

# 圆沉箱护岸结构波浪力试验研究

葛蓉, 陈国平, 严士常, 许荔

(河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098)

**摘要:** 大直径圆沉箱护岸适用于水深较大的外海海域。采用物理模型试验, 探究带有连接件的大直径圆沉箱压力分布的规律及影响因素, 研究包括沉箱上部胸墙的位置, 胸墙顶超高与波浪要素等因素。通过比较试验结果与各家水平波浪压力的理论公式, 进行波浪总水平力的计算方法研究, 给出合田良实公式的折减系数来拟合大直径圆沉箱护岸的波浪总水平力计算公式, 供工程设计参考与进一步研究。

**关键词:** 压力分布; 圆沉箱; 波浪总水平力

**中图分类号:** TV 139.2<sup>3</sup>

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2013)09-0031-05

## Experimental study on wave forces on circular caisson revetment

GE Rong, CHEN Guo-ping, YAN Shi-chang, XU Li

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Large circular caisson revetment is applicable to deep waters. Physical models are conducted to research the influence factors for wave forces on large circular caisson with connectors, the results show that the key factors are the position of wave wall on the structure, the height of wave wall, waves parameters, etc. on the basis of comparison of different theoretical methods of horizontal wave forces and experimental results, the modified Goda is given for total wave forces on large circular caisson revetment. The method can be used as reference for further research and engineering design.

**Key words:** force distribution; circular caisson; total force

近年来, 随着我国大型开敞式码头建设步伐的提速, 大型圆沉箱在青岛、大连等地区得到广泛应用。在已建30万吨级及以上码头工程中, 圆沉箱直径一般在14~18 m。钢筋混凝土沉箱式结构的码头、防波堤、护岸等在国外也都已广泛应用。其优点是整体性好, 抗震性能强, 地基应力较小, 水上安装工作量少, 施工速度快, 依靠其自身质量、地基强度维持其整体稳定性, 需要有较好的地基。

沉箱结构是重力式结构的主要形式之一, 根据平面形状可分为矩形和圆形两种: 矩形沉箱一般适用于掩护较好的内港, 应免受波浪直接作用而使建筑物前出现反射波而影响船舶的泊稳, 制

作简单, 施工经验较成熟, 但受力情况不如圆形沉箱好, 钢筋用量也较大; 圆形沉箱一般适用于外海, 承受水平力和垂直力, 但在圆沉箱结构的港口水工建筑物设计时, 大部分计算内容, 如圆沉箱所受水平波浪力, 现行港工规范并未给出确切的计算方法, 都是参照矩形沉箱相应的计算公式进行<sup>[1]</sup>。对于波浪力的计算方法, 已有不少学者进行过研究, 在研究的同时有些也给出了波浪力的分布规律, 但都有一定的局限性。

本文通过某护岸工程的断面物理模型试验, 获得了圆沉箱结构直立式护岸在各种工况组合下, 承受水平波浪力的大量数据。本文对这些数据进行了分析总结, 得出了有关圆沉箱直立式护

**收稿日期:** 2013-02-25

**作者简介:** 葛蓉(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事港口、海岸工程研究。

岸波浪力的分布规律，旨在为今后工程设计应用该圆沉箱结构形式提供科学依据。

## 1 试验资料和方法

### 1.1 试验资料

#### 1) 断面形式。

该护岸为大直径圆沉箱结构，沉箱模型直径40 cm，高度46 cm，上部胸墙采用直立L型胸墙，试验中为保证胸墙顶高程的一致性，故胸墙的大小是按比例缩放的，物理模型长度比尺 $\lambda$ 为35。护岸的模型参数包括胸墙位置 $B$ ，胸墙顶端与静水面的距离（超高） $\Delta h$ （图1）。试验中胸墙位置 $B$ 为0.15, 0.53, 0.83 m，胸墙顶超高 $\Delta h$ 为0.17, 0.27, 0.37 m，胸墙1~3对应试验断面1~3。

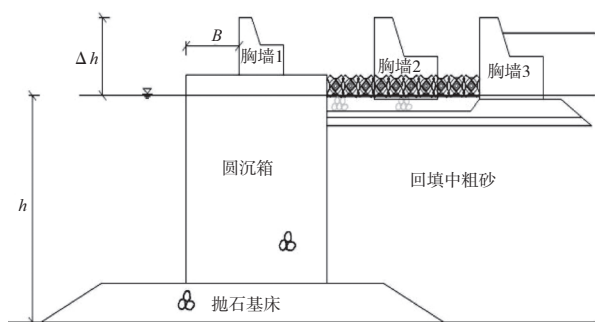


图1 护岸断面模型结构

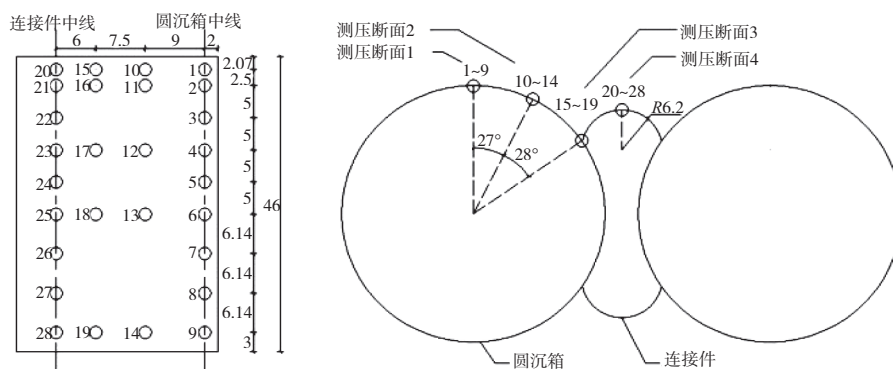


图2 圆沉箱水平波压力测点布置 (单位: cm)

## 2 试验结果分析

### 2.1 圆沉箱压力分布规律

#### 2.1.1 压力垂线分布规律

在海港工程中，研究作用在建筑物上的波压力是经常要遇到的问题之一，如防波堤、码头、护岸等建筑物，为了得到波压力在建筑物上的作

### 2) 水文资料

水深50, 40, 30 cm；波高（文中波高均指 $H_{1\%}$ ）11 cm，40 cm水深增加19 cm和15 cm的波高要素，周期为1.6 s，19 cm波高增加1.8 s和1.4 s的周期要素。

### 1.2 试验方法

本次物理模型试验在河海大学海岸灾害与防护教育部重点实验室波浪水槽内进行，该水槽长80 m，宽1 m，高1.2 m。水槽的一端安装有液压式推板造波机，通过电机系统控制推波板运动的行程和频率，水槽的另一端铺设消能缓坡，以减小和消除波浪反射影响。本次波浪压强试验数据的测量和采集均使用北京水利水电科学研究院研制的DJ800型多功能监测系统，采样间隔0.013 s。对波高仪采集的数据由编写的Matlab程序通过上跨零点法处理，并设置阈值；原始波要素的率定采用JONSWAP风浪谱。

试验共设4个测压断面，布置了28个压力盒，用以测定水平波力沿护岸横断面和纵向的分布（图2）。测点编号6<sup>#</sup>, 13<sup>#</sup>, 18<sup>#</sup>, 25<sup>#</sup>为同一高程沿护岸正面不同角度布置的测点，与来浪方向夹角分别为0°, 27°, 0°, 0°，试验分析采用1%峰值进行分析，另外，试验中，波浪不在堤前破碎，且基本上不越浪。

用力，必须知道压强沿水深的分布，本文研究的压强沿水深的分布为相对压强最大值沿水深的分布。对于直墙式建筑物波压力沿水深的分布研究现状：我国海港水文规范<sup>[2]</sup>认为对于不同的波态（立波、近破波、远破波），应取为不同的分布函数；合田良实<sup>[3]</sup>认为在静水位上下均服从线性分

布; Minikin<sup>[4]</sup>认为动水压强在静水位上下服从抛物线分布; Kirkgoz<sup>[5]</sup>认为从墙体底部到静水位服从抛物线分布, 而从静水位到水面上1.6*d*处服从线性分布, 其中*d*为直墙上发生最大冲击时的墙前水深。

图3为断面2测压断面1在不同波高情况下的相对压强垂线分布图(*a*代表距沉箱底部的距离, *t*代表距圆沉箱中线的距离,  $P/(\rho gH)$ 代表相对压强), 可以看出圆沉箱的压力垂线分布情况: 最大波压力出现在静水位附近, 静水位以上近似符合三角形分布, 静水位以下为抛物线分布, 这与Kirkgoz的观点比较一致, 其分布规律有待进一步研究。另外, 显而易见, 波高的大小对相对压强没有影响。

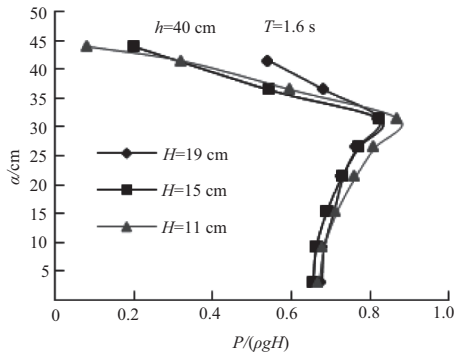


图3 相对压强垂线分布

### 2.1.2 压力横向分布规律

图4为断面1在30 cm静水位(6#, 13#, 18#, 25#测点)处圆沉箱上压力横向分布, 图中相对压强均垂直于沉箱正面。由图中可知, 圆沉箱上横向各点(6#, 13#, 18#, 25#测点, *t*分别为0, 9, 16.5, 22.5 cm)的相对压强在连接件与圆沉箱交接的地方最大, 其次为连接件中心处, 但横向各点的压力误差最多不超过5%, 因此可认为在同一深度, 圆沉箱的横向压力垂直于曲面均匀分布。这样的结果直观上说明了此形式的圆沉箱结构比不

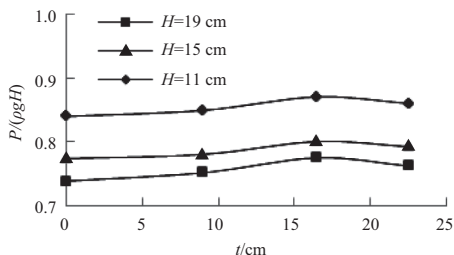


图4 相对压强横向分布

带连接件或者连接件很小的圆沉箱削弱了沉箱之间由于应力集中带来的对结构不利的影响。

### 2.2 相对超高的影响

相对超高指结构顶部距静水面的距离与波高的比值, 其变化范围为  $1.49 \leq \Delta h/H \leq 3.32$ 。图5为断面1圆沉箱上相对压强随相对超高的变化, 从图中圆沉箱上处于不同位置的几个点可以看到, 圆沉箱上某点的相对压强与相对超高存在非线性关系, 相对压强随相对超高的增大而增大, 与直墙式建筑物的规律类似<sup>[7]</sup>, 这主要由于相对超高增大, 静水面距离沉箱顶部距离增大, 波浪越过沉箱顶的量减少, 反射能量相对增大, 波能为入射波与反射波能量的叠加, 因此波压力相应增大。

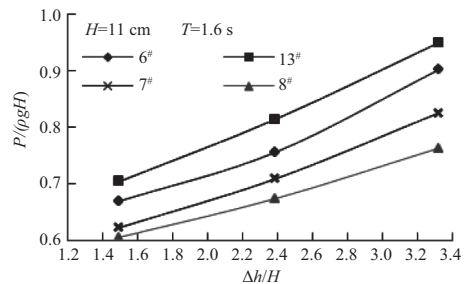


图5 相对压强随相对超高的变化

### 2.3 胸墙位置的影响

图6a)为7#测点在水深40 cm, 波高19 cm, 不同周期情况下的相对压强随胸墙相对位置的变化情况, 其变化范围为  $0.79 \leq B/H \leq 4.32$ 。从图中可以看到, 同一个波要素情况下, 胸墙位置越靠后, 相对压强呈减小的趋势, 但幅度并不大, 这主要是因为胸墙位置越往后, 越过沉箱顶部的水量相对多些, 加之胸墙二和胸墙三前的扭王字块有消浪的作用, 能量耗散得也相对多一些, 所以相对压强有所减小。

图6b)为7#测点在水深40 cm, 周期1.6 s, 不同波高情况下相对压强随胸墙相对位置的变化情况, 其变化范围为  $1.30 \leq B/H \leq 7.45$ , 体现的规律为: 在波高大时相对压强随胸墙位置的后退而减小, 波高小时胸墙位置对相对压强几乎没什么影响。

总体来讲, 胸墙为后置式的这3种断面形式对沉箱上的波压力没有多大影响。

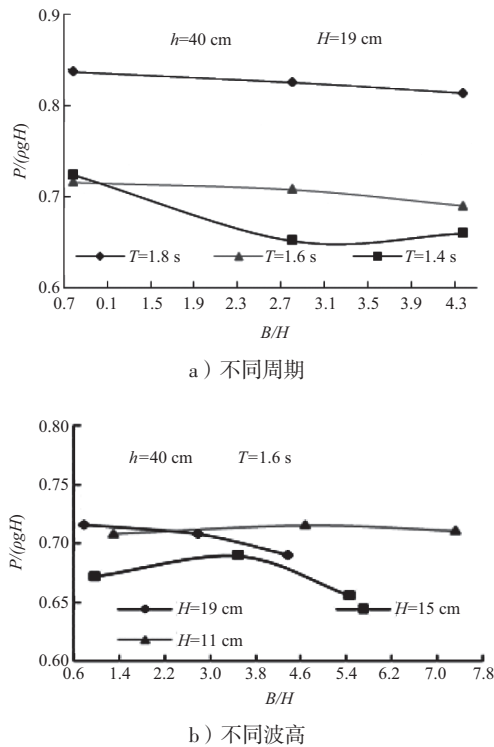


图6 7#测点相对压强随胸墙相对位置的变化

### 2.4 圆沉箱与矩形沉箱水平波压力的比较

从工程应用的角度出发，本次研究将重点放在圆沉箱与矩形沉箱水平波压力比较的研究上，并对此进行全面系统的分析。

#### 1) 压力分布试验值与理论直墙公式值的比较。

将波压力试验值分别与海港水文规范公式以及合田良实公式进行比较分析。分析可知，圆沉箱所受到的水平波浪力沿水深的分布规律与矩形沉箱相同。但从4个测压断面点的试验数据看，试验值普遍小于海港水文规范及合田良实理论计算值：海港水文规范的理论解比实测值大10%~20%；合田良实的理论解与圆沉箱上4列波压力分布较接近，误差基本在10%以内，符合情况良好（以图7a）为例，均为断面2的工况），这主要由于合田良实公式考虑了不完全反射，比海港水文规范偏小<sup>[6-7]</sup>。另外在50 cm水深的工况下，合田计算值与实测值比较在静水位处偏小，水下偏大，见图7b）；在40 cm水深、波高19 cm、周期1.8 s和30 cm水深的情况下，海港水文规范的计算值与实测值比较在静水位处大15%左右，水下小15%左右，见图7c）和d），由于这2种工况采用了基于椭圆余弦波的浅水立波法，所以它对于大直径圆

沉箱波压力计算的适用性有待进一步研究。总结上面的规律，不难发现，合田良实的直墙式解更接近该圆沉箱形式的波压力值，且总体偏安全。

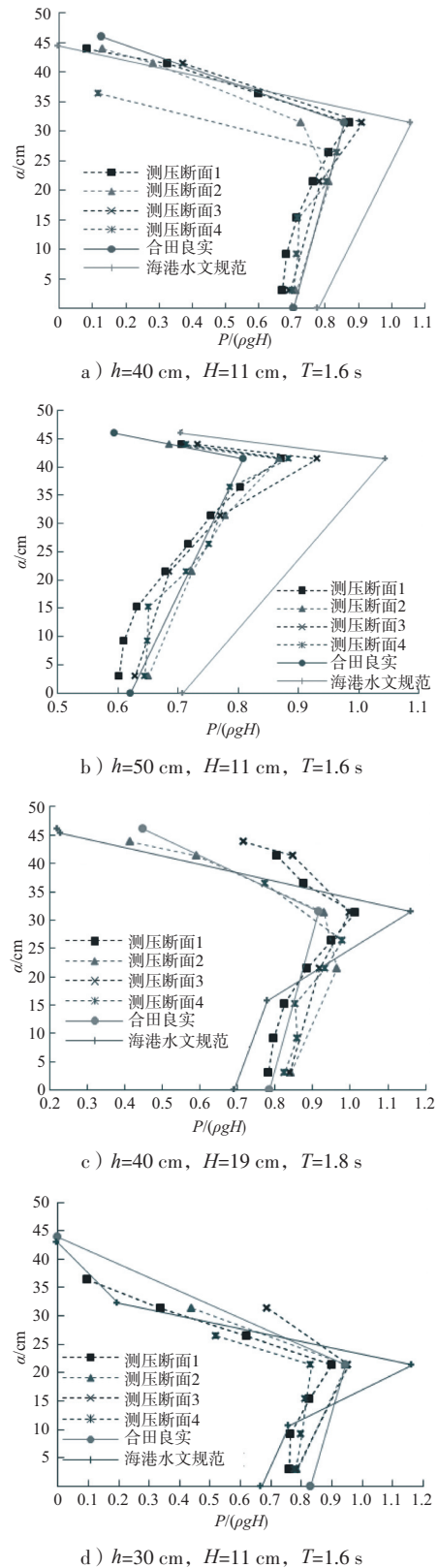


图7 压力直墙公式与理论值的比较

## 2) 圆沉箱所受水平总力的计算分析。

对于实际工程而言,确定不同波要素情况下圆沉箱所受的波浪水平总压力是十分必要的。上述的试验结果和分析表明,由于圆沉箱结构的特殊性,影响因素也较多,试图从理论上进行数学公式的推导常常难以得到令人满意的解答,通过试验值与各家公式计算值的比较,发现试验值与合田良实公式计算值较接近,而与海港水文规范公式计算值的偏差相对较大。考虑到合田良实公式结构简单并且与试验值吻合度高,采用合田良实公式作为计算方法的公式结构,加入修正系数 $K_p$ 对基础结构的公式进行修正,如式所示:

$$P = K_p P_z \quad (1)$$

式中: $P$ ,  $P_z$ 分别表示圆沉箱水平波浪总力和合田良实直墙式水平波浪总力。

根据试验值进行积分(取测压断面1与测压断面4之间的弧面范围)求出总力并将数据与合田良实的计算值进行比较(表1),取修正系数 $K_p$ 为0.94。该修正系数的适用范围: $0.78 \leq B/H \leq 7.33$ ,无越浪,不发生破碎。

表1 水平总力实测值与合田值比较

水深/cm	波高/cm	周期/s	试验值			合田 N	计算值		
			N				合田		
			1	2	3		1	2	3
50	11	1.6	72	71	70	74	97	96	95
40	19	1.8	85	84	84	83	103	102	101
40	19	1.6	74	69	68	78	95	89	87
40	15	1.6	66	65	61	75	88	87	82
40	11	1.6	63	65	64	71	89	91	90
30	11	1.6	58	58	56	59	97	97	94

注:1, 2, 3系指断面1, 2, 3。

另外,大圆筒结构所受的波压力为径向力,沿圆沉箱纵轴线的波压力水平分力将互相抵消,明显减小了对结构稳定不利的水平分力。同时,作用在圆沉箱结构上的最大波浪力具有相位差,曲面直立堤上的瞬时波浪力总是小于平面直立堤<sup>[8]</sup>。因此,用此修正系数法计算大圆筒结构所受的波浪力,工程应用是偏于安全的。

## 3 结语

针对大直径圆沉箱护岸结构,通过不规则波作用下的物理模型试验,对圆沉箱水平波浪压力

的分布规律及其影响因素进行分析,比较水平波压力的试验值与各家计算公式,通过水平总力修正系数反映实际圆沉箱所受波压总力情况。试验数据的分析结果表明:在波浪无破碎且没有越浪的前提下,圆沉箱所受波压力垂线分布的规律与直墙式建筑物类似,横向分布规律表现为沿圆沉箱均匀分布;超高与胸墙位置对波压力的影响分析结果表明,相对压强与相对超高呈正相关,与胸墙(后置式)位置关系不大;通过试验值与各家公式的比较,合田良实公式与试验值更加接近,总体上与试验情况偏差不大,通过加入修正系数,得到针对此断面形式的圆沉箱水平波浪总力计算的参考公式。

由于波浪和建筑物相互作用本身十分复杂,所以计算出圆沉箱所受水平总力以及准确掌握超高与胸墙位置对波压力的影响规律具有十分重要的意义,此次仅从物理模型试验方面对圆沉箱所受水平波浪力规律及影响因素进行了研究分析,对波压力沿水深分布的规律未进行深入讨论,沿横向均匀分布的优势有待进一步验证,并且在超高和胸墙位置对于波压力的影响规律还没有完全掌握,这些都有待进一步的研究与分析。

## 参考文献:

- [1] 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,2004,23(4):8-16.
- [2] JTJ/T 213—1998 海港水文规范[S].
- [3] Goda Y. Random Seas and Design of Maritime Structures[M]. Tokyo: University of Tokyo Press, 1985: 107-144.
- [4] Minikin R R. Wind Waves and Maritime Structures[M]. USA: Griffin, 1950.
- [5] Kirkgoz M S. Influence of water depth on the breaking wave impact on vertical and sloping walls[J]. Coastal Eng, 1992, 18: 297-314.
- [6] 严恺.海港工程[M].北京:海洋出版社,1996.
- [7] 华艳茹.波浪正向入射对直立式防波堤的作用力[D].重庆:重庆交通大学,2008.
- [8] 荆勇,周锡祁,顾纪成,等.大圆筒深水防波堤的设计简介[J].水运工程,2002(4):24-27.

(本文编辑 郭雪珍)