



# 非饱和土 强度理论及其 工程应用

徐永福 刘松玉 编著

东南大学出版社





Fei Baohu Tu

Qiangdu

Lilun Jiqi

Gongcheng

Yingyong

责任编辑:张新建

责任校对:林树

责任印制:陈跃

平面设计:王俊

ISBN 7-81050-507-6



9 787810 505079 >

ISBN 7-81050-507-6

TU·73 定价:28.00元

TU432  
X830:1

# 非饱和土强度理论 及其工程应用

徐永福 刘松玉 编著

东南大学出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

非饱和土强度理论及其工程应用/徐永福,刘松玉编著.  
南京:东南大学出版社,1999.10  
ISBN 7-81050-507-6

I. 非… II. ①徐… ②刘… III. 饱和土-强度理论-研究 IV. TU44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 63406 号

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人:洪焕兴

江苏省新华书店经销 南航飞达印刷厂印刷

开本:850×1168 1/32 印张:12.25 字数:320 千

1999 年 11 月第 1 版 1999 年 11 月第 1 次印刷

印数:1—1200 册

定价:28.00 元

## 序

非饱和土问题是近年来的研究热点,国内外学者从不同角度对非饱和土的力学特性进行了富有成效的研究,取得了丰硕的成果。《非饱和土的强度理论及其工程应用》一书是对当前非饱和土强度研究成果的系统论述,作者在书中提出了自己的独特见解,是对现有非饱和土强度理论的发展和完善。

我经对本书粗读一过,感到书中内容有以下三个特点:(1)对非饱和土强度理论进行了较为全面的归纳和总结,在此基础上提出了自己的见解,在一些方面充实了非饱和土强度理论。(2)宏观研究与微观研究相结合。宏观现象反映了微观机理,研究微观机理则是为了更好地认识和掌握宏观现象。书中用非饱和土(膨胀土)微观结构的分形模型研究了该类土的成因、变形和强度特性,取得了一定的创新成果。(3)理论研究与实践应用紧密结合。理论为指导实践服务,再用实践标准来论证和检验理论的正确性。书中提出的非饱和土强度理论得到了试验结果的验证,并应用于膨胀土的工程实践,取得了较好的效果。

书中文字简洁、朴实,语句流畅、通顺,用朴素

的语言向读者介绍了非饱和土的强度理论,适合于不同层次的读者阅读参考,这是一本好书。

应该指出,本文作者都是土力学领域的年轻学者,他们的勤奋换来了本书的面世。当然,考虑到书中还难免有不当的地方,请广大读者不吝指正。

在本书付梓之时,我乐于写下上面的文字,是为序。

孙 钧  
九九年五月于上海

注:孙钧先生是同济大学教授、中国科学院院士、上海隧道工程股份有限公司院士研究室院士。

## 前 言

非饱和土是相对于饱和土而言的,饱和土的孔隙中充满了水,孔隙水压不小于零;非饱和土孔隙中同时含有气体和水,孔隙水压可能小于零,水和气体接触面是典型的弯液面。自从第一届国际土力学与基础工程会议上出现了非饱和土的研究成果以来,对非饱和土的研究一直没有停止,但由于种种原因,非饱和土的研究进展一直较为缓慢。近几年来,非饱和土研究引起广大学者的兴趣,且取得了长足进步,以加拿大学者 Fredlund 取得的成果最为丰富和先进,代表作 *Soil Mechanics for Unsaturated Soils* 系统总结了非饱和土的研究方法和研究成果。

非饱和土强度理论以 Bishop 强度理论和 Fredlund 强度理论为代表,两个强度理论各有其优缺点,且都得到了一定程度上的认可。Bishop 强度理论是根据非饱和土有效应力原理提出的,Fredlund 强度理论是用双应力状态变量表示的强度公式表达。非饱和土强度公式相对于饱和土强度公式多了由负孔隙水压力(即基质吸力)引起的强度项,在基质吸力引起的强度项中有一个参数(有效应力参数  $\chi$  和吸力内摩擦角  $\phi^b$ )是基质吸力的隐函数,Fredlund 也认识到这一点,且提出了许多修正形式。

本书是在作者博士学位论文的基础上,总结和整理前人有关非饱和土强度研究成果编写而成。全书系统地介绍了非饱和土的强度机理,分析了已有强度公式的不足,并根据非饱和土(膨胀土)的结构模型,提出了非饱和土的吸力强度理论,讨论了原状非饱和

膨胀土强度的特性；书中根据非饱和土的强度理论研究了非饱和土地基承载力和非饱和土边坡稳定性，论证了用膨胀力和用基质吸力表示非饱和膨胀土地基承载力的统一性，提出了非饱和土边坡稳定性分析的通用方法；书中最后讨论了膨胀土的膨胀特性和膨胀土地基的加固方法。

对于本书的编写出版，作者首先要感谢河海大学殷宗泽教授给予的关怀和指导。长江科学院包承刚教授、河海大学徐志英教授、江苏省交通厅陈冠军总工等也给予了关心和支持，在此一并致以诚挚的谢意！本书出版之时，适逢本书第一作者在上海隧道工程股份有限公司企业博士后工作站工作，公司总工白云高工和公司研究所所长傅德明高工给予了有益的帮助和支持，对此本人不胜感激。

本书由重庆后勤工程学院陈正汉教授审稿，对陈正汉教授百忙中抽空审阅书稿致以衷心的感谢！

中国科学院院士孙钧教授欣然为本书作序，作者深感荣幸，特致谢意！

由于作者才疏学浅，不妥之处在所难免，恳请专家和广大读者批评指正。

编 著 者

1998. 10. 22



# 目 次

<b>1 绪 论</b> .....	1
1.1 非饱和土研究的历史 .....	1
1.2 非饱和土的构成与分类 .....	3
1.3 非饱和土的物性指标及其相互关系 .....	13
1.4 非饱和土研究的方法和意义 .....	17
参考文献 .....	22
<b>2 非饱和土的试验研究</b> .....	25
2.1 吸力的量测 .....	25
2.1.1 吸力的概念 .....	25
2.1.2 总吸力的量测 .....	31
2.1.3 基质吸力的量测 .....	37
2.1.4 溶质(渗透)吸力的量测 .....	44
2.2 非饱和土三轴试验 .....	46
2.2.1 试验装置及试验方法 .....	47
2.2.2 试验结果 .....	50
2.2.3 试验成果分析 .....	60
2.3 非饱和土的直剪试验 .....	67
2.3.1 试验装置 .....	67
2.3.2 试验结果 .....	67
参考文献 .....	70

3	非饱和土的有效应力原理	74
3.1	Bishop 公式	75
3.1.1	公式推导	75
3.1.2	有效应力参数 $\chi$ 的物理意义	79
3.2	多孔介质变形的有效应力公式	84
3.2.1	理论公式	85
3.2.2	有效应力参数的测定	87
3.3	非饱和土强度问题的有效应力公式	88
3.3.1	非饱和土的微观结构模型	89
3.3.2	非饱和土强度问题的有效应力公式	91
3.4	封闭气泡压力的确定	93
3.4.1	小气泡压力	93
3.4.2	大气泡压力(气体空洞压力)	97
3.5	非饱和土有效应力公式的比较	105
	参考文献	107
4	非饱和土的强度理论	109
4.1	Mohr-Coulomb 强度准则	110
4.2	非饱和土的强度公式	112
4.2.1	Bishop 公式	112
4.2.2	$\chi$ 的确定方法	113
4.2.3	Fredlund 公式	115
4.2.4	非饱和土强度的非线性公式	124
4.3	对非饱和土应力状态变量的讨论	125
4.4	用水分特征曲线确定非饱和土的强度	128
4.5	吸力摩擦角 $\phi^s$ 的经验公式	133
4.6	用通用状态参量表示的非饱和土强度公式	140

4.7	含大气泡非饱和土的强度 .....	141
4.7.1	含大气泡土的特点 .....	142
4.7.2	含气泡土的不排水剪切强度 .....	146
4.8	非饱和土强度公式的分类 .....	150
	参考文献 .....	152
<b>5</b>	<b>膨胀土的结构模型与强度特性 .....</b>	<b>154</b>
5.1	膨胀土微结构的分形模型 .....	154
5.1.1	分形几何理论 .....	154
5.1.2	确定膨胀土粒度分布分维的方法 .....	156
5.2	用粒度分布的分形模型研究膨胀土的工程性质和 力学性质 .....	160
5.2.1	分维与膨胀土成因的关系 .....	160
5.2.2	分维与膨胀土力学性质的关系 .....	163
5.3	膨胀土微孔隙分布的分形模型 .....	172
5.4	膨胀土的水分特征曲线方程 .....	173
5.5	非饱和膨胀土的吸力强度公式 .....	175
5.6	原状膨胀土的强度特性 .....	182
5.7	膨胀土强度的衰减特性 .....	185
5.7.1	胀缩性对强度的影响 .....	185
5.7.2	裂隙对强度的影响 .....	188
5.7.3	膨胀土的残余强度 .....	193
5.8	膨胀土强度的微观机制 .....	199
5.8.1	矿质成分对强度的影响 .....	199
5.8.2	膨胀土强度的微观分析 .....	200
	参考文献 .....	204

6	膨胀土膨胀变形的研究 .....	207
6.1	膨胀土的判别与分类 .....	207
6.1.1	膨胀土的判别 .....	207
6.1.2	膨胀土的分类 .....	209
6.2	膨胀土胀缩变形的试验研究 .....	211
6.2.1	膨胀变形的几个基本参量 .....	211
6.2.2	宁夏膨胀土膨胀变形特征 .....	215
6.2.3	膨胀土的循环胀缩变形特征 .....	221
6.3	膨胀变形的物理机制 .....	230
6.4	膨胀变形的影响因素 .....	234
6.4.1	微结构 .....	234
6.4.2	约束条件 .....	236
6.5	膨胀变形的速率过程理论 .....	238
6.5.1	速率过程理论 .....	238
6.5.2	膨胀变形速率的时间函数 .....	240
6.5.3	宁夏膨胀土膨胀变形的试验结果 .....	241
6.6	膨胀土的浸水规律 .....	250
	参考文献 .....	255
7	非饱和土地基承载力 .....	258
7.1	非饱和土地基极限承载力公式 .....	259
7.1.1	太沙基承载力公式 .....	259
7.1.2	非饱和土地基承载力公式应用实例 .....	263
7.2	膨胀土地基的承载力 .....	264
7.2.1	用基质吸力表示的承载力公式 .....	264
7.2.2	用膨胀力表示的承载力公式 .....	265
7.3	邯郸膨胀土地基承载力研究 .....	266

7.3.1	邯郸膨胀土地基概况 .....	266
7.3.2	荷载试验 .....	267
	参考文献 .....	270
<b>8</b>	<b>非饱和土边坡稳定性分析 .....</b>	<b>271</b>
8.1	特征滑移线方法 .....	271
8.1.1	问题的提出及求解 .....	272
8.1.2	边界条件 .....	276
8.1.3	计算结果 .....	280
8.1.4	轴对称问题的边坡稳定分析 .....	282
8.2	条分法 .....	287
8.2.1	条分法概述 .....	287
8.2.2	非饱和土边坡稳定性分析的条分法 .....	288
8.3	膨胀土边坡稳定性分析 .....	295
8.3.1	膨胀土的力学特性 .....	295
8.3.2	膨胀土边坡的滑动机制 .....	296
8.3.3	膨胀土边坡滑动特点及其影响因素 .....	300
8.3.4	膨胀土边坡稳定性分析的一种简化方法 ——不平衡推力传递法 .....	306
8.3.5	圆弧滑面和折线滑面计算结果的比较 .....	309
8.4	膨胀土边坡滑动的防治 .....	311
8.4.1	膨胀土边坡防治的主要方法 .....	311
8.4.2	挡土墙设计 .....	313
8.4.3	膨胀土边坡加筋设计 .....	315
8.4.4	土钉加固膨胀土边坡的研究 .....	321
8.5	膨胀土边坡滑动的预报和监测 .....	328
8.5.1	根据强度衰减速率来预报滑坡时间 .....	329

8.5.2	根据降雨强度预报滑坡 .....	334
	参考文献 .....	337
<b>9</b>	<b>膨胀土地基的加固方法 .....</b>	<b>339</b>
9.1	膨胀土地基的加固措施 .....	339
9.1.1	土性改良法 .....	339
9.1.2	保湿法 .....	342
9.1.3	换土法 .....	344
9.2	膨胀土掺灰处理研究 .....	345
9.2.1	掺石灰处理研究 .....	345
9.2.2	最佳掺灰量的确定 .....	347
9.2.3	掺灰处理的膨胀土性状 .....	351
9.2.4	分层掺灰试验研究 .....	357
9.2.5	掺水泥处理研究 .....	358
9.2.6	掺砂试验研究 .....	363
9.2.7	各种改良方法效果比较 .....	364
9.3	桩基础 .....	368
9.3.1	预制桩(灌注桩)基础 .....	368
9.3.2	砂桩、碎石桩 .....	374
9.4	化学处理 .....	376
	参考文献 .....	378



# 1 绪 论

非饱和土分布十分广泛,与工程密切联系的地球表层土都可认为是非饱和土。干旱和半干旱地区的土处于非饱和状态,土体孔隙中为孔隙气和孔隙水所充填,这些土是严格意义上的非饱和土;土坝、铁路和公路路堤填土、机场跑道工程的击实填土也是处于非饱和状态,亦即非饱和土;港口平台、管路等离岸工程中所遇到的土,往往是含有生物气的海相沉积土,生物气以气体空洞或大气泡形式存在于土粒之间。另外,在地下水面附近的高饱和度土,其孔隙中也可能溶解了部分气体,气体以气泡形式存在于孔隙水中,气泡尺寸与土粒尺寸相当。以上两种含有气泡的土也可以认为是非饱和土。可见,非饱和土分布十分广泛。饱和土是非饱和土的特例,真正意义上的饱和土在工程实践中是不存在的。非饱和土是工程实践中常遇到的土类,为了在工程实践中充分了解非饱和土的力学性质对工程实践的影响,对非饱和土的研究十分必要。处于饱和状态下的土与处于非饱和状态下的土,其性质是完全不同的,如分布在我国西南地区的膨胀土遇水产生体积膨胀,而分布在我国西北地区的黄土遇水产生湿陷,因此对非饱和土进行独立研究很有必要。

## 1.1 非饱和土研究的历史

早在 1936 年第一届国际土力学与基础工程会议上,Ostashev 的两篇论文中提出土中毛细水流的许多影响因素,其中就包括孔隙水压力和毛细作用力。在这次会议上,Boulichev 提出两种可以

测量土中毛细压力和毛细水上升高度的仪器。

1941年, Hogentogler 和 Barber 综合评述了毛细水的性质, “……可以认为, 这类毛细水流动是严格符合公认的表面张力、重力和水力学原理的……”, 他们已认识到负孔隙水压对非饱和土强度的影响。1943年, Terzaghi 在《理论土力学》中对 Hogentogler 等人的工作进行了总结, 同时他强调了水—气界面对土的性状的重要影响, 推导出在孔隙率  $n$  和渗透系数  $k$  不变的情况下, 毛细水上升高度与时间的相关关系:

$$t = \frac{nh_{\max}}{k} \left( \lg \frac{h_{\max}}{h_{\max} - z} - \frac{z}{h_{\max}} \right) \quad (1-1)$$

式中:  $t$ ——时间;

$n$ ——孔隙率;

$h_{\max}$ ——最大毛细水上升高度;

$z$ ——时间  $t$  内毛细水上升的高度。

Valle-Roads (1944), Lane, Washburn (1946) 和 Krynine (1948) 也研究了毛细水的特性, 结果与 Terzaghi (1943) 的结果基本一致。

1948年, Sitz 建议将毛细水分为重力毛细水和分子毛细水, 重力毛细水与普通水相似, 分子毛细水不同于普通水, 它能承受很大的拉应力, Bernatzik (1948) 观察到水—气弯液面使土的强度增加; 1951年, Lambe 发现控制毛细水流速率的不是饱和渗透系数, 毛细区内的水力梯度是不均匀的。50年代以前, 人们的注意力多集中于毛细水上升模型上, 这一模型虽有一定价值, 但其局限性已日益明显, 同时也是非饱和土土力学发展缓慢的原因之一。

50年代后期, Black 和 Croney (1957), Bishop (1960), Aitchison (1967) 和 Williams (1957) 研究了非饱和土的体变和抗剪强度, 提出了用有效应力表示的强度公式; Coleman (1962), Matyas 和 Radhakrishna (1968), 以及 Fredlund 和 Morgenstern (1977) 提出了用

双应力参量表示的强度公式。Lytton(1967)用混合物理论与连续介质力学,研究了非饱和土多相系的性质。1995年的第一次非饱和土国际会议标志着非饱和土的研究进入了新的阶段。

我国学者从60年代就已经开始研究非饱和土的性质。俞培基和陈愈炯(1965)研究了孔隙气的形态特征和非饱和土的物理参量及其之间的相互关系,给出了确定封闭气泡气体压力的方法;包承刚(1979;1998)研究了压实土的孔隙气和孔隙水的存在形态。90年代以来,对非饱和土的研究成为我国岩土工程界的一个热点。陈正汉(1989;1991)用混合物理论研究了非饱和土的力学性质和固结理论;1992年全国非饱和土理论和实践学术研讨会和1994年中加非饱和土学术会议有力地推动了我国非饱和土土力学的研究。1995~1996年间,沈珠江提出了许多有关非饱和土的变形模型,如广义吸力模型、损伤力学模型等;殷宗泽、孙长龙(1995)研究了膨胀土的浸水变形规律;1995年殷宗泽自行设计和改造的非饱和土三轴仪,是国内第一台用于研究非饱和土强度和变形的三轴仪;利用非饱和土三轴仪,殷宗泽、徐永福(1997)研究了宁夏非饱和和膨胀土的强度和变形特征;徐永福(1997)用分形几何理论研究了非饱和膨胀土的强度特性,提出了确定非饱和膨胀土强度的一种新方法,用椭圆—抛物线双屈服面研究了非饱和膨胀土的变形性质。

## 1.2 非饱和土的构成与分类

非饱和土就是在土粒间的孔隙中既不为孔隙水完全填满(不是饱和土),也不为孔隙气完全填满,而是同时为孔隙水和孔隙气共同填满。土在沉积过程的最初阶段通常是饱和的,并在其覆盖层的重力作用下固结。随着时代的变迁和地质变化,以及土中水分的蒸发,地下水位逐渐降至地表面以下,沉积层慢慢开始干燥和脱