

高等学校教学用书

JIANZHU DIJI JICHU

建筑地基基础

(新规范)

◆ 郭继武 编著

高等学校教学用书

建筑地基基础

(新 规 范)

郭继武 编著



机械工业出版社

本书是参照新修订的《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2002)编写的。主要内容包括:地基土的物理性质,地基中应力,地基变形,土的抗剪强度和地基承载力,挡土墙土压力及边坡稳定,工程地质勘察,建筑地基计算原则,基础设计,软弱地基,桩基设计与计算,基槽检验与地基的局部处理。考虑到教学的要求和工程设计的实用性要求,本书按教学体系编写,并体现了新规范的主要内容。本书适合作为高等学校工科土建类专业教材,也可作为一、二级注册结构工程师考前复习用书,还可作为工程设计、施工技术人员学习新规范的参考。

图书在版编目(CIP)数据

建筑地基基础/郭继武编著. —北京:机械工业出版社, 2005.6
高等学校教学用书
ISBN 7-111-16719-8

I. 建… II. 郭… III. 地基-基础(工程)-高等学校-教材 IV. TU47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 059079 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑:杨少彤
责任编辑:杨少彤 马 宏 版式设计:张世琴 责任校对:张莉娟
封面设计:张 静 责任印制:洪汉军
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2005 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷
787mm×1092mm $1/16$ ·22.25 印张·549 千字
0 001—4 000 册
定价:39.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68326294
封面无防伪标均为盗版

前 言

我国新修订的《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2002)已于2002年4月1日颁布实施。修订后的地基规范反映了近十年来我国地基基础工程的实践经验和新的科研成果,较原规范在技术水平上有了较大的提高,达到了国际先进水平。

为了满足教学和工程设计的需要,我们参照新规范编写了这本《建筑地基基础》。全书共分12章,主要内容包括:地基土的物理性质,地基中应力,地基变形,土的抗剪强度和地基承载力,挡土墙土压力及边坡稳定,工程地质勘察,建筑地基的计算原则,天然地基上基础设计,软弱地基,桩基础设计与计算,基槽检验与地基的局部处理。

我国改革开放后,大中城市高层建筑日益增多,为了适应我国高层建筑的迅速发展,书中重点叙述了柱下条形基础、十字交叉基础、筏形基础和箱形基础的设计和计算,介绍了国内外常用的计算方法。

为了简化计算,书中介绍了在偏心荷载作用下扩展基础和桩基等的直接计算方法。

本书在编写过程中,力求做到内容由浅入深,循序渐进,重点突出,理论联系实际。为了便于读者掌握本书所叙述的基本理论,书中列举了大量的典型例题,供读者参考。

限于编者水平,加之时间仓促,书中可能有疏漏之处,敬请广大读者不吝指正。

主要符号

- A ——基础底面面积;
 a ——压缩系数;
 b ——基础底面宽度;
 c ——粘聚力;
 d ——基础埋置深度,桩身直径;
 d_{fr} ——基底下容许残留冻土层厚度;
 d_s ——土粒相对密度(比重);
 E_a ——主动土压力;
 E_s ——土的压缩模量;
 e ——孔隙比;
 F ——基础底面竖向力;
 f ——地基承载力设计值;
 f_0 ——地基承载力基本值;
 f_{ak} ——地基承载力特征值;
 f_r ——岩石饱和单轴抗压强度;
 G ——恒载;
 H_f ——自基础底面算起的建筑物高度;
 H_g ——自室外地面算起的建筑物高度;
 L ——房屋长度或沉降缝分隔的单元长度;
 I_L ——液性指数;
 I_p ——塑性指数;
 l ——基础底面长度;
 M ——作用于基础底面的力矩或截面的弯矩;
 p ——基础底面处平均压力;
 p_0 ——基础底面处平均附加压力;
 Q ——竖向荷载,桩基中单桩所受竖向力设计值;
 q_{pa} ——桩端土的承载力特征值;
 q_{sa} ——桩周土的摩擦力特征值;
 R_a ——单桩竖向承载力特征值;
 s ——沉降量;
 u ——周边长度;
 w ——土的含水量;
 w_L ——液限;
 w_p ——塑限;
 z_0 ——标准冻深;
 z_n ——地基沉降计算深度;
 α ——附加应力系数;
 $\bar{\alpha}$ ——平均附加应力系数;
 β ——边坡对水平面的坡角;
 γ ——土的重力密度,简称土的重度;
 δ ——土对挡土墙墙背的摩擦角;
 θ ——地基的压力扩散角;
 μ ——土对挡土墙基底的摩擦系数;
 φ ——内摩擦角;
 η_b ——基础宽度的承载力修正系数;
 η_d ——基础埋深的承载力修正系数;
 ψ_s ——沉降计算经验系数;
 ψ_t ——采暖对冻深的影响系数。

目 录

前言

主要符号

第1章 概述 1

- 1.1 地基基础的概念 1
- 1.2 本书内容和学习要求 2
- 1.3 本学科发展简介 3

第2章 地基土的物理性质及岩土 的分类 4

- 2.1 土的成因与组成 4
- 2.2 土的物理性质指标 7
- 2.3 粘性土的塑性 12
- 2.4 地基岩土的分类及其物理状态 13
- 思考题 17

第3章 地基中的应力 18

- 3.1 自重应力的计算 18
- 3.2 附加应力的计算 21
- 3.3 基础埋置深度对附加应力的影响 38
- 思考题 44

第4章 地基变形的计算 46

- 4.1 土的压缩性 46
- 4.2 地基最终沉降量的计算 52
- 4.3 地基沉降与时间关系的估算 61
- 4.4 建筑物的沉降观测 63
- 思考题 64

第5章 土的抗剪强度与地基承载力 65

- 5.1 概述 65
- 5.2 土的抗剪强度 65
- 5.3 土的极限平衡理论 66

5.4 土的抗剪强度指标的测定方法 71

- 5.5 地基临塑压力、临界压力与
极限压力 74
- 5.6 地基承载力特征值的确定 80
- 思考题 90

第6章 挡土墙的土压力与边坡稳定 91

- 6.1 概述 91
- 6.2 土压力的分类 91
- 6.3 朗金土压力理论 93
- 6.4 库伦土压力理论 98
- 6.5 特殊情况下土压力的计算 112
- 6.6 按规范方法计算主动土压力 116
- 6.7 挡土墙设计 119
- 6.8 边坡稳定分析 126
- 思考题 128

第7章 工程地质勘察 129

- 7.1 工程地质勘察的目的和要求 129
- 7.2 勘探方法 131
- 7.3 土的野外鉴别与描述 133
- 7.4 地下水 136
- 7.5 岩土工程勘察报告 137
- 思考题 137

第8章 建筑地基基础的设计原则 138

- 8.1 一般要求 138
- 8.2 地基基础设计等级 139
- 8.3 地基基础设计的规定 139
- 8.4 地基变形的分类 140
- 8.5 地基允许变形值 142
- 思考题 142

第9章 天然地基上基础设计 143

9.1 地基基础设计步骤	143	11.1 桩的功能与种类	297
9.2 基础的类型	143	11.2 单桩竖向承载力的确定	299
9.3 基础埋置深度的确定	148	11.3 单桩水平承载力的确定	305
9.4 基础底面尺寸的确定	154	11.4 桩的根数及布置	308
9.5 刚性基础剖面设计	178	11.5 承台的设计与计算	319
9.6 扩展基础剖面及配筋设计	180	11.6 桩基沉降验算	325
9.7 柱下条形基础设计	194	11.7 桩基设计的步骤	326
9.8 柱下十字交叉基础设计	241	思考题	331
9.9 筏形基础的设计	247		
9.10 箱形基础的设计	264	第 12 章 基槽检验与地基的局部	
思考题	276	处理	332
第 10 章 软弱地基	278	12.1 基槽检验	332
10.1 一般要求	278	12.2 地基的局部处理	335
10.2 建筑措施	278	12.3 地基局部处理实例	338
10.3 结构措施	280	思考题	340
10.4 软弱地基的处理	282		
10.5 压实填土的密实度	293	附录	341
思考题	296	附录 A 标准贯入试验和轻便触探试验	341
第 11 章 桩基础	297	附录 B 抗剪强度指标的计算方法	342
		参考文献	348

第 1 章 概 述

1.1 地基基础的概念

任何建筑物都要建造在土层或岩石上面。土层受到建筑物的荷载作用后，就要产生压缩变形。土层的压缩性比建造墙或柱的建筑材料（如砖、混凝土等）的压缩性大得多，为了减小建筑物的下沉和保证它的稳定性，就需要将墙或柱与土接触的部分的断面尺寸适当地扩大，以减小建筑物与土接触部分的压强。我们将建筑物最底下被扩大的这一部分称为基础，而将承受由基础传来荷载的土层（或岩层）称为地基，位于基础底面下的第一层土称为持力层，持力层以下的土层统称为下卧层。如图 1-1 所示。

基础是建筑物十分重要的组成部分，没有一个坚固而耐久的基础，上部结构就是建造得再结实，也是要出问题的。因此，为了保证建筑物的安全和必需的使用年限，基础应当具有足够的强度和耐久性。地基虽不是建筑物的组成部分，但是，它的好坏却直接影响整个建筑物的安危。实践证明，建筑物的事故很多是与地基基础有关的。例如，著名的意大利比萨斜塔的倾斜就是由于地基不均匀沉降而造成的。该塔高度约 55m，始建于 1173 年，当建至 24m 高时发现塔身倾斜而被迫停工，至 1273 年续建完工。该塔由于建造在不均匀的高压缩性地基上，

致使北侧下沉 1m 有余，南侧下沉近 3m，沉降差达 1.8m，倾角达 5.8° 之多。现在这个塔还以每年 1mm 的沉降速率下沉。又如，建于 1913 年的加拿大特朗斯康谷仓，由于设计前不了解地基埋藏有厚达 16m 的软粘土层，建成后谷仓的荷载超过了地基的承载能力，造成地基丧失稳定性，使谷仓西侧陷入土中 8.8m，东侧抬高 1.5m，仓身倾斜 27° 。

为了保证建筑物的安全，地基应同时满足以下两个基本要求：

- (1) 地基应具有足够的强度，在荷载作用后，不致因地基失稳而破坏。
- (2) 地基不能产生过大的变形而影响建筑物的安全与正常使用。

良好的地基一般具有较高的强度与较低的压缩性，容易满足上述要求。软弱地基的工程性质较差，对这种地基必须进行人工处理，才能满足强度与变形的要求。经过人工处理而达到设计要求的地基称为人工地基，这种地基随着建设的发展已被广泛利用。若地基上部软弱，下部坚实，可考虑采用桩基础，将上部结构荷载穿过软弱土层，传至坚实土层。不需处理而直接利用的地基称为天然地基。建筑物应尽量建造在良好的天然地基上，以减少地基处理的费用。

在地基基础设计中，保证它具有足够的可靠性是十分重要的。为此，在设计地基基础

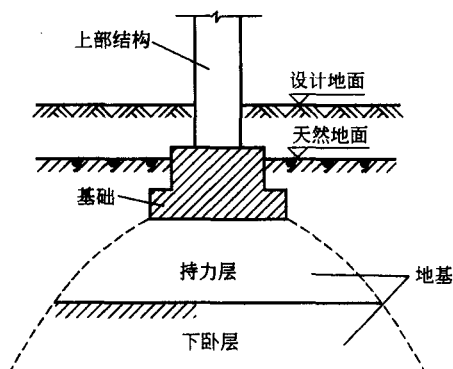


图 1-1 地基与基础示意图

前,要充分进行调查研究,掌握必要的设计资料。一方面通过地基勘探和验槽查清地基土的类别及其分布情况,有无软土层、暗塘、古井、古墓与地下人防工程等异常部位,以及地下水位高低,它对基础材料有无侵蚀作用,另一方面弄清建筑物使用要求,荷载大小,有无振动设备,振动频率与振幅大小等。根据这两方面情况,按照安全可靠、经济合理、技术先进和便于施工的原则,考虑上部结构和地基的共同作用,全面分析,权衡利弊,最后,拟出地基基础的设计方案,作出正确的设计。

1.2 本书内容和学习要求

本书是参照国家新颁布的《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2002)编写的。书中反映了新规范的主要内容,特别是对新规范的条文作了必要的解释和说明。

全书共分12章,包括以下内容:

第1章为绪论。

第2章地基土的物理性质及岩土的分类,简要地介绍了土的成因、组成和反映土的物理性的指标,以及岩土的分类方法。本章内容是学好地基基础的必备知识,不可忽视。

第3、4、5章较详细地叙述了土中的应力、变形及强度稳定性的计算方法。这些内容是地基基础设计的理论基础。因此必须加以掌握。

第6章挡土墙的土压力与边坡稳定,主要介绍了古典土压力理论,即朗金土压力理论和库伦土压力理论。重点介绍了重力式挡土墙的设计方法。本章最后简要地叙述了简单边坡稳定的分析原理及边坡稳定的措施。

第7章工程地质勘察,本章较详细地介绍了工程地质勘察的目的和要求。特别对详细勘察阶段任务、方法和要求作了必要的说明。读者要学会阅读和使用岩土工程地质勘察报告。

第8章建筑地基的计算原则,本章根据《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2002)的有关内容,叙述了地基基础设计等级,地基按承载力、变形和稳定性的计算规定。在学习本章时,要特别注意地基按承载能力计算,按变形计算和按稳定性计算以及按基础承载力计算时结构荷载效应的组合方法。

第9章天然地基上基础设计,本章内容较多,主要叙述了地基基础的设计步骤、基础类型、埋深的确定原则,基底剖面尺寸的确定和配筋的计算。特别对高层建筑的基础梁、筏板基础和箱形基础反力的计算,作了较详细的分析。

第10章软弱地基,叙述了在软弱地基上勘察、设计和施工的一般规定。软弱地基的利用与处理以及在软弱地基上兴建房屋所采取的建设和结构措施。

第11章桩基础,较详细地介绍了桩的功能和种类、单桩竖向承载力特征值的确定以及桩基的设计方法。随着我国经济建设的发展,高层建筑的不断出现,桩基在高层建筑中广泛应用。因此,要掌握桩基设计。

第12章基槽检验与地基的局部处理,本章叙述了基槽检验的目的、方法和地基的局部处理。验槽是地基勘察的补充,是保证地基基础安全的重要措施。因此,在基础工程中,要十分重视验槽工作。

由于地基土的种类繁多,土层分布又十分复杂,所以,在设计地基基础前,必须通过地基原位测试和室内土工试验,获得土的各种计算资料。因此,土的现场原位测试和室内土工

试验也是本学科的一个重要内容。

1.3 本学科发展简介

地基基础工程技术远溯到我国史前就已应用于建筑工程中。如在我国西安半坡村发现的新石器时代的遗址中就有土台石础，就是古代的地基基础。公元前两世纪修建的，驰名中外的万里长城、宏伟的宫殿和寺院以及宝塔建筑，都是因为有了坚固的地基基础，才能经受强风考验和历次大地震的袭击而保留至今。

隋朝石工李春所修赵州桥，不仅因其造型艺术高超而为后人所赞许，而其地基基础设计合理也是令人称奇的。他把桥台埋在密实的粗砂层上，赵州桥迄今虽已逾 1300 余年，其下沉量也不过几厘米。现经计算其基础底面压力为 $500 \sim 600 \text{ kN/m}^2$ ，与持力层土的承载力设计值十分接近。

桩基和人工地基在我国建筑中也由来已久。如郑州隋朝的超化寺的塔基采用的就是桩基。许多古建筑的基础就应用了灰土垫层。但是，由于当时生产力发展水平的限制，这些地基基础高超技艺未能提炼成系统的科学理论。

18 世纪工业革命后，随着资本主义工业化的发展，建筑、铁路和水利的兴建，推动了作为地基基础的理论基础的土力学的发展。1773 年法国库伦 (C.A.Coulomb) 根据实验提出了砂土的抗剪强度公式，创立了滑动土楔的土压力理论。之后，1857 年英国朗金 (W.J.M.Rankine) 根据土体极限平衡条件，从另一途径建立了土压力理论。1885 年法国布辛奈斯克 (J.Boussinesq) 求得了半无限弹性体在竖向集中力作用下的应力和变形理论解答。1922 年瑞典费伦纽斯 (B.H.Fellenius) 解决了土坡稳定计算理论课题。以上这些古典理论和计算方法，至今仍在工程中沿用。1925 年美国太沙基 (K.Terzaghi) 发表了土力学专著，这对土力学理论的发展起了很大的推动作用。

近年来，世界各国大型水利工程、高层建筑及核电站巨型工程的兴建，促进了土力学和基础工程理论的进一步发展。我国建国五十多年来，在勘察、测试技术、土的物理力学性质研究、土力学理论以及地基基础设计和施工技术，都取得了很多科研成果和实践经验。这对保证完成我国基本建设任务具有重大意义。

第2章 地基土的物理性质及岩土的分类

2.1 土的成因与组成

2.1.1 土的成因

地壳表面的岩石在大气中由于长期受到风、霜、雨、雪的侵蚀和生物活动的破坏作用(风化作用),使其崩解和破碎而形成大小不同的松散物质,这种松散物质就称为土。风化后残留在原地的土称为残积土,它主要分布在岩石暴露在地面受到强烈风化的山区和丘陵地带。由于残积土未经分选作用,所以无层理,厚度很不均匀。因此,在残积土地基上进行工程建设时应注意其不均匀性,防止建筑物的不均匀沉降。如风化后的土受到各种自然力(例如重力、雨雪水流、山洪急流、河流、风力和冰川等)的作用,搬运到大陆低洼地区或海底沉积下来,在漫长的地质年代里沉积的土层逐渐加厚,它在自重和外力作用下逐渐压密,这样形成的土就称为沉积土。陆地上大部分平原地区的土都属于沉积土。由于沉积土在沉积过程中地质环境不同,生成年代不一,所以它的物理力学性质有很大差异。如洪水沉积的洪积土,有一定的分选作用,距山区较近地段,其颗粒较粗,远的地方颗粒较细。由于每次洪水搬运能力不同,所以形成了土层粗细颗粒交错的地质剖面。通常,粗颗粒的土层压缩性较低,承载力高,而细颗粒的土层压缩性高,承载力较低。在沉积土地基上进行工程建设时,应尽量选择粗颗粒土层作为基础的持力层。

土的沉积年代不同,其工程性质将有很大变化,所以,了解土的沉积年代的知识,对正确判断土的工程性质是有实际意义的。土的沉积年代通常采用地质学中的相对地质年代来划分。所谓相对地质年代,是指根据主要地壳运动和古生物演化顺序,将地壳历史所划分的时间段落。最大的时间单位称为代,每个代分为若干纪,纪分为若干世,世再分为若干期。

大多数的土是在第四纪地质年代沉积形成的,这一地质历史时期是距今较近的时间段落(大约100万年)。在第四纪中包括四个世,即早更新世(用符号 Q_1 表示)、中更新世(Q_2),晚更新世(Q_3)和全新世(Q_4)。

2.1.2 土的组成

如前所述,土是一种松散物质,这种松散物质主要是矿物^①,在矿物颗粒之间有许多孔隙,通常孔隙中间有液体(一般是水),也有气体(一般是空气)。所以,在一般情况下,土是由固体颗粒、水和气体三部分(也称为三相)组成。

显然,土的工程性质与组成土的这三部分的性质及其之间的比例有关。因此,对这三个部分的性质和它们之间的比例关系应分别加以研究。本节仅叙述固体矿物颗粒、水和气体的

① 矿物是指在地壳中具有—定化学成分和物理性质的自然元素或化合物,如石英、云母等。

性质。关于土的三个组成部分的比例关系及其对土的性质影响，将在下一节讨论。

1. 土的固体颗粒

土的固体颗粒主要由矿物颗粒构成，对于有些土来说，除矿物颗粒外还含有有机质。土的固体颗粒的大小和形状，矿物成分及组成情况对土的物理力学性质有很大的影响。

(1) 土的颗粒级配

自然界中的土都是由大小不同的土粒组成的。大的颗粒粒径有几百毫米，小的颗粒粒径仅有几微米。试验表明，土粒的粒径随着由粗变细，土的性质相应地发生很大变化，例如，可使土的透水性由大变小，甚至变为不透水，可使土由无粘性变为有粘性，等等。因此，为了便于分析和利用土的工程性质，解决工程建设问题，可将性质相近的土粒划分若干粒组，见表 2-1。由表中可见，粒径较大的粒组与水之间几乎没有物理化学作用，而粒径小的粒组，例如粘粒组和胶粒组就受到水的强烈影响，遇水后出现粘性、可塑性等。

表 2-1 土的粒组划分

粒组名称		分界粒径/mm	一般特征
漂石或块石颗粒 卵石或碎石颗粒		> 200 200 ~ 20	透水性大，无粘性，无毛细水，不能保持水分
圆砾或角砾颗粒	粗	20 ~ 10	透水性大，无粘性，无毛细水
	中	10 ~ 5	
	细	5 ~ 2	
砂 粒	粗	2 ~ 0.5	易透水，无粘性，干燥时不收缩，呈松散状态，不表现可塑性，压缩性小，毛细水上升高度不大
	中	0.5 ~ 0.25	
	细	0.25 ~ 0.075	
粉 粒	粗	0.075 ~ 0.01	透水性小，湿时稍有粘性，干燥时稍有收缩，毛细水上升高度较大，极易出现冻胀现象
	细	0.01 ~ 0.005	
粘 粒 胶 粒		0.005 ~ 0.002 < 0.002	几乎不透水，结合水作用显著，潮湿时呈可塑性，粘性大，遇水膨胀，干燥时收缩显著，压缩性大

注：1. 漂石、卵石和圆砾颗粒均呈一定的磨圆形状（圆形或亚圆形），块石、碎石和角砾颗粒都带有棱角。

2. 粘粒、粉粒可分别称为粘土粒、粉土粒。

显然，土中所含各粒组的相对含量不同，则表现出来的土的工程性质也就必然不同。为此，工程上常以土中各个粒组的相对含量（各粒组占土粒总重的百分数）表示土中颗粒的组成情况。粒组的相对含量称为土的颗粒级配，它是确定土的名称和选用建筑材料的重要依据。

确定粒组相对含量的方法称为粒径分析法。对于粒径大于 0.075mm 的土采用筛分法，粒径小于 0.075mm 的土采用比重计法。所谓筛分法就是将所要分析的风干分散的代表性土样放进一套筛子（常用每套共计 6 个筛子，筛孔尺寸（mm）分别为 200、20、2、0.5、0.25 和 0.075，另外还有顶盖与底盘各一个）的顶部，当筛子振动时，大小不同的土粒就被筛分开来，直径大于 20mm 的颗粒留在最上边的筛子里，直径小于 0.075mm 的颗粒通过各层筛子，最后落到底盘里，留在每个筛子里的土重除以土的总重再乘以 100%，即可求得各粒组的相对含量。粒径小于 0.075mm 的土采用比重计法测定粒组的相对含量。关于比重计法可参阅《土工试验操作规程》。

颗粒分析结果常用图 2-1 的颗粒级配累积曲线表示。图中横坐标（为对数坐标）表示粒

径，纵坐标表示小于某粒径的土粒占土总重的百分率，由颗粒级配累积曲线可求得各粒组的相对含量。对于图 2-1 所示土样，砂粒组占总重为 $(80 - 7)\% = 73\%$ 。同时，由曲线的坡度还可鉴别土的均匀程度。如曲线较平缓，则表示粒径大小相差悬殊，土粒不均匀，即级配良好；如曲线较陡，则表示粒径相差不多，土粒均匀，即级配不良。

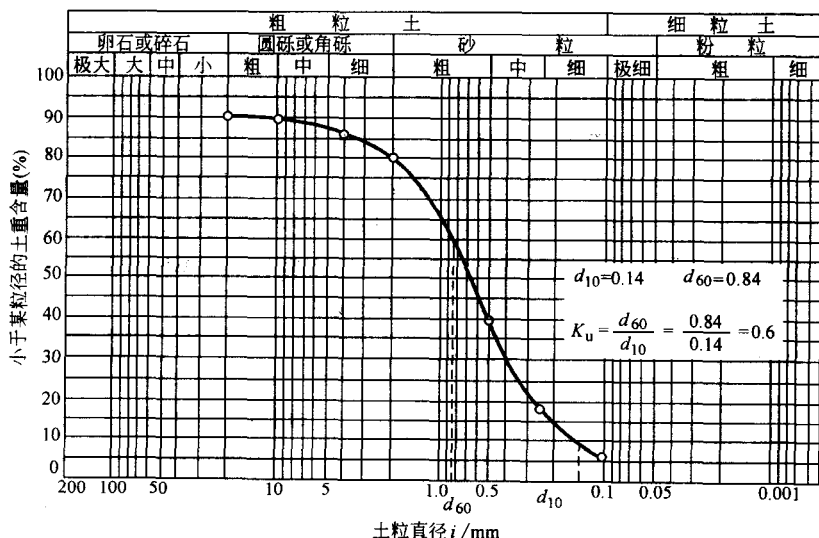


图 2-1 颗粒级配累积曲线

在工程上常采用不均匀系数 K_u 来衡量颗粒级配的不均匀程度：

$$K_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

式中 d_{60} ——土中小于某粒径的土重百分比为 60% 时相应的粒径，又称限定粒径；

d_{10} ——土中小于某粒径的土重百分比为 10% 时相应的粒径，又称有效粒径。

K_u 愈大，说明曲线愈平缓、土粒愈不均匀。工程中把 $K_u < 5$ 的土看作是级配均匀即级配不良的土； $5 \leq K_u \leq 10$ 的土看作是中等均匀的； $K_u > 10$ 的土看作是不均匀即级配良好的土。级配良好的土，粗粒间的孔隙为细粒所填充，压实时容易获得较大的密实度。这样的土强度高、压缩性小，适于做地基填方的土粒。

(2) 土粒的矿物成分

土粒中的矿物成分分为原生矿物和次生矿物。原生矿物是岩石经物理风化后颗粒的矿物成分，如石英、长石、云母等。原生矿物的性质比较稳定，在粗的土粒中常含有这些矿物成分。次生矿物是岩石经化学风化后而产生的新的矿物，如蒙脱石、伊利石、高岭石等。极细的粘粒常含有这些次生矿物。土粒中所含矿物成分不同，其性质就不同。如粘粒中蒙脱石含量较多时，则这种土遇水就会强烈膨胀，失水后又会产生收缩，给工程建设带来不利影响。

2. 土中水

土中水按其性质可分为以下几类 (图 2-2)。

(1) 结合水

根据其与土颗粒表面结合的紧密程度又可分为吸着水 (强结合水) 和薄膜水 (弱结合

水)。

吸着水：实验表明，极细的粘粒表面带有负电荷，由于水分子为极性分子，即一端显正电荷，另一端显负电荷，水分子就被颗粒表面电荷引力牢固地吸附在其周围而形成很薄的一层水，这种水就称为吸着水。其性质接近于固态不冻结，相对密度（比重）大于1，具有很大的粘滞性。受外力不转移，在 $100 \sim 105^{\circ}\text{C}$ 温度下被蒸发。这种水不传递静水压力。

薄膜水：这种水是位于吸着水以外，但仍受土颗粒表面电荷吸引的一层水膜。显然，距土粒表面愈远，水分子所受的引力就愈小。薄膜水也不能流动，含薄膜水的土具有塑性。它不传递静水压力，冻结温度低，已冻结的薄膜水在不太大的负温下就能融化。

(2) 自由水

只受重力的影响，其性质与普通水无异，能传递静水压力，土中含有自由水时呈现出流动状态。

3. 土中气体

土中气体可分为两类：与大气连通的自由气体和与大气隔绝的封闭气体。自由气体在外力作用下能很快逸出，因此它不影响土的性质，封闭气体则增加土的弹性，减小土的透水性。

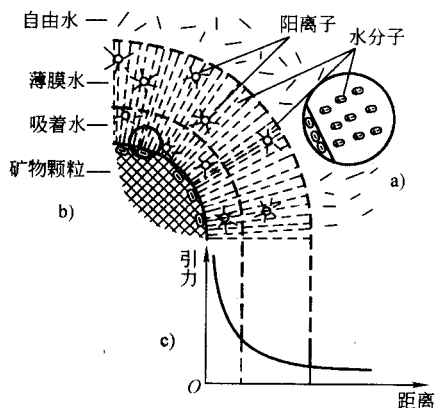


图 2-2 水在土中的形态简图

a) 水分子在土粒四周定向排列 b) 土粒与水的相互作用 c) 土粒电荷引力随距离的变化

2.2 土的物理性质指标

如前所述，土是由固体颗粒、水和气体三部分组成的。这三部分之间的不同比例，反映着土处于各种不同的状态：稍湿或很湿、密实或松散。它们对于评定土的物理力学性质有很重要的意义。因此，为了研究土的物理性质，就要掌握土的三个组成部分之间的比例关系。表示这三部分之间关系的指标，就称为土的物理指标。

为了便于说明和计算，用图 2-3 表示土的三个组成部分。

气体的质量比其他两部分质量小得多，可忽略不计。

1. 土的质量密度和重力密度

(1) 土的质量密度

单位体积土的质量称为土的质量密度，简称土的密度，用符号 ρ (t/m^3) 表示。

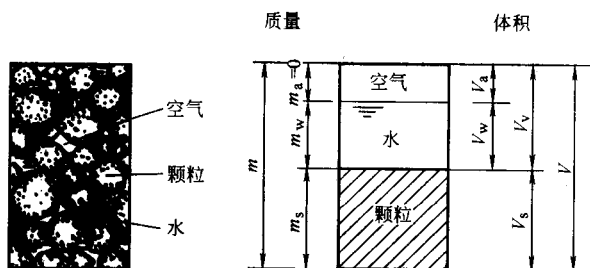


图 2-3 土的三相简图

m —土的总质量 m_s —土中颗粒质量 m_w —土中水的质量
 V —土的总体积 V_s —土中颗粒体积 V_w —土中水的体积
 V_a —土中孔隙体积 V_a —土中空气的体积

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-1a)$$

土的密度随着土的矿物成分、孔隙大小和水的含量而不同，天然状态下的土的密度一般为 $1.6 \sim 2.0 \text{ t/m}^3$ 。

(2) 土的重力密度

单位体积土所受的重力称为土的重力密度，简称土的重度，用符号 γ (kN/m^3) 表示。

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (2-1b)$$

式中 G ——土的重力 (kN)。

因为 $G = mg$ ，把它代入式 (2-1b)，得：

$$\gamma = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (2-1c)$$

式 (2-1c) 说明，土的重度等于土的密度与重力加速度的乘积。

2. 土的含水量

土中水的质量与颗粒质量之比 (用百分数表示)，称为土的含水量，用符号 w 表示。

$$w = \frac{m_w}{m_s} 100\% \quad (2-2)$$

3. 土粒相对密度 (比重)

土粒单位体积的质量与 4°C 时蒸馏水的密度 ρ_w 之比，称为土粒相对密度或比重，用符号 d_s 表示。

$$d_s = \frac{m_s}{V_s \rho_w} \quad (2-3)$$

土的相对密度是没有单位的，它的数值变化范围不大，一般为 $2.65 \sim 2.75$ 。

上面三个物理指标： ρ 、 w 和 d_s 是直接用实验方法测定的，通常称为实验指标。已知这三个基本指标就可以用公式算出下面一些指标——计算指标。

4. 土的干密度和干重度

(1) 土的干密度

土的单位体积内颗粒质量，称为土的干密度，用符号 ρ_d (t/m^3) 表示。

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (2-4a)$$

土的干密度愈大，表示土愈密实。在填土夯实时，常以土的干密度来控制土的夯实标准。例如，房心填土和基础回填土夯实后的干密度一般要求达到 $1.50 \sim 1.65 \text{ t/m}^3$ 。

如果已知土的密度 ρ 和含水量 w ，就可以按下式算出土的干密度，即

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w} \quad (2-5)$$

现将公式 (2-5) 推证如下：

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{m_s}{V} \frac{m}{m} = \frac{\frac{m}{V}}{\frac{m}{m_s} + \frac{m_w}{m_s}} = \frac{\rho}{1 + w}$$

(2) 土的干重度

土的单位体积内颗粒所受的重力称为土的干重度, 用符号 γ_d (kN/m^3) 表示。

$$\gamma_d = \frac{G_s}{V} \quad (2-4b)$$

式中 G_s ——颗粒的重力。

同理可得

$$\gamma_d = \rho_d g \quad (2-4c)$$

5. 土的饱和密度和饱和重度

(1) 饱和密度

土中孔隙完全被水充满时土的密度称为土的饱和密度, 用符号 ρ_{sat} (t/m^3) 表示。

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} \quad (2-6a)$$

(2) 饱和重度

土中孔隙完全被水充满时土的重度称为土的饱和重度, 用符号 γ_{sat} (kN/m^3) 表示。

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{G_s + V_v \gamma_w}{V} \quad (2-6b)$$

6. 土的有效重度

在地下水位以下, 土体受到水的浮力作用时土的重度被为土的有效重度, 用符号 γ' 表示。

$$\gamma' = \frac{G_s + V_v \gamma_w}{V} - \frac{V \gamma_w}{V} = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \quad (2-7)$$

式中第一项为饱和重度, 第二项为单位体积土所受到的水的浮力, 即排开与 V 同体积的水重, 其中 γ_w 为水的重度。

7. 土的孔隙比

土中孔隙体积与土粒体积之比称为孔隙比, 用符号 e 表示。

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2-8)$$

孔隙比也是反映土的密实程度的物理指标。一般 $e < 0.6$ 的土是密实的低压缩性土, $e > 1$ 的土是疏松的高压缩性土。

孔隙比可用下式计算:

$$e = \frac{d_s \rho_w (1 + w)}{\rho} - 1 \quad (2-9)$$

根据以上介绍的物理指标的定义, 式 (2-9) 推导过程如下:

$$\begin{aligned} e &= \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{V m}{V_s m} - 1 \\ &= \frac{\frac{m_s + m_w}{V_s}}{\frac{m}{V}} - 1 = \frac{\frac{m_s (1 + w)}{V_s}}{\rho} - 1 \\ &= \frac{d_s \rho_w (1 + w)}{\rho} - 1 \end{aligned}$$

由式 (2-8) 知道, 孔隙比 e 是两个体积之比, 它不象干密度 ρ_d , 与土粒的比重 d_s 有关。所以, 用孔隙比表示土的密实程度, 比用干密度表示要更好一些。但由于土的干密度可以通过实验指标, 经过简单换算就可求出, 所以在填土夯实时, 仍采用土的干密度作为夯实标准。

8. 孔隙率

土中孔隙体积与土的体积之比 (用百分数表示), 称为孔隙率, 用符号 n 表示。

$$n = \frac{V_v}{V} 100\% \quad (2-10a)$$

孔隙率与孔隙比有下列关系:

$$n = \frac{e}{1+e} 100\% \quad (2-10b)$$

9. 饱和度

土中水的体积与孔隙体积之比称为饱和度, 用符号 S_r 表示。

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (2-11)$$

饱和度可按式计算:

$$S_r = \frac{wd_s}{e} \quad (2-12)$$

现将式 (2-12) 推证如下:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{m_w/\rho_w}{V_v} \frac{V_s m_s}{V_s m_s} = \frac{wd_s}{e}$$

饱和度是衡量砂土潮湿程度的物理指标。如土中孔隙完全被水充满, 即当 $V_w = V_v$ 时, 则 $S_r = 1$, 这种土就是饱和土, 如土中不含水, 即 $V_w = 0$, 则 $S_r = 0$, 土为干土。饱和度大小还可说明土的可能的压实程度, 例如, 对于 $S_r = 1$ 的饱和粘性土, 就不可能再把它夯实。所以在基础施工中遇到饱和土就不要再夯实了。因为在这种情况下不但夯不实, 反而破坏了土的天然结构, 降低了地基的强度。在工地有时遇到夯不实的“橡皮土”就是这个道理。

这里顺便说明, 含水量虽然也是表示土的潮湿程度的一个指标, 但它不如用饱和度 S_r 表示直观, 所以在衡量砂土的潮湿程度时, 常用饱和度而不用含水量。

【例题 2-1】 某房屋房心填土夯实后的密度 $\rho = 1.85 \text{ t/m}^3$, 含水量 $w = 15\%$, 若要求夯实后的土的干密度达到 1.55 t/m^3 , 试问此房心填土是否达到质量标准。

【解】 按公式 (2-5) 算出

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+w} = \frac{1.85}{1+0.15} = 1.61 (\text{t/m}^3)$$

因为它大于要求的干密度 1.55 t/m^3 , 故合乎质量标准。

【例题 2-2】 由钻探取得某原状土样, 经实验测得土的天然密度 $\rho = 1.70 \text{ t/m}^3$, 含水量 $w = 13.2\%$, 土颗粒的相对密度 $d_s = 2.69$ 。试求土的孔隙比 e 和饱和度 S_r 。

【解】 按公式 (2-9) 算出孔隙比