

# 基于 CT 及数字图像相关法的混凝土变形场测量分析

王凡<sup>1</sup>, 赵亮<sup>1,2\*</sup>, 吴晓东<sup>1</sup>, 党发宁<sup>3</sup>

<sup>1</sup>西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055;

<sup>2</sup>西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055;

<sup>3</sup>西安理工大学土木与建筑工程学院, 陕西 西安 710048

**摘要** 采用动态加载仪和医用 CT 机对混凝土进行单轴原位压缩应力分层扫描, 选取试件中部层面的 CT 图像作为对象, 对混凝土的组成部分进行 CT 阈值划分, 分析裂纹的产生及发展过程。利用数字图像相关(DIC)法测量混凝土内部的位移场及应变场, 结合位移场与应变场分析变形局部化区域的产生及发展过程, 得到高应变产生区域与 CT 图像的裂纹产生区域一致; 结合 CT 值的平均值与最大主应变随应力的变化曲线, 分析混凝土破坏过程的各阶段, 得到 CT 尺度裂纹阶段开始于峰值荷载的 70.3% 处。实验结果表明, DIC 法与先进的 CT 技术相结合的方法可以直观地以图像的形式对混凝土试件内部的应力应变过程进行呈现, 为研究混凝土内部结构的变形、破坏和稳定性提供有效的可视化手段。

**关键词** 探测器; 混凝土; 数字图像相关法; CT 图像; 应力应变

中图分类号 TU528

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.200401

## Measurement and Analysis of Concrete Deformation Field Based on CT and Digital Image Correlation Method

Wang Fan<sup>1</sup>, Zhao Liang<sup>1,2\*</sup>, Wu Xiaodong<sup>1</sup>, Dang Fanning<sup>3</sup>

<sup>1</sup> College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

<sup>2</sup> College of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

<sup>3</sup> School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

**Abstract** A dynamic loading instrument and medical computed tomography (CT) machine are used to perform a single-axis *in situ* compressive stress-layered scan of a concrete. The CT image of the middle layer of the concrete specimen is selected as the object, and the concrete components are divided into CT thresholds to analyze the occurrence and development of cracks. The internal displacement and strain fields of the concrete are measured using the digital image correlation (DIC) method, and the displacement and strain fields are combined to analyze the generation and development process of the localized deformation area. The results reveal that the high-strain generation area is consistent with the crack generation area of the CT image. Combined with the CT value, the curve of the average value and maximum principal strain versus stress are analyzed. Moreover, the various stages of the concrete failure process are analyzed. The evaluation reveals that the CT-scale crack stage started at 70.3% of the peak load. Experimental results show that the combination of DIC method and advanced CT technology can present the stress and strain process inside the concrete specimen in the form of images, providing effective visualization for studying the deformation, failure, and stability of the internal structure of the concrete.

**Key words** detectors; concrete; digital image correlation method; CT image; stress and strain

**OCIS codes** 040.7480; 100.2000; 100.2960

收稿日期: 2019-12-24; 修回日期: 2020-01-14; 录用日期: 2020-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(51878548, 51209167)、陕西省自然科学基金(2019JM-474)

\* E-mail: tanatee@163.com

# 1 引言

混凝土是一种特殊的天然缺陷材料,由骨料、砂浆和孔洞组成,除了具有多尺度特性以外,还具有非常独特的物理和力学特性,使其在工程上应用非常广泛<sup>[1-5]</sup>。由于混凝土具有复杂的内部结构,研究起来非常不便,人们经常将复杂的混凝土材料看作宏观的连续体,再对其进行研究,这是解决工程问题常用方法之一。力学特性的测量中,位移和应变是力学行为最直观的反映,在工程应用及研究中,获取材料的变形场是最基本的测量任务之一。传统的光测力学技术,如电子散斑干涉法、光弹性法、几何云纹法、光栅投影法和数字全息技术等,一般要求将激光作为光源,且光路较复杂,测量过程需要在暗室环境下进行,并且测量结果易受外界振动的影响<sup>[6]</sup>,约束条件的限制使得这些光测方法通常只能应用在实验室内隔振平台上的科学研究测量。数字图像相关(DIC)<sup>[7-10]</sup>方法是一种能够避免干涉条纹带来的影响并从材料表面的散斑图像中获取应变信息的光学测量方法,凭借其实验设备简单和对环境要求低等特点越来越普遍地应用于实际测量中。

目前,采用 CT (Computed Tomography) 与 DIC 相结合的方法对材料进行力学性能研究已经成为一种新的研究手段。赵燕茹等<sup>[11]</sup>在单纤维混凝土拉拔试验中,采用了 DIC 方法测量钢纤维从混凝土基体拔出过程中界面的应变分布及其变化规律,进而观察纤维界面剪切破坏的局部化现象。Chun 等<sup>[12]</sup>采用了 DIC 方法分析混凝土表面的破裂过程,发现不同尺度的裂纹应采用不同的方法,DIC 方法适用于小裂纹,X 射线 CT 适用于大裂纹,将两个方法有效地结合可以更好地分析裂纹演化过程中内部结构特征的变化过程。王学滨等<sup>[13]</sup>利用了 DIC 方法对不同含水率砂样进行观测研究,发现子区尺寸对砂样不同位置最大剪切应变的影响规律。毛灵涛等<sup>[14-15]</sup>利用了 X 射线 CT 获取单轴压缩试验下试件的三维图像,采用了数字体散斑(DVC)法测量试件

内部的三维变形场,分析内部变形的产生和发展过程。

本文采用动态加载仪和医用 CT 机对饱和混凝土进行单轴原位压缩应力分层扫描,得到混凝土原始的 CT 数据,并利用 DIC 方法测得同一层面在不同应力条件下的位移场,以直观反映混凝土细观裂纹的产生到宏观破坏的过程。通过位移差分获得应变场,结合 CT 值的平均值与最大主应变随应力的变化曲线,分析混凝土破坏过程的各阶段,为研究荷载条件下混凝土开裂破坏过程提供可视化方法和新的实验手段。

## 2 DIC 法的基本原理

DIC 法的核心是相关匹配运算,采用相关函数对参考图像的子区域与目标图像的子区域进行相关性比较,以获得准确的变形参数估计,DIC 方法的基本原理如图 1 所示。在参考图像  $f(x, y)$  中选取一个以待求点  $(x_0, y_0)$  为中心和尺寸为  $(2M+1) \times (2M+1)$  的参考图像子区域,通过相关搜索方法来匹配变形图像  $g(x', y')$  以确定位移矢量,其中  $M$  为任意像素,  $(x, y)$  为参考图像的坐标,  $(x', y')$  为图像匹配变形后的坐标。

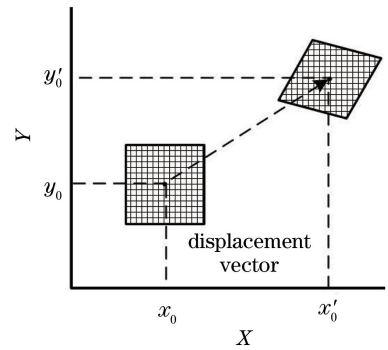


图 1 DIC 方法原理示意图

Fig. 1 Schematic of DIC method principle

为了评价变形前后图像子区域的相关程度,需要选取一个相关函数对其进行评价,实验采用抗干扰能力较强的归一化最小平方距离(ZNSSD)<sup>[16-17]</sup>函数,表达式为

$$C_{f,g}(p) = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M \left\{ \frac{f(x, y) - f_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y) - f_m]^2}} - \frac{g(x', y') - g_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x', y') - g_m]^2}} \right\}^2, \quad (1)$$

式中:  $f(x, y)$  为参考图像中点  $(x, y)$  的灰度值;  $g(x', y')$  为变形图像中对应点  $(x', y')$  的灰度值;

$f_m$  和  $g_m$  分别为参考图像子区域和变形图像子区域的灰度平均值,  $f_m = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y)]^2 / (2M + 1)$

$1)^2$  和  $g_m = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x', y')]^2 / (2M+1)_2$ ;  $p$  为待求的变形参数矢量。

### 3 混凝土单轴压缩 CT 图像的获取

#### 3.1 实验条件

混凝土试件的强度为 C15, 水灰比为 0.40, 在西安浐河中获取的砂料及粒径尺寸为 5~20 mm 的卵石作为骨料, 制成标准的混凝土圆柱体试件的高度为 120 mm, 直径为 60 mm, 并在标准条件下养护 28 天。

#### 3.2 实验过程

采用西安市中心医院影像中心的 Marconi M8000 螺旋 CT 扫描仪配合加载设备, 在不同的静力压缩荷载下 ( $\sigma=0, 17.69, 21.92, 28.72, 25.91$  MPa) 对混凝土圆柱试件沿横断面进行连续扫描, 扫描厚度约为 1.0 mm, 扫描分辨率为 0.35 mm×0.35 mm×1 mm。

实验开始前, 将混凝土试件放置在 CT 动态加载设备中, 试件的加载面与顶面相垂直。在对试件进行加载的同时开始扫描, 控制阀门不断增加加载力度, 等试件达到最大峰值抗压强度后慢慢卸载, 再利用 CT 扫描仪对混凝土试件进行扫描, 不断循环直到试件破坏为止。

图 2 为扫描定位图, 用来表明试件扫描的部位。

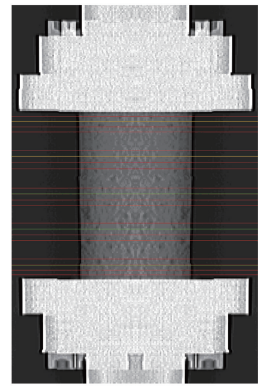


图 2 试件扫描示意图

Fig. 2 Schematic of specimen scanning

实验结果是以 8 位数字存储的灰度图像, 图像中每个像素点上附带有以 12 位数字存储的 CT 值, 该数值共有 4096 个阶位。

#### 3.3 实验结果

试件的顶端与底端受到加载盘的影响, 所以图像存在较大的畸变与伪影, 选取试件中间部分的同一截面在不同荷载下的 CT 图像进行实验, 结果图 3 所示。从图 3 可以看到, 不同加载条件下试件在同一断面的 CT 图像中, 颜色较亮的区域为骨料区, 其 CT 的阈值划分范围为 1584~3095, 砂浆的阈值划分范围为 1103~1583; 颜色最暗的区域为孔洞裂纹区, 其阈值划分范围为 -297~1102。

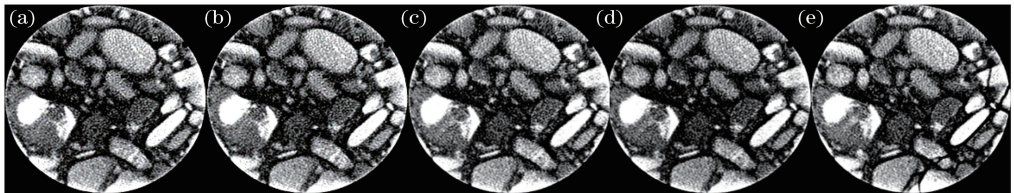


图 3 同一截面在不同荷载作用下的 CT 图像。(a) 0 MPa; (b) 17.69 MPa; (c) 21.92 MPa; (d) 28.72 MPa; (e) 25.91 MPa

Fig. 3 CT images of same section under different loads. (a) 0 MPa; (b) 17.69 MPa; (c) 21.92 MPa; (d) 28.72 MPa; (e) 25.91 MPa

裂纹产生的区域如图 4 所示。从图 4 可以看到, 第 1 次加载阶段, 即  $\sigma=17.69$  MPa, 肉眼可以

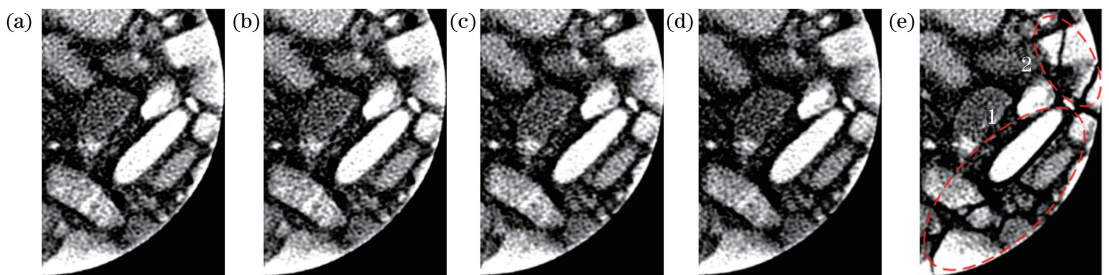


图 4 裂纹产生区域的局部放大图。(a) 0 MPa; (b) 17.69 MPa; (c) 21.92 MPa; (d) 28.72 MPa; (e) 25.91 MPa

Fig. 4 Partial enlarged views of crack generation area. (a) 0 MPa; (b) 17.69 MPa; (c) 21.92 MPa; (d) 28.72 MPa; (e) 25.91 MPa

观测到的 CT 图像上无明显变化;第 2 次加载阶段,即  $\sigma=21.92$  MPa,骨料与砂浆的交界处开始出现细观裂纹;当加载应力达到  $\sigma=28.72$  MPa 时,裂纹宽度增加,小骨料被破坏;由于峰值的出现难以准确捕捉裂纹,出现峰值后慢慢卸载至 25.91 MPa,结果如图 4(e) 所示。在骨料与砂浆的接触面边界形成一条宏观的贯通主裂纹,当裂纹与骨料的相交角度较大时,骨料会被切断并继续扩展,而小骨料被裂纹穿过并击碎,周围产生许多次生裂纹。

图 5 为混凝土试件的应力与应变的关系曲线,其中 1~5 表示 CT 扫描阶段。从图 5 可以看到,第 2 次扫描是裂纹出现的临界点;第 2 次扫描前,曲线呈近似直线状态,此时试件处于弹性形变的阶段,而混凝土属于脆性材料,没有明显的屈服与塑性变形阶段;第 2 次扫描后,曲线偏离直线状态,混凝土试件进入塑性变形阶段,根据经验判断此时裂纹开始出现。试件峰值出现时刻变化较快,CT 扫描仪难以精确捕捉,所以实验未对其进行扫描。

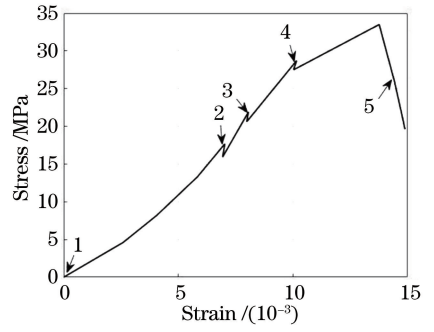


图 5 试件的应力与应变的关系曲线

Fig. 5 Relationship between stress and strain of specimen

## 4 实验与结果分析

### 4.1 位移测量原理

实验采用 Newton-Rapshon(N-R)迭代法<sup>[18]</sup>对位移进行测量,与传统测量算法相比,N-R 法具有精度高( $10^{-4}$  pixel)和稳定性好等优点,使得位移测量结果更准确。

当参考图像与当前图像中图像子区域最为相似时, $C_{f,g}(p)$ 值最小,趋近于 0,即

$$\nabla C_{f,g}(p) = \frac{\partial C}{\partial p_i} = -2 \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M \left\{ \left[ \frac{f(x,y) - f_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x,y) - f_m]^2}} - \frac{g(x',y') - g_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x',y') - g_m]^2}} \right] \times \frac{1}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x',y') - g_m]^2}} \times \frac{\partial g(x',y')}{\partial p_i} \right\} = 0, \quad (2)$$

式中: $i=1,2,3,4,5,6$ 。对(2)式进行求解并整理,可以得到

$$\nabla C(p) = \nabla C(p_0) + \nabla \nabla C(p_0)(p - p_0) = 0, \quad (3)$$

式中: $p_0$ 为变形初值估计; $\nabla \nabla C(p_0)$ 为相关函数的梯

度; $\nabla \nabla C(p_0)$ 为相关函数的二阶偏导,即 Hessian 矩阵。 $p$ 可整理为

$$p = p_0 - \nabla C(p_0) / \nabla \nabla C(p_0). \quad (4)$$

对 Hessian 矩,即  $\nabla \nabla C(p)$  进行简化处理后,可以得到

$$\nabla \nabla C(p) = \frac{\partial^2 C}{\partial p_i \partial p_j} \approx \frac{2}{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x',y') - g_m]^2} \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M \left[ \frac{\partial^2 g(x',y')}{\partial p_i \partial p_j} \right], \quad (5)$$

式中: $j=1,2,3,4,5,6$ 。将计算收敛条件设置为相邻两次迭代位移波动的绝对值小于  $10^{-3}$  pixel,当计算达到收敛条件后,迭代停止,最终得到各个计算点的位移  $u, v$  和各方向的位移梯度  $u_x, u_y, v_x, v_y$ ,进而获得图像的位移场。

### 4.2 位移场结果分析

将首次扫描所得的 CT 图像( $\sigma=0$  MPa)作为实验的参考图像,从中选择三张 CT 图像( $\sigma=21.92, 28.72, 25.91$  MPa)作为变形后的图像,图像子区域的尺寸为  $31 \text{ pixel} \times 31 \text{ pixel}$ ,利用所提方法

对图像进行位移计算,得到  $x$  轴和  $y$  轴方向上的  $u$  和  $v$ 。荷载为 21.92,28.72,25.91 MPa(峰后)在同一切面的位移场,如图 6 和图 7 所示,其中单位为 pixel,1 pixel 相当于 10 mm。

从图 7(a)可以看到,当荷载为 21.92 MPa 时,图像出现正负分界但无较大位移变化。从图 7(b)可以看到,当荷载为 28.72 MPa 时,试件小骨料区域出现裂纹,砂浆位置产生较大位移,其余部位无较大位移变化;混凝土自身具有脆断特性,细观裂纹的

产生、贯通到破损的时间较短,所以峰值难以准确捕捉。在荷载达到 25.91 MPa 前,试件的峰值强度已经达到最大并产生大裂纹,如图 4(e)的标示区域所示,此时大骨料的边沿产生较大位移,强度较小的骨料被击碎且产生位移。由此可见,试件内部变形且局部化,这源于混凝土内部的非均质特性,砂浆与小骨料的边界区域产生较大位移,大骨料区域的位移变化较小,裂纹出现在孔洞位置,沿着骨料与砂浆的方向发展。

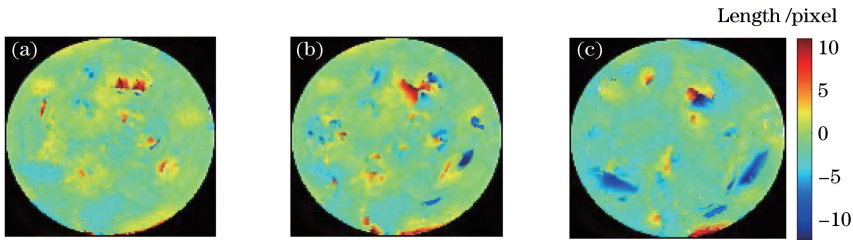


图 6 不同荷载下的  $u$  位移场。(a) 21.92 MPa;(b) 28.72 MPa;(c) 25.91 MPa

Fig. 6  $u$ -displacement field under different loads. (a) 21.92 MPa; (b) 28.72 MPa; (c) 25.91 MPa

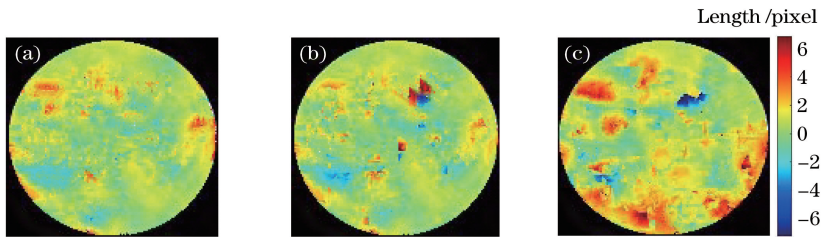


图 7 不同荷载下的  $v$  位移场。(a) 21.92 MPa;(b) 28.72 MPa;(c) 25.91 MPa

Fig. 7  $v$ -displacement field under different loads. (a) 21.92 MPa; (b) 28.72 MPa; (c) 25.91 MPa

### 4.3 应变计算原理

目前,已有的应变测量方法有差分法、全场最小二乘法和局部最小二乘法等。实验使用的混凝土是带有孔洞和裂纹等缺陷的试件,差分法无法对其特殊区域完成应变计算,全场最小二乘法很难选择一个合适的拟合函数,所以实验采用局部最小二乘法<sup>[19]</sup>对混凝土试件进行全场变形计算。

该方法的基本思想:对离散位移数据的局部子区域(应变窗)采用二维多项式以分片逐点拟合,然

后采用最小二乘法来求解拟合多项式的系数。拟合区域的中间点利用拟合多项式的系数求得对应值和各阶导数,并将其作为平滑和差分结果;再将局部子区域移动到下一个数据点,计算新的数据子集中心点的平滑和差分结果。对于计算区域的边界和孔洞、裂纹附近的数据点,由于局部位移数据可能是非均匀分布的,即可能存在无效点,计算时可以忽略无效的数据点,这不会影响计算结果。局部位移场如图 8 所示。

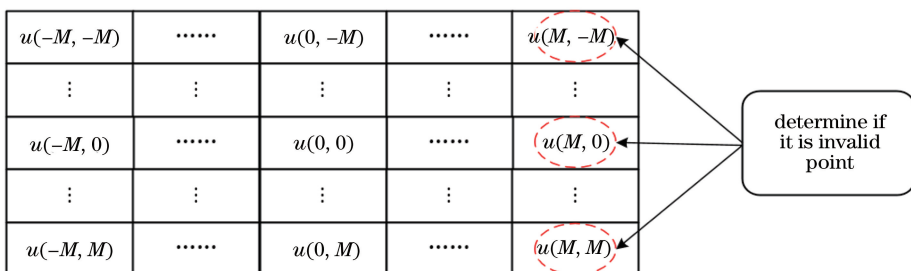


图 8 局部位移场示意图

Fig. 8 Schematic of local displacement field

对局部位移场中的离散数据进行拟合,表达式为

$$u(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y, \quad (6)$$

$$v(x, y) = b_0 + b_1x + b_2y, \quad (7)$$

式中:  $(x, y) = (-M, M)$  为局部位移场中各点的局部坐标;  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$  为待求的拟合多项式系数;  $u(x, y)$  和  $v(x, y)$  为离散位移数据点。

再利用最小二乘法求解待定的拟合多项式系数,表达式为

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{u}, \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{v}, \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & -m & -m \\ 1 & -m+1 & -m \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & m-1 & m \\ 1 & m & m \end{bmatrix}$ , 其中  $m$  为  $X$  的元

素。待求点在不同方向的 Cauchy 应变分量的表达式为

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = a_1, \quad (10)$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = b_2, \quad (11)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = a_2 + b_1. \quad (12)$$

待求点在不同方向的 Green 应变分量的表达式为

$$E_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] = a_1 + \frac{1}{2} (a_1^2 + b_1^2), \quad (13)$$

$$E_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] = b_2 + \frac{1}{2} (a_2^2 + b_2^2), \quad (14)$$

$$E_{xy} = \frac{1}{2} (a_2 + b_1) + \frac{1}{2} (a_1 a_2 + b_1 b_2). \quad (15)$$

#### 4.4 应变结果的分析

当轴向荷载为 21.92, 28.72, 25.91 MPa(峰后)时,由位移场拟合的应变云图如图 9~11 所示。从图 9~11 可以看到,随着荷载的增加,应变绝对值逐渐增大,但由于试件具有非均质特性,所以呈现出不均匀的变形,将应变视为表观应变。从图 11 可以看到,在试件被破坏以前,局部位置产生高应变区域,随着荷载的增加,该区域的裂纹逐渐发展,最终发展为宏观裂纹,此时试件被破坏。图 11(c)中标注的位置对应图 4(e)裂纹产生的区域,裂纹产生的区域与应变图中高应变区域一致。

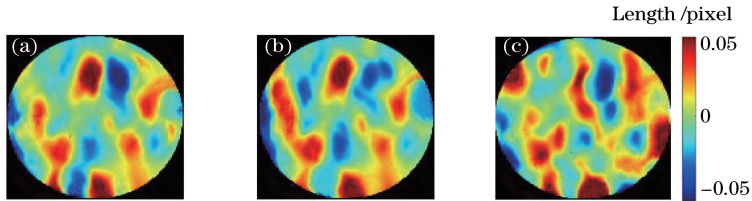


图 9 不同荷载下  $x$  方向的法应变分量  $E_{xx}$ 。(a) 21.92 MPa; (b) 28.72 MPa; (c) 25.91 MPa

Fig. 9 Normal strain component  $E_{xx}$  in  $x$  direction under different loads. (a) 21.92 MPa; (b) 28.72 MPa; (c) 25.91 MPa

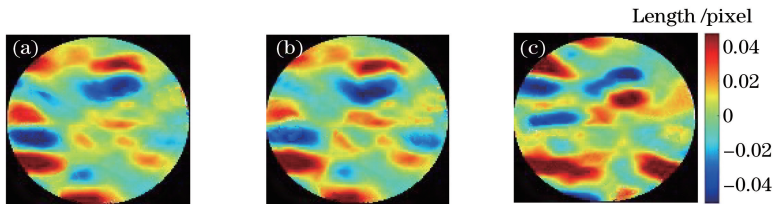


图 10 不同荷载下  $y$  方向的法应变分量  $E_{yy}$ 。(a) 21.92 MPa; (b) 28.72 MPa; (c) 25.91 MPa

Fig. 10 Normal strain component  $E_{yy}$  in  $y$  direction under different loads. (a) 21.92 MPa;

(b) 28.72 MPa; (c) 25.91 MPa

当荷载较小时,人眼难以从 CT 图像中发现裂纹,但应变图已出现小裂纹,此时裂纹产生的高应变区域集中分布在骨料与砂浆的交界处。随着荷载不断的增加,小裂纹(即高应变区)逐渐发展和贯通,从

而产生宏观裂纹。应变场可反映混凝土试件内部变形局部化的产生和发展过程,相比于位移场,其可以清楚地反映 CT 尺度裂纹的出现位置及发展方向,使得变形局部化区域萌生和发展过程可视化,为

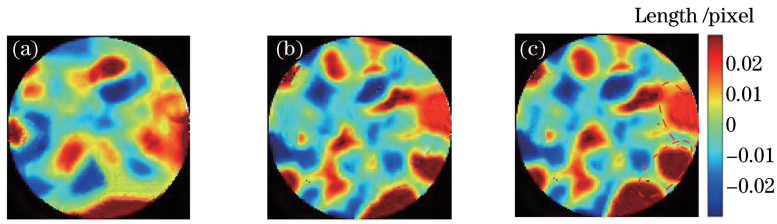


图 11 不同荷载下的切应变分量  $E_{xy}$ 。(a) 21.92 MPa; (b) 28.72 MPa; (c) 25.91 MPa

Fig. 11 Shear strain component  $E_{xy}$  under different loads. (a) 21.92 MPa; (b) 28.72 MPa; (c) 25.91 MPa

研究混凝土内部变形提供一种手段。

图 12 和图 13 分别为 CT 值的平均值与最大主应变随应力变化的曲线。从图 12 和图 13 可以看到,在应力范围为 0~21.92 MPa, CT 值的平均数缓慢增加,最大主应变增长较平稳,此时混凝土试件在力的作用下向内压密,该阶段试件处于压密阶段;在应力为 21.92 MPa 后, CT 值的平均数明显下降,最大主应变增长速率变大,试件进入扩容阶段。由于受到 CT 扫描仪分辨率的限制,当应力为 21.92 MPa 时, CT 图像中未看到明显的裂纹,但在图 11(a) 中出现局部高应变,表明此时产生的裂纹尺度为小于 CT 尺度,此阶段小于 CT 尺度的裂纹在较小骨料界面处产生,并且向前发展、分叉和贯通。从图 12 和图 13 可以看到,当应力为 23.83 MPa 时, CT 值的平均数大幅度下降,最大主应变发生大幅度增长,此时为峰值荷载的 70.3%, 将此时期定义为 CT 尺度裂纹<sup>[20]</sup>阶段的开始。当加载至 28.72 MPa 时,最大主应变值增长到 0.057,在图 4(e) 中可以观察到明显裂纹,图 11(b) 中的高应变区域较图 12(a) 有进一步发展。若荷载继续增加,这些裂纹会形成宏观裂纹进而贯穿试件,最终试件被完全破坏。

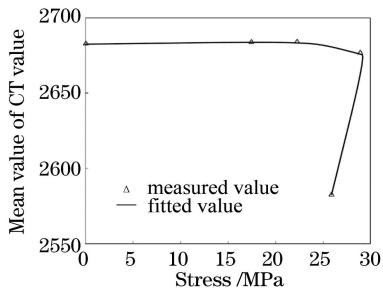


图 12 CT 值的平均值与应力的关系曲线

Fig. 12 Relationship between average value of CT values and stress

## 5 结 论

采用 DIC 法并结合混凝土 CT 图像,测量得到混凝土试件在单轴压缩不同荷载下的位移场和应变

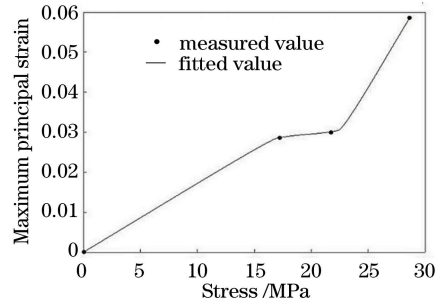


图 13 最大主应变与应力的关系曲线

Fig. 13 Relationship between maximum principal strain and stress

场。首先通过医用 CT 配合加载设备来获得混凝土 CT 图像,反映不同荷载条件下同一截面的宏观变化。裂纹的产生是从孔洞出发,沿骨料与砂浆的连接处向前发展,发现大骨料区域不容易被破坏,小骨料由于强度较小易被裂纹贯穿并击碎,同时周围会产生许多次生裂纹。然后采用 N-R 法对裂纹进行位移测量,可使 DIC 位移测量精度达到  $10^{-4}$  pixel,保证实际应用过程中需要的精度等级。接着分析变形局部化区域的萌生和发展过程,高应变的产生区域与 CT 图像裂纹的产生区域一致。通过应变场结合 CT 值的平均值与最大主应变随应力的变化曲线,分析混凝土破坏过程中出现的 4 个阶段,得到 CT 尺度裂纹阶段开始于峰值荷载的 70.3% 处,这些裂纹随着荷载的增加逐渐形成贯穿试件的宏观裂纹,最终导致试件完全破坏。

## 参 考 文 献

- [1] Chevalier L, Calloch S, Hild F, et al. Digital image correlation used to analyze the multiaxial behavior of rubber-like materials [J]. European Journal of Mechanics A-Solids, 2001, 20(2): 169-187.
  - [2] Li G C, Liu Z Q, Tang B, et al. Investigation on adhesive interface failure using digital image correlation method [J]. Aerospace Materials & Technology, 2012, 42(3): 82-85.
- 李高春, 刘著卿, 唐波, 等. 基于数字图像相关方法

- 的粘接界面细观破坏分析[J]. 2012, 42(3): 82-85.
- [3] Hao W F, Chen X W, Deng L W, et al. Evaluation of mode I stress intensity factor of aramid fiber composite materials utilizing digital image correlation method[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2015, 35(2): 90-95.  
郝文峰, 陈新文, 邓立伟, 等. 数字图像相关方法测量芳纶纤维复合材料 I 型裂纹应力强度因子[J]. 航空材料学报, 2015, 35(2): 90-95.
- [4] Sung W P, Tung S H, Shih M H. Identification of the landslide using the satellite images and the digital image correlation method [J]. Disaster Advances, 2013, 6(4): 4-9.
- [5] Wang X X, Jin Z Q, Jiang Y D, et al. Analysis of stress in concrete induced by corrosion of reinforcing bar based on DIC and strain test [J]. Materials Review, 2019, 33(16): 2690-2696.  
王潇舷, 金祖权, 姜玉丹, 等. 基于 DIC 与应变测试的混凝土中钢筋锈胀应力分析[J]. 材料导报, 2019, 33(16): 2690-2696.
- [6] Sjidahl M, Benckert L R. Electronic speckle photography: analysis of an algorithm giving the displacement with subpixel accuracy [J]. Applied Optics, 1993, 32(13): 2278-2284.
- [7] Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3): 2134-2147.
- [8] Sutton M A, Matta F, Rigos D, et al. Recent progress in digital image correlation: background and developments since the 2013 W M Murray lecture [J]. Experimental Mechanics, 2017, 57(1): 1-30.
- [9] Zhang D, Zhang X, Cheng G. Compression strain measurement by digital speckle correlation [J]. Experimental Mechanics, 1999, 39(1): 62-65.
- [10] Chu T C, Ranson W F, Sutton M A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics [J]. Experimental Mechanics, 1985, 25(3): 232-244.
- [11] Zhao Y R, Xing Y M, Huang J Y, et al. Study on the fiber-reinforced concrete pull-out test using digital image correlation method [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(6): 169-175.  
赵燕茹, 邢永明, 黄建永, 等. 数字图像相关方法在纤维混凝土拉拔试验中的应用[J]. 工程力学, 2010, 27(6): 169-175.
- [12] Chun C, Zhang Y M, Wang R X, et al. Application of micro-structure testing in the analysis of the cause of concrete cracks [J]. Key Engineering Materials, 2014, 629/630: 121-129.
- [13] Wang X B, Du Y Z, Pan Y S, et al. Measurement of shear bands of sand specimens with different water contents under constant strain rate based on digital image correlation method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 625-632.  
王学滨, 杜亚志, 潘一山, 等. 基于数字图像相关方法的等应变率下不同含水率砂样剪切带观测[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 625-632.
- [14] Mao L T, Yuan Z X, Lian X Y, et al. Measurement of 3D strain field in red stone sample under uniaxial compression with computer tomography and digital volume correlation method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(A1): 21-30.  
毛灵涛, 袁则循, 连秀云, 等. 基于 CT 数字体相关法测量红砂岩单轴压缩内部三维应变场[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(A1): 21-30.
- [15] Mao L T, Lian X Y, Hao N, et al. 3D strain measurement in coal using digital volumetric speckle photography [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 65-72.  
毛灵涛, 连秀云, 郝耐, 等. 基于数字体散斑法煤样内部三维应变场的测量[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 65-72.
- [16] Pan B, Xie H M, Wang Z Y. Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching [J]. Applied Optics, 2010, 49(28): 5501-5509.
- [17] Tong W. An evaluation of digital image correlation criteria for strain mapping applications [J]. Strain, 2005, 41(4): 167-175.
- [18] Bruck H A, McNeill S R, Sutton M A, et al. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction [J]. Experimental Mechanics, 1989, 29(3): 261-267.
- [19] Pan B, Xie H M. Full-field strain measurement based on least-square fitting of local displacement for digital image correlation method [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(11): 1980-1986.  
潘兵, 谢惠民. 数字图像相关中基于位移场局部最小二乘拟合的全场应变测量[J]. 光学学报, 2007, 27(11): 1980-1986.
- [20] Ding W H, Wu Y Q, Pu Y B, et al. Measurement of crack width in rock interior based on X-ray CT [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1421-1425.  
丁卫华, 仵彦卿, 蒲毅彬, 等. 基于 X 射线 CT 的岩石内部裂纹宽度测量[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1421-1425.