

饱和砂土地基中吸力式桶形基础水平承载力研究

金书成¹, 张永涛¹, 杨炎华¹, 黎 冰²

(1. 中交第二航务工程局有限公司 技术中心, 武汉 430040; 2. 东南大学 土木工程学院, 南京 210096)

摘 要: 吸力式桶形基础不仅承受着上部结构及自身所引起的竖向荷载, 还受到波浪、海流、海风等引起的水平荷载作用, 在高纬度海域冬季还可能受到海冰的长时间挤压作用。利用三维有限元模型, 研究饱和排水砂土条件下吸力式桶形基础的水平极限承载力和失稳模式, 分析缓慢施加水平荷载时吸力式桶形基础失稳破坏机制, 探讨不同长径比的桶形基础承载性能, 研究桶体内外壁土压力分布情况和转动轴位置, 并根据极限平衡解法, 推导出饱和砂土地基桶形基础水平极限承载力计算公式。研究结果可为砂土地基条件下的吸力式桶形基础的设计提供参考。

关 键 词: 吸力式桶形基础; 饱和砂土地基; 水平极限承载力; 失稳模式; 极限平衡解法

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Research on horizontal ultimate bearing capacity of suction bucket foundation in saturated sand ground

JIN Shu-cheng¹, ZHANG Yong-tao¹, YANG Yan-hua¹, LI Bing²

(1. Technology Center, CCCC Second Harbour Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: During working process, suction bucket foundation is not only subjected to the action of vertical load induced by the weights of fan and equipment, but also imposed by lateral loads caused by wind, wave, and current. In the case of high-latitude waters, the suction bucket foundation structures may also suffered by long-term ice pressure. To this end, by using three-dimensional finite element model, this paper researches on the horizontal ultimate bearing capacity and instability mode of suction bucket foundation under the saturated drainage sand conditions, analyzes the suction bucket foundation failure mechanism when horizontal loading slowly, discusses the bucket foundation bearing performance under different length-diameter ratios; and the earth pressure distribution and the rotation axis position of bucket inner and outer are studied. Furthermore, based on the limit equilibrium method, a formula of ultimate horizontal bearing capacity for the suction bucket under saturated drainage sand conditions is deduced. The study results can provide the reference and basis for the design of suction bucket foundation in sand ground.

Key words: suction bucket foundation; saturated sand ground; horizontal ultimate bearing capacity; instability mode; limit equilibrium method

1 前 言

吸力式桶形基础作为一种新型基础形式, 已广泛应用于海上石油钻井平台基础和深海锚式基础, 海上风电场相比于传统的基础形式, 具有节省用钢量、减少建设费用、加快施工速度、降低勘察费用等优点^[1], 近年来吸力式桶形基础在海上风电项目中多有应用, 2002年10月丹麦在腓特烈港安装了吸力式桶形基础的3 MW 海上风机, 见图1(a), 2009

年3月又成功为Horns Rev2风电场的一个海上测风塔安装了吸力式桶形基础, 见图1(b)^[2]。

吸力式桶形基础风电塔结构, 不仅受到上部平台结构自重及其设备所引起的竖向荷载的长期作用, 而且还承受风、波浪、潮流、冰等所引起的水平荷载、力矩荷载的共同作用, 其中水平荷载的承受能力对于桶型基础的稳定性尤为重要。在吸力式桶形基础工作机制和承载特性研究方面, 墨西哥湾以黏土地基为主, 美国 and 墨西哥等国家的研究者主

要针对黏土基础而开展的。近年来我国的科研人员也针对软黏土地基中吸力式桶基础水平承载特性和破坏模式进行了大量研究,取得了一系列成果^[3-7]。在砂土地基方面,由于桶形基础应用的先例Europipe16-11平台和SleipnerT平台所处的欧洲北海地区均是中密和致密砂地质,现有的研究也多是针对这类砂土的,在实验室中进行的试验大部分均在干砂中进行,与实际情况存在很大差别^[8]。现场试验所施加的多是作用时间短、频率高的荷载,即试验中认为土体不排水与高纬度海域吸力式桶形基础风机可能受到冰荷载的长期挤压作用不符。为此,本文以高纬度海域桶形基础海上风机为背景,利用大型通用有限元软件ABAQUS,建立了饱和砂土排水条件下的吸力式桶形基础三维有限元分析模型,模拟桶形基础海上风电机组缓慢加载下的水平承载能力,分析桶形基础工作机制和破坏模式。



(a) 腓特烈港风机基础 (b) Horns Rev2 风电场桶基

图1 吸力式桶形基础在风电机组中的应用

Fig.1 Application of suction bucket foundation in off shore wind farm

2 数值分析

2.1 有限元模型

为了研究饱和排水砂土海床上吸力式桶形基础的水平承载特性,取清华大学离心机试验土体为原型^[9-11],本文采用有限元模型如图2所示。土体为理想弹塑性材料,服从Mohr-Coulomb屈服准则,除顶部自由外,其他土面均采用法向固定约束,考虑到桶形基础桶盖大多采取了加强措施,本文假定桶盖刚性^[12]。采用ABAQUS摩擦接触对模拟桶壁与桶内外土体之间的接触,桶土间接触面的摩擦系数取为0.2,地基土的计算范围水平方向上取为桶径的10倍,竖向取10倍桶高,根据相关研究这样的区域范围基本上可以消除边界效应对计算结果的影响^[5-6]。桶体为普通钢材,弹性模量和泊松比分别取为210 GPa和0.3,并用实体单元划分土体和桶体。

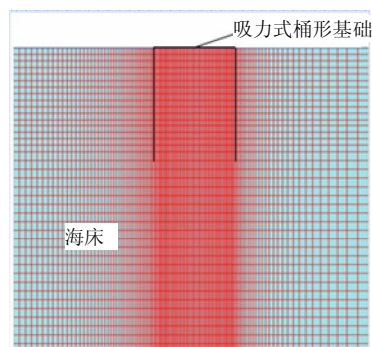


图2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

2.2 加载模式

为了更有效地计算单调水平加载条件下饱和砂土地基中的吸力式桶形基础的水平承载力,使模拟过程尽可能接近实际,本次采用位移控制法来施加水平荷载^[5],不考虑偏心水平荷载作用,逐步施加位移,其作用点在桶体轴线顶部桶盖中心处。为了模拟水平荷载长时间作用,水平位移缓慢施加。根据清华大学离心机试验结果,静态加载试验中超静孔隙水压力没有明显的累积,所以本文计算模型中也不考虑孔隙水压力的影响^[9-10],故采用纯静力分析,分析中采用有效应力参数。

考虑到水平荷载作用下海上风电机组的地基破坏形式主要是一种整体结构的失稳,因此,确定水平位移量达到 $0.05D$ (D 为桶体直径)时所对应的水平荷载,确定为饱和砂土地上吸力式桶形基础的水平承载力^[5-6]。

3 计算结果分析

3.1 水平荷载作用下吸力式桶形基础失稳模式研究

本次分析水平荷载作用下吸力式桶形基础结构的承载特性,采用位移控制分析法,在桶盖中心处缓慢逐步施加水平位移。计算桶体直径 D 均取为0.5 m,分别分析桶体长径比 L/D 为1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、5.0、6.0的吸力式桶形基础在水平荷载下的失效模式,得到各长径比桶形基础极限状态的位移云图如图3所示。从图可见,当 $L/D=1$ 时,桶体绕底面某位置发生倾覆,同时伴随部分整体水平滑移,桶体前侧土体均呈被动破坏,而桶体后侧与土体分离;当 $L/D=1.5$ 时,桶内靠近底面形成土体转动中心,随着 L/D 的增加,桶形基础的失稳模式均为前倾转动破坏。沿着水平荷载作用方向桶体前侧压缩土体,使得前部上侧土体呈现被动破坏,转动中心以下土体则

发生主动破坏。由于采用的是砂土模型,黏聚力很小,在水平荷载作用下,随着桶基旋转,在桶体后侧的上部桶壁与土体之间出现分离,且随着长径比增加,后侧裂缝导致桶土分离深度增加,桶后形成主动侧破坏楔体,主动侧土体与桶基脱离后发生下陷。此外,土体后面下部土体,在转动中心以下部分形成了被动破坏区域。

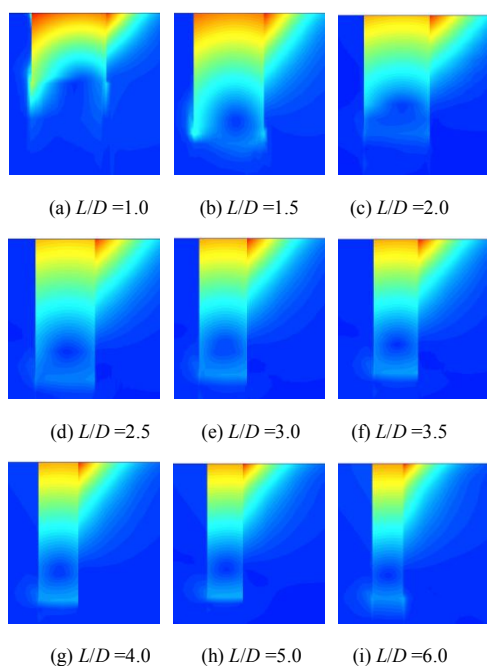


图3 基础位移云图

Fig.3 Displacement nephogram of bucket foundation

3.2 转动中心位置分析

由章节3.1的分析可见,水平荷载作用下饱和砂土中的桶形基础是绕着泥面以下、桶底以上的某一位置发生转动而失稳的,桶体前侧土体被挤压隆起形成被动侧破坏区,而桶体后侧与土体分离,裂缝深度接近于转动中心,这与软土中桶形基础的研究结果是一致的^[5-6]。此外也发现,转动中心与桶体的长径比有关。图4为水平荷载作用下不同长径比的桶形基础水平位移与埋深关系曲线。由图可见, L/D 较小时,随着 L/D 增加桶形基础的转动中心位置相对上升,但 $L/D > 2$ 后转动中心位置与桶体埋深比 Z_0/Z 稳定在0.80左右。

3.3 水平荷载作用下桶体内壁土压力分布

(1) 桶体内壁土压力沿桶体埋深分布

参照章节3.2分析内容,结合水平荷载作用下桶体失效模式的研究结论,分别取 L/D 为1.0、1.5、4.5、5.0的吸力式桶形基础来考察桶体内壁土压力的分布情况。将桶-土接触面上的法向压力作为地基

土作用在桶体内壁上的土压力,考察桶体内壁上土压力的分布规律,同时进一步分析饱和砂土地基上吸力式桶形基础结构的失稳机制。图5为各桶体内壁土压力分布情况。

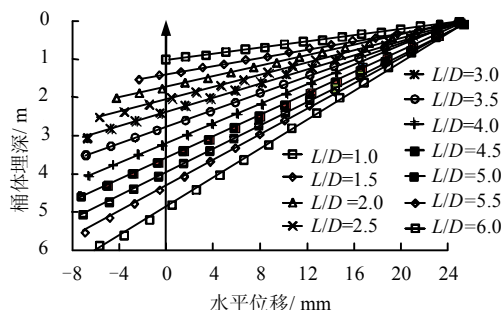


图4 不同长径比桶体水平位移与埋深曲线

Fig.4 Curves of horizontal displacements and buried depths with different length-diameter ratios

图5为桶形基础桶体内壁土压力分布。从图5(a)、5(b)可以看出,桶体外壁前侧土压力随着桶体埋深先增大后减小,呈近似抛物线型分布,这与桶体在水平荷载作用下绕泥面下转动中心倾覆的失稳模式相符。桶体外壁后侧土压力在埋深浅区间很小,以后迅速增大,是由于桶体在水平荷载作用下后侧外壁与地基土上部接触区产生裂缝,下部接触区的后侧外壁土压力从主动土压力向被动土压力转变的所致。此外,桶体内壁中上部的土压力沿着桶体高度基本上按照线性分布,但在转动中心位置以下桶体内壁的前侧土压力迅速增大,这是由于桶形基础在水平荷载作用下发生转动失稳时桶体底部前侧附近的土体挤入桶内的原因。后侧土压力在接近桶底时出现了明显的降低,可能是由于水平荷载作用下桶内土体在底部存在漏出,这种现象在砂土地基将更为明显。由图5(c)和5(d)可以看出,与小长径比桶体相比,其桶体外侧前部土压力也近似呈抛物线形式分布,但极值点接近转动中心 Z_0 的1/2处,在转动中心以下的桶体外侧前部土压力较小,是由于在转动中心以下桶体外壁前侧土压力从被动土压力转为主动土压力的原因,这种转变进而也可以解释桶体外壁后侧土压力在转动中心以下部分迅速增大的现象。

(2) 桶体内壁土压力沿桶周分布

考虑到长径比对吸力式桶形基础水平荷载作用下破坏模式的影响,仍以 L/D 分别为1.0、1.5、4.5、5.0的吸力式桶形基础为例,分析桶体内壁土压力沿桶周的分布情况。如图6所示,取桶体前侧泥面

下转动中心 Z_0 的1/2处为剖面,得到桶体前侧外壁土压力,以桶体后侧桶底外壁土压力为例得到后侧土压力沿桶周分布情况。

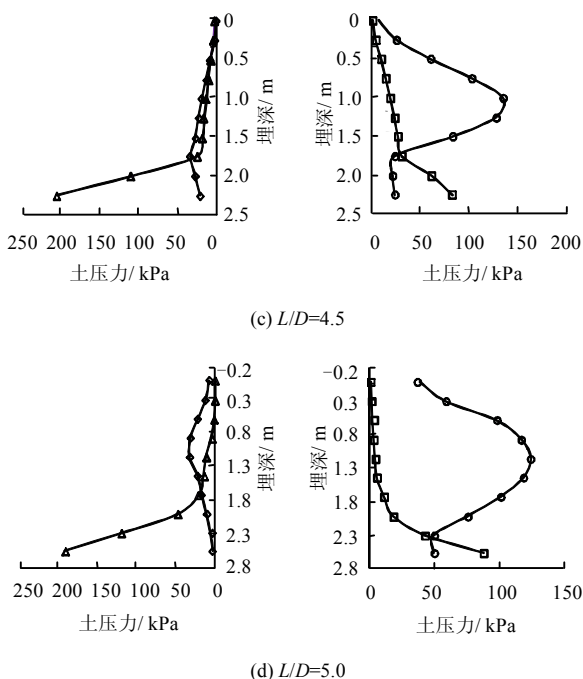
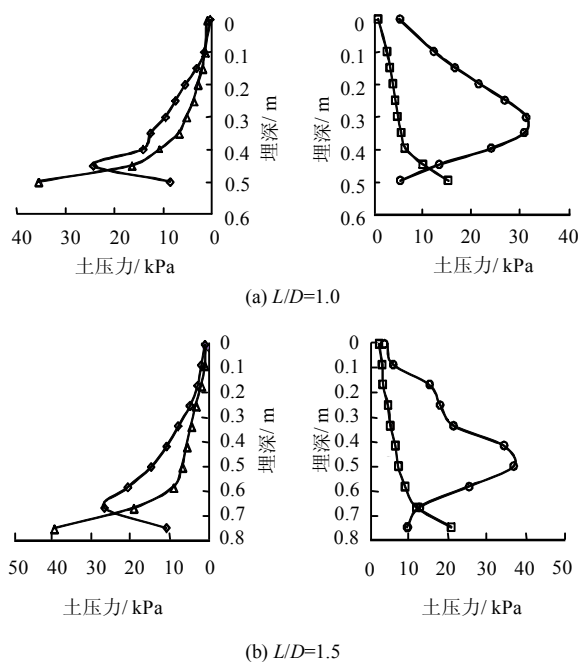


图 5 桶形基础桶体内外壁土压力分布

Fig.5 Earth pressure distribution on the surface of the bucket foundation

从图 6 可见,桶形基础前侧和后侧的土压力沿桶周从垂直荷载 P 方向到平行荷载 P 方向迅速增大,均呈近似呈抛物线形式分布,也符合温克尔假定。

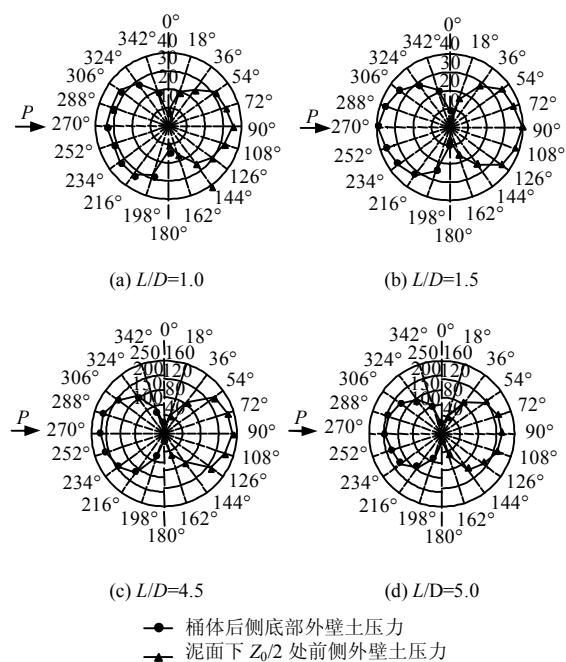


图 6 桶形基础桶体外壁土压力沿桶周分布(单位: kPa)
Fig.6 Earth pressure distribution on the inner surface of the cylinder of bucket foundation(unit: kPa)

综上,相比于黏性土地基的桶形基础,本文建立的饱和砂土地基条件下的桶形基础破坏性形式有以下特点:(1)荷载作用方向桶后土体形成主动侧破坏楔体,且主动侧土体与桶基脱离后发生部分塌陷;(2)长径比较小时,桶体绕底面某位置发生倾覆,同时伴随整体水平移动。随着长径比的增加,桶形基础则发生前倾转动破坏;(3)饱和砂土地基中,水平荷载作用下吸力式桶形基础靠近主动破坏区土体的端部土体有从桶内漏出现象。

3.4 桶形基础水平承载力极限平衡解法

桶形基础水平承载力极限平衡解法是假定土对桶基的反力分布,根据力的平衡建立反力与外荷载之间的关系。目前关于吸力式桶形基础的破坏模式尚未形成共识,根据前人研究结论和本文的分析结果,吸力式桶形基础的破坏模式与桶体尺寸、荷载形式及土体性质有关^[11,13-15]。本文根据砂土地基桶形基础土体变形机制,建立不同区域的土压力计算方法。

桶形基础水平承载力极限平衡解法最重要的是破坏模式的合理假定,根据章节3.3分析结果对计算模型进行合理的简化,再根据力的平衡建立反力与荷载之间的关系。

根据不同长径比的桶形基础失稳模式研究结果,本文认为饱和砂土地基中吸力式桶形基础达到

水平极限承载状态时应根据不同长径比桶形基础不同的破坏模式来选择合适的计算模型。

如图 7 所示, 以桶盖中心为原点 O , 垂直纸面向内为 Y 轴正向, 定义图中坐标系, z_0 为桶体转动中心深度; P 为水平荷载; T_1 、 T_2 分别为桶体前后外壁竖向摩擦力, 其余参数详见下面公式推导过程。当 $L/D < 2.0$ 时, 假设单桶形基础在水平荷载作用下围绕其轴线上桶底中心发生转动, 根据前面分析因主动楔体坍塌, 因此桶体后侧外壁抗力和摩擦力不可忽略。选择图 7(a) 的计算模型; 当 $L/D \geq 2.0$ 时, 桶体转动中心位置位于桶体轴线上 $0.8L$ 处, 选择图 7(b) 的计算模型。本文考虑了 L/D 对桶形基础失稳模式的影响, 根据以转动中心位置为分界线的上下部土压力分布形式建立了不同的简化计算模式, 考虑作用于桶体外表面和基础底面上的摩擦力作用对水平承载力所产生的影响, 使得单桶形基础的受力状态更加符合工程中的实际情况, 为下一步推导吸力式桶形基础的水平荷载计算公式做准备。

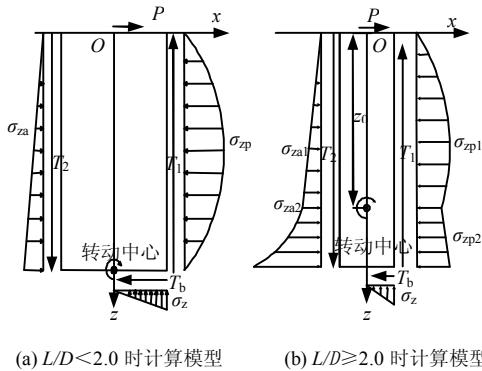


图 7 水平荷载极限平衡受力状态

Fig.7 The calculation model for the limit equilibrium state of suction bucket foundation

由于极限平衡法属于一种近似求解方法, 故其成立的条件应以一系列合理的假定为前提。本文在计算中所遵循的基本假定:

- (1) 桶体与桶内土体视为一个刚性整体。
- (2) 桶体后侧主动区土体在水平荷载作用下转动中心以上部分完成达到主动破坏。
- (3) 忽略桶体的桶壁端阻力作用。
- (4) 考虑到前面关于桶体水平荷载作用下基底靠近主动区的端部土体出现了漏砂现象, 故不考虑这部分土体抗力和摩擦力。

(5) 作用于外侧桶壁上的水平土体抗力服从 Winkler 假定。

(6) 作用于外侧桶壁上的竖向土体摩擦力与该处径向水平土体压力成正比, 即在深度 z 处, 竖向

剪应力为

$$t_z = f \sigma_r \quad (1)$$

式中: f 桶土之间的摩擦系数, 由桶壁材料与土的直剪试验确定。

(7) 作用于基底表面上的竖向土体抗力同样服从 Winkler 假定, 其形式为

$$\sigma_z = -k_v x \omega \quad (2)$$

式中: k_v 为竖向地基系数; ω 为桶体在水平荷载作用下的转动角。

(8) 参照文献[16—17], 假设桶底面受到的地基水平切力与桶底水平位移成正比, 总切向力 T_b 的极限值为结构与地基间的摩擦力。

基于以上假设, 按照图 7 的水平荷载极限平衡受力状态可得砂土地基不同长径比的桶形基础转动中心位置和水平承载力计算公式。

当 $L/D < 2.0$ 时, 定义以原点 O 为起点以桶体外壁任意计算点为终点的矢量, 其在 XOY 平面上的投影与 X 轴正向夹角为 θ , 则 XOZ 平面内 (即 $\theta=0$ 时), 桶体前侧径向土体水平抗力沿桶高呈抛物线型分布, 其形式为

$$\sigma_{x0} = k_h (z - z_0) \omega \quad (3)$$

式中: k_h 为水平向地基系数, 可根据“m”法确定, 即 $k_h = mz$ 。

在 XOY 平面内, 土体的径向水平抗力沿桶周呈三角函数分布, 其形式为

$$\sigma_r = \sigma_{x0} \cos \theta \quad (4)$$

土体径向水平抗力沿 x 轴方向的分量为

$$\sigma_{zp} = \sigma_r \cos \theta = \sigma_{x0} \cos^2 \theta \quad (5)$$

将式(5)代入式(3), 可得任意深度处土体的 x 向水平抗力为

$$\sigma_{zp} = \omega m z (z - L) \cos^2 \theta \quad (6)$$

桶体后侧主动区土体抗力为

$$\sigma_{za} = k_a \gamma' z \quad (7)$$

式中: k_a 为郎肯主动土压力系数; γ' 土体饱和重度。

根据以上假设, 推导可得

$$\left. \begin{aligned} z_0 &= L; \omega = 3k_a f \gamma' L^2 / (2k_v R^2 + f m L^3) \\ P &= \frac{4D \omega m L^3 (\pi L + 8Df) + 16Dk_a \gamma' L^2 (3Df - 2\pi L) + 3k_v \omega \pi D^4}{384L} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: z_0 为转动中心距泥面距离; k_a 为郎肯主动土压力系数, 其他符号意义同前。

当 $L/D \geq 2.0$ 时, 在 XOZ 平面内, $\theta=0$ 处, 桶体前侧径向土体水平抗力沿桶高在转动轴以上呈抛

物线型分布, 转动轴以下呈线性分布, 如图 7(b)所示, 其形式为

$$\sigma_{x0} = \begin{cases} k_0 \gamma' z + k_h (z_0 - z) \omega, & (z \leq z_0) \\ k_0 \gamma' z, & (z > z_0) \end{cases} \quad (9)$$

式中: k_0 为土体的静止侧压力系数。

在 XOY 平面内, 土体的径向水平抗力沿桶周呈三角函数分布, 其形式为

$$\sigma_r = \sigma_{x0} \cos \theta \quad (10)$$

土体径向水平抗力沿 x 轴方向的分量为

$$\sigma_{xp} = \sigma_r \cos \theta = \sigma_{x0} \cos^2 \theta \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (9), 可得任意深度处土体的 x 向水平抗力:

$$\sigma_{xp1} = [k_0 \gamma' z + k_h (z_0 - z) \omega] \cos^2 \theta, \quad (z \leq z_0) \\ \sigma_{xp2} = k_0 \gamma' z \cos^2 \theta, \quad (z > z_0) \quad (12)$$

桶体后侧主动区土体抗力为

$$\sigma_{x0} = \begin{cases} k_a \gamma' z, & (z \leq z_0) \\ k_a \gamma' z + k_h (z - z_0) \omega, & (z > z_0) \end{cases} \quad (13)$$

任意深度处土体的 x 向水平抗力为

$$\sigma_{xa1} = k_a \gamma' z \cos^2 \theta, \quad (z \leq z_0) \\ \sigma_{xa2} = [k_a \gamma' z + k_h (z - z_0) \omega] \cos^2 \theta, \quad (z > z_0) \quad (14)$$

根据以上分析, 进行公式推导可得

$$\left. \begin{aligned} z_0 &= \frac{4L}{5}; \quad \omega = \frac{15f\gamma'L^2(k_a - k_0)}{10k_v R^2 + 2f m L^3} \\ P &= D\gamma'L \left[\frac{\pi L(121k_0 - 25k_a) + 375Df(k_0 + k_a)}{1500} \right] + \\ &\quad \frac{k_v \omega \pi D^4}{128L} + DmL^2 \left(\frac{289\pi \omega L + 780\omega f - 150\pi Df}{7500} \right) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

限于篇幅, 公式具体的推导过程本文不再赘述。相比于现有研究, 本文针对饱和砂土地基桶形破坏模式, 考虑了长径比对失稳模式的影响, 根据以转动中心位置为分界线的上下部土压力分布形式建立了不同的简化计算模式, 并考虑了作用于桶体外表面和基础底面上的摩擦力作用对水平承载力所产生的影响, 计算模型更接近实际工程, 所得到的公式便于工程应用。

4 结 语

针对水平荷载作用下吸力式桶形基础承载力特性的研究目前尚缺乏被广泛认可的理论体系与计算规范和水平加载模式下桶形基础的变形机制及其承载力特性, 开展系统而深入的理论分析与数值计

算。本文研究了饱和砂土地基桶形基础水平荷载作用下基础转动中心位置变化趋势, 得到了不同长径比桶形基础的失稳模式, 并进一步研究了桶形基础内外壁的土压力分布情况。根据桶体土压力分布情况, 利用极限平衡法推导了适用于饱和砂土地基的桶形基础水平承载力计算公式。

随着海上风电产业的发展, 研究不同地质条件下的桶形基础受力模式, 发展可应用于实际工程的桶形基础计算方法都还需要做大量的工作。本文的研究是建立在数值分析基础上的, 所得结论还需进一步验证。

参 考 文 献

- [1] IBSEN L B, SCHAKENDA B, NIELSEN S A. Development of the bucket foundation for offshore wind turbines[M]. Hannover: [s.n.], 2004.
- [2] CHRISTIAN L B, KIM A, NIELSEN S A. The monopod bucket foundation recent experience and challenges ahead[C]//European Offshore Wind Conference & Exhibition. Stockholm: [s.n.], 2009.
- [3] 范庆来. 软土地基上深埋式大圆筒结构稳定性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [4] 李驰. 软土地基桶形基础循环承载力研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [5] 武科. 滩海吸力式桶形基础承载力特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [6] 孙曦源. 水平荷载作用下软土地基中桶形基础工作机理及承载性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [7] 张金来, 鲁晓兵, 王淑云, 等. 桶形基础极限承载力特性研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2005, 24(7): 1169—1172.
- [8] ZHANG Jin-lai, LU Xiao-bing, WANG Shu-yun, et al. The characteristics of the bearing capacity of bucket foundation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(7): 1169—1172.
- [9] 鲁晓兵, 郑哲敏, 张金来. 海洋平台吸力式基础的研究与进展[J]. 力学进展, 2003, 33(1): 27—40.
- [10] LU Xiao-bing, ZHANG Zhe-min, ZHANG Jin-lai. Progress in the study on the bucket foundations of offshore platform[J]. *Advances in Mechanics*, 2003, 33(1): 27—40.
- [9] 李凤. 吸力式基础三维极限分析研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.
- [10] 林小静. 吸力式基础承载特性的离心模型试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.

- [11] 施晓春, 徐日庆, 龚晓南, 等. 桶形基础单桶水平承载力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 723—726.
SHI Xiao-chun, XU Ri-qing, GONG Xiao-nan, et al. Experimental study on horizontal bearing capacity of single bucket foundation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(6): 723—726.
- [12] FAN Qing-lai, LUAN Mao-tian, YANG Qing. Three dimensional nonlinear finite element analyses for horizontal bearing capacity of deeply-embedded large-diameter cylindrical structure on soft ground[C]// Proceedings of the 4th Interactional Conference on soft soil Engineering. London: Taylor & Francis Group, 2006: 521—530.
- [13] 刘振纹, 王建华, 秦崇仁, 等. 负压桶形基础地基水平承载力研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 691—95.
LIU Zhen-wen, WANG Jian-hua, QIN Chong-ren, et al. Research on the horizontal bearing capacity of bucket foundations[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(6): 691—95.
- [14] 孙大鹏, 袁中立, 朱其敏. 滩海平台桶型基础模型承载力试验研究[J]. 石油工程建设, 1999, 25(2): 12—18.
SUN Da-peng, YUAN Zhong-li, ZHU Qi-min. Experimental research on the bearing capacity of bucket foundation in beach-shallow sea[J]. **Petroleum Engineering Construction**, 1999, 25(2): 12—18.
- [15] 竺存宏, 使用极限状态大圆筒土压力计算方法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 313—318
ZHU Cun-hong. Computation of earth pressure on large diameter cylinder under service ultimate state[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(3): 313—318.
- [16] 祝振宇, 闫乃凌. 考虑土体剪切作用下桶形基础水平承载力研究[J]. 港工技术, 2005, 12(4): 43—45
ZHU Zhen-yu, YAN Nai-ling. Research on the horizontal bearing capacity of bucket foundations under the soil shearing effect[J]. **Port Engineering Technology**, 2005, 12(4): 43—45.
- [17] 王元战, 迟丽华. 沉入式大直径圆筒挡墙变位计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 41—46
WANG Yuan-zhan, CHI Li-hua. Study on calculating approach to displacements of large-diameter cylindrical wall[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(2): 41—46.

上接第 191 页

- [12] 李桂荣, 余成学, 陈胜宏. 层状岩体边坡的弯曲变形破坏试验及有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(4): 305—311.
LI Gui-rong, SHE Cheng-xue, CHEN sheng-hong. Curved deformation damage test and fem analysis of slope with layered rockmass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(4): 305—311.
- [13] 刘俊, 陈胜宏. 节理岩体三维偶应力弹性理论[J]. 岩土力学, 1995, 16(4): 20—29.
LIU Jun, CHEN Sheng-hong. Three-dimensional elastic couple stress theory of jointed rockmass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1995, 16(4): 20—29.
- [14] 刘俊, 黄铭, 葛修润, 等. 层状岩体开挖的空间弹性偶应力理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 276—280.
LIU Jun, HUANG Ming, GE Xiu-run, et al. Analysis on layered rockmass excavating with spatial elastic couple stress theory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(3): 276—280.
- [15] 杨乐, 吴德伦, 许年春. 偶应力理论的层状岩体洞室数值模拟[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(3): 73—77.
YANG Le, WU De-lun, XU Nian-chun. A Cosserat theory-based numerical simulation of an underground cavern in layered rockmass[J]. **Journal of Chongqing Jianzhu University**, 2008, 30(3): 73—77.
- [16] 王启耀, 赵法锁. 考虑偶应力的层状岩体地下洞室开挖模拟[J]. 西安科技大学学报, 2006, 26(1): 31—35.
WANG Qi-yao, ZHAO Fa-suo. Numerical simulation of excavating openings in layered rockmass considering the couple stress[J]. **Journal of Xi'an University of Science and Technology**, 2006, 26(1): 31—35.
- [17] 张培胜, 阴可. 拉力型锚杆锚固段传力机理的全过程分析方法[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(4): 714—723.
ZHANG Pei-sheng, YIN Ke. An analysis method of the whole working course for the force transferring mechanism in fixed segment of tensile-type anchor bar[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2009, 5(4): 714—723.