

文章编号:1001-4888(2007)06-0605-07

数字图像相关法在相似材料模拟试验中的应用^{*}

陈荣华¹, 王路珍², 孔海陵¹

(1. 中国矿业大学 理学院力学系, 徐州 221008; 2. 盐城工学院, 江苏 224003)

摘要: 利用相似材料模拟试验研究印度某矿长壁开采采场厚硬顶板的破断规律, 针对试验中传统的位移测量法的不足, 引入了数字图像相关法。通过恰当布设模型、合理控制光照强度, 实时用高分辨率数码相机拍摄模型在开采过程中的表面变形图像, 借用数字照相图像分析与结果可视化应用软件系统 GeoDPDM 对序列照片进行相关性分析, 得到了开采过程中上覆岩层变形的位移场和应变场。将分析结果与传统测量方法所得结果对比, 得到两种方法具有较高的一致性, 并将测试精度提高到 0.6mm/pixel, 成功实现了大范围模型变形的全场、非接触式测量。

关键词: 数字图像相关法(DICM); 相似材料模拟试验; 大范围; 变形量测

中图分类号: O342 **文献标识码:** A

0 引言

目前, 对于研究采动过程中岩体变形、移动及破坏的规律, 尤其对涉及弹塑性、破碎、垮落等多种力学行为的岩体力学问题, 利用相似材料模拟试验法已被广泛认为是一种有效的研究方法。传统的模型观测方法采样点极其有限, 测量点的布置破坏了模型的几何连续性, 工作量大。利用高分辨率数码相机, 结合数字图像相关法可以克服传统测量方法的缺点, 实现全场、非接触式变形量测。

近年来, 数字图像相关法已经在材料的力学行为测试与分析^[1]、高分子材料^[2~4]、生物力学^[5~6]、动态测量^[7]等不少领域中得到应用, 尤其值得关注的是在岩石类材料小范围的变形量测上的应用。马少鹏^[8]等将数字散斑相关方法应用到花岗岩的单轴压缩以及粘滑实验中, 较好地解决了岩石材料的非均匀、非线性、各项异性等特点。潘一山^[9]等观测了砂岩和煤的变形局部化现象, 并根据变形场的图像测量了局部化带的宽度。李元海^[10~12]等将数字图像相关法应用到砂土模型试验中, 成功地再现了地基变形的全过程, 并且将数码相机拍摄的视场范围扩大到 400mm×300mm。

此前, 由于岩石结构的复杂性导致了大范围全场变形测量过程存在诸多的困难, 表现在数码相机采集图像的时间非连续性难以满足观测区内岩层破断的突变性和随机性特点、量测精度对环境光线变化敏感、图像分析时间长等。本文大胆将数字图像相关法应用在相似材料模拟试验中, 克服了上述困难, 初步实现了大范围变形量测。

1 数字图像相关法基本原理

数字图像相关法(digital image correlation method, 简称 DICM)的基本测量过程为由高分辨率数码相机记录被测物体变形过程中一系列图片, 对这些有序的图片进行相关性分析, 得到相应的位移和变形。此方法可以测量在外界因素变化时观测体表面的变形场, 具有全场、非接触、操作相对简单等优点。

* 收稿日期: 2007-06-29; 修订日期: 2007-11-24

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50490270); 973 计划资助(2007CB209408); 中国矿业大学校基金

通讯作者: 陈荣华(1961—), 男, 博士研究生, 副教授, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: xxmiao@cumt.edu.cn

方法的关键是如何将变形前后的两幅图片相匹配。首先定义变形前的图像为基准图像,变形后的图像为目标图像。要想跟踪基准图像上一点P的运动,就以P点为中心取子集f,在目标图像上搜索与之最匹配的子集g,即以Q点为中心的子集g。搜索成功后,g所对应的Q为P点变形后的位置,两点之间的坐标差即为该点的位移。搜索过程是根据统计学的相关性原理,建立一个相关函数C^[13~14],用这个相关函数来表示变形前后两幅图像的匹配程度,一般当相关函数C=1时,表示变形前后两幅图像完全匹配,当C=0时,则表示两幅图像不相关。

$$C = \frac{\sum \sum [(f - \bar{f}) \cdot (g - \bar{g})]}{\left[\sum \sum (f - \bar{f})^2 + \sum \sum (g - \bar{g})^2 \right]^{1/2}}$$

上式中:分母分别为子集f和子集g的均方根,分子为f和g之间的相关矩。

2 模型实验

2.1 模型原型

模型实验的原型是印度东部煤田有限公司(ECL)Jhanjra煤田R-VI岩层2号钻孔1#和2#煤层。煤层厚度5m,埋深251m,直接顶为平均厚度约23.6m的中砂岩,厚顶的完整性较好,厚顶上分布有岩性相对较软的页岩及页岩砂岩互层,煤层底板为砂质页岩,岩性较硬。采用长壁采煤方法,一次采全高。各主要岩层物理力学参数见表1。

表1 各主要岩层物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of main stratum

岩性		弹性模量(GPa)	泊松比	容重(g·cm ⁻³)	抗压强度(MPa)
间接顶	页岩、砂岩等	30	0.25~0.3	2.32~2.68	20~35.1
厚顶	中粒砂岩	35	0.25	2.28	35.5
煤层	煤	15	0.35	1.48	14
底板	砂质页岩	40	0.28	2.42	43.7

2.2 模型构建

根据现场实际情况和试验条件,确定相似常数为:几何相似比1:100,容重相似比1:1.7,应力相似比1:170,外力相似比1:1.7×10⁶。试验采用二维的平面应力试验台,长×宽×厚=2500mm×1320mm×200mm。试验铺设底板高度为15cm,顶板剩余高度140cm由全自动恒压水加压模拟其自重应力。试验时两端各留煤柱30cm,模拟开挖190cm(对应实际长度190m),每步开挖10cm,共开挖19步。

为了检验数字图像相关法的精确性,同时利用位移传感器进行测量,在模型背面布置3排位移测量点,其中第一排位移传感器布置在厚顶中部,其余两排依次向上每隔24cm布置一排;每排水平间距30cm,共计21个。同时根据数字图像相关法的需要,还需在模型上布置控制基准点和测点^[19,20],如图1所示。试验共设置6个十字型控制基准点,所在位置均满足控制基准点布置要求(布置在变形区域外,最好布置在无变形部位)。在模型表面布置测点,这些点由与模型色彩对比明显的材料制成,由于厚顶为主要研究对象,上覆软岩为次要研究对象,因此在厚顶处加密测点。并准确测量、记录这些控制基准点和测点的相对坐标。

2.3 试验过程

(1) 调试位移传感器及数据采集系统,待系统稳定后,准备实时测定,每2分钟采集一次数据。

(2) 为了保证所拍摄的照片光照均匀,合理控制光照强度,试验选择在晚上进行,全部照片拍摄均借助灯光完成,试验照明设备采用普通的日光灯,并实时用光照度计测量拍摄范围内的光照强度,控制序列照片的光照度差小于10Lux,保证光照均匀、避免光线强度变化的影响。

(3) 调试数码相机,确保相机固定不动。如果拍摄到的数字照片由于记录装置的原因发生偏移,在图像校准^[19]时难以保证在整个测试过程中所必需的精度。然后根据需要选择镜头、光圈和调整焦距。保证控制基准点及包含范围在拍摄范围内,且相机镜头中心轴线与观测面保持垂直。确保拍到的数字

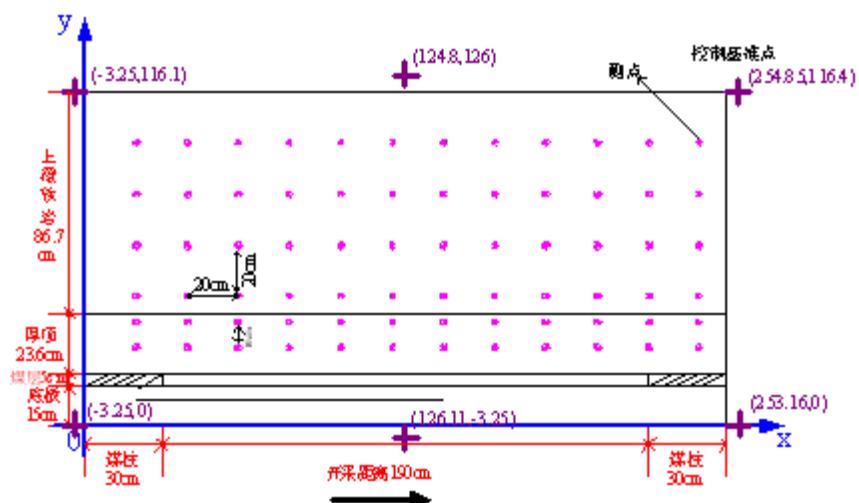


图 1 模型制作示意图

Fig. 1 The modeling graph

照片足够清晰。图像存储采用未经压缩的 RAW 格式。

(4) 按照煤层开挖步拍摄模型在开挖过程中的照片,每开挖一步拍摄一张数字照片,为了完整记录试验过程,在岩层移动变化较明显的时候增加拍摄次数,并且人工记录拍摄时间及照片序号。

3 试验结果

3.1 图像参数

如图 2 所示为试验所拍摄的模型表面变形的数字照片,其像素为 4386×2920 ,拍得数字照片的分辨率为 0.6mm/pixel 。

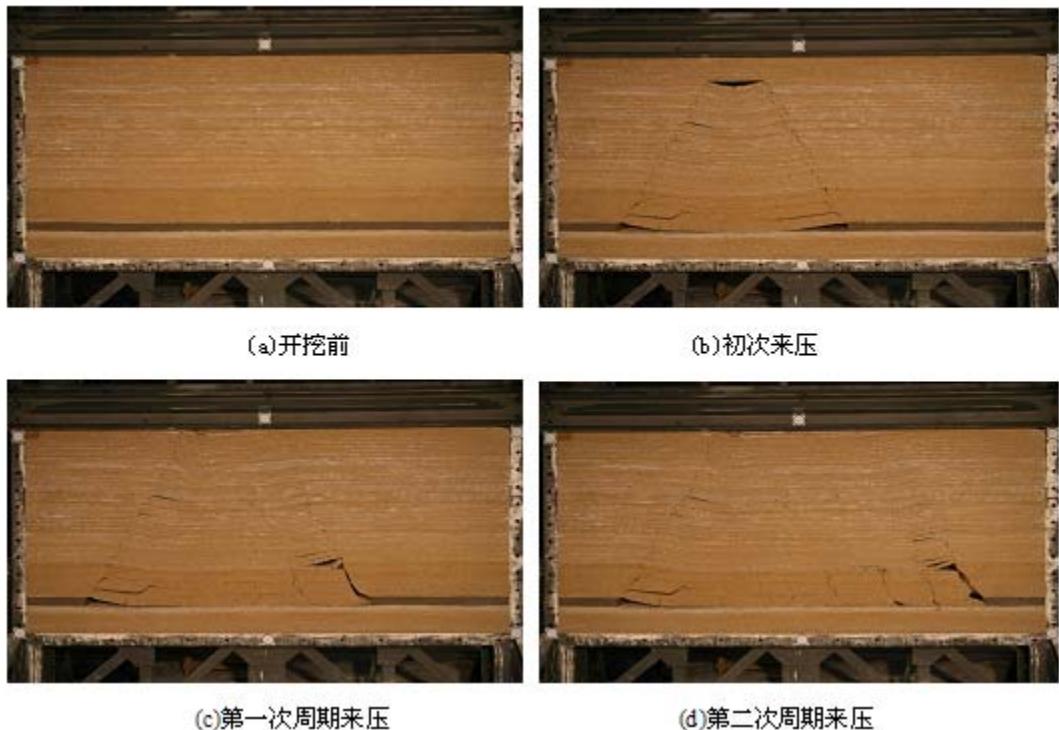


图 2 模型变形前后的数字照片

Fig. 2 Digital photos before and after the model deformation

利用中国矿业大学李元海教授研究开发的数字照相图像分析与结果可视化应用软件系统 GeoDP-DM^[10~12]进行分析。首先将拍摄的照片按照序列取具有代表性的模型表面变形照片若干张,然后将照片转换为 bmp 格式,再建立所有分析图片的控制基准点文件。根据研究需要,取煤层上覆岩层为分析对象,设定变形前图像实际分析范围为 4000×1540 像素。类似有限单元法划分网格,将图像实际分析范围以 15 个像素为间隔布设测点,共计 13566 个测点,同时,为了上覆岩层破断后准确匹配序列图像上相对应的点,将像素块的搜索范围扩大到 5 倍。

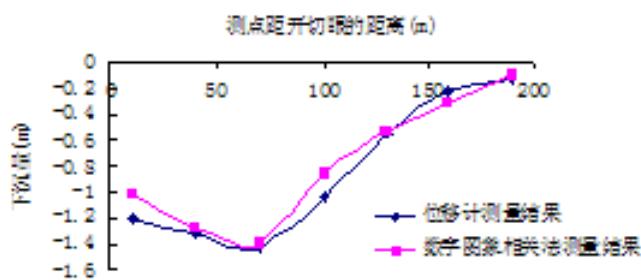


图 3 两种方法测量结果的比较

Fig. 3 Comparison of result obtained from two measurements

测量结果有较高的一致性。

3.3 全场量测结果分析

利用模型(岩土材料)本身固有的自然纹理特征以及模型表面上嵌入的人工标志点,进行图像相关性分析,计算得到随工作面推进过程中模型表面上覆岩层的变形云图。如图 4、图 5、图 6 所示为几个典型推进距离下上覆岩层的位移云图和应变云图。云图中坐标单位为 mm,横坐标为工作面推进方向,0 点处为开切眼、-300 表示模型左端留 300mm 煤柱;纵坐标为岩层高度,0 点取在模型最底端,200~1100 表示煤层上方的厚顶及其上覆岩层到模型底部的距离。

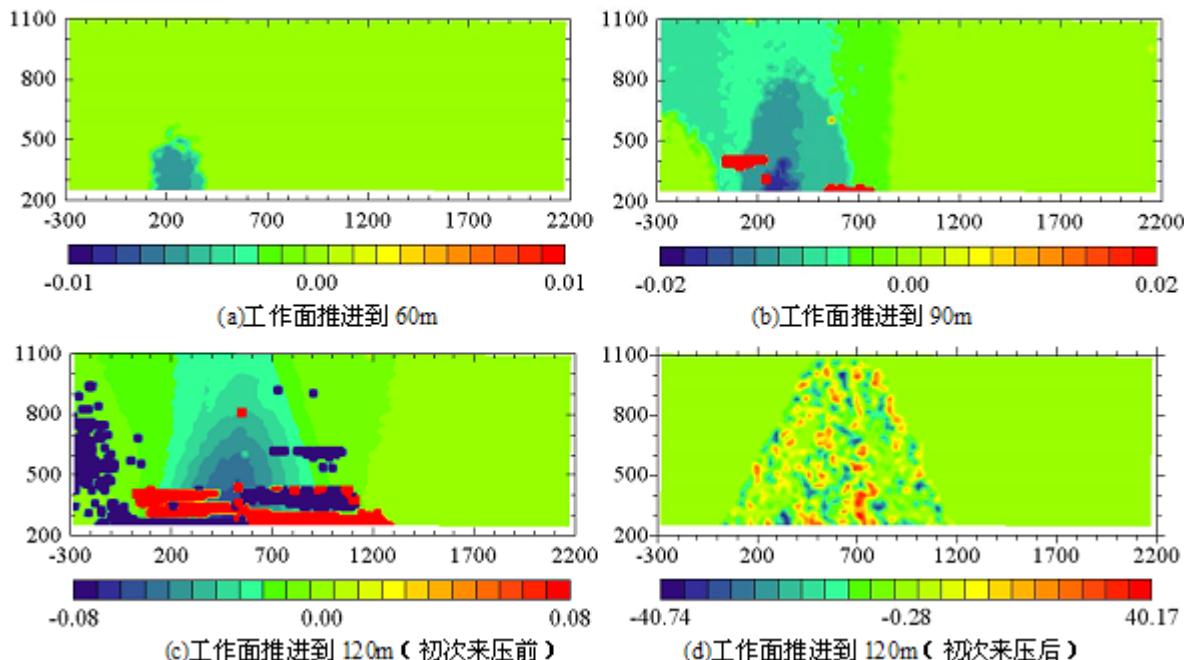


图 4 随工作面推进上覆岩层水平位移云图(单位 mm)

Fig. 4 Nephogram of horizontal displacement in overlying strata in different digging distance

由图 4 到图 6 可以看出:

整体上,水平位移和垂直位移伴随着工作面向前推进在不断地增大。其中水平位移方向有规律地

3.2 精度检验

为了验证数字图像相关法在相似材料模拟试验中应用的正确性,对数字图像相关法的测量结果和用传统方式的位移计测量结果进行对比。图 3 为用两种方法测量的当煤层开挖到 120m 时厚顶上覆软岩距离煤层约 36m 的一条水平测线上的 7 个测点的下沉量。可以看出,将数字图像相关法引入到相似材料模拟实验中得到的分析结果与传统的位移计

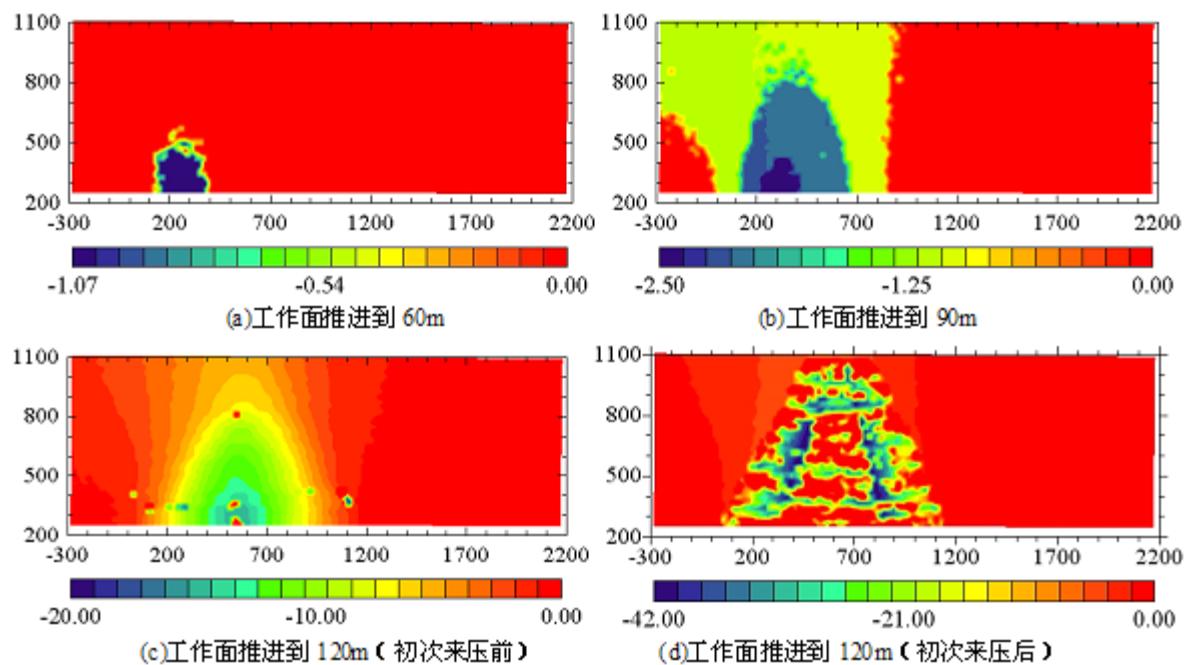


图5 随工作面推进上覆岩层垂直位移云图(单位 mm)

Fig. 5 Nephogram of vertical displacement in overlying strata in different digging distance

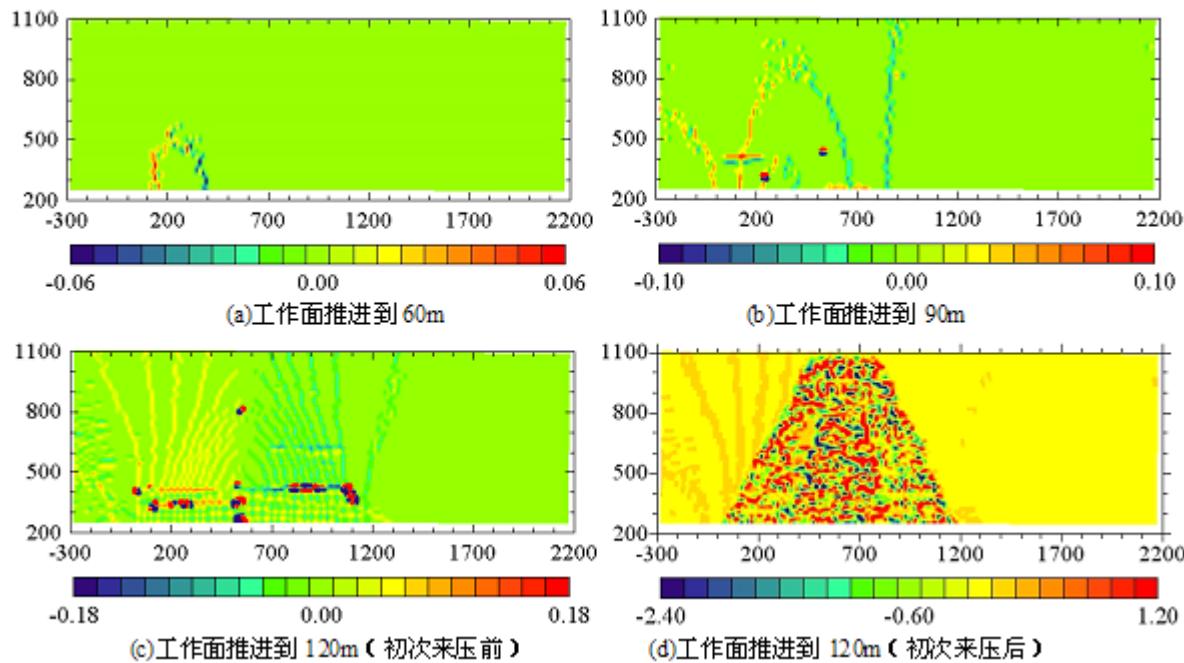


图6 随工作面推进上覆岩层剪应变云图(单位 mm)

Fig. 6 Nephogram of shear strain in overlying strata in different digging distance

指向工作面推进方向或与工作面推进方向相反,而垂直位移都是垂直向下的。工作面推进到 60m 时,水平位移和垂直位移基本分布在厚顶,位移很小,水平位移与采场推进方向相反,在工作面上方厚顶形成细微剪切破坏带。直至工作面推进到 120m 初次来压前,位移量不断增大,剪力也不断增大,切眼和工作面两端剪力的方向相反,剪切破坏带越来越明显。发生初次来压时,顶板突然垮落,水平位移与垂直位移急剧增大,因为试验中模型的组成为沙子、石灰、石膏、云母粉、水,形成的模型总体上还是松散状的,所以发生垮落时,由于顶板岩层破碎、松散,云图分布无规律。

4 结论

本文采用数字图像相关法,监测模拟开采过程中上覆岩层的变形全过程,研究结果表明:

- (1) 将数字图像相关法应用于相似材料模拟试验,模型开挖过程中,对应不同推进距离,用高分辨率数码相机拍摄模型变形图像,对图像进行相关性分析,可得到围岩的位移云图和应变云图。
- (2) 经过精度检验,已知用数字图像相关法和用位移传感器两种测量方法测得的上覆岩层下沉量有较高的一致性,同时该方法弥补了传统的位移点测量法的缺点。
- (3) 研究结果充分表明将数字图像相关法应用在大范围变形量测中是可行的。但是由于初次来压之后,上覆岩层在较大范围内出现了大变形,要准确匹配到变形前相对应的点比较困难,因此继续将数字图像相关法应用到岩石模型上,克服岩石材料的大变形特性,还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] Wang Huaiwen, Kang Yilan. Digital speckle correlation test for fracture of thin film[C]. In: 10th international conference on fracture, Honolulu, 2001-12-02-06. Oxford: Elsevier Science, 2001.
- [2] Kang Yilan, Zheng Gaofei, Qin Qinghua. Effect of moisture on mechanical behavior of polymer by experiments[J]. Key Engineering Materials, 2003, 25(1-2):7~12.
- [3] Chevalier L, Calloch S, Hild F, MarcoY. Digital image correlation used to analyze the multiaxial behavior of rubberlike materials[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2001, 20(1):169~187.
- [4] Wang Y, Cuitino A M. Full-field measurements of heterogeneous deformation patterns on polymeric foams using digital image correlation[J]. International Journal of Solids and structures, 2002, 39(13-14):3777~3796.
- [5] Nicolella D P, Nicholls A E, Lankford J, Davy D T. Machine vision photogrammetry: a technique for measurement of micro structural strain in cortical bone[J]. Journal of Biomechanics, 2001, 34(1):135~139.
- [6] Zhang D S, Eggletio C D, Arola D D. Evaluating the mechanical behavior of arterial tissue using digital image correlation[J]. Exp Mech, 2002, 42(1):409~416.
- [7] 陈思颖,黄晨光,段祝平.数字散斑相关法在高速变形测量中的应用[J].中国激光,2004,31(6):735~739(Chen Si-ying, Huang Chen-guang, Duan Zhu-ping. Digital Speckle Correlation Method and Its Application on Impact Deformation Measurement. Chinese Journal of Lasers, 2004,31(6):735~739(in Chinese))
- [8] 马少鹏.数字散斑相关方法在岩石破坏测量中的应用[D].北京:清华大学,2003 (Ma Shaopeng. Development and Application of Digital Speckle Correlation Method of Failure Measurement for Rock Materials. Beijing: QinHua University, 2003(in Chinese))
- [9] Pan Yi-shan, Yang Xiao-bin, Ma Shao-peng. Study on deformation localization of rock by white light digital speckle correlation method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Enfineering, 2002, 24(1):98~100.
- [10] 李元海,靖洪文,朱合华等.数字照相量测在砂土地基离心试验中的应用[J].岩土工程学报,2006,28(3):306~311(LI Yuan-hai, JING Hong-wen, ZHU He-hua, et al. Experimental investigation on progressive deformation patterns of sand foundation in centrifuge test using digital photogrammetry. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3):306~311(in Chinese))
- [11] 李元海,靖洪文,曾庆有.岩土工程数字照相变形量测系统研发与应用[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增2):3859 ~ 3866 (LI Yuan-hai, JING Hong-wen, Zeng Qingshou. Development and application of digital photogrammetry software package for geotechnical experiment. Chinese Jounal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(增2):3859 ~ 3866(in Chinese))
- [12] 李元海,朱合华,上野胜利,望月秋利.基于图像相关分析的砂土模型试验变形场量测[J].岩土工程学报,2004,26(1):36~41(LI Yuan-hai, ZHU He-hua, Katsutoshi Ueno, Akitoshi Mochizuki. Deformation field measurement for granular soil model using image analysis. Chinese Jounal of Geotechnical Engineering, 2004,26(1):36~41(in Chinese))
- [13] 范嘉白,金观昌,徐秉业.一种新的数字散斑相关方法及其应用[J].力学学报,1994,26(5):599~607(Rui Jiabai, Jin Guanchang, Xu Bingye. A New Digital Speckle Correlation Method and Its Application. ACTA Mechanica Sinica, 1994, 26(5):599~607(in Chinese))

- [14] 孙一翎,李善祥,李景镇. 数字散斑相关测量方法的研究与进展[J]. 光子学报,2001,30(1):54~57(Sun Yiling, Li Shanxiang, Li Jingzhen. Investigation and modification of the digital speckle correlation method. ACTA Photonica Sinica, 2001,30(1):54~57(in Chinese))

Application of Similar Material Simulating Experiment Based on DICM

CHEN Rong-hua¹, WANG Lu-zhen², KONG Hai-ling¹

(1. School of Sciences, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China;

2. Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224003, China)

Abstract: Similar material simulating experiment was used to analyze failure characteristics of the overlying strata in a longwall-mined coal mine in India. DICM (digital image correlation method) was brought in similar material simulating experiment to compensate the lack of traditional mechanical point measurement. Through proper layout of mode and reasonable control of illumination intensity, a high-resolution digital camera was used to take real-time photos of the model surface deformation. A visual application system GeoDPDM based on DICM was used to analyze correlation in the series photos. The displacement field and strain field in overlying strata during mining process were obtained. Comparing the analysis results with the results obtained by traditional measurement, it is found that these two methods are consistent and measurement accuracy is improved up to 0.6mm/pixel with successful full-court and noncontact measurement of large-scale model deformation.

Keywords: digital image correlation method (DICM); similar material simulating experiment; large-scale; deformation measurement