

文章编号: 1673-9469 (2018) 01-0014-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.01.004

## 粗糙单裂隙高速非达西渗流特性的试验研究

张 焯<sup>1, 2</sup>, 尹学谦<sup>1, 2</sup>, 陈珂<sup>1, 2</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程研究所, 南京 210098)

**摘要:** 针对裂隙岩体渗流破坏灾害问题。研制符合不同节理粗糙度的拟岩体粗糙单裂隙试件, 开展了可变裂隙开度、高水力梯度粗糙单裂隙非达西渗流室内物理试验。研究表明, 高渗流速度情况下, 渗流水力梯度与渗流流速之间呈现非线性关系; Forchheimer 方程能良好拟合高流速条件下粗糙裂隙渗流情况; 提出非达西影响系数的半经验关系式, 为工程实践中突涌水量预测提供重要参考。

**关键词:** 粗糙裂隙渗流; 高速非达西渗流; Forchheimer 方程; 非达西影响系数

**中图分类号:** TV139.1

**文献标志码:** A

## Laboratory study on the features of the high-speed non-darcy seepage flow in single rough fracture

ZHANG Ye<sup>1, 2</sup>, YIN Xueqian<sup>1, 2</sup>, CHEN Ke<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098 China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098 China)

**Abstract:** With the expansion of the scale of underground engineering construction, it becomes an important issue about seepage failure hazard of fractured rock mass in engineering and theoretical circles. Developed with simulated rock rough single fracture specimens of different rock joint roughness, laboratory tests of non-Darcy seepage in rough single fracture with variable apertures and high hydraulic gradient are carried out. It is indicated that flow behavior in the rough fractures becomes nonlinear with the high seepage velocity, and the hydraulic gradient and volumetric flow rate data points are fitted very well by the Forchheimer equation. A semi empirical formula of the non-Darcy effect coefficient is presented, which provides an important reference for the prediction of water bursting in engineering practice.

**Key words:** rough fracture seepage flow, high-speed non-Darcy seepage, Forchheimer equation, non Darcy influence coefficient

据统计数据<sup>[1-4]</sup>发现, 我国大部分隧洞突涌水事故、岩体边坡失稳、水电工程大坝失事与岩体的渗透性密切相关。因此, 研究裂隙岩体的渗流性质对于解决渗流运动引起的重大工程问题具有重要意义。自 Snow 等<sup>[5]</sup>提出并验证基于光滑平行板模型的立方定律以来, 关于岩石单裂隙渗流特性试验研究方面, 国内外学者进行了大量的工作<sup>[6-11]</sup>。由于开展过的试验裂隙渗流情况与实际条件的差距, 对于岩石粗糙裂隙的高速非达西渗流特性还缺乏深

入的研究。本文通过开展大量岩石单裂隙高水力梯度、大裂隙开度、不同节理粗糙度的高速非达西渗流特性的室内试验, 并采用 Forchheimer 方程进行二次项拟合分析, 对描述裂隙内高速非达西流运动特性的重要参数—非达西影响系数进行深入的分析讨论, 得到了非达西影响系数关于裂隙隙宽和节理粗糙度系数之间的经验关系式, 进而在实际工程中, 可以方便、快捷、准确地计算预测深埋隧洞建设过程中的突涌水量, 为灾害预防提供科学依据。

收稿日期: 2017-09-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费 (2016B08114)

作者简介: 张焯 (1992-), 女, 江苏无锡人, 硕士, 主要从事岩土体渗流方面的研究。

## 1 粗糙单裂隙渗流试验

### 1.1 粗糙单裂隙试验试件研制

基于学者们<sup>[12-13]</sup>进行的试验研究发现,岩石表面粗糙度对岩体裂隙渗流影响较大,不能忽略;简单的规则形状起伏面和随机压裂面模拟裂隙面与实际岩石裂隙面差距较大,不能完全代表岩体裂隙结构面。因此,本文根据 N. Barton 和 V. Choubey<sup>[14]</sup>提出的 JRC 标准剖面轮廓曲线,采用直径 10.36 cm,总长度为 35 cm 的圆柱形水泥模型试件,其中有效粗糙裂隙部分的宽度为 8 cm,长度为 30 cm,其人工制备过程如下:

(1) 运用 AutoCAD 软件将 Barton 提出的 JRC 标准轮廓曲线图数字化,每条曲线的水平方向长度为 10 cm,再利用 CAD 软件三维建模功能,构建满足试验需求的三维裂隙板。为满足试验槽道的长宽比等试验要求,将 JRC 轮廓曲线等比例复制延长两倍,即达到 30 cm 长度,同时在粗糙裂隙两侧各增加 15mm 光滑垫层,并在裂隙板的进水口和出水口位置各增加 25 mm 光滑平板水流过渡区。设计得到的三维模型如图 1(以 JRC=16~18 为例)所示。

(2) 传统的铣切割技术制作试件费用代价太高,并且切割工艺十分复杂,难以制备满足试验要求的粗糙板。因此,将建立的三维 CAD 模型转化成 3D 打印软件可以读取的标准 STL 文件格式,采用 3D 打印技术分段打印获得不同粗糙度系数的裂隙板。

(3) 本文利用上述裂隙板和 PVC 管制作圆柱形水泥试件的浇筑模具,将外径 10 mm,壁厚 3.2 mm 的 PVC 管对半剖开,夹入粗糙裂隙板,并在其上部、中部和下部用三个管夹夹紧固定;并在其上部、中部和下部预埋用于引流的铜管,为后面安装测水压力传感器做准备;模具下部用管盖拧紧封死,制成整个试件的浇筑模具。

(4) 试验试件浇筑采用的水泥为普通硅酸盐水泥 42.5 型,水泥与细砂之比为 1:2.5,水灰比为 28%,高效减水剂添加量为 1.1%。浇筑一周后拆模,在养护箱里养护 28 d 至水泥强度达到 70% 以上。

### 1.2 试验装置及试验方法

改进王媛等<sup>[6]</sup>采用的高水压、循环水流的试验装置如图 2,主要包括试验测试主体部分(粗糙裂隙)、增压泵、上游缓水箱、进出水端帽、测流量水槽、储水箱、水管、阀门等。

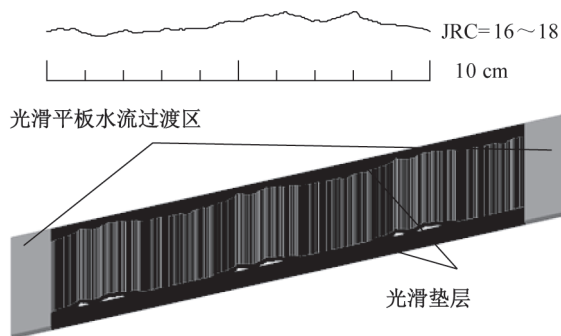


图 1 CAD 建立的裂隙板三维模型 (JRC=16~18)

Fig.1 3D model of fracture plate established by CAD(JRC=16~18)

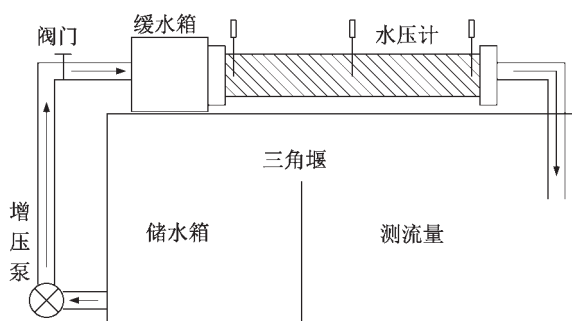


图 2 试验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of test device

为了进行大梯度、大裂隙条件下的渗流试验,采用增压泵来提供高压水头,同时在裂隙进水口前安装封闭式缓水箱,裂隙试验段内水压能迅速稳定,水泵中的水经缓水箱进入裂隙时也能够更稳定。此外,在裂隙试件的上中下游分别预埋铜管,分别安装压力变送器,进行水压的测量,同时采用直角三角堰测流量方法进行流量的测量。具体试验过程如下:

(1) 提前准备好标准厚度的橡胶垫片,在裂隙试件两侧平槽和橡胶垫片上分别涂抹一层薄薄的玻璃胶,以达到较好的密封效果。将橡胶垫片安放在试件两侧平槽中,合上水泥试件的上下面,以形成相应要求的裂隙开度,然后用管夹将上下试件固定,并用螺栓拧紧以防漏水和水压破坏。再次用游标卡尺对裂隙宽度进行多点测量取平均值,并记录下来作为最终的裂隙宽度。将试件装入进水口端帽中,盖上出水口端帽,穿入四根长螺杆进行固定,前后用螺帽拧紧固定。

(2) 连接进水水管和出水管,再次检查各管夹和螺栓是否固定紧,打开水泵电源开关,用调压阀门从小到大调节水泵流量,打开缓水箱排气阀排出缓水箱内空气,先验证试验装置的密封性是否满足要求,若不满足则用快干密封胶进行补救措施。

(3) 密封性满足要求后将调压阀门从小到大进行

调节,待上游数显计指数发生变化时,等待一段时间,等三角堰上游水位稳定再读取水位测针读数,并记录水压传感器上中下游读数和测针读数,完成一组试验数据的测量后,卸下水泥裂隙试件,进行下一试件的试验数据的测量。

(4) 重复(1) - (3)的操作,直至完成所有裂隙试件的测量为止。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 低流速达西渗流

为了验证试验设备及测量系统的准确性,本文先进行了低流速层流条件下裂隙渗流试验。因为在裂隙内水流流速较低时,渗流试验的压力条件和渗流速度都较低,所以采用测压管进行精确测量,同时用三角堰无法准确测得流量,换用量筒进行流量测量,时间用秒表读取。

图3列出了裂隙宽度  $b=3\text{ mm}$  时  $\text{JRC}=0\sim 2$  和  $\text{JRC}=16\sim 18$  两种粗糙裂隙低速渗流试验的结果,对比发现,在水力梯度较小的条件,试验测得的流量与水力梯度之间关系与立方定律计算结果十分贴近,说明在裂隙内水流流速较小时,水流运动符合线性达西定律,此时的流态为层流阶段。再次证明了低流速层流流态下,立方定律适用于粗糙裂隙渗流计算,由此也证明了本文粗糙裂隙渗流试验装置设计是合理的,试验方法和测量方式正确可靠。

### 2.2 高速非达西渗流

进行了不同裂隙开度、不同 JRC 粗糙程度、不同水力梯度下的多组粗糙单裂隙模型试验。裂隙开度最小为  $1\text{ mm}$ ,最大开度为  $8\text{ mm}$ ,裂隙粗糙程度 JRC 从 0 到 18。试验水温基本恒定,水的动力黏滞系数  $\mu=1.0\times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,运动黏滞系数  $\nu=1.0\times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ 。

限于篇幅,图4仅给出不同节理粗糙度裂隙在隙宽  $b=3\text{ mm}$  时水流水力梯度与流速之间的关系曲线,为便于比较,将立方定律计算值和王媛光滑裂隙试验值同样绘制于图中。

通过图4可以看出,试验成果与立方定律理论计算结果存在较大的偏差,说明通过粗糙裂隙的水流不满足线性立方定律,此时水流流态属于高速非达西流。从试验成果与王媛光滑平行板裂隙试验值同样存在较大的偏差可以看出,裂隙粗糙程度对高速非达西流有较大影响。从曲线递变趋势来看,  $J-v$

曲线关系呈现出某种曲线函数形式,对比不同 JRC 值时裂隙的渗流试验结果发现:同隙宽、同流速条件下,水力梯度随 JRC 值增大而增大;且随着 JRC 值的增大,试验关系曲线偏离达西定律程度越大。

试验获得的不同隙宽的裂隙在节理粗糙度  $\text{JRC}=8\sim 10$  时水流水力梯度与流速之间的关系曲线如图5所示,试验结果发现:同 JRC 值、同流速的条件下,水力梯度随  $b$  的增大而减小;且随着  $b$  的增大,试验关系曲线偏离达西定律的程度减小。

综上所述,裂隙粗糙程度和隙宽对裂隙非达西渗流运动具有重要影响作用。根据试验获得的结果,粗糙裂隙内水流在高水压条件下与线性立方定律偏差较大,渗流情况较复杂,为了更好地进一步研究高流速条件下粗糙裂隙渗流情况,采用 Forchheimer 方程对试验数据进行相关分析,Forchheimer 方程可表示为

$$J = \frac{\mu}{\rho g k} v + \frac{\beta}{g} v^2 = Av + Bv^2 \quad (1)$$

式中,  $J$  为通过粗糙裂隙水流的水力梯度,  $v$  为测得的渗流速度;  $A$ 、 $B$  为拟合系数,与水流性质相关。因为拟合曲线趋势大致相同,表1仅给出  $b=3\text{ mm}$

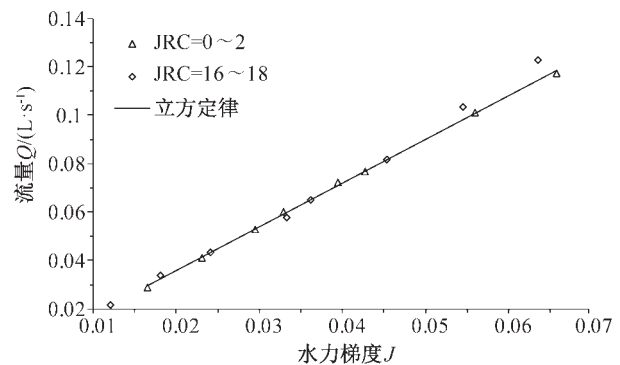


图3 粗糙裂隙低速渗流试验结果  
Fig.3 Low velocity seepage test results of rough fracture

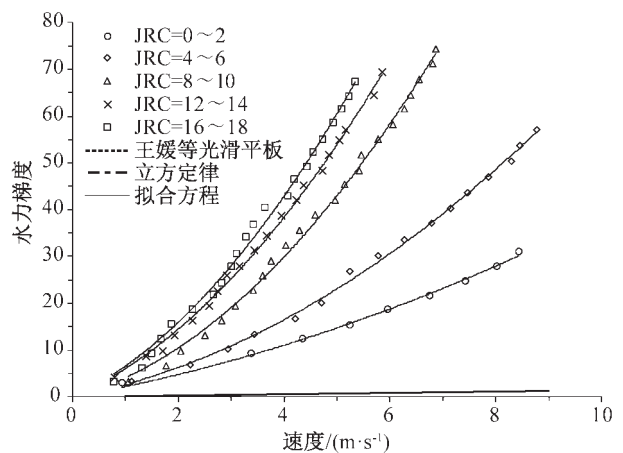


图4 不同 JRC 裂隙渗流试验 J-v 关系曲线  
Fig.4 J-v curve of seepage test with different JRC

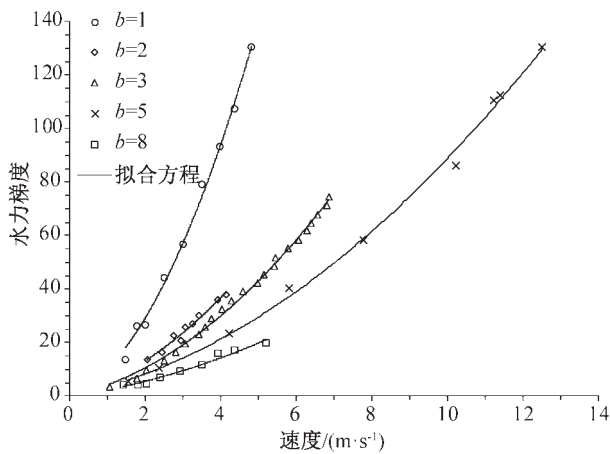


图5 不同隙宽渗流试验 J-v 关系曲线  
Fig.5 J-v curve of seepage test with different width

隙宽条件下不同粗糙度系数裂隙的拟合结果，具体拟合曲线见图5。

拟合结果表明，不同隙宽条件下粗糙裂隙渗流水力梯度与流速的拟合相关系数  $R^2$  均大于 0.9，说明试验得到的结果通过 Forchheimer 方程拟合得到了较好的相关性，验证了 Forchheimer 方程用于描述计算粗糙单裂隙高速非达西渗流运动规律的可行性。

为进一步分析裂隙粗糙度和裂隙宽度对渗流运动的影响，将汇总得到的 Forchheimer 方程一次项系数  $A$  和二次项系数  $B$  分别绘制关于 JRC 值关系曲线，如图6、图7所示。根据曲线变化趋势可以看出：在相同隙宽下，一次项系数  $A$  关于 JRC 不呈严格递增关系，说明裂隙壁面的粘滞效应在减弱；所有隙宽裂隙运动方程二次项系数  $B$  关于 JRC 均呈严格递增趋势，说明水流惯性力一直在增大。在相同粗糙程度下，除去个别数据，拟合方程的一次项系数  $A$  和二次项系数  $B$  均随着隙宽增大呈递减趋势。

### 2.3 非达西影响系数

根据 Forchheimer 公式的物理意义，其二次项式描述了流体流动偏离线性定律的程度，因此拟合得到的 Forchheimer 的二次项系数  $B$  对分析高流速条件下非达西流偏离线性流程度有重要的研究作用。由  $B=\beta/g$  得到高速非达西流体的非达西影响系数  $\beta$ ，

其中  $B$  为拟合得到的 Forchheimer 的二次项系数， $g$  为重力加速度。

将计算得到的不同粗糙度系数的非达西影响系数值绘制于图8中，根据图中曲线变化趋势可以看出：在同一隙宽条件下，随着节理粗糙度系数的增大，粗糙裂隙的非达西影响系数成递增趋势，在同一节理粗糙度系数裂隙中，非达西影响系数的大小随着隙宽增大而减小。说明在粗糙岩体裂隙中，在高速渗流条件下的非达西程度的强弱大致与裂隙隙宽大小成反比，与节理粗糙度系数成正比关系。

由上述分析结果看出，对于同一粗糙程度的裂隙试件，其非达西影响系数随着隙宽的增大而减小，本文推断粗糙裂隙的非达西系数与隙宽大小存在着反比例关系，将图9不同节理粗糙度裂隙内二者关系曲线进行拟合分析，拟合关系式采用

$$y = C/x \quad (2)$$

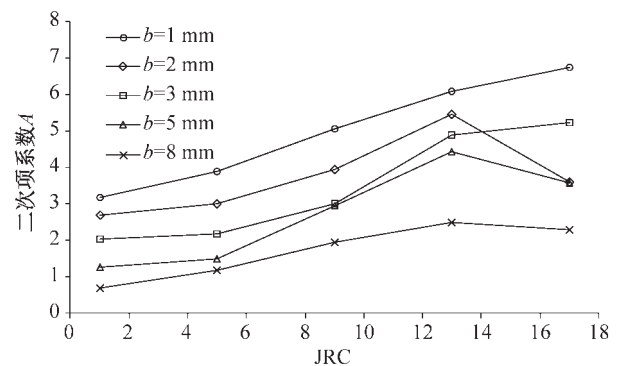


图6 一次项系数  $A$  关于 JRC 变化关系  
Fig.6 The changing relationship between  $A$  and JRC

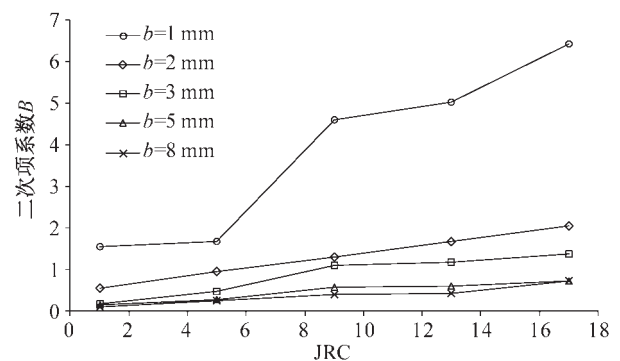


图7 二次项系数  $B$  关于 JRC 变化关系  
Fig.7 The changing relationship between  $B$  and JRC

表1 水力梯度与速度 Forchheimer 拟合结果 ( $b=3$  mm)

Tab.1 Fitting results of hydraulic gradient and velocity by Forchheimer equation ( $b=3$  mm)

		JRC=0~2	JRC=4~6	JRC=8~10	JRC=12~14	JRC=16~18
$b=3$ mm	$A/(s \cdot m^{-1})$	2.038 4	2.178 7	3.000 8	4.887 2	5.222 6
	$B/(s^2 \cdot m^{-2})$	0.182 2	0.487 9	1.120 6	1.178 8	1.376 8
	$R^2$	0.996 8	0.997 6	0.996 5	0.997 6	0.994 0

其中,  $y$  代表裂隙的非达西影响系数  $\beta$ ,  $x$  为裂隙隙宽  $b$ , 拟合结果汇总于表 2 中。

由表 2 可知, 随着节理粗糙度的增大, 系数  $C$  的值也在增大, 将  $C$  与节理粗糙度系数 JRC 之间关系绘于图 9 中, 观察发现二者之间关系较符合线性关系, 因此采用线性关系式进行拟合, 拟合关系式为

$$\beta b = m \cdot \text{JRC} \quad (3)$$

式中,  $m$  为线性拟合系数。

拟合得到的相关系数为 0.864 5, 得到的线性系数  $m=0.003 6$ 。联合式 (2) 和式 (3), 则可以得到关于非达西影响系数与隙宽  $b$ 、节理粗糙度系数 JRC 之间的经验关系式为

$$\beta = 0.003 6 \text{JRC}/b \quad (4)$$

表 2 不同节理粗糙度下拟合得到非达西系数与隙宽关系式  
Tab.2 Fitting relationship between  $\beta$  and  $b$  with different JRC

节理粗糙度	非达西影响系数关系式	相关系数
JRC=0~2	$\beta = 0.013 77/b$	0.906 07
JRC=4~6	$\beta = 0.016 96/b$	0.983 24
JRC=8~10	$\beta = 0.040 98/b$	0.921 19
JRC=12~14	$\beta = 0.045 37/b$	0.944 21
JRC=16~18	$\beta = 0.057 55/b$	0.930 64

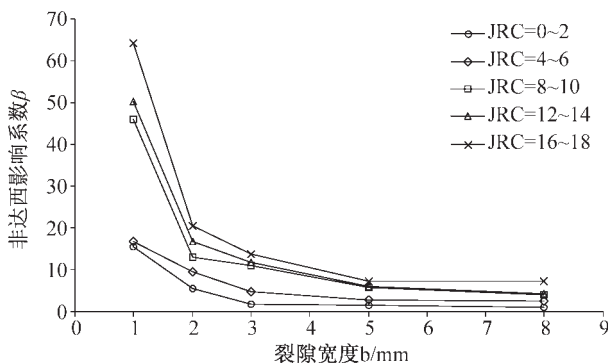


图 8 不同节理粗糙度系数非达西影响系数与隙宽关系曲线  
Fig.8 Relationship curves between  $\beta$  and  $b$

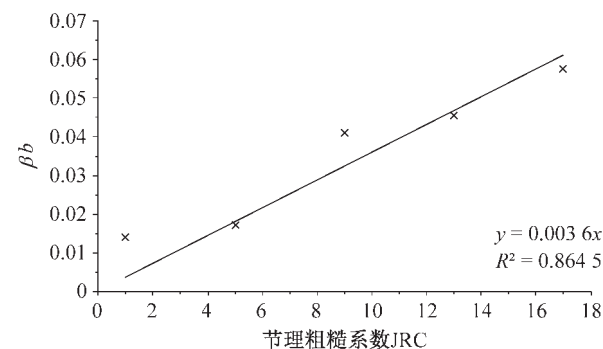


图 9  $\beta b$  与 JRC 拟合关系曲线  
Fig.9 Fitting relation curve between  $\beta b$  and JRC

式中,  $\beta$  为非达西影响系数, JRC 为裂隙面节理粗糙度系数,  $b$  为裂隙隙宽大小。

根据式 (4) 可以看出, 随着节理粗糙度的增大, 非达西影响系数成正比例增强, 随着裂隙隙宽的增大, 非达西影响系数成反比减小, 所以节理粗糙度系数与隙宽的比值  $\text{JRC}/b$  可以作为衡量粗糙裂隙水流高速非达西特性的重要参数。

### 3 结论

1) 在流速较低情况下, 裂隙内的水流为层流状态时, 粗糙裂隙渗流满足线性达西定律, 用立方定律进行粗糙裂隙渗流量计算是完全适用的; 在渗流速度较高情况下, 裂隙内水流水力梯度与渗流速度之间关系与立方定律计算结果偏差较大, 且粗糙程度越大、隙宽越小时偏离程度越大。

2) 二次项方程 Forchheimer 用于描述粗糙裂隙水流拟合良好; 裂隙面粗糙程度的增大, 同时使裂隙水流的壁面粘滞特性和非达西运动特性增大, 裂隙隙宽的增大, 使裂隙壁面对水流的粘滞特性和水流非达西运动特性均减弱, 且对粘滞特性的减弱作用更明显, 削弱了壁面粗糙程度对裂隙水流的影响。

3) 分析得非达西影响系数关于隙宽、节理粗糙度系数之间的半经验关系式, 从而可以定量地描述岩体粗糙裂隙的结构面粗糙程度和裂隙隙宽大小对高速渗流的非达西影响情况。

#### 参考文献:

[1] 何峰, 王来贵, 王振伟, 等. 煤岩蠕变 - 渗流耦合规律实验研究 [J]. 煤炭学报, 2011(6): 930-933.  
 [2] 张立海, 张业成. 中国煤矿突水灾害特点与发生条件 [J]. 中国矿业, 2008, 17(2): 44-46.  
 [3] 周心权, 陈国新. 煤矿重大瓦斯爆炸事故致因的概率分析及启示 [J]. 煤炭学报, 2008, 33(1): 42-46.  
 [4] 何满潮. 深部岩体力学基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
 [5] SNOW D T.A Parallel Plate Model of Fractured Permeable[D]. Media, Ph. D. Thesis, Univ. Calif. Berkeley, 1965.  
 [6] 王媛, 顾智刚, 倪小东, 等. 光滑裂隙高流速非达西渗流运动规律的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1404-1408.  
 [7] 贺玉龙, 陶玉敬, 杨立中. 不同节理粗糙度系数单裂隙渗流特性试验研究 [C] // 第十一次 (下转第 23 页)

### 3 结论

1) 压实  $Q_2$ 、 $Q_3$  黄土的黏聚力和内摩擦角均随着压实度的增大而增大,且在相同干密度条件下,压实  $Q_2$  黄土的黏聚力指标均大于压实  $Q_3$  黄土,其内摩擦角指标均小于压实  $Q_3$  黄土,这与  $Q_2$  黄土中的粘粒含量有关。

2) 压实  $Q_2$ 、 $Q_3$  黄土的黏聚力和内摩擦角均随着含水率的增大而逐渐减小,且在最优含水率干侧减小快,最优含水率湿侧减小缓慢,压实黄土的抗剪强度会随着含水率的增加不断降低。

3) 相比于室内重塑压实黄土,现场回填压实黄土具有更高的抗剪强度,制样方式不同导致两者具有不同的结构强度,但由于本文中试样数量有限,对比试验数据较少,试验结论有一定的局限性,今后还需对此进行更深入的研究。

#### 参考文献

- [1] 胡长明,梅源,王雪艳.吕梁地区压实马兰黄土变形与抗剪强度特性[J].工程力学,2013,30(10):108-114.
- [2] 王林浩,白晓红,冯俊琴.压实黄土状填土抗剪强度指标的影响因素探讨[J].岩土工程学报,2010,32(Z2):132-135.
- [3] 吴玮江,堪文武,宋丙辉,等.兰州原状  $Q_2$  黄土剪切试验研究[J].兰州大学学报:自然科学版,2012,48(6):21-25.
- [4] 贾亮,朱彦鹏,朱鋈川.兰州马兰、离石压实黄土抗剪强度影响因素探讨[J].岩土工程学报,2014,36(Z2):120-124.
- [5] 骆以道.考虑饱和度的压实填土抗剪强度研究[J].岩土力学,2011,32(10):3143-3147.
- [6] 廖红建,李涛,彭建兵.高陡边坡滑坡体黄土的强度特性研究[J].岩土力学,2011,32(7):1939-1944.
- [7] 应捷,杜燕宁.原状非饱和黄土抗剪强度特征及试验研究[J].工程勘察,2006,8(4):6-10.
- [8] 袁志辉,倪万魁,刘茹,等.基于吸应力的非饱和黄土抗剪强度研究[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2015,38(5):648-653.
- [9] 黄泽,张沛然,肖丁,等.重塑黄土抗剪强度试验研究[J].四川建筑科学研究,2015,41(4):36-39.
- [10] 肖丁,张沛然,杨帆,等.黄土抗剪强度试验研究[J].四川建筑,2015,35(1):102-104.
- [11] 方祥位,成培江,申春妮,等.陕西蒲城  $Q_2$  黄土物质组成试验研究[J].后勤工程学院学报,2012,28(1):1-6.
- [12] 李立军,刘春玲,金胜国.击实黄土抗剪特性的试验研究[J].山西建筑,2014,40(25):83-84.
- [13] 张诚厚.上海粘土的准超压密特性[J].岩土工程学报,1982,4(3):62-69.
- [14] 龚晓南,熊传祥,项可祥,等.黏土结构性对其力学性质的影响及形成原因分析[J].水利学报,2000(10):43-47.
- [15] 田堪良,王沛,张慧莉.黄土结构性分析及新认识[J].人民黄河,2012,34(4):145-148.
- [16] WANG Long, XIE Xiaoguang, LUAN Hai. Influence of laboratory compaction methods on shear performance of graded crushed stone[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2011, 23(10): 1483-1487.
- (责任编辑 王利君)
- (上接第18页)全国岩石力学与工程学术大会论文集,2010:3235-3240.
- [8] 鞠杨,张钦刚,杨永明,等.岩体粗糙单裂隙流体渗流机制的实验研究[J].中国科学:技术科学,2013(10):1144-1154.
- [9] 刘杰,于振民,王瑞红,等.砂岩劈裂裂隙无充填多因素影响下渗流规律研究[J].水利学报,2016,47(1):54-63.
- [10] 胡少华,周佳庆,陈益峰,等.岩石粗糙裂隙非线性渗流特性试验研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(1):48-56.
- [11] 孙可明,辛利伟,翟诚,等.考虑三维形貌特征粗糙裂隙加卸载渗流规律研究[J].岩土力学,2016(Z2):161-166.
- [12] 杨金保,冯夏庭,潘鹏志.考虑应力历史的岩石单裂隙渗流特性试验研究[J].岩土力学,2013,34(6):1629-1635.
- [13] 尹立明,王刚,孙文斌,等.节理粗糙度对应力-渗流耦合特性影响试验研究[J].山东科技大学学报,2012,31(6):30-35.
- [14] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics, 1977, 10(1-2): 1-54.
- (责任编辑 王利君)