

文章编号:1671-8879(2016)02-0066-07

利用透明土模型试验的细长桩压曲研究

张婉璐^{1,2}, 陈永辉^{1,2}, 齐昌广^{1,2}

(1. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 2. 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)

摘 要:为了研究细长单桩和多桩在竖向荷载作用下的压曲变形以及非介入性地测量细长桩屈曲引起的土体变形,利用透明土模型试验并结合粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)技术,成功地对不同长宽比以及不同桩数细长桩的屈曲过程进行了试验研究。采用激光照射透明土形成散斑场,并采用单反相机拍摄关心区域的数字图像,利用 PIV 技术分析图像所获得的位移场。研究结果表明:单桩情况下,桩上下端发生反方向的屈曲变形;多桩条件下,桩下部存在一定的嵌固深度,上部桩身弯曲形式为半个周期的正弦函数;随着长宽比的增加,产生最大横向位移的点不断上移,但是对上半部分桩屈曲变形的范围影响不大;无论在单桩还是多桩条件下,下部土体的水平抗力大于上部土体,从而导致了最大横向位移发生在桩的上半段。

关键词:岩土工程;细长桩;屈曲;透明土;粒子图形测速

中图分类号:TU411 **文献标志码:**A

Research on buckling of slender pile based on transparent soil model test

ZHANG Wan-lu^{1,2}, CHEN Yong-hui^{1,2}, QI Chang-guang^{1,2}

(1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China;
2. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of
Education, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

Abstract: In order to investigate the buckling of single and multiple slender piles under vertical loading and intrusively measure the soil deformation caused by pile buckling, a experimental study on buckling of slender piles with different length-width ratios and pile numbers was successfully carried on based on transparent soil model test combining the technology of particle image velocimetry (PIV). The speckle field was formed by projecting laser to the transparent soil model. Digital images of the region of interest were recorded using a SLR camera. PIV was employed to obtain the generated displacement fields through analyzing the image. The results show that the buckling deformation of slender pile displays the full wave in case of single pile, and half wave in case of multiple piles. The bending mode of upper pile displays sine function in half period. The maximum lateral displacement point goes up with the increasing of the length-width ratio which shows little impact on buckling deformation range of upper pile. No matter in the case of single pile or multiple piles, lateral resistance in lower part is greater than that in upper parts, which leads to location of maximum lateral displacement in upper part. 1 tab, 7 figs, 25 refs.

收稿日期:2015-08-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51178160);2014 年度江苏省高校“青蓝工程”项目

作者简介:张婉璐(1991-),女,安徽蚌埠人,工学博士研究生,E-mail:zw1114@126.com。

Key words: geotechnical engineering; slender pile; buckling; transparent soil; particle image velocimetry

0 引 言

在桥梁、路基、边坡等工程中越来越多地使用细长桩,产生了大量与桩屈曲相关的工程问题。国际上规定,当桩周土体不排水抗剪强度 $C_u < 10$ kPa 时,应考虑屈曲;当桩直径小于 30 cm 时,土体不排水抗剪强度 $C_u < 10$ kPa 应考虑屈曲,因此研究桩屈曲问题是重要的工程研究课题之一。Shields 通过对桩径 152 mm 内插小直径钢筋的微型桩试验研究桩的屈曲,认为完全埋入桩不可能发生屈曲的情况是不准确的^[1];Shanker 等对可液化土中的桩进行屈曲临界荷载计算,结果表明可液化土的深度、土体液化时强度的衰减、长细比、桩刚度及桩端承载力对桩的屈曲有重要影响^[2];姚文娟等应用扰动法和变分法推导得出超长嵌岩桩初始后屈曲过程中的稳定与桩侧土抗力模式、桩土刚度比及桩身埋置率等参数有关^[3-5];Norbert 等针对细长桩研究其在软土中的屈曲^[6]。可以看出,大量的研究集中在使用一系列计算方法来分析桩基的屈曲,但是由于试验设备有限以及计算方法不够完善,影响了结果的精确度。透明土的研究应用,可以得到一个直观完整的桩屈曲变形,并且能进一步获得桩周土体扰动变形,对工程的发展有很重要的影响。

随着 20 世纪 90 年代透明土的出现及其在岩土工程物理模拟试验中的应用,克服了上述难题,并使得观测内部土体和土体内部构筑物的变形成为可能^[7-12]。透明土是由透明的固体颗粒和折射率相匹配的孔隙溶液组成,Iskander 等主要采用无定形硅作为固体颗粒,采用矿物油和正链烷烃溶剂作为孔隙溶液^[9,11-13];Ezzein 等近年发展了一种新的透明土,由熔融石英、Krystol40 和 Puretol7 组成^[14];Guzman 等利用熔融石英和蔗糖溶液制成了最新一代的透明土^[15];Stanier 等在提高透明土模型精度方面也做了研究^[16]。目前,透明土已被用来研究一些岩土工程中的机理问题,如 Welker 等对其水力学性能做了研究^[8];Mannheimer 等对其渗透性做了相关研究^[17];Iskander 等基于透明土模型对桩周土体变形进行了研究^[18-19]。为了研究透明土体-结构物间的相互作用,Sadek 等发展了一个非介入测量透明土内部变形的系统,在该系统中,使用激光面照射透明土模型形成散射光斑^[20]。

利用数码相机近距离拍摄透明土-结构物相互作用过程中散射光斑的变化过程,采用粒子图像测

速软件对拍摄的数字图像进行分析可获得透明土-结构物相互作用的位移场。本文基于透明土模型试验,获得了长宽比分别为 60 和 100 的细长单桩和多桩在竖向荷载作用下的屈曲变形,并利用 PIV 技术非侵入测量了细长桩压曲引起的周围土体变形。

1 透明土模型试验

1.1 透明土的配制

本文采用的固体颗粒为玻璃砂,相对密度为 2.2;孔隙溶液采用白油和正十二烷在 12 ℃下按照质量比 1:2.9 混合而成。透明土的详细配置过程如下。

(1)分别测量出白油和正十二烷的物理性质,具体见表 1,由 28%的正十二烷与 72%的白油组成与玻璃砂折射率相匹配的溶液,其折射率为 1.458 5。由于折射率受温度的影响,所以在配置过程中还需不断测量混合液的折射率来调整其折射率,以达到与熔融石英最完美的匹配效果。当折射率小于 1.458 5,则用胶头滴管少量滴加白油;反之,当混合液的折射率大于 1.458 5,则添加正十二烷,不断测量直至折射率达到要求的数值。配置稍高于 1/2 桩长的混合溶液。

(2)取高 260 mm、宽 130 mm 的透明模型槽,将桩用桩头固定装置平行放置在距模型槽边约 60 mm 的位置。

(3)将玻璃砂轻轻撒入溶液中,直至固定装置下端 2~3 mm 处,防止溶液发生过大的搅动,产生大量的气泡影响透明土的透明性。

表 1 白油和正十二烷的特性

Tab. 1 Properties of white oil and kazumasa dodecane

特性	白油	正十二烷
折射率(12 ℃)	1.472	1.425
密度/(g·cm ⁻³)	0.848	0.736

配置的透明土的性质参照孔纲强等对透明土性质所做的试验研究^[21],透明土的相对密度为 70%,相对密度为 2.186。

1.2 模型桩和试验设备

模型所采用的桩材料是矩形有机钢化玻璃,桩长分别为 120 mm 和 200 mm,截面长 6 mm,宽 W 为 2 mm,桩的长宽比分别为 60、100。透明土配置完成后将打印好的字母表贴在模型槽后,观测透明土的透明性。在模型槽外壁设置控制点,用于 PIV 对拍摄图片的计算处理。配好完整的透明土模型如下页图 1 所示,模型试验装置如下页图 2 所示。

1.3 试验内容和过程

试验共进行 8 组,编号为 T1~T8,加载过程需

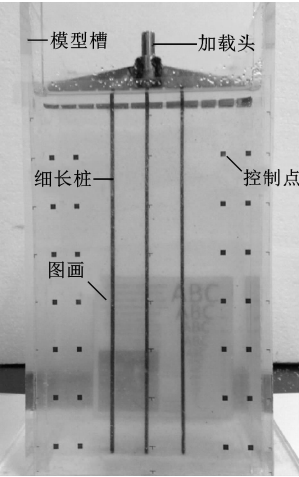


图 1 透明土中放置长宽比为 100 的模型桩

Fig. 1 Model piles in transparent soil with length width ratio of 100

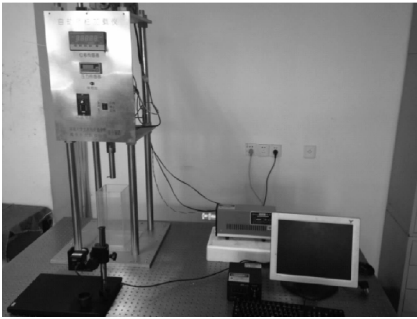


图 2 模型试验装置

Fig. 2 Model experimental setup

在黑暗环境中进行,氦氖激光束通过线发生器透镜,以一定的速度传播到激光板上,从而产生一个明亮的透明土模型散斑场。连续拍下加载开始到结束时桩的屈曲图片,其中每加载约 0.5 s 拍摄 1 次。对于 T1~T4 使用的是长宽比为 60 的模型桩,T5~T8 使用的则是长宽比为 100 的模型桩,其中, T1、T2、T5、T6 为单桩试验, T3、T4、T7、T8 为多桩试验。

PIV 是由 White 等发展而来的^[22],就是采用数字化摄影与数字图像相关法来计算土体变形,从数字图像中捕获土单元体的轨迹。模型槽前面粘贴一张带有控制点的透明幕布,在 Geo-PIV 下,这些控制点能够提供转换参数,使得图像空间坐标转化成目标空间坐标。

2 试验结果分析

2.1 模型桩的屈曲曲线

以 T2、T3、T6、T8 为分析对象,将坐标 X 、 Z 归一化处理,当上部加载位移达到 $2W$ (4 mm) 时,模型桩的屈曲曲线见图 3、图 4。对比图 3、图 4 中的(a)、

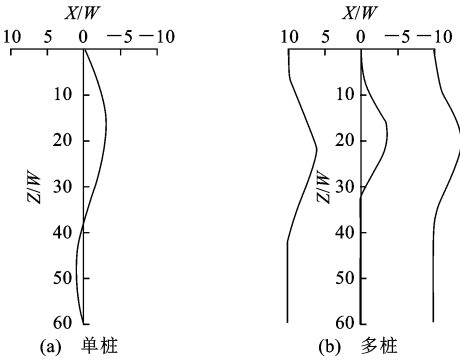


图 3 长宽比 60 的模型桩完整屈曲曲线

Fig. 3 Complete curves of model piles buckling with length-width ratio of 60

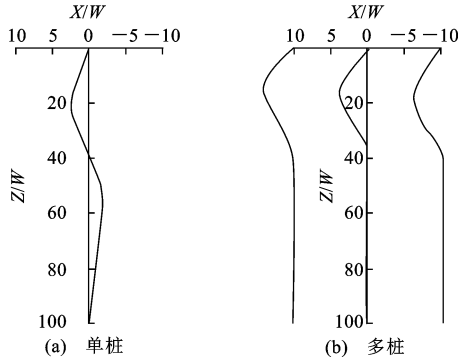


图 4 长宽比 100 的模型桩完整屈曲曲线

Fig. 4 Complete curves of model piles buckling with length-width ratio of 100

(b)可知,单桩情况下,桩上下端发生反方向的屈曲变形,变形均为半个周期的正弦函数,且上端的最大横向位移和屈曲变形均大于下端。在多桩条件下,由于土体深处水平抗力远大于单桩的,使得下部桩身发生了嵌固作用,上部桩身弯曲形式为半个周期的正弦函数形式。

对比图 3 和图 4 可知,随着桩的长宽比的增加,单桩下屈曲拐点的深度大约从 $37W$ 变为 $40W$,而深度与桩身长度的比例由 $3/5$ 变为 $2/5$,发生最大横向位移的位置深度由 $18W$ 变为 $21W$,从而可以看出,上半波长的变化其实并不是太大,屈曲变形的不同集中在下半段波长。对于多桩也有类似的情况,平均嵌固长度由 $21W$ 变为 $60W$ 。可以得出,长宽比的改变对于屈曲变形的上半段的半个周期正弦函数影响不是很大,其主要的不同集中在下半段的屈曲变形以及嵌固长度。对于每组试验其屈曲方向并没有规律性,是随机的。

2.2 桩周土体的位移变化

由于桩上端在桩头装置的作用下处于固接状态,不产生屈曲变形,因此其周围土体也几乎不发生

变形。

长宽比为 60 的桩周土体产生的变形如图 5 所示,随着竖向荷载位移由 $0W$ 到 $1W$ 再到 $2W$,土体由轻微的位移移动变成剧烈的隆起现象。

观察图 5(b)可知,在屈曲桩的拐点附近,土体呈漩涡状移动,类似土体绕着拐点做圆形滑动。在漩涡上部土体,桩右侧(受拉)方向土体处于主动状态,土体累计位移向量的方向大约为 $-10^\circ \sim 90^\circ$,尤其在桩的右侧,土体表面的方向角度很大,为 $70^\circ \sim 90^\circ$,所以会产生明显的隆起现象。而左侧(受压)方向则处于被动状态,土体累计位移向量的方向大约为 $-30^\circ \sim -60^\circ$ (土体累计位移向量沿水平向做逆时针旋转为正,顺时针旋转为负);而漩涡下部土体桩左侧(受拉)处于被动状态,右侧(受压)处于主动状态。由图 5(d)可以看出,右桩的右侧土体处于主动状态,在 $27W$ 深度以上方向变化为 $0^\circ \sim 90^\circ$,土体表面也发生明显的隆起现象。在 $27W$ 以下,土体会有半圆的滑弧移动。2 根桩之间土体累计位移向量的方向变化幅度也很大,也发生隆起现象。

长宽比为 100 的桩周土体则发生如下页图 6 所示的位移变形。同图 5 一样,单桩的周围土体也是一侧发生隆起,分布规律与其相似,且在拐点周围也发生

螺旋状旋转变形,多桩的土体位移变形也类似于图 5。

2.3 位移等值线

为了量化屈曲模型桩的土位移,模型桩周土累积位移量如下页图 7 所示,其中模型桩由虚线表示。

对于图 7(a)可知,越靠近桩,土的位移就越大,离桩距离越远位移不断减小,说明桩屈曲对土体的扰动程度随着离桩距离的增大不断减弱,且被动状态区土体的累积位移要大于主动状态区的位移,而在土体表面远离桩的土体累计位移达 0.8,靠近桩的位移值则为 0.1,这是因为桩头固定导致桩头附近土体变形很小。在桩的上部最大挠度附近区域土体产生了最大累积位移 1.4,而桩下部最大挠度附近土体的累积位移为 0.4,并且可以很明显地看出,上部桩周土体位移大于下部桩,所以验证了拐点以上的土体变形大于拐点以下的变形。从云图的轮廓线看出,主动状态的土体变形范围大于被动状态的土体变形范围。

在图 7(b)中,可以很直观地看出桩的下端区域由于嵌固作用,土体没有产生变形。由于 2 根桩之间的距离不大,所以桩与桩之间土体变形具有一定的规律,如图所示,可以发现土体等值累积位移线分布比较规律,多数趋于横向分布。由于桩屈曲产生

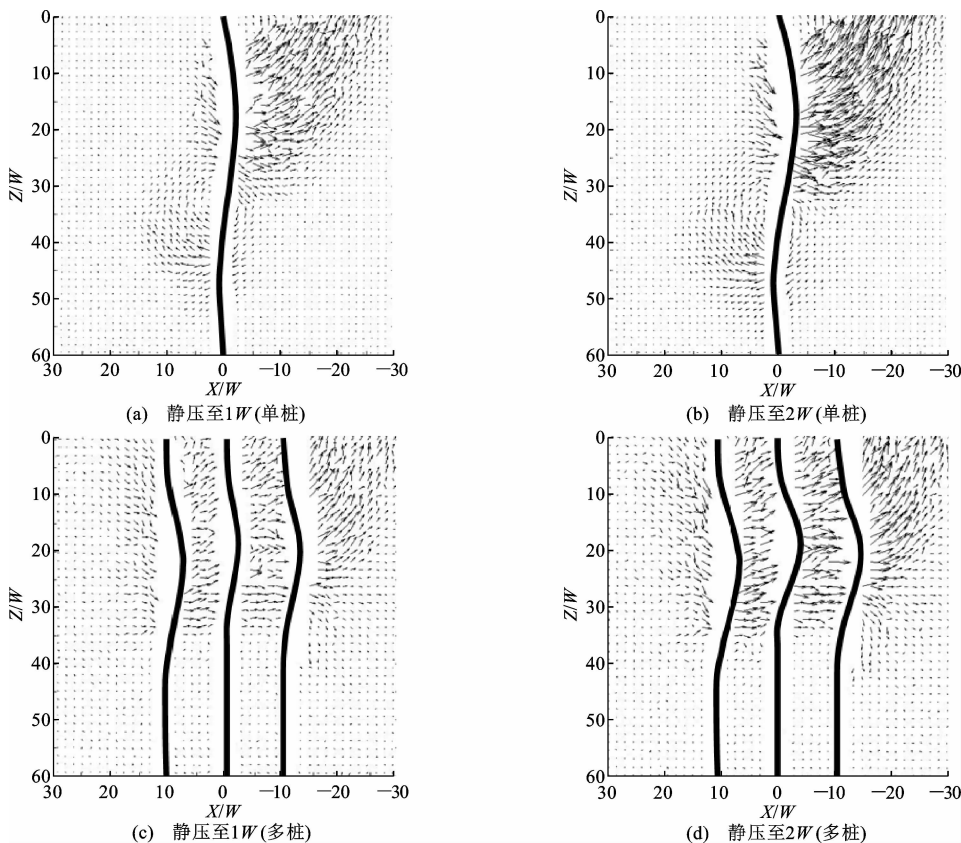


图 5 长宽比 60 的桩从 $0W$ 静压至 $1W$ 、 $2W$ 所致屈曲变形引起的累积位移向量

Fig. 5 Cumulative displacement vectors caused by piles buckling with length-width ratio of 60 as jacked from $0W$ to $1W$, $2W$

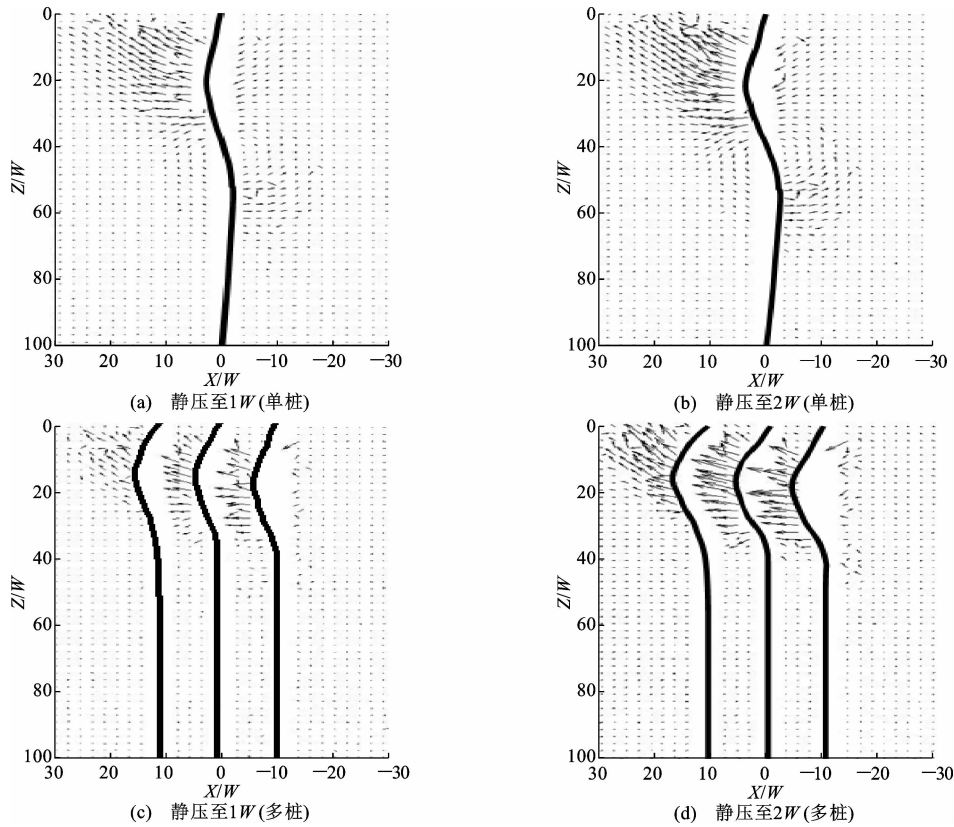


图 6 长宽比 100 的桩从 0W 静压至 1W、2W 所致屈曲变形引起的累积位移向量

Fig. 6 Cumulative displacement vectors caused by piles buckling of length-width ratio of 100 as jacked from 0W to 1W, 2W

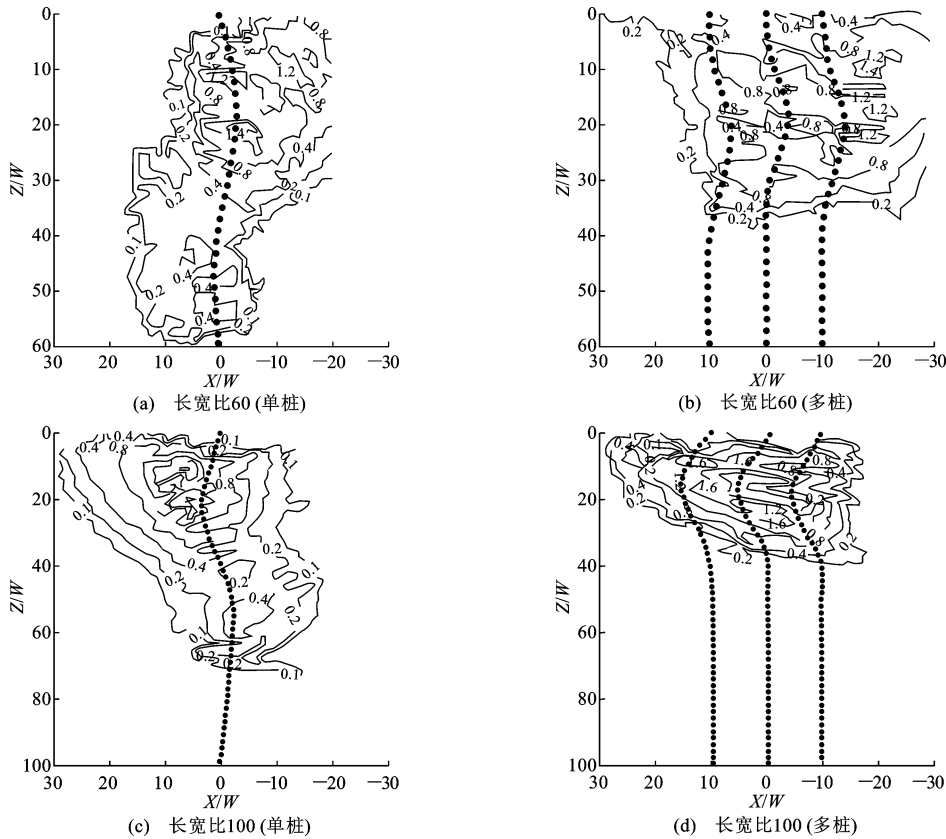


图 7 长宽比 60、100 的桩从 0W 静压至 1W 所致屈曲变形引起的总体位移等值线

Fig. 7 Total displacement contours caused by piles buckling of length-width ratio of 60 and 100 as jacked from 0W to 1W

的挤土效应,使得云图的位移等值线水波似的向外扩散。由于在左桩的左侧表面土体有0.2的位移,对比图5(d)可知,此时土体位移向量的方向约为 $-45^{\circ}\sim-80^{\circ}$,说明土体会有一定的下沉。

对于图7(c),从数值上可以发现土位移变形幅度要小于图7(a),其最大累积位移为1.2,而图7(a)中最大累积位移为1.4。尽管在桩周附近两者的位移变化值差距不大,但是在隆起的方向其位移值要比图7(a)中小,并且可以很直观地看到发生嵌固作用的桩周土体没有位移的变化。其主动状态的表面土体发生隆起,被动状态的表面土体发生下沉。

图7(d)的位移等值线图形像图7(b)一样类似于波纹向外部扩散,结合图7(d)位移向量的方向,可以验证得出左桩与中桩、右桩与中桩之间的表面土体都会发生一定程度的隆起现象。

3 透明土模型试验的局限

透明土的发展给岩土工程带来一个新的研究视角,透明土辅以PIV技术,能够直观地展现透明土中桩体的变形曲线。因此,配置优质透明土以最大程度地模拟现实土性是试验的基础,与此同时,获取图片的质量也会在一定程度上影响分析的结果。但是透明土是人工配置的土体,与现实中复杂土体存在一定的差异。研究表明,在同一密度下,低围压下透明砂土能很好地模拟自然砂土的性质,而在高围压下,具有一定的差异^[23]。使用PIV技术需要测量系统有一个很高的精度、准确度以及分辨率,在激光灯切片过程中需要得到高质量的散斑,使得在图像处理中能够实现图像坐标向现实坐标最大精度转换。影响试验结果的因素有很多,如透明土的性质、拍摄图像的质量、相机放置的角度误差、PIV分析中网格的划分等。但是透明土作为岩土工程研究的一个方向,它能解决很多问题^[24-25]。

本文是在小模型试验的基础上,研究基于透明土下嵌入型方形截面桩在竖向荷载作用下,桩身产生的屈曲以及土体变形。试验中配置的透明土有很高的透明性且与现实砂土的性质较吻合,拍摄的屈曲图像质地良好,散斑清晰,网格划分符合要求,因而能够很好地模拟屈曲变形。

4 结 语

(1)单桩情况下,桩上下端发生反方向的屈曲变

形,变形均为半个周期的正弦函数,且上端的最大横向位移及波长大于下端,屈曲变形要大于下端。桩周主动状态土体发生隆起现象,被动状态土体发生下沉现象。而在拐点附近土体产生漩涡状的位移变形,在最大挠度附近会产生最大土体累积位移。

(2)多桩条件下,由于在其桩下部土体存在较大水平抗力,从而产生了一定的嵌固深度,上部桩身弯曲形式为半个周期的正弦函数形式,2根桩之间土体也发生隆起现象。

(3)随着桩长宽比的增加,对最大横向位移所对应点的位置、屈曲变形上半段的半个周期正弦函数影响不是很大。桩周土体的累积位移基本不变,而远离桩体土体位移明显减小。

(4)无论在单桩还是在多桩条件下,下部土体的水平抗力大于上部土体,从而导致了最大横向位移发生在桩的上半段。土体的侧向移动都会发生隆起现象,并且在桩的上部,桩受拉侧处于被动状态,受压侧处于主动状态。

(5)透明土由于其特有的透明性能够让研究者很直观地观察土体中桩或者其他建筑构件的变形,并且随着现代光学的发展越加成熟以及图像处理越加清晰,越来越能够模拟天然土性的透明土被人工合成,对于透明土在岩土工程中的研究更加地趋于精确,对于健全透明土的相关研究理论也更加有益。

参考文献:

References:

- [1] SHIELDS D R. Buckling of micropiles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(3):334-337.
- [2] SHANKER K, BASUDHAR P K, PATRA N R. Buckling of piles under liquefied soil conditions[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2007, 25(3):303-313.
- [3] 姚文娟,仇元忠,程泽坤. 超长嵌岩桩初始后屈曲性状分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5):738-742.
YAO Wen-juan, QIU Yuan-zhong, CHENG Ze-kun. Initial post-buckling analysis for super-long rock-socketed piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(5):738-742. (in Chinese)
- [4] 龚成中,何春林,戴国亮. 坝陵河大桥深嵌岩桩竖向承载力试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(4):43-47.
GONG Cheng-zhong, HE Chun-lin, DAI Guo-liang. Experiment on vertical bearing capacity of deep rock-

- socketed pile for baling river bridge[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2011, 28(4): 43-47.
- [5] 邓祥辉,张永杰,房海勃.后压浆钻孔灌注桩承载力分析与试验研究[J]. *建筑科学与工程学报*, 2015, 32(2): 58-64.
DENG Xiang-hui, ZHANG Yong-jie, FANG Hai-bo. Bearing capacity analysis and experiment research on post-grouting bored piles[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2015, 32(2): 58-64. (in Chinese)
- [6] NORBERT V, STEFAN V, CHRISTIAN K. Buckling of slender piles in soft soils[J]. *Bautechnik*, 2009, 86(S1): 98-112.
- [7] ISKANDER M, LA J, OSWALD C, et al. Development of a transparent material to model the geotechnical properties of soils[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1994, 17(4): 425-433.
- [8] WELKER A L, BOWDERS J J, GILBERT R B. Applied research using a transparent material with hydraulic properties similar to soil[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1999, 22(3): 266-270.
- [9] ISKANDER M G, LIU J Y, SADEK S. Transparent amorphous silica to model clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128(3): 262-273.
- [10] LIU J Y, ISKANDER M G, SADEK S. Consolidation and permeability of transparent amorphous silica[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2003, 26(4): 390-401.
- [11] STANIER S A. *Geotechnical modeling using a transparent synthetic soil* [D]. Sheffield: University of Sheffield, 2006.
- [12] 曹兆虎,孔纲强,周航,等.极限荷载下X形桩和圆形桩破坏形式对比模型试验[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(12): 10-15.
CAO Zhao-hu, KONG Gang-qiang, ZHOU Hang, et al. Contrast model tests on failure modes of X-section pile and circle pile under ultimate load[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(12): 10-15. (in Chinese)
- [13] SADEK S, ISKANDER M G, LIU J Y. Geotechnical properties of transparent silica[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(1): 111-124.
- [14] EZZEIN F M, BATHURST R J. A transparent sand for geotechnical laboratory modeling [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2011, 34(6): 590-601.
- [15] GUZMAN I L, ISKANDER M G, SUESCUN-FLOREZ E, et al. A transparent aqueous-saturated sand surrogate for use in physical modeling[J]. *Acta Geotechnica*, 2014, 9(2): 187-206.
- [16] STANIER S A, BLACK J A, HIRD C C. Enhancing accuracy and precision of transparent synthetic soil modelling[J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2012, 12(4): 162-175.
- [17] MANNHEIMER R J, OSWALD C J. Development of transparent porous media with permeabilities and porosities comparable to soils, aquifers, and petroleum reservoirs[J]. *Ground Water*, 1993, 31(5): 781-788.
- [18] ISKANDER M G, LIU J Y. Spatial deformation measurement using transparent soil[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2010, 33(4): 314-321.
- [19] NI Q, HIRD C C, GUYMER I. Physical modelling of pile penetration in clay using transparent soil and particle image velocimetry [J]. *Géotechnique*, 2010, 60(2): 121-132.
- [20] SADEK S, ISKANDER M G, LIU J Y. Accuracy of digital image correlation for measuring deformations in transparent media[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2003, 17(2): 88-96.
- [21] 孔纲强,刘璐,刘汉龙,等.玻璃砂透明土变形特性三轴试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(6): 1140-1146.
KONG Gang-qiang, LIU Lu, LIU Han-long, et al. Triaxial tests on deformation characteristics of transparent glass sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(6): 1140-1146. (in Chinese)
- [22] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry[J]. *Géotechnique*, 2003, 53(7): 619-632.
- [23] 吴明喜.人工合成透明砂土及其三轴试验研究[D].大连:大连理工大学,2006.
WU Ming-xi. Study on transparent synthetic sand and its triaxial test[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [24] GUDEHUS G, NVBEL K. Evolution of shear bands in sand[J]. *Géotechnique*, 2004, 54(3): 187-202.
- [25] 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.