

高 等 学 校 教 材

土 力 学

陈伟庆 孔书祥 主编

中 国 铁 道 出 版 社

2 0 0 2 年 · 北 京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书系统地阐述了土的基本特性,土力学的基本原理,土体变形及稳定的主要分析方法,以及在工程实践中的应用,并适当介绍了学科的最新成果和发展动态。为满足学生毕业后的需要,书中实践性教学内容较多,并能结合内容深入浅出地进行叙述。

全书共分九章,内容包括土的组成和土的物化性质,土中应力,土的压缩性、渗透性,土的变形与时间的关系(固结度),土的抗剪强度和地基承载力,土压力和土坡稳定,土动力学。本书可作为高等学校土木工程(道路工程、桥梁工程、隧道工程)专业本科或高职高专学生和其他相关专业学生的学习教材,也可作为大专院校有关专业的教学参考书以及有关专业技术人员的技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

土力学/陈伟庆,孔书祥主编.—北京:中国铁道出版社,2002.7

ISBN 7-113-04638-X

I. 土… II. ①陈…②孔… III. 土力学 IV. TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 023470 号

书 名:土力学

作 者:陈伟庆 孔书祥

出版发行:中国铁道出版社(100054 北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:程东海 编辑部电话:路电(021)73135 市电(010)51873135

封面设计:冯龙彬

印 刷:中国铁道出版社印刷厂

开 本:787×1092 1/16 印张:12 字数:293千

版 本:2002年8月第1版 2002年8月第1次印刷

印 数:1~3000册

书 号:ISBN 7-113-04638-X/TU·697

定 价:16.60元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

联系电话:路电(021)73169,市电(010)53545969

前 言

由于铁路和公路运输的大力发展,需要大量能够应用高等工程技术的科技人才。为满足教学的需要,根据教育部《土力学教学大纲》的要求,编写了这本《土力学》教材,供土木工程专业(道路工程、桥梁工程、隧道工程、建筑工程等)的学生教学使用,教学时数为50学时左右。

《土力学》是一门技术基础课。在教材的编写中,考虑到教学要突出理论知识的应用和实际动手能力的培养,要加强针对性和实用性的教学特点和学生学习的规律。

本书由西南交通大学峨眉校区土木工程系陈伟庆、孔书祥主编,参加编写工作的还有西南交通大学峨眉校区土木工程系的王学芳老师。

本教材共分九章,分别为绪论(陈伟庆);第一章:土的物理性质和工程分类(孔书祥);第二章:土中应力(孔书祥);第三章:土的压缩性和地基沉降(陈伟庆);第四章:土的渗透性及固结理论(陈伟庆、张国林);第五章:土的抗剪强度(陈伟庆);第六章:土坡的稳定性(孔书祥);第七章:土压力和挡土墙(王学芳);第八章:天然地基的承载力(陈伟庆);第九章:土动力学概述(王学芳)。

感谢在全书编写过程中给予了指导、提出了不少宝贵意见的各位老师。

限于编者的水平,本书不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2002年5月

目 录

绪 论.....	1
第一章 土的物理性质及工程分类.....	3
第一节 土的形成.....	3
第二节 土的颗粒分析与结构.....	3
第三节 土的各相数量指标.....	5
第四节 土的物理和物理—化学性质.....	9
第五节 土的工程分类	13
第六节 土的压实性	16
第二章 土中应力	20
第一节 概述	20
第二节 土的自重应力计算	21
第三节 基底压力的计算	22
第四节 地基中的附加应力	25
第三章 土的压缩性与地基沉降	36
第一节 土的压缩性	36
第二节 土的形变模量	40
第三节 土的压缩性的原位测试	42
第四节 地基最终沉降计算	46
第五节 沉降差与倾斜	51
第六节 考虑应力历史的固结沉降计算	56
第四章 土的渗透性及固结理论	63
第一节 土的渗透性	63
第二节 饱和黏性土的单向固结	68
第三节 多维固结理论简介	81
第四节 砂土的振动液化	84
第五章 土的抗剪强度	89
第一节 概述	89
第二节 土的直剪试验与库伦定律	90

第三节	土的强度理论与极限平衡条件	92
第四节	轴压试验和十字板试验	97
第五节	总应力法和有效应力法	101
第六节	砂土的抗剪强度	103
第七节	黏性土的抗剪强度	106
第六章	土坡的稳定性	112
第一节	概述	112
第二节	砂性土土坡的稳定性分析	112
第三节	黏性土土坡的稳定性分析	114
第七章	土压力和挡土墙	122
第一节	概述	122
第二节	朗金土压力理论	123
第三节	库伦土压力理论	127
第四节	库尔曼图解法求主动土压力	131
第五节	几种常见情况下主动土压力计算	131
第六节	桥台土压力	136
第七节	综合内摩擦角	137
第八节	重力式挡土墙的计算	138
第八章	天然地基的承载力	142
第一节	地基的破坏形态	142
第二节	地基临塑应力	144
第三节	浅基础地基极限承载力	147
第四节	按《铁路桥涵设计规范》确定地基承载力	151
第五节	按《建筑地基基础设计规范》确定地基承载力	157
第六节	原位测试确定地基承载力	161
第九章	土动力学概述	168
第一节	土的动力特性	168
第二节	土的动力本构模型	170
第三节	土的动力反应分析	173
参考文献	183

绪 论

土力学是一门研究土的物理、力学性质及其受荷载作用后的变形与强度规律的一门科学,它源于社会生产力的发展,与工程实践有密切的关系。无论将土作为地基,还是作为一种建筑材料(如铁路、公路路基,工业与民用建筑物的修建场地,堤坝等的填料)或作为结构物的周围环境介质(如地下工程、隧道周围的土体)均与土力学学科所研究的范畴有关。

组成地层的土或岩石是自然界的产物,是由岩石风化后形成的。它的形成过程、物质成分、工程特性及其所处的自然环境极为复杂多变。与其他材料相比,它不是一种连续介质,而是由各种粒径大小的颗粒集合组成,颗粒间的黏结程度远比颗粒本身强度小得多。土具有松散性,颗粒之间的孔隙由水与空气所填充。所以它是由固态(土颗粒)、液态(水)和气态(空气)所组成的三相体系,它们之间的质量和体积的比例关系,尤其孔隙中水的作用对土的物理、物理—化学性质及力学性质有很大的影响。与各种连续体(弹性体、塑性体、流体等)比较,天然土体具有一系列复杂的物理力学性质,而且容易受环境条件(温度、湿度、地下水等)变动的影 响。因而,对土而言,其工程特性与钢材、混凝土等材料相比,显得更为复杂,亦增加了对土的工程性质研究的困难程度。

天然地层的性质和分布不但因地而异,而且在较小范围内也可能有很大的变化。在进行地基基础设计和土力学计算之前,必须通过勘察和测试取得有关土层分布以及土的物理力学性质指标的充分的可靠的资料。

作为基础工程理论基础的土力学,既是一项古老的工程技术,又是一门年青的学科。土力学成为一门系统的学科,亦只有六七十年的历史。土力学的发端,始于18世纪兴起了工业革命的欧洲。那时,随着资本主义工业化转变为现代大工业,建筑的规模扩大了,为了满足向国内外扩张市场的需要,陆上交通进入了所谓“铁路时代”。因此,最初有关土力学的个别理论多与解决铁路路基问题有关。1773年,法国的C·A·库伦(Coulomb)根据试验创立了著名的砂土抗剪强度公式,提出了计算挡土墙土压力的滑楔理论。九十余年后,英国的W·J·M·朗金(Rankine,1869)又从不同的途径提出了挡土墙土压力的理论,这对后来的土体强度理论的发展起了很大的作用。此外,法国J·布辛奈斯克(Boussinesq,1885)求得了弹性半空间在竖向集中力的作用下的应力和变形的理论解答,瑞典W·费兰纽斯(Fellenius,1922)为解决铁路坍方问题作出了土坡稳定分析法,达西(Darcy)通过室内试验建立了有孔介质中水的渗流理论,太沙基(Terzaghi)建立了饱和土体中的有效应力原理,并据此提出了饱和土的一维渗透固结理论,普朗特(Prandtl)研究了刚性物体压入均匀的、各向同性的无重量的介质时的剪切破坏及承载力情况,导出了极限承载力公式。这些古典的理论和方法,直到今天,仍不失其理论和实用的价值。

在长达一个多世纪的发展过程中,许多研究者继承前人的研究,总结了实践经验,为孕育学科的雏形而作出贡献。1925年,K·太沙基(Terzaghi)归纳发展了以往的成就,发表了《土力学》(Erdbaumechanik)一书。接着,于1929年又与其他作者一起发表了《工程地质学》(Ingenieurgeologie)。这些比较系统完整的科学著作的出现,带动了各国学者对本学科各个方面的

探索。从此,土力学就作为独立的科学而取得不断的发展。从1936年在美国召开第一届国际土力学与基础工程会议起到1977年,共计开过9次会议。其间,世界各地(如亚洲、欧洲、非洲、泛美、澳新、东南亚等)和许多国家也都开展了类似的活动,交流和总结了本学科新的研究经验。在土力学理论方面,我国学者的某些成就在国际上是有影响的。早在20世纪50年代,陈宗基教授对土流变学和黏土结构的研究和黄文熙教授关于砂土振动液化的探讨以及考虑土侧向变形的地基沉降计算方法的提出,都对现代土力学的发展有所贡献。其他如土的变形特性和抗剪强度、土体极限平衡理论、挡土墙土压力和土坡稳定等理论方面的研究,也取得了不少成果。在我国由中国水利学会、中国土木工程学会、中国建筑工程学会及中国水力水电工程学会联合主办的《岩土工程学报》为我国土力学方面权威性的学术刊物,每四年举办一次全国性的土力学及基础工程学术年会,及时发表和交流广大科技人员的研究成果和工程实践经验。随着科学技术的发展,对土体本质的认识逐渐深化。电子计算机应用日趋广泛和有限单元法的普遍采用,土力学的理论亦日臻严密与完善。近年来国内外一些学者与工程技术人员提出了各种反映土的应力—应变非线性关系的本构定律,并经工程实践进一步验证、比较与选择,通过数值分析方法进行研究,从而使得解决复杂的土质条件、荷载情况和边界条件的土工问题成为可能。此外,对土体变形与时间关系的固结理论的研究,也开始侧重于探讨非线性固结问题。与此同时,土的宏观结构和微观结构以及与此有关的物理化学性质的研究也受到了注意。近年来土力学学科中利用概率统计的方法去研究土的性能的变异性与确定性的可靠度理论,亦有很大的发展。土力学与振动理论、随机过程理论及振动测试技术的结合,形成了土动力学,它研究土的动力特性,如地震或在动荷载作用下的土的动强度、动弹性模量、动土压力及饱和砂土的振动液化等。可以断言,土力学学科将随着工程建设的规模和复杂程序的日益增加,技术要求日益提高而相应地走向更高的发展阶段。土力学也必将与土质学、土壤学、化学、环境工程学等相结合,这也是这门学科发展的新动向。

土力学是一门技术基础课,它起着承上启下的作用。它主要研究下列几方面的内容:

1. 研究土的物理性质及在压密、渗透、强度等方面的力学性质,从理论上和通过实验途径进行分析和研究。
2. 研究土在外荷载与自重作用下的应力与应变关系,即研究土体受荷载作用时,土中应力的分布规律、应力状态随时间发生变化的情况,土体的变形总量及变形随时间发展的过程。
3. 研究土的强度与稳定性问题,即土的极限平衡条件、土压力。土坡稳定性及地基稳定性问题。
4. 介绍土力学实验的室内、室外试验方法、原位测试技术及试验成果的分析应用。

学习本课程,必须在已学完高等数学、工程力学(理论力学、材料力学)、工程地质等课程后进行,它又是后续的桥梁基础、隧道、铁路和公路路基、房屋建筑地基基础等专业课程的理论基础课。土力学是密切结合专业、结合工程实践的。正确掌握土力学的知识,对今后的专业教学有很大的帮助。为突出本专科学生的课程学习的特点,按照土木类专业(道路工程、桥梁工程、隧道工程等方向)本专科土力学教学大纲的要求,本教材着重于土力学的基本理论的叙述,内容在满足教学要求的前提下删繁就简,使学生在在学习过程中能抓住重点,理解基本概念,掌握基本的计算方法,培养学生初步解决工程实际问题的能力。此外,由于土力学具有很强的实践性,在教学过程中还应安排约10学时的土力学实验课,以掌握土的基本物理性质及土力学中的一些力学指标的测试原理和方法。

第一章 土的物理性质及工程分类

第一节 土的形成

地壳表层的岩石长期受自然界的空气、水、温度及各种生物的共同作用(即物理风化和化学风化),使大块岩石不断地破碎与分解。随着地质历史的推移和地质环境的演变,岩体逐渐地被分裂、搬运、沉积而成为大小、形状和成分都不同的颗粒集合体——即工程上所说的土。

物理风化是岩石块体崩解为碎块和岩屑。土中的碎石、砾石、砂等便是岩石物理风化的产物。化学风化则是有水、空气中的氧和二氧化碳等作用,不仅促使岩石进一步崩解,而且使风化产物的化学成分发生了变化,黏土颗粒便是岩石经化学风化的产物。

岩石风化后,有时形成由破碎物质构成的覆盖层,残留于原处叫做残积土,由于它未经搬运,故其颗粒随着深度递增向未经风化的基岩过渡。岩石风化产物经流水、风和冰川搬运至远处沉积后成为坡积土、洪积土、冲积土、冰川沉积土、风成沉积土等。由于搬运与沉积条件和行程的远近不同,土粒大小的分选程度、土粒形状以及土的结构都各不相同。

第二节 土的颗粒分析与结构

土是松散颗粒的集合体,它是由固体颗粒、水和气体所组成的三相体系。固体颗粒构成土的骨架,其间有孔隙。若孔隙中同时存在着水和气体,则土是三相的。土粒、水和气体分别称为土的固相、液相和气相。有时土粒间的孔隙全部被水充满,形成饱和土,则土是二相的(即固相和液相)。当土粒间的孔隙中只存在空气时,就称为干土,干土也是两相的(固相和气相)。土中各相的相对含量和相互作用,决定着土的物理力学性质。

一、土的颗粒分析

土的矿物颗粒构成土骨架,它对土的物理力学性质起决定性的作用。研究矿物颗粒就要分析粒径的大小及其在土中所占的百分比,即土的颗粒级配。

自然界中,土粒的大小很不均匀,随着土粒大小的变化,土有完全不同的性质。为了确定各种大小的土粒的相互关系,必须首先按土粒的直径大小进行归并与分类。将土粒分成若干粒组,表 1—1 中列出了各种粒组的范围和相应特性。土的性质从量变到质变的过程,不仅要从其颗粒大小不同去理解,而且还要理解到随着颗粒大小的变化反映其矿物成分是不同的,粒径与其矿物成分之间存在着一定的对应关系。

表 1—1 土的粒组划分

颗粒名称		粒径(mm)
漂石(浑圆或圆棱)或块石(尖棱)	大	大于 800
	中	800~400
	小	400~200

续上表

颗 粒 名 称		粒 径 (mm)
卵石(浑圆或圆棱)或碎石(尖棱)	大	200~60
	中	60~40
	小	40~20
砾石(浑圆或圆棱)或角砾(尖棱)	大	20~10
	中	10~4
	小	4~2
砂 粒	粗	2~0.5
	中	0.5~0.25
	细	0.25~0.05
粉 粒		0.05~0.005
黏 土 粒		小于0.005

天然的土是各种大小不同的土粒的混合物,它包含着各种粒组的土粒。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,因此常作为土的工程分类的依据。这种相对含量用各粒组的重量所占土样总重的百分比来表示,叫土的级配。它是通过土的颗粒分析方法确定的。

1. 土的颗粒分析方法

工程中,实用的颗粒分析方法有筛分法和水分法两种。

筛分法适用于粒径大于0.1 mm(0.074 mm)的土。它是利用一套孔径分别为 10、5、2、1、0.5、0.25、0.1(0.074)mm 的筛子,将事先称过质量的烘干土样过筛,称留在各筛上的土样质量,然后计算相应的百分数。水分法适用于分析粒径小于0.1 mm(0.074 mm)的土,根据斯托克斯定理,球状的细颗粒在水中下沉速度与粒径的平方成正比。因此可以利用粗颗粒下沉速度快,细颗粒下沉速度慢的原理,用颗粒下沉速度进行粗细分组。基于这种原理,实验室常用比重计进行颗粒分析,称为比重计法。该法的原理说明和操作方法,可参阅土工实验指示书,本章不予详述。

2. 粒径级配曲线

为了直观起见,将颗粒分析的结果用一图形表示,图中横坐标为粒径,以对数分划表示,纵坐标以小于该粒径的土粒质量占全部土样质量的百分比表示,所绘的曲线称为土的粒径级配曲线,如图 1—1 所示。

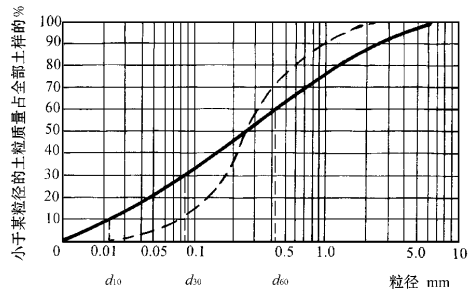


图 1—1 级配曲线

3. 粒径级配曲线的应用

粒径级配曲线反映了土粒粒径大小及其含量的变化。若曲线较平缓,表示土颗粒大小不均匀,粒径变化范围大。若曲线陡直,表示土颗粒较均匀,粒径变化范围小。

为了进一步判断土颗粒级配的优劣,常用不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 两个指标来描述粒径曲线的坡度和形状。

$$C_u = d_{60} / d_{10} \tag{1-1}$$

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

式中 d_{10} ——小于此粒径的土的质量占土的总质量的 10% 称有效粒径；

d_{30} ——小于此粒径的土的质量占土的总质量的 30%；

d_{60} ——小于此粒径的土的质量占土的总质量的 60% 称控制粒径。

当满足 $C_u \geq 5$, $C_c = 1 \sim 3$ 时, 此土样称为级配良好, 如不能同时满足上述两个条件时, 则称为级配不良。级配良好的土, 颗粒间的孔隙可由小颗粒来填充, 土较密实, 土的工程性质较好。

二、土的结构

土的结构是指骨架中土粒的排列形式和土粒间的联结特征的综合, 它对土的物理力学性质有重要的影响。土的天然结构是其在沉积和存在的整个历史过程中形成的, 土因其组成、沉积环境和沉积年代不同而形成各种各样的结构。按其颗粒的排列及联结, 一般分为散粒结构、蜂窝结构和絮状结构三种基本类型。

粗粒土的粒径较大, 彼此之间无粘结力或只有微弱的粘结力, 这些分散的粗颗粒在沉积时相互堆积在一起, 便形成散粒结构。如土粒呈棱角状、表面粗糙, 且粒径较为均匀, 常形成疏松的散粒结构(如图 1—2(a))。当土粒表面光滑, 粒径大小相差悬殊或经受振动时, 则可形成紧密的散粒结构(图 1—2(b))。

细粒土的粒径很小, 颗粒间的连接力强, 在沉积过程中, 土粒碰上已沉积的土粒时, 由于它们之间的相互吸引力大于其重力, 土粒就停留在最初的接触位置上不再下沉, 形成有很大孔隙的蜂窝状结构(如图 1—2(c))。

当土粒的粒径更小时(小于 0.005 mm), 土粒能较长时间在水中悬浮, 单靠其本身的重力已不能下沉。这种细微土粒的沉积过程, 往往是先由胶体颗粒结成棉絮状的粒团, 然后以粒团的形式下沉, 就形成了有更大孔隙的絮状结构(图 1—2(d))。

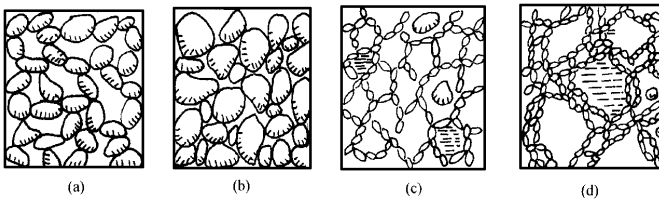


图 1—2 土的结构

土的结构在形成过程中以及形成以后, 当外界条件变化时(例如荷载条件、温度、湿度、介质条件的变化)都会发生变化。

具有蜂窝结构和絮状结构的黏性土, 一般不稳定, 在很小的外力作用下(如施工扰动)就可能破坏, 但土粒之间的联结强度(结构强度), 往往由于长期的压密作用和胶结作用而得到加强。

第三节 土的各相数量指标

土是由固相(土粒)、液相(水)及气相(气体)组成的三相体系。各相的重量、体积之间的相互比例关系, 将对土的状态和工程性质有很大影响。土的三相之间比例关系的一些物理量即

是土的基本物理性质指标。为了便于分析问题,我们常将土粒、水和气体的体积和重量按“相”集中成三部分,构成如图 1—3 所示的分析模型,称为三相图。

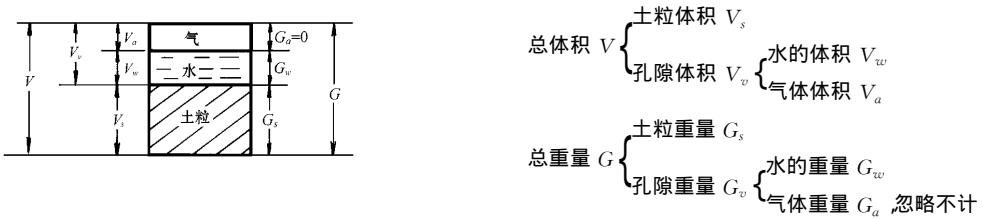


图 1—3 分析模型

土的各相数量指标,有些必须通过土的试验直接测定,称为实测指标;而另一些可依据实测指标计算出来的称为导出指标。

一、实测指标

1. 土粒比重 Δ_s 和土粒容重 γ_s

土粒比重 Δ_s 指土中矿物颗粒的比重,即矿物颗粒的重量与同体积 4℃ 时纯水重量之比,因此

$$\Delta_s = \frac{G_s}{V_s \cdot \gamma_w} \tag{1-3}$$

式中 γ_w ——水的容重,在 4℃ 时, $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ 。

土粒容重 γ_s 为矿物颗粒重量 G_s 与颗粒体积 V_s 之比,因此

$$\gamma_s = \frac{G_s}{V_s} \text{ (kN/m}^3\text{)} \tag{1-4}$$

土粒比重需要通过试验确定,通常采用比重瓶法。土粒比重的大小随土粒的矿物成分而异。通常,砂土的比重约为 2.65(土粒容重为 26.5 kN/m³),黏土的比重为 2.65~2.75(土粒容重 26.5~27.5 kN/m³)。

2. 土的容重 γ 和土的密度 ρ

土的容重 γ 为单位体积土的重量,即

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{G_s + G_w}{V_s + V_v} \text{ (kN/m}^3\text{)} \tag{1-5}$$

土的密度 ρ 为单位体积土的质量,即

$$\rho = \frac{M}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)} \tag{1-6}$$

天然状态下土的容重称天然容重,一般变化于 16.0~22 kN/m³ 之间。土的容重通常采用环刀法测定。土的容重与土的密度有如下关系: $\gamma = \rho \cdot g$ (g 为重力加速度,工程上为了计算方便,取 $g = 10 \text{ m/s}^2$)。

3. 土的含水量 W

土的含水量 W 为土中水的质量 M_w 与土粒质量 M_s 之比,用百分数表示:

$$W = \frac{M_w}{M_s} \times 100\% = \frac{M - M_s}{M_s} \times 100\% \tag{1-7}$$

含水量是表示土湿度的一个重要指标,含水量越小,土越干,反之很湿或饱和。一般来说,同一类土,当其含水量增大时其强度就降低。土的含水量对黏土、粉土的性质影响较大,对粉

砂、细砂稍有影响,而对碎石土等没有影响。

土的含水量通常采用烘干法测定。

二、导出指标

测出土的容重 γ 、土粒比重 Δ_s 和土含水量 W 后,就可以根据三相图,计算出三相组成各自在体积上和重量上的含量。工程上为了便于表示三相含量的某些特征,定义如下几种指标:

1. 表示土中孔隙含量的指标。

孔隙度 n ——指孔隙体积与土总体积之比,用百分数表示,即

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (1-8)$$

孔隙度 n 可依据三个实测指标计算出来。由图 1—4 所示的三相图中可以得出

$$\begin{aligned} \gamma &= \gamma_s(1-n)(1+W) \\ n &= 1 - \frac{\gamma}{\gamma_s(1+W)} \end{aligned} \quad (1-9)$$

由 n 的定义可知 $n < 1$ 。孔隙度 n 反映土中孔隙的多少。但是,当土发生变形时,其孔隙体积 V_v 也随之变化,使得计算中采用孔隙度有不便之处。故可引入另一个反映孔隙性的指标,即孔隙比。

孔隙比 e 指孔隙体积与固体颗粒体积之比,表示为

$$e = V_v / V_s \quad (1-10)$$

根据三个实测指标,可计算出孔隙比。由图 1—5 可得出

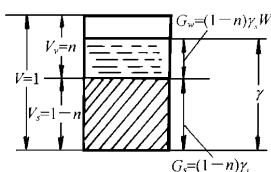


图 1—4 三相图

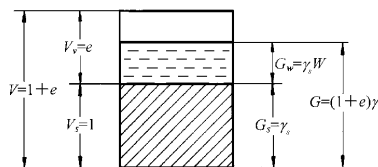


图 1—5 计算孔隙比图示

$$\begin{aligned} (1+e) \cdot \gamma &= \gamma_s(1+W) \\ e &= \frac{\gamma_s(1+W)}{\gamma} - 1 \end{aligned} \quad (1-11)$$

由定义可知 e 可能大于 1。在土力学计算中假设土粒是不可压缩的,土压缩变形时只是 V_v 变化, V_s 不变,故采用 e 较为方便。

孔隙度 n 和孔隙比 e 都是用来表示孔隙体积含量的概念,两者之间有如下关系:

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (1-12)$$

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (1-13)$$

2. 表示土中含水程度的指标

含水量 W 是表示土中含水程度的一个重要指标。此外,工程上往往需要知道孔隙中充满水的程度。这就是土的饱和度 S_r 。定义饱和度为

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \tag{1-14}$$

显然,干土的饱和度 $S_r = 0$ 而饱和土的饱和度 $S_r = 1.0$ 。《规范》规定碎石类土及砂类土的潮湿程度依据饱和度划分如表 1—2。

表 1—2 碎石类土及砂类土潮湿程度划分

分 级	饱和度 (S_r)
稍 湿	$S_r \leq 0.5$
潮 湿	$0.5 < S_r \leq 0.8$
饱 和	$S_r > 0.8$

3. 表示土的容重的几种指标

土的容重除了用 γ 表示以外,工程计算中还常用干容重、饱和容重和浮容重。

干容重 γ_d 指包括孔隙在内的单位体积土的颗粒重量,即

$$\gamma_d = \frac{G_s}{V} \quad (\text{kN/m}^3) \tag{1-15}$$

由图 1—6 所示三相图可得出:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e} = \frac{\gamma}{1+W}$$

对于土粒容重一定的土,干容重仅取决于其孔隙的多少。因此,工程上常用它表示土的密实程度。

饱和容重 γ_{sat} 为孔隙完全被水充满时土的容重,由图 1—7 所示三相图可得

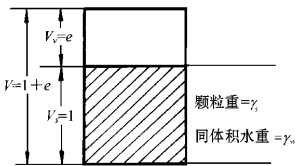


图 1—6 三相图

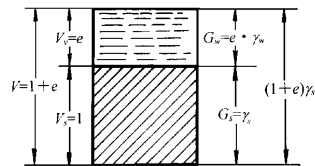


图 1—7 三相图

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1+e} \quad (\text{kN/m}^3) \tag{1-16}$$

浮容重 γ_b 为土浸没在水中,单位体积土中土粒重量与同体积水的重量之差,或为其饱和容重减去水的容重。

$$\gamma_b = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e} = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (\text{kN/m}^3) \tag{1-17}$$

以上几种容重在数值上有如下关系:

$$\gamma_{sat} \geq \gamma \geq \gamma_d > \gamma_b$$

例题 1—1 用体积为 50 cm^3 的环刀取得原状土样的总重为 0.95 N ,将此湿土样烘干后,重 0.75 N 。经实验得知土粒比重为 2.68。求该土天然容重 γ 、含水量 W 、孔隙比 e 、孔隙度 n 及饱和度 S_r 各为若干?

解 1. 已知 $V = 50 \text{ cm}^3$, $G = 0.95 \text{ N}$, $\gamma = \frac{G}{V} = \frac{0.95}{50} = 0.019 \text{ N/cm}^3 = 19 \text{ kN/m}^3$

2. 已知 $G_s = 0.75 \text{ N}$ 则 $G_w = 0.95 - 0.75 = 0.2 \text{ N}$

故 $W = \frac{G_w}{G_s} \times 100\% = \frac{0.2}{0.75} \times 100\% = 26.7\%$

3. $\gamma_s = \Delta_s \times 10 = 26.8 \text{ kN/m}^3 = 0.0268 \text{ kN/cm}^3$

$$V_s = \frac{G_s}{\gamma_s} = \frac{0.75}{0.0268} = 28 \text{ cm}^3$$

$$V_v = V - V_s = 50 - 28 = 22 \text{ cm}^3$$

故
$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{22}{28} = 0.786$$

$$4. n = \frac{V_v}{V} = \frac{22}{50} = 0.44$$

$$5. V_w = \frac{G_w}{\gamma_w} = \frac{0.2}{0.01} = 20 \text{ cm}^3$$

故
$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{20}{22} = 0.91$$

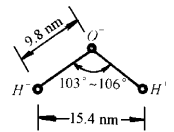
第四节 土的物理和物理—化学性质

一、土中水分的形状

土中水的分类是以水分子的活动能力的大小为主要依据的：它可以分为固态水(冰)、液态水和气态水(汽)三大类。

本章所要研究的是存在于土粒表面以外构成土的液相的水。

水分子是极性分子,如图 1—8 所示。在水分子中,两个氢原子位于等腰三角形的底角,一个氧原子位于顶角,等腰三角形顶角为 $103^\circ \sim 106^\circ$ 。这样整个水分子虽然是中性的,然而它的一端显示为正电荷,另一端为负电荷。在普通水中,水分子排列很紊乱,而在电场作用下,水分子就会定向排列起来,称为水分子的极化。当水中存在电解质的阳离子时(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 等),水分子就会围绕着离子发生定向排列。



土中细小颗粒几乎都是黏土矿物,黏土矿物颗粒一般呈片状或针状,在晶体格架表面,尤其角与棱处,均带有负电荷。这使得黏土颗粒成为带有负电荷的带电体。

黏土颗粒带负电的表面在其电场力影响范围之内,使水分子发生定向排列,并保持在土粒的近旁。同时也把水化了的钠、钾、镁、钙等离子吸引在周围,从而在黏土颗粒表面形成了一层水化膜,这种现象称为吸附,如图 1—9 所示。在土粒间组成水化膜的这部分水称为结合水。

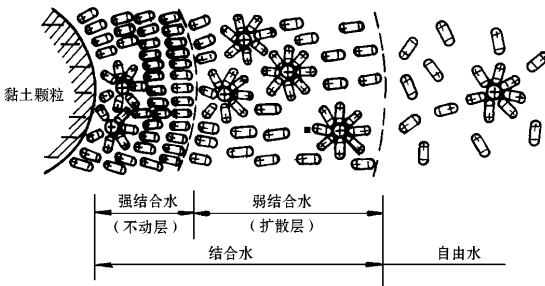


图 1—9 结合水的形成

结合水又分为强结合水和弱结合水。

强结合水是指紧靠于黏粒表面的水分子,所受电力很大,几乎完全固定排列,丧失了液体的特性而接近于固体,完全不能移动。其容重约为 $12 \sim 24 \text{ kN/m}^3$,冰点约为 -78°C ,并且具有很大的黏滞性、弹性和抗剪强度。

弱结合水是指强结合水以外,电场作用范围以内的水。它也受黏粒表面电荷所吸引而定向排列在黏粒四周。但电场力随远离黏粒而减弱,这层水是一种黏滞水膜,受力时,能由水膜较厚处缓慢移到水膜较薄处,也可以因电场力从一个黏粒周围移到另一个黏粒周围。就是说,弱结合水膜能发生变形,但不因重力而流动。弱结合水的存在是黏性土在某一含水量范围表现出可塑性的原因。

结合水膜以外的水,因其不受黏粒电场引力吸附的影响而称为自由水。自由水又分为重力水和毛细水。重力水是存在于土的孔隙中只受重力作用的普通液态水。它能在重力和水头差影响下在土的孔隙中移动,能够传递静水压力,并且具有溶解可溶性盐类的能力。由于土中存在许多细微的不规则的通道,水在弯液面的表面张力作用下,可以沿细微通道上升到距重力水面一定高度。这一部分称为毛细水。毛细水存在的位置、上升高度和移动条件是受重力和其表面张力控制的。

二、黏性土的物理和物理—化学性质

土中固相与液相之间由于电分子力引起十分复杂而活跃的相互作用,这些相互作用发生在土粒表面,称其为土的“表面活动性”。土的表面活动性的强烈程度与许多因素有关,它取决于固体颗粒的矿物组成、颗粒形状和粒径大小。在众多的黏土矿物中,基本上可以归纳为高岭石、伊利石和蒙脱石三类。蒙脱石吸附异性离子的能力和亲水性最强,能分散为十分细微的颗粒,并多呈针状和片状,这就决定了以蒙脱石为主的黏土具有十分强烈的表面活动性。而以高岭石为主的黏土表面活动性则较差。由于土的固相与液相之间发生相互作用的场所是土粒表面。那么土粒表面积的大小就决定了其表面活动性的强弱。为了反映同样体积但种类不同的土的土粒表面积大小,常用“比表面积”表示,即单位体积土粒所具有的表面积的总和:

$$\text{比表面积} = 6/d \quad (\text{cm}^2/\text{cm}^3) \quad (1-18)$$

式中 d ——土粒为圆球时, d 为直径,土粒为正方体, d 为边长。

由上式可见,当 $d = 1 \text{ mm}$ 时,比表面积为 60 cm^2 ,当 $d = 0.1 \text{ mm}$ 时,比表面积为 600 cm^2 。由此可说明为什么砂粒不具有表面活动性,而黏粒表面活动性却非常活跃。

土的表面活动性不仅与固体颗粒的因素有关,而且还受液相成分与性质的影响。土中的孔隙水中存在着多种离子,并且常有钠、钙、镁、钾等阳离子被吸附在土粒周围。扩散层中阳离子的组成对土的表面活动性有着十分显著的影响。

下面简要介绍与黏性土的电性质有关的其他物理和物理—化学性质。

(一) 黏聚性

某些土在一定状态下能够承受不大的拉力,并能够承受剪力的性质,称为黏聚性。

砂性土在含水量不大时,由于毛细力作用,会产生一些微弱的黏聚性,但在干燥或饱和状态下均不具备黏聚性。

黏性土同砂性土不同,它的黏聚性十分明显。黏性土产生黏聚性的原因有下列几方面:

1. 土颗粒之间分子力的相互作用:当颗粒间距离十分微小时,颗粒间的分子引力会将相邻颗粒紧紧地连接在一起,由此产生的连接力称为原始黏聚力。颗粒间平均距离越小,由颗粒间分子力所引起的黏聚性越强。

2. 水胶连接 :当相邻颗粒间距离小于两倍结合水膜厚度时 ,则在接触处形成共同的水化膜。此时 ,在颗粒表面间将形成由扩散层中阳离子和水分子偶极体组成的水胶链 ,从而将颗粒连接起来(如图 1—10)。颗粒间接触点越多 ,这种水胶黏聚性愈强。

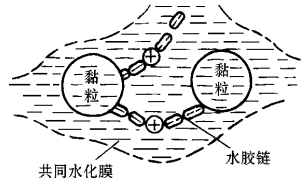


图 1—10 水胶连接

3. 结晶物质胶合作用 :原状黏性土在存在的长久时间中 ,由溶于水的物质析出结晶 ,将相邻颗粒胶结起来 ,形成土粒的结晶黏聚性(结构黏聚性)。

在上述三种黏聚性中 ,原始黏聚性和水胶黏聚性随土的密度增大而增强 ,随含水量增大而减弱。在土经历变形甚至破坏时 ,黏聚性也破坏。但土的密度、湿度复原后 ,黏聚性也可复原。此类黏聚性称为可恢复黏聚性。而结晶黏聚性与之相反 ,土体受到位移和破坏后 ,黏聚性消失 ,并且短期内不可恢复。故称此类黏聚性为不可恢复黏聚性。

(二) 塑性

土在外力作用下能改变其形状 ,但不改变体积 ,不发生断裂 ;同时 ,外力撤去后 ,在一段相当长的时间内能保持其变形后形态 ,称为塑性状态 ,它是黏性土的一种特殊性能 ,并且只有黏性土的含水量处于某一范围才会表现出来。

黏性土的塑性强弱与其比表面积有关 ,塑性也是黏性土表面活动性的一种反映。凡是影响土的表面活动性的因素 ,均能对土的塑性强弱产生直接影响。

(三) 膨胀和收缩

在黏性土中 ,细微颗粒是由共同水化膜连接起来的 ,当有水分进出黏性土时 ,必然会引起土粒间水化膜厚度的增减 ,反映为土体积的胀缩。黏性土体积浸水膨胀和失水收缩也是其表面活动性的一种反映。它与颗粒矿物成分、胶粒含量以及吸附阳离子种类等因素有直接关系。

(四) 触变

高含水时的黏性土在受到外力振动或搅拌时 ,常液化为“溶胶” ,而当外力消失 ,并经过静置一段时间后 ,土又会凝结 ,这种现象叫“触变”。这是由于黏土颗粒有较厚水化膜。当含水量高的黏性土受振动后 ,其扩散层外部的极性水分子和水化阳离子会脱离水化膜而转变为自由水。从而使土粒处于悬浮状态 ,液化为溶胶。在经过一段静置后 ,由于土粒表面电分子力影响 ,扩散层厚度得到恢复 ,一部分自由水又重新变回结合水 ,使土恢复原来状态。

触变也是黏性土表面活动性的反映 ,它的强弱与粒径大小、形状、矿物成分及土中水溶液组成有关。

三、土的物理状态指标

1. 黏性土的稠度

黏性土最重要的物理状态指标是它的稠度。稠度是指土的软硬程度 ,它实质上反映了固体颗粒与水溶液发生相互作用时所具有的相对活动性的程度。

若黏性土中土粒间孔隙全部充满水且相邻土粒表面间距离大于两倍电分子力作用半径 ,土粒处于悬浮状态 ,土处于流动状态。如土中水分被蒸发 ,土粒间距离逐渐减小到两倍电分子力作用半径时 ,土粒间结合水膜开始接触 ,土呈塑性状态。这一临界含水量称为液性界限 ,简称液限 w_l 。随着水分进一步蒸发 ,自由水进一步减少 ,体积进一步缩小 ,当自由水接近消失 ,只存在结合水时 ,开始失去塑性而呈固体状态 ,这一临界含水量为塑性界限 ,简称塑限 w_p 。

若水分继续蒸发,则会引引起弱结合水膜减薄,土的体积仍在收缩,但收缩数量不断减小,直至停止。如图 1—11 的 BO 段,若延长图中直线 AB 与自 O 点作水平线交于 D 点,相应于 D 点的含水量称为收缩界限 W_c ,可以近似认为含水量小于 W_c ,土中只有强结合水,土开始呈固体状态。

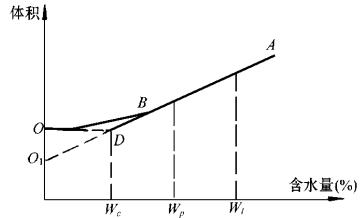


图 1—11 土的稠度界限

液限和塑限是黏性土含水量的两个很重要特征值。它们是区分土的塑性状态、流动状态和半固体状态的界限含水量。

土的比表面积和矿物成分不同,吸附结合水的能力就不一样,仅仅知道含水量的绝对值,并不能说明土处于什么状态。要说明黏性土的稠度状态,需要有一个表征土的天然含水量与界限含水量之间相对关系的指标,这就是液性指数 I_l

$$I_l = \frac{W - W_p}{W_l - W_p} \tag{1—19}$$

工程上按液性指数 I_l 的大小,将黏性土的软硬程度划成表 1—3 所列的各种状态。

表 1—3 黏性土潮湿(软硬)程度划分

黏性土具有可塑性时,其含水量变化范围为液限 W_l 与塑限 W_p 之差。这个差值称为塑性指数 I_p

$$I_p = W_l - W_p \tag{1—20}$$

I_p 用百分数绝对值表示(例如 $W_l = 32\%$, $W_p = 22\%$, 则 $I_p = 32 - 22 = 10$),塑性指数是

分 级		液性指数
半干硬状态		$I_l < 0$
可塑状态	硬塑状态	$0 \leq I_l < 0.5$
	软塑状态	$0.5 \leq I_l < 1$
流塑状态		$I_l > 1$

土的表面活动性的反映,它以具体数量反映了黏性土矿物成分、粒径大小、形状、水溶液组成对其性质的影响,以数字指标表征了表面活动性强弱,因此成为对黏性土分类的主要依据。

2. 砂性土的相对密度

对砂性土,最重要的物理状态指标是密实度,因为它反映了砂性土的可压实性的大小,土的孔隙比的大小反映了土骨架的密实程度,对同一种土,孔隙比大时,其可压实性高,反之可压实性低。但对于两种砂土,孔隙比相同时,其密实程度就不好判定,因为影响土的可压实性的因素还有土的粒径、形状、级配。所以工程上常用相对密度 D_r 来衡量砂土密实程度。

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \tag{1—21}$$

式中 e_{max} ——土在最疏松状态下的孔隙比;

e_{min} ——土在最密实状态下的孔隙比。

在实用上可用下式计算:

$$D_r = \frac{(\rho_d - \rho_{dmin}) \cdot \rho_{dmax}}{(\rho_{dmax} - \rho_{dmin}) \cdot \rho_d} \tag{1—22}$$

砂性土的原状土样难以从地层取得,可用标准贯入试验测定砂性土的密实度,砂性土的密实程度见表 1—4。