

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



TULIXUE DIJI JICHU

土力学地基基础

王铁行 主 编
高永贵 主 审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



TULIXUE DIJI JICHU

土力学地基基础

主 编 王铁行
副主编 刘丽萍 翟聚云
编 写 邢心魁 李 辉
 韩永强 罗少锋
主 审 高永贵



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。全书共分13章，主要内容为土的物理性质及分类、土体渗流、土体中的应力、土的压缩性与地基沉降、土的抗剪强度、地基承载力、土压力与挡土墙、土坡稳定性分析、工程地质勘察、天然地基上的浅基础、桩基础和深基础、地基处理、基坑工程。本书是在广泛吸收国内外优秀教材、研究成果的基础上编写而成的，具有体系完整、内容全面、例题丰富、适应面广的特点。

本书可作为高等院校土木工程、工程管理、水利工程、港口工程、道路工程等专业的教材，也可供土建工程设计和科研人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

土力学地基基础/王铁行主编. —北京: 中国电力出版社, 2009

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-9194-6

I. 土… II. 王… III. ①土力学—高等学校—教材②地基—基础(工程)—高等学校—教材 IV. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 126631 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009年10月第一版 2009年10月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 21.25印张 514千字

定价 34.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神，加强教材建设，确保教材质量，中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校，满足学科发展和人才培养的需求，坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

土力学地基基础在建筑工程、道路工程、水电工程、市政工程等领域均有广泛的应用，是土木工程专业及相关专业学生的必修课程。基于厚基础、宽口径的人才培养模式，针对建筑工程、道路工程、水电工程、市政工程等相关专业的教学大纲，编写了本书。书中系统地介绍了土力学地基基础的知识，既可作为教学用书，也可供广大工程技术人员参考。

本书由王铁行任主编，刘丽萍、翟聚云任副主编，具体编写分工如下：韩永强编写第一章和第五章，李辉编写第二章和第九章，邢心魁编写第三章和第八章，王铁行编写第四章，翟聚云编写第六章和第七章，刘丽萍编写第十、十一、十三章，罗少锋编写第十二章，任海波、赵彦峰完成了部分章节的打字工作。高永贵教授审阅了全书，并提出了宝贵意见，在此衷心致谢。

限于编者水平，不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2009年4月

目 录

前言	
第 1 章 土的物理性质及分类	1
1-1 概述	1
1-2 土的三相组成	2
1-3 土的三相比例指标	7
1-4 无粘性土的密实度	11
1-5 粘性土的物理特征	12
1-6 地基土的分类	15
习题	18
第 2 章 土体渗流	20
2-1 概述	20
2-2 土体渗流基本理论	21
2-3 渗透系数的确定	23
2-4 渗透稳定性	27
习题	31
第 3 章 土体中的应力	32
3-1 概述	32
3-2 土中自重应力	33
3-3 基底压力计算	35
3-4 集中荷载作用下土中应力计算	38
3-5 分布荷载作用下土中应力计算	43
3-6 关于土中附加应力分布规律的讨论	53
习题	56
第 4 章 土的压缩性与地基沉降	57
4-1 概述	57
4-2 土的压缩性	58
4-3 地基沉降的弹性力学方法	63
4-4 传统单向压缩分层总和法	66
4-5 规范法计算地基沉降	69
4-6 考虑应力历史的单向压缩分层总和法	75
4-7 地基变形与时间的关系 (渗透固结理论)	80
4-8 饱和粘性土地基沉降发展过程	86
习题	88

第 5 章 土的抗剪强度	90
5-1 概述	90
5-2 土的破坏准则	90
5-3 土的抗剪强度测试方法	93
5-4 饱和粘性土的抗剪强度	97
5-5 无粘性土的抗剪强度	101
习题	102
第 6 章 地基承载力	104
6-1 概述	104
6-2 地基临塑荷载及临界荷载的确定	105
6-3 按理论公式计算地基极限承载力	108
6-4 按规范方法确定地基承载力	115
6-5 按其他方法确定地基承载力	120
习题	122
第 7 章 土压力与挡土墙	124
7-1 土压力的类型	124
7-2 静止土压力计算	125
7-3 朗肯土压力理论	126
7-4 库仑土压力理论	134
7-5 挡土墙设计	140
7-6 重力式挡土墙的构造措施	143
习题	145
第 8 章 土坡稳定性分析	147
8-1 概述	147
8-2 无粘性土坡稳定性分析	149
8-3 粘性土坡的稳定分析	151
习题	155
第 9 章 工程地质勘察	156
9-1 概述	156
9-2 勘察阶段的划分及其任务	158
9-3 工程地质勘察方法	161
9-4 室内试验及其数据统计分析	166
9-5 工程地质勘察报告	168
习题	170
第 10 章 天然地基上的浅基础	171
10-1 概述	171
10-2 浅基础类型	174
10-3 基础的埋置深度	177

10-4	基础底面尺寸的确定	180
10-5	无筋扩展基础设计	187
10-6	钢筋混凝土扩展基础设计	190
10-7	地基、基础与上部结构相互作用的概念	198
10-8	柱下条形基础及十字交叉基础	201
10-9	筏形基础设计	214
10-10	箱形基础	219
10-11	减小不均匀沉降危害的措施	224
	习题	227
第 11 章	桩基础和深基础	230
11-1	概述	230
11-2	桩基础的类型	232
11-3	单桩竖向极限承载力	238
11-4	复合基桩竖向承载力验算	247
11-5	桩基础的沉降验算	252
11-6	单桩水平承载力	255
11-7	桩基础的设计步骤	260
11-8	软土地基减沉复合疏桩基础计算	269
11-9	深基础简介	270
	习题	278
第 12 章	地基处理	280
12-1	概述	280
12-2	复合地基	283
12-3	换填法设计	286
12-4	强夯法	290
12-5	砂石桩法	292
12-6	预压法设计	295
12-7	水泥土搅拌法	302
12-8	高压喷射注浆法	304
12-9	土(灰土)挤密桩	306
12-10	水泥粉煤灰碎石桩	308
	习题	310
第 13 章	基坑工程	311
13-1	概述	311
13-2	板桩墙支护结构内力计算	316
13-3	基坑稳定性分析	324
	习题	326
	参考文献	328

第 1 章 土的物理性质及分类

1-1 概 述

土是岩石在风化作用下形成的颗粒状沉积物。岩石风化成的颗粒在各种地质条件下沉积,形成土层。沉积过程土颗粒之间的相互排列和连接形式称为土的结构。土的结构形式分为三种:

(1) 单粒结构:粗颗粒土(如卵石和砂土等)在沉积过程中,每一个颗粒在自重作用下单独下沉并达到稳定状态,颗粒之间几乎无联系力,只是在重力作用下的简单堆积,如图 1-1(a)所示。

(2) 蜂窝结构:当较细土颗粒(粒径在 0.02mm 以下)在水中单个下沉,碰到已沉积的土粒,因土粒之间的分子引力大于土粒自重,则下沉的土粒被吸引不再下沉。依次一粒粒被吸引,形成具有很大孔隙的蜂窝状结构,如图 1-1(b)所示。

(3) 絮状结构:那些粒径极细的粘土颗粒(粒径小于 0.005mm)在水中长期悬浮,这种土粒在水中运动,相互碰撞而吸引逐渐形成小链环状的土集粒,质量增大而下沉,当一个小链环碰到另一小链环时相互吸引,不断扩大形成大链环状,称为絮状结构。因小链环中已有孔隙,大链环中又有更大孔隙,形象地称为二级蜂窝结构,此种絮状结构在海相沉积粘土中常见,如图 1-1(c)所示。

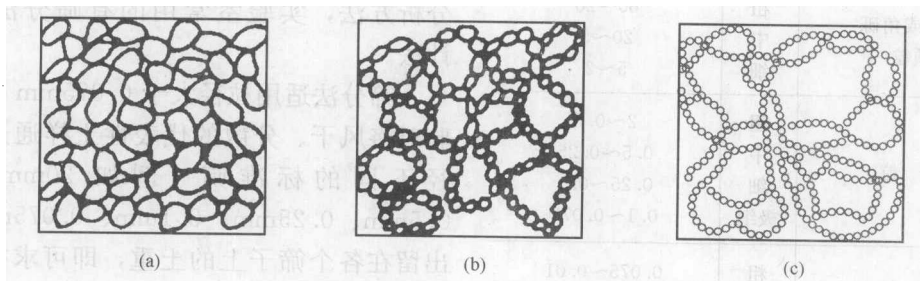


图 1-1 土的结构

以上三种结构中,以密实的单粒结构工程性质最好,蜂窝结构与絮状结构如被扰动破坏天然结构,则强度低、压缩性高,一般不可用作天然地基。

不论哪种结构形式,构成土骨架的固态颗粒之间存在孔隙,孔隙中存在水和气体,土是由颗粒(固相)、水(液相)和气(气相)所组成的三相体系。各种土的颗粒大小和矿物成分差别很大,土的三相间的数量比例也不尽相同,而且土粒与其周围的水又发生了复杂的物理化学作用。所以,研究土的性质就必须了解土的三相组成以及在天然状态下土的结构和构造等特征,必须研究土轻重、松密、干湿、软硬等一系列物理性质和状态。土的物理性质又在一定程度上决定了土的力学性质,所以物理性质是土的最基本的工程特性。

在实际工程中,不但要知道土的物理性质及其变化规律,而且还必须掌握表示土的物理性质的各种指标的测定方法和指标间的相互换算关系,并熟悉土的分类方法。

1-2 土的三相组成

一、土的固体颗粒

在自然界中存在的土，都是由大小不同的土粒组成的。土中的固体颗粒（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。粗大土粒其形状都呈块状或粒状，而细小土粒其形状主要呈片状或针状。

颗粒的大小通常用粒径表示。实际工程中常按粒径大小分组，粒径在某一范围内的分为一组，称为粒组。土粒的粒径由粗到细逐渐变化时，土体性质相应地发生变化，例如土的性质随着粒径的变细可由无粘性变化到粘性。因而，可以将土中各种不同粒径的土粒，按适当的粒径范围，分为若干粒组。划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。目前土的粒组划分方法并不完全一致，表 1-1 提供的是一种常用的土粒粒组的划分方法，表中根据界限粒径 200mm、60mm、2mm、0.075mm 和 0.005mm 把土粒分为六大粒组：漂石（块石）颗粒、卵石（碎石）颗粒、圆砾（角砾）颗粒、砂粒、粉粒及粘粒。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。

表 1-1 土粒粒组划分

粒组名称		粒径范围 (mm)
漂石或块石颗粒		>200
卵石或碎石颗粒		200~60
圆砾或角砾 颗粒	粗	60~20
	中	20~5
	细	5~2
砂粒	粗	2~0.5
	中	0.5~0.25
	细	0.25~0.1
	极细	0.1~0.075
粉粒	粗	0.075~0.01
	细	0.01~0.005
粘粒		<0.005

土体中土粒的大小及其组成情况，通常以土中各个粒组的相对含量（各粒组占土粒总量的百分数）来表示，称为土的颗粒级配。要确定各粒组的相对含量，需要将各粒组分离开，分别称重。这就是工程中常用的颗粒分析方法，实验室常用的有筛分法和比重计法。

筛分法适用粒径大于 0.075mm 的土。试验时将风干、分散的代表性土样通过一套孔径不同的标准筛（例如 20mm、2mm、0.5mm、0.25mm、0.1mm、0.075mm），称出留在各个筛子上的土重，即可求得各个粒组的相对含量。

比重计法适用于粒径小于 0.075mm 的土。基本原理是颗粒在水中下沉速度与粒径的平方成正比，粗颗粒下沉速度快，细颗粒下沉速度慢。根据下沉速度就可以将颗粒按粒径大小分组（详见土工试验书籍）。

当土中含有颗粒粒径大于 0.075mm 和小于 0.075mm 的土粒时，可以联合使用比重计法和筛分法。

根据颗粒大小分析试验成果，可以绘制如图 1-2 所示的颗粒级配累积曲线。其横坐标表示粒径，纵坐标则表示小于（或大于）某粒径的土重含量（或称累计百分含量）。因为土粒粒径相差常在百倍、千倍以上，所以横坐标宜采用对数坐标表示。由曲线的坡度可以大致判断土的均匀程度。如曲线较陡，则表示粒径大小相差不多，土粒较均匀；反之，曲线平缓，则表示粒径大小相差悬殊，土粒不均匀，即级配良好。

颗粒级配曲线在土木、水利电力等工程中经常用到。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。其中一些特征粒径，可作为选择建筑材料的依据，并评价土的级配优劣。特征粒径有： d_{10} 、 d_{30} 和 d_{60} 。小于某粒径的土粒质量累计百分数为10%时，相应的粒径称为有效粒径 d_{10} 。小于某粒径的土粒质量累计百分数为30%时的粒径用 d_{30} 表示。当小于某粒径的土粒质量累计百分数为60%时，该粒径称为限定粒径 d_{60} 。采用特征粒径，可确定两个评价指标：不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 。

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

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

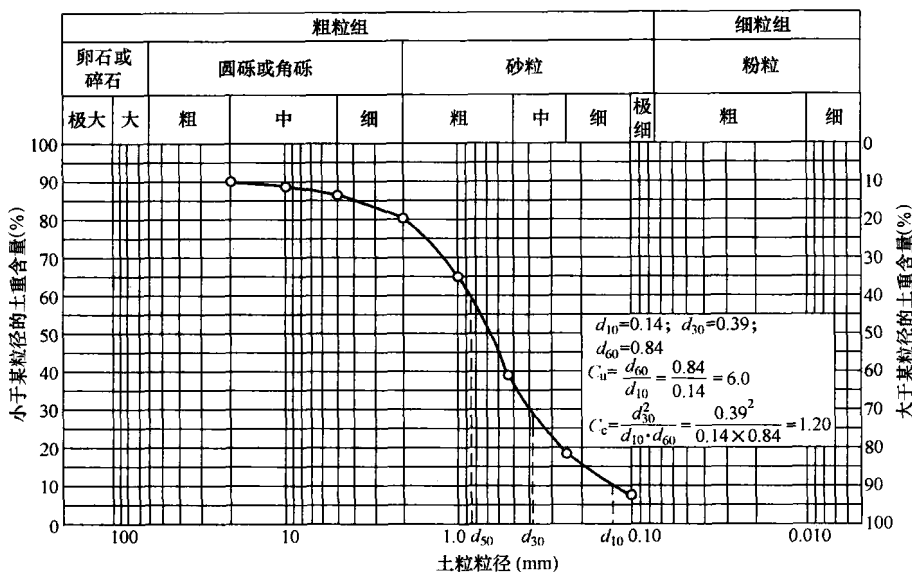


图 1-2 颗粒级配累积曲线

不均匀系数 C_u 反映大小不同粒组的分布情况。若土的颗粒级配曲线是连续的， C_u 愈大， d_{60} 与 d_{10} 相距愈远，则曲线愈平缓，表示土中的粒组变化范围宽，土粒不均匀；反之， C_u 愈小， d_{60} 与 d_{10} 相距愈近，曲线愈陡，表示土中的粒组变化范围窄，土粒均匀。 C_u 越大表示土粒大小的分布范围越大，其级配越好，作为填方工程的土料时，则比较容易获得较大的密实度。在一般情况下，工程上把 $C_u < 5$ 的土看作是均粒土，属级配不良； $C_u > 10$ 的土，属级配良好。

曲率系数 C_c 描写的是累积曲线的整体形状。若土的颗粒级配曲线不连续，表明土体中各粒组分布不均衡，如在该曲线上出现水平段，水平段粒组范围颗粒缺失。这种土缺少中间某些粒径，粒径级配曲线呈台阶状，土的组成特征是颗粒粗的较粗，细的较细，在同样的压实条件下，密实度不如级配连续的土高。经验表明，当级配连续时， C_c 的范围为1~3。因此，当 $C_c < 1$ 或 $C_c > 3$ 时，均表示级配曲线不连续。因此，单独只用一个指标 C_u 来确定土的级配情况是不够的，要同时考虑累积曲线的整体形状，所以需参考曲率系数 C_c 值。一般认为：砾类土或砂类土同时满足 $C_u \geq 5$ 和 $C_c = 1 \sim 3$ 两个条件时，则定名为良好级配砾或良好级配砂。

颗粒级配可以在一定程度上反映土的某些性质。对于级配良好的土，较粗颗粒间的孔隙被较细的颗粒所填充，因而土的密实度较好，相应的地基土的强度和稳定性也较好，透水性和压缩性也较小，可用作堤坝或其他土建工程的填方土料。

土粒的矿物成分主要决定于母岩的成分及其所经受的风化作用。不同的矿物成分对土的性质有着不同的影响，其中以粘粒组的矿物成分尤为重要。漂石、卵石、圆砾等粗大土粒都是岩石的碎屑，它们的矿物成分与母岩相同。砂粒大部分是母岩中的单矿物颗粒，如石英、长石和云母等。其中石英的抗化学风化能力强，在砂粒中尤为多见。粉粒的矿物成分是多样性的，主要是石英和 $MgCO_3$ 、 $CaCO_3$ 等难溶盐的颗粒。

粘粒的矿物成分主要是有粘土矿物、氧化物、氢氧化物和各种难溶盐类（如碳酸钙等），它们都是次生矿物。粘土矿物的颗粒很微小，在电子显微镜下观察到的形状为鳞片状或片状，经 X 射线分析证明其内部具有层状晶体构造。粘土矿物基本上是由两种原子层（称为晶片）构成的。一种是硅氧晶片，它的基本单元是 Si-O 四面体；另一种是铝氢氧晶片，它的基本单元是 Al-OH 八面体（图 1-3）。由于晶片结合情况的不同，便形成了具有不同性质的各种粘土矿物。其中主要有蒙脱石、伊利石和高岭石三类。

蒙脱石是化学风化的初期产物，其结构单元（晶胞）是两层硅氧晶片之间夹一层铝氢氧晶片所组成的。由于晶胞的两个面都是氧原子，期间没有氢键，因此联结很弱 [图 1-4 (a)]，水分子可以进入晶胞之间，从而改变晶胞之间的距离，甚至达到完全分散到单晶胞为止。因此当土中蒙脱石含量较大时，则具有较大的吸水膨胀和脱水收缩的特性。

伊利石的结构单元类似于蒙脱石，所不同的是 Si-O 四面体中的 Si^{4+} 可以被 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 所取代，因而在相邻晶胞间将出现若干一价正离子（ K^+ ）以补偿晶胞中正电荷的不足 [图 1-4 (b)]。所以伊利石的结晶构造没有蒙脱石那样活动，其亲水性不如蒙脱石。

高岭石的结构单元是由一层铝氢氧晶片和一层硅氧晶片组成的晶胞。高岭石的矿物就是由若干重叠的晶胞构成的 [图 1-4 (c)]。这种晶胞一面露出氢氧基，另一面则露出氧原子。晶胞之间的联结是氧原子与氢氧基之间的氢键，它具有较强的联结力，因此晶胞之间的距离不易改变，水分子不能进入，因此它的亲水性比伊利石还小。

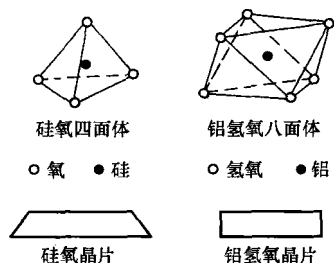


图 1-3 粘土矿物微晶片示意图

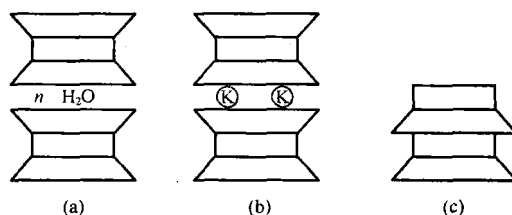


图 1-4 粘土矿物构造单元示意图

(a) 蒙脱石；(b) 伊利石；(c) 高岭石

由于粘土矿物颗粒是很细小的扁平颗粒，颗粒表面具有很强的与水相互作用的能力，表面积愈大，这种能力就愈强。除粘土矿物外，粘粒组中还包括有氢氧化物和腐殖质等胶态物质。如含水氧化铁，它在土层中分布很广，是地壳表层的含铁矿物质分解的最后产物，使土呈现红色或褐色。土中胶态腐殖质的颗粒更小，能吸附大量水分子（亲水性强）。由于土中

胶态腐殖质的存在，使土具有高塑性、膨胀性和粘性，这对工程建设是不利的。

二、土中水

在自然条件下，土中总是含水的。土中水可以处于液态、固态或气态。土中水含量不同，土的性质就不同。土中的液体一部分存在于土颗粒的周围，受到土颗粒的约束力，形成结合水；另一部分是存在于土颗粒的孔隙中不受土颗粒的约束，能够自由流动的水，形成自由水。

(一) 结合水（吸附水）

结合水是指受电分子吸引力吸附于土粒表面的土中水。这种电分子吸引力高达几万个大气压，使水分子和土粒表面牢固地粘结在一起。由于土粒（矿物颗粒）表面一般带有负电荷，围绕土粒形成电场，在土粒电场范围内的水分子和水溶液中的阳离子（ Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 等）一起吸附在土粒表面。因为水分子是极性分子（氢原子端显正电荷，氧原子端显负电荷），它被土粒表面电荷或水溶液中离子电荷的吸引而定向排列（图1-5）。土粒周围水溶液中的阳离子，一方面受到土粒所形成电场的静电引力作用，另一方面又受到布朗运动（热运动）的扩散力作用。在最靠近土粒表面处，静电引力最强，把水化离子和极性水分子，牢固吸附在颗粒表面上形成固定层。在固定层外围，静电引力比较小，因此水化离子和极性水分子的活动性比固定层中大些，形成扩散层。固定层和扩散层中所含的阳离子（反离子）与土粒表面负电荷一起即构成双电层（图1-5）。

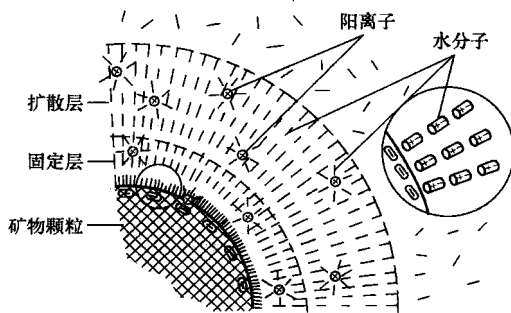


图1-5 结合水分子定向排列示意图

水溶液中的反离子（阳离子）的原子价愈高，它与土粒之间的静电引力愈强，则扩散层厚度愈薄。在实践中可以利用这种原理来改良土质，例如用三价及二价离子（如 Fe^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{3+} ）处理粘土，使得它的扩散层变薄，从而增加土的稳定性，减少膨胀性，提高土的强度；有时，可用含一价离子的盐溶液处理粘土，使扩散层增厚，而大大降低土的透水性。

从上述双电层的概念可知，反离子层中的结合水分子和交换离子，愈靠近土粒表面，则排列得愈密和整齐，活动性也愈小。因而，结合水又可以分为强结合水和弱结合水两种。强结合水是相当于反离子层的内层（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

强结合水是指紧靠土粒表面的结合水。它的特征是：没有溶解盐类的能力，不能传递静水压力，只有吸热变成蒸汽时才能移动。这种水极其牢固地结合在土粒表面上，其性质接近于固体，密度为 $1.2 \sim 2.4 \text{g/cm}^3$ ，冰点为 -78°C ，具有极大的粘滞度、弹性和抗剪强度。如果将干燥的土移到天然湿度的空气中，则土的质量将增加，直到土中吸着的强结合水达到最大吸着度为止。土粒愈细，土的比表面愈大，则最大吸着度就愈大。砂土的最大吸着度约占土粒质量的1%，而粘土则可达17%。粘土中只含有强结合水时，呈固体状态，磨碎后则呈粉末状态。

2. 弱结合水

弱结合水紧靠于强结合水的外围形成一层结合水膜。它仍然不能传递静水压力，但水膜较厚的弱结合水能向邻近的较薄的水膜缓慢转移。当土中含有较多的弱结合水时，土则具有一定的可塑性。砂土比表面较小，几乎不具可塑性，而粘性土的比表面较大，其可塑性范围就大。弱结合水离土粒表面愈远，其受到的电分子吸引力愈弱小，并逐渐过渡到自由水。

(二) 自由水

自由水是存在于土粒表面电场影响范围以外的水。它的性质和普通水一样，能传递静水压力，冰点为 0°C ，有溶解能力。自由水按其移动所受作用力的不同，可以分为重力水和毛细水。

重力水是存在于地下水位以下的透水土层中的地下水，它是在重力或压力差作用下运动的自由水，对土粒有浮力作用。毛细水是受到水与空气交界面处表面张力作用的自由水。毛细水存在于地下水位以上的透水土层中。毛细水分布在土颗粒间相互连通的弯曲孔道，由于水分子与土颗粒之间的附着力和水、气界面上的表面张力，地下水将沿着这些孔道被吸引上来，而在地下水位以上形成一定高度的毛细管水带，它与土中孔隙的大小、形状、土颗粒的矿物成分以及水的性质有关。毛细水按其与地下水面是否联系可分为毛细悬挂水（与地下水无直接联系）和毛细上升水（与地下水相连）两种。

当土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引力反作用于土粒上，使土粒之间由于这种毛细压力而挤紧，土因而具有微弱的粘聚力，称为毛细粘聚力。在施工现场常常可以看到稍湿状态的砂堆，能保持垂直陡壁达几十厘米高而不坍塌，就是因为砂粒具有毛细粘聚力的缘故。在饱水的砂或干砂中，土粒之间的毛细压力消失，原来的陡壁就变成斜坡。在工程中，要注意毛细上升水的上升高度和速度，因为毛细水的上升对于建筑物地下部分的防潮措施和地基土的浸湿和冻胀等有重要影响。

地面下一定深度的土温，随大气温度而改变。当地层温度降至零摄氏度以下，土体便会因土中水冻结而形成冻土。某些细粒土的冻结时，往往发生体积膨胀，即所谓冻胀现象。土体发生冻胀的机理，主要是由于土层在冻结时，周围未冻区土中的水分向冻结区迁移、集聚所致。弱结合水的外层在 -0.5°C 时冻结，越靠近土粒表面，其冰点越低，在 $-20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 以下才能全部冻结。当大气负温传入土中时，土中的自由水首先冻结成冰晶体，弱结合水的最外层也开始冻结。使冰晶体逐渐扩大，于是冰晶体周围土粒的结合水膜变薄，土粒产生剩余的分子引力；另外，由于结合水膜的变薄，使得水膜中的离子浓度增加，产生了渗透压力，在这两种引力的作用下，下面未冻区水膜较厚处的弱结合水便被上吸到水膜较薄的冻结区，并参与冻结，使冻结区的冰晶体增大，而不平衡引力却继续存在。假使下卧未冻区存在着水源（如地下水位距冻结深度很近）及适当的水源补给通道（即毛细通道），能继续不断地补充到冻结区来，那么，未冻结区的水分，包括弱结合水和自由水，就会继续向冻结区迁移和积聚，使冰晶体不断扩大，在土层中形成冰夹层，土体随之发生隆起，出现冻胀现象。当土层解冻时，土中积聚的冰晶体融化，土体随之下陷，即出现融陷现象。土的冻胀现象和融陷现象是季节性冻土的特性，亦即土的冻胀性。

三、土中气

土中的气体存在于土孔隙中未被水所占据的部位。土中气一般以下面两种形式存在于土中：一种是四周被土颗粒和水封闭的封闭气体，另一种是与大气相通的自由气体。

当土的饱和度较低,土中气体与大气相通时,土体在外力作用下,气体很快从孔隙中排出,土易于压缩,强度和稳定性提高。当土的饱和度较高,土中出现封闭气体时,土体在外力作用下,则气体体积缩小,产生抗力;外力减小,则体积增大。因此,土中封闭气体增加了土的弹性。同时,土中封闭气体的存在还能阻塞土中的渗流通道,减小土的渗透性。

对于淤泥和泥炭等有机质土,由于微生物(嫌气细菌)的分解作用,在土中蓄积了某种可燃气体(如硫化氢、甲烷等),使土层在自重作用下长期得不到压密,而形成高压缩性土层。

1-3 土的三相比例指标

由于土是由固体颗粒、液体和气体三部分组成,各部分含量的比例关系,直接影响土的物理性质和土的状态。例如,同样一种土,松散时强度较低,经过外力压密后,强度会提高。对于粘性土,含水量不同,其性质也有明显差别,含水量多,则软;含水量少,则硬。

土的三相组成部分的质量和体积之间的比例关系,随着各种条件的变化而改变。在土力学中,为进一步描述土的物理力学性质,将土的三相成分比例关系量化,用一些具体的物理量表示,这些物理量就是土三相比例指标。如含水量、密度、土粒比重、孔隙比、孔隙率和饱和度等。

一、指标的定义

为了便于说明和计算,用图1-6示意土的三相组成,图中符号的意义如下:

m_s ——土粒的质量;

m_w ——土中水质量;

m ——土的总质量, $m = m_s + m_w$

V_s ——土粒体积;

V_w ——土中水的体积;

V_a ——土中气体积;

V_v ——土中孔隙体积, $V_v = V_w + V_a$;

V ——土的总体积, $V = V_s + V_w + V_a$ 。

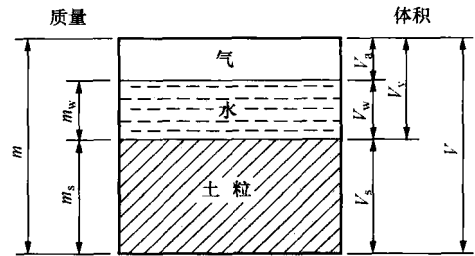


图1-6 土的三相组成示意图

土的三相比例指标有多个,其中,土粒比

重、含水量和密度三个指标是通过试验测定的,其他指标根据这三个指标换算得到。

(一) 土粒比重(土粒相对密度) d_s

单位体积土粒质量与4℃时单位体积纯水质量之比,称为土粒比重(无量纲),即

$$d_s = \frac{m_s}{V_s} \cdot \frac{1}{\rho_{w1}} = \frac{\rho_s}{\rho_{w1}} \quad (1-3)$$

式中 ρ_s ——土粒密度, g/cm^3 ;

ρ_{w1} ——纯水在4℃时的密度(单位体积的质量),等于 $1\text{g}/\text{cm}^3$ 。

实用上,土粒比重在数值上就等于土粒密度,但前者无因次。土粒比重决定于土的矿物成分,它的数值一般为2.6~2.8;有机质土为2.4~2.5;泥炭土为1.5~1.8。同一种类的土,其比重变化幅度很小。

土粒比重可在试验室内用比重瓶法测定。由于比重变化的幅度不大,通常可按经验数值

选用，一般土粒比重参考值见表 1-2。

表 1-2 土粒比重参考

土的名称	砂 土	粉 土	粘 性 土	
			粉质粘土	粘 土
土粒比重	2.65~2.69	2.70~2.71	2.72~2.73	2.74~2.76

(二) 土的含水量 ω

土中水的质量与土粒质量之比，称为土的含水量，以百分数计，即

$$\omega = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (1-4)$$

含水量 ω 是标志土的湿度的一个重要物理指标。天然土层的含水量变化范围很大，它与土的种类、埋藏条件及其所处的自然地理环境等有关。一般干的粗砂土，其值接近于零，而饱和砂土，可达 40%；坚硬的粘性土的含水量约小于 30%，而饱和状态的软粘性土（如淤泥），则可达 60% 或更大。一般说来，同一类土，当其含水量增大时，则其强度就降低。

土的含水量一般用“烘干法”测定。取一定量的土试样（15~30g），先称其湿质量，然后置于烘箱内维持 100~105℃ 烘至恒重，再称干土质量，湿、干土质量之差与干土质量之比值，就是土的含水量。

测定土体含水量的方法还有烧干法、炒干法等其他方法。

(三) 土的密度 ρ

天然土体单位体积的质量称为土的天然密度或土的密度（单位为 g/cm^3 或 t/m^3 ），即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-5)$$

天然状态下土的密度变化范围较大。一般粘性土 $\rho = 1.8 \sim 2.0 \text{g}/\text{cm}^3$ ；砂土 $\rho = 1.6 \sim 2.0 \text{g}/\text{cm}^3$ ；腐殖土 $\rho = 1.5 \sim 1.7 \text{g}/\text{cm}^3$ 。

对于具有粘聚力的土体，其密度一般用环刀法测定。用一个圆环刀放在削平的原状土样上面，徐徐削去环刀外围的土，边削边压，使保持天然状态的土样压满环刀内。称得环刀内土样质量，求得它与环刀容积之比值即为其密度。

对于散体状的土体，其密度一般用灌砂法测定。在散粒体的土体中，按规定挖一直径 150~250mm，深度 200~300mm 的试坑，将挖出的土全部收集并称其质量；用标准砂将试坑填满，称标准砂质量，计算得出试坑体积；试坑挖出全部土质量与其体积之比值即为散粒土密度。

(四) 土的干密度 ρ_d 、饱和密度 ρ_{sat} 和有效密度 ρ'

完全干燥情况下单位体积土体的质量，亦即单位体积土中固体颗粒部分的质量，称为土的干密度 ρ_d ，即

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (1-6)$$

在工程上常把干密度作为评定土紧密程度的标准，以控制填土工程的施工质量。

土体孔隙中充满水时的单位体积质量，称为土的饱和密度 ρ_{sat} ，即

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} \quad (1-7)$$

式中 ρ_w ——水的密度, 近似等于 $\rho_w = 1\text{g/cm}^3$ 。

在地下水水位以下, 单位土体积中土粒的质量扣除同体积水的质量后, 即单位土体积中土粒在水下的质量, 称为土的有效密度 ρ' , 即

$$\rho' = \frac{m_s - V_s \rho_w}{V} \quad (1-8)$$

土的天然重度 γ 、干重度 γ_d 、饱和重度 γ_{sat} , 有效重度 γ' 分别按下列公式计算

$$\gamma = \rho g$$

$$\gamma_d = \rho_d g$$

$$\gamma_{\text{sat}} = \rho_{\text{sat}} g$$

$$\gamma' = \rho' g$$

式中 g ——重力加速度, 重度指标的单位为 kN/m^3 。

(五) 土的孔隙比 e 和孔隙率 n

土的孔隙比是土中孔隙体积与土粒体积之比, 即

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-9)$$

孔隙比用小数表示。它是土重要的物理指标, 可以用来评价天然土层的密实程度。一般 $e < 0.6$ 的土是密实的低压缩性土, $e > 1.0$ 的土是疏松的高压缩性土。

土的孔隙率是土中孔隙所占体积与总体积之比, 以百分数表示, 即

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (1-10)$$

(六) 土的饱和度 S_r

土孔隙中水的体积与孔隙总体积之比, 称为土的饱和度, 以百分数表示, 即

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (1-11)$$

砂土根据饱和度 S_r 的指标值分为稍湿、很湿与饱和三种湿度状态, 其划分标准见表 1-3。

表 1-3 砂类土湿度状态的划分

砂土湿度状态	稍 湿	很 湿	饱 和
饱和度 S_r (%)	$S_r \leq 50$	$50 < S_r \leq 80$	$S_r > 80$

二、指标的换算

上述土的三相比比例指标中, 土粒比重 d_s 、含水量 ω 和密度 ρ 三个指标是通过试验测定的。在测定这三个基本指标后, 可以导得其余各个指标。

常用图 1-7 所示三相图进行各指标间关系的推导, 令 $\rho_{w1} = \rho_w$, 并取 $V_s = 1$, 则 $V_v = e$, $V = 1 + e$, $m_s = V_s d_s \rho_w = d_s \rho_w$, $m_w = \omega m_s = \omega d_s \rho_w$, $m = d_s (1 + \omega) \rho_w$, 于是有

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{d_s (1 + \omega) \rho_w}{1 + e} \quad (1)$$

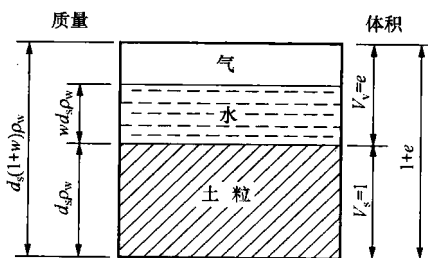


图 1-7 土三相指标换算图

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{d_s \rho_w}{1+e} = \frac{\rho}{1+\omega} \quad (2)$$

$$e = \frac{d_s \rho_w}{\rho_d} - 1 = \frac{d_s (1+\omega) \rho_w}{\rho} - 1 \quad (3)$$

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} = \frac{(d_s + e) \rho_w}{1+e} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \rho' &= \frac{m_s - V_s \rho_w}{V} = \frac{(d_s - 1) \rho_w}{1+e} \\ &= \frac{m_s + V_s \rho_w - V \rho_w}{V} = \rho_{\text{sat}} - \rho_w \end{aligned} \quad (5)$$

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{e}{1+e} \quad (6)$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{m_w}{V_w \rho_w} = \frac{\omega d_s}{e} \quad (7)$$

土的三相比例指标间的换算公式一并列于表 1-4 中。

【例 1-1】 某一原状土样，经试验测得的基本指标值为密度 $\rho = 1.67 \text{g/cm}^3$ ，含水量 $\omega = 12.9\%$ ，土粒比重 $d_s = 2.67$ 。试求孔隙比 e 、孔隙率 n 、饱和度 S_r 、干密度 ρ_d 、饱和密度 ρ_{sat} 以及有效密度 ρ' 。

解 (1) $e = \frac{d_s (1+\omega) \rho_w}{\rho} - 1 = \frac{2.67 (1+0.129)}{1.67} - 1 = 0.805$

(2) $n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.805}{1+0.805} = 44.6\%$

(3) $S_r = \frac{\omega d_s}{e} = \frac{0.129 \times 2.67}{0.805} = 43\%$

(4) $\rho_d = \frac{\rho}{1+\omega} = \frac{1.67}{1+0.129} = 1.48 \text{g/cm}^3$

(5) $\rho_{\text{sat}} = \frac{(d_s + e) \rho_w}{1+e} = \frac{2.67 + 0.805}{1+0.805} = 1.93 \text{g/cm}^3$

(6) $\rho' = \rho_{\text{sat}} - \rho_w = 1.93 - 1 = 0.93 \text{g/cm}^3$

【例 1-2】 某场地土的土粒比重 $d_s = 2.70$ ，孔隙比 $e = 0.9$ ，饱和度 $S_r = 0.35$ ，若保持土体积不变，将其饱和度提高到 0.85，每 1m^3 的土应加多少水？

解 由 $S_r = \frac{\omega d_s}{e}$ ，得

加水前土体含水量为

$$w_1 = \frac{S_{r1} e}{d_s} = \frac{0.35 \times 0.9}{2.7} = 11.7\%$$

加水后土体含水量为

$$w_2 = \frac{S_{r2} e}{d_s} = \frac{0.85 \times 0.9}{2.7} = 28.3\%$$

进一步根据 $\rho = \frac{d_s (1+\omega) \rho_w}{1+e}$ ，得

加水前土体密度为