

文章编号: 1000-7598 (2013) 07-1825-07

非饱和土力学中几个基本问题的探讨

赵成刚, 李 舰, 刘 艳, 蔡国庆, ASREAZAD Saman

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘 要: 近些年非饱和土力学的研究非常活跃, 但对一些基本问题的认识并不一致, 有时甚至概念混淆。针对非饱和土力学的几个基本问题: 非饱和土状态变量的选择、非饱和土有效应力变量的选择、吸力概念的界定和轴平移技术的局限性、非饱和土的结构表征方法等问题进行了分析和探讨。其中非饱和土状态变量和有效应力的选择对于非饱和土力学的理论和相应本构模型的建立具有重要影响, 因此, 首先深入讨论了这一问题, 概括论述了非饱和土有效应力的演变并深入探讨了目前各种形式有效应力的优缺点。其次, 指出由于受负压孔隙水气化(液-气相变化)的影响, 在实际场地中大于某一界限值的基质吸力是不存在的; 目前被广泛使用的轴平移试验技术却掩盖了这一情况, 而基于此所建立的非饱和土强度和变形理论的适用性需要进一步的研究和论证。再次, 指出非饱和土的结构除了包括组构和颗粒之间作用力的综合效应外, 还建议增加孔隙水和孔隙气的分布以及各相之间的相互作用和物理-化学作用。最后对一些容易混淆的概念进行了梳理。其目的是希望国内同行在今后的研究中对这些问题加以关注, 并建立正确的认识, 促进非饱和土力学沿着正确的方向发展。

关 键 词: 非饱和土; 吸力; 非饱和土有效应力; 轴平移技术的局限性; 非饱和土结构

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

Discussion on some fundamental problems in unsaturated soil mechanics

ZHAO Cheng-gang, LI Jian, LIU Yan, CAI Guo-qing, ASREAZAD Saman

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Unsaturated soil mechanics has become an active researching area in recent years. However the understanding of some fundamental problems is inconsistent and some basic concepts are confusing. This paper aims at the fundamental problems, e.g. the choices of state variables and effective stress of unsaturated soils, the definition of suction, the limitation of axis-translation technique and the characterization of unsaturated soil structure. In these problems, the choices of state variables and effective stress of unsaturated soils play an important role in the theory of unsaturated soil mechanics and constructing constitutive models. Firstly, this paper briefly reviews expressions of effective stress of unsaturated soils and discusses their advantages and disadvantages. Secondly, this paper points out that there does not exist such matric suction beyond a certain limit in real site because of cavitation of capillary water. However the laboratory axis-translation technique conceals the possibility of cavitation and modifies soil behavior. Thus the validity of theories of shear strength and deformation of unsaturated soils based on it is a question worth study. Thirdly, the paper suggests that the characterization of unsaturated soil structure should include the distributions of pore water and pore air, the interaction among all phases (e.g. capillary and physical-chemical forces), except for the elements of saturated soil structure, e.g. fabric and inter-particle actions. Finally, this paper further combs the confusable concepts. The purposes of these discussions are to attract attention of domestic scholars on these problems, to set up correct understanding about them, and to promote development of unsaturated soil mechanics.

Key words: unsaturated soils; suction; effective stress of unsaturated soils; limitation of axis-translation technique; unsaturated soil structure

1 概 述

最近 20 多年非饱和土力学的研究非常活跃, 尤

其是近些年国内外期刊中关于非饱和土力学及其工程性质研究的文章逐渐增多, 并占有一定的比例。突破了土力学就是指经典的饱和土力学的界限。一

收稿日期: 2012-10-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51278047, No. 50178019); 北京市自然科学基金资助项目(No. 8112024)。

第一作者简介: 赵成刚, 男, 1955 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 从事土力学与地震工程方面的研究。E-mail: cgzhao@bjtu.edu.cn

些学者在不同时期给出了当时是非常出色的关于非饱和土力学研究的总结和综述, 这些论述至今仍然值得回味, 例如: Sheng^[1]、D'onza 等^[2]、Gens^[3]、Baker 等^[4]、Delage 等^[5]、Wheeler 等^[6]、赵成刚等^[7]、孙德安^[8]、包承纲等^[9]、陈正汉等^[10]。本文不再对非饱和土力学研究的现状做全面的论述, 因为上述论文已经给出了非常好的综述。本文仅针对目前非饱和土力学研究中几个基本但又非常关键的问题展开讨论, 目的是希望国内同行在今后的研究中加入关注, 并使国内非饱和土力学的研究沿着正确和深入的方向发展。

人们已经认识到土体随着含水率(或饱和度)的变化, 其工程性质也会随之改变。如何定量地描述土体工程性质的这种变化和产生的机制是非饱和土力学研究的主要目的。土体含水率(或饱和度)的变化仅仅是一种宏观的表象, 它会引起哪些关键因素的改变, 并由此导致土体工程性质的变化, 这才是研究的重点。就力学的角度应该从以下两方面考虑: ①含水率(或饱和度)的变化是否会对非饱和土的有效应力产生影响, 因为有效应力一旦发生变化, 土体的工程性质肯定会随之改变; ②含水率(或饱和度)的变化对土的力学性质(例如土体的刚度、强度和渗流)是否存在影响, 如果存在影响又如何定量描述它。而这两方面的考虑会涉及到以下几个基本但又非常关键的问题: ①非饱和土状态变量的选择; ②非饱和土有效应力变量的选择; ③吸力概念的界定和轴平移技术的局限性; ④非饱和土的结构。本文针对这几个关键问题展开讨论。

2 非饱和土状态变量的选择

建立非饱和土的各种控制方程时, 例如渗流方程、平衡方程、热传导方程、本构方程等, 首先需要选择描述该系统的状态变量或本构变量。状态变量既包括应力变量也包括其他热力学变量。通常所选择的本构变量越多, 描述的现象就可能更多或更复杂, 所建立的本构关系也越复杂, 参数也会越多。Gens^[3]指出“the choice of constitutive variables is not neutral; it has a significant influence on the nature of the constitutive law developed.” 独立状态变量的选择依赖于所涉及问题的性质和特点、已有的认识(包括理论知识和试验结果等)和研究者的经验等。

从热力学的观点, 选择何种独立状态变量对非饱和土系统进行描述是一个基本而重要的问题。独立的状态变量的选择不是惟一的, 而是有多种可能。通常独立的状态变量越少, 相应的理论就会越简单。

但就非饱和土的问题, 因其性质非常复杂, 影响因素很多, 土的行为对很多因素都很敏感(例如吸力、饱和度、温度等)。因此, 面临着既要简单、又需考虑很多敏感因素的两难抉择。状态变量的选择应该有理论和科学依据, 例如最好选取热力学能量守恒方程中的变形功所包含的变量形式为状态变量, 其理论基础是热力学能量守恒方程。文献[11]中式(34)是基于热力学给出的一组非饱和土的状态变量。另外状态变量的选择也应该便于应用。当然状态变量的选择还包括非饱和土有效应力变量的选择。

3 非饱和土有效应力变量的选择

非饱和土有效应力的研究是非饱和土研究中最基本和最重要的, 它是非饱和土的其他研究的基础和前提。因此, 也促使研究者对其进行了持续不断地研究。本文首先简要回顾非饱和土有效应力研究的演进, 并指出各种有效应力的优劣。

1959 年 Bishop^[12]提出了非饱和土的有效应力(单应力变量的有效应力)。针对非饱和土中单应力变量的有效应力, Jennings 等^[13]提出了以下质疑, 即它不能说明非饱和土在湿化过程中的湿陷现象(collapse phenomenon)。他们对非饱和土进行了一系列的固结试验, 结果表明, 在湿化过程(即减小吸力)中所有土样都表现出湿陷。但用 Bishop 非饱和土有效应力公式进行计算反而得到膨胀的结果, 这与试验结果相违背(后来的研究证实, 土样的湿陷是由塑性变形引起的)。另外, 人们还发现, 饱和度 S_r 与有效应力参数 χ 之间没有惟一的关系。

为了克服上述非饱和土中单应力变量的有效应力的缺点, Coleman^[14]、Bishop^[15]、Blight^[16]提出了用两个独立的应力变量——净应力和基质吸力描述非饱和土的强度和变形。这实际上隐含着认为采用单应力变量的有效应力不能全面地描述非饱和土的性质。Fredlund 和 Morgenstern^[17]提出了零位试验, 验证了采用这两个独立变量描述非饱和土的强度和变形的正确性。此后, 用双应力变量作为有效应力, 即认为用两个独立的变量就可以确定非饱和土的变形和强度的研究得到了迅速的发展。最近一些学者采用 Bishop 形式的应力(有效应力)和吸力作为两个独立应力变量, 用于描述非饱和土的性质, 例如 Cai 等^[18]、刘艳等^[19]、Sheng 等^[20]、Wheeler 等^[21]。

用具有普适性的能量守恒方程中的变形功对非饱和土中的应力和变形进行表述是一种更加科学的方法, 并具有坚实的理论基础。能量守恒方程中的

变形功 (work of deformation) 包括了非饱和土内各相的应力以及与这些应力相对偶的广义应变 (它们之积等于变形功)。关于它的讨论有助于加深在非饱和土力学性质的全面认识和本构关系的建立, 因此, 受到有关研究者的关注。Houlsby^[22] 对非饱和土变形功的表达形式进行了研究, 并给出了具体表达式。Houlsby^[23] 从变形功出发, 讨论了非饱和土有效应力的原则和具体表述方式。值得注意的是, 基于变形功, 非饱和土有效应力的表达式不是惟一的^[22]。2010年 Zhao等^[11] 基于连续孔隙介质理论推演得到了非饱和土变形功的表达式, 给出了与固体骨架变形对偶的 Bishop 形式的非饱和土的有效应力, 并基于变形功提出了非饱和土广义有效应力原理。非饱和土广义有效应力原理的实质是: 土体变形和含水率的变化互相影响 (实际上各项体积分数的变化是互相影响的)。因此, 其相应的三相变形功都必须考虑, 忽略每一项变形功都要有充分的理由和依据。通常气相变化对应的变形功很小, 可以忽略; 所以可以只考虑其他两项变形功, 即: Bishop 形式的有效应力与其对偶的固相应变之积的功 (固相变形功) 以及吸力、饱和度和孔隙比之积的功 (液相变形功)。

近些年随着非饱和土研究的不断深入, 对非饱和土有效应力的认识和理解也不断深化。非饱和土单应力变量的有效应力是借鉴了饱和土中有效应力的概念, 它是一种宏观、直觉、经验性的表达式。但因其公式简单, 又与饱和土的有效应力的表达式相类似, 容易被工程师掌握, 也易于在已有的有限元程序中实现和应用。在特定的范围和条件下, 用于实际工程也会取得较好的效果。从工程应用的角度来看, 针对单应力变量的有效应力及其工程应用的研究是有实际意义的。因此, Khalili等^[24] 就坚持认为, 单应力变量的有效应力原理是可以描述非饱和土的强度和变形, 并给出了一些新的说明与证据。1996年沈珠江^[25] 提出广义吸力的概念, 即把一切增加颗粒间的抗滑阻力的因素都称为广义吸力, 它包括基质吸力、物理-化学力等; 并把广义吸力引入非饱和土的有效应力中, 建立了非饱和土的统一变形理论。另外, Lu^[26-27] 提出了吸应力的概念, 与沈珠江相类似, 吸应力除了包括表面张力 (基质吸力) 外还包括物理-化学力、黏结力等。但 Lu^[27] 进一步论证了基质吸力不是宏观的应力变量, 作为应力变量还必须乘以一个尺度转换函数因子, 该函数包括所有的微观作用机制, 并给出了它的具体表达式和非饱和土有效应力公式^[28]。但非饱和土单应力变量的有效应力的致命弱点是: 当含水率变化时, 它仅

能描述其应力的变化, 然而却不能同时描述其内部结构及其工程性质的变化。实际上非饱和土含水率变化时, 不但使有效应力发生了变化, 而且其内部结构 (指颗粒、水、气的分布结构以及它们的相互作用) 及其工程性质也随之变化; 而非饱和土的力学行为不仅取决于其应力的变化, 而且还与其内部结构的变化相关。吸力就是描述土体内部结构变化的一个状态变量。因此, 状态变量的选择应该考虑这两方面的变化, 并建立相应的本构模型。

采用净应力和基质吸力作为两个独立应力变量具有以下优点: ①它们相互独立, 并且在三轴试验中是可控的; ②不含材料参数, 因此, 应力空间在整个变形过程中是不变的, 所以试验容易控制, 试验数据也容易得到解释; 如果应力包含材料参数或变形影响, 则在应力作用下材料的响应就难以准确区分是应力的影响还是材料参数或变形的影响造成的, 并使应力路径变得复杂; ③加载路径明确。其缺点为: ①用它们建立本构模型时难以处理饱和与非饱和状态的连续和光滑的变换; ②难以处理强度随吸力的变化, 这是由于吸力的局限性导致的; ③其水力模型与力学模型相互没有关系, 难以处理饱和度的影响以及力与渗流的耦合问题。

陈正汉等^[29] 基于非饱和土典型体元骨架的平衡方程, 深入讨论了非饱和土应力变量的选择问题。Nuth等^[30] 基于试验讨论了使用 Bishop 形式的有效应力和吸力作为两个应力变量的情况, 并认为采用 Bishop 参数等于饱和度是一个简单和适用性好的选择。Alonso等^[31] 对非饱和土应力状态变量的不同选择进行了评述和比较, 认为采用 Bishop 形式的应力 (有效应力) 和吸力作为两个应力变量已经是一个没有争议的选择, 并建议 Bishop 形式的有效应力应考虑非饱和土微观结构的影响, 并且这种影响可以通过采用有效饱和度得到反映。

采用 Bishop 形式的有效应力和吸力作为两个独立应力变量具有以下优点: ①用它们建立本构模型时饱和与非饱和状态是可以连续和光滑的变换; ②可以建立体积应变、抗剪强度和屈服压力之间协调一致的关系; ③很容易考虑水力滞回和饱和度变化的影响; ④从力学的角度, 它便于在有限元中应用。其缺点为: ①它不是一个可控量, 因此, 在试验中它不方便使用和控制; ②加载路径不易明确或直接表示, 而当缺少含水率的数据时其加载路径是不能明确表示的; ③非饱和土的行为被同时蕴藏在本构方程和有效应力的定义中, 导致本构方程的物理含义不是很明确; ④Alonso等^[31] 指出 Bishop 形

式的有效应力受到最强烈的批评是：当吸力和饱和度之积非常大时，将导致非饱和土产生很不实际的压缩。

前面已经说过，非饱和土有效应力的表达式不是惟一的，另外这一问题又非常基本而重要，因此，才导致对这一问题不同的意见和争论，并进行着持续不断地研究，产生了很多不同的研究结果。目前普遍认同：采用 2 个应力变量作为本构变量。但采用何种具体变量，依赖于研究者的认识和方便。另外本构模型的优劣不仅取决于所选择的应力变量，更重要的是取决于它对非饱和土的关键性质的描述能力。需要指出的是：非饱和土的变形和强度并不惟一地取决于非饱和土的两个独立应力变量或 Bishop 形式的有效应力，而饱和度对其结构和刚度等性质的影响也是不容忽略的。

4 吸力概念的界定和轴平移技术的局限性

20 世纪 50 年代研究者们就已经认识到吸力是影响非饱和土行为的重要和关键因素，只有适当地考虑吸力的作用才能够真正理解非饱和土的性质和行为，非饱和土力学是随着对吸力研究的不断深入而得到发展的。由于人们认识到毛细现象或基质吸力对非饱和土性质有重要影响，因此，在建立非饱和土强度、本构方程和渗流方程时都把吸力作为主要的变量之一。并且把农业土壤学中的土-水特征曲线引入，作为描述基质吸力随饱和度变化的工具。但值得注意的是：土-水特征曲线中的基质吸力并不仅仅包括毛细现象所产生的基质吸力，它还包括黏吸部分。而毛细现象产生的基质吸力 s 可以用 $s = p_a - p_w$ 表示（ p_a 为孔隙气压力， p_w 为孔隙水压力），它包括液-气交界面上的表面张力和液相的负孔隙水压力（孔隙水张力）的作用，并可以通过 Laplace 方程描述。Gens^[3]指出，基质吸力可以近似地认为由两部分组成：毛细部分和黏吸部分（adsorption）；哪一部分起主要作用则依赖于含水率和土的类型。就较细颗粒的黏土而言，当饱和度较小时，黏吸部分起控制作用；Baker 等^[4]则认为黏土即使在饱和度较高时，在基质吸力中黏吸部分也占有很大比例。黏吸部分事实上是由水与颗粒之间复杂的相互作用产生的，它包括长程的静电力（双电层理论）、短程的范德华力和其他水合作用，即所谓的物理-化学作用。基质吸力可以通过试验得到的土-水特征曲线而确定。基质吸力的两个部分在概念上的区分是明显的，但由试验确定的基质吸力是很

难明显区分这两个部分的。因此，应该明确了解这两部分基质吸力对非饱和土作用的机制和影响是不同的。另外黏吸部分用毛细基质吸力的形式 $s = p_a - p_w$ 表示是否合适也是值得研究的。就非黏性土或较高饱和度的土而言，毛细部分起控制作用；而对较高塑性指数的黏土或低饱和度的土，黏吸部分起控制作用。由于历史的原因，目前在建立非饱和土本构模型时，土-水特征曲线中基质吸力随饱和度在整个 0~1 范围变化，就好像毛细模型在整个范围内都有效。实际上，在低饱和度时毛细模型已经失效。因此，低饱和度时就不能以毛细模型为基础建立本构模型，而应该考虑水与颗粒之间复杂的相互作用，即所谓的物理-化学作用，由此建立相应的本构模型。另外，黏土（例如膨胀土）即使在高饱和度时，其黏吸部分也占有重要比例，不容忽视，也不能与基质吸力相混淆。因此，以基质吸力（或负孔压力）为基础建立的本构模型其适用性是值得探讨的。所以吸力可以恰当地考虑为^[3]：一个描述液相吸附到固相程度的量，这种吸附是由气-液-固表面的相互作用产生的。因此，当吸力很大时，只表明液相吸附到固相的程度很大，但绝不能认为是传统意义上的孔隙压力很大。

Baker 等^[4]深入地讨论了非饱和土力学中吸力和轴平移技术的局限性。他们指出，当气压 p_a 近似认为 1 个大气压时，基于毛细现象的基质吸力，近似等于负孔隙水压力即孔隙水张力，它精确地等于其吸力减去 1。受气化的影响，孔隙水中的张力不可能大于某一界限值（100~400 kPa 左右，它表示了水由液态向气态变化的临界相变值）。由于受负孔隙水压气化（相变）的影响，在实际场地中超过这一值的基质吸力是不存在的。所以当吸力超过这一界限值（100~400 kPa 左右）时，它代表什么？具有何种含义？此时非饱和土有效应力的适用性如何？另外轴平移技术掩盖了负孔隙水压超过这一界限值的气化的影响，由此建立的非饱和土本构模型适用性又如何？这些问题都是值得思考和深入研究的。实际上，要解决这些问题则必须考虑吸力的黏吸部分的影响，而这一影响肯定是不同于基质吸力的；因此，对此前以基质吸力为基础而建立的理论和模型必须重新审视，并把这种不同吸力的影响考虑进去。黏吸部分的影响如何在建立非饱和土强度、本构模型以及渗流方程中给予恰当地考虑，是非饱和土力学研究中值得重视的一个基本问题。

通常人们概念中的吸力是指基质吸力的毛细部分，下面所述的吸力概念仍然遵照这一习惯。吸力

对非饱和土的性质和行为有两种作用或影响: ①吸力的变化会引起非饱和土的平均骨架应力的变化(通过孔隙内流体的平均压力的变化引起); ②由于毛细水表面的拉力提供了颗粒之间的附加拉力, 这一作用与颗粒之间的黏结作用有些类似。值得注意的是饱和状态(即饱和度)对这两种作用的影响很大。即使吸力相同, 而饱和度不同时, 非饱和土也会因饱和度的不同而使非饱和土的平均骨架应力发生变化, 并且颗粒之间毛细连结的数目和连结强度也会随之发生较大的变化, 从而导致非饱和土的强度、刚度甚至渗透性能产生较大变化。因此, 基质吸力(毛细力)对非饱和土性质的影响并不是由于其单独作用而产生的, 它与饱和度通常是同时存在并共同对土的性质产生影响。因此, 在讨论吸力对非饱和土性质的影响时, 一般不宜仅考虑吸力而不计及饱和度。也就是说, 毛细现象及其作用仅采用一个吸力指标进行描述是不够的, 还必须同时考虑另一个指标即饱和度的影响。

2003年 Gallipoli 等^[32]提出了毛细黏结作用的概念, 并将其表示为 $\xi = f(s)(1 - S_r)$ 。其中, $f(s)$ 表示吸力作用的强度, $(1 - S_r)$ 表示毛细连接的数量或范围。Gallipoli 等^[32]的研究揭示了: 毛细现象仅用吸力描述是不够的, 还应该同时考虑吸力作用的数量和范围; 也就是说毛细现象应该同时用吸力和饱和度来描述。我们认为可以用最简单的 sS_r 近似表示毛细的作用。

值得一提的是: 状态变量不一定具有同样的物理单位, 例如压力、温度、湿度等。但非常巧合的是, 吸力的量纲正好与应力相同; 但这并不能说明它就是应力。Lu^[27]指出, 吸力是一种微观的状态变量, 然而作为宏观典型体元中的应力变量, 它必须乘以一个尺度转换函数因子。实际上, 在孔隙尺度毛细吸力仅存在于液-气交界面上和液相内部。宏观吸应力是一个借助体元平衡而导出的量并由此得到尺度转换函数因子。这一吸应力不仅仅是描述毛细现象的吸力, 它还包括物理-化学等的作用^[27]。Lu 等^[28]给出了尺度转换函数因子就是饱和度或有效饱和度, 这实质上是将 Bishop 系数取为饱和度或有效饱和度。

5 非饱和土的结构

从流体流动的角度, 非饱和土中的孔隙水和孔隙气肯定是不同于河海中的水和大气环境中的气体。受土体内部结构和各相相互作用的影响, 孔隙水和孔隙气的势能低于河海中的水和大气环境中的

气体。即使在同一孔隙中的孔隙水, 其势能也是不同的; 靠近颗粒的黏吸部分的水的势能低于距离颗粒较远的自由水。

土的结构性问题在 Terzaghi 时代就引起了关注, 人们已经普遍认识到土的结构对土的变形、强度和渗流具有重要影响。目前已经更进一步认识到, 非饱和土的结构对土的变形、强度和渗流的影响比饱和土的影响还要大。

对于非饱和土的结构目前还没有统一的认识。Mitchell 等^[33]给出土的结构的说明为, 土的结构是组合了组构(fabric)、矿物成分和颗粒之间作用力的综合效应的结果。土的组构则指土的颗粒、颗粒团和孔隙的排列或分布。但是这里定义的结构没有提到孔隙水和孔隙气体的分布以及各相之间的相互作用和物理-化学作用。非饱和土中孔隙水和孔隙气体的分布(分布本身包括其含量), 也就是孔隙水和孔隙气的结构, 对其工程性质具有非常重要的影响。基质吸力和饱和度就是这种结构的反映。因此, 非饱和土的结构除了 Mitchell 等^[33]给出的定义外, 还应该增加孔隙水和孔隙气的分布以及各相之间的相互作用和物理-化学作用。而组构也可分为4种组构: 颗粒的组构、孔隙的组构、孔隙水的组构和孔隙气的组构; 它们分别指各自的空间分布或排列。它们的各自的体积分数、含水率、饱和度等只是结构的一阶近似表示, 但这种表示还远不能描述组构的影响。

目前, 水在孔隙中的结构性问题还没有引起土力学界的足够重视。尤其就非饱和土而言, 孔隙中水的结构对土的性质具有重要影响^[34]。因此, 讨论非饱和土的结构时, 不应忽略水在土孔隙中的结构(或分布)问题。通常水在非饱和土的孔隙中的结构问题包括两个方面: ①单个孔隙中水的分布; ②水在土体众多孔隙中的分布。当前国内非饱和土力学的研究中, 对单个孔隙中水的分布情况考虑较多, 而对水在土体众多孔隙中的分布情况考虑不够, 因此, 需要引起注意和研究, 例如双孔隙结构^[35]。另外与饱和土不同, 水在非饱和土体众多孔隙中的分布(即水的组构)本质上是各向异性的, 它随着孔隙(或颗粒)的组构和饱和度的改变而变化^[26, 36-37]。

6 结 语

绝大多数岩土工程师通常把主要精力放在考虑和解决具体的工程问题上, 而很少有时间考虑土力学的基本问题。本文则针对非饱和土力学的一些基本和重要的问题展开讨论, 目的是使岩土界的同行

们了解这些基本问题的存在,并认真地对待和研究这些问题,促进和深化对非饱和土行为和性质的研究以及对它们的认识和理解,使非饱和土力学沿着健康的道路发展。

参考文献

- [1] SHENG D C. Review of fundamental principles in modelling unsaturated soil behaviour[J]. **Computers and Geotechnics**, 2011, 38(6): 757—776.
- [2] D'ONZA F, GALLIPOLI D, WHEELER S, et al. Benchmark of constitutive models for unsaturated soils[J]. **Géotechnique**, 2011, 61(4): 283—302.
- [3] GENS A. Soil-environment interactions in geotechnical engineering[J]. **Géotechnique**, 2010, 60(1): 3—74.
- [4] BAKER R, FRYDMAN S. Unsaturated soil mechanics: Critical review of physical foundations[J]. **Engineering Geology**, 2009, 106(1—2): 26—39.
- [5] DELAGE P, GRAHAM J. Mechanical behaviour of unsaturated soils: Understanding the behavior of unsaturated soils requires reliable conceptual models[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils. Paris: A. A. Balkema, 1996: 1223—1256.
- [6] WHEELER S J, KARUBE D. Constitutive modeling[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils. Paris: A. A. Balkema, 1996: 1323—1356.
- [7] 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.
ZHAO Cheng-gang, WEI Chang-fu, CAI Guo-qing. Development and challenge for soil mechanics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(12): 3521—3540.
- [8] 孙德安. 非饱和土的水力和力学特性及其弹塑性描述[J]. **岩土力学**, 2009, 30(11): 3217—3231.
SUN De-an. Hydro-mechanical behaviours of unsaturated soils and their elastoplastic modelling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(11): 3217—3231.
- [9] 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.
BAO Cheng-gang, ZHAN Liang-tong. Relationship between unsaturated soil behavior and engineering problems[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(2): 129—136.
- [10] 陈正汉, 孙树国, 方祥位, 等. 非饱和土与特殊土测试技术新进展[J]. **岩土工程学报**, 2006, 28(2): 147—169.
CHEN Zheng-han, SUN Shu-guo, FANG Xiang-wei, et al. Recent advances of the measuring technology for unsaturated soils and special soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(2): 147—169.
- [11] ZHAO C G, LIU Y, GAO F P. Work and energy equations and the principle of generalized effective stress for unsaturated soils[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2010, 34(9): 920—936.
- [12] BISHOP A W. The principle of effective stress[J]. **Teknisk Ukeblad**, 1959, 106(39): 113—143.
- [13] JENNINGS J E B, BURLAND J B. Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils[J]. **Géotechnique**, 1962, 12(2): 125—144.
- [14] COLEMAN J D. Stress-strain relations for partly saturated soils[J]. **Géotechnique**, 1962, 12(4): 348—350.
- [15] BISHOP A W, BLIGHT G E. Some aspects of the effective stress in saturated and partially saturated soils[J]. **Géotechnique**, 1963, 13(3): 177—197.
- [16] BLIGHT G E. Effective stress evaluation for unsaturated soils[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, 1967, 93(2): 125—148.
- [17] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R. Stress state variables for unsaturated soils[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, 1977, 103(5): 447—466.
- [18] CAI G Q, ZHAO C G, LIU Y, et al. Volume change behaviour of unsaturated soils under non-isothermal conditions[J]. **Chinese Science Bulletin**, 2011, 56(23): 2495—2504.
- [19] 刘艳, 赵成刚, 蔡国庆, 等. 考虑气相硬化影响的非饱和土本构模型[J]. **科学通报**, 2010, 55(26): 2635—2642.
- [20] SHENG D C, SLOAN S W, GENS A. A constitutive model for unsaturated soils: Thermomechanical and algorithmic aspects[J]. **Computational Mechanics**, 2004, 33: 453—465.
- [21] WHEELER S J, SHARMA R S, BUISSON M S R.

- Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils[J]. **Géotechnique**, 2003, 53(1): 41—54.
- [22] HOULSBY G T. The work input to an unsaturated granular material[J]. **Géotechnique**, 1997, 47(1): 193—196.
- [23] HOULSBY G T. Editorial[J]. **Géotechnique**, 2005, 55(5): 415—417.
- [24] KHALILI N, GEISER F, BLIGHT G E. Effective stress in unsaturated soils: Review with new evidence[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2004, 4(2): 115—126.
- [25] 沈珠江. 广义吸力和非饱和土的统一变形理论[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(2): 1—9.
- SHEN Zhu-jiang. Generalized suction and unified deformation theory for unsaturated soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(2): 1—9.
- [26] LU N, LIKOS W J. Suction stress characteristic curve for unsaturated soil[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2006, 132(2): 131—142.
- [27] LU N. Is matric suction stress variable?[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2008, 134(7): 899—905.
- [28] LU N, GODT J W, WU D T. A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil[J]. **Water Resources Research**, 2010, 46(5), W05515, doi:10.1029/2009WR008646.
- [29] 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.
- CHEN Zheng-han, QIN Bing. On stress state variables of unsaturated soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(1): 1—11.
- [30] NUTH M, LALOU L. Effective stress concept in unsaturated soils: Clarification and validation of a unified framework[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2008, 32(7): 771—801.
- [31] ALONSO E E, PEREIRA J-M, VAUNAT J, et al. A microstructurally based effective stress for unsaturated soils[J]. **Géotechnique**, 2010, 60(12): 913—925.
- [32] GALLIPOLI D, GENS A, SHARMA R, et al. An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effect of saturated degree on mechanical behaviour[J]. **Géotechnique**, 2003, 53(1): 123—135.
- [33] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior (3rd Edition)[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [34] ROMERO E, DELLA VECCHIA G, JOMMI C. An insight into the water retention properties of compacted clayey soils[J]. **Géotechnique**, 2011, 61(4): 313—328.
- [35] ALONSO E E, ROMERO E, HOFFMANN C. Hydromechanical behaviour of compacted granular expansive mixtures: Experimental and constitutive study[J]. **Géotechnique**, 2011, 61(4): 329—344.
- [36] LI X S. Effective stress in unsaturated soil: A microstructural analysis[J]. **Géotechnique**, 2003, 53(2): 273—277.
- [37] ZHANG W H, ZHAO C G. Micromechanics analysis for unsaturated granular soils[J]. **Acta Mechanica Sinica**, 2011, 24(3): 273—281.