

天然地应力作用下不同产状岩体裂隙渗流特性研究

魏海, 杨升友, 张国辉, 雷红军, 许军才, 张志雄

A study of the permeability of fractures with variable attitude in rock mass subjected to natural crustal stresses

WEI Hai, YANG Shengyou, ZHANG Guohui, LEI Hongjun, XU Juncai, and ZHANG Zhixiong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202111080>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

裂隙延展性统计分布离散性对岩体块体化程度REV的影响

Influence of statistical distribution dispersion in the fracture size on blockiness REV of fractured rock masses

夏露, 谢娟, 于青春 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 112-118

共和盆地干热岩体人工裂隙带结构的控热机理与产能优化

Heat control mechanism and productivity optimization of artificial fracture zone structure of dry hot rock in Gonghe Basin

陈炫沂, 姜振蛟, 徐含英, 冯波 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 191-199

节理分布位置对岩体剪切破裂特征影响试验研究

An experimental study of the influence of discontinuous structural planes at different locations on the shear fracture characteristics of rock mass

郭朋瑜, 吉锋, 何双, 胡如刚, 梁德爽, 易林立, 蒋彦如 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 81-81

基于相关指标的裂隙岩体渗透系数估算模型研究

A model for estimating hydraulic conductivity of fractured rock mass based on correlation indexes

王玮, 钱家忠, 马雷, 王德健, 马海春, 赵卫东 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 82-89

利用电导率测井与压水试验联合评价岩体渗透性的方法

Method of evaluating the permeability of rock mass by the combination of packer test and flowing fluid electrical conductivity log

张必昌, 胡成, 陈刚, 张, 段丹丹 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 62-62

基于非均质系数的裂隙岩体表征单元体研究

Investigation of the representative elementary volume of fractured rock mass using the homogeneity index

王晓明, 杜玉芳, 梁旭黎 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 55-60



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202111080

魏海, 杨升友, 张国辉, 等. 天然地应力作用下不同产状岩体裂隙渗流特性研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 54-62.
WEI Hai, YANG Shengyou, ZHANG Guohui, *et al.* A study of the permeability of fractures with variable attitude in rock mass subjected to natural crustal stresses[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 54-62.

天然地应力作用下不同产状岩体裂隙渗流特性研究

魏海¹, 杨升友¹, 张国辉¹, 雷红军¹, 许军才², 张志雄¹

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 云南昆明 650500;

2. 凯斯西储大学, 俄亥俄州克利夫兰 44106)

摘要: 为了研究天然地应力作用下裂隙产状等因素对深部岩体裂隙渗流特性的影响, 基于单裂隙面渗透性服从负指数变化规律, 建立了三维应力作用下不同产状裂隙的渗透系数计算公式, 利用 Lagrange 乘子法分析裂隙面产状变化对其渗透性的影响, 并分析了岩体裂隙有、无充填物对其渗透性的影响及敏感性; 然后, 以我国大陆地区地应力统计规律为例, 分析了地表以下 5 000 m 范围内在天然地应力作用下裂隙渗透性随深度、产状的变化规律。结果表明: 裂隙产状的变化对其渗流特性有明显影响, 对于浅层岩体, 在大主应力大致呈水平方向分布时, 随着裂隙面倾角的增加, 裂隙渗透系数逐渐降低; 但随着深度的增加, 在裂隙深度超过约 200 m 和裂隙面走向与大或中主应力方向大致一致时, 裂隙渗透性反而会随着裂隙面倾角的增加逐渐增加, 在裂隙面走向与小主应力方向垂直时增加最为明显; 对于深部岩体, 裂隙的渗透性很小, 裂隙面产状的变化对其渗透性影响很弱; 对于有充填物裂隙, 岩块与充填物的弹模比和充填物泊松比的变化对裂隙渗透性的影响很小。研究结果可为深入研究我国深部岩体渗透特性变化规律提供借鉴意义。

关键词: 天然地应力; 岩体裂隙; 渗透性; 裂隙面产状; 裂隙充填物

中图分类号: P642.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)02-0054-09

A study of the permeability of fractures with variable attitude in rock mass subjected to natural crustal stresses

WEI Hai¹, YANG Shengyou¹, ZHANG Guohui¹, LEI Hongjun¹, XU Juncai², ZHANG Zhixiong¹

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, 650500, China; 2. Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio 44106, USA)

Abstract: In order to investigate the influence of fracture attitude variation on the permeability of fractures in deep rock mass under natural crustal stresses, based on the permeability law of a single fracture obeying the law of negative exponential change, the theoretical formula of coefficient of permeability of fractures with variable attitude subjected to 3D stresses is proposed. The Lagrange multiplier method is applied to analyze the change of variable attitude on fracture permeability, and influence factors and sensibility of fracture permeability with or without infillings are also analyzed. Statistic law of crustal stress in Chinese mainland is taken as an example, and the variable laws of the permeability of fractures in rock mass with depth and fracture attitude are analyzed. The results show that (1) the permeability of fractures in rock mass is obviously influenced by the attitude of fractures. For shallow rock mass, under the condition of the maximum principle stress distribution in the horizontal

收稿日期: 2021-10-28; 修订日期: 2022-04-28

投稿网址: www.swdgedz.com

第一作者: 魏海(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要从事水工结构和岩土工程方面的研究。E-mail: weihai2005@126.com

通讯作者: 张国辉(1988-), 男, 博士, 副教授, 主要从事水工混凝土方面的研究。E-mail: 466541011@qq.com

direction, the permeability of fractures gradually decreases with the increasing dip angle of fractures; but with the increasing depth, when the depth is more than 200 m and the strike of fracture is roughly consistent with the direction of large or medium principal stress, the permeability of fractures can increase with the increasing dip angle of fractures, especially the strike of fractures perpendicular to the direction of the minimum principle stress. For deep rock mass, the permeability of fracture is very weak, and the impact of fracture attitude change on its permeability is very slight. (2) For fractures with infillings, the change of elastic modulus ratio of rock block to infillings and Poisson's ratio of infillings have little effect on fracture permeability. The conclusions can be used for reference for further investigating the variation of deep rock permeability characteristics.

Keywords: natural crustal stress; fracture in rock mass; permeability; attitude of fracture; fracture infilling

裂隙岩体的渗流特性是地下工程研究的热点问题之一,大量地下结构的稳定问题都与岩体渗流有关。随着大型水利水电工程、深部采矿工程、核废料处置等工程的实施,越来越多的工程涉及到深部岩体渗透性问题。深部岩体的渗流过程不但与岩体、裂隙本身特性有关,而且与岩体的天然地应力有关。根据对单裂隙的渗流特性研究,裂隙渗流量与裂隙开度的立方成正比,即服从立方定律^[1]。Gan等^[2]通过试验研究了裂隙开度、渗透系数、水力梯度、水温等因素对单裂隙渗透规律的影响。Zhou等^[3]通过试验研究了周期荷载的频率和振幅的变化对单裂隙岩体渗透性的影响,认为随着循环荷载频率的增加,裂隙岩体渗透系数先降低然后升高。

单裂隙模型是研究岩体裂隙渗流特性的基础,但只能考虑裂隙面法向应力,应用局限性较大,因此广大学者开展了三维应力作用下裂隙的渗流特性研究。常宗旭等^[4]基于单裂隙渗流模型,从理论出发经过合理的推演,并结合试验认为侧向应力对裂隙岩体渗流影响较大,裂隙渗透系数符合负指数变化规律。韩国锋等^[4]研究了侧向应力对裂隙渗透性的影响,建立了侧向应力作用下的裂隙渗透性与三维应力的耦合模型。刘才华等^[5]通过理论分析建立了三轴应力作用下岩体单裂隙渗流模型,表明裂隙渗透系数随法向应力的增加而减小,裂隙渗透系数与三轴应力呈指数函数关系。Zhao等^[6]建立了三维应力作用下的裂隙岩体渗透系数计算公式。

岩体裂隙的渗流过程十分复杂,不仅会涉及到非达西流,而且会涉及渗流-应力耦合、裂隙网络的展布等问题^[7],很难通过理论分析来实现。一些学者基于试验、岩体应变分析、裂隙网络技术对裂隙的渗流特性展开研究。金爱兵等^[8]给出了单一节理面等效水力张开度-应变理论公式和单节理面渗透系数计算公式。侯昭飞等^[9]通过电液伺服岩石三轴试验机,开展

单裂隙渗流应力耦合试验,得出了裂隙渗流量随围压、水压的变化规律。Huo等^[10]采用室内岩芯渗流实验,研究了不同有效应力状态下裂缝中氮-水混合物的相对渗透率。Latham等^[11]结合有限元和离散元法模拟裂隙岩体,同时模拟裂隙的张开、闭合、剪切过程,并分析应力作用下裂隙的扩展、弯曲效应对裂隙张开度以及渗透性的影响。Baghbanan等^[12]首先建立了裂隙法向变形与裂隙开度和裂隙长度的关系,然后通过数值试验分析裂隙开度、长度、应力状态、表征单元体积对裂隙岩体渗透系数张量的影响。Ma等^[13]通过试验研究裂隙岩体的非达西流特性,并建立非达西流渗透系数与围压的关系。Rutqvist^[14]认为裂隙岩体渗透系数不但受应力影响,而且受温度影响也较大,并通过室内和现场试验分析了裂隙岩体渗透系数受应力、温度的影响。

这些研究大多假设裂隙面为竖直面、水平面或一个斜面,没有考虑裂隙产状的变化对裂隙岩体渗透性的影响。同时,为了研究方便,文献[1,4,8]假设中主应力或某一主应力与裂隙面法向一致,同时在该方向引入孔隙水压力,这也与实际情况不相吻合。本文在前人的基础上,从单裂隙渗透性入手,分析不同产状裂隙面上的应力状态,研究三维应力作用下裂隙产状、弹性模量、泊松比等参数对裂隙渗流特性的影响及其敏感性,为深入研究深部岩体渗透性提供借鉴。

1 三维应力对无充填物岩体裂隙渗流特性的影响

某单一裂隙岩体渗流模型如图1所示。单条裂隙渗透系数(k_f)的大小与裂隙法向初始开度、裂隙面粗糙度系数、裂隙面法向应力、裂隙面法向刚度等因素有关,可表示为^[1,4,8]:

$$k_f = \frac{gb_0^4}{12\nu JRC^5} e^{\left(\frac{-4\sigma_n}{u_m k_n}\right)} \quad (1)$$

式中: g ——重力加速度/($m \cdot s^{-2}$);
 ν ——流体的运动粘滞系数/($m^2 \cdot s^{-1}$);
 JRC ——裂隙面粗糙度系数;
 b_0 ——裂隙的初始开度/m;
 u_m ——裂隙最大法向闭合量/m;
 k_n ——裂隙面法向刚度/($Pa \cdot m^{-1}$);
 σ_n ——裂隙面的法向应力/Pa。

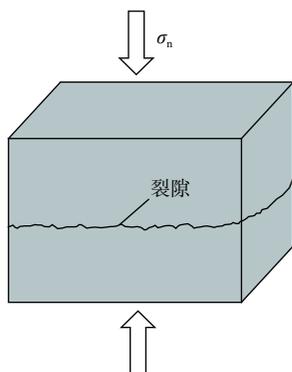


图 1 单一裂隙模型
 Fig. 1 Single fracture model

上式可改写为:

$$k_f = k_{f0} \exp\left(-\frac{4\sigma_n}{u_m k_n}\right) \quad (2)$$

式中: k_{f0} ——岩体裂隙的初始渗透系数, $k_{f0} = \frac{gb_0^4}{12\nu JRC^5}$ 。

由式(2)可知,裂隙渗透系数与法向应力呈负指数变化关系, σ_n 越大 k_f 越小。式(2)是基于一维应力条件下推导出的理论公式,因此,只适用于应力与裂隙面垂直的情况。一般来说,岩体中地应力分布复杂,裂隙面上应力大多不与裂隙面垂直,需要分析三维应力作用下裂隙面上的应力状态。

如图 2 所示,在三维空间应力作用下,裂隙面上法向应力 σ_n 可通过空间斜截面上的法向应力得到:

$$\sigma_n = \sigma_x l^2 + \sigma_y m^2 + \sigma_z n^2 + 2\tau_{xy} lm + 2\tau_{xz} nl + 2\tau_{yz} mn \quad (3)$$

式中: l, m, n ——裂隙面法向的方向余弦。

显然,

$$l^2 + m^2 + n^2 = 1 \quad (4)$$

将式(3)带入式(2),可得:

$$k_f = k_{f0} \exp\left[-\frac{4}{u_m k_n}(\sigma_x l^2 + \sigma_y m^2 + \sigma_z n^2 + 2\tau_{xy} lm + 2\tau_{xz} nl + 2\tau_{yz} mn)\right] \quad (5)$$

当裂隙面法向取 (0,1,0) 时,即可得到文献 [1, 4, 8] 类似的公式。

由式(3)可知 σ_n 的大小与裂隙面的产状有关,因

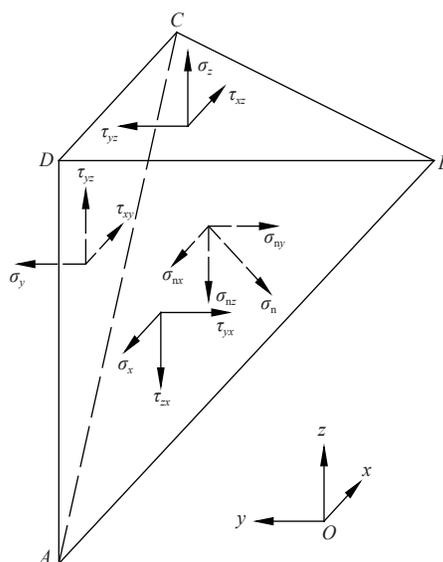


图 2 微六面体斜截面应力

Fig. 2 Stress state on the inclined plane of hexahedron element

此裂隙面产状的变化也会影响到裂隙面的渗流特性。显然,由式(2)可知,当 σ_n 取极值时 k_f 也将达到其极值。

下面应用 Lagrange 乘子法,求 σ_n 的极值。若某处应力状态不变,构造辅助函数 $F(l, m, n)$:

$$F(l, m, n) = \sigma_x l^2 + \sigma_y m^2 + \sigma_z n^2 + 2\tau_{xy} lm + 2\tau_{xz} nl + 2\tau_{yz} mn + \lambda(l^2 + m^2 + n^2 - 1) \quad (6)$$

求函数 $F(l, m, n)$ 关于 l, m, n 的偏导数:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial l} &= 2\sigma_x l + 2\tau_{xy} m + 2\tau_{xz} n + 2\lambda l = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial m} &= 2\sigma_y m + 2\tau_{xy} l + 2\tau_{yz} n + 2\lambda m = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial n} &= 2\sigma_z n + 2\tau_{xz} l + 2\tau_{yz} m + 2\lambda n = 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

整理可得:

$$\left. \begin{aligned} (\sigma_x + \lambda)l + \tau_{xy} m + \tau_{xz} n &= 0 \\ \tau_{xy} l + (\sigma_y + \lambda)m + \tau_{yz} n &= 0 \\ \tau_{xz} l + \tau_{yz} m + (\sigma_z + \lambda)n &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

写成矩阵形式有:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x + \lambda & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y + \lambda & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z + \lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

显然方程(9)的解 $(l, m, n)^T$ 就是裂隙应力张量 σ_{ij} 的特征向量。因此空间裂隙面上法向应力 σ_n 的极值问题转化为求 σ_{ij} 的特征值和特征向量问题。由于应力张量 σ_{ij} 存在主应力方向,因此应力张量 σ_{ij} 与对角阵相似,其特征值为 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 。 σ_1, σ_3 对应的特征向量分别为 $r_1=(l_1, m_1, n_1)^T, r_3=(l_3, m_3, n_3)^T$,显然 r_1 与 r_3 相互垂直。若在其它条件保持相同的条件下,当裂隙面法

向与 r_1 一致时,裂隙面法向应力 σ_n 达最大值 σ_1 ,此时裂隙渗透系数 k_f 最小;同理当裂隙面法向与 r_3 一致时,裂隙面法向应力 σ_n 取最小值 σ_3 ,此时裂隙渗透系数 k_f 最大。这也说明裂隙面的产状对其渗透系数有一定的影响。

若考虑裂隙内裂隙水压力的影响,则:

$$\sigma_n^* = \sigma_n - \alpha p \quad (10)$$

式中: σ_n^* ——裂隙面的有效应力/Pa;

α ——孔隙水压力系数;

p ——裂隙的孔隙水压力/Pa。

下面对 k_f 的敏感性进行分析。分别对 σ_n 和 $u_m k_n$ 求导,可得:

$$\frac{\partial k_f}{\partial \sigma_n} = k_0 \exp\left(-\frac{4\sigma_n}{u_m k_n}\right) \frac{-4}{u_m k_n} \quad (11)$$

$$\frac{\partial k_f}{\partial (u_m k_n)} = k_0 \exp\left(-\frac{4\sigma_n}{u_m k_n}\right) \frac{4\sigma_n}{(u_m k_n)^2} \quad (12)$$

由式(11)可以看出, k_f 随 σ_n 呈相反变化趋势,即随着 σ_n 的增加, k_f 逐渐减小;由式(12)可以看出, k_f 随 $u_m k_n$ 一致变化趋势,即随着 $u_m k_n$ 的增加, k_f 也逐渐增加,但随着 $u_m k_n$ 的不断增加, k_f 的增幅逐渐降低。在大多数情况下 $\frac{4}{u_m k_n}$ 较 $\frac{4\sigma_n}{(u_m k_n)^2}$ 取值要小,因此 k_f 对 $u_m k_n$ 更为敏感。

2 三维应力对有充填物岩体裂隙渗流特性的影响

当裂隙有充填物(如断层泥)时,充填物的应力状态显然不同于裂隙岩体整体的应力状态。由于裂隙开度相对于两侧岩体尺寸而言很小,因此,可假设充填物在裂隙面法向方向的变形一致,并且与两侧接触的岩块保持变形协调^[4],于是在裂隙面上充填物和两侧岩块的总应变相等,即:

$$\varepsilon'_a + \varepsilon'_b = \varepsilon_a + \varepsilon_b \quad (13)$$

式中: ε'_a 、 ε'_b ——充填物在裂隙面上相互垂直坐标轴方向的应变;

ε_a 、 ε_b ——两侧岩块在相互垂直坐标轴方向的应变。

两侧岩块与充填物的法向应力满足

$$\sigma_n = \sigma_n - \alpha p \quad (14)$$

式中: σ'_n 、 σ_n ——充填物、两侧岩块在裂隙法向上的

$$k'_f = k_{f0} \exp\left\{\frac{-\beta E_s(1-\nu_r)}{3E_r(1-\nu_s)}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) - \frac{\beta E_r(1+\nu_s) - \beta E_s(1+\nu_r)}{3E_r(1-\nu_s)}(l^2\sigma_x + m^2\sigma_y + n^2\sigma_z) + \frac{\alpha\beta(1+\nu_s)}{3(1-\nu_s)}p\right\} \quad (21)$$

式(21)即为在三维应力作用下,考虑裂隙面产状

应力/Pa。

对于裂隙软弱充填物,裂隙面的剪应力大小、分布复杂,这里暂不予考虑,将式(3)带入上式可得:

$$\sigma'_x l^2 + \sigma'_y m^2 + \sigma'_z n^2 = \sigma_x l^2 + \sigma_y m^2 + \sigma_z n^2 - \alpha p \quad (15)$$

式中: σ'_x 、 σ'_y 、 σ'_z ——充填物的应力/Pa。

利用 Hooke 定理可得裂隙两侧岩块应变为:

$$\varepsilon_a + \varepsilon_b = \varepsilon_v - \varepsilon_n = \frac{1-\nu_r}{E_r}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) - \frac{1+\nu_r}{E_r}(l^2\sigma_x + m^2\sigma_y + n^2\sigma_z) \quad (16)$$

式中: ε_v 、 ε_n ——岩块体积应变、法向应变;

E_r ——岩块弹性模量/Pa;

ν_r ——岩块泊松比。

同理可得裂隙充填物应变为:

$$\varepsilon'_a + \varepsilon'_b = \varepsilon'_v - \varepsilon'_n = \frac{1-\nu_s}{E_s}(\sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z) - \frac{1+\nu_s}{E_s}(\sigma_x l^2 + \sigma_y m^2 + \sigma_z n^2 - \alpha p) \quad (17)$$

式中: ε'_v 、 ε'_n ——充填物体积应变、法向应变;

E_s ——充填物弹性模量/Pa;

ν_s ——充填物泊松比;

将式(16)(17)带入式(13)可得:

$$\frac{1-\nu_s}{E_s}(\sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z) = \frac{1-\nu_r}{E_r}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) + \frac{E_r(1+\nu_s) - E_s(1+\nu_r)}{E_r E_s}(l^2\sigma_x + m^2\sigma_y + n^2\sigma_z) - \frac{1+\nu_s}{E_s}\alpha p \quad (18)$$

整理式(18)可得考虑裂隙面产状变化的裂隙充填物体积应力为:

$$\sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z = \frac{E_s(1-\nu_r)}{E_r(1-\nu_s)}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) + \frac{E_r(1+\nu_s) - E_s(1+\nu_r)}{E_r(1-\nu_s)}(l^2\sigma_x + m^2\sigma_y + n^2\sigma_z) - \frac{\alpha(1+\nu_s)}{1-\nu_s}p \quad (19)$$

有充填物裂隙渗透系数(k'_f)与平均应力有关,服从负指数关系^[15],即:

$$k'_f = k'_{f0} \exp(-\beta\Theta) \quad (20)$$

式中: β ——应力影响系数;

Θ ——平均应力, $\Theta = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3$ 。

将式(19)带入式(20)可得有充填物裂隙的渗透系数为:

变化的有充填物裂隙渗透系数计算公式。当裂隙面

法向取 (0,1,0) 时, 即可得到文献 [4, 8] 类似的公式。因此, 文献 [4] 中的式 (13)(14) 为式 (19)(21) 的特例。由式 (21) 可以看出, 在三维应力状态不变的条件下, 当裂隙面与大主应力相垂直时, 有充填物裂隙的渗透系数最小; 当裂隙面与小主应力相垂直时, 有充填物裂隙的渗透系数最大。

3 岩体裂隙渗流特性的变化

3.1 天然地应力对岩体裂隙渗流特性的影响

由式 (5) 和式 (21) 可以看出, 裂隙渗透系数受三维应力影响比较大。天然岩体所受应力主要包括: 地应力和附加应力, 附加应力主要是由所建工程引起, 一般只影响地表附近的区域, 随着地下深度的增加, 应力不断扩散, 附近应力的影响逐渐减小。因此, 天然岩体应力主要由地应力构成, 于是这里只考虑地应力对裂隙岩体渗透系数的影响。

我国幅员辽阔, 地质条件差异大, 地应力的分布也比较复杂。广大学者通过大量的地应力实测资料建立了我国大陆地应力的统计分布规律^[16-21], 公式形式基本一致, 差别不大。

(1) 地应力对无充填物裂隙渗透性的影响

假若某地区地应力分布服从景峰等^[17-18]的统计规律, 裂隙岩体地表的渗透系数为 k_0 。地表以下岩体渗透系数受 $u_m k_n$ 影响较大, 文献 [4-5] 的试验数据反演得到的 $u_m k_n = 8.476 \sim 43.220$ MPa, 变化范围较大。下面来反演 $u_m k_n$ 的值, 假设地表下 1 m 岩体的渗透系数 k_{n1} 与 k_0 基本相等, 近似取 $k_{n1} = 0.99k_0$, 根据式 (2) 可得:

$$u_m k_n = \frac{-4\Delta\sigma_n}{\ln(k_{n1}/k_0)} \quad (22)$$

根据景峰等^[17]的地应力统计规律, 竖向应力 $\sigma_v = 0.0263h$, 水平向大主应力 $\sigma_{H1} = 0.024h + 4.9125$, 水平向小主应力 $\sigma_h = 0.018h + 1.5673$, 变量 h 为深度 (该式适用范围大致为地表以下 5 000 m 的范围内), 可得 $h=0$ m 时, $\sigma_v=0$, $\sigma_{H1}=4.9125$ MPa, $\sigma_h=1.5673$ MPa; $h=1$ m 时, $\sigma_v=0.0263$ MPa, $\sigma_{H1}=4.9365$ MPa, $\sigma_h=1.5856$ MPa。

将数据代入式 (22) 可反演出 $u_m k_n = 9.55$ MPa, 在文献 [4-5] 的试验结果范围之内, 基本合理。再利用式 (5) 可得无充填物裂隙渗透系数的相对变化规律。随着深度的增加, 地表以下 5 000 m 范围内无充填物裂隙渗透系数的变化规律如图 3 所示。

由图 3 可知, 随着深度的增加, 裂隙的渗透系数迅速下降, 裂隙产状变化也对裂隙渗透系数产生较大影响。对于中等坚硬程度的岩体, 在深度 1 000 m 时, 裂

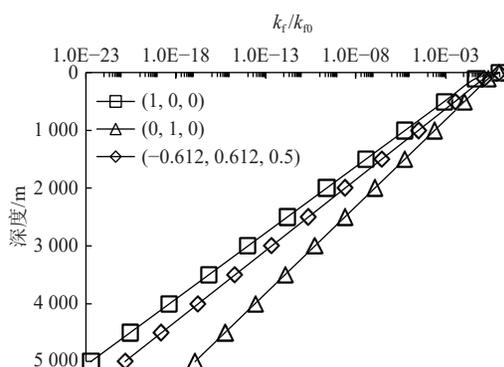


图 3 无充填物裂隙渗透系数随深度的变化
Fig. 3 Variation of coefficient of permeability of fractures without infillings versus depth

隙渗透系数只有地表的万分之一, 说明地应力对裂隙岩体渗透性影响很大, 随着深度的增加这种影响更为明显。

(2) 地应力对有充填物裂隙渗透性的影响

假设岩块 $E_r=50$ GPa, $\nu_r=0.25$, 充填物 $E_s=0.5$ GPa, $\nu_s=0.45$ 。为了分析地应力对有充填物裂隙渗透性的影响, 还需确定应力影响系数 β 。跟反演 $u_m k_n$ 一样, 近似取 $k_{n1} = 0.99k_0$, 再根据式 (20) 可得:

$$\beta = \frac{-\ln(k_{n1}^1/k_0^1)}{\Delta\Theta} \quad (23)$$

由式 (23) 反演 β , 可得 $\beta=0.4488$ 。

由图 4 可知, 随着深度的增加, 裂隙的渗透系数迅速降低。对于中等坚硬程度的岩体, 在深度 1 000 m 时, 有充填物裂隙的渗透系数只有地表的百分之一。再对比图 3 和图 4 发现, 有充填物裂隙的渗透系数下降速率较无充填物裂隙渗透系数的慢, 说明充填物对裂隙渗透系数影响较大。无充填物裂隙渗透性对地应力更为敏感。

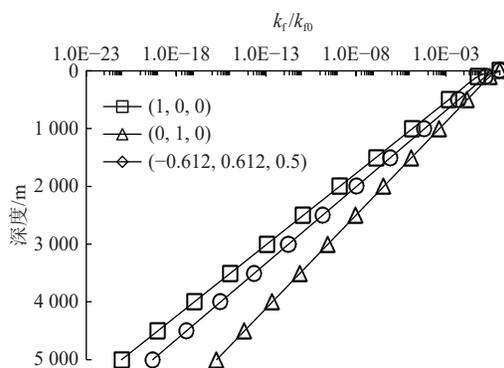


图 4 有充填物裂隙渗透系数随深度的变化
Fig. 4 Variation of coefficient of permeability of fractures with infillings versus depth

3.2 $u_m k_n$ 对无充填物岩体裂隙渗流特性的影响

由式 (5) 可知 $u_m k_n$ 对无充填物裂隙的渗透系数 k_f

影响很大。而 k_n 的取值变化也较大,比较软弱的岩体(如泥质岩) $k_n=100 \sim 500$ MPa/m;半坚硬岩石, $k_n=500 \sim 5\,000$ MPa/m;坚硬岩石, $k_n=500 \sim 40\,000$ MPa/m^[22],因此, $u_m k_n$ 的取值变化范围较大,一般软岩取值较小,硬岩取值较大。这里取 $u_m k_n$ 为 0.30, 0.6, 1.19, 2.39, 4.78, 9.55, 19.10, 38.20, 76.40, 152.80, 305.60 MPa, $u_m k_n$ 对 k_r 的影响如图 5 所示。

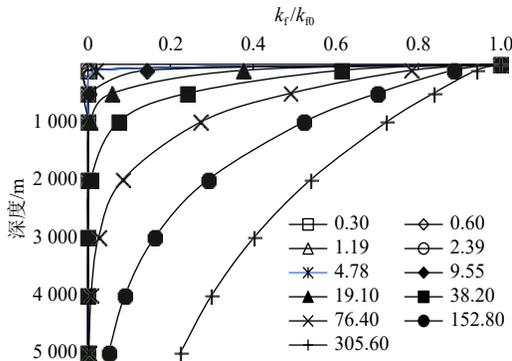


图 5 $u_m k_n$ 对无充填物裂隙渗透性的影响
Fig. 5 Effect of $u_m k_n$ on permeability of fracture without infillings

由图 5 可知, $u_m k_n$ 越小,岩体越软弱,裂隙渗透性随着深度的增加下降很快,透水性变得很差,裂隙的影响深度较小,仅影响浅层岩体;相反, $u_m k_n$ 越大,岩体越坚硬,裂隙渗透性随着深度的增加也逐渐降低,透水性变差,但影响深度较软岩大得多,可达 5 000 m,影响深度很大,这点可从水库诱发地震的实例得到证实。

3.3 E_r 、 E_s 、 ν_r 、 ν_s 对裂隙渗流特性的影响

(1) E_r/E_s 对有充填物裂隙渗透性的影响

取 $E_r/E_s=1, 10, 100, 500, 1\,000$, E_r/E_s 变化对裂隙渗透性的影响如图 6 所示。

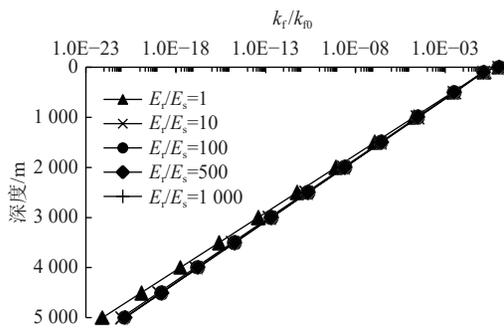


图 6 E_r/E_s 对有充填物裂隙渗透性的影响
Fig. 6 Effect of E_r/E_s on permeability of fracture with infillings

由图 6 可知 E_r/E_s 比值的变化对有充填物裂隙渗透性的影响不大。

(2) ν_s 对裂隙渗透性的影响

取岩体 $\nu_r=0.25$, 裂隙充填物 $\nu_s=0.35, 0.45, 0.65, 0.80, 0.95$, ν_s 变化对裂隙渗透性的影响如图 7 所示。

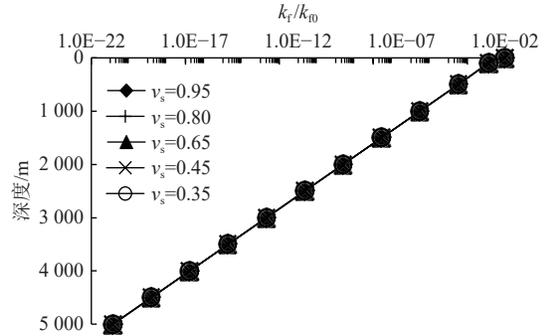


图 7 ν_s 对有充填物裂隙渗透性的影响
Fig. 7 Effect of ν_s on permeability of fracture with infillings

由图 7 可知 ν_s 的变化对有充填物裂隙渗透性的影响也很小。

3.4 裂隙面产状对岩体裂隙渗流特性的影响

为了分析裂隙面产状对裂隙渗透性的影响,倾向分别取为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$, 倾角分别取为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 。

(1) 裂隙面产状对无充填物裂隙渗流特性的影响

裂隙面产状变化对无充填物裂隙渗透性的影响,如图 8 虚线所示。

由图 8 可知,随着裂隙深度的增加,岩体裂隙的渗透系数迅速下降。对于浅层岩体(如深度为 50 m),裂隙面产状变化对裂隙渗透性影响很大,在大主应力大致呈水平方向分布时,随着裂隙面的倾角增加,裂隙渗透系数逐渐降低,降低幅度在 0.4 ~ 0.9;当裂隙面倾向为 0° 或 180° 时降幅较大,当裂隙面倾向为 90° 时降幅较小。这是因为浅层岩体裂隙渗透性受大主应力影响较大,在地表浅层岩体大主应力大致呈水平方向分布,裂隙面越陡,大主应力在裂隙面上产生的垂直压力作用越明显,裂隙面在压力作用下呈闭合趋势,因而渗透性越差。随着深度的增加,当裂隙深度超过约 200 m 以及裂隙面走向与大或中主应力方向大致一致时,裂隙渗透性的变化趋势出现反常,在同一深度裂隙渗透性反而会随着裂隙倾角增加而逐渐增加,这是由于竖向压力随着深度增加迅速增加,竖向压力逐渐向中、大主应力转变,在大主应力和中主应力的挤压作用下,引起裂隙面上的垂直压力减小,导致裂隙的渗透性逐渐增加。这种挤压作用致裂隙呈张开的趋势在裂隙面倾向为 90° (或裂隙走向与小主应力方向垂直) 时最为明显,在深度为 1 000 m 时,大

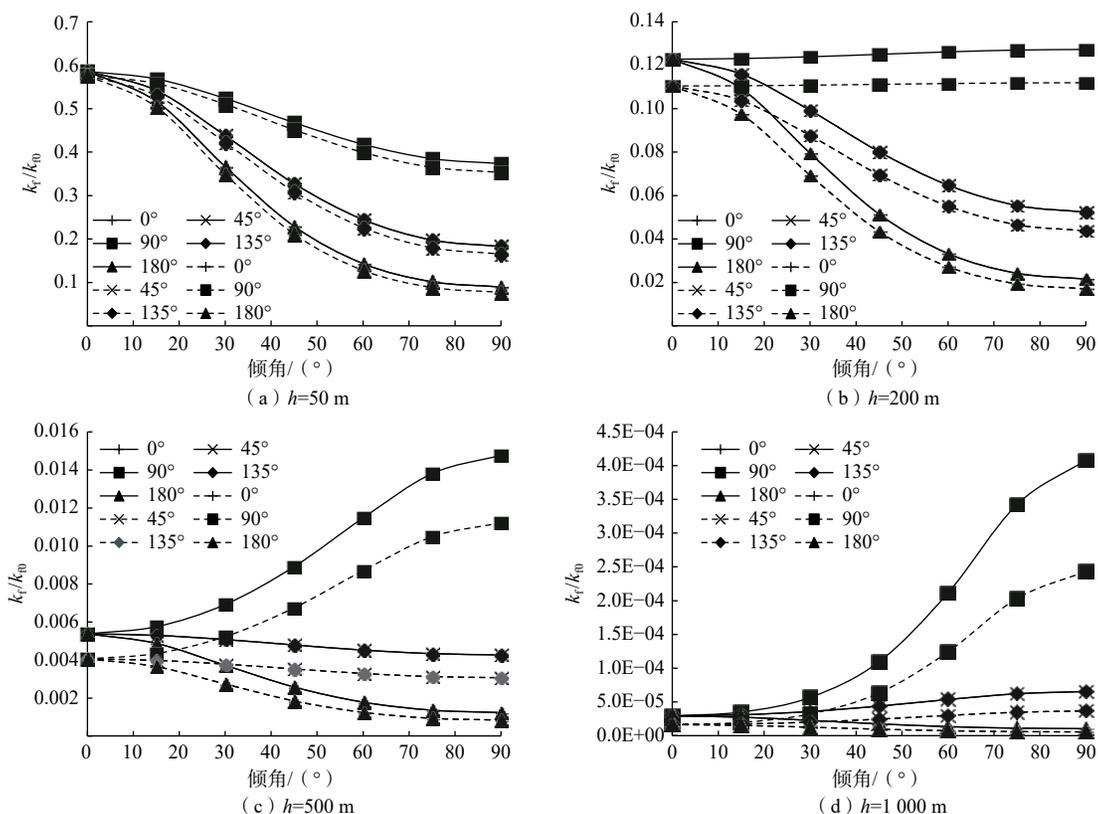


图 8 无充填物裂隙和有充填物裂隙渗透性随裂隙面产状的变化

Fig. 8 Variation of permeability of fractures without or with infillings versus attitude of fractures

注: 图中实线和虚线分别代表有充填物和无充填物裂隙渗透性的变化。

倾向裂隙的渗透性较低倾向裂隙的渗透性可提高约 10 倍。尽管如此, 深部岩体裂隙的渗透性还是很低, 裂隙的渗透性仅为地表的千分之一~十万分之一, 倾向和走向的变化对裂隙的渗透性影响很弱。裂隙面的走向也会影响到裂隙面的渗透性, 裂隙面的走向变化会影响法向应力的大小, 当裂隙面走向与小主应力一致时, 大主应力与裂隙面近似垂直, 垂直压力作用越明显, 因而裂隙的渗透性越低; 反之, 当裂隙面与大主应力一致时, 小主应力与裂隙面近似垂直, 垂直压力作用越弱, 因而裂隙的渗透性越大。

(2) 裂隙面产状对有充填物裂隙渗流特性的影响

裂隙面产状变化对有充填物裂隙渗透性的影响, 如图 8 实线所示。由图 8 可知, 裂隙面产状的变化对有充填物裂隙渗透性影响趋势与无充填物裂隙岩体基本一致。在相同深度, 产状变化对有充填物裂隙的相对渗透性的影响略大一些, 这种变化趋势在地表浅层岩体中更为明显。

4 结论

(1) 岩性对岩体裂隙渗透性影响很大。岩体越坚

硬, 裂隙影响的深度越深。对于中等坚硬程度的岩体, 在深度 1 000 m 时, 随着地应力的增加, 裂隙渗透系数只有地表的万分之一。对于软弱岩体, 在岩体深部, 裂隙对岩体渗透性的影响很弱。有充填物裂隙的渗透系数下降速率较无充填物裂隙渗透系数的慢, 对于中等坚硬程度的岩体, 二者之比约为 10^{-2} 。无充填物裂隙渗透性对地应力更为敏感。

(2) 对于有充填物裂隙, E_f/E_s 比值的变化对有充填物裂隙渗透性的影响不大, v_s 的变化对有充填物裂隙渗透性的影响很小。

(3) 对于浅层岩体, 在大主应力大致呈水平方向分布时, 随着裂隙面的倾角增加, 裂隙渗透系数逐渐降低; 随着深度的增加, 当裂隙深度超过约 200 m 以及裂隙面走向与大或中主应力方向大致一致时, 裂隙渗透性的变化趋势出现反常, 在同一深度裂隙渗透性反而会随着裂隙倾角增加逐渐增加, 这种由大、中主应力的挤压作用致裂隙呈张开的趋势在裂隙面倾向为 90° (或裂隙走向与小主应力方向垂直) 时最为明显; 对于深部岩体, 随着深度的增加, 裂隙的渗透性逐渐降低, 在 500~1 000 m 深度, 裂隙的渗透性仅为地表的千分

之一~十万分之一,倾角和走向的变化对裂隙的渗透性影响很弱。

本文只针对单条裂隙的渗透性展开分析,对于多条裂隙的渗流分析,可采用叠加原理求解。由于裂隙是岩体导水的主要通道,因此本文未考虑岩块内部渗流的影响,同时也未考虑岩体在地应力作用下的损伤和裂隙面法向刚度非线性变化的影响。对于这些问题还需进一步开展深入研究。

参考文献 (References) :

- [1] 常宗旭,赵阳升,胡耀青,等.裂隙岩体渗流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(增刊2):4907-4911. [CHANG Zongxu, ZHAO Yangsheng, HU Yaoqing, 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(Sup 2): 4907-4911. (in Chinese with English abstract)]
- [2] GAN Lei, SHEN Zhenzhong, XIAO Ming. Experimental investigation of seepage characteristics in porous rocks with a single fracture[J]. *Hydrogeology Journal*, 2020, 28(8): 2933-2946.
- [3] ZHOU Zilong, ZHANG Jing, CAI Xin, et al. Permeability evolution of fractured rock subjected to cyclic axial load conditions[J]. *Geofluids*, 2020, 2020: 1-12.
- [4] 韩国锋,王恩志,刘晓丽.侧向应力对裂隙渗透性的影响[J].水文地质工程地质,2011,38(4):38-42. [HAN Guofeng, WANG Enzhi, LIU Xiaoli. Effect of lateral stress on rock fracture permeability[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(4): 38-42. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 刘才华,陈从新.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 Caihua, CHEN Congxin. Seepage characteristics of single rock fracture under three-dimensional stresses[J]. *Advances in Natural Science*, 2007, 17(7): 989-994. (in Chinese with English abstract)]
- [6] ZHAO Yu, WANG Chaolin, ZHAO Yanlin, et al. Experimental characterization and dependence of rock fracture permeability on 3D stresses[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(2): 41-1-9.
- [7] LIU Richeng, LI Bo, JIANG Yujing, et al. Review: Mathematical expressions for estimating equivalent permeability of rock fracture networks[J]. *Hydrogeology Journal*, 2016, 24(7): 1623-1649.
- [8] 金爱兵,王贺,高永涛,等.三维应力下岩石节理面的渗流特性[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(1):267-273. [JIN Aibing, WANG He, GAO Yongtao, et al. Seepage characteristics of rock joint under three-dimensional stresses[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(1): 267-273. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 侯昭飞,纪洪广,王金安,等.三维应力作用下砂岩单裂隙渗流规律试验研究[J].中国矿业,2011,20(5):107-110. [HOU Zhaofei, JI Hongguang, WANG Jin'an, et al. Experiment research on the laws of seepage in sandstone within single fracture under triaxiality stresses[J]. *China Mining Magazine*, 2011, 20(5): 107-110. (in Chinese with English abstract)]
- [10] HUO D, BENSON S M. Experimental investigation of stress-dependency of relative permeability in rock fractures[J]. *Transport in Porous Media*, 2016, 113(3): 567-590.
- [11] LATHAM J P, XIANG Jiansheng, BELAYNEH M, et al. Modelling stress-dependent permeability in fractured rock including effects of propagating and bending fractures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013(57): 100-112.
- [12] BAGHBANAN A, JING Lanru. Stress effects on permeability in a fractured rock mass with correlated fracture length and aperture[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2008, 45(8): 1320-1334.
- [13] MA D, MIAO X X, CHEN Z Q, et al. Experimental investigation of seepage properties of fractured rocks under different confining pressures[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46(5): 1135-1144.
- [14] RUTQVIST J. Fractured rock stress-permeability relationships from in situ data and effects of temperature and chemical-mechanical couplings[J]. *Geofluids*, 2015, 15(1/2): 48-66.
- [15] 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 Yuanxin, LIU Guangting. Porous seepage in calcirudite rock with 3-D stresses[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2007, 47(3): 335-339. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 朱焕春,陶振宇.不同岩石中地应力分布[J].地震学报,1994,16(1):49-63. [ZHU Huanchun, TAO Zhenyu. Geostress distributions in different rocks[J]. *Acta Seismologic Sinica*, 1994, 16(1): 49-63. (in Chinese with English abstract)]

- [17] 景锋, 盛谦, 张勇慧, 等. 不同地质成因岩石地应力分布规律的统计分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1877 - 1883. [JING Feng, SHENG Qian, ZHANG Yonghui, et al. Statistical analysis of geostress distribution laws for different rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1877 - 1883. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 景锋, 盛谦, 张勇慧, 等. 中国大陆浅层地壳实测地应力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2056 - 2062. [JING Feng, SHENG Qian, ZHANG Yonghui, et al. Research on distribution rule of shallow crustal geostress in China mainland[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2056 - 2062. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 赵德安, 陈志敏, 蔡小林, 等. 中国地应力场分布规律统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1265 - 1271. [ZHAO Dean, CHEN Zhimin, CAI Xiaolin, et al. Analysis of distribution rule of geostress in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1265 - 1271. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 李新平, 汪斌, 周桂龙. 我国大陆实测深部地应力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 2875 - 2880. [LI Xinping, WANG Bin, ZHOU Guilong. Research on distribution rule of geostress in deep stratum in Chinese mainland[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Sup 1): 2875 - 2880. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 陈志敏, 严松宏, 赵德安, 等. 青藏地区地应力分布规律研究[J]. 地球科学进展, 2015, 30(8): 915 - 921. [CHEN Zhimin, YAN Songhong, ZHAO De'an, et al. A study of distribution rule of geostress in Qinghai-Tibet area[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(8): 915 - 921. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 徐志英. 岩石力学[M]. 3版. 北京: 中国水利水电出版社, 1993. [XU Zhiying. Rock Mechanics[M]. 3rd ed. Beijing: China Water & Power Press, 1993. (in Chinese)]

编辑: 汪美华
刘真真