

# 非线性弹粘塑本构模型开发及应用

潘晓明

(深圳市地铁集团有限公司, 广东深圳 518026)

**摘要:**讨论了岩体非线性流变的复杂力学行为,基于 Peirc 比例因子,提出一种非线性弹粘塑性本构模型,并推导了有限元应力返回算法及一致切线模量。根据 ABAQUS 的 UMAT 格式要求,编制了相应的接口程序,将该模型引入 ABAQUS 中。数值试验结果表明,所建立的非线性弹粘塑性流变模型可以统一描述不同应力状态下的蠕变过程,具有广泛的适用能力。采用该模型对岩石隧道进行弹粘塑蠕变数值计算,得到了隧道拱顶下沉及接触压力的随时间的变化规律。结果表明该模型是正确和可靠的,具有良好的应用前景。

**关键词:**非线性弹粘塑性模型;应力返回算法;一致切线模量;蠕变特性;UMAT

中图分类号:TU 452

文献标识码:A

文章编号:1674-4764(2012)S2-0071-06

## Development and Application of Nonlinear elasto-viscoplastic constitutive model

PAN Xiaoming

(Shenzhen Metro Group Co. Ltd., Shenzhen 518026, Guangdong, China)

**Abstract:** A complex nonlinear rheological mechanical behavior of rocks is discussed. Based on Peirc's Scale factor, a nonlinear elasto-viscoplastic constitutive model is proposed; meanwhile stress return algorithm and consistent tangent modulus are derived. According to the UMAT interface requirement of ABAQUS, the corresponding UMAT codes are programmed. The numerical test results show that the establishment of nonlinear elasto-viscoplastic rheological model can uniformly describe creep process under different stress states, which demonstrate the extensive adaptability of the model. Using the nonlinear elasto-viscoplastic constitutive model, the rheological numerical analysis is applied to rock tunnel, the variation with time of the tunnel crown settlement and contact pressure are obtained. These results indicate that the developed model is correct and reliable, and will have good application prospects.

**Key words:** Nonlinear elasto-viscoplastic constitutive model; stress return algorithm; consistent tangent modulus; creep property; UMAT

流变是岩石的重要力学特征之一。国内外大量的工程实例表明,在岩石工程中的失稳现象与岩石流变特性密切相关。岩石工程失稳前,其受力特征一般是外载荷长时间恒定作用,这种破坏形式即为典型的流变失稳。

关于岩石蠕变特性及其应用的研究,很多学者从不同的角度进行了探讨。孙钧<sup>[1]</sup>建立了不同的蠕变模型,并阐述了确定模型蠕变参数的方法。赵延林等<sup>[2]</sup>对二辉橄榄岩试样进行弹粘塑性流变试验,建立了定常流动速率及加速蠕变率的应力拟合函数,从理论上给出非线性弹粘塑性流变模型的三维蠕变方程。余成学等<sup>[3]</sup>引进岩石时效强度理论及 Kachanov 损伤理论,建立以时间变量表示的岩石损伤表达式,并将其与岩石黏塑性流变参数相联系,建立了非线性黏弹塑性蠕变模型。潘晓明等<sup>[4]</sup>在西原模型的基础上,引入非线性黏塑性体与开尔文元件,建立一个能完整反映蠕变全过程的非定常西原黏弹塑性流变模型。

基于 Peirc<sup>[5]</sup>提出的比例因子,采用 Drucker-Prager 屈服准则,提出一种新的非线性弹粘塑性本构模型。针对主应力

空间的应力状态处于光滑屈服面或锥点屈服的不同位置,推导了该模型的应力返回和隐式积分算法,通过塑性迭代保证应力状态始终位于当前屈服面,具有非常高的计算精度。同时得到的积分算法相一致的弹粘塑性切线模量,提高了增量迭代有限元方法的收敛速度。

在此基础上,利用 ABAQUS 所提供的用户材料子程序 UMAT 接口,在 ABAQUS 中开发了该非线性弹粘塑性本构模型,对单轴压缩流变试验的数值模拟及圆形洞室问题进行了弹粘塑性分析,并与 ABAQUS 软件自带模型及解析解进行比较,以验证编制的接口程序的正确性。

### 1 非线性弹粘塑性本构模型

#### 1.1 应变率表达式

总的应变率分为弹性应变率和粘塑性应变率,表达式为

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^{vp} \quad (1)$$

其中  $\dot{\epsilon}$  是总应变率,  $\dot{\epsilon}^e$  是弹性应变率,  $\dot{\epsilon}^{vp}$  是塑性应变率。

## 1.2 屈服准则

对于 Drucker-Prager(D-P)模型,其屈服面在主应力空间为圆锥面,如图 1 所示,主应力空间分为光滑屈服面和锥点屈服<sup>[6-7]</sup>。屈服准则为

$$\varphi(\sigma, c) = \sqrt{J_2} + \eta p - \xi c. \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} J_2 &= \frac{1}{2} s : s, s = \sigma - p(\sigma) I, \\ \eta &= \frac{6 \sin \beta}{\sqrt{3}(3 - \sin \beta)}, \\ \xi &= \frac{6 \cos \beta}{\sqrt{3}(3 - \sin \beta)}, \\ c &= c(\bar{\varepsilon}^p) = c_0 + \kappa(\bar{\varepsilon}^{vp}). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $\varphi$ 为屈服函数; $s$ 为偏应力张量; $p(\sigma) = tr(\sigma)/3$ 为静水压力场; $\beta$ 为内摩擦角; $c_0$ 为初始内粘聚力; $\bar{\varepsilon}^p$ 为等效粘塑性应变; $\kappa$ 为 $\bar{\varepsilon}^{vp}$ 的函数。

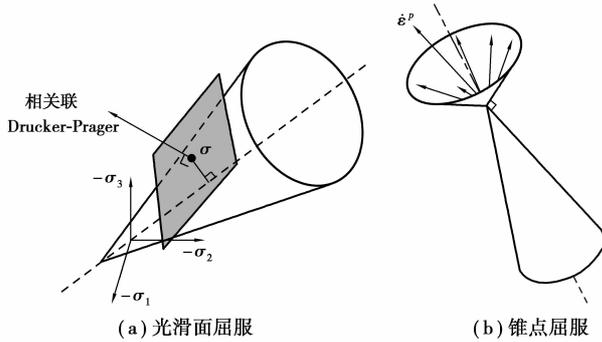


图 1 D-P 模型应力空间屈服面

## 1.3 流动法则

塑性流动势函数 $\phi$ 为

$$\left. \begin{aligned} \phi(\sigma, c) &= \sqrt{J_2} + \bar{\eta} p, \\ \bar{\eta} &= \frac{6 \sin \theta}{\sqrt{3}(3 - \sin \theta)}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \dot{\gamma} N = \dot{\gamma} \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} = \dot{\gamma} \left( \frac{1}{2\sqrt{J_2}} s + \frac{\bar{\eta}}{3} I \right). \quad (5)$$

其中: $\theta$ 为膨胀角, $N$ 为流动张量

对于光滑屈服面上,等效粘塑性应变率为

$$\bar{\varepsilon}^{vp} = -\dot{\gamma} \frac{\partial \phi}{\partial c} = \dot{\gamma} \xi. \quad (6)$$

对于锥点屈服面处,粘塑性体应变率为

$$\dot{\varepsilon}_v^{vp} = \dot{\gamma} \bar{\eta}. \quad (7)$$

根据 Peirc<sup>[8-9]</sup>,比例因子 $\dot{\gamma}$ 为

$$\dot{\gamma} = \begin{cases} \frac{1}{\mu} \left[ \left( \frac{\sqrt{J_2} + \eta p}{\xi c} \right)^{\frac{1}{\zeta}} - 1 \right], & \varphi(\sigma, c) > 0, \\ 0, & \varphi(\sigma, c) < 0. \end{cases} \quad (8)$$

$\mu, \zeta$ 材料参数。

当 $\zeta=1$ 时,令 $\mu = \frac{\lambda}{\xi c}$ 时, $\lambda$ 为粘滞系数,式(8)则退化为

$$\dot{\gamma} = \begin{cases} \frac{1}{\lambda} \varphi(\sigma, c) = \frac{\sqrt{J_2} + \eta p - \xi c}{\lambda}, & \varphi(\sigma, c) > 0; \\ 0, & \varphi(\sigma, c) < 0. \end{cases} \quad (9)$$

从上式可以看出,为线性 Bingham 体模型

## 2 应力返回算法

### 2.1 光滑屈服面应力返回算法

假定在 $[t_n, t_{n+1}]$ 时段内为纯弹性,则弹性预测为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{n+1}^{trial} &= \varepsilon_n^e + \Delta \varepsilon, \\ \sigma_{n+1}^{trial} &= D^e : \varepsilon_{n+1}^{trial}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

当 $\sqrt{J_2^{trial}} + \eta p_{n+1}^{trial} - \xi c(\bar{\varepsilon}_n^p) > 0$ 时,应力状态超出屈服面,发生粘塑性流动。

粘塑性应力径向返回<sup>[10-12]</sup>

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{n+1} &= \sigma_{n+1}^{trial} - \Delta \gamma D^e : N_{n+1}, \\ &= \sigma_{n+1}^{trial} - \Delta \gamma \left( \frac{G}{\sqrt{J_2}(s_{n+1})} s_{n+1} + \frac{K \bar{\eta}}{3} I \right). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中: $G$ 为剪切模量, $K$ 为体积模量由主应力空间的对称性

$$\frac{s_{n+1}}{\sqrt{J_2}(s_{n+1})} = \frac{s_{n+1}^{trial}}{\sqrt{J_2}(s_{n+1}^{trial})}. \quad (12)$$

式(11)分解成偏应力和体应力为

$$s_{n+1} = \left( 1 - \frac{G \Delta \gamma}{\sqrt{J_2}(s_{n+1})} \right) s_{n+1}^{trial} p_{n+1} = p_{n+1}^{trial} - K \bar{\eta} \Delta \gamma \quad (13)$$

对上式求内积

$$\sqrt{J_2}(s_{n+1}) = \sqrt{J_2}(s_{n+1}^{trial}) - G \Delta \gamma \quad (14)$$

由式(6)和式(8),在增量时间内

$$\Delta \gamma = \frac{\Delta t}{\mu} \left[ \left( \frac{\sqrt{J_2}(s_{n+1}) + \eta p}{\xi c} \right)^{\frac{1}{\zeta}} - 1 \right], \quad (15)$$

$$\bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp} = \bar{\varepsilon}_n^{vp} + \xi \Delta \gamma. \quad (16)$$

将以上各式代入式(15)整理得

$$\left[ \sqrt{J_2}(s_{n+1}^{trial}) - G \Delta \gamma + \eta (p_{n+1}^{trial} - K \bar{\eta} \Delta \gamma) \right] \times \left( \frac{\Delta t}{\mu \Delta \gamma + \Delta t} \right)^{\frac{1}{\zeta}} - \xi c(\bar{\varepsilon}_n^{vp} + \xi \Delta \gamma) = 0. \quad (17)$$

对上式进行 Newton-Raphson 迭代求解  $\Delta \gamma$

令式(17)方程左端为 $\bar{\varphi}(\Delta \gamma)$

对上式进行求导, $\bar{\varphi}'(\Delta \gamma)$ 为

$$\left. \begin{aligned} \bar{\varphi}'(\Delta \gamma) &= - \left( G + K \bar{\eta} \eta + \zeta \mu \frac{\sqrt{J_2}(s_{n+1}^{trial}) - G \Delta \gamma + \eta (p_{n+1}^{trial} - K \bar{\eta} \Delta \gamma)}{\mu \Delta \gamma + \Delta t} \right) \times \\ &\quad \left( \frac{\Delta t}{\mu \Delta \gamma + \Delta t} \right)^{\frac{1}{\zeta}} - \xi^2 H(\bar{\varepsilon}_n^{vp} + \Delta \gamma). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} H'(\bar{\varepsilon}_n^{vp} + \Delta \gamma) &= \frac{dc}{d\bar{\varepsilon}^{vp}}, \\ \Delta \gamma &= \Delta \gamma - \bar{\varphi}(\Delta \gamma) / \bar{\varphi}'(\Delta \gamma). \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$H'$ 为强化(硬化)函数。

求得 $\Delta \gamma$ 后,由下面两式更新应力和等效粘塑性应变

$$\bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp} = \bar{\varepsilon}_n^{vp} + \xi \Delta \gamma, \quad (20)$$

$$\left. \begin{aligned} s_{n+1} &= \left( 1 - \frac{G \Delta \gamma}{\sqrt{J_2}(s_{n+1}^{trial})} \right) s_{n+1}^{trial}, \\ p_{n+1} &= p_{n+1}^{trial} - K \bar{\eta} \Delta \gamma. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

### 2.2 锥点屈服应力返回算法

当在锥点屈服面上时, $\sqrt{J_2} = 0$ ,采用类似方法,得到迭

代的方程

$$\begin{aligned} \varphi(\Delta \varepsilon_v^{vp}) &= \partial \varepsilon_n^{vp} + \bar{\omega} \Delta \varepsilon_v^{vp} - \\ (p_{n+1}^{trial} - K \Delta \varepsilon_v^{vp}) &\left( \frac{\Delta t}{\mu \Delta \varepsilon_v^{vp} + \Delta t} \right) \zeta = 0. \end{aligned} \quad (22)$$

采用 Newton-Raphson 迭代进行计算求得  $\Delta \varepsilon_v^{vp}$ , 并更新应力状态。

$$\bar{\varepsilon}_{n+1}^{vp} = \bar{\varepsilon}_n^{vp} + \bar{\omega} \Delta \varepsilon_v^{vp}, \quad (23)$$

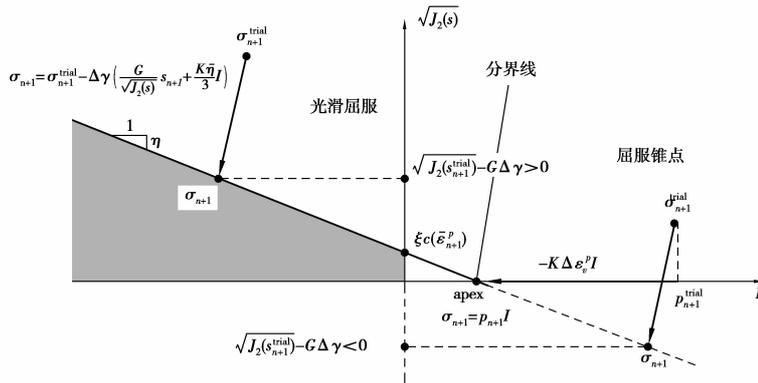


图 2 光滑屈服面与锥点屈服的界限

由式(14),从图 2 中可以看出

当  $\sqrt{J_2(s_{n+1})} = \sqrt{J_2(s_{n+1}^{trial})} - G\Delta\gamma \geq 0$  时,应力状态返回至光滑屈服面上。

当  $\sqrt{J_2(s_{n+1})} = \sqrt{J_2(s_{n+1}^{trial})} - G\Delta\gamma < 0$  时,应力状态返回至屈服锥点上。

### 3 一致切线模量及程序流程

计算塑性力学的中心问题,就是更新状态变量在时间  $t_n$  的收敛值,获得其在时间  $t_{n+1}$  的收敛值。为了获得 Newton 迭代法的二次渐近收敛速度,同时克服在迭代过程中的伪加载,Simo<sup>[13-14]</sup>提出了一致切线模量。

#### 3.1 光滑屈服面一致切线模量

由(13)式,应力与弹性预测应变的关系为

$$s_{n+1} = 2G \left( 1 - \frac{\Delta\gamma}{\sqrt{2} \|\varepsilon_{dn+1}^{trial}\|} \right) \varepsilon_{dn+1}^{trial}, \quad (25)$$

$$p_{n+1} = K(\varepsilon_{vn+1}^{trial} - \bar{\eta} \Delta\gamma), \quad (26)$$

$$\begin{aligned} ds_{n+1} &= 2G \left( 1 - \frac{\Delta\gamma}{\sqrt{2} \|\varepsilon_{dn+1}^{trial}\|} \right) d\varepsilon_{dn+1}^{trial} + \\ 2G &\left[ \frac{\Delta\gamma}{\sqrt{2} \|\varepsilon_{dn+1}^{trial}\|} \mathbf{D} \otimes \mathbf{D} : d\varepsilon_{dn+1}^{trial} - \frac{1}{\sqrt{2}} d\Delta\gamma D \right] \\ dp_{n+1} &= K(d\varepsilon_{vn+1}^{trial} - \bar{\eta} d\Delta\gamma). \end{aligned} \quad (27)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{D} &= \frac{\varepsilon_{dn+1}^{trial}}{\|\varepsilon_{dn+1}^{trial}\|} = \frac{s_{n+1}^{trial}}{\|s_{n+1}^{trial}\|}, \\ \sqrt{J_2(s_{n+1}^{trial})} &= \sqrt{2G} \|\varepsilon_{dn+1}^{trial}\|. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

式中:  $\|\cdot\|$  为张量的模,  $\otimes$  张量的并矢

对(17)式取全微分,整理得

$$\begin{aligned} d\bar{\varphi} &= [\sqrt{2}GD : d\varepsilon_{dn+1}^{trial} + K\eta d\varepsilon_{vn+1}^{trial} - (G + K\bar{\eta})d\Delta\gamma] \cdot \\ \left( \frac{\Delta t}{\mu \Delta\gamma + \Delta t} \right) \zeta &- \zeta \mu \left[ \frac{\sqrt{J_2(s_{n+1}^{trial})} - G\Delta\gamma + \eta(p_{n+1}^{trial} - K\eta\Delta\gamma)}{\mu \Delta\gamma + \Delta t} \right] \cdot \\ \left( \frac{\Delta t}{\mu \Delta\gamma + \Delta t} \right) \zeta &d\Delta\gamma - \xi Hd\Delta\gamma = 0. \end{aligned} \quad (29)$$

$$\sigma_{n+1} = (p_{n+1}^{trial} - K\Delta\varepsilon_v^{vp})I, \quad (24)$$

式中:  $\bar{\omega} = \frac{\xi}{\eta}, \vartheta = \frac{\xi}{\eta}$ 。

#### 2.3 光滑屈服面与锥点屈服的界限

当预测弹性应力在应力空间的不同,其应力返回路径也不相同,如图 2 所示。

$$d\Delta\gamma = A(\sqrt{2}GD : d\varepsilon_{dn+1}^{trial} + K\eta d\varepsilon_{vn+1}^{trial}). \quad (30)$$

式中:

$$A = \frac{1}{G + K\bar{\eta} + \zeta \mu \left[ \frac{\sqrt{J_2(s_{n+1}^{trial})} - G\Delta\gamma + \eta(p_{n+1}^{trial} - K\eta\Delta\gamma)}{\mu \Delta\gamma + \Delta t} \right] + \xi H \left( \frac{\Delta t}{\mu \Delta\gamma + \Delta t} \right)^{-\zeta}}$$

由(27)式整理得到的一致切线模量为

$$\begin{aligned} \mathbf{D}^{ep} &= 2G \left( 1 - \frac{\Delta\gamma}{\sqrt{2} \|\varepsilon_{dn+1}^{trial}\|} \right) l_d + 2G \left( \frac{\Delta\gamma}{\sqrt{2} \|\varepsilon_{dn+1}^{trial}\|} - GA \right) \times \\ &\mathbf{D} \otimes \mathbf{D} - \sqrt{2}GAK(\eta \mathbf{D} \otimes \mathbf{I} + \bar{\eta} \mathbf{I} \otimes \mathbf{D}) + \\ &K(1 - K\bar{\eta}A)\mathbf{I} \otimes \mathbf{I}. \end{aligned} \quad (31)$$

其中:  $l_d, l_s$  为四阶张量,表达为

$$\begin{aligned} l_d &= l_s - \frac{1}{3}(\mathbf{I} \otimes \mathbf{I}), \\ l_{sijkl} &= \frac{1}{2}(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}). \end{aligned} \quad (32)$$

#### 3.2 锥点屈服一致切线模量

屈服面锥点处一致切线模量采用类似的方法进行推导,整理得到的一致切线模量为

$$\mathbf{D}^{ep} = K(1 - KB)\mathbf{I} \otimes \mathbf{I}. \quad (33)$$

$$B = \frac{1}{K + (p_{n+1}^{trial} - K\Delta\varepsilon_v^p) \frac{\zeta \mu}{\mu \Delta\varepsilon_v^p + \Delta t} + \vartheta \omega H \left( \frac{\Delta t}{\mu \Delta\varepsilon_v^p + \Delta t} \right)^{-\zeta}}$$

#### 3.3 非线性弹粘塑性模型的计算流程

ABAQUS 的用户材料子程序(UMAT)<sup>[15]</sup>通过与其求解器 Standard 的接口来实现数据交流。在每个增量步的每一次迭代中,在每个积分点处 UMAT 均会被调用,以获取材料信息,形成刚度矩阵,求解应力和与求解相关的一些变量,例如塑性应变等等。在调用 UMAT 时,已知的变量信息主要有增量开始前的应变、应力、求解相关的状态变量和应变增量,以及在输入文件(.inp)中定义的材料参数等等。

根据上述思路,本文的 UMAT 子程序主要流程如图 3 示。

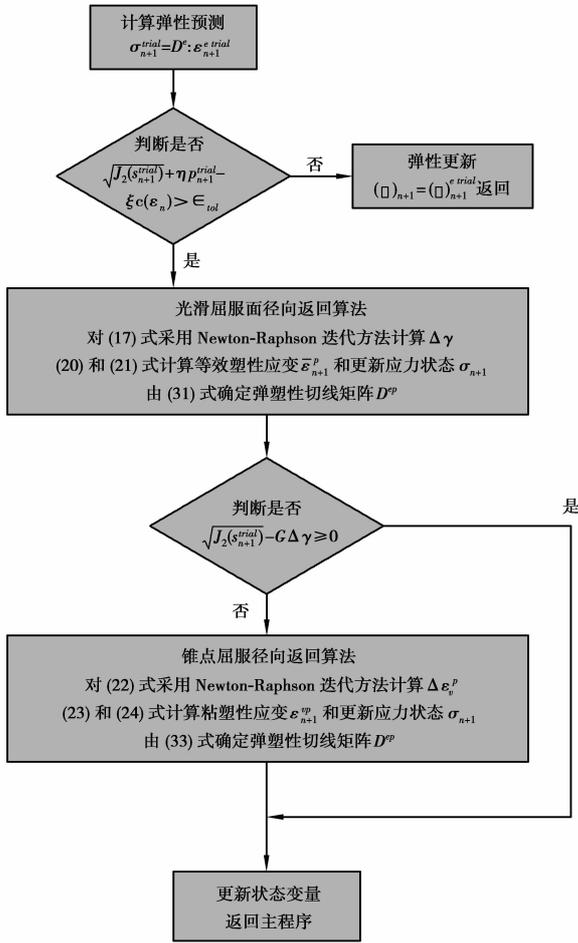


图 3 弹粘塑性分析流程图

## 4 程序验证及应用

### 4.1 单轴压缩试验算例

如图 4 所示,验证算例为一个六面体 C3D8 单元,试件长、宽均为 100 mm,底端竖向固定,顶部施加向下的压力 90 MPa,采用用户自定义的弹粘塑性模型子程序,进行轴向压缩蠕变数值试验。材料参数如表 1 所示。ABAQUS 软件中,应力受压为负,受拉为正。

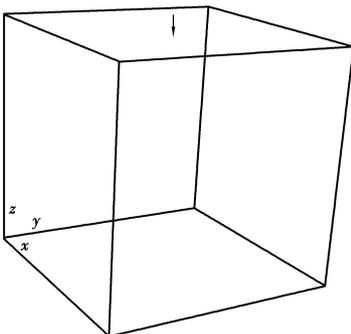


图 4 计算网格

表 1 材料计算参数

$E$ (GPa)	$\nu$	$\beta$ ( $^\circ$ )	$\theta$ ( $^\circ$ )	$\mu$ (mon)	$\zeta$	$c_0$ (MPa)
7.157	0.3	0	0	500	0.2	25.9

对于流变计算,在 ABAQUS 中一般设置两个分析步:第一个分析步为 static 静力分析步,时间设置很小如  $1 \times 10^{-20}$  月(mon);第二个分析步为 visco 准静态分析步,采用自动增量时间步,初始增量时间步为 0.001 月,计算总时间为 2.0 月。

为验证小变形情况下单轴压缩蠕变数值解与解析解,设内摩擦角  $\beta=0$ ,膨胀角  $\theta=0$ ,则  $\eta=0, \xi=2/\sqrt{3}$ 。

屈服准则退化为

$$\varphi(\sigma, c) = \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma - \frac{2}{\sqrt{3}}c. \quad (34)$$

塑性势函数及比例因子为

$$\begin{aligned} \varphi(\sigma, c) &= \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma, \\ \dot{\gamma} &= \frac{1}{\mu} \left[ \left( \frac{\sigma}{2c} \right)^{\frac{1}{\zeta}} - 1 \right]. \end{aligned} \quad (35)$$

总应变为

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma}{E} + \frac{1}{\sqrt{3}\mu} \left[ \left( \frac{\sigma}{2c} \right)^{\frac{1}{\zeta}} - 1 \right]. \quad (36)$$

图 5、图 6、分别为不考虑强化参数 ( $H'=0$ ),当  $\mu=500, \zeta=1.0, \zeta=0.2$  时,以及当  $\zeta=0.2, \mu=500, \mu=50$  时,单轴压缩蠕变解析解与单轴压缩蠕变数值解的关系曲线。从图中可以看出,在各种情况下,瞬时弹性应变均为  $-0.0126$ ,一维解析解与数值解均能够较好的模拟等速蠕变,轴向应变随着时间的增加而增加,同时,两者的结果十分吻合,轴向应变最大相对误差为 0.13%。从图 5 和图 6 蠕变解析解和数值解可以看出,  $\zeta$  和  $\mu$  越小轴向蠕变增长越快,  $\zeta$  和  $\mu$  越大轴向蠕变增长越慢。综上所述,当  $\mu=500, \zeta=1.0$  时,蠕变发展最为缓慢,当  $\mu=50, \zeta=0.2$ ,蠕变发展最快。

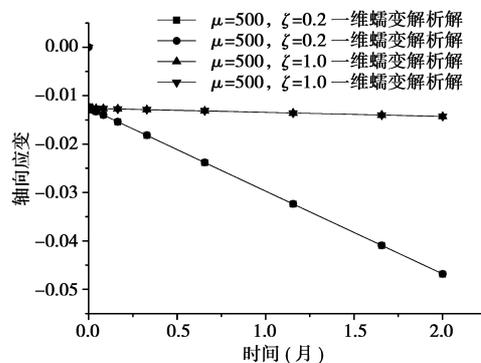


图 5 轴向应变随时间的变化规律

图 7 为考虑硬化参数为  $H'=1.29\text{GPa}, \mu=50, \zeta=1.0$  时,其余参数同上,弹粘塑性模型的轴向应变随时间变化的蠕变数值曲线。从图中可以看出,考虑强化后的数值结果能较好的反映减速,瞬时弹性应变为  $-0.0126$ ,轴向应变随着时间的增加而均趋于稳定值  $-0.019$ 。

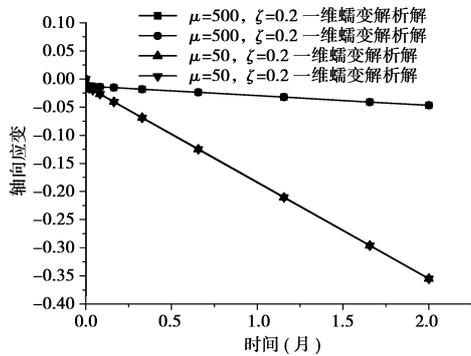


图 6 轴向应变随时间的变化规律

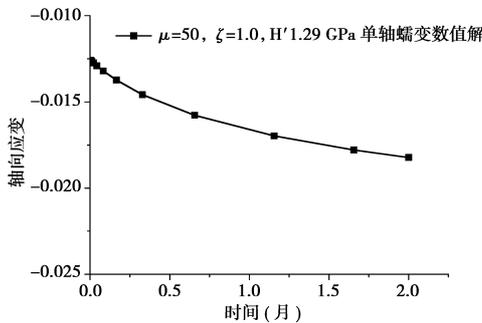


图 7 考虑硬化后,轴向应变随时间的变化规律

#### 4.2 地下圆形洞室弹粘塑性模型的数值解

图 8 为一圆形洞室及衬砌的计算网格,隧道半径为 10 m,地应力  $p_0$  在  $x$  和  $y$  方向均为 30 MPa。

取  $\frac{1}{4}$  模型进行计算。非线性弹粘塑本构模型软岩的计算参数如表 2 所示。

表 2 材料计算参数

$E/\text{GPa}$	$\nu$	$\beta/(\text{°})$	$\theta/(\text{°})$	$\mu/\text{h}$	$\zeta$	$c_0/\text{MPa}$
7.157	0.3	15	15	30 000	0.3	0.6

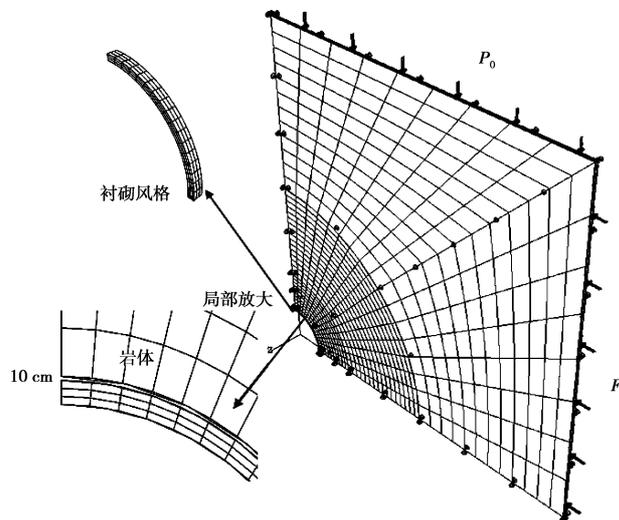


图 8 洞室及衬砌计算网格

衬砌厚度为 0.6 m,衬砌与岩体之间预留 10 cm 变形量,如图 8 所示。衬砌采用弹性材料,弹性模量为 29.5 GPa,泊松比为 0.16。

计算时设置二个分析步:第一个分析步设置为 static 静力分析步,施加外荷载,计算时间  $1 \times 10^{-20}$  s;第二个分析步为 visco 准静态分析步,计算时间为 1 440 h,时间增量为 50 h。

图 9 为施加衬砌和不施加衬砌,通过数值计算得到隧洞围岩拱顶下沉曲线。由计算可知开挖后瞬时弹性变形为 0.8 cm,不施加衬砌时,隧道开挖后 1 440 小时,围岩拱顶下沉变形 17.1 cm,其中流变变形为 16.3 cm。若不及时进行支护,由于软弱岩体流变时效特性,围岩变形随时间持续增加,最终达到破坏状态。施加二衬后,围岩变形受到二衬的约束,变形的进一步控制,最终拱顶下沉变形为 12.0 cm,二衬施加后,岩体变形为 2.0 cm。

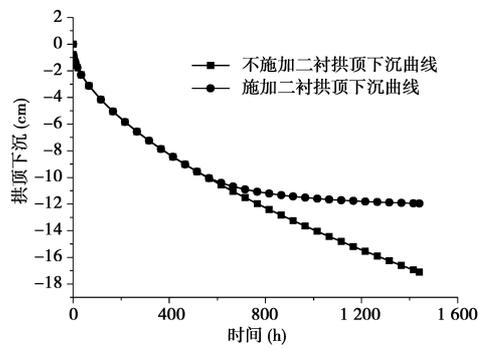


图 9 有无衬砌时拱顶下沉随时间变化曲线

图 10 为施加衬砌后,岩体与二衬的接触压力随时间的变化曲线。由于衬砌与岩体之间预留 10 cm 的变形量,岩体在未与二衬接触前,流变变形持续增加,在  $t=500$  h 时刻,岩体与二衬相接触,接触压力随时间的增加,逐渐增加,最终趋于稳定值 3.7 MPa。

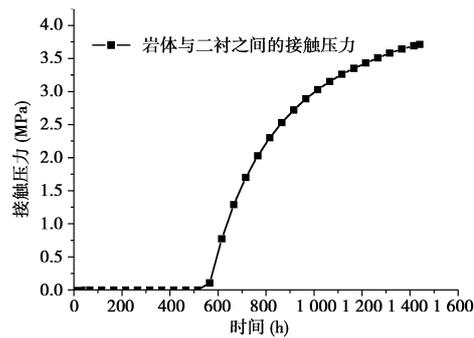


图 10 衬砌接触压力随时间变化曲线

## 5 结 语

岩石材料具有明显的流变时效特性。如果仍沿用经典弹性理论或传统线性流变模型进行设计,可能会带来显著的误差。为此。本文根据 Peirc 提出的比例因子,采用 Drucker-Prager 屈服准则,建立了一种非线性弹粘塑性本构模型。采用 ABAQUS 提供的 UAMT 二次开发程序接口,推导了该模型在 ABAQUS 中的计算格式,并编制了相应的接口程序。通过计算得到以下几点结论:

1)比例因子  $\dot{\gamma}$  中,参数  $\zeta$  取不同的值,可以反映粘塑应变的非线性,可反映加速流变过程。当  $\zeta=1$  时,退化为线性 Bingham 体模型。

2)通过单轴压缩蠕变试验的数值模拟与解析解的对比

表明两者的计算结果吻合很好。 $\zeta$  和  $\mu$  越小轴向蠕变增长越快, $\zeta$  和  $\mu$  越大轴向蠕变增长越慢。

3) 采用所编制的数值程序,对一开挖隧道进行了三维流变数值分析,进一步验证了研制的非线性弹粘塑模型流变程序的正确性和可靠性。所编写程序可以应用于大型岩土工程数值计算。

#### 参考文献:

- [1] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1018-1106. (SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1082-1106. (in Chinese))
- [2] 赵延林, 曹平, 文有道等. 岩石弹黏塑性流变试验和非线性流变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 478-486. (ZHAO Yanlin, CAO Ping, WEN Youdao, et al. Elastovisco-plastic rheological experiment and nonlinear rheological model of rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 478-486. (in Chinese))
- [3] 余成学. 岩石非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2006-2011. (SHE Chengxue, research on nonlinear viscoelasto-plastic creep model of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 2006-2011. (in Chinese))
- [4] 潘晓明, 杨钊, 徐健聪. 非正常西原黏弹塑性流变模型的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增 1): 2640 - 2646 (PAN Xiaoming, YANG Zhao, XU Jiancong. Application study of no stationary Nishhara viscous elasto-plastic rheological model. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Supp. 1): 2640 - 2646. (in Chinese))
- [5] Peirc, D., Shih, C. F. & Needleman, A., A tangent modulus method for rate dependent solids, Comp. & Struct., 33, 799-815 (1984).
- [6] De Souza Neto E A. On general isotropic tensor functions of one tensor[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering 2004, 61: 880-895.
- [7] 孙钧, 潘晓明, 王勇. 隧道软弱围岩挤入型大变形预测与工程应

用研究, [J]. 河南大学学报(自然科学版), 建校 180 周年校庆专刊. 2012. 9. 25 开封 SUN Jun, PAN Xiaoming, WANG Yong. A Study on precast of large squeezing deformation of tunnel weak rocks, and the engineering applications J. He Nan University (nature science edition), 2012. 9. 25. Kai Feng (in Chinese))

- [8] Peric, D. 1993. On a Class of Constitutive Equations in Viscoplasticity: Formulation and Computational Issues. Int. J. Numer. Meth. Eng, 36, 1365-1393.
- [9] 潘晓明. 挤压大变形隧道围岩流变力学特征研究. [博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2011. (导师: 孙钧), (PAN Xiaoming. Study on squeezing large deformation rheological mechanical characteristics of tunnel surrounding rocks [Ph. D. Thesis] [D]. Shanghai: Tongji Univ., 2011. (in Chinese))
- [10] E. A. de Souza Neto, D. Peric and D. R. J. Owen, Computational Methods for Plasticity: Theory and Applications, Wiley, [M], Chichester, 2009
- [11] De Souza Neto E A. On general isotropic tensor functions of one tensor[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering 2004, 61: 880-895.
- [12] 徐卫亚, 杨圣奇, 褚卫江. 岩石非线性黏弹塑性流变模型(河海模型)及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 433-447. (XU Weiya, YANG Shengqi, CHU Weijiang. Nonlinear viscoelasto-plastic rheological model (Hohai model) of rock and its engineering application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 433-447. (in Chinese))
- [13] Simo J C. Algorithms for Static and Dynamic Multiplicative Plasticity That Preserve the Classical Return Mapping Schemes of the Infinitesimal Theory[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1992, 99: 61-112.
- [14] Simo, J. C. and Hughes, T. J. R., Computational Inelasticity [M], Springer 1998.
- [15] Hibbit, Karlsson and Sorenson. ABAQUS User Subroutines Reference Manual[M], HKS INC, 2011.

(编辑 张小强)

(上接第 70 页)

#### 参考文献:

- [4] 王世和. 人工湿地出水收集器 [P]. 中国专利. ZL200710022269X. 2009-02-11.
- [5] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法. 第 4 版[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [6] 黄娟. 人工湿地的运行调控及氮转移规律研究[D]. 南京: 东南大学, 2004.
- [7] 朱建文. 水解-曝气生物滤池工艺处理生活污水的研究[D]. 南京: 东南大学, 2004.
- [8] Wang N M, William J M. A detailed ecosystem model of phos-

phorus dynamics in created riparian wetlands[J]. Ecol Eng, 2000, 126: 101-130.

- [9] 王世和. 人工湿地污水处理理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [10] 尹军, 崔玉波. 人工湿地污水处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [11] 国家环境保护总局. 《城镇污水处理厂污染物排放标准》[M]. 北京: 中国环境出版社, 2002.

(编辑 陈穆峰)