

高等学校教材

# 土质学与 土力学

(第三版)

高大钊 袁聚云 主编  
谢永利 主审



人民交通出版社

The People's Communications Press

TU43

12(3)

高等学校教材

Tuzhixue Yu Tulixue

# 土质学与土力学

(第三版)

高大钊 袁聚群  
熊厚利

人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书系统地介绍了土质学与土力学的基本原理和分析计算方法,内容包括土的物理性质及工程分类、粘性土的物理化学性质、土中水的运动规律、土中应力计算、土的压缩性与地基沉降计算、土的抗剪强度、土压力计算、土坡稳定分析、地基承载力、土的动力性质和压实性以及土工试验与原位测试结果的分析与利用等共十一章,每章均附有较全面、详细的例题以及习题和思考题。

本书主要作为高等学校公路与城市道路、桥梁工程专业的教学用书,亦可供其他专业师生及技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

土质学与土力学 / 高大钊, 袁聚云主编. —3 版. —北京: 人民交通出版社, 2001. 3

ISBN 7-114-03854-2

I. 土... II. ①高... ②袁... III. ①土质学 ②土力学 IV. ①P642.1 ②TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 04589 号

### 高等学校教材 土质学与土力学 (第三版)

高大钊 袁聚云 主编

谢永利 主审

责任校对:梁秀青 责任印制:张 凯

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010-64216602)

各地新华书店经销

北京凯通印刷厂印刷

开本:787×1092  $\frac{1}{16}$  印张:16.25 字数:416 千

1979 年 12 月 第 1 版

1986 年 3 月 第 2 版 2001 年 5 月 第 3 版

2001 年 5 月 第 3 版 第 1 次印刷 总第 19 次印刷

印数:132401—140400 册 定价:26.00 元

ISBN 7-114-03854-2  
U·02797

# 前 言

本书系根据全国高等学校路桥及交通工程教学指导委员会制定的《土质学与土力学》教学大纲编写而成。在编写过程中征求了有关学校对本课程教学的意见,吸收了近十年来本学科工程技术的进展,同时考虑了扩大专业面的教学改革的发展要求。

《土质学与土力学》最初曾于1961年由同济大学俞调梅教授主编出版。70年代末由人民交通出版社出版了《土质学与土力学》试用教材第一版,第二版作为高等学校教材于80年代中期出版。这一次编写的第三版在吸取前几版教材优点的基础上,根据技术发展的要求,补充了一些新的或有利于扩大学生知识面的内容,删去了一些不适宜于教学或比较陈旧的材料,力求有所进步与发展。

本书由同济大学土力学基础工程教研室高大钊教授、袁聚云教授主编,由长安大学谢永利教授主审,并由同济大学土力学基础工程教研室多年从事该课程教学的教师承担编写任务,各章编写的分工如下:

- |     |            |
|-----|------------|
| 高大钊 | 绪论、第一、十一章; |
| 胡中雄 | 第二章;       |
| 张宏鸣 | 第三、八章;     |
| 沈锡英 | 第四章;       |
| 陈光敬 | 第五章;       |
| 袁聚云 | 第六章;       |
| 钟才根 | 第七、九章。     |
| 王天龙 | 第十章;       |

本书每章都给出了必要的例题、习题和思考题,这些大多经过多年课堂教学的使用,表明有利于学生的自学。最后还给出了必要的参考书与文献,这是为了便于教师备课时参考,也可希望深入学习的学生提供方便,但不要求每个学生必读。

本书在处理与技术规范的关系时,遵循以阐明土力学基本原理为主并有助于学生正确理解规范的原则,不拘于长篇引用一本规范的特殊内容,使学生能灵活使用不同行业的工程建设规范,有利于培养学生适应工程实践的能力。

土力学是一门理论性和实践性都很强的课程,本书编写时注意了理论与实际的结合,通过对一些工程问题的分析,希望有助于培养学生分析与解决实际问题的能力。

限于编者的水平,能否处理好上述这些关系尚无把握,错误之处恳请读者指正。

编 者

千禧龙年于同济大学

# 目 录

绪论	1
一、土质学与土力学的研究对象及发展简史	1
二、土质学与土力学的学习内容	2
三、土质学与土力学与专业的关系	3
第一章 土的物理性质及工程分类	4
第一节 土的三相组成	4
第二节 土的颗粒特征	5
第三节 土的三相比例指标	10
第四节 粘性土的界限含水量	13
第五节 砂土的密实度	16
第六节 土的工程分类	17
习题	21
思考题	22
第二章 粘性土的物理化学性质	23
第一节 键力的基本概念	23
第二节 粘土矿物颗粒的结晶结构	24
第三节 粘土颗粒的胶体化学性质	27
第四节 粘性土工程性质的利用和改良	29
思考题	35
第三章 土中水的运动规律	36
第一节 土的毛细性	36
第二节 土的渗透性	39
第三节 流网及其应用	48
第四节 土在冻结过程中水分的迁移和积聚	52
习题	54
思考题	55
第四章 土中应力计算	56
第一节 概述	56
第二节 土中自重应力计算	57
第三节 基础底面的压力分布与计算	59
第四节 竖向集中力作用下的土中应力计算	61
第五节 竖向分布荷载作用下土中应力计算	65
第六节 应力计算中的其他一些问题	78

第七节 有效应力原理 .....	82
习题 .....	84
思考题 .....	85
<b>第五章 土的压缩性与地基沉降计算</b> .....	86
第一节 概述 .....	86
第二节 研究土压缩性的试验及指标 .....	86
第三节 地基沉降实用计算方法 .....	95
第四节 饱和粘性土地基沉降与时间的关系 .....	107
习题 .....	117
思考题 .....	118
<b>第六章 土的抗剪强度</b> .....	120
第一节 概述 .....	120
第二节 土的强度理论与强度指标 .....	120
第三节 土的抗剪强度指标的试验方法及其应用 .....	123
第四节 土的天然强度及其在荷载作用下的强度增长 .....	136
第五节 关于土的抗剪强度影响因素的讨论 .....	138
习题 .....	141
思考题 .....	142
<b>第七章 土压力计算</b> .....	143
第一节 概述 .....	143
第二节 静止土压力计算 .....	144
第三节 朗金土压力理论 .....	145
第四节 库仑土压力理论 .....	151
第五节 几种特殊情况下的库仑土压力计算 .....	156
第六节 关于土压力的讨论 .....	161
习题 .....	163
思考题 .....	164
<b>第八章 土坡稳定分析</b> .....	165
第一节 概述 .....	165
第二节 砂性土的土坡稳定分析 .....	165
第三节 粘性土的土坡稳定分析 .....	166
第四节 土坡稳定分析的几个问题 .....	181
习题 .....	186
思考题 .....	187
<b>第九章 地基承载力</b> .....	189
第一节 概述 .....	189
第二节 临界荷载的确定 .....	192
第三节 极限承载力计算 .....	195
第四节 按规范方法确定地基容许承载力 .....	202
第五节 关于地基承载力的讨论 .....	206

习题	209
思考题	209
<b>第十章 土的动力性质和压实性</b>	<b>211</b>
第一节 土在动荷载作用下的变形和强度性质	211
第二节 砂土和粉土的振动液化	216
第三节 土的压实性	222
习题与思考题	227
<b>第十一章 土工试验与原位测试结果的分析与利用</b>	<b>228</b>
第一节 土的目力鉴别	228
第二节 勘察、取土方法对土的试验指标的影响	229
第三节 用原位测试方法测定土的工程性质	231
第四节 原位测试与室内试验指标之间的定性分析	233
第五节 工程实例分析	235
思考题	247
参考文献	248
编后记	249

# 绪 论

## 一、土质学与土力学的研究对象及发展简史

土质学与土力学是将土作为建筑物的地基、材料或介质来研究的一门学科,主要研究土的工程性质以及土在荷载作用下的应力、变形和强度问题,为设计与施工提供土的工程性质指标与评价方法、土的工程问题的分析计算原理,是土木工程专业的技术基础课。

土质学是从工程地质学范畴里发展起来的,它从土的成因与成份出发,研究土的工程性质的本质与机理。对土在荷载、温度及湿度等因素作用下发生的变化作出数量上的评价,并根据土的强度、变形机理提出改良土质的有效途径。

土力学是从工程力学范畴里发展起来的,它把土作为物理—力学系统,根据土的应力—应变—强度关系提出力学计算模型,用数学力学方法求解土在各种条件下的应力分布、变形以及土压力、地基承载力与土坡稳定等课题。同时根据土的实际情况评价各种力学计算方法的可靠性与适用条件。

土质学和土力学是两门关系非常密切的学科,在发展过程中互相渗透、互相结合。在工程学科范围内,把土的微观与亚微观结构的研究和土的应力—应变—强度关系的研究结合起来,把土的变形、强度机理和土的工程性质指标结合起来,进一步说明力学现象的本质,为近代计算技术在土力学中的应用提供比较符合实际的计算模型,以解决比较复杂的工程问题。从工程的要求出发,将土质学和土力学紧密结合起来学习是有好处的,有利于定性和定量研究的结合,更全面地理解土的工程问题的特点。

土力学始于 18 世纪,有关土力学的第一个理论是 1773 年由 Coulomb 建立并由 Mohr 发展了的土的 Mohr—Coulomb 强度理论,为土压力、地基承载力和土坡稳定分析奠定了基础。1776 年 Coulomb 发表了建立在滑动土楔平衡条件分析基础上的土压力理论;1857 年 Rankine 提出了建立在土体的极限平衡条件分析基础上的土压力理论;1856 年 Darcy 通过室内试验建立了有孔介质中水的渗透理论;1885 年 Boussinesq 和 1892 年 Flamant 分别提出了均匀的、各向同性的半无限体表面在竖直集中力和线荷载作用下的位移和应力分布理论。这些早期的著名理论奠定了土力学的基础。20 世纪初,土力学继续取得进展,Prandtl 根据塑性平衡的原理,研究了坚硬物体压入较软的、均匀的、各向同性材料的过程,导出了著名的极限承载力公式。在这基础上,Terzaghi、Meyerhof、Vesic 和 Hansen 等分别进行了修正、补充和发展,提出了各种地基极限承载力公式;Fellenius 提出了著名的瑞典圆弧法分析土坡的稳定性;特别是 Terzaghi 建立了饱和土的有效应力原理和一维固结理论,Biot 建立了土骨架压缩和渗透耦合理论,为近代土力学的发展提供了理论依据。Terzaghi 在 1925 年发表的《土力学》是最早系统论述土力学体系的著作,也是土力学形成一门独立学科的标志。20 世纪中叶, Terzaghi 的《理论土力学》以及 Terzaghi 和 Peck 合著的《工程实用土力学》是对土力学的全面总结。

早期土质学的著作如 Приклонский 的《土质学》和 Денисов 的《粘性土的工程性质》,系统地论述了土质学的基本原理,对我国有很大的影响;近代的著作如黄文熙的《土的工程性质》和



Mitchell 的《Fundamentals of Soil Behavior》代表了从两个不同的角度深入研究土的工程性质所达到的新水平。

将土质学和土力学结合在一起的教材,有 50 年代 Бабков 的《Основы грунтоведений и механики грунтов》与 60 年代俞调梅的《土质学及土力学》。在土力学的教学中,特别强调应当重视对土的基本性质的认识和土工试验,并将粘性土的物理化学性质的内容列入教材,从而形成了土力学的教学与土的工程特性的教学紧密结合的教材体系。

## 二、土质学与土力学的学习内容

本书根据道路、桥梁等专业的教学要求,并兼顾扩大专业面的要求编写,内容包括土的物理性质及工程分类、粘性土的物理化学性质、土中水的运动规律、土中应力分布、土的压缩性与沉降计算、土的抗剪强度、土压力计算、土坡稳定分析、地基承载力、土在动荷载作用下的力学性质和土工试验与原位测试结果的分析与利用等共十一章,可分为两种类型的内容。第一类是关于土的基本性质的试验、分析以及基本规律的介绍;第二类是土的应力、变形和强度的分析计算。在每一章中都有关于工程应用的内容,同时在这最后的十一章特别侧重介绍土质学与土力学在工程实践中的应用,包括土的鉴别、对试验指标可靠程度的分析以及若干代表性的工程实例分析。

第一章土的物理性质及工程分类主要介绍描述土的物质组成和干湿、疏密状态的指标试验与计算,以及利用土工指标对土进行分类的方法。

第二章粘性土的物理化学性质主要讨论土颗粒表面与水的相互作用所引起的一系列物理化学现象及其工程意义。

第三章土中水的运动规律主要研究土的渗透特性和冻结时土中水分的积聚机理。土中水的存在是土区别于其他材料的重要因素。土中水的渗流、土的渗透破坏、水的浮力以及土的冻胀和翻浆是工程设计与施工必须考虑的问题,也是许多工程事故的主要原因。

第四章土中应力分布主要研究在外荷载作用下,土体应力状态的变化及其实用计算方法。这种应力的变化通常是造成土体变形或强度破坏的内在原因,在沉降计算时则需要计算土中附加应力沿深度的变化。这一章为后面几章的学习提供关于应力分布的基础知识和计算附加应力的方法。

第五章土的压缩性与沉降计算主要介绍压缩性指标的试验方法和建筑物沉降计算方法。沉降的计算与控制是地基基础设计的重要内容,过大的沉降与不均匀沉降常常是影响工程安全与正常使用的主要原因。此外,还介绍了分析沉降与时间关系的饱和土固结理论。

第六章土的抗剪强度主要讨论土的极限平衡理论、土的抗剪强度指标的试验方法与指标的工程应用。土的抗剪强度是土力学的重要课题之一,包括地基承载力、土压力和边坡稳定在内的土体稳定性验算都需要正确地测定与正确应用土的抗剪强度指标。

第七章土压力计算主要讨论静止、主动与被动土压力的基本概念、朗金土压力理论和库仑土压力理论的基本原理及实用计算方法,特别在各种特殊条件下土压力的计算方法。

第八章土坡稳定分析主要介绍均质土和层状土的土坡稳定分析的几种实用方法,讨论在各种工程条件下土坡稳定计算需要考虑的一些特殊问题。

第九章地基承载力主要讨论地基破坏的三种模式,介绍地基临界荷载和极限荷载理论公式的基本概念和实用计算表达式,同时还介绍了规范给出的确定地基容许承载力的实用经验方法。

第十章土的动力特性和击实特性讨论了土的动强度、动模量的基本概念与试验方法;介绍饱和粉细砂和粉土的液化机理与液化判别方法;讨论了填土击实控制的原理与击实性指标的工程应用。

第十一章土工试验与原位测试结果的分析与利用主要讨论了影响试验指标可靠性的因素及其解决方法,土工设计参数之间的依存关系,在实际工程中对土工指标的判别、利用和分析计算;并通过工程事故实例和大型原型试验实例将试验指标、计算结果与实测数据之间作定性或定量的对比分析。希望能将本书各章的内容尽可能地联系起来分析,以获得比较完整的知识,正确地理解土力学的基本概念和了解土力学理论与工程实际之间可能存在的差别,这对于土木工程师是非常重要的。

### 三、土质学及土力学与专业的关系

土质学与土力学是一门研究与土的工程问题有关的学科,它既是工程力学的一个分支学科,又是土木工程学科的一部分。土是一种自然地质历史产物,是一种特殊的变形体材料,它既服从连续介质力学的一般规律,又有其特殊的应力—应变关系和特殊的强度、变形规律,形成了土力学不同于一般固体力学的分析方法和计算方法,所以在学习本课程以前必须具备工程地质学、材料力学等预备知识。而土力学的理论与方法又是学习专业课程与从事土木工程技术工作必需的基础知识,是一门介于基础课与专业课之间的技术基础课。

从事道路工程和桥梁工程的技术人员在工程实践中将会遇到大量的与土有关的工程技术问题。

在路基工程中,土是修筑路堤的基本材料,同时它又是支承路堤的地基。路堤的临界高度和边坡的取值都与土的抗剪强度指标及土体的稳定性有关;为了获得具有一定强度和良好水稳定性的路基,需要采用碾压的施工方法压实填土,而碾压的质量控制方法正是基于对土的击实特性的研究成果;挡土墙设计的侧向荷载—土压力的取用需借助于土压力理论计算;近年来,我国高速公路大量修建,对路基的沉降计算与控制提出了很高的技术要求,而解决沉降问题需要对土的压缩特性进行深入的研究。

在路面工程中,土基的冻胀与翻浆在我国北方地区是非常突出的问题,防治冻害的有效措施也是以土质学的原理为基础的;稳定土是比较经济的基层材料,它就是根据土的物理化学性质提出的一种土质改良措施,目前深层搅拌水泥土桩在公路的软基处理中就得到了广泛应用;道路一般在车辆的重复荷载作用下工作,因此需要研究土在重复荷载作用下的变形特性,而抗震设计更需要研究土的动力特性。

在桥梁工程中,基础工程常常是能否在预选桥址建桥的技术关键,基础工程的造价占总造价的比重很大,经济、合理的桥梁基础设计需要依靠土力学基本理论的支持;对于超静定的大跨度桥跨结构,基础的沉降、倾斜或水平位移是引起结构过大次应力的重要因素;在软土地区高速公路建设中的“桥头跳车”是影响工程质量的技术难题,解决这一难题的技术关键在于如何处理好桥墩与高路堤之间的沉降差,这涉及桩基和高路堤的沉降计算与控制、填土的碾压质量控制以及软基的加固处理等问题。

由此可见,土质学与土力学这门课程与专业课的学习和今后的技术工作有着非常密切的关系,学习这门课程是为了更好地学好专业课,也是为了今后更好地解决有关土的工程技术问题。

# 第一章 土的物理性质及工程分类

土是由岩石经过物理风化和化学风化作用后的产物,是由各种大小不同的土粒按各种比例组成的集合体,土粒之间的孔隙中包含着水和气体,是一种三相体系。本章主要讨论土的物质组成以及定性、定量描述其物质组成的方法,包括土的三相组成、土的三相指标、粘性土的界限含水量、砂土的密实度和土的工程分类等。这些内容是学习土质学和土力学所必需的基本知识,也是评价土的工程性质、分析与解决土的工程技术问题的基础。

## 第一节 土的三相组成

土是由固体颗粒、水和气体三部分组成的,通常称之为土的三相组成(固相、液相和气相),随着三相物质的质量和体积的比例不同,土的性质也就不同。因此,首要的问题是了解土是由什么物质组成的。

### 1. 土的固相

土的固相物质包括无机矿物颗粒和有机质,是构成土的骨架最基本的物质。土中的无机矿物成分可以分为原生矿物和次生矿物两大类。

原生矿物是岩浆在冷凝过程中形成的矿物,如石英、长石、云母等。

次生矿物是由原生矿物经过风化作用后形成的新矿物,如三氧化二铝、三氧化二铁、次生二氧化硅、粘土矿物以及碳酸盐等。次生矿物按其与水的作用可分为易溶的、难溶的和不可溶的,次生矿物的水溶性对土的性质有重要的影响。粘土矿物的主要代表性矿物为高岭石、伊利石和蒙脱石,由于其亲水性不同,当其含量不同时土的工程性质也就不同。

在以物理风化为主的过程中,岩石破碎而并不改变其成分,岩石中的原生矿物得以保存下来;但在化学风化的过程中,有些矿物分解成为次生的粘土矿物。粘土矿物是很细小的扁平颗粒,表面具有极强的和水相互作用的能力。颗粒愈细,表面积愈大,亲水的能力就愈强,对土的工程性质的影响也就愈大。

在风化过程中,由于微生物作用,土中产生复杂的腐殖质矿物,此外还会有动植物残体等有机物,如泥炭等。有机颗粒紧紧地吸附在无机矿物颗粒的表面形成了颗粒间的连接,但是这种连接的稳定性较差。

### 2. 土的液相

土的液相是指存在于土孔隙中的水。通常认为水是中性的,在零度时冻结,但实际上土中的水是一种成分非常复杂的电解质水溶液,它和亲水性的矿物颗粒表面有着复杂的物理化学作用。按照水与土相互作用程度的强弱,可将土中水分为结合水和自由水两大类。

结合水是指处于土颗粒表面水膜中的水,受到表面引力的控制而不服从静水力学规律,其冰点低于零度。结合水又可分为强结合水和弱结合水。强结合水存在于最靠近土颗粒表面处,水分子和水化离子排列得非常紧密,以致其密度大于1,并有过冷现象(即温度降到零度以下而不发生冻结的现象)。在距土粒表面较远地方的结合水称为弱结合水,由于引力降低,弱

结合水的水分子的排列不如强结合水紧密,弱结合水可能从较厚水膜或浓度较低处缓慢地迁移到较薄的水膜或浓度较高处,亦即可从一个土粒周围迁移到另一个土粒的周围,这种运动与重力无关。这层不能传递静水压力的水定义为弱结合水。

自由水包括毛细水和重力水。毛细水不仅受到重力的作用,还受到表面张力的支配,能沿着土的细孔隙从潜水面上升到一定的高度。毛细水上升对于公路路基土的干湿状态及建筑物的防潮有重要影响。重力水在重力或压力差作用下能在土中渗流,对于土颗粒和结构物都有浮力作用,在土力学计算中应当考虑这种渗流及浮力的作用。在以后的章节中将进一步讨论重力水的渗流及浮力的作用与计算问题。

### 3. 土的气相

土的气相是指充填在土的孔隙中的气体,包括与大气连通和不连通的两类。与大气连通的气体对土的工程性质没有多大的影响,它的成分与空气相似,当土受到外力作用时,这种气体很快从孔隙中挤出;但是密闭的气体对土的工程性质有很大的影响,在压力作用下这种气体可被压缩或溶解于水中,而当压力减小时,气泡会恢复原状或重新游离出来。含气体的土称为非饱和土,非饱和土的工程性质研究已成为土力学的一个新分支。

## 第二节 土的颗粒特征

### 一、土的粒度成分

天然土是由大小不同的颗粒组成的,土粒的大小称为粒度。土颗粒的大小相差悬殊,有大于几十厘米的漂石也有小于几微米的胶粒,同时由于土粒的形状往往是不规则的,很难直接测量土粒的大小,故只能用间接的方法来定量地描述土粒的大小及各种颗粒的相对含量。常用的方法有两种,对粒径大于 0.075mm 的土粒常用筛分析的方法,而对小于 0.075mm 的土粒则用沉降分析的方法。工程上常用不同粒径颗粒的相对含量来描述土的颗粒组成情况,这种指标称为粒度成分。

天然土的粒径一般是连续变化的,为了描述的方便工程上常把大小相近的土粒合并为组,称为粒组。粒组间的分界线是人为划定的,划分时应使粒组界限与粒组性质的变化相适应,并按一定的比例递减关系划分粒组的界限值。

对粒组的划分,各个国家,甚至一个国家的各个部门有不同的规定。从 70 年代末到 80 年代末这十年中,我国的粒组划分标准出现了一些变化。《建筑地基基础设计规范》(GBJ 7—89)和《岩土工程勘察规范》(GB 50021—94)在修订和编制过程中经过充分论证,将砂粒粒组与粉粒粒组的界限从 0.05mm 改为 0.075mm。我国上述规范采用的粒组划分标准见表 1-1。《土的工程分类标准》(GBJ 145—90)在砂粒粒组与粉粒粒组的界限上取与上述规范相同的标准,但将卵石粒组与砾石粒组界限改为 60mm,其粒组划分标准见表 1-2。

粒组划分标准(GB 50021—94)

表 1-1

粒 组 名 称	粒 组 范 围(mm)
漂石(块石)粒组	> 200
卵石(碎石)粒组	20 ~ 200
砾石粒组	2 ~ 20

续上表

粒组名称	粒组范围(mm)
砂粒粒组	0.075 ~ 2
粉粒粒组	0.005 ~ 0.075
粘粒粒组	< 0.005

粒组划分

表 1-2

粒组统称	《土的工程分类标准》(GB145—90)		《公路土工试验规程》(JTJ 051—93)	
	粒组名称	粒组范围(mm)	粒组名称	粒组范围(mm)
巨粒	漂石(块石)	> 200	漂石(块石)	> 200
	卵石(碎石)	200 ~ 60	卵石(小块石)	200 ~ 60
粗粒	粗砾	60 ~ 20	粗砾	60 ~ 20
	细砾	20 ~ 2	中砾	20 ~ 5
	砂粒	2 ~ 0.075	细砾	5 ~ 2
			粗砂	2 ~ 0.5
			中砂	0.5 ~ 0.25
		细砂	0.25 ~ 0.074	
细粒	粉粒	0.075 ~ 0.005	粉粒	0.074 ~ 0.002
	粘粒	< 0.005	粘粒	< 0.002

## 二、粒度成分表示方法

土的粒度成分是指土中各种不同粒组的相对含量(以干土质量的百分比表示),它可用以描述土中不同粒径土粒的分布特征。

常用的粒度成分的表示方法有表格法、累计曲线法和三角坐标法。

1)表格法:是以列表形式直接表达各粒组的相对含量。它用于粒度成分的分类是十分方便的。表格法有两种不同的表示方法,一种是以累计含量百分比表示的,如表 1-3 所示;另一种是以粒组表示的,如表 1-4 所示。累计百分含量是直接由试验求得的结果,粒组是由相邻两个粒径的累计百分含量之差求得的。

粒度成分的累计百分含量表示法

表 1-3

粒径 $d_i$ (mm)	粒径小于等于 $d_i$ 的累计百分含量 $p_i$ (%)		
	土样 A	土样 B	土样 C
10	—	100.0	—
5	100.0	75.0	—
2	98.9	55.0	—
1	92.9	42.7	—
0.50	76.5	34.7	—
0.25	35.0	28.5	100.0
0.10	9.0	23.6	92.0
0.075	—	19.0	77.6

续上表

粒径 $d_i$ (mm)	粒径小于等于 $d_i$ 的累计百分含量 $p_i$ (%)		
	土样 A	土样 B	土样 C
0.010	—	10.9	40.0
0.005	—	6.7	28.9
0.001	—	1.5	10.0

粒度成分分析结果

表 1-4

粒 组 (mm)	土 样 A	土 样 B	土 样 C
10~5	—	25.0	—
5~2	1.1	20.0	—
2~1	6.0	12.3	—
1~0.5	16.4	8.0	—
0.5~0.25	41.5	6.2	—
0.250~0.100	26.0	4.9	8.0
0.100~0.075	9.0	4.6	14.4
0.075~0.010	—	8.1	37.6
0.010~0.005	—	4.2	11.1
0.005~0.001	—	5.2	18.9
<0.001	—	1.5	10.0

2) 累计曲线法: 是一种图示的方法, 通常用半对数纸绘制, 横坐标(按对数比例尺)表示某一粒径, 纵坐标表示小于某一粒径的土粒的百分含量。表 1-3 中的三种土的累计曲线示于图 1-1。

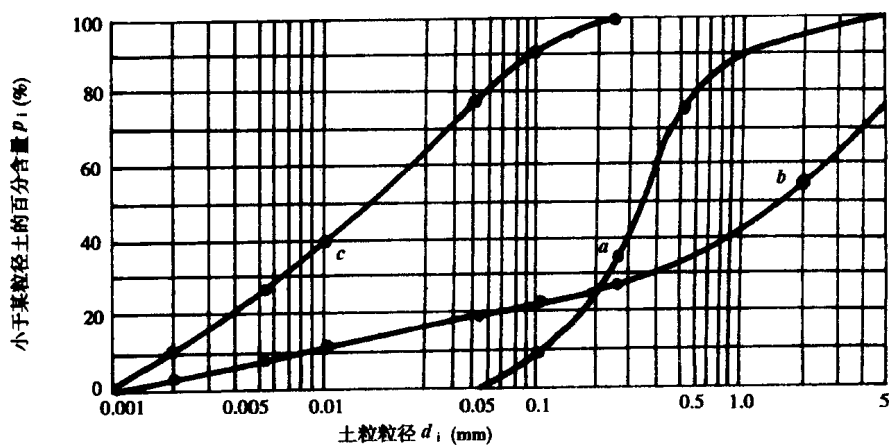


图 1-1 土的累计曲线

在累计曲线上, 可确定两个描述土的级配的指标:  
不均匀系数

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

曲率系数

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

式中： $d_{10}$ 、 $d_{30}$ 、 $d_{60}$ ——分别相当于累计百分含量为 10%、30% 和 60% 的粒径， $d_{10}$  称为有效粒径； $d_{60}$  称为限制粒径。

不均匀系数  $C_u$  反映大小不同粒组的分布情况， $C_u < 5$  的土称为匀粒土，级配不良； $C_u$  越大，表示粒组分布范围比较广， $C_u > 10$  的土级配良好。但如  $C_u$  过大，表示可能缺失中间粒径，属不连续级配，故需同时用曲率系数来评价。曲率系数则是描述累计曲线整体形状的标志。

3) 三角坐标法：这也是一种图示法，它利用等边三角形内任意一点至三个边 ( $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ ) 的垂直距离的总和恒等于三角形之高  $H$  的原理，用表示组成土的三个粒组的相对含量，即图中的三个垂直距离可以确定一点的位置。三角坐标法只适用于划分为三个粒组的情况。例如当把粘性土划分为砂土、粉土和粘土粒组时，就可以用图 1-2 所示的三角坐标图来表示。图中  $m$  点的坐标分别为：粘粒含量 28.9%；粉粒含量 48.7%；砂粒含量 22.4%。对照表 1-4 的数据可以发现，此土样即为表中的土样 C。

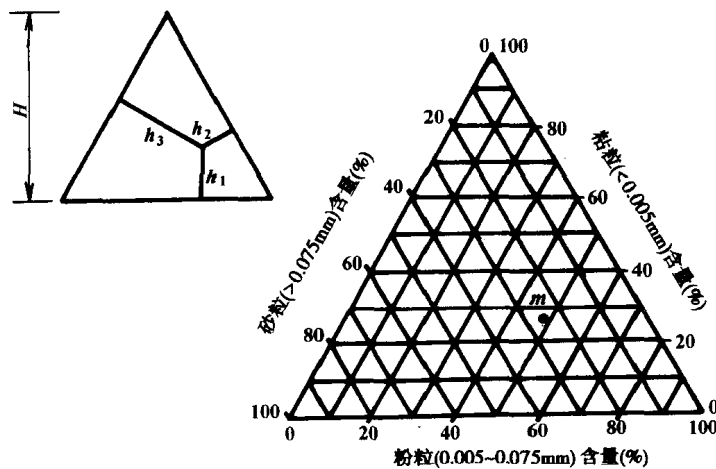


图 1-2 三角坐标图

上述三种方法各有其特点和适用条件。表格法能很清楚地用数量说明土样的各粒组含量，但对于大量土样之间的比较就显得过于冗长，且无直观概念，使用比较困难。

累计曲线法能用一条曲线表示一种土的粒度成分，而且可以在一张图上同时表示多种土的粒度成分，能直观地比较其级配状况。

三角坐标法能用一点表示一种土的粒度成分，在一张图上能同时表示许多种土的粒度成分，便于进行土料的级配设计。三角坐标图中不同的区域表示土的不同组成，因而还可以用来确定按粒度成分分类的土名。

在工程上可根据使用的要求选用适合的表示方法，也可以在不同的场合选用不同的方法。

### 三、粒度成分分析方法

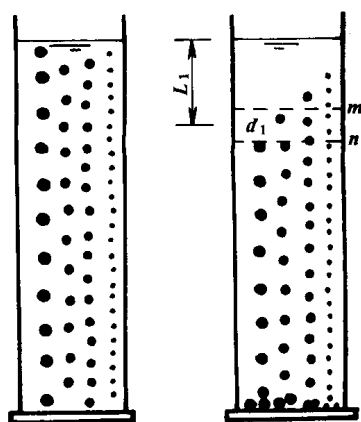
对于粗粒土可以采用筛分法，而对于细粒土则必须用沉降分析法分析粒度成分。

筛分法是用一套不同孔径的标准筛把各种粒组分离出来，这和建筑材料的粒径级配筛分试验是一样的。但很细的粒组却无法用筛分法分离出来，这是因为工艺上无法生产很细的筛布。按我国原有的标准，最小孔径的筛是 0.1mm，但是新的筛孔标准已改为 0.075mm，这相当

于美国 ASTM 标准的 200 号筛(即在 1 平方英寸面积上共有 200 个筛孔)。这是在国际上比较通用的标准,因此我国已经采用了这一标准,按新的标准生产了孔径为 0.075mm 的筛。在采用最小孔径的筛作筛分试验时应当采用水筛的方法,才能把连结在一起的细颗粒分开。通过 0.075mm 筛的土粒用筛分法无法再加以细分,这就需要沉降分析法。将筛分法和沉降分析法的结果综合在一起就可以得到完整的以累计百分含量表示的粒度成分如表 1-3 所示。

沉降分析法是根据土粒在悬液中沉降的速度与粒径的平方成正比的司笃克斯(Stokes)公式来确定各粒组相对含量的方法。但实际上,土粒并不是球形颗粒,因此用上述公式计算的并不是实际土粒的尺寸,而是与实际土粒有相同沉降速度的理想球体的直径,称为水力直径。

用沉降分析法测定粒度成分时,如图 1-3 所示,将一定质量( $m_s$ )的干土制成一定体积( $V$ )的悬液,在搅拌均匀并停止搅拌时开始计时,经一定时间( $t_i$ )在液面下某个深度( $L_i$ )测定该深度



度处悬液的密度( $\rho_i$ )。则根据司笃克斯(Stokes)公式,在此深度处的最大粒径( $d_i$ )及小于等于此粒径的土粒质量( $m_{si}$ )可由下式求得:

$$d_i = 1.126 \sqrt{\frac{L_i}{t_i}} \quad (1-3)$$

$$m_{si} = 1000 \frac{\rho_i - \rho_w}{\rho_s - \rho_w} \rho_s \quad (1-4)$$

式中:  $\rho_s$ ——土粒的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\rho_w$ ——水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

则悬液中粒径小于等于  $d_i$ (mm)的土粒质量  $m_{si}$ 占土粒总质量  $m_s$ 的累计百分比  $p_i$ (以%表示)为:

$$p_i = \frac{m_{si}}{m_s} \quad (1-5)$$

在不同的时间间隔测定悬液的密度,就可以得到不同的粒径及其对应的累计百分含量的对应数据,具体的试验方法见有关试验标准。

沉降分析时测定悬液密度的方法有两种,即比重计法和移液管法。比重计是用以测定液体密度的一种仪器,对于不均匀的液体,从比重计读出的密度只表示浮泡形心处的液体密度,公式(1-3)中的  $h_i$ 是由液面至浮泡形心的距离。移液管法是用一种特定的装置在一定深度处吸出一定量的悬液,用烘干的方法求出其密度。用上述二种方法都可以用上述公式求出土粒的粒径  $d_i$ 和累计百分含量  $p_i$ 。

#### 四、土粒的形状

土粒的形状是多种多样的,卵石接近于圆形而碎石颇多棱角,砂是粒状的而粘土颗粒大多是扁平的。土粒形状对于土的密实度和土的强度有显著的影响,棱角状的颗粒互相嵌挤咬合形成比较稳定的结构,强度较高;磨圆度好的颗粒之间容易滑动,土体的稳定性比较差。

土粒的形状与土的矿物成分有关,也与土的成因条件及地质历史有关。云母是薄片状而石英砂却是颗粒状的;未经长途搬运的残积土的颗粒大多呈棱角状,而在河流下游沉积的颗粒大多已经磨圆了。

描述土粒的形状一般用肉眼观察鉴别的方法,在勘察报告中都有定性的描述;在一些文献中报道了对电子显微镜扫描照片采用计算机图像处理的方法研究土粒的几何参数,但还不能



实际应用;还有用体积系数和形状系数描述土粒形状的方法,当然,这些指标也只能用于定性的评价。

体积系数  $V_c$ :

$$V_c = \frac{6V}{\pi d_m^3} \quad (1-6)$$

式中:  $V$ ——土粒体积( $\text{mm}^3$ );

$d_m$ ——土粒的最大粒径( $\text{mm}$ )。

$V_c$ 愈小,土粒愈接近于圆形。圆球状的  $V_c = 1$ ;立方体的  $V_c = 0.37$ ;棱角状的土粒  $V_c$  更小。

形状系数  $F$ :

$$F = \frac{A_1 C_1}{B_1^2} \quad (1-7)$$

式中:  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$  分别为土粒的最大、中间和最小粒径。

### 第三节 土的三相比例指标

土的三相物质在体积和质量上的比例关系称为三相比例指标。三相比例指标反映了土的干燥与潮湿、疏松与紧密,是评价土的工程性质的最基本的物理性质指标,也是工程地质勘察报告中不可缺少的基本内容。

为了推导土的三相比例指标,通常把在土体中实际上是处于分散状态的三相物质理想化地分别集中在一起,构成如图 1-4 所示的三相图。在图 c) 中,右边注明各相的体积,左边注明各相的质量或重力。土样的体积  $V$  为土中空气的体积  $V_a$ 、水的体积  $V_w$  和土粒的体积  $V_s$  之和;土样的质量  $m$  为土中空气的质量  $m_a$ 、水的质量  $m_w$  和土粒的质量  $m_s$  之和;通常认为空气的质量可以忽略,则土样的质量就仅为水和土粒质量之和。

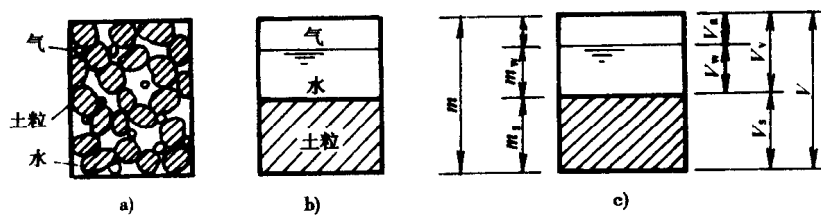


图 1-4 土的三相图

a) 实际土体; b) 土的三相图; c) 各相的质量与体积

三相比例指标可分为两种,一种是试验指标;另一种是换算指标。

#### 一、试验指标

通过试验测定的指标有土的密度、土粒密度和含水量。

1. 土的密度是单位体积土的质量,如令土的体积为  $V$ ,质量为  $m$ ,则土的密度  $\rho$  可由下式表示:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (1-8a)$$

土的密度常用环刀法测定,其单位是  $\text{g/cm}^3$ ,一般土的密度为  $1.60 \sim 2.20 \text{g/cm}^3$ 。当用国际单位