

单裂隙辐射流渗流试验研究

罗吉鹏,柴军瑞,许增光,覃源

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地,陕西 西安 710048)

摘要:通过裂隙辐射流渗流试验装置对人工裂隙进行不同法向荷载下渗流试验,分析法向应力和渗流压力对渗流量的影响机理。各级法向荷载下裂隙面冲刷痕迹大体接近,被冲刷的区域集中在试件中心进水口处,进水口附近水流产生较大紊动。不同法向应力下渗流量与入渗水头近似呈线性关系,说明了试验过程中裂隙水的运动特性符合达西定律;相同入渗水压下的渗流量大致相同,上下试件之间的接触状态不随法向应力的加大发生变化,而是维持一个稳定的裂隙开度。入渗水压从0.1 MPa到0.2 MPa之间水头损失增加较快,0.2 MPa后增速变慢且趋近直线;水头损失百分比曲线呈现先增大后减小的规律,拟合曲线为三次多项式。

关键词:单裂隙;辐射流;法向荷载;裂隙渗流量;渗透压力

中图分类号:TU47

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2017)03-0211-05

Experimental study on seepage flow in single fracture

LUO Jipeng, CHAI Junrui, XU Zengguang, QIN Yuan

(State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The influence mechanism of normal stress and seepage pressure on seepage flow was analyzed by the seepage tests of artificial fracture under different normal loads by means of the experimental device of seepage flow in fracture radiation flow. All the normal loading gap scour marks were generally close to the surface. The washed area concentrated in the center of the specimen at the inlet, and the flow near the inlet had great turbulence. The seepage flow of different normal stress has a linear relationship with the infiltration head, which shows that the motion characteristics of the crack water in the experimental course accords with Darcy's law. The seepage flow rate was approximately the same under the same infiltration water pressure. The contact state between the upper and lower parts does not change with the increase of normal stress, but maintains a stable fracture opening. The water head loss increased rapidly from 0.1 MPa to 0.2 MPa with the infiltration water pressure, after 0.2 MPa the growth is slow and close to the straight line. The percentage curve of head loss increases first and then decreases. The fitting curve is three degree polynomial.

Key words: single fracture; radiation flow; normal load; fracture seepage flow; infiltration water pressure

1 研究背景

岩石裂隙渗流特性的研究对资源的安全、高效开发和工程地质减灾都具有重要意义。法国 Malpasset 拱坝(1959年)在初次蓄水时发生溃坝、意大利的瓦依昂边坡失稳(1963年)^[1]等问题的出现使人们更加重视对该领域的研究。

早前学者认为,正应力对裂隙面影响比较大,并认为渗透系数和总应力之间存在一定的指数关

系^[2]。于洪丹等^[3]利用高精度渗流应力耦合三轴试验系统,对含裂隙砂岩、粉砂岩在不同荷载作用下裂隙渗流性能进行了研究。结果表明:加载过程中,随着围压增大,岩石试样隙宽减小,同时渗透率也减小,有效围压和渗透率呈现出负指数关系;并且得到有效围压与渗透率的关系式。满轲等^[4]利用自行研究开发的渗透试验台架,进行了大尺度单裂隙花岗岩的渗透试验研究。发现单裂隙花岗岩渗透系数随着渗透时间的增加而增大,并趋于稳定;分析了影

收稿日期:2016-11-28; 修回日期:2017-02-18

基金项目:陕西省重点科技创新团队项目(2013KCT-015)

作者简介:罗吉鹏(1990-),男,陕西西安人,硕士研究生,主要从事水工渗流及数值仿真、裂隙渗流方面研究。

响渗透系数变化的各个因素,认为粘贴在裂隙介质表面的细砂起决定性作用。薛雯等^[5]研究了不同法向应力下裂隙岩体剪切应力和变形的关系,并修正了裂隙的弹性矩阵,认为可以采用三段函数描述岩石裂隙剪应力与剪切变形的3个不同阶段:开始的剪缩过程,剪胀到峰值阶段及抗剪强度残余阶段。刘杰等^[6]利用ELE岩石渗透仪对劈裂砂岩试样进行渗流试验,研究在不同应力条件下,多因素共同作用下的裂隙渗流量变化规律。分析认为应力路径对渗流量的影响非常显著,并提出不均匀系数 λ ,用于反映渗透压恒定、围压持续加载时渗流量随围压的变化规律;提出高效和有效控渗的临界点,可描述在渗透压恒定情况下渗流量随围压变化的规律。Olsson等^[7]认为,裂隙面剪胀现象促使法向位移的增长,裂隙内的渗流规律在剪切作用下变得非常复杂。常宗旭等^[8]得出了裂隙侧向应力促使裂隙侧向变形,从而直接影响裂隙岩体渗透性,其影响基本符合负指数关系。

上述研究尚是建立在层流假设的基础上,关于单裂隙非达西流渗流的研究成果目前还较少,国内外部分研究人员已经开始从紊流理论开展裂隙非达西流渗流理论研究^[9-10]。

王媛等^[9]研究高水力梯度下宽裂隙的非达西渗流运动规律,建立了流速与水力梯度的非线性关系曲线,并将试验结果与Lomize紊流公式、速宝玉紊流半经验公式进行了对比,分析发现三者在低水力梯度下结果较为一致,而高水力梯度情况下会出现较大差异;熊祥斌等^[10]基于Izbash非达西流方程,推导了高压压水试验条件下裂隙岩体渗透系数计算公式。

粗糙裂隙在足够高的法向应力作用下将形成渗流区、接触区和滞水区,渗流路径复杂^[11-15],对于存在残余渗流的现象给出了较好的解释。明确裂隙面渗流特征,有利于对法向应力下裂隙渗流问题的解释。因此,本文首先通过试验对法向荷载下的辐射流渗流路径进行探究,然后通过实测试验数据,分析

法向应力和渗流压力对渗流量的影响机理。

2 试验

2.1 试件

本文所用试件为人工浇筑的高强石膏试件(容重 17.6 kN/m^3 、抗压强度 47.82 MPa),试件为圆盘形,直径 200 mm ,高 80 mm 。试件接触面如图1所示。

2.2 渗流试验装置

渗流试验装置如图2,该设备包括上、中、下3部分。其中从下到上分别为:底座、硅胶密封垫、下层O型密封圈、下试件密封圈装置、中间盒体、上试件盒、上试件盒密封装置、上层盖板等。其中,底座、中间盒体、上层盖板均由不锈钢板制成,上下各部分通过高强螺栓连接组合;不同部位的密封材料可使水流按照确定的路径流动,并确保在水压力作用下试件盒的密封性。静音式伺服油源为法向压力加载提供压力源,可以实现恒定法向压力下的渗流试验。水压系统采用储水器和气压加压方式。把氮气、水箱及试件盒连接,调整到试验需要的压力方可进行试验。下侧细管进水,上侧出水。上下试件放置方式如图3所示。

2.3 试验方案

渗流试验之前,在裂隙面涂染黑色墨水。渗流后裂隙表面颜色深度与渗流时间、渗流速度等有关,水流冲刷后的渗流通道颜色应较浅,而接触点和滞水区部分颜色应该较深。

试验共两组,第1组法向荷载相同,为 0.96 MPa ,水压5级分别为 $0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5\text{ MPa}$ 。第2组水压相同,为 0.2 MPa ,法向荷载4级分别为 $0.96, 1.27, 1.59, 1.91\text{ MPa}$ 。开始时,施加某级法向荷载(按 $0.96, 1.27, 1.59, 1.91\text{ MPa}$ 的顺序施加),然后将氮气瓶调节到预定压力,测得此状态下的稳定流量 Q_1 (流经裂隙前的流量)和 Q_2 (流经裂隙后的流量),水流路径如图4所示。每级荷载加载结束后,打开密封盒对裂隙面拍照,然后干燥后涂染墨水,再次干燥后进行下一级加载。

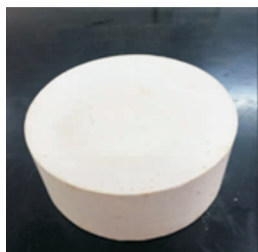


图1 人工裂隙的接触面



图2 渗流试验装置

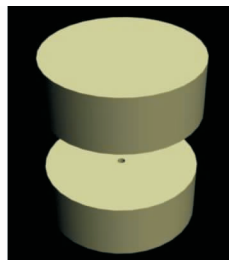


图3 试件放置示意图

3 试验结果与分析

3.1 渗流理论

单裂隙是组成岩体裂隙网络的基本元素,所以对其渗流基本规律的研究是岩体水力学的基本任务。由理想光滑平板裂隙推导出的裂隙渗流基本理论,因为其单宽流量 Q 与隙宽 e 成3次方关系而称为立方定律。其表达式为:

$$Q = C \frac{ge^3}{12\nu} \Delta H \tag{1}$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; C 为与试件尺寸有关的参数,对于幅向流, $C = \frac{2\pi}{\ln(D/d_0)}$, D 、 d_0 分别为试件的外径和内径(因试件直径较小,近似渗径为试件半

径), m ; e 为隙宽, m ; ΔH 为水头差, m ; ν 为运动黏滞性系数; g 为重力加速度, m/s^2 。

通常情况下,自然裂隙都是粗糙不平的,在考虑粗糙度的情况下,式(1)可改写成:

$$Q = C \frac{ge_h^3}{12\nu} \Delta H \tag{2}$$

$$k_h = \frac{ge_h^2}{12\nu} \tag{3}$$

式中: e_h 为等效水力隙宽, m ; k_h 为等效渗透系数^[16]。

3.2 试验结果与分析

3.2.1 试验结果 渗流试验后裂隙面颜色分布如图5所示。裂隙面上白色为渗流冲刷区域,黑色部分则为非冲刷区域,渗流通道形式比较复杂。

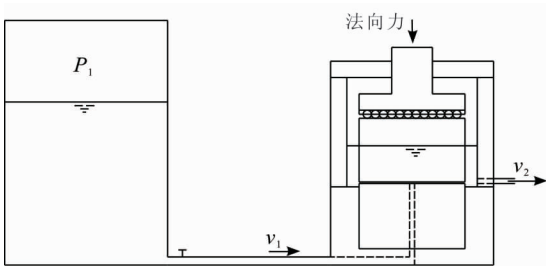


图4 水流路径示意图



图5 试验后裂隙面

各级荷载下裂隙面冲刷痕迹大体接近,被冲刷的区域集中在试件中心进水口处,呈辐射状,其他区域均未被冲刷,未出现沟槽流^[17]渗流形态。分析原因:首先,各级法向荷载作用下,裂隙开度均较小,水流在裂隙面流动缓慢;其次,进水口附近水流方向突变产生紊动。

3.2.2 数据分析 根据试验数据绘出恒定法向应力条件下,渗流量与入渗水压的关系曲线如图6所示。试验中入渗水流开关打开后,法向位移传感器显示的位移无变化,此时,由于水流对法向有效应力的影响很小,所以渗透系数和致流量的变化同样很小。

入渗水头近似呈线性关系。 $Q - P$ 的这种线性关系,说明了试验过程中裂隙水的运动特性符合达西定律,则式(2)对本文的试验结果是适用的。

从图7可以看出,当入渗水压相同时,不同法向应力荷载下的渗流量大致相同,分析其原因:上下试件的接触面近似为平面,裂隙接近闭合,接触部分为面接触,且法向应力不足以使试件产生应变。由此可知,上下试件之间的接触状态不随法向应力的加大发生变化,而是维持一个稳定的裂隙开度。

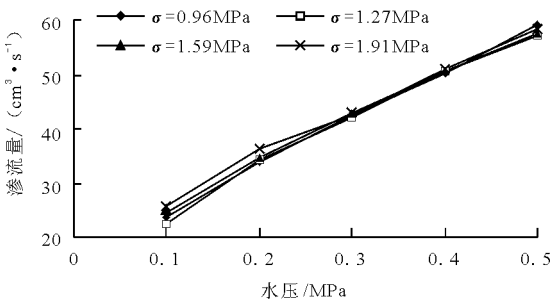


图6 裂隙渗流量-入渗水头关系曲线

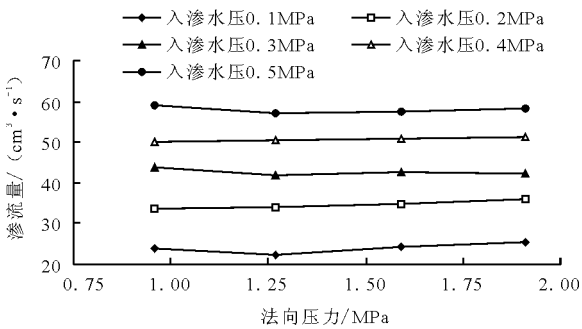


图7 裂隙渗流量-法向压力关系曲线

从图6可以看出,各级法向应力下裂隙流量与

根据试验数据,计算出试验前后水流流速 v_1 、 v_2 ,可以得到有、无裂隙连接条件下流速水头 $\frac{\alpha v^2}{2g}$,流

速水头与入渗水压的关系曲线如图 8 所示。图 8 中，相同入渗水压对应的纵坐标之差 $\Delta H = \frac{\alpha v_1^2}{2g} - \frac{\alpha v_2^2}{2g}$ 即

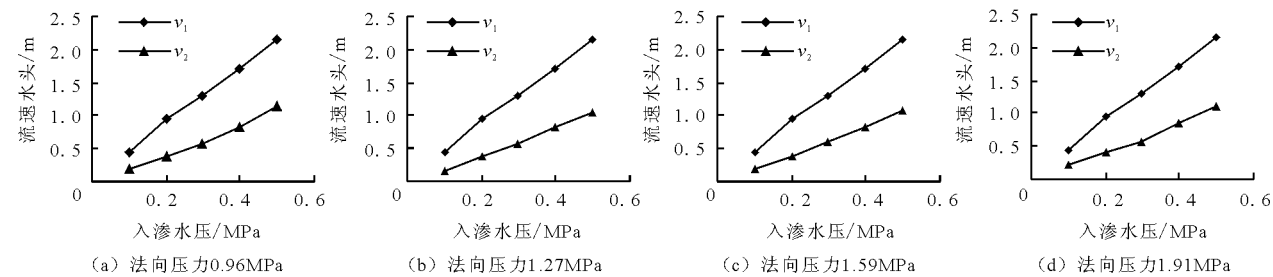


图 8 不同法向压力下流速水头与入渗水压关系曲线

表 1 不同压力作用下水头损失 m				
入渗水压/ MPa	法向压力/MPa			
	0.96	1.27	1.59	1.91
0.1	0.2714	0.2668	0.2618	0.2435
0.2	0.5826	0.5728	0.5591	0.5259
0.3	0.7197	0.7315	0.7069	0.6992
0.4	0.9120	0.8932	0.8872	0.8741
0.5	1.0255	1.0925	1.0900	1.0527

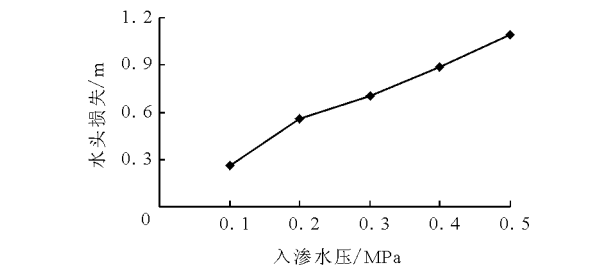


图 9 水头损失与入渗水压关系曲线
(法向压力 1.59 MPa)

根据表 1 和图 9 可看出,入渗水压从 0.1 MPa 到 0.2 MPa 之间水头损失增加较快,0.2 MPa 后增速变慢且趋近直线,由达西公式计算出各入渗水压对应的坡降分别为 0.025、0.054、0.069、0.086、0.102。由公式(2)计算所得的等效水力隙宽 e_h 见表 2,水压 0.1 MPa 时计算结果稍大于其他,但各压力作用下计算结果基本接近,维持在 0.3 ~ 0.4 mm 之间,与实际情况和前文分析相同,验证了公式(2)的正确性。由公式(3)计算所得的等效渗透系数 k_h 平均值在水压 0.1 MPa 时较大,为 12.2 cm/s,其他水压下 k_h 在 8.58 ~ 9.36 cm/s 之间,变化不大。水头损失百分比与入渗水压曲线如图 10 所示,百分比曲线呈现先增大后减小的规律,拟合曲线近似为三

次多项式。
图 9 为水头损失与入渗水压关系曲线。

表 2 不同压力作用下等效水力隙宽 $e_h \cdot 10^{-4} \text{m}$				
入渗水压/ MPa	法向压力/MPa			
	0.96	1.27	1.59	1.91
0.1	3.8012	3.7519	3.8800	4.0353
0.2	3.3100	3.3434	3.3907	3.5081
0.3	3.3289	3.2996	3.3611	3.3615
0.4	3.2519	3.2870	3.2984	3.3235
0.5	3.3056	3.2037	3.2074	3.2636

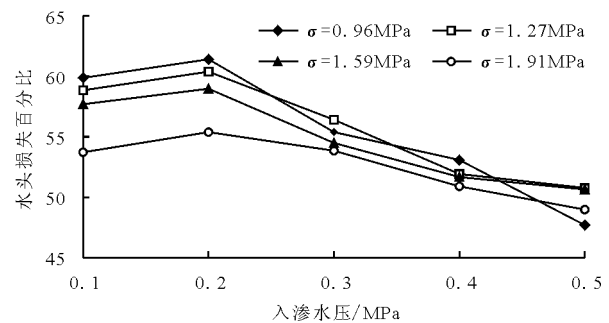


图 10 不同法向压力下水头损失百分比与入渗水压关系曲线

4 结 论

天然岩石节理多处于压剪应力状态,作用在节理上的应力可以分解为垂直节理面的法向应力和平行节理面的剪切应力。采用室内试验方法是目前研究节理应力-渗流耦合作用常用方法,开展法向应力-渗流耦合试验有助于节理全剪切-渗流耦合试验这一复杂应力条件下的渗流分析。本文通过裂隙辐射流渗流试验装置对人工裂隙进行了法向加载下裂隙辐射流试验,得到主要结论如下:

(1)各级法向荷载下裂隙面冲刷痕迹大体接

近,被冲刷的区域集中在试件中心进水口处,进水口附近水流产生较大波动,其他区域流速缓慢。

(2) 不同入渗水压下渗流量与入渗水压近似呈线性关系,说明了试验过程中裂隙水的运动特性符合达西定律;相同入渗水压下的渗流量大致相同,上下试件之间的接触状态不随法向应力的加大发生变化,而是维持一个稳定的裂隙开度。

(3) 入渗水压从 0.1 MPa 到 0.2 MPa 之间水头损失增加较快,0.2 MPa 后增速变慢且趋近直线;水头损失百分比曲线呈现先增大后减小的规律,拟合曲线为三次多项式。

参考文献:

- [1] 肖维民,夏才初,邓荣贵. 岩石节理应力-渗流耦合试验系统研究进展[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(S2):3456-3465.
- [2] 谢妮,徐礼华,邵建富,等. 法向应力和水压力作用下岩石单裂隙水力耦合模型[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(S2):3796-3803.
- [3] 于洪丹,陈飞飞,陈卫忠,等. 含裂隙岩石渗流力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(S1):2788-2795.
- [4] 满轲,刘晓丽,苏锐,等. 大尺度单裂隙介质应力-渗流耦合试验台架及其渗透系数测试研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(10):2064-2072.
- [5] 薛变鸾,陈胜宏. 岩石裂隙渗流与法向应力耦合的复合单元模型[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(S1):2613-2619.
- [6] 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.
- [7] Olsson R, Barton N. An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints[J]. Inter-

national Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001,38(3):317-329.

- [8] 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(S2):4907-4911.
- [9] 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.
- [10] 熊祥斌,张楚汉,王恩志. 岩石单裂隙稳态渗流研究进展[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(9):1839-1847.
- [11] 熊祥斌,李博,蒋宇静,等. 剪切条件下单裂隙渗流机制试验及三维数值分析研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(11):2230-2238.
- [12] 夏才初,王伟,曹诗定. 节理在不同接触状态下的渗流特性[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(7):1297-1306.
- [13] 蒋宇静,李博,王刚,等. 岩石裂隙渗流特性试验研究的新进展[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(12):2377-2386.
- [14] 李博,蒋宇静. 岩石单节理面剪切与渗流特性的试验研究与数值分析[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(12):2431-2439.
- [15] Pyrak-Nolte L J, Morris J P. Single fractures under normal stress: the relation between fracture specific stiffness and fluid flow[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000,37(1):245-262.
- [16] 刘才华,陈从新,付少兰. 剪应力作用下岩体裂隙渗流特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(10):1651-1655.
- [17] 郭保华,苏承东. 多级加载下岩石裂隙渗流分段特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(增2):3787-3794.