

高等学校教材

土质学与土力学

Tuzhixue yu Tulixue

(公路与城市道路、桥梁工程专业用)

第 二 版

人民交通出版社

高等学校教材

土质学与土力学

Tuzhixue yu Tulixue

(公路与城市道路、桥梁工程专业用)

第 二 版

人民交通出版社

内 容 提 要

本书共分十一章，其内容，土质学部分包括：土的物理性质及工程分类、粘性土的物理化学性质及土中水的运动规律；土力学部分包括：土中应力、变形及强度计算，土压力及土坡稳定计算以及土的动力特性等。

本书为高等学校公路与城市道路工程及桥梁工程专业的教材，亦可供道路、桥梁及其它土建部门的勘察、设计和施工技术人员参考。

前 言

本书是根据1982年4月在长沙召开的全国高等院校路、桥专业教材编委会扩大会议上所讨论制定的《土质学及土力学》教材编写大纲编写的。在编写过程中，曾广泛征求各高等院校近年来对本课程的教学意见，力求使本教材能更好地满足各院校的教学要求。本书编写时，主要参考了1979年出版的高等院校试用教材《土质学及土力学》，吸取了该教材的优点，也吸取了近年来各院校试用该教材的经验，并参考了国内外近年来出版的比较成熟的教科书及有关的文献资料。

本书由同济大学土力学及基础工程教研室洪毓康主编，北京工业大学土力学与地基基础教研室叶于政教授主审。参加编写的有同济大学朱小林和魏道堦。编写分工是：洪毓康编写绪论、第三、四、七、八、九章；朱小林编写第一、二、十一章；魏道堦编写第五、六、十章。

遵照国务院发布的《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》，及文化部出版局和国家计量局发出的贯彻《中华人民共和国法定计量单位》的联合通知的要求，本书编写时采用了中华人民共和国法定计量单位。在书末附录二中给出了法定计量单位与公制单位的换算表。

为了便于自学，本书每章都给出了必要的例题、习题和思考题。在附录中还列出了主要参考书目和文献。

本书在编写中力图做到叙述简明、重点突出、文字简练、易于自学，并密切联系工程实践，适当地反映近代土力学中国内外的新成果。但限于编者水平，书中缺点和谬误之处在所难免，尚希读者批评指正。

绪 论

一、土质学及土力学研究的对象

土质学及土力学是一门研究土的学科，是为了解决工程中有关土的问题。

土的形成经历了漫长的地质历史过程。土的特征一定要从土的形成过程来认识。

土是由地壳表层的整体岩石经受风化作用后形成的。风化作用包括物理风化、化学风化和生物风化三种。风化作用的结果使整体岩石破碎成分散体，其矿物成分也可能发生变化，以及产生有机质的积聚。岩石风化后的产物还受到重力、流水、冰川和风等的挟带搬运，使土颗粒进一步破碎分散，并使得土颗粒变得浑圆和分选。土在搬运过程中随之产生沉积过程，使土体具有不同的结构与构造。上述风化、搬运和沉积的过程是交错进行的，是经历了很长的地质历史年代，每一个过程都对土的性质产生影响。因此，可以认为土是自然历史的产物，土的性质与成因有关，土的最大特征是它的分散性。

在工程建设中，土往往是作为不同的研究对象。如在土层上修建房屋、桥梁、道路、堤坝时，土是用来支承建筑物传来的荷载，这时土是被用作为地基；路堤、土坝等土工构筑物，土就是被用作为建筑材料；此外，如隧道、涵洞及地下建筑等，土是作为建筑物周围的介质或环境。

分散土广泛地分布在地壳表面，其性质随形成过程和自然环境的不同而有差异，因此在进行工程建设时，必须密切结合土的实际性质进行设计和施工，否则，会影响工程的经济合理性和安全使用。

土质学及土力学研究的对象是分散土，它与岩石（也称石质土）和土壤既有联系又有区别。

土的主要特征是分散性、复杂性和易变性。土是由固体颗粒和孔隙组成的分散体系，土颗粒之间没有或只有很弱的联结，因此土的强度低，易变形。土的性质与成因有关，由于土的成因历史不同，使土的性质也各有差异，因此土的分布及其性质复杂。由于土的分散性，其性质极易受到外界环境（温度、湿度）的变化而发生变化。

岩石的强度远大于分散土。岩石虽然也具有裂隙性，但又具有连续介质的特征。虽然某些软质岩石的性质接近于分散土，但从总体来说与分散土还是有区别的，因此它是作为岩石力学研究的对象。

土壤是农业学科，是土壤学研究的对象。土壤的特征是具有肥力，能够提供植物生长过程中所需要的养料。人类对土壤的认识和利用比土要丰富得多，土壤学的发展也比土质学及土力学要早得多。

应该指出，岩石力学、土壤学与本学科是有密切联系的，土质学及土力学在发展过程中也利用了许多岩石力学和土壤学的成就。

二、土质学及土力学的研究内容及方法

土质学是地质学科的一个分科，它是从土的成因出发，研究土的基本工程性质及影响土

性质变化的本质原因。土质学是应用工程地质学、矿物结晶学及物理化学等知识，对土的基本工程性质进行分析研究，并提出土质改良的有效措施的一门学科。

土力学是工程力学的一个分支，主要研究与工程建筑有关的土的应力、应变、强度和稳定性等力学问题的一门学科。由于土是自然历史的产物，以及土的分散性使得土力学除了运用一般连续体力学的基本原理外，还应该密切结合土的实际情况进行研究。在土力学计算中所提出的一些力学计算模型，必须通过土的现场勘察及室内土工试验测定土的计算参数，因此土力学是一门实践性很强的学科。

随着社会生产力的不断提高和科学的不断发展，各学科之间的相互渗透已成为现代科学发展的趋势。土质学与土力学本来就是两门关系十分密切的学科，其相互渗透、相互结合已日益受到重视。土力学应该吸取土质学中从成因及微观结构认识土性质本质的研究成果，来进一步说明土的力学现象本质，并同土的应力-应变-强度关系的研究结合起来。本课程把土质学与土力学结合在一起讲授，就是希望能把两门学科的研究成果相互渗透，相互促进，以便能更好地解决实际工程中有关土的问题。

三、土质学及土力学与专业的关系

在道路及桥梁工程中，会遇到各种有关土的工程问题，包括土作为建筑物地基、作为填筑路堤的建筑材料，以及作为建筑物的环境等三个方面。

在道路工程中，路堤是用土填筑而成，土作为建筑材料要求用碾压方法将填土压实，以保证路堤的强度及稳定性，因此需要研究土的压实性，包括土的压实机理、压实方法及压实指标的评价。

自然环境的变化也将影响土的稳定性，如我国北方地区的道路常常发生冻胀及翻浆冒泥现象，影响行车安全，这是因为温度的变化而引起的。因此在本课程中将研究土的冻胀机理及防治措施。

在路基工程中遇到的土质改良问题，也即稳定土问题，就是根据土质学中粘性土的物理化学性质提出的。山区道路工程中的边坡稳定及挡土墙的土压力计算，都是应用土力学的计算方法。路基是承受车辆荷载重复作用的结构物，故需要研究土在重复荷载下的变形特性。

在桥梁工程中，基础工程占有非常重要的地位。在桥梁墩台基础设计时，需要确定地基容许承载力，以及计算基础的沉降量，这特别对超静定结构的桥梁更为重要。桥台台背上的土压力计算，桥头引道路堤重力在地基中引起的应力及沉降问题等，这些都需要应用土力学的方法进行计算。

由此可见，土质学及土力学与道路及桥梁工程有着密切的联系，学习本课程是为了更好地学习有关专业课程，也为了更好地解决有关土的工程技术问题。

目 录

绪 论	1
一、土质学及土力学研究的对象	1
二、土质学及土力学的研究内容及方法	1
三、土质学及土力学与专业的关系	2
第一章 土的物理性质及工程分类	1
第一节 土的三相组成	1
第二节 土的颗粒特征	2
一、土粒大小及粒组划分	2
二、粒度成分及其表示方法	3
三、粒度成分分析方法	5
四、土粒形状	6
第三节 土的结构	7
第四节 土作为三相体的比例指标	8
第五节 粘性土的界限含水量及其测定	13
第六节 砂土的密实度	15
第七节 土的工程分类	16
一、《公路桥涵地基与基础设计规范 (JTJ024-85) 》与《工业与民用建筑地基规范 (TJ7-74) 》、《工业与民用建筑工程地质勘察规范 (TJ21-77) 》中的工程分类	16
二、公路路基土的分类	17
三、细粒土按塑性图分类	19
第二章 粘性土的物理化学性质	22
第一节 键力的基本概念	22
一、化学键	22
二、分子间键	22
三、氢键	23
第二节 粘土矿物颗粒的结晶结构和基本特性	23
第三节 粘土颗粒与水的相互作用	26
一、粘土颗粒表面的带电现象	26
二、粘土颗粒表面带电的原因	26
三、双电层与扩散层的概念	27
四、影响扩散层厚度的因素	28
五、粘土颗粒间的相互作用力	29
第四节 土的工程性质的变化机理	31

一、土的塑性.....31

二、土的体积变化.....32

三、土的强度和土的应力应变关系.....34

第三章 土中水的运动规律.....36

第一节 土的毛细性.....36

一、土层中的毛细水带.....36

二、毛细水上升高度及上升速度.....37

三、毛细压力.....39

第二节 土的渗透性.....39

一、土的层流渗透定律.....39

二、土的渗透系数.....41

三、影响土的渗透性的因素.....44

四、动水力及流砂现象.....45

第三节 土在冻结过程中水分的迁移和积聚.....47

一、冻土现象及其对工程的危害.....47

二、冻胀的机理与影响因素.....48

三、冻结深度.....49

第四章 土中应力计算.....51

第一节 概述.....51

一、土中应力计算的目的及方法.....51

二、土中一点的应力情况.....51

第二节 土的自重应力计算.....52

一、均匀土体时.....52

二、成层土体时.....52

三、土层中有地下水时.....53

四、水平向自重应力计算.....53

第三节 基础底面的压力分布与计算.....54

一、基础底面压力分布的概念.....55

二、基底压力的简化计算方法.....56

第四节 集中力作用时土中应力计算.....57

第五节 分布荷载作用下土中应力计算.....61

一、空间问题.....62

二、平面问题.....69

第六节 有效应力概念.....74

一、有效应力原理.....74

二、毛细水上升时土中有效应力计算.....75

三、土中水渗流时（一维渗流）有效应力计算.....76

第七节 其它条件下的地基应力计算.....79

一、建筑物基础下地基应力计算.....79

二、桥台后填土引起的基底附加应力计算.....81

第五章 土的压缩性与沉降计算	86
第一节 土体压缩性的概念与意义.....	86
第二节 研究土体压缩性的方法及变形指标.....	86
一、室内压缩试验与压缩性规律.....	86
二、现场载荷试验与变形模量.....	90
三、变形指标间的关系.....	91
四、土的弹性模量.....	95
第三节 地基沉降计算.....	96
一、概述.....	96
二、分层总和法计算最终沉降量.....	96
三、弹性理论方法计算最终沉降量.....	103
四、考虑不同变形阶段的沉降计算方法.....	104
五、考虑应力历史影响的沉降计算方法.....	105
第四节 沉降与时间的关系.....	106
一、饱和土压缩时土骨架和孔隙水压力的分担作用.....	107
二、单向固结理论.....	108
三、实测沉降-时间关系的应用	117
第六章 土的抗剪强度	121
第一节 土的强度概念与工程意义.....	121
第二节 土体强度理论与强度指标.....	122
一、直剪试验与土的强度规律.....	122
二、土的强度理论——极限平衡理论.....	123
三、抗剪强度的三轴试验.....	126
第三节 有效应力原理在抗剪强度问题中的应用.....	130
一、有效抗剪强度指标.....	130
二、孔隙压力系数 A 、 B	132
三、强度试验方法与指标的选用.....	136
第四节 土的强度特性的若干问题简介.....	137
一、土的应力-应变曲线及其所反映的土的性状	137
二、土的结构性与灵敏度.....	140
三、土的应力历史对抗剪强度的影响.....	141
四、应力路径的概念及其在土的强度问题中的应用.....	142
第五节 土的天然强度及强度增长规律.....	147
一、土的天然强度.....	147
二、软土在荷载下的强度增长规律.....	149
第七章 土压力计算	154
第一节 概述.....	154
一、挡土结构物.....	154
二、土压力的类型.....	154
第二节 静止土压力计算.....	155

第三节 朗金土压力理论.....	157
一、基本原理.....	157
二、朗金主动土压力计算.....	158
三、朗金被动土压力计算.....	163
第四节 库仑土压力理论.....	165
一、基本原理.....	165
二、主动土压力计算.....	165
三、库尔曼图解法确定主动土压力.....	168
四、被动土压力计算.....	171
五、朗金与库仑土压力理论的讨论.....	172
第五节 车辆荷载引起的土压力计算.....	173
第六节 支撑结构物上的土压力计算.....	177
一、悬臂式板桩墙的土压力计算.....	177
二、锚碇式板桩墙的土压力计算.....	179
三、多支撑板桩墙的土压力计算.....	182
第八章 土坡稳定分析.....	187
第一节 概述.....	187
第二节 砂性土的土坡稳定分析.....	187
第三节 粘性土的土坡稳定分析.....	188
一、土坡圆弧滑动体的整体稳定分析.....	189
二、条分法分析土坡稳定.....	193
三、毕肖普条分法.....	196
四、非圆弧滑动面的杨布法.....	198
第四节 土坡稳定分析的几个问题.....	203
一、土的抗剪强度指标及安全系数的选用.....	203
二、坡顶开裂时的稳定计算.....	204
三、有水渗流时土坡稳定计算.....	205
四、按有效应力法分析土坡稳定.....	205
第九章 地基承载力.....	208
第一节 概述.....	208
一、地基破坏的性状.....	208
二、确定地基容许承载力的方法.....	210
第二节 临界荷载的确定.....	211
一、塑性区边界方程的推导.....	212
二、临塑荷载及临界荷载计算.....	213
第三节 极限荷载计算.....	215
一、按极限平衡理论求解极限荷载的概念.....	216
二、按假定滑动面确定极限荷载.....	221
第四节 按规范方法确定地基容许承载力.....	228
一、地基容许承载力.....	228

二、地基容许承载力的修正和提高.....228

第十章 土在动荷载作用下的力学性质.....235

第一节 土的压实性.....235

一、土的压实性对工程的意义.....235

二、击实试验与土的压实特性.....235

三、压实土的力学特性.....240

第二节 土在动荷载作用下的力学性质.....244

一、反复荷载下土的变形强度特征.....244

二、土的动力特征参数.....247

三、振动三轴仪简介.....248

第三节 砂土振动液化.....249

一、砂土液化及其工程危害.....249

二、砂土液化机理及其影响因素.....249

三、砂土液化可能性的判别.....251

四、防止砂土液化的工程措施简介.....252

第十一章 土的勘察及勘察报告的应用.....254

第一节 土的现场目力鉴别方法.....254

第二节 土的勘察方法.....256

一、勘探.....256

二、原位测试.....258

第三节 勘察报告书及有关图件.....261

第四节 勘察成果的分析与应用.....262

附录一 常用符号和名词术语.....264

附录二 部分法定计量单位与公制单位的换算表.....268

附录三 参考文献.....269

第一章 土的物理性质及工程分类

土是由岩石经过物理与化学风化作用后的产物，它是由各种大小不同的土粒按各种比例组成的集合体。这些土粒间的联结是比较微弱的，在外力作用下，土体并不显示出一般固体的特性，土粒间的联结也并不象胶体那样易于相对地滑移，也不表现出一般液体的特性。因此，在研究土的工程性质时，既有别于固体力学，也有别于流体力学。土是一种分散体，我们把土体看作为颗粒性的多孔材料，在孔隙中，除了空气外，还存在有部分水，或孔隙中完全为水所充满。当土是由土粒、空气和水组成时，土为固相、气相和液相组成的三相体系。当土是由土粒和空气，或土粒和水组成时，土为二相体系。由于空气易被压缩，水能从土体流出或流进，土的三相的相对比例会随时间和荷载条件的变化而改变，土的一系列性质也随之而改变。

在古典土力学中，在研究土的各种工程性质时，首先注意到土粒的物理特性（例如土粒的大小、形状等）、土的物理状态、以及土的三相比例关系。在近代土力学中，还注意到土的三相组成在空间的分布、排列，以及土粒间的联结对土的性质的重要影响。

从物理的观点，定量地描述土粒的物理特性、土的物理状态，以及三相比例关系，即构成土的各种物理指标特性。利用这些物理指标特性，可对土进行鉴别和分类，间接地推测土的其它工程性质（如渗透性、力学强度、压缩性等）。这些就是本章的主要内容。

第一节 土的三相组成

土中的三相（固相、液相和气相）物质组成是很复杂的。

1. 土的固相物质分无机矿物颗粒和有机质，成为土的骨架。矿物颗粒由原生矿物和次生矿物组成。

原生矿物是指岩浆在冷凝过程中形成的矿物，如石英、长石、云母等。原生矿物经化学风化作用后发生化学变化而形成新的次生矿物，如三氧化二铁、三氧化二铝、次生二氧化硅、粘土矿物、碳酸盐等。次生矿物按其与水的作用可分为可溶的或不可溶的。可溶的按其溶解难易程度又可分为易溶的、中溶的和难溶的。次生矿物的成分和性质均较复杂，对土的工程性质影响也较大。

在风化过程中，往往有微生物的参与，在土中产生有机质成分，如多种复杂的腐殖质矿物。此外，在土中还会有动植物残骸体等有机残余物，如泥炭等。有机质对土的工程性质影响很大。但目前对土的有机质组成的研究还很不够。

2. 土的液相是指土孔隙中存在的水。一般把土中的水看成是中性的，无色、无味、无嗅，其密度为 1g/cm^3 ，容重为 9.81kN/m^3 ，在 0°C 时冻结，在 100°C 时沸腾。但实质上，土中水是成分复杂的电解质水溶液，它与土粒间有着复杂的相互作用，这将在第二章中进一步讨论。

土中的水是由一个氧原子 O^{2-} 和两个氢原子 H^+ 构成的水分子以一定的方式联结而形成的。

当土粒与水相互作用时，土粒会吸附一部分水分子，在土粒表面形成一定厚度的水膜，称为表面结合水。它受土粒表面引力的控制而不服从静水力学规律。结合水的密度、粘滞度均比一般正常水为高；冰点低于 0°C ，最低可达零下几十度。结合水的以上这些特征随着离土粒表面的距离而变化。愈靠近土粒表面的水分子，受土粒的吸附力愈强，与正常水的性质的差别愈大。因此按吸附力的强弱，结合水可分为强结合水（也称为吸着水）和弱结合水（也称为薄膜水）。

在结合水膜以外的水，为正常的液态水溶液，它受重力的控制而流动，能传递静水压力，称为自由水。

自由水包括毛细水及重力水。

毛细水是受毛细作用控制的水，它除了受重力作用外，还受到表面张力引起的毛细作用的支配。可以把土的孔隙看作是连续的变截面的毛细管。在物理学中已经知道毛细管中毛细水的上升高度取决于毛细管的直径，毛细管直径愈小，上升高度愈高。土中的毛细水也会从潜水面上升到一定的高度。毛细水对公路路基的干湿状态及冻害有重要的影响，对砂类土的强度也有一定的影响。

重力水是只受重力控制的自由水，它不受表面张力的影响，它在重力或压力差作用下于土中渗流。

土中除结合水、自由水等液态水外，还可能有气态水（呈水蒸汽形态的水）和固态水（呈冰形态的水）存在。不同形态的水，在一定条件下会相互转化，并对土的性质起着重要作用。

3. 土的气相主要指土孔隙中充填的空气。土的含气量与含水量有密切关系。土孔隙中占优势的是气体还是水，土的性质有很大的不同。

土中气体的成分与大气成分比较，主要的区别在于 CO_2 、 O_2 及 N_2 的含量不同。一般土中气体含有更多的 CO_2 ，较少的 O_2 ，较多的 N_2 。土中气体与大气的交换愈困难，两者的差别就愈大。

土中的气体可分为与大气连通的和不连通的两类。与大气连通的气体对土的工程性质影响不大。在受到外力作用时，这种气体能很快地从孔隙中被挤出。而与大气不连通的密封气体对土的工程性质影响较大。在受到外力作用时，随着压力的增大，这种气泡可被压缩或溶解于水中，压力减少时，气泡会恢复原状或重新游离出来。这种含气体的土称为非饱和土。非饱和土的工程性质研究已形成土力学的一个新分支。

第二节 土的颗粒特征

本节专门论述组成土的各个土粒的特征。实际上土是由土粒集合体组成的。有关集合体的特征将在下一节讨论。

一、土粒大小及粒组划分

土粒大小是描述土的最直观和最简单的标准。对于立方体或圆球体的土粒。可直接量测立方体的边长或圆球体的直径来描述土粒的大小。但实际上，土粒的形状往往是不规则的，很难直接量测土粒的大小。因而通过一些分析方法来定量地描述土粒的大小。常用的分析土粒大小的方法有两种。对于大于 0.1mm 的土粒常采用筛分析的方法，而对于小于 0.1mm 的土

粒则用沉降分析的方法。

筛分析法就是把试样放在筛网网孔逐级减小的一套标准筛上摇震，停留在某一筛孔上的土粒重量即代表土粒大小为大于该筛孔而又小于上一筛孔的土粒重量。

在沉降分析法中，土粒大小即相当于与实际土粒有相同沉降速度的理想圆球体的直径。

天然土体土粒大小变化很大，由 $1 \times 10^{-6}\text{mm}$ 的极细粘土颗粒，一直变化到有几米大小的岩石碎块。

土粒的大小称为**粒度**。在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确定的。划分粒组有两种方式：

- 1.任意划分的方式，即按一定的比例递减关系划分粒组的界限值。
- 2.考虑土粒性质变化的方式，即使划分的粒组界限值与粒组性质（如矿物成分、物理性质、水理性质、力学性质等）的变化相适应。

对粒组的划分，各个国家，甚至一个国家各个部门有不同的规定。图1-1所示为我国交通部《公路土工试验规程（JTJ 050-85）》及水利电力部《土工试验规程（SDS01-79）》中粒组的划分。图中也列出了美国麻省理工学院的粒组划分。

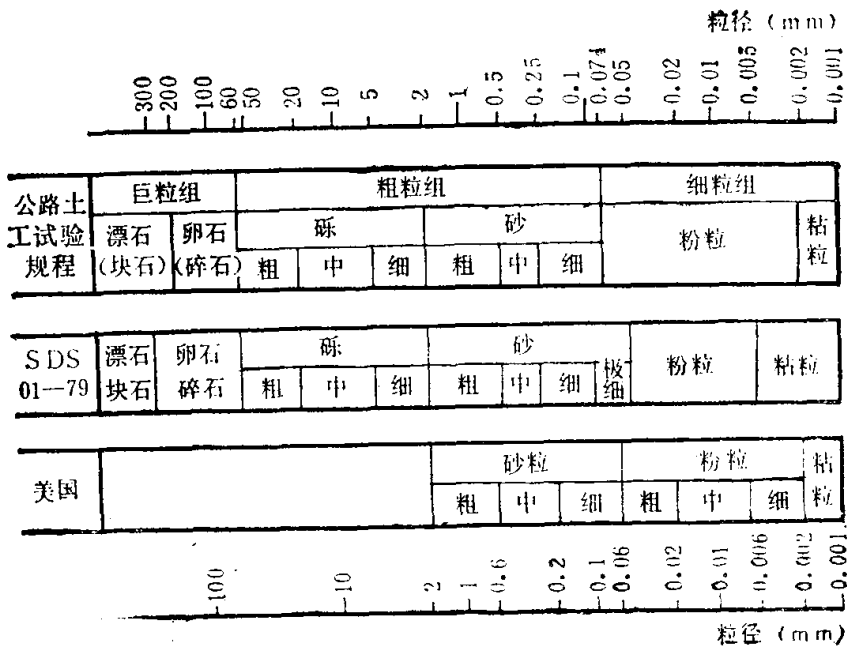


图1-1 土粒粒组的划分

二、粒度成分及其表示方法

土的**粒度成分**是指土中各种不同粒组的相对含量（以干土重量的百分比表示），它用来描述土的各种不同粒径土粒的分布特性。

常用的**粒度成分**的表示方法有：表格法、累计曲线法和三角形坐标法。

1.表格法：以列表形式直接表达各粒组的百分含量。它用于粒度成分的分类是十分方便的，例如表1-1。

2.累计曲线法：它是一种比较完善的图示方法。通常用半对数纸绘制。横坐标（按对数比例尺）表示某一粒径 d ；纵坐标表示小于某一粒径的土粒的累计百分含量（注意：不是某一粒径的百分含量）。采用半对数纸，可以把细粒的含量更好地表达清楚，如采用普通坐标纸，则不可能做到这一点。图1-2是根据表1-1的资料绘制的。由累计曲线可以直观地判断土

中各粒组的分布情况。曲线 *a* 表示该土绝大部分是由比较均匀的砂粒组成的；而曲线 *b* 表示该土是由各种粒组的土粒组成，土粒是极不均匀的；曲线 *c* 表示该土中砂粒极少，主要由细颗粒组成的粘性土。

由累计曲线上，可确定两个土粒的级配指标：

不均匀系数

$$C_u = d_{60}/d_{10} \tag{1-1}$$

曲率系数(或称级配系数)

$$C_c = d_{30}^2/d_{10} \cdot d_{60} \tag{1-2}$$

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 越大，表示土粒大小分布范围大，土的级配良好。曲率系数 C_c 则是描述累计曲线的分布范围，反映累计曲线的整体形状。

一般认为不均匀系数 $C_u < 5$ 时，称为匀粒土，其级配不好； $C_u > 10$ 时，称为级配良好的土。但实际上仅用单独一个指标 C_u 来确定土的级配情况是不够的，还必须同时考察累计曲线的整体形状，故需兼顾曲率系数 C_c 值。

当同时满足不均匀系数 $C_u > 5$ 和曲率系数 $C_c = 1 \sim 3$ 这两个条件时，土为级配良好的土；如不能同时满足，土为级配不良的土。

例如图1-2中曲线 *a*， $d_{10} = 0.10\text{mm}$ ； $d_{30} = 0.22\text{mm}$ ； $d_{60} = 0.39\text{mm}$ ；则 $C_u = 3.9$ ， $C_c = 1.24$ ，土样 *a* 为级配不良的土。

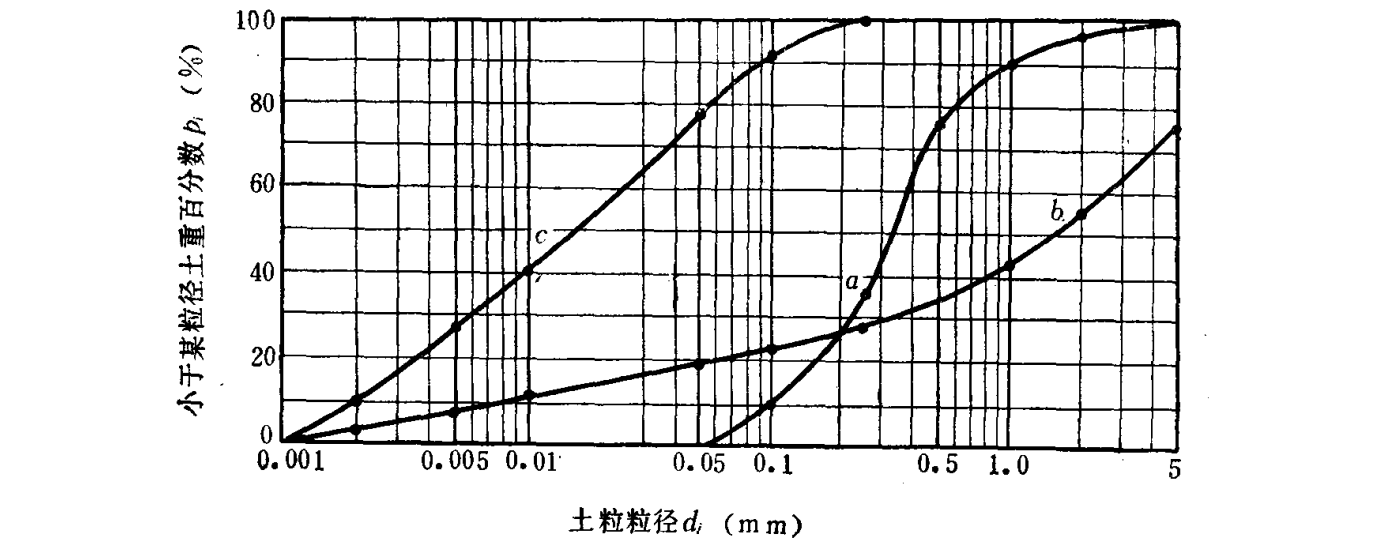


图1-2 粒度成分累计曲线

3.三角坐标法：三角坐标法可用来表达三种粒组的含量。三角形坐标是由等边三角形组成，如图1-3。在几何上已知等边三角形内任一点到三角形各边的垂直距离之和为一常数，等于三角形之高，即 $h_1 + h_2 + h_3 = H$ 。如取三角形的高 $H = 100\%$ ， h_1 为粘土颗粒的含量， h_2 为粉土颗粒的含量， h_3 为砂土颗粒的含量。则 *m* 点即表示土中粘粒、粉土粒及砂粒的百分

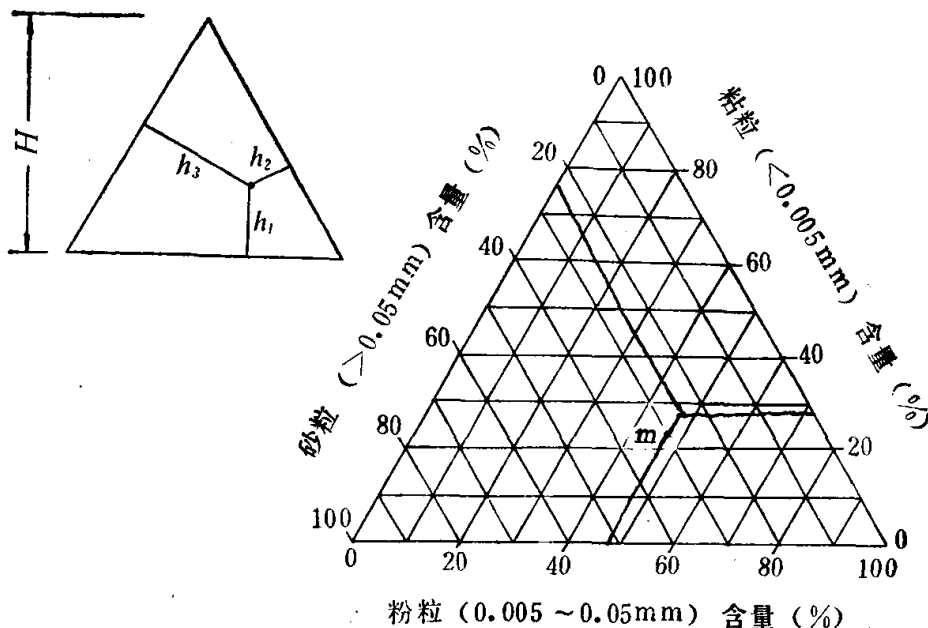


图1-3 三角坐标表示粒度成分

含量分别为28.9%、48.7%和22.4%。在道路工程、水利工程中三角坐标法是常用的方法。

三、粒度成分分析方法

粒度成分分析的目的在于确定土中各粒组颗粒的相对含量。对于粗粒土，即颗粒大于0.1mm的土，可以用筛分析法。对于颗粒小于0.1mm的土，则可用沉降分析法。当土中粗细粒兼有，则可联合使用筛分法和沉降分析法。

1.筛分法：利用一套标准筛子，可测定留在每一筛子上的土粒重量（如表1-1），并可计算小于某一筛孔直径土粒的累计重量及累计百分含量。

2.沉降分析法：沉降分析法就是根据土粒在液体中沉降的速度与粒径间的关系可由司笃克斯（Stokes）定理确定。属于沉降分析法的有比重计法及吸管法。

土粒越大，在静水中沉降速度越快；反之，土粒越小，沉降速度越慢。设有一个圆球形颗粒在无限大的不可压缩的粘滞性液体中，它在重力作用下产生的稳定沉降速度 v 可以用司笃克斯公式计算：

$$v = \frac{2}{9} r^2 \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\eta} \quad (1-3)$$

式中： v ——球形颗粒在液体中的稳定沉降速度(m/s)；

r ——球形颗粒的半径(m)；

γ_s 、 γ_w ——分别为颗粒及液体的容重(N/m³)；

η ——液体的粘滞度(Pa·s)。

公式(1-3)也可写为：

$$d = \sqrt{\frac{18\eta}{\gamma_s - \gamma_w}} \sqrt{v} \quad (1-4)$$

式中： d ——球形颗粒的直径(m)。

如近似地取 $\gamma_w = 9.81 \times 10^3 \text{ N/m}^3$ （水溶液）， $\eta = 0.00114 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ （对于15℃的水溶液）， $\gamma_s = 26 \times 10^3 \text{ N/m}^3$ ，则代入公式(1-4)得：

$$d = 0.001126\sqrt{v} \quad (\text{m})$$

若颗粒直径 d 以毫米计, 则上式成为:

$$d = 1.126\sqrt{v} \quad (\text{mm}) \quad (1-5)$$

式(1-5)表明粒径与沉降速度的平方根成正比。实际上土粒并不是圆球形颗粒, 因此用司笃克斯公式求得的颗粒直径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。

在进行粒度成分分析时, 先把一定重量 $W_s(\text{g})$ 的干土制成一定体积的悬液, 搅拌均匀后, 在刚停止搅拌的瞬时, 各种粒径的土粒在悬液中是均匀分布的, 即各种粒径在悬液中的浓度(单位体积悬液内含有的土粒重量)在不同深度处都是相等的。静置一段时间 $t_i(\text{s})$ 后, 悬液中粒径为 d_i 的颗粒以相应的沉降速度 v_i 在水中沉降。较粗的颗粒在悬液中沉降较快, 较细的颗粒则沉降较慢。考虑如图 1-4 所示深度 $L_i(\text{m})$ 处, 则沉降速度为 $v_i = L_i/t_i$ 的颗粒, 其

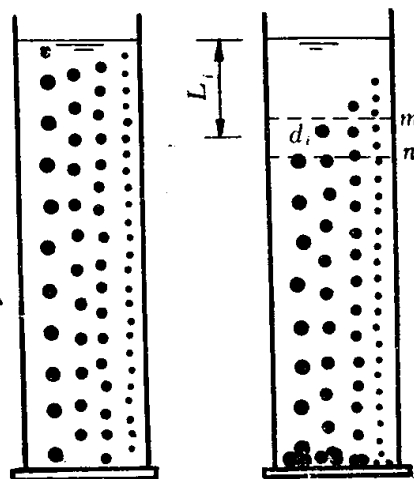


图1-4 土粒在悬液中的沉降

直径相当于 $d_i = 1.126\sqrt{\frac{L_i}{t_i}}(\text{mm})$ 。所有大于 d_i 的颗粒, 其沉降速度必然大于 v_i , 因此在 L_i 深度范围内, 肯定已没有大于 d_i 的颗粒。如在 L_i 深度处考虑一个小区段 $m-n$, 则 $m-n$ 段内的悬液中只有等于及小于 d_i 的颗粒, 而且等于及小于 d_i 颗粒的浓度与开始均匀悬液中等于及小于 d_i 颗粒的浓度相等。

如果悬液体积为 1000cm^3 , 其中所含 $\leq d_i$ 的土粒重量为 $W_{si}(\text{g})$, 则在 $m-n$ 段内悬液的密度为:

$$\gamma_i = \frac{1}{1000} \left[W_{si} + \left(1000 - \frac{W_{si}}{\gamma_{s0}} \right) \gamma_{w0} \right] \quad (1-6)$$

式中: W_{si} ——悬液中 $\leq d_i$ 土粒的重量(g);

γ_{s0} 、 γ_{w0} ——土颗粒及水的密度(g/cm^3)。

$$\text{则} \quad W_{si} = 1000 \frac{\gamma_i - \gamma_{w0}}{\gamma_{s0} - \gamma_{w0}} \cdot \gamma_{s0} \quad (1-7)$$

悬液中 $\leq d_i$ 土粒重量 W_{si} 占土粒总重 W_s 的百分比 p_i 为:

$$p_i = \frac{W_{si}}{W_s} \times 100\% \quad (1-8)$$

公式(1-7)中的悬液密度 γ_i 可用比重计测读, 也可用吸管吸取 $m-n$ 处的悬液试样测定。

有关比重计法和吸管法的具体试验操作及计算, 可参阅土工试验的书籍或讲义。

比重计法的优点是操作简便, 不需多次烘干称重; 而吸管法则比较麻烦, 但对于细砂及粘土, 它是可靠的方法, 通常用它测定小于 0.05mm 土粒的含量。

四、土粒形状

土粒形状对土体的密度及稳定性有显著的影响。大部分粉砂粒及砂粒是浑圆的或棱角状的, 而云母颗粒往往是片状的, 粘土颗粒则往往是薄片状的。土粒的形状取决于矿物成分,