

DOI: 10.11779/CJGE201909013

# 基于颗粒物质热动力学理论的非饱和土热水力耦合模型研究

杨光昌, 白冰\*

(北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要:** 基于颗粒物质热动力学理论和混合物理论, 结合改进的土水特征曲线 (SWCC) 模型, 考虑温度和饱和度变化引发的颗粒层次能量耗散, 提出了一个非饱和土的热水力耦合模型。该模型引入颗粒熵和颗粒温度的概念, 通过构建热力学恒等式得出非饱和土非弹性变形的本构关系, 并通过迁移系数和能量函数模型将非饱和土体的耗散机制与宏观的物理力学行为建立联系。基于该理论模型, 研究了非饱和土的热水力耦合问题, 通过模拟结果与试验数据的对比, 证实了模型的有效性。模拟结果表明, 模型具有描述非饱和土在不同温度和吸力下的固结和剪切特性以及非等温条件下的热体应变特性的能力。

**关键词:** 非饱和土; 颗粒物质热动力学; 耦合模型; 温度

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)09-1688-10

作者简介: 杨光昌(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事环境岩土工程等方面的科研。E-mail: ygc3ang@bjtu.edu.cn。

## A thermo-hydro-mechanical coupled model for unsaturated soils based on thermodynamic theory of granular matter

YANG Guang-chang, BAI Bing

(Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Based on the thermodynamic theory of granular matter and the theory of mixtures, combined with the modified soil water characteristic curve (SWCC) model, considering the granular level energy dissipation caused by changes of temperature and saturation, a new thermo-hydro-mechanical coupled model for unsaturated soils is proposed. The model introduces the concepts of granular entropy and granular temperature. The constitutive relationship of non-elastic deformation can be obtained through the thermodynamic identity. The relationship between the dissipation mechanism of unsaturated soils and the macro-physical and mechanical behavior is established by using the migration coefficients and energy function model. Based on the theoretical model, the thermo-hydro-mechanical (THM) coupling behavior of unsaturated soils is studied. The validity of the model is verified by comparing the simulated results with the experimental data. The results show that the proposed model has the capability to describe the consolidation and shear behavior of unsaturated soils at different temperatures and suctions and the thermal volumetric strain changes under non-isothermal conditions.

**Key words:** unsaturated soil; thermodynamic theory of granular matter; coupled model; temperature

## 0 引言

土体的热水力耦合模型的发展对解决一些岩土工程中的问题起着十分重要的作用, 也是近年来一个备受关注的研究课题<sup>[1-2]</sup>。在临界状态框架下发展了很多经典的非饱和土的弹塑性本构模型<sup>[3-5]</sup>, 其中, Alonso等<sup>[3]</sup>采用净应力和基质吸力双应力变量, 提出了著名的 Barcelona 模型 (BBM)。该模型用修正的剑桥模型来描述应力应变关系, 并推导了加载湿陷屈服曲线 (LC 屈服) 来描述非饱和土的屈服特性, 作为一个

基本模型被研究人员广泛引用和改进<sup>[6-7]</sup>。这些模型多采用双应力状态变量, 即考虑了基质吸力的影响, 但忽略了饱和度对非饱和土强度、变形等的影响。大量的试验数据表明, 即便在基质吸力和净应力完全相同的情况下, 不同饱和度土体显示出不同的力学特性。因此, 一些学者在本构模型中引入饱和度来描述饱和

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51878035, 51678043)

收稿日期: 2018-06-05

\*通讯作者 (E-mail: baibing66@263.net)

度对土体特性的影响<sup>[8-9]</sup>。为了模拟非等温过程中非饱和土的力学特性, 一些学者在上述经典模型的基础上提出了非饱和土的热力耦合模型<sup>[10-12]</sup>, 通过考虑温度对屈服面或塑性势面的影响来反映热力的耦合效应。一些 THM 耦合模型便是通过对热力模型的扩展得出<sup>[13]</sup>。一般来说吸力对非饱和土力学特性的影响是不可忽视的, 土水特性与弹塑性变形的耦合是非饱和土水力耦合模型的核心。因此, 研究非饱和土的 THM 耦合必不可少的涉及到温度对土水特征曲线 (SWCC) 的影响。一般模型都是在常用 SWCC 模型 (如 vG 模型) 的基础上, 考虑温度对吸力的影响或加入温度影响因子来反映温度对 SWCC 的影响<sup>[14-15]</sup>。近年来, 一些学者从不同的角度研究了非饱和土的 THM 耦合模型。Sánchez 等<sup>[16]</sup>基于双孔隙构想并结合已有的力学双结构模型, 考虑非等温多相流与力学特性的耦合, 提出了一个 THM 全耦合模型, 模型可以很好的模拟膨胀性非饱和黏土的热力特性。Abed 等<sup>[17]</sup>给出了全耦合平衡控制方程的理论推导过程及其扩展的物理机制解释, 提出了一个非饱和土 THM 耦合理论框架。Bellia 等<sup>[18]</sup>基于有效应力和界面塑性概念提出了一个 THM 耦合模型, 与一般模型不同, 该模型用有效饱和度和温度来预测非饱和土的行为特性。

现有的很多 THM 耦合模型都是以经典弹塑性理论为基础, 将应变分为弹性和塑性两部分, 弹性应变根据胡克定律求解, 塑性应变则按塑性增量理论求解, 剑桥模型便是弹塑性理论在土力学中的一个成功运用。此外, 一些学者基于热力学原理, 通过定义自由能函数和耗散势函数, 分析非饱和土固液气三相体的热力学势以及骨架变形过程和毛细滞回过程中的耗散能, 建立了相应的弹塑性或超塑性本构模型<sup>[19-20]</sup>。这种模型为流动法则和屈服准则等概念提供了较明确的物理意义, 是对经典弹塑性模型的重要补充。超塑性模型在其使用的热力学原理中尽管也包含了熵和温度的概念, 但并没有给出熵演化的定量表达, 也没有考虑温度和密度等变量随时间的变化及其空间分布的不均匀性。近年来, 基于物理守恒定律和经典非平衡态热力学理论基础的流体动力学理论建模方法也备受关注。该方法通过定义自由能函数和耗散函数, 构造出热力学和动力学恒等式来建立材料的本构关系, 并已在晶体和聚合物等典型固体材料中得到了成功应用<sup>[21]</sup>。Jiang 等<sup>[22]</sup>在此基础上, 引入颗粒熵的概念, 考虑颗粒层次上的耗散, 提出了一个描述颗粒物质材料的本构模型 (GSH 模型)。该模型同时考虑了材料的宏观行为, 是一种多尺度理论模型。颗粒物质一般是指单

个颗粒尺寸大于 1  $\mu\text{m}$  的聚集体, 除了微观和宏观两个空间层次外, 还多出一个以临近颗粒间距为特征长度的介观层次, 该特征长度与颗粒粒径相关, 可通过声波传播法进行确定<sup>[23]</sup>。张志超等<sup>[24-26]</sup>把 GSH 模型扩展到饱和土体, 给出了饱和黏土的 THM 耦合模型, 并可以模拟饱和黏土的一些热力学特性。蒋亦民等<sup>[27]</sup>基于 GSH 理论提出了一个简单的非饱和土的自由能模型, 并对比分析了本构关系建模与自由能和迁移系数建模的异同。

本文基于颗粒物质热动力学理论以及混合物理理论, 将 GSH 理论扩展到非饱和土三相混合物体系中, 考虑温度和饱和度变化引发的颗粒层次上的能量耗散, 并结合改进的可反映温度和变形效应的 SWCC 模型, 建立了一个非饱和土的热水力耦合模型。模型引入颗粒熵和颗粒温度的概念, 从理论上确定热力学体系的耗散结构组成以及迁移系数关系, 通过构建热力学恒等式得出非弹性变形的本构关系, 并通过迁移系数和能量函数模型将非饱和土体的耗散机制与宏观的物理力学行为建立联系。通过和试验数据的对比, 验证了模型模拟非饱和土热水力耦合特性的能力。

## 1 模型理论框架

### 1.1 守恒方程

非饱和土固液气三相的质量守恒方程表示为<sup>[28]</sup>

$$\dot{\rho}^a + \rho^a \nabla_i v_i^a = \hat{\rho}^a, \quad (a \in [S, L, G]) \quad (1)$$

式中,  $\rho^a$  为  $a$  相的表观密度,  $\rho^a = n^a \rho_a$ ,  $n^a$  为  $a$  相的体积分数,  $\rho_a$  为  $a$  相的本征密度。 $\hat{\rho}^a$  为其他相对  $a$  相的质量供给量,  $\hat{\rho}^S = 0$ ,  $\hat{\rho}^L = -\hat{\rho}^G = \hat{\rho}$ ;  $v_i^a$  为  $a$  相的速度。

各相的动量守恒方程为<sup>[28]</sup>

$$\rho^a \dot{v}^a + \nabla_n \sigma^a - \rho^a b^a = \hat{\rho}^a v^a \quad (a \in [S, L, G]) \quad (2)$$

式中  $\sigma^a$  为  $a$  相的柯西应力张量, 根据土力学习惯, 压为正;  $b^a$  为  $a$  相的体积力矢量, 这里取  $b^a = g$ ,  $g$  为重力加速度;  $\hat{\rho}^a v^a$  为物质交换对  $a$  相动量的贡献。

总能量守恒方程式为<sup>[28]</sup>

$$\sum_{a=S,L,G} (\rho^a \dot{e}_a) = \sum_{a=S,L,G} (n^a \sigma_{kj}^a \psi_{jk}^a) + \nabla_k Q_k - \rho^L v_k^{LS} \nabla_k e_L - \rho^G v_k^{GS} \nabla_k e_G, \quad (a \in [S, L, G]) \quad (3)$$

一般规定  $Q_k = w v_k + \sigma_{kj} v_j - \omega_k$ ,  $Q_k$  表示为热传导等耗散过程伴随的能量流动,  $w$  为总能量密度,  $\omega_k$  为能量的流量, 简称能流;  $e = \frac{w}{\rho} - \frac{v^2}{2}$ , 为比能;  $v_i^{LS}$  和  $v_i^{GS}$  分别为液相和气相对固相的相对流速; 定义

$$\psi_{ij}^a = -\frac{\nabla_i v_j^a + \nabla_j v_i^a}{2}, \quad \text{为 } a \text{ 相的变形率, 对于固相土骨}$$

架, 在小变形假设的前提下,  $\dot{\epsilon}_{ij} = \psi_{ij}^S$ 。

### 1.2 熵增加方程

熵与上述守恒量一样, 有着可叠加性和不可消失性, 但不同之处是它可以被产生, 即熵产生 (entropy production)。热力学中习惯将熵产生表示成单位时间单位体积的发热, 也就是热产生率  $R$  除以温度  $T$ ,  $R \geq 0$ , 即热力学第二定律。则总的熵增方程则为<sup>[28]</sup>

$$\sum_{a=S,L,G} (\rho^a \dot{\mathcal{G}}_a) = \frac{R}{T} + \nabla_k f_k - \rho^L v_k^{LS} \nabla_k \mathcal{G}_L - \rho^G v_k^{GS} \nabla_k \mathcal{G}_G, \quad (4)$$

式中,  $\mathcal{G}_a = S_a / \rho^a$  为  $a$  相的熵容,  $f_k$  为其他形式的熵流。

类似熵增方程, 也可给出颗粒熵运动方程<sup>[28]</sup>

$$\rho^S \dot{\mathcal{G}}_g = R_g / T_g + \nabla_k f_k^g - I_g, \quad (R_g \geq 0, I_g \geq 0), \quad (5)$$

式中,  $\mathcal{G}_g = S_g / \rho^S$  为颗粒熵容;  $f_k^g$  为颗粒层次上的热传导;  $R_g / T_g$  为颗粒熵产生,  $T_g$  为颗粒温度, 描述颗粒尺度上的涨落运动;  $I_g$  为颗粒熵衰减率, 表示单位时间单位体积颗粒熵的减少值。运动颗粒系统即使达到 Maxwell 速度分布, 其所携带的动能也会向微观分子运动衰减, 并伴随着熵产生, 因此颗粒熵增方程中要减掉  $I_g$  项<sup>[22]</sup>。颗粒温度  $T_g$  并不能直接测量, 可通过与颗粒速度脉动量的关系来间接得到<sup>[29]</sup>。

### 1.3 热力学关系

#### (1) 耗散体系的确定

非饱和土的耗散力集合可以表示为  $\{\pi_{ij}, T_g, \nabla_k T, \dot{\epsilon}_{ij}, \psi_{ij}^L, \psi_{ij}^G\}$ , 所对应的耗散流为  $\{Y_{ij}, I_g, q_k/T, \sigma_{ij}^{vS}, \sigma_{ij}^{vL}, \sigma_{ij}^{vG}\}$ 。其中,  $q_k$  为  $\nabla_k T$  所对应的耗散流, 也就是热传导量;  $\sigma_{ij}^{va}$  为  $a$  相的黏滞应力;  $Y_{ij}$  为有效应力  $\pi_{ij}$  所对应的耗散流。

Onsager 关系<sup>[30]</sup>表明, 熵的产生率  $R$  可表示成耗散力与耗散流的乘积之和

$$R = Y_{ij} \pi_{ij} + I_g T_g + \frac{q_k}{T} \nabla_k T + \sigma_{ij}^{vS} \dot{\epsilon}_{ij} + \sigma_{ij}^{vL} \psi_{ij}^L + \sigma_{ij}^{vG} \psi_{ij}^G. \quad (6)$$

类似的, 考虑颗粒层次上的黏滞以及温度和饱和度变化引发的颗粒层次上的耗散, 有

$$R_g = \sigma_{ij}^{vg} \dot{\epsilon}_{ij} + \mathfrak{R} T_g \dot{T} + s T_g \dot{s}_r, \quad (7)$$

式中,  $\dot{T}$  和  $\dot{s}_r$  可看作是耗散力,  $\mathfrak{R}$  和吸力  $s$  为对应的耗散流。  $\mathfrak{R} T_g \dot{T}$  代表非饱和土受温度影响引发的颗粒层次上的熵产生, 如“热固结”现象;  $s T_g \dot{s}_r$  代表饱和度的变化引起的颗粒层次上的熵产生, 如“湿陷”现象。当  $T_g = 0$  时, 即在颗粒层次上无耗散发生,  $\mathfrak{R} T_g \dot{T}$  和  $s T_g \dot{s}_r$  也随之消失 (乘以  $T_g$  来反映此现象)。后文可知, 此二者的变化也将会引起气液相之间的相互转化。

在偏离平衡态不远的非平衡态区, 耗散流可以表

示成耗散力的线性函数<sup>[31]</sup>, 表示如下

$$\begin{bmatrix} Y_{ij} \\ I_g \\ q_i \\ \sigma_{ij}^{vS} \\ \sigma_{ij}^{vL} \\ \sigma_{ij}^{vG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_{ijkl} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \kappa_{ik} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{ijkl}^S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{ijkl}^L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{ijkl}^G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \pi_{kl} \\ T_g \\ \nabla_k T \\ \dot{\epsilon}_{kl} \\ \psi_{kl}^L \\ \psi_{kl}^G \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中, 中间的矩阵称为迁移系数矩阵, 其内部的系数为相应耗散流和耗散力之间的关联系数。要求其为正定矩阵, 除了满足 Onsager 倒易性, 还需满足 Curie 原理, 即耗散力不能比与之耦合的耗散流有更多的对称元素, 也就是说, 不同对称特性的流和力之间不存在耦合。这样可以减少迁移系数的数量, 有相互作用明显的两个过程可增加非对角系数, 即耦合系数。式 (8) 各耗散关系之间并无显著的相互影响, 本文暂不考虑耦合系数的影响。

类似的, 颗粒层次上的黏滞耗散关系也可表示为

$$\sigma_{ij}^{vg} = T_g \lambda_{ijkl}^g \dot{\epsilon}_{kl}, \quad (9)$$

式中,  $\lambda_{ijkl}^g$  为颗粒层次上的迁移系数,  $\sigma_{ij}^{vg}$  为颗粒黏滞应力, 可通过声学方法测定<sup>[32]</sup>。同样, 当  $T_g = 0$  时, 颗粒层次上无耗散产生, 黏滞耗散也随之消失。

#### (2) 热力学恒等式

非饱和土热力学的全微分形式, 用比能  $e$  的形式可表示成

$$\sum_{a=S,L,G} (\rho^a \dot{e}_a) = \pi_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^e + T_g \rho^S \dot{\mathcal{G}}_g + \sum_{a=S,L,G} (\rho^a \mu_a \dot{\rho}^a + T \rho^a \dot{\mathcal{G}}_a), \quad (10)$$

式中,  $\mu_a = \frac{1}{\rho^a} (\mu_{ca} + T \mathcal{G}_a + T_g \mathcal{G}_g + v_i^a v_i^a / 2 - e_a)$ , 为化学势, 仅当  $a=S$  时, 包含  $T_g \mathcal{G}_g$  项。考虑塑性变形, 有

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{ij}^e &= \dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}^p, \text{ 把守恒方程 (1), (2), (3) 和熵增加方程 (4), (5) 代入上式 (10), 可以得出} \\ R + R_g &= [n^S \sigma_{ij}^S - \pi_{ij} - \mu_S (\rho^S)^2 \delta_{ij}] \psi_{ij}^S + \\ & [n^G \sigma_{ij}^G - \mu_G (\rho^G)^2 \delta_{ij}] \psi_{ij}^G + [n^L \sigma_{ij}^L - \mu_L (\rho^L)^2 \delta_{ij}] \psi_{ij}^L + \\ & (\rho^G \mu_G \nabla_k \rho^G + T \rho^G \nabla_k \mathcal{G}_G - \rho^G \nabla_k e_G) v_k^{GS} + \\ & (\rho^L \mu_L \nabla_k \rho^L + T \rho^L \nabla_k \mathcal{G}_L - \rho^L \nabla_k e_L) v_k^{LS} + (\mu_G - \mu_L) \hat{\rho} + \\ & T_g I_g + \nabla_k (Q_k - f_k T) + \pi_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p + f_k \nabla_k T. \end{aligned} \quad (11)$$

由式 (6), (7) 可知, 熵产生率还可以表示为

$$R + R_g = Y_{ij} \pi_{ij} + I_g T_g + \frac{q_k}{T} \nabla_k T + (\sigma_{ij}^{vS} + \sigma_{ij}^{vg}) \psi_{ij}^S + \sigma_{ij}^{vL} \psi_{ij}^L + \sigma_{ij}^{vG} \psi_{ij}^G + \mathfrak{R} T_g \dot{T} + s T_g \dot{s}_r. \quad (12)$$

对比方程 (11) 和 (12), 可以得出

$Y_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^p$ , 即塑性应变的变化率为有效应力  $\pi_{ij}$  所对应的耗散流。

$(\mu_G - \mu_L)\hat{\rho} = \Re T_g \dot{T} + s T_g \dot{s}_r$ ,  $(\mu_G - \mu_L)\hat{\rho}$  可以看作由温度和饱和度变化引起的气液相之间的转化量。其中温度变化的贡献主要是孔隙水加热转化成气相; 饱和度的变化使吸力发生改变, 即气液相压力差的变化, 从而引起相应的气液相变。

Lu 等<sup>[33]</sup>用一个指数方程描述水的饱和蒸气压与温度的关系

$$u_{v,\text{sat}} = 0.611 \exp\left(17.27 \frac{T}{T + 237.2}\right), \quad (13)$$

式中,  $u_{v,\text{sat}}$  为饱和蒸气压,  $T$  为摄氏温度。

理想气体的状态方程为  $P_G V_G = n R_0 T$ ,  $n$  表示气体的物质的量;  $T$  表示理想气体的热力学温度;  $R_0$  为理想气体常数,  $R_0 = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。将理想气体定律应用到水蒸气进行计算可得

$$\rho_v = \frac{w_v u_{v,\text{sat}}}{R(T + 273.2)} \quad (14)$$

式中,  $\rho_v$  为蒸汽压的密度,  $w_v$  为水蒸气的摩尔质量,  $w_v = 18 \text{ g/mol}$ 。

由于非饱和土的气相与大气连通, 不考虑气压变化对相变的影响, 则由温度变化引起的气液相变量为

$$\hat{\rho} = \hat{\rho}_v = 1.32 \left( \frac{4718.164}{T + 237.2} - 1 \right) \frac{\exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.2}\right)}{(T + 273.2)^2} \dot{T}. \quad (15)$$

所以,  $\Re$  可近似表示为

$$\Re = 1.32 \left( \frac{4718.164}{T + 237.2} - 1 \right) \frac{\exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.2}\right)}{(T + 273.2)^2}. \quad (16)$$

### 1.4 势能密度函数

#### (1) 弹性势能密度函数

弹性势能密度函数一般表示为弹性应变的函数, 比如我们熟悉的线弹性模型, 一些学者根据平均有效应力对弹性体积模量和弹性剪切模量的影响来确定弹性势能密度函数<sup>[22, 34]</sup>。Jiang 等<sup>[22]</sup>通过类比赫兹接触, 将接触球比作颗粒固体, 将弹簧比作胡克固体, 给出的颗粒类材料的弹性势能密度函数如下:

$$w_e = B(\varepsilon_v^e)^{0.5} \left[ \frac{2}{5}(\varepsilon_v^e)^2 + \frac{1}{\zeta}(\varepsilon_s^e)^2 \right]. \quad (17)$$

式中  $\varepsilon_v^e = \varepsilon_{kk}^e$ ,  $\varepsilon_s^e = \sqrt{e_{ij}^e e_{ij}^e}$ ,  $e_{ij}^e = \varepsilon_{ij}^e - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk}^e \delta_{ij}$ ;  $B$  和  $\zeta$  为材料参数,  $B$  描述材料的软硬程度, 与应力同量纲;  $\zeta$  为类似于泊松比的材料参数, 与库仑内摩擦角有关, 对于干砂, 可取为 5/3。

Zhang<sup>[26]</sup>针对饱和黏土的情形, 在此基础上引入了温度和黏聚力的影响, 将式 (17) 修正为

$$w_e = B \left[ (\varepsilon_v^e + \beta_T \Delta T)^{2.5} + \zeta (\varepsilon_v^e + \beta_T \Delta T + c)^{0.5} (\varepsilon_s^e)^2 \right], \quad (18)$$

式中, 引入材料参数  $c$  来反映黏性对弹性剪切模量的影响,  $\xi$  对应于  $1/\zeta$ 。

对于非饱和土体, 温度和颗粒之间的胶结以及基质吸力都会对颗粒之间的接触产生很大影响, 仿照文献[35]中描述固体热胀冷缩效应的方法, 加入描述基质吸力对弹性势能的贡献项  $\chi s \varepsilon_v^e$ , 引入温度和黏性的影响效应, 非饱和土的弹性势能密度函数可修正为

$$w_e = B \left[ \frac{2}{5} (\varepsilon_v^e + \beta_T \Delta T)^{2.5} + \xi (\varepsilon_v^e + \beta_T \Delta T + c)^{0.5} (\varepsilon_s^e)^2 \right] + \chi s \varepsilon_v^e. \quad (19)$$

类似于 Bishop 形式的非饱和土有效应力, 可令  $\chi$  等于饱和度  $s_r$ 。

#### (2) 应力表达式的确定

由公式 (10) 可知

$$\pi_{ij} = \frac{\partial w_e}{\partial \varepsilon_{ij}^e} = B \left[ (\varepsilon_v^e + \beta_T \Delta T)^{1.5} \delta_{ij} + 0.5 \xi (\varepsilon_v^e + \beta_T \Delta T + c)^{-0.5} (\varepsilon_s^e)^2 \delta_{ij} + 2 \xi (\varepsilon_v^e + \beta_T \Delta T + c)^{0.5} e_{ij}^e \right] + s s_r \delta_{ij}. \quad (20)$$

定义考虑温度影响的弹黏性体积模量和剪切模量分别为

$$K_e = B \left[ (\varepsilon_v^e + \beta_T \Delta T)^{0.5} + 0.5 \xi (\varepsilon_v^e + \beta_T \Delta T + c)^{-0.5} \frac{(\varepsilon_s^e)^2}{\varepsilon_v^e + \beta_T \Delta T} \right], \quad (21)$$

$$G_e = B \xi (\varepsilon_v^e + \beta_T \Delta T + c)^{0.5}. \quad (22)$$

既而,  $\pi_{ij}$  可表示为

$$\pi_{ij} = \left[ K_e (\varepsilon_v^e + \beta_T \Delta T) + s s_r \right] \delta_{ij} + 2 G_e e_{ij}^e. \quad (23)$$

因此, 平均有效应力可表示为

$$p' = \frac{\pi_{kk}}{3} = B \left[ (\varepsilon_v^e + \beta_T \Delta T)^{1.5} + 0.5 \xi (\varepsilon_v^e + \beta_T \Delta T + c)^{-0.5} (\varepsilon_s^e)^2 \right] + s s_r. \quad (24)$$

采用 Bishop 的有效应力形式, 平均净应力可表示为  $\tilde{p} = p' - s s_r$ 。根据已有的试验结果可知<sup>[36]</sup>, 当达到临界状态时, 非饱和土的孔隙比  $e$  与  $\ln \tilde{p}$  近似成线性关系  $\Gamma = e + \lambda \ln \tilde{p}$ ,  $\lambda$  为压缩曲线斜率, 与吸力  $s$  有关<sup>[3]</sup>, 可近似表达为吸力的函数  $\lambda(s) = \lambda(0)[(1-r) \exp(-\beta s) + r]$ ,  $\lambda(0)$  为饱和土压缩曲线斜率,  $r$ ,  $\beta$  为拟合系数。对  $\tilde{p}$  两边取对数, 则有  $\ln \tilde{p} = \ln B + \ln A$ ,  $A = (\varepsilon_v^e)^{1.5} + 0.5 \xi (\varepsilon_v^e + c)^{-0.5} (\varepsilon_s^e)^2$ , 在临界状态时可视为常数。已知  $B$  与干密度  $\rho_d$  有关<sup>[22]</sup>, 即与孔隙比  $e$  有关,  $e = \frac{\rho_L G_s}{\rho_d} - 1$ , 其中  $\rho_L$  为水的密度。假设  $B$  可表示成  $B_0 \exp(\Xi)$  的形式, 则有  $\ln \tilde{p} = \Xi + \ln B_0 + \ln A$ , 因此可以近似得出,  $B = B_0 \exp\left(-\frac{e}{\lambda(s)}\right)$ 。  $B$  与土体的密实度相关, 在上式中  $B$  值的大小由  $B_0$ ,  $e$ ,  $\lambda(s)$  共同决定,

当吸力增大时，土的密实度往往也会增大，从而  $B$  值也将增大。

此外，偏应力  $s_{ij}$  可表示为

$$s_{ij} = \pi_{ij} - \frac{\pi_{kk}}{3} \delta_{ij} = 2B\xi(\varepsilon_v^e + \beta_T \Delta T + c)^{0.5} \varepsilon_s^e \quad (25)$$

则剪应力可以表示为

$$q = \sqrt{\frac{1}{3} s_{ij} s_{ji}} = \frac{2\sqrt{3}}{3} B\xi(\varepsilon_v^e + \beta_T \Delta T + c)^{0.5} \varepsilon_s^e \quad (26)$$

### 1.5 土水特征曲线

土水特征曲线一般采用 van Genuchten<sup>[37]</sup>模型(vG

模型)，即  $s_r = \left[ 1 + \left( \frac{s}{a} \right)^n \right]^{-m}$ ，其中  $a$ ， $m$ ， $n$  与曲线的

形状相关，对于干燥和浸湿曲线， $a$ ， $m$ ， $n$  的取值也不同。由于变形对土水特征曲线具有一定的影响，Tarantino<sup>[38]</sup>根据试验发现，孔隙含水率  $e_w$  与吸力  $s$  呈现幂函数的关系，尤其在高吸力范围内， $e_w = a_1 s^{b_1}$ ， $a_1$ ， $b_1$  分别与  $\ln s - \ln e_w$  关系曲线的截距和斜率有关。在 vG 模型的基础上，给出考虑孔隙比变化的 SWCC 模型

$$s_r = \left\{ 1 + \left[ \left( \frac{e}{a_1} \right)^{1/b_1} s \right]^n \right\}^{-b_1/n}, \quad (b_1/n = m) \quad (27)$$

式中， $a_1$ ， $b_1$ ， $n$  为拟合参数。

Grant 等<sup>[39]</sup>把温度对 SWCC 的影响表示为

$$s_r = \left[ 1 + \left( \frac{b_2 + T_0}{b_2 + T} \left( \frac{s}{a} \right)^n \right)^m \right]^{-1/n} \quad (28)$$

式中， $b_2 = -493.5^\circ\text{C}$  为常数，通过纯水与空气接触面的参数校正得出。

结合式 (27)，(28)，同时考虑变形和温度效应的土水特征曲线可修正为

$$s_r = \left\{ 1 + \left[ \frac{b_2 + T_0}{b_2 + T} \left( \frac{e}{a_1} \right)^{1/b_1} s \right]^n \right\}^{-b_1/n} \quad (29)$$

### 1.6 迁移系数模型

根据迁移系数矩阵 (8) 和热力学恒等式 (11)，可以得到

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \eta_{ijkl} \pi_{ij} \quad (30)$$

当颗粒温度  $T_g$  为零时，塑性应变不再发展，所以塑性应变应为  $T_g$  的函数，在各向同性条件下， $\eta_{ijkl}$  可定义为

$$\eta_{ijkl} = (T_g)^a \frac{\eta_s}{2G_e} \delta_{il} \delta_{jk} + (T_g)^a \left( \frac{\eta_v}{3K_e} - \frac{\eta_s}{6G_e} \right) \delta_{ij} \delta_{lk} \quad (31)$$

式中， $\eta_v$  和  $\eta_s$  为迁移系数，为张量形式迁移系数  $\eta_{ijkl}$  的一种表示方式。假设临界状态的弹性剪应变与剪切速率无关， $a$  可取为 0.5<sup>[25]</sup>，将式 (31) 代入式 (30)，并定义  $c_1 = \eta_v/\eta_s$ ，则应变率可表示成

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + c_1 (\eta_s^{1/a} T_g)^a \left( \varepsilon_v^e + \beta_T \Delta T + \frac{ss_r}{K_e} \right) \delta_{ij} + (\eta_s^{1/a} T_g)^a e_{ij}^e \quad (32)$$

Jiang 等<sup>[22]</sup>指出， $w_g = b\rho^s T_g^2/2$ ，为与颗粒的涨落运动相关能量， $b$  为材料参数。则有

$$\rho^s \dot{g}_g = \frac{\partial w_g}{\partial T_g} = \rho^s b T_g, \quad (g_g = b T_g) \quad (33)$$

类似的，迁移系数  $\lambda_{ijkl}^g$  可定义为

$$\lambda_{ijkl}^g = \lambda_{sg} \delta_{il} \delta_{jk} + \left( \lambda_{vg} - \frac{\lambda_{sg}}{3} \right) \delta_{ij} \delta_{lk} \quad (34)$$

式中， $\lambda_{vg}$  和  $\lambda_{sg}$  为颗粒层次上的迁移系数，是张量形式迁移系数  $\lambda_{ijkl}^g$  的一种表示。

结合式 (5)，(7)，(32)，(34)，并定义  $c_2 = \eta_s^{1/a} \lambda_{sg}/\gamma$ ， $c_3 = \eta_s^{1/a} \lambda_{vg}/\gamma$ ， $c_4 = \eta_s^{1/a}/b$ ， $c_5 = \gamma/b$ ， $T_{gg} = \eta_s^{1/a} T_g$ ，则颗粒温度的运动方程为

$$\dot{T}_{gg} = c_2 c_5 \frac{\dot{e}_{ij} \dot{e}_{ij}}{\rho^s} + c_3 c_5 \frac{\dot{\varepsilon}_v \dot{\varepsilon}_v}{\rho^s} + c_4 \frac{\mathcal{R}\dot{T} + ss_r}{\rho^s} - c_5 \frac{T_{gg}}{\rho^s} \quad (35)$$

## 2 模型总结

非饱和土的热水力耦合特性可通过平均有效应力方程 (24)，剪应力方程 (26)，土水特性方程 (29)，应变演化方程 (32) 和颗粒温度运动方程 (35) 来描述。本模型中，不涉及屈服准则，流动法则，硬化准则等经典弹塑性力学中的概念，取而代之的是颗粒熵、颗粒温度、迁移系数以及能量函数。

模型涉及了很多系数，包括  $\eta_v$ ， $\eta_s$ ， $\lambda_{vg}$ ， $\lambda_{sg}$ ， $b$ ， $\gamma$ ，并不需要确定上述每个系数的值，因为模型最终计算所需的参数为  $c_1$ ， $c_2$ ， $c_3$ ， $c_4$ ， $c_5$ ，并且这些参数大都可通过试验来确定。比如， $c_5$  可通过参考不同类型土的应力松弛试验确定<sup>[40]</sup>，即在等温条件下，施加在土样上的应力在应变保持不变下减小，通过应力松弛的时间可确定  $c_5$  的值； $c_2$  和  $c$  可通过临界状态时的应力应变关系来确定； $c_1$  与不排水剪切试验的有效应力路径以及应力应变关系相关； $c_3$  与土的体积变形相关，可通过等向压缩-回弹试验来确定，同时也可以确定  $B_0$  的值； $c_4$  可根据非等温过程中的热响应或是等温过程的湿化或干燥试验确定。SWCC 模型所涉及的参数  $a_1$ ， $b_1$ ， $n$ ，可根据土水特征曲线拟合得出。

此外， $c_1 = \eta_v/\eta_s$ ，受吸力和温度的影响，可假定

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

参数	初始值				土水特征曲线参数						
	$G_s$	$T_0$	$s_r$	$p_0$	$a_1$	$n$	$b_1$	$b_2$			
值	2.76	25°C	0.5	0.1 MPa	0.716	2.880	0.175	-493.5°C			
参数	热力学模型参数										
	$c_0$	$c_4$	$B_0$	$r$	$c_T$	$\beta_T$	$c_3$	$c_5$	$\lambda(0)$	$\beta$	$c_s$
值	0.001	0.21 kg/(m <sup>3</sup> ·MPa)	8846.48 MPa	0.18	0.02°C <sup>-1</sup>	10 <sup>-5</sup> °C <sup>-1</sup>	9000 s <sup>2</sup>	20.63 kg/(m <sup>3</sup> ·s)	0.25	0.14 MPa <sup>-1</sup>	0.005 kPa <sup>-1</sup>

为如下形式

$$c_1 = c_0 [1 + c_T(T - T_0)] \exp[c_s(s - s_0)] \quad (36)$$

式中,  $c_0$  为初始值,  $c_T$ ,  $c_s$  分别为与温度和吸力相关的参数。

### 3 模型验证

#### (1) 固结特性

Tang 等<sup>[41]</sup>通过可控吸力、温度的等向加压装置研究了非饱和 MX80 膨润土的热力学特性: 通过固结压缩试验研究了吸力和温度对压缩性的影响; 通过加热试验, 研究了吸力和应力对热体应变变化特性的影响。本文通过与该文献试验数据的对比, 来验证所提出模型的有效性。所涉及的模型参数列于表 1, 其中初始值以及压缩曲线斜率  $\lambda(s)$  的参数直接取自文献<sup>[41]</sup>, 土水特征曲线参数取自文献<sup>[38]</sup>, 热力学参数  $c_1-c_5$  可根据文献<sup>[40]</sup>, <sup>[41]</sup>和<sup>[42]</sup>中的试验确定。

图 1 给出常温 25°C 下, 不同吸力试样的固结压缩特性。其中, 散点为试验数据, 实线为模拟结果, 试验过程控制吸力不变。可以看出, 吸力从 0.1 MPa 到 110 MPa, 压缩曲线的斜率减小, 在高吸力下, 压缩性很小, 固结曲线的斜率近乎为 0, 模拟结果与试验数据相吻合。

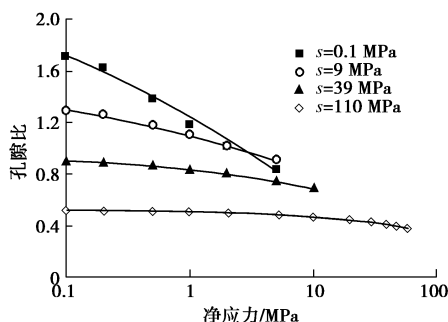
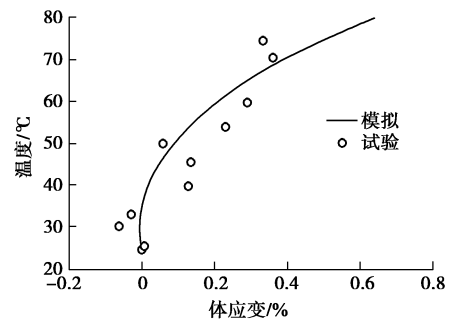


图 1 控制吸力不变的固结压缩曲线 ( $T=25^\circ\text{C}$ )

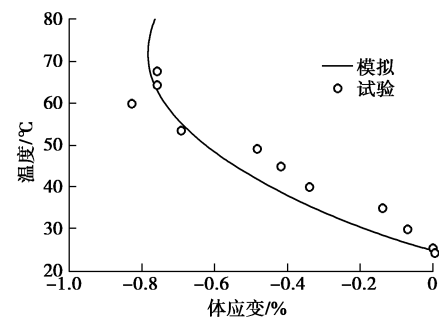
Fig. 1 Compression curves at constant suction and 25°C

图 2 给出了在恒定净应力 0.1 MPa 下, 不同吸力试样加热 ( $25^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ ) 引起的体积变化情况。试验结果表明在吸力较低时 ( $s=9 \text{ MPa}$ ), 加热引起热收缩; 而高吸力情况下 ( $s=39 \text{ MPa}$  和  $110 \text{ MPa}$ ), 加热将引起热膨胀, 并且加热到一定温度 ( $s=39 \text{ MPa}$  时约为  $68^\circ\text{C}$ ) 时, 将由热膨胀逐渐转变为热收缩。对于饱和土, 对高固结比的土体加热时将产生热膨胀, 而对正常固结土

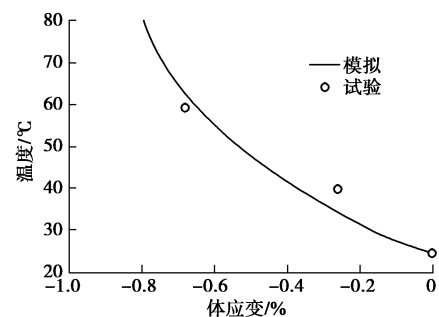
和较低超固结土加热将引起热收缩<sup>[43-45]</sup>。对于较高吸力状态的非饱和土, 土体处于超固结状态, 并且吸力越高, 其超固结比越大<sup>[41]</sup>。因此, 对不同吸力的非饱和土加热, 将会呈现出与不同超固结比饱和土相类似的特性。由此可见, 吸力对非饱和土的热体应变有较大的影响, 可以解释为由于吸力增大而导致非饱和黏土的硬化。



(a)  $s=9 \text{ MPa}$



(b)  $s=39 \text{ MPa}$



(c)  $s=110 \text{ MPa}$

图 2 恒定净应力 ( $p_0=0.1 \text{ MPa}$ ) 下, 不同吸力试样加热 ( $25^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ ) 引起的体应变变化

Fig. 2 Changes of volumetric strain during heating (from  $25^\circ\text{C}$  to  $80^\circ\text{C}$ ) under constant pressure ( $p_0=0.1 \text{ MPa}$ ) for various suction values



表2 模型参数

Table 2 Model parameters

参数	热力学模型参数												
	$G_s$	$B_0$	$M$	$c_T$	$c_2$	$c_4$	$c$	$\beta_T$	$\lambda(0)$	$c_0$	$c_s$	$c_3$	$c_5$
值	2.65	$1.41 \times 10^8$ kPa	1.23	$0.0026^\circ\text{C}^{-1}$	$7470.36 \text{ s}^2$	0.25 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{kPa})$	0.0061	$10^{-5}^\circ\text{C}^{-1}$	0.20	0.29	0.0022 $\text{kPa}^{-1}$	$17000 \text{ s}^2$	60.34 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$
参数	土水特征曲线参数												
	$a_1$	$n$	$b_1$	$b_2$									
值	9.502	1.627	0.495	$-493.5^\circ\text{C}$									

本模型的热体应变通过下式反映：

$$\dot{p} = \frac{\rho_L G_s \tilde{p}}{\lambda(s) \rho_d} \dot{\varepsilon}_v + 1.5B(\varepsilon_v^e + \beta_T \Delta T)^{0.5} \dot{\varepsilon}_v^e + 1.5B\beta_T(\varepsilon_v^e + \beta_T \Delta T)^{0.5} \dot{T} \quad (37)$$

该式是式(24)的时间导数形式，可以看出热体应变与净应力  $\tilde{p}$ ，弹性应变  $\varepsilon_v^e$  及其变化率，以及温度变化率等有关，模型可以近似的模拟试验结果，见图2。

图3给出了控制吸力不变 ( $s=9, 39, 110 \text{ MPa}$ )，不同温度下 ( $25^\circ\text{C}, 80^\circ\text{C}$ ) 固结压缩曲线的对比。其中，实线为  $25^\circ\text{C}$  的模拟结果，虚线为  $80^\circ\text{C}$  的模拟结果。

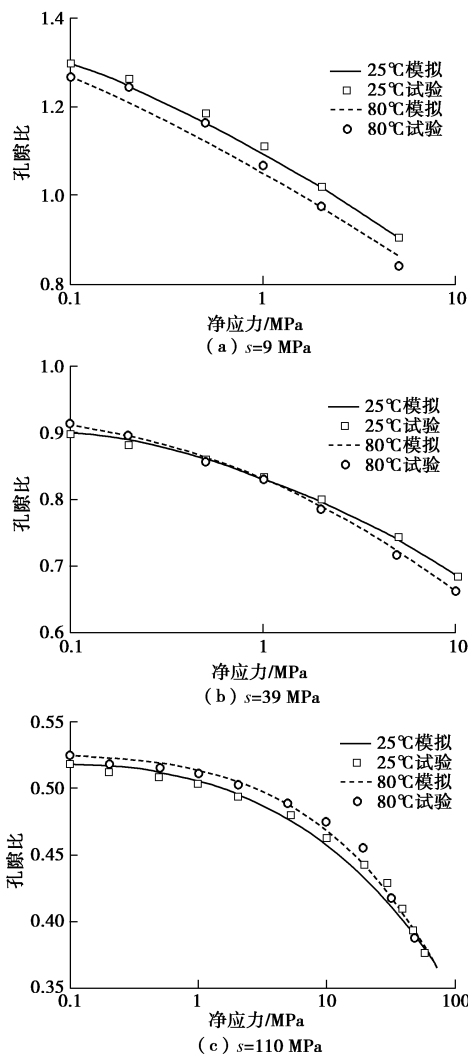


图3 不同吸力试样的不同温度状态固结压缩曲线对比

Fig. 3 Comparison between two compression curves at constant suction under different temperatures

可以看出，非饱和土压缩曲线的斜率受温度的影响较小，而更大程度上取决于吸力的大小。并且随着吸力的增大，相对于  $25^\circ\text{C}$  的状态， $80^\circ\text{C}$  时的压缩曲线逐渐从下方转移到上方，即从热收缩逐渐变为热膨胀，与图2结果相对应。模型可以较好的反映出这种变化。

(2) 剪切特性

Uchaipichat 等<sup>[46]</sup> 对非饱和粉质黏土进行了一系列的三轴试验来研究其升温时的热水力耦合特性，包括控制吸力和温度的固结和剪切试验，控制温度的干燥试验等。采用其三轴剪切试验的数据来验证所提出的模型描述非饱和土在不同温度和吸力下剪切特性的能力，表2给出了所需的模型参数。

对于三轴排水剪切试验，剪应力  $q$  与平均净应力  $\tilde{p}$  之间有如下关系：

$$\dot{\tilde{p}} = \frac{1}{3} \dot{q} \quad (38)$$

结合式(24)，(26)，可以得出体应变的变化率。图4给出了在不同温度和吸力控制下的剪应力-应变

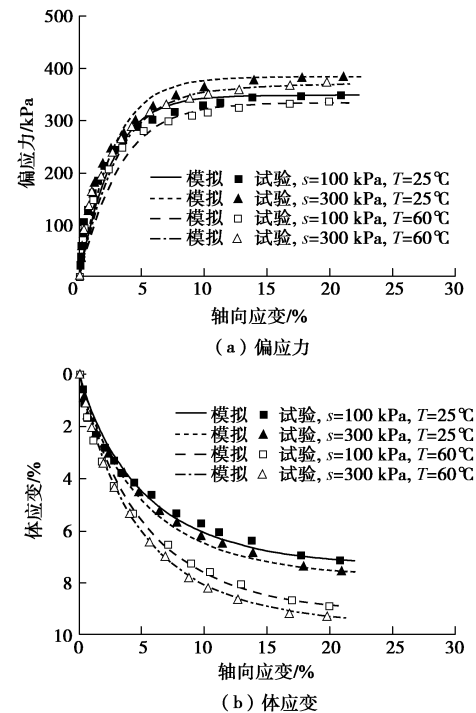


图4 控制温度和吸力的三轴剪切试验模拟 ( $p'_0=150 \text{ kPa}$ )

Fig. 4 Simulations of suction- and temperature-controlled triaxial shear tests at initial mean effective stress of 150 kPa



变关系和剪切过程中体应变的演化过程。可以看出, 温度一定时, 剪切强度和体应变都随吸力的增大而增大; 吸力一定时, 剪切强度随温度的增加而减小, 而体应变随温度的增加而增大。模型的模拟结果能与试验结果较好的吻合, 说明所提出的模型可以描述不同吸力和温度下的剪切特性。

## 4 结 语

基于颗粒固体热动力学理论以及混合物理论, 结合改进的 SWCC 模型, 考虑温度和饱和度变化引发相应的颗粒层次能量耗散过程, 本文提出一个非饱和土的热水力耦合模型。与一般的非饱和土模型不同, 模型不涉及屈服准则、流动法则、硬化准则等概念, 而是引入颗粒熵和颗粒温度的概念, 从理论上确定热力学体系的耗散结构组成以及迁移系数关系, 通过热力学恒等式得出非弹性变形的本构关系, 将土体的耗散机制与其引发的宏观物理力学行为描述为迁移系数和能量函数模型。这些使得模型能够更深入描述非饱和土体的能量耗散机理及其引发的宏观力学特性, 从而能够在统一理论框架中建立非饱和土在复杂环境下的耦合模型。

通过与现有试验结果的对比, 证明了模型具有描述非饱和土在不同温度和吸力下的固结和剪切特性以及非等温条件下的热体应变特性的能力。

### 参考文献:

- [1] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(2): 201 - 272. (CHEN Zheng-han. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(2): 201 - 272. (in Chinese))
- [2] BAI B, RAO D Y, XU T, et al. SPH-FDM boundary for the analysis of thermal process in homogeneous media with a discontinuous interface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, **117**: 517 - 526.
- [3] ALONSO E E, GENS A, JOSA A. A constitutive model for partially saturated soils[J]. Géotechnique, 1990, **40**(3): 405 - 430.
- [4] WHEELER S J, SIVAKUMAR V. An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil[J]. Géotechnique, 1995, **45**(1): 35 - 53.
- [5] 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. (in Chinese))
- [6] KHALILI N, LORET B. An elasto-plastic model for non-isothermal analysis of flow and deformation in unsaturated porous media: formulation[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, **38**(46/47): 8305 - 30.
- [7] 姚仰平, 牛 雷, 崔文杰, 等. 超固结非饱和土的本构关系[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(6): 833 - 839. (YAO Yang-ping, NIU Lei, CUI Wen-jie, et al. UH model for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(6): 833 - 839. (in Chinese))
- [8] GALLIPOLI D, GENS A, SHARMA R, et al. An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behavior[J]. Géotechnique, 2003, **53**(1): 123 - 135.
- [9] SHENG D C, ZHOU A N. Coupling hydraulic with mechanical models for unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **48**(5): 826 - 840.
- [10] 蔡国庆, 赵成刚, 刘 艳, 等. 考虑温度影响的非饱和土变形特性[J]. 科学通报, 2011, **56**(18): 1487 - 1496. (CAI GUO-qing, ZHAO Cheng-gang, LIU Yan, et al. Volume change behavior of unsaturated soils under non-isothermal conditions[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, **56**(18): 1487 - 1496. (in Chinese))
- [11] DUMONT M, TAIBI S, FLEUREAU J M, et al. A thermohydro-mechanical model for unsaturated soils based on the effective stress concept[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2011, **35**(12): 1299 - 1317.
- [12] MASIN D, KHALILI N. A thermo-mechanical model for variably saturated soils based on hypoplasticity[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2012, **36**(12): 1461 - 1485.
- [13] SULEM J, LAZAR P, Vardoulakis I. Thermo-poro-mechanical properties of clayey gouge and application to rapid fault shearing[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2007, **31**(3): 523 - 540.
- [14] WANG X, SHAO H, HESSER J, et al. Numerical analysis of thermal impact on hydro-mechanical properties of clay[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2004, **6**(5): 405 - 416.

- [15] ZHOU A N, SHENG D C, LI J. Modelling water retention and volume change behaviours of unsaturated soils in non-isothermal conditions[J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, **55**: 1 - 13.
- [16] SANCHEZ M, GENS A, VILLAR M V, et al. Fully coupled thermo-hydro-mechanical double-porosity formulation for unsaturated soils[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2016, **16**(6): 1 - 38.
- [17] ABED A A, SOLOWSKI W T. A study on how to couple thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated soils: Physical equations, numerical implementation and examples[J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, **92**: 132 - 155.
- [18] BELLIA Z, GHEMBAZA M S, BELAL T. A thermo-hydro-mechanical model of unsaturated soils based on bounding surface plasticity[J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, **69**: 58 - 69.
- [19] HOULSBY G T, PUZRIN A M. A thermomechanical framework for constitutive models for rate-independent dissipative materials[J]. *International Journal of Plasticity*, 2000, **16**(9): 1017 - 1047.
- [20] LI X S. Thermodynamics-based constitutive framework for unsaturated soils: 1 theory[J]. *Géotechnique*, 2007, **57**(5): 411 - 422.
- [21] TEMMEN H, PLEINER H, LIU M, et al. Convective nonlinearity in non-Newtonian fluids[J]. *Physical Review Letters*, 2000, **84**: 3228 - 3231.
- [22] JIANG Y M, LIU M. Granular solid hydrodynamics[J]. *Granular Matter*, 2009, **11**(3): 139 - 156.
- [23] DE GENNES P G. Granular matter: a tentative view[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1999, **71**(2): 374 - 382.
- [24] 张志超, 程晓辉. 饱和土非等温固结和不排水剪切的热力学本构模型[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(7): 1297 - 1306. (ZHANG Zhi-chao, CHENG Xiao-hui. Thermodynamic constitutive model for non-isothermal consolidation and undrained shear behaviors of saturated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(7): 1297 - 1306. (in Chinese))
- [25] ZHANG Z C, CHENG X H. A thermo-mechanical coupled constitutive model for clay based on extended granular solid hydrodynamics[J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, **80**: 373 - 382.
- [26] ZHANG Z C. A thermodynamics-based theory for the thermo-poro-mechanical modeling of saturated clay[J]. *International Journal of Plasticity*, 2017, **90**: 164 - 185.
- [27] 蒋亦民, 刘佑. 水-气-颗粒固体三相混合系统的流体动力学[J]. *物理学报*, 2013, **62**(20): 284 - 292. (JIANG Yi-min, LIU Mario. Hydrodynamic theory of grains, water and air[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(20): 284 - 292. (in Chinese))
- [28] 孙其诚, 厚美瑛, 金峰, 等. 颗粒物质物理与力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (SUN Qi-cheng, HOU Mei-ying, JIN Feng, et al. *Physics and mechanics of granular matter*[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [29] JIANG Y M, LIU M. Applying GSH to a wide range of experiments in granular media[J]. *The European Physical Journal E*, 2015, **38**(15): 1 - 27.
- [30] ONSAGER L. Reciprocal relations in irreversible processes[J]. *Physical Review*, 1931, **37**(2): 405 - 426.
- [31] DE GROOT S R, MAZUR P. Non-equilibrium thermodynamics[M]. New York: Dover Publications, 1984.
- [32] 钱祖文. 颗粒介质中的黏滞系数[J]. *物理学报*, 2012, **61**(13): 1 - 4. (QIAN Zu-wen. Viscosity coefficient in granular medium[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(13): 1 - 4. (in Chinese))
- [33] LU N, WILLIAM J. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012. (NING L, WILLIAM J. *Unsaturated soil mechanics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. (in Chinese))
- [34] HOULSBY G T, AMOROSI A, ROJAS E. Elastic moduli of soils dependent on pressure: a hyperelastic formulation[J]. *Géotechnique*, 2005, **55**(5): 383 - 392.
- [35] LANDAU L D, LIFSHITZ E M. *Theory of elasticity*[M]. 3rd ed. Oxford: Pergamon Press, 1986.
- [36] SIVAKUMAR V. A critical state framework for unsaturated soil[D]. Sheffield: University of Sheffield, 1993.
- [37] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, **44**: 892 - 898.
- [38] TARANTINO A. A water retention model for deformable soils[J]. *Géotechnique*, 2009, **59**(9): 751 - 762.
- [39] GRANT S A, SALEHZADEH A. Calculation of temperature effects on wetting coefficients of porous solids and their capillary pressure functions[J]. *Water Resources Research*, 1996, **32**(2): 261 - 270.
- [40] 朱启银. 软黏土的流变特性及流变参数统一性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014. (ZHU Qi-yin. *Time-dependent behavior and uniqueness of its key parameters for soft clays*[D].

- Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. (in Chinese))
- [41] TANG A M, CUI Y J, BARNEL N. Thermo-mechanical behaviour of a compacted swelling clay[J]. Géotechnique, 2008, **58**(1): 45 - 54.
- [42] TANG A M, CUI Y J. Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, **42**(1): 287 - 296.
- [43] SULTAN N, DELAGE P, CUI Y J. Temperature effects on the volume change behaviour of boom clay[J]. Engineering Geology, 2002, **64**(2/3): 135 - 145.
- [44] BAI B, SHI X Y. Experimental study on the consolidation of saturated silty clay subjected to cyclic thermal loading[J]. Geomechanics and Engineering, 2017, **12**(4): 707 - 721.
- [45] 杨光昌, 白冰. 考虑超固结效应的不同温度路径下饱和粉质黏土的热固结[J]. 岩土力学, 2018, **39**(1): 71 - 77. (YANG Guang-chang, BAI bing. Thermal consolidation of saturated silty clay considering overconsolidation effect with different heating-cooling paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(1): 71 - 77. (in Chinese))
- [46] UCHAIPICHAT, A, KHALILI, N. Experimental investigation of thermo-hydro-mechanical behaviour of an unsaturated silt[J]. Géotechnique, 2009, **59**(4): 339 - 353.

## 第一届全国水工建筑物健康诊断技术高端论坛(1号通知)

2019年11月12—14日, 重庆

随着我国水资源开发与利用的蓬勃发展, 水工建筑物的安全运行与健康诊断技术问题日益突出。为了加强水工建筑物健康诊断技术学术交流, 促进水工建筑物健康诊断技术发展, 由重庆交通大学、中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会、中国水利学会岩土力学专业委员会共同主办的“第一届全国水工建筑物健康诊断技术高端论坛”将于2019年11月12—14日在重庆召开。本次论坛将邀请国内著名专家、学者做高水平学术报告。在此, 热忱欢迎来自全国高校科研院所和工程建设领域的专家、学者、师生和技术人员踊跃参加。

**论坛主题:** 水工建筑物健康诊断关键理论与技术创新。专题包括: ①水工建筑物病害机理研究及安全监测技术; ②水工建筑物健康诊断技术及长期性能评价; ③水工建筑物病害治理理论及病害修复技术; ④其他与水工建筑物健康诊断相关的问题。

**论坛时间:** 2019年11月12—14日

**论坛地点:** 重庆华商国际会议中心

**主办单位:** ①重庆交通大学; ②中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会; ③中国水利学会岩土力学专业委员会。

**承办单位:** ①重庆交通大学河海学院; ②水工建筑物健康诊断技术重庆市高校工程研究中心; ③水利水运工程教育部重点实验室; ④长江航运工程与智能航道技术省部共建协同创新中心; ⑤国家内河航道整治工程技术研究中心。

**日程安排:** ①2019年11月12日, 全天, 报到; ②2019年11月13日, 全天, 学术报告与研讨; ③2019年11月14日, 上午, 工程考察。

**注册费用:** 正式代表:1600元; 学生代表:600元。

**住宿标准:** 单间(338元/晚); 标间(338元/晚)。

**联系人:** 王俊杰, 联系电话:023-62896924; 13883116938, 传真: 023-62652841, E-mail: topforumcqjtu@163.com。

(第一届全国水工建筑物健康诊断技术高端论坛组委会 供稿)