

节理在不同接触状态下的渗流特性

夏才初^{1, 2}, 王 伟^{1, 2, 3}, 曹诗定^{1, 2, 4}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 闵行区建设工程安全质量监督站, 上海 201100; 4. 上海市市政工程设计研究总院, 上海 200092)

摘要: 将取自雅砻江水电站锦屏二期工程施工现场的白色大理岩, 采用劈裂法制成张拉性人工节理试件, 用 TJXW - 3D 型岩石节理表面形貌仪测量节理的表面形貌, 并采用自行编制的表面形貌和组合形貌参数计算软件, 分析其用以表征节理表面形貌的节理面二维分形维数, 以及用以表征组合形貌的节理内空腔的三维分形维数。对节理面进行错位, 以改变其接触状态, 然后进行不同接触状态下节理的渗流试验。将试验实测结果与传统的经验公式及各种修正公式的计算值进行比较, 发现利用现有经验公式分析试验结果存在较大的偏差。通过对实测数据做进一步分析, 发现表征节理表面形貌和组合形貌特征的分形维数也是影响节理渗透率的重要因素之一。综合考虑节理透过率以及表征节理形貌的分形维数等因素对节理渗透特性的影响, 得到更为合理的节理渗流经验公式, 该公式具有更广阔的应用前景。

关键词: 岩石力学; 表面形貌; 组合形貌; 节理; 接触状态; 错位; 渗流; 分形

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)07 - 1297 - 10

FLOW CHARACTERISTICS OF JOINTS UNDER DIFFERENT CONTACT CONDITIONS

XIA Caichu^{1, 2}, WANG Wei^{1, 2, 3}, CAO Shiding^{1, 2, 4}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Construction Safety and Quality Supervision Station, Minhang Sub-station, Shanghai 201100, China; 4. Shanghai Municipal Engineering Design and Research General Institute, Shanghai 200092, China)

Abstract: Seepage characteristics of rock joints under different contact conditions are studied. Artificial tension rock joints are made of white marble samples taken from construction site of the Yalong River(Jinping II Project), using cleaving method. Surface topographies of rock joints are measured by a three-dimensional TJXW - 3D-typed portable rock surface topography measuring instrument. A self-programmed software is used to calculate parameters for rock joints, including not only 2D fractal dimension of surface topography for each single joint surface, but also 3D fractal dimension of composed topography for vacuum formed by two coupled joint surfaces. Then seepage experiments of the artificial rock joints are carried out. During the experiment, contact condition of rock joints varied by offsetting the relative position of the joints from 1 mm to 6.5 mm. Deficiency of traditional empirical formulas, such as Darcy's law, cubic flow law and its modified formula, and seepage formula in turbulent flow, are exposed by comparing experimental results with calculating ones from those traditional

收稿日期: 2010 - 02 - 25; **修回日期:** 2010 - 03 - 31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40472142, 50579088)

作者简介: 夏才初(1963 -), 男, 博士, 1984年毕业于中南大学采矿工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石力学、地下结构等方面的教学与研究工作。E-mail: tjxiaccb@126.com

empirical formulas. After a thorough study of experimental results, it is discovered that fractal dimensions of single joint surface topography and composed joint topography have great influences on the seepage characteristics of rock joint. By taking permeability and the topography coefficients of rock joint into consideration, a new empirical formula for seepage in rock joints that highly matches the test results is presented, which is much more reasonable in theory and accurate in practice than traditional formulas.

Key words: rock mechanics; surface topography; composed topography; rock joints; contact condition; offset; seepage; fractal

1 引言

在岩体工程中,地下水是影响工程稳定的重要因素。岩体中存在不同程度发育的节理,由于节理的渗透系数是完整岩石的几倍甚至几十倍,使得节理成为地下水流动的主要通道。因此,要了解并掌握岩体的渗流特性,首先应开展对节理渗流特性的研究。水在节理中流动时,其流动特性受到节理表面粗糙程度的影响,即节理的表面形貌;而当节理发生相对位移时,渗流特性也会发生改变,此时,节理的表面形貌并未发生变化,对渗流特性产生影响的是构成节理的两个面组合在一起的组合形貌。故在不同的接触状态下,节理的表面形貌和组合形貌是影响节理渗透特性的关键因素,需做进一步研究。因此,有必要在对节理的表面形貌和不同接触状态下的组合形貌做定量分析的基础上,进行节理的渗流试验,也是今后进行节理应力-渗流耦合特性研究的基础。

对节理中水流运动规律的研究开展的比较早,但大多未考虑节理表面粗糙度的影响,因此,其研究成果在实际应用中存在一定的局限性。如:N. Barton 和 V. Choubey^[1]的 JRC 修正法在一定范围内受到广泛的认可,但忽略了节理在不同接触状态下的组合形貌特征的影响。为了研究自然节理中水的渗流特性,需采用各种方法研究节理表面形貌对其的影响。此外,B. Amadei 等^[2~6]均通过引入不同的粗糙度修正系数来表征节理表面形貌对渗流特性的影响;P. A. Witherspoon 等^[7~9]采用对隙宽密度分布函数进行修正的方法来分析节理面粗糙度对渗流特性的影响;K. Iwai^[10]在试验中发现,表面粗糙度对节理水流规律的影响主要与隙面的面积接触率有关,J. B. Walsh^[11]模仿热传导理论,周创兵和熊文林^[12]通过数学推导,提出了面积接触率修正法。以上方法均是利用隙宽分布函数来表征表面形貌对渗流的影响,由于隙宽分布函数本身与接触状态有关,所以这些方法在一定程度上能反映节理的组合形

貌。但是,隙宽是上下节理面高度的差值,对吻合性好的节理,无法反映出不同粗糙度节理的差别。面积接触率修正法也是表征组合形貌的方法之一,适用于在一定法向应力作用下已接触上的节理面,对于未接触或处于张开状态的节理并不适用,故无法全面反映各种接触状态下的特性。由此可知,需寻找一种新的方法来表征不同类型节理在不同接触状态下的表面形貌和组合形貌特征,以分析渗流特性的变化规律。

通过对节理面进行错位,可获得不同的接触状态。接触状态改变,使得节理内空腔体的空间分布发生变化。使用 TJXW-3D 型岩石节理表面形貌测量仪^[13],对节理表面形貌进行测量;用自行编制的表面形貌和组合形貌参数计算软件,计算节理表面和节理内空腔的分形维数。通过对节理试件错位改变其接触状态,进行在不同接触状态下节理的渗流试验,分析不同接触状态下节理的渗流特性,也为今后节理的应力-渗流耦合特性研究打下基础。

2 试件的制备及试验装置

2.1 试件的制备

试件均为白色大理岩,取材自四川省境内的雅砻江水电站锦屏 II 期工程的施工现场。加工工艺为:首先在施工现场采用常规爆破和钻、凿、切割的方法获取不规则立方体的岩块试样;再在实验室内用水钻法(钻头内径约 50 mm)钻取岩芯并切割,制备成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱形试件;最后采用劈裂法将圆柱形试件沿径向劈开,制成人工张拉性节理试件(见图 1)。



(a) 水钻法制成的圆柱形岩石试件



(b) 节理试件

图 1 制成岩石节理试件的照片

Fig.1 Photos for rock joint samples

2.2 试验装置

自行加工了节理渗流试验装置(见图 2)。首先将节理试件固定在套筒中, 渗透水由水压加载系统加压, 从进水口压入套筒, 流过节理面, 再由出水口流出, 经集水装置收集并称重, 以获得单位时间内水的流量。套筒和试件接触部分用硅胶做出密封层, 以防止水从套筒和节理试件之间的缝隙流出。

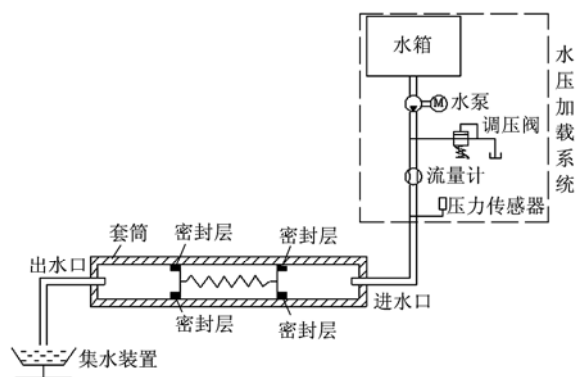


图 2 节理渗流试验装置

Fig.2 Device for seepage test of rock joint

2.3 试验方法

试验前, 先对节理试件进行错位配合, 取两片直径为 100 mm、厚度分别为 1 mm 的半圆形钢片, 分别黏贴在右节理试件的上端面和左节理面的下端面, 得到错位距离 $\delta_s = 1$ mm 的节理试件(见图 3)。这种方法可以改变节理的接触状态和隙宽的空间分布。将错位后的节理试件用热缩管密封, 装入节理渗流试验装置的套筒内(见图 2)。水箱中的水在一定压力作用下流过节理面, 在试验中通过改变水压值, 来获得不同的水力梯度, 本试验的水力梯度 J_f 范围为 40~200, 记录不同 J_f 下的水流量 q 。试验结束后, 再取厚度分别为 2, 3, 4 和 5 mm 的半圆形钢片, 按上述步骤重复试验。

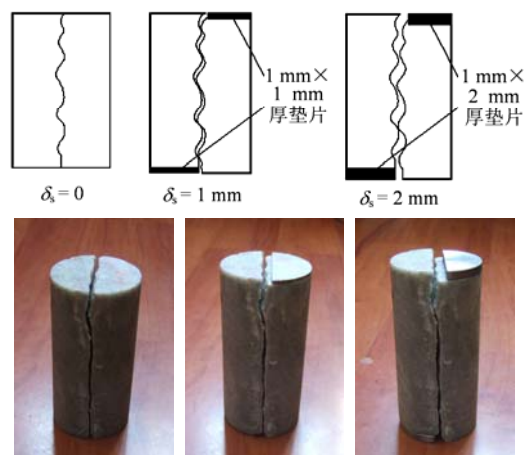


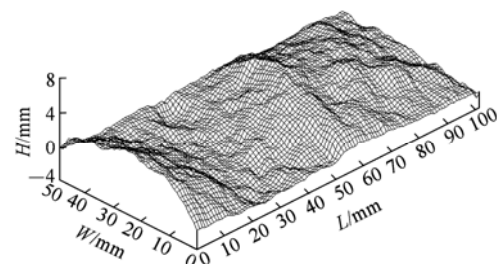
图 3 节理试件错位装配图

Fig.3 Assemble of offset joint samples

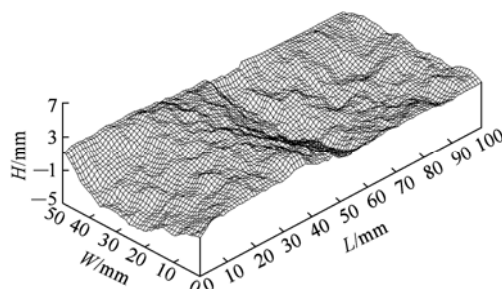
3 表面形貌

3.1 表面形貌的测量

用 TJXW-3D 型便携式岩石节理三维形貌测量仪^[13]对 4 组节理试件(编号为 B1~B4)的表面形貌进行测量, 其中试件 B4 进行了正反向共 2 组错位, 再用自行编制的参数计算软件计算节理的表面形貌参数。图 4 为试件 B3 节理表面形貌的空间图形显示, 其中 L 和 W 分别为节理面的长度和宽度, LOW 平面为节理的最小二乘面。在实际测量中, 每个节理面均由十几万个离散点所构成, 平均点距 0.2 mm。为便于识别, 在显示图像时进行了简化处理: 对显示的测量点进行删减, 整个面共计 5 000 个点, 平均点距为 1 mm; 在高度 H 方向放大了 2.5 倍。



(a) B3 上节理面



(b) B3 下节理面

图 4 节理表面形貌

Fig.4 Surface topographies of rock joints

3.2 组合形貌的表示方法

节理在发生渗流、闭合以及剪切的过程中,是由上下节理面组合在一起共同作用的,因此需对节理表面的组合形貌参数进行研究。节理的组合形貌从表述上分为 2 种,分别称之为节理表面形貌的叠加参数和空腔参数:前者是将上下节理面以各自的最小二乘面作为参照面,将获得的高度分布函数相加后再做参数计算^[14];后者是将节理内的三维空腔单独取出,计算节理面上每一点所对应空腔体的高度,即隙宽 b 。

当节理发生错位时,其接触状态发生了变化,隙宽的空间分布也发生变化。图 5 为试件 B1 在不同错位时隙宽的空间分布,随着错位距离的增加,隙宽空间分布的体积和形状也发生明显变化。图 5 中, b 为上下节理面的每一点对应的隙宽,其值越大,可供水流动空间的净高越大,节理面达到闭合极限状态所需的法向位移也越大。水在流动过程中,会自动寻找面积最大的截面,并沿此截面流动。 b 的平均值称为均值隙宽,用 b_m 表示。

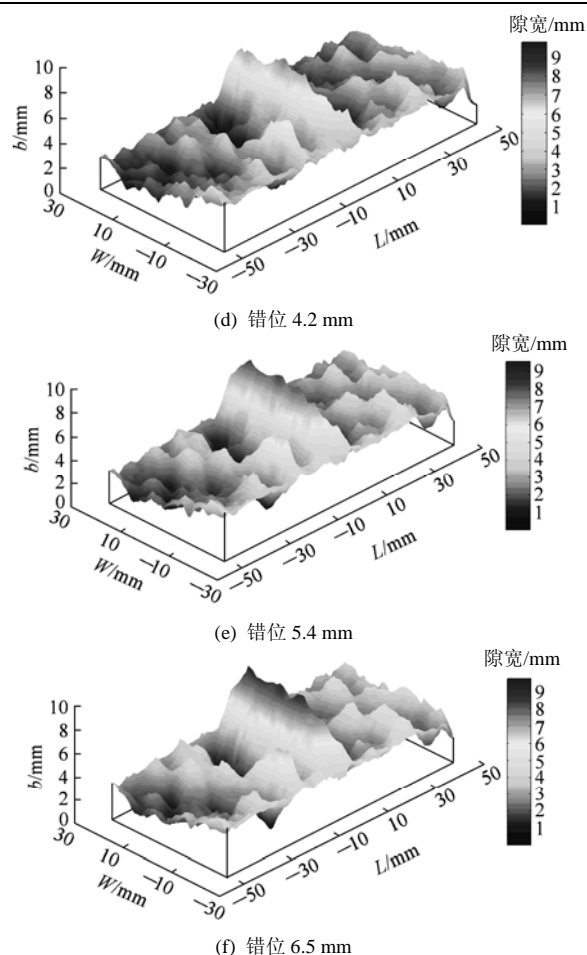
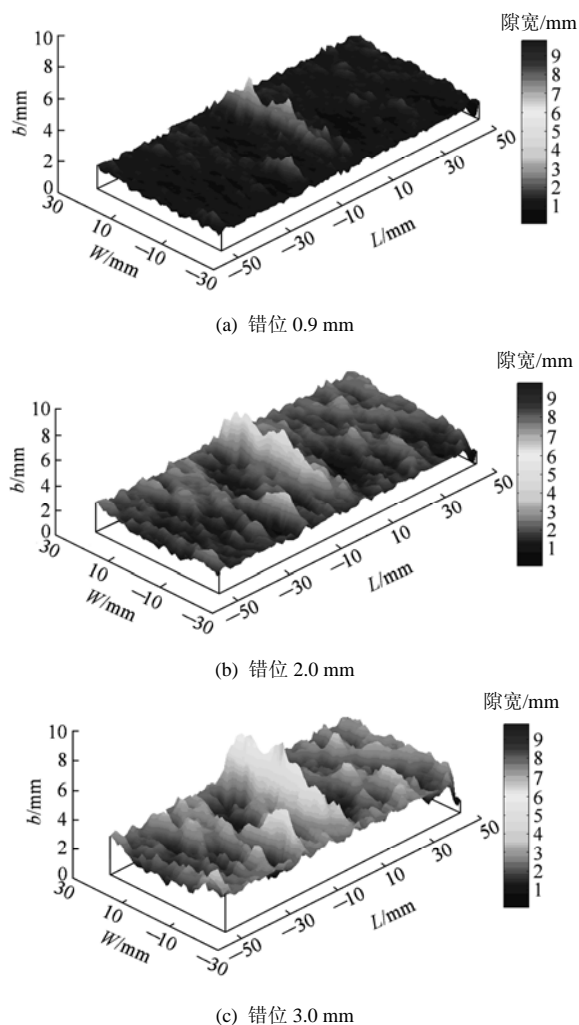


图 5 节理内空腔体隙宽分布图(试件 B1)

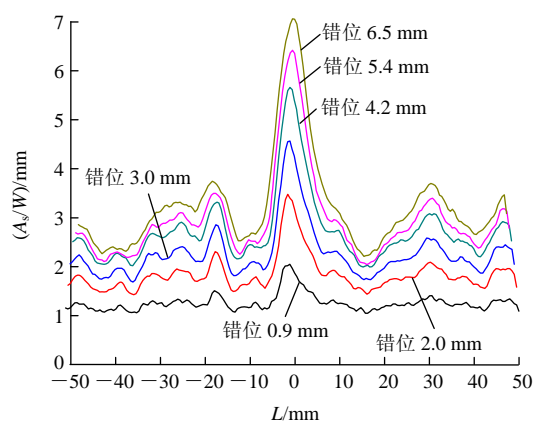
Fig.5 Aperture distribution of vacuums formed by joint (specimen B1)

图 6 为不同错位下,垂直于节理试件长度方向的单位宽度下的空腔体截面面积(A_c/W)。当错位距离较小时,上下节理面的吻合性较好,不同位置的截面面积相差不多,曲线也表现的较为平缓;随着错位距离的增加,上下节理面的吻合性越来越差,不同位置上的截面面积变化比较大,曲线越来越陡峭。这说明随着接触状态的改变,节理内空腔空间分布的形式发生变化,这在一定程度上会改变水流的路径。需说明的是,试件 B1, B3 在沿长度方向的中部有较明显的起伏(见图 4),在该处空腔高度和空腔体截面积的增加也较明显(见图 5, 6)。若试件无此明显起伏,则空腔高度和截面积均无此明显变化,见图 6(b)中试件 B4-1。

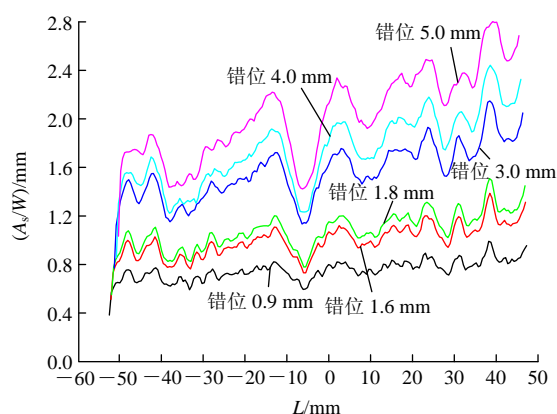
3.3 节理表面形貌的分形维数

分形维数是节理面几何特征的最佳描述,也是分析表面粗糙程度的方法之一。采用二维量规法^[15],计算试件 B1~B4 在不同放大因子 1, 10, 100, 500, 1 000 和 2 000 下的节理面分形维数 D_{r2} ,计算公式为

$$D_{r2} = -\lg A / \lg A_0 \quad (1)$$



(a) 试件 B1

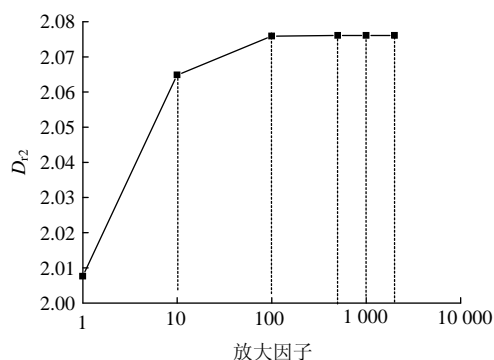


(b) 试件 B4 - 1

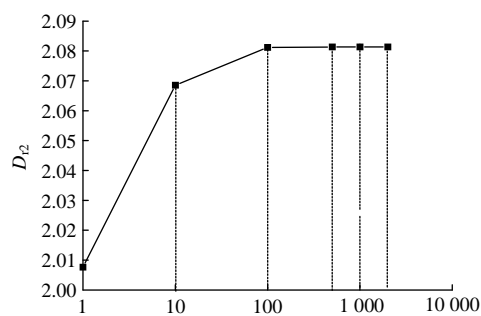
图 6 节理垂直于 L 方向的单位宽度的空腔截面面积Fig.6 Section areas for cavum of unit width perpendicular to L direction of the joint

式中: A 为用分形方法计算出的节理面的面积, A_0 为节理面在 LOW 平面上的投影面积。

图 7 为试件 B1 在不同放大因子下的表面分形维数。当放大因子为 1 时, 所计算出的节理面分形维数接近于 2。乘以放大因子后, 分形维数随着放大因子的增加而增大, 最终趋于常数。该常数可视为粗糙表面的真实分形维数。表 1 列出了试件 B1~B4 表面的二维分形参数。



(a) B1 上节理面



(b) B1 下节理面

图 7 不同放大因子下的表面分形维数

Fig.7 Fractal dimensions in different amplification factors

表 1 不同试件表面的二维分形维数

Table 1 2D fractal dimensions of different joint surfaces

试件编号	D_{2}	$D_{1\,000}$	$D_{2\,000}$	$D_{2}D_{2\,000}$
B1(上节理面)	2.076 1	14.309	15.002	31.146
B1(下节理面)	2.081 3	14.277	14.970	31.157
B2(上节理面)	2.064 4	14.311	15.004	30.974
B2(下节理面)	2.051 1	14.387	15.080	30.931
B3(上节理面)	2.078 3	13.965	14.658	30.464
B3(下节理面)	2.087 5	13.939	14.632	30.544
B4(上节理面)	2.061 8	14.054	14.747	30.405
B4(下节理面)	2.072 2	13.970	14.662	30.383

3.4 节理组合形貌的分形维数

节理面发生错位后, 组合形貌特征发生变化, 需计算节理组合形貌的分形维数。采用三维数盒法^[15]计算节理试件 B1~B4 在不同错位下空腔高度(隙宽 b)的分形维数 D_{a3} , 计算公式为

$$D_{a3} = \ln N / \ln n \quad (2)$$

式中: n 为沿长、宽和高方向上长方体的个数; N 为填充空腔所需的长方体总数。

绘制不同错位下的 $\ln N - \ln n$ 图(见图 8)。表 2 列出了试件 B1~B4 空腔体的三维分形维数 D_{a3} 和均值隙宽 b_m , 可以较为全面地反映出空腔模型的空间分布, 一个参数包含多个空间特征。

4 不同接触状态下的节理渗流试验

4.1 节理渗流的 $q-J_f$ 曲线

分析试验数据时, 由于岩石自身的渗透性远低于节理的渗透性, 故被忽略。试验共使用了 4 个节理岩样 B1~B4, 在 5~6 种错位接触状态和 6 种水力梯度条件下, 进行了 15 组试验。试验中, 进水口、出水口的水压差为 0.04~0.20 MPa, 节理面宽度 $W=5$ cm, 长度 $L=10$ cm。

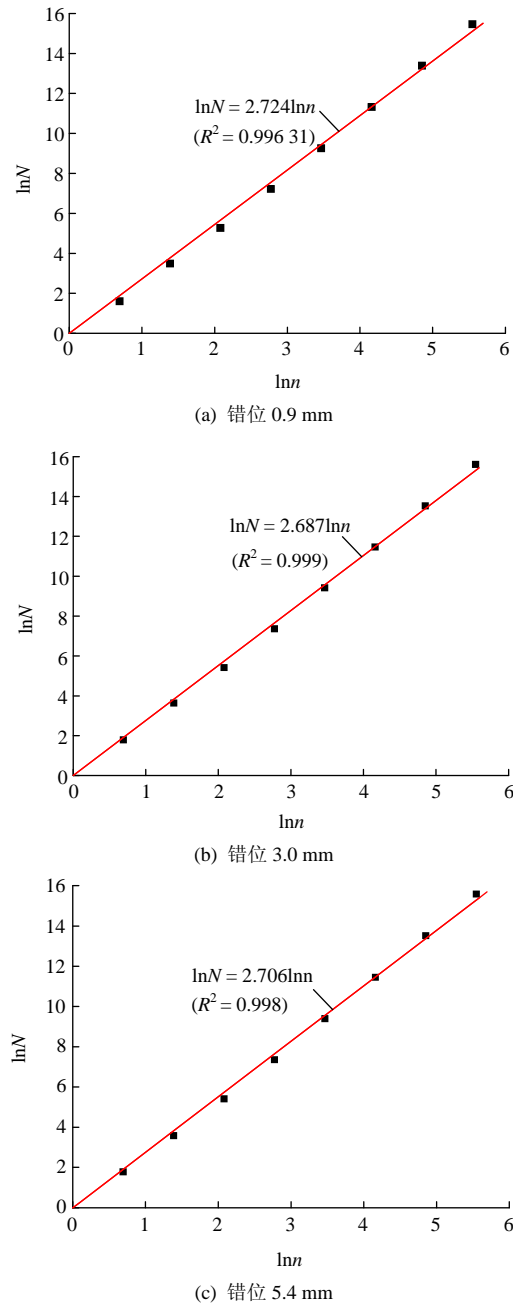


图8 隙宽高度分布的 $\ln N$ - $\ln n$ 变化图(试件 B1)

Fig.8 $\ln N$ - $\ln n$ charts for aperture distribution of specimen B1

图9为部分试件在不同接触状态下的 q - J_f 曲线,图中离散点为试验实测数据,实线为实测数据的指数拟合曲线,指数用 m 表示,该处取0.5; q 为单宽流量,即单位时间内在垂直于水流方向的单位长度截面上所流过水的体积,单位为 $\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ (本文统一简写为 cm^2/s); J_f 为水力梯度,水流运动黏滞系数 $\nu=0.00897\text{ cm}^2/\text{s}$ (水温 $25\text{ }^\circ\text{C}$)。可以观察到:

(1) 对同一节理试件,在同一错位状态下,随着水力梯度 J_f 的加大,水流量 q 不断增加,呈单调递增变化,但增加的速率随着水力梯度的增加,不断降低。说明流量的增长不随水力梯度呈线性增长。

(2) 不同错位状态下、同一水力梯度 J_f 下的流量 q 不同。对同一节理试件,当节理面发生不同的错位后,同一水力梯度 J_f 下对应的流量值 q 差别较大。节理面发生错位时,初始的接触状态被改变,节理面内空腔模型的形状和体积也发生了变化,这使得均值隙宽 b_m 发生了变化,而 b_m 是决定流速的重要因素。对于节理表面来说,接触状态的改变不会影响节理单个面的表面形貌,但是改变了节理面的组合形貌。由此可见,研究不同接触状态下组合形貌的变化是分析节理渗流特性的决定性因素。

4.2 试验结果与现有经典公式的比较

(1) 达西定律与实测数据的比较

将实测结果与达西定律计算结果进行比较。以试件B1为例,将实测结果按照达西定律的形式拟合,拟合后的结果比较见图10。图中离散点为试验实测数据,实线为达西定律的拟合曲线。

在同一接触状态下,均值隙宽 b_m 可近似看做定值,达西定律公式 $q=T_f J_f$ 可表述为单宽流量 q 与水力梯度 J_f 成正比,于是有 $q=k_f b_m J_f$ 。由图10可知,直接用达西定律拟合出来的直线效果较差,相关系数 R^2 的最大值仅为0.616;随着错位距离的增加,拟合效果越来越差,最低的 R^2 值仅为0.130。说明在该试验条件下,达西定律不适用,需寻找新

表2 不同接触状态的空腔分形维数和均值隙宽

Table 2 Fractal dimension and mean aperture of cavum under different contact conditions

B1			B2			B3			B4-1			B4-2		
δ_s	D_{a3}	b_m	δ_s	D_{a3}	b_m	δ_s	D_{a3}	b_m	δ_s	D_{a3}	b_m	δ_s	D_{a3}	b_m
0.9	2.514	1.28	1.6	2.418	1.54	1.0	2.558	0.88	0.9	2.411	0.77	-1.6	2.485	1.17
2.0	2.604	1.86	3.0	2.491	2.06	2.9	2.616	1.52	1.6	2.466	1.02	-2.0	2.507	1.27
3.0	2.648	2.30	3.1	2.539	2.09	3.1	2.619	1.55	1.8	2.484	1.10	-3.5	2.551	1.57
4.2	2.687	2.76	3.4	2.56	2.19	3.5	2.626	1.66	3.0	2.557	1.60	-3.9	2.569	1.72
5.4	2.706	3.00	5.1	2.584	2.74	5.9	2.667	2.14	4.0	2.581	1.79	-4.9	2.587	1.90
6.5	2.725	3.30	-	-	-	-	-	-	5.0	2.610	2.08	-	-	-

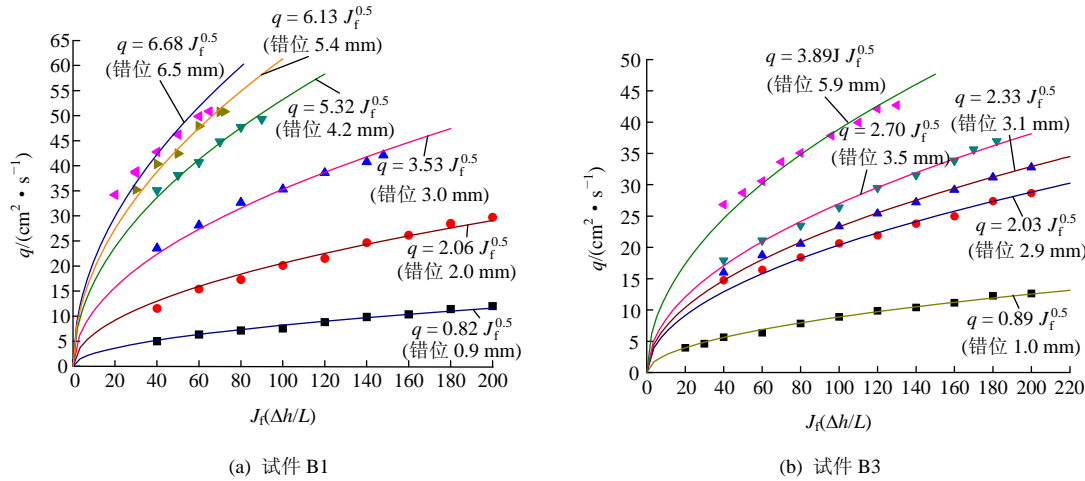
图 9 不同接触状态的 q - J_f 曲线

Fig.9 Figures of flow rate vs. hydraulic gradients under different contact conditions

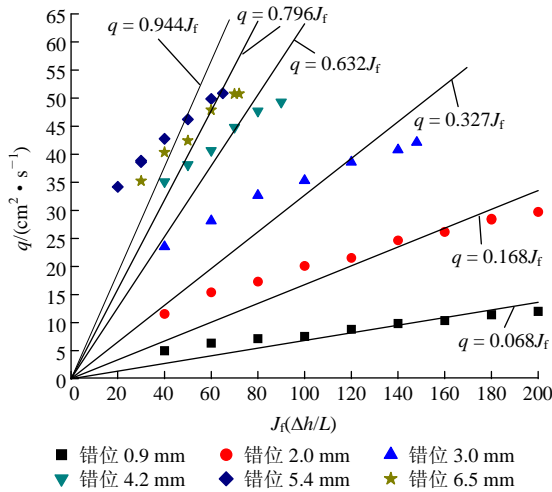


图 10 不同接触状态下实测结果与达西定律拟合结果的比较(试件 B1)

Fig.10 Comparison between experimental data and results calculated by Darcy's law under different contact conditions(specimen B1)

的公式来求解渗透系数, 以表征流量与 J_f 的关系。

(2) 立方定律及其粗糙度修正公式计算值与实测值的比较

立方定律的研究对象为平行板缝隙, 而天然节理面是粗糙的, 若将由平行板缝隙层流流态导出的立方定律用于天然节理, 必须要做出修正。利用组合形貌分析软件, 计算出表面凸起的绝对高度 Δ , 分别按立方定律^[15]、B. Amadei 公式^[2]、C. Louis^[4]公式、C. Louis^[5]公式、G. M. Lomize^[3]公式和速宝玉等^[6]公式, 计算水的单宽流量 q , 并与实测结果进行比较, 见图 11。

分析可知, 实测值与直接用立方定律计算出的值相差较大, 计算值与实测值的比值在 8~20 倍不

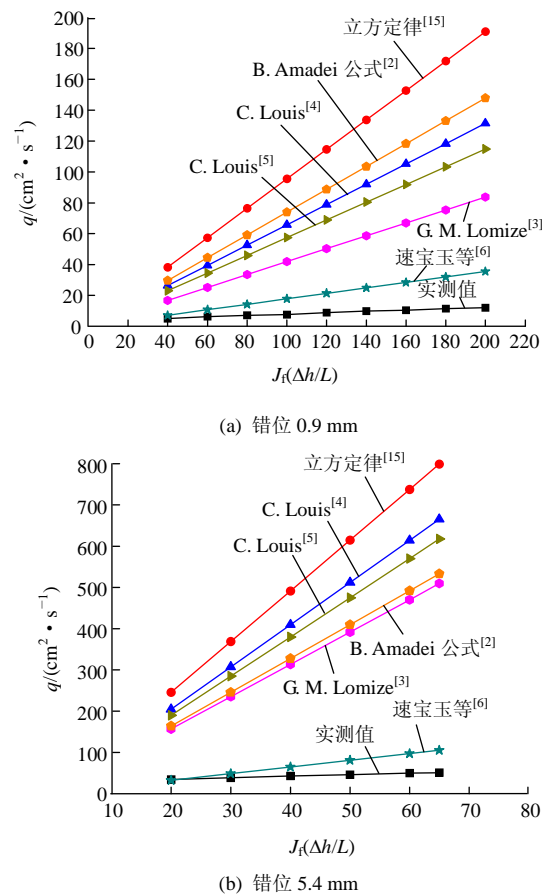


图 11 不同水力梯度下实测值与传统经验公式计算值的比较

Fig.11 Comparison between experimental flow rates and results calculated by some traditional empirical formulas under different hydraulic gradients (specimen B1)

等, 比值随着水力梯度的增加而增长, 随着错位距离的增加而增长。其余 5 个经粗糙度修正后的公式, 其计算值与实测值的比值也较大, 但差值低于立方

定律。其中速宝玉等^[6]修正公式的计算结果与实测值最接近, 比值范围为 1.5~2.5, 且比值随着水力梯度的增加而增加。该公式采用了 Δ/b_m 的负指数形式来表征修正系数, 而其余 4 个公式均采用了正指数形式, 说明负指数更能满足低水力梯度下的渗流试验。总体说来, 立方定律及其各种形式的粗糙度修正公式, 所计算出的不同水力梯度下的单宽流量, 与实测数据相比, 差值均比较大, 需做进一步修正。

(3) 紊流公式计算值与实测值的比较

将实测结果分别与 G. M. Lomize^[3]和 C. Louis^[5]提出的紊流状态下水流量计算公式的计算结果进行比较(见图 12)。用紊流公式拟合的 q - J_f 曲线与实测值曲线的变化趋势基本相同, 但是用紊流公式计算出的单宽流量与实测值仍有一定差值。所以, 该紊流公式存在一定误差, 需做进一步修正。

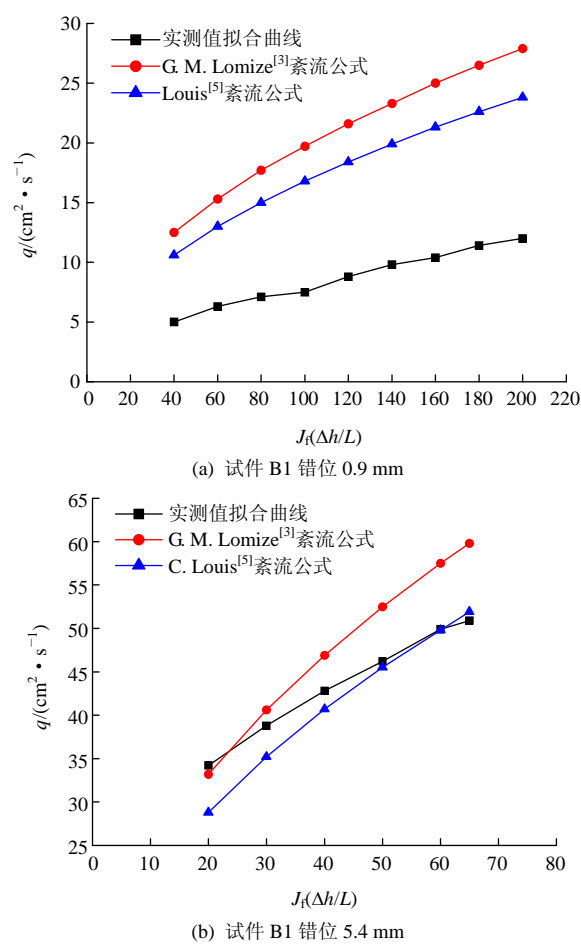


图 12 不同水力梯度下 q 实测值与紊流公式计算值的比较
Fig.12 Comparison between experimental flow rates and results calculated by seepage formulas in turbulent flow under different hydraulic gradients

4.3 节理渗流的经验公式

由于上下节理面错位引起了接触状态的变化, 改变了空腔的体积, 从而改变了水流通道。图 6 中,

随着错位距离的增加, 空腔的高度不断增大, 可供水流过的截面积也逐渐增大。图 9 中, 随着错位距离的增加, 水的流量在增加。需要说明, 对耦合节理, 在无错位状态下, 上下节理面在法向力作用下能够完全吻合, 此时节理的渗透系数, 在理论上应为 0; 此外, 由于节理面是粗糙和不规则的, 可能存在大的起伏, 所以会出现大错位状态下的吻合性比小错位状态下吻合性好也是合理的。

(1) 水流量 q 与水力梯度 J_f 的幂指数关系

对图 9 进行分析后发现, 在该水力梯度范围内, 单宽流量 q 与水力梯度 J_f 之间存在很好的幂指数关系:

$$q = T_f J_f^m = k_f b_m J_f^m \tag{3}$$

式中: T_f 为透过率, m 为幂指数。将各试件的渗透试验结果进行拟合, 拟合后的值见表 3。

表 3 流量 - 梯度、渗透系数 - 隙宽的关系								
Table 3 Relationships between flow rate and gradient, permeability and aperture								
试件 编号	错位 /mm	b_m /mm	N_s	$q = T_f J_f^m$			$q = T'_f J_f^{0.5}$	
				T_f /($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	m	R^2	T'_f /($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	R^2
B1	0.9	0.98	9	0.61	0.560	0.989	0.82	0.980
	2.0	1.56	10	1.35	0.585	0.996	2.06	0.980
	3.0	2.00	7	4.68	0.440	0.998	3.53	0.983
	4.2	2.46	6	6.84	0.440	0.991	5.32	0.973
	5.4	2.70	7	11.96	0.347	0.998	6.13	0.821
	6.5	3.00	6	8.29	0.425	0.987	6.68	0.959
B2	1.6	1.24	9	1.44	0.465	0.996	1.22	0.992
	3.0	1.76	9	2.77	0.451	0.993	2.18	0.983
	3.1	1.79	8	2.62	0.461	0.985	2.16	0.980
	3.4	1.89	11	2.86	0.487	0.996	2.69	0.995
	5.1	2.44	8	4.64	0.458	0.999	3.84	0.991
B3	1.0	0.58	11	0.78	0.527	0.996	0.89	0.994
	2.9	1.22	9	2.72	0.441	0.988	2.04	0.974
	3.1	1.25	9	2.76	0.465	0.996	2.33	0.991
	3.5	1.36	9	2.69	0.501	0.994	2.70	0.994
	5.9	1.84	9	5.72	0.414	0.996	3.89	0.957
B4 - 1	0.9	0.37	9	0.92	0.485	0.994	0.86	0.993
	1.6	0.62	12	1.78	0.444	0.988	1.37	0.976
	1.8	0.70	9	0.93	0.595	0.995	1.47	0.975
	3.0	1.20	7	4.07	0.450	0.997	3.22	0.986
	4.0	1.39	6	5.43	0.423	0.981	3.83	0.954
	5.0	1.68	5	5.02	0.462	0.998	4.23	0.992
B4 - 2	1.6	0.67	10	1.30	0.506	0.995	1.34	0.995
	2.0	0.77	9	2.16	0.486	0.985	2.02	0.984
	3.5	1.07	7	2.90	0.527	0.984	3.28	0.982
	3.9	1.22	6	4.01	0.486	0.998	3.76	0.997
	4.9	1.40	5	6.32	0.426	0.998	4.57	0.972

注: N_s 为离散点个数。

相关分析成果表明,拟合曲线相关系数 R^2 的最小值均大于 0.98。对指数 m 进行分析,发现:① 对于不同试件, m 为 0.347~0.595,与 1 相差较远,不同试件在不同错位时, m 的平均值为 0.470;② m 与均值隙宽 b_m 的变化规律不明显(见图 13),离散性较大,但总体呈现出 m 随均值隙宽增大而降低的变化趋势。这也说明 b_m 只是影响水流量变化的因素之一,除此之外,还应考虑组合形貌的影响。

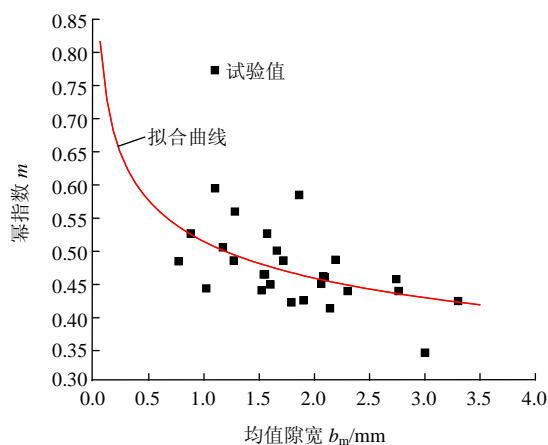


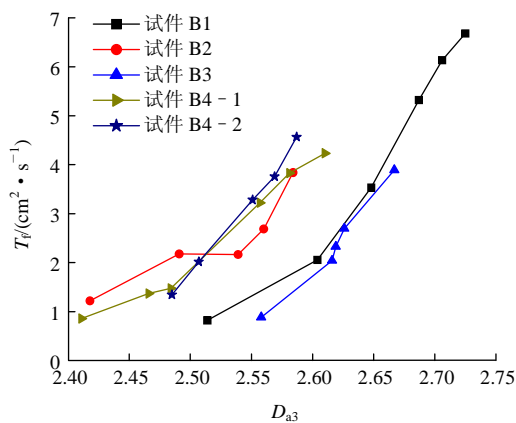
图 13 不同接触状态下指数 m 随均值隙宽 b_m 的变化
Fig.13 Figure of exponent m varies with aperture b_m under different contact conditions

由以上分析,可对 m 值做简化处理,取为经验值 0.5,其相对误差为 9.8%,此时有 $q = T_f' J_f^{0.5}$ 。用指数 $m = 0.5$ 对试验数据重新拟合,拟合后的曲线见图 13 中的实线,重新拟合后 T_f' 值见表 3,拟合曲线的相关系数均大于 0.95。

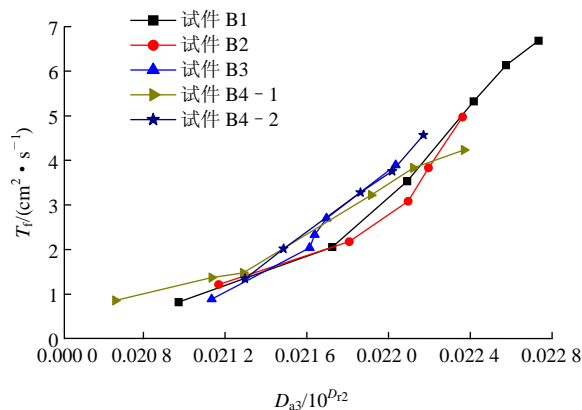
(2) 包含分形维数的节理渗流经验公式

节理中水的渗流特性,主要受到 2 个因素的制约,即节理的表面形貌以及不同接触状态下节理的组合形貌。节理的表面形貌反映了节理表面的粗糙程度和起伏程度,接触状态对单个面的表面形貌没有影响,仅改变组合形貌。所以,对同一节理,当节理面错位,接触状态发生改变,表现为空腔体空间分布的变化。要研究节理的渗流规律,需对表面形貌和组合形貌进行量化,并建立均值隙宽 b_m 、流量 q 与分形维数的关系。

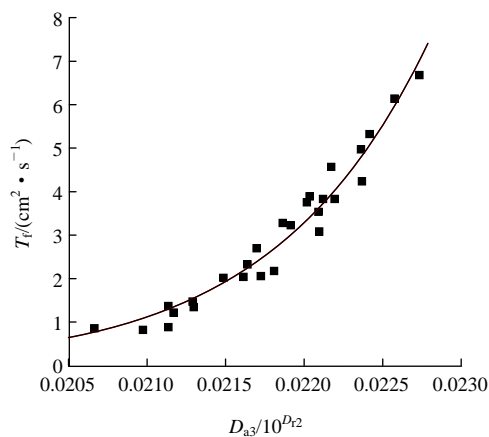
图 14(a)绘制了试件 B1~B4 的透过率 T_f 与分形维数 D_{a3} 的关系曲线。对于某一试件,随着错位距离的增加,空腔体积增加,三维盒维数 D_{a3} 也增加,符合指数关系;但对于不同试件,仅凭 D_{a3} 无法得到较好的回归关系,故引入表面的二维分形维数 D_{r2} (见图 14(b), (c)),存在以下关系:



(a) 不同节理面 T_f 与 D_{a3} 的关系曲线



(b) 不同节理面 T_f 与 $D_{a3}/10^{D_{r2}}$ 的关系曲线



(c) T_f 与 $D_{a3}/10^{D_{r2}}$ 的拟合曲线

图 14 透过率 T_f 与分形维数 D_{a3} 的关系曲线

Fig.14 Relationship curves of permeability, T_f with fractal dimension D_{a3}

$$T_f = \alpha \left(\frac{D_{a3}}{10^{D_{r2}}} \right)^\beta \quad (4)$$

式中: α 和 β 均为常数,根据试验结果,分别取经验值 6.43×10^{38} 和 23。

将试件 B1~B4 的实测结果与式(4)的计算结果进行比较,可知,经验公式与实测数据吻合性较好,

用分形维数比均值隙宽能更好地拟合试验结果, 分形方法具备广泛的应用前景。

5 结 论

用自行加工的张拉性人工节理试件, 进行不同接触状态下节理的渗流试验, 得到以下结论:

(1) 用实测结果验证了现有经验公式的不足: 现有的经典经验公式, 包括 Darcy 定律、立方定律及其粗糙度修正公式和紊流计算公式, 在一定程度上能够反映节理渗流规律, 例如, 紊流公式的计算流量曲线与实测流量曲线的变化趋势基本一致, 但其计算值与实测值相差较大, 说明有必要对现有公式做进一步修正。

(2) 在与现有经验公式计算值进行比较的基础上, 通过对实测结果进行拟合分析, 认为在该试验条件下, 流量与水力梯度呈幂指数变化, 幂指数 m 可取经验值 0.5。

(3) 节理的表面形貌和不同接触状态下的组合形貌, 是节理渗流性质的主要影响因素。用二维量规法获得了节理面的分形维数 D_{r2} , 用以表征节理表面形貌特征; 用三维数盒法获得了节理面内空腔的分形维数 D_{a3} , 用以表征节理面的组合形貌特征。通过对试验结果进行分析, 提出了包含 D_{r2} 和 D_{a3} 透过率的经验公式, 进而得到了不同接触状态下节理试件的流量与水力梯度的关系式。该经验公式计算值与实测值吻合性较好, 用分形方法获得的一个参数包含了多个信息, 用该方法能很好地模拟并预测试验结果, 具备广泛的应用前景。

参考文献(References):

- [1] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock and rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1977, 10(1/2): 1 - 54.
- [2] AMADEI B, ILLANGASEKARE T. A mathematical model for flow and solute transport in non-homogeneous rock fracture[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1994, 31(6): 719 - 731.
- [3] LOMIZE G M. Flow in fractured rocks[M]. Moscow: Gosemergoizdat, 1951.
- [4] LOUIS C. A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses[J]. Rock Mechanics Research Report, 1969, 32(10): 90 - 98.
- [5] LOUIS C. Rock Hydraulics in rock mechanics[M]. New York: Springer-Verlag, 1974.
- [6] 速宝玉, 詹美礼, 赵 坚. 仿天然岩体裂隙渗流的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 19 - 24.(SU Baoyu, ZHAN Meili, ZHAO Jian. Study of fracture seepage in the imitative nature rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(5): 19 - 24.(in Chinese))
- [7] WITHERSPOON P A. New approaches to problems of fluid flow in fractured rock masses[C]// The 22nd U.S. Symposium on Rock Mechanics. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Cambridge Mass, 1981: 57 - 76.
- [8] NEUZIL C E, TRACY J V. Flow through fracture[J]. Water Resources Research, 1981, 17(1): 191 - 194.
- [9] TSANG Y W, WITHERSPOON P A. Hydromechanical behavior of a deformable rock fracture subject to normal stress[J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86(B10): 9 287 - 9 298.
- [10] IWAI K. Fundamental studies of fluid flow through a single fracture[Ph. D. Thesis][D]. Berkeley: University of California, 1976.
- [11] WALSH J B. Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18(5): 429 - 435.
- [12] 周创兵, 熊文林. 不连续面渗流与变形耦合的机制研究[J]. 水文地质工程地质, 1996, (3): 14 - 17.(ZHOU Chuangbing, XIONG Wenlin. Research for coupling mechanism between permeability and deformation of geological discontinuities[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1996, (3): 14 - 17.(in Chinese))
- [13] 夏才初, 王 伟, 丁增志. TJXW - 3D 型岩石表面三维形貌仪的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1 285 - 1 291.(XIA Caichu, WANG Wei, DING Zengzhi. Development of three-dimensional TJXW - 3D-typed portable rock surface topography[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1 285 - 1 291.(in Chinese))
- [14] 夏才初, 孙宗硕, 潘长良. 天然岩石节理剪切强度的室内试验研究[J]. 中南矿业学院学报, 1991, 22(增 3): 87 - 94.(XIA Caichu, SUN Zongqi, PAN Changliang. Experiment of shearing strength for nature rock joint[J]. Journal of Zhongnan University of Mining and Technology, 1991, 22(Supp.3): 87 - 94.(in Chinese))
- [15] KULATILAKE P, PARK J, BALASINGAM P, et al. Quantification of aperture and relations between aperture, normal stress and fluid flow for natural single rock fractures[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, 26(3): 269 - 281.