

高等土力学

龚晓南 著



浙江大学出版社

463121

高等土力学

龚晓南 编著

浙江大学出版社

DV21 / 11

高等土力学

龚晓南 著

责任编辑 李桂云

* * *

浙江大学出版社出版

(杭州玉古路 20 号 邮政编码 310027)

(E-mail: zupress@public1.hz.zj.cn)

浙江大学出版社电脑排版中心排版

浙江省良渚印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

* * *

860×1168 32 开 9.25 印张 238 千字

1996 年 8 月第 1 版 1998 年 10 月第 2 次印刷

印数:1001—2000

ISBN 7-308-01677-3/TU · 031 定价:11.00 元

前 言

《高等土力学》是浙江大学岩土工程研究所岩土工程专业研究生系列教材之一。系列教材还包括基础工程学、土塑性力学、土工试验、土动力学和土工计算机分析。这套教材是为硕士研究生系统学习土力学及基础工程领域的专业知识,掌握土工测试技术和计算机分析方法而编写的。

《高等土力学》一书共有 5 章,包括土的结构和分类、土的渗透性和渗流、固结、沉降分析和抗剪强度。

研究生培养工作在我国起步较晚,基础教材建设是一个新的研究课题,课程设置门类以及各门课程间的分工、教材内容取舍都值得探讨。据了解,我国各高等院校间岩土工程硕士研究生专业课程设置门类差别较大,而教学内容总体范围差别并不大。浙江大学岩土工程研究所自实行学分制以来,硕士研究生课程高等土力学、土塑性力学、基础工程、土工试验、土动力学和土工计算机分析均为 3 个学分,每门课程课内学时约 60 学时。这套系列教材的设置是根据浙江大学岩土工程研究所硕士研究生教学计划而安排的。

自 1984 年以来作者一直从事研究生教学工作,每届学生都希望除教学参考书外能有一套教材。国内虽然已出版许多优秀的土力学及基础工程领域的著作,但硕士研究生教材较少。为适应这一要求组织编写了这一套系列材料。

在内容编排上,《高等土力学》一书注意基础性和系统性,注意与大学教材的衔接,同时也注意到学科的最新发展。

作者感谢曾国熙教授的指导和鼓励,感谢浙江大学岩土工程研究所同行们的帮助。王铁儒教授、谢康和副教授对本书初稿提出了许多宝贵的意见,研究生卢海华、童小东、陈锦霞、刘吉福、蒋云峰和史美东协助了本书校核和插图工作,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免有错误和不当之处,敬请读者批评指正。

作者 1994 年暑期于杭州

目 录

| | |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 土的结构与分类 | 1 |
| 1.1 土的形成 | 1 |
| 1.2 土的组成 | 7 |
| 1.2.1 土的矿物成份 | 7 |
| 1.2.2 土的三相及相互关系 | 13 |
| 1.3 土骨架..... | 19 |
| 1.3.1 土的颗粒及级配..... | 19 |
| 1.3.2 土的结构 | 23 |
| 1.4 土中水..... | 24 |
| 1.4.1 土中水的存在形态 | 24 |
| 1.4.2 双电层理论、粘土颗粒间作用力 | 26 |
| 1.4.3 离子交换 | 35 |
| 1.4.4 饱和土中的静孔隙水压力 | 36 |
| 1.4.5 毛细作用 | 37 |
| 1.5 无粘性土的密实度..... | 39 |
| 1.6 粘性土的稠度..... | 40 |
| 1.7 土的分类..... | 43 |
| 1.8 有效应力原理..... | 51 |
| 1.9 粘性土的灵敏度和触变性..... | 57 |
| 1.10 非饱和土的压实原理 | 57 |

| | |
|--|-----|
| 第 2 章 土的渗透性和渗流 | 61 |
| 2.1 土的渗透性 | 61 |
| 2.1.1 Darcy 定律 | 61 |
| 2.1.2 Darcy 定律的适用范围及非线性渗透定律 | 63 |
| 2.1.3 土的渗透性及影响因素 | 66 |
| 2.1.4 渗透系数的测定 | 68 |
| 2.2 渗流 | 72 |
| 2.2.1 渗流连续方程 | 72 |
| 2.2.2 势函数和流函数 | 74 |
| 2.2.3 流网 | 77 |
| 2.2.4 多层地基和各向异性地基中渗流问题 | 79 |
| 2.2.5 渗流问题电拟法 | 81 |
| 2.2.6 渗流问题的数值解法 | 82 |
| 2.2.7 渗透力 | 87 |
| 第 3 章 固结 | 91 |
| 3.1 概述 | 91 |
| 3.2 一维固结 | 92 |
| 3.2.1 Terzaghi 一维固结理论 | 92 |
| 3.2.2 固结系数的测定 | 103 |
| 3.2.3 次固结 | 110 |
| 3.2.4 采用粘弹性模型的一维固结理论 | 111 |
| 3.3 二维与三维固结 | 116 |
| 3.3.1 Terzaghi-Rendulic 固结理论及其有限差分解法 | 116 |
| 3.3.2 Biot 固结理论及其有限单元法 | 120 |
| 3.3.3 砂井地基固结理论 | 129 |
| 3.4 非饱和土的固结理论 | 136 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| 第 4 章 沉降分析 | 150 |
| 4.1 概述 | 150 |
| 4.2 地基中的应力 | 156 |
| 4.2.1 引言 | 156 |
| 4.2.2 自重应力..... | 156 |
| 4.2.3 附加应力..... | 161 |
| 4.3 土的压缩性 | 177 |
| 4.3.1 压缩试验和压缩曲线 | 177 |
| 4.3.2 先期固结压力和土的固结状态 | 181 |
| 4.3.3 弹性变形和残余变形 | 187 |
| 4.3.4 土的变形参数及相互间关系 | 188 |
| 4.4 沉降的组成部分 | 193 |
| 4.5 沉降计算方法 | 195 |
| 4.5.1 弹性理论法 | 195 |
| 4.5.2 分层总和法 | 203 |
| 4.5.3 Skempton-Bjerrum 法 | 211 |
| 4.5.4 三维压缩非线性模量法 | 215 |
| 4.5.5 应力路径法 | 217 |
| 4.5.6 次固结沉降计算 | 222 |
| 4.5.7 有限单元法 | 223 |
| 4.5.8 原位试验法 | 224 |
| 4.5.9 从现场实测资料推算总沉降 | 229 |
| 4.5.10 讨论 | 235 |
| 第 5 章 抗剪强度 | 239 |
| 5.1 概述 | 239 |
| 5.2 抗剪强度测定方法 | 246 |

| | | |
|-------|---------------------|-----|
| 5.2.1 | 直剪试验 | 247 |
| 5.2.2 | 三轴试验 | 248 |
| 5.2.3 | 单剪试验 | 255 |
| 5.2.4 | 十字板剪切试验 | 256 |
| 5.3 | 无粘性土抗剪强度 | 257 |
| 5.4 | 粘性土抗剪强度 | 262 |
| 5.4.1 | 土中超孔隙水压力 | 262 |
| 5.4.2 | 粘性土抗剪强度和抗剪强度指标 | 267 |
| 5.4.3 | 抗剪强度指标的选择 | 277 |
| 5.4.4 | 在荷载作用下的软粘土地基中土体强度变化 | 278 |
| 5.4.5 | 软粘土地基强度各向异性 | 282 |

第 1 章 土的结构与分类

1.1 土的形成

土的结构及其物理力学性质与土的形成历史密切相关。详细介绍各类土的形成过程已超出本书的范围,这里只能作简略介绍。

岩石经过风化作用而形成土。风化作用包括物理的、化学的、生物的作用。物理作用包括风、水、冰川、热胀冷缩、加载卸载以及冻融交替的破坏作用等;化学作用包括水解作用、离子交换作用、氧化还原作用、碳化作用等;生物作用包括微生物、植被、树木等对岩石的破坏作用等。由岩石风化形成的土可能留存在原地,也可能经过风、水、以及冰川的剥蚀和搬运作用,在别处沉积形成土层。留存在原地的土称为残积土;由风的剥蚀和搬运作用而在别处沉积的土称为风成沉积土。风成沉积土包括黄土、砂丘;由水的侵蚀和搬运作用在别处沉积的土称为沉积土。沿着水流的方向,根据不同的沉积条件可分为:坡积土、洪积土、山区河谷冲积土、平原河谷冲积土、湖相沉积土、三角洲沉积土、海相沉积土等;由冰川活动的剥蚀和搬运作用在别处形成的土称为冰川沉积土。除了由岩石风化形成土外,植物分解也形成土,如泥炭土、腐殖土等。

残积土的特性在很大程度上取决于母岩的性质,残积土与母岩两者的矿物成份相差不大。残积土与基岩之间没有明显的界限,通常经过强风化层、弱风化层过渡到新鲜岩石。残积土与强风化层很难区分,残积土常常是由于雨、雪水流将细颗粒带走后残留的较粗颗粒的堆积物。残积土未经搬运,故土体颗粒未被磨圆和分选,

没有层理构造,土体孔隙较大,均质性也较差。

黄土是以风力搬运堆积而成的黄色粉状土。未经次生扰动不具层理的称为原生黄土。原生黄土经过流水侵蚀、搬运重新沉积形成的黄土称为次生黄土或黄土状土。据形成的年代又可分为老黄土和新黄土。我国黄土地区面积约60万平方公里,主要分布在甘、陕、晋、宁夏等西北和华北地区。黄土组成以粉粒为主,具有肉眼可见的大孔隙,结构强度较高,压缩性较小。但有的黄土,在自重应力或自重应力和附加应力联合作用下,受水浸湿后土体结构迅速破坏而发生显著附加下沉,这类黄土称为湿陷性黄土。前者称为自重湿陷性黄土,后者称为非自重湿陷性黄土。

风成沉积土除黄土外还有砂丘。当大面积砂性土露出地面后,烈风可以把它搬运到一定距离之外,到风速减小时落下形成砂丘。在风力作用下,砂丘也可以在地面上移动。由于风的选分作用,砂丘的砂在颗粒大小上表现极不均匀。

雨水和雪水由河流的发源地、从四面八方,经小河汇成大河,浩浩荡荡流入大海,一路上侵蚀、搬运土层,形成各种新的沉积土。河道坡降大,水流急,侵蚀能力强,搬运能力大。河道坡降小,水流变缓,粗颗粒沉积下来。搬运距离长,土颗粒磨圆磨细。水位的季节性变化,以及每年洪水位的差异造成水成冲积土的层理构造。三十年河东,三十年河西,河道和湖泊的变迁,使水成冲积土构造更为复杂。下面简略介绍各类水成冲积土。

坡积土是岩石风化物经雨水、雪水冲刷侵蚀、携带,沉积在较平缓的山坡上形成的沉积物。搬运距离很短,坡积土土质不均匀,厚度变化大,尤其是新近堆积的坡积土,土质疏松,压缩性高。

洪积土是山洪急流冲刷地表土层,形成泥石流,在山谷冲沟山口或山前倾斜平原上形成的堆积物。由于山洪常常是周期性产生的,且每次大小并不相同,故每次堆积物性质也不一样。洪积土常常表现有不规则交错的层理构造,如具有夹层、透镜体等。洪积土

土质不均匀。

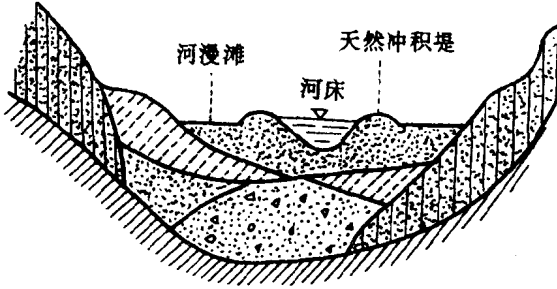


图 1-1 河谷横断面示意图

冲积土是河流水力作用,将坡积土和洪积土侵蚀、搬运,沉积在河流坡降变小的平缓地带形成的沉积物。周期性的洪水也会剥蚀河流上游两岸的冲积土,搬运至下游再次形成冲积土。有的经一次一次搬运直到形成海相沉积土。由于搬运距离长,搬运作用显著,碎屑物质由带棱角颗粒(块石、碎石及角砾)经滚磨、碰撞形成圆形或准圆形颗粒(漂石、卵石及圆砾)。搬运距离越长,沉积的物质越细。正常流量时,河水仅在河床中流动。在洪水期,携带大量泥沙的河水泛滥于河床两侧河漫滩,流速减慢,泥沙沉积。一般河流横断面可由河床、天然冲积堤、河漫滩或泛滥平原三部分组成(图 1-1)。山区河流坡降大,流速急,河漫滩范围小;平原河流坡降小,流速慢,河漫滩范围大。山区河流与平原河流的差异性造成了山区河谷冲积土与平原河谷冲积土的区别。前者冲积土颗粒粗,后者颗粒细。河漫滩沉积土一般都有层理,有时夹细砂层,不会遇到很厚的均匀粘土层。但在河流下游靠近河口处,河流冲积物可具有很大的厚度和范围。需要注意的是与河漫滩沉积土不同,在牛轭湖中沉积的粘土是一种河道淤塞沉积物,通常处于欠固结状态,液性指数接近 1.0。牛轭湖沉积物只是在表面变干,硬壳层下的粘土依然很软。硬壳层又可能被河漫滩沉积物覆盖。在现场勘测中需要

注意。

湖相沉积土比较复杂,其成份变化较大。在湖边沉积土颗粒较粗,在近岸带沉积多数是粗颗粒的卵石、圆砾和砂土,在远岸带沉积的是细颗粒的砂土和粘性土,在湖中心区沉积的是粘土和淤泥,常夹有细砂、粉砂薄层。湖泊如逐渐淤塞,则可演变成沼泽,形成沼泽沉积物。沼泽沉积土主要是由半腐烂的植物残余体——泥炭土组成。泥炭土含水量极高,渗透性差,压缩性很高,抗剪强度也很低。

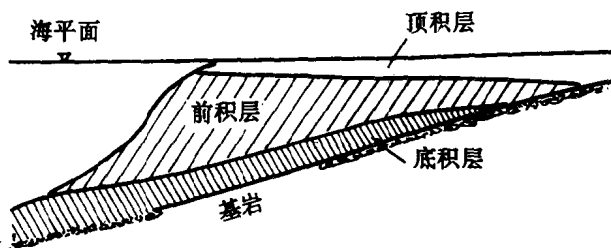


图 1-2 三角洲沉积层示意图

三角洲沉积土是河流流至海洋时流速急剧减小,河水中所携带的悬浮物质在河口形成的沉积土。悬浮物质中较粗部分在靠近河口处沉积。而细粒部分在远离河口的近海处沉积。三角洲沉积土取决于河流悬浮物质情况、水流情况以及气候因素。虽然三角洲沉积物构造非常复杂,但通常可以分为三个基本部分:顶积层、前积层和底积层(图 1-2)。也可分为水上部分和水下部分。水上部分沉积主要是河床加河漫滩冲积物(包括砂、粉砂、粘土)。由于多次沉积常有层理或透镜体。水下部分沉积由河流的冲积物和海或湖的沉积物交替或混合组成,呈倾斜的沉积层,层理比较复杂。

海相沉积土按照海水深度分区不同而不同(图 1-3),可分为滨海沉积物、浅海沉积物、陆坡沉积物和深海沉积物。滨海区是指高潮位时淹没,低潮位时露出的地带。滨海沉积物主要由卵石、圆砾和砂等粗颗粒土组成。浅海区指大陆架,水深 0~200m,宽度

100~200km。浅海沉积物主要是细颗粒砂土、粘性土、淤泥和生物化学沉积物。离海岸愈远,沉积物颗粒愈细小。陆坡区是指浅海区和深海区的过渡陡坡地带。陆坡和深海沉积物主要是棕色粘土和含钙及含硅的软泥。

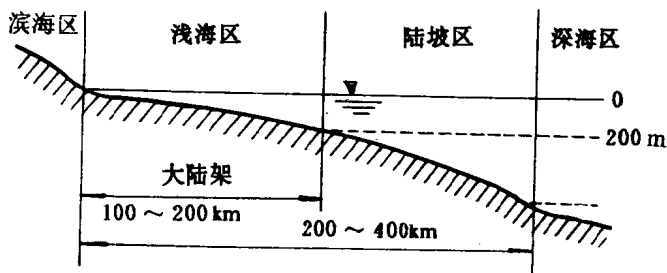


图 1-3 海相沉积土按海水深度划分区域示意图

冰川活动具有极大的搬运能力,沉积作用是在融化过程中发生的。冰川沉积土的特性取决于其搬运土的种类、搬运距离、坡度、压力等因素。根据冰川环境不同形成冰川沉积物、冰川—河流沉积物和冰川—湖泊沉积物。

上述各种沉积物,无论风成沉积土、还是水成沉积土,或是冰川沉积土,在沉积后还会经受物理、化学作用,产生沉积后的变化。沉积后的物理、化学过程主要有下述几个方面:

(1) 风化作用

当沉积物暴露在大气中,风化作用可以引起土的成份逐步改变。暴露的细粒沉积物处于干燥状态会产生收缩现象,导致风化过程的加速。复杂的物理化学反应使软粘土地基地面表层形成类似超固结状态的硬壳层。

(2) 固结作用

沉积土在上覆土重作用下产生固结,土体孔隙比减小,强度提

高。固结过程也称压密过程。地基中地下水位下降也会使土体产生压密。地震以及人类活动引起的动荷载也会使土体产生压密,特别是无粘性土效果更明显。

(3) 自生作用和成岩作用

自生作用是指沉积土在沉积处形成新的矿物。自生作用可以使得土颗粒变得更有棱角、孔隙比减小和渗透性降低。

成岩作用是指因温度、压力和时间效应使沉积土由一种物质转化成另一种物质。

(4) 溶解作用

环境的改变可以导致离子交换和可溶盐的淋溶。沉积物可以被不均匀的溶解作用以及紧接着的淋溶作用从沉积土中迁移。土洞、溶洞是溶解作用的结果。

以上介绍土的形成。地基土层的分布在很大程度上与地壳运动有关。整个地球表面所经历的地质年代作用有四个基本过程:地壳运动、剥蚀作用、沉积作用、成岩作用。它们成为一个永无休止的循环过程(图 1-4)。剥蚀作用和沉积作用前面已作介绍。成岩作用是反映沉积土被压密固化,成份蚀变、转化成岩石的一系列变化过程。地壳运动包括造陆运动和构造运动引起部分地壳的上升和下降。历史上的地壳运动对区域工程地质构造影响较大。

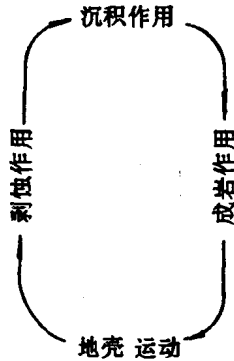


图 1-4 地质循环

浙东滨海平原普遍存在着一层厚度达十多米以致数十米的软粘土层。据了解,该地区在上新纪末期至第四纪时期,新构造运动

广泛发育。自上新纪末至上第四纪地壳主要呈现上升运动,在上第四纪地壳显著下降,到了第四纪后期又出现微弱上升。由于上第四纪前地壳上升,海水位上升,沿海受到海浪冲刷侵蚀,形成了海湾和泻湖。到了上第四纪地壳下降,沉积了海相和泻湖相软粘土。浙东滨海地区主要是第四纪沉积物,属海相和泻湖相沉积。温州、平阳、瑞安、宁波、黄岩等地区属这种类型。沉积土颜色较深,含有有机质、贝壳等,平均厚度70~110m。

杭州、萧山、绍兴等地区软粘土层属于滨海、湖泊和三角洲混合沉积物。土层交替成层,性质变化较大,有的属海相沉积,有的属泻湖相沉积。总体看其性质比浙东滨海平原地区沉积土好。在钱塘江两岸广泛分布着粉砂层或砂质粘性土,是近代河水冲积土。

对土层的地质历史的了解有助于预测它的大致成分、结构和性质。土的物理力学性质与它的形成方式以及形成后的历史有关。

1.2 土的组成

1.2.1 土的矿物成份

虽然不能按照土的矿物成份来定量地评价土的工程性质,但了解土的矿物成份对认识土体性状是非常有益的。

一种土的固相部分可以含有各种各样的结晶质粘土矿物和非粘土矿物、非晶质粘土矿物、有机质、以及沉淀析出的盐类。在实际工程中遇到的多数土的固相,绝大多数是由无机质结晶矿物组成,并且非粘土矿物的含量比粘土矿物含量多得多。虽然粘土矿物含量少,但粘土矿物成分对土体性状的影响较大,远远超过其相对数量的影响。

下面对土的矿物成份作简要介绍:

一、非粘土矿物

非粘土矿物又称原生矿物,通常是岩石碎屑或是形成岩石结构的矿物颗粒。砾石、砂和粉砂都是由非粘土矿物组成的。许多土源于火成岩矿物,其中最普遍的成份是长石(约占 60%),辉石和角闪石(约占 17%),石英(约占 12%),云母(占 4%),其它矿物(约占 7%)。然而在大多数土中,含量最丰富的是石英、也有少量长石、云母。其原因是:角闪石和辉石的晶体结构和成份在风化过程中很快被破坏,长石也在化学风化过程中减少其数量,而石英具有很高的稳定性。

石英是由结合成螺旋式结构的硅氧四面体聚合群组成的,四面体中所有的氧原子都同硅原子成键。四面体结构具有很高的稳定性。石英属于一种氧化物,该结构中无弱键结合的离子,因而具有很高的硬度。这些因素决定了石英具有很好的耐久性。

长石是一种具有空间框架结构的硅酸盐矿物,该矿物中有部分硅原子被铝原子所置换。由于这种置换所产生的多余的负电荷,需要如钾、钙、钠、铯、钡这样一些阳离子来平衡。当这些阳离子相对较大时,则它们的配位数目就较多。由此产生开放式结构和单元间成键强度的降低,结果出现节理面,硬度降低,且容易破碎。同火成岩石中含量相比,土中长石含量大为降低。

云母是由四面体和八面体单元组成的片状结构。该片状结构是一片一片迭合起来的,并且主要是由钾离子在层间由 12 重配位结合而成。云母具有完整的基本节理面。

非粘土矿物的物理特性主要由矿物类型、颗粒粒径、形状、组构特性和大小分布范围来确定。非粘土矿物化学性质稳定或较稳定,具有强或较强的抗水性和抗风化能力,可以看作惰性较大的物质,它们间相互作用的本质属于物理作用。