

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201810027



数码摄影测量技术在填充墙 框架抗震试验中的应用

林超¹, 郭子雄^{1,2}, 黄群贤^{1,2}, 叶勇^{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: 将数码摄影测量(DP)技术引入填充墙框架受力全过程的位移场测量,研究 DP 技术应用于填充墙框架结构抗震试验研究的可行性.数据分析结果表明:采用 DP 技术的测量结果与传统位移计所测结果吻合良好.通过 DP 技术进一步得到在不同位移幅值下填充墙的剪切滑移破坏情况及框架柱的变形特征.

关键词: 数码摄影测量;非接触测量;填充墙框架;抗震试验;位移场测量

中图分类号: TU 375.4; TP 391.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2019)03-0319-05

Application of Digital Photogrammetry in Experimental Study on Seismic Behavior of Infilled Frames

LIN Chao¹, GUO Zixiong^{1,2}, HUANG Qunxian^{1,2}, YE Yong^{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: The digital photogrammetry (DP) technology is introduced to the displacement-field measurement of the infilled frame, and the feasibility of applying the DP technology to the seismic test of infilled frame structures is discussed. The test results show that, the measurement taken by the DP technology agrees well with that taken by the traditional displacement meters. Furthermore, the shear-slip failure of the infilled wall under different displacement amplitude and the deformation feature of the frame columns are obtained by the DP technology.

Keywords: digital photogrammetry; non-contact measurement; infilled frame; seismic performance; displacement-field measurement

传统试验位移测量方法存在安装复杂、测点有限、量程受限及易受损等局限性^[1-3].随着计算机处理技术的高速发展和相机像素的提高,数码摄影测量(DP)技术的低成本、非接触性及测量范围大等优点更为突出,可弥补传统测量方法的不足.目前,DP技术已在岩土工程模型试验、桥梁安全监测和控制测量等领域得到了较为广泛的应用^[4-8].在结构工程领域,DP技术也逐渐得到重视和研究应用.林磊等^[9]探索 DP 技术在砌体墙试验变形测量中的适用性,证明这一新技术在结构试验变形测量中的可行性.曲哲等^[10]将 DP 技术应用到混凝土梁受剪试验中,得到梁剪跨区内的全局位移场和变形场.于先智等^[11]

收稿日期: 2018-10-12

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减灾方向的研究. E-mail: guozxcy@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578254);福建省科技重大项目(2015Y4007)

在钢结构冲击试验中采用 DP 技术观测钢结构震动变形情况,绘制试件的变形曲线. 填充墙框架是目前工程中常用的结构体系,在地震作用下填充墙与主体框架相互作用、共同工作^[12-15]. 在填充墙框架抗震试验中,填充墙平面内变形特征是研究框架与填充墙之间复杂相互作用机理的关键问题,而采用传统测量方法难以获得填充墙平面内的不规则变形. 因此,本文采用 DP 技术测量填充墙框架结构抗震试验中填充墙的变形发展情况,并对带填充墙框架与空框架的变形区别进行分析.

1 试验概况

1.1 试验的设计及测量点的布置

制作 1 榀足尺空框架试件(BF)和 6 榀足尺填充墙框架试件(IF1~IF6),进行低周往复荷载作用下的抗震性能试验. 试件主要参数为不同的砌块类型和不同的拉结方式,其中,填充墙砌块采用工程中常用的空心黏土砖(IF1)、混凝土空心砌块(IF2)、陶粒混凝土砌块(IF5)和加气混凝土砌块(IF6)4 种,不同拉结方式包括常规拉结(IF2)、钢筋通长拉结(IF3)和配筋砂浆带拉结(IF4)3 种. 由往复作动器在框架梁端施加水平位移,在位移角为 1/1 500,1/1 000,1/700,1/500 和 1/300 时加载循环一次,在位移角为 1/200,1/150,1/100,1/50,1/35 和 1/25 时,加载循环 3 次. 采用带滚动导轨的竖向千斤顶对框架柱施加 500 kN 恒定轴压荷载. 试件加载装置,如图 1 所示. 加载过程中,通过采集系统对试件水平荷载进行量测,使用激光位移计对梁端水平位移进行测量,并在地梁水平和竖向安装位移计,监测地梁可能发生的水平位移及竖向变形.

为研究填充墙框架结构在往复加载过程中的平面变形情况,在试件表面粘贴布置标志点. 在地梁左侧布置标志点 1,将其定为坐标原点,在地梁右侧同高处布置标志点 16,在地梁中线上布置相距 1.5 m 的两标志点 17,18,将其作为尺寸参照点. 在框架梁柱中线处布置标志点 2~15,在填充墙表面斜对角线、中竖线及靠近梁柱的砌块上布置标志点 19~38. 各标志点的布置位置,如图 2 所示.

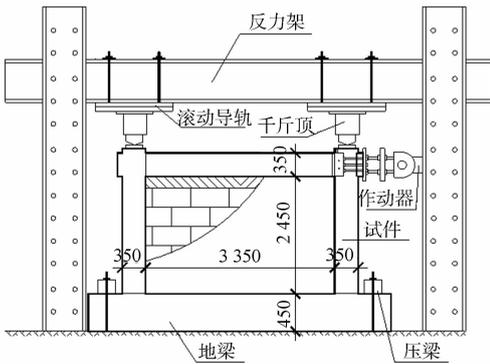


图 1 加载装置 (单位:mm)

Fig. 1 Test set-up (unit: mm)

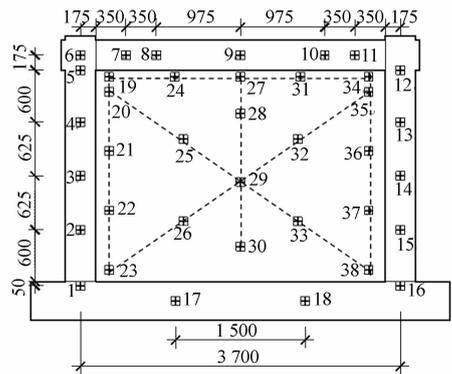


图 2 标志点布置 (单位:mm)

Fig. 2 Measurement point arrangement (unit: mm)

试验开始前,将相机固定在三脚架支座上,并使相机镜头保持与框架中心同高. 采用遥控器远程控制拍照,降低手动操作对相机的震动干扰,提高成像质量. 图像的分辨率为 4 272 px×2 848 px. 试验加载过程中对试件进行连续图像采集,获得各位移幅值下试件标志点的位置信息.

1.2 主要试验结果

各试件的荷载(P)-位移(Δ)曲线,如图 3 所示. 由图 3 可知:砌体填充墙的存在提高了框架结构的抗侧刚度和水平承载力,使填充墙框架试件表现出良好的变形性能和耗能能力;不同砌体类型填充墙对框架试件水平承载力的提高幅度影响不同,其中,陶粒混凝土砌体填充墙框架试件(IF5)的水平承载力最大,加气混凝土砌体填充墙框架试件(IF6)的承载力和刚度退化较慢;对于不同拉结方式填充墙框架试件,常规拉结

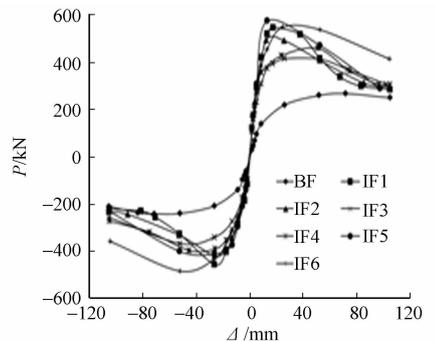


图 3 荷载位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curve

试件(IF2)的水平承载力最大,钢筋通长拉结试件(IF3)和配筋砂浆带拉结试件(IF4)在达到最大荷载后的承载力退化速度较慢。

填充墙框架试件(IF1~IF6)填充墙均经历墙体开裂、裂缝贯通、砌块开裂剥落和墙体局部塌落等破坏阶段,均为剪切滑移和对角开裂组合的破坏模式。以试件 IF2 为例,当加载至 $1/1\ 000(\Delta=2.63\text{ mm})$ 时,试件 IF2 墙体与框架交界处出现裂缝,墙体出现阶梯形裂缝;当加载至 $1/500(\Delta=5.25\text{ mm})$ 时,墙体出现“X”形裂缝,梁柱端出现数条弯曲裂缝;当加载至 $1/200(\Delta=13.13\text{ mm})$ 时,墙体部分砌块开裂,梁、柱端均有新裂缝出现;当加载至 $1/50(\Delta=52.5\text{ mm})$ 时,部分砌块肋被剪断,出现破裂掉落现象,柱上端出现剪切裂缝;当加载至 $1/35(\Delta=75\text{ mm})$ 时,出现墙体部分塌落现象,梁柱端受压区混凝土压碎剥落;当加载至 $1/25(\Delta=105\text{ mm})$ 时,墙体砌块塌落面积增大。当位移角为 $1/50$ 和 $1/25$ 时,试件 IF2 填充墙破坏形态,如图 4 所示。

2 测量结果的分析

2.1 图像数字化的处理

简化近似方法有以下 2 个假定:1) 假定填充墙框架上标志点均位于同一平面;2) 忽略相机镜头畸变和相机分辨率的影响。通过图像数字化软件读取照片中标志点中心坐标,设测点 1 为坐标原点 $(0,0)$,得到各标志点原坐标 (x_1, y_1) 。考虑到在试件和相机摆放中出现的平面扭转问题,标志点原坐标 (x_1, y_1) 参照标志点 1, 16 所确定的 x 坐标轴和地梁中线上标志点 17, 18 所确定的坐标刻度,通过转换公式和缩放比例对标志点坐标进行修正,得到各标志点修正后坐标 (x, y) 。即

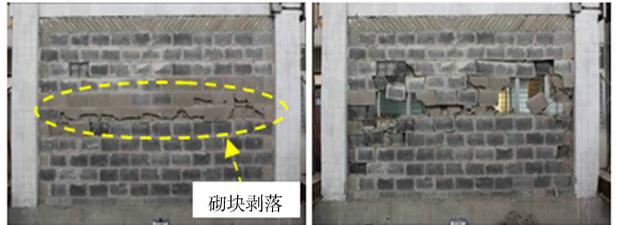
$$x_2 = x_1 \cos \theta + y_1 \sin \theta, \quad y_2 = -x_1 \sin \theta + y_1 \cos \theta. \quad (1)$$

取框架节点处布置的标志点 6 所测水平位移值,采用 DP 技术绘制测得的试件荷载 (P) -位移 (Δ) 曲线,与传统激光位移计测量方法所得荷载 (P) -位移 (Δ) 曲线基本重合。以试件 IF2 为例,两种测量方法所得荷载 (P) -位移 (Δ) 曲线,如图 5 所示。由图 5 可知:在各位移角加载到最大位移时,采用 DP 技术所测结果存在的最大误差为 4.6%,表明采用 DP 技术的测量结果与传统位移计所测结果吻合良好,具有一定的可靠性。DP 技术测量误差的产生原因主要有以下 3 个方面:1) 粘贴布置标志点和安装相机不够精确;2) 人工定位图片标志点坐标有误差;3) 采用简化近似方法处理图像平面坐标。

2.2 填充墙位移场的分析

取填充墙上的标志点坐标绘制填充墙局部位移场,通过位移场的分布及发展研究填充墙的变形破坏过程。以填充墙框架试件 IF2 为例,取 $1/500, 1/200, 1/100$ 和 $1/50$ 位移角下填充墙局部位移场,即标志点 19~23, 27~30, 34~38 位移值进行分析,如图 6 所示。图 6 中: H 为标志点高度; ΔL 为标志点位移值, $\Delta L < 0\text{ mm}$ 为试件在不同位移角下正向加载时标志点的位移值, $\Delta L > 0\text{ mm}$ 为试件反向加载时标志点的位移值。

由图 6 可知以下 2 点结论。1) 通过填充墙中部上下标志点的位移差值,可得到在不同位移幅值下填充墙剪切滑移破坏情况,并计算出墙体相对滑移值。在 $1/100$ 位移角正向加载时,标志点 27~30 的 ΔL 值分别为 18, 20, 10, 0 mm,可计算出标志点 27, 28 间砂浆层剪切滑移值为 2 mm,标志点 28, 29 间及标志点 29, 30 间 5 皮砌块砂浆层的剪切滑移值均为 10 mm;在 $1/50$ 位移角正向加载时,标志点 27, 28 间砂浆层剪切滑移值仍为 2 mm,标志点 28, 29 间及标志点 29, 30 间 5 皮砌块砂浆层的剪切滑移值分别增加到 14, 22 mm。2) 同一位移角正反向加载时,由于填充墙出现无规律不对称开裂破坏,使得填充墙标志点的位移值存在差异。填充墙左侧标志点位移值的最大差值出现在标志点 22 处,在 $1/50$ 位移



(a) $1/50$ 位移角

(b) $1/25$ 位移角

图 4 试件 IF2 破坏形态

Fig. 4 Failure modes of IF2

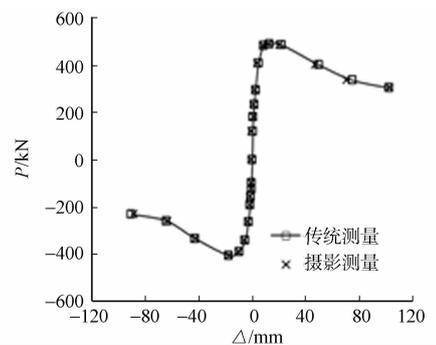


图 5 试件 IF2 荷载位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curve of IF2

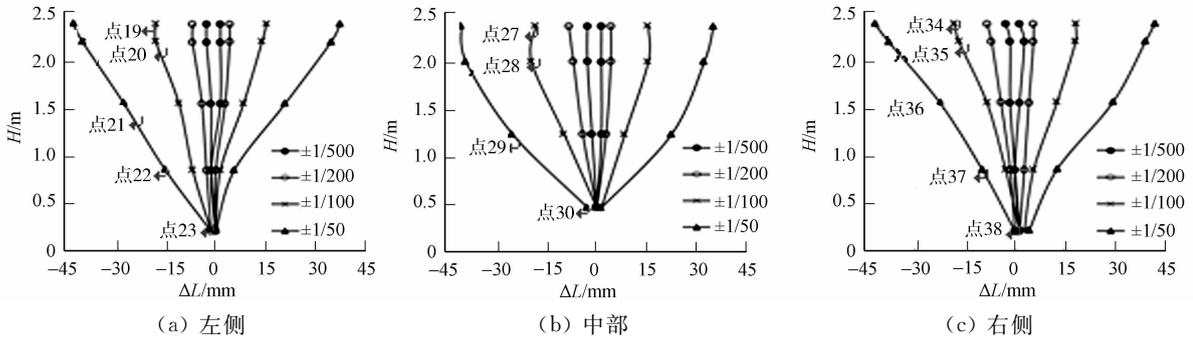


图6 填充墙中部标志点测量值

Fig. 6 Measured value of point on middle of infilled wall

角下其差值为 10 mm;填充墙右侧标志点位移值的最大差值出现在标志点 34 和标志点 36 处,在 1/50 位移角下其差值分别为 4,7 mm;填充墙中部标志点位移值的最大差值出现在标志点 28 处,在 1/500, 1/200, 1/100, 1/50 位移角正反向加载时,标志点 28 的位移差值分别为 2,3,4,7 mm.

2.3 框架柱变形的分析

地震中填充墙与框架相互作用、共同工作,填充墙对框架柱的受力状态产生较大影响,使得框架柱的侧向变形与空框架柱存在差异.以填充墙框架试件 IF2 为例,取 1/500, 1/200, 1/100 和 1/50 位移角下框架柱位移场(即标志点 1~5, 12~16 的坐标值)进行分析,并与空框架试件 BF 柱上相应标志点坐标值进行对比,如图 7 所示.

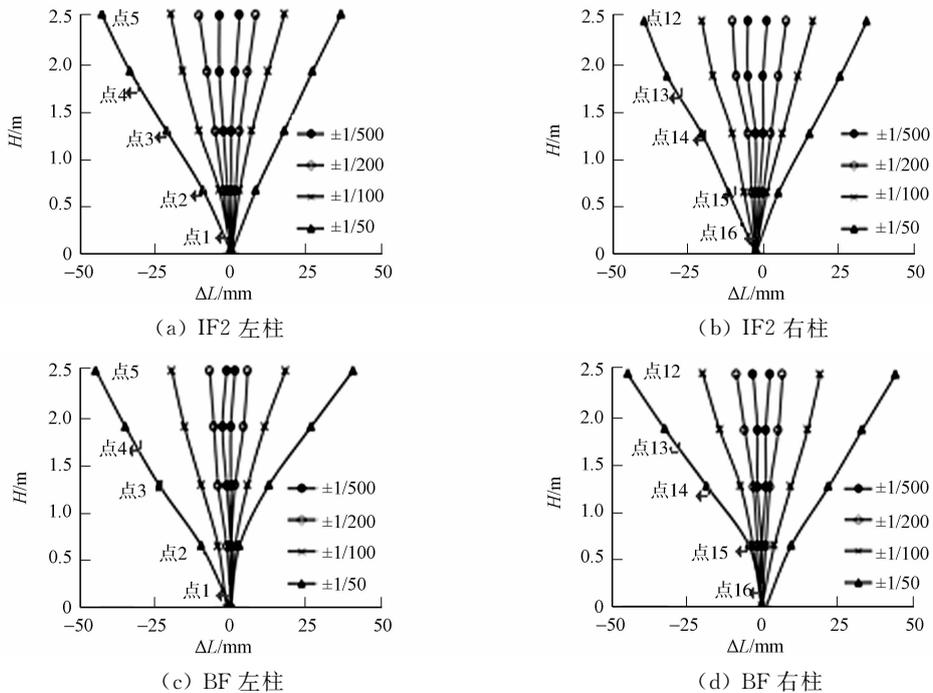


图7 框架柱标志点测量值

Fig. 7 Measured value of point on frame columns

由图 7 可知以下 2 点结论. 1) 由于填充墙的存在,填充墙框架和空框架的框架柱底部约 1/5 高度处的变形值明显不同. 在 1/50 位移角正向加载时,填充墙框架试件 IF2 标志点 15 的 ΔL 值为 6 mm,明显小于空框架试件 BF 标志点 15 的 ΔL 值 9 mm;同理,反向加载时,填充墙框架试件 IF2 左柱标志点 2 的 ΔL 值与空框架试件 BF 柱上相应标志点 2 的 ΔL 值存在差异. 2) 同一位移角正反向加载时,填充墙框架试件 IF2 框架柱标志点的位移值存在较大差异. 在 1/50 位移角正向加载时,标志点 2, 3, 14, 15 的 ΔL 值分别为 23, 10, 6, 18 mm, 不等于与反向加载时各标志点的 ΔL 值 3, 13, 11, 23 mm, 其中,标志点 2, 15 的 ΔL 值相差较大.

3 结论

将 DP 技术应用于足尺填充墙框架结构抗震性能试验中,对填充墙框架进行非接触式测量,得到以下 3 个主要结论.

1) 通过 DP 技术的测量结果与传统位移计测量结果比较分析,验证了采用 DP 技术测量填充墙框架结构变形场的可行性,从而为填充墙框架结构抗震试验复杂变形场的测量寻找到一种有效替代方法.

2) 通过 DP 技术测得填充墙局部位移场,可了解在不同位移幅值下填充墙的剪切滑移破坏情况,并计算出墙体的相对滑移值.在 1/100 位移角下,填充墙 5 皮砌块间砂浆层的剪切滑移值约为 10 mm,在 1/50 位移角下,剪切滑移值增加到 14~22 mm.

3) 将填充墙框架与空框架的框架柱变形值进行对比,进一步揭示了填充墙与框架之间的相互作用特征.由于填充墙的存在,填充墙框架和空框架的框架柱底部约 1/5 高度处的变形值明显不同.

参考文献:

- [1] 陆新征,王海波,严吉洁,等.结构摄影测量图形自动识别系统[C]//第一届全国土木工程研究生学术论坛论文集.南京:[s. n.],2003:662-666.
- [2] 任伟中,寇新建,凌浩美.数字化近景摄影测量在模型试验变形测量中的应用[J].岩石力学与工程学报,2004,23(3):436-440. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2004.03.014.
- [3] 田国伟,韩晓健,徐秀丽.基于视频图像处理技术的振动台试验动态位移测量方法[J].世界地震工程,2011,27(3):174-179.
- [4] 郭葆锋,肖大威.虚拟可视化城市研究[J].华侨大学学报(自然科学版),2005,26(3):317-320. DOI:10.3969/j.issn.1000-5013.2005.03.024.
- [5] 周拥军,任伟中.一种仅需距离控制的模型试验平面位移场单像视觉测量[J].岩石力学与工程学报,2009,28(4):799-804. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2009.04.019.
- [6] 林俊义,黄常标,刘斌,等.双目立体视觉摄像机标定及精度分析[J].华侨大学学报(自然科学版),2011,32(4):364-367. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2011.04.0364.
- [7] 许薛军,张肖宁.基于数字图像的混凝土桥梁裂缝检测技术[J].湖南大学学报(自然科学学报),2013,40(7):34-40. DOI:10.3969/j.issn.1674-2974.2013.07.006.
- [8] 胡瀚,王凤艳,王明常,等.数字摄影测量采集岩体结构面信息的控制测量方法[J].世界地质,2018,37(1):309-315. DOI:10.3969/j.issn.1004-5589.2018.04.031.
- [9] 林磊,叶列平,程锦.数字摄影技术在结构试验变形测量中的应用[J].实验技术与管理,2003,20(1):34-38. DOI:10.16791/j.cnki.sjg.2003.01.011.
- [10] 曲哲,陆新征,叶列平,等.数字摄影测量在混凝土梁受剪性能研究中的应用[J].建筑结构学报,2006,27(2):936-939.
- [11] 于先智,张国建,于承新.数字摄影技术观测钢结构震动变形的研究[J].山东科学,2015,28(6):133-138. DOI:10.3976/j.issn.1002-4026.2015.06.021.
- [12] 郭子雄,黄群贤,魏荣丰,等.填充墙不规则布置对 RC 框架抗震性能影响试验研究[J].土木工程学报,2010,43(11):47-54. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2010.11.011.
- [13] 潘毅,季晨龙,王超,等.日本地震中钢筋混凝土框架结构震害及分析[J].工程抗震与加固改造,2012,34(4):122-127. DOI:10.3969/j.issn.1002-8412.2012.04.023.
- [14] BASHA S H, KAUSHIK H B. Behavior and failure mechanisms of masonry-infilled RC frames (in low-rise buildings) subject to lateral loading[J]. Engineering Structures, 2016, 111: 233-245. DOI:10.1016/j.engstruct.2015.12.034.
- [15] HUANG Qunxian, GUO Zixiong, KUANG J S. Designing infilled reinforced concrete frames with strong frame-weak infill principle[J]. Engineering Structures, 2016, 123: 341-353. DOI:10.1016/j.engstruct.2016.05.024.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)