

DOI: 10.11779/CJGE20240526

# 黏土中海上风电单叶片刚性螺旋桩水平承载特性研究

李心如<sup>1</sup>, 刘润<sup>1</sup>, 王乐<sup>\*1</sup>, 赵欢<sup>1</sup>, 田英辉<sup>2</sup>

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 墨尔本大学基础设施工程系, 澳大利亚 墨尔本)

**摘要:** 螺旋桩具有安装速度快, 承载性能优越等优点, 将其作为海上风电的基础, 可以有效降低建设成本, 促进海上风电规模化发展。在风电服役期间, 螺旋桩需要承受巨大的水平荷载。然而, 目前针对螺旋桩的研究大都集中于其竖向承载性能, 亟需研究螺旋桩的水平承载性能。采用有限元数值分析方法, 从螺旋桩转动中心以及桩周土体影响范围等角度, 分析研究了叶片尺寸和叶片位置对单叶片刚性螺旋桩水平极限承载力的影响, 得到了水平荷载作用下桩周土体的破坏模式, 提出了黏土中单叶片刚性螺旋桩水平极限承载力的预测公式。结果表明: 螺旋桩水平极限承载力随着叶片直径的增大而增大, 随着叶片位置的下移呈现出先增大后减小再增大的变化趋势, 当叶片位于螺旋桩底部时, 水平极限承载力达到峰值, 对于主要承受水平荷载的螺旋桩, 建议将叶片设置在 0.3~0.5 倍桩身埋置深度处或螺旋桩底部。当叶片位于转动中心以上时, 桩周土体呈“伴随倒楔形的刚性转动破坏”; 当叶片位于转动中心以下时, 桩周土体呈“无倒楔形的刚性转动破坏”。

**关键词:** 海上风电; 黏土; 单叶片; 螺旋桩; 水平极限承载力

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)09-1995-08

**作者简介:** 李心如(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事结构物与土体相互作用研究。E-mail: lixinru0211@tju.edu.cn。

## Study on horizontal bearing characteristics of single-blade rigid screw pile for offshore wind power in clay

LI Xinru<sup>1</sup>, LIU Run<sup>1</sup>, WANG Le<sup>1</sup>, ZHAO Huan<sup>1</sup>, TIAN Yinghui<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Department of Infrastructure Engineering, The University of Melbourne, Melbourne Australia)

**Abstract:** Screw piles have advantages of fast installation speed and superior bearing performance, and as the foundation of offshore wind power, they can effectively reduce construction costs and promote large-scale development of offshore wind power. During service of wind turbines, screw piles are subjected to huge horizontal loads. However, most of current research on screw piles focuses on vertical bearing performance, and it is urgent to study horizontal bearing performance of screw piles. In this paper, finite element numerical analysis method is used to analyze influence of blade size and blade position on the horizontal ultimate bearing capacity of a single-blade rigid spiral pile from perspectives of the rotation center of the screw pile and influence range of the soil around the pile, and the failure mode of the soil around the pile under horizontal loading is obtained. A prediction formula of the horizontal ultimate bearing capacity of the single-blade rigid screw pile in clay is proposed. The results show that horizontal ultimate bearing capacity of the screw pile increases with the increase of the blade diameter, and shows a trend of first increasing and then decreasing and then increasing with the downward movement of the blade position. When the blade is located at the bottom of the screw pile, the horizontal ultimate bearing capacity reaches the peak, and it is recommended to set the blade at 0.3~0.5 times the embedded depth of the pile or the bottom of the screw pile when the screw pile mainly bears horizontal load. When the blade is located above the center of rotation, the soil around the pile presents a rigid rotational failure accompanied by an inverted wedge. When the blade is located below the center of rotation, the soil around the pile presents a rigid rotational failure without inverted wedge.

**Key words:** offshore wind power; clay; single blade; screw piles; horizontal ultimate bearing capacity

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金项目 (52301334) This work was supported by Youth Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52301334).

收稿日期(Received): 2024-05-29

修回日期(Revised): 2024-11-30

接受日期(Accepted): 2024-12-03

网络出版日期(Online): 2024-12-04

\*通信作者 (E-mail: lewang\_1895@tju.edu.cn)

## 0 引言

螺旋桩可通过旋转按压的方式快速安装, 施工设备轻便, 安装到位后连杆和叶片协同承载, 能够提供巨大的承载力<sup>[1-3]</sup>。采用螺旋桩作为海上风电基础, 可大幅缩短施工周期, 有效降低建造成本。

浅海、近海风机通过风电塔筒直接与桩基相连。风机服役期间, 风电基础除承受上部结构自重外, 主要承受风机运转、风、浪、流等产生的巨大水平向荷载。对于典型 5 MW 风机, 正常运行下风机基础泥面位置处的总水平作用力可以达 4 MN<sup>[4]</sup>。海上风机基础的水平承载力问题往往比竖向承载力问题更加突出, 是风机基础结构设计中最为关键的一环, 直接关系到风机机组的稳定性与安全性<sup>[5]</sup>。因此, 螺旋桩基础水平承载特性的研究显得尤为重要。

目前国内外针对螺旋桩的研究主要集中在竖向承载力<sup>[6]</sup>。Ilamparuthi 等<sup>[7]</sup>针对不同密实度砂土中螺旋桩开展了上拔试验, 发现叶片直径、埋深率及砂土密实度等因素是影响螺旋桩上拔承载性能的主要因素, 并提出了深、浅埋螺旋桩抗拔破坏时不同的破坏面。Hanna 等<sup>[8]</sup>通过试验推导出了桩周土体破坏机理, 提出了预测螺旋桩抗拔承载力的模型。Demir 等<sup>[9]</sup>对黏土中螺旋桩同时进行了数值模拟和室内模型试验, 发现其最大的抗拔力取决于埋深比与锚片间距比。郝冬雪等<sup>[10]</sup>对黏土中螺旋桩的竖向抗拔承载性能进行了相关参数分析, 研究了锚片埋深、锚片间距对螺旋桩抗拔承载特性的影响。袁驰等<sup>[11]</sup>利用有限元软件分析了锚盘埋深及间隔对上拔承载力及破坏模式的影响, 提出了在不同埋深比与锚片间距比情况下的破坏形式。李青松等<sup>[12]</sup>通过砂土中螺旋桩原型足尺试验和既有文献实测数据, 基于圆孔扩张理论, 采用 Tresca 屈服准则修正了螺旋桩抗拔承载力计算方法。

尽管国内外针对螺旋桩的水平承载性能也进行了一些研究, 但是大都集中在砂土中, 黏土中螺旋桩水平承载的研究较少。Mittal 等<sup>[13]</sup>开展了砂土中螺旋锚桩的模型试验, 研究了叶片数量、嵌入长度和加载位置对螺旋锚桩侧向承载性能的影响, 提出了一种预测干砂中螺旋锚桩的侧向承载能力的理论模型。张新春等<sup>[14]</sup>基于自制的锚土动力相互作用模型试验系统, 分析了螺旋锚长径比、叶片距宽比、叶片外伸比、不同荷载幅值和振动频率等对砂土中螺旋锚水平动力响应特性的影响, 提出螺旋锚长径比及叶片外伸比是影响螺旋锚水平动力响应特征的重要指标。胡伟等<sup>[6]</sup>通过模型试验等方法研究了砂土螺旋桩在水平荷载作用下的承载性能, 认为当锚盘埋深比大于 4 时, 可直接按

等直径裸桩进行水平承载力计算, 提出了砂土中单叶片螺旋锚水平承载力的理论计算公式。韦芳芳等<sup>[2]</sup>基于有限元研究了黏土中不同倾斜角度下叶片数量和首层叶片埋深对螺旋桩水平承载性能的影响规律, 发现叶片数量对倾斜螺旋桩的水平承载性能影响不大, 提出了不同倾斜角度下螺旋桩水平极限承载力计算中锚片所承担部分的计算公式。Prasad 等<sup>[15]</sup>通过试验提出了匀质黏土中多叶片螺旋锚水平承载力的预测公式。

针对黏土中螺旋桩水平承载力研究不足的现象, 本文对黏土中单叶片刚性螺旋桩的水平承载特性开展研究。通过有限元数值分析方法, 从转动中心以及桩周土体影响范围等角度, 分析了叶片尺寸和叶片位置对单叶片刚性螺旋桩水平极限承载力的影响, 得到了水平荷载作用下桩周土体的破坏模式, 提出了非匀质黏土中单叶片刚性螺旋桩水平极限承载力的预测公式。

## 1 数值仿真方法及验证

### 1.1 模型建立及参数

螺旋桩包括连杆和叶片两部分, 由于螺距对于螺旋桩水平承载力影响较小<sup>[16]</sup>, 螺旋桩叶片可简化为无螺距叶片, 结构如图 1 所示。其中,  $L_h$  为叶片下表面到泥面的距离, 即叶片埋置深度;  $L$  为桩身埋置深度;  $L_h$  为叶片位置;  $D_s$  为桩身直径;  $D_h$  为叶片直径。

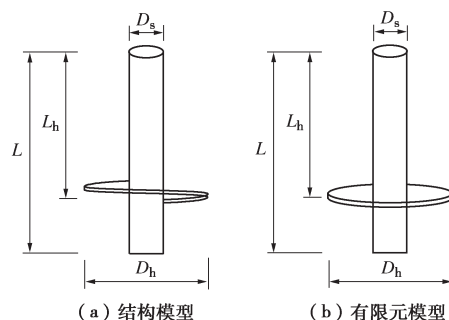


图 1 螺旋桩结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of screw pile structure

螺旋桩及土体的建立参照 Yu 等<sup>[17]</sup>中离心模型试验的数据。螺旋桩桩径  $D_s$  为 2 m, 叶片直径 5 m, 总长度  $L_0$  为 14 m, 入土深度  $L$  为 12 m。桩身截面抗弯刚度  $EI=30 \text{ GNm}^2$ , 叶片厚度  $t=20 \text{ mm}$ , 弹性模量  $E=210 \text{ GPa}$ , 桩身和叶片的泊松比  $\nu$  均为 0.3, 密度  $\rho$  均为  $7850 \text{ kg/m}^3$ 。土体刚度系数  $E/S_u=200$ ; 有效重度  $\gamma$  为  $6.4 \text{ kN/m}^3$ , 不排水抗剪强度  $s_u$  随深度  $z$  变化,  $s_u$  满足:

$$s_u = 1.39z \quad (1)$$

式中:  $z$  为泥面以下深度 (m);  $s_u$  为泥面以下  $z$  深度

处土体不排水抗剪强度 ( $\text{kPa}$ )。建模时为实现  $s_u$  随深度  $z$  变化, 在材料属性模块, 将土体不排水抗剪强度与温度函数进行关联, 采用线性插值法完成设置。

由于结构和荷载均具有对称性, 为简化计算提高计算速度, 采用半结构模型。螺旋桩选用理想弹塑性本构模型, 黏土选用莫尔库仑本构模型。

为避免边界效应的影响, 须保证土体区域足够大, 所以土体高度取  $22\text{ m}$ , 直径取  $30\text{ m}$ <sup>[18]</sup>。对土体进行边控制法线方向平动位移, 土体底部控制 3 个方向平动位移。桩与土的接触部分分别定义法向行为与切向行为, 法向行为定义为硬接触且不允许接触后分离; 切向行为定义为库仑摩擦, 摩擦系数  $0.4$ , 如图 2 (a) 所示。

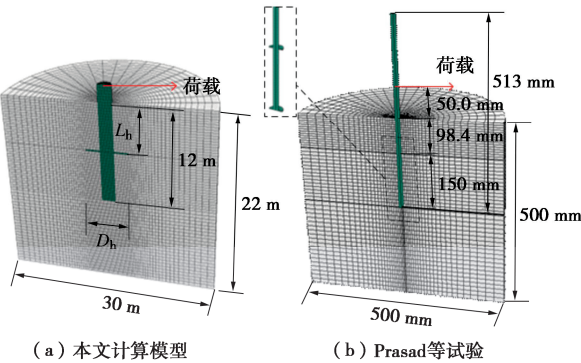


图 2 螺旋桩数值模型

Fig. 2 FEM numerical model of screw pile

1.2 模型验证

以 Prasad 等<sup>[15]</sup>开展的黏土中双叶片螺旋桩的水平承载试验为基础, 验证建模方法的准确性。螺旋桩高  $513\text{ mm}$ , 杆体直径  $13.8\text{ mm}$ , 叶片直径  $33\text{ mm}$ , 入土深度  $248.4\text{ mm}$ , 加载点位置为泥面上  $50\text{ mm}$  处, 土体高度和直径均为  $500\text{ mm}$ , 可避免边界效应的影响<sup>[18]</sup>, 黏土泊松比  $0.49$ , 不排水抗剪强度  $s_u=3\text{ kPa}$ , 如图 2 (b) 所示。提取螺旋桩泥面处位移和加载点处的荷载, 将模拟结果与试验结果进行对比, 如图 3 所示, 曲线趋势一致, 结果较为吻合, 说明了该建模方法的准确性。

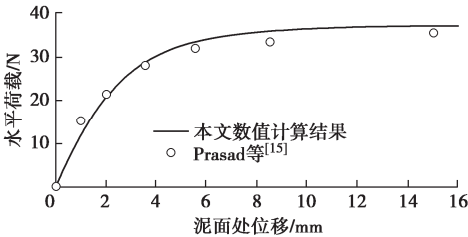


图 3 有限元数值结果与试验结果对比图

Fig. 3 Comparison chart of numerical results of finite elements and test results

2 仿真计算及方案

为研究叶片位置  $L_h$  和叶片尺寸  $D_h$  对螺旋桩水平承载性能的影响, 本文分别采用不同的叶片直径  $L_h$  ( $1.0 D_s$ ,  $1.5 D_s$ ,  $2.0 D_s$ ,  $2.5 D_s$ ,  $3.0 D_s$ ) 和叶片位置  $D_h$  ( $L/6$ ,  $L/3$ ,  $L/2$ ,  $2L/3$ ,  $5L/6$ ,  $L$ ) 进行建模, 共 25 个螺旋桩。其中, 叶片直径  $D_h=1.0 D_s$  时的螺旋桩即为单桩, 编号记为  $P_0$ , 作为对照组。其余螺旋桩根据叶片位置分为 6 组, 即 A、B、C、D、E、F 组, 每组根据叶片尺寸分别记为 1, 2, 3, 4 号, 如表 1 所示。

表 1 螺旋桩变量表

Table 1 Screw pile variablen gauge

编号	叶片位置	叶片直径	编号	叶片位置	叶片直径
A-1	$L/6$	$1.5D_s$	B-1	$L/3$	$1.5D_s$
A-2	$L/6$	$2.0D_s$	B-2	$L/3$	$2.0D_s$
A-3	$L/6$	$2.5D_s$	B-3	$L/3$	$2.5D_s$
A-4	$L/6$	$3.0D_s$	B-4	$L/3$	$3.0D_s$
C-1	$L/2$	$1.5D_s$	D-1	$2L/3$	$1.5D_s$
C-2	$L/2$	$2.0D_s$	D-2	$2L/3$	$2.0D_s$
C-3	$L/2$	$2.5D_s$	D-3	$2L/3$	$2.5D_s$
C-4	$L/2$	$3.0D_s$	D-4	$2L/3$	$3.0D_s$
E-1	$5L/6$	$1.5D_s$	F-1	$L$	$1.5D_s$
E-2	$5L/6$	$2.0D_s$	F-2	$L$	$2.0D_s$
E-3	$5L/6$	$2.5D_s$	F-3	$L$	$2.5D_s$
E-4	$5L/6$	$3.0D_s$	F-4	$L$	$3.0D_s$

3 结果分析

3.1 极限承载力

在桩顶施加  $0.6\text{ m}$  的水平位移荷载, 提取桩顶的荷载-位移曲线, 以  $0.1 D_{h,max}$  水平位移处对应的荷载作为桩的极限承载力。各桩无量纲化水平极限承载力如图 4 所示。

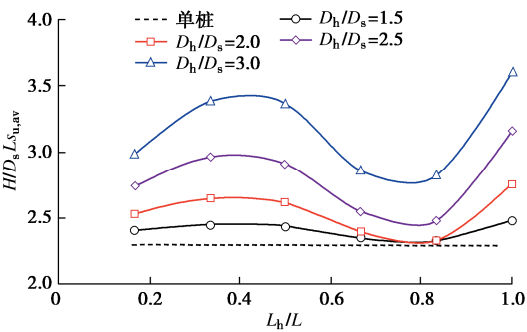


图 4 不同叶片直径螺旋桩水平极限承载力随叶片位置的变化规律

Fig. 4 Variation of horizontal ultimate bearing capacity of spiral piles with different diameters and position of the blades

由图 4 可知, 相较于单桩, 增加叶片能提高桩基的水平承载力, 并且增加叶片后螺旋桩水平承载力随叶片直径的增大而增大, 随叶片埋置深度的增加先增大后减小再增大。当叶片设置在  $30\% \sim 50\%$  和  $1.0$  倍



桩身埋置深度时, 水平承载力提高效果尤为显著, 且当叶片位于 1.0 倍桩身埋置深度, 即螺旋桩底部时, 提升效果最佳。

对于叶片直径为  $D_h=3.0D_s$  的螺旋桩, 当叶片位于 30%~50%桩身埋置深度时, 螺旋桩水平极限承载力相较于单桩提高了 46.7%~47.7%, 当叶片位于桩底部时, 水平极限承载力相较于单桩提高了 57.5%, 水平承载力达到峰值。对于主要承受水平荷载的螺旋桩, 建议将叶片设置在 30%~50%桩身埋置深度和桩底部。

产生上述规律的原因在于, 叶片直径越大、距离桩底越近, 其上覆土越多, 叶片所受的竖向压力越大, 桩倾覆时需抵抗的压力越大, 并且随着叶片的增大, 与土体的接触面积越大, 倾覆时需抵抗的土体摩擦力越大, 所以承载力提高。但当叶片位于转动中心附近时, 其转动位移很小, 叶片的抗倾覆能力不能充分发挥。综上, 螺旋桩水平承载力随着叶片直径增大而增大, 随叶片位置下移呈现出先增大后减小再增大的变化趋势。

3.2 转动中心位置

通过提取桩身位移可以得到桩的转动中心, 记转动中心为  $O$  点, 转动中心的位置 (转动中心距离泥面的距离) 记为  $L_o$ 。

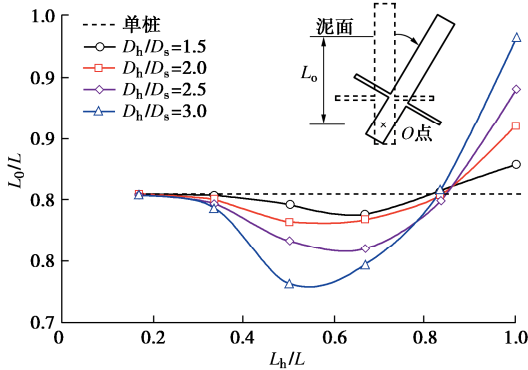


图5 水平极限状态下不同叶片直径螺旋桩转动中心位置随叶片位置的变化规律

Fig. 5 Variation of rotation center position of the screw pile with different blade diameters and positions in horizontal ultimate limit state

由图 5 转动中心位置与叶片直径和叶片位置的关系可以看出, 单桩转动中心位置约为 80%桩身埋置深度, 安装叶片之后, 转动中心位置发生改变, 螺旋桩转动中心大约在 70%~95%桩身埋置深度处。当叶片安装在 0.8L 以上时, 螺旋桩转动中心上移, 叶片越大, 转动中心上移越多, 当叶片位置下移时, 转动中心上移量先增大后减小, 在 50%~70%桩身埋置深度范围

内, 转动中心上移最多。当叶片安装在 0.8L 以下时, 转动中心位置下移, 叶片直径越大, 叶片位置距离桩底越近, 转动中心下移越多。

3.3 土体影响范围及破坏模式

在桩顶施加相同的水平位移荷载, 变形云图如图 6 所示。螺旋桩周围土体影响范围比单桩大, 且影响范围大小与叶片尺寸和位置有关。当叶片距离转动中心较远时, 即  $L_h < 0.5L$  时, 叶片周围及其上部土体影响范围明显增大, 并且随着叶片直径增大而增大, 桩底附近土体影响范围基本保持不变。当叶片位于转动中心附近时, 即  $L_h > 0.5L$  时, 桩底附近土体受影响范围随着直径的增大而增大, 上部土体受影响范围基本保持不变。

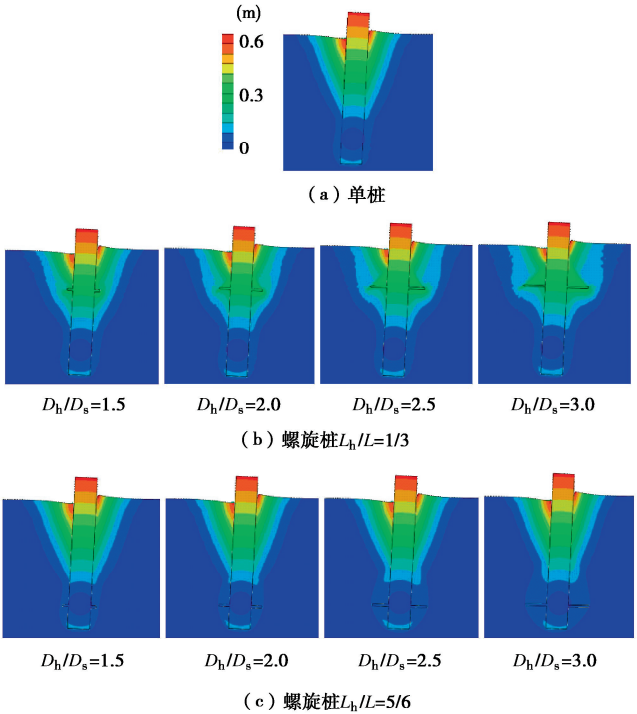


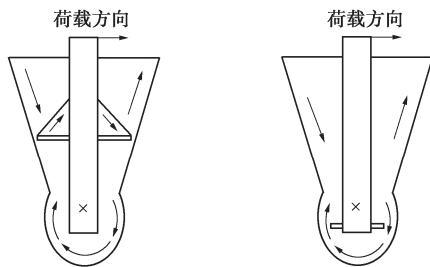
图6 水平极限状态下桩基及其周围土体的变形云图

Fig. 6 Deformation contours of pile foundation and surrounding soil in horizontal ultimate limit state

当叶片与转动中心距离较远时, 在水平荷载作用下因转动产生的位移相对较大, 迫使周围的土体发生移动, 土体受影响范围较大。同时, 当影响叶片距离转动中心较远时, 叶片埋置深度较浅, 上覆土较少, 抗倾覆能力较弱, 叶片上方土体随叶片转动而发生移动和变形, 所以叶片附近及其上方土体上影响范围较大。当叶片位于转动中心附近时, 水平荷载作用下由于转动叶片产生的位移相对较小, 周围受影响土体范围较小。叶片越大, 与土体接触面积越大, 叶片产生位移时波及的土体越多, 所以土体受影响范围也越大。

### 3.4 桩周土体破坏模式

由图7可知, 桩主要发生刚性转动, 基础底部产生较大的位移, 发生明显的“踢脚”现象, 根据叶片与中心的相对位置, 螺旋桩达到极限状态时的破坏模式分为两种情况。当叶片位于转动中心以上时, 土体主要表现为浅层土的楔形破坏、叶片附近的倒楔形破坏和深层土的平面转动破坏, 即“伴随倒楔形的刚性转动破坏”。当叶片位于转动中心以下时, 螺旋桩的破坏模式与刚性单桩的破坏模式<sup>[19]</sup>相似, 主要表现为浅层土的楔形破坏和深层土的平面转动破坏, 即“无倒楔形的刚性转动破坏”。其原因在于刚性螺旋桩埋置深度较浅, 属于短桩, 基底嵌固作用弱, 螺旋刚性短桩在水平荷载的作用下, 基础发生刚体转动。



(a) 叶片位于转动中心之上 (b) 叶片位于转动中心之下

图7 水平极限状态下螺旋桩-土破坏模式

Fig. 7 Failure mechanisms of pile-soil in horizontal ultimate limit state

### 3.5 水平极限承载力预测

根据破坏模式, 在极限荷载作用下螺旋桩发生破坏时承受的力主要由3部分组成, 即沿桩身分布的侧向土阻力, 叶片上的土压力和摩擦力, 如图8所示。考虑到螺旋桩发生极限破坏时转动很小(小于 $5^\circ$ ), 认为桩仍处于竖直状态, 叶片上的土压力竖向分量近似等于叶片上土压力, 水平分量近似为0, 摩擦力沿水平方向分布, 当叶片位于转动中心之上时, 摩擦力方向与荷载方向相反, 当叶片位于转动中心之下时, 摩擦力方向与荷载方向相同。

考虑到螺旋桩发生极限破坏时破坏模式与单桩相似, 且叶片厚度很小( $t/L=1.67 \times 10^{-3}$ ), 叶片厚度范围内由于叶片直径而增加的侧向土压力很小, 忽略不计, 所以螺旋桩沿桩身侧向土抗力与单桩相似。API规范规定, 匀质黏土中桩的极限土抗力 $p$ , 当 $Z$ 从0增加到 $Z_R$ 时,  $p$ 值根据式(2)由 $3s_u$ 线性增加到 $9s_u$ , 然后保持 $9s_u$ 不变。

$$Z_R = \frac{6D}{\gamma D/s_u + J} \quad (2)$$

式中:  $p$  为极限土抗力 (kPa);  $Z$  为泥面以下深度 (m);  $D$  为桩直径 (m);  $\gamma$  为土的单位有效重量 (N/m);  $J$

为无因次经验常数, 现场试验已确定其变化范围为0.25~0.5。

由于本文为非匀质土, 为简化计算, 取  $s_u = s_{u, av}$  (桩身埋置深度范围内的平均不排水抗剪强度), 并根据单桩的极限承载力进行反算, 确定  $Z_R$  为 5.89 m, 取为  $3D_s$  (6 m)。

叶片上的土压力(叶片的抗倾覆能力)可以简化为两部分, 即底部土体提供的承载阻力和顶部土体提供的上拔阻力<sup>[15]</sup>。螺旋桩发生转动时, 叶片的前半部分向下转动, 叶片的后半部分向上转动, 前半部分叶片将受到方向向上的承载阻力, 后半部分叶片将受到方向向下的抗拔阻力。假定承载阻力(上拔阻力)大小由外径到内径从  $p_b$  ( $p_u$ ) 线性减小至0。根据 Skempton<sup>[20]</sup>的方法可以确定圆形基础的净承载力沿埋置深度从泥面处到  $5D_h$  处由  $6.2s_u$  线性增加为  $9s_u$ , 然后保持  $9s_u$  不变<sup>[15]</sup>。对于非匀质土, 本文假定  $p_b$  为沿埋置深度从泥面处到  $5D_h$  处由  $6.2s_{u, av}$  线性增加为  $9s_{u, av}$ , 然后保持  $9s_{u, av}$  不变。 $p_u$  可以看作是板的抗拔阻力, Das<sup>[21]</sup>提出黏土中板的抗拔阻力沿埋置深度从地表到  $2D_h$  处由0线性增加为  $9s_u$ , 然后保持  $9s_u$  不变。与承载阻力类似, 本文假定  $p_u$  为沿埋置深度从地表到  $2D_h$  处由0线性增加为  $9s_{u, av}$ , 然后保持  $9s_{u, av}$  不变。

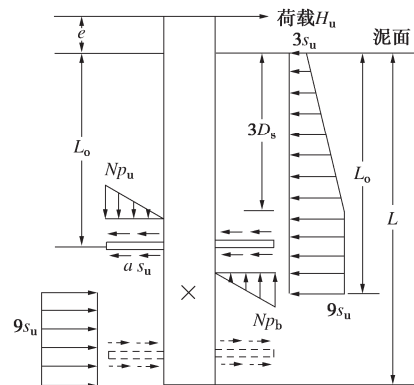


图8 水平极限状态下螺旋桩受力示意图

Fig. 8 Schematic diagram of force distribution of screw pile in horizontal ultimate limit state

由于螺旋桩发生极限破坏时, 叶片的抗倾覆能力不能充分发挥, 并且发挥情况受叶片与转动中心相对位置的影响, 距离转动中心越近, 发挥程度越小, 所以在计算叶片的承载阻力和抗拔阻力时需乘以一个折减系数  $N$ , 如下式:

$$N = 0.8 \left( \frac{L_h - L_0}{L} \right) \quad (3)$$

式中:  $L_0$  为螺旋桩转动中心距离泥面的距离, 其范围为  $0.7L \sim 0.95L$ , 计算折减系数  $N$  时取  $0.8L$ 。

桩在转动时, 叶片的上下表面均受到摩擦阻力,

假定上下表面相同,沿径向均匀分布,其大小为 $\alpha s_u$ ,其中 $\alpha$ 为黏着系数,软黏土取 $1.0^{[15]}$ 。

根据静力平衡,列出方程可以求出转动中心 $L_o$ 和极限荷载 $H$ 。

横向力平衡:

$$H = s_{u,av} D_s (18L_o - 10.5D_s - 9L) \pm K_1 \alpha s_{u,L_h} \quad (4)$$

弯矩平衡:

$$He \pm K_1 \alpha s_{u,L_h} L_h = 10.5 s_{u,av} D_s^3 - 9 s_{u,av} D_s L_o^2 + 4.5 s_{u,av} D_s L^2 + NK_2 (p_b + p_u) \quad (5)$$

其中,当叶片位于转动中心之上时取“+”,叶片位于转动中心之下时取“-”, $K_1$ 和 $K_2$ 的公式如下:

$$K_1 = 2\pi(R_h^2 - R_s^2) \quad (6)$$

$$K_2 = 2(R_h^4/4 + R_s^4/3 - R_s^4/4 - R_s R_h^3/3)/(R_h - R_s) \quad (7)$$

将式(4)代入式(5)可以求出转动中心的位置 $L_o$ ,如式(8),再将 $L_o$ 代入式(4)即可得到螺旋桩的水平极限承载力。

$$L_o = -e + \left[ (324D_s^2 e^2 + 36D_s \zeta)^{0.5} / 18D_s \right] \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} \zeta = & 10.5D_s^2 e + 9LeD_s + 10.5D_s^3 + 4.5D_s L^2 - \\ & (\pm K_1 \alpha L_h s_{u,L_h} / s_{u,av} \pm K_1 \alpha e s_{u,L_h} / s_{u,av}) + \\ & NK_2 (p_b + p_u) / s_{u,av} \quad (9) \end{aligned}$$

其中,当叶片位于转动中心之上时取“+”,叶片位于转动中心之下时取“-”。

$K_2$ 的计算如下:

如图9,假定叶片内径处( $x = D_s$ )土压力为0,并且在外径处为 $p$ ( $x = D_h$ )。因此,距离 $x$ 处的压力分布( $x$ 位于 $D_s \sim D_h$ )由下式给出:

$$p_x = p(x - D_s)/(D_h - D_s) \quad (10)$$

作用在长度较小的基本区域上的土压力为

$$dx = p_x (xd\theta dx) = p(x - D_s)(xd\theta dx)/(D_h - D_s) \quad (11)$$

绕AA轴产生的力矩:

$$A = p(x - D_s)(xd\theta dx)x \sin(\theta + 0.5d\theta)/(D_h - D_s) \quad (12)$$

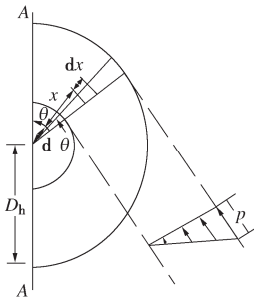


图9 叶片上的土压力计算简图

Fig. 9 Schematic diagram of earth pressure on a blade

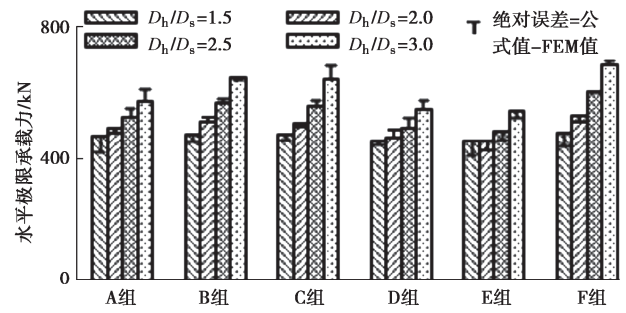
作用在叶片底部的土压力产生的总力矩(二重积分):

$$\begin{aligned} & \frac{p}{(D_h - D_s)} \int_{D_s}^{D_h} \int_0^\pi (x - D_s) x^2 dx \sin \theta d\theta \\ & = 2p(R_h^4/4 + R_s^4/3 - R_s^4/4 - R_s R_h^3/3)/(R_h - R_s) \quad (13) \end{aligned}$$

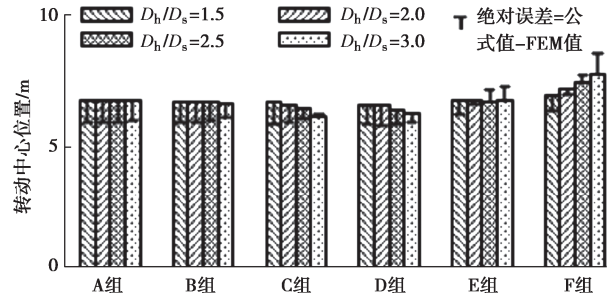
所以可得

$$K_2 = 2(R_h^4/4 + R_s^4/3 - R_s^4/4 - R_s R_h^3/3)/(R_h - R_s) \quad (14)$$

上述公式的理论计算值与有限元数值模拟结果对比如图10所示,水平极限承载力最大误差为10.8%,转动中心位置最大误差为12.5%,说明公式能够较好的预测螺旋桩的水平极限承载力。



(a) 螺旋桩水平极限承载力



(b) 水平极限下螺旋桩转动中心位置

图10 理论计算结果与数值模拟结果对比

Fig. 10 Comparison of theoretical calculation results with numerical simulation results

## 4 结 论

(1)螺旋桩水平极限承载力随着叶片直径的增大而增大,随着叶片位置下移呈现出先增大后减小再增大的变化趋势,当叶片位于螺旋桩底部时,水平极限承载力达到峰值,相较于单桩最大可提高57.5%。对于主要承受水平荷载的螺旋桩,建议将叶片设置在30%~50%桩身埋置深度处或螺旋桩底部。

(2)叶片对螺旋桩水平极限承载力的影响主要表现为对螺旋桩转动中心、桩周土体影响范围以及桩周土体破坏模式的影响。螺旋锚转动中心距泥面的距离随着叶片的下移先减小再增大,且叶片越大,转动中心位置变化越大。当叶片距离转动中心较远时,叶片



周围及其上部土体影响范围随着叶片直径的增大而增大,螺旋锚底部土体受影响较小;当叶片位于转动中心附近时,螺旋锚底部土体影响范围随着叶片直径的增大而增大,上部土体受影响较小。当叶片位于转动中心以上时,锚周土体呈“伴随倒楔形的刚性转动破坏”;当叶片位于转动中心以下时,锚周土体呈“无倒楔形的刚性转动破坏”。

(3)在水平极限荷载作用下,螺旋桩上的各种阻力表现为:①桩身周围土体提供的侧阻力;②叶片底部土体提供的承载阻力;③叶片顶部土体提供的上拔阻力;④叶片表面土体提供的摩擦阻力。结合数值分析的结果,提出了非匀质黏土中刚性单叶片螺旋桩水平极限承载力的计算公式。

**利益冲突声明/Conflict of Interests:** 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

**作者贡献/Authors' Contributions:** 王乐、刘润和田英辉设计研究内容,王乐、赵欢和田英辉提供研究指导,李心如完成计算分析,李心如和王乐参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by WANG Le, LIU Run and TIAN Ying-hui and supervised by WANG Le, ZHAO Huan and TIAN Ying-hui. The numerical analyses were conducted by LI Xinru. The manuscript was drafted and revised by LI Xinru and WANG Le. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

## 参考文献:

- [1] 张新春,韩春雨,白云灿,等. 叶片可伸缩钢管螺旋桩结构的承载特性及设计方法[J]. 中国工程机械学报, 2018, **16**(2): 130-135. (ZHANG Xinchun, HAN Chunyu, BAI Yuncan, et al. Bearing capacity and design method of steel screw pile structures with telescopic blades[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2018, **16**(2): 130-135. (in Chinese))
- [2] 韦芳芳,邵盛,陈道申,等. 黏土中倾斜螺旋桩的水平承载性能数值模拟及理论研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, **51**(3): 463-472. (WEI Fangfang, SHAO Sheng, CHEN Daoshen, et al. Numerical simulation and theoretical research on horizontal bearing capacity of inclined helical pile in clay[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, **51**(3): 463-472. (in Chinese))
- [3] 吴立晴,邵国栋,盛寒柯,等. 螺旋锚在软黏土中上拔承载力计算与数值模拟分析[J]. 低温建筑技术, 2021, **43**(10): 120-124. (WU Liqing, SHAO Guodong, SHENG Hanke, et al. Calculation and numerical simulation analysis of uplift bearing capacity of spiral anchor in soft clay[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2021, **43**(10): 120-124. (in Chinese))
- [4] 赖踊卿. 软黏土地基海上风机大直径单桩水平受荷特性与分析模型[D]. 杭州: 浙江大学, 2021. (LAI Yongqing. Modelling of Lateral Behaviour of Large-Diameter Monopiles Supporting Offshore Wind Turbines in Soft Clay[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese))
- [5] 李炜,胡波,李波,等. 大直径加翼单桩水平承载性能离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(4): 831-837. (LI Wei, HU Bo, LI Bo, et al. Centrifuge model tests on horizontal bearing capacity of a large diameter pile with wings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(4): 831-837. (in Chinese))
- [6] 胡伟,孟建伟,刘顺凯,等. 单螺旋锚桩水平承载机理试验与理论研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(1): 158-167. (HU Wei, MENG Jianwei, LIU Shunkai, et al. Experimental and theoretical researches on horizontal bearing mechanism of single screw anchor pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(1): 158-167. (in Chinese))
- [7] ILAMPARUTHI K, DICKIN E A, MUTHUKRISNAIAH K. Experimental investigation of the uplift behaviour of circular plate anchors embedded in sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, **39**(3): 648-664.
- [8] HANNA A, AYADAT T, SABRY M. Pullout resistance of single vertical shallow helical and plate anchors in sand[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2007, **25**(5): 559-573.
- [9] DEMIR A, OK B. Uplift response of multi-plate helical anchors in cohesive soil[J]. Geomechanics and Geoengineering, 2015, **8**(4): 615-630.
- [10] 郝冬雪,宋阳,陈榕,等. 黏土中螺旋锚几何尺寸对上拔承载力影响的数值分析[J]. 东北电力大学学报, 2018, **38**(4): 70-75. (HAO Dongxue, SONG Yang, CHEN Rong, et al. Numerical analysis of influences of helical anchor geometry on uplift capacity in clay[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2018, **38**(4): 70-75. (in Chinese))
- [11] 袁驰,张新,郝冬雪,等. 松砂中螺旋锚上拔承载力及破坏模式数值分析[J]. 东北电力大学学报, 2019, **39**(6): 50-57. (YUAN Chi, ZHANG Xin, HAO Dongxue, et al. Numerical analysis of the uplift capacity and the failure mode of helical anchors in loose sand[J]. Journal of Northeast

- Electric Power University, 2019, **39**(6): 50-57. (in Chinese))
- [12] 李青松, 文磊, 孔纲强, 等. 基于孔扩张理论的螺旋桩抗拔承载力计算分析[J]. 岩土力学, 2021, **42**(4): 1088-1094, 1103. (LI Qingsong, WEN Lei, KONG Gangqiang, et al. Theoretical computation of the uplift bearing capacity of helical piles based on cavity expansion method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(4): 1088-1094, 1103. (in Chinese))
- [13] MITTAL S, GANJOO B, SHEKHAR S. Static equilibrium of screw anchor pile under lateral load in sands[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2010, **28**(5): 717-725.
- [14] 张新春, 白云灿, 何泽群, 等. 砂土中螺旋锚基础水平振动特性的模型试验研究[J]. 应用力学学报, 2020, **37**(2): 601-606, 929-930. (ZHANG Xinchun, BAI Yuncan, HE Zequn, et al. Experimental study on vibration response characteristics of screw pile foundation in sand under lateral dynamic loading[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, **37**(2): 601-606, 929-930. (in Chinese))
- [15] PRASAD Y V S N, RAO S N. Lateral capacity of helical piles in clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **122**(11): 938-941.
- [16] WANG D, MERIFIELD R S, GAUDIN C. Uplift behaviour of helical anchors in clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, **50**(6): 575-584.
- [17] YU J, LEUNG C F, HUANG M S, et al. Application of T-bar in numerical simulations of a monopile subjected to lateral cyclic load[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2018, **36**(6): 643-651.
- [18] 张驰. 砂性土中螺旋锚基础承载特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2019. ZHANG Chi. Bearing Characteristics of Helical Anchor Foundation in Sand[D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [19] 王欢. 砂土海床大直径单桩基础和桶形基础水平受荷特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020. WANG Huan. Lateral Behaviour of Offshore Monopile and Bucket Foundations in Sand[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese))
- [20] SKEMPTON A W. The Bearing Capacity of Clays[M]// Selected Papers on Soil Mechanics, Thomas Telford Publishing, 1984: 50-59.
- [21] DAS B M. Model tests for uplift capacity of foundations in clay[J]. Soils and Foundations, 1978, **18**(2): 17-24.