

基于下加载面概念的饱和黏土 温度 - 应力耦合弹塑性模型

龚 哲¹, 陈卫忠^{1, 2}, 于洪丹¹, 马永尚¹, 李香玲³

(1. 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, 湖北 武汉 430071; 2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 3. Euridice, SCK•CEN, 比利时核研究中心, 比利时 摩尔 2400)

摘要: 温度对黏土力学特性具有重要影响, 温度变化将引起黏土的体积变形发生变化, 并对其前期固结应力、剪切强度、弹性模量等具有重要影响。基于黏土“热陷”特性, 引入热屈服面以描述不同超固结比的黏土在温度升高时所产生的塑性变形, 并进一步开展以下工作: (1) 建立考虑温度影响的下加载面模型, 由于保留了下加载面模型对超固结黏土应力 - 应变特性优异的描述能力, 并考虑了温度对黏土的 2 种作用(即温度使超固结黏土的超固结比降低和温度塑性应变对屈服面的硬化效应), 该模型可以描述温度变化对不同黏土力学特性的复杂影响; (2) 证明了所提出的模型严格满足热力学第一、第二定律; (3) 采用该模型模拟 Pontida clay 和 MC clay 在不同压力下的排水加热试验和在不同温度下的三轴排水/不排水试验, 模拟结果与试验结果对比分析表明, 模型能合理地描述不同超固结比的黏土在温度变化时产生的体积变形以及温度对黏土强度的影响等。

关键词: 土力学; 饱和黏土; 下加载面; 热屈服面; 超固结土; 热力学

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2015)07 - 1392 - 10

A THERMO-ELASTO-PLASTIC MODEL FOR SATURATED CLAY BASED ON CONCEPT OF SUBLOADING SURFACE

GONG Zhe¹, CHEN Weizhong^{1, 2}, YU Hongdan¹, MA Yongshang¹, LI Xiangling³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China; 3. Euridice, SCK•CEN, Belgian Nuclear Research Centre, Mol 2400, Belgium)

Abstract: The coupled thermo-mechanical behavior of saturated clays was summarized, including the temperature effects on volume change, pore pressure, preconsolidation pressure, strength and elastic modulus. Based on the experimental results, a thermal yield surface was introduced to describe the temperature-induced reversible and irreversible volume change of saturated clay. A subloading surface model was extended to consider the temperature effects. The extended model depicted the decrease of preconsolidation pressure of overconsolidated clay and the hardening of yield surface by temperature-induced plastic strain. The model was then proved to satisfy strictly the thermodynamics. With the developed model, numerical simulations of drained heating tests, drained and undrained triaxial compression tests of clay with different over consolidation ratios under different temperature were performed. The simulated results were compared with the existing test results, which showed that the model described the volume change induced by temperature change, the thermal softening effect on

收稿日期: 2014 - 09 - 09; **修回日期:** 2014 - 10 - 24

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(51225902); 国家自然科学基金资助项目(51109207, 51479190)

作者简介: 龚 哲(1988 -), 男, 2010年毕业于武汉大学水利水电工程专业, 现为博士研究生, 主要从事软岩多场耦合长期力学性质方面的研究工作。E-mail: zhe_gong_gucas@hotmail.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.1238

overconsolidated clay and thermal hardening effect of normally consolidated clay.

Key words: soil mechanics; saturated clay; subloading surface; thermal yield surface; overconsolidated clay; thermodynamics

1 引 言

岩土工程领域的许多方面都涉及到多孔介质的温度 - 渗流 - 应力(T-H-M)耦合问题,如核废料深部地下处置、换热桩埋管、煤层瓦斯渗流、地下油气库的注 - 采气等。尤其是在核废料地下处置库工程中,由于核素在长期衰变过程中缓慢放出热量,处置库围岩的温度逐渐上升^[1]。在温度作用下岩土体的力学性质变得非常复杂,往往表现出与常温下明显不同的特征。而黏土作为一种备选的核废料处置库地质屏障,其温度场、渗流场和应力场等耦合条件下力学特性越来越受到关注。

黏土在温度作用下的力学特性的试验研究始于 20 世纪 60 年代, R. G. Campanella 和 J. K. Mitchell^[2]首先研究了温度变化时黏土体积变形,以及温度对黏土压缩指数和回弹指数的影响。此后许多学者对黏土的 T-H-M 耦合特性开展了大量的试验。例如, M. Tidfors 与 G. Sallfors^[3]研究了温度对黏土的前期固结应力的影响; K. R. Demars 等^[4-5]研究了温度引起的黏土体积应变与超固结比之间的关系; N. Sultan 等^[6-8]研究了黏土温度塑性应变的硬化作用; H. M. Abuel-Naga 等^[7-9]研究了温度对黏土剪切强度的影响。

在本构模型方面, T. Hueckel 与 G. Baldi^[10]考虑温度使屈服面收缩的效应,建立了黏土温度应力耦合的临界状态模型; J. Graham 等^[11]考虑了温度对弹性模量和前期固结应力的影响,将修正剑桥模型进行了扩展; J. C. Robinet 等^[12]引入温度软化面的概念,可以考虑温度对屈服面的不可逆的软化作用; Y. J. Cui 等^[13-14]引入了热屈服的概念,将热屈服与力学屈服相耦合,可以较好地描述不同超固结比的黏土的温度体积变形以及热硬化现象;姚仰平等^[15-16]将温度变量引入到统一硬化模型(UH 模型),使该模型能够反映温度对超固结土强度和前期固结应力的影响。S. Zhang 等^[17]提出了温度等效应力的概念,并将该模型引入下加载面模型,温度上升会使下加载面外扩,可以描述温度变化过程中超固结比的变化。

本文在研究黏土温度应力耦合特性的基础上,基于黏土在升温 - 降温过程中的体积变形特征,引

入热屈服面的概念以描述不同超固结比的黏土的塑性体积变形,并进一步建立了考虑温度影响的下加载面模型。此外,基于不可逆热力学证明了所提出的模型严格满足热力学第一、第二定律,并通过数值模拟与试验结果对比分析证明了模型能较好地反映温度对黏土力学特性的影响。

2 黏土的温度 - 应力耦合特性

国内外众多学者进行了大量的关于温度对黏土力学特性影响的室内试验研究,包括三轴排水/不排水试验、固结试验等,其主要的实验结果体现在以下几个方面:

2.1 温度影响下黏土的体积变形

P. Delage 等^[5,7-8,18-21]分别就温度变化对 Pontida clay, Boom clay, Bangkok clay、高岭土、粉黏土等的体积变形的影响进行了试验研究。结果表明:在排水条件下,正常固结土在温度上升时均会产生很大的体积收缩变形;超固结土在温度上升时,首先因为受热而产生膨胀,随着温度的升高逐渐产生收缩变形。超固结比越大,从膨胀到收缩的转化温度越高。而在温度下降的过程中不同超固结比的黏土都只产生冷却收缩变形(见图 1)。这种温度升高而导致的塑性体缩现象被称之为热陷^[14]。

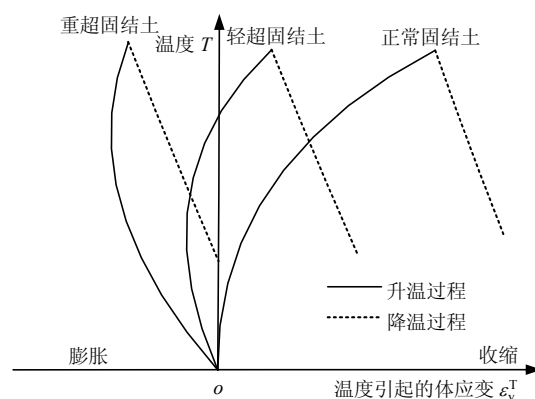


图 1 温度影响下不同超固结比黏土的体积变形特征
Fig.1 Volume change behavior of clay with different overconsolidation ratios during thermal cycle

关于温度升高产生塑性变形的机制同样有许多学者进行了研究,如 R. Morin 与 A. J. Silva^[22]认为,高温压缩了扩散双电层厚度; R. E. Paaswell^[23]认为,

温度导致部分吸附水脱离; J. C. Robinet^[12]认为, 温度促进了黏土颗粒之间的相对移动, 使黏土的孔隙结构变得更加紧密。白冰和赵成刚^[24]指出, 黏土受热固结变形是一个受到孔压、温度梯度、矿物成分、水渗透系数、热传导系数等多个方面影响的复杂的力学现象。

2.2 温度对黏土压缩指数与回弹指数的影响

R. G. Campanella 和 J. K. Mitchell^[2]利用伊利土在不同温度下进行了固结试验, 其压缩回弹曲线如图 2 所示, 从图中可以看出, 不同温度下压缩与回弹的曲线都基本平行, 差别在于温度上升之后试样发生压缩, 孔隙比降低, 试验曲线向下发生平移。这表明压缩指数 λ 与回弹指数 κ 与温度无关。J. C. Robinet 等^[12]对 Bassin Parisen clay 进行了类似的试验, 得到了相同的结论。

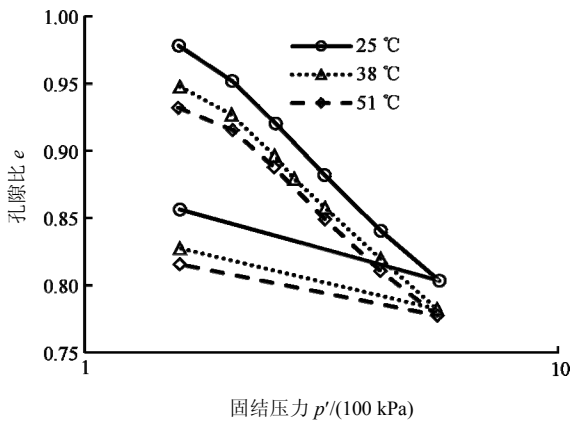


图 2 不同温度下的黏土固结试验^[2]

Fig.2 Oedometer tests on clay under different temperatures^[2]

2.3 温度对前期固结应力的影响

温度对黏土前期固结应力的影响表现在 2 个方面:

一方面, M. Tidfors 等^[3, 25-26]对超固结黏土进行排水加热后发现, 黏土的前期固结应力随着温度的升高而降低。L. Laloui 等^[27]总结了不同黏土前期固结应力与温度的关系(见图 3), 拟合出了前期固结应力随着温度呈对数形式下降的关系式:

$$p_c(T) = p_c(T_0) \left[1 - \gamma \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] \quad (1)$$

式中: T 为当前温度; T_0 为参考温度; $p_c(T)$, $p_c(T_0)$ 分别为对应温度 T , T_0 时的前期固结应力。

而另一方面, I. Towhata 等^[28]进行排水加热试验后发现温度上升产生的塑性应变会使其屈服面发生硬化, 使黏土的前期固结应力升高。

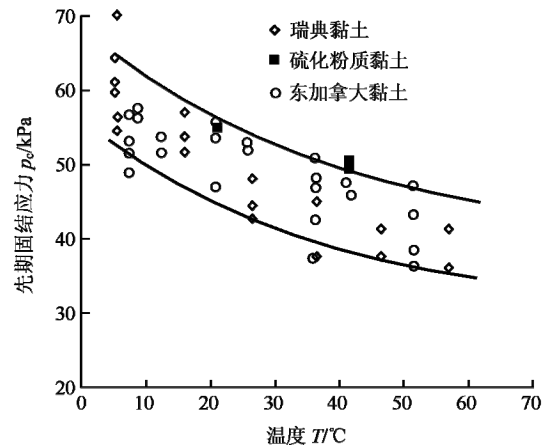


图 3 超固结土前期固结应力随温度的变化^[27]

Fig.3 Variation of preconsolidation pressure of over-consolidated clay with temperature^[27]

H. M. Abuel-Naga 等^[7-8]和 N. Sultan^[6]分别对不同超固结比的 Bangkok clay 和 Boom clay 进行了排水加热试验研究, 发现超固结比不相同, 温度对前期固结应力的影响是不同的: 对于正常固结土, 温度升高产生的塑性变形大, 前期固结应力会升高(见图 4^[7]); 对重超固结土, 温度上升导致其超固结比下降, 前期固结应力降低。

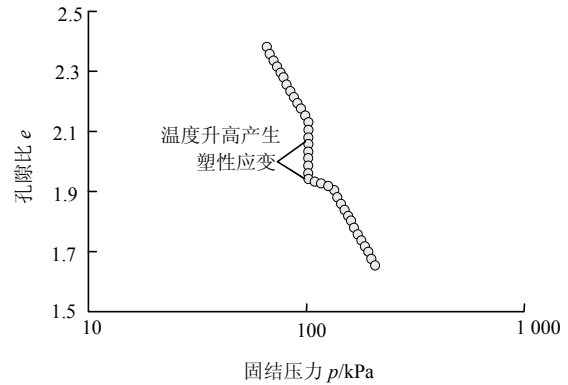


图 4 温度塑性应变对正常固结土前期固结应力的影响^[7]

Fig.4 Void ratio increase of normally consolidated clay induced by thermal plastic strain^[7]

2.4 温度对剪切强度的影响

H. M. Abuel-Naga 等^[8, 20, 29-31]对不同温度的黏土进行的三轴不排水压缩试验表明, 黏土的临界状态时的应力比 q/p 不随温度发生明显变化, 临界状态线斜率 M 可以认为是恒定的。

T. Hueckel 等^[10, 31]对超固结黏土在不同温度下进行三轴排水/不排水压缩试验表明, 超固结黏土的峰值强度随温度升高而降低。H. M. Abuel-Naga 等^[8, 20]对正常固结黏土在不同温度下进行三轴排水/

不排水压缩试验表明正常固结土的强度随温度升高而升高。这与温度对前期固结应力的影响是一致的。P. Kuntiwattanukul 等^[9]的研究表明：温度对超固结土和正常固结土的强度影响不同。对正常固结黏土，温度产生的塑性体缩很大，黏土强度提高；对于超固结黏土，由于温度产生的塑性变形小，温度对强度的影响不明显。

3 黏土温度应力耦合下加载面模型

3.1 温度引起的体积变形描述

在温度上升的过程中，饱和黏土的应变分为两部分：一部分是土骨架颗粒的热胀冷缩而产生的应变，这部分变形是在温度下降的过程中是可逆的；另一部分是温度塑性应变，这一部分的变形在温度降低后不能恢复。

对于各向同性的黏土，可以认为温度只会产生体积应变，因此总的温度应变可以写为

$$\dot{\epsilon}^T = \dot{\epsilon}^{Te} + \dot{\epsilon}^{Tp} = \frac{1}{3}(\dot{\epsilon}_v^{Te} + \dot{\epsilon}_v^{Tp})\delta \quad (2)$$

式中： $\dot{\epsilon}^{Te}$ 为可逆的热胀冷缩应变张量， $\dot{\epsilon}^{Tp}$ 为温度塑性应变张量， δ 为 Kronecker 符号。

热胀冷缩应变采用率形式表示为

$$\dot{\epsilon}_v^{Te} = -\alpha \dot{T} \quad (3)$$

式中： α 为黏土的热体积膨胀系数。

T. Hueckel 等^[10-12]认为，温度升高之所以会产生体积收缩的原因是屈服面在温度作用下发生了收缩，使应力超出屈服面。但这种理论无法解释 N. Sultan 等^[6-8]发现的热塑性体积变形会使屈服面发生硬化的现象。对此 Y. J. Cui 等^[13-14]提出了热屈服面的概念，认为土体不仅存在加载屈服，当温度升高到超过热屈服面时，就会产生塑性应变，同时热屈服面会产生硬化，而温度降低相当于卸载，只产生可逆的热胀冷缩变形。因此，引入 Y. J. Cui 等^[13-14]中的热屈服面概念：

$$f_T = T - T_{CT} = T - (T_C - T_0)\exp(-\beta p') - T_0 \quad (4)$$

式中： T_{CT} 为屈服温度； T_C ， T_0 分别为控制热屈服面的最高点和最低点的参考温度，通常 T_0 可设为初始温度； β 为热屈服面的形状参数，当 β 取不同参数时热屈服面的形状如图 5^[13-14]所示。

温度产生的塑性体积应变可采用指数函数和线性函数之和表示。

当 $T = T_C$ 且 $\dot{T} > 0$ 时，有

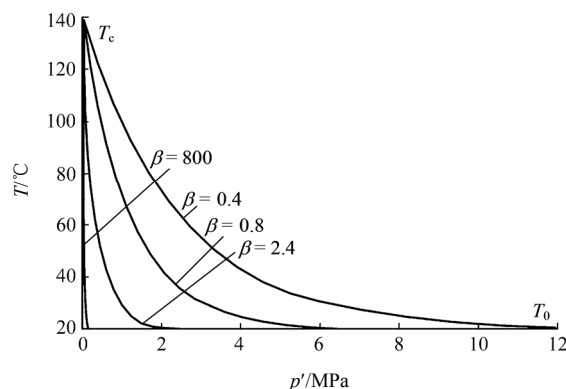


图 5 热屈服面的形状随 β 的变化^[13-14]

Fig.5 Evolution of thermal yield surface with β ^[13-14]

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon}_v^{Tp} &= \alpha_p [\exp(\alpha_p \Delta T) - a] \dot{T} \\ \Delta T &= T - T_0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： α_p ， a 为模型参数。

显然不同超固结的黏土在加热过程中的塑性体积变形是不一样的，因此式(5)的参数与超固结比有关，这导致参数的存在困难。因此，引入热胀 - 热陷转化临界面的概念建立上述参数与超固结比的关系。

在压力恒定的情况下对黏土进行加热，超固结比越高的黏土，从膨胀到收缩的转化温度越高。热胀 - 热陷转化临界面的形状如图 6 所示，当温度上升到这一临界面时，体积变化率为 0，即

$$\dot{\epsilon}_v^{Te} + \dot{\epsilon}_v^{Tp} = 0 \quad (6)$$

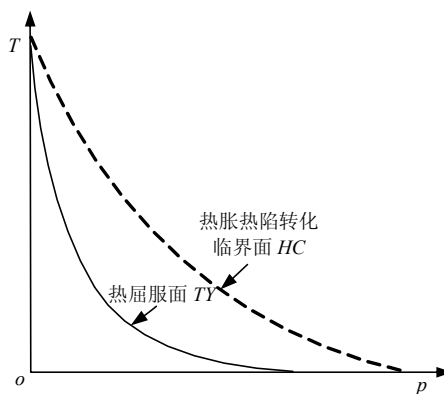


图 6 热胀 - 热陷临界面示意图

Fig.6 Sketch of heating-contraction critical surface

根据其形状特点，可假设其表达式为

$$p' = c_1 p_{c0} \exp(\alpha_p \Delta T) \quad (7)$$

式中： c_1 为模型常数， p_{c0} 为黏土的前期固结应力。

显然 α_p 应当为超固结比的函数，由式(3)，(5)，(7)可得

$$\alpha_p = \frac{\alpha}{a - \frac{p'}{c_1 p_{c0}}} \quad (8)$$

模型的硬化可以视为是形状参数 β 减小的过程:

$$d\beta = \frac{-\exp(\beta p')}{p'(T_c - T_0)\alpha_p[\exp(\alpha_p \Delta T) - a]} d\varepsilon_v^{TP} \quad (9)$$

3.2 下加载面的概念

剑桥模型是基于正常固结黏土特性所提出来的弹塑性模型,并不适用于超固结黏土。K. Hashiguchi 和 M. Ueno^[32]基于剑桥模型提出了下加载面模型,在剑桥模型基础上仅仅增加了一个参数,就可以较好地描述不同超固结比下的黏土的应力-应变特性。

下加载面模型在剑桥模型的基础上引入超固结状态参数 R 和一个代表当前应力状态的下加载面^[2]。下加载面与正常固结屈服面几何相似,相似点为应力坐标系原点,相似比即为超固结状态参数 R 。如图 7 所示,其中 (p, q) 为当前应力状态, (p_n, q_n) 为对应的正常屈服面应力点, p_{oc} 为下加载面与 p 轴的交点, p_c 为先期固结压力。

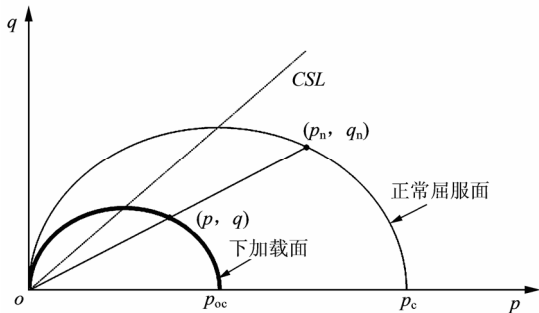


图 7 下加载面模型在 p - q 平面内示意图
Fig.7 Sketch of subloading surface model in p - q space

超固结状态参数定义为

$$R = \frac{1}{OCR} = \frac{p}{p_n} = \frac{q}{q_n} = \frac{p_{oc}}{p_c} \quad (0 \leq R \leq 1) \quad (10)$$

在加载过程中,超固结状态参数 R 发生硬化,逐渐趋向于 1,黏土逐渐趋于正常固结状态。

正常屈服面的表达式为

$$f = p(p - p_c) + \frac{q^2}{M^2} = 0 \quad (11)$$

下加载面的表达式为

$$f_s = p(p - Rp_c) + \frac{q^2}{M^2} = 0 \quad (12)$$

在卸载的过程中,正常固结面保持不变,而超

固结参数 R 则按照式(10)发生变化,使下加载面始终通过当前应力点。

3.3 弹性模量

由前面的分析可知,温度不影响黏土的压缩指数和回弹指数,因此可将体积弹性模量 K 和剪切模量 G 分别表示为

$$K = \frac{1+e}{\kappa} p \quad (13)$$

$$G = \frac{3(1-2\mu)}{2(1+\mu)} K \quad (14)$$

增量形式的弹性应力-应变关系可以写为

$$\dot{\sigma} = K \dot{\varepsilon}_v^e \delta + 2G \dot{e}^e \quad (15)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_v^e$ 为弹性体积应变增量, \dot{e}^e 为弹性偏应变增量。

3.4 内变量的演化规律

关于温度对黏土的强度影响表现在 2 个方面:一方面温度升高改变了颗粒之间相互作用力的平衡状态,在温度的作用下黏土的结构会发生破坏和与重组,使得黏土的力学性质趋于各向同性^[12],超固结比逐渐降低,向正常固结土演化^[33];而另一方面,温度所产生的塑性变形又能使黏土的塑性屈服面发生硬化,使其强度升高^[8, 34]。

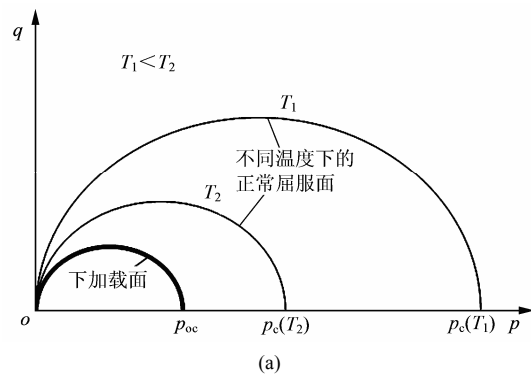
一般而言,对于重超固结黏土,其热塑性变形小,而超固结比随温度变化较大,表现为温度软化,如图 8 所示。对于正常固结的黏土,由于温度所产生的塑性应变较大,表现为温度硬化,如图 9 所示。

下加载面模型的内变量为超固结参数 R 与前期固结应力 p_c , K. Hashiguchi 和 M. Ueno^[32]建议将 R 的演化规律取为

$$\dot{R} = CM \ln R b_1 \dot{\gamma}^p \quad (16)$$

其中,

$$C = \frac{1+e_0}{\lambda - \kappa} \quad (17)$$



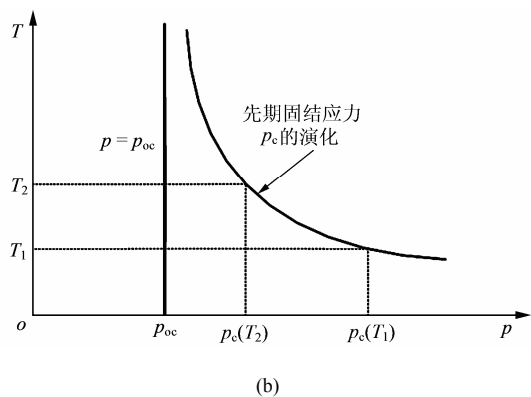


图 8 温度上升导致超固结黏土的超固结比降低
Fig.8 Variation of OCR of overconsolidated clay during heating process

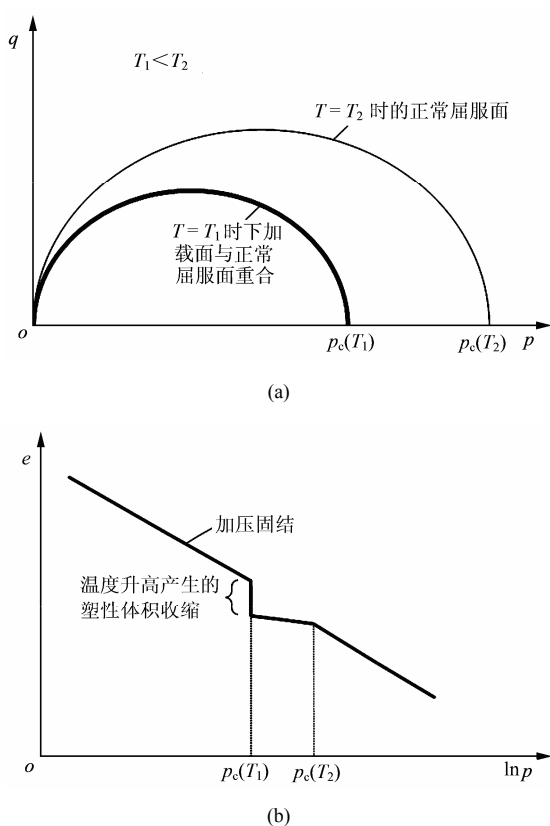


图 9 温度塑性应变使正常固结土变成超固结土
Fig.9 Thermal plastic strain induced overconsolidation behavior of normally consolidated clay

$$\dot{\gamma}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial f_s}{\partial q} \tag{18}$$

式中： γ^p 为塑性等效剪应变， $\dot{\lambda}$ 为塑性乘子增量， b_1 为控制 R 演化速率的模型常数， e_0 为初始孔隙比， λ 为回弹指数， κ 为回弹指数。

在考虑温度影响的下加载面模型中，由于温度升高会使超固结比降低，因此 R 的演化规律则在式(14)的基础上加入温度的影响：

$$\dot{R} = CM \ln R (b_1 \dot{\gamma}^p - b_2 \langle \dot{T} \rangle) \tag{19}$$

式中： b_2 为反映温度对超固结参数影响程度的常数， $\langle \rangle$ 为 Macauley 括号。

前期固结应力 p_c ，一方面会随着塑性体应变发生硬化，另一方面由于超固结比的降低而降低，其形式可写为

$$\dot{p}_c = Cp_c (\dot{\epsilon}_v^{Tp} + \dot{\epsilon}_v^{Mp}) - CMb_2 \frac{\ln R}{R} \langle \dot{T} \rangle \tag{20}$$

3.5 流动法则与协调方程

采用关联流动法则，可得加载产生的塑性应变增量为

$$d\epsilon^{Mp} = \dot{\lambda} \frac{\partial f_s}{\partial \sigma} \tag{21}$$

加载过程中协调方程为

$$\dot{f}_s = 0 \tag{22}$$

将式(19)，(20)代入式(22)可得

$$\frac{\partial f_s}{\partial \sigma} : \dot{\sigma} + CMpp_c \ln R b_1 \dot{\gamma}^p + CpRp_c (\dot{\epsilon}_v^{Tp} + \dot{\epsilon}_v^{Mp}) = 0 \tag{23}$$

3.6 应变的组成

弹性应变与塑性应变均包括由应力状态改变而产生的应变和由温度变化而产生的应变，可以写为

$$\dot{\epsilon}^e = \dot{\epsilon}^{Me} + \dot{\epsilon}^{Te} = \dot{\epsilon}^{Me} - \frac{1}{3} \alpha \dot{T} \delta \tag{24}$$

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\epsilon}^{Mp} + \dot{\epsilon}^{Tp} = \dot{\epsilon}^{Mp} + \frac{1}{3} \dot{\epsilon}_v^{Tp} \delta \tag{25}$$

4 模型在热力学框架内的验证

任何热力学过程必须严格满足热力学第一、第二定律。具体连续介质力学中，可把系统看作一个非均匀的热力学场，将其分成许多微元，每一个微元都是处于平衡状态的均匀系统，可以按照经典热力学处理。

热力学第一定律可表述为流入系统的热量与外部环境对系统所做的功之和等于系统内能的变化，即

$$\dot{u} - \gamma = \sigma : \dot{\epsilon} - \text{div}(q) \tag{26}$$

式中： q 为热流密度矢量， \dot{u} 为单位质量内能变化率， γ 为单位质量内热源功率。对于黏土，一般认为不存在内热源，式(26)变为

$$\dot{u} = \sigma : \dot{\epsilon} - \text{div}(q) \tag{27}$$

而内能的变化包括弹性势能的变化与热能的变化, 即

$$\dot{u} = \boldsymbol{\sigma} : (\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{Me} + \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{Te}) + \dot{w} \quad (28)$$

联立式(27)与(28)得单位体积热能的变化为

$$\dot{w} = \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{Mp} + p\dot{\epsilon}_v^{Tp} + \text{div}(\mathbf{q}) \quad (29)$$

单位熵的改变分为两部分: 一部分是与外界进行热量交换而带入的供熵 \dot{s}_e , 另一部分是由于系统内部不可逆过程产生能量耗散所引起的产熵 \dot{s}_i , 即

$$\dot{s} = \dot{s}_e + \dot{s}_i \quad (30)$$

根据熵和供熵的定义, 分别有

$$\dot{s} = \frac{\dot{w}}{T} \quad (31)$$

$$\dot{s}_e = \frac{\text{div}(\mathbf{q})}{T} \quad (32)$$

于是产熵的表达式为

$$\dot{s}_i = \dot{s} - \dot{s}_e = \frac{1}{T} \left[\boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{Mp} + p\dot{\epsilon}_v^{Tp} - \frac{\mathbf{q}}{T} \cdot \text{grad}(T) \right] = \frac{1}{T} (\dot{W}^{Mp} + \dot{W}^{Tp} + \dot{W}^T) \quad (33)$$

可见系统的产熵由三部分组成, 分别随力学塑性耗散 \dot{W}^{Mp} , 温度塑性耗散 \dot{W}^{Tp} 与热功耗散 \dot{W}^T 产生。

由下加载面模型的基本假设, 有

$$\dot{W}^{Mp} = p\sqrt{(\dot{\epsilon}_v^p)^2 + M^2(\dot{\gamma}^p)^2} \geq 0 \quad (34)$$

而温度引起的塑性变形 $\dot{\epsilon}_v^{Tp} \geq 0$, 且只有在 $p > 0$ 时才会产生, 可得到:

$$\dot{W}^{Tp} = p\dot{\epsilon}_v^{Tp} \geq 0 \quad (35)$$

热传导过程满足 Fourier 定律:

$$\mathbf{q} = -\lambda \text{grad}(T) \quad (36)$$

得到热功耗散表达式

$$\dot{W}^T = \frac{\lambda}{T} \text{grad}(T) \cdot \text{grad}(T) \geq 0 \quad (37)$$

将式(34), (35)代入式(37)可得

$$\dot{s}_i \geq 0 \quad (38)$$

由此可见, 模型满足熵增原理, 即热力学第二定律。

5 试验模拟

为了验证本文提出的模型能够描述温度对黏土力学性质的影响, 本文模拟了 T. Hveckel 和 G. Baldi^[10]中的 Pontida clay 和 P. Kuntiwattanukul 等^[9, 28]中的 MC clay 这 2 种黏土材料的排水加热试验、不同温度下的三轴排水/不排水试验, 并将其与试验结果比较。其中, Pontida clay 是意大利的一种富含石英成分的粉黏土, MC clay 是一种主要矿物成分为高岭石的软黏土。2 种黏土材料的模型参数如表 1, 2 所示。

表 1 2 种黏土的下加载面模型参数

材料名称	e_0	λ	κ	μ	M	p_c/MPa	b_1	b_2
Pontida clay	0.90	0.01	0.06	0.25	1.4	2.500	0.2	9.3×10^{-4}
MC clay	0.85	0.08	0.16	0.23	0.6	0.196	0.8	1.0×10^{-5}

表 2 2 种黏土的热体积变形的参数

材料名称	$T_c/^\circ\text{C}$	$T_0/^\circ\text{C}$	β	c_1	$a/10^{-4}$	$\alpha/(10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$
Pontida clay	200	22.4	4.0	0.298	-1.35	5.2
MC clay	200	22.0	9.8	1.000	-1.90	9.2

5.1 不同超固结比的黏土排水加热试验模拟

图 10 为超固结黏土和正常固结黏土排水加热的温度 - 应力路径^[9, 28]。在排水条件下黏土经过加压固结达到稳定后, 卸载到预定的超固结比, 然后将其温度升高到预定值。对于正常固结黏土不进行卸载, 直接将其温度提高。升温过程中实测的黏土体积变化的实测值和模拟值的比较如图 11 所示, 由图可见, 本文提出的模型能够基本预测不同超固结比黏土体积的变化趋势。

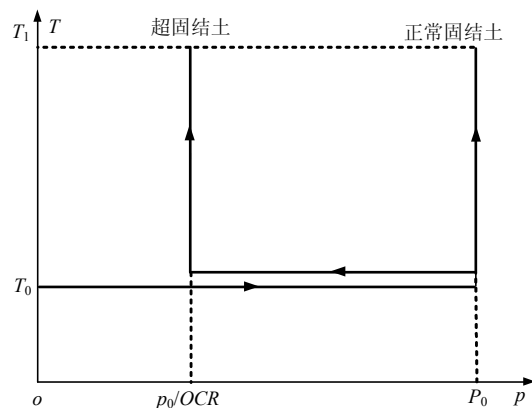


图 10 排水加热试验的温度 - 应力路径

Fig.10 Thermo-mechanical paths of drain heating tests

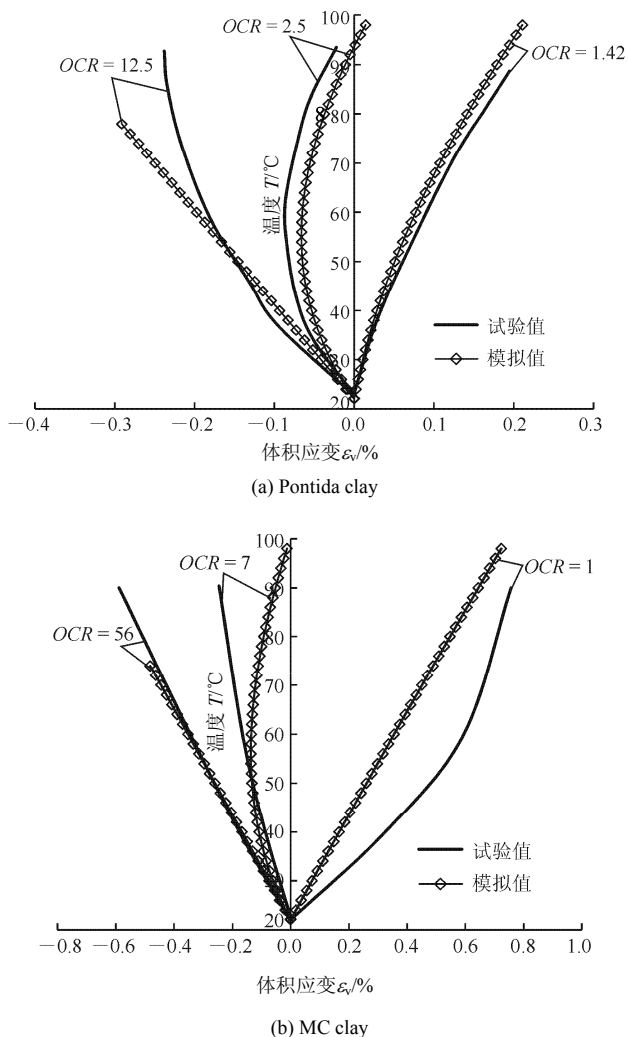


图 11 黏土的排水加热试验数据与模型预测

Fig.11 Predicted and test results of drain heating tests for clay

5.2 重超固结 Pontida clay 在不同温度下三轴排水压缩试验模拟

T. Hveckel 和 G. Baldi^[10]进行了重超固结 Pontida clay 的在不同温度下的三轴排水试验，其三轴排水压缩之前的温度应力路径如图 10 所示。图 12 为 $OCR = 12.5$ 的重超固结 Pontida clay 在不同温度下三轴排水压缩试验的试验结果和模拟结果的比较，结果表明，本文提出的模型能较好地反映重超固结 Pontida clay 在温度升高后超固结比降低的现象。

5.3 正常固结 MC clay 在不同温度下的三轴不排水压缩试验模拟

T. Hveckel 和 G. Baldi^[10]研究了温度对正常固结 MC clay 三轴不排水强度的影响，其三轴不排水压缩之前的温度应力路径如图 10 所示。正常固结的 MC clay 在不同温度下三轴排水压缩的试验结果和模拟结果的比较如图 13 所示，本文提出的模型能够较好的热塑性应变对正常固结 MC 土的硬化作用。

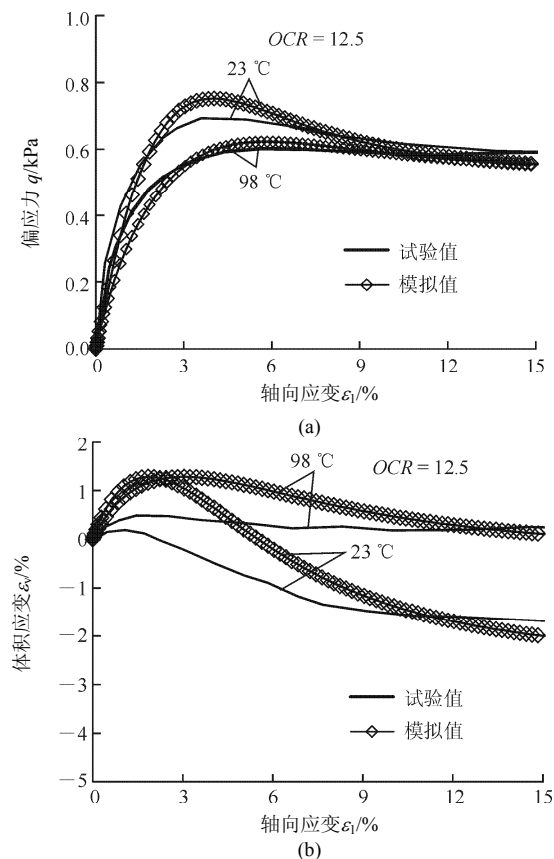


图 12 Pontida clay 排水加热试验数据与模型预测

Fig.12 Predicted and test results of triaxial drain compression tests under different temperatures for Pontida clay

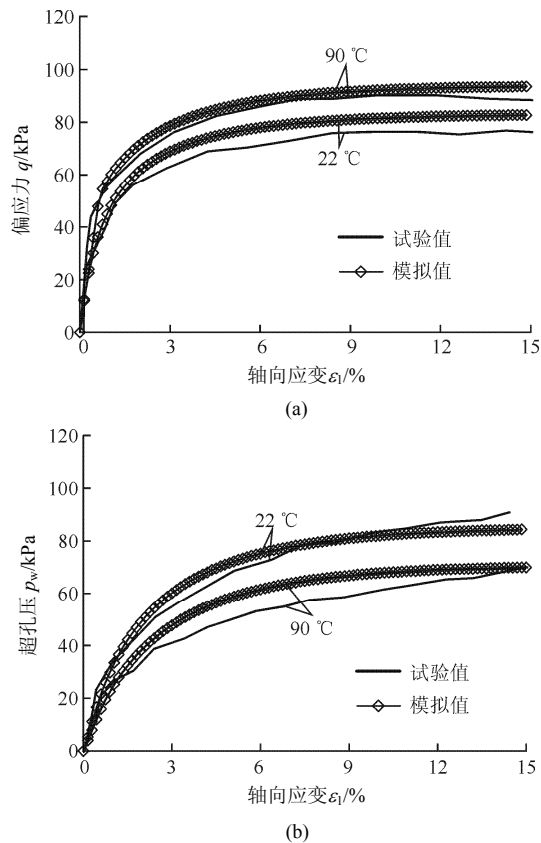


图 13 MC clay 的排水加热试验数据与模型预测

Fig.13 Predicted and test results of drained heating tests for MC clay

6 结 论

本文分析了温度对饱和黏土力学特性的影响规律,并将温度这一因素引入到经典下加载面的理论,建立了反映温度效应的饱和黏土热弹塑性本构模型。得到以下结论:

(1) 温度对黏土力学性质的影响主要表现在:温度上升会导致黏土产生不可逆的塑性变形;温度不影响饱和黏土压缩指数、回弹指数和临界状态线斜率;温度塑性应变对黏土有硬化作用;温度使重超固结土的超固结比降低。

(2) 将温度影响引入到下加载面模型,该模型不仅由于保留了下加载面模型的特点,因而能描述超固结黏土应力-应变特性,并能描述温度上升产生的塑性应变,温度使超固结黏土的超固结比降低的作用以及温度塑性应变对屈服面的硬化效应。

(3) 采用不可逆热力学证明了模型严格满足热力学第一、第二定律。

(4) 利用模型模拟了 Pontida clay 和 Bangkok clay 这 2 种典型黏土不同超固结比的排水加热试验,不同温度下的三轴排水、不排水试验等,模拟结果和试验结果的对比分析表明模型能较好地反映温度对不同超固结比的黏土力学性质的影响。

参考文献(References):

- [1] GENS A, OLIVELLA S. Clay barriers in radioactive waste disposal[J]. *Revue Française de Génie Civil*, 2001, 5(6): 845 - 856.
- [2] CAMPANELLA R G, MITCHELL J K. Influence of temperature variations on soil behavior[J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, 1968, 94(3): 709 - 734.
- [3] TIDFORS M, SALLFORS G. Temperature effect on preconsolidation pressure[J]. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 1989, 12(1): 93 - 97.
- [4] DEMARS K R, CHARLES R D. Soil volume changes induced by temperature cycling[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1982, 19(2): 188 - 194.
- [5] DELAGE P, SULTAN N, CUI Y J. On the thermal consolidation of Boom clay[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37(2): 343 - 354.
- [6] SULTAN N. Etude du comportement thermo-mécanique de l'argile de Boom: expériences et modélisation[Ph. D. Thesis][D]. Paris: École Nationale des Ponts et Chaussées, 1997.
- [7] ABUEL-NAGA H M, BERGADO D T, BOUAZZAA, et al. Volume change behaviour of saturated clays under drained heating conditions: experimental results and constitutive modeling[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44(8): 942 - 956.
- [8] ABUEL-NAGA H M, BERGADO D T, RAMANA G V, et al. Experimental evaluation of engineering behavior of soft Bangkok clay under elevated temperature[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(7): 902 - 910.
- [9] KUNTIWATTANAKUL P, TOWHATA I, OHISHI K, et al. Temperature effects on undrained shear characteristics of clay[J]. *Soils and Foundations*, 1995, 35(1): 147 - 162.
- [10] HUECKEL T, BALDI G. Thermoplasticity of saturated clays: experimental constitutive study[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1990, 116(12): 1778 - 1796.
- [11] GRAHAM J, TANAKA N, CRILLY T, et al. Modified Cam-Clay modelling of temperature effects in clays[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, 38(3): 608 - 621.
- [12] ROBINET J C, RAHBAOUI A, PLAS F, et al. A constitutive thermomechanical model for saturated clays[J]. *Engineering Geology*, 1996, 41(1): 145 - 169.
- [13] CUI Y J, SULTAN N, DELAGE P. A thermomechanical model for saturated clays[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37(3): 607 - 620.
- [14] 崔玉军, 叶为民. 饱和黏土热-力学体积变形特征模拟研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 24(21): 3903 - 3910.(CUI Yujun, YE Weimin. On modeling of thermo-mechanical volume change behavior of saturated clays[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 24(21): 3903 - 3910.(in Chinese))
- [15] 姚仰平, 杨一帆, 牛雷. 考虑温度影响的 UH 模型[J]. *中国科学: 技术科学*, 2011, 41(2): 158 - 169.(YAO Yangping, YANG Yifan, NIU Lei. UH model considering temperature effects[J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 41(2): 158 - 169.(in Chinese))
- [16] YAO Y P, YANG Y F, NIU L. UH model considering temperature effects[J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(1): 190 - 202.
- [17] ZHANG S, LENG W, ZHANG F, et al. A simple thermo-elastoplastic model for geomaterials[J]. *International Journal of Plasticity*, 2012, 34(1): 93 - 113.
- [18] PLUM R L, ESRIG M I. Some temperature effects on soil compressibility and pore water pressure[R]. Washington, D C: Highway Research Board Special Report, 1969.

- [19] BALDI G, HUECKEL T, PEANO A, et al. Developments in modelling of thermo-hydro-geomechanical behaviour of Boom clay and clay-based buffer materials(volume 1)[R]. Luxembourg: Commission of the European Communities, 1991.
- [20] CEKEREVAC C, LALLOUI L. Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2004, 28(3): 209 - 228.
- [21] BAI B, SU Z. Thermal responses of saturated silty clay during repeated heating-cooling processes[J]. Transport in Porous Media, 2012, 93(1): 1 - 11.
- [22] MORIN R, SILVA A J. The effects of high pressure and high temperature on some physical properties of ocean sediments[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth(1978 - 2012), 1984, 89(B1): 511 - 526.
- [23] PAASWELL R E. Temperature effects on clay soil consolidation[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1967, 93(SM3): 9 - 22.
- [24] 白 冰, 赵成刚. 温度对黏性土介质力学特性的影响[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 533 - 537.(BAI Bing, ZHAO Chenggang. Temperature effects on mechanical characteristics of clay soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 533 - 537.(in Chinese))
- [25] MORITZ L, GABRIELSSON A. Temperature Effect on the Properties of Clay[C]// HANSON J L, TERMAAT R J ed. Soft Ground Technology Conference. Noordwijkerhout: American Society of Civil Engineers, 2001: 304 - 314.
- [26] BOUDALI M. Comportement tridimensionnel et visqueux des argiles naturelles[Ph. D. Thesis][D]. Quebec: Université Laval, 1995.
- [27] LALLOUI L, CEKEVERAC C, VULLIET L. Thermo-plasticity of clays: a simple constitutive approach[C]// Environmental Geomechanics. Lausanne, Suisse: Epfl Press, 2002: 45 - 58.
- [28] TOWHATA I, KUNTIWATTANAKU P, SEKO I. Volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests[J]. Soils and Foundations, 1993, 33(4): 170 - 183.
- [29] HUECKEL T, BALDI G. Thermoplasticity of saturated clays: experimental constitutive study[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 116(12): 1 778 - 1 796.
- [30] GHAREMANNEJAD B. Thermo-mechanical behaviour of two reconstituted clays[Ph. D. Thesis][D]. Sydney: Sydney University, 2006.
- [31] DE-BRUYN D, THIMUS J F. The influence of temperature on mechanical characteristics of Boom clay: the results of an initial laboratory programme[J]. Engineering Geology, 1996, 41(1): 117 - 126.
- [32] HASHIGUCHI K, UENO M. Elastoplastic constitutive laws of granular materials[C]// Constitutive Equations of Soils. Proceedings of 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Specialty Session 9. Tokyo: Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1977: 73 - 82.
- [33] 姚仰平, 万 征, 杨一帆, 等. 饱和黏土不排水剪切的热破坏[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2 561 - 2 569.(YAO Yangping, WAN Zheng, YANG Yifan, et al. Thermal failure for saturated clay under undrained condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2 561 - 2 569. (in Chinese))
- [34] CUI Y J, LE T T, TANG A M, et al. Investigating the time-dependent behaviour of Boom clay under thermo-mechanical loading[J]. Geotechnique, 2009, 59(4): 319 - 329.