

文章编号: 1000-7598-(2014) 08-2191-07

多尺度岩石渗透特性的试验研究

马秀媛¹, 芮洪兴², 王 倩¹

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061; 2. 山东大学 数学学院, 济南 250100)

摘 要: 岩体赋存于一定地质环境中, 经过漫长的地质构造作用, 形成由连续性状的岩石材料和非连续性状的各种地质结构面组成的复杂地质体。渗透率是影响这种复杂岩体渗透特性的重要参数之一, 渗透率选择的正确与否直接关系到裂隙岩体渗流分析结果的可靠性与工程稳定性。采用室内试验的方法, 结合达西定律确定裂隙岩体的渗透率。通过自行研发的 5 种尺寸压力室测定不同尺寸岩石试样的渗透率, 得到由不同裂隙、孔洞组合的岩石试样在稳定流、非稳定流下的渗透率, 并由此分析得到多尺度岩石的渗透特性。从多组试验结果中分析可得, 随着岩石试样的尺寸增加, 岩石的渗流通道增多, 从而渗透率增大, 但增大到一定程度后会趋于稳定, 这一渗透规律对实际工程有指导意义。

关 键 词: 裂隙岩石; 渗透率; 多尺度; 室内试验

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

Experimental study of permeability characteristics of multiscale rock

MA Xiu-yuan¹, RUI Hong-xing², WANG Qian¹

(1. Research Centre of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. School of Mathematics, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: Occurrence of rock mass in certain geological environments forms complex geologic body after a long geological tectonism. This geologic body is composed of rock material of continuous character and various geological structure planes of discontinuous character. Permeability is one of the important parameters affecting the permeability characteristics of complex rock mass. Permeability selected correctly or not is directly related to the reliability and engineering stability of the fractured rock mass seepage analysis results. Laboratory experiment methods are used to determine permeability of fractured rock mass combining with the principle of Darcy's law. Independent development of five pressure chambers of different sizes can measure the permeability of rock specimen in different sizes. Three types of experiment include stable seepage pressure experiment, variable seepage pressure experiment in one size and variable seepage pressure experiment in five different sizes. Experiment can get the permeability of rock specimen which is combined by different fractures and holes under steady flow and unsteady flow and also the permeability characteristics of multiscale rock. This method can determine the changing law of permeability along with the rock size increasing. Conclusions can be drawn from the multiple groups of experimental results. The rock seepage channel increases along with the rock size increasing, thus the permeability increases. But the permeability will be stable until it increases to a certain extent. And also this law can play a guiding significance to engineering.

Key words: fractured rock mass; permeability; multiscale; laboratory experiment

1 引 言

裂隙岩体是极其复杂的介质, 是经过复杂的构造运动、风化作用、溶蚀作用及卸荷作用等往复改造后形成的地质体^[1], 由完整岩块和不连续结构面(节理、裂隙、断层等)组成, 使得岩体的结构特征与力学性质错综复杂。裂隙岩体的这种特殊性决定了岩体的裂隙与孔隙中地下水的活动是影响岩体

渗透特性和工程稳定性不可忽视的因素。渗透系数是确定岩体渗流特性的重要指标, 在水文地质中是一个非常重要的概念^[2]。在实际工程中, 由于渗透率获取方式不同, 所得意义不同, 现场应用条件也有区别。岩芯分析渗透率反映的是几厘米范围内的岩石渗透性, 属于小尺度范畴; 测井分析得到的渗透率反映几十厘米范围内的岩石渗透性, 属于中尺度范畴; 试井分析探测范围较大, 属于大尺度范畴。

收稿日期: 2014-03-31

第一作者简介: 马秀媛, 女, 1965 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程渗流及稳定性方面的研究工作。E-mail: maxiu yuan@sdu.edu.cn

通讯作者: 王倩, 女, 1988 年生, 硕士研究生, 主要从事地下水渗流方面的研究工作。E-mail: xiaopao1988@126.com

国内外许多学者对裂隙岩体的渗透率做了大量研究。Pratt 等^[3]在花岗岩块上进行了持续几个月的多手段原地试验,这次试验针对过去大多数原地研究中仅研究单一的岩石性质的局限性,采用了形变、波速、电阻率、渗透率等手段对比,得到应力作用方向与渗透率大小的相应关系;Kranz 等^[4]在实验室对完整和节理 Barre 花岗岩的渗透率做了研究,主要研究节理粗糙度与渗透系数的关系;Engelder 等^[5]1981 年选用质地坚硬的 Cheshire 石英岩制成节理试件,用煤油作为流体介质以避免与岩石发生化学反应,试验详细研究了节理开距在加载过程中的变化与渗透率之间的关系;刘杰等^[6]通过试验研究了在有充填物的条件下,劈裂岩体在加载路径、围压、轴压、填充物厚度、粒径等不同因素影响下的渗流规律。

对单一尺寸裂隙岩石的渗透系数与节理之间关系的试验研究较为成熟,杨金保等^[7]通过巴西劈裂法产生单一裂隙的方法来研究标准尺寸花岗岩的裂隙渗透特性,取得了显著成果。但现今还缺乏不同尺寸节理岩石与渗透系数之间的定性规律。本文针对这一现象,通过改进 ELE 渗透仪的室内试验方法确定不同尺度的裂隙岩石试样的渗透率,该方法能测定随着岩石试样尺寸变化,岩石的渗透率的变化规律,对研究岩石的水力学特性有指导性意义。

2 渗透系数的确定方法

近年来裂隙岩体渗透系数的确定方法,主要有现场水力试验法、室内试验法、裂隙采样测量法、反演分析法和离散裂隙网络渗流数值试验法^[8]等。

现场水力试验法一般指单孔压水试验,它是用栓塞将钻孔隔离出一定长度的孔段,并向该孔段压水,根据压力和流量的关系确定岩体渗透特性的一种原位渗透试验^[9]。室内试验法主要根据室内物理水力学模型试验成果结合立方定理推求^[10]。裂隙采样测量法先用测线测量法或者侧面测量法确定岩体裂隙的隙宽、产状及位置^[11],然后运用统计学的方法来确定裂隙岩体的渗透系数张量^[12]。反演分析法是根据地下水动态观测资料或抽水试验资料已获得的各处地下水面或水头分布,反过来确定渗透系数、给水度和贮水度等水文地质参数^[13]。反演法又可分为解析法和数值法。解析法利用解析解直接反求岩体各向同性的渗透系数。数值法通常先利用数值方法求解渗流正问题,再根据不同的计算原理反求岩体各向同性的渗透系数或各向异性的渗透张量^[14]。离散裂隙网络渗流数值试验法是指首先构建一个大

尺度的离散裂隙网络,然后从网络中心点开始,依次从小尺度到大尺度,取不同尺度的子裂隙网络。在每一个尺度的子裂隙网络中,通过离散裂隙网络渗流模拟程序,在给定人为水力边界条件下求解地下水运动差分方程,求出岩体在水力梯度方向上的渗透系数^[15]。

室内试验方法相对比较简单、费用少,且结果较精确。本文采用了一种新型室内测量岩石渗透率的试验方法并结合达西定律推求。通过室内试验结果分析可得到裂隙岩体的渗透规律。

3 室内试验方法及原理

3.1 试验设计

本试验设计用 5 组不同尺寸的岩石试样,分别进行稳定渗透压力与变渗透压力下渗透性试验,探究随着岩石试样尺寸的增大,具有不同的裂隙、孔洞组合下以及在不同的渗透压力下,岩石渗透率的变化规律。

3.2 试验仪器与改造

试验所用仪器原型是法国进口的 ELE 岩石渗透仪。该渗透仪采用渗透试验端帽与 ELE-Hoek 压力室和油压系统配套使用,是实验室研究高围压作用下岩石渗透试验的高效经济方式。系统连接原理如图 1 所示。

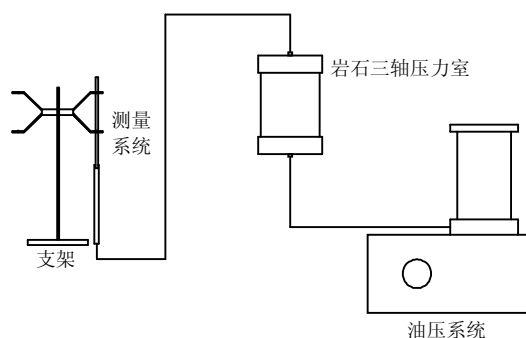


图 1 系统连接原理图

Fig.1 The principle diagram of system connection

为探究岩石的渗透规律,需要进行多组尺寸的岩石渗透试验。常规岩石渗透试验装置只有 1 个 5 cm×10 cm 标准尺寸的压力室,不能满足多尺度岩石试验要求。因此,设计了 5 种尺度的压力室,直径按照 5~10 cm 的规律递增,考虑到试验的可行性与经济性,最大直径不超过 35 cm,同时实际压力室尺寸兼顾了现场取得的岩石试样的尺寸,故压力室尺寸分别为 9 cm×10 cm、12 cm×10 cm、20 cm×20 cm、25 cm×20 cm、32 cm×20 cm。

压力室及其配套系统的主要部件如图 2 所示。

改进后的渗透试验不加围压, 通过现场浇筑硅胶溶液固化后形成的硅胶套进行岩石试样周围的密封。为满足硅胶溶液的可灌性、黏结性、硬度、合适的固化时间等方面的要求, 对多种密封材料、添加剂配比等进行了大量试验研究, 最后确定合适的材料和配方。为了配合现场密封胶的浇注、成型、切割等工序的顺利完成, 设计了与压力室配套的多个部件。



图 2 自制压力室主要部件示意图

Fig.2 Schematic diagram of major components of homemade pressure chamber

3.3 试验原理

当有水头差存在时, 处于裂隙岩体中的地下水, 就会透过岩体中的孔隙和裂隙而发生流动, 即产生渗流。地下水在岩体中的储存和渗流是一个很复杂的问题。大量野外试验证明, 不仅孔隙介质中的渗流, 裂隙甚至岩溶裂隙的渗流也服从达西定律^[16]。故本试验采用达西稳定流方法测定岩样的渗透率, 即根据流体通过岩样的流量和岩样两端的渗透压力差等可测量参数计算得到岩样的渗透率, 计算式为

$$k = \frac{qL\mu}{\Delta p A} \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中: k 为岩样的渗透率 (cm^2); q 为通过岩样的渗流流量 (mL/s); L 为岩样长度 (cm); μ 为水的动力黏滞系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); A 为岩样的横截面积 (cm^2); Δp 为岩样两端的渗透压力 (MPa)。

3.4 试样制备与试验步骤

3.4.1 试样制备

从现场钻取的大量碳酸盐岩芯中, 选取有明显结构面和孔洞组合、长度大于 20 cm 的岩芯。为满足试验需求, 将各组岩芯加工成统一规格的试样, 加工后岩芯试样尺寸 (直径×高度) 分别为: 7 cm×10 cm、10 cm×10 cm、18 cm×20 cm、23 cm×20 cm、

30 cm×20 cm。将 5 种尺度岩芯试样按直径从小到大的顺序编为 A 组、B 组、C 组、D 组、E 组, 每组 8 个试样, D 组试样如图 3 所示。对试样进行标记, 统计裂隙、孔洞分布。

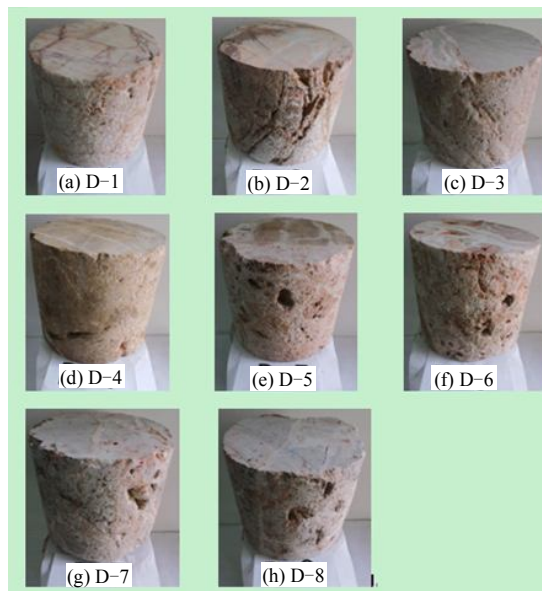


图 3 D 组岩石试样示意图

Fig.3 Schematic diagram of rock specimens group D

3.4.2 试验步骤

(1) 采用浸水饱和的方法, 将岩石试样在蒸馏水中浸泡 3 d 以上。

(2) 将饱和试样在室温下风干试样表面。

(3) 将风干的岩石试样放置于自制的压力室中, 用与压力室配套的固定圈将试样固定在压力室正中间, 使其周围空隙均匀。

(4) 配制硅胶, 取乳白色黏结性及硬度较好的硅胶适量, 按预先确定的比例加入黏结剂和固化剂, 快速搅拌均匀。

(5) 沿着试样上表面边缘均匀灌胶。灌胶过程中, 用橡胶锤轻击压力室侧壁, 使硅胶更均匀密实地填充。

(6) 将灌好试样放置 24 h。

(7) 用与压力室配套的割胶圈将岩石上部硅胶割掉, 然后在硅胶表面涂抹黄油与液压油, 再拧紧上压力室即可。

(8) 连接油压系统, 分级加水头压力。

(9) 加水头压力后待量测系统中水位均匀稳定上升后, 开始记录一定时间段内水位上升的高度。

(10) 该级水头压力下数据观测完毕后, 改变水头压力, 按上步方法记录。

(11) 该试样数据观测完毕后, 拆除压力室并清洗。

4 试验结果分析

4.1 试验现象

试验中观察到在加水头压力开始的瞬间量管示数会突然上升,然后很快下降,下降到一定数值后会停止下降。随着持续的施加水头压力,示数会再随时间的增长而缓慢均匀地上升。分析此现象的原因:在给试样施加水头压力的瞬间,试样受到压缩,试样中的裂隙与孔隙中的水被排出,因此,量管示数上升;经过这个过程后,试样开始吸水饱和,导致量管示数下降;当试样完全饱和后,有水稳定流

出,使量管示数缓慢上升。在该缓慢均匀上升阶段,即是试样在该级水头压力下的正常渗流。

4.2 试验结果与分析

4.2.1 稳定渗透压力试验结果与分析

由于岩石渗透率较小,在较低的压力下渗流量很小;而有结构面的岩石试样,在渗透压力较大时,会出现流量较大的情况,使渗流量难以准确测定。经过比较,采用 2 MPa 渗透压力来做稳定渗流分析,结果较精准。5 组试样试验数据如表 1 所示,各组试样渗透率对数曲线如图 4 所示。由图、表可知:

表 1 稳定渗透压力下渗透试验数据

Table 1 Infiltration experiment data under stable seepage pressure

编号	渗透率 /(10^{-16} cm ^{2})	编号	渗透率 /(10^{-15} cm ^{2})	编号	渗透率 /(10^{-14} cm ^{2})	编号	渗透率 /(10^{-13} cm ^{2})	编号	渗透率 /(10^{-12} cm ^{2})
A-1	2.86	B-1	1.21	C-1	8.88	D-1	22.31	E-1	5.58
A-2	2.92	B-2	2.12	C-2	8.37	D-2	31.61	E-2	6.37
A-3	1.13	B-3	5.26	C-3	9.20	D-3	7.20	E-3	7.24
A-4	4.23	B-4	2.32	C-4	9.48	D-4	36.88	E-4	7.97
A-5	0.66	B-5	2.79	C-5	26.33	D-5	13.11	E-5	3.97
A-6	2.74	B-6	2.51	C-6	14.67	D-6	28.37	E-6	4.44
A-7	2.79	B-7	3.62	C-7	19.10	D-7	16.08	E-7	7.55
A-8	1.93	B-8	1.90	C-8	17.93	D-8	8.77	E-8	2.99

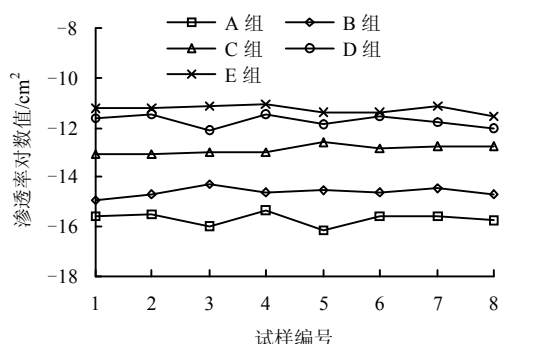


图 4 渗透率对数分布曲线图

Fig.4 Lognormal distribution curves of permeability

(1) 在相同尺寸试样的渗透试验中,由于每个试样裂隙与孔洞组合形式不同,渗透率略有差异。试样分布有裂隙和孔洞的,渗透率相对大些,反之,试样较密实的,渗透率就小一些。

(2) 在相同渗透压力下,随着试样尺寸增大,渗透率随之增大。

4.2.2 等尺寸变渗透压力试验结果与分析

每个尺寸试样选取两个,进行 0.5、1.0、2.0、3.0 MPa 的不稳定水头渗透试验,结果如表 2 所示。

为了更清晰地反应各组试样在不同渗透压力下渗透率的关系,将数据绘制成曲线图,如图 5 所示。

表 2 变渗透压力下渗透试验数据 (单位: cm ^{2})

Table 2 Infiltration experiment data under variable seepage pressures (unit: cm ^{2})

试样 编号	渗透压力/MPa			
	0.5	1.0	2.0	3.0
A-1	0.78×10^{-16}	2.42×10^{-16}	2.94×10^{-16}	3.23×10^{-16}
A-4	1.35×10^{-16}	3.96×10^{-16}	4.21×10^{-16}	4.45×10^{-16}
B-1	0.45×10^{-15}	1.17×10^{-15}	1.21×10^{-15}	1.28×10^{-15}
B-4	1.79×10^{-15}	2.19×10^{-15}	2.32×10^{-15}	2.47×10^{-15}
C-5	2.12×10^{-13}	2.55×10^{-13}	2.63×10^{-13}	2.80×10^{-13}
C-7	1.26×10^{-13}	1.87×10^{-13}	1.91×10^{-13}	2.01×10^{-13}
D-3	6.77×10^{-13}	7.14×10^{-13}	7.21×10^{-13}	7.32×10^{-13}
D-8	5.16×10^{-13}	5.72×10^{-13}	8.77×10^{-13}	9.92×10^{-13}
E-5	3.25×10^{-12}	3.89×10^{-12}	3.97×10^{-12}	4.07×10^{-12}
E-6	3.92×10^{-12}	4.35×10^{-12}	4.44×10^{-12}	4.64×10^{-12}

由图、表可知,岩石的渗透性是跟渗透压力大小有关的,渗透压力越大,渗透率也越大。当渗透压力为 0.5 MPa 时的渗透率较 1.0 MPa 以上渗透率差别较大,这是由于渗透压力较小时,岩石的渗透性较低,只有当渗透压力达到一定值后,才能在试样内部形成较顺畅的渗流通道。由试验结果可以看出,当渗透压力达到 1.0 MPa 后,其渗透性比较稳定。虽然在试验所施加的压力范围内,渗透率大小差别不是很大,但也说明了渗透率与渗透压力几乎成直线关系。这是因为主要通过岩石中的裂隙和孔洞而发生渗流,渗透压力大,水流对岩石中的裂隙

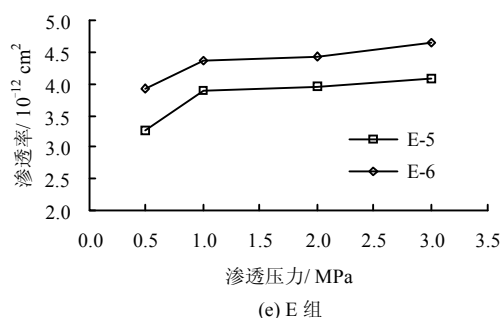
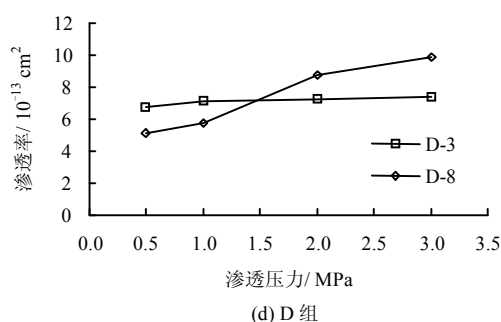
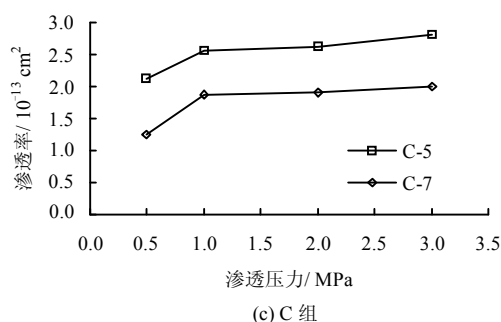
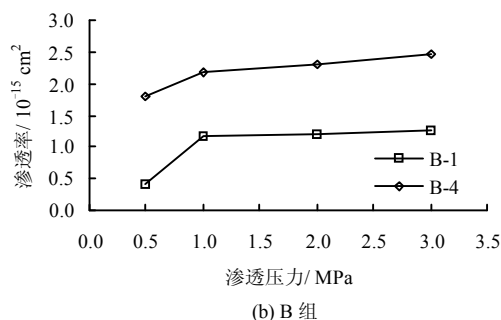
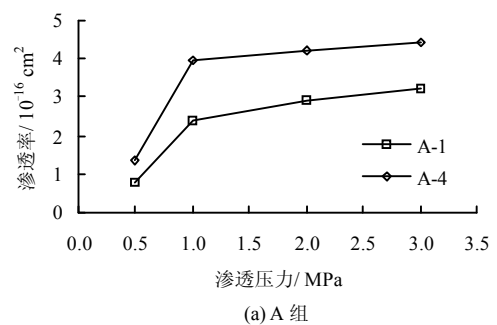


图 5 变渗透压力下各组试样渗透曲线
Fig.5 Specimen permeability curves
under variable seepage pressures

和孔洞扩张作用较大,使其通过裂隙或孔洞的能力增强,过水量就越大。

4.2.3 变尺寸、变渗透压力试验结果与分析

试验结果:每个尺寸岩石选取一个代表性试样编号为 H-1、H-2、H-3、H-4、H-5,进行 0.5、1.0、2.0、3.0 MPa 的不稳定水头渗透试验,试验结果如表 3 所示。将试验数据绘制成图 6,进行结果分析可得:

(1) 随着试样尺寸增大,渗透率随之增大。

(2) 随着渗透压力的增大,试样渗透率随之增大。

(3) 每个尺寸的试样在渗透压力从 0.5 MPa 提升到 1.0 MPa 后,渗透率都有较大提高,但随着试样尺寸的增大,其提高程度有所减少。这是因为试样尺寸越大,其结构面越明显,结构面对渗透率的影响远大于渗透压力的影响。

表 3 变尺寸变渗透压力下渗透试验数据

Table3 Infiltration experiment data under variable sizes and variable seepage pressures

试样 编号	渗透压力/MPa			
	0.5	1.0	2.0	3.0
H-1	1.01×10^{-16}	1.43×10^{-16}	1.94×10^{-16}	2.31×10^{-16}
H-2	1.33×10^{-15}	1.98×10^{-15}	2.19×10^{-15}	2.40×10^{-15}
H-3	8.73×10^{-14}	9.12×10^{-14}	9.21×10^{-14}	9.33×10^{-14}
H-4	4.75×10^{-13}	5.71×10^{-13}	5.77×10^{-13}	5.89×10^{-13}
H-5	3.60×10^{-12}	4.36×10^{-12}	4.80×10^{-12}	5.15×10^{-12}

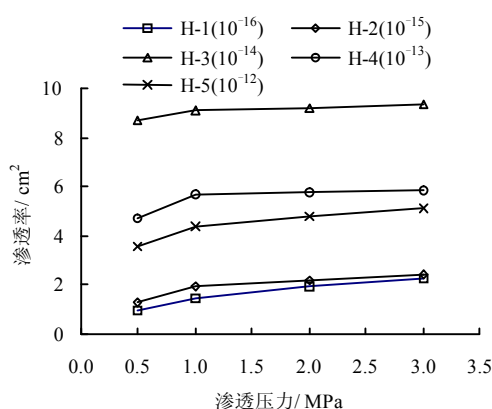


图 6 变尺寸变渗透压力下各组试样渗透率分布曲线图
Fig.6 Specimen permeability curves under variable sizes and variable seepage pressures

4.3 试验数据拟合

根据稳定渗透压力试验得到的数据,按照文献[17]进行统计修正,用 Matlab 软件给出拟合函数。

对得到的数据进行分析可以看出,渗透系数 K

的对数与试样直径 r 有一定对应关系。关系曲线按照如下函数进行拟合, 拟合函数中的相关系数 $R^2 = 0.9025$, 可以看出拟合效果比较好, 如图 7 所示。

$$\lg K(r) = -0.005r^2 + 0.388r - 13.21 \quad (2)$$

从图可以看出, 随着岩石试样尺寸增大, 岩石的渗透率随之增大, 但增大趋势有所减缓, 而增大到一定数值后会趋于稳定。分析此原因, 是随着岩石试样尺寸增大, 岩石内包含的孔洞与裂隙增多, 增加了渗流通道, 故岩石的渗透率会增大; 而随着岩石试样尺寸的逐渐加大, 渗透率的增大趋势会逐渐减小直至稳定, 由于岩石试样尺寸增大到一定程度后, 岩石试样内的孔洞与裂隙对岩石的影响不再增加, 岩石的渗透系数会趋于一个固定值, 此时的岩体可以视作等效连续介质。

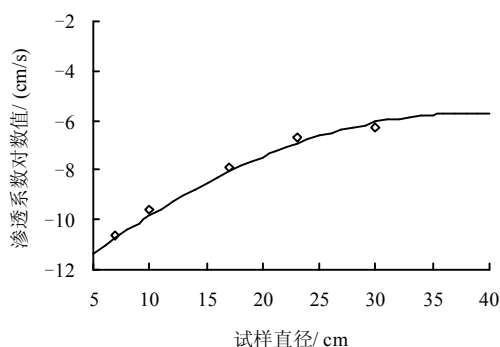


图 7 渗透系数与试样尺寸拟合关系曲线

Fig.7 Relation permeability coefficient and specimen size fitting

5 结 论

(1) 以自主研发改进的高压岩石渗透试验仪器, 成功地进行了稳定流及非稳定流、5 种尺寸、多种裂隙、孔洞组合的复杂介质试样的渗透试验。

(2) 裂隙岩体渗透特性在一定程度上受渗透压力的影响。随着渗透压力的增大, 岩石试样的渗透率也随之增大。

(3) 随着岩石试样的尺寸增大, 岩体的渗透率随之增大, 但是增大到一定值后, 会趋于稳定。

(4) 岩石的裂隙与孔洞发育, 形成裂隙网络系统, 增加渗流通道, 渗透率较大; 岩石的裂隙与孔洞不发育, 不能形成完整的渗流通道, 渗透率较小。

(5) 在裂隙、孔洞岩体中, 流体的渗流路径主要以裂隙为主, 裂隙对岩体渗透率的影响因数大于孔洞。因为裂隙的渗透率比岩体大许多, 故流体会优先选择渗透率较大的流动通道。

参 考 文 献

- [1] 倪绍虎, 何世海, 汪小刚, 等. 裂隙岩体水力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 488—498.
NI Shao-hu, HE Shi-hai, WANG Xiao-gang, et al. Hydraulic properties of fractured rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(3): 488—498.
- [2] 陈崇希. 地下水动力学[M]. 北京: 中国工业出版, 1961.
- [3] PRATT H R, SWOLFS H S, BRACE W F, et al. Elastic and transport properties of an in situ jointed granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1977, 14(1): 35—45.
- [4] KRANZ R L, FRANKEL A D, ENGELDER T, et al. The permeability of whole and jointed Barre granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1979, 18(4): 225—234.
- [5] ENGELDER T, SCHOLZ C H. Fluid flow along very smooth joints at effective pressures up to 200 megapascals[C]//Mechanical Behavior of Crustal Rock (The Handin Volume). Washington: AGU, 1981: 147—152.
- [6] 刘杰, 李建林, 赵宗勇, 等. 不同填充及加载路径下劈裂砂岩渗透特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 2): 45—47.
LIU Jie, LI Jian-lin, ZHAO Zong-yong, et al. Research on seepage characteristics of splitting sandstone in different fillers and loading paths[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(Supp.2): 45—47.
- [7] 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—1632.
YANG Jin-bao, FENG Xia-ting, PAN Peng-zhi. Experimental study of permeability characteristics of single rock fracture considering stress history[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(6): 1629—1632.
- [8] 孙蓉琳, 梁杏, 靳孟贵. 裂隙岩体渗透系数确定方法综述[J]. 水文地质工程地质, 2006, (6): 120—123.
SUN Rong-lin, LIANG Xing, JIN Meng-gui. Review on determination of hydraulic conductivity of fractured rocks[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2006, (6): 120—123.