

脆性岩石各向异性损伤和渗透性演化规律研究

胡大伟^{1,2}, 朱其志², 周辉¹, 邵建富^{1,2}, 冯夏庭¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学和工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 里尔科技大学 里尔力学实验室, 法国 里尔 59655)

摘要: 在压应力作用下, 脆性岩石的渗透性随着裂纹的扩展而演化。通过试验观察和微观机制分析, 提出渗透系数计算方法。在已建立的细观损伤力学模型的基础上, 对摩擦准则和加载函数进行改进, 采用改进模型模拟 Lac du Bonnet 花岗岩三轴压缩试验。根据力学模型中得到的损伤变量和裂纹的法向、切向位移, 引入连通系数描述裂纹扩展过程中, 裂纹逐渐贯通形成渗流通道, 采用立方定律作为单个裂纹中渗流方程, 利用细观力学定义裂纹半径和等效开度, 对各方向裂纹上的渗流速度进行平均化, 得到渗透系数张量计算方法。采用此方法对 Lac du Bonnet 花岗岩现场试验结果进行模拟, 比较轴向和侧向渗透系数的不同演化规律, 预测不同围压条件下轴向渗透系数的演化规律。分析结果表明, 模型的计算值与试验值非常吻合, 验证了模型的适用性。

关键词: 岩石力学; 细观力学; 各向异性损伤; 渗透性演化; 流固耦合

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)09 - 1822 - 06

RESEARCH ON ANISOTROPIC DAMAGE AND PERMEABILITY EVOLUTIONARY LAW FOR BRITTLE ROCKS

HU Dawei^{1,2}, ZHU Qizhi², ZHOU Hui¹, SHAO Jianfu^{1,2}, FENG Xiating¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Laboratory of Mechanics of Lille,

Lille University of Sciences and Technology, Lille 59655, France)

Abstract: Permeability in brittle rocks under compressive stress changes with crack growth. A method to calculate permeability evolution is presented, in which both experimental phenomenon and inherent mechanism of permeability evolution are taken into account. The mechanical model is based on the research of ZHU Qizhi et al, two modifications are applied to frictional criterion and potential function; and the modified anisotropic damage model is used to simulate triaxial compression test of Lac du Bonnet granite. According to damage variable and crack normal and tangential deformation obtained in mechanical model, a function of connectivity coefficient is used to describe the ratio of the crack involved in hydraulic flow to total number of crack, more and more cracks are involved in hydraulic flow when microcracks grow; the cubic law is used for seepage flow in a single crack, crack radius and equivalent aperture are defined by micromechanical result; a method is proposed to analyze permeability evolution in brittle rocks under deviatoric stress. The proposed method is employed to simulate in-situ permeability test of Lac du Bonnet granite. Comparison between axial and lateral permeability evolutions under increasing deviatoric stress is carried out; axial permeability evolution under different confining stresses is also predicted. It is shown that the numerical simulation results and experimental data are in good agreement.

Key words: rock mechanics; mesomechanics; anisotropic damage; permeability evolution; hydro-mechanical coupling

收稿日期: 2007 - 10 - 08; **修回日期:** 2008 - 06 - 22

基金项目: 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究项目(50579091); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412708)

作者简介: 胡大伟(1981 -), 男, 2004年毕业于沈阳工业大学建筑工程学院, 现为博士研究生, 主要从事岩石细观力学、流固耦合试验和理论方面的研究工作。E-mail: dawei@hotmail.com

1 引言

在压应力的作用下, 大多数岩石由某些方向上裂纹的成核、扩展和贯通而引起各向异性损伤, 在应力 - 应变曲线上表现为在线弹性变形阶段之后存在一个非线性段, 这是造成岩石破坏的主要原因。许多学者^[1-7]从不同角度解释了裂纹成核和扩展的机制。目前已形成共识, 即在压应力的作用下, 裂纹的扩展方式主要表现为滑移。从细观水平上看, 在裂纹扩展的过程中, 由于裂纹面的粗糙和颗粒 - 基质之间的相互作用, 引起裂纹面产生法向位移, 在宏观水平上则表现为体积膨胀。当裂纹长度达到某一临界值时, 裂纹贯通, 形成局部的宏观裂纹, 导致岩石材料的最终破坏。

另一方面, 在实际岩土工程中, 岩石材料通常被一种或多种液体所饱和。因此, 有必要对岩石破坏过程中由裂纹成核、扩展而引起渗透性演化的过程进行研究。许多学者对岩石材料中的渗透系数演化规律进行了研究, 可以分为两类: 一类为通过拟合试验数据, 得出不同应力条件下岩体渗流系数与应力间的经验公式^[8, 9]; 另一类以统计方法为基础, 得到了渗流系数与应力耦合规律^[10, 11]。但是, 由于岩石中裂隙扩展方式较复杂, 为简化起见, 这些方法一般事先假设裂隙的分布, 不能准确描述岩石破坏过程中渗流系数的演化规律。近年来, J. F. Shao 等^[12]提出了一个各向异性损伤和渗流耦合模型, 该模型可以考虑准脆性岩石破坏过程中, 渗透系数随损伤发展的演化耦合规律。周 辉等^[13, 14]提出了细观统计渗流模型, 并将其与各向异性损伤模型联合起来。

本文在朱其志等^[15]所建立的细观力学模型的基础上, 根据试验规律, 对模型中的裂纹面摩擦准则和加载函数进行了修正, 并对 Lac du Bonnet 花岗岩三轴试验结果进行了模拟。同时, 根据力学模型得到的损伤变量和裂纹法向、侧向位移, 提出了相应的渗透系数计算方法, 模拟了 Lac du Bonnet 花岗岩现场渗流试验, 比较了轴向和侧向渗透系数的差异, 研究了围压对渗透系数演化的影响。

2 细观力学模型

朱其志等^[15]已就基于均匀化理论的损伤摩擦耦合力学模型进行了详细阐述, 因而本文着重研究

岩石渗透性的演化, 对力学模型仅做简要的介绍, 并对修改部分进行叙述。

2.1 自由能及热动力学

朱其志等^[15]得到的含单族裂纹特征单元体的自由能可表示为如下一般形式:

$$W = \frac{1}{2}(\mathbf{E} - \mathbf{E}^c) : \mathbf{C}^s : (\mathbf{E} - \mathbf{E}^c) + \frac{1}{2} \mathbf{E}^c : \mathbf{C}^c : \mathbf{E}^c \quad (1)$$

式中: \mathbf{E} 为总应变; \mathbf{C}^s 为基质的弹性模量; \mathbf{C}^c 为塑性模量; \mathbf{E}^c 为非弹性应变, 也可以理解为摩擦型塑性应变, $\mathbf{E}^c = \beta(\mathbf{n} \otimes \mathbf{n}) + \underline{\gamma} \otimes \mathbf{n}$, \mathbf{n} 为裂纹面的法线方向, β 为标量变量, 可描述裂纹开度, $\underline{\gamma}$ 为向量, 可描述裂隙面的切向滑动位移。

式(1)中, 等号右边第一项为与基质部分相关的弹性自由能, 第二项为和裂纹部分相关的塑性功。

根据热动力学基本理论, 与非弹性应变 \mathbf{E}^c 和损伤变量 d 相关联的热动力学力 σ^c 和 F^d 可以由宏观自由能得到

$$\sigma^c = - \frac{\partial W}{\partial \mathbf{E}^c} \quad (2)$$

$$F^d = - \frac{\partial W}{\partial d} \quad (3)$$

2.2 裂纹滑动准则、应变流动准则和损伤准则

在岩土工程中, 岩体基本上处于压应力状态, 本文只考虑裂纹闭合的情况, 并采用库仑型裂纹滑动准则。对于拉、剪和拉剪组合应力状态, 可以参考 Q. Z. Zhu 等^[16]的研究。根据试验观察, 发现岩石破坏经历了由弹性阶段到非弹性应变引起的硬化阶段, 在峰值强度附近, 由于损伤的增大, 出现了软化。为了描述上述力学行为, 对库仑型滑动摩擦准则 f_s 进行了修正, 表示为

$$f_s = |\underline{\tau}| + \eta_c \alpha (1 - b_4 d) \sigma_n^c = 0 \quad (4)$$

式中: σ_n^c 为局部应力的法向分量, $\sigma_n^c = \sigma^c : (\mathbf{n} \otimes \mathbf{n})$; $\underline{\tau}$ 为切向分量, $\underline{\tau} = \sigma^c \cdot \mathbf{n} \cdot (\boldsymbol{\delta} - \mathbf{n} \otimes \mathbf{n})$; η_c 为裂纹面的摩擦因数; b_4 为模型参数, 用来描述损伤的软化影响; α 为强化函数, 定义为裂隙等效剪切应变 γ^p 的函数:

$$\alpha = \alpha_f - (\alpha_f - \alpha_0) e^{-b_1 \gamma^p} \quad (5)$$

式中: α_0 和 α_f 分别为强化函数的初值和终值, b_1 为控制 α 变化速度的模型参数。裂隙等效剪切应变 γ^p 定义为

$$\gamma^p = \int \sqrt{d\gamma d\gamma} \quad (6)$$

非关联流动法则可表示如下:

$$g_p = |\underline{\boldsymbol{\epsilon}}| + (1 - b_4 d) \chi \sigma_n^c \quad (7)$$

式中： χ 为体积膨胀系数，可表示为

$$\chi = \chi_f - (\chi_f - \chi_0) e^{-b_2 \gamma^p} \quad (8)$$

式中： χ_0 和 χ_f 分别为 χ 的初值和终值， b_2 为控制变化速度的模型参数。

采用如下形式的损伤演化准则：

$$d = d_f - (d_f - d_0) e^{-b_3 \sqrt{\frac{1}{2}(H_0 \beta^2 + H_1 \boldsymbol{\gamma} \boldsymbol{\gamma})}} \quad (9)$$

式中： d_0 和 d_f 分别为材料的初始和最终损伤值， b_3 为用来控制损伤演化速度的模型参数。

2.3 渗透系数

由前面的力学模型可以得到准脆性岩石在破坏过程中的损伤变量和其内部裂纹法向、侧向位移，裂纹的这些变化正是引起岩石固有渗透系数变化的主要原因。由于裂纹的分布为各向异性，因此渗透系数也是各向异性，必须采用张量形式进行表示，并且渗透系数随着裂纹的扩展而演化。力学模型中假设特征单元体(REV)是由岩体基质和其中的微裂纹构成的非均匀基质-夹杂系统。这里，同样假设岩石的渗透系数由两部分组成^[12]：一部分为岩体基质孔隙中的渗透系数 $\underline{\mathbf{k}}^0$ ，根据力学模型中岩体基质均匀和各向同性的假设，可以认为 $\underline{\mathbf{k}}^0$ 也是均匀和各向同性的，大量的试验^[17~19]表明，岩石在弹性阶段渗透系数变化很小，因此认为 $\underline{\mathbf{k}}^0$ 在应力过程保持不变，即 $\underline{\mathbf{k}}^0 = k^0 \underline{\boldsymbol{\delta}}$ ($\underline{\boldsymbol{\delta}}$ 为二阶单位张量)；另一部分为微裂纹贯通引起的渗透系数 $\underline{\mathbf{k}}^c$ ， $\underline{\mathbf{k}}^c$ 可通过对所有方向上微裂纹引起的渗透系数均质化后得到，为各向异性。总的渗透系数 $\underline{\mathbf{k}} = \underline{\mathbf{k}}^0 + \underline{\mathbf{k}}^c$ ， $\underline{\mathbf{k}}^0$ 为恒定的各向同性的张量，认为与岩石的初始渗透系数相等。 $\underline{\mathbf{k}}^c$ 为所有方向上微裂纹形成的渗透系数的总和。

下面通过平均化方法来推导渗透系数。假设 REV 由含孔隙的岩石基质和随机分布的裂缝组成，其边界上作用有均匀的流体压力梯度。通过平均化后认为 REV 为均匀、各向异性的多孔介质，渗流服从达西定律：

$$\underline{\mathbf{v}} = -\frac{\underline{\mathbf{k}}}{\mu} \cdot \nabla p = -\frac{\underline{\mathbf{k}}^0 + \underline{\mathbf{k}}^c}{\mu} \cdot \nabla p \quad (10)$$

式中： $\underline{\mathbf{v}}$ 为流体的相对运动速度， ∇p 为宏观的压力梯度， μ 为流体的动力黏滞系数。

对于一个方向为 $\underline{\mathbf{n}}$ 、等效半径为 $r(\underline{\mathbf{n}})$ 的币形裂纹，假设流体在两个平行面之间的流动为层流，采用 Navier-Stokes 方程来描述，则流体的速度为

$$\underline{\mathbf{v}}^c(\underline{\mathbf{n}}) = -\frac{\lambda}{12} \frac{1}{\mu} [e(\underline{\mathbf{n}})]^2 (\underline{\boldsymbol{\delta}} - \underline{\mathbf{n}} \otimes \underline{\mathbf{n}}) \cdot (\nabla p)^c \quad (11)$$

式中： λ 为折减系数， $0 \leq \lambda \leq 1$ ，这是因为考虑到并非裂纹面的所有部分都构成了渗流通道，为了简化，这里取 $\lambda = 1$ ，退化成经典的单裂隙立方定理^[20]； $e(\underline{\mathbf{n}})$ 为法向等效开度； $(\nabla p)^c$ 为裂纹场内的流体压力梯度，采用适当的局部化方法^[21]，可以建立起其与宏观压力梯度 ∇p 之间的关系，这里简单假设与宏观压力梯度 ∇p 相等，即 $(\nabla p)^c = \nabla p$ 。根据含裂隙材料的弹性柔度张量的 Viotg 上限理论分析，这个简化结果相当于裂纹渗透系数的上限值。

对所有裂纹场内的渗流速度进行平均化后，可以得到宏观的渗流速度：

$$\underline{\mathbf{v}} = -\frac{\underline{\mathbf{k}}^0}{\mu} \cdot \nabla p + \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \underline{\mathbf{v}}^c d\Omega = -\frac{\underline{\mathbf{k}}^0}{\mu} \cdot \nabla p + \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega^c} \underline{\mathbf{v}}^c d\Omega^c \quad (12)$$

式中： Ω 为 REV 的体积， Ω^c 为 REV 内构成渗流通道的裂纹所占有的体积。对于方向为 $\underline{\mathbf{n}}$ ，等效半径为 $r(\underline{\mathbf{n}})$ ，法向等效开度为 $e(\underline{\mathbf{n}})$ 的一簇币形裂纹，构成渗流通道的裂纹所占有体积可表示为

$$\Omega(\underline{\mathbf{n}}) = N_h(\underline{\mathbf{n}}) e(\underline{\mathbf{n}}) \pi [r(\underline{\mathbf{n}})]^2 \quad (13)$$

式中： $N_h(\underline{\mathbf{n}})$ 为该方向上构成渗流通道的裂纹的密度(单位体积内构成渗流通道的裂纹数量)。

在 REV 内，对所有方向在单位球面上进行数值积分，可以得到所有方向上构成渗流通道的裂纹所占有的体积，式(12)可写成

$$\underline{\mathbf{v}} = -\frac{\underline{\mathbf{k}}^0}{\mu} \cdot \nabla p + \frac{1}{\Omega} \frac{1}{4\pi} \int_{S^2} \underline{\mathbf{v}}^c N_h(\underline{\mathbf{n}}) e(\underline{\mathbf{n}}) \pi [r(\underline{\mathbf{n}})]^2 dS \quad (14)$$

式中： S^2 为单位球面， dS 为 $\underline{\mathbf{n}}$ 方向所代表的球面微元。

尽管所有的微裂纹对岩石的宏观力学行为都有影响，但是对岩石渗透系数的影响并不是这样的。实际上，在电镜扫描试验^[22]中，从细观层次上看，有些裂纹与渗流路径是孤立的，对渗流系数没有贡献。同时，大量试验研究^[17~19]揭示了岩石在全应力-应变过程中渗透率变化的普遍规律：在弹性阶段，渗透率随应力的增大而略有降低(原生微裂隙闭合阶段)或渗透率变化不大(原生微裂隙不发育)，进入损伤阶段后，随着新生裂隙的扩展、贯穿，越来越多的裂纹参与渗流，岩石的渗透率先是缓慢增加，然后急剧增大，在峰前或峰后达到极大值，之后随应变的增加，渗透率可能继续增加，可能平缓

降低, 也有可能急剧降低。在当前的模型中则表现为: 随着切向应变 γ 的增加, 参与渗流通道的裂纹数量逐渐增加; 当超过某一值后, 参与渗流通道的裂纹数量急剧增加。本文中, 暂不考虑弹性阶段渗透系数的变化。因此, 可以采用下面的函数来表示裂纹连通系数 $R(\underline{n})$:

$$N_h(\underline{n}) = R(\underline{n})N \quad (15)$$

$$R(\underline{n}) = 1 - (1 - R_0)e^{-b_5(\gamma(\underline{n})^p - \gamma(\underline{n}_0)^p)} \quad (16)$$

式中: N 为裂纹的密度(单位体积内所有裂纹数量); $R(\underline{n})$ 为裂纹连通系数, 表示参与渗流的裂纹数量与总裂纹数量之比, $0 \leq R(\underline{n}) \leq 1$; R_0 为参与渗流的裂纹与全部裂纹比值的最小值; b_5 为控制变化速度的模型参数; $\gamma(\underline{n})^p$ 为 \underline{n} 方向上裂纹的切向位移; $\gamma(\underline{n}_0)^p$ 为渗透系数发生突变的切向位移阈值。

通过引入裂纹连通系数, 宏观流体速度又可以写成

$$\underline{v} = -\frac{\underline{k}^0}{\mu} \cdot \nabla p + \frac{N}{\Omega} \frac{1}{4\pi} \int_{S^2} R(\underline{n}) \underline{v}^c(\underline{n}) e(\underline{n}) \pi [r(\underline{n})]^2 dS \quad (17)$$

将式(11)代入到式(17), 最后得到宏观流体速度:

$$\underline{v} = -\frac{\underline{k}^0}{\mu} \cdot \nabla p + \left(-\frac{1}{\mu} \right) \frac{\lambda}{12} \frac{N}{\Omega} \frac{1}{4\pi} \nabla p \int_{S^2} R(\underline{n}) [e(\underline{n})]^3 \cdot \pi [r(\underline{n})]^2 (\underline{\delta} - \underline{n} \otimes \underline{n}) dS \quad (18)$$

比较式(18)和(10), 可得到由裂纹引起的总渗透系数:

$$\underline{k}^c = \frac{\lambda}{48} \frac{N}{\Omega} \int_{S^2} R(\underline{n}) [e(\underline{n})]^3 [r(\underline{n})]^2 (\underline{\delta} - \underline{n} \otimes \underline{n}) dS \quad (19)$$

注意到, 从前面的力学模型只能得到裂纹的法向开度 β 、切向应变 γ 和损伤 d , 为了得到渗流模型中 $e(\underline{n})$ 和 $r(\underline{n})$, 还需做以下分析。

根据 Budiansky 和 O'Connell 引入的损伤内变量 $d(\underline{n}) = Nr(\underline{n})^3$, 方向为 \underline{n} 的裂纹面上的等效裂纹半径为

$$r(\underline{n}) = \left[\frac{d(\underline{n})}{N} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (20)$$

法向等效开度 $e(\underline{n})$ 可以表示成

$$e(\underline{n}) = \frac{1}{\pi [r(\underline{n})]^2} \int_{\omega^+} [u_n] ds \quad (21)$$

式中: ω^+ 为裂纹的外表面, ds 为裂纹面面积微元。

由朱其志等^[15]的研究中式(13)关于 β 的定义,

式(21)简化为

$$e(\underline{n}) = \frac{1}{\pi [r(\underline{n})]^2} \frac{\beta}{N} \quad (22)$$

因此, 式(19)可以写成

$$\underline{k}^c = \frac{\lambda}{12} \frac{1}{4\pi^3} \int_{S^2} R(\underline{n}) \frac{\beta(\underline{n})^3}{d(\underline{n})^{\frac{4}{3}} N(\underline{n})^{\frac{2}{3}}} (\underline{\delta} - \underline{n} \otimes \underline{n}) dS \quad (23)$$

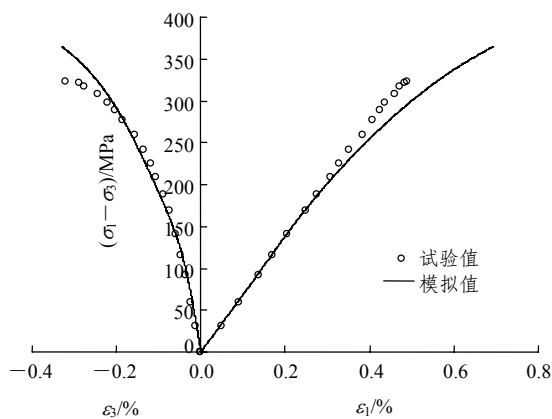
3 模拟结果和讨论

将上面的模型应用于 Lac du Bonnet 花岗岩, 分别对三轴压缩试验和现场渗流试验进行了模拟。

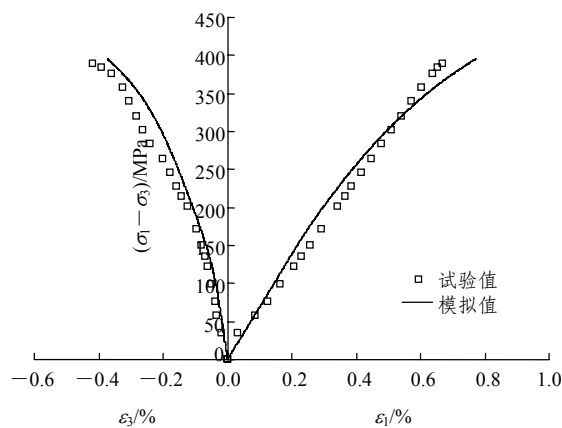
3.1 力学试验模拟

由于前文已详细叙述了力学模型的优缺点, 因此本文只概括介绍模拟结果。由 Lac du Bonnet 花岗岩的三轴压缩试验结果, 可确定该花岗岩的力学参数为: $E_0 = 68 \text{ GPa}$, $\nu_0 = 0.21$, $\eta_c = 0.8$, $\alpha_f = 1.0$, $\alpha_0 = 0.20$, $b_1 = 100$, $\chi_f = 0.30$, $\chi_0 = 1.5$, $b_2 = 1 \ 000$, $d_f = 0.83$, $d_0 = 0.01$, $b_3 = 1.9$, $b_4 = 0.3$ 。

根据图 1 中的模拟结果可以发现, 改进模型可以很好地描述 Lac du Bonnet 花岗岩的力学行为。



(a) 围压为 10 MPa



(b) 围压为 20 MPa

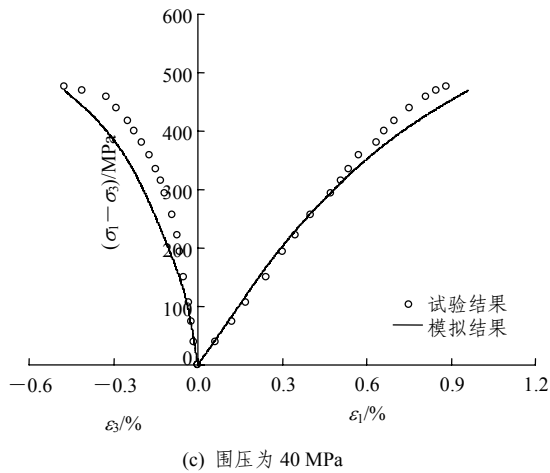


图1 三轴压缩试验模拟结果

Fig.1 Simulating results of triaxial compressive experiments

3.2 花岗岩渗透系数试验及模拟

为了验证渗流模型,采用该模型对 Lac du Bonnet 花岗岩的现场渗流试验结果进行了模拟^[23]。现场渗透试验得到了围压为 10 MPa 条件下,轴向渗透系数随偏压的演化曲线。下面,首先模拟现场渗透试验曲线;然后根据模拟结果,分析轴向和侧向渗透系数的各向异性;最后采用所建立的模型,预测了不同围压条件下轴向渗透系数随偏压的演化规律。

由现场渗透试验得到完整岩石的渗透系数,即初始渗透系数为 $6.0 \times 10^{-22} \text{ m}^2$ 。在力学模型的基础上,通过对现场渗透系数演化规律进行分析,可得到渗流模型的参数取值: $b_5 = 30$, $\gamma_0^p = 2.1 \times 10^{-3}$, $R_0 = 0.001$, $N = 1.5 \times 10^{10}$ 。现场渗透试验及模拟结果如图 2 所示。

图 2 中,通过比较发现,模拟结果与试验结果基本吻合,能够较好地描述岩石在受压破坏过程中渗透系数的演化规律。随着裂纹的不断扩展,不同

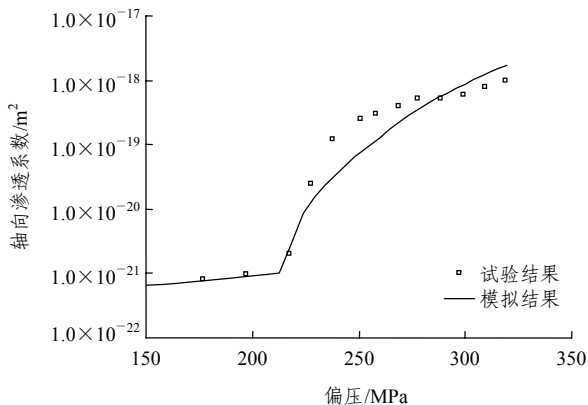


图2 现场渗透试验与模拟结果比较(围压为 10 MPa)

Fig.2 Comparison between in-situ permeability test results and simulating results (confining pressure is 10 MPa)

方向上裂纹逐渐相互贯通,微裂纹之间的相互作用逐渐增强,超出了模型中不考虑裂纹间相互作用的假设,导致在峰值阶段模拟结果与试验数据有一定的偏差。但是,在裂纹扩展至充分贯通前的初期和中期阶段,本文的渗流模型对于实际岩石渗透性演化的描述是足够精确的。

由图 3 可以发现,在三轴压缩初始阶段,轴向和侧向渗透系数基本相等;随着偏压的增加,轴向和侧向渗透系数相差越来越大;最终侧向渗透系数为 $4.74 \times 10^{-18} \text{ m}^2$,轴向渗透系数为 $8.47 \times 10^{-18} \text{ m}^2$,轴向渗透系数为侧向渗透系数的 1.79 倍。因此,对于脆性岩石,有必要考虑各向异性损伤引起渗透系数的各向异性。

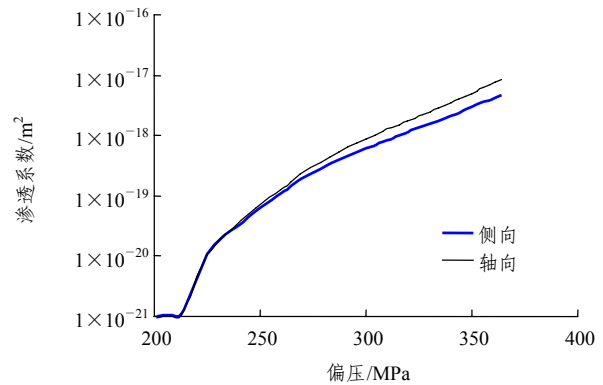


图3 轴向和侧向渗透系数比较(围压为 10 MPa)

Fig.3 Comparison between axial and lateral permeability coefficients (confining pressure is 10 MPa)

从图 4 中可以看出,围压越大,随着偏压的增大,轴向渗透系数增加的速率越小。这是由于,围压越大,对裂纹的法向作用力越大,从而约束了裂纹开度的发展。

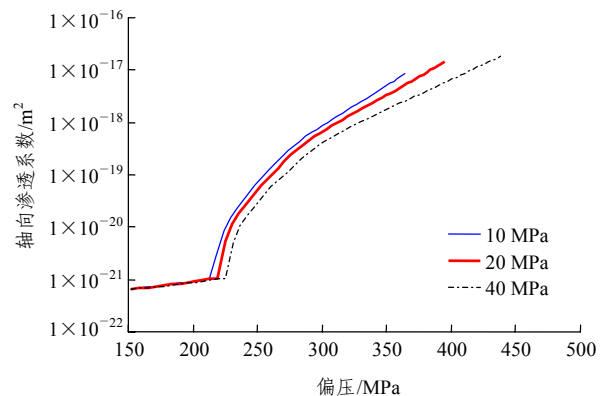


图4 不同围压下轴向渗透系数演化

Fig.4 Evolutions of axial permeability coefficient under different confining pressures

4 结 论

在前文细观损伤模型的基础上, 对摩擦准则和加载函数进行了修改, 采用改进模型模拟了 Lac du Bonnet 花岗岩三轴压缩试验; 然后引入渗透系数计算方法, 对 Lac du Bonnet 花岗岩现场试验结果进行了模拟, 比较了轴向和侧向渗透系数的不同演化规律, 预测了不同围压条件下轴向渗透系数的演化规律, 得到了以下结论:

(1) 在改进细观损伤模型的基础上, 采用渗透系数计算方法模拟了 Lac du Bonnet 花岗岩在受压破坏过程中渗流系数的演化规律, 模拟结果与现场试验结果非常吻合, 表明了模型的可靠性。

(2) 在三轴压缩初始阶段, 轴向和侧向渗透系数基本相等; 随着偏压的增加, 轴向和侧向渗透系数相差越来越大; 最终轴向渗透系数为侧向渗透系数的 1.79 倍。因此, 对于脆性岩石, 有必要考虑破坏过程中由各向异性损伤引起渗透系数的各向异性。

参考文献(References):

- [1] BIENIAWSKI Z T. Mechanism of brittle fracture of rock: part I—theory of the fracture process[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1967, 4(4): 395 - 404.
- [2] WAWERSIK W R, BRACE W F. Post-failure behavior of a granite and diabase[J]. *Rock Mechanics*, 1971, 3(2): 61 - 85.
- [3] PATERSON M S, WONG T F. *Experimental deformation of rocks: the brittle field*[M]. Berlin, Germany: Springer, 1978.
- [4] NEMAT-NASSER S, HORII H. Compression-induced non-planar crack extension with application to splitting, exfoliation and rockburst[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, 87(B8): 6 805 - 6 821.
- [5] WONG T F. Micromechanics of faulting in Westerly granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1982, 19(2): 49 - 64.
- [6] STEF P S. Crack extension under compressive loading[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1984, 20(3): 463 - 473.
- [7] OLSSON W. Development of anisotropy in the incremental shear moduli for rock undergoing inelastic deformation[J]. *Mechanics of Materials*, 1995, 21(3): 231 - 242.
- [8] BARTON N R, BANDIS S C, BAKHTAR K. Strength, deformation conductivity coupling of rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1985, 22(3): 121 - 140.
- [9] 杨天鸿. 岩石破裂过程的渗流特性——理论、模型与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.(YANG Tianhong. Seepage characteristic in rock failure—theory, model and applications[M]. Beijing: Science Press, 2004.(in Chinese))
- [10] ODA M. An equivalent model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses[J]. *Water Resources Research*, 1986, 22(13): 1 845 - 1 856.
- [11] SUZUKI K, ODA M, YAMAZAKI M, et al. Permeability changes in granite with crack growth during immersion in hot water[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1998, 35(7): 907 - 921.
- [12] SHAO J F, ZHOU H, CHAU K T. Coupling between anisotropic damage and permeability variation in brittle rocks[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2005, 29(12): 1 231 - 1 247.
- [13] 周 辉, 邵建富, 冯夏庭. 岩石细观统计渗流模型研究(I): 理论模型[J]. *岩土力学*, 2004, 25(2): 169 - 173.(ZHOU Hui, SHAO Jianfu, FENG Xiating. Research on statistical penetration meso-model of rock (I): theoretical model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(2): 169 - 173.(in Chinese))
- [14] 周 辉, 邵建富, 冯夏庭, 等. 岩石细观统计渗流模型研究(II): 实例分析[J]. *岩土力学*, 2006, 27(1): 123 - 126.(ZHOU Hui, SHAO Jianfu, FENG Xiating, et al. Research on statistical penetration meso-model of rock—part II: case analysis[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(1): 123 - 126.(in Chinese))
- [15] 朱其志, 胡大伟, 周 辉, 等. 基于均匀化理论的岩石细观力学损伤模型及其应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(2): 266 - 272.(ZHU Qizhi, HU Dawei, ZHOU Hui, et al. Research on homogenization-based micromechanical damage model and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(2): 266 - 272.(in Chinese))
- [16] ZHU Q Z, KONDO D, SHAO J F. Micromechanical analysis of coupling between anisotropic damage and friction in quasi-brittle materials: role homogenization scheme[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2008, 45(5): 1 385 - 1 405.
- [17] ZHANG S, COX S F, PATERSON M S. The influence of room temperature deformation on porosity and permeability in calcite aggregates[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(B8): 15 761 - 15 775.
- [18] MORDECAI M, MORRIS L H. An investigation into the changes of permeability occurring in a sandstone when failed under triaxial stress conditions[C]// *Proceedings of the 12th Symposium of Rock Mechanics*. Rolla, USA: [s.n.], 1971: 221 - 239.
- [19] PEACH C J, SPIERS C J. Influence of crystal plastic deformation on dilatancy and permeability development in synthetic salt rock[J]. *Tectonophysics*, 1996, 256(1 - 4): 101 - 128.
- [20] SNOW D T. Anisotropic permeability of fractured media[J]. *Water Resources Research*, 1969, 5(6): 1 273 - 1 289.
- [21] DORMIEUX L, KONDO D. Approche micromécanique du couplage perméabilité-endommagement[J]. *Comptes Rendus. Mécanique*, 2004, 332(2): 135 - 140.
- [22] 仵彦卿, 曹广祝, 丁卫华. CT 尺度砂岩渗流与应力关系试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(23): 4 203 - 4 209.(WU Yanqing, CAO Guangzhu, DING Weihua. Experimental study on relation between seepage and stress of sandstone in CT scale[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(23): 4 203 - 4 209.(in Chinese))
- [23] SOULEY M, HOMAND F, PEPA S, et al. Damage-induced permeability changes in granite: a case example at the URL in Canada[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(2): 297 - 310.