

文章编号:1671-6833(2011)05-0020-04

## PIV 测量技术在锚板周土体变形场研究中的应用

张 昕<sup>1,2</sup>, 乐金朝<sup>1</sup>, 刘汉东<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 华北水利水电学院 资源与环境学院, 河南 郑州 450011)

**摘 要:**采用粒子图像测速技术对锚板在上拔过程中板周土体的变形进行了研究. 首先将图像进行网格划分, 利用相关匹配技术得到了锚板周围土体在峰值点处的位移场, 锚板在上拔过程中, 锚板上部的土体位移中心部分大, 周边小, 最大位移与实测位移一致. 通过位移场计算得到剪切应变场, 锚板两侧形成对称并贯通到地面的剪切带, 该剪切带与竖直方向的夹角约为  $18^\circ$ , 与实际结果一致. 测量结果表明: 粒子图像测速技术能较好地测定锚板在上拔过程中任意点在任意时刻的位移, 从而得到锚板周边的剪切带以及剪切应变的大小分布, 对量化分析锚板的变形破坏机理具有重要的研究意义.

**关键词:**锚板; 变形场; 粒子图像测速技术

**中图分类号:** TU476

**文献标志码:** A

### 0 引言

抗拔锚板基础广泛应用于输电线路杆塔、电视通讯塔、高耸构筑物, 挡土结构以及各种承受上拔荷载作用的构筑物基础. 锚板作为一种重要的基础形式, 有效地发挥了土体的承载能力, 且经济实用, 在工程中的应用越来越广泛. 不少学者对锚板的抗拔承载力做了研究<sup>[1-5]</sup>, 但多数研究只进行锚板受力与位移的量测, 而对于影响锚板承载力的根本因素——板周土体的变形过程研究较少<sup>[6]</sup>.

近年来, 随着计算机图像学的发展, 越来越多的高精度图像处理技术应用到试验中来, 为测量带来了很大的便利. 一种基于图像分析的无干扰测量技术——粒子图像测速技术 (Particle Image Velocimetry PIV)<sup>[7]</sup> 得到越来越广泛的应用. PIV 测量技术是一种基于图像分析的无干扰测量技术, 具有测量精度高、不干扰测量对象、稳定性和抗干扰能力好、自动化程度高、工作量小等优点. 笔者采用 PIV 技术对锚板上拔过程中板周土体的变形场进行研究, 从而得到锚板两侧的剪切带以及剪切应变的大小分布.

### 1 PIV 测量技术

PIV 粒子图像测量技术突破了以往的测速手

段, 如激光多普勒测速、热线测速技术等传统单点测量的限制, 实现了对空间瞬态流场的实时测量. 它能够提供瞬时整个流场的定量信息, 具有极高的空间分辨率和精度, 同时还具有不干扰被测流场的定量信息、动态响应快等优点, 因此目前在各个领域应用得非常广泛<sup>[8-10]</sup>.

PIV 基于图像序列匹配技术, 图像匹配是通过图像之间建立的交叉关联函数进行的<sup>[11]</sup>, 交叉关联函数如式(1)所示.

$$R_v(\Delta x, \Delta y) = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N I(i, j) I'(i + \Delta x, j + \Delta y) \quad (1)$$

式中:  $R_v(\Delta x, \Delta y)$  为关联函数;  $M, N$  为图像块的尺寸;  $I$  为  $t_1$  时刻图像中, 中心点坐标在  $(i, j)$  处图像块的灰度值分布函数;  $I'$  为  $t_2$  时刻图像中, 中心点坐标在  $(i + \Delta x, j + \Delta y)$  处图像块灰度值分布函数;  $(\Delta x, \Delta y)$  为坐标位移增量.

PIV 的基本原理如图 1 所示, 利用摄像设备采集  $t_1$  时刻和  $t_2$  时刻的图片, 分别如图 1(a) 和图 1(b) 所示. 将位移发生前后摄取的灰度图像分割成若干均匀网格. 将位移发生前某一网格在位移发生后图像指定范围内根据式(1)进行全场匹配和相关运算, 当关联函数值达到峰值时, 如图 1(c), 就会得到根据峰值相关系数确定该网格在

收稿日期: 2011-04-06; 修订日期: 2011-06-14

基金项目: 教育部留学回国人员启动基金资助项目; 河南省重点科技攻关计划项目 (112102310602)

作者简介: 张昕 (1977-), 女, 河南新乡人, 郑州大学博士研究生, 华北水利水电学院讲师, 主要从事岩土工程方面的研究, E-mail: zhangxin@ncwn.edu.cn.

发生位移后的位置,由此可以得到该网格的像素位移,再根据一定的比例关系转换得到网格中心点的物理位移.对发生位移前所有网格进行类似运算就可以得到整个位移场如图1(d)所示.

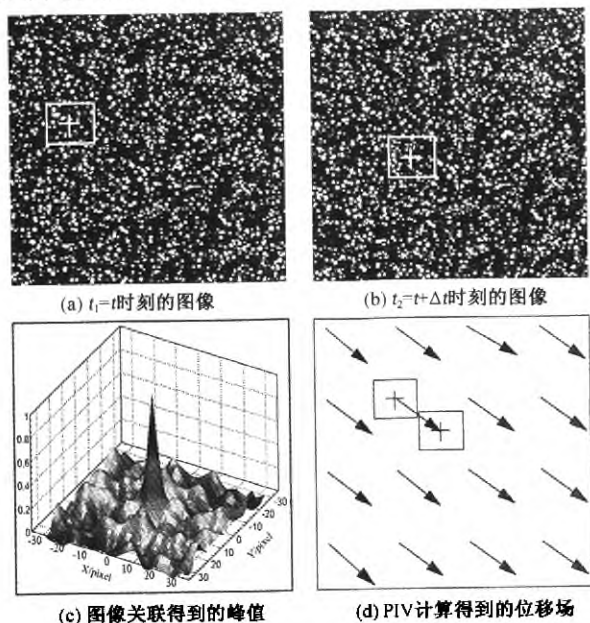


图1 PIV 分析方法的基本原理

Fig.1 Principles of PIV analysis

## 2 试验设备及数据采集系统

### 2.1 试验仪器

仪器设备主要由 Sensortronics 60001-200 型拉力传感器(Load Cell);Gaging Transducer 354-000 型差动变压位移传感器(LVDT);PL-B741E CMOS 型相机;NI SCB-68 屏蔽连接盒;NI PCI-MIO-16XE-50(NI 6011E)数据采集卡和一台计算机组成.拉力传感器(Load Cell)用于测量锚板上拉过程中的拉力,最大测量荷载为 890 N.差动变压位移传感器(LVDT)用于测量锚板上拉过程中的位移,最大测量位移为 50 mm. CMOS 相机用于记录板锚上拉过程中的图像,相机连续图像记录速度为 26 张/s. NI SCB-68 屏蔽连接盒可根据不同的传感器设置不同的接线方式,并通过数据线将信号传送给数据采集卡. NI PCI-MIO-16XE-50(NI 6011E)数据采集卡提供单端输入方式 16 个通道、差分输入方式 8 个通道,且具有模拟、数字信号转换功能和信号放大功能.

### 2.2 试验模型

锚板上拔试验在有机玻璃模型箱内进行.模型箱的长×宽×高尺寸为 500 mm×300 mm×500 mm,图2为测试试验正视图.土样采用重度

为  $\gamma = 16.1 \text{ kN/m}^3$  的砂土,其不均匀系数  $C_u = 1.27$ ,曲率系数  $C_c = 1.25$ ,有效粒径  $d_{10} = 0.56 \text{ mm}$ ,土的相对密实度  $D_r = 0.79$ ,内摩擦角  $\varphi = 43^\circ$ .锚板直径为  $D = 50 \text{ mm}$ ,厚度为 5 mm,材质为有机玻璃,埋置深度  $H = 150 \text{ mm}$ ,埋深率  $H/D = 3$ .

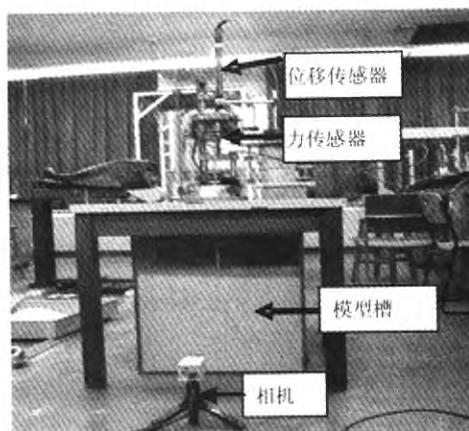


图2 粒子图像测速试验装置图

Fig.2 PIV test setup

## 3 数据采集系统

基于 Labview 图形化编程语言开发环境,开发了力、位移、图像同步采集系统,该系统可对锚板上拔过程中的力、位移、图像进行同步采集并能自动储存,而且可实时监控数据变化.经后处理程序可绘制出力与位移的关系曲线,并通过三者之间的时间关系找出对应力与位移点的图像.整个过程如图3所示.

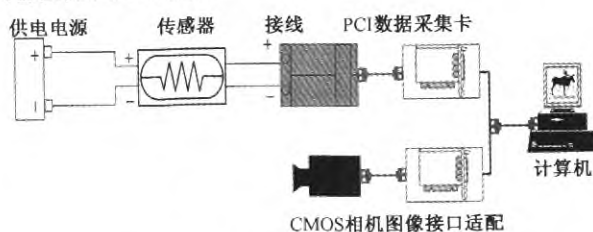


图3 数据同步采集过程

Fig.3 Simultaneous data acquisition procedure

## 4 结果分析

PIV 方法应用于锚板抗拔破坏试验,可得到使用其它测量方法所无法获得的一些重要信息.通过分析可以获得锚板模型在上拔力作用下上拔过程中变形的全过程,为深入了解锚板上拔的破坏机理提供了辅助条件.

图4为数据采集系统采集到的上拔力和位移关系曲线,该上拔力与位移关系曲线可以反映出锚板在上拔过程中上拔力随位移变化的整个过

程.首先,锚板上拔力随位移近似为线性增加,位移为0.8 mm时达到峰值荷载49.6 N,随后上拔力随位移呈缓慢减小趋势.

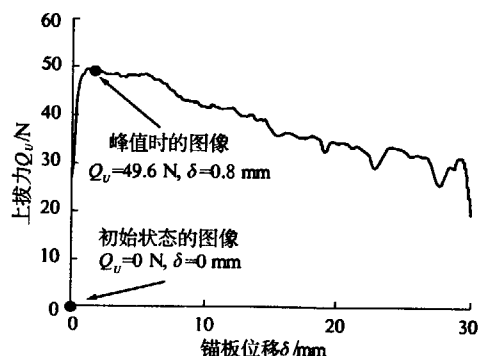


图4 锚板上拔力与位移关系曲线

Fig. 4 Pullout force vs displacement curve

图5是峰值点图像经PIV技术所得到的位移矢量图,图中箭头的长短表示该点的位移大小,从图中可以看出锚板周围土体的运动方向和位移大小.该阶段锚板正上方土体表现出较为均匀的整体向上移动,两翼土体位移则以一定倾角外倾向上运动,位移大小从中心向周边逐渐减小,最大位移为0.75 mm,与LVDT所测位移0.8 mm基本一致.

图6为峰值时的剪切应变场,从该图中可以

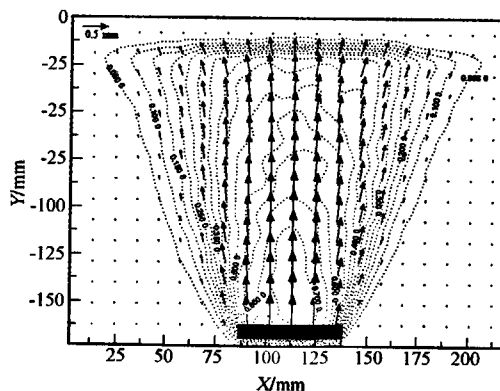


图5 峰值时的位移场

Fig. 5 Displacement field at peak value

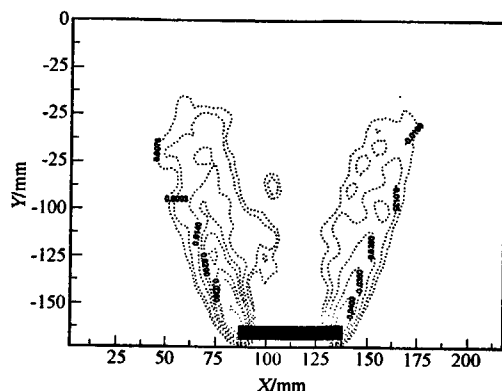


图6 峰值时的剪应变场

Fig. 6 Shear strain field at peak value

看到峰值点处,锚板周边形成对称的剪切带,该剪切带与竖直方向的夹角约为 $18^\circ$ .

## 5 结论

基于PIV技术结合锚板抗拉破坏试验,对PIV方法在锚板抗拉破坏试验中的应用进行了尝试.结果表明该测量技术能较好地测定锚板上拔过程中任意点在任意时刻的位移,可以准确获得上拔过程中上拔力随位移变化的整个过程.并具有不干扰测量对象、无需预先确定测点、稳定性和抗干扰能力好、自动化程度高、工作量小等优点.通过对位移时程曲线的分析,能够得到锚板周围土体的运动方向和大小,从而得到锚板周边的剪切带以及剪切应变的大小分布,对量化分析锚板的变形破坏具有重要的研究意义.

## 参考文献:

- [1] ILAMPARVTHI K, DICKIN E A, MUTHUKRISNAIAH K. Experimental investigation of the uplift behaviour of circular plate anchors embedded in sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(3): 648-664.
- [2] 初晓峰, 李志刚, 汪稳. 钙质砂中锚定物锚固性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 368-371.
- [3] MERIFIELD R S, LYAMIN A V, SLOAN S W. Three-dimensional lower-bound solutions for the stability of plate anchors in sand[J]. Geotechnique, 2006, 56(2): 123-132.
- [4] 于龙, 刘君, 孔宪京. 锚板在正常固结黏土中的承载力[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1427-1434.
- [5] DAS B M. Earth anchors[M]. New York: Elsevier, 1990.
- [6] SUTHERLAND H B. Uplift resistance of soils[J]. Geotechnique, 1988, 38(4): 493-516.
- [7] ADRIAN R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1991, 23(1): 261-304.
- [8] WOLF H, KONIG D, TRIANTAFYLIDIS T. Experimental investigation of shear band patterns in granular material[J]. Journal of Structural Geology, 2003, 25(8): 1229-1240.
- [9] GREGORIO F D. PIV technique assessment in icing wind tunnel[M]. New York: Springer-Verlag, 2008.
- [10] 王定标, 杨丽云, 于艳, 等. 双层桨叶搅拌器流场的CFD模拟与PIV测量[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2009, 30(2): 1-5.
- [11] THOMAS S H, JAGDISHKUMAR K A. Image Sequence Analysis[M]. New York: Springer-Verlag, 1981.

## Application of PIV Technique to Research on Sand Deformation Around Plate Anchors

ZHANG Xin<sup>1,2</sup>, YUE Jin-chao<sup>1</sup>, LIU Han-dong<sup>2</sup>

(1. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Institute of Resources and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

**Abstract:** The research on the sand deformation around an uplifting anchor is conducted based on the PIV. The images are divided into small patches. The digital cross-correlation method is used to search for the best matching between these small patches and the sand displacement field around plate anchor at peak point is obtained. The sand displacement is characterized as large movement above the anchor but small movement at the sides of the anchor. The measured maximum sand displacement by PIV is consistent with the anchor displacement measured by LVDT. The shear strain field shows that the symmetric shear zones tangent with the anchor side and inclining upward to the surface are shaped. The angle of the shear bands with the vertical is about  $18^\circ$ , which is consistent with other researchers' results. The results show that PIV measurement can better measure the sand displacement around the plate anchor during anchor uplifting at any time. The shear bands distribution and shear strain can also be deduced. These results are of great significance for the quantitative analysis of deformation and failure of anchor plate.

**Key words:** plate anchor; deformation field; PIV

(上接第10页)

- |  |  |
|--|--|
| [2] 杨淑慧,孙钢柱,高丹盈,等.矿渣微粉对复合纤维混凝土抗压性能的影响[J].施工技术,2009(6):73-75. | [6] 高晓冰,杨晓光,赵彦芳.外墙筑保温技术与节能材料[J].粉煤灰综合利用,2006,(3):46-47.                |
| [3] 莫磊.新型保温节能复合墙体研究[D].石家庄:河北工业大学土木工程学院,2003.                | [7] 彭家惠,韩舜,张建新,等.聚合物纤维对聚苯乙烯颗粒保温砂浆性能的影响[J].重庆建筑大学学报,2008,30(2):135-137. |
| [4] CECS 194:2006,聚苯模板混凝土结构技术规程[S].                          | [8] JGJ 26—2010.严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准[S].                                  |
| [5] GB/T 20473—2006,建筑保温砂浆[S].                               |  |

## Mix Proportion and Performance of Modified EPS Thermal Insulating Mortar

SUN Gang-zhu

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The improvement of building energy standard presents more requirement for traditional external wall thermal insulating material in China. In order to improve the thermal and mechanical properties of thermal insulating material, hydrophilic expandable polystyrene granules was added to thermal insulating material, which is called modified EPS thermal insulating mortar. Then experimental investigation was conducted on modified EPS thermal insulating mortar with different mix proportion of hydrophilic expandable polystyrene granules. Finally, the optimum mix proportion of modified EPS thermal insulating mortar was achieved. The experimental results indicate that: the thermal conductivity and softening coefficient of thermal insulating mortar can be improved by adding modified material to traditional thermal insulating mortar. The modified EPS thermal insulating mortar can not only meet the requirements of external wall perpetual thermal insulating material, but also satisfy the requirements of thermal insulation property in Chinese cold area.

**Key words:** expandable polystyrene granule; thermal insulating mortar; qroperty; mix proportion