1989年3月 NORTHWESTERN SEISMOLOGICAL JOURNAL March, 1989

岩石渗透特性的实验研究*

吴景浓1)	龚钢延2)
颜玉定1)	谢原定2)

摘要

本文介绍了在低压下(最大压力20MPa)对完整岩石和含自然裂面岩石 渗透率的实验研究。在实验中对四种材料(花岗岩、变质岩、大理岩、水泥 块)用六种方法进行了测试。实验结果表明,低压下完整岩石的渗透率为1 μd量级,含裂面岩石的渗透率为1 md量级,渗透率明显地与应力状态和加载 方式有关。

一、前 言

研究岩石(包括断裂带)的渗透特性对于水库或深井注水诱发地 震 的 研究 是非常重要 的,因为岩石的渗水条件与地震活动的时空分布有密切的联系^[1]。此外,这项研 究 对于在 地学的其它研究领域及工程实践中也是很重要的。诸如核废液的地下贮藏、石油和天然气的 勘探与开采、地下热能的开发利用等^[2]。

目前,研究岩石的渗透特性大体有三种途径,即原地测量,实验室测量及由理论分析和 数学计算来推算岩石渗透率。前者耗资昂贵,而且精度较低,实验条件不易控制,后者必须 在占有前二者资料的基础上才能实施。根据现有的条件,我们采用稳态法⁽³⁾对花岗岩、大 理岩、变质岩和水泥块四种材料的试件的渗透率进行了实验研究。本文介绍了实验的方法、 原理及其结果,並提出了进一步进行实验研究的设想。

二、实验原理及方法

多孔介质中液体流动的达西定律为:

 $\mathbf{v}_i = -\frac{\mathbf{k}_i}{\mu} \frac{\partial p}{\partial \mathbf{x}_i}$ (i = x, y, z) (1)

其中 k_i 是沿 x_i 方向的渗透 率, $\frac{\partial p}{\partial x_1}$ 是沿 x_i 方向的流体压力梯度, μ 为 流 体的粘滞系数,

^{*}木研究项目得到了地震科学联合基金资助。

^{1)} 广东省龜震局

²⁾国家地震局兰州地震研究所

60

v₁是沿x₁的方向的流速。实验中可将试件视为各向同性材料,即k₁=k,对试件沿径向上施 加压力使流体沿径向流动,如图1所示。(1)试可以简化成,

$$\mathbf{v}_{r} = -\frac{\mathbf{k}}{\mu} \frac{\mathrm{d}\mathbf{p}}{\mathrm{d}\mathbf{r}} \tag{2}$$

单位时间内通过试件单位面积的流量是

$$\mathbf{q} = \mathbf{v}_{\mathbf{r}} = \frac{\mathbf{Q}}{\mathbf{t} \cdot \mathbf{A}} \tag{3}$$

其中t为观测时间,A为流体通过的面积。Q为观测时间内通过面积A的稳定总流量。

当有效的渗透高度为h时,

 $A = 2 \pi r h, \qquad R_2 \leqslant r \leqslant R_1 \qquad (4)$

将(3)、(4)式代入(2)式得:

$$\frac{Q}{2 \pi r \cdot h \cdot r} = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dr}$$

分离变量后並积分可得:

$$\mathbf{k} = \frac{\mu \ln \left(\frac{R_1}{R_2} \right)}{2\pi \hbar_2^3} \frac{Q}{\Delta \mathbf{p} \cdot \mathbf{t}}$$
(5)

其中 $\Delta p = p_2 - p_1$, p_2 、 p_1 分别是 $r = R_2$ 、 $r = R_1$ 处的水压力。

由于每个试件的几何尺寸(R₁, R₂、h)已经确定,在常温常压条件下水的粘滞系数μ =0.01泊,这样在实验中只需测量Q、t、Δp,就可按照(3)式、(5)式分别求得流量 q和渗透率k值。实验中应该注意的是渗透流量必须达到稳定流动状态。

渗透率的单位常用达西(darcy)表示,其量纲为〔L²〕, 1 darcy≈10⁻¹²m²。

由于低渗透率岩石的k值很小,有时采用 毫达西(md)、微达 四(µd)、 毫微达两(nd)表示:

$$1 d = 10^{\circ} m d = 10^{\circ} \mu d = 10^{\circ} n d$$

在岩土工程中往往应用渗透系数(或导水系数),用K表示,

$$\overline{K} = k \frac{\gamma_{\star}}{\mu} = k \times 10^{-5} \,\mathrm{m/sec}$$

其中k的单位为达西,γ_v是水的容重。

实验用的试件都加工成园柱形(如图 1),几何尺 寸为 $R_1 = 2.5$ cm, $R_2 = 0.5$ cm, H = 10 cm,试件加工时严格要求内外园同心,以保证渗流均匀,试件的上 下 端 面用"水中胶"与压头粘贴,经过24小时的固结后投入使用。试验前我们还将试件中心孔中的气体排出,同时检查试件与压头之间是否有漏水现象。



试件形状及尺寸 图 1 Fig. 1 Shape and scales of the sample



II的读数应一致。调整好第一级注水压力后打开阀门3,关闭阀门1,试件内孔便承受第一 级压力作用,此时压力表 I、 I 读数应一致。施加下一级压力时,应关闭阀门 3. 避免试件 受到压力冲击。

注水压力的确定主要考虑了三个要素,一是被测材料的渗透性。一般来说,渗透率高则 用低水压、渗透率低则用高水压;二是试件的水压致裂强度,如果最大注入水压超过试件的 水压致裂强度,则在施加水压过程中可能使试件张裂;三是加载设备的能力和精度。一般分 三级注水加压(如2.1MPa、3.1MPa、4.1MPa)便可测得到稳定的k值。

流量观测采用化学试验用的量筒及滴定管,精度达0.1ml(5)。观测时间视排水流量的 大小而定。对完整试件通常半小时至1小时观测一次,对含裂面的试件,按分秒量级计时, 观测到连续三次流量稳定(差值2%∆Q)为止。

各种实验材料的物理性质列于表1中。从表1中看出,新丰江水库区的花岗岩的孔隙度 要比刘家峡水库区岩石大一个量级。刘家峡水库区岩石的抗拉、抗压强度均较高,可见岩石 是极致密的。水泥块的容重很小、孔隙度大、其物理、力学性质与天然岩石截然不同。

六种实验方式如表 2 所示,在实验中以第 1 种为主,其它五种仅作为试验性的。

्रमर ।		11	· 312 173 174 07 2	密华1974、刀	子性风	
试件名称 及其代号	比重 Gs	干容重 Yā(g/cm ⁸)	孔隙度 n (%)	干抗拉强度 σt(MPa)	干抗压强度 σo(MPa)	性状描述
新丰江 花岗 岩 G	2,68	2,65	1,5	9,95	108.5	细中粒斑状花岗结构,主要 成分斜长石、钾长石和石英
大冶 大理岩 M	_	2,69	0.39	8.7	97.2	白色光泽,中细粒结晶,构 造完好、均质
刘家峡 変质岩L・M	2.89 (2.98)	2.88 (2.93)	0.5 (1.86)	10.4	139.6 (152.3)	细黑云石母块状构造,结构 极致密,主要含斜长石、钾 长石、石英、黑云母
水況块 C	2.66	1,15	5.4	2.0	10.5	粉状结构,含砂量少,养护 时间不长

61

电阻 应变仪

峁簧

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

62	西北地震学报	第11卷	
表 2	各类试验方式		
类別	试验方式	教性	
1	完整试件,无围压,内孔注水,幅射型全渗透	23	
2	完整试件,图压注水,聚集型全渗透	8	
3	含横断裂面, 内孔注水, 裂面渗透 {恒定轴压、改变孔压 恒定孔压、改变轴压	8	
4	含横断裂面,围压注水,裂面渗透 {恒定围压、改变围压	3	
5	含纵向裂面,内孔注水,裂面渗透	1	
6	全 纵向刻面。图压注水。刻面渗透	1	

三、实验结果及其分析

图 3 表明 4 个花岗岩试件在不同的孔压注水情况下平均渗透率变化的情况。 4 个试件的 k值都很接近,均在10⁻°达西左右,随着注水压力的变化,k值变化甚微。



花岗岩的平均渗透率随孔隙压力的变化 图 3





图 5 是在两种不同注水方式下大理岩渗透特性的比较。两种注水方式不同,而两条流量 曲线却在同一数量级内变化,说明若施加相同的注水压力,孔压注水的流量将比围压注水时 大得多,因此围压注水测定的k值比孔压注水测出的偏小,而且随着围压的增加继续减小。



Fig. 5 The permeating characteristics of marble under two injecting water ways

图 6 表示不同应力途径对横断面渗透的影响。(1)恒定围压,随着轴压的增加,q、 k值都有明显的减小。说明轴压使裂面相对被压密;(2)恒定轴压,随着围压注水压力的 增加,q值增大,而k值反而减小,此现象尚待进一步探讨。



图 7 、图 8 表示内孔注水升压及减压过程中的渗透情况。无论p₂增加或减小, Δp和q值 的相关性都很好, 在压力较高时k亦很稳定。降压时的平均k值比升压时低了三倍。









the crack permeating procedure



图 9 各类注水方式的受力分析 Fig. 9 The analyses of sample forced under all kinds of injecting water ways

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

第11卷

图 9 表示各种注水方式中试件的受力状态。第 1、 2 种实验的 σ ,和 σ ,是根 据 厚 壁园筒 的拉梅公式计算的。在渗透压力进入之前,第 2 种试验中试件始终处于受压状态,第 1 种试 验中试件则受切向张应力作用。当 σ , σ ,(抗张强度)时,试件将发生张性破裂,出现q值 的突增。因此实验前应通过快速加载测定未渗透时的岩石的抗拉强度 σ_{D1} ,以便 挖 制 p_{2n+2} 的施加,使 σ , $\leq \pm \sigma_{D1}$ 。当渗透压全部进入后,试件内出现附加张应力,此时试件 的致裂强 度大大降低。以大理岩为例,快速加载时未渗透岩石的致裂强度 $\sigma_{D1} = 8.67$ MPa(N = 8); 稳定渗透后平均致裂强度 $\sigma_{v1} = 4.16$ MPa(N = 3),而此时的内孔注水压力 $p_2 = 4.03$ MPa。从计算结果来看, $\sigma_{D1} = \sigma_{v1} + p_2 = 8.19$ MPa,接近于 $\sigma_{D1} = 8.67$ MPa, $p_2 < \sigma_{v1} < \pm \sigma_{D1}$ 。从抗拉强度考虑,全渗透后的软化系数 $a \approx 0.48$,如果再考虑化学作用, a将更低。

对于第2种加载而言,一般试件不易破裂,只有当 $\tau_{max} = \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{2} > \tau_0$ (抗剪强度)时,

才会首先在内孔表面出现剪破裂。因此,第2种实验的注水压力 p_1 可以提高。第3、4种实验中,当 σ_1 > p_1 (或 p_1)时,裂面压密;当 σ_1 σ_1 > p_1 (或 p_1)时,裂面压密;当 σ_2 (或 p_1)时,裂面张开。只要 试件完整部分的强度足够,可通过调整 σ_1 和p的关系达到适当的流量。第5种实验中裂面始 终处于受张状态,只适合于低压力、大流量测试。第6种实验中 $p_1R_1/(R_1-R_2)>p_1$,裂面 处于受压状态,此时 q_1 、k值将随 p_1 的增加而减小。

实验结果汇总于表 3 . 从表中看出,无论内孔注水或围压注水,完整花岗岩 的渗透率k 值都在10⁻⁶~10⁻⁷达西范围内变化,均值为10⁻⁶达西,完整大理岩为10⁻⁷达西。有裂面情形 下k值要增大10⁴量级。在刘家峡库区采集的 5 块岩石试件的实验均无结果。对 含 纵 向裂面 的大理岩试件,沿裂面进行内、外注水,其结果是内孔注水时的k值 比 围 压注水的k值大 2 - 3 个数量级。

试验材料	1	2	8	4	5	6
《 個单位 试验方式	10 ⁻⁷ darcy	10 ⁻⁷ darcy	10 ⁻³ jarcy	10 ⁻⁸ darcy	JO ⁻² darcy	10 ⁻⁴ darcy
新丰江 花岗岩	4,31 15,94 32,16 4,44	10,10 24,75	1.79 0.89	2.34 2.10 2.22		
大治 大趙岩	12.66 0.78 6.09 4.82	1.10			2.145	0.296
刘 <i>家 映</i> 变 质 岩	0		1.00 2.88 3.02 5.112 7.77 10.89	0.46		
水泥块	27.29 42.33 108.90 152.20					

赛 3

各类试验值汇总表

65

四、结 论

(1)对于中、低渗透率(k=10⁻⁵~10⁻⁷darcy)而且抗拉强度较高的结晶岩类,采 用内孔注水法或围压注水法测定渗透率,效果都比较好,尤以内孔注水法为佳。此次对新丰 江花岗岩的实验获得了成功,但对渗透率更低的岩石,如刘家峡的变质岩,尚未测出结果。 若再增大注水压力和再延长渗透时间,或许有可能测出渗透率。

(2) 对渗透率较高(k=10⁻⁴darcy以上)或抗拉强度很低,浸水后又易崩解的岩石、 使用第2种实验方式较好。只要控制注水围压低于岩石的构造骨架强度,不致于改变岩石的 渗透通道, k是不会有太大变化的。

(3)初步的实验结果表明:含横断裂面的试件的k值几乎都在10^{-s}darcy左右,比保 整试件的k值要高 3 ~ 4 个数量级, 与现场观测结果基本一致[8]。实验 结 果 还表明, 当恒 定轴压(σ_{1}),增加渗透压(p_{1} 或 p_{2})时,流量随之增大,但k值变化却不大,在同一数量 级内略有减小;恒定渗透压,增加轴压时流量和k值都随之减小,这一结果对于 研究水库诱 发地震是十分有意义的。

(4)实验中对水泥喷芯样试件的渗透性测定,得到了良好的结果,说明本方法不仅适 用于研究地壳岩石的渗透特性,还能为解决工程问题提供一种行之有效的测试手段。

本实验虽取得了初步结果 但许多方面尚待进一步完善大提高。如 提 高 围 压和渗透压 力,改善观测技术,提高观测清度和连续性,如测定流量采用自动的电记录等。

国家地震局兰州地震研究所周建国同志参加了部分实验工作,张生源、王建瑞同志曾为 实验采集了部分岩样,在此一并表示感谢。

(本文1987年12月14日收到)

文 揻

- (1)P. Talwani et al., Pore pressure diffusion and mechanism of reservoir-induced seismicity, Pageoph., Vol. 122, No. 6, 1984/85.
- (2)W.F. Brace, Permeability of crystalline and argillaceous rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sin. & Geomech. Abstr., Vol.17, PP.241-251, 1980.
- [8]K.G.斯塔格等,工程实用岩石力学,地质出版社,1978.
- (4)W.F. Brace et al., Permeability of granite under high pressure, J. G. R., Vol.73, PP.2225-2236, 1968.

[5]Y. Bernab'e, A wide range permeameter for use in rock physics, Int. J. Rock Mech. Min. Sci, Vol.24, No. 5, 1987.

(6)W. F. Brace, Permeability of crystalline rocks: new in situ measurements, J. G. R., Vol. 89, No.B6, 1984.

[7]R. L. Kranz, The permeability of whole jointed barre granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.16, PP.225-234, 1979.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

第11卷

EXPERIMENTAL RESEARCH ON ROCK PERMEABLE BEHAVIORS

Wu Jingnong1)Gong Gangyan2)Yan Yuding1)Xie Yuanding2)

Abstract

This paper deals with laboratory investigation into permeability of intact rock, natural facture rock under lower pressure (maximum test pressure is 20MPa).Four materials (granite, metamorphic rock, marble and cement block) have been tested in experiment by using six kinds of ways. The results show that permeability of intact rock under lower pressure is of 0.001 md magnitude and fractural rock is of 1 md magnitude, and rock permeability is clearly related to stress state and loading way.

¹⁾ Seismological Bureau of Guangdong Province.