

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202411009



采用 3D-DIC 技术的框架填充墙 平面外变形特征分析

谢鑫尧¹, 郭子雄^{1,2}, BASHA Syed Humayun^{1,2}

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 基于三维数字图像相关(3D-DIC)技术,研究框架填充墙在不同加载阶段下的 Mises 应变场、裂缝宽度和平面内/外(IP/OOP)位移场的变化规律。结果表明:当墙体加载至峰值荷载的 70%~80%时,主裂缝轮廓基本形成,裂缝宽度为 0.96~1.97 mm;当墙体加载至峰值荷载时,最大裂缝宽度达 3.81 mm;墙体平面外曲面呈现类似二次曲面的形态,平面外位移幅值从墙体中心向四周依次递减;墙体各个区块内平面内位移幅值接近,主裂缝分割的各个区块平面内/外位移场呈现对称分布规律。

关键词: 三维数字图像相关技术; 框架填充墙; 平面外性能; 应变场; 位移场

中图分类号: TU 375.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)02-0147-09

Analysis on Out-of-Plane Deformation Characteristics of Frame Infilled Wall Using 3D-DIC Technique

XIE Xinyao¹, GUO Zixiong^{1,2}, BASHA Syed Humayun^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Key Laboratory for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province,
Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Based on three-dimensional digital image correlation (3D-DIC) technique, the Mises strain field, crack width and in-plane/out-of-plane (IP/OOP) displacement fields of the frame infilled wall at different loading stages were investigated. The results show that under 70%-80% peak load, the main crack contour basically forms, and the crack width is 0.96-1.97 mm; under the peak load, the maximum crack width is 3.81 mm. The outer surface of the wall resembles the shape of a quadric surface, the OOP displacement amplitude value decreases from the center to the edges of the wall. The IP displacement amplitude values of each block of the wall are similar, and the IP/OOP displacement fields of each block divided by the main crack presents the symmetrical distribution.

Keywords: three-dimensional digital image correlation technique; frame infilled wall; out-of-plane performance; strain field; displacement field

框架填充墙平面外(out-of-plane, OOP)的倒塌已经成为导致经济损失和人员伤亡的主要因素之

收稿日期: 2024-11-09

通信作者: 郭子雄(1967-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事工程结构抗震防灾的研究。E-mail: guozxcy@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178485); 国家自然科学基金外国学者研究基金资助项目(52350410467)

一, 准确评估填充墙平面外变形曲面的特征是研究填充墙平面外倒塌的重要依据^[1-5]。仅靠应变计和位移计等传统测量手段无法完成对填充墙的全场应变和全场变形的有效测量。为解决上述困难, 引入三维数字图像相关(3D-DIC)技术, 它具备非接触、多方向、全程测量和高精度测量等优点, 可突破传统应变计和位移计测量的局限性, 有效监测框架填充墙的三维变形曲面。

早在 20 世纪 80 年代, Yamaguchi^[6]和 Peters 等^[7]各自独立提出数字图像相关(DIC)技术。目前, DIC 技术已经成功应用于各种结构体系(包括砌体结构、钢结构和组合结构)。刘聪等^[8]开展纤维增强复合材料包裹混凝土柱轴压性能试验, 并在圆柱体周围布置 8 个数码相机, 获取圆柱体全表面的应变场。廖健等^[9]基于二维数字图像相关(2D-DIC)技术开展钢筋混凝土剪力墙拟静力试验, 通过对比位移计和 DIC 技术测得的骨架曲线, 验证 DIC 技术的有效性。赵宪忠等^[10]分析影响 DIC 技术测量精度的相关因素。刘宇飞等^[11]介绍数字图像法在识别结构表面裂缝中的应用。许力等^[12]基于 3D-DIC 技术研究组合剪力墙外包压型钢板应变场的发展规律。熊二刚等^[13]采用 DIC 技术获取预制拼装桥墩的应变场和位移场, 研究桥墩塑性铰区处裂缝宽度随时间的变化规律。Xie 等^[14]利用 3D-DIC 技术研究粘土砖框架填充墙平面外位移场, 基于试验结果提出粘土砖框架填充墙的平面外计算模型。杨子涵等^[15]采用 DIC 技术研究混凝土梁剪切试验中裂缝宽度随着时间的变化规律。基于此, 本文引入三维数字图像相关技术, 对框架填充墙平面外变形特征进行分析。

1 数字图像相关技术

1.1 基本原理

DIC 技术的基本原理, 如图 1 所示。由于计算机无法直接对图像进行读取, 需利用栅格将图像切割成若干个小区域。小区域的坐标信息和亮暗程度可以用数字表示。矩阵的第一行和第二行的数字代表像素点的位置信息, 最后一行数字代表像素点的亮暗程度(灰度值)。用数字矩阵记录下图像上像素点的位置和灰度值信息后, 工作站电脑可以直接对矩阵进行处理。

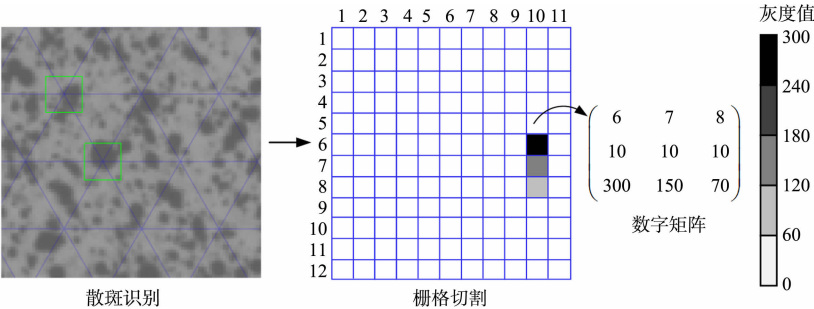


图 1 DIC 技术的基本原理
Fig. 1 Fundamentals of DIC technique

测量开始前, 需先拍摄一张测量对象的参考照片, 再对变形后的试件进行连续拍摄, 获得每个时刻的照片。通过比对变形前后的照片寻找对应关系, 从而计算出每个像素的位移矢量和应变, 获得全场应变和全场位移。

1.2 相机的安装

相机的安装, 如图 2 所示。测量设备采用 GOM ARAMIS, 这是一款集分析、计算和记录物体变形、位移和速度等动态特性的系统。系统分为平面单相机系统布置和立体相机布置, 前者布置相对简单, 仅可量测二维空间中物体的位移和变形。双相机的安装相对复杂, 但可以量测三维空间中物体的位置坐标、位移、变形、速度和加速度。横梁有 600、1 200、1 600 mm 等 3 种长度可选, 不同长度的横梁对应不同的测量体积, 横梁配备

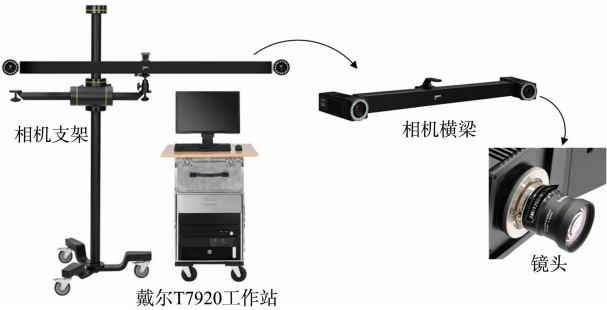


图 2 相机的安装
Fig. 2 Installation of camera

照明和激光红外线追踪点灯,用于标定过程中的定位。试验选取 1 600 mm 横梁,架设在支架上的相机分辨率为 4 096 px×3 068 px,采样频率为 0.1 Hz(低速采集),测量体积(长×宽×高)为 3 890 mm×3 100 mm×3 100 mm。为避免试件表面的反射,两个相机镜头都安装偏振滤光镜。

1.3 散斑的制作

散斑场是一种计算试件表面变形信息的载体,为了给 DIC 软件提供特定的图像特征,需在测量物体表面制作高对比度的随机灰度分布。试验采用手动喷涂,喷涂过程尽量让灰度随机分布,且黑白区域各占 50%。

散斑的制作,如图 3 所示。在墙体表面刷上一层乳胶漆,降低试件表面反光,再用黑色墨水对墙体进行喷涂。此外,还将荧光追踪点粘贴在试件表面的关键位置,获取该处位移场的信息。

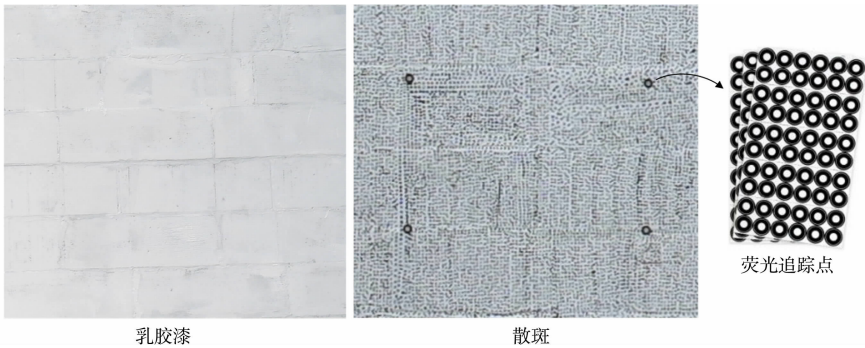


图 3 散斑的制作

Fig. 3 Fabrication of speckle

1.4 测量头的标定

首次试验前或者改变相机的相对位置都需要对 DIC 测量头进行标定,在标定之前,需要将 DIC 设备预热 30 min。标定也是一种测量过程,用于调节 DIC 系统,保证测量尺寸的一致性。摄取照片后,根据若干张照片计算出各个相机的方位,并识别相机镜头的成像特性,这些信息是软件后续的计算基础。

测量头标定,如图 4 所示。测量头根据不同位置标定十字的空间坐标,主要从中间十字位、左侧十字位和右侧十字位分别摄取标定物的中心点,根据这些数据建立空间直角坐标系。标定程序结束后,软件会给出标定结果,若标定结果不达标,则需要重新标定,直至标定通过。

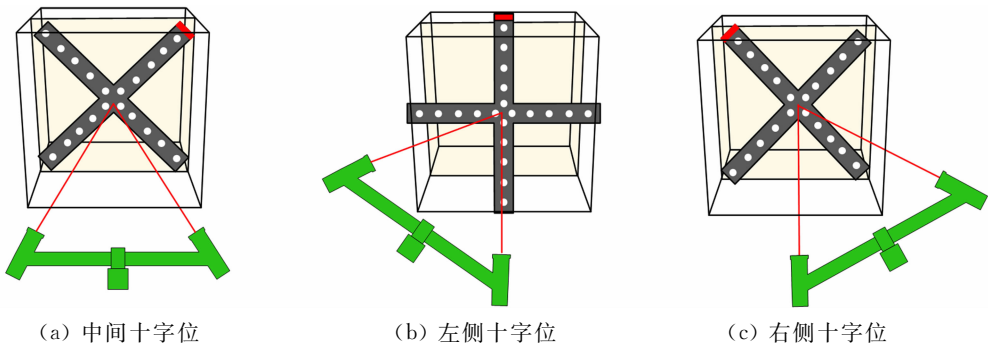


图 4 测量头的标定

Fig. 4 Calibration of measuring heads

2 基于 3D-DIC 技术的框架填充墙变形特征分析

2.1 试验概况

设计一榀蒸压轻质加气混凝土(AAC)砌体框架填充墙,加气混凝土砌块的几何尺寸(长×宽×高)为 600 mm×200 mm×200 mm,填充墙面板尺寸(长×高)为 3 150 mm×3 025 mm。加载装置,如图 5 所示。试验加载装置可分为平面外加载装置和限位装置,平面外加载装置包含加载横梁、滚轴和钢支撑,限位装置包含底部千斤顶和顶部钢梁。平面外加载采用两台液压作动器同步施加位移,加载横梁与平面外液压作动器通过螺栓连接,滚轴通过螺栓固定在加载横梁上,平面外液压作动器将荷载经由加载

横梁和滚轴传递至填充墙表面。设计的拟静力加载装置旨在等效模拟填充墙在实际地震作用下的第一阶振型^[16]。文献[2-3]将平面外荷载施加在墙体对角线 1/3 和 2/3 的 4 个集中点处来模拟实际地震作用。考虑到文中足尺框架填充墙的平面外承载力,在填充墙 1/3 和 2/3 高度处采用 2 台 250 kN 的液压作动器来等效模拟填充墙一阶平面外振型。2 台 250 kN 的液压作动器以 $0.02\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度单向加载,在平面外位移达到 10 mm 前,每级增量 2.5 mm,此后,每级增量为 5.0 mm,直至墙体即将倒塌时,停止加载。采用位移计和 DIC 相结合的量测方案,将位移计布置在墙体背面,DIC 测量设备放置在墙体前方,并辅以蓝灯补光,减少周围光线对墙体表面的干扰。

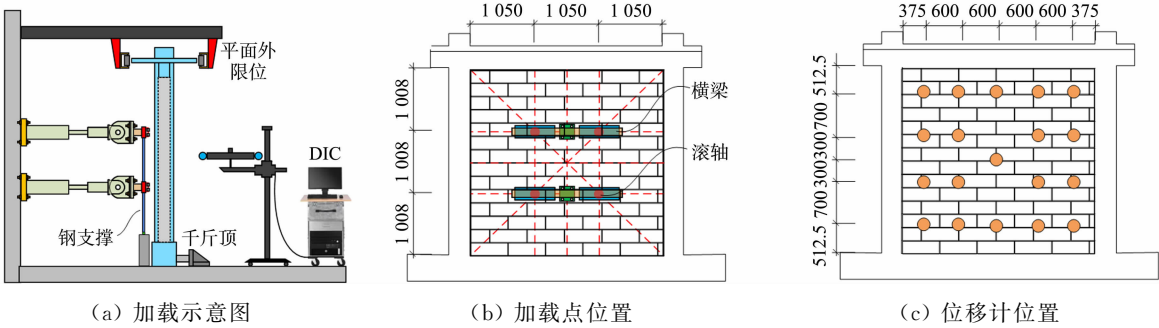


图 5 加载装置(单位:mm)
Fig. 5 Loading setup (units: mm)

2.2 荷载位移曲线

试件的平面外荷载(P_{OOP})-位移(Δ_{OOP})曲线,如图 6 所示。由图 6 可知:平面外荷载-位移曲线可分为弹性阶段、承载力强化阶段和破坏阶段;在墙体开裂前,平面外荷载迅速上升,平面外位移增长较缓;荷载和曲线基本呈现线性关系,墙体可视为处于弹性阶段;当墙体最外层砌体达到抗拉强度,填充墙达到开裂荷载,其平面外荷载约为峰值荷载的 30%;由于双向拱机制不断增强,平面外荷载不断上升,平面外荷载主要由 AAC 砌体抗压强度提供;达到峰值荷载后,填充墙拱机制逐步失效,砌体大量压碎剥落,导致填充墙平面外荷载迅速下降。试件最终破坏现象,如图 7 所示。

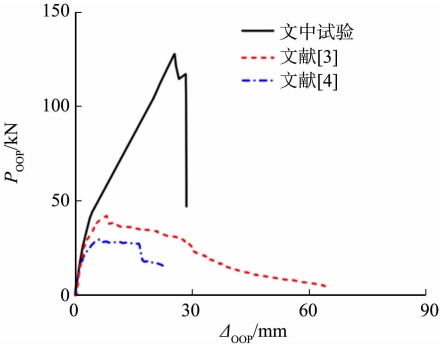


图 6 试件的平面外荷载-位移曲线
Fig. 6 OOP load-displacement curves of specimens

对比文中试验(高厚比为 15.13)、文献[3](高厚比为 15.25)和文献[4](高厚比为 22.87)的试验曲线可知,平面外峰值荷载和峰值变形能力随着高厚比的降低而显著提升

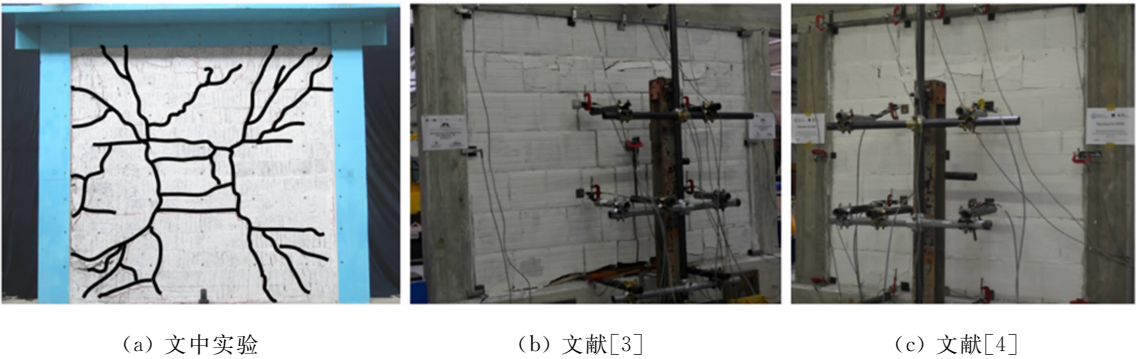
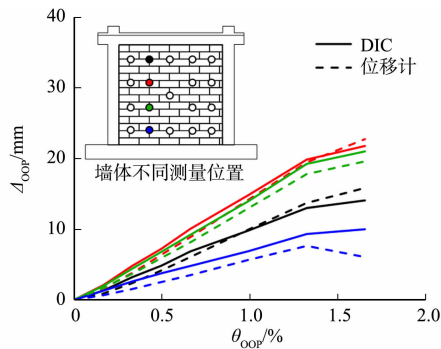


图 7 试件的最终破坏现象
Fig. 7 Final failure of specimens

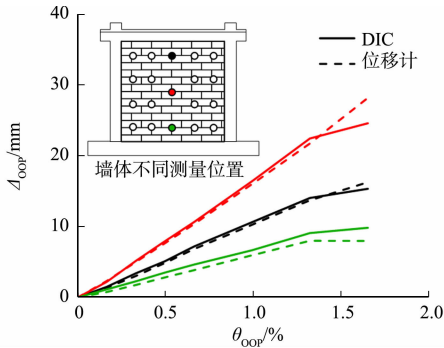
(平面外荷载提升大于 300%,峰值变形能力提升大于 130%);文中试件裂缝发展更加充分,呈现明显的双向破坏特征;文献[3-4]的试件出现明显砌体局部破坏,中部阶梯型裂缝发展充分,试件极限变形能力最大可达 64.50 mm。

2.3 精度验证

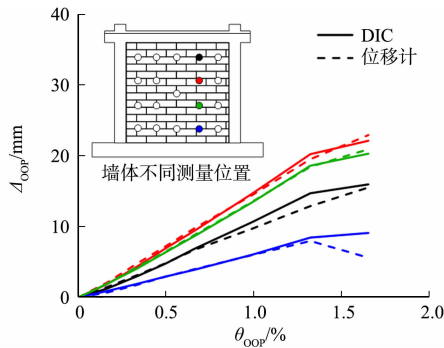
墙体不同测量位置 DIC 和位移计测量结果的对比, 如图 8 所示。图 8 中: θ_{OOP} 为平面外位移角, $\theta_{\text{OOP}}=(2\Delta/h)\times 100\%$ (h 为墙体高度)^[14];不同颜色的点表示不同的测量位置。由图 8 可知:初始状态时,位移计导杆和墙体表面法向量平行,DIC 与位移计测量结果较吻合;随着墙体平面外变形的增大,位移计的导杆与墙体表面法向量偏离,所测结果偏小;在加载中后期,两者偏离程度越来越大,砌体的局部压溃使部分位移计和墙体脱开造成结果突降,位移计的测量结果已丧失精度;在加载



(a) 第 2 列位移计



(b) 第 3 列位移计



(c) 第 4 列位移计

图 8 墙体不同测量位置 DIC 和位移计测量结果的对比

Fig. 8 Comparison between DIC and displacement meter measurements results at different positions of wall 后期,即使墙体表面处的散斑随着砌体的压碎剥落,但 DIC 内置的虚拟位移计依然可以根据周围散斑处位移值二阶插值得到剥落处的平面外位移,充分验证了 DIC 技术在侦测砌体结构试验中的优越性。

提高 DIC 精度主要有以下 3 种方法:1) 尽可能保证散斑场中灰度随机分布,且黑白区域各占 50%;2) 蓝光具有更强的抗干扰能力,采用 100 W 的 LED 蓝光照射,为测量区域提供稳定且均匀的光学环境;3) 小平面尺寸越小、小平面间距越小且网格越细,则曲面成分精度越高,但计算时间更长。

2.4 填充墙应变场和裂缝宽度

DIC 的 Mises 应变场云图可以直观描述框架填充墙在平面外荷载作用下裂缝的形成和发展过程。Mises 应变场,如图 9 所示。

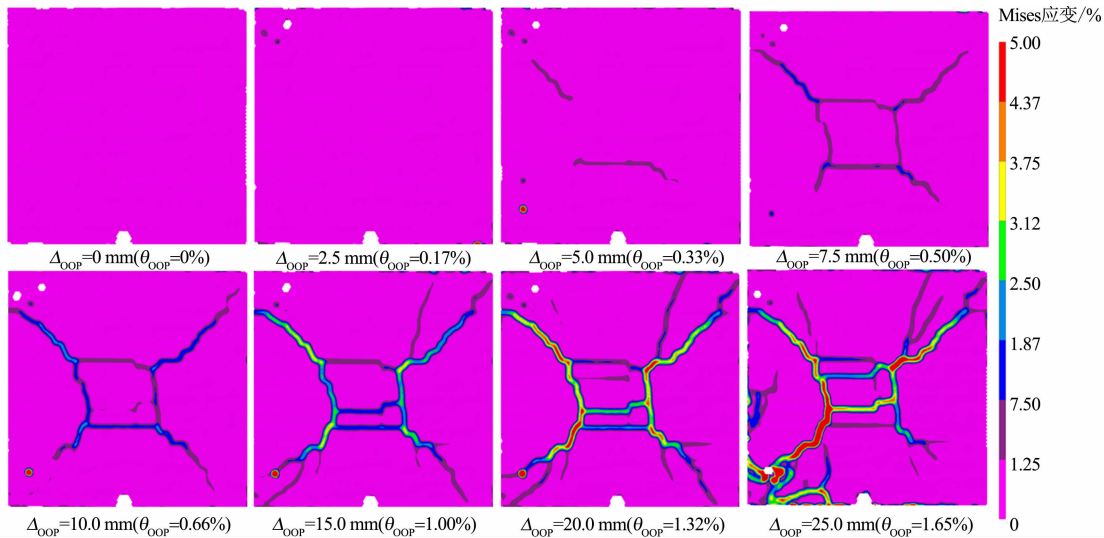
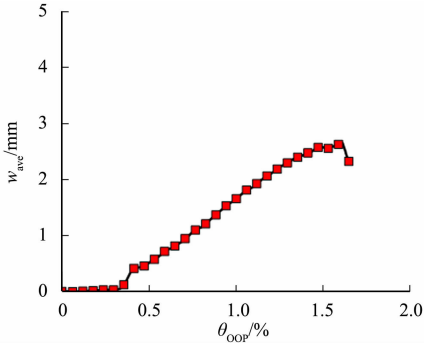


图 9 Mises 应变场

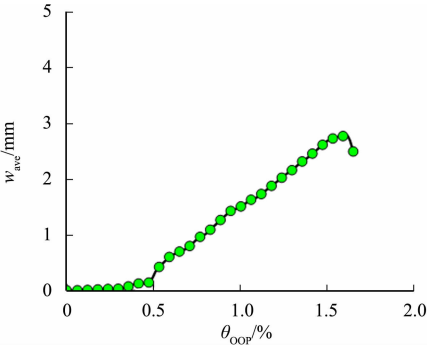
Fig. 9 Mises strain field

由图 9 可知:裂缝的判别阈值为 1.25%,Mises 应变的计算可采用文献[14]中的计算公式;通过构造虚拟裂缝测量工具对裂缝宽度进行监测,墙体主要裂缝可划分为左上斜裂缝、右上斜裂缝、中间水平裂缝、左下斜裂缝和右下斜裂缝。

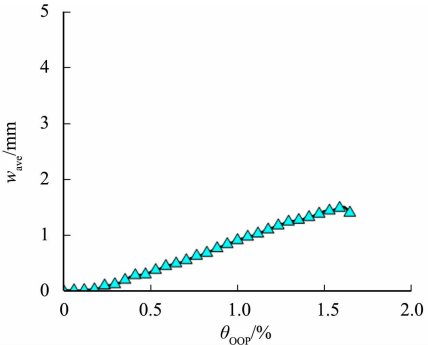
为研究不同位置处裂缝的宏观规律,取每一部分裂缝上足够多测点的平均值来反映该处裂缝宽度(平均值, w_{ave})随着平面外位移角的变化规律,如图 10 所示。由图 10 及相关分析可知:在 $\theta_{OOP}=0.33\%$ (峰值荷载的 30%)之前,墙体基本处于弹性阶段,墙体左上角和 1/3 中部高度处出现了细微的裂缝,此时,裂缝最大宽度为 0.23 mm,试件开裂荷载为 36.27 kN;当加载至 $\theta_{OOP}=0.50\%$ (峰值荷载的 40%)时,墙体 1/3 和 2/3 宽度处出现两条新的竖向裂缝,中部 2/3 高度处出现新的水平裂



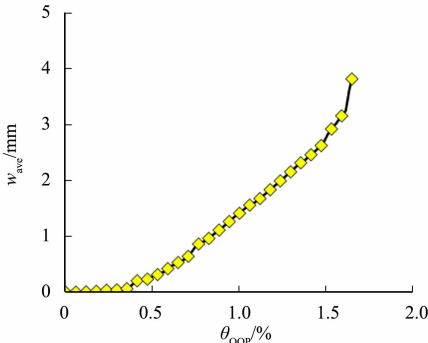
(a) 左上斜裂缝



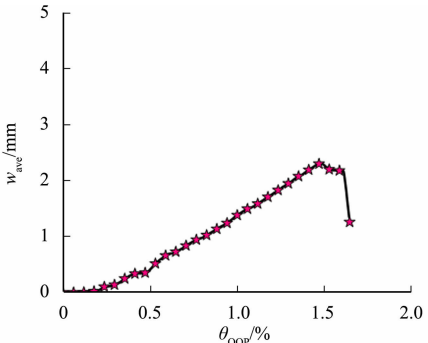
(b) 右上斜裂缝



(c) 中间水平裂缝



(d) 左下斜裂缝



(e) 右下斜裂缝

图 10 填充墙裂缝宽度随着平面外位移角的变化规律

Fig. 10 Variation of crack width of infill walls with OOP drift

缝,裂缝轮廓基本展现;主斜裂缝最大宽度为 0.52 mm,水平裂缝宽度为 0.33 mm,竖向裂缝宽度为 0.28 mm;当加载至 $\theta_{OOP}=0.66\%$ (峰值荷载的 53%)时,阶梯型斜裂缝宽度达到 0.83 mm,中间水平裂缝宽度为 0.49 mm;随着加载进行,裂缝宽度不断加深,当加载至 $\theta_{OOP}=1.00\%$ (峰值荷载的 74%)时,墙体中部出现新的水平斜裂缝,4 条斜裂缝朝墙体 4 个角部不断延伸,并发展出次斜裂缝;当加载至 $\theta_{OOP}=1.32\%$ 时(峰值荷载的 93%)右上角出现新的阶梯型斜裂缝,裂缝宽度达到 2.22 mm;当加载至 $\theta_{OOP}=1.65\%$ 时,试件达到峰值荷载 127.73 kN,墙体左下角砌体压溃,左下主斜裂缝宽度达到 3.81 mm,框架填充墙平面外荷载迅速下降。

2.5 平面内/外(IP/OOP)位移场

墙体平面外的位移场是通过 ARAMIS SRX 后处理软件基于填充墙曲面成分计算获得。平面外位移场,如图 11 所示。

由图 11 可知:在 $\theta_{OOP}=0.33\%$ (峰值荷载的 30%)之前,墙体整体平面外位移较小(小于 3.75 mm),形态接近平面;当加载至 $\theta_{OOP}=0.50\%$ (峰值荷载的 40%)时,平面外位移场出现更大的位移层

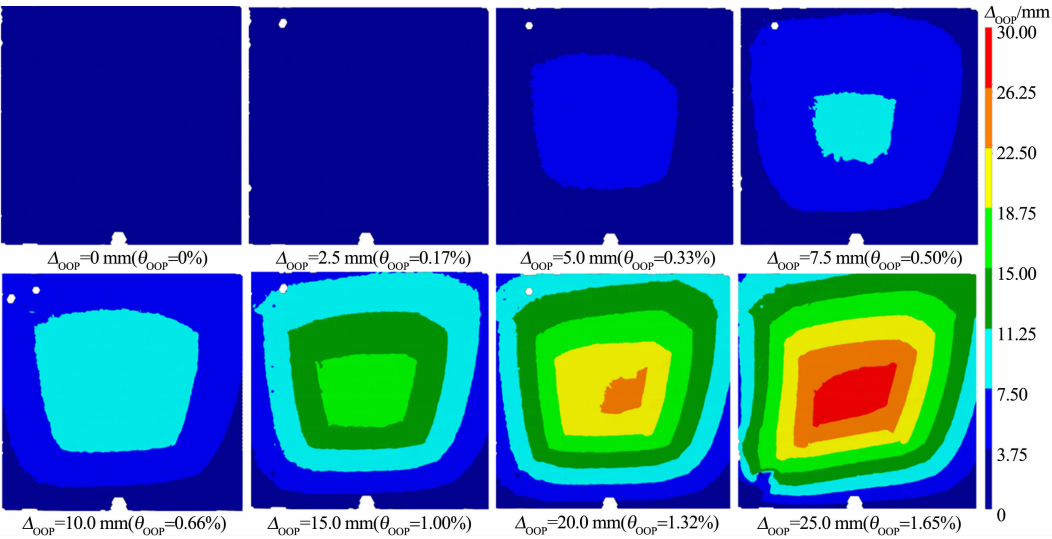


图 11 平面外位移场
Fig. 11 OOP displacement field

级,墙体中点位移达到 7.96 mm,离中点 500 mm 范围内的位移为 5.96~6.23 mm,墙体与框架交界处的位移较小(0.42~2.98 mm),此时,墙体的 3D 变形面形态由近似平面逐渐转变成较小曲率的曲面;当加载至 $\theta_{\text{OOP}}=0.66\%$ (峰值荷载的 53%) 时,墙体平面外位移进一步增大,中点位移达到 10.56 mm,离中点 500 mm 范围内的位移为 8.01~8.64 mm,但平面外 3D 变形面形态没有显著变化;当加载至 $\theta_{\text{OOP}}=1.00\%$ (峰值荷载的 74%) 时,墙体中部位移进一步增加,曲面形态从微曲面过渡到二次曲面,墙体中部位移为 11.84~13.44 mm,墙体与框架交界处位移为 2.08~4.78 mm;当加载至 $\theta_{\text{OOP}}=1.32\%$ (峰值荷载的 93%) 时,墙体中部右下角观察到砌体的局部压碎,墙体 3D 变形面的不对称程度加剧,具体表现为墙体上半部分位移(5.07~22.38 mm)更大,下半部分位移(2.08~22.62 mm)相对较小,这是因为墙体顶梁和底梁平面外约束程度不同导致的,后续填充墙平面外的边界条件还需要进一步研究;当加载至 $\theta_{\text{OOP}}=1.65\%$ 时,试件达到峰值荷载,中心点位移为 28.81 mm,墙体左下方砌体压溃,墙体平面外变形面从较为对称的正方形转变为平行四边形。总体而言,墙体平面外位移场表现出中心最大,从中心到四周逐渐减小的变化规律,呈现“回”字形分布。

框架填充墙平面内(in-plane, IP)水平和竖直位移场,分别如图 12、13 所示。图 12、13 中: $\Delta_{\text{IP},h}$ 、 $\Delta_{\text{IP},v}$ 分别为平面内水平位移和平面内竖直位移。

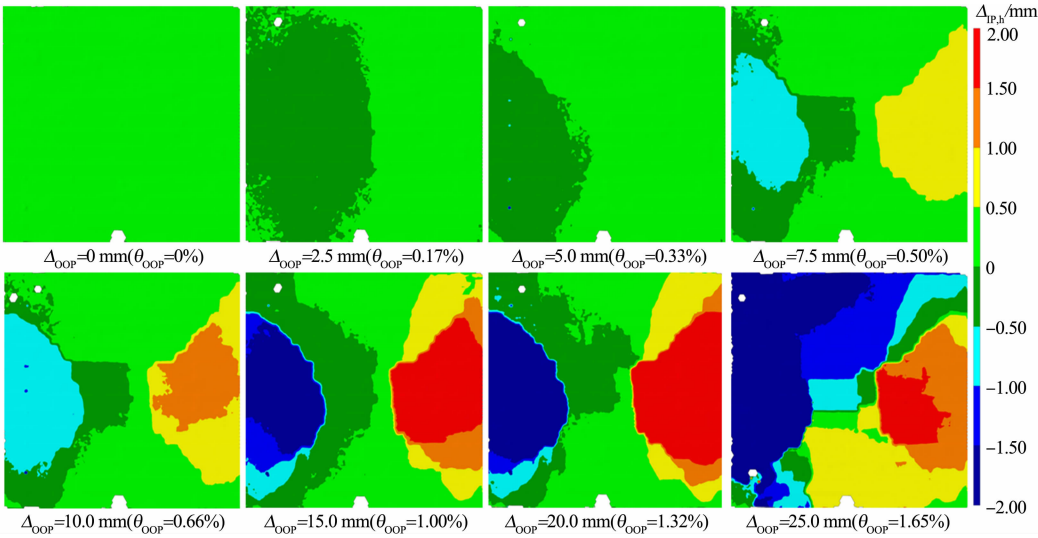


图 12 平面内水平位移场
Fig. 12 IP horizontal displacement field

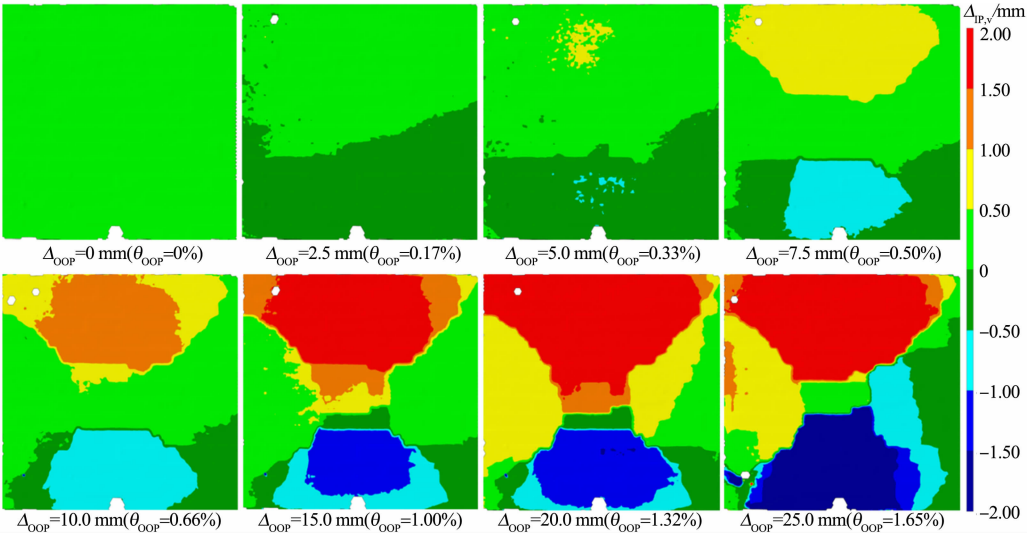


图 13 平面内竖直位移场

Fig. 13 IP vertical displacement field

由图 12、13 可知：主裂缝将墙体分成上下左右和中间区块；当加载至 $\theta_{\text{OOP}}=0.33\%$ （峰值荷载的 30%）之前，填充墙左区块平面内水平位移略大于右区块，上区块平面内竖向位移略大于下区块，这是由于在加载初期墙体还没有完全受力，导致其位移场并不对称；当加载至 $\theta_{\text{OOP}}=0.50\%$ （峰值荷载的 40%）时，墙体受力重新分布，墙体平面内水平和竖直位移场由先前的不对称转变为较为对称的分布规律；当加载至 $\theta_{\text{OOP}}=0.66\%$ （峰值荷载的 53%）时，墙体平面内位移场分区基本明朗，各个区块位移值基本接近；当加载至 $\theta_{\text{OOP}}=1.00\%$ （峰值荷载的 74%）时，墙体左侧区块位移为 $-1.06\sim-1.70\text{ mm}$ ，右侧区块位移为 $0.75\sim1.63\text{ mm}$ ，上区块位移为 $1.25\sim1.93\text{ mm}$ ，下区块位移为 $-0.89\sim-1.15\text{ mm}$ ；当加载至 $\theta_{\text{OOP}}=1.65\%$ 后，墙体中部和左下角部观察到严重的局部破坏，墙体平面内水平位移场从先前的对称转变为不对称的分布规律，其竖直位移场基本保持对称。

3 结论

1) 加载至峰值荷载的 30% 之前，位移计导杆和墙面基本垂直，位移计和 DIC 测量结果较为接近。随着墙体平面外曲面形态的不断变化，位移计的导杆与墙体表面法向量不再完全平行。砌体的局部压溃使部分位移计和墙体脱开，造成平面外位移突降，其测量结果与 DIC 相差较大。即使加载后期墙体表面的散斑剥落，DIC 仍然能够根据周围位移值插值，得到剥落处位置的平面外位移值，充分证明了 DIC 技术在捕捉填充墙 3D 变形曲面上的优越性。

2) Mises 应变场表明，在峰值荷载的 30% 之前，裂缝发展不明显，裂缝最大宽度为 0.23 mm ；当加载至峰值荷载的 74% 时，墙体中部水平裂缝、中部竖向裂缝和 4 条阶梯型斜裂缝的轮廓基本形成，向角部延伸的斜裂缝发展出次斜裂缝；在峰值荷载阶段，左下角砌体压溃，裂缝的最大宽度达到 3.81 mm 。

3) 平面外位移场表明，加载至峰值荷载的 30% 之前，墙体平面外位移场形态接近平面；当加载至峰值荷载的 40%，墙体中部位移场幅值为 $5.96\sim6.23\text{ mm}$ ，四周边界处位移为 $0.42\sim2.98\text{ mm}$ ，墙体平面外曲面形态由近似平面转变成有一定曲率的曲面；当加载至峰值荷载的 74% 时，墙体平面外曲面逐渐过渡到二次曲面形态，位移场总体呈现“回”字形分布规律。

4) 加载前期，填充墙平面内水平和竖直位移场并不对称。随着墙体受力重新分布，其平面内位移场由先前的不对称转变为较为对称的分布规律。由平面内/外位移场云图可知，上下左右区块围绕各自支点做近似刚体转动，形成典型的平面外双向拱抵抗机制。随着墙体进入破坏阶段，位移场从先前的对称转变为不对称的分布规律，其平面外双向拱机制逐渐消失。

参考文献：

[1] 郭子雄, 吴毅彬, 黄群贤. 砌体填充墙框架结构抗震性能研究现状与展望[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(6):

- 172-177. DOI:10.13197/j. eeev. 2008. 06. 031.
- [2] 翟长海, 王晓敏, 孔璟常, 等. 砌体填充墙 RC 框架结构抗震性能研究现状及展望[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(6): 1-13. DOI:10.11918/j. issn. 0367-6234. 201801073.
- [3] RICCI P, DI DOMENICO M, VERDERAME G M. Experimental assessment of the in-plane/out-of-plane interaction in unreinforced masonry infill walls[J]. Engineering Structures, 2018, 173: 960-978. DOI: 10.1016/j. engstruct. 2018. 07. 033.
- [4] DE RISI M T, DI DOMENICO M, RICCI P, *et al.* Experimental investigation on the influence of the aspect ratio on the in-plane/out-of-plane interaction for masonry infills in RC frames[J]. Engineering Structures, 2019, 189: 523-540. DOI:10.1016/j. engstruct. 2019. 03. 111.
- [5] XIE Xinyao, GUO Zixiong, BASHA S H. Out-of-plane performance of lightweight AAC infills within RC frames using noncontact full-field strain measurement technique[J]. Journal of Structural Engineering, 2024, 150(5): 4024043. DOI:10.1061/JSENDH. STENG-12626.
- [6] YAMAGUCHI I. Simplified laser-speckle strain gauge[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3): 436-440. DOI: 10.1117/12. 7972927.
- [7] PETERS W H, RANSON W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3): 427-431. DOI:10.1117/12. 7972925.
- [8] 刘聪, 陈振宇, 何小元. 3D-DIC 在土木结构力学性能试验研究中的应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(2): 339-344. DOI:10.3969/j. issn. 1001-0505. 2014. 02. 020.
- [9] 廖健, 章红梅, 陈杨. 基于数字图像相关法(DIC)的剪力墙破坏过程分析[J]. 结构工程师, 2019, 35(3): 83-90. DOI: 10.15935/j. cnki. jggcs. 2019. 03. 012.
- [10] 赵宪忠, 李秋云. 土木工程结构试验量测技术研究进展与现状[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(1): 48-55. DOI:10.15986/j. 1006-7930. 2017. 01. 008.
- [11] 刘宇飞, 樊健生, 聂建国, 等. 结构表面裂缝数字图像法识别研究综述与前景展望[J]. 土木工程学报, 2021, 54(6): 79-98. DOI:10.15951/j. tmgcxb. 2021. 06. 008.
- [12] 许力, 郭子雄, 郭亦宸, 等. 低剪跨比闭口型压型钢组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(2): 109-118. DOI:10.14006/j. jzjgxb. 2021. 0467.
- [13] 熊二刚, 巩忠文, 于顺尧, 等. 新型预制节段拼装桥墩抗震性能及塑性铰区变形分析[J]. 土木工程学报, 2024, 57(9): 68-83. DOI:10.15951/j. tmgcxb. 23050414.
- [14] XIE Xinyao, GUO Zixiong, BASHA S H. Out-of-plane behavior of clay brick masonry infills contained within RC frames using 3D-digital image correlation technique[J]. Construction and Building Materials, 2023, 376: 131061. DOI:10.1016/j. conbuildmat. 2023. 131061.
- [15] 杨子涵, 舒江鹏, 杨静滢, 等. 基于 DIC 技术的钢筋混凝土梁剪切裂缝自动提取与量化方法[J]. 工程力学, 2024, 41(增刊 1): 187-196. DOI:10.6052/j. issn. 1000-4750. 2023. 05. S021.
- [16] GNIHOTRI P, SINGHAL V, RAI D C. Effect of in-plane damage on out-of-plane strength of unreinforced masonry walls[J]. Engineering Structures, 2013, 57: 1-11. DOI:10.1016/j. engstruct. 2013. 09. 004.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)