

建筑结构教学丛书

建筑地基基础

(按新规范)

JIANZHU DIJI JICHU
(AN XINGUIFAN)

● 郭继武 主编
郭继武 张述勇 冯小川 编

高等教育出版社

413031

建筑结构教学丛书

建筑地基基础

(按新规范)

郭继武 主编

郭继武 张述勇 冯小川 编

高等教育出版社

建筑结构教学丛书是分别根据建筑结构设计新规范（已出版）有关内容编写的，共四本。包括《建筑地基基础》、《混凝土结构与砌体结构》、《钢结构》和《建筑抗震设计》。

本书《建筑地基基础》为丛书之一，是参照已出版的新规范《建筑地基基础设计规范》（GBJ 7-89）编写的。主要内容包括：地基土的物理性质，地基中的应力，地基变形，土的抗剪强度与地基承载力，挡土墙的土压力与土坡稳定，工程地质勘察，建筑物地基计算原则，浅基础设计，基槽检验与地基的局部处理，桩基础。

考虑到教学的要求和设计的实用，本丛书按教材体系编写，并体现了新规范的主要内容。本丛书适合作为工料士建类专业教材，也可作为工程设计、施工技术人员学习新规范参考。

DV20/32 0

建筑结构教学丛书
建筑地基基础
(按新规范)

郭继武 主编
郭继武 张述勇 冯小川 编

*
高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
北京印刷一厂印装

*
开本 787×1092 1/16 印张 17.5 字数 400 000
1990年10月第1版 1990年10月第1次印刷
印数 0001—12 210
ISBN 7-04-002965-0/TU·40
定价 3.95 元

前 言

根据原国家建委的要求,由有关部门对原建筑结构设计规范进行了修订,在修订过程中曾以多种方式在全国广泛征求意见,几经讨论修改,最后由建设部审查定稿,并将于1990年1月1日起公布实施。

新规范无论在内容上和技术水平上都较原规范有较大的充实、提高和发展。它反映了我国建国四十年来工程设计、施工经验和科研成果,同时也吸收了国外一些国家的建筑经验。

为了便于广大读者尽快熟悉和掌握新规范内容,我们编写了这套《建筑结构教学丛书》供学习参考。这套丛书共四本,分别为《建筑地基基础》、《混凝土和砌体结构》、《钢结构》和《建筑抗震设计》。考虑到教学的要求和设计的实用,本丛书按教材体系编写,并体现了新规范的主要内容。

本书《建筑地基基础》为丛书之一,是参照新规范《建筑地基基础设计规范》(GBJ 7-89)编写的。书中采用了国家规定的建筑结构设计通用符号、计量单位和基本术语。在编写过程中,力求做到内容由浅入深、循序渐进、重点突出和理论联系实际。为了便于读者掌握本书所叙述的基本理论,书中附有必要数量的典型例题、思考题、习题供读者参考。

本书由郭继武主编,郭继武、张述勇、冯小川编写。

本书由清华大学陈希哲教授审阅。

由于编者水平所限、书中缺点和不妥之处,请广大教师和读者指正。

编 者

1989年4月于北京

主要符号

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

目 录

主要符号

第一章 概述 1

§ 1-1 地基基础的概念 1

§ 1-2 本书的特点及内容 2

§ 1-3 本学科的发展简介 3

第二章 地基土(岩)的物理性质及分类 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 11

§ 2-4 地基土的分类及土的物理状态 12

第三章 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 22

§ 3-3 基础埋置深度对附加应力的影响 40

第四章 地基变形的计算 49

§ 4-1 土的压缩性 49

§ 4-2 地基最终沉降量的计算 55

§ 4-3 地基沉降与时间关系的估算 64

§ 4-4 建筑物沉降观测 67

第五章 土的抗剪强度与地基承载力 69

§ 5-1 概述 69

§ 5-2 土的抗剪强度 69

§ 5-3 土的极限平衡理论 71

§ 5-4 土的抗剪强度指标的测定方法 75

§ 5-5 地基临塑压力、临界压力与极限压力 78

§ 5-6 地基承载力的确定 84

§ 5-7 附录 92

第六章 挡土墙上的土压力与土坡稳定 94

§ 6-1 概述 94

§ 6-2 土压力的分类 94

§ 6-3 朗金土压力理论 96

§ 6-4 库伦土压力理论 102

§ 6-5 特殊情况下土压力的计算 113

§ 6-6 按规范法计算主动土压力 117

§ 6-7 挡土墙设计 124

§ 6-8 土坡稳定性分析 130

第七章 工程地质勘察 134

§ 7-1 工程地质勘察的目的和要求 134

§ 7-2 勘探方法 136

§ 7-3 土的野外鉴别与描述 138

§ 7-4 地下水 139

§ 7-5 工程地质勘察报告 142

第八章 建筑物地基的计算原则 144

§ 8-1 一般要求 144

§ 8-2 地基变形的分类 145

§ 8-3 地基允许变形值 146

§ 8-4 建筑物安全等级及地基变形计算的规定 147

第九章 天然地基上浅基础设计 149

§ 9-1 地基基础设计步骤 149

§ 9-2 基础的类型 149

§ 9-3 基础埋置深度的确定 155

§ 9-4 基础底面尺寸的确定 159

§ 9-5 刚性基础剖面设计 185

§ 9-6 扩展基础剖面设计 187

§ 9-7 柱下条形基础与十字交叉基础 203

§ 9-8 墙下筏板基础 212

第十章 基槽检验与地基的局部处理 215

§ 10-1 基槽检验 215

§ 10-2 地基的局部处理 217

§ 10-3 地基处理实例 222

第十一章 软弱地基 225

§ 11-1 一般要求 225

§ 11-2 建筑措施 225

§ 11-3 结构措施 227

§ 11-4 软弱地基的处理 229

第十二章 桩基础 235

§ 12-1 桩的功能与种类 235

§ 12-2 单桩垂直承载力的确定 237

§ 12-3 群桩垂直承载力的确定 242

§ 12-4 单桩水平承载力的确定 243

§ 12-5 桩的根数及布置 247

§ 12-6 承台的设计与计算 257

§ 12-7 桩基设计的步骤 262

参考文献 271

第一章 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）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的部分的压强。我们将建筑物最底下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，位于基础底面下第一层土称为持力层，在其以下土层统称为下卧层。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 55 m，始建于 1173 年，当建至 24 m 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 1 m 有余，南侧下沉近 3 m，沉降差达 1.8 m，倾角达 5.8° 之多。现在这个塔还以每年 1 mm 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 16 m 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 8.8 m，东侧抬高 1.5 m，仓身倾斜 27° 。

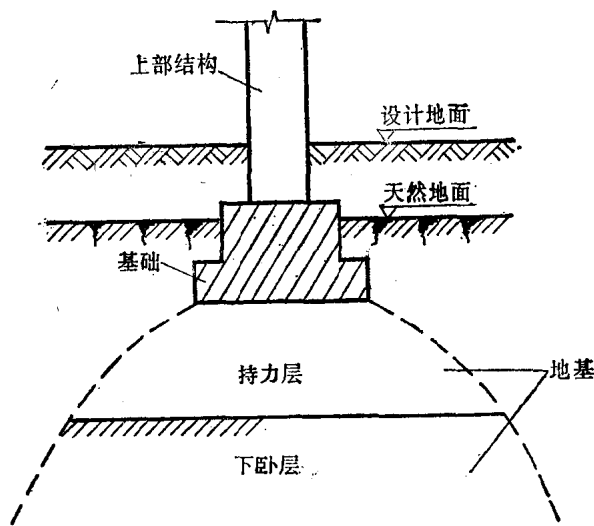


图 1-1 地基与基础示意图

为了保证建筑物的安全，地基应同时满足两个基本要求：

- (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 本书的特点及内容

本书是参照国家最新颁布的《建筑地基基础设计规范》(GBJ 7-89)^①编写的。书中体现和反映了此新规范的主要内容,特别是对新规范的条文作了必要的解释和说明,全书采用了国务院颁布的《法定计量单位》,为了便于读者掌握地基基础的基本理论和计算方法,书中附有大量计算实例,供读者参考。

《GBJ 7-89 规范》是在原规范(TJ 7-74)(以下简称原规范)的基础上作了较大的补充和修改而成的,并由部颁标准提高到国家标准。

读者在阅读本书时,要注意《GBJ 7-89 规范》在以下几方面作了补充和修改:

(一)《GBJ 7-89 规范》所采用的符号、单位、术语系按照《建筑结构设计通用符号、计量单位和基本术语》的规定编制的。较原规范有了很大的变动,但原规范中采用的“国际土力学与基础工程学会”统一的通用符号仍保留未变,以便不影响国际间的学术经验交流。

(二)按照《建筑结构设计统一标准》(GBJ 68-84)的规定,运用概率统计理论确定地基基础的设计原则。

(三)在土的分类和描述部分,新增加了粉土一档,规定了砂土的下限,红粘土的定义在原规范的基础上进行了修订。

(四)采用了数理统计确定土的工程特性指标的方法,使承载力的取值更趋合理。新规范取消了老粘土承载力表,修订了红粘土承载力表并增加了粉土承载力表。

(五)在确定基础埋深的部分,采用了最新修订的中国季节性冻土标准冻深线图,补充了不同冻胀类型地基防冻害措施。

(六)软弱下卧层验算,改由上、下层土的压缩模量之比来确定压力扩散角。

(七)在地基变形的计算中,修正了沉降计算深度的确定方法,并调整了沉降计算经验系数。

(八)设计挡土墙时,采用了更具有一般性的计算简图;土压力的计算采用了平面滑裂面假定的设计方法。

(九)在基础设计中,增加了高杯口基础,柱下条形基础和墙下筏板基础的设计计算原则。

^① 以下简称《GBJ 7-89 规范》。

(十)在桩基部分补充了扩底桩的内容,修订了桩基承台抗弯计算方法。

地基基础是综合性很强的一门学科,它涉及到工程地质学、土力学、建筑结构和施工技术等几个学科领域。对于从事工业与民用建筑专业的读者,学习《GBJ 7-89 规范》时,要重视工程地质基本知识的学习,学会阅读和使用工程地质勘察资料,掌握土的应力、变形和承载力计算等土力学基本原理,应用这些基本知识和原理,结合建筑结构和施工技术 etc 知识,解决地基基础工程问题。

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一个重要内容,限于篇幅,本书不再赘述。

土是多相的组合物,它的物理力学性质以及它受荷载后应力和变形是十分复杂的,所以目前的土力学计算理论还很难与实际情况完全吻合。由于这些理论大多是建立在实验基础上的,因此,在学习新规范时,应注意理论的适用条件和应用范围。

§ 1-3 本学科的发展简介

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。这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惊人的。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,这些无数的地基基础高超技艺未能提炼成系统的科学理论。

十八世纪工业革命后,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。我国建国四十年来,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 etc,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。

第二章 地基土(岩)的物理性质及分类

§ 2-1 土的成因与组成

一、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;而细颗粒的土层则其压缩性高,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)。

二、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、水和气体的性质。关于土的三个组成部分的比例关系及其对土的性质的影响,将在下一节讨论。

1. 土的固体颗粒

^① 矿物是指在地壳中具有一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。

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。

土的粒组划分

表 2-1

粒 组 名 称		分界粒径(mm)	一 般 特 征
漂石或块石颗粒		>200	透水性大,无粘性,无毛细水,不能保持水分
卵石或碎石颗粒		200~20	
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	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
		<0.002	

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 0.075 mm 的土采用筛分法;粒径小于 0.075 mm 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(常用每套共计六个筛子,筛孔分别为 200、20、2、0.5、0.25 和 0.075 mm,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离开,直径大于 20 mm 的颗粒留在最上边的筛子里,直径小于 0.075 mm 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 0.075 mm 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比,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,砂粒组占土总重为 $(80-7)\%=73\%$ 。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。

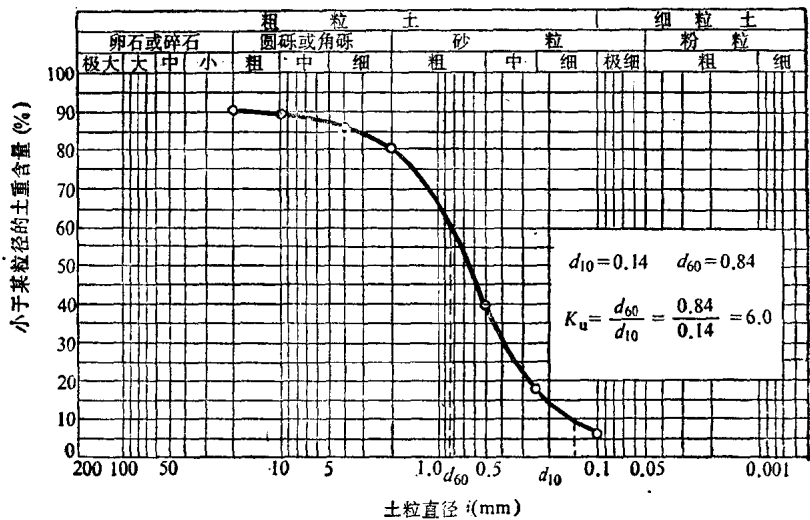


图 2-1 颗粒级配累积曲线

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料。

(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, 原生矿物就是岩石经物理风化产生的矿物成分。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, 给工程建筑带来不利影响。

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。

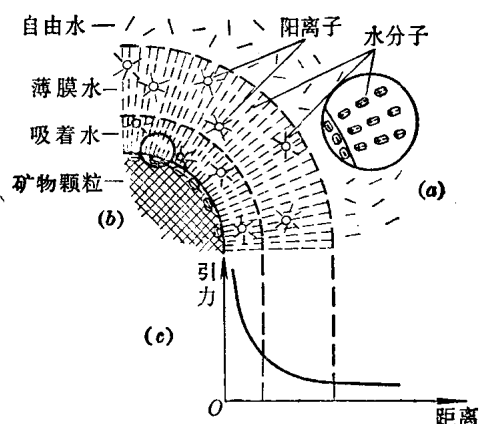


图 2-2 水在土中的形态简图

(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。

气体的质量比其它两部分质量小得多，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 表示。

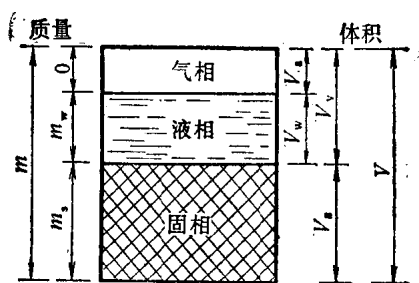


图 2-3 土的三相简图

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_v ——土中孔隙体积； V_a ——土中空气的体积

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{t/m}^3) \quad (2-1 a)$$

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 表示。

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (\text{kN/m}^3) \quad (2-1 b)$$

式中: G ——土的重力(kN)。

因为 $G = mg$, 把它代入式(2-1 b), 得:

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

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。

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

土的比重是没有单位的,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 是直接由实验方法测定的,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 表示。

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (\text{t/m}^3) \quad (2-4 a)$$

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:

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

(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 表示。

$$\gamma_d = \frac{G_s}{V} \quad (\text{kN/m}^3) \quad (2-4b)$$

式中, G_s ——颗粒重力。

同理可得

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

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} 表示。

$$\rho_{sat} = \frac{m_s + V_v \cdot \rho_w}{V} \quad (\text{t/m}^3) \quad (2-6a)$$

(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} 表示。

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + V_v \cdot \gamma_w}{V} \quad (\text{kN/m}^3) \quad (2-6b)$$

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称为土的有效重度,用符号 γ' 表示。

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

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,

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

根据以上介绍的物理指标的定义,公式(2-9)推导过程如下:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{V}{V_s} \cdot \frac{m}{m} - 1$$

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

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。

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

饱和度可按下列式计算:

$$S_r = \frac{w \cdot d_s}{e} \quad (2-12)$$

现将公式(2-12)推证如下:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{m_w / \rho_w}{V_v} \cdot \frac{V_s \cdot m_s}{V_s \cdot m_s} = \frac{w d_s}{e}$$

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

$$e = \frac{d_s \rho_w (1+w)}{\rho} - 1 = \frac{2.69 \times 1 \times (1+0.132)}{1.70} - 1 = 0.79$$

按公式(2-12)算出饱和度

$$S_r = \frac{w d_s}{e} = \frac{0.132 \times 2.69}{0.791} = 0.449$$

§ 2-3 粘性土的塑性

含水量对粘性土所处的状态影响很大, 随着含水量的增加, 粘性土可从固体状态经过塑性状态而变为流动状态。土所处的状态不同, 它的强度也就不同。下面研究不同状态转变时的含水量, 这个含水量也就是分界含水量。

一、塑限

当土由固体状态变到塑性状态时的分界含水量称为塑限, 用符号 w_p 表示。

塑限的测定, 一般常用搓条法。在干土内加适量的水, 拌合均匀后, 在毛玻璃板上用手掌内侧搓成土条, 当土条搓到直径为 3 mm 时, 恰好开始断裂(图 2-4), 这时土的含水量称为塑限。

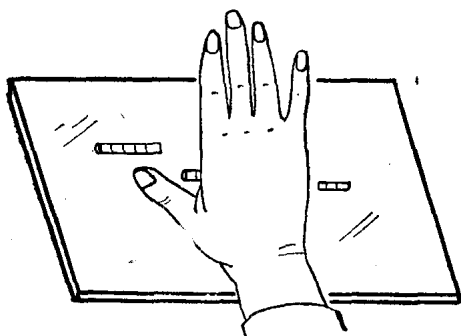


图 2-4 塑限试验

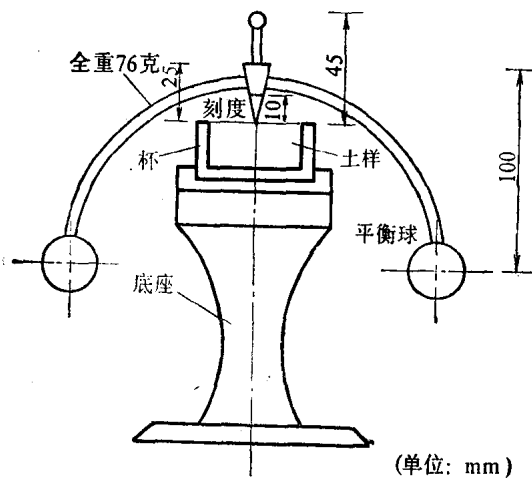


图 2-5 液限仪

二、液限

当土由塑性状态变到流动状态时的分界含水量称为液限, 用符号 w_L 表示。