

DOI:10.19479/j.2095-719x.2403174

水平荷载作用下三桶基础承载特性研究

陆佳清^{a,b}, 鹿群^b, 郭少龙^b, 刘举^{a,b}

(天津城建大学 a. 天津市软土特性与工程环境重点实验室; b. 土木工程学院, 天津 300384)

摘要:通过建立三维有限元模型,土体采用弹塑性界面理论,设置不同的加载方向和重力荷载,探究三桶基础的水平承载特性;通过验证现有模型试验,证实数值方法的可行性.研究结果表明:60°水平加载(单桶受压,双桶受拉)极限承载力最小,基础的水平极限承载力由受压桶控制;0°(双桶受压,单桶受拉)方向加载,自重荷载较小时,基础的承载力随着自重荷载的增大而增大,受拉桶的抗拔承载力决定了基础的总体承载力,自重荷载较大时,基础的水平承载力会减小,受压桶的抗压承载力决定了基础的总体承载力;60°方向加载时,基础的承载力随自重荷载的增大而减小,受压桶的沉降决定了基础的转角.

关键词:吸力桶;软黏土;加载方向;极限承载力

中图分类号:TU476 文献标志码:A 文章编号:2095-719X(2024)03-0174-06

Study on the Bearing Characteristics of Tripod Suction Bucket Foundation under Lateral Loading

LU Jiaqing^{a,b}, LU Qun^b, GUO Shaolong^b, LIU Ju^{a,b}

(a. Key Laboratory of Soft Soil Engineering Character and Engineering Environment of Tianjin;

b. School of Civil Engineering, TCU, Tianjin 300384, China)

Abstract: The three-dimensional finite element model is established to investigate the horizontal bearing characteristic of the tripod suction foundation by setting different loading direction and gravity load. An elastic-plastic bounding surface constitutive model is used to simulate the stress-strain behavior of clays. The feasibility of the numerical method is verified by predicting the existing model test results. The research results show that the ultimate bearing capacity at 60° horizontal loading direction (one-bucket compression, two-bucket tension) is the smallest, and the overall bearing capacity of the foundation is controlled by the compressed bucket. When the self-weight load is less, the ultimate bearing capacity at 0° loading direction (two-bucket compression, one-bucket tension) of the tripod suction bucket increases with the increase of the self-weight load, and the pull-out capacity of the tensioned bucket determines the overall load bearing capacity of the foundation. When the self-weight load is larger, the ultimate bearing capacity of the foundation decreases and the compressive bearing capacity of the compressed bucket determines the overall bearing capacity of the foundation. The ultimate bearing capacity of the tripod suction foundation at 60° loading direction decreases as the self-weight load increases and the settlement of the compressed bucket determines the overall rotation angle of the tripod suction bucket.

Key words: suction bucket; soft clay; loading direction; ultimate bearing capacity

由于化石能源的过度使用,环境污染问题变得日益严重,这对清洁能源的需求也逐渐增加.风能作为一种新型清洁能源得到了国内外广泛关注,我国正在大规模建立海上风电场,据统计海上风机基础造价约占风机总投资的30%^[1],所以选择合理的风机基础是节约成本和保证风机安全运行的关键.吸力式三桶基础

作为一种新型的吸力桶基础,它具有倾覆能力强、成本低、可重复利用等特点,且适用的水深也更深,因此具有很大的发展潜力^[2].

目前有不少关于单桶基础的研究成果.朱斌等^[3]针对粉土中不同尺寸的吸力桶开展离心模型实验,提出了基于变形控制的倾覆弯矩承载力分析方法.黎冰

收稿日期:2022-11-30;修订日期:2023-03-30

基金项目:中国电建市政建设集团有限公司2020年度重点项目(KHX2020-006)

作者简介:陆佳清(1997—),男,江苏南通人,天津城建大学硕士生.

通讯作者:鹿群(1970—),男,教授,博士,从事桩基工程和软土地基处理研究. E-mail:zdlq585@126.com

等^[4]通过开展室内模型实验,分析了长径比对砂土中单桶基础抗拔承载力的影响.练继建等^[5]研究了粉质黏土中吸力式单桶的抗拔承载特性.Cao等^[6]通过建立有限元模型,研究了软黏土中单桶基础的抗拔承载特性,并探索了基础在上拔过程中吸力的变化趋势.王志云等^[7]利用有限元方法研究了复杂加载条件下单桶基础的破坏包络面.刘梅梅等^[8]和丁红岩等^[9]通过有限元法分析了宽浅式桶形基础的承载特性.李大勇等^[10]通过开展室内缩尺模型试验,探究了饱和砂土中裙式吸力桶基础的水平承载特性.刘红军等^[11]通过开展三维有限元模拟,研究了饱和黏土中伞式吸力桶基础的水平承载特性.

相较于单桶基础,目前对吸力式三桶基础的研究相对较少.Jeong等^[12]通过离心试验,研究了水平荷载作用下砂土中三桶基础的承载特性.Houlsby等^[13]通过研究拉压循环荷载下吸力单桶的运动规律,评估三桶基础的永久变形和循环响应刚度.Kim等^[14]通过开展数值模拟,研究三桶基础的群桶效应.刘树杰等^[15]研究了三桶基础的水平承载特性,探讨了加载方向和桶间距对三桶基础承载力的影响.Ochmański M等^[16]对砂土中三桶基础进行三维有限元分析,研究了循环荷载下三桶基础的刚度弱化特性.

综上所述,目前已有不少学者研究了单桶基础的单调和循环承载特性,但对于三桶基础的研究相对较少,尤其是黏土中的三桶基础.如今大功率的海上风机成为发展趋势,风机系统的整体自重随着上部结构和基础尺寸的增加而增加,这对三桶基础的承载能力提出新的挑战.在恶劣的海洋环境中,三桶基础除了承受风机的自重荷载之外,还要承受任意方向的风、浪等水平荷载作用.这些水平荷载将会在三桶基础顶部产生倾覆力矩,使得基础周围土体产生不可恢复的塑性变形,进而引起三桶基础产生一定的累积转角,从而影响上部风机结构的正常运行.本文拟利用ABAQUS软件,土体采用程等^[17-18]建议的弹塑性界面本构模型,提出一种用于分析黏土中三桶基础水平承载特性的数值方法,并通过对比已有模型试验结果的预测验证数值方法的合理性.本文通过设置不同的加载方向和自重荷载,建立三维数值模型;通过系统的数值模拟,研究不同的加载方向和自重荷载对黏土中三桶基础的水平承载特性的影响.

1 数值计算模型

本文采用的三桶基础的尺寸参照德国某风场正

在服役的风机基础^[2],其中每个单桶桶径 $D = 8\text{ m}$,桶长 $L = 8\text{ m}$,桶壁厚度 $t = 0.2\text{ m}$,桶间距 S 为 30 m .由于结构的对称性,建立一半的桶土有限元模型,如图1所示.考虑到计算效率,土体单元从桶至土体边界由密到疏排列.为了避免边界效应的影响,通过试算,当三桶基础到土域边界的水平距离约为5.5倍桶径,到土域边界的竖向距离约为3.6倍桶径时,可以消除边界效应的影响.桶体和土体均采用三维实体单元(C3D8)模拟,共计24 672个单元.土域侧面竖向边界施加水平约束,土域底部边界施加固定约束.

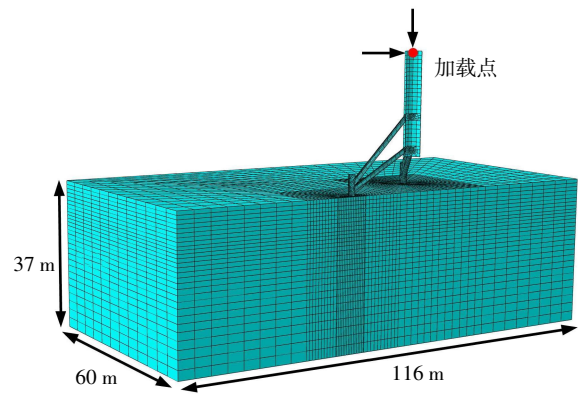


图1 三维有限元模型

土体的不排水应力应变行为采用程等^[17-18]建议的弹塑性界面本构模型模拟,该模型在偏应力空间中构建硬化模量的演化规则,其增量偏应力应变关系为

$$de_{ij} = \frac{1}{2G} ds_{ij} + \frac{3\bar{s}_{ij}}{2H'A_0^2} \bar{s}_{kl} ds_{kl} \quad (1)$$

式中: de_{ij} 为偏应变增量; ds_{ij} 、 ds_{kl} 为偏应力增量; G 为弹性剪切模量; H' 为塑性硬化模量; \bar{s}_{ij} 、 \bar{s}_{kl} 为边界面上偏应力张量; A_0 为边界面半径.该本构模型包括4个模型参数: A_0 、 G 、 μ 和 ξ .其中: A_0 是边界面半径,表征土体的不排水强度; G 是弹性剪切模量; ξ 表征土体的初始刚度; μ 控制着初始加载应力-应变曲线的形状; ξ 控制着土体刚度弱化及应变累积速率.模型的基本理论框架及模型参数确定方法详见文献[17-18].对于饱和软黏土,其强度通常由不排水抗剪强度 S_u 表示.在本文有限元模型中,假定 S_u 沿深度线性增长,即, $S_u = 2 + 2z$,其中 z 表示土体深度.土的有效密度为 680 kg/m^3 .本构模型参数取值, $A_0 = 2S_u$;根据工程经验,土的弹性模量 E 通常可表示为 S_u 的倍数,这里取 $E = 500 S_u$,据此可由式 $G = E/2(1 + \nu)$ 确定弹性剪切模量(ν 为泊松比,不排水条件下取0.5);参数 μ 取2,此时土的初始加载应力应变曲线刚好为双曲线; ξ 主要控制循环加载条件下土的刚度弱化和应变累积,

对于本文的静力单调加载条件, ξ 取 0.

由于黏土具有低渗透性, 吸力桶内的负压消散缓慢, 在上拔荷载的作用下, 桶内壁和土塞在负压的作用下紧密相连, 因此考虑到负压的作用, 将桶内壁和土体设置为绑定接触. 在拉拔荷载下, 桶外壁和土体发生分离, 因此将桶外壁和土体设置为摩擦接触, 接触行为满足库伦摩擦准则, 摩擦系数为 0.25, 当接触面上的切向应力大于临界摩擦力时桶-土发生切向滑移.

海上风机在海洋环境中可能遭受任意水平方向的风、浪荷载作用, 由于三桶基础为等边三角形布局, 各个单桶的运动行为随着加载方向的改变而改变, 如图 2 所示. 其中, 对 0° 和 120° 方向加载, 三桶基础表现为单桶受拉和双桶受压的受力情形; 对 60° 和 180° 方向加载, 三桶基础表现为单桶受压和单桶受拉的受力情形. 因此设置 $0^\circ \sim 60^\circ$ 之间 5 个不同的加载方向, 以自重荷载为 10 MN 为例, 探究不同加载方向下三桶基础的水平承载特性.

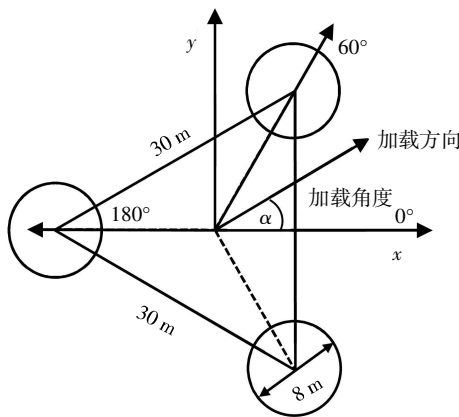


图 2 三桶基础平面

风机基础受到的竖向荷载, 主要是基础和上部结构的自重, 随着风机发电功率不断增大, 相应的风机上部结构和基础的尺寸都在增大. 为探究不同重力荷载对三桶基础水平承载力的影响, 将设置 0~20 MN 之间 5 个不同的竖向荷载, 其中 0 MN 和 5 MN 小于基础本身的自重 10 MN, 通过等效密度的方式施加自重荷载, 旨在探究极端情况下三桶基础的水平承载特性.

有限元模拟时首先进行地应力平衡分析, 目的是使土体具有初始应力场的同时初始位移场基本为零; 然后给三桶基础施加竖向自重荷载; 最后给三桶基础施加单调水平荷载.

2 数值模型与离心试验结果对比

吸力桶基础长期承受海上风浪带来的水平荷载,

与单桶基础不同的是, 三桶基础依靠各个单桶的上拔和下压来抵抗外部弯矩, 而单桶基础依靠刚性转动. 因此合理的预测单桶基础在竖向荷载下的承载特性, 是理解三桶基础水平承载特性的关键. 据此, 对 Cao 等^[6]开展的软黏土中吸力式单桶基础的竖向抗拔离心试验进行数值模拟, 通过模拟结果与试验结果的对比, 验证上文采用的数值方法, 主要包括本构模型、接触设置等的合理性.

选择离心试验编号 SAT06-3 进行数值模拟, 试验离心加速度为 100 g. 相应原型桶的直径 $D = 5.17$ m, 裙长 $L = 24.5$ m, 桶壁厚度 $t = 0.065$ m. 考虑到竖向荷载作用下单桶基础结构的对称性, 选取桶及土体的一半建立有限元模型, 如图 3 所示. 软黏土的不排水抗剪强度 $S_u = 1.14z$ (z 为土体深度). 本构模型参数为: $A_0 = 2S_u, E = 500S_u, \mu = 2, \xi = 0$. 试验分两个阶段进行, 即贯入和竖向加载, 贯入过程中产生了 50 mm (原型 5 m) 的土塞, 本次验证只模拟单桶基础竖向受荷的工况. 桶体外壁和土体之间设置摩擦接触条件, 摩擦系数为 0.25. 由于实验过程中负压始终存在, 桶内壁和土塞保持紧密接触, 因此采用绑定接触模拟桶内壁和土体的接触状态.

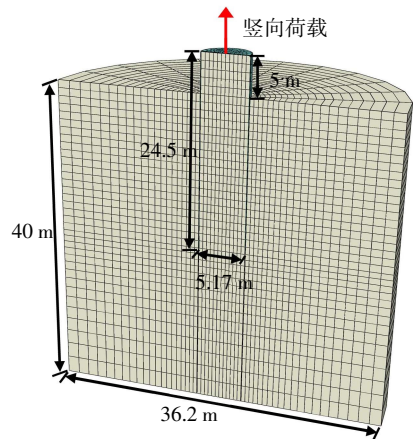


图 3 单桶基础三维有限元模型

图 4 比较了数值模拟和试验结果的荷载位移曲线, 模拟和实验的结果总体趋势一致, 验证了数值方法预测吸力式单桶基础拉拔行为的合理性. 应注意的是, 随着向上位移的增加, 单桶基础的承载力达到最大, 然后逐渐减小, 即表现出软化现象. 然而, 这种数值方法可以相对准确地预测极限承载力, 但仍然无法模拟吸力桶基础在上拔过程中发生的软化现象.

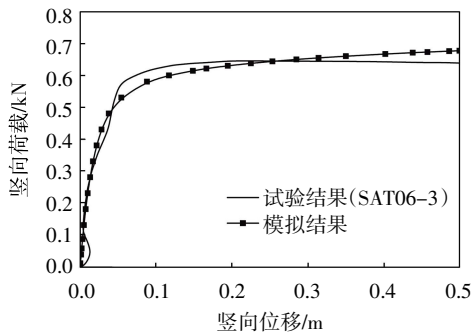


图4 数值模拟和试验数据比较

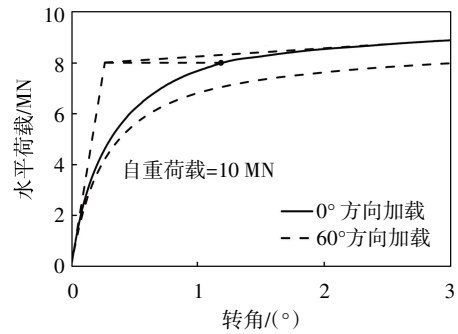


图6 水平加载引起的弯矩-转角曲线

3 三桶基础的水平承载特性分析

3.1 加载角度对水平承载力的影响

图5给出了 0° ~ 60° 之间5个不同加载角度下三桶基础的水平极限承载力。从图中可以看出加载方向对三桶基础的水平承载力影响显著,三桶的水平极限承载力随着加载角度的增加而减小。其中 0° 加载方向的承载力最高, 60° 加载方向的承载力最低。

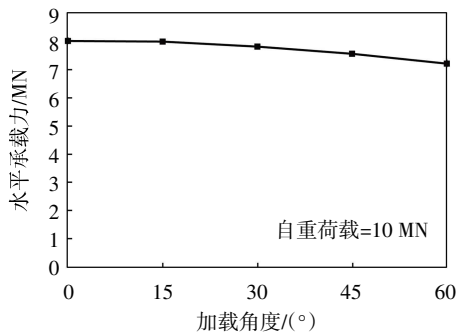


图5 沿角度变化的水平承载力

使用切线相交法^[4]确定三桶基础的极限承载力,如图6所示。从荷载位移曲线的初始加载点及终点分别绘制切线,两条切线交点的纵坐标为基础的极限承载力,相应于荷载位移曲线上的点为失效位移点。下文中三桶基础的水平极限承载力也依据该方法确定。

为进一步研究加载方向对三桶基础水平承载特性的影响,选择 0° 和 60° 作为两种极端加载方向(最有利或最不利加载方向)进行分析。从图6可以看出, 0° 方向比 60° 方向极限承载力更大。图7为基础失效时位移矢量图,从其相应的承载机制可以看出,由于桶内壁与土体绑定,所以桶内土塞将随着吸力桶一起向上运动。此时,除了桶内外壁与土的摩擦力以及桶的自重,吸力桶底部土体的反向承载力将显著提高单个吸力桶的抗拔承载力。但是由于单桶受压承载力远小

于双桶的受压承载力,受压桶的竖向沉降大小决定了三桶基础整体的转角大小,因此,三桶基础的总体承载力由受压桶控制。 0° 加载下两桶受压,而 60° 加载下单桶受压,显然 0° 加载下吸力桶抗压承载能力更高,受压桶沉降更小,三桶基础整体转角更小,因此相应的承载力更高。

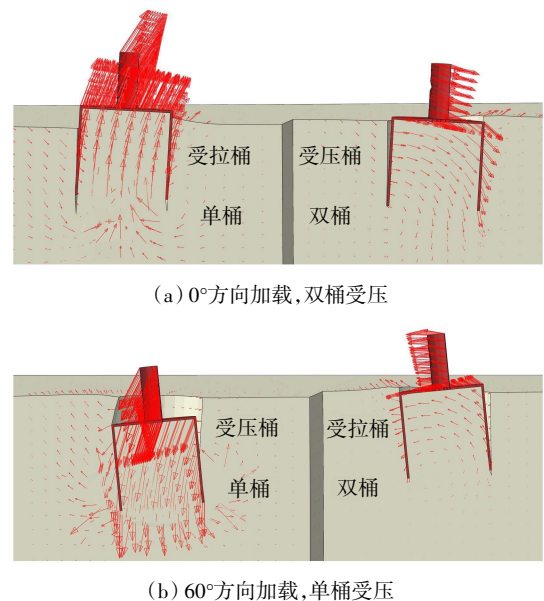


图7 三桶基础失效破坏时的位移矢量

3.2 自重荷载对水平承载力的影响

由于不同的加载方向会改变三桶基础的水平承载特性,因此选择 0° (双桶受压)和 60° (单桶受压)作为两种极端加载方向,探讨重力荷载对三桶基础水平承载力的影响。图8为 0° 方向不同重力荷载下三桶基础的荷载-转角曲线,可以看出,基础的水平极限承载力随着自重荷载的增加而增加。图9a为所对应的破坏机制,当自重荷载较小时,以5 MN为例,受拉桶依靠土塞和桶体的自重以及吸力桶底部的反向承载力,抵抗水平荷载作用产生的向上的拉力分量,而受压桶依靠土体的抗力抵抗桶体自重和向下的压力分量。自重荷载的增加可以提高受拉桶的抗拔承载力,从而提高

三桶基础的水平极限承载力.值得注意的是,相较于自重为 15 MN,自重为 20 MN 时三桶基础的极限承载力较小.从图 9b 可以看出,受压桶在重力和竖向压力分量作用下发生明显沉降,且受压桶下土体发生显著变形.当自重荷载较大时,受压桶更容易发生沉降,所以受压桶的沉降是导致基础承载力降低的重要原因.

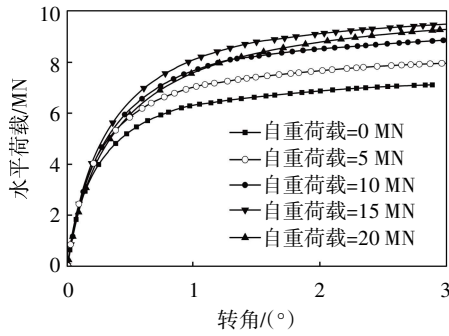
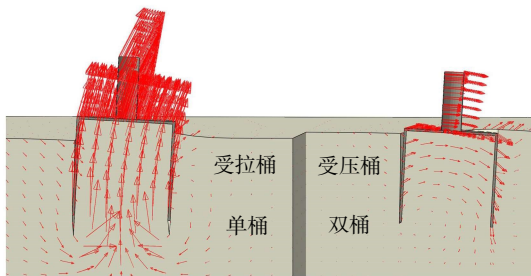
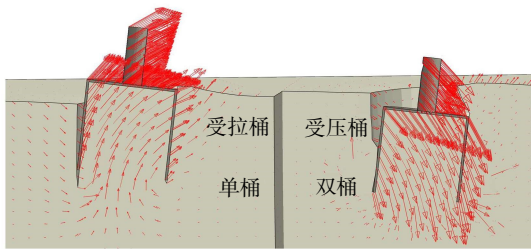


图 8 0°方向下不同重力荷载引起的荷载-转角曲线



(a) 自重荷载为 5 MN



(b) 自重荷载为 20 MN

图 9 不同自重荷载下三桶基础破坏时的位移矢量图

图 10 为 60°方向不同重力荷载下三桶基础的荷载-转角曲线,与 0°方向下三桶基础的水平承载特性不同,其在 60°方向下的水平极限承载力随着自重荷载的增大而减小.自重荷载为 0 MN 时,承载力最大;自重荷载为 20 MN 时,承载力最小.相应的破坏机制如图 11 所示.自重荷载和地基反向承载力显著提高了受拉桶的抗拔承载力,受拉桶下土体变形较小,且在 60°方向下是双桶受拉,相比于 0°方向,受拉双桶没有发生明显的竖向位移.受压桶在重力和竖向压力分量下发生显著沉降,由于反向承载力提高了受拉桶的抗拔承载力,且由双桶共同抵抗拉力分量,因此单桶

的抗压承载力小于双桶的抗拔承载力,所以受压桶在水平荷载下更容易发生沉降.受压桶的沉降是导致三桶基础发生转动的重要原因.

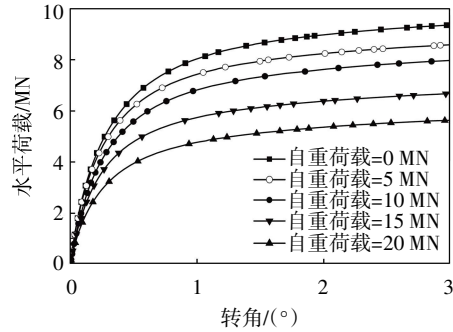


图 10 60°方向下不同重力荷载引起的荷载-转角曲线

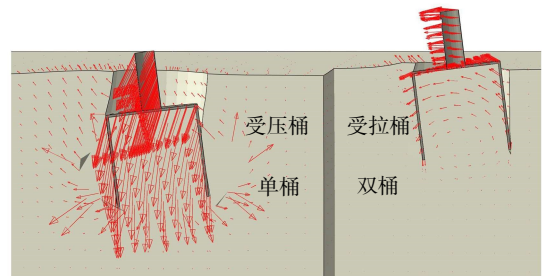


图 11 三桶基础破坏时的位移矢量图(自重荷载 20 MN)

4 结论

通过建立三维有限元模型,研究了三桶基础的水平承载特性,所得主要结论如下.

(1)60°加载(双桶受拉,单桶受压)水平极限承载力最小;0°加载(单桶受拉,双桶受压)水平极限承载力最大.受压桶的沉降决定了三桶基础的总体承载力.

(2)0°方向下,自重荷载较小时,三桶基础的水平承载力随自重增大而增大,受拉桶的上拔位移决定基础的转角;自重荷载较大时,基础的承载力会减小,此时受压桶的沉降决定基础的转角.

(3)60°方向下,三桶基础的水平承载力随自重的增加而减小,0 MN 时基础的承载力最大,此时三桶基础的承载力由受压桶控制,即受压桶的沉降决定了基础的转角.

参考文献:

[1] HOULSBY G T, BYRNE B W. Suction caisson foundations for offshore wind turbines and anemometer masts[J]. Wind Engineering, 2000, 24(4): 249-255.
 [2] WANG L Z, WANG H, ZHU B, et al. Comparison of monotonic

- and cyclic lateral response between monopod and tripod bucket foundations in medium dense sand[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 155: 88–105.
- [3] 朱 斌, 应盼盼, 郭俊科, 等. 海上风电机组吸力式桶形基础承载力分析与设计[J]. *岩土工程学报*, 2013(S1): 443–450.
- [4] 黎 冰, 郑 翔, 高玉峰, 等. 砂土中吸力式沉箱基础抗拔承载特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013(5): 902–907.
- [5] 练继建, 王芑文, 乐丛欢, 等. 吸力锚在粉质黏土中的上拔特性试验研究[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(5): 443–449.
- [6] CAO J, AUDIBERT J M E, AL-KHAFAJI Z, et al. Numerical analysis of the behavior of suction caissons in clay [C]// *The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference*. Cupertino: *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2002: 154–159.
- [7] 王志云, 王 栋, 栾茂田. 复合加载条件下吸力式沉箱基础承载特性数值分析[J]. *海洋工程*, 2007, 25(2): 52–56.
- [8] 刘梅梅, 练继建, 杨 敏, 等. 宽浅式筒型基础竖向承载力研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(2): 379–384.
- [9] 丁红岩, 王旭月, 张浦阳, 等. 砂土中宽浅式复合筒型基础刚度退化试验研究[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(3): 34–44.
- [10] 李大勇, 张景睿, 张雨坤, 等. 饱和砂土中裙式吸力基础水平循环特性和累积转角变化规律[J]. *岩土力学*, 2021, 42(3): 611–619.
- [11] 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.
- [12] JEONG Y H, KO K W, KIM D S, et al. Studies on cyclic behavior of tripod suction bucket foundation system supporting offshore wind turbine using centrifuge model test[J]. *Wind Energy*, 2021, 24(5): 515–529.
- [13] HOULSBY G T, KELLY R B, HUXTABLE J, et al. Field trials of suction caissons in clay for offshore wind turbine foundations [J]. *Géotechnique*, 2005, 55(4): 287–296.
- [14] KIM S R, HUANG L C, OH M. Group effect on bearing capacities of tripod bucket foundations in undrained clay[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 79: 1–9.
- [15] 刘树杰, 王忠涛, 栾茂田. 单向荷载作用下海上风机多桶基础承载特性数值分析[J]. *海洋工程*, 2010, 28(1): 31–35.
- [16] OCHMAŃSKI M, MAŠÍN D, DUQUE J, et al. Performance of tripod foundations for offshore wind turbines: a numerical study[J]. *Géotechnique Letters*, 2021, 11(3): 230–238.
- [17] 程星磊, 王建华. 考虑循环软化特性的饱和软土弹塑性本构关系研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(3): 786–794.
- [18] 程星磊. 软土不排水循环弹塑性本构关系及其在海洋锚固基础变形分析中的应用[D]. 天津: 天津大学, 2016.