

交通类成人高等教育系列教材

# 土质学与土力学

李明田 赵峥嵘 主编

Jiaotonglei  
Chengren Gaodeng  
Jiaoyu Xilie Jiaocai



山东大学出版社

交通类成人高等教育系列教材

# 土质学与土力学

主 编 李明田 赵峥嵘  
副主编 马华月 温淑莲

山东大学出版社

### 图书在版编目(CIP)数据

土质学与土力学/李明田,赵峥嵘主编. — 济南:山东大学出版社,2006.7  
ISBN 7-5607-3204-6

I. 土...

II. ①李... ②赵...

III. ①土质学—成人教育:高等教育—教材

②土力学—成人教育:高等教育—教材

IV. ①P642.1②TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 081908 号

山东大学出版社出版发行

(山东省济南市山大南路 27 号 邮政编码:250100)

山东省新华书店经销

山东旅科印务有限公司印刷

787×1092 毫米 1/16 11.25 印张 324 千字

2006 年 7 月第 1 版 2006 年 7 月第 1 次印刷

印数:1—4000 册

定价:22.00 元

**版权所有,盗印必究**

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社营销部负责调换

# 前 言

本书是根据教育部颁布实施的《普通高等学校本科专业目录》中规定的土木工程专业培养目标和教育部审定的《土质学与土力学课程教学基本要求》编写的。

本书编写过程中参考了许多高校教材,力求做到取材适宜、内容精练、由浅入深、联系实际,并注重学生的分析能力、解题能力和实践应用能力的培养。

本书可作为普通高等教育、成人高等教育、高等教育自学考试“土木工程”专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

本书共分九章,由山东交通学院土木工程系李明田、赵嵘任主编,马华月、温淑莲任副主编。其中李明田编写绪论和第四、六章,赵嵘编写第一、三章,菏泽公路局马华月、济宁公路局陈奎民编写第二、九章,温淑莲编写第七、八章,何君莲编写第五章。为便于成人高等教育和高等教育自学考试学员业余学习、复习及应用,本书各章前均给出了考核要求,章内列举了例题,章后附有复习思考题、习题。书末附有自学进度表,可供学习时参考。

鉴于编者水平所限,在内容和结构安排上难免有不足之处,读者在使用本教材过程中,若发现不妥或错误之处,敬请批评指正。

编 者  
2006年6月

# 目 录

|                     |      |
|---------------------|------|
| 绪 论                 | (1)  |
| 第一章 土的物理性质及工程分类     | (4)  |
| 第一节 土的三相组成          | (5)  |
| 第二节 土的颗粒特征          | (6)  |
| 第三节 土的结构            | (12) |
| 第四节 土作为三相体的比例指标     | (13) |
| 第五节 黏性土的界限含水量及其测定   | (18) |
| 第六节 砂土的密实度          | (20) |
| 第七节 土的工程分类          | (22) |
| 习 题                 | (28) |
| 思考题                 | (29) |
| 第二章 土中水的运动规律        | (30) |
| 第一节 土的毛细性           | (30) |
| 第二节 土的渗透性           | (34) |
| 第三节 流网及其应用          | (42) |
| 第四节 土在冻结过程中水分的迁移和积聚 | (47) |
| 习 题                 | (49) |
| 思考题                 | (50) |
| 第三章 土中应力计算          | (51) |
| 第一节 概 述             | (51) |
| 第二节 土的自重应力计算        | (53) |
| 第三节 基础底面的压力分布与计算    | (55) |

|            |                   |              |
|------------|-------------------|--------------|
| 第四节        | 竖向集中力作用时的土中应力计算   | (58)         |
| 第五节        | 竖向分布荷载作用下的土中应力计算  | (62)         |
| 第六节        | 有效应力概念            | (75)         |
| 第七节        | 其他条件下的地基应力计算      | (80)         |
| 习 题        |                   | (85)         |
| 思考题        |                   | (87)         |
| <b>第四章</b> | <b>土的压缩性与沉降计算</b> | <b>(88)</b>  |
| 第一节        | 土体压缩性的概念与意义       | (88)         |
| 第二节        | 研究土体压缩性的方法及变形指标   | (89)         |
| 第三节        | 地基沉降计算            | (96)         |
| 第四节        | 沉降与时间的关系          | (107)        |
| 习 题        |                   | (119)        |
| 思考题        |                   | (121)        |
| <b>第五章</b> | <b>土的抗剪强度</b>     | <b>(122)</b> |
| 第一节        | 概 述               | (122)        |
| 第二节        | 土的强度理论与强度指标       | (123)        |
| 第三节        | 土的抗剪强度指标测定方法      | (127)        |
| 第四节        | 有效应力原理在强度问题中的应用   | (132)        |
| 第五节        | 关于土的抗剪强度影响因素的讨论   | (135)        |
| 习 题        |                   | (138)        |
| 思考题        |                   | (139)        |
| <b>第六章</b> | <b>土压力</b>        | <b>(140)</b> |
| 第一节        | 概 述               | (140)        |
| 第二节        | 土压力的种类与影响因素       | (141)        |
| 第二节        | 静止土压力计算           | (142)        |
| 第三节        | 朗肯土压力理论           | (145)        |
| 第四节        | 库仑土压力理论           | (152)        |
| 第五节        | 朗肯理论与库仑理论的比较      | (159)        |
| 第六节        | 车辆荷载引起的土压力计算      | (161)        |
| 习 题        |                   | (165)        |
| 思考题        |                   | (166)        |
| <b>第七章</b> | <b>土坡稳定性分析</b>    | <b>(167)</b> |
| 第一节        | 概 述               | (167)        |
| 第二节        | 砂性土土坡稳定分析         | (168)        |

---

---

|                               |              |
|-------------------------------|--------------|
| 第三节 黏性土土坡稳定分析·····            | (169)        |
| 第四节 土坡稳定分析的几个问题·····          | (180)        |
| 习 题·····                      | (181)        |
| 思考题·····                      | (182)        |
| <b>第八章 地基承载力·····</b>         | <b>(183)</b> |
| 第一节 概 述·····                  | (183)        |
| 第二节 临界荷载的确定·····              | (186)        |
| 第三节 极限荷载计算·····               | (189)        |
| 第四节 按规范方法确定地基容许承载力·····       | (199)        |
| 习 题·····                      | (203)        |
| 思考题·····                      | (204)        |
| <b>第九章 土在动荷载作用下的力学性质·····</b> | <b>(205)</b> |
| 第一节 土的压实性·····                | (205)        |
| 第二节 砂土和粉土的振动液化·····           | (211)        |
| 习 题·····                      | (216)        |
| 思考题·····                      | (216)        |
| <b>附 录 自学进度表·····</b>         | <b>(217)</b> |
| <b>参考文献·····</b>              | <b>(218)</b> |

# 绪 论

## 一、土质学与土力学的研究对象

土质学及土力学是一门研究土的学科,目的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、冰川和风等挟带搬运,使土颗粒进一步破碎分散,并使土颗粒变得浑圆和分选。土在搬运过程中随之产生沉积,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,往往经历很长的地质历史年代,其中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,土的性质与其成因有关,土的最大特征是分散性。

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,这时土被用作为地基;而对于路堤、土坝等土工构筑物,土则是被用作建筑材料;此外,如隧道、涵洞及地下建筑等,土却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。土的性质与其成因有关,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非常复杂。由于土的分散性,其性质极易受到外界环境(如温度、湿度)的影响而发生变化。

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,它往



往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、土质学与土力学的研究内容及方法

土质学是地质学科的一个分支,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。

自然环境的变化也会影响土的稳定性,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,这是由于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,亦即稳定土问题,就是根据土质学中黏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,这一点对超静定结构的桥梁特别重要。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,等等,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,同时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

### 考核要求

1. 了解土的三相组成,掌握土的颗粒级配的含义、颗粒级配的做法、用途以及土中水的主要形态。
2. 记住三相比例的定义,掌握土的三相比例指标以及相互换算。
3. 理解黏性土的物理状态,掌握其界限含水量及其测定方法。
4. 了解土的结构与构造。
5. 了解砂土的密实度的工程意义,掌握评价砂土密实度的试验方法及相应指标。
6. 掌握各类土的分类方法,会根据土的物性指标确定土的名称。

土是由岩石经过物理与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。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像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,我们把土体看作颗粒性的多孔材料,在土粒之间的孔隙中,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。

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、黏性土的界限含水量、砂土的密实度和工程分类等。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、分析与解决土木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,土中的三相物质组成是很复杂的,因此,必须首先了解土的物质组成。

### 1. 土的固相

土的固相物质分为无机矿物颗粒和有机质,是土的骨架。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、黏土矿物、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,可溶的次生矿物按其溶解难易程度又可分为易溶、中溶和难溶等。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

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、无臭。其密度为  $1\text{g}/\text{cm}^3$ ,容重为  $9.81\text{kN}/\text{m}^3$ 。在  $0^\circ\text{C}$  时冻结,在  $100^\circ\text{C}$  时沸腾。但实质上,土中水是成分复杂的电解质水溶液,与土粒间有着复杂的相互作用。这一点将在第二章中进一步讨论。

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、黏滞度均比一般正常水为高,冰点低于  $0^\circ\text{C}$ ,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,它受重力的控制在土粒间的孔隙中流动,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连续改变截面的毛细管。在物理学中已经讲到,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,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(呈水蒸气形态的水)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

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  $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$  及  $\text{N}_2$  的含量不同。一般土中气体含有更多的  $\text{CO}_2$ 、较少的  $\text{O}_2$ 、较多的  $\text{N}_2$ 。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,气泡则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成为土力学的一个新分支。

## 第二节 土的颗粒特征

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

### 一、土颗粒的大小及粒组划分标准

天然土是由大小不同的颗粒组成的,土粒的大小称为粒度。

土粒大小是描述土的最直观和最简单的标准,但土粒的大小相差悬殊,有大于几十厘米的漂石,也有小于几厘米的胶粒。对于较大的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,因而往往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振摇,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,变化范围可由  $1 \times 10^{-6}$  mm 的极细黏土颗粒一直到有几米大小的岩石碎块。

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,主要有两种方式:

(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,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。

关于粒组的划分,各个国家甚至一个国家各个部门都有不同的规定。图 1-1 所示为我国交通部《公路土工试验规程(JTJ051-93)》(M0101-93)对粒组的划分。

|            |             |       |    |   |   |     |      |       |           |
|------------|-------------|-------|----|---|---|-----|------|-------|-----------|
|            | 200         | 60    | 20 | 5 | 2 | 0.5 | 0.25 | 0.074 | 0.002(mm) |
| 巨粒组        |             | 粗粒组   |    |   |   |     |      | 细粒组   |           |
| 漂石<br>(块石) | 卵石<br>(小块石) | 砾(角砾) |    |   | 砂 |     |      | 粉粒    | 黏粒        |
|            |             | 粗     | 中  | 细 | 粗 | 中   | 细    |       |           |

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),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

这种方法以列表形式直接表示各粒组的百分含量(如表 1-1a),或以累计含量百分比表示(如表 1-1b)。用这种方法对粒度成分分类是十分方便的。

表 1-1a 土的粒度成分

| 粒组(mm)      | 粒度成分(以重量%计) |      |      |
|-------------|-------------|------|------|
|             | 土样 a        | 土样 b | 土样 c |
| 10~5        | —           | 25.0 | —    |
| 5~2         | 3.1         | 20.2 | —    |
| 2~1         | 6.0         | 12.0 | —    |
| 1~0.5       | 14.4        | 8.0  | —    |
| 0.5~0.25    | 41.5        | 6.2  | —    |
| 0.25~0.10   | 26.0        | 4.9  | 8.0  |
| 0.10~0.05   | 9.0         | 4.6  | 14.4 |
| 0.05~0.01   | —           | 8.1  | 37.6 |
| 0.01~0.005  | —           | 4.2  | 11.1 |
| 0.005~0.002 | —           | 5.2  | 18.9 |
| <0.002      | —           | 1.5  | 10.0 |

表 1-1b

粒度成分的累计百分含量表示法

| 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   |
| 0.010         | —                              | 10.9   | 40.0   |
| 0.005         | —                              | 6.7    | 28.9   |
| 0.001         | —                              | 1.5    | 10.0   |

## 2. 累计曲线法

这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清楚地表达出来。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;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,主要是由细颗粒组成的黏性土。

由累计曲线可确定两个土粒的级配指标:

(1) 不均匀系数

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

(2) 曲率系数(或称级配系数)

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

式中:  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{60}$  分别相当于累计百分含量为 10%, 30%, 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，对图 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。

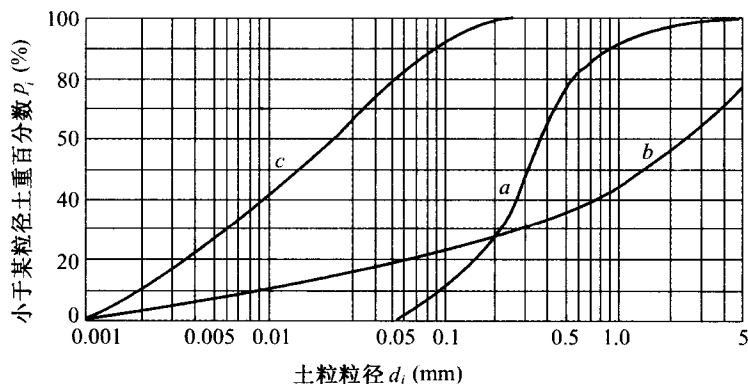


图 1-2 粒度成分累计曲线

### 3. 三角坐标法

这种分法可用来表达三种粒组的含量。三角形坐标由等边三角形组成，如图 1-3 所示。由几何知识可知，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  $H = 100\%$ ， $h_1$  为黏土颗粒的含量， $h_2$  为砂土颗粒的含量， $h_3$  为粉土颗粒的含量，则  $m$  点即表示土中黏粒、粉土粒及砂粒的百分含量分别为 23.0%，47.0%，30.0%。在道路工程、水利工程中，三角坐标法是常用的方法。

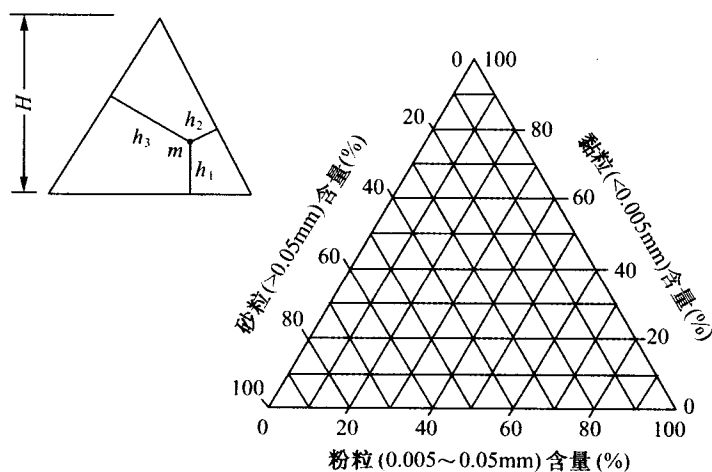


图 1-3 三角坐标表示粒度成分



### 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;当土中粗细粒兼有时,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(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

根据土粒在液体中沉降的速度与粒径间的关系,可由斯托克斯(Stokes)定理确定沉降速度。属于沉降分析法的有比重计法和吸管法。

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。设在无限大的不可压缩的黏滞性液体中有一个圆球形颗粒,在重力作用下产生的稳定沉降速度  $v$  可用斯托克斯公式计算:

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

式中: $v$  为球形颗粒在液体中的稳定沉降速度(m/s); $r$  为球形颗粒的半径(m); $\gamma_s, \gamma_w$  分别为颗粒及液体的容重(N/m<sup>3</sup>); $\eta$  为液体的黏滞度(Pa·s)。

公式(1-3)也可写成为:

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

式中: $d$  为球形颗粒的直径(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°C 的水溶液),  $\gamma_s = 26 \times 10^3 \text{ N/m}^3$ , 则代人公式(1-4)可得:

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

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,因此用斯托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  $W_s$  (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  $t_i$  (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。如图 1-4 所示,深度  $L_i$  (m) 处沉降速度为  $v_i = L_i/t_i$  的颗粒,其直径相当于  $d_i = 1.126 \sqrt{\frac{L_i}{t_i}}$  (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  $m \sim n$ ,