

# 根据试验视频确定石灰岩中的位移场

徐金明, 王 强, 周廷文  
(上海大学 土木工程系, 上海 200072)

**摘要:** 根据室内石灰岩抗压强度试验拍摄得到的彩色视频图像与试验数据, 使用数字图像相关分析技术, 在对原始彩色视频图像进行可读格式转换、灰度变换、傅里叶变换基础上, 利用最大相关匹配技术与小变形假设实现了石灰岩视频图像中不同位置相对位移的计算。通过循环计算得到整个石灰岩试样中的位移场与试样中各点位置的变化过程。本文方法对分析岩石变形和破坏机理具有一定的参考价值。

**关键词:** 石灰岩; 室内试验; 视频图像; 位移场

**中图分类号:**           **文献标识码:** A           **文章编号:** 1000-3665(2010)02-0070-06

变形过程分析对石灰岩力学形状研究非常重要, 已有大量文献报道了这方面的工作。但已有工作比较传统, 很难快速确定石灰岩的力学行为。目前, 一些学者使用图像处理技术对岩土材料进行研究, 取得了一些很有意义的成果。岳中琦等<sup>[1]</sup>提出了岩土工程材料的数字图像有限元分析方法; 谈叶飞和周志芳<sup>[2]</sup>将数字图像识别方法用于标准砂介质中高锰酸钾溶液浓度的拟合识别; 朱珍德等<sup>[3]</sup>采用录像资料对裂隙扩展过程进行了实时全场监测和局部显微放大监测; 马少鹏等<sup>[4]</sup>用序列图像灰度相关性研究了变形发展过程; 刘延保等<sup>[5]</sup>在使用数字图像处理技术分析非均质岩土材料细观特征基础上, 利用支持向量机提取原始图像的特征参数; 范留明和李宁<sup>[6]</sup>提出了裂隙位置确定技术与裂隙图像的采集、解译和识别方法; 刘冬梅等<sup>[7]</sup>结合实时全息干涉研究了裂隙扩展速率、蠕变扩展速率、扩展变形量与蠕变变形量; 于庆磊等<sup>[8]</sup>对岩石破裂过程进行了破坏分析; 刘春等<sup>[9]</sup>在数学形态学分析与智能识别基础上提出了裂隙形态参数的抽取方法; 魏继红等<sup>[10]</sup>将图像处理技术用于隧洞断面超欠挖方量的评价; Ferrer 等<sup>[11]</sup>探讨了应力-应变关系与裂隙扩展过程; Lu 和 Li<sup>[12]</sup>实现了摄像资料中移动对象特性的自动抽取; 翟文信等<sup>[13]</sup>由二维小波技术分析粉质粘土图像的纹理特征, 获得了小波能量参数与粉质

粘土工程性质指标的多元线性回归方程; 董宏志等<sup>[14]</sup>利用扫描电子显微镜技术, 对季节冻土的物理性质及微观结构特征进行了定量分析。徐金明等还将边缘检测技术和数学形态学方法结合研究了岩石中微观成分的分布特征<sup>[15]</sup>及其非均质性评价方法<sup>[16]</sup>。

总的来说, 使用数字图像处理技术研究岩石的变形破坏特征, 研究工作还不多; 而使用视频图像分析岩石变形破坏机理, 现有成果更少。本次研究拟使用 MATLAB 平台<sup>[17]</sup>与图像相关分析技术<sup>[18]</sup>, 根据石灰岩抗压强度试验时摄取的高分辨率视频图像, 提取视频图像中的各帧图像, 分析石灰岩在单轴压缩试验过程的位移场, 通过灰度变换、傅里叶变换、小变形假设、最大相关匹配, 获得石灰岩在不同加荷情况下的相对位移分布及其变化过程。本文方法对分析岩石变形破坏机理、研究岩体工程地质问题具有重要的参考价值。

## 1 石灰岩位移场的确定方法

### 1.1 石灰岩强度试验数据

石灰岩取自浙江湖州市白鹤岭边坡, 通过室内切割与磨光制成大小为 50mm×50mm×50mm 的试块, 采用常规抗压强度试验, 试验采用 YE-2000 型液压式压力试验机 (浙江竞远机械设备有限公司生产) 来完成, 采集数据使用 Smart Test 压力试验机计算机控制系统。试验结果见表 1, 数据采集结果见图 1 (试样 DY1-1)。表 1 中, L、W、H 分别为试样的长、宽、高, P 为最大加荷量,  $\sigma$  为最大加荷量对应的端面应力。

需要说明的是, 试样尺寸本来取为 50mm×50mm×50mm, 但由于切割和磨光出现误差, 实际尺寸略有差异, 表 1 中的各尺寸是实际测量得到的数值。

收稿日期: 2009-08-10 修订日期: 2009-12-10  
基金项目: 国家自然科学基金项目 (40972191 50678100); 上海市教委科研创新项目 (09YZ39)  
作者简介: 徐金明 (1963-) 男, 教授, 博士生导师, 主要从事工程地质与岩土工程的教学与科研工作。  
E-mail: xjmng@163.com

表 1 石灰岩试块强度试验结果  
Table 1 Result of uniaxial compression tests  
for limestone specimen

试样编号	L (mm)	W (mm)	H (mm)	P (kN)	$\sigma$ (MPa)
DY1-1	50.7	50.8	50.6	148.0	57.5
DY1-2	50.2	50.6	50.4	113.0	44.5
DY1-3	50.6	50.6	50.7	78.0	30.5
DY1-4	50.5	50.4	50.5	38.7	15.2
DY1-5	50.6	50.4	50.3	0.0	0.0
DY2-1	50.6	50.2	50.6	173.8	68.5
DY2-2	49.6	50.4	50.9	131.4	52.6
DY2-3	49.5	50.4	50.5	85.6	34.3
DY2-4	49.5	50.4	50.4	45.9	18.4
DY2-5	50.3	50.3	50.7	0.0	0.0
DY3-1	50.6	50.6	49.7	140.5	54.8
DY3-2	50.5	50.4	50.0	106.7	41.9
DY3-3	50.5	49.8	49.9	71.2	28.4
DY3-4	50.8	50.6	50.6	37.3	14.5
DY3-5	50.2	49.6	50.2	0.0	0.0
DY4-1	50.6	50.7	50.7	220.0	85.8
DY4-2	50.8	50.8	50.3	167.0	64.7
DY4-3	50.3	50.4	50.4	108.9	43.0
DY4-4	50.8	50.7	50.2	56.4	21.9
DY4-5	50.7	50.8	50.8	0.0	0.0

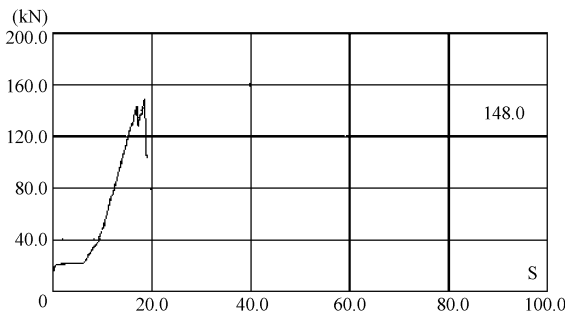


图 1 试块 DY1-1 的单轴抗压试验结果  
Fig 1 Loading Process of the  
limestone specimen DY1-1

### 1.2 视频图像与帧图像的获取

抗压强度试验过程中, 石灰岩视频图像和静态图像分别通过三星 DG MAX 150 型摄像机和索尼 T5 型 (CyberShot) 照相机在试样侧面实拍得到, 相机镜头到试件之间距离大约为 50 cm。

视频图像保存在计算机中时, 都是 AV 格式。考虑到本次研究采用 MATLAB 平台通过编程来确定位移场, 已经压缩的原始视频图像需要解压成 24 色的 AV 格式的图像文件, 这样处理后的 AV 格式视频才能被 MATLAB 平台读取。同时, 由于实验室所摄视频通常占用很大的空间, 为了能正常处理, 需要将原视频

分割成较小空间的多个视频。

解压前后的视频信息见表 2。为了方便编程计算, 表 2 中的视频编号与表 1 中的试样编号相同。表 2 中, 各视频图像的高度为 480 像素、宽度为 640 像素, 视频播放帧率为 30.0 帧 / s。各视频原始占用空间为 2 367 ~ 8 9054 kB, 解压后占用空间为 32 9727 ~ 2 613 480 kB, 拍摄历时为 18.600 ~ 147.433 s, 帧数为 558 ~ 4 423 帧, 摄制时间可以精确到 0.001 s。

表 2 石灰岩试验视频信息一览表  
Table 2 Summary of the video images  
for limestone specimen

视频编号	原文件 大小 (kB)	解压文件 大小 (kB)	压缩率	播放时间 (s)	总帧数
DY1-1	16 885	1 743 569	103.26	98.366	2 951
DY1-2	5 319	652 121	122.60	36.800	1 104
DY1-3	14 325	2 023 634	141.27	114.166	3 425
DY1-4	15 013	2 187 530	145.71	123.400	3 702
DY2-1	14 681	1 993 017	135.75	112.433	3 373
DY2-2	15 786	2 238 861	141.83	126.300	3 789
DY2-3	4 409	590 884	134.02	33.333	1 000
DY2-4	2 367	329 727	139.30	18.600	558
DY3-1	19 041	2 613 480	137.26	147.433	4 423
DY3-2	11 696	1 586 877	135.68	89.500	2 685
DY3-3	12 528	1 685 936	134.57	95.100	2 853
DY3-4	60 230	1 269 887	21.08	47.660	1 410
DY4-1	89 054	1 891 250	21.24	69.566	2 100
DY4-2	76 396	1 612 093	21.10	59.666	1 790
DY4-3	51 036	1 077 179	21.11	39.866	1 196
DY4-4	2 953	623 305	211.08	23.660	692

由表 2 可以看出, 所有原始视频图像占用空间并不很大, 但解压后视频占用空间都很大, 压缩率变化较大, 达到 21.08 ~ 211.08。

预处理之后, 每一幅视频图像由许多帧图像连接而成, 每一帧数字图像又是由矩阵形式排列的像素组成, 可以在 MATLAB 平台中直接提取视频中的单帧静态图像。

### 1.3 图像选取与匹配

一个视频中单帧图像 (相当于 1 幅静态图像) 的数量通常都很大。为了减少程序计算量, 研究时选取试块在破坏前后一段时间内的任意两幅静态图像逐块进行相关匹配分析, 采用最大相关法对不同帧图像进行匹配, 匹配时的互相关系数定义为:

$$\varphi(m, n) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M f_{ij} g_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M f_{ij}^2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M g_{ij}^2}} \quad (1)$$

$$f = f(i, j), g = g(i + m, j + n) \quad (2)$$

式中:  $f(i, j), g(i + m, j + n)$ ——两帧图像中像素块的灰度分布;

$(m, n)$ ——像素块中心的新位置。

理论上, 要求图像  $g(x, y)$  中任一位置  $(x, y)$  相对于图像  $f(x, y)$  中的相应位移 (图 2), 可以通过包含点  $(x, y)$  的图像块  $E(x, y)$  进行扫描, 在图像  $g(x, y)$  中寻找与  $E(x, y)$  相匹配的最佳位置。通常,  $E(x, y)$  比  $f(x, y)$  要小很多。实际匹配时, 根据富里叶变换卷积定理, 后一帧图像块  $f(x, y)$  和前一帧图像块  $E(x, y)$  的空间相关 (用符号  $\rho$  表示), 可以使用  $f(x, y)$  富里叶变换与  $g(x, y)$  富里叶变换复共扼乘积的富里叶逆变换求得<sup>[18]</sup>:

$$f(x, y) \circ E(x, y) \Leftrightarrow F(u, v) \overline{H(u, v)} \quad (3)$$

两帧图像中各像素块的实际位移大小, 可通过像素位移分量  $(dx, dy)$  乘以单个像素代表的实际长度  $\delta$  来表示, 即:

$$ds = \delta \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad (4)$$

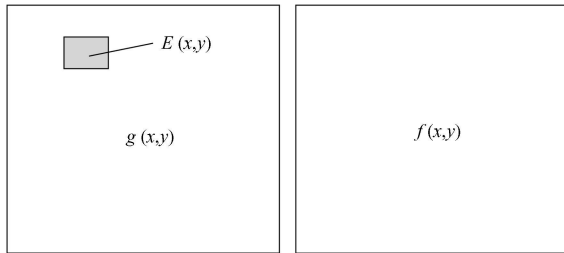


图 2 两帧图像之间的匹配

Fig 2 Matching between two frames of images

### 1.4 位移场计算

计算位移场时, 需首先确定匹配图像大小, 在目标图像中进行图像块循环。本次研究的图像块大小取为  $8 \times 8$  像素。考虑到目标图像边长并不正好是图像块的正整数倍, 在目标图像边缘进行舍入处理。虽然这一处理会引起误差, 但由此引起的误差可以通过降低图像块大小来消除。

如果每一次匹配都是图像块与整幅图像来进行, 不仅运行时间很长, 而且匹配效果并不好。这是由于, 上述最大相关匹配本质上还是区域灰度匹配; 如果使用图像区域多项特征参数进行匹配, 也许效果会改善 (作者正在进行这一工作, 但尚未完全成功)。本次研究, 使用小变形假设, 把相邻两帧图像块位移限制在一个比较小的范围内。由于单帧图像延时很小, 通常属于  $0.01$  的数量级范围。因此, 小变形假设是合理的。

匹配过程中, 不仅可以获得各位置 (以图像块为

代表) 的总位移与相应的位移矢量图, 还可以得到总位移在  $x$  方向上的位移矢量和  $y$  方向上的位移矢量。

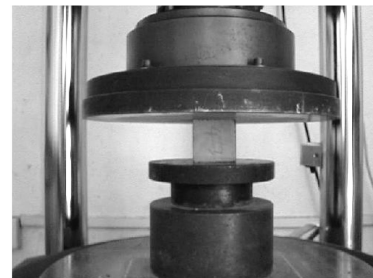
## 2 计算结果与简要讨论

### 2.1 视频图像位移场变化

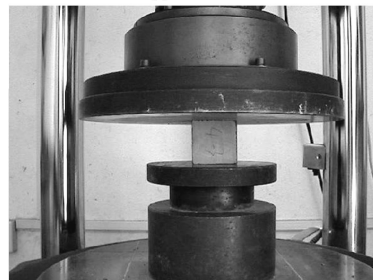
由于试验时摄像与加压并不完全同步进行, 加压起始时间与视频摄制开始时间并不完全一致, 视频帧位置与加载时刻是大致对应关系, 各图像对应加载时刻由表 2 可以大致换算出来。但为准确起见, 下面分析时不使用加载时刻, 而使用帧序号。

视频图像匹配分析工作量很大, 下面仅以视频图像 DY4-3 为例, 选取任意两幅图像分别作为目标图像和被匹配图像, 求出石灰岩破坏前后各帧图像的相对位移分布。

视频图像 DY4-1 的总帧数为 2100 其中的第 200 帧图像与第 1700 帧图像分别见图 3 (a) 和图 3 (b) (为节省篇幅, 这里没有显示其它各帧图像)。图 3 (a) 没有任何破坏迹象, 而图 3 (b) 对应试块表面出现了少量新裂隙。



(a) 匹配图



(b) 目标图像

图 3 第 200 帧和第 230 帧图像

Fig 3 Images of the frames 200 and 230

位移场计算时, 作者使用 MATLAB R2009 a 编程平台, 结合 MaPIV 公开源码<sup>[19]</sup> 并通过编制应用程序来实现。编程时, 首先将原始彩色转化为灰度图像, 然后将第 200 帧图像作为匹配图像, 分别选用第 350、500、650、...、1700 帧图像作为匹配图像, 匹配图像块面积重叠比取为 50%。在获得初始位移、初始信噪比、初始峰高滤波后, 通过滤波计算得到含 NAN 非数

字 的位移值,使用最近点插值来消除 NAN并得到全场插值结果,进而获得指定点总位移及其移动方向随

时间 (以帧序数表示 )的变化情况。第 200 帧与第 350、950 帧、1550 帧图像匹配后的位移场见图 4

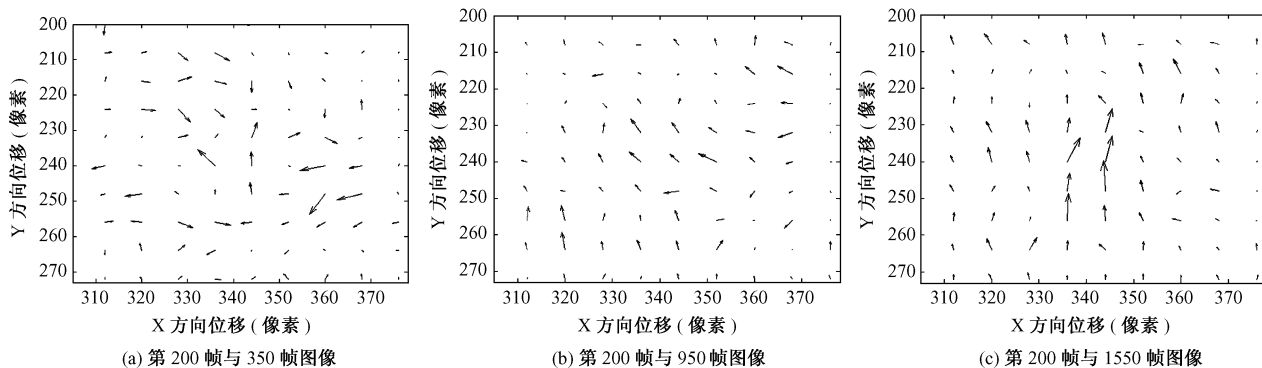


图 4 第 200 帧与第 350、950、1550 帧图像匹配后的位移场

Fig 4 Displacement field matched between the frames 200 with 350 950 1550

为了反映不同时刻不同位置的位移变化过程,研究时还分析了总位移大小及其与 X轴 夹角随时间的变化过程。图 5 是 [ 350 250] 位置处总位移随时间的变化过程。由图 5 可以看出,随着时间的增加,该点总位移通常是不断增加的;在 650 帧附近,出现了总位移迅速增加后迅速减少的现象,这是由于相机抖动所致;在 1 500 帧附近,总位移达到较大值,这是由于岩石开始出现少量的细小裂纹。整个曲线不太光滑,因为计算时只选取 10 幅目标图像进行匹配处理。如果选用更多的目标图像,曲线应该会更光滑一些,但计算工作量将增加很多。

定及其与既有裂隙之间的关系,具有重要的参考价值。

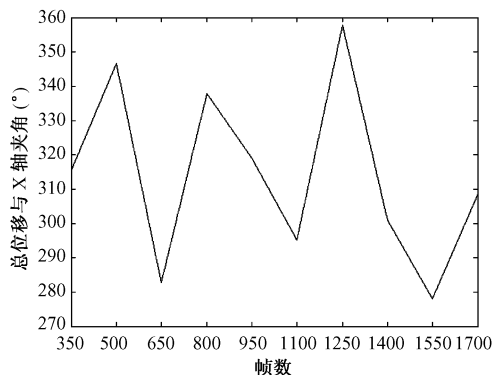


图 6 图像中 [ 350 250] 位置处总位移与 X轴 夹角随时间的变化过程

Fig 6 Degrees with respect to X-direction vs time of the frames [ 350 250]

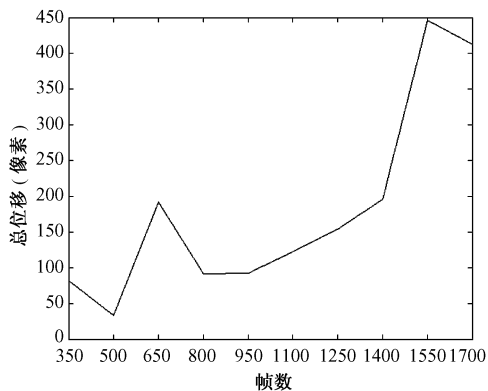


图 5 图像中 [ 350 250] 位置处总位移随时间的变化过程

Fig 5 Total displacements vs time of the frames [ 350 250]

图 6 是 [ 350 250] 位置处总位移方向与 X轴 夹角随时间的变化过程。由图 6 可以看出,该处总位移方向与 X轴 夹角为 270 ~360°,表示该处颗粒移动是向样品右下角进行的。使用图像分析方法来确定试样视频各点的位移大小和方向,对岩石起始破裂标准的确定

### 2.2 简要讨论

根据石灰岩试验视频图像,使用灰度最大相关技术确定岩石中的位移场,是对传统位移确定方法的一种改进。但是,这一新方法还有待于进一步完善,尤其是确定位移还须考虑有关因素的影响。

(1) 研究时匹配图像块边长到底取多少像素,目前还没有定论。边长过大,匹配效果不好;边长过小,不仅计算工作量增大很多,目标图像中还会出现较多的匹配块 (即存在匹配不唯一的问题)。研究过程中作者发现,图像块边长取 6 ~ 15 像素可以获得比较好的匹配效果。

(2) 拍摄视频过程中,摄像机抖动会严重影响匹配效果。由于试验拍摄视频的帧数都是 30 相邻两幅图像之间的时间大致为 0.03 s (即 1/30 s),本文方法

不至于使相邻图像匹配出现较大的误差。若匹配图像和目标图像时间间隔相差较大, 则可能出现比较大的累计误差。因此, 作者建议使用匹配方法确定位移场时, 应该严格控制摄像机抖动, 不同位置变化过程的分析宜以相邻两幅图像为主。

(3) 匹配时, 本文使用了小变形假设。这一假设在岩石没有破坏时得到了比较好的结果。但是, 岩石即将破坏时, 小变形假设不再成立。此时, 如何确定岩石中的位移场还需要深入研究。

(4) 使用视频资料确定岩石位移场, 会受视频拍摄环境(比如分辨率、光照条件)的影响, 这些因素的影响大小也还需要进一步探讨。

### 3 结论

(1) 对于石灰岩抗压强度试验的视频图像, 使用本文方法可以求出视频图像中任意位置任意时刻的相对位移。

(2) 使用 PIV 技术可以得到比较好的位移场分布, 还可以得到样品中任意一点总位移大小和方向随时间的变化情况, 对于裂纹生长机理分析与岩石破坏机理研究具有重要的参考价值。

(3) 确定岩石位移场的核心是考虑小变形假设的图像灰度最大相关匹配, 但在匹配时还必须考虑匹配图像块边长、摄像机抖动、岩样状态与拍摄环境的影响。

(4) 本文提出的估计石灰岩抗压强度试验时相对位移场的视频图像处理办法, 对石灰岩变形和破坏机理研究具有重要的理论意义, 对岩体工程地质研究也有较好的应用前景。

### 参考文献:

- [ 1 ] 岳中琦, 陈沙, 郑宏, 等. 岩土工程材料的数字图像有限元分析[ J ]. 岩石力学与工程学报, 2004 23 (6): 889—897.
- [ 2 ] 谈叶飞, 周志芳. 有色示踪剂在溶质运移实验中的数字图像识别和处理[ J ]. 水文地质工程地质, 2007 34(1): 99—102.
- [ 3 ] 朱珍德, 杨永杰, 蒋志坚, 等. 用数字图像处理技术进行膨胀红砂岩细观结构动态劣变特征研究[ J ]. 岩石力学与工程学报, 2007 26(10): 2007—2013.
- [ 4 ] 马少鹏, 刘善军, 赵永红. 数字图像灰度相关性用以描述岩石试件损伤演化的研究[ J ]. 岩石力学与工程学报, 2006 25(3): 590—595.
- [ 5 ] 刘延保, 曹树刚, 刘玉成. 应用支持向量机处理岩土材料的细观图像[ J ]. 重庆大学学报, 2008 31 (7): 720—724.
- [ 6 ] 范留明, 李宁. 基于数码摄影技术的岩体裂隙测量方法初探[ J ]. 岩石力学与工程学报, 2005 24 (5): 792—797.
- [ 7 ] 刘冬梅, 蔡美峰, 周玉斌, 等. 岩石裂隙扩展过程的动态监测研究[ J ]. 岩石力学与工程学报, 2006 25(3): 467—472.
- [ 8 ] 于庆磊, 唐春安, 朱万成, 等. 基于数字图像处理的岩石细观力学分析[ J ]. 力学与实践, 2006 28 (4): 60—64.
- [ 9 ] 刘春, 王宝军, 施斌, 等. 基于数字图像识别的岩石体裂隙形态参数分析方法[ J ]. 岩土工程学报, 2008 30(9): 1383—1388.
- [ 10 ] 魏继红, 吴继敏, 孙少锐. 图像处理技术在隧洞超欠挖评价中的应用[ J ]. 水文地质工程地质, 2005 32(1): 105—108.
- [ 11 ] Ferrero A M, Migliazza M, Roncella R, et al. Analysis of the failure mechanisms of a weak rock through Photogrammetric measurements by 2D and 3D visions[ J ]. Engineering Fracture Mechanics, 2008 75: 652—663.
- [ 12 ] Lu Y, Li Z. Automatic object extraction and reconstruction in active video[ J ]. Pattern Recognition, 2008 41: 1159—1172.
- [ 13 ] 翟文信, 徐金明, 张学明, 等. 粉质粘土图像纹理参数的多元线性回归分析及其工程应用[ J ]. 水文地质工程地质, 2009 36 (1): 90—95.
- [ 14 ] 董宏志, 王清, 于莉, 等. 长春季季节性冻土地区土体微观结构与水分迁移的关系[ J ]. 水文地质工程地质, 2008 35 (2): 62—65.
- [ 15 ] Xu J, Zhao XB, Liu B. Digital image analysis of fluid inclusions[ J ]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007 44: 942—947.
- [ 16 ] Xu J, Liu B, Xie Q. Microscopic heterogeneity of fluid inclusion distributions in rocks[ C ] // Geotechnical Special Publication No. 179. ASCE, 2008: 205—212.
- [ 17 ] 徐金明, 张孟喜, 丁涛. MATLAB实用教程[ M ]. 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2005.
- [ 18 ] 冈萨雷斯. 数字图像处理(MATLAB版)[ M ]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [ 19 ] <http://www.math.uq.edu.au/~jks/matPiv/DownLoad/>

## Displacement field of limestone using video images from laboratory tests

XU Jinming WANG Qiang ZHOU Tingwen

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract** According to the colorful video images and experimental data from the laboratory uniaxial compression test of limestone, the displacement field was obtained in this paper. Using the digital image correlation (DIC) technique, the colorful video images were converted first into a readable format of frames, and then into the gray-scale images. A Fourier transformation and the small deformation assumption were used to match characteristics of different points in a limestone specimen. Thereafter the displacement field was obtained by cycling in the global regions of the specimen. The techniques proposed herein may provide valuable information in investigating the deformation and/or failure mechanism of rocks.

**Key words** limestone; laboratory test; video images; displacement field

责任编辑: 张明霞

(上接第 69 页)

## Analysis on construction mechanics of ventilation cabinet caverns of Putao Mountain extra long tunnel

DING Baochen JIN Xiaoguang LUO Liang HE Xi

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract** In long tunnel construction process, ventilation cabinet caverns construction is the key. Combined with the construction of ventilation cabinet caverns of Putao Mountain extra long tunnel caverns, a three-dimensional non-linear finite element model that based on DP yielding principle was established and stability of ventilation cabinet caverns surrounding rock in the construction was analyzed by ANSYS. For the example of the section where variations of stress-displacement were most significant, effects of each construction step and adit excavation on main tunnel stress-displacement and plastic zone were analyzed. Then compared with monitoring measurement information, the conclusion that calculating displacement was in accordance with monitoring measurement information was obtained. So a science basis for design and construction of tunnel ventilation cabinet caverns was offered.

**Key words** ventilation cabinet caverns; numerical analysis; construction mechanics; stability

责任编辑: 张明霞