

要 要 容 内

建筑地基基础

主 编 丰培洁

副主编 王占锋 吴潮玮

主 审 高俊发

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

编审委员会

顾 问：胡兴福 全国住房和城乡建设职业教育教学指导委员会秘书长
全国高职工程管理类专业指导委员会主任委员
享受政府特殊津贴专家，教授、高级工程师

主 任：杨云峰 陕西交通职业技术学院党委书记，教授、正高级工程师

副主任：薛安顺 刘新潮

委 员：

于军琪	吴 涛	官燕玲	刘军生	来弘鹏
高俊发	石 坚	黄 华	熊二刚	于 均
赵晓阳	刘瑞牛	郭红兵		

编写组：

丁 源	罗碧玉	王淑红	吴潮玮	寸江峰
孟 琳	丰培洁	翁光远	刘 洋	王占锋
叶 征	郭 琴	丑 洋	陈军川	

前 言

本教材系统地介绍了建筑地基基础的基本原理、计算方法、设计原理和施工工艺，主要包括土的物理性质及工程分类、土中应力计算、土的压缩性与地基沉降计算、土的抗剪强度与地基承载力、土压力和边坡稳定、建筑场地的工程地质勘察、天然地基上的浅基础、桩基础、软弱土地基处理及区域性地基等内容，各章后附有本章小结、思考与练习。

“建筑地基基础”是土木工程类相关专业的一门主干专业课，是专业的核心学习领域之一，具有很强的理论性与实践性。本教材在基本原理和方法的选用上以工程实用为主，并兼顾反映国内外的先进技术水平。理论部分尽可能以够用为度，删繁就简，注重准确性和完整性；应用部分充分结合现行规范、标准的规定，着重阐述适用于一般情况的成熟技术，同时根据内容需要反映特殊情况下一般规律的深化，并有选择地介绍一些日趋常用的新技术，有利于培养学生工程实践的能力。

本教材采用简洁明快的表述方法，内容精练、重点突出、体系完整、紧密结合实际。根据课程要求，本教材包括土力学基础理论与基础工程应用两部分，并附有针对性较强的案例、思考练习题、土工试验指导，力求突出学生实践技能的培养，注重学生综合素质的提高。

本教材由丰培洁担任主编，由王占锋、吴潮玮担任副主编。具体编写分工如下：绪论、第一、二、三、四、九、十章、附录由丰培洁编写；第五、七章由王占锋编写；第六、八章由吴潮玮编写。全书由丰培洁统稿，由高俊发主审。本书在编写过程中，参考了大量国内外资料和部分教材、著作等文献，在此谨向文献的作者致谢！

由于编写时间仓促及编者水平有限，书中难免有不妥之处，欢迎读者批评指正。

编 者

目 录

绪论..... 1

- 一、地基与基础的基本概念 1
- 二、地基与基础在建筑工程中的重要性及设计原理 1
- 三、本课程的特点与要求 2
- 四、本学科的发展概况 3

第一章 土的物理性质与工程分类... 4

- 第一节 土的成因及其构造 4
 - 一、土的形成 4
 - 二、土的组成 5
 - 三、土的结构 8
- 第二节 土的物理性质指标 9
 - 一、土的三相图 9
 - 二、土的主要物理指标 9
- 第三节 土的物理状态指标 12
 - 一、无黏性土 12
 - 二、黏性土 14
- 第四节 建筑中土的分类 16
 - 一、岩石 16
 - 二、碎石土 17
 - 三、砂土 18
 - 四、粉土 18
 - 五、黏性土 18
 - 六、人工填土 18
- 本章小结 19
- 思考与练习 19

第二章 地基中的应力计算..... 20

- 第一节 土的自重应力计算 20
 - 一、均质土的自重应力 20

- 二、成层土的自重应力 21
- 三、地下水与不透水层对自重应力的影响 21

第二节 基底应力的分布与计算 23

- 一、基底压力的分布规律 23
- 二、基底压力的简化计算 24
- 三、基底附加压力 25

第三节 地基附加应力计算 26

- 一、竖向集中力作用下的附加应力 27
- 二、空间问题的附加应力计算 29
- 三、平面问题的附加应力计算 35
- 四、地基中附加应力的分布规律 37

本章小结 37

思考与练习 37

第三章 土的压缩性与地基沉降量计算..... 38

第一节 土的压缩性和压缩性指标 38

- 一、压缩试验 39
- 二、压缩系数 40
- 三、压缩模量 41
- 四、土的载荷试验及变形模量 41

第二节 地基的最终沉降量 43

- 一、分层总和法 43
- 二、规范法 45

第三节 地基沉降量的组成 51

- 一、土的应力历史 51
- 二、地基沉降量的组成 52

第四节 地基变形与时间的关系 52

- 一、达西定律 52
- 二、饱和土的渗透固结 53
- 三、单向渗透固结理论 54

第五节 建筑物的沉降观测与地基允许变形值	57	二、朗肯主动土压力计算	89
一、建筑物沉降观测	57	三、朗肯被动土压力计算	91
二、地基的允许变形值	57	四、几种特殊情况下的朗肯土压力计算	93
本章小结	59	第四节 库仑土压力理论	97
思考与练习	59	一、库仑理论的基本原理	97
		二、库仑主动土压力计算(数解法)	98
		三、用图解法求解土压力	103
		第五节 边坡稳定性分析	105
		一、边坡滑动失稳的原因及影响边坡稳定性的因素	106
		二、无黏性土的边坡稳定性分析	107
		三、黏性土的边坡稳定性分析	107
		本章小结	118
		思考与练习	118
第四章 土的抗剪强度与地基承载力	61	第六章 建筑场地的工程地质勘察	121
第一节 土的抗剪强度理论	61	第一节 工程地质勘察概述	121
一、库仑公式	61	一、工程地质勘察的目的	121
二、莫尔应力圆	62	二、工程地质勘察的分级	121
三、土的极限平衡条件	63	三、工程地质勘察阶段的划分	123
第二节 土的抗剪强度试验	64	第二节 工程地质勘察方法	123
一、直接剪切试验	64	一、勘探点的布置	123
二、三轴压缩试验	65	二、工程地质勘探方法	124
三、无侧限抗压强度试验	67	三、室内试验	126
四、“十”字板剪切试验	68	四、原位测试	127
第三节 土的抗剪强度指标	69	第三节 工程地质勘察报告	127
一、总应力强度指标和有效应力强度指标	69	一、工程地质勘察报告的内容	127
二、黏性土在不同排水条件下的抗剪强度指标	70	二、工程地质勘察报告的阅读与使用	128
三、无黏性土的抗剪强度指标	76	第四节 基槽检验与局部处理	129
第四节 地基承载力	77	一、验槽的内容	129
一、浅基础地基的破坏模式	77	二、验槽的方法	129
二、地基的临塑荷载和临界荷载	77	三、基槽的局部处理	130
三、地基极限承载力	80	本章小结	131
本章小结	83	思考与练习	131
思考与练习	83		
第五章 土压力与边坡稳定	84	第七章 天然地基上浅基础的设计	132
第一节 土压力的类型	85	第一节 地基基础设计的基本规定	132
一、静止土压力	85	一、地基基础设计等级	132
二、主动土压力	85		
三、被动土压力	85		
第二节 静止土压力计算	86		
一、静止土压力强度及分布	86		
二、总静止土压力	86		
三、静止土压力系数	87		
第三节 朗肯土压力理论	88		
一、基本原理	88		

二、对地基计算的要求	133
三、关于作用效应和抗力限值的 规定	134
第二节 浅基础的类型	134
一、无筋(刚性)扩展基础	134
二、扩展基础	135
三、联合基础	136
四、柱下条形基础	137
五、筏形基础	137
六、箱形基础	138
七、壳体基础	139
第三节 基础埋置深度的确定	139
第四节 地基承载力的确定	141
一、按荷载试验确定	141
二、用公式计算确定	143
第五节 基础尺寸的确定	144
一、轴心受压基础	144
二、偏心受压基础	145
第六节 地基验算	146
一、地基持力层承载力验算	146
二、地基软弱下卧层承载力验算	148
三、地基变形验算	148
四、地基稳定性验算	149
第七节 无筋扩展基础的设计	149
一、无筋扩展基础构造	149
二、无筋扩展基础高宽比设计	150
第八节 扩展基础与柱下条形基础 设计	152
一、扩展基础构造	152
二、扩展基础结构的计算	155
三、柱下条形基础	160
本章小结	161
思考与练习	162

第八章 桩基础设计..... 164

第一节 概述	164
一、桩基的概念及适用范围	164
二、桩基的特点及作用	165
三、桩基的设计等级及基本规定	165
第二节 桩基的类型及构造要求	166
一、桩基的类型	166
二、桩基的构造要求	168
第三节 单桩竖向及水平承载力	169

一、单桩竖向承载力	169
二、单桩水平承载力	186
第四节 桩基承载力与沉降量计算	190
一、桩基承载力验算	190
二、桩基软弱下卧层验算	191
三、桩基沉降变形的指标	191
四、桩基沉降量的计算	191
第五节 承台设计	195
一、桩基承台的构造要求	195
二、桩基承台承载力计算	196
第六节 桩基设计与施工	202
一、桩基设计步骤	202
二、桩基施工	209
本章小结	210
思考与练习	211

第九章 软弱地基处理..... 213

第一节 软弱地基概述	213
一、软弱地基的特性与类型	213
二、可以直接建造建筑物的软弱 地基	214
三、必须进行地基处理的软弱 地基	214
第二节 换填垫层法	215
一、换填垫层法概述	215
二、换填垫层法设计	215
三、换填垫层法施工	217
四、换填垫层法质量检验	217
第三节 机械动力压实法	218
一、机械碾压法	218
二、滚动冲击压实法	219
三、重锤夯实法与强夯法	220
第四节 高压喷射注浆法	221
一、高压喷射注浆法概述	221
二、高压喷射注浆法的主要特征和 类型	222
三、高压喷射注浆法设计	223
四、高压喷射注浆法施工	224
五、高压喷射注浆法质量检验	225
第五节 水泥粉煤灰碎石桩法	226
一、水泥粉煤灰碎石桩法概述	226
二、复合桩基设计	227
三、复合桩基施工	229

四、质量检验与控制	231
第六节 预压法	232
一、砂井堆载预压法	232
二、真空预压法	232
三、真空预压联合堆载预压法	233
本章小结	234
思考与练习	234

第十章 特殊土地基..... 235

第一节 膨胀土地基	235
一、膨胀土的成因类型及分布	235
二、膨胀土的特征及危害	235
三、膨胀土地基的评价	236
四、膨胀土地基设计	238
五、膨胀土地基的工程措施	241
第二节 黄土地基	241

一、黄土的分类、特征及分布	241
二、黄土湿陷的影响因素	242
三、黄土湿陷性的评价	243
四、黄土地基计算	245
五、黄土地基的工程措施	247
第三节 冻土地基	248
一、冻土的形成条件及分布	248
二、冻土地基的评价	248
三、冻土地基的工程措施	252
本章小结	252
思考与练习	253

附录 土工试验..... 254

参考文献..... 270

绪 论

一、地基与基础的基本概念

1. 土力学

土力学是运用力学基本原理和土工测试技术,研究土的性质、地基土的应力、地基的变形、土的抗剪强度与地基承载力、土的压力及土坡稳定性等内容的一门学科,它是本课程的理论基础。由于土与其他连续固体介质在性质上根本不同,仅靠具备系统理论和严密公式的力学知识,尚不能描述土体在受力后所表现的性状及由此引起的工程问题,必须借助经验、现场试验、室内试验辅以理论计算加以描述,因此也可以说土力学是一门依赖实践的学科。

2. 地基

土层中附加应力和变形所不能忽略的那部分土层称为地基。良好的地基一般应具有较高的承载力与较低的压缩性,以满足地基与基础设计的两个基本条件(强度条件与变形条件)。软弱地基的工程性质较差,需经过人工地基处理才能达到设计要求。通常将不需处理而直接利用天然土层的地基称为天然地基;将经过人工加工处理才能作为地基的称为人工地基。人工地基施工周期长、造价高,因此,建筑物一般宜建造在良好的天然地基上。

3. 基础

建筑物埋入土层一定深度的、向地基传递荷载的下部承重结构称为基础。根据不同的分类方法,基础可以有多种形式,但无论是何种基础形式,其结构本身均应具有足够的承载力和刚度,在地基反力作用下不发生破坏,并应具有改善沉降与不均匀沉降的能力。通常将埋置深度不大(一般小于 5 m),只需经过挖槽、排水等普通施工程序就可以建造起来的基础统称为浅基础(各种单独的和连续的基础);反之,浅层土质不良,而需将基础埋置于深处土质较好的地层时,就要借助特殊的施工方法,建造各种类型的深基础(桩基础、沉井及地下连续墙等)。

二、地基与基础在建筑工程中的重要性及设计原理

建筑物的地基、基础和上部结构三个部分,虽然各自的功能不同、研究方法相异,然而,对于一个建筑物来说,在荷载作用下,这三个部分却是彼此联系、相互制约的整体。

地基与基础是建筑物的根本,又属于地下隐蔽工程。它的勘察、设计和施工质量直接关系到建筑物的安危。实践表明,建筑物事故的发生,很多与地基和基础有关,而且,地基与基础一旦发生事故,补救并非易事。另外,基础工程费用与建筑物总造价的比例,视其复杂程度和设计、施工的合理与否,可以在百分之几到百分之几十之间变动。因此,地基与基础在建筑工程中的重要性是显而易见的。在工程实践中,虽然地基与基础事故屡有发生,但是,只要严格遵循基本建设原则,按照“勘察—设计—施工”的先后顺序,并切实

抓好这三个环节,那么,地基与基础事故一般是可以避免的。

地基与基础设计是整个建筑物设计的重要组成部分。它与建筑物的安全和正常使用有着密切的关系。设计时,要考虑场地的工程地质和水文地质条件,同时也要考虑建筑物的使用要求、上部结构特点及施工条件等各种因素,使基础工程做到安全可靠、经济合理、技术先进和便于施工。

一般认为,地基与基础在设计时应考虑的因素如下:

- (1)施工期限、施工方法及所需的施工设备等。
- (2)在地震区,应考虑地基与基础的抗震性能。
- (3)基础的形状和布置,及其与相邻基础和地下构筑物、地下管道的关系。
- (4)建造基础所用的材料与基础的结构形式。
- (5)基础的埋置深度。
- (6)地基土的承载力。
- (7)上部结构的类型、使用要求及其对不均匀沉降的敏感度。

三、本课程的特点与要求

本课程是一门综合性很强的课程,它涉及工程地质学、土力学、建筑力学、建筑结构、建筑材料、施工技术等领域。因此在学习本课程时,应熟知《岩土工程勘察规范(2009年版)》(GB 50021—2001)及局部修订条文、《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)、《建筑抗震设计规范(2016年版)》(GB 50011—2010)、《土工试验方法标准(2007年版)》(GB/T 50123—1999)、《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)等标准,既要注意与其他学科的联系,又要注意紧紧抓住土的应力、强度和变形这一核心问题。同时,要学会阅读和使用工程地质勘察资料,掌握土的现场原位测试和室内土工试验,并应用这些基本知识和原理,结合建筑结构和施工技术知识,解决地基与基础的工程问题。

学习本课程时应该突出重点,兼顾全面,根据工业与民用建筑专业要求,重视工程地质的基本知识,培养阅读和使用工程地质勘察资料的能力;必须牢固掌握土的应力、变形、强度和地基计算等土力学基本原理,并能够应用这些基本概念和原理,结合有关建筑结构理论和施工知识,分析和解决地基与基础问题。

为了便于学习,本书在每章的学习内容前按教学大纲要求编写了能力目标与知识目标,它们是各章节学习过程要理解、领会和贯彻的内容和标准。

在学习过程中,学生应思路正确,理解和掌握知识的方法得当,学习态度端正,并能有效地将所学知识转化为实际工作技能。

在学习过程中,首先,要求学生具有相关课程的基础知识作保证,能够正确理解并记忆所学名词、定义和各种基本概念,正确理解并领会各种基本原理,理解和掌握所学知识;其次,要求学生逐步掌握运用所学知识解决实际问题的思路、方法和技能;再次,要求学生认真领会理解各种试验目的、过程、方法、推理及结论,还要清楚常用主要计算公式的来由脉络,在理解的基础上推导并记忆常用的主要公式;最后,学生要学会正确理解并运用各种设计、施工验收、试验等的相关规范。

在学习过程中,学生可通过施工现场的参观、课程设计等其他实训环节,提高课堂学习的成效,达到将所学知识逐步转化为实际工作技能的目的;认真完成一定数量的思考练习题,加深对有限的课堂教学内容的理解、消化、掌握和巩固;通过持续不断的复习,在

理解的基础上记忆和掌握所学知识,最终达到掌握实际工作技能目的。

四、本学科的发展概况

追本溯源,远古先民在史前的建筑活动中,就已创造了自己的地基与基础工艺。我国陕西西安的半坡遗址和河南安阳的殷墟遗址的考古发掘中都发现有土台和石础,这就是古代的“堂高三尺、茅茨土阶”(语见《韩非子》)建筑的地基与基础形式。历代修建的无数建筑物都出色地体现了我国古代劳动人民在地基与基础工程方面的高超水平。举世闻名的长城、蜿蜒万里的大运河,如不处理好岩土的有关问题,就不能穿越各种地质条件的广阔地区,因此它们被誉为亘古奇观;宏伟壮丽的宫殿寺院,要依靠精心设计建造的地基与基础,才能逾千百年而留存至今;遍布各地的巍巍高塔,正是由于奠基牢固,方可经历多次强震强风的考验而安然无恙。这些事实就是地基与基础学科发展的明证。

从 20 世纪 50 年代起,现代科技成就,尤其是电子技术,渗入了土力学与基础工程的研究领域。在实现试验测试技术自动化、现代化的同时,人们对土的基本性质又有了进一步的认识。随着电子计算机的迅速发展和数值分析法的广泛应用,科学研究和工程设计更具备了强有力的手段,遂使土力学理论和基础工程技术也出现了令人瞩目的进展。因此,有人认为,1957 年召开的第四届国际土力学与基础工程会议标志着一个新时期的开始。正是在这个时期,年轻的中华人民共和国以朝气蓬勃的姿态进入了国际土力学与基础工程科技交流发展的行列。从 1962 年开始的全国土力学与基础工程学术讨论会的多次召开,已成为本学科迅速进展的里程碑。我国在土力学与基础工程各个领域的理论与实践成就难以尽述。

我国的地基与基础科学技术,作为岩土工程的一个重要组成部分,遵循现代岩土工程的工作方法和研究方法,阔步进入 21 世纪,其必将取得更多更大的成就,为我国的现代化建设做出更大的贡献。

第一章 土的物理性质与工程分类

学习目标

通过本章的学习，了解土的成因与构造，地基土的工程分类；熟悉土体物理性质指标的三相换算；掌握土的物理状态指标描述。

能力目标

能够充分掌握土的物理性质、状态及地基土的分类，并能够确定工程中的地基土的状态和名称。

第一节 土的成因及其构造

一、土的形成

土是岩石经过风化、剥蚀、搬运、沉积形成的含有固体颗粒、水和气体的松散集合体。从广义上来讲，土包括地壳表层的松散堆积物和地下的岩石。

风化作用与气温变化、雨雪、山洪、风、空气、生物活动等(也称为外力地质作用)密切相关，风化作用是使岩石产生物理和化学变化的破坏作用。根据其性质和影响因素的不同，风化可以分为物理风化、化学风化和生物风化三种类型。

(1)物理风化作用主要是指在季节变化、昼夜更替、晴雨天气变化的影响下，岩石表面和内部产生温度差，表里胀缩不均，破坏了矿物之间的结合作用，岩石慢慢地产生裂隙，由表及里地发生破坏。因此，引起岩石产生物理风化的主要因素是温度的变化，物理风化只引起岩石的机械破坏，所形成的颗粒成分与原岩石矿物成分相同，称为原生矿物。

(2)化学风化作用是岩石与其周围相接触的物质发生的化学反应，如岩石与水、氧气、二氧化碳等发生的水化、氧化、酸化等化学反应。化学风化作用使原岩石破碎并生成新矿物，称为次生矿物。

(3)生物风化作用是指生物活动过程对岩石产生的破坏作用，如穴居地下的动物的活动、植物根部的生长等都会对岩石产生机械破坏作用；动物新陈代谢所排出的产物、动物死亡后遗体腐烂的产物及微生物作用等则使岩石因成分发生化学变化而遭到破坏。

各种风化作用常常是同时存在、相互促进的，但其强弱与原岩石的成分、构造，以及原岩石所处的环境等因素有密切关系。岩石的风化产物在外力作用下(如重力、风、流水及动物活动等)，脱离岩石表面，有的残留在原地，有的则被搬运到远离原岩的地方沉积下来。风化产物被不断地搬运并一层层地沉积而形成一层厚厚的碎屑堆积物，这就是通常所

称的土。

二、土的组成

土是由固体颗粒、水和气体组成的三相分散体系。其中，固体颗粒构成土的骨架，是三相体系中的主体；水和气体填充土骨架之间的空隙。土体三相组成中每一相的特性及三相比例关系都对土的性质有显著影响。

1. 土的固体颗粒

土的固体颗粒是由大小不等、形状不同的矿物颗粒或岩石碎屑按照各种不同的排列方式组合在一起所构成的土的骨架，它是土的主要组成成分。

土中固体颗粒(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。当土粒的粒径由大到小逐渐变化时，土的性质也相应发生变化。随着土粒粒径变小，无黏性且透水性强的土逐渐变为有黏性且低透水性可塑性的土，所以应根据土中不同粒径的土粒，按某一粒径范围分成若干组，通常将土划分为六大粒组，即漂石或块石颗粒、卵石或碎石颗粒、圆砾或角砾颗粒、砂粒、粉粒及黏粒。各粒组的界限粒径分别是 200 mm、60 mm、2 mm、0.075 mm 和 0.005 mm，见表 1-1。

表 1-1 土粒粒组划分

粒组名称		粒径范围/mm	一般特征
漂石或块石颗粒		>200	透水性很大，无黏性，无毛细水
卵石或碎石颗粒		200~60	
圆砾或角砾颗粒	粗	60~20	透水性大，无黏性，毛细水上升高度不超过粒径大小
	中	20~5	
	细	5~2	
砂粒	粗	2~0.5	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，通水不膨胀，干燥时松散，毛细水上升高度不大，随粒径的变小而增大
	中	0.5~0.25	
	细	0.25~0.1	
	极细	0.1~0.075	
粉粒	粗	0.075~0.01	透水性小，湿时稍有黏性，遇水膨胀小；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
	细	0.01~0.005	
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，但速度较慢

【小提示】 为了说明天然土颗粒的组成情况，不仅要了解土颗粒的大小，还需要了解各种颗粒所占的比例。在实际工程中，常以土中各粒组的相对含量(各粒组占土粒总重的百分数)表示土中颗粒的组成情况，称为土的颗粒级配。土的颗粒级配直接影响土的性质，如土的密实度、透水性、强度、压缩性等。

为了直观，工程中常用颗粒级配曲线直接表示土的级配情况。曲线的横坐标用对数

表示土的粒径(因为土的粒径相差常在百倍、千倍以上,所以宜采用对数坐标表示),单位为 mm;纵坐标则表示小于或大于某粒径的土重含量(或称为累计百分含量)。从曲线中可直接求得各粒组的颗粒含量及粒径分布的均匀程度,进而估测土的工程性质,如图 1-1 所示。由曲线的形态可以大致判断土粒大小的均匀程度。如曲线较陡,则表示粒径范围较小,土粒较均匀,级配不良;反之,曲线平缓,则表示粒径大小相差悬殊,土粒不均匀,级配良好。

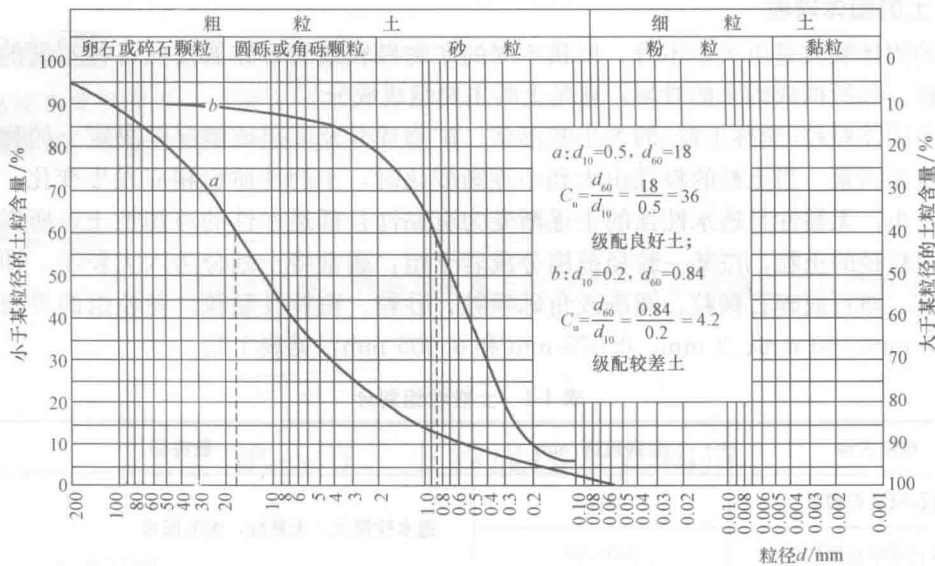


图 1-1 土的颗粒级配曲线

为了定量反映土的级配特征,工程中常用不均匀系数 C_u 来评价土的级配优劣。

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

式中 d_{10} ——土的颗粒级配曲线上的某粒径,小于该粒径的土的质量占总土质量的 10%,称为有效粒径;

d_{60} ——土的颗粒级配曲线上的某粒径,小于该粒径的土的质量占总土质量的 60%,称为限定粒径。

【小提示】 在工程建设中,常根据不均匀系数 C_u 的值来选择填土的土料,若 C_u 的值较大,表明土粒不均匀,则其较颗粒均匀的土更容易被夯实(级配均匀的土不容易被夯实)。通常将 $C_u < 5$ 的土看作级配均匀的土,将 $C_u > 10$ 的土看作级配良好的土。

【例 1-1】 若图 1-1 中 a 曲线上, $d_{60} = 0.8$, $d_{10} = 0.18$, 计算其级配是否均匀。

解:
$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0.8}{0.18} = 4.44$$

由于 $C_u = 4.44 < 5$, 则其级配均匀, 不容易被夯实。

2. 土中的水

土中的水在自然界中存在的状态可以分为固态、气态和液态三种形态。

(1) 固态水又称为矿物质内部结晶水,是指在温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时土中水以冰的形式存在,形成冻土。其特点是冻结时强度高,而解冻时强度迅速降低。

(2) 气态水是指土中的水蒸气,它对土的性质影响不大。

(3)液态水包括存在于土中的结合水和自由水两大类。

1)结合水。结合水是指在电场作用力范围内,受电分子吸引力作用吸附于土粒表面的土中水。它距离土粒越近,作用力越大;距离土粒越远,作用力越小,直至不受电场力作用(图 1-2)。结合水的特点是包围在土粒四周,不传递静水压力,不能任意流动。由于土粒的电场有一定的作用范围,因此结合水有一定的厚度,其厚度与土粒的黏土矿物成分有关。

结合水又可分为强结合水和弱结合水,强结合水相当于固定层中的水,而弱结合水则相当于扩散层中的水。

①强结合水指靠近土粒表面的水。它没有溶解能力,不能传递静水压力,只有在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时才能蒸发。这种水牢固地结合在土粒表面,其性质接近固体,重力密度为 $12\sim 24\text{ kN/m}^3$,冰点为 $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$,具有极大的黏滞度、弹性和抗剪强度。

②弱结合水是存在于强结合水外围的一层结合水。它仍不能传递静水压力,但水膜较厚的弱结合水能向邻近的薄水膜缓慢转移。当黏性土中含有较多弱结合水时,土具有一定的可塑性。

2)自由水。自由水是存在于土粒表面电场范围以外的水,自由水的性质与普通水一样,服从重力定律,能传递静水压力,冰点为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,有溶解力。自由水按其移动所受作用力的不同,可分为自重水和毛细水。

①自重水指土中受重力作用而移动的自由水,它存在于地下水水位以下的透水层中。

②毛细水受到它与空气交界面处表面张力的作用,存在于潜水位以上透水土层中。当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张力作用于土粒,使土粒由于这种毛细压力而相互挤紧,从而具有微弱的黏聚力,称为毛细黏结力,如图 1-3 所示。

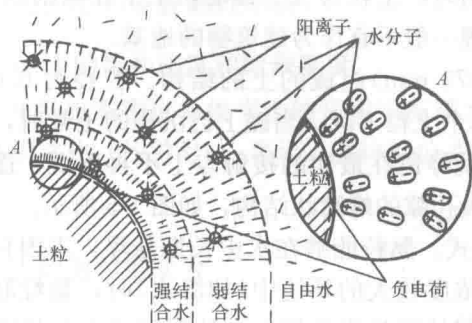


图 1-2 结合水示意

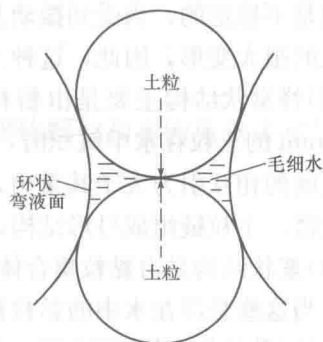


图 1-3 土中的毛细水示意

【小提示】 在工程中,毛细水的上升对建筑物地下部分的防潮措施与地基土的浸湿和冻胀有重要的影响。碎石土中无毛细现象。

3. 土中的空气

土中的空气存在于土孔隙中未被水占据的空间,一般可以分为自由气体和封闭气体。自由气体是指在粗粒的沉积物中常见的与大气连通的空气,在外力作用下,它很容易从空隙中被挤出,所以,它对土工程性质影响不大。与大气不相通的气体称为封闭气体,常存在于细粒土中,在外力作用下,它使土的弹性变形增加,可在车辆碾压时,它使土形成有弹性的橡皮土。

三、土的结构

土的结构是指由土粒单元的大小、形状、相互排列及联结关系等因素形成的综合特征，一般分为单粒结构、蜂窝状结构和絮状结构三种基本类型。

(1)单粒结构是由于粗大土粒在水或空气中下沉而形成的。全部由砂粒及更粗的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很小，所以颗粒之间几乎没有联结，至于未充满孔隙的水分只可能通过微弱的毛细水联结。单粒结构可以是疏松的，也可以是紧密的，如图 1-4 所示。

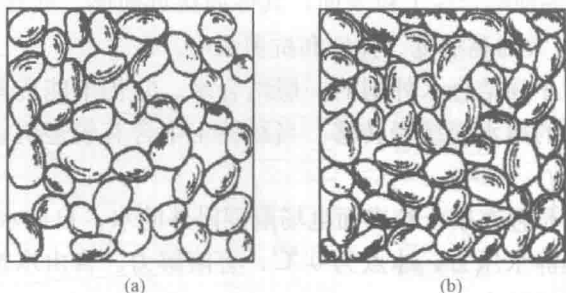


图 1-4 单粒结构

(a)疏松的单粒结构；(b)紧密的单粒结构

具有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，是较良好的天然地基。具有疏松单粒结构的土，其骨架是不稳定的，当受到振动及其他外力作用时，土粒易发生移动，土中孔隙剧烈减小，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。

(2)蜂窝状结构主要是由粉粒($0.005 \sim 0.075 \text{ mm}$)组成的土的结构。粒径为 $0.005 \sim 0.075 \text{ mm}$ 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，逐渐形成土粒链。土粒链组成弓形结构，形成具有很大孔隙的蜂窝状结构，如图 1-5 所示。

(3)絮状结构是由黏粒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。当这些悬浮在水中的黏粒被带到电解质浓度较大的环境中(如海水)时，黏粒凝聚成絮状集粒(黏粒集合体)而下沉，并相继与已沉积的絮状集粒接触，从而形成类似蜂窝但孔隙很大的絮状结构，如图 1-6 所示。

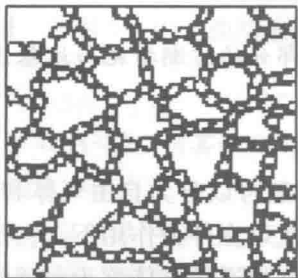


图 1-5 细砂和粉土的蜂窝状结构

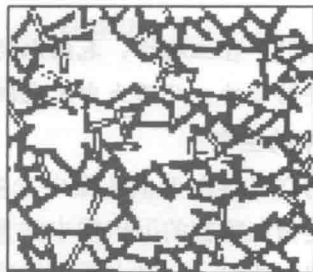


图 1-6 黏性土的絮状结构

第二节 土的物理性质指标

一、土的三相图

土是固、液、气三相的分散系。土中三相组成的比例指标反映着土的物理状态，如干燥或潮湿、疏松或紧密。这些指标是最基本的物理性质指标，它们对于评价土的工程性质具有重要的意义。

土的三相本来是混合分布的，但为了阐述和标记的方便，将三相的各部分集合起来，画出土的三相示意图，如图 1-7 所示。图中各符号意义如下：

V ——土的总体积；

V_s ——土中固体颗粒的体积；

V_v ——土中孔隙的体积；

V_w ——土中水所占的体积；

V_a ——土中气体所占的体积；

m ——土的总质量；

m_s ——土中固体颗粒的质量；

m_w ——土中水的质量；

m_a ——土中气体的质量(一般认为 $m_a=0$)。

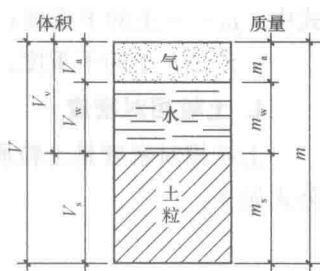


图 1-7 土的三相示意图

二、土的主要物理指标

1. 土的饱和密度和饱和重度

土的饱和密度是指当土的孔隙中充满水时，土中的固体颗粒和水的质量之和与土样的总体积之比，用符号 ρ_{sat} 表示。其计算公式如下：

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} \quad (1-2)$$

土的饱和重度为

$$\gamma_{\text{sat}} = \rho_{\text{sat}} g \quad (1-3)$$

式中 ρ_{sat} ——土的饱和密度；

γ_{sat} ——土的饱和重度；

m_s ——固体部分的质量；

g ——重力加速度。

2. 土的浮密度和浮重度

地下水水位以下的土，其固体颗粒受到重力水的浮力作用，此时土中固体颗粒的质量减去固体颗粒排开水的质量再与土样的总体积之比，称为浮密度，用符号 ρ' 表示。其计算公式如下：

$$\rho' = \frac{m_s - V_s \rho_w}{V} \quad (1-4)$$

土的浮重度为

$$\gamma' = \rho' g \quad (1-5)$$

由土的浮密度和浮重度的定义可知

$$\rho' = \rho_{\text{sat}} - \rho_w \quad (1-6)$$

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \quad (1-7)$$

3. 土的干密度和干重度

土的干密度是土中固体部分的质量与土样总体积之比或土样单位体积内的干土质量，用符号 ρ_d 表示。其计算公式如下：

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (1-8)$$

土的干重度为

$$\gamma_d = \rho_d g \quad (1-9)$$

式中 ρ_d ——土的干密度；

γ_d ——土的干重度。

4. 土粒相对密度

土粒相对密度是土粒质量与同体积水(在 4 °C 时)的质量之比，用符号 d_s 表示。其计算公式如下：

$$d_s = \frac{m_s}{m_w} = \frac{V_s \rho_s}{V_s \rho_w} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (1-10)$$

式中 m_s 、 m_w ——固体、水的质量；

V_s ——固体的体积；

ρ_s ——土粒的密度(在 4 °C 时)；

ρ_w ——水的密度(在 4 °C 时)。

5. 天然土的密度

天然土的密度是土样的总质量与其总体积之比，用符号 ρ 表示。其计算公式如下：

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-11)$$

$$\rho = \frac{d_s(1+w)\rho_w}{1+e} \quad (1-12)$$

式中 w ——土的天然含水量；

e ——土的孔隙比；

V ——土样的总体积， $V = V_s + V_v$ (V_v 为土中孔隙的体积， $V_v = V_w + V_a$ ， V_w 、 V_a 分别为水、气体的体积)；

m ——土样的总质量， $m = m_s + m_w + m_a$ (m_s 为固体的质量， m_w 为水的质量， m_a 为气体的质量，常可忽略)。

其中， m 、 V 如图 1-7 所示，其他符号意义同前。

6. 土的天然含水量

在天然状态下，土中含水的质量与土粒的质量之比，称为土的天然含水量，用符号 w 及百分数表示。其计算公式如下：

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (1-13)$$