

# 数字摄影测量在混凝土梁受剪性能研究中的应用

曲哲, 陆新征, 叶列平, 程锦

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

**摘要:** 混凝土梁的受剪属于复杂受力行为。长期以来由于传统的位移计和电阻片等变形量测手段的测点有限, 无法获得剪跨区段的位移场和变形场等全局变形数据, 使得混凝土复杂受力性能的研究停滞不前。而数字摄影测量技术可以获得剪跨区内的全局位移场和变形场, 有助于弥补传统量测手段的不足, 为混凝土梁受剪性能的研究提供丰富而可靠的实验依据。本文通过简单实用的投影方法和图像识别算法, 开发出一套行之有效的平面数字摄影变形测量方法, 编制了相应的图像识别和数据分析软件, 并将该技术应用于混凝土梁受剪试验研究中, 取得了初步的成果。

**关键词:** 数字摄影测量; 混凝土梁; 变形场; 受剪性能

中图分类号: TB89; TU375.1 文献标识码: A

## Applications of the digital photogrammetry in the studies on shear behavior of concrete beams

QU Zhe, LU Xinzheng, YE Lieping

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The incapability in obtaining the deformed specimens' global displacement and strain fields of current measuring methods, such as linear variable differential transformer (LVDT) or strain gauges has become an obstacle to understand the complicated behaviors of concrete beams subjected in shear. Digital photogrammetry is able to capture the global displacement and strain fields in shear span regions of concrete beams, which give substantial experimental results for understanding the concrete behaviors. By introducing a simple projection method and developing efficient algorithms to recognizing digital images, practical digital photogrammetric technique for in-plane measurement is developed. This technique is applied to a series of shear tests of concrete beams with the assistance of in-house software package for post-processing. Preliminary results are obtained.

**Keywords:** digital photogrammetry; concrete beam; displacement field; shear behavior

## 1 引言

自 20 世纪中叶以来, 研究人员对钢筋混凝土构件的受剪行为进行了大量的试验研究<sup>[1]</sup>, 但由于传统的位移传感器和电阻应变片等量测手段受到测点数量、量程等条件的限制, 无法得到剪跨区段的全

局和全过程位移场和应变场, 使得试验资料过于单一, 阻碍了混凝土构件复杂受力行为和机理的深入研究。而运用摄影测量技术, 可以通过非接触手段, 得到构件的全局、全过程位移场和应变场, 尤其在大变形破坏性试验中优势更加明显。因此这一技术可以作为现有试验测量手段的有效补充, 尤其是可为研究复杂受力状态下混凝土的力学行为提供丰富而可靠的试验资料。

摄影测量技术从 19 世纪中叶开始发展至今, 经历了模拟、解析和数字三个主要阶段。其核心内容

**作者简介:** 曲哲 (1983—), 男, 陕西兴平人, 博士研究生  
**收稿日期:** 2006 年 5 月

包括两部分，即获取相片坐标，再由相片坐标还原到空间物理坐标。数字摄影测量在继承了解析摄影测量中经典的投影理论的同时，可直接用计算机获取相片坐标。随着数码相机在我国的迅速普及，这一技术的成本大为降低了，我国也正逐渐把这一技术用于结构试验<sup>[2-5]</sup>，并已取得不错的成果。然而精度不高、施测复杂，仍然是阻碍该技术推广使用的障碍。本文采用并完善了一种简化的投影方法，尝试利用先进的图像特征提取算法以提高获取相片坐标的精度，并编制了相应的图像后处理程序以减轻人工数据分析的工作量。并将该技术应用于一组混凝土梁的抗剪试验研究中，取得了初步的成果。

## 2 相片坐标提取

为便于相片坐标的获取，本文采用在试件表面粘贴一些特定图案的标志点以降低图像识别的难度。标志点图案见图 1 (a)<sup>[6]</sup>，只需要精确提取直线边缘特征，就能确定标志点中心的相片坐标。但实际相片图像中的标志点会模糊并存在一些噪声（如图 1b），增加了精确定位的难度。一般的边缘提取算子（如 Sobel 算子等）精度不高，但简单快速。Zernike 正交矩方法<sup>[7]</sup>是一种提取边缘亚像素位置的算法，但计算量较大。将两种方法结合起来，可以在速度和精度上达到平衡<sup>[8]</sup>。



(a) 理想标志点 (b) 实际图像中的标志点

图 1: 标志点图案

Fig. 1 Pattern of mark point

本文采用如下的标志点中心的提取流程。对于一条直线边缘，首先利用 Sobel 算子扫描整个标志点图像，确定边缘像素。然后对所有边缘像素应用 Zernike 正交矩算子，确定边缘的亚像素位置。最后用最小二乘法拟合上一步得到的亚像素级边缘位置坐标，得到该直线边缘的几何方程。重复这一过程，得到另一条直线边缘的方程，求出二者的交点即为标志点的中心相片坐标。

## 3 平面物理坐标分析

经典的三维摄影测量投影理论解算空间物理坐标方法对摄影设备和控制条件都有很高的要求，坐标解算也比较复杂<sup>[9]</sup>，即使简化到二维平面测量，也仍然复杂。本文针对平面二维变形测量，采用文献[2]中的近似方法解算测点的物理坐标，并完善了基准点体系，采用如图 2 所示的控制方法。在测量区域四周布置四个钢尺，每个钢尺上至少有一对间距已知的标志点作为控制点。图 2 中每个钢尺上有四个相互间距已知的标志点，用于采用整体平差消除控制点的间距误差。试验过程中允许钢尺随试件在测量平面内运动。加载台座上额外布置两个控制点以确定试件相对于加载台座的位移。试验过程中，所有控制点和测点均应位于测量平面内。实践表明，所采用的近似投影方法能够满足平面测量的要求。

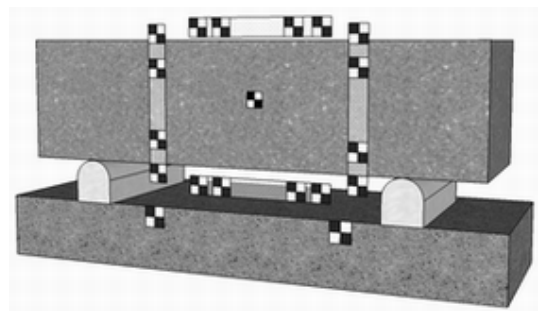


图 2: 测量控制点及测点布置

Fig. 2 Configuration of control points and measuring point

## 4 应用

基于以上方法，本文开发了结构试验数字摄影测量软件系统，并用于一组混凝土梁的抗剪试验中。试验梁为一组三维几何相似的无腹筋钢筋混凝土梁，梁高分别为 200mm，400mm 和 600mm，剪跨比均为 2，三点弯曲加载。测量采用 400 万像素普通数码相机。图 3 所示为梁高 200mm 试验梁的摄影测量标志点布置。

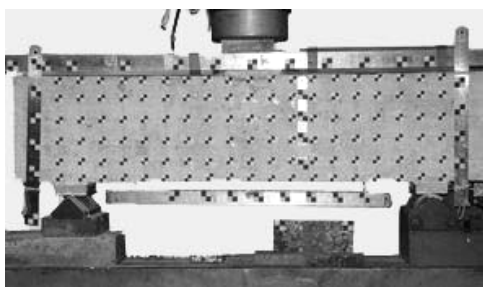


图 3: 摄影测量标志点布置 ( $h=200\text{mm}$ )

Fig. 3 Arrangement of mark points for specimen  $h=200\text{mm}$

图 4 比较了摄影测量得到的三个试件的荷载-位移曲线与传统电子位移计得到的结果。可以看出, 摄影测量的结果总体趋势正确, 但不太稳定。表面上看随着梁高的增大, 摄影测量测得的荷载-位移曲线更加接近位移计结果, 这只是反映出相对误差的减小, 而绝对误差基本相同。

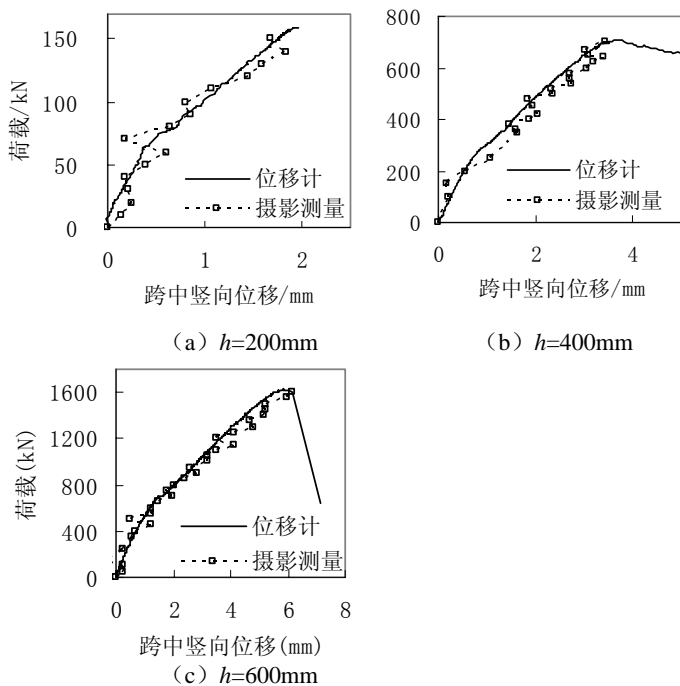


图 4: 荷载位移曲线比较

Fig. 4 Comparisons of load-deflection curves

摄影测量的一大优势在于能够获取全局应变场, 从而为复杂受力状态下混凝土构件的受力行为研究提供更为充分的试验依据。图 5 显示了摄影测量得到的梁剪跨区主拉应变分布, 并与实际的裂缝形态进行了比较。图中云图为摄影测量结果, 实线为实际裂缝。虽然存在一定的误差, 但摄影测量结

果已经能够正确反映梁腹的开裂行为, 随着测量精度的进一步提高, 这一测量技术对梁腹全局应变场量测的优势将更加突出。

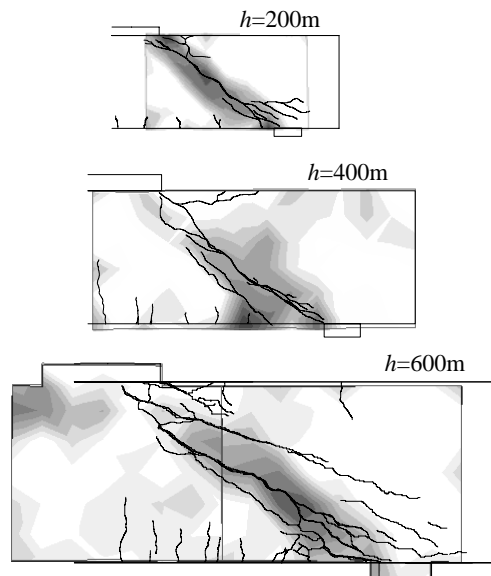


图 5: 梁腹主拉应变场与裂缝形态比较

Fig. 5 Comparisons between principle tensile strain fields obtained by photogrammetry and the crack patterns

## 5 误差分析

摄影测量中, 相片坐标获取和空间物理坐标分析两大内容都会引入误差。在空间物理坐标分析中, 本文采用了简化近似方法, 没有考虑镜头的非线性畸变, 并假设测点均位于同一平面。实际上, 在试验中这一假设并非严格成立。同时作为控制条件的钢尺本身的精度也有限制。在相片坐标获取方法中, 标志点中心的定位不可避免的存在误差, 这一误差受到相机分辨率和识别算法精度的影响。

通过在不同相机分辨率下标定上述摄影测量方法的精度, 发现其误差主要来自于相片坐标获取方法。标定装置如图 6 所示, 用千分表记录混凝土块的水平位移, 将摄影测量的结果与之比较, 发现摄影测量精度受数码相片分辨率的直接限制。当数码相片上一个像素代表约  $0.14\text{mm}$  时, 摄影测量最大位移误差为  $0.09\text{mm}$ , 当数码相片上一个像素代表约  $0.42\text{mm}$  时, 摄影测量最大位移误差为  $0.41\text{mm}$ 。

另外,相机的旋转、摇摆或俯仰对测量精度的影响均不显著。这一方面说明本文中摄影测量的误差主要来自相片坐标获取方法,另一方面也反映出本文使用的图像特征提取算法仍只能达到像素级精度。本文尝试采用了文献[10]提出的对 Zernike 正交矩方法的改进,效果仍不明显。

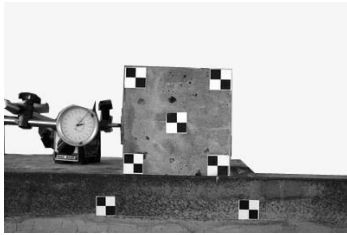


图 6: 摄影测量精度的标定

Fig. 6 Calibration of photogrammetry

前述混凝土梁抗剪试验应用中的精度情况也反映了上述误差情况,不同的是物理坐标分析的误差表现得比标定中更明显一些。表 1 列出了对上述三个试验梁进行摄影测量得到的荷载-位移曲线与电子位移计结果比较的误差,同时列出了摄影测量所用的数码照片上 1 个像素代表的物理长度(表示照片的分辨率)。可见,最大位移误差与照片的分辨率有明显的依赖关系,同时最大位移误差往往超过了一个像素,超出的这部分误差则基本来自于物理坐标分析。

表 1: 摄影测量位移误差

Table 1 Displacement errors by photogrammetry

梁高	$h=200\text{mm}$	$h=400\text{mm}$	$h=600\text{mm}$
1 像素代表长度 (mm)	0.22	0.38	0.56
最大位移误差 (mm)	0.29	0.46	0.57
方差 (mm)	0.03	0.04	0.09

## 6 结语

本文通过引入比较先进的图像边缘检测算法和采用简化的近似物理坐标解算方法,发展出一套便于实际结构试验的数字摄影测量系统,并应用于一组钢筋混凝土梁的剪切试验中,获得了梁腹的全局应变场的发展情况。通过将摄影测量得到的荷载位移曲线与传统电子位移计测得的结果进行比较,发现本文方法的位移测量结果的最大误差约为数码相

片上 1 个像素代表的物理长度。结合摄影测量精度标定的结果,表明数字摄影测量的误差主要来自图像识别部分,而物理坐标解算方法引起的误差尚不显著。图像识别部分的误差可随着相机设备分辨率的提高以及识别算法的改进而显著减小。

本文工作表明,数字摄影测量可以得到混凝土试件表面的全局应变分布。若采用高分辨率的相机和高精度适用性强图像识别算法,则可以得到更加准确的结果,从而为研究混凝土构件的剪切行为提供更加详实的试验资料。

## 参 考 文 献

- [1] Collins, M. P., Mitchell, D, Adebar, Perry and Vecchio, F. J., A General Shear Design Method [J]. ACI Structural Journal. 1996, vol. 93, no. 1: 36-45.
- [2] 于承新, 徐芳, 黄桂兰, 刘友光. 近景摄影测量在钢结构变形监测中的应用 [J]. 山东建筑工程学院学报. 2000, no. 4: 1-7.
- [3] 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. 2004. vol. 20, no. 1: 34-38.
- [4] 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. vol. 23, no. 3: 436-40.
- [5] 周拥军, 寇新建, 任伟中. 数字近景摄影测量在模型试验平面位移场测量中的应用 [J]. 勘察科学技术. 2004. no. 5: 26-30.
- [6] 陆新征, 王海波, 严吉洁, 叶列平, 江见鲸. 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, 2003, 南京: 662-666
- [7] Ghosal, S. and Mehrotra, R. Orthogonal Moment Operators for Subpixel Edge Detection. Pattern Recognition [J]. 1993. vol. 26, no. 2: 295-306.
- [8] 曲迎东, 崔成松, 陈善本, 李金权, 李庆春. 利用 Sobel-Zernike 矩算子的快速亚像素边缘检测方法 [J]. 光电工程. 2003. vol. 30, no. 5: 59-61.
- [9] 王之卓. 摄影测量原理 [M]. 北京: 测绘出版社, 1979.
- [10] 李金泉, 王建伟, 陈善本, 吴林. 一种改进的 Zernike 正交矩亚像素边缘检测算法 [J]. 光学技术. 2003. vol. 29, no. 4: 500-503.