

DOI: 10.11779/CJGE2017S1037

# 光电编码器在深水离岸结构沉降测量中的应用

曹永勇, 关云飞, 李文轩

(南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 新型桶式结构防波堤是位于开敞式海域的深水离岸结构, 对于该结构的沉降监测是原位试验中的一大难题。结合该结构的原位观测试验研究了离岸深水结构沉降的量测技术, 利用光电编码器实现了沉降观测, 并通过与同步实施的 GNSS 变形监测系统的结果进行对比, 证明了将光电编码器用到深水离岸结构的沉降测量中是可行的, 其测量精度受被测结构的倾角影响较大。开发了适用于开敞式离岸深水结构的自动化测试系统, 利用该系统实现了沉降测量和数据传输。

**关键词:** 深水离岸结构; 光电编码器; 沉降测量; 自动化测量系统

中图分类号: TU196 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S1-0187-05

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研究。E-mail: ycao@nhri.cn。

## Application of photoelectric encoder in measurement of deepwater offshore structure

CAO Yong-yong, GUAN Yun-fei, LI Wen-xuan

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

**Abstract:** The new bucket structure breakwater is one kind of deepwater offshore structure in the open sea area. The settlement monitoring of the bucket structure has been a major problem in the in-situ tests. Combined with the in-situ tests of the structure, the settlement measurement technology of offshore deepwater structure is investigated, and the settlement measurement can be achieved using the photoelectric encoder. According to the comparison with the synchronized results of GNSS deformation monitoring system, it is proved that it is feasible to use the photoelectric encoder to measure the settlement of offshore deepwater structure, and the measurement accuracy is mainly affected by the inclination of the measured structure. An automated test system is developed for open offshore deepwater structure, which realizes settlement measurement and data transmission.

**Key words:** deep-water offshore structure; photoelectric encoder; settlement measurement; automatic measuring system

## 0 引言

深水离岸结构往往位于开敞式海域, 地质条件差, 波浪情况也更加恶劣, 因而结构的稳定性提出了更高的要求。对结构的变形监测是预防结构失稳的重要手段, 而对于深水离岸结构沉降的观测成为一个难点。在国外, Tscherning 等<sup>[1]</sup>成功地利用 GPS 水准法将高程基准跨越 Great Belt 海峡传递到离陆地 20 km 的海岛上, 传递的高程基准与静力水准所得的结果相差 4~5 cm, 为海岛附近离岸深水结构沉降测量提供了基准点。Fialko 等<sup>[2]</sup>利用微分干涉合成孔径雷达对加利福尼亚州 7.1 级赫克托耳矿山地震震中区三维的地表位移进行了观测, 推进了 InSAR 技术在沉降测量中的应用。在国内, 唐子阳等<sup>[3]</sup>在天津大港埕海油田二区海洋工程岛桥工程中, 在箱筒型深水离岸结构的顶板上安装了 3 根标尺, 通过水准仪进行常规的大地水准

测量得到各观测点的下沉量并计算出倾斜度, 从而反馈给施工单位进行多次调整排水泵, 解决了箱筒型结构下沉调平纠偏等关键工序的施工工艺。孙庆祥<sup>[4]</sup>把基准站安装在采油平台钻井甲板上, 进行偏心结算得到基准站坐标, 然后对动态载体上的定位点进行相对位置测量从而得到动态载体的相对位置参数, 实现了深水离岸动态载体的测量, 具有很高的工程应用前景。近年来, 非接触测量方法由于受工作环境影响较小而迅速发展起来, 黄醒春等<sup>[5]</sup>利用普通的数码相机配合 PHOTO 数字化摄影测量解析系统开发了一套近景化摄影测量方法, 并成功的应用在上海浦东一个大型沉井工程的位移测量中, 实现了位移、偏斜及沉井三维

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609147); 南京水利科学研究院基金项目(Y316010)

收稿日期: 2016-11-28

工况等信息的图文动态显示与输出,  $x$  方向上误差为 3.6 mm,  $y$  方向上误差为 3.2 mm。

目前, 传统的对于结构位移观测的方法主要有以下几种: 大地测量法(包括水准仪、经纬仪和测距仪等)、近景摄影法(全站式速测仪和电子经纬仪等)、沉降仪(水管式、电磁式、干簧管式及横臂式)。而现代的结构位移观测方法主要有 GPS、DInSAR 和地面激光扫描等。这些方法所使用的仪器费用高或者精度不够, 并且对现场施工环境、仪器保护、供电和数据传输系统都有严格的要求, 因此开发一套简单经济并能适用与开敞式海域的沉降测量系统十分有必要。

本文结合连云港港徐圩港区直立式桶式基础防波堤工程开展原位试验, 开发了光电编码器沉降观测系统, 通过自动化测量系统进行数据远程传输, 实现了对深水离岸结构的位移观测, 并通过与同步实施的 GNSS 变形监测系统的结果进行对比, 研究了结构在下沉过程中的位移变化规律。

## 1 原位观测概况

### 1.1 深水离岸防波堤现场概况

连云港徐圩港区防波堤总长度约 21.78 km, 由直立式结构和斜坡式结构组成。如图 1 所示, 红色线框部位代表直立式工程, 离岸近 10 km。直立式结构东防波堤采用单桶多隔舱基础的新型桶式结构, 该结构在预制场制作完成后, 通过浮船坞运送到设计位置后, 通过下桶内抽水和抽真空进行负压下沉。当防波堤下沉施工完成后, 主要起防浪、减淤的作用。



图 1 直立堤工程示意图

Fig. 1 Diagram of vertical breakwater

为进一步研究直立式桶式结构防波堤与地基土的稳定性和变形问题, 在徐圩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, 选取了其中两个桶体 ET4 和 ET5 进行原位观测试验<sup>[6]</sup>, 如图 2 所示。

### 1.2 开敞式深水离岸结构原位监测难点

该工程属于深水离岸结构, 位于开敞式海域, 其监测不同于常规监测, 具有一定特殊性和难点:

(1) 离岸距离较远。原位试验的桶体离岸近 10 km, 桶体附近没有任何可利用建筑物, 不具备驻守监测的条件, 应采用自动化观测。

(2) 波浪条件恶劣。随着水深和离岸距离的增加, 外海施工测量条件更加恶劣, 受地质条件、气象条件的影响也逐步加大。

(3) 测试精度高。下沉工况的桶式基础结构沉降测量精确到 1.0 cm, 防波堤运行期和桶式岸壁结构运行期结构沉降测量精度达到 2.0 mm。

(4) 施工速度快。桶体安装施工速度快, 所以测量仪器埋设与安装应在预制场完成, 并且不宜大量占用额外的施工期。

(5) 观测周期长。由于观测周期为 3 a, 因此对仪器质量、成活率和使用寿命要求较高。

(6) 满足实时性和同步性要求。应注意实测结果与环境条件变化的同步性, 第一时间将监测数据反馈到施工中。

(7) 数据传输困难。由于不能采用传统人工测量并采集数据, 因此需要开发自动化测量和传输系统。

(8) 现场供电和仪器保护困难。结构附近环境恶劣, 应解决仪器和信号线的防水防潮、防腐、防撞、防雷及电缆防断等问题。

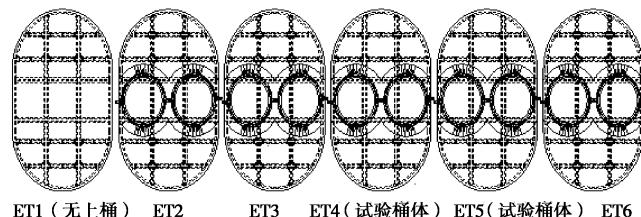


图 2 试验段桶体示意图

Fig. 2 Schematic diagram of barrel in test section

因此, 对于开敞式海域桶式结构防波堤试验段的监测不能采用传统的测量方法, 本文利用光电编码器开发出一套离岸结构沉降观测系统。

## 2 结构整体变形监测系统

### 2.1 开敞式深水离岸结构沉降测量

最常用的变形监测方法是通过水准仪、经纬仪或者全站仪利用已知坐标的控制点测出目标的竖向沉降、水平位移和倾角值。但是由于深水离岸结构监测的特殊性, 很难在单桶多隔舱结构防波堤附近找到已知坐标的控制点。如果利用岸上的控制点, 由于视线长度超出常规水准的长度或前后视距相差太大, 导致水准尺读数精度降低、 $i$  角误差和大气折光影响增大。光电编码器沉降监测系统就避免了这些问题。

光学编码器是一种通过光电转换将输出轴上的机

械几何位移量转换成脉冲或数字量的传感器, 可以高精度测量被测物的直线位移量。如图 3 所示, 光电编码器利用前一个下沉稳定后的桶体作为基点。当四号桶下沉稳定后, 在其上桶桶壁顶部埋两根  $\angle 50 \times 3$  角钢支杆, 一根竖向埋设用以支撑滑轮 2 及固定光电位移编码器, 一根水平埋设用以支撑滑轮 1 及悬挑挂重。施工五号桶时, 在靠近四号桶体边预埋一个 1 m 高  $\angle 50 \times 3$  支杆 (为保证固定点的最终位置比滑轮 2 高同时保证固定点支杆有足够的刚度, 采用 1 m 长角钢作为固定点支杆)。所有支杆都在上桶制作时预埋。连接固定点、滑轮、挂重的绳索采用低伸缩性的柔性细钢丝绳, 钢丝绳长 10 m。在支杆 1 和支杆 2 顶部焊接一横向短钢筋以安装滑轮, 角钢支杆顶端焊接一短钢筋作为固定点。在五号桶负压下沉施工时, 将钢丝绳与固定点牢固连接, 当桶体下沉时, 将钢丝绳与滑轮 1 和滑轮 2 及挂重连接。编码器固定在滑轮 2 上, 挂重下降带动滑轮 2 转动, 从而使编码器空心轴转动, 编码器测量记录桶体下沉位移。受量程限制, 五号桶下桶下沉 2 m 后开始用光电位移编码器进行位移测量, 其下沉量约为 7 m, 上桶空间能保证挂重的自由行程。

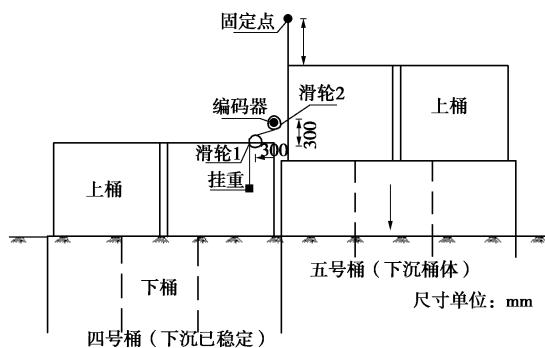


图 3 光电编码器的安装示意图

Fig. 3 Schematic diagram of installation of photoelectric encoder

光电编码器测桶体位移能实现自动测量, 方便快捷。但同时也有一定的不足之处:

(1) 桶体下沉过程中, 光电编码器安装没有足够的操作空间。

(2) 光电编码器只能实现桶体竖向位移测量, 无法测量桶体水平位移。

(3) 在五号桶体下沉过程中, 四号桶体也会继续下沉(虽然下沉量比较小), 影响五号桶位移测量精度。

(4) 通过光电编码器可以实现对离岸深水结构下沉时的位移观测, 但其精度受被测结构的倾角影响较大。

## 2.2 自动化测量系统的开发

本文所进行的原位试验离岸近 10 km, 并且易受恶劣天气的影响, 常规的人工监测具有一定的难度,

尤其在风暴潮到来时, 并不具备驻守测量的条件, 因此开发一套自动化监测系统, 在无人值守的条件下定时获取监测数据, 对于今后的研究有着重要的意义。

该原位试验采用的分布式自动化监测系统由监测子系统、数据采集系统、数据传输及处理系统和终端系统 4 个子系统构成。各子系统可并联单独运行, 也可以串联协同工作。系统结构运行方式如图 4 所示。监测仪器子系统可以根据不同试验需要进行调整, 本文的监测子系统包括光电编码器沉降测量、结构本身的倾斜度、所承受的土压力、孔隙水压力、波压力和结构内部的钢筋应力、混凝土应变等。数据采集系统包括测控装置, 通过电缆实现对监测点仪器数据的自动采集, 数据采集控制器 MCU 模块自带 DTU, 对接入的传感器按照客户端命令或者预设的时间进行自动控制、测量。根据连云港徐圩港区直立式防波堤工程施工现场具体情况, 自动化数据采集和监测系统数据传输和网络发布系统采用 GPRS 无线通信方式。

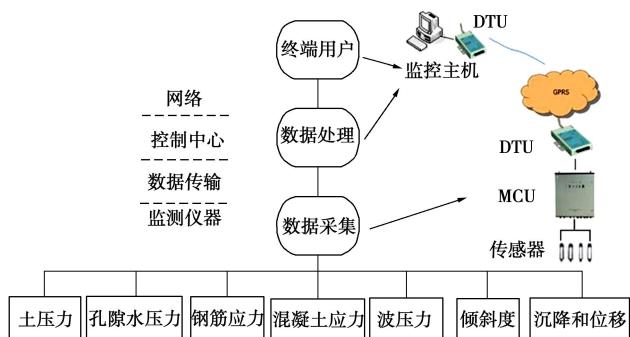


图 4 桶式结构防波堤自动化监测系统运行图

Fig. 4 Operating chart of automatic monitoring system for bucket structure breakwater

自动化监测系统主界面含有数据采集、数据管理、绘制过程线、监测报表、传感器设置、用户管理、系统设置、系统帮助和系统简介等子菜单。该分布式自动化监测系统克服了海上人工观测的各种缺点, 具有测量数据连续性、稳定性、长期性、及时性和高精度的特点。

光电编码器沉降系统的现场安装见图 5 (a)。由于远程自动化监测系统由于现场不具备供电条件, 需要利用光能、风能或者水能源进行补给。对数据采集系统来说供电方式一般有集中供电和分散供电两种方式, 本系统的测控装置 (MCU) 采用交流浮充或太阳能浮充, 蓄电池供电方式。对于有特殊要求的试验, 也可采用风光互补供电系统, 即风力发电和太阳能供电结合蓄电池的方式对系统进行供电。采用电缆方式要考虑到电缆敷设保护、屏蔽保护和接地等问题。为保护仪器及数据采集设备, 本系统对两个桶体均进行

了避雷措施, 如图 6 (b) 所示。

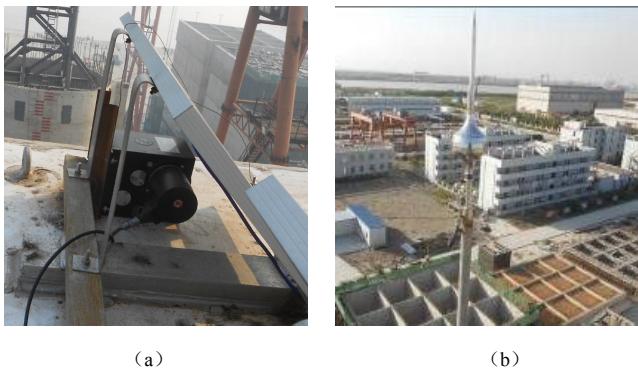


图 5 光电编码器沉降测量系统及其避雷系统现场图

Fig. 5 Settlement survey and lightning protection system of photoelectric encoder

### 3 观测结果分析

### 3.1 光电编码器观测数据处理方法

为确保能够全面的反映测试桶体在下沉期间的沉降情况,采集系统每5 min进行一次光电编码器的沉降测量。为了对比分析,同时进行了GNSS变形监测和倾角仪进行测量。倾角仪的埋设布置在上下桶的一端侧壁内,只测量沿椭圆长轴方向的倾角<sup>[7]</sup>。

本次原位试验首次尝试将光电编码器用于深水离岸结构的沉降测量并取得了成功。但是光电编码器测出的数据并非实际的沉降位移，需要通过公式转换，图 6 是编码器测值转换计算的简化示意图。

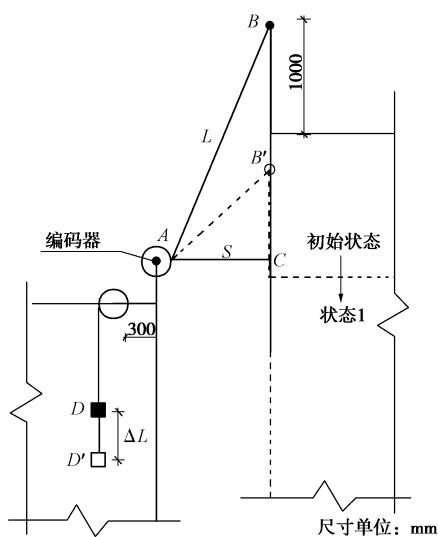


图 6 光电编码器沉降值计算示意图

Fig. 6 Calculation of settlement of photoelectric encoder

过  $A$  点向五号桶作垂线得到垂足  $C$  点，则  $AC$  与  $BC$  距离已知分别为  $S, H$ ，可计算得到  $AB$  的长度  $L$ 。当五号桶由初始状态变为状态 1 时， $B$  点下降到了  $B'$  点，挂重  $D$  下降到了  $D'$  点，光电编码器测出的是  $DD'$

的距离  $\Delta L$ 。由此可以算出二号桶的沉降量  $\Delta H$ ，即

$$\Delta H = H - \sqrt{(\sqrt{S^2 + H^2} - \Delta L)^2 - S^2} \quad . \quad (1)$$

式中  $H$  为  $A, B$  点垂直高度差;  $S$  为  $A, B$  点水平位移;  $\Delta L$  为光电编码器测出的距离。

### 3.2 光电编码器观测结果

桶体不断下沉,通过式(1)就可以算出桶体各种状态的实时沉降量。如图7和图8所示,为验证光电编码器进行沉降测量的实用性,了解位移与倾角变化规律,本文绘制了GNSS系统和光电编码器系统所测得的五号桶位移-时间曲线图、倾角-时间曲线图。桶体下沉速度在初期较快,之后随着入土深度增加,端阻力和摩阻力变大,下沉速度变缓。桶体下沉较为稳定,最终达到了设计的沉降量。图中还能发现,负压下沉过程中当桶体产生较大的倾角时,下沉速度变得非常缓慢。

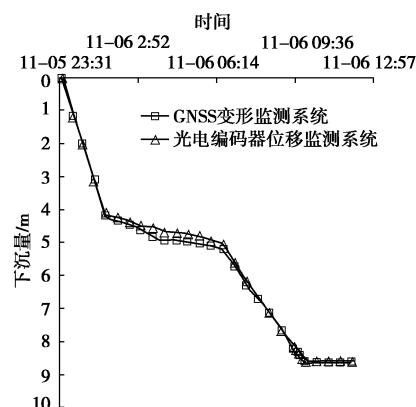


图 7 下沉时五号桶两种方法所测位移随时间变化曲线

Fig. 7 Variation curves of displacement measured by two methods of fifth barrel with time during sinking

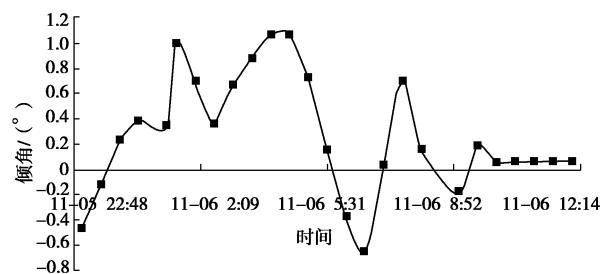


图 8 下沉时五号桶倾角值随时间变化曲线

Fig. 8 Variation curves of dip value of fourth barrel with time during sinking

试验结果表明, 五号测试桶在下沉期间倾角仪的倾角平均值约为 $+0.043^{\circ}$ , 波动范围为 $-1.073^{\circ} \sim +1.066^{\circ}$ , 最后稳定在 $0.07^{\circ}$ 左右(偏于海侧)。五号桶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。从图中还可以看出, 五号桶在6点时测试桶体的倾角度数

在下沉期间由负值慢慢发展为正值, 而此时的五号桶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, 五号桶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, 两个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。

由于光电编码器的量程限制, 该原位试验在桶体下沉 2 m 后才开始光电编码器的测量。从图 7 中的可以看出, 光电编码器测出的沉降值与 GNSS 系统测出的沉降值在下沉中差异不大, 下沉完毕时两种测量方法的累计沉降值基本相同。从式(1)的推导可以看出, 光电编码器计算公式是在假定五号桶体桶壁在竖直方向的基础上成立的, 也就是说桶体的倾角大小直接影响计算值的精度。对比图 8 中的倾角随时间变化曲线可以发现, 在 2 时至 6 时倾角出现较大波动, 而这时 GNSS 变形监测系统和光电编码器位移监测系统所测得的位移沉降出现较大差异。3 时左右, 倾角绝对值最大, 此时两种方法测得的位移差值也是最大的。由于式(1)不受之前各种状态的影响, 所以当下沉结束时倾角变小, 两种方法测得最终沉降量也几乎相同。这也就直接证明了将光电编码器用到深水离岸结构的沉降测量中是可行的, 其精度受到被测结构的倾角影响较大。因此, 控制桶体施工垂直度可提高沉降测量精度, 也可以通过测得的倾角对沉降值进行修正。

## 4 结论与建议

本文开发了适用于开敞式离岸深水结构的沉降测量系统, 首次将光电编码器应用于离岸深水结构的沉降测量并取得了成功。

利用该系统实现了新型桶式结构下沉安装的位移测量, 发现其精度主要受被测结构的倾角影响, 通过控制桶体施工垂直度可提高沉降测量精度, 也可以通过测得的倾角对沉降值进行修正。该沉降测量系统克服了海上人工观测的各种缺点, 具有测量数据连续性、稳定性、长期性、及时性和高精度的特点, 能够满足开敞海域自然条件恶劣、结构距岸较远、仪器及数据采集系统需进行防潮防撞处理等要求。

## 参考文献:

- [1] TSCHERNING C C, MADSEN F. The use of height differences determined by the GPS in the construction process of the fixed link across the Great Belt[C]// FIG XIX Int. Congress. 1984.
- [2] FIALKO Y, SIMONS M, AGNEW D. The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 M W 7.1 Hector Mine Earthquake, California, from space geodetic observations[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(16): 3063 – 3066.
- [3] 唐子阳, 张志满. 箱筒下沉施工及下沉调平和纠偏[J]. 水运工程, 2009(2): 135 – 137. (TANG Zi-yang, ZHANG Zhi-man. Box tube's submersion construction, sinking leveling and deviation rectification[J]. Port & Waterway Engineering, 2008(5): 48 – 50. (in Chinese))
- [4] 孙庆祥. 基于 GPS RTK 技术实现海上三维高精度动态测量[J]. 测绘通报, 2008(5): 48 – 50. (SUN Qing-xiang. Precise 3D dynamic survey on the sea based on GPS RTK technique[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2008(5): 48 – 50. (in Chinese))
- [5] 黄醒春, 寇新建, 徐张生. 大型沉井施工过程的数字化摄影监测[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 559 – 563. (HUANG Xing-chun, KOU Xin-jian, XU Zhang-sheng. Monitoring of dynamic displacement of large scale well-sinking by close-up photogrammetry[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(5): 559 – 563. (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))
- [7] 曹永勇, 蔡正银, 关云飞, 等. 新型桶式基础防波堤在负压下沉中的稳定性试验[J]. 水运工程, 2014(7): 41 – 45. (CAO Yong-yong, CAI Zheng-yin, GUAN Yun-fei, et al. Stability tests for new bucket-based breakwater driven by negative pressure[J]. Port & Waterway Engineering, 2014(7): 41 – 45. (in Chinese))