

文章编号:1001-4888(2016)05-0577-07

岩体交叉裂隙水流分配特性研究^{*}

桑盛^{1,2}, 刘卫群^{1,2}, 宋良³, 章统¹, 沈汉栋⁴

(1. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 烟台大学机电汽车工程学院, 山东 烟台 264005; 4. 浙江东南网架股份有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 岩体交叉裂隙的水流分配特性对揭示水体运移规律、人工疏导地下水、优化水力压裂方案等具有指导作用。文章利用自制裂隙渗流实验装置测试了常见“一进两出”“人”字裂隙开度、交叉角度变化时的流量分配特性。利用交叉控制体模型和雷诺输运方程分析了产生流量差异的原因。结果表明, 偏流来自惯性力与裂隙壁面法向力作用产生的漩涡; 流量分配只受进口和旁路裂隙开度的影响, 与交角和水力梯度无关; 旁路流量比(旁路流量与进口流量之比)与裂隙开度间存在实验幂次定量关系。

关键词: 交叉裂隙; 交叉角度; 裂隙开度; 流动状态; 流量分配

中图分类号: O35 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-15-205

0 引言

地下岩土工程兴建、油气资源的开采会遇到大量的岩体裂隙渗流问题。地下水流过裂隙交叉位置时的流动特征对岩石力学特性和岩土工程设计有重大影响。

已有的研究大多集中在单裂隙粗糙度、隙宽、曲折流等因素对岩石单裂隙渗流的影响^[1-5]。天然岩体裂隙错综复杂, 相互交叉, 当流体经过交叉裂隙节点时会发生偏流效应, 各分支裂隙流体流量各不相同, 确定天然岩体裂隙网络的优势水力路径是岩土工程中必须考虑和解决的问题^[6-9]。对于裂隙交叉位置, 流体流动伴随着局部水头损失^[10-11], 交叉裂隙流体流动的“收缩”或“扩张”效应是产生局部水头损失的主要原因^[12]。裂隙交叉位置处的流体流动特征不仅与压力相关, 而且受裂缝发育的角度和宽度影响^[13]。另外, 岩体中裂隙水流对裂隙壁会产生法向渗透静水压力作用和切向的拖曳(渗透动水压力)作用^[14], 这无疑给天然岩体裂隙渗流特性的深入研究带来极大困难。

研究天然岩体裂隙网络可将其拆分成单裂隙与裂隙交叉的简单组合。作为一种最基本的裂隙交叉单元, “人”字型裂隙的水流运动特征直接影响裂隙网络水流计算的准确性, 本文对“人”字型分叉裂隙渗流特性进行研究, 得到该裂隙交叉单元的渗流规律。

1 实验方案

为研究交叉裂隙渗流特性和流量分配规律, 采用中国矿业大学自主研发的裂隙渗透仪(如图 1(a)所示), 配以 3DSY 电动试压泵、溢水杯、橡胶水管、开关阀门、量筒等组成交叉裂隙渗流实验系统(图 2)。裂隙渗透仪对称开有 3 条深度 6mm 且中部交汇的渗流沟槽通道。本文通过在沟槽内充填水

^{*} 收稿日期: 2015-10-27; 修回日期: 2016-02-04

基金项目: 国家 973 计划(2015CB251602, 2009CB219605), 国家自然科学基金(41074040, 40811120546, 50774083)和江苏省自然科学基金(BK20141125)资助

通讯作者: 刘卫群(1970—), 男, 教授, 工学博士, 主要从事计算岩石力学、岩土体渗流和灾害防治等方面的研究工作。Email: wqliu@cumt.edu.cn

泥并用一定厚度的直铁片垂直插入至沟槽底部的方式,制作不同开度的水泥预制裂隙,见图 1(b)(c)。由于水泥硬化时会伴随着一定的体积形变,人工预制裂隙开度 b 可待水泥完全凝固后,再次利用塞尺测量并确认。经过反复测试,渗透仪密封性良好。实验过程中,为排除流体重力的影响,渗透仪平面水平放置,通过调节溢流杯高度 h 改变水力梯度,同时利用量筒测量各裂隙出口的体积流量 Q ,其单位为 L/h(升/每小时)。

开展预制裂隙渗流实验前,利用渗透仪空置沟槽作为渗流通道,测得进水水头分别为 0.1m 和 0.2m 时,装置的体积流量分别为 20.42L/h 和 36.85L/h,供水系统管路整体水头损失与流量成正比。制作三条长度为 0.10m,开度分别为 0.3mm、0.6mm 和 0.9mm 的裂隙,通过控制进口水头得到不同开度单裂隙流量 Q 随水力梯度 J 的变化关系。如图 3 所示,当裂隙开度为 0.3mm 时,流量随水力梯度近似呈线性变化;对于 0.6mm 裂隙,两者关系曲线产生轻微“上凸”,随裂隙开度增加,“上凸”现象愈加明显。当测试 0.6mm 和 0.9mm 裂隙时,裂隙水流量较大,除裂隙之外的供水系统会造成一定的水头损失,这是图 3 中关系曲线“上凸”的主要原因。分析可知,当流量小于 12.5L/h 时,对于本文测试的水力梯度,可忽略外部供水装置对渗流实验结果的影响。

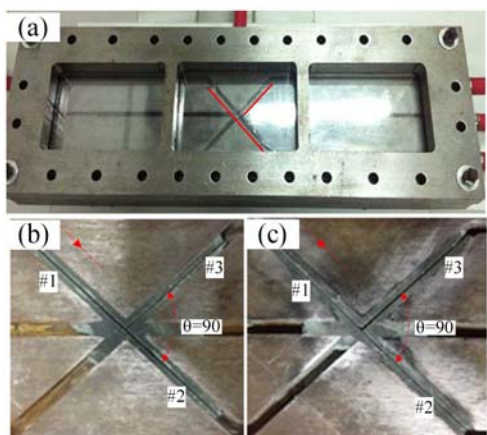


图 1 裂隙渗流仪及预制裂隙

(a) 裂隙渗流仪;(b)(c) 交叉水泥裂隙

Fig. 1 Fracture seepage instrument and crack

(a) fracture seepage instrument;(b)(c) The cement fissure

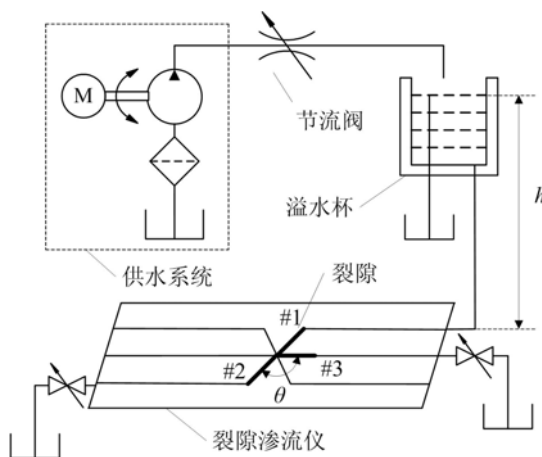


图 2 实验系统结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of the testing system

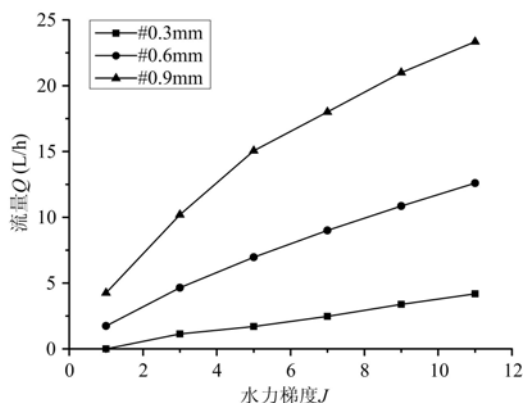


图 3 裂隙流量与水头关系曲线

Fig. 3 Relationship between flow and water head loss

采用 Lomize 考虑粗糙度修正的立方定律:

$$Q_f = \frac{\omega b^3}{12\mu} \cdot \frac{\Delta p}{L} \cdot \frac{1}{\left[1 + 6.0 \left(\frac{\Delta}{b}\right)^{1.5}\right]} \quad (1)$$

我们对开度 0.3mm 的裂隙进行了粗糙度拟合,得到裂隙壁面的绝对粗糙度为 0.043mm,由于本文采用同批次、同比例水泥且裂隙加工工艺相同,本文认为实验所用预制裂隙的粗糙度均相同。所以,本文实验对于除交叉位置处的单直裂隙段,均可以通过以上公式进行渗流特性分析。

为减少实验外部供水系统水头损失对实验结果的影响,本文采用 0.3mm 和 0.6mm 两种开度裂隙作为研究对象。“人”字型分叉裂隙模型设置一个流入口和二流出,其几何特征包括裂隙开度 b 和交叉角度 θ ,单一直裂隙长度均为 0.05m ($L_1 = L_2 = L_3 = 0.05m$),裂隙深度均为 6mm,如图 4。我们沿水流运动方向将裂隙依次定义为 #1、#2、

＃3,为便于实验操作和分析,令 $b_1=b_2$ 。控制渗透仪位于＃2 与＃3 通道出口处的开关可改变水流在裂隙内的流通过径,通过调节进水水头,分析裂隙开度、交叉角度对交叉裂隙流量分配特征的影响。实验方案见表 1,每组实验重复三次,取平均值进行分析。

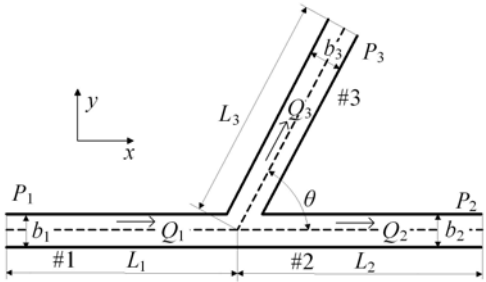


图 4 “人”字型交叉裂隙模型

Fig. 4 Herringbone cross crack model

表 1 实验方案

Tab. 1 The experimental scheme

裂隙开度 $b_1=b_2/b_3$ (mm)	交叉角度 θ (°)	溢流杯进口水头 h (m)
0.6/0.6	45/90/135	0.3/0.5/0.7/0.9/1.1
0.6/0.3		
0.3/0.6		
0.3/0.3		

2 实验结果与讨论

作为交叉裂隙中的特殊情况,＃3 裂隙为不贯通裂隙,水只在＃1 裂隙与＃2 裂隙内流动为直流;＃2 为不贯通裂隙,水只在＃1 与＃3 内流动为折流。裂隙中水的流量与水力梯度呈线性关系。如表 2 所示,旁路裂隙与主干裂隙开度相同时,直流的流量比折流时高,0.6mm 裂隙直流与折流之比为 1.4~1.5,0.3mm 裂隙直流与折流之比为 1.15~1.25,直流与折流之比与进口水头大小无关。裂隙弯折处有局部水头压力损失,并且局部水头压力损失与开度的大小有关,开度越大,局部水头损失越大,而弯折的角度对局部水头损失的影响很小。

表 2 $h=0.9$ m 时各工况下实验结果

Tab. 2 The experiment result of specimen at $h=0.9$ m

裂隙＃1/＃3 开度 b (mm) /交叉角度 θ (°)	裂隙流量 Q (L/h)			
	直流	折流	交叉流＃2	交叉流＃3
0.6/0.3/45	9.54	3.53	9.63	1.20
0.6/0.3/90	9.90	3.54	9.84	1.14
0.6/0.3/135	10.14	3.80	9.39	1.10
0.6/0.6/45	9.84	6.63	8.64	3.27
0.6/0.6/90	9.67	6.75	8.31	3.24
0.6/0.6/135	9.24	6.48	7.98	3.15
0.3/0.3/45	2.69	2.30	2.03	1.29
0.3/0.3/90	2.69	2.25	1.98	1.32
0.3/0.3/135	2.60	2.10	1.92	1.34
0.3/0.6/45	1.68	3.15	0.44	2.94
0.3/0.6/90	1.74	3.03	0.39	2.70
0.3/0.6/135	2.22	3.30	0.48	2.88

实验中交叉裂隙的总流量大于同等情况下单裂隙的流量,相当于在直裂隙的后半段并联上一裂隙,使得裂隙的有效开度增加,但增加的量并不是两个裂隙开度的算术相加。如图 5 所示,在交叉裂隙中水流量与水力梯度呈线性关系,旁路流量比(旁路流量 Q_3 与进口流量 Q_1 之比)不随进口水头变化。

如表 2,旁路裂隙与主干裂隙开度相同时,＃2 比＃3 的流量多,0.6mm 裂隙旁路流量比为 0.27~

0.30, 0.3mm 裂隙旁路流量比为 0.37~0.41。惯性力使得大部分水流向 #2, 由于裂隙内阻力以及裂隙壁的影响使部分水流向 #3。交叉裂隙旁路流量比与裂隙的开度有关, 开度越大, 旁路流量比越小, 而惯性力作用越大, 水更倾向沿直线流动。旁干裂隙开度不一致时, 交叉后大开度裂隙内的流量占到总流量的 80%~90%; $b_2=0.6\text{mm}$ 、 $b_3=0.3\text{mm}$ 时通过 #2 的流量占到总流量的 90%, 而 $b_2=0.3\text{mm}$ 、 $b_3=0.6\text{mm}$ 时通过 #3 的流量占到总流量的 80%~85%; 惯性力的作用使得前者大于后者。如图 6 所示, 在交叉角度 $\theta=45^\circ$ 、 90° 、 135° 时裂隙旁路流量比基本维持在同一水平, 在交叉处的局部水头损失不随交叉角度的变化。

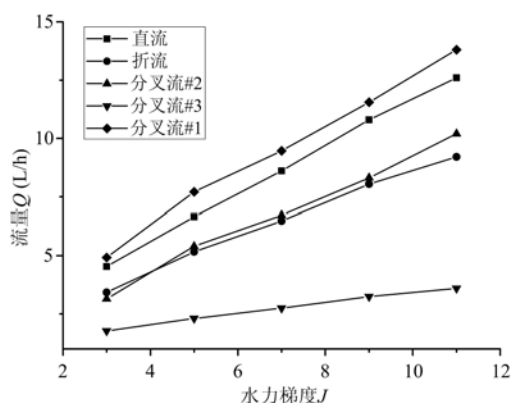


图 5 交叉裂隙流量与水力梯度曲线
($b_1 = b_3 = 0.6\text{mm}$, $\theta = 90^\circ$)

Fig. 5 Relationship between flow of crossed and hydraulic gradient ($b_1 = b_3 = 0.6\text{mm}$, $\theta = 90^\circ$)

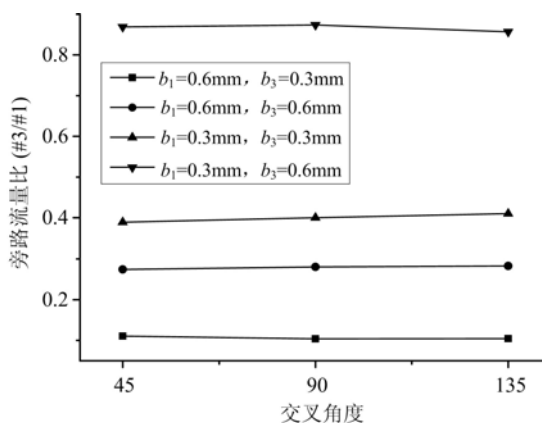


图 6 裂隙旁路流量比与交叉角度关系图

Fig. 6 Relationship between fracture bypass flow ratio and cross angle

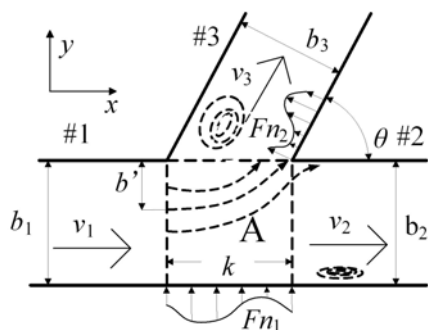


图 7 裂隙交叉处示意图

Fig. 7 Schematic diagram for the junction of fracture

3 流量分配模型

实验采用接近天然材料的水泥裂隙, 平均流速与水力梯度呈线性关系。通过计算, 实验雷诺数范围介于 30~300, 远低于层流临界雷诺数 500。受到裂隙粗糙度和交叉位置裂隙形态改变的影响, 裂隙中水流动状态并非层流, 其满足耿克勤^[4]的裂隙隙宽与流量间的经验公式:

$$Q = Ab_m^n J \quad (2)$$

式中, b_m 为裂隙机械隙宽; A 和 n 是待定系数。代入单裂隙渗流实验数据计算得到:

$$V = 1.10b^{0.36} J \quad (3)$$

式中, J 为水力梯度。单裂隙内流体为过渡状态, 立方定律不再适用。

取交叉裂隙为研究对象, 裂隙壁为水泥, 其渗透率极低, 可视交叉裂隙渗流为非交换渗流。取整个交叉裂隙为控制体, 如图 4 所示, 其满足雷诺输运方程, 由于实验为稳态流动故不考虑方程时间项, 分别取 $\eta=1$, $\eta=v$ 则得到流体的连续性方程与流体动量方程:

$$v_1 b_1 = v_2 b_2 + v_3 b_3 \quad (4)$$

$$\rho b_1 w v_1^2 - \rho b_2 w v_2^2 - \rho b_3 w v_3^2 \cos \theta = F_x \quad (5)$$

$$- \rho b_3 w v_3^2 \sin \theta = F_y \quad (6)$$

式中, v_1 、 v_2 、 v_3 为裂隙横截面平均速度; w 为裂隙深度; ρ 为水的密度; F 为作用于控制体上的外力, 除水压差外主要为裂隙壁面施加的沿壁面的拖曳力和垂直于裂隙壁面的法向压力; F_x 为外力 x 方向上的分力; F_y 为外力 y 方向上的分力。

根据控制体的受力得到:

$$F_x = P_1 b_1 w - P_2 b_2 w - P_3 b_3 w \cos \theta + F_{\tau} + F_{P_{nx}} \quad (7)$$

$$F_y = -P_3 b_3 w \sin \theta + F_{\tau y} + F_{P_{ny}} \quad (8)$$

式中, F_{τ} 为裂隙壁作用于控制体的拖曳力; F_{P_n} 为裂隙壁面作用于控制体的法向合力; P_1 、 P_2 、 P_3 分别为裂隙进出口的水力压力。式(7)、式(8)中的应力变量还满足

$$F_{\tau} = f_{\tau 1} L_1 w + f_{\tau 2} L_2 w + f_{\tau 3} L_3 w \cos \theta \quad (9)$$

$$F_{\tau y} = f_{\tau 3} L_3 w \sin \theta \quad (10)$$

$$f_{\tau} L w = -\rho g w b L J \quad (11)$$

$$F_{P_{nx}} = -F_{n2} \sin \theta \quad (12)$$

$$F_{P_{ny}} = F_{n2} \cos \theta + F_{n1} \quad (13)$$

式中, f_{τ} 为裂隙壁作用于控制体的拖曳应力, 其方向与水流方向相反; F_{n1} 、 F_{n2} 为裂隙交叉处裂隙壁作用在流体上的合力, 其方向为裂隙壁法向; $f_{\tau 1}$ 、 $f_{\tau 2}$ 、 $f_{\tau 3}$ 分别为三条单裂隙壁作用于控制体的拖曳应力。

根据实验条件 $P_2 = P_3 = 0$, $L_1 = L_2 = L_3 = L$, 把式(7)~(13)代入式(4)~(6)得到

$$F_{n1} = \frac{\rho w}{\sin \theta} [\cos \theta b_1 (v_1^2 - v_2^2) - b_3 v_3^2 + \cos \theta g L \frac{v_1 + v_2}{1.1} b_1^{0.64} + g L \frac{v_3}{1.1} b_3^{0.64} - \cos \theta \frac{P_1 b_1}{\rho}] \quad (14)$$

$$F_{n2} = \frac{\rho w}{\sin \theta} [\cos \theta b_3 v_3^2 - b_1 (v_1^2 - v_2^2) - g L \frac{v_1 + v_2}{1.1} b_1^{0.64} - \cos \theta g L \frac{v_3}{1.1} b_3^{0.64} + \frac{P_1 b_1}{\rho}] \quad (15)$$

式中, $F_{P_{ny}}$ 改变水的流动方向, 使得部分水进入 #3; F_{n2} 为漩涡两侧裂隙壁法向不平衡力, #3 入口处水会沿垂直裂隙方向产生横向流动, 受裂隙壁限制水流在 #3 入口内形成漩涡, 势必减小裂隙的有效过水面积, 减少 #3 内的有效裂隙开度。 F_{n1} 与 F_{n2} 都是关于交叉角度与裂隙开度的函数, 但根据实验所得流量的分配比基本不随交叉角度的变化而变化, 裂隙交叉角度对有效裂隙开度影响不大, 因此裂隙壁对流体的作用力分布更加复杂。漩涡造成局部水头损失, 在 #3 内会存在水压突降。同样 #1 内的流体受到 $F_{P_{ny}}$ 的作用发生偏移, 在 #2 的入口内也会发生漩涡, 但此处漩涡对水头压力的影响很小, 认为此处不存在水压的突降, 则有

$$P_1 = (v_1 + v_2) \frac{L g \rho}{1.1 b_1^{0.36}} \quad (16)$$

假设 m 为旁路流量比, 即有

$$\frac{P_1}{v_1} = (2 - m) \frac{L g \rho}{1.1 b_1^{0.36}} \quad (17)$$

于是得到当几何裂隙一定时流量分配与水力梯度无关, 与实验结论一致。

如图7所示, 假设 $F_{P_{ny}}$ 均匀作用在区域A, 流速沿裂隙开度方向均匀分布, 并且满足 $v_1 = 1 \text{ m/s}$, 依据加速度定律则有

$$\frac{b'}{b_1} = \frac{F_{P_{ny}} b_3}{2 \sin \theta \rho w b_1^2 v_1^2} = \frac{v_3 b_3}{v_1 b_1} \quad (18)$$

即为

$$m = \frac{b_3^{0.64}}{b_1} \frac{g L}{1.1} - 2 \quad (19)$$

式中, b' 为 #1 内的水流受到不平衡合力在交叉处发生偏转的最大距离。

根据式(19)得到“人”字型交叉裂隙的旁路流量比是关于裂隙开度的函数, 与交叉角度无关, 旁路裂隙与主干裂隙开度相同时裂隙开度越大, 旁路流量比就越小, 与实验结果相吻合。为方便以后的应用, 根据假设和实验结果拟合得到开度(0.2~0.7mm)平行交叉裂隙中旁路流量比与裂隙开度的半经验公式:

$$m = 0.039 \frac{b_3^{0.64}}{b_1} - 0.2864 \quad (20)$$

对于不同粗糙度天然裂隙仍需对单裂隙实验测定得到公式(20)中的指数系数。

裂隙流体的能量损失由裂隙壁的拖曳力引起的沿程损失和由漩涡引起的局部损失, 局部损失主要

集中在#3入口处。水力梯度与局部损失呈线性关系,交叉角度对局部损失并没有影响,裂隙开度对局部损失的影响很大。

4 结 论

本文讨论了低水头压力梯度下交叉裂隙几何特征对流动状态与流量分配的影响,得到以下几点认识,可供裂网渗流模拟计算参考。

(1) 实验开度(0.2~0.7mm)的“人”字交叉裂隙水流量与水力梯度呈线性关系。裂隙弯折处会造成流体水头局部损失。旁路裂隙与主干裂隙开度相同时开度越大惯性力也越大,此时主干流动是流动的主要方向。

(2) 流体在裂隙分支处受到壁面法向力作用偏转进入旁路,旁路入口处的流动漩涡减少了裂隙有效开度,水头损失主要集中在旁路入口处。

(3) “人”字交叉裂隙的旁路流量比(旁路流量与进口流量之比)与裂隙的开度间存在定量幂次关系,与裂隙交叉角度和水力梯度无关。

(4) 旁路裂隙与主干裂隙开度相同时,裂隙开度越大旁路流量比越小。但相对主干裂隙更大的旁路开度很容易导致旁路流量比大于50%,实验中的最大旁路流量比甚至可达85%。

参考文献:

- [1] Crandall D, Bromhal G, Karpyn Z T. Numerical simulations examining the relationship between wall-roughness and fluid flow in rock fractures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(5): 784—796.
- [2] Javadi M, Sharifzadeh M, Shahriar K. A new geometrical model for non-linear fluid flow through rough fractures[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 389(1-2):18—30.
- [3] 郭保华, 田采霞. 岩石单裂隙水力特性试验研究进展[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 28(1):39—44 (GUO Baohua, TIAN Caixia. Progress in experimental research on hydraulic characteristics of single-fractured rock[J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2009, 28(1):39—44 (in Chinese))
- [4] 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 Keqin, CHEN Fengxiang, LIU Guangting, et al. Experimental research of hydraulic properties of seepage flow in fracture[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 1996, 36(1):102—106 (in Chinese))
- [5] Zimmerman R W, Al-Yaarubi A, Pain C C, et al. Non-linear regimes of fluid flow in rock fractures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41:163—169.
- [6] 倪绍虎, 何世海, 汪小刚 等. 裂隙岩体渗流的优势水力路径[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2012, 44(6):108—115 (NI Shaohu, HE Shihai, WANG Xiaogang, et al. Preferential flow pathways in fractured rock mass[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2012, 44(6):108—115 (in Chinese))
- [7] Berkowitz B. Characterizing flow and transport in fractured geological media: A review[J]. *Advances in Water Resources*, 2002, 25(8):861—884.
- [8] Swanson S K, Bahr J M, Bradbury K R, et al. Evidence for preferential flow through sandstone aquifers in Southern Wisconsin[J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 184(3-4):331—342.
- [9] McLaren R G, Forsyth P A, Sudicky E A, et al. Flow and transport in fractured tuff at Yucca Mountain: numerical experiments on fast preferential flow mechanisms[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2000, 43(3): 211—238.
- [10] 速宝玉, 詹美礼, 郭笑娥. 交叉裂隙水流的模型实验研究[J]. *水利学报*, 1997, 5:2—7 (SU Baoyu, ZHAN Meili, GUO Xiaoe. Experiment research of cross fracture flow[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, 5:2—7 (in Chinese))
- [11] 田开铭. 裂隙水交叉流的水力特性[J]. *地质学报*, 1986, 2:202—214 (TIAN Kaiming. The hydraulic of crossing-flow in an intersected fracture[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1986, 2:202—214 (in Chinese))
- [12] 朱红光, 易成, 姜耀东 等. 裂隙交叉联接对采动岩体中流体流动特性的影响研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2015,

- 44(1):24—28 (ZHU Hongguang, YI Cheng, JIANG Yaodong, et al. Effect of fractures cross connection on fluid flow characteristics of mining-induced rock[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(1):24—28 (in Chinese))
- [13] 唐玄, 金之钧, 杨明慧 等. 碳酸盐岩裂缝介质中微观二维油水运移聚集物理模拟实验研究[J]. 地质论评, 2006, 52(4):570—576 (TANG Xuan, JIN Zhijun, YANG Minghui, et al. Experimental study on water-oil migration and accumulation in 2-D micro-model carbonate fractures media[J]. Geological Review, 2006, 52(4):570—576 (in Chinese))
- [14] 柴军瑞, 仵彦卿, 袁继国. 岩体中裂隙水流对裂隙壁的双重力学效应[J]. 岩土力学, 2003, 24(4):514—517 (CHAI Ruijun, WU Yanqing, YUAN Jiguo. Double mechanical effects of fissure flow on fissure walls[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4):514—517 (in Chinese))

On the Flow Distribution Characteristics of Cross Cracks in Rock Mass

SANG Sheng^{1,2}, LIU Wei-qun^{1,2}, SONG Liang³, ZHANG Tong¹, SHEN Han-dong⁴

(1. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 3. School of Electromechanical Automobile Engineering, Yantai University, Yantai 264005, Shandong, China; 4. Zhejiang Southeast Space Frame CO., LTD, Hangzhou 310000, Zhejiang, China)

Abstract: Flow distribution characteristics of cross cracks in rock mass play a guiding role in revealing the water movement pattern, groundwater artificial channeling and optimization of hydraulic fracturing scheme, etc. In this paper, using a home-made crack seepage experimental device, the flow distribution characteristics of common herringbone cracks (so called “one way in two ways out”) with different crack openings and different cross angles were experimentally measured. Taking advantage of cross control volume model and Reynolds transport equation, the reason of flow difference was analyzed. Results show that bias current is caused due to the vortex produced by the interaction between inertia force and normal force of crack surface. Flow distribution is only affected by inlet and bypass crack opening, and has nothing to do with the angle and hydraulic gradient. The bypass flow ratio (the ratio of the bypass flow and inlet flow) has the experimental power of quantitative relation with crack opening.

Keywords: cross cracks; cross angle; crack opening; flow state; flow distribution