

# 数字散斑相关方法的建筑力学分析应用研究进展

马衍轩, 张颖锐, 雷欣, 王金华, 孙启轩, 周桓竹

青岛理工大学土木工程学院, 青岛 266033

**摘要** 数字散斑相关方法, 作为固体材料表面变形测量方法, 是一种全场、无接触、高自动化和高精度的光学变形测量方法, 与其他变形测量方法相比, 具有灵敏度高, 测量准确等一系列独特的优越性, 在建筑工程变形测量及力学分析中得到较快的发展。本文阐述了数字散斑方法的基本原理, 重点综述了数字散斑方法在混凝土、沥青材料、硅酸盐水泥、复合材料、负泊松比防爆材料等建筑材料以及混凝土结构、桥梁结构、岩土结构、木质结构等建筑结构力学行为测量与分析中的应用进展, 总结并展望了数字散斑方法在未来建筑材料与结构在服役过程中有效监测的应用前景与发展趋势。随着数字散斑相关方法的测量精度与速度大幅提升, 结合光纤技术与计算机模拟等方法, 建筑材料与结构三维实体的微观力学行为有望实现全方位实时监测。

**关键词** 数字散斑相关方法; 建筑材料; 建筑结构; 力学分析

数字散斑相关方法(DSCM)由 Yamaguchi<sup>[1]</sup>、Peters<sup>[2]</sup>等最早于 20 世纪 80 年代初提出, 是一种视觉检测方法, 具体来说, 是依据物体表面随机散斑灰度场的相关性追踪物体表面形变及其导数的高精度光学测量方法, 可在较短测试时间内进行快速校准, 得出实验中被测试样表面亚像素级的位移参数差异<sup>[3]</sup>。检测材料力学性能的传统方法——电阻应变片检测方法, 通常用于刚度与其相近的物体的测试, 高温下, 材料变得柔软, 需要防止应变计因试样变形而异位。应变计只适用于点测量, 为增加测量面积<sup>[4]</sup>, 需进行昂贵的应变计组合设计, 而且物体因检测区域受限, 无法获取全场数据, 也无法检测大变形。相对先进的 X 射线断层扫描(CT), 能够对物体表面进行测量, 但只能局限于较小的范围。与电阻应变片检测方法及 CT 技术相比, DSCM 是基于曲面有效性的二维技术<sup>[5]</sup>, 其检测结果准确性较高、测试区域不受限、可获取大变形全场数据, 具有更广泛的使用领域。使用半无限连续体对矩形沟或者圆孔进行压力测定的方法, 通常会得到复杂的非线性位移, 且该方法很难在样本上找到参考位置, 通过将聚焦离子束铣削和数字散斑的方法相结合就可以很好的解决这一类问题, 无论是物体是无定形还是结晶的, 都可以用 DSCM 进行测量并重建残余应力<sup>[6]</sup>。DSCM 检测方法既可以从局部分析大的应变, 又可以从整体上分析材料应变特点, 包括完成平面内漂移, 对角线 RC 系列柱和砖石面板之间的变形和界

面滑动, 且测量结果优于线性位移传感器。另外, 与手工标记的裂缝图相比, 由 DSCM 获得的裂纹图更容易识别裂纹<sup>[7]</sup>。DSCM 也适用于测量受热发生热膨胀金属样品表面, DSCM 可以完成对发生温度变化金属样品的全场热变形分布的测量, 同时通过校正面外位移对面内应变测量的影响<sup>[8]</sup>。鉴于 DSCM 具有无损伤、无接触、动态检测、灵敏度高、对光路要求低、可实现对不可见裂纹的准确估计, 以及可依据现实中测量需求而对整体或局部检测做调整的一系列优点, 该方法应用于土木工程建设与运维、岩土力学与采矿科学等领域具有极大潜力, 在建筑表面进行测量与力学分析具有广泛应用前景。然而, 目前国内外尚且没有关于该测试方法在建筑材料与结构力学分析中的应用进展的系统化评论, 针对该问题, 本文就 DSCM 的基本原理及其在建筑力学分析中应用研究进展进行综述, 可为该技术在建筑力学研究领域提供参考。

## 1 数字散斑相关方法简介

DSCM 是近年来发展起来的先进的非接触式光学法测量位移技术<sup>[6,9]</sup>, 它利用斑点追踪方法确定数字图像中的散斑位移。在试样表面上提取全位移场分析数字图像的光学方法<sup>[10-11]</sup>, 可用于完成对微变形尺度分辨率, 使用数字图像相关性进行实验, 通过比较一对数字图像, 就可以匹配出小区域确定变形前图像变形后的图像<sup>[12]</sup>, 其原理是通过数字图像匹

收稿日期: 2017-02-20; 修回日期: 2017-05-29

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51408330); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2014CL031)

作者简介: 马衍轩, 讲师, 研究方向为建筑功能与智能材料, 电子信箱: yxma@qut.edu.cn

引用格式: 马衍轩, 张颖锐, 雷欣, 等. 数字散斑相关方法的建筑力学分析应用研究进展[J]. 科技导报, 2017, 35(13): 77-83; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.11.012

配的方法分析试件表面的位移场,依据检测前与检测后图像灰度的变化相关情况确定相应点的位置变化,并检测出材料表面的形变和位移,进而分析材料的各种力学性能<sup>[13]</sup>。DSCM是在视图分析的基础上研究出的非接触式表面测量方法。试验运用三维数字散斑方法,如图1所示<sup>[14]</sup>,应用电荷耦合器件(CDD)相机,根据双目立体视觉的原理来实现试件不同维度坐标的获取。

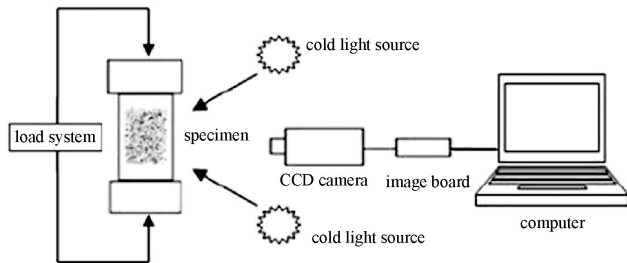


图1 数字散斑相关方法实验装置示意

Fig. 1 Illustration of experiment facility of digital speckle correlation technique

DSCM测量位移是基于对两个散斑场灰度相关性的对比<sup>[15]</sup>。以场中P点为中心取子区S,在S区域内可以得到中心点附近斑点光强信息,称作二维样本空间。发生变形后,P点移动到P'点,S内的斑点就移动到S'内与之对应的位置,从而形成新的样本空间。如图2与3所示。

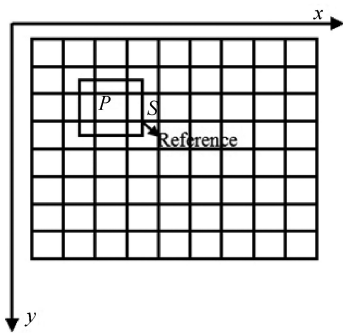


图2 沥青混合料试件表面数字散斑场子区变形之前搜索示意

Fig. 2 Search area diagram of asphalt mixture specimen surface before-deformation

DSCM位移计算的依据是图像的灰度值在变形前、后不变<sup>[16]</sup>。先在图像上选取一个区域(兴趣区),然后在其内部选取一个子集,把它作为匹配的单位进行相关计算,相关计算公式为

$$C_{cc} = \frac{\sum_{(i,j) \in s} (f(\bar{x}_{refi}, \bar{y}_{refj}) - f_m)(g(\bar{x}_{curi}, \bar{y}_{curj}) - g_m)}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in s} (f(\bar{x}_{refi}, \bar{y}_{refj}) - f_m)^2 \sum_{(i,j) \in s} (g(\bar{x}_{curi}, \bar{y}_{curj}) - g_m)^2}} \quad (1)$$

式中,  $f, g$  为变形前、后图像在  $(x, y)$  处的灰度值;  $f_m$  为变形前

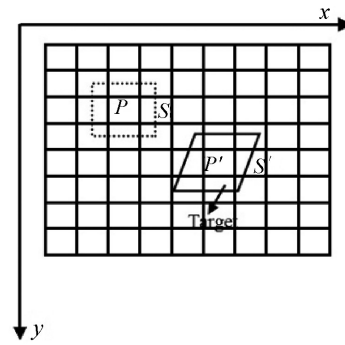


图3 沥青混合料试件表面数字散斑场子区变形之后搜索示意

Fig. 3 Search area diagram of asphalt mixture specimen surface after-deformation

子集的平均灰度值;  $g_m$  为变形后子集的平均灰度值,得到初值后,为得到子区域精准的位移值,需要初值进一步修正,非线性修正的计算公式为

$$C_{LS} = \left[ \frac{f(\bar{x}_{refi}, \bar{y}_{refj}) - f_m}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in s} (f(\bar{x}_{refi}, \bar{y}_{refj}) - f_m)^2}} - \frac{g(\bar{x}_{curi}, \bar{y}_{curj}) - g_m}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in s} (g(\bar{x}_{curi}, \bar{y}_{curj}) - g_m)^2}} \right] \quad (2)$$

如图4所示,要获得兴趣区的水平与竖直位移场,需先获得其所有子集的位移,这就需要重复进行以上过程。

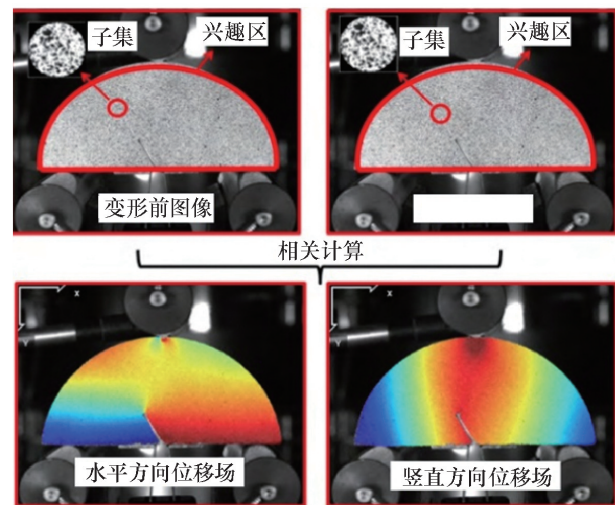


图4 数字图像相关的计算步骤

Fig. 4 Calculation procedure of digital image correlation

DSCM的测量精度较高,但由于实际测量中的诸多因素均会影响其准确性,故而会产生随机误差和系统误差<sup>[17]</sup>。系统误差主要有:摄像机镜头与试件表面不垂直引起的误差<sup>[18]</sup>、由离面位移造成的系统误差<sup>[19]</sup>、亚像素重建造成的系统误差、亚像素运算方法的误差。相关搜索是DSCM的关键步骤,选

择合适的搜索方法可大幅度提高效率。由于整像素搜索法计算量大,根据实际操作情况可优先选择粗-细搜索法,爬山搜索法,曲面拟合法,十字搜索法等。

采用数字散斑方法测量后,为反映研究对象各方面特性或特征的数据,将数据处理并以等值线图的形式呈现。SURFER的突出功能是用于等值线图及立体图形描绘,使用方法和对数据的处理与Microsoft Excel大致相同,而且可以直接处理Excel文件,能迅速地将离散的测量数据通过插值转换为连续的数据曲面,应用极广<sup>[20]</sup>。通过该软件在绘制等值线及三维图的突出功能与数字散斑相关方法结合,使结果更科学直观地表达出来,应用SURFER软件处理DSCM数据具有重要意义。

## 2 DSCM在建筑材料及结构中的应用

### 2.1 DSCM在建筑材料力学分析中的应用

#### 2.1.1 DSCM在混凝土中的应用

随着建设事业的发展,混凝土自修复方法成为土木工程领域研究的一大热点,如何有效的检验自修复效果对自修复方法具有重要意义。自修复混凝土能对外部环境改变做出反应,在出现裂纹等情况下进行自修复,对于改善混凝土材料耐久性,延长混凝土构件服役寿命具有重要意义。伴随复合材料技术的突飞猛进,微胶囊方法在自修复方面的应用为材料研究开辟了新道路<sup>[21]</sup>。

对于混凝土自修复效果的检测,许多学者采取了不同的方法。Jacobsen<sup>[22]</sup>在实验中首次提出裂纹密度的理念,Mi-hashi等<sup>[23]</sup>采用对裂缝处水渗性能的指标检查修复结果。但大多数类似的方法通过测试相关参数,基于一定的数学方法和相关模型间接表示修复效果,不能真实反映修复情况,尤其是基体内部的微裂纹。有关文献中都已提到Zhu等<sup>[24]</sup>将SEM、AFM与DSCM联用,进行了纳米尺度位移和应变的测量。Love等<sup>[25]</sup>用DSCM分析了SEM下物体局部的形变场。故在检测混凝土自修复效果中,DSCM与显微镜的联用可以实现微裂纹的可视化。

高强混凝土是混凝土材料重点发展的方向之一,它具有优越的抗震性、抗弯、抗裂、自重轻等优点,普遍应用于实际工程中<sup>[26]</sup>。

吴庆等<sup>[27]</sup>通过DSCM测量高强混凝土的全场二维应变。检测了高强混凝土在外界条件下的受压情况,改善了其他测量方法中受场地限制、精度低等不足,实验结果显示将DSCM应用于测量高性能混凝土的检测具有很高的实用性。

混凝土的渗透性是影响混凝土各方面性能的重要因素,裂纹裂缝都会造成混凝土渗透水。刘燕<sup>[28]</sup>等利用DSCM研究混凝土裂纹扩展规律,实验过程表明DSCM有效的测量了实验试块的微裂纹损伤面积,有效地保障了后续实验的进行。Chen等<sup>[29]</sup>提出了两步扩展数字图像相关(X-DSCM)的方法,直接测量具有不连续性的全场位移。通过刚

体测试试验和单轴拉伸试验,验证了两步X-DSCM方法的可靠性。结果表明,该方法具有较好的准确性,且用于单轴拉伸试验和三点弯曲试验中的交叉裂纹位移场测量,在测量和分析一些不连续区域的变形场的区域具有潜力,可将两步扩展数字图像相关法进行裂纹变形测量。

了解材料力学中每种材料的应力-应变关系,才能更好的理解它们的在不同载荷下的行为在建筑工程中,混凝土通常作为承重材料。通常它们所承受的是负载,Heredia等<sup>[30]</sup>通过使用一个光束和由它的反射产生的斑点以及通过数字图像相关方法评估这些试验过程中所观察到的异质应变场过程实现对应力-应变关系的研究。

钢筋混凝土结构的断裂过程非常复杂,既存在宏观裂缝也存在微观裂缝,其断裂行为不仅与局部应变和裂纹桥接相关,也取决于具体的类型的混凝土的属性。Fayyad等<sup>[31]</sup>使用DSCM通过不同加的载阶段的图像可以推断出一个物体的变形承受外载荷进而研究混凝土中裂纹扩展模式与断裂性质之间的关系,实验证明DSCM可以有效的测量裂纹张开位移。Nunes等<sup>[32]</sup>采用DSCM对裂纹扩展的短切玻璃纤维增强聚合物砂浆的断裂行为进行评估。研究结果表明,聚合物砂浆裂纹扩展的抗断裂性随玻璃纤维的增加而增加,该方法是一种可以确定位移场的强大的光学数值方法。

#### 2.1.2 DSCM在沥青材料中的应用

数字散斑相关方法作为一种新兴起的光学测量手段,可以用于分析沥青混合料的老化问题,从而开拓评价沥青混合料老化特性的新方法。王岚等<sup>[33]</sup>利用数字散斑相关方法研究沥青混合料的老化特性,试图从沥青混合料破坏全过程中,水平应变场、水平应变速率的变化,以及通过破坏全过程中的荷载-位移曲线求出断裂能使得学者们可以对沥青混合料老化特性进行更深层次的探索。王岚等<sup>[33]</sup>应用数字散斑相关方法对聚合物改性沥青混合料的抗裂性进行研究,通过断裂韧性分析结果对比发现,采用数字散斑相关方法测量改性沥青的抗裂性能有效可行。

#### 2.1.3 DSCM在硅酸盐水泥中的应用

杨建林等<sup>[34]</sup>利用数字散斑相关方法研究硅酸盐水泥改性泥岩的受压破坏过程,实验中利用万能试验机测试物体在单轴受压阶段的应力-应变曲线,并通过DSCM系统对单轴压缩过程中泥岩的表面形貌变化进行同步观测,利用DSCM软件同步采集试件的散斑图获得了改性前后泥岩应变场的变化过程。

#### 2.1.4 DSCM在复合材料中的应用

复合材料已广泛应用于航空和土木工程等由于优秀机械性能,炭炭复合材料作为耐高温、烧蚀材料,经常用于机翼前沿的热防护系统,火箭发动机,飞机刹车盘等。赵丽娜<sup>[35]</sup>利用DSCM确定炭/炭复合材料在喷涂区形变,结果表明,该方法可动态测量出点的形变,直观准确地描绘出C/C复合材料试样在2000℃以上形变状态,有助于C/C复合材料在高温下的进一步形变研究。

### 2.1.5 DSCM在负泊松比防爆材料中的应用

中国建筑抗爆设计领域中存在的一些不足和方法难题,拉胀材料是一种具有负泊松比的材料,可以有效地抵抗冲击载荷的作用,将“多孔拉胀”引入混凝土结构设计领域,从混凝土材料自身出发,制成多孔结构复合拉胀混凝土,通过研究其宏微观泊松比进一步研究其抗爆性能。

为了准确地表征多孔拉胀混凝土受载过程中的负泊松比效应,采用数字散斑相关方法对4块试样进行泊松比测量。利用图像灰度梯度迭代的数字散斑方法测试四类试块的受压变形情况,该方法由Zhou等<sup>[36]</sup>首次提出,并由Meng等<sup>[37]</sup>进行了修正和完善,在荷载某一均匀变化阶段,给出了试块的散斑场和各自的位移场分布复合图,普通试块位移分布见图5,内凹孔试块(具有负泊松比效应)位移分布见图6<sup>[38]</sup>。结果表明:利用该方法对多孔拉胀混凝土进行变形测量是可行的,同时应用数字散斑方法测量轴心受压的多孔拉胀混凝土试件的位移全过程,为探索采用非接触的方式测量构件变形提供了一种新的测试手段。

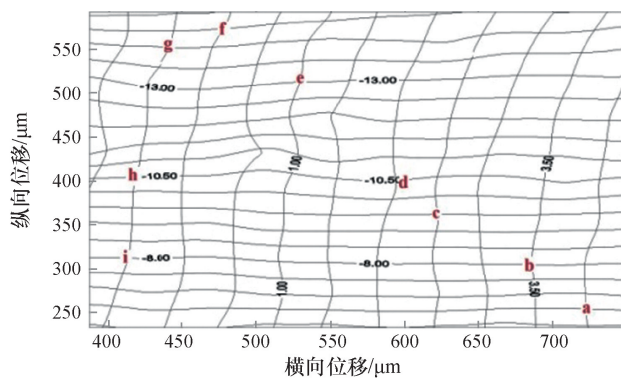


图5 普通试块横向和纵向位移分布复合

Fig. 5 Horizontal and vertical displacement distribution composite of ordinary block

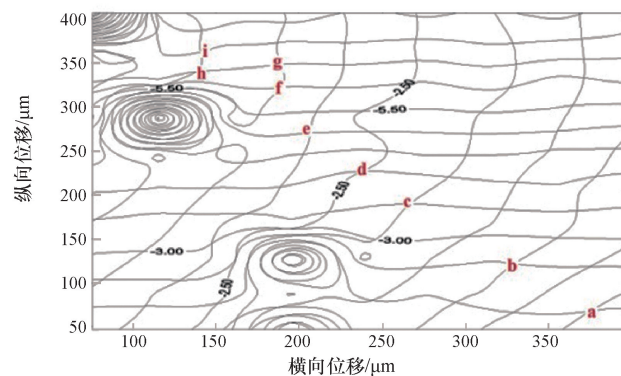


图6 内凹孔试块横向和纵向位移分布复合

Fig. 6 Horizontal and vertical displacement distribution composite of Concave hollow block

### 2.2 DSCM在建筑结构力学分析中的应用

#### 2.2.1 DSCM在混凝土结构中的应用

童晶等<sup>[39]</sup>利用数字散斑相关方法研究混凝土保护层的开裂,发现了混凝土表面形变的变化特性,结果表明DSCM方法可以精准的判断锈胀裂缝位移。DSCM方法可以获得混凝土试件表面产生广义主拉应变的范围。根据广义主拉应变的范围确定试件表面开裂可能性最大区域,给混凝土结构的监测及修复提供了新的思路。

#### 2.2.2 DSCM在桥梁结构中的应用

由于数字散斑相关方法对环境要求低、设备简单等特点,因而在土建施工过程中应用较多,刘光利等<sup>[40]</sup>对数字散斑方法基本原理、模型及决定测量精度的因素及其在桥梁结构等土木工程中的应用进行了概述。实桥测量中的靶面系统和摄像系统分别如图7、图8所示<sup>[41]</sup>,摄像系统布置于伸缩缝外,距离靶面约为12 m。Yoneyama等<sup>[42]</sup>用DSCM进行桥梁的非接触挠度测量,结果表明,通过DSCM获得的桥梁偏转测量与通过常规位移传感器获得的测量结果一致。在国内建筑、



图7 桥上设置靶面系统

Fig. 7 Target surface system on the bridge



图8 桥上设置摄像系统

Fig. 8 The camera system on the bridge

桥梁等工程的快速建设期间,许多桥梁建筑需要在服役期内进行重新检测与维护以确保安全,桥梁结构的检测工作也越来越受到重视。

利用电测法测量物体表面应变存许多问题,相比较其而言,数字散斑方法具有测量范围宽、光路要求简单、可以实现动态测量等优点。为测量桥梁的应变,刘亚双<sup>[43]</sup>将其DSCM与有限元分析软件相结合,结果表明该方法在检测桥体应变方面有很好的适应性。

### 2.2.3 DSCM在岩土结构中的应用

岩土材料变形过程一般以持续时间较长且形变特征不明显的渐变期和持续时间很短且出现突然断裂的断裂期组成,因而岩土材料变形过程复杂,变形位移不易测量,李云海等<sup>[44]</sup>将数字散斑相关方法应用于岩土工程试验中,提出局部定向搜索优化方法,结果表明DSCM可以较好地应用于岩土力学领域。

岩土破坏时的临界断裂特征对研究岩土的断裂问题具有重要意义。纪维伟等<sup>[6]</sup>应用数字散斑相关试验手段,获得了岩石破坏时的临界应变场,对应变场进一步分析得到了裂缝位移,研究结果表明DSCM可以有效地解决岩石断裂问题。

### 2.2.4 DSCM在木质结构中的应用

作为天然高分子复合材料,木材或以木材为原料的木制品人造板、木塑复合材等在加工与使用过程中,由于受到内力或外力的作用,其性能产生变化甚至破坏。从而,有效的木材力学性能检测方法将对探索木材的性能产生重要影响。赵景尧等<sup>[45]</sup>概述了DSCM方法在木材力学性能检测,干燥变形中的应用及研究,研究结果利用DSCM可以获得木材较好的形变信息。

## 3 结论与展望

相较于应变片等传统测试建筑材料与结构力学行为的技术,数字散斑相关方法具有实时、无接触和动态观测的特点,不仅可在微观层面揭示混凝土、沥青、水泥、木材、岩土、以及桥梁等一系列建筑材料与结构力学行为,而且有望通过动态且高精度的实时数据对建筑材料与机构的力学性能及服役期内的建筑进行检测,确保建筑材料与结构在使用过程以及极限承载压力下的安全性与稳定性。DSCM的发展日渐完善,测量精度与速度均大幅提升,已被大量应用于微观的力学检测,但在现有建筑材料三维实体的微观结构与力学行为的探索中仍存在一定的不足,未来与光纤技术以及计算机模拟方法相结合,DSCM势必在建筑工程领域发挥出重要的应用价值。

### 参考文献 (References)

[1] Yamaguchi I. A laser-speckle strain gauge[J]. Journal of Physics E Scientific Instruments, 2000, 14(14): 1270-1273.  
 [2] Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[M]. Kluwer Law International, 1982, 21(3): 427-431.  
 [3] Gajewski T, Garbowski T. Calibration of concrete parameters based on

digital image correlation and inverse analysis[J]. Archives of Civil & Mechanical Engineering, 2014, 14(1): 170-180.  
 [4] Chen X, Yang L, Xu N, et al. Cluster approach based multi-camera digital image correlation: Methodology and its application in large area high temperature measurement[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 57(7): 318-326.  
 [5] Rossol M N, Shaw J H, Hrishikesh B, et al. Characterizing weave geometry in textile ceramic composites using digital image correlation[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2013, 96: 2362-2365.  
 [6] Krottenthaler M, Schmid C, Schaufler J, et al. A simple method for residual stress measurements in thin films by means of focused ion beam milling and digital image correlation[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 215(4): 247-252.  
 [7] Ghorbani R, Matta F, Sutton M A. Full-Field displacement measurement and crack mapping on masonry walls using digital image correlation[M]//Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics (Vol 3). 2014: 187-196.  
 [8] Tominaga Y, Arikawa S, Yoneyama S, et al. Observation of thermal strain on electronic packages using digital image correlation[M]//Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics (Vol 3). 2014: 151-157.  
 [9] Yuan Y, Huang J, Peng X, et al. Accurate displacement measurement via a self-adaptive digital image correlation method based on a weighted ZNSSD criterion[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 52(1): 75-85.  
 [10] Yates J R, Zanganeh M, Tai Y H. Quantifying crack tip displacement fields with DIC[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 77(11): 2063-2076.  
 [11] Roux S, Réthoré J, Hild F. Digital image correlation and fracture: an advanced technique for estimating stress intensity factors of 2D and 3D cracks[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2009, 42(21): 214004-214024.  
 [12] Lin Q, Labuz J F. Fracture of sandstone characterized by digital image correlation[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, 60(8): 235-245.  
 [13] 高红刚, 刘欢, 齐子诚, 等. 基于DSCM谐振载荷作用下疲劳裂纹尖端位移应变场测量[J]. 兵器材料与科学工程, 2016, 39(1): 17-21.  
 Gao Hongli, Liu Huan, Qi Zicheng, et al. Measurement of displacement and strain fields of fatigue crack tip under resonant loading based on DIC method[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2016, 39(1): 17-21.  
 [14] Ma Y, Zheng Y, Meng H, et al. Heterogeneous PVA hydrogels with micro-cells of both positive and negative Poisson's ratios[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2013, 23: 22-31.  
 [15] 王岚, 贾永杰, 张大伟, 等. 基于数字散斑相关法的聚合物改性沥青混合料抗裂性能[J]. 复合材料学报, 2016, 33(9): 2123-2131.  
 Wang Lan, Jia Yongjie, Zhang Dawei et al. Crack resistance of polymer modified asphalt mixture based on digital speckle correlation technique[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(9): 2123-2131.  
 [16] 纪维伟, 潘鹏志, 苗书婷, 等. 基于数字图像相关法的两类岩石断裂特征研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2300-2305.  
 Ji Weiwei Pan Pengzhi, Miao Shuting, et al. Fracture characteristics of two types of rocks based on digital image correlation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(8): 2300-2305.  
 [17] 王冬梅, 方如华, 秦玉文. 数字图像相关测量的误差分析及其改进措施[J]. 实验力学, 1998, 13(3): 417-422.

- Wang Dongmei, Fang Ruhua, Qin Yuwen. Measuring errors analysis and improvement of digital image correlation method measurement system[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1998, 13(3): 417-422.
- [18] 孟利波, 金观昌, 姚学锋. DSCM中摄像机光轴与物面不垂直引起的误差分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(11): 1930-1932.
- Meng Libo, Jin Guanchang, Yao Xuofeng. Errors caused by misalignment of the optical camera axis and the object surface in the DSCM[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2006, 46(11): 1930-1932.
- [19] 戴相录, 谢惠民, 王怀喜. 二维数字图像相关测量中离面位移引起的误差分析[J]. 实验力学, 2013, 28(1): 11-19.
- Dai Xianglu, Xie Huimin, Wang Huaixi. Analysis of the error caused by off-plane displacement in two-dimensional digital image correlation measurement[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(1): 11-19.
- [20] 张爱印, 任印国. Golden Surfer软件绘制地质图件的技巧[J]. 中国煤田地质, 2006(增刊): 87-89.
- Zhang Aiyin, Ren Yinguo. Geological map making tips when use the golden surfer software [J]. Coal Geology of China, 2006(Suppl 1): 87-89.
- [21] 张鸣. 水泥基材料用微胶囊自修复方法与原理的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- Zhang Ming. A study on microcapsule based self-healing method and mechanism for cementitious composites[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [22] Jacobsen S, Marchand J, Boisvert L. Effect of cracking and healing on chloride transport in OPC concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(6): 869-881.
- [23] Mihashi H, Nishiwaki T. Development of engineered self-healing and self-repairing concrete-state-of-the-art Report[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2012, 10(5): 170-184.
- [24] Zhu Y, Barthelat F, Labossiere P E, et al. Nanoscale displacement and strain measurement[C]. Charlotte, USA Proceedings of the 2003 SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, ResearchGate, 2003: 155-158.
- [25] Love J, Deininger P. Micromechanical applications of digital image correlation techniques[M]//Interferometry in Speckle Light. Springer Berlin Heidelberg, 2000: 67-74.
- [26] 司炳君, 孙治国, 王东升, 等. 高强箍筋约束高强混凝土柱抗震性能研究综述[J]. 土木工程学报, 2009, 42(4): 1-9.
- Si Bingjun, Sun Zhiguo, Wang Dongsheng, et al. Review of studies on the seismic behavior of high strength concrete columns with high strength transverse reinforcement[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(4): 1-9.
- [27] 吴庆, 倪源, 孙林柱, 等. 基于VIC-3D技术的高强混凝土单轴受压试验研究[J]. 混凝土, 2014, 11(2): 19-23.
- Wu Qing, Ni Yuan, Sun Linzhu, et al. Experimental study on high-strength concrete under uniaxial compression based on VIC-3D technology[J]. Concrete, 2014, 11(2): 19-23.
- [28] 刘燕, 刘晋艳, 易成. 缺陷混凝土抗氯离子渗透性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(6): 979-983.
- Liu Yan, Liu Jinyan, Yi Cheng. Experimental study of the chloride penetration of defective concrete[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(6): 979-983.
- [29] Chen J, Zhang X, Zhan N, et al. Deformation measurement across crack using two-step extended digital image correlation method[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2010, 48(11): 1126-1131.
- [30] Heredia A S, Marquez A P A. Concrete stress-strain characterization by digital image correlation[J]. Journal of Applied Mechanical Engineering, 2015, 4(6): 1-5.
- [31] Fayyad T M, Lees J M. Application of digital image correlation to reinforced concrete fracture[J]. Procedia Materials Science, 2014, 3: 1585-1590.
- [32] Nunes L C S, Reis J M L. Estimation of crack-tip-opening displacement and crack extension of glass fiber reinforced polymer mortars using digital image correlation method[J]. Materials and Design, 2012, 33(1): 248-253.
- [33] 王岚, 王宇, 弓宁宁, 等. 基于数字散斑相关方法的沥青混合材料老特性实验研究[J]. 功能材料, 2016, 47(1): 1087-1092.
- Wang Lan, Wang Yu, Gong Ningning et al. Aging characteristic test research of asphalt mixture based on the digital speckle correlation method[J]. Journal of Functional Materials, 2016, 47(1): 1087-1092.
- [34] 杨建林, 王来贵, 张鹏, 等. 水泥改性泥岩受压破坏的变形场演化规律研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(11): 3271-3276.
- Yang Jianlin, Wang Laigui G, Zhang Peng, et al. Deformation field evolution during compression failure process of mudstone modified by portland cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(11): 3271-3276.
- [35] 赵丽娜, 贺平照, 邢树根, 等. 基于数字散斑方法的炭/炭复合材料高温应变测量[J]. 固体火箭技术, 2014, 37(5): 729-733.
- Zhao Lina, He Pingzhao, Xing Shugen, et al. Strain measurement of carbon/carbon composites at high temperatures by digital speckle correlation method[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2014, 37(5): 729-733.
- [36] Zhou P, Goodson K E. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation (DISC)[J]. Optical Engineering, 2001, 40(8): 1613-1620.
- [37] Meng L B, Jin G C, Yao X F. Application of iteration and finite element smoothing technique for displacement and strain measurement of digital speckle correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(1): 57-63.
- [38] 徐永杰. 多孔结构复合拉胀混凝土的设计及力学性能表征[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
- Xu Yongjie. Design of auxetic concrete with porous structure and characterization of their mechanical properties[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2015.
- [39] 童晶, 金贤玉, 田野, 等. 基于DSCM方法的锈蚀钢筋混凝土表面开裂[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(2): 193-199.
- Tong Jing, Jin Xianyu, Tian Ye, et al. Study on surface cracking of corroded reinforced concrete based on DIC method[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science Edition), 2015, 49(2): 193-199.
- [40] 刘光利, 姜红艳. 数字散斑相关方法的原理及土木工程应用简介[J]. 安徽建筑大学学报, 2015, 23(6): 53-62.
- Liu Guangli, Jiang Hongyan. Principle of digital speckle correlation method and its applications in civil engineering deformation measurement[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture and Industry, 2015, 23(6): 53-62.
- [41] 孟利波, 刘会耕, 胡建新. 基于数字散斑相关方法的中小跨径桥梁挠度测量系统研究[J]. 公路交通技术, 2013(5): 55-57.
- Meng Libo, Liu Huigeng, Hu Jianxin. Research on measuring system for deflection of medium and small-span bridges based on digital speckle correlation method[J]. Technology of Highway and Transport, 2013(5): 55-57.
- [42] Yoneyama S, Kitagawa A, Iwata S, et al. Bridge deflection measure-

- ment using digital image correlation[J]. *Exp Tech*, 2007, 31(1): 34-40.
- [43] 刘亚双. 基于数字散斑技术的桥梁检测[J]. *成都大学学报*, 2013, 32(3): 309-311.
- Liu Yashuang. Detection of bridges based on digital speckle technique [J]. *Journal of Chengdu University(Natural Science Edition)*, 2013, 32(3): 309-311.
- [44] 李元海, 贾冉旭, 杨苏. 基于岩土渐进变形特征的数字散斑相关优化分析法[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(8): 1490-1496.
- Li Yuanhai, Jia Rranxu, Yang Su. Optimized method for DSCM based on progressive displacement characteristics of geotechnical materials [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(8): 1490-1496.
- [45] 赵景尧, 蔡英春. 数字图像相关方法及其在木材科学研究中的应用 [J]. *世界林业研究*, 2015, 28(6): 53-57.
- Zhao Jingyao, Cai Yingchun. Digital image correlation technology and its application to wood science[J]. *World Forestry Research*, 2015, 28(6): 53-57.

## Application research progress of digital speckle correlation method in architectural mechanics analysis: A review

MA Yanxuan, ZHANG Yingrui, LEI Xin, WANG Jinhua, SUN Qixuan, ZHOU Huanzhu

School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China

**Abstract** Digital speckle correlation method is a kind of integral, non-contacting, high-automation and high-precision optical deformation measurement method, which has its unique superior performance such as high sensitivity, easily identifying cracks and estimate accuracy, compared with other deformation measuring techniques. As a kind of deformation measurement method for solid material surface, it gets fast application in the deformation measurement for construction projects. In this paper, the basic principle of digital speckle correlation method is elaborated, and the application progress of digital speckle correlation method in mechanical behaviors measurement and analysis of building materials are summarized, including the concrete, asphalt material, Portland cement, composite materials, explosion-proof materials with negative Poisson's ratio, and architectural structures such as concrete structure, bridge structure, geotechnical structure and wooden structure. The application prospect and development trend of digital speckle correlation method for building materials and architectural structures in service are generalized and predicted as well. With significant boost of the measuring accuracy and speed of digital speckle correlation method, it is envisioned that combined with the methods of optical fiber technology and computer simulation, micromechanics behaviors of three-dimensional solid of building materials and architectural structures can achieve dynamic real-time monitoring.

**Keywords** digital speckle correlation method; building materials; architectural structure; mechanics analysis

(责任编辑 祝叶华)