

静压桩沉桩对既有桩桩周土影响的 PIV 试验研究^{*}

姜彤, 李博, 杨晓燕, 张俊然

(华北水利水电大学 河南省岩土力学与结构工程重点实验室, 郑州 450045)

摘要:基于粒子图像测速(PIV)技术,用自行设计的静压桩自动沉桩模型试验系统,针对单桩和既有桩侧新桩沉桩过程中桩周土体的形变场进行一系列对比试验研究。在沉桩过程中用高速工业相机和 Davis8.0 采集软件连续拍摄观测面上的图像,同时用 PIVview2C 图像处理软件得到位移场云图。试验结果表明:(1)单桩、既有桩侧新桩的压桩力 P 与沉桩深度 H 的关系曲线具有相似的形态特征;既有桩侧(桩间距为 $2d$ 和 $4d$, d 为桩径)新桩的 P - H 曲线比单桩的高;由于受既有桩体限制的影响较大,新桩($2d$)的 P - H 曲线比新桩($4d$)的更高些。(2)单桩和新桩($4d$)沉桩时,总位移场在桩端两侧呈对称椭圆环形分布;剪切应变场沿桩两侧基本呈对称蝶型分布。而新桩($2d$)沉桩时,总位移场和剪切应变场在桩端两侧不对称分布显著,沉桩左侧位移场影响范围较大。(3)单桩和新桩($4d$)沉桩时,总位移场的横、竖向最大影响范围基本一致;而新桩($2d$)沉桩时,由于受到已有桩体限制影响较大,导致总位移场的横、竖向最大影响范围有所减小。单桩和新桩($2d$)沉桩时,剪切应变场的横、竖向最大影响范围基本一致;而新桩($4d$)沉桩时,剪切应变场的横、竖向最大影响范围有所增加。研究成果对于进一步明确沉桩挤土效应内在机理和解决相关的岩土工程问题均具有重要的意义。

关键词:PIV;模型试验;沉桩;位移场;应变场

中图分类号:TU43

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)05-1185-10

Experimental Study on the Influence of Pile Driving by Static Pressure Pile on Soil near the Existing Pile Using PIV Technique

Jiang Tong, Li Bo, Yang Xiaoyan, Zhang Junran

(Henan Province Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics and Structural Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, P.R.China)

Abstract: A modeling test system based on PIV (particle image velocimetry) was developed for studying the deformation characteristic of single pile and the new pile of the existing pile side driving in sand. During the whole process, a CCD (charge coupled device) high-speed industrial camera and Davis 8.0 series of acquisition software were used to capture images of the soil deformation around piles, and the PIVview2C image processing software was used to obtain the deformation field distribution of the soil around piles. The test results show that: (1) the P - H curves of the single pile and the new pile of the existing pile side ($2d$ and $4d$) have a similar morphological characteristic. The P - H curves of the new pile ($2d$ and $4d$) are higher than the single pile's, and the P - H curve of new pile($2d$) is higher than the new pile($4d$)'s due to the embedded pile limited is larger. (2) In the process of single pile and new pile($4d$) driving, the total displacement fields symmetrically distributed on both sides of the pile tip, and it presents the oval- ring shaped. The shear strain fields symmetrically distribute on both sides of the pile,

^{*} 收稿日期:2017-12-05(修改稿)

作者简介:姜彤(1973-),男,浙江天台人,博士,教授,主要从事岩土力学及地学信息研究。

E-mail:jiangtong@ncwu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金(41602295,U1704243);华北水利水电大学高层次人才基金项目(201501001)

and its presents the butterfly-shaped. In the process of the new pile(2d) driving, the total displacement and shear strain fields significantly asymmetric distribute on both sides of the pile tip, and the fields is larger on the left side of the pile tip. (3) In the process of single pile and the new pile(4d) driving, the maximum impacted scopes of the total displacement fields are basically the same in the vertical and horizontal direction. But in the process of new pile(2d) driving, the maximum impacted scopes of the total displacement fields has decrease somewhat due to the influence of existing pile limit is bigger. In the process of single pile and the new pile(2d) driving, the maximum impacted scopes of the shear strain fields are basically the same in the vertical and horizontal direction. But in the process of the new pile(4d) driving, the maximum impacted scopes of the shear strain fields has increase. The study is expected to contribute to disclose the mechanisms of compaction effects and provide the solution to the problem of related geotechnical engineering.

Keywords: PIV; modeling test; pile driving; displacement field; strain field

0 引言

桩体沉桩过程中会对桩周土体产生变形(如不均匀沉降、地表隆起等),对邻近地下建筑物、构筑物等产生影响,导致重大的经济损失。因此,研究沉桩过程中桩周土体形变规律是非常必要的,对于沉桩施工控制和挤土效应的评价等问题均具有重要的工程意义。

国内外学者已对沉桩引起的桩周土体变形进行了大量的研究。关于理论研究,龚晓南等^[1]对静压桩挤土效应中的若干力学问题进行总结。Sagaseta^[2]在圆孔扩张理论基础上针对实际情况研究了静压沉桩的沉桩效应,并建立了相应理论模型。李镜培等^[3]基于柱孔不排水扩张后桩周土体应力与孔压基本解答,提出了预测新、旧桩荷载的荷载沉降关系的理论模型。关于模型试验研究,陈文等^[4]对静压桩沉桩的挤土效应进行了模型试验研究。徐建平等^[5]用模型试验研究静压桩沉桩过程中位移随深度和水平向的变化规律。周建等^[6]在砂土中静压桩沉桩过程试验研究与颗粒流模拟中,根据宏细观力学响应机理,研究了不同沉桩阶段的桩周土体位移场。张建新等^[7]基于模型试验的静压群桩引起的土体变形分析,研究了群桩挤土效应。曹兆虎等^[8]开展了基于PIV技术的沉桩过程土体位移场模型试验,研究了不同沉桩深度、桩-土摩擦系数和桩尖形式下的桩周土体位移场。Chen等^[9]基于PIV研究了不同沉桩速度对桩周土体的水平位移场和竖向位移场的影响。袁炳祥等^[10]基于PIV对静压桩受到水平力作用时桩周土体形变场进行测量。Kong等^[11]对桩体上拔时桩周土体位移场进行了系统的研究。姜彤等^[12]利用PIV技术对锚板上拔过程中周围土体形变场进行

测量分析。还有学者进行了现场试验,如Yang等^[13]对静压桩进行实测研究,得到了静压桩沉桩的一些特性,张永刚等^[14]和雷华阳等^[15]进行了管桩挤土效应的现场试验。

综上所述,PIV技术在可视化模型试验研究中得到了一定的应用,但基于PIV技术对沉桩过程中桩周土体形变场的研究仍未完善,尤其针对静压桩沉桩过程中与桩侧既有桩体的相互影响的研究甚少。因此,本文基于PIV技术对静压桩在邻近有无既有桩体时桩端沉入土体过程中桩周土体的形变场进行了一系列对比试验研究,以期进一步明确沉桩挤土效应内在机理,为解决相关岩土工程问题提供试验依据。

2 试验方案

2.1 试验设备

试验设备由加载系统和PIV照片采集系统组成,如图1所示。试验的加载系统为美国迈斯特公司研制的CMT4000型电子万能试验机,它由两部分组成加载设备和数据采集系统;对荷载、变形、位移的测量和控制具有较高的精度和灵敏度,可以进行等速加载、等速变形、等速位移的自动控制。照片采集所用的PIV系统装置,包括泛光灯、CCD高速相机、Davis8.0系列软件及PIVview2C等后处理软件。试验拍摄范围为38.5 cm×38.5 cm。

试验所用模型箱为上部开口的长方体,由钢化玻璃组成外部结构。上部开口外边界平面开口外边界平面尺寸为80 cm×58 cm,壁厚1.2 cm,高度为60 cm。箱体上部设有加荷设备,内装有传感器,其承载能力满足试验要求。模型桩为半模桩,采用钢板制作,桩长 $L=30$ cm,桩径 $d=3$ cm,桩端形式为平头。

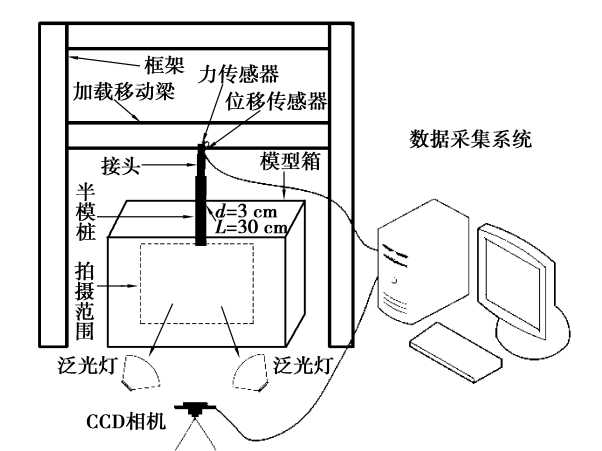


图 1 试验装置示意图

Fig.1 The schematic diagram of test apparatus

2.2 土样参数

试验所用的砂样是福建标准中级砂,其粒径范围为 0.5~1.0 mm,不均匀系数 $C_u=1.4$,曲率系数 $C_c=1.06$,有效粒径 $d_{10}=0.57\text{ mm}$,相对密度 $D_r=68\%\sim73\%$,最大干密度为 1.70 g/cm^3 ,最小干密度为 1.407 g/cm^3 ,具体的物理力学性质指标如表 1 所示。

表 1 砂土的物理力学性质指标

Table 1 Physico-mechanical properties of the sand			
相对密度 G_s	最小干密度 $\rho_{\min}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	最大干密度 $\rho_{\max}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$
2.65	1.407	1.70	37

2.3 模型试样的制备

首先称出砂土的质量,在模型槽底部先铺上 5 cm 厚砂土作为垫层,然后将标准砂分层装入使达到预定模型箱设计深度,填砂时控制一定的落高,并分层压实,每层厚度 5 cm,以保证整个试样密度一致。控制砂土重度 γ 为 16.0 kN/m^3 左右,相对密实度 D_r 为 0.72 左右。在试验开始前,试样需静置 24 h,以使土体内部的应力分布均匀。

2.4 试验步骤

(1) 首先将桩固定在连接杆上,并用计算机程序控制桩体下沉至标准砂的上表面,并使其直边与模型槽壁紧贴,保证压力传感器另一端与电脑连接好。(2) 把相机移动到模型箱前 1.2 m 处,调节焦距,使相机图像清晰;调节相机的高度和左右移动螺旋,使相机处于最佳拍照状态。调节上下旋转螺旋使相机镜片与模型箱拍摄面相平行,最终使相机拍摄效果最佳。(3) 检查 PIV 测量系统和加载系

统电源是否连接好,启动这两个设备,确保电脑和加载装置 USB 接口连接好,对相机进行标定,标定完成后再设置 PIV 测量系统的拍照频率和照片数目,同时设置加载设备的加载速度、加载位移等各项采集参数。为有利于沉桩过程图像的对称分布,桩体的加载速率选为 60 mm/s 。(4) 根据力-位移图像的关系,选择某一个阶段开始时刻和结束时刻对应的图片,用 PIVview2C 和 tecplot 软件对变形场分析分别生成云图和等值线图。

3 桩体沉桩过程 P - H 曲线对比分析

如图 2 所示为单桩、距既有桩体 $2d$ 和 $4d$ 桩间距的新桩的压桩力 P 与沉桩深度 H 关系曲线。3 条 P - H 曲线具有相似形态特征;既有桩侧新桩 ($2d$ 、 $4d$) 的曲线均比单桩的曲线高,由于受到既有桩体限制的影响较大,新桩 ($2d$) 的曲线比新桩 ($4d$) 的曲线更高些。根据 P - H 曲线变化特征将其分为 3 个阶段,第一阶段压桩力与沉桩深度的关系均呈线性。第二阶段随沉桩深度的增加压桩力增加速率明显增加,其中新桩 ($2d$) 沉桩时由于受到既有桩的阻挡作用,新桩 ($2d$) 沉桩时的第二个阶段比其他两种情况的时间长。第三阶段随沉桩深度增加,压桩力的增加速率有所减小,也就是说在这个阶段压桩力增加很小时却可产生很大位移,上述试验现象与 Kong 等^[10]的试验结果相一致,可称为破坏阶段。

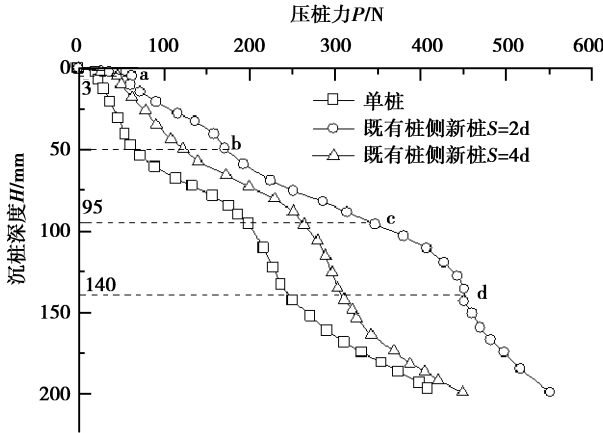


图 2 压桩力与沉桩深度的关系曲线

Fig.2 Relationship between the driving force of pile and the depth of pile sinking

4 单桩沉桩过程的变形场

4.1 单桩沉桩过程中的总位移场

图 3(a)~(d)所示为图 2 中点 a~d 所对应的

图像。为分析压桩过程中不同阶段的变形场,选取阶段1~3为研究对象。图3所示的图像通过PIVview2C和tecplot软件处理,可得如图4所示的位移场。具体如下:从图3(a)~(b)的图像得到

位移场如图4(a)所示;从图3(b)~(c)图像可得位移场如图4(b)所示;从图3(c)~(d)图像可得位移场如图4(c)所示。

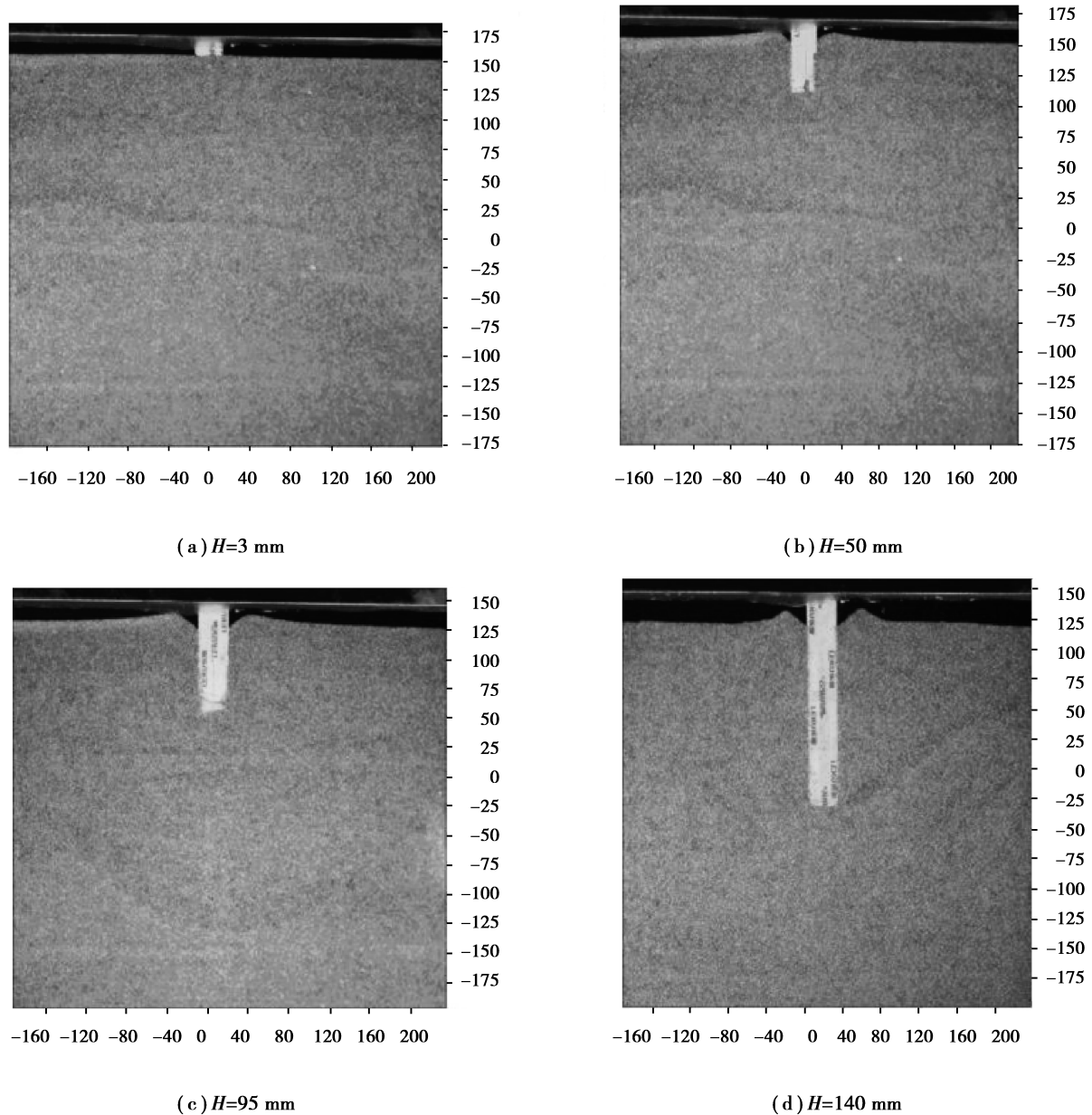


图3 不同阶段起始点所对应的图像

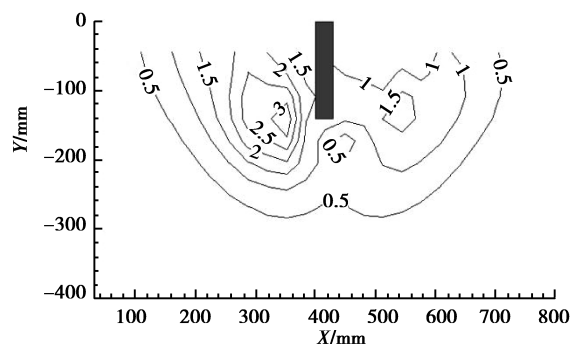
Fig.3 Images corresponding to the initial points of different stages

如图4所示,桩周土体总位移场分布规律为中间大,两边小。不同阶段图像的位移等值线形状不同。

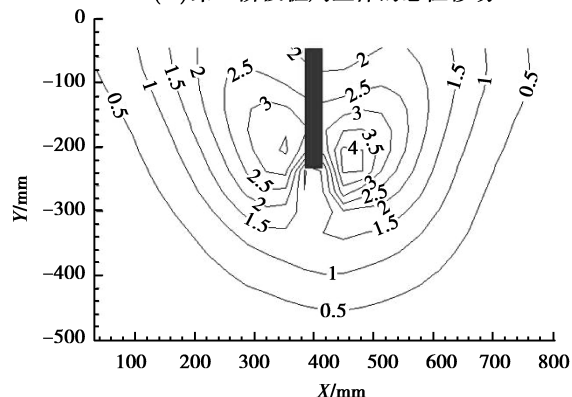
(1)当 $H=50\text{ mm}$ 时,横向的影响范围远大于竖向影响范围,横向的影响范围约为 $4.3d$,而桩端下竖向影响范围约为 $2.3d$ 。桩端的桩周土体的斜向下挤扩态势已呈现,但轮廓不明显。

(2)当 $H=95\text{ mm}$ 时,桩端土体总位移影响范围迅速增加。横向距桩中心 $1.6d$ 范围内土体位移增加不明显,并且位移在横向衰减较快。表明桩端刺入对桩端土体的影响范围逐渐稳定,横向和竖向的影响范围分别约 $6.3d$ 和 $3.8d$ 。桩端两侧近距离处逐渐形成椭圆环形,远处再逐渐贯通。

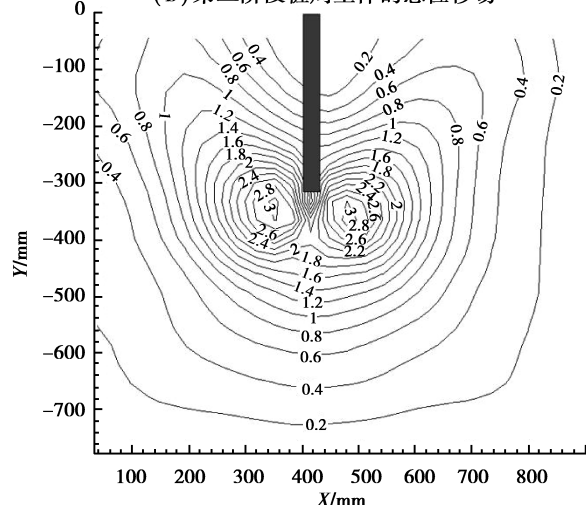
(3)当 $H=140\text{ mm}$ 时,桩端周围土体主要以斜



(a) 第一阶段桩周土体的总位移场



(b) 第二阶段桩周土体的总位移场



(c) 第三阶段桩周土体的总位移场

图4 不同阶段桩周土体的总位移场

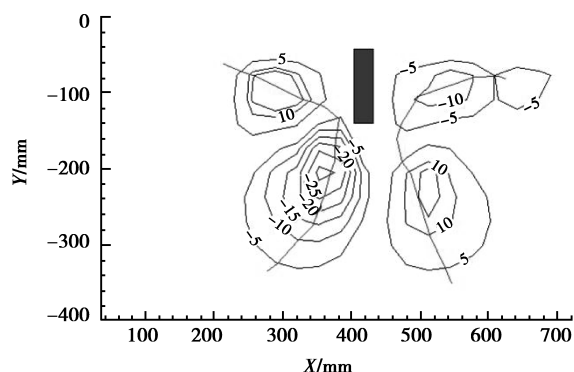
Fig.4 Displacement contours of different stages

向下挤扩为主,椭圆环状扩张态势明显稳定。两桩端外侧位移场为贯通独立椭圆环形,此阶段桩端横向和竖向的最大影响范围分别为 $6.3d$ 和 $6.7d$ 。

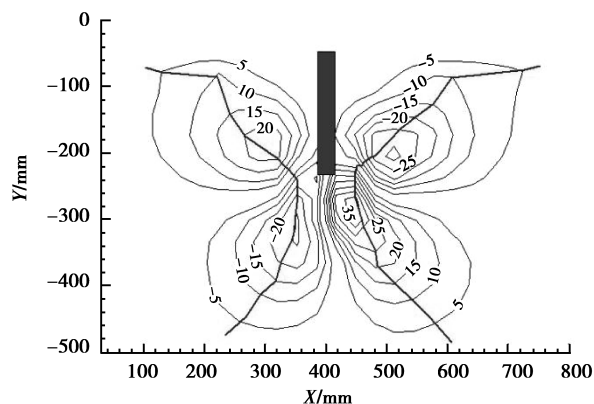
4.2 单桩沉桩过程中的剪切应变场

如图5所示为沉桩过程中不同阶段桩周土体的剪切应变场。最大剪切应变点连线基本对称,呈现不规则的双曲线形态。具体如下:

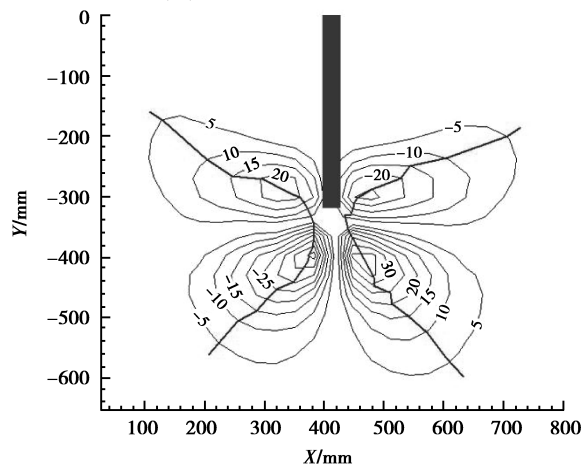
(1)当 $H=50\text{ mm}$ 时,桩端上部及端角下部逐渐出现剪应变集中,上部剪应变集中向土体表面和



(a) 第一阶段桩周土体的总位移场



(b) 第二阶段桩周土体的总位移场



(c) 第三阶段桩周土体的总位移场

图5 单桩沉桩时不同阶段桩周土体的剪切应变场

Fig.5 Shear strain contours of different stage

in the process of single pile driving

横向发展,桩端下部剪应变集中向土体深部和横向发展,其扩展速度竖向大于横向;产生的冲剪带贯通连成椭圆环形;桩端上部的剪应变场形成较疏松的椭圆环形。桩端下部剪应变扩展区域呈较密的椭圆环形。最大剪切应变点连线呈不规则的双曲线,其横向与竖向的扩展范围分别约为 $3.0d$ 和 $4.0d$ 。

(2) 当 $H=95\text{ mm}$ 时, 桩端上部及桩端角下部也逐渐出现剪应变集中, 剪应变场出现明显的横向位移, 而向土体深部发展缓慢并收敛; 桩端上部及下部的剪应变场均形成较致密的椭圆环形。最大剪切应变点连线呈开口较大的双曲线, 其横向与竖向的扩展范围分别约为 $4.7d$ 和 $4.0d$ 。

(3) 当 $H=140\text{ mm}$ 时, 随着桩端的深入剪应变场也逐渐下移, 但最大剪应变的扩展区域在横向基本不变。桩端上部及下部的剪应变场, 都形成较致密的椭圆环形。最大剪切应变点的连线形成更大的双曲线。下部椭圆环形剪应变集中带, 桩端以下界面作用区域与位移场影响范围基本吻合, 其横向与竖向的扩展范围分别约为 $4.7d$ 和 $4.5d$ 。

5 既有桩桩侧新桩 ($S=2d$) 沉桩变形场

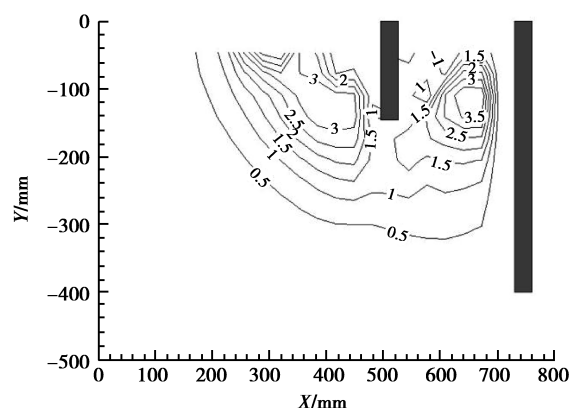
5.1 新桩 ($2d$) 沉桩时的总位移场

如图6所示为距既有桩体 $2d$ 桩间距的新桩在沉桩过程中桩周土体总位移场的分布情况, 总体由于受到既有桩体的影响, 总位移场分布不对称, 呈上大下小。其获得方法与单桩的相同。位移场从第1~2阶段逐步在桩两侧形成贯通的圆环, 总位移场横向和竖向影响范围明显增大, 在既有桩附近明显出现等值线因受到阻挡而变密, 且第二阶段既有桩右侧已形成位移等值线。总位移场从第2~3阶段桩端两侧贯通圆环显著, 尤其既有桩下部的土体不再受到既有桩的影响, 总位移场向右扩张趋势明显, 且位移等值线数值增加。具体如下:

(1) 如图6(a)所示, 当 $H=50\text{ mm}$ 时, 横向影响范围远大于竖向影响范围, 横向和竖向影响范围分别约为 $5d$ 和 $3d$ 。两桩间的位移场逐渐形成独立的椭圆环, 且两桩间的位移量较大。

(2) 如图6(b)所示, 当 $H=95\text{ mm}$ 时, 横向距桩中心 $1.6d$ 范围内土体位移增加迅速, 桩端土体的横向和竖向影响范围分别约为 $6.0d$ 和 $5.8d$ 。桩端两侧近处逐渐形成椭圆环形, 而桩端远处两侧的总位移场逐渐贯通。与第一阶段不同的是, 总位移场绕过既有桩在既有桩右侧形成位移场。

(3) 如图6(c)所示, 当 $H=140\text{ mm}$ 时, 桩端周围土体影响范围趋于稳定, 横向影响范围稍有增加, 而竖向影响范围基本未变。桩端土体的横向和竖向影响范围分别约为 $6.0d$ 和 $4.7d$ 。桩端附近位移比第二阶段的稍有增加, 既有桩右侧位移数值比第二阶段较大。



5.0d。具体如下:

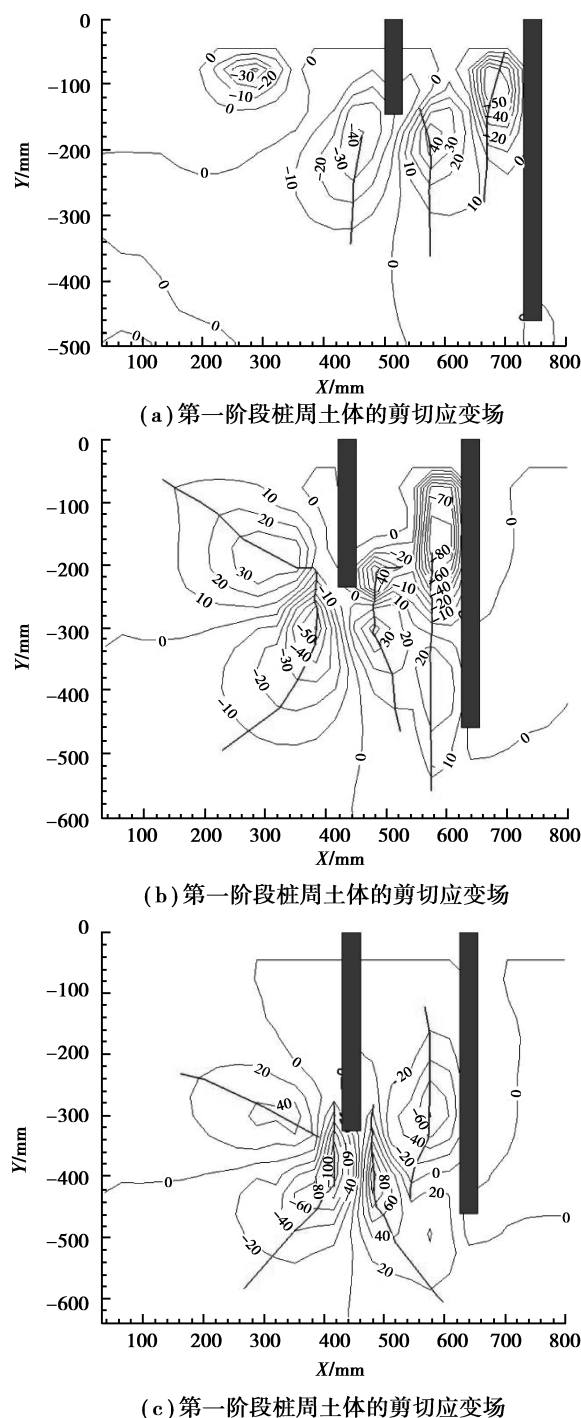


图7 桩间距为2d的新桩沉桩时不同阶段的剪切应变场

Fig.7 Shear strain contours in different stages of the new pile driving ($s=2d$)

(1)如图7(a)所示,当 $H=50\text{ mm}$ 时,既有桩附近产生剪切应变场,既有桩附近左侧剪切倾斜角比较小,且随着 H 的增加,剪切倾斜角变化很小;桩端下部左右两侧产生剪切应变场,且右侧剪切角较大;由于右侧有既有桩的阻挡作用,且阻挡作用

随着沉桩深度增加而增加,从而导致剪切倾斜角随 H 的增加而增加。

(2)如图7(b)所示,当 $H=50\text{ mm}$ 时,两桩间形成四部分剪切应变场。最大剪切应变点连线与桩刺入方向夹角为剪切倾斜角;既有桩附近形成两部分剪切应变场,其斜角随 H 的增加基本不变,剪应变呈上大小下小。沉桩右侧也形成两部分剪切应变场,剪切倾斜角随着距桩端的距离变化较快;上部剪应变场集中与桩端,且剪应变较大;而下部剪应变较小。关于沉桩左侧的两部分剪切应变场,上部剪应变比右侧的小;其剪切倾斜角与右侧的相比具有先大后小的变化规律。剪切倾斜角随距桩端的距离增加稍有变化;下部剪应变和倾斜角变化率均比右侧的大。

(3)如图7(c)所示,当 $H=140\text{ mm}$ 时,由于右侧既有桩对下部剪切应变场的阻碍作用随着桩体沉桩深度增加而减小,桩端下部两侧的剪切应变等值线基本对称,剪切应变基本一致;剪切倾斜角随着距桩端距离的变化较大;沉桩左侧上部形成的剪切应变比右侧上部的大,剪切倾斜角随着沉桩深度的增加基本不变;沉桩右侧上部剪切应变场的剪切倾斜角随着沉桩深度的增加稍有变大。

6 既有桩桩侧新桩($S=4d$)沉桩变形场

6.1 新桩($4d$)沉桩时的总位移场

如图8所示为距既有桩体 $4d$ 桩间距的新桩在沉桩过程中桩周土体总位移场的分布情况,其获得方法与单桩的相同。位移场从第1~2阶段,同一点的位移量明显增大,位移场竖向影响范围明显增大。由于受到既有桩阻挡作用,既有桩附近位移等值线而变密。从第2~3阶段,由于随着沉桩深度增加既有桩下部土体不再受到阻力作用,既有桩底部的右侧已有位移场出现。第2~3阶段的横向和竖向影响范围稍有增加。具体如下:

(1)如图8(a)所示,当 $H=50\text{ mm}$ 时,横向影响范围稍大于竖向影响范围,横向和竖向影响范围分别约为 $6d$ 和 $6d$ 。两桩间的位移场逐渐形成独立的椭圆环,且两桩间的位移量稍大与左侧位移形变量。

(2)如图8(b)所示,当 $H=95\text{ mm}$ 时,桩端下土体的竖向位移迅速增大。尤其横向距桩中心 $1.6d$ 范围内土体位移形变量由 2.0 mm 增加到 6.5 mm ;横向和竖向影响范围分别约为 $6.3d$ 和 $6.8d$ 。

桩端两侧逐渐形成独立的椭圆环形,距桩端两侧远处位移场逐渐贯通,此阶段的位移场竖向影响范围明显增加。

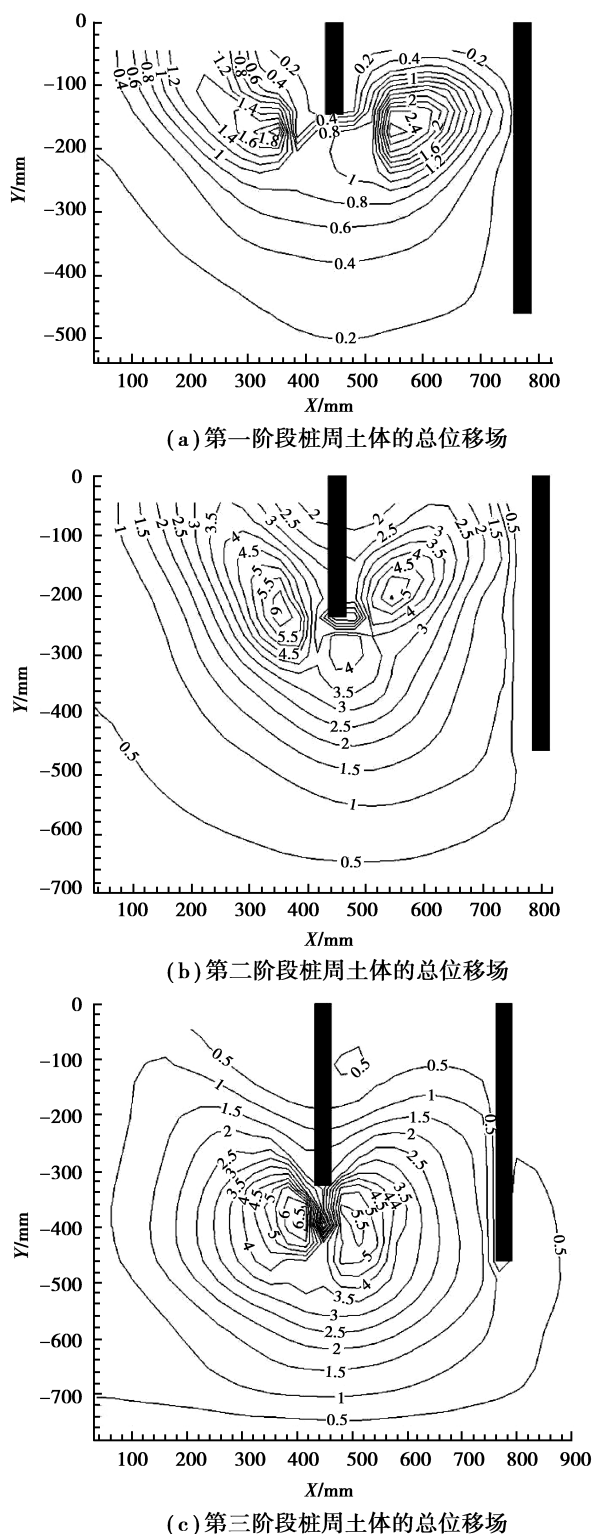


图8 桩间距为 $4d$ 的新桩沉桩时不同阶段的总位移场

Fig.8 Total displacement contours in different stages of the new pile driving ($s=4d$)

(3) 如图8(c)所示,当 $H=140\text{ mm}$ 时,桩端周围土体影响范围趋于稳定,横向和竖向的最大影响范围分别约为 $6.7d$ 和 $7.0d$ 。桩端附近位移量较第二阶段稍有增加。沉桩桩端下位移场集中,随着沉桩深度的增加,位移场绕过既有桩底部,并在既有桩右侧形成位移场。

6.2 新桩(4d)沉桩时的剪切应变场

图9为沉桩过程中不同阶段桩周土体的剪切应变场。最大剪切应变点连线分布基本对称,桩体两边呈现不规则的双曲线形态。剪切应变场横向和桩端下竖向最大影响范围分别约为 $5.0d$ 和 $5.7d$ 。具体如下:

(1) 如图9(a)所示,当 $H=50\text{ mm}$ 时,沉桩左侧和沉桩与既有桩之间产生剪切应变场。由于右侧有既有桩的阻挡作用,对两桩之间的土有挤密作用,导致沉桩左侧剪切应变场横向影响范围约为 $2.7d$,而沉桩与既有桩之间的剪切应变场横向影响范围约为 $4.0d$ 。沉桩左侧和沉桩与既有桩之间剪切应变场的竖向影响范围基本一致。最大剪切应变点连线与桩刺入方向夹角为剪切倾斜角;上、下剪应变场的倾斜角随 H 的增加变化很小;沉桩桩端左侧的剪切倾斜角比右侧的大,两侧形成的剪切倾斜角随着 H 的增加基本保持不变。

(2) 如图9(b)所示,当 $H=50\text{ mm}$ 时,沉桩左右两侧形成的剪切应变场基本对称分布。右侧剪切应变场未绕过既有桩,剪切量呈现上部较大而下部较小,其剪切角随 H 的增加变化较快。沉桩左侧的两部分剪切应变场,上部剪应变量上沉桩右侧部分的稍小,而倾斜角与沉桩右侧部分相比先大后小,随着距桩端的距离的变化稍有变化;下部剪应变变量比沉桩右侧部分较大,倾斜角变化率也比沉桩右侧部分的稍大。

(3) 如图9(c)所示,当 $H=140\text{ mm}$ 时,由于右侧既有桩下部对剪切应变场的阻碍作用随 H 的增加而减弱,桩端下部两侧的剪切应变等值线基本对称;沉桩桩端两侧形成的剪切应变最大值基本一致;剪切倾斜角随距桩端距离的变化而变化较大。沉桩左侧上部形成的剪切应变变量比沉桩右侧上部的小,其剪切倾斜角随 H 的增加基本不变;由于既有桩下部阻力作用较弱,沉桩右侧上部的剪切倾斜角随着沉桩深度基本不变。

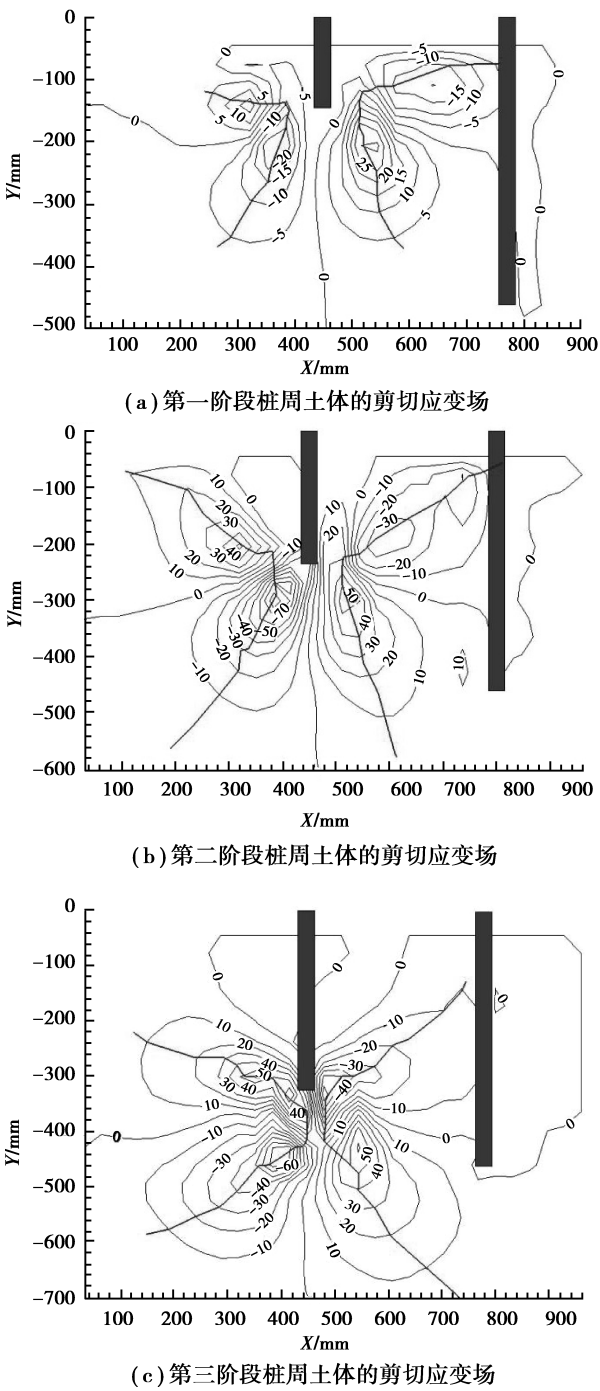


图9 桩间距为 $4d$ 的新桩沉桩时不同阶段的剪切应变场

Fig.9 Shear strain contours in different stages of the new pile driving($s=4d$)

7 单桩、既有桩桩侧新桩沉桩变形场影响范围对比分析

不同压桩条件下总位移场和剪切应变场的最大影响范围如表 2 所示。单桩和既有桩桩侧新桩

(4d) 沉桩时,总位移场的横向和竖向最大影响范围基本一致;而既有桩桩侧新桩(2d) 沉桩时,由于受已有桩体限制的影响较大,导致总位移场的横向和竖向最大影响范围有所减小。单桩和既有桩桩侧新桩(2d) 沉桩时,剪切应变场的横向和竖向最大影响范围基本一致;而既有桩桩侧新桩(4d) 沉桩时,剪切应变场的横向和竖向最大影响范围有所增加。

表 2 不同压桩条件下总位移场和剪切应变场的最大影响范围

Table 2 The maximum impact scopes of total displacement field and shearing strain field under different conditions

最大影响范围		单桩	新桩(2d)	新桩(4d)
总位移场	横向	6.3d	6.0d	6.7d
	竖向	6.7d	5.8d	7.0d
剪切应变场	横向	4.7d	4.7d	5.0d
	竖向	4.5d	5.0d	5.7d

8 结论

用 PIV 技术和静压桩自动沉桩模型试验系统,针对单桩和既有桩桩侧新桩沉桩过程中桩周土体的变形场进行一系列对比模型试验研究。试验表明:

- (1)单桩、既有桩新桩的 $P-H$ 曲线具有相似形态特征;既有桩桩侧新桩的 $P-H$ 曲线均比单桩的高,由于受既有桩体限制的影响较大,既有桩桩侧新桩(2d) 的 $P-H$ 曲线比既有桩桩侧新桩(4d) 的更高些。
- (2)单桩沉桩过程中,总位移场在桩端两侧呈对称的椭圆环形;剪切应变场沿桩两侧对称分布,整体呈“蝶型”分布。既有桩桩侧新桩(2d) 沉桩时,总位移场和剪切应变场在桩端两侧不对称分布显著,刺入桩左侧位移场影响范围较大。既有桩桩侧新桩(4d) 沉桩时,总位移场在桩端两侧基本对称;剪切应变场基本对称呈蝶型。
- (3)单桩和既有桩桩侧新桩(4d) 沉桩时,总位移场的横向、竖向最大影响范围基本一致;既有桩桩侧新桩(2d) 沉桩时,由于受已有桩体限制影响较大,导致总位移场的横向、竖向最大影响范围有

所减小。单桩和既有桩侧新桩(2d)沉桩时,剪切应变场的横、竖向最大影响范围基本一致;既有桩侧新桩(4d)沉桩时,剪切应变场的横向、竖向最大影响范围有所增加。

参考文献(References)

- [1] 龚晓南,李向红. 静力压桩挤土效应中的若干力学问题[J]. 工程力学, 2000, 17(4): 7-12. (Gong Xiaonan, Li Xianghong. Some mechanical problems in compacting effects of the static pressure pile [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 17(4): 7-12. (in Chinese))
- [2] Sagaseta C. Prediction of ground movements due to pile-driving in clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(1): 55-66.
- [3] 李镜培,张凌翔,李林,等. 天然饱和黏土中新、旧桩荷载-沉降关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(9): 1906-1913. (Li Jingpei, Zhang Lingxiang, Li Lin, et al. Analysis of load-settlement relationship of new and old piles in natural saturated clays [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(9): 1906-1913. (in Chinese))
- [4] 陈文,施建勇,龚友平,等. 饱和粘土中静压桩挤土效应的离心机模型试验研究[J]. 河海大学学报, 1999, 27(6): 103-109. (Chen Wen, Shi Jianyong, Gong Youping, et al. Centrifugal model tests of piles jacked in saturated clay [J]. Journal of Hohai University, 1999, 27(6): 103-109. (in Chinese))
- [5] 徐建平,周健,许朝阳,等. 沉桩挤土效应的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 235-238. (Xu Jiangping, Zhou Jian, Xu Zhaoyang, et al. Model test research on pile driving effect of squeezing against soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(3): 235-238. (in Chinese))
- [6] 周健,邓益兵,叶建忠,等. 砂土中静压桩沉桩过程试验研究与颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 501-507. (Zhou Jian, Deng Yibing, Ye Jianzhong, et al. Experimental and numerical analysis of jacked piles during installation in sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 501-507. (in Chinese))
- [7] 张建新,鹿群,吴东云,等. 基于模型试验的静压群桩引起的土体变形分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1243-1246. (Zhang Jianxin, Lu qun, Wu Dongyun, et al. Analysis of soil deformation in jacked pile group based on the model test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1243-1246. (in Chinese))
- [8] 曹兆虎,孔纲强,刘汉龙,等. 基于 PIV 技术的沉桩过程土体位移场模型试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(8): 168-174. (Cao Zhaohu, Kong Gangqiang, Liu Hanlong, et al. Model test on deformation characteristic of pile driving in sand using PIV technique [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 31(4): 501-507. (in Chinese))
- [9] Chen Z C, Omidvar M, Iskander M, et al. Modelling of projectile penetration using transparent soils [J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2014, 14(3): 68-79.
- [10] 袁炳祥. 发展三维粒子图像测速技术在桩土相互作用研究中应用[D]. 兰州:兰州大学, 2012. (Yuang Bingxiang. Development of stereo particle image velocimetry for investigation pile-soil interaction [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012. (in Chinese))
- [11] Kong G Q, Cao Z H, Zhou H, et al. Analysis of piles under oblique pullout load using transparent-soil models [J]. Geotechnical Testing Journal, 2015, 38(5): 725-738.
- [12] 姜彤,任淼,张昕. 抗拔锚板群锚基础模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(4): 968-974. (Jiang Tong, Ren Miao, Zhang Xin. Model test of group uplift anchor foundation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4): 968-974. (in Chinese))
- [13] Yang J, Tham L G, Lee P K K, et al. Observed performance of long steel H-piles jacked into sandy soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(1): 24-35.
- [14] 张永刚,李俊才,邓亚光,等. 管桩水泥土复合桩挤土效应现场试验[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 601-606. (Zhang Yonggang, Li Juncai, Deng Yaguang, et al. Field test on soil compacting effect of composite pile made up of jet-mixing cement and PHC pile [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 601-606. (in Chinese))
- [15] 雷华阳,李肖,陆培毅,等. 管桩挤土效应的现场试验和数值模拟[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1006-1012. (Lei Huayang, Li Xiao, Lu Peiyi, et al. Field test and numerical simulation of squeezing effect of pipe pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1006-1012. (in Chinese))