

基于振动减阻原理的吸力式基础纠偏试验研究^①

谢立全^② 林田田

(同济大学土木工程学院 上海 200092)

摘 要 吸力式基础作为一种新兴的海洋锚泊基础,具有运输便捷、施工快、节省材料等优点。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易发生倾斜,严重影响自身的承载功能。本文针对海底吸力式基础的沉贯倾斜问题,展开一系列试验,采用振动减阻原理达到纠偏效果。试验分别研究了在不同振动频率、不同初始倾斜角、不同静压荷载作用下的基础纠偏过程。结果表明,倾斜的吸力式基础可通过侧壁振动方式实现有效纠偏,其纠偏效果与振动频率、初始倾斜角以及静压荷载息息相关;相同激振力作用下,激振频率越大(25 ~ 75 Hz),所需纠偏时间越短;桶基的初始倾斜角越大,则完全纠偏所需时间越长,且呈非线性增加;贯入荷载(或贯入深度)越大,纠偏难度越大,纠偏越早(贯入深度越小)越容易。

关键词 吸力式基础, 倾斜, 振动, 纠偏, 频率

0 引 言

海洋是人类赖以生存发展的基础与载体。占地球表面 71% 的海洋兼具生命摇篮,资源宝库,国防屏障等重大功能^[1]。海上风能具有资源丰富,分布广泛,清洁等优点,已经逐渐成为主要的可再生能源之一^[2]。海上风能的开发促进其基础研究,相比于传统的单桩基础与重力桩基础,吸力式基础更具发展前景^[3]。吸力式基础又称为吸力沉箱,其上端封闭,下端开敞,像一只倒扣在土中的桶,主要依靠负压实现沉放就位^[4]。吸力式基础具有运输便捷,安装简单,施工周期短,节省材料等诸多优点^[5]。但吸力式基础在安装过程中易发生倾斜,导致其承载力降低,影响海洋平台的稳定性^[6]。因此,本文基于侧振纠偏技术^[7]对吸力式基础的沉贯纠偏过程进行了试验分析。

吸力式基础的安装过程,包括定位触底、重力贯

入、负压贯入及结束安装 4 个阶段,其中负压贯入过程一直是研究关注的重点。由于复杂的深海波流环境和海床地形的影响,在安装初期基础易发生倾斜,倾斜状态下的基础在负压贯入过程中易产生渗流破坏,渗流大小与基础长径比、土体级配参数、水力坡度等息息相关^[8]。此外,随着倾斜角增加,临界负压明显减小,降低了施工效率与最终贯入深度,进而影响基础承载力与稳定性^[9]。国内外工程试验证明,大部分吸力式基础贯入失败的原因主要是因为贯入过程中出现倾斜问题^[4]。

海底沉积物在循环荷载(包括振动)作用下,易于发生土体液化,导致土体破坏和强度降低,土体液化时,其孔压小于上覆自重应力^[10]。同济大学谢立全^[7]提出一种海底吸力式基础沉放方法,即利用砂土振动减阻实现纠偏的效果。Taslagyan 等^[11]认为振动强度的增加降低了土颗粒材料的摩擦角,从而降低土体承载力。Dash 和 Sitharam^[12]则研究了振动频率对砂土液化的影响,研究表明抗液化能力随

① 国家自然科学基金(51479137)资助项目。

② 男,1972 年生,副教授,博士;研究方向:海洋岩土工程研究;联系人,E-mail: xie_liquan@ tongji. edu. cn
(收稿日期:2018-07-30)

加载频率的增加而降低。郭莹与贺林^[13]通过三轴试验发现,在饱和状态下,松砂与密砂的液化强度随振动频率的增大而增大。

目前关于吸力式基础沉放调平方法的研究相对较少,鉴于海洋资源开发的步伐加快、吸力式基础广阔的发展前景以及贯入倾斜问题的严重性,对吸力式基础贯入过程的研究,特别是调平方法的研究具有重要意义。

针对调平方法研究,本文采用模型试验方法,利用砂土振动减阻特性展开试验研究,从振动频率、初始倾斜角、荷载三个角度研究振动纠偏效果,为工程实际提供参考。

1 试验设计与试验方法

1.1 实验原理

本实验利用饱和砂土的振动减阻特性,对吸力式基础的侧壁进行局部振动,减小基础局部沉贯阻力,进而达到纠偏效果。试验主要围绕吸力式基础贯入过程中的振动频率,基础初始倾斜角以及荷载这 3 个方面进行。采用控制单一变量的试验方法,分别研究不同振动频率,不同初始倾斜角度,不同负压大小作用下,基础的纠偏效果。在基础左右两侧的桶壁外侧分别设置刻度尺,在沉放调平过程中,通过观测左右两侧刻度变化情况,进而得出基础左右两侧贯入深度变化情况,定量观测纠偏全过程。由于吸力式基础在沉贯过程中桶内负压大小不稳定且不易读取,因此本实验采用恒定的静压荷载模拟负压荷载。试验原理示意图如图 1 所示。

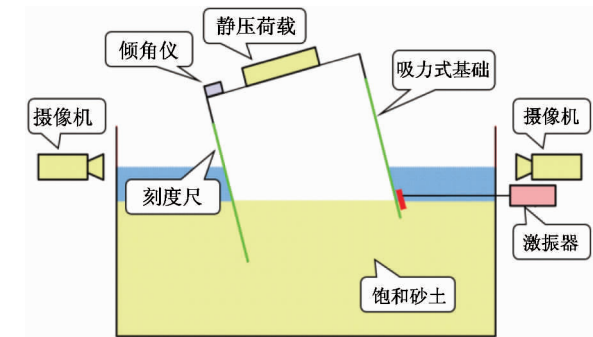


图 1 试验原理示意图

1.2 实验仪器与材料

本试验在刚性试验模型箱中进行,吸力桶模型位于土槽中间位置。试验模型箱是由型钢作为固定框架,侧壁与底板为钢化玻璃,便于观察读数。考虑模型基础的尺寸大小、试验条件及边界效应,试验模型箱的长宽高分别定为 1200mm × 1000mm × 500mm。吸力式基础模型侧壁采用铝质金属,侧壁左右两侧粘贴刻度尺,便于观测沉贯纠偏过程;顶部以有机玻璃圆板密封,便于观察,顶板设有排气、抽气开关各一个。基础桶高 500 mm,桶内径 500 mm,壁厚 1 mm,长径比为 1,自重为 23 kg。振动加载装置采用南京航空航天大学振动工程研究所研制的 HEV-200 型号的激振器,HEV-200 型高能激振器是一种电动变换器,将电能转换为机械能,对试件提供激振力的一种装置。试验土体为筛分后的细砂,粒径范围 0.1 mm ~ 0.25 mm,干密度为 1.56 g/cm³,饱和密度为 1.99 g/cm³,孔隙比为 0.77,颗粒粒径 D₁₀ = 0.11 mm、D₅₀ = 0.16 mm、D₆₀ = 0.18 mm,渗透系数为 2.80 × 10⁻⁵ m/s。试验仪器及现场布置情况如图 2。基础模型顶板设有静压荷载以及数显倾角仪,试验过程中可以根据方案要求设置荷载及倾角。

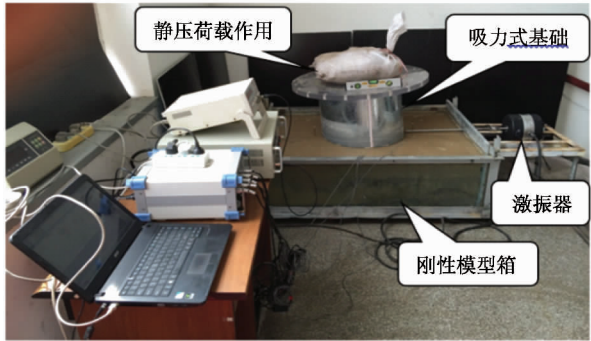


图 2 试验仪器现场布置图

1.3 试验方案

本实验的研究目的是为了探究吸力式基础沉贯过程中的振动纠偏效果以及探究主要物理参数对纠偏效果的影响。为此,本文采用控制单一变量法展开实验,分别研究在不同激振频率、不同初始倾斜角、不同静压荷载作用下的调平效果。通过观察基础左右两侧的刻度尺在调平过程中的液面读数变化并记录调平时长,进而定量判断纠偏快慢,总结振动

纠偏规律。

试验过程中的激振力为 20 N,具体工况如表 1 所示。其中,组 A 可分析对比得到不同激振频率下的纠偏效果;组 B 可得到不同初始倾斜角的纠偏效果;组 C 可得到不同静压荷载下的纠偏效果。

表 1 试验方案			
工况	激振频率(Hz)	初始倾斜角	静压荷载(N)
A1	25	4%	400
A2	50		
A3	75		
B1	50	2%	400
B2		4%	
B3		6%	
C1	50	4%	200
C2			400
C3			600

2 试验结果与分析

在吸力式基础沉贯纠偏试验中,对已经发生倾斜的单桶基础实施局部侧振,使其局部砂土液化,贯入阻力减小,加速贯入进而实现纠偏。试验以桶基的倾斜角纠偏达到零为基准,所需时间越短,则纠偏效果越好。桶基向左侧倾斜,局部加载的激振荷载位于右侧。在桶基完全实现纠偏时,其左右两侧的桶壁贯入土体深度也将完全相等。通过系列试验的结果对比(如图 3 ~ 图 5),可分析纠偏效果的影响

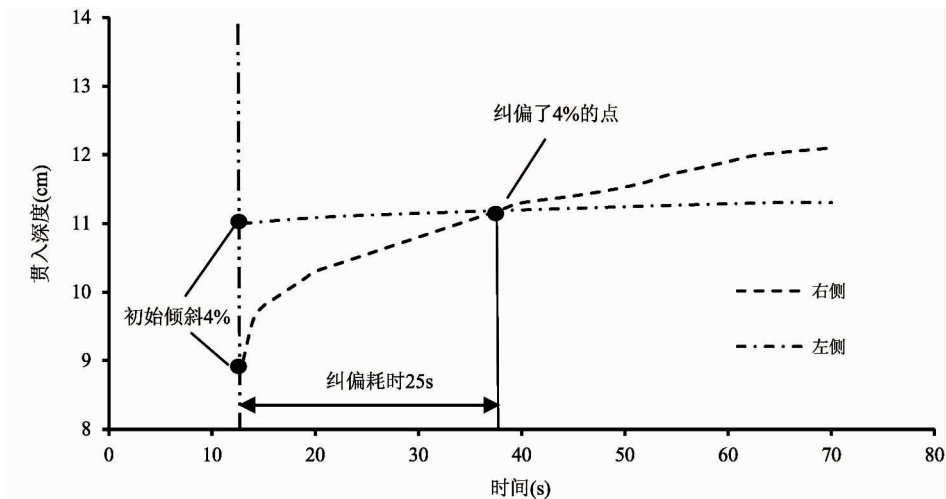
因素及其作用规律。

2.1 不同振动频率作用下纠偏效果对比分析

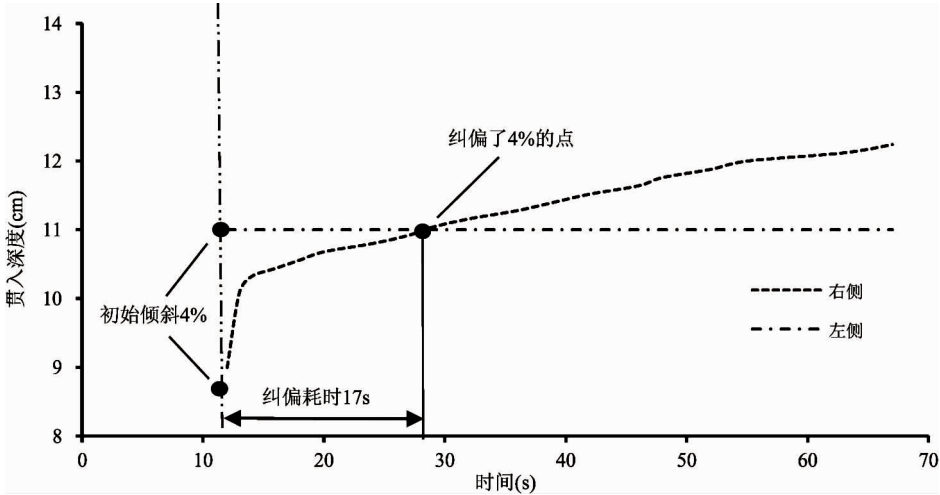
A1 ~ A3 为不同激振频率作用下的试验工况,初始倾斜角为 4%,静压荷载为 400 N 时,激振频率分别为 25 Hz、50 Hz、75 Hz。图 3 为不同激振频率作用下基础左右两侧贯入深度变化情况。由图中可知,激振频率为 25 Hz、50 Hz、75 Hz 所需纠偏时间分别为 25 s、17 s、2 s。对比可知,在其它条件不变的情况下,激振频率对倾斜吸力桶的纠偏效果有很大影响,在一定范围内,随激振频率增加,纠偏所用时间明显减小,纠偏效果越明显,并且当频率为 75 Hz 时,调平完成后短时间内迅速出现“过纠偏”现象,导致基础又发生反向倾斜。这说明纠偏中应当控制合适的纠偏频率,提高纠偏效率的同时防止纠偏过于迅速导致的“过纠偏”现象。

2.2 不同初始倾斜角下纠偏效果对比分析

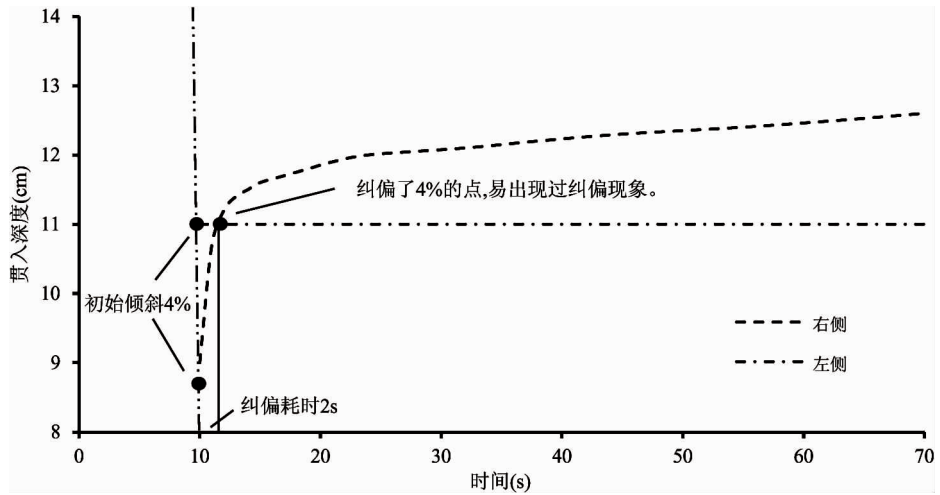
B1 ~ B3 为不同初始倾斜角下的试验工况,振动频率为 50 Hz,静压荷载为 400 N 时,初始倾斜角分别为 2%、4%、6%。图 4 为不同初始倾斜角下基础左右两侧贯入深度变化情况。从图中可知,倾斜角为 2%、4%、6% 所需纠偏时间分别为 2 s、17 s、48 s。对比可看出,在其他条件不变的情况下,桶体初始倾斜角对纠偏效果的影响显著,倾斜角越小时纠偏所用时间越短,纠偏越容易,随着倾斜角增加,纠偏所用时间迅速增加,呈非线性变化,这说明施工中应时刻注意基础的倾斜角,尽早纠偏以减小纠偏成本。



(a) A1: 25 Hz

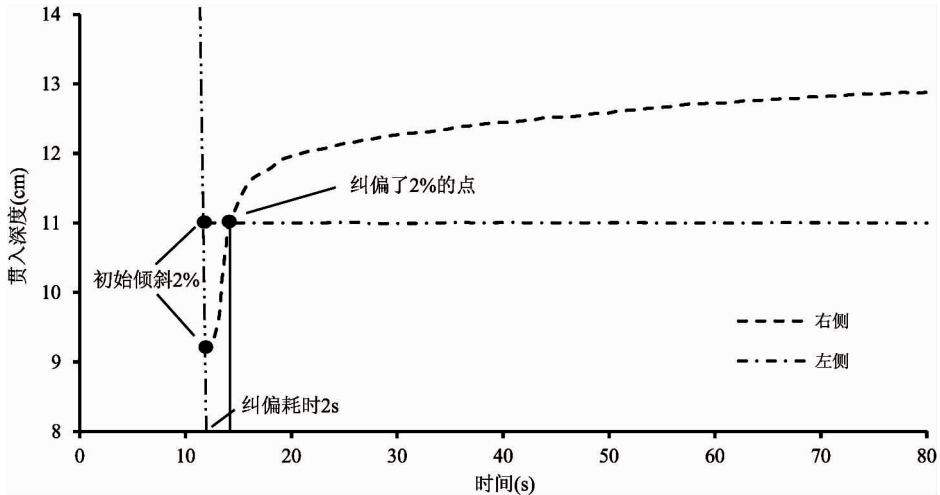


(b) A2: 50 Hz

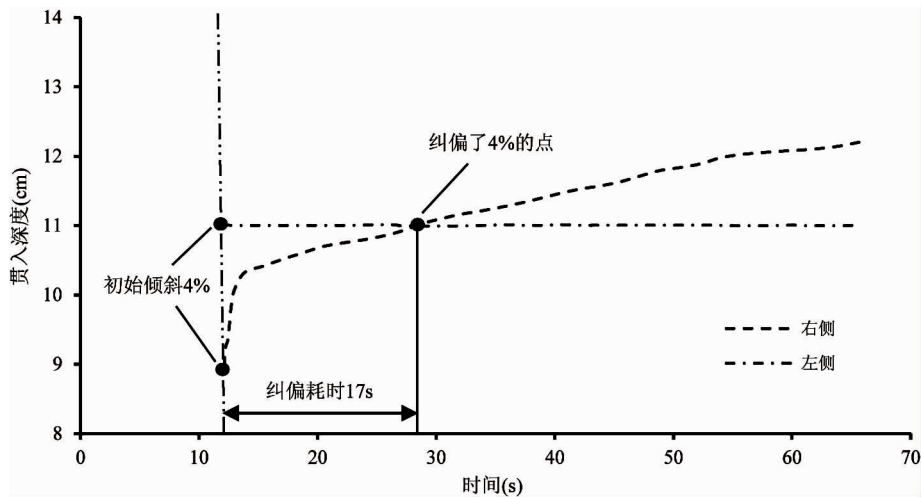


(c) A3: 75 Hz

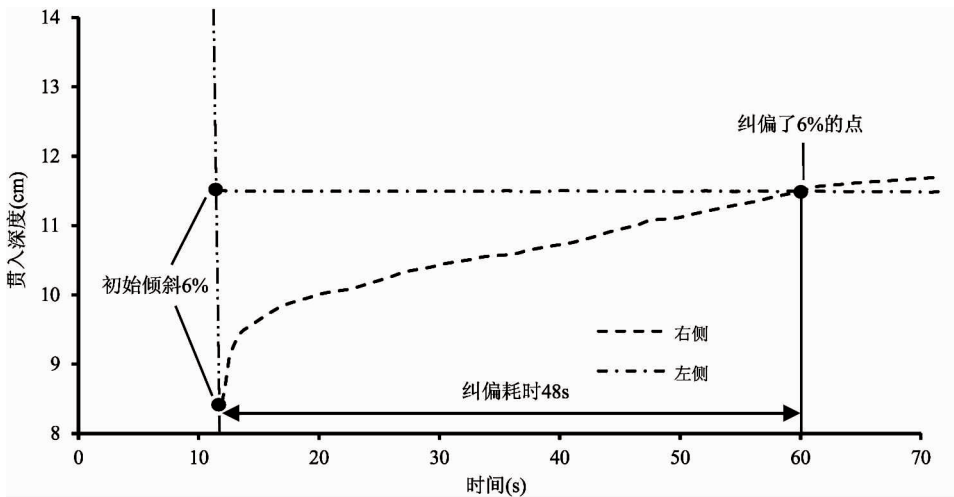
图 3 不同振动频率下基础两侧贯入深度变化情况



(a) B1: 初始倾斜角为 2%

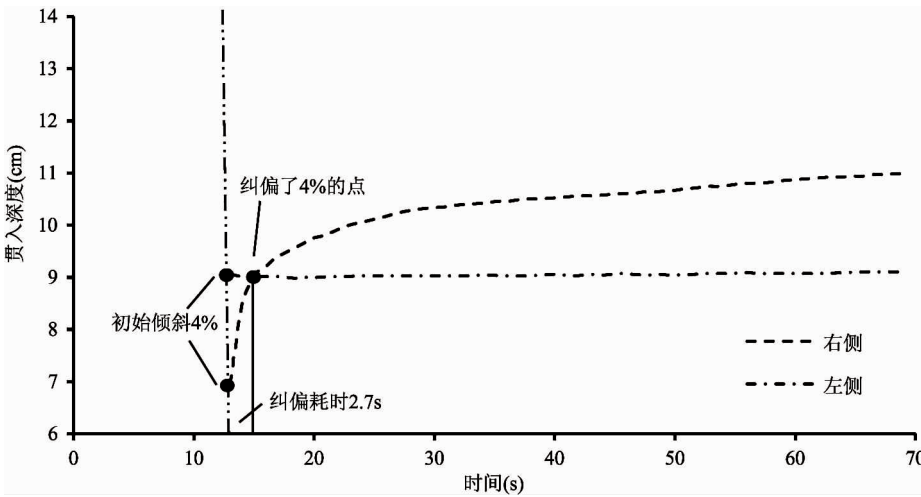


(b) B2: 初始倾斜角为 4%

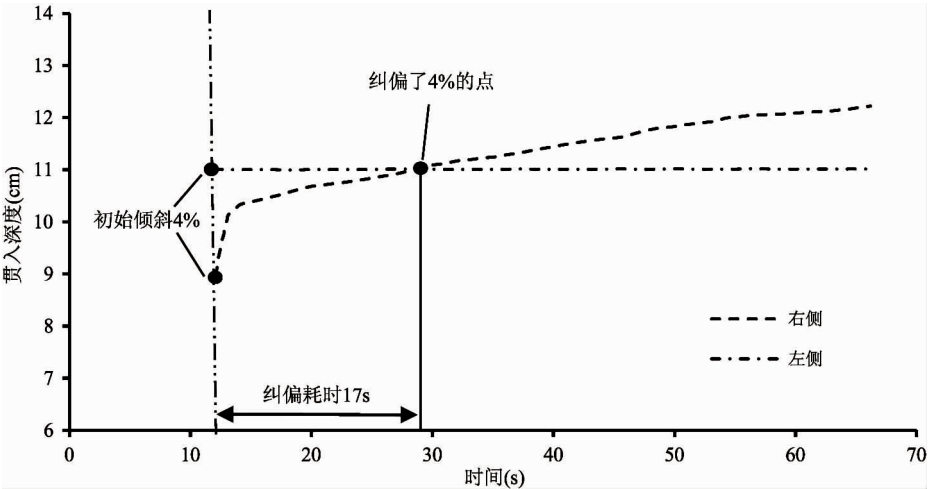


(c) B3: 初始倾斜角为 6%

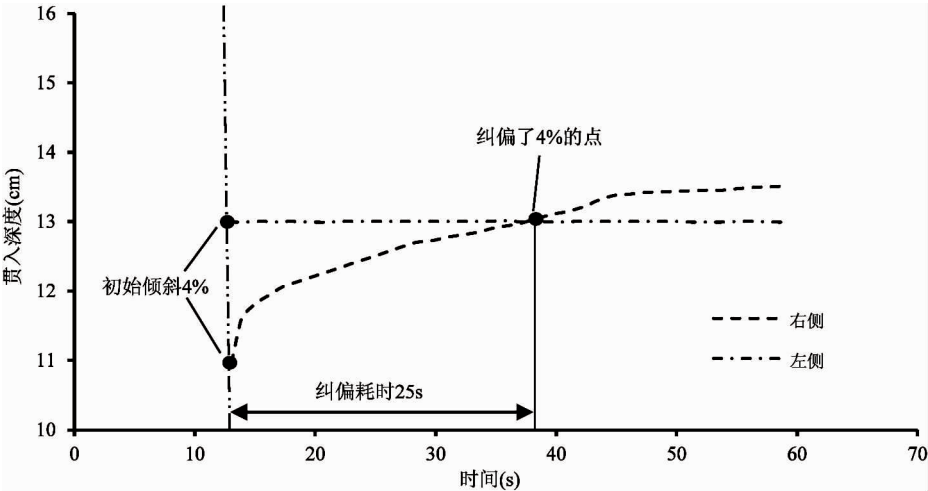
图 4 不同初始倾斜角时的基础左右两侧贯入深度变化情况



(a) C1: 静压荷载为 200 N



(b) C2: 静压荷载为 400 N



(c) C3: 静压荷载为 600 N

图 5 不同静压荷载作用下的基础左右两侧贯入深度变化情况

2.3 不同静压荷载下纠偏效果对比分析

C1 ~ C3 为不同静压荷载下的试验工况,激振频率为 50 Hz,初始倾斜角为 4% 时,静压荷载分别为 200 N、400 N 和 600 N。图 5 为不同静压作用下基础左右两侧贯入深度曲线图,从图中可知,静压荷载 200 N、400 N、600 N 所需的纠偏时间分别为 2.7 s、17 s、25 s,对比可看出,在其他条件不变的情况下,初始施加的静压荷载对倾斜吸力桶的纠偏效果影响很大,且纠偏时长随静压荷载的增大而增大,这说明纠偏中不宜施加过大的负压荷载。

3 结 论

本文在自行研制的试验平台上,针对吸力式基

础的纠偏过程展开一系列试验研究。采用控制单一变量法,观测吸力式基础在不同振动频率、不同初始倾斜角以及不同静压荷载作用下的沉贯过程,总结沉贯纠偏规律。主要得出以下结论:

- (1) 吸力式基础在沉贯安装过程中易发生倾斜,可通过施加侧壁局部振动方式实现有效纠偏,其纠偏效果与振动频率、初始倾斜角以及静压荷载息息相关。
- (2) 相同激振力作用下,激振频率越大(25 ~ 75 Hz),所需纠偏时间越短,纠偏中应当控制合适的纠偏频率,提高纠偏效率的同时防止纠偏过于迅速而导致的“过纠偏”现象。
- (3) 桶基的初始倾斜角越大,则完全纠偏所需

时间越长,且呈非线性增加,施工中应及早纠偏以减小纠偏成本。

(4) 贯入等效荷载(或贯入深度)越大,纠偏难度越大,纠偏越早(贯入深度越小)越容易。

参考文献

- [1] 相建海. 海洋科技发展趋势[N]. 人民日报, 2015-10-18(005)
- [2] Li J L, Yu X. Model and procedures for reliable nearterm wind energy production forecast[J]. *Wind Engineering*, 2015, 39(6): 595-607
- [3] Wang X F, Yang X, Zeng X W. Centrifuge modeling of lateral bearing behavior of offshore wind turbine with suction bucket foundation in sand[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 139: 140-151
- [4] 陈飞. 砂土中海上风机筒型基础沉放过程筒—土作用研究[D]. 天津:天津大学建筑工程学院, 2014. 3-4
- [5] Yang X, Zeng X W, Wang X F. Lateral-moment loading capacity and bearing behavior of suction bucket foundations for offshore wind turbines in sand[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2018, 18(11)
- [6] 袁中立, 秦延龙, 唐海燕. 浅海桶形基础平台[M]. 北京:石油工业出版社, 2010. 27-30
- [7] 谢立全. 一种海底吸力式基础沉放方法[P]. 中国专利, 2008100404777. 2008-12-10
- [8] Hu R Q, Zhang P Y, Ding H Y, et al. Numerical analysis of seepage field of bucket foundations for offshore wind turbines[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2018, 13(8): 822-834
- [9] 练继建, 陈飞, 杨旭, 等. 海上风机复合筒型基础负压沉放调平[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2014, 47(11): 987-992
- [10] 冯秀丽, 石要红, 潘毅, 等. 海底原位土体孔压监测与评价技术[J]. 高技术通讯, 2005, 15(12): 75-78
- [11] Taslagyan K A, Chan D H, Morgenstern N R. Effect of vibration on the critical state of dry granular soils[J]. *Granular Matter*, 2015, 17(6): 687-702
- [12] Dash H K, Sitharam T G. Effect of frequency of cyclic loading on liquefaction and dynamic properties of saturated sand[J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 10(5): 487-492
- [13] 郭莹, 贺林. 振动频率对饱和砂土液化强度的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(6): 618-623

Test research on incline rectification of suction foundation based on principle of resistance-reduce vibration

Xie Liquan, Lin Tiantian

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200091)

Abstract

The suction foundation, as a new type of anchor foundation, has the advantage of convenient transportation, rapid construction and material saving. However, there are many problems related to vertical installation of suction buckets due to the complex ocean wave current and seabed geological conditions, which may cause the decrease of bearing capacity of the suction buckets after inclined installation. In this paper, a series of experiments are conducted to model the leaning process of the suction foundations, and to verify the righting rate of the leaning buckets by exerting resistance-reduce vibration on local side walls (RRV-LSW) under different conditions of the vibration loading frequency, the initial leaning angle of the bucket and the suction loading. The experiment results show that the method of RRV-LSW is satisfactory to upright the leaning buckets during penetrating process, and its performance is closely relative to the vibration loading frequencies, initial leaning angles and equivalent loading. Within the range of 25 – 75Hz, the higher frequency of the vibration loading has a higher righting rate when exerting same value of the vibration force. The required time to upright the leaning bucket increases nonlinearly with the increase of the leaning angle of the bucket. The difficulty of uprighting the leaning bucket is higher when the suction loading (or the buried depth of buckets) is larger, which reminds that it is better to upright the leaning bucket as early as possible.

Key words: suction foundation, inclination, vibration, rectification, frequency