

岩体裂隙等效水力隙宽的统计确定方法

第六图书馆

针对天然裂隙岩体等效水力隙宽确定的复杂性,利用平行板水流的立方定律及流量等效原理,推导出光滑平行板单裂隙的等效水力隙宽公式,同时对隙宽分布的频率特性进行了探讨,认为非均匀隙宽单裂隙的等效水力隙宽可近似取40%频率的隙宽,或取隙宽的几何平均值与调和平均值的算术平均值。针对天然裂隙岩体等效水力隙宽确定的复杂性,利用平行板水流的立方定律及流量等效原理,推导出光滑平行板单裂隙的等效水力隙宽公式,同时对隙宽分布的频率特性进行了探讨,认为非均匀隙宽单裂隙的等效水力隙宽可近似取40%频率的隙宽,或取隙宽的几何平均值与调和平均值的算术平均值。岩体裂隙 等效水力隙宽 累积频率曲线地质科技情报钟嘉高 梁杏 任志刚 [1]中国地质大学研究生院,武汉430074 [2]中国地质大学环境学院,武汉430074 [3]家电力公司成都勘察设计研究院,成都6100722007第六图书馆

第六图书馆

www.6lib.com

岩体裂隙等效水力隙宽的统计确定方法

钟嘉高^{1a}, 梁杏^{1b}, 任志刚²

(1. 中国地质大学 a. 研究生院; b. 环境学院, 武汉 430074; 2. 国家电力公司成都勘察设计院, 成都 610072)

摘要:针对天然裂隙岩体等效水力隙宽确定的复杂性,利用平行板水流的立方定律及流量等效原理,推导出光滑平行板单裂隙的等效水力隙宽公式,同时对隙宽分布的频率特性进行了探讨,认为非均匀隙宽单裂隙的等效水力隙宽可近似取40%频率的隙宽,或取隙宽的几何平均值与调和平均值的算术平均值。

关键词:岩体裂隙;等效水力隙宽;累积频率曲线

中图分类号:TV131.4

文献标识码:A

文章编号:1000-7849(2007)04-0103-04

在评价裂隙岩体的渗透性时,裂隙的隙宽(又称为裂隙开度)和间距是研究的主要对象^[1],相对于裂隙的方位、间距、密度,裂隙的隙宽是最难确定而又极其重要的几何参数。众所周知,在立方定律中裂隙岩体的渗透系数与隙宽的立方成正比,因而等效水力隙宽的确定对渗透系数的计算以及对岩体裂隙渗透性的评价起着主要作用,而通常的裂隙测量只是在一个平面露头上进行,对于三维空间的裂隙隙宽则很难直接描述和测量,同时在测量断面裂隙隙宽后,由于隙宽大小的不一致,最终选取怎样的裂隙等效水力隙宽,也是裂隙岩体渗透性研究的难点。柴军瑞等^[2]采用流量等效原理推导出了等效水力隙宽公式,许光祥等^[3-4]曾采用宽配曲线研究了频率隙宽。笔者在前人研究的基础上,拟根据单裂隙断面隙宽测量数据,从隙宽分布累积曲线的统计学意义出发,提出表征裂隙等效水力隙宽的方法。

1 隙宽的描述与应用

隙宽是指一个张开的结构面两壁之间的法向相对距离,对于理想光滑平行板构成的裂隙,其隙宽呈简单的规律性变化,而在实际的结构面中,两壁之间的内部空间形状极其复杂,两壁面之间的距离亦随机变化。为了寻求隙宽的变化规律,许多学者^[5-7]根据概率统计学原理确定了隙宽的主要分布形式为对数正态分布和负指数分布两种。

在实际应用中给予了裂隙面隙宽3种不同的定义,即:平均隙宽 \bar{b} 、机械隙宽 b_m (亦称力学隙宽)和等效水力隙宽 b_h 。平均隙宽 \bar{b} 是指隙宽函数 $b(x, y)$ 的平均值;机械隙宽 b_m 是指裂隙间的最大机

械闭合量,即裂隙达到完全闭合的位移量;等效水力隙宽 b_h 通常是通过试验方法按实测裂隙渗流量用立方定律反求的隙宽。对于光滑平行板裂隙,它们的值是相等的,对于实际天然粗糙裂隙,它们的值通常是不相等的。

立方定律是以光滑平行板为前提,通过 Navier-Stokes 公式推导的^[8]:

$$q = -\frac{b^3}{12\mu} J$$

式中: q 为裂隙水流的单宽渗流量; b 为隙宽; γ 为水的容重; μ 为水的动力黏滞系数; J 为水力梯度。

天然岩体裂隙与理想光滑平行板裂隙相差很大,因而上式中的隙宽 b 实际应为等效水力隙宽,但由于天然岩体裂隙面隙宽的不确定性和试件取样的困难,众多学者提出了修正的等效水力隙宽,即用机械隙宽或平均隙宽来代替。

(1)隙宽函数 $b(x, y)$ 修正法^[9]:

$$b_h^3 = \int_0^{b_m} b^3 n(b) db \text{ (一维裂隙) 或}$$

$$b_h^3 = \int_0^{b_m} b^3 n(b) db / \int_0^{b_m} b n(b) db \text{ (二维裂隙) } \quad (1)$$

式中: $n(b)$ 为隙宽密度分布函数。

(2)裂隙面粗糙度修正系数法:

$$b_h^3 = \frac{c}{\xi} b_m^3 \quad (2)$$

式中: c 为常数; ξ 为裂隙面粗糙度修正系数,与裂隙面的凸起高度分布有关。Lomize^[10]提出 $\xi = 1 + 6.0(h/b_m)^{1.5}$ ^[10], Louis^[11]提出 $\xi = 1 + 8.8\left(\frac{h}{2b_m}\right)^{1.5}$, Barton 等^[12]提出 $\xi = 1 +$

$20.5 \left(\frac{h}{2b_m} \right)^{1.5}$, $h = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} |b_i - b_{i+1}|$, 其中 h 为裂隙凸起的绝对高度; N 为统计样品个数; b_i 为统计样品隙宽。

对于隙宽函数 $b(x, y)$ 修正法, 其关键是否能获得精确的隙宽密度分布函数, 而实际上隙宽密度分布函数是很难确定的, 因而许多学者, 如 Elsworth 等^[13] 提出用近似函数(如标准正弦曲线)来模拟, 而用何种曲线来模拟最符合实际仍难以确定。

对于裂隙面粗糙度修正系数法, 若裂隙面凸起高度越大, 则修正系数 ξ 越大, 这较符合实际情况, 它是在凸起高度较为均匀的条件下提出的, 对于天然凸起高度不均匀的情况是否适用并没得到很好的检验。形式上, 在修正系数 ξ 中仍含有隙宽变量, 因而单宽渗流量 q 与机械隙宽 b_m (或平均隙宽 \bar{b}) 仍不是完全的立方关系。Nolte 等^[14] 的试验研究表明, q 与 b_m 约成 8 次方的关系, 而 Barton 等^[15] 通过试验得出 b_h 与 b_m 成二次方关系, 即用机械隙宽 b_m 代替等效水力隙宽 b_h 后, q 与 b_h 不再成立方关系。

2 单裂隙隙宽特征与累积分布曲线

如图 1 所示某一裂隙, 沿裂隙长度 l 方向采用塞尺按等间距依次测量各测点的隙宽 b 。从隙宽累积分布曲线的统计学意义出发, 将所有测定的各点的隙宽按一定的差值进行分组统计(表 1), 并计算各组的频率和累积频率 P_i , 以累积频率为纵坐标, 隙宽 b 为横坐标绘制的累积频率曲线见图 2。

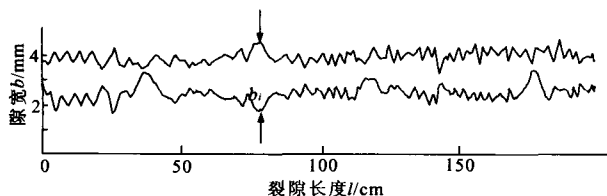


图 1 单裂隙隙宽剖面

Fig.1 Section of single aperture

表 1 单裂隙隙宽统计特征值
Table1 Statistics of single fracture

隙宽 b/mm	频数 N	累积频率 $P_i/\%$	隙宽 b/mm	频数 N	累积频率 $P_i/\%$
0.20	7	0.5	1.40	37	79.1
0.40	5	3.0	1.60	24	91.0
0.60	7	6.5	1.80	13	97.5
0.80	16	14.4	1.90	1	98.0
1.00	39	33.8	2.00	1	98.5
1.20	54	60.7	2.20	3	100.0

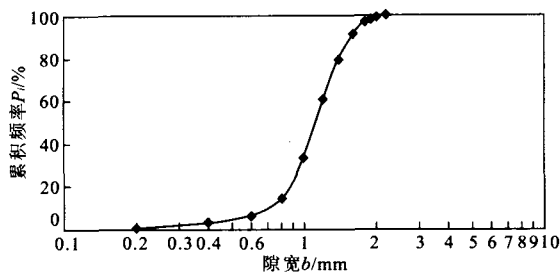


图 2 单隙宽分布累积频率曲线

Fig.2 Cumulative frequency curve of single fracture

由此笔者定义以下几种隙宽作为隙宽分布统计特征值:

b_{60} 表示小于此隙宽的频率为 60%; b_{50} 为中值隙宽, 表示小于此隙宽的频率为 50%; b_{30} 表示小于此隙宽的频率为 30%; b_{10} 表示小于此隙宽的频率为 10%。

定义单裂隙隙宽分布的不均匀系数 C_u 为:

$$C_u = b_{60}/b_{10} \quad (3)$$

C_u 反映大小不等隙宽的分布情况。 C_u 愈大, 表示隙宽愈不均匀, 即大隙宽和小隙宽相差愈悬殊; 曲线愈平缓, 表示裂隙隙宽变化范围较大, 则 C_u 愈大。当裂隙隙宽频率曲线的 $C_u \leq 5$ 时, 为均匀分布隙宽裂隙, 否则为非均匀分布隙宽裂隙。

定义单裂隙隙宽的曲率系数 C_c 为:

$$C_c = b_{30}^2 / (b_{60} \cdot b_{10})$$

C_c 反映了隙宽累积频率曲线的形状, 或称反映累积频率曲线的斜率是否连续, 若 C_c 在 1~3 间, 则隙宽频率分布较均匀, 即称为隙宽级配连续, 否则称为隙宽级配不连续。

3 等效水力隙宽

3.1 光滑平直变隙宽裂隙模型

基于渗流等效原理, 可以根据变隙宽来求取其相应的等效水力隙宽, 对如图 3 所示光滑平直变隙宽单裂隙, 取 OX 轴为基准面, 有:

$$\text{tg} \alpha = (b_2 - b_1)/l \quad (4)$$

$$b(x) = b_1 + x \cdot \text{tg} \alpha \quad (5)$$

$$db = \text{tg} \alpha \cdot dx \quad (6)$$

通常 α 很小, 可以忽略 Y 方向的水的流速, 则在 x 到 $x+dx$ 的范围内立方定律适用:

$$q = \frac{\gamma b^3}{12\mu} J \quad (7)$$

$$p = \gamma H \quad (8)$$

$$J = -\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{1}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (9)$$

式中: p 为流体压力; H 为水头。

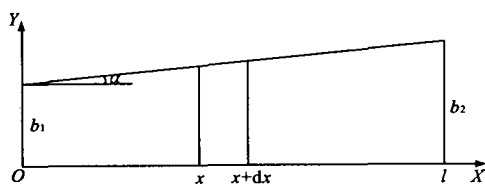


图3 光滑平直变隙宽裂隙模型

Fig.3 Model of smooth and parallel changed fracture

将式(6)、(9)代入式(7)得:

$$dp = -\frac{12\mu q}{b^3} \frac{db}{\tan \alpha} \quad (10)$$

对式(7)两边积分,并将边界条件 $p|_{b=b_1}=p_1$, $p|_{b=b_2}=p_2$ 代入式(8),得:

$$q = -\frac{b_1^2 b_2^2}{6\mu(b_1+b_2)} \frac{p_2-p_1}{l} \quad (11)$$

将式(10)代入式(11)得:

$$q = \frac{\gamma}{12\mu} \frac{2b_1^2 b_2^2}{(b_1+b_2)} J \quad (12)$$

将式(12)与立方定律公式 $q = \frac{\gamma}{12\mu} b_h^3 J$ 相比,可得平直光滑变隙宽单裂隙的等效水力隙宽 b_h 为:

$$b_h^3 = 2b_1^2 b_2^2 / (b_1 + b_2) \quad (13)$$

对于一组正数 $a_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 有:

$$\text{算术平均值: } a_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i$$

$$\text{几何平均值: } a_j = \sqrt[n]{a_1 a_2 a_3 \dots a_n}$$

$$\text{调和平均值: } a_t = n / \sum_{i=1}^n \frac{1}{a_i}$$

显然有: $a_s \geq a_j \geq a_t$, 则有:

$$(\sqrt{b_1 b_2})^3 \geq b_h^3 = \frac{2b_1^2 b_2^2}{b_1 + b_2} \geq \left(\frac{2}{1/b_1 + 1/b_2} \right)^3 \quad (14)$$

即理论上,光滑平直变隙宽单裂隙的等效水力隙宽 b_h 应介于隙宽几何平均值与调和平均值之间,而小于算术平均值。

通过对某电站裂隙岩体大裂隙①、中等裂隙②、小裂隙③(图4)不同的隙宽进行分析,每10 cm测一次,统计频率曲线如图4和表2所示。

从图4和表2可知:

(1)中值隙宽值 b_{50} 基本与算术平均值接近,等效水力隙宽值介于隙宽的几何平均值与调和平均值之间,与几何平均值与调和平均值的平均值较接近,可近似取二者的平均值。

(2)隙宽分布越不均匀,隙宽分布不均匀系数 C_u 越大,则等效水力隙宽体现出小隙宽的影响越明显。

(3)等效水力隙宽对应频率不仅与 C_u 有关,还与曲率系数 C_c 有关,当隙宽频率分布为均匀连续曲线时($C_u \leq 5, C_c = 1 \sim 3$),反映出小隙宽的影响明

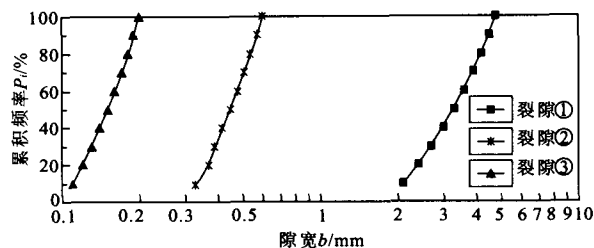


图4 变隙宽的单裂隙的隙宽频率曲线

Fig.4 Cumulative frequency curve of nonlinear single fracture

表2 不同尺度裂隙隙宽特征值

Table 2 Statistics of diverse scale fracture

特征值	大裂隙①	中等裂隙②	小裂隙③
b_1/mm	1.830	0.303	0.100
b_2/mm	4.800	0.600	0.200
b_2/b_1	2.62	2.00	2.00
算术平均值 a_s	3.315	0.452	0.151
几何平均值 a_j	3.196	0.426	0.142
调和平均值 a_t	3.075	0.403	0.134
$(a_j + a_t)/2$	3.136	0.415	0.138
等效水力隙宽	3.145	0.418	0.139
等效水力隙宽对应频率/%	42.4	39.5	39.4
b_{60}/mm	3.60	0.48	0.16
b_{50}/mm	3.30	0.45	0.15
b_{30}/mm	2.80	0.40	0.13
b_{10}/mm	2.10	0.33	0.11
C_u	1.71	1.50	1.45
C_c	1.03	1.04	1.06

显,则其等效水力隙宽对应频率较小。

3.2 非均匀隙宽单裂隙模型的等效水力隙宽

在以上均匀变化隙宽模型统计的基础上,可以将非均匀隙宽单裂隙假设为许多段均匀变化的裂隙,逐段求取等效水力隙宽并进行统计,求取天然非均匀单裂隙的等效水力隙宽,与其隙宽频率特征值相对应。笔者以雅砻江上某水电站坝址区玄武岩岩体中大裂隙为研究对象,绘制隙宽级配曲线(图5),并计算其隙宽特征值,其统计规律基本与图4裂隙所反映的隙宽频率曲线基本一致,即 C_u 越大,其等效水力隙宽对应频率越大;而当隙宽频率分布为均匀连续曲线时($C_u \leq$

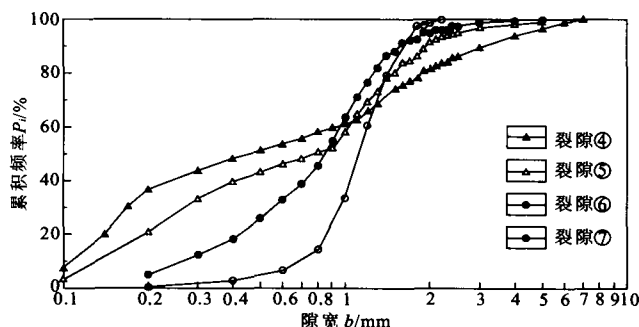


图5 非线性变隙宽裂隙的隙宽频率曲线

Fig.5 Cumulative frequency curve of nonlinear changed fracture

5, $C_c=1\sim3$), 则其等效水力隙宽对应频率较小。实例的等效水力隙宽对应频率在 36.4%~45.5% 间, 近似为 40% (图 5 和表 3)。

表 3 不同尺度裂隙隙宽特征值

Table 3 Statistics of diverse scale fracture

裂隙编号	④	⑤	⑥	⑦
最大隙宽值 b_{\max}/mm	6.78	5.33	4.64	2.04
最小隙宽值 b_{\min}/mm	0.05	0.05	0.12	0.17
算术平均值 a_s	1.124	0.933	0.907	1.120
几何平均值 a_g	0.401	0.576	0.730	1.055
调和平均值 a_h	0.243	0.336	0.567	0.964
$(a_g+a_h)/2$	0.322	0.456	0.650	1.010
等效水力隙宽对应频率/%	45.5	42.0	36.5	36.4
C_u	5.4	3.8	1.8	1.2
C_c	0.29	0.57	1.23	1.11

4 结 论

(1) 频率隙宽的测定可以采用塞尺进行, 取一定间隔 (如 5~20 cm 等) 进行测量, 采用统计方法来计算等效水力隙宽, 在实际工作中具有较强的可操作性。

(2) 隙宽分布越不均匀, 等效水力隙宽体现出小隙宽的影响越明显, 隙宽分布不均匀系数 C_u 越大。

(3) 等效水力隙宽应小于隙宽统计的几何平均值, 大于隙宽统计的调和平均值, 可以近似取二者的平均值, 或取 40% 频率的隙宽, 这样更接近实际, 同时使立方定律的因次更相符。

参考文献:

- [1] 蔡耀军. 裂隙岩体三维空间非均质各向异性渗透性评价[J]. 地质科技情报, 1989, 8(2): 89-98.
- [2] 柴军瑞, 作彦卿. 变隙宽裂隙的渗流分析[J]. 勘察科学技术,

2000, 3: 39-41.

- [3] 许光祥, 哈秋聆, 张永兴, 等. 岩体裂隙渗流的频率水力隙宽[J]. 重庆建筑大学学报, 2001, 23(5): 49-55.
- [4] 许光祥. 岩石粗糙裂隙隙宽配曲线和糙配曲线[J]. 岩土力学与工程学报, 1999, 18(6): 641-644.
- [5] Snow D T. Rock fracture spacings, openings and porosities [J]. *Journal Soil Mechanics and Div. Proc. ASCE*, 1968, 94 (SM1): 73-91.
- [6] Snow D T. The frequency and apertures of fractures in rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics. Abstracts*, 1970, 7(1): 23-30.
- [7] 徐光黎, 潘别桐, 唐辉明, 等. 岩体结构模型与应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993: 45-47.
- [8] 作彦卿, 张俦元. 岩体力学导论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1995: 45-48.
- [9] Tsang Y W, Witherspoon P A. Hydromechanical behavior of a deformable rock fracture subject to normal stress[J]. *J. of Geophys. Research*, 1981, 86(B10): 9 287-9 298.
- [10] C. H. 切尔内绍夫. 水在裂隙网络中的运动[M]. 盛志浩, 天开铭, 译. 北京: 地质出版社, 1987: 48-50.
- [11] Louis C. A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses [R]. London: Rock Mech. Res. Rep 10, Imp. Coll., 1969: 91-98.
- [12] Barton N, de Quadros E F. Joint aperture and roughness in the prediction of flow and groutability of rock masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3): 700-708.
- [13] Esworth D, Goodman R E. Characterization of rock fissure hydraulic conductivity using idealized wall roughness profiles [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics. Abstracts*, 1986, 23(3): 233-243.
- [14] Nolte K G, Anifire J L, Owens K A. After-closure analysis of fracture calibration tests[J]. *SPE* 38676, 1997: 126-133.
- [15] Barton N, Bandis S, Bakhtar K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics. Abstracts*, 1985, 22(3): 121-140.

Statistical Determination of the Equivalent Hydraulic Aperture of Rock Fissures

ZHONG Jia-gao^{1a}, LIANG Xing^{1b}, REN Zhi-gang²

(1a. Graduate School; 1b. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Chengdu Hydro-electric Investigation and Design Institute of SPC, Chengdu 610072, China)

Abstract: It is complicated to determine the equivalent hydraulic aperture of natural fractured rock mass. This paper works out the formulae of equivalent permeable aperture of smooth and parallel single fissure based on the research works of the predecessors and the cubic law and inflow equivalent principle in parallel board. The analysis of the frequency characteristics of aperture reveals that the equivalent hydraulic aperture of the fissure with non-uniform aperture is almost equal to 40% of frequency aperture or equal to the average aperture of geometric mean and harmonic mean.

Key words: rock fissure; equivalent hydraulic aperture; cumulative frequency curve