

全国高职高专水利水电类专业规划教材

土力学

张守民 张书俭 主编
方 崇 主审



黄河水利出版社

全国高职高专水利水电类专业规划教材

土 力 学

主 编	张守民	张书俭
副主编	李宝玉	龙立华
	冯建江	陈瑞亮
主 审	方 崇	

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书是全国高职高专水利水电类专业规划教材,是根据全国水利水电高职教研会制定的土力学课程教学大纲编写完成的。土力学是土木工程类专业基础课。本书共分 11 章。第一章系统地阐述了土的物理性质、力学性质及其评价指标的概念表达和检测方法,第二章对土的渗透原理和土的渗透评价指标做了充分的分析和阐述,第三章对土中应力和各种情况下的应力计算做了系统和全面的阐述,第四章对土压缩原理、地基沉降量确定、土压缩指标的检测试验做了系统的阐述,第五章对土体剪切破坏理论、土体破坏模式及提高土体强度的方法措施、土的剪切指标测定方法等做了系统和详尽的阐述,第六、七章通过对土压力和土坡稳定问题的理论分析主要解决挡土结构和土体自身稳定的技术问题,第八章介绍了地基承载力,第九章介绍了冻土力学的理论和实际问题,第十、十一章是综合运用前八章的土力学理论和土工技术分析解决水利工程中的实际问题。

本书为高职高专水利水电工程、农业水利技术、工业与民用建筑、道桥、工程监理、工程造价等专业的教材,也可供工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

土力学/张守民,张书俭主编. —郑州:黄河水利出版社,
2009. 8

全国高职高专水利水电类专业规划教材

ISBN 978 - 7 - 80734 - 689 - 0

I. 土… II. ①张… ②张… 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(2009)第 131931 号

组稿编辑:王路平 电话:0371 - 66022212 E-mail:hhsllwlp@126.com

马 翀

66026749

machong2006@126.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslicbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:14

字数:320 千字

印数:1—4 100

版次:2009 年 8 月第 1 版

印次:2009 年 8 月第 1 次印刷

定价:25.00 元

前 言

本书是根据《教育部 财政部关于实施国家示范性高等职业院校建设计划 加快高等职业教育改革与发展的意见》(教高[2006]14号)、《教育部关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》(教高[2006]16号)等文件精神,由全国水利水电高职教研会拟定的教材编写规划,在中国水利教育协会指导下,由全国水利水电高职教研会组织编写的第二轮水利水电类专业规划教材。第二轮教材以学生能力培养为主线,具有鲜明的时代特点,体现出实用性、实践性、创新性的教材特色,是一套理论联系实际、教学面向生产的高职高专教育精品规划教材。

本书编写的指导思想是本着学以致用为原则,以高职教育教学大纲和有关教育部文件为准绳,遵循工作过程系统化原理,努力做到由水利水电类一线工作岗位实践技能点回溯理论支撑点,使土力学理论与土工实践紧密结合,以培养高技能型水利水电类专门人才为宗旨。

本书在编写过程中,将工程案例、土力学基本理论、土工试验、土工技术有机地融合为一体,充分体现本学科的实用性。在每一章的编写设计中力求进行项目化处理,即每一章内容相对自成体系,与其相关的理论、试验到土工实践的知识可以独立完成一项土工任务。同时,各章节之间又是紧密联系的整体,共同形成完整的土力学知识框架,使知识内容系统化。通过对本学科的学习,力求使学生能够对与土力学有关的工程有全面的了解,并能独立完成简单的土工设计和土工施工任务。全书编写过程中努力做到论述具有概要性、全面性、透彻性,便于学生自学和教师教学参考,努力致力于项目化与系统化的统一。

土力学是研究土的物理性质及其力学规律的一门学科,即土体在力的作用下的应力—应变或应力—应变—时间关系和强度的应用学科,主要用于土木、交通、水利等工程。18世纪中期以前,人类的建筑工程实践主要是根据建筑者的经验进行的。18世纪中期至20世纪初期,工程建筑事业迅猛发展,许多学者相继总结前人和自己的实践经验,发表了迄今仍然行之有效的、多方面的重要研究成果。例如,法国的库仑发表了土压力滑动楔体理论(1773)和土的抗剪强度准则(1776);法国的达西在研究水在砂土中渗透的基础上提出了著名的达西定律(1856);英国的W. J. M. 兰金分析半无限空间土体在自重作用下达到极限平衡状态时的应力条件,提出了另一著名的土压力理论,与库仑理论一起构成了古典土压力理论;法国的J. V. 博西内斯克提出的半无限弹性体中应力分布的计算公式(1885),成为地基土体中应力分布的重要计算方法;德国的O·莫尔提出了至今仍广泛应用的土的强度理论(1900);19世纪末至20世纪初期瑞典的A. M. 阿特贝里提出了黏性土的塑性界限和按塑性指数的分类,至今仍在实践中广泛应用。1925年奥地利的K·太沙基出版了世界上第一部《土力学》,是土力学作为一个完整、独立学科已经形成的重要标志。此后,在土的基本性质和动力特性、固结理论和强度理论的研究,流变理论的应用,土体稳定性分析方法以及试验技术和设备等方面都有很大的发展,

使土力学得到进一步的完善和提高。

目前,随着高大建筑物、核电站以及近海石油探采平台等的兴建,不断对土力学提出更高的要求。裂隙对土体力学性能的控制性、非线性应力—应变的本构关系以及新的测试技术和设备等方面的研究将会有新的进展。

当前国际经济形势要求扩大需求,加大投资建设力度,正是大搞学科理论建设和实践积累的有利时机,随着职业技能专门人才的大量需求,希望本书能在高职高专院校的人才培养中、在建设项目实施中、在社会经济发展中发挥出应有的作用。

本书参加编写人员有:黑龙江省农垦农业职业技术学院张守民、山西省水利职业技术学院张书俭、黑龙江省农垦总局水务局母成波、华北水利水电学院水利职业学院李宝玉、湖北水利水电职业技术学院龙立华、浙江水利水电专科学校冯建江、长江工程职业技术学院陈瑞亮、重庆水利电力职业技术学院李影、广西水利电力职业技术学院刘慧娟、沈阳农业大学高等职业技术学院张海军、长江工程职业技术学院吕知鑫。本书由张守民、张书俭担任主编,李宝玉、龙立华、冯建江、陈瑞亮担任副主编,广西水利电力职业技术学院方崇担任主审。

另外,黑龙江省农垦总局水务局局长潘福田、黑龙江农垦水利建设监理公司教授级高工王立权对本书提出了许多宝贵意见,对本书修改和定稿起了很大作用,在此深表谢意。

由于编者水平有限,书中谬误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2009 年 2 月

目 录

前 言

第一章 土的物理性质	(1)
第一节 土的基本理论	(1)
第二节 几种特殊性质的土	(16)
第三节 关于土的工程应用	(22)
第四节 土的性质指标检测试验	(27)
思考题	(47)
习 题	(47)
第二章 土的渗透	(49)
第一节 土的渗透理论	(49)
第二节 土渗透理论的工程应用	(54)
第三节 土的渗透试验	(56)
思考题	(62)
习 题	(63)
第三章 土中的应力	(64)
第一节 土中应力种类及其计算	(64)
第二节 各种基础荷载情况下的基底压力和地基附加应力值计算	(70)
思考题	(85)
习 题	(85)
第四章 土的压缩	(87)
第一节 土压缩有关理论	(87)
第二节 地基变形量的确定	(90)
第三节 土压缩试验	(101)
思考题	(104)
习 题	(104)
第五章 土的抗剪强度	(106)
第一节 土的剪切理论	(106)
第二节 工程中土体的剪切破坏	(111)
第三节 土工剪切指标测定试验	(115)
思考题	(120)
习 题	(121)
第六章 土压力	(122)
第一节 土压力理论	(122)

第二节	土压力理论在挡土工程中的应用	(138)
思考题		(146)
习 题		(147)
第七章	土坡稳定性分析	(148)
第一节	土坡稳定性分析	(148)
第二节	工程中土体稳定问题	(159)
思考题		(161)
习 题		(161)
第八章	地基承载力	(163)
第一节	地基承载力概念	(163)
第二节	地基承载力经验确定	(166)
第三节	规范法确定地基承载力	(172)
习 题		(175)
第九章	冻土力学	(176)
第一节	冻土危害和类型	(176)
第二节	冻土理论简介	(179)
第三节	水工建筑物防冻	(184)
思考题		(185)
第十章	软土地基处理方法	(186)
第一节	复合地基理论	(186)
第二节	软土地基处理	(189)
思考题		(193)
第十一章	水利工程中较常见的土工设计和施工简介	(194)
第一节	地基基础土工设计	(194)
第二节	挡土构件及基坑围护结构土工设计相关知识	(202)
第三节	常见软基工程	(204)
第四节	土方工程	(210)
思考题		(216)
附录	岩土工程常用规范	(217)
参考文献		(218)

第一章 土的物理性质

【引导性案例】

1999 年广州市政府本着要把流溪河建设成广州市人民的“生命河”、“风景河”，开始对流溪河两岸进行整治，整治目的是使工程建设既要加固堤围，提高防洪能力，又要改善流溪河水源水质，美化环境，发展两岸经济。广州市流溪河防洪整治工程设计洪水标准：下游段为 100 年一遇，上游段为 50 年一遇；堤防标准为Ⅲ级。工程项目主要有表土清理、旧堤土方挖运、堤身土方填筑、护脚浆砌石挡土墙及附属工程等。

在流溪河防洪整治工程的初步设计前，地质勘察部门已经对流溪河沿线的山脉进行勘察，勘察结果表明，能开采的有（1）类回填土、（2）类回填土，其指标和要求如表 1-1 所示。

表 1-1 回填土指标和要求

回填土类型	回填土要求
（1）类	粒径 $d < 0.005\text{ mm}$ 的颗粒含量为 4.5% ~ 30%；粒径 $d < 0.05\text{ mm}$ 的颗粒含量不少于 35%；塑性指数 $I_p = 10 \sim 23$ ，渗透系数 $k \leq 1.0 \times 10^{-5}\text{ cm/s}$ ；且不得含有植物根茎、砖瓦、垃圾等杂质；压实度 $P \leq 95\%$ ；回填土最大干密度 $\rho_{dmax} \geq 1.65\text{ t/m}^3$ ；设计干密度 $\rho_{d0} \geq \rho_{dmax} P$
（2）类	当地风化土或旧堤土，要求最大干密度 $\rho_{dmax} \geq 1.75\text{ t/m}^3$ ；压实度 $P \geq 92\%$ ；设计干密度 $\rho_{d0} \geq \rho_{dmax} P$

哪类回填土是理想的堤身填筑土料？回填土各项指标是如何确定的？整治工程堤身土料碾压筑堤的质量如何控制？这就需要对土的物质组成、结构、土的物理性指标的测定和土的击实性等进行研究，具有对土进行识别、命名和评价的技能。

第一节 土的基本理论

一、土的组成、结构与性质

（一）土的组成

土是由固体、液体和气体三相所组成的松散颗粒集合体。固体部分即为土粒，由矿物颗粒或有机质组成。颗粒之间有许多孔隙，而孔隙可为液体、气体或两者所充填。水及其溶解物为土中的液相。空气及其他一些气体为土中的气相。当土中孔隙全部为水所充满时，称为饱和土；当孔隙全部为气体所充满时，则称为干土；当孔隙中同时存在水和空气时，则称为湿土。饱和土和干土为二相系，湿土则为三相系。这些组成部分的相互作用和

数量上的比例关系,将决定土的物理力学性质。

1. 土的固相

土的固相构成了土的基本骨架,其矿物组成、大小和形状及级配情况是决定土的工程性质的重要因素。

1) 土的矿物成分和有机质

土的矿物成分取决于成土母岩的成分以及所经受的风化作用,主要有原生矿物和次生矿物两大类。

(1)原生矿物。岩石经物理风化作用后形成的矿物颗粒。常见的有石英、长石和云母等。颗粒较大,与水相互作用的能力弱,物理化学性质较稳定,由它们构成的粗粒土工程性质较稳定,若级配好,则土的密度大,强度高,压缩性低。

(2)次生矿物。岩石经化学风化后形成的新矿物颗粒,如黏土矿物。常见的黏土矿物有蒙脱石、伊利石和高岭石,颗粒细小,亲水性强,遇水易膨胀,性质较不稳定,它们是构成黏性土的主要成分。另外,还有一类易溶于水的次生矿物,称水溶盐。如碳酸钙、石膏、各种氯化物等。需要注意的是,若黏性土中含有水溶盐时,遇水溶解后会被渗透水流带走,导致地基或坝体产生集中渗流,引起不均匀沉降甚至降低强度。所以,通常规定筑坝土料的水溶盐含量不得超过8%。

(3)有机质。微生物参与风化作用的产物和土中动植物的残骸体。前者为腐殖质,后者为泥炭。有机质易分解、强度低、压缩性大,对土的工程性质影响很大。有机质含量超过5%的土称为有机土,有机土不能作为堤坝工程的填筑材料,否则会影响建筑工程的质量。

2) 土的颗粒大小和形状

自然界中的土都是由大小不同的土粒组成的。土粒的大小称为粒度,通常以粒径表示。天然土体的粒度变化很大,大的超过几十厘米,小的只有千分之几毫米,形状也不相同。不同粒度组成的土性质上有很大差别。如砂、卵石等粗粒土多为浑圆或者棱角状的石英颗粒组成,粒度较粗,具有较大的透水性而无黏性;而黏土的颗粒组成主要为颗粒细小的黏土矿物,形状为片状或者针状,粒度极细,具有黏滞性而透水性差。因此,工程上常把大小、性质相近的土粒划分为一组,称为粒组,划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。

对粒组的划分,各个国家,甚至一个国家不同的部门有不同的规定。我国的粒组划分原则上是将土分为六大粒组即漂石或块石、卵石或碎石、圆砾或角砾、砂粒、粉粒和黏粒,但各行业的界限粒径有所不同,表1-2给出了几组粒组划分标准。

3) 土的颗粒级配

土的工程性质不仅取决于土粒的大小,而且主要取决于土中不同粒组的相对含量。土中各粒组的相对含量用各粒组质量占土粒总质量的百分数表示,称为土的颗粒级配。土的颗粒级配可通过颗粒分析试验测定。

(1)颗粒分析试验。颗粒分析试验方法有筛分法和密度计法两种,前者适用于粒径大于0.075 mm的粗粒,后者适用于粒径小于0.075 mm的细粒土。若土中同时含有粒径大于和小于0.075 mm的土粒时,则需联合使用这两种方法。

筛分法是用一套从上到下孔径依次由大到小的标准筛,将事先称过质量的干土样倒

入筛的顶部,盖严上盖,置于筛分机上振筛 10 ~ 15 min,分别称出留在各筛上的土的质量,即可求出各个粒组的相对含量,即得土的颗粒级配。

表 1-2 土粒粒组划分

粒 组 统 称	《土工试验规程》(SL 237—1999) 《公路土工试验规程》 (JTG E40—2007)		《建筑地基基础设计规范》 (GB 50007—2002) 《岩土工程勘察规范》 (GB 50021—2001)		一般特性
	粒组名称	粒径范围(mm)	粒组名称	粒径范围(mm)	
巨 粒	漂石(块石) 卵石(碎石)	>200 200 ~ 60	漂石(块石) 卵石(碎石)	>200 200 ~ 20	透水性大,无黏性,无毛细水
粗 粒	砾粒	粗砾 中砾 细砾 60 ~ 20 20 ~ 5 5 ~ 2	砾石	20 ~ 2	透水性大,无黏性,毛细水上升高度不超过粒径大小
	砂粒	粗砂 中砂 细砂 2 ~ 0.5 0.5 ~ 0.25 0.25 ~ 0.075 (0.25 ~ 0.074)	砂粒	2 ~ 0.075	易透水,当混入云母等杂物时透水性小,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
细 粒	粉粒	0.075 ~ 0.005 (0.074 ~ 0.002)	粉粒	0.075 ~ 0.005	透水性小,湿时稍有膨胀,干时稍有收缩;毛细水上升高度较大较快,极易出现冻胀现象
	黏粒	≤0.005 (≤0.002)	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;毛细水收缩高度大,且速度较慢

注:括号中的数值是《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)的分类标准。

密度计法是利用不同大小的土粒在水中的沉降速度(简称沉速)不同来确定小于某粒径的土粒含量(详见本章第四节)。

【例 1-1】 从干砂样中称取质量为 1 000 g 的试样,放入标准筛中,经充分振动后,称得各级筛上留存的土粒质量,见表 1-3 中的第二列,试求土中各粒组的土粒含量及小于各级筛孔径的土粒含量。

解:留在孔径 2.0 mm 筛上的土粒质量为 100 g,则小于该孔径的土粒含量为(1 000 - 100)/1 000 = 90%;留在孔径 1.0 mm 筛上的土粒质量为 100 g,则小于该孔径的土粒含量为(1 000 - 100 - 100)/1 000 = 80%;同样可算得小于其他孔径的土粒含量,见表 1-3 中的

第三列。因 $0.5 \geq d > 0.25$ 的土粒含量为 300 g, 则粒径范围 $0.5 \geq d > 0.25$ (中砂) 的含量为 $300/1\,000 = 30\%$; 同样可算得其他粒组的土粒含量, 见表 1-3 中第五列。所以, 该土样各粒组含量分别为: 砾 10%, 砂 80% (粗砂 35%、中砂 30%、细砂 15%), 细粒 (包括粉粒和黏粒) 10%。

表 1-3 筛分试验结果

筛孔径 (mm)	各级筛上留存的 土粒质量(g)	小于各级筛孔径的 土粒含量(%)	粒径的范围 (mm)	各粒组的土粒含量 (%)
2.0	100	90	$d > 2.0$	10
1.0	100	80	$2.0 \geq d > 0.5$	35
0.5	250	55		
0.25	300	25	$0.5 \geq d > 0.25$	30
0.1	100	15	$0.25 \geq d > 0.075$	15
0.075	50	10		
底盘	100		$d \leq 0.075$	10

(2) 土的级配曲线。根据颗粒分析试验的成果, 绘制颗粒级配累计曲线, 如图 1-1 所示。

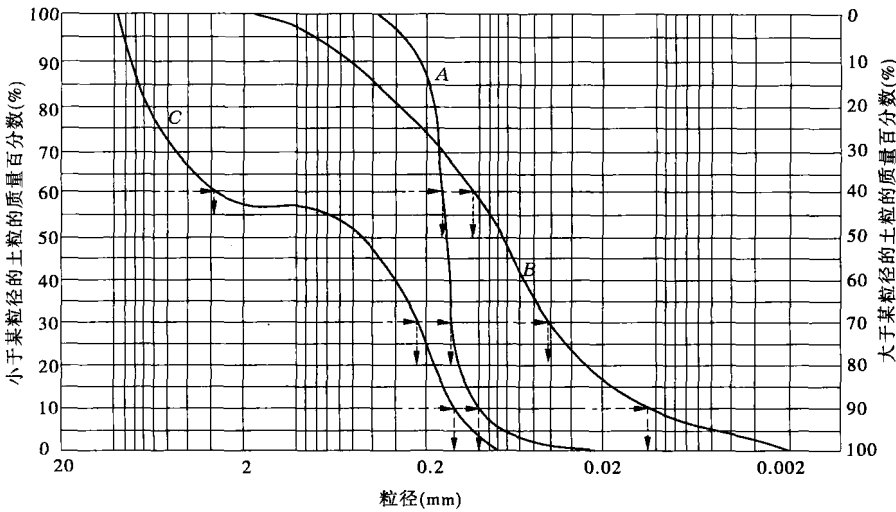


图 1-1 土的颗粒级配曲线

图 1-1 中横坐标表示粒径(用对数尺度), 纵坐标表示小于某粒径的土粒质量占总质量的百分数。

从颗粒级配曲线的形态上可以评定土颗粒的级配特征, 曲线平缓表示粒度分布连续, 颗粒大小不均匀, 级配良好(见图 1-1 中的 B 线); 若土中缺乏某些粒径, 则级配曲线出现水平段(见图 1-1 中的 C 线); 曲线坡度陡而窄, 说明颗粒均匀, 级配不良(见图 1-1 中的 A 线)。

(3) 颗粒级配指标。颗粒级配曲线的形状只能定性地评价土的级配好坏, 为了定量判别土的颗粒级配好坏, 工程中引用了不均匀系数、曲率系数两个指标。

$$\text{不均匀系数} \quad C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1-1)$$

$$\text{曲率系数} \quad C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10}d_{60}} \quad (1-2)$$

式中 d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} ——级配曲线纵坐标上小于某粒径含量为 10%、30%、60% 所对应的粒径值, d_{10} 称为有效粒径, d_{60} 称为控制粒径。

不均匀系数 C_u 是反映土颗粒大小不均匀程度的指标。 C_u 越大, 表明土颗粒愈不均匀, 级配良好(颗粒级配曲线愈平缓); 反之, C_u 越小, 表明土颗粒愈均匀, 级配不良。工程上把 $C_u < 5$ 的土视为级配不良的土; $C_u > 10$ 的土视为级配良好的土。

曲率系数 C_c 是反映级配曲线分布的整体形态, 表明是否有某粒组缺失。 $C_c = 1 \sim 3$ 时, 表明土粒大小的连续性较好; C_c 值小于 1 或大于 3 时, 颗粒级配曲线有明显弯曲而呈阶梯状, 表明颗粒级配不连续, 缺乏中间粒径。

对于砾类土或砂类土, 同时满足 $C_u \geq 5$ 和 $C_c = 1 \sim 3$ 时, 定名为良好级配砂或良好级配砾。若不能同时满足这两个条件, 则称为级配不良的土。

级配良好的土, 粗细颗粒搭配较好, 粗颗粒间的孔隙被细颗粒填充, 易被压实。所以, 在工程中常用级配良好的土作为填土用料。

【例 1-2】 如图 1-1 所示, 曲线 A、B、C 表示三种不同粒径组成的土, 试求三种土中各粒组的百分含量为多少? 各土的不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 为多少? 并对各种土的颗粒级配情况进行评价。

解: (1) 由曲线 A 查得各粒组的含量百分数为:

$$\text{砂粒}(2 \sim 0.075 \text{ mm}) \quad 100\% - 5\% = 95\%$$

$$\text{粉粒}(0.075 \sim 0.005 \text{ mm}) \quad 5\% - 0\% = 5\%$$

查曲线 A 得知 $d_{60} = 0.165 \text{ mm}$, $d_{10} = 0.11 \text{ mm}$, $d_{30} = 0.15 \text{ mm}$

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0.165}{0.11} = 1.5 < 5 \text{ (土粒均匀)}$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10}d_{60}} = \frac{0.15^2}{0.11 \times 0.165} = 1.24 \text{ (介于 } 1 \sim 3 \text{)}$$

虽然 C_c 在 $1 \sim 3$, 但 $C_u < 5$, 其中有一个条件不满足, 故 A 土级配不良。

(2) 曲线 B 和 C 中各粒组的百分含量及 C_u 、 C_c 的计算结果见表 1-4。

表 1-4 A、B、C 三种土的计算结果

土样 编号	土粒组成(%)				d_{60} (mm)	d_{10} (mm)	d_{30} (mm)	C_u	C_c
	10 ~ 2 mm	2 ~ 0.075 mm	0.075 ~ 0.005 mm	< 0.005 mm					
A	0	95	5	0	0.165	0.11	0.15	1.5	1.24
B	0	52	44	4	0.115	0.012	0.044	9.6	1.40
C	43	57	0	0	3.00	0.15	0.25	20.0	0.14

由此可知, B 土级配良好, C 土级配不良。

2. 土的液相

土中的水按存在方式的不同,可分为下列几类(见图1-2)。

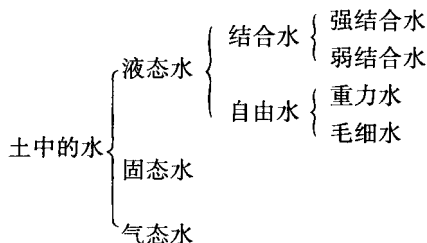


图1-2 土中水的类型

1) 结合水

结合水是指附着于土粒表面成薄膜状的水。一般情况下,土粒(黏性土)表面多带有负电荷,并在周围形成电场,吸引周围的极性水分子,使其定向排列,形成结合水膜,如图1-3所示。根据吸附力的大小,可将结合水分为强结合水和弱结合水。

(1)强结合水。指紧靠土粒表面的结合水,又称吸着水。其特征为:无溶解能力,不受重力,不传递静水压力作用,温度在 105°C 以上时才能蒸发,冰点为 -78°C ,密度为 $1.2 \sim 2.4 \text{ g/cm}^3$ 。这种水牢固地吸着在土粒表面,其性质与固体相似,具有很大的黏滞性、弹性及抗剪强度。土粒越细,比表面积愈大,其最大吸着度就愈大。黏土中仅含强结合水时,黏土呈固体状态。

(2)弱结合水。指紧靠于强结合水外围的一层水膜,故又称薄膜水。它也不能传递静水压力,不能自由移动,只能以水膜的形式由厚向薄处缓慢移动。弱结合水的存在,使土具有可塑性。由于黏性土比表面积较大,含薄膜水多,故其可塑性范围大;而砂土比表面积较小,含薄膜水极少,故几乎不具有可塑性。

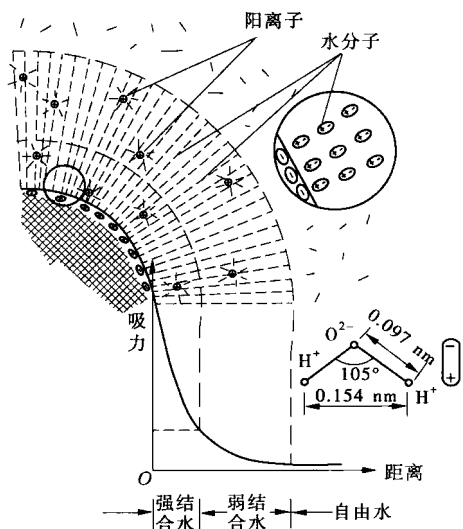


图1-3 黏土矿物水分子的相互作用示意图

2) 自由水

土孔隙中位于结合水以外的水。它不受土粒电荷力的作用,可在孔隙中自由移动。按其移动时所受的作用力不同,可分为重力水和毛细水。

(1)重力水。受重力作用而运动的水。这种水位于地下水位以下,具有浮力作用,从水头高处向水头低处流动,能引起土的渗透变形。

(2)毛细水。由于水分子与土粒表面之间的附着力和水表面张力的作用而存在,并运动于毛细孔隙中的水。这种水位于地下水位以上,受毛细作用而上升,上升高度视土粒大小、孔隙大小及形状而定。一般来说,卵石接近零,砂土较小,可从几厘米到几十厘米,黏性土可达几米。

3) 固态水

当气温降至 0°C 以下时,液态的自由水结冰为固态水。水在冻结后会发生膨胀,使基础冻胀,寒冷地区基础的埋置深度要考虑冻胀问题。

4) 气态水

气态水即水汽,对土的性质影响不大。

3. 土的气相

土中气体存在于土孔隙中未被水所占据的部分。土中气体可分为以下两种类型:

(1) 流通气体。与大气连通的气体,受外力作用时,易被挤出,对土的工程性质影响不大。

(2) 封闭气体。与大气隔绝以气泡形式出现的气体,常见于黏性土中。受外力作用时,不易逸出,因而增大了土的压缩性,降低了透水性。较为典型的淤泥质土和泥炭土,由于微生物分解有机物,在土层中产生了一些可燃性气体(如甲烷、硫化氢等),使其在自重作用下长期不易压实,成为高压缩性土层。

(二) 土的结构

土粒或粒团的大小、形状、相互排列与联结等综合特征,称为土的结构,其一般分为以下三种类型。

1. 单粒结构

粗粒土颗粒(卵石、砾石及砂土等)在水或空气中在自重作用下沉落形成的结构,如图 1-4(a)所示。单粒结构的特点是土粒间存在点与点的接触。随着沉积条件的不同,可形成疏松的或紧密的状态。疏松状态的单粒结构在荷载作用下,特别是在振动荷载作用下会使土粒向更稳定的位置,产生较大的变形。密实状态的单粒结构则比较稳定,力学性能较好。

2. 蜂窝结构

较细土颗粒如粉粒(粒径介于 $0.075 \sim 0.005 \text{ mm}$),由于土粒之间的分子引力大于其重力,当其在沉积过程中碰到已沉积的土粒,就停留在最初的接触点上不再下沉,并彼此接触形成链环状团粒,构成较疏松的蜂窝结构,如图 1-4(b)所示。

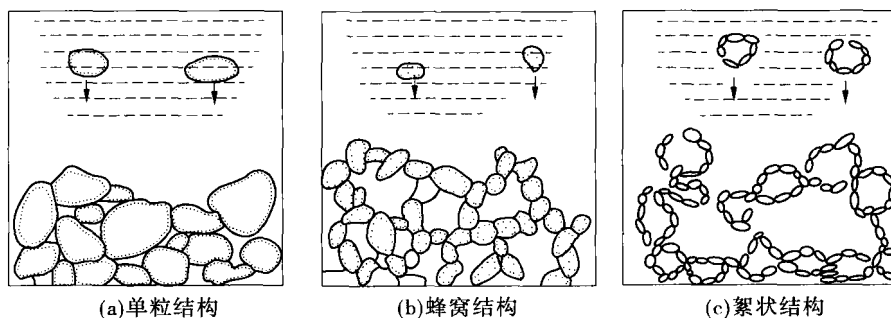


图 1-4 土的结构

3. 絮状结构

更细的黏土颗粒(粒径小于 0.005 mm)在水中长期悬浮,不会因自重而下沉。当悬

液介质发生变化时,土粒表面的弱结合水厚度减薄,黏粒互相接近,凝聚成絮状物下沉,形成孔隙较大的絮状结构。如图 1-3(c) 所示。

具有蜂窝结构和絮状结构的土,结构疏松、强度低、压缩性高。当天然结构遭受破坏时,强度会迅速降低。所以,对这种土进行施工时,一定要注意保持其天然结构不受破坏。

(三) 土的性质

由于土的特有结构特点决定了土具有结构性、击实性、触变性、渗透性、压缩性等。此处仅对前三种性质做一简单介绍,其他性质在有关章节中详加论述。

1. 土的结构性

土的天然结构扰动后,土中的胶结物联结遭到破坏,土原有的物理、力学性质会降低的特性称为土的结构性。土的结构性大小评价指标常用灵敏度表示,一般灵敏度 S_l 按下式计算

$$S_l = \frac{q_u}{q'_u} \tag{1-3}$$

式中 q_u ——原状土样的无侧限抗压强度, kPa;

q'_u ——重塑土样的无侧限抗压强度, kPa。

所谓原状土样是指取样时保持天然状态下土的结构和含水量不变的黏性土样;当土样的结构受到彻底破坏而含水量保持不变时,则为重塑土样。

按灵敏度的大小可将黏性土分为:

不灵敏土	$S_l \leq 2$
中等灵敏土	$2 < S_l \leq 4$
灵敏土	$4 < S_l \leq 8$
极灵敏土	$S_l > 8$

土的灵敏度越高,其结构性越强,受扰动后土的强度降低就越多。在基础工程施工中,若遇到灵敏度较高的土,应特别注意保护基槽(坑)底土,防止人来车往践踏基槽,以免破坏土的结构,降低地基强度。

黏性土一般具有结构性,而砂土则不具有结构性。

2. 土的击实性

土的击实是指用重复性的冲击动荷载将土压密,提高强度。

研究土的击实性的目的在于揭示击实作用下土的干密度、含水率和击实功三者之间的关系和基本规律,从而选定适合工程需要的最小击实功。我们可以通过试验的方法进行研究。

击实试验是把某一含水率的土料填入击实筒内,用击锤按规定落距对土打击一定的次数后,测其含水率和干密度的关系曲线,即为击实曲线。如图 1-5 所示。

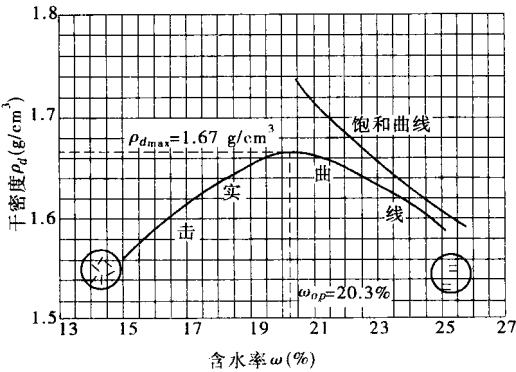


图 1-5 击实曲线

在击实曲线上可找到某一峰值,称为最大干密度 ρ_{dmax} ,与之相对应的含水率,称为最优含水率 ω_{op} 。它表示在一定击实功作用下,达到最大干密度的含水率。即当击实土料为最优含水率时,击实效果最好。

无黏性土情况有些不同。无黏性土的击实性也与含水率有关,不过不存在着一个最优含水率。一般在完全干燥或者充分洒水饱和的情况下容易压实到较大的干密度。潮湿状态,由于具有微弱的毛细水联结,土粒间移动所受阻力较大,不易被挤紧压实,干密度不大。

无黏性土的压实标准,一般用相对密度 D_r 。一般要求砂土击实至 $D_r > 0.67$,即达到密实状态。

从黏土击实曲线分析可知,影响土击实性的因素主要有含水率、击实功能、土的种类和级配等,并且存在着一定的规律性。

1) 含水率的影响

当含水率较低时,击实后的干密度随含水率的增加而增大。而当干密度增大到某一值后,含水率的继续增加反而导致干密度的减小。干密度的这一最大值称为该击数下的最大干密度,与它对应的含水率称为最优含水率。

当击数一定时,只有在某一含水率下才能获得最佳的击实效果。

2) 击实功的影响

(1) 土料的最大干密度和最优含水率不是常数。最大干密度随击数的增加而逐渐增大,最优含水率逐渐减小。然而,这种变化速率是递减的。同时,光凭增加击实功来提高土的最大干密度是有限的(如图1-6所示)。

(2) 当含水率较低时击数的影响较显著。当含水率较高时,含水率与干密度关系曲线趋近于饱和线,这时提高击实功是无效的。

填料的含水率过高或过低都是不利的。含水率过低,填土遇水后容易引起湿陷;含水率过高又将恶化填土的其他力学性质。因此,在实际施工中填土的含水率控制得当与否,不仅涉及到经济效益的高低,而且影响到工程质量的好坏。

3) 土类和级配的影响

击实试验表明,在相同击实功下,黏性土黏粒含量愈高或塑性指数愈大,击实愈困难,最大干密度愈小,最优含水率愈大。

土的级配对土的击实性影响很大。级配良好的土,易于击实,级配不良的土,不易击实,因为级配良好的土有足够的细粒去充填较粗粒形成的孔隙,因而能获得较高的干密度。

在工程实践中,常用土的压实度来直接控制填土的工程质量。压实度的定义

是:土体压实时要求达到的干密度 ρ_d 与室内击实试验所得到的最大干密度 ρ_{dmax} 的比值,即

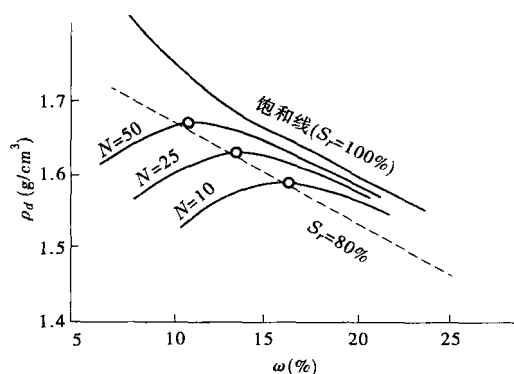


图1-6 土的含水率、干密度和击实功关系曲线

$$\lambda = \frac{\rho_d}{\rho_{dmax}} \quad (1-4)$$

可见, λ 值越接近 1, 表示对压实质量的要求越高。我国《碾压式土石坝设计规范》(SL 274—2001) 中规定: I 级坝和高坝, 填土的 $\lambda = 0.98 \sim 1.00$; II 级、III 级及其以下的中坝, 填土的 $\lambda = 0.96 \sim 0.98$ 。在高速公路的路基工程中, 要求 $\lambda > 0.95$, 对一些次要工程, λ 值可适当取小些。

3. 触变性

当饱和黏性土结构受扰动时, 会导致土的强度降低, 但静置一段时间后, 土的强度又会逐渐增长, 这种黏性土的胶体化学性质称为土的触变性。原因在于停止扰动后, 黏性土中土粒、离子和水分子体系随时间而逐渐形成新的平衡状态。

在工程施工中(特别是桩基施工), 应充分利用土的触变性, 把握施工进度, 既保证施工质量, 又使桩的承载力提高。

二、土的评价指标

土的评价指标有土的物理性质指标和土的物理状态指标两种。

(一) 土的物理性质指标

土是由固体、液体和气体组成的三相系。三相的性质与数量以及它们之间的相互作用, 决定着土的物理力学性质。如土质疏松且湿润则其强度低而压缩性大; 反之则强度高而压缩性小。三相在体积或质量上的比例关系称为土的物理性质指标, 包括有土的密度、比重、含水率、孔隙比、孔隙率和饱和度等, 它们是评价土体工程性质优劣的基本指标。

为便于研究这些指标, 通常把实际相互混合的三相分别集中起来, 并以图 1-7 的形式表示出来, 称为土的三相草图。

土的物理性质指标有的可以实地测量取得, 称为实测指标; 有的则需进行指标换算取得, 称为换算指标。

1. 实测指标

1) 土的密度 ρ

单位体积土的质量称为土的密度(常用单位为 g/cm^3 或 kg/m^3), 简称天然密度, 以 ρ 表示

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_s + m_w}{V} \quad (1-5)$$

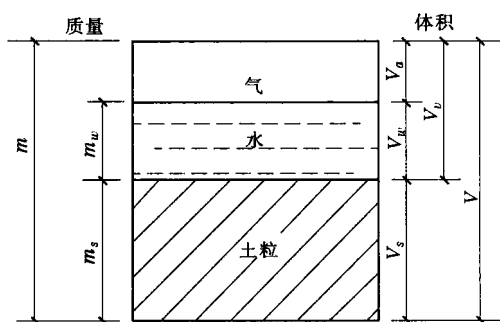


图 1-7 土的三相示意图

单位体积土所受的重力称为土的重力密度, 简称土的重度(常用单位为 N/cm^3 或 kN/m^3), 以 γ 表示

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (1-6)$$

式中 g ——重力加速度, 取 9.8 m/s^2 。

土的天然密度一般为 $\rho = 1.8 \sim 2.2 \text{ g/cm}^3$, 常用环刀法测定(见本章第四节)。