

职工大学教材

土 力 学

松辽水利水电职工大学 罗家枢 主编

江苏工业学院图书馆
藏书章

水利电力出版社

职工大学教材

水利电力出版社

土 力 学

松辽水利水电职工大学 罗家枢 主编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书简要地介绍了土的物理性质及工程分类，土的渗透性，地基的应力和变形，土的强度，地基承载力，挡土墙土压力，土坡稳定性等的基本理论和地基设计与地基处理的基本原理。

本书为水利水电类职工大学水工专业的教材，也可供水利水电类高等专科学校师生使用和水利水电工程设计及施工技术人员参考。

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 土的形成及基本特性	1
第二节 土的工程用途及可能出现的主要问题	1
第三节 土力学及其发展概况	3
第二章 土的物理性质及工程分类	5
第一节 概述	5
第二节 土的矿物成分和土中的有机质	5
第三节 土的粒组划分与颗粒级配	6
第四节 土中的水	9
第五节 土中的气体	11
第六节 土的结构	11
第七节 土的物理性质指标	13
第八节 土的物理状态指标	17
第九节 土的工程分类	20
第十节 土的压实性	26
思考题	29
习题	29
第三章 土的渗透性	31
第一节 概述	31
第二节 渗透定律	31
第三节 渗透系数的测定	33
第四节 影响渗透性的主要因素	34
第五节 成层土的渗透系数	35
第六节 在静水条件和渗流作用下土的孔隙水应力与有效应力	36
第七节 渗透力与渗透变形	38
第八节 流网在渗流计算中的应用	42
思考题	45
习题	45
第四章 土体中的应力	47
第一节 概述	47
第二节 土体中的自重应力计算	47
第三节 基底压力计算	49
第四节 附加应力计算	52

思考题	69
习题	69
第五章 土的压缩性及基础沉降量计算	71
第一节 概述	71
第二节 土的压缩性及压缩量计算	71
第三节 基础的沉降计算	77
第四节 饱和粘性土地基的单向渗透固结理论	85
思考题	93
习题	93
第六章 土的抗剪强度	95
第一节 概述	95
第二节 直接剪切试验与抗剪强度定律	95
第三节 摩尔-库伦强度准则	98
第四节 三轴剪切试验	102
第五节 总应力强度指标和有效应力强度指标	105
第六节 其他剪切试验方法	106
第七节 土的动力强度概述	108
思考题	109
习题	109
第七章 挡土墙土压力	111
第一节 挡土墙与土压力概述	111
第二节 朗肯土压力理论	113
第三节 库伦土压力理论	121
第四节 朗肯理论与库伦理论的比较	132
第五节 减小主动土压力的措施	132
思考题	134
习题	134
第八章 土坡的稳定性分析	136
第一节 概述	136
第二节 无粘性土土坡的稳定性分析	137
第三节 粘性土土坡的稳定性分析	138
第四节 复合滑动面的土坡稳定性分析	147
第五节 土坡稳定性分析的简单讨论	148
思考题	149
习题	149
第九章 地基承载力	151
第一节 地基承载力和容许承载力的概念	151
第二节 地基剪切破坏的形式	151
第三节 按极限荷载确定地基承载力	153
第四节 按塑性区开展深度确定地基承载力	161

第五节 按原位试验方法确定地基承载力	164
第六节 按规范确定地基容许承载力	167
思考题	169
习题	169
第十章 地基设计与地基处理	170
第一节 概述	170
第二节 天然地基上浅基础的设计程序与方法	170
第三节 桩基础	177
第四节 地基处理	188
思考题	201
习题	201

第一章 绪 论

第一节 土的形成及基本特性

土是岩石风化的产物。地壳表层的岩石，经受长期的风化作用，不断碎裂与分解，形成碎块与细粒——土颗粒。土颗粒或在原地堆积起来或由水力、风力搬运至他处沉积下来，形成各种类型的土。

土是矿物颗粒的松散堆积物，颗粒之间的联结强度远比其他工程材料如钢铁、木材以及混凝土中颗粒间的联结强度为小，甚至没有联结，因此，土具有“松散性”。另外，颗粒之间形成许多孔隙，使土具有“多孔性”。在一般情况下，土中的孔隙由水和空气填充。由于土粒、水和空气是三种不同相的物质，所以土又是由固相（土粒）、液相（水）和气相（空气）组成的多相物体。

土在形成过程中往往经过多次搬运及沉积，而且沉积方式、沉积顺序、沉积范围与厚度、土粒的矿物成分与大小都各不相同，因此，天然土层的分布常常是十分复杂的，即使在同一地区甚至同一地点，地层中可能埋藏有多种土层，而且同一土层的性质也常会因位置或深度而变化。工程技术人员对土的这种复杂性应有充分认识。其次，土的工程性质又常会随温度、湿度、地下水位和压力等外界因素的变化而发生显著变化，故还须注意土的性质易变性。

土在地壳表层分布极广，因而它在工程建筑中的用途也很广。但由于土具有松散性，多孔性，加以天然土层埋藏条件复杂，土的工程性质又易受外界因素影响，所以可能发生一系列的工程问题。本教材力求对基本的土工原理与计算方法作简明介绍，为读者提供研究土的工程特性及解决土工问题的基本理论与方法。

第二节 土的工程用途及可能出现的主要问题

土在工程建筑中被广泛用作各种建筑物的地基、材料和周围介质。

所有建筑物，例如房屋、堤坝、涵洞、渡槽、桥梁等，其全部荷载都由它下面的地层来承担。在地层上修建了建筑物以后，将使地层一定范围内的原有应力状态发生变化。我们把由于承受建筑物荷载而引起原有应力状态发生变化的那部分地层，称为地基。图1-1表示水闸的地基。

建筑物一般都具有上部结构与下部结构。下部结构通常是指建筑物的基础，如图1-1所示水闸的底板，一般埋置在地下，其作用是将建筑物荷载传递到地基中去。

在工程建筑中，土又常是价格最低廉的一种建筑材料。例如采用土料填筑堤坝和路基等土工建筑物。图1-2表示用土料修筑的土坝。

在工程建筑中，还往往需要在天然土层中开挖修建涵洞，隧洞，渠道及各种地下室。形成涵洞、隧洞、渠道或洞室的周围土体，称为建筑工程的周围介质。图1-3(a)、(b)分别为隧洞和渠道的示意图。

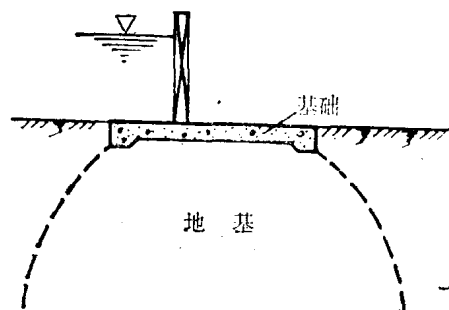


图 1-1 水闸的地基

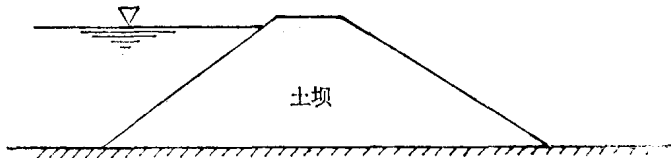


图 1-2 土坝

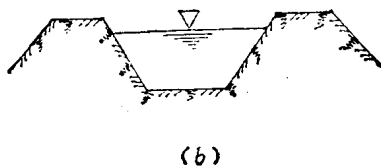
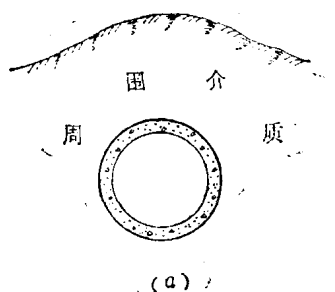


图 1-3 隧洞和渠道
(a)隧洞; (b)渠道

土由于具有多孔性，易透水 and 产生压缩变形；又因具有松散性，土粒间的联结强度低，故抗剪强度较小，易发生滑动破坏。因此，各种建筑物的土质地基，在建筑物荷载作用下，必将产生或大或小的压缩变形，引起建筑物沉降。当荷载较大时，还可能使地基土向一侧或两侧产生剪切滑动，致使地基失去稳定性。在水利工程中，如闸、坝的地基，除有可能出现上述问题以外，还可能由于渗漏而损失大量蓄水，而且渗流产生的渗透力还将引起渗透破坏，招致工程失事。

对于土坝来说，不仅地基可能存在渗漏和渗透破坏问题，坝体也可能存在这类问题，而且还可能因坝坡设计过陡而导致边坡滑动。

隧洞或地下室的周围土体，在其自重及洞内输水或交通荷载等作用下，可能发生压缩变形或剪切破坏，从而使衬砌结构破坏，乃至洞体坍塌。若周围土体还有渗流存在，则这种破坏的可能性更大。

从以上的叙述使我们初步认识到，土是由岩石经风化形成的自然产物，性质复杂多变，修建在土质地基上的建筑物、以土为建筑材料或周围介质的建筑物，如设计有误或考虑不周，可能会由于过度沉降或剪切破坏或渗透破坏而招致失败。因此，必须全面研究土的物理力学性质以及土的变形、强度和稳定问题，以便使地基基础设计能满足以下两个基

本条件：（1）作用于地基的荷载不超过地基的承载能力，保证地基在防止剪切破坏方面有足够的系数；（2）控制地基的沉降变形使不超过建筑物的允许沉降值，特别是不能超过建筑物不同部位的沉降差，以保证建筑物不会因地基变形而损坏或影响其正常使用。对于水工建筑物，还要控制渗流，确保不至发生渗透破坏。

第三节 土力学及其发展概况

土力学是通过试验手段研究土的物理力学性质，并运用力学方法研究土体渗流，土中应力以及土的压缩变形与强度规律的一门技术学科，同时也是密切结合专业和工程实践的一门课程。在学习上要着重于基本概念的了解，掌握计算方法，并培养解决实际工程问题的能力。

土力学作为技术基础课，学习它主要是为学习水工建筑物的勘测、设计与施工打好基础。学习本课程的基本要求是：

（1）了解土的基本物理性质，即土的颗粒组成、密度、湿度和可塑性等基本属性以及土所处的物理状态（如粘性土的软硬程度）；了解土的力学性质，即土在外力作用下所表现的性质，如渗透性，压缩性和抗剪强度等；了解土的这几种物理力学性质指标的测定原理与技术。

（2）掌握地基的应力、变形和承载能力以及挡土墙土压力和土坡稳定性等的计算原理与方法。

在分析有关土工问题时，必须特别注意天然土层埋藏情况的复杂性及土的性质的易变性这两个特点。水工建筑物的地基范围较广，土层变化往往更为复杂，而且水工建筑物的修建又常会改变原有水文地质条件，给水工建筑物的稳定性带来不利影响。此外，水工建筑物除了承受竖向荷载以外，还经常承受巨大的水平荷载（水压力），从而使地基的强度稳定性与变形问题也变得更为复杂。因此，要十分重视土的地质勘探、取样试验工作，充分研究土的类别、性质和状态，针对具体工程的特点进行分析，将取得的勘探，试验资料，细心地有区别地加以利用。

人类在土质地基上修造建筑物以及利用土料修筑堤坝，由来已久，但土力学却是一门年轻的学科。世界上几个文明古国，在远古的工程实践中就曾成功地解决了某些地基基础的技术问题。例如我国的万里长城、大运河、赵州桥和埃及的金字塔等，都是举世闻名的亘古奇观；印度的一些土坝，至今已蓄水2000年以上；罗马人早在2000年前就成功地修建了许多桥梁、道路和渠道工程。然而直到18世纪才出现土力学的个别理论。

1773年，法国C.A.库伦（Coulomb）根据试验研究提出了土的抗剪强度公式及挡土墙土压力理论，为挡土墙的稳定性分析最先指出了科学的方法。1856年，法国H.达西（Darcy）通过试验发表了土的渗透定律（即达西定律），为土中渗流计算奠定了基础。1869年，英国W.J.M.朗肯（Rankine），从不同途径提出了挡土墙土压力理论。库伦土压力理论与朗肯土压力理论，是当今仍被广泛应用的两个古典土压力理论。1882年，O.摩尔（Mohr）提出了分析一点的应力图解方法（即摩尔圆），与库伦的抗剪强度公式一

起,至今仍被作为土的强度准则。1885年,法国J.V.布辛涅斯克(Boussinesq)求得了由作用在弹性半无限体表面上的竖向集中力所引起的应力解答,为土中应力提供了理论计算方法。1922年,瑞典W.费兰纽斯(Fellenius)为解决铁路坍方问题提出了土坡稳定分析法,现在也还在应用。

对土力学贡献最大的应是K.太沙基(Terzaghi)。他将土力学发展成为土木工程学中的主要学科之一。1925年,他发表的著作《土力学》(Erdbaumechnik),为现代土力学奠定了基础。自从太沙基的这个巨著发表以来,又涌现了一些著名的学者,分别在土力学的不同领域取得了很有价值的研究成果。例如A.W.毕肖普(Bishop)对土中的孔隙应力、边坡稳定性及抗剪强度的研究,A.卡萨格兰德(Casagrande)对土的分类、渗流及抗剪强度的研究,D.W.泰勒(Taylor)对土的固结、抗剪强度及边坡稳定性的研究,A.W.斯肯普顿(Skempton)对粘土中的孔隙应力及地基沉降的研究,梅耶霍夫(Meyerhof)、J.B.汉森(Hansen)和A.S.魏西克(Vesic)等对地基承载力的研究,H.B.锡德(Seed)对土的振动液化的研究,以及我国学者陈宗基教授对土流变学和粘土结构的研究,黄文熙教授对砂土振动液化和地基沉降的研究,等等,都对现代土力学的发展作出了突出的贡献。

此外,从1936年在美国召开的第一届国际土力学与基础工程会议起至1985年,共计开过11次会议,与此同时,世界各地和许多国家,包括我国在内,先后也开展了类似的活动,交流和总结这门学科的新成就,推动这门学科不断向前发展。

第二章 土的物理性质及工程分类

第一节 概 述

土是一种由固相、液相和气相三个部分组成的松散的颗粒堆积物。固相部分主要是土粒，有的土还有粒间胶结物和有机质，液相部分为水，气相部分为空气和其它气体。

土粒是土的主体，它构成土的骨架。从本质上说，土的物理性质取决于组成土的土粒大小及其矿物成分。各种土的颗粒大小和矿物成分差别很大，三相间的相对含量也不同，而且土中三相并非机械地组合在一起，而是相互联系，相互作用，共同形成土的物理性质。例如水同细小粘土粒表面的相互作用，形成一层极薄的所谓结合水，将土粒联结起来，使粘性土具有粘性、可塑性与胀缩性等物理特性，并使粘性土在不同的湿度下表现出不同的稠度（软硬程度）。又如土中三相含量的比例关系不同，可以使土具有不同的密度和湿度，因而其性质也就不同；颗粒大小组成乃至颗粒排列形式，都对土的性质有直接影响。

土的物理性质是土的最基本的工程特性，它们在很大程度上决定着土的力学性质，因此，表征土的各种物理性质的指标在土工计算中占有重要的地位。

第二节 土的矿物成分和土中的有机质

一、土的矿物成分

土的矿物成分主要取决于母岩的成分及其所经受的风化作用。矿物成分不同，对土的性质影响也不同，尤其对细粒土性质的影响最为显著。

自然界的土，颗粒大小相差极为悬殊，它们可以大至数百mm以上，也可小至千分之几甚至万分之几mm。通常将自然界的土颗粒划分为漂石或块石、卵石或碎石、砾、砂粒、粉粒和粘粒等6个粒组，（划分标准详见本章第三节）。各级粒组的矿物成分是大不相同的，它们的性质也就有极大的差别。

漂石、块石、卵石、碎石和砾等粗大颗粒，都是岩石的碎片，其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。

粉粒的矿物成分是多种多样的，主要是石英和水溶盐中的难溶盐。

粘粒的矿物成分最主要有粘土矿物，还有含水铁铝氧化物和水溶盐。

石英、长石和云母，大部分是母岩经受物理风化后，化学成分未发生变化的原生矿物。石英和长石呈粒状，主要是砂类土和砾石类土的矿物成分，强度很高。云母呈薄片状，强度较低，压缩性大，在外力作用下易变形。通常细砂及粉砂可能含有较多云母。含

云母较多的土，作为地基时，沉降量较大，承载力较小，作为筑坝土料时则不易压实。

粘土矿物中主要有高岭石、伊利石与蒙脱石三种，它们是由各种硅酸盐矿物经受化学风化作用分解形成的。例如长石经化学风化后常形成高岭石，玄武岩经化学风化后主要形成蒙脱石。它们是母岩在风化过程中新产生的一种次生矿物，颗粒极细，一般都小于0.005mm，呈薄片状，具有胶体特性，亲水性强，与水相互作用形成粘性土的一系列特性——可塑性、胀缩性等。不同类型的粘土矿物，亲水性和胶体特性的强弱也有差别，其强弱的顺序为：蒙脱石>伊利石>高岭石。

土中的水溶盐矿物，主要是由土中水溶液蒸发而沉淀于土中的卤化物、硫酸盐及碳酸盐等。水溶盐矿物也是一种次生矿物，种类很多，按其溶解度可区分为难溶盐、中溶盐和易溶盐三类。难溶盐主要是碳酸钙（ CaCO_3 ），中溶盐常见的是石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ），易溶盐常见的是各种氯化物（如 NaCl 、 KCl 、 CaCl_2 等）以及易溶的钾与钠的硫酸盐和碳酸盐等。水溶盐常充填于土的孔隙中，成为土粒间的胶结物。土中的水溶盐溶解并被渗流带走后，会导致地基或土坝坝体发生集中渗流、不均匀沉降以及强度降低。因此，通常规定筑坝土料的中、易溶盐单独含量或两者含量的总和不得超过8%。如果水工建筑物地基土的水溶盐含量较大，必须采取适当的防渗措施，以防流失。

二、土中的有机质

在岩石风化及风化产物搬运、沉积过程中，常有动、植物的残骸及其分解物质参与沉积，成为土中的有机质。其中分布较广较多的是植物残骸、分解不全的泥炭和分解完全的腐植质。

腐植质呈胶体状，亲水性强。淤泥类土含腐植质较多（1.5%~2.0%以上），压缩性极高，强度极低。分解不全的泥炭，一般都疏松多孔，强度低，压缩性高，而且还将继续分解，随着分解度增高，亲水性增强。生物遗骸也是这样。所以有机质也是土中的有害物质成分。选择筑坝土料时，对有机质含量应有一定限制，一般认为不宜超过5%，对防渗料且应小于2%。

第三节 土的粒组划分与颗粒级配

一、土的粒组划分

自然界的土，都是由不同大小的土粒组成的。土粒的大小通常以其直径表示，简称“粒径”，常用单位为mm。由第二节可知，随着粒径变小，土粒的矿物成分和性质也逐渐发生变化。所以由于颗粒大小不同所组成的土其性质有很大差别。为研究土的颗粒大小组成，需将自然界各种土粒划分为若干组别（级别）——“粒组”。划分粒组的方法是将一定粒径范围内具有相似成分和性质的土粒作为一个粒组，这样可以将自然界的土粒划分为数个粒组。

图2-1为我国原水利电力部1984年制定的《土工试验规程》（SD128-84）采用的粒组划分标准。图中根据界限粒径300，60，2，0.05和0.005mm把土粒划分为6个粒组，即漂石或块石、卵石或碎石、砾、砂粒、粉粒及粘粒。土力学主要是研究粒径60mm以下的各

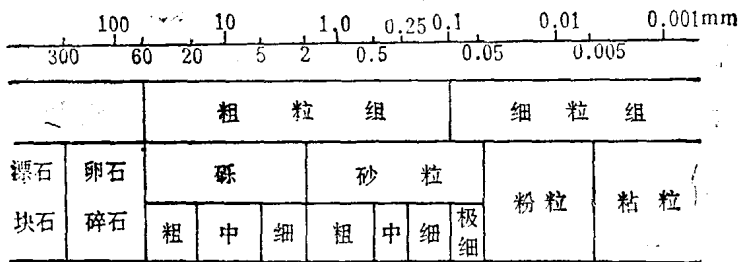


图 2-1 粒组划分

个粒组。

二、土的颗粒级配

土中的颗粒大小及其组成情况，通常以土中各个粒组的相对含量（各粒组占土粒总土质量的百分数）来表示，这就是土的颗粒级配。

土的颗粒级配可通过土的颗粒大小分析试验来测定。粒径大于 0.1mm 的粗颗粒，常用筛析法测定。粒径小于 0.1mm 的细颗粒，常用沉降分析法测定。如果土中粗细颗粒都有，则联合使用以上两种试验方法。

筛析法是用一套孔径不同的标准筛，将称过质量的风干土样过筛，分别称出留在各筛上土的质量，然后算出累积留筛土质量及小于各筛孔径的土质量占总土质量的百分数。表 2-1 为某土样的筛析结果。

表 2-1 某土样筛析结果（土样总质量为 3000g）

筛 孔 径 (mm)	留 筛 土 质 量 (g)	累积留筛土质量 (g)	小于该孔径的土质量 (g)	小于该孔径的土质量 占总土质量的百分数 (%)
40	0	0	3000	100.0
20	345	345	2655	88.5
10	570	915	2085	69.5
5	670	1585	1415	47.2
2	605	2190	810	27.0
1	215	2405	595	19.8
0.5	330	2735	265	8.8
0.25	195	2930	70	2.3
0.1	55	2985	15	0.5
底盘总计		3000		

沉降分析法是将土样放在水中分散制成均匀悬浮液，根据不同粒径的土粒在水中下沉的速度不同（大颗粒沉速快，小颗粒沉速慢），从而可以把不同粒径的颗粒区分开来。沉降分析法就是根据这个原理制定的。

沉降分析法有多种，比重计法是其中广泛应用的一种。比重计（图 2-2）是用来测定溶液比重（或密度）的一种仪器。随着悬液内的土粒逐渐下沉，悬液的比重逐渐变小。若在某时刻将比重计落到悬液中，则与液面相切的刻度表示此时浮泡中心处的悬液比重 R 。

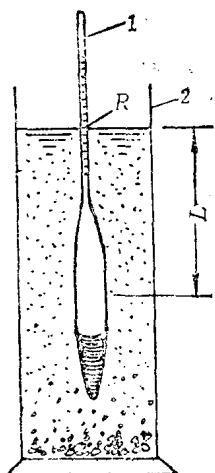


图 2-2
1—比重计；2—量筒

从液面至浮泡中心的距离表示该深度范围内的最大颗粒的下沉深度 L 。由下沉时间和下沉深度，根据粒径与沉降速度的理论关系（即斯托克斯定律）可以估算这种颗粒的粒径，再通过悬液比重与所含土粒质量的理论关系，可算出小于这种颗粒的土质量百分数。

颗粒大小分析试验的结果，除列表统计外，常在半对数纸上绘成如图2-3所示的颗粒大小分配曲线，以进一步分析土的颗粒级配情况。颗粒大小分配曲线也称级配曲线，其横坐标表示粒径（因土粒粒径相差常在百倍、千倍以上，故宜取对数尺度），纵坐标表示小于某粒径的土质量百分数（即相应某粒径的累积百分含量）。例如根据表2-1的筛析结果可绘得图2-3中的曲线A。曲线B为某细粒土以比重计法试验的结果绘制的，而曲线C则是对粗细颗粒都有的另一土样以筛析法与比重计法联合分析的结果绘制的。在这种情况下，应将两段曲线绘成一平滑曲线。

由颗粒大小分配曲线既可看出小于某粒径的土质量百分数，又可由两个分界粒径的土质量百分数之差得出各粒组的百分含量。现以图2-3中的曲线C为例，C土中各粒组含量（级配）为：砾粒（60~2 mm）的含量可以认为等于零；砂粒（2~0.05 mm）占52%（=100%~48%）；粉粒（0.05~0.005 mm）占30%（=48%~18%）；粘粒（<0.005 mm）占18%。

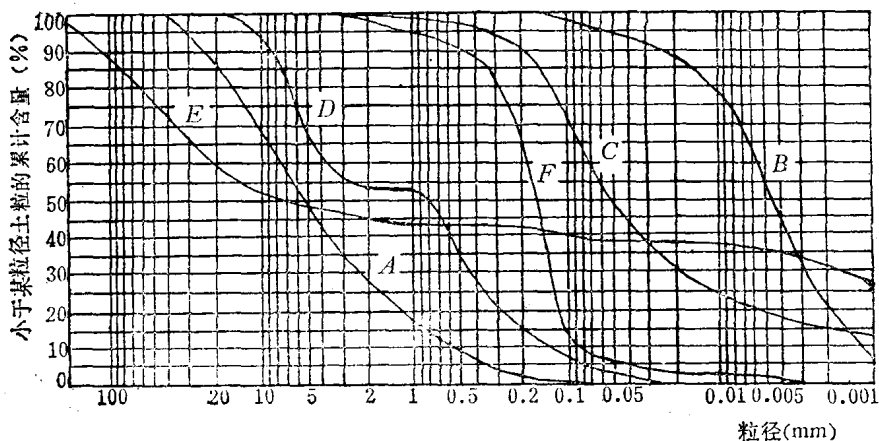


图 2-3 颗粒大小分配曲线

三、颗粒级配优劣的评价

从颗粒大小分配曲线的坡度可以大致判断土的均匀程度或级配情况。如果曲线平缓，土粒大小变化范围广，说明土粒不均匀，各级粒组级配良好；反之，如果曲线较陡，土粒大小变化范围窄，则说明土粒均匀，各级粒组级配不良。常用的判别土的颗粒级配良好与

否的指标是不均匀系数 C_u 及曲率系数 C_c ：

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2-1)$$

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

式中 d_{60} 、 d_{10} 和 d_{30} 分别为颗粒大小分配曲线的纵坐标上小于某粒径的土质量百分数为60%、10%及30%所对应的粒径值。 d_{60} 称为控制粒径， d_{10} 称为有效粒径。

不均匀系数 C_u 反映土的颗粒组成的离散程度或颗粒大小的不均匀程度。 C_u 值愈大，说明土的颗粒大小愈不均匀；反之， C_u 值愈小，说明曲线愈陡，颗粒大小愈均匀。一般将 $C_u > 5$ 的土列为土粒大小不均匀、级配较好的土， $C_u < 5$ 的土为土粒大小均匀、级配不良的土。曲率系数 C_c 反映 d_{60} 与 d_{10} 之间曲线主段的弯曲情况。一般 C_c 值在1~3之间的土，土粒大小连续，即粒径变化有规律，级配较好。 C_c 值小于1或大于3的土，土粒大小不连续，而且颗粒大小分配曲线往往呈阶梯状（图2-3中的曲线D），主要由粗颗粒和细颗粒组成，缺乏中间颗粒，故为级配不良的土。因此，工程界规定级配良好的土必须同时满足两个条件，即 $C_u > 5$ 及 $C_c = 1 \sim 3$ ，如不能同时满足这两个条件，则为级配不良的土。例如图2-3中的粗粒土A， $d_{60} = 7.5\text{mm}$ ， $d_{10} = 0.55\text{mm}$ ， $d_{30} = 2.2\text{mm}$ ，算得 $C_u = 13.6$ ， $C_c = 1.17$ ，所以该土的级配是良好的。

四、颗粒级配的应用

颗粒级配相近的土，往往具有某些共同的性质。因此，级配可作为土特别是粗粒土的工程分类依据。级配良好的土，粗细颗粒搭配较好，粗颗粒间的孔隙有细颗粒填充，易被压实到较大的密度，渗透性和压缩性较小，强度较大。所以级配又可作为选择筑坝土料的依据。

第四节 土 中 的 水

充填于土孔隙中的水，由于所受的作用力不同，因而具有不同的性质。在工程上，常把土中水划分为结合水和自由水两大类，并将自由水又区分为重力水与毛细管水。

一、结合水

研究表明，大多数粘土颗粒表面带有负电荷。由于粘土颗粒表面带有负电荷，它们将吸引孔隙水中的阳离子和极性水分子（因水的分子结构为极性结构，故称极性水分子），以及四周吸附着极性水分子的阳离子，形成一层包围土粒的与自由水性质不同的水膜，称为结合水，如图2-4所示。

结合水愈靠近土粒表面的部分，吸附愈牢固，水分子排列愈规则，阳离子的密度也愈大。距土粒表面愈远，水分子排列愈不规则，吸附力愈微弱，阳离子的密度也愈小，并逐渐过渡为自由水。通常把紧靠土粒表面的结合水，称为强结合水，其性质近于固体，几乎失去了普通水的基本特性。距土粒表面稍远的结合水，称为弱结合水，它能以水膜形式由水膜较厚处缓慢地迁移到水膜较薄的地方，但不是受重力作用。结合水的联结作用对粘性

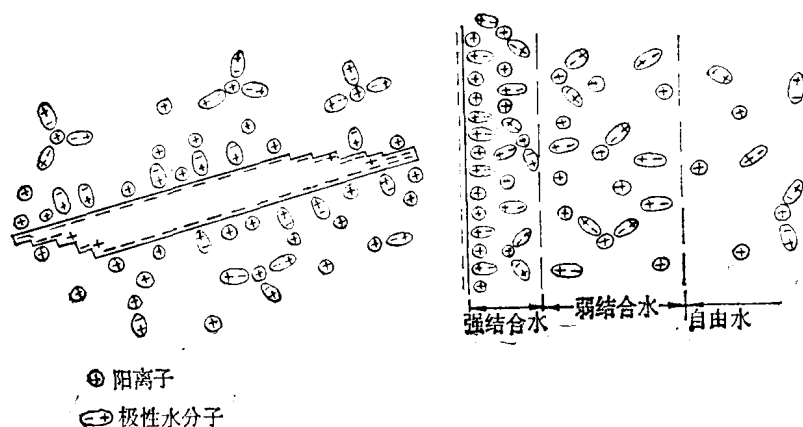


图 2-4 结合水示意图

土的性质影响很大，将在本章第八节中论述。

二、自由水

土孔隙中位于结合水以外的水都是自由水，按其运动所受作用力的不同，又可分为重力水与毛细管水。

(一) 重力水

这是受重力作用在土中流动的水，常处于地下水面以下。重力水在水利工程中有多方面的作用，如：沿基底产生扬压力，降低建筑物的稳定性；对土产生浮力，使土的容重减小一半左右，从而使地基沉降量增大，承载力减小；土中渗透水流产生的渗透力，将使土发生渗透变形（见第三章）。

(二) 毛细管水

土中存在着许多相互连通的毛细孔道，由于水分子与土粒分子之间的附着力和水、气界面上的表面张力作用，地下水将沿毛细孔道上升，在地下水面以上形成一定高度的毛细管水带，如图2-5所示。土中毛细管水上升高度与土的孔隙大小、形状、粒径大小和矿物成分等有关，可用试验方法或经验公式确定。毛细管水上升高度试验可参阅《土工试验规程》（SD128-84）。确定毛管水上升高度的经验公式这里提出两个，可供参考。一个是哈曾（Hazen）公式：

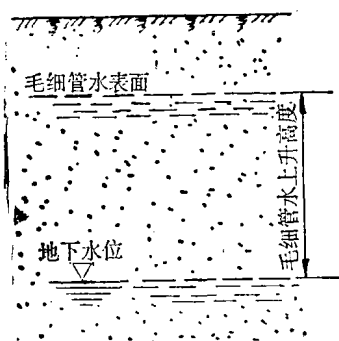


图 2-5 毛细管水

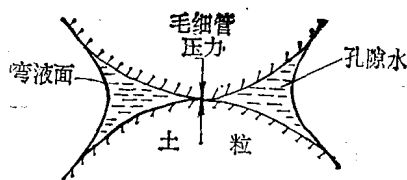


图 2-6 毛细管压力