



桶式防波堤离心模型试验

陈海峰, 李 武

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 桶式基础防波堤结构在淤泥质海岸工程中的应用逐渐引起关注, 但单桶多隔舱桶式基础结构的稳定性问题尚未得到解决。结合连云港防波堤工程, 通过离心模型试验探讨波浪荷载作用下桶式基础防波堤结构的稳定性问题。采用拟静力和循环往复作用力两种方式模拟波浪荷载作用, 分析试验结果, 得出桶式基础防波堤结构在各个阶段中的变形稳定性状和可能的破坏模式, 为工程设计优化提供参考。

关键词: 桶式基础; 软土地基; 防波堤; 稳定性

中图分类号: TU 473.11

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)03-0057-05

Centrifugal model test of bucket-based breakwater

CHEN Hai-feng, LI Wu

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The bucket-based breakwater has drawn extensive concern in deep mud soil coastal projects. The stability of a single bucket with bulkheads remains a key technique. This article establishes a centrifugal model test and researches stability issues under wave loads on the basis of Lianyungang breakwater project. Wave loads are applied as quasi-static load and cyclic loads. Test results give stability performance and possible failure modes at different phases and provide the optimal design for coastal projects.

Keywords: bucket-based structure; soft soil foundation; breakwater; stability

在沿海深厚软土地区, 如何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。对于物理力学指标差的深厚软土层, 一般在修建防波堤之前必须进行软基处理, 以提高地基承载力来保证防波堤的稳定。但是地基处理费用高、施工周期长, 为了解决这些问题, 必须尽可能利用天然地基承载力建造结构, 以达到节省投资、缩短工期的目的。鉴于低承载力的天然软土地基不能满足传统重力式防波堤结构, 所以采用新型结构形式防波堤不失为一种选择^[1]。

在各种轻型结构中, 桶式基础结构是一种适用于近海软土地基的新型结构。该种结构由安装

在水下土中的基础和其上的墙体两部分组成, 上下两部分通过盖板刚性连接。当桶式基础结构作为防波堤结构与地基土体相结合时, 具有以下特点: 1) 桶式结构是一种轻型刚性结构, 给地基施加的竖向荷载较小; 2) 桶式结构本身是一种薄壁结构, 加上内隔板, 使得它与地基土相接触的面积很大, 能将桶结构所承受的竖向荷载和侧向荷载合理分布到水下地基土体上^[2-5]; 3) 下桶在下沉就位后, 所有通气孔被密封, 桶内土体与桶体侧壁发生相对位移时将受到真空吸力作用, 使下桶基础与桶内地基土形成一个整体, 共同承受波浪荷载、冰荷载等侧向荷载作用而保持稳定^[6-8]。

收稿日期: 2015-08-02

作者简介: 陈海峰 (1976—), 男, 高级工程师, 从事港口航道工程结构设计及研究工作。

本文拟依托连云港港徐圩港区防波堤工程，利用土工离心模型试验等研究手段，解决桶式基础防波堤结构建设的主要关键技术问题，从中得出合理的设计参数，为新型桶式基础防波堤结构的设计和优化提供技术依据。

1 土工离心模型

在岩土工程中，土自重引起的应力通常占支配地位，而土的力学特性又随应力水平不同而表现不同，在地面上 $1g$ (g 为重力加速度) 条件下进行常规小比尺的物理模型试验，土体及其中结构物的自重应力水平与原型的自重应力水平不成比例，模型的性状不能反映原型的性状。所以，开展真正的土工物理模型试验研究，首先必须使模型中的土体及其中结构物的应力水平与原型成比例。满足这一前提条件的途径之一就是模型置于特制的离心机中，使 $1/N$ 缩尺的模型承受 Ng 离心加速度的作用（此受力环境称 N 倍重力加速度的超重力场），使模型土体及其中结构物的应

力水平等同于原型的应力水平。换言之，土工离心模型试验原理的核心是借助离心机为模型创造一个与原型应力水平相同的应力场。

根据桶式基础防波堤结构断面几何尺寸，并结合原状土的取土数量和模型制作、测量等因素，选定模型几何比尺为 $n = 80$ 。

2 桶式基础防波堤结构的模拟

2.1 工程概况

徐圩港区位于连云港区南翼埭子口以西至小丁港之间的海岸，隶属连云区，目前为开敞海岸。港区设计高水位 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。设计波浪要素见表 1，工程区域地质资料见表 2。

表 1 防波堤沿线外侧 50 a 一遇设计波要素

设计水位	N 向		NE 向	
	$H_{1\%}/m$	T/s	$H_{1\%}/m$	T/s
设计高水位 5.41 m	6.20	8.87	6.34	8.76
设计低水位 0.47 m	3.57	8.87	3.57	8.76

表 2 地基土的主要物理力学特征指标

土层	土层厚度/m	土层底高程/m	$w/\%$	$\rho/(t/m^3)$	e_0	I_L	a_{1-2}/MPa^{-1}	E_s/MPa	快剪		固快		十字板	标贯击数 N
									c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	S_v/kPa	
淤泥层	6.10~17.80	-21.60~-10.89	64.8	15.8	1.819	1.37	1.82	1.61	6.7	2.5	9	3.0	18.90(5~44)	~1
粉质黏土层	1.00~8.40	-22.70~-12.97	27.1	19.2	0.770	0.53	0.39	4.98	37.8	10.7	45	11.5		10
粉砂粉土层	0.6~7.25	-24.71~-15.64	20.0	20.0	0.587		0.25	6.53						24
粉质黏土层	0.50~11.50	-32.40~-22.06	31.4	18.6	0.891	0.70	0.51	3.97	29.2	9.0	35	8.7		13.1

结构设计采用泥面以下单个椭圆截面和泥面以上两个圆形截面组合成的空间薄壳结构作为防波堤挡浪结构。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 1 节高 8.1 m(3.5 ~ -4.6 m)，第 2 节延伸桶高 7 m(10.5 ~ 3.5 m)。连接上下桶结构的盖板厚 0.4 m，桶式基础防波堤第 1 阶段高度 17.68 m，第 2 阶段高度 24.68 m。

2.2 模型设计与制作

离心模型试验中材料采用铝合金板替代混凝土墙板制作离心模型中的各种构件。模型地基土样取自现场，自上而下依次为：淤泥层、粉质黏

土层、粉砂粉土层，均为扰动土样，需在模型箱中自下而上逐层重塑，以地基强度指标作为控制标准。模型地基共设置了 3 个土层，最上层是淤泥层，厚约 114 mm；中间是粉质黏土层，厚约 53 mm；在模型箱最底部的厚约 36 mm 的粉砂排水层，是采用固结排水法制备上述两层土体的透水层。

模型试验模拟对防波堤结构性状最不利的波浪力荷载作用进行模拟，由于采用等效波浪力方法，试验模拟原型设计低水位，其高程为 0.47 m，水位在试验中采用溢流水筒控制。桶式基础防波堤结构的模型布置见图 1。

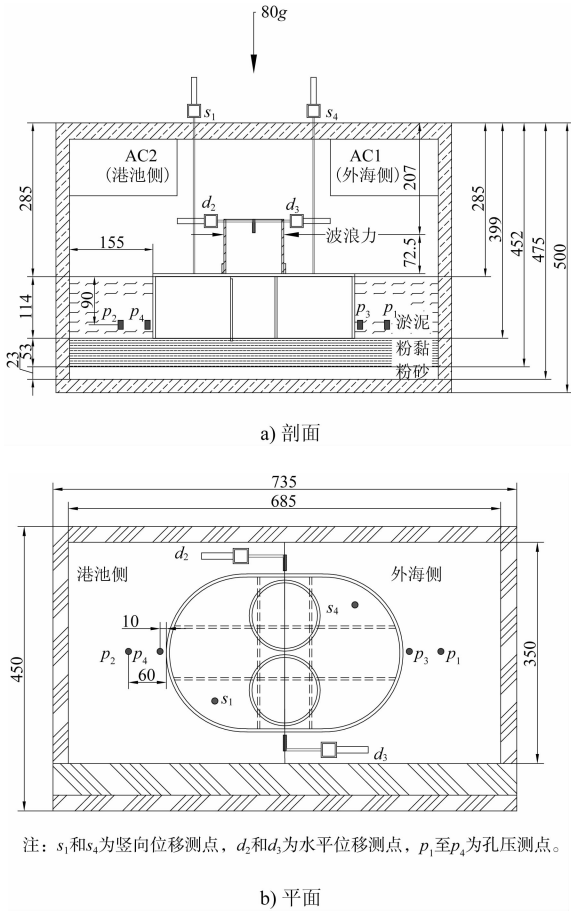


图1 循环往复波浪荷载作用模型布置 (单位: mm)

2.3 模型试验结果

1) 水平荷载作用下桶式基础防波堤结构的性状。

图2为M13桶式基础防波堤结构承受水平力后的测点 d_3 处水平位移变化曲线, 随着水平力不断增大, 开始阶段的水平位移发展较为平稳, 即以一个较小的速率增大, 一直持续到荷载比 P/P_{pp} 达到某个值, 即水平力达到一定量值为止。之后, 水平位移以一个较大的速率随荷载比 P/P_{pp} 增大, 使曲线出现一个转折点。由此可见, 转折点是稳定工作状态和非稳定工作状态(极限状态)的分界点。转折点的荷载比 P/P_{pp} 约1.54, 水平位移量约192 mm。

由图3可知, 在水平推力作用下, 靠近推力作用一侧的测点 s_1 的实测沉降为负值, 并且曲线在荷载比 P/P_{pp} 达到1.58时出现一个明显的转折点。而测点 s_4 处的实测沉降量较小, 但在荷载比

P/P_{pp} 达到1.58后, 此处实测沉降值开始明显减小, 继而由正值转为负值。转折点处两测点的沉降量分别为-79、13 mm。

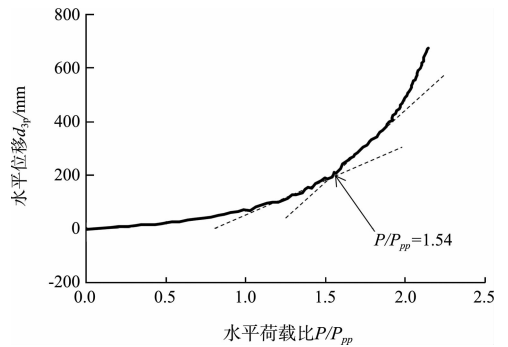


图2 结构水平位移随水平力荷载比的变化过程曲线

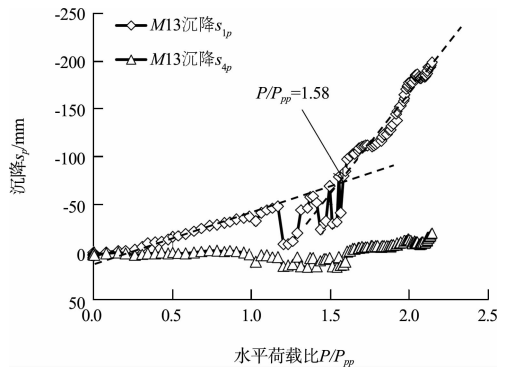


图3 结构沉降随水平力荷载比的变化过程曲线

图4为M13桶式基础防波堤结构承受水平力后的桶体转角变化曲线, 同样, 曲线上有明显的转折点。这个转折点的水平荷载比 P/P_{pp} 约为1.76, 该转折点处转角达 1.40° 。

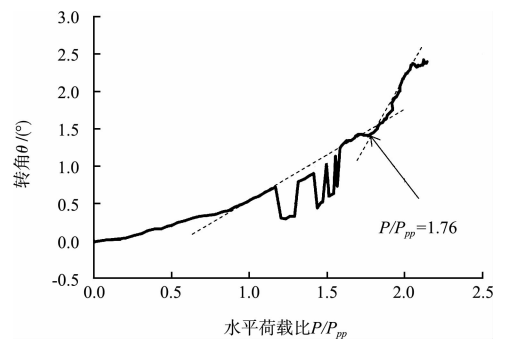


图4 结构桶体转角随水平力荷载比的变化过程曲线

综上, 桶式基础防波堤结构承受水平力后, 水平位移、沉降和转角发展变化曲线均出现转折点, 3个转折点处水平荷载比 P/P_{pp} 分别在1.54、1.58、1.76。这些转折点对应的都是桶式基础防

波堤结构的3种极限使用状态。对于淤泥质海岸上的直立结构，JTS 167-2—2009《重力式码头设计与施工规范》和JTS 147-1—2010《港口工程地基规范》中建议容许荷载可以取极限荷载的 $1/1.3 \sim 1/1.5$ 。按上述规范要求取得的容许水平承载力平均值为 $1.1P_{pp}$ ，新结构稳定性满足规范要求。

2) 循环往复波浪力作用下桶式基础防波堤结构的性状。

根据表1波浪要素，在模型达到设计加速度 $80g$ 后，分6种风浪强度逐级在桶式基础防波堤结构上施加不对称波浪合力($P_{ps}/P_{pp} = 0.7$)，作用点高度与波浪合力作用点高度一致。整个试验所模拟的风浪作用总历时达 43.6 h。波浪力强度定义为波浪力与设计波压力之比，即 P/P_{pp} (设计波压力即波浪力峰值 $P_{pp} = 12\ 048$ kN)。从图5可知，最后一阶段施加的波浪力强度最高，起始波浪力强度达到 0.5 ，之后逐渐增大，直至达到设计波浪力强度 1.0 。最后这个阶段历时约 8.5 h，达到或接近设计波浪力强度的风浪作用时间约 3.5 h。

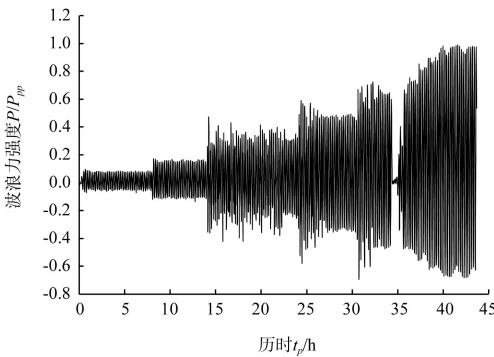


图5 波浪力荷载作用历时

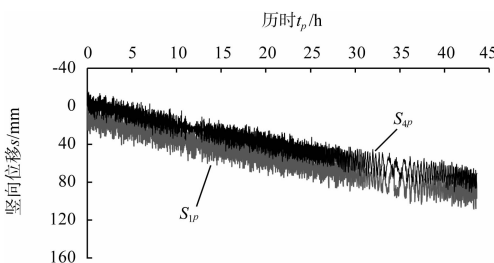


图6 波浪作用期间防波堤结构沉降变化过程曲线

从图6可知，桶式基础防波堤结构在循环往复波浪力作用下，结构上的两个竖向位移测点 s_1 (港池侧)和 s_4 (外海侧)的读数随时间逐渐增大，并且在整个风浪作用期间位移增长速率几乎维持不变。在 43.5 h的风浪荷载作用结束后，这两个测点处发生的竖向位移量(即沉降量)分别为 92 、 76 mm。由于这两个竖向位移测点关于防波堤轴线对称布置，故结构发生的平均沉降量为 84 mm。

图7给出水平位移测点 d_3 处读数变化情况。由于在桶式基础防波堤结构上施加了不对称的波浪力，波压力位于外海侧，波吸力位于港池侧，因此，桶式基础防波堤结构水平位移指向港池侧，位移值为负。经过 43.5 h的风浪荷载作用， d_3 测点处发生的水平位移量为 28 mm。

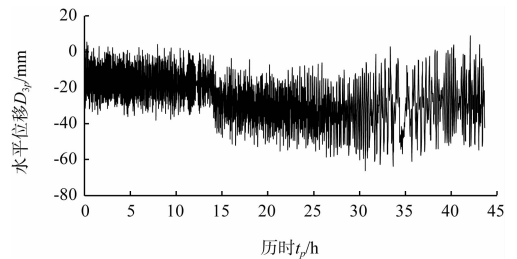


图7 水平位移变化过程曲线

如图8所示，倾角位移即转角 θ 是根据前面的竖向位移测点处的沉降差除以它们的剖面距离换算而来。由于桶式基础防波堤结构受风浪荷载作用引起的两侧沉降差较小，因此，结构发生的转角很小，且倾向港池侧，故转角位移为负值。经过 43.5 h的风浪荷载作用，桶式基础防波堤结构发生的转角位移量为 -0.059° 。

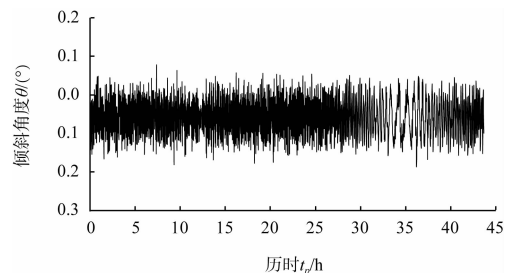


图8 倾斜度变化过程曲线

在本次动态模型试验前后,对地基土层的原位不排水强度作了圆锥贯入强度试验,对比发现,波浪荷载作用43.5 h后,地基土层自泥面向下约8 m深度范围内不排水强度均出现了一定程度的衰减,即所谓的强度弱化。地基最表层的强度弱化最明显,最大降幅在9 kPa左右,随着深度的增加,试验前后强度差异越来越小。总体来说,强度弱化主要发生在泥面以下约6 m深度范围内。表明本次试验中,下桶深度范围内地基土层的强度衰减了约20%。究其原因,土体出现的强度弱化或者强度降低归结于波浪荷载长时间的循环往复作用和海底浅表层软土微细结构变化。波浪荷载通过桶式基础防波堤结构传递给地基土层,尤其是浅表层土体,而海底浅表层土体自身微细结构松散、密度不高,桶壁两侧荷载往复性周期性作用下极易损坏或摧毁这种松软的土体微细结构,由此,土体自身结构在波浪荷载作用下的调整,造成土体正的孔压增量累积,即出现超静孔隙水压力。长时间累积产生的超静孔隙水压力,使得土颗粒间的有效应力降低,最终导致土体软化和强度衰减。

本文所研究的桶式基础防波堤结构属于薄壳建筑物,它的位移变形稳定安全性可按照苏联1986年出版的《有关大直径薄壳码头建筑物计算与设计方法建议》标准进行评价。其中规定薄壳结构的结构水平位移、垂直位移和转角控制值分别为80、200 mm和 0.458° (0.008弧度)。桶式基础防波堤结构在风浪荷载作用后的水平位移、垂直位移和转角位移特征值,分别为28、84 mm和 0.059° ,因此,该桶式基础防波堤结构能够抵御50 a一遇设计高水位的波浪荷载作用而保持稳定安全。

3 结论

1) 从模型试验结果得到桶式基础防波堤结构

抵抗水平滑动、下沉和倾转的极限水平荷载能力分别是 $1.54P_{pp}$ 、 $1.58P_{pp}$ 和 $1.76P_{pp}$,其中抵抗滑动的极限水平承载力最低,为 $1.54P_{pp}$,按规范取得的容许水平承载力平均值约为 $1.1P_{pp}$,满足规范要求。

2) 波浪荷载作用43.5 h后,桶式基础防波堤结构水平位移、垂直位移和转角位移特征值分别为28、84 mm和 0.059° ,它们均在稳定安全范围内。表明桶式基础防波堤结构能够抵御50 a一遇设计高水位的波浪荷载而保持稳定安全。

3) 波浪荷载作用43.5 h后,泥面以下约6 m深度范围内土体强度弱化现象明显,下桶深度范围内地基土层不排水强度平均值衰减了约20%。

参考文献:

- [1] 陈浩群,李武.新型结构在连云港港口工程中的应用[J].水运工程,2013(10):83-88.
- [2] 高志伟,李亚,高树飞,等.徐圩防波堤工程桶式基础结构设计[J].水运工程,2013(10):89-94.
- [3] 李武,陈甦,程泽坤,等.水平荷载作用下桶式基础结构稳定性研究[J].中国港湾建设,2012(5):14-18.
- [4] 李武,吴青松,陈甦.桶式基础结构稳定性试验研究[J].水利水运工程学报,2012(5):42-47.
- [5] 李武.新型桶式基础防波堤与地基动力相互作用研究[R].南京:南京水利科学研究院,2014.
- [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.
- [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.
- [8] 徐光明,顾行文,任国峰,等.防波堤椭圆形桶式基础结构的贯入受力特性试验研究[J].海洋工程,2014,32(1):1-7.

(本文编辑 武亚庆)