



基于三维数字照相量测技术的风荷载作用下 玻璃幕墙变形量测研究

陈元义¹, 刘文白¹, 原媛¹, 孔戈², 高建卫²

(1. 上海海事大学海洋科学与工程学院, 上海 201306; 2. 上海众材工程检测有限公司, 上海 201209)

摘要: 针对玻璃幕墙在风荷载作用下变形量测方法不能解决全场、复杂节点变形的问题, 提出一种基于三维数字照相变形量测技术的光学方法。通过使用双摄像机的三维数字照相量测技术, 测定玻璃幕墙在不同风荷载作用下的应变和挠度, 然后通过与传统方法应变片和百分表测量以及有限元数值模拟所得的数据进行比较, 来验证三维数字量测方法在玻璃幕墙变形量测的可行性。试验结果表明: 在相同的风荷载作用下, 通过 3 种方法所测得的应变-位置和挠度-位置的比较, 说明三维数字照相量测试验测量得到的玻璃幕墙表面变形数据是准确的, 数字照相量测方法可以应用于玻璃幕墙表面变形量测。

关键词: 三维数字照相量测; 玻璃幕墙; 风荷载; 变形测量

中图分类号: TU382

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2019)06-0029-06

Research on three-dimensional deformation measurement for glass curtain wall under wind load by the technique of DPDM

CHEN Yuanyi¹, LIU Wenbai¹, YUAN Yuan¹, KONG Ge², GAO Jianwei²

(1. College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Public Material Engineering Testing Co., Ltd., Shanghai 201209, China)

Abstract: In order to solve the problem that the deformation measurement method of glass curtain wall under wind load can't solve the deformation of whole site and complex nodes, an optical method based on three-dimensional digital photographic deformation measurement technology is proposed to measure the deformation of glass curtain wall under the action of wind. Through the use of two-camera three-dimensional digital camera measurement technology, the strain and deflection of the glass curtain wall under different wind loads are measured, and then compared with the data obtained by traditional methods of strain gauge and dial indicator measurement and finite element numerical simulation. The feasibility of three-dimensional digital measurement methods in the deformation measurement of glass curtain wall is Verified. The test results show that under the same wind load, the comparison of the strain-position and deflection-position measured by the three

收稿日期: 2018-04-12; 收到修改稿日期: 2018-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078228); 国家海洋公益性行业科研专项经费项目(201105024-5); 2013 年上海市研究生教育创新计划实施项目“学位点建设培育”(20131129); 上海市科学技术委员会立项项目(15DZ0500700)

作者简介: 陈元义(1991-), 男, 河南信阳市人, 硕士研究生, 专业方向为数字图像。

methods shows that the three-dimensional digital camera test is accurate in measuring the surface deformation of the glass curtain wall. Photogrammetry methods can be applied to the surface deformation measurement of glass curtain walls.

Keywords: three-dimensional digital camera measurement; glass curtain wall; wind load; deformation measurement

0 引言

玻璃幕墙作为一种新型建筑围护结构,因其采光好,防风雨,美观的特性,已经成为当今建筑外墙的主流材料^[1]。玻璃幕墙由玻璃面板和承载结构组成^[2]。虽然我国在玻璃幕墙行业已经取得了很好的成果,但是缺乏对玻璃幕墙结构的基础研究^[3-4]。基础研究和数据分析的缺失为日后玻璃幕墙的使用埋下了巨大的隐患。因此,对玻璃幕墙设计及使用过程中应变及挠度的研究不容忽视。

目前,玻璃幕墙应变的测量是将应变片安装在被观测物体上;对于挠度的测量主要是利用百分表,这种传统方法只能得到单个测点的应变和挠度值^[5-6]。而采用数字图像相关法测量玻璃幕墙变形的研究目前还很少,该方法有全场性、非接触的特点^[7-11]。黄琳洁等通过二维数字照相量测方法所得的玻璃幕墙表面应变值与应变片量测所得的应变值相差非常大。此外,二维数字照相量测试验不能得出玻璃幕墙的挠度值。二维数字照相量测主要用于物体表面的位移测量,它在使用的过程中有局限性:被测物表面必须是或近似平面;被测物的运动主要是平面内运动,离面运动很小或没有;相机光轴必须垂直或近似垂直被测物表面^[12]。

在实际应用过程中,被测物体往往不是一个平面,发生的变形也不仅仅只是面内位移。为了满足对平面或曲面物体表面变形测量的要求,采用了以双相机拍摄的三维数字照相量测方法。该方法采用双目立体视觉原理^[13],为改善目前玻璃幕墙的单点式挠度及应变测量方法,更加全面而直观地展示被测物体整体的受力状态及变形状态,尝试将三维数字照相量测方法引入玻璃幕墙的应变和挠度量测分析中。通过采用三维数字照相量测方法,研究玻璃面板的变形情况,与应变片和百分表所测得的测点数据进行对比,验证三维数字照相量测方法在风荷载作用下玻璃幕墙变形量测的可行性。

1 实验

1.1 三维数字照相量测技术基本原理

基于双目立体视觉原理的三维数字照相量测即可满足非平面或曲表面物体的三维形貌以及三维变形量测。双目立体视觉是基于人的视觉方式的仿生学原理,通过两台相机从不同空间位置来观察同一物体表面上的一点,根据其在两幅图像中的匹配像素点及相机的空间位置和光学参数,计算出其空间的三维坐标^[14-15]。

三维照相量测技术包含4个关键部分:1)图像采集,两个相机同步获取被测物图像;2)图像匹配,在两幅图像中寻找对应点;3)三维重建,标定两台相机成像模型参数,结合图像匹配得到的对应点坐标计算该点的三维坐标;4)变形计算,由同一点变形前后的三维坐标求解该点变形。在这4个关键部分中,2)和3)是两大核心。

在利用三维数字照相量测技术进行测量的过程中,为了确定空间中的一点在二维图像中的对应点的位置,必须通过相机的参数建立几何模型,通过相机的标定就可以确定这些参数。用于标定的标定板应具有易识别、易提取的特征,常见的标定板有黑白棋盘格标定板图1(a)和圆点标定靶(图1(b))。

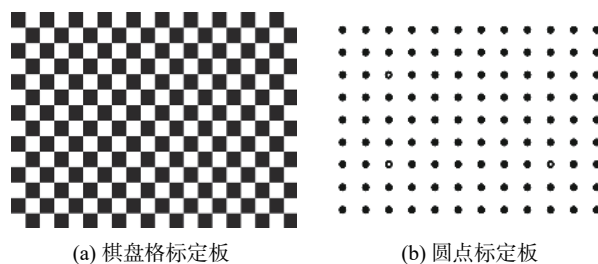


图1 标定板

1.2 实验材料与仪器

玻璃幕墙试件由玻璃面板和铝塑板材质密封箱体组成,玻璃面板安置在密封条上,外侧用硅胶密封。玻璃面板为800 mm×800 mm×6 mm的双层钢化玻璃。试验场地和材料由上海众材工程检测有限

公司提供。

传统测量仪器有: 应变仪(型号为 DH3821)、BF120-3CA 三向直角应变花; 测量挠度的百分表和磁性表座一套。工业相机(型号为 GS3-PGE-91S6M-C); PMLAB 图像处理软件。

1.3 实验方法

图 2 为实验现场布置示意图, 两台相机分别安装在左右两边的三脚架上, 相机相距 0.8 m, 相机与玻璃面板的距离为 1.2 m。通过数码相机量测方法, 采集在 0, 500, 1 000, 1 500, 2 000 Pa 荷载作用下玻璃幕墙的图像。然后将采集到的图片导入到图形分析软件 PMLAB 中, 得到应变云图和挠度云图。

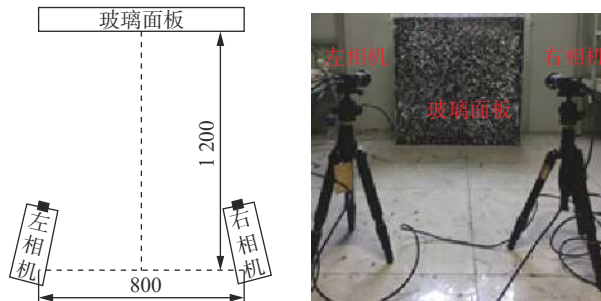


图 2 现场布置示意图(单位: mm)

利用传统测量贴应变片和架设百分表方法, 分别测量幕墙在施加 500, 1 000, 1 500 Pa 和 2 000 Pa 荷载作用下 4 个位置的应变值和挠度值。

为与试验作对比, 建立有限元数值模型。模型尺寸为 80 cm×80 cm。采用 SHELL181 二维单元来模拟玻璃面板。利用二维单元模拟玻璃面板的受力情况, 主要优点在于每个节点具有 6 个自由度。SHELL181 单元适合对具有一定厚度的壳体结构进行分析, 是一个 4 节点单元, 每个节点单元具有 6 个自由度, 可以支持线性分析、材料塑性、应力刚化、大应变和大变形分析。设置玻璃面板弹性模量

为 72 GPa, 泊松比 0.3。在行业标准 JGJ 102-2013 《玻璃幕墙工程技术规范》^[16] 中将玻璃面板视为简支板。因此, 在有限元模型的建立过程中, 限制 x, y, z 3 个方向的平动约束, 而不限制 3 个方向的转动约束。网格划分采用 20 mm×20 mm 的正方形网格。

2 结果与讨论

利用三维数字照相量测系统获取单元玻璃幕墙的表面变形信息, 对玻璃幕墙逐级加压, 计算幕墙表面的全场位移和应变数据; 同时, 在幕墙表面布置应变片和百分表, 采集对应的应变和挠度信息; 进一步建立玻璃幕墙的有限元模型, 模拟各级风压荷载作用下的幕墙响应行为; 比较分析上述数字照相量测技术、应变片测量、百分表测量和有限元模拟的数据, 验证数字照相量测技术的可行性。

2.1 三维应变云图结果分析

通过三维数字照相量测试验, 所得玻璃面板应变分布云图, 如图 3 所示。由图可知在不同荷载作用下, 玻璃面板上的应变值呈现出中间大、四周小的趋势; 随着荷载的增加, 在面板相同位置处应变值在增加; 云图四周出现应变值激增的情况, 通过分析可知与拍摄光线以及周边玻璃面板密封有关, 但总体变化情况符合玻璃面板在受到外荷载后应变的变化规律。

在上图应变云图上取得 4 个不同位置测点的应变值, 同理通过应变计布置在相同位置处采集应变值, 将所得数值绘制在图 4 中进行分析。可以得出, 对于同一荷载作用下, 位置 1 到位置 4 应变值逐渐增大; 而在相同位置处, 随着荷载的增加应变值也随之增加, 综合分析可知这是由于四边约束玻璃板在受到外荷载作用下, 中心位置应变值最大, 沿着对角线往四周方向逐渐递减。

为了更好的做比较, 图 5 将两种不同方法下所

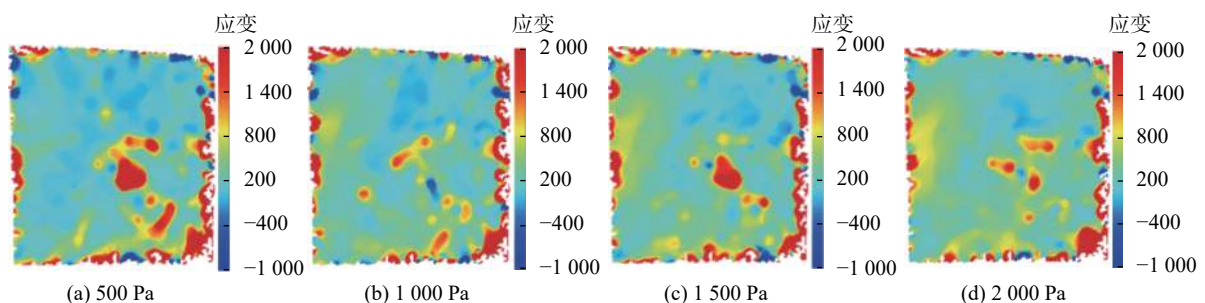
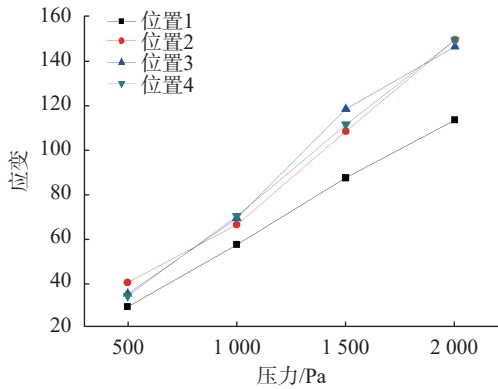
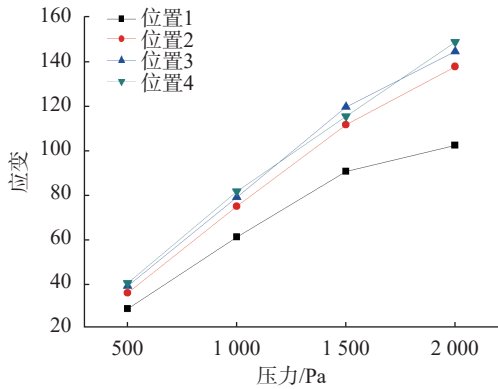


图 3 三维数字照相量测方法所得应变云图



(a) 应变片测量下



(b) 三维数字照相量测下

图4 各测点应变随压力变化曲线

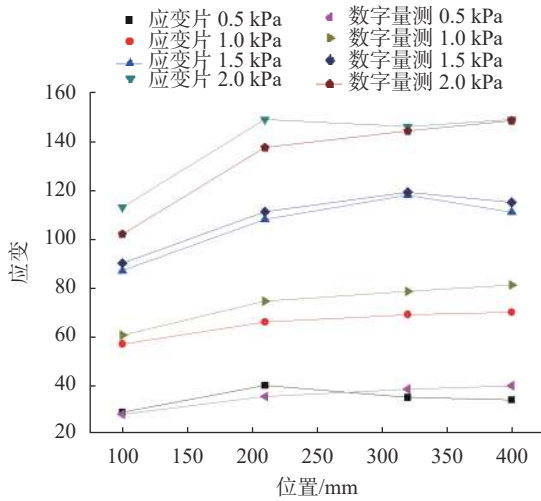


图5 应变片与三维数字照相量测方法所得测点应变值比较

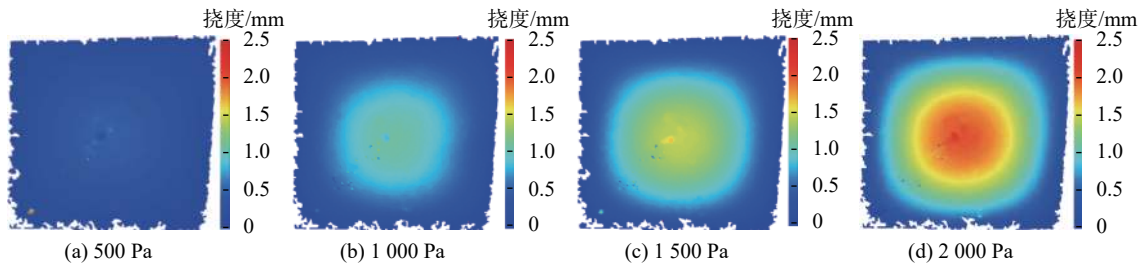


图6 三维数字照相量测方法所得挠度分布云图

得应变值放在同一曲线图中,由图可以看出,在同一荷载作用下,通过应变片测量得到的应变值整体要小于数字量测所得应变值;另外通过对比分析数值变化,可得出两种不同方法所得的应变随荷载变化曲线基本一致,说明两种方法得到的结果吻合。

2.2 三维数字照相量测方法测得挠度云图分析

各荷载条件下,三维数字照相量测试验所得的玻璃面板的挠度 d_z 分布如图6所示。从图中可看出,在1 kPa 荷载作用下,面板挠度云图呈圆环形分布,即中间大,四周小;随着荷载的增加,在同一位置处挠度值也在增加。

2 000 Pa 下三维数字量测方法与有限元模拟方法得到的玻璃幕墙挠度云图,如图7所示。可以看出,利用三维数码相机量测和数值模拟得到的挠度云图都是中心位置挠度最大,然后呈环形向四周扩散。

两种方法所得结果存在误差,其原因有:1)有限元模型对于玻璃幕墙四边的约束条件为限制 x, y, z 3 个方向的平动,而没有限制 3 个方向的转动。2)实际试验中,玻璃幕墙四边是用结构胶进行密封,在风荷载的作用下,结构胶也会发生一定量的形变,从而导致有限元模型测量得到的应变和挠度值与试验过程测量得到的应变和挠度值存在误差。3)有限元模型在加载的过程中采用均布荷载的加载方式,而在实际试验过程中,对于玻璃面板而言风并不是完全垂直均匀地吹在玻璃面板上,在边角位置会受到结构胶粘结不均匀的影响,因此数值上存在一些差异。

2.3 三维数字量测方法测得挠度的可行性分析

用挠度计测得位置 1~4 测点的挠度值 d_z ,由数字量测所得云图中提取相同位置处不同荷载作用下的挠度值,同理提取经过有限元数值模拟中相同位置不同荷载作用下的数值,将所得数值绘制在如下曲线图中。将各方法所得挠度值单独绘制在曲线

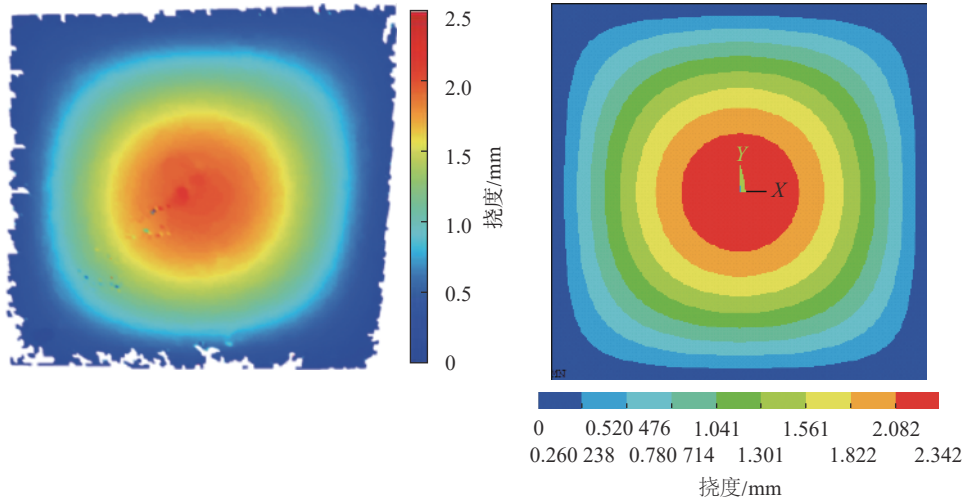


图 7 三维数字照相量测与数值模拟方法挠度云图对比

图中, 如图 8 所示, 对于挠度计、数码量测技术和数值模拟这 3 种不同测量方法, 在同一荷载作用下, 从位置 1 至位置 4 所测得挠度值逐渐递增; 在同一测点位置处, 随着荷载的增大, 挠度值呈现递增趋势。由图表明玻璃幕墙的玻璃面板中心处变形最大, 而边缘变形较小。

为了将 3 种不同方法所得数值做比较, 将 3 种方法所得数值绘制在同一曲线图上, 如图 9 所示, 在相同的风荷载作用下, 3 种方法所测得的挠度值在测点 1~4 逐渐增加, 所得位置-挠度曲线基本吻合。整体来说, 随着荷载的增大, 同一位置处的挠度也增大。当风荷载的增幅相同时, 越靠近玻璃面板中心, 挠度的增幅越大。在相同风荷载条件下, 越靠近玻璃面板中心, 其挠度越大, 靠近玻璃幕墙框架处的挠度几乎为零。为进一步分析 3 种方法的误差, 将 3 种方法所采集到的数据两两对比, 计算误差值。百分表测得的挠度数据与有限元模型得到的挠度数据对比分析, 结果见表 1。

三维数字照相量测方法得到的挠度数据与有限元模型得到的挠度数据对比分析, 结果见表 2。

由表 1 可以看出, 百分表测得的挠度数据相对有限元模型得到的挠度数据整体偏大, 平均误差在 6% 左右。由表 2 可以看出, 三维数字照相量测方法得到的挠度数据与有限元模型得到的挠度数据吻合得较好, 平均误差在 1% 左右。对比传统测量方法、有限元模型与数字照相量测三种测量方法结果发现, 在相同的风荷载作用下, 3 种方法所测得的挠度-位置曲线都基本吻合, 说明三维数字照相量测试验测量得到的玻璃幕墙表面变形数据是准确的, 有

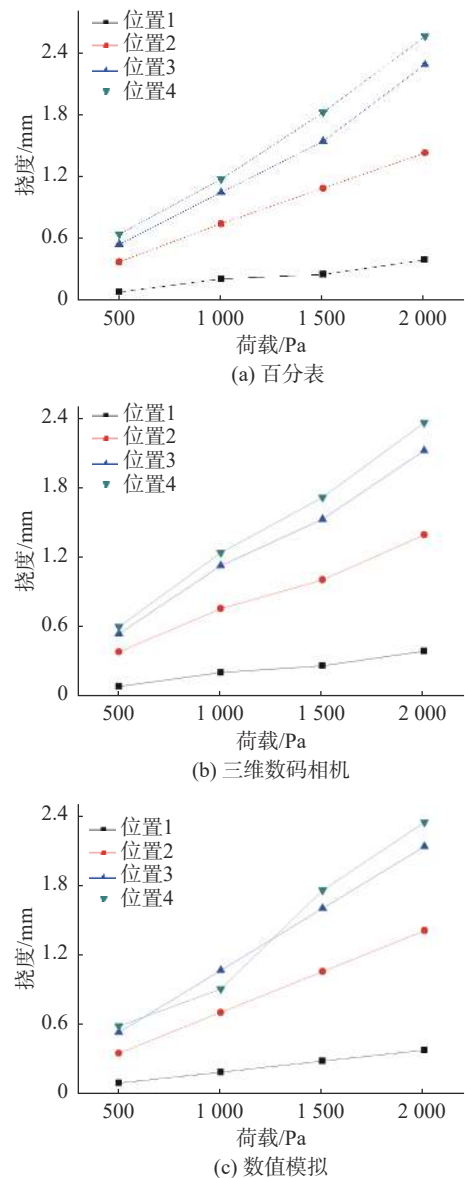


图 8 各测点挠度随荷载变化曲线

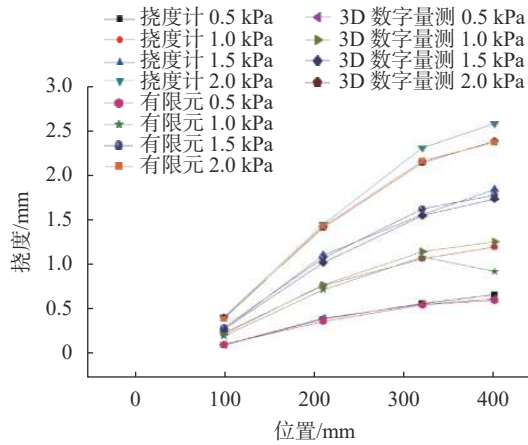


图9 3种方法所得不同位置下玻璃幕墙挠度值的对比

表1 百分表所测挠度与有限元模型所测挠度相对误差

荷载	位置1	位置2	位置3	位置4
500 Pa	-5.3	7.9	3.0	11.0
1 000 Pa	15.8	6.6	-1.7	30.1
1 500 Pa	-8.8	3.1	-3.8	3.6
2 000 Pa	5.3	1.5	25.5	8.9

表2 有限元模型所得挠度与三维数字照相量测方法所测挠度相对误差

荷载	位置1	位置2	位置3	位置4
500 Pa	-4.2	10.1	1.7	3.2
1 000 Pa	10.0	7.8	5.8	2.7
1 500 Pa	-6.4	-4.7	-4.7	-2.4
2 000 Pa	3.9	-1.0	-0.9	0.6

有限元模型也符合实际情况。

3 结束语

分析传统测量方法、有限元模型与数字照相量测三种测量方法所得到的玻璃幕墙试件应变和挠度值,得到的结论如下:

1)对于应变测量方面,在同一荷载条件下,三维数字照相量测方法所测得的应变值较大,应变片测量所得的应变值相对较小,不同位置处两种方法测得的数值呈现相同的变化规律。

2)对于挠度测量方面,对比传统测量方法、有限元模型与数字照相量测三种测量方法结果发现,

在相同的风荷载作用下,三种方法所测得的挠度-位置曲线基本吻合,相对误差在允许范围以内,说明三维数字照相量测试验测量得到的玻璃幕墙表面变形数据是准确的,有限元模型也符合实际情况。

参考文献

- [1] 黄琳洁,刘文白,原媛,等.基于数字照相量测技术的风荷载作用下玻璃幕墙变形量测研究[J].硅酸盐通报,2017(2):625-628.
- [2] 王娜,马眷荣,刘海波.负风压下结构密封胶对隐框幕墙力学行为的影响[J].硅酸盐通报,2011(2):320-324.
- [3] 马化柱.风荷载作用下隐框玻璃幕墙力学行为研究[J].门窗,2014(4):13-15.
- [4] 李正农,罗叠峰,史文海,等.沿海高层建筑玻璃幕墙风致应力现场实测研究[J].中国科学,2011,41(11):1439-1448.
- [5] LI C, WANG L, WANG X X. Crack and crack growth behavior analysis of asphalt mixtures based on the digital speckle correlation method[J]. Construction and Building Materials, 2017, 147: 227-238.
- [6] 梁晋,梁瑜,张桁维,等.高亮度下近红外激光散斑投射的轮廓测量[J].中国测试,2017,43(11):17-21.
- [7] 潘兴琳,保宏,张旭东.基于模糊的框架变形重构的应变测量修正[J].振动、测试与诊断,2018,38(2):360-364.
- [8] 曲嘉,李东昌,黄超.动态断裂韧性实验中DIC技术应用研究[J].中国测试,2016,42(10):45-48.
- [9] 张顺庆,高晨家,张龙.数字图像相关技术在应力应变测量中的发展与最新应用[J].影像科学与光化学,2017(2):193-198.
- [10] BING P, LONG T, XIAO L S. Real-time, non-contact and targetless measurement of vertical deflection of bridges using off-axis digital image correlation[J]. NDT&E International, 2016, 79: 73-80.
- [11] XING C, TAN Y Q, LIU X Y, et al. Research on local deformation property of asphalt mixture using digital image correlation[J]. Construction and Building Materials, 2017, 140: 416-423.
- [12] 朱魁章,程腾,仰叶,等.基于DIC的斯特林制冷机振动非接触三维全场测试方法[J].中国测试,2015,41(5):1-4.
- [13] 潘兵,谢惠民,李艳杰.用于物体表面形貌和变形测量的三维数字图像相关方法[J].实验力学,2007(6):556-567.
- [14] 赵明珠,王志勇,王世斌,等.基于三维数字图像相关方法的面部表情变形测量研究[J].实验力学,2017(2):152-163.
- [15] 俞立平,潘兵.使用单彩色相机的单相机三维数字图像相关方法[J].试验力学,2017(5):687-699.
- [16] 玻璃幕墙工程技术规范:JGJ 102-2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.

(编辑:徐柳)