



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2406658

引用格式:周全智,范晓旭,黄琳,等. 漂浮式风机吸力锚尺寸对水平承载特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(21): 8905-8913.

Zhou Quanzhi, Fan Xiaoxu, Huang Lin, et al. Influence of floating offshore wind power suction anchor size on horizontal bearing characteristics[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(21): 8905-8913.

能源与动力工程

漂浮式风机吸力锚尺寸对水平承载特性的影响

周全智¹, 范晓旭², 黄琳³, 李红有¹, 张浦阳⁴, 刘伟¹

(1. 龙源(北京)新能源工程设计研究院有限公司, 北京 100034; 2. 龙源电力集团股份有限公司, 北京 100034;
3. 福建龙源海上风力发电有限公司, 莆田 351174; 4. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350)

摘要 为了研究漂浮式海上风电吸力锚尺寸对于水平承载能力的影响,以 ABAQUS 有限元软件为平台,采用弹塑性本构模型建立吸力锚基础的三维有限元模型,开展吸力锚不同尺寸影响分析。结果表明:直径和高度的增加均会提高吸力锚的水平承载能力,且高度的增加对水平承载能力的提升更为明显。随着直径和高度的改变,系缆点的位置也需要进行相应的调整,当吸力锚直径与高度之比 $D/H > 1$ 时,需要相应地提高系缆点的位置以使其发生平动位移。直径的改变会影响锚壁的压力变化,而高度几乎不会影响锚壁压力的变化。研究成果应用到全球首座漂浮式风渔融合平台“国能共享号”示范工程中并可为相关工程设计提供参考。

关键词 海上风电; 漂浮式平台; 吸力锚; 水平承载力

中图分类号 TK513.5; **文献标志码** A

Influence of Floating Offshore Wind Power Suction Anchor Size on Horizontal Bearing Characteristics

ZHOU Quan-zhi¹, FAN Xiao-xu², HUANG Lin³, LI Hong-you¹, ZHANG Pu-yang⁴, LIU Wei¹

(1. Longyuan (Beijing) New Energy Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100034, China;
2. China Longyuan Power Group Corporation Limited, Beijing 100034, China;
3. Fujian Longyuan Offshore Wind Power Corporation Limited, Putian 351174, China;
4. School of Civil Engineering and Architecture, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

[Abstract] In order to study the influence of floating offshore wind power suction anchor size on the horizontal bearing capacity, based on the ABAQUS finite element software, a three-dimensional finite element model of suction anchor foundation was established by using elastic-plastic constitutive model. The results show that the increase of diameter and height can improve the horizontal bearing capacity of suction anchor, and the increase of height is more obvious. With the change of diameter and height, the position of the mooring point also needs to be adjusted accordingly. When the ratio of suction anchor diameter to height $D/H > 1$, the position of the mooring point needs to be increased correspondingly to make it move in translation. The change of diameter will affect the pressure change of the anchor wall, while the height has little effect on the pressure change of anchor wall. The research results are used in global first offshore floating wind power + aquaculture platform “Guoneng Gongxiang Hao” and can provide a reference for relevant project design.

[Keywords] offshore wind power; floating platform; suction anchor foundation; horizontal bearing capacity

风能是一种循环可利用的能源,并且海上的风速比陆地上的大且稳定,减少了土地资源的利用,因此探讨海上风机的发展变化是现在研究的重点。吸力锚基础作为一种海上风电的系泊锚固基础,在深海漂浮式风电领域得到了广泛的应用。全球首座漂浮式风电与渔业养殖融合半潜平台“国能共享号”位于南日岛以东 7 km 海域,地处台湾海峡西岸

中北部,风电场水深 35 m,由漂浮式风机和养殖网箱组成,包括漂浮式平台、风力发电机、养殖系统和系泊锚固系统等,漂浮式平台为三立柱半潜式结构,形状为等边三角形,每个立柱配备三套系泊及锚固系统,总计采用 9 个吸力锚进行系泊锚链的海床锚固。

锚固基础的设计和计算方法直接影响设计效

收稿日期: 2024-09-04 修订日期: 2025-04-15

基金项目: 国家能源集团科研项目(GJNY-20-17);福建省科技重大专项计划(2022HZ028001)

第一作者: 周全智(1981—),男,汉族,河北泊头人,硕士,高级工程师。研究方向:海上风电结构设计分析。E-mail:20066358@ceic.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

率和工程经济性,目前已有学者针对锚固基础的设计方法进行研究,康思伟等^[1]针对拖曳锚的设计过程,通过采用经验图表法、理论计算方法以及有限元方法对黏土地拖曳锚的贯入深度以及承载力进行了计算。与其他海上基础形式相比,吸力锚可以易地复用,施工就位准确,降低了与其他平台或其他作业活动发生干扰冲突的可能性,对不同的土质也具有广泛的适用性。因此,许多学者对其进行了研究,王胤等^[2]基于计算流体动力学与离散单元法理论(computational fluid dynamics-discrete element method, CFD-DEM)流固耦合方法对吸力锚在砂土中的吸力贯入过程进行数值模拟分析。并且通过与室内物理模型试验、沉贯阻力理论解析计算结果进行对比分析,验证了该方法的有效性和准确性。数值模拟发现砂层呈现出中间向上凸起的弧状分布,说明贯入产生挤土效应,其造成的土体位移和膨胀也是土塞产生的原因。最终,通过对比计算结果,得到了锚内土体渗透系数随沉贯的变化规律。李家康^[3]选用高岭土作为离心模型试验材料,通过多种室内试验研究了高岭土与海洋软黏土的基本物理力学特性及 set-up 效应。同时,采用离心模型试验对吸力锚基础在不同锚体个数、不同土体强度、不同荷载作用角度下的抗拔承载力进行了研究,并推导了抗拔承载力的公式,为吸力锚基础的设计提供了理论依据。马鹏程等^[4]以成层土中吸力锚为研究对象,采用有限元数值模拟软件 ABAQUS 为计算工具,探究了不同土层高度和组合荷载条件下吸力锚承载力与最优加载点变化规律,给出了竖直-水平(V-H)组合加载模式下的破坏包络线。研究表明,随着上覆土层厚度的增加,吸力锚在 V-H 组合加载模式下的极限承载力逐渐减小并趋于稳定,最优加载点的位置先下降再上升,最后保持不变。张浦阳等^[5]采用先进的仿真开发工具 MultiGen Creator,并结合 VC 环境对 Vega 与 MFC 相结合的具体技术进行了研究和实践。研究表明,该技术实现了图形仿真与施工力学参数的有机结合,成功完成了吸力锚平台施工的视景仿真,并在此基础上实现了简单的沉放控制,进一步提高吸力锚平台施工的效率和质量。丁红岩等^[6-8]通过在室内粉质黏土土槽中进行吸力锚土塞形成试验,给出了部分试验结果。通过模拟海上吸力锚沉放过程,研究土塞形成和发展的规律及模型沉放过程中压力差、沉放速度等因素对土塞形成产生的影响。庞雅博^[9]采用 ABAQUS 有限元软件对两种砂土和黏土地基中系泊点位置不同的吸力锚基础模型进行数值计算,分析了系泊点位置对基础静力

承载特性的影响。研究结果可以为吸力锚的设计和施工提供重要参考。

基础的尺寸对于承载能力有较大的影响,孔德森等^[10]针对复合单桩基础的水平承载性能,开展了数值计算分析,结果表明,相同受荷工况下,复合桩基础由于摩擦轮的存在,桩身泥面处位移和桩身弯矩均大幅减小,水平承载力明显优于单桩。郭健等^[11]针对海上风机变径单桩基础的水平承载特性开展了数值计算分析,分析其相对于通长单桩基础的承载性能优势,并针对变径段尺寸进行了参数分析。乐丛欢等^[12]通过物理模型试验,建立一系列不同筒裙高度和筒间距的基础模型,研究了筒裙高度和筒间距对基础抗扭承载特性的影响。结果表明:随着筒裙高度的增加,四筒导管架基础达到抗扭承载力时筒壁深度方向的被动土压力明显增大。张伟等^[13]采用理想弹塑性本构模型建立了吸力桩基础三维有限元模型,研究了不排水饱和软黏土中吸力桩基础在水平荷载作用下承载特性,分析了加载点位置和裙结构尺寸对吸力桩承载性能的影响。结果表明:裙结构的设置能明显增强吸力桩水平承载性能;加载点位置对吸力桩转动中心位置产生较大影响。赵学亮等^[14]通过一系列小比尺模型试验对吸力式三筒基础水平荷载作用下的承载特性进行了研究,分析了长径比、荷载作用方向和筒间距对吸力式三筒基础承载力影响,结果表明:不同工况条件下得到的吸力式三筒基础荷载-位移曲线特性有所不同。相同筒重、不同筒间距下,增大筒的长径比有利于提高水平承载力,但在基础失稳前,沉箱基础模型水平位移随长径比的增加而增大。刘红军等^[15]预先通过室内小尺度模型确定了伞式吸力锚基础(umbrella suction anchor foundation, USAF)水平承载的位移控制标准,继而针对软黏土中不同加载高度下 USAF 承载规律及地基土变形特性进行有限元分析,并对波浪循环荷载作用下的海床土应力折减效应进行了阐述。结果表明:随水平荷载加载高度升高,USAF 的转动中心上移,海床土的应力扩散深度加深。

现以实际工程为背景,通过有限元分析软件 ABAQUS 建立数值模型,对不同直径和不同高度尺寸下的漂浮式风机吸力锚结构承载性能进行研究,从而为实际工程提供一定的参考建议。

1 不同尺寸的吸力锚有限元模型

1.1 有限元模型的建立

全球首座漂浮式风渔融合平台“国能共享号”如图 1 所示,“国能共享号”吸力锚安装施工图如图 2 所示。

通过建立吸力锚-砂土的有限元模型,分析了不同高度和直径的变化对于吸力锚水平承载能力的影响,为“国能共享号”及后续相关工程设计提供参考。

为了探究吸力锚的尺寸对周围土体承载能力的影响,建立了吸力锚-土体的有限元模型,包括吸力锚锚体、内土以及外土3个部分,土体采用福建标准砂,具体土体参数如表1所示。吸力锚采用标准钢结构,具体参数如表2所示。



图1 全球首座漂浮式风渔融合平台“国能共享号”

Fig.1 Global first offshore floating wind power + aquaculture platform “Guoneng Gongxiang Hao”



图2 “国能共享号”吸力锚安装施工

Fig.2 Suction anchor foundation installation of “Guoneng Gongxiang Hao”

表1 土体物理力学参数

Table 1 Soil physical mechanics parameters

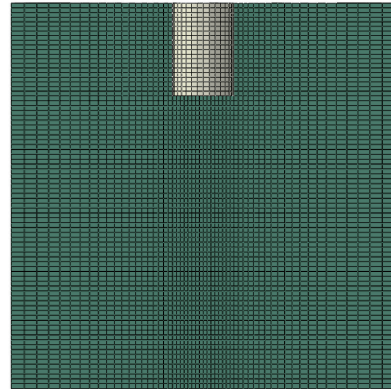
土体	有效重度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	内摩擦角/ ($^\circ$)	黏聚力/ Pa
砂土	10.0	20	30	2 500

表2 吸力锚材质及力学参数

Table 2 Suction anchor material and mechanics parameters

类别	材质	弹性模量/MPa	泊松比	密度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)
吸力锚	DH36	2.1×10^6	0.3	7 850

采用线弹性本构关系模拟分析,选用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性本构模型,对锚体单元和土体单元均采用三维 8 节点缩减积分 (C3D8R) 实体单元进行有限元计算分析,对锚体外表面、内表面与周围土体的接触均采用面对面的摩擦接触,桩土的接触摩擦因数的值取 0.35。荷载加载点在距离锚体底端 1/4 处,施加荷载的大小为 100 000 kN,方向为水平方向。选择合理的边界范围,模型周边土层按直径 50 m 圆柱体设置,土层高度为 50 m。周边土体采用径向位移约束,土体底部固定,建好后的吸力锚和土体的有限元模型如图 3 所示,边界条件和土体约束如图 4 所示。



D 为吸力锚直径 (diameter); H 为吸力锚高度 (height)

图3 $D=8\text{ m}$, $H=12\text{ m}$ 的吸力锚-土体有限元数值模拟计算模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of finite element numerical simulation model of suction anchor-soil with $D=8\text{ m}$, $H=12\text{ m}$

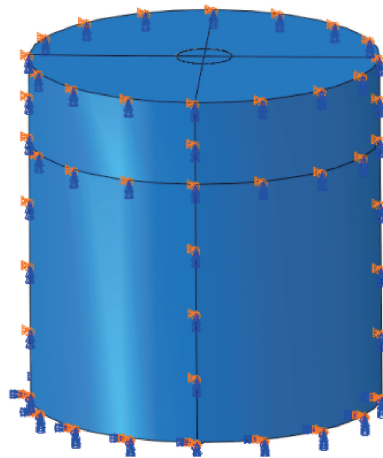


图4 吸力锚-土体边界条件和约束示意图

Fig.4 Schematic diagram of suction anchor-soil boundary conditions and constraints

1.2 分析工况

为了探究不同吸力锚尺寸参数对其承载能力的影响,分别改变锚体的直径和高度来进行对比,设计分析工况如表 3 和表 4 所示。

表3 不同直径的吸力锚工况组合
Table 3 Combination of suction anchor working conditions with different diameters

编号	高度/m	直径/m
A1	12	4
A2	12	6
A3	12	8
A4	12	10
A5	12	12

表4 不同高度的吸力锚工况组合
Table 4 Combination of suction anchor working conditions at different heights

编号	高度/m	直径/m
B1	8	8
B2	10	8
B3	12	8
B4	14	8
B5	16	8

2 土体本构模型

以吸力锚水平极限承载力为分析的重点,选取 Mohr-Coulomb 本构模型。Mohr-Coulomb 模型屈服面函数为

$$F = R_{mc} - p \tan \varphi - c = 0 \quad (1)$$

式(1)中: $\varphi(\theta, f^\alpha)$ 为材料在子午面上的摩擦角, θ 为温度, $f^\alpha (\alpha = 1, 2, \dots)$ 为待定变量,表示材料黏聚力 c 按等向硬化(或软化)方式的变化过程; p 为等效压应力。

ε^{pl} 为等效塑性应变,其应变率可定义为塑性功的表达式为

$$c \bar{\varepsilon}^{pl} = \sigma : \varepsilon^{pl} \quad (2)$$

$R_{mc}(\Theta, \varphi)$ 为 Mohr-Coulomb 偏应力系数,控制了屈服面在 π 平面的形状,定义为

$$R_{mc}(\Theta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{3} \cos \varphi} \sin \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) + \frac{1}{3} \cos \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) \tan \varphi \quad (3)$$

式(3)中: φ 为 Mohr-Coulomb 屈服面在 $p-R_{mc}-q$ 平面上的斜角,一般指材料的内摩擦角, p 为等效压应力, q 为 Mises 等效应力; Θ 为广义剪应力方位角。

3 吸力锚尺寸对承载能力的影响

3.1 不同直径的吸力锚对周围土体影响

对比不同直径下吸力锚的水平位移-荷载曲线,如图5所示,可以看出,随着吸力锚直径的增加,其周围土体的极限承载力也随之增加,相同荷载下直径越大的吸力锚限制发生的水平位移越小。直径为

4、6、8、10和12m的吸力锚对应的极限荷载值分别为22 356、30 523、38 120、45 596及54 021 kN,变化曲线如图6所示。

对比分析不同直径下土体在达到极限水平荷载值后的位移云图如7所示,可以看出,在加载侧对侧发生了较大的位移,随着直径的增大,周围受扰动的土体的范围也逐渐增大,因此,直径尺寸的改变对周围土体的影响效果较为显著。

施加水平力的过程中,吸力锚会随着荷载的方向发生转动,为了尽量控制吸力锚发生平动的位移,需要依据发生转动的角度来相应调整系缆点的位置,因此研究了不同直径下吸力锚的位移矢量图,如图8所示。可以看出,当系缆点在距离锚底1/4筒高处时,直径越小,锚体发生转动的角度越大,当直径为12m时,吸力锚几乎发生平动位移,因此,当直径较小时,考虑相应提高系缆点的位置以达到发生平动位移的目的。

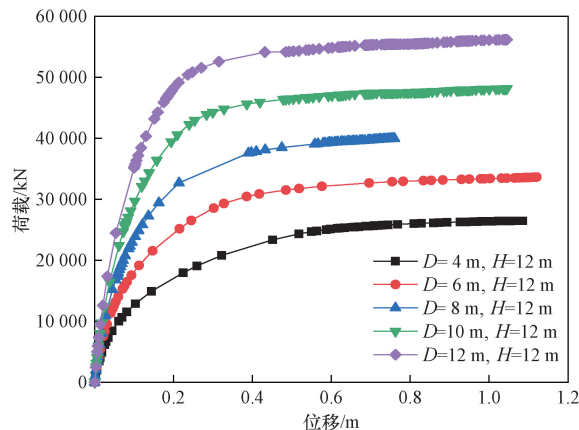


图5 不同直径下吸力锚的水平位移-荷载曲线
Fig. 5 Horizontal displacement-load curves of suction anchors with different diameters

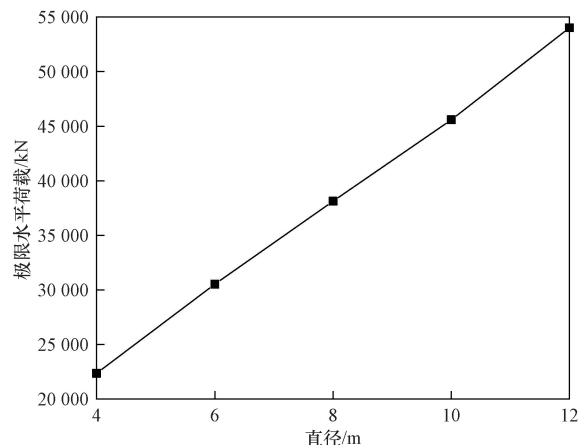


图6 不同直径下吸力锚的极限水平荷载值曲线
Fig. 6 Curve of ultimate horizontal load of suction anchors with different diameters

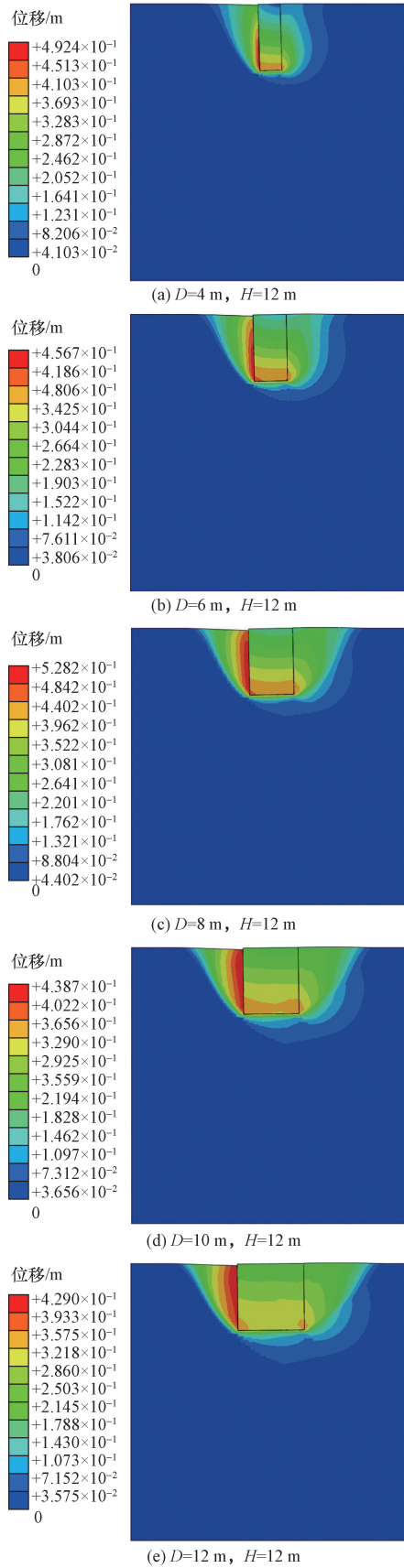


图7 不同直径下吸力锚的位移云图

Fig. 7 Displacement nephogram of suction anchors with different diameters

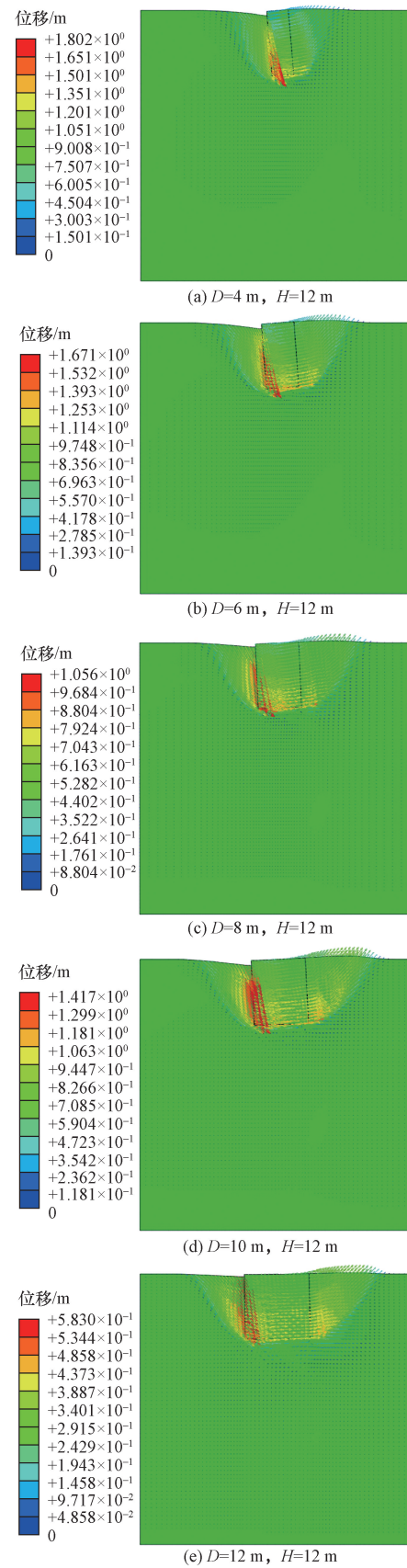


图8 不同直径下吸力锚的位移矢量图

Fig. 8 Displacement vector diagram of suction anchors with different diameters

观察水平荷载在 25 000 kN 条件下,不同直径的锚体锚壁压力的变化如图 9 所示,可以看出直径越大,锚体的锚壁压力也越大,且在加载点附近锚壁的压力会急剧增加。不同直径的锚体水平位移变化曲线如图 10 所示,可以看出,大直径的锚体的水平位移相较于小直径锚体要小得多,因此增大直径可以有效限制锚体位移。

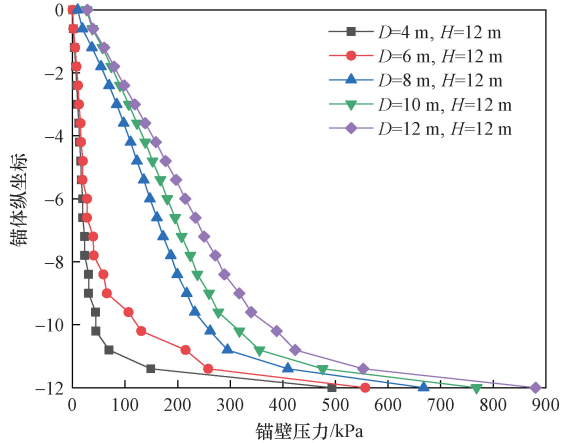


图 9 不同直径下的锚体锚壁压力的变化曲线
Fig. 9 Change curve of anchor wall pressure under different diameters

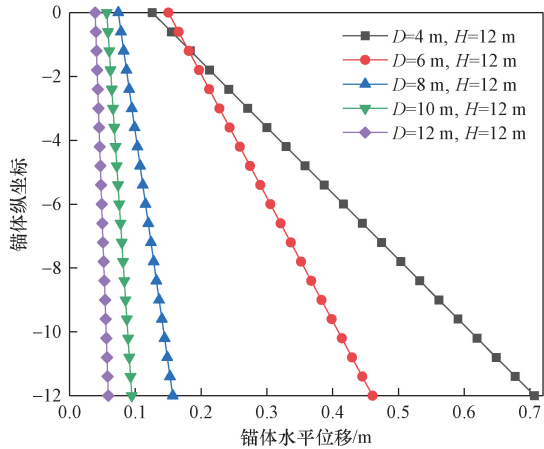


图 10 不同直径下的锚体水平位移的变化曲线
Fig. 10 Curve of horizontal displacement of anchor body under different diameters

3.2 不同高度的吸力锚对周围土体影响

对比不同高度下吸力锚的水平位移-荷载曲线,如图 11 所示,可以看出,随着吸力锚高度的增加,其周围土体的极限承载力也随之增加,相同荷载下高度越大的吸力锚限制发生的水平位移越小。高度为 8、10、12、14 和 16 m 的吸力锚对应的极限荷载值分别为 19 200、29 513、38 120、55 423 及 74 845 kN,变化曲线如图 12 所示。

同样对比分析不同高度下土体在达到极限水平荷载值后的位移云图如图 13 所示,可以看出,在

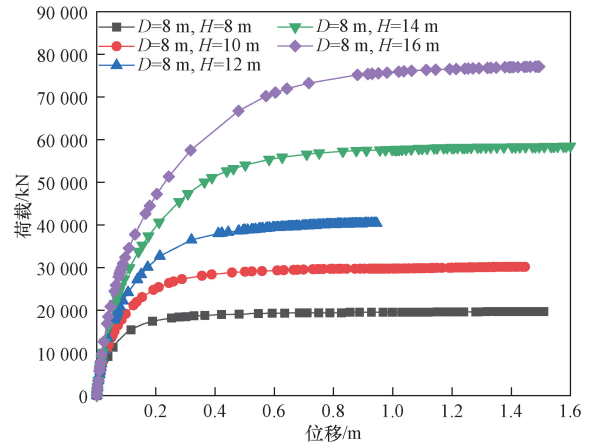


图 11 不同高度下吸力锚的水平位移-荷载曲线
Fig. 11 Horizontal displacement-load curves of suction anchors at different heights

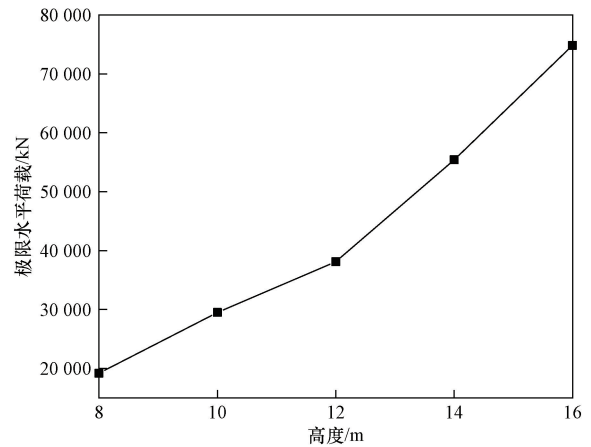


图 12 不同高度下吸力锚的极限水平荷载值曲线
Fig. 12 Curve of ultimate horizontal load of suction anchors at different heights

加载侧对侧发生了较大的位移,相较于直径的改变,高度的改变对周围土体的影响范围并不明显。

同样在施加水平力的过程中,吸力锚会随着荷载的方向发生转动,为了尽量控制吸力锚发生平动的位移,需要依据发生转动的角度来相应调整系缆点的位置,因此研究了不同高度下吸力锚的位移矢量图,如图 14 所示。可以看出,当系缆点在距离锚底 1/4 处时,高度越高,锚体发生转动的角度越大,当高度和直径均为 8 m 时,吸力锚几乎发生平动位移,因此,当高度较高时,考虑相应提高系缆点的位置以达到发生平动位移的目的。

观察水平荷载在 20 000 kN 条件下,不同高度的锚体锚壁压力的变化如图 15 所示,可以看出,在相同高度下,锚壁的压力差距不大,随着锚的高度的增加,相应的锚壁的压力也逐渐增加。不同高度的锚体水平位移变化曲线如图 16 所示,可以看出,高度的增加反而使得锚体在同一高度下的水平位移

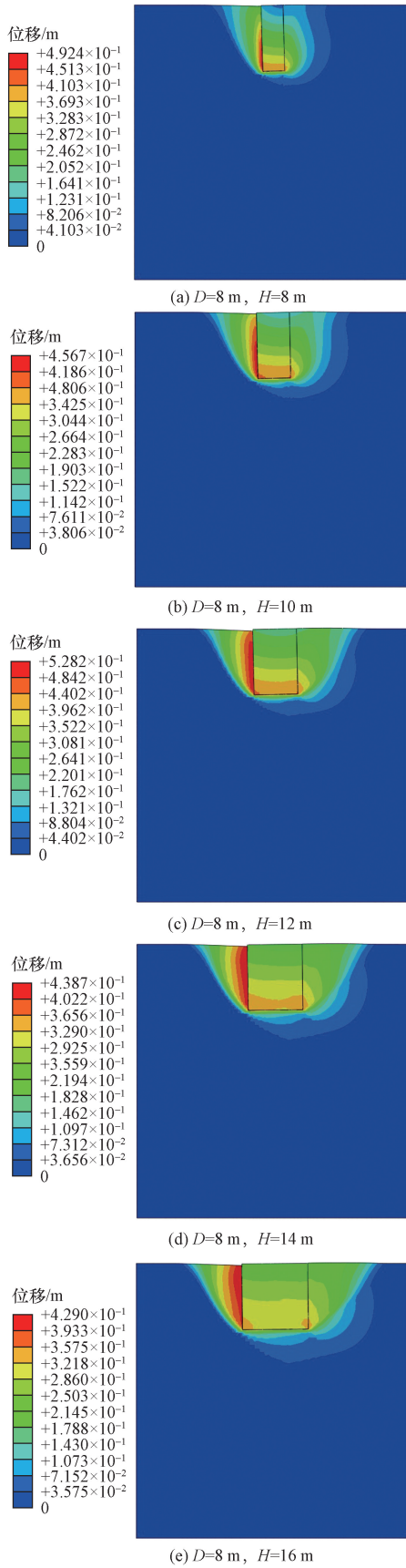


图 13 不同高度下吸力锚的位移云图
 Fig. 13 Displacement nephogram of suction anchors with different heights

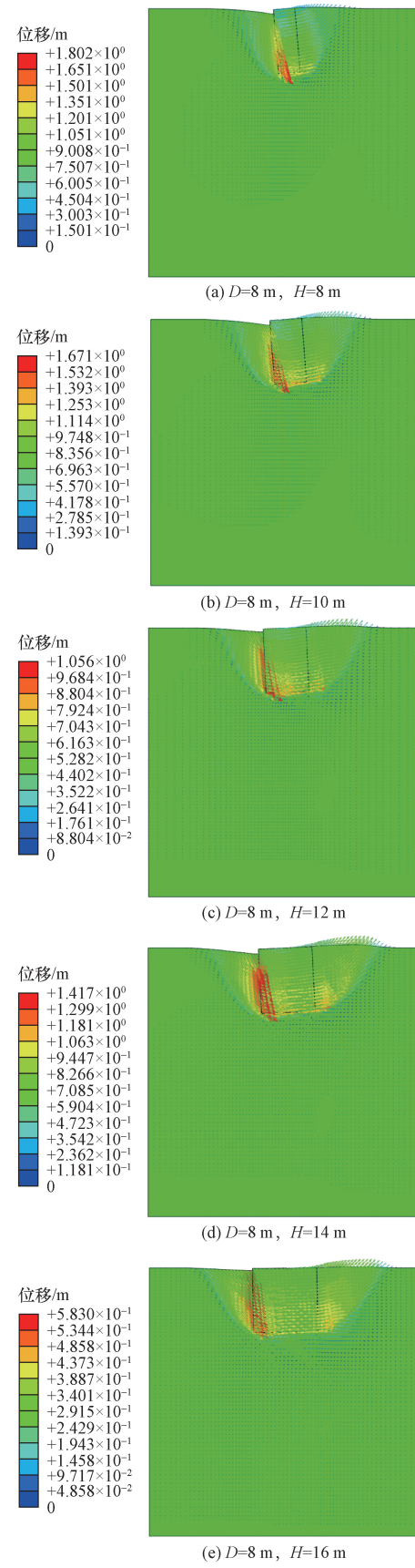


图 14 不同高度下吸力锚的位移矢量图
 Fig. 14 Displacement vector diagram of suction anchors with different heights

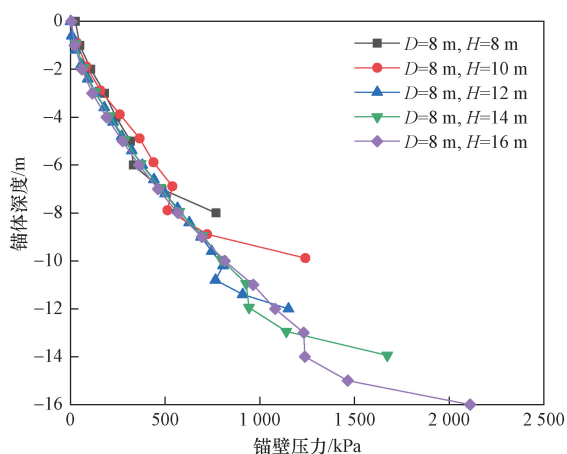


图 15 不同高度下的锚体锚壁压力的变化曲线
Fig. 15 Change curve of anchor wall pressure of anchor body at different heights

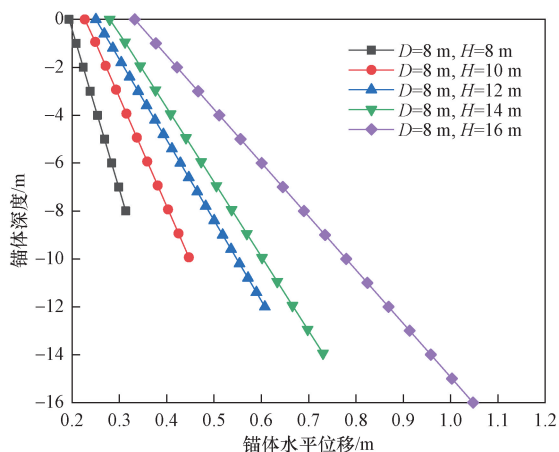


图 16 不同高度下的锚体水平位移的变化曲线
Fig. 16 Curve of horizontal displacement of anchor body at different heights

增大,因此在高度增加后需要调整系缆点的位置,以达到更好地限制位移的作用。

4 结论

通过建立吸力锚与砂土的有限元模型,分析了吸力锚的尺寸对其水平承载能力的影响,得出以下结论。

(1)直径和高度的增加均会显著提高吸力锚的水平承载能力,且高度的增加对吸力锚的水平承载力的提升效果较直径更为明显。

(2)当吸力锚的直径和高度发生变化时,需要相应的改变系缆点的位置来使得吸力锚尽量发生平动位移,当 $D/H > 1$ 时,考虑系缆点的位置在锚身侧壁偏下的位置,当 $D/H < 1$ 时,可以相应的提高系缆点的位置。

(3)直径的改变对锚壁压力的变化有较大的影

响,而高度的改变几乎不影响同高度下的锚壁压力,直径的增加可以限制锚的水平位移,而高度的增加会使得锚的水平位移增大。

参 考 文 献

- [1] 康思伟, 栾辰宇, 张雨蓉, 等. 拖曳锚在浮式风机中的设计计算方法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(5): 2109-2114.
Kang Siwei, Luan Chenyu, Zhang Yurong, et al. Design methods of drag anchor for floating wind turbine[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(5): 2109-2114.
- [2] 王胤, 杨涵, 庞子毅, 等. 基于 CFD-DEM 流固耦合方法的吸力锚基础负压沉贯数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(2): 384-393.
Wang Yin, Yang Han, Pang Ziyi, et al. Numerical simulation of negative pressure penetration of suction anchor foundation based on CFD-DEM fluid-solid coupling method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(2): 384-393.
- [3] 李佳康. 软黏土中张紧式吸力锚抗拔承载力试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
Li Jiakang. Experimental study on uplift bearing capacity of tensioned suction anchor in soft clay[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [4] 马鹏程, 邱月, 舒爽. 成层土中吸力锚极限承载力的数值模拟及分析[J]. 河南科学, 2021, 39(8): 1264-1269.
Ma Pengcheng, Qiu Yue, Shu Shuang. Numerical simulation and analysis of the ultimate bearing capacity of suction anchors in layered soils[J]. Henan Science, 2021, 39(8): 1264-1269.
- [5] 张浦阳, 丁红岩, 白智华. 吸力锚平台沉降过程中施工仿真技术[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(6): 123-127.
Zhang Puyang, Ding Hongyan, Bai Zhihua. Construction simulation technology during the placement of suction anchor platform[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2012, 36(6): 123-127.
- [6] 丁红岩, 刘振勇, 陈星. 吸力锚土塞在粉质粘土中形成的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001(4): 441-444.
Ding Hongyan, Liu Zhenyong, Chen Xing. Model test study on the formation of suction anchor plug in silty clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001(4): 441-444.
- [7] 丁红岩, 韩雪松, 张浦阳, 等. 离散元法模拟吸力锚施工中生成的土塞研究[J]. 海洋技术, 2004(1): 52-56.
Ding Hongyan, Han Xuesong, Zhang Puyang, et al. Study on the simulation of soil plug generated during suction anchor construction using discrete element method[J]. Marine Technology, 2004(1): 52-56.
- [8] 丁红岩, 张浦阳. 海上吸力锚负压下沉渗流场的特性分析[J]. 海洋技术, 2003(4): 44-48.
Ding Hongyan, Zhang Puyang. Characteristic analysis of seepage field of suction anchor under negative pressure sinking at sea[J]. Marine Technology, 2003(4): 44-48.
- [9] 庞雅博. 海上漂浮式风机悬链式系泊吸力锚承载特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
Pang Yabo. Study on bearing characteristics of suction anchor with catenary mooring for offshore floating wind turbine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [10] 孔德森, 郭文婷, 吴艳崇. 海上风机复合单桩基础水平承载

- 力数值分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(20): 8350-8355.
- Kong Desen, Guo Wenting, Wu Yanchong. Numerical analysis of horizontal bearing capacity of composite pile foundation for offshore wind turbine[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(20): 8350-8355.
- [11] 郭健, 王皓, 骆光杰, 等. 海上风机变径单桩基础水平承载特性数值分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(9): 3658-3664.
- Guo Jian, Wang Hao, Luo Guangjie, et al. Numerical analysis of horizontal bearing capacity of variable diameter pile foundation for offshore wind turbine[I]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(9): 3658-3664.
- [12] 乐丛欢, 庞雅博, 张浦阳, 等. 四筒导管架基础在砂土中的抗扭承载特性[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(11): 1654-1662.
- Le Conghuan, Pang Yabo, Zhang Puyang, et al. Torsional bearing characteristics of four-tube jacket foundation in sand[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(11): 1654-1662.
- [13] 张伟, 马振杰. 软黏土地基中吸力桩水平承载性能数值分析[J]. 水道港口, 2022, 43(3): 377-382.
- Zhang Wei, Ma Zhenjie. Numerical analysis of horizontal bearing capacity of suction piles in soft clay foundation[J]. Waterways and Ports, 2022, 43(3): 377-382.
- [14] 赵学亮, 李扬扬, 王鑫, 等. 砂土中吸力式三筒基础水平承载特性试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(9): 20-29.
- Zhao Xueliang, Li Yangyang, Wang Xin, et al. Experimental study on horizontal bearing characteristics of suction three-tube foundation in sand[J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2021, 48(9): 20-29.
- [15] 刘红军, 张浩, 李洪江, 等. 软黏土中伞式吸力锚基础水平承载有限元分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3325-3331.
- Liu Hongjun, Zhang Hao, Li Hongjiang, et al. Finite element analysis of horizontal load of umbrella suction anchor foundation in soft clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(11): 3325-3331.