

不同结构形式码头港内波高分布及越浪量试验研究*

Experimental Study on Wave Height in Harbors and Wave Overtopping by Different Wharf Structures

张义丰¹,牙韩争²,李蓓¹,李谊纯^{2**}

ZHANG Yi-feng¹,YA Han-zheng²,LI Bei¹,LI Yi-chun²

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所,天津 300456;2. 广西科学院 广西近海海洋环境科学重点实验室,广西南宁 530007)

(1. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin, 300456, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Science, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China)

摘要:【目的】研究码头本身结构形式对港内波高分布及越浪量的影响。【方法】通过整体物理模型试验,以某码头扩建工程为例,对比分析了普通沉箱码头及开孔沉箱码头港内波高分布以及不同面高程下的越浪量。【结果】开孔沉箱码头在减小港内波高及越浪上相比普通沉箱码头更有优势;码头面高程是影响越浪量的重要因素。【结论】为有效地控制港内波高及减小码头越浪量,工程中可优先考虑采用具有良好消浪性能的开孔形式码头,同时在经济技术可行的条件下尽可能地提高码头面高程。

关键词: 码头结构 港内波高 越浪量

中图分类号:U656.2 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2014)05-0550-05

Abstract:【Objective】By overall physical model test, the harbor wave height distribution and the wave overtopping of different wharf structural forms were studied.【Methods】With the example of one wharf extension project, the wave heights in harbors and the wave overtopping in different wharf surface elevation were compared between ordinary and perforated caisson wharf.【Results】The results show that the perforated caisson wharf has more advantages to controlled the harbor wave height and reduced the wave overtopping than ordinary caisson wharf. The wharf surface elevation is an important influence factor in wave overtopping.【Conclusion】In order to reduced harbor wave height and wave overtopping, the perforated caisson wharf, which has good characteristics of dissipating waves, should be preferentially considered to use, meanwhile the wharf surface elevation should be increased as much as possible under economic conditions available.

Key words: wharf structures, harbor wave heights, overtopping

收稿日期:2014-09-03

作者简介:张义丰(1983-),男,博士,副研究员,主要从事物理海洋和近岸水动力学研究。

* 国家自然科学基金项目(41306034)和广西自然科学基金北部湾重大专项(2012GXNSFE053001)资助。

** 通讯作者:李谊纯(1977-),男,博士,工程师,主要从事河口海岸学研究。E-mail:ychli@vip.sina.com。

【研究意义】波浪是影响港内船舶正常停靠、作业的主要因素之一,港口规划建设中,港内波浪条件一直是专家学者研究的重点。【前人研究进展】国内外学者^[1~7]在港内波浪条件上做了大量的研究工作,取得丰厚的成果。李衍旺等^[4]通过物理实验,对码头及护岸波要素、码头上水高度及港内波高分布等进行研究,确定码头结构及平面进行优化布置。巩世杰等^[5]对比普通直立式和开孔直立式沉箱结构防波堤对港

内泊稳条件的掩护效果,并分析了港内及防波堤周围水域的波高分布。刘海源等^[6]采用物理及数学模型,对三亚南山港工程平面方案码头前沿、护岸波高分布以及航道对波浪折射影响进行对比研究,分析了对码头前沿波峰面高程和上水情况。林尚飞等^[7]通过波浪整体物理模型试验,对工程码头及护岸设计波要素、码头上水和港内波高分布进行了测定。【本研究切入点】目前港内波浪条件研究中,对码头、防波堤平面布置方面的研究较多,而对码头本身结构形式的研究尚少,但已研究结果表明,码头结构对港内波高分布特征有直接的影响^[8]。【拟解决的关键问题】因此,本文以某码头扩建工程为例,通过物理实验,对不同结构形式码头港内波高分布进行研究,为今后类似工程规划建设提供参考依据。

1 试验条件

1.1 工程概况

拟建码头工程在原码头基础上进行扩建。码头采用F形的平面布置形式,总体向西侧外海延伸,包括1个70000t级杂货泊位。码头按直立式考虑,拟采用开孔沉箱型式和不开孔沉箱型式。工程平面布置如图1所示。

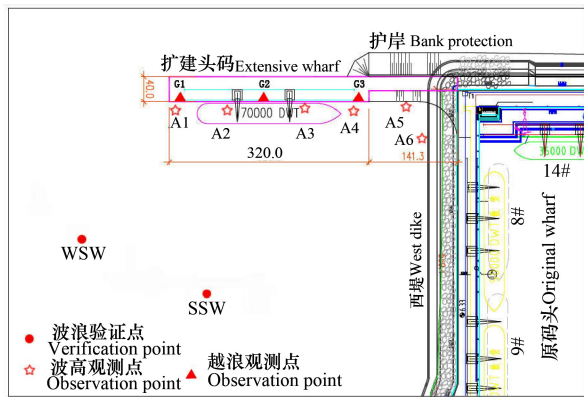


图1 工程平面布置
Fig.1 The project layout

1.2 工程水位

工程海域极端高水位为5.23m(理论基面,下同),设计高水位为3.60m,设计低水位为0.64m,极端低水位为-0.41m。

1.3 试验波要素

WSW及SSW向不同工程水位下重现期为100年,50年及2年各波浪验证点位置及波要素如图1及表1所示。

1.4 试验断面形式

采用普通沉箱和开孔沉箱两种码头断面结构形式。普通沉箱横纵尺寸为14.9m×20.7m,沉箱顶高

程+2.7m,护舷高程+2.7m。开孔沉箱尺寸、顶高程、护舷高程、布置形式与普通沉箱一致,区别之处在于开孔沉箱对箱身进行开孔处理,同时设置消浪孔,沉箱开孔尺寸为2.2m×0.9m,每段沉箱开孔数为9个,沉箱上部与胸墙相接。两种沉箱均采用明基床的布置形式,基床外侧用护底块石保护,增加基床稳定性。各沉箱结构断面分别如图2及图3所示。

表1 模型试验波要素(H_{13%}波高)

Table 1 Wave parameters of model test(H_{13%})

| 重现期 Return Period | 水位 Water Level | 方向 Direction | 周期 Period | 方向 Direction | 周期 Period |
|-------------------------|----------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| | | WSW | T _m | SSW | T _m |
| 100年 | 极端高 Extreme High | 5.63 | 9.2 | 4.73 | 9.2 |
| | 设计高 Design High | 5.38 | 9.2 | 4.58 | 9.2 |
| | 设计低 Design Low | 4.75 | 9.2 | 4.20 | 9.2 |
| | 极端低 Extreme Low | 4.46 | 9.2 | 4.01 | 9.2 |
| 50年 | 极端高 Extreme High | 5.32 | 8.9 | 4.42 | 8.9 |
| | 设计高 Design High | 5.13 | 8.9 | 4.30 | 8.9 |
| | 设计低 Design Low | 4.62 | 8.9 | 4.01 | 8.9 |
| | 极端低 Extreme Low | 4.37 | 8.9 | 3.86 | 8.9 |
| 2年 | 极端高 Extreme High | 3.04 | 6.6 | 2.50 | 6.6 |
| | 设计高 Design High | 3.02 | 6.6 | 2.49 | 6.6 |
| | 设计低 Design Low | 3.00 | 6.6 | 2.48 | 6.6 |
| | 极端低 Extreme Low | 2.99 | 6.6 | 2.47 | 6.6 |

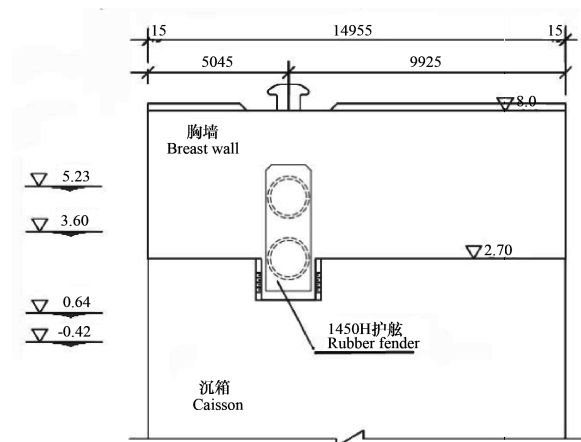


图2 普通沉箱码头断面

Fig.2 Structural drawing of ordinary caisson wharf

1.5 设备与仪器

在天津水运工程科学研究院水工厅波浪水池中进行,水池尺寸为51.0m×48.0m×1.0m(长×宽×深)。水池一端配备可移动推板式不规则波造波机,

可产生试验要求的不规则波浪,池尾部和侧面安装了消能网等消能设备,以尽量避免波浪的反射。

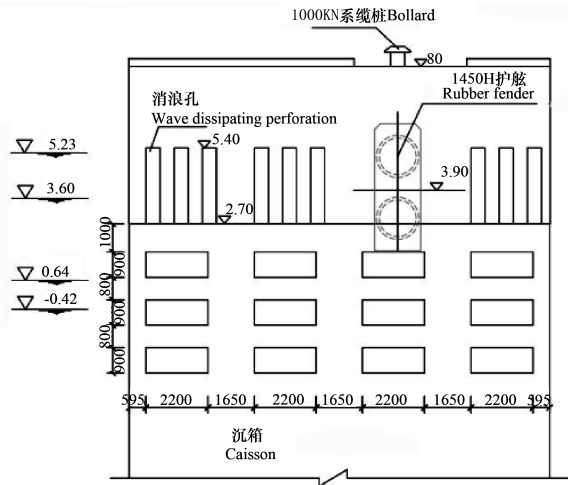


图3 开孔沉箱码头断面

Fig. 3 Structural drawing of perforated caisson wharf

模型波高采用BG-1型波高传感器采集系统进行监测,该系统采用电容式传感器测波,自动采集并统计波高、波峰面高度与波周期结果。波高测量仪器试验前均经过严格检测和率定,性能可靠,在试验期间定期对浪高仪进行检测和率定。

2 试验方法

2.1 模型设计与制作

根据相似定律,原型与模型相似,满足重力相似的准则。试验遵循《波浪模型试验规程》(JTJ-T 234-2001)^[9]中的规定,同时结合试验场地,最终选用1:40正态模型比尺,模型各试验比尺见表2。

表2 模型试验比尺

Table 2 Scales of model test

| 几何比尺 λ Geometric Scale λ | 时间比尺 λ_t Time Scale λ_t | 波高比尺 λ_H Wave Scale λ_H | 周期比尺 λ_T Period Scale λ_T | 单宽比尺 λ_q Unit Width Scale λ_q |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 40 | 6.32 | 40 | 6.32 | 252.98 |

表3 各测点波高观测结果(m)

Table 3 Observational results of wave heights at each observation point (m)

| 观测点 Observation Point | WSW 向 WSW direction | | | | SSW 向 SSW direction | | | |
|-----------------------------|--------------------------|-----------|----------------------------|-----------|--------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| | 普通沉箱 Ordinary Caisson | | 开孔沉箱 Perforated Caisson | | 普通沉箱 Ordinary Caisson | | 开孔沉箱 Perforated Caisson | |
| | $H_{13\%}$ | $H_{4\%}$ | $H_{13\%}$ | $H_{4\%}$ | $H_{13\%}$ | $H_{4\%}$ | $H_{13\%}$ | $H_{4\%}$ |
| A1 | 2.27 | 2.79 | 2.24 | 2.76 | 3.13 | 3.83 | 2.87 | 3.52 |
| A2 | 2.98 | 3.65 | 2.52 | 3.10 | 2.88 | 3.53 | 2.60 | 3.20 |
| A3 | 3.05 | 3.73 | 2.48 | 3.05 | 2.93 | 3.59 | 2.41 | 2.96 |
| A4 | 3.06 | 3.75 | 2.42 | 2.98 | 3.44 | 4.20 | 3.00 | 3.67 |
| A5 | 3.12 | 3.78 | 2.44 | 2.98 | 3.48 | 4.20 | 3.04 | 3.69 |
| A6 | 3.00 | 3.65 | 2.48 | 3.03 | 3.49 | 4.22 | 3.08 | 3.74 |

2.2 波浪模拟

根据试验技术要求,采用《海港水文规范》(JTS 145-2-2013)^[10]提供的波谱进行造波,并根据《波浪模型试验规程》(JTJ/T234-2001)中规定的允许偏差来控制每组模拟的波浪参数,波浪谱解析式如式(1)~(3)所示。

$$S(f) = \beta_j H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}(T_p f)^{-4}\right] \cdot \gamma^{\exp[-(f/f_p-1)^2/2\sigma^2]}, \quad (1)$$

$$\beta_j = \frac{0.06238}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} \cdot [1.094 - 0.01915 \ln \gamma], \quad (2)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07, & f \leq f_p \\ 0.09, & f > f_p \end{cases} \quad (3)$$

式中 T_p 为谱峰周期; $H_{1/3}$ 为有效波高; γ 为谱峰升高因子,取值为 3.3; 试验中波浪数为 100 ~ 120 个。

2.3 试验步骤

步骤1 原始地形下波浪要素的测定,将浪高仪布置在计算点位置处,通过测量试验波谱并与目标谱进行对比修正,得到目标波浪要素。

步骤2 布置码头模型,在码头前沿布置浪高仪,进行港内波高分布试验,记录下各试验工况下各观测点的波高。

步骤3 布置不同高程面码头模型,对各模型越浪量进行试验,记录下各试验工况码头越浪量。根据波浪试验规程规定,每组至少重复3次,当3次试验现象差别较大时,增加重复次数。

3 试验结果与分析

3.1 港内波高分布

根据前文所述方法及步骤,采用重现期为2年一遇的设计高水位对WSW向及SSW向入射波作用下港内波高进行观测,观测结果见表3。

从表 3 可以看出,WSW 向波作用下,当港内码头为不开孔沉箱结构时,各测点波高 $H_{4\%}$ 波高在 2.79~3.78m, $H_{13\%}$ 波高在 2.98~3.12m, $H_{4\%}$ 波高和 $H_{13\%}$ 波高最大值分别为 3.75m 和 3.12m。当码头为开孔沉箱结构时,各测点波高有所减小,幅度约为 20%,港内波高 $H_{4\%}$ 波高变化范围为 2.76~3.10m, $H_{13\%}$ 波高变化范围为 2.24~2.52m, $H_{4\%}$ 波高和 $H_{13\%}$ 波高最大值分别为 3.10m 和 2.52m。相比于普通沉箱码头,开孔沉箱消能作用明显减小了沉箱的反射作用,开孔沉箱码头前沿波高有明显的降低。

SSW 向波作用下,当港内码头为不开孔沉箱结构时,码头前沿各测点 $H_{13\%}$ 波高变化范围为 2.88~3.49m, $H_{4\%}$ 波高变化范围为 3.53~4.22m。 $H_{4\%}$ 波高和 $H_{13\%}$ 波高最大值分别为 3.49m 和 4.22m。相比于入射波,由于波浪的正向作用及沉箱的不开孔结构,反射作用较强,SSW 向波作用下港内波高略有增大,当码头为开孔沉箱结构时,各观测点波高相比入射波有一定的增大,但幅度不大,约 0~0.5m, $H_{13\%}$ 波高和 $H_{4\%}$ 波高变化范围分别为 2.41~3.08m 和 2.96~3.74m,最大值分别为 3.08m 和 3.74m。相比于普通沉箱码头,开孔沉箱码头波高增高幅度有明显的减小,增高幅度仅为普通沉箱码头的 50%左右,可见,开孔沉箱码头对改善港内波况条件作用明显。

3.2 码头越浪量

采用重现期为 50 年和 100 年一遇的设计高水位和极端高水位对 SSW 向入射波 +6.0m, +7.0m, +8.0m 三个不同码头面高程越浪量 ($m^3/s \cdot m^{-1}$)

Table 4 Wave overtopping statistics of different wharf elevation in SSW direction ($m^3/s \cdot m^{-1}$)

| 沉箱类型 Caisson types | 水位 Water Level | 重现期 Return period | 码头面高程(+6.0m) Wharf Elevation (+6.0m) | | | 码头面高程(+7.0m) Wharf Elevation (+7.0m) | | | 码头面高程(+8.0m) Wharf Elevation (+8.0m) | | |
|----------------------------|---------------------|----------------------|--------------------------------------------|-------|-------|--------------------------------------------|-------|-------|--------------------------------------------|-------|-------|
| | | | G1 | G2 | G3 | G1 | G2 | G3 | G1 | G2 | G3 |
| 普通沉箱 Ordinary Caisson | 设计高 Design High | 50 年 | 0.051 | 0.084 | 0.119 | 0.048 | 0.036 | 0.078 | 0.023 | 0.008 | 0.04 |
| | | 100 年 | 0.077 | 0.104 | 0.141 | 0.057 | 0.04 | 0.089 | 0.039 | 0.013 | 0.06 |
| | 极端高 Extreme High | 50 年 | 0.185 | 0.225 | 0.27 | 0.149 | 0.16 | 0.217 | 0.11 | 0.066 | 0.125 |
| | | 100 年 | 0.268 | 0.277 | 0.346 | 0.159 | 0.217 | 0.254 | 0.158 | 0.082 | 0.179 |
| 开孔沉箱 Perforated Caisson | 设计高 Design High | 50 年 | 0.03 | 0.028 | 0.102 | 0.013 | 0.003 | 0.059 | 0.002 | 0.001 | 0.028 |
| | | 100 年 | 0.042 | 0.025 | 0.122 | 0.017 | 0.007 | 0.071 | 0.004 | 0.002 | 0.042 |
| | 极端高 Extreme High | 50 年 | 0.126 | 0.161 | 0.195 | 0.118 | 0.11 | 0.173 | 0.06 | 0.023 | 0.091 |
| | | 100 年 | 0.159 | 0.246 | 0.266 | 0.128 | 0.125 | 0.198 | 0.095 | 0.057 | 0.139 |

8.0m 3 个不同码头面高程码头上水情况进行试验,并在码头处布置 3 个上水情况测点,各观测点位置见图 1。不同结构形式码头及面高程组合下的越浪量见表 4。

由表 4 结果可知,设计高水位 50 年一遇波浪作用下,当码头为不开孔沉箱时,+6.0m, +7.0m 和 +8.0m 码头面高程下,码头单宽越浪量最大值分别为 $0.119m^3/s \cdot m^{-1}$, $0.078m^3/s \cdot m^{-1}$ 和 $0.040m^3/s \cdot m^{-1}$;当码头为开孔沉箱时,+6.0m, +7.0m 和 +8.0m 码头面高程下,码头单宽越浪量最大值分别为 $0.102m^3/s \cdot m^{-1}$, $0.059m^3/s \cdot m^{-1}$ 和 $0.028m^3/s \cdot m^{-1}$ 。设计高水位 100 年一遇波浪作用下,+6.0m, +7.0m 和 +8.0m 码头面高程下,单宽越浪量最大值分别为 $0.141m^3/s \cdot m^{-1}$, $0.089m^3/s \cdot m^{-1}$ 和 $0.060m^3/s \cdot m^{-1}$;当码头为开孔沉箱时,+6.0m, +7.0m 和 +8.0m 码头面高程下,单宽越浪量最大值分别为 $0.266m^3/s \cdot m^{-1}$, $0.198m^3/s \cdot m^{-1}$ 和 $0.139m^3/s \cdot m^{-1}$ 。这表明,码头面高程的增加与采用开孔沉箱结构,码头越浪量都有明显减小。设计高水位 50 年一遇波浪条件下,+6.0m, +7.0m 和 +8.0m 码头面高程越浪量有明显的减小趋势,普通沉箱码头越浪量依次减小约为 35% 和 58%,开孔沉箱码头则减小约为 42% 和 52%。设计高水位 50 年一遇波浪条件下,开孔沉箱码头在 +6.0m, +7.0m 和 +8.0m 三个码头面高程相比于普通沉箱码头减小分别约为 14%、24% 和 30%,可见,采用具有良好消浪性能的开孔沉箱式及高高程面的码头结构对减小越浪量的作用十分明显。

4 结论

以码头扩建工程为例,通过整体物理模型实验,对不同结构形式码头及不同码头面高程港内波高分布及越浪量进行研究,结果表明:

(1)码头结构及波浪入射角对港内波高分布有一定的影响。开孔沉箱码头结构对改善港内波况条件作用明显。波浪入射角是影响港内波高分布的重要因素,斜向波比垂向波更有利于减小港内波高。

(2)增加码头面高程与采用开孔沉箱结构形式码头时,码头越浪量都有明显减小。相比于普通沉箱码头,开孔沉箱码头更有利于减小港内波高及码头上水量。码头面高程也是影响越浪量的一个重要因素。实际工程中,为有效地减小港内波高分布及码头上水量,可优先考虑采用具有消浪性能的开孔式码头,同时在经济技术可行的条件下提高码头面高程。

参考文献:

- [1] 白静,王朝辉,刘海源,等.大型港区港内波浪条件分析研究[J].水道港口,2010,31(5):429-432.
Bai J,Wang Z H,Liu H Y,et al. Analysis and study of wave condition in large port area[J]. Journal of Waterway and Harbor,2010,31(5):429-432.
- [2] 陈长泰.祥芝渔港挡浪墙顶高程与港内泊稳条件的研究[J].水运工程,2007(5):43-45.
Chen C T. Mooring conditions and wave barrier's elevation of Xiangzhi fishing port[J]. Port & Waterway Engineering,2007(5):43-45.
- [3] 李瑞杰,江森汇,郑俊,等.日照港码头结构消浪的数值模拟[J].河海大学学报:自然科学版,2001,39(2):190-194.
Li R J,Jiang S H,Zheng J,et al. Numerical simulation of wave dissipation on dock structure of Rizhao Port[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2011,39(2):190-194.
- [4] 李衍旺,王勇健,林尚飞.海丰电厂码头工程港内波浪条件研究[J].水运工程,2013(9):68-73.
Li Y W,Wang Y J,Lin S F. Wave condition research for

Haifeng power plant terminal project[J]. Port & Waterway Engineering,2013(9):68-73.

- [5] 巩世杰,郑宝友,白玉川,等.不同沉箱结构形式防波堤对港内泊稳影响的试验研究[J].水道港口,2012,33(5):375-379.
Gong S J,Zheng B Y,Bai Y C,et al. Impact on stability in harbor by different caisson structures[J]. Journal of Waterway and Harbor,2012,33(5):375-379.
- [6] 刘海源,张慈珩.三亚南山港波浪数模与物模试验对比研究[J].水道港口,2006,27(4):231-235.
Liu H Y,Zhang C H. Comparison study between mathematical and physical model tests on waves in Nanshan Harbor in Sanya[J]. Journal of Waterway and Harbor,2006,27(4):231-235.
- [7] 林尚飞,陈国平,严士常,等.不同平面布置方案对港内波浪影响[J].水运工程,2013(3):61-66.
Lin S F,Chen G P,Yan S C,et al. Influence of different layout schemes upon waves inside port[J]. Port & Waterway Engineering,2013(3):61-66.
- [8] 林尚飞,严士常,郑金海.码头结构对波高分布的影响[J].中国科技论文,2013,8(5):465-469.
Lin S F,Yan S C,Zheng J H. Influence of wharf structure upon the distribution of wave heights[J]. China Science Paper,2013,8(5):465-469.
- [9] 中华人民共和国交通运输部.波浪模型试验规程(JTJ/T 234-2001)[S].北京:人民交通出版社,2002.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Wave model test regulation(JTJ/T 234-2001)[S]. Beijing:China Communications Press,2002.
- [10] 交通部第一航务工程勘察设计院.《海港水文规范》(JTS 145-2-2013)[S].北京:人民交通出版社,2013.
China Communication First Design Institute of Navigation Engineering. Code of hydrology for sea harbour (JTS 145-2-2013)[S]. Beijing: China Communications Press,2013.

(责任编辑:尹 闯)