

混凝土裂纹扩展过程的测量方法研究综述

储 峰

(中国路桥工程有限责任公司,北京 100011)

摘要:为充分应用混凝土结构物的承载能力及保障其运营安全,需及时进行裂纹检测,并掌握裂纹扩展情况。针对混凝土裂纹扩展过程的试验测量,主要介绍了光弹性贴片法、云纹干涉法、电子散斑干涉法和数字图像相关方法4种测量方法,并从原理、特点以及在混凝土裂纹扩展过程测量中的应用等方面分析了4种方法的优缺点。结果表明:电子散斑干涉法和数字图像相关方法能更好地应用于混凝土裂纹的测量,本文成果可为混凝土裂纹扩展测量方法的选择提供一定的理论支撑。

关键词:混凝土裂纹; 扩展过程; 测量方法; 散斑干涉技术; 数字图像相关方法

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)09-0060-05

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.09.122

Research review on measurement methods of crack growth process of concrete

CHU Feng

(China Road and Bridge Corporation(CRBC) Co., Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract: In order to make full use of the bearing capacity of concrete structure and ensure its operation safety, it is necessary to detect the crack in time and grasp its expansion. Aiming at the experimental measurement of crack growth process of concrete, this paper mainly introduces four methods of measuring crack growth process of concrete, namely photoelastic patch method, moire interferometry method, electronic speckle interferometry method and digital image correlation method, and analyzes their advantages and disadvantages from the aspects of principle, characteristics and application in the measurement of crack growth process of concrete. The results show that the electronic speckle interferometry and digital image correlation method can be better applied to concrete crack measurement, and the research results in this paper provide some theoretical support for the selection of concrete crack propagation measurement methods.

Key words: concrete cracks; expansion process; measurement method; speckle interferometry; digital image correlation method

混凝土作为当前土木工程结构最主要的材料之一,主要由水泥、水、骨料及外加剂组成。混凝土是一种多相复合材料,其破坏与断裂机理非常复杂。混凝土结构物(桥梁、水坝、房屋等)在运营过程中受荷载作用容易产生裂缝,且部分结构物为带裂缝工作^[1]。混凝土材料的断裂特性对结构承载力和安全性的影响极大,因此裂缝检测对混凝土结构的运营、诊断和维护具有重要意义。

传统的混凝土裂纹扩展过程主要以传统应变计进行测量,属于离散点接触式测试。这种测试方法采样频率较低,裂纹高速扩展时无法准确测量,且无法获得结构全场开裂情况。目前,针对混凝土结构裂纹扩展全过程测试,有4种应用较普遍且技术较成熟的方法,即光弹性贴片法、云纹干涉法、电子散斑干涉法(electronic speckle interference, ESPI)和数字图像相关(digital image

收稿日期: 2023-07-20

作者简介: 储 峰(1993—),男,工程师,从事公路工程项目管理、施工等工作。

correlation, DIC) 方法。本文分别介绍了这 4 种方法的原理、特点及在混凝土裂缝扩展测量中的运用现状, 同时总结了他们的优缺点, 为混凝土裂纹扩展测量方法的选择提供一定的理论支撑。

1 光弹性贴片法

光弹性贴片法是一种传统的试验应力分析方法, 其主要原理: 在需要测试的对象表面黏贴一种应变光学灵敏度较高的光弹性塑料薄片(简称贴片)。该贴片会随着被测对象一起变形, 并在测试对象表面产生等差线干涉条纹, 通过测试干涉条纹级数, 求得被测对象表面的应变分布。该方法从对象表面测试得到应变全场分布, 同时对于应力集中现象也能准确测试, 因此该方法可以用于现场实测。

光弹性贴片法^[2]最早由 MESNAGER 于 1930 年提出, 其做法是即将玻璃片黏贴到结构表面上。但是玻璃材料具有加工难、弹性模量高、易发生脆性断裂等不足, 且当时缺乏合适的胶黏剂使玻璃和结构物黏贴牢固, 因此该方法在当时并未得到发展。之后, OPPEL 用酚醛塑料薄片进行了简单的试验验证, 但由于薄片出现了明显的“时间边缘效应”, 造成测量结果的误差; 同时还存在胶黏剂黏性不足的问题, 且适用范围仅限于平面, 限制了该方法在实际工程中的应用。直至 20 世纪 50 年代末, FLEURY 等根据复杂构件表面的曲率和形状利用环氧树脂固化形成贴片, 制成反射式光弹性仪, 解决了该方法仅限于平面应用的问题。在断裂力学测试领域, 光弹性贴片法广泛应用于测量裂纹尖端弹塑性应变场及观测裂纹扩展。董伟^[3]应用光弹性贴片法测量了混凝土 I - II 复合型裂缝扩展全过程, 并记录分析了裂缝尖端主应力的变化。光弹性贴片黏贴于试件表面如图 1 所示, 其中 σ_{xx}^e 、 σ_{yy}^e 分别为 x 、 y 轴方向的试件应力, MPa; ε_{xx}^e 、 ε_{yy}^e 分别为 x 、 y 轴方向的贴片应变。

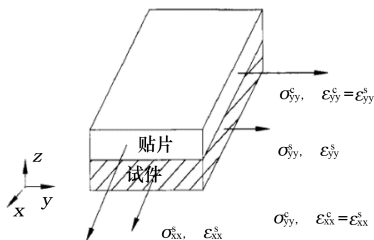


图 1 黏贴薄光弹性贴片的试件

2 云纹干涉法

20 世纪 80 年代, 随着全息照相术和散斑计量术的发展, 云纹干涉法在此基础上也得到了发展。该方法主要依据物理光学的基本原理, 利用全息方法可以方便高效地制作密度达 1 200 ~ 2 400 线/mm 的光栅, 而普通云纹法光栅密度不足云纹干涉法的 1/10, 约为 10 ~ 120 线/mm。其主要测试过程为将软片全息光栅粘贴在试件表面上, 可以达到较大尺度、反射和投射的实时观察和测量。但是该方法全过程都需要在全息实验台上完成试验, 因此对粘贴的软片、胶结剂和粘贴工艺要求极高。另外, 该方法可实现实时观测、全场分析、高反差条纹、方便测量面内位移和应变场, 在应变分析、复合材料、断裂力学、残余应力测量方面实现了广泛应用。沙风焕等^[4]探索了在压力容器中的应用, 针对轴向穿透裂纹尖端的弹塑性应变场、塑性区大小和裂纹张开位移进行了测试, 并分析了云纹测量精度误差的影响因素; 李禾等^[5]测试了 1 种高温新材料的断裂力学行为, 发现密栅云纹法具有非接触、高精度、高分辨率、高对比度等优点; 刘杰等^[6]将云纹干涉法用于研究混凝土试件受压力荷载作用下的破坏机理及变形性能, 发现该方法可以分别计算混凝土弹性阶段、塑性阶段以及微裂缝贯通阶段的平均应力。

3 电子散斑干涉法

电子散斑干涉法 (electronic speckle pattern interferometry, ESPI) 是将激光投射于被测物体上, 形成干涉散斑长的相关条纹, 使用电荷耦合器件 (charge coupled device, CCD) 摄像机拍摄散斑变化并进行软件分析后, 得到散斑干涉条纹图, 经计算转换为位移、应变等通用物理量。该方法测量过程高度自动化, 可实现自动测量, 且后期结果经图像直观呈现和解释。

干涉光斑的灰度值计算公式:

$$I_m = I_A + I_B + 2 \sqrt{I_A I_B} \cos(\varnothing + \varphi_m) \quad (1)$$

式中: I_m 为干涉光斑强度, cd; I_A 、 I_B 分别为测量光束与参考光束的灰度强度值, cd; $\varnothing$ 为两个相干光的干涉相位; φ_m 为引入相移。

干涉相位可以根据四步相移法计算:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right) \quad (2)$$

式中: $I_1 \sim I_4$ 分别为引入相移 0、 $\varnothing/2$ 、 $\varnothing$ 、 $3\varnothing/2$ 的干涉光斑强度, cd。

变形前后的相位差 Δ 计算公式如下。

$$\Delta = \varnothing' - \varnothing \quad (3)$$

式中: $\varnothing'$ 为变形后两相干光的干涉相位。

平面内位移 u 的计算公式为

$$u = \frac{\Delta \cdot \lambda}{4\pi \sin \alpha} \quad (4)$$

式中: u 为平面内位移, nm; α 为照射光的入射角, ($^\circ$); λ 为激光波长, nm。

平面外位移 w 的计算公式为

$$w = \frac{\Delta \cdot \lambda}{2\pi(1 + \cos \alpha)} \quad (5)$$

将 ESPI 应用于混凝土裂纹扩展过程的测量方面, 王青原等^[7]对混凝土试件预制切口进行单点弯曲试验, 利用 ESPI 对试件的裂缝扩展过程进行了测量, 并分析了试件的 COD 曲线; 黄兴震等^[8]同时采用 ESPI 和数字图像相关 (digital image correlation, DIC) 方法测量了混凝土梁三点弯曲试验下的表面位移场, 并分析了两种方法的误差来源。

4 数字图像相关方法

4.1 基本原理

数字图像相关方法基本原理如图 2 所示。当物体发生变形时, 试件表面的散斑会随构件变形而变形, 通过变形前后区域的相关性分析即可得到结构变形信息。图 2(a) 为围绕待计算点 $P(x, y)$ 选择的一个 $N \times N$ 像素的正方形图像区, 图 2(b) 为该图像在变形后的图像形状及位置, 变形后该点位置为 $P'(x', y')$ 。对该子区域变形前后的

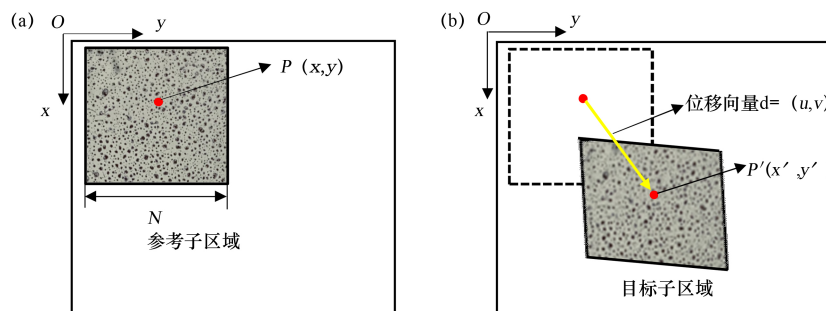
图像根据预先设定的相关函数规则进行相关运算, 当搜索到最大或最小的相关数极值时, 即可确定该子区域在变形后图像中的形状与位置。据此, 计算出 $P(x, y)$ 在变形前后两张图像上的位移矢量 $d = (u, v)$ 。其中, 数字散斑场的制作和优化、相关函数的选择以及亚像素的搜索方法和标定方法都对精度高低有直接的影响。

相关运算的精度与散斑的制作方法和最终得到的散斑场密切相关。选择平均灰度梯度作为评价的全局参数, 其值使用灰度梯度算子计算获得。图 3~6 为 4 幅不同类型散斑图及其对应的灰度直方图, 其中散斑图 A 是使用黑色为底, 白色自喷漆喷洒斑点 (图 3); 散斑图 B 是用砂纸打磨试样表面形成斑纹 (图 4); 散斑图 C 是使用白色为底, 黑色自喷漆喷洒斑点 (图 5); 散斑图 D 是使用白色为底, 黑色墨水喷壶喷洒斑点 (图 6)。由图 3~6 可知: 上述 4 种散斑所对应的灰度直方图差别较大。

4.2 裂缝评估及图像处理技术优化

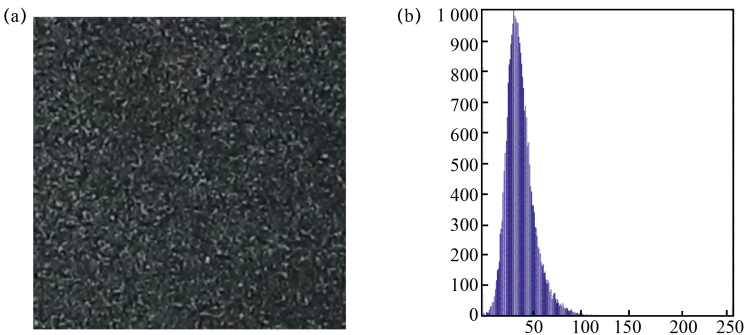
裂缝评估方法用于评估裂缝的尺寸、位置和模式, 主要有图像处理方法和目标方法两种。其中比较先进的图像处理方法有小波变换、曲线变换和轮廓变换。两种裂缝评估方法的主要难点为图像来源的不足。图像从属设置是使用成像框架来识别图像中的裂缝, 并从一个角度确定某些边界 (如裂缝的长度); 另一方面, 它想要利用一系列连续的照片来跟踪中断如何在长时间内扩展。RISHI^[9]提出的一种基于卷积神经组织的断裂图像识别策略, 能够理解固体表面断裂的程序化识别, 识别正确率高达 93.7%。

DIEGO 等^[10]提出, 神经网络虽在大多数应用中表现优异, 但其计算成本 (内存和计算能力) 比非神经模型高。已有不少研究发现, 基于计算机视



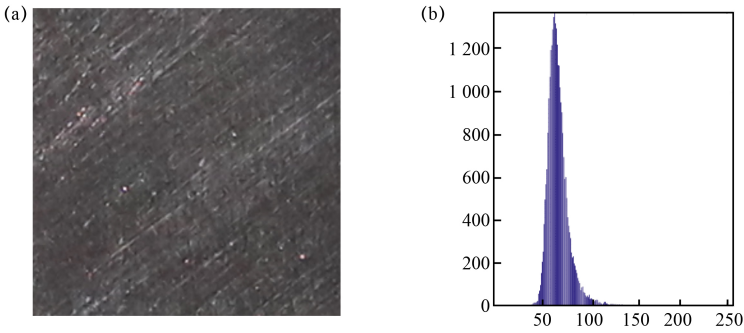
(a) 参考图像; (b) 变形图像

图 2 图像子区变形追踪原理示意



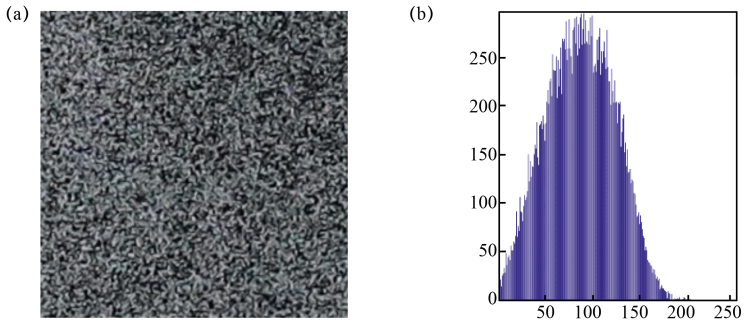
(a) 散斑图；(b) 直方图

图 3 散斑图 A 及其灰度直方图



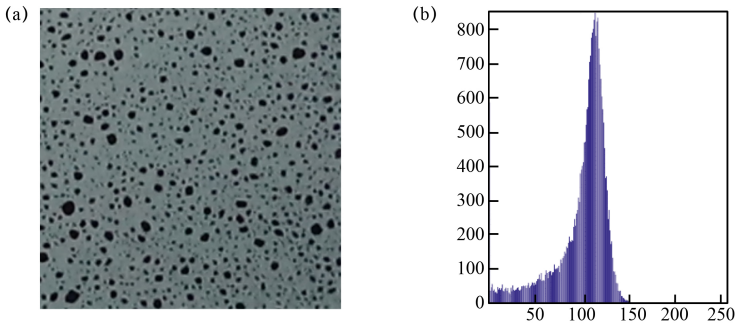
(a) 散斑图；(b) 直方图

图 4 散斑图 B 及其灰度直方图



(a) 散斑图；(b) 直方图

图 5 散斑图 C 及其灰度直方图



(a) 散斑图；(b) 直方图

图 6 散斑图 D 及其灰度直方图

觉技术提取的特征对于有无裂缝的图像进行分类的非神经模型仍存在一些不足: 1) 最大报告分数(准确率)范围为 0.87~0.93; 2) 大多数情况下的测试数据集不太能代表现实情况; 3) 没有使用可靠的分类器统计验证程序, 例如 K-fold 交叉验证。DIEGO 等^[9]研究了一个含有 40 000 张图像的数据集, 经过分辨率、亮度、几何失真、压缩前后数据损坏等自然干扰, 并实施了基于统计的模型性能验证过程。对 17 个非神经分类器进行测试后发现, 随机森林分类器使用一小组特征(由取自 227×227 像素的具体图像的 10 个不同的 64 位哈希值组成)进行训练, 获得了非常高的分数, 准确率、精密度、召回率和 F1 分数范围为 0.99~1.0, AUC-ROC 曲线下面积为 0.98, 展示了非神经模型使用少量图像哈希特征对无裂纹和无裂纹混凝土图像进行分类的极高容量。

基于渗透模型的图像处理技术是一种考虑相邻像素间亮度连通性的可扩展局部处理方法, 比传统方法更加准确。然而, 当裂缝区域的对比度不清晰时, 该方法却无法准确检测裂缝。TOMOYUKI 等^[11]提出了基于渗流模型的降噪方法。假定裂缝具有以下两个特征: 1) 形状比其他纹理图案薄; 2) 亮度低于背景。颜色较深的裂缝相较颜色不清晰的裂缝更容易被检测到。形状信息对于不清晰裂缝的检测非常有效。混凝土表面的图像包含各种类型的干扰, 如混凝土气泡、污渍、对比度不足和阴影等。着重研究裂缝的前述两个特征。在之前的渗透模型中, 局部窗口中的中心像素根据渗透过程形成的聚类仅使用亮度标准进行评估, 从而实现可扩展的窗口处理。通过在渗流过程中加入形状准则来改进渗流模型, 并考虑裂缝的长度来表示薄的形状。在可扩展窗口处理技术中, 长度准则能够检测到细小裂纹, 即使裂纹区域的对比度不清楚。此外, 为了降低噪声敏感性, 采用基于渗透簇形状的降噪方法。最后, 对降噪后的图像进行二值化处理。该渗透处理技术基于形状和亮度对传统方法进行改进, 并结合降噪和二值化。文献[12]中提出的算法需要改进, 以使加速渗流的加速度参数 w 可扩展。当裂缝区域的对比度很低(即不清楚)时, 由于之前的渗流模型只依赖于亮度, 该参数往往太大, 无法在

渗流进行过程中形成准确的裂缝簇。因此, 在这种情况下, 圆度接近于 1, 然后将不清楚的裂纹视为背景。TOMOYUKI 等^[11]提出了改进的渗流模型: 1) 在渗流过程中修改参数 w ; 2) 将渗流过程的标准尺寸替换为渗流簇的长度。改进的渗透模型通过引入渗透区域的圆度作为一种形状信息, 实现了鲁棒性(robust)和高精度的裂纹检测。此外, 渗透处理技术使用长度标准进行可扩展的局部处理。

5 结 论

本文针对光弹性贴片法、云纹干涉法、电子散斑干涉技术、数字图像相关方法 4 种混凝土裂纹扩展过程的测试方法、特点及应用现状进行比较分析, 为混凝土裂纹扩展测量方法的选择提供一定的理论支撑。

(1) 光弹性贴片法技术要求及成本较高, 贴片制作要求配比精确, 应用较少。

(2) 云纹干涉法光栅灵敏度非常高, 对试件栅的复制以及光路系统要求严格。

(3) 电子散斑干涉技术(ESPI)精度高、可实时处理; 可实现全场测量, 测量设置简单, 便于应用, 能满足表面曲率变化较大构件的测量; 检测结果数字化, 便于存储和后续分析处理; 利用叠差原理处理干涉散斑条纹, 实现降噪; 测试仪器可实现高温物体的损伤检测。

(4) 数字图像相关方法(DIC)与其他光测力学方法相比, 具有非接触、全场应变、设备简单、环境要求较低等显著的优点。

因此, ESPI 和 DIC 可以更好地被应用于大多数混凝土断裂实验研究。本文仅从原理、特点、运用现状以及优缺点等理论层面对 4 种混凝土裂纹扩展过程的测试方法进行了探讨, 在后期研究中将通过多尺寸试件试验进行电子散斑干涉技术尺寸效应分析, 以及优化数字图像处理技术, 以提高混凝土裂纹扩展测量的准确性。

参考文献:

- [1] 贾君玉, 王子茹, 肖魁. 基于 VC++ 与 ANSYS 的混凝土裂缝扩展仿真系统的研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(S1): 539-543; 576.

(下转第 78 页)

参考文献:

- [1] 钱旭彤,陈静. 某地下室上浮原因分析及加固处理[J]. 地基处理,2021,3(5):415-419.
- [2] 王海,应晓霖,罗野,等. 某综合楼二层地下室局部上浮事故调查及原因分析[J]. 建筑结构,2022,52(增刊1):2273-2277.
- [3] 刘冬. 锚杆静压桩在地下室上浮治理中的应用[J]. 建筑结构,2022,52(S2):2051-2054.
- [4] 傅睿. 地下车库梁柱损伤成因分析及加固处理[D]. 长沙:中南林业科技大学,2020.
- [5] 顾晓星,何超. 某地下室上浮问题分析[J]. 建设科技,2020(20):77-79.
- [6] 建筑工程抗浮技术标准:JGJ 476—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2020.
- [7] 杨淑娟,张同波,吕天启,等. 地下室抗浮问题分析及处理措施研究[J]. 建筑技术,2012,43(12):1067-1070.
- [8] 宗钟凌,吕凤伟. 地下室上浮事故原因分析与加固处理方法[J]. 建筑技术,2013,44(11):992-995.
- (上接第 64 页)
- [2] 严承嵩. 光弹性贴片技术及工程应用[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- [3] 董伟. 混凝土 I - II 复合型裂缝起裂准则的试验研究与裂缝扩展过程的数值模拟[D]. 大连:大连理工大学,2008.
- [4] 沙风焕,陈绪. 云纹干涉法在压力容器断裂分析上的应用[J]. 太原工业大学学报,1994(1):58-64.
- [5] 李禾,李仁增,王凤翔,等. 用密栅云纹法研究高温新材料的断裂力学行为[J]. 材料工程,1997(6):12-14;45.
- [6] 刘杰,罗至善,张学深. 应用云纹干涉法研究混凝土破坏机理[J]. 天津大学学报,2004(10):896-900.
- [7] 王青原,陈红鸟,袁波,等. 基于电子散斑干涉技术的混凝土裂纹扩展特性研究[J]. 水力发电学报,2018,37(4):26-35.
- [8] 黄兴震,陈红鸟,刘轶,等. 基于 ESPI 和 DIC 技术的混凝土断裂特性研究及对比分析[J]. 应用力学学报,2018,35(5):1131-1138;1191.
- [9] SHARMA R, POTNIS A, CHOURASIA V. Review of image based concrete crack detection [C]//2021 International Conference on Advances in Technology, Management & Education (ICATME). Zhengzhou: IEEE CS,2021.
- [10] FRIAS D, JOSÉ HIDALGO. A high accuracy image hashing and random forest classifier for crack detection in concrete surface images[J]. arXiv,2021(6):05755.
- [11] NON-MEMBER T Y, NON-MEMBER S N, NON-MEMBER R S, et al. Image - based crack detection for real concrete surfaces[J]. Ieee Transactions on Electrical & Electronic Engineering,2008,3(1):128-135.
- [12] YAMAGUCHI T, HASHIMOTO S. Image processing based on percolation model [J]. Ieice Transactions on Information & Systems D,2006,89(7):2044-2052.