

文章编号: 1005-9865(2002)03-0081-06

圆筒形水工建筑物波浪荷载的试验研究

夏运强, 陈兆林

(海军工程设计研究院 工程综合试验研究中心, 山东 青岛 266100)

摘 要:在圆筒形水工建筑物的波压力测定试验基础上,通过多种波压力理论计算方法进行计算、比较和分析,采用半经验半理论方法,探讨性地提出一种适合圆筒形水工建筑物波浪荷载的分布及计算方法,该法表现形式简单,计算结果接近实测值,可为相关的工程设计提供参考依据。

关键词:大直径薄壁圆筒;立波;折算波高;波浪荷载

中图分类号:U656.109 **文献标识码:**A

Experimental study of wave forces on the surface of cylinder structures

XIA Yun-qiang, CHEN Zhao-lin

(Engineering Experiment & Research Center, Navy Institute of Engineering Design & Research, Qingdao 266100, China)

Abstract: Based on the experiment of wave pressure on the surface of cylinder structures and a series of calculations, comparisons and analyses with different existing theories, a new calculation method of the wave forces on the cylindrical surface is recommended, and a semi-theory and semi-experience method is adopted here. The recommended method is of simple expression with the calculated result close to the testing value, which can be a reference for the corresponding project design.

Key words: large-diameter and thin-wall cylinder; standing waves; referring wave-height; wave forces

圆筒形水工建筑物主要指大直径薄壁圆筒和薄壁圆沉箱,二者的主要区别是:前者为无底结构而后者一般都带底,这是两种比较新型的水工建筑物结构型式。研究表明,水工建筑物采用圆筒形结构与采用平面结构相比,具有受力特性好、波浪反射小的特点,能承受较大的外荷载。另外,尤其是大直径薄壁圆筒相对常规水工建筑物还具有用料省、造价低、施工速度快等优点。因此,近年来,这两种结构型式在我国港口工程建设中得到推广应用,如:广西防城港 3 万吨级粮食码头、天津港东防波堤、山东岚山港防波堤以及青岛北海船厂海西湾修造船码头等工程均采用了大直径薄壁圆筒结构。

通常,在设计和使用时,不可避免地要涉及到如何确定曲面上各种作用力,如:波浪力、土压力、内部填料对侧壁的筒仓压力等,这些作用力的确定,直接影响到结构的整体稳定性和内力计算。作为新型的结构型式,我国现行的《规范》^[1]并未作具体的规定,只是提出采用经验方法,按近似平面水工建筑物考虑。由于该处理方法存在较大的近似性,成为直接影响此新型结构形式推广应用的重要原因。

通过对防波堤弧底圆沉箱结构进行模型试验,包括圆沉箱圆筒形上的波压力测试,本文在该试验的基础上,通过多种波浪理论进行计算分析比较,探讨性地提出一种适合圆筒曲面的波浪力计算方法,为相关的工程设计提供参考依据。

收稿日期:2001-08-29

作者简介:夏运强(1971-),男,山东威海人,工程师,硕士,主要从事近海及海岸工程专业设计、试验和研究。

1 模型波压力测定试验

1.1 试验方法及说明

断面模型试验是在长 60 m、宽 0.8 m、高 1.2 m 的无反射水槽内进行的,其一端装有水流式无反射造波机,产生正向规则波。波高和波压力测试采用 SG200 型水工试验数据采集处理系统。

模型设计主要遵循重力相似和几何相似准则,模型比尺定为 1:30。原型及模型波要素见表 1。试验布置图见图 1,试验断面图见图 2。

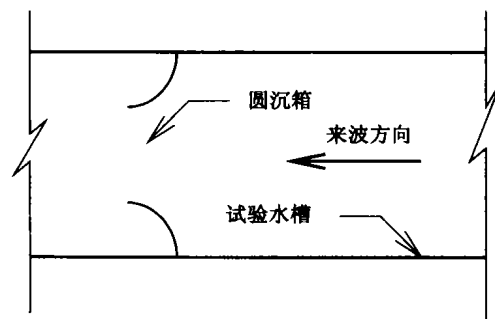


图 1 模型试验布置图

图 1 Arrangement of model experiment

表 1 波要素表

Tab. 1 Wave elements

项 目	设计高水位			极端高水位		
	水深/cm	波高/cm	周期/s	水深/cm	波高/cm	周期/s
原型值	673	370	8.7	833	450	8.7
模型值	22.4	12.3	1.59	27.8	15	1.59

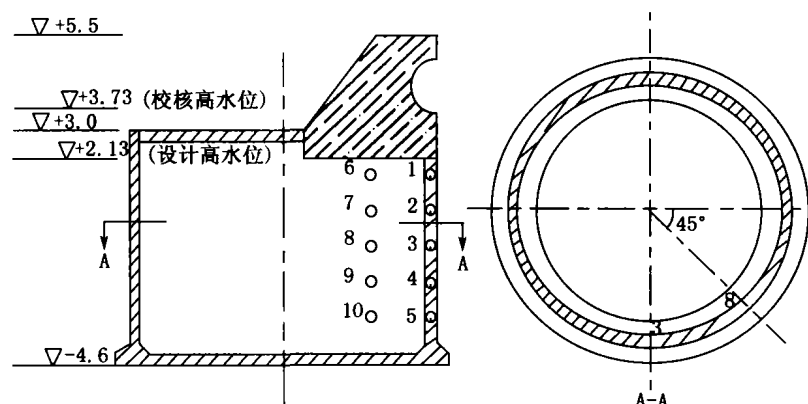


图 2 试验断面及测点布置图

Fig. 2 Model section and testing-spots arrangement

圆沉箱直径为 10 m,壁厚 0.5 m,高 7.6 m,胸墙为直线布置,按 1:30 比例做成模型。其上布置波压测点,位置见图 2。

1.2 试验结果

试验中分别测出设计水位、极端水位、有胸墙和无胸墙时四种情况下的试验结果汇于表 2。表中数值均为实测平均值。实测波压力曲线分布图见图 3。

表 2 有(无)胸墙时各水位波压力测值

(单位: kPa)

Tab. 2 Wave pressure on different WL with(without) parapet

(unit: kPa)

水位测点号	设计高水位		极端高水位	
	波谷作用	波峰作用	波谷作用	波峰作用
1	-0.17(-0.205)	0.93(0.795)	-0.595(-0.635)	0.98(0.825)
2	-0.595(-0.665)	0.79(0.76)	-0.9(-0.74)	0.97(0.775)
3	-0.64(-0.51)	0.765(0.725)	-0.77(-0.595)	0.91(0.77)
4	-0.6(-0.465)	0.71(0.675)	-0.705(-0.56)	0.915(0.74)
5	-0.6(-0.42)	0.70(0.705)	-0.715(-0.56)	0.90(0.73)
6	-0.04(-0.065)	0.905(0.82)	-0.47(-0.605)	0.99(0.765)
7	-0.635(-0.66)	0.82(0.715)	-1.035(-1.01)	0.92(0.725)

续表

8	-1.02(-0.68)	0.785(0.70)	-1.045(-0.75)	0.935(0.705)
9	-0.98(-0.57)	0.74(0.68)	-0.835(-0.715)	0.94(0.73)
10	-0.76(-0.52)	0.74(0.71)	-0.795(-0.615)	0.925(0.735)

说明:括号内数值为沉箱上无胸墙时的波压力测值。

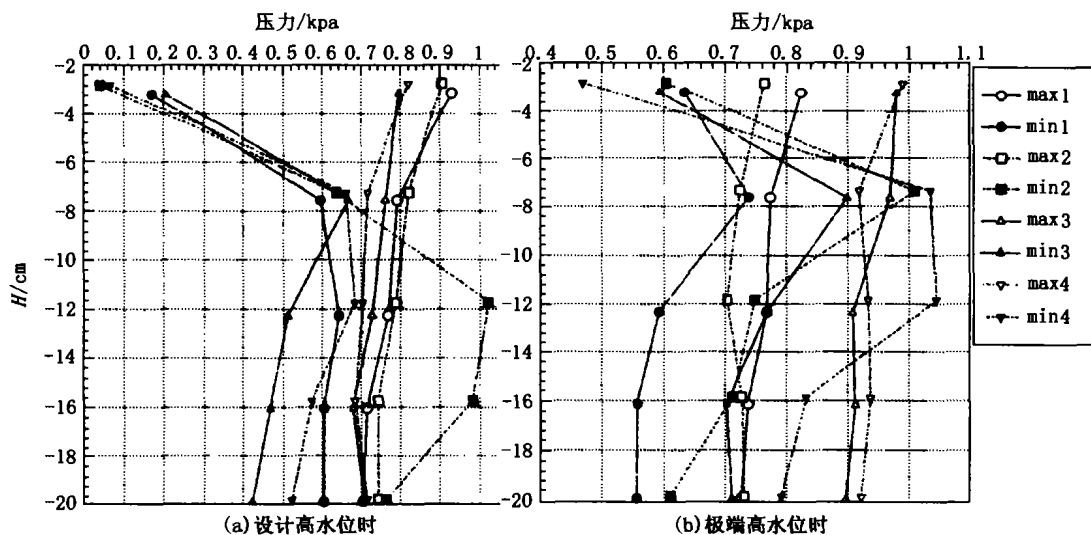


图3 有胸墙正侧面波压强分布图

Fig.3 Wave pressure distribution with (without) parapet

图中:竖坐标为沉箱高度尺寸(模型值),0刻度对应沉箱顶端位置;横坐标为沿高度分布的波压强值(模型值);max1、min1 - 有胸墙时正面测点在波峰、波谷时实测波压力;max2、min2 - 有胸墙时侧面测点波峰、波谷时实测波压力;max3、min3 - 无胸墙时正面测点在波峰、波谷时实测波压力;max4、min4 - 无胸墙时侧面测点波峰、波谷实测波压力

由以上实测数据可看出:

1)波浪力沿圆筒曲面的分布:波峰时,正面与侧面波压力大小基本相同,可认为波峰时波压力环向分布,见图4。波谷作用时,在某一深度以下,侧向波吸力变大,甚至大于同深度处的波峰时波压强的分布。实测波压强分布趋势见图5。

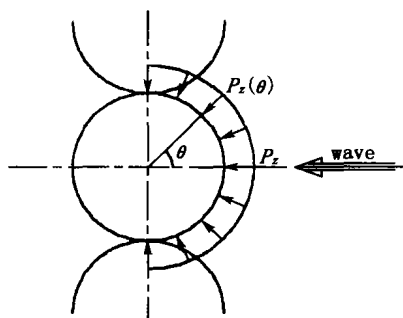


图4 波峰时实测波压力分布图

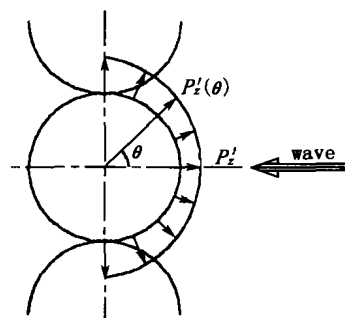


图5 波谷时实测波压力分布图

Fig.4 Distribution of measured wave pressure during wave crest Fig.5 Distribution of measured wave pressure during wave hollow

2)波峰作用时,有胸墙波压力大于无胸墙情况,且波高越大差别越明显;波谷作用时,有胸墙波吸力明显增大。

2 理论计算及分析

对于圆筒形水工建筑物的波浪力计算理论,目前国内曾做过一些研究,取得了许多有价值的成果,见文献[6]及文献[7]。文献[6]中给出波浪总力及作用点计算理论,但未给出波浪力沿曲面环向及纵向分布。文献[7]中采用线性绕射理论并通过试验验证提出一套较为准确的计算理论;但该理论表现形式过于复杂,无

法普及使用。本文将采用半理论半经验方法确定波浪力的计算式。

2.1 理论计算方法简介

前述试验给出了波浪力沿圆筒曲面的分布趋势,只要用理论方法比较精确地确定沉箱半圆顶处波压力数值,即可确定圆筒形建筑物表面的波浪力。本文以下部分将在堤前实测正面波压力数据的基础上,采用多种波压力计算方法进行计算比较,从中找出与实测数据吻合较好的方法,用来确定沉箱半圆顶处波压力数值。

这里采取了四种计算方法来确定防波堤正面波浪形态及荷载大小。其原理如下:

方法一,假设堤前波浪形成完全立波,即入射波与反射波完全叠加,波高为原入射波高的 2 倍。

这是常规的平面直立堤前波浪计算方法。此种计算方法在给定的试验条件下:

设计高水位时 $T\sqrt{g/d} = 10.5 > 8$ $d/H = 1.818 > 1.8$;

极端高水位时 $T\sqrt{g/d} = 9.44 > 8$ $d/H = 1.851 > 1.8$ 。

根据《规范》[1]规定,堤前波浪形态为立波,按立波公式计算波压力。其计算结果明显大于实测值。这说明:曲面上的波浪力作用与平面上的波浪力作用有明显的不同,常规算法不适合曲面上的波浪力计算。

方法二,根据堤前实测波高来确定波浪形态,进行荷载计算。

经多次测试,设计水位时平均实测堤前波高为 5.4 m,小于全反射时的 7.4 m;极端高水位时平均实测波高为 6.0 m,小于全反射时的 9.0 m。这说明:由于圆沉箱迎浪面为弧面,入射波浪发生反射时方向发生变化,二个波系相位差小于 180° ,在来波方向发生不完全叠加,叠加后的波高小于入射波高的 2 倍,这时堤前为不完全立波或三向波。根据《规范》[1]规定,此波高条件下,堤前波浪仍为立波形态,这与试验现象比较符合。

方法三,采用日本的合田良实波压力计算公式(见文献[4])。其中波高 H 取原行进波波高值。注:原公式 H 采用不规则波列中最大波高,取在堤面向海侧 $5H_{1/3}$ 距离处波高。

当海底面水平,入射波垂直于堤时,合田良实波峰压力计算公式(计算图式见图 6):

$$\eta = 1.5H \quad (1)$$

$$P_1 = a_1 \gamma H \quad (2)$$

$$\text{式中: } a_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)} \right]^2 \quad (3)$$

$$P_1 = P_2 / \cosh(\pi d/L) \quad (4)$$

$$P_3 = a_3 P_1 \quad (5)$$

$$a_3 = 1 - \frac{d_1}{d} \left[1 - \frac{1}{\cosh(2\pi d/L)} \right] \quad (6)$$

墙底面上的浮托力假定为三角形分布,墙后踵处为 0,墙前趾处:

$$P_u = a_1 a_3 \gamma H \quad (7)$$

波谷作用时

$$P = \begin{cases} rz & -0.5H \leq z < 0 \\ 0.5rH & z < -0.5H \end{cases} \quad (8)$$

式中: η 为静水面以上波压零点的高度; P_1 、 P_2 、 P_3 分别为静水面处、海底处和墙底处的波峰压力强度值; r 为水重度; z 为静水面以下的深度; L 为波长。

合田良实公式是被日本港口设施技术标准采用的计算波压力公式,它适用于立波和远破波的计算,它有效地解决了立波和远破波的过渡连续问题。

方法四,仍采用合田良实公式,但式中波高 H 采用试验堤前实测波高。

2.2 理论计算结果与分析

四种方法计算的结果及实测波压力值均列于表 3,并附有设计高水位、极端高水位时各种方法及实测曲线比较图(见图 7)。

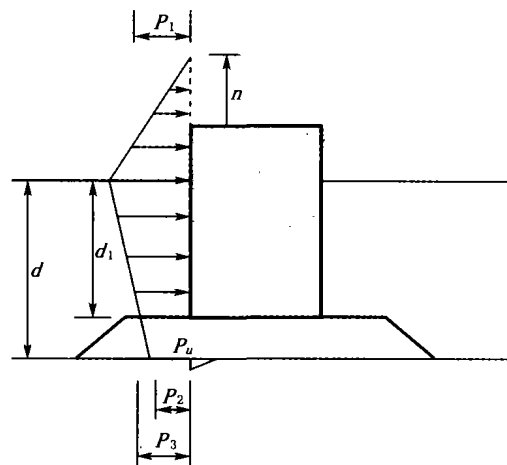


图 6 合田良实波浪力计算图式

Fig.6 Sketch of Gota's method for wave pressure calculation

表3 圆沉箱迎浪面波浪力计算方法结果比较

(单位:kPa)

Tab. 3 Comparison of results with different calculation methods for wave pressure on the curve surface of the coffer (unit: kPa)

项	目	方法一 完全立波	方法二 实测波高立波	方法三 合田良实公式	方法四 合田良实公式	实测值	推荐方法
设波	Max	43.3	33.0	33.374	24.341	23.85	24.341
计峰	堤底	25.85	23.2	27.674	20.183	21.09	20.183
水波	Max	24.5	19.3	18.5	13.5	19.95	19.3
位谷	堤底	23.5	18.1	18.5	13.5	12.6	18.1
极波	Max	52.0	36.7	38.88	25.916	24.75	25.916
端峰	堤底	29.3	23.0	30.709	20.469	21.9	20.469
水波	Max	31.7	23.1	22.5	15.0	22.0	23.1
位谷	堤底	29.9	20.9	22.5	15.0	16.8	20.9

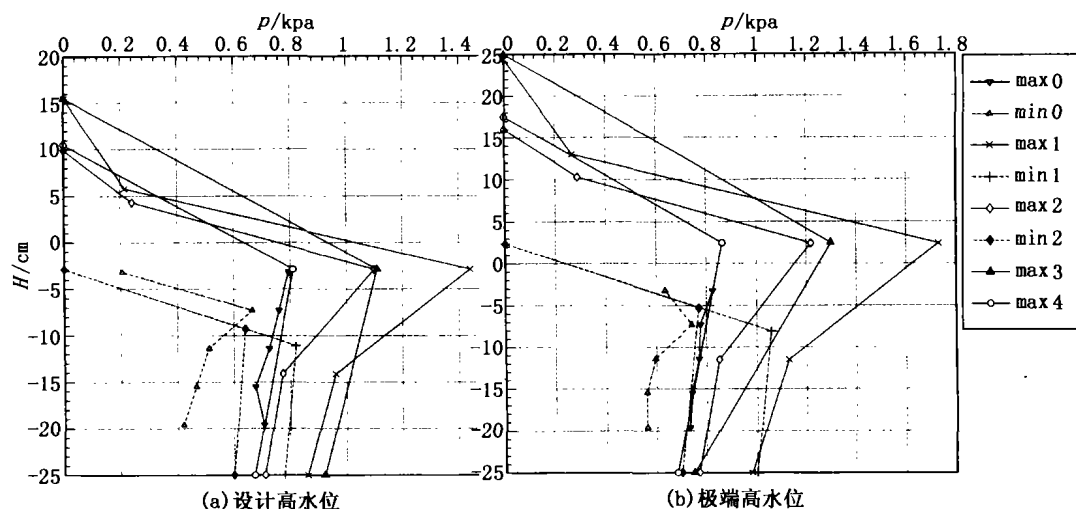


图7 设计高水位波浪力计算方法比较图

Fig. 7 Comparison of different methods for wave pressure calculation

图7说明:竖坐标为沉箱高度尺寸(模型值),0刻度对应沉箱顶端位置;横坐标为沿高度分布的波压强值(模型值);max0、min0一波峰、波谷时堤前实测波压力分布曲线;max1、min1一方法一波峰、波谷时计算曲线;max2、min2一方法二波峰、波谷时计算曲线;max3一合田良实波峰计算曲线;max4一合田良实波峰计算曲线(以堤前实测波高计算)。

由表及图可看出:

1) 在所有计算条件(包括波高、水深、建筑物形状等)相同的条件下,计算圆筒形水工建筑物表面上的波浪压力时,采用合田良实公式比采用 Sainflou 计算公式(该式为我国现行规范采用的波浪力计算公式)结果更接近于实测值。

2) 对于圆筒形水工建筑物的波浪计算,不能采用近似平面直墙的全反射波原理计算,其结果误差很大,应采用折算波高计算。折算波高指堤前的实测波高,折算波高与水工建筑物的高度及波浪是否越浪有关。在实际应用中,折算波高可近似采用如下方法确定:当堤前越浪较严重时,折算波高取为原行进波波高的1.3~1.5倍;当堤前越浪较少或不越浪时,折算波高取为原行进波波高的1.5~1.7倍。

3) 计算波谷时的波浪吸力,采用合田公式计算出的结果较实测值偏小;相对来说,采用折算波高的 Sainflou 波谷计算公式比较合理。

4) 在同一深度,波浪力沿曲面的分布规律:波峰时,波浪力垂直于曲面均匀分布,即:

$$P_z(\theta) = P_z \quad (9)$$

波谷时,波浪力在曲面半圆顶处最小,向两侧其值逐渐增大,在假设此时波浪力沿曲面线性分布的前提下,根据实测数据,可得以下计算公式:

$$P'_z(\theta) = P'_z(1 + 4K\theta/\pi) \quad (10)$$

上述式中, P_z 及 P'_z 为静水面以下Z米深度处曲面半圆顶处的波压强; θ 为曲面上某点与圆心的连线与

中垂面的夹角, $0 \leq \theta \leq \pi/2$, 单位: 弧度; K 为波谷作用分布常数, 当堤前越浪较严重时, $K = 0.401$, 当堤前越浪较少或不越浪时, $K = 0.226$ 。

3 结 语

圆筒形水工建筑物上波浪力的分布及计算方法叙述如下:

- 1) 波峰作用时, 波压强沿曲面的分布见图 4; 波谷作用时, 波压强沿曲面的分布见图 5。
- 2) 曲面半圆顶处的波压强计算方法如下: 波峰时, 采用折算波高的 Goda(合田良实) 公式计算, 见公式(1)~(8); 波谷时, 采用折算波高的 Sainflou 波谷计算公式, 见《规范》[1]。
- 3) 折算波高的取法: 折算波高系指堤前实测波高; 当堤前越浪较严重时, 折算波高取为原行进波波高的 1.3~1.5 倍; 当堤前越浪较少或不越浪时, 折算波高取为原行进波波高的 1.5~1.7 倍。
- 4) 同一深度处, 波浪力沿曲面的分布计算公式见公式(9)~(10)。

以上结论是在堤前为立波形态时单一的试验数据基础上经分析得出的, 有一定的适用范围。希望本文能对圆筒形水工建筑物上波浪力的计算理论研究提供有益的探讨。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通部. 防波堤设计与施工规范——海港水文规范[S].
- [2] 交通部第一航务工程勘察设计院编. 海港工程设计手册(中册)[M]. 人民交通出版社, 1994.
- [3] 严 恺. 中国海岸工程[M]. 南京: 河海大学出版社, 1992.
- [4] John B Herbich 主编. 李玉成, 陈士荫, 俞聿修, 等译. 海岸及海洋工程手册(第一卷)[M]. 大连理工大学出版社, 1992.
- [5] CH 列瓦切夫. 薄壳在水工建筑物中的应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 1982.
- [6] 张子樵. 圆筒防波堤立波波压力试验研究[R]. 天津大学水资源与港湾工程系, 1991.
- [7] 张子樵, 宋 初. 圆筒防波堤波浪力的理论计算[R]. 天津大学水资源与港湾工程系, 1991.
- [8] 周锡初 刘佳岭. 大圆筒结构在港口工程中的应用以及结构设计计算中的几个问题[J]. 港口工程, 1994, (5): 1-10.