【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

原位加载下橡胶砂浆断裂的可视化和量化分析

张健超^{1,2}, 彭少成², 匡 川², 翁建武², 董必钦², 洪舒贤², 邢 锋^{1,2}

1) 中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150080;

2) 深圳大学土木与交通工程学院, 广东省滨海土木工程耐久性重点实验室, 广东深圳 518060

摘 要: 为提高材料的延展性, 经常在水泥基材料中加入橡胶, 但橡胶-水泥界面会产生更多的初始缺陷, 由 X 射线微观层析成像技术得到的三维图像更加复杂, 导致以全阈值法为主的传统方法不再适用于对内部三维裂缝进行分析. 提出一种改进的图像处理方法, 能够准确识别介观裂缝, 完成孔和裂缝的分离. 采用 X 射线层析成像原位观测技术对不同质量分数的橡胶砂浆进行测试, 通过该方法识别并分离孔和裂缝, 得到裂缝发展的可视化过程, 分析橡胶加入对裂缝形成的影响. 定量分析表明, 该方法相比传统方法, 能更好地识别介观裂缝, 具有更高的精度; 由于橡胶的掺入, 橡胶砂浆内部产生更多的初始裂缝, 但增加了试样整体对输入能量的吸收, 使受压破坏时的大裂缝数量和总裂缝体积减小, 与未掺入橡胶的试样相比, 橡胶质量分数为 5% 和 10% 的试样总裂缝体积分别减小 30% 和 45% 左右.

关键词: 建筑材料; 橡胶砂浆; 三维可视化; X 射线微观层析成像; 裂缝发展; 图像处理

中图分类号: TU528

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2021.02144

Visualization and quantitative fracture analysis of rubber mortar under in-situ loading

ZHANG Jianchao^{1,2}, PENG Shaocheng², KUANG Chuan², WENG Jianwu²,
DONG Biqin², HONG Shuxian², and XING Feng^{1,2}

1) Institute of Engineering Mechanics, Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang Province, P. R. China

2) College of Civil and Transportation Engineering, Guangdong Province Key Laboratory of Durability for Marine Civil Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: In order to improve the ductility of cement-based materials, rubber is often added to cement-based materials. But the rubber-cement interface will introduce more initial defects, and make the three dimensional images obtained by the X-ray micro-computed tomography (X-ray μ CT) technology more complex, and finally, which leads to the full threshold method no longer applicable to analysis of the internal three-dimensional cracks. This paper presents an improved image processing method, which can accurately identify mesoscopic cracks and achieve the separation of pores and cracks. In order to verify this method, X-ray computed tomography (XCT) in-situ observation technology is used to obtain the crack formation of rubber mortar with different replacement ratios. Pores and

Received: 2020-06-03; **Accepted:** 2020-10-25

Foundation: National Natural Science Foundation of China (51878411, 51727813); National Science Foundation for Outstanding Youth of China (51925805)

Corresponding author: Professor XING Feng. E-mail: xingf@szu.edu.cn

Citation: ZHANG Jianchao, PENG Shaocheng, KUANG Chuan, et al. Visualization and quantitative fracture analysis of rubber mortar under in-situ loading [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(2): 144-150. (in Chinese)

cracks are well identified and separated by this method. Quantitative analysis shows that the new method has higher accuracy and better identification of mesoscopic cracks than traditional methods. Due to the incorporation of rubber, there are more initial cracks in the rubber mortar, but the rubber will improve the overall absorption of the input energy of the sample, resulting in a decrease in the number of large cracks and the total crack volume when the specimen is failure. Compared with the sample without rubber content, the total crack volume of the sample with 5% and 10% mass fraction of rubber decreases by 30% and 45%, respectively.

Key words: building materials; rubber mortar; 3D-visualization; X-ray micro-computed tomography; crack propagation; image processing

随着橡胶消费的增加,大量废弃橡胶尤其是废弃轮胎带来环境污染问题.橡胶-水泥复合材料由于可回收作为骨料来源,受到了广泛关注^[1].橡胶-水泥复合材料作为一种新型的环保材料,相对于普通混凝土,具有更好的延展性、韧性、抗冲击性、能量耗散和阻尼比^[2-4],同时也有抗压强度、抗拉强度和弹性模量低的缺点^[5-8].现有研究大多是基于宏观尺寸的力学分析^[9-10],对于内部介观尺寸变化和表征方面的研究较少^[11].对于橡胶-水泥复合材料,受载下内部的介观裂缝可能会演变成宏观裂缝^[12],从而带来严重的经济和社会损失.因此,随着橡胶-水泥复合材料的广泛应用,有必要对其内部的裂缝发展过程展开研究.

最近几年,X射线计算机层析成像(X-ray computed tomography, XCT)无损检测技术被广泛应用于橡胶-水泥复合材料的内部裂缝检测中,并且取得了较为直观的可视化结果^[13-15].在处理XCT图像时,往往采用全阈值法,即根据灰度直方图划分图像灰度值,来分离固相和气相等目标^[16].这种处理忽略了X射线不均匀和噪声的影响,且确定阈值范围带有较大的主观性.以局部阈值法能够解决以上问题,同时也能减小图像中伪影的影响^[17].然而在识别介观裂缝时会在出现较大的尺寸误差^[18].相比于普通混凝土,橡胶-水泥复合材料受压破坏时候会产生更多的介观裂缝^[19-20],导致实际中得到的XCT图像更加复杂,而以往的方法也不再适用于橡胶-水泥复合材料内部裂缝的图像处理.为此,本研究建立一种比传统处理方法能更准确识别、分离橡胶砂浆内部孔隙和裂缝的方案,研究不同质量分数的橡胶砂浆内部裂缝的变化规律.

1 实验

1.1 试样制备

本实验采用P.O.42.5普通硅酸盐水泥(参照

GB 175—2007)、去离子水和标准砂,砂子、水泥和水的质量比为4:2:1.其中,砂子选择粒径为100~300 μm 的细砂,堆积密度为1 810 kg/m^3 .橡胶颗粒粒径为100~300 μm ,堆积密度为850 kg/m^3 ,质量分数分别为0%、5%和10%.将上述材料按比例混合搅拌后浇入10 mm×10 mm×10 mm的模具中,浇筑后将样品连同模具放入(20±2)℃的标准养护室中养护24 h并拆模,再在相同条件下继续养护27 d.在XCT扫描测试开始前,用砂纸打磨样品的表面,以便可以均匀施加压力.

1.2 加载试验

采用基于XCT原位的加载扫描装置.试样加载速度为0.1 mm/min,采样速率为500 ms/次.在正式加载前,进行预加载,对橡胶质量分数为0%、5%和10%的样品,分别取6个试样测试相应的极限荷载(参照标准GB/T 17671—2020).得到3个不同橡胶质量分数的极限荷载后,开始正式实验.第1次扫描未加载状态的样品,然后对分别增加到50%极限荷载和90%极限荷载的载荷进行XCT扫描.最后,将样品加载到破坏状态(极限加载),停止加载并进行最后1次扫描,共扫描4次.扫描参数为:电压为80 kV,电流为100 μA ,放大倍率为0.4,曝光时间为8 s,图像矩阵为1 024 voxel×1 024 voxel×1 000 voxel,像素分辨率为14.273 5 μm ×14.273 5 μm ×14.273 5 μm .

2 数值图像处理与分析

通过XCT原位加载得到的3D切片图像中,包含水泥、砂子、孔隙、裂缝、橡胶颗粒、未水化水泥颗粒、外部空气和伪影等.为达到分离裂缝目的,建立图1所示流程图,主要步骤为:

1) 沿 z 方向取切片图 f_z^0 作为输入,确定图中样品边界并获得只包含样品区域部分的图像 f_z^1 (边缘含少量背景残留);

- 2) 对 f_z^1 进行二值化处理, 获得包含孔、橡胶颗粒、裂缝和少量边缘背景的二值化图 f_{sz}^1 ;
- 3) 通过特定的形状分离筛选出孔 (除去与橡胶颗粒相同形状特征的)、橡胶颗粒、裂缝的 2D 二值图像 $F_z(F_{z1}, F_{z2}, F_{z3})$;
- 4) 根据 F_z 图像栈, 堆叠成 F_{z3D} ;
- 5) 重新沿 x 和 y 方向分别取切片图 f_x^0 和 f_y^0 , 依次按照步骤 1) 至步骤 4) 得到 F_{x3D} 和 F_{y3D} ;
- 6) 将 F_{x3D} 、 F_{y3D} 和 F_{z3D} 全部选择孔图像, 其交集作为最终孔的 3D 图像, 以同样方式得到橡胶颗粒和裂缝的图像。

图 1 3D 切片图像处理流程

Fig. 1 Flow chart of image processing of 3D slice

2.1 提取样品的真实轮廓

在获取的 XCT 图像中, 常常在样品区域的边缘部分存在与外部连通的裂缝或孔隙, 为能区别于外部空气, 需要封闭处理. 对裂缝附近的灰度值进行非线性拉伸处理, 构建的变换函数为

$$s(x, y) = \begin{cases} 0, & f(x, y) < qT \\ V(f(x, y)), & qT \leq f(x, y) < T + qT \\ 255, & T + qT \leq f(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{其中, } V(f(x, y)) = 255 \times \left[\frac{f(x, y) - qT}{T} \right]^{\text{lam}} \quad (2)$$

$f(x, y)$ 为原始输入图像的灰度值; T 为 $f(x, y)$ 的 Ostu's 阈值; q 为区间系数, 本研究取 0.7; lam 为系数, 取 0.04; $s(x, y)$ 为输出图像的灰度值。

图 2 以橡胶质量分数为 10% 的样品切片为例, 进行真实的轮廓处理. 除了区域 A 外, 其他边缘线都能很好识别. 将二值化图像填充后便可得到样品区域的掩膜 $M(x, y)$, 有

$$g^0(x, y) = f_z^0(x, y) \times M(x, y) \quad (3)$$

其中, 输出 $g^0(x, y)$ 为只包含样品区域的灰度图像; $M(x, y)$ 中的像素值只包含 0 和 1. 为改善该图在样品区域的对比度, 对样品所在区域的灰度值进行最大最小标准化, 得到 $g(x, y)$, 结果如图 2 (c). 其中, 残留部分背景 (外部空气) 在后面孔隙筛选时会被分离. 通过以上操作可获得较为真实的样品区域图像, 并且区域 A 中的连通裂缝也被识别为样品部分, 如图 2 (d).

2.2 二值化

Sauvola's 方法^[17]属于局部阈值法. 阈值计算公式为

$$H(x, y) = \left[k \left(\frac{s(x, y)}{R} - 1 \right) + 1 \right] m(x, y) \quad (4)$$

其中, $m(x, y)$ 和 $s(x, y)$ 分别为像素点 (x, y) 的灰度平均值和标准差; k 是敏感系数, 本研究取 0.15. 可得 x 和 y 方向的图像为

$$f_s(x, y) = \begin{cases} 0, & g(x, y) \leq H(x, y) \\ 255, & g(x, y) > H(x, y) \end{cases} \quad (5)$$

将高于局部阈值的设为前景 255, 其他为背景 0, 由式 (5) 可得 x 和 y 方向的 2D 图为

$$F_{sz}^1(x, y) = 255 \times M(x, y) - f_s(x, y) \quad (6)$$

将表示样品区域的掩膜与二值化图像结果相减, 可得到样品内部的孔隙与裂缝。

2.3 形状分离

2.3.1 分离裂缝与残留空气边缘连接点

样品二值化结果如图 3. 在 ImageJ 中加载所有沿 z 方向的切片, 选定图 3 所示 3 个黑框处, 进行 “Edit” 和 “Clear”, 并应用到所有切片. 经过此操作, 在进行邻域标记时, 残留边缘空气便与裂缝区分开。

2.3.2 24 邻域标记

对于图像上任意一个像素的邻域, 可将其周围 24 个点标记为 $N_{24}(P)$ 集合。

在二值图中, 如果灰度值均为 255 的像素点都

图2 样品的真实轮廓处理过程

Fig. 2 (Color online) The processing process of real contour of sample

图3 二值化结果及打断位置(黑框)

Fig. 3 Binarization results and interrupt location
(black frame)

在集合 $N_{24}(P)$ 中, 那么这些像素点同属一个 24 连通域. 本研究对图 2 中 24 连通域的标记可以通过两步法^[21]在 Matlab 中完成.

2.3.3 形状分离

为了能够在形状上区分裂缝、孔和橡胶颗粒, 本研究建立一个形状分离器, 其细长度 p 为

$$p = d_{\max} d_{\min} / d_E^2 \quad (7)$$

其中, $d_{\max}$ 和 $d_{\min}$ 分别是最大和最小 Feret 直径; d_E 为等效直径. 当连通域为圆形时, $p = 1$; 当连通域为正方形时, $p = \sqrt{2}\pi/4$; 当连通域为正三角形时, $p = \pi/2$; 当连通域为长方形(长为 a , 宽为 b) 时, $p = \frac{1}{4}\pi \times \sqrt{1 + b/a} \in (\frac{1}{4}\pi, \frac{\sqrt{2}}{4}\pi)$.

等效直径 d_E 为

$$d_E = 2\sqrt{s/\pi} \quad (8)$$

其中, s 为连通域的面积.

连通域中心点 (x_o, y_o) , 为每个连通域内所有像素点坐标的平均值.

橡胶颗粒的粒径范围为 $100 \sim 300 \mu\text{m}$, 形状介于圆形和正三角形之间, 即细长度在 $[1, \pi/2]$ 内. 具体参数筛选条件如表 1.

表 1 中, 若条件 2 的两个条件都满足, 便判定为橡胶颗粒(包含部分孔). 条件 1 中的 $x_{\min}$ 、 $y_{\min}$ 、 $x_{\max}$ 和 $y_{\max}$ 分别对应图像中连通域中心点坐标的最值; t 为判定是否靠近外侧的阈值条件, 本研究取 15.

表 1 筛选不同目标的参数条件范围

Table 1 Parameter range for screening different targets

筛选条件	p	中心点坐标 (x_0, y_0)	d_0
条件 1		$x_0 \in (x_{\min} + t, x_{\max} - t),$ $y_0 \in (y_{\min} + t, y_{\max} - t)$	
条件 2	$[1, \pi/2]$		$[7, 21]$
条件 3	$[1, \pi/2]$		

根据以上条件和参数, 建立形状筛选过程 (图 4), 步骤为:

1) 将上述领域标记图像 f_z 作为输入, 并构建与之相同的副本 f_z^1 , 分别填充 f_z^1 中每个邻域中的空洞并得到图像 Q_2^1 ;

2) 分别计算图像 f_z 和 Q_2^1 的形状系数, 得到 U_1 和 U_2 , 计算中保持连通域编号不变, 那么每个连通域都有 U_1 和 U_2 ;

3) 当 U_1 满足条件 1, 判定为边界外部空气残留, 将之全部剔除, 得到图像 Q_2 ; 当 U_1 满足条件 2 时, 判定为橡胶颗粒以及相同形状的孔, 将之全部从 Q_2 中筛出, 得到剩余图像 Q_3 ; 当 U_1 满足条件 3 时, 判定为孔, 并将其全部筛选出, 剩余图像为裂缝.

图 4 形状筛选过程

Fig. 4 Process of shape filter

2.4 图像处理结果

XCT 扫描后得到一系列二维投影图像, 利用这些图像重建 3D 数据集或 3D 立体图像. 按照图 1 和图 4, 以质量分数为 10% 的橡胶砂浆为例, 对极限加载下的图像进行处理. 图 5 为裂缝提取过程. 其中, 图 5 (a) 为实验获取的 XCT 图像的 3D 重构结果; 图 5 (b) 为样本中间高度处的切片图像, 可以观察到有未水化的水泥、砂子、孔和裂缝等信息; 图 5 (c) 为提取的孔、橡胶和裂缝整体; 图 5 (d) 为最终裂缝的提取结果. 可以看出, 经过 3 个方向的处理与合并, 裂缝上与之相连的球状孔可以被正确分离.

图 5 裂缝提取过程

Fig. 5 (Color online) Crack extraction process

3 裂缝变化特征

以橡胶质量分数为 10% 的样品为例, 加载下的图像处理结果如图 6. 通过相同的处理过程, 可以得到不同加载阶段 3 种质量分数橡胶的裂缝 3D 重构图, 计算体积与宽度, 分析不同质量分数橡胶对试样内部裂缝的影响.

不同橡胶质量分数试样在不同加载阶段的裂缝体积如图 7. 试样内部的裂缝体积变化趋势是一致的. 试件破坏前裂缝体积较小, 在极限荷载作用下突然增大. 在加载前, 试样内部初始裂缝的体积随着橡胶的掺入逐渐增大, 这是因为橡胶-水泥界面的作用效果一般不如传统的橡胶-砂子界面, 橡胶

图6 加载过程的3D裂缝重构
Fig. 6 (Color online) Three-dimensional crack reconstruction under load

的掺入可能会改变橡胶砂浆内部初始结构的特征, 导致初始裂缝体积的增加. 但试样破坏时, 橡胶质量分数为0的试样裂缝体积最大(约为橡胶质量分数为10%试样的2倍), 其次为橡胶质量分数为5%的试样. 这是因为橡胶是一种可逆形变的高弹性材料, 它的掺入提高了试样整体对输入能量的吸收, 进而提高试样的延性, 导致破坏时裂缝体积的减小.

图7 不同橡胶质量分数试样在不同加载阶段的裂缝体积
Fig. 7 The crack volumes of the samples with different rubber contents at different loading stages

裂缝体积分数随裂缝宽度的变化如图8. 由图8可见, 随着橡胶掺入量的增加, 试样内部的细裂缝逐渐增多, 宽裂缝逐渐减小.

图8 裂缝体积分数随裂缝宽度的变化
Fig. 8 The relationship between volume fraction and crack width

结 语

改进传统方法, 进行橡胶砂浆受载后裂缝的识别和提取研究. 提出的方法能够较精准地提取 XCT 加载测试中橡胶砂浆样品图像的裂缝, 并完成橡胶颗粒和孔的分离. 在加载前, 试样内部初始裂缝体积随着橡胶的掺入逐渐增大, 试样破坏时, 由于橡胶提高了试样受载后的延性, 导致裂缝体积随着橡胶质量分数的增加而减小. 随着橡胶掺入量的增加, 试样内部的细裂缝增多, 宽裂缝逐渐减少.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878411, 51727813); 国家杰出青年科学基金资助项目(51925805)
作者简介: 张健超(1991—), 深圳大学博士研究生. 研究方向: 土木工程无损检测及混凝土结构耐久性. E-mail: zhangjianchao728@163.com
引 文: 张健超, 彭少成, 匡 川, 等. 原位加载下橡胶砂浆断裂的可视化和量化分析[J]. 深圳大学学报理工版, 2021, 38(2): 144-150.

参考文献 / References:

[1] 岳雪涛, 刘冲昊, 王可良, 等. 橡胶混凝土的研究进展[J]. 山西建筑, 2018, 44(32): 115-116.
YUE Xuetao, LIU Chonghao, WANG Keliang, et al. Research progress of rubber concrete [J]. Shanxi Architecture, 2018, 44(32): 115-116. (in Chinese)

- [2] SUKMAK G, SUKMAK P, HORPIBULSUK S, et al. Physical and mechanical properties of natural rubber modified cement paste [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 244: 118319.
- [3] WANG Jiaqing, DAI Qingli, SI Ruizhe, et al. Mechanical, durability, and microstructural properties of macro synthetic polypropylene (PP) fiber-reinforced rubber concrete [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 234: 1351-1364.
- [4] ZABIHI S M, TAVAKOLI H, MOHSENI E. Engineering and microstructural properties of fiber-reinforced rice husk-ash based geopolymers concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(8): 04018183.
- [5] LI Yang, ZHANG Shuai, WANG Ruijun, et al. Potential use of waste tire rubber as aggregate in cement concrete: a comprehensive review [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 225(1): 183-201.
- [6] THOMAS B S, CHANDRA G R. Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 113: 86-92.
- [7] THOMAS B S, GUPTA R C. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54(13): 23-33.
- [8] JALAL M, NASSIR N, JALAL H. Waste tire rubber and pozzolans in concrete: a trade-off between cleaner production and mechanical properties in a greener concrete [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 238: 117882.
- [9] ZHENG Lei, SHARON H X, YUAN Yong. Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(5): 939-947.
- [10] YOUSSEF O, HASSANLI R, MILLS J E, et al. An experimental investigation of the mechanical performance and structural application of LECA-Rubcrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 175(2): 39-53.
- [11] ADAMU M, MOHAMMED B S, LIEW M S, et al. Evaluating the impact resistance of roller compacted concrete containing crumb rubber and nanosilica using response surface methodology and Weibull distribution [J]. *World Journal of Engineering*, 2019, 16(1): 33-43.
- [12] ALAM S Y, LOUKILI A. Effect of micro-macro crack interaction on softening behaviour of concrete fracture [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2020, 182: 34-45.
- [13] 滕晓娟, 刘昱清, 刘 鹏, 等. 弯曲荷载诱发微型梁开裂演化过程的可视分析 [J]. *深圳大学学报理工版*, 2018, 35(5): 24-30.
- TENG Xiaojuan, LIU Yuqing, LIU Peng, et al. Visual analysis of crack evolution process of microbeam induced by bending load [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2018, 35(5): 24-30. (in Chinese)
- [14] HONG Shuxian, LIU Peng, ZHANG Jianchao, et al. Visual & quantitative identification of cracking in mortar subjected to loads using X-ray computed tomography method [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 100: 15-24.
- [15] YANG Zhenjun, REN Wenyuan, SHARMA R, et al. In-situ X-ray computed tomography characterisation of 3D fracture evolution and image-based numerical homogenisation of concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 75: 74-83.
- [16] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [17] GUO Jiebin, HE Chuanjiang, ZHANG Xiaoting. Nonlinear edge-preserving diffusion with adaptive source for document images binarization [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2019, 351: 8-22.
- [18] TAN Y, KIEKENS K, KRUTH J P, et al. Material dependent thresholding for dimensional X-ray computed tomography [C]// *International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography*. Berlin: [s. n.], 2011.
- [19] XU Jie, FU Zhengwu, HAN Qinghua, et al. Micro-cracking monitoring and fracture evaluation for crumb rubber concrete based on acoustic emission techniques [J]. *Structural Health Monitoring*, 2017, 17(4): 946-958.
- [20] AKONO A T, CHEN J, KAEWUNRUEN S. Friction and fracture characteristics of engineered crumb-rubber concrete at microscopic lengthscale [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 175: 735-745.
- [21] KHALID R, JAVAID N. A survey on hyperparameters optimization algorithms of forecasting models in smart grid [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 61: 102275.

【中文责编：坪 梓；英文责编：之 隼】