

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2020.01.008

# 弹塑性损伤蠕变模型的有限元数值实施

崔 贤,张 涛,黄文雄

( 河海大学 力学与材料学院,江苏 南京 210098)

**摘 要:** 利用有限元软件 ABAQUS 为平台,采用隐式应力积分回映算法编制了 UMAT 子程序。对不同围压下的三轴压缩试验和蠕变试验进行有限元数值模拟,并与试验结果进行对比分析,结果表明所编写的本构模型数值模拟结果与试验结果非常接近,可以有效反映软岩的力学特性,丰富了 ABAQUS 的材料库。采用该模型对地下开挖进行数值计算,得到了岩体表面的位移关系和洞口顶部的下沉随时间的变化规律,结果表明该子程序是正确和可信的,可以为地下工程分析提供合理的建议。

**关键词:** 本构模型;塑性;蠕变;损伤;应力积分算法

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)01—0044—07

## Finite Element Numerical Implementation of Elastoplastic Damage Creep Model

CUI Xian, ZHANG Tao, HUANG Wenxiong

( College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** Based on the implicit stress integration return mapping algorithm, the UMAT subroutine of the elastoplastic damage creep model is developed in FEM software of ABAQUS. Compared with experimental data, the numerical simulation of triaxial compression test and creep test is implemented in FEM respectively, it shows that the simulation results of the developed constitutive model is very close to the experimental results which proves that the UMAT can be used to accurately simulate the mechanical characteristics of the soft rock and overcome the deficiency of the model in ABAQUS. Using the constitutive model, the numerical analysis is applied to underground excavation, the displacement on the surface and the variation with time of the top of tunnel settlement are obtained. These results indicate that the developed UMAT is correct and reliable which can provide reasonable suggestions in underground engineering.

**Keywords:** constitutive model; plasticity; creep; damage; stress integration algorithm

随着地下洞室开挖、油气储存、核废料处理等项目的增多,软岩流变特性对工程的安全性和稳定性影响已经成为国内外地下工程领域的热点问题,建立能够描述软岩流变特性的本构模型变得至关重要,对于地下工程的变形和破坏的合理预测具有重要的工程意义<sup>[1-2]</sup>。

国内外学者对软岩的非线性蠕变进行了大量研究,Cristescu等<sup>[3]</sup>主要研究了岩石的蠕变试验、损伤机理、本构关系以及断裂问题;Adachi等<sup>[4]</sup>提出了一个可以同时描述软岩硬化和软化的本构模型。

Jia等<sup>[5]</sup>根据泥岩的三轴试验结果,建立了在饱和状态和非饱和状态下都能适用的弹塑性损伤本构模型。在与时间相关性方面,Borja等<sup>[6]</sup>建立了三维应力状态下湿黏性土与时间相关的本构模型。Shao等<sup>[7]</sup>提出了一个短期可以描述弹塑性行为,长期可以描述岩石蠕变的本构模型。Hunsche等<sup>[8]</sup>建立了一个弹黏塑性非线性的盐岩力学模型,该模型可以模拟盐岩的损伤、断裂和膨胀。

肖欣宏等<sup>[9]</sup>利用 Burgers 模型和非线性黏弹塑性模型对水环境下红层软岩蠕变进行了研究。贾善

坡等<sup>[10]</sup>在修正 Mohr - Coulomb 准则中引入了损伤变量建立了反映泥岩软硬化的本构模型。杨春和等<sup>[11]</sup>通过对盐岩蠕变试验研究,提出了一个盐岩非线性蠕变本构方程。姜永东等<sup>[12]</sup>根据不同应力水平产生的蠕变差异,建立了砂岩的蠕变本构模型。

ABAQUS 材料库中的岩土类模型都是比较经典的本构模型,不能很好地描述软岩流变特性,为了弥补这一不足,利用 ABAQUS 提供的用户材料二次开发接口,对 Shao 等<sup>[7]</sup>模型的进行了有限元数值实施。该模型数学公式简单,参数不多且容易通过基本试验确定,能够描述软岩的三轴试验和体应变特点,并且能进一步考虑软岩的流变特性。采用 Fortran 语言编写了 UMAT 子程序,将模拟的结果和试验数据进行对比,进一步验证模型和程序的可靠性。

## 1 本构模型

本文采用的本构模型<sup>[6]</sup>包含两部分,即弹塑性模型和考虑塑性损伤的蠕变模型,基础模型描述软岩的短期力学响应,扩展模型能反映软岩在较长时段内的蠕变变形。

### 1.1 弹塑性模型

基础模型假定材料在应力空间中的屈服面与破坏面相似。采用的强度条件在  $p - q$  坐标系(应力平面)的轨迹为抛物线,如图 1 所示。该模型屈服函数为:

$$q^2 + Ap_r(p - C_0) = 0 \quad (1)$$

式中: $p = \sigma_{kk}/3$  为平均应力; $q = \sqrt{3/2s_{ij}s_{ij}}$  为偏应力; $C_0$  是与黏聚力有关的参数; $p_r = 1 \text{ MPa}$  为具有应力量纲的参考压力值; $A$  是一个无量纲参数。

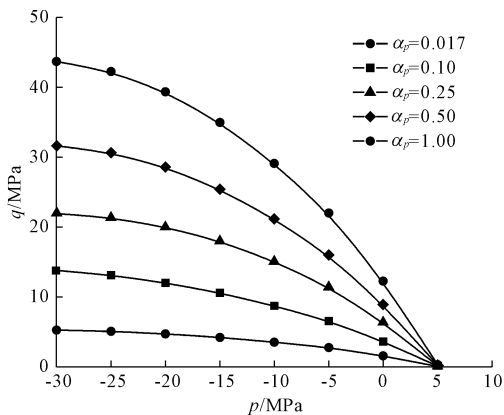


图 1 破坏面和屈服面形态

材料在偏应力作用下的屈服条件采用与强度条件相似的数学表达:

$f(p, q, \gamma_p) = q^2 + \alpha_p(\gamma_p)Ap_r(p - C_0) = 0 \quad (2)$   
式中: $\alpha_p$  是硬化变量,依赖于塑性应变。

$$\alpha_p = \alpha_p^0 + (1 - \alpha_p^0) \frac{\gamma_p}{B + \gamma_p} \quad (3)$$

其中: $\alpha_p^0$  为确定初始屈服的  $\alpha_p$  值; $B$  为控制硬化速率的参数。

$$\gamma_p = \int \sqrt{\frac{2}{3}} de_{ij}^p de_{ij}^p, \quad de_{ij}^p = d\epsilon_{ij}^p - \frac{1}{3} d\epsilon_{kk}^p \delta_{ij} \quad (4)$$

该模型采用了非关联流动法则,塑性函数采用与原始剑桥模型相似的形式:

$$g = q + \eta A(p - C_0) \ln\left(\frac{p - C_0}{p_1 - C_0}\right) \quad (5)$$

式中: $\eta$  是另外一个材料参数,该参数确定塑性势面水平切线点连线的斜率; $p_1$  是塑性势面与  $p$  轴左边交点的坐标(见图 2),与计算塑性应变增量的应力点(当前应力状态)有关。

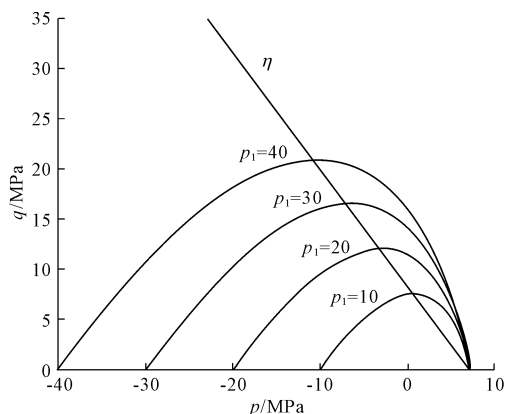


图 2 塑性势面形态

### 1.2 扩展的弹 - 黏塑性模型

上述模型经过扩展后,可考虑流变效应,用以预测软岩的长期变形。具体的做法是仿照 Pitruszczak 等<sup>[13]</sup>,引进一个时变损伤变量,用于描述刚度和强度随塑性变形发展而下降的规律:

$$E = (1 - \alpha\zeta)E_0, A = (1 - \alpha_1\zeta)A_0 \quad (6)$$

式中: $E_0$  是初始杨氏模量, $\alpha$  描述刚度损伤, $\alpha_1$  描述强度损伤。

建议的损伤变量演化规律为:

$$\dot{\zeta} = \gamma(\bar{\zeta} - \zeta) \quad (7)$$

式中: $\gamma$  为材料参数, $\bar{\zeta}$  是  $\zeta$  的渐近值,对应于稳定状态,为简单起见,假定  $\bar{\zeta} = \alpha_p$ 。设  $\zeta(0) = 0$ ,从式(7)可得到

$$\zeta(t) = \int_0^t \gamma \bar{\zeta}(\tau) e^{-\gamma(t-\tau)} d\tau = \bar{\zeta}(t) - \int_0^t \frac{d\bar{\zeta}}{d\tau}(\tau) e^{-\gamma(t-\tau)} d\tau \quad (8)$$

## 2 有限元数值实施

利用 ABAQUS 材料二次开发接口,可将上述模型编成 UMAT 子程序用于有限元数值分析。数值实施需要在典型的时间增量步  $[t_n, t_{n+1}]$  上,在已知应力状态  $\sigma_n$  和应变增量  $\Delta\varepsilon$  求出的条件下,根据本构关系求出应力增量更新应力,并且给出下一步计算的材料雅可比矩阵。具体如下。

### 2.1 隐式应力积分回映算法

弹塑性模型的应力积分一般在弹性预测基础上,判断加卸载。对于塑性加载步,本文采用隐式应力积分回映算法,将超出屈服面的应力调整返回到屈服面<sup>[8-9]</sup>(见图 3)。

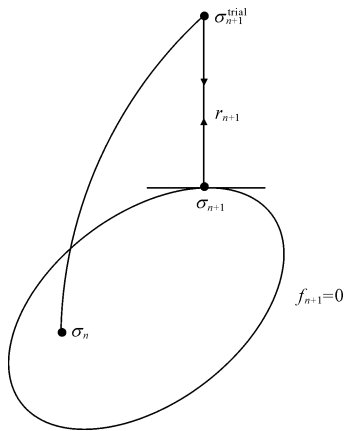


图 3 隐式应力积分回映算法示意图

首先按弹性关系计算应力增量 and 状态变量的初步预估值,从图可知,已知应力状态  $\sigma_n$  在屈服面内,预估值  $\sigma_{n+1}^{\text{trial}}$  为:

$$\sigma_{n+1}^{\text{trial}} = \sigma_n + \Delta\sigma_e = \sigma_n + \mathbf{D}_e \Delta\varepsilon \quad (9)$$

式中:  $\Delta\sigma_e$  为弹性应力增量,  $\mathbf{D}_e$  为弹性矩阵。

若  $f_{n+1}^{\text{trial}} = f(\sigma_{n+1}^{\text{trial}}, \alpha_{p,n}) > 0$ , 则试探应力  $\sigma_{n+1}^{\text{trial}}$  落在屈服面之外,需按下式调整:

$$\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{\text{trial}} - \mathbf{D}_e \Delta\varepsilon^p = \sigma_{n+1}^{\text{trial}} - \Delta\lambda_{n+1} \mathbf{D}_e r_{n+1} \quad (10)$$

式中:  $\lambda$  为塑性应变因子,  $r_{n+1} = \frac{\partial g}{\partial \sigma_{n+1}}$ 。

按隐式积分格式,计算塑性应变和内变量增量:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{n+1} &= \varepsilon_n + \Delta\varepsilon \\ \varepsilon_{n+1}^p &= \varepsilon_n^p + \Delta\lambda_{n+1} r_{n+1} \\ \alpha_{p,n+1} &= \alpha_{p,n} + \Delta\lambda_{n+1} h_{n+1} \\ \sigma_{n+1} &= \mathbf{D}_e : (\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_{n+1}^p) \\ f_{n+1} &= f(\sigma_{n+1}, \alpha_{p,n+1}) \end{aligned} \quad (11)$$

式中:

$$h = \frac{(\alpha_p^0 - 1) B_0}{\eta A (C_0 - p) (B + \gamma_p)^2} \quad (12)$$

采用牛顿法对非线性方程组(11)求解,在算法的塑性修正阶段中,总应变是一个定值,线性化只有一个变量,即塑性应变因子增量  $\Delta\lambda$ 。

牛顿法中应用如下标记:方程  $g(\Delta\lambda) = 0$  线性化,令  $\Delta\lambda^{(0)} = 0$ :

$$g^{(k)} + \left( \frac{dg}{d\Delta\lambda} \right)^{(k)} \delta\lambda^{(k)} = 0 \quad (13)$$

$$\Delta\lambda^{(k+1)} = \Delta\lambda^{(k)} + \delta\lambda^{(k)}$$

式中:  $\delta\lambda^{(k)}$  是在第  $k$  次迭代时  $\Delta\lambda$  的增量。

为了适应牛顿迭代法,以公式(13)的形式写出公式(11)中的塑性更新变量和屈服条件,省略公式角标  $n+1$ :

$$\begin{aligned} a &= -\varepsilon^p + \varepsilon_n^p + \Delta\lambda r = 0 \\ b &= -\alpha_p + \alpha_{p,n} + \Delta\lambda h = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

$$f = f(\sigma, \alpha_p) = 0$$

线性化后:

$$\begin{aligned} a^{(k)} + \mathbf{D}_e^{-1} : \Delta\sigma^{(k)} + \Delta\lambda^{(k)} \Delta r^{(k)} + \delta\lambda^{(k)} r^{(k)} &= 0 \\ b^{(k)} - \Delta\alpha_p^{(k)} + \Delta\lambda^{(k)} \Delta h^{(k)} + \delta\lambda^{(k)} h^{(k)} &= 0 \\ f^{(k)} + f_{\sigma}^{(k)} : \Delta\sigma^{(k)} + f_{\alpha_p}^{(k)} \Delta\alpha_p^{(k)} &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

式中:

$$\begin{aligned} \Delta r^{(k)} &= r_{\sigma}^{(k)} : \Delta\sigma^{(k)} + r_{\alpha_p}^{(k)} \Delta\alpha_p^{(k)} \\ \Delta h^{(k)} &= h_{\sigma}^{(k)} : \Delta\sigma^{(k)} + h_{\alpha_p}^{(k)} \Delta\alpha_p^{(k)} \end{aligned} \quad (16)$$

对方程组(15)联立求解  $\Delta\sigma^{(k)}$ ,  $\Delta\alpha_p^{(k)}$  和  $\delta\lambda^{(k)}$ , 公式(16)代入(15)

$$[A^{(k)}]^{-1} \begin{Bmatrix} \Delta\sigma^{(k)} \\ \Delta\alpha_p^{(k)} \end{Bmatrix} = - \{ \tilde{a}^{(k)} \} - \delta\lambda^{(k)} \{ \tilde{r}^{(k)} \} \quad (17)$$

式中:

$$\begin{aligned} [A^{(k)}]^{-1} &= \begin{bmatrix} \mathbf{D}_e^{-1} + \Delta\lambda r_{\sigma} & \Delta\lambda r_{\alpha_p} \\ \Delta\lambda h_{\sigma} & -I + \Delta\lambda h_{\alpha_p} \end{bmatrix}^{(k)} \\ \{ \tilde{a}^{(k)} \} &= \begin{Bmatrix} a^{(k)} \\ b^{(k)} \end{Bmatrix} \\ \{ \tilde{r}^{(k)} \} &= \begin{Bmatrix} r^{(k)} \\ h^{(k)} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

由公式(17)可知应力和硬化变量增量:

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma^{(k)} \\ \Delta\alpha_p^{(k)} \end{Bmatrix} = - [A^{(k)}] \{ \tilde{a}^{(k)} \} - \delta\lambda^{(k)} [A^{(k)}] \{ \tilde{r}^{(k)} \} \quad (19)$$

将结果(19)代入(15)<sub>3</sub> 求解  $\delta\lambda^{(k)}$

$$\delta\lambda^{(k)} = \frac{f^{(k)} - \partial f^{(k)} A^{(k)} \tilde{a}^{(k)}}{\partial f^{(k)} A^{(k)} \tilde{r}^{(k)}} \quad (20)$$

式中:  $\partial f = [f_{\sigma} \ f_{\alpha_p}]$

参数更新后:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\varepsilon}^{p(k+1)} &= \boldsymbol{\varepsilon}^{p(k)} + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{p(k)} = \boldsymbol{\varepsilon}^{p(k)} - \mathbf{D}_e^{-1} : \Delta \boldsymbol{\sigma}^{(k)} \\ \boldsymbol{\alpha}_p^{(k+1)} &= \boldsymbol{\alpha}_p^{(k)} + \Delta \boldsymbol{\alpha}_p^{(k)} \\ \Delta \boldsymbol{\lambda}^{(k+1)} &= \Delta \boldsymbol{\lambda}^{(k)} + \delta \boldsymbol{\lambda}^{(k)}\end{aligned}\quad (21)$$

多次使用牛顿迭代法,直到结果收敛到更新屈服表面误差范围内。

## 2.2 一致性切线刚度矩阵推导

应力应变关系为:

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij} = (1 - \alpha \zeta) \mathbf{D}_{ijkl}^e (\boldsymbol{\varepsilon}_{kl} - \boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^p) \quad (22)$$

增量形式

$$d\boldsymbol{\sigma}_{ij} = (1 - \alpha \zeta) \mathbf{D}_{ijkl}^e (d\boldsymbol{\varepsilon}_{kl} - d\boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^p) - \alpha d\zeta \mathbf{D}_{ijkl}^e \boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^e \quad (23)$$

根据流动法则,塑性应变增量

$$d\boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^p = d\lambda \frac{\partial \boldsymbol{g}}{\partial \boldsymbol{\sigma}_{kl}} \quad (24)$$

其中:

$$\begin{aligned}d\lambda &= \frac{1}{H_d} \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \mathbf{D}_e d\boldsymbol{\varepsilon} \\ H_d &= \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \mathbf{D}_e \frac{\partial \boldsymbol{g}}{\partial \boldsymbol{\sigma}} + h_p \\ h_p &= - \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\alpha}_p} \frac{d\boldsymbol{\alpha}_p}{d\boldsymbol{\gamma}_p} \frac{d\boldsymbol{\gamma}_p}{d\lambda}\end{aligned}\quad (25)$$

把式(24)代入式(23)得到

$$d\boldsymbol{\sigma}_{ij} = (1 - \alpha \zeta) \mathbf{D}_{ijkl}^e \left( d\boldsymbol{\varepsilon}_{kl} - d\lambda \frac{\partial \boldsymbol{g}}{\partial \boldsymbol{\sigma}_{kl}} \right) - \alpha d\zeta \mathbf{D}_{ijkl}^e \boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^e \quad (26)$$

式中: $d\lambda$  由加载的一致性条件确定

$$df = \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}_{ij}} d\boldsymbol{\sigma}_{ij} + \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\alpha}_p} d\boldsymbol{\alpha}_p + \frac{\partial f}{\partial A} dA = 0 \quad (27)$$

其中: $d\boldsymbol{\alpha}_p = (d\boldsymbol{\alpha}_p/d\lambda) d\lambda$  依赖塑性应变, $dA = (dA/d\zeta) d\zeta$  依赖损伤变量。

对  $df$  展开后得到:

$$d\lambda = \frac{1}{H_{\varepsilon d}} \left[ (1 - \alpha \zeta) N_{ij} \mathbf{D}_{ijkl}^e d\boldsymbol{\varepsilon}_{kl} - (\alpha N_{ij} \mathbf{D}_{ijkl}^e \boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^e + h_{\zeta}) d\zeta \right] \quad (28)$$

其中:

$$\begin{aligned}H_{\varepsilon d} &= (1 - \alpha \zeta) N_{ij} \mathbf{D}_{ijkl}^e M_{kl} + h_p \\ h_{\zeta} &= - \frac{\partial f}{\partial A} \frac{dA}{d\zeta} = \alpha_p p_r (p - C_0) \alpha_1 A_0\end{aligned}\quad (29)$$

把  $d\lambda$  代入式(26)

$$d\boldsymbol{\sigma}_{ij} = \mathbf{D}_{ijkl}^{epd} d\boldsymbol{\varepsilon}_{kl} + \boldsymbol{\psi}_{ij}^{\varepsilon} d\zeta = \mathbf{D}_{ijkl}^{epd} d\boldsymbol{\varepsilon}_{kl} + \boldsymbol{\psi}_{ij}^{\zeta} d\zeta \quad (30)$$

式中:

$$\begin{aligned}\mathbf{D}_{ijkl}^{epd} &= (1 - \alpha \zeta) \left( \mathbf{D}_{ijkl}^e - \frac{1 - \alpha \zeta}{H_{\varepsilon d}} \mathbf{D}_{ijmn}^e M_{mn} N_{rs} \mathbf{D}_{rskl}^e \right) \\ \boldsymbol{\psi}_{ij}^{\varepsilon} &= \frac{1 - \alpha \zeta}{H_{\varepsilon d}} \mathbf{D}_{ijmn}^e M_{mn} (\alpha N_{rs} \mathbf{D}_{rskl}^e \boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^e + h_{\zeta}) - \alpha \mathbf{D}_{ijkl}^e \boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^e\end{aligned}\quad (31)$$

注意式(22) 可写  $\mathbf{D}_{ijkl}^e \boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^e = \boldsymbol{\sigma}_{ij} / (1 - \alpha \zeta)$ , 所以  $\boldsymbol{\psi}_{ij}^{\varepsilon}$  也可以写成

$$\boldsymbol{\psi}_{ij}^{\varepsilon} = \frac{\alpha}{H_{\varepsilon d}} \mathbf{D}_{ijmn}^e M_{mn} N_{rs} \boldsymbol{\sigma}_{kl} + \frac{1 - \alpha \zeta}{H_{\varepsilon d}} h_{\zeta} \mathbf{D}_{ijmn}^e M_{mn} - \frac{\alpha}{1 - \alpha \zeta} \boldsymbol{\sigma}_{ij} \quad (32)$$

## 2.3 算法更新流程

第 1 步,设置初始值。损伤变量  $\zeta$  是时间的显函数,假定损伤变量  $\zeta = 0$ ,利用式(8),在当前值  $\zeta(t)$  已知的情况下,对给定的时间增量,利用积分中值定理

$$\Delta \zeta = -\gamma \Delta t \zeta_t + \gamma (\zeta_t + \theta \Delta \bar{\zeta}) e^{-\gamma(1-\theta)\Delta t} = \Delta \zeta_0 + \Delta \zeta_p, \quad \theta \in (0, 1) \quad (33)$$

其中: $\Delta \zeta_0 = \gamma \bar{\zeta}_t e^{-\gamma(1-\theta)\Delta t} - \gamma \zeta_t \Delta t$  与塑性应变无关, $\Delta \zeta_p = \gamma \theta \Delta \bar{\zeta}_t e^{-\gamma(1-\theta)\Delta t}$  与塑性应变相关;中值因子  $\theta$  在实际中近似取 1/2。

$$k = 0 : \boldsymbol{\varepsilon}^{p(0)} = \boldsymbol{\varepsilon}_n^p, \boldsymbol{\alpha}_p^{(0)} = \boldsymbol{\alpha}_p, \Delta \boldsymbol{\lambda}^{(0)} = 0, \zeta_n^{(0)} = \zeta_n, \boldsymbol{\sigma}^{(0)} = (1 - \alpha \Delta \zeta_0) \boldsymbol{\sigma}_n + \mathbf{D}_n \Delta \boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{D}_n \boldsymbol{\varepsilon}^{p(0)} \quad (34)$$

其中: $\mathbf{D}_n = (1 - \alpha \zeta_n) \mathbf{D}_e$ 。

第 2 步,第  $k$  次增量步后,检查屈服函数收敛性。

$$f^{(k)} = f(\boldsymbol{\sigma}^{(k)}, \boldsymbol{\alpha}_p^{(k)}, \zeta^{(k)}) \quad (35)$$

若  $f^{(k)} < \text{TOL}$ ,则结果收敛;否则,转到第 3 步。

第 3 步,计算塑性参数的增量。

$$\delta \boldsymbol{\lambda}^{(k)} = \frac{f^{(k)} - \partial f^{(k)} A^{(k)} \bar{a}^{(k)} + h_{\zeta}^{(k)} \Delta \zeta^{(k)}}{\partial f^{(k)} A^{(k)} \bar{r}^{(k)}} \quad (36)$$

第 4 步,得到应力和硬化变量的增量。

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \boldsymbol{\sigma}^{(k)} \\ \Delta \boldsymbol{\alpha}_p^{(k)} \end{array} \right\} = - [A^{(k)}] \{ \bar{a}^{(k)} \} - \delta \boldsymbol{\lambda}^{(k)} [A^{(k)}] \{ \bar{r}^{(k)} \} \quad (37)$$

第 5 步,更新变量。

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\varepsilon}^{p(k+1)} &= \boldsymbol{\varepsilon}^{p(k)} + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{p(k)} \\ \boldsymbol{\alpha}_p^{(k+1)} &= \boldsymbol{\alpha}_p^{(k)} + \Delta \boldsymbol{\alpha}_p^{(k)} \\ \Delta \boldsymbol{\lambda}^{(k+1)} &= \Delta \boldsymbol{\lambda}^{(k)} + \delta \boldsymbol{\lambda}^{(k)} \\ \boldsymbol{\sigma}^{(k+1)} &= \boldsymbol{\sigma}^{(k)} + \Delta \boldsymbol{\sigma}^{(k)} \\ \Delta \zeta^{(k+1)} &= \frac{1}{2} \gamma \Delta \boldsymbol{\alpha}_p^{(k)} e^{-\gamma \Delta t / 2}\end{aligned}\quad (38)$$

令  $k = k + 1$ ,转到第 3 步。

## 3 UMAT 二次开发

有限元商业软件 ABAQUS 提供了 UMAT 子程序接口<sup>[15]</sup>,供用户创建自定义材料模型。在增量步开始时,主程序在积分点上调用 UMAT,根据传入的应变增量和状态变量,计算出雅可比矩阵(见图 4)。

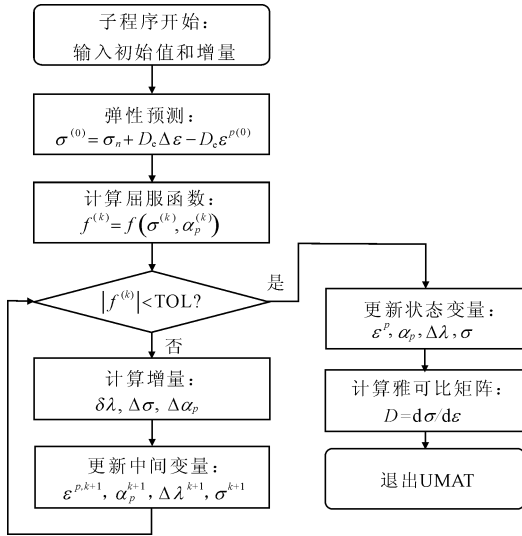


图 4 UMAT 子程序分析流程图

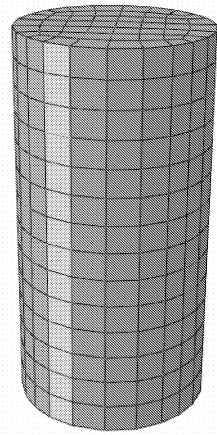


图 5 三轴压缩试验分析模型

## 4 有限元程序验证

利用该本构模型在 ABAQUS 软件中开发了 UMAT 子程序,对不同围压下三轴压缩试验和单轴蠕变试验进行有限元数值模拟,将模拟结果与试验结果相比较,用以测试 UMAT 程序的可行性和准确性。

### 4.1 不同围压常规三轴压缩试验模拟

常规三轴压缩试验设置了 2 个围压等级,分别为 2 MPa 和 10 MPa。试验的试样为标准试样(直径 50 mm,高 100 mm)(模型见图 5),试验加载采用轴向应变控制方式,对试样施加竖向位移 2 mm。材料参数见表 1。

表 1 算例 1 的模型参数

参数	数值	参数	数值
$E/\text{GPa}$	14.5	$C/\text{MPa}$	50
$\nu$	0.08	$B$	0.0015
$\alpha_p$	0.9	$\eta$	-0.006
$A$	107	$p_r/\text{MPa}$	1

图 6 和图 7 分别为围压 2 MPa 和 10 MPa 时的试样应力 - 应变曲线和体积应变曲线。从图 6 和图 7 可以看出,该模型的弹塑性模拟和试验结果有较好的一致性,但是 10 MPa 围压下的模拟结果比试验结果稍小,原因是在更高的围压条件作用下,材料之间的孔隙受到压缩变小,使弹性模量变大,导致模拟的结果偏小。材料的体积应变曲线前期的结果与试验比较符合,后期材料进入破坏阶段,出现了小偏离。

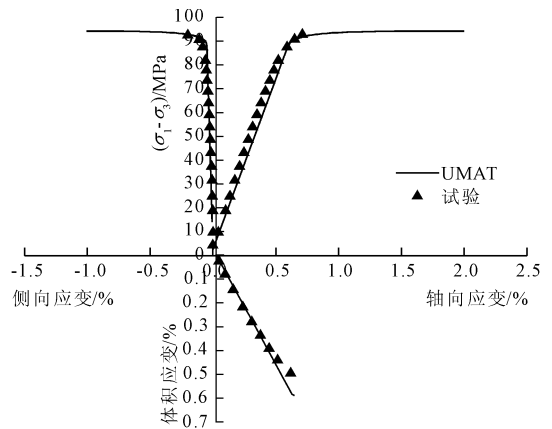


图 6 围压为 2 MPa 时应力 - 应变和体积应变曲线

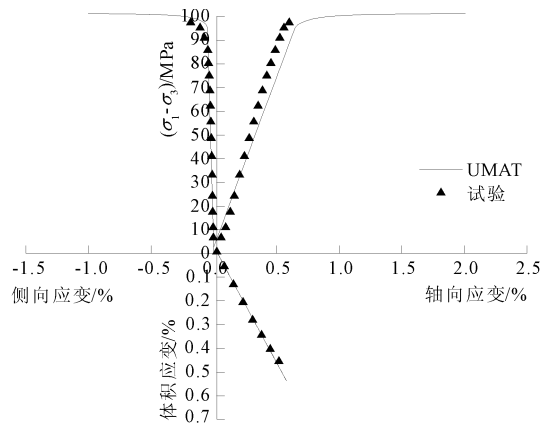


图 7 围压为 10 MPa 时应力 - 应变和体积应变曲线

### 4.2 蠕变试验模拟

试样模型不变,进行了单轴蠕变模拟,首先在试样垂直方向施加均布荷载力,其值从 0 MPa 逐渐增加到 48.5 MPa,然后保持不变。蠕变模型新增加了三个新参数,取值如表 2 所示。

图 8 为单轴压缩蠕变试验模拟曲线,从图 8 中可以看出,模拟结果和蠕变的试验结果都较为相似,该模型可以表征该类泥岩的蠕变变形性能。

表 2 算例 2 的模型参数

参数	数值
$\alpha$	1
$\alpha_1$	1
$\gamma$	0.00014

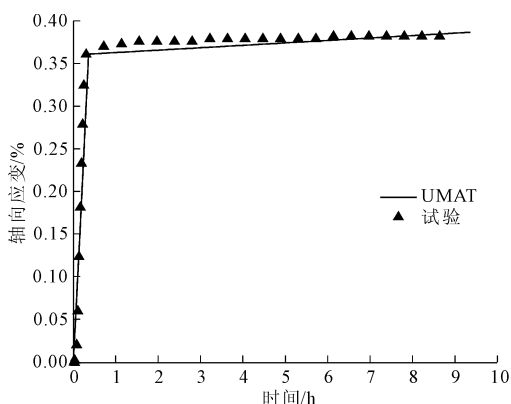


图 8 单轴压缩蠕变试验模拟曲线

## 5 开挖算例

为了进一步验证模型的蠕变特性,建立一个地下无支护洞室对称二维模型,尺寸如图 9 所示,岩体参数选取依据为上述试验结果,岩体容重  $2.0 \times 10^4 \text{ N/m}^3$ ,侧压力系数  $k = 0.5$ ,总时间  $T$  为 100 d,固定左右边界的水平位移和底部边界的竖向位移,对其进行计算分析。

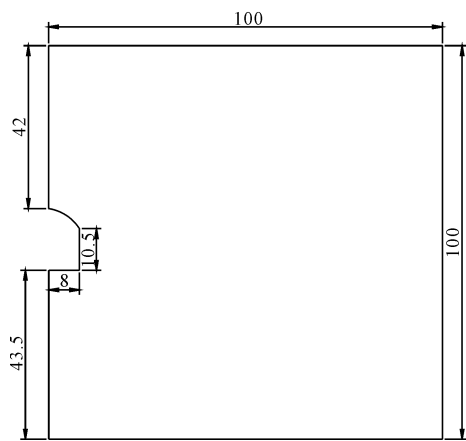


图 9 地下洞室模型示意图(单位:m)

图 10 为开挖后的 Mises 云图;图 11 为岩体表面的水平位移和竖向位移图;图 12 为不同侧压力系数下洞顶位移随时间变化图。由图 10 可知开挖后的应力变化,右侧顶部和底部的应力比较大,应该作为重点加固区域。从图 11 可见,靠近中心线的岩体表面处的竖向位移最大,当离中心线距离增大时竖向位移逐渐减小,而水平位移的方向指向中心线,反映

了变形方向指向开挖面。为了研究不同侧压力水平对开挖位移的影响,由图 12 可知,竖向位移随  $k$  的增大而减小,不同的侧向应力只对开挖完成时的变形有影响,而后期蠕变的生长趋势保持一致。

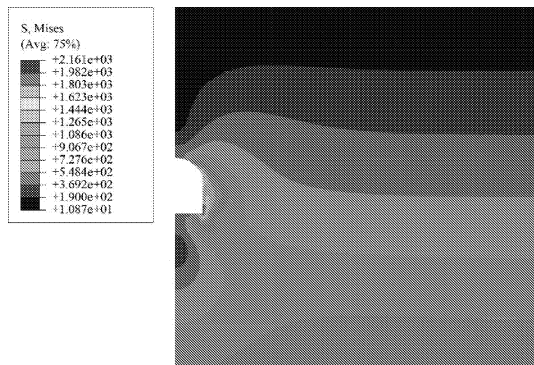


图 10 开挖后 Mises 应力云图

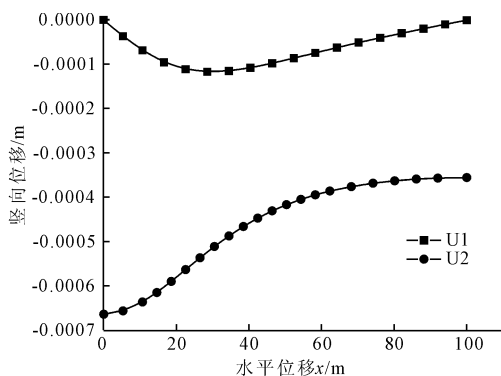


图 11 岩体表面的水平位移和竖向位移图

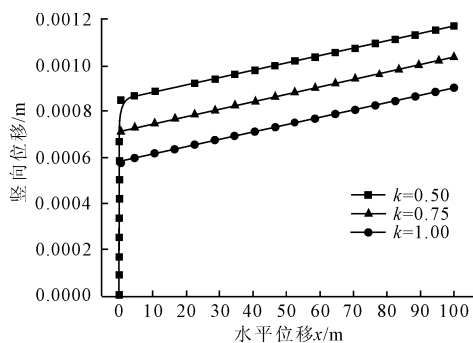


图 12 不同侧压力系数下洞顶竖向位移随时间变化

## 6 结论

(1) 利用 ABAQUS 提供的 UMAT 子程序接口,实现了泥岩弹塑性损伤模型的二次开发。该模型简单易懂,物理意义明确,能够较好地反映泥岩的弹塑性变形和蠕变变形特性。

(2) 算例结果显示,所采用的隐式积分回映算法具有很高的精确度和收敛性,能够利用本模型反映软岩的应力应变特性。

(3) 工程实例模拟结果符合实际,可以为大型复杂应力状态下的地下工程数值分析提供合理的建议,扩大了 ABAQUS 在岩土工程中的应用范围,同时也为开发其他岩土类的本构模型提供了参考。

### 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): 1081-1106.
- [2] 田 佳. 深埋软岩供水隧洞蠕变特性研究进展[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(4): 182-189.
- [3] Cristescu N, Hunsche U. Time effects in rock mechanics [M]. USA: Jone Willey & Sons Ltd, 1998.
- [4] Adachi T, Oka F. An elastoplastic constitutive model for soft rock with strain softening[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1995, 19(4): 233-247.
- [5] Jia Y, Song X C, Duveau G, et al. Elastoplastic damage modelling of argillite in partially saturated condition and application [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2007, 32(8/14): 656-666.
- [6] Borja R I, Kavazanjian E. A constitutive model for the stress - strain - time behaviour of 'wet' clays [J]. Geotechnique, 1985, 35(3): 283-298.
- [7] Shao J F, Zhu Q Z, Su K. Modeling of creep in rock materials in terms of material degradation [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(7): 549-555.
- [8] Hunsche U, Hampel A. Rock salt - The mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository[J]. Engineering Geology, 1999, 52(3): 271-291.
- [9] 肖宏欣,王 静,白志华,等. 真实水环境下红层软岩蠕变模型辨识与参数确定[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(4): 82-87.
- [10] 贾善坡,陈卫忠,于洪丹,等. 泥岩弹塑性损伤本构模型及其参数辨识[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3607-3614.
- [11] 杨春和,陈 锋,曾义金. 盐岩蠕变损伤关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1602-1604.
- [12] 姜永东,鲜学福,熊德国,等. 砂岩蠕变特性及蠕变力学模型研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1478-1481.
- [13] Pietruszczak S, Lydzba D, Shao J F. Modelling of inherent anisotropy in sedimentary rocks[J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39(3): 637-648.
- [14] 庄 茁. 连续体和结构的非线性有限元[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [15] Simo J C, Hughes T J R. Computational inelasticity [M]. New York: Springer, 1998.
- [16] 王金昌,陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.

(上接第 31 页)

- [10] 丁志洋,张发明,杨 帆,等. 降雨对大型水库滑坡稳定性影响分析[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(10): 2736-2740.
- [11] 王力威. 不同水位条件下土的自重应力计算[J]. 水科学与工程技术, 2011(3): 72-74.
- [12] 柳治富,曲洪军,何 爽. 基坑土体渗透稳定性的分析与防治[J]. 岩土工程界, 2009, 12(11): 24-27.
- [13] 曾 程,党发宁,沈贵华,等. 基于细观力学的土体渗透稳定分析方法研究[J]. 西安理工大学学报, 2010, 26(1): 48-54.
- [14] 刘 动. 深圳前海某深基坑支护结构监测与分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(4): 102-106.
- [15] 陈 涛,黄亚德,李更召,等. 深基坑开挖施工对邻近地铁结构受力性状的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3): 54-59.
- [16] 雷 振. 深海淤泥地层深基坑施工数值模拟与监测分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3): 20-24, 29.
- [17] 水利水电工程地质勘察规范: GB 50487—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008: 70-74.