

文章编号: 1001-4888(2017)06-0818-09

两条粗糙平行节理构型对超声波 波速影响的试验研究^{*}

李业学^{1,3}, 徐福卫¹, 马彦熊², 周伟¹

(1. 湖北文理学院, 湖北襄阳 410053; 2. 南洋理工大学, 新加坡 639798; 3. 四川大学, 四川成都 610065)

摘要: 基于图形图像学和分形几何学交叉学科理论, 采用图像学中的颜色单元体, 借鉴将颜色灰度值间接对应节理面高度值的思想, 结合分形布朗函数, 本文提出了间接描述节理粗糙度的自仿射维数计算方法——YUV 维数法。依据本文提出的方法, 计算了 24 个节理岩石共 48 个粗糙面的 YUV 维数, 剖析了节理面几何构型的分形特征。采用含两条节理岩石超声波试验, 探讨了节理岩石的两条节理 YUV 维数对超声波波速的影响规律。研究表明, 超声波波速平均值随着任一节理 YUV 维数、两条节理维数之和减小而增大。在维数减小过程中, 尽管波速持续增加, 但波速增大速率逐渐降低。当维数减小至某个量值时, 波速不再增大, 近似趋于一常量。通过类比分析, 文中认为上述结论的机理和原因是: 维数由大变小的过程, 可类比为节理面孔隙缺陷被逐渐压密且分布越来越规则的过程, 因为在此过程中, 量化的数值体现就是维数逐渐变小。因而, 当维数变小, 或者说节理面缺陷空隙被压密且分布更为规则时, 超声波波速将由小变大, 且最后将趋于一常数。

关键词: 节理岩石; 超声波; 波速; 分形; 几何构型

中图分类号: TU457 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-16-166

0 引言

天然岩体富含大量微孔隙、裂隙和断层、节理等不连续结构面, 这些不连续结构面对岩体的物理力学性质存在很大的影响甚至起决定性作用^[1]。由于“上天可能, 入地不易”, 已有研究^[2,3]多借助各种间接“入地”的试验研究手段, 如钻孔成像、超声波仪探测地下岩体及其赋存环境的相关信息。超声波检测由于其无损性和操作简单在不同工程领域获得了广泛应用, 尽管如此, 由于节理岩体的结构复杂且对于超声波穿越节理时相关透反射、散射规律尚不完全清楚, 导致超声波探测节理存在、节理的产状性能及其相关参数时精度不高甚至出现与实际情况偏差较大的情况, 因此, 为了方便在不同领域广泛应用超声波检测技术, 深入开展节理等不连续结构面的相关参数对超声波波速影响规律研究很有必要。

1960 年, Birch^[4,5]在研究岩体中超声波传播规律时揭示, 岩体中的不连续结构面对超声波传播存在影响, 随着静水围压增大, 波速将不断增加; 当围压值增大至一定程度时, 波速增大速率降低; 围压继续增大, 波速增大幅度持续减小, 直至近乎定值。李振生^[6]等研究也发现了这一现象, 然而, 他们同时还发现, 当节理岩体的荷载再持续增加, 穿越节理岩体的超声波波速反而开始减小, 研究认为, 这是因为荷载增加至某一数值时, 岩体内的岩石部分开始破裂, 内部的微孔隙结构再次增加所致。简文彬^[7]等利用

^{*} 收稿日期: 2016-09-06; 修回日期: 2016-11-02

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究计划重点项目(D20142603)

通讯作者: 李业学(1977—), 副教授。主要从事节理岩石动力学的研究工作。Email: warmhearted520@163.com

上述研究成果开展了应用研究,基于超声波波速的大小,探测了某水电站坝址节理断层的分布情况,查明了节理裂隙发育地段,为大坝的设计施工提供了重要的第一手资料。以上研究进展定性地探讨了节理存在对超声波波速的影响。科学研究最终必须由定性探讨上升至定量分析,赵明阶^[8]定量研究了在一维、二维应力场下的弹性波波速问题,他基于岩体在二维应力场作用下的节理变形分析,运用节理变形对岩体中节理体积率的改变,建立节理对岩体中弹性波传播影响的等效模型,从而推导出节理岩体在应力场作用下的弹性波传播速度的解析解。徐松林^[9]等也应用双裂纹的组合建立了双裂纹体系模型,在双裂纹体系内部采用“相互作用”分析法,以部分考虑波在岩体内的多次散射,导出了岩体卸荷时波速变化规律。

纵观以上研究发现,已有研究已导出了岩体在多种状态下波速的解析解或经验方法,但是,很多研究都假定每个节理是光滑平直的,事实上,天然节理表面是粗糙不平的,且这种不规则的表面几何构型是导致散射的根本原因^[10,11],散射不仅耗散超声波能量,同时降低其传播速度。因此要从本质上分析超声波在节理岩石中传播时的波速变化规律和衰减机理,探讨节理面几何构型的影响是必不可少的。

分形几何自问世以来,成为了探讨节理面几何构型粗糙性与不规则特征的有力工具。分形几何中,最重要也是最基本的参数即为分形维数,或简称为维数。维数的计算方法研究进展迅速,先后经历了三角形棱柱表面积法^[12]、投影覆盖法^[13]、立方体覆盖法^[14]。然而,这些方法所计算的维数都是自相似维数,垂直于节理面的几何构型特征是自仿射的。传统意义上的自相似图像维数不适宜描述具有自仿射特征的节理面的粗糙特征。因此,本文提出一种新的自仿射图像维数计算方法,命名为 YUV 维数。

本文的研究内容包括:提出描述节理面几何构型的自仿射图像维数计算方法,计算节理面自仿射图像维数,分析它们的分形几何特征,探讨两条节理面的几何构型特征对超声波波速的影响规律,并通过类比分析方法揭示试验结论的底层机制。

1 含两条节理的岩石试样制作

为了避免岩石内部的结构缺陷对试验结果的影响,本文选取同一产地的结构面致密且晶粒纯度高的大理岩块(俗称汉白玉),采用标准钻具垂直表面取芯,钻取直径 50mm 的圆柱体岩芯,考虑到天然岩石的各向异性特征,在钻取岩芯时,必须沿着同一轴线平行钻取。采用双面磨石机初步打磨圆柱体岩样的上下两个底部,磨短至长度 85mm 停止打磨,垂直于圆柱体试样轴线切割两刀将岩石分成 3 节,用刀具在表面随机刻画模拟天然节理的粗糙特征,对粗糙节理面拍照后,在节理表面涂上很薄一层 AB 胶水,以切割前划定的两条黑色竖线为标识牢固将 3 节粘接成一个半成品试样,进行精细打磨,直至满足如下要求:(1)单面不平度公差 $\leq 0.05\text{mm}$, (2)两端平行度公差 $< 0.1\text{mm}$, (3)长度为 65mm, (4)两条节理分别距上下底面 15mm。制成含两条平行粗糙节理的成品岩样 24 个(如图 1)。

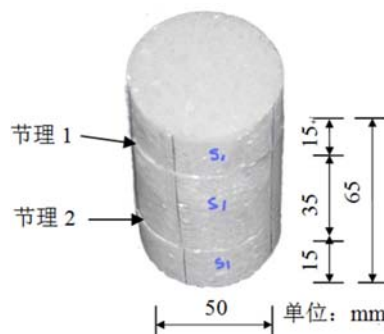


图 1 两条平行粗糙节理岩样

Fig. 1 Rock sample with two rough parallel joints

2 节理面图像维数计算新方法——YUV 维数法

2.1 提出维数计算新方法

2.1.1 节理面三维坐标获取的间接方法

在灰度图像维数中,已有研究将图像灰度值间接对应为表面高度值 z ,像素点所在位置的 x, y 坐标作为三维空间点的 x, y 值,间接构建粗糙表面上点的三维坐标 (x, y, z) 。为此,本文借鉴这一思想,将描述表面图像的颜色三个分量视为坐标的三个分量,前提是三个分量中必须有一个显式地表示图像的灰度值,且三个分量两两正交。最常见的用于描述颜色的是 RGB 模型,一种颜色在 RGB 颜色空间中可表示为如下向量,即

$$RG = Rr + Gg + Bb \quad (1)$$

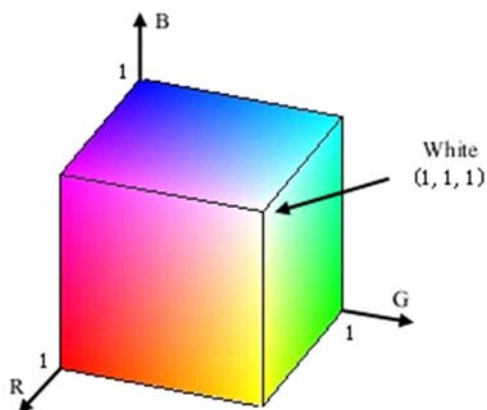


图 2 颜色单元体图

Fig. 2 Color units

YUV 颜色空间中,经过坐标平移,将所有点统一到以 O 点为原点的空间坐标系 UOV 下,任何一个形如 OF 的向量(如图 3)可表示为:

$$OF = A \cdot \vec{RG} + B \quad (3)$$

式中, $B = [m\gamma \quad n\gamma \quad 0]^T$, m, n 为纵横向像素点个数; γ 为像素间距。因此, YUV 粗糙面任一点(如: F 点)的三维坐标为 $(-0.147R - 0.289G + 0.436B + m\gamma, -0.615R - 0.515G - 0.100B + n\gamma, 0.299R + 0.587G + 0.114B)$ 。

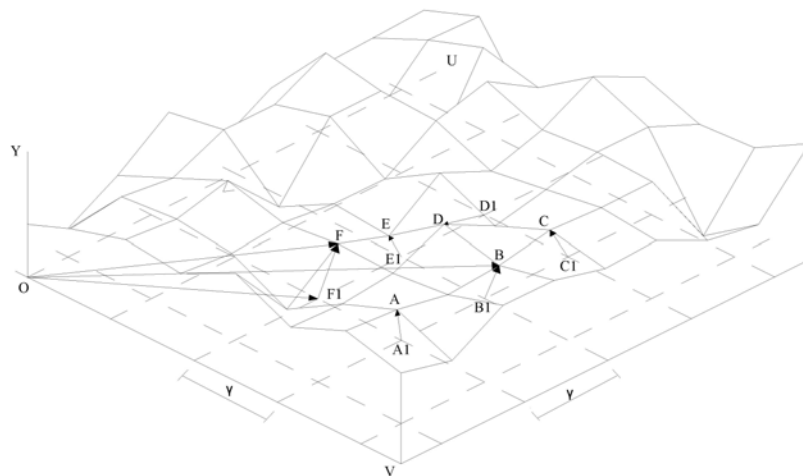


图 3 YUV 表面形貌图

Fig. 3 Diagram on YUV surface topography

2.1.2 YUV 维数计算方法

由于节理粗糙面在垂直于表面方向是自仿射的,而分形布朗函数是用于描述这一特征的有力数学工具,所以依据分形布朗函数的均值方差等数字特征可得:

$$\text{Var}[B_\alpha(X+H) - B_\alpha(X)] \propto \|H\|^{2\alpha} \quad (4)$$

$$E[B_\alpha(X+H) - B_\alpha(X)] = 0 \quad (5)$$

式中, Var 、 E 、 $\propto$ 分别为方差、均值、正比记号。 $B_\alpha(x)$ 为分形布朗函数; H 是 $n-1$ 维向量; α 表示 Hurst 指数。由式(4)、(5)可得:

$$E[B_\alpha(X+H) - B_\alpha(X)]^2 \propto \|H\|^{2\alpha} \quad (6)$$

两边取对数,可得

$$\log\{E[B_\alpha(X+H) - B_\alpha(X)]^2\} = \alpha \log \|H\|^2 + \log(C) \quad (7)$$

在双对数坐标中绘出多组点 $(\|H\|^2, E[B_\alpha(X+H) - B_\alpha(X)]^2)$, 并计算出直线斜率值,即可求取

式中, $\{r, g, b\}$ 为 RGB 颜色空间中的基矢量; R, G, B 为对应的颜色坐标分量。从图 2 可知,它的 R, G, B 三个分量相互正交,但三个分量中没有一个是显示描述图像灰度,经过如下线性变换,可以将 RGB 颜色模型变换为 YUV 颜色模型,经过式(2)的线性变换后,三个向量仍然正交

$$F_1 F = A \cdot \vec{RG} \quad (2)$$

式中,线性变换矩阵

$$A = \begin{bmatrix} -0.147 & -0.289 & 0.436 \\ 0.615 & -0.515 & -0.100 \\ 0.299 & 0.587 & 0.114 \end{bmatrix}$$

且其中的 Y 分量表示的就是灰度值,因而,最终选择 YUV 颜色模型分析图像的分形几何特征。在

Hurst 指数 α 。结合本文研究的对象——岩石节理面, $\|H\|^2$ 指节理粗糙面上的两点在 UOV 平面上的投影点之间距离的平方, $E[B_\alpha(X+H) - B_\alpha(X)]^2$ 指粗糙面两点间高度差值平方的算术平均值。根据 Ness 和 Mandelbrot 研究成果, 并考虑到研究的对象处于 3 维空间, 因此自仿射维数 D 与 Hurst 指数 α 存在如下关系, 即

$$D = 3 - \alpha \quad (8)$$

由此可以计算出节理的自仿射维数, 即为节理面图像的 YUV 维数。

2.2 节理面分形特性分析

采用单反数码相机拍摄每个断面的照片, 基于 2.1 节的方法间接提取表面的三维坐标, 在 surfer8.0 环境下, 绘制节理面表面形貌图。依据 2.1 节的 YUV 维数算法, 采用 Matlab(一种数学编程语言), 本文编制了节理面的图像维数计算软件, 输入节理面数码照片, 软件自动读取每幅图像, 计算维数并写入 Excel 数据表中, 实施全过程无干预数据处理, 充分保证了数据所展示规律的真实性和可信度。

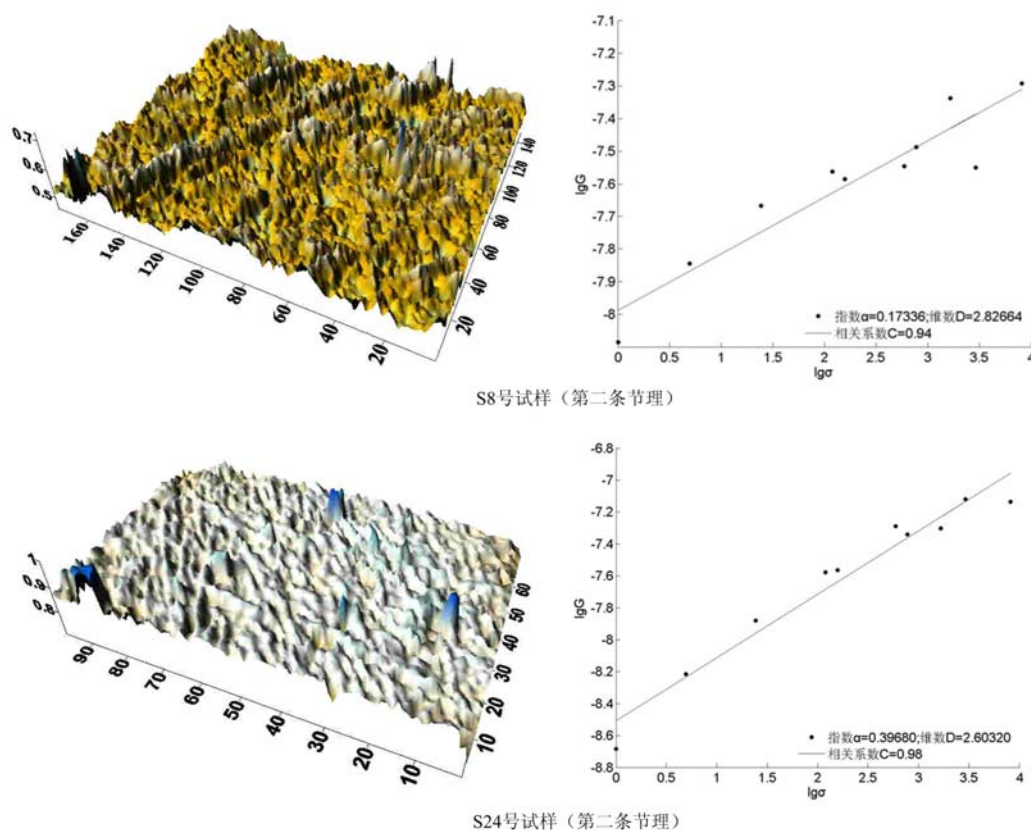


图4 表面形貌图与双对数图

Fig. 4 Surface profile and bi-logarithm figure

图4给出了 S8、S24 号试样的表面形貌图和计算其 YUV 维数的双对数图。从形貌图不难看出, S8 号试样比 S24 号试样显得更为粗糙且表面颗粒结构分布更不规则, 对应的双对数图上揭示, S8 试样节理面的 YUV 维数是 2.82664, S24 号试样的 YUV 维数为 2.60320, 这表明, 表面越粗糙, 其几何构型越不规则, 则对应的 YUV 维数越大, 这正好符合分形的定义, 即: 几何形貌越粗糙, 维数则越大。由试验验证可知, 本文所提出的 YUV 维数不仅符合分形定义且计算方法合理可行。

3 两条节理 YUV 维数对超声波波速影响的分析

3.1 节理岩石的超声波试验过程

本试验采用的是由美国 Tektronix 公司生产的超声波仪(如图5), 该套超声波检测设备包括发射超声波信号的激发探头、接收超声波信号的接收探头和显示与处理波形的示波器。在岩石试样上下底面

与发射、接收探头间的两接触面上,超声波穿越时易发生波速和能量的衰减,为最大程度上减小试验误差,试验前,先在试样两端面均匀涂上凡士林,以保证探头与试样端面光滑且接触良好。准备工作就绪后,开启数据采集设备——示波器,点击如图 5 所示的按钮,激发一系列超声波,超声波进入含预制节理岩样,经过复杂透反射过程后到达接收探头/岩样端面,由接收探头接收超声波信号,送入数据处理设备进行放大,并由示波器显示超声波波形(如图 5),最后保存波形数据以备试验后处理。

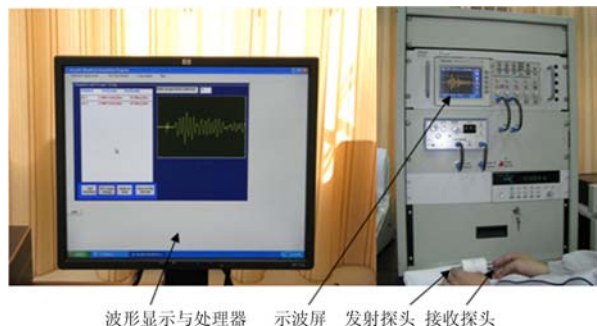


图 5 超声波仪

Fig. 5 Ultrasonic instrument

样中传播的超声波,在 S8 号岩样中的波速较小。

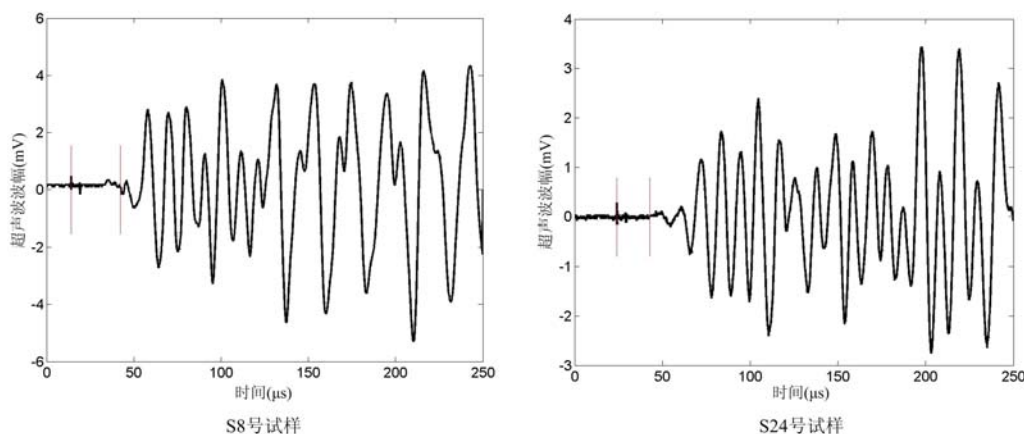


图 6 超声波波形

Fig. 6 Ultrasonic waveform

从制作试样的过程中我们知道,其他各个参数相同,如:长度、直径、材质(大理岩)等,存在差异的是预制节理面的粗糙度。超声波传至粗糙节理时将发生散射、透射和反射等复杂的传播过程,这些复杂过程将衰减超声波能量并降低其波速。节理面越粗糙,超声波在节理面的传播过程越复杂,能量与波速衰减将更显著。以下将通过超声波在节理岩石中的传播过程及测试时间分析节理面粗糙性对超声波波速衰减的影响规律,剖析节理面 YUV 维数影响波速的原因和机理。

3.2 岩石节理 YUV 维数对超声波波速影响分析

由发射探头激发的一系列速度为 V_0 的超声波脉冲信号,进入试样 I 区(如图 7),考虑到本试验中采用的大理岩试样较为致密,可认为 I 区中传播介质均匀,传播过程中不会发生透反射现象;当超声波传至节理 1(如图 7)时,由于界面左右壁的声波阻抗差异,超声波将发生复杂的反射与折射且伴随有散射现象,其入射与折射角满足 snell 定律,即

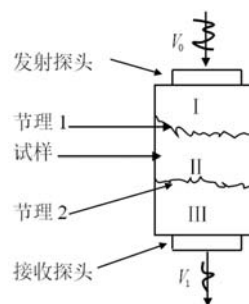


图 7 超声波穿越节理示意图

Fig. 7 Diagram on ultrasonic wave crossing the joints

$$\frac{\sin \alpha_1}{C_1} = \frac{\sin \alpha_2}{C_2} \quad (9)$$

式中, α_1 是入射角; α_2 是折射角; C_1 和 C_2 为在大理岩 I 区与节理 1 的超声波波速。折射进入大理岩 II 区的声波继续向前传播, 传至节理 2 后, 由于两种介质的波阻抗不同, 将再次发生如同节理 1 处的复杂透反射现象, 透射进入 III 区的超声波将继续前行, 直至到达大理岩/接收探头端面, 由于节理面处的复杂透反射和散射衰减了超声波波速, 超声波最终以小于初始速度 V_0 的波速 V_1 离开节理岩石。从分析超声波传播过程来看, 其传播时间可表示如下:

$$T = \sum_{i=1}^3 \Delta t_i + \sum_{j=1}^2 \Delta T_j \quad (10)$$

式中, Δt_i 为超声波在大理岩第 i 区的传播时间; ΔT_j 为超声波在第 j 个节理的传播时间; T 为超声波在岩样中传播的总时间。从发射探头到接收探头的传播时间, 即超声波穿越节理岩样的时间, 可由记录的超声波波形求得。所以, 波速平均值可由下式表示:

$$V = \frac{L}{T} \quad (11)$$

式中, V 为波速平均值; L 为试样长度。

依据测定的所有试样的超声波图形, 获取超声波在节理岩石中的传播时间, 岩石试样长度 65mm, 计算超声波波速的平均值, 考虑到岩样制作过程、间接三维坐标获取和超声波测试等试验过程中不可避免存在各种偶然误差和系统误差, 本文给出的是经误差分析剔除了误差样品后的成果。

为初步估测节理存在对超声波波速的影响规律, 依据表 1 的节理 1、2 维数和超声波穿越两条节理岩石时的波速数据, 本文绘出了维数与波速的关系散点图, 并分别拟合了节理 1 维数、节理 2 维数与波速间的关系曲线(见图 8、图 9)。由关系散点图可知, 尽管波速随着维数变化时存在一定的离散性, 但总体关系是清楚的, 散点图的拟合曲线也表明, 两者间关系总体趋势明显。分析结果表明, 在维数递减的过程中, 节理岩石中的波速呈现递增趋势。另外, 在维数减小初期, 波速递增较快, 速率较大, 随着维数持续减小, 波速增大速率放缓, 曲线切线斜率减小, 在整个过程的后期, 波速似乎随着维数增加不再减小, 保持在一恒定值, 该段曲线切线水平, 斜率为 0。

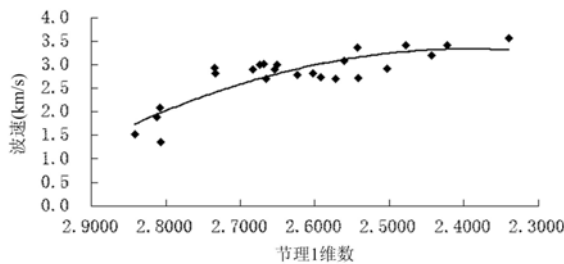


图 8 节理 1 维数对波速的影响
Fig. 8 Influence of the first joint dimension on ultrasonic speed

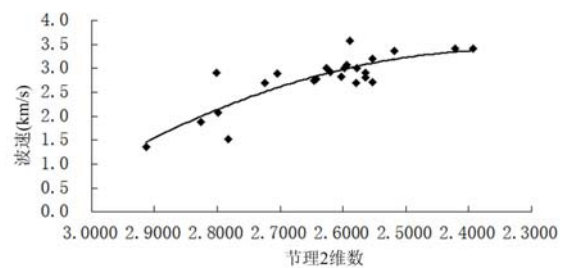


图 9 节理 2 维数对波速的影响
Fig. 9 Influence of the second joint dimension on ultrasonic speed

为深刻剖析两节理共同作用下对超声波波速的影响规律, 基于 tablecurve3D 三维回归分析软件, 依据表 1 中的节理 1、2 维数和波速数据, 绘制了坐标空间中的三维散点图; 采用数据回归分析方法, 本文给出了节理 1 维数、节理 2 维数与波速间的二元关系曲面图(如图 10)。图示曲面清楚显示, 尽管三维散点随着两节理维数改变不断上下波动, 但从拟合的关系曲面不难看出, 波速随着节理 1、2 维数的变化而改变的趋势是清楚的, 随着节理 1、2 维数持续增加, 波速不断减小。另外, 用垂直于节理 1 维数数轴的平面剖切关系曲面, 可以获得在保持节理 1 维数不变时波速随节理 2 维数变化的规律曲线, 该曲线清楚揭示, 当节理 2 维数持续增加时, 穿越节理岩石的波速不断减小。保持节理 2 维数不变, 波速随节理 1 维数变化时也有类似规律。

表 1 YUV 维数和超声波波速
Tab.1 YUV dimension and ultrasonic speed

编号	YUV 维数		YUV 维数和	波速(km/s)
	节理 1	节理 2		
S1	2.6544	2.7047	5.3591	2.898
S2	2.6233	2.6430	5.2663	2.782
S3	2.5601	2.5943	5.1544	3.077
S4	2.3394	2.5894	4.9288	3.571
S5	2.4222	2.3926	4.8148	3.416
S6	2.4436	2.5529	4.9965	3.198
S7	2.8414	2.7831	5.6245	1.528
S8	2.8127	2.8266	5.6393	1.885
S9	2.8084	2.7993	5.6077	2.083
S10	2.8066	2.9125	5.7191	1.354
S11	2.5032	2.5648	5.0679	2.916
S12	2.6510	2.5782	5.2293	3.004
S13	2.6690	2.6268	5.2958	3.012
S14	2.5427	2.5180	5.0606	3.371
S15	2.4782	2.4215	4.8996	3.416
S16	2.6736	2.5971	5.2707	3.004
S17	2.5723	2.5795	5.1518	2.703
S18	2.5421	2.5524	5.0945	2.716
S19	2.5918	2.6458	5.2375	2.738
S20	2.6836	2.8009	5.4845	2.911
S21	2.6652	2.7247	5.3899	2.704
S22	2.7333	2.5643	5.2976	2.811
S23	2.7347	2.6205	5.3552	2.931
S24	2.6024	2.6032	5.2056	2.823

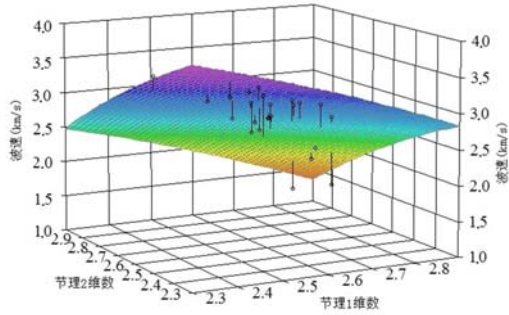


图 10 节理 1、2 维数与波速间的关系
Fig. 10 Relation between wave speed and 1 #、2 # joints

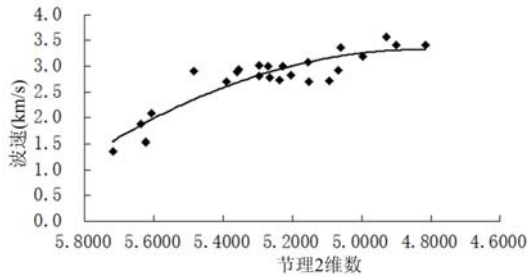


图 11 节理 1、2 维数之和与波速间的关系
Fig. 11 Relation between wave speed and sum of 1 # and 2 # joints

图 11 揭示了超声波波速随着两条节理 YUV 维数之和的变化规律。其中,矩形点表示在某一维数值对应的波速,曲线为依散点回归的趋势曲线。从图 11 不难看出,当两条节理维数之和增大时,尽管波速或多或少都有些上下波动,但是,它的总体变化趋势明显,波速随着节理维数之和减小而增大。另外,这一趋势逐渐放缓,曲线切线的倾斜程度降低,斜率减小,波速不再增大,保持定值。

上述现象可通过类比分析解释:不同的节理岩石试样维数由大变小过程,可类比为同一节理岩石在

围压逐渐增加时不同时刻的节理状态变化过程。当一个节理岩石试样所受围压逐渐增加时,岩石内包含节理表面的缺陷孔隙排列由杂乱无章变得越来越规则,同时节理的两个面在围压作用下被越压越密实,这在描述节理面的量化参数上所体现的结果就是维数由大变小。根据已有研究结果,在节理维数减小过程中,或者说节理在围压作用下被压实且孔隙缺陷排列规则化的过程中,穿越节理岩石的波速将逐渐增加,当节理岩石压缩至密实度很高时,波速将不再增加,近似一恒定值。

4 结论

基于分形几何学、图形图像学、岩石动力学等多交叉学科理论,本文采用节理岩石的超声波试验,在提出节理面图像自仿射维数——YUV 维数计算方法基础上,探讨了两条节理面 YUV 维数对节理岩石超声波波速的影响规律,主要研究结论包括:

(1)采用图形图像学中的颜色单元体,结合分形几何学自仿射理论,借鉴图像灰度值间接对应节理表面高度值的思想,提出了一种间接描述节理面分形几何构型的新方法——YUV 维数法。随后的试验验证和数值分析表明,该方法正确可行的。

(2)在提出 YUV 维数的基础上,剖析了节理面构型的分形几何特征,探讨了两条节理面 YUV 维数与节理岩石超声波波速间的关系,研究表明:随着两条节理中的任一条节理的 YUV 维数减小,超声波波速相应增加。同时,当两条节理 YUV 维数之和减小时,波速也持续递增。然而,当 YUV 维数递减过程中,波速尽管增大但增大速率逐渐减小,直至波速基本不变,接近一恒定值。

(3)为剖析波速随 YUV 维数减小而增加这一现象的原因和机理,本文进行类比分析,研究结果表明,维数由大变小的过程,可类比为试样加压时节理面几何构型由不规则压实至规则的过程,因为这种节理面构型由不规则渐变为规则的过程在维数上则体现为维数由大变小。在维数由大变小或者说节理面压实至规则分布过程中,由于节理面压密且节理面缺陷孔隙分布更加规则,此时波速将随之变大,且增大速度同时减小,当节理面压密、孔隙分布规则至一定程度时,波速将基本不变,直至趋近某个常数。

参考文献:

- [1] Yexue Li, Zheming Zhu. Study on the velocity of P waves across a single joint based on fractal and damage theory [J]. Engineering Geology, 2012, 151(29):82—88.
- [2] 赵国旗, 虞波, 骆英, 等. 与 CRP 相结合的 SAFF 在混凝土损伤检测成像中的研究[J]. 实验力学, 2015, 30(6): 717—722 (ZHAO Guoqi, YU Bo, LUO Ying, et al. On the imaging method in concrete damage detection based on the combination of SAFF with CRP signal superposition method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(6):717—722 (in Chinese))
- [3] 付代光, 周黎明, 肖国强, 等. 综合地球物理测井技术在滇中引水隧洞工程勘察中的应用[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(4): 67—70 (FU Daiguang, ZHOU Liming, XIAO Guoqiang, et al. Application of comprehensive geophysical well logging technology to the engineering exploration of water diversion tunnel in central yunnan[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(4):67—70 (in Chinese))
- [4] Birch F. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars(Part 1)[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1960, 65:1083—1102.
- [5] Birch F. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars(Part 2)[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1961, 66:2199—2224.
- [6] 李振生, 刘德良, 刘波, 等. 断层封闭性的波速和品质因子评价方法[J]. 科学通报, 2005, 50(13):1365—1369 (LI Zhensheng, LIU Deliang, LIU Bo, et al. A way used to assess wave speed and quality factor of fracture closure[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(13):1365—1369 (in Chinese))
- [7] 简文彬, 简洪钰. 声波探测技术判别某水电站坝址区岩体缺陷地下空间与工程学报, 2006, 2(6):1053—1057 (JIAN Wenbin, JIAN Hongyu. Exploration of rock mass disfigurement for a hydropower station dam site by acoustic wave test[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(6):1053—1057 (in Chinese))
- [8] 赵明阶. 二维应力场作用下岩体弹性波速与衰减特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1):123—130

- (ZHAO Mingjie. Study on wave velocity and attenuation of rock mass in 2D stresses field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1):123—130 (in Chinese))
- [9] 徐松林, 郑文, 刘永贵, 等. 岩体中弹性波传播尺度效应的初步分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9):1348—1356 (XU Songlin, ZHENG Wen, LIU Yonggui, et al. A preliminary analysis of scale effect of elastic wave propagation in rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9):1348—1356 (in Chinese))
- [10] Ju Y, Sudak L, Xie H P. Study on stress wave propagation in fractured rocks with fractal joint surfaces[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44:4256—4271.
- [11] Li Y, Zhu Z, Li B, et al. Study on the transmission and reflection of stress waves across joints. International[J]. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(3):364—371.
- [12] Clarke K C. Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method[J]. Computers & Geosciences, 1986, 12(5):713—722.
- [13] Xie H P, Wang J A. Direct fractal measurement of fracture surfaces[J]. International Journal of Solids and Structures, 1999, 36(20):3073—3084.
- [14] Zhou H W, XIE H. Direct estimation of the fractal dimensions of a fracture surface of rock[J]. Surface Review and Letters, 2003, 10(5):751—762.

Experimental Study on the Influence of Two Rough Parallel Joint Configurations on Ultrasonic Wave Velocity

LI Ye-xue^{1,3}, XU Fu-wei¹, MA Yan-xiong², ZHOU Wei¹

(1. Department of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Science and Arts, Hubei 410053, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798; 3. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Based on the interdisciplinary theory of graphics, iconography and fractal geometry, adopting colour unit from iconography, drawing on the idea that colour gray value is indirectly corresponded to joint surface height, combining fractal Brown function, a method for calculating self-affine dimension for indirectly describing joint roughness-YUV dimension is presented in this paper. Based on above mentioned method, the YUV dimensions of 48 rough surfaces taken from 24 jointed rocks were calculated and fractal characteristics of jointed surface geometric configuration were analyzed. Based on ultrasonic experiment of rock sample with two joints, the influence of YUV dimension of two joints on ultrasonic wave velocity was discussed. Study results show that the mean value of ultrasonic wave velocity increases not only with the decrease of any single joint YUV dimensions, but also with the decrease of the sum of two joints YUV dimensions. During the process of dimension decreasing, although the wave speed continuously increases, but the increasing rate gradually decreases. When the dimension is reduced to a certain value, wave speed does not increase further and approximately approaches to a constant. Through comparison analysis, the mechanism and cause of above conclusion are explored. The process of dimension change from large to small can be compared with the process that the pore defect of joint surface is gradually compressed and distributed more and more regularly. In this process, the numerical representation of quantization is just the dimension number decrease. So, when dimension decreases, the pore defect of joint surface is gradually compressed and distributed more and more regularly, which results in the increase of ultrasonic wave speed and approaching to a constant.

Keywords: jointed rock; ultrasonic wave; wave speed; fractal; geometric configuration