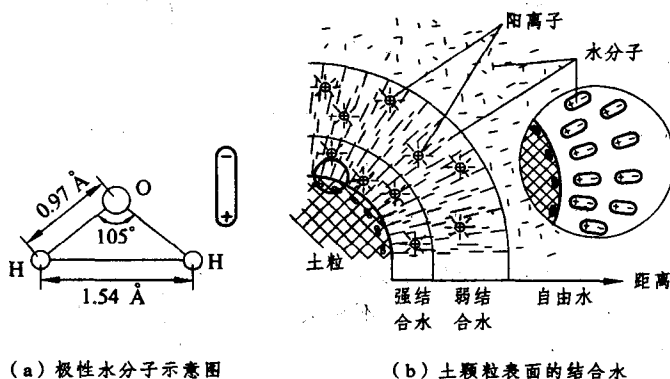


图 1.3 黏土矿物与水分子的相互作用

① 强结合水(吸着水)。被紧密吸附在土粒表面的结合水称为强结合水,厚度只有几个水分子厚,性质接近于固体,对土的工程性质影响较小。它不受重力影响而移动,不传递静水压力,冰点为 -78°C ,它只能在 105°C 的高温下变成蒸气时才能排除,只含强结合水的

黏性土呈坚硬固体状态，只含强结合水的砂土呈现干燥散粒状态。

② 弱结合水（薄膜水）。在强结合水的外围，仍然受土粒电分子引力吸引的一层水膜称弱结合水。弱结合水离开土粒表面越远所受的电分子引力就越小，一直过渡到没有吸附力作用的自由水。弱结合水仍不传递静水压力，并呈黏滞状态，从内到外的黏滞性逐渐降低，水膜较厚的薄膜水能向邻近较薄的水膜缓慢转移。砂土由于矿物成分较稳定而且土粒的比表面积（每 g 质量或每 cm^3 体积的干土中各土粒表面积的总和）小，可认为不含薄膜水。黏性土中由于黏粒比表面积大及黏土矿物成分的影响，薄膜水较厚，其含量也随黏粒增多而增大。薄膜水的多少对黏性土的性质影响很大，黏性土的一系列特征（黏性、塑性及压实性等）都和薄膜水有关。

（2）自由水。自由水是存在于土粒表面电场影响范围以外自由散乱地排列着的水，它的性质与普通水一样。按其转移时所受作用力的不同，可将其分为重力水和毛细水。

① 重力水。在自由水位以下，土粒电分子引力范围以外的水，它在本身重力（或压力差）作用下，可在土中自由移动，故称重力水。重力水在土中能产生和传递静水压力，对土产生浮力。重力水在土的孔隙中流动时，能产生动水压力，带走土中细颗粒，而且还能溶解土中的盐类。这两种作用会使土的孔隙增大，压缩性提高，抗剪强度降低。在开挖基坑及修筑地下结构物时，由于重力水的存在，应采取防水、排水措施。地下水位以下的土粒受水的浮力作用，使土的应力状态发生变化。

② 毛细水。毛细水是指在受到重力作用以外，还受到水与空气交界面上表面张力作用的自由水。毛细水一般存在于地下水位以上的透水土层中，按毛细水与地下水面是否联系可分为毛细悬挂水（与地下水无直接联系）和毛细上升水（与地下水相连）两种。

土中局部孔隙存在的毛细水中，毛细水的表面张力使缝壁粒面产生内挤压力，即毛细压力，因而砂粒间可出现不大的黏聚作用。这种作用在砂土被水淹没时会消失，故称假黏聚力。在施工现场可见稍湿状态的砂性地基可开挖成一定深度的直立坑壁，就是砂粒间有假黏聚力的缘故。当地基饱和或特别干燥时，不存在水与空气的界面，假黏聚力消失，坑壁就会塌落。

毛细水的上升高度在粗粒土中很小，在细粒土中较大。如在砾砂、粗砂层中的毛细水上升高度只有几个厘米。在中砂、细砂层中能上升几十厘米至 1 m 左右，在黏性土中则可上升至几米高。但毛细水主要存在于孔径为 0.002~0.5 mm 的孔隙中，孔径小于 0.002 mm 的孔隙中的水主要是结合水，毛细水含量很少。在工程中，应特别注意毛细水上升的高度和速度，因为毛细水的上升对建筑物地下部分的防潮措施和地基土的浸湿和冻胀有重要影响。

3. 土中气体

土中气体主要是空气和水汽，有时也可能有较多的二氧化碳、沼气及硫化氢等。土中气体有两种存在形式：一种与大气相通；另一种在土的孔隙中封闭着，与大气隔绝。

与大气相通的气体存在于接近地表的孔隙中，其含量与孔隙体积大小及孔隙被填充的程度有关，它对土的工程性质影响不大。

在细粒土中常存在着与大气隔绝的封闭气泡，它不易逸出，因气泡的栓塞作用，降低了土的透水性。封闭气体的存在，增大了土的弹性和压缩性，在受压而处于压缩状态下有可能冲破土层逸出，造成突然沉陷。又如溶解于水中的二氧化碳会加剧化学潜蚀作用，对土的性质有较大的影响。