

Application of Digital Image Correlation Technology in Splitting Tensile Test of Concrete Modified by Nano-SiO₂

Kunkun Zhang^{1,2*}, Weiwei Ma^{1,2}, Tonghuan Zhang^{1,2}, Xinchao Zheng^{1,2}

¹College of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

²Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Email: *1219543287@qq.com

Received: Sep. 10th, 2019; accepted: Sep. 23rd, 2019; published: Sep. 30th, 2019

Abstract

At present, digital image correlation technology (DIC) is a novel and effective method to monitor the change of performance parameters during the mechanical test of concrete. Based on this technology, the non-contact strain measurement system is adopted here to collect the deformation data of nano-SiO₂ modified concrete during the splitting tensile test to study the changes of the displacement field and strain field in the three stages of pre-destruction, initial and complete failure, and analyze the variation rules of horizontal displacement field (U) and horizontal strain field (Exx) at different stages. The results show that the displacement field U of the surface crack has a step shape, while the strain field Exx has a ravine shape. The whole process of transverse deformation, crack initiation and propagation during mechanical test can be effectively monitored by digital speckle technique.

Keywords

Digital Speckle Image Processing, Displacement Field, Strain Field, Nano-SiO₂ Modified Concrete, Splitting Tensile Test

数字散斑图像处理技术在Nano-SiO₂改性混凝土劈裂拉伸试验中的应用

张昆昆^{1,2*}, 马卫卫^{1,2}, 张桐欢^{1,2}, 郑鑫超^{1,2}

¹西京学院土木工程学院, 陕西 西安

²西京学院陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

*通讯作者。

文章引用: 张昆昆, 马卫卫, 张桐欢, 郑鑫超. 数字散斑图像处理技术在 Nano-SiO₂ 改性混凝土劈裂拉伸试验中的应用 [J]. 土木工程, 2019, 8(8): 1276-1283. DOI: 10.12677/hjce.2019.88148

Email: 1219543287@qq.com

收稿日期: 2019年9月10日; 录用日期: 2019年9月23日; 发布日期: 2019年9月30日

摘要

目前, 数字散斑图像技术(DIC)是一种监测混凝土力学试验过程中性能指标变化较为新颖且有效的方法。基于该技术, 采用非接触应变测量系统对纳米二氧化硅改性混凝土在劈裂拉伸试验过程中产生的变形进行实时数据采集, 研究试样在破坏前、初始破坏以及完全破坏三个阶段的位移场和应变场的过程变化, 分析不同阶段下试样水平方向位移场(U)和水平方向应变场(E_{xx})的变化规律。结果表明, 试样在完全破坏时表面裂缝位移场U出现阶梯形状, 应变场E_{xx}出现峡谷状形。利用数字散斑技术可有效地监测试样在力学试验中的横向变形、裂缝萌生及扩展的全过程。

关键词

数字散斑图像处理, 位移场, 应变场, 纳米二氧化硅改性混凝土, 劈 - 拉试验

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在 20 世纪 80 年代, Peters WH 和 Eanson WF [1]及 I Yamaguchi [2]等人首先提出数字散斑相关方法的思想, 使计算机图像处理实验数据成为可能。在光学全测量的早期, 光弹性等技术的数据须人工处理, 尽管本质相同, 且提供了位移与应变的视觉分布图, 它们仅能提供少数定量的测量点, 且因为数据提取程序繁琐, 使这类技术仅限于实验室。当连接到计算机的 CCD (Charge-coupled Device) 摄像机可实现以数字化形式记录信息时, 该技术逐渐引起了实验力学界的关注, 而用 CCD 摄像机以数字化记录信息的方法, 则称之为数字图像技术(Digital image correlation 英文全写, DIC)。近年来, Sutton MA [3]和 Hild F [4]等国内外科学家对形状变形的测量进行了大量的研究。李根等[5]阐述了数字散斑相关方法的基本原理, 表明数字图像技术具有非接触性、高精度测量等特点。Pan B 等[6]对平面位移和应变测量提出了利用二维 DIC 技术。采用 CCD 非接触式角度测量法进行误差分析[7] [8]和对柱状构筑物垂直度检测[9], 实现数字图像技术的测量精度研究[10]和高精度测量[11]的措施, 王青原等[12]采用电子散斑干涉(ESPI)技术获得梁表面的位移场, 利用计算机对图像进行处理和分析, 得到所需的数字信息, 从而得到所需的本构模型。数字图像相关技术在材料应力应变方面的发展[13], 改变了材料本构模型参数的试验方法[14], 采用数字图像技术(DIC)相关方法研究了混凝土材料的压缩破坏过程中应变场的分布[15], 对于解决本构模型参数的问题, 多数研究人员用虚拟场法(VFM)来解决本构模型参数识别。

本文采用非接触应变测量系统, 对纳米二氧化硅改性混凝土在劈裂拉伸试验过程进行实时监测。通过 CCD 摄像机对混凝土表面裂缝变化过程进行采集, 基于 MatchID 软件将数字图像处理技术和虚拟场法结合来对 CCD 摄像机采集的试块表面图像进行提取, 对水平方向位移和应变进行分析, 研究试样在破坏前、初始破坏以及完全破坏三个阶段的位移场和应变场的过程变化, 分析不同阶段下试样水平方向位移场(U)、水平方向应变场(E_{xx})的变化规律及在劈拉过程中混凝土表面裂缝的变化。

2. 实验方法

本文采用纳米二氧化硅对混凝土进行改性, 改性材料掺加量为 0.4%和 0.6%, 粒径为 30 nm (即 30nmNS0.4 和 30nmNS0.6), 试样尺寸为 $100 \times 100 \times 100$ mm, 其配合比见表 1。试样养护和劈裂拉伸按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2002)进行。

Table 1. Test mate ratio

表 1. 试验配合比

编号	W/C	C/kg	天然骨料		纳米材料/g	W/kg	SP/g
			S/kg	G/kg	30nmSiO ₂		
NS0.4	0.5	8.75	14.2	26.5	210.77	4.22	21.9
NS0.6	0.5	8.73	14.2	26.5	316.16	4.13	26.3

注: 表中的符号或简写, NS-纳米 SiO₂, W/C-水灰比, C-水泥, S-砂子, G-石子, W-水, SP-高效减水剂。

试验所需设备有: 万能试验机、非接触应变测量系统(包括 CCD 高速摄像机、Match ID 操作及处理软件、光源、校正板等)。

本文在劈 - 拉试验过程中配置非接触应变测量系统进行实时监测, 利用 CCD 摄像机对试块在劈 - 拉试验全程进行图像的储存。试验前, 将混凝土试块在试验过程中面向摄像机的一面做散斑处理, 使混凝土表面呈现不规则且均匀分布的散斑点。

在进行劈拉试验前, 将摄像机安装在刚性支架上, 以避免相机运动(如图 1)确保安装系统不与任何振动部件(如风扇、压缩机、液压、试验机等)接触。



Figure 1. Non-contact strain measurement system unit diagram

图 1. 非接触应变测量系统装置图

随后, 进行摄像机对焦工作: 1) 完全打开光圈, 以确保实现最小的景深(DOF), 产生了大量的光线, 通过减少曝光时间来补偿。2) 调制光圈以获得较大的景深。增加曝光时间或添加额外的光源。3) 对焦摄像机, 在计算机呈现清晰的图像。调整好摄像机后, 用摄像机采集 3~7 张试验前混凝土试块散斑图像, 利用校正板校正, 使在计算机上可以看到校正板上所有点, 如图 2, 移动校正板, 在不同位置用控制器采取 9~11 张图像, 保证在试验过程中能采集并计算混凝土试块的所有散斑点。

当上述工作完成, 确保 CCD 高速摄像机与万能试验机协调一致时, 开始进行劈拉试验, 在混凝土试块完全破坏后, 关闭摄像机控制器。

试验结束后, 对该系统采集的试验全过程变形及裂缝图像进行处理, 并分析横向位移和应变。

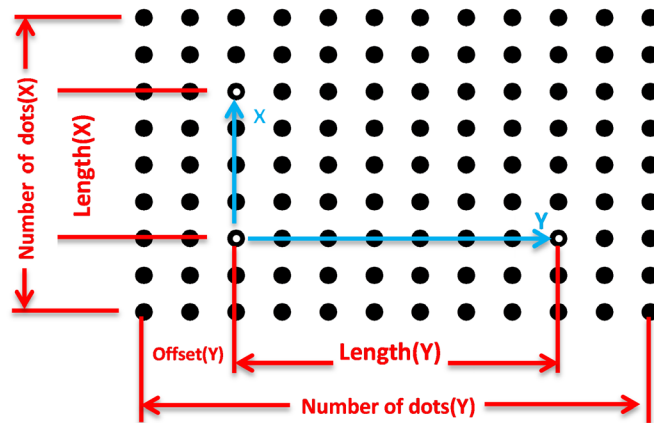


Figure 2. Correction board schematic
图 2. 校正板示意图

3. 裂缝图像处理基本原理

基于平衡方程、边界条件、有限元模拟和虚拟场法等搭建的 MatchID 分析软件，实现了对 CCD 摄像机图像的识别和结构特征参数的自动测量。

基于散斑点：在物体的任意一点都满足局部平衡方程：

$$\text{div} + b = \rho a \quad (1)$$

式中： a 是加速度， b 是施加的体积力。

向外单位法向量 n 和应力张量 σ 表示应力矢量 T ，与柯西公式有关：

$$T = \sigma n \quad (2)$$

T 看作作用于小于表面 dS 上的力 f 的表面密度，则有：

$$T = \frac{df}{dS} \quad (3)$$

则可以确定应力作用下的边界 S_f 条件：

$$T = \sigma n = \bar{T} \quad (4)$$

在加载变形量很小，用位移分量导出笛卡尔应变计算式：

$$\varepsilon_{ij} = 1/2(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (5)$$

可定义局部旋转位移：

$$\omega_{ij} = 1/2(u_{i,j} - u_{j,i}) \quad (6)$$

当边界上位移已知时，建立物体边界上点的位移与给定位移相等的条件，给定位移边界条件在 S_u 上：

$$u = \bar{u} \quad (7)$$

虚位移原理：在外力作用下处于平衡状态的可变形体，当给予微小虚位移时，外力的总虚功等于物体的总虚应变能。因此虚位移可表示为：

$$\iiint_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV = \iiint_V F_{bi} \delta u_i dV + \iint_S p_i \delta u_i dS \quad (8)$$

$$\text{即 } \delta W = \Delta u \quad (9)$$

采用虚应力原理：如令 δW 为虚外力在实际位移上所做的总虚功：

$$\delta W' = \int_{S_u} \bar{u}_i \delta p_i dS \quad (10)$$

$\delta U'$ 为物体内虚功外力在实际应变上的总虚应变余能:

$$\delta U' = \int_V \varepsilon_{ij} \delta \sigma_{ij} dV \quad (11)$$

则虚应力原理可表示为:

$$\delta W' = \delta U' \quad (12)$$

当物体处于平衡状态时, 微小虚外力在真实位移上所做的总虚功, 等于虚应力在真实应变上所完成的总虚应变余能。

4. 结果及分析

基于 MatchID 软件, 结合 MTS 试验机对不同含量(即 30nmNS0.4 和 30nmNS0.6)混凝土试块进行劈裂-拉伸试验破坏, 并对破坏前、初始破坏、以及完全破坏的三个阶段位移和应变场后处理分析。见图 3 为 30nmNS0.4 试样失稳破坏的横向应变场云图, 图中所选散斑区域为整个过程的计算区域, 对图示区域进行劈拉破坏过程的变形及裂缝分析。

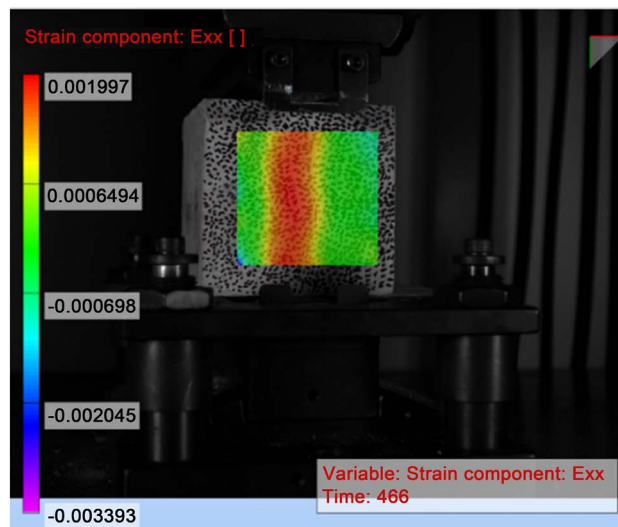


Figure 3. Sample instability destroys horizontal strain field cloud map (30nmNS0.4)

图 3. 试样失稳破坏横向应变场云图(30nmNS0.4)

图 4 为 30nmNS0.4、30nmNS0.6 混凝土试样劈拉试验的荷载-位移曲线, 由图可见 30nmNS0.4 和 30nmNS0.6 试样的曲线发展规律大致相同, 随着纳米二氧化硅含量增加, 混凝土劈裂抗拉强度亦随之增加, 较之于 30nmNS0.4, 30nmNS0.6 试样的劈拉强度增加幅度约为 11.7%。二者曲线分别在 17.632 kN、19.234 kN 之后出现转折, 荷载变化速率降低。当荷载分别达到 32.56 kN 和 36.890 kN 时, 相应位移分别为 0.0180 mm 和 0.0181 mm, 此时达到曲线峰值, 试块发生失稳破坏, 随后裂缝扩展迅速, 直至试块全部破坏。

图 5 和图 6 所示, 试样在破坏前、初始破坏和完全破坏三个阶段, 水平方向位移场和应变场的变化情况。从中可以看出, 试块表面出现裂缝的区域在水平 U 方向位移场中呈现阶梯状。其中 30nmNS0.4 在初始破坏的横向位移是 0.01488 mm, 完全破坏的时候是 0.03743 mm, 横向总位移是 0.02255 mm, 而 30nmNS0.6 在初始破坏的横向位移是 0.04551 mm, 完全破坏的时候是 0.53 mm, 横向总位移是 0.00749 mm,

较之于 30nmNS0.4, 30nmNS0.6 试样的劈拉横向总位移减少的幅度是 66.8%, 说明纳米材料含量约高的试块在劈裂 - 拉伸试验中横向位移变化越小。

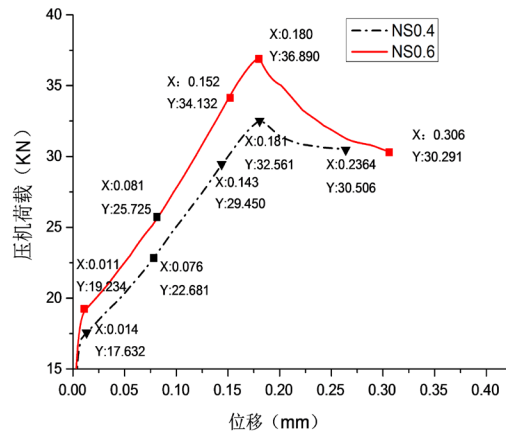


Figure 4. Split stretching test load-displacement curve
图 4. 劈裂拉伸试验荷载 - 位移曲线

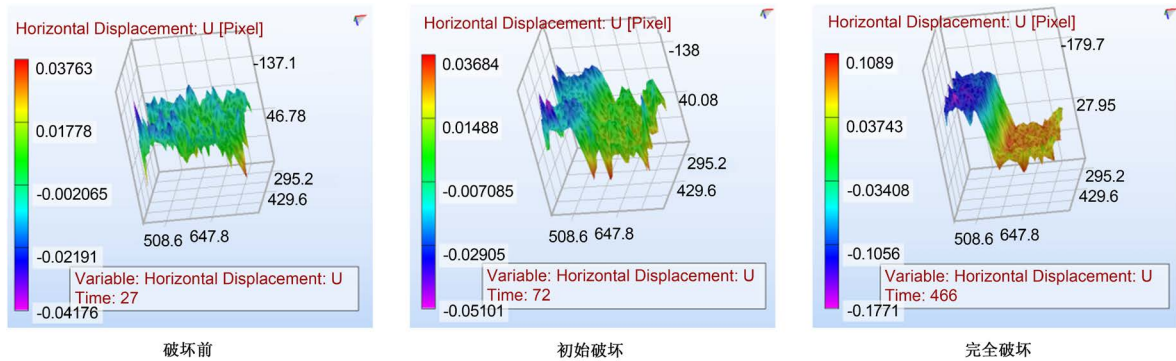


Figure 5. 30nmNS0.4 Landscape shift field cloud map
图 5. 30nmNS0.4 横向位移场云图

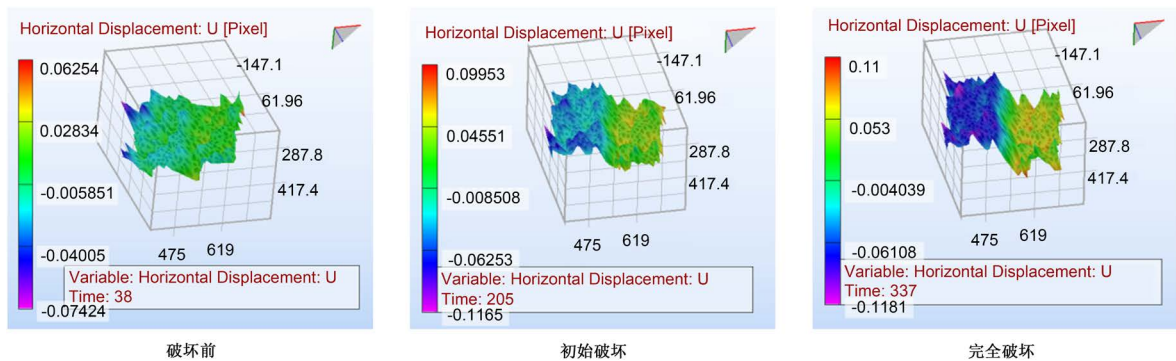


Figure 6. 30nmNS0.6 Landscape shift field cloud map
图 6. 30nmNS0.6 横向位移场云图

混凝土表面的散斑区域, 在加载初期, 位移变化较小, 随着荷载不断增加, 混凝土表面产生的横向位移也随之增大, 当试块出现失稳状态时, 位移变化较大, 出现断裂阶梯状, 表明混凝土表面有裂缝产生, 且裂缝不断扩展, 到完全破坏。

图 7 和图 8 分别给出了 30nmNS0.4、30nmNS0.6 混凝土试块表面散斑区域的水平方向应变场 E_{xx} 变化图。在加载初期, 应变变化较小, 当应变场出现峡谷状, 意味着混凝土表面出现裂缝, 试块处于失稳状态。在裂缝发展区域, 随着荷载持续增加, 应变场也随之出现较深的峡谷状。30nmNS0.4 在初始破坏的横向应变是 0.001347, 完全破坏的时候是 0.001997, 横向总应变是 0.000650, 而 30nmNS0.6 在初始破坏的横向应变是 0.001456, 完全破坏的时候是 0.001459, 横向总应变是 0.000003, 表明含纳米材料量少的应变相对于含量较多的纳米材料的应变较大, 含量越多的纳米材料的应变几乎为 0。纳米二氧化硅对混凝土劈裂 - 拉伸强度有一定的影响, 其在劈裂 - 拉伸中横向位移变化也有差异, 含量多的纳米二氧化硅材料横向位移较小。

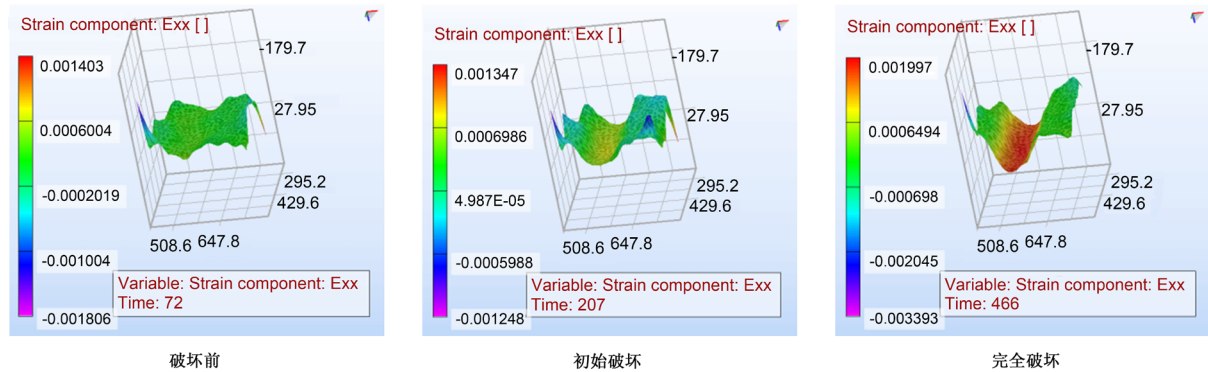


Figure 7. 30nmNS0.4 Landscape strain field cloud map
图 7. 30nmNS0.4 横向应变场云图

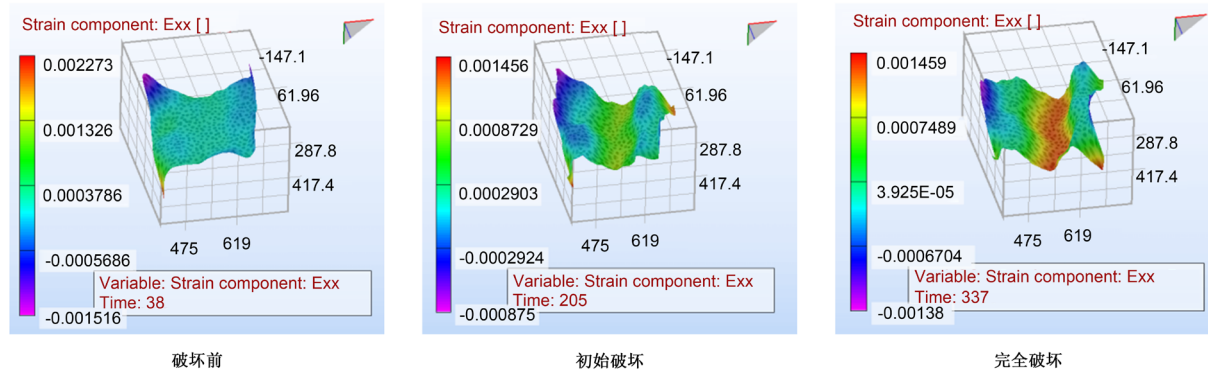


Figure 8. 30nmNS0.6 Landscape strain field cloud map
图 8. 30nmNS0.6 横向应变场云图

通过基于 MatchID 分析软件有限元模拟水平方向位移和应变可以发现有效的表面裂缝扩展对裂缝两侧表面的影响变化较小。利用数字图像散斑相关技术可以测出试件破坏荷载下的裂缝位移场和应变场的变化数据, 采用虚拟场法带入位移场方程和应变场方程, 利用牛顿 - 辛普森方法求解非线性方程, 确定在加载过程中荷载对试件破坏产生裂缝的位置, 进而计算裂缝扩展值。

5. 结论

本文基于数字散斑图像处理技术研究了混凝土试块在劈 - 拉试验中横向位移及应变场的变化, 直观地对比了纳米改性混凝土试块破坏前、初始破坏和完全破坏后的变化情况。主要结论如下:

1) 纳米二氧化硅的掺加可提高混凝土劈裂抗拉强度, 当改性材料含量为 0.6% 时, 其劈裂抗拉强度与较低含量(0.4%)相比, 增加幅度约为 11.7%, 可减小混凝土劈裂中出现裂缝的横向位移。

2) 数字散斑图像处理技术可以在试件破坏表面有效地观测裂缝处位移场和应变场,进而分析裂缝在不同阶段水平方向上位移及应变的变化,结果表明位移场和应变场变化同步,位移场出现阶梯形状,应变场出现峡谷形状,混凝土表面出现裂缝。

3) 数字散斑图像相关技术具有非接触性、精度高、无损测试等特点,且操作简单,可有效地观察试件在试验过程中变形及裂缝产生发展全过程。

参考文献

- [1] Peters, W.H. and Eanson, W.F. (1981) Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis. *Optical Engineering*, **21**, 427-431. <https://doi.org/10.1117/12.7972925>
- [2] Yamaguchi, I. (1981) Speckle Displacement and Decorrelation in the Diffraction and Image Fields for Small Object Deformation. *Optica Acta*, **28**, 1359-1376. <https://doi.org/10.1080/713820454>
- [3] Sutton, M.A., Orteu, J.J. and Schreier, H.W. (2009) Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Springer, New York.
- [4] Hild, F. and Roux, S. (2006) Digital Image Correlation: From Displacement Measurement to Identification of Elastic Properties—A Review. *Strain*, **42**, 69-80. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2006.00258.x>
- [5] 李根, 王学志, 张晓飞, 胡柯心, 李春蕊. 基于数字散斑法研究碾压混凝土的有效裂纹扩展量[J]. 混凝土, 2018(9): 9-13.
- [6] Pan, B., Qian, K.M., Xie, H.M. and Asundi, A. (2009) Two-Dimensional Digital Image Correlation for In-Plane Displacement and Strain Measurement: A Review. *Measurement Science and Technology*, **20**, Article ID: 062001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/6/062001>
- [7] 韩军海, 陈家斌, 于家成. CCD 技术在非接触式角度测量中的应用[J]. 中国造船, 2003, 44(4): 100-103.
- [8] 刘岩. 圆柱工件形位误差非接触智能在线检测技术研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [9] 欧斌. 非接触测量方法在柱状构筑物垂直度检测中的应用研究[J]. 城市勘测, 2013(4): 142-144+148.
- [10] Chu, T.C., Ranson, W.F. and Sutton, M.A. (1985) Applications of Digital-Image-Correlation Techniques to Experimental Mechanics. *Experimental Mechanics*, **25**, 232-244. <https://doi.org/10.1007/BF02325092>
- [11] Gao, Y., Cheng, T., Su, Y. and Xu, X.H. (2015) High-Efficiency and High-Accuracy Digital Image Correlation for Three-Dimensional Measurement. *Optics and Lasers in Engineering*, **65**, 73-80. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2014.05.013>
- [12] 王青原, 陈红鸟, 袁波, 黄兴震, 赵艳兵. 基于电子散斑干涉技术的混凝土裂纹扩展特性研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(4): 26-35.
- [13] 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, 35(2): 193-198.
- [14] 贺体人. 结合数字图像相关技术并采用位移数据开展复合材料本构识别的可行性分析[C]//中国力学学会固体力学专业委员会、国家自然科学基金委员会数理科学部. 2018 年全国固体力学学术会议摘要集(上), 2018: 1.
- [15] 雷冬, 乔丕忠. 混凝土压缩破坏的数字图像相关研究[J]. 力学季刊, 2011, 32(2): 173-177.