

The Centrifuge Experiments on Maximum Bearing Capacity of the Suction Bucket under the State of Inclination

Yifan Ji, Liquan Xie*, Wencai Huang

School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai
Email: xie_liquan@tongji.edu.cn

Received: Nov. 5th, 2019; accepted: Nov. 25th, 2019; published: Dec. 2nd, 2019

Abstract

To study the mechanism of bearing capacity of a suction bucket, a series of centrifugal tests were designed to investigate the uplift bearing capacity and the entire dynamic process of soil pressure and pore water pressure were monitored as well. Finally, mechanical analysis was carried out for the suction bucket structure, and the calculated bearing capacity was compared with the experimental data, and the error was less than 12%. The experiments presented the obvious influence of inclination on the foundation bearing capacity, and it can be used for reference in engineering.

Keywords

Suction Bucket Foundations, Tilt, The Bearing Capacity, Centrifugal Model Test, Pore Pressure

倾斜状态下的吸力式基础极限承载力离心试验模拟

季一帆, 谢立全*, 黄文财

同济大学, 土木工程学院, 上海
Email: xie_liquan@tongji.edu.cn

收稿日期: 2019年11月5日; 录用日期: 2019年11月25日; 发布日期: 2019年12月2日

摘要

为研究倾斜吸力式基础的极限承载力机制, 本文设计并实施了一系列吸力式基础抗拔承载力的离心模拟试验, 并全程监测了吸力式基础周围土压力、孔隙水压力的动态演变过程, 最后针对吸力式桶形结构进

*通讯作者。

行力学分析,算出的承载力值与实验数据进行对比,误差在12%以内。本次实验表明,倾斜程度对吸力式基础承载力的影响明显,对实际工程中的判断起到一定的借鉴作用。

关键词

吸力式基础, 倾斜, 承载力, 离心模型试验, 孔隙水压力

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

吸力式基础作为一种新兴的海洋锚泊基础,具有重复利用、施工快、竖向承载力大等优点[1],能在不同地基以及不同海洋环境下使用,应用在海上风力发电、工程船舶、水下生产系统和浮式生产系统等方面[2] [3],其优越性备受工程界的青睐。但吸力式基础在复杂多变的海洋环境以及海床地质条件贯入过程中会发生倾斜,严重影响自身的承载功能[4]。

在实际工程中,无论是海洋油气资源开发、海洋风力发电,还是海底管道等结构都需要定位及锚泊,从而为结构物正常、高性能地发挥其功效提供稳定、安全的外部环境[5] [6]。海洋平台造价昂贵,结构复杂,不易维修安装,要想保证海洋平台的正常运营、减少经济损失,就必须提高海洋平台的稳定性。而海洋基础,则是实现海洋工程建筑物正常运营的重要保证[7]。因此,研究吸力式基础在倾斜状态下的承载性能,为工程应用提供参考,并以此研发出一种解决吸力式基础沉贯过程中发生倾斜的方法,对保证海洋平台的安全性来说意义重大[8]。

吸力式基础是应用于近海以及深海平台中的不可或缺的一环,其承载力特性需进行严格的试验以及理论论证[9]。目前对于吸力式基础的承载性能研究主要是竖直状态下的承载特性。而在深海环境下,水体流动的不确定性以及海底地貌的复杂性导致了在吸力桶沉贯过程中很难以一个完全竖直的方向进行贯入[10] [11]。同时,在吸力桶倾斜贯入的过程中由于水流的影响,在吸力桶周围会形成由于水流冲刷而产生的土坑。这势必导致了吸力桶承载力的下降[12]。故而在倾斜后承载力特性的变化以及极限承载力的变化需要进一步的仔细研究。

本文针对不同的吸力式基础倾斜度,分别进行了对应的抗拔离心机模拟试验,应用土压和孔隙水压力传感器监测土体破坏过程中土压和孔压的变化,分析倾斜吸力式基础极限承载力的影响,对实际工程中的判断起到一定的借鉴作用。

2. 离心机模型试验设计

2.1. 试验土样

本次试验过程中所采用的砂为加工过后的砂,土样的颗粒级配曲线如图1所示,其物理参数如表1所示。土体为均匀土,级配较差。

由于试验所用土料颗粒较细并含有部分粘粒,如果直接加水会导致部分土体结成块状,因此本试验采用了分层泥浆搅拌法。整个试验土体分3层制作,总共高度为30 cm,每次层高为10 cm,在制样时先在桶里加入清水,而后将晒干的土颗粒均匀地洒落在桶中,而后用搅拌器搅拌至泥浆与水充分混合,而后再将制作完毕后的泥浆均匀地倒在模型箱中。泥浆的固结过程在离心机试验中完成。

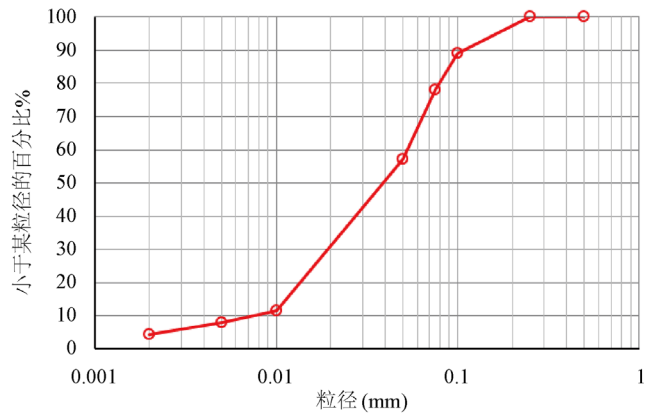


Figure 1. Grading curves of soil samples
图 1. 土样颗粒级配曲线

Table 1. Soil test parameters
表 1. 土的试验参数

含水率	相对密实度	土粒比重	渗透系数	孔隙比	液限	塑限	塑性指数	液性指数
ω (%)	D_r	G_s	k (g/cm ³)	e	ω_L (%)	ω_p (%)	I_p	I_L
20.6	0.675	2.7	5.41×10^{-4}	0.56	26.8	17.1	9.7	0.36

2.2. 实验装置

本次静态加载离心模型试验装置(图 2)是在同济大学现有的土工离心机的基础上自主设计完成的。其中,模型箱(图 3)的尺寸:长 700 mm、宽 500 mm、高 600 mm,吸力桶模型尺寸:桶直径 100 mm、桶高 100 mm、桶壁厚度 0.5 mm,试验模型比尺 $N = 50$ 。离心机的主要参数:最大荷载能力为 150 g·t,有效转臂半径为 3.0 m。远程控制动态测量系统可以通过高清数码相机、摄像头、孔隙压力传感器(1#~3#)、土压力传感器(4#)完整地记录静态加载过程中力学参数变化规律。

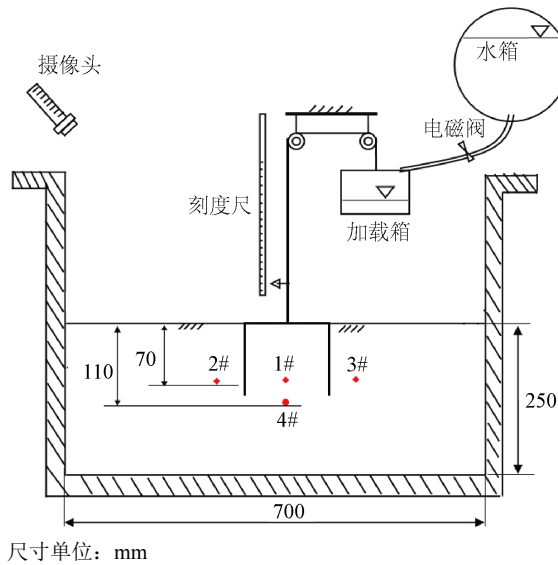


Figure 2. Diagram for monitoring and loading principles in centrifugal model tests
图 2. 静态加载离心模型试验监测、加载示意图

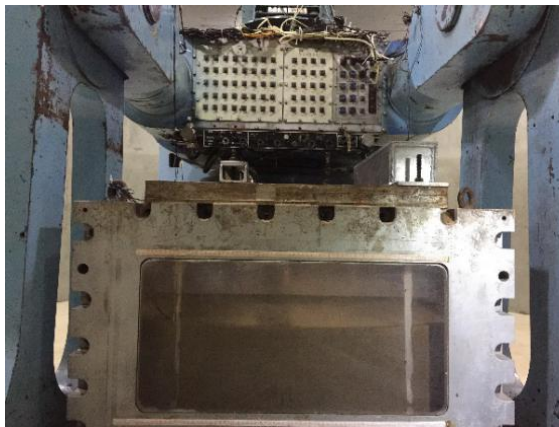


Figure 3. The model box
图 3. 模型箱

3. 离心试验结果及分析

本次试验离心机保持离心加速度为 50 g，针对 0°、5°、15°这 3 种不同的吸力式基础倾斜状态，分别进行了对应的抗拔承载力的离心模拟试验，应用土压和孔隙水压力传感器监测土体破坏过程中土压和孔压的变化。试验采用竖向连续加载方式(原理如图 2)，通过不断注水来增加抗拔承载力的方法，以吸力式基础在抗拔过程中的位移为监测变量，测试吸力式基础在饱和粘土地基中的极限承载力。

3.1. 孔压变化分析

图 4 是试验过程中孔压从试验开始到离心加速度为 50 g 时的变化情况，通过换算，孔压变化程度良好，精度较高。

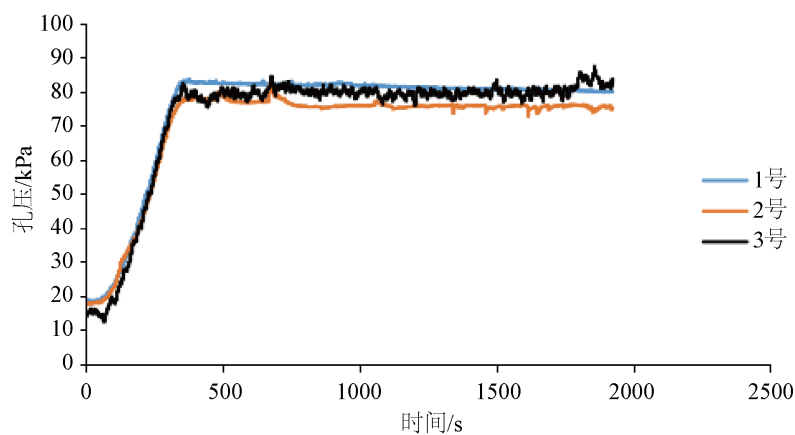


Figure 4. Changes of pore pressure in centrifugal acceleration
图 4. 离心加速过程孔压变化情况

在吸力桶的左侧、中部、右侧分别布置 3 个孔隙水压力计 2#、1# 和 3# (图 2)，记录试验过程中土内孔隙水压力。由试验相关数据可知，孔压在 3 种不同倾斜角度工况下变化规律较为相似。选取吸力式基础在倾斜度为 0° 状态下抗拔过程中的孔压变化情况(图 5)进行分析。由图可以发现，当吸力式基础被拔起时孔压受到扰动，1# 孔压受到扰动情况最为明显，2# 孔压和 3# 孔压在 20 s~40 s 稍有下降，后继续上升。这是因为桶基在上拔过程中周围的水向桶内流动，导致桶内水位上升，孔隙体积减小，孔压整体呈上升趋势。

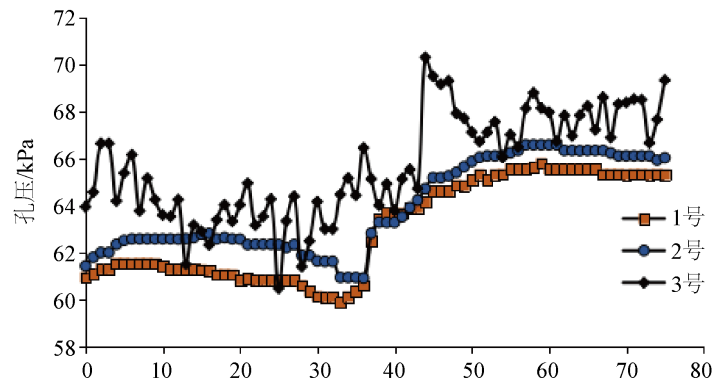


Figure 5. The changing process of pore pressure in the suction foundation
图5. 吸力式基础抗拔过程孔压变化情况

3.2. 承载力变化分析

3.2.1. 承载力变化机理分析

将竖直沉贯的桶体与倾斜 5° 沉贯桶体、倾斜 15° 沉贯桶体时间位移曲线图进行对比,可以发现:随着倾斜角度的增加,位移增长速度加快。竖直沉贯的桶体在位移达到 5.1 cm 时拔出,历经 45 s ;倾斜 5° 沉贯桶体在位移达到 5.1 cm 时拔出,历经 32 s ;结合图6、图7,对倾斜 15° 沉贯桶体的抗拔过程进行分析,吸力式基础在整个抗拔过程中刚开始还是匀速上拔状态,当桶体位移到达 3.9 cm 时,出现了一个水平位移突增点,并随着拉拔力的增加,水平位移增加愈加明显,吸力式基础则以水平位移的突变点对应的拉拔力作为极限破坏承载力。

将竖直沉贯的桶体与倾斜 5° 沉贯桶体、倾斜 15° 沉贯桶体承载力位移曲线图进行对比,可以发现:随着吸力式基础倾斜程度的增加,吸力式基础承载力不断减小。竖直沉贯的桶体在位移达到 5.1 cm 时拔出,以拔出时候的荷载作为该工况下的吸力式基础极限承载力,即 1607 kN ;倾斜 5° 沉贯桶体在位移达到 5.1 cm 时拔出,吸力式基础极限承载力为 1513 kN ;倾斜 15° 沉贯桶体在刚开始出现水平位移突增点对应的拉拔力作为桶体的极限承载力,为 1352 kN 。随着倾斜角度的增加,侧壁摩阻力和桶底阻力减小,吸力式基础承载力也在不断较小。

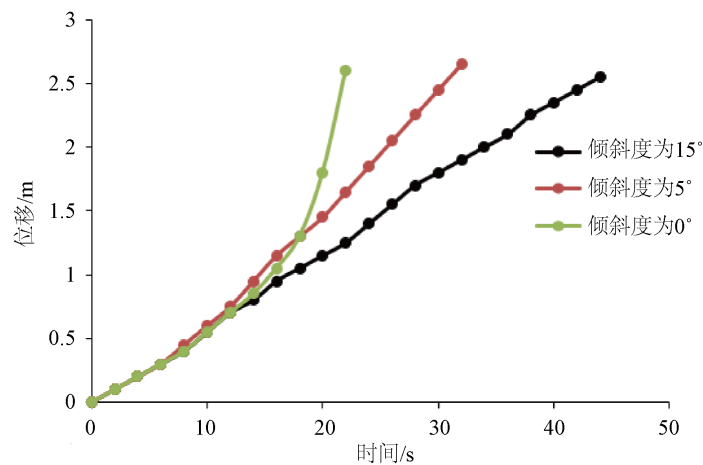


Figure 6. History of the vertical displacement in the uplift process of the suction foundation

图6. 吸力式基础抗拔过程中桶体时间 - 竖向位移曲线

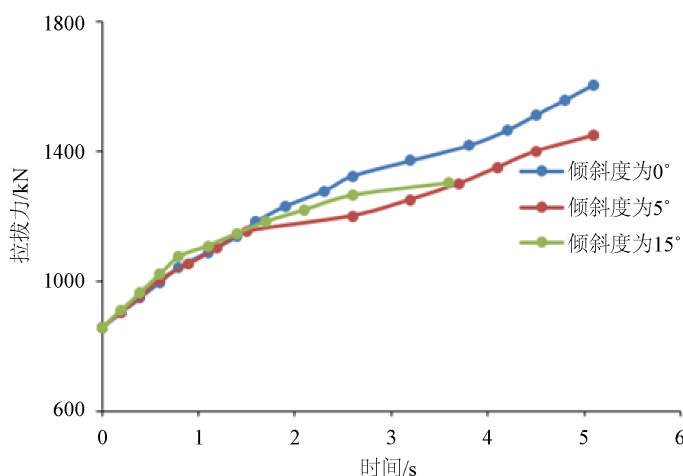


Figure 7. Force-displacement curve in the process of pulling out of the suction foundation

图 7. 吸力式基础抗拔过程中桶体承载力 - 位移曲线

以吸力式基础在竖直状态下的抗拔过程为例, 桶形基础在抗拔过程中主要是承受侧壁摩阻力 T 和桶底阻力 F_1 。随着吸力式基础在抗拔过程中上升, 外荷载增加比较快, 侧壁摩阻力增加较快, 桶底的抗拔阻力增加较慢, 桶内负压逐渐减小, 减小在一定程度上减慢了桶底抗拔阻力的增加; 当侧壁阻力达到极限后, 桶底阻力还有所增加, 这是因为桶内底部土塞也能承受一定的拉力。位移继续增加, 桶底阻力减小, 桶内土塞与桶基下面土层断开, 桶内负压不再变化(由于土塞自重、桶内壁摩阻力和桶顶负压之和与外部气压达到平衡), 侧壁阻力减小直至为 0, 最后桶基只剩桶基本身重量和土塞重量, 桶形基础被拔出, 以此时拔出时候的荷载作为该工况下的吸力式基础极限承载力。而随着倾斜角度的增加, 侧壁摩阻力和桶底阻力减小, 在竖直的分量也在不断减小, 导致吸力式基础承载力不断较小。

3.2.2. 承载力计算与试验对比

吸力式基础的极限抗拔破坏机理有三种: 1) 在桶内没有负压, 土与桶壁的摩擦力小于土体的拉伸强度, 沿着桶壁局部剪切破坏而导致基础破坏, 这时桶体单独拔离地面; 2) 当土与桶壁内侧的摩擦力和负压之和大于土的拉伸强度时发生局部拉伸破坏, 这时的土塞拉离海床留下空洞而破坏; 3) 一般的剪切破坏, 即基础的整体破坏。本次实验过程中, 由于加载速率较大, 产生的被动吸力较大, 桶体会带同土塞一起拔出, 抗拔承载能力较强, 属于第二、三种破坏机理。

以在竖直状态下的吸力式基础为例, 桶形基础的受力分析如图 8 所示, 抗拔能力的计算公式为:

$$F = W_p + W_s + T_e + T_s - T_n$$

其中 W_p 是吸力桶的重量; W_s 为吸力桶中土塞重量; $T_e = \alpha C_\mu A_{se}$ 为吸力桶裙外壁与土的摩擦力; $T_s = \sigma_t A_t$ 为吸力桶内土塞底部极限张力。 $T_n = \rho_{ip} (A_e - A_t)$ 为吸力桶桶裙底端部所受水压力, 其值近似为 0, 忽略不计。

经计算, $W_p = 132.5 \text{ kN}$; $W_s = 845.3 \text{ kN}$; $T_n = 266 \text{ kN}$; $T_s = 184.8 \text{ kN}$; 由此得出 $F = 1428.6 \text{ kN}$ 与 1607 kN 进行对比, 发现相差不大, 误差范围在 12% 以内。公式可知, 随着倾斜角度的增加, 摩擦力与土塞底部的极限张力在竖直方向的分量减小, 在水平方向的分量增加, 水平位移突增点越小, 水平位移突增点对应的拉拔力越小, 导致极限承载力越小, 这可以解释倾斜 15° 的吸力式基础到达某一点后桶体的水平位移突增, 极限承载减小的实验现象, 说明力学分析与实验结果是相一致的。

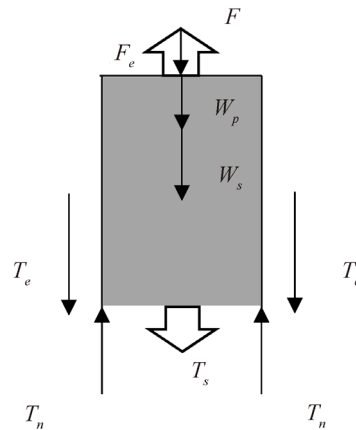


Figure 8. Schematic view of forces
图 8. 受力分析

4. 结论

本文通过土工离心试验平台,进行了3组不同倾斜度状态下的离心模型试验。试验采用竖向连续加载方式,通过不断注水来增加抗拔力的方法,以吸力式基础在抗拔过程中的位移为监测变量,测试了吸力式基础在饱和粉土地基中的极限承载力。同时在整个试验过程中还监测了吸力式基础在拉拔破坏过程中的周围土体孔压、土压变化规律情况。在经过试验结果分析之后,可得主要结论如下:

1) 离心模型试验中,随着吸力式基础倾斜程度的增加,吸力式基础承载力不断减小,当倾斜程度为 5° 时吸力式基础的承载力减小了6%,当倾斜程度为 15° 时基础承载力减小了19%。在高速离心还原现场规模状态下,基础承载力受倾斜度的影响较大。

2) 吸力式基础上升过程中,在桶体埋设的左侧、内侧、右侧三个位置的孔压受到扰动,内侧孔压受到扰动情况最为明显,左侧、右侧孔压情况基本相同,三个位置的孔压整体呈上升趋势。

3) 离心模型试验结果表明,吸力式基础在拉拔破坏过程有两种不同状态:当吸力式基础倾斜程度较小时,吸力式基础始终保持匀速上升的状态,吸力式基础以拔出时的荷载值作为极限承载力。当吸力式基础倾斜程度为 15° 时,吸力式基础先匀速上升,当到达某一点后,桶体的水平位移突增,并随着拉拔力的增加,水平位移增加愈加明显,吸力式基础则以水平位移的突变点对应的拉拔力作为极限破坏承载力。针对吸力式桶形结构进行力学分析,计算承载力的值与实验数据进行对比,误差在12%以内,基本认为合理。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 何炎平, 谭家华. 筒型基础的发展历史和典型用途[J]. 中国海洋平台, 2002, 17(6): 10-14.
- [3] Tjelta, T.L., Hermstad, J. and Andenaes, E. (1990) The Skirt Piled Gullfaks C Platform Installation. OTC6473, 453-462.
- [4] 李润培, 谢永和, 舒志. 深海平台技术的研究现状与发展趋势[J]. 中国海洋平台, 2003, 18(3): 1-5.
- [5] 张建红, 林小静. 深海海洋平台基础简介[J]. 岩土工程界, 2004, 7(12): 19-22.
- [6] 谢彬, 张爱霞, 段梦兰. 中国南海深水油气田开发工程模式及平台选型[J]. 石油学报, 2007, 28(1): 115-118.
- [7] 段梦兰, 陈永福, 李林斌, 等. 海洋平台结构的最新研究进展[J]. 海洋工程, 2000, 18(1): 86-90.
- [8] Lian, J., Ding, H. and Zhang, P. (2012) Design of Large-Scale Pre-Stressing Bucket Foundation for Offshore Wind Turbines. *Transactions of Tianjin University*, **18**, 79-84. <https://doi.org/10.1007/s12209-012-1661-5>

-
- [9] 朱儒弟, 高恒庆, 马小兵. 海上平台桶形基础模型压力压贯与负压沉贯试验研究[J]. 海岸工程, 1999, 18(1): 60-66.
- [10] 洪学福, 刘志安, 陈学春, 等. 桶形基础海上中间试验研究[J]. 海岸工程, 1999, 18(1): 56-59.
- [11] Wang, M.C., Nacci, V.A. and Demars, K.R. (1975) Behavior of Underwater Suction Anchor in Soil. *Ocean Engineering*, 3, 47-50. [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(75\)90006-2](https://doi.org/10.1016/0029-8018(75)90006-2)
- [12] 徐继祖, 史庆增, 宋安, 等. 吸力锚在国内近海工程中的首次应用与设计[J]. 中国海上油气(工程), 1995, 7(1): 32-36.