

岩土力学

主 编 侯献语 殷雨时 袁金秀
副主编 李 晶 李玉良 白 洋
主 审 王万德



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

岩 土 力 学

主 编 侯献语 殷雨时 袁金秀
副主编 李 晶 李玉良 白 洋
主 审 王万德



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本教材结合国家现行规范、规程和标准组织教材内容，同时努力结合工程实践编写而成。全书共分两部分：土力学和岩体力学。土力学部分包括 5 章，主要介绍土的物理性质及工程分类、地基中的应力及沉降计算、土的抗剪强度与地基承载力、土压力的计算；岩体力学包括 6 章，主要介绍了岩体力学、岩体的物理性质及工程分类、岩体的基本力学性质、岩体初始应力及其测量、地下洞室围岩稳定性分析和岩体边坡稳定性分析。各章后附有思考题与习题，供学生复习使用。

本教材适合作为高等职业院校相关专业的教材，同时可以作为相关行业从业人员的参考用书。

图书在版编目（C I P）数据

岩土力学 / 侯献语，殷雨时，袁金秀主编. -- 北京：
中国水利水电出版社，2017. 1
ISBN 978-7-5170-4842-8

I. ①岩… II. ①侯… ②殷… ③袁… III. ①岩土力
学—高等学校—教材 IV. ①TU4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第276957号

书 名	岩土力学 YANTU LIXUE
作 者	主编 侯献语 殷雨时 袁金秀 副主编 李晶 李玉良 白洋 主审 王万德
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 13 印张 308 千字
版 次	2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	38.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

《《 前 言 》》

本教材包括土力学和岩体力学两部分内容,目前多数职业院校使用的教材版本比较陈旧,其中部分内容已经不符合实际,加上很多本科学校仅有少部分《岩土力学》教材可供使用,这些教材普遍理论知识点叙述较深且实操性不强,不适合当下高职院校学生学习。由于现今地下工程行业的加速发展,迫切需要一本适合高职学生应用的教材,以满足教学和行业要求。

本教材结合国家现行规范、规程和标准组织教材内容,同时努力结合工程实践编写而成。共分两部分:土力学和岩体力学。土力学部分包括5章,主要介绍土的物理性质及工程分类、地基中的应力及沉降计算、土的抗剪强度与地基承载力、土压力的计算;岩体力学包括6章,主要介绍了岩体力学、岩体的物理性质及工程分类、岩体的基本力学性质、岩体初始应力及其测量、地下洞室围岩稳定性分析和岩体边坡稳定性分析。各章后附有思考题与习题,供学生复习使用。通过本课程的学习,要求学生掌握土的基本物理力学特性和计算方法,培养学生应用土力学原理解决土工问题的能力,掌握岩块、结构面、岩体等基本概念、性质指标及其测试方法,掌握工程岩体重分布应力特征及工程岩体稳定性分析方法;培养学生分析问题的能力,初步具备解决岩体力学实际问题的能力,为今后从事生产实际工作和科学研究打好基础。

本教材由辽宁省交通高等专科学校王万德担任主审;辽宁省交通高等专科学校侯献语、殷雨时,河北交通职业技术学院袁金秀担任主编;辽宁省交通高等专科学校李晶,浙江同济科技职业学院李玉良,江苏建筑职业技术学院白洋担任副主编。其中,侯献语负责编写第3章~第5章,殷雨时负责编写第1章、第2章和第6章,袁金秀负责编写第8章,李晶负责编写第7章和第9章,李玉良负责编写第10章,白洋负责编写第11章,河北交通职业技术学院王道远负责本书的大量绘图和制图工作。对以上各位老师做的辛勤工作一并表示感谢!

由于编者水平有限,书中难免存在疏误之处,恳切希望广大读者批评指正。

编者

2016年9月

目 录

前言

土 力 学

第1章 土的物理性质及工程分类	3
1.1 土的形成与组成	3
1.2 土的物理性质指标	8
1.3 土的物理状态指标	12
1.4 地基土的工程分类	16
1.5 土的击实机理及工程控制	18
思考题与习题	23
第2章 地基中的应力计算	25
2.1 土的自重应力	25
2.2 基底压力的计算	28
2.3 地基中的附加应力计算	30
思考题与习题	37
第3章 地基沉降计算	39
3.1 土的压缩性	39
3.2 地基最终沉降量计算	44
3.3 基础沉降与时间的关系	51
3.4 地基容许沉降量与减小沉降危害的措施	55
思考题与习题	57
第4章 土的抗剪强度与地基承载力	59
4.1 土的抗剪强度与极限平衡条件	59
4.2 抗剪强度指标的测定方法	64
4.3 地基承载力	68
思考题与习题	76
第5章 土压力的计算	78
5.1 土压力的基本概念	78
5.2 静止土压力的计算	80
5.3 朗肯土压力理论	81
5.4 库仑土压力理论	89
5.5 朗肯土压力理论与库仑土压力理论比较	92
5.6 挡土墙设计	93

思考题与习题	99
岩 体 力 学	
第 6 章 岩体力学概述	103
6.1 岩石与岩体	104
6.2 岩体力学的研究内容及方法	106
6.3 岩体力学的发展	108
思考题与习题	111
第 7 章 岩体的物理性质及工程分类	112
7.1 岩石的物理性质	112
7.2 岩石的水理性质	114
7.3 岩石的其他性质	118
7.4 岩石的工程分类	119
思考题与习题	122
第 8 章 岩体的基本力学性质	123
8.1 概述	123
8.2 岩石的强度特性	124
8.3 岩石的强度准则	132
8.4 岩石强度分析	136
8.5 岩石的变形特征	144
思考题与习题	153
第 9 章 岩体初始应力及其测量	154
9.1 岩体的初始应力	154
9.2 岩体初始应力的现场量测方法	158
思考题与习题	164
第 10 章 地下洞室围岩稳定性分析	166
10.1 概述	166
10.2 地下洞室围岩的变形破坏	167
10.3 围岩压力	173
10.4 洞室围岩稳定性计算	177
思考题与习题	185
第 11 章 岩体边坡稳定性分析	186
11.1 边坡的变形与破坏类型	186
11.2 边坡稳定分析与评价	192
11.3 边坡的处理措施	197
思考题与习题	199
参考文献	200

土 刀 学

第1章 土的物理性质及工程分类

土的物理性质是土最基本的性质，土的组成不同和三项比例指标不同，土表现出不同的物理性质，如土的干湿、轻重、松密和软硬等。而土的这些物理性质在某种程度上又确定了土的工程性质。例如，松散、湿软地层，土的强度低、压缩性大；反之，强度大、地基承载力高、压缩性小；土颗粒大（无黏性土），地层的渗透性大，地基稳定性好、承载力大；土颗粒细（黏性土），则地层的渗透性小，地基稳定性差；土颗粒大小不均匀（级配好），则土在动荷载作用下易于压实。

本章详细介绍了土的形成与组成，定性、定量地描述了土的物质组成以及密实性对工程性质的影响。其中主要包括土的三相组成分析、土的三相比例指标的定义、黏性土的界限含水量、砂土的密实度、地基土的工程分类方法和土的压实特性等。这些内容是学习土力学所必需的基本知识，是评价土的工程性质、分析与解决土的工程技术问题的基础。

1.1 土的形成与组成

1.1.1 土的形成

土是由岩石经过长期风化、搬运、沉积作用而形成的。地球表面的岩石在大气中经受长期的风化、剥蚀后形成形状不同、大小不一的颗粒，这些颗粒在不同的自然环境下堆积，或经搬运和沉积而形成沉积物，当沉积年代不长，即沉积颗粒在压紧硬结成岩石之前形成的一种松散物质，即为土。土是一种集合体。土粒之间的孔隙中包含着水和气体，因此，土是一种三相体。岩石和土在不同的风化作用下形成不同性质的土。风化作用主要有物理风化、化学风化和生物风化。

1. 物理风化

岩石经受风、霜、雨、雪的侵蚀，温度、湿度的变化，不均匀的膨胀与收缩破碎，或者运动过程中因碰撞和摩擦破碎，只改变颗粒的大小和形状，不改变矿物颗粒成分的过程称为物理风化。物理风化后的产物称为原生矿物，如石英、长石、云母等。

2. 化学风化

母岩表面破碎的颗粒受环境因素的作用而产生一系列的化学变化，改变了原来矿物的化学成分，形成新的矿物——次生矿物，这一过程称为化学风化。经化学风化生成的土为细粒土，具有黏结力，成分最主要是黏土颗粒以及大量的可溶性盐类，如黏土矿物、铝铁氧化物和氢氧化物等。

3. 生物风化

由植物、动物和人类活动对岩体的破坏称生物风化。土经生物风化后，其矿物成分没有发生变化。如植物的根对岩石的破坏、人类开山等，其矿物成分未发生变化。



1.1.2 土的三相组成

在天然状态下，自然界中的土是由固体颗粒、水、气体组成的三相体系。固体颗粒构成土的骨架。骨架间有许多孔隙，可由水和气所填充。这三个组成部分本身的性质以及它们之间的比例关系和相互作用决定土的物理性质。土的三相组成比例并不是恒定的，它随着环境的变化而变化。土的状态和工程性质随土的三相组成比例的不同而不同。例如，固体+气体（液体=0）为干土，此时黏土呈坚硬状态，砂土呈松散状态；固体+气体+液体为湿土，是一种非饱和土，此时黏土多为可塑状态；固体+液体（气体=0）为饱和土，此时粉细砂或粉土遇强烈地震，可能产生液化，而使工程遭受破坏；黏土地基受建筑荷载作用发生沉降需十几年才能稳定。

1. 土的固体颗粒

土的固体颗粒是土的三相组成中的主体，是决定土的工程性质的主要成分。固体颗粒的矿物成分、大小、形状和组成情况是决定土的物理力学性质的主要因素。

自然界中的土都是由大小不同的土颗粒组成。土颗粒的大小与土的性质密切相关。如土颗粒由粗变细，土的性质可由无黏性变为有黏性。粒径大小在一定范围内的土，其矿物成分及性质都比较相近。因此，可将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 1.1 中根据界限粒径 200mm、20mm、2mm、0.075mm、0.005mm 把土粒分为六大粒组，即漂石（块石）、卵石（碎石）、砾石、砂粒、粉粒和黏粒。

表 1.1 粒 组 划 分 标 准

粒组名称	粒组范围/mm	一 般 特 征
漂石（块石）	>200	透水性很大，无黏性，无毛细水
卵石（碎石）	20~200	
砾石	2~20	透水性大，无黏性，毛细水上升高度不超过粒径
砂粒	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	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	<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

天然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）称为颗粒级配。

确定各个粒组相对含量的颗粒分析试验方法分为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则，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 1.1 所示。颗粒级配曲线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；纵坐标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情况。

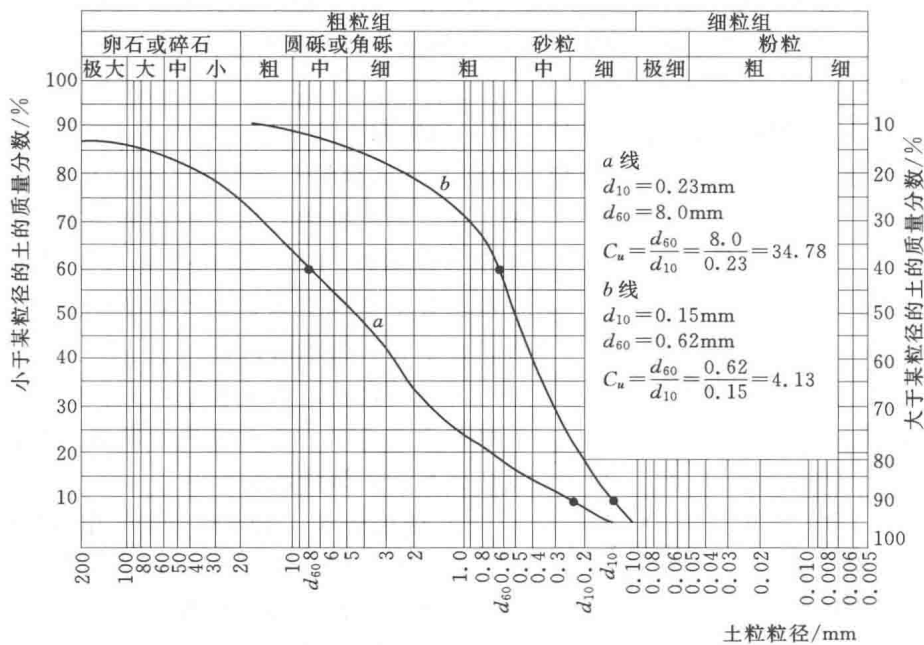


图 1.1 颗粒级配曲线

如图 1.1 中曲线 a 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，即为级配不良。

工程中为了定量反映土的不均匀性，常用不均匀系数 C_u 来表示颗粒级配的不均匀程度，即

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

式中 C_u ——土的不均匀系数；

d_{60} ——限定粒径，在粒径分配曲线上小于等于该粒径的土的质量含量占总土质量的 60% 的粒径；

d_{10} ——有效粒径，在粒径分配曲线上小于等于该粒径的土的质量含量占总土质量的 10% 的粒径。

不均匀系数 C_u 能反映土颗粒组成的重要特征。 C_u 越大表示土粒大小的分布范围越大，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



$C_u \leq 5$ 的土称为级配不良的土； $C_u > 10$ 的土称为级配良好的土。

实际上，单独只用一个指标 C_u 确定土的级配情况是不够的，要同时考虑级配曲线的整体形状。曲率系数 C_c 为表示土颗粒组成的又一特征， C_c 的计算式为

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

式中 C_c ——曲率系数；

d_{30} ——在粒径分配曲线上小于等于该粒径的土的质量含量占总土质量的 30% 的粒径。

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

2. 土中水

土中水即土的液相，其含量及其性质明显地影响土的性质。水分子 H_2O 为极性分子，由带正电荷的氢原子与带负电荷的氧原子组成。固体颗粒本身带负电荷，在其周围形成电

场。在电场范围内，水中的阳离子和极性水分子被吸引在颗粒四周，定向排列，如图 1.2 所示。根据水分子受到引力的大小，土中水主要可以分成结合水和自由水两大类。

(1) 结合水。由土粒表面电场引力吸附的土中水称为结合水。根据其离土粒表面的距离分为强结合水和弱结合水两类。

1) 强结合水。受颗粒电场作用力吸引紧紧包围在颗粒表面的水分子称为强结合水，它的性质接近固体，不传递静水压力，密度为 $1.2 \sim 2.4 \text{ g/cm}^3$ ， 100°C 时不蒸发，冰点为 -78°C ，具有极大的黏滞性。

2) 弱结合水（也称薄膜水）。指紧靠于强结合水外围形成的一层水膜，其厚度小于 $0.5 \mu\text{m}$ ，

这层水膜里的水分子和水化离子仍在土颗粒电场作用范围以内。弱结合水也不传递静水压力，但水膜较厚的弱结合水能向邻近的较薄的水膜处缓慢转移。弱结合水的存在是黏性土在某一含水量范围内表现出可塑性的原因。弱结合水密度为 $1.0 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$ ，冰点温度为 $-20 \sim -30^\circ\text{C}$ 。

(2) 自由水。不受颗粒电场引力作用的水称为自由水。自由水又可分为重力水和毛细水。

1) 重力水。这种水位于地下水位以下，是在本身重力或压力差作用下运动的自由水，对土粒有浮力作用。土中重力水传递水压力，与一般水的性质无异。

2) 毛细水。这种水存在于地下水位以上，是受水与空气交界面处的表面张力作用而存在于细颗粒的孔隙中的自由水。由于表面张力作用，地下水沿着不规则的毛细孔上升，形成毛细上升带。其上升的高度取决于颗粒粗细与孔隙的大小。砂土、粉土及粉质黏土中

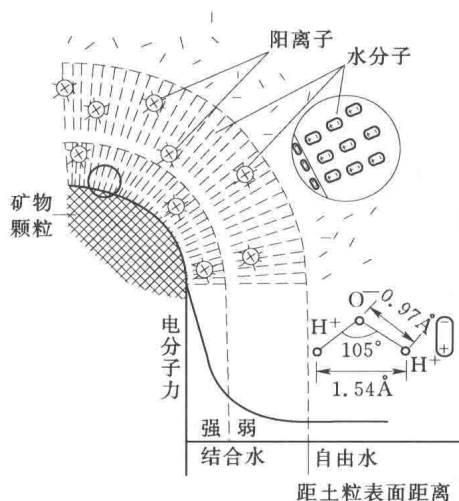


图 1.2 矿物颗粒对水分子的静电引力作用



毛细水含量较大。毛细水的上升会使地基湿润、强度降低、变形增大。在干旱地区，地下水中的可溶盐随毛细水上升后不断蒸发，盐分便积聚于靠近地表处而使地表土盐渍化。在寒冷地区，要注意因毛细水上升产生土的冻胀现象，地下室要采取防潮措施。

3. 土中气体

土中的气体是指存在于土孔隙中未被水占据的部分。土中的气体存在的形式有两种：一种与大气相通，不封闭，对土的性质影响不大，称为自由气体；另一种则封闭在土的孔隙中与大气隔绝，封闭气体，不易逸出，增大了土体的弹性和压缩性，减小了透水性，称为封闭气泡。在淤泥和泥炭土中，由于微生物的分解作用，产生一些可燃气体（如硫化氢、甲烷等），使土层不易在自重作用下压密而形成具有高压缩性的软土层。

1.1.3 土的结构

土的结构是指土颗粒之间的相互排列和连接方式。它在某种程度上反映了土的成分和土的形成条件，因而它对土的特性有重要的影响。土的结构分为单粒结构、蜂窝结构和絮状结构三种基本类型。

1. 单粒结构

粗颗粒在重力的作用下单独下沉时与稳定的颗粒相接触，稳定下来，就形成单粒结构。单粒结构可以是疏松的，也可以是密实的，如图 1.3 所示。

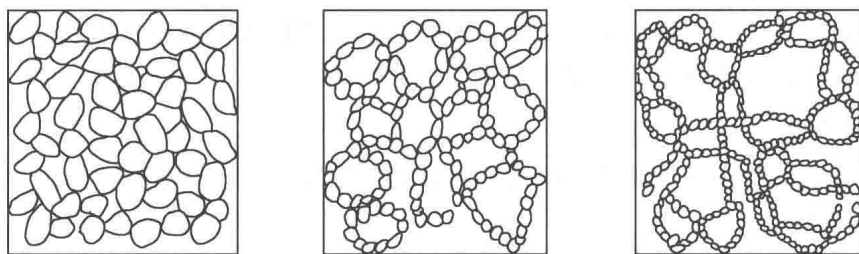


图 1.3 单粒结构的不同形态

2. 蜂窝结构

较细的颗粒在水中单独下沉时，碰到已沉积的土粒，因土粒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，最终形成具有很大孔隙的蜂窝状结构。

3. 絮状结构

粒径极细的黏土颗粒在水中长期悬浮，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个小链环时相互吸引，不断扩大形成大链环状的絮状结构。因小链环中已有孔隙，大链环中又有更大的孔隙，因此被形象地称为二级蜂窝结构，此种絮状结构在海积黏土中常见。

以上三种结构中，以密实的单粒结构工程性质最好，蜂窝结构与絮状结构如被扰动破坏天然结构，则强度低、压缩性高，不可用作天然地基。

1.1.4 土的构造

土的构造是指在土体中各结构单元之间的关系。一般可分为以下几种。



1. 层状构造

土粒在沉积过程中,由于不同阶段沉积的土的物质成分、粒径大小或颜色不同,沿竖向呈现层状特征。常见的有水平层理和交错层理。层状构造反映不同年代不同搬运条件形成的土层,为细粒土的一个重要特征。

2. 分散构造

在搬运和沉积过程中,土层中的土粒分布均匀,性质相近,呈现分散构造。分散构造的土可看作各向同性体。各种经过分选的砂、砾石、卵石等沉积厚度常较大,无明显的层理,呈分散构造。

3. 裂隙构造

裂隙构造的土体被许多不连续的小裂隙所分割,裂隙中往往充填着盐类沉淀物。不少坚硬和硬塑状态的黏性土具有裂隙构造。红黏土中网状裂隙发育,一般可延伸至地下3~4m。黄土具有特殊的柱状裂隙。裂隙破坏了土的完整性,水容易沿裂隙渗漏,造成地基土的工程性质恶化。此外,土中的包裹物(如腐殖质、贝壳、结核体以及天然或人为洞穴等构造特征)都构成土的不均匀性。

4. 结核状构造

在细粒土中混有粗颗粒或各种结核的构造属结核状构造。如含礓石的粉质黏土、含砾石的冰渍黏土等。

通常分散构造的工程性质最好。结核状构造的土工程性质的好坏取决于细粒土部分。裂隙状构造中,因裂隙强度低、渗透性大,工程性质差。

1.1.5 土的特性

土与钢材、混凝土等连续介质相比,具有以下特性。

1. 高压缩性

由于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,混凝土属于胶结体,都不存在孔隙被压缩的条件,故土的压缩性远远大于钢筋和混凝土等。

2. 强渗透性

由于土中颗粒间存在孔隙,因此土的渗透性远比其他建筑材料大。特别是粗粒土具有很强的渗透性。

3. 低承载力

土颗粒之间孔隙具有较大的相对移动性,导致土的抗剪强度较低,而土体的承载力实质上取决于土的抗剪强度。

土的压缩性高低和渗透性强弱是影响地基变形的两个重要因素,前者决定地基最终变形量的大小,后者决定基础沉降速度的快慢程度(即沉降与时间的关系)。

1.2 土的物理性质指标

描述土的三相物质在体积和质量上比例关系的有关指标称为土的三相比指标。三相比指标反映土的干和湿、疏松和密实、软和硬等物理状态,是评价土的工程性质的最基本的物理指标,是工程地质报告中不可缺少的基本内容。三相比指标可分为基本指标和



换算指标两种。

1.2.1 土的三相图

为了便于说明和计算,可以用土的三相图(图 1.4)来表示土各部分之间的数量关系。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。

$$V = V_s + V_v$$

$$V = V_s + V_w + V_a$$

$$m = m_s + m_w$$

1.2.2 基本指标

土的三相比比例指标中有三个指标可用土样进行试验测定,称为基本指标,也称为试验指标。

1. 土的密度和重度

单位体积内土的质量称为土的密度 $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$; 单位体积内土的重力称为土的重度 $\gamma(\text{kN}/\text{m}^3)$ 。

$$\rho = \frac{\text{土的总质量}}{\text{土的总体积}} = \frac{m}{V} \quad (1.3)$$

$$\gamma = \frac{\text{土的总重量}}{\text{土的总体积}} = \frac{W}{V} = \rho g \quad (1.4)$$

式中 W ——土的重量, N;

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 $g=10\text{m}/\text{s}^2$;

m ——土的质量, g;

V ——土的体积, cm^3 。

天然状态下土的密度变化范围比较大,一般对于黏性土, $\rho=1.8\sim2.0\text{g}/\text{cm}^3$; 对于砂土, $\rho=1.6\sim2.0\text{g}/\text{cm}^3$ 。黏性土的密度一般用“环刀法”测定。

2. 土粒相对密度 d_s

土中固体颗粒的质量与土粒同体积 4°C 纯水质量的比值称为土粒相对密度(无量纲)。

$$d_s = \frac{m_s}{V_s} \rho_w = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (1.5)$$

式中 m_s ——土粒的质量, g;

V_s ——土粒的体积, cm^3 ;

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,其大小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 $2.72\sim2.75$; 粉土一般为 $2.70\sim2.71$; 砂土一般为 $2.65\sim2.69$ 。

3. 土的含水量 w

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。

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (1.6)$$

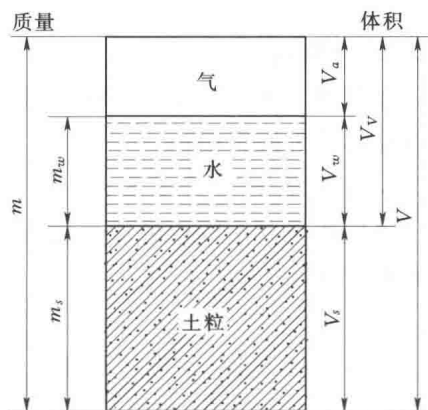


图 1.4 土的三相图

V ——土的总体积, cm^3 ; V_v ——土的孔隙体积, cm^3 ; V_s ——土粒体积, cm^3 ;
 V_w ——水的体积, cm^3 ; V_a ——气体体积, cm^3 ; m ——土的总质量, g;
 m_s ——固体颗粒质量, g;
 m_w ——水的质量, g



式中 m_w ——土中水的质量, g;

m_s ——土粒的质量, g。

含水量是反映土的湿度的一个重要物理指标。天然土层的含水量变化范围很大, 它与土的种类、埋藏条件及其所处的自然地理环境等有关。同一类土, 含水量越高, 土越湿, 一般来说也就越软。

1.2.3 换算指标

在测出上述三个基本指标之后, 可根据图 1.4 所示的三相图, 经过换算可求得下列五个指标, 称为换算指标。

1. 干密度 ρ_d 和干重度 γ_d

单位体积内土颗粒的质量称为土的干密度 (g/cm^3); 单位体积内土颗粒的重力称为土的重度 (N/cm^3)。

$$\rho_d = \frac{\text{固体颗粒质量}}{\text{土的体积}} = \frac{m_s}{V} \quad (1.7)$$

$$\gamma_d = \rho_d g \quad (1.8)$$

式中 m_s ——土粒的质量, g;

V ——土的体积, cm^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 $g=10\text{m}/\text{s}^2$ 。

2. 土的饱和密度 ρ_{sat} 和饱和重度 γ_{sat}

饱和密度是指土中孔隙完全充满水时, 单位体积土的质量 (g/cm^3); 饱和重度是指土中孔隙完全充满水时, 单位体积内土的重力 (N/cm^3)。

$$\rho_{sat} = \frac{\text{孔隙完全充满水时的质量}}{\text{土的体积}} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} = \frac{m_s + m_w + V_a \rho_w}{V} \quad (1.9)$$

$$\gamma_{sat} = \rho_{sat} g \quad (1.10)$$

式中 m_s ——土粒的质量, g;

m_w ——气体的质量, g;

V_v ——土中孔隙的体积, cm^3 ;

V_a ——气体体积, cm^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 $g=10\text{m}/\text{s}^2$;

ρ_w —— 4°C 纯水的密度, g/cm^3 ;

V ——土的体积, cm^3 。

3. 土的有效密度 ρ' 和有效重度 γ'

土的有效密度 ρ' (g/cm^3) 是指在地下水位以下, 单位土体积中土粒的质量扣除土体排开同体积水的质量; 土的有效重度 γ' (N/cm^3) 是指在地下水位以下, 单位土体积中土粒所受的重力扣除水的浮力。

$$\rho' = \frac{m_s - V_s \rho_w}{V} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} - \frac{(V_s + V_v) \rho_w}{V} = \rho_{sat} - \rho_w \quad (1.11)$$

$$\gamma' = \rho' g = (\rho_{sat} - \rho_w) g = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (1.12)$$

式中 m_s ——土粒的质量, g;



- V_s ——土粒的体积, cm^3 ;
 g ——重力加速度, 约等于 9.807m/s^2 , 在工程计算中常近似取 $g=10\text{m/s}^2$;
 ρ_w —— 4°C 纯水的密度, g/cm^3 ;
 V ——土的体积, cm^3 。

4. 土的孔隙比 e 和孔隙率 n

孔隙比 e 为土中孔隙体积与土粒体积之比, 用小数表示; 孔隙率为土中孔隙体积与土的总体积之比, 以百分数表示。

$$e = \frac{V_v}{V_s} \tag{1.13}$$

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \tag{1.14}$$

式中 V_v ——土中空隙的体积, cm^3 ;
 V_s ——土粒的体积, cm^3 。

孔隙比是评价土的密实程度的重要物理性质指标。一般孔隙比 $e < 0.6$ 的土是低压缩性的土, 孔隙比 $e > 1.0$ 的土是高压缩性的土。土的孔隙率也可用来表示土的密实度。

5. 土的饱和度 S_r

土中水的体积与孔隙体积之比称为土的饱和度, 以百分数表示。

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \tag{1.15}$$

式中 V_w ——土中水的体积, cm^3 ;
 V_v ——土中孔隙的体积, cm^3 。

饱和度用作描述土体中孔隙被水充满的程度。干土的饱和度 $S_r = 0\%$, 当土处于完全饱和状态时 $S_r = 100\%$ 。根据饱和度, 土可划分为稍湿、很湿和饱和三种湿润状态: 当 $S_r \leq 50\%$ 时, 为稍湿状态; 当 $50\% < S_r \leq 80\%$ 时, 为很湿状态; 当 $S_r > 80\%$ 时, 为饱和状态。

土的三相比例指标常见数值范围及常用换算公式见表 1.2。

表 1.2 土的三相比例指标常见数值范围及常用换算公式

名称	符号	表达式	单位	常见值	换算公式
密度	ρ	$\rho = \frac{m}{V}$	g/cm^3	1.6~2.2	$\rho = \rho_d(1+w)$
重度	γ	$\gamma \approx 10\rho$	kN/cm^3	16~22	$\gamma = \gamma_d(1+w)$
比重	G_s	$G_s = \frac{m_s}{V_s}$		砂土 2.65~2.69 粉土 2.70~2.71 黏性土 2.72~2.75	
含水量	w	$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100$	%	砂土 0~40% 黏性土 20%~60%	$w = \left(\frac{\gamma}{\gamma_d} - 1 \right) \times 100\%$
孔隙比	e	$e = \frac{V_v}{V_s}$		砂土 0.5~1.0 黏性土 0.5~1.2	$e = \frac{n}{1-n}$
孔隙率	n	$n = \frac{V_v}{V} \times 100$	%	30%~50%	$n = \frac{e}{1+e} \times 100\%$
饱和度	S_r	$S_r = \frac{V_w}{V_v}$		0~1	