



复合地基桶式基础结构下沉力 原位试验研究*

李武, 朱琳

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对复合地基上桶式基础结构下沉阻力和下沉力估算问题, 通过现场原位试验得到桶式基础结构下沉过程中的潮位、隔仓真空度及桶式基础结构底高程等相关数据, 分析复合地基对桶式基础结构下沉影响的规律, 得出桶式基础结构下沉阻力估算参数的取值, 确定下沉力估算值。结果表明, 复合地基中砂桩顶高程是控制安装质量的关键, 建议选取大功率抽真空设备以保证下沉力的可控性。研究成果可为桶式基础结构下沉施工提供技术依据。

关键词: 复合地基; 桶式基础结构; 下沉阻力; 下沉力

中图分类号: U652.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)03-0092-04

In-situ experimental study on sinking force of bucket-foundation structure on composite foundation

LI Wu, ZHU Lin

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: To estimate the sinking resistance and sinking force of the bucket-foundation on the composite foundation, the tide level, the vacuum degree of the compartment and the bottom elevation of the bucket-foundation structure in the sinking process are obtained through the field in-situ test, the influence law of the composite foundation on the sinking of the bucket-foundation structure is analyzed. The parameter values for estimating the sinking resistance of the bucket-foundation structure are obtained, and the estimated values of the sinking force are determined. The results show that the top elevation of sand pile in composite foundation is the key to control the installation quality, and it is suggested to select high-power vacuum equipment to ensure the controllability of sinking force. The research results can provide technical basis for the sinking construction of bucket-foundation construction.

Keywords: composite foundation; bucket-foundation structure; sinking resistance; sinking force

桶式基础结构是近十年针对外海软土地提出
的大型水工新结构, 具有承载力强、稳定性好等
优点。李武等^[1]针对桶式基础结构特性进行系统
研究, 提出桶式结构形式及其主尺度估算方法、
稳定性和承载力验算方法、沉降验算方法、结构
强度验算方法, 归纳桶式基础结构设计技术规定

等主要设计方法。练学标^[2]通过对桶式基础结构
的浮游稳定、无底模板工艺、桶体场内搬运、气
浮负压下沉工艺的运用及自动化控制系统的研发,
形成成套施工技术。徐光明等^[3]、曹永勇等^[4-5]、
Watson et al.^[6]、利用土工离心模型试验, 研究
椭圆形下桶基础在淤泥层中的自重下沉和负压

收稿日期: 2024-09-27

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFB2604200)

作者简介: 李武 (1978—), 男, 博士, 正高级工程师, 从事港口、航道工程设计及项目管理。

工法的贯入下沉,分析下桶基础的下沉总阻力、桶壁摩擦力以及截面压应变随贯入位移的变化,得到下沉曲线的转折点,根据转折点对应的下沉总阻力确定椭圆形下桶基础贯入过程所受临界下沉总阻力值。Villalobos et al.^[7]、朱小军等^[8-9]、彭剑等^[10]利用海上离岸结构的测量技术,开展钢桶的原位试验,得到桶体负压下沉和充气顶升过程中结构位移、倾角、桶内气压以及桶壁应变的变化规律,发现抽水和抽气互相配合的高效作业方式,钢桶壁环向受力大于纵向受力,靠近底部的位置易出现压应力,靠近顶部的位置易出现拉应力。

近几年,桶式基础结构应用范围不断扩大,从适应淤泥层厚度十几米向几十米发展,新的组合形式出现,即复合地基与桶式基础结构组合。该组合结构一般将深层淤泥加固,桶式基础结构穿透浅层淤泥坐落在加固后的复合地基上。组合结构中的桶体下沉深度是关键,目前尚无原位试验用以检验桶式基础结构能否穿透淤泥坐落在复

合地基上。为了研究复合地基对桶式基础结构下沉的影响,本文依托实际工程开展原位试验研究,揭示桶式基础结构下沉过程中的力学机理,估算下沉阻力 $F_{阻}$ 和下沉力 $F_{沉}$,旨在为施工设备选型提供依据。

1 原位试验

1.1 结构方案

桶式基础结构由1个基础桶体和上部沉箱组成,下桶为椭圆形,主尺寸为40 m×20 m×12 m(长×宽×高),桶壁厚0.4 m,下桶顶盖板厚0.5 m,桶内通过隔板划分为15个隔仓,隔板厚0.3 m。上部沉箱与基础桶刚性连接,上部沉箱顶高程为3.0 m,宽14 m,仓高10 m,外墙壁厚0.4 m,隔墙壁厚0.3 m。下桶底部和两侧面土体采用砂桩加固处理,地基处理宽60 m,深20 m,置换率为35%,桩径1 m,桩间距1.5 m,采用梅花形布置,见图1。

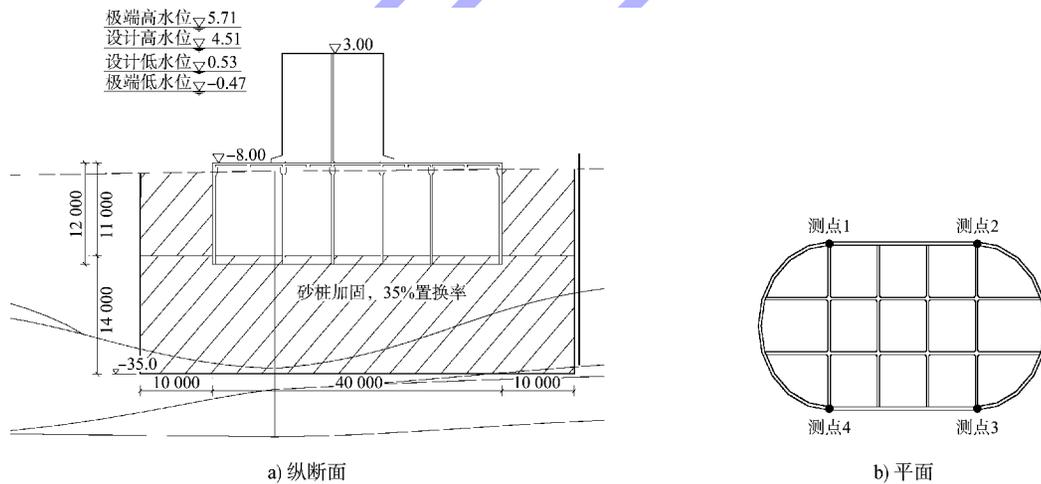


图1 复合地基桶式基础结构(高程:m;尺寸:mm)

Fig.1 Composite foundation with bucket-foundation structure (elevation: m; dimension: mm)

1.2 水文地质条件

试验区设计高水位4.51 m,设计低水位0.53 m。场地范围地层由上到下主要分布有②₁灰黄色淤泥、②₂灰黄色黏质粉土、③₂灰黄色淤泥质粉质黏土、③₃灰色粉细砂等。除了零星分布的②₁灰黄色淤泥及②₂灰黄色黏质粉土外,工程场地软弱土层主要为③₂灰黄色淤泥质粉质黏土及④₁灰色黏土,其中③₂层厚度为20.0~30.0 m。表1为

③₂层地基土和砂桩的主要物理力学特性指标。

表1 地基土和砂桩的物理力学特征指标
Tab.1 Physical and mechanical properties of foundation soil and sand piles

土体类型	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
③ ₂ 淤泥质粉质黏土	13.40	9.90	1.720
砂桩加固后③ ₂ 淤泥质粉质黏土	6.45	20.98	1.823

2 原位试验方案

2.1 试验目的

在下沉施工期对桶式基础结构的下沉力测试是施工设备选型的重要依据。根据现场测试，监控桶式基础结构下沉过程中下沉力的变化规律，优化下沉施工工艺和设备，寻找潮位与负压荷载的最优组合，尽量发挥负压和潮位联合压载效应，提高桶式基础结构沉放效率和质量，保证桶式基础结构下沉至设计高程。

2.2 试验内容

测试内容主要包括3部分：潮位、各隔仓内部的负压值、测点坐标值。原位试验测试步骤为：桶式基础结构排气下沉→排水下沉→抽真空下沉→达到验收指标停止下沉。

3 原位试验结果分析

3.1 原位试验结果

27#试验桶安装泥面高程-12.89 m，复合地基砂桩顶面平均高程-23.99 m。从2024-04-28T19:32:00开始排气下沉，入土-16.29 m；排水下沉，入土-19.68 m；抽真空下沉，入土-22.46 m；高潮位4.10 m，负压0.8个大气压，持续1 h，下沉量小于5 mm停止下沉，停止下沉高程-22.45 m。下沉过程如图2所示。

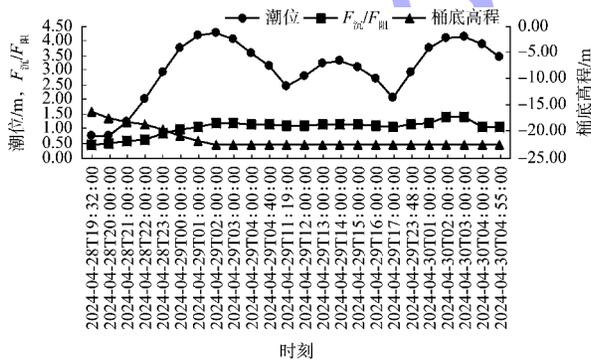


图2 27#桶下沉过程曲线

Fig. 2 Sinking process curve of No. 27 bucket

28#试验桶安装泥面高程-12.63 m，复合地基砂桩顶面平均高程-23.87 m。从2024-05-03T14:00:00开始排气下沉，入土-17.48 m；排水下沉，入土-20.78 m；抽真空下沉，入土-22.41 m；高潮位

4.20 m，负压0.8个大气压，持续1 h，下沉量小于5 mm停止下沉，停止下沉高程-22.42 m。下沉过程如图3所示。

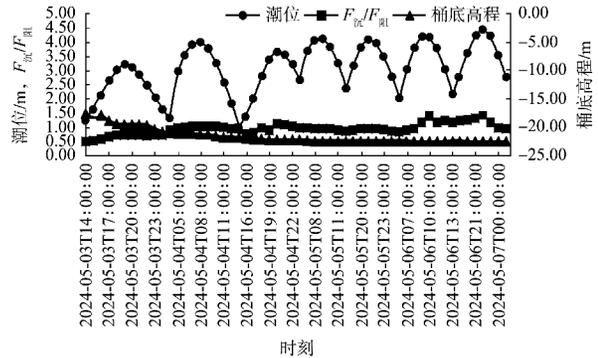


图3 28#桶下沉过程曲线

Fig. 3 Sinking process curve of No. 28 bucket

29#试验桶安装泥面高程-12.73 m，复合地基砂桩顶面平均高程-24.20 m。从2024-05-13T21:00:00开始排气下沉，入土-17.77 m；排水下沉，入土-19.40 m；抽真空下沉，入土-22.56 m；高潮位4.20 m，负压0.8个大气压，持续1 h，下沉量小于5 mm停止下沉，停止下沉高程-22.57 m。下沉过程如图4所示。

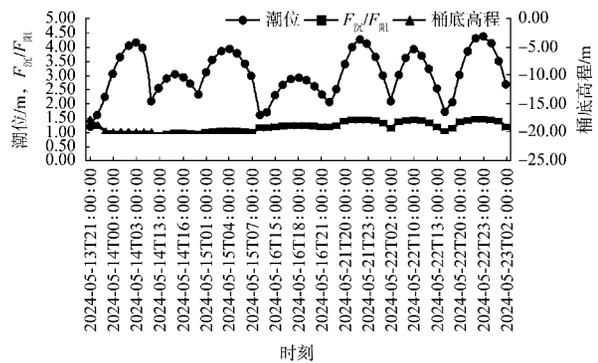


图4 29#桶下沉过程曲线

Fig. 4 Sinking process curve of No. 29 bucket

30#试验桶安装泥面高程-12.41 m，复合地基砂桩顶面平均高程-26.51 m。从2024-05-16T23:00:00开始排气下沉，入土-17.55 m；排水下沉，入土-23.42 m；开始抽真空下沉，入土-23.50 m；高潮位4.00 m，负压0.8个大气压，持续1 h，下沉量小于5 mm停止下沉，停止下沉高程-23.51 m。下沉过程如图5所示。

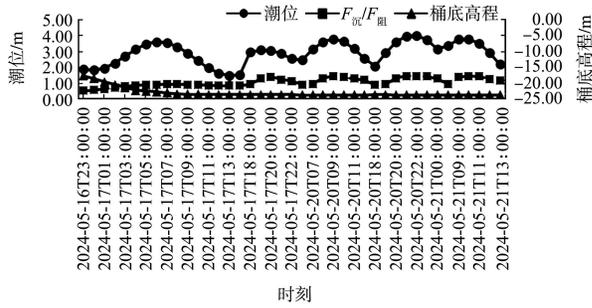


图5 30#桶下沉过程曲线

Fig. 5 Sinking process curve of No. 30 bucket

3.2 试验结果分析

从表1指标数值结合桶底所在位置发现,桶体下沉需要穿过淤泥层为典型的高含水率、高孔隙比、高压缩性和低抗剪强度的③₂淤泥质粉质黏土,并插入1 m深的砂桩加固后的③₂淤泥质粉质黏土中。根据地基淤泥和地基处理后土层性质和承载能力的不同特点,设计桶身穿越淤泥层,桶底触及地基处理后的土层。这两层土将与桶连为一体共同抵御荷载作用,因此它们对桶的下沉影响最大。27#~30#桶体下沉曲线也能反映出这一规律。从4个桶体的下沉曲线可见,桶体均未插入设计指定的复合地基,距离设计高程还差2 m左右。主要有两方面原因:一是复合地基砂桩顶面抬升,35%砂桩植入土层,使整个桶体安装区域的复合地基砂桩顶面抬升1.5 m左右,抬升范围内的土体指标大幅度提高,增大了桶体下沉的端阻力和摩擦力;另一个原因是砂桩顶面高低不平使桶体下沉困难,当桶体局部被砂桩顶住,桶体下沉会出现不平,顶端下沉缓慢,另一端下沉过快,需要通过隔仓气压调平桶体下沉姿态,由此导致下沉力损失,达不到总体下沉力。因此,从下沉现象可以得出,桶体穿过淤泥层到达复合地基抬升范围内时,下沉速度下降,调平次数增多,需要乘潮位下沉。最有利组合是高潮位时,桶体负压达到最大,且桶体底端到达复合地基,下沉深度达到最大,否则需要等待高潮位再继续下沉。但是等待高潮位时,桶体停滞会使土体恢复强度,增加高潮位下沉阻力。这也是4个试验桶体经历几个高潮位后桶体下沉量仍很小的原因。根据图2~5分析得出,桶体下沉过程中遇到顶高程最高的砂

桩时,桶体下沉力开始调平,且需要始终保持顶端负压最大,其他隔仓依照距离依次减小。当桶体底端的1/3遇到砂桩时,桶体基本下沉结束。

4 结论

1) 复合地基中砂桩顶高程是控制安装质量的重要因素。砂桩顶高程差距小,桶式基础结构能够安装到位,下沉力即可充分发挥作用,避免调整桶体姿态而损失下沉力。

2) 复合地基要考虑地基处理引起的土层顶面抬升,做下沉阻力估算时,抬升土层内应采用复合地基指标,避免下沉阻力估算过低而影响下沉设备选型。

3) 桶式基础结构插入复合地基最优时间为高潮位叠加最大真空度,且在持续下沉过程中发生,应避免在复合地基中暂停下沉、等候潮位,否则即使高潮位叠加最大真空度也很难下沉。

4) 桶式基础结构下沉力由桶体自重、潮位和隔仓真空度引起的压力组成。为保证下沉力具有灵活的可控性,应尽量选取大功率的抽真空设备。

参考文献:

- [1] 李武,程泽坤.淤泥质海岸桶式结构设计[J].水运工程,2015(1):42-47.
LI W, CHENG Z K. Design of bucket-based structure on silt coast [J]. Port & waterway engineering, 2015 (1): 42-47.
- [2] 练学标.新型桶式基础结构防波堤主要施工技术[J].水运工程,2016(2):162-166.
LIAN X B. Main construction technology of new bucket-based breakwater [J]. Port & waterway engineering, 2016(2): 162-166.
- [3] 徐光明,顾行文,任国峰,等.防波堤椭圆形桶式基础结构的贯入受力特性实验研究[J].海洋工程,2014,32(1):1-7.
XU G M, GU X W, REN G F, et al. Penetration resistance and wall friction of ellipse lower bucket of breakwater into soft ground in centrifuge [J]. The ocean engineering, 2014, 32(1): 1-7.

(下转第108页)