

脆性岩石动态渗流特性试验研究

朱珍德¹, 刘立民^{1,2}

(1. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 山东科技大学 资源与环境工程学院, 山东 泰安 271019)

摘 要: 取三峡永久船闸高边坡花岗岩与山西万家寨水电站高边坡灰岩试样分别进行不同围压条件下全应力-应变过程渗流试验。试验结果表明, 岩石变形过程渗透性与变形破坏形式密切相关, 岩石在破坏前、后不同变形阶段渗流特性具有明显的不同。在破坏前的弹性变形乃至屈服阶段, 渗透性较弱且随变形的变化不明显; 岩样破坏至应变软化段, 渗透系数急剧增强并达到渗透峰值。在试验的基础上进一步探讨了岩石全应力-应变过程渗流特点之机理。

关键词: 脆性岩石; 渗流特性; 全应力-应变过程

中图分类号: TU452

文献标识码: A

岩体的渗流性指标是应力场与渗流场耦合分析的重要参数, 选取合理与否对评价结果的客观性和准确程度十分关键。目前, 相关渗流性参数主要是通过地下洞室现场压水实验获取, 计算研究中一般将这些参数作为常数处理。由于坝址边坡或采场顶、底板因开挖引起的变形一般要历经比较长的时间, 围岩的破坏程度在时间和空间上均表现出渐进的特点。围岩变形破坏必然会导致渗流场要素的动态变化, 实例表明^[1,2], 围岩不但在开挖前、后渗透性表现出明显的差异, 在开挖过程中其渗流特征在时间和空间上也表现为不均匀特点。因此, 地下洞室某点在某一时刻的渗透很难客观地反映开挖过程中围岩的渗透性变化, 将其用于整个工程区域围岩变形过程中的应力与渗流耦合关系分析就会存在很大的局限性。

然而, 由于开挖库区围岩渗透性变化的复杂性以及地质条件和施工环境的限制, 常规的现场试验方法获取岩体变形过程的渗透性参数在技术上相当困难。针对这种情况, 有学者提出了采用岩石全应力-应变过程渗透试验方法建立渗透性-应变耦合关系的研究思路, 并在煤系砂岩全应力-应变过程渗透试验结果基础上对渗透系数-应变耦合关系的拟合方法进行了探讨^[3]。这一研究思路的重要意义在于, 通过将全应力、应变过程渗透系数-应变关系与相对成熟的开挖扰动岩体应力场与应变场耦合技术相衔接, 有效地克服了目前有关岩体应力场与渗流场耦合分析中存在的技术缺陷。

将渗透系数-应变耦合关系融合到岩体应力场与渗流场耦合或损伤场与渗流场耦合分析是一个崭新的研究课题。笔者利用三峡船闸闷云斜长花岗岩和山西万家寨水利枢纽工程高边坡灰岩岩样在不同压力条件下进行全应力-应变过程渗透性试验, 通过试验所反映的应力-应变和渗透系数-应变关系的特点, 就岩石变形过程中的应力、应变及渗透系数三者之间的关联性特征作了初步探讨。

1 全应力-应变过程中的岩石渗透性试验

岩石全应力-应变过程渗透性试验所获得的应力-应变关系和应变-渗透系数关系对比曲线, 可以直观地反映出岩石在变形-破坏全过程的渗透系数变化。

1.1 试验原理

全应力-应变过程渗透性试验采用有渗透装置的岩石力学电液伺服系统(美国MTS公司生产的815 02型)进行。如图1所示, 该试验系统配备轴压($\sigma_1 \leq 500$ MPa)、围岩($\sigma_3 \leq 45$ MPa)和孔隙水压($p_w \leq 45$

收稿日期: 2003-04-02

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(9910)

MPa) 等 3 套独立的闭环伺服控制系统, 具有单轴压缩实验、假三轴实验、单轴拉伸试验功能。其中, 压水渗透试验是先施加一定的轴压 σ_1 、围压 σ_3 ($\sigma_2 = \sigma_3$)、孔隙水压 p_{w1} (始终保持 $p_{w1} < \sigma_3$), 然后降低岩石试件一端的孔压至 p_{w2} , 在试件两端形成渗透水压差 $\Delta p_w = p_{w1} - p_{w2}$, 从而引起水体通过试件渗流。伺服渗透试验全过程由计算机控制, 包括数据采集和处理, 在施加每一级轴向压力过程中, 测定试样的轴向变形及渗透压差随时间的变化过程, 并读出每一级轴向压力下的轴向应变及渗透性数据, 可以获得应力 - 应变和渗透系数 - 应变关系曲线。

在渗流过程中, Δp_w 不断减少, Δp_w 减少的速率与岩石种类、岩石结构、试件长度 (渗流路程)、试件截面尺寸、流体密度与黏度以及应力状态和应力水平等因素有关。根据试验过程中计算机自动采集的数据, 岩石渗透率^[3]为

$$k = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^A m \lg \left[\frac{\Delta p_w (I-1)}{\Delta p_w (I)} \right], \quad (1)$$

式中, k 为渗透系数, cm/s ; A 为数据采集行数; m 为试验参数, $m = 526 \times 10^{-6}$; $\Delta p_w (I-1)$ 和 $\Delta p_w (I)$ 分别为第 $i-1$ 行和第 i 行的渗透压差值。

1.2 试样及试验条件

取长江三峡船闸高边坡岩体 - 闪云斜长花岗岩和山西万家寨水电站坝址灰岩为试样, 这两种岩石都属于脆性岩体, 其力学性质指标见表 1。

表 1 试验岩样的力学性质指标

Table 1 Mechanical characteristic indexes of specimens

岩 性	R_c /MPa	E /GPa	$\bar{\mu}$	$\bar{U}$ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	C /MPa	$\bar{\Phi}$ (°)
花岗岩	180	40	0.22	2.7	2.2	44
灰 岩	140	32	0.25	25.8	14.0	38

为探讨脆性岩石的透水性, 试验条件设置如下:

- (1) 所有的试样在相同的试验条件下 (两端面具有径向变形的效果) 做渗透性试验, 试验控制参数: 围压 6.0 MPa, 孔隙压力 5.8 MPa, 起始渗透压差 1.5 MPa。
- (2) 两类岩样试件尺寸为 $\phi 54 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$, 各自取 9 个试件。
- (3) 试样的全应力 - 应变过程控制在 8~12 个测试点进行测试。
- (4) 两类岩石试样分别分 3 个试件 1 组, 控制参数: 围压 10 MPa, 孔隙压力 9.0 MPa, 起始渗透压差 1.5 MPa。

2 岩石渗透性特征

全应力 - 应变过程岩石渗透性试验方法称为瞬态渗透法。即给试件施加一定的轴力、围压和孔隙压力, 然后固定试件上端的孔隙压力, 降低试件下端的孔隙压力, 这样在试件两端造成一定的压差, 测定这个压差随时间的变化过程就可以计算出试样在该应力状态下的渗透率。如果将试件峰前、峰值、峰后各点的渗透率测出, 就可画出试件全应力 - 应变过程的渗透曲线。

两类不同岩性的岩石试件各取两种不同工况, 其试验条件与试验结果见表 2。

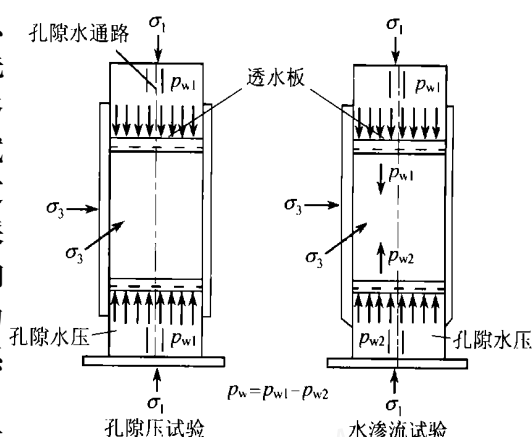


图 1 伺服渗透的试验原理

Fig. 1 Test principle along complete stress-strain path

表 2 实测试样的渗透系数特征

Table 2 Measured values for permeability coefficient of the rock specimens

工 况	岩 性	围压 / MPa	试样尺寸		孔隙压力 / MPa	起始渗透压力 / MPa	渗透系数峰值 / $\text{nm} \cdot \text{s}^{-1}$	k^* / $\text{nm} \cdot \text{s}^{-1}$
			$\bar{D}$ / mm	$\bar{H}$ / m				
I	花岗岩	6.0	54.6	80.2	6.0	1.5	32.60	29.82
	灰岩	6.0	54.1	80.8	6.0	1.5	34.50	31.56
II	花岗岩	10.0	53.6	79.6	9.0	1.5	31.47	28.90
	灰岩	10.0	53.8	79.4	9.0	1.5	35.85	32.73

注: k^* 为破坏后的稳定值, 即应变软化后渗透系数趋于稳定的几个测点均值。

在 12 个渗透性试件(围压为 6 MPa)中选取 4 个具有代表性(花岗岩、灰岩各 2 个)的应力 - 应变过程以及渗透率与之相应变化的曲线, 如图 2 所示。在 6 个渗透性试件中(围压为 10 MPa)选取 2 个具有代表性(花岗岩、灰岩试件各 1 个)的应力 - 应变过程以及渗透率与之相应变化的曲线, 如图 3 所示。

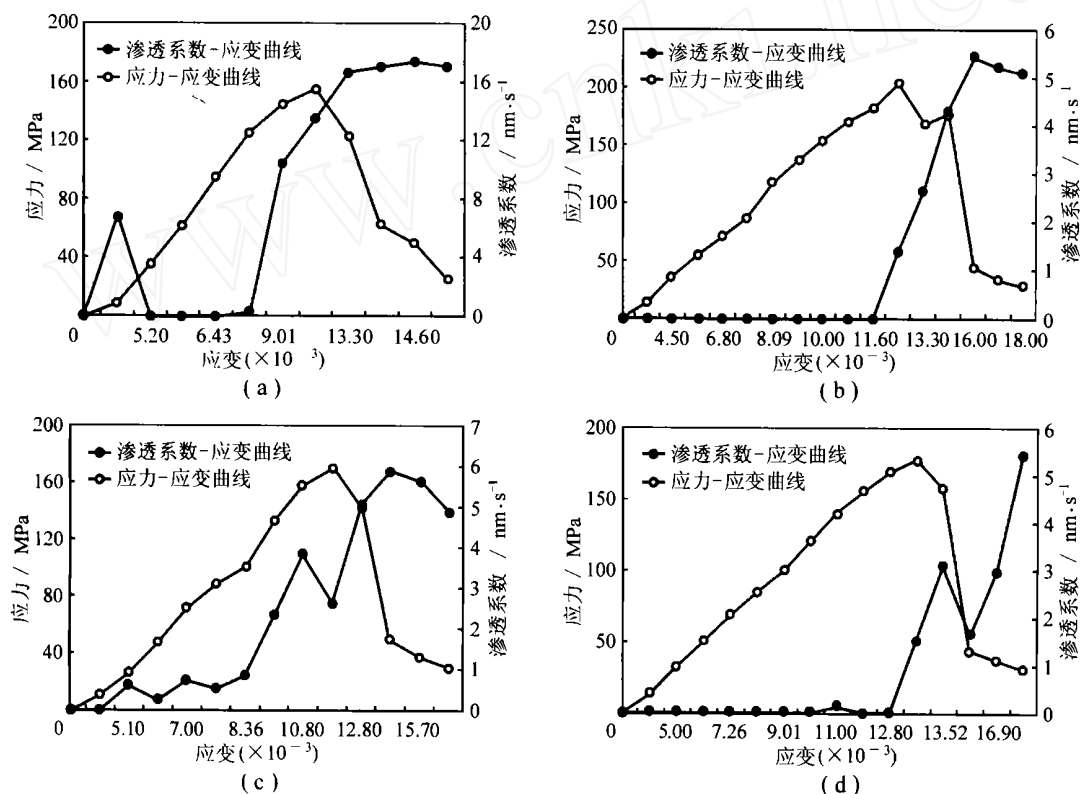


图 2 全应力 - 应变过程的渗透性变化曲线

Fig. 2 Permeability - strain behavior of granite specimens and limestone specimens

(a), (b) 花岗岩试样; (c), (d) 灰岩试样

2.1 渗透系数 - 应变的关系

从实验结果与变形曲线看出: 花岗岩和灰岩试样全应力 - 应变过程的渗透系数变化具有其共同的一致性。在破坏前的弹性变形乃至屈服阶段, 渗透性较弱且随变形的变化不明显; 岩样破坏至应变软化段, 渗透系数急剧增强并达到渗透峰值, 且塑性压密变形阶段没有明显的降低, 随变形扩展而逐步趋于稳定。

2.2 渗透系数 - 应力的关系

图 3 为花岗岩和灰岩在围压 $\sigma_3 = 10 \text{ MPa}$ 状态下的测试结果, 与围压 $\sigma_3 = 6 \text{ MPa}$ 状态下的试验结果相比, 围压提高使全应力 - 应变过程的渗透系数与应变关系发生了一定变化, 但对渗透强度并没有明显的影

响. 与围压为 6 MPa, 渗透压力为 5.8 MPa 条件下的结果相比 (图 2), 在 10 MPa 围压条件下, 花岗岩 (或灰岩) 的全应力 - 应变过程在后期塑性变形阶段的渗透系数随变形扩展呈下降的趋势, 但仍表现出较高的渗透系数^[4].

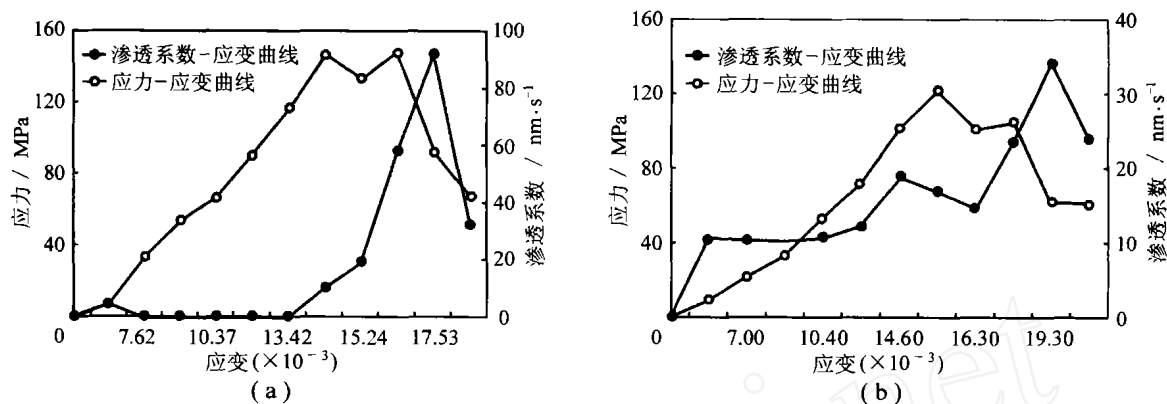


图 3 脆性岩石试样应力 - 应变过程的渗透性变化曲线

Fig. 3 Permeability-strain behavior of brittle rock specimens

(a) 花岗岩; (b) 灰岩

3 脆性岩石变形过程的渗透分析

Elsworth, Oda 等对裂隙岩体的渗透性特征进行了试验研究和模拟分析^[5,6]; Jones、作彦卿等概括出了裂隙岩体渗透系数与应力之间的耦合关系^[7,8], 认为岩体的渗透系数随应力与裂隙的作用关系而变化, 当应力对裂隙的作用主要表现为压效果时, 渗透系数随应力的增大而降低; 在应力对裂隙作用主要表现为拉张效果时, 渗透系数随应力增大而增强. 与裂隙岩体相比, 在常规的渗透压力作用下, 水透过岩石孔隙进行渗流的能力极其微弱, 岩石变形过程的渗透系数变化主要反映了裂隙的发育程度, 包括裂隙的张开度和连通率. 张性裂隙的发育程度和连通性越好, 表现的渗透能力就越强. 因此, 上述裂隙岩体渗透系数与应力之间的耦合特征对本项试验中脆性岩石变形过程的渗透性机理分析具有借鉴意义.

水透过岩石需要渗流通道, 本次试验所用试样均无肉眼可见的天然微裂隙. 且等压 ($\sigma_1 - \sigma_3 = 0$) 测试的渗透系数初始值均极其微弱, 可以认为, 试样孔隙和微裂隙的连通状态具有可比性. 因此, 根据试验所获得的应力 - 应变和渗透系数 - 应变关系曲线, 结合试样破坏前后形态、受力变形过程的应变特征 - 裂隙性质 - 渗透系数之间的关联性表现为如下特点: 弹性较强的脆性岩石在弹塑性变形段之前的变形以压缩为主, 只是从屈服开始才出现剪张裂纹, 且裂隙的张开度和连通程度随变形扩展而提高, 所以相应的渗透系数从屈服段开始显示出且急剧增强, 至岩样破坏, 连通性较好的裂隙渗流通道发育形成, 从而渗透系数达到峰值. 从应变软化阶段开始, 变形表现为以压缩为主, 相应的渗透系数表现为一定程度的下降, 但从下降的幅度看, 裂隙的压闭合程度较低, 仍保持良好的连通性. 从岩石力学角度分析, 岩石的变形破坏形式与压力状态密切相关, 即极坚硬的强弹性岩石, 在极高的压力状态下也会表现出塑性剪裂形式的变形破坏. 在相应条件下, 其渗透系数也必然会随之发生变化. 本项试验结果也反映了这种趋势, 图 2, 3 的结果也反映出脆性岩石变形过程的渗透系数变化特征在较大的压力范围具有普遍意义.

4 结 论

(1) 试验所获得的应力 - 应变与渗透系数 - 应变之间的对比关系, 直观地反映岩石破坏前后不同变形阶段的渗透系数, 渗透系数与应变之间的对应关系是比较明显的. 因此, 全应力 - 应变过程渗透系数试验可以作为岩体变形过程渗透系数特征研究的试验方法.

(2) 岩石变形过程渗透系数与变形破坏形式密切相关, 在全应力 - 应变过程的渗透系数 - 应变关系上脆性岩石表现出的特点: 渗透峰值形成于破坏后, 且破坏后的塑性压密阶段仍表现出较强的渗透性。试验结果反映脆性岩石在变形过程的渗透系数对于通过压水试验界定破坏具有重要意义。

(3) 压力状态对岩石渗透系数的影响反映在变形过程中渗透系数变化特点和渗透强度两方面, 且与岩石自身强度有关。

试验研究所揭示的脆性岩石变形过程渗透性与力学性质、应力状态关系的基本特征, 对于工程岩体渗流场研究具有重要意义; 在岩体高边坡开挖变形过程或暴雨入渗中, 为渗流场边界和初始条件的设置及变形过程岩层渗透性参数的合理确定提供了重要依据。

参考文献:

- [1] 张金才, 张玉卓, 刘天泉. 岩体渗流与底板突水 [M]. 北京: 地质出版社, 1997. 37~89.
- [2] 陈卫中, 朱维申, 罗超文. 万家寨引黄过程总干一、二级泵站水力劈裂试验研究 [J]. 岩土力学, 2001, 22 (1): 26~28.
- [3] 李世平, 李玉寿, 吴振业. 岩石全应力应变过程对应的渗透率 - 应变方程 [J]. 岩土工程学报, 1995, 17 (2): 13~19.
- [4] 朱珍德. 裂隙岩体损伤流变模型研究及其应用 [R]. 成都: 四川大学博士后工作报告, 1999. 5~26.
- [5] Elsworth D, Xing J. A reduced degree of freedom model for thermal permeability enhancement in blocky rock [J]. Geothermics, 1989, 18: 691~709.
- [6] Ode M, An equivalent model for coupled stress and flow analysis in jointed rock masses [J]. Water Resources Research, 1986, 22 (1): 1 945~1 956.
- [7] Jones F O. A laboratory study of the effects of confining pressure on fracture flow and storage capacity in carbonate rock [J]. Journal of Petrol Technology, 1975, 21 (3): 21~27.
- [8] 作彦卿, 张倬元. 岩体水力学导论 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1995. 67~141.

作者简介:

朱珍德 (1964 -), 男, 河北盐山人, 博士后, 教授, 1997 年毕业于同济大学, 获博士学位, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与科研工作. E-mail: zhendezhu 50918 @sina. com

Experimental research on dynamic seepage characteristics of brittle rock

ZHU Zhen-de, LIU Li-min

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Natural Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019, China)

Abstract: Seepage test was carried out on the granite specimens which were taken from the high slope at the permanent shiplock of the Three Gorges project, and limestone specimens which were taken from the high slope at the Wanjiashai Hydropower Station in Shanxi Province, under several surrounding pressures. The test results showed that the rocks have obviously unlike seepage characteristics before and after destruction of rocks; and the permeability behavior of the rock during deformation has a clearly correlation with the style of deformation destruction. On the basis of tests, the mechanism of seepage characteristics of complete stress - strain process is discussed.

Key words: brittle rock; seepage characteristics; complete stress - strain process