

循环荷载下粉土中吸力基础承载特性试验研究

马士力, 谢立全

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 针对我国东海海域的粉土海床工况, 基于模型试验, 研究了循环荷载下吸力基础的荷载-水平转角响应规律, 分析了吸力基础水平刚度与水平转角的相关特性, 并建立了海上风力发电机使用寿命中吸力基础累积转角与循环次数的关系式。结果表明: 循环荷载下吸力基础周围粉土的变形呈增加趋势, 刚度随循环次数的增加而减小; 加载或卸载过程中, 吸力基础转动中心均呈明显的上移趋势, 这将加速吸力基础的倾覆; 卸载刚度与循环次数遵循对数增加关系。

关键词: 粉土; 吸力基础; 循环荷载; 水平承载力; 转角

中图分类号: TU47

文献标志码: A

Experimental Study on Bearing Capacity Behavior of Suction Caisson Subjected to Cyclic Loading in Silt

MA Shili, XIE Liqian

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A series of model tests was carried out on silt in the East China Sea to study the load-lateral rotation response characteristics and analyze the relationship between lateral stiffness and lateral rotation of a suction caisson subjected to cyclic loading. The accumulated rotation variation of the suction caisson with the number of loading cycles during the service life of offshore wind turbines was discussed. The test results show that the deformation of the silt around the suction caisson has an increasing trend under cyclic loading and its stiffness decreases with the increase of the number of cycles. The rotation point has an obvious upward trend whether the suction caisson is subjected to loading or unloading, which will accelerate the overturning of the suction caisson. The relationship between the unloading stiffness and the number of cycles follows a logarithmic increase.

Key words: silt; suction caisson; cyclic loading; lateral bearing capacity; rotation

较之陆上风电, 海上风能资源丰富, 而且沿海地区电网容量大、风电接入条件好, 因此海上风电更具优势。据估计, 在海上风电场项目中风力发电机基础的建设成本约占总成本的 25%~35%^[1-2]。吸力基础作为新型风电基础形式, 是一种顶部封闭下端开口的钢制或钢-混结构圆桶基础, 因其具有节省投资、缩短安装工期、可重复利用等优点, 在海上风电工程中逐渐受到重视^[3-4]。2020 年国内首台海上风力发电机吸力基础顺利应用于广东省阳江市阳西沙扒 300 MW 海上风电项目, 该基础的应用有效降低了工程施工对海洋环境的污染, 并减小了海上施工风险^[5]。

吸力基础在服役期间受到风浪流等循环荷载的作用, 而长期的桩-土循环荷载容易导致吸力基础水平承载性能劣化。对于风力发电机基础, 应着重考虑低竖向力和高水平荷载的共同作用^[6], 因此基础的水平承载力和刚度是设计的主导因素^[7]。关于砂土和黏土中吸力基础与桩周土体水平单调相互作用已有大量的研究^[8-11]。Bhattacharya^[1]发现, 海上风力发电机在 25 年的服役期内将经历 $10^7 \sim 10^8$ 次的加载循环, 这将导致基础不可恢复的转动。Cox 等^[12]、Kelly 等^[13]和 Bienen 等^[14]通过 1g 小模型试验与离心机试验探讨了循环荷载下吸力基础的承载特性, 发现吸力基础的累积水平位移和沉降量随循环次数的增加而增加, 累积转角也随着循环次数的增加而增加, 并存在幂指数关系。利用模型试验, 罗仑博等^[15]发现水平循环荷载下桩周土趋于致密化, 导致砂土地基中吸力基础的水平承载力增加。目前我国许多

收稿日期: 2021-08-06

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51479137)

第一作者: 马士力(1992—), 男, 博士生, 主要研究方向为海洋岩土工程和近海工程。E-mail: ma_shili@163.com

通信作者: 谢立全(1972—), 男, 研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为岩土工程、近海和海洋工程以及深水建筑物安全防护。E-mail: xie_liquan@tongji.edu.cn。



论文
拓展
介绍

近海风电场和潜在海上风电场场址土层大部分为粉土^[16],而吸力基础承载特性研究大多集中在砂土和黏土,因此研究循环荷载下粉土中吸力基础承载特性有着极其重要的意义。

针对我国东海海域粉土进行了一系列的1g模型试验,研究了循环荷载下吸力基础水平承载特性,并对试验结果进行了量纲一处理。通过吸力基础的循环荷载-转角响应,得到了吸力基础水平刚度与水平转角之间的关系。基于试验中吸力基础的累积转角,分析了其与循环次数之间的关系,并预测了吸力基础服役期累积转角的变化。最后,探究了循环荷载下吸力基础内部的压强变化,并重新构建卸载刚度,以进行对比分析。

1 1g 模型试验装置和流程

1.1 试验装置

试验在砖-混模型箱内完成。模型箱内部尺寸为1.72 m×0.76 m×0.72 m(长×宽×高),壁厚为17.20 cm。模型箱内底部铺设的约5 cm厚的碎石垫层用作排水通道,土体与碎石垫层之间采用土工布进行分隔。模型箱外设水箱系统,用于反渗饱和和土体^[17]和调节模型箱内水位高低^[16]。试验装置示意图如图1所示。

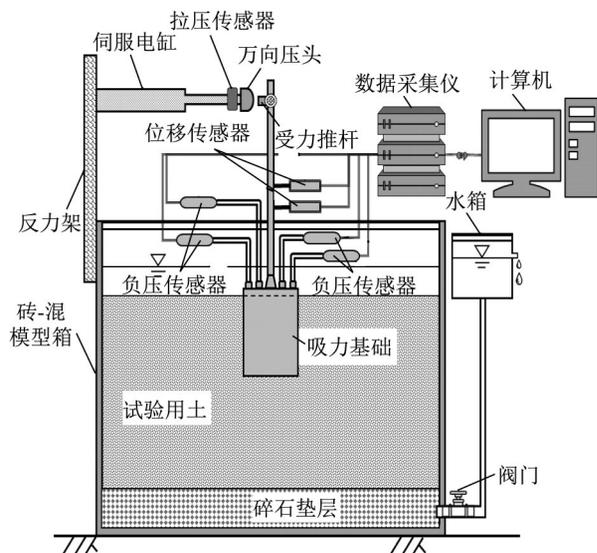


图1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of test set-up

吸力基础由不锈钢制成,桶壁和顶板厚度分别为2 mm和10 mm,长径比 $L/D=1.5$,具体尺寸如图2所示。吸力基础顶板设有4个直径为8 mm的排水孔,并与负压传感器连接,排水口1、2、3、4处测得的

压强分别为 p_1 、 p_2 、 p_3 和 p_4 。图2中, h 为转动中心位置。顶板非密封状态时排水口打开,不与负压传感器相连。如图1所示的伺服电缸固定于钢制反力架上,提供稳定的水平循环荷载。循环荷载加载方式如图3所示,加载频率为0.05~0.02 Hz,该频率适合于Bhattacharya等^[18]得到的Jonswa谱波浪,荷载沿模型箱长度方向施加,以避免边界效应影响。作为海上风电机组的重要组成部分,吸力基础荷载作用点一般大于3倍桶高^[12],本研究中水平荷载加载高度 $e=540$ mm(3L)。位移传感器和负压传感器分别与动态数据采集仪相连,数据采集频率为10 Hz。

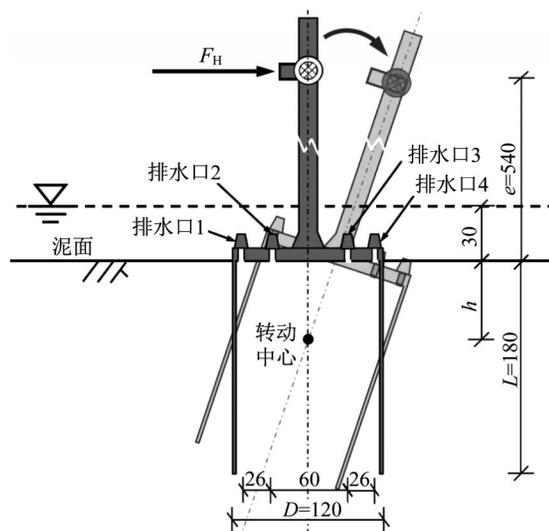


图2 吸力基础模型(单位:mm)

Fig.2 Suction caisson model (unit:mm)

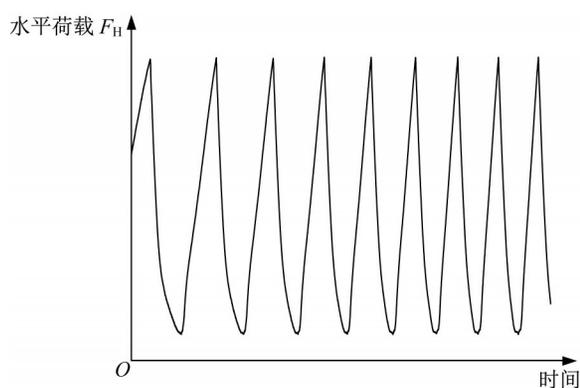


图3 水平荷载加载示意图

Fig.3 Schematic diagram of horizontal loading

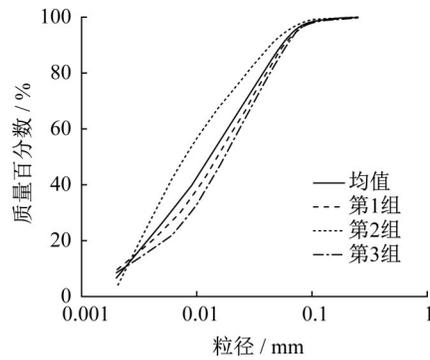
试验用粉土(见图4a)取自上海东部近海,其颗粒级配如图4b所示。采用堆载预压法制备粉土试件,在堆载预压的同时进行反渗饱和,并持续24 h左右,最终土层厚度达0.6 m。水箱系统中调整后水位高于泥面约3 cm。粉土试件饱和重度约为19.6

$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$, 含水率为 17.8%~23.5%, 渗透系数为 $1.62\times 10^{-6}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。对 3 组粉土试件进行单桥静力

触探试验, 所得比贯入阻力曲线如图 5 所示。从图 5 可见, 制备的粉土试件具有较好的一致性。



a 试验用土



b 试验用土颗粒级配曲线

图 4 试验用土及其颗粒级配曲线

Fig.4 Silt in tests and its particle grading curve

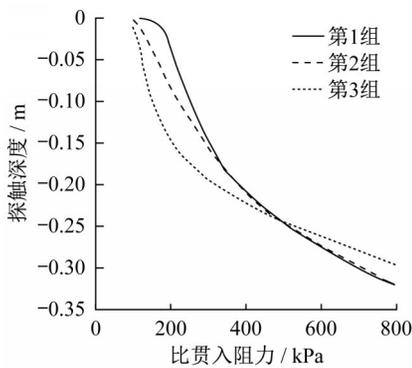


图 5 单桥静力触探试验曲线

Fig.5 Curves of single bridge cone penetration tests

1.2 试验理论与流程

LeBlanc 等^[19]和 Zhu 等^[20]定义了 2 个量纲一参数 ξ_b 与 ξ_c , 分别表征循环荷载的幅值大小和对称性, 即:

$$\xi_b = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ult}}} = \frac{F_{H, \max} e}{F_{H, \text{ult}} e} = \frac{F_{H, \max}}{F_{H, \text{ult}}} \quad (1)$$

$$\xi_c = \frac{M_{\min}}{M_{\max}} = \frac{F_{H, \min} e}{F_{H, \max} e} = \frac{F_{H, \min}}{F_{H, \max}} \quad (2)$$

式中: M_{\max} 、 M_{\min} 分别为一个周期内作用于基础上弯矩的最大值与最小值; $F_{H, \max}$ 和 $F_{H, \min}$ 分别为一个周期内作用于基础上水平作用力的最大值与最小值; M_{ult} 和 $F_{H, \text{ult}}$ 分别为相同加载速率的单调荷载下基础所能承受(容许)的极限弯矩和极限水平荷载。

图 6 为循环荷载下吸力基础的累积转角-荷载关系, 最大、最小循环荷载对应的累积转角分别为 $\theta_{\max, N}$ 和 $\theta_{\min, N}$ 。为评价循环作用下吸力基础累积转角的演化, LeBlanc 等^[19]将累积转角量纲一化, 计算式如下所示:

$$\frac{\Delta\theta_{\max}}{\theta_{\max, s}} = \frac{\theta_{\max, N} - \theta_{\max, 1}}{\theta_{\max, s}} \quad (3)$$

式中: $\theta_{\max, s}$ 为静力加载时吸力基础最大循环荷载对应的水平转角, $\theta_{\max, s} = \theta_{\max, 1}$ 。

若在服役期间海上风机基础刚度发生改变, 则结构的一阶固有频率也发生变化, 从而改变了结构的固有频率。Zhu 等^[21]和 LeBlanc 等^[19]定义了卸载刚度 k'_N ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$, 见图 6), 但在荷载对称性系数 $\xi_c \neq 0$ 时, k'_N 数值较大, 不利于对比分析, 因此定义卸载刚度 k_N 。虽然水平位移对吸力基础的性能有重要影响, 但是结构的动力特性很大程度上取决于吸力基础的刚度。Wang 等^[7]提出水平刚度 K (即水平荷载与相应水平位移的比值) 以分析吸力基础水平运动过程中的刚度变化。为消除尺寸效应对试验结果的影响, 采用量纲一参数进行数据分析, 如表 1 所示^[20, 22]。表 1 中, p_a 和 γ' 分别为大气压强和土体的浮重度。

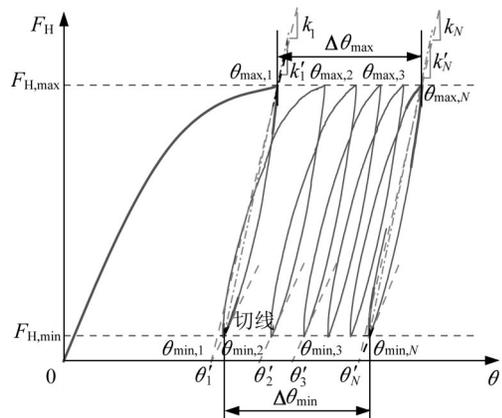


图 6 累积转角和卸载刚度定义

Fig.6 Definition of accumulated rotation and unloading stiffness

表1 吸力基础在1g模型试验中的量纲一参数

Tab.1 Normalized parameters for a suction caisson in 1g model tests

| 参数 | 量纲一表示形式 |
|---------------|--|
| 转动中心位置 h | $\frac{h}{L}$ |
| 水平荷载 F_H | $\frac{F_H}{\gamma' D^3}$ |
| 水平转角 θ | $\frac{\theta p_a^{0.5}}{(\gamma' D)^{0.5}}$ |
| 桶内顶板处压强 p | $\frac{p}{\gamma' D}$ |
| 水平刚度 K | $\frac{K}{(\gamma' p_a)^{0.5} D^{3.5}}$ |
| 卸载刚度 k | $\frac{k}{(\gamma' p_a)^{0.5} D^{3.5}}$ |

粉土试件制备完成后,以 $0.1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 匀速将吸力基础竖直压入土体^[23]。在循环试验前进行相同加载速度下的单调水平承载力试验,顶板密封与非密封状态下极限承载力分别为 30.7 N 和 28.3 N(见图 7)。将伺服电缸、负压传感器与位移传感器安装到位后静置试验系统 1 h,设置逻辑控制器参数 ξ_b 与 ξ_c ,控制水平循环荷载动作(试验方案如表 2 所示),打开数据采集仪后开始试验。

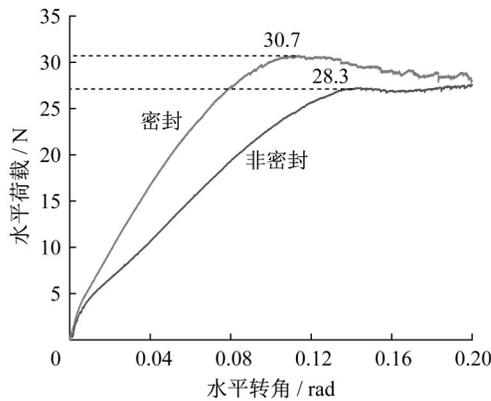


图7 单调荷载作用下水平荷载与转角关系

Fig.7 Relationship between lateral load and rotation under monotonic loading

表2 试验方案

Tab.2 Experimental scheme

| 试件编号 | ξ_b | ξ_c | 密封状态 |
|-------|---------|---------|------|
| B2C | 0.2 | 0 | 密封 |
| B4C | 0.4 | 0 | 密封 |
| B4CU | 0.4 | 0 | 非密封 |
| B6C | 0.6 | 0 | 密封 |
| B6C33 | 0.6 | 0.33 | 密封 |

2 试验结果与分析

2.1 循环加载响应分析

图 8、9 分别为吸力基础的循环荷载-水平转角响应曲线和水平刚度-水平转角响应曲线。从图 8 可以看出,在加载初期,吸力基础周围粉土变形近似弹性,循环荷载曲线几乎呈线性增大,此时荷载增加较快,水平转角变化较小,水平刚度约为 450。当荷载超过一定值后,水平刚度急剧变小。从图 9 可以看出,由于吸力基础周围粉土的变形而使得水平位移增大,水平荷载为 $F_{H,max}$ 时水平刚度随着循环次数的增加而减小^[7]。对比 B4C 和 B4CU,在非密封状态下,首次卸载残余转角较大,而在密封状态下,由于加载过程中吸力基础顶板与土体分离而使得桶内形成负压,此负压有利于吸力基础的“复位”,因此密封状态下首次卸载残余转角较小。由于负压的存在,随着循环次数的增加桶-土密封空间逐渐被水体占据,桶内负压减小导致密封状态下残余转角产生相对较大的变化。如图 8 所示, $\xi_c=0$ 时第 1 次卸载后残余转角随着 ξ_b 增大而减小, $\xi_b=0.6$ 时的残余转角是 $\xi_b=0.2$ 时的 4.07 倍。B6C 与 B6C33 在第 10 次加载峰值时水平刚度相差仅 4.7%,荷载对称性 ξ_c 对水平刚度的影响不显著。

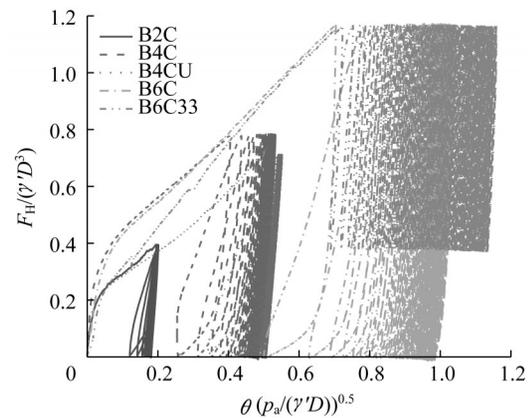


图8 循环荷载-水平转角响应

Fig.8 Cyclic loading-lateral rotation response

2.2 吸力基础累积转角

图 10 为累积转角 $\Delta\theta_{max}/\theta_{max,s}$ 与循环次数 N 的关系曲线。可以看出,累积转角随着循环次数的增大而增加。在初始阶段, $\Delta\theta_{max}/\theta_{max,s}$ 快速积累,并随着循环次数的增大而增量逐渐减缓。对比 B2C、B4C 和 B6C, $\Delta\theta_{max}/\theta_{max,s}$ 增长速率随着 ξ_b 的增加而增大。循环次数 $N=50$ 时, B6C 的累积转角比 $N=10$ 时增长了 53.6%。对比密封和非密封状态,非密封状态

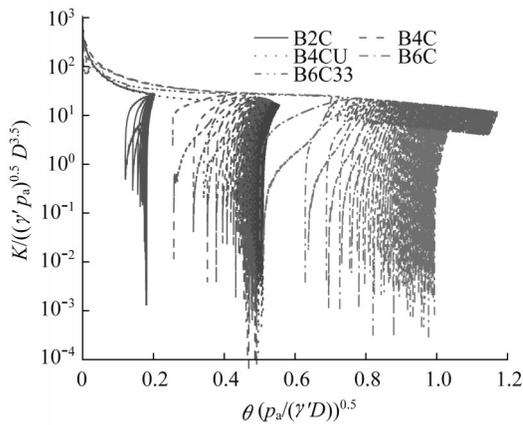


图9 水平刚度-水平转角响应

Fig.9 Lateral stiffness-lateral rotation response

时没有顶板负压耗散影响,B4CU的累积转角随着循环次数的增大迅速增加而后趋近某一稳定值。B6C33累积转角增长速率明显高于B6C,循环60次时 $\xi_c=0.33$ 和 $\xi_c=0$ 的增长速率分别为0.003 3和0.001 7。

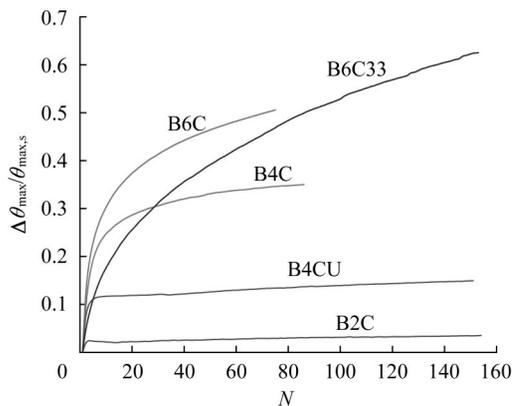


图10 累积转角和循环次数关系

Fig.10 Relationship between accumulated rotation and number of loading cycles

通过大量试验对单桩和吸力基础累积转角与循环次数的关系进行研究,Zhu等^[20,24]和Cox等^[12]提出了幂指数关系,如下所示:

$$\frac{\Delta\theta_{\max}}{\theta_{\max,s}} = \beta N^\alpha \quad (4)$$

式中: α 和 β 为量纲一变量。表3为通过回归方程得到的量纲一变量 α 和 β 。Zhu等^[20]在松散和干燥的粉土中对吸力基础进行水平循环荷载的1g模型试验,得到 $\alpha=0.39$,而Foglia等^[25]得到致密砂中 $\alpha=0.18$ 。B2C、B4C、B4CU和B6C的 α 为0.180~0.390,而B6C33相对较大,为0.449。 β 与 ξ_b 的关系如图11所示。可以看出,Cox等^[12]通过离心机得到 $\xi_b=0.54$

时 β 相对较小,仅为0.032。试验中 $\xi_c=0.33$ 时的 β 低于 $\xi_c=0$ 时的 β ,而Zhu等^[24]得到 $\xi_c=0.1$ 时 β 相对较大。 $\xi_c=0$ 、 $\xi_b=0.20\sim0.62$ 时通过拟合本研究试验数据和Zhu等^[20]研究结果可以得到以下计算式:

$$\beta = 0.553\xi_b - 0.107 \quad (5)$$

海上风力发电机15年服役期(循环次数约 4×10^7)^[11]时, $\xi_b=0.5$ 和 $\xi_c=0$ 下,由式(4)和式(5)可得累积转角为3.96。若设计中规定吸力基础水平转角最大值为 0.250° 时,基础受到 $0.5M_{ult}$,则理论上首次加载水平转角应小于 0.063° 。

表3 变量 α 和 β 值

Tab.3 Values of α and β

| 编号 | α | β |
|-------|----------|---------|
| B2C | 0.191 | 0.013 |
| B4C | 0.215 | 0.141 |
| B4CU | 0.124 | 0.079 |
| B6C | 0.290 | 0.150 |
| B6C33 | 0.449 | 0.067 |

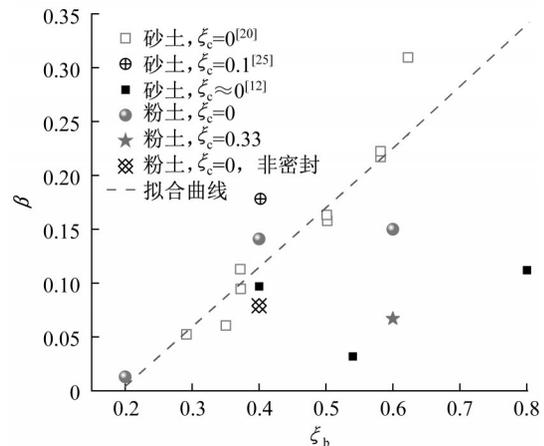


图11 β 与 ξ_b 的关系

Fig.11 Variation of β with ξ_b

2.3 桶内压强与水平转角关系

为研究加载过程中桶内压强对吸力基础周围粉土的影响,参考沉贯过程归一化速度 V ^[26-27]。 V 可以表达为

$$V = \frac{vD}{c_v} \quad (6)$$

式中: v 为加载速率; c_v 为垂直固结系数,对于黏土 $c_v=2.6 \text{ m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,对于砂 c_v 至少为 $60\ 000 \text{ m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ ^[28]。Chung等^[29]认为, $V>30$ 时土体处于完全不排水状态,而当 $V<0.01$ 时土体处于完全排水状态。本研究中循环试验加载点速度为 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,为简便计算,假定转动中心在吸力基础顶板中心处,吸力基础顶板最大运动速度约为 $0.011 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。试验中粉土

渗透系数较小,偏于黏土,取黏土 c_v 可得 $V=0.016$ 。由此可见,桶内土体处于部分排水状态,因此容易导致循环加载初始阶段桶-土之间密封空间出现负压而形成较大的水平刚度(见图 12a)。随着循环次数的增加顶板与土体之间出现存积海水现象(见图 12b),海水的不可压缩性与土体较小的渗透共同作用使累积转角增大(见图 12c)。吸力基础顶板排水孔处桶内压强与水平转角的关系如图 13 所示,图中正值表示负压(小于大气压强)。循环加载初期顶板挤压桶内土体造成桶内出现了正压;初始循环加载下 B2C 较小的水平转角和桶体挤压土体排水共同作用导致桶内压强基本保持正压。循环加载初期随着水平转角的增大,顶部与土体进一步分离,空间变大(见图 12),压强减小并逐渐趋于负压,增大了吸力基

础抗倾覆能力。负压引起吸力基础周围土体排水,水体逐渐占据桶-土密封空间,桶内负压减小。从图 13 可以看出,桶内压强变化范围随着 ξ_b 的增大而增大,并随着循环次数的增加而小,桶内压强对抗倾覆能力影响越来越小。当 $\xi_b=0.6$ 、 $\xi_c=0$,循环次数 $N=5$ 加载和卸载时 p_1 分别为 0.0025 和 -0.0031 。对于 B6C,加载时 p_1, p_2, p_3, p_4 呈现先增大后减小的趋势;对于 B6C33,卸载时 p_4 随着循环次数增大而增加。

2.4 转动中心位置

假定转动中心在吸力基础的中轴线上,如图 2 所示,转动中心位置 h 可以表示为

$$h = \frac{x_1 h_2 - x_2 h_1}{x_2 - x_1} \quad (7)$$

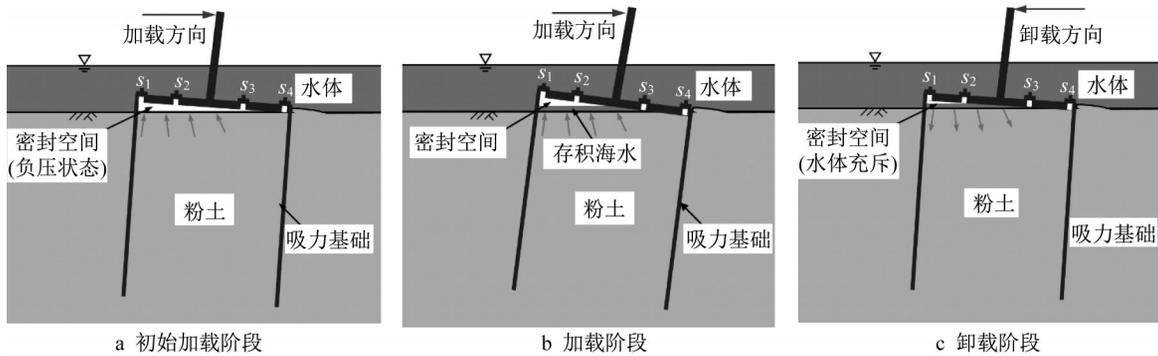


图 12 循环加载下吸力基础与土相互作用示意图

Fig.12 Schematic diagram of interaction between suction caisson and soil under cyclic loading

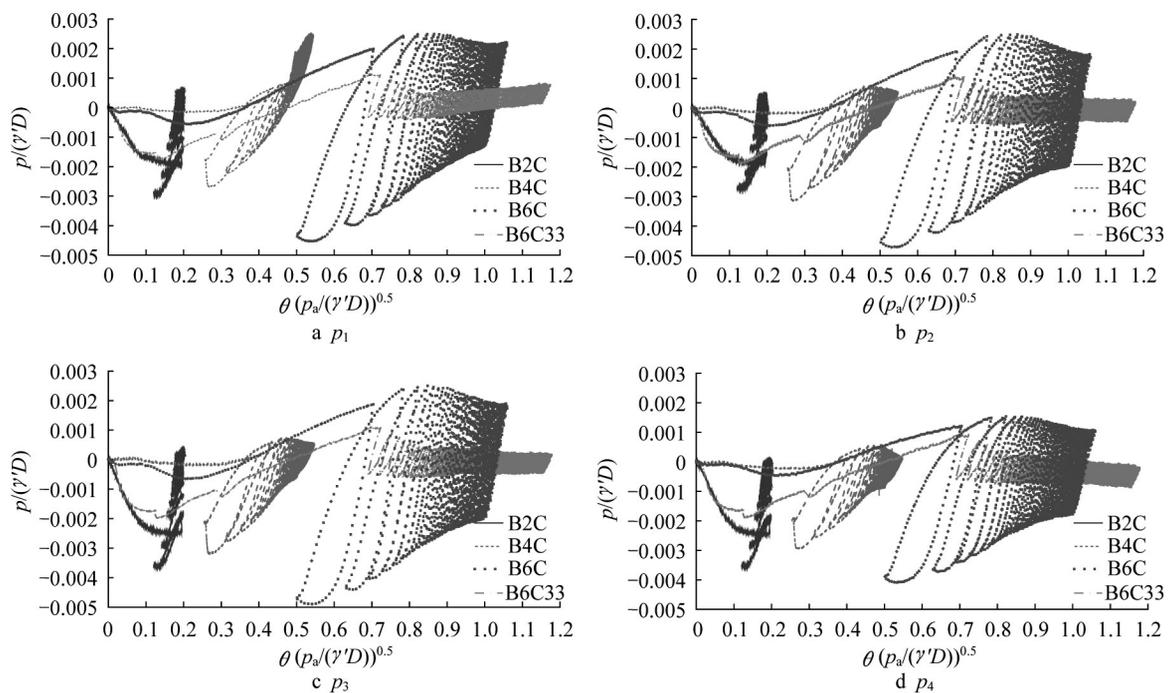


图 13 桶内压强与水平转角关系

Fig.13 Relationship between pressure in suction caisson and lateral rotation

式中: h_1 和 h_2 为位移传感器距顶板高度; x_1 和 x_2 为位移传感器得到的位移值。

图 14 为循环荷载下吸力基础转动中心位置与水平转角关系,其中负值表示转动中心在顶板上方。 $\xi_c=0$ 时 B6C 的 h/L 相对较大,而且主要移动范围为 0.47~0.61。非密封状态加载时转动中心位置与密封状态近似。B6C33 的转动中心在 0.1 附近, h/L 较小容易造成吸力基础承载能力的下降,因此长期循环荷载作用下 B6C 累积转角将小于 B6C33。无论是加载还是卸载 h/L 都有明显减小趋势,此现象将加速吸力基础倾覆。

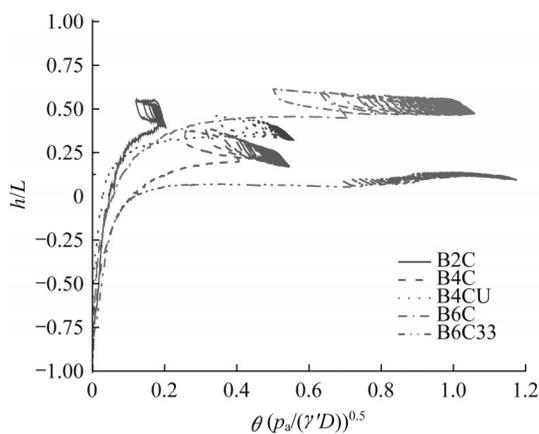


图 14 转动中心与水平转角关系

Fig.14 Relationship between location of rotation center and lateral rotation

2.5 卸载刚度

Arany 等^[30]通过计算发现,如果卸载刚度增长 50%,风力发电机固有频率就会变化 1.5%~3.5%,因此研究卸载刚度的变化对海上风力发电机稳定性设计尤为重要。吸力基础卸载刚度与循环次数关系如图 15 所示。卸载刚度随着循环次数 N 的增大而增大并遵循对数关系,这与 Cox 等^[12]得出的结果相同。随着土体固结和越来越致密,卸载刚度逐渐趋于稳定。

$\xi_c=0$ 时 B4C 的 $k/((\gamma'p_a)^{0.5}D^{3.5})$ 相对较小,当 $N=50$ 时 B4C 的卸载刚度仅为 B2C 的 71.06% 和 B6C 的 86.83%。由于卸载不完全 B6C33 卸载刚度相对较大且不稳定,但也存在与 B6C 相同的生长趋势。当循环次数 $N=32$ 时, B4CU 的卸载刚度达到最大值后呈现下降趋势,这是因为吸力基础土体受到循环荷载作用后出现了软化。 $\xi_c=0$ 时吸力基础的卸载刚度平均增长了 3.73 倍,可见粉土对风力发电机服役期的固有频率和稳定性有着重要影响。

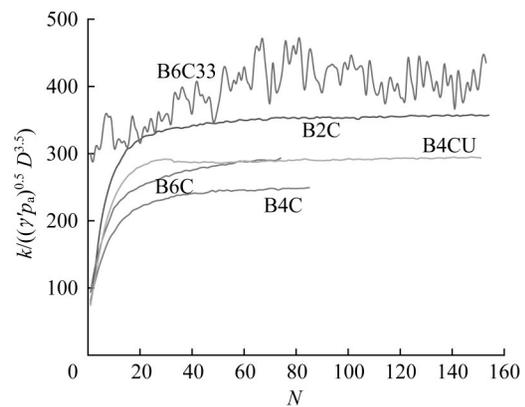


图 15 卸载刚度与循环次数关系

Fig.15 Relationship between unloading stiffness and number of loading cycles

3 结论

(1)吸力基础周围粉土变形显著,致使吸力基础水平位移增大,并且其最大水平荷载 $F_{H,max}$ 对应的水平刚度随着循环次数的增加而减小。非密封状态下吸力基础的首次卸载残余转角较大,而密封状态下加载过程中吸力基础顶板与土体分离使得桶内形成负压,负压有利于吸力基础的“复位”,因此密封状态下首次卸载残余转角较小。

(2)在初始阶段吸力基础水平转角快速积累,并随着循环次数的增大而增量逐渐减缓。当 $\xi_c=0$ 时, $\Delta\theta_{max}/\theta_{max,s}$ 增长速率随着 ξ_b 的增加而增大。当桶内土体处于部分排水状态时,容易导致循环初始阶段吸力基础水平刚度较大。随着循环次数的增大顶板与土体之间出现存积海水现象,海水的不可压缩性与土体较小的渗透性使得土体卸载不彻底,继而增大累积转角。

(3)无论是加载还是卸载,吸力基础转动点均呈明显的上移趋势,此现象加速了吸力基础的倾覆。卸载刚度随着循环次数的增大而增大并遵循对数关系。随着土体固结和致密,卸载刚度逐渐趋于稳定。

作者贡献声明:

马士力:试验设计,试验实施,结果分析,论文撰写与修改。

谢立全:方案讨论与优化,论文修改。

参考文献:

- [1] BHATTACHARYA S. Challenges in design of foundations for offshore wind turbines [J]. Engineering & Technology Reference, 2014, 1(1): 922.

- [2] 靳军伟, 杨敏, 王伟, 等. 海上风电机组单桩基础模态及参数敏感性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(3): 386.
JIN Junwei, YANG Min, WANG Wei, *et al.* Offshore wind turbine monopile foundation modal and parameter sensitivity analysis [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(3): 386.
- [3] GAO Y, QIU Y, LI B, *et al.* Experimental studies on the anti-uplift behavior of the suction caissons in sand [J]. Applied Ocean Research, 2013, 43: 37.
- [4] 李大勇, 王栋林, 张雨坤, 等. 黏性土中裙式吸力基础沉贯与注水拔出试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(3): 568.
LI Dayong, WANG Donglin, ZHANG Yukun, *et al.* Model tests on penetration and extration of modified suction caissons in clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42: 568.
- [5] 国内首个吸力筒导管架风机基础完成海上安装[EB/OL]. [2021-05-06]. <https://www.chinanews.com.cn/cj/2020/08-10/9260690.shtml>.
The first suction tube jacket fan foundation has been installed offshore [EB/OL]. [2021-05-06]. <https://www.chinanews.com.cn/cj/2020/08-10/9260690.shtml>.
- [6] BYRNE B W, HOULSBY G T. Assessing novel foundation options for offshore wind turbines [C/OL]//World Maritime Technology Conference. London: [s.n.], 2006. [2021-05-06]. https://www.researchgate.net/publication/265874157_Assessing_Novel_Foundation_Options_for_Offshore_Wind_Turbines.
- [7] WANG X, YANG X, ZENG X. Centrifuge modeling of lateral bearing behavior of offshore wind turbine with suction bucket foundation in sand [J]. Ocean Engineering, 2017, 139: 140.
- [8] MA P, LIU R, LIAN J, *et al.* An investigation into the lateral loading response of shallow bucket foundations for offshore wind turbines through centrifuge modeling in sand [J]. Applied Ocean Research, 2019, 87: 192.
- [9] LIU J, CHEN X, ZHU Z, *et al.* Investigation of scour effects on lateral behaviors of suction caisson [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2019, 37(2): 142.
- [10] GELAGOTI F, GEORGIU I, KOURKOULIS R, *et al.* Nonlinear lateral stiffness and bearing capacity of suction caissons for offshore wind-turbines [J]. Ocean Engineering, 2018, 170: 445.
- [11] 李大勇, 张景睿, 张雨坤. 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.
LI Dayong, ZHANG Jingrui, ZHANG Yukun. Bearing behavior and accumulated rotation of modified suction caisson (MSC) in saturated sand under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3): 611.
- [12] COX J A, O' LOUGHLIN C D, CASSIDY M, *et al.* Centrifuge study on the cyclic performance of caissons in sand [J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2014, 14(4): 99.
- [13] KELLY R B, HOULSBY G T, BYRNE B W. A comparison of field and laboratory tests of caisson foundations in sand and clay [J]. Geotechnique, 2006, 56(9): 617.
- [14] BIENEN B, KLINKVORT R T, O' LOUGHLIN C D, *et al.* Suction caissons in dense sand, part I: installation, limiting capacity and drainage [J]. Geotechnique, 2018, 68(11): 937.
- [15] 罗仑博, 王媛, 黄景琦, 等. 海洋循环荷载对吸力桶基础水平承载力的影响研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 142.
LUO Lunbo, WANG Yuan, HUANG Jingqi, *et al.* Study on effects of cyclic loading on lateral capacity of suction bucket foundations [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(3): 142.
- [16] ZHU B, KONG D, CHEN R, *et al.* Installation and lateral loading tests of suction caissons in silt [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(7): 1070.
- [17] WANG X, YANG X, ZENG X. Lateral response of improved suction bucket foundation for offshore wind turbine in centrifuge modelling [J]. Ocean Engineering, 2017, 141: 295.
- [18] BHATTACHARYA S, COX J A, LOMBARDI D, *et al.* Dynamics of offshore wind turbines supported on two foundations [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering, 2013, 166(2): 159.
- [19] LEBLANC C, HOULSBY G T, BYRNE B W. Response of stiff piles in sand to long-term cyclic lateral loading [J]. Geotechnique, 2010, 60(2): 79.
- [20] ZHU B, BYRNE B W, HOULSBY G T. Long-term lateral cyclic response of suction caisson foundations in sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(1): 73.
- [21] ZHU F, BIENEN B, O' LOUGHLIN C, *et al.* Suction caisson foundations for offshore wind energy: cyclic response in sand and sand over clay [J]. Geotechnique, 2019, 69(10): 924.
- [22] ZHU B, ZHANG W, YING P, *et al.* Deflection-based bearing capacity of suction caisson foundations of offshore wind turbines [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(5): 4014013.
- [23] VILLALOBOS F A, BYRNE B W, HOULSBY G T. An experimental study of the drained capacity of suction caisson foundations under monotonic loading for offshore applications [J]. Soils and Foundations, 2009, 49(3): 477.
- [24] ZHU F Y, O' LOUGHLIN C D, BIENEN B, *et al.* The response of suction caissons to long-term lateral cyclic loading in single-layer and layered seabeds [J]. Geotechnique, 2018, 68(8): 729.
- [25] FOGLIA A, IBSEN L B, NICOLAI G, *et al.* Observations on bucket foundations under cyclic loading in dense saturated sand [C]//The International Conference of Physical Modelling in Geotechnics. Perth: CRC Press, 2014: 667-673.
- [26] FINNIE I M S, RANDOLPH M. Punch-through and liquefaction induced failure of shallow foundations on calcareous