

# 基于数字图像技术对Nano-SiO<sub>2</sub>改性混凝土力学性能的研究

张昆昆<sup>1,2\*</sup>, 马卫卫<sup>1,2</sup>, 蒋伟<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>西京学院, 土木工程学院, 陕西 西安

<sup>2</sup>陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

Email: \*1219543287@qq.com

收稿日期: 2020年10月29日; 录用日期: 2020年11月11日; 发布日期: 2020年11月18日

## 摘要

通过数字图像处理技术(DIC), 对不同含量(0.8%、1.0%、1.5%、2.0%)纳米改性混凝土进行抗压试验, 采用CCD低速摄像机对试样加载过程实时监测, 并基于Match ID软件分析不同荷载下位移场U的变化规律以及裂纹开展区域不同坐标的位移量的变化规律。研究表明: 在不同含量的纳米改性混凝土抗压试验中, 含量为2.0%时混凝土强度较高。在出现裂纹之前, 位移变化较小, 裂纹开展到最终破坏, 位移变化较大。

## 关键词

数字图像处理技术, 纳米改性混凝土, Match ID软件, 位移场

# Study on Mechanical Properties of Nano-SiO<sub>2</sub> Modified Concrete Based on Digital Image Technology

Kunkun Zhang<sup>1,2\*</sup>, Weiwei Ma<sup>1,2</sup>, Wei Jiang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xi'an Shaanxi

Email: \*1219543287@qq.com

Received: Oct. 29<sup>th</sup>, 2020; accepted: Nov. 11<sup>th</sup>, 2020; published: Nov. 18<sup>th</sup>, 2020

\*通讯作者。

文章引用: 张昆昆, 马卫卫, 蒋伟. 基于数字图像技术对 Nano-SiO<sub>2</sub> 改性混凝土力学性能的研究[J]. 纳米技术, 2020, 10(4): 59-68. DOI: 10.12677/nat.2020.104008

## Abstract

Through digital image processing technology (DIC), the compressive test of nano-modified concrete with different content (0.8%, 1.0%, 1.5%, 2.0%) is carried out, and the CCD low-speed camera is used to monitor the sample loading process in real time, and is based on Match ID. The software analyzes the changing law of the displacement field  $U$  under different loads and the changing law of the displacement of different coordinates in the crack development area. Research shows that in the compressive test of nano-modified concrete with different content, the concrete strength is higher when the content is 2.0%. Before the crack appears, the displacement change is small, and the crack develops to the final failure, the displacement change is larger.

## Keywords

Digital Image Processing Technology, Nano-Modified Concrete, Match ID Software, Displacement Field

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

在 19 世纪 60 年代, 纳米材料被誉为“21 世纪最有前途的材料”, 纳米材料指粒径在纳米级, 尺寸在 1~100 nm 范围之间的材料。普通硅酸盐水泥的水化反应主要是指水化生成硅酸钙的过程, 但其在内部细观尺度下水化产物还存在缺陷。Nano-SiO<sub>2</sub> 的粒径非常小, 具有较好的火山灰活性, 纳米 SiO<sub>2</sub> 改性机制以加速水化反应为主, 在早期生成大量水化产物, 水化生成的低密度硅酸钙凝胶会填充微孔, 改善的微观组织结构[1] [2], 从而进一步改变内部骨料与水泥之间的界面结构, 提高混凝土的强度、耐久性和密实性等性能[3] [4] [5] [6]。姚廉[7]等采用 15 nm SiO<sub>2</sub> 和 80 nm SiO<sub>2</sub> 分别以 0.5%、1%、1.5%、2% 替代水泥对混凝土进行改性, 研究表明: 替代水泥率为 2% 的 15 nm SiO<sub>2</sub> 与替代水泥率为 1.5% 的 80 nm SiO<sub>2</sub> 比其他替代水泥率的混凝土抗压强度、抗折强度增幅较大, 提高了混凝土的力学性能。叶青[8]等研究人员采用二氧化硅纳米材料对混凝土改性及机理进行研究, 结果表明: 纳米材料能改善混凝土微观结构, 降低水泥浆体内部结构缺陷, 提高了混凝土的密实度和力学性能。

数字图像技术(Digital image correlation, DIC)具有精度高、灵活性高、非接触等优点, 随着国内外学者对数字图像技术进一步的探究, 使其在不同材料的弹塑性应力、应变分析等方面得到广泛的应用[9] [10] [11] [12]。Pan B [13]等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。李根[14]等研究了劈拉过程中碾压混凝土裂缝开裂的位移场和应变场的变化, 结果表明: 随着试件的尺寸增加, 其延性越好。基于数字图像技术在材料应力应变的研究, 采用虚拟场法, 改变了材料本构模型参数的试验方法。Ahn [15]等采用了数字图像法技术对铝镁合金在微尺度下进行了应变变化的相关研究。

本文对不同掺量的 15 nm SiO<sub>2</sub> 改性混凝土的抗压过程进行研究, 使用 CCD 摄像机采集混凝土表面裂缝变化全过程的数字信息, 并基于 Match ID 系统将 CCD 采集的数字信息结合数字图像法处理技术和虚拟场法对试块表面图像进行分析, 得到不同掺量纳米改性混凝土水平方向的位移场  $U$  和应变场  $E_{xx}$ , 进

一步对比不同掺量的纳米改性混凝土不同方向位移场和应变场的变化规律及混凝土在抗压过程中表面裂缝的变化。

## 2. 原材料及试验设计

### 2.1. 原材料

本试验采用纳米二氧化硅(Nano-SiO<sub>2</sub>)材料对混凝土进行改性, 改性纳米二氧化硅材料掺量分别为0.8%、1.0%、1.5%、2.0%, 选取的粒径为15 nm, 纳米颗粒主要指标如表1所示。水泥采用陕西秦岭牌P.P 42.5R 级水泥, 物理性能指标如表2。

**Table 1.** Performance indicators of nanoparticle materials

**表 1.** 纳米颗粒材料性能指标

纳米材料	粒径/nm	分子量	比表面积 m <sup>2</sup> /g	烧失量/%	PH 值
Nano-SiO <sub>2</sub>	15	60.08	250	0.2	5~7

**Table 2.** Physical performance indexes of Portland cement

**表 2.** 普通硅酸盐水泥物理性能指标

密度/(kg/m <sup>3</sup> )	细度/%	安定性	比表面积(m <sup>2</sup> /g)	凝结时间/min	
				初凝	终凝
3100	≤8.0	合格	0.36	≥60	≤300

本试验选择的粗骨料级配为二级配, 表观密度为 2835 kg/m<sup>3</sup>, 堆积密度为 1720 kg/m<sup>3</sup>, 细骨料为河砂, 细度模数为 2.80。

试样养护和抗压试验按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2002)进行。试验配合比如表3所示。

**Table 3.** Test mix design

**表 3.** 试验配合比设计

编号	W/C	C/kg	15nm SiO <sub>2</sub>	天然骨料		W/kg
NS0.8	0.5	8.71	70.27	14.28	26.54	4.39
NS1.0	0.5	8.70	87.84	14.28	26.54	4.39
NS1.5	0.5	8.65	131.76	14.28	26.54	4.39
NS2.0	0.5	8.61	175.68	14.28	26.54	4.39

注: NS0.8: 掺量为 0.8%SiO<sub>2</sub>; W/C: 水灰比; C: 水泥; W: 水。

### 2.2. 试验过程

1、在进行抗压试验前, 对混凝土试件进行散斑处理, 2、将 CCD 低速摄像机安装在刚性支架上, 调节 CCD 摄像机位置, 使摄像机能对准加载试块; 然后固定摄像机位置, 避免摄像机移动。3、调节光圈、光源以及对焦, 使计算机显示清晰的准备加载试块的图片。4、采用 CCD 摄像机和 Match ID 系统采集不同位置校正板信息, 保证可以采集到混凝土试块在加载过程中所有的散斑点。

在加载过程中, CCD 摄像机与万能压力试验机协调一致, 确保试验同时开始, 同时结束, 确保荷载同位移场能直接对应。试件按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2002)进行抗压试验,

试件加载速率为 0.5 Mpa~0.8 Mpa，加载至试件完全破坏后自动停止。

试验所需设备有：万能压力试验机、CCD 摄像机、光源、Match ID 操作系统、校正板等。如图 1(a)、图 1(b)所示。

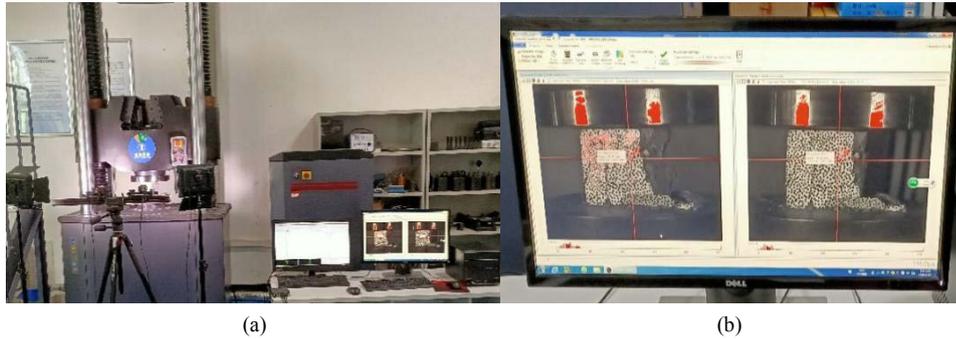


Figure 1. Test equipment. (a) Low-speed camera capture; (b) Acquisition interface  
图 1. 试验仪器。(a) 低速相继采集；(b) 采集界面

### 3. 结果与分析

#### 3.1. Match ID 位移算法

数字图像技术指采用 CCD 摄像机采集试样表面散斑点在试验中变形前后的图像，通过分析试样表面分布的散斑点位移变化计算试样表面的位移云图。本文采用 Match ID 软件计算分析位移场裂纹区域坐标点的变化规律。

在试验过程中参考图像内子集的形状会发生形变，由固体的变形连续性假定可知，参考图像子集分布在 M 点周围的 N 点，则目标图像的子集也在 M 点周围，如图 2 所示，参考子集的点映射到目标子集的区域内的相同点。即形成形函数：

$$\begin{cases} x'_\xi = x_\xi + \xi(x_i, y_j) \\ y'_j = y_j + \eta(x_i, y_j) \end{cases} \quad (1)$$

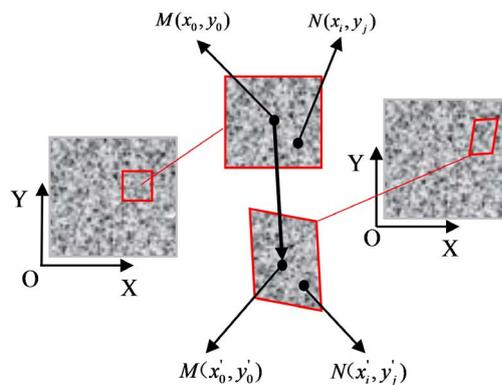


Figure 2. Subset before and after deformation  
图 2. 变形前后子集

根据试样子集变形不同，形函数可分为如下几种：

(1)

$$\begin{aligned}\xi_0(x_i, y_j) &= u \\ \eta_0(x_i, y_j) &= v\end{aligned}\quad (2)$$

该函数为零阶形函数，适用于参考子集与目标子集之间的位移。

(2)

$$\begin{cases} x'_i = x_i + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \\ y'_j = y_j + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \end{cases}\quad (3)$$

该函数为一阶函数，表示位移、剪切、转角、应变及股和条件下的变形。其中  $\frac{\partial u}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial u}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial v}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial v}{\partial y}$  为图像子集的位移梯度； $\Delta x$ 、 $\Delta y$  为参考图像子集内点  $M(x_0, y_0)$  与  $N(x_i, y_j)$  沿坐标轴方向距离，即  $\Delta x = x_i - x_0$ ， $\Delta y = y_j - y_0$ 。

(3)

$$\begin{cases} x'_i = x_i + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Delta x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Delta y^2 + u_{xy} \Delta x \Delta y \\ y'_j = y_j + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \Delta x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \Delta y^2 + v_{xy} \Delta x \Delta y \end{cases}\quad (4)$$

该函数为二阶形函数，可以表示比一阶形函数更复杂的变形，但函数计算复杂，因此在 MatchID 分析过程中一般用一阶形函数。

### 3.2. 试验分析

不同含量(即: NS0.8; NS1.0; NS1.5; NS2.0)的纳米改性混凝土强度如图 3 所示。由图可见, 随着 Nano-SiO<sub>2</sub> 材料掺量的增加试样抗压强度呈现波动的趋势, 与掺量为 NS0.8 相比, NS1.0、NS2.0 抗压强度提高的幅度分别 10.02%、14.51%。SiO<sub>2</sub> 掺量为 2.0%, 抗压强度较高, 为 43.4 Mpa。研究表明: Nano-SiO<sub>2</sub> 材料与混凝土内部的 Ca(OH)<sub>2</sub> 发生反应生成水化硅酸盐凝胶, 可以改善混凝土内部砂浆与骨料之间的过渡区域, 可有效的增加混凝土的抗压强度, 且存在最佳含量使纳米改性混凝土抗压强度最佳。

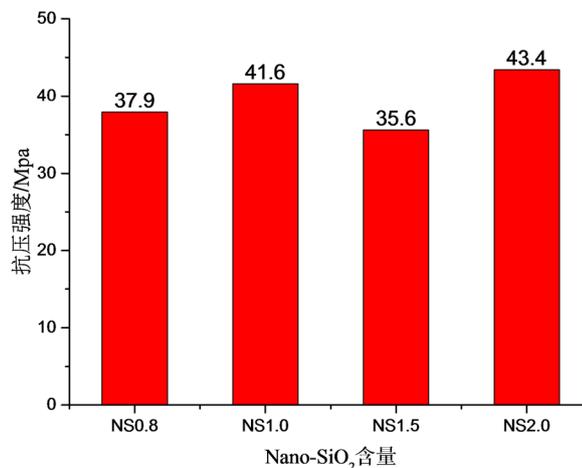
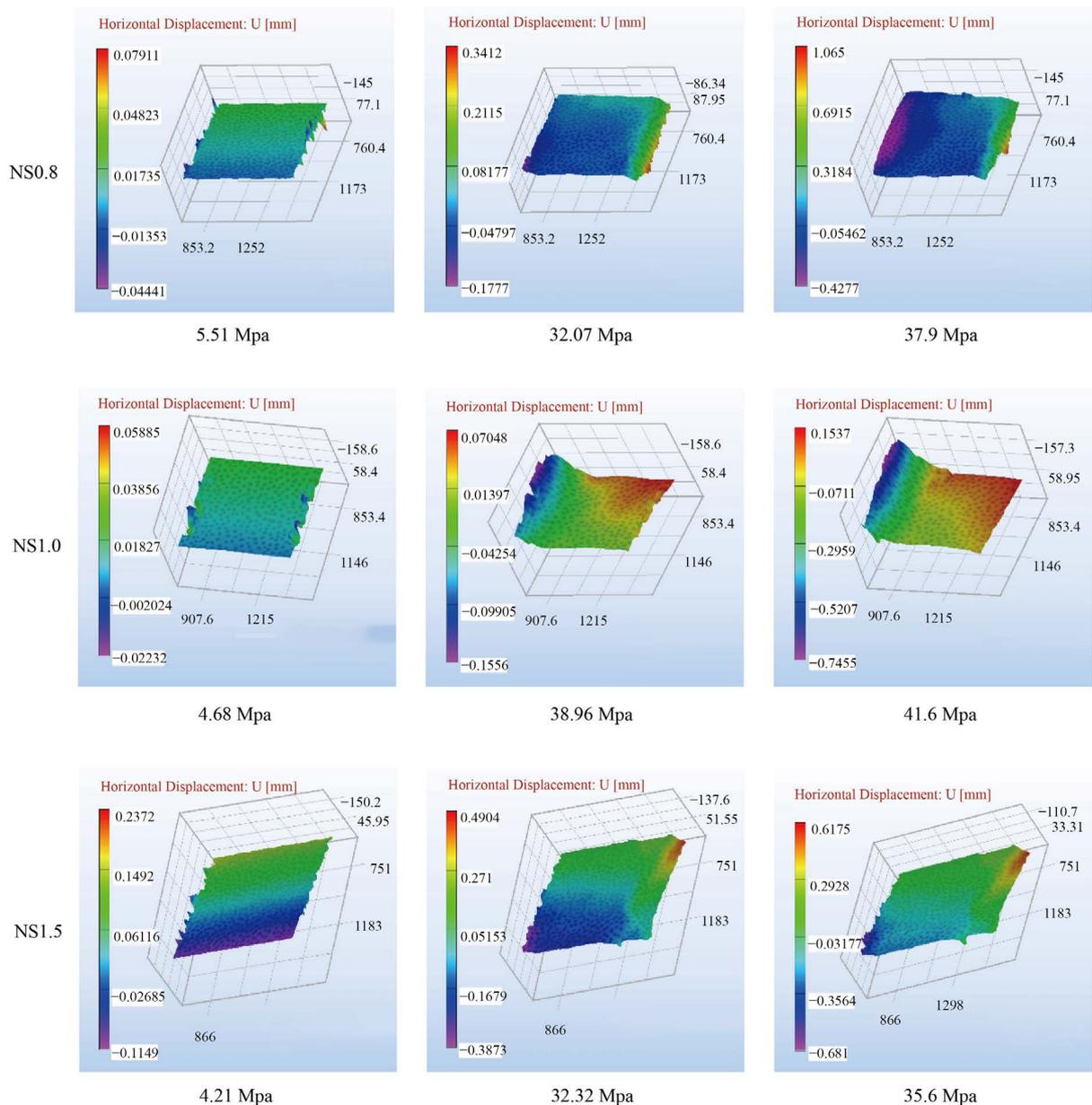


Figure 3. Compressive strength of different contents  
图 3. 不同含量抗压强度

基于 Match ID 软件, 对不同含量(即: NS0.8、NS1.0、NS1.5、NS2.0)纳米改性混凝土不同荷载下进行位移场  $U$  处理分析。得到不同含量纳米改性混凝土位移场, 如图 3~图 6 所示, 应变场如图 7~图 10 所示。分别列出了试件从加载到失稳破坏三个阶段位移场  $U$  在不同荷载下的变化情况和裂纹扩展的过程, 且水平方向的正数表示水平向右位移量, 负数表示向左位移量。加载初期, 试样表面位移变化较小, 随着荷载的增加, 不同含量的纳米改性混凝土(NS0.8、NS1.0、NS1.5、NS2.0)分别在 32.09 Mpa、38.96 Mpa、32.32 Mpa、37.2 Mpa 出现裂纹, 位移变化明显增大, 可能只是试样表面出现浅层裂纹, 内部尚未开裂, 荷载分别加载到峰值时, 即 37.9 Mpa、41.6 Mpa、35.6 Mpa、43.4 Mpa, 试块失稳, 较之于 NS1.0, 试样 NS2.0 强度的增幅大约为 4.3%, 但试样 NS2.0 裂纹开裂早于试样 NS1.0。

在裂纹开展区域选择一条水平方向的线段, 将线段等距分为五个点为 5 个坐标, 如图 5 所示为 NS0.8 选点分析。则不同含量的纳米改性混凝土每个坐标的位移量如图 6~图 9 所示。最大位移如图 10 所示。



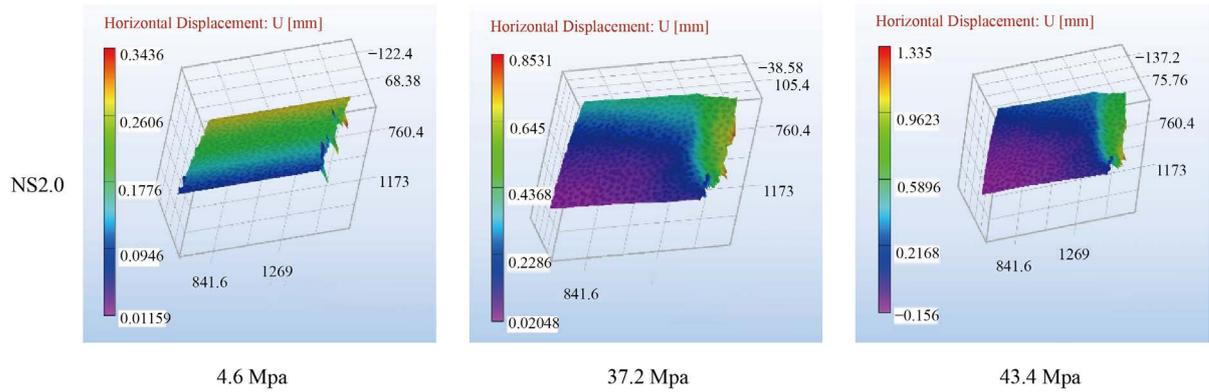


Figure 4. Displacement field with different contents  
图 4. 不同含量位移场

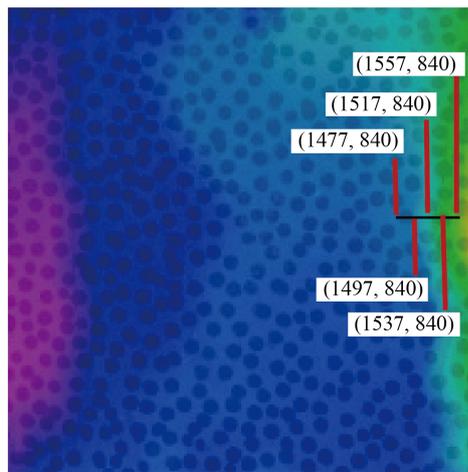


Figure 5. NS0.8 point selection analysis  
图 5. NS0.8 选点分析

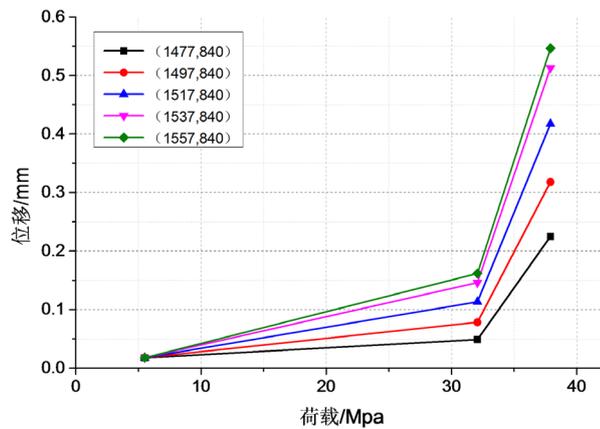


Figure 6. NS0.8 coordinate displacement  
图 6. NS0.8 坐标位移

由图 6~图 10 可见：裂纹开展不是全部沿一个方向扩展裂纹开展，部分裂纹位移是水平左右方向都有变化。裂纹开裂之前位移较小，裂纹出现到失稳破坏位移和应变变化较大。选取不同含量的纳米改性

混凝土(NS0.8、NS1.0、NS1.5、NS2.0)坐标点的最大位移,位移量分别是:0.53 mm、0.50 mm、0.16 mm、0.57 mm。较之于NS0.8,NS1.0强度高于NS0.8,但最大位移量降低的幅度约为5.6%,NS2.0位移量增幅大约为7.5%,NS1.5的强度较小,位移量较小,NS2.0位移变化最大。

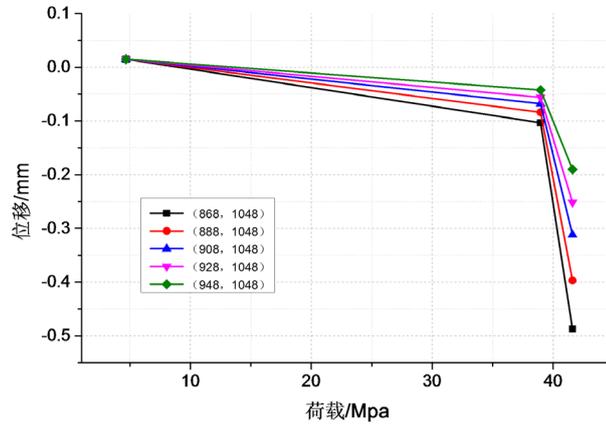


Figure 7. NS1.0 coordinate displacement  
图 7. NS1.0 坐标位移

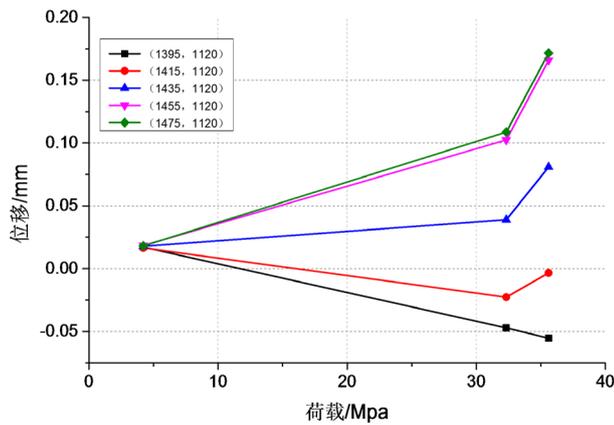


Figure 8. NS1.5 coordinate displacement  
图 8. NS1.5 坐标位移

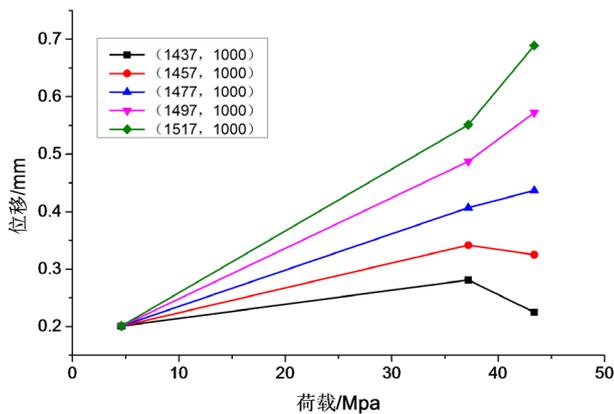


Figure 9. NS2.0 coordinate displacement  
图 9. NS2.0 坐标位移

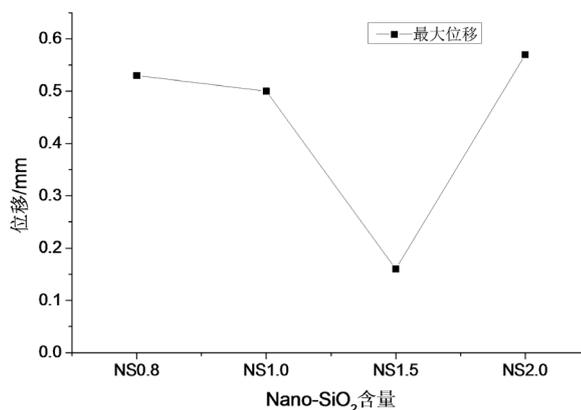


Figure 10. Maximum displacement change

图 10. 最大位移变化

#### 4. 结论

本文基于数字图像技术相关方法，研究了不同含量纳米改性混凝土试块在抗压过程中水平方向位移场变化分析，直观地对比了混凝土试块在不同阶段变化情况，主要结论如下：

(1) 纳米改性混凝土不一定随着纳米材料含量的增加而增大，有可能会影响混凝土的强度，使用纳米改性混凝土应当选取合理的纳米材料含量。Nano-SiO<sub>2</sub>材料掺量为NS1.5时，较之于NS1.0试样的抗压强度降低幅度约为14.42%，NS2.0强度较大，为43.4 Mpa，较之于NS1.0试样抗压强度增幅约为4.1%。

(2) 加载初期，试样表面位移变化较小，随着荷载的增加，不同含量的纳米改性混凝土(NS0.8、NS1.0、NS1.5、NS2.0)分别在32.09 Mpa、38.96 Mpa、32.32 Mpa、37.2 Mpa出现裂纹，位移变化明显增大，可能只是试样表面出现浅层裂纹，内部尚未开裂，试样NS2.0裂纹开裂早于试样NS1.0。

(3) 基于Match ID软件对裂纹区域选点分析，研究表明：水平方向位移向两边扩展。

(4) 基于数字图像技术，可获取试样裂纹开展全过程水平方向位移和应变数据，根据不同的选点分析区域多个位移变化规律，拓展研究的分析面。

#### 参考文献

- [1] 叶青. 纳米 SiO<sub>2</sub> 与硅粉的火山灰活性的比较[J]. 混凝土, 2001(3): 19-22.
- [2] Balapour, M., Joshaghani, A. and Althoey, F. (2018) Nano-SiO<sub>2</sub> Contribution to Mechanical, Durability, Fresh and Microstructural Characteristics of Concrete: A Review. *Construction and Building Materials*, **181**, 27-41. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.266>
- [3] 邢蓉. 纳米 SiO<sub>2</sub> 和纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺量对混凝土性能的影响[J]. 人民黄河, 2020, 42(1): 131-134+144.
- [4] 陈坚, 蒋子平. 纳米 SiO<sub>2</sub> 对混凝土抗压强度的影响作用[J]. 建筑技术, 2017, 48(1): 38-40.
- [5] Morteza, H., Beigi, J.B., et al. (2013) An Experimental Survey on Combined Effects of Fibers and Nanosilica on the Mechanical, Rheological, and Durability Properties of Self-Compacting Concrete. *Materials and Design*, **50**, 1019-1029. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.046>
- [6] Eskandari, H., Vaghefi, M. and Kowsari, K. (2015) Investigation of Mechanical and Durability Properties of Concrete Influenced by Hybrid Nano Silica and Micro Zeolite. *Procedia Materials Science*, **11**, 594-599. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.11.084>
- [7] 姚蔚, 师阳. 纳米 SiO<sub>2</sub> 混凝土力学性能研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2019, 37(4): 517-519+524.
- [8] 叶青. 硅溶胶对水泥基材料微观结构和力学性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2008(4): 425-430.
- [9] Sutton, M.A., Orteu, J.J. and Schreier, H.W. (2009) *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. Springer, New York.
- [10] 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>
- [11] 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.
- [12] 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>
- [13] 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>
- [14] 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.
- [15] Ahn, B. and Nutt, S.R. (2010) Strain Mapping of Al-Mg Alloy with Multiscale Grain Structure Using Digital Image Correlation Method. *Experimental Mechanics*, **50**, 117-123.