

石灰岩局部化变形的图像特征

徐金明¹, 韩娜娜¹, 李岩松²

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200072; 2. 上海自然博物馆 工程建设指挥部, 上海 200041)

摘要: 根据室内单轴压缩试验视频图像对石灰岩局部化变形的数字特征进行分析。原始视频在岩石单轴抗压试验时摄得, 根据试验荷载-时间关系曲线得到加载阶段的视频图像并转化为计算机易于识别的视频格式, 利用粒子图像测速技术得到石灰岩试样表面任意时刻任意位置的位移大小, 分析不同荷载作用下既有裂纹端点的变化过程及新生裂隙的萌生和扩展过程, 选取单帧图像纹理参数作为石灰岩不同变形状态的数字特征参数, 分别使用灰度直方图和灰度共生矩阵得到石灰岩图像数字特征参数随时间的变化过程。结果表明, 既有裂隙端点和新生裂隙的局部化变形现象非常明显; 可以将平稳变形阶段和急剧变形阶段间的分界点作为局部化变形的起始点并据此作为局部化变形的启动条件; 图像纹理特征参数能够较好反映不同荷载阶段的变形状态, 可以用于预报局部化变形的起始时刻。由于图像特征反映岩石的变形破坏过程, 该方法将为研究岩体地区局部化变形和地质灾害的微观机制提供一条新的研究途径。

关键词: 岩石力学; 石灰岩; 局部化变形; 图像特征

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2010)10-2110-06

IMAGE FEATURES OF LOCALIZED DEFORMATION OF LIMESTONE

XU Jinming¹, HAN Nana¹, LI Yansong²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Project Construction Headquarters, Shanghai Natural History Museum, Shanghai 200041, China)

Abstract: The digital features of localized deformation of limestone are analyzed by using video images of uniaxial compression test. The original videos were record during the laboratory uniaxial compression test. The video images at loading stage were obtained by using load-time relation curves and converted into the video formats that can be recognized easily by computer. A particle image velocimetry(PIV) technique was used to compute the displacements of surface of limestone specimen in any time and in any location. The change history of tip displacement of the existing fissure was investigated; the processes of initiation and propagation of new fissures were also analyzed. The textural parameters of a single frame were selected as the digital features reflecting the deformation status of limestone. The change processes of these parameters with time were further investigated based on the grayscale histogram and grayscale co-occurrence matrix from video images. The results show that the phenomena of localized deformations of existing and new fissures are much obvious; the dividing point between stable and rapid deformation stages may be used to determinate the start point and to establish the initiate conditions for localized deformations; the textural parameters can reasonably reflect the change in the deformation status of the limestone under different loading stages and may be used to predict the initial time of localized deformations. Due to the reflection of image features on deformation/failure process of intact rocks or rock masses, the methods presented herein may provide a new research way of meso-scale mechanisms of the localized deformation and geological hazards in rock areas.

Key words: rock mechanics; limestone; localized deformation; image feature

收稿日期: 2010-05-14; **修回日期:** 2010-06-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40972191); 上海市教育委员会科研创新项目(09YZ39)

作者简介: 徐金明(1963-), 男, 博士, 1983年毕业于长春地质学院水文地质与工程地质系工程地质专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土工程计算技术方面的教学与研究。E-mail: xjiming@163.com

1 引言

外荷作用下岩石变形发展到一定程度时, 会出现局部变形比较大的情况。当变形场极不均匀时, 某个单元首先破坏并逐步引起其他单元陆续破坏, 细观裂隙萌生、扩张、贯通并逐步形成剧烈变形带。岩石破坏过程就是局部化变形发生发展的过程。

岩石的局部化变形问题, 多使用数值方法和解析方法进行研究。比如, 王小平和徐卫亚^[1]分析了应变局部化正则化机制的存在问题。曾亚武等^[2]对岩石试样局部化剪切带形成过程进行了数值模拟。吕玺琳等^[3]使用分叉理论探讨了剪切带、压缩带和膨胀带的出现条件, 分析了临界硬化模量和变形带方向角的变化特性。王庚荪等^[4]使用含剪切带单元模型和破坏面自动寻踪技术模拟了边坡的渐进破坏过程。钱建固和黄茂松^[5]使用非共轴应变率概念建立了非共轴本构理论框架。

由于图像特征反映了岩石的变形破坏过程, 可以使用图像分析方法研究局部化变形问题。比如, 杨天鸿等^[6]使用三维不接触测量系统对结构面进行测量, 得到了砂岩几何形态数字信息与水力学参数的定量关系。刘延保等^[7]将最小二乘支持向量机分类方法与阈值分割法相结合, 提出了花岗岩细观结构的图像分析方法。丁秀丽等^[8]由数字图像生成颗粒流模型, 采用二维颗粒流程序对土石混合体进行了双轴压缩试验的数值模拟。赵毅鑫等^[9]通过失稳破坏前兆信息的对比研究, 得到不同煤岩组合体失稳破坏过程中红外热像、声发射能谱及不同部位应变的变化规律。J. M. Kemeny 等^[10]使用数字图像处理技术分析了视频图像中的岩石破碎程度。K. Sobhan 等^[11]利用相关匹配方法分析了岩土材料三轴循环荷载作用下的应变变化。J. M. Xu 等^[12, 13]使用图像边缘检测技术和数学形态学方法探讨了岩石中的流体包裹体分布。尹小涛等^[14]利用形态学处理技术分析了砂岩试样裂纹的演化过程。D. White 等^[15]将粒子图像测速(*particle image velocimetry*, 简称 PIV)技术与离心机试验结合, 进行了基础不均匀沉降的位移量测。最近, 徐金明等^[16]结合数字图像处理和粒子图像测速技术, 初步实现了单轴压缩条件下石灰岩表面的位移计算。

图像特征分析方法将全局变形问题和局部变形问题统一起来, 用于研究局部化变形问题能更好体

现岩石组成不均匀性和非连续性的本质特点。随着计算机软件和硬件、计算技术的快速发展, 使用 PIV 技术可以快速、经济、准确地获得任意位置任意时刻的位移大小, 更好分析局部化变形的启动条件与变化特点, 对于岩石工程问题精细化研究和岩体地区地质灾害细观机制分析具有较好的参考价值。因此, 本文拟根据单轴压缩试验时摄得的石灰岩视频图像, 利用 PIV 技术计算石灰岩试样表面的全局位移场, 探讨不同荷载作用下既有裂纹端点的变化情况与新生裂隙的萌生和扩展过程, 分析试验过程中石灰岩图像数字特征参数的变化特点。

2 石灰岩位移场的确定

2.1 使用粒子图像测速(PIV)技术确定位移场

2.1.1 原始视频的获得

石灰岩取自浙江省湖州市白鹤岭边坡, 在室内切割与磨光制成 50 mm×50 mm×50 mm 的试块, 抗压强度试验采用 YE-2000 型液压式压力试验机, 数据采集使用 Smart Test 压力试验机计算机控制系统, 视频图像和静态图像分别使用三星 DIGIMAX L50 型摄像机和索尼 T5 型照相机在试样侧立面实拍得到, 相机镜头到试样的距离大约为 50 cm。

2.1.2 原始视频的预处理

编程计算前对原始视频进行预处理, 将原始视频图像解压成 24 色 AVI 格式的图像文件。解压之后, 各视频图像大小为 480 像素×640 像素, 播放帧率为 30.0 帧/s, 拍摄历时为 18.600~147.433 s, 帧数为 558~4 423 帧。

由于视频拍摄与加压过程不完全同步、加压起始时间与视频摄制开始时间并不一致, 根据视频拍摄延时、实际加载延时和试验结束时刻计算视频中各帧图像的具体时刻。

2.1.3 位移场的计算

采用最大相关法对不同帧图像进行匹配, 2 帧图像中各像素块的实际位移为

$$d_s = \delta \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \quad (1)$$

式中: d_x , d_y 分别为 x , y 方向像素位移分量; δ 为单个像素代表的实际长度。

考虑到位移计算结果的可比性和计算方法的通用性, 研究时使用 PIV 技术、结合 MatPIV 开源码^[17]并编制程序来实现位移场的计算。

使用 PIV 技术计算位移时，以样品附近不动点作为参考点，通过图像模式匹配和相关分析得到不同时刻任意两幅图像间的相对位移场；在获得初始位移、初始信噪比、初始峰高滤波后，通过滤波和插值计算得到整数像素点的位移，使用相邻像素位移与拟合方法得到非整数像素点位移；对于非正常位移和离群位移，使用不同滤波器进行处理：用信噪比滤波器来过滤不符合信噪比指定范围的位移，用峰高滤波器移除匹配相关系数过小的位移，用全局滤波器移除明显很大或明显很小的位移，用局部滤波器移除与邻域位移向量相差过大的离群位移。

2.2 石灰岩位移场的主要特征

使用上述方法，可以得到任意时刻任意位置的石灰岩试样表面位移。下面以石灰岩试样 DY2 - 1 为例，说明这些表面位移的变化特点。

2.2.1 任意时刻位移场的主要特征

石灰岩试样 DY2 - 1 在 16.7 s 时的位移场见图 1。为清楚起见，图 1 只标出了位移矢量的相对大小，没有标出总位移大小。由图 1 可知，由于试样右侧裂纹比左侧裂纹更为发育，右侧位移明显比左侧位移要大，在外荷作用下试样不同位置总的移动方向是向下的；在下端，由于固定边界的约束，颗粒移动为向右下角展开。在 16.7 s 时试样中的总位移在右下角达到最大值(1.750 4 mm)，与实际观测结果基本一致。

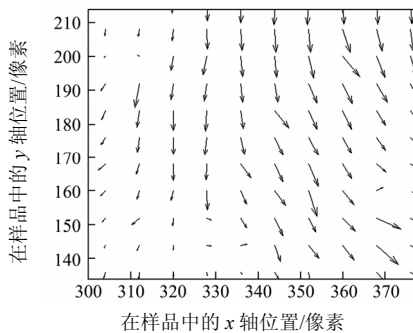


图 1 石灰岩试样 DY2 - 1 在 16.7 s 时的位移场

Fig.1 Displacement field of specimen DY2 - 1 at the time of 16.7 s

2.2.2 任意位置的位移变化

选取试样上不同位置的 5 个点来分析不同时刻的位移大小。5 个点分别为左上中点 A，左下中点 B，右上中点 C，右下中点 D 和中心点 E，各点在样品中的位置见图 2。

图 3 为点 A，B，C，D，E 的总位移随时间的变化曲线。由图 3 可知，各点总位移在 15 s 前变

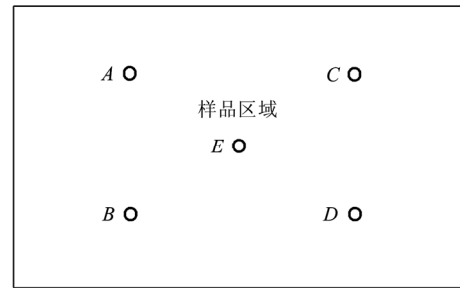


图 2 位移分析时 5 个点在样品中的位置

Fig.2 Locations of five points in specimen for displacement analysis

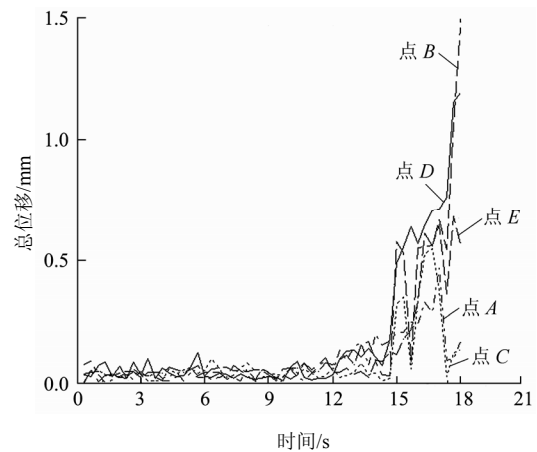


图 3 不同位置总位移随时间的变化曲线

Fig.3 Variation curves of total displacement with time at different locations

化平稳、但在 15 s 后变化很大。15 s 后，位于样品下部的点 B，D 总位移一直增大、直到样品在 18 s 时达到破坏；位于样品上部的点 A，C 总位移变动幅度很大；而位于样品中部的点 E，总位移大小介于上部和下部之间，总位移变动幅度也较大。这说明，样品破坏应该是从下部开始、然后逐步扩大至全部样品，这种变形破坏过程与肉眼观察到的视频情况基本一致。

3 裂隙的变化过程

3.1 既有裂隙变化过程

图 4 为右侧一个既有裂隙端点的运动过程，由图 4 可知，在整个试样变形破坏的 18 s 时间内，既有裂隙端点的变形开始比较平稳(前 44 点、相当于 14.7 s 之前)；但在 14.7 s 之后，端点移动速度急速加快、并在 3.3 s 之后样品发生破坏。还可看到，这一既有裂隙位于样品临空面附近(见图 4(a))，在即将快速移动时裂隙端点恰恰位于原样品的边缘，而快速移动时端点迅速移向原来的临空面(各点位于

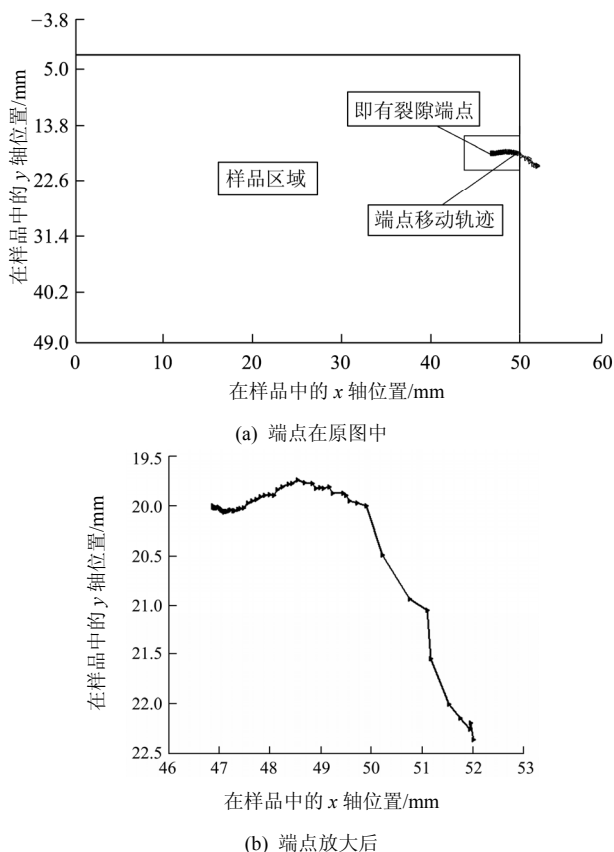
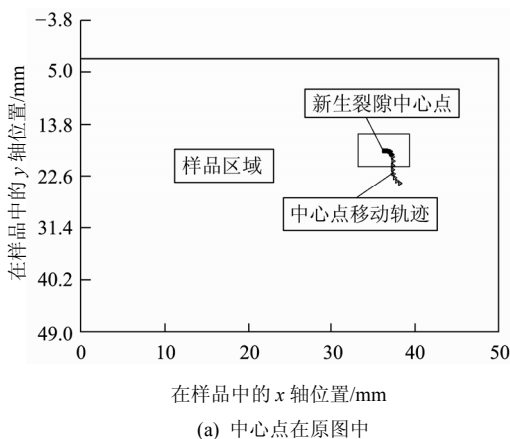


图 4 既有裂隙端点运动过程
Fig.4 Movement process of tip of an existing fissure

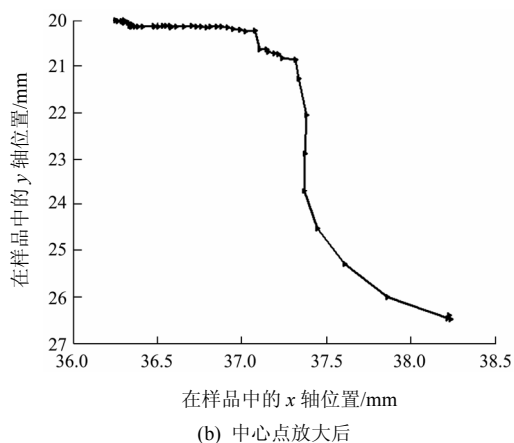
图 4(b)中 0~50.0 mm 之间), 这与肉眼观察到的变形破坏过程基本吻合。

3.2 新生裂隙的萌生和扩展过程

图 5 为试样右侧中部附近一个新生裂隙中心点的运动过程, 由图 5 可知, 在整个试样变形破坏的 18 s 时间内, 新生裂隙端点变形规律与既有裂隙基本一致, 即在开始阶段的 14.7 s 比较平稳、但在 14.7 s 之后移动速度加快直至样品发生破坏。同时, 这一新生裂隙位于样品右部中间(见图 5(a)), 即使在样品完全破坏之后(18 s 后), 新生裂隙仍然位于样品原来范围之内(图 5(b)中水平轴上 0~50.0 mm



(a) 中心点在原图中



(b) 中心点放大后

图 5 新生裂隙中心点运动过程
Fig.5 Movement process of center of a new fissure

之间), 这与肉眼观察到的变形破坏过程也基本吻合。

4 图像数字特征参数的变化过程

由于纹理参数反映了图像特征的局部变化模式, 本文选取纹理参数作为石灰岩不同变形状态的数字特征参数, 分别使用灰度直方图和灰度共生矩阵计算不同时刻图像的数字特征参数。

4.1 图像数字特征参数计算方法

基于灰度直方图的图像纹理参数计算公式为

$$h_1 = \sum_{i=0}^{L-1} z_i p(f_i) \tag{2}$$

$$h_2 = \sqrt{\sum_{i=0}^{L-1} (f_i - m)^2 p(f_i)} \tag{3}$$

$$h_3 = 1 - 1 / (1 + s^2) \tag{4}$$

$$h_4 = \sum_{i=0}^{L-1} (f_i - m)^3 p(f_i) \tag{5}$$

$$h_5 = \sum_{i=0}^{L-1} p^2(f_i) \tag{6}$$

式中: h_1 为均值, h_2 为标准差, h_3 为平滑度, h_4 为 3 阶矩, h_5 为一致性指标, L 为图像总灰度级数, $p(f_i)$ 为图像直方图上灰度级 f_i 的分布密度, z_i 为灰度直方图上的第 i 个灰度值, $m = h_1$, $s = h_2$ 。

基于灰度共生矩阵的图像纹理参数计算公式为

$$g_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p^2(i, j) \tag{7}$$

$$g_2 = \sum_{n=1}^N (i - j)^2 \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p^2(i, j) \right] \tag{8}$$

$$g_3 = \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N ij p(i, j) - \mu_1 \mu_2 \right] / (\sigma_1^2 \sigma_2^2) \tag{9}$$

$$g_4 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p(i, j) / (i - j)^k \quad (i \neq j) \quad (10)$$

$$g_5 = - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p(i, j) \log_2 p(i, j) \quad (11)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} \mu_1 &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p(i, j) \\ \sigma_1^2 &= \sum_{i=1}^N (i - \mu_1)^2 \sum_{j=1}^N p(i, j) \\ \mu_2 &= \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N p(i, j) \\ \sigma_2^2 &= \sum_{j=1}^N (j - \mu_2)^2 \sum_{i=1}^N p(i, j) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式(7)~(12)中: g_1, g_2, g_3, g_4, g_5 分别为二阶矩、对比度、相关度、逆差矩和熵; $p(i, j)$ 为归一化的灰度共生矩阵。

根据已有研究成果^[18], 构造灰度共生矩阵时取像素间距为 4, 并采用 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 这 4 个方向的平均值作为灰度共生矩阵的元素。

4.2 不同加载时刻的图像数字特征参数

为便于比较, 各纹理参数使用最大最小值归一化法进行处理。图 6 为基于直方图的纹理参数随时间的变化情况, 由图 6 可知, 基于直方图的纹理参数, 在开始的 13 s 时间内变化比较平稳、但在 13 s 后所有参数都出现了明显的变化。变化时刻比裂隙开始扩展的时刻(14.7 s)提前, 这说明基于直方图的纹理参数可以起到“预报”急剧变形的作用、可以较好反映岩石的变形状态。从图 6 还可以看出, 在基于直方图的 5 个纹理参数中, 均值 h_1 和一致性指标 h_5 (尤其是 h_5) 的变化更为明显。

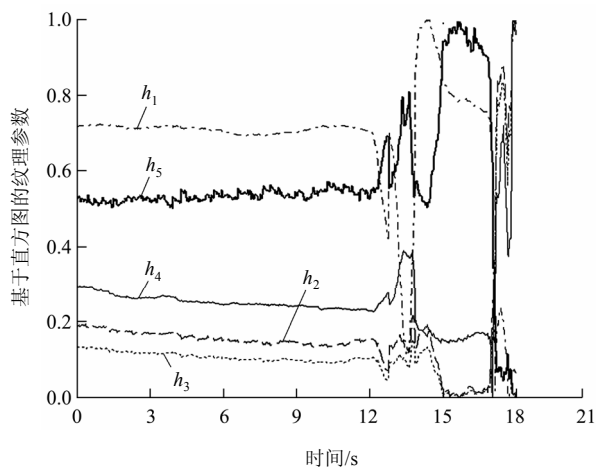


图 6 基于直方图的纹理参数随时间的变化情况

Fig.6 Variations in textural parameters with time based on histogram

图 7 为基于灰度共生矩阵的纹理参数随时间的变化情况。由图 7 可知, 基于灰度共生矩阵的纹理参数, 也是 13 s 之前比较平稳、13 s 后变化明显, 同样反映了岩石的变形状态并可以起到“预报”急剧变形的作用。在基于灰度共生矩阵的 5 个纹理参数中, 对比度 g_2 、相关度 g_3 和逆差矩 g_4 的变化更为明显、并且在破坏之前的 1 s (17 s 时) 出现了极为剧烈的变化。

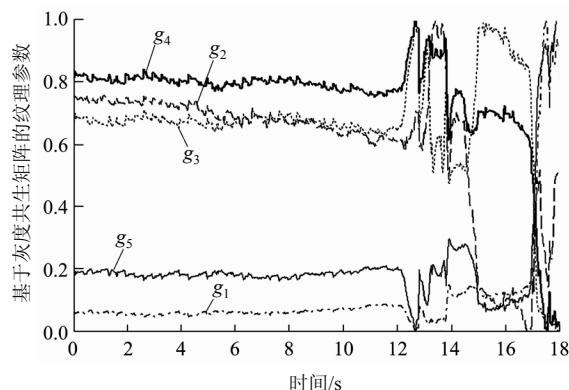


图 7 基于灰度共生矩阵的纹理参数随时间的变化情况
Fig.7 Variations in textural parameters with time based on grayscale co-occurrence matrix

5 讨论

(1) 使用石灰岩视频图像计算局部化变形时, 视频图像必须处理成计算机易于辨认的格式; 在计算视频中各帧图像的具体时刻时要注意视频拍摄与加压过程不完全同步的问题。

(2) 使用粒子测速技术虽然可以较快地获得试验视频的全场位移、可以反映岩石颗粒组成的本质特点、还可以将宏观分析与局部变形问题有效结合起来, 但在具体编程计算时必须注意参考点的正确性。

(3) 对于既有裂隙端点和新生裂隙, 使用粒子测速技术得到的局部化变形现象非常明显。如何将这种现象与已有局部化变形理论、与岩石宏观破坏标准有效结合起来, 还需要进一步研究。

(4) 基于直方图和灰度共生矩阵的纹理参数, 反映了岩石变形过程中的局部模式, 可以较好反映岩石的变形状态并可以起到“预报”急剧变形的作用, 对局部化变形分析具有很好的参考价值。但是, 建立局部化变形的数字特征参数体系并进而建立相应的细观判别标准, 也还需要进一步研究。

(5) 本文方法可用于三轴加载条件下局部化变形的图像特征研究, 但三轴加载是一个空间问题; 推广应用时, 必须考虑三维研究中不同于二维分析的特点, 比如: 必须考虑不同位置的照度条件、三

维坐标系中灰度的相关关系、多个摄像机同时工作时的结果校正等。

6 结 论

(1) 本文根据石灰岩单轴压缩试验时的视频图像, 通过图像模式匹配和相关分析得到不同时刻任意两幅图像间的相对位移场, 通过滤波和插值计算得到任意位置的位移大小, 使用粒子测速技术得到了岩石表面不同时刻任意位置的位移分布。

(2) 对于既有裂隙端点和新生裂隙, 使用粒子测速技术得到的局部化变形现象非常明显, 可以将平稳和急剧变形阶段的分界点作为局部化变形的起始点并据此作为局部化变形的启动条件。

(3) 图像纹理参数, 可以较好反映岩石的变形状态并用于“预报”局部化变形的起始时刻, 还可以在此基础上建立局部化变形的数字特征参数体系与细观变化评判标准。

(4) 由于图像特征反映了岩石的变形破坏机制和岩石中各种裂隙的变化过程, 本文提出的石灰岩局部化变形图像特征分析方法, 将全局变形问题和局部变形问题统一起来, 为岩石工程问题精细化研究和岩体地区地质灾害细观机制分析提供了一条新的途径。

参考文献(References):

[1] 王小平, 徐卫亚. 应变局部化问题中的正则化机制探讨[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 2 997 - 3 002.(WANG Xiaoping, XU Weiya. Discussion on regularization mechanism in strain localization problems[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 2 997 - 3 002.(in Chinese))

[2] 曾亚武, 杨建, 刘继国. 轴对称压缩条件下岩石局部化剪切带数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增2): 3 953 - 3 958.(ZENG Yawu, YANG Jian, LIU Jiguo. Numerical simulation of strain localization shear-bands of rocks under axial symmetric compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 3 953 - 3 958.(in Chinese))

[3] 吕玺琳, 钱建固, 黄茂松. 基于分叉理论的轴对称条件下岩石变形带分析[J]. 水利学报, 2008, 39(3): 307 - 312.(LU Xilin, QIAN Jiangu, HUANG Maosong. Analysis of deformation band in rock under axisymmetrical condition based on bifurcation theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(3): 307 - 312.(in Chinese))

[4] 王庚荪, 孔令伟, 郭爱国, 等. 含剪切带单元模型及其在边坡渐进破坏分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3 852 - 3 857.(WANG Gengsun, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Element model with shear band and its application to progressive failure analysis of slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3 852 - 3 857.(in Chinese))

[5] 钱建固, 黄茂松. 复杂应力状态下岩土体的非共轴塑性流动理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1 259 - 1 264.(QIAN Jiangu, HUANG Maosong. Non-coaxial plastic flow theory in multi-dimensional stress state[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

Engineering, 2006, 25(6): 1 259 - 1 264.(in Chinese))

[6] 杨天鸿, 于庆磊, 陈仕阔, 等. 范各庄煤矿砂岩岩体结构数字识别及参数表征[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2 482 - 2 489.(YANG Tianhong, YU Qinglei, CHEN Shikuo, et al. Rock mass structure digital recognition and hydro-mechanical parameters characterization of sandstone in Fangezhuang coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2 482 - 2 489.(in Chinese))

[7] 刘延保, 曹树刚, 刘玉成. 基于 LS-SVM 的岩石细观图像分析方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 1 059 - 1 065.(LIU Yanbao, CAO Shugang, LIU Yucheng. Discussion on analytical method for LS-SVM based mesoscopic rock images[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 1 059 - 1 065.(in Chinese))

[8] 丁秀丽, 李耀旭, 王新. 基于数字图像的土石混合体力学性质的颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 477 - 484.(DING Xiuli, LI Yaoxu, WANG Xin. Particle flow modeling mechanical properties of soil and rock mixtures based on digital image[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 477 - 484.(in Chinese))

[9] 赵毅鑫, 姜耀东, 祝捷, 等. 煤岩组合体变形破坏前兆信息的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 339 - 346.(ZHAO Yixin, JIANG Yaodong, ZHU Jie, et al. Experimental study on precursory information of deformations of coal-rock composite samples before failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 339 - 346.(in Chinese))

[10] KEMENY J M, DEVGAN A, HAGAMAN R M, et al. Analysis of rock fragmentation using digital image processing[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(7): 1 144 - 1 160.

[11] SOBHAN K, REDDY D V, GENDUSO M J. Permanent strain characterization in granular materials using repeated load triaxial tests and digital image correlation(DIC) technique[C]// ALSHAWABKEH A N, REDDY K R, KHIRE M V, ed. Proceedings of Selected Sessions of Geo-Congress, [S. l.]: [s.n.], 2008: 181 - 188.

[12] XU J M, ZHAO X B, LIU B. Digital image analysis of fluid inclusions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(6): 942 - 947.

[13] 徐金明, 赵晓波. 边缘检测技术在确定流体包裹体迹线中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1 132 - 1 137.(XU Jinming, ZHAO Xiaobo. Determination of fluid inclusion lines using edge-detection technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1 132 - 1 137.(in Chinese))

[14] 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 Xiaotao, DANG Faning, DING Weihua, 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))

[15] WHITE D, RANDOLPH M, THOMPSON B. An image-based deformation measurement system for the geotechnical centrifuge[J]. International Journal of Physical Modeling in Geotechnics, 2005, 15(3): 1 - 12.

[16] 徐金明, 王强, 周廷文. 根据试验视频确定石灰岩中的位移场[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(2): 70 - 75.(XU Jinming, WANG Qiang, ZHOU Tingwen. Displacement field of limestone using video images from laboratory tests[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2010, 37(2): 70 - 75.(in Chinese))

[17] Mathworks Inc: MatPIV-the PIV toolbox for MATLAB(tm). <http://www.math.uio.no/~jks/matpiv/Download/>

[18] 徐金明, 羌培, 张鹏飞. 粉质黏土图像的纹理特征分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 2 903 - 2 907.(XU Jinming, QIANG Pei, ZHANG Pengfei. Texture analysis of photographs of silty clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 2 903 - 2 907.(in Chinese))