

桶式基础结构稳定性试验研究

李 武¹, 吴青松², 陈 甦¹, 程泽坤¹

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032; 2. 江苏省射阳县港口管理局, 江苏 盐城 224300)

摘要:桶式基础防波堤结构在深厚软泥土沿海工程中逐渐引起关注并大量应用于工程实践,但单桶多隔舱桶式基础结构的稳定性尚未得到解决.采用原状软黏土,通过室内物理模型试验,探讨了桶式基础防波堤的稳定性,得到荷载—位移曲线的变化规律,下桶内的负压对荷载—位移曲线的影响及桶式基础结构破坏形式与外荷载的关系.试验证明,在表层土体的抗剪强度范围内,荷载与位移呈线性变化,否则,呈非线性变化.如果存在负压作用,荷载与位移的线性关系范围扩大,非线性关系范围缩小,最终破坏形式相同.桶式基础结构的破坏形式与外荷载的作用点及桶底面土体的强度直接相关.上述规律可以为新型桶式基础结构防波堤的设计、优化与完善提供参考.

关 键 词:桶式基础;软土地基;防波堤;稳定性

中图分类号:TU411; U656.2⁺4 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-640X(2012)05-0042-06

随着经济发展的需要,港口建设朝着大型化、深水化的格局发展,然而,在深厚软泥土沿海地区,如何在深厚软土地基上进行防波堤建设并确保其稳定,已成为迫在眉睫的关键课题.范庆来等^[1]基于软黏土的循环强度理论,在ABAQUS平台上,通过二次开发将Duncan-Chang非线性弹性应力应变关系与Mises屈服准则结合,针对大圆筒等结构及基础形式,基于拟静力分析建立了循环承载力的计算模型.武科等^[2]基于大型有限元分析软件ABAQUS,采用Swipe试验加载方法,通过比较系统的数值计算与分析,考察了不同荷载组合加载模式下桶式基础破坏包络面形状,并给出了数学表达式,依次评判实际荷载作用下桶式基础的工作状态.孙曦源^[3]等探讨了饱和软黏土地基中单桶式基础水平承载力随着土体有效重度、土体变形模量、桶体长径比的增加而增大,随着荷载作用高度的增加而减小的特性.王元战等通过桶式基础防波堤三维弹塑性有限元分析,总结了结构稳定性的极限承载力判别标准、基于 $p-s$ 曲线出现较明显拐点的判别标准、基于允许变位的判别标准和基于桶底脱离的临界点的判别标准等4种判别标准^[4-12].但是单桶多隔舱的桶式基础防波堤结构的研究较少,尤其是物理模型试验研究.因此,本文拟利用物理模型试验,探讨桶式基础结构防波堤的稳定性,并找出稳定性规律,为此类新型桶式基础结构防波堤设计、优化与完善提供参考.

1 模型试验

1.1 模型试验基本原理

由于土力学试验的特殊性,小比例尺模型试验不能模拟重力效应,不能进行与原型的相似关系试验.因此,由物理模型试验得到的土压力及外荷载等物理量不能直接按模型比尺换算到原型相应结果.因此,本研究目的在于通过模型试验,探索结构稳定性的影响因素,进而为原型结构稳定性判断提供依据,为工程设计提供参考.

收稿日期: 2012-02-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179105)

作者简介: 李 武(1978-),男,黑龙江哈尔滨人,高级工程师,博士,主要从事港口工程、岩土工程、地下工程等领域的设计与科研工作. E-mail: liw@theidi.com

静载试验通过结构位移—荷载关系以及土压力—荷载关系的实测结果,分析结构的失稳机理,并进一步确定结构的稳定性极限荷载。

1.2 桶体模型及试验土样

根据实验室水槽尺度和造波能力,确定桶体稳定性试验和圆桶水槽波浪试验的模型尺寸,上桶的桶体外径、高度分别为 400 和 683 mm,下桶的桶体高度、椭圆短轴和长轴方向长度、直线段长度分别为 384, 800, 1 200 和 400 mm。

土样制备是试验中最为关键的一步。连云港土表层为淤泥,分布的平均深度大约为 $-14.13 \sim -6.0$ m 以上,淤泥下层为粉质黏土,深度大约在 $-22.7 \sim -12.97$ m。按照现场土体的实际分布情况,设计两层土试验模型,上层为淤泥,下层为粉质黏土。同时根据淤泥上下土性的差异,又将淤泥进一步分为上层、中层和下层。试验桶体布置和土层分布如图 1 所示。

各层土的力学指标如表 1 所示。可以看出由于扰动的原因,模型试验土样的强度指标较原状土降低很多,原状土黏聚力为试验土样的 3~4 倍,综合抗剪强度为试验土样的 3~7.7 倍。

表 1 淤泥层模型土样强度指标对比

Tab. 1 Contrast of soil strength index of silt layer model

项 目	泥层厚度/ cm	直 剪		十字板强度/ kPa
		$C/$ kPa	$\varphi/ (^{\circ})$	
原型现场取样		6.7	2.5	17.8
上 层	17	1.62	1.31	2.3
中 层	12	1.62	1.31	4
下 层	11	2.46	2.27	6
加权平均	40	1.85	1.57	3.83

1.3 试验设备

(1) 土压力测定。土压力传感器采用丹东三达测试仪器厂生产的 DYB-1 型进行测量。数据采集用靖江泰斯特电子有限公司生产的 TST3827 USB 式动静式信号测试分析系统。桶壁上采用直径为 30 mm, 量程为 0.5 MPa 的传感器。考虑到桶体下沉时桶端土压力较大, 为避免超量程, 桶端采用直径 16 mm, 量程为 1 MPa 的传感器。压力传感器的精度为 0.5%。

(2) 位移测定。位移采用 WBD 型机电百分表进行测量。分别在模型的下桶顶端和上桶顶端两点进行线位移测量, 借此可以测出桶体的水平位移和倾斜角度。

(3) 静拉力加载装置。考虑到桶体失稳需要的水平荷载较大, 特制了一套专用加载装置(见图 2)。

(4) 波压力测定。采用北京水科院生产的 DJ200 波压力数据采集系统采集波压力。上桶共安装了 15 个波压力传感器。

(5) 其他仪器设备。包括试验水槽长 90 m, 宽 2 m, 高 1.8 m, 配备伺服式不规则波造波机。水槽的特色是中部有一 $6 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的基坑, 便于进行波浪作用下建筑物土体相互作用的试验。

1.4 试验概况

试验淤泥厚度分为 40 和 36 cm 两种情况。泥厚 40 cm 情况下, 桶体全部沉入泥中后桶端以下仍有 4 cm

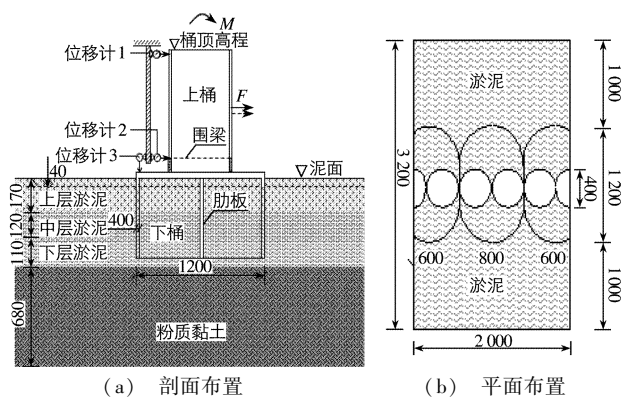


图 1 试验土层及桶体布置(单位: mm)

Fig. 1 Test soil and bucket layout (unit: mm)

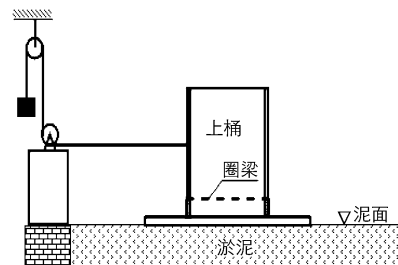


图 2 加载装置力学示意图

Fig. 2 Mechanical schematic of loading device

厚的淤泥,桶端未与下部粉质黏土接触. 泥厚 36 cm 系将泥厚 40 cm 情况下的淤泥去除表层 4 cm 而成,桶体下沉后桶端恰好触及下层粉质黏土. 试验组次如表 2 所示.

表 2 桶体稳定性试验组次
Tab.2 Test group of bucket stability

试验编号	泥厚/ cm	水平力作用点距下桶底高度/ cm	荷载形式	下桶密封情况
1	40	32	静载	无负压
2	40	34	静载	无负压
3	36	32	静载	无负压
4	36	34	静载	无负压
5	36	32	静载	带负压
6	36	34	静载	带负压

2 试验结果

荷载和位移随时间的变化见图 3,由图可知,当荷载较小时,桶体加载后较短时间内即可达到受力平衡,而位移趋于停止.(注:由于试验 1 失败,图 3、图 5 未给出其曲线图.)

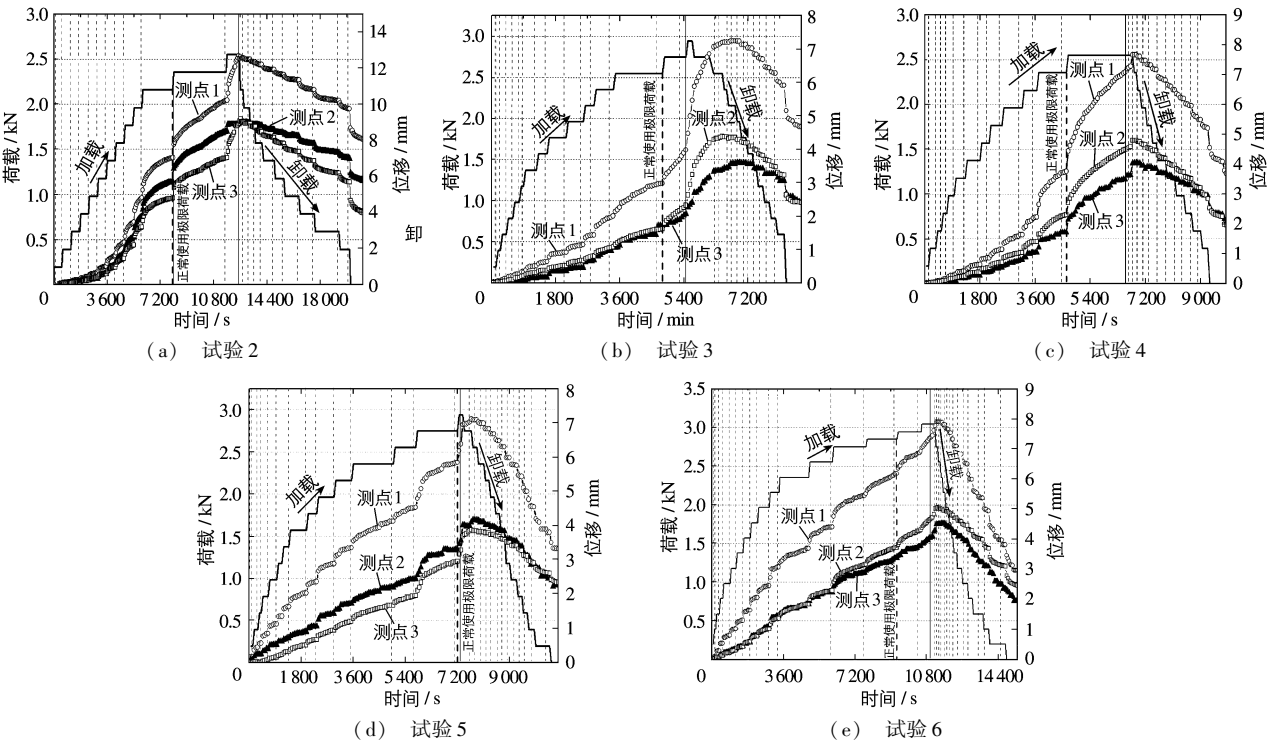


图 3 位移—荷载曲线

Fig.3 Displacement-load curves

但当荷载较大时,桶体达到平衡需要较长时间,相同荷载增量下的位移增量也相应增大,说明位移—荷载关系进入非线性阶段,但在该阶段,一定荷载下结构仍可达到受力平衡. 荷载—位移曲线见图 4,可见加载初期,荷载—位移基本呈线性关系,这一阶段大致可以持续到荷载达到 1.2 ~ 1.4 kN,当荷载超过这一界限后,开始进入非线性关系阶段,但结构仍能正常工作,因此非线性阶段仍可作为正常使用

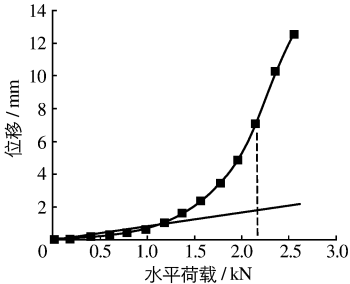


图 4 实测荷载位移曲线

Fig.4 Measured load displacement curves

承载范围.

桶体倾斜度和位移随时间变化见图5.由图可见,桶体倾斜度随荷载变化过程与位移变化具有类似规律,即当荷载较小时,结构倾斜度增加缓慢.但当荷载超过一定值后,倾斜度增加速率加快.

静拉试验结果见表3,可见桶体在负压工作状态下,水平承载力可提高8.3%,位移量略有增加,但倾斜度在较大荷载下显著加大.

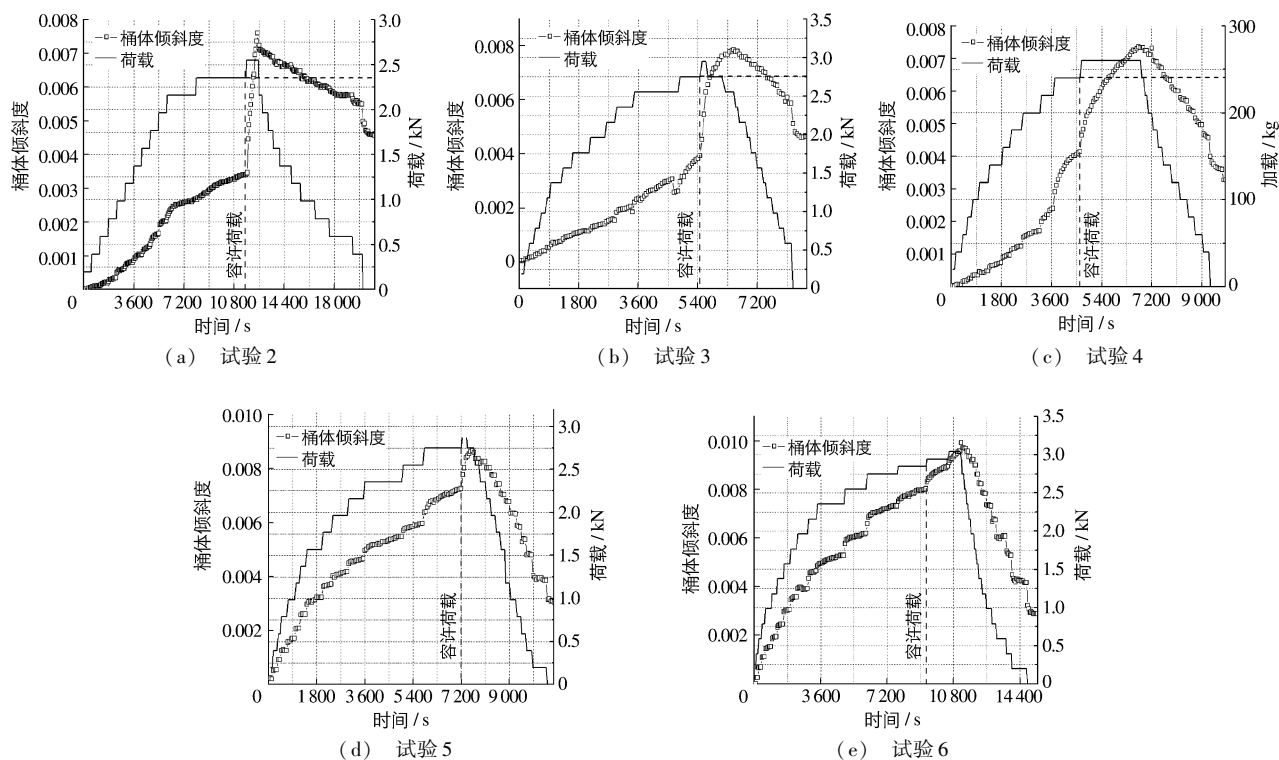


图5 倾角、荷载随时间变化曲线

Fig.5 Variation in inclination ~ load curve with time

表3 静拉试验结果

Fig.3 Static pull test results

泥厚/ cm	拉孔高/ cm	正常使用最大 水平荷载/ kN	容许荷载时的位移量/ mm			负压状态
			桶顶	桶底	竖向	
40	32	2.40	6			无
	34	2.20	7	5.7	4.8	无
36	32	2.60	3.0	1.7	1.6	无
	34	2.35	3.8	1.7	2.3	无
36	32	2.60	3.3	1.8	1.9	有
	34	2.40	5.5	2.7	3.5	有

3 试验结果分析

工程上一般以位移量是否超标作为判断桶体是否处于正常工作状态的指标.因此,可以将位移达到正常使用极限时的这一级荷载作为容许荷载.取淤泥厚度36 cm,拉力孔高度32 cm,对结构逐级加载,直至基础破坏.从试验过程看,加载至3.13 kN(320 kg)时,已经观察到淤泥开始屈服,位移增速开始加大,位移荷载曲线出现转折,达到极限荷载时实测上桶上端水平位移为66.4 mm,上桶下端27.9 mm,平均47.1 mm.可见桶体已经发生显著水平位移.受桶体挤压,下桶前部淤泥出现明显的隆起,试验之前下桶顶端高于泥面10 mm,

试验中下桶前端下沉了近 20 mm, 试验后已经低于泥面; 同时后端翘起近 50 mm, 后部淤泥也出现与桶体脱离现象, 且由于桶体整体向前滑移, 下桶后方的淤泥出现拉裂破坏。前端下陷和后端翘起量不等, 说明桶体在发生局部地基承载力破坏的同时, 还发生了倾覆变形。这表明基础承载力达到极限状态。最终确定每组桶式基础结构极限承载力为 3.34 kN。由此确定结构容许承载力为 2.23 ~ 2.57 kN。另外, 软弱淤泥层较厚时, 位移量较大, 承载力也较小, 软弱淤泥层较薄时, 位移量也较小, 承载力也较大。淤泥厚 36 与 40 cm 情况相比, 位移量大约减少一半, 而容许承载力提高 8.3%, 不及位移量变化显著。承载力提高的原因, 一是上层较软土层厚度减少, 二是桶底抵达较好持力层。这也表明桶体的破坏形式与上桶水平力的作用点以及持力层的土性有关系, 当上桶水平荷载作用点靠下时, 桶体会因为水平抗力不足而产生水平滑移破坏; 而当持力层承载力较高, 桶体入土范围内土体较软弱时, 整个桶体可以视为其点转动, 结构另一端向上跷起, 结构发生倾覆失稳; 若持力层及桶体入土范围内土体均较软弱时, 桶体将因地基局部失稳而发生倾覆, 与第 2 种情况不同的是, 桶体除了在某点因为下层土体承载力不够而向下沉陷外, 另一端泥土将会出现拉裂破坏, 结构发生局部地基破坏失稳。

4 结 语

(1) 桶式基础结构在荷载作用下, 开始阶段荷载大约为极限破坏荷载 1/3 时, 荷载和位移随时间变化曲线接近线性, 超过该值时, 曲线表现出明显非线性, 随着荷载的增加位移增量变大, 稳定时间变长, 结构附近土体的应力发生重分布, 使结构重新达到平衡。

(2) 桶体在有、无负压作用下的荷载和位移随时间变化曲线不同, 有负压时曲线的线性阶段变长, 但最终都进入非线性阶段。这是由于负压作用下桶底土体对结构有吸力, 使结构处于弹性范围内, 随着荷载增大桶底产生吸附力的土体破坏, 结构受力状态改变到无负压状态, 荷载和位移随时间变化曲线发生明显非线性变化。

(3) 桶式基础结构失稳破坏形式, 根据外荷载作用不同, 可能产生 3 种破坏, 当结构没有进入强持力土层时, 结构容易发生滑移破坏; 当结构进入持力强的土层, 外荷载作用点高, 结构产生倾覆破坏; 当结构进入较强持力土层, 在荷载作用下, 容易发生局部破坏, 最终导致结构倾覆破坏。

参 考 文 献:

- [1] 范庆来, 栾茂田, 杨庆, 等. 考虑循环软化效应的软基上深埋大圆筒结构承载力分析[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(5): 702-706. (FAN Qing-lai, LUAN Mao-tian, YANG Qing, et al. Analyses of bearing capacity for deeply-buried large-diameter cylindrical structure on soft clay considering cyclic-softening effect[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, 46(5): 702-706. (in Chinese))
- [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. (WU Ke, LUAN Mao-tian, FAN Qing-lai, et al. Numerical analysis of failure envelopes of bucket foundation subjected to combined loads based on elasto-plastic FEM[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(11): 156-161. (in Chinese))
- [3] 孙曦源, 栾茂田, 唐小微. 饱和软黏土地基中单桶形基础水平承载特性有限元研究[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(5): 702-707. (SUN Xi-yuan, LUAN Mao-tian, TANG Xiao-wei. Finite element study of horizontal bearing characteristics of single-bucket foundation on saturated soft clay ground[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2010, 50(5): 702-707. (in Chinese))
- [4] 王元战, 王海龙, 付瑞清. 沉入式大直径圆筒码头稳定性计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 417-420. (WANG Yuan-zhan, WANG Hai-long, FU Rui-qing. Method of stability analysis of embedded large-diameter cylinder quay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 417-420. (in Chinese))
- [5] 王元战, 王琳, 黄长虹. 沉入式大圆筒防波堤稳定性计算方法[J]. 中国港湾建设, 2003(5): 17-20. (WANG Yuan-zhan, WANG Lin, HUANG Chang-hong. Computation methods of stability of embedded large cylinder breakwater[J]. China Harbour Engineering, 2003(5): 17-20. (in Chinese))

- [6] 王元战, 肖忠, 迟丽华, 等. 筒型基础防波堤稳定性简化计算方法[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1367-1372. (WANG Yuan-zhan, XIAO Zhong, CHI Li-hua. A simplified calculation method for stability of bucket foundation breakwater[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1367-1372. (in Chinese))
- [7] 王元战, 华蕾娜, 祝振宇. 软土地基条件下大型圆筒海岸结构稳定性计算方法[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 41-45. (WANG Yuan-zhan, HUA Lei-na, ZHU Zhen-yu. Stability calculation methods of large cylinder structure in coastal soft clay foundation[J]. 2005, 26(1): 41-45. (in Chinese))
- [8] 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(增2): 3865-3870. (JIANG Min-min, CAI Zheng-yin, XU Guang-ming, et al. Experimental study of centrifugal model of bucket foundation breakwater on soft soil foundation under static load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Suppl2): 3865-3870. (in Chinese))
- [9] 茅加峰, 顾行文, 徐光明, 等. 波浪荷载对箱筒型基础防波堤作用的拟静力模拟研究[J]. 中国港湾建设, 2010(增1): 105-109. (MAO Jia-feng, GU Xing-wen, XU Guang-ming, et al. Working performance of a cylindrical breakwater under pseudo-static wave loading[J]. China Harbour Engineering, 2010(Suppl1): 105-109. (in Chinese))
- [10] 文靖斐, 徐少鲲, 别社安. 箱筒型基础承载力研究[J]. 水运工程, 2011(6): 136-142. (WEN Jing-fei, XU Shao-kun, BIE She-an. Analysis of bearing capacity for box and bucket foundation[J]. Port & Waterway Engineering, 2011(6): 136-142. (in Chinese))
- [11] 蔡正银, 徐光明, 顾行文, 等. 波浪荷载作用下箱筒型基础防波堤性状试验研究[J]. 中国港湾建设, 2010(增1): 90-94, 99. (CAI Zheng-yin, XU Guang-ming, GU Xing-wen, et al. Behavior investigation on a cylindrical breakwater during wave loading[J]. China Harbour Engineering, 2010(Suppl1): 90-94, 99. (in Chinese))
- [12] 李元音, 谢世楞, 王元战, 等. 箱筒型基础防波堤断面稳定计算方法[J]. 中国港湾建设, 2010(增1): 95-99. (LI Yuan-yin, XIE Shi-leng, WANG Yuan-zhan, et al. Stability calculation methods for the cylindrical caisson breakwater[J]. China Harbour Engineering, 2010(Suppl1): 95-99. (in Chinese))

Stability tests of bucket-based structure

LI Wu¹, WU Qing-song², CHEN Su¹, CHENG Ze-kun¹

(1. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 2. The Port Authority in Sheyang County of Jiangsu Province, Yancheng 224300, China)

Abstract: Bucket-based breakwater structure is increasingly concerned and used in engineering practice for the coastal engineering of deep soft soil, but the stability of multi-compartment single-bucket structure has not yet been solved. In this paper, the stability of bucket-based breakwater structure is investigated using original soft clay in laboratory by physical model tests. The variation law of load-displacement curve, the effect of negative pressure on load-displacement curve, and the relationship between bucket-based structural damage form and external load are obtained. Test results show that the load-displacement curve changes linearly in the surface soil shear strength, but changes nonlinearly beyond the range. If there is negative pressure, the linear relationship of the load-displacement curve is expanded, the scope of non-linear relationship is reduced, and the eventual extent of damage is the same. The destruction form of the bucket-based structure is directly related to external load point and the strength of the soil in the bucket bottom. The law above can give a reference to design, optimization and improvement of new bucket-based breakwater structure.

Key words: bucket-based; soft soil foundation; breakwater; stability