



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 非饱和土力学

Soil Mechanics for Unsaturated Soils

谢定义 编著

高等教育出版社

UNSATURATED SOILS



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

非

FEIBAOHETU TULIXUE

饱和土土力学

Soil Mechanics for Unsaturated Soils

谢定义 编著

高等教育出版社·北京

## 内容简介

本书比较完整地讲述了非饱和土土力学的基本内容,包括非饱和土的相态特性、吸力特性、应力特性、强度特性、渗透特性和变形特性,也包括非饱和土体的渗流问题、强度问题与固结问题等主要应用问题,最后提出对非饱和土土力学的展望。本书可以作为土木工程相关专业研究生、高年级本科生的教材,亦可作为岩土工程领域科技人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

非饱和土土力学 / 谢定义编著. --北京:高等教育出版社,2015.7

ISBN 978-7-04-042317-4

I. ①非… II. ①谢… III. ①非饱和-土力学 IV. ①TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 042670 号

策划编辑 刘剑波 责任编辑 刘剑波 特约编辑 陈 静 封面设计 李卫青  
版式设计 于 婕 插图绘制 尹文军 责任校对 刘春萍 责任印制 朱学忠

---

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
邮政编码	100120		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
印 刷	北京鑫海金澳胶印有限公司	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
开 本	787mm×1092mm 1/16		<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
印 张	23.75	版 次	2015年7月第1版
字 数	430千字	印 次	2015年7月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	69.00元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 42317-00

# 前 言

由于土材料组成的多相性、相态变化的复杂性、基本特性的时空变异性,长期以来,作为研究土材料的力学特性及其在土体稳定性分析中应用科学的土力学学科,它的理论部分基本上是针对比较简单的饱和土条件建立的。20世纪末以来,随着测试和计算技术以及相关学科的发展,面对真正三相土的土力学研究得到了比较迅速的进展,形成了在普遍意义上的土力学,通常将它称为“非饱和土土力学”。它无论是在试验土力学、应用土力学、计算土力学还是在理论土力学方面都显示出土力学学科发展的新特色,从而引起了人们广泛的兴趣。但是,世界上关于非饱和土土力学的专著仅有1993年由Fredlund和Rahardjo编著的《Soil Mechanics for Unsaturated Soils》(John Wiley & Sons Inc., New York 出版),国内也只有它的译本(非饱和土土力学,陈仲颐,张在明,等,译.北京:中国建筑工业出版社,1997)。而近几十年来的有关研究成果还散布在大量的各类期刊文献之中。将它们尽可能地做一番收集和整理,介绍给需要它的广大读者,应该是一件很有意义的工作。这就是作者在多年教学的基础上写这本《非饱和土土力学》的初衷。

本书将需要研究解决的问题仍然分为土材料的特性问题和土体的稳定问题两个方面。在第一个问题方面,重点放在非饱和土的特性规律与特性参数的量测上,分章揭示了非饱和土的相态特性、吸力特性、应力特性、强度特性、渗透特性和变形(包括本构、固结)特性;在第二个问题方面,重点放在基本理论及其在土体工程中的应用上,分别介绍了土体中的渗流问题、面对土体的渗透稳定问题,土体的强度问题、面对土体的强度稳定问题,以及土体的固结问题、面对土体的变形稳定问题;最后提出了对非饱和土土力学的展望。考虑到目前对非饱和土研究和应用的不成熟性,本书较宽泛地选择了国内外研究者的观点和思路,适当地提出了作者对研究问题的倾向性,以便于读者在自己选择、分析与判断时参考。由于作者必然会受到知识面、资料收集面和理解分析水平的限制以及理论基础和实际经验的约束,书中的不妥之处在所难免,希望读者在发现后及时给予指正,作者将不胜感激。

谢定义

2015年4月

# 符 号 表

$A_s, A_w, A_a$	土粒、孔隙水和孔隙气分别所占的面积
$a$	压缩系数
$a_t, a_m$	土骨架在净总应力( $\sigma - u_a$ )、基质吸力( $u_a - u_w$ )变化下的压缩系数
$b_t, b_m$	孔隙水在净总应力( $\sigma - u_a$ )、基质吸力( $u_a - u_w$ )变化下的压缩系数
$C$	浓度
$C, C_s$	土骨架和土颗粒的压缩性
$C_c$	压缩指数
$C_e$	回弹指数
$C_t, C_m$	土骨架在净总应力( $\sigma - u_a$ )、基质吸力( $u_a - u_w$ )变化下的压缩指数
$[C]_{nt}, [C]_{st}$	净总应力 $\{\Delta\sigma\}$ 、基质吸力 $s$ 的柔度矩阵
$c$	黏聚力
$D$	分形理论方法中分维数
$D_t, D_m$	孔隙水在净总应力( $\sigma - u_a$ )、基质吸力( $u_a - u_w$ )变化下的压缩指数
$[D]_{nt}$	净总应力 $\{\Delta\sigma\}$ 的刚度矩阵(柔度矩阵的倒数)
$E, H$	土骨架在净总应力( $\sigma - u_a$ )、基质吸力( $u_a - u_w$ )作用下的弹性模量
$E_0$	变形模量
$E_i$	初始模量
$E_s$	压缩模量
$E_u$	回弹模量
$E_w, H_w$	孔隙水在净总应力( $\sigma - u_a$ )、基质吸力( $u_a - u_w$ )作用下的弹性模量
$e$	孔隙比
$G_s$	土颗粒的相对密度
$g$	重力加速度
$H$	质量溶解系数,与基质吸力有关的模量

$H_1$	基质吸力作用下土骨架的切线弹性模量
$h$	体积溶解系数(亨利系数)
$K, K_s$	土骨架和土颗粒的体积变形模量
$k$	渗透系数
$k_{fi}$	扩散渗透系数
$M_a$	空气质量
$m_1^s, m_2^s$	土骨架在净总应力( $\sigma - u_a$ )、基质吸力( $u_a - u_w$ )作用下的 体积压缩系数
$m_1^w, m_2^w$	孔隙水在净总应力( $\sigma - u_a$ )、基质吸力( $u_a - u_w$ )作用下的 体积压缩系数
$n$	孔隙率
$p, \varepsilon_v$	球应力, 球应变(体积应变)
$p_a$	大气压力
$Q_a$	空气体积
$q, \varepsilon_s$	偏应力, 偏应变
$R_f$	破坏比
$R_s$	弯液面的曲率半径
$S, S_r, S_e$	饱和度, 残余饱和度, 有效饱和度
$S_f$	应力水平
$s$	基质吸力( $s = u_a - u_w$ )
$\bar{s}, s'$	广义吸力( $s' = c_s \cot \varphi_s$ )
$s_a$	基质吸力的气侵入值
$s_w$	基质吸力的水侵入值
$T_{aij}$	气相的应力张量
$T_{ij}$	总应力张量
$T_s$	表面张力
$T_{sij}$	固相的应力张量
$T_{wij}$	液相的应力张量
$u^*$	等效流体压力
$u_a$	孔隙气压力
$u_w$	孔隙水压力
$\bar{u}_v$	水蒸气的分压力
$\bar{u}_{v0}$	饱和蒸汽压力
$w$	含水量
$w_L$	液限

$w_{op}$	最优含水量
$w_p$	塑限
$\gamma$	重度
$\lambda$	孔隙大小分布指数
$\mu$	土的泊松比
$\mu_a, \mu_w$	气、水的动黏滞性
$\pi$	溶质吸力(渗析吸力)
$\frac{\partial \pi}{\partial z}$	渗析吸力的梯度
$\rho$	质量密度(简称密度)
$\rho_a$	空气的质量密度
$\rho_{d, \max}$	最大干密度
$\rho_w$	水的质量密度
$\sigma$	总应力
$\sigma - u_a$	净总应力或净应力
$\sigma_0 = c \cot \varphi$	黏结应力
$\sigma_1$	大主应力
$\sigma_2$	中主应力
$\sigma_3$	小主应力
$\sigma_f$	摩擦应力
$\sigma_h, \sigma_v$	横向应力, 竖向应力
$\sigma_i$	胶结应力
$\sigma_\alpha, \tau_\alpha$	$\alpha$ 方向平面上的法向应力和切向应力
$\tau_{fs}$	饱和状态下的有效抗剪强度
$\tau_{fw}$	抗剪强度
$\tau_s$	吸附强度
$\varphi$	内摩擦角
$\varphi^b$	吸附内摩擦角
$\chi$	有效应力参数
$\psi$	土中水系统的自由能, 总吸力
$\psi_g$	重力势
$\psi_m$	基质势
$\psi_p$	压力势
$\psi_s$	溶质势

---

$\psi_T$	温度势
$\omega$	损伤度
$\omega_a$	空气的分子质量
CD 试验	固结排水的剪切试验
CSL	临界状态线
CSR	等应力比
CU 试验	固结不排水的剪切试验
IYB	初始屈服
LC 线	应力屈服线
LY	加载屈服
RH	相对湿度
SI 线	吸力 $s$ 增大的屈服线
SMP	强度发挥面
SWCC	土水特征曲线
UU 试验	不固结不排水的剪切试验



# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 非饱和土与非饱和土土力学 .....	1
1.2 非饱和土土力学的框架体系 .....	2
1.3 非饱和土土力学的发展 .....	3
1.4 小结 .....	4
参考文献 .....	5
第 2 章 非饱和土的相态特性 .....	6
2.1 概述 .....	6
2.2 非饱和土各相的自态特性 .....	6
2.2.1 固相的自态特性 .....	6
2.2.2 液相的自态特性 .....	7
2.2.3 气相的自态特性 .....	9
2.3 非饱和土各相的互态特性 .....	11
2.3.1 固相与液相之间的互态特性 .....	12
2.3.2 气相与液相之间的互态特性 .....	13
2.3.3 固相、气相和液相之间的互态特性 .....	15
2.4 非饱和土各相的变态特性 .....	16
2.4.1 固相的变态特性 .....	16
2.4.2 液相的变态特性 .....	17
2.4.3 气相的变态特性 .....	19
2.5 小结 .....	25
参考文献 .....	26
第 3 章 非饱和土的吸力特性 .....	28
3.1 概述 .....	28
3.2 吸力的物理力学本质 .....	28
3.2.1 土中水的自由能与吸力 .....	28
3.2.2 基质势、溶质势和土水势 .....	31
3.3 土水特征曲线 .....	34
3.3.1 土水特征的干燥曲线与增湿曲线 .....	34
3.3.2 土水特征曲线的特征参数 .....	37

3.3.3	土水特征曲线的表达式	40
3.3.4	土水特征曲线的物理机制	47
3.3.5	土水特征曲线的边界曲线与扫描曲线	54
3.4	非饱和土吸力的测试	65
3.4.1	多孔陶土板技术、轴平移技术、渗析压力技术与相对湿度 控制技术	65
3.4.2	总吸力、基质吸力和溶质吸力的量测方法	70
3.5	小结	74
	参考文献	76
<b>第4章</b>	<b>非饱和土的应力特性</b>	<b>81</b>
4.1	概述	81
4.2	荷载作用下应力的分担与变化	82
4.2.1	收缩膜张力与孔隙水压力、孔隙气压力间的关系	82
4.2.2	非饱和土应力状态变量的选择	83
4.3	双应力的应力状态变量	86
4.3.1	双应力状态变量的可行性	86
4.3.2	双应力状态变量的推广应用	88
4.3.3	对双应力状态变量的若干讨论	91
4.4	有效应力的应力状态变量	93
4.4.1	非饱和土有效应力关系的分析	93
4.4.2	非饱和土的有效应力原理与有效应力的表达式	94
4.4.3	Bishop 有效应力表达式及对它的若干讨论	99
4.4.4	非饱和土有效应力研究新思路(一)	106
4.4.5	非饱和土有效应力研究新思路(二)	111
4.4.6	关于有效应力研究思路的简单讨论	142
4.5	小结	144
	参考文献	147
<b>第5章</b>	<b>非饱和土的强度特性</b>	<b>152</b>
5.1	概述	152
5.2	非饱和土抗剪强度研究的基本思路	153
5.2.1	Bishop 强度表达式与 Fredlund 强度表达式	153
5.2.2	非饱和土吸附强度变化的非线性	155
5.3	非饱和土抗剪强度研究的其他思路	157
5.4	非饱和土抗剪强度特性参数的测定	160
5.4.1	Bishop 强度表达式和 Fredlund 强度表达式中强度参数的测定	161

5.4.2 一般强度表达式中参数的测定	163
5.5 非饱和土强度测试的新型土工三轴仪	163
5.5.1 真三轴仪	163
5.5.2 $\gamma$ 射线(双源双能)土工三轴仪	166
5.6 小结	175
参考文献	176
<b>第6章 非饱和土的渗透特性</b>	178
6.1 概述	178
6.2 渗透性定理	178
6.2.1 达西定律	179
6.2.2 菲克定律	179
6.3 渗透性函数	180
6.3.1 渗水的渗透性函数	180
6.3.2 渗气的渗透性函数	190
6.4 渗透性参数的试验测定	193
6.4.1 渗水系数的测定	193
6.4.2 渗气系数的测定	200
6.4.3 渗水系数与渗气系数的联合测定	202
6.5 小结	206
参考文献	207
<b>第7章 非饱和土的变形特性</b>	210
7.1 概述	210
7.2 非饱和土的体积变形理论	210
7.2.1 土骨架本构面和液相本构面的表达形式	212
7.2.2 土骨架本构面和液相本构面参数的确定	215
7.3 非饱和土的变形本构理论(一)——非线性弹性模型	216
7.3.1 非线性弹性模型的基本形态	217
7.3.2 非线性弹性模型中对吸力影响的考虑	218
7.4 非饱和土的变形本构理论(二)——弹塑性模型	224
7.4.1 非饱和土弹塑性的 Alonso 模型	225
7.4.2 非饱和土的其他一些弹塑性模型	230
7.4.3 对非饱和土弹塑性模型的一些讨论	248
7.5 非饱和土的变形本构理论(三)——结构性模型	265
7.5.1 结构性土的变形本构模型研究	265
7.5.2 二元介质模型	268

7.5.3	突变模型 .....	275
7.5.4	弹塑性损伤模型 .....	281
7.5.5	综合结构势模型 .....	283
7.6	非饱和土的固结变形 .....	293
7.6.1	非饱和土固结的特点 .....	293
7.6.2	非饱和土的固结特性参数 .....	293
7.6.3	非饱和土的固结变形理论 .....	296
7.7	小结 .....	298
	参考文献 .....	300
<b>第8章</b>	<b>非饱和土体的渗流问题、强度问题与固结问题 .....</b>	<b>306</b>
8.1	概述 .....	306
8.2	非饱和土体的渗流问题 .....	306
8.2.1	非饱和土体中渗流的基本方程 .....	307
8.2.2	非饱和土体中渗流计算成果的举例 .....	309
8.3	非饱和土体的强度问题 .....	313
8.3.1	非饱和土体强度计算中的有关公式 .....	315
8.3.2	考虑土结构性影响的非饱和土边坡稳定性分析 .....	317
8.4	非饱和土体的固结问题 .....	323
8.4.1	非饱和土体固结理论的变形模型、流动模型与控制方程组 .....	323
8.4.2	非饱和土体固结过程的初始超孔隙压力与计算分析 .....	325
8.4.3	非饱和土体固结理论研究的若干具体成果 .....	331
8.5	小结 .....	350
	参考文献 .....	352
<b>第9章</b>	<b>对非饱和土土力学的展望 .....</b>	<b>354</b>
9.1	概述 .....	354
9.2	当前非饱和土土力学发展的趋势 .....	355
9.3	在几个问题上的思辨 .....	355
	参考文献 .....	359
	中英文对照名词索引 .....	360

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 非饱和土与非饱和土土力学

非饱和土是一种由固相、液相和气相组成的三相土。它广泛存在于干旱、半干旱地区和地下水位以上的土体中。非饱和土最基本的一个特征是它液相(孔隙水)的压力小于零( $u_w < 0$ ),反映了非饱和土中气相与液相之间的收缩膜与固相颗粒作用的结果。由于非饱和土所占据的广大干旱地区(地球表面纬度处于 $+10^\circ \sim +40^\circ$ ,经度处于 $10^\circ \sim 40^\circ$ 之间)是世界上 60% 的人口和 60% 的国家世代居息和生活活动的地域,因此,非饱和土不仅是岩土工程工作者研究的重要对象,也是环境保护工作者研究的主要对象,研究非饱和土的工程特性有着非常重要的意义。

一般来讲,地表以下的土层,由上到下常可以分为干燥土层区、双流相土层区、毛细土层区和饱和土层区。在干燥土层区,土中的液相不连续,气相充于大部分孔隙中;在双流相土层区,土中的液相和气相都处于连续状态;在毛细土层区,土中的气相不连续,液相充于孔隙中;在饱和土层区,土中的液相充满孔隙,气相常在液相内处于溶解或气泡状态。显然,非饱和土中这种液相和气相的不同存在状态,必然会使土显示出不同的力学性质;它们与土中固相在矿物成分、化学成分以及结构构造等方面的差异与变化相结合,就使得非饱和土在力学性质上会出现更加多样而复杂的差异性,从而给深入研究带来较饱和土多得多的困难。

但是,在非饱和土土力学研究中,一切非饱和土总可以看作是两个基本系统的组合:一个是孔隙流体系统,另一个是土骨架系统。非饱和土特性的复杂化来源于孔隙流体系统中气相的存在以及它与土骨架系统的相互作用。孔隙流体系统包括了液相和气相,对于它应该着重研究的是流体的流动规律(流动模型);土骨架系统包括了固相和气液的交界面(收缩膜),对于它应该着重研究的是土骨架的变形规律(变形模型)。流体的流动规律(流动模型)和土骨架的变形规律(变形模型)以及它们相互作用的研究构成了非饱和土土力学研究的基本架构。在研究这些问题时,除了应该注意到非饱和土材料在其粒度、湿度、密度、构度(结构)以及应力等各种状态变化下强度发挥的规律与变形发展的规律外,还应该注意到非饱和土在增减荷(应力边界条件变化)、

增减湿(流量边界条件变化)或它们耦合变化时土性变化的基本规律及其对土体稳定性变化的影响。

因此,非饱和土土力学的研究应该以力学、水力学,尤其是内界面物理学的基本原理为基础。所谓内界面物理学,主要是指描述气、固、液各相间的平衡、物质由一相向另一相的转换、一相与另一相和不同物质相邻相之间的吸收或分解问题的热动力学。如果考虑到变形模型与应力变量有着直接的关系,则非饱和土土力学研究的问题就可以包括它的流动现象、应力现象和变形现象与具有可变性的多孔介质相结合并互相影响下的一系列实际问题。在多孔介质的非饱和土中,应力的产生、变形的发展和水分的迁移是互相紧密结合的。

应该说,经过几十年来的发展而形成的土力学是不可能不注意到与工程问题密切关联的非饱和土的。传统土力学中关于土的压实、压缩、抗剪等特性方面的理论研究历来都是以非饱和土为主要对象的,但关于土的渗透、固结特性方面的理论研究却主要局限于饱和土。以饱和土有效应力原理为基础,已经发展了比较完善的渗透理论和固结理论,但它们与解决非饱和土的同类问题还有很大的差距。因此,从土力学学科的完整性和理论性来看,传统的土力学的理论还没有能够真正包括多种特殊土类的特性规律和工程应用问题。当代的土力学仍然担负着发展非饱和土土力学及其应用问题这一个中心课题的任务。非饱和土土力学以普遍存在的实际土和土体作为研究对象来建立自己的土力学理论体系,是一种真正广泛意义上的土力学,是对传统土力学的进一步深化,也是现代土力学发展的基本方向。

## 1.2 非饱和土土力学的框架体系

非饱和土土力学所需要研究解决的问题同样包括了土材料的特性和土体的稳定两大方面的问题。它的理论体系应该既包括非饱和土从它的三个组成相及其上作用的应力到土的渗透、强度、变形、固结等特性问题,又包括非饱和土体因土的渗透、强度、变形、固结等特性而导致的土体稳定分析问题。对于第一个问题,重点应是土材料的特性规律与其相关特性参数的量测,需要揭示非饱和土的相态特性、吸力特性、应力特性、强度特性、渗透特性以及变形特性(包括本构特性和固结特性)。对于第二个问题,重点应是土体稳定性分析的基本理论与理论的工程应用,需要建立土体的渗流理论,解决渗透稳定问题;建立土体的极限平衡理论,解决强度稳定问题;建立土体的变形与固结理论,解决变形、固结与变形过程的稳定问题。

因此,本书建立的非饱和土土力学基本框架体系包括了土材料和土体两

大部分。对土材料,以土的基本物理力学性质为中心;对土体,以土体的变形、强度、渗流等方面的稳定性为中心。根据土力学是土工试验与力学原理相结合来解决工程问题的认识以及非饱和土土力学的研究现状,非饱和土土力学需要更加重视土性参数与特性规律的试验测定与试验研究。这不仅是因为它为认识和应用非饱和土所必需,而且是因为它在发展中还存在较多的困难,更是因为目前的非饱和土土力学尚未能得到足够量的试验成果,从而限制了它建立能够真正揭示本质特性规律的理论工作。本书共包括9章:第1章为简要的总论;第2章到第7章分别论述非饱和土材料的相态特性、吸力特性、应力特性、强度特性、渗透特性、变形特性(包括本构特性与固结特性)等,它们均包括了有关材料基本特性参数的测试;第8章以土体为对象,针对非饱和土体由于渗流、强度、变形和固结而引起的稳定性问题进行相应的分析与讨论;第9章对非饱和土土力学的发展进行了展望。

### 1.3 非饱和土土力学的发展

由于非饱和土同人类的生活与文明息息相关,早在1936年举行的第一届国际土力学会议上,就指出了对它进行研究的重要性。但是,由于非饱和土中气相的存在和变化,使得在非饱和土土力学特性的影响因素、测试方法、基本理论的建立、方程的求解等方面都具有特殊的复杂性,从而使非饱和土土力学在揭示机理、寻求规律和力学模拟与计算处理上都遇到了较大的困难。因此,长期以来,尽管它是土力学学科领域中最有普遍性和实用性的对象,但它的发展仍然显得十分缓慢;土力学中所形成的渗透的理论以及同有效应力理论相联系的强度理论和固结理论等都只限于饱和土,而对非饱和土有关问题的解决不得不仍然依赖于试验和经验、半经验的方法。

近些年来,相关学科、计算技术和量测技术的迅速发展,为非饱和土土力学的发展在需要与可能的结合上提供了必要的条件,使土力学工作者们看到了非饱和土土力学将传统土力学理论发展为广义土力学理论的可能性,为非饱和土土力学的研究复苏注入了新的活力。在国际上,已经举办了3次非饱和土的学术会议(法国的巴黎、中国的北京、巴西的里约热内卢)和多次膨胀土、残积土、压实填土和黄土等非饱和土的学术会议;在国内,也已经举办了3次专门的非饱和土学术会议(北京、杭州、重庆)。它们对非饱和土土力学的发展起到了新的推动作用。

在非饱和土土力学发展的现阶段,可以看到如下一些重要的趋向。<sup>①</sup>为了确保非饱和土理论建立的正确性,正在发展有效的测试技术(设备、方法),新的试验成果逐渐为力学机理的分析打下了较厚实的基础;同时,为了确保理

论应用的可靠性,正在探求对非饱和土体稳定性分析的流量边界及稳定性控制的技术措施。②同任何其他力学学科的研究一样,非饱和土土力学的力学变量、力学规律和实际应用问题的力学分析都引起了研究者的广泛重视;为了寻求最能正确描述、刻画非饱和土中应力作用实质的应力状态变量,人们经过多年的工作,不仅在双应力变量方面已经有了较大的突破和发展,而且在单应力变量的有效应力理论方面也进行了多方面的研究,正在开拓新的途径,具有良好的发展前景。③为了使非饱和土土力学显示出自己真实的价值和生命力,人们在全面揭示非饱和土特性的同时,正在以更大的注意力将非饱和土土力学的实用问题提上重要的议事日程,力图使非饱和土土力学由研究材料特性发展到解决实际土体工程稳定性问题,并通过实际应用,进一步检验和推动非饱和土土力学理论的深化与发展。

## 1.4 小 结

(1) 非饱和土是一种由固相、液相和气相组成的三相土。非饱和土土力学是以实际上普遍存在的土和土体状态作为研究对象而建立的一种土力学理论体系。非饱和土研究包括了孔隙流体系统和土骨架系统两个基本系统以及它们的相互作用。对非饱和土的孔隙流体系统应该研究流体的流动规律(流动模型);对非饱和土的土骨架系统应该研究土骨架的变形规律(变形模型)。它们构成了非饱和土土力学问题研究的基本架构,以揭示非饱和土在其粒度、湿度、密度、构度(结构)及应力等各种状态变化下,土强度发挥的规律与土变形发展的规律作为目标,构成了非饱和土土力学研究的第一类问题(材料特性问题)。

(2) 研究非饱和土土体与渗流、变形或强度特性有密切关系的各类稳定性问题是非饱和土土力学研究的第二类问题(土体稳定问题)。它以揭示非饱和土的土体在增减荷(应力边界条件变化)、增减湿(流量边界条件变化)或它们耦合变化时的反应特征,进而建立土体稳定分析的基本理论,解决土体工程应用方面的实际问题为目标。

(3) 非饱和土土力学特性的影响因素复杂和试验测试复杂的特点是使非饱和土土力学发展缓慢的重要原因。现在,相关学科、计算技术和量测技术的迅速发展已经为非饱和土土力学的发展提供了一切必要的条件。非饱和土土力学已经开始了新的复苏:一方面面临着将发展需要与发展可能结合起来的大好形势;另一方面担负着将传统土力学理论发展为广义土力学理论,并在实际工程应用中大展宏图的远大目标。它们已经成了非饱和土土力学领域工作者们去努力克服各种困难的强大动力。



(4) 目前,研究非饱和土力学特性测试的理论与技术,研究最能正确描述、刻画非饱和土中应力作用实质的应力状态变量,以及研究非饱和土土力学与土体工程结合,走向实际应用等方面的问题,成了非饱和土土力学研究中必须突破的重点问题。

## 参 考 文 献

- 包承纲,詹良通. 非饱和土性状及其与工程问题的联系[J]. 岩土工程学报,2006,28(2): 129-136.
- 陈正汉. 非饱和土与特殊土测试技术新进展(发展水平报告)[J]. 岩土工程学报,2006,28(2):147-169.
- 陈正汉,秦冰. 非饱和土应力状态变量的研究[J]. 岩土力学,2012,33(1):1-11.
- 谢定义. 21世纪土力学的思考[J]. 岩土工程学报,1997,19(4):111-114.
- 谢定义,姚仰平,党发宁. 高等土力学[M]. 北京:高等教育出版社,2008.
- 俞培基,陈愈炯. 非饱和土的水-气形态及其与力学性质的关系[J]. 水利学报,1965,(1): 16-23.
- 赵成刚,韦昌富,蔡国庆. 土力学理论的发展和面临的挑战[J]. 岩土力学,2011,32(12): 3521-3540.
- Fredlund D G, Rahardjo H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. New York: John Wiley & Sons,1993. (中译本:非饱和土土力学[M]. 陈仲颐,张在明,陈愈炯,等,译. 北京:中国建筑工业出版社,1997)
- Lu N, Likos W J. Unsaturated Soil Mechanics[M]. Hoboken: John Wiley & Sons,2004.
- Ng C W W, Menezie B. Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering[M]. Boca Raton: CRC press,2007.