侧向应力对裂隙渗透性的影响

韩国锋,王恩志,刘晓丽

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,北京 100084)

摘要:目前不同试验者得出的侧向应力对裂隙渗透性影响的结果存在矛盾,其根本原因在于侧向应力对裂隙有多方面 的影响。侧向应力引起裂隙开度增加、壁面磨损、充填物压缩。这些对裂隙渗透性有不同的影响。根据裂隙是否存充填 物 建立了相应的三维应力对裂隙渗透性影响的表达式。当不存在充填物时,裂隙渗透性与侧向应力呈指数关系,当存 在较多充填物时呈负指数关系。把两种情况写成统一的指数形式,认为裂隙存在少量充填或者裂隙壁面磨损时也是适 合的。利用已有的试验成果对结果进行了验证,表明本文建立的表达式与试验结果符合得比较好。 关键词: 岩石裂隙;渗透性;侧向应力

中图分类号: TU452; 0357.3 文献标识码: A

岩体工程中很多事故都与地下水活动有关。渗流 场的改变会引起应力场的变化,同时应力场的变化会 改变岩体孔隙、裂隙结构,也就改变了岩体渗透性,从 而引起渗流场的变化,这就是岩体中的渗流应力耦合 问题。渗流应力耦合问题是目前岩体力学中研究的热 点问题 其中三维应力作用下单裂隙的渗透规律是其 基础与关键课题。国内外学者对应力作用下单裂隙的 渗透规律进行了大量研究。主要集中在法向应力和剪 切应力对裂隙渗透性影响方面^[1~4]。对于侧向应力对 裂隙渗透性的影响,国内做了一些实验,并进行了一些 理论分析^[5~9],不同试验者得出了完全相反的结论。 常宗旭[5~6]等对煤样裂隙和石灰岩裂隙在三维应力下 的渗透性试验,分析了其中侧向应力对渗透性的影响, 建立相应的数学表达式,得出裂隙侧向应力对裂隙渗 透性有重要影响,且类似于法向应力,符合负指数关 系。曾亿山^[7]等对砼块制作的单裂隙进行双向压力 下渗流试验,刘才华^[8]对花岗岩裂隙进行的三轴应力 下渗流试验 都得出裂隙渗透性随侧向应力的增加而 增加。刘才华同时推导了相应的数学公式。李新 平^[9]等认为侧向应力对裂隙结构面产生如泊松效应 的侧向压缩变形 利用渗透性与应力的幂函数关系 推 出了三维应力下的耦合方程,并对赵阳升等的试验结 果进行拟合,结果表明,渗透性随侧向应力的增加而减

收稿日期: 2010-10-11;修订日期: 2010-12-02

- 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40872152)
- 作者简介:韩国锋(1983-),男,博士研究生,主要从事岩石力 学和渗流研究。

E-mail: hgf02@ mails. tsinghua. edu. cn

文章编号: 1000-3665(2011)04-0038-05

小。

在裂隙形态一定的情况下,影响裂隙渗透性的主要因素是裂隙的开度和裂隙中的充填物。侧向应力可以影响这两个因素,从而影响裂隙渗透性。本文首先分别推导了侧向应力对裂隙开度和对充填物的影响带来的渗透性变化,给出了统一的三轴应力下岩石单裂隙渗透性方程。然后探讨了当侧向应力作用下裂隙局部剪切作用造成的裂隙形态改变对渗透性的影响,表明前面的公式也是适用的。最后用其他研究者的试验结果对方程进行了验证。

1 裂隙渗透与三轴应力耦合模型

外力作用一方面使裂隙宽度发生改变,另一方面, 当裂隙有充填物时,充填物的孔隙率也会发生改变。 这两者都改变了裂隙的渗透性。侧向应力对这两者都 有影响。由于泊松效应,一般来说裂隙开度随侧向应 力而增加。充填物随侧向应力而压缩,孔隙率减小。 前者增加渗透性,后者降低渗透性。下面分别推导侧 向应力通过裂隙开度和充填物密度变化造成的渗透性 变化方程,先从单裂隙的渗透性开始。在推导公式的 过程中,部分参考了文献[5]~[9]的推导方法。

如图 1 所示,岩石弹性模量为 E_r ,泊松比为 ν_r ,裂隙法向刚度为 k_n ,裂隙壁面两侧突起部分厚度分别为 $L_1 \ L_3$,除去裂隙壁起伏部分充填物厚度为 L_2 ,裂隙总 开度为 L_0 当裂隙没有充填物或充填物较少时 L_2 为 负数,当充填物不太少时, L_2 为正数。当裂隙充填物 较多时 $L_2 \approx L_0$ 裂隙法向应力为 σ_2 ,侧向应力分别为 $\sigma_1 \ \sigma_3$,其中 σ_3 垂直于纸面。这里采用岩石力学中通 常的做法,以压应力和压缩变形为正。



图 1 单一裂隙简图 Fig. 1 Sketch of a single fracture

首先考虑裂隙开度的变化。裂隙初始开度为 b_0 , 受到的法向应力为 σ_2 ,法向刚度为 k_n ,最大法向闭合 变形为 u_m ,单独法向应力作用下裂隙的法向变形 为^[10]:

$$u = b_0 (1 - e^{-\frac{\sigma_2}{u_m k_n}})$$
(1)

变形后裂隙的开度为:

$$b = b_0 - u = b_0 - b_0 (1 - e^{-\frac{\sigma_2}{u_m k_n}})$$
$$= b_0 e^{-\frac{\sigma_2}{u_m k_n}}$$
(2)

裂隙两侧的岩块在侧向应力 σ_1 、 σ_3 的作用下,由于泊松效应,会沿裂隙法向产生变形,由于裂隙法向应 力不变,当侧向应力为压应力时,裂隙会向 σ_2 负方向 变形(不是裂隙壁面向内变形,否则裂隙壁面挤压,法 向应力增加。而实际上法向应力不变),这与法向应 力的作用效果类似,我们只考虑这种效应的线性项,与 广义胡克定律类似(这里不一定是线弹性的),可以认 为这个变形与法向应力 – $\nu_i(\sigma_1 + \sigma_3)$ 产生的变形等价 (由于裂隙这一层与岩块并不相同, ν_i 只是一个比例 系数,与岩块的泊松比并不完全相同)。

因此,考虑侧向应力时,裂隙的法向变形为:

$$u = b_0 (1 - \exp(-\frac{\sigma_2 - v_f(\sigma_1 + \sigma_3)}{u_m k_n}))$$
 (3)

变形后的裂隙开度为:

$$b = b_0 - u$$

= $b_0 - b_0 (1 - \exp(-\frac{\sigma_2 - v_f(\sigma_1 + \sigma_3)}{u_m k_n}))$
= $b_0 \exp(-\frac{\sigma_2 - v_f(\sigma_1 + \sigma_3)}{u_m k_n})$ (4)

当裂隙中有水流动时,从有效应力方面考虑有:

$$b = b_0 \exp(-\frac{(\sigma_2 - \alpha p) - v_f(\sigma_1 + \sigma_3)}{u_m k_n})$$

$$= b_0 \exp\left(-\frac{(\sigma_2 - v_f(\sigma_1 + \sigma_3) - \alpha p)}{u_m k_n}\right) \quad (5)$$

(用于裂隙开度相对岩块很薄,且认为岩块不能渗透, 故式中 σ₁、σ₃方向有效应力不用减去裂隙水压力。)

对于天然粗糙裂隙,Barton¹¹¹采用裂隙粗糙度系数对裂隙开度进行了修正,等效水开度:

$$b_{\rm h} = b^2 / JRC^{2.5} \tag{6}$$

当裂隙没有充填物时,渗透系数有如下表达式:

$$K_{\rm f} = \frac{g b_{\rm h}^2}{12\nu} \tag{7}$$

因此,有裂隙渗透系数:

$$K_{\rm f} = \frac{g b_{\rm h}^2}{12\nu}$$

= $\frac{g b_{\rm 0}^4}{12\nu (JRC)^5} \exp(-\frac{4(\sigma_2 - \nu_{\rm f}(\sigma_1 + \sigma_3) - \alpha p)}{u_{\rm m} k_{\rm n}})$
= $K_0 \exp(-\frac{4(\sigma_2 - \nu_{\rm f}(\sigma_1 + \sigma_3) - \alpha p)}{u_{\rm m} k_{\rm n}})$ (8)

实际试验中很难测量裂隙厚度,而是测量流量变化。这样流量为:

$$Q = K_{f}JWb_{h}$$

$$= K_{0}\exp(-\frac{4(\sigma_{2} - \nu_{f}(\sigma_{1} + \sigma_{3}) - \alpha p)}{u_{m}k_{n}})\frac{b^{2}}{JRC^{2.5}}JW$$

$$= K_{0}\exp(-\frac{6(\sigma_{2} - \nu_{f}(\sigma_{1} + \sigma_{3}) - \alpha p)}{u_{m}k_{n}})\frac{b_{0}^{2}}{JRC^{2.5}}JW$$

$$= Q_{0}\exp(-\frac{6(\sigma_{2} - \nu_{f}(\sigma_{1} + \sigma_{3}) - \alpha p)}{u_{m}k_{n}}) (9)$$

再考虑裂隙充填物对渗透性的影响。当裂隙充填 物较多 L_2 相对于 $L_1 \ L_3$ 大很多时 ,可以不考虑裂隙两 壁面起伏的影响。充填物的应力状态显然不同于裂隙 岩体整体的应力状态 ,假设其有效应力的主应力分别 为 $\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3$,并且方向分别与 $\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3$ 的方向相 同。显然有:

$$\sigma_2' = \sigma_2 - \alpha p \tag{10}$$

式中: α——biot 系数;

p----裂隙水压力。

相对于岩体,裂隙开度很薄,充填物侧向变形跟岩 块的侧向变形基本上相同^[5],因此可以假设充填物的 侧向应变与岩块的一致,即:

$$\varepsilon_{1} = \frac{1}{E_{r}} [\sigma_{1} - \nu_{r} (\sigma_{2} + \sigma_{3})]$$

$$\varepsilon_{3} = \frac{1}{E_{r}} [\sigma_{3} - \nu_{r} (\sigma_{2} + \sigma_{1})]$$
(11)

另一方面有:

$$\varepsilon_{1} = \frac{1}{E} \left[\sigma_{1}^{\prime} - \nu_{s} (\sigma_{2}^{\prime} + \sigma_{3}^{\prime}) \right]$$
$$\varepsilon_{3} = \frac{1}{E} \left[\sigma_{3}^{\prime} - \nu_{s} (\sigma_{2}^{\prime} + \sigma_{1}^{\prime}) \right]$$

把上面两组式子各自相加 经过整理后可得:

$$\sigma_{1}' + \sigma_{3}' = \frac{E(1 - \nu_{r})}{E_{r}(1 - \nu_{s})} (\sigma_{1} + \sigma_{3}) + \frac{2\nu_{s}E_{r} - 2\nu_{r}E}{E_{r}(1 - \nu_{s})} \sigma_{2} - \frac{2\alpha\nu_{s}}{1 - \nu_{s}} p \qquad (12)$$

因此平均有效应力:

$$\Theta = (\sigma_{1}^{\prime} + \sigma_{2}^{\prime} + \sigma_{3}^{\prime}) / 3$$

$$= \frac{E(1 - \nu_{r})}{3E_{r}(1 - \nu_{s})} (\sigma_{1} + \sigma_{3}) + \frac{(1 + \nu_{s})E_{r} - 2\nu_{r}E}{3E_{r}(1 - \nu_{s})} \sigma_{2} - \frac{\alpha(\nu_{s} + 1)}{3(1 - \nu_{s})} p \quad (13)$$

孔隙渗流 ,岩石的渗透性与平均有效应力呈负指 数关系^[12] 因此有:

$$K_{t} = K_{0} \exp(-\beta \Theta)$$

= $K_{0} \exp(-\frac{E(1-\nu_{r})\beta}{3E_{r}(1-\nu_{s})}(\sigma_{1} + \sigma_{3}) - \frac{(1+\nu_{s})E_{r} - 2\nu_{r}E}{3E_{r}(1-\nu_{s})}\beta\sigma_{2} + \frac{\alpha(\nu_{s} + 1)}{3(1-\nu_{s})}\beta p) (14)$

(8) 式和(14) 式分别为三维应力作用下裂隙无充 填物和裂隙有较多充填物时裂隙渗透性演化表达式。

当裂隙没有充填物时,可以认为 ν_r 为岩石的泊松 比 ν_r ,从式(8)可以看出侧向应力没有法向应力对渗 透性的影响大。当裂隙有较多充填物时,考虑到泊松 比在 0~0.5之间,而岩石弹性模量 E_r ,远大于充填物 弹性模量 E_r 从式(14)也可以得出法向应力对渗透性 的影响比侧向应力对渗透性的影响大。这与文献[6] 的结论一致。

实际上裂隙可能没有充填物,也可能充填物很少, 也可能充填物很多。上面两种情况是在没有充填物和 充填物很多的两种极端情况下分别推导出来的,两个 表达式在形式上是一致的。很多时候是处于这两种情 况之间,可以认为应力作用下渗透性表达式也具有上 面的形式。因此可以统一表达为如下关系式:

 $K = K_0 \exp(-a\sigma_2 + b(\sigma_1 + \sigma_3) + cp)$ (15) 式中 $a \cdot c$ 为大于零的正数 b 可以为正数 b 也可为负数 ,取决于实际裂隙充填物情况、裂隙壁面磨损情况。

一般情况下,试验中不方便测量裂隙宽度,一般测量流量,由于裂隙宽度变化的表达式(5)与上形式类 (4),因此流量的表达式也具有类似形式。无充填情况 下裂隙流量公式(9)证明了这点,当有裂隙充填时公 式太复杂,此处不再列出。有较多充填时,考虑到裂隙 开度的变化,测量的流量不一定随侧向应力而减小,这 与充填物性质有关。

上面的分析都是在裂隙壁面形态不改变的情况下 进行的。实际上当法向应力水平较高、裂隙壁面容易 磨损、侧向应力的作用下,裂隙局部剪切应力可以剪断 壁面某些突起,形成细小颗粒充填物。一方面,壁面突 起的磨损减小了裂隙开度;另一方面细小颗粒减少了 裂隙的过流通道。显然,随着侧向应力的增加,这种磨 损是越来越少的。因此随着侧向应力的增加,壁面磨 损造成裂隙渗透性减小,而且减小的幅度也是减小的。 负指数函数满足这种性质。因此把这种因素对裂隙渗 透性的影响表示成侧向应力的负指数形式是合适的。 这样,式(15)的形式在考虑侧向应力作用下裂隙壁面 的磨损时也是适用的。

试验中之所以出现矛盾的结果,是由于有的试验 中裂隙基本没有或者少有充填物,渗透性随侧向应力 而增加;有些在试验过程中裂隙局部剪切产生细小的 充填物,这种因素造成渗透性随侧向应力而减小。综 合两种因素,可能出现渗透性随侧向应力的增加而减 小。以前的研究者没有区分这两种情况,出现矛盾的 结论其实是在不同试验情况下的结果,不能用任何一 种情况代替另一种情况。

2 试验验证

用推导的公式对其他研究者的试验结果进行拟 合。由于篇幅限制只给出其中一些试验的拟合结果。

当只改变应力或裂隙水压力中一个变量,而其他 应力不变时,渗透性的变化也为指数形式:

 $K = K_0 \exp(f\sigma) \quad \Pi K = K_0 \exp(f'p) \quad (16)$

利用式(16)对试验结果进行拟合。图 2 和图 3 的试验数据来自曾亿山的试验成果^[7]。图 2 是文献 [7]中情况一(侧向应力不变,改变法向应力)的结果。 图 3 是情况二(法向应力不变,改变侧向应力)的结 果。图 4 和图 5 的数据来自赵阳升的试验成果^[5]。图 4 是煤岩裂隙在一个侧压力和法向应力 5 MPa 的情况 下的结果。图 5 是石灰岩裂隙轴压 12 MPa,另一个侧 压和法向压力 8 MPa 的结果。从图 2 ~ 图 5 可以看出 拟合结果都比较好。从图 2 可以看出裂隙流量(渗透 性)随法向应力的增加而减小,且呈负指数关系。图 3 中裂隙流量(渗透性)随侧向应力的增加而增加,图 4 中裂隙导水系数(渗透性)随侧向应力的增加而减小。 这是因为图 3 裂隙中基本没有细小颗粒填充,而图 4 中应力水平较高,且煤岩裂隙比石灰岩更容易被局部 剪切应力磨损,变形过程中裂隙中形成了细小颗粒填 充。从前面的理论分析来看,这样就可能造成不同的 结果。图 5 中裂隙导水系数(渗透性)随裂隙水压力 的增加而增加。这些都与上文推导比较符合。

从图 2 和图 3 中的数据看,当法向应力从 0 变到 3MPa 时,渗透性不到原来的 1/4,而侧向应力从 0 变 到 3MPa 时,渗透性不到原来的 2 倍。说明法向应力 对渗透性的影响比侧向应力大,这与前面的理论分析 结果是一致的。

由于目前还没有裂隙充填物较多时渗透性的试验 数据 ,我们还无法对此种情况进行验证。



图 2 裂隙流量随法向应力变化





图 3 裂隙流量随侧向应力增加

Fig. 3 Change in fracture flux with lateral stress

3 结论

(1)裂隙侧向应力对裂隙的渗透性存在重要的影响,但没有法向应力的影响大。

(2)不同试验者发现裂隙渗透性随侧向应力相反的变化规律看似矛盾,其实是不同裂隙情况的反映。 当裂隙没有充填物或充填物很少的时候,裂隙渗透性 随侧向应力的增加而呈指数增加。当裂隙壁面磨损时,裂隙渗透性可能随侧向应力的增加而而以的。



coefficient with pore pressure

(3)裂隙渗透性随法向应力的增加而呈负指数减小 随裂隙水压力而呈指数增加。

参考文献:

- [1] 王媛. 单裂隙面渗流与应力的耦合特性[J]. 岩石 力学与工程学报,2002,21(1):83 - 87. [WANG Y. Coupling characteristic of stress and fluid flow within a single fracture [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002,21(2):83-87. (in Chinese)]
- [2] 耿克勤,陈凤翔,刘光廷,等. 岩体裂隙渗流水力特性的实验研究[J]. 清华大学学报:自然科学版, 1996,36(1):102-106. [GENG K Q, CHEN F X, LIU G T, et al. Experimental research of hydraulic properties of seepage flow in fracture [J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 1996, 36(1):102 - 106. (in Chinese))
- [3] 蒋宇静,王刚,李博,等. 岩石节理剪切渗流耦合试验及分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26 (11):2253-2259. [JIANG Y J, WANG G, LI B, et al. Experimental study and analysis of shear-flow coupling behaviors of rock joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(11):

2253 - 2259. (in Chinese)]

- [4] 孔亮,王媛. 剪切荷载对裂隙渗透性影响研究现状
 [J]. 河海大学学报:自然科学版 2007,35(1):42 -46. [KONG L, WANG Y. Influence of shear loads on fissure permeability [J]. Journal of Hohao Unversity: Natural Sciences, 2007,35(1):42-46. (in Chinese)]
- [5] 常宗旭,赵阳升,胡耀青,等. 裂隙岩体与三维应力 耦合的理论与实验研究[J]. 岩石力学与工程学 报,2004,23(增2):4907-4911. [CHANG Z X, ZHAO Y S, HU Y Q, et al. Theoretic and experimental studies of the coupling of seepage flow and 3D stresses in fractured rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(supp.2): 4907-4911. (in Chinese)]
- [6] 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[J]. 岩石力学与 工程学报,2004,23(4):620-624. [CHANG Z X, ZHAO Y S, HU Y Q, et al. Theoretic and experimental studies on seepage law of single fracture under 3D stresses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(4): 620-624. (in Chinese)]
- [7] 曾亿山,卢德唐,曾清红,等. 单裂隙流 固耦合渗流的试验研究[J]. 实验力学,2005,20(1):10 16. [ZENG Y S, LU D T, ZENG Q H, et al. Experimental study on coupling of flow-stress within a single fracture [J]. Journal of experimental

mechanics , 2005 , 20(1): 10 - 16. (in Chinese)]

- [8] 刘才华,刘从新. 三轴应力作用下岩石单裂隙的渗流特性[J]. 自然科学进展,2007,17(7): 989 994.
 [LIU C H, LIU C X. Rock single fracture seepage property under triaxial stress[J]. Progress in Natural Science, 2007, 17(7): 989 994. (in Chinese)]
- [9] 李新平,米健,米成良,等. 三维应力作用下岩体单 个裂隙的渗流特性分析[J]. 岩土力学,2006,27 (增):13-16. [LI X P, MI J, ZHANG C L, et al. Analysis of seepage characteristics of rock masses with a single joint under 3D stresses [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (supp.): 13 - 16. (in Chinese)]
- [10] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京:科学出版社, 1988. [SUN G Z. Rock Mass Structural Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1988. (in Chinese)]
- [11] Barton N , Bandis S , Bakhtar K. Strength , deformation and conducitivity coupling of rock joints. Inte J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr , 1985 , 22(3): 121 – 140.
- [12] 叶源新,刘光廷. 三维应力作用下砂砾岩孔隙型渗流[J]. 清华大学学报:自然科学版,2007,47(3): 335-339. [YE Y X, LIU G T. Porous seepage in calcirudite rock with 3 - D stresses [J]. J Tsinghua Univ: Sci & Tech, 2007,47(3): 335-339. (in Chinese)]

Effect of lateral stress on rock fracture permeability

HAN Guo-feng , WANG En-zhi , LIU Xiao-li

(State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: There are contradiction conclusions from different experimenter of the influence of lateral stress on rock fracture permeability. The reason for this is that the lateral stress has multi-aspect influences on a fracture. The lateral stress may cause crack opening increase , fracture wall attrition and filing compression. All of these have different influences on the fracture permeability. Expression of the influences of three-dimensional stress on the fracture permeability has been established according to whether the filing material exists. The fracture permeability has an exponential relation with the lateral stress when filing material does not exist , and it has a negative exponential relation when there is plenty of filing material. We unify those two cases in the form of an exponential form , and consider that the exponential form is also suitable when a little filing material or the fracture wall attrition exists. Other experimenter's test results have been used to verify our conclusions , and reasonable fitting is obtained.

Key words: rock fracture; permeability; lateral stress

责任编辑:张明霞