

王盛源 著◎

工程实用软土力学

GONGCHENG
SHIYONGRUANTULIXUE



人民交通出版社
China Communications Press

Gongcheng Shiyong Ruantu Lixue
工程实用软土力学

王盛源 著

人民交通出版社

内 容 摘 要

本书以软土力学为指导,是一部集软土理论研究、软土加固技术与典型工程实践总结为一体软土力学著作。主要内容包括软土设计理论、施工和监测、大型试验工程总结、工程事故案例分析等。

本书理论与实践紧密结合,适用于土建工程中设计、施工、工程管理的工程技术人员和相关科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

工程实用软土力学/王盛源著. --北京:人民交通出版社,2012.7

ISBN 978-7-114-09931-1

Ⅰ. ①工… Ⅱ. ①王… Ⅲ. ①软土—土力学 Ⅳ. ①TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 159107 号

书 名: 工程实用软土力学

著 作 者: 王盛源

责任编辑: 刘永芬

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757969,59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 13

字 数: 286 千

版 次: 2012 年 8 月 第 1 版

印 次: 2012 年 8 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-09931-1

定 价: 38.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

序

XU

改革开放 30 多年来,我国进行了大规模的工业建设:建成了大量的高速公路、高速铁路、高层建筑、地铁、城铁、大型工业基地、港口枢纽等大型土木工程。其中很大一部分位于我国东南沿海的软土地基区域。我国的地质地貌受西北高东南低的控制,河流的流程长,出海口附近是大面积的河网地区,数千年来淤积了大量的淤泥,典型的有广东省珠江三角洲区域,遍布深达 20 ~ 30m 的高含水率超软弱地基。地基承载力仅为 50 ~ 60kPa。

本书就是以软土力学为指导,集软土加固技术与典型工程实践总结为一体的著作,也是作者毕生工作实践的总结,是近年来工程界的一部力作,有理论、有技术、有方法、有工程实践经验。鉴于沿海软土地区工程建设速度迅猛,推动了地基加固技术的飞速发展,实践超越了理论,理论工作的滞后会带来工程质量的下降和浪费等问题。可见这本有理论有实践的书,值得土建工程人员深读。

本书内容有设计理论、施工和监测,还有大型试验工程,因此是适用于设计、施工、工程管理和监测的参考书籍。

由于近年来大家忙于工程,读书时间被挤掉了,整天面对工程与计算机,但我认为读点书对自己的工作能力提高是有益的,建议大家抽空读读本书。谨此共勉。

徐冠雄

2012年3月

前言

QIANYAN

本书以软土地基工程的理论与实践为主体,书中的理论推演、工程实践均为作者亲力所为。第一篇是软土的基本理论。软土的力学问题除了涉及弹性理论外,必须考虑时间因素,因此比一般的力学问题要困难一些,在某些边界条件下求解偏微分方程会受到一定限制。为了将问题简化,以饱和软土为研究对象,课题就比较容易解决。此外,软土地基的工程问题可以归纳为沉降与时间的关系问题,地基的稳定问题也是沉降与时间关系中的一个特殊问题。本书由此出发,将软基问题的解决归结为如何解决好沉降时间过程问题。

地基处理虽说是工程实践问题,但归根到底是一个力学问题,必须以理论为指导。软土作为一种材料,它的应力问题在不计时间的情况下可以借用弹性力学来解决,如果计入时间它就是个流变问题。而软土是多孔介质,在孔隙中充满水体,这就称为饱和多孔介质。本书的基本理论是用饱和多孔介质的黏弹性理论来指导研究饱和软土地基的变形规律。

关于复合地基问题,目前尚无合适的理论能分析其沉降和稳定问题,方法还处在经验阶段。近年我国沿海地区经济大发展,出现了大量的复合地基,这为复合地基处理和计算积累了丰富的实践经验和资料,也为地基工程技术人员创造了良好的研究条件,一些有兴趣的同志可以多研究复合地基的理论问题。

松软地基处理技术以往统计有 70~80 种方法,可以分为五个大类。对于软土地基处理技术可以分为两个大类:一类是排水固结法,是指砂井、塑料板、砂桩等堆载预压排水固结法,以及真空预压和真空联合堆载预压法;另一类就是复合地基法。排水固结法的目的是将饱和软土中的孔隙水排挤出来,为加快排水速度就设法加载预压和在土体内部设置排水通道。复合地基是将刚度大于软土的材料加入到软土体内使之变成刚度较大的复合材料。由于两种不同刚度的材料组成的复合材料在力学上很难处理,因此本书中很少讨论复合地基的力学性能,留待以后专门讨论。

王盛源

目录

MULU

绪论	1
第一篇 饱和软黏土的工程特性	
第一章 软土地基中饱和黏性土的物理性指标及工程意义	7
第一节 饱和黏性土物理指标的定义和测定方法	7
第二节 饱和黏性土的界限含水率及工程意义	9
第二章 饱和黏性土的化学性质与工程措施	12
第一节 键力的基本知识	12
第二节 黏土矿物的晶体结构与工程性质	13
第三章 饱和黏性土的渗透性与工程性质	18
第一节 饱和黏性土的渗透性质	18
第二节 饱和黏性土地基的渗透系数	19
第四章 饱和黏性土的微结构工程特性	22
第一节 饱和黏性土的塑性破坏和脆性破坏	23
第二节 饱和黏性土原状样品冷冻升华脱水技术	23
第三节 电镜室扫描拍摄原状土的微结构相片	25
第四节 原状土样微结构相片计算机处理技术	26
第五节 饱和黏土微结构特征参数的工程应用	27
第六节 饱和黏土微结构的工程应用实录	31
第五章 饱和黏性土的力学性能	35
第一节 概述	35
第二节 软土的强度指标	35
第三节 软土抗剪强度的试验方法	39
第六章 饱和黏性土地基的压缩变形	46
第一节 饱和软黏土地基最终沉降量的分析计算	46
第二节 饱和软黏土地基沉降时间过程计算	48

第三节	饱和软黏土地基的工后沉降计算	52
第四节	逐级加载的软土地基沉降过程计算	58
第五节	砂井或砂桩(轴对称问题)地基的沉降过程计算	61
第六节	复合地基的沉降计算	64
第七节	按地基压缩层附加应力分布来计算沉降过程	67
第八节	高速公路路堤填筑的薄层轮加法技术	69
第七章	软土地基承载力与地基稳定分析	75
第一节	浅层地基承载力计算	75
第二节	圆弧滑动法稳定分析	77
第三节	稳定分析原理在处理滑坡事故中的应用实例	79
第四节	复合地基稳定分析	81

第二篇 饱和软黏土地基的加固技术

第八章	软土地基的置换法	89
第一节	高速水流切割法快速挖除淤泥	89
第二节	换填土的压实技术	89
第九章	强夯法	91
第一节	强夯法加固深度计算理论分析	91
第二节	强夯法加固深度计算理论	92
第十章	饱和软土的排水加固技术	96
第一节	概述	96
第二节	排水预压加固技术	96
第三节	排水砂井或塑料排水板加固技术	100
第十一章	真空预压排水加固技术	105
第一节	概述	105
第二节	真空预压加固技术	106
第三节	工程实录	108
第十二章	振冲法	112
第一节	概述	112
第二节	振冲法加固软土地基的原理	114
第三节	振冲法加固地基的设计	115
第四节	振冲法施工技术	121
第五节	振冲法加固松软地基的试验与检验	126
第六节	振冲法加固工程实例	130
第七节	振动置换法	131
第八节	振动置换法工程实例	136

第九节	目前几个规范中有关振冲法的条例分析	141
第十三章	深层搅拌法	143
第一节	概述	143
第二节	水泥深层搅拌法	144
第三节	水泥深层搅拌法的施工工艺	159
第四节	深层搅拌法的试验与检验	161
第五节	工程实录	164
第十四章	强夯加固地基大型试验实例	173
第一节	概述	173
第二节	长江下游河漫滩地软基强夯加固试验	173
第三节	关于强夯加固有效深度的讨论	183
第四节	结语	183
第十五章	工程事故及处治实例	184
实例一:	三水高能电池厂厂房滑坡事故	184
实例二:	某住宅挖孔桩降水引起相邻建筑大范围沉降事故	186
实例三:	中山镀锡板厂基坑开挖发生滑移	189
实例四:	三水市河口水泥厂码头滑坡事故	190
实例五:	舟山定海北马寺小安塘海堤滑坡事故	191
实例六:	江宁天然气公司 1 万立方米气罐倾斜事故	194
参考文献		197
后记		198

绪 论

软土地基的主要土类有:软黏土、砂土、黄土、冻土、泥炭土等。从土的组成成分来分析,有三相体组成,即固体相的土颗粒、液体相的孔隙水和气体相的土中气,也有固体和液体组成的所谓饱和土体的两相体。本书讨论的对象是饱和土体,主要是研究在地面上承受了建筑物的重力之后地基土体内发生的应力应变状态。此外,还研究当地基土承受不了外力后发生的情况及如何加固处理。由于土体的组成物质和形成过程的复杂性,因此土体的应力应变状态的变化随机性很大且难于测定,再者建筑物边界条件也不规则,施加在地基上的外力分布又不规则,因此主体和客体都是随机性,造成研究土体内的应力应变状态十分困难。其中比较简单和理想的土还是饱和软黏土。有人认为饱和软黏土已接近理想弹性体,因此目前土力学的基本计算,例如各种稳定计算、沉降计算等原理大部分是搬用弹性理论。但近百年来实际使用情况并不理想,工程设计人员的计算结果与实际结果不是偏大就是偏小,有时相差甚大,因此,目前工程界对土力学感到难以捉摸,无法深入。土力学界近 20~30 年来为解决此问题,采用了各种数值计算方法,可是到目前为止也认为数值计算难于达到预期目标,因此,工程界通常采用估算方法加上工程措施,这种方法实际上是经验大于理论。例如当前工程界在处理地基的设计计算方面采用两种常用手段:(1)将建筑物的重力全部由桩基承担,通过桩体直接传递给深层的岩体或坚硬的土体,中间所经过的土体已较少考虑它的受力条件;(2)考虑了土体的受力条件后借用经验或半经验的方法进行沉降或稳定性估算,然后加上合理的工程措施进行设计计算。上述方法虽然能够解决目前的工程问题,但是其中或者已包含着巨大的浪费,或者不够安全而发生事故,因此结合工程实践研究松软地基的应力应变状态和加固处理方法,有着积极的意义和广阔的前景。

本书讨论问题的方式是首先研究比较简单的问题,其次是结合工程实践进行探讨。作为三相体的土是很复杂的,如果研究两相体就简单很多,两相土体尤以饱和黏土研究最有价值,一方面它是两相体,无论用仪器测试土体的应力应变,或建立计算模式,或测定饱和黏土的内部微结构状态,都比其他三相土体或其他土类要简单很多;其次是结合工程实际问题进行研究,它既能直接解决某些工程问题,又能用工程概念来指导研究工作,把握住研究方向,使研究的课题具有活力;第三是饱和软黏土大都处在江、海、湖泊的周边一带及河网三角洲地域,而这个区域人类活动频繁、工程建设广泛,这就为研究工作创造了有利条件,为此本书讨论的范围是工程实用的软土力学问题。

我国地域辽阔,地势西部高东部低,河流由西向东流动,整个地形地貌受到黄河、长江、辽河、新安江、闽江、珠江等几条大河流所控制,这些河流的中下游地区又形成太湖、洞庭湖、巢湖、鄱阳湖、洪湖、洪泽湖等几大湖泊的调节和关联,通过河汉互相制约和互相协调,出现了大大小小的河网三角洲地区。由于这些地区的自然条件适合人类的生存和发展,因此在这些地区人类活动频繁、繁衍快速,工业、农业、交通发达。因地势的高差,当河流出山区抵达中下游

时,地势突然平坦,流速放慢。从山区夹带的泥沙到达这个区域就慢慢沉积,随着水流放慢,水中的粗颗粒和细颗粒也慢慢沉积下来,到了各大河口进入海洋时,因受到咸水的盐分影响,一些悬浮的极细颗粒漂移下沉,产生了流体力学中的异重流现象。在河口、海岸、湖泊、河网等地区,大都是极细的土颗粒夹杂着人类和动物活动的有机物、纤维物等渐渐沉淀、堆积而造成海岸带逐年向海洋推移,河口向大海延伸,陆地向海洋扩展,几千年、几百年前还是海域的地区,如今已是陆地,建立了城镇,例如广州市中心的西门口近年开挖出驳岸码头,又如广州南沙区有个地点称十八涌,它从一涌到第十八涌都是近百年淤积形成,每隔几十年淤积一块土地,农民就筑一个堤,堤内称第几涌,堤外过几年又“长出”一块,这样一直到如今面对伶仃洋的十八涌,很快又要十九涌了。再如上海的浦东、崇明岛一直在向海洋延展。我国的海岸带几乎全是淤泥质海岸,在黄河近海带、长江三角洲、新安江和闽江口岸带、珠江三角洲等这些地区出现了大部的上部10~30m,甚至40~60m厚几乎全部是特别软弱的淤泥或淤泥质地区。此外,几个大的湖泊与几条大河的连接地区形成了河网地区,这些地区表层同样是这种深厚软弱的淤泥和淤泥质土层。所以我国的淤泥地区占据大片区域,而这些地域又是人口密集、工农业发达地区。现将这些区域的部分典型软土性质列入表0-1中。

20世纪的后50年,尤其从20世纪80年代开始,在我国沿海、湖周边一带开展了大量的工业建设:建造了大型钢铁工业基地、化工工业区、大型电厂、特大桥梁、码头港口、高速公路、高层建筑、地铁工程等等,这些建设工程带动了软土地基加固技术的迅猛发展。比起西方国家,我国在软基加固技术方面的发展,无论在理论研究、设计计算、施工实践、监测技术、事故处理等方面的技术和经验水平远远超过他们,这是我们的财富,值得总结和交换、推广和发展。

新中国成立初期开展治理淮河流域水患,建设了许多大型水利工程,由此带动了土质学和土力学的起步研究和发展。五六十年代在软土地基加固技术方面研究和应用了砂井排水固结法、降水预压法、真空预压法、堆载预压法、石灰桩等,70年代出现了振冲法、强夯法、深层搅拌法、旋喷法,80年代出现加筋土、CFG桩、树根桩等。随着沿海工业大发展,至20世纪末期,在珠江三角洲、深圳、上海、北京、天津等地将原由潘千里归纳总结的地基处理5大类70种方法又发展了近20种,这20种左右的加固方法主要因单一方法满足不了工程的要求,遂将两种或三种方法叠加或联合起来使用,从而解决了工程难题。例如真空联合堆载预压法,将真空和堆载预压联合起来使用,充填夯法是将强夯法与碎石桩叠加使用。而对于饱和软黏土来说,排水固结的方法是主要的,无论从理论研究还是工程实践都已比较成熟,而对于振冲法、搅拌法一类属软土和刚度较大的水泥、石料组成的复合地基,它的设计计算比较困难,再加上施工工艺复杂,质量问题也难于控制。目前软土加固中的复合地基质量控制已成为一大难题,给工程带来许多麻烦。如何能解决好这个问题,笔者认为应遵循如下规律:首先应研究和掌握饱和黏土的工程性质,作为设计者掌握这部分知识是基础;其次是应该掌握所使用加固方法的机理、施工工艺和施工机械的要点;最后在设计时不能单纯地照搬规范,应结合工程要求合理使用规范,这样才能正确完成一个工程设计。本书共分五个部分介绍饱和软黏土的工程特性和加固方法的机理。(1)饱和软黏土的工程特性;(2)饱和软黏土地基的加固处理方法和设计计算;(3)饱和软黏土地基的工程加固实录;(4)饱和软黏土地基的原位测试、工程监测技术;(5)饱和软黏土地基加固技术的发展和展望。

表 0-1

全国各地软土物理力学性质统计表

地区 指标	土层深度 (m)	含水率 w (%)	密度 γ (g/cm ³)	孔隙比 e	饱和度 S_r (%)	液限 w_L (%)	塑限 w_P (%)	塑性指数 I_P	渗透系数 k_v (cm/s)	压缩系数 a_{1-2} (cm ²)	无侧限抗压 强度 q_u (0.1MPa)	备 注
天津	7~14	34	1.82	0.97	95	36	19	17	1×10^{-7}	0.051	0.3~0.4	
塘沽	8~17	47	1.77	1.31	99	42	20	22	2×10^{-7}	0.097		
	0~8, 17~24	39	1.81	1.07	96	34	19	15				
上海	6~17	50	1.72	1.37	98	43	23	20	6×10^{-7}	0.124	0.2~0.4	
	1.5~6, >20	37	1.79	1.05	97	34	21	13	2×10^{-6}	0.072		
杭州	3~9	47	1.73	1.34	97	41	22	19		0.117		
	9~19	35	1.84	1.02	99	33	18	15				
宁波	2~12	50	1.7	1.42	97	39	22	17	3×10^{-8}	0.095	0.6~0.48	
	12~28	38	1.86	1.08	94	36	21	15	7×10^{-8}	0.072		
舟山	2~14	45	1.75	1.32	99	37	19	18	7×10^{-6}	0.11		
	17~32	36	1.8	1.03	97	34	20	14	3×10^{-7}	0.063		
温州	1~35	63	1.62	1.79	99	53	23	30		0.193		
福州	3~19	68	1.5	1.87	98	54	25	29	8×10^{-8}	0.203	0.05~0.18	
	1~3, 19~35	42	1.71	1.17	95	41	20	21	5×10^{-7}	0.07		
龙溪	0~6	89	1.45	2.45	97	65	34	31		0.233		
广州	0.5~10	73	1.6	1.82	99	46	27	19	3×10^{-6}	0.118		
珠江三角洲	1~42	78.6	1.55	2.004	100	45	26	19	4.13×10^{-6}	0.304	0.29	京珠高速公路

续上表

地区	指标	土层深度 (m)	含水率 w (%)	密度 γ (g/cm ³)	孔隙比 e	饱和度 S_r (%)	液限 w_L (%)	塑限 w_P (%)	塑性指数 I_P	渗透系数 k_v (cm/s)	压缩系数 a_{1-2} (cm ²)	无侧限抗压 强度 q_u (0.1MPa)	备 注
深圳		1 ~ 6	95.3	1.49	2.55	100			28	8.26×10^{-7}	0.241	0.339	深圳宝安新城区
		1 ~ 18	88.1	1.47	2.42	100			29.7	6.56×10^{-7}		0.42	深汕高速公路
台山		1 ~ 20	107.7	1.43	2.83	100			38	3.2×10^{-7}		0.418	广东西部沿海高速公路
昆明		淤泥	41 ~ 270	1.2 ~ 1.8	1.1 ~ 5.8				77	$e. \times 10^{-7}$			
		积炭	68 ~ 299	1.1 ~ 1.5	1.9 ~ 7.0				27 ~ 62	$e. \times 10^{-8}$	0.12 ~ 0.42	0.02 ~ 0.35	
贵州		<20	54 ~ 127	1.3 ~ 1.7	1.7 ~ 2.8				15 ~ 34	$e. \times 10^{-4}$	0.12 ~ 0.42		
			140 ~ 264	1.2 ~ 1.5	1.6 ~ 5.9				26 ~ 73	$e. \times 10^{-8}$	0.17 ~ 0.73	0.01 ~ 0.18	

饱和软黏土的工程特性

土是由岩石经长期风化发生了化学和物理变化而来。当岩石经日晒夜露,冷热胀缩,冰雪雨水浸泡冲蚀后,发生崩解,由大块岩石渐渐破碎为小块碎石,在各种自然的、动植物的和人类的动力作用下促使小块石进一步风化破碎为砾石、卵石和砂粒,这样就出现了小粒的松散状的砾石、卵石和砂土。在地表上这些砂石都位于相对海平面来讲是处在高处,人类活动较少的山区,尤其是山区谷地河流带。卵石和砂粒因成分单一,单位表面能量小,因此颗粒间无黏结力,属无机性质的无黏性土。卵石、粗砂、中砂、细砂和粉砂所组成的地基土层在工程上一般认为它们是不发生沉降的,这里是指当荷载作用上去后立即完成压缩的意思。当卵石和砂经河流的水力搬运出山区后,一般卵石就留在近山区,水力已较难搬动,砂料由水力推动继续向湖区、三角洲河网地区、海边低洼处等地域推进,并由粗砂向细砂、粉砂发展,到了海边已大都成细砂和粉砂。砂粒在滚动、推移过程中棱角磨损、颗粒变小,最终出现扁平细小的黏粒。近期地质年代,人类活动都位于沿海和湖泊水源周围及三角洲河网地区,由于人类活动产生了大量的有机物质,这些有机物质掺入到这些扁平的细颗粒中,混合后再经化学和物理变化的作用,便形成黏粒和团粒,出现了黏性土。黏性土和砂性土无论在物理性、化学性和力学性方面有着质的区别。

黏土颗粒并非圆粒或近似圆粒,而是扁平多边形颗粒,三个方向的尺度相差甚远。第四章图 4-4 中给出的是珠江三角洲京珠高速公路广珠东段灵山试验路段地面下 12m 处的原状土样,经冷冻升华处理后保持原状结构,再用电镜扫描放大一万倍拍摄的原状黏土微结构图片,在图片上清晰显示出单个颗粒的扁平形状,三个方向的尺度差异大,以及颗粒间形成团粒和土中较大的孔隙。其次黏土颗粒细小,它的比表面积较大,比表面能也大,它的吸附能量也大,尤其与极分子水之间相互作用紧密而复杂。因为黏土颗粒细,造成黏土的孔隙体积庞大,往往土中孔隙体积比固体的体积大,甚至占整个土体积的 60% ~ 70%。沿海一带淤泥的孔隙比常大于 2,这就是说单位体积中孔隙体积占 2/3 以上,而固体只占 1/3 以下。此外,

黏土中掺有大量的各种有机物质,这种有机物质与黏土颗粒掺杂在一起,使黏性土的工程性质更复杂化,第四章图 4-4 给出的是一个有机物混杂在黏土颗粒中的图像,有机物是多孔性的。黏性土具备颗粒细小、孔隙巨大、有机物质多三个方面的特点,使得黏性土地基给工程带来了许多问题:首先是黏性土地基的强度指标不但小而且难于测定,强度在地区分布上差别很大,即使在相近的建筑物,它的地基强度有时也相差较大。由于黏性土结构的脆弱性,即使同一个土样,用不同的仪器、不同的方法测定的强度也不同。同一建筑的黏性土地基不同时期的强度变化规律至今尚未完全掌握,因此给设计者和施工者带来许多困难。其次是黏性土地基的沉降问题,由于土性复杂,至今没有研究出一个通用合理的沉降计算方法或与实际测量相符的理论,甚至可以说计算与观测结果两者相近的工程实例不多,为此正确的说法应该将沉降计算称之为沉降分析或沉降估算。可见目前的软土地基带给工程建造者许多难题,造成许多浪费或事故,要求设计者、施工人员或工程管理人员具备有一定的软土力学的知识。本篇讨论是从工程实践出发,结合工程需要,从基础知识方面来叙述软土力学的基本特性,并指出这些特性在工程中起什么作用。设计者、施工者和管理者通过本篇讨论,了解到饱和黏性土的一些力学性基本规律,为设计指标的正确选用,掌握加固方法的原理和正确应用打下基础,并增长软土力学的基础知识和提高技术水平。

第一章 软土地基中饱和黏性土的物理性指标及工程意义

土的物理性质应包括两大部分:即土的组成和土的物理量。鉴于各种土力学书籍中均讨论这两大部分,且内容大体相同,已形成统一论述,本章不再重复,需要了解的可阅读其他土力学土质学的书籍。

本章是从工程角度来讨论饱和黏土的物理性质,主要讨论的内容有饱和黏土的含水率、重度、孔隙比、孔隙率、界限含水率(即液限和塑限)、塑性指数和液性指数、饱和度和渗透性等物理量,以及这些物理量的定义、相互关系和测定方法,并且重点讨论它们在地基工程中的作用和地位及如何改善的措施。

第一节 饱和黏性土物理指标的定义和测定方法

通常土是三相物质组成,它们的体积和质量之间的比例关系表达了它们的物理性。饱和黏土仅两相物质,即固体土颗粒和液体水,这就简单一些。两相体或三相体的比例指标反映了土体的干燥与潮湿、疏松与紧密的状态,是评判其工程性质的最基本的物理性指标,也是工程地质勘察报告中的主要内容。

通常教科书把分散状态的土的三相物质分别集中起来表达,便于理解和计算。图 1-1 是饱和黏性土的两相图。因为饱和土只有水和土粒,土样的体积为 V ,土粒的体积为 V_s ,水的体积为 V_w ,土样的质量为 m ,土粒的质量为 m_s ,水的质量为 m_w 。

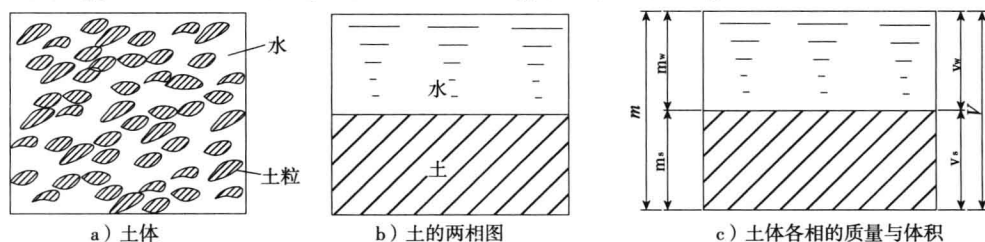


图 1-1 饱和黏土两相图

土的物理性指标有两类:一类必须通过试验手段取得,称试验指标;另一类是通过试验指标换算而得,称换算指标。现将两类指标都统计在表 1-1 中。

饱和黏性土地基中软土的含水率这个物理指标是反映工程性质的首位指标,它不但反映出土的软弱,而且可以判断出地基土的强度、沉降及沉降延续时间的状态、工后沉降的性质。因此工程设计者对于软土含水率大小应有充分透彻的认识。一般而言,一个有经验的工程师,当饱和黏土地基的土的含水率大于 40% 时,在工程设计中应对土性有深入的了解和注意,例如应了解软土层厚度、所处在地基中的深度位置以及工程对地基的要求等;当含水率大于 50% 时应深入研究土的工程性质,例如钻孔位置和深度,勘察内容中应包含十字板强

度和静力触探的指标,对于标准贯入击数的资料,仅作参考,不能应用,对工程要求需详情掌握,例如对相邻建筑,相邻地形,水文地质条件均需清楚,尤其对附近类似工程的施工期稳定控制和工后状态进行调查和了解,以供借鉴;此外,对所采用的地基处理方法的原理和施工条件、工程措施要全面掌握,并留有足够的安全度储备;当土的含水率大于60%时,除贯彻上述要求外,尚需在勘察方面加强工作,例如软基上的大型工程必须进行补充勘察,高速公路工程钻孔的间距沿纵轴线每100m补充一个断面,每断面布设3个孔,主要是静力触探和十字板试验,适量取原状土样,做室内外补充和特殊试验,对于大型厂房和场地的钻孔位置按50m×50m或80m×80m方格布孔,所有钻孔必须穿透软土层。

饱和黏性土物理指标统计表

表 1-1

名称	符号	单位	定 义	测 定 方 法	工 程 性 质	说 明
含水率	w	%	单位土体中水体所占有的质量百分数	烘干法	它表明土中所含水分的多少,含量愈大,土质愈软,排水固结时间愈长,地基加固愈困难。它大于液限,表示土体处于流动状态,小于塑限,处在固态半固态状态,介于液塑限之间,处在塑性状态	
孔隙比	e	无量纲	单位土体中孔隙体积与土颗粒体积之比	换算指标 $e = \frac{\gamma_s(1+w)}{\gamma} - 1$ $e = \frac{w\gamma_s}{S_r\gamma_w}$ $e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$ $e = \frac{n}{1-n}$	它表示土体的紧密程度,当孔隙比达到2时,土体中孔隙体积已占2/3,此时土体已是空架结构形式,会产生大沉降量	
孔隙率	n	%	单位土体中孔隙体积所占有的百分比	换算指标 $n = 1 - \frac{\gamma}{\gamma_s(1+w)}$ $n = \frac{e}{1+e}$	它与孔隙比有完全相同的工程性质,两者互换使用。反映出土的紧密度,用于估算沉降	
重度	γ	N/cm ³	单位土体的重力。它分为几种状态,饱和土为饱和重度 γ_{sat} ,湿土为湿重度 γ ,地下水位以下为浮重度 γ' ,烘干后为干重度 γ_d ,有效重度是饱和重度扣除水的重度	用环刀法测定 $\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w}$ $\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e}$ $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$	它表明土体的密实状态,含水率愈小,土体愈密实,重度愈大	土质学上用土的密度来表示,即单位体积的质量(g/cm ³)。土的密度一般为1.6~2.20g/cm ³ 。国际单位以重力计,土的质量产生的单位体积的重力为重力密度,又称重度 γ_0 ,单位kN/m ³ ,在工程上一般用密度加大10倍

续上表

名称	符号	单位	定 义	测 定 方 法	工 程 性 质	说 明
土粒密度	ρ_s	g/cm^3	单位体积土粒的质量,即干土粒的质量 m_s 与体积 v_s 之比	用土的悬液沉降法测定	一般黏性土的土粒密度为 $2.4 \sim 2.6 (\text{g/cm}^3)$	土粒的相对密度指的是土的质量与 4°C 时同体积水的质量比
干密度	ρ_d	g/cm^3	土的固体质量与土的总体积之比	换算指标	土的干密度越大,土越密实,强度越高,可压缩性越小	
饱和度	S_r	%	土中孔隙充满水的体积与孔隙体积之比	换算指标	工程上一般认为地下水位以下的黏性土为饱和土	土中有封密气体,故土的饱和度接近 100%,工程上忽略这些气体
饱和密度	ρ_{sat}	g/cm^3	土体中孔隙全部充满水时的密度	换算指标	即饱和黏土的密度	
渗透系数	k	cm/s	水在土中每秒渗流经过的距离	用渗透仪测定	渗透性的大小决定了饱和黏土的固结时间长短	土的水平向节理较多,水平向渗透性大于竖直向很多,目前用两个方向来切土样,没有考虑水平向重力影响,因此水平向渗透系数就失真

第二节 饱和黏性土的界限含水率及工程意义

黏性土在不同的含水率下能表现出不同的物理状态,含水率从高至低可以出现四种状态:流动状态、塑性状态、半固体状态和固体状态。流动状态是指土体不能成型,放置平板上为坍塌流动;塑性状态是指在外力将土体造型后,当除去外力后仍能保持原有的形态,也就是指土体此时是可以塑造成各种形态的,即有可塑性;当随着土中含水率的减小,土体失去可塑性而进入固体状态,但此时土中仍含有一定量的重力水分,称它为半固体状态;当土体在 105°C 的高温烘箱内烘干 6h 以上,此时土体中的重力水已被排除,土体已处于干燥状态,称之为固体状态。土体的四种状态可以用三种界限含水率来分割。流动状态与塑性状态之间用液限 w_L 含水率来区分,塑性状态与半固体状态间可用塑限含水率 w_p 来界分,半固体与固体状态之间用缩限含水率 w_s 分界,以上就是界限含水率的物理含义。

一、界限含水率测定方法及工程应用

(1) 碟式液限仪测定法。该测定方法目前为西方国家常用。采用铜制标准圆碟(图 1-2),将调制的土膏分层填在碟内,表面刮平后由专用开槽器刻一底宽 2mm 的槽,以 2 次/s 的转速摇动摆柄,使碟子在落距 10mm 下自由跌落,当槽两边的土合拢长度为 13mm 时记下跌落次数并测定试样含水率,将测定的不同含水率和不同跌落次数绘在对数纸上,取 25 次跌落次数的含水率定义为液限含水率。

(2) 锥式平衡液限仪测定法。铜制标准锥体质量 76g,锥角 36° (图 1-3),用两只平衡锤