

DOI: 10.11779/CJGE2018S2022

回填荷载作用下桶式结构的内力变化研究

曹永勇^{1,2}, 侯贺营¹, 张宁¹, 李文轩¹

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 单桶多隔舱型式的桶式结构已经在防波堤工程中得到了应用, 但作为直立式岸壁结构, 需要在陆侧进行回填, 这种结构的安全可靠性尚未得到验证。通过原位试验对桶式结构的内力进行了测试, 得到了下桶壁、隔舱、盖板和上桶壁等部位的内力数据。绘制了回填荷载作用下关键部位的混凝土应变随时间变化曲线和钢筋应力随时间变化曲线, 发现了桶式结构各部位内力的发展规律, 了解了陆侧回填工况下桶式结构的受力状况。试验结果表明结构本身在回填过程中具有良好的稳定性, 为结构的进一步优化提供了数据支撑。

关键词: 桶式结构; 内力分布; 回填荷载; 原位试验

中图分类号: TU196

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2018)S2 - 0107 - 05

作者简介: 曹永勇(1987 -), 男, 博士, 工程师, 主要从事土与结构相互作用现场试验与数值分析研究。E-mail: rawlinsoncao@hotmail.com.cn。

Change of internal force of bucket-based structure under backfill loads

CAO Yong-yong^{1,2}, HOU He-ying¹, ZHANG Ning¹, LI Wen-xuan¹

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

Abstract: The single-bucket and multi-compartment structure has been applied in breakwater engineering. However when it used as a vertical quay wall structure, backfilling at the land side is required, and its safety and reliability have not been verified. The internal forces of the bucket-based structure are measured by the in-situ tests, and those of the lower barrel wall, the compartment, the cover plate and the upper barrel wall are obtained. The variation curves of the vital part of concrete strain with time and reinforcement stress with time are plotted under the backfill loads. The development laws of internal force of each part of bucket structure are found, and the stress state of bucket structure at the land side under the backfilling condition is understood. The test results show that the structure has good stability in the backfilling process, and it may provide data support for further optimization of the structure.

Key words: bucket-based structure; internal force distribution; backfill load; in-situ test

0 引言

桶式结构是一种倒扣的杯形混凝土空间薄壁壳体结构, 由单舱或多舱组成。国内外常见的桶式结构主要用于防波堤、护岸、导流堤、防沙堤等, 其结构尺寸的选择主要根据当地自然条件、使用要求、材料来源和施工条件等因素, 经技术经济综合比较后确定。但是, 目前尚没有一种明确的内力计算方法可以应用到各种桶式结构的设计中。

国内外许多学者对桶式结构的内力分布和变化进行了大量研究。Fujiyama C等^[1]在日本福岛县一台20 m高的风力机塔筒基础系统上开展现场测试, 利用各种应变计和加速度计得到该塔筒基础的内力分布和动力响应。然后采用三维非线性有限元分析方法对系统各部分的应力状态进行分析。该研究主要针对风力机

塔筒基础系统的振动响应特性, 对系统的受力状态进行识别和分析。Vaitkune E等^[2]制作了直径1 m的桶式结构模型, 开展了饱和砂土中桶式结构的单调加载和循环拉伸加载试验, 对拟静力和循环加载下内外力和位移发展进行了研究。在国内, 贡金鑫等^[3]为了研究桶式结构在拖运过程中的内力和变形, 专门制作了1:8的小比尺模型并进行室内试验, 获取了桶壁的应变-加载时间关系曲线, 采用通用有限元软件对模型进行了弹性有限元分析并与试验结果比较。在理论计算方面, 孟昭瑛等^[4]利用弹性抗力法推导出了多桶平台基础约束刚度矩阵, 并用程序计算桶体位移、转角,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609147); 江苏省自然科学基金项目(BK20171129); 南京水利科学研究院院基金项目(Y317006)
收稿日期: 2018-07-22

以及内力等。刘文白等^[5]通过室内模型试验和有限元数值模拟研究了上拔荷载作用下桩-桶基础结构内力分布,将试验数据和数值模拟结果进行对比分析。发现上拔荷载达到极限时,基础应力及变形达到最大,土体破坏后桩-桶结构各部分的受力趋于稳定;桶壁及桩身从上到下,受力逐渐减小;桩和桶的结合部位及桶顶边缘处所受应力较大。

上述分析主要是通过原位试验、小比尺模型试验和数值模拟的方法,研究各种不同形式的桶式结构在水平荷载或者竖向上拔荷载作用下结构内力变化情况。桶式结构安装时,桶体在自身重力和抽水抽真空所产生的负压荷载作用下下沉至设计标高。但作为直立岸壁结构,需要在陆侧进行回填加载,这时桶体受到来自陆侧向下的偏心荷载和水平推力。荷载传递到结构上,桶体原有的平衡被打破,结构的内力可能发生变化,特别是波浪循环荷载的长期作用使得结构的受力更加复杂。因此,需要开展回填荷载作用下结构的内力变化研究。本文通过现场原位试验研究了桶式基础结构在陆侧回填工况下的各部位结构内力变化规律,初步探讨了桶式结构作为直立式岸壁在回填荷载作用下的稳定性。

1 原位试验概况

1.1 新型桶式岸壁结构型式

新型桶式岸壁结构由1个椭圆桶体和2个上部圆桶体组成,基础桶体呈椭圆形,桶内通过隔板划分为9个隔舱,2个上部圆桶体坐落在基础桶的盖板上,通过盖板上的杯口圈梁连接。如图1所示,下桶椭圆长轴30 m,短轴20 m,高9.18 m(-5.0~-14.18 m)。上桶外径8.9 m,壁厚0.3 m,第一节高8.1 m(3.5~-4.6 m),第二节延伸桶高7 m(10.5~3.5 m),连接上下桶的结构盖板厚0.4 m。多组结构的上桶互连接形成防波堤挡浪结构,而下桶插入淤泥软土层并坐落于硬土层上,利用桶壁和隔舱周边软土的黏聚力和摩擦力来保证结构的抗滑和抗倾覆稳定性。

1.2 回填工况介绍

由于港口建设的需要,2014年12月底对部分防波堤陆侧进行回填,形成码头结构的一部分,这部分防波堤的功能相当于直立岸壁,如图1(b)所示。为了方便分析,根据实际分层回填方案和时间,将回填工况分为10个阶段,具体工况划分见表1。

陆侧回填后,回填块石一方面对上桶产生向海侧的推力与弯矩,另一方面又作用在下桶的表面,产生向下的压力与向陆侧的弯矩,这两个相反的作用使得问题变得十分复杂。要搞清楚桶式基础岸壁结构的变

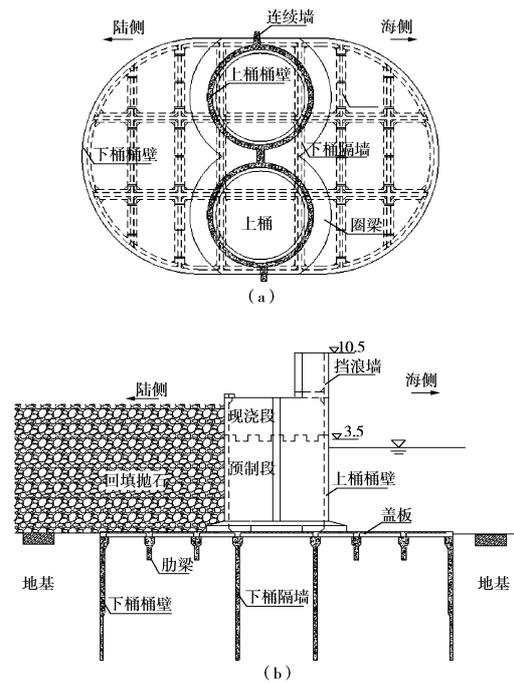


图1 新型桶式岸壁结构图

Fig. 1 Structure of new bucket wall

表1 回填工况简介

Table 1 Backfill conditions

时间	进度
2014/12/30—2015/04/25	-3.0 m 回填至-2.0 m
2015/05/07—2015/06/20	回填至+1.0 m
2015/07/09—2015/10/03	回填至+3.0 m
2015/10/06—2015/12/15	回填至+5.0 m
2015/12/19—2016/01/06	回填至+6.5 m
2016/02/29—2016/03/22	回填至+7.5 m
2016/03/29—2016/05/02	超高回填至+9.38 m
2016/05/02—2016/07/14	持荷中
2016/07/15—2016/07/18	卸载至+7.5 m

形和整体稳定情况,最重要的是真实地了解结构的受力情况。因此,在某港区直立堤与斜坡堤相连位置开展了试验段工程。该试验段由6个桶体组成,针对这种新型结构,选取其中两个桶体进行原位观测试验^[6]。其中,五号桶主要进行内力测试试验,通过埋设混凝土应变计和钢筋计实现对混凝土应变和钢筋应力的观测。混凝土应变计主要置在下桶壁、盖板、上桶壁等部位,共布置18支应变计;钢筋应力计主要布置在下桶壁、下桶隔墙、盖板、肋梁、上桶和连接墙等部位,共布置123支钢筋计。通过配套安装的自动化数据采集管理分析系统和避雷系统,安全可靠的实现了对桶式岸壁结构所承受内力的观测。

2 桶式岸壁结构各部位混凝土应变分析

2.1 下桶壁混凝土应变分析

桶式结构中预埋的所有混凝土应变计和钢筋应力计都接入分布式自动化测量设备,通过太阳能供电进

行观测, 观测频率为每 15 min 观测 1 次, 采集到的数据通过无线传输系统导入终端服务器。

通过对混凝土应变计的测值分析可以了解桶体结构关键部位的受力状况, 分析混凝土是否开裂, 判别结构是否安全。为了从宏观上了解桶式岸壁结构下桶壁混凝土应变的发展规律, 绘制了陆侧回填期间下桶壁典型测线混凝土应变随时间变化曲线, 如图 2 所示。其中典型测线 C1 各测点布置如图 2 右侧图例所示。

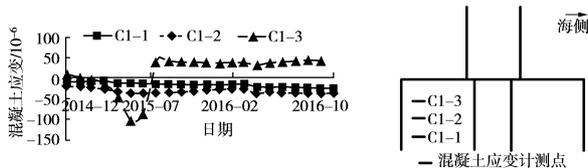


图 2 回填过程中下桶壁 C1 测线混凝土应变 - 时间变化曲线
Fig. 2 Strain-time curves of concrete in C1 measuring line of bottom wall during backfilling

从图 2 中可以看出, C1 测线下部的混凝土应变在回填过程中变化都不大, 上部混凝土的应变变化略大。下部的 C1-2 和 C1-3 测点一直处于受压状态, 压应变在回填荷载作用下略微增大, 变化幅度很小, 在 20×10^{-6} 以内。回填初期, 加载速度较快, 而且上部的 C1-1 测点与抛石距离近, 受到影响相对底部测点更大, 所以变化幅度也较大。回填初期, 上部的 C1-1 测点由拉应变迅速变为压应变, 测值不断变大。当第一层回填结束后, 压应变达到最大值 102.76×10^{-6} 。随着回填荷载的继续施加, 该测点又由压应变迅速变为拉应变。当第二层回填结束后, 拉应变达到最大值 45.22×10^{-6} 。随后的回填引起了下桶壁应变值的波动较小, 卸载后趋于稳定。

2.2 盖板混凝土应变分析

如图 3 所示, 采用同样的方法绘制了陆侧回填期间盖板典型测线混凝土应变随时间的变化曲线, 其中典型测线 C3 各测点布置如图 3 右侧图例所示, 在上下两层钢筋笼上按纵横向分别布置测点。

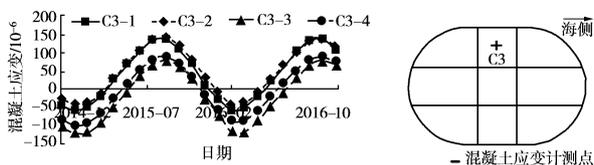


图 3 回填过程中盖板 C3 测线混凝土应变 - 时间变化曲线
Fig. 3 Strain-time curves of concrete in C3 measuring line of bottom wall during backfilling

由图 3 可以看出, C3 测线各测点的应变值在陆侧回填期间出现了一些波动, 大致呈正弦变化。回填以前各测点均为压应变, 随着第一层回填的进行, 各测点由压应变逐步变成拉应变。之后随着回填高度的增加, 混凝土应变随时间变化曲线呈现周期性的正弦变

化, 这个过程中最大拉应变为 142.18×10^{-6} , 在盖板上部测点 C3-2 上, 最大压应变为 -119.81×10^{-6} , 在盖板下部测点 C3-3 上。

2.3 桶式岸壁结构混凝土应变极值分布

为了准确判断结构在回填过程中的稳定性, 整理了回填过程中混凝土应变 (拉压) 最大测点部位与测值, 如表 2 所示, 其中正值为拉应变, 负值为压应变。

表 2 回填过程中混凝土应变 (拉压) 最大测点部位与测值
Table 2 Location and measured values at maximum strain (tensile and compressive) points of concrete strain during backfilling

部位	编号	应变值/(10^{-6})
下桶壁	C2-4	83.400
	C1-2	-102.760
盖板	C3-2	142.180
	C3-3	-119.810
上桶壁	C5-2	158.097
	C5-4	-193.832

从表中的数据可以看出, 在回填过程中, 结构的最大压应变和最大拉应变均在盖板处。各部位混凝土受压应变均在 C40 混凝土抗压强度范围以内。盖板和上桶壁的受拉混凝土应变逐渐超过 C40 混凝土比例极限, 混凝土表层可能会出现微小的裂缝, 但是应变的变化在设计安全范围内, 结构仍然是十分稳定的。

3 桶式岸壁结构各部位钢筋应力分析

3.1 下桶壁钢筋应力分析

为了从宏观上了解基础结构内力的情况, 绘制了回填期间陆侧下桶壁内外壁的钢筋应力 - 时间曲线, 如图 4, 5 所示。其中 G1 在陆侧基础桶体外壁方向, G2 在内壁方向, 均测量竖向钢筋应力。

从图中可以看出, 下桶壁外侧的钢筋应力随着时间推移和回填荷载的增大呈现下降趋势, 而内侧钢筋应力的发展趋势呈现与外侧相反的规律。桶壁弯矩增大, 结构姿态观测中发现其向陆侧转动变形也验证了这一点。整个回填阶段陆侧下桶壁都保持受拉状态, 对于 G1 测线最大拉应力为 15.73 MPa, 在最下端测点 G1-1 上; 最小拉应力为 1.23 MPa, 在中上部测点 G1-4 上。对于 G2 测线最大拉应力为 18.62 MPa, 在上部测点 G2-5 上; 最小拉应力为 8.07 MPa, 在下部测点 G2-2 上。陆侧回填第二层时, 钢筋应力都出现了不同程度的波动, 以最上端的 G1-5 和 G2-5 的波动最大。各测线上的钢筋应力的变化趋势大致相同。在回填过程中, G1-1 和 G2-1 的变化范围很小, 这是由于桶体入土较深, 两侧受到土压力的抑制作用导致底部变形不大。2016 年 7 月 18 日卸载至 +7.5 m, 之后到 2016 年 10 月 31 日, 这两测线上的钢筋计变化逐渐减小, 结构下桶壁在回填荷载作用受力趋于平衡, 处于稳定状态。

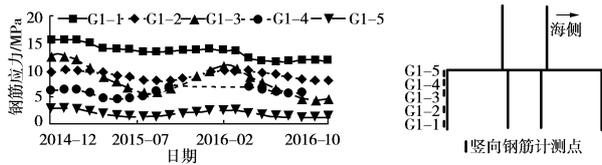


图4 回填过程中下桶壁 G1 测线钢筋应力 - 时间变化曲线
Fig. 4 Stress-time curves of reinforcement in G1 measuring line of bottom wall during backfilling

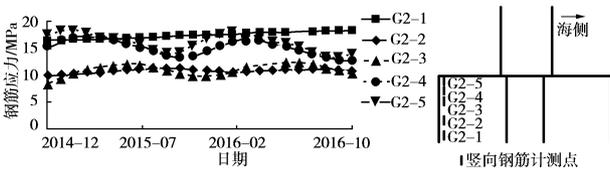


图5 回填过程中下桶壁 G2 测线钢筋应力 - 时间变化曲线
Fig. 5 Stress-time curves of reinforcement in G2 measuring line of bottom wall during backfilling

与陆侧桶体下桶壁的钢筋计埋设方向不同，海侧桶壁 G3 侧线钢筋计为水平方向布置，测量环向钢筋应力。图 6 是海侧桶壁环向钢筋应力 - 时间曲线。

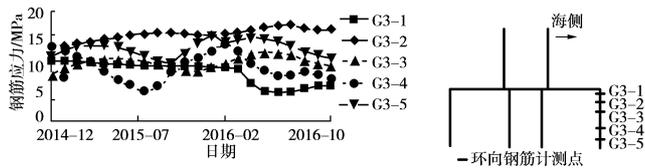


图6 回填过程中下桶壁 G3 测线钢筋应力 - 时间变化曲线
Fig. 6 Stress-time curves of reinforcement in G3 measuring line of bottom wall during backfilling

从图中可以看出，除 G3-5 外，其他海侧桶壁环向钢筋测线在回填过程中钢筋应力变化幅度不是很大。在 G3 测线上，最大拉应力为 22.20 MPa，在 G3-2 测点上，最小拉应力为 6.64 MPa，在 G3-1 测点上。但上部测点 G3-5 的波动幅度明显强于其他测点。到了回填快结束时，环向钢筋应力趋于回填前的应力值。

3.2 下桶隔舱钢筋应力分析

图 7, 8 是陆侧回填期间下桶隔舱的钢筋应力随时间的变化曲线，其中 G9 在椭圆体长轴方向隔舱壁上，G10 在短轴向隔舱壁上，钢筋计水平方向布置。

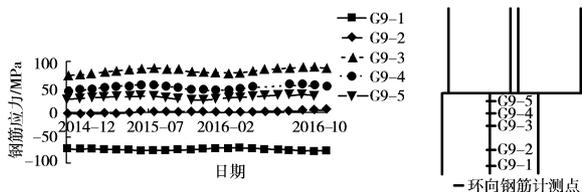


图7 回填过程中隔舱 G9 测线钢筋应力 - 时间变化曲线
Fig. 7 Stress-time curves of reinforcement in G9 measuring line of compartment during backfilling

从图中可以看出，椭圆体长轴方向隔舱的下部 (G9-1、G9-2) 钢筋应力在回填初期测值都出现了压应力，最大拉应力出现在上部 G9-4 测点上，最大压

应力出现在下部 G9-1 测点上。在整个回填过程中，钢筋应力变化不大。椭圆体短轴方向隔舱钢筋应力在回填期间出现了一定的波动，这说明结构在垂直于短轴方向发生了一定的变位。这与观测到的倾角的变化一致，在陆侧回填过程中，桶体向陆侧发生了一定的转动。

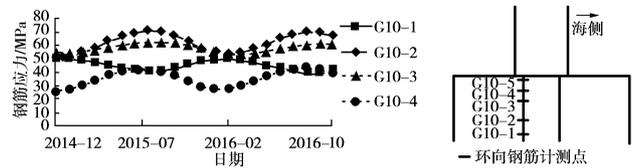


图8 回填过程中隔舱 G10 测线钢筋应力 - 时间变化曲线
Fig. 8 Stress-time curves of reinforcement in G10 measuring line of compartment during backfilling

3.3 盖板钢筋应力分析

图 9, 10 为陆侧回填期间盖板的钢筋应力随时间变化曲线图，其中 G16 为盖板正中测线，G20 为陆侧盖板顶端测线。

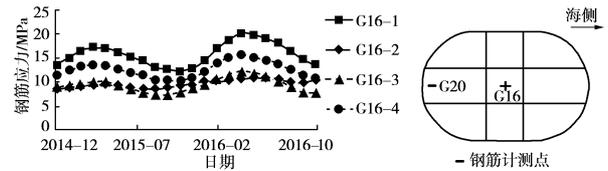


图9 回填期间盖板 G16 测线钢筋应力 - 时间变化曲线
Fig. 9 Stress-time curves of reinforcement in G16 measuring line of cover plate during backfilling

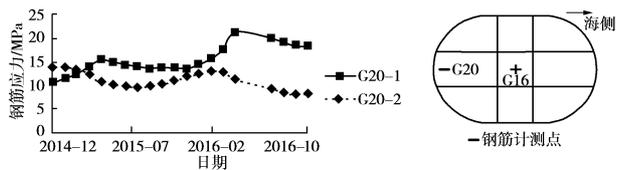


图10 回填期间盖板 G20 测线钢筋应力 - 时间变化曲线
Fig. 10 Stress-time curves of reinforcement in G20 measuring line of cover plate during backfilling

从图 9, 10 可以看出，在整个回填过程中，盖板钢筋应力变化不大，在回填期间均为拉应力，大致呈不规则的正弦分布。在卸载至+7.5 m (2016年7月)后，钢筋计的数值基本趋于稳定。盖板上、下两层钢筋的应力相差不大。在卸载至+7.5 m (2016年7月)后，钢筋计的数值基本趋于稳定。

3.4 桶式岸壁结构钢筋应力极值分布

为了准确判断结构在回填过程中的稳定性，对各部位在回填中钢筋应力的最大值和最小值做了统计，如表 3 所示，其中正值为拉应力，负值为压应力。从表中的数据可以看出，桶体在回填工况中，除了下桶

壁和隔墙以外, 其他位置的钢筋应力都不大。大部分位置的钢筋出现拉应力, 有个别位置出现压应力。在下桶壁上, 测线 G5 和 G6 上的钢筋应力较大。盖板上各测线的最大应力值相差不大。隔墙的结构内力略微偏大, 这是下沉阶段结束后的持续性影响。肋梁的钢筋应力较小, 在结构设计中可以进行优化(减少配筋或者取消)。上桶壁和连接墙的上部测点的钢筋应力的测值都小于下部的。

表 3 回填过程中各部位钢筋应力(拉压)极值表

Table 3 Extreme values of stress (tensile and compressive) of reinforcement at various parts during backfilling

部位	测点编号	应力极值/MPa
下桶壁	G4-3 (竖向)	48.778
	G7-5 (竖向)	-4.681
	G6-3 (环向)	66.170
	G6-2 (环向)	6.640
隔墙	G9-3 (竖向)	91.310
	G9-1 (竖向)	-76.460
肋梁	G14 (竖向)	21.200
	G13 (竖向)	-7.990
盖板	G17-4 (环向)	31.868
	G15-3 (环向)	1.804
上桶壁	G24-1 (竖向)	18.413
	G24-9 (竖向)	-18.590
连接墙	G27-1 (竖向)	13.800
	G27-4 (竖向)	2.740

从整体上来讲回填阶段的结构内力都在安全限值之内, 稳定性较好。综合原位试验观测的数据还可以发现, 在回填荷载的作用下结构内力的变化幅度一般在 5~15 MPa 以内。

4 结 论

本文通过现场原位试验研究了桶式岸壁结构在单侧回填荷载作用下各部位结构内力变化规律, 发现回填荷载对桶式结构的内力影响不是很大, 并得到初步结论如下:

(1) 钢筋的应力测值和变化幅度均在钢筋的抗拉抗压范围以内, 隔墙和下桶壁的拉应力测值和变化幅度大于其他位置。

(2) 下桶下部混凝土应变变化较小, 且均在 C40 混凝土抗压抗拉强度范围以内。下桶上部、盖板、上

桶壁的受拉混凝土应力逐渐超过 C40 混凝土比例极限, 混凝土表层可能会出现微小的裂缝, 但是不影响结构的稳定性。

参考文献:

- [1] FUJIYAMA C, YONETSU K, MAESHIMA T, et al. Identifiable stress state of wind turbine tower-foundation system based on field measurement and FE analysis[J]. Procedia Engineering, 2014, 95: 279 - 289.
- [2] VAITKUNE E, IBSEN L B, NIELSEN B N. Bucket foundation model testing under tensile axial loading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(5): 702 - 728.
- [3] 贡金鑫, 高树飞, 陈浩群, 等. 桶式基础气压模型试验和有限元分析[J]. 水利水运工程学报, 2015(5): 21 - 29. (GONG Jin-xin, GAO Shu-fei, CHEN Hao-qun, et al. Pneumatic experiment and finite element analysis of bucket foundation model[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(5): 21 - 29. (in Chinese))
- [4] 孟昭瑛, 冯小军, 杨树耕. 浅海单立柱桶形基础平台整体结构分析[J]. 中国港湾建设, 1999(1): 34 - 38. (MENG Zhao-ying, FENG Xiao-jun, YANG Shu-geng. Structure analysis of an offshore bucket foundation platform with a single pillar[J]. China Harbour Engineering, 1999(1): 34 - 38. (in Chinese))
- [5] 刘文白, 李小强. 桩-桶基础的结构试验及数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(增刊 2): 1525 - 1529. (LIU Wen-bai, LI Xiao-qiang. Indoor experimental study and numerical simulation on the pile-bucket foundation under uplift loading[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(S2): 1525 - 1529. (in Chinese))
- [6] 曹永勇, 张海文, 丁大志, 等. 新型桶式基础防波堤在负压下沉中的结构内力观测及分析[J]. 中国港湾建设, 2014(4): 26 - 29. (CAO Yong-yong, ZHANG Hai-wen, DING Da-zhi, et al. Test and analysis on the structural internal force of the new bucket-based breakwater driven by negative pressure[J]. China Harbour Engineering, 2014(4): 26 - 29. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)