

高等职业教育建筑工程专业教学改革规划教材

土力学与地基基础工程

TULIXUE YU DIJI JICHU GONGCHENG

程建伟 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS


针对教材使用者
赠 电 子 教 案

高等职业教育建筑工程专业教学改革规划教材

土力学与地基基础工程

主 编	程建伟			
副主编	黄淑森	陶 莉	丁 斌	
参 编	窦本洋	杨宏宇	张世宪	开永旺
	张玉龙	李建华	刘忠洪	
主 审	齐加连			



机械工业出版社

本教材内容按照“项目教学”的要求来组织,将基本理论融入到工程实践。在各个项目当中,体现了“学做合一,边学边做,做中学、学中做”的教学理念,以建筑工程技术专业培养方案为依据,突出了建筑工程技术人员岗位能力的培养和训练。

本教材内容由13个教学项目组成。分别为土的物理与工程性质的认知、土的应力计算与地基中土的应力分布、地基变形的计算、土的抗剪强度与地基承载力的确定、土压力与挡土墙的设计、工程地质勘察、土方工程施工、天然地基浅基础的设计、天然地基浅基础的施工、桩基础设计、桩基础施工、基坑工程和软土地基处理。

本教材内容简洁扼要,实用性强;突出高职高专特色,注重反映地基基础领域的新标准、新规范及推广应用新技术、新工艺。为方便读者的学习,本教材每个项目还包括相应的拓展练习题,并全书配有电子课件。

本书可作为高职高专建筑工程技术、监理等土建类专业教材,亦可供土建专业勘察、设计、施工技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

土力学与地基基础工程/程建伟主编. —北京:机械工业出版社, 2010.6
高等职业教育建筑工程专业教学改革规划教材
ISBN 978-7-111-30907-9

I. ①土… II. ①程… III. ①土力学②地基—基础(工程)
IV. ①TU4

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第102366号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑:边 萌 责任编辑:宋林静 版式设计:霍永明
责任校对:李秋荣 封面设计:鞠 杨 责任印制:乔 宇
北京机工印刷厂印刷

2010年7月第1版第1次印刷

184mm×260mm·21.25印张·527千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-30907-9

定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

本书编委会

编委会主任：薛朝晖

编委会副主任：窦本洋 黄淑森

编委会委员：谢金忠 姜洪斌 齐加连 王孟泉
程建伟 丁 斌 杨宏宇 张玉龙
开永旺 陶 莉 刘忠洪 兰 茗
戴庆斌 李建华 习晓兰 卓 菁
杨 洁 李之松 卓坚红 麻晓芳
项海勇 孙 于 徐美艳 沈志庭
金鸥贤 胡月莲 刘晓霞 林永静
肖友民 李锦泛 林建爱

前言

本书是按照“任务驱动，项目导向”的原则编写而成的项目化教材，围绕地基基础工程施工岗位能力的培养目标，科学设计和选择项目，以完成一个完整的工程项目所需要的知识、能力和素质设计教材的内容，以便于教师按照完成工程项目的流程组织实施教学，使学生在完成项目的过程中，掌握知识，达到人才培养目标的要求，满足高职高专培养技能型人才的需要。在教材内容安排上，主要根据高职高专学生的认知特点、知识水平，由浅入深地按能力递进选择工程项目，按工作任务的难易程度编排教材内容。本书总体内容安排为：土的物理与工程性质的认知、土的应力计算与地基中土的应力分布、地基变形的计算、土的抗剪强度与地基承载力的确定、土压力与挡土墙的设计、工程地质勘察、土方工程施工、天然地基浅基础的设计、天然地基浅基础的施工、桩基础设计、桩基础施工、基坑工程和软土地基处理。

本教材的特点为：在汲取传统教材优点的基础上，将基础理论教学与实践教学融合在一起，注重对学生专业技能的训练，贴近工程实际，针对性强，充分体现了“做中学、学中作、边做边学”的育人理念，故教材的适用性较强；本书实现了校企合编教材，案例教学和工程实践紧密结合，达到了高职教育的“三结合”的教学目标。

本教材建议总课时为120学时，由于本教材内容是将地基与基础设计、施工内容整合在一起及以软土地基地区为主编写的，故在具体授课时应根据本地区的工程实际来选取授课内容。需特别指出的是，实践教学的内容应根据地区实际合理选择。

本教材编写内容分工如下。

序号	姓名	编写内容	工作单位
1	程建伟	项目一、项目七、项目八、项目十、项目十二、项目十三	温州职业技术学院
2	黄淑森	统稿、修改	温州职业技术学院
3	陶莉	项目十一	温州职业技术学院
4	丁斌	统稿、修改	温州职业技术学院
5	窦本洋	项目三	宣城职业技术学院
6	李建华	附录	温州职业技术学院
7	杨宏宇	项目六	青岛海洋地质工程勘察院
8	张世宪	项目五	中国建筑北京设计研究院有限公司
9	开永旺	项目四	浙江交通职业技术学院
10	张玉龙	项目二	黑龙江交通职业技术学院
11	刘忠洪	项目九	温州职业技术学院

全书由黄淑森教授、丁斌讲师进行统稿、修改。本教材由哈尔滨工业大学齐加连副教授担任主审。齐教授认真、仔细审查了全稿，并提出了许多宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢。

本教材编写主要依据为：温州职业技术学院“基础工程”课程标准，同时参考建筑工程相关的规范、规程、标准、施工手册及其他兄弟院校的教材、精品课程、筑龙网提供的资料，在此谨表示衷心的感谢。在本教材编写过程中得到了温州职业技术学院领导的关心与支持，在此也表示衷心的感谢。由于编者水平有限，书中难免存在不妥或错误之处，恳请读者、专家及同行批评指正。

编 者

目 录

前言

项目一 土的物理与工程性质的认知 1

教学目标 1

一、知识目标 1

二、能力目标 1

三、素质目标 1

理论知识 1

一、土的成因与组成 1

二、土的物理性质指标 8

三、土的工程性质 10

四、土的物理状态指标 12

五、地基土(岩)的工程分类 14

六、土的现场鉴别 16

任务实施 17

一、掌握土的物理性质指标的计算 17

二、判断土的物理状态 17

三、地基土(岩)的工程分类 18

拓展训练 19

项目二 土的应力计算与地基中土的 应力分布 20

教学目标 20

一、知识目标 20

二、能力目标 20

三、素质目标 20

理论知识 20

一、土体中的应力计算与分布 20

二、基底压力的计算 22

三、地基中的附加应力计算 25

任务实施 30

一、地基土中自重应力的计算 30

二、基底压力的计算 31

三、基底附加应力的计算 32

拓展训练 33

项目三 地基变形的计算 34

教学目标 34

一、知识目标 34

二、能力目标 34

三、素质目标 34

理论知识 34

一、土的压缩性 35

二、基础最终沉降量的计算 37

三、建筑物沉降观测与地基允许变形值 42

任务实施 44

一、用分层总和法计算地基变形 44

二、用《建筑地基基础设计规范》(GB 50007

—2002)推荐的方法计算地基变形 45

拓展训练 46

项目四 土的抗剪强度与地基承载力的 确定 48

教学目标 48

一、知识目标 48

二、能力目标 48

三、素质目标 48

理论知识 48

一、土的抗剪强度 49

二、抗剪强度的确定及试验方法 53

三、地基承载力 57

任务实施 61

一、利用土的极限平衡条件分析土的

状态 61

二、确定地基承载力 63

拓展训练 63

项目五 土压力与挡土墙的设计 65

教学目标 65

一、知识目标 65

二、能力目标 65

三、素质目标 65

理论知识 65

一、土压力的分类 66

二、朗肯土压力理论 68

三、库伦土压力理论 71

四、土坡稳定分析的基本理论 74

五、挡土墙的设计 77

任务实施	82	四、基础底面尺寸的确定	160
一、挡土墙主动土压力的计算	82	五、无筋扩展基础设计（刚性基础）	162
二、挡土墙的设计	83	六、扩展基础设计	164
拓展训练	86	七、柱下条形基础的使用范围及构造	171
项目六 工程地质勘察	87	八、筏板基础的构造与设计的要求	171
教学目标	87	九、减轻建筑物不均匀沉降的措施	173
一、知识目标	87	任务实施	176
二、能力目标	87	一、验算地基持力层的承载力及确定	
三、素质目标	87	基础底面积	176
理论知识	87	二、刚性基础的计算与分析	179
一、工程地质勘察的相关知识	87	三、墙下扩展基础的计算与分析	181
二、工程地质勘察报告	94	四、柱下钢筋混凝土独立基础的计算与	
三、基础验槽	96	分析	182
四、地基局部处理	99	拓展训练	186
任务实施	101	项目九 天然地基浅基础的施工	189
一、正确阅读工程地质勘察报告	101	教学目标	189
二、进行基础验槽	114	一、知识目标	189
拓展训练	115	二、能力目标	189
项目七 土方工程施工	117	三、素质目标	189
教学目标	117	理论知识	189
一、知识目标	117	一、毛石基础施工	189
二、能力目标	117	二、素混凝土基础施工	192
三、素质目标	117	三、钢筋混凝土独立基础施工	194
理论知识	117	任务实施	202
一、工程场地的平整	117	依据相关规范、标准，阅读或编制天然	
二、基坑（槽）、管沟土方开挖	127	地基浅基础施工方案	202
三、土方回填与压实	131	拓展训练	203
四、土方机械的选择	136	项目十 桩基础设计	204
任务实施	143	教学目标	204
一、工程场地平整设计	143	一、知识目标	204
二、土方专项施工方案的编制	149	二、能力目标	204
三、基槽（沟槽）基坑土方量的计算	149	三、素质目标	204
拓展训练	150	理论知识	204
项目八 天然地基浅基础的设计	152	一、桩基础概要	204
教学目标	152	二、桩竖向承载力的确定	207
一、知识目标	152	三、桩基础计算	218
二、能力目标	152	四、桩基础设计	219
三、素质目标	152	任务实施	228
理论知识	152	一、按经验参数法计算单桩竖向承载力	
一、浅基础的类型	153	特征值	228
二、浅基础设计的基本规定	156	二、桩基础软弱下卧层验算	231
三、基础埋置深度的确定	159	拓展训练	233
		项目十一 桩基础施工	234

教学目标	234	项目十三 软土地基处理	297
一、知识目标	234	教学目标	297
二、能力目标	234	一、知识目标	297
三、素质目标	234	二、能力目标	297
理论知识	234	三、素质目标	297
一、打入式钢筋混凝土预制桩施工	234	理论知识	297
二、静力压入式钢筋混凝土预制桩 施工	246	一、软弱土的种类和性质	297
三、混凝土灌注桩施工	251	二、软土地基处理方法分类及应用 范围	298
任务实施	262	三、换填垫层法	301
一、掌握桩基础施工方案的编制	262	四、高压喷射注浆法	305
二、掌握桩基础施工质量问题的处理 方法	262	拓展知识	308
拓展练习	264	一、强夯法和强夯置换法	308
项目十二 基坑工程	265	二、灰土挤密桩法和土挤密桩法	311
教学目标	265	任务实施	314
一、知识目标	265	一、换土垫层法地基处理分析计算	314
二、能力目标	265	二、旋喷桩复合地基设计	316
三、素质目标	265	三、强夯地基处理设计	316
理论知识	265	四、灰土挤密桩设计	317
一、基坑支护设计要点	265	拓展练习	318
二、基坑支护结构施工	267	附录	319
三、基坑降水设计	285	试验一 土的密度试验	319
任务实施	294	试验二 界限含水率试验	320
一、轻型井点降水设计	294	试验三 直接剪切试验	322
二、基坑支护结构施工方案的阅读	296	试验四 土的三轴压缩试验	324
拓展练习	296	试验五 无侧限抗压强度试验	327
		参考文献	331

项目一 土的物理与工程性质的认知

教学目标

一、知识目标

- ◇ 掌握土的三相组成和物理指标计算的相关知识。
- ◇ 懂得黏性土的物理状态及相应指标、砂土的相对密度及状态划分。
- ◇ 掌握土的分类及现场鉴别的相关知识。

二、能力目标

- ◇ 能计算土的三相含量指标、塑性指数及液性指数。
- ◇ 能通过土工试验确定土的三个基本指标密度、比重、含水量以及土的界限含水量、塑限和液限。
- ◇ 能够进行土的工程分类。
- ◇ 熟练掌握土的形成过程，土的矿物成分及相应的物理性质，粗粒土、粉土、黏性土的结构及对土性的影响。

三、素质目标

- ◇ 通过对土的基本指标及换算指标的计算，培养学生求真务实、一丝不苟的工作作风。
- ◇ 通过试验操作，锻炼学生动手操作和解决实际问题的能力，培养学生的团队协作精神。

理论知识

一、土的成因与组成

自然界中的土是由岩石经风化、搬运、沉积作用而形成的。母岩成分、风化的性质、搬运过程和堆积的环境是影响土的组成的主要因素，土的组成是决定地基土工程性质的基础。一般来说，土是由固体颗粒、水和气体所组成的，通常称为土的三相组成。土的固体颗粒的矿物成分、三相组成比例、结构以及所处的物理状态决定了土的物理性质。而土的物理性质又影响着土的力学性质，故土的物理性质是最基本的工程特性。

1. 土的成因

“土”一词在不同的学科领域有其不同的涵义。就土木工程领域而言，土是指覆盖在地表的、没有胶结和弱胶结的颗粒堆积物。土与岩石的区分仅在于颗粒间胶结的强弱。自然界

的土是由岩石经风化、搬运、堆积而形成的,包括无机矿物颗粒和有机质。

土是由地壳表层的岩石(完整的)经长期的风化和剥蚀变为碎屑,原地堆积或经风力、水流等搬运后沉积而形成的。与岩石相比,其形成的年代较短,多在一百万年以内,属第四纪沉积。其中,风化作用主要为物理风化、化学风化和生物风化。物理风化是指由于温度变化,使岩石内部产生应力,反复作用导致岩体表面破碎,逐渐崩解,形成大小和形状不同的一些碎块。物理风化后的产物与母岩具有相同的矿物质成分,这种矿物称为原生矿物,如石英、长石、云母等。物理风化后形成的碎块与水、氧气、二氧化碳等物质接触,使岩石碎屑发生化学变化,生成新的矿物成分,这个过程称为化学风化,如黏土矿物、铝铁氧化物和氢氧化物等。生物风化是指动植物和人类活动对岩石的破坏,矿物成分未发生变化,如植物的根对岩石的破坏、人类开山等。

根据成因不同,土的沉积类型有:残积土、坡积土、洪积土、冲积土、湖沼积土、海积土、冰川积土和风积土等。此外,还有在特殊环境下形成的特殊土,如沿海的软土、陕甘晋的黄土、黔滇桂的红黏土等。不同成因类型的沉积物,具有各自的分布规律和工程地质特征,下面简单介绍其中主要的成因类型。

(1) 残积物 残积物是指残留在原地,未被搬运的那一部分原岩风化剥蚀后的产物,如图1-1所示。一般是由基岩风化带直接过渡到新鲜基岩。残积物的主要工程地质特征为:均质性很差,颗粒一般较粗且带棱角,孔隙度较大,土的物理力学性质一致性较差,作为地基易引起不均匀沉降。

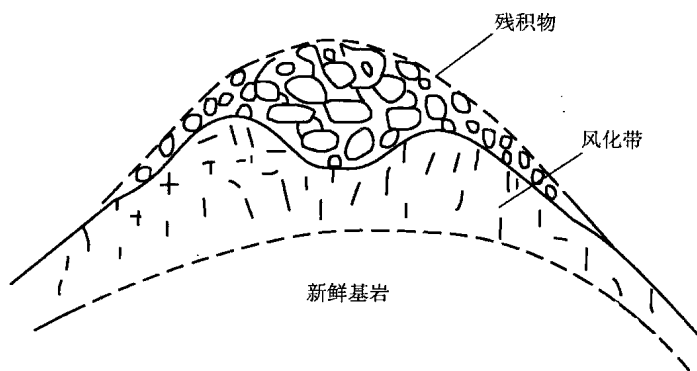


图 1-1 残积物(层)断面

(2) 坡积物 坡积物是雨雪水流的地质作用将高处岩石风化产物缓慢地洗刷剥蚀、顺着斜坡向下逐渐移动、沉积在较平缓的山坡上而形成的沉积物,如图1-2所示。坡积物的主要工程地质特征为:土颗粒粗细混杂,土质不均匀,厚度变化大,会发生沿下卧基岩倾斜面滑动;作为地基易形成不均匀沉降;新近堆积的坡积物土质疏松,压缩性较高。

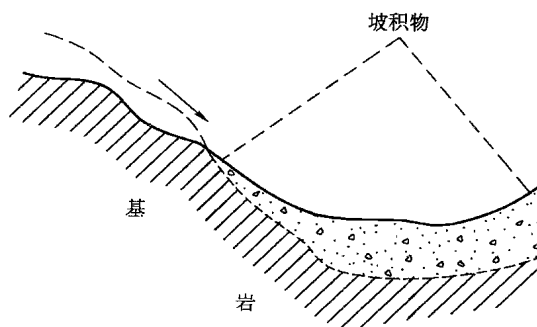


图 1-2 坡积物(层)断面

(3) 洪积物 由暴雨或大量融雪骤然集聚而形成的暂时性山洪急流,具有很大的剥蚀和搬运能力,它冲刷地表,挟带着大量碎屑物质堆积于山谷冲沟出口或山前倾斜平原而形成洪积物,如图1-3所示。洪积物的主要工程地质特征为:靠近山地的洪积物的颗粒较粗,地下水位埋藏较深,常呈现不规则交错的层理构造,土的承载力一般较高,常为良好的天然地基。离山较远地段的洪积物较细,成分均匀,厚度较大,土质较为密

实,一般也是良好的天然地基。

(4) 冲积物 冲积物是河流流水的地质作用将两岸基岩及其上部覆盖的坡积、洪积物质剥蚀后搬运、沉积在河流坡降平缓地带形成的沉积物。冲积物可分为平原河谷沉积物、山区河谷冲积物和三角洲冲积物。冲积物的主要工程地质特征为:平原河谷冲积物大多为中密砂砾,承载力较高,但尚需注意河流的冲刷作用及凹岸边坡的稳定。河漫滩地段压缩性较高,承载力较低。河流阶地沉积物强度较高,一般可作为良好的地基。

山区河谷冲积物,颗粒较粗,一般为砂粒所充填的卵石、圆砾,在高阶地往往是岩石或坚硬土层,最适宜于作为天然地基。三角洲冲积物的颗粒较细,含水量大,呈饱和状态,有较厚的淤泥或淤泥质层分布,承载力较低。

2. 土的组成

自然界中的土是由固体颗粒、水和气体组成的三相体系。固体颗粒形成土的骨架,骨架之间的孔隙充有水和气体,因此,土也被称为三相孔隙介质。在自然界的每一个土单元中,这3部分所占的比例不同,土的物理状态和土的工程性质也不相同。当土中孔隙没有水时,称为干土;当土位于地下水位线以下,孔隙全部被水充满时,称为饱和土;当土中孔隙同时有水和气体存在时,称为非饱和土(湿土)。

(1) 土的固体颗粒 土的固体颗粒即为固相。土中的固体颗粒(简称土粒)的大小和形状、矿物成分及其组成情况是决定土的物理力学性质的重要因素。

1) 土粒的矿物成分 土粒的矿物成分主要取决于母岩的成分及其所经历的风化作用。不同的矿物成分对土的性质有着不同的影响。土矿物可分为原生矿物和次生矿物两大类。土的固相部分包括无机矿物颗粒和有机质,主要是土粒,有时还有粒间胶结物和有机质,它们构成了土的骨架。

① 原生矿物。原生矿物是物理风化产物,化学性质比较稳定,具有较强的水稳定性。其中以石英砂粒强度最高,硬度最大,稳定性最好,而云母则最弱,石英和云母是粗颗粒土的主要成分。

② 次生矿物。次生矿物是化学风化的产物,颗粒细小,比表面积大,活性强。其中高岭石、伊利石、蒙脱石这3种复合的铝—硅酸盐晶体是最重要的次生矿物,蒙脱石具有很强的亲水性,伊利石次之,高岭土亲水性最小,它们遇水膨胀,失水收缩。

2) 土的颗粒级配 自然界中的土都是由大小不同的颗粒组成。土颗粒的大小与土的性质密切相关。如土颗粒由粗变细,则土的渗透性会由大变小,由无黏性变为有黏性等。故工程中采用不同粒径颗粒的相对含量来描述土的颗粒组成情况。

土中各种不同粒径的土粒,按适当的粒径范围分为若干粒组,各个粒组的性质随分界尺寸的不同而呈现出一定质的变化。划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。我国习惯采用的粒组划分标准见表1-1。表中根据界限粒径200mm、20mm、2mm、0.075mm、0.005mm把土粒分为6大粒组:漂石(块石)、卵石(碎石)、圆砾(角砾)、砂粒、粉粒和黏粒。

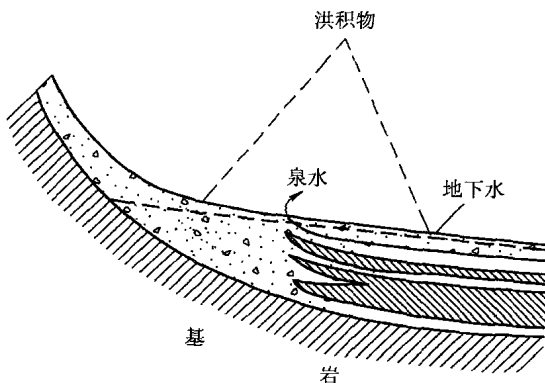


图1-3 洪积物(层)断面

表 1-1 粒组划分标准

粒组名称	粒组范围/mm	一般特性
漂石(块石)粒组	>200	透水性很大,无黏性,无毛细水
卵石(碎石)粒组	20~200	
圆砾(角砾)粒组	2~20	透水性很大,无黏性,毛细水上升高度不超过粒径
砂粒粒组	0.075~2	易透水,当混入云母等杂质时透水性减小,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
粉粒粒组	0.005~0.075	透水性小,湿时稍有黏性,遇水膨胀小,干燥时有收缩;毛细水上升高度较大、较快,极易出现冻胀现象
黏粒粒组	<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;毛细水上升高度较大,但速度慢

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. 黏粒也称黏土粒,粉粒也称粉土粒。

3. 黏粒的粒径上限也有采用0.002mm的。

土体中包含有大小不同的颗粒,通常把土中各个粒组的相对含量(各个粒组占土粒总量的百分数),称为土的颗粒级配。这是决定无黏性土工程性质的主要因素,是确定土的名称和选用建筑材料的主要依据。

确定各个粒组相对含量的颗粒分析试验方法有筛分法和相对密度计法两种。筛分法适用于粗颗粒土,一般用于粒径小于等于60mm、大于0.075mm的土。它是用一套孔径不同的筛子,按从上至下筛孔逐渐减小放置。将事先称过质量的烘干土样过筛,称出留在各筛上土的质量,然后计算占总土粒质量的百分数。相对密度计法适用于细颗粒土,一般用于粒径小于0.075mm的土粒质量占试样总质量的10%以上的土。此法根据球状的细颗粒在水中下沉速度与颗粒直径的平方成正比的原理,把颗粒按其在水中的下沉速度进行分组。在实验室内具体操作时,利用密度计测定不同时间土粒和水混合悬液的密度,据此计算出某一粒径土粒占总土粒质量的百分数。

根据颗粒大小分析试验结果,可以绘制颗粒级配曲线,如图1-4所示。其横坐标表示土粒粒径,由于土粒粒径相差悬殊,常在百倍、千倍以上,所以采用对数坐标表示;其纵坐标则表示小于某粒径土的质量含量(或累计质量分数)。根据曲线的坡度和曲率可以大致判断土的级配状况。

如图1-4中曲线a较平缓,则表示粒径大小相差较大,土粒不均匀,即级配良好;反之,曲线b较陡,则表示粒径的大小相差不大,土粒较均匀,即级配不良。

工程上常用不均匀系数 C_u 来反映颗粒的不均匀程度:

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

式中 C_u ——土的不均匀系数;

d_{60} ——限定粒径,在粒径级配曲线上小于等于该粒径的土含量占总土质量的60%的粒径(mm);

d_{10} ——有效粒径,在粒径级配曲线上小于等于该粒径的土含量占总土质量的10%的粒径(mm)。

不均匀系数 C_u 反映不同的粒组的分布情况, C_u 越大,表示土粒大小的分布范围越广,

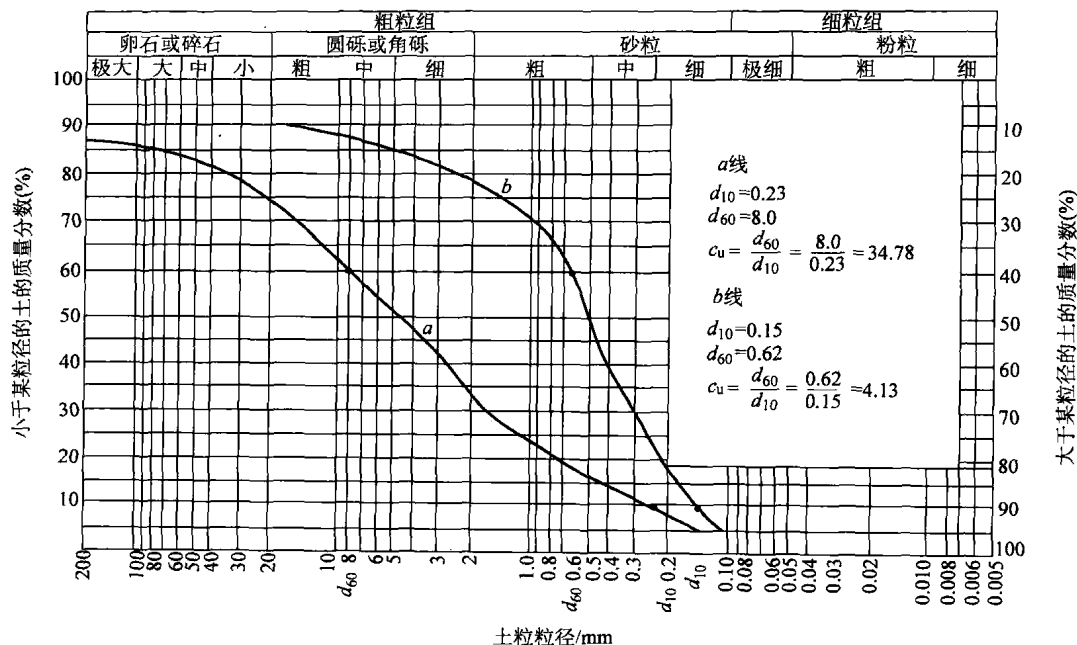


图 1-4 颗粒级配曲线

其级配越良好。作为填方工程的土料时，比较容易获得较大的密实度。工程上一般把 $C_u \leq 5$ 的土称为匀粒土，属级配不良； $C_u > 10$ 的土则称为级配良好的土。

单独用一个指标 C_u 确定土的级配情况是不够的，还必须同时考虑级配曲线的整体形状。曲率系数 C_c 为描述累计曲线整体形状的指标，按下式计算为

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

式中 C_c ——曲率系数；

d_{30} ——在粒径级配曲线上小于等于该粒径的土含量占总土质量的 30% 的粒径 (mm)。

一般认为，砾石或砂土同时满足 $C_u \geq 5$ 和 $C_c = 1 \sim 3$ 两个条件时，为级配良好。级配良好的土，较粗颗粒间的孔隙被较细的颗粒所填充，因而土的密实度较好。

(2) 土中水 土中水是土的液体相部分。在自然条件下，土中总是含水的。土中水可以处于液态、固态或气态 3 种形态。土中细粒愈多，即土的分散度愈大，水对土的性质的影响也愈大。研究土中水，必须考虑到水的存在状态及其与土粒的相互作用。土中液态水有结合水和自由水两大类。

1) 结合水是指吸附在土粒表面的结合水膜 研究表明，黏土颗粒表面带负电荷，吸附电场范围内的水分子及水分子中的阳离子，越靠近土粒表面吸附作用越强，结合水从内向外可分为固定层和扩散层。根据被土粒吸附的程度可以分为强结合水和弱结合水。强结合水处于固定层中，性质接近于固体，不能传递水压，具有一定的黏滞性、弹性和抗剪强度；弱结合水处于扩散层中，性质呈黏滞体状态，在压力作用下可以挤压变形。弱结合水对黏性土的物理力学性质影响极大，而砂土因其表面积较小，可认为不含弱结合水。

2) 自由水是存在于土粒表面电场影响范围以外的水 它的性质和普通水一样，能传递静水压力，冰点为 0°C ，有溶解能力。自由水按其移动所受作用力的不同，可以分为重力水和毛细水。

重力水是在重力或压力差作用下运动的自由水，它是存在于地下水位以下的透水土层中的地下水，对土粒有浮力作用。重力水对土中的应力状态和开挖基槽、基坑以及修筑地下构筑物时所应采取的排水、防水措施有重要的影响。

毛细水是受到水与空气交界面处表面张力作用的自由水。毛细水存在于地下水位以上的透水层中。毛细水按其是否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，当土孔隙中局部存在毛细水时，毛细水的弯液面和土粒接触处的表面引力反作用于土粒上，使土粒之间由于这种毛细压力而挤紧，土因而具有微弱的黏聚力，这种力称为毛细黏聚力。

施工现场经常可以看到稍湿状态的砂堆，能保持垂直陡壁达几十厘米高而不坍落，就是因为砂粒间具有毛细黏聚力的缘故。在饱水的砂或干砂中，土粒之间的毛细压力消失，原来的陡壁就变成斜坡，其天然坡面与水平面所形成的最大坡度角称为砂土的自然坡度角。在工程中，因为毛细水的上升对于建筑物地下部分的防潮措施和地基土的浸湿和冻胀等有重要影响。

(3) 土中气体 土中气体存在于土孔隙中未被水占据的部位。土中气体以两种形式存在，一种与大气相通，另一种则封闭在土孔隙中与大气隔绝。在接近地表的粗颗粒土中，土孔隙中的气体常与大气相通，它对土的力学性质影响不大。在细粒土中则常存在与大气隔绝的封闭气泡，使土在外力作用下的弹性变形增加，透水性减小。

对于淤泥和泥炭等有机质土，由于微生物（嫌气细菌）的分解作用，在土中蓄积了某种可燃气体（如硫化氢、甲烷等），使土层在自重作用下长期得不到压密，而形成高压缩性土层。

3. 土的结构

土的结构是指由土粒单元的大小、形状、表面特征、相互排列及其联结关系等因素形成的综合特征。一般可分为单粒结构、蜂窝结构和絮状结构 3 种基本类型。

(1) 单粒结构 是由粗大土粒在水或空气中下沉而形成的。全部由砂粒及更粗土粒组成的土都具有单粒结构。因其颗粒较大，土粒间的分子吸引力相对较小，所以颗粒间几乎没有联结，至于未充满孔隙的水分只可能使其具有微弱的毛细水联结。单粒结构可以是疏松的，也可以是紧密的。

呈紧密状单粒结构的土，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，是较为良好的天然地基，如图 1-5a 所示。

具有疏松单粒结构的土，其骨架是不稳定的，当受到震动及其他外力作用时，土粒易于发生移动，土中孔隙剧烈减少，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，如图 1-5b 所示。如果饱和疏松的土是由细粒砂或粉粒砂所组成，在强烈的震动（如地震）作用下，土的结构会突然变成流动状态，产生砂土“液化”破坏。

(2) 蜂窝结构 是主要由粉粒（ $0.05 \sim 0.005\text{mm}$ ）组成的土的结构形式。据研究，粒径为 $0.05 \sim 0.005\text{mm}$ 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，形成具有很大孔隙的蜂窝状结构，如图 1-6 所示。

(3) 絮状结构 是由黏粒（ $<0.005\text{mm}$ ）集合体组成的结构形式。黏粒能够在水中长期悬浮，不因自重而下沉。当这些悬浮物在水中的黏粒被带到电解质浓度较大的环境中

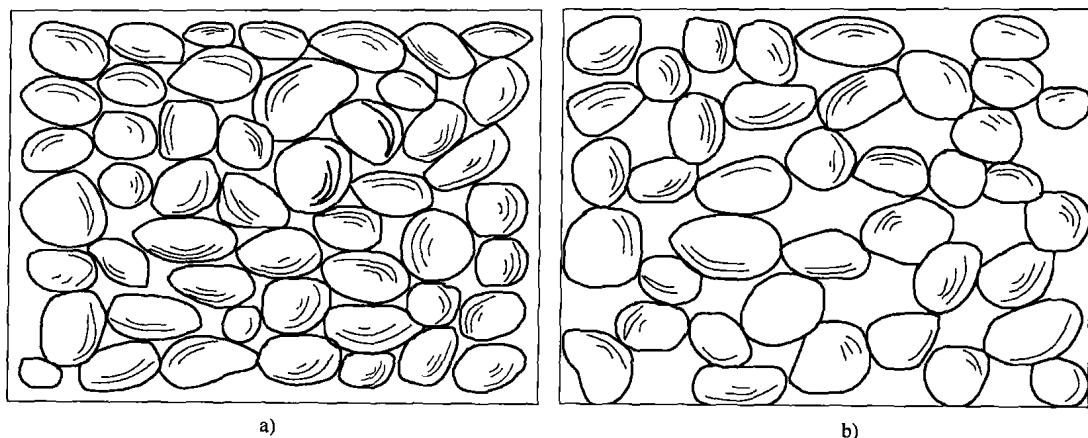


图 1-5 土的单粒结构

(如海水), 黏粒凝聚成絮状的集粒 (黏粒集合体) 而下沉, 并相继和已沉积的絮状集粒接触, 而形成类似蜂窝而孔隙很大的絮状结构, 如图 1-7 所示。

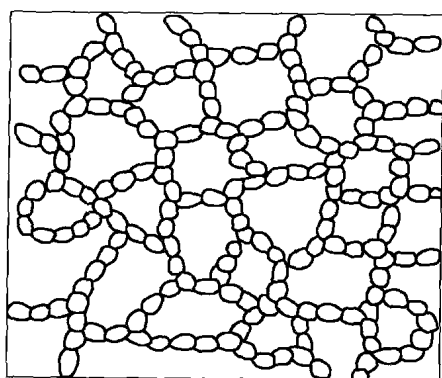


图 1-6 土的蜂窝结构

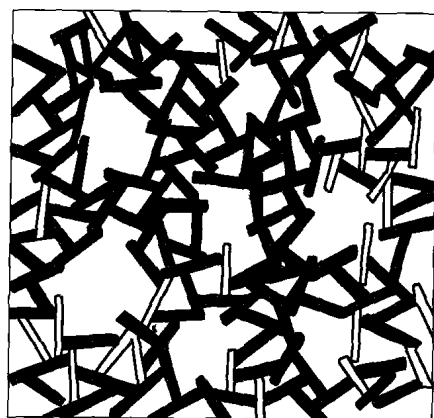


图 1-7 土的絮状结构

蜂窝结构和絮状结构的土中存在大量孔隙, 压缩性高, 抗剪强度低, 透水性弱, 其土粒之间的黏结力往往由于长期的压密作用和胶结作用而得到加强。

4. 土的构造

土的构造是指同一土层中土颗粒之间相互关系的特征。土的构造通常分为层状构造、分散构造和裂隙构造。

(1) 层状构造 是土粒在沉积过程中, 由于不同阶段沉积物质成分和颗粒大小不同, 沿竖直方向呈层状分布特征。

(2) 分散构造 是土层颗粒间无大的差别, 分布均匀, 性质相近, 一般为厚度较大的粗粒土, 如砂、卵石层等。

(3) 裂隙构造 是指土体被许多不连续的小裂隙分割。裂隙的存在极大地降低了土体的强度和稳定性, 增大了透水性, 对工程不利。

一般地, 分散构造的工程性质最好。裂隙构造中, 因裂隙附近强度低, 渗透性大, 工程特性比较差。

二、土的物理性质指标

自然界中的土体结构组成十分复杂,为了分析问题方便,将其看成是三相,简化成一般的物理模型进行分析。土的三相,即土粒为固相;土中的水为液相;土中的气为气相。表示土的三相组成部分质量、体积之间的比例关系的指标,称为土的三相比例指标。主要指标有:密度、天然密度、含水量(这3个指标需用实验室实测)和由这3个指标计算得出的指标:干密度、有效密度、饱和密度、孔隙率、孔隙比和饱和度。这些指标随着土体所处的条件的变化而改变,如地下水位的升高或降低,土中水的含量也相应增大或减小;密实的土,其气相和液相占据的孔隙体积少。这些变化都可以通过相应指标的数值大小反映出来。

1. 土的三相图

土的颗粒、水、气体混杂在一起,为分析问题方便,常理想地将三相分别集中来表示各部分之间的数量关系,如图1-8所示。三相图的右侧表示三相组成的体积关系;三相图的左侧表示三相组成的质量关系。

2. 基本指标

土的三相比例指标中有3个指标必须用土的试验测定,称为基本指标或试验指标。

(1) 土的密度 ρ 和重度 γ 天然状态下,单位体积土的质量称为土的密度(单位为 g/cm^3 或 t/m^3);单位体积天然土所受到的重力,称为重度(单位为 kN/m^3)。

$$\rho = m/V \quad (1-3)$$

$$\gamma = \rho g \quad (1-4)$$

式中 γ ——土的重度(kN/m^3);

g ——重力加速度,约等于 $9.807\text{m}/\text{s}^2$,
在工程计算中常近似取 $g = 10\text{m}/\text{s}^2$ 。

天然状态下土的密度变化范围比较大,一般黏性土 $\rho = 1.8 \sim 2.0\text{g}/\text{cm}^3$,砂土 $\rho = 1.6 \sim 2.0\text{g}/\text{cm}^3$ 。黏性土的密度一般用“环刀法”测定。

(2) 土粒相对密度 d_s 土粒的质量与同体积 4°C 时纯水的质量之比,称为土粒相对密度。

$$d_s = m_s/V_s \rho_w = \rho_s/\rho_w \quad (1-5)$$

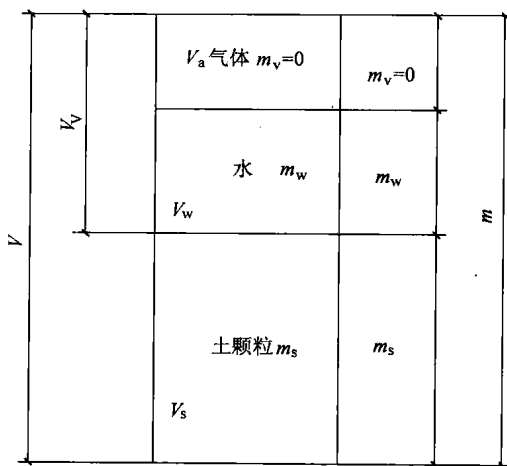
式中 ρ_w —— 4°C 纯水的密度(g/cm^3);

ρ_s ——土粒的密度(g/cm^3)。

d_s 的变化范围不大,取决于土的矿物成分,常用密度瓶法测定。黏性土的 d_s 一般为 $2.75 \sim 2.72$;粉土一般为 $2.71 \sim 2.70$;砂土一般为 $2.69 \sim 2.65$ 。

(3) 土的含水量 ω 土中水的质量与土粒质量之比(用百分数表示)称为土的含水量。

$$\omega = m_w/m_s \times 100\% \quad (1-6)$$



图中字母的物理意义: V ——土的总体积
 V_v ——土粒的孔隙体积 V_s ——土粒的体积
 V_w ——水的体积 V_a ——气体的体积
 m ——土的总质量 m_s ——土粒的质量
 m_w ——水的质量

图 1-8 土的三相图