

DOI: 10.11779/CJGE202103018

# 非饱和土热-水-力全耦合本构模型及其验证

刘 祎<sup>1, 2</sup>, 蔡国庆<sup>1, 2</sup>, 李 舰<sup>1, 2</sup>, 赵成刚<sup>2, 3</sup>

(1. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044;  
3. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 在地热资源开发与利用、核废料地质处理、垃圾填埋场等诸多岩土工程领域都需要考虑温度对非饱和土性质的影响。为了更为全面描述非饱和土在热-水-力耦合条件下的变形及持水特性, 以平均土骨架应力、修正吸力和温度为应力变量, 以比体积和饱和度为应变变量, 建立了一个非饱和土热-水-力全耦合本构模型。模型通过屈服面方程及屈服面之间的耦合规律来反映热-水-力之间的相互影响, 主要包含温度和饱和度对力学特性的影响, 吸力和超固结比(应力历史)对热变形的影响, 密度、温度和滞回效应对持水特性的影响, 温度、应力和滞回效应对干化及湿化变形的影响。利用建立的模型, 对不同应力路径下的试验进行预测。通过预测与试验结果的对比, 验证了模型的适用性。

**关键词:** 非饱和土; 本构模型; 热-水-力耦合; 温度; 吸力

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)03-0547-09

作者简介: 刘 祎(1995—), 女, 博士研究生, 主要从事非饱和土力学等方面的研究工作。E-mail: gqcai1001@163.com。

## A fully coupled thermo-hydro-mechanical constitutive model for unsaturated soils and its verification

LIU Yi<sup>1, 2</sup>, CAI Guo-qing<sup>1, 2</sup>, LI Jian<sup>1, 2</sup>, ZHAO Cheng-gang<sup>2, 3</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;  
2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. School of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** For many geotechnical problems, such as development and utilization of geothermal resources, nuclear waste disposal and refuse landfills, we need to consider the effects of temperature on the properties of unsaturated soils. In order to describe the volume change and water retention behavior of unsaturated soils under thermo-hydro-mechanical coupling conditions more comprehensively, a fully coupled thermo-hydro-mechanical constitutive model for unsaturated soils is proposed. In the proposed model, the average soil skeleton stress, modified suction and temperature are taken as stress variables, while the specific volume and degree of saturation are taken as strain variables. The thermo-hydro-mechanical interactions are reflected through the yield surface equations and the coupling laws between yield surfaces by the model. The thermo-hydro-mechanical interactions mainly include the influences of temperature and saturation on mechanical behavior, the influences of suction and overconsolidation ratio (stress history) on thermal deformation, the influences of density, temperature and hysteresis effect on water retention behavior, and the influences of temperature, stress and hysteresis effect on deformation during drying/wetting process. The predictions are performed on the test results under different stress paths using the proposed model. The applicability of the model is verified by the comparisons between predicted and experimental results.

**Key words:** unsaturated soil; constitutive model; thermo-hydro-mechanical coupling; temperature; suction

## 0 引 言

土的热-水-力耦合特性研究是当今非饱和土力学领域中的一个热点问题, 在地热资源开发与利用、核废料地质处理、垃圾填埋场等等工程应用中日益受到重视。由于耦合机理的复杂性, 如何建立适用可靠的热-水-力耦合本构模型成为学者们所关注的问题。

近 20 a 来, 众多学者基于试验研究成果建立了非

饱和土热-水-力耦合本构模型, 并重点研究了耦合条件下土的变形特性。Gens<sup>[1]</sup>将热软化规律(即超固结土的先期固结压力随温度的增加而减小)引入到已有

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078031, 51722802, 51678041); 北京市自然科学基金面上项目(8202038); 中央高校基本科研业务费项目(2020CZ002)

收稿日期: 2020-04-01

\*通信作者(E-mail: guoqing.cai@bjtu.edu.cn)

的非饱和土本构模型中,提出了第一个非饱和土热-水-力耦合本构模型。随后,采用类似的研究思路,学者们<sup>[2-8]</sup>先后在已有的非饱和土本构模型或饱和土的热-力耦合模型基础上,考虑温度和吸力的影响,建立了非饱和土热-水-力耦合本构模型。然而,现有的多数模型未能考虑吸力和应力历史(超固结比)对土的热变形的影响,同时不能预测不同应力和温度水平下的干化和湿化变形。

此外,温度对持水特性的影响也不容忽视。学者们<sup>[2, 7, 9-14]</sup>根据热力学理论推导出等体积含水率或等质量含水率下吸力随温度的变化方程,然后将其代入到常温下的非饱和土的土-水特征曲线(SWCC)模型中,并依据试验结果修正模型参数,建立考虑温度影响的SWCC模型。除秦冰等<sup>[14]</sup>建立的考虑温度影响的SWCC模型是针对高吸力段外(在高吸力段,密度对持水特性基本没有影响),这部分考虑温度的SWCC研究中大多忽略了密度和滞回效应的影响<sup>[15-16]</sup>,即使考虑密度影响,也仅是通过初始干密度来反映,未能考虑水力加载过程中的变形。也有一些学者<sup>[4, 8, 17]</sup>建立的非饱和土热-水-力耦合本构模型中包含水力部分,作为水力部分的SWCC模型同时考虑了密度、温度和滞回效应的影响,但由于相关试验数据的缺乏,未能充分验证模型水力部分的适用性。

为了更为全面地描述非饱和土在热-水-力耦合条件下的变形及持水特性,建立了一个非饱和土热-水-力全耦合弹塑性本构模型。编程实现了所建立耦合本构模型的预测功能,采用文献中不同应力路径下的试验,对模型参数进行了标定,并通过模型预测结果与试验结果的对比,验证了所建立模型的适用性。

## 1 模型建立

### 1.1 应力和应变变量

拟建立的本构模型包含两部分,力学模型和SWCC模型。对于力学模型而言,选取平均土骨架应力 $\sigma'$ 和温度 $T$ 作为应力变量,并选取比体积 $v$ 和饱和度 $S_r$ 作为应变变量。对于SWCC模型而言,选取修正吸力 $s'$ 和温度 $T$ 作为应力变量,并选取比体积 $v$ 和饱和度 $S_r$ 作为应变变量。吸力对力学特性的作用包括两点<sup>[15, 18]</sup>: ①吸力降低了土孔隙中流体的平均压力,从而使土骨架应力增加; ②因毛细现象,吸力使土颗粒接触处产生额外“黏结”作用。对于前者而言,平均孔隙压力可表示为吸力与饱和度的乘积,并作为平均土骨架应力 $\sigma'$ 的一部分。对于后者而言,额外“黏结”作用的影响程度与非饱和土中弯液面个数密切相关,并利用饱和度 $S_r$ 进行表征<sup>[15, 18]</sup>。对于建立的力学

模型而言,选取了饱和度 $S_r$ 作为应变变量,用于描述“黏结”作用对力学特性的影响。然而,饱和度 $S_r$ 并不是一个已知变量,其变化规律需要根据SWCC模型进行确定。类似地,对于建立的SWCC模型而言,选取了比体积 $v$ 作为应变变量,用于描述变形对持水特性的影响。然而,比体积 $v$ 也并不是一个已知变量,其变化规律需要根据力学模型确定。实际上,力学模型和SWCC模型是耦合的,在后续对模型描述时,不再区分力学模型和SWCC模型,综合为整体进行描述。

平均土骨架应力 $\sigma'$ 定义式如下所示:

$$\sigma' = \sigma + s \times S_r \delta \quad (1)$$

式中 $\sigma$ 为净总应力; $s$ 为基质吸力(以下简称吸力); $S_r$ 为饱和度; $\delta$ 为单位张量。修正吸力 $s'$ 定义为

$$s' = ns \quad (2)$$

式中, $n$ 为孔隙率。

对于三轴条件下,应力变量可简化为:平均有效应力 $p'$ 、偏应力 $q$ 、修正吸力 $s'$ 和温度 $T$ 。

### 1.2 弹性变形

弹性体应变 $d\varepsilon_v^e$ 和弹性剪应变 $d\varepsilon_s^e$ 分别表示为

$$d\varepsilon_v^e = \frac{\kappa}{vp'} dp' - \alpha_T dT = \frac{1}{K} dp' - \alpha_T dT \quad (3)$$

$$d\varepsilon_s^e = \frac{2(1+\mu)}{9(1-2\mu)K} dq = \frac{1}{3G} dq \quad (4)$$

式中 $\kappa$ 为 $v - \ln p'$ 平面内等向回弹曲线的斜率; $\alpha_T$ 为土骨架的热膨胀系数; $K$ 和 $G$ 分别为弹性体积模量和弹性剪切模量; $\mu$ 为泊松比。

典型的考虑滞回效应的SWCC弹塑性模型如图1所示,包含主干化线、主湿化线和扫描线<sup>[15, 18]</sup>。若干化或湿化路径是沿着扫描线移动,会产生饱和度的弹性变化,该变化对应的是孔隙水-气交界面的可逆运动。若干化或湿化路径是沿着主干化线或主湿化线移动,会产生饱和度的塑性变化,该变化对应的是孔隙水的吸收和排出。

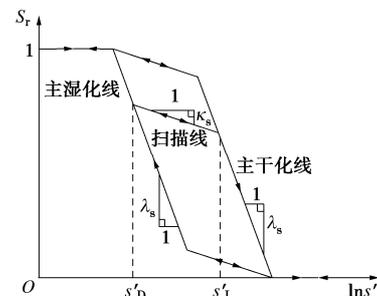


图1 考虑滞回效应的土-水特征曲线弹塑性模型

Fig. 1 Elasto-plastic model for soil-water characteristic curve considering hysteresis effect

拟建立的SWCC模型是在 $S_r - \ln s'$ 平面内,不能直接通过试验测量。需要通过试验测定水力加载过程

中的变形及  $S_r - \ln s$  平面内的 SWCC。由比体积 - 吸力 ( $v - s$ ) 和饱和度 - 吸力 ( $S_r - \ln s$ ) 的关系可换算得到饱和度 - 修正吸力 ( $S_r - \ln s'$ ) 的关系, 即可得到  $S_r - \ln s'$  平面内的 SWCC。依据 Uchaipichat 等<sup>[19]</sup>对压实粉土进行的干化试验结果(干缩变形及  $S_r - \ln s$  平面内的 SWCC)进行了换算, 得到了不同温度 (25°C、40°C、60°C) 和不同净应力 (50, 200 kPa) 下  $S_r - \ln s'$  平面内的 SWCC, 如图 2 所示。

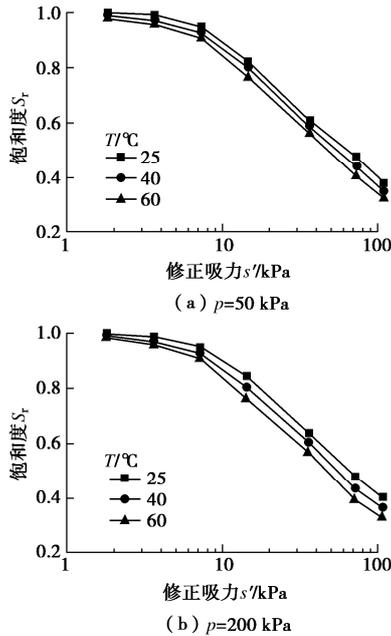


图 2  $S_r - \ln s'$  平面内的土-水特征曲线<sup>[19]</sup>

Fig. 2 Soil-water characteristic curves in  $S_r - \ln s'$  plane<sup>[19]</sup>

与塑性饱和度相比, 弹性饱和度的数值较小, 且主要是由修正吸力引起的, 忽略温度和有效应力对弹性饱和度的影响, 则弹性饱和度可由下式计算:

$$dS_r^e = \frac{-\kappa_s}{s'} ds' \quad (5)$$

式中,  $\kappa_s$  为  $S_r - \ln s'$  平面扫描线的斜率 (如图 1 所示)。

### 1.3 屈服条件

模型的第一个屈服面为加载屈服面 (LS), 它不仅描述了修正吸力和温度对先期固结压力的影响, 还控制着正常固结土和弱超固结土的热变形。根据 Wheeler 等<sup>[15]</sup>的研究, 因毛细现象使土颗粒接触处产生的额外“黏结”作用影响程度与弯液面引起的吸力 (即修正吸力) 相关性很小, 而非饱和土中弯液面个数 (以饱和度表征) 密切相关。与饱和度的变化相比, 修正吸力的变化对土骨架的稳定性 (土骨架抵抗滑移的能力, 以先期固结压力表征) 影响很小。因此, 在提出的 LS 表达式中, 忽略了修正吸力对先期固结压力的影响。通过 LS 硬化规律包含塑性饱和度作用来体现额外“黏结”作用。考虑热软化规律, LS 表达式采用与饱和土加载屈服线 (LY)<sup>[20]</sup>类似的表达式,

具体表示为

$$p' - p'_0 \exp[-\alpha(T - T_{ref})] = 0 \quad (6)$$

式中,  $p'_0$  和  $p'$  分别为参考温度  $T_{ref}$  和实际温度  $T$  下的先期固结压力,  $\alpha$  为控制 LS 形状的参数。

将 LS 与修正剑桥模型的屈服面相结合, 扩展到三轴应力空间, 可表示为

$$q^2 + M^2 p' \{p' - p'_0 \exp[-\alpha(T - T_{ref})]\} = 0 \quad (7)$$

式中,  $M$  为临界状态参数。

当恒温下加载到达 LS 时, 产生的塑性变形为

$$d\varepsilon_{vL}^p = \frac{\lambda - \kappa}{v} \frac{dp'_0}{p'_0} \quad (8)$$

式中,  $\lambda$  为  $v - \ln p'$  平面内正常压缩线的斜率 (由等向压缩试验得到)。

对于 LS, 不管应力路径如何, 采用相同的硬化规律。当加热正常固结土或弱超固结土时, 由式 (6) 和式 (8) 可推导出热塑性变形:

$$d\varepsilon_{vL}^p = \frac{\lambda - \kappa}{v} \alpha dT \quad (9)$$

塑性剪应变可通过下式计算:

$$d\varepsilon_s^p = \frac{2p'q}{M^2 p'^2 - q^2} d\varepsilon_{vL}^p \quad (10)$$

第二个屈服面为温度屈服面 (TS), 它描述了具有不同超固结比的土, 热膨胀变形转变为热收缩变形的过渡温度 (即屈服温度) 的变化。与饱和土的热变形类似, 吸力对非饱和土热变形的影响实际上是通过改变土的初始超固结比实现, 先期固结压力和平均有效应力均可能随吸力的变化而变化。TS 的表达式包含了吸力的部分影响: 吸力不同, 平均有效应力不同, 则屈服温度不同。同时, 通过 TS 硬化规律包含塑性饱和度作用来体现吸力另外一部分影响: 水力加载到达吸力屈服面 (SS), 产生饱和度的塑性变化, 改变先期固结压力和屈服温度。TS 表达式采用与饱和土的热加载屈服线 (TY)<sup>[20]</sup>类似的表达式, 具体表示为

$$T - T_0 + \xi \ln \frac{p'}{p'_{ref}} = 0 \quad (11)$$

式中,  $T_0$  和  $T$  分别为参考平均有效应力  $p'_{ref}$  和实际平均有效应力  $p'$  下的屈服温度,  $\xi$  为控制 TS 形状的参数。

当加热超固结土到达 TS, 产生的热塑性变形可通过下式计算:

$$d\varepsilon_{vT}^p = \frac{\lambda - \kappa}{v} \alpha dT_0 \quad (12)$$

因此, 总的塑性体积变形可叠加为

$$d\varepsilon_v^p = d\varepsilon_{vL}^p + d\varepsilon_{vT}^p \quad (13)$$

第三个屈服面为吸力屈服面 (SS), 包含吸力增加屈服面 (SSI) 和吸力减小屈服面 (SSD), 它们描述了

不同温度下, 主干化和主湿化路径上屈服吸力的变化。由于温度对毛细作用和吸附作用的影响(表面张力、接触角、液体密度等), 高温下土的持水性减弱<sup>[10, 14, 19, 21-24]</sup>。在常温下线性表达式的基础上<sup>[15]</sup>, 提出考虑温度影响的 SSI 和 SSD 表达式, 如下所示:

$$s' - s'_{VD} + \gamma \ln \frac{T}{T_{ref}} = 0 \quad (14)$$

式中,  $s'_{VD}$  表示  $s'_i$  或  $s'_D$ , 分别为参考温度  $T_{ref}$  下扫描线和主干化线或主湿化线的交叉点的吸力, 即主干化和主湿化路径上的屈服吸力(如图 1 所示);  $s'$  为实际温度  $T$  下主干化或主湿化路径上的屈服吸力;  $\gamma$  为控制 SS 形状的参数。为了简便, 将 SSI 和 SSD 用相同表达式进行描述, 仅是硬化参数不同, 即  $s'_{VD}$  表示  $s'_i$  或  $s'_D$ 。采用相同表达式来描述 SSI 和 SSD, 意味着温度不改变滞回圈的大小和形状, 仅改变滞回圈的位置, 认为滞回圈随温度的变化而发生平移。

干化和湿化过程中产生的塑性饱和度可通过下式计算:

$$dS_r^p = -(\lambda_s - \kappa_s) \frac{ds'_{VD}}{s'_{VD}} \quad (15)$$

式中,  $\lambda_s$  为  $S_r - \ln s'$  平面主干化线或主湿化线的斜率(如图 1 所示)。

图 3 为模型在平均有效应力  $p'$  - 修正吸力  $s'$  - 温度  $T$  空间屈服面的计算图, 屈服面参数取值如下:  $\alpha = 0.01 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $\xi = 8 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $\gamma = 3 \text{ kPa}$ 。

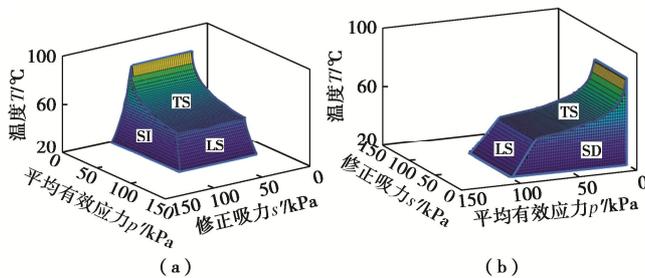


图 3 平均有效应力 - 修正吸力 - 温度空间屈服面  
Fig. 3 Yield surfaces in mean effective stress-modified suction-temperature space

#### 1.4 硬化规律

屈服面之间的耦合规律控制着彼此之间的联动<sup>[15]</sup>, 和屈服面方程一样, 反映了热-水-力之间的相互影响。本模型的耦合规律可表达为

$$\frac{dp'_0}{p'_0} = k_1 \frac{ds'_{VD}}{s'_{VD}} + \alpha dT_0 \quad (16)$$

$$dT_0 = \xi \left( \frac{dp'_0}{p'_0} + k_1 \frac{ds'_{VD}}{s'_{VD}} \right) \quad (17)$$

$$\frac{ds'_{VD}}{s'_{VD}} = k_2 \left( \frac{dp'_0}{p'_0} + \alpha dT_0 \right) \quad (18)$$

式(16)中  $k_1$  为耦合参数, 表示 SS 移动, 带动 LS 移动。这是由于当干化或湿化过程到达 SS 时, 产生饱和度的塑性变化, 弯液面和重力水的比例改变, 从而影响土骨架的稳定性, 即改变先期固结压力的大小(额外“黏结”作用<sup>[15]</sup>)。式(16)中  $\alpha$  表示 TS 移动, 带动 LS 移动。这是由于加热超固结土的热塑性变形为收缩变形, 可以等效为压缩变形。式(17)中  $\xi$  表示 LS 移动, 带动 TS 移动。这是由于压缩变形同样可以等效为热收缩变形。式(17)中  $\xi k_1$  表示 SS 移动, 带动 TS 移动。这是由于当干化或湿化过程到达 SS 时, 先期固结压力会改变, 从而改变土的初始超固结比。式(18)中  $k_2$  为耦合参数, 表示 LS 移动, 带动 SS 移动。这是由于加载到达 LS 时, 产生塑性压缩变形, 孔隙和孔隙通道减小, 从而使得主干化线或主湿化线移动, 即屈服吸力改变<sup>[15, 25]</sup>。式(18)中  $k_2 \alpha$  表示 TS 移动, 带动 SS 移动。这是由于加载到达 TS 时, 产生热收缩变形, 孔隙和孔隙通道减小, 从而使得主干化线或主湿化线移动, 即屈服吸力改变。

通过塑性变形的表达式(式(8), (12), (15)) 和耦合规律(式(16), (17), (18)) 可以推导出 LS、TS、SS 的硬化规律, 如下所示:

$$\frac{dp'_0}{p'_0} = \frac{v}{\lambda - \kappa} (d\varepsilon_{vL}^p + d\varepsilon_{vT}^p) - k_1 \frac{dS_r^p}{\lambda_s - \kappa_s} \quad (19)$$

$$dT_0 = \frac{v}{\alpha(\lambda - \kappa)} d\varepsilon_{vT}^p + \xi \frac{v}{\lambda - \kappa} d\varepsilon_{vL}^p - k_1 \xi \frac{dS_r^p}{\lambda_s - \kappa_s} \quad (20)$$

$$\frac{ds'_{VD}}{s'_{VD}} = -\frac{dS_r^p}{\lambda_s - \kappa_s} + k_2 \frac{v}{\lambda - \kappa} (d\varepsilon_{vL}^p + d\varepsilon_{vT}^p) \quad (21)$$

#### 1.5 模型参数及确定方法

所建立的模型参数共有 12 个, 包括弹塑性参数 ( $\kappa$ ,  $\mu$ ,  $\lambda$ ,  $M$ )、水力参数 ( $\kappa_s$ ,  $\lambda_s$ )、土骨架热膨胀系数 ( $\alpha_T$ )、水-力耦合参数 ( $k_1$ ,  $k_2$ ) 和热-水-力耦合参数 ( $\alpha$ ,  $\xi$ ,  $\gamma$ )。弹塑性参数可通过土的三轴试验确定, 水力参数可通过干化或湿化试验确定, 热膨胀系数可通过升温或降温试验确定, 参数  $k_1$  可通过不同吸力下的等向压缩试验确定, 参数  $\alpha$  可通过不同温度下的等向压缩试验确定, 参数  $\xi$  可通过不同超固结比土的升温试验确定, 参数  $\gamma$  可通过不同温度下的干化试验或湿化试验确定, 参数  $k_2$  可通过不同净应力下的干化或湿化试验确定。

## 2 模型验证

Uchaipichat 等<sup>[19]</sup>对压实粉土进行了一系列试验, 包括温度和吸力控制的等向压缩-卸载试验、温度和吸力控制的三轴排水剪切试验、不同净应力下温度控

制的干化试验、吸力控制的升温-降温试验。本文编程实现了所建立耦合本构模型的预测功能, 将模型预测结果与上述试验数据进行对比, 以验证模型的适用性。

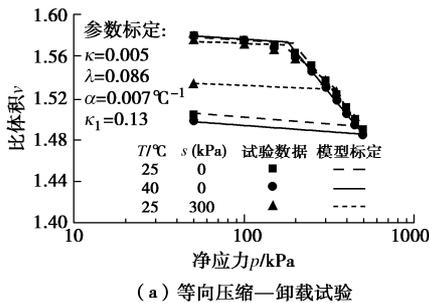
### 2.1 模型参数标定

(1) 等向压缩-卸载试验: 根据吸力  $s = 0$  kPa、温度  $T = 25^\circ\text{C}$  的试验数据标定得到  $\kappa = 0.005$ 、 $\lambda = 0.086$ ; 根据吸力  $s = 0$  kPa、温度  $T = 25^\circ\text{C}$ 、 $40^\circ\text{C}$  的试验数据标定得到  $\alpha = 0.007^\circ\text{C}^{-1}$ ; 根据吸力  $s = 0$ 、 $300$  kPa、温度  $T = 25^\circ\text{C}$  的试验数据标定得到  $k_1 = 0.13$ 。图 4 (a) 为等向压缩-卸载试验数据与模型标定结果的对比。

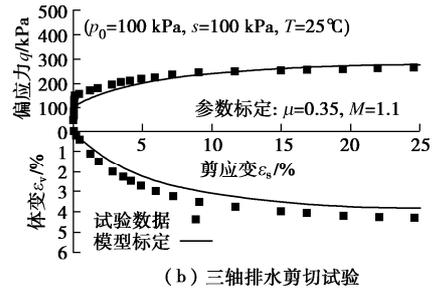
(2) 三轴排水剪切试验: 根据初始平均净应力  $p_0 = 100$  kPa、吸力  $s = 100$  kPa、温度  $T = 25^\circ\text{C}$  的试验数据标定得到  $\mu = 0.35$ 、 $M = 1.1$ 。图 4 (b) 为三轴排水剪切试验数据与模型标定结果的对比。

(3) 干化试验: 根据净应力  $p = 50$  kPa、温度  $T = 25^\circ\text{C}$  的 SWCC 标定得到  $\kappa_s = 0.035$ 、 $\lambda_s = 0.21$ ; 根据净应力  $p = 50$  kPa、温度  $T = 25^\circ\text{C}$ 、 $40^\circ\text{C}$  的 SWCC 标定得到  $\gamma = 2.4$  kPa; 根据净应力  $p = 50$ 、 $200$  kPa、温度  $T = 25^\circ\text{C}$  的 SWCC 标定得到  $k_2 = 0.01$ 。图 4 (c) 为干化试验数据 (SWCC 和干缩变形) 与模型标定结果的对比。利用所建立本构模型预测的 SWCC 分为 3 个阶段, 饱和段 (饱和度为 1 的水平直线段)、非饱和和扫描线路径段 (扫描线, 对应饱和度的弹性变化) 和非饱和和主干化路径段 (主干化线, 对应饱和度的弹塑性变化)。相应地, 利用所建立本构模型预测的干缩变形也可分为 3 个阶段。 $p = 50$  kPa、 $T = 25^\circ\text{C}$ 、 $40^\circ\text{C}$  的土样为超固结土, 在 3 个阶段的变形均为弹性变形。 $p = 200$  kPa、 $T = 25^\circ\text{C}$  的土样为正常固结土, 饱和段与非饱和和扫描线路径段均为弹塑性变形, 非饱和和主干化路径段初始阶段为弹性变形, 后为弹塑性变形。

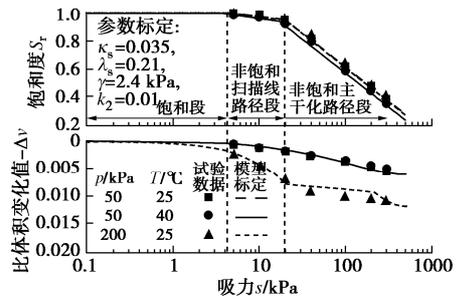
(4) 升温-降温试验: 根据净应力  $p = 50$  kPa、吸力  $s = 0$  kPa 的降温试验标定得到  $\alpha_T = 0.000034^\circ\text{C}^{-1}$ ; 根据净应力  $p = 50$  kPa、吸力  $s = 0$ 、 $100$  kPa 的升温-降温试验标定得到  $\xi = 1.6^\circ\text{C}$ 。图 4 (d) 为升温-降温试验数据与模型标定结果的对比。



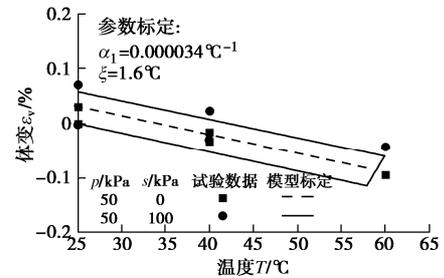
(a) 等向压缩-卸载试验



(b) 三轴排水剪切试验



(c) 干化试验



(d) 升温-降温试验

图 4 试验数据与模型标定结果对比

Fig. 4 Comparison between model results and experimental data  
2.2 温度和吸力控制的等向压缩-卸载试验

Uchaipichat 等<sup>[19]</sup>对压实粉土进行了 12 组温度和吸力控制的等向压缩-卸载试验。所有土样初始均处于饱和状态, 平均净应力  $p = 200$  kPa。首先将土样卸载至  $p = 50$  kPa, 此时土样均处于超固结状态。然后施加目标温度值 ( $T = 25^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$ ), 在维持 24 h 的平衡后, 再施加目标吸力值 ( $s = 0, 10, 100, 300$  kPa)。待吸力平衡后, 将土样净应力逐级增加至目标净应力后 ( $p = 350, 450, 500$  kPa), 卸载至  $p = 50$  kPa。

除 3 组等向压缩-卸载试验数据用以标定模型参数外, 图 5 为不同吸力、不同温度下共 9 组等向压缩-卸载试验数据与模型预测结果的对比。通过对比可以发现, 该模型可以很好地预测土在不同温度和吸力条件下的变形特性。此外, 试验结果表明: ①压缩指标 (正常压缩线和回弹线的斜率) 的大小与温度无关; ②净先期固结压力随温度的增加而减小 (热软化规律)。

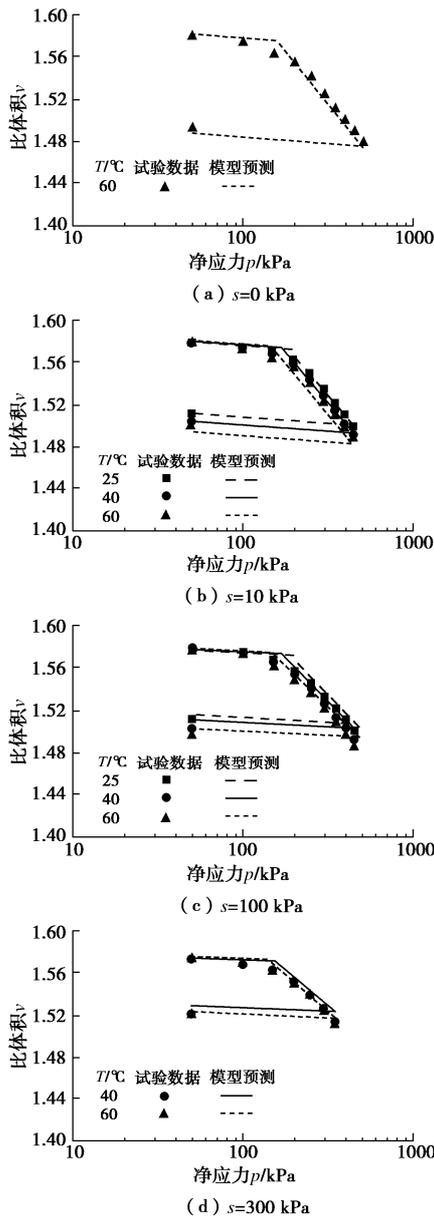


图5 温度和吸力控制的等向压缩—卸载试验数据与模型预测对比

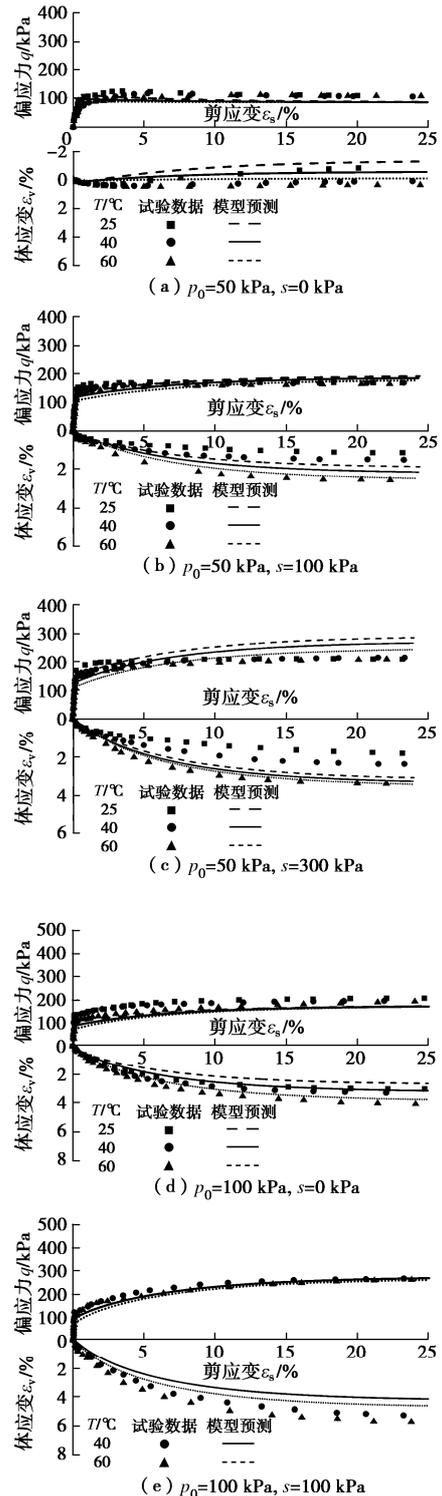
Fig. 5 Comparison between model predictions and experimental data for temperature- and suction-controlled isotropic loading-unloading tests

### 2.3 温度和吸力控制的三轴排水剪切试验

Uchaipichat 等<sup>[19]</sup>对压实粉土进行了 27 组温度和吸力控制的三轴排水剪切试验。所有土样初始均处于饱和状态, 平均净应力  $p = 200$  kPa。首先将土样卸载至目标净应力 ( $p_0 = 50, 100, 150$  kPa), 此时土样均处于超固结状态。然后施加目标温度值 ( $T = 25^\circ\text{C}, 40^\circ\text{C}, 60^\circ\text{C}$ ), 在维持 24 h 的平衡后, 再施加目标吸力值 ( $s = 0, 100, 300$  kPa)。待吸力平衡后, 对土样进行排水剪切试验。

除 1 组三轴排水剪切试验数据用以标定模型参数外, 图 6 为不同初始平均净应力、不同吸力、不同温

度下共 17 组三轴排水剪切试验数据与模型预测结果的对比 (为节省篇幅,  $p_0 = 150$  kPa 的剪切试验结果并未给出)。通过对比可以发现, 该模型能较好地预测土在不同温度和吸力下的剪切特性。此外, 试验结果表明: ①土的峰值强度随温度的增加而减小; ②吸力和温度的增加使得土由应变软化转变为应变硬化; ③土的临界状态强度随吸力的增加而增大, 随温度变化不大; ④吸力和温度的增加使得土在剪切过程中产生更大的体应变。



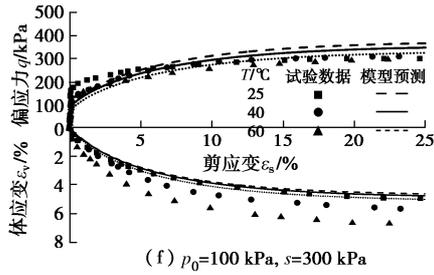


图 6 温度和吸力控制的三轴排水剪切试验数据与模型预测对比

Fig. 6 Comparison between model predictions and experimental data for temperature- and suction-controlled drained shear tests

### 2.4 不同净应力下温度控制的干化试验

Uchaipichat 等<sup>[19]</sup>对压实粉土进行了 12 组不同净应力下温度控制的干化试验。所有土样初始均处于饱和状态, 平均净应力  $p = 200$  kPa。首先将土样卸载至目标净应力 ( $p = 50, 100, 150, 200$  kPa)。然后施加目标温度值 ( $T = 25^\circ\text{C}, 40^\circ\text{C}, 60^\circ\text{C}$ )。最后在维持 24 h 的平衡后, 将土样的吸力逐级增加至 300 kPa, 并测量每级吸力平衡后的体变。

除 3 组干化试验数据用以标定模型参数外, 图 7 为不同平均净应力、不同温度下共 9 组试验测得的土-水特征曲线与模型预测结果的对比。图 8 为不同平均净应力、不同温度下共 9 组试验测得的干缩变形与模型预测结果的对比。通过对比可以发现, 该模型能反映温度和应力对持水特性及干缩变形的影响。此外, 试验结果表明: ①土的进气值随温度的增加而减小; ②土的持水性随温度的增加而减弱; ③正常固结土 ( $p = 200$  kPa) 的干缩变形大于超固结土 ( $p = 50, 100, 150$  kPa); ④正常固结土的干缩变形与温度有关, 超固结土的干缩变形则与温度无关。

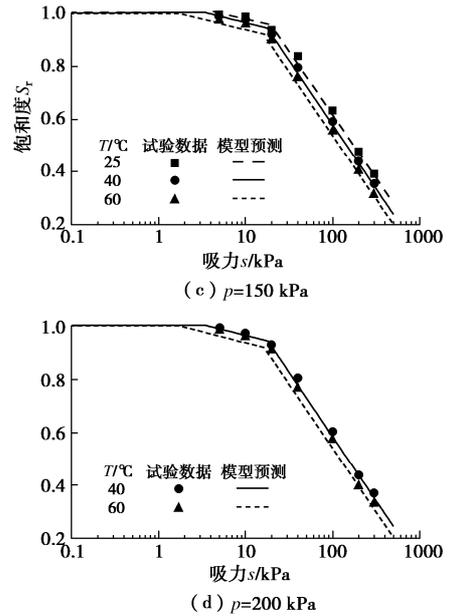
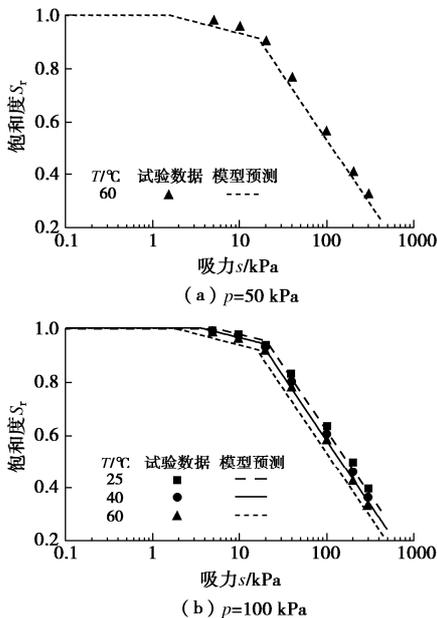


图 7 不同净应力下温度控制的干化试验数据与模型预测对比 (土-水特征曲线)

Fig. 7 Comparison between model predictions and experimental data for temperature-controlled drying tests at different mean net stresses (soil-water characteristic curve)

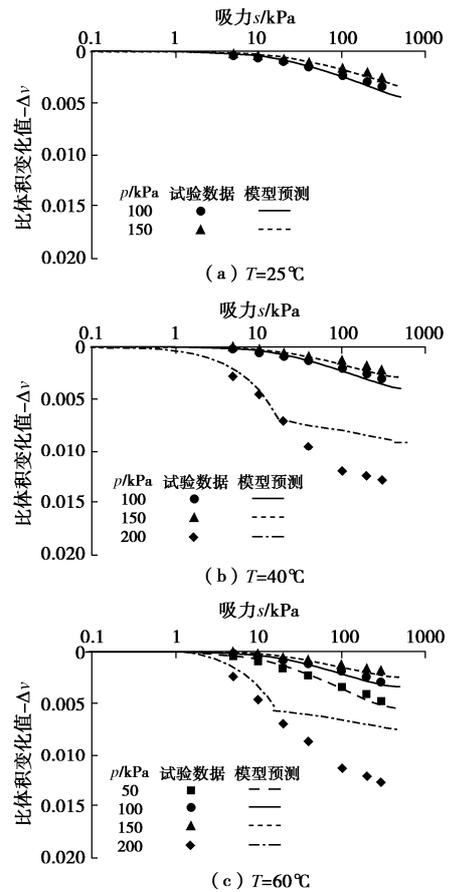


图 8 不同净应力下温度控制的干化试验数据与模型预测对比 (干缩变形)

Fig. 8 Comparison between model predictions and experimental data for temperature-controlled drying tests at different mean net stresses (drying shrinkage deformation)

## 2.5 吸力控制的升温—降温试验

Uchaipichat 等<sup>[19]</sup>对超固结压实粉土进行了吸力控制的升温—降温试验, 本文选取平均净应力为 50 kPa 的试验数据来验证模型。所有土样初始均处于饱和状态, 平均净应力  $p = 200$  kPa。首先将土样卸载至  $p = 50$  kPa, 此时土样处于超固结状态。然后增加温度至 25℃, 在维持 24 h 的平衡后, 施加目标吸力值 ( $s = 0, 100, 300$  kPa)。待吸力平衡后, 逐级增加温度至 60℃, 最后降低温度至 25℃。

吸力  $s = 0, 100$  kPa 的升温—降温试验数据用以标定模型参数, 图 9 为吸力  $s = 300$  kPa 时, 升温—降温试验数据与模型预测结果的对比。通过对比可以发现, 该模型能够反映吸力对热变形的影响。此外试验结果表明: ①超固结土升温时先膨胀后收缩, 降温时仅产生收缩; ②有效先期固结压力和有效应力均随吸力的增加而增大, 改变了土初始超固结比; ③吸力增加减小了土饱和时的超固结比, 使得土在高吸力时热收缩变形更大。

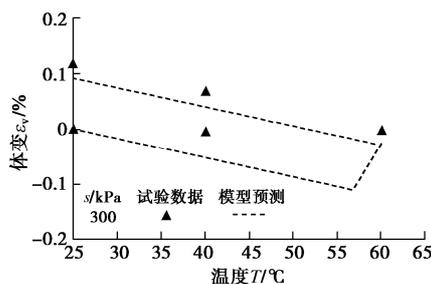


图 9 吸力控制的升温—降温试验数据与模型预测对比

Fig. 9 Comparison between model predictions and experimental data for suction-controlled heating-cooling tests

## 3 结 论

为了更为全面描述非饱和土在热—水—力耦合条件下的变形及持水特性, 本文建立了一个非饱和土热—水—力全耦合本构模型, 其特点如下所述:

(1) 模型中选取平均土骨架应力、修正吸力、温度为应力变量, 选取比体积、饱和度为应变变量。

(2) 模型通过屈服面方程及屈服面之间的耦合规律来反映热—水—力之间的相互影响, 主要包含温度和饱和度对力学特性(先期固结压力、体变、剪胀、强度)的影响, 吸力和超固结比(应力历史)对热变形的影响, 密度(压缩变形、热变形)、温度和滞回效应对持水特性的影响, 温度、应力和滞回效应对干化及湿化变形的影响。

(3) 模型共包含 12 个参数, 所有参数均具有明确的物理含义, 可通过常规的室内试验确定。

(4) 编程实现了所建立耦合本构模型的预测功

能, 采用文献中温度和吸力控制的等向压缩试验、温度和吸力控制的三轴排水剪切试验、不同净应力下温度控制的干化试验、吸力控制的升温—降温试验, 对模型参数进行了标定, 并通过模型预测结果与试验结果的对比, 验证了所建立模型的适用性。

## 参考文献:

- [1] GENS A. Constitutive Laws[M]// Modern Issues in Non-Saturated Soils. Vienna: Springer, 1995: 129 - 158.
- [2] 武文华, 李锡夔. 非饱和土的热—水力—力学本构模型及数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 411 - 416. (WU Wen-hua, LI Xi-kui. Constitutive model and numerical simulation of thermo-hydro-mechanical behavior in unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 411 - 416. (in Chinese))
- [3] 谢云, 陈正汉, 李刚. 考虑温度影响的重塑非饱和膨胀土非线性本构模型[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1937 - 1942. (XIE Yun, CHEN Zheng-han, LI Gang. Thermo-nonlinear model for unsaturated expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1937 - 1942. (in Chinese))
- [4] FRANÇOIS B, LALOUI L. ACMEG-TS: A constitutive model for unsaturated soils under non-isothermal conditions[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2008, 32(16): 1955 - 1988.
- [5] TANG A M, CUI Y J. Modelling the thermo-mechanical volume change behaviour of compacted expansive clays[J]. Géotechnique, 2009, 59(3): 185 - 195.
- [6] 姚仰平, 牛雷, 杨一帆, 等. 考虑温度影响的非饱和土本构模型[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 2881 - 2888. (YAO Yang-ping, NIU Lei, YANG Yi-fan, et al. Constitutive model for unsaturated clays considering temperature effects[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 2881 - 2888. (in Chinese))
- [7] ZHOU A N, SHENG D, LI J. Modelling water retention and volume change behaviours of unsaturated soils in non-isothermal conditions[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 55: 1 - 13.
- [8] 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. (CAI Guo-qing, GUO Yan-xin, LI Jian, et al. Elastoplastic modeling of volume change behavior of unsaturated soils under thermo-hydro-mechanical coupling conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4):

- 1060 - 1068. (in Chinese))
- [9] BACHMANN J, HORTON R, GRANT S A, et al. Temperature dependence of water retention curves for wettable and water-repellent soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, **66**(1): 44 - 52.
- [10] 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. (in Chinese))
- [11] JACINTO A C, VILLAR M V, GÓMEZ-ESPINA R, et al. Adaptation of the van Genuchten expression to the effects of temperature and density for compacted bentonites[J]. *Applied Clay Science*, 2009, **42**(3/4): 575 - 582.
- [12] SALAGER S, EL YOUSOUFI M S, SAIX C. Effect of temperature on water retention phenomena in deformable soils: theoretical and experimental aspects[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, **61**(1): 97 - 107.
- [13] 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. (in Chinese))
- [14] 秦 冰, 陈正汉, 孙发鑫, 等. 高吸力下持水曲线的温度效应及其吸附热力学模型[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(10): 1877 - 1886. (QIN Bing, CHEN Zheng-han, SUN Fa-xin, et al. Temperature effect on water retention curve under high suction and its modeling based on thermodynamics of sorption[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(10): 1877 - 1886. (in Chinese))
- [15] 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.
- [16] 马田田, 韦昌富, 陈 盼, 等. 非饱和土毛细滞回与变形耦合弹塑性本构模型[J]. *岩土力学*, 2012, **33**(11): 3263 - 3270. (MA Tian-tian, WEI Chang-fu, CHEN Pan, et al. An elastoplastic constitutive model of unsaturated soils with capillary hysteresis and deformation coupling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(11): 3263 - 3270. (in Chinese))
- [17] ZHOU C, NG C W W. Simulating the cyclic behaviour of unsaturated soil at various temperatures using a bounding surface model[J]. *Géotechnique*, 2015, **66**(4): 344 - 350.
- [18] 李 舰, 刘 凯, 尹振宇, 等. 非饱和砂土及黏土的水-力耦合双屈服面模型[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(1): 72 - 80. (LI Jian, LIU Kai, YIN Zhen-yu, et al. Hydro-mechanical double-yield-surface model for unsaturated sand and clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(1): 72 - 80. (in Chinese))
- [19] UCHAIPICHAT A, KHALILI N. Experimental investigation of thermo-hydro-mechanical behaviour of an unsaturated silt[J]. *Géotechnique*, 2009, **59**(4): 339 - 353.
- [20] CUI Y J, SULTAN N, DELAGE P. A thermomechanical model for saturated clays[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, **37**(3): 607 - 620.
- [21] VILLAR M V, LLORET A. Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite[J]. *Applied Clay Science*, 2004, **26**(1/2/3/4): 337 - 350.
- [22] 蔡国庆, 赵成刚, 白 冰, 等. 温控非饱和土三轴试验装置的研制及其应用[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(6): 1013 - 1019. (CAI Guo-qing, ZHAO Cheng-gang, BAI Bing, et al. Development and application of a temperature-controlled triaxial test system for unsaturated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(6): 1013 - 1019. (in Chinese))
- [23] 谈云志, 胡新江, 喻 波, 等. 粉土持水性能的温度效应研究[J]. *岩土力学*, 2014, **35**(增刊 1): 121 - 126, 140. (TAN Yun-zhi, HU Xin-jiang, YU Bo, et al. The water holding capacity of silt under temperature effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(S1): 121 - 126, 140. (in Chinese))
- [24] 朱赞成, 孙德安, 田 进. 高吸力高温下 2 种滤纸率定曲线及其应用[J]. *岩土工程学报*, 2014, **36**(6): 1020 - 1027. (ZHU Zan-cheng, SUN De-an, TIAN Jin. Calibration curves of two filter papers at high suction and temperature and their application[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(6): 1020 - 1027. (in Chinese))
- [25] GALLIPOLI D, WHEELER S J, KARSTUNEN M. Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil[J]. *Géotechnique*, 2003, **53**(1): 105 - 112.