

Study on the Development Process of Uniaxial Compression Cracks in Concrete Based on Digital Speckle Method

Weiwei Ma^{1,2}, Kunkun Zhang^{1,2}, Wei Jiang^{1,2}

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

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

Email: 331951848@qq.com

Received: Jun. 28th, 2020; accepted: Jul. 21st, 2020; published: Jul. 28th, 2020

Abstract

In this paper, a three-dimensional digital speckle correlation (DIC) method is introduced into the measurement of nano-concrete deformation. Based on digital speckle technology, the full-field displacement and strain of nano-concrete during uniaxial compression are collected and analyzed. Analyze the changing characteristics of the strain cloud diagram and the changing rules of the deformation parameters of the concrete in different nano-material dosages and different stress stages, and compare the force and displacement curves of different nano-concrete concretes. The results show that the strength of concrete with a nano-content of 1.5% is reduced by 15.7% compared to concrete with a nano-content of 1%. The reason for this decrease may be that as the nano-content increases, the possibility of agglomeration of nano-silica during dispersion increases, resulting in a decrease in the strength of concrete. The digital speckle correlation method can effectively observe the strain evolution trend of nano-concrete specimens before and after deformation, thereby calculating the crack propagation of the specimen. During the compression of concrete, the sudden change of strain is caused by the local failure of concrete. Concrete failure is caused by a combination of lateral and longitudinal cracks.

Keywords

Digital Speckle, Nano-Concrete, Crack Propagation, Force and Displacement Curve

基于数字散斑法对混凝土单轴受压裂缝发展过程的研究

马卫卫^{1,2}, 张昆昆^{1,2}, 蒋伟^{1,2}

¹西京学院土木工程学院, 陕西 西安

²陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

Email: 331951848@qq.com

收稿日期: 2020年6月28日; 录用日期: 2020年7月21日; 发布日期: 2020年7月28日

摘要

本文将三维数字散斑相关方法(Digital Image correlation, DIC)引入纳米混凝土变形测量当中, 基于数字散斑技术对纳米混凝土在单轴受压过程中的全场位移和应变进行采集, 分析混凝土在不同纳米材料掺量、不同受力阶段下应变云图的变化特征和变形参数的变化规律, 并对不同纳米掺量混凝土力与位移曲线。结果表明: 纳米含量为1.5%的混凝土于纳米含量为1%的混凝土相比, 其强度降低了15.7%。其降低原因可能是由于随着纳米含量的增加, 纳米二氧化硅在分散时出现团聚的可能性增加, 从而导致混凝土强度降低。数字散斑相关方法可有效观测纳米混凝土试件在变形前后应变演化趋势, 从而对试件裂纹的扩展进行计算。混凝土受压过程中, 发生的应变突变现象是因为混凝土局部破坏导致。混凝土破坏是由横向裂缝和纵向裂缝共同作用。

关键词

数字散斑, 纳米混凝土, 裂缝扩展, 力与位移曲线

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

随着经济的飞速发展, 混凝土在现代生活中所占比例越来越重。近年来对混凝土研究地不断深入, 人们发现混凝土内部的孔隙是影响混凝土强度, 导致混凝土破坏的主要因素[1]。所以很多学者选择在混凝土中掺加改性材料, 以此来提高混凝土强度[2]。二十世纪八十年代[3]以来随着光电子技术、数字图像处理 and 计算机等新技术的诞生, 一种光学测力新方法——数字散斑相关方法(digital image correlation, DIC)形成发展起来。数字散斑相关方法是由光学原理结合力学理论, 并加以计算机辅助, 以实验的手段对混凝土的各项力学性能进行测定。数字散斑相关方法具有测量方便性、非接触性、测量高精度性[4]等特点, 使得这项技术在工程材料领域[5][6]、医学、生物、国防等[7]各个领域获得了广泛地应用。Jennifer D'Anna等[8]研究了 DIC 技术在玄武岩纤维增强胶凝材料(BFRCM)条拉伸性能中的应用。Yinyin Li、Wei Jiang [9]利用数字图像相关方法和积分理论, 对不同质量的纳米碳化钨掺入量进行了激光修复, 评价了其断裂性。洪哲、杨树[10]利用 DIC 技术研究了沥青混凝土断裂特性, 结果表明裂缝尖端区域具有不规则、不唯一、不确定性。黄兴震等[11]利用电子散斑干涉技术(ESPI)和数字散斑技术(DIC)对普通混凝土和高强混凝土的断裂特性进行研究, 结果表明 ESPI 和 DIC 均可代替传统测量仪器; 当试件变形较大时应用 DIC 技术测量的误差较小且较稳定。李东洋[12]在混凝土断裂性能测试及描述方法研究中, 表明 DIC 技术确定混凝土中裂纹尖端的方法是有有效且可行的。时金娜等[13], 利用 DIC 技术对不同玄武岩纤维掺量的混凝土进行单轴压缩实验进行分析, 结果表明掺入玄武岩纤维可减小混凝土的变形。本文采用数字散斑技术

(DIC), 对纳米二氧化硅改性混凝土压缩变形过程进行实时监测分析, 研究试件在不同力作用下的变形量、试件表面应变场变化以及裂纹开展情况。

2. 实验概况

2.1. 试件制作

实验采用 100 mm × 100 mm × 100 mm 混凝土试块, 纳米含量为 1%、1.5% 的二氧化硅纳米混凝土试块, 其试验配合见表 1:

Table 1. Test mix 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
			S/kg	G/kg	15 nm SiO ₂	
NS1.0	0.5	8.70	14.28	26.54	87.84	4.39
NS1.5	0.5	8.65	14.28	26.54	131.76	4.39

注: 表中的符号简写, W/C: 水灰比, C: 水泥, S: 砂子, G: 石子, W: 水, NS: 纳米 SiO₂ 混凝土。

2.2. 散斑制作

在本实验中采用人工散斑, 首先在试件表面先喷洒一层白漆, 再用装有黑色哑光漆的喷雾器在试件表面撒布黑色斑点。喷涂时应将黑色喷雾器提高一定高度水平喷射, 使黑色雾状油气在自身重力作用下在试件表面形成随机且均匀的分布散斑点。散斑点的大小与灰度的对比度是评价人工散斑质量的主要指标, 人工散斑的制作对灰度计算中的相关系数值及数字散斑相关测量的精确度具有一定影响。

2.3. 实验设备及装置

实验试件为混凝土试件, 实验器材: MTS 公司生产的万能伺服试验机、冷白光源、高精度低速摄像机、图像卡、计算机以及软件。试验装置和光路如图 1 所示:

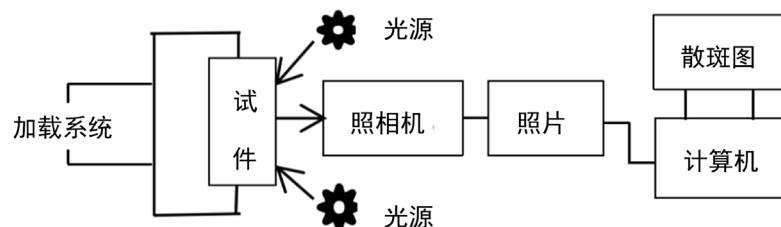


Figure 1. Test device and optical path

图 1. 试验装置和光路

2.4. 原理

如图 1 所示, 光源照射试件表面, 根据试件表面喷涂的颗粒, 形成随机分布散斑。用低速摄像机记录散斑图, 试件表面散斑随着试件的变形而发生变化, 分析变形前后散斑的位置变化, 得到散斑沿着横轴和纵轴发生的相对位移。变形前后试件的散斑图有一定的相关性, 若试件变形不大, 其表面的散斑场灰度变形可忽略。设 (x, y) 为变形前点, (x^*, y^*) 为变形后点。二者关系如下:

$$\begin{cases} x^* = x + u + \Delta x \frac{\partial u}{\partial x} + \Delta y \frac{\partial u}{\partial y} \\ y^* = y + v + \Delta x \frac{\partial v}{\partial x} + \Delta y \frac{\partial v}{\partial y} \end{cases} \quad (1)$$

$P(x_i^*, y_j^*)$ 表示变形后对应点的灰度值，则二者关系为：

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{m_x} \sum_{j=1}^{m_y} [f(x_i, y_j) - \bar{f}] [g(x_i^*, y_j^*) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m_x} \sum_{j=1}^{m_y} [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{m_x} \sum_{j=1}^{m_y} [g(x_i^*, y_j^*) - \bar{g}]^2}} \quad (2)$$

式中 \bar{f} 、 \bar{g} 分别为参考子目标和目标子目的平均灰度值，当 $C = 1$ 时，完全相关； $C = 0$ 时，无关。

2.5. 试验过程

图像采集系统由两台高分辨像机、图像采集板、计算机以及控制系统组成。利用相机进行图像采集时，摄像机同步到以恒定时间间隔捕捉被调查试样的同步图像，以保证荷载同变形场的演化与时间轴对应关系。系统中采用磁性表座将两台低速像机固定于试验机下台面，并使相机呈一定角度，保证低速相机与试件之间相对稳定性，相机轴线垂直于试件被测面，与试件表面交于形心位置，试验中采用轴向压缩的加载方式，设计加载速率为 0.5 kN/s，加载至试件破坏。

3. 试验结果分析

3.1. 力与位移曲线分析

单轴受压过程中力与位移曲线，如图 2 所示。实验结果发现，纳米二氧化硅含量为 1% 时混凝土强度为 36.9 MPa；纳米二氧化硅含量为 1.5% 时混凝土强度为 31.1 MPa，与纳米含量为 1% 的混凝土相比其强度降低了 15.7%。其降低原因可能是由于随着纳米含量的增加，纳米二氧化硅在分散时出现团聚的可能性增加，从而导致混凝土强度降低。

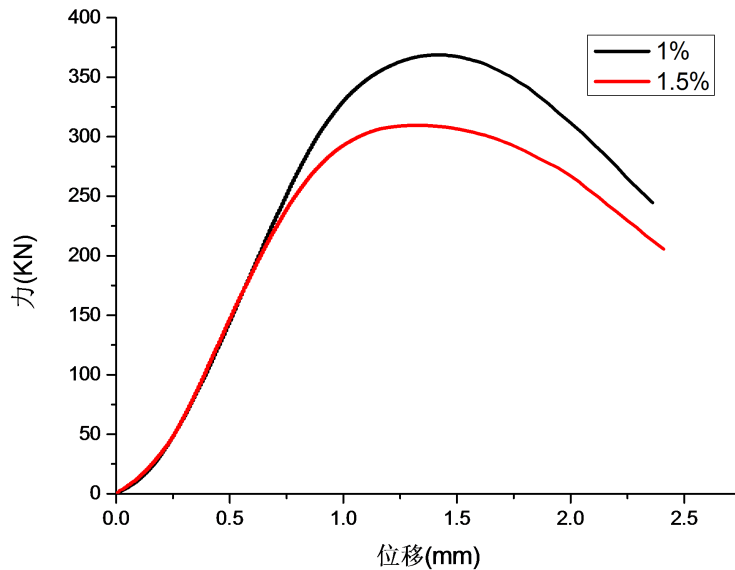


Figure 2. Force and displacement curve

图 2. 力与位移曲线

3.2. 应变分析

图 3~6 为不同纳米材料掺量在不同受压阶段的横向、纵向应变云图。分别为混凝土受压前期(a)、中期(b) (c)、后期(d)~(g)、试件破坏(h)四个阶段。

混凝土受压前期,如图 3~6 中图(a)所示,横、纵向云图中均有密压区出现,且两种含量的试件左下部都有应变集中区域产生,由此可知此时试件内部存在的原始孔隙已基本被挤压密实。

混凝土受压中期,如图 3~6 中(b) (c)所示,不同掺量的混凝土在受压中期时均出现了横向应变集中区域,由图中标尺可读出,含量为 1% 的纳米混凝土受压前期左下部的集中应变区域已经被破坏,随之延伸出两条应变加深带;含量为 1.5% 的纳米混凝土应变集中区域增大,从上下方向各延伸出一条应变加深带;因为混凝土本身就是带裂缝工作,所以试验继续进行。混凝土受压中期局部最大应变见表 2,通过对不同含量纳米混凝土在中期局部最大应变值比较,结果表明应力较低时,含量为 1% 的混凝土对变形的抵抗能力较弱。

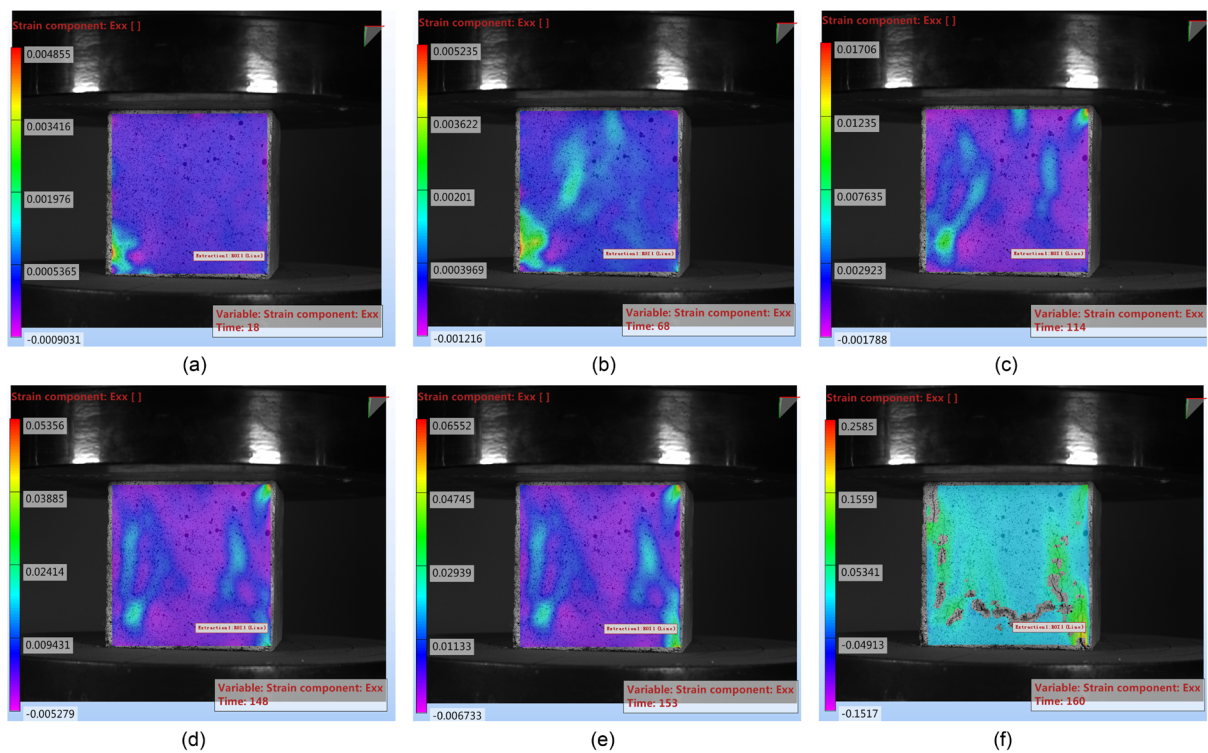
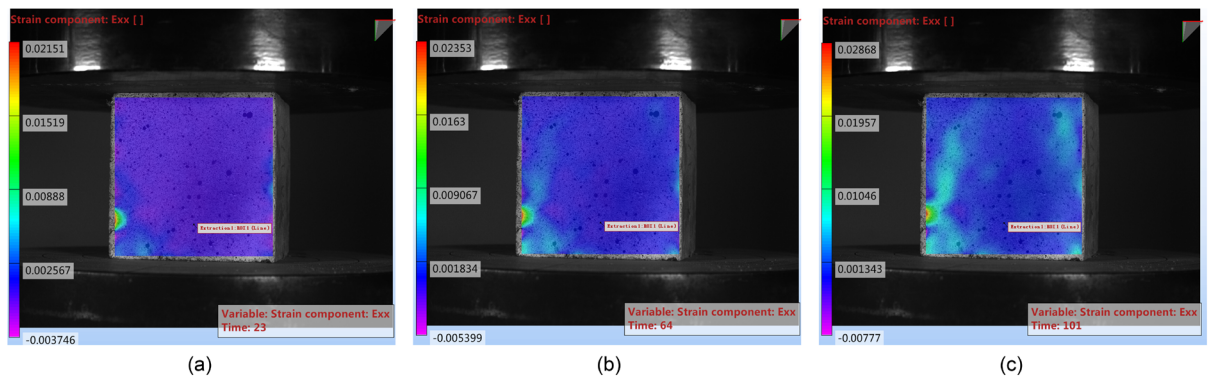


Figure 3. Horizontal strain cloud image of concrete with 1% nanometer content

图 3. 纳米掺量为 1% 的混凝土的横向应变云图



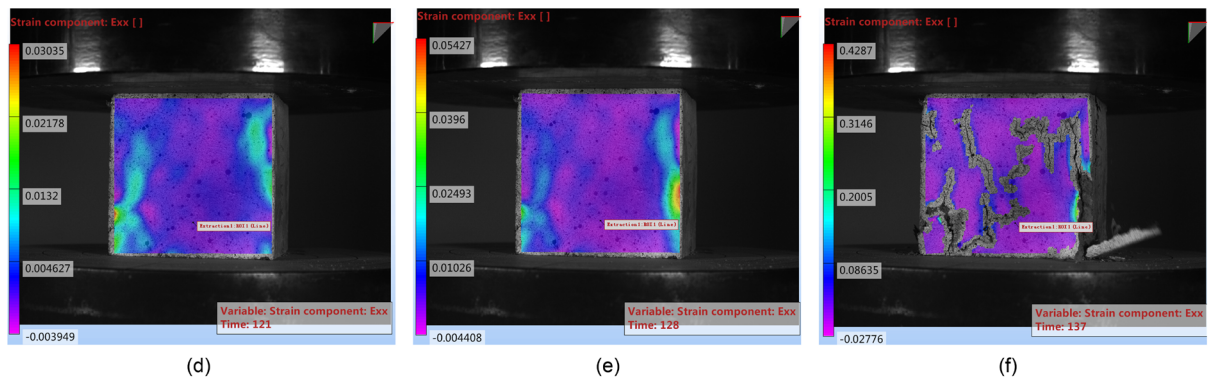


Figure 4. Horizontal strain cloud image of concrete with 1.5% nanometer content
图 4. 纳米掺量为 1.5% 的混凝土的横向应变云图

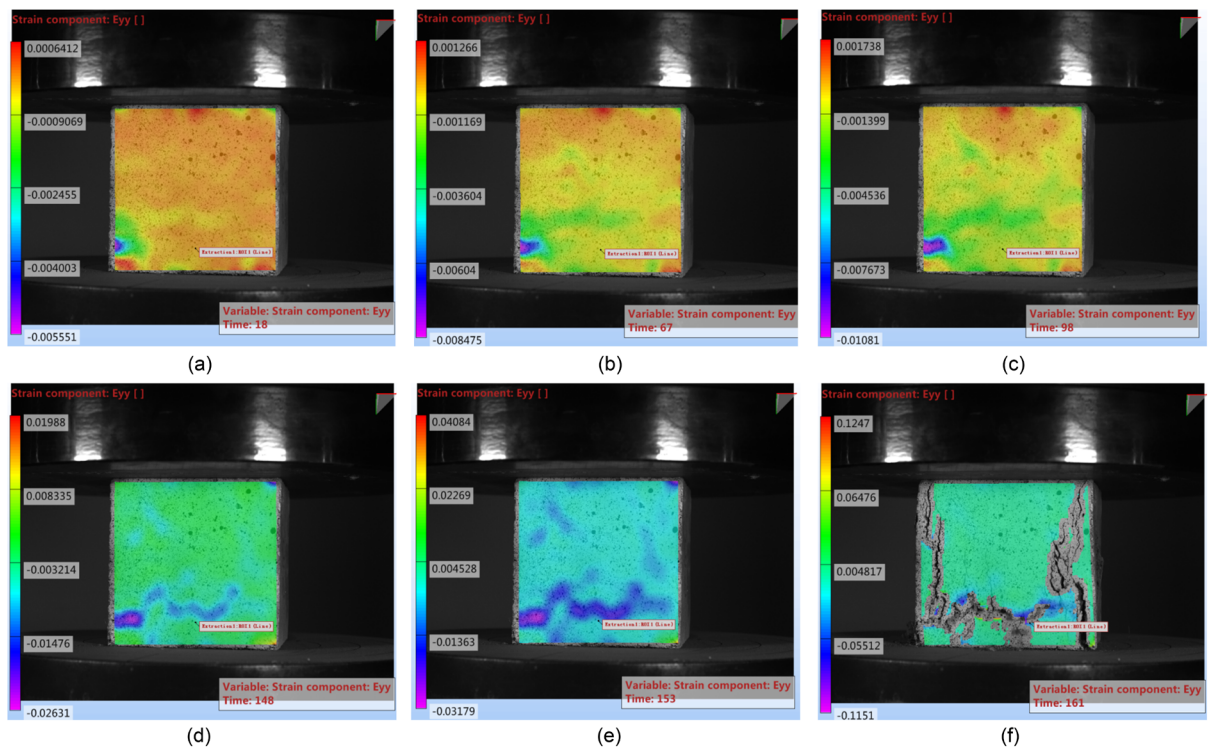
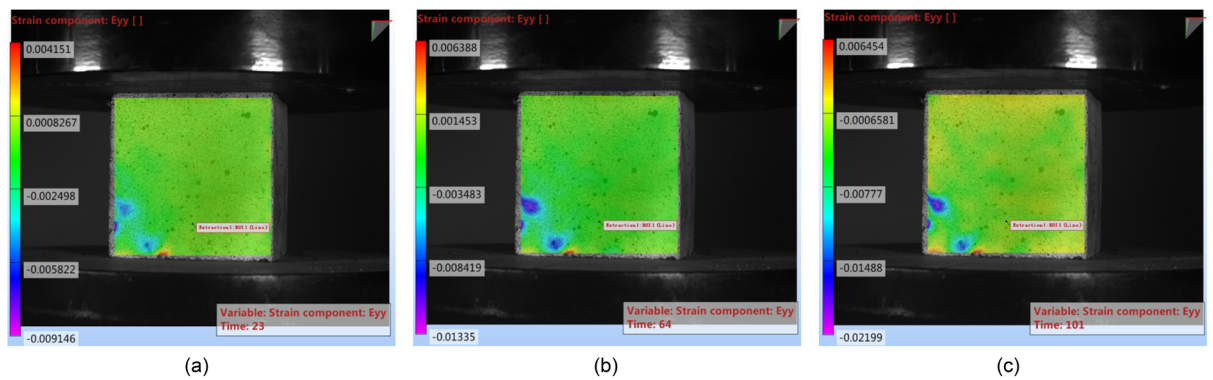


Figure 5. Longitudinal strain cloud image of concrete with 1% nanometer content
图 5. 纳米掺量为 1% 的混凝土的纵向应变云图



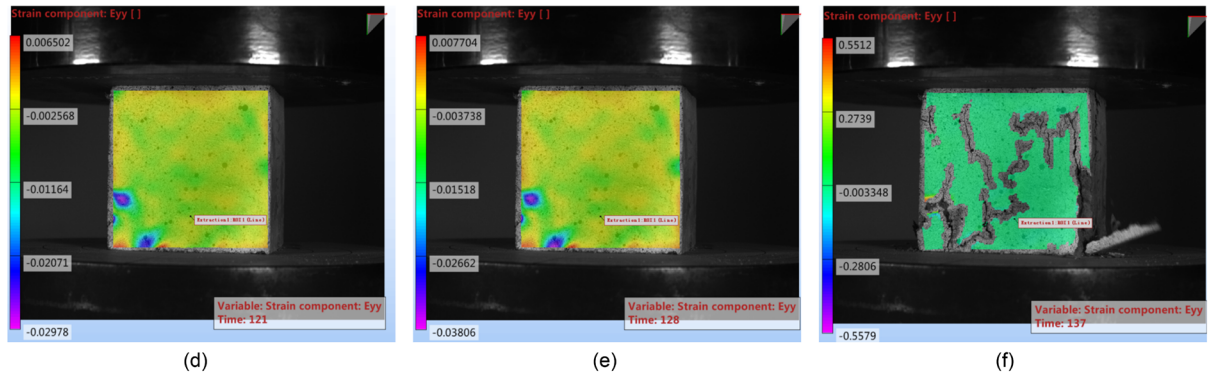


Figure 6. Longitudinal strain cloud diagram of concrete with nanometer content of 1.5%
图 6. 纳米掺量为 1.5% 的混凝土的纵向应变云图

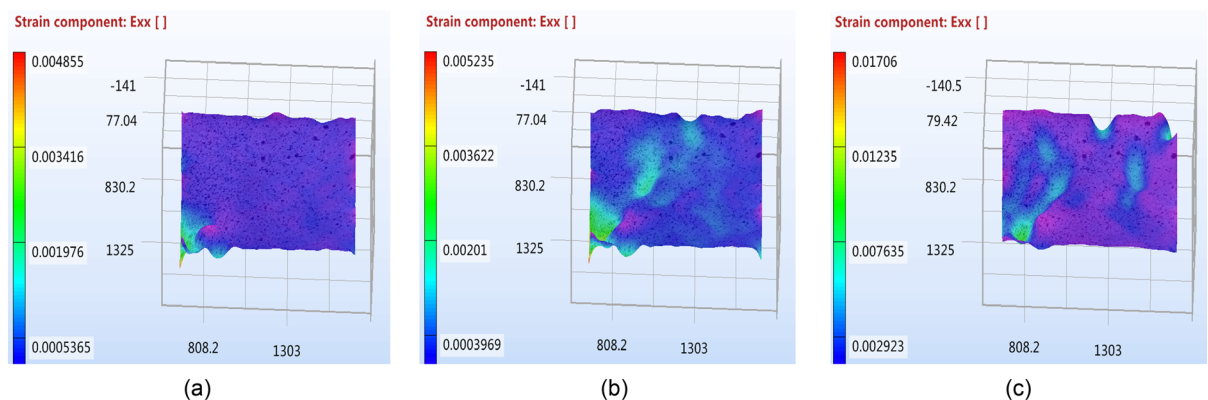
Table 2. Local maximum strain value in the middle stage of concrete compression
表 2. 混凝土受压中期局部最大应变值

纳米含量	横向局部最大应变	纵向局部最大应变
1%	0.5235×10^{-2} 至 1.706×10^{-2}	0.1266×10^{-2} 至 0.1738×10^{-2}
1.5%	2.353×10^{-2} 至 2.868×10^{-2}	0.6388×10^{-2} 至 0.6454×10^{-2}

混凝土受压后期，如图 3~6 中(d)~(g)所示，局部最大应变继续增加，由图中标尺可读出，混凝土受压后期局部最大应变见表 3，由此可得，混凝土受压后期纳米含量为 1% 的混凝土较纳米含量为 1.5% 的混凝土局部最大应变变化更加明显，且与中期比较 1% 纳米混凝土应变剧增，从应变云图中可以看出是因为含量为 1% 的混凝土左下角破坏导致。混凝土在受压过程中除纵向压应变外，还有横向膨胀应变，所以结合横、纵向集中应变云图及三维应变云图(图 7，图 8)可更加明显地看出，纳米含量为 1% 的混凝土产生了一条近乎贯穿的横向裂缝，和试件左右两条近乎贯穿的纵向裂缝；而纳米含量为 1.5% 的混凝土仅有试件左右两侧出现近乎贯穿的裂缝。

Table 3. Local maximum strain value in the later stage of concrete compression
表 3. 混凝土受压后期局部最大应变值

纳米含量	横向局部最大应变	纵向局部最大应变
1%	5.356×10^{-2} 至 9.489×10^{-2}	1.988×10^{-2} 至 6.239×10^{-2}
1.5%	3.002×10^{-2} 至 5.427×10^{-2}	0.6479×10^{-2} 至 0.7704×10^{-2}



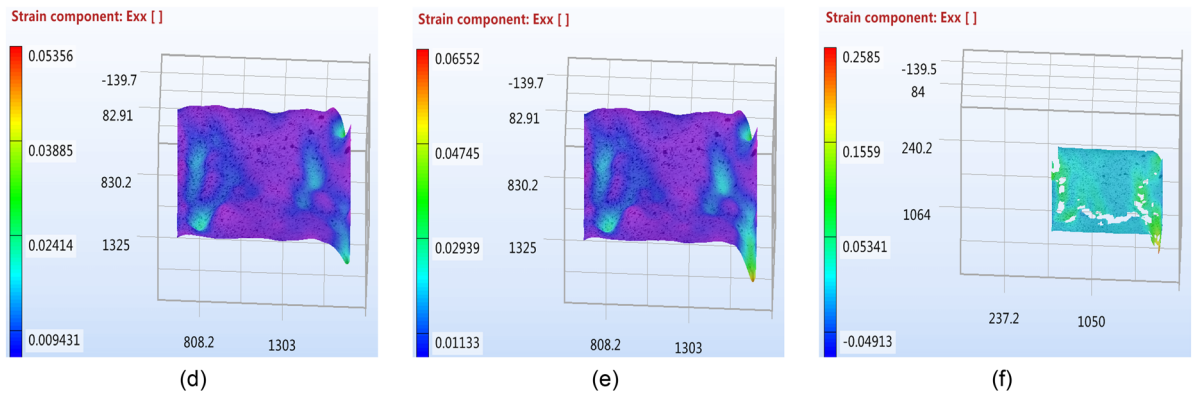


Figure 7. Horizontal strain cloud image of concrete with 1% nanometer content
图 7. 纳米掺量为 1% 的混凝土的横向应变云图

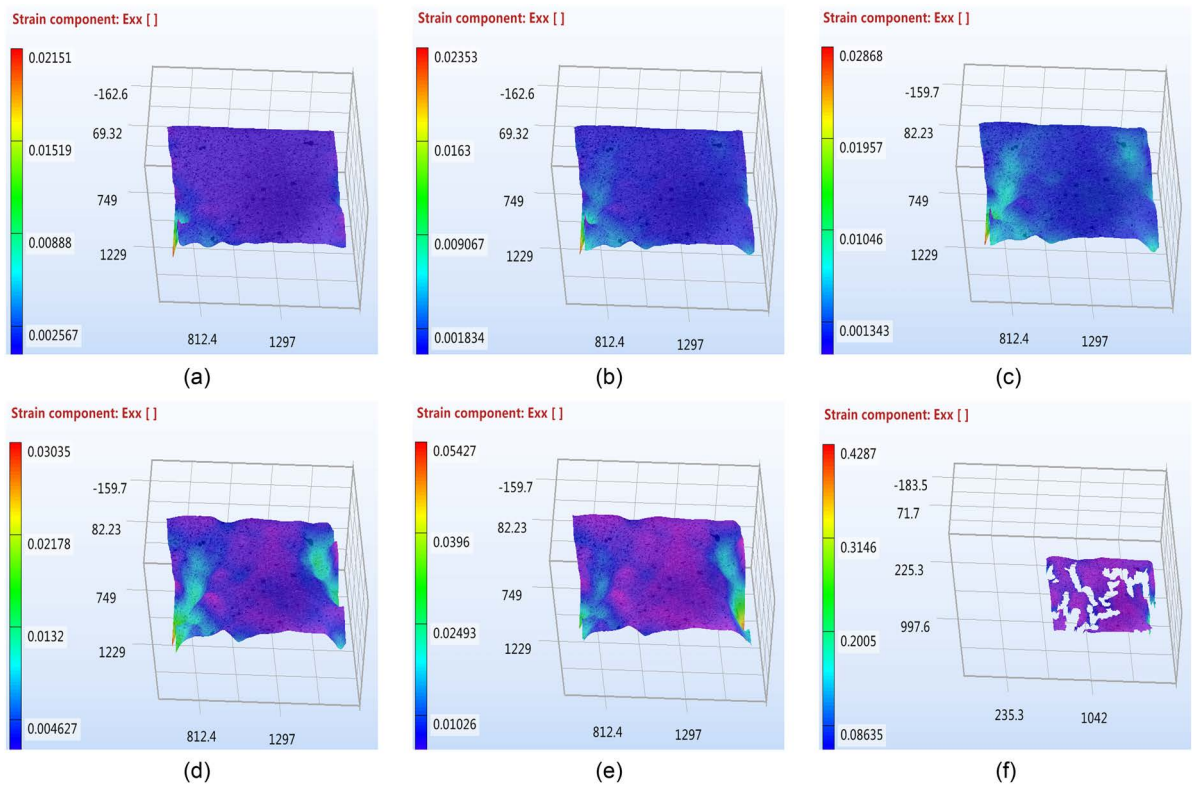


Figure 8. Horizontal strain cloud image of concrete with 1.5% nanometer content
图 8. 纳米掺量为 1.5% 的混凝土的横向应变云图

试件破坏,如图 3~6 中(h)所示,在试件破坏时,各含量的纳米混凝土左右两侧均出现贯穿竖向裂缝,纳米含量为 1% 的混凝土出现横向贯穿裂缝,纳米含量为 1.5% 的混凝土也出现了很多较小的横向裂缝。说明混凝土破坏是由横向裂缝和纵向裂缝共同形成。

4. 结论

本实验基于数字散斑技术对纳米混凝土在单轴受压过程中的全场位移和应变进行了采集,通过对比不同掺量纳米混凝土荷载与位移曲线,分析了混凝土在不同纳米材料掺量、不同受力阶段下应变云图的变化特征和变形参数的变化规律。

- 1) 纳米含量为 1.5% 的混凝土于纳米含量为 1% 的混凝土相比, 其强度降低了 15.7%。其降低原因可能是由于随着纳米含量的增加, 纳米二氧化硅在分散时出现团聚的可能性增加, 从而导致混凝土强度降低。
- 2) 数字散斑相关方法可有效观测纳米混凝土试件在变形前后应变演化趋势, 从而对试件裂纹的扩展进行计算。
- 3) 混凝土受压过程中, 发生的应变突变现象是因为混凝土局部破坏导致。
- 4) 混凝土最终破坏模式是由横向裂缝和纵向裂缝共同形成。

参考文献

- [1] 王静薇. 混凝土细微观结构与强度的关系[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [2] 周孟真. 纳米颗粒改性混凝土的性能及损伤机理研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西京学院, 2019.
- [3] Peters, W.H. and Ranson, W.F. (1982) Digital Imaging Techniques on Experimental Stress Analysis. *Optical Engineering*, **21**, 427-432. <https://doi.org/10.1117/12.7972925>
- [4] 谭豪云. 数字散斑相关方法研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2008.
- [5] 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.
- [6] Gao, Y., Cheng, T., Su, Y., Xu, X.H., *et al.* (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>
- [7] 刘战伟, 等. 基于数字散斑相关方法的环氧树脂材料冲头加载实验研究[C]//中国力学学会北方七省市第十三届学术大会论文集. 郑州: 河南省力学学会, 2010: 165.
- [8] D'Anna, J., Amato, G., Chen, J.F., Minafò, G. and La Mendola L. (2019) On the Use of Digital Image Correlation (DIC) for Evaluating the Tensile Behaviour of BFRCM Strips. *Key Engineering Materials*, **817**, 377-384. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.817.377>
- [9] Li, Y.Y. and Jiang, W. (2019) DIC-Based *J*-Integral Evaluation of Laser Repaired Cracks with Micro/Nanomaterial Addition. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **42**, 2262-2275. <https://doi.org/10.1111/ffe.13040>
- [10] 洪哲, 杨树. 基于 DIC 技术的沥青混凝土开裂特征量化研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2019, 16(7): 1652-1659.
- [11] 黄兴震, 陈红鸟, 刘轶, 肖建春, 王青原. 基于 ESPI 和 DIC 技术的混凝土断裂特性研究及对比分析[J]. *应用力学学报*, 2018, 35(5): 1131-1138+1191.
- [12] 李东洋. 湿热环境下 CFRP 加固 RC 梁疲劳主裂纹扩展规律研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [13] 时金娜, 赵燕茹, 郝松, 王磊. DIC 技术分析玄武岩纤维混凝土单轴受压应力应变曲线研究[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(6): 1668-1673+1680.