

DOI: 10.11779/CJGE201612017

# 软岩热-弹-黏塑性本构模型

张升<sup>1,2</sup>, 徐硕<sup>1</sup>, 熊勇林<sup>3</sup>, 张锋<sup>4</sup>

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075; 2. 高速铁路建造技术国家工程实验室, 湖南长沙 410075;  
3. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 4. 名古屋工业大学, 日本名古屋)

**摘要:** 在诸多岩土工程如高放核废料处置、地热资源开发等应用中需要考虑软岩的长期力学特性, 而温度升高会对软岩材料的蠕变破坏特性产生复杂影响, 建立能反映蠕变破坏特性的本构模型具有理论价值和现实意义。从连续介质力学入手, 基于下负荷面剑桥模型和等价应力的概念, 建立了能描述软岩在温度作用下蠕变过程的热弹黏塑性模型。利用自主开发的仪器, 采用大谷石进行了不同围压下的三轴蠕变试验, 并对模型进行了验证。多种实验结果表明, 材料在不同应力状态下, 存在最优温度使得蠕变破坏最慢, 此外, 受温升影响时存在蠕变破坏加快和减慢两种现象, 提出的模型能统一描述这两种现象。分析了模型特性, 总结了不同材料参数和应力状态对蠕变规律的影响。

**关键词:** 等价应力; 蠕变本构模型; 蠕变规律; 最优温度

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)12-2278-09

**作者简介:** 张升(1979-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程数值模拟、岩土材料本构特性等方面的研究与教学工作。E-mail: zhang-sheng@csu.edu.cn.

## Thermo-elasto-viscoplastic model for soft rock

ZHANG Sheng<sup>1,2</sup>, XU Shuo<sup>1</sup>, XIONG Yong-lin<sup>3</sup>, ZHANG Feng<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China; 2. National Engineering Laboratory for High Speed Railway Construction, Changsha, Hunan 410075, China; 3. Department of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Department of Civil Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya 466-8555, Japan)

**Abstract:** In the construction of many geotechnical projects, such as nuclear waste disposal and geothermal extraction and storage, it is necessary to consider the long-term mechanical properties of soft rock. Furthermore, the evaluated temperature will cause a complicated influence on the creep damage behaviors of soft rock. In consequence, it is theoretically and practically meaningful to establish a constitutive model which can describe the creep damage behaviors. Within the framework of continuum mechanics, a thermo-visco-elastoplastic model is proposed based on the sub-loading Cam-clay model and the concept of equivalent stress. Triaxial creep tests on Tase stone under different confining pressures are conducted by using the self-developed apparatus. Compared with the numerical results, the experimental results exhibit that for a certain stress state, an optimum temperature exists, which will slow down the creep damage rate the most. In addition, both retarding and accelerating effects on creep rupture due to limited warming are observed for the same material, and this phenomenon can be predicted by the proposed model. Finally, model characteristics are analyzed, and the influence of material parameters on creep laws is discussed.

**Key words:** equivalent stress; creep constitutive model; creep law; optimum temperature

## 0 引言

近年来, 随着地下核废料处理、地热工程及深部开挖等工程的发展, 岩土材料在高温下的应力应变特性日益引起关注。尤其在长期高温条件下, 岩土材料的长期稳定性对工程安全的影响至关重要<sup>[1]</sup>; 因此, 需要深入研究岩土材料的高温-蠕变特性。过去数年来, 围绕黏土、软岩等材料在恒定温度下的蠕变特性, 国内外研究者<sup>[2-5]</sup>取得了大量成果。Campanella<sup>[6]</sup>和

Habibagahi<sup>[7]</sup>研究了温度对黏土固结系数及渗透系数的影响, 认为温升会降低孔隙水的黏性, 从而提高土的渗透系数。Akagi等<sup>[8]</sup>和 Shimizu等<sup>[9]</sup>观察到温度会加速饱和黏土的固结和二次压缩。Bruyn等<sup>[10]</sup>进行了 Boom-clay 的非排水蠕变试验, 以 0.5°C/min 的加热速

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2014CB047001); 国家自然科学基金项目(51208519)

收稿日期: 2015-10-11

率升温至 75℃ 并保持恒定, 研究表明高温会导致连续的孔隙水压增加。类似的试验<sup>[11]</sup>表明, 蠕变应力和温度对体积应变速率有很大影响, 体积变化还与超固结比 OCR 和温度范围有关。高小平等<sup>[12]</sup>进行了不同温度下盐岩的蠕变试验, 研究了不同应力水平和温度下盐岩的蠕变量, 发现随温度升高蠕变量会增加。除了材料的体积变化和强度变化, 针对蠕变中值得关注的蠕变速率变化曲线, 也有学者做了相关工作。Okada<sup>[13]</sup>进行了 20℃~80℃ 下泥岩和凝灰岩的单轴蠕变试验, 发现不同的蠕变应力下, 随温度升高, 材料的蠕变破坏会出现加快和减慢两种情况。李剑光等<sup>[15]</sup>进行了标准蠕变试验, 在 20℃~60℃ 条件下, 发现砂岩的蠕变量变化并不单纯随温度升高而升高, 而是与当前应力水平有关。可见, 材料蠕变的破坏不仅与 OCR 等材料性质有关, 还与蠕变应力和温度密切相关, 不能单纯的从温度对材料延脆性的影响来类比长期应力作用下材料破坏的变化趋势。

为描述温度变化下岩土材料的蠕变行为, 国内外学者<sup>[15-16]</sup>利用不同方法建立了很多考虑温度的模型。高峰等<sup>[17]</sup>基于西原体模型, 引入热膨胀系数、黏性衰减系数和损伤变量, 建立了能较全面反映温度作用下岩石黏弹塑性和损伤性质的模型。王春萍<sup>[18]</sup>等将高温损伤流变元件代替经典西原模型中牛顿元件的方法, 构建了能够描述不同温度条件下花岗岩蠕变全过程的本构模型。Laloui 等<sup>[19]</sup>建立了循环热-黏塑性模型, 考虑了热硬化和温度屈服面的发展。

软岩作为连续性较好的材料, 通常可以利用连续介质力学的理论来研究。经典的剑桥模型很好地描述了重塑土的应力应变特性; 而为描述超固结土, 出现了边界面模型、气泡模型、下负面模型等。其中, Hashiguchi<sup>[20]</sup>提出的下负面模型定义了下加载面的概念, 通过引入与 OCR 相关的状态参量较好的解决了超固结土的软化特性。Yamakawa<sup>[21]</sup>进一步拓展了下负面剑桥模型的隐式应力更新算法。基于下负面概念, Zhang 等<sup>[22-23]</sup>提出温度等价应力的概念, 将温度的影响融入到超固结土的 OCR 发展中, 建立了热-弹塑性模型, 并验证了模型满足热力学第二定律。在此基础上, 本文采用下负面的概念建模研究了软岩在不同温度作用下的蠕变破坏行为, 并进行了试验验证。试验中, 不同应力水平下, 高温同时导致了蠕变破坏加快或减慢。结合模型计算结果和试验结果, 分析总结了蠕变应力和温度对岩土材料蠕变破坏特性的影响规律。

## 1 基于等价应力概念的热弹黏塑模型

### 1.1 等价应力

很多研究表明, 在恒定的平均主应力  $\sigma_m$  作用下, 相对于初始温度  $\theta_0$ , 在温度升高至  $\theta$  时, 材料会发生弹性体积应变  $\Delta\varepsilon_v^{e\theta}$ ; 另一方面, 当平均主应力  $\sigma_m$  增加  $\Delta\sigma_m$  时, 同样会产生  $\Delta\varepsilon_v^e$ 。当  $\Delta\varepsilon_v^{e\theta}$  与  $\Delta\varepsilon_v^e$  相等时, 即可认为温度增量  $(\theta - \theta_0)$  与应力增量  $\Delta\sigma_m$  对材料体积应变的效果“等价”, 称此时对应的应力增量  $\Delta\tilde{\sigma}_m$  为等价应力。图 1 从单元体的体积变化对温度增量的等价效应进行了描述。

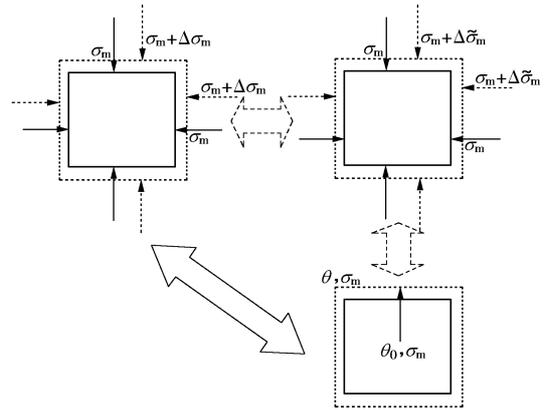


图 1 温度与应力引起体积应变的等价效应

Fig. 1 Equivalent effect on change of volumetric strain due to temperature increment or stress increment

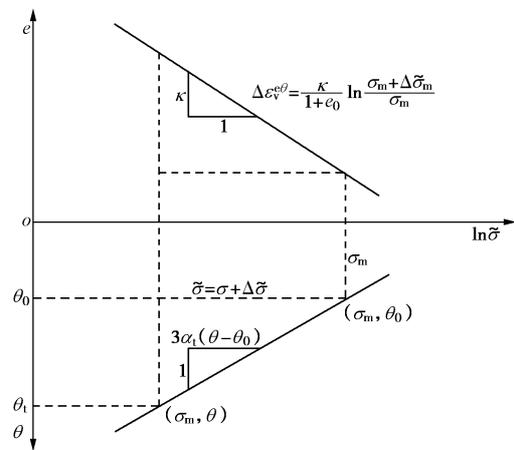


图 2 应力与温度引起体积应变对应图

Fig. 2 Thermal volume strain corresponding to mechanical elastic volume strain

一般条件下, 温度通常的选取范围为 0~100℃, 而相对温度  $\theta_0$  一般取 15℃~20℃。由温度引起的弹性体积应变增量表达式如下:

$$\Delta\varepsilon_v^{e\theta} = 3\alpha_1(\theta - \theta_0) \quad (1)$$

其中,  $\alpha_1$  为材料的热弹性线膨胀系数。在土力学中, 压缩为正, 故此参数取负值。

图 2 给出了分别由温度和应力增量引起的体积应变增量对应情况, 当这两种应变增量相等时, 有

$$\frac{\kappa}{1 + e_0} \ln \frac{\sigma_m + \Delta\tilde{\sigma}_m}{\sigma_m} = \Delta\varepsilon_v^{e\theta} = 3\alpha_1(\theta - \theta_0) \quad (2)$$

式中,  $\Delta\varepsilon_v^e$  为温度升高时产生的弹性体积应变增量;  $\sigma_m$  为当前应力状态, 最小取值为 98 kPa (一个大气压);  $\kappa$  为材料的膨胀系数;  $e_0$  为相对状态 (本文取 98 kPa) 时的孔隙率。结合式(2), 等价应力的增量  $\Delta\tilde{\sigma}_m$  表达式如下:

$$\Delta\tilde{\sigma}_m = \sigma_m \exp\left[\frac{3\alpha_t(\theta - \theta_0)(1 + e_0)}{\kappa}\right] - \sigma_m \quad (2)$$

一般应力条件下表达式如下:

$$\Delta\tilde{\sigma}_{ij} = \sigma_m \exp\left[\frac{3\alpha_t(\theta - \theta_0)(1 + e_0)}{\kappa}\right] \delta_{ij} - \sigma_m \delta_{ij} \quad (3)$$

式中,  $\delta_{ij}$  为克罗内克张量,  $\Delta\tilde{\sigma}_{ij}$  为一般应力条件下的等价应力。

进一步, 可得到等价应力的表达式如下:

$$\tilde{\sigma}_m = \sigma_m + \Delta\tilde{\sigma}_m = \sigma_m \exp\left[\frac{3\alpha_t(\theta - \theta_0)(1 + e_0)}{\kappa}\right] \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}_{ij} &= \sigma_{ij} + \Delta\tilde{\sigma}_{ij} \\ &= \sigma_{ij} + \sigma_m \exp\left[\frac{3\alpha_t(\theta - \theta_0)(1 + e_0)}{\kappa}\right] \delta_{ij} - \sigma_m \delta_{ij} \quad (5) \end{aligned}$$

基于等价应力的表达式, 可得到由温度和应力引起的总的弹性体积应变如下:

$$\begin{aligned} \varepsilon_v^e &= \varepsilon_v^{e\sigma} + \Delta\varepsilon_v^{e\theta} \\ &= \frac{\kappa}{1 + e_0} \ln \frac{\sigma_m}{\sigma_{m0}} + \frac{\kappa}{1 + e_0} \ln \frac{\tilde{\sigma}_m}{\sigma_m} \\ &= \frac{\kappa}{1 + e_0} \ln \frac{\tilde{\sigma}_m}{\sigma_m} + 3\alpha_t(\theta - \theta_0) \quad (6) \end{aligned}$$

式中,  $\sigma_{m0}$  表示参照应力, 一般取大气压强 (98 kPa)。

### 1.2 等价下负荷载加截面

在连续介质力学框架内, 剑桥模型在描述黏土本构特性时有很好的表现。软岩作为一种连续性较好的岩土材料, 可以被当作一种超固结土来研究。Hashiguchi<sup>[20]</sup>定义了下加载面剑桥模型来描述超固结土的力学行为; 其中, 下加载面通过当前应力状态, 并与正常固结面呈几何类似, 随应力增加而扩张。在当前应力状态  $(p, q)$  时, 下负荷屈服面的表达式如下:

$$f_s^\sigma = \ln \frac{p}{p_0} + \frac{1}{M} \frac{q}{p} - \frac{1}{C_p} \left( \varepsilon_v^p - \frac{\rho^\sigma}{1 + e_0} \right) \quad (7)$$

式中,  $C_p = (\lambda - k)/(1 + e_0)$ ,  $\lambda$  为土的压缩系数,  $\rho^\sigma = C_p(1 + e_0) \ln \text{OCR}^\sigma$ , 为与超固结度 OCR 相关的一个状态变量,  $M$  为临界状态剪切应力比。

根据等价应力的概念, 温度升高对材料力学性质的影响类似于卸载。在下负荷面模型中, 当前应力状态  $P_{N1}(\theta_0)$  即代表土体受到的卸载作用, 这里温度的卸载作用相当于使当前应力水平  $P_{N1}(\theta_0)$  的进一步减小为  $\tilde{P}_{N1}(\theta_1)$ , 其中, 当前温度  $\theta_1 > \theta_0$ , 见图 3。

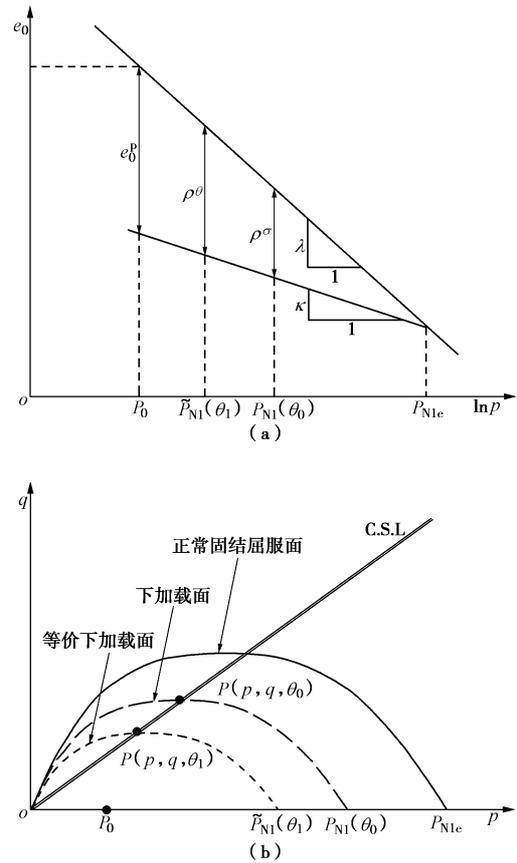


图 3 等价下负荷载的概念

Fig. 3 Concepts of equivalent sub-loading yield surface and normal yield surface

此外, 正常固结屈服面仍由剑桥模型确定, 即考虑正常固结面对应的塑性体积应变时, 认为温度不产生影响。此时, 结合式(4),

$$\tilde{p}_0 = p_0 \exp\left[\frac{3\alpha_t(\theta_0 - \theta_0)(1 + e_0)}{\kappa}\right] = p_0 \quad (8)$$

$$\tilde{P}_{N1e} = P_{N1e} \exp\left[\frac{3\alpha_t(\theta_0 - \theta_0)(1 + e_0)}{\kappa}\right] = P_{N1e} \quad (9)$$

$$\tilde{P}_{N1} = P_{N1} \exp\left[\frac{3\alpha_t(\theta - \theta_0)(1 + e_0)}{\kappa}\right] \quad (10)$$

式中,  $p_0$  为参考应力,  $P_{N1e}$  为前期固结应力, 这两项均不受温度变化影响,  $P_{N1}$  为常温下当前应力值,  $\tilde{P}_{N1}$  为温度升高后当前应力水平下的等价应力。

如图 3 所示, 引入等价应力后, 屈服面的形式依然保持不变, 然而当前应力在  $p - q$  坐标下会发生变化, 从而导致屈服面的大小及位置发生变化。通过当前温度和应力状态  $P(p, q, \theta_1)$  的下加载面表达式为

$$f_s = C_p \ln \frac{p}{p_0} + \frac{C_p}{M} \frac{q}{p} - \left( \varepsilon_v^p - \frac{\rho}{1 + e_0} \right) \quad (11)$$

式中,  $\rho = C_p(1 + e_0) \ln(P_{N1e} / \tilde{P}_{N1})$ , 为同时考虑温度和应力卸载作用的超固结状态参量。

### 1.3 具有时间依存性的下加载面发展准则

在确定塑性流动方向时, 本文采用相关联的流动法则, 将所提出的屈服函数作为材料的热-塑性势函数, 可得到塑性应变增量如下:

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon_{ij}^p &= \Lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}, \\ d\varepsilon_v^p &= \Lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ii}}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中, 塑性因子  $\Lambda$  为一正的标量, 大小由势函数的协调方程确定:

$$\dot{f} = 0 \rightarrow \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \dot{\sigma}_{ij} - \frac{1}{C_p} \left( \dot{\varepsilon}_v^p - \frac{\dot{\rho}}{1+e_0} \right) = 0 \quad (13)$$

进一步, 则需要确定状态变量  $\rho$  的发展式。基于 Zhang 等<sup>[24]</sup>为描述蠕变的时间依存性而提出的发展式, 将等价应力的概念融入, 可很容易得到  $\rho$  在温度-应力作用下与时间相关的发展式如下:

$$\frac{\dot{\rho}}{1+e_0} = -\Lambda \frac{G(\rho, t)}{\bar{\sigma}_m} + h(t) \quad (14)$$

$$h(t) = \dot{\varepsilon}_v^0 [1+t/t_1]^{-\alpha} \quad (15)$$

$$G(\rho, t) = a \cdot \rho \cdot \rho^{C_n \ln(1+t/t_1)} \quad (16)$$

式中,  $h(t)$  用于描述蠕变阶段, 应力增量为 0 时黏塑性应变的发展。在蠕变试验过程中, 会有应力加载过程, 而初始的加载速率会对蠕变过程有影响, 故此处  $h(t)$  的表达式中包含了剪切速率和时间项。 $\dot{\varepsilon}_v^0$  为时刻  $t=0$  s 的体积应变速率;  $\alpha$  为蠕变参数, 为材料参量;  $t_1$  为单位时间。

另一方面,  $G(\rho, t)$  用于描述与当前应力  $\sigma_m$  相关的超固结比发展过程。 $a$  为材料参量, 与下负荷面模型类似, 决定  $\rho$  的发展速率;  $C_n$  用于反映应变速率对超固结土或软岩在压缩试验时峰值的影响, 可由多组三轴试验确定。

基于胡克定律, 应力增量可表示为

$$\begin{aligned} d\sigma_{ij} &= E_{ijkl} d\varepsilon_{kl}^e = E_{ijkl} (d\varepsilon_{kl} - d\varepsilon_{kl}^p - d\varepsilon_{kl}^e) \\ &= E_{ijkl} d\varepsilon_{kl} - E_{ijkl} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} \Lambda - E_{ijkl} \alpha_t \delta_{kl} d\theta \end{aligned} \quad (17)$$

将式 (11)、(12)、(14) 代入协调方程式 (13) 中, 可得

$$\Lambda = \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} E_{ijkl} d\varepsilon_{kl} - \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} E_{ijkl} \alpha_t \delta_{kl} d\theta}{\frac{h_p^\theta}{C_p} + \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} E_{ijkl} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}}} \quad (18)$$

其中,

$$h_p^\theta = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ii}} + \frac{G(\rho, t)}{\sigma_m \exp\left[\frac{3\alpha_t(\theta - \theta_0)(1+e_0)}{\kappa}\right]} \quad (19)$$

塑性应变和黏塑性应变增量均可根据式 (12) 进行计算。加载准则如下:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{f}_\sigma > 0 & \text{ 硬化} \\ \dot{f}_\sigma < 0 & \text{ 软化} \\ \dot{f}_\sigma = 0 & \text{ 纯塑性蠕变} \end{aligned} \right. \quad \left\{ \begin{aligned} \|d\varepsilon_{ij}^{p\sigma}\| > 0 \quad \Lambda > 0, \\ \|d\varepsilon_{ij}^{p\sigma}\| > 0 \quad \Lambda \leq 0, \end{aligned} \right. \text{ 弹性应变。}$$

本文提出的热-弹-黏塑性模型在温度场的处理中仅添加一个参数  $\alpha_t$ , 且具有明确的物理意义, 与材料本身相关。在与时间相关项的处理上, 参考了 Zhang 等<sup>[24]</sup>提出的方法, 在  $d\rho$  的发展式中加入了非齐次项  $h(t)$ , 事实上, 对正常固结土而言,  $h(t)$  即为二次固结产生的应变速率。当选取的蠕变应力无限大时, 模型会退化考虑温度影响的弹塑性模型, 当温度取参考温度时, 模型则退化为普通的下负荷面剑桥模型。

## 2 试验验证

为研究在温度影响下软岩的剪切及蠕变特性, 基于传统三轴压缩试验仪, 开发了温控的三轴压缩测试仪。加载系统和数据采集系统都由电脑终端控制, 温度控制系统由加热器和温度传感器组成。试验仪器能很好地实现温度条件下的三轴蠕变试验。

### 2.1 仪器设备及试样准备

高温三轴仪主要由围压加载系统、轴压加载系统和温度控制系统组成。其中, 轴压加载能实现应力控制和应变控制两种不同的加载控制情况。在应力控制条件下, 加载由液压控制; 在应变控制条件下, 上下加载板由伺服发动机控制, 其加载速度可预先设定。通过 AD-DA 转换电路, 轴压和围压的具体数值由 VB 语言编写的软件程序给定。

一般来说, 软岩的单轴抗压强度不大于 20 MPa, 而在核废料处理等工程中, 核废料埋深一般大于 100 m, 此时的围压约为 10 MPa 左右。据此, 研究中所用仪器设置的最大轴压为 50 kN, 最大围压为 10 MPa。核废料在产生辐射过程中, 会同时使周围岩体温度升高, 已有研究表明温度升高的上限一般为 100℃; 此外, 当温度超过 100℃ 时, 水分会产生相变, 土体变得非饱和, 使研究的问题复杂化, 因此, 本仪器采用的温度上限为 90℃。对试样的加热是通过对压力室中的水加热来实现的, 在压力室内设置了一个螺旋传动装置, 用以加快水温度的分布。试验仪器的整体组成参见文献[22]。

为保证试验研究不受物化反应的影响, 材料的矿物组成应该在高温作用下仍具有稳定的特性。考虑这些因素, 试验材料选用 Ohya stone。这是一种在日本北部地区广泛分布的典型软质火山凝灰岩, 形成于第三纪中新世。其矿物组成主要有斜长石、石英以及部

分黑云母、角闪石和辉石。在温度作用下这些矿物组分均很稳定,因此该试验材料很适合本试验。

## 2.2 试验条件及试验过程

采用大谷石作为试验材料,其单轴抗压强度约为10~20 MPa,取自日本北部地区的一个矿石场,埋深约为60 m。取样时保持试样的湿润状态,避免暴露在空气中。试样大小为径向50 mm,高度为100 mm。为保证试样的饱和度达到95%以上,对试样进行抽真空饱和,并置于真空环境中维持7 d。此后,需对试样在设定的围压下进行同向固结24 h,试验的应力水平设置为0.98, 0.49 MPa两组,对应的蠕变应力分别为9.1, 7.4 MPa。在不同应力水平下材料的物性参数具体见表1所示。

表1 材料物性参数表

Table 1 Physical parameter of specimen

参数	$\sigma_m = 0.98 \text{ MPa}$	$\sigma_m = 0.49 \text{ MPa}$
弹性模量 $E/\text{MPa}$	400	400
压缩系数 $\lambda$	0.024	0.024
膨胀系数 $\kappa$	0.02	0.02
$a$	390	390
$\alpha$	0.043	0.043
$C_n$	1.4	1.4
泊松比 $\nu$	0.08	0.08
残余强度 $R_f$	5.04	7.78
初始孔隙率 $e_0$	0.42	0.42
超固结比 OCR	250	250

试验按标准蠕变试验进行,温度分别控制在20℃, 40℃, 60℃和80℃下,在到达目标温度前,温度上升梯度为0.5℃/min。在升温过程中,保持排水状态。在施加蠕变应力的过程中,蠕变应力是不可能瞬间加上去的,而是有一个逐渐加载的过程,初始阶段对试样采用0.002%/min的恒定的初始剪切速率进行三轴剪切,达到指定的蠕变应力值时,停止剪切过程,并保持温度和应力不变,材料进入蠕变阶段。

## 2.3 试验结果及理论验证

按照前述试验条件,进行了不同应力水平和蠕变应力下,不同温度的蠕变试验,结果如图4, 5。

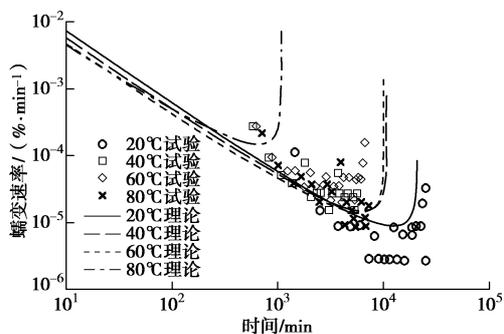


图4 0.49 MPa 围压下的理论及试验结果

Fig. 4 Experimental and theoretical results under constant confining stress  $\sigma_3 = 0.49 \text{ MPa}$

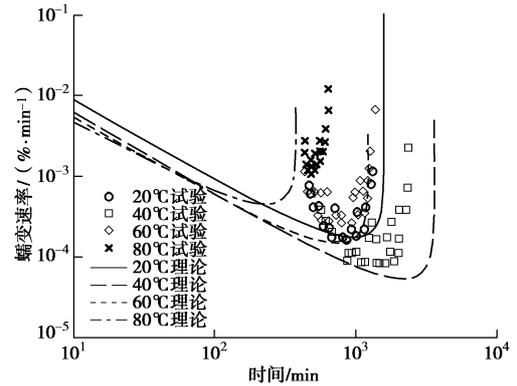


图5 0.98 MPa 围压下的理论及试验结果

Fig. 5 Experimental and theoretical results under constant confining stress  $\sigma_3 = 0.98 \text{ MPa}$

试验结果表明,蠕变速率先是稳定下降,到一定时间进入迁移阶段,之后会在较短时间内进入破坏阶段,此时材料进入塑性流动状态,在短时间内应变速率急剧增大,曲线表现为垂直向上延伸的趋势。围压为0.49 MPa时,随温度升高,岩体材料的由延性向脆性转化,岩体的蠕变破坏加快。计算结果有同样的规律,且与试验结果有较好的拟合度。然而,当温度升高至80℃时,计算结果的定量描述不能完全令人满意,这与试验的离散性有关,但计算结果能反映蠕变破坏随温度的升高而变化,是不争的事实。

当围压为0.98 MPa时,试验反映出来的规律则与0.49 MPa时不同。从图5可以看出,温度升高并非单调地影响材料的蠕变破坏,当温度从20℃升高至40℃时,蠕变破坏减慢;当温度从40℃上升至60℃及80℃时,蠕变破坏加快,尤其是80℃,温升加速破坏的现象十分明显。同样,计算得到的结果也具有较高的拟合度,并反映了上述两个规律。综合两组试验来看,温度升高对软岩材料蠕变特性的影响并非单纯的加速或减慢破坏,而是与应力水平、蠕变应力,甚至温度都有关。不同应力条件下,均存在某个温度,使得蠕变的破坏最慢,本文将之称为“最优温度”。在温度升高时,结合水含量降低,材料的基面间距会减小<sup>[25]</sup>,此外,材料的晶相结构也可能发生不同程度的变化,从而进一步导致软岩向延性或脆性转化,当在某个温度下软岩的延性较强时,蠕变进入迁移阶段所需时间较长,表现在宏观上为破坏最慢。本次试验研究表明,在相对低应力条件下,“最优温度”为20℃,在相对高应力条件下,为40℃。为进一步揭示蠕变破坏与温度的关系,现取两组试验的蠕变曲线的最低点,以温度为横轴,破坏时间为纵轴,研究不同温度下蠕变破坏点的变化规律,如图6所示。

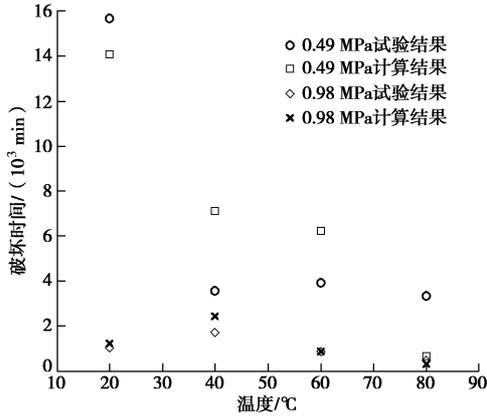


图 6 破坏时间与温度关系

Fig. 6 Relationship between time-to-failure and temperature

图 6 中, 三角形表示 0.49 MPa 条件下的试验和计算结果, 圆形表示 0.98 MPa 条件下试验和计算的结果。不可否认的是, 随着应力水平和蠕变应力的增加, 破坏时间会明显减少, 即蠕变破坏加快。然而, 单一应力条件下, 温度的影响则有明显差异, 在高应力条件下, 破坏时间存在峰值, 在低应力条件下, 破坏时间呈单调递减。该图更清晰地表明, 对软岩材料的三轴蠕变而言, 不同应力条件下存在最优温度, 使蠕变破坏最慢, 且这个温度不一定是常温。

进一步, 为验证模型的适用性, 本文研究了 Okada 等<sup>[13]</sup>针对泥岩进行的高温单轴蠕变试验结果, 并用模型进行了计算验证。泥岩是由黏土固化而成的沉积岩, 其成分构造与页岩类似, 从力学属性来看, 亦属于软岩。试验在 20°C 和 60°C 的条件下进行, 蠕变应力设置为 3.5, 4.0 MPa, 初始剪切速率为 0.009%/min, 材料的物性参数弹性模量  $E$  为 900 MPa,  $a$  为 250, 压缩系数  $\lambda$  为 0.024,  $\alpha$  为 0.043, 膨胀系数  $\kappa$  为 0.02,  $C_n$  为 2.2, 残余强度  $R_f$  为 7.78, 初始孔隙率  $e_0$  为 0.42, 泊松比  $\nu$  为 0.08。

从图 7 可以看出, 在泥岩的单轴蠕变试验中, 升高温度对蠕变破坏的影响同样很复杂。在蠕变应力为 3.5 MPa 时, 材料的蠕变破坏随温度升高而减慢, 而在 4.0 MPa 时, 材料的蠕变破坏随温度升高而加快。然而, 值得注意的是, 此研究选取温度范围较小, 高温仅取到 60°C, 因此, 当蠕变应力较低时, 80°C 的高温可能仍会加速蠕变破坏。模型的计算结果与试验结

果相比有一定的拟合效果, 虽然量化上不能完美地描述试验结果, 但清晰地反映了温升使蠕变破坏加快和减慢的两种相反的情形。此外, 前文针对本文试验现象提出的解释依然适用于本组数据, 即不同蠕变应力下依然存在最优温度, 使得蠕变破坏最慢, 在 3.5 MPa 下为 60°C, 在 4.0 MPa 下为 20°C。值得指出的是, 对泥岩而言, 在 3.5 MPa 的围压时, 最优温度可能存在于 20°C~60°C 之间, 对于该温度点的确定, 仍需要进一步的试验研究。

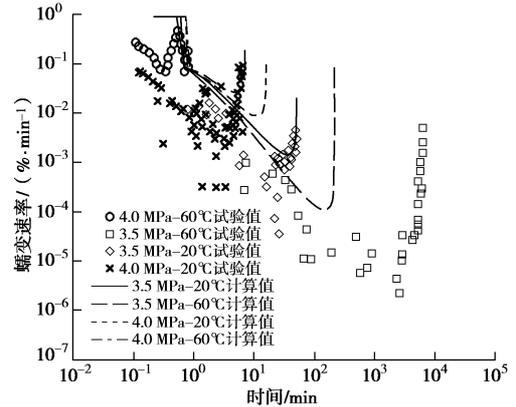


图 7 泥岩单轴蠕变的试验和计算结果 (Okada, 2005)

Fig. 7 Theoretical and experimental results of unconfined uniaxial creep tests on mudstone (Okada, 2005)

### 3 模型讨论

根据前文的试验结果及计算结果对比可知, 提出的模型能在一个不变参数体系中统一描述了蠕变破坏加快和减慢两种现象。在模型试验中, 参数  $a$  和 OCR 对温度作用下软岩的蠕变破坏行为有重要影响, 其中,  $a$  主要决定与超固结比相关的状态变量  $\rho$  的发展速率, OCR 则为初始超固结比。改变这两个参数将适应不同的蠕变破坏规律。进一步在 20°C~80°C 的条件下, 研究了不同参数对模型表现的影响。表 2 给出了模型计算采用的材料参数, 为了保证计算结果的可信度, 与大谷石的物性参数相同, 围压为 0.98 MPa。图 8 为参照组计算结果, 与图 5 相同。图 9~12 则分别反映了增大或减小参数  $a$  和 OCR 时对应的模型表现及蠕变破坏随温度变化的规律。

算例 1 作为对照组, 结果如图 8 所示。算例 2 研

表 2 算例 1~5 所用材料参数表

Table 2 Physical parameters involved in Case 1~5

算例	弹性模量 $E/\text{MPa}$	压缩系数 $\lambda$	膨胀系数 $\kappa$	$a$	$\alpha$	$C_n$	泊松比 $\nu$	残余强度 $R_f$	初始孔隙率 $e_0$	超固结比 OCR
1	400	0.024	0.02	390	0.043	1.4	0.08	5.04	0.42	250
2	400	0.024	0.02	190	0.043	1.4	0.08	5.04	0.42	250
3	400	0.024	0.02	500	0.043	1.4	0.08	5.04	0.42	250
4	400	0.024	0.02	390	0.043	1.4	0.08	5.04	0.42	150
5	400	0.024	0.02	390	0.043	1.4	0.08	5.04	0.42	250



究了减小  $a$  值情况下模型的表现, 如图 9 所示, 温度的强化效应在此时更加明显, 与对照组相比, 不仅 40℃ 时材料蠕变破坏时间长于 20℃ 时, 同时在 60℃ 时, 温升对材料也表现出强化影响。另一方面, 算例 3 则相对增大了  $a$  值, 图 10 结果表明, 此时温度的弱化效应更明显, 随着温度升高, 蠕变破坏依次加快, 这一现象与 Shimizu<sup>[9]</sup> 的试验结果相符。

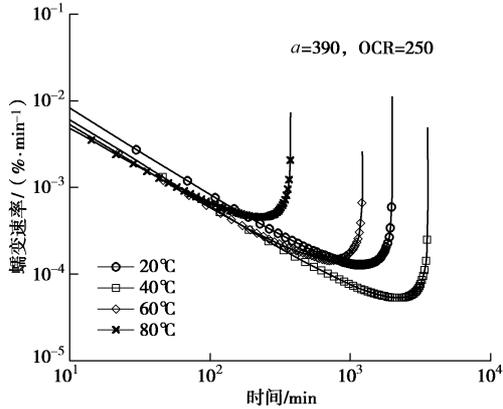


图 8 算例 1: 对照组算例

Fig. 8 Case 1: numerical results for reference

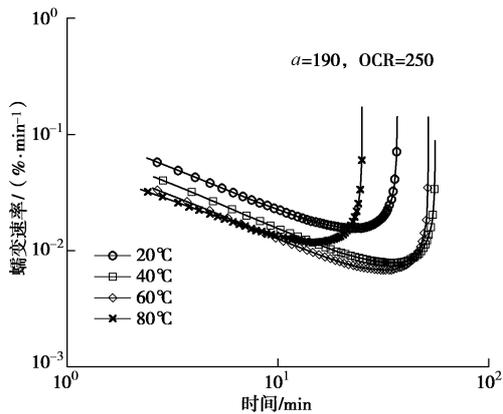


图 9 算例 2:  $a$  值较低水平时计算结果

Fig. 9 Case 2: numerical results at low level of  $a$

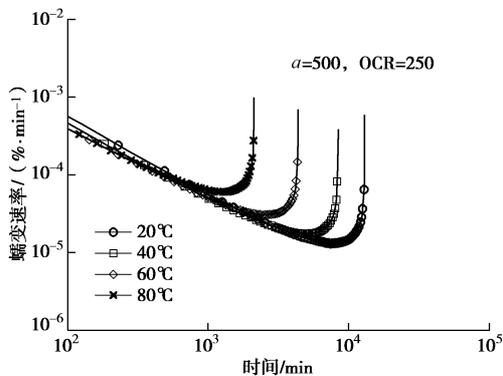


图 10 算例 3:  $a$  值较高水平时计算结果

Fig. 10 Case 3: numerical results at high level of  $a$

算例 4 和算例 5 则分别研究了较大 OCR 和较小 OCR 对计算结果的影响。图 11 结果表明, 在较低 OCR

的情况下, 材料表现出温度升高破坏加快的现象; 图 12 结果表明, 在 OCR 较高的情况下, 随着温度升高, 材料的蠕变破坏反而会减慢。

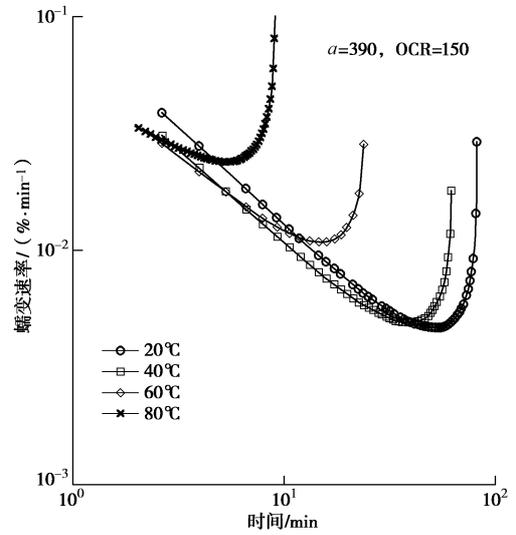


图 11 算例 4: OCR 值较低水平时计算结果

Fig. 11 Case 4: numerical results at low level of OCR

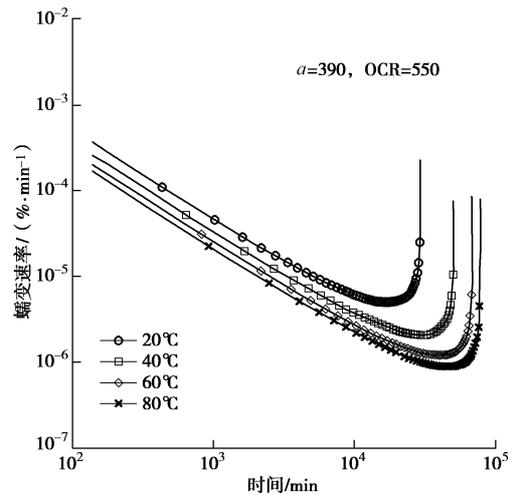


图 12 算例 5: OCR 值较高水平时计算结果

Fig. 12 Case 5: numerical results at high level of OCR

事实证明, 岩土材料蠕变破坏受温度的影响情况非常复杂, 对不同的材料在不同的应力状态下, 温度升高既可能加速蠕变破坏, 也可能减慢蠕变破坏, 提出的模型具有能够反映这种复杂的变化规律的特性, 然而, 更系统的结论则需要进一步对不同材料进行深入细化的试验研究。

## 4 结 论

(1) 通过分析温度对岩土材料力学特性的影响, 将温度引入到连续介质力学中, 采用下加载面剑桥模型建立了考虑温度的热-弹-黏塑性模型, 该模型能描述温度升高情况下软岩材料蠕变破坏的变化。

(2) 自主开发了具有温控功能的三轴试验机, 该仪器能进行 0~100℃ 温度下的三轴试验及蠕变试验。利用该仪器, 研究了大谷石的高温蠕变特性。进行了两组不同围压和蠕变应力条件下的温升蠕变试验, 温度设置为 20℃, 40℃, 60℃ 和 80℃。试验发现, 在低应力条件下, 温度升高, 蠕变破坏加快; 在高应力条件下, 温度升高, 蠕变破坏会先减慢, 后加快。利用建立的模型进行预测发现, 计算结果能良好地反映试验结果, 同时能清晰地描述温度引起的蠕变破坏变化规律。进一步, 利用日本 Okada 等<sup>[13]</sup>的试验数据进行拟合, 同样得到了较好的模型计算结果, 验证了模型的普适性。

(3) 结合模型参数, 提出最优温度的概念。对某个应力条件而言, 存在最优温度, 使当前应力条件下蠕变破坏最慢, 最优温度能解释不同应力条件下蠕变破坏受温度影响的离散性。同时, 模型计算表明, 材料 OCR 和  $a$  值对蠕变破坏规律有较大影响, 不同材料在不同应力状态下受温度影响会出现强化或弱化效应: 初始 OCR 较高或  $a$  较低时, 升高温度会减慢蠕变破坏, 初始 OCR 较高或  $a$  较高时升高温度会加快蠕变破坏。

#### 参考文献:

- [1] LALOUI L, MODARESSI H. Modelling of the thermo-hydro-plastic behaviour of clays[C]// HOTEIT N, ed. Hydro Mechanical and Thermohydromechanical Behaviour of Deep Argillaceous Rock. Rotterdam: Balkema, 2002: 161 - 170.
- [2] DELAGE P, SULTAN N, CUI Y J. On the thermal consolidation of Boom clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**(2): 343 - 354.
- [3] 刘泉声, 许锡昌, 出口勉, 等. 三峡花岗岩与温度及时间相关的力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, **20**(5): 715 - 719. (LIU Quan-sheng, XU Xi-chang, TSUTOMO Y, et al. Testing study on mechanical properties of the three gorges granite concerning temperature and time[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, **20**(5): 715 - 719. (in Chinese))
- [4] 宋世雄, 张建民. 砂土流变行为的热力学本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(增刊 1): 129 - 133. (SONG Shi-xiong, ZHANG Jian-min. Thermodynamic constitutive model for rheological behavior of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(S1): 129 - 133. (in Chinese))
- [5] 梁玉雷, 冯夏庭, 周 辉, 等. 温度周期作用下大理岩三轴蠕变试验与理论模型研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(10): 3107 - 3112. (Liang Yu-lei, Feng Xia-ting, Zhou Hui, et al. Research on triaxial creep experiment and theoretical model of marble under cyclic temperatures[J]. Rock & Soil Mechanics, 2010, **31**(10): 3107 - 3112. (in Chinese))
- [6] CAMPANELLA R G, MITCHELL J K. Influence of temperature variations on soil behavior[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Engineering Division, ASCE, 1968, **94**(3): 709 - 734.
- [7] HABIBAGAH K. Temperature effect and the concept of effective void ratio[J]. Indian Geotechnical Journal, 1977, **7**(1): 14 - 34.
- [8] AKAGI H, KOMIYA K. Constant rate of strain consolidation properties of clayey soil at high temperature[C]// Compression and Consolidation of Clayey Soils. Rotterdam: Balkema, 1995: 3 - 8.
- [9] SHIMIZU M. Quantitative assessment of thermal acceleration of time effects in one-dimensional compression of clays[C]// Deformation Characteristics of Geomaterials. Lyon, 2003: 479 - 487.
- [10] 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.
- [11] CUI Y J, LE T T, TANG A M, et al. Investigating the time-dependent behaviour of Boom clay under thermo-mechanical loading[J]. Géotechnique, 2009, **59**: 319 - 29.
- [12] 高小平, 杨春和, 吴 文, 等. 盐岩蠕变特性温度效应的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(12): 2054 - 2059. (GAO Xiao-ping, YANG Chun-he, WU Wen, et al. Experimental studies on temperature dependent properties of creep of rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2005, **24**(12): 2054 - 2059. (in Chinese))
- [13] OKADA T. Mechanical properties of sedimentary soft rock at high temperature. Part 2. Evaluation of temperature dependency of creep behavior based on unconfined compression test[R]. Chiba: Central Research Institute of Electric Power Industry, 2006. (in Japanese)
- [14] 李剑光, 王永岩. 软岩蠕变的温度效应及实验分析[J]. 煤炭学报, 2012, **37**(增刊 1): 81 - 85. (LI Jian-guang, WANG Yong-yan. Experimental analysis of temperature effect in creep of soft rock[J]. Journal of China Coal Society, 2012, **37**(S1): 81 - 85. (in Chinese))

- [15] 龚 哲, 陈卫忠, 于洪丹, 等. 基于下加载面概念的饱和黏土温度-应力耦合弹塑性模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2015. (GONG Zhe, CHEN Wei-zhong, YU Hong-dan, et al. Thermo-elasto-plastic model for saturated clay based on the concept of sub-loading surface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2015. (in Chinese))
- [16] YASHIMA A, LEROUEIL S, OKA F, et al. Modelling temperature and strain rate dependent behavior of clays: One dimensional consolidation[J]. Soils and Foundations, 1998, **38**(2): 63 - 73.
- [17] 高 峰, 徐小丽, 杨效军, 等. 岩石热黏弹塑性模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(1): 74 - 80. (GAO Feng, XU Xiao-li, YANG Xiao-jun, et al. Research on thermo-visco-elastoplastic model of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(1): 74 - 80. (in Chinese))
- [18] 王春萍, 陈 亮, 梁家玮, 等. 考虑温度影响的花岗岩蠕变全过程本构模型研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(9): 2493 - 2501. (WANG Chun-ping, CHEN Liang, LIANG Jia-wei, et al. Creep constitutive model for full creep process of granite considering thermal effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(9): 2493 - 2501. (in Chinese))
- [19] MODARESSI H, LALOUI L. A thermo-viscoplastic constitutive model for clays[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1997, **21**(5): 313 - 335.
- [20] HASHIGUCHI K. Elasto-plastic constitutive laws of granular materials, constitutive equations of soils[C]// Constitutive Equations of Soils, Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Spec. Session 9. Tokyo, 1977: 73 - 82.
- [21] YAMAKAWA Y, HASHIGUCHI K, IKEDA K. Implicit stress-update algorithm for isotropic Cam-clay model based on the subloading surface concept at finite strains[J]. International Journal of Plasticity, 2010, **26**(5): 634 - 658.
- [22] ZHANG S, LENG W, ZHANG F, et al. A simple thermo-elastoplastic model for geomaterials[J]. International Journal of Plasticity, 2012, **34**: 93 - 113.
- [23] ZHANG S, ZHANG F. A thermo-elasto-viscoplastic model for soft sedimentary rock[J]. Soils and Foundations, 2009, **49**(4): 583 - 595.
- [24] ZHANG F, YASHIMA A, NAKAI T, et al. An elasto-viscoplastic model for soft sedimentary rock based on tij concept and subloading yield surface[J]. Soils and foundations, 2005, **45**(1): 65 - 73.
- [25] SHARIATMADARI N, SAEIDIJAM S. The effect of thermal history on thermo-mechanical behavior of bentonite-sand mixture[J]. International Journal of Civil Engineering, 2012, **10**(2): 162 - 167.