

考虑裂纹内水压的节理岩体蠕变柔量分析

韦立德¹,徐卫亚¹,杨松林¹,李 建²

(1.河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098;2.江苏省交通规划设计院,江苏 南京 210005)

摘要 利用自洽理论和线粘弹性断裂力学原理推导了考虑张开裂纹、闭合裂纹和裂纹内水压影响的节理岩体体变蠕变柔量和单轴蠕变柔量的理论表达式,并根据该表达式分析了应力荷载、水压、裂隙密度参数、泊松比和摩擦系数改变时裂隙岩体蠕变柔量的变化规律,从而为裂隙岩体工程流变计算提供了一种新的计算方法.

关键词 岩石;节理;流变;蠕变柔量;饱和渗流

中图分类号:TU452 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2003)05-0564-05

节理岩体是岩体工程中常会遇到的复杂介质,其强度、变形及时效特征将直接影响到工程设计、施工与加固方案的选取.大量工程实践表明,岩体工程开挖后的应力调整和变形并不是瞬时完成的.因此,开展岩体流变特性研究具有极其重要的工程意义和理论价值.

细观损伤力学的一个重要特征是采用一种平均化方法把细观结构损伤机制研究的结果反映到材料的宏观力学行为的描述中去.比较典型的平均化方法有不考虑微裂隙之间相互作用的非相互作用方法,考虑微缺陷之间弱相互作用的自洽方法、微分方法、Mori-Tanaka 方法,考虑微缺陷之间强相互作用的统计细观力学方法等^[1].文献[2,3]利用断裂力学和自洽方法对裂隙岩体的等效弹性参数进行分析计算,得出了考虑裂纹内水压和闭合裂纹的节理岩体弹性柔量表达式.本文在此基础上利用线粘弹性断裂力学原理对裂隙岩体的蠕变柔量进行探讨.

1 基本概念^[4]

工程上有这样一类问题,线粘弹性问题的解可以由相应的弹性问题的解乘以某一个时间因子得到.本文只考虑这类问题.

考虑岩石材料的流变变形时,裂纹延展平面上($\theta=0$)的应力为相应的弹性解乘以应力强度因子时间因子,即

$$\sigma_{\theta\theta}(r,0,t) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}f_{I\sigma}(t) \qquad \sigma_{r\theta}(r,0,t) = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}}f_{II\sigma}(t) \qquad \sigma_{\theta z}(r,0,t) = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}}f_{III\sigma}(t) \quad (1)$$

式中: K_I, K_{II}, K_{III} ——I型、II型和III型裂纹的应力强度因子; $f_{I\sigma}(t), f_{II\sigma}(t), f_{III\sigma}(t)$ ——3种相应类型裂纹的应力强度因子时间因子; r, θ ——极坐标系中的矢径和极角,极点为裂纹上某个顶点,极坐标轴为沿着裂纹轴线并指向裂纹外面的直线,以裂纹延展线为 $\theta=0$ 线, z 轴经过极点且垂直于裂纹平面.

应力强度因子引起的相应裂纹位移为相应的弹性解乘以位移时间因子 $f_{iu}(t)$ ($i=I, II, III$),即

$$v(t) = vf_{Iu}(t) \qquad u(t) = uf_{IIu}(t) \qquad w(t) = wf_{IIIu}(t) \quad (2)$$

受三轴静水应力作用时,给定荷载

$$F(t) = Ff_{\sigma}(t) \quad (3)$$

即荷载为某一固定荷载 F 乘以应力时间因子 $f_{\sigma}(t)$.像文献[4]推导平面问题那样,则可得到位移时间因子

$$f_u(t) = f_{\sigma}(t) + \frac{E}{3(1-2\mu)}\int_0^t \frac{\partial J_2'(t-\tau)}{\partial(t-\tau)}f_{\sigma}(\tau)d\tau = f_{\sigma}(t) + \frac{1}{J_{20}'}\int_0^t \frac{\partial J_2'(t-\tau)}{\partial(t-\tau)}f_{\sigma}(\tau)d\tau \quad (4)$$

式中: $J_2'(t - \tau)$ ——体变蠕变柔量; E ——弹性杨氏模量; μ ——弹性泊松比; J_{20}' ——弹性体变柔量. 当 $f_{\sigma}(t) = 1(t \geq 0)$ 时

$$f_u(t) = \frac{J_2'(t)}{J_{20}'} = \frac{EJ_2'(t)}{3(1 - 2\mu)} \tag{5}$$

2 裂隙岩体的蠕变柔量

本文推导采用如下假设:(a)裂隙岩体中的岩石为线粘弹性体;(b)岩石中的裂隙均为币状裂纹,裂纹的大小、方位和位置均为随机分布,裂隙岩体为均质各向同性粘弹性体;(c)张开裂纹中充满了水,裂纹内水压在整个荷载作用过程中不变,闭合裂纹接触面之间的摩擦剪切应力不随时间而变,闭合裂纹没有水的作用;(d)在整个荷载作用过程中,张开裂纹没有发生闭合,所有裂纹都没有扩展,仅发生张开度的变化.

2.1 静水应力作用下的蠕变柔量

包含币状裂纹的粘弹性三维裂隙岩体在三轴静水应力 σ_p 作用下发生蠕变,应力强度因子中只有 K_I 不等于 0, $f_{I_g}(t) = f_{I_{\sigma}}(t)f_{I_u}(t) = f_{I_u}(t) = \frac{J_2'(t)}{J_{20}'} = \frac{EJ_2'(t)}{3(1 - 2\mu)}$, 岩石和裂隙岩体的蠕变规律分别为

$$\varepsilon(t) = J_2(t)\sigma_p \quad \bar{\varepsilon}(t) = \bar{J}_2(t)\sigma_p \tag{6}$$

式中: $J_2(t), \bar{J}_2(t)$ ——岩石和裂隙岩体的体变蠕变柔量; $\varepsilon(t), \bar{\varepsilon}(t)$ ——岩石和裂隙岩体在静水应力 σ_p 作用下的蠕变应变.

假设体积为 V 的岩体中包含 n_1 个张开户状裂纹和 n_2 个闭合币状裂纹, n_1 个张开裂纹中因充满水而受到恒定的静水压力 p , 根据自治理论则有如下能量关系:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_p^2 V}{2k_0} \frac{\overline{E_0} \bar{J}_2(t)}{3(1 - 2\mu_0)} &= \frac{\sigma_p^2 V}{2k_0} \frac{E_0 J_2(t)}{3(1 - 2\mu_0)} + \sum_{i=1}^{n_1} \frac{8(1 - \mu_0^2) a_i^3 \left(\sigma_p^2 + \frac{\sigma_p}{|\sigma_p|} p^2 \right)}{9(1 - 2\mu_0) \frac{1}{k_0}} \frac{\overline{E_0} \bar{J}_2(t)}{3(1 - 2\mu_0)} + \\ &\sum_{i=1}^{n_2} \frac{8(1 - \mu_0^2) a_i^3 (H\langle \sigma_p \rangle \sigma_p)^2}{9(1 - 2\mu_0) \frac{1}{k_0}} \frac{\overline{E_0} \bar{J}_2(t)}{3(1 - 2\mu_0)} \\ \frac{1}{k_0} &= \frac{3(1 - 2\mu_0)}{E_0} \quad \frac{1}{k_0} = \frac{3(1 - 2\mu_0)}{E_0} \end{aligned} \tag{7}$$

式中: V ——岩体的体积; $\overline{E_0}$ ——岩体的弹性模量; μ_0 ——岩体的弹性泊松比; E_0 ——岩石的弹性模量; μ_0 ——岩石的弹性泊松比; a_i ——第 i 个裂纹的特征尺寸; $H\langle \rangle$ ——开关函数,

$$H\langle f \rangle = \begin{cases} 0 & (f \leq 0) \\ 1 & (f > 0) \end{cases} \tag{8}$$

化简式(7)得到岩体和岩石的体变蠕变柔量关系

$$\bar{J}_2(t) = J_2(t) + \frac{16 \sum_{i=1}^{N_1} a_i^3 (1 - \mu_0^2) \left[1 + \frac{\sigma_p}{|\sigma_p|} \left(\frac{p}{\sigma_p} \right)^2 \right] \bar{J}_2(t)}{9(1 - 2\mu_0)} + \frac{16 \sum_{i=1}^{N_2} a_i^3 (1 - \mu_0^2) H\langle \sigma_p \rangle \bar{J}_2(t)}{9(1 - 2\mu_0)} \tag{9}$$

式中: N_1 —— 1 m^3 裂隙岩体中张开裂纹的个数; N_2 —— 1 m^3 裂隙岩体中闭合裂纹的个数. 采用裂纹的大小、方位和位置均为随机分布的假设, 假设 N_1 个 a_i^3 的平均值为 $\overline{a_1^3}$, $X_1 = N_1 \overline{a_1^3}$, N_2 个 a_i^3 的平均值为 $\overline{a_2^3}$, $X_2 = N_2 \overline{a_2^3}$, 则得到岩体和岩石的体变蠕变柔量关系式为

$$\frac{\bar{J}_2(t)}{J_2(t)} = \frac{1}{1 - \frac{16X_1(1 - \mu_0^2) \left[1 + \frac{\sigma_p}{|\sigma_p|} \left(\frac{p}{\sigma_p} \right)^2 \right]}{9(1 - 2\mu_0)} - \frac{16X_2(1 - \mu_0^2) H\langle \sigma_p \rangle}{9(1 - 2\mu_0)}} \tag{10}$$

2.2 单轴应力作用下的蠕变柔量

上述裂隙岩体在单轴应力 σ_s 作用下发生蠕变,只考虑应力强度因子 K_I 和 K_{II} 的作用, $f_{ig}(t) = f_{i\sigma}(t)f_{iu}(t) = f_{iu}(t) = \frac{c'(t)}{c'_0} = Ec'(t) = ED'(t)$. 其中 $i = I, II$, $\frac{1}{c'_0} = E$, $c'(t)$ 是广义平面应力蠕变柔量, $D'(t)$ 是单轴蠕

变柔量. 岩石和裂隙岩体的单轴蠕变规律分别为

$$\epsilon(t) = D(t)\sigma_s \qquad \bar{\epsilon}(t) = \bar{D}(t)\sigma_s \tag{11}$$

式中: $D(t), \bar{D}(t)$ ——岩石和裂隙岩体的单轴蠕变柔量; $\epsilon(t), \bar{\epsilon}(t)$ ——岩石和裂隙岩体的单轴应力 σ_s 作用下的轴向蠕变应变.

根据自洽理论,则有如下能量关系式:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_s^2 V}{2 E_0} \overline{E_0 D}(t) = & \frac{\sigma_s^2 V}{2 E_0} E_0 D(t) + \sum_{i=1}^{n_1} \left[\frac{8(1 - \overline{\mu_0^2}) a_i^3 \sigma_s^2 \cos^4 \alpha_i}{3 E_0} + \frac{\sigma_s}{|\sigma_s|} \frac{8(1 - \overline{\mu_0^2}) a_i^3 p^2}{3 E_0} + \right. \\ & \left. \frac{16(1 - \overline{\mu_0^2}) a_i^3 \sigma_s^2 \cos^2 \alpha_i \sin^2 \alpha_i}{3 E_0 (2 - \overline{\mu_0})} \right] \overline{E_0 D}(t) + \sum_{i=1}^{n_2} \left[\frac{8(1 - \overline{\mu_0^2}) a_i^3 (H\langle \sigma_s \rangle \sigma_s)^2 \cos^4 \alpha_i}{3 E_0} + \right. \\ & \left. \frac{16(1 - \overline{\mu_0^2}) a_i^3 (H\langle \sigma_s k \cos \alpha_i + |\sigma_s| \sin \alpha_i \rangle (\sigma_s k \cos \alpha_i + |\sigma_s| \sin \alpha_i))^2 H\langle -\sigma_s \rangle \cos^2 \alpha_i}{3 E_0 (2 - \overline{\mu_0})} \right] \overline{E_0 D}(t) \end{aligned} \tag{12}$$

式中: k ——岩石的摩擦系数; α_i ——第*i*个裂纹走向和单轴轴向之间的夹角. 化简式(12)得到岩体和岩石的单轴蠕变柔量关系式为

$$\begin{aligned} \bar{D}(t) = D(t) + & \left[\frac{16(\sum_{i=1}^{N_1} a_i^3 \cos^4 \alpha_i)(1 - \overline{\mu_0^2})}{3} + \frac{\sigma_s}{|\sigma_s|} \frac{16 \sum_{i=1}^{N_1} a_i^3 (1 - \overline{\mu_0^2}) \left(\frac{p}{\sigma_s}\right)^2}{3} + \right. \\ & \left. \frac{32(\sum_{i=1}^{N_1} a_i^3 \cos^2 \alpha_i \sin^2 \alpha_i)(1 - \overline{\mu_0^2})}{3(2 - \overline{\mu_0})} \right] \bar{D}(t) + \left[\frac{16(\sum_{i=1}^{N_2} a_i^3 \cos^4 \alpha_i)(1 - \overline{\mu_0^2}) H\langle \sigma_s \rangle}{3} + \right. \\ & \left. \frac{32(1 - \overline{\mu_0^2}) (\sum_{i=1}^{N_2} a_i^3 (H\langle k \cos \alpha_i - \sin \alpha_i \rangle (k \cos \alpha_i - \sin \alpha_i))^2 \cos^2 \alpha_i) H\langle -\sigma_s \rangle}{3(2 - \overline{\mu_0})} \right] \bar{D}(t) \end{aligned} \tag{13}$$

采用裂纹大小、方位和位置均为随机分布的假设,经球面平均后由式(13)得到岩体和岩石的单轴蠕变柔量关系式为

$$\begin{aligned} \frac{\bar{D}(t)}{D(t)} = & \left\{ 1 - \left[\frac{16(10 - 3\overline{\mu_0})(1 - \overline{\mu_0^2})}{45(2 - \overline{\mu_0})} + \frac{\sigma_s}{|\sigma_s|} \frac{16(1 - \overline{\mu_0^2}) \left(\frac{p}{\sigma_s}\right)^2}{3} \right] X_1 - \right. \\ & \left. \left[\frac{16(1 - \overline{\mu_0^2}) H\langle \sigma_s \rangle}{15} + \frac{32(1 - \overline{\mu_0^2}) c_k H\langle -\sigma_s \rangle}{3(2 - \overline{\mu_0})} \right] X_2 \right\}^{-1} \end{aligned} \tag{14}$$

式(10), (14)中的 $\overline{\mu_0}$ 由下式求出.

$$\begin{aligned} 1 - 2\overline{\mu_0} = (1 - 2\mu_0) \Big\{ & 1 - \left[\frac{16(10 - 3\overline{\mu_0})(1 - \overline{\mu_0^2})}{45(2 - \overline{\mu_0})} + \frac{\sigma_s}{|\sigma_s|} \frac{16(1 - \overline{\mu_0^2}) \left(\frac{p}{\sigma_s}\right)^2}{3} \right] X_1 - \\ & \left[\frac{16(1 - \overline{\mu_0^2}) H\langle \sigma_s \rangle}{15} + \frac{32(1 - \overline{\mu_0^2}) c_k H\langle -\sigma_s \rangle}{3(2 - \overline{\mu_0})} \right] X_2 \Big\} \left\{ 1 - \frac{16X_1(1 - \overline{\mu_0^2}) \left[1 + \frac{\sigma_p}{|\sigma_p|} \left(\frac{p}{\sigma_p}\right)^2 \right]}{9(1 - 2\overline{\mu_0})} - \right. \\ & \left. \frac{16X_2(1 - \overline{\mu_0^2}) H\langle \sigma_p \rangle}{9(1 - 2\overline{\mu_0})} \right\}^{-1} \end{aligned} \tag{15}$$

从式(10), (14)和(15)可以看出,单轴蠕变柔量比值和体变蠕变柔量比值只与作用的应力荷载(σ_p 和 σ_s)正负号、裂纹内水压及其比值有关,而与它们的大小无关,因此下面只写出它们的数量而不涉及单位.

3 岩体的蠕变柔量分析与结论

图1为蠕变柔量比值随荷载变化的情况. 其中: $k = 0.23, X_1 = 0.05, \mu_0 = 0.25$; (σ_p, σ_s) 配对为 (-25

$-35), (-15 -25), (-5 -15), (5 -5), (15 5), (25 15), (35 25)$ 和 $(45 35)$ 。0.15 单轴表示 $X_2 = 0.15$ 单轴蠕变柔量比值 $\bar{D}(t)/D(t)$, 0.15 体变表示 $X_2 = 0.15$ 体变蠕变柔量比值 $\bar{J}(t)/J(t)$, 其他类推。图 1(a)对应 $p = 0$ 的情况。由图 1(a)可知 蠕变柔量比值只与 σ_p 和 σ_s 的正负号有关,而与它们的大小、比值等无关 在受拉应力荷载情况下,体变蠕变柔量比值和单轴蠕变柔量比值都随 X_2 增大而增大 在相同应力荷载情况下,单轴蠕变柔量比值比体变蠕变柔量比值小。图 1(b)对应 $p = 5$ 的情况。由图 1(b)可知 随着压应力荷载的增大,蠕变柔量比值有先减小后增大的趋势 随着拉应力荷载的增大,蠕变柔量比值有先增大后减小的趋势。同时从式(10),(14)还可以看出:当荷载为一固定的压应力时,柔量比值随水压的减小而减小,随水压的增大而增大;当荷载为一固定的拉应力时,柔量比值随水压的增大而减小,随水压的减小而增大。

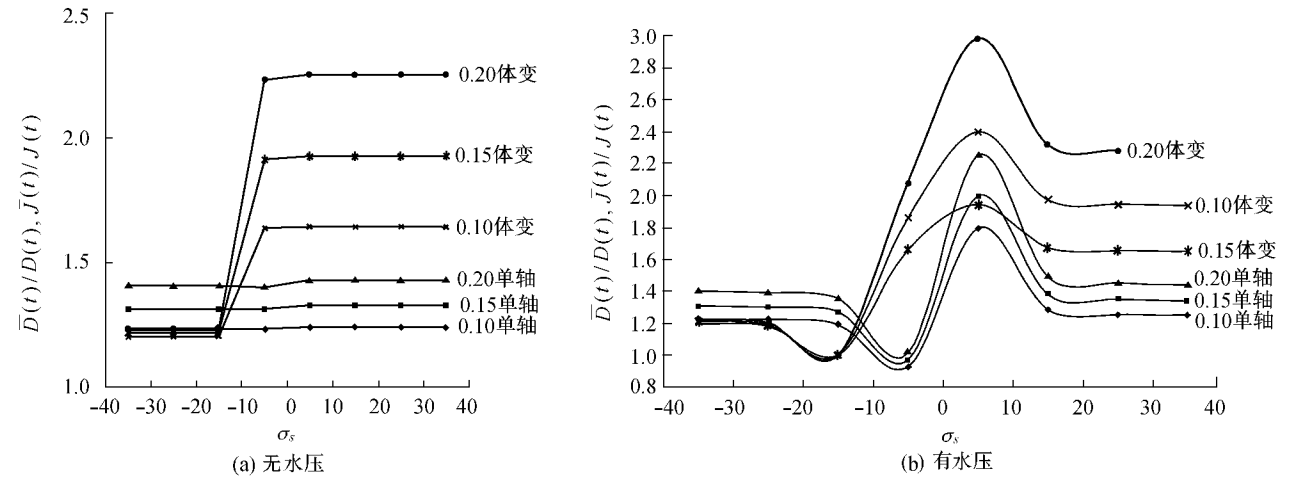


图 1 蠕变柔量比值与荷载关系曲线

Fig.1 Variation of ratio of creep compliance with load

图 2 为蠕变柔量比值随裂隙密度变化的情况。其中 $k = 0.23, \mu_0 = 0.25$, 曲线上面每一点对应的张开裂隙密度和闭合裂隙密度相等;单轴 $(-4 -5)$ 表示应力荷载 (σ_s, σ_p) 为 $(-4 -5)$ 时 $\sigma_s = -4$ 对应的单轴蠕变柔量比值,体变 $(-4 -5)$ 表示应力荷载 (σ_s, σ_p) 为 $(-4 -5)$ 时 $\sigma_p = -5$ 对应的单轴蠕变柔量比值,其他类推。图 2(a)表示 $p = 0$ 的情况。由图 2(a)可知 曲线单轴 $(-4 -5)$ 与单轴 $(-25 -35)$ 、单轴 $(15 25)$ 重合,曲线体变 $(-4 -5)$ 和体变 $(-25 -35)$ 重合。其原因是:它们对应的应力荷载的正负号一样,蠕变柔量比值都随裂隙密度增加而陡增。一般情况下,体变蠕变柔量比值比单轴蠕变柔量比值增大更快。图 2(b)表示 $p = 10$ 的情况。由图 2(a)可知 在受压应力荷载且其值小于裂纹内水压时,蠕变柔量比值小于 1 且比值随裂隙密度增大而减小,单轴蠕变柔量比值比体变蠕变柔量比值稍大,它们基本上重合 在受压应力荷载且其值大于裂纹内水压时和在受拉应力荷载时,蠕变柔量比值大于 1 且比值随裂隙密度增大而陡增,体变蠕变柔量比值比单轴蠕变柔量比值大。

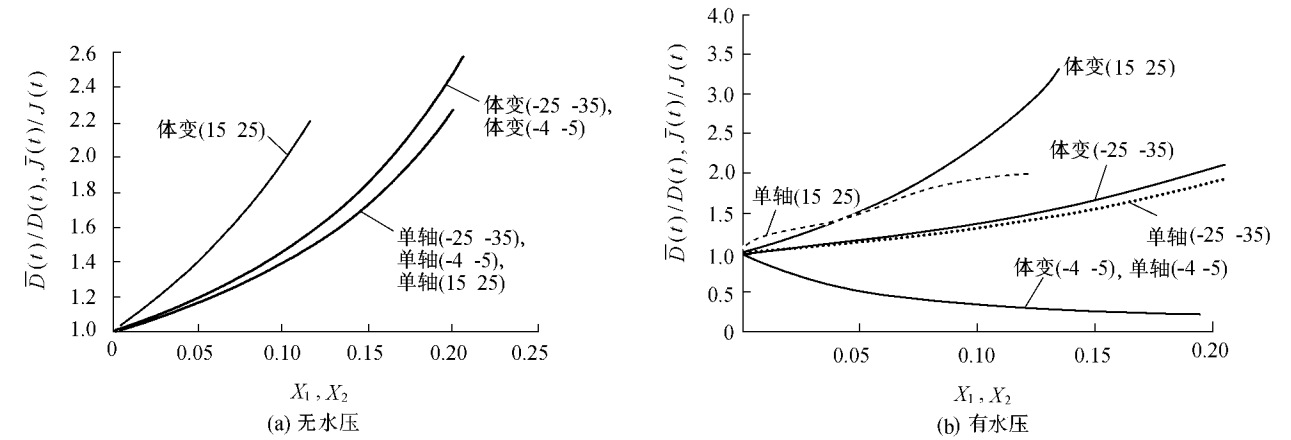


图 2 蠕变柔量比值与裂隙密度参数关系曲线

Fig.2 Variation of ratio of creep compliance with crack density

图 3 和图 4 分别是蠕变柔量比值随岩石弹性泊松比和岩石摩擦系数变化的情况. 其中: 无水压单轴表示裂纹内无水压单轴蠕变柔量比值, 无水压体变表示裂纹内无水压体变蠕变柔量比值; 4 单轴表示裂纹内水压数量为 4 的单轴蠕变柔量比值; 4 体变表示裂纹内水压数量为 4 的体变蠕变柔量比值. 由图 3 可知, 在受压应力荷载作用下, 裂纹内无水压的蠕变柔量比值比有水压的小, 体变蠕变柔量比值有随着岩石弹性泊松比增大而增大的趋势, 单轴蠕变柔量比值在裂纹内有水压情况下有随着岩石弹性泊松比增大而减小的趋势, 而在裂纹内无水压情况下有随着岩石弹性泊松比增大而减小的趋势. 由图 4 可知, 在受压应力荷载作用下, 蠕变柔量比值有随着岩石摩擦系数增大而减小的趋势.

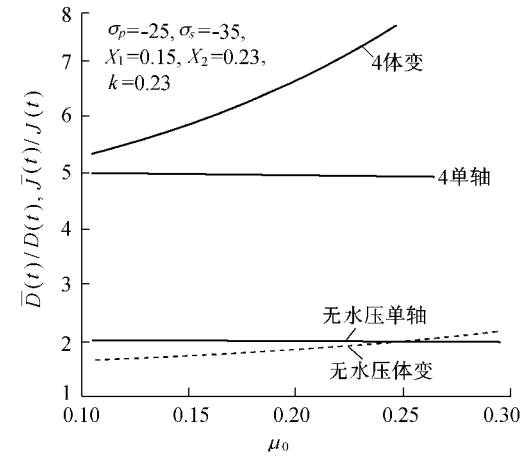


图 3 蠕变柔量比值与泊松比的关系曲线
Fig.3 Variation of ratio of creep compliance with Poisson's ratio

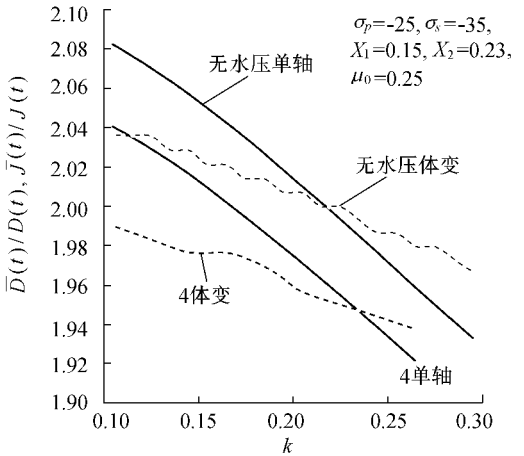


图 4 蠕变柔量比值与摩擦系数的关系曲线
Fig.4 Variation of ratio of creep compliance with friction coefficient

参考文献:

[1] 余寿文,冯西桥.损伤力学[M].北京:清华大学出版社,1997.78—119.
[2] BUDIANSKY B,O'CONNELL R.Elastic moduli of a cracked solid[J].Int J Solids Structures,1976,12:31—97.
[3] HORRI H,NEMAT-NASSER S.Overall moduli of solids with microcracks:load-induced anisotropy[J].J Mech Phys Solids,1983,31:155—171.
[4] 张淳源.粘弹性断裂力学[M].武汉:华中理工大学出版社,1994.83—148.

Analysis of creep compliance of jointed rocks with consideration of the influence of water pressure in saturated cracks

WEI Li-de¹, XU Wei-ya¹, YANG Song-lin¹, LI Jian²

(1. Geotechnical Research Institute of Hohai Univ., Nanjing 210098, China;
2. Jiangsu Transportation Survey and Design Institute, Nanjing 210005, China)

Abstract: In consideration of the effects of the opening crack, closed crack, and water pressure in cracks, theoretical formulas for the creep compliance of jointed cracks under hydrostatic and uniaxial stress are derived by use of the self-consistent theory and viscoelastic fracture theory. Then, the formulas are used for analysis of the regularities of creep compliance of jointed cracks varying with stress load, water pressure, crack density, Poisson's ratio, and friction coefficients. The present study provides a new method for rheological calculation in cracked rock engineering.

Key words: rock; joint; rheological deformation; creep compliance; saturated seepage