



新型桶式基础防波堤 在负压下沉中的稳定性试验*

曹永勇, 蔡正银, 关云飞, 黄英豪
(南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 通过新型桶式基础防波堤的原型观测试验, 实现对结构所承受的土压力、孔隙水压力和倾斜度等的观测。试验分析了基础各部位的应力最大值以及气压纠偏对总应力的影响, 表明新型桶式基础防波堤在负压下沉中具有良好的稳定性, 对大型离岸深水构筑物的原位观测有一定的指导意义。

关键词: 原位观测; 桶式基础; 负压下沉; 稳定性; 离岸深水构筑物

中图分类号: U 653.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)07-0041-05

Stability tests for new bucket-based breakwater driven by negative pressure

CAO Yong-yong, CAI Zheng-yin, GUAN Yun-fei, HUANG Ying-hao

(Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: Based on the in-situ test of bucket-based breakwater, we realize the measurements of soil pressure, pore water pressure and gradient on the structure. The test analyzes the maximal stress on each part of the structure. The result shows the new bucket-based breakwater is stable when driven by negative pressure and it makes sense for in-situ test of large-scale offshore deep-water structure.

Key words: in-situ test; bucket-base; negative-pressure sinking; stability; deep-water offshore structure

目前, 国内外学者大多通过室内模型试验^[1]和数值模拟^[2]进行波浪荷载作用下离岸深水构筑物变形和稳定性研究。由于离岸深水构筑物处于复杂多变的自然环境中, 所以这两种方法并不能完全真实地反映构筑物的变形和稳定性。原位监测通过在构筑物施工过程中埋设相关测量元件, 直接获取实际工程结构的工作性状信息。但是国内外专门针对离岸深水构筑物监测技术方面的研究依然很少。在日本, Tanimoto Katsutoshi 等^[3]进行了双圆柱沉箱防波堤的现场振动试验, 但是由于只观测了位移和波压力, 该试验存在一定的局限性。在国内, 喻志发等^[4-5]对天津港的箱筒型基

础结构进行了全方位的原型监测, 并发明了具有水下无线传输系统的海上构筑物自动监测技术方法, 为原位试验开展离岸深水结构稳定性研究奠定了基础。

连云港港徐圩港区直立式结构东防波堤采用新型桶式基础结构, 该结构能够较好地适用于淤泥质海岸软土地基以及砂石料缺乏的地区, 具有不需要地基加固、施工工期短、不需要大型水上安装装备等特点。由于该新型结构在国内外首次应用, 所以在设计、施工及检测等方面都没有成熟经验可供借鉴。为了检验工程效果, 本文通过现场原位观测试验, 观测结构本身的倾斜度及其

收稿日期: 2013-11-22

*基金项目: 江苏省水利科技项目 (2012001-1); 国家 863 计划项目 (2012AA112510); 南京水利科学研究院基金项目 (Y312008)

作者简介: 曹永勇 (1987—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程现场试验与数值分析研究。

所承受的土压力、孔隙水压力等，从而进一步研究防波堤在下沉施工中的稳定性。

1 工程概况

主体结构试验段由6个桶式基础结构组成。新型桶式基础防波堤下桶为椭圆形，长轴30m，短轴20m，高11m，通过2道横隔墙和2道纵隔墙划分为9个隔舱；上桶高15.10m，桶身总高度达24.68m（图1）。该原位试验工艺为：预埋仪器→预制桶式基础→安装观测房→高压气囊搬运上浮船坞→出运及浮运→负压下沉→试验测试及分析。

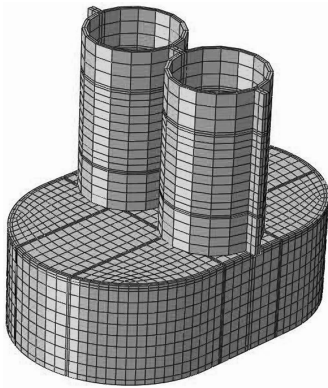


图1 新型桶式基础防波堤结构

2 试验项目的实施

2.1 整体位移与变形测试

在运行期波浪荷载作用下桶体位移与变形测量通过倾角仪和GNSS变形监测系统实现。在上、下桶的长轴一端侧壁内分别安装倾角仪，测量桶体的倾斜度（图2）。在靠近直立堤的相对稳定区域设置GR10基准站，每个测试桶上布置4台GR10监测站。

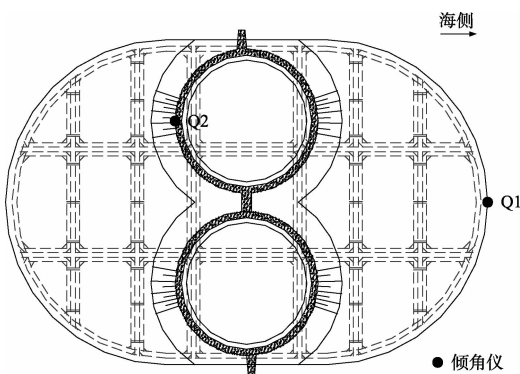


图2 倾角仪的测点布置

2.2 土压力和孔隙水压力测量

2.2.1 测点布置

桶体与地基土之间的界面土压力和孔隙水压力测试是判断土与结构相互作用的最直观方法^[6]。本文主要测试结构在负压下沉工况下基础桶桶壁及隔板侧面所受的水平向土压力和孔隙水压力，基础桶顶板下侧和基础桶桶壁及隔板底端所受地基土的竖向作用力和孔隙水压力。根据土压力分布曲线绘制原则，在基础桶侧壁和隔板侧面上布置7条土压力测线和3条孔压测线（图3）。

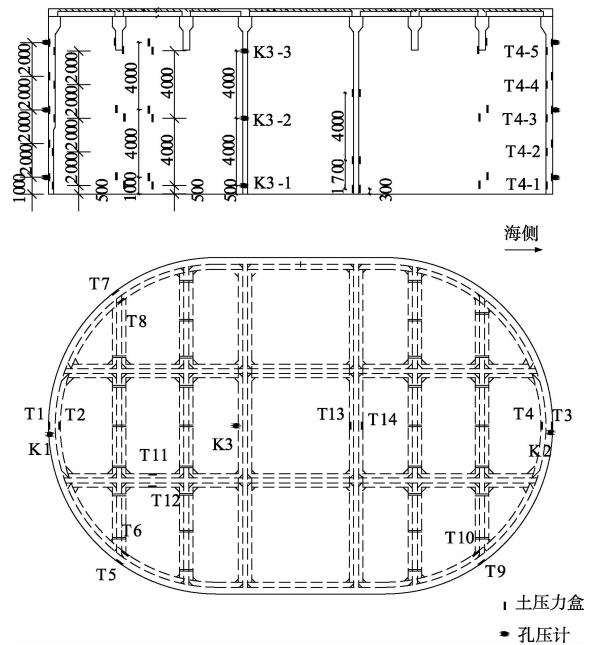


图3 基础桶侧壁和隔板侧面上的土压力计和孔压计布置

2.2.2 测试仪器设备和埋设方法

本试验采用VWE型界面振弦式土压力计和VWP型振弦式孔隙水压力计进行土压和孔压的测量。

土压力计的埋设方法如图4所示。在浇筑桶体混凝土前，将土压力计的感应面对应着钢模板，并使感应薄板表面与钢模板的内表面完全平齐，用两根钢筋通过焊接或者绑扎的方法固定住土压力计的挂耳进行定位，这样当模板拆除后，感应面刚好与侧面平齐也不会从混凝土中被拔出。

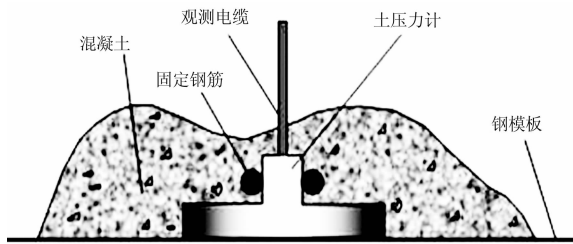


图4 土压力计的安装

孔隙水压力计的埋设方法如图5所示。在安装之前应先进行检测, 安装埋设前先将透水部件从孔压计主体上卸下, 然后将透水部件放入水中浸泡2 h以上, 排除透水石中的气泡。在浇筑当层混凝土前, 将孔压计的测头与钢模板平齐, 然后用绑扎钢筋固定到定位钢筋上。该原位试验所用的各种仪器见表1。

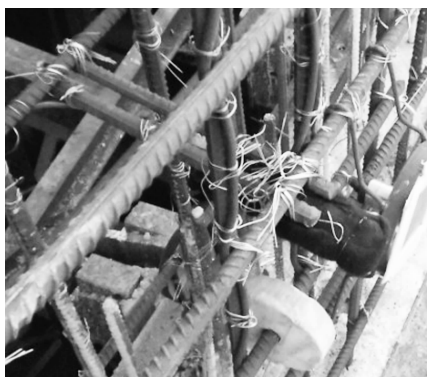
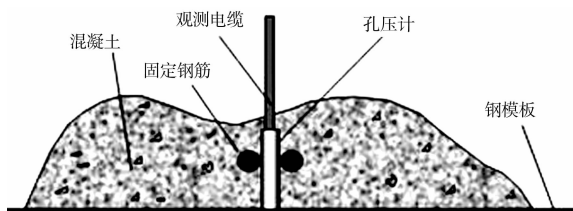


图5 孔隙水压力计的安装

表1 仪器类型及编号

仪器类型	数量	编号范围	类型	量程	精度
土压力计	74	T1-T16	VWE	500 kPa	±0.1% F.S
孔压计	9	K1-K3	VWP-0.25	250 kPa	±0.1% F.S
倾角计	2	Q1-Q2	ELT-15	±15°	±0.1% F.S
GPS	4	G1-G4	GR10		±8 mm

3 试验结果及分析

3.1 整体位移与变形测试

为确保能够全面地反映测试桶体在浮运及下沉期间的倾斜和位移情况, 采集系统每5 min采集一次倾角值, 而徕卡GNSS变形监测系统每1 min进行一次沉降测量。本文把倾角仪和GPS数据绘制成随时间的变化趋势图, 从宏观上了解桶体在负压下沉中的姿态变化规律(图6)。

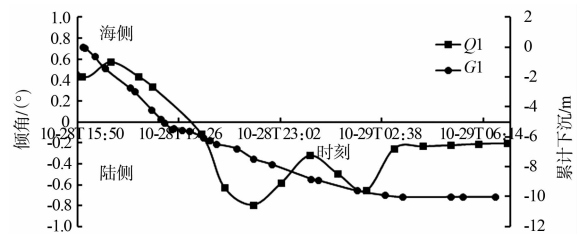


图6 下沉时Q1倾角值和G1累计沉降随时间变化曲线

试验结果表明, 测试桶体在下沉期间倾角平均值约为 -0.224° , 波动范围为 $-0.656^\circ \sim +0.875^\circ$, 最后稳定在 -0.2° 左右(其中正值表示偏向海测, 负值表示偏向港侧)。桶体下沉时竖向变化轨迹斜率由大逐渐变小, 特别是在下桶底入土一段时间后下沉速度变得非常缓慢。从图中可以看出, 19点时测试桶体的倾角度数在下沉期间由正值慢慢发展为负值, 而此时的G1竖向变化轨迹恰巧出现拐点。这是因为下桶底入泥一段深度后, 端阻力和摩阻力变大的缘故。倾角度数并没有随着波浪而做规律性的上下摆动, 这是由于下沉的时候风浪较小, 相对于隔舱中气压对桶体的影响程度较弱。所以整个过程中, Q1倾角度数的变化间接反映了桶体海侧和陆侧隔舱气压的相对变化。综合以上分析, 测试桶在下沉过程中桶体倾角变化较小, 隔舱气压平衡控制较好, 桶体下沉较为稳定。

3.2 土压和孔压对比分析

为了从宏观上了解桶体所受外力的情况，本文绘制了海侧桶体外壁 T3、内壁 T4 的总土压力-时间曲线和对应的 K2 总孔隙水压力-时间曲线(图 7~9)。

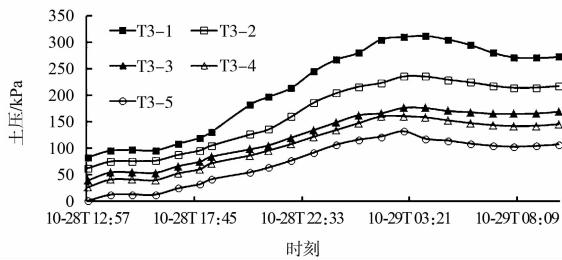


图 7 下沉时 T3 测线各测点的总应力变化曲线

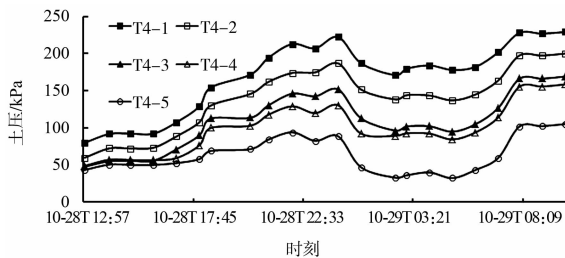


图 8 下沉时 T4 测线各测点的有效应力变化曲线

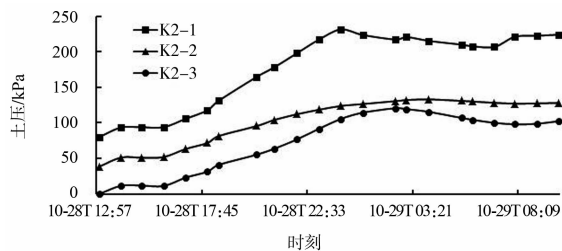


图 9 下沉时 K2 测线各测点总孔隙水压力值随时间变化曲线

从图中可以看出：下沉初期，T3 土压力压基本呈线性增长，这表明桶体在持续稳定下沉并且桶底还没有接触海底土层。18 时之后，测线各测值先后出现急速上升现象，表明随着桶体底部接触土层，底端土压力计的受力随之增大，下沉速率变缓。29 日 00 时，测线压力值增至最大，表明桶体负压下沉受到了很大的阻力。29 日 8 时，土压力值开始稳定，表明负压下沉结束，隔舱停止抽气。下沉前期内壁 T4 测线土压力压也基本呈线性增长，变化趋势和外侧土压力基本相同。但是

在 22 时左右土压力到达最大值，曲线出现了拐点，之后 T4 土压力的变化出现了与 T3 截然相反的变化趋势。在 22 时至 7 时，T3 测线土压力-时间曲线是凸函数，而 T2 测线土压力-时间曲线是凹函数。这是由于桶体开始往港侧倾斜，海侧外壁的土压力以主动土压力为主，内壁的土压力以被动土压力为主，这种土压力差直到下沉稳定后才渐渐减小。

K2 孔隙水压力与其对应的 T3 土压力呈现几乎相同的变化趋势，这是由于 T3 所测得土压力由有效土压力和孔隙水压力 K2 组成。

为了准确判断防波堤在负压下沉过程中的稳定性，本文对各部位在下沉过程中总应力的最大值做了统计(表 2)。

表 2 下沉中各部位总应力最大值

部位	相对桶底高度/m	测点编号	总应力最大值/kPa
桶壁外侧	1	T3-1	316.205
桶壁内侧	0	T2-1	271.482
桶底	0	T16-4	611.297
盖板	10.7	T15-7	135.385
隔墙	1	T11-1	265.029

从表中的数据可以看出，桶体在下沉过程各部位受力均没有超过设计极值。各部位土压力最大值都是发生在下桶底部已经入泥，隔舱在抽水的过程中。在出现最大值之前，桶体均出现过明显的倾斜。这就可以看出，土压力最大值出现在纠偏之后的半小时内，这就说明通过气压值进行纠偏对土压力的影响具有滞后性，滞后时间在半小时内。桶底所承受的总应力最大，并且远高于其他部位。这是由于下沉中桶底在承受土的压力时容易碰到砾石，从而产生应力集中。但是通过原位试验观测的数据，砾石导致的应力集中仍然没有超过设计的极限值，桶体在下沉过程中的稳定性非常好。

4 结语

通过原位试验观测了作用在新型桶式基础防

波堤结构上的淤泥地基土压力和孔隙水压力以及自身的位移和转角, 能够较好地反映桶式基础的稳定性, 对大型离岸深水结构的原位观测试验有一定的指导意义。桶体在下沉过程中由于应力集中导致桶底受力远大于其他部位, 但是各部位受力均没有超过设计极值, 桶体在负压下沉过程中的稳定性非常好。试验结果还表明气压纠偏对土压力的影响具有滞后性。

参考文献:

[1] 蒋敏敏, 蔡正银, 徐光明, 等. 软土地基上箱筒型基础防波堤静力离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 3 865-3 870.

[2] 武科, 栾茂田, 范庆来, 等. 复合加载模式下桶形基础破坏包络面弹塑性有限元数值分析[J]. 工程力学, 2008, 25(11): 156-161.

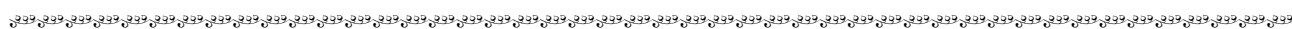
[3] Tanimoto K, Endoh H, Takahashi S. Field experiments on a dual cylindrical caisson breakwater[J]. Coastal Engineering Proceedings, 1992, 23(1): 625-628.

[4] 喻志发, 李树奇, 田俊峰. 箱筒型基础结构原型监测技术[J]. 中国港湾建设, 2010 (S1): 110-118.

[5] 喻志发, 杨京方, 解林博, 等. 离岸深水构筑物的自动监测新方法[J]. 中国港湾建设, 2012 (3): 25-28.

[6] 焦志斌, 蔡正银, 王剑平, 等. 遮帘式板桩码头原型观测技术研究[J]. 港工技术, 2005(1): 42-44.

(本文编辑 郭雪珍)



(上接第 22 页)

参考文献:

[1] 韩其为, 何明民. 三峡水库修建后下游长江冲刷及其对防洪的影响[J]. 水力发电学报, 1995 (3): 34-46.

[2] 刘春晶. 明渠非恒定流运动规律及推移质输沙特性的试验研究[R]. 北京: 清华大学, 2004: 25-28.

[3] Nezu I, Kadota A, Nakagawa H. Turbulent structure in unsteady depth-varying open-channel flows[J]. J of Hydr Engin, 1997, 123(9): 752-763.

[4] Qu Z. Unsteady open-channel flow over a mobile bed [D]. Lausanne, Switzerland: EPFL, 2003: 42.

[5] De Sutter Renaat, Verhoeven, Krein A. Simulation of sediment

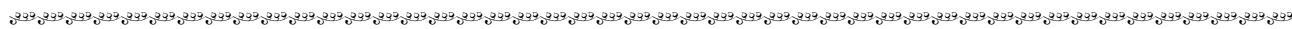
transport during flood events: Laboratory work and field experiments [J]. Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, 2001, 46(4): 599-610.

[6] 马爱兴, 陆彦, 陆永军, 等. 明渠非恒定流流速分布及推移质运动研究进展[J]. 水科学进展, 2012(1): 135-136.

[7] 许炯心. 汉江丹江口水库下游河床下伏卵石层对河床调整的影响[J]. 泥沙研究 1999(3): 48-52.

[8] 张耀新, 韦直林, 吴卫民. 赣江万安水电站下游一维非恒定流水沙数学模型[J]. 广西电力工程, 1999 (4): 71-76.

(本文编辑 武亚庆)



著作权授权声明

全体著作权人同意: 论文将提交《水运工程》期刊发表, 一经录用, 本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。