

室内静压沉桩试验桩周土体全过程位移场分析

陆 焯¹, 王校勇¹, 孙汉清², 李晓蛟¹

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200444; 2. 上海勘察设计研究院(集团)有限公司, 上海 200093)

摘要: 采用室内半桩模型试验研究了砂土中静压桩沉桩过程, 基于 DIC(digital image correlation) 技术对桩周土体位移发展与相应土压力变化律进行了分析研究. 试验采用无标识点方法对桩周土体累计竖向位移发展规律进行了全过程分析, 并拟合出了桩周土体位移轨迹, 揭示了桩周不同位置土体的运动规律. 通过对桩周土体竖向位移与相应位置土压力变化进行联合分析, 从土体变形的角度对土压力变化机理进行了解释与证明, 实现了力与位移关系的统一. 最后对沉桩速度对桩周土体位移的影响进行研究. 研究成果对于进一步明确沉桩挤土效应内在机理和桩周土体压力的发展规律提供参考.

关键词: 静压桩; DIC(digital image correlation) 技术; 沉桩过程; 挤土位移场; 土压力变化机理

中图分类号: TU443

文献标志码: A

Analyses on Soil Displacement Field Caused by Press-in Process of Pile Model Tests

LU Ye¹, WANG Xiaoyong¹, SUN Hanqing², LI Xiaojiao¹

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd, Shanghai 200093, China)

Abstract: Base on the digital image correlation (DIC) technique, soil displacements and corresponding earth pressures induced by press-in process of pile model tests were studied. In the model tests, the vertical accumulative soil displacements were tracked without marks. The soil displacement trajectories were plotted, which revealed that pile press-in process caused different soil displacement paths at different depths and locations. Through joint analysis on the vertical displacements of soils around the pile and the corresponding earth pressure, the mechanism of earth pressure change was explained from the perspective of soil deformation. It shows that the displacement and earth pressure induced by advance of pile were conjugative. Finally, the influence of press-in velocity on soil

displacements was investigated. The analyses presented in this study tended to further clarify the squeezing effect caused by pile press-in process and the mechanism of the development of earth pressures around the pile.

Key words: jacked pile; digital image correlation (DIC) technology; punching process; compacting displacement field; mechanism of soil pressure changes

静压桩具有承载力高、环境影响小、机械化程度高等特点^[1-2], 在我国人口密集地区及沿江、沿海的软土分布地区得到了广泛应用. 但静压桩属于挤土桩, 压桩引起的桩周土体变形会对临近既有建筑产生不利的影响, 因此相关土体变形成为了工程界广泛关注的问题.

目前国内外学者对压桩引起的桩周土体变形开展了大量研究, 主要集中在理论方法、数值模拟和模型试验这几方面. 理论方法主要有圆孔扩张法和应变路径法. 圆孔扩张法^[3-4]采用无限土体(球孔)或是平面应变假定(圆柱孔), 形式简单, 易于求解, 因而广被采用. 但圆孔扩张法基于理想弹塑性假定和平面应变假定, 竖向应变为零, 并不符合实际情况, 且无法模拟整个沉桩过程. 应变路径法(SPM)^[5]是由 Baligh 首先提出, 主要用于深基础贯入问题, 可反映土体位移在深度方向的分布. 但 SPM 法基于无限空间体假定, 与半无限空间体实际情况不符, 且计算过于复杂. 除理论方法外, 许多学者采用数值方法来研究桩周土体变形, 比较常用的有有限元法和离散元法^[6-9]. 但数值方法对桩体贯入的模拟较为复杂, 涉及到土体性质及参数、土体本构、桩-土界面性质、模拟结果普适性、数值方法本身限制等方面的问题, 无法对压桩过程进行精确模拟. 为此有不少学者开展了模型试验结合图像分析技术来研究沉桩引起的土体位移, 主要有采用真实土样结合标识点方法^[10-11]

收稿日期: 2017-10-12

基金项目: 上海自然科学基金(16ZR1411900)

第一作者: 陆 焯(1979—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为砂土室内试验及相关离散元模拟. E-mail: ye.lu@i.shu.edu.cn

及透明土结合像素灰度追踪的方法^[12-13].但是这些研究大多集中于桩周土体的最终位移,桩体压入过程中桩周土体位移变化规律及其与土压力的关系方面的研究较少.

综上所述,针对压桩过程中桩周土体位移场变化及其位移与土压力联合分析问题,拟基于 DIC (digital image correlation) 技术,建立考虑压桩过程的桩周土体位移计算方法,采用半桩模型试验研究分析桩体压入过程中桩周土体位移发展规律,并将沉桩过程中土压力变化与相应位置处土体竖向位移变化规律进行联合分析,力图实现力与位移关系的统一,继而开展影响因素分析.

1 试验概况

1.1 模型试验装置

所采用的模型试验装置及材料包括模型箱、加载装置、高清数码相机、图像后期处理软件、模型桩、土压力传感器、摄影灯和试验用砂等,静压桩模型试验装置示意图如图 1 所示.

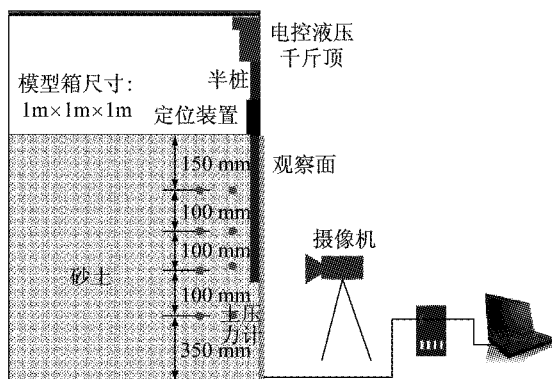


图 1 模型试验装置示意
Fig. 1 Sketch of model test device

试验所采用的模型箱尺寸为 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$, 其中一面为透明钢化玻璃,其余四面为钢板.加载装置为电控液压千斤顶,可提供恒定速度贯入动力.高清数码相机为佳能 700D,镜头有效像素 1 800 万以上,通过计算机控制可同步记录试验过程.试验中使用 2 台摄影灯进行辅助工作,以消除反射光线对成像质量的影响.图像后期处理软件为基于 MATLAB 软件中 MatPIV 工具箱编制的程序.模型桩为铝制半模闭口方桩,半模方桩长 560 mm,横截面尺寸为 $50\text{ mm} \times 25\text{ mm}$,材料厚 3 mm.试验用砂为普通建筑黄砂.

1.2 土样性质与制备

试验用砂为中细砂.由筛分试验可知 d_{60} 、 d_{30} 及 d_{10} 分别为 0.34 mm、0.22 mm 和 0.16 mm,不均匀系数 $C_u = 1.94$,曲率系数 $C_c = 0.89$,试验所用砂土为颗粒级配不良,属于均粒土.

干砂铺设共分为 5 步,铺设高度依次为 350 mm、100 mm、100 mm、100 mm、150 mm,土样厚度共计 800 mm.在初次制备土样的时候,预先将所有干砂放置于一塑料容器中,然后根据各层铺设高度算出干砂在塑料容器中对应的等比例体积,并做好标记.采用雨落法分层将干砂装入模型箱中,试验中所使用的击实器由 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的钢板制作,其尺寸是根据各层干砂铺设高度和压实土层最佳深度为压实面直径的 3.0~3.5 倍^[14] 2 个条件确定.每次制备土样时,将塑料容器中对应体积的干砂装入到模型箱中,通过击实器击实干砂相同的次数至指定的高度,试验结果表明该方法可以很好保证试验的重复性.在每次砂土制备完成之后都会进行一次静力触探试验,静力触探采用的贯入速度为 $2.5\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,贯入深度为 450 mm.根据各组静力触探试验结果换算得到比贯入阻力随深度的变化曲线,如图 2 所示.由图可以看出,试验 1 和试验 2 制备的土样密实度具有很高的重复性,结果表明该标准化制备土样的方法(等体积控制方法)能够满足试验重复性的要求.

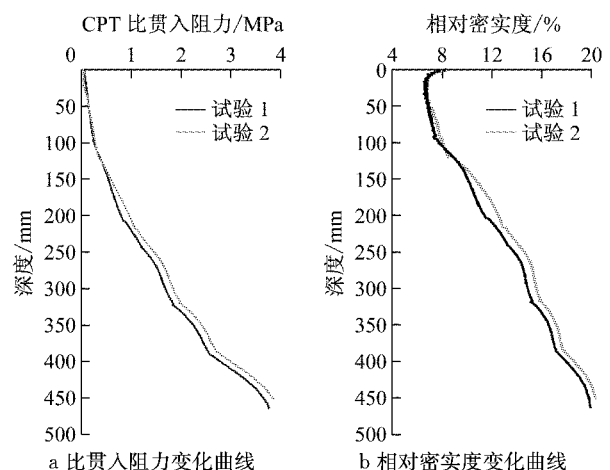


图 2 比贯入阻力及相对密实度随深度变化曲线
Fig. 2 Specific penetration resistance and relative density curve with depth

参考 Mayne 等^[15]的计算方法将 p_s 换算成相对密实度 D_r ,如图 2 所示.由试验 p_s 曲线和相对密实度 D_r 曲线参考表 1^[16]可判定试验制备的砂土密实度介于极松和疏松之间.

1.3 模型试验工况

为了对比分析不同沉桩速度对桩周土体位移的影响,共开展了 2 次模型试验,具体模型试验工况见表 2.

表 1 砂土密实度界限值
Tab. 1 Classification of sands

分级	D_r	p_s/MPa	
密实	$D_r \geq 0.67$	$p_s \geq 14$	
中密	$0.67 > D_r > 0.33$	$14 > p_s > 4$	
松散	稍松	$0.33 \geq D_r \geq 0.20$	$4 \geq p_s \geq 2$
	极松	$D_r < 0.20$	$p_s < 2$

表 2 模型试验工况
Tab. 2 Conditions of model tests

工况	贯入速度/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	标定系数/ ($\text{mm} \cdot \text{像素}^{-1}$)
试验 1	2.310	0.375
试验 2	0.517	0.480

1.4 数据处理方法

在模型箱观察面外侧架设高清数码相机,在压入半桩时同时打开相机进行图像采集.图像处理时首先使用 MATLAB 对采集的沉桩视频进行图片提取,以桩体贯入 10 mm 为间隔依次提取桩体在不同深度处的观察面图像,试验中桩体总共压入 450 mm,所以共计提取 45 张照片.然后,依托 MATLAB 中的 MatPIV 工具箱对所提取的不同位置图像依次与初始图像进行 DIC 计算,获得测点位置的桩侧土体累计位移变化量,最终得到桩体贯入过程中桩侧土体在测点位置的累计位移变化量随桩体贯入的发展规律.

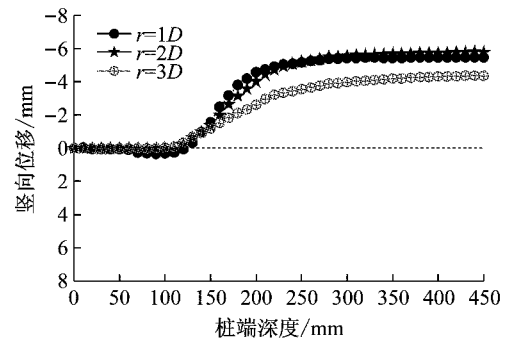
已知原图像像素尺寸为 $1\ 088 \times 1\ 920$,图像相关计算时取 16×16 的像素块作为基本计算单位,所以计算得到的位移云图尺寸为 67 计算单位乘 119 计算单位.数据采集时以计算后图像中一个计算单位为一个测点,即删除一个测点信息表示原图中 16×16 的像素块信息.以试验 2 试验为例,已知标定系数为每像素 0.375 mm,一个测点代表 $6\ \text{mm} \times 6\ \text{mm}$ 的实际面积.

2 试验结果与分析

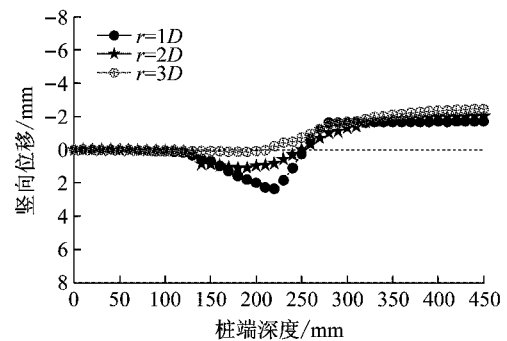
2.1 累计竖向位移发展规律

以试验 1 为例,桩体贯入速度为 $2.31\ \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$.图 3 为使用该方法绘制的不同深度处距桩表面 $r=1D$ 、 $r=2D$ 和 $r=3D$ 处侧向土体竖向累计位移随桩体贯入的曲线图, r 为距离桩侧表面的距离, D 为模型桩边长, H 为测点埋深.竖向运动方向以向下

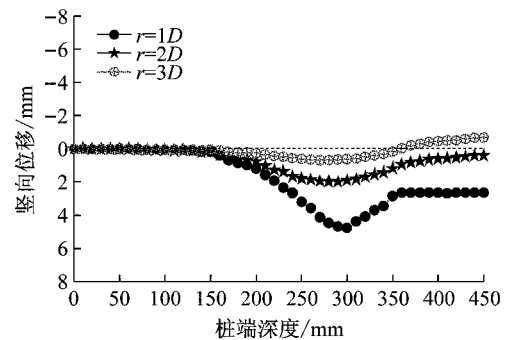
为正,向上为负.



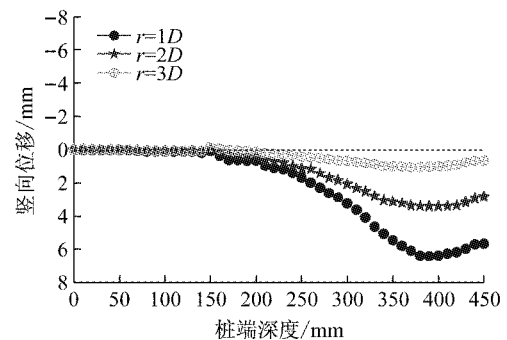
a $H=150\ \text{mm}$



b $H=250\ \text{mm}$



c $H=350\ \text{mm}$



d $H=450\ \text{mm}$

图 3 不同深度处测点位置的竖向累计位移随桩体贯入深度的发展规律

Fig. 3 Development of the vertical cumulative displacement measured at different depths with advancement of the model pile

从图 3 可以看到,随着桩体的贯入,位于 250

mm、350 mm 和 450 mm 处测点位置的累计竖向位移总体上依次经历先向下然后向上运动直至稳定的过程,而位于 150 mm 处测点位置的竖直向下运动量很小,甚至在 $r=2D$ 和 $r=3D$ 处的土体并没有经历竖直向下运动的过程. 由此说明距离桩身较近的土体在桩体贯入时,会先经历一段竖直向下的运动过程,但随着至桩身表面距离的增加,位于深度较浅处的土体并不会经历向下运动的过程,且沿着深度方向始终作竖直向上运动的土体区域在增大. 由图还可以看出相同深度处测点位置的累计竖向位移基本上可以同步达到稳定状态,当桩端穿越测点所在深度时,该深度测点位置的累计竖向位移仍在缓慢增加,说明此处土体继续在作向上运动. 随着测点的深入,桩周土体总的运动趋势为向下运动.

2.2 土体位移轨迹拟合

通过提取测点在不同沉桩深度处的水平位移分量和竖向位移分量,近似拟合出了桩周各测点在沉桩过程中的轨迹图,如图 4 所示. 竖向运动方向以向下为正,向上为负,水平方向以作远离桩身运动方向为正.

从图 4 可以看出, $H=150$ mm 处的土体沿近似抛物线的位移轨迹做斜向上运动;在 $H=250$ mm 处, $r=1D$ 和 $r=2D$ 处的土体先做斜向下运动,然后再做斜向上运动,最终运动方向为斜向上运动; $H=350$ mm 处的土体先做斜向下运动,然后再做斜向上运动,最终运动方向为斜向下运动; $H=450$ mm 处的土体则始终做斜向下运动. 总体趋势与 Lehane 和 Gill^[12] 的试验结果类似.

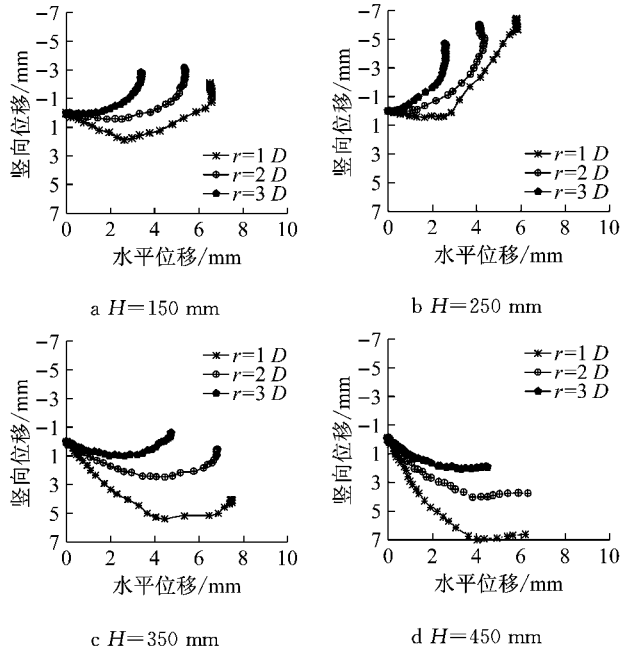


图 4 不同深度处测点的位移轨迹

Fig. 4 Displacement trajectories of measuring points at different depths

以上分析证明,通过对沉桩过程中桩周土体变形图像进行连续拍摄,然后使用 DIC 相关计算方法可以更加精确拟合出桩周任何一点的位移轨迹,从而真正实现对桩周土体无标识动态分析.

2.3 不同沉桩深度处桩周土体位移

图 5 为不同沉桩深度处的桩周土体水平位移云图. 由图 5 可知,随着沉桩深度的不断增加,桩周土体水平位移不断增大;桩端位置以下区域土体相对于沉桩深度提前产生了水平向位移;在桩侧 1D 以内

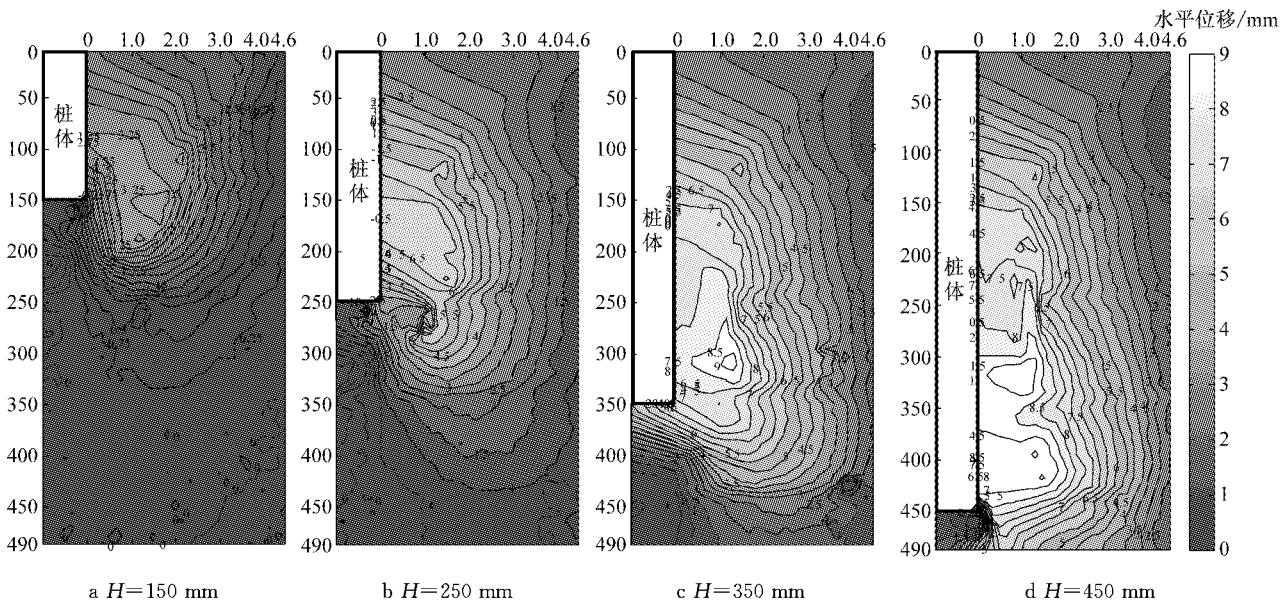


图 5 不同沉桩深度处桩周土体水平位移云图

Fig. 5 Contour maps of soil horizontal displacements around the pile at different penetration depths

区域剪切变形较大,当所划分的小图像块进入该区域后很难追踪其运动轨迹。

图 6 为不同沉桩深度处桩周土体竖向位移云图,由图可知,桩端土体以向下位移为主;当沉桩深

度较浅时,桩侧土体以向上位移为主,对应图 6a 和图 6b;当沉桩深度较深时,桩端以上一定区域的桩侧土体产生了向下位移,对应图 6c 和图 6d。

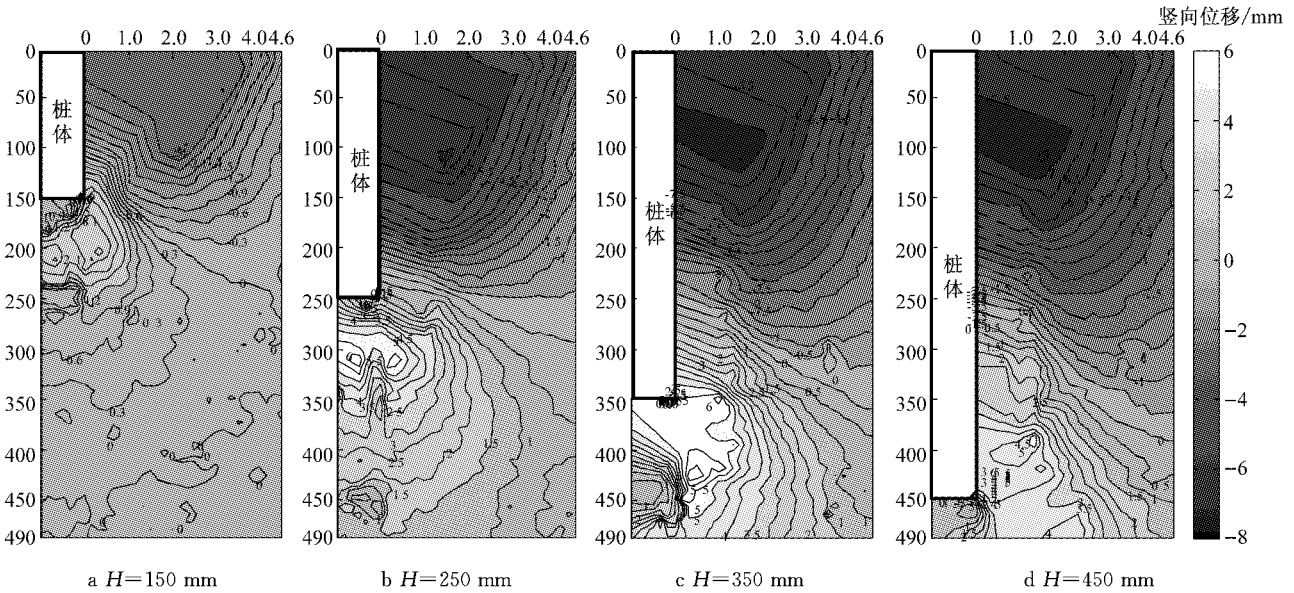


图 6 不同沉桩深度处桩周土体竖向位移云图

Fig. 6 Contour map of soil vertical displacements around the pile at different penetration depths

2.4 桩周土压力与位移联合分析

试验中在距离桩身表面 1D 和 3D 以及埋深 150 mm、250 mm、350 mm 和 450 mm 处同时埋设了微型土压力计。由于千斤顶压强限制,压桩过程中需暂停加杆,暂停时间点选在桩端尚未到达土压力计所在深度时。土压力变化值原始数据如图 7 所示。

由图 7 可知,沿沉桩深度方向土压力变化峰值逐渐增大,且该峰值相对于桩体贯入深度存在“提前”效应。当暂停沉桩时,土压力变化值迅速跌落至某一稳定值,沿沉桩深度方向该土压力变化稳定值逐渐增大且均大于零。当继续沉桩时,土压力变化值迅速增加至跌落前大小,随着沉桩深度的继续增加,土压力变化值则逐渐减小至零值。

为了研究土压力变化值最终为零值的原因,尝试将沉桩过程中土压力变化与相应位置处土体竖向位移变化规律进行联合分析,力图实现力与位移关系的统一。

由图 8 可知,当桩侧土体处于静止或竖直向下运动状态时,相应位置处土压力变化值处于增长阶段;当桩侧土体竖向运动方向发生改变时,相应位置处土压力变化值几乎可以同步达到峰值。由此认为土体的竖向位移发展与相应位置处土压力的变化存在对应关系。

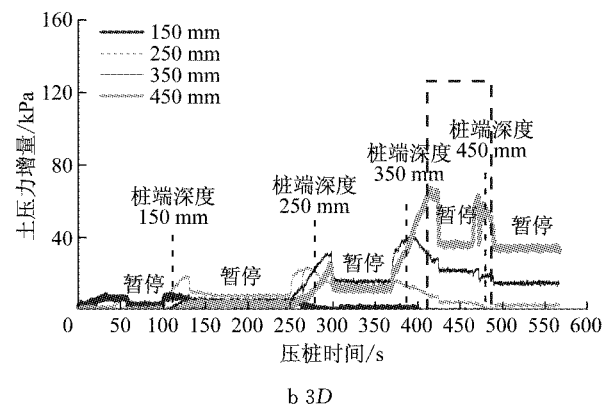
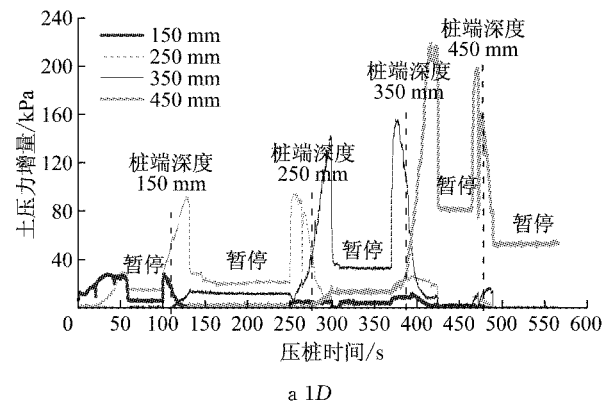


图 7 土压力变化值原始数据

Fig. 7 Variation of earth pressures measured during pile push-in

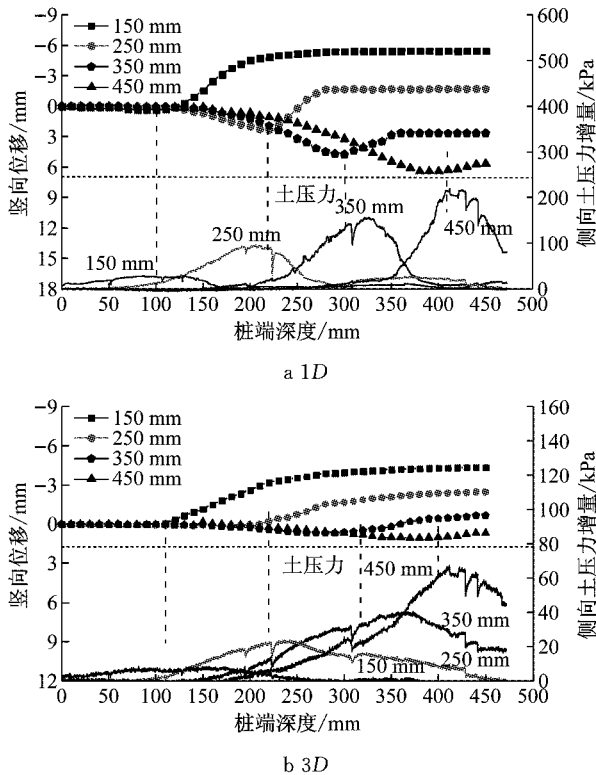


图 8 土压力与相应位置土体竖向位移变化
 Fig. 8 Variation of soil pressure and soil vertical displacement

图 9 为暂停压桩时桩周土体瞬时回弹位移矢量图,由图可知,土体回弹主要以竖向位移为主,且主要发生在桩端下部,仅在靠近桩身处存在微小的回弹.此时对照图 7b 中虚线框处土压力跌落值可发现,暂停压桩时桩端下部土压力变化值跌落幅度很大,而桩端上部土压力变化值跌落幅度则很小,该值的变化与暂停压桩时土体回弹位移相对应,即发生回弹处土压力变化值跌落较大,而未发生回弹处或回弹量很小的地方土压力变化值跌落幅度很小或几乎没有变化,由此证明了土压力的发展与相应位置处土体竖向位移相关的结论.当土体竖直向下运动

时,土体密实度增加,相应的土压力变化值增大;当土体竖直向上运动时,土体密实度减小,相应位置处土压力变化值则开始变小.

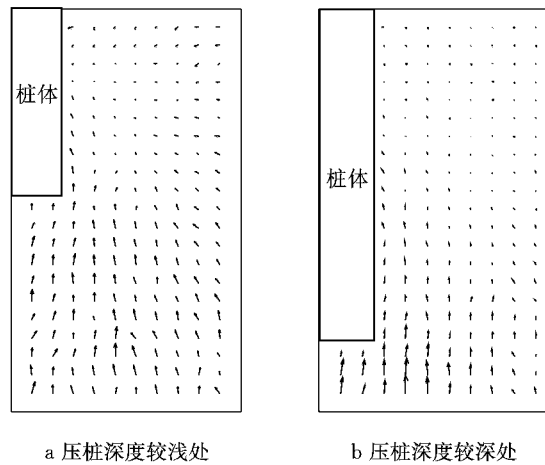


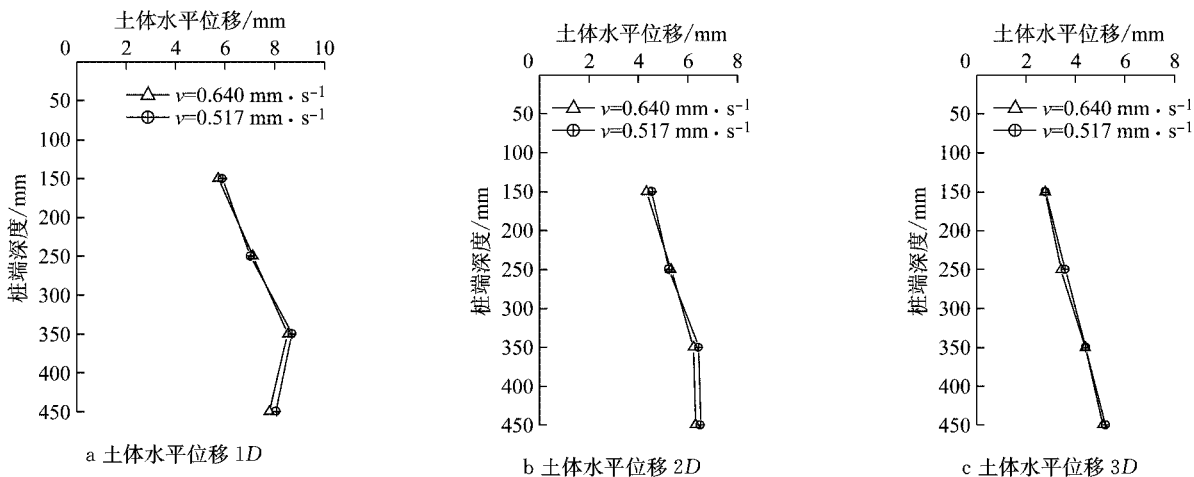
图 9 土体回弹位移矢量图

Fig. 9 Vector map of soil rebound displacement vector

2.5 不同压桩速率下桩周土体位移对比分析

图 10 为不同贯入速率情况下,桩体贯入 450 mm 时,各测点处土体的水平位移和竖向位移. 2 种贯入速率分别为 $v=0.517 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $v=2.312 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 2 次试验砂土的制备采用了标准的制备方法,在试验开始前使用静力触探仪对砂土的密实度进行检验,发现其密实度基本一致.

由图 10 可见,在距离桩身不同距离处的测点处,桩体贯入速度对土体水平位移和竖向位移的影响并不显著.这一现象可能是因为对沉桩周围土体产生较大影响的是沉桩过程中孔隙水压力的变化,而本试验所用土样是干砂,加上土样制备的密实度介于极松与稍松之间,导致沉桩速度对桩周土体变形的影响较小.其具体原因还有待通过试验进一步研究探讨.



a 土体水平位移 1D

b 土体水平位移 2D

c 土体水平位移 3D

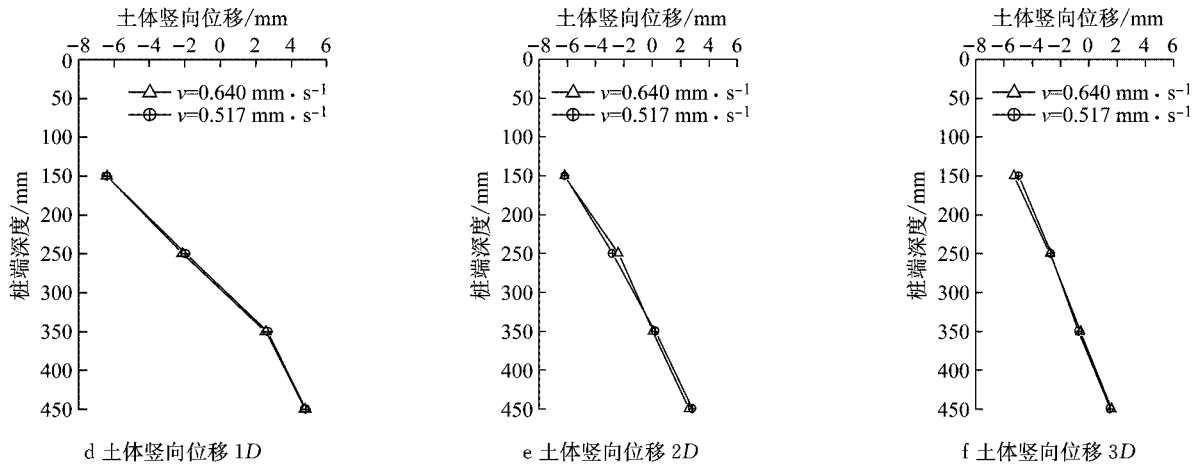


图 10 不同沉桩速率下土体位移

Fig. 10 Soil displacement under different jacking velocity

3 结论

通过室内模型试验结合 DIC 图像获取与分析方法对压桩过程中桩周土体位移场进行全面的分析,并得到以下结论:

(1) 依靠自行编制的 MATLAB 程序,实现了对沉桩过程中桩周土体位移的动态分析,并拟合了土体的位移轨迹.整个系统处理数据操作灵活,可以计算观察面所有位置任何时刻的水平及竖向位移变化,并导出矢量图以及位移平均值等.

(2) 静压沉桩时,距离桩身较近的土体先向下运动.但随着至桩身表面距离的增加,位于深度较浅处的土体并不会经历向下运动的过程,且沿着深度方向始终作竖直向上运动的土体区域在增大.

(3) 根据沉桩过程中不同部位土体的位移轨迹发展,可将桩周土体沿竖向划分为 3 个区域:表面隆起区、中部径向压缩区、端部扰动区.位移表现为:表面土体主要作斜向上运动,水平位移与竖向位移相接近;中部土体水平位移明显大于竖向位移,且都经历了先向下后向上的运动过程,但竖向位移较小;桩端土体以斜向下运动为主,水平位移同样大于竖向位移,但相比中部土体竖向位移明显变大,且无向上运动的过程.

(4) 桩周土压力的变化与相应位置土体沿竖向的运动方向相对应.当土体竖直向下运动时,土体密实度增加,相应的土压力变化值增大;当土体竖直向上运动时,土体密实度减小,相应位置处土压力变化值则开始变小.桩周土压力变化峰值相对于桩体贯入深度存在“提前”效应,且随着沉桩深度的继续增加,土压力变化值逐渐减小至零值.停止压桩时土体

回弹位移以竖向运动为主,回弹主要发生在桩端及其下部,桩周仅在靠近桩身处存在微小的回弹.

(5) 在距离桩身不同距离处的测点处,桩体贯入速度对土体水平位移和竖向位移的影响并不显著.这一现象可能是因为对沉桩周围土体产生较大影响的是沉桩过程中孔隙水压力的变化,而本试验所用土样是干砂,加上土样制备的密实度介于极松与稍松之间,导致沉桩速度对桩周土体变形的影响较小.

参考文献:

- [1] 石原行博. 压入工法: 解决都市型建设问题的技术[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(S2): 1707.
YUKIHIRO Ishihara. The press-in method: A construction solution for urban development [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(S2): 1707.
- [2] 张明义. 静力压入桩的研究与应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004.
ZHANG Mingyi. Research and application of static press piling [M]. Beijing: China Building Materials Press, 2004.
- [3] VESIC A C. Expansion of cavity in infinite soil mass [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1972, 98(3): 265.
- [4] 龚晓南, 王启铜, 罗晓. 拉压模量不同材料的圆孔扩张问题 [J]. 应用力学学报, 1994, 11(4): 127.
GONG Xiaonan, WANG Qitong, LUO Xiao. The problem of circular hole expansion of different materials with tensile and compressive modulus [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1994, 11(4): 127.
- [5] BALIGH M M. Strain path method [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(9): 1108.
- [6] CHOPRA M B, DARGUSH G F. Finite-element analysis of time-dependent large-deformation problems [J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2010, 16(2): 101.

- [7] 鲁祖统. 软黏土地基中静力压桩挤土效应的数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 1998.
LU Zutong. Numerical simulation of squeezing effect of static pile in soft clay foundation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1998.
- [8] 周健, 邓益兵, 叶建忠, 等. 砂土中静压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.
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.
- [9] 詹永祥, 姚海林, 董启朋, 等. 砂土中开口管桩沉桩过程的颗粒流模拟研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 283.
ZHAN Yongxiang, YAO Hailin, DONG Qipeng, *et al.* Study of process of open-ended pipe pile driven into sand soil by particle flow simulation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 283.
- [10] 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.
XU Jianping, 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.
- [11] 李镜培, 李雨浓, 张述涛. 成层地基中静压单桩挤土效应试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(6): 824.
LI Jingpei, LI Yunnong, ZHANG Shutao. Experimental analysis of compaction effect of single pile jacked in layered ground [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(6): 824.
- [12] LEHANE B M, Gil D R. Displacement fields induced by penetrometer installation in an artificial soil [J]. International Journal of Physical Modeling in Geotechnics, 2004, 4(1): 25.
- [13] 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.
CAO Zhaohu, KONG Gangqiang, LIU Hanlong, *et al.* Model test on deformation characteristic of pile driving in sand using PIV technique [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(8): 168.
- [14] 于国锋. 路基工程施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
YU Guofeng. Subgrade engineering construction press [M]. Beijing, China Communications Press, 2009.
- [15] MAYNE P W, CHRISTOPHER B R, DEJONG J. Manual on subsurface investigations [M]. Washington D C: Federal Highway Administration, 1996.
- [16] 陈维家, 姚锋杰. 砂土比贯入阻力 P_s 与相对密实度 D_r 的关系[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(1): 36.
CHEN Weijia, YAO Fengjie. Relationship between sandy soil specific penetration resistance P_s and relative density D_r [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003, 30(1): 36.

(上接第 1359 页)

- QIAN Jiuru, YANG Xinke, QIN Heng, *et al.* Tests on seismic behavior of pre-cast shear walls with various methods of vertical reinforcement splicing [J]. Journal of Building Structures, 2011(32): 51.
- [7] 刘香, 崔涛, 伍敏, 等. 直螺纹灌浆套筒连接预制剪力墙抗震性能试验[J]. 沈阳工业大学报, 2017, 39(2): 205.
LIU Xiang, CUI Tao, WU Min, *et al.* Test for seismic behavior of precast shear wall connected with straight thread grouting sleeves [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2017, 39(2): 205.
- [8] 余琼. 一种新型的约束搭接套筒粘胶: 中国, ZL 2014 20656653.0 [P]. 2015-04-01.
YU Qiong. Grouted sleeve lapping connector: China, ZL 2014 20656653.0 [P]. 2015-04-01.
- [9] 余琼, 许志远, 袁炜航, 等. 两种因素影响下套筒约束浆锚搭接接头拉伸试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12): 34.
YU Qiong, XU Zhiyuan, YUAN Weihang, *et al.* Experimental study of grouted sleeve lapping connectors varied in two factors under tensile load [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(12): 34.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 装配式混凝土结构技术规程: JGJ 1—2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Technical specification for precast concrete structures: JGJ 1—2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [11] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Constructure of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [12] 吕西林. 高层建筑结构 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2003.
LV Xilin. High-rise building structure [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2003.
- [13] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Constructure of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision. Code for Seismic Design of Buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.