

DOI: 10.11779/CJGE2020S1043

离岸多隔舱钢桶基础下沉和顶升原位试验

曹永勇

(上海市市政工程建设发展有限公司, 上海 200025)

摘要: 混凝土桶式基础结构是一种高效、节能、绿色、环保的新型结构, 已经广泛用于防波堤的建设中。多隔舱的钢桶基础结构是在该结构基础上的进一步优化, 为中国淤泥质海域防波堤和护岸建设提供了新的解决方案。利用海上离岸结构的测量技术, 开展钢桶的原位试验, 得到了桶体负压下沉和充气顶升过程中的结构位移、倾角、桶内气压以及桶壁应变的变化规律, 发现了抽水和抽气互相配合的高效作业方式。钢桶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。试验结果为结构的进一步优化提供了数据支撑。

关键词: 钢桶基础; 离岸结构; 负压下沉; 原位试验

中图分类号: TU196

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S1-0219-05

作者简介: 曹永勇(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事土木工程管理、试验与数值分析研究。E-mail: ctglcaoyy@chengtou.com。

In-situ tests on sinking and lifting on offshore steel-bucket foundation with multi-bay

CAO Yong-yong

(Shanghai Municipal Engineering Construction Development Co., Ltd., Shanghai 200025, China)

Abstract: The concrete bucket foundation structure is a new structure with high efficiency, energy saving, green environmental protection, which has been widely used in the construction of breakwater. The steel-bucket foundation with multi-bay is further improved on basis of this structure, which is a new solution for the construction of breakwater and revetment in the muddy sea areas of China. The in-situ tests on the steel bucket are carried out through offshore structure measurement. The variation rules of structural displacement, dip angle, air pressure and wall strain in the process of negative-pressure sinking and air-inflation lifting are obtained and the efficient operation mode for water pumping and air pumping is provided. The hoop stress of the bucket wall is greater than the longitudinal stress, and the compressive stress is more likely to appear near the bottom, and the tensile stress is easy to appear near the top. The results may provide support for the further optimization of the structures.

Key words: steel-bucket foundation; offshore structure; negative-pressure sinking; in-situ test

0 引言

目前国内外沿海软土地基上一般采用抛石堤的方法建造防波堤和护岸工程, 需要进行大量的开山采石, 而且往往对环境造成严重的破坏。多隔舱的混凝土桶式基础结构是一种高效、节能、绿色、环保的新型结构, 已经广泛用于防波堤和护岸工程的建设中。这种结构在深水区域具有非常高的性价比, 但是在浅水区价格优势并不显著。采用多隔舱的钢桶结构可以进一步降低工程造价, 这种结构是在桶式基础结构的前期成果上进行的二次深化, 为中国淤泥质海域防波堤和护岸建设提供了新的解决方案, 促进了技术进步和技术推广应用, 同时也是实施创新驱动发展战略, 提高科技成果转化质量和水平需要, 积极响应习总书记实施创新驱动发展战略的重大部署。

对于钢桶基础结构, 国内外已经展开了大量研究。在模型试验方面, Watson等^[1]利用离心模型试验, 研究了钢桶基础在正常固结粉土受竖向、水平及弯矩荷载作用下的响应, 并对荷载施加速率与竖向承载力之间的关系进行了分析。在原位试验方面, 由于海上进行现场测试相当困难, 关于这方面的研究成果少之又少, 尤其是海上钢桶的实测数据。Nadim^[2]、Villalobos等^[3]等对黏土中桶型基础在下沉安装、单调荷载及循环荷载作用下的位移和孔压进行了相应的研究, 发现筒型基础与结构体对受压过程的特征相应一致, 同时分析了在基础安装过程中孔压的变化对基础的荷载和

基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (BK20171129); 国家自然科学基金项目 (51609147)

收稿日期: 2020-06-05

位移规律产生的影响。马文冠等^[4]开展了粉土中钢桶基础的现场贯入试验,观测了自重下沉阶段与负压贯入阶段钢桶基础贯入阻力与贯入深度的关系,提出了粉土中计算沉贯阻力的方法,发现钢桶使用减阻环会破坏筒壁周围土体,形成渗流通道,导致负压失效。

由于模型试验采用较小比尺,无法真实还原土体的应力状态,所得结果也会有较大的偏差。海上原位试验可以得到最真实的数据,但是目前钢桶的监测技术受限于复杂多变的海洋环境以及长距离传输,相关监测手段昂贵,监测技术发展缓慢。钢桶结构的工作机理、计算方法的合理性、正确性还缺少原型观测资料的验证,实际的设计中可能偏于保守,这就导致钢桶结构的经济优势不是很突出,从而妨碍了其推广应用和经济、社会效益的发挥。因此,有必要研究海上离岸结构的测量技术,开展钢桶的原位试验,在保证钢桶在施工和运行过程中的安全的同时,还可以揭示桶式基础的稳定机理,验证新结构型式计算方法的正确性,有助于新型结构的推广应用,促进行业的发展和进步。

1 原位试验概况

1.1 多隔舱钢桶结构

如图 1 所示,多隔舱钢桶基础结构尺寸为 19 m×19 m×17 m,由 9 个直径 6.0 m 钢质圆桶通过钢板连接,整体桶内形成 13 个独立舱体,包括 9 个圆桶舱体和 4 个异形舱体。桶身壁厚 10~14 mm,盖板厚 14 mm,桶身和盖板都进行了构造加强:每个小桶下部 3 m 采用 20 cm 高的 T 钢进行竖向加强,一圈共布置 20 道;桶身中上部进行了环向加强,加强间距 2.0 m,采用高 20 cm 的 L 钢;盖板下方各分布 5 个工字钢主横梁、主纵梁和 T 字钢次纵梁。钢材材质采用 Q345B。

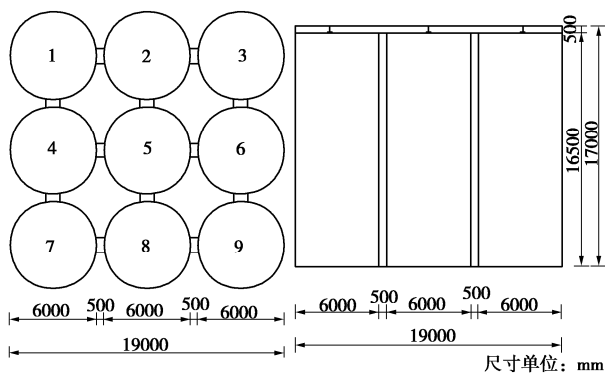


图 1 多隔舱钢桶基础结构

Fig. 1 Steel-bucket foundation with multi-bay

钢桶在岸边预制场制作完成后,桶体先进行除锈处理,表面达到 Sa2.5 级,外露部分涂一道底漆(环氧富锌防锈底漆),涂膜厚度 80 μm,二道中间层漆(环

氧云铁防锈漆),涂膜厚度 120 μm,二道面漆(酯肪族聚氨酯面漆),涂膜厚度 100 μm。工厂预制完毕后装船,运输采用水上船舶运输。钢桶每个隔舱均埋设 1 个气管、1 个水管。采用桶体安装用的操作平台,平台上放置发电机一台,平台设控制系统、真空泵、排气管道、排水管道等。设置充气船,充气船上放置空压机和发电机,如图 2 所示。



图 2 多隔舱钢桶基础结构现场安装

Fig. 2 Field installation of steel-bucket foundation with multi-bay

1.2 试验场地水文地质条件

钢桶下沉试验区设计高水位 5.41 m,设计低水位 0.47 m,极端高水位 6.56 m,极端低水位-0.68 m。地基土层自上而下依次为:9.24 m 淤泥层、5.80 m 粉质黏土层和 7.69 m 粉砂层,表 1 列出这 3 层地基土的主要物理力学特性指标。

表 1 地基土的物理力学特征指标

Table 1 Physical and mechanical characteristics of foundation soil

岩土名称	天然含水率 w/%	重度 γ (kN·m ⁻³)	天然孔隙比 e ₀	快剪	
				凝聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
淤泥层	64.8	15.8	1.819	6.7	2.5
粉质黏土层	27.1	19.2	0.77	37.8	10.7
粉砂层	20.0	20.0	0.587	—	—

从表 1 中所列指标数值结合钢桶所在位置可以发现,钢桶下沉处 9 m 厚度的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软黏土,其下卧的粉质黏土层和粉砂层为中等压缩性土,抗剪强度指标也好于淤泥层。根据地基淤泥和其下卧的粉质黏土层的土性和承载能力的不同特点,设计的钢桶结构的桶身将穿越淤泥层,让桶底触及下层粉质黏土层或者粉砂层。这几层土将与钢桶相互联为一体共同抵御回填荷载的作用,它们对钢桶的受力特性影响最大。

2 原位试验方案

2.1 试验目的

在下沉施工期对桶式结构的现场监测是确保结构安全可靠的重要手段。根据现场测试监控桶式基础结构在下沉和吹填过程中的安全性，避免钢桶局部变形过大以及整体滑移、倾覆，分析负压荷载对结构和地基稳定性的影响，得到钢桶结构的受力性状。通过对监测结果进行数据分析，进而优化设计方案。

2.2 测试内容

测试的内容主要包括 4 个部分：水平位移和沉降、结构整体倾角、各隔舱内部的负压值、钢桶内力计算薄弱处的钢板应力，具体的仪器类型和编号见表 2。由于该试验位于海上，采用了离岸结构的分布式自动测量系统。该原位试验步骤为：预制钢桶基础→预埋各种传感器→拖航定位→一阶段下沉 4 m→安装自动化采集设备→二阶段负压下沉→两次充气顶升试验→三阶段下沉→试验测试及分析。

表 2 仪器类型及编号

Table 2 Types and number of instrument

测试内容	沉降和水平位移	整体倾斜	负压值	桶壁应力
仪器名称	GNSS 系统	双向倾角仪	气压计	钢板应变计
数量	1	2	10	120
量程	全量程	±30°	1 个大气压	0~2500με
精度	2 mm	±0.1%F.S	±0.1%F.S	2.5με

结合某吹填区围堤的总平面布置，试验段平面位置选择在围堤东端，并与斜坡堤衔接段相接（图 3）。布置在该位置紧邻衔接段斜坡堤，便于试验后的处理，试验段将作为设计堤身的一部分，可减少工程费用。为了便于描述，对各个桶体进行编号。大多数仪器主要布置在 3 号、5 号和 6 号桶体上，其他桶体上的仪器作对比分析使用。由于钢桶结构在水平面属于中心对称结构，因此只需要得到部分桶体的应力状态和变形，就可以了解所有桶体的应力状态和变形。



图 3 试验钢桶的位置和编号示意图

Fig. 3 Location and number of test steel bucket

2.3 测试方法

对于沉降、倾斜度和负压值的测量采用常规的测量方法^[5]。通过在监测桶体上设置 GNSS 监测站，可以实时测量并计算钢桶沉降位移和下沉速度。在盖板

上的工字钢上沿着两个对称的角各布置一个双向倾角仪，可以测量轴线方向和垂直于轴线方向的倾角。在每个桶舱内盖板下面埋设一支振弦式气压力计，可以测出该测点所在桶体的负压值。

钢桶基础结构在负压荷载、水压力和土压力共同作用下，桶壁会发生变形。在钢桶桶壁关键部位埋设应变计可以了解受力分布，判断钢桶结构可能发生屈曲的位置。在桶体高度范围内，地基土有 2~3 层，在布设钢板应变计时，要保证每层土都布设有仪器。本试验在桶壁布置 29 条应变测线，其中 Y1-Y22 测线沿着竖直方向布置，每条测线上布置 4~5 支应变计，各测点距桶壁底端的距离分别为 1.1, 4.1, 8.1, 12.1 m 和 16.6 m。测线 Y23~Y29 沿环向布置。钢板应变计的布置如图 4 所示。

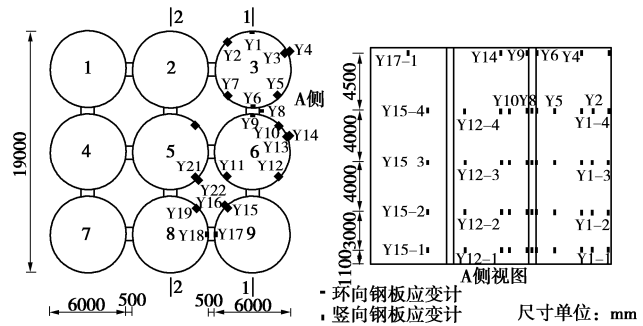


图 4 桶壁钢板应变计布置

Fig. 4 Location of steel plate strainometers on bucket wall

本项目采用特制的大量程振弦钢板式应变计，其测试精度为 2.5 με，量程为 2500 με。安装时首先将特制夹具焊接在钢板的预定位置，然后将钢板应变计安装在特制夹具中（图 5（a）），并在仪器底部涂一定量的环氧树脂或者结构胶对仪器进行保护，仪器外部用钢板专用保护罩进行保护（图 5（b））。

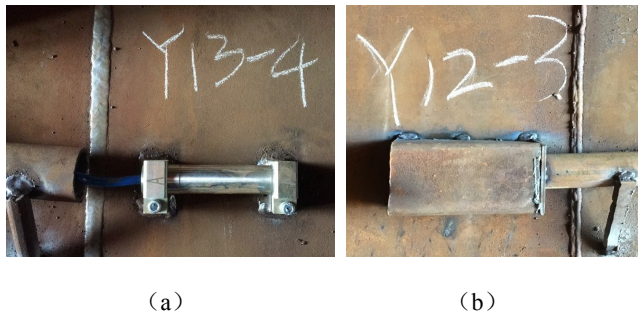


图 5 现场桶壁应变计安装

Fig. 5 Field installation of plate strainometers on bucket wall

3 试验结果分析

3.1 钢桶位移变化

由于试验钢桶的测试平台过高，无法在下沉安装

前进行平台吊装。因此试验钢桶先靠自重下沉了 4 m 后,开始调试自动化监测系统并展开测量工作。钢桶的下沉作业要配合潮水,因此每天作业时间受到了限制。

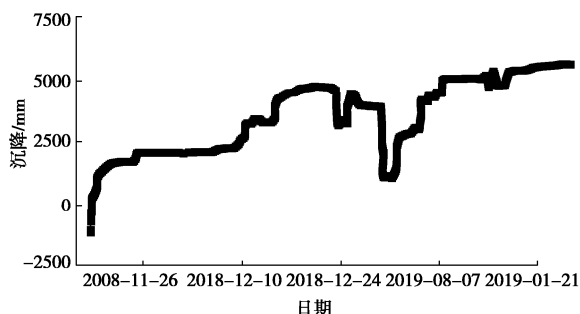


图 6 钢桶沉降变化曲线

Fig. 6 Settlement curves of steel bucket

图 6 是钢桶沉降随时间的变化曲线,从图中可以看出钢桶自第二阶段下沉开始的前 3 d 沉降速度较大,随后下沉量变化幅度逐渐放缓,到 2018 年 11 月 25 日凌晨累计下沉量在 3 m 左右。接着对抽水和抽气管道进行为期两周的改造,于 2018 年 12 月 8 日 18:30 重新开始下沉试验,但是下沉速度仍然缓慢,15 d 共沉降 2.5 m。

2018 年 12 月 22 日开始进行充气顶升试验,此时桶体开始进入充气顶升状态,之后钢桶随着桶内气压的升高而慢慢上升,8 h 后顶升高度达到最大,累计上升幅度达到 1.53 m,随后钢桶的沉降变化趋势逐渐趋于稳定。之后随着桶内气压慢慢释放,桶体在自重的作用下缓慢下沉。2018 年 12 月 29 日开始第二次顶升试验,10 h 后顶升高度达到最大,累计上升幅度达到 2.89 m,随后钢桶的沉降变化趋势逐渐趋于稳定。两次顶升试验得到了相同的变化趋势。

在 2019 年 1 月 6 日,开始第三次下沉试验,到 24 日下沉试验结束,桶体沉入土中约 9.5 m,桶底标高为 -18 m,进入了粉质黏土层约 0.8 m。钢桶在实际下沉过程中,由于结构下部钢板和 T 型板间出现了夹土现象,小桶与小桶之间产生了明显的挤土效应,使得结构端阻力大大增加。

3.2 钢桶倾角变化

图 7 是钢桶倾角随时间的变化曲线,从图中可以看出在东西方向上,这一阶段钢桶的倾角最小值为 0.424° ,最大值为 4.425° 。桶体倾角的波动范围为 $0.424^\circ \sim 4.425^\circ$,目前桶体倾角为正值,表示钢桶向防波堤侧倾斜。在南北方向这一阶段钢桶的倾角最小值为 -1.122° ,最大值为 5.415° 。桶体倾角的波动范围为 $-1.122^\circ \sim 5.415^\circ$,目前桶体倾角为正值,表示

钢桶向回填侧倾斜。值得注意的是,在 2019 年 1 月 4 日 7:00 到 9:00 之间的 3 h 内,由于舱内气压突然变化,使得该侧桶体沉降发生变化,倾角也随之变动,由 1.174° 变化至 5.395° ,变化幅度达到 4.221° 。

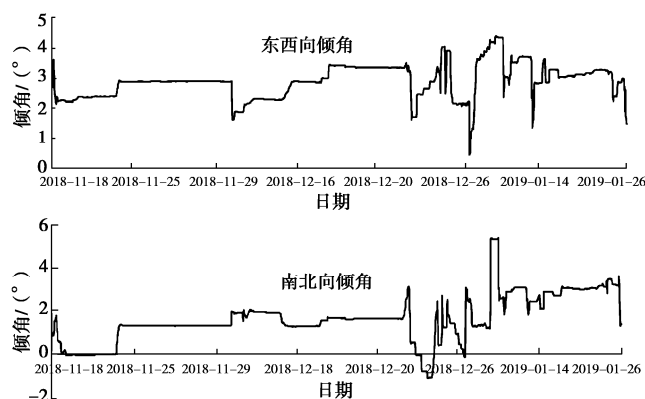


图 7 钢桶倾角变化过程曲线

Fig. 7 Dip curves of steel bucket

下沉初期钢桶倾角变化较小,说明钢桶截面各部位受力较为均匀;在充气上浮和抽水下沉交替施工过程中,钢桶倾角变化较为剧烈,说明充气过程未能很好地控制桶体姿态,并进一步导致再次下沉过程中钢桶倾角无法保持稳定。钢桶内部充气对于结构整体姿态十分重要,建议在通过充气的方式进行姿态调整的过程中,需要进一步加强调控的精度和准度。

3.3 桶内气压变化

图 8 绘出了 5 号隔舱内气压在 2018 年 11 月 18 日至 2019 年 1 月 26 日期间的变化过程曲线。从图 8 中可以看出,桶体负压值并不稳定,一直在不断变化中。试验过程中发现,通过抽水的方式能够比抽气达到更大的负压,前者比后者大 $0.2 \sim 0.3$ 个大气压。通过抽水的方式还可以比抽气更快地达到负压状态,在负压作用下,桶体被逐渐压入土体,内部气压随之逐渐升高,继续抽水可以继续该过程。抽气产生负压相对稳定,抽水产生的气压波动性较大。

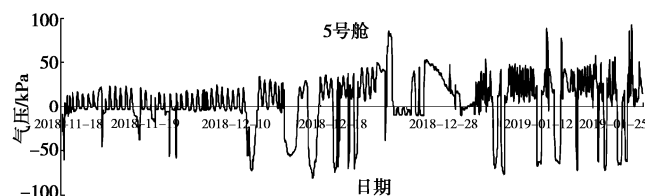


图 8 5 号隔舱内气压变化曲线

Fig. 8 Air pressure curves inside bay No. 5

3.4 侧壁应变分析

由图 9 可知,5 号舱桶壁在 2018 年 12 月 9 日前变化比较稳定,结构的内部应力基本没发生变化,在 2018 年 12 月 9 日到 2019 年 1 月 6 日之间,应力值增加也呈现出稳定的状态,在之后的测量中发现结构内

部的应力值变化比较大,此时现场进行了抽水下沉试验,负压值也达到了最大。还可以看出同一条测线处在底部的两个测点值变化幅度相对于上部测点较为稳定,这是因为下部测点入泥深度较深,在土体约束作用下侧向变形较小,而上部结构由于缺乏侧向约束容易出现较大变形。通过对测点值大小沿深度的变化来看,应变值不是随深度单调变化的,在距离底部约 4.1 m 处出现极值,这说明桶体出现了屈曲变形,因此侧向土压力在桶体下沉过程中起到十分重要的作用。从环向应变测值还可以看出桶壁环向受力大于纵向受力。

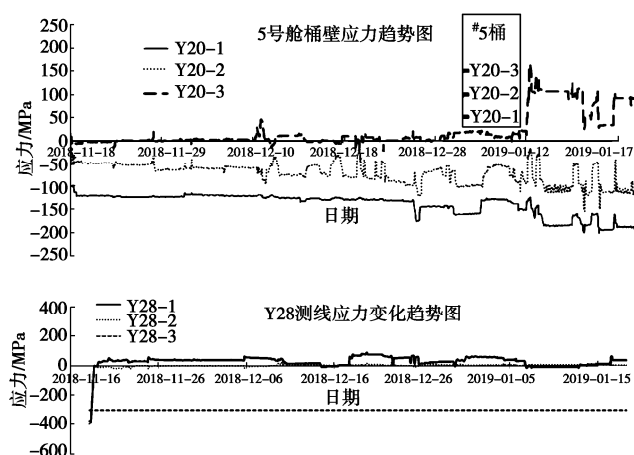


图9 桶壁典型应力测点变化曲线

Fig. 9 Typical stress curves of bucket wall

4 结论与建议

本文通过原位试验观测了钢桶负压下沉过程中的整体位移、倾角、桶内气压以及钢桶应变等情况,主要得出以下结论:

(1) 多隔舱钢桶结构下沉过程基本稳定,试验钢桶可以穿过淤泥层进入粉质黏土层。但是钢桶在实际下沉过程中异形舱内产生了明显的挤土效应,使得结构端阻力大大增加。钢桶内部充气顶升作业容易引起

结构整体姿态变化,甚至造成结构倾斜失稳。

(2) 通过抽水的方式能够比抽气达到更大的负压,抽气产生负压相对稳定,抽水产生的气压波动性较大。钢桶下沉过程中建议采用先抽水,到下沉后期,再进一步结合抽气的负压施工方法,可以使得下沉效率和效果最好。

(3) 钢桶在下沉过程中,桶壁环向受力大于纵向受力,容易出现屈曲变形,最中间的隔舱变形最大。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。

参考文献:

- [1] WATSON P G, RANDOLPH M F. Failure envelopes for caisson foundations in calcareous sediments[J]. Applied Ocean Research, 1998, 20(1): 83 - 94.
- [2] NADIM F. Tools and Strategies for Dealing with Uncertainty in Geotechnics[M]// Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering. Springer Vienna, 2007: 71 - 95.
- [3] VILLALOBOS F A, BYRNE B W, HOULSBY G T. Model testing of suction caissons in clay subjected to vertical loading[J]. Applied Ocean Research, 2010, 32(4): 414 - 424.
- [4] 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(4): 1307 - 1314. (MA Wen-guan, LIU Run, LIAN Ji-jian, GUO Shao-zeng. The study of penetration resistance of bucket foundation in silt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019(4): 1307 - 1314. (in Chinese))
- [5] 曹永勇, 侯贺营, 张宁, 等. 回填荷载作用下桶式结构的内力变化研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊 2): 107 - 111. (CAO Yong-yong, HOU He-ying, ZHANG Ning, et al. Study on internal force change of bucket-based structure under backfill load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2): 107 - 111. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)