

文章编号: 1672-3031(2006)01-0001-07

混凝土 CT 图像中等效裂纹区域的定量分析

陈厚群^{1,2}, 卫华^{1,3}, 党发宁^{1,3}, 尹小涛³

(1. 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国水利水电科学研究院 工程抗震研究中心, 北京 100044;

3. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 从细观尺度观察, 混凝土材料可看作由骨料、砂浆及其结合面构成的不均匀复合材料。为研究加载时裂纹在混凝土内部结构中扩展的过程, 采用 X 射线 CT 扫描技术获得单轴加载条件下混凝土破裂过程的系列 CT 图像。对于 CT 图像中裂纹信息的提取, 传统的方法是将 CT 图像中的低密度区作为裂纹区域, 无法准确地识别裂纹和判定裂纹具体形态。本文根据差值 CT 图像是否出现线状或环状影像判断裂纹的存在。通过变换差值 CT 图像中像素值的阈值范围分析裂纹的分布特点。根据 CT 物理原理确定等效裂纹区域。探讨了混凝土 CT 图像中裂纹及其形态的判定时存在的问题。

关键词: 混凝土; CT; 裂纹; 差值 CT 图像; 阈值

中图分类号: TV32

文献标识码: A

1 研究背景

从细观尺度观察, 混凝土材料可看作由骨料、砂浆及其结合面构成的不均匀材料。随着荷载条件变化, 裂纹在砂浆与骨料结合面部位萌生, 其扩展方式受加载条件、混凝土性能、骨料形状等多种因素影响。混凝土内部细观裂纹的变化可以解释混凝土材料宏观力学特性。混凝土细观裂纹的研究方法有理论分析、数值模拟和实验观察, 实验方法是建立裂纹模型、检验数值模拟结果的基础。光学显微镜和电子扫描显微镜可以观测混凝土切面的精细结构, 包括微裂纹特征, 但混凝土内部细观裂纹演化过程的实验观察一直难以进行。X 射线混凝土 CT 试验, 即采用医用 CT 或工业 CT 扫描混凝土试件断面获得混凝土 CT 图像, 通过 CT 图像的影像特征分析混凝土细观结构及其变化过程。X 射线 CT 观察混凝土裂纹演化过程最大优点在于它的无损探测性能和高分辨率。

Morgan 等^[1]首次采用医用 CT 对混凝土小试件进行 CT 扫描, 获得了骨料、砂浆、裂纹的清晰的混凝土断面图像, 只是图像分辨率和成像速度与当代 CT 设备技术指标相比有较大差距。Oral Buyukozturk^[2]通过对基于 X 射线或 γ 射线的 CT 方法、热红外线法、微波法、声发射法等对比, 发现骨料、砂浆、孔洞等组分在 CT 图像中清晰可见, 认为 X 射线 CT 是研究混凝土内部结构的有效方法。John 等^[3]采用数字图像关联术(Digital image correlation, 简称 DIC)分析混凝土表面破裂模式, 采用 X 射线 CT 分析三维裂纹内部特征, 发现 DIC 适合于观察混凝土表面的小裂纹, X 射线 CT 描述混凝土内部大裂纹更有效, 两种方法结合能体现裂纹演化过程中内部结构特征的影响, 文中还根据混凝土破裂后的 CT 图像讨论了骨料形状、裂纹形状对混凝土强度和韧性的影响。上述文献的一个不足之处是将原始 12 字节 CT 图像转化为 8 字节灰度 CT 图像后, 再分析灰度 CT 图像, 实际上降低了 CT 图像的分辨率, 并且判断裂纹的根据是灰度 CT 图像中是否出现低密度带, 用肉眼直接观察, 这对进一步判定裂纹具体形状带来困难, 且判断裂纹何时萌生误差很大。

最近十几年来, X 射线 CT 研究成为岩石材料细观破裂过程的热点研究课题, 其成果主要表现在加

收稿日期: 2005-11-04
基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(90510017); 西安理工大学科技创新与特色研究计划(106-2104020); 冻土工程国家重点实验室开放基金(SKLFSE200401)
作者简介: 陈厚群(1932-), 男, 江苏无锡人, 中国工程院院士, 主要从事工程抗震研究。E-mail: chenhq@iwhr.com

载条件的变化方面^[4-8]。由于岩石和混凝土材料密度近似,岩石 CT 理论和图像分析方法均可用来研究混凝土材料细观结构。混凝土 CT 基本原理与岩石 CT 是相同的,混凝土各组分物理密度不同,反映在 CT 图像上各部位的 CT 数(正比于物理密度)不同,从而形成骨料、砂浆、孔洞等灰度不同的影像图。混凝土试件受力产生细观裂纹后,相应的 CT 图像部位灰度降低(即 CT 数减小),形成线状或环状影像,称之为 CT 尺度裂纹,属于基于 X 射线 CT 分辨率条件下的细观裂纹,这是混凝土 CT 的主要研究对象。但是,目前关于裂纹具体形状的描述和裂纹萌生时间如何判定的问题尚未解决,因此关于混凝土、岩石 CT 图像中裂纹的定量分析进展不大,包括如何识别裂纹、裂纹空间形状和演化过程如何描述,严重地浪费了 CT 图像资源,成为制约混凝土、岩石 CT 发展的瓶颈问题。

由于受 X 射线 CT 设备资源的限制,国内尚无类似混凝土 CT 研究成果的报道。本文根据混凝土卸载 CT 图像研究混凝土 CT 尺度细观裂纹判断标准和裂纹区域的定量描述方法,探讨混凝土 CT 图像中裂纹及其形态的判定时存在的问题。

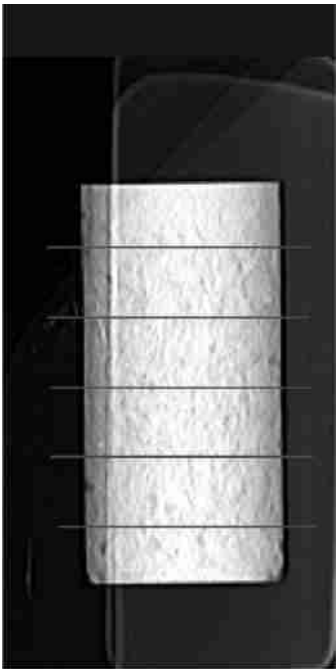


图1 HEN-012 扫描定位示意

2 试验方案和试验结果

2.1 试样 水泥为三峡牌 525[#] 中热水泥,粗骨料为粒径 10~ 15mm 的单级配花岗岩人工碎石,细骨料为霸河河砂,采用渭河一级粉煤灰作为掺和料。混凝土配合比为:水泥:粉煤灰:粗骨料:细骨料:水= 233: 59: 1083: 784: 190。试件为高 120mm、直径 60mm 的圆柱体试件。试验时试件龄期 12 个月。

2.2 试验设备 采用 Instron 1342 型压力试验机进行压缩试验,加载波形可根据需要设定。X 射线 CT 扫描利用 Marconi M8000 螺旋 CT 扫描仪,分辨率 24 线对/cm,图像大小为 1 024 × 1 024 和 512 × 512 两种,成像速度最快为 0.5s 内扫描 4 层 CT 图像。

2.3 试验步骤 首先对混凝土试件进行初次定位扫描,图 1 为试件 HEN-012 的扫描位置。扫描层厚 2.5mm,间距 15mm。利用 Instron 1342 型压力试验机进行单轴压缩试验,加载速率 1.2×10^{-3} /s,预估混凝土强度,在峰值强度前的 90% 卸载,再第二次进行 CT 扫描。再对试件施加荷载,最大压力控制在比上次大 2% 左右,卸载后扫描。如此反复,直至试件破坏。

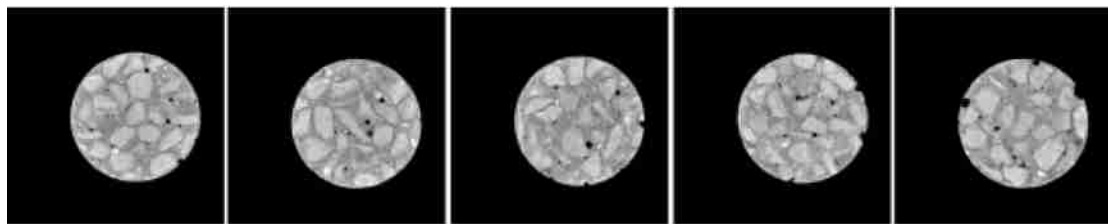
2.4 混凝土 CT 图像 HEN-012 圆柱体试件各断面 CT 图像见图 2。

从图 2 可以看出,由于骨料、砂浆、空洞的 CT 数差别较大,因此混凝土 CT 图像可以清晰地显示混凝土结构组成。由于卸载和弹性恢复的影响,混凝土试件破坏前,即使单轴压力 109.1kN 接近峰值强度 111.6kN 时,CT 图像中也未发现明显裂纹,即线状或环状影像特征。此时,究竟有无裂纹出现,破坏后裂纹具体形状如何,需进一步分析。单轴压力为 111.6kN 时,裂纹已经贯通,但裂纹区域究竟有多大,形状如何,单从灰度 CT 图像无法得出结论。

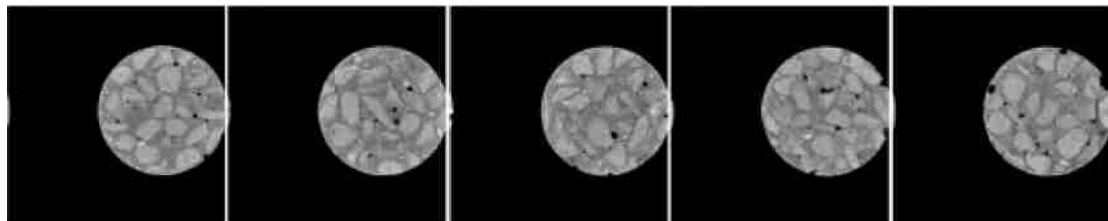
3 裂纹区域的确定

裂纹区域的确定实质上是两个问题,一是裂纹是否存在或产生,二是其形状尺寸如何。对于第一个问题,一般采用兴趣区的平均 CT 数判断。根据 CT 物理原理,水的 CT 数为 0,空气的 CT 数为- 1 000。因此,从理论上来说,判断裂纹或空洞是没有任何问题的。但实际上,由于 CT 图像是采用一定的数学算法得到的反演图像,并受采样方式影响,一点的 CT 数受附近像素点 CT 数影响,造成水的 CT 数比 0 大,空气的 CT 数比- 1 000 大。而且,水或空气的区域愈小,其 CT 数与 0 或- 1 000 相差愈大,究竟相差多少,与水或空气区域的大小和形状有关,因此,在一副静态 CT 图像中确定细观裂纹或空洞区域是很

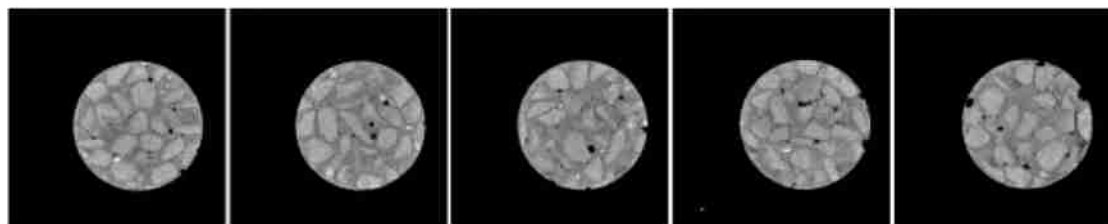
困难的。另一方面, 由于裂纹是一个非常薄的三维空间体, 其宽度方向往往只占体素(每一混凝土单元体素对应于一个 CT 图像的像素)的一部分, 也是造成裂纹部位像素值(即 CT 数)偏高的原因。如果已确定裂纹的存在, 裂纹区域的具体形状尺寸和边界如何判断, 到目前为止, 尚无满意的方法。



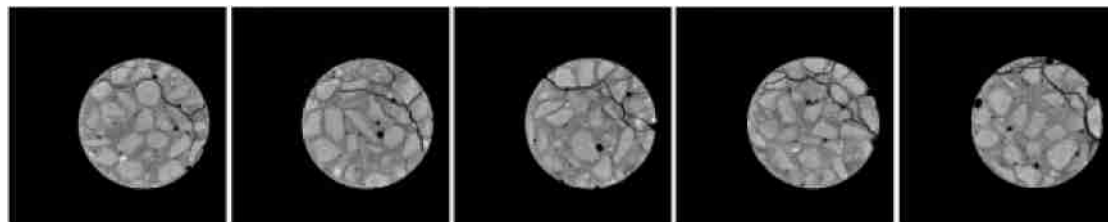
(a) 各断面初始状态



(b) 各断面在单轴压力 101.0 kN 卸载后



(c) 各断面在单轴压力 109.1 kN 卸载后



(d) 各断面在单轴压力 111.6 kN 卸载后

图2 混凝土试件 HEN-012 CT 图像

3.1 根据差值 CT 图像判断裂纹是否开裂 当试件扫描断面中某一部位出现裂纹时, 如果裂纹长度或宽度较大, 在相应的灰度 CT 图像中低密度带会以线性或环状影像出现, 可以确认裂纹已产生。如果试件扫描断面中裂纹尺寸较小, 则 CT 图像中线状或环状影像特征不明显, 在灰度 CT 图像中难以确定裂纹是否存在。本文采用 CT 图像的差值图像判断是否有裂纹出现。差值图像的含义是: $\Delta H_{i,j} = H_{i,j}^{k+1} - H_{i,j}^k$, 其中, i 和 j 表示原始 12 字节图像矩阵的行及列, k 表示加载或者扫描阶段; $H_{i,j}$ 为第 i 行、第 j 列上像素的 CT 数, $\Delta H_{i,j}$ 表示该点 CT 数加载前后的变化。

图 3 为 HEN-012 各断面在 109.1 kN 卸载后与初始阶段差值 CT 图像。从图 3 可见, 仅在左边第 5 幅差值图像中右下角部位有线状阴影, 表明该处有 CT 尺度裂纹萌生, 其余部位未发现明显的线状阴影。图 4 为 HEN-012 各断面 111.6 kN 卸载后与初始阶段差值 CT 图像。从图 4 可见, 每个断面的线状阴影都已连通, 说明混凝土试件已经破坏。与相应的破坏后的灰度 CT 图像相比, 裂纹更加清晰, 并且 CT 图像中不能确定的裂纹也得到确认。原因在于, 差值图像中的线状或环状阴影只能用裂纹来解释, 并且裂纹

影像得到增强。

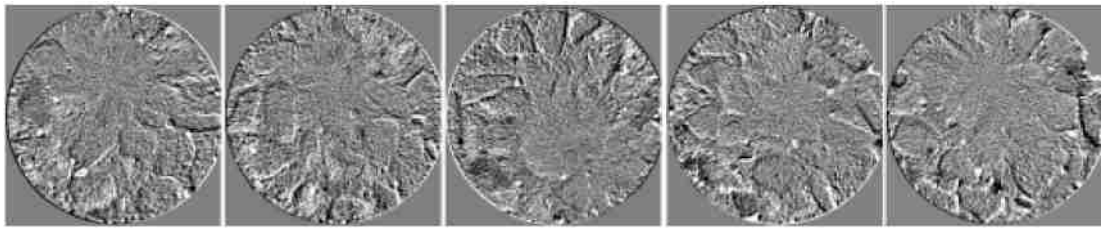


图3 HEN-012 各断面在 109.1kN 卸载后与初始阶段差值 CT 图像

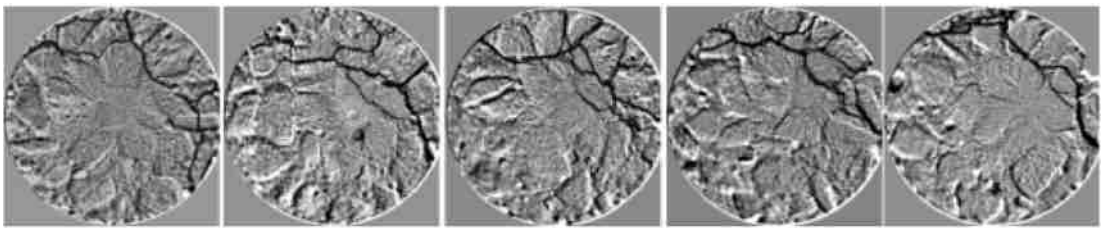


图4 HEN-012 各断面在 111.6kN 卸载后与初始阶段差值 CT 图像

3.2 差值 CT 图像像素值的分布特征 图 5 是图 4 左边第 1 幅差值图像的直方图, 横坐标 $\Delta H_{i,j}$ 表示 CT 数差值, 纵坐标 f 表示统计区域内相同差值的频数, 以相对值表示。可以看出, $\Delta H_{i,j}$ 最小值为 - 2 429, 最大值为 2 161, 均值 - 24. 75, 方差 274. 98。

$\Delta H_{i,j}$ 表示了材料在受力后像素 (i,j) 所对应体素的密度变化情况。一种是局部裂纹产生, 对应的 $\Delta H_{i,j}$ 为负值; 另一种是在受力过程中砂浆和骨料的变形、变位量不同, 形成密度变化, 其 $\Delta H_{i,j}$ 可正可负。在差值 CT 图像中负值像素的集合体如果呈现线状或环状影像, 只能用裂纹来解释。由于直方图不能说明某一像素的位置, 必须进一步考虑图像的方法显示差值 CT 图像的像素值分布特征。

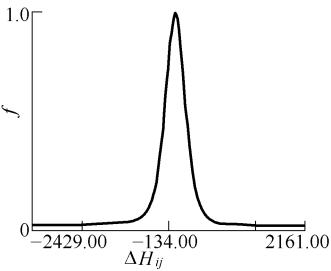


图5 HEN-012 差值 CT 图像的直方图

定义一个集合 $\Omega = \{(i,j) | \xi_1 \leq \Delta H_{i,j} \leq \xi_2\}$, 式中 ξ_1 和 ξ_2 为 $\Delta H_{i,j}$ 的分割阈值, Ω 为落入该阈值范围的像素点集。当 $\Delta H_{i,j}$ 值处于 ξ_1 和 ξ_2 之间时对该像素点赋值为 1, 图像中表现为白色部分; $\Delta H_{i,j}$ 值落在阈值之外则该像素点赋值为 0。图像中表现为黑色部分, 这样就形成了图 6 所示的二值图。

根据二值图的含义, 为分析 $\Delta H_{i,j}$ 的分布特点, 只需分析点集 Ω (即图中白色部分) 的分布特征即可。在 $\xi_2 > - 593$ 时, 图中无白色线状或环状影像出现, 表明无裂纹产生。当 $\xi_2 < - 593$ 时白色线状影像明显, 即为裂纹。裂纹区在图 6(m) ~ 图 6(r) 中出现, 并且从后到前具有一定的继承性和扩展壮大。综合分析说明, 裂纹获得阈值 ξ_1 和 ξ_2 分别在 - 2 429 ~ - 593 之间取值为宜, 但阈值上限 ξ_2 究竟取多少合适, 需进一步进行图像试验。

选用阈值 ξ_1 和 ξ_2 分别为 - 2 429 ~ - 593、- 2 429 ~ - 822 和 - 2 429 ~ - 1 052 共 3 组, 得到图 7, 图中剔除了不是裂纹的孔洞等不连续体的影响。

经测量得出, 图 7(a) 白色裂纹区域的像素点总数为 4 615、图 7(b) 白色裂纹区域的像素点总数为 2 605、图 7(c) 白色裂纹区域的像素点总数 1 299。究竟实际裂纹的几何形态及其区域接近于哪一种情况, 需采用另外的方法来判断。

3.3 根据 CT 物理原理确定裂纹区域 关于材料的 X 射线 CT 图像中裂纹区域的确定问题最早可追溯到材料 CT 图像中裂纹宽度的测量问题。Segal 等^[9] 认为合成材料中窄裂纹与宽裂纹在 CT 图像的纵剖面上测量宽度时须采用不同的测量方法。Robert 等^[10] 提出与已知裂纹宽度的 CT 图像相比较获得未知裂纹宽度。Verhelst 等^[11] 也得出类似结论。任建喜^[12]、丁卫华等^[13] 根据 CT 物理原理从理论推导了岩石

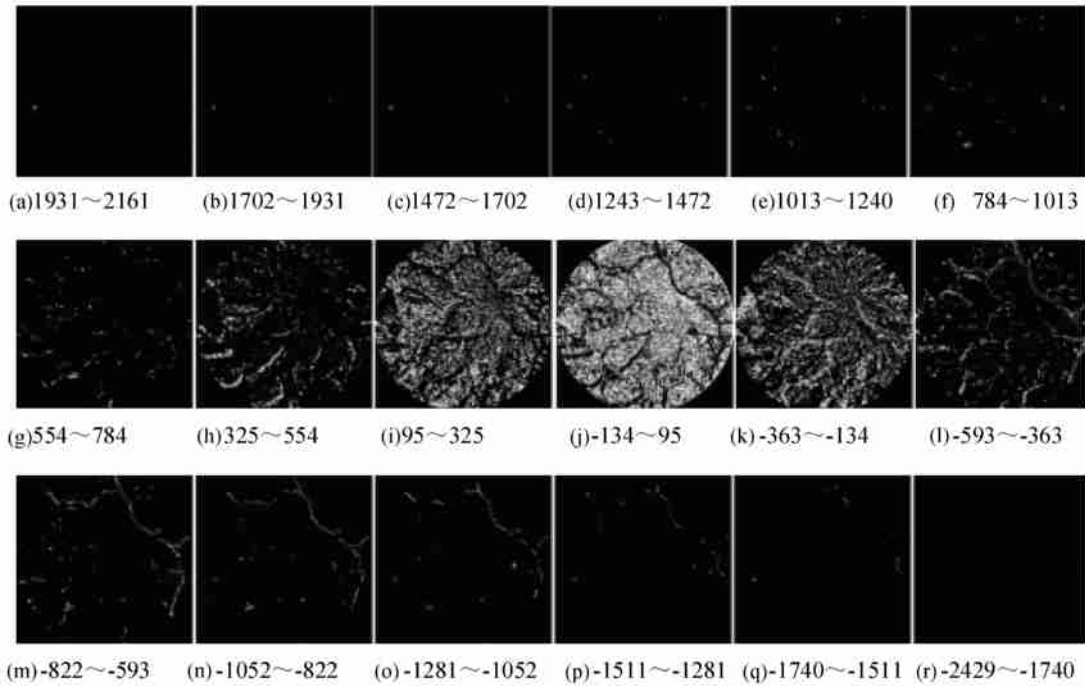


图6 图4 左边第 1 幅差值图像在不同 ΔCT 数國值所截取的二值图

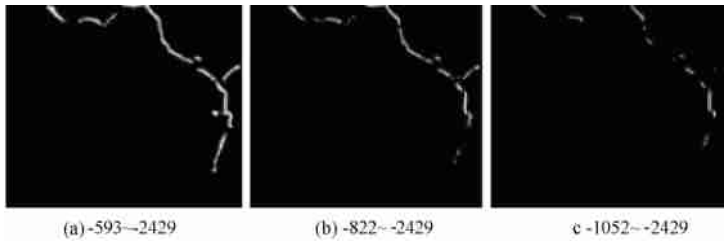


图7 不同 ΔCT 数國值所截取的裂纹二值图

裂纹宽度计算公式。

由于裂纹形状的不规则性, 裂纹宽度有一系列假定, 难以描述实际裂纹的形态。关键的问题是在差值图像中, 表征裂纹的 CT 数上限难以定量确定。为此, 本文提出以下定量确定裂纹区域的方法。

表 1 HEN-012 第 1 断面统计区域内 CT 值统计结果

统计区域面积(用像素点表示)	最小值	最大值	均值	方差
初次扫描 CT 图像, 232 281	- 743	3 095	1 897. 94	262. 93
10I. 1kN 卸载后 CT 图像, 232 281	- 765	3 095	1 897. 34	263. 13
109. 1kN 卸载后 CT 图像, 232 281	- 826	3 095	1 900. 49	264. 97
11I. 6kN 卸载后 CT 图像, 232 281	- 835	3 095	1 872. 00	305. 00

以混凝土圆柱体试件 HEN-012 第 1 断面统计区域为例(图 4 左边第 1 幅差值图像阴影区), 设统计区域面积为 S_0 。未受力时, S_0 内平均 CT 数为 H_0 , 用像素点多少度量面积, S_0 有 232 281 个像素点, 即 $S_0= 232\ 281$ 。受力后产生裂纹, 裂纹面积为 S_1 。根据 CT 物理原理, 裂纹区 S_1 的平均 CT 数的变化量为: $H_0- (-\ 1\ 000)= H_0+ 1\ 000$ 。

表 1 为 HEN-012 统计区域内 CT 值统计结果, 从表 1 可以看出, 在裂纹产生之前, 统计区域 S_0 内平均 CT 数变化不大, 并且根据实验观察, 裂纹区混凝土保持基本完整。这表明, 引起 S_0 内平均 CT 数变化的原因在于裂纹区 S_1 的平均 CT 数有突变, 即 S_0 内平均 CT 数的变化量等于裂纹区 S_1 的平均 CT 数变化量为

$$(H_0 - H_1) S_0 = (H_0 + 1\,000) S_1 \tag{1}$$

式中: H_1 为裂纹 S_1 产生后 S_0 内的平均 CT 数。

统计区域 S_0 确定之后, 其面积即为已知, 根据 CT 图像, 可以直接读出 H_0 、 H_1 , 由此得到 S_1 值。
根据统计结果, HEN-012 第 1 断面 111.6kN 卸载后相对于 101.1kN 卸载后的 CT 图像, 裂纹 S_1 面积为 2 032 个像素点。差值 CT 图像像素点的最小值 - 2 429, 最大值 2 161, 差值从 - 2 429 到 - 959 共有 2 031 个点, 基本接近计算的 S_1 面积。因此可将 CT 数小于 - 959 作为裂纹的差值 CT 数上限, 即把小于 - 959 的像素点作为裂纹区域, 如图 8 所示, 该裂纹区域在 CT 图像中的位置如图 9 所示。

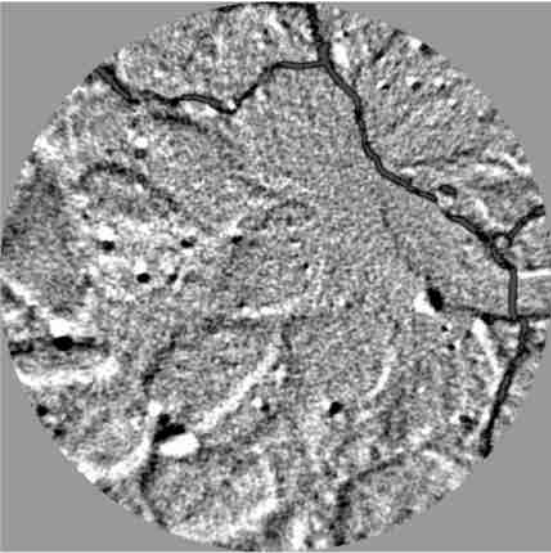


图 8 HEN-012 第 1 断面统计区域内 111.6kN 卸载后
差值图像裂纹区域(用黑色像素点表示)

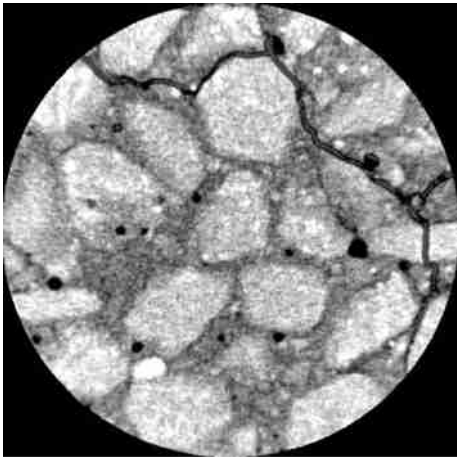


图 9 HEN-012 第 1 断面 111.6kN 卸载后 CT
图像中裂纹区域(用黑色像素点表示)

3.4 讨论 图 9 采用黑色像素点表示的 HEN-02 第 1 断面统计区域内裂纹区域显示了破坏 CT 图像的等效裂纹区域, 反映了实际裂纹的轮廓和位置。等效裂纹的含义是, 在 2.5mm 的扫描厚度内, 由于裂纹空间的不规则性, 理论上将其等效为宽度相当的规则的理想裂纹(空洞区)。图 9 的问题是黑色像素点集未能将裂纹完全连通, 第一种原因可能是由于图中的黑色像素点理论上表示真正的空气区, 但这在实际裂纹宽度不可能总是像素宽度的整数倍; 第二种原因是宽裂纹边缘在差值 CT 图像中比细裂纹部位的像素值小, 因此黑色点首先落在宽裂纹边缘; 第三种原因是 CT 图像的误差, 结果造成 S_1 面积偏小, 因此实际裂纹区未能有足够的黑色像素点充填。这些问题有待于今后进一步研究。

4 结语

本文根据 CT 物理原理和差值图像运算建立了混凝土 CT 图像中裂纹区域的定量分析方法, 从理论上探讨了以往在混凝土 CT 图像中受骨料影响裂纹是否出现难以确定及裂纹出现后其具体区域也无法确定的难题, 为定量描述裂纹形态和位置奠定了基础。今后进一步的工作是如何将等效裂纹贯通及如何定量分析等效裂纹的形状。

参 考 文 献:

[1] Morgan I L, et al. Examination of concrete by computerized tomography[J]. ACI Journal, 1980, 77(1): 23- 27.
[2] Oral Buyukozturk. Imaging of concrete structures[J]. NDT & E. International, 1998, 31(4): 233- 243.
[3] John S L, Denis T K, Surendra P S. Measuring three-dimensional damage in concrete under compression[J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(6): 465- 475.

- [4] 葛修润,任建喜,蒲毅彬. 岩石疲劳损伤扩展规律 CT 细观分析初探[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 191– 195.
- [5] 任建喜,葛修润,蒲毅彬,等. 岩石卸荷损伤演化机理 CT 实时分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 697– 701.
- [6] 仵彦卿,丁卫华,蒲毅彬,等. 压缩条件下岩石密度损伤增量的 CT 动态观测[J]. 自然科学进展, 2000, (9): 830 – 835.
- [7] Kawakata H, Cho A, Kiyama T, et al. Three-dimensional observations of faulting process in Westerly granite under uniaxial conditions by CT X-ray scan[J]. Tectonophysics, 1999, 313(3): 293– 305.
- [8] Ueta K, Tani K, Kato T. Computerized X-ray tomography analysis of three-dimensional fault geometries in basement-induced wrench faulting[J]. Engineering Geology, 2000, 56(1– 2): 197– 210.
- [9] Segal E, Nitea A, Segal Y. Dimensional information through industrial computerized tomography [J]. Material Evaluation, 1982, 40(11): 1268– 1272.
- [10] Robert A J, John S S, Louis M C, et al. Nondestructive measurements of fracture aperture in crystalline rock cores using X ray computed tomography[J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98(B2): 1889– 1900.
- [11] Verhelst F, Vervoort A, Debosscher P H, et al. X-ray computerized tomography: determination of heterogeneities in rock samples[A]. The 8th International Congress on Rock Mechanics[C]. In: T. fujii ed., Rotterdam: A. A. Balkema, 1995. 105– 108.
- [12] 任建喜,葛修润. 单轴压缩岩石损伤演化细观机理及其本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 425– 431.
- [13] 丁卫华,仵彦卿,蒲毅彬,等. 基于 X 射线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.

Quantitative analysis of equivalent crack region in CT images of concrete

CHEN Hou-qun^{1,2}, DING Wei-hua^{1,3}, DANG Fa-ning^{1,3}, YIN Xiao-tao¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. Earthquake Engineering Research Center, IWHR, Beijing 100044, China;

3. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract In view of the meso-mechanism, concrete can be regarded as a heterogeneous composite material consisting of aggregates, mortar and interfaces. In order to investigate the crack propagation in the inner structure of concrete under loading, a series of CT images about the fracture evolution process of concrete under a uni-axial dynamic loading condition was obtained by applying the X-ray CT technique. The traditional method of collecting crack information in CT images is to define the low density region in the CT images as the cracks. But the cracks would not be truly identified and the specific shape of the cracks would not be clearly determined. This paper presents a method of determining cracks according to linear or circular shadows whether or not appearing in the minus image between CT images. The characteristics of distributional region of cracks are also analyzed by means of changing threshold value. Then, the equivalent crack region can be determined based on the CT physics theory. Finally, a few issues about crack determination criterion and crack locations are discussed.

Key words: concrete; CT; meso-crack; minus image value between CT images; threshold value.

(责任编辑:王冰伟)