

建筑地基与 基础工程

黄熙龄 钱力航 主编

中国建筑工业出版社

建筑地基与基础工程

黄熙龄 钱力航 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑地基与基础工程/黄熙龄等主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 10

ISBN 978-7-112-19644-9

I. ①建… II. ①黄… III. ①地基-基础(工程) IV. ①TU47

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 178529 号

本书全面论述各种地基土环境下的各种类型基础工程的设计与施工技术问题, 内容涵盖岩土土的鉴别与工程分类、地基土的工程特性、地基评价与计算、地基设计原则、软弱地基、湿陷性黄土地基、膨胀土地基、冻土地基、扩展基础与柱下条形基础、筏形与箱形基础、桩基础、沉箱与沉井、基础梁计算、地下结构、基坑与边坡、地基处理、地下连续墙、地下水、检测与监测等共 22 章。紧紧围绕地基与基础设计与施工规范的内容, 论述深入, 资料翔实, 内容全面, 堪称是一部不可多得的专业百科全书。

参与本书策划及编审人员有 50 多位, 许多是该专业国家标准或地方标准的主要编制成员、全国主要科研、设计、施工单位的专家及大学土建专业的知名教授。从酝酿选题、提纲, 多次审稿、修改成书, 历时 30 多年。

本书是土木工程地基基础专业、岩土工程、土建勘察等专业人员的重要参考书, 亦可供该专业大学师生学习参考。

责任编辑: 朱象清 王 梅

责任设计: 王国羽

责任校对: 王宇枢 姜小莲

建筑地基与基础工程

黄熙龄 钱力航 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 88 字数: 2193 千字

2016 年 10 月第一版 2016 年 10 月第一次印刷

定价: 198.00 元

ISBN 978-7-112-19644-9

(29155)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

经过近 30 年的酝酿和辛勤耕耘,《建筑地基与基础工程》终于和大家见面了。编写本书的目的是为了承前启后,总结新中国成立 60 多年来建筑地基基础工程设计施工的基本经验和理论研究成果,围绕着该专业的国家标准和行业标准这根主线,把海量的调查实例、科技成果、成熟的理论、先进的技术归纳、总结成书,为该领域的科研和设计施工人员、土建专业师生提供一本比较全面、实用的参考书籍,以促进该领域的持续快速发展。

地基与基础是一门从工程实践中发展起来又服务于工程建设的科学。它随着国家经济建设的发展而进步。20 世纪 50 年代,我国经济比较落后,建设刚刚起步,建筑物多为中低层房屋和工业厂房,多采用独立基础、条形基础和一般桩基础。为了解决当时西北地区“三线”建设中突出的黄土湿陷性问题,对黄土的研究取得了显著的成绩。60 年代为解决软土地区的工程问题,进行了大规模的软土调查与工程特性的研究,结合软土高结构性和高压缩性的特点,提出了控制地基压力和建筑物长高比等建筑措施和结构措施,以及合理设置沉降缝,增加结构刚度等减少建筑物差异沉降的方法等等。70 年代针对国内外发生的膨胀土引起的工程事故,开展了全国性的膨胀土研究工作,完成了膨胀土分布调查,建立了试验研究基地,建造了试验性房屋,根据研究成果提出了膨胀土地基处理原则及措施,编制了《膨胀土地区建筑技术规范》,大大减少了膨胀土地区的工程事故,保证了工程质量。这一时期高层建筑逐渐增多,箱形和筏形基础被广泛采用,对箱筏基础的研究也得到重视,进行了大规模的工程实测,编制了《高层建筑箱形基础设计与施工规程》。1976 年的唐山大地震给震区房屋造成了巨大损害,国家建委组织了唐山大地震灾害调查,针对震区房屋特点、地基基础损害程度,提出了房屋结构、地基基础的加固措施和方法。

进入 80 年代以后,随着我国经济的腾飞,高层建筑和超高层建筑飞速发展,高度越来越高,建筑平面和建筑结构越来越复杂,对地基基础设计和施工的要求也越来越严格。为适应这一形势,适时开展了群楼厚筏基础模型试验、工程实测和上部结构与地基基础共同作用的研究。

桩基工程技术为适应城市建设对环境的要求,形成了灌注桩的成套技术,编制了《建筑桩基技术规范》。上海、天津等地建成的高度超过 600m 的超高层建筑,体现了我国桩基工程的设计施工水平。随着高层建筑的发展和城市地下空间的开发利用,超深超大基坑工程技术也随之发展,桩墙、锚杆、内支撑、地下连续墙等支护体系得到充分应用,成功建成的基坑面积大至数万平方米,最大深度达到 40 多米,并且编制了行业标准《建筑基坑支护技术规范》。

我国地基处理技术的研究开发也具有自己的特色。20 世纪 60 年代开发了注浆法,用碱液法加固湿陷性黄土地基效果显著;70 年代开发了适合我国软土特性的真空预压法、堆载预压法、振冲法、强夯法等地基加固方法。特别是强夯法处理高填方地基取得了良好的技术经济效益。石灰桩、水泥搅拌桩、水泥粉煤灰碎石桩等地基处理方法,都纳入了行

业标准《建筑地基处理技术规范》，得到了广泛的推广应用。

20世纪70年代以来，对建筑地基基础技术来说，最重要的事件莫过于我国第一本国家标准《工业与民用建筑地基基础设计规范》(TJ 7—74) (简称《74规范》)的诞生。这本规范是由全国60多个单位近百名工程技术人员和教师，搜集并总结新中国20多年的工程实践经验和资料编写的。其主要内容是：总则、地基土的分类与允许承载力、基础埋深、地基计算、山区地基、软弱地基、基础等。由于黄土、膨胀土、多年冻土的物理力学性质的特殊性，《74规范》规定尚不适用于这几类土地基。《74规范》的特点是结合我国的地质情况，根据解决生产实际问题的经验、载荷试验和沉降观测资料，做出关于地基设计的规定。考虑到山区地基的软硬不均、软弱地基的变形过大等特点，分别采用以处理为主，或者以加强上部结构刚度为主的设计措施，使普遍原则与特殊的地基条件结合起来，使地基处理、结构处理、基础选型结合起来。对于极为复杂的岩溶、土洞、滑坡防治、边坡稳定、冻害、大面积堆料等提出了相应的措施。《74规范》吸收了国外设计计算方法中的合理部分，并按我国实践经验进行了修正或简化，如沉降计算公式、挡土墙计算公式、地基允许变形值等。《74规范》的颁布实施，结束了我国一直沿用苏联地基基础设计规范(HYTY 127-55)的历史。随着建设的发展和科技的进步，根据地基基础技术的发展和工程实践经验的积累，1989年对《74规范》进行了修订，规范编号改为GBJ 7—89。2002年和2011年又经两次修订，成为现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007—2011。现行规范增加了地基基础设计使用年限不应小于建筑结构设计使用年限、泥炭和泥炭质土的工程定义、地基回弹再压缩变形计算方法及岩石地基设计等许多内容。现行规范与《湿陷性黄土地区建筑规范》、《膨胀土地区建筑技术规范》、《吹填土地基处理技术规范》、《冻土地区建筑地基基础设计规范》、《盐渍土地区建筑技术规范》、《建筑桩基技术规范》、《建筑地基处理技术规范》、《高层建筑筏形与箱形基础技术规范》、《建筑基坑支护技术规范》等专项规范一起构成了我国建筑地基基础的标准体系，也确立了我国建筑地基基础设计理论和相应的施工方法及检测的完整体系。

编写本书的计划由来已久，自《74规范》出版后就酝酿组织编写，20世纪90年代初就写出了部分初稿，但随着规范修订的开始，本书的定稿工作只得后延，又随着本专业其他国家标准及地方标准的出版，为求得书稿内容的更加完善，框架要调整，内容要充实，编写队伍要扩大。又经过20年的磨炼，今天已经成书，这是全国各主要土建科研、设计、施工、勘察单位及全国各主要土建院校的集体成果，是劳动的丰收、智慧的结晶，希望得到广大读者的厚爱！技术在进步，不断修订，永葆该书的青春常在，这才是众望！我们要发扬这种优良传统！

本书共分22章，由黄熙龄、钱力航、朱象清总成，各章的编写人员如下：

- 第1章 岩土鉴别与工程分类：郭明田 顾宝和（审改）
- 第2章 地基土的工程特性及其测定：杜坚 滕延京（审改）
- 第3章 地基评价：高岱 滕延京（审改）
- 第4章 地基计算：黄熙龄
- 第5章 地基基础设计原则：黄熙龄
- 第6章 软弱地基：孙更生 杨敏
- 第7章 湿陷性黄土地基：秦宝玖 罗宇生

第 8 章 膨胀土地基：陈希泉 陆忠伟

第 9 章 冻土地基：朱磊 王公山

第 10 章 扩展基础与柱下条形基础：钱力航

第 11 章 基础梁的计算与分析：曹名葆

第 12 章 筏形基础：侯光瑜 宫剑飞 薛慧立

第 13 章 箱形基础：侯光瑜 薛慧立 钱力航

第 14 章 地下结构：巢斯

第 15 章 桩基础：裴捷 刘耀峰 袁内镇

第 16 章 沉箱与沉井：李耀良

第 17 章 边坡工程：吴曙光 胡岱文 黄求顺 朱桐浩（审稿：梅全亭）

第 18 章 基坑工程：顾晓鲁

第 19 章 地基处理：滕延京

第 20 章 地下连续墙与逆作法：钟显奇 滕延京（审改）

第 21 章 地下水：刘小敏

第 22 章 检验与监测：唐孟雄 陈玉桂

陈志德、封光炳、许惟阳、唐杰康、彭大用、庄皓、施履祥等曾分别撰写过第 1、7、8、9、10、15、20、21、22 章的初稿，但写作年代较久，所依据的标准规范已几经修订，在本书重新编写时参考了这些初稿的有关内容，仅此向他们表示诚挚的谢意。

侯学渊、赵锡宏、童翊湘、叶政青、胡文尧等专家参加了在本书最早的策划工作，朱玉明和周圣斌参加了本书的部分编写工作。在本书即将出版之时，也向他们表示由衷的感谢。

由于本书涉及的内容和作者较多，研究的深度和各地的经验也不尽相同，因此全书难免存在不协调之处，敬请读者谅解。

目 录

前言

第 1 章 岩土 的鉴别与工程分类	1
1.1 概述	1
1.2 岩土物理性指标与分类指标	4
1.3 岩石 (岩体) 的工程分类与鉴定.....	15
1.4 土的工程分类与鉴定.....	26
1.5 特殊岩土.....	33
第 2 章 地基土的工程特性及其测定	59
2.1 地基土的工程特性.....	59
2.2 土的变形特性.....	60
2.3 土的抗剪强度.....	66
2.4 土的渗透性.....	71
2.5 土的动力特性与液化.....	76
2.6 静力触探与标准贯入试验.....	82
第 3 章 地基评价	92
3.1 地基评价的准则.....	92
3.2 均质地基.....	94
3.3 岩石地基	102
3.4 岩溶与土洞	118
3.5 地下水	127
3.6 不良地质条件及其应注意的问题	134
第 4 章 地基计算	140
4.1 地基承载能力	140
4.2 土体中的应力分布与地基变形	154
4.3 地基的变形计算	169
第 5 章 地基基础设计原则	187
5.1 地基基础设计基本规定	187
5.2 地基变形特征及允许变形值	194
5.3 基础设计一般原则	199
第 6 章 软弱地基	211
6.1 我国主要软土地区地基土的一般工程特性	211
6.2 软土地基的变形特点	264
6.3 地基设计、施工注意要点	273

6.4	基础纠偏措施	316
第7章	湿陷性黄土地基	324
7.1	概述	324
7.2	湿陷性黄土的工程特性及其评价	331
7.3	黄土地基湿陷变形的特征	339
7.4	湿陷性黄土地基上的建筑设计	346
7.5	湿陷性黄土地基处理	350
第8章	膨胀土地基	376
8.1	膨胀土的地质属性	376
8.2	膨胀土的胀缩特性	384
8.3	膨胀土的抗剪强度与地基承载力	393
8.4	膨胀土的判别、场地与地基评价	401
8.5	膨胀土上房屋的位移及其影响因素	416
8.6	地基设计	430
8.7	预防措施	439
8.8	施工与维护	456
第9章	冻土地基	459
9.1	概述	459
9.2	季节冻土冻结深度与冻胀性	477
9.3	季节冻土对建筑基础的冻胀力作用	494
9.4	冻土工程地质勘察与冻土试验	501
9.5	季节冻土地区地基与基础设计	510
9.6	多年冻土地区地基与基础设计	522
第10章	扩展基础与柱下条形基础	541
10.1	无筋扩展基础	541
10.2	扩展基础	545
10.3	柱下条形基础	555
第11章	基础梁的计算与分析	562
11.1	概述	562
11.2	地基模型	564
11.3	条形基础梁的计算	570
11.4	曲形基础梁的计算	587
11.5	交叉形基础梁的计算	599
11.6	非线性地基上考虑上部结构刚度因素的基础梁计算方法简介	603
第12章	筏形基础	605
12.1	筏形基础形式和几何尺寸的确定	605
12.2	筏形基础的内力计算	607
12.3	筏形基础的构件截面设计	617
12.4	筏形基础一般构造要求	623

12.5	高层建筑大底盘基础变形控制设计	631
12.6	高层建筑基础和地下结构抗震设计	655
12.7	工程实例简介	660
第 13 章	箱形基础	683
13.1	箱形基础几何尺寸的确定	683
13.2	箱形基础的工作机理	690
13.3	箱基实用计算	697
13.4	箱形基础的构件截面计算	699
13.5	箱形基础一般构造要求	704
13.6	箱形基础的地基反力系数	706
第 14 章	地下工程	713
14.1	概述	713
14.2	地下室结构	718
14.3	隧道工程	746
14.4	防水排水设计	774
第 15 章	桩基础	791
15.1	概述	791
15.2	竖向承压桩	803
15.3	承受水浮力的桩基础	871
15.4	承受水平荷载的桩基础	881
15.5	桩基础施工	898
第 16 章	沉箱与沉井	966
16.1	概述	966
16.2	沉井与沉箱的分类	967
16.3	沉井与沉箱的设计	969
16.4	沉井的施工	983
16.5	沉箱的施工	1003
16.6	沉井与沉箱对周边环境的影响	1029
16.7	工程实例	1031
第 17 章	边坡工程	1048
17.1	概述	1048
17.2	边坡工程勘察	1049
17.3	土质边坡稳定性分析	1051
17.4	土压力计算	1059
17.5	重力式挡土墙的设计与计算	1064
17.6	桩锚挡土结构体系	1070
17.7	岩石边坡稳定性分析与支护	1079
17.8	崩塌的防治	1090
17.9	边坡工程信息法施工	1094

第 18 章 基坑工程	1099
18.1 基坑工程的特点和设计要求	1099
18.2 基坑支护结构的类型	1101
18.3 基坑工程的勘察与环境调查	1103
18.4 土压力与水压力	1104
18.5 基坑稳定性	1109
18.6 放坡开挖	1114
18.7 支挡式支护结构计算	1115
18.8 支护结构的内支撑体系	1124
18.9 预应力锚杆	1128
18.10 水泥土重力式墙支护结构.....	1134
18.11 土钉墙.....	1138
18.12 基坑工程逆作法.....	1147
18.13 地下水控制.....	1152
18.14 基坑工程的变形分析.....	1156
18.15 基坑开挖与施工监测.....	1164
第 19 章 地基处理	1170
19.1 概述	1170
19.2 换填垫层	1188
19.3 预压地基	1192
19.4 压实、夯实、挤密地基	1199
19.5 复合地基	1215
19.6 注浆加固	1222
第 20 章 地下连续墙与逆作法	1228
20.1 概述	1228
20.2 地下连续墙	1229
20.3 地下连续墙作为围护结构的逆作法工程实例	1232
20.4 地下连续墙与地下室逆作法的施工工法	1248
第 21 章 地下水	1267
21.1 地下水类型与流动特点	1267
21.2 地下水渗流分析	1272
21.3 地下水勘察与试验	1283
21.4 地下水对地基基础工程的影响	1290
21.5 地下水控制工程	1307
第 22 章 检验与监测	1330
22.1 检验	1330
22.2 监测	1379

第1章 岩土的鉴别与工程分类

1.1 概 述

任何工程的承力结构系统都是由上部结构、基础结构和地基三部分组成。上部结构是工程的主体，是根据使用的要求设计的，它本身要能承受自己的重力和外加的荷载（包括动荷载），并通过基础将这些荷载安全地传递给地基。

地基是工程的支承体，接受基础传递来的全部荷载。在保证地基稳定的同时，需满足基础和上层结构的变形不致危及工程安全和正常使用要求；另一方面，地基本身又是个地质体，工程场地会选在人类能够生存的任何地方，如平原、山陵、近海、沼泽、冻土带等，而这些地方的地质构成千差万别。构成地基岩土的工程性质各不相同，对建筑物的承载能力迥然不同，因此，岩土的诊断和工程分类成为工程建设首先需要解决的问题。

1.1.1 岩土的形成

上部结构和基础是工程师设计出来的，其材料如混凝土、钢材等是人工制造，并由工程师选定的。作为地基岩土则完全不同，是在漫长地质时期中自然形成的，工程师只能认识它，利用它，或采用适当方法改造它。因此，首先应当了解岩土的形成过程。

1. 岩石的形成

地球上的一切岩石，按其成因，可归纳为岩浆岩、沉积岩、变质岩三大类。

岩浆侵入地壳或喷出地面冷却凝结形成的岩石称岩浆岩，又称火成岩。侵入地壳形成的称侵入岩；喷出地面形成的称喷出岩。

已有岩石经风化、剥蚀、搬运、沉积、成岩等外力作用形成的岩石称沉积岩。外力作用包括风、流水、冰川等。

先成岩经热力、压力或两者综合作用，使矿物成分和结构构造发生质的变化形成的岩石称变质岩。变质作用有的局部分布，如接触变质；有的大面积分布，如区域变质。

岩石是天然产出的单一矿物或多种矿物的集合体。工程上将各类结构面及其切割岩石构成的地质体称为岩体，岩体突出了各种结构面对岩石工程特性的影响。由于漫长地质历史时期的多次地壳运动，形成了褶皱、断层、节理等各种地质构造，显示出块状、层状、囊状等各种不同的形态，层状岩石又有厚层、薄层和各种不同的倾斜角度（包括水平、垂直和倒转）。

2. 土的形成

地球上的土大部为沉积土，由岩石经风化、剥蚀、搬运、沉积形成，与沉积岩的差别在于未经成岩作用。按外力和沉积环境的不同分为坡积土、洪积土、冲积土、海积土、风积土、湖相沉积土、冰碛土等。

非沉积土有：岩石风化后未经搬运、沉积，原地残留的残积土；主要由腐殖物构成的泥炭土；建筑垃圾、生活垃圾、尾矿、灰渣等固体废弃物构成的人工土；工程建设形成的压实和未经压实的回填土等。

由于成因和形成环境的不同，土体有各种不同的形态，如厚层、薄层、互层、夹层、透镜体等。

岩石和土的形成见图 1.1.1 和表 1.1.1。

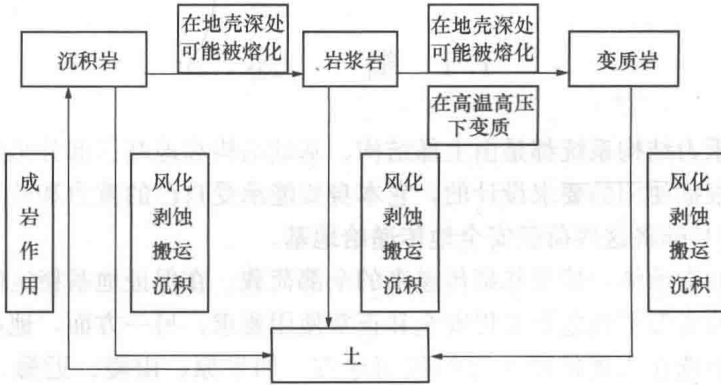


图 1.1.1 岩石和土的地质循环示意图

岩石的风化和土的形成

表 1.1.1

种 类	岩土状态	描 述	
岩石	新鲜岩石	完整的	未风化、未破裂
		有损伤的	未风化、破裂成块、不连续
过渡性岩石	被分解的岩石	完整的	风化，岩石仍保持其结构及组成，但矿物构成有变化，且其实体软化
		有损伤的	风化、软化、变质、破裂并出现不连续性
土	残积土	岩土继续分解，使大多数矿物成分改变，但结构保持原状或不分离	
	沉积土	残积土扰动搬运过程中，矿物颗粒离散混杂分选，分选程度随搬运模式（如：风、水、重力、冰川等）而异	
有机物	煤、油、气	埋藏的动、植物原地分解，形成有机质沉积，如：煤、油、气及其他有机物质	

表 1.1.1 中的过渡性岩土是指界于岩石和土之间，似岩非岩，似土非土，包括风化、构造作用改造的岩石和新生代沉积的半成岩，如强风化岩、全风化岩、破碎岩、极破碎岩、软岩、极软岩。

1.1.2 岩土的复杂多变性

由于岩土为漫长地质历史时期自然形成，故具有复杂多变性，包括地质结构的复杂多变和岩土材料的复杂多变。前者需通过地质勘探查明，后者需通过岩土试验测定。

岩体地质条件对工程影响较大的是软夹层和破碎带，可溶性岩石中的溶洞更是工程的“陷阱”，必须查明而又很难查明。土体地质条件对工程影响较大的是软夹层、水平方向突变和透镜体，需增加勘探手段和密度查明。

岩土参数的测试有较大难度，其原因：一是取样扰动，严重影响试验的质量；二是试

样尺寸太小,代表性不足;三是即使同一岩土层,其性质也是有差别的。与混凝土、钢材等人工材料不同,人工材料测试结果的变异性是较为单一的随机性;而岩土材料除了与人工材料同样的随机性外,还随位置的不同而不同。同一层岩土,随位置的改变指标也会变化,必须取得一定数量的测试成果,经统计分析给出代表值。

由于岩土中孔隙和裂隙的存在,多数情况存在透水性(也称渗透性)。但透水性的差别非常大,致密岩石不透水,黏土的透水性极小,而溶洞和宽裂隙、碎石土,透水性很强。

1.1.3 岩土工程分类的原则

工程分类是为工程建设服务的分类,工程上最关心的是岩土的强度、变形和渗透特征。因此工程分类既要简便易行,又要体现岩土这三大力学性质。

岩土作为工程地基,主要着眼于它的承载力、变形性质、透水性能以及它在自然环境和人类活动影响下的稳定性等问题。这需要针对岩土的特点、类型进行分类。这种分类不宜采用单一的分类方法,而应根据各种地基的工程要求和岩土各种特性确定分类的指标和等级,以便在勘察工作中做出正确的评价,在设计工作中确定参数以及在施工方面采取合理正确的措施。

岩土作为工程的支承体基本分为三大类型:即岩石地基(岩体)、砂卵石地基(无黏性土)、粉土和黏性土地基(可塑或低塑性土)。它们不论在组织结构方面、相态方面、强度及变形方面都是很复杂的,而且存在着历史的变异性。因此,岩土分类指标采用数据统计、经验总结及合理的理论估算。选定的参数是概括性的代表值,使用时应掌握其基本机理及性状,而不拘泥于细小的数值差别。

岩石除了工程分类外,还有地质分类,即岩石学分类,这是不可或缺的基础性分类,将在1.3节中阐述。

岩石的坚硬程度直接体现岩石的强度和变形特征,越硬强度越高,变形模量越大,这是显而易见的。岩体中有或密或稀、或宽或窄的裂隙,裂隙破坏了岩体的完整性,降低了强度和变形模量,增加了透水性,也必须充分关注。因此,规范将岩石的坚硬程度和岩体的完整程度作为工程分类的主要因素。

土的工程分类首先按颗粒粗细分为粗粒土(包括碎石土和砂土)和细粒土(包括粉土和黏性土)。这是因为:从土的渗透性角度考虑,粗粒土的渗透系数比细粒土高几个数量级,越粗渗透系数越大。从土的强度角度考虑,粗粒土只有内摩擦角,没有黏聚力,且颗粒越粗,内摩擦角越大;细粒土则兼有内摩擦角和黏聚力,且黏性越大,黏聚力越占主要地位。从土的变形角度考虑,粗粒土在压力作用下变形较小,且很快完成;而细粒土变形较大,且需长时间才能完成。

此外,还存在各种各样性质特殊的岩土,如软土、湿陷性土、膨胀岩土、红黏土、冻土、盐渍岩土、混合土、污染土等,称特殊岩土,专门分出,以便针对其特殊性质重点试验研究,并在工程设计时采取专门措施。这是我国岩土工程分类的重要特色。

1.1.4 岩土的鉴定

为了确定岩石的名称,进行地质分类,需鉴定岩石的结构和矿物成分。对于岩土工程,主要借助目力鉴别,必要时才进行镜下鉴定。所谓目力鉴别是指主要依靠肉眼,有时

借助放大镜、小刀、稀盐酸等简易工具。鉴定砂岩、泥岩、石灰岩等沉积岩一般不会有什
么问题。对于结构和矿物成分比较复杂的岩浆岩、变质岩，有时目力难以鉴定，可借助偏
光显微镜进行镜下鉴定。

岩石工程分类的主要因素是坚硬程度和完整程度，勘察人员通过野外观察即可作出初
步判断。坚硬程度的定量指标是饱和单轴抗压强度，需取样试验；完整程度的定量指标是
岩块波速和岩体波速，需取样进行波速测试和在野外进行岩体波速测试。

土的工程分类也是首先由勘察人员进行目力鉴别，然后根据分类指标进行校核。砂土
主要是颗粒分析，粉土和黏性土主要是阿太堡界限（液限和塑限）。当需鉴定碎石土、砂
土的密实度时，则需进行标准贯入试验或动力触探试验等。

1.2 岩土物理性指标与分类指标

1.2.1 岩土三相关系

岩石和土一般由固体矿物（岩土实体）、气体和水三相组成，当孔隙被水完全充满时，
则由固相和液相两相组成。图 1.2.1 为土的三相示意。

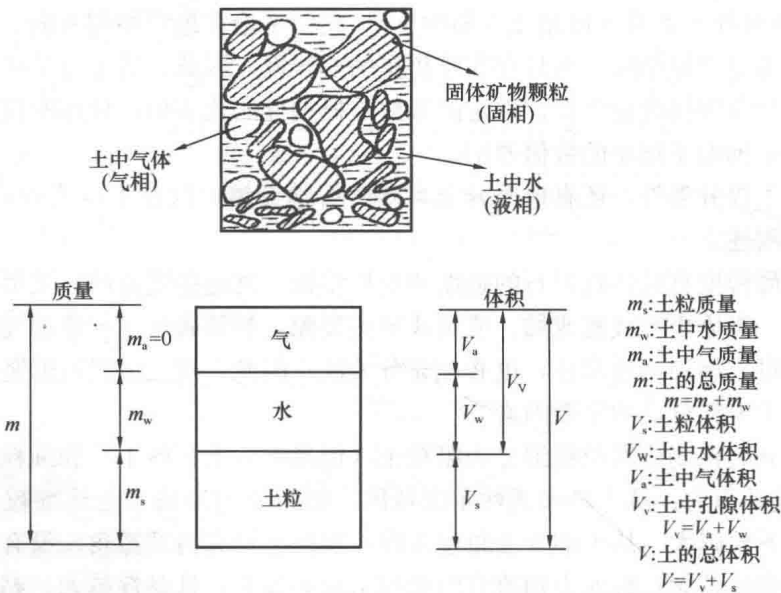


图 1.2.1 岩土体中固体、液体、气体含量分解图

土的三相关系中，由液相和气相组成的孔隙互相贯通，固相呈互不连接的大小不同的
颗粒形态，如图 1.2.1 所示。岩石的三相关系中，固相一般互相连接，由液相和气相组成
的孔隙则不一定贯通，但由于岩体存在结构面，岩石被结构面分割成不连续体。结构面问
题将在 1.2.3 节中阐述，本节和 1.2.2 节阐述的是岩块的基本物理性指标。

1.2.2 岩土基本物理性指标

1. 岩土物理指标的意义和测试方法

岩土物理指标的名称、物理意义和测试方法见表 1.2.1。

指标的名称、物理意义及测试方法

表 1.2.1

指标名称	符号	单位	物理意义	测求方法
颗粒比重 (土粒相对密度)	$G_s (d_s)$		岩土固体质量与 4℃ 纯水质量之比	试验室直接测定
天然密度	ρ	g/cm ³	岩土总质量与总体积之比	试验室直接测定
干密度	ρ_d	g/cm ³	岩土实体质量与总体积之比	计算求得
饱和密度	ρ_{sat}	g/cm ³	岩土饱水质量与总体积之比	计算求得
浮密度 (有效密度)	ρ'	g/cm ³	岩土实体密度与同体积水密度之差	计算求得
含水量	w	%	水质量与固体质量的比值, 以百分数计	试验室直接测定
饱和度	S_r	%	土中水的体积与土中孔隙体积之比, 以百分数计	计算求得
孔隙率	n	%	土中孔隙体积与土的总体积之比, 以百分数计	计算求得
孔隙比	e		土中孔隙体积与土粒体积之比, 以百分数计	计算求得

以上各项指标中, 颗粒比重又称颗粒相对密度; 浮密度又称有效密度; 含水量又称含水率; 岩石的天然密度称块体密度; 对于岩石, 饱和密度和浮密度一般不用。

2. 颗粒比重 (G_s)

颗粒比重多用颗粒相对密度 (d_s) 表示, 为岩土实体中的各种矿物的混合比重, 绝大多数岩矿比重在 2.65~2.80, 少数重矿物如: 重金属矿 (barblend)、辉石 (augute) 及赤铁矿 (hematite) 等比重在 3.0~5.0, 而火山岩 (tuff)、页岩 (shale) 等的比重仅 1.4~2.4。 G_s 为物理性指标计算中的基本参数。

3. 岩土密度 (ρ)

岩土工程设计时, 密度主要用作岩土体重力计算, 故常使用重力密度 (简称重度), 其代号为 γ 。它是随其中土粒比重及密实程度而不同, 也因含水量的大小而变化, 在计算地下水位以上的土重时, 应采用天然重度 (γ), 在地下水位以下的土体重力应减去水的浮力, 是为浮重度 (γ')。土体干燥时的重力密度称为干重度 (γ_d), 它可衡量土的实际密实程度。一般岩土干重度 γ_d 为 20kN/cm³~30kN/cm³, 土的干重度 (γ_d) 为 12.5 kN/cm³~18.0kN/cm³, 而有的有机质淤泥 γ_d 仅 9.0kN。

4. 孔隙率 (n) 与孔隙比 (e)

岩石中含有的孔隙量取决于形成时的环境。缓慢冷却的岩浆岩凝结后几乎无孔隙; 而急速冷却的岩浆, 气体来不及逸出而生成气孔状岩石。岩石的孔隙率与岩石中的胶结物含量、沉积颗粒大小及颗粒的排列有关, 其值的大致范围如下:

致密岩石	0.1%~0.5%
中等岩石	0.5%~5%
风化岩石	5%~30%

开裂破碎岩石难以确定, 一般依据其透水情况估计。

土的孔隙率与其沉积条件、颗粒大小和级配的均匀性有关。黏性土更与其矿物成分的

特性和沉积条件及应力历史有关，一般为 30%~60%。由于土的孔隙率大，土粒间结合力小，在自重和外力影响下，变形较大。土体的压密基本上就是孔隙率的减小。为了计算方便，一般用孔隙比 (e) 这个指标来反映。因此，土的孔隙比在土的应力应变计算中具有十分重要的地位。

土的孔隙比 e 值：砂 0.5~1.0，黏性土 0.55~1.2，淤泥质土及红黏土可达 2.00。

5. 含水量 (w) 和饱和度 (S_r)

岩土中的含水量是随着外部气候条件、地下水的变化而变化的，它的含量对土体结构强度、固结速度及冻害有很大影响。

饱和度就是土体中水分所占的体积与总孔隙体积之比，当岩土中孔隙完全无水时饱和度为 0，孔隙完全为水充填时，即成饱和状态，饱和度为 100%。在饱和情况下，土体受压后除非水能从孔隙中排出，否则认为土体是不可压缩的。

6. 饱和密度 (ρ_{sat})

土的孔隙完全被水充满时的密度称为饱和密度，即土的孔隙中全部充满液态水时的单位体积质量，可用 ρ_{sat} 表示：

土的饱和密度由公式计算：

$$\rho_{sat} = (m_s + V_v \times \rho_w) / V \quad (1.2.1)$$

7. 土的基本物理指标之间的相互关系

土的基本物理指标之间的相互关系见表 1.2.2。

1.2.3 细粒土的黏性和胶结

细粒土以可塑性（液限、塑限、塑性指数）为分类指标，可塑性与黏性直接有关，黏性越大，可塑性越高。因此，了解细粒土黏性的来源很有必要。粗粒土的胶结作用显而易见；细粒土的胶结作用则不易察觉，需予适当说明。

1. 黏粒的比表面积与电化学引力

土粒的表面积与体积之比称为比表面积，土粒越细，比表面积越大。公式计算比表面积时，假设土粒为球体，而实际上黏粒多为鳞片状或针叶状，故实际比表面积比计算值大得多。

土粒表面具有静电荷，土粒面上为 O^{-2} 或 OH^{-} 的负电荷，而在土粒的边角处为正电荷。当土粒十分微小时，这种电化学力比土的重力显著得多。电化学引力与土的比表面积成正比，比表面积越大，静电键形成的结合力越大，这是细粒土黏聚力的基本来源。

图 1.2.2 表示不同粒径土粒积聚时的不同结构；其中：

图 1.2.2 (a) 为砂粒结构。颗粒靠自身重力相互支撑，疏松时孔隙大，密实时颗粒相互镶嵌，孔隙减小。

图 1.2.2 (b) 为黏粒结构。由于土粒扁平，土粒表面的静电键形成相邻土粒的面和边角的结合，而使土粒间造成蜂窝状结构。图为单一的蜂窝状构。受力后，蜂窝状结构逐渐压扁，黏粒趋于平行排列，密度增大。

图 1.2.2 (c) 为粉土质黏土结构。当黏土中混有粉粒和砂粒时，黏粒常依附于分散的粉粒四周，或者许多黏粒蜂窝架构组成团粒结构。这类结构多种多样，导致黏性土组织的复杂性。不少学者提出各种各样的模型，所谓蜂窝状、凝絮状、海绵状、叠片状以及具

表 1.2.2

土的基本物理性质指标换算公式

已知指标	所求指标						
	含水量 w (%)	相对密度 d_s	密度 ρ	干密度 ρ_d	孔隙比 e	孔隙率 n (%)	饱和度 S_r (%)
w, d_s, ρ			$(1+0.01w)\rho_d$	$\frac{\rho}{1+0.01w}$	$\frac{d_s \rho_w (1+0.01w)}{\rho} - 1$	$100 - \frac{100\rho}{d_s \rho_w (1+0.01w)}$	$\frac{w d_s \rho}{d_s \rho_w (1+0.01w) - \rho}$
w, d_s, ρ_d					$\frac{d_s \rho_w}{\rho_d} - 1$	$100 - \frac{100\rho_d}{d_s \rho_w}$	$\frac{w d_s \rho_d}{d_s \rho_w - \rho_d}$
w, d_s, e			$\frac{d_s \rho_w (1+0.01w)}{1+e}$	$\frac{d_s \rho_w}{1+e}$		$\frac{100e}{1+e}$	$\frac{w d_s}{e}$
w, d_s, n			$(1+0.01w)(1-0.01n)d_s \rho_w$	$(1-0.01n)d_s \rho_w$	$\frac{n}{100-n}$		$\frac{(100-n)w d_s}{n}$
w, d_s, S_r			$\frac{S_r d_s \rho_w (1+0.01w)}{w d_s + S_r}$	$\frac{S_r d_s \rho_w}{w d_s + S_r}$	$\frac{w d_s}{S_r}$	$\frac{100w d_s}{w d_s + S_r}$	
w, ρ, e		$\frac{(1+e)\rho}{(1+0.01w)\rho_w}$		$\frac{\rho}{1+0.01w}$		$\frac{100e}{1+e}$	$\frac{w(1+e)\rho}{(1+0.01w)e\rho_w}$
w, ρ, n		$\frac{100\rho}{(1+0.01w)(100-n)\rho_w}$		$\frac{\rho}{1+0.01w}$	$\frac{n}{100-n}$		$\frac{100w\rho}{n(1+0.01w)\rho_w}$
w, ρ, S_r		$\frac{S_r \rho}{S_r \rho_w (1+0.01w) - w\rho}$		$\frac{\rho}{1+0.01w}$	$\frac{w\rho}{S_r \rho_w (1+0.01w) - w\rho}$	$\frac{100w\rho}{S_r \rho_w (1+0.01w)}$	
w, ρ_d, e		$\frac{(1+e)\rho_d}{\rho_w}$	$(1+0.01w)\rho_d$			$\frac{100e}{1+e}$	$\frac{w(1+e)\rho_d}{e\rho_w}$
w, ρ_d, n		$\frac{100\rho_d}{(100-n)\rho_w}$	$(1+0.01w)\rho_d$		$\frac{n}{100-n}$		$\frac{100w\rho_d}{n\rho_w}$