

# 地应力对裂隙岩体渗流特性影响的研究

殷黎明<sup>1</sup>, 杨春和<sup>1</sup>, 王贵宾<sup>1</sup>, 陈锐<sup>2</sup>

(1. 中国科学院岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 温州市水利电力勘测设计院, 浙江 温州 325011)

**摘要:** 岩体总是赋存于一定的渗流场与应力场中的, 研究地应力场对渗流场的影响具有重要的意义。首先分析了裂隙岩体渗流运动的基本规律, 研究了应力对渗流作用影响的机理。在此基础上, 结合甘肃某工程进行了现场地应力测量及高压压水试验, 并且作了大量地表的、钻井岩芯的节理裂隙地质调查, 得到了该地区的地应力值和渗透系数值。然后通过回归分析, 可以发现该地区渗透系数随地应力值的增大呈负指数递减的变化规律。

**关键词:** 岩石力学; 地应力; 渗透系数; 高压压水试验; 渗流特性

**中图分类号:** TU 457; P 618

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)17-3071-05

## STUDY ON EFFECT OF GEOSTRESS ON PERMEABILITY OF FRACTURED ROCK MASS

YIN Li-ming<sup>1</sup>, YANG Chun-he<sup>1</sup>, WANG Gui-bin<sup>1</sup>, CHEN Rui<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. Wenzhou Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Wenzhou 325011, China)

**Abstract:** Rock mass always exists in the fields of geostress and seepage, so it is important to study the effect of geostress on the permeability of rock mass. Firstly, the basic rule of seepage in fissured rock mass and the mechanism of the effect are studied. Then the in-situ geostress measurement and high water pressure test are made combining with an engineering project in Gansu Province. Investigations into joints on ground surface and in borehole are done; and the geostress and permeability coefficient of this area are obtained. By nonlinear regression analysis the change law is found that with the increase of geostress the permeability coefficient will decrease with negative exponential trend.

**Key words:** rock mechanics; geostress; permeability coefficient; high water pressure test; characteristics of seepage

## 1 引言

前苏联学者早在 1951 年就开始了对于单个裂隙水流运动的试验研究, 提出了著名的立方定理, 即岩体裂隙的过水能力和裂隙隙宽的 3 次方成正比。20 世纪 60 年代法国 Malpasset 拱坝的失事, 引起了工程界对岩体渗流问题的重视。随着社会、经济的快速发展, 人类的活动空间越来越大, 使得其开发

所依托的岩土体问题也越显突出, 裂隙介质地下水运动规律就是其中的突出问题之一。诸如大型水利水电工程中的地下水问题、核废料的深部贮存、垃圾填埋污水下渗、输油管道渗漏造成的地下水污染问题等都与裂隙岩体的渗流有关。而岩体是受结构面的纵横切割、具有一定结构的多裂隙体, 同时赋存于一定地质环境中, 地应力场和地下渗流场是岩体物理学环境中的 2 个重要组成部分, 裂隙岩体渗流受应力的影响, 而渗流场的改变也会影响到应

**收稿日期:** 2004-06-17; **修回日期:** 2004-12-14

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412704); 国家自然科学基金资助项目(50374064, 50334060)

**作者简介:** 殷黎明(1977-), 硕士, 2001年毕业于福州大学水利水电建筑工程专业, 主要从事岩体节理及渗流方面的研究工作。E-mail: dawn\_77@163.com.

力场的改变，两者相互影响、相互作用称为耦合作用<sup>[1]</sup>。由立方定理可知，裂隙开度对渗流的影响很大，而应力会直接引起裂隙开度的变化。因此，研究应力对渗流的影响具有重要的意义。

首先人们对作为基础性的单裂隙面渗流、力学及其耦合特性作了理论和试验研究<sup>[2~4]</sup>。在单裂隙面的渗流、应力耦合机理方面，Louis(1974 年)，Jones(1975 年)，Nelson(1975 年)，Kranz(1978 年)，Gale(1982 年)等通过试验研究直接得到了渗流和应力的关系式；Barton(1985 年)，刘继山(1987 年)等利用单裂隙面的变形规律间接地得出渗流与应力的关系式；Gongi(1978 年)，Walsh(1981 年)，Tsang 和 Witherspoon(1981 年)试图提出某种理论概念模型来解释渗流与应力的耦合规律。

本文在甘肃省西北部某地进行了水压致裂法地应力测量和高压压水试验，试验地区地貌为低山丘陵区，海拔 1 670 ~ 1 834 m，相对高差很小，地势低缓。研究区 SN 两侧以区域性 EW 向断裂、褶皱和韧性剪切带为主，中部以 WE 断裂为主导的构造格局。钻孔岩性主要为似斑状二长花岗岩、云英闪长岩及黑云母花岗岩。试验获得了沿井深的地应力值和渗透系数值，对所测得的结果进行非线性回归分析，得出该地区渗透系数与地应力值呈负指数递减关系。

## 2 单裂隙水流基本定理

### 2.1 单裂隙水流基本定理

根据质量守恒原理，一般流体的运动方程为

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v = f - f_p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot p \quad (1)$$

式中： $v$  为流体运动速度矢量， $f$  为作用在单位质量流体上的质量力矢量， $f_p$  为流体的动力压力矢量， $\rho$  为流体的密度， $p$  为流体的应力张量。

再考虑边界条件，可得通过裂隙端面的单宽流量为

$$q = \frac{\gamma b^3}{12\mu} J_f \quad (2)$$

式中： $\gamma$  为地下水的比重， $J_f$  为裂隙水流的水力梯度。

这就是著名的立方定理，即裂隙断面上的单宽流量与裂隙面的开度的立方成正比。实际研究表明，式(2)仅近似地描述两侧壁光滑平直，且无物质充填

的不连续面的渗流规律。实际岩体裂隙形状如图 1 所示。

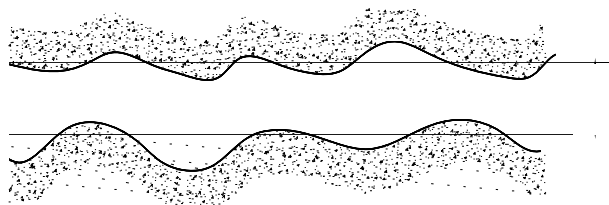


图 1 岩体裂隙开度

Fig.1 Aperture of fracture in rock mass

为了考虑粗糙度、张开度变化等因素对渗流的影响，一些学者引用等效水力传导开度的概念，对式(2)进行修正。设修正系数为  $C$ ，则式(2)可改写为

$$q = \frac{\gamma b^3}{12\mu C} J_f \quad (3)$$

式中： $C$  为裂隙面相对粗糙度修正系数。

### 2.2 单裂隙面力学特征

单裂隙面渗流与应力的耦合特性不仅与水流运动规律有关，而且与其力学变形性质有关。有些学者研究裂隙面的力学性质时将其简化为弹性结构面，但实际上众多试验研究表明，裂隙面变形与应力存在非线性关系。文[5]研究了结构面闭合变形法则，采用指数函数表征了结构面法向闭合变形特性：

$$b_m = b_{m0} \left( 1 - e^{-\frac{\sigma_n}{k_n}} \right) \quad (4)$$

式中： $b_{m0}$  为结构面最大闭合量； $k_n = b_{m0} k_0$  为法向刚度系数， $k_0$  为初始法向刚度系数。

Bandis 和 Lumsden 提出了裂隙面法向变形随法向应力变化的双曲线型的变形公式<sup>[2]</sup>：

$$b_m = \frac{\sigma_n}{k_0 + \frac{\sigma_n}{b_{m0}}} \quad (5)$$

由式(4)，(5)可知，随着法向应力的增加，裂隙面将逐渐闭合，隙宽也将逐渐减小，从而影响了裂隙岩体的渗透性。

### 2.3 单裂隙面渗流与应力的耦合特性

文[6]首先对单裂隙面渗流与应力的关系进行了探索性的试验研究，并结合一些钻孔压水试验成果提出了指数型的经验公式：

$$K_f = K_0 e^{-\alpha \sigma_n} \quad (6)$$

式中： $K_f$  为裂隙渗透系数， $K_0$  为初始渗透系数， $\alpha$

为耦合参数。式(6)表明岩体的渗透系数随压应力的增加而减小，随拉应力的增加而增大。耦合参数  $\alpha$  越大，应力对渗透系数的影响越大，该参数反映了岩体结构的固有属性。

文[7]通过某水电站工程岩体渗流与应力关系试验，得出岩体渗透系数与有效应力之间存在负幂指数关系：

$$K_f = K_0 \sigma^{-\beta} \quad (7)$$

式中： $\beta$  为裂隙分布密度的分形维数， $\sigma$  为有效应力。式(7)通过对岩体裂隙分布密度的分形维数的描述，同样反映了应力对渗透系数的影响程度。

由于在一定的法向应力作用下，裂隙面开度将发生变化，由立方定理可知裂隙面的渗流量发生重大改变的主要原因是裂隙面开度的减小。因此有些学者利用已有的法向变形经验公式，建立力学隙宽随应力的变化关系式，再根据等效水力隙宽和力学隙宽的关系，间接地导出渗透性与应力的关系。文[8,9]从裂隙面受力变形的角度出发，根据式(4)，结合平面径向流的水流特性提出：

$$K_f = \frac{\mu_0^2}{12\mu} e^{-\frac{2\sigma}{K_n}} \quad (8)$$

式中： $\mu_0$  为一个反映结构面变形性能和水力条件的综合参数，它包含了裂隙水压力对其变形的影响。

### 3 现场试验研究

目前国内外学者对于应力渗流的耦合关系研究作了大量的工作，但鉴于耦合机理本身的复杂性，为了更好地研究地应力对裂隙岩体渗流的影响，做一定的现场试验是很有必要的。试验采用水压致裂法测量地应力，水压致裂法是利用一对可膨胀的橡胶封隔器在预定的测试深度封隔一段钻孔，然后泵入水对该段钻孔施压，根据压裂过程曲线的压力特征值计算地应力。试验封隔器长 1.3 m，钻孔直径为 96 mm。在 500 m 深的钻孔中选取 26 个典型区段，其中都是较完整的岩层，获取有效数据 16 段，能较好地代表该地区地应力值，地应力测试结果见表 1。

结果显示该地区属中等应力区，地应力值随着孔深呈递增趋势，这是符合地应力分布规律的。地应力分布如图 2 所示：高压压水试验选在节理裂隙比较密集的测段进行，共选取了 21 个典型区段进

表 1 地应力测试成果表  
Table 1 Testing results of geostress

测试深度/m	最大水平主应力/MPa	最小水平主应力/MPa
134.1	11.04	6.84
164.6	10.65	6.25
169.1	6.29	4.19
183.4	12.03	7.83
199.0	8.39	5.09
237.1	14.97	8.87
265.3	11.35	7.15
284.1	12.94	7.84
302.9	16.23	9.53
331.0	15.61	9.31
368.7	15.49	9.49
427.7	13.28	8.68
453.3	14.53	9.33
461.7	17.52	11.12
472.2	10.82	7.72
485.1	11.35	8.35

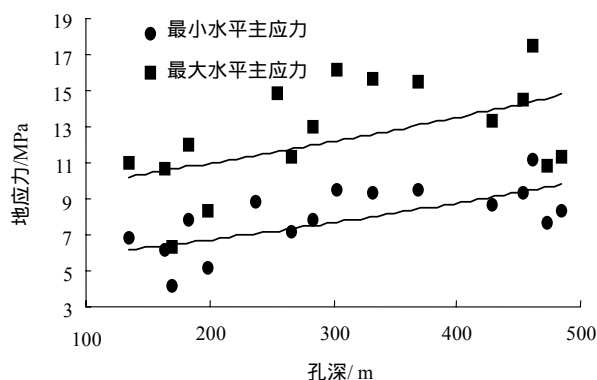


图 2 地应力随孔深关系图

Fig.2 Relationship between geostress and borehole depth

行试验。为了能更好地考察 500 m 深钻孔中岩体的渗透特性，试验时地面的最高静水压力取 6 MPa，试验按 3 级压力(2, 4, 6 MPa)5 个阶段(2 MPa 4 MPa 6 MPa 4 MPa 2 MPa)进行，同样也是利用 2 个橡胶封隔器封隔一段钻孔进行压水，试验装置如图 3 所示，高压压水试验结果见表 2。

根据钻孔的实际情况，通过考查该钻孔的岩芯裂隙编录并结合已经取得的钻孔电视资料，参考有关压水实例，为了让测段尽可能多地包含节理裂隙，经反复比较验证，最终取压水段长度为 6.5 m。

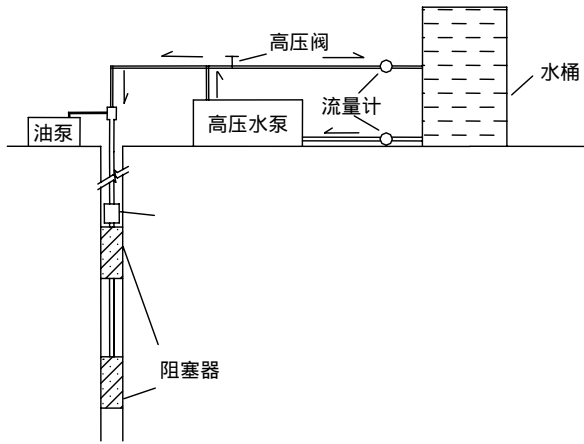


图 3 高压压水试验装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of apparatus of high water pressure test

表 2 高压压水测试成果表

Table 2 Testing results of water pressure test

测试深度/m	透水率/Lu	渗透系数/(cm · s <sup>-1</sup> )
127.5	0.10	1.28 × 10 <sup>-6</sup>
135.0	0.06	7.71 × 10 <sup>-7</sup>
148.0	0.88	1.14 × 10 <sup>-5</sup>
156.0	1.34	1.75 × 10 <sup>-5</sup>
171.5	0.89	1.16 × 10 <sup>-5</sup>
187.5	0.93	1.22 × 10 <sup>-5</sup>
195.5	0.07	9.43 × 10 <sup>-7</sup>
209.9	0.41	5.37 × 10 <sup>-6</sup>
223.0	1.40	1.82 × 10 <sup>-5</sup>
252.0	0.32	4.12 × 10 <sup>-6</sup>
276.0	0.50	6.50 × 10 <sup>-6</sup>
313.5	0.40	5.17 × 10 <sup>-6</sup>
384.7	0.27	3.53 × 10 <sup>-6</sup>
392.2	0.22	2.90 × 10 <sup>-6</sup>
402.0	0.26	3.38 × 10 <sup>-6</sup>
455.0	1.37	1.77 × 10 <sup>-5</sup>
467.0	1.44	1.88 × 10 <sup>-5</sup>
487.0	0.16	2.11 × 10 <sup>-6</sup>

本次高压压水试验获得了 3 种类型的试验曲线：开裂型、扩张型和透水层型，反映了 3 种不同测段的渗流特性。其中开裂型曲线(如图 4 所示)压力达不到 6 MPa，在加到 6 MPa 之前岩体就发生了开裂，说明该测段裂隙较发育，裂隙面抵抗水力破坏的临界值较低。该曲线存在一临界压力值，一

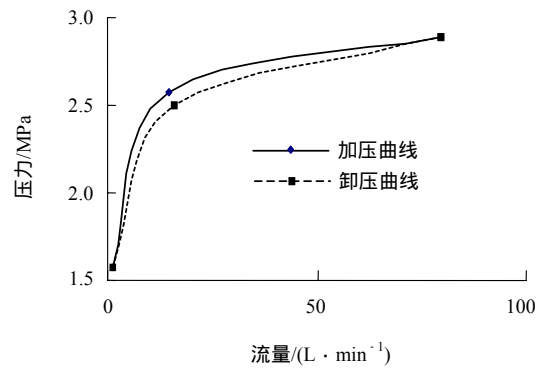


图 4 开裂型试验曲线

Fig.4 Flow-pressure curves

旦水压超过临界值，渗流量就急剧增大，压力值基本保持不变。从  $P-Q$  曲线上的拐点可以读出裂隙面抵抗水力劈裂破坏的临界压力值大小；扩张型试验曲线说明该测段节理裂隙不是很发育，抵抗水力破坏的临界值大于 6 MPa；而透水层型的试验曲线出现在几个破碎带处，因此透水率极大，并且基本不起压，如 433.0 ~ 439.5 m, 441.5 ~ 448.0 m, 479.0 ~ 485.5 m 测段。

试验获得了每个测段的透水率值，如表 2 所示。然后根据《水利水电工程钻孔压水试验规程》(SL25-92)中推荐公式(14)计算出该压水测段的渗透系数值。可利用下式计算岩体的渗透系数：

$$K = \frac{Q}{2\pi HL} \ln \frac{L}{r} \quad (9)$$

式中： $K$  为岩体的渗透系数， $Q$  为压入流量， $H$  为试验水头， $L$  为试验长度， $r$  为钻孔半径。

计算所得的渗透系数值与压水试验测得的透水率值之间具有很好的线性关系，如图 5 所示，这说明采用该计算公式来计算渗透系数是可行的。

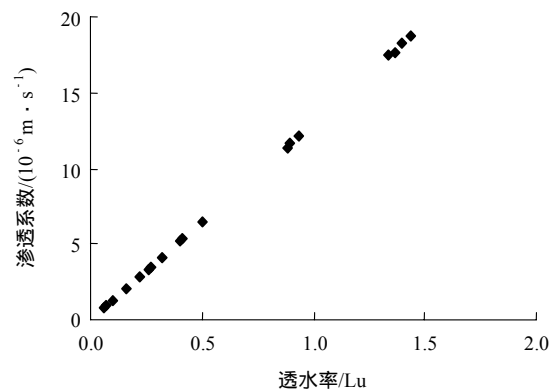


图 5 渗透系数-透水率曲线

Fig.5 Permeability coefficient vs. absorption rate curve

抛开几个典型的破碎带不考虑(即透水层型试验段),分析各段透水率(透水率:单位试段在单位压力下的压入流量)与孔深的关系,结果如图 6 所示。很明显透水率是随着深度的增加而呈递减趋势的。这是因为地应力是随着深度的增加而递增的,而透水率受到裂隙开度的影响,地应力的增加又引起了裂隙开度的变小,因此,呈现出这种变化趋势。

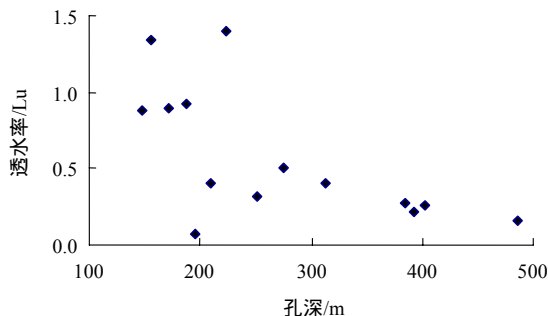


图 6 透水率随孔深的变化

Fig.6 Variation of absorption with geostress

通过以上试验获得了该钻孔的地应力值和一些测段的渗透系数值,由于水压致裂地应力测量是在完整岩石段测得的,因此,其应力值相对较高,而压水试验是在裂隙发育的测段进行的,所以节理裂隙的发育使得这些测段的应力值得到了削弱,通过高压压水试验的开裂型试验曲线可以获得部分测试段的抵抗水力破坏的临界值。

在测得了地应力值与渗透系数的基础上,并结合高压压水试验确定的测试段抵抗水力劈裂的临界值,通过非线性回归分析得出了两者具有如下关系(如图 7 所示):

$$K = Ae^{-B\sigma} \quad (10)$$

式中:  $A, B$  为耦合参数,  $B$  反映了应力对渗透系数的影响程度。该地区:  $A = 59.70, B = 0.455$ 。

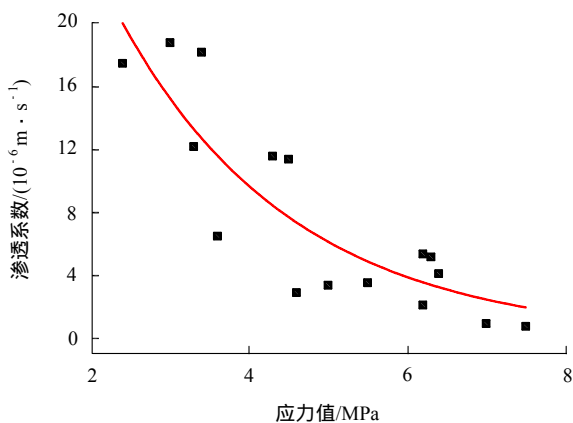


图 7 渗透系数随地应力变化关系曲线

Fig.7 Curve of permeability coefficient vs. stress

## 4 结 论

本文通过现场试验得到了大量宝贵的第一手数据,通过对所得数据的回归分析得出了该地区渗透系数是随着地应力值的增大呈负指数递减关系的。这与国内外学者的研究结果是相吻合的,从而为该地区进一步的渗流规律分析打下了基础。由于是通过现场试验获得的结果,因此,可以比较真实地反映该地区的渗流变化规律。但对渗流应力耦合的机理研究还不够,有待进一步的研究。

### 参考文献(References):

- [1] 周创兵,熊文林. 地应力对裂隙岩体渗透特性的影响[J]. 地震学报, 1997, 19(2): 154-163.(Zhou Chuangbing, Xiong Wenlin. The effect of geostress on the permeability character of fractured rock mass[J]. Acta Seismologica Sinica, 1997, 19(2): 154-163.(in Chinese))
- [2] 王媛. 单裂隙面渗流与应力的耦合特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 83-87.(Wang Yuan. Coupling characteristic of stress and fluid flow within a single fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 83-87.(in Chinese))
- [3] 王贵宾,杨春和. 岩体节理三维网络模拟技术及渗透率张量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3 591-3 594.(Wang Guibin, Yang Chunhe. 3D network simulation technique of joints in rock mass and permeability tensor analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3 591-3 594.(in Chinese))
- [4] 仵彦卿,张俦元. 岩体水力学导论[M]. 成都:西南交通大学出版社, 1995.(Wu Yanqing, Zhang Zhuoyuan. Introduction to Rock Hydraulics[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1995.(in Chinese))
- [5] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京:科学出版社, 1988.(Sun Guangzhong. Structural Mechanics of Rock Mass[M]. Beijing: Science Press, 1988.(in Chinese))
- [6] Louis C. A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on stability of rock masses[R]. London: Imperial College, 1969.
- [7] 仵彦卿. 裂隙岩体应力与渗流关系研究[J]. 水文地质工程地质, 1995, 6: 30-35.(Wu Yanqing. The study of the relation between stress and seepage in fractured rock mass[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1995, 6: 30-35.(in Chinese))
- [8] 刘继山. 单裂隙受正应力作用时的渗流公式[J]. 水文地质工程地质, 1987, 14(2): 28-32.(Liu Jishan. The seepage formula of single joint when acted with normal stress[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1987, 14(2): 28-32.(in Chinese))
- [9] 刘继山. 结构面力学参数与水力参数耦合关系及其应用[J]. 水文地质工程地质, 1988, 15(2): 7-12.(Liu Jishan. The coupled relationships between mechanical and hydraulic parameters of a structural surface and their applications[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1988, 15(2): 7-12.(in Chinese))