

非饱和土本构模型及其扩展模型综述

陈鹏举

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年2月19日; 录用日期: 2026年3月12日; 发布日期: 2026年3月26日

摘要

本文对非饱和土本构模型进行了综述, 包括非饱和土本构模型(BBM模型)及其扩展、水-力耦合模型和考虑温度影响的模型。尽管引言介绍了代表性的本构关系模型, 但本文将重点放在了这些模型在理论研究和模拟方面的讨论上。在综述中, 对于非饱和土本构模型的发展历史和理论基础进行了深入探讨, 包括其在描述非饱和土力学特性和行为方面的重要性。各种类型的本构模型被详细介绍, 以帮助读者更好地理解非饱和土体的复杂性和模拟方法。此外, 本文还讨论了非饱和土本构模型在不同环境条件下的适用性和局限性, 以及模型在实际工程问题中的应用前景。通过对相关研究文献和实验数据的综合分析, 展示了非饱和土本构模型在土力学研究领域中的重要性和发展趋势。

关键词

本构模型, BBM模型, 非饱和土, 水-力耦合, 温度影响

Review of Unsaturated Soil Constitutive Models and Their Extension Models

Pengju Chen

School of Earth Sciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: February 19, 2026; accepted: March 12, 2026; published: March 26, 2026

Abstract

This paper provides a review of the constitutive models for unsaturated soil, including the Unsaturated Soil Constitutive Model (BBM model) and its extensions, the water-soil coupling model, and models considering temperature effects. While the introduction briefly outlines representative constitutive relationship models, the focus of this paper lies in the theoretical research and simulation aspects of these models. The development history and theoretical foundations of unsaturated soil constitutive models are extensively discussed in the review, emphasizing their significance in

describing the mechanical properties and behaviors of unsaturated soils. Various types of constitutive models are elaborated upon to aid readers in better understanding the complexity of unsaturated soil and simulation methodologies. Furthermore, this paper delves into the applicability and limitations of unsaturated soil constitutive models under different environmental conditions, as well as the prospects of their application in practical engineering problems. Through a comprehensive analysis of relevant research literature and experimental data, the paper showcases the importance and developmental trends of unsaturated soil constitutive models in the field of soil mechanics. By summarizing and discussing these aspects, this paper aims to provide readers with a comprehensive review of unsaturated soil constitutive models, offering insights and inspiration for research and academic discussions in related fields.

Keywords

Constitutive Model, BBM Model, Unsaturated Soil, Hydro-Mechanical Coupling, Temperature Effect

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

本构模型是描述材料固有力学性质的数学物理方程，土的本构模型是土力学和土木工程领域中的重要研究内容，是表征土体强度与变形行为的最直接方式。本构模型的基本原理包括弹性理论、塑性理论、细观力学和统计力学等，这些原理为建立不同类型土体的本构模型提供了理论基础。与常规宏观连续介质不同，土是由固体、液体和气体组成的多相多孔介质，不仅具有压硬性、剪胀性、蠕变性和摩擦性，还具有环境和应力条件下的实时性和动态性。因此，从宏观连续材料角度出发所建立的弹性、塑性和弹塑性本构模型存在描述土体应力变形上的天然不足。20世纪50年代以来，对土本构关系的研究随着大型、高层和超高建筑设施的建设以及土工试验装备的不断发展逐渐兴起。出现了以 Duncan-Chang 模型、剑桥模型为代表的土体本构模型，该类本构模型一般具有形式较为简单、参数不多且物理意义明确、参数获取便捷、能够反映土的主要变形特性等特点。

土是一种复杂的多相材料，其力学性质受到多种因素的影响，包括颗粒间的相互作用、孔隙水的存在以及土体结构的变化等。土的本构模型旨在描述土体的应力 - 应变关系，并通过合适的数学和物理模型来模拟土体的力学行为。以土的应力应变试验为基础，基于适当的假设和抽象建立数学物理方程，来描述土的复杂应力应变性质。基于上述思路，已经建立数以百计的本构模型，部分代表性的本构关系模型如表 1 所示。这些模型可简要分成非线性弹性模型、弹塑性模型两大类。前者属于经验模型，一般函数拟合试验得到的应力应变曲线，根据试验曲线确定模型参数。后者一般采用增量法，指弹性应变增量与塑性应变增量的和，而弹性应变增量与应力增量之间符合广义 Hooke 定律，塑性应变增量可按照塑性增量理论计算，不同的塑性理论，其破坏准则(屈服面函数)，塑性势函数和硬化准则不同。

Table 1. Representative constitutive models of soil [1]

表 1. 代表性的土的本构关系模型[1]

模型名称	模型建立依据	模型评价
Duncan-Chang 模型	基于广义胡克定律的非线性弹性模型，常规三轴试验确定模型参数。	参数少、物理意义明确、实用性强，但不能描述土的剪胀性及应力历史的影响。

续表

Cam-clay 模型	基于正常固结土和超固结土的三轴实验, 提出土体临界状态的概念, 并引入加工硬化原理和能量方程。	基本概念及物理意义明确, 模型参数较少, 不能描述土的剪胀性及应力历史的影响。
UH 模型	基于剑桥模型和下加载面概念提出, 适用于超固结土和正常固结土。	参数与剑桥模型一致, 弥补了剑桥模型不能反映土体剪胀、软化等特性的缺点。
Asaoka 模型	考虑了超固结土体结构性的耦合影响。	能反映土体的应力历史依存性和结构性等特性。
Li-Dafalias 模型	基于状态相关剪胀理论建立的描述砂土剪胀性的本构模型。	可以反映土的压硬性、剪缩和剪胀性, 体现摩擦性和临界状态, 能够描述应力路径以及应力历史的影响。
清华模型	基于砂土试验确定塑性应变增量方向, 根据正交法则确定其屈服面, 再由试验结果确定硬化参数。	模型能够反映土的压硬性、剪胀性和摩擦性, 以及湿化变形、非饱和土应力应变关系、应变软化和表现减载和循环荷载下变形特
沈珠江模型	以 Duncan-Chang 模型为基础建立了 9 参数的南水模型。	其中 6 个参数与 Duncan-Chang 模型共用, 模型能够反映压硬性、剪胀性、摩擦性、应力历史依存性等特性。

通过对土的本构模型的最新进展进行综述, 我们可以更好地了解土体的力学行为和变形机制, 为工程实践提供可靠的理论依据。本综述将介绍非饱和土的本构模型, 以及近年来的进展。并探讨土的本构模型在土工工程和地质学等领域的应用。最后, 我们将指出当前面临的挑战, 并展望土的本构模型研究的未来发展方向。

2. 非饱和土本构模型

绝大多数地表土壤都处于非饱和状态, 这一现象在干旱与半干旱区域尤为明显。传统的饱和土力学理论及实验方法难以准确描述与解决非饱和土相关的工程问题。当前, 将饱和土理论推广至非饱和状态时, 关键需应对因含水率或吸力改变所引发的土体在体积、强度及水力特性方面的变化。为此, 普遍采用基于双应力变量的建模方法, 即以净应力 σ_{-u_a} 与基质吸力 s 作为两个独立的状态变量进行分析。而 Alonso (1990) 也是在此基础上提出了最早的非饱和土本构模型(BBM 模型), 即巴萨罗纳基本模型(Barcelona Basic Model, BBM) [2]。BBM 模型作为非饱和土本构模型的开端, 利用双独立应力作为应力变量, 分别为净应力 p_{net} 和吸力 s , 第一次考虑了吸力对土体体积应变的影响。在 (p_{net}, s) 坐标系内分别定义了加载-湿陷>Loading Collapse, LC)屈服线和吸力增加(Suction Increase, SI)屈服线。只要土体达到两条屈服线中的任何一条, 都会引起土体塑性体积应变的产生。其中, 净应力为平均应力 p 与孔隙气压力 u_w 的差值, 吸力为孔隙气压力 u_a 与孔隙水压力 u_w 的差值。

1) 应力变量

BBM 非饱和土本构模型采取平均净应力 p_{net} 剪应力 q 和吸力 s 为应力变量, 其表达式为:

$$p_{net} = p - u_a = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} - u_a$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$s = u_a - u_w$$

式中, p 为平均应力, u_a 为孔隙气压力, u_w 为孔隙水压力, σ_1 和 σ_3 分别对应于三轴应力情况下的轴向应

力和围压，且 $\sigma_2 = \sigma_3$ 。

2) 屈服面准则

BBM 模型有两条屈服线，分别为加载湿陷屈服线(LC)和吸力增加屈服线(SI)，表达式如下。

$$f_{LC} = q^2 - M^2 (p_{net} + p_s)(p_c(s) - p_{net})$$

$$f_{SI}(s, s_0) = s - s_0$$

式中， p_s 为吸力引起的黏聚力的增加； $p_c(0)$ 为饱和土体的先期固结压力； $p_c(s)$ 为一定吸力下的土体的先期固结压力； M 为临界状态线的斜率； s_0 为吸力增加屈服面的硬化参数。

两条屈服线相交构成一个弹性区域，其在 (p_{net}, q, s) 空间内的屈服线如图 1 所示。

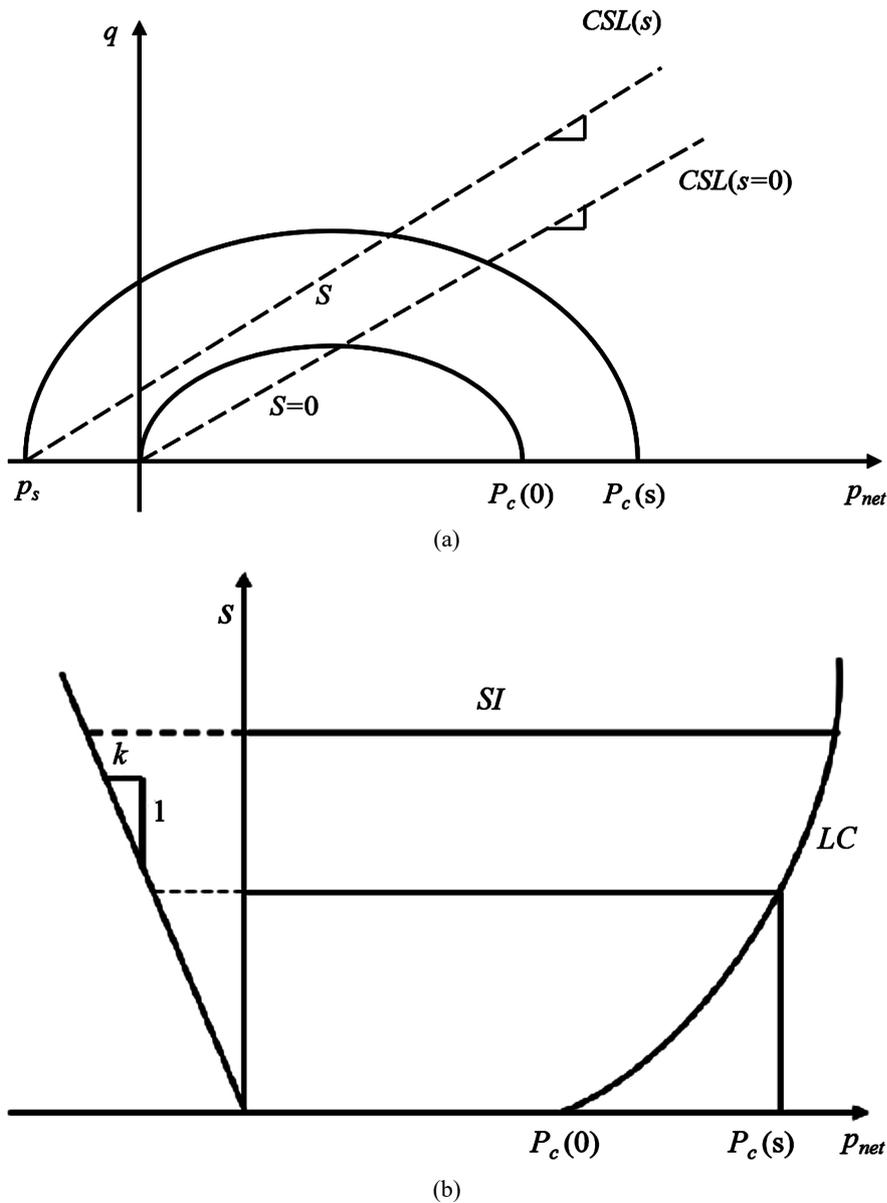


Figure 1. Schematic diagram of yield surface of BBM model
图 1. BBM 模型屈服面示意图

$p_c(0)$ 和 $p_c(s)$ 的关系为:

$$\frac{p_c(s)}{p_r} = \left(\frac{p_c(0)}{p_r} \right)^{(\lambda(0)-\kappa)/(\lambda(s)-\kappa)}$$

式中, $\lambda(0)$ 为饱和土的正常固结线的斜率, $\lambda(s)$ 为与吸力有关的正常固结线的斜率, 且

$$\lambda(s) = \lambda(0) \left[(1-r) \exp(-\beta s) + r \right]$$

r 为一个常数, 体现土体最大刚度; β 为控制土体刚度随吸力增长速率的参数。

从 BBM 模型数值结果和试验结果的对比中, 可以看出 BBM 模型可以预测非饱和土的变形特性。例如: 土体先期固结应力随着吸力的增加而增加; 超过一定的吸力会引起土体的塑性变形; 土体的抗剪强度随吸力增加等。BBM 模型作为非饱和土本构模型研究的开端, 为后续非饱和土本构模型的建立提供了良好的理论基础。但是, 在预测土的变形时, 该模型存在一定局限性。例如, 不能在饱和与非饱和状态之间平滑的过渡, 不能反映超固结土的变形特性等。此后, 许多学者基于 BBM 模型开展了大量的研究, 建立了更能反映非饱和土变形特性的本构模型。

近年来, 学者们基于 BBM 模型开展了更多研究。王晓静[3]提出了适用于双独立应力的 BBM 模型和水-力耦合的临界状态相关的非饱和土本构模型的切面应力积分算法和 Solve-G 函数。利用 Fortran 语言编写数值模拟程序, 实现了非饱和土本构模型的数值化。其次, 基于数值化的非饱和土本构模型, 结合遗传算法开展对非饱和本构模型参数的辨识优化, 提高模型的预测精度; 石朗晶[4]根据土体双重孔隙结构提出了适用于膨胀性非饱和土的双重孔隙结构模型, 介绍非饱和土的双孔隙结构, 系统介绍了西班牙加泰罗尼亚理工大学(UPC)提出了巴塞罗那膨胀本构模型(BEXM), 及其基础应用。非饱和土双重孔隙模型基本包括了描述宏观孔隙部分的 BBM 模型, 和描述微观结构的非线性本构模型, 及两部分的耦合方程组成。

3. 水-力耦合的非饱和土本构模型

在 BBM 类模型出现以后的几十年里, 学者们对以净应力和吸力作为独立应力变量的非饱和土本构模型开展了大量研究。但是, 随着非饱和土试验研究的不断进行, 研究者们发现同一土体即使在吸力相同时, 在湿化和干燥过程中其变形特性也会因为饱和度的不同表现出变形特性的差异, 而且体变也会引起非饱和土-水特征曲线(Soil-Water Characteristic Curve, SWCC)的移动。这让学者们意识到, 吸力变化和饱和度变化都会对非饱和土的应力应变行为产生一定的影响。然而, BBM 类模型只考虑了净应力和吸力对土体变形的影响, 对饱和度的作用完全没有考虑。

基于此种思想, Wheeler [5]等建立了 GCM (Glasgow Coupled Model)模型。该模型不仅考虑应力和吸力对土体变形影响, 也考虑了饱和度对土体变形影响。该本构模型包含 3 个屈服线, 分别是加载湿陷 LC 屈服线、吸力增加 SI 屈服线和吸力减少 SD 屈服线(Suction Increase 和 Suction Decrease) [6]。GCM 模型的 SI 屈服线表示的是吸力变化引起塑性饱和度增量, BBM 模型的 SI 屈服线表示的是吸力变化引起塑性体积应变增量。该模型考虑了两种塑性物理过程: 一是土颗粒之间位移变化导致塑性体积变形, 对应于 LC 屈服线; 二是孔隙水流动产生饱和度塑性变化, 对应于 SI 和 SD 屈服线。这两组屈服线相互影响, 其任意一组发生移动都会引起另外一组屈服线的移动, 体现了土体应力-应变行为和持水特性间的耦合。在 (p', s^*) 应力空间内, 假定 LC、SI 和 SD 屈服曲线均为直线, 由此构成了一个矩形的弹性区域, 屈服面如图 2 所示。图中, p' 为 Bishop 应力, 常被称之为非饱和土平均有效应力; p'_c 为前期固结压力; s^* 为修正吸力, s_i^* 和 s_d^* 为硬化参数。

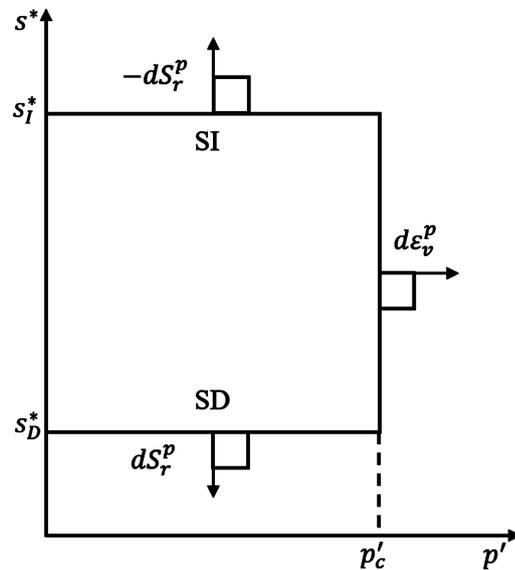


Figure 2. Yield line under isotropic compression
图 2. 各向等压状态下的屈服线

平均 Bishop 应力 p' 定义为:

$$p' = p - S_r u_w - (1 - S_r) u_a$$

式中, p 为总平均应力, S_r 为饱和度, u_a 为孔隙气压力, u_w 为孔隙水压力。

修正吸力 s^* 定义为:

$$s^* = ns = n(u_a - u_w)$$

其中, n 为土体孔隙率, 修正吸力考虑了固相变形对吸力的影响。

近些年, 考虑饱和度作用的非饱和土本构模型一直是研究热点, 学者们建立了更完善的水-力耦合模型。Sun 和 Xiang [7] 建立了能够统一预测非饱和土弹塑性变形的非饱和土水-力耦合本构模型。蔡国庆等[8]针对非饱和土的双孔结构特征, 分析了微观孔隙差异对土体水力与力学行为的影响, 并提出采用有效饱和度和区分不同孔隙对力学特性的贡献。Sun 和 Xiang 在基于以饱和度为状态变量的非饱和土水-力全耦合模型(GCM)中, 将有效饱和度引入 Bishop 有效应力中, 该研究进一步反映了在水-力响应上宏观孔隙与微观孔隙的不同作用。以有效应力和修正吸力作为模型中应力的状态变量, 以体应变和有效饱和度作为应变状态变量, 在此基础上推导了相应的屈服准则、硬化规律与流动法则, 从而建立了一个能够考虑微观孔隙结构的各向等压非饱和土水-力耦合本构模型。

蔡国庆等[9]在已有的关于非饱和土水-力耦合模型的基础上, 耦合考虑温度影响, 以平均土骨架应力、修正吸力和温度为应力状态变量, 以土骨架应变、饱和度和熵为应变状态变量, 通过引入与温度相关的屈服面(LY, TY)以及相应的硬化规律来考虑温度对土体变形的影响, 发展和建立了关于热-水-力耦合作用下非饱和土弹塑性本构模型, 该本构模型不仅包含有关于土的骨架弹塑性变形的力学部分, 还包含有关于液相含量变化的水力部分。韩博文等[10]基于塑性理论框架下, 提出一种能够综合考虑基质吸力、饱和度及孔隙结构黏结效应的非饱和土水-力耦合模型。以有效应力和黏结变量作为其力学部分的本构变量, 通过建立黏结变量与 e/e_s 之间的关系, 在基于边界面塑性理论描述非饱和土的变形行为; 在水力部分, 其还建立了水力滞后土-水特征曲线方程来考虑变形影响。该研究利用膨润土-高岭土混合土和重塑高岭土的试验数据, 对模型进行了参数标定与验证。

吴天驰等[11]系统综述了国内外关于土体结构、微观结构对其水力-力学性质的影响、结构性变量以及相关水-力耦合本构模型的研究进展。在此基础上,建立了适用于双孔结构非饱和土的水-力耦合本构模型,分析了模型在不同应力路径下的响应特性及参数敏感性,并通过等向压缩、三轴剪切和干湿循环路径下的试验结果与模型预测结果进行了对比验证。

4. 考虑温度影响的非饱和土本构模型

考虑温度影响土体本构模型研究进度与非饱和土研究类似,前人以饱和土本构模型为基础,从多方面切入分析逐渐深入,分别在超固结,各项同性屈服,次加载面等方向都有了显著的成果。Hueckel 和 Baldi 等[12]以及 Hueckel 和 Borsetto 等[13]作出了开创性工作,在饱和土力学领域首次尝试建立考虑温度影响土壤行为模型,通过修改著名的 Cam-Clay 模型,将热弹塑性行为考虑在内,建立了第一个热机械本构模型。

罗海林[14]考虑温度影响的统一屈服面的非饱和土本构模型研究。在统一屈服面的非饱和土本构模型基础上,引入温度对 SFG 模型的影响,使二者相结合,得到一种能够反映考虑温度影响的非饱和土的统一屈服面,并推导出相应的本构关系。基于考虑温度影响的 BBM 模型的改进研究。基于考虑温度影响的 BBM 模型,引入李涛等人针对 BBM 模型中统一光滑屈服面,使二者相结合,得到一种能够反映考虑温度影响的非饱和土统一光滑屈服面,使其既能考虑温度对屈服面的影响又能将 SI 线与 LC 线统一为一光滑曲线,并推导出相应的本构关系。周莹等[15]等在广义塑性本构模型的理论框架下,建立了考虑温度影响的黏性土本构模型,并进行了二次开发,应力比试验结果表明,室温下,黏性土的剪胀比与应力比的关系和修正剑桥模型接近,应力比较小时,剪胀比较大,随着应力比的增加,剪胀比快速减小;随着温度的升高,剪胀比与应力比的关系类似,但温度较高时,同一应力比对应的剪胀比更大。基于试验结果,在前人研究的基础上提出了反映温度影响的剪胀方程,当应力比为 0 即等向压缩时,剪胀比趋于无穷大,当应力比达到临界状态应力比时,剪胀比趋于 0,所提剪胀方程可以合理地模拟不同温度下黏性土的剪胀规律。同时给出了与剪胀方程相关的塑性势面表达形式,随着温度的增加,塑性势面的顶点向右上方移动,顶点右侧的形状更陡。将所提反映温度影响的剪胀方程引入到广义塑性模型中,并修正了塑性模量表达形式,提出了考虑温度影响的黏性土本构模型,并介绍了模型中的参数及确定方法。

5. 结论

本文对非饱和土本构模型及其扩展模型、水-力耦合的非饱和土本构模型以及考虑温度影响的非饱和土本构模型进行了综述和分析。通过对这三个关键主题的讨论,我们可以得出以下结论。

首先,非饱和土在工程实践中具有重要意义,其本构模型的研究对于地下水工程、岩土工程等领域具有重要意义。针对非饱和土的特殊性质,研究者提出了多种本构模型,包括各种扩展模型,以更好地描述非饱和土的力学行为。

其次,水-力耦合是非饱和土力学行为中的重要因素之一。水-力耦合的非饱和土本构模型考虑了土体中水分运移对力学性质的影响,为工程实践提供了更为准确的模拟和预测手段。

最后,考虑温度影响的非饱和土本构模型在考虑气候变化和季节变化等因素时具有重要意义。通过引入温度因素,我们可以更全面地理解非饱和土的力学响应,为工程设计和风险评估提供更为全面的参考依据。

综上所述,非饱和土本构模型的研究是一个不断发展的领域,对于推动工程实践的发展和提高工程设计的准确性具有重要意义。未来的研究可以进一步探讨不同环境条件下非饱和土的力学行为,以及模型的精细化和多尺度建模等方面,为工程实践提供更为可靠的理论支持。

参考文献

- [1] 柴海华, 刘岩, 邵彦平. 非饱和土的弹塑性本构模型探讨[J]. 现代盐化工, 2023, 50(6): 16-17+31.
- [2] 邵龙潭, 吴雪晴, 田筱剑, 等. 基于图像测量三轴试验的土的本构模型构建方法[J]. 土木工程学报, 2023, 56(S2): 11-19.
- [3] 王晓静. 非饱和土本构模型的数值实现及参数优化[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- [4] 石朗晶. 非饱和土双孔隙结构本构模型简析[J]. 江西建材, 2017(6): 9+14.
- [5] Wheeler, S.J., Sharma, R.S. and Buisson, M.S.R. (2003) Coupling of Hydraulic Hysteresis and Stress-Strain Behaviour in Unsaturated Soils. *Géotechnique*, **53**, 41-54. <https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.1.41>
- [6] 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]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [7] Sun, D.A. and Xiang, L. (2007) An Elastoplastic Hydro-Mechanical Model for Unsaturated Soils. In: *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 1138-1145. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72588-6_180
- [8] 蔡国庆, 王亚南, 周安楠, 等. 考虑微观孔隙结构的非饱和土水-力耦合本构模型[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(4): 618-624.
- [9] 蔡国庆, 郭艳鑫, 李舰, 等. 热-水-力耦合作用下非饱和土变形特性的弹塑性模拟[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1060-1068.
- [10] 韩博文, 蔡国庆, 李舰, 等. 考虑颗粒黏结效应的非饱和土水-力耦合边界模型[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(11): 2059-2068.
- [11] 吴天驰. 双孔结构非饱和土水-力耦合本构模型研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [12] Hueckel, T. and Baldi, G. (1990) Thermoplasticity of Saturated Clays: Experimental Constitutive Study. *Journal of Geotechnical Engineering*, **116**, 1778-1796. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1990\)116:12\(1778\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1990)116:12(1778))
- [13] Hueckel, T. and Borsetto, M. (1990) Thermoplasticity of Saturated Soils and Shales: Constitutive Equations. *Journal of Geotechnical Engineering*, **116**, 1765-1777. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1990\)116:12\(1765\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1990)116:12(1765))
- [14] 罗海林. 考虑温度影响的非饱和土本构模型研究及试验验证[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- [15] 周莹. 考虑温度影响的黏性土本构模型研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2021.