

文章编号: 1000-7598-(2005)04-0667-06

非饱和土固结理论新进展

张志红¹, 赵成刚¹, 邓 敏²

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044 2. 浙江南都房产集团公司, 杭州 310007)

摘 要: 总结了国内外多年来在非饱和土固结理论领域研究的主要理论成果, 内容包括国内外非饱和土固结理论研究的概况, 涉及线性、非线性、弹塑性和结构性等方面, 非饱和土固结理论的研究具有非常好的应用前景。但非饱和土固结理论还很不成熟, 有待广大科研工作者的进一步研究。

关 键 词: 非饱和土; 固结理论; 新进展

中图分类号: TU 43 **文献标识码:** A

Recent development of consolidation theories of unsaturated soils

ZHANG Zhi-hong¹, ZHAO Cheng-gang¹, DENG Min²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Zhejiang Nandu Real Estate Development Group, Hangzhou 310007, China)

Abstract: The consolidation theories and test results of unsaturated soils are summarized in detail, which include the recent development in China and abroad. The consolidation theories of unsaturated soil have very good applied future, but they are not mature and need the much research effort to develop.

Key words: unsaturated soils; consolidation theory; recent development

1 引 言

在荷载的作用下, 土体中产生超静孔隙水压力, 导致土中孔隙水逐渐排出, 随着时间的发展, 超静孔隙水压力逐步消散, 土体中有效应力逐步增大, 直至超静孔隙水压力完全消散, 孔隙压力的消散过程称为固结^[1]。在固结过程中, 随着孔隙水的排出, 土体产生压缩, 使土体的强度提高。

通常认为, 太沙基 (Terzaghi) 提出的一维固结理论和有效应力原理标志着土力学学科的诞生。他在一系列假定的基础上, 建立了著名的一维固结理论。Rendulic 把 Terzaghi 的一维固结理论推广到二维或三维的情况, 但存在一定的缺陷。Biot 考虑了土体固结过程中孔隙水压力消散和土骨架变形之间的耦合作用, 提出了 Biot 固结理论。Biot 固结理论较 Terzaghi 固结理论更为合理完整, 但计算较为困难, 通常需要采用数值解法。以上这些固结理论都是针对饱和土体的固结问题, 并假定土中水的渗流服从 Darcy 定律, 土体变形为小变形, 且是弹性

变形。由于土体的复杂性, 人们又发展了考虑土体大变形、考虑非 Darcy 渗流以及非饱和土的各种固结理论。

2 非饱和土的固结理论研究

非饱和土在土骨架形成的孔隙中同时含有气体和水, 气体在压缩时会有部分溶解于水中, 非饱和土的压缩性和渗透性比饱和土复杂得多。因此, 迄今为止, 还没有公认为成熟的非饱和土固结理论。建立非饱和土固结理论的困难主要有几个方面^[2]:

(1) 饱和粘土固结理论是以土体变形是连续的作为基本假设。对于非饱和土而言, 土体中气体具有很高的压缩性, 同时, 部分气体溶解于水中, 很难满足严格的连续条件。

(2) 非饱和土的渗透性包括透气性和透水性, 渗透性与非饱和土的基质吸力和含水量密切相关, 且在由干到湿和由湿到干的干湿循环过程中, 相同含水量的土体, 渗透性并不一样, 即渗透性与含水量不是单值函数关系, 因此, 测量渗透系数不容易。

(3) 非饱和土的有效应力参量和有效应力原理的适用性较窄, 有效应力公式中含有与基质吸力有关的参量不易确定。

(4) 非饱和土的水气接触是一个复杂的物理-化学界面, Fredlund 称之为第四相, 第四相对非饱和土的行为有何影响仍不得而知。

(5) 非饱和土本构模型还没有公认的理论, 因此建立成熟的非饱和土固结理论还需要时间。

2.1 国外固结理论的研究概况

非饱和土的固结是工程中常见的问题, 其理论研究内容包括孔隙水压力和孔隙气压力随土体变形而变化以及随时间增长而消散的规律。由于在建立同时适用于不同土类固结的普遍方程上的复杂性, 很多研究者只是针对某种特定的土类来寻求非饱和土固结问题的解答^[3]。由于影响因素的复杂性, 研究中总是做出某些简化的假定, 并分为一维、二维和三维问题。大量被研究的主要是气封闭的非饱和土, 气相以气泡形态(自由气泡、吸附气泡)存在于土中, 只建立孔隙水压力的控制方程, 如 Scott、Brechtz、费洛林、黄文熙和蒋彭年^[4]等的固结理论, 至今仍有人沿用这种方法研究非饱和土的固结问题^[5]。1941 年 Boit^[5]对含有封闭气泡的非饱和土提出了一般性固结理论, 建立了 2 个以有效应力 $(\sigma - u_w)$ 和孔隙水压力 u_w 表达的本构方程, 将应力与应变联系起来。换言之, 当时已经认识到区分总应力和孔隙水压力作用的必要性。一个方程建立孔隙比与应力状态的关系; 另一个方程建立含水量与土的应力状态的关系。Boit 理论所采用的假定与 Terzaghi 理论采用的类似, 对于一维固结, Boit 理论得到的方程也与 Terzaghi 得到的方程式相似, 只是其固结系数 C_v 经过修正, 考虑了孔隙流体的压缩性。Larmour、Hill 和 Olson 证明, 使用修正的固结系数 C_v , Terzaghi 方程便可用来描述含有气泡的非饱和土的固结性状。Scott^[6]将孔隙比的变化及饱和度的变化引入含有气泡的非饱和土的固结方程中。同时考虑变形、孔隙水压力和孔隙气压力耦合作用的固结模型首先是由 Barden 提出^[7], 他利用水、气连续方程、Darcy 定律、吸力状态函数、Bishop 有效应力公式及孔隙率-有效应力关系组成封闭方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(nsr_w)}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z}(v_w r_w); \\ \frac{\partial}{\partial t}[hsnu_a + r_a(1-s)n] &= \frac{\partial}{\partial z}(v_a r_a + hu_a v_w); \\ u_a - u_w &= f_c(n, \lambda, s); \\ n &= f_n(\sigma') = f_n[\sigma - u_a + x(u_a - u_w)] = \\ &= f_n[\sigma - u_a + f_x(n, \lambda, s)(u_a - u_w)] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 $v_w = k_w \frac{\partial u_w}{\partial z}$, $k_w = f_w(n, \lambda, s)$; $v_a = k_a \frac{\partial u_a}{\partial z}$, $k_a = f_a(n, \lambda, s)$, λ 代表土的结构性; n 为亨利系数, 单位压力下溶解于单位体积水中的气体质量。

由上述控制方程可以解出未知量 u_a, u_w, s 和 n 。Barden 针对压实非饱和粘土的不同类型探讨了解控制方程的可能性。

国外从 20 世纪 60 年代开始研究非饱和土固结问题, 典型的有 Scott R. F.^[6], Barden L.^[7], Lioret A.^[8], Fredlund, D.G.^[9]等人提出的固结方程, 其中最为流行的为 Fredlund 固结理论。Fredlund 和 Hasan 将非饱和土视为四相系^[9], 即在水、气、土粒之外增加了水气分界面作为第四相。土粒和气的分界面在力的作用下处于平衡状态, 而空气和水在应力梯度下发生流动。如果假设土粒不可压缩, 气水分界面又没有体积变化, 则非饱和土微体的总体积变化 Δn 必等于液相和气相体积变化之和, 即连续条件为

$$\Delta n = \Delta n_a + \Delta n_w \quad (2)$$

为了求得非饱和土的体积变化状态, 必须求出液相和气相的体积变化, 即必须有 2 个应力状态变量和应变状态变量相关的本构关系。他采用了 $(\sigma - u_a)$ 和 $(u_a - u_w)$ 为应力状态变量, 其本构关系为

$$\left. \begin{aligned} \Delta n_a &= m_1^a d(\sigma - u_a) + m_2^a d(u_a - u_w); \\ \Delta n_w &= m_1^w d(\sigma - u_a) + m_2^w d(u_a - u_w) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

同时考虑了土体变形的连续性, 渗水的达西定律、渗气的 Fick 定律和若干假定, 导出一维条件下孔隙水压力和孔隙气压力消散的控制方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u_w}{\partial t} &= -c_w \frac{\partial u_a}{\partial t} + c_v^w \frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2}; \\ \frac{\partial u_a}{\partial t} &= -c_a \frac{\partial u_a}{\partial t} + c_v^a \frac{\partial^2 u_a}{\partial z^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 c_w, c_a 分别为液相方程和气相方程的相互作用常量; c_v^w, c_v^a 分别为液相和气相的固结系数。

Fredlund 的固结理论可以看作是 Terzaghi 固结理论的推广, 概念明确, 形式简单, 最大的优点在于它放弃了有异议的非饱和土有效应力原理, 代之以 2 个独立的应力状态变量外加应力 $(\sigma - u_a)$ 和吸力 $(u_a - u_w)$ 来建立非饱和土各相的体应变本构方程; 但也具有与 Terzaghi 固结理论类似的缺点, 即假定总应力在固结过程中不变, 本构方程中参数的测定也很困难。为了导出孔隙压力消散方程, 采用了过多的与实际情况不大相符的简化假设。

Lloret 和 Alonso (1980 年)^[8]以状态面代替本

构方程, 并结合连续方程及渗水渗气的 Darcy 定律组成封闭方程, 即

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{div}(\rho_w \vec{v}_w) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho_w s n) &= 0; \\ \operatorname{div}(\rho_a \vec{v}_a + \rho^* H \vec{v}_w) + \frac{\partial}{\partial t}[\rho_a(1-s) + \rho^* H n s] &= 0; \\ e &= F(\sigma - u_a, u_a - u_w, e_0, s_0); \\ s &= (\sigma - u_a, u_a - u_w, e_0, s_0) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

求解了非饱和土的固结和一维入渗时的膨胀问题和湿陷问题, 从而拓宽了非饱和土固结的内涵。但模型没有参数化, 不便于应用。

Blight (1961 年)^[10]推导得出干硬状非饱和土气相的固结方程。他在推导中使用了将质量传递与压力梯度联系起来的 Fick 扩散定律。

Barden (1965 年, 1974 年)^[11, 12]提出了压实非饱和和粘土的一维固结分析, 用 Darcy 定律描述气相和液相的流动。对于土的不同饱和度, 提出了若干种独立的分析, 但由于对非饱和土应力状态和本构关系缺乏了解, 所以, 这些分析具有不确定性。

Fredlund 和 Hasan (1979 年)^[13]提出用 2 个偏微分方程, 可以求解非饱和土固结过程的孔隙气压力和孔隙水压力。该方程假定气相是连续的, 将 Darcy 定律和 Fick 定律分别应用于液相和气相的流动, 并认为液相和气相的渗透系数都是土的基质吸力或某一体积-质量特性的函数。也就是说, 2 个偏微分方程中包含了考虑渗透系数变化项, 2 个方程联立求解, 该方法通常称为两相流方法。

Fredlund 和 Hasan (1979 年) 的公式在形式上与传统的 Terzaghi 一维公式类似, 并在非饱和与饱和两种情况之间可以平顺过渡。Lioret 和 Alonso (1981 年)^[14]也提出过类似的固结方程。

Chang^[15]和 Duncan (1983 年) 研究了非饱和土的弹塑性固结问题, 但实际上他们研究的是接近饱和土, 土中气处于封闭状态, 水和气作为混合流体处理, 且他们的表达缺乏严谨的理论体系。

Dakshanamurthy^[16] (1984 年) 等人将非饱和土的固结理论延伸到三维的情况。在三维公式的推导中, 将连续方程和平衡方程联立起来求解。

Rahardjo^[17] (1990 年) 在特别设计的 K_0 圆筒仪中对非饱和粉砂进行一维固结试验。仪器满足 K_0 加荷条件, 并可在整个试样上同时测定孔隙气压力和孔隙水压力。试验过程中还独立地量测了总体积和液相体积的变化, 结果表明试验用土的超孔隙气压力基本上是瞬时消散的。另一方面, 超孔隙水压

力的消散则是随时间进行的过程。这个过程可用流体偏微分方程近似模拟。

Fredlund 教授在 1979 年提出了非饱和土的一维固结理论, 1993 年在他的《非饱和土土力学》一书中又推导出了非饱和土三维固结的控制方程组, 包含 5 个独立变量^[18]。

Kitamura^[19] (1996 年) 应用概率论理论, 从微观角度考虑, 建立了固结的本构模型。假定孔隙水压力消散和土骨架变化单独的发生在固结过程中, 孔隙水压力的消散与渗透系数有关, 但是, 土骨架的变化却与土颗粒的变形有关。对于渗透现象, 土颗粒可以做成模型, 固相为平行六面体模型, 由管来代表孔隙。用统计和概率的方法, 可得到非饱和状态时土的孔隙率、含水量、饱和-非饱和渗透系数以及吸力值等。在这个模型中, 引入了概率密度函数来表示管直径和倾角的分布。对一维固结过程进行数值模拟, 并与土工试验结果进行比较, 证明了假设模型的有效性。

Wong Tai T.^[20] (1998 年) 进行了非饱和土耦合固结的数值研究, 介绍了耦合公式在非饱和土固结理论中的数值应用。用 Mandel-Cryer 问题对开发的计算机程序进行验证, 以用于多维耦合固结问题。结果表明在非饱和土中采用参数分析研究, 可以抑制 Mandel-Cryer 效应, 非饱和土的固结过程受土-水特征曲线的影响很大, 该耦合固结模型可用于分析非饱和-饱和土柱的固结。

Loret, Benjamin^[21] (2000 年) 把混合物理论应用于三相介质, 提出了确定非饱和土本构关系的三维模型, 三相中每相都有其应力和应变, 建立了弹性和弹-塑性本构方程。该构方程要求最少的材料参数, 直接包含了土-水特征曲线。对公式影响较大的是有效应力的确定, 有效应力和吸力的耦合影响。该模型可以描述试验过程中观察到的许多土的固结特征。

Saix, C.^[22] (2000 年) 介绍了非饱和粘质粉砂固结中的热力学耦合作用。通过对与固结力学特性 (与热有关) 有关的温度影响来分析这种耦合作用 (与总竖向应力有关), 并通过热固结和力学固结两种试验来证明耦合作用的影响。

Loret, Benjamin^[23] (2002 年) 提出了一种用于非饱和多孔介质的有效应力弹塑性模型, 模型要求最少的材料参数确定减饱和效应。

Ausilio E.^[24] (2002 年) 在外荷载或基质吸力增加的情况下, 对非饱和土一维固结进行了分析。采用了由 Ausilio 和 Conte 提出的简单方程, 把非饱

和土沉降速率与平均固结度联系起来。考虑了由 Rahardjo 和 Fredlund 进行的粉砂试验结果,着重论述了应用太沙基经典理论预测非饱和地基的沉降速率问题。

2.2 国内固结理论的研究概况

国内在非饱和土固结理论问题的研究中,近年来取得了较大的进展。非饱和土的固结理论是 20 世纪 90 年代研究的热点,陈正汉(1989 年,1991 年)、杨代泉(1992 年)和殷宗泽(1998 年)曾先后研究过非饱和土的固结理论,李锡夔、陈正汉、杨代泉、孙长龙和殷宗泽各自独立的提出了自己的结论。其中陈正汉和杨代泉的研究结论都适用于水、气各自连通的非饱和土,并可涵盖饱和土的固结理论;孙长龙和殷宗泽的理论适用于气封闭的非饱和土。从控制方程数和包含的独立变量来看,陈正汉的有 5 个,杨代泉的有 6 个,孙-殷的有 4 个。路志平(1987 年)用三轴仪研究了气封闭状态非饱和土的孔压(孔隙气压=孔隙水压)、体变、强度和非线性本构关系^[25]。陈正汉用混合物理论研究了非饱和土的固结理论,建立了非饱和土固结的混合物理论^[26],他提出的非饱和土固结理论是一个完整的理论体系,是对土力学理论的创新;对于水、气各自连通的非饱和土,杨代泉根据非饱和土的非线性本构模型建立了包括湿胀、湿陷和热运动的非饱和土的广义固结理论^[27];殷宗泽对非饱和土三维固结理论进行了简化,提出了非饱和土的二维固结理论。另外,包承纲(1998 年)研究了非饱和土固结过程中孔压消散系数和饱和度之间的关系。

陈正汉的理论是以岩土力学的公理化理论体系为基础,用公理化方法建立的。该理论在 1989 年用全量形式给出,不久改用增量形式^[28],其数学模型(即增量控制方程组)和一维问题的解析解在 1991 年 5 月召开的第 7 届国际岩土力学中计算机方法与发展会议上发表^[29]。1993 年《应用数学和力学》中、英文版同时发表了该理论的比较完整的成果(详细的建模过程、一维问题解析解和二维问题的有限元分析)^[29,30],此项工作还先后于 1992 年和 1995 年在国内和国际学术会议上报导。

在陈正汉的增量型固结理论中,使用了多孔介质的有效应力公式,该公式仅对线性变形成立,且不适用于描述具有湿陷性土类的湿陷变形。若把非饱和土的非线性本构关系^[31]和改进的 Alonso^[32]弹塑性模型引入陈正汉的固结理论,就可得到非饱和的非线性固结模型和弹塑性固结模型^[33]。

杨代泉用水气连续方程、水气渗流的 Darcy 定律、

土骨架的平衡方程、热量守恒方程、吸力状态方程等 19 个方程求得 19 个未知量: σ_{ij} , ε_{ij} 和 w_i (土的位移); u_a , u_w , T (温度) 和 s (饱和度)。对一维固结条件,由于在孔隙气体未进入完全封闭状态之前,非饱和土的固结过程主要是排气过程,而且固结过程中饱和度的变化与瞬时加荷后饱和度的变化相比可以忽略不计,故此时非饱和土的固结问题就变成孔隙气压力的消散问题。从而求得了简化的解析解,证明了它与数值解的一致性。他还提出了 Fredlund 关于非饱和土加载瞬时不排水、不排气分析方法中存在的问题,提出用水气连续方程、土在加载后的体变增量方程和吸力方程作为封闭方程,从而求出加载瞬时的 Δu_a , Δu_w , Δs , Δn , 这个增量与加载前相应量之和即为固结的起始条件。

陈正汉以混合物理论的场方程为基本框架,以在本构原理指导下建立的本构方程为补充方程,在不计热效应、气溶解和水蒸发的条件下,建立了非饱和土固结的物理数学模型,由 25 个方程求得 25 个求知量。在增量线性情况下,模型简化为 5 个控制方程求解 5 个未知量: δu_w , δu_a 和 δx_{si} 。这个模型概括了三相连续方程、水气运动方程、总体平衡方程、几何方程、有效应力方程、理想气体的状态方程、广义虎克定律、饱和度-密度-吸力状态方程,共 11 个方面的关系,每一个方程中都包含了 5 个基本未知量,体现了应力、变形、渗水、渗气的耦合效应。在使用控制方程时,可以在每一增量过程中把材料参数视为常量,而在每一增量过程的末尾,再根据实际的饱和度和孔隙率调整它们的数值,供下一个增量过程使用,从而为考虑土的非线性应力-应变关系及模拟施工过程提供了方便。

此外,陈正汉还借用 Laplace 变换,求得了一维固结的理论解,直接从控制方程同时解出了孔隙水压力、孔隙气压力和土竖向位移的增量,给出了固结沉降和瞬时沉降,定义了综合反映非饱和土基本特性(压缩性、饱和度、密度、渗水性、渗气性和吸力)的固结系数和固结度。

2001 年陈正汉等^[33]把非饱和土的增量非线性本构模型及改进的 Alonso 等人提出的饱和土弹塑性模型引入到他建立的非饱和土固结理论,得到了非饱和土的非线性固结模型和弹塑性固结模型,并设计了有关程序,求解了地基在分级加载条件下的固结过程和塑性区的动态,从而把非饱和土固结问题的研究推到了一个新水平。

卢再华最近研究了非饱和膨胀土的弹塑性损伤本构模型与固结模型,首次给出了非饱和膨胀土坡

在多次降雨入渗和蒸发条件下的损伤场变化^[34]。

2003年, 沈珠江^[35]在孔隙气的排气率等于常量的假设下, 建立了非饱和土的简化固结理论, 并应用于裂隙粘土中雨水入渗过程的数值模拟, 得出了土体吸力丧失、有效应力降低和膨胀回弹的全过程, 算例结果合理, 只是孔隙气排气量的设定尚有待进一步研究。

3 结 语

黄土的湿陷和膨胀土的湿胀是应用非饱和土固结理论的两个最重要的工程领域^[36]。非饱和土固结理论的另一个重要应用领域是与冻土有关的工程问题。即使对于沿海软土地区, 非饱和土力学同样也有重大的应用前景。另外, 硬粘土地区开挖边坡的稳定问题, 显然也与吸水软化有关, 同样可以应用这一理论进行分析。几十年来, 岩土工程界已经对非饱和土固结理论开展了大量的研究工作, 积累了大量资料, 也取得了很大进展, 但是由于问题的复杂性, 关于非饱和土固结理论的研究还很不成熟, 需要广大科研工作者的共同努力。

参 考 文 献

- [1] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [2] 吴世明, 杨挺, 周健, 等. 岩土工程新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [3] 谢定义, 陈正汉. 非饱和土力学特性的理论与测试[A]. 非饱和土理论与实践学术研讨会文集[C]. 北京: 中国土木工程学会土力学及基础工程学会, 1992.
- [4] 蒋彭年. 非饱和土工程性质简介[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(6): 39—59.
JIANG Peng-nian. On the engineering properties of unsaturated soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1989, 11(6): 39—59.
- [5] Biot M A. General theory of three-dimensinal consolidation[J]. **Journal of Applied Physics**, 1994, 12(2): 155—164.
- [6] Scott R F. Principles of soils mechanics[A]. **Addison-Wesley Publishing Company**[M]. [s.l.]: [s.n.], 1963.
- [7] Barden L. Consolidation of compacted and unsaturated clays[J]. **Géotechnique**, 1965, (3): 257—286.
- [8] Liovet A, Alonso E E. Consolidation of unsaturated soils, meluding swelling and collapse behavior[J]. **Géotechnique**, 1980, (4): 449—477.
- [9] Frelund D G. Mechanics of Fluid in Porous Media[M]. [s.l.]: [s.n.], 1982. 525—578.
- [10] Blight G E. Strength and consolidation characteristics of compacted soils[Ph. D.]. **dissertation, England: University of London**, 1961.
- [11] Barden L. Consolidation of compacted and unsaturated clays[J]. **Geotechnique**, 1965, 15(3): 267—286.
- [12] Barden L. Consolidation of clays compacted 'dry' and 'wet' of optimum water content[J]. **Géotechnique**, 1974, 24(4): 605—625.
- [13] Fredlund D G. Second canadian geotechnical colloquium: appropriate concepts and technology for unsaturated soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1979, 16(1): 121—139.
- [14] Lloret A, Alonso E E. Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behavior[J]. **Géotechnique**, 1981, 30(4): 449—477.
- [15] Chantawarangul K. Comparative study of different procedures to evaluate effective stress strength parameters for partially saturated soils[M.Sc. Thesis]. Thailand: Asian Institute of Technology, Bangkok, 1983.
- [16] Dakshanamurthy V, Fredlund D G, Rahardjo H. Coupled three-dimensional consolidation theory of unsaturated porous media[A]. **Preprint of Papers: 5th International Conference on Expansive Soils (Adelaide, South Australia)**[C]. Australia: Institute of Engineers, 1984. 99—104.
- [17] Rahardjo H. The study of undrained and drained behavior of unsaturated soils[Ph.D.]. Canada: Univisity of Saskatchewan, 1990.
- [18] Fredlund D G, Rahardjo. Soil Mechanics for Unsaturated Soil[M]. New York: John Wiley and Sons, 1993.
- [19] Kitamura, Ryosuke. Constitutive model for consolidation based on microscopic consideration by probability theory [A]. **Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference**[C]. Colorado: Golden, 1996. 456—459.
- [20] Wong Tai T, Fredlund Delwyn G, Krahn John. Numerical study of coupled consolidation in unsaturated soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1998, 35(6): 926—937.
- [21] Loret, Benjamin, Khalili, Nasser. Three-phase model for unsaturated soils[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2000, 24 (11): 893—927.
- [22] Saix C, Devillers P, El Youssoufi M S. Éléments de couplage thermomécanique dans la consolidation de sols non saturés[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2000, 37(2): 308—317.
- [23] Loret, Benjamin, Khalili, Nasser. An effective stress elastic-plastic model for unsaturated porous media[J]. **Mechanics of Materials**, 2002, 34(2): 97—116.
- [24] Ausilio E, Conte E, Dente G. An analysis of the consolidation of unsaturated soils[J]. **Unsaturated Soils**, 2002. 239—251.
- [25] 路志平. 锚定板结构与填土的相互作用[博士学位论

- 文 D]. 铁道科学院, 1987.
- [26] 陈正汉. 非饱和土固结的混合物理论-数学模型、试验研究、边值问题[博士论文 D]. 陕西: 陕西机械学院, 1991.
- [27] 杨代泉. 非饱和土广义固结理论及其数值模拟与试验研究[博士学位论文]. 南京: 南京水科院, 1990.
- [28] CHEN Zheng-han(陈正汉), XIE Ding-yi, LU Zou-dian. The consolidation of unsaturated soil[A]. **Proceedings of 7th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics**[C]. Australia: Beer G, Carter J P, eds.[s.l.]: [s.n.] 1991, 1617—1621.
- [29] 陈正汉. 非饱和土固结的混合物理论(I) [J]. 应用数学和力学, 1993, (2): 127—137.
CHEN Zheng-han. Consolidation theory of unsaturated soil based on the theory of mixture(I) [J]. **Applied Mathematics and Mechanics**, 1993, (2): 127—137.
- [30] 陈正汉. 非饱和土固结的混合物理论(II) [J]. 应用数学和力学, 1993, (8): 687—698.
CHEN Zheng-han. Consolidation theory of unsaturated soil based on the theory of mixture(II) [J]. **Applied Mathematics and Mechanics**, 1993, (8): 687—698.
- [31] 陈正汉, 周海清. 非饱和土的非线性模型及其应用[J]. 岩土工程学报, 1999, (5): 603—608.
CHEN Zheng-han, ZHOU Hai-qing. Nonlinear model for unsaturated soils and its application[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, (5): 603—608.
- [32] 黄海, 陈正汉, 李刚. 非饱和土在 P-S 平面上的屈服轨迹及土-水性特征曲线的探讨[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 316—321.
HANG Hai, CHEN Zheng-han, LI Gang. A study on yield locus of unsaturated soils on P-S plane and soil-water characteristic curve[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(4): 316—321.
- [33] 陈正汉, 黄海, 卢再华. 非饱和土的非线性固结模型和弹塑性固结模型及其应用[J]. 应用数学和力学, 2001, (1): 93—103.
CHEN Zheng-han, HANG Hai, LU Zai-hua. Nonlinear and elasto-plasticity consolidation models of unsaturated soil and applications[J]. **Applied Mathematics and Mechanics**, 2001, (1): 93—103.
- [34] 卢再华. 非饱和膨胀土的弹塑性损伤模型及其在土坡多场耦合分析中的应用[博士学位论文 D]. 重庆: 解放军后勤工程学院, 2001.
- [35] 沈珠江. 非饱和土简化固结理论及其应用[J]. 水利水电工程学报, 2003, (4): 1—6.
SHEN Zhu-jiang. Simplified consolidation theory for unsaturated soils and its application[J]. **Hydro Science and Engineering**, 2003, (4): 1—6.
- [36] 沈珠江. 非饱和土力学的研究途径和发展前景[A]. 非饱和土理论与实践学术研讨会文集[C]. 北京: 中国土木工程学会土力学及基础工程学会, 北京: [s.n.] 1992.
-
- 上接第 663 页
- [4] Fredlund D G, Morgenstern N R, Widger R S. The shear strength of unsaturated soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1978, 15(3): 313—321.
- [5] 赵慧丽, 马易鲁, 牛红凯. 非饱和土抗剪强度研究方法的探讨[J]. 岩土工程技术, 2001, (3): 142—145.
ZHAO Hui-li, MA Yi-lu, NIU Hong-kai. Probing study way in shear strength of unsaturated soil[J]. **Geotechnical Engineering Technique**, 2001, (3): 142—145.
- [6] 吴宏伟, 陈守义, 庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩土力学, 1999, 18(3): 1—13.
NG Wang-wai, CHEN Shou-yi, PANG Yu-wei. Parametric study of effects of rain infiltration on unsaturated slopes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 18(3): 1—13.
- [7] 党进谦, 李靖. 非饱和黄土的强度特征[J]. 岩土工程学报, 1997, 18(3): 56—61.
DANG Jing-qian, LI Jing. Strength characteristics of unsaturated loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 18(3): 56—61.
- [8] 缪林昌, 殷宗泽. 非饱和土的剪切强度[J]. 岩土力学, 1999, 21(1): 1—6.
- [9] 黄义, 张引科. 非饱和土土-水特征曲线和结构强度理论[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 268—277.
HUANG Yi, ZHANG Yin-ke. The theory of soil-water characteristic curve and structure strength for unsaturated soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(3): 268—277.
- [10] 孟黔灵, 姚海林, 邱伦锋. 吸力对非饱和土抗剪强度的贡献[J]. 岩土力学, 2001, 22(6): 423—426.
MENG Qian-ling, YAO Hai-lin, QIU lun-feng. The contribution of matric suction to shear strength of unsaturated soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(6): 423—426.
- [11] Gan J K, Fredlund D G, Rahardjo H. Determination of shear parameters of an unsaturated soil using the direct shear test[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1988, 25(8): 500—510.
- [12] 贺剑章, 郁寿松. 黄土的物理化学性质-黄土基本性质的研究[M]. 北京: 科学出版社, 1961.