

# 基于PIV的沉桩过程珠海软土扰动区时空分布\*

彭斌<sup>1</sup>, 李佳骏<sup>2</sup>, 何帆<sup>1</sup>, 李智文<sup>1</sup>,  
李陆海<sup>1</sup>, 黄伟洪<sup>2</sup>, 林宏杰<sup>2</sup>, 刘建坤<sup>2</sup>

1. 珠海市规划设计研究院, 广东 珠海 519001
2. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519082

**摘要:**采用粒子图像测速技术,开展高含水率软土室内模型试验,观察不同状态的软土在沉桩不同深度时桩周土体的水平与竖向位移场发展趋势。结果表明:随着桩中心水平距离增加,桩侧土体水平位移呈明显的空间衰减规律,扰动强度和影响深度都逐渐减弱;软土含水率越高水平和竖向影响区越小,沉桩结束时软塑状态软土水平和竖向影响范围分别为3.9和1.9倍桩径,流塑状态软土水平和竖向影响范围分别为1.8和1.2倍桩径;当软土状态由软塑变为流塑时,贯入深度与水平影响区范围的关系由非线性变为线性;软塑状态软土强度更高,压力响应强烈且集中,流塑状态软土流动性更强,压力响应更加分散。

**关键词:**珠海软土;粒子图像测速技术;示踪粒子;位移场

**中图分类号:**TU447 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0137(2025)06-0111-10

## Spatiotemporal distribution of disturbed zones in Zhuhai soft clay during pile installation based on PIV

PENG Bin<sup>1</sup>, LI Jiajun<sup>2</sup>, HE Fan<sup>1</sup>, LI Zhiwen<sup>1</sup>,  
LI Luhai<sup>1</sup>, HUANG Weihong<sup>2</sup>, LIN Hongjie<sup>2</sup>, LIU Jiankun<sup>2</sup>

1. Zhuhai Institute of Urban Planning & Design, Zhuhai 519001, China
2. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

**Abstract:** Laboratory model tests on soft soils with high water content were conducted using particle image velocimetry (PIV) to observe the development trends of horizontal and vertical displacement fields of soil around the pile during pile driving at different depths under varying soil states. The results show that: with the increase in horizontal distance from the pile center, the horizontal displacement of soil adjacent to the pile exhibits an obvious spatial attenuation law, and both the disturbance intensity and influence depth weaken gradually; the higher the water content of soft soil, the smaller the horizontal and vertical influence zones; at the end of pile driving, the horizontal and vertical influence ranges of soft plastic soft soil are 3.9 times and 1.9 times the pile diameter, respectively, while those of fluid plastic soft soil are 1.8 times and 1.2 times the pile diameter; when the soft soil state changes

\* 收稿日期:2025-06-22 录用日期:2025-07-12 网络首发日期:2025-09-29

基金项目:国家自然科学基金(NSFC42207188);广东省基础与应用基础研究基金(2023A1515012116)

作者简介:彭斌(1979年生),男;研究方向:岩土力学;E-mail:28790766@qq.com;

李佳骏(2001年生),男;研究方向:岩土力学;E-mail:lijj363@mail2.sysu.edu.cn

(彭斌、李佳骏并列第一作者)

通信作者:刘建坤(1965年生),男;研究方向:岩土力学;E-mail:liujiank@mail.sysu.edu.cn;

林宏杰(1992年生),男;研究方向:岩土力学;E-mail:linhj33@mail.sysu.edu.cn

(刘建坤、林宏杰为共同通信作者)

增强出版



ZR20250112

全文阅读



ZR20250112

from soft plastic to fluid plastic, the relationship between penetration depth and horizontal influence zone range transforms from nonlinear to linear; soft plastic soft soil has higher strength, with intense and concentrated pressure responses, whereas fluid plastic soft soil shows stronger fluidity and more dispersed pressure responses.

**Key words:** Zhuhai soft clay; particle image velocimetry; tracer particles; displacement field

珠江三角洲地区作为典型的滨海相沉积平原,其软土受长期海陆交互沉积作用控制,表现出低渗透性、高压缩性及低承载力特征(张芳枝等,2003)。现有研究表明,该区域全新世海相沉积层的天然含水率可达42.5%~81.2%,不排水抗剪强度普遍低于20 kPa,地基承载力为58.9~120 kPa,是中国力学性能最弱的软土类型之一(Yue et al.,2020)。

针对此类软土地基,目前主要采用排水固结、复合地基及桩基础等加固技术(Serridge,2021)。然而,地基加固在施工中易引发土体扰动效应(赵春风等,2013)。以静力压桩为例,单桩沉桩时挤土效应对桩周土体的位移和孔隙水压力的影响范围分别达到单桩桩长的0.6和0.5倍(Li et al.,2012),由于超静孔隙水压力的消散,地基土会产生再固结沉降,并诱发邻近建筑物开裂等(张雪松等,2004)。

近年来,粒子图像测速(PIV)技术因其非接触、全场测量的优势,在岩土变形领域获得广泛应用。剑桥大学White首次在岩土领域创新性地引入粒子图像测速技术(White et al.,2001;2003),将PIV应用到堤坝沉降和桩基贯入模型试验。利用PIV进行位移观测时,需要保证单一网格的灰度值不是单调的。对于砂土来说,其颜色自身多样化、具有纹理性,可以直接进行PIV分析。但对于软黏土来说,其本身颜色灰度值变化不大,无法满足PIV分析要求,需要使用示踪粒子对其进行表面纹理构建。Hossain et al.(2005)将黑色植绒粉末撒在观测面一侧的土体表面,为白色高岭土增加纹理特征以满足PIV分析要求。Arenson et al.(2007)采用荧光粉溶液对黏土表面进行处理,研究了冻土内部冰透镜体生长的微观机理。Wang et al.(2020)混合不同粒径的黑白石英砂对冻土表面进行纹理构建,混合砂的粒径与颜色差异能显著增强图像对比度。

目前,开源的MatPIV(Sveen,2004),GeoPIV(White et al.,2003),OpenPIV(Taylor et al.,2010),PIVlab(Thielicke et al.,2014)可用于图像分析。由于大多是基于零阶子集形函数,不支持子集变形从而在大变形分析中会出现误差累积,且多侧重于流体分析、未对土工纹理进行优化,均不适用于岩土

大变形分析。相较于GeoPIV的零阶形函数与手动参数调整,GeoPIV\_RG通过引入高阶子集形函数、双五次B样条插值与RG框架实现了高精度的计算(Stanier et al.,2016)。该代码已被证实其生成的应变场噪声较低,位移场空间连续性更优,能够为涉及大位移和变形的问题提供亚像素测量分辨率(Jayalath et al.,2021)。

目前,已有研究利用PIV技术分析了砂土与含水率较低的软黏土的位移场(Jiang et al.,2020;2023),但针对高含水率软土在竖向沉桩过程中土体的扰动机制仍缺乏研究。因此,本文通过设计系列室内模型试验,结合PIV技术,研究了适用于珠海高含水率软土的示踪材料匹配准则,静力压桩过程中土体扰动区的发展规律以及挤土效应影响范围与沉桩深度的量化关系。

## 1 方法和材料

### 1.1 测试装置

图1显示了尺寸为600 mm(长)×300 mm(宽)×500 mm(高)顶部开口的亚克力箱、桩压入系统和控制系统组成的测试设备,以及9个微型土压力盒与一台DH3816N数据采集仪组成的数据采集系统。压力箱观测面设有12个已知具体坐标的标准点,桩压入系统的竖向电缸下连接作动器,作动器的连接杆端头配有直径 $D = 40$  mm的半桩模型,竖向电缸按照给定的速度与位移下压实现压桩过程的模拟。亚克力箱长边一侧为观测面,用于观察压桩过程中的土体位移变化;土体内不同桩径不同深度处理有微型土压力盒,用于采集数据以获取压桩过程中不同深度与桩径处土体压力的变化。

### 1.2 粒子图像测速技术

使用AX700摄像机采集压桩全过程图像。基于matlab平台,使用GeoPIV\_RG的相关代码对图像进行分析。分析原理是将图像划分为 $L \times L$ 像素的子集,利用材料自身纹理或人工标记作为特征,通过指定初始特征点,利用归一化互相关估计像素位移,基于一阶形变函数描述子集变形并通过双五次B样条插值结合逆合成高斯-牛顿(IC-GN)算法迭

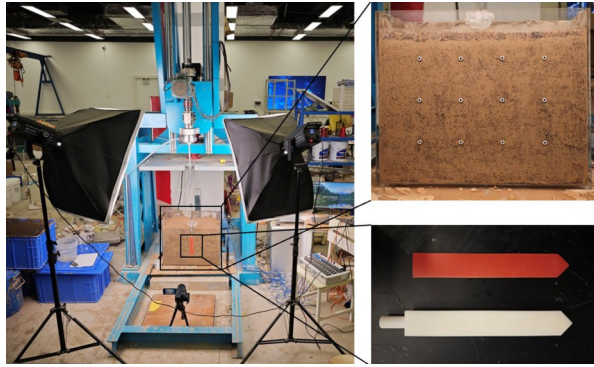


图1 桩贯入试验模型

Fig. 1 Model for pile penetration test

代优化变形参数,最后通过双三次样条插值对输出结果进行空间适配,最终得到水平、竖向矢量位移。针对大变形,系统在子集相关系数低于阈值时更新基准图像,可靠性引导(RG)算法通过预条件优化和路径规划优先处理高相关性子集,从而控制随机游走误差(White et al., 2003; Stanier et al., 2016)。

### 1.3 土壤

试验所用软土为珠海大桥河岸附近的淤泥质黏土。该土样的颗粒比重为2.63,孔隙比为1.89,液限为52.56%,塑限为28.20%。土样充分搅拌均匀避免结块现象,分别配置软塑状态和流塑状态两类模型土体,以及含水率为50%和70%的软土状态。天然场地中约有4 m厚的填土层覆盖,试验中在软土上方铺设砂层作为上覆垫层,垫层厚度为40 mm,以再现现场应力环境。

### 1.4 示踪粒子

由于本次试验所采用的土体为高含水率软黏土,植绒会在水分作用下吸附于观测面从而影响随土体变形的流动性(刘振亚等, 2018),荧光粉末和玻璃珠由于其形状规则会被软土覆盖从而无法在软土表面形成纹理。因此,采用形状不规则的16目和80目的黑白机制砂作为示踪粒子进行试验。

### 1.5 模型准备与测试方案

首先在亚克力箱四周内侧均匀涂抹一层透明润滑油,以降低黏土与箱体内侧的摩擦。凡士林具有一定黏性,能够与示踪粒子和黏土较好粘结(李逸涛, 2022),因此在亚克力箱观测面内侧涂抹一层薄凡士林,然后使用喷枪将示踪粒子均匀喷洒在观测面内侧,接着分层将土体填入亚克力箱内部并等待其固结密实,图2展示了四种示踪粒子的纹理构建效果。观测面应处在恒定光源下,控制竖向电缸以1 mm/s的速度恒定下压240 mm,视频录制采用8 k分辨率25 Hz帧率。

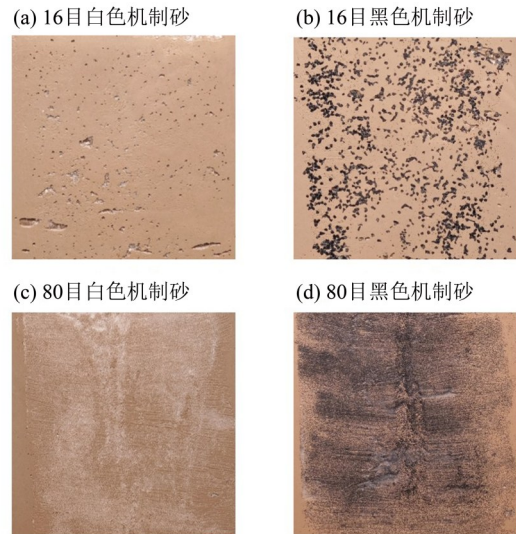


图2 示踪粒子布设效果

Fig. 2 Layout of tracer particles

如图3所示,在径向距离 $r/R = 2, 4, 6$ ,埋深 $z = 100, 180, 260$  mm处布设9个微型土压力盒(刘汉龙等, 2012), $r$ 为距桩中心的距离, $R$ 为桩半径。土层为40 mm厚的砂垫层和400 mm厚的软土层,软土含水率为50%(软塑态)和70%(流塑态)两组,控制竖向电缸以1 mm/s的速度恒定下压320 mm。视频录制采用8 k分辨率25 Hz帧率,压力盒与桩顶的压力传感器采样频率为5 Hz。

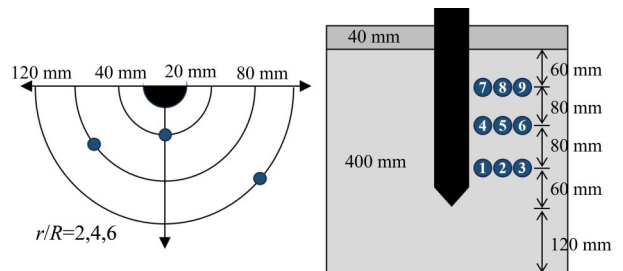


图3 压力传感器布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of pressure sensor arrangement

## 2 结果与分析

选取的图像是桩下压50~80 mm的区段,如图4所示,16目的粒子在图像分析中可识别性强,展现出强对比位移边界和不同梯度的矢量位移,其中黑色机制砂在背景对比度上优于白色机制砂,可以更有效地跟踪土体位移方向,80目的机制砂在桩贯入这类大变形研究中容易出现颗粒丢失,并且无法有效反映桩周土体的位移梯度。因此,综合考虑粒径稳定性与背景对比度,16目黑色机制砂是高含水率软土的示踪粒子优选。

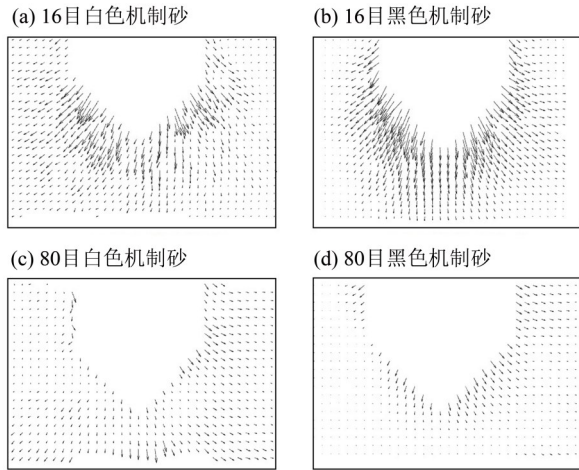


图4 示踪粒子位移计算效果

Fig. 4 Displacement calculation result based on tracer particles

### 2.1 50%含水率软土桩侧位移

采用GeoPIV\_RG算法对试验采集的图像进行位移计算、图像畸变校正及坐标转换等操作,获得桩侧土体在沉桩结束时的水平与竖向位移场如图5~6所示。分析区域宽600 mm、高400 mm,覆盖整个软土区域。考虑桩两侧的位移基本一致,仅用单侧土体区域进行数据分析。根据沉桩过程中不同桩距的水平位移差异,将水平位移1 mm作为水平影响区边界,此时土体水平位移场影响范围约为距桩心154 mm处,与已有研究中软土扰动范围约为4倍桩径的结论基本一致(徐建平等,2000),验证了模型试验的合理性与算法的精度。

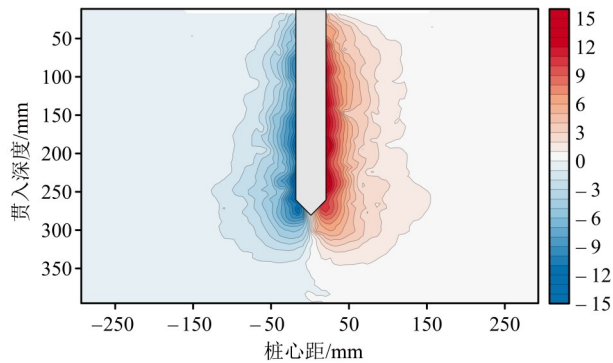


图5 沉桩结束时水平位移云图

Fig. 5 Horizontal displacement field at the end of pile installation

**2.1.1 桩侧土体水平位移** 对每帧图像中的子集进行逐点位移计算,形成桩贯入过程中的土体水平位移云图,如图7所示。根据桩侧土体水平位移规律,土体按深度划分为3个变形区域,如图8所示。

当模型桩穿透砂垫层到达软土层顶部阶段,覆

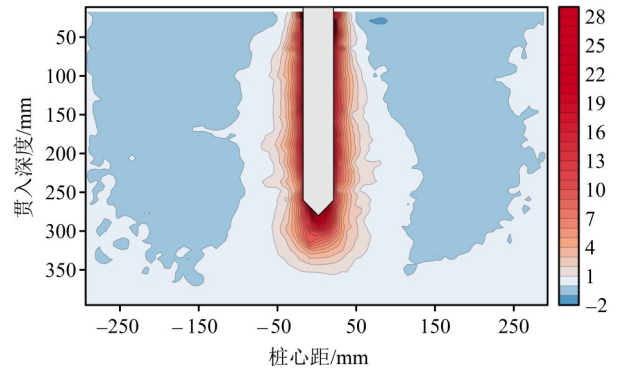


图6 沉桩结束时的竖向位移云图

Fig. 6 Vertical displacement field at the end of pile installation

砂层的挤压效应使软土1区底部出现最大水平位移,如图7a所示。桩侧 $r/R = 2$ 位置处,不同深度土层水平位移随桩贯入深度变化如图9所示,随着桩持续贯入软土层至80 mm期间,最大水平位移深度在2区缓慢下移,位移量随之增大。桩贯入软土层80~160 mm阶段,1区底部和2顶部之间的最大位移区域出现位移回弹,最大水平位移深度随桩贯入不断向下移动。桩贯入软土层160~280 mm阶段,1区底部和2顶部之间位移量趋于稳定,最大水平位移深度随着桩贯入继续向下移动,最大水平位移先增大后保持在9.5 mm左右,3区土体在桩贯入至软土层160 mm之前几乎未产生水平位移,贯入深度超过160 mm之后,其水平位移随着贯入深度增加而增大,且同一贯入深度下位移随深度增加而减小。

$r/R = 3$ 和 $r/R = 4$ 位置处的水平位移变化分别如增强出版:附图1~2所示。相较于 $r/R = 2$ , $r/R = 3$ 位置处2区上部土体在桩贯入到120 mm时最大水平位移深度更大,最大水平位移更小。随着桩贯入深度增加,2区上部出现的最大水平位移先增大,当最大水平位移的深度与桩贯入深度一致时达到最大,此时最大水平位移为4.5 mm。桩贯入软土层深度120~200 mm阶段,最大水平位移稳定在4.5 mm,深度约为120 mm。桩贯入软土层深度200~280 mm阶段,水平位移深度趋势由单峰向双峰转变, $r/R = 4$ 处位移响应规律与 $r/R = 3$ 基本一致,水平位移更小。

当桩贯入深度达到280 mm,沉桩过程结束时提取分析区域各子集最终的水平位移,不同桩距下的水平位移随深度的变化如图10所示。在1区,位移随深度增加而增大,距桩中心越远水平位移越小。2区 $r/R = 2$ 位置处水平位移增长趋势较1区更缓。 $r/R = 3$ 位置处,位移随深度呈比较明显的双峰趋势。桩心距离继续增大后,同一深度水平位移进一步减小。综合分析显示,整个沉桩过程中水平位移

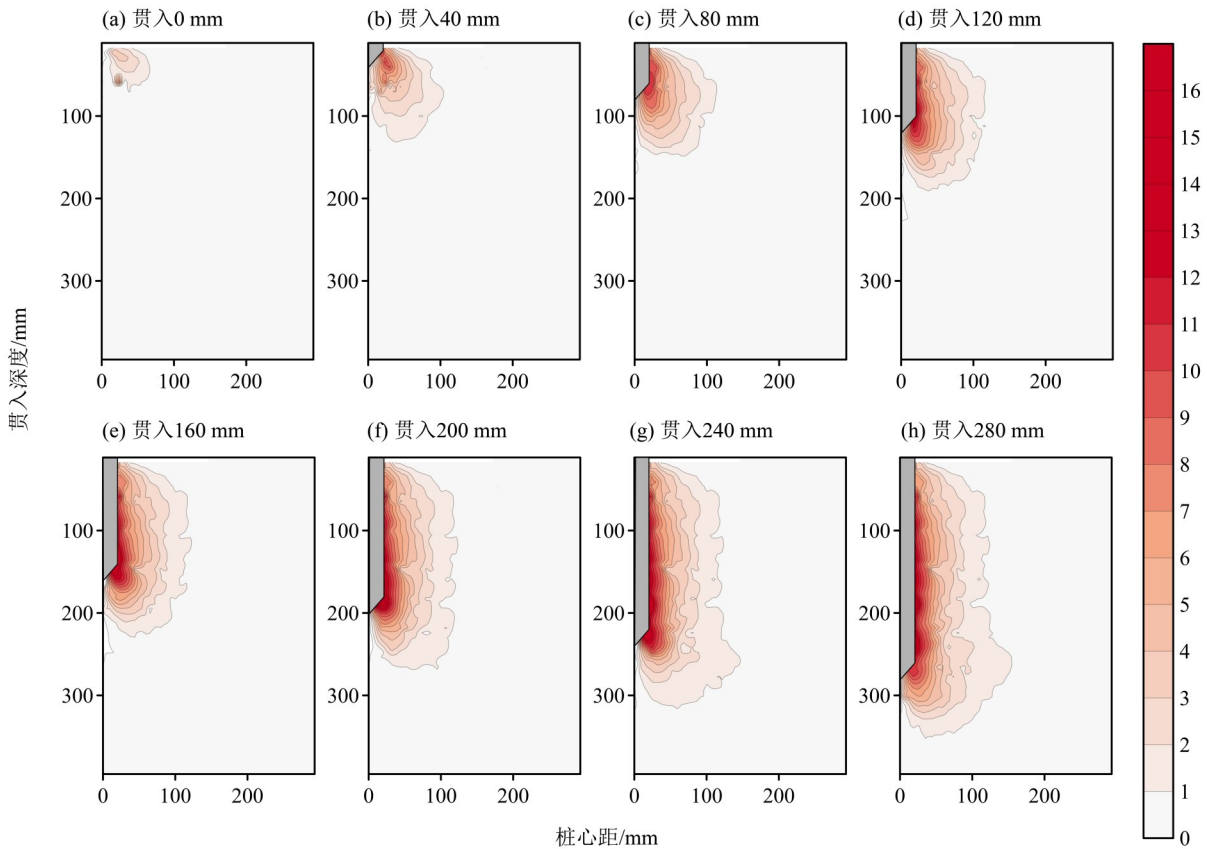


图 7 50% 含水率下不同贯入深度的水平位移云图

Fig. 7 Horizontal displacement fields at various penetration depths under 50% water content

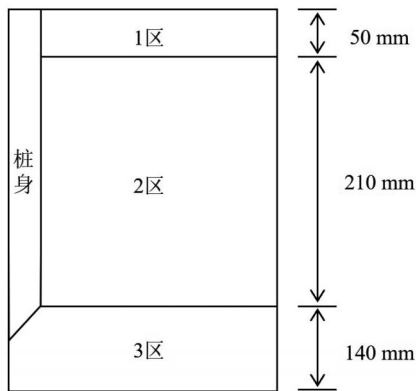


图 8 土体变形区域划分

Fig. 8 Zoning of soil deformation regions

影响范围最大为 3.9 倍桩径, 出现在沉桩结束时。

图 11 为不同贯入深度对应的最大水平位移, 可以发现在贯入深度为 200 mm 时具有明显的转折。采用两段式量化贯入深度与水平影响范围, 有

$$x = \begin{cases} -55.07\exp\left(\frac{-h}{38.11}\right) + 121.75, & h < 200, \\ -1184.44\exp\left(\frac{-h}{61.26}\right) + 167.76, & h \geq 200, \end{cases} \quad (1)$$

式中  $x$  为水平位移影响范围,  $h$  为贯入软土深度。

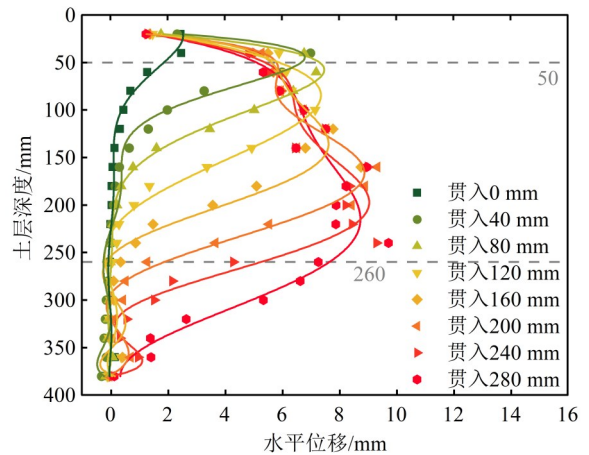


图 9  $r/R = 2$  处不同贯入深度水平位移随深度的变化

Fig. 9 Variation of horizontal displacement with depth at  $r/R = 2$  for different penetration depths

**2.1.2 桩侧土体竖向位移** 图 12 中, 当桩贯穿砂垫层到达软土层顶部, 由于上覆垫层的挤压作用, 桩下方土体竖向位移随深度逐渐减小, 最大值为 13.4 mm, 113 mm 以下区域竖向位移小于 1 mm, 对应竖向影响区范围为 2.8 倍桩径。桩贯入至软土层 40 mm 处, 竖向位移最大值为 29.9 mm, 出现在桩尖

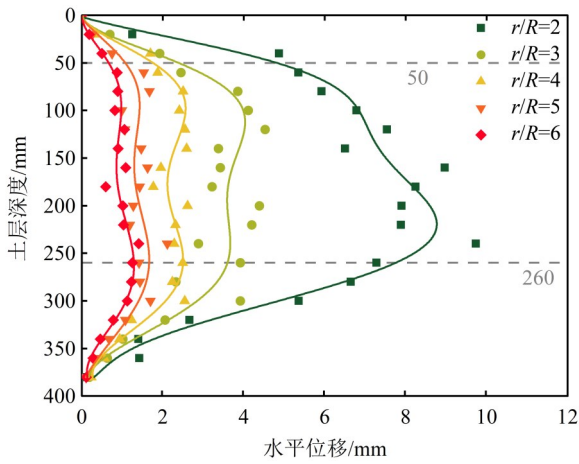


图 10 距桩心不同距离水平位移随深度的变化

Fig. 10 Horizontal displacement profiles at various distances from the pile center

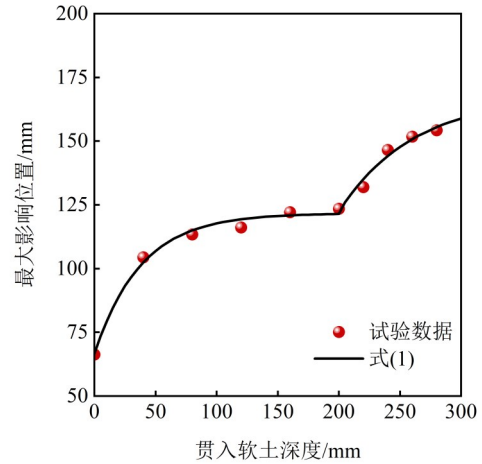


图 11 50% 含水率下最大水平位移随最大贯入深度的变化

Fig. 11 Maximum horizontal displacement versus maximum penetration depth under 50% water content

斜面中部, 160 mm 以下的土层竖向位移小于 1 mm, 影响范围为 3 倍桩径, 50 mm 深度处竖向位移随距桩心距离增大而减小, 超过 104 mm 后部分土体产生小幅度反向位移。随着桩持续贯入, 最大竖向位移值在桩尖斜面处向桩尖靠近, 影响范围不断减

小; 当沉桩结束时, 竖向影响范围减至 1.9 倍桩径, 反向运动区域进一步扩大。如图 13~14 所示, 桩侧土体竖向位移在一定范围内随距离增大而减小, 浅层土体更易出现明显反向位移。

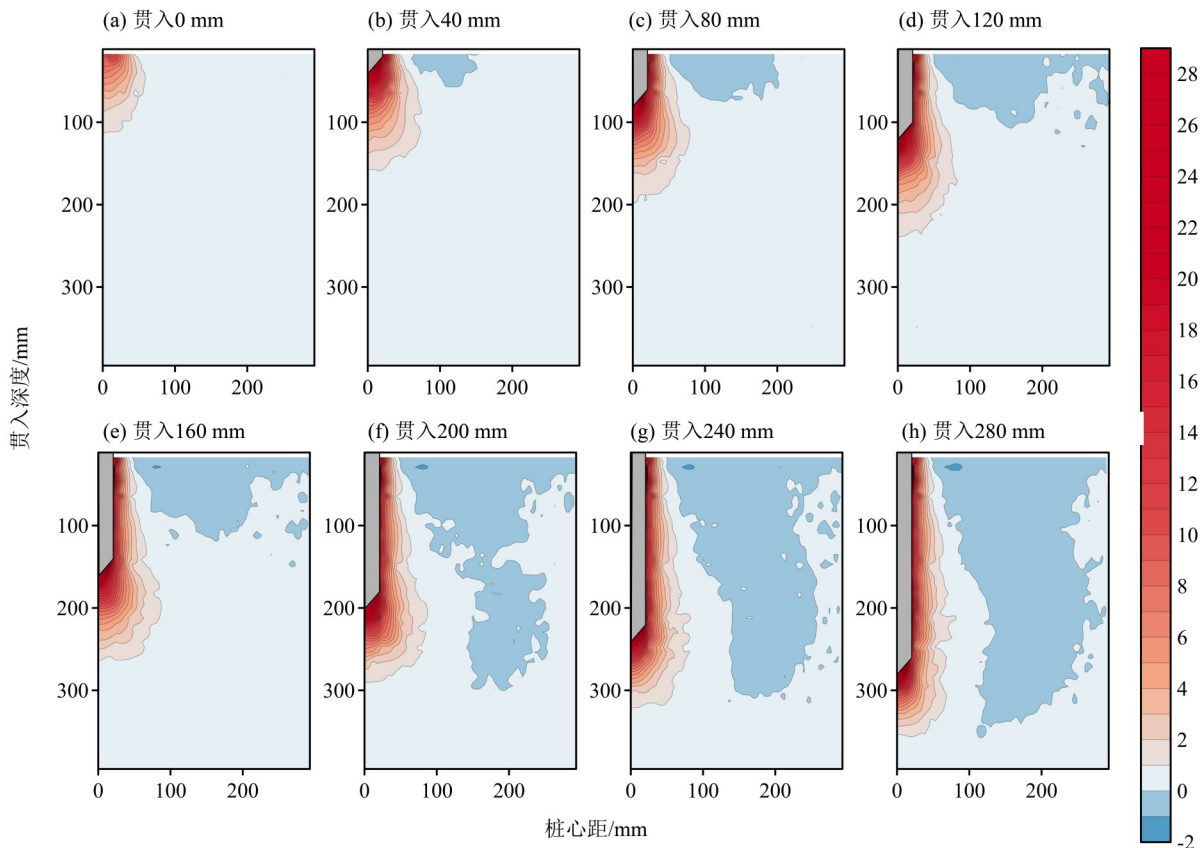


图 12 50% 含水率下不同贯入深度的竖向位移云图

Fig. 12 Vertical displacement fields at various penetration depths under 50% water content

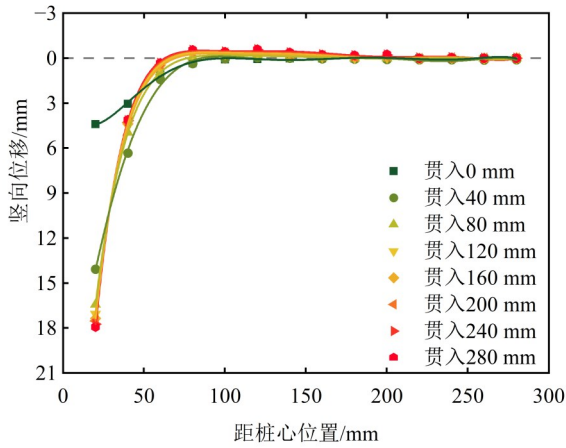


图 13 50 mm 深处竖向位移随距桩心位置的时程变化  
Fig. 13 Time history of vertical displacement at 50 mm depth versus distance from pile center

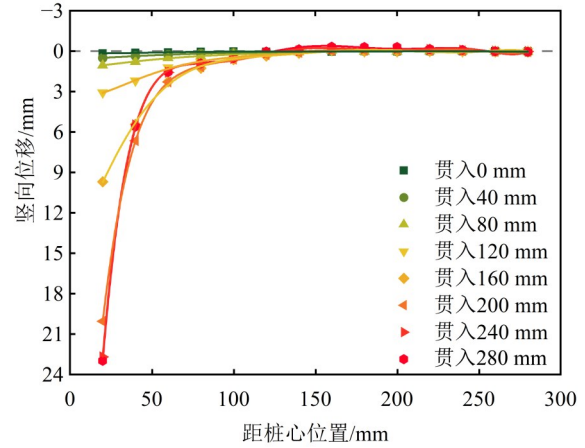


图 14 150 mm 深处竖向位移随距桩心位置时程变化  
Fig. 14 Time history of vertical displacement at 150 mm depth versus distance from pile center

2.2 70% 含水率软土位移

将软土层替换为含水率 70% 的软土, 得到土体的水平与竖向位移云图如图 15~16 所示。桩贯穿砂垫层到达软土层顶部时候, 挤压效应仅影响浅层土体。与 50% 含水率软土相比, 70% 含水率软土土体的竖向与水平位移范围明显减小。当桩贯入软土层深度 80 mm, 桩侧靠近土层顶部出现反向水平位

移, 由于高含水率的软土呈流塑状态, 桩贯入土层一定深度后, 桩侧与土体之间的摩擦使得近桩侧的土体随桩下移, 周围的土体发生向内流动以填补桩壁附近的空隙。试验结果显示, 沉桩结束时, 水平影响范围为 1.8 倍桩径, 竖向影响范围为 1.2 倍桩径。不同贯入深度对应的最大水平位移呈线性增长 (如图 17 所示), 表述为

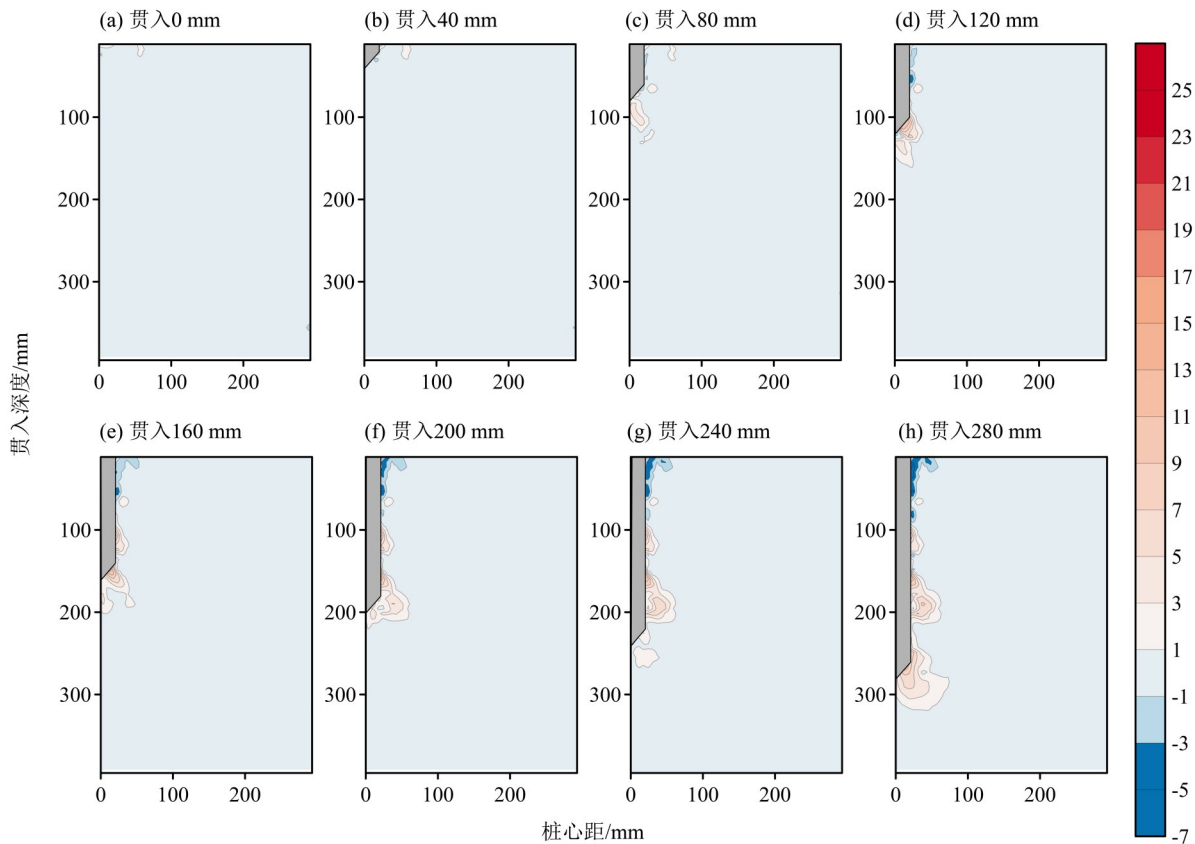


图 15 70% 含水率下不同贯入深度的水平位移云图

Fig. 15 Horizontal displacement fields at various penetration depths under 70% water content

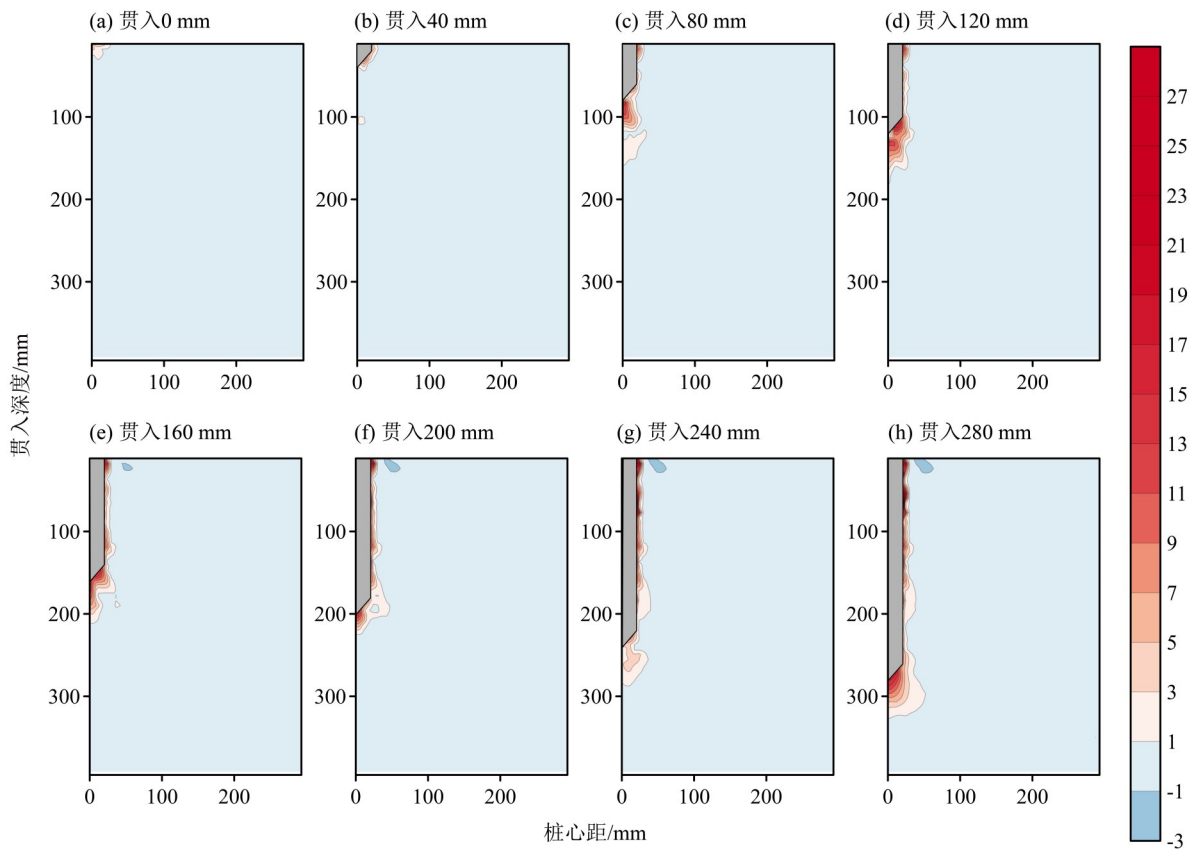


图 16 70% 含水率下不同贯入深度的竖向位移云图

Fig. 16 Vertical displacement fields at various penetration depths under 70% water content

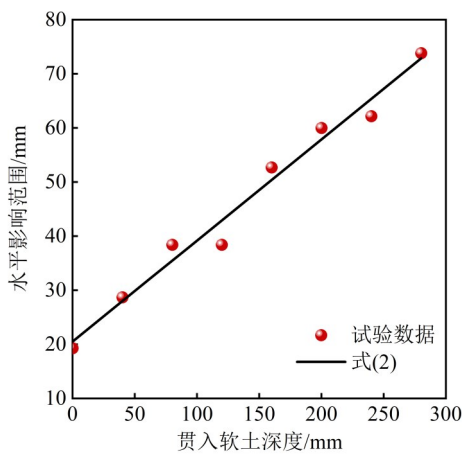


图 17 70% 含水率下最大水平位移随最大贯入深度的变化

Fig. 17 Maximum horizontal displacement versus maximum penetration depth under 70% water content

$$x = 0.19h + 20.52. \quad (2)$$

### 2.3 土压力

试验模型箱内微型土压力传感器安装在 3 个不同深度 3 个不同桩心距处, 所得沉桩过程中 50% 和 70% 含水率软土层不同位置的土压力响应分别如图 18~19 所示。由于 70% 含水率软土呈流塑态, 土压

力传感器难以采得准确的数据, 因此主要分析 50% 含水率的软土层土压力响应。50% 含水率中土压力峰值更高且曲线波动更剧烈, 特别是靠近桩体的位置, 当桩下沉到靠近土压力传感器的深度时, 土压力值迅速升高, 最大值超过了 1.5 kPa, 表明软土处于软塑状态下土体的抗剪强度相对流塑状态更高, 沉桩过程更容易形成应力集中, 扰动强度更大。而流塑状态的软土土压力曲线更为平缓, 土体的变形能力更强, 土压力更容易扩散。桩心距 40 mm 的土压力传感器所记录的土压力值远高于 80 和 120 mm 处的土压力值, 这说明软土在水平向的扰动具有明显的衰减性。可以发现, 深度越深土压力响应越明显, 说明桩尖推进过程中应力集中主要分布在桩尖以下及其邻近区域并不断向外扩展, 扩展范围发展到一定程度后保持不变。

### 2.4 桩顶压力

图 20 展示了桩以 1 mm/s 速度贯入的过程中, 不同含水率条件下桩顶所受的下压力随桩尖位移的变化。在桩贯入砂垫层过程中, 两条曲线均呈快速上升趋势, 表明砂层的抗力较强, 桩贯入需要克服较大的桩端阻力与桩侧摩阻力。桩尖快接近软

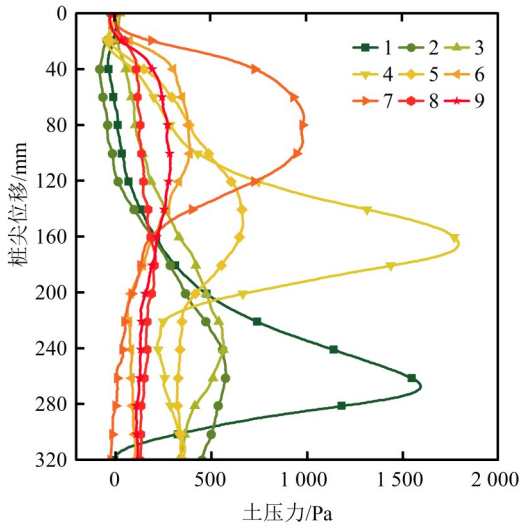


图 18 50%含水率下土压力传感器随桩尖位移的时程变化  
 Fig. 18 Time history of earth pressure versus pile tip displacement under 50% water content

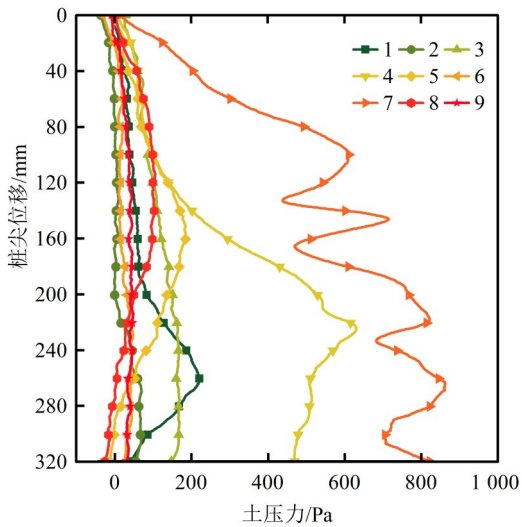


图 19 70%含水率下土压力传感器随桩尖位移时程变化  
 Fig. 19 Time history of earth pressure versus pile tip displacement under 70% water content

土层时, 桩顶压力出现最大值, 之后呈下降趋势, 这是由于桩处在砂层与软土层过渡段, 软土无法提供和砂层一样的桩端阻力与桩侧摩阻力, 导致抗力减弱。进入软土层 40 mm 后, 桩壁与土层接触面积不断增大, 50% 含水率的压力曲线开始呈上升趋势, 70% 含水率的压力曲线整体波动幅度大但趋势平缓, 这表明软塑状态的软土在桩贯入过程中不断破坏挤压并提供桩侧摩阻力; 而流塑状态的软土强度较低, 在桩贯入过程中更容易产生土体的流动, 无法提供不断增长的桩侧摩阻力。整个沉桩过程, 在桩贯入深度到 150 mm 之前, 两种含水率软土的压力趋势大体一致; 150 mm 之后, 50% 含水率的软土

提供的桩端阻力与桩侧摩阻力大于 70% 含水率的软土。

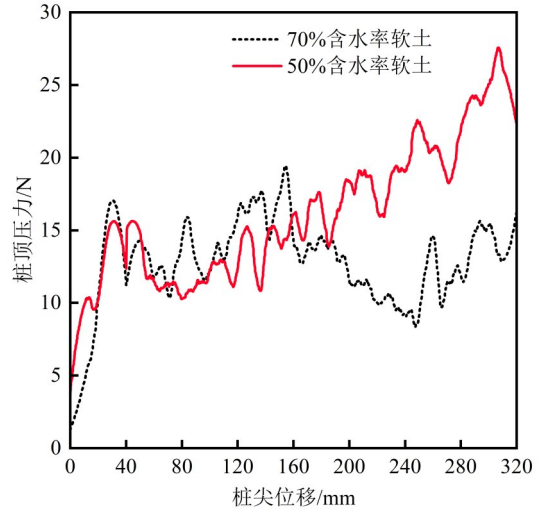


图 20 不同含水率下桩顶压力随桩尖位移的时程变化  
 Fig. 20 Time history of pile head force versus pile tip displacement under different water contents

### 3 结论

1) 随着桩中心水平距离增加, 桩侧土体水平位移呈明显的空间衰减趋势, 扰动强度和影响深度都逐渐减弱。靠近桩体的土体水平变形主要集中在深层土体, 桩中心水平距离越大, 扰动带向深层扩展的趋势越弱。

2) 软土含水率越高, 水平和竖向影响区越小, 软土水平影响范围最大值出现在沉桩结束时。沉桩过程中部分土体由竖向挤压变形转换为水平挤出变形, 因此竖向影响范围最大值并不是出现在沉桩结束时, 而是先增大后减小。沉桩结束时, 软塑状态软土的水平 and 竖向影响范围分别为  $3.9D$  和  $1.9D$ , 流塑状态软土的水平 and 竖向影响范围分别为  $1.8D$  和  $1.2D$ 。

3) 量化了贯入深度与水平影响区范围的关系, 当软土状态由软塑变为流塑时, 关系曲线由非线性转变为线性。

4) 软塑状态的软土强度更高, 压力响应更加强烈且集中, 更能有效提供桩侧摩阻力与桩端阻力。流塑状态的软土流动性更强, 压力响应更加分散, 桩贯入过程中抗力波动较大。

5) 本研究在模型箱内壁涂抹透明润滑油、凡士林以减小土体与箱壁摩擦, 虽然降低了边界约束对土体位移的影响, 但黏性物质易产生额外的边界效应, 后续需探索更适宜的边界处理材料。

## 参考文献:

- 李逸涛, 2022. 软土与异形结构面的相互作用特性及抗力计算方法[D]. 上海: 同济大学.
- 刘汉龙, 金辉, 丁选明, 等, 2012. 现浇 X 形混凝土桩沉桩挤土效应现场试验研究[J]. 岩土力学, 33(S2): 219-223.
- 刘振亚, 刘建坤, 李旭, 等, 2018. PIV 技术在非饱和冻土冻胀模型试验中的实现与灰度相关性分析[J]. 岩土工程学报, 40(2): 313-320.
- 徐建平, 周健, 许朝阳, 等, 2000. 沉桩挤土效应的模型试验研究[J]. 岩土力学, 21(3): 235-238.
- 张芳枝, 陈晓平, 黄国怡, 2003. 珠江三角洲饱和软粘土的固结特性试验研究[J]. 岩土力学, 24(S2): 192-194.
- 张雪松, 屠毓敏, 龚晓南, 等, 2004. 软粘土地基中挤土桩沉降时效性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 23(19): 3365-3369.
- 赵春风, 杜兴华, 赵程, 等, 2013. 中掘预应力管桩挤土效应试验研究[J]. 岩土工程学报, 35(3): 415-421.
- ARENSEN L U, SEGO D C, TAKE W A, 2007. Measurement of ice lens growth and soil consolidation during frost penetration using particle image velocimetry (PIV) [C]// The 60th Canadian Geotechnical Conference. Ottawa: Canadian Geotechnical Society: 2046-2053.
- HOSSAIN M S, HU Y, FRANDOLPH M F, et al, 2005. Limiting cavity depth for spudcan foundations penetrating clay[J]. Géotechnique, 55(9): 679-690.
- JAYALATH C, GALLAGE C, 2021. Evaluating the tensile properties of geogrids using the particle image velocimetry technique [J]. J Mater Civ Eng, 33(11): 04021328.
- JIANG T, LIU C, ZHANG X, et al, 2023. Experimental study on the deformation of sandy soil around multi-helical anchor piles under horizontal load[J]. Appl Ocean Res, 139: 103721.
- JIANG T, WANG L, ZHANG J, et al, 2020. Effect of water content on near-pile silt deformation during pile driving using PIV technology[J]. Geomech Eng, 23(2): 139-149.
- LI F R, SUN H C, WANG Z Y, 2012. Mechanism analysis and experimental study of soil-compacting by silent piling [[J]. Appl Mech Mater, 170/171/172/173: 457-460.
- SERRIDGE C J, 2021. Soft clay engineering and ground improvement[M]. Boca Raton: CRC Press.
- STANIER S A, BLABER J, TAKE W A, et al, 2016. Improved image-based deformation measurement for geotechnical applications [J]. Can Geotech J, 53(5): 727-739.
- SVEEN J K, 2004. Quantitative imaging techniques and their application to wavy flows [M]. LIU P L F. Advances in coastal and ocean engineering. Great Britain: World Scientific Publishing Co Pte Ltd.
- TAYLOR Z J, GURKA R, KOPP G A, et al, 2010. Long-duration time-resolved PIV to study unsteady aerodynamics [J]. IEEE Trans Instrum Meas, 9(12): 3262-3269.
- THIELICKE W, STAMHUIS E J, 2014. PIVlab-towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB[J]. J Open Res Softw, 2: e30.
- WANG M, LI X, LIU Z, et al, 2020. Application of PIV technique in model test of frost heave of unsaturated soil [J]. J Cold Reg Eng, 34(3): 04020014.
- WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M, et al, 2001. A deformation measurement system for geotechnical testing based on digital imaging, close-range photogrammetry, and PIV image analysis [C]//15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Istanbul, Turkey: 1-3.
- WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D, 2003. Soil deformation measurement using particle image velocimetry(PIV) and photogrammetry[J]. Geotechnique, 53(7): 619-631.
- YUE X, XIE Y, ZHANG H, et al, 2020. Study on geotechnical characteristics of marine soil at Hong Kong-Zhuhai-Macao tunnel[J]. Mar Geores Geotechnol, 38(6): 647-658.

(责任编辑 王海蓉)