

文章编号:1671-8879(2018)09-0213-08

基于紫外图像的隧道岩体样本节理裂隙 二维面积及三维体积估计

高 婷,王卫星,王峰萍,刘 威,张广南

(长安大学 电子与控制工程学院,陕西 西安 710064)

摘 要:通过对隧道施工断面的岩体裂隙发育程度的量化测量,实现对隧道断面内部岩体的节理裂隙量化评价,对隧道施工安全和维护进行决策支持;结合计算机图像处理技术,提出了一种基于紫外图像的施工样本岩体裂隙测量的方法。采用该方法对获取的施工岩体节理裂隙样本浇灌环氧树脂液体,并将其做成固定厚度(18 mm)的切片,建立岩体节理裂隙特征模型,使用最佳匹配搜索特征方法自动确定节理裂隙区域,利用紫外线光对切片进行照射并获取样本岩体裂隙的紫外图像;最后通过图像处理技术对样本裂隙图像进行处理,对施工岩体样本的节理裂隙二维面积和三维体积精确估计。对 19 个岩体样本(100 多幅紫外图像和 100 多幅可见光图像)进行采样试验,并进行数据分析。研究表明:该算法的准确度和事实性达到预期;该方法可以通过对岩体样本细微的节理裂隙密度和孔隙度的计算估计,实现对节理裂隙二维面积和三维体积的有效测量;通过测量估计节理裂隙的相关信息,获取较为精确的岩体样本节理裂隙的面积和体积。该方法可应用于各类公路及铁路隧道施工中的施工面岩体节理裂隙检测与测量,有助于工程技术人员选择安全合理的施工方案。

关键词:交通信息与控制工程;节理裂隙;孔隙度;紫外线;图像处理

中图分类号:U451;TN911.73

文献标志码:A

2D area and 3D volume estimation for rock fractures of Joint fracture of rock mass in tunnel by using ultraviolet images

Gao Ting, WANG Wei-xing, WANG Feng-ping, LIU Wei, ZHANG Guang-nan

(School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to provide decision supports for the safety and maintenance of the tunnel construction, a quantitative measurement of the degree of fracture development in the rock mass in a tunnel construction section, the joint fractures of the rock mass were quantized. The construction sample based on UV images was used in combination with the computer image processing technology. Epoxy resin liquid was poure in joint fracture samples from the rock mass, and made into a slice of fixed thickness (18 mm). The characteristic model of the rock joint fracture was then established, and the best matching characteristic search method was used to automatically determine the joint fissure. UV rays were then used to irradiate the slices and the UV images of the fracture on the rock mass were obtained. Finally, image processing technique

收稿日期:2018-05-02

基金项目:国家自然科学基金项目(41372330)

作者简介:高 婷(1979-),女,陕西西安人,讲师,工学博士研究生,E-mail:361509277@qq.com。

was used on the sample crack images, thus generating the accurate estimation of the two-dimensional area and three-dimensional volume of the joint fracture in the rock mass samples. Through sampling experiments on 19 rock samples (more than 100 ultraviolet and visible images each), the accuracy and facticity of the algorithm was determined by analyzing the data. The results show that this method can be used to calculate and estimate the two-dimensional area and three-dimensional volume of joints fractures in rock samples through density and porosity calculation. This method can be applied to the detection and measurement of joints and fissures in rock masses on the construction surfaces of various highway and railway tunnels. It is also helpful for engineers to select a safe and reasonable construction scheme to ensure the smooth and safe implementation of bridge, tunnel, and road construction. 9 figs, 25 refs.

Key words: traffic information and control engineering; joint fracture; rock porosity; ultraviolet (UV); image processing

0 引言

由岩体结构导致的施工事故严重影响着隧道施工进度和施工安全,获取和测量岩体特性是各类隧道建设的重要依据。节理是岩体中的裂隙,是岩体中发育最广泛的地质构造,其几何特征(包括方位、间距、形状、规模、裂隙宽度、粗糙度、壁面强度和充填性等)对岩体的力学特性有着重大影响,对道路建设施工安全造成隐患。岩石节理裂隙信息的获取主要有人工实地测量和自动化测量。自 20 世纪 70 年代起,众多科学家对此进行了较为系统的研究,推动了相关领域工程技术的发展,但是由于节理在岩体内部空间延伸,节理裂隙形态的不规则性、组成结构的复杂性以及人工测量方法的工作危险性和测量精度与范围的不足,该方法已不再被广泛使用,取而代之的是以图像分析技术为基础的自动化测量技术,这种方法具有施工安全、采集周期短、数据采集方便、分析精度高的特点。20 世纪 90 年代,日本首次采用图像处理技术,对岩体地质条件进行了测量。文献[1]中提出了一种基于地震波的岩石裂缝图像检测技术。文献[2]中提出了一种基于 X 射线 CT 图像和蒙特卡洛模拟的二维和三维裂缝分析方法。文献[3]中提出了一种基于单维二维图像分水岭分割的三维孔隙网络协调数估计方法。文献[4]中提出了一种基于小波变换的 2 种光照融合的岩石裂隙图像采集方法。文献[5]、文献[6]中提出了一种 CT 技术在岩体探测中的应用方法。文献[7]中提出了一种岩石节理裂隙的检测方法。文献[8]中提出了通过紫外光和可见光获取岩石节理裂隙的方法。

设备采样精度的提升与设备造价的增加通常是

成正比的,工程应用中主要采用相对廉价的可见光拍摄,但是可见光拍摄只能获取岩石表面图像,对内部不可见的节理裂隙无法有效测量。紫外成像技术的发展为节理裂隙测量提供了新的思路。作为新兴的光源,紫外光源具有传统基于可见光光学仪器所不具备的特性,即使在日光下也可正常工作,同时由于紫外光线的特性,对处理过的岩石紫外图像可以反映岩石内部节理结构。本文基于紫外图像的岩体节理裂隙测量方法,可用于隧道施工断面岩体样本节理裂隙的分析和测量。

1 基于样本切片的二维节理裂隙分析

硬岩实验室位于瑞典东部奥斯卡港以北的 Aspo,为了解地下隧道 300~600 m 深处的岩石节理裂隙发育状况及趋势,选择节理裂隙发育的地段(地下 300 m 深)进行 60 mm 直径的钻孔(长 4 m),然后注入液体环氧树脂到孔里。液体以孔为中心,通过开启的节理裂隙向四周侵入和流动。3~4 个月后,当环氧树脂液体已凝固,再在同一地方进行 300 mm 直径的钻孔(长 4.5 m),取出岩芯制成样本。在同一节理裂隙网络中(有多个节理裂隙网络)选择几个邻近的样本。如图 1 所示,为了进行节理裂隙的三维估算,在 2 个互相垂直的方向,将其切成 2 cm 厚的切片,每个样本被切成约 10 片,如样本 B2 被切割成 7 片,B3 被切割成 12 片。

在该研究中,对 B2、B3 两个样本进行了 2 种不同的光照取像(可见光和紫外光)。除用数码相机取像外,还用了显微镜取像(放大系数为 60 倍)。为了避免外界光照的影响,在暗室中(主要是将标本放在灯光架上)进行取像。数码相机(图像分辨率为 2 560 像素×1 920 像素×24 像素)移动,便于调节

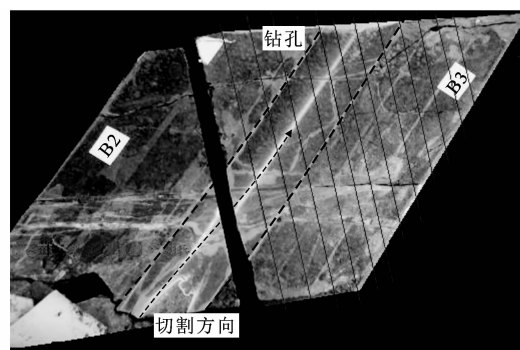


图 1 B2 和 B3 在 2 个相交方向被切图像

Fig. 1 B2 and B3 were cut in two orthogonal directions

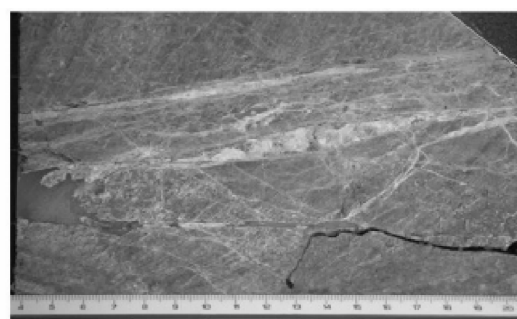
焦距。2 个白炽灯也可移动和转动。紫外线设备是手持式的,可以灵活移动。当取可见光图像时,只打开白炽灯并调节光照均匀度;而当取紫外线图像时,关闭白炽灯打开紫外线灯光。

样本中的钻孔是浇灌环氧树脂的。如图 1 所示,一共有 19 个岩石样本切片(B2 样本编号 a1~a7, B3 样本编号 a1~a12)。对于每 1 个切片,首先使用紫外线将彩色图像转换成灰度图像,接着使用图像增强技术,对图像进行二值化,对图像骨架及节点进行检测。需要注意的是,对于一些紫外线图像,当使用自适应阈值操作时,二值图像可能产生一些不确定区域(假的裂缝),在这种情况下,通过人视觉检查和比较相应的可见光图像做修改和确认。

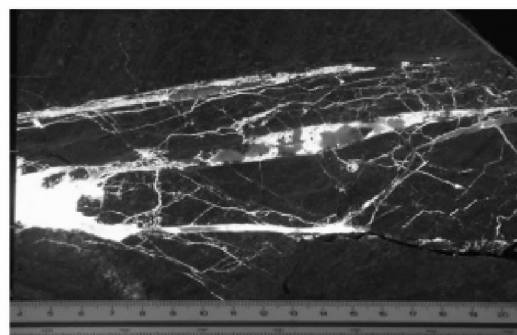
在 B2 的 7 个切片中,可以在所有的切片中看到相同的裂缝网络,如图 2 所示。a1 是 B2 样本切割之前的表面区域,每个像素的长度是 0.062 mm。接下来是 a2, a3, ..., a6, 最后的 a7 接近小圆孔面(孔壁),切片的面积从 a1~a7 逐渐减少。

沿着另一个方向(垂直于 B2 的切割方向)切割 B3,从左到右分别标记成 a1~a12。从 a1~a8 裂纹面积逐渐减小,从 a1~a4 中能看到相同的裂缝网络。在切片 a9~a12,除了其他单一的裂缝外,也存在裂缝网络的信息。

样本被切割后,使用图像采集设备获得切片图像(图像分辨率为 2 560 像素×1 920 像素×24 像素,放大倍数为 7)。图像采集灯光是可见光或紫外线光(1 个图像帧的 2 个不同图像)。使用可见光拍摄的图像可以呈现出岩石的表面信息(如矿物质、颜色或灰度变化等),但不能明显显示裂缝信息,由于环氧树脂的作用,在拍摄的紫外图像中节理裂隙呈深绿色,岩石表面其他信息缺失;而在可见光图像中表面信息丰富,但节理裂隙很难从多种颜色的岩石表面被区分出来。因此,同一切片面(上、下面)的 2



(a) 可见光



(b) 紫外光

图 2 B2-a1 原始可见光图像及其对应的紫外图像

Fig. 2 B2-a1 original visible image & corresponding UV image

种不同类型的图像信息彼此相互补充,使用紫外图像实现裂缝检测,使用可见光图像进行更详细的岩石表面信息分析。

为了解释更全面,本文以 1 个来自 B2 切片和 1 个来自 B3 切片为例说明。上文的切片图像为缩小图像概貌,本部分展示一个使用相对大的图像尽可能显示更详细信息。图 2 为 B2-a1 可见光图像及其相应的紫外线图像。在紫外图像中,节理裂隙被突出显示,3 个大的(或宽大的)裂缝通过许多小而细的裂缝片接,形成了一个节理裂隙网络。在大裂缝的内部,有些部分被一些填充材料填满,使其有些不确定性部分。当检查可见光图像时,这些不确定性将会减弱。图 2 中的图像经过图像滤波、处理和自适应阈值操作后,灰度图像变为二值图像,如图 3 所示。

紫外线图像能够清晰地显示节理裂隙,用简单的大津阈值法就可以得到较为满意的二值图像。图像被二值化处理后,需要确定节理裂隙区域。节理裂隙区域的测定结果影响后续的分析,所以合理的节理裂隙区域的测定非常重要,需要满足 3 个基本条件:①节理裂隙网络外切矩形最小面积;②节理裂隙区域具有规则的形状,方便裂缝区域的计算和描述;③确定形状的区域应该具有旋转不变性。基于以上考虑,本文使用最佳匹配搜索特征方法确定节

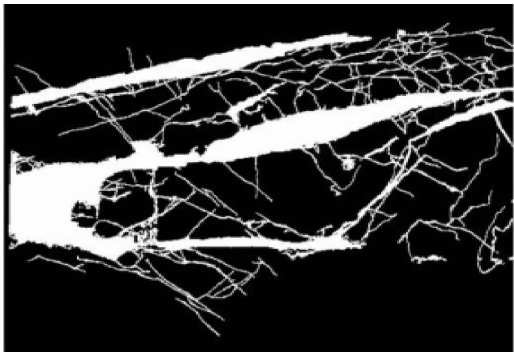


图3 二值图像

Fig. 3 Two value image

理裂隙区域。

为实现对节理裂隙区域的测定,寻找搜索框的最简单方法是找出一个对象对立面的 2 个平行切线之间的距离,然后,在线的方向上,找出对象内的最大距离,2 个正交线确定搜索框的长度和宽度,Feret 方法使用边界编码技术,标记最大、最小 x 、 y 坐标对象边界周围的单一通道,将产生垂直和水平搜索框的长度和宽度。所以,搜索框的长度和宽度主要依赖于使系统扫描的方向不具备旋转不变性。

如果把边框的方法和获取对象方向的方法进行结合(至少二阶矩),将会获得满足上述 3 个条件的最佳匹配搜索框。首先,获得对象的方向,然后在该方向上找出搜索框的长度,最后,在对象方向的垂直方向上找出搜索框的宽度。

最小外接矩形测量的目的在于确定一个对象的一个合理的方向,但是之前并未考虑同时使用这种方向和边界,如图 4 所示。

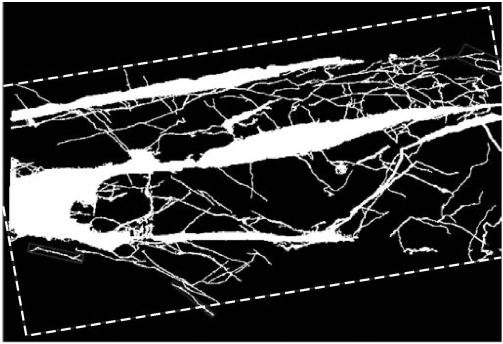


图4 搜索框

Fig. 4 Search box

二维等效轴的最小惯性轴,即线到对象点的距离平方积分最小,转动惯量 E 的计算式为

$$E = \iint_I R^2 f(x, y) dx dy \quad (1)$$

式中: R 为点 (x, y) 到线的垂直距离; $f(x, y)$ 为二值

图像。

$$E = \frac{1}{2} (I_x + I_y) + \frac{1}{2} (I_x - I_y) \cos(2\theta) - \frac{1}{2} I_{xy} \sin(2\theta) = I_x \sin^2(\theta) - I_{xy} \sin(\theta) \cos(\theta) + I_y \cos^2(\theta) \quad (2)$$

式中: $I_x = \iint_I (x')^2 f(x, y) dx' dy'$, $I_y = \iint_I (y')^2 f(x, y) dx' dy'$, $I_{xy} = \iint_I x' y' f(x, y) dx' dy'$, $x' = x - \bar{x}$, $y' = y - \bar{y}$; (\bar{x}, \bar{y}) 为对象区域的中心; θ 为 x 轴与次轴方向之间的夹角。

求解 E 的极小值,对式(2)中 θ 求导数,使其结果为 0,可得

$$\begin{cases} \sin(2\theta) = \pm \frac{I_{xy}}{\sqrt{I_{xy}^2 + (I_x - I_y)^2}} \\ \cos(2\theta) = \pm \frac{I_x - I_y}{\sqrt{I_{xy}^2 + (I_x - I_y)^2}} \end{cases} \quad (3)$$

存以下 2 种情况,当 $\sin(2\theta)$ 和 $\cos(2\theta)$ 都取正值时, E 取得最小值;相反地,当两者都取负值时, E 取得最大值。

对于离散的二值图像,根据式(3),用 $b(i, j)$ 代替 $f(x, y)$ 可生成

$$\tan^2(\theta) + \frac{I(2, 0) - I(0, 2)}{I(1, 1)} \tan(\theta) - 1 = 0 \quad (4)$$

其中

$$I(p, q) = \sum i^p j^q b(i, j) \quad p, q \text{ 均取 } 0, 1, 2 \quad (5)$$

式中: $b(i, j)$ 为二值图像; i, j 分别为横纵坐标。

通过最小二阶矩方法获取对象的方向后,使用搜索方法找到框的长和宽,获得最优匹配框,其具有旋转不变性,外接矩形倾向于最小面积。图 4 为通过网络中心和其二阶矩与中心确定的裂缝区域最小外接矩形,即搜索框。图 5 为通过最小二阶矩获取对象方向的示意。

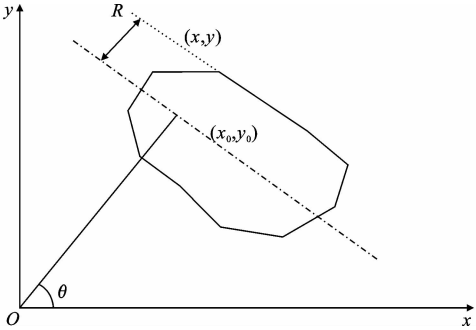


图5 使用最小二阶矩测量获得对象方向

Fig. 5 Uses smallest two moments to measure object direction

由于不同的工程应用图像分析时有不同的规则和定义,为了在实际应用中确定节理裂隙区域,需要

参考应用其需求和定义。本文分析对象为岩石表面有裂缝网络的 1 幅图像,参考一些工程定义较困难,因此,采用数学方法确定节理裂隙区域。图像中节理裂隙网络的外接矩形,被称为最优匹配外接矩形。理论上,矩形不和任何连接成网络的节理裂隙相交,实际上,长度远大于宽度的节理裂隙外接矩形边界可能需要相交,否则节理裂隙网络的搜索框太大。但可以 and 矩形相交的裂缝有多少? 哪些类型的节理裂隙可以和矩形相交? 如图 6 所示,从上述 2 图中能估计一个网络的复杂程度,通过该网络能估计其连通性和复杂性,有利于计算节点数量、网络分支和孔洞和获取搜索框的分支数量等。所有的信息能指导计算机怎样确定合理的和最小的搜索框。

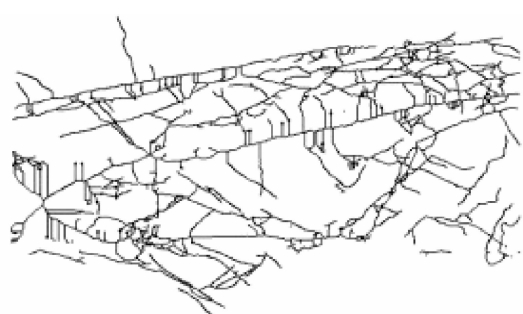


图 6 网络图像(稀疏图像)
Fig. 6 Network image (sparse image)

在本文的实例中,一个网络包含许多节理裂隙,对象中的一些网络是粗宽的(包含孔洞且边界粗糙的),另一些网络是细的(称为曲线或直线)。因为额外的骨架可能会引起节理裂隙量的过估计,本文主要考虑主骨架,未考虑由粗糙边界和孔洞引起的骨架,通过对不同算法进行测试,选用形态学算法处理检测主骨架,该算法对粗糙边界和孔洞不敏感(图 7)。图像能被用来计算节理裂隙空间密度和平均宽度,但这些骨架彼此并不完全连接(只是部分),在这种情况下,孔洞和节点不能被检测到。为了检测节点和孔洞,使用另一种骨架算法使骨架变得连续,如图 7 所示。为了区别第 1 种骨架算法(形态学骨架算法),将其称为细化算法。节点检测后,使用二值图像减去节点图像,节理裂隙网络被分解,获得节理裂隙分支图像。

2 孔隙度估计

2.1 定义

对于每个切片的紫外图像,同样进行图像处理、分割和分析,获得大量的二维属性见图 7,然后使用二维节理裂隙信息估计三维节理裂隙信息。重构三

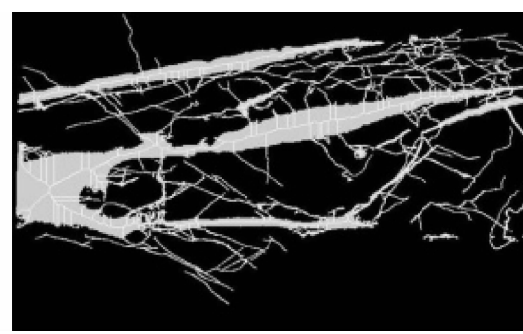


图 7 B2-a1 网络图像覆盖了图像
Fig. 7 B2-a1 network images cover image

维岩石样本最好的方式是基于切片的计算机图形学方法。有多种测试方法可以对三维信息粗略估计,其中之一是估计岩体的三维孔隙度。

首先,定义:切片上最佳匹配搜索框区域标记为 A_t ,切片上的节理裂隙区域为 A_f ,切片厚度为 T ,总节理裂隙区域体积为 V_t ,总节理裂隙体积为 V_f ,岩石样本的切片数量为 m ,从切片 a1 到 a2(2 个相邻切片)区域体积能被简单的重构成一个梯形,如图 8 所示。

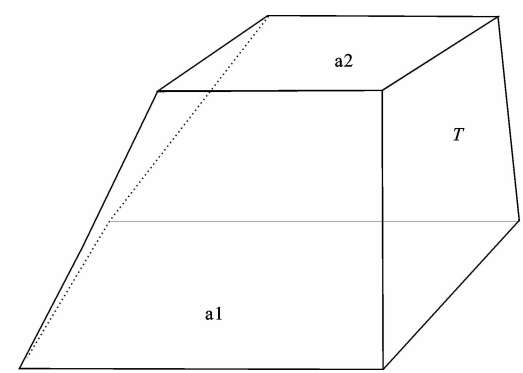


图 8 通过 2 个相邻切片的三维对象重构
Fig. 8 Reconstruction of 3D objects through two adjacent slices

2.2 二维孔隙度计算

图像搜索框确定后,计算每片切片的孔隙度,孔隙度通过节理裂隙和搜索框的面积比表示,如图 9 所示。对 B2 进行统计学分析可知,其平均孔隙度和标准差分别为 18.6 和 3.2。B3 孔隙度和标准差分别为 10 和 9。B2 中切片 a1~a7 孔隙度相对稳定;B3 中切片 a1~a12 孔隙度急剧减少。B3 中,前 4 个切片具有复杂的裂缝网络,能在切片发现很少的裂缝(a5~a12),其计算方式和岩石工程中应用的传统人工测量方法相似,主要的不同是怎样确定节理裂隙区域。在实际岩石工程和地质应用中,节理裂隙区域常通过工程师的经验来确定,受限于主观经验。本文方法通过计算机实现自动确定节理裂隙

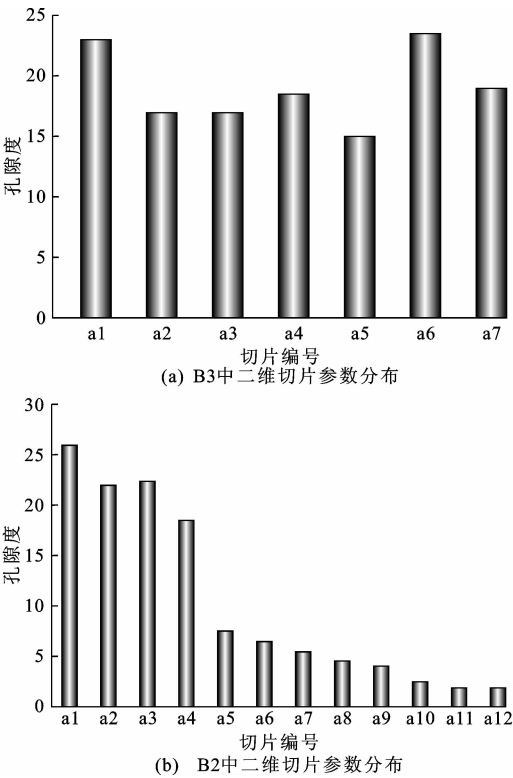


图9 切片样本分析

Fig. 9 Samples of slice analysis

区域,减少主观经验产生的误差。

2.3 三维孔隙度估计

根据以上定义,三维孔隙度计算为

$$V_{t_1} = \frac{A_{t_1} + A_{t_2}}{2} T \tag{6}$$

整个节理裂隙区域的体积(一个样本的所有切片)为

$$V_t = \sum_{i=1}^m V_{t_i} = \frac{T}{2} (A_{t_1} + 2A_{t_2} + \dots + A_{t_m}) = \frac{T}{2} \left(\sum_{i=1}^m A_{t_i} + \sum_{i=2}^{m-1} A_{t_i} \right) \tag{7}$$

对于节理裂隙体积相同的过程为

$$V_f = \sum_{i=1}^m V_{f_i} = \frac{T}{2} (A_{f_1} + 2A_{f_2} + 2A_{f_3} + \dots + A_{f_m}) = \frac{T}{2} \left(\sum_{i=1}^m A_{f_i} + \sum_{i=2}^{m-1} A_{f_i} \right) \tag{9}$$

通过式(7)、式(8),可得体积孔隙度为

$$100 \frac{V_f}{V_t} = 100 \frac{\sum_{i=1}^m A_{f_i} + \sum_{i=2}^{m-1} A_{f_i}}{\sum_{i=1}^m A_{t_i} + \sum_{i=2}^{m-1} A_{t_i}} \tag{9}$$

根据式(9),得到 B2 的孔隙度为 17.99%,B3 的孔隙度为 8.05%。在 B2 切片中,切片 a1~a7 孔

隙度相对稳定(图 7),平均孔隙度为 18.6%,更接近三维孔隙度。B3 中,切片 a1~a4 包含相同的裂缝网络,余下的切片仅有部分包含节理裂隙网络。如果只计算 a1~a4 切片的孔隙度,可得三维孔隙度为 21.7%,其切片孔隙度变化范围为 18%~25%。

为了验证本文算法的有效性,将同样的样本分别交给 3 人作人工测量分析,可发现本文算法与人工测量结果的二维孔隙度和三维孔隙度的相对误差均不超过 10%。

本文方法计算简单,研究阶段估计结果只与二维切片参数比较,应进一步改进(如真实三维重构等)。节理裂隙复杂度和关联度也可以使用切片进行估计,但是需要孔洞和节点等更多的细节(如位置和尺寸变化等)。

3 结 语

(1)在对隧道施工断面进行岩体样本采集的基础上,提出了一种全新的基于紫外图像的岩体节理裂隙测量方法。该方法通过将环氧树脂浇灌入岩石样本的节理裂隙中,并将样本做成了 19 个样本切片,获取每个切片的可见光图像和紫外光图像。将相应的图像处理和分割算法用于岩石孔隙度和其他参数分析,建立搜索框并估计节理裂隙区域的范围。只要图像覆盖整个区域,这种方法既可以实现二维和三维节理裂隙密度的测量和比较,也可以用于孔隙度的计算与估计。

(2)首次将岩体节理裂隙检测的二维图像结果应用于估计三维孔隙度,该方法可以应用到实际岩石工程施工中,用以描述和区分具有不同特性的岩体样本中的裂隙区域。

(3)通过对 19 个岩体样本(100 多幅紫外图像和 100 多幅可见光图像)的试验,验证了本文方法可以较精确获取岩体样本的节理裂隙信息,对其二维面积和三维体积进行计算和估计,为隧道建设施工的安全保障和后期隧道养护维护提供了必要数据支持。

(4)该方法还可用于其他交通建设施工中的岩体结构和建筑材料的无损测量和检测。

(5)下一步将采集更多的样本,通过小规模测试工作,结合蒙特卡罗方法或其他技术来模拟真实岩体三维孔隙度,建立相关的岩体节理裂隙结构数

据库,为大规模的工程应用提供必要的数据库支持。

参考文献:

References:

- [1] HEDAYAT A, WALTON G. Laboratory determination of rock fracture shear stiffness using seismic wave propagation and digital image correlation [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2016, 40(1): 92-106.
- [2] HUANG Y, YAN D, YANG Z, et al. 2D and 3D homogenization and fracture analysis of concrete based on insitu X-ray computed tomography images and Monte Carlo simulations [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2016, 163: 37-54.
- [3] RABBANI A, AYATOLLAHI S, KHARRAT R, et al. Estimation of 3-D pore network coordination number of rocks from watershed segmentation of a single 2-D image [J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 94: 264-277.
- [4] WANG Wei-xing, WANG Feng-ping, HUANG Xiaojun, et al. Rock fracture image acquisition using two kinds of lighting and fusion on a wavelet transform [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2016, 75(1): 311-324.
- [5] 孔得天, 李 高, 郑旭辉, 等. 弹性波 CT 技术在大足石刻岩体破碎带探测中的应用[J]. *CT 理论与应用研究*, 2018(1): 35-44.
KONG De-tian, LI Gao, ZHENG Xu-hui, et al. Application of elastic wave CT technique on detection of fracture zone in the rock mass of Dazu stone carvings [J]. *Computerized Tomography Theory & Applications*, 2018(1): 35-44.
- [6] LI B, TAN X, WANG F, et al. Fracture and VUG characterization and carbonate rock type automatic classification using X-ray CT images [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 153: 88-96.
- [7] 王珊珊, 王卫星, 黄凌潇, 等. 矿山岩石节理裂隙检测方法综述[J]. *金属矿山*, 2016, 45(8): 1-5.
WANG Shan-shan, WANG Wei-xing, HUANG Ling-xiao, et al. A review on the detection method of rock joint and fissure in mine [J]. *Metal Mine*, 2016, 45(8): 1-5.
- [8] LI Xu, XU Shu-chang, YOU Yu-cai, et al. Segmentation method for personalized American car plate based on clustering analysis [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2012, 46(12): 2155-2159.
- [9] WANG Wei-xing, ZHANG Xin, CAO Ting, et al. Fuzzy and touching cell extraction on modified graph MST and skeleton distance mapping histogram [J]. *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*, 2014, 4(3): 2156-2158.
- [10] 惠 鑫, 马凤山, 许嘉谟, 等. 考虑节理裂隙尺寸与方位分布的岩石统计损伤本构模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(增 1): 3233-3238.
HUI Xin, MA Feng-shan, XU Jia-mo, et al. Study on statistical damage constitutive model for rocks considering length and occurrence distribution of joint fissures [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(S1): 3233-3238.
- [11] ROSE C H, GSHHO S, BLUM J D, et al. Effects of ultraviolet radiation on mercury isotope fractionation during photo-reduction for inorganic and organic mercury species [J]. *Chemical Geology*, 2015, 405(1): 102-111.
- [12] YAJI K, HARASAWA A, KURODA K, et al. High-resolution three-dimensional spin- and angle-resolved photo electron spectrometer using vacuum ultraviolet laser light [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(5): 053111.
- [13] DEBORAH A L, GRAHAM V C, ROBERT J C, et al. Examination of theory for bow shock ultraviolet rocket experiments [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2015, 8(3): 453-459.
- [14] PARRAVANO A, HOLLENBACH D J, MCKEE C F. Time dependence of the ultraviolet radiation field in the local interstellar medium[J]. *Astrophysical Journal*, 2015, 584(2): 797-817.
- [15] NGUYEN H N, KAM T Y, CHENG P Y. An automatic approach for accurate edge detection of concrete crack utilizing 2D geometric features of crack [J]. *Journal of Signal Processing Systems*, 2014, 77(3): 221-240.
- [16] FEKKES S, SWILLENS A E S, HANSEN H H G, et al. 2-D versus 3-D cross-correlation-based radial and circumferential strain estimation using multiplane 2-D ultrafast ultrasound in a 3-D atherosclerotic carotid artery model [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2016, 63(10): 1543-1553.

- [17] OHASHI K, SANGHVI T, EL-KHOURY G Y, et al. Diagnostic accuracy of 3D color volume-rendered CT images for peroneal tendon dislocation in patients with acute calcaneal fractures [J]. *Acta Radiologica*, 2015, 56(2): 190-195.
- [18] ADAMS S F, CAPLINGER J E, SOMMERS B S. Spatial temperature mapping of an atmospheric microdischarge using ultraviolet Rayleigh scatter imaging [J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2015, 24(2): 025031.
- [19] LI L, CHIGAN C. Fuzzy C-means clustering based secure fusion strategy in collaborative spectrum sensing[C]//IEEE. 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC). New York: IEEE, 2014: 1355-1360.
- [20] 常 振, 王 煜, 司福祺, 等. 基于科学级 CCD 的紫外成像系统设计与实现[J]. *中国激光*, 2017, 44(8): 177-185.
CHANG Zhen, WANG Yu, SI Fu-qi, et al. Design and implementation of UV imaging system based on scientific grade CCD [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 177-185.
- [21] 陈 涛, 李剑平, 邢 胜, 等. 紫外-可见双光谱成像系统的紫外图像滤波[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(增 10): 325-331.
CHEN Tao, LI Jian-ping, XING Sheng, et al. Filtering of UV images of UV-vis dual-band imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(S10): 325-331.
- [22] 王卫星, 杨记明. 一种基于图像处理的岩石裂隙粗糙度几何信息算法[J]. *重庆邮电大学学报: 自然科学版*, 2010, 22(4): 454-457.
WANG Wei-xing, YANG Ji-ming. A geometric information on roughness of rock fractures based on image processing [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition*, 2010, 22(4): 454-457.
- [23] 许姜严, 王卫星. 抑制图像纹理的岩石节理裂隙检测[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(6): 1-2.
XU Jiang-yan, WANG Wei-xing. Rock fracture detection algorithm based on suppressing color image texture [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(6): 1-2.
- [24] 权 利, 王 颖, 龙维刚, 等. 紫外图像传感器技术研究进展[J]. *半导体光电*, 2013, 34(4): 537-541.
QUAN Li, WANG Ying, LONG Wei-gang, et al. Advance in UV sensor technology [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, 34(4): 537-541.
- [25] 张瑞亮, 王鹏冲, 于 瀛, 等. 紫外图像处理方法[J]. *光电技术应用*, 2012, 27(4): 47-50.
ZHANG Rui-liang, WANG Peng-chong, YU Ying, et al. Research on ultraviolet image processing method [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2012, 27(4): 47-50.