第13卷 第1期
2002年1月

水 科 学 进 展
ADVANCES IN WATER SCIENCE

Vol. 13, No. 1
Jan., 2002

单裂隙面渗流特性及等效水力隙宽*

王 媛[1], 速宝玉[2]

(1. 河海大学土木工程学院岩土所, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 首先讨论了描述单裂隙面几何特性的两个最基本参数——隙宽和粗糙性的确定方法, 系统地总结和分析了现有有关单裂隙面渗流特性方面的研究成果, 并对不同粗糙性描述下的裂隙等效水力隙宽的确定问题进行了探讨, 提出了自己的看法, 并指出进一步要解决的问题。

关 键 词: 岩体裂隙; 单裂隙面渗流; 岩体渗流; 等效水力隙宽

中图分类号: TV 139.11 **文献标识码**: A **文章编号**: 1001-6791(2002)01-0061-08

众所周知, 由于岩体中裂隙的存在, 使得岩体的渗流性质不同于一般的多孔介质, 具有其复杂性和特殊性, 如非均匀性、各向异性及与应力有关的特性。单裂隙面是构成岩体裂隙网络的基本元素, 岩体的渗透性能和渗透方向不仅与裂隙网络的发育、切割特征有关, 还与单个裂隙的几何特征, 如裂隙的宽度、方向、粗糙性和充填性等, 密切相关。因此, 为合理地预测工程岩体中复杂的渗流状态, 首先需从单裂隙面的渗流特性这一基础性课题入手。

在单裂隙面的渗流特性方面, 前苏联学者Lomize[1]、Romm[2]、法国学者Louis[3]首先进行了平行板裂隙的水流实验, 证明了立方定律, 即缝隙中的流量与隙宽的三次方成正比。而实际天然情况下的裂隙面大多是粗糙不平的, Lomize[1]、Louis[3]、Neuzil[4]、Tsang[5~7]、Elsworth[8]、Barton[9]、Walsh[10]、周创兵[11]等相继对粗糙裂隙的水流特性进行了研究, 根据对粗糙性定义的不同, 分别提出了相应的修正立方定律。此时如果仍采用立方定律, 则等效水力隙宽的确定成为关键问题。因此本文在总结和分析现有有关单裂隙面渗流研究成果的基础上, 对等效水力隙宽的确定问题进行了探讨, 最后还简要探讨了充填裂隙渗流、非饱和裂隙渗流、应力作用下的裂隙渗流等方面的研究成果, 可望对此项工作有所帮助。

1 裂隙面隙宽和粗糙性的描述

1.1 裂隙表面粗糙性的描述方法

描述裂隙面粗糙性的方法很多, 可归纳为三类: 凸起高度表征法、节理粗糙度系数 *JRC* 表征法和分数维表征法。

* **收稿日期**: 2000-05-14; **修订日期**: 2001-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (59909002)

作者简介: 王 媛 (1969-), 女, 江苏阜宁人, 河海大学土木工程学院副教授, 博士, 主要从事岩土工程方面的研究。

凸起高度表征法是直接以裂隙表面的凸起高度函数 $h(x, y)$ 或凸起高度的概率密度函数 $n(h)$ 来描述裂隙表面的粗糙性,这一方法需精确量测裂隙面上每一测点的凸起高度，对于一个已知的裂隙面是可行的，但不适合于实际工程中的应用。

节理粗糙度系数(JRC)是工程中常用来描述裂隙面粗糙性的一个重要几何参数，在裂隙的隙宽、剪切刚度、剪切强度等诸多重要参数的经验公式中都直接包括着 JRC 的影响。JRC 的确定采用的是标准剖面对照法，Barton[12]于 1977 年提出了确定 JRC 的 10 条标准剖面（JRC 变化范围 0～20)，并经国际岩石力学学会推荐而被广泛采用。但是实际工程中结构面是很复杂的，很难用 10 条标准剖面完全表述。于是 20 世纪 80 年代以来 JRC 的许多定量方法[13]相继问世，如 Barton 等的直边法，王岐的伸长率法、Tse 和 Cruden 的剖分参数法等。

近几年来，随着分形几何理论的兴起和发展，在裂隙面粗糙性表征方面兴起了一种新型方法，即分数维法[14～16]。由于光滑的裂隙为二维，极端粗糙裂隙则接近三维，因此实际粗糙裂隙的维数应在二与三之间，即是一个分数维。同样，粗糙裂隙剖面的维数也是一个分数维，介于一与二之间。因此可以采用分数维的大小来表征裂隙面的粗糙程度。测定分数维维数的方法通常有量轨法和功率谱密度法[14]。量轨法要求量距足够小时，测得的分数维才接近它的真值，这样必定会带来很大的工作量，功率谱密度法需进行两次富氏变换，工作量也相当大。谢和平[15]根据粗糙剖面与三元科契曲线这一经典分形具有统计上自相似性这一特性，将粗糙剖面看作一个分形，建立了确定分数维 D 的近似方法，并建立了利用分数维 D 确定 JRC 的公式。

由此可见，粗糙裂隙面的分数维表征法既解决了粗糙性的描述问题，又解决了 JRC 的定量问题，应该说是一种最有应用前景的方法。但至目前为止主要还是应用于裂隙剖面的粗糙性描述上，如何采用分数维来描述沿两个方向都变化的整个裂隙的粗糙性，尚需得到进一步解决。

1.2　隙宽的描述

隙宽(即裂隙面的张开度)主要是岩体受张拉应力作用或结构面剪切位移导致岩石破裂扩张造成的。对于理想的光滑平行板构成的裂隙，隙宽是指两壁之间的法向相对距离。天然裂隙通常是粗糙不平的，隙宽是随着裂隙面上点位置变化的，可采用隙宽概率分布密度函数来描述隙宽的变化情况，根据许多学者的研究[17～20]，隙宽的分布型式主要有对数正态分布和负指数分布两种。

值得指出的是，裂隙面隙宽有三种不同的定义：平均隙宽 $\langle b\rangle$，力学隙宽 b_m（有时也称机械隙宽）和等效水力隙宽 b_h。$\langle b\rangle$是指隙宽函数 $b(x, y)$ 的均值；b_m 是指裂隙面发生的最大闭合变形量；b_h 是为了应用立方定律于实际裂隙而提出的概念，即是将试验所得裂隙渗流量代入立方定律反求得到的裂隙宽度。对于光滑平行板裂隙，这三种隙宽值是相等的；而对于实际粗糙裂隙，它们通常是不等的，因此在运用含有隙宽的相关公式时需分析清楚其中隙宽所指的含义。

2　平行板裂隙模型与立方定律

光滑平行板裂隙模型认为裂隙由两片光滑、平直、无限长的平行板构成。由流体为不可压缩、粘性及水流为层流的假定，根据流体力学基本原理可以推导出平行板裂隙的水流公式

$$\vec{v}_f = -k_f \vec{J}_f, \qquad k_f = \frac{g b^2}{12\mu} \tag{1}$$

式中　k_f 为裂隙面的渗透系数；b 为裂隙宽度；g 为重力加速度；μ 为水流运动粘滞系数；$\vec{J}_f$ 为沿裂隙面方向的水力坡降。

可见，通过裂隙面的单宽流量与隙宽的三次方成正比，这就是著名的立方定律。在等温、稳定流条件下，可以进一步得到

$$Q/\Delta H = C \cdot b^3 \tag{2}$$

式中　Q 为流量；ΔH 为水头差；C 为常数；对于径向流，$C = \frac{2\pi}{\ln(r_1/r_0)} \frac{g}{12\mu}$，$r_1$、$r_0$ 分别为裂隙面的外径和内径；对于直线流，$C = \frac{W}{L}\frac{g}{12\mu}$，$L$、$W$ 分别为裂隙平面沿水流方向的长度和沿垂直水流方向的宽度。

为证明平行板裂隙立方定律的正确性，人们相继进行了单条裂隙的水流实验研究。Lomize[1]、Romm[2]、Louis[3]分别以平行玻璃板(光学光滑)模拟裂隙，证明了在层流时立方定律的有效性。Romm 还研究了微裂隙(10～100 μm)和极微裂隙(0.25～4.3 μm)的情况，提出了只要隙宽大于 0.2 μm，立方定律总是成立的。

3　粗糙裂隙水流规律及等效水力隙宽

3.1　修正立方定律

式(2)建立在光滑平行板裂隙模型假定之上，认为裂隙面上任一点的隙宽是一个定值。实际天然裂隙面很难满足平行板裂隙的假定(本文统称非平行板裂隙为粗糙裂隙)，其隙宽是裂隙面上点位置的函数，因此许多学者致力于粗糙裂隙水流规律的研究，对式(2)提出了各种各样的修正方法，笔者将其归纳为以下几类：

(1)　裂隙面粗糙性修正系数修正法　该法由 Lomize[1]、Louis[3]等提出，他们通过对仿天然裂隙的试验研究，以凸起高度来描述裂隙面粗糙性，建立如下修正公式：

$$Q/\Delta H = \frac{C}{\xi} b_{\max}^3 \tag{3}$$

式中　$b_{\max}$ 为最大隙宽；ξ 为裂隙面粗糙性修正系数，与裂隙面的凸起高度分布情况有关，Lomize 提出 $\xi = 1 + 6.0\left(e/b_{\max}\right)^{1.5}$ (适用于 $e/b_{\max} > 0.065$ 情况)，Louis 提出 $\xi = 1 + 8.8\left(e/2b_{\max}\right)^{1.5}$，$e$ 为凸起的绝对高度。

可以看出，若裂隙面凸起的高度越大，则修正系数 ξ 越大，这是符合实际情况的。但上述是在裂隙表面凸起高度分布比较均匀的试验条件下提出的(如在有机玻璃板上粘上粒径较均一的砂粒)，而实际天然裂隙面上的凸起是高低不平的，因此使其应用受到限制。

(2)　隙宽密度分布函数 $n(b)$ 修正法　该法首先是由 Neuzil[4]基于隙宽只沿垂直水流方向变化，而沿平行水流方向不变的假定，通过数学推导而提出的，建议如下修正公式：

$$Q/\Delta H = C \cdot \int_0^\infty b^3 n(b)\, \mathrm{d}b \tag{4}$$

后来，Tsang[5]将式(4)推广到二维裂隙面情况，并考虑了试样尺寸效应的影响，得到

$$Q/\Delta H = \frac{C}{f} < b^3 > \quad , \quad < b^3 > = \int_0^{b_{max}} b^3 n(b) \mathrm{d} b / \int_0^{b_{max}} n(b) \mathrm{d} b \tag{5}$$

式中 f 为试样尺寸修正系数；对于直线流 $f \equiv 1$；对于径向流 $f \geq 1$，并随试样式外内径之比 r_1/r_0 增加，f 趋向于 1；当 $r_1/r_0 = 7 \sim 61$ 时，$f = 1.0093 \sim 1.004$。$\langle b^3 \rangle$ 为 b^3 的统计平均值。

可以看出，应用该类方法的关键是是否能够确定隙宽的概率密度分布函数，而且该类公式是理论上推导而得的，尚需试验进一步验证。

(3) 隙宽函数 $b(x, y)$ 直接修正法 当隙宽函数已知时，可以直接采用隙宽函数来修正，Tsang[5]首先给出了如下的含尺寸修正系数 f 的修正公式

$$Q/\Delta H = \frac{C}{f} < b^3 >_1^{1/3} \cdot \frac{1}{< 1/b^2 >_2} \tag{6}$$

式中 $< b^3 >_1$ 表示沿垂直水流方向的隙宽 3 次方几何平均值；$< 1/b^2 >_2$ 表示沿平行水流方向的 $1/b^2$ 的几何平均值，例如对于直线流有 $< b^3 >_1 = \frac{1}{W}\int_0^W b^3 \mathrm{d} y$，$< 1/b^2 >_2 = \frac{1}{L}\int_0^L \frac{1}{b^2} \mathrm{d} x$，$W$ 为试样裂隙面沿垂直水流方向的宽度；L 为裂隙面沿平行水流方向的长度。

而实际上裂隙的隙宽函数是很难量测的，因此 Elsworth 和 Goodman[8]建议以标准正弦曲线或锯齿形曲线这些有规律的曲线来近似表征隙壁的几何形状，再根据隙壁发生压缩或错位的程度得到隙宽的函数表达式 $b(x, y)$，进而计算出 b^3 的几何平均值，例如对于正弦曲线有 $Q/\Delta H = C < b^3 >$，$< b^3 > = \frac{1}{\lambda_1}\frac{1}{\lambda_2}\int_0^{\lambda_1}\int_0^{\lambda_2} b^3 \mathrm{d} x \mathrm{d} y$，$\lambda_1$、$\lambda_2$ 为两个方向的波长。

隙宽函数直接修正法的关键是要获得隙宽函数的表达式，而这一点是很难做到的，只有采用一些近似的函数来近似模拟，但采用何种曲线模拟比较符合实际尚需进一步研究。

(4) 节理粗糙度系数 JRC 修正法 Barton[9]通过大量的实验，提出力学隙宽 b_m、等效水力隙宽 b_h 与 JRC 之间存在如下经验关系式 $b_h = JRC^{2.5} / (b_m / b_h)^2$（适用于 $b_m > b_h$，b_h、b_m 单位为微米），再将得到的 $b_h = b_m^2 / JRC^{2.5}$ 应用于立方定律就可以得到以 JRC 修正的立方定律。

Barton 首次将等效水力隙宽与力学隙宽联系起来，这是一个重要的贡献，但其中包含 JRC 的影响，因此 JRC 修正法的关键是如何获得 JRC。

(5) 面积接触率 ω（隙面凸起接触面积与总面积之比）修正法 Iwai 通过试验首先发现隙面粗糙性对裂隙水流规律的影响主要与隙面面积接触率 ω 有关，继而 Walsh[10]模仿热传导理论，周创兵[11]通过数学推导，得出了类似的结论，建议如下公式：

$$Q/\Delta H = C \cdot \frac{1 - \omega}{1 + \eta\omega} b_{max}^3 \tag{7}$$

式中 η 为经验常数，Walsh 提出 $\eta = 1$，周创兵提出 $\eta = 0$。

面积接触率 ω 修正法使得立方定律的修正问题大为简化，避免了考察隙面上每一点处凸起或隙宽的分布情况，只需把握总体裂隙接触部分的情况即可，而要量测这一部分还是能够实现的，比如采用投放吸附性元素的方法，根据吸附性元素的吸附量来推算。

3.2 等效水力隙宽 b_h 的确定

由于人们仍习惯于采用立方定律来描述粗糙裂隙水流特性，因此在裂隙岩体渗流分析中，等效水力隙宽 b_h 的确定就显得十分重要。总结以上水流公式，确定 b_h 的方法有以下几种：

(1) $$b_h^3 = \frac{1}{\xi} b_{\max}^3 \tag{8}$$

式中　ξ 为粗糙性修正系数。

(2) $$b_h^3 = \int_0^{b_{\max}} b^3 n(b) \mathrm{d} b \text{(一维裂隙) 或 } b_h^3 = \int_0^{b_{\max}} b^3 n(b) \mathrm{d} b \Big/ \int_0^{b_{\max}} n(b) \mathrm{d} b \text{(二维裂隙)} \tag{9}$$

式中　$n(b)$ 表示隙宽密度分布函数。

(3) $$b_h^3 = \left[\frac{1}{W} \int_0^W b^3 \mathrm{d} y\right]^{1/3} \Big/ \left[\frac{1}{L} \int_0^L \frac{1}{b^2} \mathrm{d} x\right] \tag{10}$$

式中　W 为裂隙面沿垂直水流方向的宽度；L 为裂隙面沿平行水流方向的长度。

(4) $$b_h = b_m^2 / JRC^{2.5} \tag{11}$$

式中　b_h、b_m 单位为微米；JRC 为节理粗糙度系数。

(5) $$b_h = \frac{1}{W \cdot L} \int_0^W b \mathrm{d} x \mathrm{d} y \tag{12}$$

(6) $$b_h^3 = \frac{1-\omega}{1+\eta\omega} b_{\max}^3 \tag{13}$$

式中　η 为经验常数，介于 0～1；ω 为隙面面积接触率。

3.3　讨论

人们对粗糙裂隙水流规律已进行了大量的研究，根据各自对粗糙性的描述方法不同而得到了不同形式的近似经验公式，在选用这些公式时，既要考虑到公式中所包含的粗糙性描述参数是否容易获得，也要对近似公式的合理性要有所把握。由上述分析可知，裂隙面粗糙性修正系数修正法的局限性在于目前的修正公式都是基于裂隙表面凸起高度分布比较均匀的假定下建立的，难以应用于实际；隙宽函数直接修正法的困难在于是否能够寻找到合适的近似函数来代替隙宽函数；隙宽密度分布函数修正法和节理粗糙度系数修正法的困难则是如何能够获得隙宽密度分布函数和节理粗糙度系数。特别是，上述四类方法存在的共同缺点是未能反映凸起接触面大小的影响，而面积接触率修正法则考虑了这一点，同时比较简单，应是值得推广的方法。笔者[21]也曾对粗糙裂隙渗流特性进行了数值模拟，发现对于张开裂隙，可以近似采用平均隙宽〈b〉来代替 b_h；但对于两壁有部分接触的裂隙则不能简单地采用几何平均隙宽〈b〉来代替，必须采用考虑接触面积影响的隙宽式(13)来计算。Tsang 也曾指出[22]，对于有一定接触的裂隙，渗流会出现沟槽流现象，因此对立方定律修正时，考虑接触面影响是符合实际的。

4　充填裂隙的渗流特性

充填裂隙与平行板裂隙不同，其渗流特性不仅与裂隙的宽度有关，还与充填材料的性质有关，如充填材料的颗粒组成、孔隙率、颗粒直径等。速宝玉等[23]采用两平行玻璃板模拟裂隙，以河砂作为充填材料，通过试验研究和数学推导，提出了充填裂隙渗透系数的计算公式：

$$K_f = \frac{g b^2}{12 \mu} \cdot 12 n^3 / 20.4 \left[1 + 3(1-n) \frac{b}{d}\right]^2 \tag{14}$$

式中　b 为裂隙宽度；n、d 为充填料的孔隙率和颗粒直径。

上式与平行板裂隙渗透系数式(1)相比，增加了修正系数，该系数与裂隙宽度、充填料的孔隙率和颗粒直径有关。