

文章编号: 1006- 7329(2001)05- 0050- 06

岩体裂隙渗流的频率水力隙宽^{*}

许光祥¹, 哈秋龄², 张永兴³

(1. 重庆交通学院 河海工程系, 重庆 400074; 2 中国长江三峡开发总公司技术委员会, 北京 100062; 3 重庆大学 B 区 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 基于宽配曲线, 首次提出频率隙宽的概念, 它具有表征隙宽分布情况、均匀程度、充分体现隙宽组成等重要意义。特别是频率水力隙宽的提出, 为解决现有水力隙宽应用中出现的局限性具有极大的帮助作用。借助现有研究成果, 通过实例分析得到, 水力隙宽 e_h 基本与中值隙宽 e_{50} 相应。再通过随机裂隙的计算机有限元模拟, 频率水力隙宽可取 e_{48} 。

关键词: 宽配曲线; 频率水力隙宽; 中值隙宽; 随机裂隙

中图分类号: TU 451, O 242 1

文献标识码: A

地下水渗流是影响边坡、基础、地下等岩体工程稳定性的重要因素, 而裂隙渗流又是岩体渗流的主要特征, 单一裂隙是构成岩体裂隙网络的基本元素, 其张开度、粗糙度、起伏度等几何参数是确定裂隙渗透系数的主要因素, 是岩体渗流场计算和分析不可缺少的参数, 所以在岩体水力学中, 裂隙的几何参数是首要研究的任务。

对于理想平板裂隙, 可根据水流运动方程导出渗流量与隙宽、水力比降等的关系。

$$q = \frac{ge^3}{12\nu} J \quad (1)$$

该式即为著名的立方定律^[1]。其中, q : 裂隙断面渗流量; e : 裂隙张开度, 又称隙宽; J : 水力比降; g : 重力加速度; ν : 水流运动粘滞系数, 当水温 15 时, $\nu = 1.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

1 水力隙宽、平均隙宽和机械隙宽

1.1 水力隙宽

由于理想的平板裂隙在自然界是不存在的, 天然裂隙面不仅存在小范围的不平整和大范围的起伏以外, 还存在吻合、连通程度等。天然裂隙的隙宽 e 是沿程变化的, 立方定律中的 e 该取最大值、最小值或是平均值? 人们进行众多研究。因此, 对于天然裂隙, 立方定律很难成立, 为了能将立方定理应用于天然粗糙裂隙, 人们提出了等效水力隙宽 e_h 的概念。其确定方法是通过试验方法获得实测渗流量, 然后按式(1)反求隙宽即为 e_h 。

$$e_h = \sqrt[3]{\frac{12q\nu}{gJ}} \quad (2)$$

1.2 平均隙宽和机械隙宽

根据分析^[2], 采用水力隙宽有两个问题难以解决, 一是取原状裂隙试件很困难, 而现场作压水试验, 一般钻孔孔径很小, 隙宽值受钻孔大小和位置的影响。二是即使求得 e_h , 当裂隙产生变形(压缩或张开)后, 新的 e_h 仍是未知的, 因而无法在分析中考虑应力增量对岩体渗流的影响。另外, 水力隙宽只是一个等效概念, 很难进行实际应用, 所以需要采用其它特征隙宽代替。为此, 人们提出了采

* 收稿日期: 2001- 08- 30

作者简介: 许光祥(1966-), 男, 重庆潼南人, 副教授, 博士, 主要从事水利工程科研及教学工作。

用平均隙宽 \bar{e} 或机械隙宽 e_m 作为主要隙宽变量进行裂隙渗流分析的方法。

平均隙宽 \bar{e} 是指各测点隙宽的平均值, 机械隙宽 e_m 一般是指裂隙间的最大机械闭含量, 即裂隙在受压情况下, 达到完全闭合的位移量, 给定具体裂隙后, 该两个隙宽值就容易获得。

1.3 水力隙宽、平均隙宽或机械隙宽的相互关系

采用平均隙宽 \bar{e} 或机械隙宽 e_m 代替水力隙宽 e_h 之后, 如仍要应用立方定理, 那必须对 \bar{e} 、 e_m 与 e_h 之间的关系进行研究。目前这方面的研究较多, 式(3)~(5) e_h 与 \bar{e} 的关系具有较强的代表性。

$$\text{Lomize 采用: } e_h^3 = \frac{\bar{e}^3}{1 + 6 \left(\frac{\Delta}{\bar{e}} \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

$$\text{Louis 采用: } e_h^3 = \frac{\bar{e}^3}{1 + 8 \cdot 8 \left(\frac{\Delta}{2\bar{e}} \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

$$\text{Amadei 等采用: } e_h^3 = \frac{\bar{e}^3}{1 + 0.6 \left(\frac{\Delta}{\bar{e}} \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

上面各式中, Δ 为绝对粗糙度, Lomize 和 Louis 用下式表示

$$\Delta = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} |e_i - e_{i+1}| \quad (6)$$

式中, N 为测定隙宽值的次数; e_i 为第 i 测点的隙宽值, σ_e 为隙宽均方差。对于一面光滑一面粗糙的裂隙, 或者两个隙宽彼此对着弯曲不平的裂隙, Δ 采用下式计算

$$\Delta = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left| \frac{e_i - e_{i+1}}{2} \right| \quad (7)$$

从形式上看, 当 \bar{e} 代替 e_h 后, 仍然保持了单宽流量 q 与 \bar{e} 成立方关系, 但实际上在各式的粗糙度修正系数中均含有变量 \bar{e} , 即 q 与 \bar{e} 并不是完全的立方关系。另一些学者研究表明, 用 \bar{e} 代替 e_h 后立方定理不再适用, q 与 \bar{e} 不再成立方关系, 应该还要修正 \bar{e} 的幂指数^[3]。Nolte 等试验研究表明, 裂隙渗流量与 e_m 成约 8 次方关系, Barton 等通过大量的试验得到 e_h 与 e_m 成二次方关系^[4]。如采用指数修正, \bar{e} 、 e_m 的应用还存在一个最大的不足之处, 因为 q 与 \bar{e} 不为立方关系, 使得计算公式失去了原有的因次和谐, 所以其合理性较差, 变量之间的关系不严谨, 在使用中必须统一单位制。

2 频率水力隙宽

前面已对水力隙宽、平均隙宽和机械隙宽在岩体裂隙渗流分析中存在的不足之处进行了分析, 我们再来考察如图 1 所示的人工假定裂隙。很明显, 裂隙 A 和裂隙 B 的 \bar{e} ($= 4.75$) 和平均绝对粗糙度 Δ ($= 1.25$) 均相等, 并且裂隙 B 的分数维 D ($= 1.1216$) 还大于裂隙 A 的 D ($= 1.0697$), 即从分数维的角度上考虑, 裂隙 B 还比裂隙 A 粗糙。但是, 在此可是断定, 在同一水力比降下, 裂隙 B 肯定比裂隙 A 的过流量大。如按现有的 \bar{e} 和 Δ 计算和修正方法, 二者应该一样; 如按分数维 D 进行修正, 裂隙 B 的过流能力还小于裂隙 A, 这明显与实际情况不符。

根据裂隙水流运动的一般规律, 较窄的裂隙段和较高的凸起度应是控制过流能力的主要因素, 而现有的计算方法忽略了这一点。鉴于此, 本文提出一种可描述裂隙各种特征隙宽的新方法——宽配曲线和频率隙宽以及频率水力隙宽。

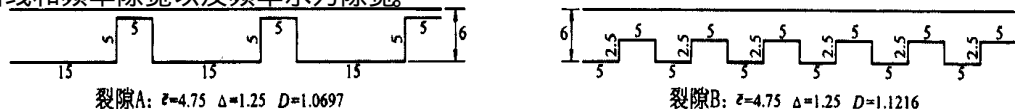


图1 同平均隙宽、同平均绝对粗糙度裂隙对比简图

2.1 裂隙宽配曲线

裂隙宽配曲线是指隙宽累积频率曲线,为了叙述和表达方便,取其隙宽配比、级配及组成之意,简称宽配曲线。图2是切尔内绍夫根据花岗岩中的裂隙获得的裂隙剖面图和隙宽累积频率曲线(概率纸)^[5],文[6]详细介绍了在线性直角坐标中绘制宽配曲线的方法和过程以及其所具有的重要意义。

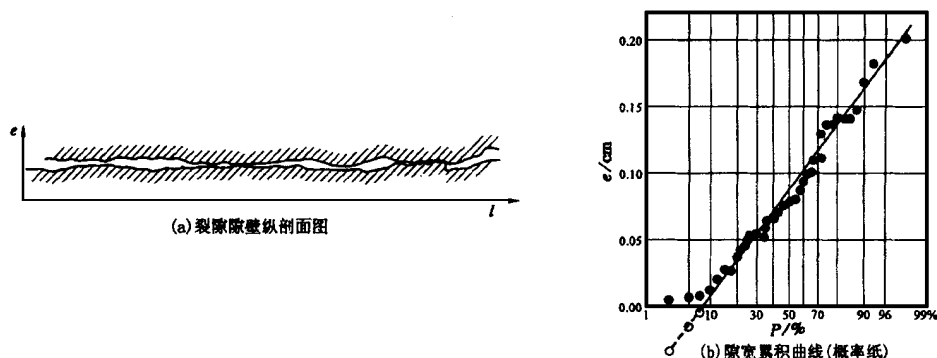


图2 概率纸上隙宽累积频率曲线(据文献[5])

2.2 频率隙宽

首先将 e_p 定义为小于和等于某个隙宽出现频率为 P 时的隙宽,在宽配曲线中表现为相应于 P 的隙宽,如图3中的 e_{25} 、 e_{50} 、 e_{75} 、 e_{95} 等,即 e_{25} (可读为 E 二五) 就表示小于和等于该值的隙宽出现频率为 25%, e_{95} (读为 E 九五) 就表示小于和等于该值的隙宽出现频率为 95%,特别是 e_{50} 称为中值隙宽,它是具有非常重要意义的特征隙宽,表示小于和大于它的隙宽值各占一半。我们将这些特征隙宽统称为频率隙宽,由定义可见, e 的脚标越小,隙宽就越小。表1为实例的各种频率隙宽值。

表1 实例的各种频率隙宽值

频率隙宽	e_5	e_{16}	e_{25}	e_{50}	e_{75}	e_{84}	e_{95}	\bar{e}
隙宽值(mm)	0.064	0.359	0.502	0.850	1.449	1.615	1.869	0.944

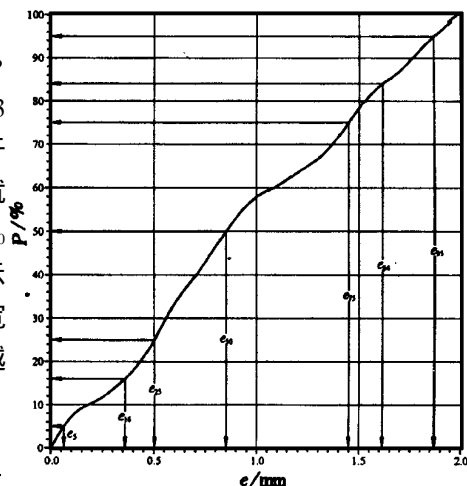


图3 裂隙宽配曲线及统计隙宽

2.3 频率水力隙宽

宽配曲线除了具有表征隙宽分布情况、均匀程度、充分体现隙宽组成等重要意义以外,它还可以寻求替代水力隙宽 e_h 的特征频率隙宽 e_{sh} 等重要意义。我们再来考察一下图1所示的 \bar{e} 和 Δ 均相同的两种裂隙,裂隙B过流量应该大却反而小的不合理现象。在此,可以采用小频率隙宽来代替平均隙宽进行渗流分析,由此可保证较窄的裂隙段成为过流能力的主要控制因素,从而可避免这种不合理现象。因为,裂隙A的 $e_{25}=1.0$ 、 $e_{50}=2.67$,而裂隙B的 $e_{25}=1.75$ 、 $e_{50}=3.5$ (假定宽配曲线用直线连接),使得裂隙B算出的过流量才有可能比裂隙A大,不至于与实际情况下相背。

如前面所述,使用水力隙宽的最大优点是因次和谐,使立方定理合理性较强,而其缺点是基本不能进行实际应用。采用平均或机械隙宽的优点在于隙宽值容易获得,其缺点是必须在立方定理前面加一修正系数或进行指数修正,修正系数随粗糙度和隙宽而变,修正指数必然使计算公式因次不和谐,合理性不强。如果我们在宽配曲线中寻找出(也一定能寻出)相应于某一频率的频率隙宽 e_{sh} 与水力隙宽相应或相等,就可弥补上述的不足,因为隙宽发生任何变化后均可测定该频率的频率隙宽值 e_{sh} ,所以我们称之为频率水力隙宽。这是频率隙宽研究中最具重要意义的参数。

2.4 频率水力隙宽的估算

利用式(3)~(7)以及图2所示的裂隙几何参数,便可计算出相应的水力隙宽 e_{h0} 。获得 e_h 值后,

再利用图 3 查出 e_h 相应的频率, 即可获得频率水力隙宽 e_{sh} , 见表 2。

表 2 不同方法确定的频率水力隙宽

采用者	Lomize		Louis		Amadei 等
e_h (mm)	0.785	0.874	0.847	0.905	0.859
e_h 相应的 e_{sh}	$e_{45.5}$	$e_{51.5}$	$e_{49.8}$	$e_{53.4}$	$e_{50.5}$
e_h 的计算式	(3)		(4)		(5)
Δ 的计算式	(6)	(7)	(6)	(7)	

由表 2 可见, 水力隙宽出现的频率在 45.5~53.4% 范围内, 基本在 50% 左右, 将其平均, 可得 $e_{sh} = e_{50.1}$, 几乎就是中值隙宽。由此可见, 根据现有研究成果估算, 频率水力隙宽取中值隙宽较为合适, 即 $e_{sh} = e_{50}$ 。

2.5 频率水力隙宽的计算机模拟

为了更加说明水力隙宽的频率范围, 即频率水力隙宽 e_{sh} , 本文对其进行了计算机模拟。模拟方法为: 首先采用计算机生成随机平面裂隙, 然后假定单元内渗流系数遵循立方定律进行有限元模拟, 获得单宽流量, 反过来计算水力隙宽 e_h , 从而在宽配曲线中查出其相应的频率即为频率水力隙宽 e_{sh0} 。

本次共进行了 5 条裂隙的模拟, 每条裂隙均为 $20 \times 10\text{ m}$ (x 轴纵向 $\times y$ 轴横向) 的矩形边界, 在随机生成裂隙时, 按 $0.4 \times 0.4\text{ m}$ 的网格随机取点获得上下隙面的高程, 其高程差即为该点的隙宽。各裂隙的下裂隙面透视图见图 4, 中线纵剖面图见图 5, 隙面基本不接触, 宽配曲线见图 6。

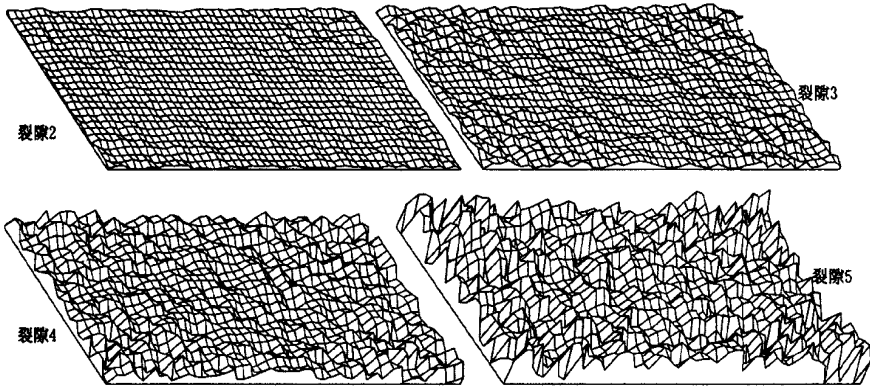


图 4 随机裂隙下隙面透视图

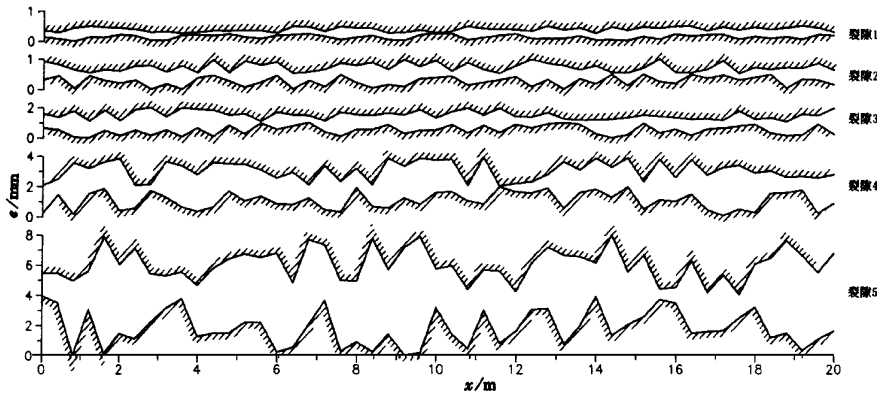


图 5 随机裂隙中线纵剖面图

选用纵向为渗流方向, 进出口水位落差 $\Delta H = H_1 - H_2 = 20\text{ m}$, 即平均比降 $J = 1$ 。按网格大小为 $0.4 \times 0.4\text{ m}$ 进行单元剖分, 共剖分 $50 \times 25 = 1\,250$ 个四结点单元。单元内隙宽认为不变, 取四结

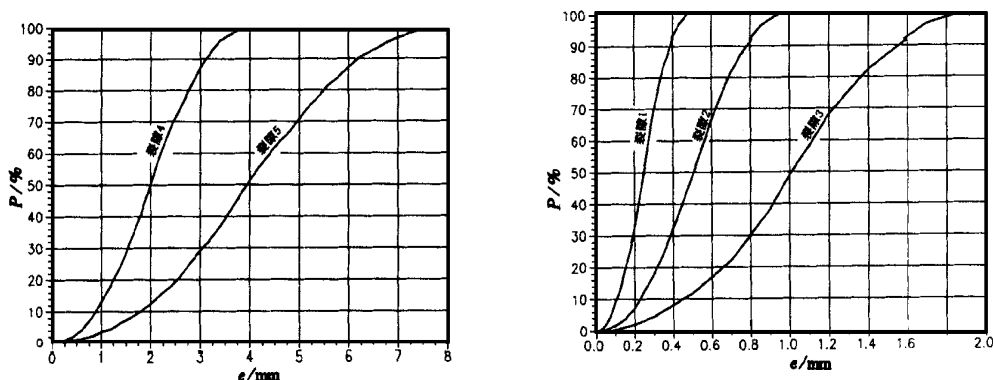


图 6 随机裂隙宽配曲线

点隙宽的平均值,其渗流系数遵循立方定律且均质各向同性。进出口按第一类边界条件处理,其余边界均为不透水边界。

根据上述条件对 5 条裂隙进行了有限元数值模拟,其裂隙基本参数及水力隙宽、渗流量、频率水力隙宽等计算结果见表 3。

由计算结果可见,5 条裂隙的水力隙宽的频率为 47.76%~49.93%,随着隙宽增加,频率水力隙宽稍有增大,平均值为 48.3%,也在中值隙宽附近。计算机模拟结果表明,对于无接触的裂隙,其频率水力隙宽可取 $e_{48\%}$ 。

表 3 随机裂隙基本参数及计算机模拟结果

裂隙编号	$\bar{e}(\text{mm})$	$\alpha_e(\text{mm})$	$e_{50}(\text{mm})$	$q(\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$e_h(\text{mm})$	e_{sh}
裂隙 1	0.247	0.102	0.249	1.0216×10^{-5}	0.242	$e_{47.76}$
裂隙 2	0.504	0.205	0.507	8.6321×10^{-5}	0.494	$e_{47.80}$
裂隙 3	1.010	0.404	1.011	6.9490×10^{-4}	0.990	$e_{47.94}$
裂隙 4	1.997	0.821	1.994	5.3580×10^{-3}	1.956	$e_{48.18}$
裂隙 5	3.997	1.657	3.942	4.3771×10^{-2}	3.939	$e_{49.93}$

3 结论

通过文的分析和研究,可获得如下结论:

1) 对现有表示隙宽的方法及其局限性进行充分的认识。等效水力隙宽实际上是很难获取和应用的参数,平均隙宽或机械隙宽使得立方定律很难成立,从而使计算公式失去因次和谐和较强的合理性,同时忽略了裂隙中较窄的隙段才是控制过流能力的主要因素。

2) 基于宽配曲线,本文首次提出频率隙宽的概念,它具有表征隙宽分布情况、均匀程度、充分体现隙宽组成等重要意义。特别是频率水力隙宽的提出,为解决现有隙宽应用中出现的局限性具有极大的帮助作用。借助现有研究成果,通过实例分析得到,水力隙宽 e_h 基本与中值隙宽 e_{50} 相应。再通过随机裂隙的计算机有限元模拟,得到频率水力隙宽可取 $e_{48\%}$ 。

参考文献:

- [1] Snow, D. T., A Parallel Plate Model of Fractured Pemeable Media [D] Berkeley: Univ. Calif, 1965.
- [2] 张有天. 裂隙岩体中水的运动与水工建筑物相互作用 [M]. 水利水电科学研究院, 1992.
- [3] Amadei, B. & Illangasekare, T. A Mathematical Model for Flow and Solute Transport in Non-homogeneous Rock Fracture [J] Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1994, 18: 719-731.
- [4] Barton, N., Bandis, S., Bakhtar, K., Strength, Deformation and Conductivity Coupling of Rock Joints [J] Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1985, 22(3): 121-140.

[5] 切尔内绍夫 水在裂隙网络中的运动 [M] 盛志浩, 田开铭译 北京: 地址出版社, 1987.

[6] 许光祥 岩石粗糙裂隙宽配曲线和糙配曲线 [J] 岩土力学与工程学报, 1999.

Frequency Hydraulic Aperture about Fracture Seepage in Rock Mass

XU Guang-xiang¹, HA Qiu-ling², ZHANG Yong-xing³

(1. Department of River and Ocean Engineering, Chongqing Institute of Communications, Chongqing 400074, China;

2. China Yangtze Three-Gorge Project Development Corporation Technique Committee, Beijing 100062, China; 3. Faculty of Civil Engineering Chongqing University B, Chongqing 400045, China)

Abstract The frequency aperture given in this paper is a new method that describes the fracture aperture composition. The aperture curve plays a role in describing the aperture distribution and uniformity. In particular, the frequency hydraulic aperture is of great importance in seepage analysis. It overcomes limitations of hydraulic aperture and mean aperture. Based on existing information, the result of example calculation shows that the hydraulic aperture e_h equals to the median aperture e_{50} . This paper also obtains that the frequency hydraulic aperture e_{sh} equals to e_{48} through finite element numerical modeling for various type of random fracture.

Keywords aperture curve; frequency hydraulic aperture; median aperture, random fracture

(上接第 49 页)

Study on the Ship Navigation Process after Construction of the Yangtze River Bridge in Sutong City

CHEN Ming-dong¹, YANG Sheng-fa², WEN Cen¹, XU Guxiang², CHEN Jie¹

(Department of River & Ocean Eng., Chongqing Institute of Communications, Chongqing 400074, China; 2. Southwest Research Institute of Water Transport Engineering, Chongqing 400042, China)

Abstract In this paper, the equations of ship and current motion model are established. The calculation of the ship manipulative capability parameter is consistent with the measured in static stream. Through the ship motion model, the layout of the navigation route and the change of the ship manipulative capability parameter due to the Yangtze River Bridge in Sutong City are studied.

Keywords The Yangtze River Bridge in Sutong; layout of navigation route; numerical model