



铁道科学与工程学报  
*Journal of Railway Science and Engineering*  
ISSN 1672-7029, CN 43-1423/U

## 《铁道科学与工程学报》网络首发论文

题目: 既有基础螺旋桩顶升纠偏机理透明土试验  
作者: 孙智文, 孔纲强, 付贵海, 王文明, 胡达, 张根宝  
DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20210974  
收稿日期: 2021-09-08  
网络首发日期: 2022-01-04  
引用格式: 孙智文, 孔纲强, 付贵海, 王文明, 胡达, 张根宝. 既有基础螺旋桩顶升纠偏机理透明土试验[J/OL]. 铁道科学与工程学报.  
<https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20210974>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

收稿日期：2021-09-08

基金项目：国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目（52027812）

通信作者：孔纲强（1982-），男，浙江磐安人，教授，博士，从事能源岩土工程研究；E-mail: gqkong1@163.com

DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20210974

# 既有基础螺旋桩顶升纠偏机理透明土试验

孙智文<sup>1</sup>，孔纲强<sup>1</sup>，付贵海<sup>2</sup>，王文明<sup>3</sup>，胡达<sup>2</sup>，张根宝<sup>2</sup>

- (1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点试验室，江苏 南京 210098；
2. 湖南城市学院 土木工程学院，湖南 益阳 413000；
3. 山东建筑大学 土木工程学院，山东 济南 250101)

**摘要：**既有建（构）筑物基础纠偏与加固技术是建（构）筑物倾斜纠正的重要有效手段之一，也是现代建筑技术中的一个重要分支，对古建筑保护等具有重要意义。为研究既有基础环境下螺旋桩沉桩过程中的挤土效应，探讨顶升法纠偏过程中的既有基础下部土体位移场、基础变形、作用机理以及纠偏效果，基于透明土材料与 PIV 图像处理技术，开展了螺旋桩顶升纠偏既有基础的模型试验。研究表明，沉桩过程中主要表现为无基础一侧的桩侧土体的位移，土体扰动最大影响范围可达 11 倍桩径；既有独立基础下土体位移相对较小；纠偏过程中基础下土体大致呈以基础中心为圆心的圆弧状运动趋势，运动方向与基础纠偏转动方向相同，沿深度方向对土体的最大影响范围在 0.57 倍基础宽度左右；纠偏过程中各监测点位移随倾角基本上呈线性变化，顶升侧最终达到了约 2.9 mm 的竖直位移量，约为设计顶升量的 50%。利用透明土材料与 PIV 图像处理技术进行试验，可以对具体既有建（构）筑基础纠偏加固现场设计与施工提供参考依据。

**关键词：**既有基础；纠偏；螺旋桩；位移场；模型试验

中图分类号：TU478

文献标志码：A

文章编号：1672-7029（XXXX）XX-0001-09

## Experiment on jacking rectification mechanism of existing foundation with helical pile using transparent soil

SUN Zhiwen<sup>1</sup>, KONG Gangqiang<sup>1</sup>, FU Guihai<sup>2</sup>, WANG Wenming<sup>3</sup>, HU Da<sup>2</sup>, ZHANG Genbao<sup>2</sup>

- (1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China;
3. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

**Abstract:** The rectification and reinforcement technology is one of the important and effective means to correct the inclination of buildings (structures), and it is also an important branch of modern architectural technology, which is of great significance to the protection of ancient buildings. The model test of Jacking rectification of existing foundation is carried out based on transparent soil material and PIV image processing technology to analyze the soil squeezing effect during screw pile sinking beside the existing foundation, and the soil displacement field, foundation deformation, action mechanism and deviation correction effect under the existing foundation are discussed. The results show that, under the test conditions, in the process of pile sinking, the displacement of soil is mainly on the side without foundation. Displacement of soil under the existing independent foundation is relatively small. The maximum influence range of soil disturbance is about 11 times the pile diameter, which is located on the side without foundation. In the process of jacking rectification, the soil under the foundation roughly moves in a circular arc with the foundation center as the center, and the movement direction of soil is the same as the rotation direction of foundation. The maximum influence range on the soil along the depth direction is about 0.57 times the foundation width. In the process of rectification, the displacement of each monitoring point basically changes linearly versus the inclination angle, and the vertical displacement on the jacking side finally reaches about 2.9 mm, which is about 50% of the design jacking amount. The experiment

using transparent soil material and PIV image processing technology can provide a reference basis for the field design and construction of rectification and reinforcement of existing building (structure) foundation.

**Key words:** existing foundation; rectification; helical pile; displacement field; model test

随着社会经济的持续发展与基础设施建设进程的加快，建（构）筑物的数量不断增加<sup>[1]</sup>。建（构）筑物在正常使用的过程中，受地质灾害的影响或因勘察设计、施工、管理和使用方法不当等方面的影响造成地基整体沉降或不均匀沉降，导致其基础发生倾斜或破坏，对上部结构安全构成了严重威胁<sup>[2-3]</sup>。既有建（构）筑物基础纠偏与加固技术是建（构）筑物倾斜纠正的重要有效手段之一，也是现代建筑技术中的一个重要分支，对古建筑保护等具有重要意义<sup>[4]</sup>。微型桩以其施工速度快、场地适应性强、轴向承载力高、工程造价相对较低等技术优点，在既有建（构）筑物基础纠偏等工程中得到了广泛应用<sup>[5-6]</sup>。意大利 LIZZI 等采用钻孔注浆施工工艺制作微型钢管桩，应用于意大利 St Andrew's Church 和 Naplas 市政府办公楼的加固，以及 Venice 的 Burano 钟楼基础的加固止倾<sup>[7]</sup>。SADEK 等<sup>[8]</sup>基于数值模拟研究了桩-网复合系统中倾斜微型桩在水平向及倾斜向荷载下的承载特性。高森亚<sup>[9]</sup>研究了微型钢管桩在工程应用中的设计方案及施工方法，并对其受力特点进行了具体分析，结合工程经验补充完善了理论设计上的不足。董天文等<sup>[10-11]</sup>针对输电工程中的螺旋桩基础，研究了螺旋桩的极限承载力和荷载传递机理。螺旋桩作为微型桩的一种，不仅施工方便，而且相比于直线形桩，螺旋桩改变了桩-土相互作用机理，其叶片增加了与土体之间的嵌合力，可以有效提高桩基竖向抗压和抗拔承载力，相同承载要求下可以适当减少桩长或桩径以降低工程成本，在输变线塔基础、风电基础等既有基础纠偏和加固工程应用方面具有广阔的推广前景。然而，既有基础环境下利用螺旋桩顶升纠偏的作用机理尚不清楚。基于透明土材料和 PIV 数字图像处理技术的透明土试验技术，可以非嵌入式可视化观测土体内部位移场，并在桩基沉桩过程、桩-土相互作用等方面获得有效应用<sup>[12-14]</sup>。因此，依托实际工程案例，开展螺旋桩顶升纠偏既有基础的透明土试验，分析既有基础环境下螺旋桩沉桩过程中的挤土效应，探讨顶升法纠偏过程中的既有基础下部土体位移场、基础变形、作用机理以及纠偏效果；以期为实际既有建筑基础纠偏加固工程的设计与施工提供参考依据。

## 1 模型试验简介

### 1.1 依托工程背景

依托于连云港振兴花卉市场内输电线路杆塔基础纠偏工程<sup>[3]</sup>。输电杆总高度 31 m，基础形式为三阶钢筋砼独立基础，基底尺寸为 4.8 m×4.8 m，基础总高度 1.8 m、埋深 1.5 m，基础及设备总重量约 55 t。该输电杆在运行过程中，输电杆顶部向北偏移 1.54 m、向东偏移 0.62 m，该纠偏工程采用 102 mm 直径后注浆直线形微型钢管桩，在基础东、西、北三侧加装牛脚，各布置四根桩进行顶升纠偏。其倾斜情况及顶升纠偏设计平面图如图 1 所示。

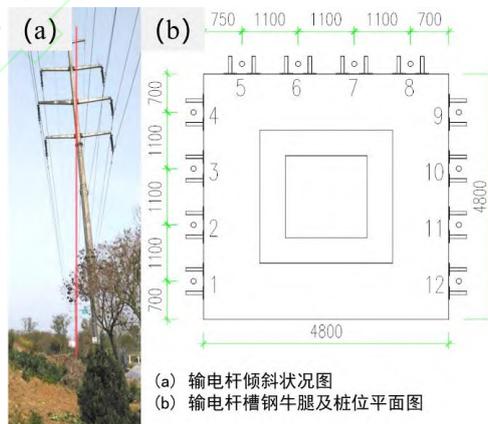


图 1 输电杆倾斜情况及顶升纠偏设计平面图

Fig. 1 Leaning of transmission pole and design plan of jacking rectification

### 1.2 模型试验装置及材料

模型试验装置与设备主要包括自动沉桩加载仪、模型槽、CCD 高速工业相机、激光仪器、手持电钻、万向水准仪和计算机。

自动沉桩加载仪压杆升降范围为 0~200 mm，升降速度为 0~5 mm/s；电钻转速为 0~20 r/s；模型槽由有机玻璃制成，槽内腔尺寸为 200 mm×200 mm×250 mm，壁厚为 10 mm；激光源输出功率为 0~2 W，片光厚度为 0~1 mm，出光张角为 10°~25°；照射于透明土样可形成一激光剖面，显示出特有散斑场。模型试验装置及布置实物图如图 2 所示。

独立基础模型和螺旋桩模型分别如图 3(a)和 3(b)所示，依托实际工程及试验条件进行缩尺，简化模型基础尺寸为 70 mm×70 mm×10 mm，由高强度有机玻璃制作而成；螺旋桩模型以一种原型桩（杆径 150 mm，叶片直径为 300 mm）按 1: 30 缩尺，桩体直径  $d$  为 5 mm，叶片直径为 10 mm，螺纹倾角为 15°，桩尖角度为 30°；桩长为 115 mm，由树脂材料 3D 打印而成；小型液压千斤顶由加载仪和 3 支注射器构造而成。倾斜纠偏示意图如图 3(c)所示，基础上部结构设计总荷载为 100 N，上部结构与基础组合为刚性整体，基础埋深为 10 mm，模型结构整体向基础一侧倾斜，初始倾角  $\theta$  为 5°。

所用透明土材料由熔融石英砂、正 12 烷和 15 号白油制配而成。透明土相对密实度为 60%，粒径范围为 0.5~1.0 mm，折射率为 1.4585，基本性质具体见表 1 所示。孔隙液体采用正 12 烷和 15 号白油混合制成，利用阿贝折射仪测定混合液体折射率，调配至与熔融石英砂具有相同的折射率。

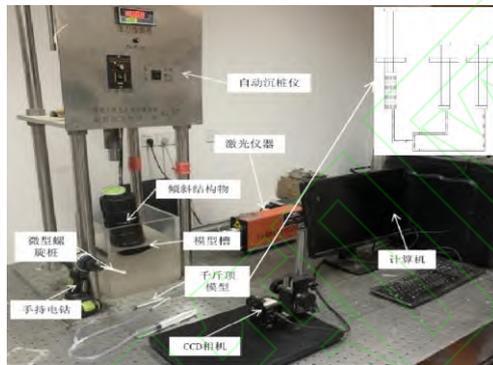
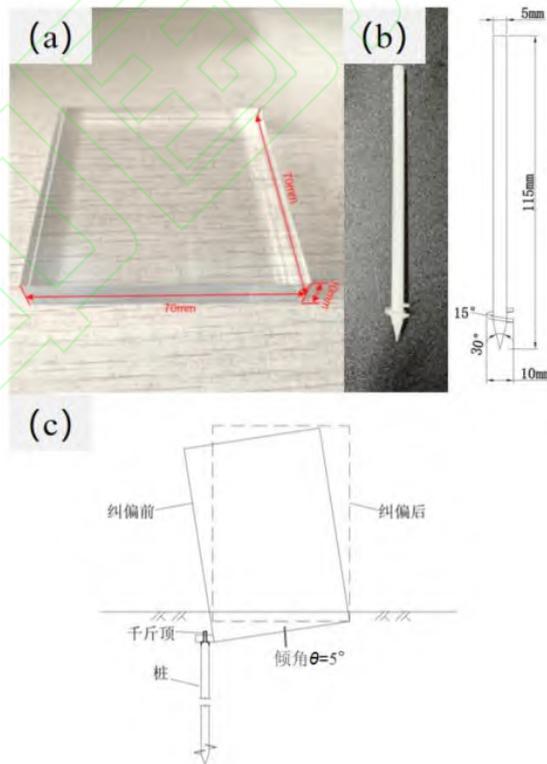


图 2 模型试验装置及布置实物图  
Fig. 2 Model test device and layout



(a)独立基础 (b)螺旋桩 (c)倾斜纠偏示意图

图 3 模型制作及倾斜纠偏示意图

Fig. 3 Design of model and diagram of rectification

表 1 试验所用熔融石英砂基本性质

Table 1 Basic properties of molten quartz sand used in the test

土体	粒径 (mm)	比重	不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$	最小干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	最大干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	峰值内摩擦角(°)
透明土	0.5~1.0	2.186	2.59	0.91	0.97	1.274	48

### 1.3 试验方案与工况设计

螺旋桩受压承载力由三部分组成，分别为螺旋桩与土体之间的摩擦力、螺旋叶片之间圆柱形剪切面上的剪应力、最下层叶片的“端阻力”，当叶片数为 1 时，可视作多叶片的特殊情况，即螺旋叶片之间圆柱形剪切面上的剪应力为 0，具体螺旋桩单桩极限承载力如式(1)所示。

$$P_u = \int_0^h \pi d \cdot (1 - \sin\phi) \gamma z \tan\phi dz + (NC_u + \gamma h) \cdot \pi D^2 \quad (1)$$

式中， $h$  为螺旋桩入土深度， $d$  为螺旋桩直径， $\gamma$  为土体重度， $\phi$  为土体内摩擦角， $N$  为待定参数，当  $D > 600$  mm 时， $N=6$ ；当  $300 \text{ mm} < D < 600$  mm 时， $N=7$ 。 $C_u$  为土的不排水抗剪强度。

顶升桩位数量由式(2)确定。

$$n_d \geq \frac{rKQ_k}{Q_{uk}} \quad (2)$$

式中， $r$  为杠杆系数，一般取 0.5； $K$  为顶升安全系数，一般取 1.5； $Q_k$ 、 $Q_{uk}$  分别为建筑物总荷载和单桩极限承载力。

经设计计算，开展整体结构自重为 100 N，基础埋深为 10 mm，初始倾角  $\theta$  为 5° 的螺旋桩顶升纠偏模型试验，具体试验方案与工况设计见表 2 所示，桩位及监测点布置形式如图 4 所示。测得既有基础环境下沉桩入土深度分别为  $8d$  和  $16d$  时的桩周土体位移场，及纠偏过程中结构物倾角分别为 3° 和 0° 时的基础下土体扰动情况，监测既有基础上各监测点位移变化规律。

表 2 试验方案与工况设计

Table 2 Test scheme and working conditions

基础类型	顶升纠偏			
	沉桩深度 (mm)	顶升桩位 (个)	顶升量 (mm)	顶升速率 (mm/s)
独立基础	80	2	6.1	0.1

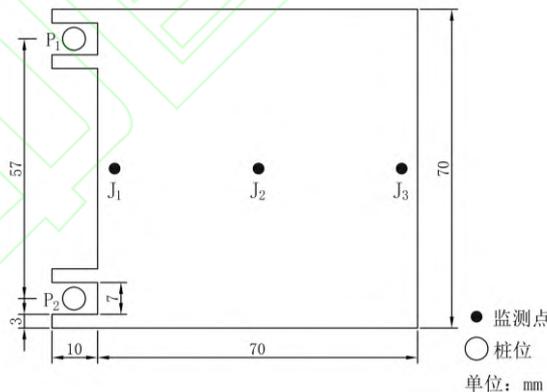


图 4 桩位及监测点布置形式

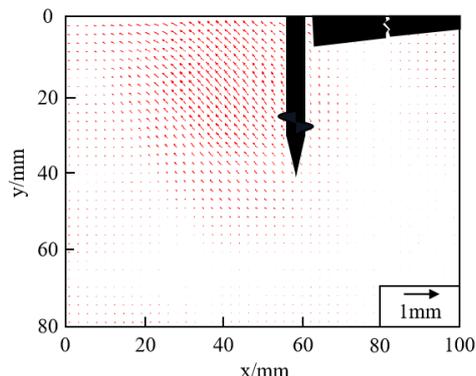
Fig. 4 Layout of monitoring points and piles

## 2 试验结果与分析

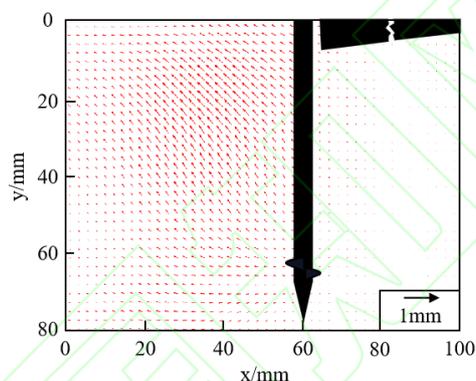
### 2.1 沉桩挤土效应

图 5(a)和 5(b)分别为既有独立基础环境下沉桩深度为  $8d$  与  $16d$  时桩侧位移矢量图。由图 5 可知，螺旋桩沉桩过程中不同时刻均主要表现为无基础一侧的桩侧土体的位移，位移方向为斜向上方向，与曹兆虎等<sup>[13]</sup>所开展的沉桩挤土效应试验中桩周土体经典位移场规律相似；既有独立基础下土体位移相对较小；既有基础侧贴近桩身处的土体以向上运动为主，最后表现为基础与桩之间土体的隆起。桩侧的土体随着螺旋桩沉桩深度的增加，位移不断累积，影响范围也向水平和竖直方向拓展；图 5(b)中螺旋叶片处的土

体位移方向与桩身轴线相垂直，螺旋叶片以下桩端土体呈斜向下的微小位移，主要因为沉桩下压力随着沉桩深度的增加不断增加，该区域土体受到向下挤压的作用及拖曳效应。



(a) 沉桩深度为  $8d$



(b) 沉桩深度为  $16d$

图 5 不同沉桩深度桩侧土体位移矢量图

Fig. 5 Soil displacement vector diagram of different pile sinking depths

沉桩过程中桩侧土体的水平位移与竖向位移云图分别如图 6 和 7 所示；图 6(a)、6(b)、图 7(a)、7(b)分别为沉桩深度为  $8d$  和  $16d$  时水平方向和竖直方向位移云图。对比可知，随着沉桩深度的增加，桩侧水平方向位移与竖直方向位移均有所增大，向深度方向延伸，最大位移出现位置均在无基础一侧桩身中上部；在水平方向，沉桩过程土体扰动最大影响范围约为  $55\text{ mm}(11d)$ ，位于无基础一侧。由图 7(b)可知，沉桩深度为  $16d$  时，在竖直方向，桩端及螺旋叶片处出现了明显的分界，形成了类似于人体鼻腔的“鼻锥区”，即该区域土体在螺旋桩沉桩过程中随着螺旋叶片一同下沉，这与 WHITE 等<sup>[15]</sup>发现一致；沉桩深度为  $8d$  时没有出现，主要由于沉桩深度较浅时沉桩阻力较小，螺旋桩以旋入为主，且桩端部存在  $30^\circ$  的桩尖角度，故桩端处主要表现为刺入挤土，土体在水平方向受到挤压。

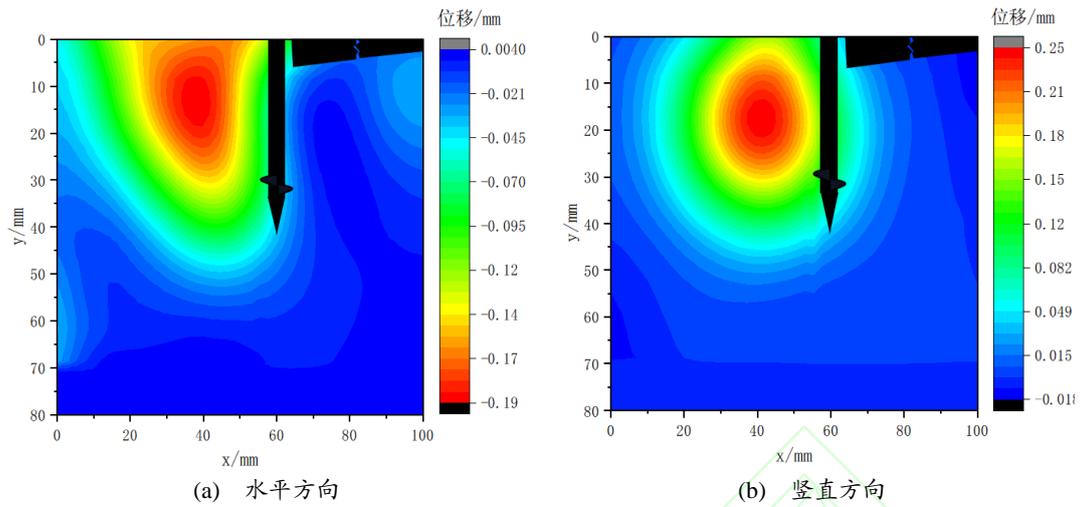


图6 沉桩深度为 $8d$ 时桩侧土体位移云图  
**Fig.6** Cloud map of soil displacement when pile sinking depth is  $8d$

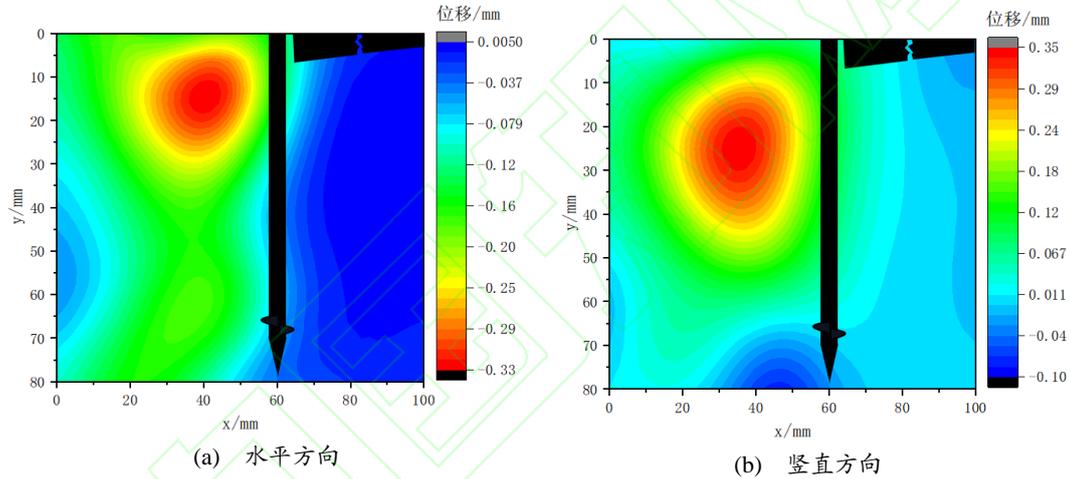
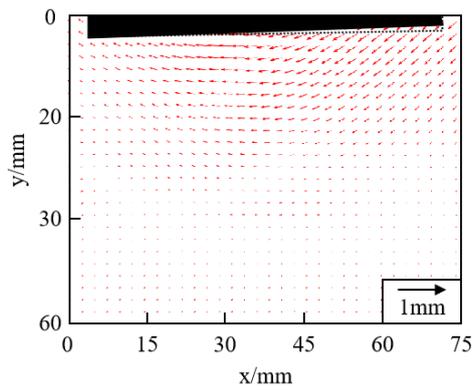


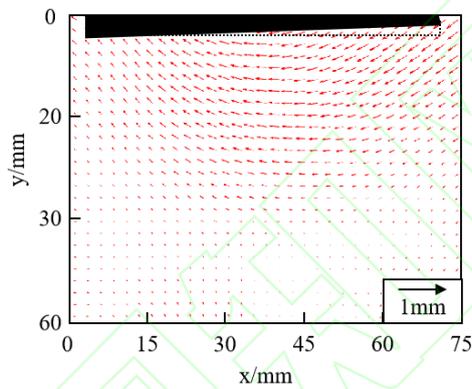
图7 沉桩深度为 $16d$ 时桩侧土体位移云图  
**Fig.7** Cloud map of soil displacement when pile sinking depth is  $16d$

## 2.2 纠偏过程中基础下土体扰动情况

纠偏过程中不同时刻既有独立基础下土体位移场变化分别如图8(a)和8(b)所示；通过对比纠偏过程中基础倾角为 $3^\circ$ 和 $0^\circ$ 时的位移矢量图变化，可以得到以下规律：由图8(a)可知，倾角为 $3^\circ$ 时基础下的土体大致呈以基础中心为圆心的圆弧状运动趋势，运动方向与基础纠偏转动方向大致相同，从沉降较小一侧（右侧）向沉降较大一侧（左侧）运动；主要由于结构物基础纠偏过程中基底压力的重新分布，导致右侧基底压力增大，土体呈斜向下运



(a) 倾角  $\theta$  为  $3^\circ$  时位移矢量图



(b) 倾角  $\theta$  为  $0^\circ$  时位移矢量图

图 8 纠偏过程不同时刻基础下土体位移矢量图

Fig.8 Soil displacement vector at different period of the rectification

动趋势；基础抬升一侧（左侧）土体竖向应力得到释放，该侧土体由于受到右侧土体位移的挤压和基底压力的释放，土体呈向斜上运动的趋势，表现为地表土体隆起；基础转动轴线所在竖直平面下的土体以水平向位移为主，主要表现为右侧土体运动时的挤压作用。由图 8(b)可知，基础抬升侧（左侧）与右侧的土体分别为斜向上的位移与斜向下的位移，运动规律与基础倾角为  $3^\circ$  的结果大致相同。

图 9(a)、9(b)和图 10(a)、10(b)分别为纠偏过程中基础倾角为  $3^\circ$  和  $0^\circ$  时的水平方向和竖直方向位移云图。由图 9(a)和 10(a)可知，纠偏过程中基础下土体水平位移大致呈半圆形向深度方向拓展，影响范围不断增大。由图 9(b)和 10(b)可知，土体的竖向位移主要集中在基础的抬升侧（左侧）和相对侧（右侧），抬升侧土体向上位移，另一侧相反。对比二者可知，纠偏过程中基础下土体位移是一个不断累积的过程，随着纠偏角度的增加，土体水平位移和竖直位移均有所增大；纠偏全过程中最大水平位移大致出现在基础转动轴线所在竖直平面及偏右处；既有基础顶升纠偏过程中沿深度方向对土体的最大影响范围在  $40\text{ mm}(0.57B)$  左右（ $B$  为基础宽度）。由于螺旋桩埋深较深，桩体刚度、承载力储备较大，且有螺旋叶片的锚固作用，实测桩顶位移接近于  $0$  可忽略不计。

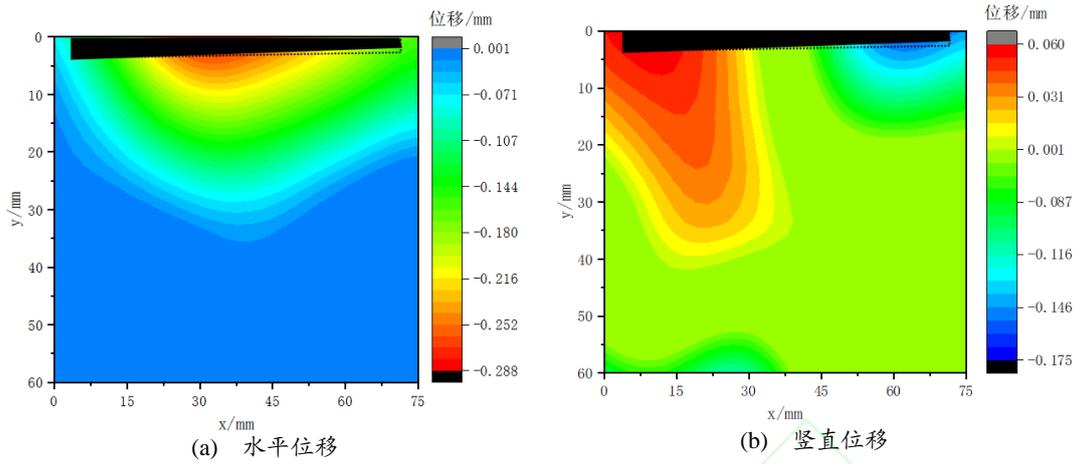


图9 倾角 $\theta$ 为 $3^\circ$ 时位移云图  
**Fig.9** Cloud map when the inclination  $\theta$  is  $3^\circ$

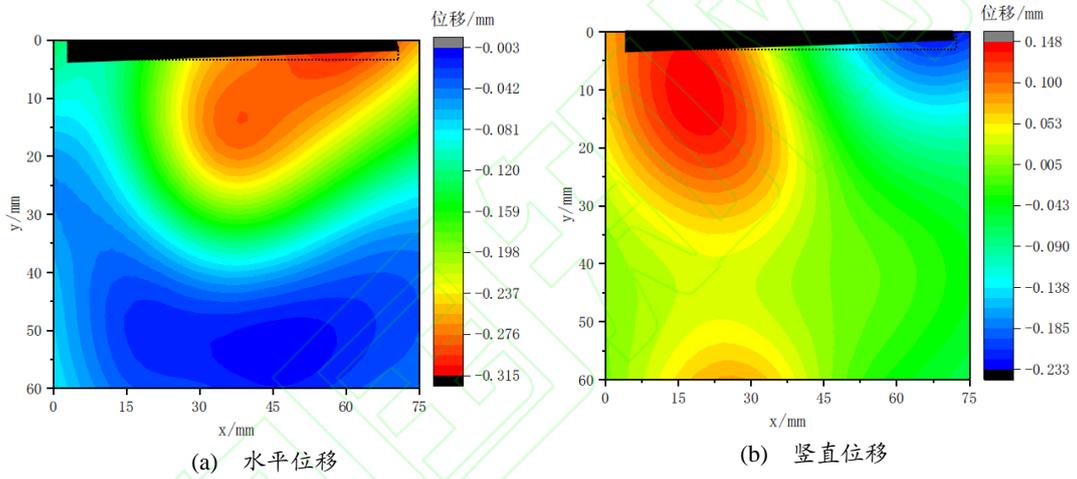
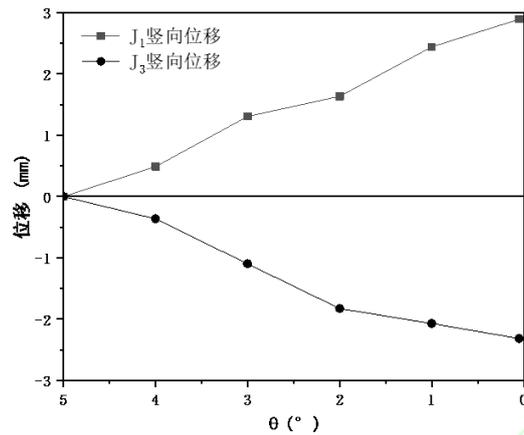


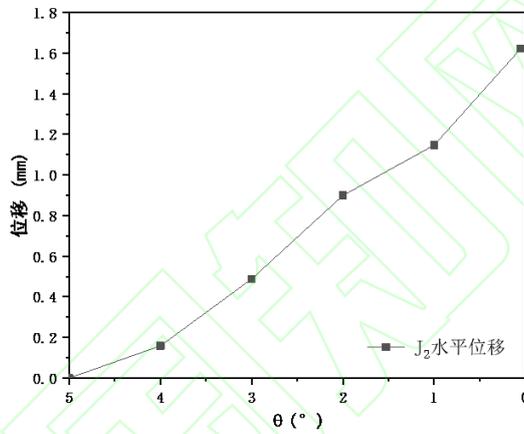
图10 倾角 $\theta$ 为 $0^\circ$ 时位移云图  
**Fig.10** Cloud map when the inclination  $\theta$  is  $0^\circ$

### 2.3 基础位移情况

既有基础上监测点  $J_1$ 、 $J_2$ 、 $J_3$  随倾角  $\theta$  的位移变化如图 11(a)和 11(b)所示；约定以向上的位移和向左的位移为正。由图 11 可知，纠偏过程中各点位移随倾角基本上呈线性变化， $J_1$  点最终达到了约 2.9 mm 的竖直位移量，为设计顶升量的 50%左右，主要由于该独立模型基础下的透明土具有一定的流动性与压缩性，故实际顶升量应小于设计顶升量； $J_2$  最终向左位移 1.62 mm； $J_3$  最终达到了约 -2.3 mm 的竖向位移， $J_2$ 、 $J_3$  的位移变化曲线同样也说明了该透明土具有流动性与压缩性这一特点； $J_1$ 、 $J_3$  的位移变化证实了前文所说该土质条件下既有基础在纠偏过程中绕着某一转动轴转动的特点。



(a)  $J_1$ 、 $J_3$ 点随倾角  $\theta$  的竖直位移变化



(b)  $J_2$ 点随倾角  $\theta$  的水平位移变化

图 11 监测点随倾角  $\theta$  的位移变化

Fig.11 Monitoring points change versus the angle  $\theta$

### 3 结论

1) 沉桩过程中主要表现为无基础一侧的桩侧土体的位移，土体扰动最大影响范围约 11 倍桩径；既有独立基础下土体位移相对较小，可近似忽略；沉桩深度较大时，螺旋叶片的存在使得桩端处的土体主要表现为向下的位移。

2) 纠偏过程中由于基底压力重新分布，基础下土体大致呈以基础中心为圆心的圆弧状运动趋势，运动方向与基础纠偏转动方向相同，沿深度方向对土体的最大影响范围在 0.57 倍基础宽度左右。

3) 纠偏过程中基础上各监测点位移随倾角基本上呈线性变化，由于土体发生了一定的变形和压缩，顶升侧最终达到了约 2.9 mm 的竖直位移量，约为设计顶升量的 50%。

#### 参考文献：

- [1] 温晓贵,魏纲. 某软土地基上倾斜建筑物的纠倾与加固实例[J]. 土木工程学报,2004, 37(8): 61-65.  
WEN Xiaogui, WEI Gang. Rectification and reinforcement of an inclined building on soft soil foundation[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(8): 61-65.
- [2] 文颖文,胡明亮,韩顺有,等. 既有建筑地下室增设中锚杆静压桩技术应用研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(S2): 224-229.  
WEN Yingwen, HU Mingliang, HAN Shunyou, et al. Application of static bolt-pile technique to construction of basement of existing buildings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 224-229.
- [3] WEN Lei, KONG Gangqiang, ABUEL-NAGA H, et al. Rectification of tilted transmission tower using micropile underpinning method[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34(1): 04019110.
- [4] 谢洪恩,丁幼亮,李爱群,等. 大型古建筑物顶升施工数值分析方法及应用[J]. 防灾减灾工程学报,2012, 32(6): 743-747.

- XIE Hongen, Ding Youliang, Li Aiqun, et al. Numerical analysis and application of lifting construction in large ancient buildings[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2012, 32(6): 743-747.
- [5] 姜华. 微型桩-锚索联合支护顺层岩质边坡的稳定性分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2019, 16(9): 2184-2191.  
JIANG Hua. Stability analysis of bedding rock slope reinforced by micro-piles and prestressed anchor[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2019, 16(9): 2184-2191.
- [6] 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 Mingxing, GAO Yongtao, ZHOU Yu. 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.
- [7] MASON J A. Strengthening of a historic unreinforced masonry church tower[J]. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 2008, 13(1): 31-38.
- [8] SADEK M, SHAHROUR I, MROUEH H. Influence of micropile inclination on the performance of a micropile network[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 2006, 10(4): 165-172.
- [9] 高森亚. 微型钢管桩在基坑支护中的应用研究[D]. 长沙:中南大学, 2008.  
GAO Senya. The research and application in pit support of the micro-steel pipe pile[D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [10] 董天文,梁力,王明恕,等. 极限荷载条件下螺旋桩的螺距设计与承载力计算[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(11): 2031-2034.  
DONG Tianwen, LIANG Li, WANG Mingshu, et al. Pitch of screws and bearing capacity of screw piles under ultimate load[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(11): 2031-2034.
- [11] 董天文,梁力,黄连壮,等. 螺旋群桩基础承载性状试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(4): 893-896,900.  
DONG Tianwen, LIANG Li, HUANG Lianzhuang, et al. Experimental research on bearing characters of screw pile group[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(4): 893-896,900.
- [12] 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.
- [13] 曹兆虎,孔纲强,刘汉龙,等. 基于透明土材料的沉桩过程土体三维变形模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(2): 395-400.  
CAO Zhaohu, KONG Gangqiang, LIU Hanlong, et al. Model tests on 3-D soil deformation during pile penetration using transparent soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(2): 395-400.
- [14] 杜明芳,遆永新,徐志军,等. 深部缩径缺陷桩的透明土模型试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(6): 1436-1446.  
DU Mingfang, TI Yongxin, XU Zhijun, et al. Research on transparent soil model test of deep shrinkage defective pile[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(6): 1436-1446.
- [15] WHITE D J, BOLTON M D. Displacement and strain paths during plane-strain model pile installation in sand[J]. *Géotechnique*, 2004, 54(6): 375-397.