文章编号:1674-2869(2024)06-0687-07

施工平台吸力桶基础沉贯阻力影响因素分析

张 鑫[1],李元松*[1],李昭宪[1],侯 瑛[1],叶绍其[2]
1. 武汉工程大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430074;
2. 中铁大桥局集团第五工程有限公司,江西 九江 332001

摘 要:为了探究影响导向架平台吸力桶基础沉贯阻力的因素,以广东某近海风机基础工程为背景,通过数值模拟的方法,对土体力学性质参数和桶体结构参数进行分析研究。结果表明:内摩擦角(φ)对贯入阻力影响最大,φ从16°增至28°时,总阻力值增加4 800 kN;黏聚力(c)的影响次之,c从20 kPa增至80 kPa时,总阻力值增加2 500 kN;长径比与厚径比对沉贯阻力有影响,总体上呈现出随着长径比和厚径比的增大而增大的趋势。在贯入2 m左右时,阻力值不受长径比的变化而变化。在厚径比(t/D)取值在0.006~0.036、0.042~0.048范围时,阻力值没有显著的改变。在整个贯入过程中未见连通地面的塑性贯通区,桶体在土体中沉贯是以局部剪切破坏为主,侧摩阻力在贯入中后期处于主导地位。

关键词:导向架平台;吸力桶基础;沉贯阻力;数值模拟
中图分类号:TU473;TM614 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202206021

Factors affecting the penetration resistance of suction bucket foundation of construction platform

ZHANG Xin[1], *LI Yuansong*[*1], *LI Zhaoxian*[1], *HOU Ying*[1], *YE Shaoqi*[2]
1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. The 5th Engineering Co., Ltd, China Raiway Major Bridge Engineering Group Co., Ltd, Jiujiang 332001, China

Abstract: In order to investigate the factors affecting the sinking penetration resistance of the suction bucket foundation of the guided frame platform, the mechanical property parameters of the soil and the structural parameters of the bucket were analyzed and studied by numerical simulation with the background of an offshore wind turbine foundation project in Guangdong. The results show that the angle of internal friction (φ) has the most significant influence on the penetration resistance, and when its value increases from 16° to 28°, the total resistance increases by 4 800 kN; the cohesive force (c) has the second most significant influence, and when its value increases from 20 kPa to 80 kPa, the total resistance increases by 2 500 kN; the length-to-diameter ratio and the thickness-to-diameter ratio have an influence on the penetration resistance, and in general, they show a tendency to increase with the increase in the length-to-diameter ratio and thickness-to-diameter ratio. The overall pemetration resistance increases with the increase in the L/D ratio and the thickness-to-diameter ratio. At about 2 m penetration, the penetration resistance was not changed by the change of the L/D ratio. The penetration resistance did not change significantly when the thickness-to-diameter ratio (t/D) was in the range of 0.006−0.036 and 0.042−0.048. The plastic penetration zone connecting the ground was not seen during the penetration process, the barrel sinking penetration in the soil was dominated by local shear damage, and the lateral friction resistance was dominant in the middle and late stages of the penetration.

Keywords: guided frame platform; suction bucket foundation; penetration resistance; numerical simulation

收稿日期:2022-06-14
基金项目:武汉工程大学第十三届研究生教育创新基金(CX2021131)
作者简介:张 鑫,硕士研究生。Email:842382180@qq.com
***通信作者**:李元松,博士,教授。Email:li_yuan_song@126.com
引文格式:张鑫,李元松,李昭宪,等. 施工平台吸力桶基础沉贯阻力影响因素分析[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(6):687-693.

“海上风电导向架平台吸力桶基础”是海上风电基础施工中采用的新型施工方法，吸力桶基础施工时间短、可重复利用，极具应用前景[1-3]。

吸力桶基础施工作为风电场建设的关键工序，基础负压沉贯过程中涉及沉贯阻力、土塞、渗流等多方面，国内外学者在理论、试验、数值模拟等方面做了一系列研究[4-6]。马文冠等[7]在粉土中进行桶体贯入试验，提出土体强度指标黏聚力(c)、内摩擦角(φ)值计算粉土贯入阻力方法，通过试验探讨公式中系数的取值。丁红岩等[8]在粉质黏土中开展了大比尺模型试验，对比理论公式预测负压，确定沉贯阻力计算公式中摩擦系数为0.3。Houlsby等[9]通过受力分析，建立负压作用下黏土和砂土中桶形基础的沉贯解析公式。周密等[10]采用(coupled eulerian-lagrangian，CEL)有限元方法模拟吸力锚贯入饱和黏土过程，得出贯入深度、黏土抗剪强度以及应变软化参数等因素对沉贯阻力的影响。由于影响桶基础沉贯阻力因素众多，目前仍缺乏针对桶体结构参数、土体力学性质参数不同导致沉贯阻力变化的系统研究。

本文拟以广东某海上风电场风机基础工程为背景，利用ABAQUS有限元数值模拟，结合实测数据建模，开展不同土体力学性质参数及不同桶体结构参数对沉贯阻力的影响研究。研究结果为类似工程及类似地质条件的情况下的工程设计和施工提供参考[11]。

1 工程背景

1.1 项目概况

粤电阳江沙扒海上风电项目场址位于广东省阳江市阳西县沙扒镇附近海域，涉海面积大约48 km^2。场址水深范围23~27 m，中心离岸距离约20 km。项目规划装机容量为300 MW，拟布置6台单机容量5.5 MW的风电机组和42台单机容量为6.45 MW的风机机组，配套建设一座220 kV海上升压站和一座陆上运维基地。风机机组采用四桩非嵌岩导管架基础、三桩嵌岩导管架基础和吸力桶基础等三种形式。其中42台风机机组三桩或四桩导向架吸力桶基础平台进行施工。单个导向架平台布置4根φ5 000 mm×d30 mm吸力桶，4根吸力桶呈正方形布置，桩间距26.0 m，桩长6.5 m；吸力桶顶通过φ1 500 mm×d18 mm钢管立柱与上部作业平台连接。

1.2 工程地质及水文地质条件

地形地貌。项目区域内，水深变化较平缓，海底标高−24.2~−27.1 m之间变化，整体从北西向南东方向水深逐渐加深。海底地形较平坦，坡度基本小于0.5°。

地层岩性。风电场覆盖层按其成因类型分为：①全新统海相沉积层(Q_4^m)；②全新统海陆过渡相沉积层(Q_4^{m+al})；③第四系残积黏性土层(Q^{el})；④下伏基岩为中生代晚白垩系泥质砂岩；⑤砂岩和⑥古生代寒武纪花岗片麻岩。

1.3 吸力桶计算参数

桶体参数：桶体外径D=5.0 m，桶壁厚t=0.03 m，桶长L=6.5 m，桶体自重498.48 kN，水下自重按410.55 kN计。弹性模量E=210 000 MPa，泊松比v=0.3。

2 有限元分析

2.1 有限元模型

本文中，利用Abaqus/Explicit[12]中的任意拉格朗日-欧拉(arbitrary Lagrangian-Eulerian，ALE)法对模型进行模拟计算。如图1(a，b)所示，桶的构造用拉格朗日体来表示，并在part模块中构建一

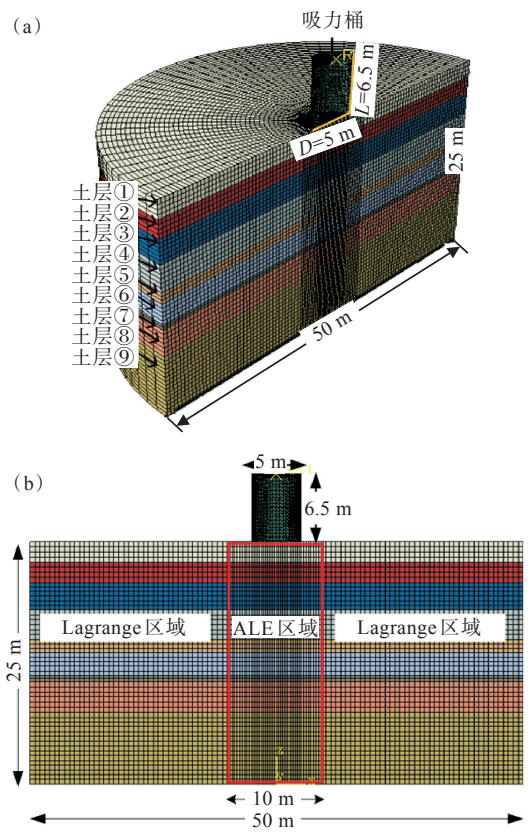

图1 吸力桶模型原理图：(a)吸力桶贯入有限元计算模型和边界条件，(b)截面A-A土层剖面

Fig. 1 Schematic diagram of suction barrel model: (a) suction bucket penetration finite element calculation model and boundary conditions, (b) soil profile at section A-A

个可变形立体，在相互作用模块中对桶体指定的基准点（reference plane）施加钢体约束，从而加快求解的速率，采用弹性本构模型，模型参数见表1。

吸力桶在沉贯时具有对称性，选取整体的1/2进行高效准确模拟，体尺寸与实际尺寸一致，即桶长L=6.5 m，桶体外径D=5.0 m，为消除边界效应以及网格密度对计算结果的影响，土体长度为10D，宽度和深度为5D；在桩-土接触面区域进行网格加密，加密网格尺寸建议取0.05D、加密网格范围建议取2D[13]，网格尺寸至中心向外逐渐增大。桩-土接触面附近区域的土体模型设置为ALE区域，有效解决桩-土接触周边区域的土体网格畸变问题。土体采用Mohr-Coulomb模型，其本构参数采用施工现场场地参数，详见表1。

表1　材料计算参数

Tab. 1　Material calculation parameter

材料	质量密度 ρ / (kg·m^{-3})	弹性模量 E / MPa	泊松比 ν	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / (°)	剪胀角 ψ / (°)	接触单元摩擦系数 μ
吸力桶	7 800	210 000.0	0.30	–	–	–	–
土层①	1 740	0.3	0.38	8	–	–	0.4
土层②	1 810	5.0	0.49	30	–	–	0.4
土层③	1 850	7.0	0.35	49	–	–	0.4
土层④	1 910	50.0	0.30	–	35	–	0.4
土层⑤	1 825	15.0	0.49	62	-	–	0.4
土层⑥	2 000	20.0	0.23	–	30	–	0.4
土层⑦	1 825	15.0	0.49	100	–	–	0.4
土层⑧	1 850	25.0	0.35	55	–	–	0.4
土层⑨	1 850	40.0	0.35	65	–	–	0.4

接触与边界条件：以库伦摩擦力法则为基础的一般接触算法[12]模拟桶土体的接触，其中包含切向行为和法向行为。切向行为的摩擦系数μ取值一般在0.10~0.42之间[14-16]，本文有限元模型摩擦系数取值μ=0.40；法向接触属性为硬接触[11]。土体模型侧向边界与对称面上的节点水平方向位移设置为0，底部边界节点位移完全固定。地表采用自由边界。

地应力平衡通过ODB文件导入法[17-18]，图2（a，b）给出地应力平衡后的应力场和初始位移场，位移量级在10^{-4} m以下，地应力平衡效果满足实际工程，地应力场呈层状均匀分布，并随深度逐渐增加，与实际情况相符。结果表明GEOSTATIC分析步后，其初始应力场可用于模拟天然地基应力。

2.2　模型验证

为了对本文有限元分析结果的准确性进行验证，数值模拟数据结合现场6个四桩导向架吸力桶基础的施工实测得到的桶体沉贯位移和沉贯阻力数据进行对比，数值模拟结果与现场实测结果基本一致，图3证明，有限元模拟可以合理反映实际情况，相关参数的取值和设置有效。

2.3　工况设定

研究影响导管架平台吸力桶基础的贯入沉贯阻力的因素，从单个吸力桶基础着手，研究不同强

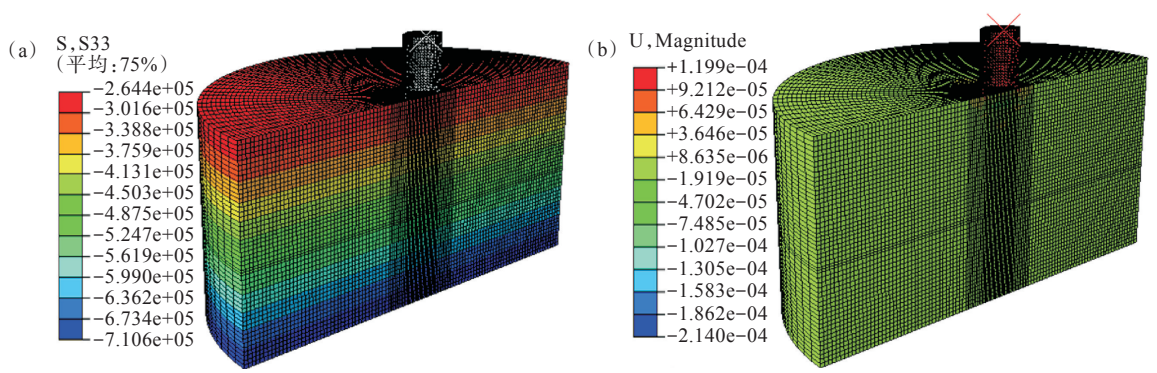

图2　地应力平衡应力位移云图：（a）吸力桶沉贯模型地应力平衡应力云图，（b）吸力桶沉贯模型地应力平衡位移云图

Fig. 2　Stress and displacement nephogram of in-situ stress balance: (a) suction bucket penetration model in-situ stress balance stress nephogram, (b) ground stress balanced displacement nephogram of suction bucket penetration model

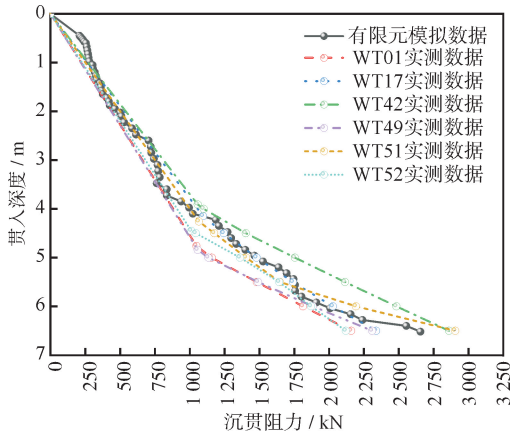

图3 模型验证

Fig. 3 Model verification

度参数及不同桶体结构参数对沉贯阻力的影响，具体工况如表2所示。

3 吸力桶贯入阻力影响因素分析

3.1 土体强度参数影响

3.1.1 黏聚力对沉贯阻力的影响 饱和黏土，内摩擦角近似为0，所以研究的重点是黏聚力。通过改变土体黏聚力值大小，对桶体沉贯过程中贯入阻力发展情况进行分析，由图4可得：(1)当黏聚力增大时，其总贯入阻力也随之增大，黏聚力 c 为20、40、60和80 kPa时，其总沉贯阻力为1 250、1 800、2 750、3 750 kN。每一阶段的增量与上阶段总阻力的比值为44.0%、53.0%、36.4%。结果表明，随着黏聚力的增大，总摩擦力的改变呈现先增大后降低的特点，但其整体的贯入摩擦力随黏聚力的增大而增大。(2)在沉贯过程中，黏聚力大的土层贯入同一深度所需外部压力更大，这体现出不同黏聚力的土质侧摩阻力之间的差异性。

3.1.2 内摩擦角对沉贯阻力的影响 对黏聚力几乎为0的无黏性土，着重研究土体中内摩擦角对桶基贯入特性的影响。由图5可得：(1)随着内摩擦角的改变，其对贯入阻力的影响较大，总体上表现为随着内摩擦角的增大而增大。内摩擦角 φ 分别为16°、20°、24°、28°时，桶体贯入阻力分别为6 200、8 900、10 700、11 000 kN。每一阶段的增量与上阶段总阻力的比值为43.5%、20.2%、0.028%。由此可见，当内摩擦角增大时，阻力增加速率变缓，即敏感度变小。但总体上，随着内摩擦角的增大，总阻力也随之增大。

在以上研究中，发现在对非黏性土内摩擦角影响沉贯阻分析过程中，只考虑了内摩擦角的影响，而忽略了砂性土的渗流效应。在砂土中，内摩擦角通常会随着土颗粒变细，而逐步地减小，摩擦角大的土层，贯入时需较大负压，甚至需另外施加

表2 计算工况

Tab. 2 Working condition computation

工况	吸力桶几何参数			土体力学性质参数		桶体结构参数	
	直径 / m	桶长 / m	壁厚 / m	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	长径比	厚径比
标准组	5	6.5	0.03			1.3	0.006
1	5	6.5	0.03	20/40/60/80		1.3	0.006
2	5	6.5	0.03		16/20/24/28	1.3	0.006
3	5	3.0/5.0/8.0/10.0/12.0/15.0	0.03			0.6/1.0/1.6/2.0/2.4/3.0	0.006
4	5	6.5	0.06/0.09/0.12/0.15/0.18/0.21/0.27			1.3	0.012/0.0180.024/0.030/0.036/0.042/0.048

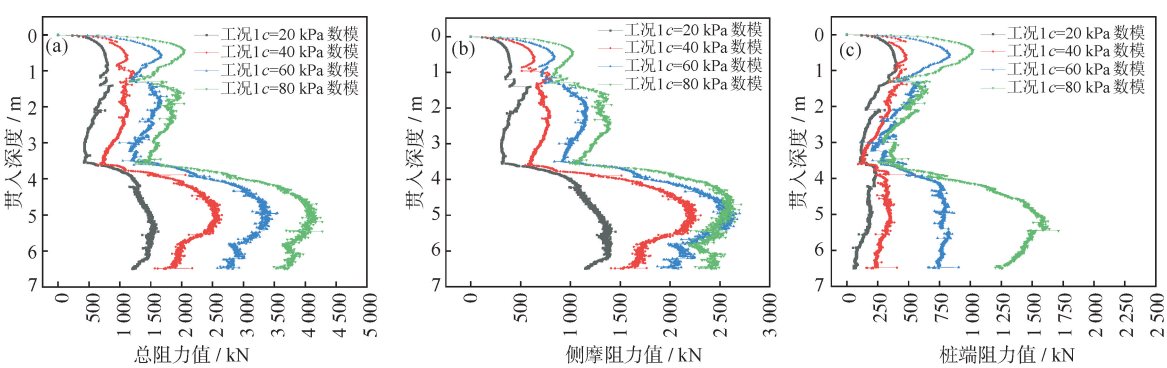

图4 不同黏聚力贯入阻力对比图：(a)总阻力，(b)侧摩阻力，(c)桩端阻力

Fig. 4 Contrast of penetration resistance of different cohesive forces: (a)total resistance, (b)side friction, (c)tip resistance

外部压力，为了模拟的方便，φ取值16°、20°、24°、28°。

3.2　桶体结构参数影响

3.2.1　长径比对沉贯阻力的影响　为了研究不同长径比对吸力桶贯入特性的影响，分别选取6种不同长径比的吸力桶进行计算分析，由图6可得：(1)长径比L/D分别为0.3，1.0，1.6，2.0，2.4，3.0时，总阻力值约为700，780，2 420，3 360，2 850，3 240 kN，当L/D为0.3~2.0范围时，阻力值随长径比成正相关关系，阻力值呈现出先减小再增大的趋势；(2)贯入2 m左右时，桶侧阻力与桶端阻力相近，其值大小不受长径比的改变而变化；(3)同等贯入深度下，随着长径比的增加，桶侧摩阻力降低；随着吸力桶进入土体较深，土体塑性损伤程度进一步增加，桶壁与土体间的相互摩擦作用降低，则侧摩阻力随之降低；(4)数值模拟结果中L/D=1.0、L/D=1.6与现场实测值吻合较好，其他工况均符合这一规律。

3.2.2　厚径比对沉贯阻力的影响　对不同厚径比对于吸力桶贯入特性的影响进行研究，对8种不同厚径比的吸力桶展开数值分析，由图7可得：(1)在吸力桶沉贯时，随着厚径比的增大，吸力桶在贯入过程中侧摩阻力、端阻力会不断地增加。当t/D从0.006增加到0.048时，总阻力可达至1 250、1 580、1 610、1 810、2 100、2 405、3 025、3 315 kN。每一阶段的增量与上阶段总阻力的比值为26.4%、0、12.4%、16.0%、14.5%、25.8%、9.6%。(2)当t/D的取值为0.006~0.036、0.042~0.048范围时，吸力桶厚径比的变化对贯入侧摩阻力、端阻力的影响较小，由于桶内挤土效应，导致贯入过程中，侧摩阻力的增加幅度小于厚径比增加引起的摩擦面减小的幅度，所以侧摩阻力的变化不显著。(3)吸力桶的贯入阻力以侧摩阻力为主要作用。(4)标准组t/D=0.006数模值与实测数据相符合，能够体现真实的贯入状况，其他条件与此规律相符合。

图8为不同厚径比的桶体贯入2 m时的土体塑性应变分布图，从图8中可以看出，随着厚径比的增大，桶体在贯入时，土体的破坏模式并未发生变化，贯入过程中，塑性区域始终贴近桩身，因为桶底对土体的刺入作用，故土体的破坏模式为局部剪切破坏。

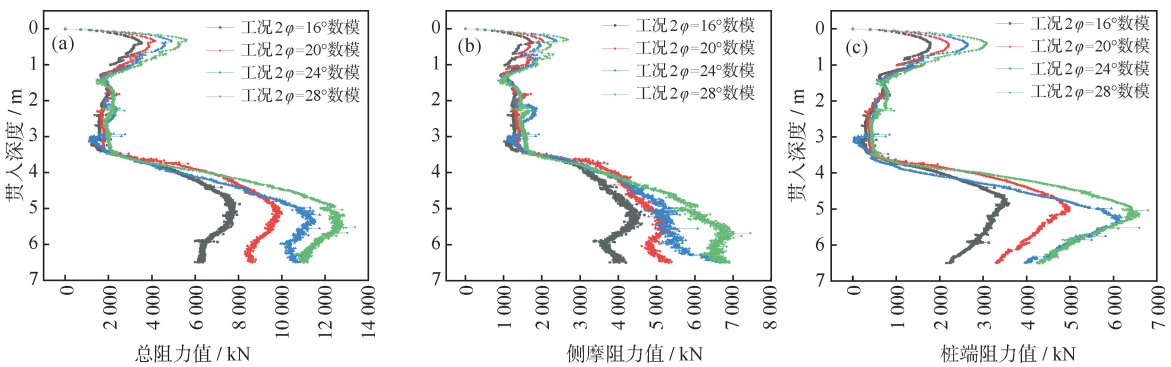

图5　不同内摩擦角贯入阻力对比图：(a)总阻力，(b)侧摩阻力，(c)桩端阻力

Fig. 5　Contrast of penetration resistance at different internal friction angles: (a)total resistance, (b)side friction, (c)tip resistance

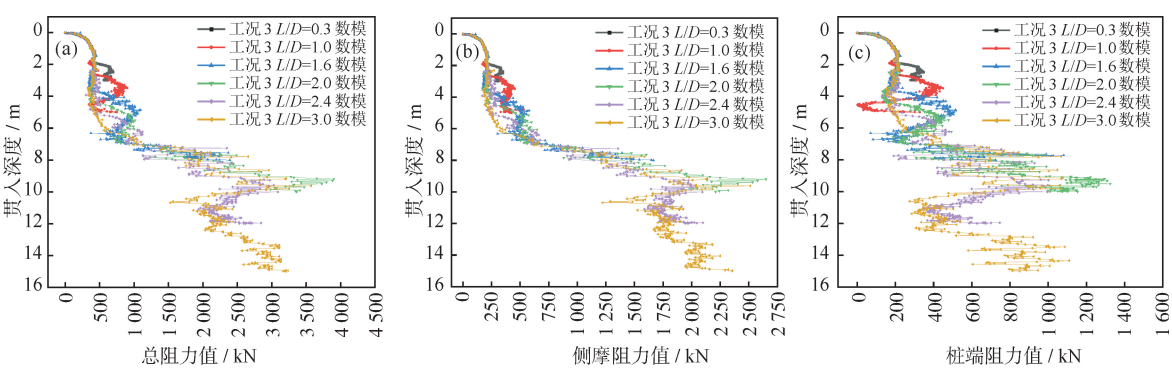

图6　不同长径比贯入阻力对比图：(a)总阻力，(b)侧摩阻力，(c)桩端阻力

Fig. 6　Contrast of penetration resistance with different length-diameter ratios: (a)total resistance, (b)side friction, (c)tip resistance

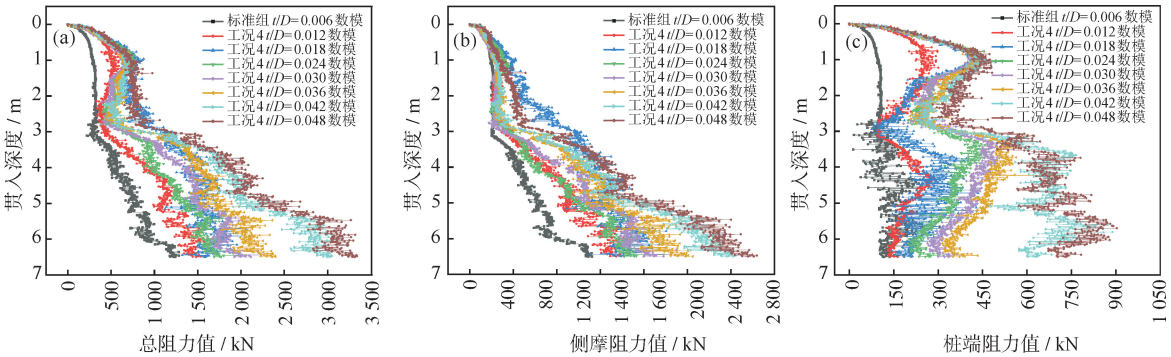

图7 不同厚径比贯入阻力对比图:(a)总阻力,(b)侧摩阻力,(c)桩端阻力

Fig. 7 Contrast of penetration resistance with different thick-diameter ratios: (a)total resistance, (b)side friction, (c)tip resistance

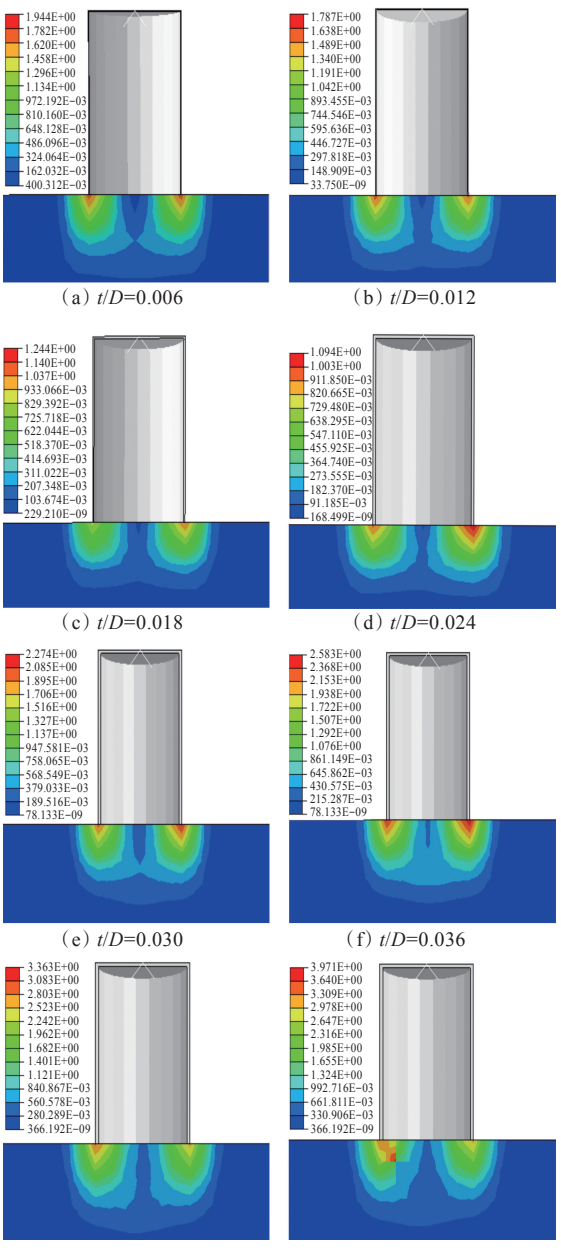

图8 不同厚径比桶体贯入过程土体塑性区分布

Fig. 8 Plastic zone distribution of soil during bucket penetration with different thickness-diameter ratios

4 结 论

本文以粤电阳江沙扒海上风电项目导向架平台吸力桶基础工程为背景,采用数值模拟方法对吸力桶基础沉贯阻力的影响因素进行研究,得出以下结论:

(1)通过数值模拟,可得出摩擦角φ和黏聚力c对贯入阻力成正相关,两者的变化对沉贯阻力影响巨大,通过对比可得,吸力桶在不同摩擦角土体中沉贯比在不同黏聚力土体中沉贯,所受的贯入阻力更大,φ与c分别是砂性土与黏性土的特征,故桶体在砂性土中的贯入阻力远远大于黏性土中贯入阻力;

(2)从敏感性角度而言,黏聚力的敏感程度大于内摩擦角,在整个贯入阶段,同一贯入深度下,阻力值随着黏聚力的增加而增加,反观内摩擦角,在桶体贯入1~4 m的位置时,阻力值相近,随着内摩擦角从24°增至28°时,侧摩阻力与端阻力值相近,说明随着贯入阻力随内摩擦角的增加而增加,但是增长的幅度在逐渐减小,敏感性在降低;

(3)厚径比为0.006~0.048时,阻力值总体趋势是随厚径比增大而增大。t/D取值在0.006~0.036、0.042~0.048范围时,厚径比的变化对贯入侧摩阻力、端阻力的影响较小,桶内土体挤密导致贯入过程中侧摩阻力增大的速率不及厚径比增大使摩擦面减小的速度,从而使侧摩阻力变化不明显。贯入过程中,塑性区域始终贴近桩身,因为桶底对土体的刺入作用,故土体为局部剪切破坏。在满足桶体不发生屈曲的状态下,建议工程桶体厚度30 mm,既保守又经济。

(4)长径比取值0.3~2.0区间时,阻力值与长径比呈正相关,L/D为2.0~3.0区间时,阻力值逐渐减小再增大,不同长径比桶体在贯入初期(深度为

2 m左右),侧摩阻力值与桩端阻力值近似相等,故桶体贯入2 m左右的阻力值不受长径比的改变而改变。

(5)在整个贯入过程中未见连通地面的塑性贯通区,得出桶体在土体中沉贯是以局部剪切破坏为主,且侧摩阻力在贯入中后期处于主导地位。

参考文献

[1] 王伟, 杨敏. 海上风电机组基础结构设计关键技术问题与讨论[J]. 水力发电学报, 2012, 31(6): 242-248.

[2] ZHANG X, LI Y S, LIU M Y, et al. Study on the design calculation method and construction control method of suction drum foundation for guided frame platform[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 1405.

[3] ZHANG X, LI Y S, LIU M Y, et al. Comparative analytical study of suction drum foundation penetration characteristics of guide frame platforms with real measurements[J]. PloS ONE, 2024, 19 (2): e0299647.

[4] 富坤,刘占国,尹燎原,等. 负压桶基础沉贯试验研究与分析[J]. 水利水运工程学报, 2021(5): 129-136.

[5] 闫澍旺, 霍知亮, 楚剑, 等. 黏土中桶形基础负压下沉阻力及土塞发展试验[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(10): 1027-1033.

[6] 国振, 王立忠, 袁峰. 粘土中吸力锚沉贯阻力与土塞形成试验研究[J]. 海洋工程, 2011, 29(1): 9-17.

[7] 马文冠,刘润,练继建,等. 粉土中筒型基础贯入阻力的研究[J]. 岩土力学,2019,40(4):1307-1312,1323.

[8] 丁红岩, 贾楠, 张浦阳, 等. 海上风电复合筒型基础粉质黏土下沉试验分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017, 50(9): 893-899.

[9] HOULSBY G T , BYRNE B W. Design procedures for installation of suction caissons in sand[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 2005, 158(3): 135-144.

[10] 周密, 周树津, 张文耀, 等. 吸力锚基础在黏土中的贯入特性[J]. 广东海洋大学学报, 2021, 41(6): 108-117.

[11] 李元松,侯瑛,叶绍其,等. 吸力桶基础在阳江沙扒海上风电场施工中的应用[J]. 武汉工程大学学报, 2022, 44(5): 545-550.

[12] 庄茁. 基于ABAQUS的有限元分析和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2009.

[13] 戴笑如, 王建华, 范怡飞. 钻井船插桩CEL数值模拟中的若干问题分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 2278-2286.

[14] 吕阳, 王胤, 杨庆. 吸力式筒形基础沉贯过程的大变形有限元模拟[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3615-3624.

[15] WANG Y, ZHU X Y, LÜ Y, et al. Large deformation finite element analysis of the installation of suction caisson in clay [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2018, 36(8):883-894.

[16] CHEN F Q, LIN Y J, DONG Y Z, et al. Numerical investigations of soil plugging effect inside large-diameter, open-ended wind turbine monopiles driven by vibratory hammers [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2018(2):1553081.

[17] 胡长明, 袁一力, 梅源, 等. 基于ABAQUS的地层-结构法模型的地应力平衡方法研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(4): 76-86.

[18] 代汝林, 李忠芳, 王姣. 基于ABAQUS的初始地应力平衡方法研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2012, 29(9): 76-81.

本文编辑:张　瑞