

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.01.017

基于 PIV 技术的锚板抗拉破坏模式识别

刘明亮^{1,2},朱珍德^{1,2},刘金元³

(1.河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;
2.河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098;3.瑞尔森大学土木工程系,多伦多 安大略 M5B 2K3)

摘要:利用自行开发的力、位移和图像同步数据采集系统对锚板上拔过程中的力、位移和图像进行同步采集,基于 PIV (particle image velocity) 无干扰测量技术对初始点和峰值点的图像进行分析,根据分析得到的锚板峰值点处的变形场对砂土中锚板的抗拉破坏模式进行了识别.结果表明 在峰值点处,锚板上部土体中间部分位移大、两边位移小,位移场呈倒梯形状分布.剪切应变场沿锚板两侧出现对称的剪切带,剪切带倾斜向上并延伸到地面,剪切带内出现剪胀现象.

关键词:锚板;PIV 技术;破坏模式

中图分类号: TU47 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2011)01-0084-05

锚板主要应用于电视塔、输电线塔和挡土墙等结构,其作用是为结构提供抗拔力^[1].近年来,随着海洋事业的发展,如海洋调查船、石油钻探装置、海上作业平台等各种浮动式海洋结构物不断出现,这些悬浮结构物需通过锚板提供的锚固力来抵抗风浪产生的荷载^[2-4].因此,通过对锚板破坏模式的研究来建立可靠的预测模型,对海洋悬浮平台的安全设计具有重要的现实意义.

目前,锚板破坏模式研究的主要方法是 将半圆形的锚板埋置于分层铺设了染过色的砂土中,试验完成后描绘出破坏面的形状^[3,5-7].然而,这种方法只能大致描绘出破坏面的形状,并不能真实地了解锚板的抗拉破坏机制.尽管根据假定的破坏面提出的预测模型有许多^[5-6,8],但这些模型的预测结果差别很大^[9-10].

近年来,用于流体速度测量的 PIV 技术也在岩土工程土体变形测量方面得到应用^[11-14].为了研究砂土中锚板的抗拉破坏模式,笔者首先利用自行开发的力、位移、图像同步采集系统对锚板上拔过程中的力、位移和图像进行同步采集,然后利用 PIV 技术对锚板抗拉破坏模式进行了识别.

1 PIV 技术原理

1.1 图像匹配原理

PIV 技术是在图像序列匹配技术的基础上发展起来的一种流体速度测量技术,而图像匹配是通过图像之间建立的交叉关联函数 $C(\Delta x, \Delta y)$ 进行的^[15].

$$C(\Delta x, \Delta y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) g(m + \Delta x, n + \Delta y) \tag{1}$$

式中: M, N ——图像块的长、宽尺寸; f —— t_1 时刻图像中,中心点坐标为 (m, n) 处图像块的灰度值分布函数; g —— t_2 时刻图像中,中心点坐标为 $(m + \Delta x, n + \Delta y)$ 处图像块的灰度值分布函数; $\Delta x, \Delta y$ —— x 和 y 方向的位移增量.

首先通过交叉关联函数逐个计算 t_1 时刻图像中的图像块(灰度值分布函数为 f)与 t_2 时刻图像中的图像块(灰度值分布函数为 g)之间的关联函数值.如果该关联函数值达到最大,则 2 个图像块之间达到最佳匹配,图像块从 t_1 时刻到 t_2 时刻的位移为 $(\Delta x, \Delta y)$.如果 $\Delta x = 0, \Delta y = 0$,则该图像块的位移为 $(0, 0)$.

收稿日期:2009-12-21
基金项目:中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金(SKLGDEUK0902) 加拿大自然科学研究基金(355425-2009);
江苏省普通高校研究生科研创新计划(CX10B-206Z) 江苏省土木工程研究生科技创新基金
作者简介:刘明亮(1979—),男,河南南阳人,博士研究生,主要从事岩土工程研究. E-mail :mingliang.liu79@gmail.com

1.2 图像匹配过程

图像匹配过程如图 1 所示. 图 1(a)中图像块 A 中心点的坐标为 (m, n) , 灰度值分布函数为 $f(m, n)$, 位移 $(\Delta x, \Delta y)$ 后在图 1(b)中的坐标为 $(m + \Delta x, n + \Delta y)$, 其灰度值分布函数为 $g(m + \Delta x, n + \Delta y)$. 图像块 A 在图 1(a)中的灰度值分布如图 2(a)所示, 图像块 A 在图 1(b)中的灰度值分布如图 2(b)所示. 由于图 1(a)和 (b)中的 2 个图像块一样, 只是位置不同, 所以其灰度值分布函数相同, 故 2 个图像的关联度最大, 关联函数值也最大. 图 2(c)所示为图 2(a)与图 2(b)关联计算后得到的关联度分布函数, 其中的峰值点即是关联度最大值点.

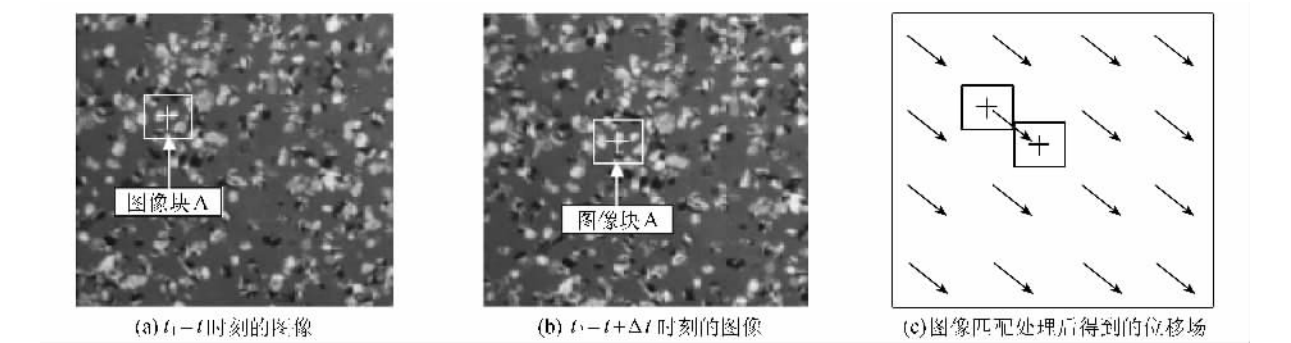


图 1 图像匹配过程
Fig. 1 Matching process of images

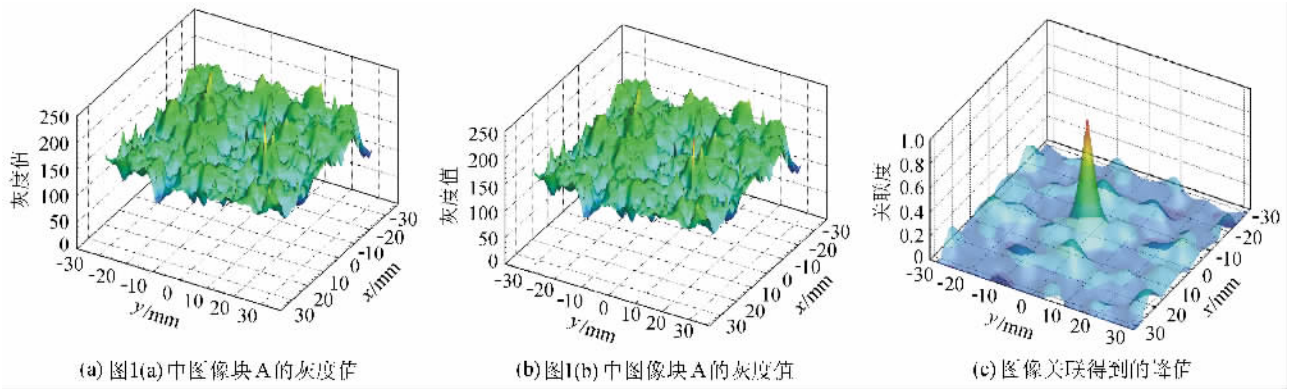


图 2 图块关联过程
Fig. 2 Associating process of images

1.3 改进的关联算法

式(1)对灰度分布函数的平均值比较敏感, 归一化的关联函数算法可大大提高识别的精度^[16]. 归一化的关联函数为

$$N(\Delta x, \Delta y) = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [f(m, n) - \bar{f}] [g(m + \Delta x, n + \Delta y) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [f(m, n) - \bar{f}]^2 [g(m + \Delta x, n + \Delta y) - \bar{g}]^2}} \tag{2}$$

式中: $N(\Delta x, \Delta y)$ ——归一化的关联函数; $\bar{f}$ ——灰度值分布函数 f 的平均值; $\bar{g}$ ——灰度值分布函数 g 的平均值.

由于整个图像的位移场是通过各个小的图像块的位移得出的, 各个小的图像块的大小与位移场的精度密切相关. 为了提高位移场的精度, 图像分析时总是将图像块分得尽可能的小. 图像块分得越小, 计算工作量越大, 计算速度也越慢. 为了提高计算速度, 可采用傅立叶变换将灰度分布函数变换为傅立叶形式, 通过傅立叶灰度分布函数的卷积来计算关联函数值. 傅立叶形式的关联函数为

$$C_{fg}(\Delta x, \Delta y) = F^{-1} [G(X, Y) \times F^*(X, Y)] \tag{3}$$

式中: $F^*(X, Y)$ —— $f(m, n)$ 的傅里叶变换形式; F^{-1} ——傅立叶逆变换; $G(X, Y)$ —— $g(m + \Delta x, n + \Delta y)$ 的傅立叶变换形式.

1.4 PIV 技术在砂土中的位移测量验证

采用 Parker 公司生产的型号为 4000 型的三维线性定位仪进行精度验证试验. 该型号定位仪 3 个方向的量程都为 25.4 mm, 测量精度为 0.025 4 mm. 将三维线性定位仪固定在试验台上, 装有砂土的方形有机玻璃容器平放在三维线性定位仪的平台上, 一把有刻度的尺子放在容器后方作为参考标准, 相机正对装有砂土的有机玻璃容器放置在 25 cm 远的地方. 在没有位移的情况下拍下第 1 张照片(图 3(a)), 旋转三维线性定位仪的螺母使装有砂土的方形有机玻璃容器平移 0.025 4 mm, 拍下第 2 张照片(图 3(b)). 利用 PIV 技术对前后 2 幅图像进行分析, 分析得到的位移场如图 3(c) 所示, 图中箭头表示位移方向. 从位移场可以看出, 整个区域的位移矢量为水平均匀分布, 且大小相等. 图 3(d) 为位移矢量的三维分布, 从整个分布情况来看, 位移均匀地分布在 0.006 mm 附近. 图 3(e) 为位移分布统计图, 从图中可以看出矢量均匀地分布在 0.005 ~ 0.007 mm 之间, 平均值为 0.005 985 mm, 标准差为 0.000 269 mm, 与实际位移大小相当.

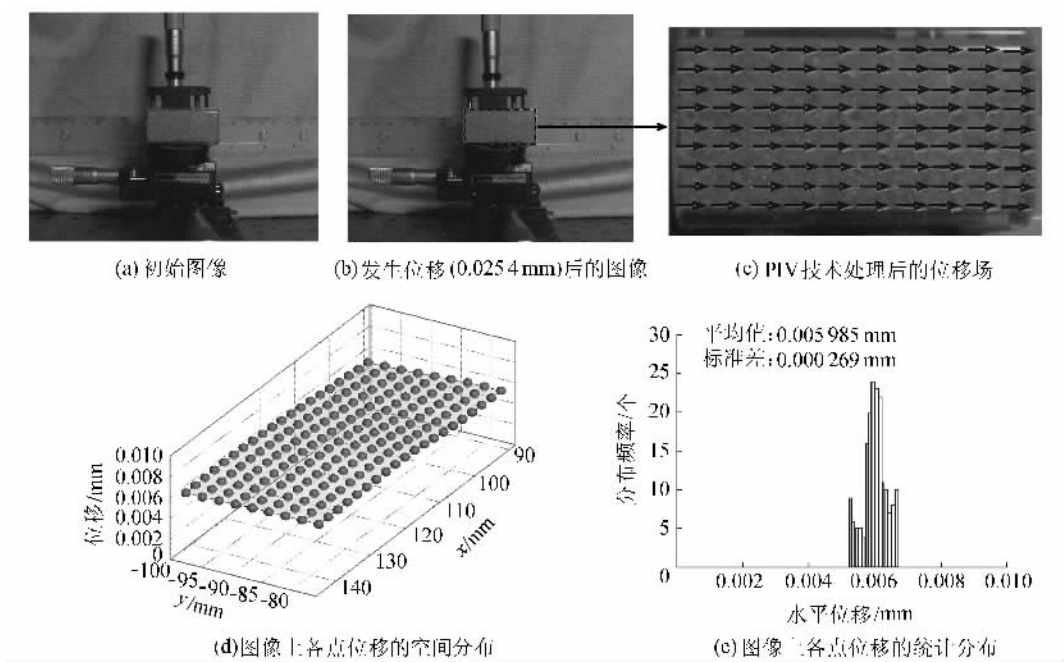


图3 PIV 技术在砂土中的位移测量验证

Fig. 3 Verification of PIV technology in displacement measurements of sand

2 锚板破坏模式识别

首先利用自行开发的数据采集系统对试验过程中的上拔力、位移和图像进行同步采集, 然后绘制锚板上拔力与位移之间的关系曲线, 通过时间关系找出各对应力和位移点的图像, 再基于 PIV 技术原理对图像进行分析, 从而得到位移场, 进而得到剪切应变场和体积应变场. 试验设备和数据采集系统如图 4 所示, 力传感器和位移传感器用来测量锚板上拔过程中的力和位移, CMOS 相机采集上拔过程中的图像.

试验所用砂土的密度为 1490 kg/m^3 , 不均匀系数 C_u 为 1.29, 曲率系数 C_c 为 0.98, 相对密度 D_r 为 71%, 有效粒径 D_{10} 为 0.56 mm, 摩擦角为 41° . 锚板采用半圆形有机玻璃制成, 直径 D 为 50 mm, 厚度为 5 mm. 模型槽采用长、宽、高分别为 $500\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 的有机玻璃板制成, 锚板埋置深度 $H = 100\text{ mm}$, 埋深率 $H/D = 2$.

试验得到的上拔力与位移关系曲线如图 5 所示. 从图 5 可以看出, 锚板在上拔过程中经历了很小的位移 $\delta = 1.06\text{ mm}$ 便达到峰值荷载 $Q_{\max} = 22.1\text{ N}$, 然后便进入峰后破坏阶段. 通过力、位移和图像之间的时间关系得到初始状态点的图像和峰值点的图像, 如图 6(a), (b) 所示.

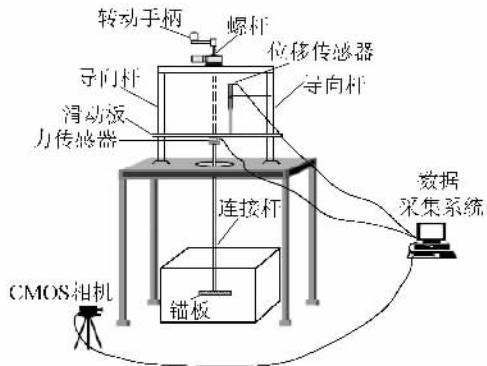


图4 试验设备和数据采集系统

Fig. 4 Test setup and data acquisition system

图 6(c)为图 6(a)与图 6(b)经 PIV 技术处理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.由位移场可知,峰值点处锚板上部土体整体产生了位移,且中间部分位移大、两边位移小,位移场形成一个倒置的梯形,如图 6(c)中虚线部分所示.

应变场可以从位移场得到^[17-18],正应变、剪应变和体积应变可以由以下公式计算得到.

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]$$
 (4)

$$\epsilon_y = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]$$
 (5)

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \left[\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \right]$$
 (6)

$$\epsilon_v = \epsilon_x + \epsilon_y$$
 (7)

式中: u, v —— x 和 y 方向的位移分量; ϵ_x, ϵ_y —— x 和 y 方向的正应变; γ_{xy}, ϵ_v ——剪应变和体积应变.

由式(6)计算得到的剪切应变场如图 6(d)所示.从剪切应变场可以看出,沿锚板两侧形成了一个倾斜向上并贯通到地面的剪切带.该剪切带离锚板附近比较狭长,并逐渐向上变宽.由式(4),(5)和(7)计算得到的体积应变场如图 6(e)所示.由体积应变场可知,在锚板上部两边缘处土体产生了体积变化,离锚板越近体积变化越大,越远体积变化越小,且体积变化为正值,表明该区域产生了剪胀现象.图 6(e)中的剪胀区域正好处于图 6(d)的剪切带内.

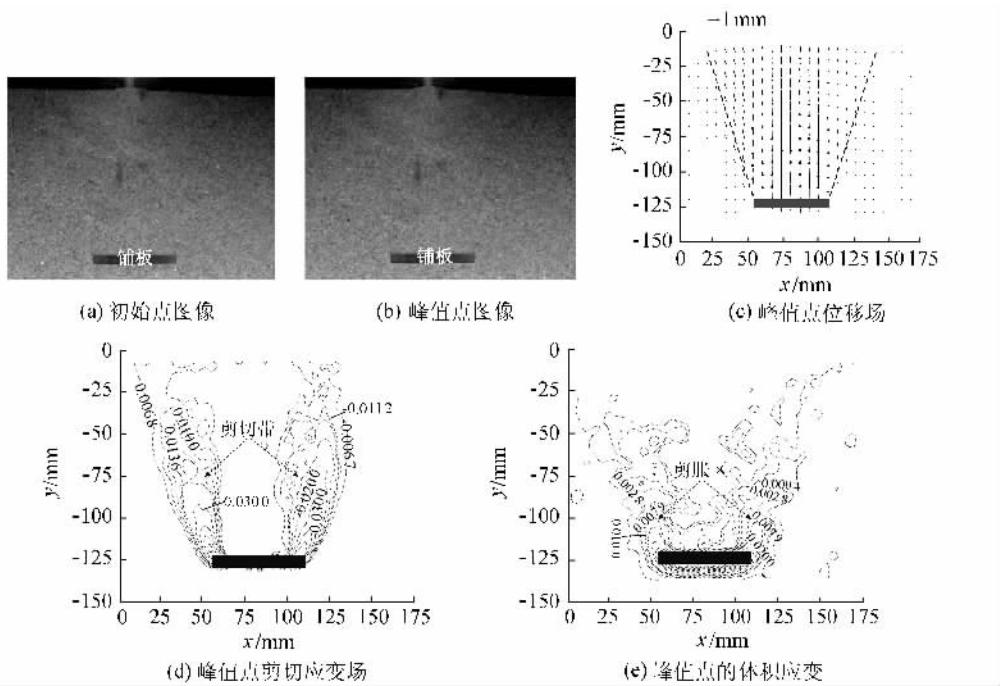


图 6 PIV 技术处理后的变形场

Fig. 6 Deformation fields proceeded by use of PIV technology

3 结 语

锚板作为海洋悬浮结构物的新型锚固基础具有广阔的应用前景,破坏模式对于锚板上拔力的可靠预测至关重要.笔者利用自行开发的力、位移和图像数据采集系统对锚板上拔过程中的力、位移和图像进行同步采集,应用 PIV 技术对初始点和峰值点的图像进行分析,得出了锚板在峰值点的位移场,进而得到了剪切应变场和体积应变场.变形场分析结果表明 在峰值点处,锚板上部土体中间部分位移大、两边位移小,位移场形成一个倒置的梯形.剪切带沿锚板两侧对称分布,并倾斜向上延伸到地面,剪切带内出现剪胀现象.

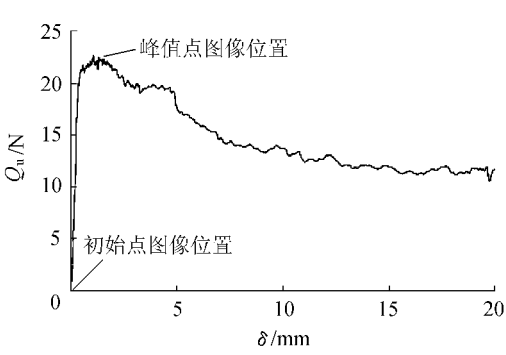


图 5 锚板上拔力 Q_u 与位移 δ 关系曲线

Fig. 5 Relationship between uplift force and displacement

参考文献:

- [1] 何思明. 抗拔锚板基础承载力研究[J]. 地下空间, 2002, 22(2): 145-148. (HE Si-ming. Study on bearing capacity of uplift anchor foundation[J]. Underground Space, 2002, 22(2): 145-148. (in Chinese))
- [2] 徐蓉, 何炎平, 谭家华. 几种新型深海锚泊形式概念[J]. 中国海洋平台, 2005, 20(2): 30-33. (XU Rong, HE Yan-ping, TAN Jia-hua. The concept on several new deepwater mooring systems[J]. China Offshore Platform, 2005, 20(2): 30-33. (in Chinese))
- [3] ILAMPARUTHI K, MUTHUKRISHNAIAH K. Anchors in sand bed: delineation of rupture surface[J]. Ocean Engineering, 1999, 26(12): 1249-1273.
- [4] VESIC A S. Breakout resistance of objects embedded in ocean bottom[J]. American Society of Civil Engineers Proceedings, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 97(9): 1183-1205.
- [5] MEYERHOF G G, ADAMS J I. The ultimate uplift capacity of foundations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1968, 5(4): 225-244.
- [6] ILAMPARUTHI K, DICKIN E A, MUTHUKRISHNAIAH K. Experimental investigation of the uplift behaviour of circular plate anchors embedded in sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(3): 648-664.
- [7] 茜平一, 刘祖德, 刘一良. 浅埋斜拔锚板周土体的变形破坏特征[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(1): 62-66. (XI Ping-yi, LIU Zu-de, LIU Yi-liang. The failure modes of inclining shallow anchors[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(1): 62-66. (in Chinese))
- [8] 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.
- [9] DAS B M. Earth anchors[M]. New York: Elsevier, 1990.
- [10] SUTHERLAND H B. Uplift resistance of soils[J]. Geotechnique, 1988, 38(4): 493-516.
- [11] HORII H, TAKAMATSU K, INOUE J, et al. Measurement of displacement field by "matching Method" and observation of strain localization in soft rock[C]//Proc 2nd Int Conf on Imaging Technologies: Techniques and Applications in Civil Engineering. New York: Elsevier, 1998: 10-19.
- [12] GULER M, EDIL T B, BOSSCHER P J. Measurement of particle movement in granular soils using image analysis[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1999, 13(2): 116-122.
- [13] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry[J]. Geotechnique, 2003, 53(7): 619-631.
- [14] SADEK S. Soil structure interaction in transparent synthetic soils using digital image correlation[D]. New York: Polytechnic University, 2002.
- [15] HUANG T S, AGGARWAL J K. Image sequence analysis[M]. New York: Springer-Verlag, 1981.
- [16] GIACHETTI A. Image and vision computing[M]. New York: Elsevier, 2000.
- [17] ROSCOE K H, ARTHUR J R F, JAMES R G. Determination of strains in soils by X-ray method[J]. Civil Engineering (London), 1963, 58(685): 1009-1012.
- [18] YAMAMOTO K, KUSUDA K. Failure mechanisms and bearing capacities of reinforced foundations[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, 19(3): 127-162.

Identification of failure modes for uplift anchor plates based on PIV technology

LIU Ming-liang^{1,2}, ZHU Zhen-de^{1,2}, LIU Jin-yuan³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Department of Civil Engineering, Ryerson University, Toronto, ON M5B 2K3, Canada)

Abstract: By use of the self-developed data acquisition system, the force, displacement and images of anchor plates during uplift were synchronously collected. The images at the initial and peak points were analyzed based on the non-intrusive measuring technology of particle image velocimetry (PIV). According to the deformation fields obtained at the peak point, the failure modes of the uplift anchor plates in sand were identified. The results show that at the peak point, the displacement of the soil at the upper part of the anchor plates is large in the center and small at the both sides, and an inverted trapezoid of the displacement fields is observed. Two symmetrical shear bands are formed along the two sides of the anchor plates. They are obliquely upward and extend to the ground surface. The shear dilation is also observed in the shear bands.

Key words: anchor plate; PIV technology; failure mode