

DOI: 10.11779/CJGE20230204

# 不同推进比下螺旋桩在砂土中安装力的离散元研究

王乐<sup>1</sup>, 李钰<sup>1</sup>, 徐志军<sup>2</sup>, 刘波<sup>3</sup>, 张春会<sup>4,5</sup>, 田英辉<sup>6</sup>

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350; 2. 河南工业大学土木工程学院, 河南 郑州 450001; 3. 香港理工大学土木与环境工程学系, 香港 999077; 4. 河北科技大学建筑工程学院, 河北 石家庄 050018; 5. 河北省岩土与结构体系防灾减灾技术创新中心, 河北 石家庄 050018; 6. 墨尔本大学基础设施工程系, 维多利亚 3010)

**摘要:** 螺旋桩作为一种颇具潜力的海上风电基础形式, 其安装问题是螺旋桩能否成功应用在海上风电工程中的关键。基于离散元方法, 采用 PFC<sup>3D</sup> 模拟分析了螺旋桩在不同推进比下安装时的桩身受力情况以及对周围土体的影响。宏观上, 研究了螺旋桩在不同推进比下安装时螺旋桩连杆侧壁、连杆端部、螺旋叶片上下表面的受力变化规律; 微观上, 分析了螺旋桩安装过程中桩周土体孔隙率、配位数及应力变化规律。研究表明: 随着推进比的减小, 螺旋桩安装时受到的竖向力与扭矩也随之降低, 对桩周土体的扰动也更小; 螺旋桩在推进比为 1 时安装与在推进比小于 1 时安装存在两种不同的安装机制。研究结果对进一步确定螺旋桩在不同推进比下的安装条件具有一定意义。

**关键词:** 螺旋桩; 推进比; 砂土; 离散元法

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)06-1166-11

**作者简介:** 王乐(1989—), 男, 博士, 助理研究员, 长期从事结构物与土的相互作用问题的研究工作。E-mail: 15620600240@163.com。

## Discrete element study of method for installation forces of screw piles in sand under different advancement ratios

WANG Le<sup>1</sup>, LI Yu<sup>1</sup>, XU Zhijun<sup>2</sup>, LIU Bo<sup>3</sup>, ZHANG Chunhui<sup>4,5</sup>, TIAN Yinghui<sup>6</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. School of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China; 4. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 5. Hebei Technological Innovation Center of Disaster Prevention and Mitigation Engineering of Geotechnical and Structural System, Shijiazhuang 050018, China; 6. Department of Infrastructure Engineering, The University of Melbourne, Victoria 3010, Australia)

**Abstract:** The installation of a screw pile, as a potential offshore wind power foundation form, is the key to its successful application in offshore wind power engineering. Based on the discrete element method, the installation forces of the screw pile installed under different advancement ratios in sand and the interaction between the screw pile and the surrounding soil are simulated with PFC<sup>3D</sup>. On the macro-level, the effects of the installation advancement ratio on the installation forces acting on the shaft, base and upper and lower surfaces of the helix of the screw pile are studied. Microscopically, the changes in porosity, coordination number and stresses in the surrounding soil during the installation of the screw pile are analyzed. The research shows that with the reduction of the advancement ratio, both the vertical force and the torque acting on the screw pile decrease, and the disturbance caused by installation of the screw pile to the surrounding soil also reduces. The mechanisms of installation of the screw pile are different for advancement ratios equal to or below 1. The research results provide some insights into the conditions required for the installation of screw piles under different advancement ratios.

**Key words:** screw pile; advancement ratio; sand; discrete element method

## 0 引言

螺旋桩是一种由钢制桩身连杆和焊接在其上的螺旋叶片构成的基础。由于螺旋桩外形的特殊性, 可以通过在桩顶施加的扭矩和压力将其旋转按压至土体

内。螺旋桩安装所需设备轻便, 安装过程快速且噪音

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(51978247, 51879183); 国家自然科学基金重大项目(51890913)

**收稿日期:** 2023-03-09

\*通信作者 (E-mail: bo\_liu\_shanghai@foxmail.com)

小<sup>[1]</sup>;其安装在位后,桩身连杆和螺旋叶片协同承载,提供的抗拔承载力明显大于传统单桩基础<sup>[2-3]</sup>;同时,可通过施加反向扭矩实现螺旋桩的回收利用<sup>[4]</sup>。基于以上优势,螺旋桩被视作一种有广泛应用价值的海上风电基础形式。

目前,螺旋桩基础常用于锚固或支撑近岸及陆上小型结构<sup>[5-6]</sup>,螺旋叶片直径约0.15~0.6 m,桩身连杆长约1~6 m<sup>[7]</sup>,可以提供的抗拔承载力约为50~300 kN。典型单叶片螺旋桩的外形及安装参数如图1所示。在极端海况下,典型8 MW 四腿导管架海上风电结构若采用螺旋桩作为其单腿基础,其桩长和螺旋叶片直径需分别达30, 2 m以上<sup>[8]</sup>。相比于陆上螺旋桩,应用于海洋工程中的螺旋桩其尺寸需要大幅提升,安装过程需要的压力和扭矩也需要大幅增加。因此,如何准确预测安装螺旋桩所需的压力和扭矩是其应用于海上风电工程中的关键问题之一。许多学者提出螺旋桩安装过程所受力和扭矩的预测模型<sup>[9-10]</sup>,这些预测模型的共同点在于将螺旋桩各部件所受的力和扭矩分别计算。Ghaly等<sup>[9]</sup>和Sakr<sup>[11]</sup>预测螺旋桩分别在砂土和无黏性土中安装所受的扭矩时,都将螺旋桩安装扭矩分为作用在桩身连杆、螺旋叶片上下表面、螺旋叶片侧壁等部分产生的扭矩。Therar<sup>[12]</sup>提出的CPT法预测螺旋叶片受力时,将其分为螺旋叶片底部摩擦力、螺旋叶片侧向摩擦力和螺旋叶片刃口承载力。现有的螺旋桩安装扭矩及压力的预测方法都是在推进比为1的前提下提出的<sup>[10]</sup>。推进比作为用来描述螺旋桩的安装的重要参数,其计算公式为螺旋桩旋转一周的竖向位移 $\Delta z_h$ 与螺旋叶片螺距 $p_h$ 的比值。推进比AR的建议取值为 $1 \pm 0.2$ <sup>[13-14]</sup>,即螺旋桩每旋转一周向下推进约一个螺距,这样的安装形式被称为“螺距匹配”式安装。现有的螺旋桩施工规范建议采用这样安装方式是为了减少安装过程对土体的扰动。

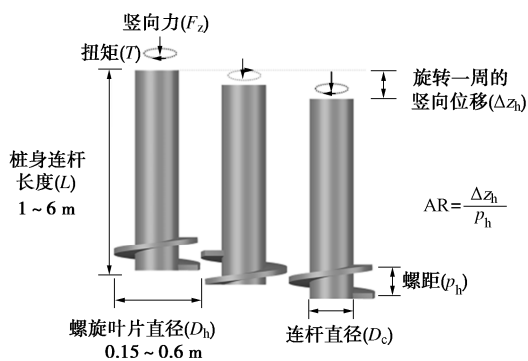


图1 典型单叶片螺旋桩及安装参数

Fig. 1 Appearance and installation parameters of a typical single blade screw pile

然而,史旦达等<sup>[13]</sup>通过室内模型试验发现减小

AR 可以显著降低螺旋挤扩钻具贯入时的竖向阻力以及扭矩。Wang等<sup>[15]</sup>和Sharif等<sup>[14]</sup>通过模型试验及离散元数值模拟发现在螺旋桩的安装过程中存在相似的结果。Sharif等<sup>[14]</sup>应用离散元方法模拟了螺旋桩在不同AR下的安装和上拔,发现在显著减小螺旋桩安装所需竖向力的同时,减小AR可以显著增大螺旋桩的上拔承载力。Cerfontaine等<sup>[16]</sup>通过离心机实验进一步表明在 $AR < 0.25$ 时,螺旋桩的整个安装过程都受到土体的下拉作用,即不需要提供额外的竖向压力便可将螺旋桩安装到位。对于海上大型螺旋桩而言,AR对于其施工设备选型以及螺旋桩安装工作能否顺利进行起着关键性作用。

此外,学者们对于螺旋桩安装过程对其周围土体的影响进行了研究。Shi等<sup>[17]</sup>通过离散元方法模拟螺旋桩在不同AR下的安装过程,发现AR较大时螺旋桩周围土体的孔隙率降低更明显,即螺旋桩安装引起的土体压实效应更强。Sharif等<sup>[14]</sup>应用离散元方法研究了螺旋桩安装完成后AR对桩周土体残余应力的影响,观察到在较高AR值下安装导致螺旋桩下方产生较大的残余应力且这些应力随AR的增加而增加的现象。史旦达等<sup>[13]</sup>通过模型试验研究了不同AR下安装螺旋挤扩钻具时周围土体的组构演化,发现接触法向各向异性程度随着AR的减小而减小。螺旋桩安装过程对桩周土体影响的研究对理解螺旋桩与土的相互作用具有重要意义。

综上所述,业内学者已关注到AR对螺旋桩安装所需条件以及安装后承载性能的影响,并对螺旋桩安装过程中土体所受响应进行了一定研究。但目前有关螺旋桩在不同AR下的安装受力研究,仅将螺旋桩的受力分为连杆受力与螺旋叶片受力两部分<sup>[18]</sup>。要准确预测螺旋桩在不同AR下安装时所需扭矩和力,还需将连杆与螺旋叶片所受的反力和扭矩进一步细分。

本文目的是通过离散元方法模拟螺旋桩在不同AR下的安装过程,研究螺旋桩在不同AR下安装时的桩身受力情况以及对周围土体的影响。宏观上,分析了螺旋桩各部件的受力情况,相较于之前学者的研究进行了进一步细化:将连杆受力进一步划分为连杆侧壁及端部受力,将螺旋叶片受力进一步划分为螺旋叶片上下表面受力;细观上,研究了螺旋桩安装前后土体孔隙率、配位数、应力等方面的变化。研究螺旋桩与土之间的相互作用,从侧面解释螺旋桩各部件受力在不同AR下发生变化的内在原因。

## 1 离散元模型建立

本文涉及到的螺旋桩模型依据Cerfontaine等<sup>[16]</sup>

的离心机试验建立。在 50g 的条件下, Cerfontaine 等在 HST95 砂中开展了螺旋桩的安装试验, 研究了不同 AR 对螺旋桩安装力的影响。螺旋桩模型与其离心机试验中的平底螺旋桩模型的几何参数一致, 并模拟其在 50g 条件下的安装过程。

1.1 螺旋桩模型

螺旋桩通过离散元中的墙单元模拟, 建立过程如下: 首先在 AutoCAD 软件中构建螺旋桩的三维模型, 然后导入 PFC<sup>3D</sup> 中生成由三角形面单元组成的整个螺旋桩模型。螺旋桩模型的叶片上下表面、连杆端部和连杆侧面分别赋予不同的识别 id, 以便后续研究螺旋桩安装过程中各部位的受力情况。螺旋桩模型尺寸如图 2 所示, 螺旋叶片直径  $D_h$  和桩身连杆直径  $D_s$  分别为 21.2, 11 mm。螺旋叶片的厚度和螺距分别为 1.4, 7 mm。桩身连杆长度为 160 mm。

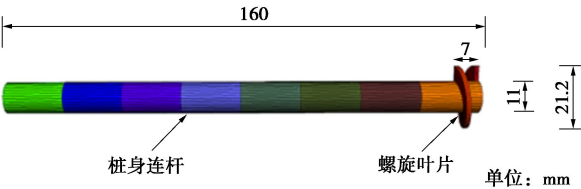


图 2 螺旋桩模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of model for screw pile

1.2 土样及边界

离散元模型中所使用的土体颗粒以 HST95 砂土为原型, 该砂土的物理力学性质<sup>[18-21]</sup>如表 1 所示。为在保证计算精度的前提下尽可能缩减离散元模拟的时间, 离散元颗粒的特征粒径 ( $d_{10}$ ,  $d_{50}$  和  $d_{100}$ ) 扩大为 HST95 砂土粒径的 10 倍。螺旋桩桩身连杆直径  $D_c$  (11 mm) 与放大后颗粒中值粒径  $d_{50}$  (1.4 mm) 的比值约为 7.8, 大于 Arroyo 等<sup>[22]</sup>建议的  $D_c$  与  $d_{50}$  的最小比值 2.69, 与 Shi 等<sup>[17]</sup>和 Cerfontaine 等<sup>[18]</sup>采用的比值近似 (分别为 8, 7.8), 因此, 认为放大后的颗粒粒径不会对计算结果精度产生影响。选用球形颗粒并限制其旋转以模拟异形砂土颗粒间的咬合力。采用 Ciantia 等<sup>[23]</sup>提出的颗粒胞元复制法 (PCRM) 生成目标孔隙率为 0.38 的试样, 此孔隙率对应于 HST95 砂土的相对密度为 52%, 与原型试验<sup>[18]</sup>中所用砂土的相对密度一致。该方法首先生成一个颗粒数较少但符合目标应力状态、孔隙率和配位数的胞元, 随后通过复制胞元来填充目标模型区域, 最后通过修改颗粒间接触力使模型内应力分布满足目标地应力场。通过复制“胞元”生成的模型收敛速度快, 密度分布均匀且初始应力状态容易控制。该成样方法适用于生成颗粒数目较多且同时需要控制水平土压力系数的离散元模型。本文中

的模型所生成的总颗粒数目约为 70 万。模型中的土样及边界条件如图 3 所示。模型边界的设置对颗粒数目、计算成本以及边界效应都起到关键性作用。如果采用位置固定的水平向边界 (无限刚度), 在有限的土体范围内将导致颗粒受到的径向约束过大; 如果采用恒应力 (零刚度) 边界条件将会因颗粒的无限制运动而导致径向应力的低估。因此, 模型的水平向环状边界采用了 20 个直径为 85 mm、沿深度分布的恒定刚度的环状边界。每个环状边界的径向位移根据其当时的径向位置进行伺服控制, 即环状墙单元会随着所受接触力的增加或减少发生扩张或收缩, 以此达到更合理的模拟土体受到的径向约束, 同时减小边界效应的目的。

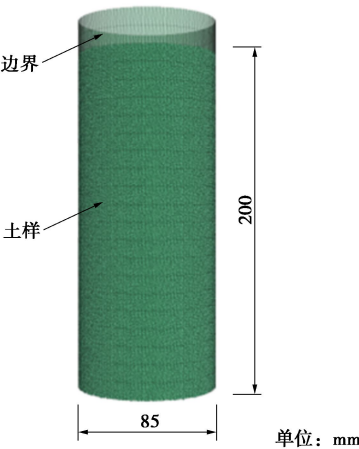


图 3 模型土样及边界

Fig. 3 Soil sample and boundary

环状墙单元的扩张 (或收缩) 刚度通过圆柱孔在弹性介质中的扩张理论计算得到<sup>[24]</sup>, 其中涉及到的土体剪切模量  $G_{sand}$ <sup>[18]</sup>为

$$G_{sand} = 17.3 \left( \frac{p'}{100} \right)^{0.548} \quad (1)$$

式中:  $p'$  为平均有效围压。

表 1 HST95 砂物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of HST95 sand	
物理力学参数	对应值
最小孔隙比 $e_{min}$	0.467
最大孔隙比 $e_{max}$	0.769
临界状态摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	32
颗粒密度 $\rho_s/(kg \cdot m^{-3})$	2650
有效粒径 $d_{10}/mm$	0.09
中值粒径 $d_{50}/mm$	0.14
静止土压力系数 $K_0$	0.47

为了记录螺旋桩安装过程对其周围土体的影响, 在螺旋桩一侧生成 80 个测量球。测量球直径为 5 mm, 其在 X-Z 面上的分布如图 4 所示。

1.3 接触模型

本文模拟中采用 Hertz 接触模型<sup>[25]</sup>, 接触模型参

数如表 2 所示。其中颗粒间的接触模型参数大小采用 Sharif 等<sup>[14]</sup>根据 HST95 砂的三轴试验结果所标定的 Hertz 模型微观参数。钢-土界面摩擦系数采用 Lauder 等<sup>[21]</sup>通过直接剪切试验确定的砂土与钢制螺旋桩之间的摩擦系数。离散元颗粒与边界墙之间的摩擦系数由砂的峰值摩擦角计算得到<sup>[18, 23]</sup>。

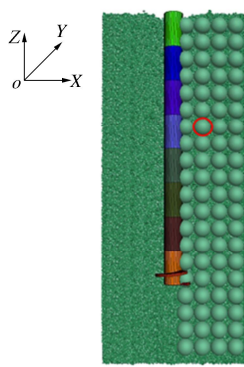


图 4 测量球布置示意图

Fig. 4 Layout of measuring ball

表 2 接触模型参数<sup>[14, 18-19, 23]</sup>

Table 2 Parameters of contact model	
物理参数	对应值
剪切模量 $G/\text{GPa}$	3
泊松比 $\nu$	0.3
颗粒间摩擦系数 $\mu$	0.264
刚度指数 $\alpha_h$	1.5
桩界面摩擦系数 $\mu_p$	0.445
边界墙摩擦系数 $\mu_w$	0.8

1.4 螺旋桩安装

在模拟螺旋桩的安装时，在保证螺旋桩附近土体处于准静态状态的同时尽可能降低计算成本，本模拟中采用 Da 等<sup>[26]</sup>提出的惯性数  $I$  来控制极限安装速度。惯性数  $I$  是通常用作确定离散元模型是否以处于准静态的指标。通常假设惯性数保持在某个阈值  $I_{\max}$  以下时，离散元模型处于准静态状态。相关文献中对该阈值的建议值并不固定，常用取值在  $0.001^{[26-27]} \sim 0.01^{[28]}$ 。模拟采用 0.01 作为惯性数的阈值，并根据此阈值与 Cerfontaine 等<sup>[18]</sup>推导公式计算螺旋桩安装过程中的最大允许贯入速率：

$$v_{z,\max} = \min(4p_h AR, 3D_h) \frac{I_{\max}}{d_{50}} \sqrt{\frac{\sigma_3}{\rho_s}} \quad (2)$$

式中： $p_h$  为螺旋叶片螺距； $D_h$  为螺旋叶片直径； $d_{50}$  为颗粒中值粒径； $\sigma_3$  为初始围压； $\rho_s$  为颗粒密度。

根据 AR 的定义，螺旋桩的旋转速率为

$$w_{\max} = \frac{2\pi \cdot v_{z,\max}}{AR \cdot p_h} \quad (3)$$

由式 (2) 可知，最大允许贯入速率随初始围压  $\sigma_3$

的增加而增大。因此，随着螺旋桩安装深度的增加，其最大允许贯入速率也相应增加<sup>[10,14]</sup>。为减少模拟时间，本模拟中采用变速率的方式来安装螺旋桩。根据式 (2)，当螺旋桩的安装 AR 为 0.5 时，保证模型处于准静态的螺旋桩的最大贯入速率与深度的关系如表 3 所示。

表 3 AR=0.5 时螺旋桩贯入速率与深度的关系

Table 3 Relationship between penetration rate and depth of screw

pile when AR=0.5	
深度范围/m	最大贯入速率/(m·s <sup>-1</sup> )
0.0~0.01	0.6958
0.01~0.02	1.2052
0.02~0.04	1.7045
0.04~0.06	2.2005
0.06~0.1	2.7834
0.1~0.16	3.5481

1.5 模拟汇总

为了对比不同 AR 下螺旋桩的安装对土体的扰动，分别模拟了 AR 为 1, 0.5, 0.25 时螺旋桩的安装过程。在拥有两颗 Intel Xeon Scalable Platinum 8358 (32 核, 64 线程) 芯片的工作站上同时模拟 3 种 AR 下螺旋桩安装至 0.16 m 深度处，总用时 32 d。

2 螺旋桩受力分析

螺旋桩各部件所受到的竖向力可通过记录该部件所受接触力的垂直分量来获得，扭矩可通过各部件所受接触力水平分量与该部件中心与旋转轴之间距离的积来获得。

螺旋桩各部件受力按照图 5 进行划分。将螺旋桩安装过程中所受的竖向力通过下式划分为连杆受力及叶片受力：

$$F_z = F_c + F_h \quad (4)$$

式中： $F_c$  为安装过程中桩身连杆所受竖向力； $F_h$  为安装过程中叶片所受竖向力。

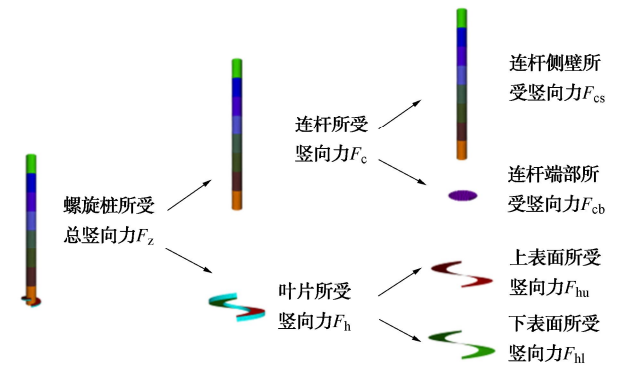


图 5 螺旋桩受力划分

Fig. 5 Distribution of force of screw pile

将螺旋桩连杆及叶片所受竖向力进一步细分：



$$F_c = F_{cs} + F_{cb}, \quad (5)$$

$$F_h = F_{hu} + F_{hl}. \quad (6)$$

式中:  $F_{cs}$  为桩身连杆侧壁所受竖向摩擦力;  $F_{cb}$  为连杆端部所受竖向力;  $F_{hu}$  为螺旋叶片上表面所受竖向力;  $F_{hl}$  为螺旋叶片下表面所受竖向力。

## 2.1 螺旋桩所受竖向力及扭矩

螺旋桩整体所受竖向力及扭矩随安装深度的变化如图 6 所示。图 6 (a) 中横坐标为螺旋桩安装过程中所受的竖向力, 负号表示螺旋桩受力方向与螺旋桩运动方向相反, 即竖直向上。纵坐标为螺旋桩桩端深度与螺旋叶片外径比。从图 6 (a) 中可以看出, 在同一 AR 下, 随着螺旋桩安装深度的增加, 其受到的竖向阻力也随之增大。此外, 随着 AR 的减小螺旋桩安装过程中受到的竖向力明显降低, 从 AR=1 至 AR=0.25, 竖向力降低近 80%。使用低 AR 安装模式 (AR<1) 可以有效减小螺旋桩的安装阻力, 这与目前已有的试验和数值模拟结果一致<sup>[14]</sup>。

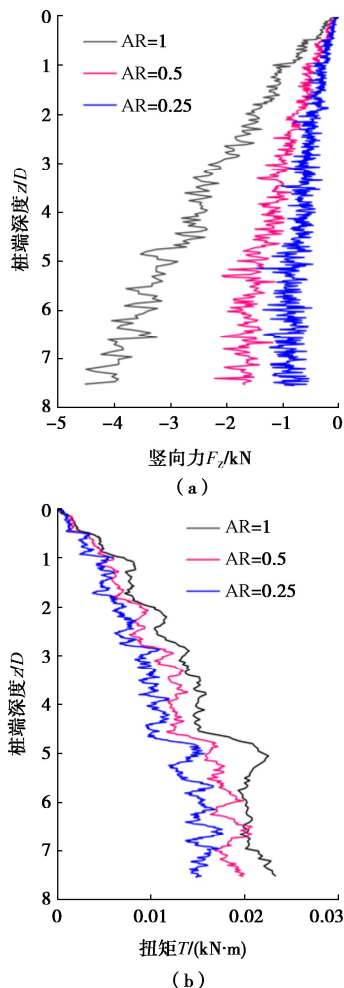


图 6 螺旋桩安装所受竖向力及扭矩随深度变化

Fig. 6 Change of vertical force and torque of screw pile during installation with depth

图 6 (b) 中横坐标为螺旋桩安装过程中所受的扭矩。从图 6 (b) 中可以看出, 在同一 AR 下, 随着螺

旋桩安装深度的增加, 其受到的扭矩也随之增大。随着 AR 的减小, 螺旋桩安装过程中受到的扭矩随之降低。这一现象说明采用低 AR 安装模式既可减小螺旋桩的竖向安装力, 也可减小安装扭矩, 对安装设备的要求也将显著降低。图 6 中安装扭矩随 AR 的减小幅度小于竖向安装力, 这与 Cerfontaine 等<sup>[18]</sup>离心机实验所反映的规律一致。

## 2.2 螺旋桩连杆及叶片所受竖向力

按照图 5 所示, 对螺旋桩安装过程中各部件受力情况分别进行分析。螺旋桩连杆及叶片受力随安装深度变化如图 7 所示。

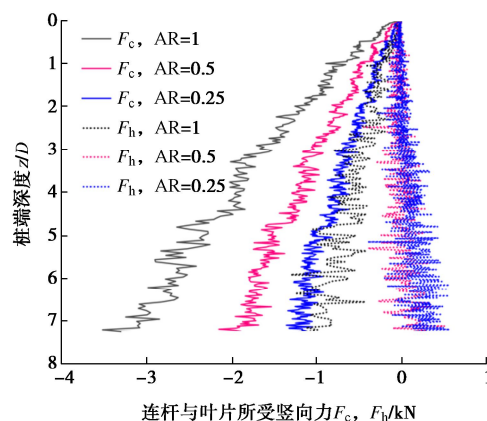


图 7 连杆与叶片所受竖向力随深度变化

Fig. 7 Change of vertical force on cylinder and helix with depth

从图 7 可以看出, 螺旋桩安装过程所受的竖向力主要来自桩身连杆 ( $F_c$ ), 在 AR=1 时, 桩身连杆的受力约占总竖向力的 76%。在 AR<1 时, 螺旋桩叶片的受力为正, 即与螺旋桩运动方向相同, 不再阻碍螺旋桩的安装, 且 AR 为 0.5, 0.25 时, 螺旋叶片上的受力基本一致。连杆端部及侧向所受竖向力随安装深度变化如图 8 所示。

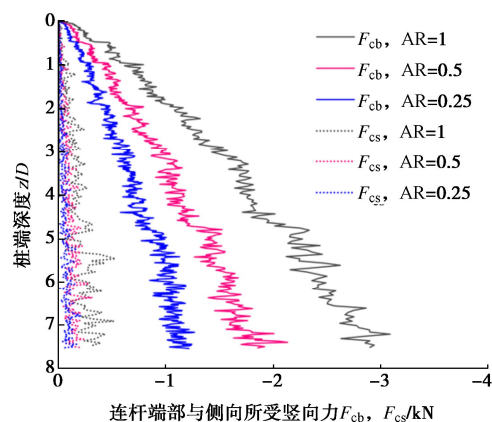


图 8 连杆端部及侧向所受竖向力随深度变化

Fig. 8 Change of vertical force on base and shaft with depth

从图 8 中可以看出, 桩身连杆上的受力几乎全部来自连杆端部, 且其受力随 AR 的减小而减小, 这一

现象将在后文中进行详细解释。同时, 图 8 说明连杆侧向所受竖向力较小。连杆侧向在安装过程中主要受摩擦力的作用, 该力的大小与桩-土摩擦系数以及螺旋桩在土中的深度有关。对于本文中所研究的安装深度较浅的螺旋桩, 侧摩阻力明显低于端阻力。此外, 螺旋桩所受摩擦力方向与桩-土相对运动方向相反: 在  $AR=1$  时, 摩擦力方向与叶片倾角方向一致; 随着  $AR$  的减小, 摩擦力的方向更接近水平方向; 当  $AR=0$  时, 螺旋桩在土中仅发生旋转而没有竖向位移, 摩擦力方向沿水平向。因此, 安装过程中桩身连杆所受摩擦力对竖向安装阻力贡献随  $AR$  的减小而减小, 但其对安装扭矩的贡献随  $AR$  的减小而增大。桩身连杆侧向所受竖向安装阻力大小与螺旋桩的几何形式和安装模式有关。

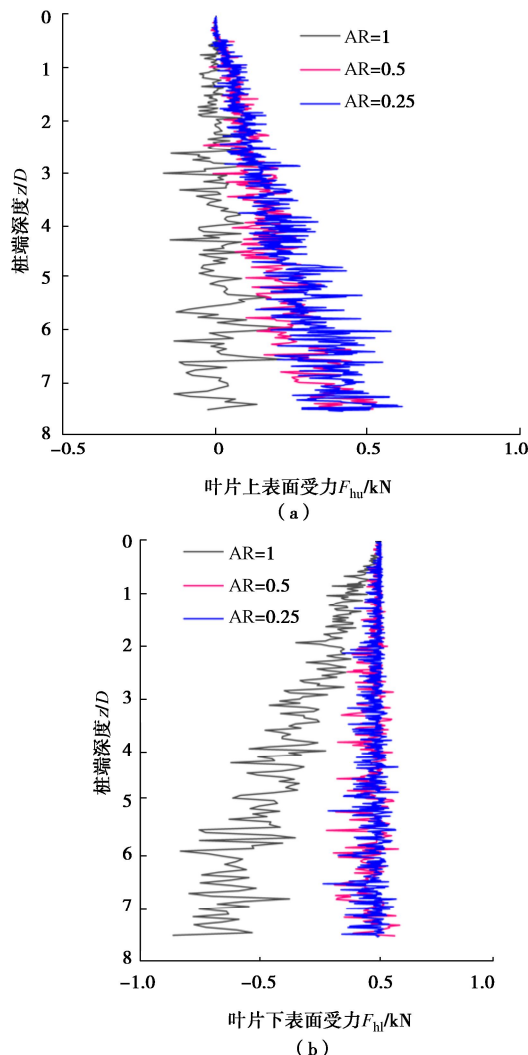


图9 螺旋叶片所受竖向力随深度变化

Fig. 9 Change of vertical force on helix with depth

图 9 中对比了不同的  $AR$  情况下螺旋叶片上下表面受力随安装深度的变化, 在  $AR=1$  时, 叶片上表面受到十分小的外力作用, 下表面受大小为负的竖向力, 即叶片上的安装阻力主要来源于叶片下表面与土的相

互作用力。在  $AR$  为 0.5, 0.25 时, 螺旋叶片下表面受微小力, 上表面所受力向下, 即螺旋叶片所受合外力为安装推动力。这表明叶片在  $AR=1$  与  $AR<1$  两种安装情况下受力机制存在明显的差异, 这一差异是螺旋桩安装阻力随  $AR$  变化的主要原因之一。

综上所述, 安装过程中螺旋桩所受竖向阻力主要由桩身连杆端部力  $F_{cb}$  和叶片上的作用力  $F_b$  构成。桩身连杆端部力随  $AR$  的减小而减小; 叶片下表面接触力 (方向向上, 阻力) 随  $AR$  减小而减小, 而上表面接触力 (方向向下, 推动力) 随  $AR$  减小而增大。桩身连杆端部的受力的方向主要竖直向上, 且桩身连杆端部上的作用力矩理论上是 0, 因此对安装扭矩的贡献很小; 螺旋叶片上作用力的力矩较大, 这部分力是安装扭矩的主要来源, 且作用于螺旋叶片上下表面的力均产生阻碍螺旋桩旋转的扭矩, 因此  $AR$  发生变化时螺旋叶片上的受力变化对安装扭矩的变化影响较小; 随着  $AR$  的减小, 连杆侧壁上的摩擦力方向逐渐靠近水平方向, 对安装扭矩的贡献增大。以上 3 个因素共同作用导致了图 6 中安装扭矩随着  $AR$  的变化幅度小于竖向安装力变化幅度的现象。

### 2.3 叶片上下表面颗粒运动及接触力分布

为了进一步分析造成  $AR=1$  与  $AR<1$  时受力机制差异的原因, 分别研究了螺旋桩在  $AR$  为 1, 0.5 两种模式下安装至 0.16 m ( $7.5D$ ) 深度时, 螺旋叶片附近土体颗粒的运动以及叶片上下表面的受力分布变化。 $AR$  为 0.25, 0.5 两种情况下的颗粒运动和叶片受力情况大致相同, 因此省略了  $AR=0.25$  的模拟结果。

图 10 显示了不同  $AR$  下叶片附近相同区域内的颗粒速度矢量图, 图中箭头的大小代表颗粒速度的大小, 箭头的方向为颗粒运动的方向。为突出显示叶片上下表面的颗粒运动方向, 图 10 中删除了部分位于叶片刃口位置的移动速度大的颗粒。从图 10 中可以看出, 在  $AR=1$  时, 叶片上方颗粒主要沿水平方向运动。而在  $AR=0.5$  时, 叶片上方颗粒主要沿竖直方向运动, 因此颗粒对螺旋叶片的反作用力是竖直向下的。

为了更直观地表示叶片上表面颗粒速度方向, 此处考虑将颗粒速度均投影到  $X-Z$  平面上。同时, 将所有速度矢量划分到 12 个相同大小的角度区间中, 分别计算速度方向位于各个区间内的颗粒数目, 以此获得颗粒速度在  $X-Z$  平面上的概率分布。叶片上表面同一区域内颗粒速度方向概率分布如图 10 所示。从中可以明显看出,  $AR=1$  时螺旋叶片上表面颗粒速度方向更多的偏向水平方向。 $AR=0.5$  安装模式下螺旋叶片上表面颗粒速度方向更多的偏向竖直方向。图 10 解释了图 9 中叶片上表面受力随  $AR$  变化的原因。

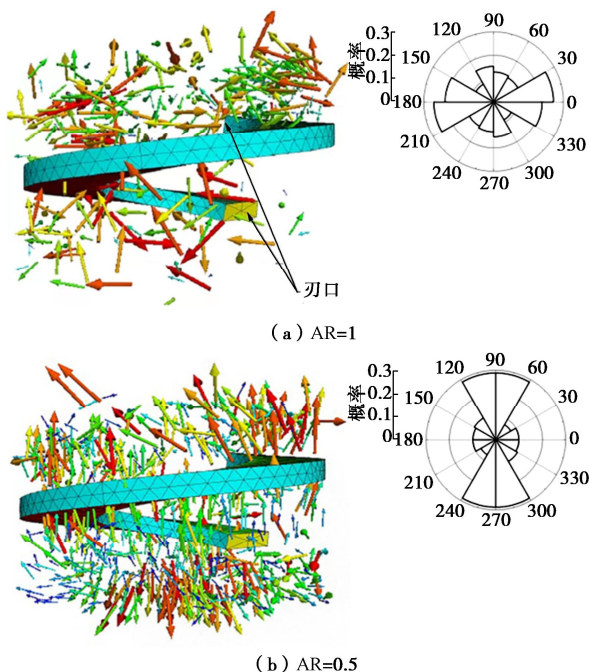


图 10 叶片附近颗粒速度云图 (移除刃口处大速度颗粒)  
Fig. 10 Cloud chart of particle velocity near helix (large velocity particles at blade edge are removed)

图 11, 12 分别为 AR 为 1, 0.5 的安装模式下叶片上的颗粒接触力的作用位置在水平面上的投影图。图中点的位置为颗粒与叶片接触点在水平面上的投影, 点的颜色表示总接触力的大小。从图 11, 12 可以看出, 在 AR=1 时叶片上表面接触点的个数明显小于 AR=0.5 时, 且接触力的值大多小于 2 N。对于叶片下表面, 在 AR=1 时接触点的个数明显多于 AR=0.5 时。这与图 9 所示的结果一致。

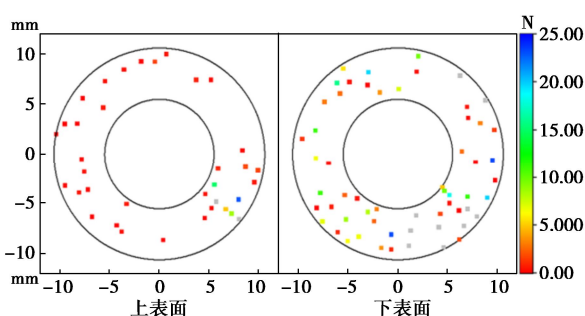


图 11 AR=1 安装模式下螺旋叶片表面接触力分布水平投影  
Fig. 11 Horizontal projection of distribution of contact force on surfaces of helix under installation mode when AR=1

为了更好的理解不同 AR 下螺旋桩与其周围土体间的相互作用, 图 13 将三维空间中的螺旋叶片展开到二维平面上。根据 AR 的定义, 在 AR=1 时, 螺旋叶片的运动方向将与螺旋叶片倾角方向一致, 即叶片表面处的土颗粒与螺旋叶片发生沿螺旋叶片倾角方向的相对滑动。在 AR<1 时, 螺旋叶片的运动方向更靠近水平向, 导致叶片上表面的颗粒在发生沿叶片倾角方

向的相对滑动的同时产生向上的位移; 随着螺旋桩的旋转, 叶片下表面与土颗粒之间的挤压作用减弱, 甚至可能产生一定的间隙, 使得叶片下表面受到的力小于 AR=1 时对应的情况。图 13 说明 AR 影响了螺旋桩叶片与土之间的相对运动方向, 从而导致螺旋叶片上下表面受力随 AR 的变化。

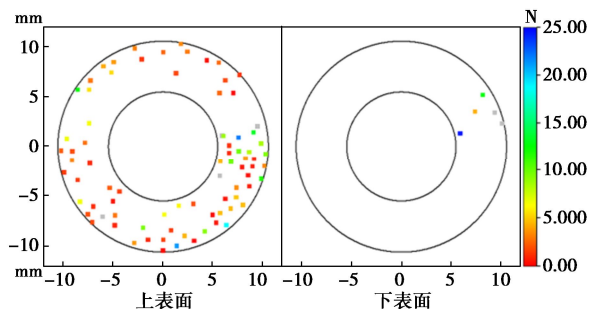


图 12 AR=0.5 安装模式下螺旋叶片表面接触力分布水平投影  
Fig. 12 Horizontal projection of distribution of contact force on surfaces of helix under installation mode when AR=0.5

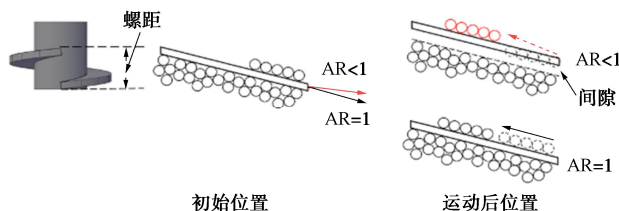


图 13 螺旋叶片与颗粒二维运动示意图

Fig. 13 Schematic diagram of two-dimensional motion of helix and particles

### 3 微观结果分析

微观结果侧重于分析螺旋桩模型在不同 AR 下安装对周围土体造成的影响, 通过螺旋桩一侧土体中孔隙率、配位数和应力变化等方面进一步分析, 以研究螺旋桩在不同 AR 进行安装时对周围土体的扰动。

#### 3.1 孔隙率与配位数变化

离散颗粒体在外荷载作用下的密度变化可通过孔隙率的变化直接反映。此外, 配位数也常被用作离散颗粒体堆积密度的量度, 其变化受颗粒组构和土体密实度的共同影响。配位数为某离散颗粒体中平均每个颗粒所分配的接触个数, 其计算公式为

$$Z_c = 2 \frac{N_c}{N_p} \quad (7)$$

式中:  $N_c$  为接触的总数;  $N_p$  为颗粒的数量。

为研究螺旋桩安装过程对其周围土体密度的影响, 选取了离散元模型中深度为 0.065 m (3.1D)、距螺旋桩中心 0.017 m 的测量球, 研究了该测量球中土体孔隙率和配位数变化, 测量球位置在图 4 中用红色圆圈标出。该测量球距螺旋桩通过区域较近, 其内的土体响应较为明显。测量球内土体孔隙率和配位数随



螺旋桩安装深度的变化如图 14 所示。

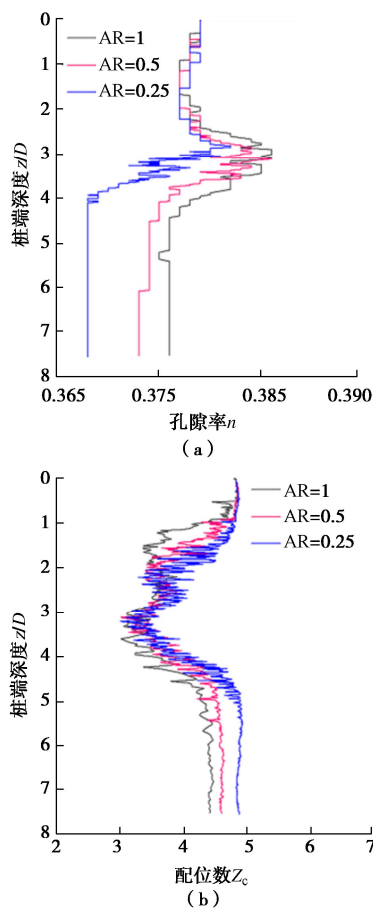


图 14 同一测量球内孔隙率与配位数随安装深度的变化

Fig. 14 Change porosity and coordination number in same measuring sphere with installation depth

从图 14 (a) 中可以看出, 当螺旋桩安装深度达到测量球中心所在位置时, 孔隙率增大至一峰值。螺旋桩端远离测量球后孔隙率开始减小, 稳定后的孔隙率相较于初始值有所减小, 且减小幅度随  $AR$  的减小而增加。这表明螺旋桩的安装导致了土体密实度的增大, 且  $AR$  越小这一密实效应越强。这一现象说明在中等密实砂土中采用  $AR < 1$  的安装模式不仅不会导致原土体的扰动, 反而对土体有一定的加固效果。低  $AR$  安装条件下螺旋桩上拔承载力的提升或许与这一加固效果有关。此外, 从图 14 (a) 中可以看出, 螺旋桩安装对孔隙率的影响范围约为桩端上下  $1D$ 。

从图 14 (b) 中可以看出, 当螺旋桩安装深度达到测量球中心所在位置时, 配位数减小至 3 左右。螺旋桩端远离测量球后配位数开始回升, 稳定后的配位数相较于初始值有所减小, 且减小幅度随  $AR$  的减小而减小; 在  $AR=0.25$  时配位数最终又回到初始值。从图 14 (b) 中可以看出, 螺旋桩的安装过程对配位数的影响范围约为桩端上下  $2D$ 。

对比图 14 左右两部分, 可以发现在螺旋桩安装过

程中, 螺旋桩周围的土体出现了密度增加但是配位数减小的情况, 这与螺旋桩安装过程中土体结构的变化有关<sup>[29]</sup>。

为研究螺旋桩安装过程对不同区域土体密度变化的影响, 图 15 中对比了螺旋桩在  $AR$  为 1, 0.25 两种模式安装时, 离散元模型中孔隙率和配位数增量在  $X-Z$  平面上的分布。图 15 (a) 中对比了  $AR$  为 1, 0.25 时螺旋桩安装导致的桩周土体孔隙率的变化分布, 图 15 (b) 中对比了  $AR$  为 1, 0.25 螺旋桩安装导致的桩周土体配位数的变化分布。由于测量球的分布位置情况, 螺旋桩一侧的小部分区域数值由插值所得, 故将其覆盖。

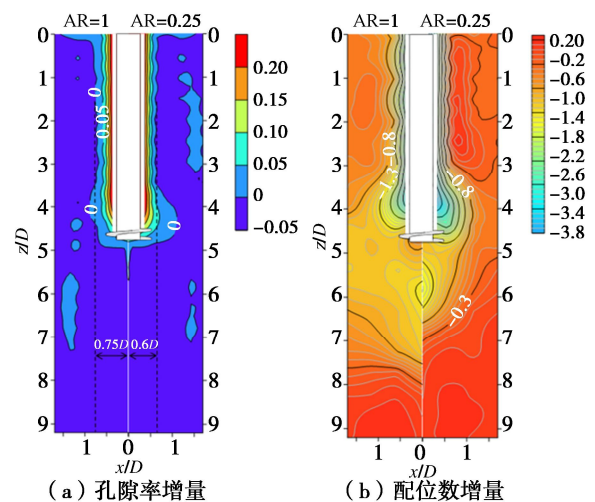


图 15 螺旋桩安装过程土体孔隙率与配位数增量云图

Fig. 15 Cloud chart of soil porosity and coordination number increment during installation of screw pile

图 15 为螺旋桩安装至  $0.1 \text{ m}$  深度 ( $4.7D$ ) 时孔隙率与配位数的增量分布云图。从图 15 (a) 中可以看出, 孔隙率仅在螺旋桩周围一定范围内增大。在此范围外孔隙率减小, 即土体密实度增加。这与从图 14 所得到的:  $AR$  越小土体密实效应越强的结论一致, 而与 Shi 等<sup>[17]</sup>通过离散元数值模拟所获得的结论相反。这可能与所模拟的螺旋桩类型以及土体的初始密实程度有关。

从图 15 (b) 中可以看出, 桩周的土体内配位数相较于初始值几乎都有所减小。对比土体内相同位置配位数在  $AR$  为 1, 0.25 时的变化, 发现在  $AR=1$  时配位数的减小效果更为显著, 与图 14 中配位数变化相呼应。

### 3.2 应力变化

选取图 4 所示位置测量球研究螺旋桩安装过程对其周围土体应力的影响。该测量球内土体水平应力及竖向应力随螺旋桩安装深度的变化如图 16 所示。

从图 16 可以看出, 当螺旋桩安装深度达到测量球



中心所在位置时,土体水平应力和竖向应力都增大至一峰值,相同条件下土体水平应力峰值明显大于土体竖向应力峰值。这是因为选取的测量球位于螺旋桩外侧,当测量球内应力达峰值时,螺旋桩的桩端与测量球中心处于同一水平位置,故测量球内土体受到水平向的影响效果更明显。

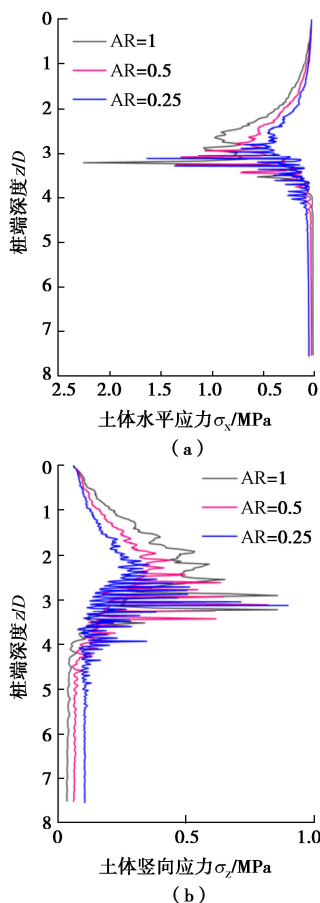


图 16 同一测量球土体水平应力与竖向应力随安装深度变化  
Fig. 16 Change of horizontal and vertical stresses in same measuring sphere with installation depth

为进一步分析螺旋桩安装前后土体残余应力的变化,将上述测量球内土体水平应力及竖向应力在螺旋桩安装前后的数值大小绘制于图 17 中。从图 17 中可以看出,在  $AR=1$  时,螺旋桩一侧测量球内土体水平应力与竖向应力最终值均低于初始值,即残余应力为负值。随着  $AR$  的减小,残余应力增大。在  $AR=0.5$  时残余应力几乎为 0,而在  $AR=0.25$  时残余应力为正值。这表明螺旋桩一侧土体残余应力随着  $AR$  的减小而增大。 $Sharif$  等<sup>[14]</sup>模拟观察到螺旋桩下方土体残余应力随着  $AR$  的增大而增大,这与所研究区域的位置有关。

下文通过对比螺旋桩在  $AR$  为 1, 0.25 安装时离散元模型中应力增量在  $X-Z$  平面上的分布,以研究螺旋桩安装过程对不同区域土体应力的影响。

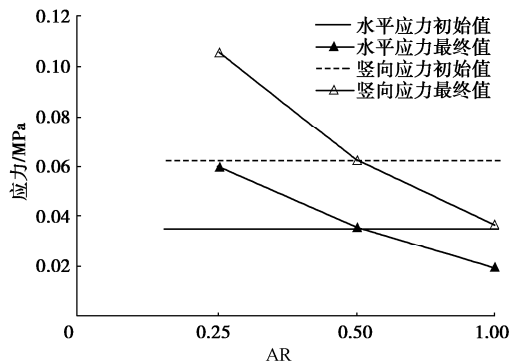


图 17 螺旋桩安装前后测量球内应力值  
Fig. 17 Stress values in measuring ball before and after installation of screw pile

图 18 为螺旋桩安装至 0.1 m 深度 ( $4.7D$ ) 时应力增量分布云图。图 18 (a) 中对比了  $AR$  为 1, 0.25 时螺旋桩安装导致的土体水平应力变化分布,图 18 (b) 中对比了  $AR$  为 1, 0.25 时螺旋桩安装导致的土体竖向应力变化分布。从图 18 (a) 可以看出,桩身连杆周围土体的水平应力减小,而螺旋叶片周围土体水平应力增大。并且,螺旋桩在  $AR=1$  安装时螺旋桩连杆周围土体水平应力减小的范围和螺旋叶片周围土体水平应力增大的范围都大于在  $AR=0.25$  时。在图 18 (b) 中可以看出竖向应力也存在相同的现象。

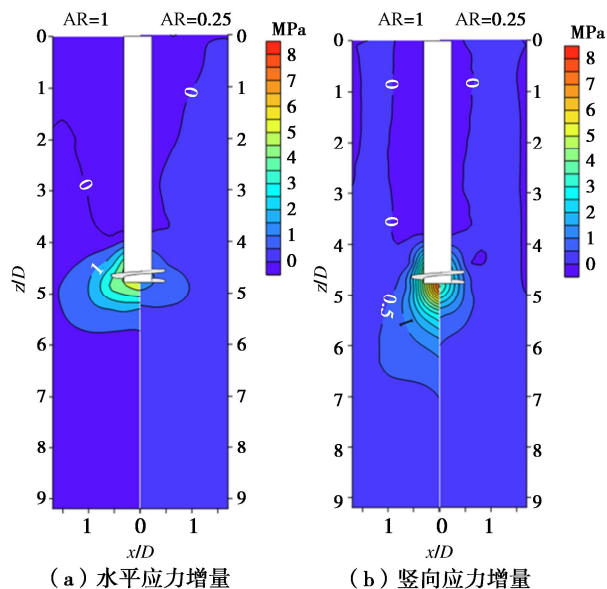


图 18 螺旋桩安装过程土体水平应力与竖向应力增量云图  
Fig. 18 Cloud chart of horizontal and vertical stresses increment of soils during installation of screw pile

由 2.2 节可知,螺旋叶片随着  $AR$  的减小呈现两种不同的安装机制,  $AR=1$  时,螺旋叶片与土体之间的相互作用阻碍螺旋桩的安装,螺旋叶片下表面土体应力增长幅度最大,导致连杆端部在  $AR=1$  时所受阻力最大。随着  $AR$  的减小,螺旋叶片上所受合外力为安

装推动力, 螺旋叶片下表面与土颗粒之间的挤压作用减弱, 螺旋叶片下部土体应力增长幅度减小, 使得连杆端部受力也随之减小。这可以很好地解释图 8 中桩身连杆端部受力随 AR 的减小而减小的现象。

## 4 结 论

基于离散元分析方法, 分别分析了螺旋桩在 AR 为 1, 0.5, 0.25 下的安装过程, 研究了螺旋桩安装过程中其各个部件的受力及螺旋桩与周围土体的相互作用。得到 5 点结论。

(1) 在螺旋桩安装过程中, 螺旋桩受到的竖向力与扭矩均随着 AR 的减小而降低且扭矩随 AR 的减小幅度小于竖向力的减小幅度。

(2) 螺旋桩在 AR=1 与 AR<1 时存在两种不同的安装机制: AR=1 时, 螺旋叶片表面处的土颗粒与螺旋叶片发生沿螺旋叶片倾角方向的相对滑动; 螺旋叶片上表面所受竖向力很小, 下表面所受的竖向力为负值。在 AR<1 时, 螺旋叶片的运动方向更接近水平向, 叶片上表面颗粒在发生沿叶片倾角方向相对滑动的同时产生向上位移; 在 AR≤0.5 时, 螺旋叶片上表面所受竖向力为正值, 下表面所受竖向力很小。

(3) 螺旋桩安装过程中所受竖向力由桩身连杆和螺旋叶片所受竖向力组成, 桩身连杆所受竖向力占比大于螺旋叶片所受竖向力。桩身连杆所受竖向力几乎全部来自桩身连杆端部受力。

(4) 螺旋桩的安装导致其周围土体孔隙率降低, 且随着 AR 的减小, 螺旋桩周围土体孔隙率减小更为显著, 即密实效应更加明显。这与部分学者所观察到的现象不一致, 桩型与土体相对密实度对螺旋桩安装前后土体中孔隙率变化的影响还需进一步的研究。

(5) 随着 AR 的减小, 螺旋桩周围土体的附加竖向应力与水平应力都降低, 螺旋桩连杆端部受力随 AR 的减小与这一现象有关。螺旋桩安装完成后, 周围土体内的残余应力随着 AR 的减小而增大。

## 参考文献:

- [1] BAILEY H, SENIOR B, SIMMONS D, et al. Assessing underwater noise levels during pile-driving at an offshore windfarm and its potential effects on marine mammals[J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, **60**(6): 888-897.
- [2] CERFONTAINE B, KNAPPETT J A, BROWN M J, et al. A finite element approach for determining the full load-displacement relationship of axially loaded shallow screw anchors, incorporating installation effects[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2021, **58**(4): 565-582.
- [3] HAO D X, WANG D, O'LOUGHLIN C D, et al. Tensile monotonic capacity of helical anchors in sand: interaction between helices[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, **56**(10): 1534-1543.
- [4] DING H, WANG L, ZHANG P, et al. The recycling torque of a single-plate helical pile for offshore wind turbines in dense sand[J]. Applied Sciences, 2019, **9**(19): 4105.
- [5] TANG C, PHOON K K. Statistical evaluation of model factors in reliability calibration of high-displacement helical piles under axial loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2020, **57**(2): 246-262.
- [6] CLEMENCE S P, LUTENEGGER A J. Industry survey of state of practice for helical piles and tiebacks[J]. DFI Journal-the Journal of the Deep Foundations Institute, 2015, **9**(1): 21-41.
- [7] PERKO H A. Helical Piles a Practical Guide to Design and Installation[M]. Hoboken: J Wiley, 2009.
- [8] BYRNE B W, HOULSBY G T. Helical piles: an innovative foundation design option for offshore wind turbines[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2015, **373**(2035): 20140081.
- [9] GHALY A, HANNA A. Experimental and theoretical studies on installation torque of screw anchors[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, **28**(3): 353-364.
- [10] DE HOLLANDA CAVALCANTI TSUHA C, AOKI N. Relationship between installation torque and uplift capacity of deep helical piles in sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, **47**(6): 635-647.
- [11] SAKR M. Relationship between installation torque and axial capacities of helical piles in cohesionless soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, **52**(6): 747-759.
- [12] THERAR A B. Screw Piles as Offshore Foundations: Numerical and Physical Modelling[D]. Dundee: University of Dundee, 2018.
- [13] 史旦达, 杨彦骋, 邓益兵, 等. 考虑转速比影响的砂土中螺旋挤扩钻具成孔特性宏观模型试验[J]. 岩土力学, 2018, **39**(6): 1981-1990, 1998. (SHI Danda, YANG Yancheng, DENG Yibing, et al. Experimental study of the effect of drilling velocity ratio on the behavior of auger piling in sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(6): 1981-1990, 1998. (in Chinese))
- [14] SHARIF Y U, BROWN M J, CERFONTAINE B, et al. Effects of screw pile installation on installation requirements

- and in-service performance using the discrete element method[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2021, **58**(9): 1334-1350.
- [15] WANG L, ZHANG P Y, DING H Y, et al. The uplift capacity of single-plate helical pile in shallow dense sand including the influence of installation[J]. *Marine Structures*, 2020, **71**: 102697.
- [16] CERFONTAINE B, BROWN M J, KNAPPETT J A, et al. Control of screw pile installation to optimise performance for offshore energy applications[J]. *Géotechnique*, 2023, **73**(3): 234-249.
- [17] SHI D D, YANG Y C, DENG Y B, et al. DEM modelling of screw pile penetration in loose granular assemblies considering the effect of drilling velocity ratio[J]. *Granular Matter*, 2019, **21**(3): 74.
- [18] CERFONTAINE B, CIANTIA M, BROWN M J, et al. DEM study of particle scale and penetration rate on the installation mechanisms of screw piles in sand[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, **139**: 104380.
- [19] KEITH L. The Performance of Pipeline Ploughs[D]. Dundee: University of Dundee, 2010.
- [20] AL-DEFAE A H, CAUCIS K, KNAPPETT J A. Aftershocks and the whole-life seismic performance of granular slopes[J]. *Géotechnique*, 2013, **63**(14): 1230-1244.
- [21] LAUDER K D, BROWN M J, BRANSBY M F, et al. The influence of incorporating a forecutter on the performance of offshore pipeline ploughs[J]. *Applied Ocean Research*, 2013, **39**: 121-130.
- [22] ARROYO M, BUTLANSKA J, GENS A, et al. Cone penetration tests in a virtual calibration chamber[J]. *Géotechnique*, 2011, **61**(6): 525-531.
- [23] CIANTIA M O, BOSCHI K, SHIRE T, et al. Numerical techniques for fast generation of large discrete-element models[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering and Computational Mechanics*, 2018, **171**(4): 147-161.
- [24] YU H S. *Cavity Expansion Methods in Geomechanics*[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [25] Itasca Consulting Group, Inc. PFC<sup>3D</sup> User's Manual[M]. Denver: Itasca Consulting Group, 2019.
- [26] DA CRUZ F, EMAM S, PROCHNOW M, et al. Rheophysics of dense granular materials: discrete simulation of plane shear flows[J]. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2005, **72**(2 Pt 1): 021309.
- [27] KHOUBANI A, EVANS T M. An efficient flexible membrane boundary condition for DEM simulation of axisymmetric element tests[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2018, **42**(4): 694-715.
- [28] JANDA A, OOI J Y. DEM modeling of cone penetration and unconfined compression in cohesive solids[J]. *Powder Technology*, 2016, **293**: 60-68.
- [29] 胡敏云, 肖 斌, 张旭俊, 等. 粗粒土细观组构分析的影响因素研究[J]. *浙江工业大学学报*, 2018, **46**(3): 342-349. (HU Minyun, XIAO Bin, ZHANG Xujun, et al. Study on influential factors of micro-fabric analysis of granular sand[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2018, **46**(3): 342-349. (in Chinese))