

峰后大理岩非线性渗流特征及机制研究

胡大伟^{1,2}, 周辉¹, 谢守益², 邵建富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. 法国里尔科技大学 里尔力学实验室, 法国 里尔 59655)

摘要: 在围岩开挖扰动区中, 围岩应力和裂隙水压力将会显著地影响其渗流性质。当水头压力梯度增大时, 渗流速率增大, Darcy 流转化为非线性渗流。首先, 采用研制的温度-应力-渗流耦合的岩石力学试验系统进行不同静水压力下大理岩峰后非线性渗流试验, 研究渗流速率随压力梯度的演化规律, 将其演化过程分为稳定 Darcy 流、Darcy 流向非线性渗流过渡段和非线性渗流 3 个阶段进行分析, 并采用完全二次多项式描述渗流速率与水头压力梯度的关系。然后, 通过试验中记录的变形数据, 拟合临界启动压力梯度和裂隙水力开度与试样侧向变形的函数关系式, 得到不同静水压力条件下由水头压力引起的裂隙水力开度的变化规律; 并深入分析临界启动压力梯度、固有渗透系数和二次项系数演化的内在机制。随着静水压力的升高, 试样中裂隙水力开度逐渐减小, 引起固有渗透系数逐渐减小, 二次项系数和临界启动压力梯度逐渐增大; 随着水头压力的增大, 裂隙水力开度逐渐增大, 引起固有渗透系数增大, 临界启动压力梯度和二次项系数减小。

关键词: 岩石力学; 非 Darcy 流; 固有渗透系数; 二次项系数; 临界启动压力梯度; 水力开度

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2009)03-0451-08

RESEARCH ON CHARACTER AND MECHANISM OF NONLINEAR SEEPAGE IN POST-PEAK MARBLE

HU Dawei^{1,2}, ZHOU Hui¹, XIE Shouyi², SHAO Jianfu², 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: For the excavation damage zone(EDZ) in underground construction, seepage is greatly influenced by the stress in the surrounding rock and the water pressure in cracks. For example, seepage velocity will increase with the water head pressure gradient increasing, and then the seepage becomes nonlinear instead of Darcy flow. So the properties of nonlinear seepage in cracked marble under different hydrostatic pressures and water pressures are focused on. Firstly, the seepage tests are performed using the self-developed temperature-stress-hydraulic coupling test system. According to the test results, the evolutionary law of seepage under different water head pressure gradients can be divided into three stages, namely, steady Darcy seepage, transition from Darcy seepage to nonlinear seepage and nonlinear seepage; and a complete quadratic polynomial is proposed to describe the relationship between water head pressure gradient and seepage velocity. Secondly, the relationship between

收稿日期: 2008-08-15; **修回日期:** 2008-10-31

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基金项目(50579091); 国家科技支撑计划项目(2006BAB04A06); 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、流固耦合方面的研究工作。
E-mail: dawei@hotmail.com

critical water head pressure gradient and lateral deformation of rock specimen is described by a linear equation based on the deformation data; and then an empirical function is proposed for crack hydraulic aperture and the lateral deformation of specimen. Finally, the evolution of crack hydraulic aperture is studied, which is responsible for the variations of the critical water head pressure gradient, inherent permeability and quadratic term coefficient. Two conclusions are drawn as follows: (1) with the hydrostatic pressure increases, the crack hydraulic aperture reduces, which leads to reduction of the inherent permeability while augments of the critical water head pressure gradient and the quadratic term coefficient; and (2) with the water pressure increases, the crack hydraulic aperture increases, accordingly, the inherent permeability increases, but the critical water head pressure gradient and the quadratic term coefficient reduce.

Key words: rock mechanics; non-Darcy flow; inherent permeability; quadratic term coefficient; critical water head pressure gradient; hydraulic aperture

1 引言

我国西部建设的大型水电站大多地处崇山峻岭中的深山峡谷地区,地形地质条件复杂,将会出现大量的深埋长大引水隧洞,高水压力引起的隧洞突(涌)水甚至失稳已经成为这些工程亟待解决的关键技术问题之一。由于开挖的影响,隧洞围岩存在开挖扰动区(excavation damage zone, EDZ),其中含有许多微观裂纹和宏观贯通裂隙,在高水压力的作用下,裂隙岩石中的渗流不再符合 Darcy 定律,为非线性渗流,并可能引起渗流失稳。

国内外一些学者对岩石中非线性渗流特性进行了研究。P. Forchheimer 等^[1, 2]认为,压力梯度与渗流速率之间的关系是由流体和渗流通道的形态共同决定的,在低渗流速率情况下,压力梯度和渗流速率为线性关系,符合 Darcy 流;当渗流速率较大时, Darcy 定律不成立,为非 Darcy 流,应采用 Forchheimer 表达式:

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{K}v + \rho\beta v^2 \quad (1)$$

式中: p 为水头压力(Pa/m), μ 为流体动力黏滞系数(Pa·s), K 为固有渗透系数(m²), v 为流体渗流速率(m/s), ρ 为流体密度(kg/m³), β 为二次项系数(m⁻¹)。式(1)中, $\rho\beta v^2$ 项由流体流动惯性引起^[3]。

程宜康等^[4, 5]对含裂隙岩石中非 Darcy 流渗透特性进行了试验研究,分析了渗透率随轴向应变的演化规律。孙明贵等^[6]对石灰岩应力-应变全过程进行非 Darcy 流渗流试验,观察到在峰后阶段,孔隙压力迅速衰减,非 Darcy 流 β 因子变为负值,可能引起渗流失稳。缪协兴等^[7]通过对峰后岩石非

Darcy 流系统的分岔行为研究,得到了系统的失稳条件之一,即非 Darcy 流 β 因子为负。

但是,关于裂隙岩石在高水压力作用下的非 Darcy 流及其失稳方面的研究并不多见。工程中渗流失稳的本质是:水流进入到围岩的孔隙和裂隙中,造成围岩应力场重分布,引起围岩原有孔隙、裂隙开度增大,甚至产生新的裂隙;反过来,围岩的这种变形又为渗流提供了更加有利的渗流路径,从而加剧了渗流对围岩的影响。在高水压力条件下,渗流和围岩之间这种相互促进作用将可能引起突(涌)水,造成工程事故。为此,本文进行了不同静水压力下峰后大理岩非线性渗流试验,得到了渗流性质随水头压力的演化规律;同时,根据试验记录的试样变形数据,从裂隙水力开度入手,深入探讨了试验现象的物理机制。

2 试验系统和步骤

进行峰后大理岩非线性渗流试验时,由于试验中孔隙水压较大,密封困难,同时还必须精确控制轴压和围压,因此,在一般的三轴试验机上很难实现。根据此试验的特殊性,下面将具体介绍。

2.1 试验系统介绍

该系统由围压、轴压和孔隙水压 3 套独立的加载部分组成,分别采用 LVDT 和环式位移传感器测量试样的轴向和侧向变形。该系统具有以下功能和特点:(1) 特殊设计的水压力施加系统,具有流量大和稳流、稳压的特点,并能够直接输出高达 100 MPa 的水压力,满足高渗透压条件下稳态法渗流试验的要求;(2) 特殊设计的氟化橡胶套,能保证将孔隙水压力和围压完全隔离;(3) 高围压(可达 100 MPa)和高轴压(可达 500 MPa)输出,可实现应变和

应力加载控制方式, 且控制精度为±0.01 MPa; (4) 全自动数据采集。试验系统示意图见图 1。

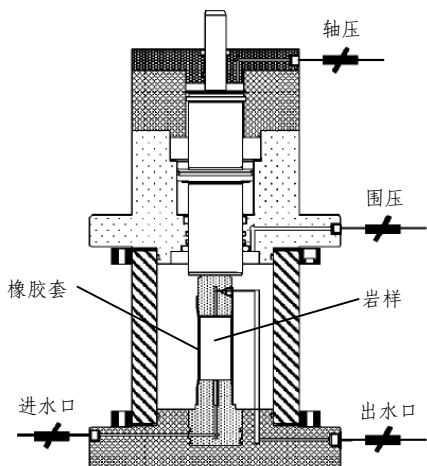


图 1 试验系统示意图

Fig.1 Sketch of test system

2.2 试验步骤

试验所用岩样取自于锦屏二级水电站, 为白山组大理岩 T_{2b}。其单轴峰值强度均值为 98 MPa, 实验室中测定完整大理岩的固有渗透系数^[8]为 10⁻²⁰ m²。在三轴压缩试验过程中进行渗透系数测量时, 发现其渗透系数在应力峰值以前基本不变, 因此, 本文重点对其峰后阶段的渗透性质演化规律进行研究。

为了研究破裂大理岩非线性渗流特性, 本文采用稳定渗流的方法测量渗透系数, 具体实施步骤如下:

- (1) 单轴压缩至试样破坏;
- (2) 施加静水压力, 采用应力控制方式使其稳定在某一设定值;
- (3) 在不同的恒定静水压力条件下, 在进水口分级施加水压力, 出水口无水压力, 保持为大气压;
- (4) 每级水头压力梯度保持一段时间, 待试样的变形稳定后, 记录试样的变形, 并测量该级水头压力梯度条件下的渗流速率。

在完成以上步骤后, 可以得到在施加水压力的过程中, 试样的变形和渗流速率与水头压力梯度的关系曲线。

3 试验现象和结果

根据以上试验步骤, 开展了不同静水压力下破裂大理岩的非线性渗流试验。

3.1 单轴压缩与静水压力加载

单轴压缩过程应力 - 应变试验曲线和试样破坏后的照片分别见图 2, 3; 静水压力加载过程中, 试样的轴向和侧向应变与静水压力的关系曲线如图 4 所示。

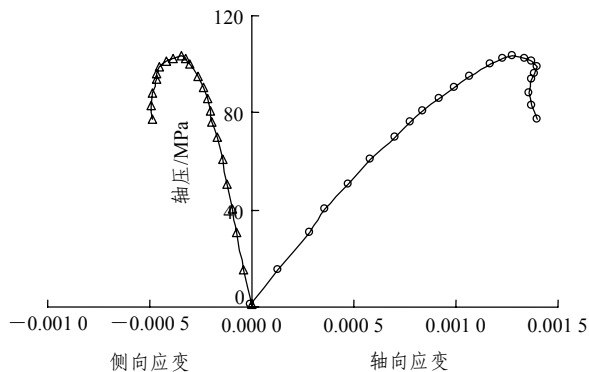


图 2 单轴压缩过程应力 - 应变试验曲线

Fig.2 Stress-strain curves in uniaxial compression test



图 3 单轴压缩破坏后试样照片

Fig.3 Photo of specimen after uniaxial compression failure

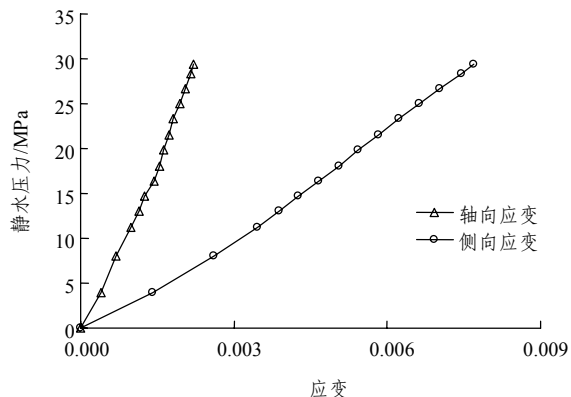


图 4 试样轴向和侧向应变与静水压力的关系曲线

Fig.4 Relation curves between axial and lateral strains of specimen and hydrostatic pressure

从图 4 可以发现, 在静水压力加载过程中, 试

样轴向和侧向均产生压缩变形，且侧向变形比轴向变形大很多。单轴破坏时，试样中大部分宏、细观裂隙沿轴向方向扩展^[9]，引起试样结构的各向异性，造成了静水压力加载过程中试样变形的各向异性。

3.2 渗流试验结果

根据节 2.2 中试验步骤，进行了不同静水压力下峰后大理岩的非线性渗流试验，共包括 8 组静水压力，分别为 3, 5, 7, 9, 15, 20, 25 和 30 MPa。限于篇幅，下面将给出静水压力为 3, 9, 20 和 30 MPa 条件下的非线性渗流试验曲线，如图 5 所示。

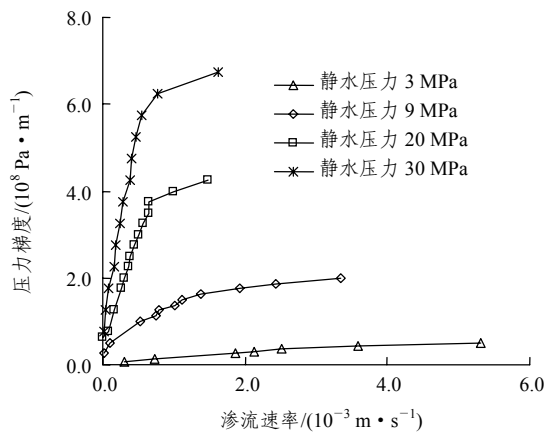


图 5 不同静水压力下渗流速率和压力梯度的试验曲线
Fig.5 Testing curves of seepage velocity vs. pressure gradient under different hydrostatic pressures

通过分析图 5 可以发现，4 组静水压力下渗流速率和压力梯度的关系曲线规律基本一致。图 6 给出了试样变形和水头压力的试验曲线。随着进水口水头压力的增大，试样中的孔隙水压力也随之增大，改变了有效应力场，引起试样轴向和侧向发生变形。据此，可以把图 5 中渗流速率的演化过程分为 3 个阶段进行分析：(1) 初始阶段，试样中的孔隙水压力与静水压力相差很大，静水压力的约束作用较大，试样变形较小，渗流速率较小，渗流近似为 Darcy 流，而且存在一个临界启动压力梯度^[9]，具有低渗透岩石的特征；(2) 随着水头压力的增大，孔隙水压力与静水压力的差值减小，但静水压力对试样的约束仍起主导作用，试样变形逐渐增大，此阶段渗流速率开始加速增大，曲线斜率逐渐减小，为 Darcy 流向非线性渗流过渡阶段；(3) 随着水头压力继续增大，此时孔隙水压力与静水压力相差很小，在孔隙水压力作用下，试样变形急剧增大，渗流速率急剧增大，曲线变得更加平缓，此阶段为非线性渗流阶段。

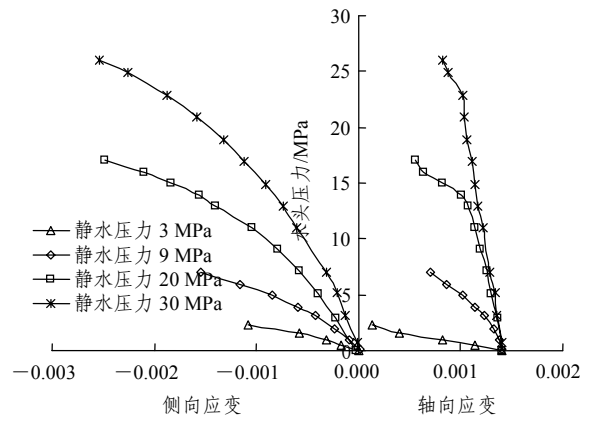


图 6 不同静水压力下应变和水头压力的试验曲线
Fig.6 Testing curves of strains vs. head pressure under different hydrostatic pressures

4 试验分析

通过分析以上结果，本文确定采用完全二次多项式来拟合渗流速率和压力梯度的关系，即在 Forchheimer 表达式后增加一常数项，用以表示临界启动压力梯度^[10]，具体表达式如下：

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{K}v + \rho\beta v^2 + B \quad (2)$$

式中： B 为临界启动压力梯度(Pa/m)。本文中取 $\mu = 1.005 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ， $\rho = 1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。值得注意的是，式中的固有渗透系数 K 、二次项系数 β 和临界启动压力梯度 B 均为和试样变形相关的函数。

4.1 Darcy 流阶段分析

首先选取图 5 中曲线的直线段初始部分，计算试样的初始固有渗透系数和临界启动压力梯度，并采用立方定律反算初始固有渗透系数所对应的裂隙水力开度。然后，根据图 4 中不同静水压力下试样侧向变形数据，引入裂隙水力开度，并采用经验公式拟合裂隙水力开度与试样侧向变形的函数关系式，分别建立试样侧向变形与临界启动压力梯度和固有渗透系数之间的联系。

如节 3.2 分析，图 5 中的渗流速率和压力梯度试验曲线的起始阶段近似为直线，此时渗流速率非常小，为 Darcy 流，因此，可以采用线性渗流方程(即式(2)中等号右边第二项为 0)。选取直线段的初始部分，计算出不同静水压力条件下的初始固有渗透系数 K^0 和初始临界启动压力梯度 B^0 ，结果见表 1。

4.1.1 临界启动压力梯度

在低渗透岩石中，通常会存在一个临界启动压

表 1 不同静水压力下侧向变形、初始固有渗透系数和初始临界启动压力梯度

Table 1 Lateral deformation, initial inherent permeability and initial critical water head pressure gradient under different hydrostatic pressures

静水压力 /MPa	侧向变形 / μm	初始临界启动压力梯度 /($10^7 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$)	初始固有渗透系数 /(10^{-9} m^2)
3	20	0.19	59.700
5	32	1.27	37.600
7	40	2.00	24.000
9	50	2.63	9.120
15	72	3.88	5.630
20	90	4.83	2.000
25	110	6.29	1.340
30	124	6.67	0.946

力梯度, 对其机制解释目前还未获得统一认识^[11]。这里, 首先根据表 1 中试样侧向变形和初始临界启动压力梯度数据, 得到图 7; 再根据图 7 所示关系曲线, 采用一次多项式拟合两者的函数关系式, 拟合结果为

$$B = \begin{cases} 6.12 \times 10^5 u_1 - 6.31 \times 10^6 & (B \geq 0) \\ 0 & (B < 0) \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_1 为试样的侧向变形(μm), 压缩变形为正, 拉伸变形为负。

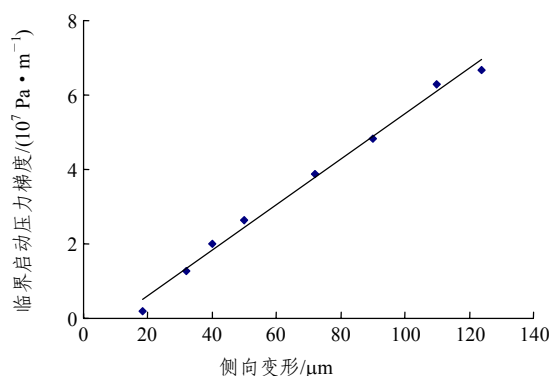


图 7 临界启动压力梯度和侧向变形关系(Darcy 流阶段)
Fig.7 Relationship between critical water pressure gradient and lateral deformation(stage of Darcy seepage)

采用式(3), 通过水头压力变化所引起的试样侧向变形就可以预测临界启动压力梯度的演化规律。

4.1.2 固有渗透系数

为了研究渗流性质随水头压力的演化规律, 在

试样变形数据的基础上, 引入裂隙水力开度, 建立固有渗透系数与试样侧向变形之间的函数关系。

对于岩石裂隙, 裂隙表面的粗糙度和外部应力将引起裂隙面的接触面积发生变化, 从而影响裂隙的水力开度, 对裂隙中的渗流产生影响。为了考虑这些因素, N. Barton 等^[12]提出了一个经验公式来描述裂隙的力学开度 $b_0 - u_n$ 和粗糙度 JCR 与裂隙的水力开度 e_h 的关系式:

$$e_h = \frac{(b_0 - u_n)^2}{JRC^{2.5}} \quad (4)$$

式中: b_0 为裂隙面初始力学开度(μm); u_n 为岩石裂隙的法向变形(μm), 压缩变形为正, 拉伸变形为负。在单轴压缩破坏的情况下, 试样中的裂隙主要沿最大主应力方向(即试样的轴向方向)发展(如图 3 所示), 因此, 这里用试样的侧向变形来代替岩石裂隙的法向变形。

在 Darcy 流条件下, 裂隙中的固有渗透系数可以采用立方定律^[13]进行计算:

$$K(u_1) = \frac{e_h^2(u_1)}{12} \quad (5)$$

式中: e_h 为试样侧向变形 u_1 的函数; $K(u_1)$ 为固有渗透系数, 也为试样侧向变形 u_1 的函数。因此, 在不同静水压力条件下, 由表 1 中初始固有渗透系数 K^0 , 通过式(4)可以反算裂隙初始水力开度 e_h^0 。

在不同的静水压力条件下, 由反算得到的裂隙初始水力开度 e_h^0 和试样的侧向变形, 采用式(4)拟合裂隙初始水力开度 e_h^0 和试样侧向变形 u_1 之间的函数关系(如图 8 所示)。

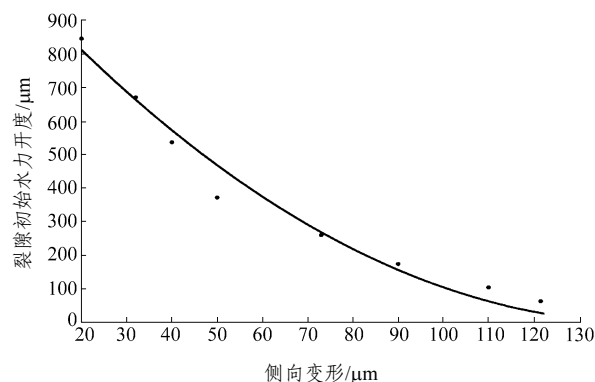


图 8 裂隙初始水力开度和侧向变形关系
Fig.8 Relationship between initial hydraulic aperture of fracture and lateral deformation

拟合结果为: $JCR = 3.3$, $b_0 = 146 \mu\text{m}$ 。综合式(4)和(5), 可以得到固有渗透系数与试样侧向变

形之间的函数关系式:

$$K(u_1) = \frac{(146 - u_1)^4}{4 \cdot 696} \quad (6)$$

根据图 6 中试样的侧向变形, 结合式(6)计算固有渗透系数, 从而研究水头压力变化过程中固有渗透系数演化规律。

4.2 非线性渗流阶段分析

本节中, 首先根据式(3)和(6), 由试验记录的侧向变形数据预测在水头压力加载过程中临界启动压力梯度和固有渗透系数的演化规律, 然后由式(2)计算二次项系数, 并研究其演化规律。

4.2.1 临界启动压力梯度

由图 6 中试样的侧向变形, 根据式(3)计算临界启动压力梯度, 结果见图 9。

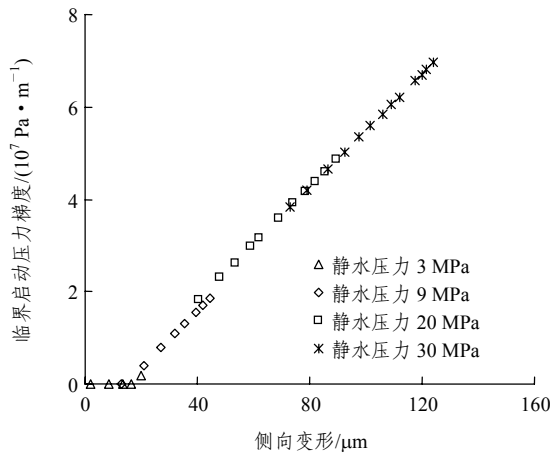


图 9 临界启动压力梯度和侧向变形关系(非线性渗流阶段)

Fig.9 Relationship between critical water pressure gradient and lateral deformation(stage of nonlinear seepage)

根据图 9, 可以得到临界启动压力梯度与水头压力梯度的关系, 见图 10。

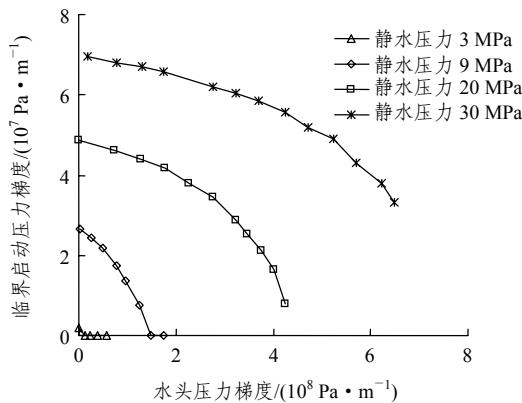


图 10 临界启动压力梯度和水头压力梯度关系

Fig.10 Relationship between critical pressure gradient and water head pressure gradient

在图 10 中, 不同静水压力条件下, 随着水头压力梯度的增大, 临界启动压力梯度逐渐减小。其中, 在静水压力为 3 和 10 MPa 的试验后期, 由于裂隙开度较大, 临界启动压力梯度变为 0。

4.2.2 固有渗透系数

在不同静水压力条件下, 根据图 6 中试样的侧向变形, 首先通过式(4)计算裂隙的水力开度, 然后采用式(5)预测固有渗透系数的演化规律。固有渗透系数与侧向变形的关系见图 11。

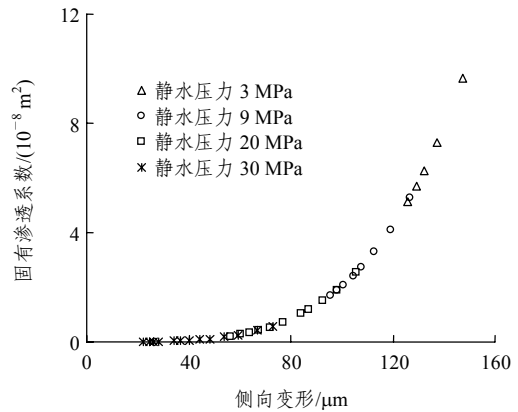


图 11 固有渗透系数和侧向变形关系

Fig.11 Relationship between inherent permeability and lateral deformation

图 12 给出了不同静水压力条件下, 施加水头压力过程中试样固有渗透系数的演化规律。

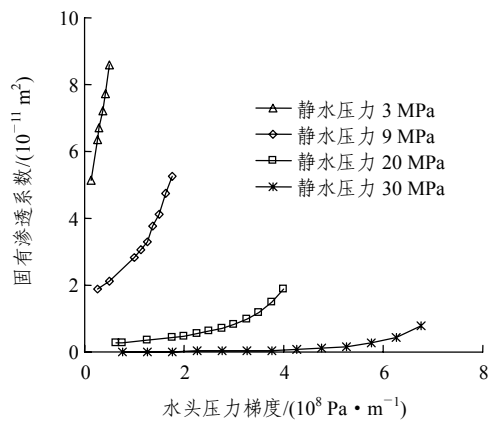


图 12 固有渗透系数和水头压力梯度关系

Fig.12 Relationships between inherent permeability and water head pressure gradient

从图 12 中可以发现, 静水压力对试样的固有渗透系数影响较大, 在相同的水头压力梯度条件下, 静水压力为 3 MPa 的固有渗透系数比静水压力为 30 MPa 的值高出 1~2 个数量级。更为重要的是, 水头压力梯度对试样的固有渗透系数演化规律也有

不同程度的影响。随着水头压力梯度的增大, 当静水压力为 3 MPa 时, 固有渗透系数增大了 67%; 当静水压力为 30 MPa 时, 固有渗透系数增大了 2 个数量级。这说明了水头压力梯度对固有渗透系数影响的重要性。

4.2.3 二次项系数

在式(2)中, 等号右端第 1 项为线性项, 由流体的黏性所引起; 第 2 项为二次项, 由流体的惯性引起; 第 3 项为常数项, 为临界启动压力梯度。

根据以上分析, 在已知线性项和常数项的基础上, 容易得到在水头压力梯度增加过程中二次项系数的演化规律, 如图 13 所示。

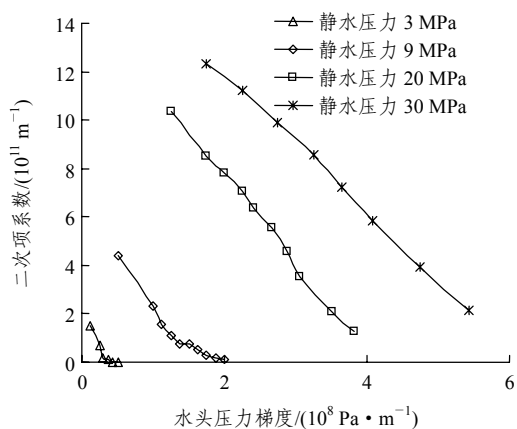


图 13 二次项系数和水头压力梯度关系图

Fig.13 Relationship between quadratic term coefficient and water head pressure gradient

从图 13 可以发现, 随着水头压力梯度的增大, 二次项系数逐渐减小。当静水压力为 3 MPa 时, 二次项系数随着水头压力梯度的增大由正变为负; 相应地, 试验中观察到, 当水头压力梯度较大时, 试样的侧向变形急剧增大, 提供水头压力的泵为了保持设定的水头压力, 持续向试样中注水, 这与孙明贵等^[6]所得结论较为一致。而在静水压力为 9, 20 和 30 MPa 的条件下, 直到水头压力接近于静水压力时, 二次项系数仍然为正值。

在得到二次项系数的演化规律后, 为了更加深入分析其物理机制, 本文研究了二次项系数与裂隙水力开度的关系, 见图 14。

图 14 中, 不同静水压力下的二次项系数和裂隙水力开度曲线部分重合, 即在水力开度相同的情况下, 其对应的二次项系数也基本相同。这揭示了裂隙水力开度是影响二次项系数演化的根本原

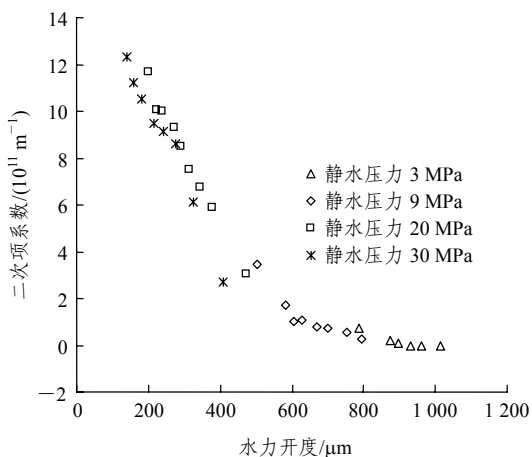


图 14 二次项系数和裂隙水力开度关系图

Fig.14 Relationship between quadratic term coefficient and hydraulic aperture of fracture

因; 同时也说明了峰后大理岩中非线性渗流为非 Darcy 流, 可以采用完全二次多项式来描述。

根据图 14, 可以拟合二次项系数和裂隙水力开度 e_h 的函数关系式, 尝试性地研究二次项系数演化规律:

$$\beta = -7.16 \times 10^{-11} \ln e_h + 4.82 \times 10^{12} \quad (7)$$

为了便于应用, 采用式(4)将二次项系数转化为侧向变形的函数

$$\beta = -7.16 \times 10^{-11} \ln \left[\frac{(b_0 - u_1)^2}{JRC^{2.5}} \right] + 4.82 \times 10^{12} \quad (8)$$

因此, 根据式(3), (6)和(8), 采用试样侧向变形, 可以预测水头压力变化过程中临界启动压力梯度、固有渗透系数和二次项系数演化规律。

5 结论与展望

隧洞围岩开挖扰动区通常存在许多发育充分的裂隙, 在水压力的作用下, 岩石裂隙的渗流性质将发生显著变化。本文进行了不同静水压力下大理岩峰后渗流特性试验, 从裂隙水力开度变化入手, 得到了不同静水压力下渗流速率随水头压力梯度的演化规律, 分析了水头压力对临界启动压力梯度、固有渗透系数和二次项系数演化规律的影响, 得出了以下结论:

(1) 不同静水压力下渗流速率与压力梯度关系曲线可以分为 3 个阶段: 直线段, 渗流近似为稳定

Darcy 流, 裂隙开度很小; 过渡段, 裂隙开度逐渐增大, Darcy 流向非 Darcy 流过渡; 非 Darcy 流阶段, 裂隙开度急剧增大, 可能渗流失稳。

(2) 随着静水压力的升高, 试样中裂隙水力开度逐渐减小, 试样的固有渗透系数逐渐减小, 临界启动压力梯度逐渐增大。

(3) 随着水头压力的增大, 试样中裂隙水力开度逐渐增大, 引起固有渗透系数增大, 临界启动压力梯度和二次项系数减小。

在下一步的工作中, 将考虑应力路径、时间效应等因素, 研究临界启动压力梯度、固有渗透系数和二次项系数演化规律, 对式(3), (6)和(8)进行验证和修正, 进而分析工程中隧洞围岩突(涌)水机制, 为预防和预测隧洞围岩稳定性提供理论支持。

参考文献(References):

- [1] FORCHHEIMER P. Lehr-und handbuch der hydraulik[C]// Hydrolik, Berlin: [s.n.], 1914: 116 - 118.
- [2] ERGRUN S. Fluid flow through packed column[J]. Chemical Engineering Progress, 1952, 48: 89 - 94.
- [3] RUTH D, MA H. On the derivation of the Forchheimer equation by means of the averaging theorem[J]. Transport in Porous Media, 1992, 7(3): 255 - 264.
- [4] 程宜康, 陈占清, 缪协兴, 等. 峰后砂岩非 Darcy 流渗透特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2 005 - 2 009. (CHENG Yikang, CHEN Zhanqing, MIAO Xiexing, et al. Testing study on non-Darcy flow in post-peak sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 2 005 - 2 009.(in Chinese))
- [5] 李天珍, 李玉寿, 马占国. 破裂岩石非达西渗流的试验研究[J]. 工程力学, 2003, 20(4): 132 - 135.(LI Tianzhen, LI Yushou, MA Zhanguo. Testing study on non-Darcy seepage flow in fractured rocks[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(4): 132 - 135.(in Chinese))
- [6] 孙明贵, 黄先伍, 李天珍, 等. 石灰岩应力 - 应变全过程的非 Darcy 流渗透特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 484 - 491.(SUN Minggui, HUANG Xianwu, LI Tianzhen, et al. Seepage properties of non-Darcy flow in complete failure process of limestone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 484 - 491. (in Chinese))
- [7] 缪协兴, 陈占清, 茅献彪, 等. 峰后岩石非 Darcy 渗流的分岔行为研究[J]. 力学学报, 2003, 35(6): 660 - 667.(MIAO Xiexing, CHEN Zhanqing, MAO Xianbiao, et al. The bifurcation of non-Darcy flow in post-failure rock[J]. Acta Mechanica Sinica, 2003, 35(6): 660 - 667.(in Chinese))
- [8] 陈卫忠, 杨建平, 伍国军, 等. 低渗透介质渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 236 - 243.(CHEN Wenzhong, YANG Jianping, WU Guojun, et al. Experimental study on permeability in low permeability media[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 236 - 243.(in Chinese))
- [9] PATERSON M S, WONG T F. Experimental rock deformation: the brittle field[M]. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2005: 115 - 145.
- [10] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999: 8 - 51.(KONG Xiangyan. Advanced mechanics of fluid in porous media[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1999: 8 - 51.(in Chinese))
- [11] 薛芸, 石京平, 贺承祖. 低速非达西流动机制分析[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(5): 102 - 104.(XUE Yun, SHI Jingping, HE Chengzu. Analysis of low velocity non-Darcy flow mechanism[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(5): 102 - 104.(in Chinese))
- [12] BARTON N, BANDIS S, BAKHTAR K. Strength deformation and conductivity coupling in rock joint[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1985, 22(3): 121 - 140.
- [13] ROMM E S. Flow characteristics of fractured rocks[M]. Moscow: Nedra Publishing House, 1966.

《学报》2009年第1期 EI COMPENDEX 收录情况

“EI 中国”公布的数据显示,《学报》2009年第28卷第1期共发表论文28篇,其中EI Compendex 收录论文28篇,收录率为100.00%。

本刊编辑部

2009年2月27日