

DOI: 10.16285/j.rsm.2023.0835

考虑锚脰作用下拖曳锚在成层土中的嵌入机制

熊树森¹, 黄蕴晗², 赖莹³

(1. 浙江大学 超重力研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 江苏海洋大学 土木与港海工程学院, 江苏 连云港 222002;
3. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘 要: 深水系泊系统及其系泊基础的开发已成为发展清洁能源“海上风电”项目的关键课题。拖曳锚由于其较大的承载力和易安装等诸多优势而具有较好的发展前景。基于极限塑性上限分析法, 建立了考虑锚脰作用的拖曳锚在成层土中的嵌入轨迹、姿态以及承载力预测模型。利用已有模型试验对本模型进行验证, 结果表明: 考虑锚脰作用模型轨迹预测误差控制在 13.5%, 轨迹和角度预测误差相比于未考虑锚脰作用的模型分别降低了 78.32% 和 36.9%。硬土层的强度、厚度和深度共同制约着拖曳锚的嵌入能力。首先, 强度比影响最明显, 强度比越大, 嵌入深度越小, 直至无法穿透硬土层; 其次, 是深度影响, 深度越大, 承载力越大。能够穿透硬土层的条件下深度对轨迹和角度影响不明显, 不能够穿透硬土层条件下深度越大, 嵌入深度越大, 最终角度越小; 最后, 是厚度影响, 硬土层厚度越大, 嵌入过程中承载力越大。

关 键 词: 拖曳锚; 预测模型; 成层土; 锚脰作用; 轨迹

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2024) 05-1495-10

Embedment mechanism of a drag anchor in layered soils considering shank effect

XIONG Shu-sen¹, HUANG Yun-han², LAI Ying³

(1. Center for Hypergravity Experimental and Interdisciplinary Research, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;
2. College of Civil and Harbor Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang, Jiangsu 222002, China;
3. College of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: The development of deep water mooring system and its mooring foundation has become a key issue in the development of clean energy "offshore wind power" projects. The drag embedment anchor, owing to its high bearing capacity and ease of installation, presents promising prospects. A prediction model for the trajectory, pitch angle and capacity of the anchor in layered soil, considering the effect of shank, is established based on the upper limit analysis. Verification of the model using existing model tests demonstrates that the trajectory prediction error of the model, accounting for the shank effect is limited to 13.5%. Furthermore, compared with the model that does not consider the shank effect, the trajectory and angle prediction error are reduced by 78.32% and 36.9% respectively. The strength, thickness and depth of stiff layer jointly restrict the embedding capability of the anchor. The influence of strength is found to be the most significant, with a higher strength ratio leading to a shallower embedding depth until the stiff layer becomes impenetrable. Additionally, greater depth is associated with increased bearing capacity. When the stiff layer can be penetrated, depth has minimal impact on trajectory and angle. However, when the stiff layer cannot be penetrated, the greater depth will result in a deeper embedment depth and smaller final angle. Lastly, the thickness of the stiff layer is found to positively correlate with the bearing capacity during the embedding process.

Key words: drag anchor; prediction model; layered soils; shank effect; trajectory

1 引 言

在双碳策略下我国着力推进可再生能源的开发, 加快构建与新发展理念相适应的清洁低碳、安全高效的现代能源体系^[1-5]。海上风电作为优先发展

项目, 深水系泊系统及其基础的研发已成为国际海洋工程领域的前沿以及关键课题。拖曳锚具有重量轻、安装简便、锚固效率高的优势, 广泛应用于浮式平台等系泊系统^[6-8]。拖曳锚安装过程中, 由锚链或锚缆连接锚眼和拖船, 将锚抛至海床表面后, 锚

收稿日期: 2023-06-15

录用日期: 2023-10-06

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 52279112)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52279112).

第一作者简介: 熊树森, 男, 2000 年生, 博士研究生, 主要从事海洋系泊基础的研究。E-mail: xiongshusen@zju.edu.cn

通讯作者: 赖莹, 女, 1989 年生, 博士, 特聘副研究员, 主要从事海洋系泊技术和海洋岩土工程方面的研究。E-mail: laiying@zju.edu.cn

在拖船提供动力下逐渐嵌入海床到达目标深度, 安装过程如图 1 所示。随着嵌入深度的增加, 饱和黏土的不排水抗剪强度也随之增加, 上覆土压力增大, 锚的承载力也相应增大。安装过程中锚板的运动轨迹和姿态持续变化, 影响其最终嵌入深度和极限承载力, 因此拖曳锚在土中的运动轨迹以及承载特性得到了国内外学者的广泛关注^[9-14]。目前, 关于拖曳锚运动轨迹的研究集中在均质土以及强度线性增加的土体中^[8, 15-19]。在实际工程中, 会遇到成层土的情况, 其中包含不同厚度和强度的硬土层, 这是由于沉积过程和地质过程的差异所导致的。然而, 成层土中的硬土层会影响基础锚固的稳定性, 同时也会增加拖曳锚嵌入轨迹和承载能力预测的难度^[7]。

目前, 关于拖曳锚在成层土中的研究较少, Rao 等^[20]测量了直径为 50 mm、厚度为 5 mm 的圆形板锚模型在中硬质黏土上覆于软黏土和软黏土上覆于中硬质黏土的抗拔能力。Liu 等^[21]、彭劲淞^[22]基于 O'Neill^[23]的解析方法, 建立了拖曳锚在包含黏土-砂土-黏土、砂土-黏土-砂土土层中嵌入、拉出和旋转行为的模型, 分析了其运动轨迹、运动姿态、极限承载力、失效模式和嵌入埋深损失。黏土强度差异会影响锚的嵌入性能及锚链在成层土中的反悬链线形态^[24]。关于拖曳锚在成层土中的嵌入研究大多忽略锚脰, 然而锚脰对拖曳锚嵌入的姿态有显著影响。因此, 这类模型不能完全反映出实际工程中的拖曳锚在嵌入过程中的轨迹、姿态以及承载能力。

本文量化了锚脰对拖曳锚在成层土中嵌入的影响, 优化了拖曳锚在海床中运动的受力模型, 并建立了考虑锚脰作用下拖曳锚嵌入轨迹、运动姿态以及承载能力的预测模型。通过与模型试验结果对比修正了模型参数, 为拖曳锚在成层土中嵌入轨迹的预测以及嵌入姿态的预测提供了可靠方法。

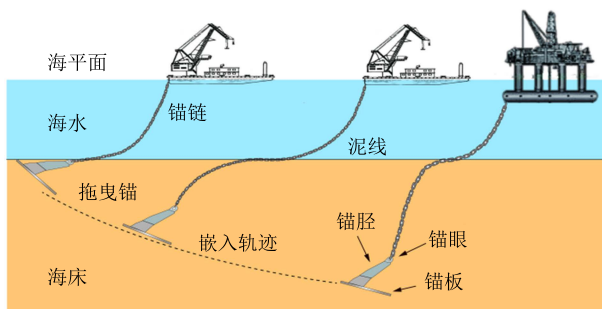


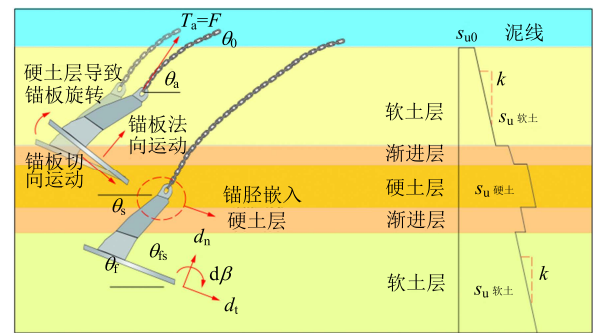
图 1 拖曳锚安装示意图

Fig.1 Sketch for the installation of drag anchor

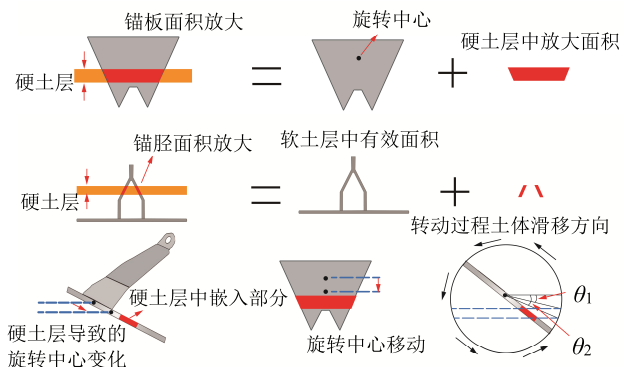
2 拖曳锚在成层土中的预测模型

拖曳锚穿透硬土层的过程以及参数定义如图 2(a)

所示。在锚链的拖曳下, 锚板逐渐嵌入海床并且发生旋转, 饱和黏土不排水抗剪强度随着深度线性增加。嵌入过程中硬土层强度放大效应如图 2(b)所示, 图中第 1 行是锚板在硬土层中的放大效应, 第 2 行是锚脰在硬土层中的放大效应, 第 3 行展示了硬土层作用下旋转中心的移动。在嵌入硬土层的过程中旋转中心的位置会随着嵌入面积的变化而移动, 在计算过程中考虑硬土层放大效应后的有效面积等于锚在软土层中的有效面积与嵌入在硬土层中的部分面积放大后的总和。海床的 T-bar 试验结果表明, 海床中硬土层并非直接出现的, 而是先经过强度迅速上升的渐进层后才会出现强度明显较高的硬土层, 其中渐进层位置如图 2(a)所示。



(a) 拖曳锚在硬土层中嵌入示意图



(b) 硬土层强度放大效应

图 2 硬土层中嵌入原理图

Fig.2 Schematics of the drag anchor embedded in a stiff layer

Aubeny 等^[8]、Rasulo^[25]基于极限塑性上限分析法提出了拖曳锚在软黏土海床中嵌入轨迹、姿态和承载能力的预测方法, 其中多向耦合荷载相互作用条件下屈服面表达式如下所示:

$$f = \left(\frac{|c_1|N_e}{N_{n \max f}} \right)^q + \left[\left(\frac{|c_3|N_e}{N_{m \max f}} \right)^m + \left(\frac{|c_2|N_e}{N_{t \max f}} \right)^n \right]^{\frac{1}{p}} - 1 = 0 \quad (1)$$

$$N_e = \frac{F}{s_u A_f} \quad (2)$$

$$c_1 = \sin \theta_{af} \quad (3)$$

$$c_2 = \cos \theta_{af} \quad (4)$$

$$c_3 = (\cos \theta_{af} \sin \theta_{ca} - \sin \theta_{af} \cos \theta_{ca}) \frac{L_{ca}}{L_f} \quad (5)$$

$$\tan \theta_{ca} = \frac{L_s \sin \theta_{fs}}{L_j + L_s \cos \theta_{fs} - 0.5L_f} \quad (6)$$

$$N_{n \max f} = 3\pi + 2 + \frac{t_f}{L_f} \left(\alpha + \frac{1+\alpha}{\sqrt{2}} \right) \quad (7)$$

$$N_{t \max f} = 2\alpha + 15 \frac{t_f}{L_f} \quad (8)$$

$$N_{m \max f} = \frac{\pi}{2} \left[1 + \left(\frac{t_f}{L_f} \right)^2 \right] \quad (9)$$

$$\theta_{af} = \theta_f + \theta_a \quad (10)$$

$$\theta_{as} = \theta_a - \theta_s \quad (11)$$

式中： m 、 n 、 p 、 q 均为锚板屈服面的包络系数； α 为黏土黏聚力因子，一般为土体灵敏度系数 S_t 的倒数 $1/S_t$ ； $N_{n \max f}$ 为锚板的法向极限承载因子； $N_{t \max f}$ 为锚板的切向极限承载因子； $N_{m \max f}$ 为锚板的转动极限承载因子； N_c 为锚板有效承载因子； s_u 为土体不排水抗剪强度； A_f 为锚板的有效面积； θ_{ca} 为锚眼处拉力与锚板的夹角； θ_{fs} 为锚板与锚脰的夹角； θ_{as} 为锚眼处拉力与锚脰的夹角； θ_s 为锚脰与水平方向的夹角； F 为只考虑锚板作用时的承载力；锚眼位置处的拉力 T_a 等效为锚的承载力 F ； L_j 为锚板后端长度； θ_f 为锚板与水平方向的夹角； θ_a 为锚眼处拉力与水平方向夹角； θ_{af} 为锚眼处拉力与锚板方向夹角； L_f 为锚板长度； t_f 为锚板厚度； L_{ca} 为锚板旋转中心到锚眼的距离； L_s 为锚脰的长度。

采用关联流动法计算锚板的位移^[26]，相应嵌入过程中法向与切向位移比 R_{ntf} 控制锚板运动方向，旋转和切向位移比 R_{rtf} 控制锚板在土中的旋转方向，表达式分别为

$$R_{ntf} = \frac{\left(\frac{N_{t \max f}}{N_{n \max f}} \right) \left(\frac{pq}{n} \right) \left(\frac{|N_{nf}|}{N_{n \max f}} \right)^{q-1}}{\left[\left(\frac{|N_{mf}|}{N_{m \max f}} \right)^m + \left(\frac{|N_{tf}|}{N_{t \max f}} \right)^n \right]^{\frac{1}{p}-1} \left(\frac{|N_{tf}|}{N_{t \max f}} \right)^{n-1}} \quad (12)$$

$$R_{rtf} = \text{sign}(c_3) \frac{m}{n} \frac{N_{t \max f}}{N_{m \max f}} \frac{\left(\frac{|N_{mf}|}{N_{m \max f}} \right)^{m-1}}{\left(\frac{|N_{tf}|}{N_{t \max f}} \right)^{n-1}} \quad (13)$$

式中： N_{nf} 、 N_{tf} 、 N_{mf} 分别为锚板法向、切向、转动有效承载因子； sign 为符号函数。当 $x > 0$ 时，

$\text{sign}(x) = 1$ ；当 $x = 0$ 时， $\text{sign}(x) = 0$ ；当 $x < 0$ ， $\text{sign}(x) = -1$ 。

本模型在嵌入过程中考虑锚脰的作用，对应锚脰在土中的屈服函数 f_s ^[27]为

$$f_s = \left(\frac{N_{ns}}{N_{n \max s}} \right)^r + \left(\frac{N_{ts}}{N_{t \max s}} \right)^s - 1 = 0 \quad (14)$$

$$N_{n \max s} = 2\alpha + 15 \frac{t_s}{w_s} \quad (15)$$

$$N_{t \max s} = 2\alpha + 7.5 \frac{t_s}{L_s} \quad (16)$$

式中： $N_{n \max s}$ 为锚脰法向极限承载因子； $N_{t \max s}$ 为锚脰切向极限承载因子； w_s 为锚脰的宽度； t_s 为锚脰的厚度； N_{ns} 和 N_{ts} 分别为锚脰法向和切向有效承载因子； r 、 s 均为锚脰屈服面包络系数。

将土体作用在锚脰上的力 F_s 分解为法向分力 F_{ns} 和切向分力 F_{ts} ，分别表示为

$$F_{ts} = N_{ts} A_s s_u \quad (17)$$

$$F_{ns} = N_{ns} A_s s_u \quad (18)$$

式中： A_s 为锚脰的正向投影面积，计算过程中使用面积相等的长方形代替不规则的锚脰正面。

由于锚脰和锚板间的夹角为定值，两者组成刚性体运动是同步的，因此锚脰的运动姿态可以通过锚板的运动姿态推出，结合式 (12) 和式 (13) 得到锚脰的法向与切向位移比 R_{nts} ：

$$R_{nts} = \frac{v_{ns}}{v_{ts}} = \frac{R_{ntf} \cos \theta_{fs} - \sin \theta_{fs}}{\cos \theta_{fs} + R_{ntf} \sin \theta_{fs}} \quad (19)$$

式中： v_{ns} 为锚脰法向运动速度； v_{ts} 为锚脰切向运动速度。

当锚进入到硬土层时锚板尖端的法向承载力和切向阻力增大，会导致转动中心偏移。在穿透硬土层过程中锚的转动中心偏移值和承载力增加值通过换算放大后等效的锚板面积得到，如图 2(b) 所示。假定塑性屈服面形状在嵌入过程中保持基本不变，对极限承载因子放大，得到锚板的极限承载因子如下：

$$N_{n \text{ mult}} = \frac{A_{fe}}{A_f} = \frac{A_f + A_{fa} (s_{uratio} - 1)}{A_f} \quad (20)$$

$$N_{t \text{ mult}} = 1 + \frac{w_{stiff} s_{uratio} - 1}{w_{max} 2} \quad (21)$$

$$N_{m \text{ mult}} = 1 + (s_{uratio} - 1) \frac{\theta_2 - \theta_1}{\pi} \quad (22)$$

式中： $N_{n \text{ mult}}$ 为法向承载力放大因子； $N_{t \text{ mult}}$ 为切向承载力放大因子； $N_{m \text{ mult}}$ 为转动扭矩放大因子； s_{uratio} 为硬土层的强度比，等于硬土层与软土层的不

排水抗剪强度之比 ($s_{u\text{硬土}}/s_{u\text{软土}}$)； θ_1 为锚板嵌入过程中土体旋转滑移面与硬土层上表面的交点同锚板中心连线与水平方向的夹角； θ_2 为锚板嵌入过程中土体旋转滑移面与硬土层下表面的交点同锚板中心连线与水平方向的夹角，如图 2(b) 中第 3 行所示； w_{stiff} 为锚板在硬土层中的宽度； w_{max} 为锚板的最大宽度； A_{fa} 为锚板在硬土层中的嵌入面积； A_{fe} 为锚板放大之后的面积。

以硬土层上边界作为上部渐进层的下边界，硬土层下边界作为下部渐进层的上边界，分别设定渐进层的厚度和强度，然后将其应用于土层剖面的强度数据中。将放大后极限承载力因子式 (20) ~ (22) 分别代入式 (7) ~ (9) 中，得到放大后的法向、切向、转动极限强度因子 $N_{\text{ne max f}}$ 、 $N_{\text{te max f}}$ 、 $N_{\text{me max f}}$ 分别为

$$N_{\text{ne max f}} = 3\pi + 2 + \frac{t_f}{L_f} \left(\alpha + \frac{1+\alpha}{\sqrt{2}} \right) N_{\text{n mult}} \quad (23)$$

$$N_{\text{te max f}} = 2\alpha + 15 \frac{t_f}{L_f} N_{\text{t mult}} \quad (24)$$

$$N_{\text{me max f}} = \frac{\pi}{2} + \left[1 + \left(\frac{t_f}{L_f} \right)^2 \right] N_{\text{m mult}} \quad (25)$$

联立式 (2) ~ (5) 和式 (17) ~ (19) 得到锚眼位置处的水平方向作用力 T_{ax} 、竖直方向作用力 T_{az} 和扭矩 M_{j0} 。

假定初始时泥线位置处锚链相对于水平面的夹角忽略不计，则由下式算出初始状态下锚眼位置的锚链倾角 θ_a [27]：

$$\frac{T_a \theta_a^2}{2} = z_a E_n N_c b \left(s_{u0} + \frac{kz_a}{2} \right) \quad (26)$$

式中： z_a 为锚眼位置深度； s_{u0} 为泥线位置处的土体强度； k 为土体的强度梯度参数； E_n 为锚链作用宽度系数，锚链采用 $E_n = 2.5$ ，锚缆采用 $E_n = 1$ ； N_c 为锚链承载力系数，通常取 $N_c = 10$ ； b 为锚链直径。

每一个循环步中锚板沿着其切线方向前进一个增量 ds ，并换算为整体坐标系中的位移增量 dz 和 dx ，建立角度增量 $d\theta_a$ 与竖直增量 dz 的关系如下：

$$d\theta_a = \frac{dz}{\theta_a} \left(\frac{E_n N_c b}{N_{e0} A_f} - \frac{k\theta_a^2}{2s_{ua}} \right) \quad (27)$$

随后将 θ_a 、 z_a 等锚运动参数更新，计算程序流程图如图 3 所示。

模型程序对应的具体计算步骤如下：

(1) 输入土体剖面不排水抗剪强度数据以及锚的形态参数，计算得到锚的初始运动状态。

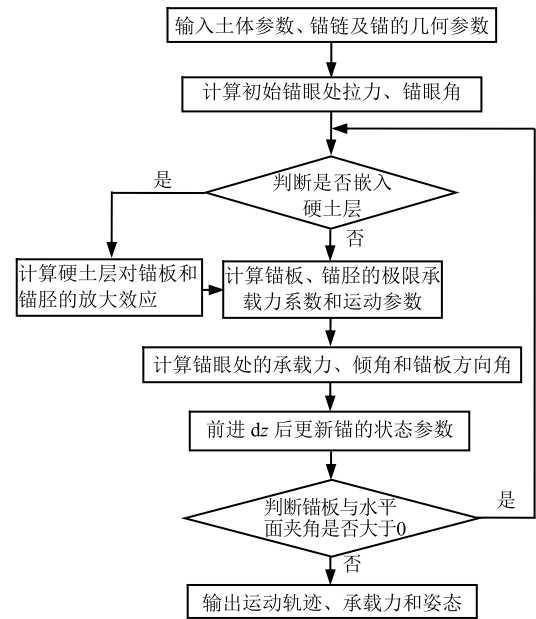


图 3 拖曳锚在成层土中计算程序流程图
Fig.3 Flow chart of a DEA in layered soils

(2) 判断锚是否嵌入硬土层中，如果嵌入则计算考虑硬土层放大效应的锚板面积 A_{fe} 和锚眼面积 A_{se} 。

(3) 通过锚板屈服函数计算锚板的有效承载因子 N_e 以及 R_{ntf} 和 R_{rtf} 。利用锚板的运动参数推导出锚眼的运动参数 R_{nts} ，并根据锚眼的屈服函数计算出其有效承载因子 N_{ns} 和 N_{ts} 。

(4) 通过 θ_a 和式 (26)、(27) 计算出锚眼位置处的拉力 T_a ，并确定锚板与水平方向的夹角 $\theta_f = \theta_{\text{fs}} - \theta_a$ 。

(5) 通过锚板位移增量 dz ，计算锚板的水平方向增量 dx ，锚板的角度增量 $d\theta_a$ ，并更新嵌入深度 z 、拖曳距离 x 及新的锚板夹角 $\theta_{f(i)}$ ， $\theta_{f(i)} = \theta_{f(i-1)} - d\theta_a$ ，下标 i 为迭代次数。

(6) 通过锚眼位置处的拉力计算得到泥线位置处拉力 $T_0 = T_a e^{\mu(\theta_a - \theta_0)}$ ，更新锚眼位置处与水平方向的夹角 $\theta_{a(i)} = \theta_{a(i-1)} - d\theta_a$ 。

(7) 判断锚板与水平方向的夹角是否大于 0，这里设定当 $\theta_f < 5^\circ$ 时不再继续嵌入，否则返回第 2 步继续计算。

(8) 输出计算得到的拖曳轨迹、泥线位置处承载力 T_0 和锚板倾角 θ_f 。

3 理论预测与模型试验对比分析

Lai 等 [28] 在成层土中进行了拖曳锚的常重力拖曳嵌入试验，模型锚几何参数为：锚板宽度为 13.4 cm，长度为 9.2 cm，厚度为 0.3 cm，面积 A_f 为 66.9 cm²；锚眼角为 50°，锚眼高度为 6.0 cm，厚度为 0.3 cm。

试验中使用的锚链直径为 0.5 cm，锚缆直径为 0.13 cm。这些尺寸是根据 A_t/b^2 的值确定的，确保与实际工程相同。本文使用的工况 6、7、8 对应的试验条件如表 1 所示。在试验中锚脰与泥面平行放置于加载模型箱内，以 20 mm/s 的速度进行拖曳，在嵌入过程中测量锚的运动轨迹、姿态和承载力。Aubeny 等^[8]的极限塑性上限分析法预测模型中，拖曳锚被简化为一块长方形厚板，通过纯法向、纯切向和纯转动抗力模型试验测得极限承载因子 $N_{n\max}$ 、 $N_{t\max}$ 、 $N_{m\max}$ ，并校准得到了模型屈服面包络系数 m 、 n 、 p 、 q 。表 2 为锚脰屈服面包络系数 r 、 s 以及考虑和未考虑锚脰作用的锚板屈服面包络系数 m 、 n 、 p 、 q 值。

表 1 模型试验结果
Table 1 Model test results

工况号	s_{u0} / kPa	k / (kPa · m ⁻¹)	硬土层 厚度 / cm	硬土层 深度 / cm	$\frac{s_{u\text{硬土}}}{s_{u\text{软土}}}$	连接 方式
6	0.67	0.99	2.53	10.13	2.2	锚缆
7	0.76	0.00	10.13	7.60	1.4	锚链
8	0.62	0.99	12.67	10.13	5.5	锚链

表 2 试验和模型中屈服面拟合系数
Table 2 Interaction coefficients of the yield surface from the model tests and prediction models

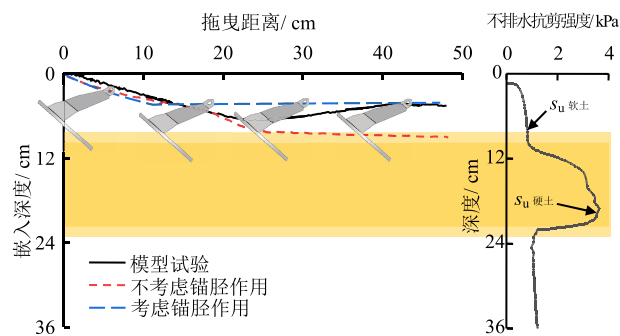
类别	m	n	p	q	r	s
模型试验 ^[28]	1.56	4.19	1.57	4.43	—	—
不考虑锚脰作用 ^[8]	1.56	1.93	1.57	2.20	—	—
考虑锚脰作用	1.56	4.19	1.57	4.43	2.20	3.00

3.1 验证算例

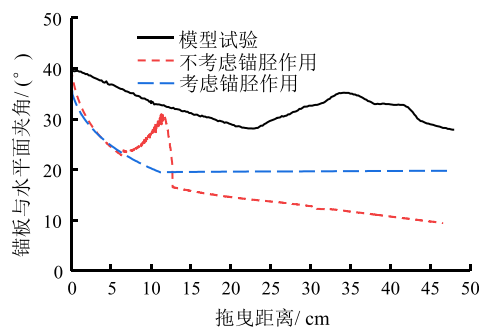
将试验工况 8^[28]的数据代入模型中计算得到了拖曳锚的嵌入轨迹以及嵌入姿态，与未考虑锚脰作用的嵌入轨迹和姿态预测结果对比如图 4 所示。

图 4(a)左侧为拖曳锚嵌入过程中锚眼位置变化，右侧为 T-bar 贯入测试得到的土体剖面不排水抗剪强度。图中 4 个模型锚的位置反映了所在位置处锚的姿态，开始阶段锚板在软土层中嵌入，锚板角度迅速减小，随后嵌入深度逐渐增加，土体强度上升，拖曳锚无法继续嵌入硬土层，锚板与水平面夹角基本维持稳定，本文模型最终嵌入深度为 4.13 cm，十分接近试验中嵌入深度（4.75 cm），而未考虑锚脰作用模型最终嵌入深度为 9.09 cm，本文预测结果和试验中拖曳锚都无法穿透硬土层。对于硬土层强度比较高的情况，嵌入阻力较大，拖曳锚无法有效穿透。而不考虑锚脰作用的预测模型在计算阻力过程中忽略了锚脰的影响，只考虑了锚板在嵌入过程中的屈服面，因而无法有效地预测在硬土层强度高的成层土中嵌入过程。

图 4(b)中试验模型锚板与水平面最终夹角为 27.9°，不考虑锚脰作用的模型锚板与水平面最终夹角为 9.5°，考虑锚脰作用的模型锚板与水平面最终夹角为 19.8°，本文模型预测的倾角更接近试验测量结果。



(a) 拖曳嵌入轨迹和土层剖面强度



(b) 锚板与水平方向夹角

图 4 工况 8 中锚脰作用对拖曳锚嵌入性能的影响

Fig.4 Shank effect on embedding performance of DEA in case 8

3.2 验证算例工况 6 和工况 7

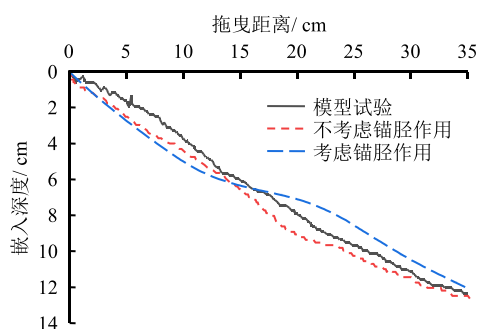
对于硬土层强度比 $s_{u\text{ratio}}$ 相对较小的工况 6 和工况 7，模型锚的预测轨迹如图 5 所示。从图中可以看出拖曳锚能够穿透该强度的硬土层，对于两种不同强度的土体工况，不考虑锚脰作用的模型和本文模型基本能够反映实际嵌入轨迹。

从图 6 中可以看出，未考虑锚脰作用模型锚板角度在接触到硬土层附近会出现突变，而考虑锚脰的模型在嵌入过程中锚板与水平面夹角变化平稳，与实际试验情况更为接近。考虑锚脰作用的预测模型在计算受力分布时考虑了土体作用在锚脰上的切向力和法向力，因此在预测嵌入姿态时更符合实际情况。

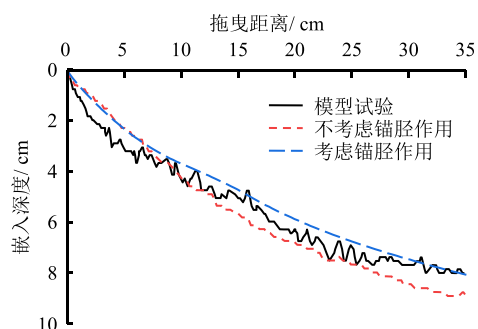
3.3 锚脰作用对承载力影响

为了分析锚脰作用对锚承载力和嵌入能力的影响，设置强度为 0.77 kPa 的均匀土体，连接方式选用锚链，拖曳距离为 45 cm，得到嵌入过程中的轨

迹和泥线处拉力曲线如图 7(a)和图 7(b)所示。

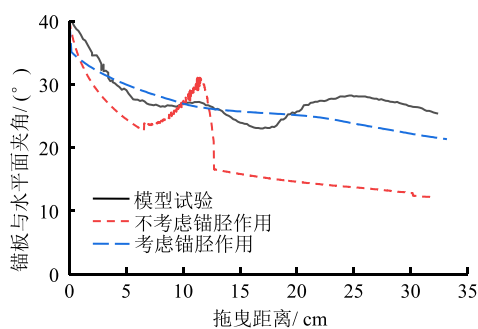


(a) 工况 6

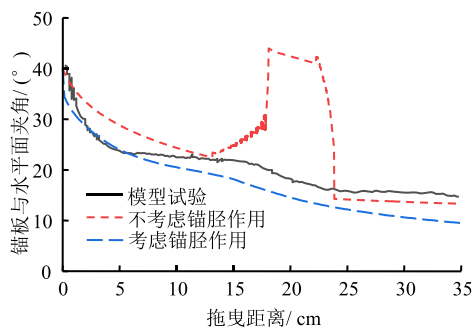


(b) 工况 7

图 5 工况 6 和 7 中锚胫作用对拖曳锚嵌入轨迹的影响
Fig.5 Shank effect on the DEA embedding trajectory in cases 6 and 7

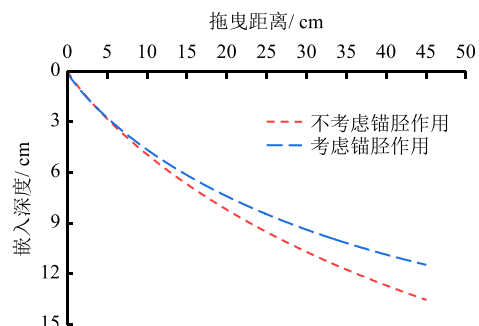


(a) 工况 6

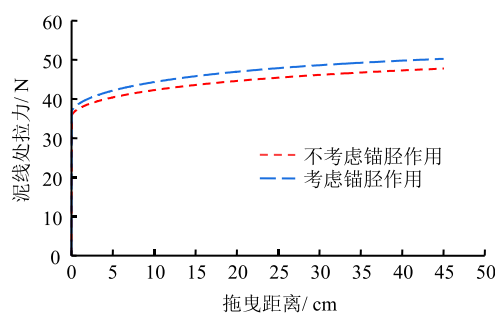


(b) 工况 7

图 6 工况 6 和 7 中锚胫作用对拖曳锚嵌入姿态的影响
Fig.6 Shank effect on the DEA pitch angle in cases 6 and 7



(a) 拖曳嵌入轨迹



(b) 泥线处拉力

图 7 匀质软黏土中锚胫作用对拖曳锚嵌入性能的影响
Fig.7 Shank effect on the embedding performance of DEA in homogeneous soft clay

在嵌入过程中受到锚胫的阻力影响,考虑锚胫作用后拖曳锚最终嵌入深度减小了 15.3%。图 7(b)中嵌入完成后考虑锚胫的模型承载力比不考虑锚胫模型大 5.2%,嵌入过程中考虑锚胫作用会增加锚的整体承载力,这也与 Wei 等^[29]的利用三维有限元和塑性方法计算锚胫对锚整体承载力影响的分析结果一致。

4 参数分析与讨论

拖曳锚在成层土中运动时受到的嵌入阻力与土体特性有关。图 8~10 分析了不同硬土层强度比、厚度和深度条件下的拖曳轨迹、锚板与水平面夹角、承载力、锚板法向与切向位移比 R_{ntf} 、锚板旋转与切向位移比 R_{rtf} 和锚板有效承载因子 N_e 的变化情况,具体工况如表 3~5 所示,所有工况的拖曳连接方式全部选用锚链。

从图 8(a)中可以看出,硬土层的强度比直接影响了拖曳锚穿透硬土层的能力。随着强度比从 1.5 增加到 5.0,拖曳锚的嵌入深度逐渐减小直至无法穿透,当强度比大于 3.0 时拖曳锚无法穿透硬土层。与强度比为 1.5 工况相比,强度比为 2.0、2.5 和 2.6 时最大嵌入深度分别减小了 8.4%、10.2%和 16.8%。图 8(a)和图 8(b)中强度比从 1.5 增加到 2.0,最终嵌

入深度和嵌入过程中锚板与水平面夹角变化速度不大。图 8(d)和图 8(e)中当强度比从 2.5 增加到 2.6 时穿透硬土层过程中的拖曳距离明显增加, 穿透过程中锚板与水平面夹角变化速度下降, R_{ntf} 和 R_{rtf} 值增

大。强度比从 2.6 增加到 3.0 后拖曳锚无法穿透硬土层, 此时 R_{ntf} 和 R_{rtf} 的值增大后就维持不变, 强度比为 5.0 时也无法穿透硬土层并且嵌入深度较强度比为 3.0 时更小, 体现了强度比越大硬土层越难嵌入。

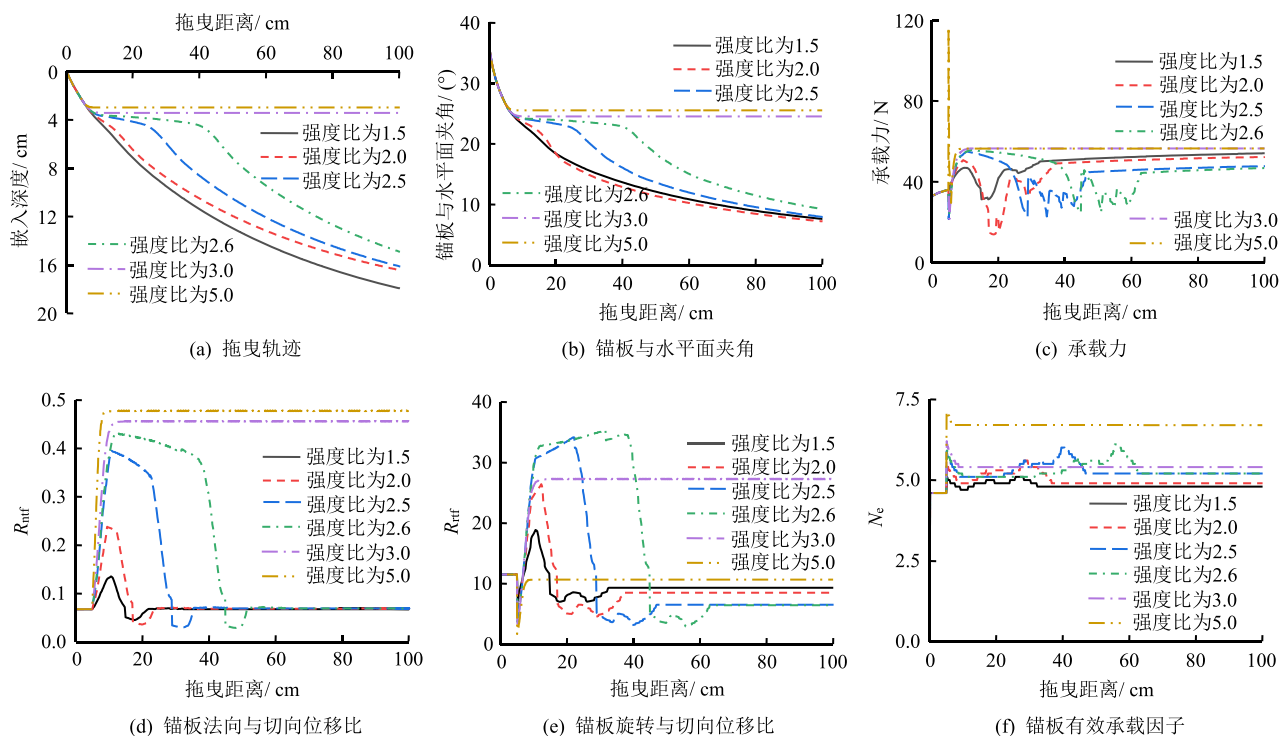


图 8 不同强度比硬土层的工况

Fig.8 Cases of stiff layers with different strength ratios

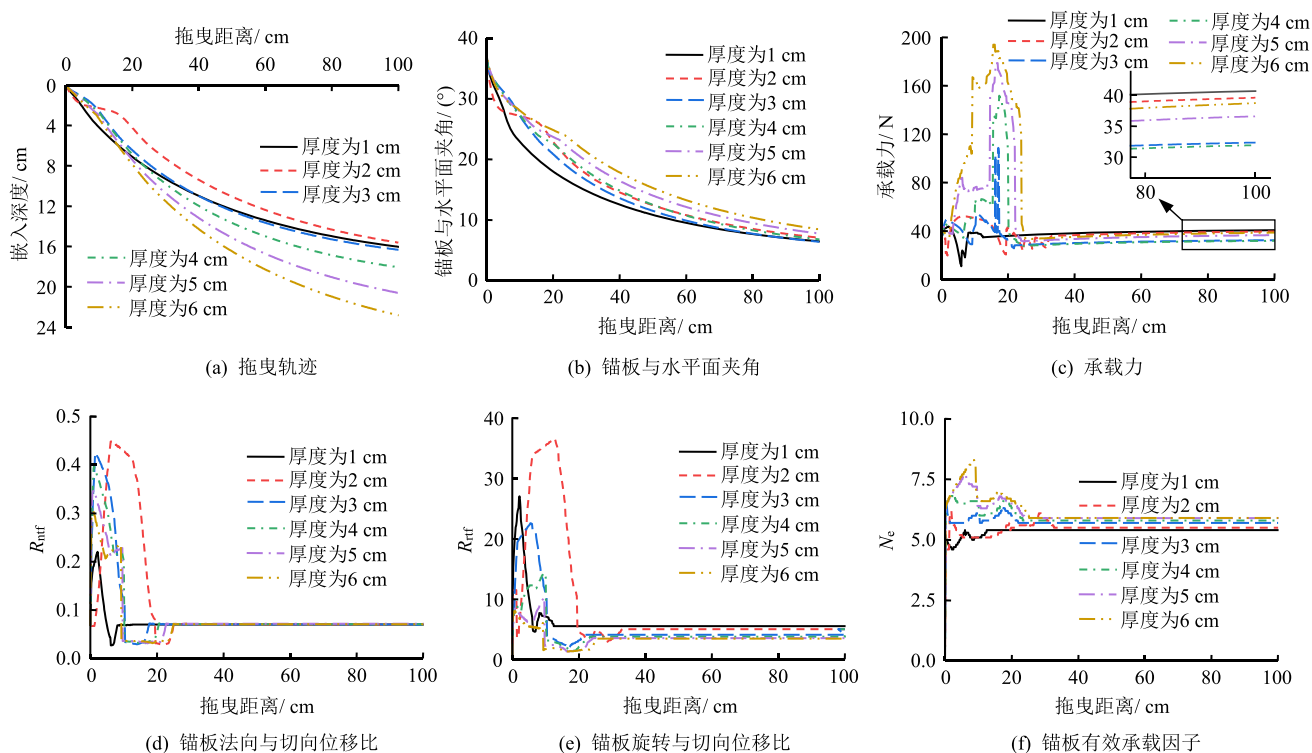


图 9 不同厚度硬土层的工况

Fig.9 Cases of stiff layers with different thicknesses

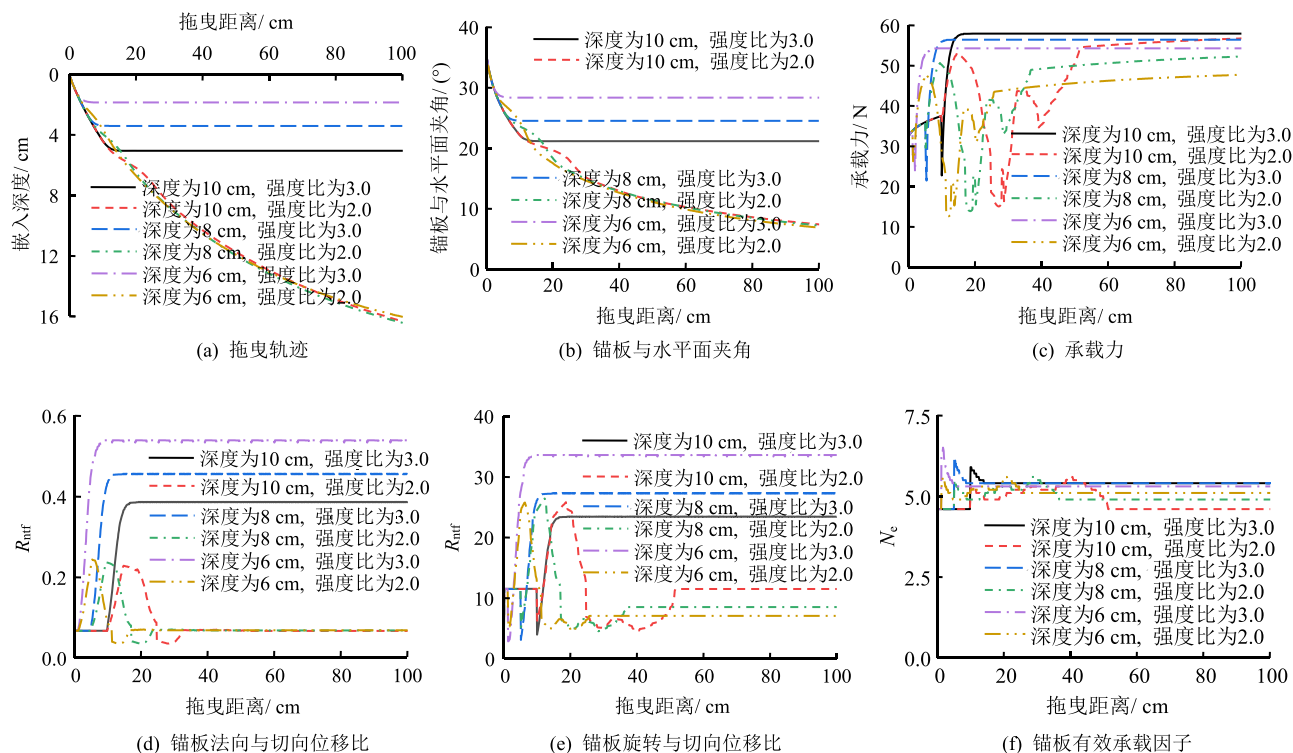


图 10 不同深度硬土层的工况

Fig.10 Cases of stiff layers with different depths

表 3 不同强度比的硬土层工况

Table 3 Stiff layer cases with different strength ratios

工况号	s_{u0} / kPa	k / (kPa · m ⁻¹)	硬土层厚度 / cm	硬土层深度 / cm	$\frac{s_{u硬土}}{s_{u软土}}$
1	0.67	0.99	2	8	1.5
2	0.67	0.99	2	8	2.0
3	0.67	0.99	2	8	2.5
4	0.67	0.99	2	8	2.6
5	0.67	0.99	2	8	3.0
6	0.67	0.99	2	8	5.0

表 4 不同厚度的硬土层工况

Table 4 Stiff layer cases with different thicknesses

工况号	s_{u0} / kPa	k / (kPa · m ⁻¹)	硬土层厚度 / cm	硬土层深度 / cm	$\frac{s_{u硬土}}{s_{u软土}}$
1	0.67	0.99	1	4	2.6
2	0.67	0.99	2	4	2.6
3	0.67	0.99	3	4	2.6
4	0.67	0.99	4	4	2.6
5	0.67	0.99	5	4	2.6
6	0.67	0.99	6	4	2.6

表 5 不同深度的硬土层工况

Table 5 Stiff layer cases with different depths

工况号	s_{u0} / kPa	k / (kPa · m ⁻¹)	硬土层厚度 / cm	硬土层深度 / cm	$\frac{s_{u硬土}}{s_{u软土}}$
1	0.67	0.99	2	10	3
2	0.67	0.99	2	8	3
3	0.67	0.99	2	6	3
4	0.67	0.99	2	10	2
5	0.67	0.99	2	8	2
6	0.67	0.99	2	6	2

图 9(a)中硬土层强度比为 2.6, 深度为 4 cm, 厚度从 1 cm 增加到 6 cm 的所有工况拖曳锚都穿透了硬土层。从图 9(c)~图 9(e)中可以看出由于硬土层的放大作用, 穿透过程中峰值承载力逐渐增加, R_{ntf} 和 R_{rtf} 的值在穿透过程中出现明显增加, 完全穿透硬土层后承载力迅速下降。图 9(a)中可以看出, 与厚度为 2 cm 时的嵌入深度相比, 厚度为 3、4、5、6 cm 的最大嵌入深度分别增加了 4.5%、15.7%、31.9%和 46.2%。厚度为 1 cm 的工况可能由于硬土层埋深较浅且厚度较小, 导致了锚板和锚脰很容易就穿透硬土层造成穿透过程中轨迹和角度变化不明显。图 9(c)和图 9(f)中承载力和 N_e 的同步变化体现了完全穿透后硬土层放大作用明显减小, 因而承载力也减小。

图 10 中对比了 3 组不同深度和 2 组不同硬土层强度比的工况, 强度比为 2.0 的 3 个工况拖曳锚完全穿透了硬土层, 穿透完成后轨迹和角度变化速度基本相同。图 10(a)和图 10(c)中可以看出, 随着硬土层深度从 10 cm 减小到 8 cm 再到 6 cm, 嵌入深度分别变化了 0.5%和 2.3%, 承载力分别减小了 7.9%和 15.9%, 说明在强度比相对较小能够穿透硬土层的条件下, 硬土层的深度对拖曳锚的嵌入能力影响较小。对于强度比为 3.0 的工况, 拖曳锚都无法穿透硬土层。深度为 8 cm 和 6 cm 的情况相比于深度为

10 cm 的工况嵌入深度分别减小了 32.6%和 63.1%,图 10(b)和图 10(c)中锚板与水平面最终夹角增加了 15.8%和 34.0%,最终承载力分别减小了 2.6%和 6.4%。对于不能够穿透硬土层的工况,在拖曳锚安装深度范围内,硬土层深度越大,最终嵌入深度就越大,锚板与水平面最终夹角越小。两种强度比的工况都体现了硬土层深度越大,最终的承载力越大。

5 结 论

本文从拖曳锚初始状态和土层剖面特性出发,建立了考虑锚脰作用的拖曳锚在成层土中运动轨迹、承载力和嵌入姿态的预测模型,并开展了计算分析,得到了以下几点结论:

(1) 本文基于考虑渐进层影响的极限塑性上限分析法预测得到的拖曳锚在成层土中嵌入轨迹、嵌入姿态和承载力与模型试验结果基本一致。考虑了锚板嵌入过程中的旋转作用和锚脰的屈服函数,在强度比为 5.0 的工况中最终预测轨迹与模型试验误差为 13.1%,相较于不考虑锚脰的模型轨迹预测误差和角度预测误差分别降低了 78.3%和 36.9%。

(2) 随着硬土层强度比逐渐增大,拖曳锚穿透硬土层所需的拖曳距离逐渐增加,穿透过程中角度变化速度逐渐减小,最终嵌入深度减小直至无法穿透硬土层。

(3) 在能够穿透硬土层的条件下,硬土层厚度越大,拖曳锚最终嵌入深度越大,穿透过程中承载力越大。

(4) 在能够穿透硬土层的强度比条件下,硬土层深度越大,承载力越大,但此时深度对拖曳锚的嵌入轨迹以及锚板与水平面夹角影响较小。在强度比大于或等于 3.0 无法穿透硬土层的条件下,硬土层深度越大,拖曳锚最终嵌入深度越大,锚板与水平面最终夹角越小,最终承载力越大。

(5) 由于现场试验和离心机试验的缺失,本文只对常重力下拖曳锚嵌入试验进行了验证。下一步将加强更多场景下的实测研究,进一步验证本文模型。

参 考 文 献

- [1] 江苏省发展改革委. 江苏省“十四五”可再生能源发展专项规划[R]. 南京: 江苏省发展改革委, 2022.
Jiangsu Provincial Development and Reform Commission. Jiangsu's 14th five-year plan for the development of renewable energy[R]. Nanjing: Jiangsu Provincial Development and Reform Commission, 2022.
- [2] 浙江省发展与改革委员会, 浙江省能源局. 浙江省可

再生能源发展“十四五”规划[R]. 杭州: 浙江省发展与改革委员会, 浙江省能源局, 2021.

Zhejiang Provincial Development and Reform Commission. Zhejiang's special plan for the development of renewable energy in the 14th five-year plan[R]. Hangzhou: Zhejiang Provincial Development and Reform Commission, Zhejiang Provincial Energy Bureau, 2021.

- [3] 广东省人民政府办公厅. 广东省能源发展“十四五”规划[R]. 广州: 广东省人民政府办公厅, 2022.
Guangdong Provincial People's Government Office. Guangdong's 14th five-Year plan for energy development [R]. Guangzhou: Guangdong Provincial People's Government Office, 2022.
- [4] 吴学震, 姜杰, 李大勇, 等. 深水注浆锚设计原理及其承载特性试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(10): 2707-2716.
WU Xue-zhen, JIANG Jie, LI Da-yong, et al. Design principle and bearing characteristics experimental study of deepwater grouting torpedo anchor[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(10): 2707-2716.
- [5] 张雨坤, 秦廷辉, 李大勇, 等. 分层土中裙式吸力基础吸力沉贯特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(5): 1317-1325.
ZHANG Yu-kun, QIN Ting-hui, LI Da-yong, et al. Model tests on installation behavior of modified suction caissons in layered soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(5): 1317-1325.
- [6] 张春会, 张海霞, 赵全胜, 等. 偏心系数和锚脰角对固定锚脰拖曳锚运动的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 515-522.
ZHANG Chun-hui, ZHANG Hai-xia, ZHAO Quan-sheng, et al. Effects of padeye offset ratio and fluke angle on travel of fixed fluke drag embedded anchor[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(2): 515-522.
- [7] AUBENY C P, MURFF J D, ROESSET J M. Geotechnical issues in deep and ultra deep waters[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2001, 1(2): 225-247.
- [8] AUBENY C P, CHI C. Mechanics of drag embedment anchors in a soft seabed[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2010, 136(1): 57-68.
- [9] 李培冬, 刘海笑, 赵燕兵. 拖曳锚在海床中运动特性的大变形有限元分析[J]. 海洋工程, 2016, 34(2): 56-63.
LI Pei-dong, LIU Hai-xiao, ZHAO Yan-bing. Large deformation finite element analysis on the kinematic behavior of drag anchor in the seabed[J]. **The Ocean**

- Engineering**, 2016, 34(2): 56-63.
- [10] 张炜, 李新仲, 李清平. 拖曳锚实验及形态优化研究[J]. 船舶工程, 2013, 35(6): 43-46.
ZHANG Wei, LI Xin-zhong, LI Qing-ping. Research on experiment and shape-optimization of drag anchors[J]. **Ship Engineering**, 2013, 35(6): 43-46.
- [11] 王胜洋, 李孙伟, 李炜. 基于拖曳锚轨迹方程的拖曳锚系泊优化[J]. 船舶工程, 2020, 42(9): 149-156.
WANG Sheng-yang, LI Sun-wei, LI Wei. Optimization of drag anchor mooring based on drag anchor trajectory equation[J]. **Ship Engineering**, 2020, 42(9): 149-156.
- [12] 张炜, 刘海笑. 拖曳锚嵌入机理及运动特性实验研究[J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2010, 40(3): 581-586.
ZHANG Wei, LIU Hai-xiao. Experimental research for embedment mechanism and kinematic characteristic of drag anchors[J]. **Journal of Southeast University (Natural Science Edition)**, 2010, 40(3): 581-586.
- [13] 毋晓妮, 胡存, 李晔. 考虑浅埋破坏的拖曳锚在黏土中安装运动特性分析[J]. 应用数学和力学, 2018, 39(10): 1137-1148.
WU Xiao-ni, HU Cun, LI Ye. Kinematic analysis on drag anchor installation in clay considering shallow failure effects[J]. **Applied Mathematics and Mechanics**, 2018, 39(10): 1137-1148.
- [14] 张春会, 王兰, 田英辉, 等. 饱和黏土中固定锚腿拖曳锚嵌入轨迹预测模型[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 1941-1947.
ZHANG Chun-hui, WANG Lan, TIAN Ying-hui, et al. Predicting model of trajectory of fixed fluke dragging embedment plate anchor in saturated clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(6): 1941-1947.
- [15] WU X, CHOW Y K, LEUNG C F. Behavior of drag anchor under uni-directional loading and combined loading[J]. **Ocean Engineering**, 2017, 129: 149-159.
- [16] WU X, CHOW Y K, LEUNG C F. Behavior of drag anchor in clay with linearly increasing shear strength under unidirectional and combined loading[J]. **Applied Ocean Research**, 2017, 63: 142-156.
- [17] O'NEILL M P, BRANSBY M F, RANDOLPH M F. Drag anchor fluke-soil interaction in clays[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2003, 40(1): 78-94.
- [18] DEGENKAMP G, DUTTA A. Soil resistances to embedded anchor chain in soft clay[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1989, 115(10): 1420-1438.
- [19] O'LOUGHLIN C D, LOWMASS A, GAUDIN C, et al. Physical modelling to assess keying characteristics of plate anchors[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics. Hong Kong: CRC Press, 2006: 659-665.
- [20] RAO S N, PRASAD Y V S N. Experimental studies on plate anchors in layered marine soils[C]//The Third International Offshore and Polar Engineering Conference. Singapore: International Society of Offshore and Polar Engineers(ISOPE), 1993.
- [21] LIU H, PENG J, LIANG K, et al. The behavior of anchor lines embedded in layered soils[J]. **Ocean Engineering**, 2019, 190: 106424.
- [22] 彭劲淞. 深水锚复杂力学特性与运动行为的统一分析模型及应用[D]. 天津: 天津大学, 2020.
PENG Jin-song. The unified analytical model and applications of complicated mechanical properties and kinematic behaviors of deep-water anchors[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [23] O'NEILL M P, RANDOLPH M F, HOUSE A R. The behaviour of drag anchors in layered soils[J]. **International Journal of Offshore and Polar Engineering**, 1999, 9(1): 73-78.
- [24] YANG Y, LIU H. Theoretical and numerical approaches to analyze gravity installed anchors in multi-layered clays[J]. **Ocean Engineering**, 2022, 264: 112452.
- [25] RASULO M. Simplified plastic limit analysis of drag embedment anchors in layered cohesive soils[D]. Texas: Texas A&M University, 2017.
- [26] 王忠涛, 王春乐, 杨庆, 等. 柔性锚腿法向承力锚安装轨迹和承载性能分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(9): 1698-1705.
WANG Zhong-tao, WANG Chun-le, YANG Qing, et al. Model analysis and performance of vertically loaded anchors with a bridle shank[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(9): 1698-1705.
- [27] AUBENY C P. Geomechanics of marine anchors[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [28] LAI Y, ZHU B, HUANG Y, CHEN C. Behaviors of drag embedment anchor in layered clay profiles[J]. **Applied Ocean Research**, 2020, 101: 102287.
- [29] WEI Q, CASSIDY M J, TIAN Y, et al. Incorporating shank resistance into prediction of the keying behavior of suction embedded plate anchors[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2015, 141(1): 04014080.