

高等学校教材

土力学及路基

西南交通大学 梁钟琪 主编
上海铁道学院 巫锡畴 主审

中国铁道出版社

1995年·北京

高等学校教材

土力学及路基

西南交通大学 梁钟琪 主编
上海铁道学院 巫锡畴 主审

中国铁道出版社

1995年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书为修订教材。在修订中,根据编者多年的教学经验和实践,对原书的章节结构作了一些调整;依据我国的法定计量单位和现行新规范,以及新技术的发展,对全书计量单位和各章节的部分内容进行了精选和更新;为便于学生学习,各章末还增设了算例和习题。本书主要内容有:土的物理性质,土中应力,土的压缩与地基沉降,土的渗透性及固结理论,土的抗剪强度,天然地基的承载力,土坡的稳定性,软土地区路基,土压力,挡土墙,滑坡地段路基,路基构造及基床变形等。

本书为铁路高等院校铁道工程、铁道工程地质等专业用教材,也可供从事这方面工作的工程技术人员参考。

高等学校教材

土力学及路基

西南交通大学 梁钟琪 主编

*

中国铁道出版社出版发行

(北京市东单三条 14 号)

责任编辑 程东海 封面设计 王毓平

中国铁道出版社印刷厂印

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:18.25 字数:453 千

1993 年 12 月 第 1 版 1995 年 9 月第 2 次印刷

印数:2001—5000

ISBN7-113-01528-X/TU · 331 定价 10.70 元

目 录

绪 论	1
第一章 土的物理性质	3
第一节 土的形成	3
第二节 土的颗粒分析与结构	3
第三节 土的各相数量指标	6
第四节 土的物理和物理-化学性质	10
第五节 土的分类	16
第二章 土中应力	19
第一节 土中一点的应力状态	19
第二节 地基土的自重应力	20
第三节 基础底面的接触压力	22
第四节 地基土的附加应力	24
第三章 土的压缩与地基沉降	38
第一节 土的压缩性	38
第二节 土的形变模量	41
第三节 荷载试验	44
第四节 地基沉降计算	45
第五节 应力历史对粘性土压缩性的影响	50
第六节 填土压实	54
第四章 土的渗透性及固结理论	59
第一节 土的渗透性	59
第二节 饱和粘性土的单向固结	63
第三节 太沙基二维、三维固结理论	75
第四节 比奥固结理论	83
第五节 砂土振动液化	86
第五章 土的抗剪强度	88
第一节 土的抗剪强度的基本概念与直剪试验	88

第二节	应力圆与莫尔——库伦破坏准则	91
第三节	轴压试验和十字板试验	95
第四节	孔隙压力系数	99
第五节	剪切试验中土的性状	102
第六节	应力路径的概念	112
第六章	天然地基的承载力	117
第一节	地基的破坏形态	117
第二节	地基临塑压力	119
第三节	浅基础地基极限荷载的近似解	121
第四节	按《铁路桥涵设计规范》确定地基承载力	126
第五节	原位测试确定地基承载力	131
第七章	土坡的稳定性	137
第一节	概 述	137
第二节	砂性土土坡的稳定性分析	138
第三节	粘性土土坡的稳定性分析	139
第四节	浸水路堤的稳定性检算	147
第五节	地震对土坡稳定的影响	151
第六节	可靠度理论在土坡稳定分析中的应用	153
第八章	软土地区路基	157
第一节	软土的成因类型及物理力学性质指标	157
第二节	软土地基路堤稳定性分析	159
第三节	软土路基的加固措施	163
第四节	砂井加固软土地基的设计及施工	176
第五节	施工现场的监测工作	188
第九章	土压力	192
第一节	概 述	192
第二节	朗金土压力理论	194
第三节	库伦土压力理论	199
第四节	库伦理论细粒土主动土压力	206
第五节	大俯角墙背的主动土压力——第二破裂面法	208
第六节	折线形墙背的土压力计算	213
第七节	桥台土压力	218
第八节	其他情况下的主动土压力	219
第九节	土压力问题讨论	223

第十章 挡土墙	229
第一节 概 述	229
第二节 重力式挡土墙检算	232
第三节 轻型挡土墙	243
第十一章 滑坡地段路基	253
第一节 滑坡稳定性分析	253
第二节 滑坡稳定分析中计算指标的确定	256
第三节 排水和防护工程	260
第四节 支挡工程和其它措施	265
第十二章 路基构造及基床变形	270
第一节 路基构造	270
第二节 基床变形及其防治	273
附录 各种边界条件下的库伦主动土压力公式	278

绪 论

土力学是用力学原理和土工试验技术来研究土的一门专门性科学。它以力学和工程地质学的知识为基础,对土的物理力学性质进行研究,为各项专门工程服务。

土力学是铁道工程专业的基础技术课程,它的先行课程是力学和工程地质学,它的后续课程有路基、桥梁基础和隧道等。

土力学的建立与发展,始终和工程建设紧密地联系在一起,它来源于工程实践,又服务于工程实践。

在土层上修筑建筑物,土层便成为建筑物的地基,是建筑荷载的支承体,因此,地基受力后的一切变化都决定于土的性质。开挖土层修造建筑物,或使土体产生新的临空面,或使土成为建筑物的周围介质,均影响土的固有状态。例如,以土筑造路堤,土的天然结构与地基受力状态就有了改变。为了保证建筑物建筑成功并能正常使用,就要分析研究土的力学性质。

土和其他材料一样,受力后将产生变形。如果这种变形(沉降)超过了一定的限度,就会使建筑物损坏或不能正常使用。这类问题在土力学里叫做变形问题。如果土受力超过了它所能承受的能力,土便要破坏,建筑物便要倒毁或不能使用。土体的破坏,在土力学里称为丧失稳定性。研究土体是否会被破坏这类问题,称为稳定问题。土的稳定性取决于它的强度。因此,稳定问题的实质,就是土的强度问题。

《土力学及路基》的主要任务是阐述土力学的基本理论,同时紧密联系路基工程的实际问题,研究土的变形和稳定及相应的路基设计计算原理。全书由以下四个部分组成。

(1)土的物理性质:它是土力学原理的基础,包括土的物理及物理化学性质。在第一章中介绍,是本专业学生必须具备的基本知识。

(2)地基土的变形问题:这部分包括三章,第二章讨论土中应力及分布,第三、第四章研究土受到荷载作用后的压缩变形规律及在水下土的渗透固结等力学性质,预测工程建筑物修建及使用期间地基的沉降,是路基及基础工程设计中的重要内容。

(3)土的强度和稳定问题:在论述土的强度、土压力的基础上,结合路基工程,从不同角度阐述路基、软土路基、支挡结构、滑坡及抗滑工程等土工建筑的稳定理论及加固方法。

软土路基及滑坡两章,应用土的强度分析自然斜坡与软弱地基的稳定与沉降,并介绍了路基的各种加固措施(如地基加固、地表排水、地下排水、防护、支挡等)的综合应用,以达到全面了解路基设计的内容。

这部分是本书的主要部分,也是土力学中的重点内容。

(4)路基构造及变形:介绍路基构造的基本内容及运营期间路基的变形与整治。它是本专业学生必须掌握的基本专业知识,在第十二章中介绍。

当前,国内外对土力学及土工方面正在进行多方面的研究工作,无论是基本理论、试验设备、试验技术或是计算手段等都在迅速的发展。如试验过程采用计算机程序控制,仪器设备趋向自动化,土工方面的模型试验、现场原位实测已得到较为普遍的应用,并且各单位不同程度

地应用了离心试验,计算工作用有限元进行分析,使得不均匀土层与一些复杂边界条件的问题,都可以通过计算解决,可以说,这门年轻的学科,已经进入一个新的发展时代。

第一章 土的物理性质

第一节 土的形成

在地球表面除基岩裸露的部位外都覆盖着一层颗粒状物质,称为土。各种建筑物在多数情况下总是同土发生关系。因此,必须研究和掌握土的工程特性。

除火山灰、硅藻土等外,绝大多数土都是岩石在漫长的地质历史年代经物理风化或化学风化作用而形成的产物。物理风化是指由于温度变化、水的冻胀、波浪冲击等作用使岩石块体崩解为碎块和岩屑的过程,土中的碎石、砾石、砂粒等便是岩石物理风化的产物。化学风化作用是由水、空气中的二氧化碳和氧以及生物活动等所促成的。它使构成岩石的化学成分发生水化、氧化、还原、碳酸化及溶解等作用;它不仅使岩石进一步崩解,而且使风化的矿物发生化学成分上的变化。极细的粘土颗粒便是岩石经化学风化作用后的产物。在自然界中,这两种风化作用往往同时或交替进行,所以由岩石风化而成的土常是物理风化和化学风化的共同产物,或者以某一种风化作用为主的产物。

岩石风化后形成的破碎物质覆盖层,如残留于原处,称为残积层。如地形平缓,基岩风化严重,残积层的厚度可以很大。由于它未经搬运,故其颗粒大都呈棱角状,粒径组成也未经分选,大小不一,其性质随着深度的增大逐渐向未经风化的基岩过渡。岩石的风化产物,可因自重作用坠落,或被流水、风和冰川搬运至远处后沉积,形成坡积层、洪积层、冲积层、冰川沉积层或风成沉积层等。由于搬运与沉积的条件和行程远近等的不同,土粒大小的分选程度、土粒形状以及土的结构都会有所不同。在地表上经过流水搬运、分选和重新沉积的土层分布甚广,是土力学中研究的主要对象,而其它搬运方式形成的土,则是土力学中的特种土。

第二节 土的颗粒分析与结构

工程中所研究的土并不只是土的颗粒,而是其整体。土是由不同的相所构成的多相体物质。由矿物颗粒组成土的骨架,其间存在孔隙,若孔隙中同时存在着水和气体,则土是三相的。土粒、水和气体分别称为土的固相、液相和气相。有时,土粒间的孔隙全部被水所充满,形成饱和土,则土是两相的。当土粒间的孔隙中只存在空气时,干土也是两相的。土的各相的相对含量和相互作用对土的状态与性质有着明显的影响。

一、土的颗粒分析

土的骨架是由土粒组成的。自然界中,土粒的大小很不均匀,碎石颗粒的直径可达 10cm 以上,而在平静的水中缓慢沉积的细微粘土颗粒的直径有时只有 0.0001mm。不同粒径的土粒在土中的相对含量是决定土的工程性质的重要指标之一。为了确定各种大小土粒的相互关系,将土粒的直径大小进行归并与分类,分成若干粒组。每一粒组具有一定的粒径变化范围。粒组

的划分则反映其随着粒径的变化、工程性质由量变到质变的规律。《铁路路基设计规范》TBJ1—85(以下简称《路基规范》)所采用的粒组划分列于表 1—1 中。这种划分所确定的粒径界限尺寸基本上符合土粒性质由量变到质变的规律。例如,当粒径大于 2mm 时(碎石、砾石颗粒),土中不具有毛细力,土粒间不存在相互间的连结;当粒径为 2~0.05mm 时(砂粒),土中存在毛细力,但不具备粘聚性;当粒径为 0.05~0.005mm 时(粉粒),土具有粘聚性,但随着水分的减少,土粒间的连结力不断减弱;而当粒径小于 0.005mm 时(粘粒),土体不仅具有粘聚性,而且随着水分的减少,变得更加坚硬。

天然土是各种不同大小土粒的混合体,它包含着几种粒组的土粒。不同粒组在土中的相对含量在很大程度上决定着土的工程特性,因此常作为土的工程分类的依据。这种相对含量用各粒组的重量所占土体总重的百分比来表示,叫做土的级配。它是通过土的颗粒分析试验确定的。

砂土及粗碎屑土的颗粒分析试验,通常采用筛分法。这种试验方法适用于粒径在 0.1mm 以上的粗颗粒。试验时,采用一套标准筛,各筛的筛孔自上而下分别为 10、5、2、1、0.5、0.25、0.1mm,上加顶盖,下加底盘,叠在一起。将粉碎状的干土样放入第一层筛中以后,用摇筛机振荡各筛,使细土粒通过筛孔漏下。称出存留在每层筛子和底盘上的土粒重量,就可以计算出颗粒为某一直径的土粒重量占总重量的百分数。

对于颗粒细微的粘性土(粒径小于 0.1mm),由于无法制作相应的细筛,同时也不能使彼此连结得很紧的土粒全部分散开来,因而不能采用筛分法。对此,可用水先使土粒彼此分散,制成悬液,然后根据不同粒径的土粒在静水中下沉速度不同的原理,来测定各粒组的百分含量。这种方法叫做水分法。各种土粒在均质液体中沉落时,起初由于重力作用,下沉速度迅速增长;经过数秒后,各种土粒的下沉速度即可达到各自的稳定数值,保持不变。不同粒径的土粒在静水中的稳定下沉速度可按斯托克斯公式求得。只要利用比重计,在不同时间内测出不同深度处的悬液密度,就可推求出直径等于和小于某一直径的所有土粒的百分含量(参见《铁路工程土工试验方法》)。

土的颗粒分析试验的结果可以用图象表示出来,以粒径为横坐标,以小于该粒径的土粒质量占全部土质量的百分比为纵坐标,绘出曲线,称为级配曲线。为了使细小的颗粒也能在图中清楚地表示出来,级配曲线通常采用半对数坐标,这时横坐标取为粒径的对数值(见图 1—1)。级配曲线可反映出土中不同粒径颗粒的分布情况。

根据级配曲线,可定量地区别土粒级配的好坏,通常借助某些特征粒径,求得不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c ,其计算式如下:

土的颗粒分组 表 1—1

颗 粒 名 称		粒 径(mm)	界限粒径 (mm)
漂石(浑圆或圆棱)或 块石(尖棱)	大	大于 800	200
	中	800~400	
	小	400~200	
卵石(浑圆或圆棱)或 碎石(尖棱)	大	200~60	20
	中	60~40	
	小	40~20	
圆砾(浑圆或圆棱)或 角砾(尖棱)	大	20~10	2
	中	10~5	
	小	5~2	
砂 粒	粗	2~0.5	$\frac{1}{20}$
	中	0.5~0.25	
	细	0.25~0.05	
粉 粒		0.05~0.005	$\frac{1}{200}$
粘土粒		小于 0.005	

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}, C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \times d_{10}} \tag{1-1}$$

式中, d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 分别为级配曲线上相应于 10%、30% 及 60% 含量的粒径。通常把 d_{10} 称为有效粒径, d_{60} 称为控制粒径。

土的不均匀系数小,表示土粒均匀,是一种级配不良的土,此时级配曲线陡,土粒组配范围窄;反之,土的不均匀系数大,表示土粒不均匀,是一种级配良好的土,级配曲线平缓,土粒级配范围宽。《路基规范》规定级配良好的标志之一是 $C_u \geq 5$ 。一般地,土的不均匀系数大,土就有足够的细颗粒去充填粗颗粒间的孔隙,使土密实。

但是,有的土缺乏中间粒径,级配曲线不连续,形成台阶状,虽然不均匀系数也很大,这种土在土中水渗流时的渗透稳定性差,也属于级配不良,此时要用曲率系数来判断。曲率系数过大,表示在 d_{10} 与 d_{30} 范围内有台阶;曲率系数过小,表示在 d_{30} 与 d_{60} 的范围内有台阶。故《路基规范》规定, $C_c = 1 \sim 3$ 为合格。凡是级配良好的土都必须同时满足上述两个条件。例如图 1—1 中曲线 a , $d_{10} = 0.07$, $d_{30} = 0.2$, $d_{60} = 0.4$, 则 $C_u = 5.7$, $C_c = 1.4$, 表明该土的级配良好。曲线 b 及 c 易于判断其为级配不良。

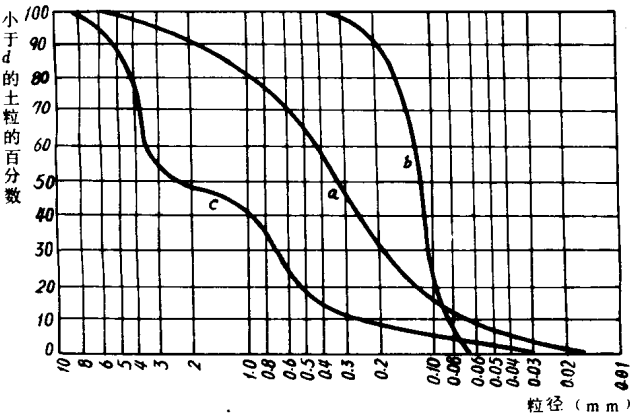


图 1—1 土的级配曲线

土的颗粒分析可作为土的分类、粗估土的工程性质及选择土为建筑材料之用。

土粒的形状与其成因及矿物成分有关。较粗的土粒,如碎石、砾石、砂粒等,是岩石经物理风化的产物。它们可能是带棱角的,也可能是磨圆的,这与搬运过程有关,其中多数颗粒在三个轴向上的尺寸相差不大。较细的土粒,如粘土粒,是岩石经物理风化和化学风化而形成的,其中多数颗粒在三个轴向上的尺寸相差很多,如鳞片状或针状颗粒。既然土粒的形状千差万别,并不是圆球,因而土的颗粒直径,只能被认为是依据某些特定的试验方法所测定出来的能反映土粒大小的一种几何尺寸,也称为等值粒径或当量粒径。筛分法中测定的粒径常是与颗粒长轴正交断面上的最大尺寸。水分法中所确定的粒径是在水中与土粒具有相同下沉速度的球状土粒的直径。

土粒的矿物组成在很大程度上影响着土的性质。碎石、砾石是由岩石破碎而成的,其颗粒远较岩石中的原有矿物颗粒为大,放一般仍保持母岩原有的多矿物结构。砂粒也是岩石物理风化的产物,但其颗粒大小与岩石中原生矿物的颗粒相差不多,故多呈单矿物形态,常由石英、长石等主要造岩矿物所组成。粉粒的矿物成分较为复杂,其较粗的颗粒一般仍为原生矿物;但在较细的粉粒中,次生矿物常占多数。粘粒主要是由次生矿物即粘土矿物组成的。粘土矿物可分为高岭石、蒙特石(微晶高岭石)和伊利石三大组。蒙特石组的粘土矿物的晶体易于劈开,因而颗粒细小,能吸附大量阳离子,具有很强的亲水性,遇水显著膨胀。高岭石组的粘土矿物则与此相反,其颗粒较为粗大,甚至可以形成粉粒;其表面虽能吸附阳离子和水分子,形成水化膜,但其亲水性较弱。伊利石组的粘土矿物的特性介于上述两者之间。

二、土 的 结 构

土的结构指土的粒径组成、空间排列形式和土粒间的联结特点。天然土的结构是在土的形成过程中和后来所经历的条件形成的，它不仅与土粒大小、形状和矿物成份等因素有关，而且还与周围介质有关。土的结构是其物理力学性质的主要决定因素之一，可据以预测在建筑物作用下土的变形；评价土作为建筑材料的质量。

粗碎屑土和砂土的颗粒较大，彼此之间没有连结力或只有微弱的连结力，它们在水中沉积时主要受重力控制，下沉时互相堆积在一起。如土粒呈棱角状，表面粗糙，且粒径较为均匀，常形成疏松的散粒结构(图 1—2a)。当受到振动或其它外力作用时，易引起很大变形。如土粒表面光滑，粒径大小相差悬殊，经受过振动时，土粒可形成紧密的散粒结构(图 1—2b)。排列紧密的土强度较大而压缩性较小，在动、静荷载作用下将不会产生大的沉降。

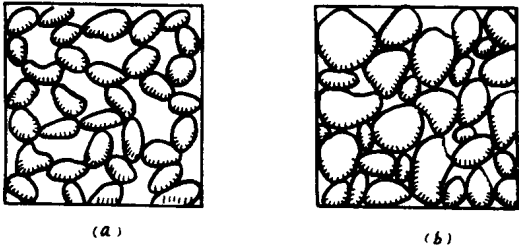


图 1—2 土的散粒结构

由粉粒($0.05\sim0.005\text{mm}$)组成的土在水中沉积时，基本上是以单个土粒下沉；当碰上已沉积的土粒时，由于它们之间的相互引力大于其重力，因此土粒就停留在最初的接触点上不再下沉，常形成具有很大孔隙的蜂窝状结构(图 1—3)。

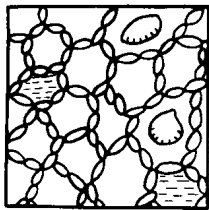


图 1—3 土的蜂窝结构

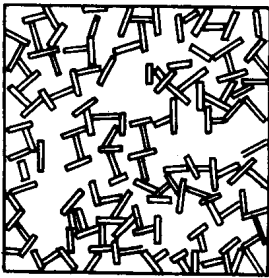


图 1—4 土的絮状结构

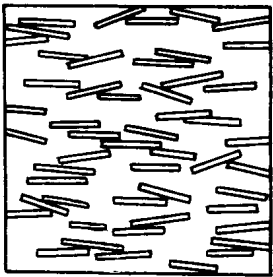


图 1—5 土的片堆结构

粘土颗粒($<0.005\text{mm}$)多呈片状或针状，表面带负电荷，而在片的断口处有局部的正电荷。粘粒在海水中沉积时，多半以面——边的方式接触，凝聚成絮状粒团下沉，并相继与已沉积的絮状粒团接触，形成类似蜂窝而孔隙很大的絮状结构(或片架结构)，见图 1—4。粘粒在淡水中，它们将单独下沉(即使极为缓慢)；沉积物多半以面——面(错开)的方式接触，定向程度较高，形成所谓的片堆结构(或分散型结构)，见图 1—5。

天然沉积土的结构要比以上的单一土的结构复杂得多，如粘性土中既有粘粒，又有粉粒和砂粒。此时，土将以粒团状态结合在一起，既有粒团内部颗粒的任意或定向排列，又有粒团之间的任意或定向排列。任何一种天然沉积土，其结构常不是单一的，而是以某种结构占优势组成。

第三节 土的各相数量指标

土是由土粒、水分和气体组成的多相体。土中各相所占的数量不仅可以描述土的物理性质

和它所处的状态,而且在一定程度上可用来反映土的力学性质。土的各相数量指标是表示土中三相比例关系的物理量。为了便于分析,我们常将土中的土粒、水和气体的体积和重量按相集中成三部分,构成如图 1—6 所示的分析模型,即三相图。土的各部分的体积与重量采用下列符号:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{总体积 } V \left\{ \begin{array}{l} \text{土粒体积 } V_s \\ \text{孔隙体积 } V_v \left\{ \begin{array}{l} \text{水分体积 } V_w \\ \text{气体体积 } V_g \end{array} \right. \\ \text{总重量 } W \left\{ \begin{array}{l} \text{土粒重量 } W_s \\ \text{水分重量 } W_w \\ \text{气体重量 } W_g (\text{可忽略不计}) \end{array} \right. \end{array} \right.$$

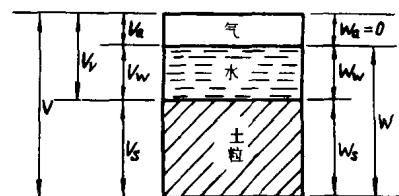


图 1—6 土的三相图

土的状态与性质都受到三相图数量关系的影响。为了定量地描述土三相间的关系,并找出它们与土的状态和性质之间的变化规律,首先需要确定反映各相间纯数量关系的指标。有些数量指标必须通过试验直接测定,称为实测指标;而另一些数量指标则可依据实测指标计算出来,称为导出指标。

一、土的密度 ρ 及容重 γ

土的密度系指单位体积土的质量,为土的质量 M 与体积之比,即

$$\rho = \frac{M}{V} (\text{g/cm}^3) \quad (1-2a)$$

土的容重 γ 指单位体积土的重量,为土体重量与体积之比,也等于土的密度乘以重力加速度,即

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{Mg}{V} (\text{kN/m}^3) \quad (1-2b)$$

土的密度在室内用环刀法测定,即用容积为 V 的环刀取土,称其质量 M 求得;不能用环刀取土样时,可用蜡封法等测定。天然土的容重随含水量而变化,一般为 $16 \sim 22 \text{kN/m}^3$ 。

二、土粒比重 G_s 和土粒容重 γ_s

土粒比重 G_s 指土中矿物颗粒的比重,即矿物颗粒与同体积 4°C 时水的质量之比,即

$$G_s = \frac{M_s}{M_w} = \frac{M_s}{V_s \rho_w} \text{ 或 } G_s = \frac{W_s}{W_w} = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \quad (1-3)$$

式中水的密度 $\rho_w \approx 1 (\text{g/cm}^3)$, 水的容重 $\gamma_w \approx 9.81 (\text{kN/m}^3) \approx 10 (\text{kN/m}^3)$ 。

土粒比重用比重瓶法测定。即将干土粒放入比重瓶,加蒸馏水煮沸除气,测得土粒排开水的体积,代入式(1—4)求得。同一种土的比重变化范围不大,一般为 $2.65 \sim 2.75$,有机质含量较多的土及泥炭土较低,可能在 2.4 以下。

土粒容重 γ_s 是土粒重量与土粒体积之比,或单位体积全为固体颗粒的重量力,即

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} = G_s \gamma_w (\text{kN/m}^3) \quad (1-4)$$

三、含 水 量 w

土的含水量系指土中水的质量与土粒质量的比值,也是两者的重力的比值,即

$$w = \frac{M_w}{M_s} = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \tag{1-5}$$

土的含水量用烘干法测定。土的天然含水量差别很大,砂土一般不超过 40%,粘性土多在 10~80%之间,而软粘土的含水量可达 100%以上。

四、孔隙比 e 与孔隙度(率) n

土的孔隙比是土中孔隙体积与土粒体积之比,即

$$e = \frac{V_v}{V_s} \tag{1-6}$$

土的孔隙度是土中孔隙体积与土的总体积之比,即

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{V_v}{V_s + V_v} \times 100\% \tag{1-7}$$

孔隙比用小数表示,可用它来评价土的密实程度。砂性土的孔隙比一般为 0.5~0.8,粘性土的孔隙比一般为 0.6~1.2。孔隙比和孔隙度不能直接测定,可用实测指标换算,由三相图求得。按图 1-7(a),有

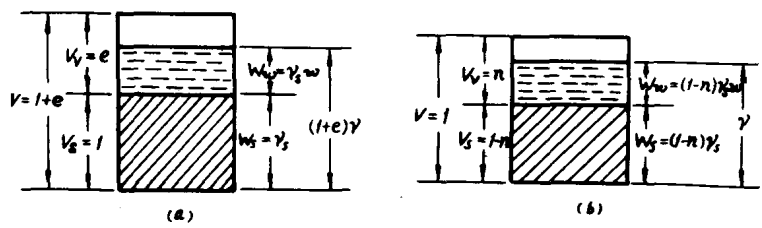


图 1-7 土的三相计算图

$$(1 + e)\gamma = \gamma_s(1 + w)$$

故

$$e = \frac{\gamma_s(1 + w)}{\gamma} - 1 \tag{1-8}$$

据图 1-7(b), $\gamma = (1 - n)\gamma_s(1 + w)$, 故

$$n = 1 - \frac{\gamma}{\gamma_s(1 + w)} \tag{1-9}$$

孔隙比与孔隙度都表示土的孔隙性,其换算关系为

$$e = \frac{n}{1 - n} \tag{1-10a}$$

$$n = \frac{e}{1 + e} \tag{1-10b}$$

五、饱和度 s_r

土中孔隙被水充满的程度称为土的饱和度,为土中水分体积与孔隙总体积之比,即

$$s_r = \frac{V_w}{V_v}$$

土的饱和度可以根据土的孔隙比 e (或孔隙度 n)、土粒容重 γ_s 、水的容重 γ_w 及含水量 w 计算。按图 1—7 导得的关系式为

$$S_r = \frac{\gamma_s w}{e \gamma_w} \quad (1-11a)$$

$$S_r = \frac{(1-n) \gamma_s w}{n \gamma_w} \quad (1-11b)$$

土的饱和度用百分率或小数表示。《路基规范》中,对碎石类土及砂类土的潮湿程度,按饱和度和度划分为稍湿 ($S_r \leq 0.5$)、潮湿 ($0.5 < S_r \leq 0.8$)、饱和 ($S_r > 0.8$) 三种情况。

六、干土容重 γ_d 和干密度 ρ

干土容重是指单位体积土中的干土粒重力,其表达式及按图 1—7(a) 导得的关系式为

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{\gamma_s}{1+e} = \frac{\gamma}{1+w} \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-12)$$

对于一定比重的土,干容重仅取决于孔隙的多少,因此工程上常用以评定土的紧密程度,以控制填土的压实质量。同样的方法可导得土的干密度为

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+w} \quad (\text{g/cm}^3)$$

七、土的饱和容重 γ_{sat}

土的饱和容重是孔隙中完全充满水时土的容重。按图 1—7 导得的关系式为

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_s + e \gamma_w}{1+e} \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-13a)$$

或
$$\gamma_{sat} = (1-n) \gamma_s + n \gamma_w \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-13b)$$

八、土的浮容重 γ'

土的浮容重是土浸没在水下,单位土体中土粒的重力扣除浮力后的有效重力。按图 1—7(a) 导得的关系式为

$$\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e} = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-14)$$

可见,土的浮容重又等于土的饱和容重减去水的容重。地基土的浮容重一般为 $8 \sim 13 \text{ kN/m}^3$ 。

土各相数量指标的计算是土力学中最基本的计算,要理解并熟悉各项指标的物理意义,借助三相图,不难求得各项指标间的换算关系。

【例题 1—1】某土样,测得 $\rho=1.67\text{g/cm}^3$, $G_s=2.67$, $w=12.9\%$,求:

(1) e 、 S_r 、 γ_d 等值。

(2) w 为多少时,该土达到饱和? 并求出饱和时的 γ_{sat} 、 γ 、 γ_d 值,此时 γ_d 有无变化?

【解】(1)按图 1—8 三相图有

$$W_s = \gamma_s = 2.67 \times 9.81 = 26.2\text{kN}$$

$$W_w = \gamma_w w = 26.2 \times 0.129 = 3.38\text{kN}$$

$$W = W_s + W_w = 26.2 + 3.38 = 29.58\text{kN}$$

$$V = \frac{W}{\gamma} = \frac{29.58}{1.67 \times 9.81} = 1.805\text{cm}^3$$

$$e = V_v = V - V_s = 1.805 - 1.0 = 0.805$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{W_w/\gamma_w}{V_v} = \frac{3.38}{0.805 \times 9.81} = 0.428$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{26.2}{1.805} = 14.51\text{N/cm}^3$$

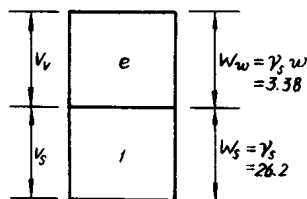


图 1—8 例 1—1 的三相图

(2)饱和时, $S_r=1.0$, 则饱和含水量

$$W = \frac{e\gamma_w}{\gamma_s} = \frac{0.805 \times 9.81}{26.2} = 30.1\%$$

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1 + e} = \frac{26.2 + 0.805 \times 9.81}{1 + 0.805} = 18.89\text{N/cm}^3$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = 18.89 - 9.81 = 9.78\text{N/cm}^3$$

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_s w_{sat}}{1 + e} = \frac{26.2 + 26.2 \times 0.301}{1 + 0.805} = 18.88\text{N/cm}^3$$

$$\gamma_d \text{ 应为不变, } \gamma_d = \frac{\gamma}{1 + w_{sat}} = \frac{18.88}{1 + 0.301} = 14.51\text{N/cm}^3$$

第四节 土的物理和物理-化学性质

一、土中水分的形态

土中的水可以分为固态水(冰)、液态水与气态水(气)三类。此外,有的水以 H^+ 和 OH^- 离子的形式或以水分子 H_2O 的形式存在于矿物结晶格架的一定位置上;有的则以水分子形式存在于晶包之间,这种水称为化合水,它已构成了矿物的组成部分。本章主要研究土粒表面以外的液态水。

水分子是偶极体,或称极性分子。如图 1—9 所示,在水分子中,两个氢原子位于等腰三角形的底角,一个氧原子位于顶角,彼此以共价键相联。整个水分子虽是中性的,然而它的一端显示正电荷,另一端显示负电荷。在普通水中,由于激烈的热运动,分

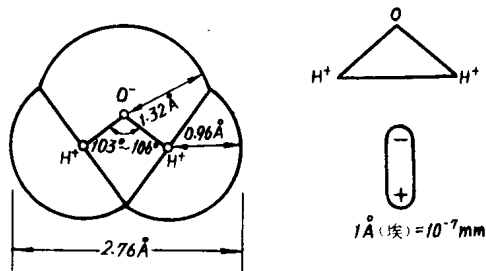


图 1—9 水分子的极性

子排列得很紊乱,遇有电场作用,水分子就会定向地排列起来,这就是水分子的极化。

土中的细小颗粒差不多都是粘土矿物,在粘土颗粒的晶体格架的内部,带有正负电荷的离

子间是相互平衡的；然而在晶体格架的表面，尤其在角和棱处，离子电荷就出现不平衡。由于粘土颗粒晶体表面主要分布着阴离子，这就使得粘土颗粒就整体而言，成为带有负电的荷电体。粘土颗粒带负电荷的表面在其电场引力影响范围内使水分子发生定向排列，并保持在其近旁，同时也把水化了的钠、钾和钙等阳离子吸引在自己的周围，从而在粘土颗粒表面形成了一层水化膜。这种现象称为吸

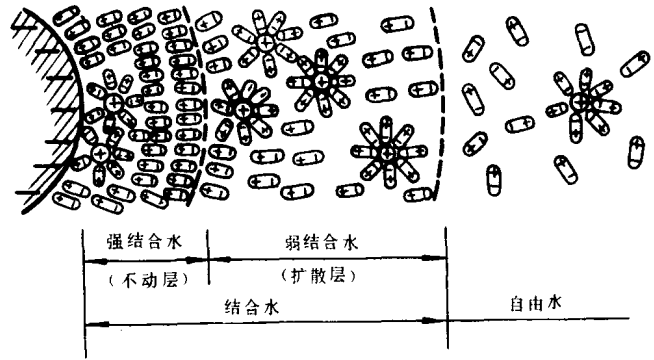


图 1—10 结合水的形成

附，见图 1—10。在土粒间组成水化膜的这一部分水，称为结合水。颗粒愈细，吸附作用愈强；离颗粒表面愈远，吸附作用也就逐渐减弱。吸附层最接近土粒表面，因强大的电荷吸力而变得十分牢固，呈固体状态，称为强结合水，又叫吸着水。在其外层，由多层分子水膜组成扩散层，水分的吸附作用较弱，呈半固体状态，类似粘滞性很大的液体，称为弱结合水，又叫薄膜水。水膜受到的引力随离粘土面的距离增加而减小，在薄膜水以外的水呈自由状态，与一般液态水相同，称为自由水。结合水与一般液态水的性质有很大差别。吸着水在一般温度下不会蒸发，也不能在土的孔隙中移动，只有在 105℃ 温度烘烤下才能除去。薄膜水在压力作用下则可变厚或变薄，也不能自由流动。当水膜增厚时，土粒间的联结减弱，在外力作用下颗粒之间容易产生相对位移；相反，水膜减薄时，土粒间的联结增强，相对位移较困难。

水膜的这种性质是粘性土具有抗剪强度、塑性、压实性的基本原因。由于粘性土的大部分颗粒都是极细的粘土矿物，故粘性土中所含的水分很大一部分是结合水，所以粘性土的性质与土中含水量的大小有密切关系。砂土颗粒表面的吸附作用几乎没有，所以砂土的性质由土粒本身的性质而定。

自由水是指脱离了土粒表面电分子影响范围以外的不受吸附作用影响的水，又可分为重力水和毛细水。重力水是存在于土的自由孔隙中只受重力作用控制的普通液态水，它能在重力和水头差的影响下在土的孔隙中移动，能够传递静水压力，并且具有溶解土中可溶盐的能力。由于土中存在着许多细微的不规则的通道，在这些通道的壁上，即在自由水与土粒表面之间或自由水与结合水膜表面之间会出现毛细现象。在弯液面的表面张力的作用下，水在重力水面以上沿细微通道能够上升一定高度。这一部分水称为毛细水。毛细水的存在位置，上升高度以及移动条件，是受重力和表面张力控制的。

二、粘性土的物理和物理-化学性质

土中固相与液相之间，由于电分子力而引起十分复杂而活跃的相互作用。这些作用发生在土粒表面，故称为土的“表面活动性”。土的表面活动性的强烈程度与很多因素有关。它取决于固相颗粒的矿物组成、粒度成分和颗粒形状。在各种粘土矿物中，由于其结晶层组的化学组成不同，存在着性质上的很大差异。蒙特石吸附异性离子的能力和亲水性最强，能分散为十分细微的颗粒，并且多呈片状或针状。这就决定了以蒙特石为主的粘土具有十分强烈的表面活动性。而以高岭石为主的粘土则与此相反。土的粒度成分也是其表面活动性强弱的决定因素。既