

考虑黏聚力与内摩擦系数的岩石黏弹塑性流变模型

杨圣奇¹ 朱运华² 于世海³

(1.河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098;2.河南理工大学安全科学与工程学院,河南 焦作 454000;
3.解放军理工大学理学院,江苏 南京 211101)

摘要 基于在岩石剪切流变仪上得到的泥板岩剪切流变试验结果,采用库仑强度准则获得了岩石长期强度参数(长期黏聚力和长期内摩擦系数),与瞬时强度参数进行对比,结果表明,岩石黏聚力对时间的敏感程度高于内摩擦系数对时间的敏感程度。提出了一个考虑黏聚力和内摩擦系数随时间变化的塑性元件,将其与线性黏性元件并联起来,得到一个新的考虑黏聚力和内摩擦系数的非线性黏塑性体(CF-NVPB),同时将 CF-NVPB 模型与三元件线性黏弹性流变模型串联起来,建立了一个新的考虑黏聚力和内摩擦系数的岩石非线性黏弹塑性流变模型,并推导了该非线性流变模型的蠕变方程与松弛方程。

关键词 岩石力学;黏聚力;内摩擦系数;非线性黏弹塑性流变模型

中图分类号 :TU452 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2007)03-0291-07

岩石黏聚力和内摩擦系数是决定岩石强度和变形特性的主要参数。在实验室内通过常规三轴压缩以及直接剪切试验计算得到的黏聚力和内摩擦系数实质上是材料的瞬时力学参数,而岩石流变试验结果充分表明^[1-6],岩石黏聚力和内摩擦系数均随着时间的增长而变化,为时间的函数,且与时间的关系随着岩性的不同而有所差异。以往所建岩石流变模型未见到同时考虑黏聚力和内摩擦系数的时间效应,文献[7]中提出了一个扩裂元件,通过扩裂元件来考虑岩石的内摩擦系数随时间的变化,但并没有考虑岩石黏聚力随时间的变化规律。为此,本文在文献[7]的基础上,提出了一个考虑黏聚力和内摩擦系数的非线性黏塑性体,然后将其与三元件线性黏弹性流变模型串联起来,建立了考虑黏聚力与内摩擦系数的岩石非线性黏弹塑性流变模型,同时推导出了该非线性黏弹塑性流变模型的蠕变方程与松弛方程。

1 岩石长期抗剪强度参数

长期抗剪强度是岩石流变力学特性的重要力学指标。基于文献[8]中的泥板岩剪切流变试验曲线,通过不同正应力水平条件的剪切位移与时间之间的关系,做出等时曲线,利用等时曲线的拐点及所对应的应力水平,可以确定出不同正应力条件下岩石的长期抗剪强度。基于岩石不同正应力下快速(瞬时)剪切试验^[9]和剪切流变试验^[8]结果,利用 Coulomb 准则可以得到岩石瞬时剪切强度以及长期剪切强度与正应力之间的线性回归关系曲线,如图 1 所示。瞬时剪切试验下岩石黏聚力为 0.31 MPa,内摩擦角为 43.23°,相应的内摩擦系数为 0.94,而剪切流变试验下岩石黏聚力为 0.09 MPa,内摩擦角为 33.4°,相应的内摩擦系数为 0.66,分别比快速剪切试验得到的强度参数降低了 71%和 22.7%。因而黏聚力对时间的敏感程度高于内摩擦系数对时间的敏感程度,随着时间的逐渐增加,岩石黏聚力衰减得更快。

岩石黏聚力和内摩擦系数随时间变化规律的形成,主要是由于岩石并非是一种理想弹性或弹塑性体,在流变变形发展过程中,其抗力取决于岩石界面处以及岩石材料内部颗粒间的摩擦力,同时材料的变形又导致

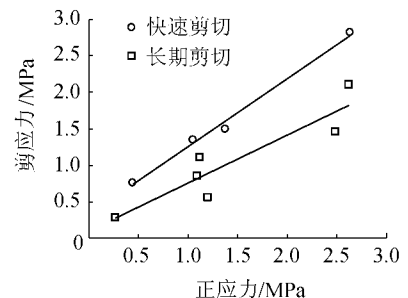


图 1 岩石瞬时和长期剪切强度分析
Fig.1 Instant and long-term shear strength analysis of rock

岩石内部相互间的剪切滑移,减小了原先的静止黏聚力和内摩擦系数,而且随着流变时间的不断增加,岩石材料内部微裂隙随变形的发展可以得到充积累和扩张,从而使岩石材料内晶体结构发生位错而强度锐减.岩性不同,材料黏聚力和内摩擦系数随时间衰减规律也不同.

2 考虑黏聚力与内摩擦系数的非线性黏塑性体(CF-NVPB)

假设瞬时剪切和剪切流变试验得到的岩石黏聚力随破坏时间的关系为 $\alpha(t)$,而岩石内摩擦系数随破坏时间的关系为 $f(t)$,且在时间 t 趋于无穷时 $\alpha(t)$ 和 $f(t)$ 均为零,这样可知, $\alpha(t)$ 和 $f(t)$ 均是关于时间 t 的递减函数.由此,建立考虑黏聚力和内摩擦系数的非线性黏塑性体(CF-NVPB 模型),如图 2 所示.令

$$\sigma_M = \sigma_S + hf(t)|_{t=0} + g\alpha(t)|_{t=0} \tag{1}$$

式中: σ_M ——岩石的摩擦抗剪强度; σ_S ——岩石的长期抗剪强度; h ——与应力大小和材料性质有关的参数,为内摩擦模型的特征参数; g ——与应力大小和材料性质有关的参数,为黏聚力模型的特征参数.很显然,当 h 等于零而 g 不等于零时,考虑黏聚力和内摩擦系数的非线性黏塑性体(CF-NVPB 模型)退化为考虑黏聚力的非线性黏塑性体(C-NVPB 模型),即表征此时岩石内摩擦系数与时间没有关系;当 g 等于零而 h 不等于零时,考虑黏聚力和内摩擦系数的非线性黏塑性体(CF-NVPB 模型)退化为考虑内摩擦系数的非线性黏塑性体(F-NVPB 模型),即表征此时岩石黏聚力与时间没有关系;而当 h 和 g 均等于零时,考虑黏聚力和内摩擦系数的非线性黏塑性体(CF-NVPB 模型)退化为西原模型中黏性元件与塑性元件的并联组合.

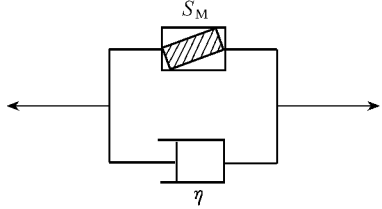


图 2 考虑黏聚力与内摩擦系数的非线性黏塑性体
Fig.2 Non-linear visco-plastic body with consideration of cohesion and internal friction coefficient (CF-NVPB)

CF-NVPB 模型的应力应变关系为:当 $\sigma \leq \sigma_M$ 时, $\epsilon = 0$;当 $\sigma > \sigma_M$ 时,CF-NVPB 模型的本构方程如式(2)所示.

$$\sigma = \sigma_S + hf(t) + g\alpha(t) + \eta \dot{\epsilon} \tag{2}$$

式中 η 为岩石的黏滞系数.

很显然,当 $\sigma > \sigma_M$ 在恒定应力 σ_0 作用时,CF-NVPB 模型的蠕变方程变为

$$\epsilon = \frac{\sigma_0 - \sigma_S}{\eta} t - \frac{h}{\eta} \int_0^t f(\tau) d\tau - \frac{g}{\eta} \int_0^t \alpha(\tau) d\tau \tag{3}$$

对式(3)进行一次和二次求导,可以得到

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\eta} \{ \sigma_0 - [\sigma_S + hf(t) + g\alpha(t)] \} \tag{4}$$

$$\ddot{\epsilon} = - \frac{h}{\eta} f'(t) - \frac{g}{\eta} \alpha'(t) \tag{5}$$

因为 $f(t)$ 和 $\alpha(t)$ 均是递减函数,所以有 $f(t) < f(0)$ 以及 $\alpha(t) < \alpha(0)$,而 $\sigma_0 > \sigma_M = \sigma_S + hf(0) + g\alpha(0)$,这样 $\dot{\epsilon} > 0$,因此式(4)为单调递增函数,递增曲线的凹凸性与应变的二次导数的正负有关.图 3 给出了考虑黏聚力和内摩擦系数的岩石非线性黏塑性体的蠕变曲线.由图 3 可见,在应变的两次导数不为零时,应变与时间的关系为非线性,此时 CF-NVPB 模型可以反映岩石的非线性蠕变特征,而图中在应变的两次导数为零时的蠕变曲线可以反映岩石的线性蠕变特征.因此,基于黏聚力和内摩擦系数的时间效应提出的 CF-NVPB 模型不仅可以描述岩石的稳态蠕变,还可以描述岩石的初期蠕变和加速蠕变.

对于 CF-NVPB 模型,在 $t = 0$ 时施加 ϵ_0 ,并保持不变.由式(2)可知:

$$\sigma = \sigma_S + hf(t) + g\alpha(t) \tag{6}$$

很显然,当时间 t 趋于无穷时,应力松弛到岩石的长期强度 σ_S .

3 考虑黏聚力与内摩擦系数的非线性黏弹塑性流变模型

将考虑黏聚力与内摩擦系数的非线性黏塑性体(CF-NVPB 模型)与三元件线性黏弹性流变模型串联起来,建立一个新的考虑黏聚力与内摩擦系数的岩石非线性黏弹塑性流变模型(图 4),该流变模型同样可以充

分反映岩石的加速流变特性,其流变模型满足如下条件:

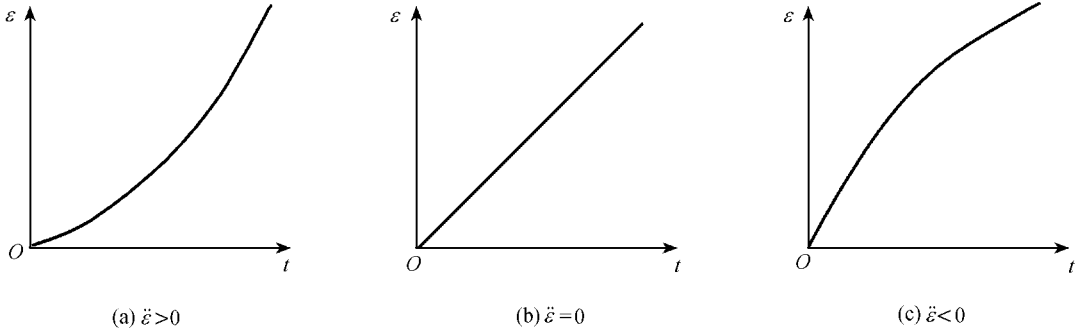


图 3 CF-NVPB 模型的蠕变曲线

Fig.3 Creep curve of CF-NVPB model

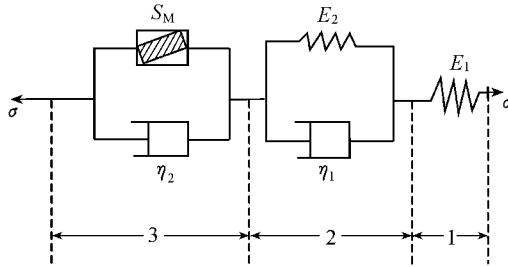


图 4 考虑黏聚力与内摩擦系数的岩石非线性流变模型

Fig.4 Non-linear visco-elasto-plastic rheological model of rocks with consideration of cohesion and internal friction coefficient

a. 当仅有 1 和 2 部分参与流变时,此时流变模型为三元件线性黏弹性模型,其相应的状态方程如式(7)所示.

$$\begin{cases} \sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 \\ \sigma_2 = E_2 \varepsilon_2 + \eta_1 \dot{\varepsilon}_2 \\ \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 \\ \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \end{cases} \quad (7)$$

b. 当 1 2 和 3 部分均参与流变时,此时流变模型为考虑黏聚力与内摩擦系数的非线性黏弹塑性模型,其相应的状态方程如式(8)所示.

$$\begin{cases} \sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 \\ \sigma_2 = E_2 \varepsilon_2 + \eta_1 \dot{\varepsilon}_2 \\ \sigma_3 = \sigma_s + hf(t) + gc(t) + \eta_2 \dot{\varepsilon}_3 \\ \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \\ \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \end{cases} \quad (8)$$

上面各式中的 σ 和 ε 分别为模型总的应力和应变; σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为 1、2 和 3 部分的应力; ε_1 、 ε_2 和 ε_3 分别为 1、2 和 3 部分的应变; E_1 、 E_2 、 η_1 和 η_2 分别为材料的弹性和黏性参数; h 和 g 分别为与应力大小以及材料性质有关的参数; $hf(t)$ 和 $gc(t)$ 分别为内摩擦系数与黏聚力与时间的关系,可通过试验直接获得; σ_s 为岩石的屈服应力或长期强度.

根据式(7)可以得到三元件(广义 Kelvin)黏弹性流变模型的本构方程为

$$\dot{\varepsilon} + \frac{E_2}{\eta_1} \varepsilon = \frac{1}{E_1} \dot{\sigma} + \frac{E_1 + E_2}{E_1 \eta_1} \sigma \quad (9)$$

根据式(8)可以得到考虑黏聚力与内摩擦系数的黏弹塑性流变模型的本构方程为

$$\ddot{\varepsilon} + \frac{E_2}{\eta_1} \dot{\varepsilon} = \frac{1}{E_1} \ddot{\sigma} + \left(\frac{E_2}{E_1 \eta_1} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{\eta_1 \eta_2} \right) \dot{\sigma} + \frac{E_2}{\eta_1 \eta_2} (\sigma - \sigma_s) - \frac{E_2}{\eta_1 \eta_2} [hf'(t) + gc'(t)] - \frac{1}{\eta_2} [hf'(t) + gc'(t)] \quad (10)$$

下面依据式(7)~(10)来推导考虑黏聚力与内摩擦系数的岩石非线性黏弹塑性蠕变和松弛方程,并对岩石非线性黏弹塑性蠕变和松弛特性进行分析.

3.1 非线性黏弹塑性蠕变特性

在 $t=0$ 时加 $\sigma_0 \leq \sigma_M$, 并保持不变, 将 σ_0 代入式(7)对其进行拉氏变换, 并注意如下条件:

$$\begin{cases} \varepsilon_i(0^-) = \varepsilon_i(0^+) = 0 \\ \sigma_i(0^-) = \sigma_i(0^+) = 0 \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (11)$$

这样可以得到:

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\sigma_0}{E_1 S} + \frac{\sigma_0}{S(\eta_1 S + E_2)} \quad (12)$$

式中 $\tilde{\varepsilon}$ —— ε 的拉氏变换; S ——拉氏变换中的复变量. 对式(12)进行拉氏逆变换, 可以得到:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_1} t}\right) \quad (13)$$

式(13)即为三元件黏弹性流变模型的蠕变方程. 两边对时间 t 进行一次求导和二次求导, 可以得到:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma_0}{\eta_1} e^{-\frac{E_2}{\eta_1} t} \quad (14)$$

$$\ddot{\varepsilon} = -\frac{E_2 \sigma_0}{\eta_1^2} e^{-\frac{E_2}{\eta_1} t} \quad (15)$$

由式(14)和式(15)可以看出 $\dot{\varepsilon} > 0$ 而 $\ddot{\varepsilon} < 0$. 此时模型有瞬时弹性变形及蠕变, 且随着时间的不断增加蠕变速率逐渐减小, 故蠕变模型反映的是稳态蠕变, 即应力 σ_0 施加后, 模型产生瞬时弹性变形和衰减蠕变变形, 最终趋于稳定.

在 $t=0$ 时加 $\sigma_0 > \sigma_M$, 并保持不变, 将 σ_0 代入式(8)对其进行拉氏变换, 注意式(11)的初始条件, 这样可以得到:

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\sigma_0}{E_1 S} + \frac{\sigma_0}{S(\eta_1 S + E_2)} + \frac{\sigma_0 - \sigma_S}{\eta_2 S^2} - \frac{hF(S)}{\eta_2 S} - \frac{g\alpha(S)}{\eta_2 S} \quad (16)$$

式中 $F(S)$ 和 $\alpha(S)$ 为 $f(t)$ 和 $\alpha(t)$ 的拉氏变换. 对式(16)进行拉氏逆变换, 可以得到:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_1} t}\right) + \frac{\sigma_0 - \sigma_S}{\eta_2} t - \frac{h}{\eta_2} \int_0^t f(\tau) d\tau - \frac{g}{\eta_2} \int_0^t \alpha(\tau) d\tau \quad (17)$$

式(17)即为考虑黏聚力与内摩擦系数的非线性黏弹塑性流变模型的蠕变方程. 两边对时间 t 进行一次求导和二次求导, 可以得到:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma_0}{\eta_1} e^{-\frac{E_2}{\eta_1} t} + \frac{\sigma_0 - \sigma_S}{\eta_2} - \frac{h}{\eta_2} f(t) - \frac{g}{\eta_2} \alpha(t) \quad (18)$$

$$\ddot{\varepsilon} = -\frac{E_2 \sigma_0}{\eta_1^2} e^{-\frac{E_2}{\eta_1} t} - \frac{h}{\eta_2} f'(t) - \frac{g}{\eta_2} \alpha'(t) \quad (19)$$

因为 $f(t)$ 和 $\alpha(t)$ 均是递减函数, 所以有 $f(t) < f(0)$ 以及 $\alpha(t) < \alpha(0)$, 而 $\sigma_0 > \sigma_M = \sigma_S + hf(0) + g\alpha(0)$, 这样 $\dot{\varepsilon} > 0$, 因此式(18)为单调递增函数, 递增曲线的凹凸性与应变的二次导数的正负有关. 若 $\ddot{\varepsilon} < 0$, 此时模型只能反映岩石流变全过程曲线的初期流变和稳态流变阶段, 而不能反映岩石的加速流变阶段. 但若应变的二阶导数可以小于零、等于零或大于零, 则恰好对应着岩石流变全过程曲线的3个阶段, 如图5(a)所示. 流变模型此时存在初期蠕变、稳态蠕变和加速蠕变, 在加速蠕变阶段, 模型的蠕变随时间增加而迅速增长. 模型的蠕变特征曲线如图5(b)所示.

3.2 非线性黏弹塑性松弛特性

对于三元件黏弹性流变模型, 在 $t=0$ 时加 ε_0 , 并保持不变. 将 $\varepsilon = \varepsilon_0$ 代入式(7)对其进行拉氏变换, 注意初始条件式(11) 这样可以得到:

$$\frac{\varepsilon_0}{S} = \frac{\tilde{\sigma}}{E_1} + \frac{\tilde{\sigma}}{\eta_1 S + E_2} \quad (20)$$

移项得

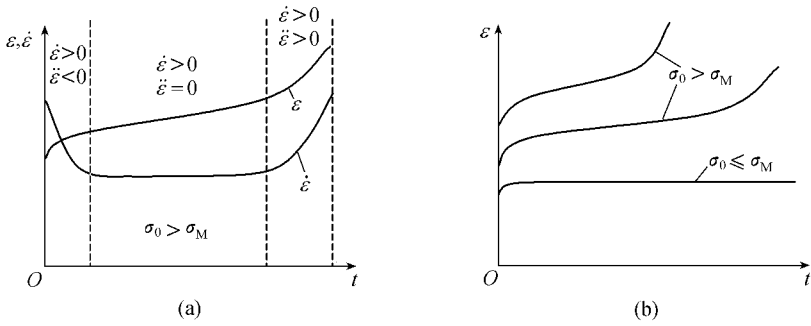


图 5 考虑黏聚力与内摩擦系数的岩石非线性黏弹塑性流变模型的蠕变特征曲线

Fig.5 Creep characteristic curve of nonlinear visco-elasto-plastic rheological model of rocks with consideration of cohesion and internal friction coefficient

$$\bar{\sigma} = \frac{E_1 \eta_1}{\eta_1 S + E_1 + E_2} \epsilon_0 + \frac{E_1 E_2}{S(\eta_1 S + E_1 + E_2)} \epsilon_0 \quad (21)$$

对式(21)进行拉氏逆变换,有

$$L^{-1} \left[\frac{E_1 \eta_1 \epsilon_0}{\eta_1 S + E_1 + E_2} \right] = E_1 \epsilon_0 e^{-\frac{E_1 + E_2}{\eta_1} t} \quad (22)$$

$$L^{-1} \left[\frac{E_1 E_2}{S(\eta_1 S + E_1 + E_2)} \epsilon_0 \right] = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_1 + E_2}{\eta_1} t} \right) \quad (23)$$

这样,三元件黏弹性流变模型的松弛方程为

$$\sigma = \left[\frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} + \frac{E_1^2}{E_1 + E_2} e^{-\frac{E_1 + E_2}{\eta_1} t} \right] \epsilon_0 \quad (24)$$

很显然,松弛曲线为下降的指数曲线。

当时间 $t = 0$ 时,应力为

$$\sigma_0 = E_1 \epsilon_0 \quad (25)$$

当时间 t 趋于无穷时,应力松弛为

$$\sigma_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \sigma = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \epsilon_0 \quad (26)$$

对于考虑黏聚力与内摩擦系数的非线性黏弹塑性流变模型,在 $t = 0$ 时加 ϵ_0 ,并保持不变,对其进行拉氏变换,并注意初始条件式(11),这样可以得到:

$$\frac{\epsilon_0}{S} = \frac{\bar{\sigma}}{E_1} + \frac{\bar{\sigma}}{\eta_1 S + E_2} + \frac{\bar{\sigma} - hF(S) - g\alpha(S) - \sigma_s/S}{\eta_2 S} \quad (27)$$

移项得

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= \frac{E_1(\eta_1 S + E_2)[hF(S) + g\alpha(S) + \eta_2 \epsilon_0 + \sigma_s/S]}{(\eta_1 S + E_2)(\eta_2 S + E_1) + E_1 \eta_2 S} = \\ &= \frac{E_1 \eta_2 (\eta_1 S + E_2) \epsilon_0 + E_1 (\eta_1 S + E_2)[hF(S) + g\alpha(S)] + E_1 (\eta_1 S + E_2) \sigma_s/S}{\eta_1 \eta_2 S^2 + (E_1 \eta_1 + E_1 \eta_2 + E_2 \eta_2) S + E_1 E_2} = \\ &= \left(E_1 S + \frac{E_1 E_2}{\eta_1} \right) \epsilon_0 + \frac{\left(\frac{E_1 S}{\eta_2} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 \eta_2} \right) [hF(S) + g\alpha(S)]}{(S + P_1)(S + P_2)} + \frac{\left(\frac{E_1 S}{\eta_2} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 \eta_2} \right) \sigma_s}{S(S + P_1)(S + P_2)} \end{aligned} \quad (28)$$

其中

$$\begin{cases} P_1 = (A + \sqrt{A^2 - 4B})/2 \\ P_2 = (A - \sqrt{A^2 - 4B})/2 \\ P_1 + P_2 = A = \frac{E_1}{\eta_2} + \frac{E_1}{\eta_1} + \frac{E_2}{\eta_1} > 0 \\ P_1 P_2 = B = \frac{E_1 E_2}{\eta_1 \eta_2} > 0 \end{cases} \quad (29)$$

由式(29)中的后两式可知: $P_1 > 0$ 且 $P_2 > 0$.

对式(28)的3项分别进行拉氏逆变换,有

$$L^{-1}\left[\frac{(E_1 S + E_1 E_2 / \eta_1) \varepsilon_0}{(S + P_1)(S + P_2)}\right] = \frac{E_2 / \eta_1 - P_1}{P_2 - P_1} E_1 \varepsilon_0 e^{-P_1 t} + \frac{E_2 / \eta_1 - P_2}{P_1 - P_2} E_1 \varepsilon_0 e^{-P_2 t} \quad (30)$$

$$L^{-1}\left[\frac{(E_1 S / \eta_2 + E_1 E_2 (\eta_1 \eta_2)) (h f(S) + g(\alpha(S)))}{(S + P_1)(S + P_2)}\right] = \frac{E_1}{\eta_1 \eta_2 (P_1 - P_2)} \left\{ h \int_0^t \tau \mathbb{I}(E_2 - \eta_1 P_2) e^{-P_2(t-\tau)} - (E_2 - \eta_1 P_1) e^{-P_1(t-\tau)} \mathbb{I} \tau + \right. \\ \left. g \int_0^t \alpha \tau \mathbb{I}(E_2 - \eta_1 P_2) e^{-P_2(t-\tau)} - (E_2 - \eta_1 P_1) e^{-P_1(t-\tau)} \mathbb{I} \tau \right\} \quad (31)$$

$$L^{-1}\left[\frac{(E_1 S / \eta_2 + E_1 E_2 (\eta_1 \eta_2)) \sigma_S}{(S + P_1)(S + P_2)}\right] = \frac{E_1}{\eta_2} \left[\frac{E_2 / \eta_1 - P_1}{P_1 (P_2 - P_1)} e^{-P_1 t} + \frac{E_2 / \eta_1 - P_2}{P_2 (P_2 - P_1)} e^{-P_2 t} + \frac{E_2 / \eta_1}{P_1 P_2} \right] \sigma_S \quad (32)$$

这样,考虑黏聚力与内摩擦系数的非线性流变模型的松弛方程为

$$\sigma = \frac{E_2 / \eta_1 - P_1}{P_2 - P_1} E_1 \varepsilon_0 e^{-P_1 t} + \frac{E_2 / \eta_1 - P_2}{P_1 - P_2} E_1 \varepsilon_0 e^{-P_2 t} + \frac{E_1}{\eta_1 \eta_2 (P_1 - P_2)} \left\{ h \int_0^t \tau \mathbb{I}(E_2 - \eta_1 P_2) e^{-P_2(t-\tau)} - (E_2 - \eta_1 P_1) e^{-P_1(t-\tau)} \mathbb{I} \tau + \right. \\ \left. g \int_0^t \alpha \tau \mathbb{I}(E_2 - \eta_1 P_2) e^{-P_2(t-\tau)} - (E_2 - \eta_1 P_1) e^{-P_1(t-\tau)} \mathbb{I} \tau \right\} + \\ \frac{E_1}{\eta_2} \left[\frac{E_2 / \eta_1 - P_1}{P_1 (P_2 - P_1)} e^{-P_1 t} + \frac{E_2 / \eta_1 - P_2}{P_2 (P_2 - P_1)} e^{-P_2 t} + \frac{E_2 / \eta_1}{P_1 P_2} \right] \sigma_S \quad (33)$$

很显然,松弛曲线为下降的指数曲线.当时间 $t = 0$ 时,应力为

$$\sigma_0 = \frac{E_2 / \eta_1 - P_1}{P_2 - P_1} E_1 \varepsilon_0 + \frac{E_2 / \eta_1 - P_2}{P_1 - P_2} E_1 \varepsilon_0 + \frac{E_1}{\eta_2} \left[\frac{E_2 / \eta_1 - P_1}{P_1 (P_2 - P_1)} + \frac{E_2 / \eta_1 - P_2}{P_2 (P_2 - P_1)} + \frac{E_2 / \eta_1}{P_1 P_2} \right] \sigma_S \quad (34)$$

当时间 t 趋于无穷时,应力松弛为

$$\sigma_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \sigma = \frac{E_1 E_2}{\eta_1 \eta_2 P_1 P_2} \sigma_S = \sigma_S \quad (35)$$

4 结 论

a. 通过考虑黏聚力与内摩擦系数与时间的关系,提出了一个新的考虑黏聚力与内摩擦系数的非线性黏塑性体(CF-NVPB模型),然后将其与广义Kelvin黏弹性模型串联起来,建立了一个考虑黏聚力与内摩擦系数的岩石非线性黏弹塑性流变模型.

b. 本文提出的考虑黏聚力与内摩擦系数的岩石非线性黏弹塑性流变模型可以很好地描述岩石的非线性加速蠕变变形,并从理论上对该非线性流变模型的蠕变特性与松弛特性进行了分析.有关该模型的试验验证及工程应用仍有待进一步探讨.

参考文献:

- [1] LI Yong-sheng, XIA Cai-chu. Time-dependent tests on intact rocks in uniaxial compression[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 2000, 37(3): 467-475.
- [2] YANG Chun-he, DAEMEN J J K, YIN Jian-hua. Experimental investigation of creep behavior of salt rock[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1999, 36(3): 233-242.
- [3] MARANINI E, BRIGNOLI M. Creep behaviour of a weak rock: experimental characterization[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1999, 36(1): 127-138.
- [4] 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.
- [5] ENRICO M, TSUTOMU Y. A non-associated viscoplastic model for the behaviour of granite in triaxial compression[J]. Mechanics of

Materials 2001 33(5) 283-293.

[6] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京 : 中国建筑工业出版社 ,1999.

[7] 余启华. 岩石的流变破坏过程及有限元分析[J]. 水利学报 ,1985(1) 55-61.

[8] 杨圣奇. 岩石流变力学特性的研究及其工程应用[D]. 南京 : 河海大学 ,2006.

[9] 徐卫亚, 杨松林, 朱珍德, 等. 龙滩水电站地下洞室群围岩流变研究报告[R]. 南京 : 河海大学 ,2003.

Nonlinear visco-elasto-plastic rheological model of rock
with consideration of cohesion and internal friction coefficient

YANG Sheng-qi¹, ZHU Yun-hua², YU Shi-hai³

(1. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnique University, Jiaozuo 454000, China ;

3. Institute of Science, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract :Based on the shear rheological experimental result of shale obtained by rock shear rheometers , the long-term strength parameters(long-term cohesion and long-term internal friction coefficient) of rocks were obtained by Coulomb criteria. The comparison of the long-term strength parameters with the instant ones shows that the sensitivity of cohesion of rocks to time is higher than that of internal friction coefficient. A plastic component with consideration of the variation of cohesion and internal friction coefficient was put forward. By its parallel connection with the linear viscous component , a new nonlinear visco-plastic body (CF-NVPB) with consideration of cohesion and internal friction coefficient was obtained. Meanwhile , by series connection of CF-NVPB model with three-component linear visco-elastic rheological model , a new nonlinear visco-elasto-plastic rheological model with consideration of cohesion and internal friction coefficient was established , and its creep equation and relaxation equation were deduced.

Key words :rock mechanics ; cohesion ; internal friction coefficient ; nonlinear visco-elasto-plastic rheological model

全国中文核心期刊 中国科技核心期刊
全国水利系统优秀期刊 华东地区优秀期刊 江苏省优秀期刊
《水利水电科技进展》征订启事

(邮发代号 28-244 ,CN32-1439/TV ,ISSN1006-7647 ,双月刊)

《水利水电科技进展》由河海大学主办 ,主要刊登与水科学、水工程、水资源、水环境等学科有关的科技论文 ,设有研究探讨、工程技术、水管理、专题综述、国外动态、科技简讯等栏目 ,适合与水科学、水工程、水资源、水环境等有关的科学研究人员、工程技术人员、科技管理人员以及大专院校师生阅读.

《水利水电科技进展》由邮局发行 ,邮发代号 :28-244 ,2007 年每期定价 8 元 ,全年 6 期共计 48 元.读者亦可直接向编辑部订阅.欢迎个人和单位直接汇款订阅或函索订单.编辑部地址 :210098 南京市西康路 1 号河海大学《水利水电科技进展》编辑部.联系电话 :025-83786335 , E-mail :jz@hhu.edu.cn ,http ://kbb.hhu.edu.cn.汇款时务请注明“订水利水电科技进展”.