

土力学理论的发展和面临的挑战

赵成刚¹, 韦昌富², 蔡国庆¹

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院 岩土工程系, 北京 100044;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 随着社会经济的不断发展, 土力学所要分析和处理问题的范围越来越广, 问题本身也越来越深入和复杂。这些问题主要是由于土与环境的相互作用而产生的。为了分析和处理这些问题, 经典土力学需要拓宽和深入发展, 它应该包含一些新的现象和新的变量以及相应的新理论。论述了土力学所面临的三大挑战, 即①没有严格、统一和完备的土力学理论; ②对更具一般意义的非饱和土的行为的研究不够充分, 现有的认识也不完善; ③没有在多种环境作用下土的统一和完备的多场耦合理论。还论及其他一些超出经典土力学范围的问题。

关 键 词: 经典土力学理论的局限性; 非饱和土力学; 土体多场耦合理论

中图分类号: TU 41

文献标识码: A

Development and challenge for soil mechanics

ZHAO Cheng-gang¹, WEI Chang-fu², CAI Guo-qing¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: With the development of society and economy, the range of the engineering problems that soil mechanics has to deal with is increasing; and these problems also become more and more complicated due to the interaction between soils and environments. In order to deal with these problems, the classical soil mechanics is required to be generalized and developed in depth and scope to incorporate the effects of new phenomena and new variables on soil behaviours. Based on a historical review of the development of soil mechanics, it is suggested that the classical soil mechanics faces three challenges: (1) lack of a unified, rational and theoretical framework of soil mechanics; (2) the knowledge and understanding of unsaturated soil behaviours is insufficient; (3) lack of a unified, rational and theoretical framework for multifield coupling problems of soils under multiple environmental actions. Finally, some problems beyond the scope of the classical soil mechanics are discussed.

Key words: limits of classical soil mechanics; unsaturated soil mechanics; multifield coupling theory for soils

1 引 言

土力学理论经过近一个世纪的发展, 已经取得了巨大的进步。学术界和工程界公认 Terzaghi 是经典土力学理论的奠基人。1948 年, Terzaghi 在第 2 届世界土力学与基础工程大会上充满自信地指出, 1936 年土力学已经建立了关于理想土的性质理论^[1], 并给工程师们提供了一系列的理论概念和方法, 它们已经涵盖了土的性质和行为的所有重要方面。但是 Terzaghi 时代 (1925—1963 年) 的经典土力学理论是基于直觉、经验和宏观现象学的认识而

建立的, 它缺少严格的理论基础, 并且这种理论基本是饱和土力学的理论, 它难以描述非饱和土的性质和行为。Roscoe 等^[1-4]建立了临界状态土力学理论, 这一理论提供了一个理论框架, 它把饱和土的一些重要特征和行为, 例如剪切性质、体积变化、强度、膨胀和屈服、临界状态、弹塑性变形等, 通过统一和一致的方式整合在一起, 深化了对土力学的认识和理解。临界状态土力学理论的建立标志着现代土力学理论的发端, 目前现代土力学理论已经在更加广泛的范围内得到了发展。然而, 土力学理论发展到现在仍然面临着三大挑战:

收稿日期: 2010-12-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 资助项目 (No. 2010CB732100); 国家自然科学基金资助项目 (No. 51078019); 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, 主要从事理性土力学、非饱和土力学及多场耦合理论等方面的研究工作。E-mail: cgzhao@bjtu.edu.cn

(1) 没有形成严格、统一和完备的土力学理论。

(2) 对更具一般意义的非饱和土的行为的研究不够充分, 现有的认识也不完善。

(3) 没有形成在多种环境荷载作用下土的多场耦合的统一和完备的理论。

面对上述三大挑战, 每一位土力学的研究者都需要认真地面对和思考。

土本身和周围赋存的环境所涉及的范围及其变化是非常广泛和巨大的, 因此, 导致经典土力学的范围也在不断地拓展和变化, 以满足现代社会发展的需要。另外, 人类社会的发展和进步已经到了需要多种环境的作用和影响的时代, 而经典土力学理论面对这样多种环境荷载作用的问题时, 就更加需要拓展其范围, 以适应社会发展的需求。

土力学发展至今, 其理论基础仍然很不完善, 仍处于半理论、半经验的发展阶段。其具体体现是: 多数理论假定渗流与变形和强度无直接联系, 渗流与变形的理论分别是根据不同的假定而建立的, 土力学各章节之间缺少有机和统一的基础; 经验公式和方法随处可见; 经验、工程判断、艺术和技巧还继续发挥重要的作用^[5-6]。虽然现代土力学的发展, 进一步完善了土力学的理论基础, 但这种发展与变化仍然没有从根本上改变上述状况, 土力学统一和完备的理论基础仍有待于研究和发展。

目前在工程界广泛应用的土力学理论是经典的饱和土力学。然而地球表面的土层绝大部分都处于非饱和状态, 即使是软土地区的土层其地表层也必然处于非饱和状态。一些经常出问题的土, 例如在我国大面积分布的膨胀土、湿陷性黄土等这些特殊土都属于非饱和土。另外, 饱和土本身也是非饱和土的特殊状态。包承纲等^[7]指出: “非饱和土工程问题时有发生, 在世界上有超过 60% 以上的国家都曾经或者正在遭受非饱和特殊土所带来的工程危害”。所以, 非饱和土基本性质和行为的研究具有重要的理论和实践意义。

土体在应力、渗流、温度和化学等场的共同作用下, 土骨架的变形、孔隙水的渗流、溶液组分或污染物的迁移与扩散、化学反应(溶解、沉淀)、相变等多过程或多场的耦合问题, 是目前国内外研究中的一个迫切需要解决而又十分困难的问题。该问题的解决将为有效地解决许多工程问题, 如土木工程的建设、地质灾害防治、环境保护(如污染物的扩散与运移等)、新能源(如煤层气、天然气水合物等)高效开采等, 提供必要的理论基础和前提条件。而传统的土体多场耦合理论大多数都是基于直觉

的、经验的、宏观现象学的认识, 缺少严格和科学的理论基础。由此所建立的理论适用范围有限, 也未能严格和有效地描述多场作用下土体中多场和多过程耦合的现象。因此, 无法满足解决上述实际工程问题的需要。土体在多种环境作用下多场耦合的统一和完备的理论基础有待于进一步研究和发展。

面对上述挑战, 土力学的理论不应该要求现实环境和工程问题去适应土力学的要求与需要, 而是应该拓展土力学的理论和范围以适应现实环境和工程问题的需求。下面将分别讨论与上述三大挑战相关问题的的发展情况和现状。

2 理性土力学理论

土作为碎散颗粒的集合体, 由固体土颗粒组成其土骨架, 骨架之间是孔隙, 孔隙由液体和气体这两种流体填充^[5]。土骨架、孔隙液体和孔隙气体的运动通常是不同的, 但它们之间存在相互作用。虽然人们希望能够得到土中流体的流动以及土骨架中每一点具体、详细运动的描述, 但事实上这是不可能的。因为通常不可能详细地知道每一孔隙的具体几何形状和尺寸, 另外, 这种几何形状和尺寸是随空间的位置和时间而变化的, 也不可能具体地描述它们的变化情况。为克服这些困难, 应当转向更为粗略的平均水平, 即转向宏观水平。宏观的方法是一种连续均匀化方法, 即连续介质方法。由于上述原因, 人们主要试图描述土体的宏观性质, 而这种宏观性质不依赖于孔隙的特殊构形, 并且可以通过宏观的试验而得到并证实。这种做法实质上就是用一种宏观上均匀、连续介质替代微观上不均匀的孔隙介质, 但这种替代应具有宏观的等价性。这种宏观上均匀、连续介质就可以用连续介质力学或连续介质热力学方法进行分析 and 描述。有两种方法可以得到描述这种宏观上均匀、连续、替代物的理论, 一种是从宏观力学和现象学方法的角度而得到的混合物理论; 另一种是把混合物理论和体积平均化理论相结合的所谓复合混合物理论。土力学教科书很少讨论过, 为何把土这样一种疏松和黏结力很弱的矿物颗粒的堆积物, 用连续的力学理论进行描述和分析, 而这样做的理由和适用条件为何?

20 世纪 60—70 年代发展起来的多相孔隙介质理论, 更一般地称为混合物理论, 可以统一地描述多相孔隙介质中复杂的相互作用以及它在外力和多种环境作用下的多场耦合响应, 它可以成为描述多相孔隙材料(当然也包括土)行为的严密、统一和完备的理论基础。我们把致力于使土力学的理论建

立在严密和科学的基础之上，即用严密、统一和完备的科学理论，例如多相孔隙介质理论或热力学理论，来研究和描述土的性质理论称之为理性土力学。实际上土与其他多相孔隙材料的重要区别在于土体的变形和强度，对于其内部的孔隙水压力、吸力和饱和度等内变量较为敏感，这些内部微观结构的影响不可忽略；另外，土是一种天然的易变性材料^[5]，土的力学性质对环境的变化和作用很敏感，因此，应该考虑环境的变化和作用（例如水和温度等）对土的力学性质的影响。文献[8-11]是介绍这一时期多相孔隙介质理论研究的权威文献。

早期的混合物理论一般仅考虑多组分的气体混合物^[8]，Bowen^[9-10]将其拓展到多相孔隙介质，将体积分数作为内变量，建立了质量、动量、能量和熵的宏观守恒方程，再由熵不等式并结合适当的本构假设建立了相应的本构方程。de Boer 研究团队^[11]建立了考虑体积分数变化的混合物理论（后被称为孔隙介质理论）。Hassanizadeh 等^[12-14]建立了一种平均化方法，他们的研究表明，Bowen 的宏观平衡方程和被平均化后的微观方程完全等价。Achanta 等^[15]把这种平均化理论和经典混合物理论相结合的理论称为复合混合物理论（HMT）。Morland^[16]、Goodman 等^[17]、Bowen^[9-10]、Passman 等^[18]、Hutter 等^[19-20]、de Boer^[11]等致力于将混合物理论用于多相孔隙介质的研究；Hassanizadeh 等^[12-14, 21-22]、Achanta 等^[15]、Bennethum 等^[23-24]致力于复合混合物理论的研究。笔者认为，基于体积平均化的复合混合物理论提供了一种对微观情况以及微观与宏观关系的较为合理的解释和说明，并且在适当的假定条件下基于体积平均化的复合混合物理论会推导得到与混合物理论相同的方程，至少会得到相同的平衡方程。

利用复合混合物理论研究土力学问题时通常需要涉及以下 3 个方面的内容^[25-26]：

(1) 选择独立的状态变量。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，利用其他理论进行分析时也应如此处理。如果独立的状态变量选择错了，则以下两方面的工作就很难做好。通常独立的状态变量的选择不是惟一的，而是有多种可能。在文献[5]土的抗剪强度一章的概述中，就饱和土的强度（变形也相同），列出了 11 种影响因素，但经典土力学仅考虑了其中最主要因素的影响，即有效应力的影响，而忽略了所有其他因素的影响。这种选择虽然存在误差，但因其简单，

并可大致地估计土的强度，而被工程界所接受。但就非饱和土的问题或土的多场耦合问题，因问题非常复杂，影响因素更多，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。

(2) 按照 Coleman 等^[27]的方法，建立介观和宏观尺度的各种平衡方程和相应的限制及约束条件。应该指出的是，求解多场耦合问题时所使用的各种平衡方程是普适性的方程，它们不随具体问题的特殊性而改变。所以，耦合现象的特殊性多反映在相应的本构关系中。而这时所建立的限制和约束条件通常就给出了某些变量和相应现象的定义。

(3) 利用热力学第二定律和给出具体的耗散势函数，就可以建立非平衡时的多场耦合问题所需要的本构方程。当然热力学第二定律的具体形式以及耗散势函数的确定并不是惟一的，它依赖于研究者的学识和研究经验。

在多相孔隙介质理论或热力学的理论框架下所建立的本构方程都可以按一定的规则提出，所考虑的多相孔隙介质的物理性质，物理的各种限制，分析、演绎中的具体假定和简化都有清楚的表述。所以这种本构方程具有科学严密性和系统性，对各种因素的考虑也具有 consistency，可以避免得出不协调的结论。当然用孔隙介质力学理论作为土力学的严格、统一和完备的理论基础还有很多工作要做，例如如何用多相孔隙介质理论对现有的土力学成果（在一定的假设和前提条件下）给予解释和说明。另外，如何用这一理论作为指导、研究和探索土力学中的一些新的、更复杂的现象，例如对非饱和土和冻土行为的分析和研究等。实际上已有的研究成果表明，从多相孔隙介质理论出发，在一些假定下就可以推导出 Biot 动力或静力方程^[28]；同样也可以推导出各种渗流和扩散方程^[21-22]。另外，它还可以作为岩土材料多场耦合现象描述的理论基础。当然，就此也存在不同的观点。例如，文献[29]中就认为：混合物理论在土力学研究中不会有多大实用价值，但也指出，它在阐明某些理论问题时有其独到之处，对它的理论价值不容置疑。由此可见，理性土力学的研究也只是土力学研究中的一种观点或一个学派，但它并不排斥其他土力学的研究，应该容许百花齐放、百家争鸣。理性土力学的研究在土力学中的位置正像理性力学的研究在力学学科中的位置一样，应该给予正确的认识。

目前，连续介质力学和热动力学已经融合为一体，在连续介质力学的教科书^[30-31]中都有热动力学

和内变量理论^[30, 32]的内容;多相孔隙介质理论也同样具有热动力学的内容^[11],这是科学进步的表现。通常大多数土力学中的工程问题可以认为是等温过程,因此,有人认为热力学对土力学的研究意义不大。但土的渗流可以用热力学中的质量、能量的交换和平衡来描述;而土的黏-弹塑性变形可以用热力学中的耗散以及熵的改变等概念描述。因此,用热力学的理论对土力学进行研究意义重大并更具一般意义^[33]。近一、二十年来,用多相孔隙介质理论对土的工程性质进行研究已经出现,但多处于建立基本控制方程和一般性理论的探讨阶段。最近几年,开始出现了基于多相孔隙介质理论建立土的具体本构方程。这主要归功于内变量理论的引入,使得利用热动力学理论建立土的具体本构方程成为可能^[33-35]。多相孔隙介质理论为土力学的研究和发展提供了又一新的研究方法和思路。这种研究方法很可能成为今后土力学研究的一个重要方面。

非饱和土是土中最复杂的一种土,因此,基于多相孔隙介质理论对非饱和土进行研究是最具有挑战性的。把非饱和土作为一种三相孔隙介质,运用体积分数和内变量的概念,结合实际情况做出各种假设,使模型尽量简化,利用这种方法建立非饱和土的本构模型将会是一种很有前途的研究方向。文献^[35]给出了一种理性土力学的理论基础,为建立描述土的行为的统一理论迈出了坚实的一步;文中还给出了基于连续孔隙介质土力学的理论建立考虑气相的能量耗散和塑性体积变形的非饱和土弹塑性本构方程的理论框架。

3 非饱和土力学理论

饱和土是土在饱和度等于 1 时的一种特殊状态,自然界中真实存在的土多处于非饱和状态。实际上,当土体的饱和度(或含水率)发生改变时,其强度、渗流特性和体积都会发生改变。例如,膨胀土浸润时会伴随着较大的体积膨胀;与此相反,湿陷性黄土浸润时,则会表现出湿陷。再如,当土壤变干时,其强度会发生改变,通常会随着饱和度的降低而产生不同程度的增高,而其渗透特性会随着饱和度的降低而迅速降低。因此,饱和土力学只能分析和理解土的行为中的一小部分,为拓展和加深对土的行为的全面认识和理解,需要研究和发展的非饱和土的力学理论。

如前所述,岩土工程师面临着大量的非饱和土的工程问题。通常吸力会增加土的强度和刚度,因此,岩土工程师认为利用饱和土力学的理论分析和

处理非饱和土的问题是偏于安全的。但是以下一些常见的工程现象值得关注,例如,降雨后的滑坡现象,非饱和土层中的隧道在开挖时遇水后的塌陷现象,湿陷性黄土雨后的沉降和膨胀性土雨后的膨胀会导致结构物产生开裂现象等等。这些现象是不可能用饱和土力学的理论进行正确和合理的分析与预测的。在这种情况下,研究者应该发展新的土力学理论以适应和满足描述这些非饱和土的行为的需要。

既然非饱和土力学理论如此重要,为何它没有与饱和土力学理论同步发展呢?一个可能的解释是,影响非饱和土性质的因素很多,其关系太复杂,很难像饱和土那样找出非饱和土的响应(或应变)与应力状态之间的简单和惟一的关系,即其状态方程不能仅通过某种应力以及与其对偶的应变进行完备的描述,而需要考虑其他因素和变量的影响。另外,非饱和土特性测试的技术难度要比饱和土大得多,这也是一个阻碍非饱和土力学发展的重要因素之一。

关于非饱和土力学的理论及其发展,将从以下几个方面展开讨论:①吸力;②有效应力的演进;③土-水特征曲线和毛细滞回现象;④毛细-弹塑性变形及其耦合本构模型。

3.1 吸力的概念

在 20 世纪 50 年代,研究者们就已经认识到,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。而利用连续孔隙介质理论和热力学理论处理非饱和土的问题时,则要求增加新的独立状态变量以满足描述非饱和土行为的需要,这种新的独立状态变量之一就是吸力。

从孔隙水移动的角度考虑,吸力能够使土中的孔隙水移动,它的大小能够反映吸引孔隙水移动的能力。总吸力通常分为基质吸力和溶质吸力两部分。基质吸力等于孔隙气压与孔隙水压之差,通常用它描述毛细力,它是在气-液交界面中,由表面张力的作用而产生的。另一方面,当孔隙水为含有某些化学成分的溶液(例如盐水)时,与纯水相比由于含有其他化学成分的溶质,其相对湿度会降低,而吸力会升高,这一部分升高的吸力与溶质种类和浓度有关,称为溶质吸力^[36-37]。两种吸力对非饱和土性质的影响是不同的,哪种吸力影响大主要依赖于土的类型。吸力是土体内部土颗粒的表面与孔隙内的水和气相互作用而产生的,与外荷载作用没有直接联系。溶质吸力与孔隙水中的化学成分含量和浓度有关。溶质吸力发生变化会对土的性质产生影响,

例如土中盐量改变,会使土的体积和强度发生变化^[37]。因此,当土体中的孔隙水有化学浓度变化或有化学溶液运输时,溶质吸力对土的性质会有较大的影响。另外,溶质吸力与土颗粒表面的双电层关系密切,就塑性指数较大的土或有机物含量较多的黏土而言,溶质吸力(与基质吸力相比)可能会具有较大的影响。

就一般土而言,基质吸力对土的性质会产生重要影响。基质吸力主要受水-气交界面(即张力收缩膜)的影响,并且与饱和度的变化密切相关,而溶质吸力与饱和度的变化关系不是很大。工程界所说的吸力,通常是指随饱和度的变化而改变的基质吸力,而不考虑溶质吸力。因此,本文后述的吸力都是指这种随饱和度的变化而改变的基质吸力。

吸力,工程中通常是指与毛细现象对应的毛细力,它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,因此形成了土颗粒之间的一种黏聚力。

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,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,毛细现象和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。

Gens^[38]指出,吸力应该认为是一种近似的表示,它可以综合为两部分:毛细部分和黏吸部分(adsorption);哪一部分起主要作用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。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、水以及其他水合作用。吸力通常是由试验确定的,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吸力对非饱和土作用的机制和影响是不同的。对非黏性土或较高饱和度土,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^[39]。由于历史上的原因,目前在建立非饱和土本构模型时,基质吸力随饱和度在整个由0~1的范围变化,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。所以吸力可以恰当地考虑为: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。

3.2 非饱和土中的有效应力与广义有效应力原理

有效应力原理的提出,使土力学从一般力学中独立出来,并成为一门独立的学科。然而具有三相不同物质组成的非饱和土的性质非常复杂,到目前为止,对它的认识和理论描述还很有限,例如:有效应力原理是否适用于非饱和土?如果适用,它的具体形式为何?这些问题到目前也没能得到很好的解决。因为有效应力的研究是非饱和土的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的研究。另外,Gens^[38]指出,采用不同的应力变量会建立不同形式的非饱和土弹塑性本构模型,由此可见选择应力变量的重要性。这方面的研究主要分3个学派:①采用单应力变量的有效应力;②双应力变量理论;③从功的表达式中确定有效应力。

3.2.1 饱和土的有效应力原理

针对饱和土的有效应力原理,Terzaghi^[1]给出了如下定义:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - u_w \delta_{ij} \quad (1)$$

式中: σ'_{ij} 为饱和土有效应力; σ_{ij} 为总应力; u_w 为孔隙水压力。有效应力原理的实质就是:通过有效应力原理可以建立饱和土的变形和强度与有效应力之间的惟一而有效的关系。换句话说,用有效应力替代连续介质力学中的应力,就可以用与单相连续介质力学理论同样的方式建立适用于两相饱和土的变形和强度的关系。关于饱和土有效应力原理发展的历史,de Boer^[11]给出了详细地评述,这里不再赘述。

3.2.2 单应力变量的有效应力

Bishop^[40]提出了非饱和土中的有效应力(单应力变量的有效应力)如下:

$$\sigma'_{ij} = (\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij}) + \chi s \delta_{ij} \quad (2)$$

式中: σ'_{ij} 为非饱和土有效应力; u_a 为气相压力; s

为基质吸力； χ 为有效应力参数，它从 0（干土）~ 1（饱和）变化。Aitchison 等^[41]、Jennings^[42]、Bishop 等^[43-44]、Blight 等^[45]也给出了类似的非饱和土有效应力的表达式。式（2）的实质就是要像饱和土那样，建立非饱和土的变形和强度仅依赖于式（2）中的有效应力的惟一的关系。针对非饱和土中单应力变量的有效应力原理，Jennings 等^[46]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。但用式（2）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。Burland 等^[47]从微观的观点论述了单应力有效应力的内在矛盾。Aitchison 等^[48]、Matyas 等^[49]、Brackley 等^[50]、Fredlund 等^[51]也对非饱和土单应力变量的有效应力原理提出了质疑。事实上，非饱和土的性质非常复杂，并取决于许多影响因素，包括非饱和土的各种应力，例如总应力、液相压力、气相压力，仅用式（2）给出的有效应力不可能建立惟一和考虑全面的非饱和土的弹塑性本构关系。然而由于单应力变量的有效应力原理简单、易于被接受和掌握，到目前为止仍有人继续研究。例如，Khalili 等^[52]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。但他们给出的应力表达式与一般的基础力学的概念不一致，而有效应力参数 χ 的表达式也与饱和度的关系不明显。总体上看，非饱和土单应力变量的有效应力是借鉴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，其物理机制不明确。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。

3.2.3 双应力变量理论

利用单应力变量的有效应力建立非饱和土的本构模型不能完整和全面的描述非饱和土的性质和行为，对此 Wheeler 等^[53]进行了深入的讨论。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 等^[54]、Bishop 等^[55]、Blight 等^[56]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。Fredlund 等^[51]提出了零

位试验验证了采用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，并居于非饱和土研究的主流地位。

也有人对用双应力变量理论描述非饱和土的性质提出了质疑。Tarantino 等^[57]指出，Fredlund 等^[51]进行的零位试验可以证实总应力、孔隙水压和孔隙气压能够用两个独立的应力变量（净应力和吸力）的组合作为等效表示，但 Bocking 等^[58]却撰文指出，当非饱和土的气相处于封闭状态时，轴平移技术不再有效。也就是说，处于封闭状态的气相压力发生变化时导致的所谓轴平移会影响到非饱和土的性质，并使之发生变化。这时用两个独立的应力变量（净应力和吸力）而忽略气相压力变化的影响可能会有问题。虽然该文通过试验已经初步验证了气相连通时两个独立的应力变量理论的正确性以及相应的轴平移技术的有效性。但他们仍然认为，当非饱和土的气相处于封闭状态时两个独立的应力变量理论的正确性以及轴平移技术的有效性还需要进一步的研究和试验验证^[59]。因此，Tarantino^[59]继续撰文指出，轴平移技术具有一些局限性，它的有效性还没有被令人满意的研究和证实。

另外，高饱和度情况下（气相处于封闭状态）用目前的三轴仪对非饱和土进行研究是有问题的，因为土体从饱和到非饱和变化时采用轴平移技术（如上所述）是不准确的。从上述分析可以看到，非饱和土的两个独立的应力变量理论虽然可以对非饱和土的性质进行分析，但也存在局限性。例如，在气相处于封闭状态时，忽略气相压力变化的影响对非饱和土的性质和试验结果会产生误差。

事实上，目前非饱和土的试验都是基于土样内部孔隙中的气相压力是等于土样表面的外加气相压力。但当非饱和土的气相处于封闭状态时，其孔隙中的封闭气体很难向外溢散。在外力作用下，即使经过长时间的稳定和平衡过程，封闭状态下孔隙中的气体压力肯定是不同于土样表面的外加气相压力。但在这种情况下，仍然假定内外气体压力相同，并在此假定的基础上得到的试验结果，肯定与真实情况有差异。这时处于封闭状态的气相压力将发生变化并且会导致气相体积刚度变化，由此影响到非饱和土的性质，并使之发生变化。也就是说，当非饱和土的气相处于封闭状态时，气相压力变化会使非饱和土压缩性质发生变化，而此时还仍然假定气相压力不变，并且认为不会改变非饱和土的性质，

是不符合实际情况的。因此，这时还仍然采用两个独立应力变量，忽略气相压力变化的影响就会有问题。

与单应力变量的有效应力情况类似，双应力变量的理论基础也同样不清楚。另外，双应力变量理论仍然不能很好地描述非饱和土的复杂现象，例如，Wheeler 等^[60]指出，非饱和土的性质不但受到净应力和基质吸力的影响，而且还受到饱和度等其他因素的影响。这是因为即使净应力（net stress）、基质吸力和孔隙比相同，但两个具有不同饱和度土样的力学行为和土颗粒之间的相互作用力（即所谓的有效应力）却可以不同^[60]。由此说明，仅用两个独立的应力变量还是不能惟一地确定非饱和土的变形和强度。

3.2.4 从功的表达式中确定有效应力

能量守恒定律是一种普适的定律。多相孔隙介质或非饱和土也必然要满足这一定律。因此，用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很自然的。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），它的讨论有助于加深对非饱和土力学性质的全面认识和本构关系的建立，因此，受到有关研究者的注意。Houlsby^[61-62]对饱和与非饱和土变形功的表达形式进行了研究和讨论。Houlsby^[63]则从变形功出发，讨论了饱和土与非饱和土中表达有效应力的原则和具体方式。Jommi^[64]、Vaunat 等^[65]也基于能量原理讨论了非饱和土的有效应力以及与这些应力相对偶的广义应变。赵成刚等^[66-67]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非饱和土的有效应力，基于变形功提出了非饱和土广义有效应力原理。

文献[66]中基于多相孔隙介质理论，在等温和不考虑渗流耗散的情况下，推导得到了以下非饱和土变形功的表达式：

$$W = \{\sigma - [S_r P_w + (1 - S_r) P_a] \delta\} \text{grad} \mathbf{v}_s + sn \frac{dS_r}{dt} - \left[P_a \frac{n^a}{K_a} \frac{dP_a}{dt} \right] \quad (3)$$

式中： W 为变形功； σ 为总应力； P_a 、 P_w 分别为气相压力和液相压力； n^a 为气相的体积分数； S_r 为饱和度； δ 为单位张量； n 为孔隙率； s 为基质吸力； K_a 为气相体积压缩模量； \mathbf{v}_s 为固相骨架的运动速度。这一表达式与 Houlsby^[62]的结果一致，相比

之下，按照多相孔隙介质理论，经推导而得到的式（3），则具有更为严格的理论基础。文献[66]还给出了非饱和土的有效应力的具体表达式为

$$\sigma' = \sigma - [S_r P_w + (1 - S_r) P_a] \delta \quad (4)$$

式（4）为变形功的表达式（3）中与非饱和土固相骨架运动 \mathbf{v}_s 相对偶的广义应力，即非饱和土的有效应力。也有人称之为平均土骨架应力（average soil skeleton stress）^[64]，通常认为它是由土骨架承担并沿着土骨架而传递的应力。

3.2.5 广义有效应力原理

纵观非饱和土力学研究的演进，可以看到它是一个从简单到复杂的发展过程，对非饱和土性质描述的理论也是从简单到复杂。非饱和土有效应力的研究也遵循这样的发展方式。首先，提出了单变量的有效应力，后来由于发现单变量有效应力有很多局限性，又提出更复杂一些的双应力变量理论。最近又提出了综合考虑双应力变量和饱和度来描述非饱和土变形的性质。目前，已经到了可以综合考虑非饱和土中所有三相应力以及与其对偶的广义应变的影响，全面、客观地描述非饱和土变形和强度性质的阶段。而这种描述的理论基础就是多相孔隙介质理论和能量守恒定律。

总结前人的研究成果，可以认为：非饱和土的性质不可能像饱和土那样由单应力变量的有效应力惟一确定，而应进一步考虑其他因素的影响（如饱和度和气体的压力的变化等）。基于上述认识，本文第一作者提出非饱和土广义有效应力原理为：它应当以三相非饱和土的总变形功表达式（3）为基础，考虑式（3）中所有 3 项的影响，即需要综合考虑式（3）中所有广义力以及与其相对偶的广义变形的作用和影响。仅考虑有效应力以及与其相对应的功，忽略其他广义应力和广义变形所产生的功的影响，实际上就是部分忽略了水和气的耦合作用，必然造成误差，而不能完备、全面、准确地反映非饱和土的变形和强度的关系和性质，由此得到的有效应力原理必然具有局限性。

也许有人会提出疑问：非饱和土的双应力变量理论就够复杂的了，现又提出更复杂、包含更多因素的广义有效应力原理，有何意义？我们的回答是：科学研究和解决工程问题的目的是不同的。解决工程问题时要求所使用的理论应简单、实用，并能解决问题；在能解决问题的前提下，采用的理论越简单、越好用越好。但科学研究的要求却与上述解决工程问题的要求不同。它要求理论应反映客观事物

的本来面目和规律。如果客观事物或规律本身就是复杂的,而理论为反映这种复杂性需要包含更多的因素,这也是无可非议的。科学的目的是认识和反映客观规律,而不仅仅是为了应用或解决问题。但目前岩土工程界存在把科学研究的目的庸俗化的风气,他们认为科学研究的惟一目的就是为了应用。因此,对一些具有科学价值,但难以直接应用的研究和成果持否定的态度。这种风气不利于土力学理论的健康发展。

另外,一旦有了可以反映更多因素或更全面的科学理论,当把它用于简单情况的工程问题时,就可以忽略一些次要因素的影响,而在该理论中仅考虑主要因素;同时,由于忽略这些因素所产生的误差,在这一理论中是可以得到认识和反映的。但在考虑因素较少的简化理论中却得不到这种认识和反映,因为它们被简化或忽略掉了。这也是科学发展与进步所带来的好处。

3.3 土-水特征曲线和毛细滞回现象

非饱和土的复杂性在于气相的存在以及水、气两相比例的变化和界面效应及其各相之间的相互作用导致其水力、力学性能的改变。在非饱和土力学中饱和度的变化和界面效应主要通过土-水特征曲线(soil-water characteristic curve,简称SWCC)来描述,SWCC定义了土中吸力(主要指毛细力,它反映了界面效应的影响和作用)与含水率之间的关系,是高度非线性的函数。非饱和土力学模型中的许多重要参数都需要利用SWCC而得到。现有的SWCC的概念以及相关的应用方法大都来源于土壤学,由于土壤学和非饱和土力学中所研究的土的物理状态以及这两个学科所研究问题的侧重点的差异,直接将土壤学中的相关研究成果应用到非饱和土力学中不一定合适。因此,如何将SWCC与土壤学所没有涉及到的相关问题例如变形与强度问题建立联系,决定着非饱和土力学能否正确地应用于岩土工程中的关键^[68]。

一般认为,SWCC主要受到土的矿物成分、孔隙结构、密实程度以及温度和水溶液的影响。矿物成分影响主要反映在随着土中黏粒含量逐渐增多,土的进气值和残余体积含水率都逐渐变大,持水能力逐渐增强,一般来说,砂土的进气值小于10 kPa,粉质黏土的进气值在10~100 kPa,而黏性土的进气值可达几十至几百 kPa。但对于确定的土样并且温度变化不大时,矿物成分和温度影响可以不考虑。孔隙结构(指组构,通常也包括密实程度,但密实程度专门讨论)通常用所谓的双孔结构表示,即原

状黏土或小于最优含水率情况下压实的黏土颗粒在其自身凝聚力的作用下会形成微团体;微团体之间的孔隙被定义为大孔隙,微团体内部的孔隙则被定义为小孔隙,这样由大孔隙和小孔隙组成的孔隙结构被定义为双孔结构。土的孔隙结构对SWCC以及自身的变形、渗透系数都存在影响;例如,孔隙比相近的击实土和泥浆预固结土的土水特征曲线就不一样^[69],前者的进气值明显小于后者,这是由于后者的孔隙大小的分布较均匀。土体变形将改变土的密实程度,表现为孔隙比的改变,进而影响到土-水特征曲线在“饱和度-吸力”空间中的位置和形状。通常随着土的孔隙比的改变,SWCC的位置和形状都有明显的变化。孔隙比的改变会改变土的进气值,从而使SWCC的位置移动;但孔隙分布指数并没有随着孔隙比的改变而单调变化,即孔隙分布指数随着孔隙比的变化没有惟一的关系,它如何变化则依赖于土的类型。另外,孔隙比对SWCC的影响程度还依赖于土的初始孔隙结构:孔隙比对于具有双孔结构的土的SWCC影响较大,而对于具有分散结构的土的SWCC影响则比较小。

孙德安^[69]通过研究指出:SWCC与应力状态无直接关系,即使应力状态不同,只要孔隙比相近,其SWCC就相近。当然这一结论是指某一特定土在变形过程中孔隙结构变化不大的条件下得到的。因此,在孔隙结构变化不太大的土体变形过程中,可以用孔隙比变化表示孔隙结构和密实程度的变化。

为了反映土体变形过程对SWCC的影响以及考虑水力与力学耦合模型的需要,建立考虑孔隙比及其变化影响的SWCC是最近非饱和土研究的一个重要方面。许多学者通过试验研究了土体密实状态对土-水特征曲线的影响,如方祥位等^[70]、龚壁卫等^[71]、张文杰^[72]、王铁行等^[73]、Huang等^[74]根据试验,提出了根据不同孔隙比预测土-水特征曲线的计算方法,Brooks等^[75]提出了SWCC模型中的参数,即进气值以及孔隙分布指数随孔隙比的变化规律。张雪东^[68]通过引入孔隙尺寸分布函数,建立了土中的平均孔隙半径与孔隙率之间的函数关系,并以此为基础得到了一个能够模拟孔隙率对土-水特征曲线的影响规律的经验模型。

大量的试验表明,SWCC具有明显的滞后和滞回效应,即土中的含水率不仅取决于当前的吸力值,也与吸力的变化历史密切相关。例如,同一吸力值在干燥曲线上对应的含水率就高于浸润曲线对应的含水率。许多学者通过试验发现,仅用吸力是无法准确地描述土中的含水率对其水力、力学性能的影响

响,在模拟土中水力、力学特性时还需要考虑滞后和滞回效应的影响^[69,76]。而建立适当的土-水特征曲线滞回模型是这类研究的关键所在。目前,土力学结构性的研究对于孔隙中流体本身的结构性,即水和气在孔隙中的分布重视不够。土的结构性通常是指孔隙和颗粒的分布和颗粒之间的连接和相互作用,但没有重视孔隙内液相和气相的分布以及它们之间的界面效应和相互作用。而这种液相和气相之间的界面效应及其相互作用对非饱和土的性质和行为具有不可忽略影响。而吸力以及 SWCC 的滞回效应就是这种作用和影响的宏观表现。

Fredlund^[77]总结了 SWCC 产生滞回效应的原因,主要包括以下 5 点:

(1) 孔隙尺寸的不均匀分布

在润湿过程中,如果孔隙水渗流过程是缓慢地进行的,那么水将首先进入湿锋附近的小孔隙,并将其充满,再充满大孔隙。之所以出现这种填充顺序是因为在小孔隙中的孔隙水具有最低的化学势(最稳定),而在大孔隙中孔隙水化学势较高。相反,在干燥过程中,位于大孔隙中的孔隙水首先排出来,再轮到小孔隙排水。由于在干燥过程中大孔隙的排水速率要快于小孔隙,因此,有可能会沿着连通大孔隙形成连通的孔隙气流路径,并阻隔了小孔隙的进一步排水,使得孔隙水在孔隙介质中呈块状分布。与此相对应,在润湿(吸湿)过程中,由于小孔隙首先被充满,所以不会形成上述水流通路阻隔现象,使得孔隙水分布相对地比较均匀。可见由于孔隙尺寸的不均匀分布,导致润湿和干燥过程中孔隙水的分布不同;润湿和干燥过程的路径不同将会对土中水-气的分布结构和非饱和土的性质和行为产生重要影响。

(2) 瓶颈效应

不同大小的孔隙,以及相互连通的孔隙喉道之间的尺寸差别造成了这种作用。在浸润(吸湿)过程中,由于孔隙以及与其连通的喉道之间存在着尺寸差异,孔隙水在涌入的过程中自然面临着瓶颈的“约束”而难以突破,这会导致在相同吸力下浸润(吸湿)时的含水率小于干燥(脱湿)时的含水率。

(3) 接触角的影响

在干燥与浸润过程中,水-气交界面上的接触角也有所不同。一般来说,干燥时接触角小,浸润时大;小的接触角对应的表面张力较大,因此,对水的滞留能量较大。接触角的大小差异决定了水的滞留特性的差别,这种现象称之为“雨点效应”。

(4) 当吸力增加或减少时,孔隙中气体的体积

及其变化是不同的,并导致饱和度的变化也不同。

(5) 在干燥和湿化过程中,触变和时间的影响效果是不同的。

目前,习惯用室内试验加模型的方式对 SWCC 的滞回性进行描述。对于考虑滞回效应的任意路径的 SWCC,由于室内试验往往费时、费力,进行完整的循环路径试验资料并不多见。现有的滞回模型主要包括以下几种类型:

(1) 经验模型

这类滞回模型主要是以经验公式为基础而建立起来的,大致分为两类,一类是曲线的拟合公式;另一类是基于干燥/浸润边界之间的关系进行预测的经验模型。其中引用较多的是 Scott 等^[78]提出的比例缩放模型,属于第 1 种类型。之后,也有一些研究者在此基础之上做了一些修正,如 Kawai 等^[79]、Karube 等^[80],他们采用 Brooks-Corey 模型^[75]去拟合边界,然后根据 Scott 模型中相同形状的假设去模拟任意路径的扫描线。实际上扫描线形状与界面形状并不完全相符。因此,该类模型的精确度不高,但由于其形式简单,而得到了一些应用。另一类的经验模型主要以 Feng 等^[81]模型为主。此类模型主要是对浸润/干燥边界的描述,缺乏对任意扫描线描述的功能。但该模型仅需少数的几个点即可以得出整条曲线。另外,在简化的 Feng 等^[81]模型中可以用一条边界曲线就可以拟合另外一条边界线。Feng 等^[81]模型以及后续的简化模型拟合的精度非常高,而且所需标定的数据较少,因此,在边界的模拟中得到了广泛的应用。

(2) 域模型

该类模型是一种将土视为孔隙的集合体,以每个孔隙的吸排水特性作为基本的研究单元,在统计学的基础上,通过引入孔隙水分布函数来计算土中含水率随吸力变化规律的土-水特征曲线滞回模型。域模型本质上是一种利用边界滞回圈通过内插的方法计算扫描线的模型。早期的域模型在计算时除了需要实测两条边界线外,还需要一定数量的扫描线(实测扫描线的数量因模型而异)来标定参数,由于这些模型在计算时所需的实测数据较多,因此,应用起来并不方便。Mualem^[82]假定“孔隙水分布函数可表示为两个独立分布函数的乘积”,利用“相似性假定”简化后的域模型仅需实测两条边界曲线就可预测滞回圈中的扫描线。Mualem^[83-84]随后将他的相似性假定应用到了一系列毛细滞回循环模型中,这既提高了域模型的计算精度,又在一定程度上简化了域模型的计算过程,使得域模型在工程中

得到了一定的应用。域模型的优点是具备良好的理论基础,在一定程度上能够反映土-水特征曲线滞回特性的物理本质;其不足之处在于,这类模型的计算过程,尤其是计算高阶扫描线以及吸力变化历史未知的情况下确定扫描线的过程仍然十分复杂,这限制了它在工程上的应用。

(3) 理性外推模型

Mualem 模型隐含着浸润与干燥扫描线非常规则而又光滑的穿越区域边界,但 Topp^[85]的试验结果表明:干燥边界曲线的斜率往往与扫描线的斜率不同。Parlange^[86-87]在 Mualem 的相似性假设的基础上,提出了理性外推模型(rational-extrapolation model),即假设含水率分布函数 $f(\psi_d, \psi_w)$ 不依赖于 ψ_w , 仅是 ψ_d 的函数, ψ_d 和 ψ_w 是表征一个孔隙吸排水特性的两个吸力值。Hogarth 等^[88], Liu 等^[89]发展了理性外推模型,使其能考虑含气量的大小。但 Parlange 类理性外推模型存在一些难以解决的缺陷:在含水率变化较小时对扫描曲线的描述往往比较准确,但一旦含水率变化范围太大,或者浸润扫描线贴近于浸润边界线时,模型的预测结果往往与实测结果差距较大。

(4) 边界面模型

边界面塑性理论^[90]就是加载面上的塑性反应取决于加载面上的应力点和它在边界面上的映射点(image point)之间的距离。基于这一理论, Li^[91]和 Wei 等^[92]分别建立了模拟土水特征曲线滞回循环的计算模型。他们提出的模型都是以边界浸润和干燥曲线作为计算的边界,以浸润-干燥(或干燥-浸润)的反弯点作为投影中心,建立了扫描线上的斜率与边界曲线斜率之间的关系。与试验结果对比,这两个模型预测结果都比较好,且都能够计算高阶扫描线,每个模型中各有一个参数,标定参数时除了需要测量边界干燥和浸润曲线外,还都需实测一条一阶扫描曲线。因此,同早期的域模型一样,利用这两个模型计算都需要提供较多的试验数据。

北京交通大学在 SWCC 的研究方面也取得了一些成果,参见文献[68, 93-98]。

SWCC 的研究和应用是一个很大的题目,需要专题进行综述。这里仅从土力学的角度,就 SWCC 与非饱和土的性质和建模相关的研究进行了评述。

3.4 毛细-弹塑性变形及其耦合本构模型

前面已经提到,剑桥模型^[2-4]即临界土力学理论的建立标志着现代土力学理论的发端。但剑桥模型是针对饱和土而建立,而如何把饱和土的弹塑性模型拓广到非饱和土中去,却一直困扰着土力学的

研究者们。1990年 Alonso 等^[99]提出了巴塞罗那模型,一般称之为 BBM (Barcelona basic model)。在该模型的影响下,20世纪90年代以后非饱和土弹塑性本构模型的研究已经成为土力学学术界的热点之一。关于非饱和土弹塑性本构模型研究的进展,最近有几篇很好的综述文献^[7, 39, 69, 100-101],这里不再赘述。下面主要讨论 BBM 的优缺点,以便于为今后的研究奠定基础。

①它提供了一个一致的理论框架,从总体上认识和理解非饱和土的不同性质和特点;②有助于确定非饱和土的基本参数以及控制非饱和土行为的参考状态;③为进一步发展描述更加复杂现象的本构模型提供理论基础;④为用于工程实际问题的数值分析方法提供理论模型和本构方程。

该模型可以描述非饱和土的许多力学特性,例如屈服应力随吸力的增大而变大、因湿化而引起湿陷变形等。BBM 模型最重要部分是加载湿陷屈服曲线(loading-collapse yield curve, 简写 LC 屈服线),它描述了非饱和土的屈服应力是如何随吸力而变化的。有了它,就可预测非饱和土的最重要的变形特性之一,即湿陷变形。在含水率发生单调变化时,基于 LC 曲线的本构模型能够很好地描述非饱和土的变形及强度特性。但从已有的研究,人们认识到 LC 屈服线以及基于 LC 曲线的传统非饱和土弹塑性模型有以下不足:

(1) 无法有效地用来描述土体在饱和与非饱和状态转换时的力学特性。在饱和与非饱和状态的转换区域附近,如果土处于干燥过程且基质吸力小于进气值,它可视为饱和土;如果土处于浸湿过程,它表现出来的却是典型的非饱和土特性。也就是说,即使在吸力相同的情况下,土的力学行为也可以完全不同。由于 LC 曲线只通过基质吸力的大小来反映土体在塑性变形中的非饱和效应,而没有考虑饱和度的影响,因此,无法有效地用来描述土体在饱和与非饱和状态转换时的力学特性。

(2) 不能考虑饱和度及其变化的影响。

(3) 没有考虑前期饱和度或含水率变化历史的影响。

(4) 模型中没有考虑土-水特征关系的循环滞回特性,即毛细循环滞回特性。

(5) 没有考虑饱和度循环变化和土的变形及强度变化之间的耦合效应。

BBM 等非饱和土弹塑性模型一般只能预测在含水率单调变化时非饱和土的变形和强度,不能直接预测非饱和土的水分特性或饱和度,也不能考虑

饱和度对非饱和土的应力-应变关系和强度的影响。正像 3.1 节所述, 非饱和土的饱和度是随着吸力及其变化过程和土的变形状态而发生变化的, 也就是说, 饱和度对非饱和土的变形和强度; 或变形对非饱和土的饱和度及其毛细特性都会产生影响。因此, 仅能预测含水率单调变化时非饱和土的弹塑性模型是不完全的, 它不能同时预测非饱和土的土-水特性(或毛细特性)。另外, LC 曲线是许多传统的非饱和土本构模型的核心组成部分, 通常用来反映土体在塑性变形中的非饱和效应。在饱和度发生单调变化时, 基于 LC 曲线的本构模型能够很好地描述非饱和土的变形及强度特性。但该类模型并不适合于饱和度循环变化的情况。另外, 基于 LC 曲线的非饱和土本构模型由于没有引入饱和度作为基本变量, 从而不能描述前期饱和度或含水率循环变化对土体变形及强度特性的影响。众所周知, 受降雨或地下水水位变化的影响, 靠近地表的非饱和土层会经历润湿-干燥循环反复的变化。前面论述表明, 随着非饱和土的润湿-干燥循环变化, 土-水特征关系呈现出明显的循环滞回特性。同时水进入非饱和土体, 还会引起土体孔隙结构的改变。土体孔隙结构的改变, 对土体骨架及土体渗流路径都会产生深刻的影响。因此, 降雨入渗后土体的应力状态及应力-应变特性也会发生较大的改变。然而对于干湿循环作用下的非饱和土的强度特性、微观孔隙结构变化规律、应力-应变规律目前了解还非常有限。这种干-湿循环过程对非饱和土中的渗流、变形及强度性质会产生重要影响^[39]。降雨诱发滑坡的分析表明^[102], 前期降雨是非饱和土边坡稳定性的重要影响因素, 即前期饱和度的变化对非饱和土强度变化的影响是不可忽略的。通常孔隙水在非饱和孔隙介质中的分布形态与润湿-干燥路径有关。CT 测试表明^[103-104]: 在相同的饱和度下, 经历加湿路径的孔隙介质中孔隙水分布要比经历脱湿的介质均匀, 其吸力、刚度和强度也小; 并通过观测压缩波在这两种试样中的传播发现^[105-106], 前者的体积弹性模量(或压缩波速)明显地比后者小, 也就是说, 即使它们饱和度或含水率相同, 但由于饱和度变化路径不同会导致它们的力学性质不同。考虑这一现象对于模拟非饱和土应力-应变关系是极为重要的。由于孔隙水分布形态对非饱和土宏观的力学行为产生重要影响, 而加湿-脱湿路径决定了孔隙水分布形态, 所以非饱和土的力学行为除了与应力历史有关外, 还与加湿-脱湿路径有关。这一点使得非饱和土模拟与饱和土模拟存在明显不同。

关于耦合现象, 首先讨论其专业术语: 液-固耦合或水力-力学耦合。这一术语最近经常出现在非饱和土弹塑性本构模型的文献中。但非饱和土的液-固耦合或水力-力学耦合的字面含义和所要描述现象的实质是存在歧义的, 容易导致误解。通常水力或液相是指与土的渗流相关的现象, 即土中的液体或水的流入和流出孔隙的现象; 饱和土的固结问题就是这种液-固耦合或水力-力学耦合的典型范例。但对于非饱和土而言, 孔隙内液-气两相所占的比例以及它们界面的作用(即毛细作用)对非饱和土的性质和行为起着重要作用。这种作用一般是通过土-水特征曲线进行描述的, 但它与土中的液体或水的流入和流出孔隙的现象是具有本质区别的。而在通常非饱和土力学的研究中, 液-固耦合或水力-力学耦合实质上是指影响非饱和土变形性质的毛细现象与土中弹塑性变形(力学)现象的耦合, 而与渗流无关。因此建议用毛细-弹塑性变形耦合替代液-固耦合或水力-力学耦合, 以避免误解或产生歧义。

近年来的研究发现, 不但饱和度循环变化及其变化的历史会改变非饱和土的变形及强度特性^[68-69, 76], 而且土骨架变形反过来也会影响非饱和土的土-水特征^[68-69]。一般分别用弹塑性模型和土-水特征曲线描述非饱和土的力学性质和毛细特性。非饱和土的这两种性质被分别考虑, 不相关联。因而不能考虑变形会引起毛细特性的变化, 也不能考虑饱和度的变化对非饱和土的力学性质的影响。针对这种状况, 近些年国际上已有学者综合考虑非饱和土的这两种性质并建立了一些耦合模型^[35, 69, 107-108]。

以上模型都没有考虑气相压力变化的影响。陈正汉等^[109]对高含水率土体进行不排水不排气试验表明, 气压的变化与土体的体变密切相关。包承纲^[110]指出了土中气相存在的结构和形态以及受力后气、水在土骨架中的运移规律, 对土的力学性质有很大影响。他根据气相存在形式的不同将非饱和土划分为: 气相完全连通、部分连通、内部连通和完全封闭四种形态。对于气相完全连通状态, 通常可作为“干土”来处理; 对于气相完全封闭的情况, 目前通常都将它简化成内部充满可压缩流体的饱和土处理。但实际上气相完全封闭时, 并不是在所有条件下都能简单地将其简化成流体可压缩的饱和土, 比如, 当封闭气泡尺寸比正常的土颗粒要大得多的情况时, 气体压力变化必将对土体变形有很大的影响, 此时必须在土体中考虑气相的影响, 这种情形经常出现在海洋工程当中。由此可见, 不管是内部连通情形或是封闭气泡尺寸较大的情形, 气体与外界都

不连通。此时气压不再保持为一恒定的值（大气压力值）。这两种情况下，封闭的气体与土骨架仍然保持接触，因此，在土体变形过程中气压的变化必将对土的行为产生影响。通常土体体积变化会引起孔隙中气体体积的变化，土中含水率的改变更直接影响到含气量的变化，干湿循环产生不可恢复的变形不仅表明液相发生了塑性变形，同样表明气体也发生了不可恢复的变形。反过来，气体体积的变化同样对土骨架和液相有影响：当土体所受的外力增大，并大于土中气压时，会使封闭气体发生收缩；在收缩的过程中，封闭气体的气压会逐渐变大，而气压的增大会使整个土体的刚度变大。另外，气压较小时，气体体积的变化是可恢复的，但当气压增加到一定程度，气体将发生不可恢复的体积变形，并会引起土体内部结构（指水和气的结构）发生改变，由此对土体塑性变形产生影响（包括液相塑性变形或固相塑性变形）。所以建立非饱和土的本构模型时，不仅要考虑固相和液相的耦合变形情况，还需要把气体尤其是封闭气体压力变化的影响考虑进来。赵成刚等^[35]利用热力学方法，并结合混合物和内变量理论，提出了一个固-液-气三相耦合的非饱和土本构模型的理论框架。这一理论框架的特点是理论基础完善，并将气相压力变化及其对塑性变形的影响引入到本构模型中。刘艳等^[111]以此框架为基础，通过适当的简化，给出三轴应力状态下具体的非饱和土本构模型。这一模型是第一个考虑气相压力变化影响的具体的非饱和土本构模型，并利用这一模型进行了预测，与已有的试验数据进行了对比分析，结果表明，模型预测结果与试验数据符合较好。文中还与不考虑气相应力变化影响的模型进行了对比分析，并得出结论：低饱和度时气相压力变化的影响很小，可以忽略；但高饱和度即气体封闭时，尤其是气体压力变化较大时，气相压力变化对非饱和土的性质有一定的影响，应适当考虑。

土的临界状态是临界状态土力学的基石。临界状态的重要性在于，它给出了土体在整个变形发展过程中的结束点。这一结束点在建立土的本构模型时是至关重要的。没有它，土体变形的发展将不知道走向哪里以及在何时、何点结束，由此所建立的土的本构模型会产生较大的误差。土的临界状态的概念是 Roscoe^[2-4]针对饱和土建立的。而非饱和土的临界状态，虽然在很多非饱和土本构模型中都得到了应用，但直到现在它的基本定义和需要满足的必要条件都没有明确和清晰地给出。最近，赵成刚^[112]基于热力学的理论，推导给出了非饱和土变形过程

到达最终点即临界状态的必要条件。与基于试验给出的非饱和土临界状态的条件相比，该研究给出的非饱和土临界状态的必要条件更具完备性和一般性，并且是基于严格的热力学的理论推导得到的，而不是根据某一特殊非饱和土样本的试验结果给出的。但该文仅给出非饱和土到达临界状态的必要条件，它的充分条件却没有讨论，有待进一步研究。

4 土的多场耦合理论

岩土工程中所处理的土体都不是单独或孤立存在于自然界的，而是处于一定的自然环境下的。因此，势必受到自然界中应力场、渗流场、温度场、化学场以及电磁场等不同场的耦合作用。在上述各场的耦合作用下，土骨架将发生变形，土中流体将发生流动，热量在土骨架和流体中分别发生热传导和热对流，甚至在某些情况下土体内还会发生化学以及电磁作用。另外，周创兵^[113]还提出了工程作用的概念和多场广义耦合方法。这种多场广义耦合除了要考虑经典场之间的耦合作用之外，还纳入了工程作用这类非经典场的综合作用效应。当然，上述作用和变化不是相互独立的，而是相互作用、相互影响着的。

随着社会的不断发展，环境问题越来越受到重视，例如核废料的处置、污染物的输运、垃圾填埋场的设计和等问题。因此，环境岩土工程也随之诞生。而化学场与其他场的耦合理论则是环境岩土工程的理论基础。近些年来，一些实际岩土工程建设对土体多场耦合理论也提出了新的要求。另外，与热相关的工程问题，例如地下管道工程、地下热能的开发与利用、冻土工程、地下能源储藏结构等工程问题都需要使用温度场与其他场耦合理论进行分析和建模^[114]。随着土力学理论的不断发展和工程的需求，土体多场耦合理论也应得到相应的发展。

一般而言，多场耦合作用下各场相应的能量守恒方程的形式没有本质的变化，所不同的是仅在各能量守恒方程中都相应地增加了其他场的耦合作用项以及各场之间的界面效应项。多场耦合作用的主要不同在于考虑耦合作用的本构方程以及耦合效应对各种极限状态和稳定性的影响。多场耦合作用的理论最早是从两场作用的研究开始的。随着两场耦合理论研究的深入以及实际工程的需要，人们开始从事3种以上场的研究。当然涉及的场越多，问题就越复杂，也越难处理。实际上多相孔隙介质理论可以作为多场耦合问题的理论基础。

为适应实际多场耦合工程问题的需要,一些具体的多场耦合模型得到发展,代表性的有:水力-力学耦合模型^[115-121]、水力-化学耦合模型^[122]、热-水力耦合模型^[123]、水力-化学-力学耦合模型^[124-126]、热-水力-化学-力学耦合模型^[127]、热-水力-力学-传质耦合模型^[128]以及水力-电化学-力学多场耦合运输模型^[129-132]等等。但上述大部分模型都是在宏观、经验性的基础上建立的。模型中通常假设渗流过程服从经典 Darcy 定律,质量扩散过程服从经典 Fick 定律,热传导过程服从经典 Fourier 定律。对于运输过程材料发生弹性变形的情况,通常采用 Terzaghi 固结理论或者 Biot 固结理论与运输过程相耦合。经证实^[133-134],Terzaghi 有效应力原理适用于饱和土体并且孔隙水化学条件不变的情况。在水化学条件发生变化时,式(1)应改写为^[135]

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - u_w \delta_{ij} + (A - R) \delta_{ij} \quad (5)$$

式中: R 和 A 分别为平均的排斥压力和吸引压力,它们与颗粒间的电化学反应有关^[135]。通常认为, R 和 A 是微小量,可以忽略不计。但在处理海底采油引起的地面沉降等问题时,已有的研究表明^[136],电化学反应是不能忽略的,即必须要采用式(5)来表示岩土介质中的有效应力。迄今为止,还没有建立起 R 和 A 的数学表达式,由于这两个量不能利用传感器直接测出来,所以,式(5)还没有在工程实践中得到广泛应用。

建立多场耦合模型也是污染物运输问题研究的关键。为合理地描述多孔介质中多相或多种物理和化学场与环境的复杂相互作用过程,需借助一种理论框架,使这种问题的研究更加科学和系统。混合物理理论(或多相孔隙介质理论)正是为了描述多相孔隙介质中的复杂相互作用而建立的。Hassanizadeh^[22]采用混合物理理论研究了多组分溶质在多孔介质中的运输现象,指出经典形式的 Darcy 定律和 Fick 定律只适用于组分低浓度的情况,若考虑高浓度效应,需要对经典形式进行修正。这为采用混合物理理论研究多组分污染物在多孔介质中的运输问题以及多孔介质的多场耦合问题拉开了帷幕。

早期,对多孔介质中产生的各种现象的研究或多或少都是通过宏观唯象的方法得到的,但要彻底的解决复杂的多孔介质问题则受到限制。20 世纪 60—70 年代发展起来的混合物理理论以连续介质力学和热力学为基础,在引入体积分数这一变量后,可以统一地描述多相孔隙介质中复杂的相互作用以及它在外力和环境作用(包括温度和水等的作用)

下的响应,为多场耦合理论的建立奠定了基础。

笔者针对混合物理理论应用于多场耦合问题以及污染物运输问题进行了研究并取得了一些阶段性成果^[137-141]。但混合物理理论的运用过程中,仍然存在一些有争议的问题,如场方程的闭合问题。多孔介质与其流体构成不可混溶的混合物,为了描述不可混溶性,引入了体积分数这一概念。但也因此而导致了场方程的缺失。目前,主要有 3 种解决此问题的方法:①引入与孔隙变化有关的均衡力^[32];②将体积分数看作内变量引入演化方程^[9-10];③利用拉格朗日乘子法将体积分数约束条件加入熵的不等式中^[142]。目前,对这 3 种方法还存在争议,但多数学者采用第 2 种方法使场方程闭合。这也牵涉到独立变量的选择问题,独立变量的选择问题既具有客观性也具有一定的主观性。

5 结 论

以 Terzaghi 为代表的经典土力学经过近百年的发展,已经取得了巨大的进步,其应用范围也在不断扩大。但如前所述它面临着三大挑战。除了这三大挑战以外,实际上还存在其他一些经典土力学以外的问题需要研究和解决。例如,土动力学的问题、砂土液化问题、环境岩土问题等。前两个问题是 20 世纪 60—80 年代的热点问题,并取得丰硕成果,但近期却进展不大。

土的结构性问题是 Terzaghi 时代就引起了注意,但直到现在仍然没有得到很好地解决,并且是不断吸引广大研究者兴趣的热点问题之一。按照 Mitchell^[135]的说明,土的结构是组合了组构(fabric)、矿物成分和颗粒之间作用力及其与水的相互作用的综合效应的结果。组构和颗粒之间作用力及其与水的相互作用是密不可分的。当组构发生变化时,则颗粒之间及其与水的相互作用力也必然随之变化,而不可能维持不变。笔者认为,土的结构还应该包括水在孔隙中的结构(或分布)问题。但水在孔隙中的结构性问题目前还没有引起土力学界的足够重视。尤其是就非饱和土而言,孔隙中水的结构对土的性质具有重要影响^[143]。因此,讨论非饱和土的结构时,不应忽略水在土的孔隙中的结构(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在土体很多孔隙中水的分布。当前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,而对在土体很多孔隙中水的分布情况考虑不够,因此,需要引起注意和研究。

土本身是各向异性的。但目前工程中使用的强度和本构模型绝大多数是各向同性的模型。如何建立能够反映土体实际情况并简单、实用的各向异性强度和本构模型（尤其是横观各同性模型）是值得注意和研究的问题。

目前，土力学理论不论在深度还是广度方面都得到了长足的发展。可以预见，在新的世纪中这种不断的发展会给土力学理论带来勃勃生机和更加辉煌的未来。

参 考 文 献

- [1] TERZAGHI K. The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear[C]// Proceedings of 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cambridge, MA, USA: Harvard University Press, 1936: 54—56.
- [2] ROSCOE K H, SCHOFIELD A N, WROTH C P. On the yielding of soils[J]. *Géotechnique*, 1958, 8(1): 22—53.
- [3] ROSCOE K H, SCHOFIELD A N, THURAIRAJAH A. Yielding of soils in states wetter than critical[J]. *Géotechnique*, 1963, 13(3): 211—240.
- [4] ROSCOE K H, BURLAND T B. On the generalised stress-strain behaviour of wet clay[C]//Engineering Plasticity. Cambridge: Cambridge University Press, 1968: 535—609.
- [5] 赵成刚, 白冰, 王运霞. 土力学原理(修订本)[M]. 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2009.
- [6] 赵成刚. 土力学的现状及其数值分析方法中某些问题的讨论[J]. *岩土力学*, 2006, 27(8): 1361—1364.
ZHAO Cheng-gang. Discussion on state-of-art of soil mechanics and some problems with applications of numerical method to geotechnical engineering[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(8): 1361—1364.
- [7] 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.
- [8] TRUESDELL C. Rational thermodynamics[M]. New York: Springer-Verlag, 1984.
- [9] BOWEN R M. Incompressible porous media models by use of the theory of mixtures[J]. *International Journal of Engineering Science*, 1980, 18(9): 1129—1148.
- [10] BOWEN R M. Compressible porous media models by use of the theory of mixtures[J]. *International Journal of Engineering Science*, 1982, 20(6): 697—735.
- [11] DE BOER R. Theory of porous media[M]. Berlin: Springer, 2000.
- [12] HASSANIZADEH S M, GRAY W G. General conservation equations for multiphase systems: 1. Averaging procedure[J]. *Advances in Water Resources*, 1979, 2(3): 131—144.
- [13] HASSANIZADEH S M, GRAY W G. General conservation equations for multiphase systems: 2. Mass, momenta, energy, and entropy equations[J]. *Advances in Water Resources*, 1979, 2(4): 191—208.
- [14] HASSANIZADEH S M, GRAY W G. General conservation equations for multiphase systems: 3. Constitutive theory for porous media[J]. *Advances in Water Resources*, 1980, 3(1): 25—40.
- [15] ACHANTA S, CUSHMAN J H. On multicomponent, multiphase thermomechanics with interfaces[J]. *International Journal of Engineering Science*, 1994, 32(11): 1717—1738.
- [16] MORLAND L W. A simple constitutive theory for a fluid-saturated porous solids[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 77(5): 890—900.
- [17] GOODMAN M A, COWIN S C. A continuum theory for granular materials[J]. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 1972, 44(4): 249—266.
- [18] PASSMAN S L, NUNZIATO J W, WALSH E K. A theory of multiphase mixtures[M]//TRUESDELL C. Rational Thermodynamics. New York: Springer-Verlag, 1984: 286—325.
- [19] SVENDSEN B, HUTTER K. On the thermodynamics of a mixture of isotropic materials with constraints[J]. *International Journal of Engineering Science*, 1995, 33(14): 2021—2054.
- [20] HUTTER K, LALOUI L, VULLIET L. Thermodynamically based mixture models of saturated and unsaturated soils[J]. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 1999, 4(4): 295—338.
- [21] HASSANIZADEH S M. Derivation of basic equations of mass transport in porous media, Part 1. Macroscopic

- balance laws[J]. **Advances in Water Resources**, 1986, 9(4): 196–206.
- [22] HASSANIZADEH S M. Derivation of basic equations of mass transport in porous media, Part 2. Generalized Darcy's and Fick's laws[J]. **Advances in Water Resources**, 1986, 9(4): 207–222.
- [23] BENNETHUM L S, CUSHMAN J H. Multiscale, hybrid mixture theory for swelling systems— I: Balance laws[J]. **International Journal of Engineering Science**, 1996, 34(2): 125–145.
- [24] BENNETHUM L S, CUSHMAN J H. Multiscale, hybrid mixture theory for swelling systems— II: Constitutive theory[J]. **International Journal of Engineering Science**, 1996, 34(2): 147–169.
- [25] SCHREFLER B A. Mechanics and thermodynamics of saturated/unsaturated porous materials and quantitative solutions[J]. **Applied Mechanics Reviews**, 2002, 55(4): 351–388.
- [26] BENNETHUM L S, MURAD M A, CUSHMAN J H. Macroscale thermodynamics and the chemical potential for swelling porous media[J]. **Transport in Porous Media**, 2000, 39(2): 187–225.
- [27] COLEMAN B D, NOLL W. The thermodynamics of elastic materials with heat conduction and viscosity[J]. **Archive for Rational Mechanics and Analysis**, 1963, 13: 167–178.
- [28] WEI C F. Static and dynamic behavior of multiphase porous media: Governing equation and finite element implementation[D]. Oklahoma: The University of Oklahoma, 2001.
- [29] 沈珠江. 关于固结理论和有效应力的讨论[J]. **岩土工程学报**, 1995, 17(6): 118–119.
- [30] 黄筑平. 连续介质力学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [31] LUBARDA V A. Elastoplasticity theory[M]. New York: CRC Press, 2002.
- [32] MAUGIN G A. The thermomechanics of nonlinear irreversible behaviors[M]. Singapore: World Scientific Press, 1999.
- [33] 赵成刚, 张雪东, 郭璇. 土的本构方程与热力学[J]. **力学进展**, 2006, 36(4): 611–618.
ZHAO Cheng-gang, ZHANG Xue-dong, GUO Xuan. Constitutive equations of soils and thermodynamics[J]. **Advances in Mechanics**, 2006, 36(4): 611–618.
- [34] LI X S. Thermodynamics-based constitutive framework for unsaturated soils: 1: Theory[J]. **Géotechnique**, 2007, 57(5): 411–422.
- [35] 赵成刚, 刘艳. 连续孔隙介质土力学及其在非饱和土本构关系中的应用[J]. **岩土工程学报**, 2009, 31(9): 1324–1335.
ZHAO Cheng-gang, LIU Yan. Continuum porous medium soil mechanics and its application in constitutive relationship of unsaturated soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(9): 1324–1335.
- [36] 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, 2007.
- [37] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: Wiley Publications, 1993.
- [38] GENS A. Soil-environment interactions in geotechnical engineering[J]. **Géotechnique**, 2010, 60(1): 3–74.
- [39] BAKER R, FRYDMAN S. Unsaturated soil mechanics: Critical review of physical foundations[J]. **Engineering Geology**, 2009, 26: 26–39.
- [40] BISHOP A W. The principle of effective stress[J]. **Teknisk Ukeblad**, 1959, 106 (39): 113–143.
- [41] AITCHISON G D, DONALD I B. Some preliminary studies of unsaturated soils[C]//Proceedings of the 2nd Australian and New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Wellington: Technical Publications for the New Zealand Institution of Engineers, 1956: 192–199.
- [42] JENNINGS J E B. A revised effective stress law for use in the prediction of the behaviour of unsaturated soils[C]//Proceedings of Pore Pressure and Suction in Soils. London: Butterworth, 1961: 26–30.
- [43] BISHOP A W, DONALD I B. The experimental study of partly saturated soils in triaxial apparatus[C]//Proceedings of 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Paris: Dunod, 1961: 13–21.
- [44] BISHOP A W, BLIGHT G E. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils[J]. **Géotechnique**, 1963, 13(3): 177–197.
- [45] BLIGHT G E. A study of effective stress for volume

- change[C]//Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas. Sydney, Australia: Butterworth, 1965: 259—269.
- [46] JENNINGS J E B, BURLAND J B. Limitations to the use of effective stresses in unsaturated soils[J]. **Géotechnique**, 1962, 12(2): 125—144.
- [47] BURLAND J B. Some aspects of the mechanical behaviour of partly saturated soils[C]//Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils beneath Covered Areas. Sydney, Australia: Butterworth, 1965: 270—278.
- [48] AITCHISON G D. Soils properties, shear strength, and consolidation[C]//Proceedings of 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Toronto: University of Toronto Press, 1965: 319—321.
- [49] MATYAS E L, RADHAKRISHNA H S. Volume change characteristics of partially saturated soils[J]. **Géotechnique**, 1968, 18: 432—448.
- [50] BRACKLEY I J A. Partial collapse in unsaturated expansive clay[C]//Proceedings of 5th Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Luanda, Angola: Laboratório de Engenharia de Angola, 1971: 23—30.
- [51] FRELUND D G, MORGENSTERN N R. Stress state variables for unsaturated soils[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1977, 103(5): 447—466.
- [52] 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.
- [53] WHEELER S J, KARUBE D. State of the art report: Constitutive modeling[C]//Proceedings of 1st International Conference on Unsaturated Soils. Paris: A.A. Balkema, 1996: 1323—1356.
- [54] COLEMAN J D. Stress-strain relations for partly saturated soils[J]. **Géotechnique**, 1962, 12(4): 348—350.
- [55] 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.
- [56] BLIGHT G E. Effective stress evaluation for unsaturated soils[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1967, 93(2): 125—148.
- [57] TARANTINO A, MONGIOVI L. Experimental investigations on the stress variable governing unsaturated soil behaviour at medium to high degrees of saturation[C]// Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils: Proceedings of an International Workshop on Unsaturated Soils. Trento: A.A. Balkema, 2000: 3—19.
- [58] BOCKING K A, FREDLUND D G. Limitations of the axis translations technique[C]//Proceedings of 4th International Conference on Expansive Soils. Denver: ASCE, 1980: 117—135.
- [59] TARANTINO A. Direct measurement of soil water tension[C]//Proceedings of 3rd International Conference on Unsaturated Soils. Recife: Taylor & Francis, 2004: 1005—1017.
- [60] 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.
- [61] HOULSBY G T. The work input to a granular material[J]. **Géotechnique**, 1979, 29(3): 354—358.
- [62] HOULSBY G T. The work input to an unsaturated granular material[J]. **Géotechnique**, 1997, 47(1): 193—196.
- [63] HOULSBY G T. Editorial[J]. **Géotechnique**, 2005, 55(5): 415—417.
- [64] JOMMI C. Remarks on the constitutive modeling of unsaturated soils[C]//Proceedings of an International Workshop on Unsaturated Soils. Trento, Italy: A. A. Balkema, 2000: 139—154.
- [65] VAUNAT J, ROMERO E, JOMMI C. An elastoplastic hydromechanical model for unsaturated soils[C]// Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils: Proceedings of an International Workshop on Unsaturated Soils. Rotterdam: A. A. Balkema, 2000: 121—138.
- [66] 赵成刚, 张雪东. 非饱和土中功的表述以及有效应力与相分离原理的讨论[J]. **中国科学(E 辑: 技术科学)**, 2008, 38(9): 1453—1463.
- ZHAO Cheng-gang, ZHANG Xue-dong. Derivation of the work expression and discussion on the effective

- principle and the phase separation theorem in unsaturated soil[J]. **Science in China Series E: Technological Sciences**, 2008, 38(9): 1453—1463.
- [67] ZHAO C G, LIU Y. 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(6): 920—936.
- [68] 张雪东. 土水特征曲线及其在非饱和土力学中应用的基本问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [69] 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.
- [70] 方祥位, 陈正汉, 申春妮, 等. 剪切对非饱和土土水特征曲线影响的探讨[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1451—1454.
- FANG Xiang-wei, CHEN Zheng-han, SHEN Chun-ni, et al. A study of effect of shear on soil-water characteristic curve on an unsaturated soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(9): 1451—1454.
- [71] 龚壁卫, 吴宏伟, 王斌. 应力状态对膨胀土 SWCC 的影响研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1915—1918.
- GONG Bi-wei, CHARLES W W Ng, WANG Bin. Influence of stress states on soil-water characteristics of expansive soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(12): 1915—1918.
- [72] 张文杰. 城市生活垃圾填埋场中水分运移规律研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [73] 王铁行, 卢靖, 岳彩坤. 考虑温度和密度影响的非饱和黄土土-水特征曲线研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 1—5.
- WANG Tie-hang, LU Jing, YUE Cai-kun. Soil-water characteristic curve for unsaturated loess considering temperature and density effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 1—5.
- [74] HUANG S Y, BARBOUR S L, FREDLUND D G. Development and verification of a coefficient of permeability function for a deformable unsaturated soil[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1998, 35(3): 411—425.
- [75] BROOKS R H, COREY A T. Hydraulic properties of porous media[M]. Colorado: Colorado State University, Fort Collins, 1964.
- [76] 韦昌富, 李幻, 王吉利. 考虑弹塑性变形和毛细循环滞回的非饱和土本构模型[C]//第一届全国岩土本构理论研讨会论文集. 北京: 北京航空航天大学, 2008: 259—266.
- [77] FREDLUND D G. The 1999 R. M. Hardy Lecture: The implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2000, 37(5): 963—986.
- [78] SCOTT P S, FARQUHAR G J, KOUWEN N. Hysteretic effects on net infiltration[C]//Advances in Infiltration. Chicago, USA: American Society of Agricultural Engineers Publication, 1983: 11—83, 163—170.
- [79] KAWAI K, KARUBE D, KATO S. The model of water retention curve considering effects of void ratio[C]//Proceedings of Asian Conference on Unsaturated Soils, Singapore. Rotterdam: A. A. Balkema, 2000: 329—334.
- [80] KARUBE D, KAWAI K. The role of pore water in the mechanical behaviour of unsaturated soils[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2001, 19(3—4): 211—241.
- [81] FENG M, FREDLUND D G. Hysteretic influence associated with thermal conductivity sensor measurements[C]//Proceedings from Theory to the Practice of Unsaturated Soil Mechanics in Association with the 52nd Canadian Geotechnical Conference and the Unsaturated Soil Group. Regina, Saskatchewan, Canada: Canadian Geotechnical Society, 1999, 14(2): 14—20.
- [82] MUALEM Y. Modified approach to capillary hysteresis based on a similarity hypothesis[J]. **Water Resources Research**, 1973, 9(5): 1324—1331.
- [83] MUALEM Y. A concept model of hysteresis[J]. **Water Resources Research**, 1974, 10(3): 514—520.
- [84] MUALEM Y. Extension of the similarity hypothesis used for modeling the soil water characteristics[J]. **Water Resources Research**, 1977, 13(4): 773—780.
- [85] TOPP G C. Soil-water hysteresis: The domain theory extended to pore interaction conditions[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1971, 35: 219—225.
- [86] PARLANGE J Y. Capillary hysteresis and the relationship between drying and wetting curves[J]. **Water Resources**

- Research, 1976, 12(2): 224–228.
- [87] PARLANGE J Y. Water transport in soils[J]. **Annual Revision of Fluid Mechanics**, 1980, 12: 77–102.
- [88] HOGARTH W L, HOPMANS J, PARLANGE J Y, et al. Application of a simple soil-water hysteresis model[J]. **Journal of Hydrology**, 1988, 98(1/2): 21–29.
- [89] LIU Y, PARLANGE J Y, STEENHUIS T S, et al. A soil water hysteresis model for fingered flow data[J]. **Water Resources Research**, 1995, 31(9): 2263–2266.
- [90] DAFALIAS Y F, HERRMANN L R. Bounding surface plasticity II: Application to isotropic cohesive soils[J]. **Journal of the Engineering Mechanics Division**, 1986, 112: 1263–1291.
- [91] LI X S. Modeling of hysteresis response for arbitrary wetting/drying paths[J]. **Computers and Geotechnics**, 2004, 32(2): 133–137.
- [92] WEI C F, DEWOOLKAR M M. Formulation of capillary hysteresis with internal state variables[J]. **Water Resources Research**, 2006, 42(7): 1–16.
- [93] 张雪东, 赵成刚, 蔡国庆, 等. 土体密实状态对土-水特征曲线影响规律研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1463–1468.
- ZHANG Xue-dong, ZHAO Cheng-gang, CAI Guo-qing, et al. Research on influence of soil density on soil-water characteristic curve[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(5): 1463–1468.
- [94] 张雪东, 赵成刚, 刘艳. 变形对非饱和土渗透系数影响规律模拟研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1): 132–139.
- ZHANG Xue-dong, ZHAO Cheng-gang, LIU Yan. Probability based model for influence of deformation on hydraulic conductivity function of unsaturated soils[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2010, 18(1): 132–139.
- [95] 蔡国庆, 赵成刚, 刘艳. 非饱和土土-水特征曲线的温度效应[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1055–1060.
- CAI Guo-qing, ZHAO Cheng-gang, LIU Yan. Temperature effects on soil-water characteristic curve of unsaturated soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(4): 1055–1060.
- [96] 蔡国庆, 赵成刚, 刘艳. 一种预测不同温度下非饱和土相对渗透系数的间接方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1405–1410.
- CAI Guo-qing, ZHAO Cheng-gang, LIU Yan. An indirect method for predicting permeability coefficients of unsaturated soils at different temperatures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(5): 1405–1410.
- [97] 刘艳, 赵成刚. 土水特征曲线滞后模型的研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 399–405.
- LIU Yan, ZHAO Cheng-gang. Hysteresis model for soil-water characteristic curves[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(3): 399–405.
- [98] 张雪东, 赵成刚, 刘艳, 等. 变形对土水特征曲线影响规律模拟研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(7): 119–126.
- ZHANG Xue-dong, ZHAO Cheng-gang, LIU Yan, et al. Modeling study of the relationship between deformation and water retention curve[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2011, 44(7): 119–126.
- [99] ALONSO E E, GENS A, JOSA A. The constitutive model for partially saturated soils[J]. **Géotechnique**, 1990, 40(3): 405–430.
- [100] SHENG D C. Review of fundamental principles in modelling unsaturated soil behaviour[J]. **Computers and Geotechnics**, 2011, 38(6): 757–776.
- [101] 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.
- [102] 崔鹏, 杨坤, 陈杰. 前期降雨对泥石流形成的贡献: 以蒋家沟泥石流流形成为例[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(1): 11–15.
- CUI Peng, YANG Kun, CHEN Jie. Relationship between occurrence of debris flow and antecedent precipitation: Taking the Jiangjia gully as an example[J]. **Science of Soil and Water Conservation**, 2003, 1(1): 11–15.
- [103] CADORET T, MARION D, ZINSZNER B. Influence of frequency and fluid distribution on elastic wave velocities in partially saturated limestones[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1995, 100(B6): 9789–9803.
- [104] CADORET T, ZINSZNER B, MAVKO G. Fluid distribution effect on sonic attenuation in partially saturated limestones[J]. **Geophysics**, 1998, 63(1): 154–

- 160.
- [105] KNIGHT R, NOLEN-HOEKSEMA R. A laboratory study of the dependence of elastic wave velocities on pore scale fluid distribution[J]. **Geophysical Research Letters**, 1990, 17(10): 1529—1532.
- [106] LE RAVALEC M, GUÉGUEN Y, CHELIDZE T. Elastic wave velocities in partially saturated rocks: Saturation hysteresis[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1996, 101(B1): 837—844.
- [107] 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.
- [108] SUN D A, SHENG D C, CUI H B, et al. A density dependent elastoplastic hydro-mechanical model for unsaturated compacted soil[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2007, 31(11): 1257—1279.
- [109] 陈正汉, 谢定义, 王永胜. 非饱和土的水气运动规律及其工程性质研究[J]. **岩土工程学报**, 1993, 15(3): 9—20.
CHEN Zheng-han, XIE Ding-yi, WANG Yong-sheng. Experimental studies of laws of fluid motion, suction and pore pressure in unsaturated soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1993, 15(3): 9—20.
- [110] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. **岩土工程学报**, 2004, 26(1): 1—15.
BAO Cheng-gang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(1): 1—15.
- [111] 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.
LIU Yan, ZHAO Cheng-gang, CAI Guo-qing, et al. Constitutive modeling for unsaturated soils considering gas hardening effect[J]. **Chinese Science Bulletin**, 2010, 55(26): 2635—2642.
- [112] 赵成刚. 热动力学的稳态与非饱和土的临界状态[J]. **岩土工程学报**, 2012, 34(4), 待刊.
ZHAO Cheng-gang. Thermodynamic steady state and critical for unsaturated soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(4), to be published.
- [113] 周创兵, 陈益峰, 姜清辉, 等. 复杂岩体多场广义耦合分析导论[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [114] 蔡国庆, 赵成刚. 非饱和土渗流和变形强度特性的温度效应[J]. **力学进展**, 2010, 40(2): 147—156.
CAI Guo-qing, ZHAO Cheng-gang. Temperature effects on seepage and strength-deformation characteristics of unsaturated soils[J]. **Advances in Mechanics**, 2010, 40(2): 147—156.
- [115] SMITH D W. One-dimensional contaminant transport through a deforming porous medium: Theory and a solution for a quasi-steady-state problem[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2000, 24(8): 693—722.
- [116] PETERS G P, SMITH D W. Solute transport through a deforming porous medium[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2002, 26(7): 683—717.
- [117] ALSHAWABKEH A N, RAHBAR N, SHEAHAN T C, et al. Volume change effects on solute transport in clay under consolidation[C]//Proceedings of Geo-Jordan Conference: Advances in Geotechnical Engineering with Emphasis on Dams, Highway Materials, and Soil Improvement (GPP 1). Irbid: ASCE, 2004: 105—115.
- [118] ALSHAWABKEH A N. A model for contaminant mass flux in capped sediment under consolidation[J]. **Journal of Contaminant Hydrology**, 2005, 78(3): 147—165.
- [119] ALSHAWABKEH A N, RAHBAR N. Parametric study of one-dimensional solute transport in deformable porous media[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2006, 132(8): 1001—1010.
- [120] FOX P J. Numerical model for contaminant transport in consolidating sediments[C]//Contaminated Sediments: Characterization, Evaluation, Mitigation/Restoration, and Management Strategy Performance. West Conshohocken, Pennsylvania, USA: ASTM Special Technical Publication, 2003: 266—281.
- [121] 张志红. 疏浚底泥污染物在黏土防渗层中的运移规律研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [122] MANASSERO M, DOMINIANNI A. Modelling the osmosis effect on solute migration through porous media[J]. **Géotechnique**, 2003, 53(5): 481—492.
- [123] SOLER J M. The effect of coupled transport phenomena in the Opalinus Clay and implications for radionuclide transport[J]. **Journal of Contaminant Hydrology**, 2001,

- 53(1-2):63-84.
- [124] GAJO A, LORET B. Finite element simulations of chemo-mechanical coupling in elastic-plastic homoionic expansive clays[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2003, 192: 3489-3530.
- [125] KACZMAREK M, HUECKEL T. Chemo-mechanical consolidation of clays: Analytical solutions for a linearized one-dimensional problem[J]. **Transport in Porous Media**, 1998, 32(1): 49-74.
- [126] PETERS G P, SMITH D W. The influence of advective transport on coupled chemical and mechanical consolidation of clays[J]. **Mechanics of Materials**, 2004, 36(5-6): 467-486.
- [127] HUECKEL T, PELLEGRINI R. Reactive plasticity for clays: Application to a natural analog of long-term geomechanical effects of nuclear waste disposal[J]. **Engineering Geology**, 2002, 64(2-3): 195-215.
- [128] 武文华, 李锡变. 热-水力-力学-传质耦合过程模型及工程土障数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 188-192.
- WU Wen-hua, LI Xi-kui. Coupled thermo-hydro-mechanical model including mass transfer and numerical simulation for engineering clay barrier[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(2): 188-192.
- [129] MOYNE C, MURAD M A. Electro-chemo-mechanical couplings in swelling clays derived from a micro/macro-homogenization procedure[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2002, 39: 6159-6190.
- [130] MURAD M A, MOYNE C. A three-scale computational model of reactive pollutant transport in smectitic clays[J]. **International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering**, 2006, 22(8): 875-891.
- [131] MOYNE C, MURAD M A. A two-scale model for coupled electro-chemo-mechanical phenomena and Onsager's reciprocity relations in expansive clays: I homogenization analysis[J]. **Transport in Porous Media**, 2006, 62(3): 333-380.
- [132] MOYNE C, MURAD M A. A two-scale model for coupled electro-chemo-mechanical phenomena and Onsager's reciprocity relations in expansive clays: II computational validation[J]. **Transport in Porous Media**, 2006, 63(1): 13-56.
- [133] SRIDHARAN A, RAO G V. Mechanisms controlling the volume change behavior of saturated clays and the role of effective stress concept[J]. **Géotechnique**, 1973, 23(3): 359-382.
- [134] SRIDHARAN A, RAO G V. Shear strength behavior of saturated clays and the role of effective stress concept[J]. **Géotechnique**, 1979, 29(2): 177-193.
- [135] MITCHELL J K, KENICHI S. Fundamentals of soil behavior(3rd Edition)[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [136] RISNES R, FLAAGENG O. Mechanical properties of chalk with emphasis on chalk-fluid interactions and micromechanical aspects[J]. **Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP**, 1999, 54(6): 751-758.
- [137] 黄璐. 基于混合物理论的污染物输运模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [138] 黄璐, 赵成刚, 张雪东, 等. 输运性质受固结过程影响的污染物输运模型[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 420-427.
- HUANG Lu, ZHAO Cheng-gang, ZHANG Xue-dong, et al. Contaminant migration model with consolidation dependent transport coefficient[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(3): 420-427.
- [139] HUANG Lu, ZHAO Cheng-gang, LIU Yan, et al. 3-D contaminant migration model with consolidation dependent transport coefficients[J]. **Acta Mechanica Sinica**, accepted.
- [140] CAI Guo-qing, ZHAO Cheng-gang, LIU Yan, et al. A nonlinear multifield coupled model for soils[J]. **Science China E: Technological Sciences**, 2011, 54(5): 1300-1314.
- [141] CAI Guo-qing, ZHAO Cheng-gang, LIU Yan, et al. Volume change behaviour of unsaturated soils under non-isothermal conditions[J]. **Chinese Science Bulletin**, 2011, 56(23): 2495-2504.
- [142] LIU I-shih. Method of Lagrange multipliers for exploitation of the entropy principle[J]. **Archive for Rational Mechanics Analysis**, 1972, 46(2): 131-148.
- [143] ROMERO E, VECCHIA G D, JOMMI C. An insight into the water retention properties of compacted clayey soils[J]. **Géotechnique**, 2011, 61(4): 313-328.