

高等学校试用教材

土质学及土力学

(公路与桥隧专业用)

同济大学土力学与基础工程研究室等编

人民交通出版社

高等学校试用教材

土质学及土力学

(公路与桥隧专业用)

同济大学土力学与基础工程研究室等编

人民交通出版社

高等学校试用教材

土质学及土力学

(公路与桥隧专业用)

同济大学土力学与基础工程研究室等编

人民交通出版社出版

(北京市安定门外和平里)

北京市书刊出版业营业许可证出字第 006 号

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张: 13.25 字数: 320 千

1979年12月 第1版

1979年12月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—5,750 册 定价: 1.40 元

前 言

本书根据1978年8月在西安召开的交通部公路工程专业和桥梁与隧道专业全国统编教材编写大纲会议所制定的教材大纲编写的。编写时，参考了1961年出版的高等学校试用教科书《土质学及土力学》；学习了兄弟院校的教学经验，并充实了在教学和科学研究中积累的一些资料。在编写过程中，力图吸收和反映近代土力学的国内外最新成果，但限于水平与篇幅，反映得还很不够。

本书试图把土质学和土力学更好地结合起来，为了有利于教学，在内容安排上按先易后难，先简后繁的顺序分为两大部分共九章。

第一部分从第一章到第五章，是最基本、实用的土力学原理；从第六章开始的第二部分主要是土质学与土力学相结合的一些比较深入和比较新的问题（由于内容安排上的原因，也包括了一些实用的基本内容）。对于第二部分，各院校可以根据专业要求、地区特点以及具体条件，有选择地讲授其中的部分或全部。这样的教材体系是否恰当，有待在教学实践中检验。

按照教育部关于新编大、中专教材采用国际单位制的指示精神，本书对主要物理量都详细介绍了国际制单位及换算方法，在书末附有国际单位换算表，并给出了用国际制运算的例题和习题。对于现行规范、规程、经验公式和经验数据仍采用原有的公制单位，但在每一种单位第一次出现时都同时介绍国际制单位，并在有关公制数据下加注与国际单位制的换算关系。

本书由同济大学土力学与基础工程研究室高大钊主编，北京工业大学地基基础教研室陈建平参加编写，重庆建筑工程学院地基基础教研室漆锡基主审。编写分工是：陈建平编写第一、六、七章（其中第一章由高大钊修改，第七章由洪毓康修改），高大钊编写第二、三、四、五章以及第八、九章（其中第五章由洪毓康修改）。第六章粘性土的物理化学性质在以往教学中难点较多，编写时作了反复研究和修改，尽可能结合工程需要来阐明粘土矿物及其与水相互作用的基本概念；在陈建平编写了两稿的基础上，由陈士衡编写了部分修改稿，俞调梅教授对这一章的体系和内容选择提出了具体方案，并提供许多新的资料，最后由高大钊执笔定稿，朱小林校订。

本书是在俞调梅教授的指导下完成的。洪毓康对本书的编写作了许多帮助并校阅了全书。

目 录

绪论.....	I
第一章 土的物理性质及土的工程分类	3
第一节 土的组成.....	3
一 矿物成分与有机质成分	3
二 土中水	3
三 土中气体	4
第二节 土的粒度成分	4
一 粒组和粒度成分的概念	5
二 粒度成分表示方法	5
三 粒度成分分析方法	7
第三节 土的物理性质指标	9
一 三相比例指标的概念	9
二 三相比例指标的换算	11
三 评价砂土密实度的指标	13
四 标准贯入试验	15
第四节 粘性土的分界含水量及状态指标	15
一 粘性土的分界含水量	15
二 粘性土的塑性指数和液性指数	16
第五节 土的工程分类	17
一 粗粒土的工程分类	18
二 细粒土按粒度成分分类	18
三 粘性土按塑性指数分类	19
四 细粒土按塑性图分类	19
第二章 土中应力.....	22
第一节 概述	22
一 研究土中应力的目的	22
二 自重应力计算	23
三 基底压力分布	23
第二节 集中荷载作用下的应力分布	25
一 直线变形体的基本假定	25
二 布西奈斯克课题	25
第三节 局部面积的分布荷载作用下的应力分布	28
一 空间课题	28
二 平面课题	36
第四节 其它一些问题	40
一 台后填土引起的基底附加压力	40

二 扩散角的概念	41
三 洗露蒂课题	42
四 荷载作用在半无限体内部时的应力分布	44
第三章 沉降计算	46
第一节 概述	46
一 沉降计算的目的	46
二 沉降计算所需的资料	46
第二节 土的压缩性指标	47
一 压缩试验	47
二 压缩曲线和压缩系数	48
三 压缩模量	49
第三节 沉降计算的分层总和法	50
一 基本公式	50
二 计算规定	52
三 计算步骤与方法	52
四 讨论	55
第四节 沉降与时间关系的概念	56
一 最终沉降量的概念	57
二 土骨架和孔隙水的压力分担作用	57
第四章 土的抗剪强度与土压力计算	59
第一节 概述	59
一 研究土的强度问题的工程意义	59
二 抗剪强度试验的目的	59
第二节 直剪试验	60
一 直接剪切试验与库仑定律	60
二 砂类土的剪切试验	61
三 粘性土的剪切试验	62
第三节 土的强度理论	63
一 摩尔应力圆	63
二 三轴试验的概念	64
三 土的极限平衡条件	66
四 无侧限抗压强度	68
第四节 朗金土压力理论	69
一 土压力的概念	69
二 静止土压力以及朗金土压力公式	69
三 填土表面有连续均布荷载作用时的土压力计算	71
第五节 库仑土压力理论	73
一 主动土压力计算公式	74
二 填土表面作用车辆荷载时土压力的计算	76
三 库尔曼图解法	78
四 墙后填土为粘性土的土压力计算	79
第六节 地震土压力的计算	81
第七节 土压力的一些特殊问题	83

一 土压力计算的概念	83
二 土抗力计算的概念	84
第五章 土坡稳定和地基承载力	87
第一节 用条分法验算均质土坡的稳定	87
一 基本概念及计算公式	88
二 怎样确定最危险滑动圆弧的圆心	89
第二节 地基承载力	91
一 载荷试验	92
二 地基破坏的模式	93
三 确定地基容许承载力的方法	94
第三节 临界荷载和极限荷载	96
一 临塑荷载和临界荷载的公式	96
二 临塑荷载和临界荷载公式的推导	97
三 极限荷载的计算公式	99
四 极限荷载公式的推导	102
第四节 按桥涵设计规范确定地基容许承载力	104
一 基本承载力	105
二 地基容许承载力的修正和提高	106
第六章 粘性土的物理化学性质	110
第一节 粘土颗粒的矿物成分、形状和比表面	110
一 粘土矿物	110
二 粘土矿物的判别与硅铝率	112
三 粘土矿物的比表面	113
四 分散系的概念	113
第二节 粘性土的胶体性质	114
一 粘土颗粒的带电性	114
二 扩散层与结合水膜	115
三 土粒之间的相互作用力	116
四 影响胶体性质的主要因素	117
第三节 粘性土的胶体性质对于工程性质的影响	120
一 对粘性土可塑性的影响	120
二 触变性	121
三 对强度和压缩性的影响	122
四 粘性土的胀缩性	123
第七章 土中水的运动规律	126
第一节 土的毛细性	126
一 土层中的毛细水带	126
二 毛细水上升高度及上升速度	127
三 毛细压力	128
第二节 土的渗透性	129
一 土的层流渗透定律	129
二 影响土的渗透性的因素	130
三 动水力及流砂现象	131

第三节 土在冻结过程中水分的迁移和积聚	132
一 冻胀的概念及冻胀对工程的危害	132
二 冻胀的机理与影响因素	133
三 冻结深度	134
第八章 土的变形和强度特性	135
第一节 土的变形模量与压缩模量的关系	135
一 变形模量	135
二 侧压力系数	136
三 变形模量与压缩模量的关系	137
第二节 土在重复荷载下的变形特性	140
一 弹性变形与塑性变形	140
二 弹性模量的测定方法	140
三 关于弹性模量的一些讨论	142
第三节 土的固结理论	143
一 单向固结理论的基本假定及结果	143
二 三向固结理论的概念及砂井理论	149
第四节 有效强度指标的测定及其应用	151
一 有效强度指标	151
二 孔隙水压力系数	153
三 有效强度用于稳定分析的一些原则	154
四 软粘土在荷重下的强度增长规律	156
五 现场十字板剪力仪	158
第五节 砂土振动液化	159
一 砂土振动液化的危害	159
二 砂土振动液化的机理和影响因素	160
三 砂土液化可能性的评价方法	162
四、振动三轴仪	163
第六节 土的压实性	164
一 研究压实性的目的	164
二 击实试验	164
三 最大干容重与最佳含水量	166
第九章 土的综合评价	171
第一节 土的成因、年代对工程性质的影响	171
一 土按成因、年代的工程分类	171
二 我国特殊土的分布	174
第二节 土的结构构造对工程性质的影响	175
一 土的结构	175
二 历史荷载的影响	177
三 土的层理与裂隙	180
第三节 区域性经验公式的利用	183
一 常用经验公式	184
二 经验公式统计方法的简单介绍	184
三 静力触探仪	185

第四节 根据勘察报告评价土的工程特性	186
一 工程地质勘察报告的主要内容	186
二 作为地基土的评价	187
三 作为筑路用土的评价	188
四 土的野外目力鉴别	188
附录一 符号与术语	192
附录二 国际单位制换算表	195
附录三 参考书目	197

绪 论

一、土质学及土力学的研究对象

土是由不同成因的岩石经风化作用（物理风化、化学风化和生物风化）后以不同的搬运方式，在不同地点沉积下来的自然历史产物。

任何建筑物都是建造在土体（或岩体）上的，这种支承建筑物的土体（或岩体）称为地基；而路堤、土坝等土工构筑物则同时以土作为建筑材料修筑的；还有一些建筑物（如涵洞、隧道等）则以土作为它的周围介质。土质学及土力学就是把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以及土的工程问题的分析、计算原理。因此，它是土木、水利工程等专业的一门技术基础课。

二、土质学及土力学研究的内容

土质学是从地质学范畴里发展起来的，它从土的成因与成分出发，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，用数学工具求解土在各种条件下的应力分布、变形计算以及土压力、地基承载力与土坡稳定等课题。同时，土力学亦必须重视土性的研究，并据以评价各种力学计算方法的可靠性与适用条件。

土质学和土力学本来是两门亲缘关系十分密切的学科。近二十年来，土质学某些问题的研究与土力学的研究正在互相渗透，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-变形-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。因此，本课程把土质学与土力学结合在一起讲授，根据循序前进、由浅入深的原则，安排了两个部分的内容。

第一部分讲授土力学的最基本原理。包括土的物理性指标与土的工程分类；土中应力分布的计算；用分层总和法计算沉降；土的抗剪强度；朗金土压力理论与库仑土压力理论；用条分法验算均质土坡稳定以及确定地基承载力的几种常用方法等。学习了这些内容就可以获得解决常用的简单条件下的土力学问题的能力，同时也具备了学习第二部分内容的必备基础知识。

第二部分主要是一些比较深入和比较新的问题。包括从粘土颗粒表面物理化学现象来阐明粘性土的许多重要工程性质（如电动性、触变性、可塑性及胀缩性等）；土中水的各种运动规律（如渗透、毛细水上升及冻结时土中水分的迁移与积聚等）；土在重复荷载作用下的强度与变形问题（如砂土振动液化、弹性模量等）；土的固结理论及有效强度原理；土的压实性；我国特殊土的分布特点；土的结构与构造；以及经验公式的利用与土的综合评价。

等。这些内容为解决更为复杂条件下的工程问题提供一些初步的、但是很基本的概念，并有助于专业课程的学习。

三、土质学及土力学这门学科与专业的关系

公路工程专业、桥梁与隧道专业毕业的工程技术人员在所从事的工作中将会碰到大量有关土的工程问题。

在路基工程中，土是修筑路堤的材料，也是支承路堤的地基。路堤的临界高度和边坡的坡度取值，主要依赖于土的工程性质；为了获得具有一定强度和良好水稳定性的路基，要用碾压方法压实填土，而碾压质量控制和施工要求都与土的压实特性有关；挡土墙土压力的计算需要应用土力学的有关成果。

在路面工程中，土基的冻胀与翻浆在我国北方地区是十分突出的问题，防治冻害的有效措施是以土质学的某些原理为基础的；稳定土是一种比较经济的路面基层材料，它就是根据土的物理化学性质提出的一种土质改良措施；路面在车辆重复荷载作用下工作，因此需要研究土在重复荷载下的变形特性。

在桥梁工程中，基础工程常常是能否在预定桥址建桥的技术关键，其造价占总造价的很大比重；对于有些超静定的桥跨结构，基础的沉降、倾斜或水平位移是很重要的设计数据；桥梁墩台基础底面积尺寸与埋置深度的选择，基础稳定性的验算都需要土力学所提供的计算指标和方法；墩台下地基的处理与加固方法常以土质学及土力学的基本原理为依据。

由此可见，土质学及土力学这门学科与路基、路面工程、桥梁工程都有着密切的联系，学习这门课程是为了更好地学习有关专业课程，为了更好地解决有关土的工程技术问题。

第一章 土的物理性质及土的工程分类

为了正确地解决和土有关的工程技术问题，需要对土的组成先有一个初步的了解，并进而掌握土的物理性质指标与状态指标的概念以及这些指标的试验方法与计算方法。同时，还需要掌握土的工程分类的方法。这些就是第一章的基本内容。有些问题还要在以后的一些章节中（例如第六章）作比较深入的研究。

第一节 土的组成

土不是连续介质，而是由固体颗粒和颗粒间孔隙中的水和气体组成的；因此可以把土看成三相体系，包括固相、液相和气相。

固相包括矿物颗粒和有机质，又称土的骨架；

液相是指土中水，它部分或全部地充满于土粒间的孔隙内；

气相是指土中空气、水汽或其它封闭气体，它占据着未被水所充满的那部分孔隙。

一、矿物成分与有机质成分

土中的矿物成分可以分为原生矿物与次生矿物两大类：

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；

次生矿物是指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、高岭石、蒙脱石、伊利石以及碳酸钙等盐类。

在分散土中，粗颗粒的土如碎石、卵石等都是母岩的风化碎屑，矿物成分与母岩完全相同，较细颗粒的土如砂土中大部分是破碎后的单矿物颗粒，这些矿物是母岩中比较稳定的石英、长石、云母等；细颗粒的粘土中大部分是次生矿物颗粒，特别是高岭石、伊利石和蒙脱石等粘土矿物，对细粒土的物理-力学性质起着显著的作用。此外，原生矿物中的云母和次生矿物中的盐类对于某些土的性质有重要作用，例如粉土中的云母和黄土中的碳酸钙。

在微生物的作用下，生物遗体被腐化。其分解后，形成分散土中的有机质成分。泥炭是低度分解的有机残余物，完全分解后称为腐殖质。有机质成分含量较高时，对土的性质有很大的影响。

从外表上看到的土的颜色，在一定程度上反映土的固相的不同成分与含量。红色、黄色和棕色一般表示土中含有较多的三氧化二铁，并说明氧化程度较高。且存在着较多的三氧化二铝等氧化物；黑色表示土中含有较多的有机质或含有锰的化合物；灰蓝和灰绿色一般含亚铁化合物，是在缺氧条件下形成的；而白色或灰白色则表示土中有机质较少，且主要含石英或含高岭石等粘土矿物。当然，湿度会影响颜色的深浅，一般描述的是潮湿状态的土的颜色。

二、土 中 水

土中水可分为结合水与自由水两大类：

结合水是指土颗粒表面的水膜中的水，受到表面引力的控制而不服从静水力学规律，冰点低于 0°C ；

自由水是指在表面引力作用范围以外的水，与普通水无异，为重力所控制，能传递静水压力并具有溶解能力。

结合水的概念是十分重要的，是正确解释粘性土的一系列工程特性的必备基础知识；这里先介绍初步的概念，在第六章还要更深入地讨论。次生矿物颗粒，特别是粘土矿物颗粒具有较强的与水相互作用的能力，称为亲水性；腐殖质也有很大的亲水性。这些亲水性的土颗粒表面对于水分子和离子都有吸引的能力，在靠近土粒表面的地方引力最大，水分子和离子排列得十分紧密，失去了水的某些特性。例如根据一些资料报导，这层水的密度大于1.0，冰点可达零下几十度。通常把最靠近土颗粒表面的这层水称为强结合水（或称吸着水）。表面引力随着距离迅速地降低，距土粒表面稍远的地方，水分子仍定向排列，但不如强结合水那末紧密；因此这种水有可能从较厚的水膜或溶液浓度较低处缓慢地迁移到较薄的水膜或浓度较高处；亦即可能从一个土粒迁移到另一个土粒，这种运动与重力无关。这层不能传递静水压力的水称为弱结合水（或称薄膜水）。

分散土中结合水的机理是土质学研究的一个重要内容。图1-1是结合水的简化模型，更详细的解释见第六章。

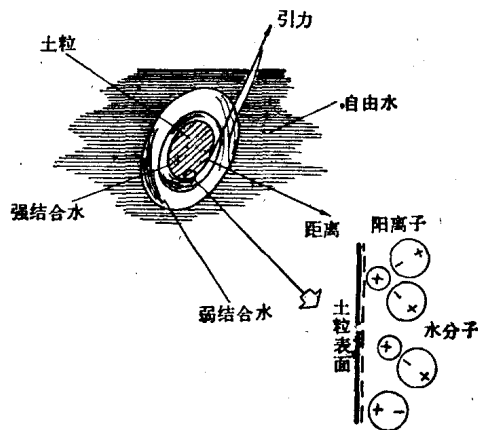


图1-1 结合水的简化模型

自由水包括毛细水及重力水。毛细水不仅受到重力而且还受到表面张力的支配，能通过土的连通孔隙从潜水面上升到一定的高度，这种毛细上升水对于公路路基土的干湿状态有着重要的影响。由于毛细水而作用在土颗粒上的毛细压力，对于砂类土的强度有一定的影响。重力水在重力或压力差作用下能在土中渗流；对于土粒及结构物都有浮力作用。在土力学计算中应当考虑到这样的渗流及浮力的影响。

三、土中气体

土中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并没有多大影响，它的成分与空气相似，而且容易与外界的空气互换；土受到外力作用时，这种气体很快地从孔隙中挤出；密闭气体对土的工程性质有较大的影响，它的成分可能是空气、水汽或天然气。在压力作用下，这种气泡可被压缩或溶解于水中，压力减小时又会恢复原状。含有气体的土称为非饱和土，非饱和土的工程性质研究对于路基工程有重要的意义。

第二节 土的粒度成分

分散土是由不同大小和不同形状的颗粒所组成。颗粒的大小和形状在一定程度上反映成土环境的特点及矿物成分，这影响到土的工程性质，因此引起人们的重视。

一、粒组和粒度成分的概念

土颗粒的大小称为粒度，把大小相近的颗粒合并为一组，称为粒组（或粒级），各种粒组的粒径范围见表1-1。

土的粒组

表1-1

	粒 组	粒 径 范 围 (mm)	
		大 中 小	
1	漂石（磨圆的）、块石（棱角的）		>800 800~400 400~200
2	卵石（磨圆的）、碎石（棱角的）		200~60 60~40 40~20
3	圆砾（磨圆的）、角砾（棱角的）		20~10 10~4 4~2
4	砂	粗 中 细	2~0.5 0.5~0.25 0.25~0.05
5	粉 土	0.05~0.005	
6	粘 土	<0.005	

关于粒组划分，在不同国家的规范中存在着一一定的差别。其中较重要的是把0.002毫米作为粘土粒组的界限，从土的胶体性质来看，这可能是更合理的。

对于用作路基材料的土来讲，后面的三个粒组即砂土、粉土与粘土粒组更为重要，路基的水稳定性主要依赖于这三个粒组的合理的相对含量。

天然分散土总是由大小不同的土颗粒所组成的，可以用不同粒组的相对含量（以干土重量百分比表示）来说明土颗粒组成的情况，这就称为土的粒度成分。粒度成分可用作土的工程分类的依据。

二、粒度成分表示方法

粒度成分可以用不同的方法来表达，常用的方法有表格法、累计曲线法和三角座标法等。

表格法是用列表的办法来表达，常见于土工试验报告书，例如表1-2。这用于按粒度成分分类是十分方便的。

粒度成分分析结果

表1-2

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	20.0	—
2~1	6.0	12.3	—
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
0.005~0.001	—	5.2	18.9
<0.001	—	1.5	10.0

累计曲线法是一种图示的方法，通常画在半对数纸上，如图1-2所示，横座标（按对数标尺）表示某一粒径 d ，纵座标表示小于 d 的土重百分含量；图中也给出了表1-2中三个土

样的粒度成分累计曲线。用半对数纸的理由是,土的最大与最小粒径会相差几个数量级,而且较细土粒具有更重要的意义;因此如果用普通的坐标纸不能很好表示较细土粒的相对含量。

从累计曲线可以大致地比较与判断土的粒径级配情况。例如,图1-2中曲线 a 表示粒径比较单一即比较均匀的砂土,级配不那么好;曲线 b 所示的级配比较好;曲线 c 表示细颗粒含量较多,属于粘性土。

对于砂土,采用不均匀系数 C_u 这个指标来评价土的级配情况,按不均匀系数的定义:

则:

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

式中: d_{10} ——在累计曲线上相当于累计百分含量为10%的粒径,称为有效粒径;

d_{60} ——在累计曲线上相当于累计百分含量为60%的粒径,称为限制粒径。

不均匀系数 C_u 越大,表示级配越良好。不均匀系数大于5的土称为级配良好的,小于5的土称为均匀的[1]。

例如图1-2中的曲线 a , $d_{10} = 0.12$, $d_{60} = 0.39$, 则:

$$C_u = \frac{0.39}{0.12} = 3.2$$

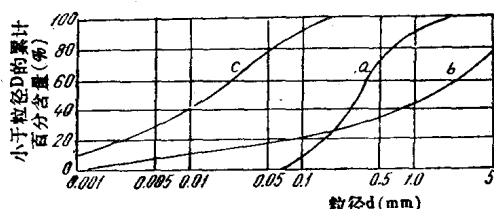


图1-2 粒度成分累计曲线

表明曲线 a 是级配均匀的土。

三角座标法也是一种图示法。它利用等边三角形内任意一点 m 至三个边的垂直距离的总和恒等于此三角形之高这一几何原理,以表示组成土的三个粒组的相对含量。三角座标法只适用于划分为三个粒组的情况,因此,当把粘性土划分为砂土、粉土和粘土粒组时,就可以用三角座标图来表示。

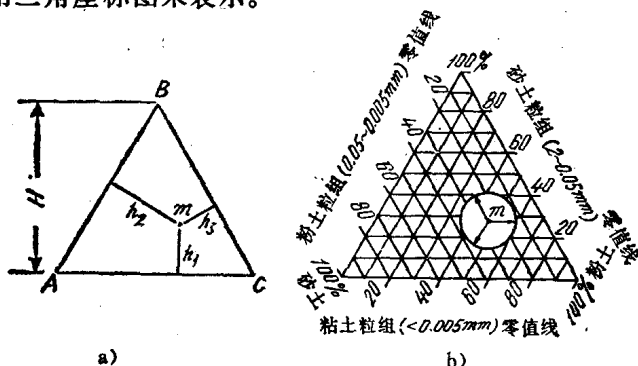


图1-3 三角座标表示土的粒度成分

图1-3a)是一个等边三角形, $h_1 + h_2 + h_3 = H$ 。如令三角形的高 H 等于100%, h_1 为粘土粒组的百分含量, h_2 为粉土粒组的百分含量, h_3 为砂土粒组的百分含量,则 m 点就表示某一土样的粒度成分。如图1-3b)上的 m 点就代表表1-2中的土样C, m 点的三个箭头分别指出三个粒组的百分含量。

平行于粘土粒组零线的箭头所指的就是粘土粒组的含量28.9%;其余两个箭头相应地指出与它平行的粒组的含量,即粉土粒组含量为28.9%,砂土粒组含量为22.4%。对于其它粒度成分的粘性土样,亦可用同样的方法确定另一点的位置。因此可以在三角座标图上比较不同土样的粒度成分。这可用来表示土的分类及进行级配稳定土的设计。在道路工程中,三角座标法是常用的方法。

以上三种表示方法的特点及适用条件如下:

表格法能很清楚地用数量说明土样的粒组含量,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,使用上比较困难。

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

三角座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, 便于路基选土级配设计。

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, 可以用筛分法, 就是用一套孔径不同的标准筛把各粒组分离出来, 这和建筑材料的粒径级配筛分试验是一样的。但粒径较细的粒组无法用筛分法分离出来, 这是因为很细的土粒互相结合在一起。筛分法只适用于粒径大于0.1毫米的粒组。如果粒径小于0.1毫米的土粒含量较高并且要求把粉土粒组和粘土粒组划分出来的话, 就要用沉降分析法。

1. 沉降分析法的基本原理

根据土粒在悬液中沉降的速度与粒径间关系的规律来确定各粒组相对含量的方法称为沉降分析法, 这个规律称为司笃克斯 (Stokes) 定理。

土粒越大, 在静水中沉降的速度越快; 反之, 土粒越小, 沉降速度越慢。设有一个球形颗粒在无限大的、不可压缩的粘滞性液体中, 那末, 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:

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

式中: v ——球形颗粒在液体中的稳定沉降速度(厘米/秒);

g ——重力加速度(厘米/秒²);

r ——球形颗粒的半径(厘米);

γ_s, γ_w ——分别为颗粒及液体的密度(克/立方厘米);

η ——液体粘滞度(泊, 即达因·秒/平方厘米)。

令球形颗粒的直径 $d = 2r$, 并以毫米为单位, 则公式(1-2)可写成如下的形式:

$$d = \sqrt{\frac{1800\eta}{(\gamma_s - \gamma_w)g}} \sqrt{v} \quad (1-3)$$

公式(1-3)表明, 粒径与沉降速度的平方根成正比, 粗的颗粒沉得快, 细的颗粒沉得慢。

实际上, 土粒并不是球体颗粒, 因此用司笃克斯公式求得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。

公式(1-3)为水力直径与沉降速度关系的一般公式。分散土的不同粒径是连续分布的, 对于每一粒径都有对应的水力直径与沉降速度, 并且符合公式(1-3)的关系。

在给定的条件下, 颗粒的密度 γ_s 为已知值、重力加速度是一定的、粘滞度 η 和水的密度 γ_w 的数值都与悬液的温度有关, 它们在一定温度时为常量。因此公式(1-3)右边第一个根号为常量, 水力直径 d 与沉降速度 v 的平方根成正比; 或者, 倘若在时间 t 的沉降距离为 L , 就可以说, 水力直径 d 与沉降距离 L 的平方根成正比, 与沉降时间 t 的平方根成反比。

在进行粒度成分分析时, 把一定重量 G_s (如20~40克)的干土制成一定体积 V_0 (如1000立方厘米)的悬液, 搅拌均匀后静置时, 悬液中不同粒径 d_i 的颗粒都以相应的速度下沉, 我们将在这样的条件下分析由于土粒沉降而导致的悬液均匀程度的变化。图 1-4 是土粒在悬液中沉降的示意图, 在停止搅拌的瞬间, 悬液是均匀的, 它的浓度即悬液的密度 (或者叫容重) γ_0 为:

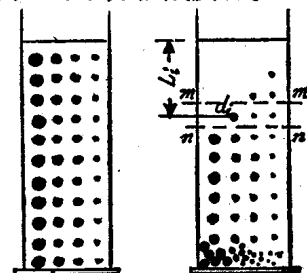


图1-4 土粒在悬液中沉降的示意图

$$\gamma_0 = \frac{1}{1000} \left[g_s + \left(1000 - \frac{g_s}{\gamma_s} \right) \gamma_w \right] \quad (1-4)$$

此时如从悬液表面下任意深度处取出少许悬液，其浓度均等于 γ_0 。

静置一定时间 t_1 后，由于粗颗粒沉得快，细颗粒沉得慢，因此在不同深度处悬液的浓度变得很不相同了。在公式 (1-3) 中令 $v = L_1/t_1$ ，则对应的直径 d_1 可表达为：

$$d_1 = \sqrt{\frac{1800\eta}{(\gamma_s - \gamma_w)g}} \cdot \sqrt{\frac{L_1}{t_1}} \quad (1-3a)$$

这个公式表明，直径为 d_1 的土粒经历时间 t_1 后，正好从悬液表面沉到深度 L_1 处。由于假定土粒在悬液中匀速下沉，因此在深度 L_1 范围以内已经没有大于 d_1 的土粒了，或者说大于 d_1 的土粒已沉到 L_1 深度以下去了，并且在 L_1 深度附近一个小区段 $m-n$ 内等于及小于 d_1 的土粒分布浓度，与开始的均匀悬液中等于及小于 d_1 的土粒分布浓度 γ_1 一样。当时间 t_1 增大时， d_1 减小，因而 L_1 处悬液浓度也随之减小。浓度 γ_1 可表示为：

$$\gamma_1 = \frac{1}{1000} \left[g_{s1} + \left(1000 - \frac{g_{s1}}{\gamma_s} \right) \gamma_w \right] \quad (1-5)$$

公式 (1-5) 中的 g_{s1} 即为在 g_s 重的土样中等于及小于 d_1 的土粒重量。

从公式 (1-5) 可以写出悬液中等于及小于 d_1 的土粒重量 g_{s1} 的计算公式：

$$g_{s1} = 1000 \frac{\gamma_1 - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \times \gamma_s \quad (1-6)$$

则悬液中等于及小于 d_1 的土粒重量 g_{s1} 占总土重 g_s 的百分比 P_1 可由下式求得：

$$P_1 = \frac{g_{s1}}{g_s} \times 100\% \quad (1-7)$$

如在悬液搅拌均匀，静置时间 t_1 后，用容积为 V 的移液管从深度 L 处吸出悬液试样，烘干后的干土重量除以悬液试样体积 V 得悬液密度 γ_1 ，代入公式 (1-6) 和 (1-7) 即可求得 P_1 值。同时将 L 及 t_1 代入公式 (1-3a) 求得水力直径 d_1 。在不同时间 t_1 重复上述试验及计算就可得到一系列的 d_1 值以及等于及小于 d_1 的土粒百分含量 P_1 ，这就是移液管法的概念。

2. 用比重计法分析土的粒度成分

本书主要介绍用比重计法来测定土的粒度成分，比重计法是沉降分析法中最常用的一种。比重计是用来测定溶液密度的一种仪器，它的外形如图 1-5 所示，对于不均匀的悬液，从比重计读出的密度值只表示浮泡中心处的悬液密度。在粒度成分分析中，比重计读数既表示浮泡中心处的悬液浓度 γ_1 ，又表示从悬液表面到浮泡中心处的沉降距离 L_1 (L_1 与比重计读数的关系曲线可预先作出，它和比重计的几何形状有关)。因此，只要把悬液搅拌均匀后隔不同时间 t_1 测读比重计的读数（此读数就是悬液浓度 γ_1 ），就能求出相应于不同时间 t_1 的一系列的按公式 (1-3a) 及 (1-7) 计算的 d_1 和 P_1 值。

比重计法是目前在土工试验中广泛采用的方法，它能够简便和较快地测定小于 0.1 毫米的粒组含量。如土中有较粗的颗粒时，可与筛分法配合使用。

关于具体的试验操作及计算，可参阅土工试验的书籍或讲义。下面简单介绍试验要点。

比重计法的操作程序是：(1) 制备土样；(2) 搅拌均匀；(3) 静置不同时间 t_1 后，重复



图1-5 乙种比重计