

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.083



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 施工顺序对微型钢管桩加固既有基础变形的影响试验研究

刘江涛<sup>1</sup>, 李存军<sup>1</sup>, 于江华<sup>2</sup>, 张彦红<sup>1</sup>, 张春彬<sup>1</sup>, 孔纲强<sup>2</sup>

(1. 中铁(上海)投资集团有限公司, 上海 201101; 2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210024)

**摘要:**微型钢管桩由于具有施工效率高、对周围环境友好等技术优点,被广泛应用于既有建筑物的增层改造、加固及纠偏工程中。施工顺序会影响加固或纠偏效果,甚至影响建筑物的安全,然而围绕施工顺序对微型钢管桩加固既有基础的变形特性影响的研究仍相对不足。基于透明土材料和粒子图像测速(Particle Image Velocimetry, PIV)处理技术,开展不同沉桩顺序(逆时针、顺时针结合、Z字形及对称形)下既有基础微型桩加固的可视化模型试验,分析加固过程引起的桩周土体位移场变化,以及不同沉桩加固顺序对既有承台的影响规律,并确定最优的加固方案。结果表明,在试验条件下,承台面下方的桩对桩周的土体有挤密作用,在承台周边压桩时,承台面下方的桩周围土体位移较小,相对于无承台情况影响范围缩小42%,最大位移缩小36%;对称加固顺序相对最优,施工过程中对既有基础的抬升位移仅为最不利加固顺序时的56%。

**关键词:**既有基础;微型钢管桩;透明土;加固顺序;位移场

中图分类号:TU478 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2024)04-0100-09

## Experimental study on influence of construction sequence on deformation of existing foundation reinforced with micropile

LIU Jiangtao<sup>1</sup>, LI Cunjun<sup>1</sup>, YU Jianghua<sup>2</sup>, ZHANG Yanhong<sup>1</sup>, ZHANG Chunbin<sup>1</sup>, KONG Gangqiang<sup>2</sup>

(1. China Railway (Shanghai) Investment Group Co., Ltd., Shanghai 201101, P. R. China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

**Abstract:** Micro steel pipe pile is widely used in the reconstruction, reinforcement and rectifying of existing buildings considering that it is of high construction efficiency and environmentally friendly. The construction sequence would influence the effect of reinforcement or rectification and even the safety of the building. However, the research about influence of the construction sequence on displacement of the existing foundation reinforced by micro steel pipe piles is still relatively insufficient. Based on transparent soil material and particle image velocimetry (PIV) technology, this study performed the visual model test of reinforcing existing

收稿日期:2022-01-10

基金项目:国家自然科学基金(52027812)

作者简介:刘江涛(1980-),男,高级工程师,主要从事工程结构研究,E-mail:260386328@qq.com。

孔纲强(通信作者),男,博士,教授,E-mail:gqkong1@163.com。

Received: 2022-01-10

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52027812)

Author brief: LIU Jiangtao (1980-), senior engineer, main research interest: engineering structure, E-mail: 260386328@qq.com.

KONG Gangqiang (corresponding author), PhD, professor, E-mail: gqkong1@163.com.

foundation via micro piles in different sinking orders (counterclockwise type, combined clockwise and counterclockwise type, Z type and symmetrical type), analyzed the displacement field of soil caused and the influence of different sinking orders on the cushion cap, pointed out the optimal strengthening scheme. The results indicate that under the test conditions, the pile under the cushion cap had a compacting effect on the surrounding soil. When the pile sank around the cushion cap, the soil displacement around was less significant, and the soil disturbance zone was reduced by 42%, and the maximum displacement was reduced by 36% compared with the case of no cushion cap. The symmetrical reinforcement sequence was optimal, considering that the lifting displacement was only reduced by half.

**Keywords:** existing foundation; micropile; transparent soil; reinforcement sequence; displacement field

既有建筑物在使用过程中因改变建筑物的使用功能或者受环境的影响,如增加荷载、改扩建、新建地下工程等,需要对原有基础进行加固,以达到满足安全性的要求<sup>[1-3]</sup>。微型钢管桩因其贯入性能优越、搬运与堆放操作容易、竖向及水平向承载力大等技术优点,被广泛应用于建筑物既有基础加固工程应用中<sup>[4]</sup>。Cadden等<sup>[5]</sup>发现微型桩摩阻力的分配将因土层土质条件、桩身自身刚度和桩土接触情况不同而异。刘小丽等<sup>[6]</sup>以微型钢管桩-喷锚联合支护的岩石基坑工程为对象,通过数值模拟分析了微型钢管桩在岩石基坑支护中的作用机制。唐咸远等<sup>[7]</sup>通过试验发现,不同标准计算的极限承载力和抗弯刚度与试验所得的相差较大。吕凡任等<sup>[8]</sup>、Fiscina等<sup>[9]</sup>分别在软土和热带红土中开展了微型桩的抗压和抗拔承载特性现场试验,分析了其荷载沉降规律和传力机理。杨汉臣<sup>[10]</sup>系统分析了微型钢管桩的加固作用机理,并提出一套设计计算方法。学者们针对微型钢管桩加固性能开展的研究较多<sup>[11-12]</sup>,但关于微型钢管桩不同加固顺序产生的挤土效应研究较少。

可视化透明土试验技术是通过利用人工合成透明土材料和粒子图像测速(Particle Image Velocimetry, PIV)技术实现土体内部变形的观测,进而实现土体内部位移场、渗透渗流、土体强度、三维变形等问题的可视化研究<sup>[13-14]</sup>。夏元友等<sup>[15]</sup>采用透明土材料,通过物理模型试验研究了锚杆拔出机理。梁越等<sup>[16]</sup>基于透明土原理,结合粒子图像测速技术,揭示孔隙液体的流动特性。王壮等<sup>[17]</sup>基于透明土技术,对岩边坡滑移机理进行了模型试验研究。孔纲强等<sup>[18-19]</sup>探讨了透明土材料与天然砂土物理力学特性的相似性,并开展了基础研究和相关岩土可视化实践应用。相关研究充分验证了采用透明土试验技术研究相关岩土工程中结构与土体相互作用机理的有效性;然而,既有研究中很少涉及微型钢管桩加固既有基础。

微型钢管桩在加固既有基础过程中会产生明

显的挤土效应,进而对既有基础和先前压入的桩产生一定的影响,不同的加固顺序产生的挤土效应不同。传统的试验研究难以对土体周围的位移场进行监测,因此,笔者基于透明土材料和数字图像处理技术,开展对称和非对称加固顺序下承台变形及桩周土体位移场的可视化模型试验,探讨不同位置沉桩及不同加固顺序对既有基础的影响规律,并提出最优的加固方案。

## 1 模型试验概况

### 1.1 依托工程简介

以河南理工大学(南校区)锅炉房基础加固工程项目为依托,由于建筑功能改变,增加两层楼板,上部荷载增加,故采用微型钢管桩进行既有基础加固。现场微型钢管桩加固过程照片如图1所示。



图1 现场微型钢管桩加固过程照片

Fig. 1 Photo of reinforcing process of micro steel pipe pile on site

现场两种加固顺序分别如图2(a)、(b)所示,图中中心灰色方块为既有基础的承台,在既有承台的基础周围布置8根微型钢管桩,并与新建的承台(图中蓝色部分)整体浇筑在一起构成基础,以此提高建筑物基础的承载力。图2中红色字体表示既有承台上部柱体相对的4个面,外围序号为压桩加固顺序,既有基础1的压桩加固顺序是逆时针,既有基础2的压桩加固顺序为顺逆时针结合,因为在边桩位置处有阻碍,在第3根桩压桩完成后无法按照逆时

针顺序继续压桩,第4根桩在第3根桩的对角位置压桩,之后按顺时针加固顺序压桩。

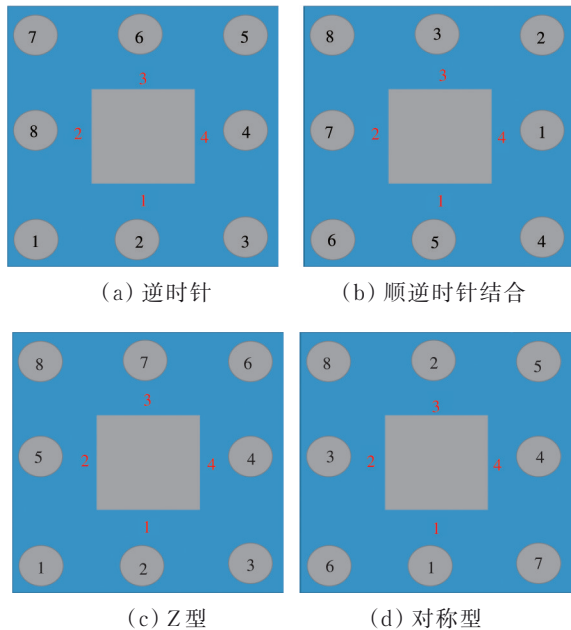


图2 模型试验加固顺序图

Fig. 2 Diagram of reinforcement sequence in model test

### 1.2 模型试验工况设计

按照现场实际施工顺序开展模型试验,并进行两组与现场试验不同的加固顺序。参考相关文献<sup>[20-21]</sup>,尽可能减小加固顺序对既有基础的影响,分别采用工程中常用的Z型加固顺序和对称加固顺序,Z型加固顺序和对称型加固顺序分别如图2(c)和(d)所示。

模型试验的模型槽、模型桩和模型承台均为无色透明的有机玻璃材质,微型钢管桩和既有承台下端灌注桩均按照1:50相似比进行缩尺,微型钢管桩桩长为13 m,缩小后为26 cm,桩径为159 mm,缩小后桩径为4 mm,但受加工条件的限制,采用桩长26 cm桩径为1 cm的模型桩。既有承台下端灌注桩桩长为8 m,桩径为0.8 m,经过缩尺考虑,实际加工条件承台下端模型桩的桩长为16 cm,桩径为2 cm,将试验中的模型桩在桩头位置打磨成圆锥状以与实际工程保持一致。模型槽尺寸为180 mm×180 mm×260 mm,壁厚为5 mm。现场试验中微型钢管桩距离土体边界为1.2 m,约为7D(D为桩径),故模型试验的模型桩距离模型槽边界按照原有模型桩相似比应该为28 mm(取30 mm),模型承台的长和宽均为120 mm。

研究加固顺序对既有承台的桩周土体位移场变化,首先需要得到压桩过程中土体的散斑场,而散斑场的照片是通过CCD相机拍摄激光入射透明土中那个面得到的,在考虑实际工程压桩顺序的基

础上,根据对称性选取两个具有代表性的激光入射面。激光入射面1为承台的某一边,选择承台其中的一边即可以代表其他3边桩周土体的位移场的变化;激光入射面2为经过承台面下方的桩的一个面,通过入射面2的压桩过程,可以得到下端桩的基础对称压桩的土体位移场的变化,激光入射面1、2示意图如图3所示。

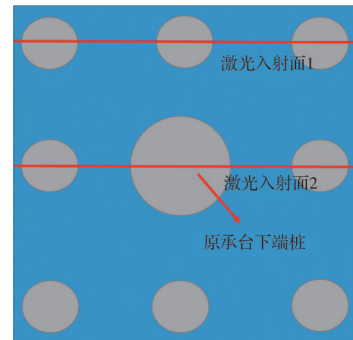


图3 激光入射面示意图

Fig. 3 Diagram of laser incident plane

针对这两个激光入射面,分析4种压桩工况下桩周土体位移场的变化。第1种工况(单压1根桩)对应的是激光入射面1中间的桩,第2种工况对应的是激光入射面1的3根桩从左至右连压,第3种工况对应的是激光入射面1两侧的两根桩从左至右连压,第4种工况对应的是激光入射面2两侧的两根桩从左至右连压,不论以何种工况沉桩,原承台面下方的桩即既有基础是始终存在的。

### 1.3 试验装置及试验材料

试验装置与设备如图4所示,沉桩过程由电机提供稳定转速带动压杆移动,压杆升降范围为0~200 mm,压力范围为0~5 000 N,压杆移动速度范围为0~5 mm/s。CCD高速工业数字相机的分辨率为1 280×960,采用帧曝光方式,帧数为15,曝光时间为100 μs~30 s,像元大小为4.65 μm×4.65 μm。采用的人工合成透明土选用折射率为1.458 5、相对密度为60%的熔融石英砂,试验孔隙液体选用正12烷和15号白油按质量比4:1混合调配而成,利用阿贝折射仪测定液体折射率,使其与熔融石英砂的折射率一致。粒径为0.5~1.0 mm,比重为2.186,最小干密度为0.97 g/cm<sup>3</sup>,最大干密度为1.274 g/cm<sup>3</sup>,直剪试验所得干样内摩擦角为37.3°,油样内摩擦角为38.3°,透明土试样物理力学性质详见文献[18]。熔融石英砂和配制的透明土如图5所示。

模型试验的目的是得到压桩加固过程对承台的位移的影响,基于透明土和PIV技术只可以得到承台4个面中的2个相对面上所标记的点的位移变化,而无法得到承台4个面的位移变化,故试验采用

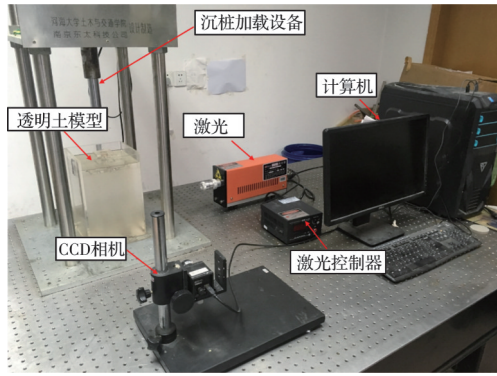


图 4 试验装置与设备图

Fig. 4 Diagram of test plant and equipment



图 5 熔融石英砂和透明土

Fig. 5 Molten quartz sand and transparent soil

标记法测量承台位移变化。具体方法是将细钢丝和承台上部绑扎在一起,再利用钢丝的易弯曲特性将其绕过压桩孔,与承台面相垂直伸出,为了使钢丝可以反映承台每条边中间点的沉降变化,用钢丝将伸出的钢丝固定在承台中间压桩孔位置,绑扎效果见图 6。为了使读数更加准确,靠近伸出的钢丝位置贴上刻度尺,这样可以减少读数的误差。通过这种方法,承台每个面的位移变化都可以通过与承台中间所固定的钢丝位置读出。

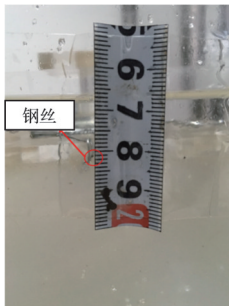


图 6 绑扎效果图

Fig. 6 Effect of Binding

### 1.4 试验过程

按照模型试验需求配制好透明砂土,对土体进行压实,之后确定透明槽、激光器、CCD 相机、沉桩加载仪在光学平台上的相对位置。打开激光器,调节功率并检验其与透明土体相互作用形成的散斑场切面的清晰度和均匀性,然后调整激光角度,使切面垂直入射并通过模型桩中心线。打开 CCD 相机,先大概调整 CCD 相机与模型槽之间的距离,使

CCD 相机正对模型槽,之后调整 CCD 相机焦距以获得较好的视场,并能拍摄整个压桩画面。将沉桩加载仪的静压桩速率调至试验需要的速率,同时通过图像采集软件控制 CCD 相机连续拍摄沉桩过程。压桩完成后,通过粒子图像处理软件 PIV-view2 分析获得的压桩过程图片,得到压桩过程中不同时刻的桩周土体的位移场变化,同时在对应的工况中记录既有承台 4 个面位移的变化。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 加固过程对桩周土体的影响

通过透明土模型试验得到单压一根桩时压桩加固过程中桩周土体位移场变化图如图 7 所示,图 7 右上角有一个代表位移矢量大小为 1 mm 的箭头,图中各个位置的位移矢量大小可通过与 1 mm 箭头长度的比值来确定,箭头越长,矢量越大。随着压桩深度的增加,压桩对桩端下部土体的影响范围从 2D 扩大到 6D 以上,土体的位移也随之增大,最大位移为 2.2 mm,位于桩端下方靠近桩体 3D 距离处;桩端土体的位移明显,靠近桩端下层的土体开始主要向下移动,随着压桩深度的增加,靠近桩端下层土体开始向右移动且位移逐渐增大,远离桩端下层的土体因为挤密效应开始向两边移动;随着靠近桩端下层的土体往下移动,远离桩端下层的土体受到挤压作用产生较小向上的位移。

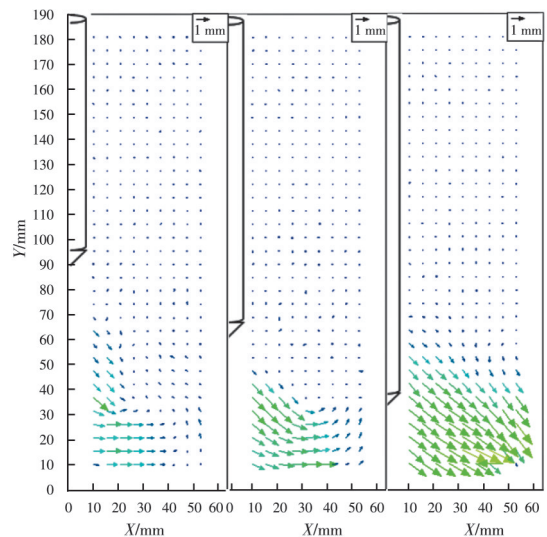


图 7 单压一根桩时加固过程位移场变化图

Fig. 7 Change of displacement field during the reinforcement process of a single pile

桩端正下方土体受到桩端向下的挤压作用,这个作用可以将其看作集中力,桩端正下方  $D$  范围内的土体以向下移动为主。桩端在  $D$  范围以外的左右侧土体以向左和向右移动为主,此范围内的土

体主要受到桩端  $D$  范围内的土体下移的挤压作用而向左、右移动,此时桩端  $D$  范围外的土体可视为受到分布荷载的作用。压桩时桩侧土体的位移并不明显,因为试验桩材料是有机玻璃,桩身过于光滑,与土体的摩擦较小,故桩侧的土体位移较小。

研究激光入射面 1 连压 3 根桩加固顺序的位移场变化图如图 8 所示,研究激光入射面 1 连压 2 根桩加固顺序的位移场变化图如图 9 所示,研究激光入射面 2 连压 2 根桩加固顺序的位移场变化图如图 10 所示。根据激光入射面 1 连压 3 根桩位移场变化图,当压入边侧桩时,桩端下层的土体开始主要向下移动,随后靠近桩端下层土体开始向右移动,位

移逐渐增大最后向上移动,位移场变化范围距离槽底  $4D$ ,最大位移为  $2.3\text{ mm}$ ,位于桩端正下方的土体处。当压入中间桩时,桩端土体向两侧移动,且向右移动的位移较大,并没有向上移动,位移场变化范围距离槽底  $3D$ ,此时最大位移为  $2.2\text{ mm}$ ,位于桩端下方靠近桩体  $3D$  距离处。当压入右边桩,桩端土体向两侧移动,且向左移动的位移较大,并没有向上移动,位移场变化范围距离槽底  $2D$ ,最大位移为  $2.1\text{ mm}$ ,位于第 2 根桩与第 3 根桩之间的槽底处。压桩过程中,桩端土体被逐渐挤密,桩端土体都向土体密度较低处移动且位移越来越小,每根桩引起的土体位移呈现出逐渐减小的趋势。

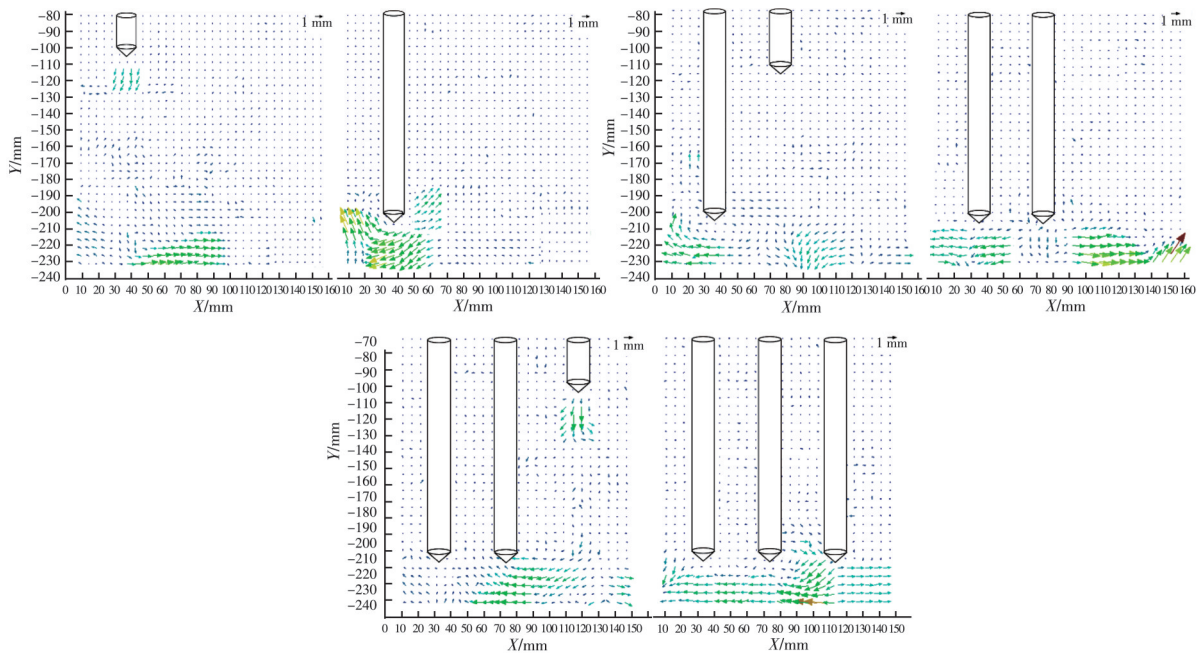


图 8 激光入射面 1 三根桩连压位移场变化图

Fig. 8 Change of displacement field during the continuous installation of the three piles in laser incident plane 1

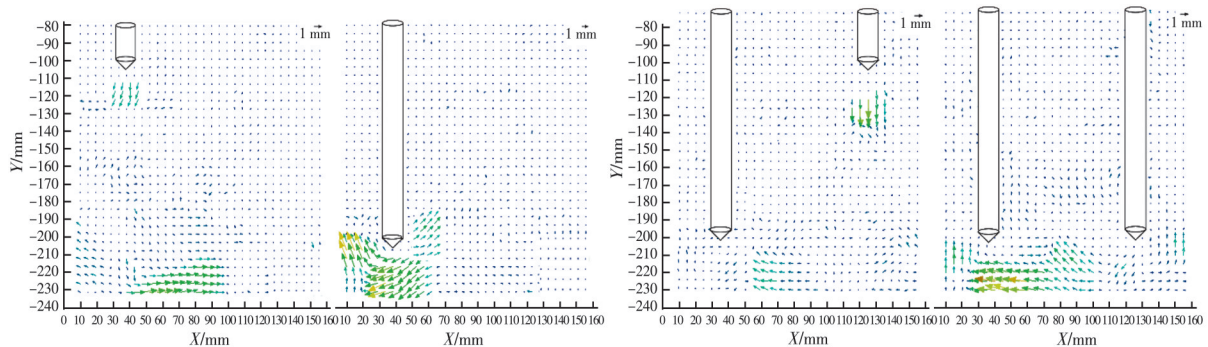


图 9 激光入射面 1 两根桩连压位移场变化图

Fig.9 Change of displacement field during the continuous installation of the two piles in laser incident plane 1

两根桩连压时,第 2 根桩沉桩结束后土体的最大位移为  $2.2\text{ mm}$ ,位于第 1 根桩的桩端下方。根据对比激光入射面 1 连压两根桩加固顺序和连压 3 根

桩加固顺序,当不存在中间桩压右边桩时,桩端左侧土体向左移动且在中间位置向上移动,最左端土体向上移动,此时压右边桩对底端土体位移场影响

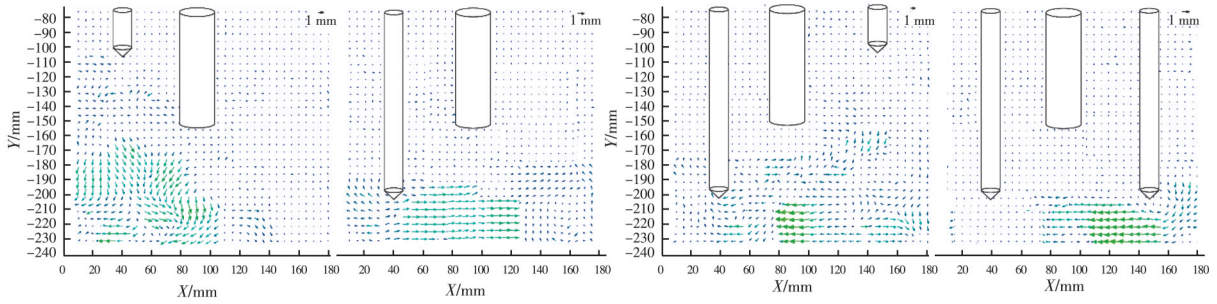


图 10 激光入射面 2 两根桩连压位移动场变化图

Fig. 10 The displacement field during the continuous installation of the two piles on laser incident plane 2

明显;当存在中间桩压右边桩时,桩端左侧土体仅向左移动且只影响中间位置,对中间桩左侧土体不产生影响,中间桩对透明槽中间土体有挤压作用,减弱了压右边桩对底端土体的影响。

当对激光入射面 2 进行两根桩连压时,由于存在既有承台面下方的桩,第 2 根桩的沉入对第 1 根沉入桩周围的土体几乎没有影响,两根沉桩引起的最大土体的位移均为 1.4 mm。通过对比激光入射面 1 连压两根桩加固顺序和激光入射面 2 连压两根桩加固顺序,得到当中间位置存在承台面下方的桩时,整个位移场的平均位移较小且压桩时位移场发生改变的区域较小,说明当对称压桩中间存在承台面下方的桩时,桩周围的土体会被挤密,桩周围土体在同样力作用下位移较小,影响的范围缩小了 42%,由 12D 变为 7D,缩小 42%,土体的最大位移缩小了 36%,由 2.2 mm 变为 1.4 mm。

### 2.2 加固顺序对既有基础的影响

逆时针加固顺序下承台的位移变化图如图 11 所示,根据图 11 可得,在加固过程中,柱 1 面最大抬升位移为 1.5 mm,从压第 1 根桩开始,到压第 2 根桩结束,压第 1 根桩抬升位移最大;柱 1 面最大下降位移为 0.8 mm,从压第 4 根桩到压第 5 根桩结束,压第 4 根桩下降的位移最大。柱 2 面最大抬升位移为 2.0 mm,从压第 1 根桩到压第 1 根桩结束。柱 3 面最大抬升位移为 2.0 mm,从压第 1 根桩到压第 1 根桩结束。柱 4 面最大抬升位移为 2.0 mm,从压第 1 根桩到压第 5 根桩结束,压第 5 根桩抬升的位移最大。

顺时针结合加固顺序下承台的位移变化图如图 12 所示,根据图 12 可得,在加固过程中,柱 1 面最大抬升位移为 2.4 mm,从压第 1 根桩开始,到压第 6 根桩结束,压第 4 根桩抬升位移最大。柱 2 面最大抬升位移为 2.0 mm,从压第 1 根桩到压第 7 根桩结束,压第 5 根桩抬升的位移最大。柱 3 面最大抬升位移为 1.0 mm,从压第 2 根桩到压第 2 根桩结

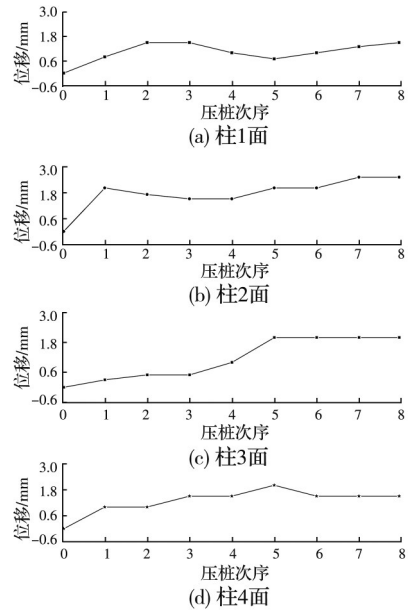


图 11 逆时针加固顺序下承台位移变化图

Fig. 11 Displacement variation of the pile cap under counterclockwise reinforcement sequence

束;柱 3 面最大下降位移为 0.5 mm,从压第 4 根桩到压第 6 根桩结束,压第 4 根桩下降的位移最大。柱 4 面最大抬升位移为 2.4 mm,从压第 1 根桩到压第 5 根桩结束,压第 1 根桩抬升的位移最大。

Z 字形加固顺序下承台的位移变化图如图 13 所示,根据图 13 可得,在加固过程中,柱 1 面位置基本不变;柱 2 面最大抬升位移为 1.7 mm,从压第 5 根桩到压第 5 根桩结束,柱 2 面最大下降位移为 1 mm,从压第 2 根桩到压第 3 根桩结束,压第 2 根桩和压第 3 根桩下降位移相同;柱 3 面最大抬升位移为 2.2 mm,从压第 3 根桩到压第 7 根桩结束,每根桩抬升的位移基本相同;柱 3 面最大抬升位移为 0.5 mm,从压第 1 根桩到压第 2 根桩结束;柱 4 面最大抬升位移为 1.8 mm,从压第 2 根桩到压第 3 根桩结束,压第 3 根桩抬升的位移最大。

对称加固顺序下承台的位移变化图如图 14 所示,根据图 14 可得,在加固过程中,柱 1 面最大抬升位移为 0.8 mm,从压第 6 根桩到压第 7 根桩结束,

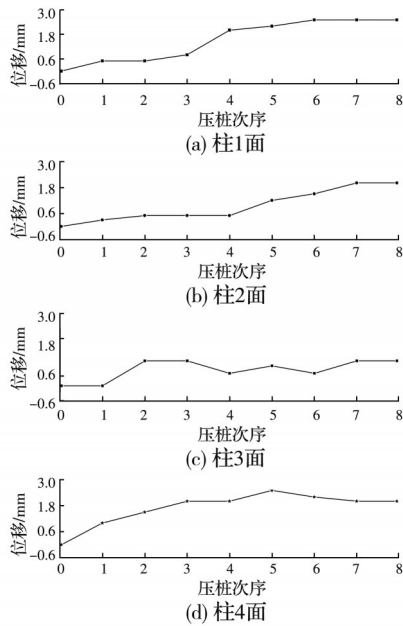


图 12 顺逆时针结合加固顺序承台位移变化图  
**Fig. 12 Displacement variation of the pile cap under combined clockwise and counterclockwise reinforcement sequence**

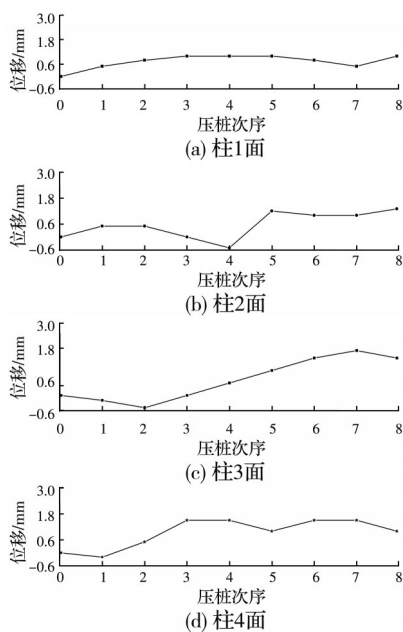


图 13 Z型加固顺序下承台位移变化图  
**Fig. 13 Displacement variation of the pile cap under Z-type reinforcement sequence**

压第 6 根桩抬升位移最大;柱 2 面最大抬升位移为 1.0 mm,从压第 1 根桩到压第 3 根桩结束,压第 3 根桩抬升位移最大,柱 2 面最大下降位移为 0.5 mm,从压第 4 根桩到压第 4 根桩结束;柱 3 面最大抬升位移为 0.9 mm,从压第 3 根桩到压第 5 根桩结束,压第 3 根桩抬升的位移最大;柱 4 面最大抬升位移为 1.4 mm,从压第 4 根桩到压第 5 根桩结束,压第 4 根桩抬升的位移最大。

在逆时针加固顺序中压桩 3 和桩 5,在顺逆时针

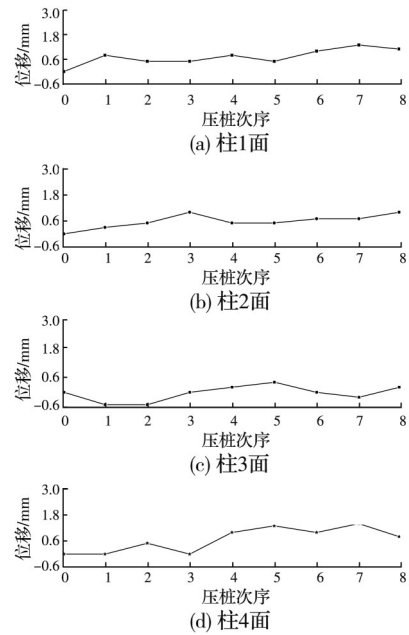


图 14 对称加固下顺序承台位移变化图  
**Fig. 14 Displacement variation of the pile cap under symmetry reinforcement sequence**

结合加固顺序中压桩 2、桩 4 和桩 6,在 Z 型加固顺序中压桩 1、桩 3 和桩 8 得出,当压桩在边角位置时,靠近压桩位置与承台相邻的两个面都抬升,而与压桩位置相对的两个面下降。在逆时针加固顺序中压桩 2 和桩 4,在顺逆时针结合加固顺序中压桩 7,在 Z 型加固顺序中压桩 7,在对称加固顺序中压桩 2 和桩 4 可以得出,当压桩在中间位置时,靠近压桩位置的承台面抬升,而与压桩位置相对的承台面下降,其他两个面略有抬升。

在逆时针加固顺序中,4 个面最大抬升位移为 2.5 mm,在顺逆时针结合加固顺序中,4 个面最大抬升位移为 2.4 mm,在 Z 型加固顺序中,4 个面最大抬升位移为 1.7 mm,在对称加固顺序中,4 个面最大抬升位移为 1.4 mm。在不同的沉桩顺序下承台的 4 个面的抬升位移不同,在顺逆时针结合加固顺序中,承台 4 个面位移变化最大;在对称型加固顺序中,承台 4 个面位移变化最小;得到承台在对称压桩加固顺序抬升位移最小,仅为最不利加固顺序的抬升位移的 56%。

通过 4 组承台位移变化图可知,逆时针加固顺序下位移变化曲线和顺逆时针结合加固顺序下位移变化曲线陡降明显,承台抬升明显,而 Z 型加固顺序位移变化曲线下降趋势较缓,承台抬升较明显,对称加固顺序下位移变化曲线变化趋势最缓,承台的抬升下降位移较小。承台抬升的位移变化是由于压桩过程对土体的挤压作用,上部土体产生土拱效应,逆时针加固顺序对土体的挤压作用最显著,对称加固顺序对土体的挤压作用较逆时针加固顺

序减弱很多,对称加固顺序是更合理的加固顺序。

逆时针、顺逆时针结合和Z型加固都是先压边角桩,再压中间桩,对称加固是先压中间桩,再压边角桩,通过试验的承台位移变化曲线可知,在前3组加固顺序中,先压边角桩时,承台相邻的面抬升明显,再压中间桩抬升很小或位置几乎不变,但在对称加固顺序下先压入中间桩时,承台相邻面抬升明显,再压入边角桩也存在较大抬升,故在边角位置压桩和中间位置压桩对承台位移的影响并不相同,在边角位置压桩对承台的位移影响范围大于在中间位置压桩,且会对后来压桩对承台的作用产生影响。

### 3 结论

基于透明土和PIV技术,开展了微型钢管桩加固既有基础过程中桩周土体位移场的可视化研究,以及4种代表性加固顺序对原承台位移影响的试验,得到如下结论:

1)沉桩过程中,靠近桩端下层的土体开始主要向下移动,随着压桩深度的增加,逐渐向两侧移动且向两侧移动的沉降缓慢增大,对桩端下部土体的影响范围也从 $2D$ 扩大到 $6D$ 以上,且桩端土体的沉降随之增大,最大位移位于桩端下方靠近桩体 $3D$ 距离处,随着靠近桩端下层土体往下移动,远离桩端下层的土体受到挤压作用而产生较小向上的位移。

2)承台面下方的桩对桩周的土体有挤密作用,在承台周边压桩时,承台面下方的桩周围土体位移较小,影响的范围由 $12D$ 变为 $7D$ ,缩小42%,土体的最大位移缩小了36%,由2.2 mm变为1.4 mm;通过激光入射面1连压3根桩加固顺序位移场变化图,对比压入不同位置的桩时,随着不断压桩,桩端土体被压密,桩端土体不再向上移动,土体受到压桩影响的范围由 $4D$ 变为 $2D$ ,影响范围缩小50%。

3)当压桩在边角位置时,靠近压桩位置相邻的两个面抬升,另外两个面下降;当压桩在中间位置时,此时靠近压桩位置的承台面抬升,与压桩位置相对的承台面下降,另外两个面略有抬升;在边角位置的压桩对承台的位移影响范围大于在中间位置的压桩。

4)在4种加固顺序中,最不利加固顺序为逆时针加固顺序,最优加固顺序为对称形加固顺序,最优加固顺序的抬升位移仅为最不利加固顺序的抬升位移的56%。

### 参考文献

- [1] 曹明星,高永涛,周喻.基于树根桩地基加固法的井塔纠偏方案[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(10):2906-2916.  
CAO M X, GAO Y T, ZHOU Y. Correction scheme of auxiliary shaft tower based on foundation reinforcement method using root piles [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(10): 2906-2916. (in Chinese)
- [2] 张超哲,童立元,刘松玉,等.后注浆静压复合桩在复杂运营供水结构加固中的应用[J].东南大学学报(自然科学版),2021,51(1):46-52.  
ZHANG C Z, TONG L Y, LIU S Y, et al. Application of post-grouting static-pressure composite pile in complex operation water supply structure [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(1): 46-52. (in Chinese)
- [3] MA L Q, YANG K, YUAN W Z, et al. Centrifuge modeling of the pile foundation reinforcement on slopes subjected to uneven settlement [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(5): 2647-2658.
- [4] 潘健,袁文俊,韦莎丽,等.微型钢管灌注桩的竖向承载性状研究[J].岩土工程学报,2019,41(Sup1):77-80.  
PAN J, YUAN W J, VAISHALI S, et al. Shaft bearing behaviors of micro cast-place piles with steel tubes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Sup1): 77-80. (in Chinese)
- [5] CADDEN A, GÓMEZ J, BRUCE D, et al. Micropiles: recent advances and future trends [C]// Contributions in Honor of George G. Gobel. July 27-31, 2004, Los Angeles, California, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2004: 140-165.
- [6] 刘小丽,李白.微型钢管桩用于岩石基坑支护的作用机制分析[J].岩土力学,2012,33(Sup 1):217-222.  
LIU X L, LI B. Analysis of supporting mechanism of micro-steel-pipe piles in rock foundation pit [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(Sup 1): 217-222. (in Chinese)
- [7] 唐咸远,杨和平,肖杰,等.注浆微型钢管桩抗弯承载力及抗弯刚度研究[J].工业建筑,2016,46(10):89-94.  
TANG X Y, YANG H P, XIAO J, et al. Experimental study of flexural behavior of grouted micro steel pipe piles [J]. Industrial Construction, 2016, 46(10): 89-94. (in Chinese)
- [8] 吕凡任,陈仁朋,陈云敏,等.软土地基上微型桩抗压和抗拔特性试验研究[J].土木工程学报,2005,38(3):99-105.  
LÜ F R, CHEN R P, CHEN Y M, et al. Field tests on compression and uplift behavior of micropiles in soft ground [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38



- (3): 99-105. (in Chinese)
- [9] FISCINA L F G, BARBOSA Y, ALBUQUERQUE P J R, et al. Field study on axial behavior of instrumented post-grouted steel pipe micropiles in tropical lateritic soil [J]. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2021, 6(2): 1-17.
- [10] 杨汉臣. 微型钢管桩在边坡治理中的应用及其机理分析[D]. 长沙: 中南大学, 2007.  
YANG H C. Application and mechanism analysis of mini steel-tube piles in treatment of landslide [D]. Changsha: Central South University, 2007. (in Chinese)
- [11] 文磊, 孔纲强, 张振东, 等. 海相淤泥质土中后注浆微型钢管桩浆液扩散及承载特性研究[J]. *工程力学*, 2019, 36(4): 214-220, 230.  
WEN L, KONG G Q, ZHANG Z D, et al. Study on the diffusion and bearing capacity of postgrouting steel pipe micropiles in marine muddy soil [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(4): 214-220, 230. (in Chinese)
- [12] 朱彦鹏, 王海明, 杨奎斌, 等. 黄土填方地基中微型钢管桩承载性状试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(Sup1): 198-204.  
ZHU Y P, WANG H M, YANG K B, et al. Experimental study on bearing characteristics of micro steel tube piles in loess fill foundation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(Sup1): 198-204. (in Chinese)
- [13] XU Z J, GUO Z X. Experimental study on bearing characteristics and soil deformation of necking pile with cap using transparent soils technology [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 6625556.
- [14] FANG T, HUANG M, TANG K. Cross-section piles in transparent soil under different dimensional conditions subjected to vertical load: an experimental study [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(21): 1-8.
- [15] 夏元友, 陈晨, NI Qing. 透明土中连续球体型锚杆拔出机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(5): 804-812.  
XIA Y Y, CHEN C, NI Q. Pull-out mechanism of continuous ball shape anchors in transparent soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(5): 804-812. (in Chinese)
- [16] 梁越, 陈鹏飞, 林加定, 等. 基于透明土技术的多孔介质孔隙流动特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(7): 1361-1366.  
LIANG Y, CHEN P F, LIN J D, et al. Pore flow characteristics of porous media based on transparent soil technology [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(7): 1361-1366. (in Chinese)
- [17] 王壮, 李驰, 丁选明. 基于透明土技术土岩边坡滑移机理的模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(Sup2): 185-188.  
WANG Z, LI C, DING X M. Model tests on sliding mechanism of soil-rock slopes based on transparent soil technology [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(Sup2): 185-188. (in Chinese)
- [18] 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 G Q, LIU L, LIU H L, et al. Triaxial tests on deformation characteristics of transparent glass sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(6): 1140-1146. (in Chinese)
- [19] 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.
- [20] 罗战友, 龚晓南, 朱向荣. 考虑施工顺序及遮拦效应的静压群桩挤土位移场研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(6): 824-829.  
LUO Z Y, GONG X N, ZHU X R. Soil displacements around jacked group piles based on construction sequence and compacting effects [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(6): 824-829. (in Chinese)
- [21] HAQUE M N, ABU-FARSAKH M Y, TSAI C. Field investigation to evaluate the effects of pile installation sequence on pile setup behavior for instrumented test piles [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2016, 39(5): 20140259.

(编辑 胡玲)