



道路与桥梁专业“十一五”高职高专应用型规划教材

# 土力学与基础工程

主 编 胡 森 田国芝  
副主编 邢焕兰 蔡韩英  
主 审 陈德芳

黄河水利出版社

## 内 容 提 要

本书为道路与桥梁专业“十一五”高职高专应用型规划教材,系统地介绍了土力学的基本理论和公路桥梁各种常用基础的设计计算方法和施工技术以及地基处理方法。内容包括土的物理性质及工程分类、土中水的运动规律、土中应力计算、土的压缩性和沉降计算、土的抗剪强度和地基承载力、土压力与土坡稳定、基础工程概述、天然地基土刚性浅基础、桩基础、其他深基础简介、软弱地基处理以及区域性地基等,每章均附有较全面、详细的例题和复习思考题。本书还专门配置了《土力学与基础工程试验指导书》。

本书主要作为高职高专院校道路与桥梁工程技术专业教学用书,也可供其他相关专业师生及工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

土力学与基础工程/胡森,田国芝主编. —郑州:黄河水利出版社,2008. 2

道路与桥梁专业“十一五”高职高专应用型规划教材

ISBN 978 - 7 - 80734 - 349 - 3

I. 土… II. ①胡…②田… III. ①土力学 - 高等学校: 技术学校 - 教材②地基 - 基础(工程) - 高等学校: 技术学校 - 教材 IV. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 011565 号

---

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940

传真:0371 - 66022620

E-mail:hhs1cbs@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:23.5

字数:543 千字

印数:1—4 100

版次:2008 年 2 月第 1 版

印次:2008 年 2 月第 1 次印刷

---

定价:39.00 元

# 前 言

本教材是根据《土力学与基础工程》教材编写大纲并参考《土力学与基础工程》课程基本要求编写的。

土力学与基础工程是道路与桥梁工程专业的一门主要专业课程,要求阐明土力学的基本原理和主要概念,以及地基基础设计和施工的基本方法。本教材结合高职高专层次的培养目标和编者多年从事本学科高职高专教学经验,理论部分尽可能以够用为度,删繁就简;实用内容尽量充实加强,力求更新。全书以现行有关规范为主要依据,注重理论和概念的准确性及完整性。在着重阐述适用于一般情况的成熟技术的同时,也根据内容需要反映特殊情况下一般规律的深化,并有选择地介绍了一些日趋常用的新技术。本书具有内容精练、体系完整、紧密联系实际的特点。根据课程要求,书中附有针对性较强的例题、思考题和习题。

本书各章编写人员如下:胡森编写绪论、第一章、第九章;山东交通职业学院刘进朝编写第二章、第十章,田国芝编写第五章、第六章、试验指导书;石家庄铁路职业技术学院邢焕兰编写第三章、第四章;山东水利职业学院王延恩编写第七章、第十一章;新乡市规划设计研究院蔡韩英编写第八章、第十二章。全书由胡森统稿。

本书由江西交通职业技术学院胡森、山东交通职业学院田国芝担任主编,由江西科技师范学院陈德芳教授担任主审。

由于编写时间和编写水平所限,本书缺点及不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者  
2007 年 10 月

# 目 录

## 前 言

绪 论 .....	(1)
第一节 土力学、地基与基础的概念 .....	(1)
第二节 国内外基础工程成败实例 .....	(2)
第三节 本课程的任务和作用 .....	(3)
第四节 本学科发展简介 .....	(4)
第一章 土的物理性质及工程分类 .....	(5)
第一节 土的组成与结构 .....	(5)
第二节 土的物理性质指标 .....	(9)
第三节 土的物理状态指标 .....	(15)
第四节 土的击实性 .....	(18)
第五节 土的工程分类 .....	(19)
复习思考题 .....	(25)
第二章 土中水的运动规律 .....	(27)
第一节 土的毛细性 .....	(27)
第二节 土的渗透性 .....	(30)
第三节 流网及其应用 .....	(34)
复习思考题 .....	(36)
第三章 土中应力计算 .....	(38)
第一节 概 述 .....	(38)
第二节 土中自重应力计算 .....	(38)
第三节 基础底面的压力分布与计算 .....	(41)
第四节 土中附加应力计算 .....	(47)
第五节 应力计算中的其他问题 .....	(65)
复习思考题 .....	(66)
第四章 土的压缩性与沉降计算 .....	(68)
第一节 概 述 .....	(68)
第二节 土的压缩性指标和确定方法 .....	(69)
第三节 地基沉降量计算 .....	(82)
第四节 沉降差和倾斜 .....	(90)
第五节 基础沉降与时间的计算 .....	(93)
复习思考题 .....	(99)

<b>第五章 土的抗剪强度与地基承载力</b> .....	(102)
第一节 概 述 .....	(102)
第二节 土的抗剪强度与极限平衡条件 .....	(103)
第三节 土的抗剪强度试验方法 .....	(105)
第四节 地基容许承载力的确定 .....	(109)
复习思考题 .....	(119)
<b>第六章 土压力与土坡稳定</b> .....	(120)
第一节 概 述 .....	(120)
第二节 静止土压力计算 .....	(121)
第三节 朗金土压力计算 .....	(123)
第四节 库仑土压力理论 .....	(130)
第五节 土坡稳定分析 .....	(140)
复习思考题 .....	(149)
<b>第七章 基础工程概述</b> .....	(150)
第一节 基础设计原则 .....	(150)
第二节 地基与基础分类 .....	(151)
第三节 作用于基础上的荷载 .....	(152)
第四节 基础埋置深度的选择 .....	(155)
复习思考题 .....	(158)
<b>第八章 天然地基上刚性浅基础</b> .....	(160)
第一节 刚性浅基础的构造 .....	(160)
第二节 浅基础的设计计算 .....	(161)
第三节 扩大基础计算实例 .....	(169)
第四节 刚性扩大浅基础施工 .....	(174)
复习思考题 .....	(183)
<b>第九章 桩基础</b> .....	(185)
第一节 桩基础的组成、作用及适用条件 .....	(185)
第二节 桩和桩基础的类型与构造 .....	(186)
第三节 桩基础的施工 .....	(193)
第四节 单桩容许承载力的确定 .....	(213)
第五节 桩的内力和变位计算 .....	(225)
第六节 桩基础整体承载力的验算 .....	(238)
第七节 桩基础设计计算步骤 .....	(240)
复习思考题 .....	(245)
<b>第十章 其他深基础简介</b> .....	(247)
第一节 沉井基础 .....	(247)
第二节 地下连续墙 .....	(253)
第三节 静压桩 .....	(259)

第四节	树根桩 .....	(261)
复习思考题	.....	(264)
第十一章	软弱地基处理 .....	(265)
第一节	概 述 .....	(265)
第二节	砂砾垫层 .....	(266)
第三节	砂桩与砂井 .....	(268)
第四节	加固地基的其他方法 .....	(273)
复习思考题	.....	(280)
第十二章	区域性地基 .....	(281)
第一节	膨胀土地基 .....	(281)
第二节	湿陷性黄土地基 .....	(283)
第三节	红黏土地基 .....	(286)
第四节	冻土地基 .....	(287)
第五节	山区地基 .....	(288)
第六节	地震区的地基基础问题 .....	(291)
复习思考题	.....	(295)
参考文献	.....	(296)

# 绪 论

## 第一节 土力学、地基与基础的概念

土是地壳岩石经受强烈风化的产物,是各种矿物颗粒的集合体,土由固体颗粒、水和空气三相组成。颗粒包括互不联结、完全松散的无黏性土和颗粒间虽有联结,但联结强度远小于颗粒本身强度的黏性土。土与其他连续固体介质相区别的最主要特征就是它的多孔性和散体性,以及由于自然地理环境的不同所形成的具有明显区域性的一些特殊性质。

土力学是用力学的基本原理和土工测试技术,研究土的物理性质以及受外力后发生变化时土的应力、变形、强度和渗透等特性的一门学科,即是研究土的工程性质和在力系作用下土体性状的学科。一般认为,土力学是力学的一个分支,但由于土具有复杂的地质成因和工程特性,因此目前在解决土工问题时,尚不能像其他力学学科一样具备系统的理论和严密的数学公式,而必须借助经验、现场试验以及室内试验以进行理论计算。所以,土力学是一门强烈依赖于实践的学科。

任何结构物都建造在地球表层上。支承结构物并受结构物荷载影响相对较大的地层称为地基,建筑物下部与地层相连的部分称为基础。桥梁上部结构为桥跨结构,而下部结构包括桥墩、桥台及其基础,如图 0-1 所示。

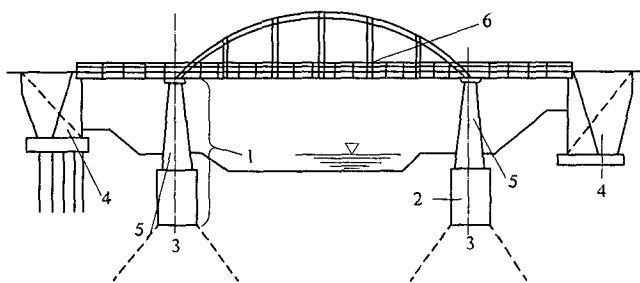


图 0-1 桥梁结构各部立面示意图

1—下部结构;2—基础;3—地基;4—桥台;5—桥墩;6—上部结构

地基与基础受到各种荷载作用后,将产生相应的应力和变形,为保证结构物的正常使用和安全,地基与基础必须具有足够的强度和稳定性,变形也应该在容许的范围内。根据地基土的具体情况、上部结构的要求和荷载特点,选用合适的基础类型,并合理地进行基础设计与施工,是本教材要解决的问题。



## 第二节 国内外基础工程成败实例

### 一、意大利比萨斜塔

该塔 1173 年动工修建,当塔筑至 24 m 高时发生倾斜。限于当时的技术水平,因不知其原因而停工。100 年后续建该塔至塔顶,高约 55 m。目前塔北侧沉降 1 m 余,南侧下沉近 3 m,沉降差达 1.8 m(倾斜  $5.8^\circ$ )。近期每年下沉约 1 mm。

### 二、加拿大特朗斯康谷仓

该谷仓长 59.4 m、宽 23.5 m、高 31.0 m,容积  $36\,500\text{ m}^3$ 。基础为钢筋混凝土筏基,厚 0.6 m,埋深 3.6 m。

谷仓于 1913 年秋完工,当年 10 月装谷子约  $32\,000\text{ m}^3$  时,发现谷仓下沉,24 h 内,谷仓西端下沉 7.3 m,东端上抬 1.5 m,整个谷仓倾斜  $26^\circ53'$ ,如图 0-2 所示。

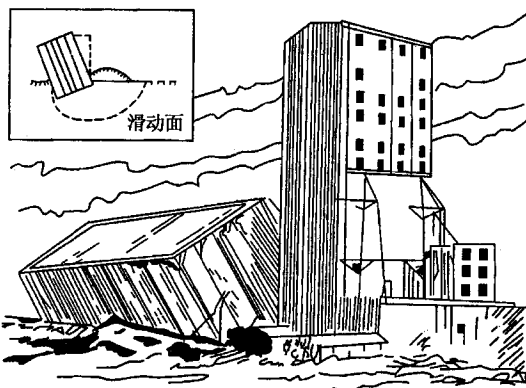


图 0-2 加拿大特朗斯康谷仓的地基事故

### 三、香港宝城大厦

该大厦建在香港山坡上。1972 年雨季出现连续大暴雨,引起山坡残积土软化而滑动。7 月 18 日早晨 7 时,大滑坡下滑,冲毁高层建筑宝城大厦。居住在该大厦的银行界人士 120 人当场死亡。这一事故,引起西方震惊,从此对岩石工程备加重视。

### 四、上海锦江饭店北楼(原名华懋公寓)

该楼建于 1929 年,总层数为 14 层,高度 57 m,是当时上海最高的一幢建筑物。基础坐落在软土地基上,采用桩基础,由于工程承包商偷工减料,未按设计桩数施工,造成大幅度沉降,建筑物的绝对沉降达 2.6 m,致使原底层陷入地下,成了半地下室,严重影响使用。

## 五、广州白云宾馆

该宾馆为高层建筑,地面以上33层,高140.05 m,总重近10万t。地基覆盖层厚薄相差悬殊,最浅10.0 m,最深27.75 m。为适应抗震、抗台风的要求,采用桩基与墩基287根。所用钢筋混凝土灌注桩直径1 m,单桩承载力4 500 kN。混凝土墩直径2 m多。宾馆建成后使用良好,沉降小于4 mm。

## 六、苏州虎丘塔——著名的中国斜塔

该塔建于公元959年,共7层,高47.5 m,塔平面呈八角形,由外壁、回廊与塔心三部分组成,主体结构为砖木结构,采用黄泥砌砖,浅埋式独立砖墩基础,坐落在人工夯实的土夹石覆盖层上,覆盖层南薄北厚,变化范围0.9~3.6 m,基岩弱风化。由于土夹石覆盖层压实后引起不均匀沉降,过大的沉降差造成塔身倾斜,据实测,塔顶偏中2.34 m。引起塔楼从底层到第二层产生了宽达17 cm的竖向劈裂;北侧壶门拱顶两侧裂缝发展到了第3层。砖墩压疏、碎裂、崩落,堪称危如累卵。近年来经过精心治理,将危塔加固,使古塔得以保存。

从以上所列实例,我们可以得到几点启示:一是安全可靠的地基基础是建筑物经久耐用的前提;二是地基与基础如果出现问题,整个结构物都将受到很大影响,甚至会导致灾难性后果;三是地基与基础方面如果出现问题,进行工程补救很困难。因此,我们要对地基与基础给予足够的重视。

# 第三节 本课程的任务和作用

《土力学与基础工程》包括土力学及基础工程两部分。土力学部分的内容,概括地说就是研究各种常见的分散土体由荷载作用所引起的力学方面的变化规律;而基础工程部分的内容,则主要是研究常见的桥梁涵洞基础和地基的类型、设计计算及施工方法。由于一般建筑物材料强度高于地基土,所以基础的设计既要考虑上部结构的情况,更要考虑地基土的特性。对本专业来说,土力学属技术基础课,基础工程属专业课,但由于前者是后者的理论基础,两部分关系十分密切,所以合并为一门课程。

本课程的内容和性质决定了它的特点是:既有理论,又有试验;既有设计,又有施工。例如土力学部分,除了必须具有数学、理论力学、材料力学、结构力学及地质和土质学等课程的基础知识外,还涉及弹性理论方面的知识。而弹性理论是我们没有学过的,因此在有关内容中,一般只直接应用其结论,指出其物理意义,而不做理论上的推导和证明。所以在学习这部分内容时,应着重于理解物理概念,学会计算方法,不宜把注意力放到数学演算上去。在学习过程中,还要特别注意土的特征,重视土力学试验。在地基基础部分,则要注意掌握设计原理,学会一般的设计方法,熟悉地基基础的主要施工内容。此外,本课程还与施工机电、桥梁工程等课程有一定关系,在学习时要注意相互间的联系。

由于土力学要直接运用土质学的知识,所以在学习本课程前,要很好地复习和熟悉一下有关土的各种物理性质指标的含义及计算方法,以利于本课程的学习。

## 第四节 本学科发展简介

早在几千年以前,人类就懂得利用土进行工程建设。我国西安市半坡村新石器时代遗址发现的土台和石础,就是古代的地基基础。公元前2世纪修建的长城,后来修建的南北大运河、黄河大堤以及宏伟的宫殿、寺院、宝塔等都有坚固的地基基础,经历地震、强风的考验保留至今。隋朝修建的赵州安济石拱桥,有一孔石拱独跨浚河,净跨37.02 m。主拱肩部设置四个小拱,节省材料,减轻桥身自重,造型美观。拱桥采用纵向并列砌筑法,28道拱圈自成一体,桥宽达8.4 m,桥上可以行车。桥台坐落在密实的天然砂砾地基上,基础承载力达500~600 kPa,1300多年来,沉降与位移甚微,至今安然无恙。公元985年建造开封开宝寺木塔时,预见塔基地质不均会引起不均匀沉降,施工时特意做成倾斜,待沉降稳定后,塔身正好垂直。四川采用泥浆护壁钻探法打盐井,西北地区在黄土中建窑洞,以及在建筑中用料石基垫、灰土地基等,证明我国人民在长期实践中,积累了有关土力学地基基础方面极其宝贵的知识与经验。

18世纪欧洲产业革命后,城市建设、水利、道路的兴建推动了土力学的发展。1773年法国库仑根据试验,创立了著名的土的抗剪强度公式和土压力理论;1857年英国朗金通过不同假定,提出另一种土压力理论;1885年法国布辛尼斯克求得半无限弹性体在垂直集中力作用下,应力和变形的理论解答;1922年瑞典费伦纽斯为解决铁路坍方,研究出土坡稳定分析法。这些理论和方法,至今仍在广泛使用。1925年美国科学家太沙基发表土力学专著,使土力学成为一门独立的学科。1936年以来,已召开了11届国际土力学和基础工程会议,涌现了大量论文、研究报告和技术资料。很多国家定期出版土工杂志。世界各地也都召开了类似的专业会议,总结和交流本学科的研究成果。

新中国诞生50多年来,为适应我国社会主义建设的需要,土力学地基基础学科经历了迅速的发展。全国各地有关生产、科研单位和高等院校总结实践经验,开展现场测试、室内试验和理论研究,在解决工程实践问题的同时也为土力学的理论研究做出了突出贡献。如全国土力学及基础工程学会原理事长、清华大学黄文熙教授,早在1957年就提出了非均质地基考虑土侧向变形影响的沉降计算方法,并于20世纪60年代初研制成功第一台振动三轴仪,发表了砂土液化理论等。

近年来,世界各地高土坝(坝高大于200 m)、高层建筑与核电站等巨型工程的兴建和多次强烈地震的发生,促使土力学进一步发展。有关单位积极研究土的本构关系、土的弹塑性及黏弹性理论和土的动力特性。同时,各单位研制成功各种各样的勘察、试验与地基处理的设备,如自动记录的静力触探仪、现场孔隙水压力仪、径向膨胀仪、测斜仪、自进式旁压仪,应用放射性同位素测土的物理性指标仪、薄壁原状取土器、高压固结仪、自动固结仪、大型三轴仪、振动三轴仪、真三轴仪、流变仪、振冲器、三重管旋喷器、深层搅拌机、塑料排水板插板机、扩底桩机械扩底机等,为土力学研究和地基加固提供了良好的条件。电子计算机的应用和试验测试技术自动化程度的提高,标志着本学科进入了一个新时代。为实现我国现代化建设大业,土力学地基基础学科必将得到新的更大发展。

# 第一章 土的物理性质及工程分类

## 本章重点

- (1) 土的三相组成、颗粒级配和粒组划分。
- (2) 三相比例指标换算及测定。
- (3) 液、塑限概念及测定。
- (4) 土的击实性。
- (5) 土的工程分类。

## 第一节 土的组成与结构

### 一、土的组成

天然状态的土一般为三相土,即由固体、液体和气体三部分组成,其中固相为土颗粒,它构成土的骨架,土骨架之间的孔隙被水和气体所填充。若土中孔隙全部由气体所填充,称为干土;若孔隙全部被水所填充,称为饱和土;若孔隙中同时存在水和气体,称为湿土。饱和土和干土都是二相体。

#### (一) 土的固相

土的固相是土中最重要的组成部分,它由各种矿物成分及有机质组成。土粒的矿物成分不同、粗细不同、形状不同,土的性质也不同。

##### 1. 土的矿物成分和土中的有机质

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,通常可分为原生矿物和次生矿物两大类。

岩石经物理风化作用后破碎形成的矿物颗粒,称原生矿物。原生矿物在风化过程中,其化学成分并没有发生变化,它与母岩的矿物成分是相同的。常见的原生矿物有石英、长石和云母等。岩石经化学风化作用所形成的矿物颗粒,称次生矿物。次生矿物的矿物成分与母岩不同。常见的次生矿物有高岭石、伊利石(水云母)和蒙脱石(微晶高岭石)等三大黏土矿物。

自然界的土是岩石风化的产物,其颗粒大小的变化很大,相差极为悬殊,其矿物成分不同,性质也有很大的差别。通常把自然界的土颗粒按照颗粒大小划分为不同的粒组,包括漂石和块石、卵石和碎石、砾石、砂粒、粉粒和黏粒等六大粒组(划分标准详见表 1-1)。

土中的有机质是在土的形成过程中动、植物的残骸及其分解物质与土混掺沉积在一起,经生物化学作用生成的物质,其成分比较复杂,主要是植物残骸、未完全分解的泥炭和完全分解的腐殖质。当有机质含量超过 5% 时,称为有机土。有机质亲水性很强,因此有

机土压缩性大、强度低。有机土不能作为堤坝工程的填筑土料,否则会影响建筑工程的质量。

## 2. 土的粒组划分

颗粒的大小及其含量直接影响着土的工程性质。例如颗粒较粗的卵石、砾石和砂粒等,其透水性较大,无黏性和可塑性;而颗粒很小的黏粒则透水性较小,黏性和可塑性较大。土颗粒的大小常以粒径来表示。土的粒径与土的性质之间有一定的对应关系,土的粒径相近时,土的矿物成分接近,所呈现的物理力学性质基本相同。因此,通常将土的性质相近的土颗粒划分为一组,称为粒组,把土在性质上表现出有明显差异的粒径作为划分粒组的分界粒径。

《土的工程分类标准》(GB 145—90)和《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)中粒组划分标准见表 1-1。

表 1-1 粒组划分标准

粒组统称	《土的工程分类标准》(GB 145—90)		《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)		
	粒组名称	粒组范围(mm)	粒组名称	粒组范围(mm)	
巨粒组	漂石(块石)	>200	漂石(块石)	>200	
	卵石(碎石)	200~60	卵石(小块石)	200~60	
粗粒组	砾粒	粗砾	60~20	粗砾	60~20
		中砾	20~5	中砾	20~5
		细砾	5~2	细砾	5~2
		粗砂	2~0.075	粗砂	2~0.5
		中砂		中砂	0.5~0.25
		细砂		细砂	0.25~0.075
细粒组	粉粒	0.075~0.005	粉粒	0.075~0.002	
	黏粒	<0.005	黏粒	<0.002	

## 3. 土的颗粒级配

### 1) 颗粒级配与颗粒分析

土中各粒组的相对含量用各粒组占土粒总质量的百分数表示,称为土的颗粒级配。颗粒级配是通过颗粒大小分析试验来测定的。土的颗粒大小分析试验简称“筛分”试验。常用的“筛分”试验方法有筛分法和比重计法两种。

筛分法适用于粒径大于 0.075 mm 的粗粒土,比重计法适用于粒径小于 0.075 mm 的细粒土。比重计法是将一定质量的风干土样倒入盛水的玻璃量筒中,将其搅拌成均匀的悬液状。根据土颗粒的大小不同在水中沉降的速度也不同的特性,将比重计放入悬液中,测记 1 min、5 min、30 min、120 min 和 1 440 min 的比重计读数,然后通过公式算出不同土粒的粒径及其小于该粒径的质量百分数。

若土中粗细粒组兼有,可将土样过 0.075 mm 的筛子,使其分为两个部分。大于 0.075 mm 的土样用筛分法进行分析,小于 0.075 mm 的土样用比重计法进行分析。

## 2) 颗粒级配的评价

土颗粒大小分析试验的成果,通常在半对数坐标系中点绘成一条曲线,称为土的颗粒级配曲线,如图 1-1 所示,图中曲线的纵坐标为小于某粒径的质量百分数,横坐标为用对数尺度表示的土粒粒径。因为土中的粒径通常相差悬殊,横坐标用对数尺度可以把粒径相差悬殊的粗、细粒的含量都表示出来。

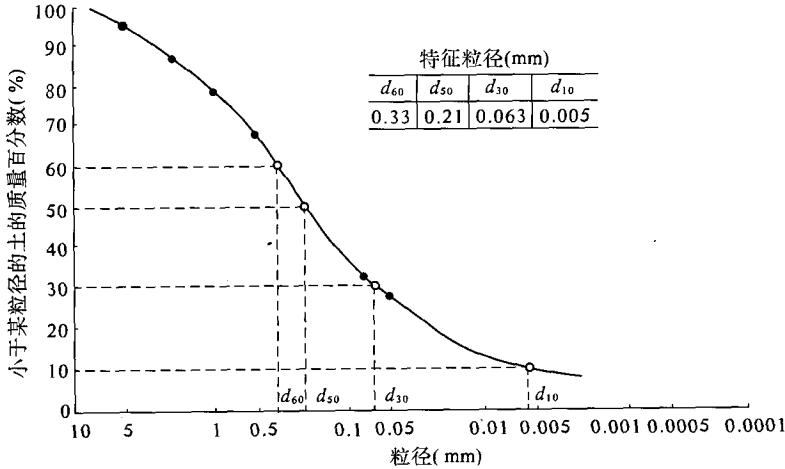


图 1-1 土的颗粒级配累计曲线

土中各粒组的相对含量为小于两个分界粒径质量百分数之差。图 1-1 中的曲线,对应各粒组的百分比含量分别为:砾石(60 ~ 2 mm)占 100% - 85% = 15%;砂粒(2 ~ 0.075 mm)占 55%。

## 3) 良好级配的判别

级配良好的土,粗细颗粒搭配较好,粗颗粒间的孔隙有细颗粒填充,易被压实到较高的密度。因为渗透性和压缩性较小,强度较大,所以颗粒级配常作为选择筑填土料的依据。为了定量地衡量土的颗粒级配是否良好,常用不均匀系数  $C_u$  和曲率系数  $C_c$  两个指标判别。

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

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

式中  $d_{60}$ 、 $d_{30}$ 、 $d_{10}$ ——颗粒级配曲线上纵坐标为 60%、30%、10% 时所对应的粒径,  $d_{10}$  称为有效粒径,  $d_{60}$  称为限定粒径。

工程上常将  $C_u < 5$  的土称为均匀土,把  $C_u \geq 5$  的土称为不均匀土。曲率系数  $C_c$  是反映  $d_{60}$  与  $d_{10}$  之间曲线主段弯曲形状的指标,同时满足  $C_u \geq 5$  和  $C_c = 1 \sim 3$  的土称为级配良好。

## (二) 土中水

### 1. 结合水

研究表明,大多数黏土颗粒表面带有负电荷,因而围绕土粒周围形成了一定强度电

场,使空隙中的水分子极化,这些极化后的极性水分子和水溶液中所含的阳离子(如钾、钠、钙、镁等阳离子),在电场力的作用下定向地吸附在土颗粒周围,形成一层不可自由移动的水膜,该水膜称为结合水,结合水又可根据受电场力作用的强弱分成强结合水和弱结合水。

强结合水是指被强电场力紧紧地吸附在土粒表面附近的结合水膜。这部分水膜因受电场力作用大,与土粒表面的结合十分紧密,所以分子排列密度大,其密度为  $1.2 \sim 2.4 \text{ g/cm}^3$ ,冰点很低,可达  $-78 \text{ }^\circ\text{C}$ ;沸点较高,在  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  以上才蒸发,而且很难移动,没有溶解能力,不传递静水压力,失去了普通水的基本特性,其性质接近于固体,具有很大的黏滞性、弹性和抗剪强度。

弱结合水是指分布在强结合水外围的结合水。这部分水膜由于距颗粒表面较远,受电场力作用较小,它与土粒表面的结合不如强结合水紧密。其密度为  $1.0 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$ ,冰点低于  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,不传递静水压力,也不能在空隙中自由流动,只能以水膜的形式由水膜较厚处缓慢移向水膜较薄的地方,这种移动不受重力影响。弱结合水的存在对黏性土的性质影响很大,将在第三节中论述。

## 2. 自由水

土空隙中位于结合水以外的水称为自由水,可分为重力水和毛细水。

受重力作用在土的孔隙中流动的水称为重力水,处于地下水位以下。重力水与一般水一样,可以传递静水和动水压力,具有溶解能力,可溶解土中的水溶盐,使土的强度降低,压缩性增大;可以对土颗粒产生浮托力,使土的重力密度减小;它还可以在水头差的作用下形成渗透水流,并对土粒产生渗透力,使土体发生渗透变形。

在地下水位以上的自由水称为毛细水。在工程实践中应注意毛细水的上升可能使地基浸湿,使地下室受潮或使地基、路基产生冻胀,造成土地盐渍化等问题。此外,在一般潮湿的砂土(尤其是粉砂、细砂)中,孔隙中的水仅在土粒接触点周围并形成互不连通的弯液面。由于水的表面张力的作用,弯液面下孔隙水中的压力小于大气压力,因而产生使土粒相互挤紧的力,这个力称为毛细压力,如图 1-2 所示。由于毛细压力的作用,砂土也会像黏性土一样,具有一定的黏聚力,如在湿砂中能开挖一定深度的坑壁,一旦砂土处在干燥或饱和状态时,毛细现象便不存在,毛细水连接即刻消失,直立坑壁就会坍塌,故把无黏性土粒间的这种连接力称为“假黏聚力”。

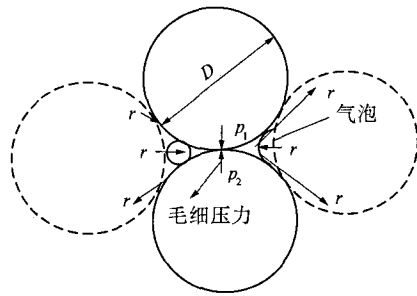


图 1-2 毛细压力

## (三) 土中的气体

土中气体可分为与大气连通的气体和以气泡形式存在的封闭气体。封闭气体可以使土弹性增大,延长土的压缩过程,使土层不易压实。此外,封闭气体还能阻塞土内的渗流通道,使土的渗透性减小。

## 二、土的结构

土的结构是指土粒或粒团的排列方式及其粒间或粒团间连接的特征。它与土的矿物成分、颗粒形状和沉积条件有关。通常土的结构可分为三种基本类型,即单粒结构、蜂窝结构和絮状结构,如图 1-3 所示。

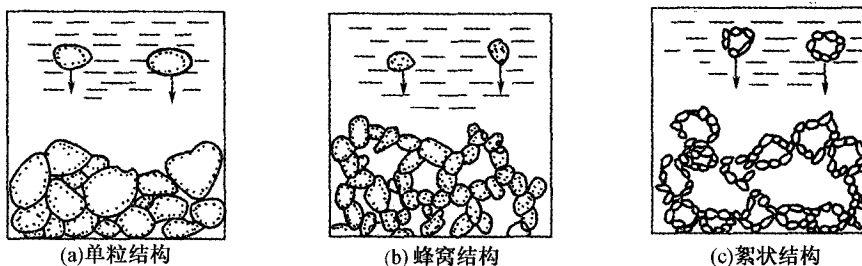


图 1-3 土的结构

粗粒土(如砂土和砂砾石土等)由于其比表面积小,在沉积过程中,主要依靠自重下沉。下沉过程中的土颗粒一旦与已经沉积稳定的颗粒相接触,找到自己的平衡位置而稳定下来,就形成点与点接触的单粒结构。疏松排列的单粒结构由于孔隙大,在荷载作用下,土粒易发生移动,引起土体变形,承载力也较低,特别是饱和状态的细砂、粉砂及匀粒粉土,受振动荷载作用后,易产生液化现象。

较细的土粒(主要指粉粒和部分黏粒),由于土粒比表面积大,粒间引力大于下沉土粒的重量,在自重作用下沉积时,碰到别的正在下沉或已经沉稳的土粒,在粒间接触点上产生连接,逐渐形成链环状团粒,很多这样的链环状的团粒连接起来,形成孔隙较大的蜂窝结构。

极细小的黏土颗粒( $d < 0.002 \text{ mm}$ )能在水中长期悬浮,一般不以单粒下沉,而是聚合成絮状团粒下沉。下沉后接触到已经沉稳的絮状团粒时,由于引力作用又产生连接,最终形成孔隙很大的絮状结构。

蜂窝结构和絮状结构的特点都是土中孔隙较多,结构不稳定,相对于单粒结构而言,具有较大的压缩性,强度也较低。

## 第二节 土的物理性质指标

土中三相物质本身的特性以及它们之间的相互作用,对土的性质有着本质的影响,但土体三相之间量的比例关系也是一个非常重要的影响因素。如对于无黏性土,密实时强度高,松散时强度低;而对于细粒土,含水少时硬,含水多时则软。所以把土体三相间量的比例关系称为土的物理性质指标,工程中常用土的物理性质指标作为评价土体工程性质优劣的基本指标。为了便于研究土中三相数量之间的比例关系,常常理想地把土中实际交错混杂在一起的三相以图 1-4 的形式表示出来,称为土的三相草图。

图 1-4 中各符号的意义如下: $m$  表示质量, $V$  表示体积。下标  $a$  表示气体,下标  $s$  表示土粒,下标  $w$  表示水,下标  $v$  表示孔隙。如  $m_s$ 、 $V_s$  分别表示土粒重力、土粒质量和土粒体



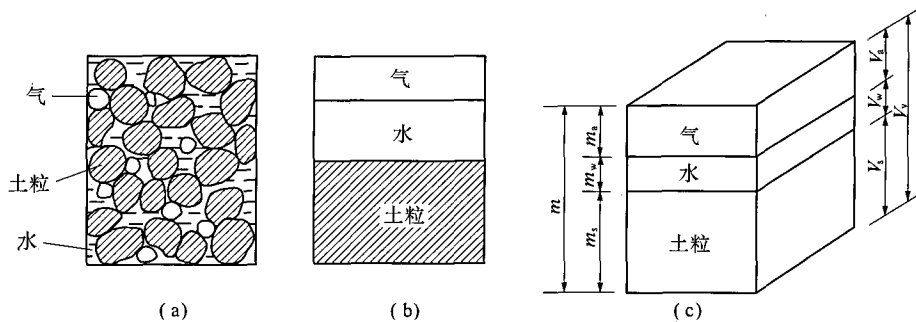


图 1-4 土的三相草图

积。图中有如下关系： $m = m_s + m_w$ ， $V = V_s + V_w = V_s + V_w + V_a$ 。

## 一、物理性质指标

### (一) 实测指标

#### 1. 土的密度 $\rho$ 和土的容重 $\gamma$

单位体积天然土的总质量称为天然土的密度(也称天然密度),简称为土的密度,常用  $\rho$ (单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ )表示,其表达式为

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_s + m_w}{V} \quad (1-3)$$

土的天然密度一般为  $1.6 \sim 2.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。三相土的天然密度称为湿密度;饱和状态的土其天然密度为饱和密度。

单位土体所受的重力称土的重力密度,简称土的容重,常用  $\gamma$ (单位为  $\text{kN}/\text{m}^3$ )表示,其表达式为

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

式中  $g$ ——重力加速度,在国际单位制中常用  $g = 9.81 \text{ m}/\text{s}^2$ ,为换算方便,也可近似用  $g = 10 \text{ m}/\text{s}^2$ 进行计算。

土的密度常用环刀法测定,具体方法见《土工试验指导书》。工程中现场测定土的密度也常用灌砂法,近期也常用核子密度仪快速测定土的密度。

#### 2. 土粒相对密度 $G_s$ (比重)

土粒相对密度指土颗粒在  $105 \sim 110 \text{ }^\circ\text{C}$  温度下烘至恒重时的质量与同体积  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  时纯水的质量之比。土粒相对密度常用比重瓶法来测定,用  $G_s$  表示。

$$G_s = \frac{m_s}{V_s \rho_w} \quad (1-5)$$

式中  $\rho_w$ —— $4 \text{ }^\circ\text{C}$  时纯水的密度,常取  $\rho_w = 1 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

土粒相对密度一般在  $2.60 \sim 2.80$  之间,但当土中含有较多的有机质时,土粒相对密度会明显减小,甚至达到  $2.40$  以下。工程实践中,由于各类土的相对密度变化幅度不大,除重大建筑物及特殊情况外,可按经验数值选用。一般土粒的相对密度见表 1-2。