

基于数字图像识别的岩土体裂隙形态参数分析方法

刘 春, 王宝军, 施 斌, 唐朝生

(南京大学地球科学与工程学院地球环境计算工程研究所, 江苏 南京 210093)

摘 要: 为了准确高效地测量岩土体裂隙的各形态参数, 结合计算机数字图像处理技术, 提出一整套裂隙图像计算机识别和定量分析方法。通过对含有裂隙的图像进行二值化、桥接、去杂、智能识别等操作, 获取裂隙网络节点以及各裂隙的主干, 进而提取裂隙的宽度、长度、方向等裂隙形态参数, 实现了裂隙图像的计算机定量分析。在此基础上提出一种评价裂隙网络连通性的方法。基于该技术思路开发的岩土体裂隙图像处理系统(CIAS)被成功应用于土体干缩裂隙图像的识别和形态定量分析研究中。研究表明, 该方法可以更加科学、高效地提取岩土裂隙形态参数, 为裂隙的定量分析和评价提供了可靠依据。

关键词: 裂隙; 形态参数; 图像处理; 智能识别

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)09-1383-06

作者简介: 刘 春(1984-), 男, 福建顺昌人, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程及数值模拟研究。E-mail: oxtown@sina.com。

Analytic method of morphological parameters of cracks for rock and soil based on image processing and recognition

LIU Chun, WANG Bao-jun, SHI Bin, TANG Chao-sheng

(ACEI, Department of Earth Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: In order to measure the morphological parameters of cracks for rock and soil accurately and quickly, with the application of computer image processing technology, a set of recognition and quantitative analytic methods of crack images were introduced. Nodes and skeleton of crack network were traced out by the operations of binarization, crack restoration, noise reduction and intelligent recognition. Morphological parameters of cracks, such as length, width and direction, were computed by further recognition methods. Furthermore, a new method was proposed to evaluate the connectivity of crack network. A software, Cracks Image Analysis System (CIAS), developed based on these technologies, was applied to the recognition and morphological quantitative analysis of soil crack images. The proposed method offered a reliable basis for the quantitative analysis and recognition of cracks, and thus the morphological parameters could be obtained more scientifically and efficiently.

Key words: crack; morphological parameter; image processing; intelligent recognition

0 引 言

对裂隙的调查、测量和统计是评价岩体质量、提取岩体力学参数和进行数值仿真分析的基础^[1-2]。在土体中, 干缩裂隙的产生对土体的强度和稳定性有重要影响^[3]。地下水的渗流、污染物的扩散等也受岩土体裂隙形状和大小的控制^[4-6]。随着交通、水电工程、建筑工程、矿业开发、石油开采、核废料处理等领域的快速发展, 对岩土体裂隙形态参数进行深入研究具有重要意义。

目前对岩土体裂隙的野外调查和现场测量还是以手工测量方法为主^[6-8], 手工方法工作效率较低, 易受到自然条件的影响, 引起的随机误差和系统误差较大。

数码摄像以及数字图像识别分析技术的发展为实现高效的裂隙测量提供了一种可能途径。这种方法的关键在于对裂隙图像的计算机识别, 进而得到裂隙各种形态参数。近年来, 已有一些学者在基于图像处理和模式识别技术实现裂隙测量和统计方面作了尝试性研究, 取得了一些成果: 吴志勇^[9]依据现代计算机视觉理论, 提出了滩地岩体数码图像的信息处理方案; 范留明^[10]结合图像边缘检测法和 Hough 变换, 实现了典型裂隙的定位和定向; 尹小涛^[11]通过疑似裂纹区检出

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40730739); 国家自然科学基金项目(40572154); 南京大学研究生科研创新基金项目

收稿日期: 2007-10-22

操作和裂隙骨架化操作得到裂隙总长度,并利用面积换算出裂隙平均宽度。由于岩土体裂隙形态的多样性,原始数字照片的多变性以及识别算法的复杂性等原因,对图像中各裂隙的智能识别和分析存在着很大困难^[10]。基于图像识别的裂隙形态参数自动分析方法的研究成果比较鲜见,对于裂隙图像识别尚没有完整的有效的方法。

本文在对岩土体裂隙图像特征研究的基础上,结合计算机数字图像处理技术,提出了一套岩土体裂隙形态参数分析方法,并开发了相应的岩土体裂隙网络图像分析系统(CIAS),实现了裂隙图像的计算机识别和定量分析。

1 裂隙的提取和识别

通过裂隙提取将裂隙与背景分离开来,同时修复并强化裂隙,在得到合理的裂隙二值图像的基础上进行裂隙识别。其中某些过程,如图像二值化等也可以在其它图像处理软件中实现,但为了保证系统的完整性,文中仍对这些算法进行了介绍。

1.1 图像二值化

在数字图像中,裂隙通常比其它区域暗,可以利用灰度的不同初步区分裂隙和背景。从彩色空间到灰度空间有多种算法^[12-13],现在简单地采用以下方法进行彩色图像到灰度图像的转换,其中 R, G, B 分别表示像素的红绿蓝3个颜色分量:

$$\text{Gray} = (R + G + B) / 3 \quad (1)$$

在裂隙灰度图像中,裂隙与周围部分存在灰度上的差异,采用直方图阈值法可以迅速有效地将裂隙提取出来^[12-13]。

在裂隙数字图像中,背景一般具有较高的亮度,在直方图上形成一个峰,将阈值设在峰的前面,可以将裂隙和背景分开。当图像中裂隙较多时,裂隙和背景各形成一个峰,在两个峰之间调整阈值,可以有效地将裂隙提取出来。

1.2 裂隙的桥接

由于裂隙中存在充填物,以及拍摄时的光照影响,二值化操作后的图像中,原本连续的裂隙可能会断成几段。在进一步的识别中,系统会将其识别为多条裂隙,因此必须对裂隙进行桥接。在系统中,通过改进的闭运算实现邻近裂隙段的桥接。

传统形态学运算中的闭运算分为膨胀和腐蚀两个步骤。如图1(a), A 为裂隙, B 为膨胀结构元素, $\hat{B}$ 表示 B 集合的反射, A 被 B 膨胀在集合论里的定义为^[13]

$$A \oplus B = \{z \mid (B)_{\hat{z}} \cap A \neq \phi\} \quad (2)$$

在本文中,结构元素均为中心对称,因此 $\hat{B} = B$,上式可以改写为

$$A \oplus B = \{z \mid (B)_z \cap A \neq \phi\} \quad (3)$$

式(3)从直观上可以这样理解:将 B 的中心移到 z 点时,如果 B 与 A 有交集,则 z 点设为黑色。在图1中,结构元素 B 是一个半径为 r 的圆面,通过膨胀,裂隙 A 向外扩展了 r 。膨胀操作后,裂隙原有的间断被桥接起来,但裂隙也相应变粗,因此需要通过腐蚀来弥补出现的这种情况。腐蚀在集合论中的定义为^[13]

$$A \ominus B = \{z \mid (B)_z \cap A = B\} \quad (4)$$

使用结构元素 B 对裂隙 A 的闭运算表示为 $A \cdot B$,定义如下^[13]:

$$A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B \quad (5)$$

上面采用的是全方向的闭运算,结构元素为圆面,裂隙在所有方向进行膨胀和腐蚀。通过闭运算,裂隙间断被消除,但是也使裂隙边缘趋于平滑^[13],裂隙的边缘信息损失,影响进一步分析的结果。针对这种情况,对闭运算做了如下研究和改进,使其影响仅限于桥接部分。

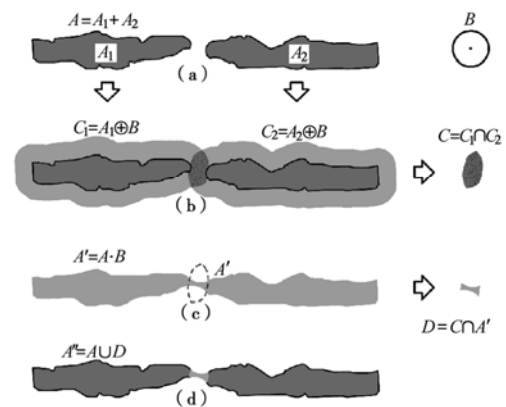


图1 改进的闭运算

Fig. 1 The improved closing operation

如图1, A_1, A_2 为两段相邻裂隙, C_1, C_2 为经过膨胀的两段裂隙,仅在需桥接区域,两段裂隙的膨胀区域重叠,因此可以利用重叠现象将桥接区域独立出来。采用的方法是:记录下每段裂隙各自的膨胀区域,在腐蚀操作后,膨胀区域中仅保留至少有两个裂隙膨胀区域重叠的像素。将这种改进的闭运算表示为 $A:B$,定义如下:

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= A_1 \oplus B; \quad C_2 = A_2 \oplus B, \\ C &= C_1 \cap C_2, \\ A' &= A \cdot B, \\ D &= C \cap A', \\ A'' &= A : B = A \cap D, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中, D 为桥接部分, A'' 为桥接后的整条裂隙。如图

1, 这种方法在保证裂隙原有部分不变的前提下, 实现了裂隙的桥接 (图 6 (b)、(c))。半径为 r 的结构元素可以连接距离不大于 r 的两段裂隙, 对于宽度在 $r \sim 2r$ 之间的间断, 重叠区域与两段裂隙没有连接, 将被腐蚀或在进一步的去杂操作中被清除。

1.3 杂点的去除

由于杂质和图像噪声等原因, 二值图像通常包含大量杂点, 表现为背景中有黑色杂点, 裂隙中存在白色杂点 (图 6 (b))。这些杂点通常是不需要的, 其存在会影响最终的分析统计, 因此在裂隙识别分析前必须去除图像中的杂点。

开运算是一种常用去杂点方法, 可以有效地去除图像中小于结构元素的杂点^[13], 定义如下:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (7)$$

开运算通过腐蚀, 将图像中宽度小于 $2r$ 的元素全部清除。但是在裂隙图像中, 杂点与裂隙的物理尺寸相近, 开运算导致部分裂隙被过分腐蚀而消失, 同时开运算一般使对象的轮廓变得光滑, 因此不适于裂隙图像中杂点的去除。

裂隙在一定方向上延伸, 并连接成裂隙网络, 占有一定的像素, 而黑色杂点则散落在背景中, 占有较少的像素。因此, 可以通过面积上的差异来区分裂隙和黑色杂点。图像中的连通区域可以通过扫描线算法^[14]得到, 杂点去除的方法如下: ①种子查找, 遍历图像, 找到一个未被选取的黑色像素, 将其作为种子; ②使用扫描线算法, 扫描出种子的连通区域, 并将此连通区域中所有像素标记为已选取; ③重复步骤①和②直至图像中不存在种子点, 由此找出图像中所有的黑色连通区域; ④将面积小于阈值的黑色连通区域全部转为白色。

同样, 扫描出所有的白色连通区域, 并将小于一定阈值的白色连通区转为黑色, 实现裂隙中白色杂点的去除。

1.4 裂隙的识别

裂隙的定量分析要求在裂隙识别中完成以下操作: 识别出图像中裂隙网络各节点, 得到各裂隙的主干及各裂隙所包含的像素。将裂隙的主干定义为到裂隙两边距离相等的点的集合, 即裂隙的中轴。我们将节点分为两类: 一类为端点, 只有一条裂隙与之相连, 裂隙终止于端点; 另一类为相交点, 为三条或三条以上裂隙的交点, 裂隙在相交点分叉。每条裂隙连接两个节点, 裂隙识别的基本思想为: 在骨架化的基础上得到裂隙网络各节点, 由节点出发, 在主干上追踪出各条裂隙线。具体步骤如下:

(1) 主干提取。通过骨架化算法可以提取裂隙的主干。主干只有一个像素宽, 记录了裂隙的主体框架。

骨架化操作中, 原有裂隙 (图 2 (a)) 上的小凸起也会形成一个小枝 (图 2 (b)), 可以通过裁剪操作将这些较短的枝去除 (图 2 (c))。骨架化和裁剪都是形态学的基础理论^[13], 在此不做进一步介绍。

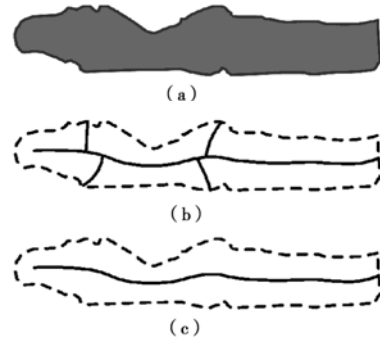


图 2 通过骨架化和裁剪操作得到裂隙主干

Fig. 2 Medial axis of cracks obtained by skeletonization and clipping operations

(2) 节点识别。节点和裂隙的识别均基于裂隙主干。对于每一个主干点, 按逆时针方向计算其相邻的八个像素由黑转白的次数 N 。当 $N=1$ 时, 为端点; 当 $N=2$ 时, 为一般主干点; 当 $N \geq 3$ 时, 为相交点。如图 3, $N=1$ 和 $N \geq 3$ 时均为节点。在某些情况下, 比如四条裂隙相交的节点, 在骨架化后可能分化出多个节点, 因此在节点查找后, 应对这些相近的节点进行重心求取, 以离重心最近的主干点作为正式节点。

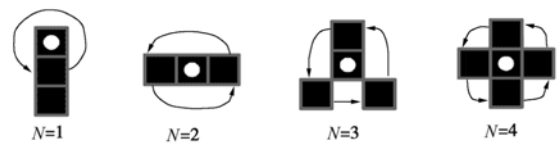


图 3 节点识别示意图

Fig. 3 Schematic diagram of node recognition

(3) 裂隙识别。任一条裂隙主干连接两个节点。在骨架化图像中, 由一个节点出发, 沿着主干延伸查找, 并记录找到的主干像素, 直至另一节点, 由此找出一条裂隙的主干。剩余非主干裂隙像素, 通过归并算法 (图 4) 归并到与之相连通的最近的裂隙主干上, 得到整条裂隙。

值得注意的是, 在骨架化操作中, 狭长的裂隙转化为一条长线, 而背景中相对较圆的杂点则转化为一条短线, 甚至一个点。因此在去杂操作中没有去除的较大杂点, 可以在骨架化后再次使用杂点去除法清除。另外, 从图 2 (b) 可以看出, 需要裁减的小枝的长度通常小于裂隙的宽度。因此, 在裁减操作中, 可以按照下文所述的裂隙宽度求取法获取若干点处的裂隙宽度, 并以其最大值作为裁减的阈值。通过使用这些方法, 可以大大提高系统的智能化程度, 减少人工操作。

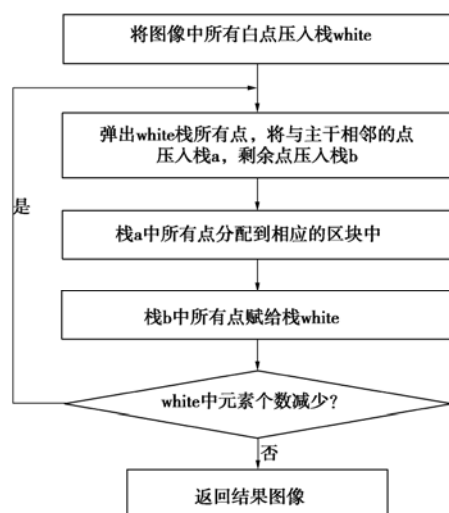


图4 归并算法流程图

Fig. 4 Flowchart of merging algorithm

2 裂隙形态参数的获取

通过裂隙识别得到了裂隙网络的各个节点, 各条裂隙的主干和所包含的像素。通过对这些数据的分析处理, 可以得到裂隙的各个基本形态参数。由于篇幅所限, 本文仅给出以下几个常用评价参数的求取方法。

(1) 裂隙分形维数

分形维数是定量表征事物分形性质的重要参数, 可以综合描述岩体的裂隙化程度^[15]。采用盒维法计算裂隙的分形维数, 用不同尺度 r 的方格网覆盖裂隙图像, 计数每一次覆盖时裂隙所占有的方格数 N , 两者之间的关系为^[15]

$$N \sim r^{-D}, \quad (8)$$

其中 D 为分形维数。将这种关系表示在双对数坐标系中, 可以得到 $\lg(N)$ 与 $\lg(r)$ 关系曲线, 在双对数图中呈简单的直线, 其中斜率正好为 $-D$ 。

对于每一个 r 值, 都对对应着一个 N , 理论上可以得出无数对 N 和 r , 并以此计算出分形维数。但是数字图像是由像素矩阵构成, 在微观尺度上, 裂隙边缘表现为锯齿状, 对像素进行切分将导致分形维数偏大。因此, 在分形维数计算过程中, r 应取整数。选取图像中某一正方形区域作为分形维数计算区域, 这个正方形区域的边长应当取具有较多约数的数值, 以保证能够获得足够多的 N - r 组合。

(2) 裂隙长度

传统的对裂隙长度(迹长)的研究, 比如统计窗法^[7]和导线法^[8], 大都是基于人工操作, 从概率统计上进行的。而在 CIAS 中, 对于每条裂隙, 系统通过累积相邻主干像素间的距离来计算其长度, 较之传统方法, 具有高效性和精确性。通过累加各裂隙的长度

可以得到裂隙总长度。

(3) 裂隙宽度

对于裂隙主干中的任一像素点(O), 通过以下方法得到该点处裂隙的宽度: ①由近及远检查 O 附近的像素点, 找出离 O 最近的白点 A ; ②在 O 附近找出另一点 B , B 为满足 $AB > OB$ 且 $AB > OA$ 中离 O 最近的点; ③ O 点处裂隙宽度为 $OA + OB$ 。

在第二步中, $AB > OB$ 且 $AB > OA$ 保证了 B 点与 A 点在裂隙的不同侧。由于在第一和第二步中都是查找最近点, 当裂隙宽度剧烈变化时, A 和 B 会趋于裂隙宽度较小的部分(图5), 因此在宽度计算上, 采用 $OA + OB$ 而非 AB 。在一条裂隙所有主干点上求取宽度后取平均, 得到这条裂隙的平均宽度。

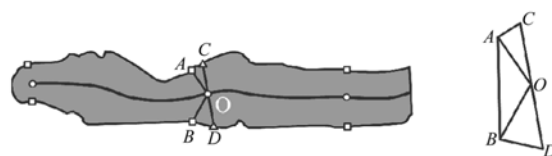


图5 裂隙宽度求取示意图

Fig. 5 The principle of computing crack width

(4) 裂隙方向

在数字图像中, 每个像素都有相应坐标值, 对单根裂隙的主干像素点坐标应用最小二乘法, 得到主干的近似斜率, 进而换算出裂隙的方向。在得到各裂隙方向的基础上, 计算出裂隙的最大概率方向, 即裂隙发育的总体方向。

(5) 裂隙率

岩体的面裂隙率是单位面积岩体所包含的裂隙总长度, 在裂隙长度计算部分已经得到裂隙总长, 将其除以裂隙图像的总面积, 即为岩体面裂隙率。线裂隙率的定义为, 与裂隙走向垂直方向上单位长度内裂隙所占的比例。上面已经得到裂隙走向, 在其垂直方向取一定长度的线段, 累积线段与各裂隙交点处的裂隙宽度, 除以线段长即可。

在土体中, 裂隙的面积与土体的收缩量有着直接关系, 将土体中的面裂隙率定义为单位面积土体所包含的裂隙总面积^[4]。在二值图像中, 裂隙表现为黑色, 因此黑色像素占整个图像的百分量即为土体面裂隙率。

3 实例分析

3.1 样品制备

在实验室中, 模拟自然条件, 生成土体干缩裂隙。实验方法为: 称取 136 g 的风干土置于内径为 16 cm $\times$ 16 cm $\times$ 3 cm 的长方体玻璃缸中, 土样厚度在 5 mm 左右, 加适量的水配制成流动性良好的泥浆, 并搅拌均匀。然后将装有试样的玻璃缸水平放入烘箱中, 让

其在 40℃ 恒温下失水。在试样失水过程中, 定时称量试样重量, 在 2 h 内, 如果试样重量无变化, 认为失水过程已经完成, 并且裂隙形态已经稳定。

图像二值化操作根据图像的灰度值来区分裂隙和背景。因此, 图像的整体明暗变化、裂隙边缘模糊、较大的图像噪声等, 均会对二值化及进一步的识别分析带来困难。这就要求在原始照片中, 裂隙与背景有较好的区分度。在室内光线充足条件下, 垂直于裂隙平面进行拍摄, 得到了较好的裂隙图像。同时, 也可以通过相应的图像处理软件来改善图像的质量。本例中, 由于原始图像上部偏亮, 在图像处理软件 Photoshop 里做了轻微的光照渐变调整。

3.2 系统分析过程与结果

截取图像中靠容器中央 504×504 (像素) 大小区域用于系统识别分析 (图 6 (a))。将裂隙图像导入 CIAS, 通过人机交互, 调整阈值, 完成二值化、桥接、去杂等操作, 实现裂隙的识别。此裂隙图像处理和识别操作中各阈值设定如表 1 所示。如图 6, 二值化后, 图像中有大量黑白杂点, 且部分裂隙不连续, 经过系统的去杂和桥接修复操作, 得到了较好的裂隙二值图像。在提取出裂隙主干的基础上, 系统输出了裂隙的各主要参数 (图 6 (e), 表 2)。

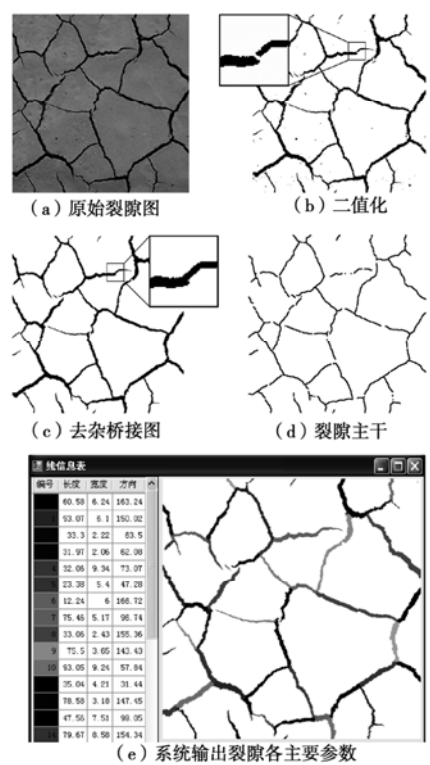


图 6 使用 CIAS 对裂隙图像进行识别分析的过程与结果
Fig. 6 The process and results of crack recognition in CIAS

3.3 裂隙网络的连通性评价

土体中裂隙的产生和相互交叉连接使得水分可以通过裂隙网络快速流动, 大大提高了土体的导水性能,

这种导水性能受土体裂隙网络的连通性影响。干缩裂隙连接于相交点, 水分通过相交点在裂隙间快速流动, 而端点则是裂隙闭合处, 水分的流动在闭合处十分缓慢。我们通过相交点数 (I) 和端点数 (E) 来定义裂隙网络的连通性 (K):

$$K=I/(E+I) \quad (9)$$

表 1 裂隙提取和识别操作中阈值取值

Table 1 Threshold values of the analysis and recognition of cracks

二值化	去黑杂点 /像素	去白杂点 /像素	桥接半径 /像素	裁剪长度 /像素
107	28	28	2	3

值得注意的是, 位于图像边缘的端点是向图像外延伸的, 不是真正的裂隙闭合点, 因此在计算裂隙连通性时, 端点数以非边缘端点计。公式 9 中, K 的取值范围为 $0 \leq K \leq 1$, 当 K 等于零时, 表明所有裂隙均为孤立, 没有相互交叉; 而 K 接近于 1 时, 则说明绝大部分裂隙相互连接成复杂的裂隙网络。 K 值越大, 裂隙网络的连通性越好, 表明较好的导水性和较低的整体稳定性。 K 可以作为评价岩土体裂隙网络连通性一个参考指标。

在本例中, 通过系统识别分析, 得到了裂隙图像中所有节点, 其中有 29 个相交点, 18 个边界端点和 19 个非边界端点, 通过公式 9 计算得到的裂隙网络连通率为 0.60, 此裂隙网络连通性较好。

表 2 裂隙分析识别得到的各参数

Table 2 Morphological parameters obtained by the analysis and recognition of cracks

分形 维数	面裂隙 率/%	节点数 /个	裂隙数 /条	裂隙均 宽/像素	裂隙均 长/像素
1.45	9.70	66	62	5.83	67.56

4 结论和讨论

(1) 建立了裂隙数字图像的计算机智能识别和分析的可行方法, 可以大大减轻测量和统计工作量, 减少人为误差, 提高工作效率。

(2) 传统图像形态学理论中的开运算和闭运算会造成图像裂隙信息的损失, 因此必须对其进行改进或寻找其它方法。本文提出的改进闭运算和去杂方法则在保证裂隙完整性的前提下, 实现了裂隙的桥接与去杂。

(3) 在获得各条裂隙的主干及裂隙所包含的像素点的基础上, 裂隙各形态参数的自动获取成为可能。通过裂隙识别和参数计算, 可以得到裂隙的长度、宽度、方向等裂隙基本形态参数。通过进一步的计算, 可以得到更多的裂隙参数, 从而为岩土体的评价提供参考。

(4) 实例分析中, 在得到裂隙网络中各节点的基础上, 提出用相交点数占总节点数的百分量来评价整个裂隙网络的连通性(K)。 K 值越大说明裂隙网络的连通性越好, 具有较高的导水性和较低的整体稳定性。

本文提出的裂隙识别方法并不局限于岩土体裂隙识别, 也可应用于医学、农业等领域, 比如农作物根系的识别分析等。基于本文技术开发的岩土体裂隙网络图像分析系统(CIAS)在土体裂隙研究上已取得相应成果^[4], 有待于在更多领域中得到应用发展。

参考文献:

- [1] 蔡永庆, 刘亚晨. 核废料地质贮存岩体裂隙结构面几何特性参数分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2001, 12(3): 33 - 39. (CAI Yong-qing, LIU Ya-chen. Geometry parameter analysis on the fracture interconnectivity of rock mass surrounding nuclear waste repositories[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2001, 12(3): 33 - 39. (in Chinese))
- [2] 马淑芝, 贾洪彪, 唐辉明, 等. 利用“岩体裂隙率”评价工程岩体的质量[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(1): 10 - 13. (MA Shu-zhi, JIA Hong-biao, TANG Hui-ming, et al. The quality of engineering rock mass appraised with cranny ratio[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2002, 29(1): 10 - 13. (in Chinese))
- [3] 姚海林, 郑少河, 陈守义. 考虑裂隙及雨水渗入影响的膨胀土坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 606 - 609. (YAO Hai-lin, ZHENG Shao-he, CHEN Shou-yi. Analysis on the slope stability of expansive soils considering cracks and infiltration of rain[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5): 606 - 609. (in Chinese))
- [4] 唐朝生, 施斌, 刘春, 等. 黏性土在不同温度下干缩裂缝的发展规律及形态学定量分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 743 - 748. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, LIU Chun, et al. Developing law and morphological analysis of shrinkage cracks of clay soil at different temperature[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 743 - 748. (in Chinese))
- [5] 施斌, 姜洪涛. 在外力作用下土体内部裂隙发育过程的CT研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 537 - 541. (SHI Bin, JIANG Hong-tao. A study on the development of failures inside soil under the external force using CT technique[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 537 - 541. (in Chinese))
- [6] INOUE H. Lateral water flow in a clayey agricultural field with cracks[J]. Geoderma, 1993, 59(1-4): 311 - 325.
- [7] KULATILAKE P H S W, Wu T H. Estimation of mean trace length of discontinuities[J]. Rock Mech Rock Eng, 1984, 17: 215 - 232.
- [8] PRIEST S D, HUDSON J A. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scaling surveys[J]. Int J Rock Min Sci & Geomech Abstr, 1981, 18: 183 - 197.
- [9] 吴志勇, 聂德新, 李雪峰, 等. 基于数码图像的岩体结构信息采集处理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增2): 2568 - 2571. (WU Zhi-yong, NIE De-xin, LI Xue-feng, et al. Information interp retation of rockmass structure based on digital image[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S2): 2568 - 2571. (in Chinese))
- [10] 范留明, 李 宁. 基于模式识别技术岩体裂隙图像的智能解译方法研究[J]. 自然科学进展, 2004, 14(2): 236 - 240. (FAN Liu-ming, LI Ning. Intelligent interpretation of rock mass fracture image based on mode recognition[J]. Progress in Natural Sciences, 2004, 14 (2) : 236 - 240. (in Chinese))
- [11] 尹小涛, 党发宁, 丁卫华, 等. 岩土CT图像中裂纹的形态学测量[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 539 - 544. (YIN Xiao-tao, DANG Fa-ning, DING Wei-hua, et al. Morphologic measurement of crack in CT images of rock and soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 539 - 544. (in Chinese))
- [12] 林开颜, 吴军辉, 徐立鸿. 彩色图像分割方法综述[J]. 中国图像图形学报, 2005, 10(1): 1 - 10. (LIN Kai-yan, WU Jun-hui, XU Li-hong. Survey on color image segmentation techniques[J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(1): 1 - 10. (in Chinese))
- [13] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing second edition[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [14] 孙家广, 胡事民. 计算机图形学基础教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 27 - 30. (SUN Jia-guang, HU Shi-min. Computer graphics tutorial[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 27 - 30. (in Chinese))
- [15] 谢和平, 于广明, 杨 伦, 等. 采动岩体分形裂隙网络研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 147 - 151. (XIE He-ping, YU Guang-ming, YANG Lun, et al. Research on the fractal effects of crack network in overburden rock stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 147 - 151. (in Chinese))