



随机波下大圆筒防波堤 整体防浪掩护试验研究

杨越, 王岗, 刘晨

(河海大学港口海岸与近海工程学院 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏南京 210098)

摘要: 防波堤的稳定性和消波特性是直接反映防波堤工程质量和使用功能的重要指标。通过港池模型试验, 研究委内瑞拉卡贝略集装箱码头大圆筒防波堤在百年一遇随机波作用下断面稳定性、波压力、越浪量等的分布规律。试验表明, 圆筒迎浪面所受波浪压力最大, 且随着入水深度的增加呈递减分布; 防浪墙在其2/3处波压力最大, 此时迎浪面为防波堤波压力最大处; 在防浪墙与圆筒交界处, 由于半圆形防浪墙在两侧漫水的作用, 最大波压力出现在两侧; 防浪墙顶有越浪现象发生; 堤后波高主要由越浪水体及筒间透射的波浪引起, 而在堤后150 m处波浪已趋于稳定; 圆筒间距对筒壁上的波压力影响不大, 而对防浪墙的波压力影响较明显。

关键词: 大圆筒防波堤; 波压力; 透浪性; 越浪量; 模型试验

中图分类号: U 656.31

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0066-05

Experimental study on wave dissipation of large-diameter cylinder breakwater under random wave

YANG Yue, WANG Gang, LIU Chen

(Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The stability and wave dissipation characteristics of breakwater reflect the important indicator of project quality and the function of the breakwater directly. The study of section stability, wave pressure and overtopping of Venezuela Puerto Cabello container terminal large-diameter cylinder breakwater under the effect of hundred years of random waves is based on the three-dimensional model test in wave basin. The test shows that the pressure on the forward direction of the cylinder is the highest; with the increase of water depth, the wave pressure shows a decreasing distribution; the maximum wave pressure of the wave wall appears in two-thirds of its height, and at this point, the wave pressure on the trim surface of the breakwater wave is the highest; at the junction of the parapet and the cylinder, because of the effect of overflow on both sides of the semi-circular parapet, the maximum wave pressure appears at both sides; and there is an overtopping phenomenon at the top of the parapet. The main causes of the wave height behind the breakwater are overtopping water and the wave which transmits through the cylinder. The wave trends stable after 150 m of the breakwater; the distance between the cylinders has little effect on the wave pressure on the cylinders wall, while the effect on the wave pressure on the parapet is much more obvious.

Keywords: large-diameter cylinder breakwater; wave pressure; wave transmission effect; overtopping; model test

收稿日期: 2014-09-27

作者简介: 杨越 (1969—), 男, 讲师, 从事波浪与港口建筑物相互作用研究。

防波堤是用来防御海浪对港域的侵袭，维持港内水域的平稳，以保证船舶在港内安全停靠、系泊以及正常的装卸作业与旅客上下^[1]。大圆筒防波堤是一种新型结构形式，由于其力学特征具有空间三维体系的柱壳结构受力特点，可使材料强度得到充分发挥，因此具有造价低、施工简便的优点，应用前景广阔^[2]。我国从20世纪80年代引进该形式后，先后应用在珠海九州港、广东三水、沙角电厂、湛江电厂、海口裕环水泥厂码头，广西防城港、山东岚山港、广东南沙联合码头等处防波堤、岸堤、灰堤等部位^[3]。因此，许多学者针对大圆筒防波堤动力响应做了研究分析：高学平等对其稳定性和筒内外壁波浪压力及防浪墙底部浮托力等问题进行研究^[4]；钟晓红等建立了随机波浪作用下大直径薄壁圆筒防波堤的动力分析模型，并提出了其附加土质量和其它参数计算公式^[5]；柳玉良等通过模型试验研究了该结构沉箱水平波浪力与浮托力的分布情况，并与现有直立堤理论公式进行比较^[6]。

在通常防波堤模型试验中，主要关注正向浪作用下的断面的稳定性问题，在波浪水槽中展开一系列模型试验研究。而波浪作用下圆筒防波堤的受力问题是一个三维问题，波浪水槽下的断面稳定性试验无法真实模拟该实际物理现象。本文以委内瑞拉卡贝略集装箱码头工程为背景，采用港池模型试验，研究大圆筒防波堤整体作用下断面稳定性、波压力、越浪量等的分布规律，为工程设计提供科学依据。

1 模型试验

卡贝略港濒临加勒比海南岸，是委内瑞拉的第一大港，全国近7成的进出口货物在这里集散。为方便大配载量的船只停靠、装卸货物，新集装箱码头项目将分别建设615 m和440 m东、西大圆筒直立式防波堤（图1）。防波堤圆筒直径约24 m（单个质量近300 t），两个圆筒间距为0.3~1.0 m，底高程-23.5 m，堤顶高程2.5 m，防浪墙高程5.6 m。

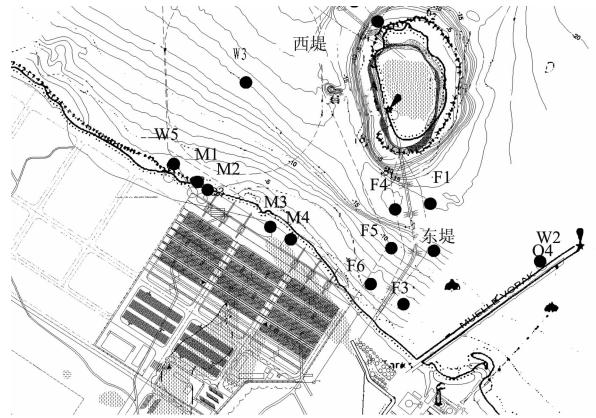


图1 卡贝略集装箱码头工程布置

试验在河海大学江宁试验大厅60 m × 40 m × 1.2 m多向不规则波浪港池中进行，采用导波墙将港池沿波浪传播方向分隔成3部分，中间部分约10 m宽用于铺设试验断面，导波墙前端距造波机约15 m，墙体不透水，墙末端与港池后边墙连接，防止波浪绕射，并设置消浪坡，以免影响堤后波高测量，水槽一端安装三维不规则造波机，另一端设置消波系统。

采用有机玻璃制作圆筒结构外形尺度，沙石回填加配重模拟结构质量和质心位置。几何尺度量允许偏差小于2 mm，质量允许偏差小于2%。波浪压力采用DJ800多功能数据采集系统，波高及波浪爬高采用电容式波高仪量测。模型按重力相似律及《波浪模型试验规程》的有关规定进行模拟。模型试验中选用的几何比尺为1:30。

试验水位包括100 a一遇高潮位1.92 m和设计高水位0.62 m。外海入射波要素为有效波高 $H_s = 3.85$ m、有效波周期 $T_s = 10.14$ s、谱峰参数 $\gamma = 3.3$ 的JONSWAP谱，波向为正向入射。为研究防波堤顶面、迎浪面、底面波浪点压力分布情况，在筒壁布置21个波压力测点，底板5个、盖板3个（图2）。

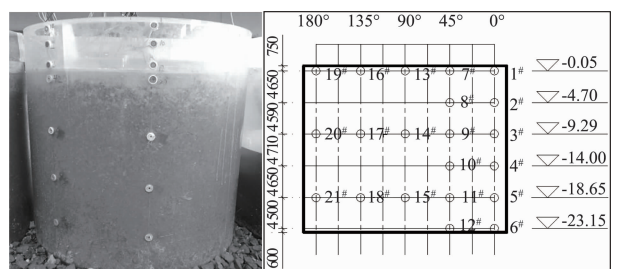


图2 圆筒及侧壁压力测点布置（高程：m，尺寸：mm）

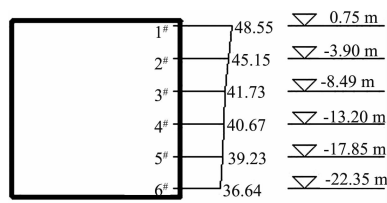
2 试验结果与分析

2.1 波压力

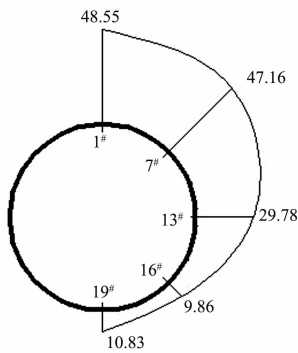
波浪力对于防波堤的抗倾能力和抗滑稳定性起着决定性的作用, 本文首先分析圆筒防波堤上的波压力分布情况。由于西堤为主要迎浪面, 波高远大于东堤, 所以这里主要分析西防波堤圆筒压力结果。

图 3 所示为圆筒壁所受的波浪序列累积频率为 1% 的最大波压力分布情况。圆筒迎浪面所受波浪压力最大, 且随着入水深度的增加呈递减分布。

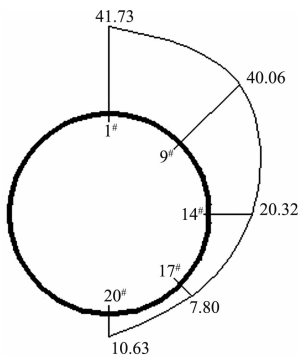
在同一高程上, 迎浪面 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内压力衰减不明显, 而在 $45^\circ \sim 180^\circ$ 范围内压力依次递减。堤顶盖板由于受到越浪水体的冲击, 所受压力较大, $P_{1\%}$ 值最大达到 149 kPa。



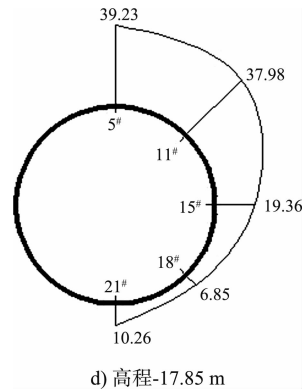
a) 大圆筒 0°



b) 高程 0.75 m



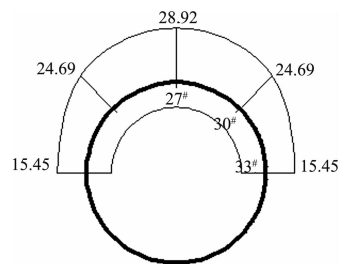
c) 高程 -8.49 m



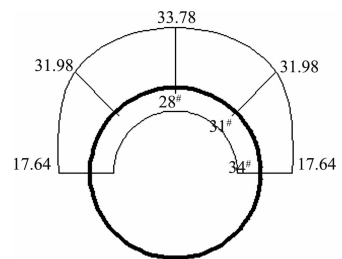
d) 高程 -17.85 m

图 3 $D=1.92$ m、 $H_s=3.85$ m、 $T=10.14$ s
涌浪为主波浪作用下圆筒压力分布 (单位: kPa)

港口工程经常采用带防浪墙的防波堤, 但这种形式常因防浪墙失稳而使防波堤遭受较大的破坏, 因此, 近年来对于作用在防浪墙上的波浪力问题一直受到人们的关注。随机波作用下防浪墙所受波浪序列为 1% 的最大波压力分布见图 4。试验结果表明, 高程从 5.0 ~ 3.59 m 时, 波压力逐渐增大, 且此时迎浪面的波压力最大, 甚至大于圆筒壁处的波压力, 两侧波压力最小。最大波压力出现在高程 1.94 m 处, 即静水位附近, 迎浪面波压力明显大于高程 3.59 m 处。此时, 防浪墙两侧也出现最大波压力 (图 5)。堤顶盖板由于受到越浪水体的冲击, 所受压力最大, 最大压力值可达到 121 kPa。



a) 高程 5.0 m



b) 高程 3.59 m

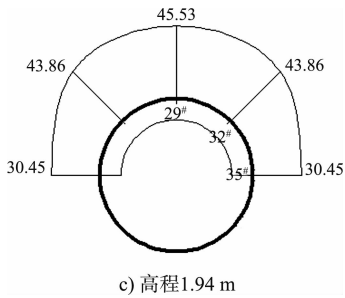


图4 $D=1.92\text{ m}$ 、 $H_s=3.85\text{ m}$ 、 $T=10.14\text{ s}$

涌浪为主波浪作用下防浪墙压力分布 (单位: kPa)

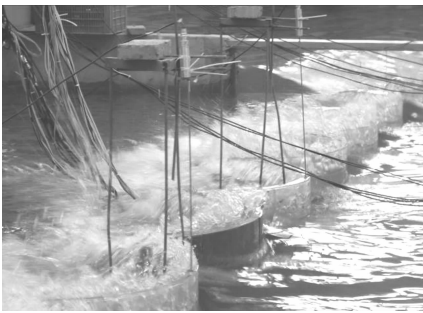


图5 波浪冲击防浪墙瞬间过程

2.2 越浪情况

在随机波作用下,圆筒盖板、防浪墙、大圆筒、400~800 kg 护底块石均处于稳定状态。由于水深较大,堤前波浪无破碎,波浪作用过程中,防浪墙顶有越浪现象发生,最大越浪水舌厚度约为2.5 m (图5)。堤后波高主要由越浪水体及筒间透射的波浪引起,堤后150 m处波浪已趋于稳定,堤后有效波高基本在0.6 m左右。

由于越浪水体对圆筒安全隐患的影响,对圆筒内的回填沙进行冲刷试验,设计高水位 $H_s=1.5\text{ m}$ 、 $T=7.46\text{ s}$,回填沙高程0.75 m,试验表明,在经历一个风暴潮的波浪作用后,圆筒前沿靠近圆筒壁处出现冲刷槽,在相邻圆筒之间因为波能集中,越浪相对也较大,冲刷槽在此处最深可达0.5 m,圆筒后半部淤积,平均为0.2 m左右,未见模型沙被大浪直接冲出筒外。由于冲刷范围及深度有限,对圆筒本身的安全性影响不大。

2.3 圆筒间距对防波堤的影响

将圆筒间距由原来的0.3 m增加到0.5 m和1.0 m,大圆筒直径、堤底高程、堤顶高程、防浪墙高程,护底块石质量等均保持不变,研究其对

越浪量与波压力的影响。

图6为压力测点位置保持不变的情况下,筒间距分别为0.3、0.5、1.0 m的筒壁所受的波压力分布情况。圆筒壁迎浪面波压力也随着入水深度的增加而减小;同一位置的波压力随着间距的增大而逐渐减小。

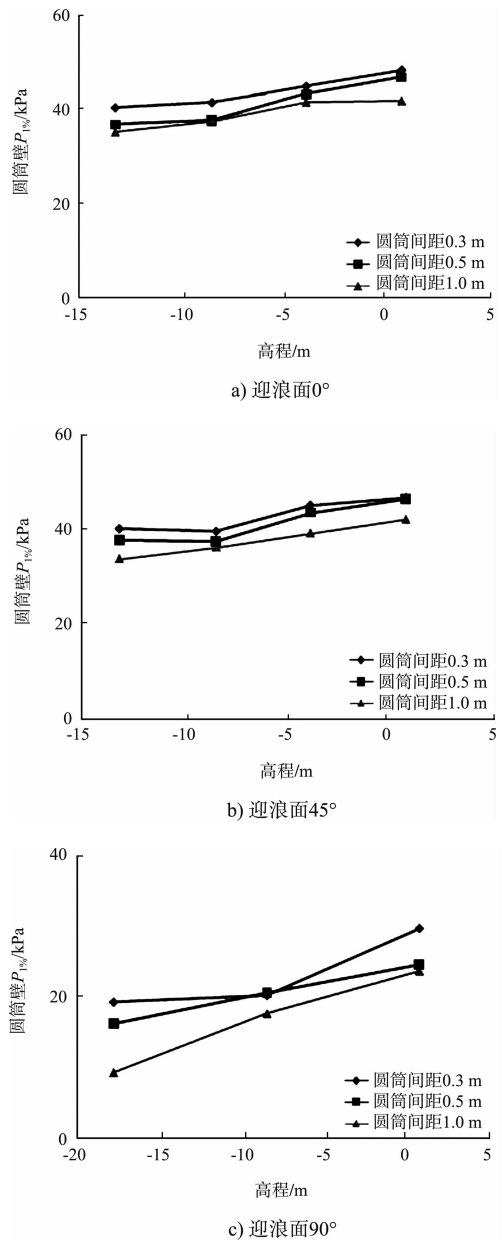


图6 不同间距情况下圆筒壁的波压力

图7为不同筒间距情况下防浪墙上波压力变化情况。相比于圆筒壁,防浪墙的波压力情况变化复杂,在迎浪面0°和90°时波压力随水深的增大呈先增大后减小的趋势,在迎浪面45°时,呈逐步递减的趋势。

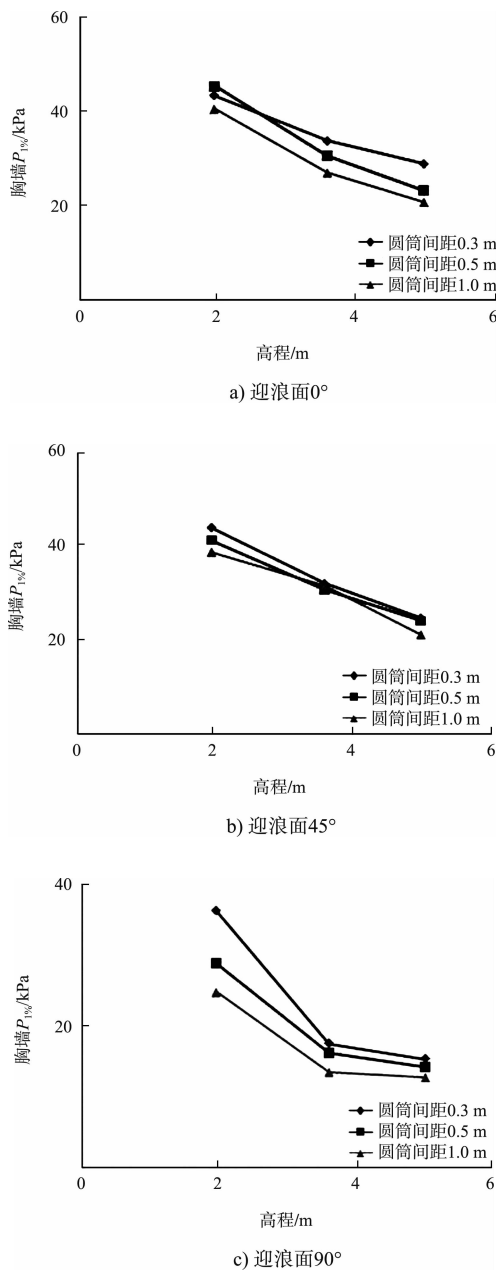


图 7 不同间距情况下防浪墙的波压力

此外, 试验表明, 当圆筒间距加大到 0.5 m 时, 堤后有效波高在 0.6 ~ 1.0 m, 当圆筒间距加大到 1.0 m 时, 堤后有效波高在 0.8 ~ 1.2 m, 即随着圆筒间距的加大, 堤后波高增大, 但越浪量却相应减小, 越浪水舌厚度变化不明显。

图 8 为迎浪面 0° 试验值与规范直立堤理论公式的比较^[7], 可以看出, 规律符合较好, 但试验值小于理论值, 主要是受到越浪及筒间距的影响, 堤前并未形成完全立波, 导致试验值小于理论值约 10% ~ 20%。

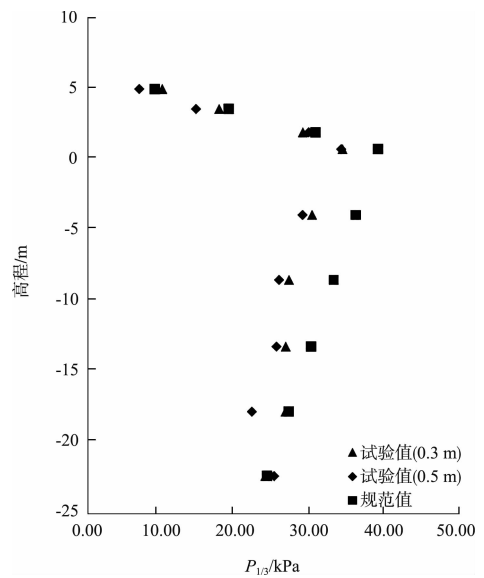


图 8 波压力试验值与规范直立堤理论值对比

3 结论

结果表明, 圆筒迎浪面所受波浪压力最大, 两侧随着角度的增大依次递减, 且随着入水深度的增加呈递减分布; 在防浪墙与圆筒交界处, 即静水位附近, 出现最大压力值; 圆筒间距对筒壁上的波压力影响不大; 试验值与规范直立堤理论公式值规律符合较好, 但由于堤前并未形成完全立波, 故试验值小于规范直立堤理论公式值约 10% ~ 20%; 堤后波高主要由越浪水体及筒间透射的波浪引起, 而在堤后 150 m 处波浪已趋于稳定。

参考文献:

- [1] 邱驹. 港工建筑物 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2008.
- [2] 中交第三航务工程勘察设计院. 码头新型结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999: 194-206.
- [3] 孙精石, 孟祥玮, 王占英. 波浪作用下下沉式大圆筒防波堤的稳定性模拟与研究[J]. 水道港口, 2000 (4): 1-6.
- [4] 高学平, 赵耀南. 大圆筒防波堤抗波能力及波浪力特性[J]. 中国港湾建设, 1995(3): 6-9.
- [5] 钟晓红, 周锡初, 肖仕宝, 等. 随机波浪作用下大直径薄壁圆筒防波堤的动力分析模型[J]. 水利学报, 2006(4): 464-470.
- [6] 柳玉良, 杨洪旗, 王爱群, 等. 圆形沉箱防波堤波压力的试验分析[J]. 海岸工程, 2005, 23(4): 8-16.
- [7] JTS 145-2—2013 海港水文规范[S].

(本文编辑 武亚庆)