

三轴应力作用下岩石单裂隙的渗流特性^{*}

刘才华^{**} 陈从新

中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071

摘要 侧向应力作用下岩体裂隙开度呈现增大的趋势, 采用侧向应力影响系数, 将侧向应力等效为作用于裂隙法向的拉应力, 基于岩体裂隙法向闭合变形法则, 建立了三轴应力作用下裂隙开度表达式, 在此基础上推导了岩石单裂隙渗流与三轴应力耦合模型. 采用人工劈裂贯通裂隙进行三轴应力下的渗流实验, 研究结果表明, 法向应力、侧向应力以及渗压对裂隙渗透系数有显著的影响, 裂隙渗透系数随法向应力的增加而减小, 而随侧向应力或渗压的增加而增大, 裂隙渗透系数与三轴应力呈指数函数关系. 实验结果与理论分析具有很好的—致性.

关键词 三轴应力 岩石裂隙 渗流 渗透系数 耦合模型

裂隙岩体渗流场与应力场的耦合问题是众多工程领域如水利水电工程、采矿工程、边坡工程、石油储藏工程以及核废料处理等领域急需解决的课题, 是当前岩体水力学研究的热点之一. 作为裂隙岩体双场耦合研究的基础, 岩体单裂隙渗流特性研究具有重要的意义. 国内外学者对此进行了大量的研究, 并取得了广泛的研究成果^[1-9]. 从目前的研究情况来看, 岩体单裂隙渗流特性研究主要集中在法向应力与渗流耦合方面, 对三维应力作用下岩体单裂隙的渗流特性所作的研究工作较少. 但是, 工程岩体一般受三维应力作用, 因而三维应力条件下岩体裂隙渗流特性更能反映天然地质岩体的实际情况. 近几年来, 国内部分学者对三轴应力作用下岩石单裂隙的渗流特性开展了一些探索性的工作. 张玉卓^[10]、曾亿山等^[11]通过室内实验研究了不同侧向应力和加载条件下裂隙流量的变化规律, 并提出了相应的经验公式, 其研究表明, 裂隙流量随法向应力的增加而减小, 随侧向应力的增加而增大. 赵阳升^[12]给出了三轴应力作用下裂隙渗透系数的经验公式, 指出裂隙渗透系数与法向应力和侧向应力均呈负相关关系. 常宗旭等^[13]研究了裂隙渗透

系数与三轴应力的耦合关系, 指出侧向应力对裂隙渗透系数的影响规律类似于法向应力, 即渗透系数与应力呈指数函数关系. 这些工作极大地推动了三维应力作用下岩体裂隙渗流特性研究, 但是, 由于三轴应力作用下裂隙渗流特性研究还处于探索性阶段, 现有的文献所揭示的三轴应力作用下裂隙的渗流规律存在很大的差异性, 还没有形成较成熟的理论.

本文首先从理论方面分析了三轴应力作用下岩石单裂隙的渗流特性, 建立了三轴应力作用下岩体单裂隙渗流模型. 通过大量的室内实验, 探讨了法向应力、侧向应力以及渗压对裂隙渗流特性的影响规律, 在此基础上验证了岩体裂隙渗流与应力耦合理论模型的合理性.

1 裂隙渗流与三轴应力耦合模型

岩体裂隙应力和渗流的相互作用是通过裂隙开度的变化来实现的. 研究表明^[14], 法向应力作用下裂隙的变形符合法向闭合变形法则, 即:

$$\Delta b = b_0 \left(1 - e^{-\frac{\sigma_n}{k_n}} \right) \quad (1)$$

2006-10-19 收稿, 2006-12-21 收修改稿

^{*} 国家自然科学基金重点项目(批准号: 50239070)和国家重点基础研究发展计划(批准号: 2002CB412704)资助项目

^{**} E-mail: chliu@whrsm.ac.cn

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

式中 b_0 为裂隙压缩闭合变形量; K_n 为结构面当量闭合刚度; Δb 为裂隙闭合变形; σ_1 为法向应力.

目前, 对于三轴应力作用下裂隙的法向变形特性研究相当匮乏, 还没有建立侧向应力作用下裂隙的法向变形规律. 事实上, 由于岩体裂隙渗透系数随侧向应力的增加而增加, 由岩体裂隙渗流平方定律可知, 裂隙开度随侧向应力的增加而增加, 即侧向应力作用下裂隙沿法向出现扩张变形, 而裂隙法向变形随法向应力(压为正)增加而减小, 因此, 可以把侧向应力对裂隙法向变形的影响等效于一法向拉应力, 则三轴应力作用下裂隙的法向变形可以用下式表述

$$\Delta b = b_0 \left(1 - e^{-\frac{\sigma_1 - \lambda(\sigma_2 + \sigma_3)}{K_n}} \right) \quad (2)$$

式中 λ 定义为裂隙法向变形的侧向应力影响系数; σ_2, σ_3 为侧向应力.

则三轴应力作用下裂隙力学开度表达式为

$$b = b_0 \exp \left\{ -\frac{\sigma_1 - \lambda(\sigma_2 + \sigma_3)}{K_n} \right\} \quad (3)$$

对于贯通裂隙, 考虑裂隙面的水压作用时, 裂隙面的法向应力为有效法向应力, (3)式可写成

$$b = b_0 \exp \left\{ -\frac{\sigma_1 - \lambda(\sigma_2 + \sigma_3) - p}{K_n} \right\} \quad (4)$$

式中 p 为裂隙面渗压.

作为岩体裂隙渗流的基本理论, 平方定律描述了光滑、平行裂隙渗透系数与开度的平方的线性关系, 其表述形式为

$$K_f = \frac{g}{12\nu} b^2 \quad (5)$$

式中 K_f 为裂隙渗透系数; g 为重力加速度; ν 为运动粘滞性系数.

对于天然粗糙裂隙, (5)式中的开度 b 为水力开度 b_h , 即:

$$K_f = \frac{g}{12\nu} b_h^2 \quad (6)$$

行修正, 并提出了等效水力开度的表达式

$$b_h = b^2 / JRC^{2.5} \quad (7)$$

将(4), (7)式代入(6)式中, 可得三轴应力作用下粗糙裂隙渗透系数表达式

$$K_f = \frac{gb_0^4}{12\nu(JRC)^5} \exp \left\{ -\frac{4[\sigma_1 - \lambda(\sigma_2 + \sigma_3) - p]}{K_n} \right\} \quad (8)$$

记裂隙初始应力状态为 $\sigma_{10}, \sigma_{20}, \sigma_{30}$, 对(8)式进行变换

$$K_f = \frac{gb_0^4}{12\nu(JRC)^5} \cdot \exp \left\{ -\frac{4[\sigma_{10} - \lambda(\sigma_{20} + \sigma_{30}) - p_0]}{K_n} \right\} \cdot \exp \left\{ -\frac{4[(\sigma - \sigma_{10}) - \lambda(\sigma_2 + \sigma_3 - \sigma_{20} - \sigma_{30}) - (p - p_0)]}{K_n} \right\} \quad (9)$$

(9)式可写成

$$K_f = K_{f_0} \exp \left\{ -\frac{4[\Delta\sigma_1 - \lambda(\Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3) - \Delta p]}{K_n} \right\} \quad (10)$$

$$K_{f_0} = \frac{gb_0^4}{12\nu(JRC)^5} \exp \left\{ -\frac{4[\sigma_{10} - \lambda(\sigma_{20} + \sigma_{30}) - p_0]}{K_n} \right\} \quad (11)$$

式中 K_{f_0} 为初始应力状态下裂隙渗透系数.

(10)式即为三轴应力下裂隙渗透系数与应力耦合的理论模型.

2 实验与分析

2.1 实验装置

采用真三轴渗流装置进行实验(见图 1), 该实验装置可在三个相互垂直方向独立施加荷载, 能够模拟不同应力状态和应力路径裂隙的渗流. 试件由坚硬的花岗岩劈裂而成, 试件为 150 mm × 150 mm × 280 mm 的长方体, 基于试件制作和裂隙密封的需要, 在试件两平行侧面开 0.5 cm 深的槽, 因此, 裂隙面实际有效尺寸为 140 mm × 280 mm. 采用高压氮气施加水压, 通过储气罐的调压阀调节储水罐中

气体的压力以提供稳定的压力源，水流自下而上流经裂隙面，在进水管和试件出水口各设置一个流量调节阀，可以任意控制试件入渗水压和出渗水压以及裂隙流量的大小。实验模型见图 2。



图 1 真三轴渗流实验设备图

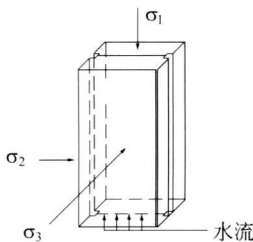


图 2 实验模型

2.2 实验结果与分析

对于粗糙裂隙，其平行流物性方程为

$$\frac{Q_f}{\Delta H} = \frac{Wgb_h^3}{L12\nu} \quad (12)$$

式中 Q_f 为裂隙流量； ΔH 为水头差； W 为垂直于渗流方向的裂隙宽度； L 为平行于渗流方向的裂隙长度。

将(6)式代入(12)式可得

$$K_f^3 = \frac{g}{12\nu} \left(\frac{LQ_f}{W\Delta H} \right)^2 \quad (13)$$

代入参数 $L=28\text{ cm}$ ， $W=14\text{ cm}$ ， $\nu=0.00898\text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ，(13)式简化为

$$K_f^3 = 0.0714 \left(\frac{Q_f}{\Delta H} \right)^2 \quad (14)$$

由(14)式计算出渗透系数，绘制出渗透系数与应力增量的关系曲线如图 3—6 所示。

由(10)式可知，侧向应力恒定时，裂隙渗透系数与法向应力增量有如下关系

$$K_f = K_{f_0} \exp \left\{ -4 \frac{\Delta\sigma_1}{K_n} \right\} \quad (15)$$

从图3可以看出，裂隙渗透系数随法向应力的

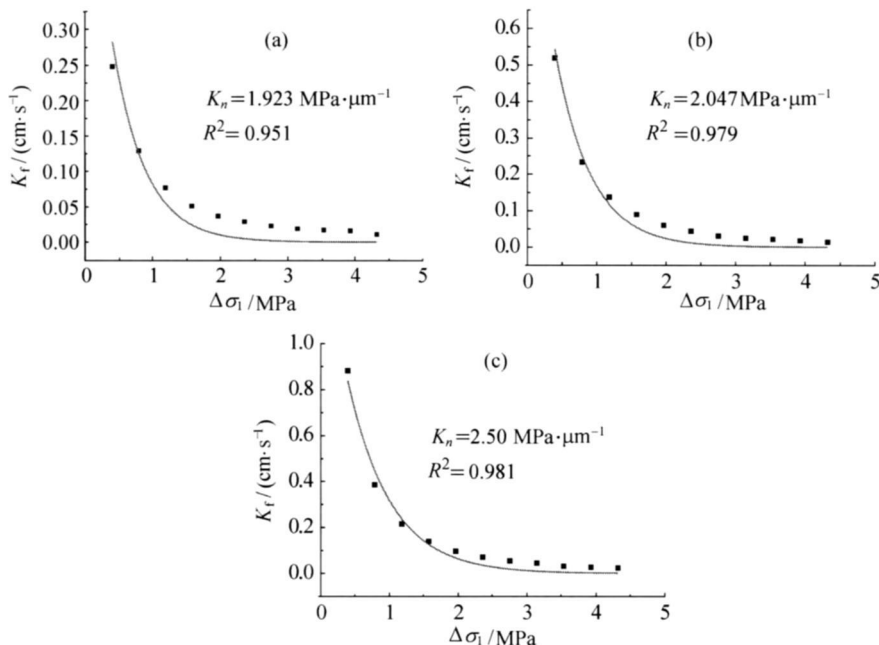


图 3 渗透系数与法向应力耦合曲线($\Delta H=0.5\text{ MPa}$)

(a) $2\sigma_2=\sigma_3=0.785\text{ MPa}$; (b) $\sigma_2=1.178\text{ MPa}$, $\sigma_3=0.785\text{ MPa}$; (c) $\sigma_2=1.964\text{ MPa}$, $\sigma_3=0.785\text{ MPa}$

增加而降低, 法向应力越大, 渗透系数降低幅度越小, 裂隙渗透系数随法向应力的增加而逐渐趋于稳定. 采用(15)式对图 3 中的数据进行拟合, 从拟合的效果来看, 采用(15)式来描述法向应力与渗透系数的耦合特性是合适的.

图 4 描述了裂隙渗透系数 K_f 与侧向应力增量 $\Delta\sigma_2$ 的关系, 此时, 法向应力 σ_1 、侧向应力 σ_3 恒定, (10)式可写成

$$K_f = K_{f_0} \exp\left\{4 \frac{\Delta\sigma_2}{k_n}\right\} \quad (16)$$

$$k_n = K_n / \chi \quad (17)$$

实验结果表明, 裂隙渗透系数随侧向应力的增加而增加, 侧向应力越大, 渗透系数增加幅度越大. 采用(16)式对图 4 中的数据点进行拟合, 从拟合的效果来看, 采用(16)式来描述侧向应力与渗透系数的耦合特性是合适的.

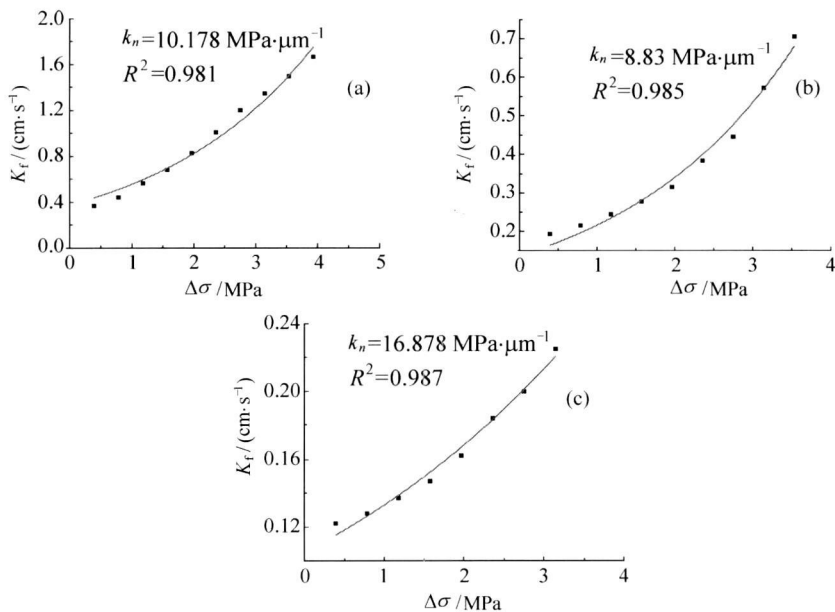


图 4 渗透系数与侧向应力耦合曲线($\Delta H=0.5$ MPa)

(a) $\sigma_1 = \sigma_3 = 0.785$ MPa; (b) $\sigma_1 = 1.178$ MPa, $\sigma_3 = 0.785$ MPa; (c) $\sigma_1 = 1.571$ MPa, $\sigma_2 = 0.785$ MPa

图 5 描述了应力 σ_1 , σ_2 , σ_3 , 恒定下裂隙渗透系数 K_f 与渗压增量 Δp 的关系. 应力恒定下, (10)式可写成

$$K_f = K_{f_0} \exp\left\{4 \frac{\Delta p}{K_n}\right\} \quad (18)$$

实验过程中裂隙中水流渗出面为自由面, 裂隙的出渗水头为零, 裂隙水头差 ΔH 等于入渗水头, 因此, 裂隙面渗压 p 与水头差 ΔH 有如下关系

$$p = \frac{1}{2}\Delta H \quad (19)$$

显的影响, 裂隙渗透系数随渗压的增加而增大. 这是因为在法向应力和侧向应力恒定的情况下, 裂隙面渗压增加, 其有效法向应力减小, 裂隙开度增加, 从而导致渗透系数增大. 采用(18)式对图 5 中的数据进行拟合, 从拟合结果可以看出, 用指数关系来描述渗压对渗透系数的影响是合适的.

图 6 描述了侧向应力 σ_3 恒定, 法向应力 σ_1 与侧向应力 σ_2 同步增加时裂隙渗透系数变化特性. 由(10)式可知:

$$K_f = K_{f_0} \exp\left\{-4 \frac{\Delta\sigma_1 - \chi\Delta\sigma_2}{K_n}\right\} \quad (20)$$

从图 5 可以看出, 渗压对裂隙的渗透系数有明 记,

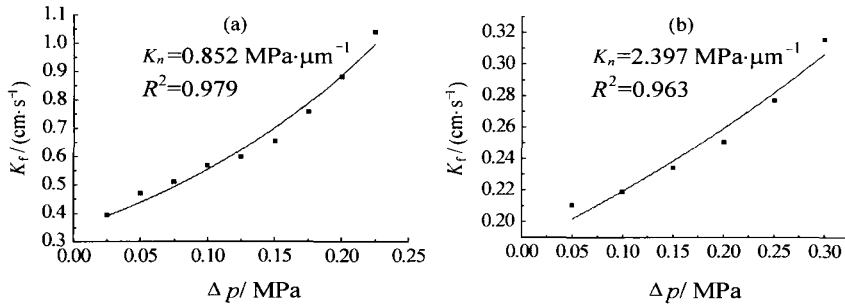


图 5 渗透系数与渗压耦合曲线

(a) $\sigma_1 = \sigma_2 = 0.5 \sigma_3 = 0.392 \text{ MPa}$; (b) $\sigma_1 = \sigma_2 = 0.5 \sigma_3 = 0.785 \text{ MPa}$

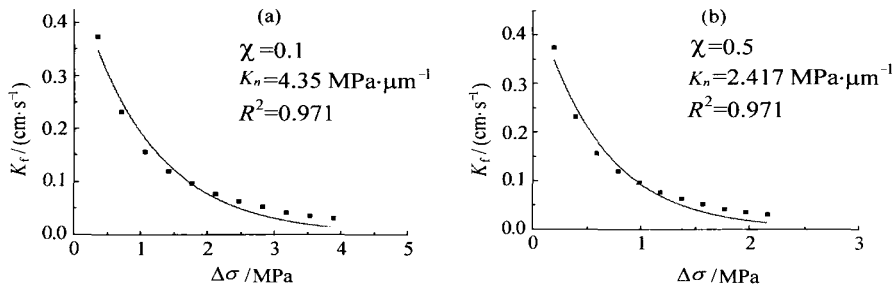


图 6 渗透系数与三轴应力耦合曲线 ($\sigma_1 = \sigma_2$, $\sigma_3 = 0.785 \text{ MPa}$, $\Delta H = 0.5 \text{ MPa}$)

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_1 - \chi\Delta\sigma_2 \quad (21)$$

3 结论

则:

$$K_f = K_{f_0} \exp\left[-4 \frac{\Delta\sigma}{K_n}\right] \quad (22)$$

在进行数据分析时,我们发现,不管 χ 取区间 (0, 1) 中的任何值, 所得到的 $K_f \sim \Delta\sigma$ 曲线形状是一致的. 图 6 分别给出了 χ 取 0.1 和 0.5 时的 $K_f \sim \Delta\sigma$ 曲线及其拟合结果. 从图 6 可以看出, $K_f \sim \Delta\sigma$ 曲线呈负指数型, 用 (22) 式对曲线进行拟合的效果很好, 这表明 (22) 式来描述渗流与应力耦合关系是合理的.

综合上述实验分析可知, 三轴应力作用下裂隙渗流与应力耦合模型可以用下面的关系式来描述

$$K_f = K_{f_0} \exp\left\{-\frac{4[\Delta\sigma_1 - \chi(\Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3) - \Delta p]}{K_n}\right\} \quad (23)$$

本文对三轴应力作用下岩石贯通裂隙的渗流特性进行了理论分析和实验研究, 建立了裂隙渗透系数与三轴应力的耦合模型. 研究表明, 法向应力、侧向应力以及渗压对裂隙渗透系数有显著的影响, 裂隙渗透系数随法向应力的增加而减小, 而随侧向应力或渗压的增加而增大, 裂隙渗透系数与三轴应力呈指数函数关系. 实验结果与理论分析具有很好的一致性. 在裂隙渗流与三轴应力耦合模型中采用侧向应力影响系数来评估侧向应力对渗透系数的影响, 该系数与三轴应力作用下裂隙的变形特性相关, 尚需进一步的研究.

参 考 文 献

- 1 Snow DT. Rock fracture spaces, openings and porosities. J Soil Mech, 1968, 94(SM1): 73-91
- 2 Gangi AF. Variation of whole and fractured porous rock permeability with confining pressure. Int J Rock Mech Min Sci, 1978, 15(5): 249-257

- 3 Witherspoon PA, Wang JSY, Iwai K, et al. Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture. *Water Resources Res.* 1980, 16(6): 1016—1024
- 4 Tsang YW. Channel model of flow through fractured media. *Water Resources Res.* 1987, 23(3): 467—479
- 5 Barton N, Bandis S, Bakhtar K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. *Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr.* 1985, 22(3): 121—140
- 6 Chen Z, Narayan SP, Yang Z, et al. An experimental investigation of hydraulic behavior of fractures and joints in granitic rock. *Int J Rock Mech Min Sci.* 2000, 37(7): 1061—1071
- 7 Kranz RL, Frankel AD, Engelder T, et al. The permeability of whole and jointed barre granite. *Int J Rock Mech Min Sci.* 1979, 16(4): 225—234
- 8 速宝玉, 詹美礼, 王 媛. 裂隙渗流与应力耦合特性研究. *岩土工程学报*, 1997, 19(4): 73—77
- 9 刘继山. 单裂隙受正应力作用时的渗流公式. *水文地质工程地质*, 1987, 14(2): 28—32
- 10 张玉卓, 张金才. 裂隙岩体渗流与应力耦合的试验研究. *岩土力学*, 1997, 18(4): 59—62
- 11 曾亿山, 卢德唐, 曾清红, 等. 单裂隙流-固耦合渗流的试验研究. *实验力学*, 2005, 20(1): 10—16
- 12 赵阳升, 杨 栋, 郑少河, 等. 三维应力作用下岩石裂缝水渗流物性规律的实验研究. *中国科学, E 辑*, 1999, 29(1): 82—86
- 13 常宗旭, 赵阳升, 胡耀青, 等. 三维应力作用下单一裂缝渗流规律的理论与试验研究. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(4): 620—624
- 14 孙广忠, 林文祝. 结构面闭合变形法则及岩体弹性本构方程. *地质科学*, 1983, 18(2): 81—87

苏定冯教授荣任 CEPP 主编

CEPP 是国际刊物 “Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology (临床和实验药理学与生理学)” 的简称, 在澳大利亚出版, 由澳大利亚高血压研究委员会 (the High Blood Pressure Research Council of Australia) 和澳大利亚临床与实验药理学家和毒理学家学会 (the Australasian Society of Clinical and Experimental Pharmacologists and Toxicologists) 主管, 创刊至今已有 34 年历史。

第二军医大学苏定冯教授于 1994 年开始担任 CEPP 的编委, 于 2005 年 6 月出任该杂志中国地区主编 (Regional Editor), 2007 年 1 月应聘为该杂志的主编 (Editor-in-Chief)。我国学者担任国外杂志的主编, 反映了苏教授的学识为国际同行所肯定。

此外, 苏定冯教授还担任美国 “Journal of Cardiovascular Pharmacology (心血管药理学杂志)” 编委, 英国 “Clinical Science (临床科学)” 编辑部顾问, 以及中国 “Acta Pharmacologica Sinica (中国药理学报)” 副主编。

苏定冯教授曾先后获得 7 项国家自然科学基金面上项目和 1 项重点项目的资助, 在血压波动性与高血压及其防治药物的研究方面取得了有特色的成绩。

(供稿: 缪朝玉)