

基于数字图像相关的力学测试系统设计与应用

徐少波¹,顾国庆¹,于小娟¹,邱成春¹,高 红²,顾 鑫³

(1. 盐城工学院学院 土木工程学院,江苏 盐城 224002;
2. 盐城工学院学院 汽车工程学院,江苏 盐城 224002;
3. 盐城工学院学院 机械工程学院,江苏 盐城 224002)

摘要:针对电测方法需在试件表面粘贴应变片及单点测量局限,将数字图像相关方法(Digital Image Correlation, DIC)引入到材料力学性能测试分析中。设计二维 DIC 系统,并将其应用于三点弯曲沥青混凝土梁的变形和应变全场测试。根据应变云图,可以直观地观察到弯曲正应变沿梁横截面线性分布的特点。实验结果表明,DIC 方法可以实现变形和应变分布的全场非接触和准确测量,可为土木工程试验提供可靠的测试手段。

关键词:力学测试;沥青混凝土;数字图像相关;全场测量

中图分类号:O348.1 文献标识码:A 文章编号:1671-5322(2018)04-0069-04

数字图像相关方法(Digital Image Correlation, DIC)是当前国内外力学工作者广泛使用的一种先进光学测试技术,具有非接触全场测量、实验装置和操作过程简便、抗干扰能力强、适用范围广等优点^[1-3]。目前,DIC 方法在实验力学、航空航天、材料科学、汽车工业、土木工程等众多领域有着非常广泛的应用^[4-9]。在工程材料力学性能测试分析方面,尤其是土木工程材料,及时引入这一先进测试方法显得尤为必要。利用二维 DIC 方法开展土木材料力学测试分析,可以准确直观地获得材料表面的全场变形及应变分布,能够更好地满足工程实验测试的要求,更能为一些利用基于应变片的传统接触式电测方法难以测量的试件提供一个新的研究途径^[10]。

本文简要介绍 DIC 方法的基本原理,并设计一套结构简单的基于 DIC 方法的材料力学测试系统,弥补传统接触式测量技术的不足。开展三点弯曲沥青混凝土梁测试实验研究,采用设计的 DIC 测试系统测量弯曲梁表面全场变形和应变分布,并验证弯曲正应变沿梁横截面线性分布的

特征。

1 数字图像相关法基本原理

二维 DIC 方法是根据物体变形前后散斑场的互相关性来获取物体的位移和变形,基本原理如图 1 所示。在变形前的散斑图中,取以待求点(x,y)为中心的N×N的矩形图像子区,在变形后的目标散斑图像中通过一定的搜索方法,并按某一相关函数来进行相关运算,找到与变形前所取矩形子区相关系数为最大值的以点(x',y')为中心的N×N目标矩形区域,从而确定参考散斑图像子区的像素位移。

采用抗干扰能力较强的标准化协方差相关函数来评价图像子区的相似程度:

$$C = \frac{\sum \sum [(f - \langle f \rangle) \cdot (g - \langle g \rangle)]}{[\sum \sum (f - \langle f \rangle)^2 \cdot \sum \sum (g - \langle g \rangle)^2]^{\frac{1}{2}}} \tag{1}$$

其取值范围为[-1,1]^[3],相关系数等于1表示完全相关,相关系数等于0表示完全不相关。

收稿日期:2018-03-17

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20160437,BK20170477);江苏省科技厅社会发展项目(BE2015658);江苏省高等学校大学生创新创业训练计划一般项目(201710305047Y)

作者简介:徐少波(1995—),男,江苏南通人,主要研究方向为材料测试与分析技术。

通讯作者:顾国庆(1984—),男,江苏盐城人,讲师,博士,主要研究方向为光测力学及图像处理。

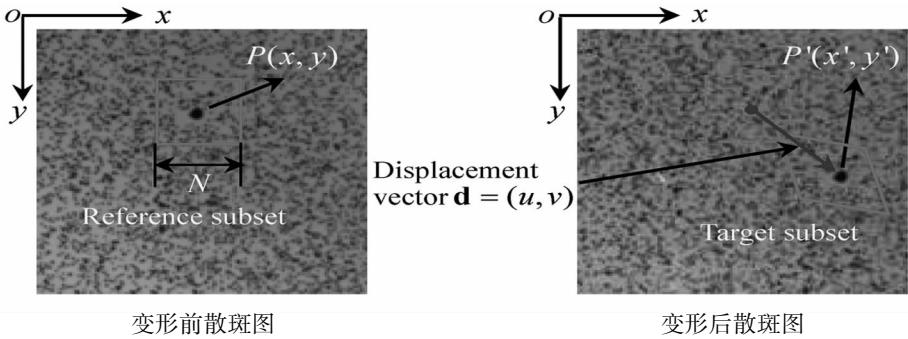


图 1 二维 DIC 基本原理
Fig. 1 Principle of two-dimensional DIC

其中 $f = f(x, y)$, $g = g(x + u, y + v)$ 分别为以源点和目标点为中心的散斑图的灰度值; u, v 为其水平和垂直方向位移值; $\langle f \rangle$ 和 $\langle g \rangle$ 为其系统平均灰度值。

2 数字图像相关测试系统设计

二维 DIC 力学测试系统如图 2 所示, 主要包含待测试件、冷光源、CCD 和计算机采集系统。

冷光源为白光, 由光纤灯产生。采用加拿大 POINT GREY 公司的分辨率为 2428×2048 Pixel 的单色 CCD (型号为 GS3-U3-51S5M-C) 和日本 FUJINON 公司的 500 Megapixel 的镜头 (型号为 HF16SA-1) 作为数字散斑图像采集装置。计算机采集系统主要由图像采集卡和图像采集、相关运算、数据处理等软件模块组成。

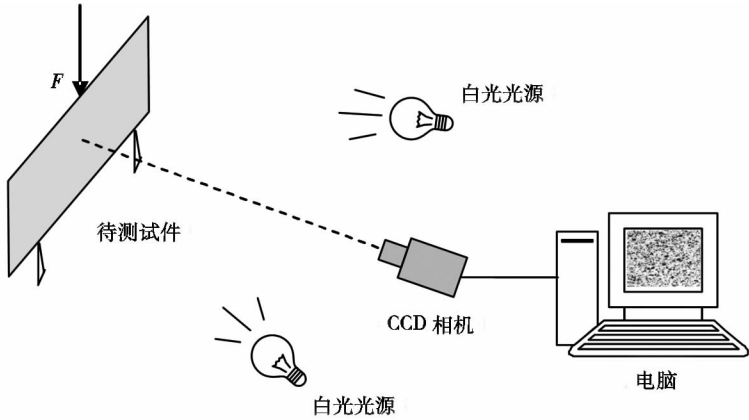


图 2 DIC 测试系统示意图
Fig. 2 Schematic diagram of DIC testing system

3 数字图像相关测试系统应用

采用长方形沥青混凝土试块 (180 mm × 30 mm × 10 mm) 进行三点弯曲实验。试块表面经粗砂纸打磨, 产生粗糙的精细结构, 形成高质量的天然散斑场, 以确保得到较高的相关系数值从而提高 DIC 方法的测量精度。试块置于小型试验机上固定好, 准备实施三点弯曲加载。采用经光纤传输的白光冷光源对试件表面进行照明, 调试光路, 用带字的纸张确保成像清楚。利用 CCD 相机采集加载弯曲变形前后的两幅数字散斑图像, 如图 3 所示。

打开 DIC 分析软件, 分别输入变形前后的两幅数字散斑图。在图 3a 上选定一个矩形测试区域, 子区设置为 21×21 pixel, 计算步长设置为 5 pixel, 点击相关计算, 软件将对测试区域内以步长为大小的子区自动进行全场相关计算。计算完成以后, 即可显示变形及应变的计算结果, 图 4 所示为 DIC 计算出的 x 方向的变形场 u , 而图 5 所示为 x 方向的应变场 ϵ_x 。从应变分布图中不难发现, ϵ_x 在试块横截面上沿 y 方向线性分布, 上部受压, 下部受拉。DIC 测量结果直观地验证了试块横截面上弯曲正应变的线性分布特点。

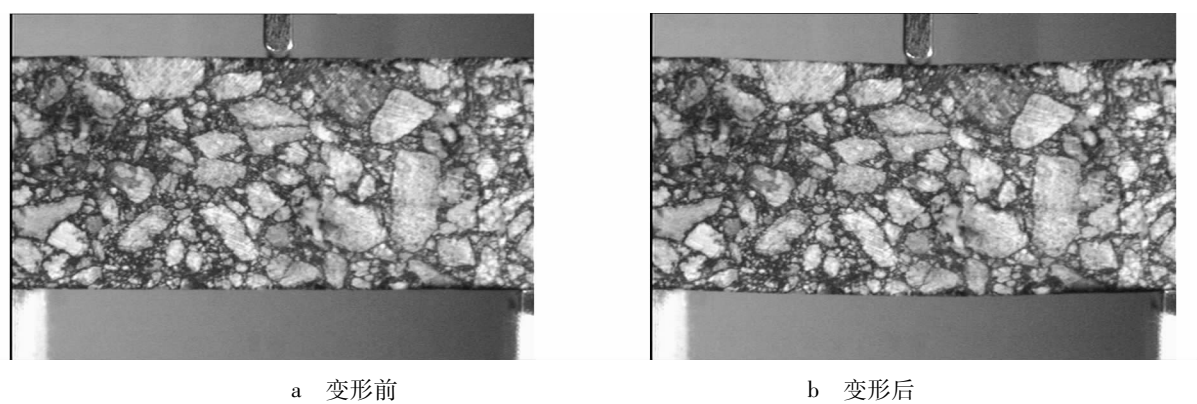


图 3 天然散斑图
Fig. 3 Natural speckle patterns



图 4 x 方向的变形场 u
Fig. 4 u -field in x -direction

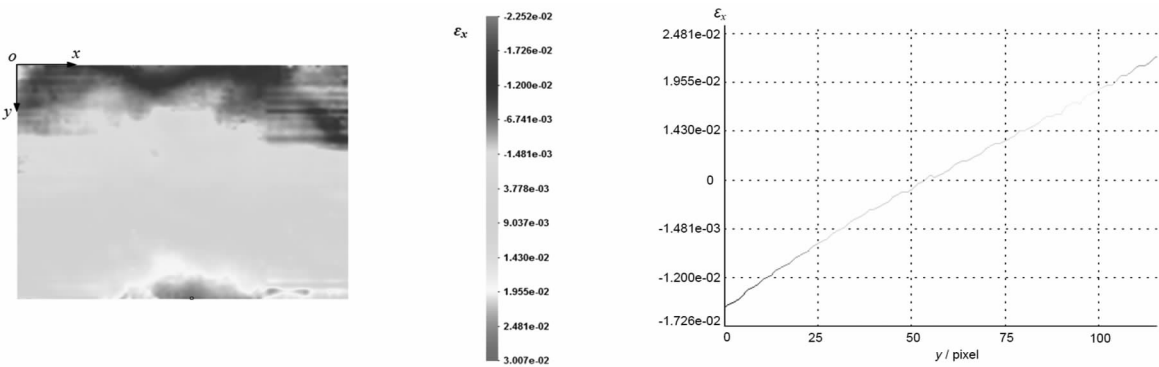


图 5 x 方向的应变场 ε_x
Fig. 5 ε_x -field in x -direction

4 结 论

利用 DIC 方法实现了三点弯曲梁的变形及应变全场非接触测量,测量结果充分验证了弯曲正应变沿梁横截面线性分布的特点。DIC 方法具

有以下优点:光学装置简单、非接触全场测量;被测对象广泛,具有天然纹理表面或者表面能够制作良好人工散斑的材料均可成为被测对象;测量范围较宽及测量精度较高;实时动态、自动化程度较高。

参考文献:

[1] YAMAGUCHI I. A laser-speckle strain gauge[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1981,14(11):1270-1273.

[2] PETER W H, RANSON W F. Digital imaging technique in experimental stress analysis[J]. Optical Engineering, 1982,21(3):427-431.

[3] PAN B, QIAN K M, XIE H M, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review[J]. Measurement Science and Technology, 2009,20(6):1-17.

[4] 刘恒彪,周亚杰,王昌灵. 双波长数字散斑相关法表面粗糙度测量[J]. 光学学报,2011,31(4):133-139.

[5] 顾国庆,王开福,许星. 基于数字图像相关的刚体面内微小转动测量及转动中心定位[J]. 中国激光, 2012,39(1):185-191.

[6] ABEDIN K M, WAHADOSZAMEN M, HAIDER A F M Y. Measurement of in-plane motions and rotations using a simple electronic speckle pattern interferometer[J]. Optics & Laser Technology, 2002,34(4):293-298.

[7] 汪敏,胡小方,伍小平. 物体内部三维位移场分析的 digital 图像相关方法[J]. 物理学报,2006,55(10):5135-5139.

[8] 张朝阳,孔祥明,卢子臣. 用数字图像相关法研究聚合物改性砂浆的力学性能[J]. 硅酸盐学报,2018,46(2):187-192.

[9] 刘强,周轶昊,孙晨,等. 基于数字图像相关的裂纹端部全场三维变形实验研究[J]. 实验力学,2018,33(1):49-58.

[10] 顾国庆,徐桂中,徐兵,等. 数字散斑干涉法在工程力学实验教学中的应用[J]. 实验室科学,2016,19(6):46-48.

Design and Application of Mechanical Testing System based on Digital Image Correlation

XU Shaobo¹, GU Guoqing¹, YU Xiaojuan¹, QIU Chengchun¹, GAO Hong², GU Xing³

1. School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224002, China;

2. School of Automotive Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224002, China;

3. School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224002, China

Abstract:In order to overcome the limitations of both requirement of sticking strain gauge upon specimen surface and one single point measurement in electronic testing method, digital image correlation (DIC) method is introduced in the mechanical behavior analysis of materials. Two-dimensional DIC system is designed and applied for measurement of the asphalt concrete beam subjected to three-point bending loads. The whole-field deformation and strain distributions of the asphalt concrete beam are determined by the designed DIC system. According to the strain distributions, the linear distribution of normal strain along the cross-section of the bending beam is directly observed. The experimental results indicate that DIC can be used for non-contact and accurate measurement of full-field deformation and strain distributions, and can provide a reliable measurement technique for civil engineering experiment.

Keywords:mechanical testing; asphalt concrete; digital image correlation; full-field measurement

(责任编辑:张英健)