

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.S1.010

基于 DIC 方法的混凝土压缩试件裂纹识别

韩依颖, 刘乃盛, 蔡永昌

(同济大学 土木工程学院; 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 基于特殊设计的混凝土试件单轴压缩破坏试验, 结合高分辨率 CMOS 采集到的逐级加载过程中的变形图像, 采用数字图像相关方法 (Digital Image Correlation, 以下简称 DIC 方法), 应用由 MATLAB 和 C++ 语言混合编程的开放式二维数字图像相关方法计算平台, 研究分析了混凝土试件表面受力变形直至破坏全过程位移场分布、特点, 计算获得了较为准确的试件裂纹表面形态、长度、位置等数字化的基本裂纹信息, 为进一步直接、准确地建立混凝土试件或构件的裂纹有限元分析模型, 以及进一步研究混凝土结构的破坏特征和断裂机理有着重要的意义和价值。

关键词: 混凝土裂纹; 数字图像相关方法; 压缩试验; 位移突变; 相关系数截断

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)S1-0051-05

Application of digital image correlation (DIC) method in experimental research on compression damage of concrete

Han Yiyi, Liu Naisheng, Cai Yongchang

(College of Civil Engineering; State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering,

Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: Digital image correlation (DIC) is a non-contact, full-field optical measurement method. DIC was used to research the compression damage of concrete. Black and white paints were sprayed on the specimen's surface to artificially make random speckles. Images during loading process were captured by high resolution CMOS. An open 2D-DIC system developed by MATLAB and C++ was used to get full-field displacement of the specimen surface. The results show that the displacement catastrophes always appear before compression failure, which can be inspected by DIC method. Effective corr-coef cutoff have to be set to remove those invalid points with low-level of correlation so that we can eventually get the real shape, length as well as the width of the crack on the specimen surface. This result can be useful on other studies on damage principle of concrete like finite-element analysis.

Key words: concrete crack; digital image correlation method; compression test; displacement catastrophe; corr-coef cutoff

混凝土是各类土木结构中使用最为广泛的建筑材料, 主要由水泥、粗骨料、细骨料等材料组成, 其破坏和断裂机理复杂^[1-2]。在土木工程建设和运营使用过程中, 施工浇筑、运输搬放、火灾高温、结构受力等多方面的原因均会使混凝土结构产生裂缝, 不仅

影响结构的美观、正常使用和耐久性, 而且还可能危及结构的安全性, 亟需采用合理的方法评价带裂缝混凝土结构的力学响应和性能演化机理。20 世纪初人们便开始了对混凝土等脆性材料裂纹扩展的研究, Griffith^[3] 从能量平衡的原理出发, 建立了

收稿日期: 2015-11-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2011CB013800); 科技部国家重点实验室基金 (SLDRCE14-B-28)

作者简介: 韩依颖 (1991-), 女, 硕士生, 主要从事结构健康监测研究, (E-mail) yiyiinghan@hotmail.com。

Griffith 强度理论,并一举奠定了断裂力学的基石,此后 Clintock^[4]、Fairburst 等^[5]、Hoek 等^[6]、Brace 等^[7]也从理论和试验方面对岩石裂纹扩展进行了研究,近年来随着试验手段的改进,借助光学显微镜^[8]、SEM 技术^[9]、CT 实时扫描技术^[10-11]、DIC 技术^[12-14]等,人们对于岩石裂纹扩展机理的研究逐渐转变到从细观甚至微观方面去探究裂纹的发展变化过程。利用微观或宏观断裂力学的方法对损伤混凝土结构进行力学分析和安全评估,一般步骤是首先要对混凝土结构在各个阶段的各种裂纹形状、分布、宽度等几何形态进行较为准确的描述,再在此基础上利用有限元等数值方法建立相应的力学分析模型。传统的人工采集裂纹信息、再绘制几何模型和建立力学模型的方法,其工作量大、数据离散性大、裂纹信息相对较粗糙,对于肉眼难以辨识的微细裂纹或火灾、爆裂等特殊情形,该传统方法则更难以胜任裂纹的识别与损伤混凝土结构的安全评估分析了。

本文基于自主设计的混凝土试件的单轴压缩试验,结合图像采集系统采集到的逐级加载过程中的试件变形图片,采用数字图像相关方法(Digital Image Correlation,以下简称 DIC 方法),通过对试件表面受力变形直至破坏全过程位移场分布、特点等方面的分析研究,计算获得了较为准确的试件表面裂纹真实形态、产生位置等数字化的基本裂纹信息,为进一步直接、准确地建立混凝土试件或构件的裂纹分析模型,以及进一步研究混凝土结构的破坏特征和断裂机理有着重要的意义和价值。

1 数字图像相关方法

数字图像相关方法(DIC)又称数字散斑相关方法,是一种利用物体表面随机分布的斑点来给出变形场的非接触变形测量方法。该方法最初是在 20 世纪 80 年代初由日本学者 Yamaguchi^[15]和美国学者 Ranson 等^[16]同时独立提出的。方钦志等^[17]、芮嘉白等^[18]、王冬梅等^[19]指出,数字图像相关分析方法的基本思想是比较物体变形前后的图像,识别其中的特定子区,以“追踪”物体表面各点变形后的位置,进而获得位移和应变。

假设物体变性前后两个数字图像的灰度特征值函数分别为 $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$,表征了图像上任一点 (x, y) 的明暗程度。又设物体 x, y 方向位移场函数分别为 $u(x, y)$ 和 $v(x, y)$,则图像上任一点变

形前的坐标 (x, y) 与变形后的坐标 (x', y') 的关系为

$$\begin{cases} x' = x + u(x, y), \\ y' = y + v(x, y). \end{cases} \quad (1)$$

为了评价变形前后两个图像子区的相似程度,需要定义相关系数来衡量,在二维空间中同样大小的两个子区关于灰度值的相关系数 C 为

$$C = \frac{\sum [f(x, y) - f_m] \cdot [g(x', y') - g_m]}{\sqrt{\sum [f(x, y) - f_m]^2} \sqrt{\sum [g(x', y') - g_m]^2}} \quad (2)$$

式中 $f(x, y)$ 与 $g(x', y')$ 分别为变形前后图像子区的灰度分布函数; f_m 与 g_m 分别为变形前后图像子区的灰度平均值。当 $C = 1$ 时,两个子区完全相关; $C = 0$ 时,两个子区不相关。对变形前图像子区内的各点去不同的位移 u', v' 进行相关匹配试算,当 C 取最大值时,所算子区即为匹配的目标子区,试算位移即为真实位移。通过试算不同的子区,即可获得物体全场位移,进一步计算可得到全场应变。

2 试验方法和过程

2.1 试样制作及试验装置

本实验采用全级配素混凝土,浇制试块尺寸为 $100 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$,在标准养护条件下养护 28 天后进行试验。标准试块首先需要对表面进行打磨处理,尤其是上下表面,否则加载时将不能够实现均布荷载,然后洗净,选取 $120 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 作为试验观测面;先在表面喷涂白色涂料,待其干后再随机喷涂黑色涂料,以形成随机分布的散斑,作为 DIC 方法的变形信息载体。

试验设备分为加载系统、图像采集系统和分析系统。加载系统采用微机控制 600 kN 万能试验机。图像采集系统使用分辨率为 512×3744 像素的数字相机。分析系统采用开放的 2D-DIC 计算平台,由 MATLAB 和 C++ 语言混合编程搭建,用户界面友好,并能够有效实现图像序列的输入、DIC 分析、以及位移场应变场的计算功能。试验现场如图 1。

2.2 试验过程

为了减少试样在压缩过程中与试验机接触面的摩擦,试验前在试样两端涂抹了润滑油。将试样置于万能试验机上,给予 1 kN 的初始荷载。图像采集系统正对试样散斑表面,使得待测物体表面平行于相机的感光元件平面,相机的光轴垂直物体表面并

指向物体中心,调节采集系统,使得采集到的图像具有较好的清晰度和对比度。此时,采集图像,作为DIC分析中的初始图像,也叫做参考图像(Reference Image)。

万能试验机对试样进行准静态加载,加载速率为0.25 kN/s,采集系统每40 s采集一次图像,也即荷载每达到10 kN的倍数时采集图像,作为各级荷载时数字图像相关分析中的目标图像,也叫做变形图像(Deformed Image)。加载直至试样破坏,结束试验过程。

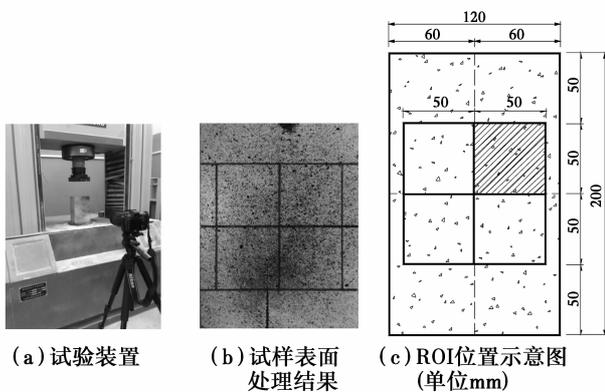


图1 实验现场示意图

3 试验结果分析

混凝土抗压强度大,逐级加载发生的位移很微小,直至荷载达到材料的极限荷载,发生瞬时的脆性断裂。针对该变形特征,选取荷载为30、60、90、120、140、160 kN时的图像作为变形图像(本次试验最大加载为169 kN),进行DIC分析。

首先将参考图像和变形图像序列输入分析系统,接着设置感兴趣区域(Region of Interest,以下简称ROI)。本文中设置ROI,一方面是可以去掉图像中非混凝土试件的部分,另一方面是由于采集的图像像素为2 100万,这使得计算机的运算量过大,为了提高研究效率,可以根据试块实际产生裂缝的位置,选取试件表面的一部分位置进行DIC分析,ROI的设置如图1右图斜线部分所示。

在DIC方法的应用中,ROI的作用远不至于如上所述,而是可以更好地体现在有已知裂缝或损伤的物体加载变形破坏的观测上,用以将图像中的不连续部分设置为无效计算区域,实现非连续物体位移和应变的测量分析。

完成图像的输入及预处理后,设置DIC分析参数,主要包括设置图像子区的大小、图像子区的计算

间隔以及迭代计算的终止条件;接着对图像序列进行DIC分析,搜索各个图像子区在变形图像中“最相关”的位置,得到位移场,进一步计算得到应变场,完成DIC方法的分析过程。

图2~4分别显示了加载至60、120、160 kN时的位移场的计算结果。计算位移场是相关系数截断值设置为0.8,表示当图像子区与在变形图像中搜索得到的“最相关”的图像子区相关程度达不到80%时,相关搜索失败,该图像子区的中心点将作为无效点处理,位移场的计算不包含无效点。

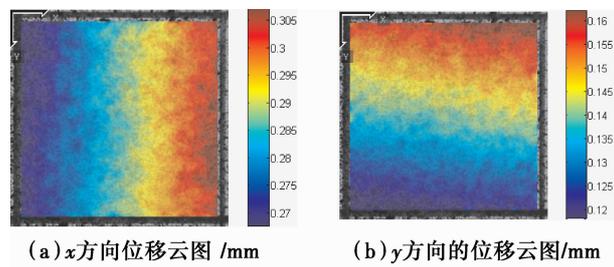


图2 60 kN时位移云图

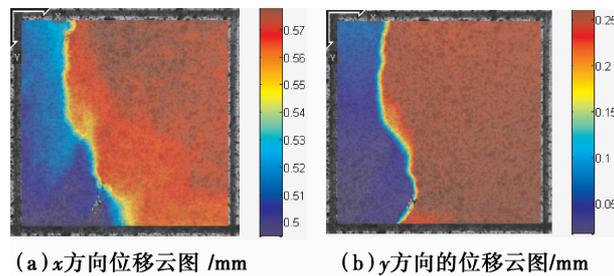


图3 120 kN时位移云图

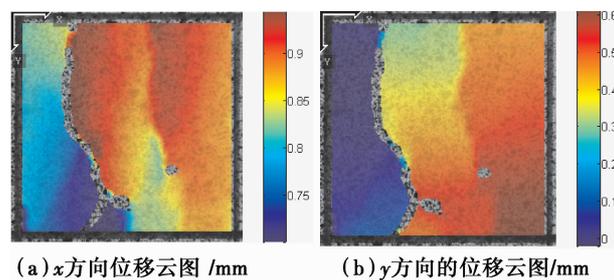
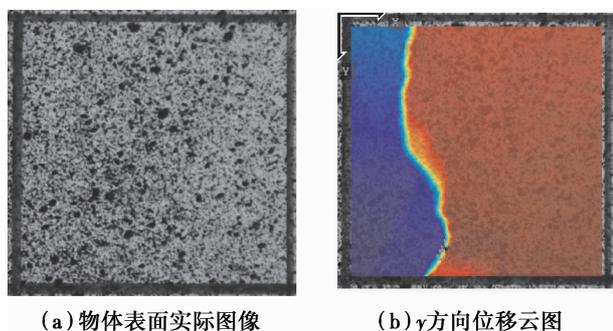


图4 160 kN时位移云图

计算结果表明,从初始状态逐级增加荷载至60 kN,试块表面位移连续且均匀,x,y方向上各自最大最小位移的差值均约为0.04 mm;当荷载增加至120 kN时,可见位移值产生突变,表现为位移云图中的条带状区域,突变差值达到0.2 mm,并开始出现很小范围的无效区域;当荷载增加至160 kN时,最大最小位移差值达到0.6 mm,位移云图上的无效区域扩展成条带。

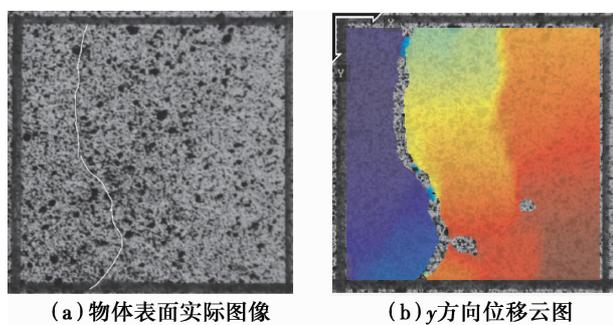
加载过程中,试件受力变形,逐渐在表面产生裂纹,机器视觉中裂纹的本质是裂开区域的灰度发生突变,进而使得基于灰度随机分布的相关匹配效果很差,也即相关程度很低,使得裂纹区域的点成为无效点,从而产生了位移云图中的无效区域。

再将位移云图与试件表面实际图像对比,如图 5~6 所示。当荷载为 120 kN 时,试件表面并没有可见裂纹,而在 DIC 分析结果中显示了明显的位移突变条带;荷载为 160 kN 时,试件表面有可见裂纹(表示为图中的白线),DIC 分析结果中显示无效点条带区域,两者很好地吻合了。



(a) 物体表面实际图像 (b) y 方向位移云图

图 5 120 kN 时试件表面实际图像与位移云图对比



(a) 物体表面实际图像 (b) y 方向位移云图

图 6 160 kN 时试件表面实际图像与位移云图对比

进一步对荷载为 160 kN 时的位移云图作分析,可以将裂纹区域的点提取出来,用简单的二值图像表示为图 7,图中黑色条带即表示位移云图中的无效点条带,即 DIC 分析得到的试件表面裂纹,裂纹的形状、宽度以及位置都能够准确地得到。由此可见,将 DIC 方法应用于混凝土加载全过程中变形的测量,能够很有效地观测到试件表面裂纹产生的过程。

值得注意的是,DIC 分析结果中无效点条带区域显示的“裂纹”宽度远远大于实际发生的裂纹宽度,实际裂纹宽度为 8 pixel,无效区域表示的裂纹宽度平均为 25 pixel。这是由于 DIC 分析中匹配的对象是图像子区,图像子区的大小直接影响了最后结



图 7 裂纹示意图

果中“裂纹”的宽度,也即分析所得的“裂纹”宽度是实际裂纹边界叠加图像子区半径的结果,裂纹的实际宽度可根据该结果进一步计算得到,这将是笔者下一步的工作。

4 结 语

将 DIC 技术应用在混凝土压缩破坏试验中,观测加载全过程试块表面的位移场。试块表面发生裂纹,在图像中的本质为灰度值的突变,在 DIC 分析方法中的本质是相关程度低,而在实际试块表面上的本质是位移突变,根据这个特点,可以通过设置有效地相关系数截断值来控制计算点的有效性,将裂纹在位移场中以无效区域的形式显示出来,进一步计算得到裂纹发生的位置、长度及宽度。

一方面,该 DIC 分析结果可以应用在已有宏观裂隙的混凝土受力破坏机理有限元方法研究中,另一方面还可以应用于混凝土微观破坏的研究中,定义借助高分辨率高速采集设备,记录微观上混凝土变形的全过程,为研究微观破坏准则提供可靠的依据。

DIC 方法的有效性拓宽了土木工程领域测量方面的研究范畴,该方法实用性强,在高温、高压或者低温等极端条件下也可以有效地发挥作用,并且区别于传统测量手段在物力人力上的高消耗。DIC 方法无损耗、可重复利用,符合绿色土木的发展需求,借助图像来研究土木工程领域的各类问题,也顺应大数据的发挥潮流,不能不引起众多学者的关注。

参考文献:

- [1] 雷冬,朱飞鹏,邵国建,等. 基于损伤应变场的岩石混凝土类脆性材料断裂分析方法[J]. 水利学报, 2012, 43 (Sup1): 118-124.
- [2] 马怀发,陈厚群,黎保琨. 混凝土细观力学研究进展及

- 评述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004(2): 124-130.
- [3] Griffith A A. The phenomena of rupture and flow in solids [J]. Royal Society of London Philosophical Transactions Series A, 1921, 221: 163-198.
- [4] McClintock F A, Walsh J B. Friction growth cracks in rocks under pressure [C]// Fourth US Nat Congr AI Mech, 1961: 1015-1021.
- [5] Fairhurst C, Cook N G W. The phenomenon of rock splitting parallel to the direction of maximum compression in the neighborhood of a surface [C] // Proc First Congress International Society for Rocks Mechanics, 1966: 687-692.
- [6] Hoek E, Bieniawski Z T. Brittle fracture propagation in rock under compression [J]. International Journal of Fracture Mechanics, 1965, 1(3): 137-155.
- [7] Brace W F, Bombolakis E G. A note on brittle crack growth in compression [J]. Journal of Geophysical Research, 1963, 68(12): 3709-3713.
- [8] Nolen-Hoeksema R C, Gordon R B. Optical detection of crack patterns in the opening-mode fracture of marble [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstract Pergamon, 1987, 24(4): 135-144.
- [9] 倪骁慧, 朱珍德, 武沂泉. 基于 SEM 的大理岩单轴受压全过程细观损伤量化研究 [J]. 金属矿山, 2009, 9: 29-32.
- [10] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 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.
- [11] 李术才, 李廷春, 王刚, 等. 单轴压缩作用下内置裂隙扩展的 CT 扫描试验 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 484-492.
- [12] 赵程, 鲍冲, 松田浩, 等. 数字图像技术在节理岩体裂纹扩展试验中的应用研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 944-951.
- [13] Pan B, Yuan J, Xia Y. Strain field denoising for digital image correlation using a regularized cost-function [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2015, 65: 9-7.
- [14] Zhao J Q, Zeng P, Pan B, et al. Improved Hermite finite element smoothing method for full-field strain measurement over arbitrary region of interest in digital image correlation [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2012, 50(11): 1662-1671.
- [15] Yamaguchi I. A laser-speckle strain gage [J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1981, 14: 1270-1273.
- [16] Ranson W F, Ptters W H. Digital image techniques in experimental stress analysis [J]. Optical Engineering, 1982, 21(3): 427-431.
- [17] 方钦志, 李慧敏, 欧阳小东, 等. 图像相关法在高分子材料拉伸性能研究中的应用 [J]. 试验力学, 2006, 21(4): 459-466.
- [18] 芮嘉白, 金观昌, 徐秉业. 一种新的数字散斑相关方法及其应用 [J]. 力学学报, 1994, 26(5): 599-607.
- [19] 王冬梅, 方如华, 计宏伟, 等. 用数字图像相关法研究改性高分子材料的断裂行为 [J]. 同济大学学报, 1999, 27(3): 278-281.

(编辑 罗 敏)