

丁卫华, 朱琳, 黄力, 等. 动载作用下混凝土细观损伤的 CT 图像分割和灰度共生矩阵特征值研究[J]. CT 理论与应用研究, 2021, 30(2): 170-182. DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.02.04.
DING W H, ZHU L, HUANG L, et al. Study on concrete mesoscopic damage under dynamic loading using CT image segmentation and gray level co-occurrence matrix eigenvalue[J]. CT Theory and Applications, 2021, 30(2): 170-182. DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.02.04. (in Chinese).

动载作用下混凝土细观损伤的 CT 图像分割 和灰度共生矩阵特征值研究

丁卫华[✉], 朱琳, 黄力, 张乐, 秦俊绒, 李爱国

(西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘要: 动载作用下混凝土随应力变化的系列 CT 图像完整地记录了混凝土内部破损过程, 在 CT 图像中能直接观察到细观裂纹时混凝土往往已发生宏观破坏, 挖掘混凝土材料损伤的细观信息是混凝土细观力学分析的核心。本文基于混凝土单轴动态压缩 CT 试验, 获得不同应力阶段的横断面 CT 图像, 分别应用图像分割技术和灰度共生矩阵法提取孔隙率和 4 个特征值, 研究孔隙率和 4 个特征值随应力的变化规律。结果表明孔隙率随应力的增加显示出单调增加的总趋势, 个别部位在应力水平较小时孔隙率随应力增加变化不大, 反映出混凝土的压密效应。受压密效应影响, 对比度在低应力水平时随应力增加有升有降, 能量对应力变化不够敏感, 相关性和同质性随应力的增加单调增加, 对应力变化较为敏感, 能反映混凝土整体损伤过程。对混凝土 CT 图像进行分区后再研究孔隙率、同质性和相关性随应力的变化, 可以更好地反映动载作用下混凝土的细观损伤过程。

关键词: CT 图像; 图像分割; 灰度共生矩阵; 孔隙率; 特征值

DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.02.04 中图分类号: O 242; TP 391.41 文献标志码: A

混凝土构件在使用过程中不可避免地受到外荷载的作用, 长期的外荷载作用会导致混凝土内部细观裂纹萌生、连接甚至贯通。而混凝土内部损伤可根据与永久变形相关的内部位移和内部裂纹形态来判定。与声发射等无损检测技术相比, X-CT 技术的优势在于能通过 CT 图像监测混凝土内部破坏的演变, 并将这种破坏过程与宏观应力应变联系起来。将 CT 技术与图像处理技术相结合, 可从细观层次表征混凝土内部各相(骨料、砂浆、孔隙、细观裂纹)的分布以及细观损伤演化过程。弄清混凝土内部各相分布状态对研究混凝土细观裂纹起裂位置、裂纹扩展过程有重要意义。

研究者已应用分形分析、图像增强、数值模拟、数字体相关等多种方法对 CT 图像进行分析以研究混凝土裂纹的发展过程。Philip 等^[1]基于 CT 图像建立能真实反映材料非均匀性的混凝土细观有限元断裂模型, 成功地模拟了混凝土在单轴受拉荷载作用下材料内部复杂多裂纹的开展过程, 发现裂缝形态和荷载-位移关系曲线在很大程度上受到混凝土组成材料随机性和非均质特性的影响; 毛灵涛等^[2-3]将数字体相关法应用于红砂岩 CT 图像, 经计算获得了荷载作用下红砂岩内部的三维应变场; 丁卫华等^[4]从理论上解决了动载条件下基于 CT

收稿日期: 2020-12-30。

基金项目: 国家自然科学基金(50649028; 50979092)。

图像的岩石内部裂纹宽度计算问题；党发宁等^[5]和方建银等^[6]结合 CT 图像和分形分析建立混凝土损伤与分形维数的关系，研究混凝土裂纹分形特征；任文渊等^[7]利用 CT 图像信息高精度地模拟了混凝土中各相组成，再使用零厚度黏结裂缝单元模拟断裂过程，裂缝单元被预先嵌入到水泥砂浆中及其与骨料的交界面处，用于表征潜在在裂纹。

尽管混凝土细观模型来源于 CT 图像，但细观参数的人为性较大，模拟结果仍需大量物理试验来验证，才能较为合理、客观地分析混凝土细观损伤过程。数字体相关法^[2-3]在混凝土或砂岩 CT 图像分析时引入了新的思路，即将混凝土的各相材料转化为数字体，目的是获得混凝土的变形场，但因数字体包含像素太多，CT 图像的细观信息被严重抑制。在混凝土 CT 图像中提取裂纹宽度信息，其结果的客观性受 CT 图像的分辨率和计算的基本假定限制。应用分形理论可以分析混凝土 CT 图像的变化规律，但这种统计性的分析结果难以同混凝土材料损伤细节相联系。

灰度共生矩阵法 (gray level co-occurrence matrix, GLCM) 是由 Honeycutt 等^[8]在 1973 年提出以描述图像纹理特征，两幅纹理特征不同的图像可能具有相同的灰度直方图，而其灰度共生矩阵特征值是唯一的。该方法基于统计模型研究图像像素灰度值分布及相互关系^[9-11]，能表征图像纹理的走向、间隔、变化幅度及快慢等。GLCM 最早用于医学影像和遥感图像的特征分析^[12-13]，随后在计算机视觉、模式识别等领域也得到了广泛应用^[14-15]。

本文拟提取混凝土各个应力阶段 CT 图像的灰度共生矩阵 4 个特征值 (对比度、能量、相关性及同质性)，研究特征值随应力的变化规律，并将其与孔隙率随应力的变化进行对比，以获得同一扫描断面在峰值荷载前各应力阶段 CT 图像变化不明显时灰度共生矩阵特征值和孔隙率的敏感程度及特征，为混凝土细观损伤局部化研究奠定基础。

1 试验系统和试验程序

1.1 试验系统

混凝土 CT 试验系统主要由 Marconi M8000 螺旋医用 CT 扫描仪和便携式加载设备组成，扫描仪分辨率为 24 线对/cm，扫描层厚 2.5 mm，电压 140 kV，电流 200 mAs，便携式加载设备的原理及使用方法详见文献^[16]。该系统能够对混凝土试件静力和动力拉、压破坏过程进行实时 CT 扫描；控制器用来设置试件的位移或荷载目标值，控制加载过程；加载设备分别通过力和位移传感器记录实时试件的荷载和位移，当荷载或位移达到目标值时，停止加载但不卸载，立即对试件进行扫描，获得该荷载或位移状态下含有细观损伤信息的混凝土 CT 图像。随后继续加载，重复上述过程。

图 1 给出了混凝土 CT 试验系统全貌。试验用规格为 $\Phi 60 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 的一级配混凝土圆柱体试件。

1.2 试验程序

应用如式 (1) 所示的正弦波加载方式模拟动力加载过程，

$$F = A_1 \sin(2\pi ft) + F_0, \quad (1)$$

式中 F_0 为初始荷载， A_1 为每循环加载增量， f 为循环频率。动力试验的具体步骤：

(1) 试件安装完成后，在未施加动力压缩荷载之前，对混凝土试件进行第 1 次扫描，

即初次扫描, 以获得试样初始损伤分布状况。

(2) 荷载控制。最小压力为 0 kN, 即不出现拉荷载。初始振幅为 ± 10 kN, 以 10 kN 为步长增加荷载, 直到荷载达到 40 kN, 每个振幅都以 2 Hz 的频率振动 10 次; 当荷载达到 40 kN 后改为位移控制, 位移步长根据荷载控制阶段荷载位移关系计算, 以达到对应的荷载步长大约 10 kN 的效果, 每个位移振幅仍以 2 Hz 的频率振动 10 次; 当位移达到设定的目标位移 0.96 mm 时对试件进行第 2 次扫描, 此时对应荷载为 77.36 kN。

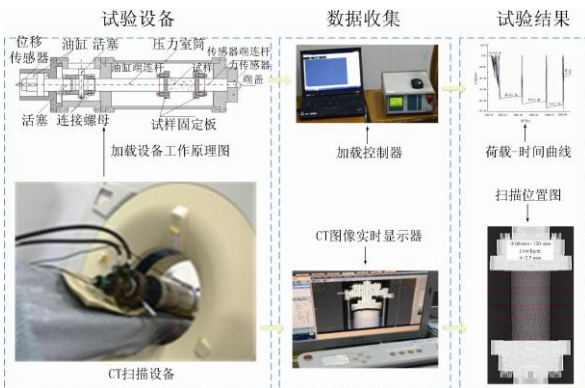


图 1 混凝土 CT 试验系统全貌

Fig. 1 Overall perspective on concrete CT test

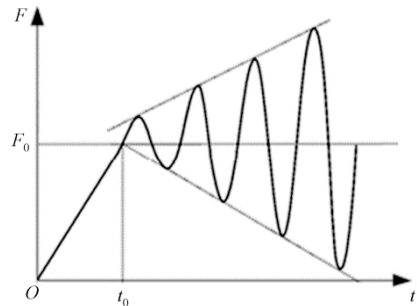


图 2 动力压缩荷载-时间曲线

Fig. 2 Force-time curve under dynamic compression loading

(3) 继续位移控制加载, 当位移达到目标位移 1.10 mm 时对试件进行第 3 次扫描, 此时对应荷载为 87.00 kN。

(4) 继续位移控制加载, 当位移达到目标位移 1.19 mm 时对试件进行第 4 次扫描, 此时对应荷载为 93.62 kN。

(5) 继续对试件进行位移控制加载, 直至试件破坏, 对其进行第 5 次扫描, 此时所对应的荷载和位移分别为 78.51 kN 和 1.35 mm。

2 试验结果

图 3 为混凝土试件在单轴动压模式下荷载-时间曲线与扫描次数的关系图, 由于显示比例尺较小导致看不清明显的正弦波循环过程。

图 4 为混凝土应力-应变曲线。试验获得系列扫描图像 (图 5)。试件沿高度方向划分为 6 等分, 均匀选取 5 个扫描断面 CT 图像 (图 5 (a) 和图 5 (b))。图 5 (b) 中的 CT 图像的大小为 1024×1024 , 每个像素对应的体素大小为 $0.16 \text{ mm} \times 0.16 \text{ mm} \times 0.16 \text{ mm}$ 。

3 混凝土 CT 图像的直观分析和 CT 数分布规律

3.1 各应力阶段扫描的 CT 图像直观分析

由图 5 (b) 可见, 初次扫描获得的 CT 图像清晰地呈现初始状态时试件内部各相 (骨料、砂浆和空洞) 分布状态。第 2 次扫描获得的 CT 图像在 $H = 20 \text{ mm}$ 和 60 mm 横断面的左上方均出现一条沿骨料界面发展的细观裂纹, 图 5 (b) 上标出的感兴趣区域 1 和区域 2。随着动

力压缩荷载的增加，微裂纹逐渐加长、加宽。但在 $H=40\text{ mm}$ 、 80 mm 和 100 mm 处，第 4 次扫描前观察不到更多的裂纹信息。当第 5 次扫描时混凝土试件各个断面处均出现一条贯穿混凝土横断面的裂纹，且裂纹沿砂浆和骨料的交界面发展，此时试件已完全失去承载能力。第 5 扫描阶段的 CT 图像显示混凝土试件已发生宏观断裂，裂纹较多，显示出动力破坏与静力破坏的差别。

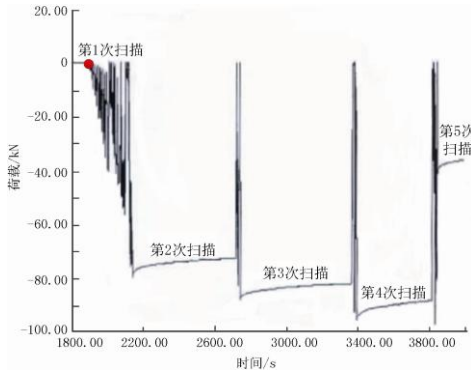


图 3 变振幅动力压缩荷载曲线图

Fig.3 Variable amplitude dynamic compression load curve with time

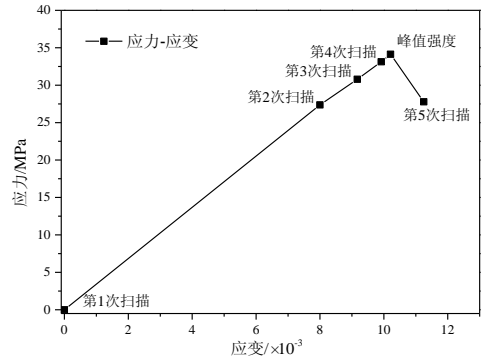
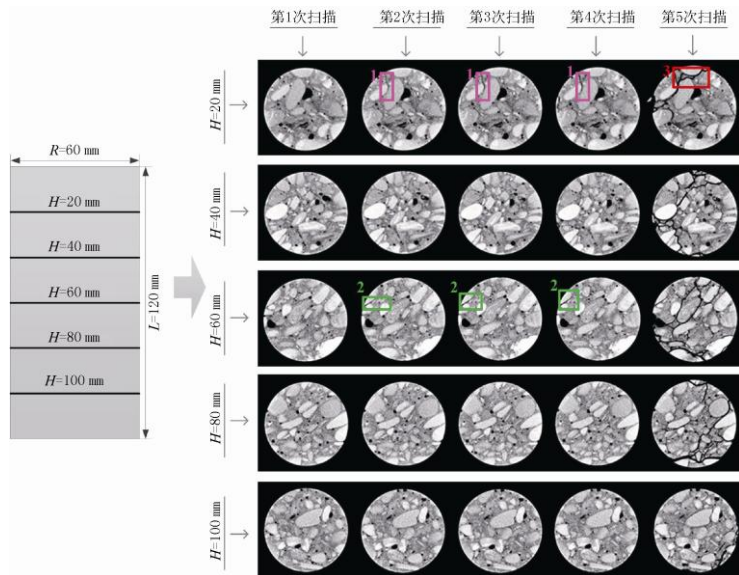


图 4 应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curve



(a) 混凝土扫描位置示意图

(b) 同一断面不同应力阶段的原始混凝土 CT 图像

图 5 混凝土 CT 图像

Fig.5 CT images of concrete

3.2 混凝土 CT 图像中 CT 数分布规律分析

为弄清混凝土 CT 图像中不同相的 CT 数分布规律，在图 5 (b) 的 $H=20\text{ mm}$ 的第 5 次扫描获得的横断面 CT 图像中取感兴趣区域。

在图 6 (a) 中选穿越骨料、砂浆及裂纹的剖面线 AB, 提取 A 点到 B 点的 CT 数分布曲线, 结果如图 6 (b)。对图 6 (b) 中的 CT 数进行划分, 可将 CT 图像划分为骨料区域、砂浆区域、裂缝区域以及介于砂浆和裂纹之间的转换区域。根据图 6 (b) 所示的各区域 CT 数范围对图 6 (a) 进行划分, 结果如图 6 (c)。

由图 6 (c) 可知在初始 CT 图像中, 转换区域和砂浆区域很难用肉眼区分, 并且转换区、砂浆区、骨料区及孔洞区的 CT 数阈值选取人为性很大, 细观损伤区即新产生的细观裂纹区域的像素 CT 值与砂浆或孔洞区域像素 CT 值相近, 而转换区域在不同应力阶段的像素 CT 值变化反映了细观损伤发育情况的重要信息。

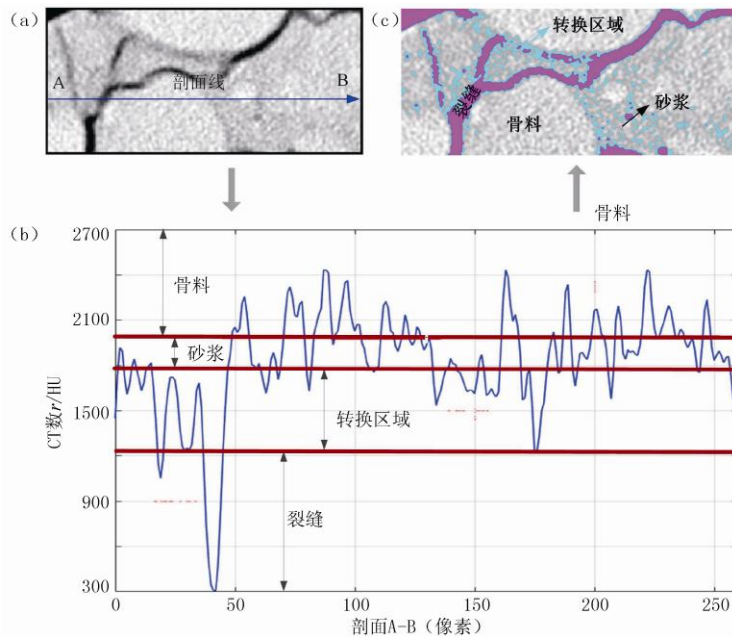


图 6 骨料、砂浆、裂纹及转换区域 CT 数分离阈值

Fig.6 Separation threshold of CT value among aggregate, mortar and crack

考虑本次试验采用的医用 CT 扫描设备的分辨率水平, 依靠单个像素点或若干个像素点 CT 值判断是否有细观裂纹萌生或裂纹扩展是行不通的。因此本文首先应用图像分割技术提取 CT 图像孔隙率变化信息, 再通过基于统计学的灰度共生矩阵特征值来分析不同应力阶段 CT 图像的纹理变化信息, 最后对两种方法的结果进行比较。

4 混凝土 CT 图像分割和孔隙率变化规律分析

4.1 CT 图像分割原理

基于二值化的图像分割是根据像素值的阈值将图像中的目标和背景分离, 该方法的难点在于阈值选取。常用的阈值选取方法都是基于图像的直方图, 包括极小值阈值、最优阈值及类间方差阈值^[17]。极小值阈值法原理简单、易行, 通过求直方图的极小值点, 式 (2) 为判断直方图中谷的位置的分割阈值公式, 式中 $g(x)$ 表示 CT 图像直方图中像素值为 x 的像素点的个数。

$$\frac{dg(x)}{dx} = 0 \text{ 或 } \frac{d^2g(x)}{dx^2} > 0。 \quad (2)$$

将二维 CT 图像用二维函数 $f(x, y)$ 表示, 则 (x, y) 为图像上任一点的坐标。将 K 设为所确定的阈值, 则分割的二值图像 $h(x, y)$ 满足式 (3):

$$h(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) \geq K \\ 0 & f(x, y) < K \end{cases}。 \quad (3)$$

4.2 孔隙率演化规律分析

对图 5 所示的不同应力阶段的五个扫描断面处的 CT 图像进行分割, 结果如图 7 所示。由图 7 可见, 初始阶段混凝土 CT 图像中存在大小不一但分布整个断面的孔隙。随着动态压缩荷载的增加, 试件左上方出现一条裂缝, 发现该裂缝沿着两个较大骨料的交界面发育, 而并非沿着孔洞最大处发育。与图 5 所示的原始阶段混凝土 CT 图像相比, 二值图不仅突出显示了各个断面在不同应力阶段的孔隙和细观裂纹形态的变化过程, 而且便于提取描述细观裂纹和孔隙变化的定量信息。

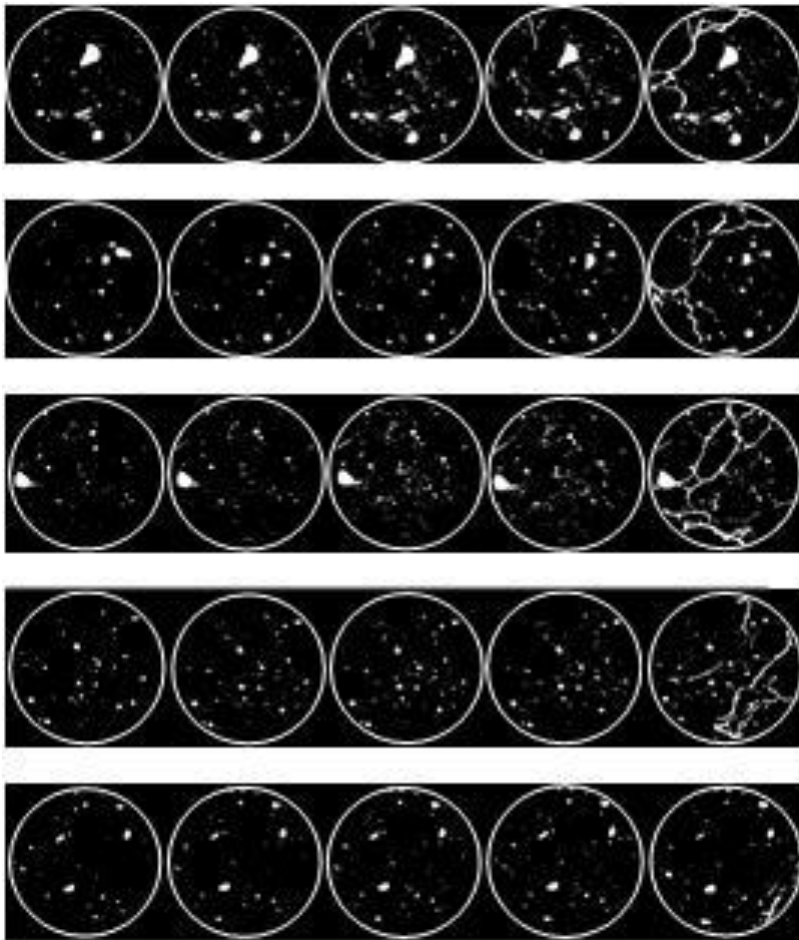


图 7 混凝土 CT 图像孔隙及细观裂纹分割结果图

Fig.7 Segmented pores and meso-crack graph based on CT images

基于图 7, 假设初始阶段孔隙区面积用 A_1 表示, 各应力阶段孔隙增量面积用 ΔA_i 表示, 孔隙总面积用 A_s 表示, 统计区域为整个混凝土扫描断面, 试件横断面面积用 A_t 表示, 各阶段孔隙率用 $n_i (i=1, 2, \dots, 5)$ 表示, 则有:

$$A_s = A_1 + \Delta A_i, \quad (4)$$

$$n_i = \frac{A_s}{A_t} \times 100. \quad (5)$$

统计图 7 所示的二值化图中的混凝土各阶段孔隙区域面积并计算孔隙率 n_i , 结果如图 8 所示, 计算加载过程中相邻两扫描阶段的孔隙率增量如图 9 所示。由 8 可见, 在未施加荷载之前 (第 1 次扫描), 试件在 $H=20$ mm 处的孔隙率达到最大值 3.36%。随着动态压缩荷载的施加 (第 2~4 次扫描), 试件在 $H=20$ 、60 mm 处的孔隙率最先出现增长的趋势, $H=40$ mm 处的孔隙率在第 4 次扫描时也略有增加。当试件破坏后 (第 5 次扫描), 孔隙率迅速增大, 尤其是在 $H=60$ mm 位置处。由图 9 可见, 在峰值荷载前, 各断面随着荷载的增加孔隙率增量变化趋势差异较大, 如 $H=20$ mm 处孔隙率增量先减后增, $H=60$ mm 处孔隙率增量先增后减。

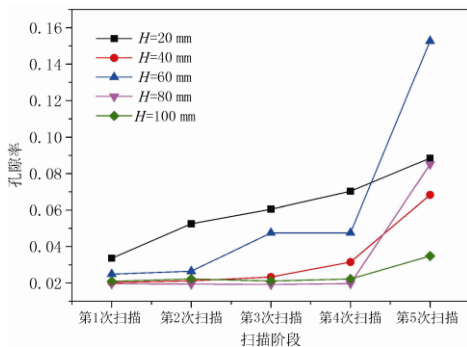


图 8 不同断面孔隙率随扫描阶段的变化图

Fig.8 Porosity change graph under different cross-section with the scanning stage

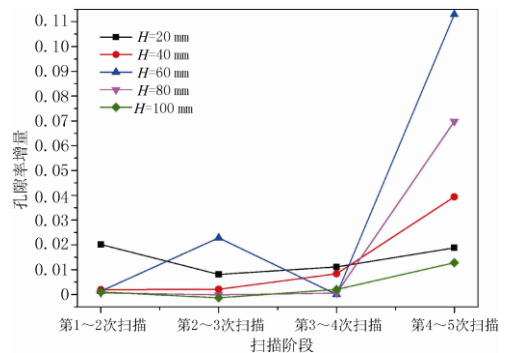


图 9 相邻两扫描阶段孔隙率增量随扫描阶段的变化图

Fig.9 Porosity increment change graph between adjacent scanning stages with the scanning stage

图 7 表明在损伤阶段, 分割的二值化孔隙及裂隙图在前 4 个扫描阶段无明显变化。但图 8 表明, 每个扫描断面统计的孔隙率变化很明显, 整体均表现为应力增加, 孔隙率增加。尤其是, 在第 4 扫描阶段, 直观地观察 CT 图像并无变化, 但 $H=20$ 、60、80 mm 处的 3 个断面孔隙率首先明显增加, 预示着宏观裂纹由上向下扩展的趋势。这表明孔隙率分析方法能够预测混凝土局部化损伤直至破坏的趋势, 与 CT 数平均值分析方法相比, 有一定优势。原因在于孔隙周边应力集中, 孔隙容易变形, 对损伤反映灵敏。

本文的孔隙率与传统的孔隙率概念有所不同。传统孔隙率 n 是指材料中孔隙体积所占试件总体积的比例。传统孔隙率可以通过 3 种方法获取, ① 可以通过密度、比重、含水率等直接测量指标导出; ② 采用压汞法或者核磁共振法直接测量; ③ 通过显微镜下平面孔隙率换算得出。

本文的孔隙率是基于混凝土 CT 图像和设定的孔隙 CT 数阈值，在二值图中孔隙面积（含细观裂纹面积）与扫描断面混凝土横断面面积的比值。根据经验，两类孔隙率测量结果大体相当。

5 混凝土 CT 图像的灰度共生矩阵特征值分析

5.1 灰度共生矩阵法原理及特征值统计量

将二维 CT 图像表示为二维函数 $f(x,y)$ ，其灰度级为 L ，在图像上取一个参考点 $(x,y) (f(x,y)=i)$ ，再取距参考点一定偏移量 δ 和角度 θ 的另一点 $(x+dx,y+dy) (f(x+dx,y+dy)=j)\delta$ 、 θ 、 L 的选取直接影响灰度共生矩阵的计算精度。为提高计算精度，本文选偏移量为一个像素。参考像素周围 8 个像素（图 10），但仅 0° 、 45° 、 90° 和 135° 四个方向上的像素是独立的，本文取 4 个方向特征值的平均值。

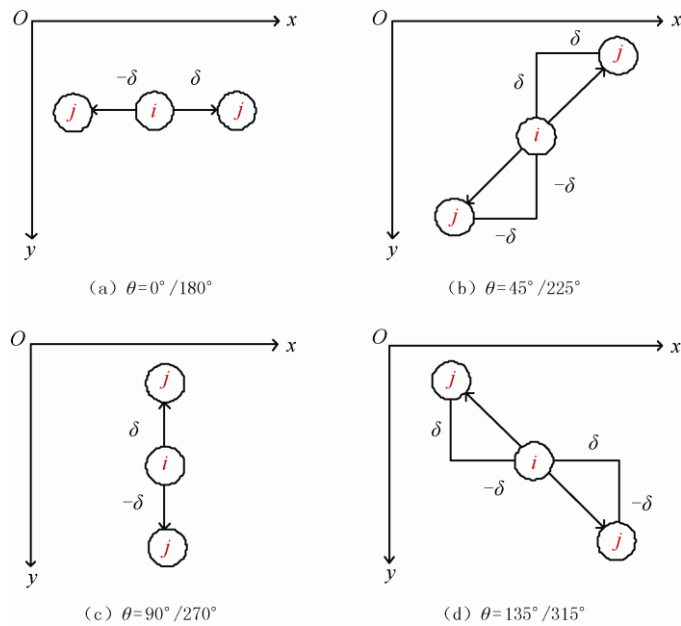


图 10 灰度共生矩阵特征参数的空间位置关系

Fig. 10 Spatial position relation among charateristic parameters of GLCM

$$P(i, j, \delta, \theta) = \{(x, y), (x+dx, y+dy) \in N \times N | f(x, y) = i, f(x+dx, y+dy) = j\} \quad (6)$$

将式 (6) 所示的灰度共生矩阵进行归一化后提取其特征值。研究表明灰度共生矩阵生成的 14 个特征值中只有对比度（式 (7)）、能量（式 (8)）、相关性（式 (9)）以及同质性（式 (10)）4 个特征值是相互独立的。

(1) 对比度 (contrast): 反映图像清晰度和纹理深浅程度。图像中纹理沟纹越深，对比度越大，图像的视觉效果越清晰。

$$con = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} ((i-j)^2 p^2(i, j, \delta, \theta)) \quad (7)$$

(2) 能量 (energy): 是灰度共生矩阵元素值的平方和, 度量图像纹理的粗细程度和灰度分布的均匀性。能量越大说明图像纹理模式越规则。

$$\text{ene} = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p^2(i, j, \delta, \theta)。 \quad (8)$$

(3) 相关性 (correlation): 用来衡量灰度共生矩阵的元素在行或列方向上的相似程度。相关性越大, 矩阵中的元素越均匀, 图像纹理越规则。

$$\text{cor} = \frac{\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} (i \times j \times p(i, j, \delta, \theta) - u_1 \times u_2)}{d_1^2 \times d_2^2}, \quad (9)$$

$$\text{式中, } u_1 = \sum_{i=0}^{L-1} i \sum_{j=0}^{L-1} p(i, j, \delta, \theta), \quad u_2 = \sum_{i=0}^{L-1} j \sum_{j=0}^{L-1} p(i, j, \delta, \theta), \quad d_1^2 = \sum_{i=0}^{L-1} (i - u_1)^2 \sum_{j=0}^{L-1} p(i, j, \delta, \theta), \\ d_2^2 = \sum_{i=0}^{L-1} (j - u_2)^2 \sum_{j=0}^{L-1} p(i, j, \delta, \theta)。$$

(4) 同质性 (homogeneity): 又称图像逆差距, 度量图像纹理局部变化的多少, 其值越大, 图像局部越均匀。

$$\text{hom} = \frac{\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p(i, j, \delta, \theta)}{(1 + (i - j)^2)}。 \quad (10)$$

5.2 基于灰度共生矩阵特征值的损伤演化规律研究

提取图 5 中不同断面不同应力阶段的各个 CT 图像的特征值, 结果如图 11 所示。由图 11 可见, 不同断面不同应力阶段的特征值变化趋势是不同的。

图 11 (a) 说明在初始阶段, 对比度的最大值、最小值分别在 $H=20\text{mm}$ 和 60mm 处, 即在初始阶段 20mm 处初始 CT 图像中灰度的局部变化最多, 即图像中的纹理沟纹最深, 而 60mm 处的原始 CT 图像中灰度的局部变化最少, 纹理最浅; 在第 2 至第 4 扫描阶段, 20 和 60mm 处的对比度逐渐增加, 而 40 、 80 和 100mm 处的对比度经历了减小和保持不变的变化; 在第 5 扫描阶段, 各个横断面处的对比度均大幅度增加。

图 11 (b) 可见, 在动压荷载施加过程中, 各个断面 CT 图像的能量变化幅度很小, 直到试件破坏, 能量急剧下降, 即在试件破坏前各个阶段的原始 CT 图像上的灰度分布均匀程度变化较小, 直到试件破坏各个横断面 CT 图像上的灰度分布发生了较大的变化。

图 11 (c) 可见同质性在不同断面 CT 图像的不同应力阶段变化趋势各异。如 $H=20\text{mm}$ 处的 CT 图像的同质性随荷载的增加不断减小, 而 $H=40\text{mm}$ 处的 CT 图像的同质性先增加后减小, 也就是说 20mm 的 CT 图像的局部变化越来越不均匀, 而 40mm 处的 CT 图像先变均匀而后均匀性变差。

图 11 (d) 可见在动力荷载施加的过程中 5 个横断面对应的初始 CT 图像的相关性整体呈现下降的趋势, 即各个断面处的原始 CT 图像上的行或列方向上的相似程度随着荷载的增加而减小。

上述分析表明，对比度、能量、相关性以及同质性 4 个特征值中只有能量统计指标在损伤阶段变化不明显，说明在损伤阶段统计区域的像素 CT 值整体变化不大，这与直观分析 CT 图像难以看到细观裂纹演化过程的结论是一致的。对比度特征值随荷载增加有增有减，反映孔隙压密、细观裂纹萌生对像素 CT 值的相互增减综合效应的影响。同质性、相关性特征值随应力增加单调下降，变化明显，反映细观损伤即细观裂纹活动对局部像素 CT 值的影响，敏感的原因在于相邻像素 CT 值进行了差值运算。

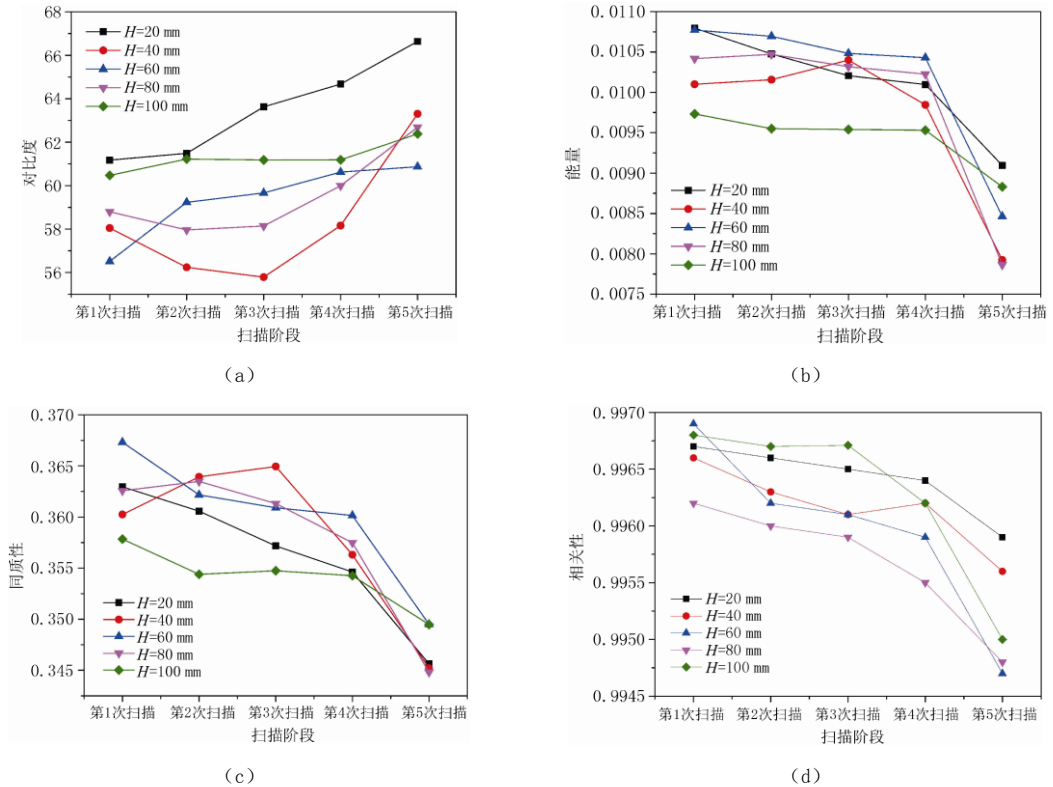


图 11 不同断面位置处特征值随扫描阶段的变化图

Fig. 11 Eigenvalue change graph at different cross-sections with the scanning stage

6 讨论

将本文孔隙率和灰度共生矩阵 4 个特征值随动力压缩荷载的变化规律与文献[18]中分形分析的结果进行比较，发现分形维数随动力荷载的变化规律与本文孔隙率结果相似，即在峰值荷载前孔隙率和分形维数均不变或小幅增加，而峰值荷载后分形维数和孔隙率均大幅增加，分形维数的准确性取决于孔隙、裂纹分割的合理性和客观性。

将分形维数、孔隙率以及 4 个特征值随荷载的变化规律相比，发现同质性和相关性在反映混凝土细观损伤演变时更敏感，孔隙率反映混凝土细观损伤演变过程最直观。但由于这 3 类统计量均是对整个 CT 图像进行运算，即只能反映材料整体的平均损伤，未能反映混凝土局部区域的细观损伤演化过程，因此有必要进一步对混凝土 CT 图像的孔隙率、同质性

和相关性特征值进行分区研究,以揭示混凝土细观损伤的局部化演化规律性。

本文仅给出了混凝土 CT 图像总体即整个扫描断面孔隙率、同质性和相关性特征值的初步变化规律和有效性分析结果。通过对扫描断面进行恰当的分区,进行孔隙率、同质性和相关性特征值的变化规律研究,揭示受力条件下混凝土局部的剪切、拉伸变形和破坏的细节过程,分析其与骨料、砂浆、孔隙、骨料和砂浆结合面的关系,是本文进一步研究的方向和目标。

大约在峰值强度的 97% 前,即第 4 扫描阶段前,细观破坏过程是渐进的,属于损伤阶段,未引起混凝土材料质的变化,混凝土结构从使用功能来看是安全的,这个信息和结论对混凝土结构设计中混凝土强度指标的确定具有重要的参考价值。

7 结论

本文分别应用图像分割技术和灰度共生矩阵理论提取不同应力阶段不同断面 CT 图像的孔隙率和灰度共生矩阵 4 个特征值,对比研究混凝土在动力压缩荷载作用下孔隙率、对比度、能量、相关性、同质性随应力的变化过程,结果表明:

(1) 在峰值荷载前,即混凝土损伤阶段,孔隙率随应力的增加显示出单调增加的总趋势,个别部位在应力水平较小时孔隙率随应力增加变化不大,反映出混凝土的压密效应影响。

(2) 灰度共生矩阵的 4 个特征值随应力的变化表现不同,对比度受压密效应影响,量值在低应力水平时随应力增加有升有降,能量指标对应力变化不够敏感,相关性和同质性指标随应力的增加单调增加,较为敏感,反映了混凝土整体损伤过程。

(3) 对混凝土 CT 图像进行分区的孔隙率、灰度共生矩阵同质性、相关性特征值研究,有助于反映动荷载作用下混凝土的细观损伤过程。

参考文献

- [1] PHILIP J, WITHERS, REN W Y, et al. Two-dimensional X-ray CT image based meso-scale fracture modelling of concrete[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, 133(15): 24-39.
- [2] 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(1): 21-30.
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(1): 21-30. (in Chinese).
- [3] 毛灵涛, 刘海洲, 牛慧雅, 等. 基于工业 CT 力学试验平台的建立及应用[J]. *CT 理论与应用研究*, 2015, 24(2): 271-282. DOI:10.15953/j.1004-4140.2015.24.02.12.
MAO L T, LIU H Z, NIU H Y, et al. Construction and applications of a mechanics experimental platform based on industrial computer tomography[J]. *CT Theory and Applications*, 2015, 24(2): 271-282. DOI:10.15953/j.1004-4140.2015.24.02.12. (in Chinese).
- [4] 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, 2(9): 1421-1425.
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, 2(9): 1421-1425. (in Chinese).
- [5] 党发宁, 方建银, 丁卫华. 基于 CT 的混凝土试样静动力单轴拉伸破坏裂纹分形特征比较研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S1): 2922-2928.
DANG F N, FANG J Y, DING W H. Fractal comparison research of fracture of concrete samples under static and dynamic uniaxial tensile using CT[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics*

- and Engineering, 2015, 34(S1): 2922-2928. (in Chinese).
- [6] 方建银, 党发宁, 李晓荣, 等. 混凝土单轴压缩 CT 试验过程量化分析[J]. 水力发电学报, 2015, 34(5): 140-146.
FANG J Y, DANG F N, LI X R, et al. Quantitative analysis of process of concrete CT test under uniaxial compression[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2015, 34(5): 140-146. (in Chinese).
- [7] 任文渊, 杨贞军, 黄宇劫. 基于 X 射线计算断层扫描图像的混凝土细观断裂模型[J]. 水利学报, 2015, 46(4): 452-459.
REN W Y, YANG Z J, HUANG Y J. Meso-scale fracture modelling of concrete based on X-ray computed tomography images[J]. Journal of hydraulic engineering, 2015, 46(4): 452-459. (in Chinese).
- [8] HONEYCUTT C E, PLOTNICK R. Image analysis techniques and gray-level co-occurrence matrices (GLCM) for calculating bioturbation indices and characterizing biogenic sedimentary structures[J]. Computers & Geosciences, 2008, 34(11): 1461-1472.
- [9] 高程程, 惠晓威. 基于灰度共生矩阵的纹理特征提取[J]. 计算机系统应用, 2010, 19(6): 195-198.
GAO C C, HUI X W. GLCM-based texture feature extraction[J]. Computer System Application, 2010, 19(6): 195-198. (in Chinese).
- [10] 薄华, 马缚龙, 焦李成. 图像纹理的灰度共生矩阵计算问题的分析[J]. 电子学报, 2006, 34(1): 155-160.
BO H, MA F L, JIAO L C. Research on computation of GLCM of image texture[J]. Acta Electronic Sinica, 2006, 34(1): 155-160. (in Chinese).
- [11] 刘丽, 匡纲要. 图像纹理特征提取方法综述[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(4): 622-635.
LIU L, KUANG G Y. Overview of image texture feature extraction methods[J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(4): 622-635. (in Chinese).
- [12] 蒋恒, 王磊, 夏开建, 等. 基于灰度共生矩阵的 ADC 纹理分析鉴别直肠癌 T3 亚分期的临床价值[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2019, 25(6): 544-548.
JIANG H, WANG L, XIA K J, et al. The value of ADC texture analysis based on gray level co-occurrence matrix to discriminate T3 subclassification of rectal cancer[J]. Chinese Computed Medical Imaging, 2019, 25(6): 544-548. (in Chinese).
- [13] 江玉杰, 王世航. 基于灰度共生矩阵的遥感图像抗旋转性研究[J]. 电脑知识与技术, 2020, 16(31): 13-16.
JIANG Y J, WANG S H. Research on anti-rotation of remote sensing image base on GLCM[J]. Computer Knowledge and Technology, 2020, 16(31): 13-16. (in Chinese).
- [14] 陈焕栩, 解浩, 张建文, 等. 基于灰度共生矩阵纹理特征的局部放电模式识别[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 25-30.
CHEN H X, XIE H, ZHANG J W, et al. Partial discharge pattern recognition based on texture feature of gray level co-occurrence matrix[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 25-30. (in Chinese).
- [15] 蒋贤维, 张妙娴, 朱兆松. 基于灰度共生矩阵和精度高斯支持向量机的中国手语手指语识别[J]. 计算机科学, 2019, 46(S2): 303-308.
JIANG X W, ZHANG M X, ZHU Z S. Recognition of Chinese finger sign language based on gray level co-occurrence and fine Gaussian support vector machine[J]. Computer Science, 2019, 46(S2): 303-308. (in Chinese).
- [16] 丁卫华, 陈厚群, 尹小涛, 等. 类岩石材料 CT 动载试验装置的关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1620-1629.
DING W H, CHEN H Q, YIN X T, et al. Study of key techniques of dynamic loading CT test device for rock-like materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1620-1629. (in Chinese).
- [17] 曹建农编著. 图像分割方法研究[M]. 西安: 西安地图出版社, 2006.
- [18] 方建银, 党发宁, 丁卫华. 基于CT扫描图形的混凝土单轴压缩动力破坏过程分形研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(2): 208-214.
FANG J Y, DANG F N, DING W H. Fractal research on failure process of concrete under dynamic uniaxial compression based on CT scan graphics[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(2): 208-214. (in Chinese).

Study on Concrete Mesoscopic Damage Under Dynamic Loading Using CT Image Segmentation and Gray Level Co-occurrence Matrix Eigenvalue

DING Weihua[✉], ZHU Lin, HUANG Li, ZHANG Le, QIN Junrong, LI Aiguo

State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region,
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

Abstract: The process of concrete internal damage development to fracture is completely recorded by series CT images of concrete under dynamic loading. However, macroscopic damage of concrete has occurred when the microscopic cracks can be observed at CT image. The core of concrete CT image analysis is to excavate the microscopic damage information in concrete damage stages. In this research, image segmentation technology and gray co-occurrence matrix theory (GLCM) were used to extract the porosity and four eigenvalues (contrast, energy, correlation and homogeneity) respectively to study the change law of these parameters with stress in different cross sections under uniaxial dynamic compression using CT. Results show that porosity presents a general trend of monotonous increase with the increase of stress, while the porosity in some parts shows little change with the increase of stress when the stress level is small, which reflects the influence of concrete density compression effect. Contrast increases and decreases with the increase of stress at low stress level due to the influence of density compression effect. The index of energy is not sensitive to stress change. Correlation and homogeneity increase monotonously with the increase of stress, which are more sensitive for reflecting the whole damage process of concrete. This study shows that the sectionalized porosity, homogeneity and correlation of GLCM is helpful to reflect the mesoscopic damage process of concrete under dynamic load.

Keywords: CT image; image segmentation; gray level co-occurrence matrix; porosity; eigenvalue



作者简介: 丁卫华[✉] (1965—), 男, 西安理工大学土木建筑与工程学院副教授, 主要从事混凝土细观力学的 CT 试验研究, Tel: 13892805636, E-mail: weihuading@163.com。