



开孔式削角沉箱防波堤水动力特性 模型试验研究

朱峰¹, 刘子宜², 覃杰¹

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290; 2. 深圳市招商前海湾置业有限公司, 广东 深圳 518101)

摘要: 针对开孔式削角沉箱防波堤在设计条件下水动力响应稳定性评估问题, 基于物理模型试验方法, 在试验水槽中建立开孔式削角沉箱防波堤的缩尺模型, 开展不同水位对应波浪条件作用下的结构稳定性、越浪量以及波压力分布模型试验研究, 并根据试验结果对结构设计进行改进优化。研究表明, 结构原始方案在极端高水位和设计高水位对应的波浪条件下护底块体发生明显移动且结构越浪量过大, 在设计低水位对应波浪条件下沉箱结构发生显著累积位移, 需要有针对性开展结构设计优化; 提高胸墙的堤顶高程可以有效降低防波堤越浪量, 当堤顶高程提升至 15 m 时, 可以满足设计规范要求; 防波堤迎浪面波压力分布中的最大值位置与水位呈正相关性, 最大浮托压力出现在沉箱外侧底部, 随后向尾部逐渐减小。模型试验充分论证了防波堤结构设计方案的可行性, 为结构优化提供参考依据。

关键词: 防波堤; 开孔式削角沉箱; 稳定性; 越浪量; 波压力分布

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0026-07

Experimental study on hydrodynamic characteristics of perforated chamfered caisson breakwaters

ZHU Feng¹, LIU Ziyi², QIN Jie¹

(1. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China;

2. Shenzhen Merchants Qianhai Bay Real Estate Co., Ltd., Shenzhen 518101, China)

Abstract: In response to the issue of evaluating the stability of hydrodynamic response of perforated chamfered caisson breakwaters under design conditions, this paper establishes a scaled model of the perforated chamfered caisson breakwater in a flume based on physical model test. The structural stability, overtopping, and wave pressure distribution under wave conditions corresponding to different water levels are carried out in the model test, and the structural design is improved and optimized based on the test results. The research results indicate that the original structural scheme has a significant movement of the bottom protection block under wave conditions corresponding to extreme high water level and design high water level, and the amount of structural overtopping is too large. Under the wave conditions corresponding to the design low water level, the caisson structure experiences significant cumulative displacement. Therefore, the structural design needs to be optimized. Raising the top elevation of the breast wall can effectively reduce the overtopping of the breakwater. When the optimized top elevation is raised to 15 m, it can meet the requirements of design standards. The maximum position of the wave pressure distribution on the wave facing surface of the breakwater is positively correlated with the water level, and the maximum buoyancy pressure appears at the outer bottom of the caisson, which gradually decreasing towards the tail. The model test fully demonstrates the feasibility of the design scheme for the breakwater structure, providing reference basis for structural optimization.

Keywords: breakwater; perforated chamfered caisson; structural stability; wave overtopping; wave pressure distribution

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 朱峰 (1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口、海岸及近海工程。

防波堤是现代港口的重要水工结构物之一, 主要用于遮挡外海波浪, 为港内提供良好的泊稳条件。防波堤在抵御外海波浪作用过程中受到水体直接冲击, 在两者接触面上产生强烈的水体-结构相互作用^[1]。因此, 开展波浪与防波堤相互作用机理分析, 掌握特定工程条件下防波堤结构的水动力响应特征, 准确评估防波堤对波浪的抵御效果, 可以为防波堤结构形式的选择和关键参数的设计提供可靠的工程参考依据^[2]。

目前的主要防波堤结构形式包括斜坡式、重力式(以沉箱结构为主体)、浮式以及混合式, 其中重力式防波堤结构以其施工便利性和结构可靠性受到工程界的广泛认可, 国内外研究人员针对波浪和重力式防波堤的相互作用开展了大量的分析研究, 并就传统沉箱式防波堤开展了多类型的结构创新^[3-4]。

传统的沉箱式防波堤坐落于海床基础上, 依靠自重力抵御波浪作用, 其上部胸墙通常采用 L 形断面结构。大量工程实践证明, 该类型防波堤结构对外海波浪的防御效果欠佳, 为防止越浪需大幅度增加胸墙顶高程, 但这显著增加了结构所受到的波浪力, 从而为结构设计建造带来不便^[5]。为优化上述问题, 研究人员针对防波堤的上部主

要受浪区域提出一系列优化措施。削角式沉箱防波堤是一种典型的优化形式, 通过将沉箱上部胸墙迎浪面设计成与水平面呈一定角度, 实现降低波浪水平力, 提高波浪下压力, 从而增强结构稳定性^[6], 但是削角式防波堤会显著增加波浪的越浪量^[7-8]。开孔是提高沉箱消浪效果的一大重要改进, 大量研究成果表明, 合理的开孔设置可以有效增加波浪的能量耗散, 从而减少越浪和波浪力^[9-10]。因此, 开展重力式沉箱优化设计可以为工程的实施提供合理高效的解决方案。

沉箱削角式胸墙结合胸墙开孔是一种新型的重力式消浪胸墙防波堤结构, 通过斜坡和开孔的联合设置, 降低波浪的冲击强度, 提高结构的稳定性, 从而降低工程造价, 提高工程的整体可靠性。本文从结构的水动力响应特征出发, 对开孔式削角沉箱防波堤结构在设计工况下的稳定性、越浪量和波压力进行评估, 以期为该结构的推广应用提供重要参考依据。

1 工程概况

工程位于广东省茂名市, 规划建设的防波堤在深水段均采用重力式沉箱结构, 沉箱上部胸墙采用开孔式削角结构, 对应的典型断面如图 1 所示。

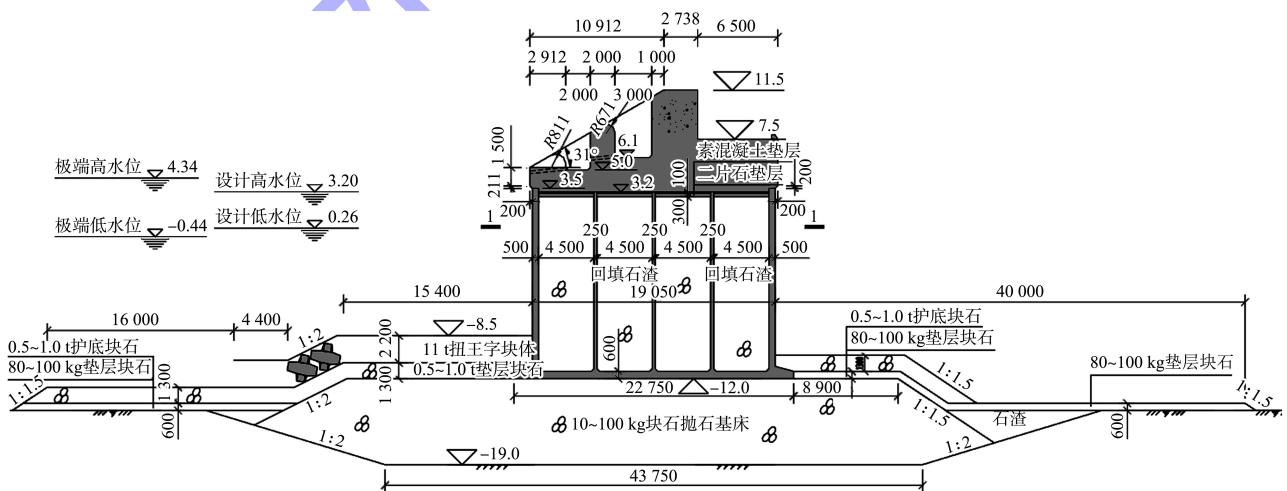


图 1 开孔式削角沉箱防波堤结构断面 (尺寸: mm; 高程: m)

在典型结构断面设计方案中, 防波堤断面堤顶高程为 11.5 m, 沉箱底高程为 -12.0 m, 抛石基床底高程为 -19.0 m, 堤前基床护肩采用 11 t 扭

王字块体, 顶高 -8.5 m, 肩台宽 16 m, 堤后侧采用 0.5~1.0 t 块石护底。

根据当地的水文观测资料, 研究中主要针对

极端高水位 4.34 m、设计高水位 3.20 m、设计低水位 0.26 m 3 种水位情况开展相应的分析。

波浪统计资料显示,工程所在地的常浪向和强浪向均为 SSE—SE 向,结合水文资料进行近岸波浪条件推演,可以得到设计条件下不同水位对应的 50 a 一遇防波堤前的入射波浪条件,如表 1 所示。

表 1 堤前 50 a 一遇波浪参数

水位	$H_{1\%}/\text{m}$	$H_{5\%}/\text{m}$	$H_{13\%}/\text{m}$	平均周期 T_m/s
极端高水位	10.3	8.9	7.8	
设计高水位	9.7*	8.8	7.7	11.3
设计低水位	8.1*	8.1*	7.5	

注:“*”表示波浪发生破碎。

2 物理模型试验

2.1 模型试验场地

为验证防波堤结构在波浪作用下的稳定性、越浪量和波压力分布,采用模型试验方法分析开孔式削角沉箱防波堤水动力特性。在对初始设计方案分析的基础上,对结构进一步优化,以满足工程使用需求。

模型试验在天津港湾工程研究院水工研究所大型波浪试验水槽中进行,水槽长 92 m、宽 4.0 m、高 1.8 m,最大试验水深 1.5 m,最大流量 $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$,造流精度 $\leq 0.03 \text{ m/s}$,波周期范围 0.5~5.0 s,波高范围 0.02~0.70 m,试验水槽如图 2 所示。



图 2 物理模型试验水槽

断面试验采用大型不规则波造波机推板造波,造波机由液压驱动装置、控制台及计算机构成,可根据试验要求生成规则波和各种谱型的不规则波。为消除水槽末端的一次反射和造波机器前的二次反射对试验结果的影响,造波板前设置 1.5 m 宽的滤波栅,水槽尾部设有 1:15 的抛石消波斜坡。

2008 型智能数据采集仪由计算机、多功能监测仪和各种传感器组成,可对多种物理量的数据进行准同步采集,如水位、波高、点脉动压力、面脉动压力、拉力、三维总力、二维流速、护舷、位移、温度、应变以及模拟电压等,还采用波高传感器进行波高的同步采集。

2.2 试验比尺设置

模型试验因场地尺寸限制,需引入模型比尺。为尽可能减小比尺效应的影响,使得波浪条件更符合现场的实际情况,模型比尺应按《波浪模型试验规程》的有关要求进行设计,根据模型重力相似准则及实际试验条件,选取直立式防波堤的模型几何比尺 $\lambda=38$,相应地,其他物理量模型比尺根据相似准则推算确定。

防波堤结构模型根据设计提供的断面尺寸制做,结构中的扭王字块体、预制块体、防浪墙、直立式沉箱及上部结构等均由水泥砂浆浇筑而成。根据《波浪模型试验规程》相关要求,模型几何尺寸允许偏差控制在 $\pm 1.0 \text{ mm}$ 以内,质量允许偏差小于 $\pm 3\%$ 。试验采用的护面块石、护底块石和棱体块石的质量允许偏差控制在 $\pm 5\%$ 以内。试验中扭王字块体护面层的安放方法亦与现场相似,以保证达到正确的安放密度。为便于观测,试验断面上的块体和块石均涂以不同的颜色。防波堤结构模型如图 3 所示。



a) 胸墙构造

b) 防波堤断面

图 3 沉箱防波堤结构模型

2.3 试验条件设置

模型试验中不规则波的生成参考 Jonswap 谱型,在模型安放之前进行波浪要素率定。不规则波的总能量偏差控制在 $\pm 10\%$ 以内,有效波高和平

均波周期偏差控制在 $\pm 5\%$ 以内。不规则波率定试验1次采集200~300个波,重复采集3次,并取其平均值作为试验结果的代表值,数据采集的时间间隔为0.05 s。

考虑到试验水深及周期的要求,防波堤模型直接设置在水槽底部水平段。模型安放位置距造波机6倍最大波周期对应的波长,后方距消波坡的距离大于2倍波长。

试验过程需对结构的稳定性和水动力特征进行试验评估。1) 检查不规则波浪作用下结构的稳定性,观测护面块石、块石棱体、护面块体、护底块石及沉箱和防浪墙等各部位的稳定性;2) 保持不规则波浪持续作用时间不小于原型2.5 h,记录断面在波浪累积作用下的变化情况;3) 采用电容式波高传感器,对防波堤断面堤内侧距防波堤轴线100 m位置处的再生波高进行测量;4) 在防浪墙顶部放置接水箱,对1个组次波浪作用下的总越浪量进行测量,并给出断面的平均越浪量;5) 采用小型压力传感器,对直立式防波堤沉箱及防浪墙进行波压力测定。

3 计算结果分析

3.1 原始方案结构稳定性

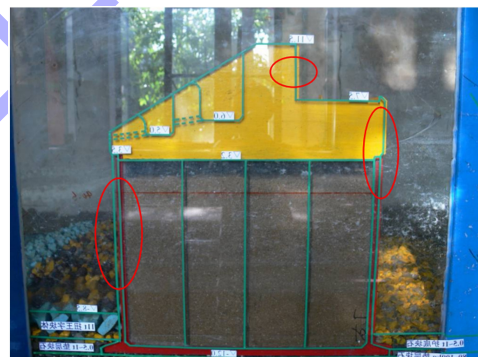
波浪作用下结构的瞬时动态响应和累积变形是判断结构物稳定性的重要依据。开孔式削角沉箱防波堤在设计使用期内受到50 a一遇极端波浪作用情况下的主体结构及护面结构稳定性是工程中关注的重点。模型试验针对极端高、设计高和设计低3种水位叠合50 a一遇波浪作用下的结构稳定性开展分析研究。

在极端高水位和50 a一遇波浪组合作用下,沉箱及上部防浪墙稳定。堤前11 t扭王字块体最外排在大浪作用下掀动,个别块体立起并向外侧滚动,最大位移量为0.76 m。堤前0.5~1.0 t的护底块石有少量向护肩块体方向滚动。越浪水体无法触及0.5~1.0 t堤后护底块石,因此处于稳定状态。

在设计高水位和50 a一遇波浪组合作用下,

沉箱及上部防浪墙稳定。堤前11 t扭王字块体外排随波摆动,累积作用下未产生进一步的位移。堤前0.5~1.0 t的护底块石在大浪作用下随波滚动,肩角在波浪累积作用下略有变缓。越浪水体无法触及0.5~1.0 t堤后护底块石,因此处于稳定状态。

在设计低水位和50 a一遇波浪组合作用下,由于水位降低,波浪基本上作用在沉箱上部防浪墙迎浪侧,沉箱及上部防浪墙整体有明显的向后位移,经过波浪作用3 h后,沉箱及防浪墙整体后移0.027~0.380 m,如图4所示。堤前11 t扭王字块体外排随波摆动,累积作用下未产生进一步的位移。堤前0.5~1.0 t的护底块石在大浪作用下随波滚动,肩角在波浪累积作用下略有变缓。堤后0.5~1.0 t护底块石在波浪作用过程中处于稳定状态。



a) 整体变形



b) 局部变形

图4 设计低水位50 a一遇波浪作用下结构变形

由模型试验结果可知,极端高水位叠加50 a一遇波浪作用下,开孔式削角沉箱防波堤海侧护底块体出现较明显的失稳,但沉箱主体保持基本

稳定；设计低水位叠加 50 a 一遇波浪作用下，沉箱结构发生显著位移，海侧护底也发生破坏。由此可见，开孔式削角沉箱防波堤原始方案需对沉箱结构和堤前护面块体进行局部加强设计。

3.2 防波堤结构越浪量

防波堤结构的主要功能是限制港内波高，保障港区内部船舶作业条件，其结构设计通常要求波浪无法翻越坝顶，或者在极端情况下仅有少量波浪翻越坝顶。如果越浪量较大，则可能对防波堤后方地基与港池内泊稳条件造成较大破坏。因此，防波堤结构的越浪性能也是模型试验验证的关键内容。

由模型试验成果可知，在极端高水位叠加 50 a 一遇波浪情况下，防波堤原始方案堤顶发生大规模越浪，越浪水体的水舌厚度接近 5 m，越浪引起的水后 100 m 位置处波高达到堤前入射波高的 55%，越浪过程典型时刻的照片如图 5 所示。由此可见，原始方案无法满足设计要求，需要结合实际情况对开孔式削角防波堤胸墙进行结构方案优化。



图 5 原始方案极端高水位 50 a 一遇波浪越浪

为减小防波堤越浪量，通常需要提高胸墙顶高程，并在一定程度上利用胸墙角度引导爬高水体的运动方向，从而充分耗散水体动能。研究过程中对原始方案进行优化，增加设置 1 个反弧形挡墙，并将原始方案的胸墙顶高程由 11.5 m 向上延伸至 13.0 m (方案 1) 以及在方案 1 基础上进一步增加堤顶高程至 15.0 m (方案 2)。2 个优化方案的胸墙结构如图 6 所示。

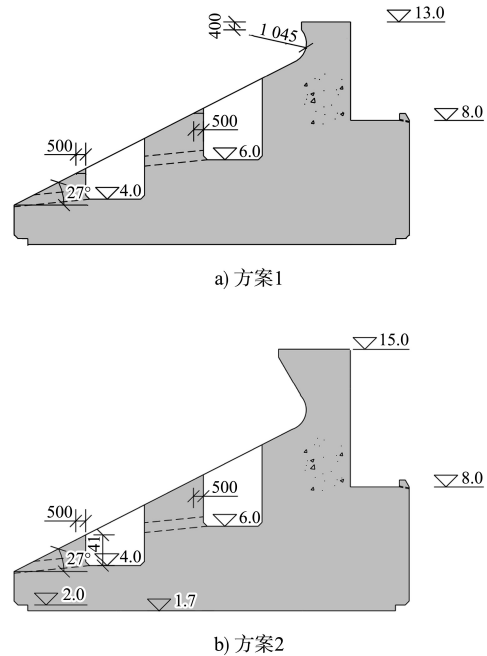
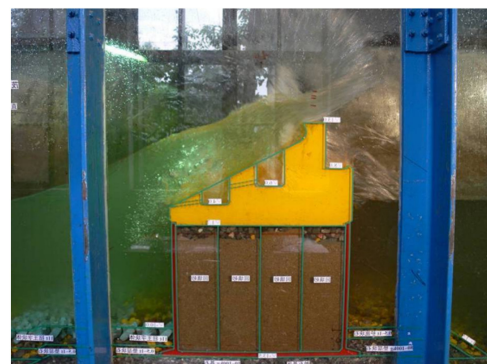


图 6 优化方案胸墙结构构造
(尺寸: mm; 高程: m)

由模型试验成果可知：在极端高水位叠加 50 a 一遇波浪情况下，翻越防波堤堤顶的水体受到挡墙的反弧形明显阻滞，防波堤优化方案的越浪量显著降低。

方案 2 相比方案 1，由于大幅度提高了挡墙高度以及墙鼻尺寸，越浪水体受到显著阻滞，水体在胸墙前发生回卷，与后续水体发生强烈掺混，有效耗散了波浪的动能，减少后续水体翻越堤顶的可能性。2 个优化方案在极端高水位叠加 50 a 一遇波浪在越浪典型时刻的状态如图 7 所示。



a) 方案1



b) 方案2

图 7 优化方案极端高水位 50 a 一遇波浪越浪典型时刻

开孔式削角沉箱防波堤原始方案和 2 个优化方案在不同水位对应 50 a 一遇波浪作用下的越浪量、堤后波高、水舌厚度等统计结果见表 2。

表 2 防波堤水动力结果统计

方案	水位/ m	波高 $H_{13\%}/m$	T_m/s	水舌 厚度/m	堤后波高 $H_{4\%}/m$	越浪量/ $(m^3 \cdot m^{-1} \cdot s^{-1})$
原始				4.94	3.06	过大
1	4.34	8.0	11.3	4.20	2.50	0.34
2				3.23	1.42	0.07
原始				4.18	2.71	过大
1	3.20	7.9	11.3	3.80	2.35	0.25
2				1.90	1.16	0.04
原始				1.90	1.37	0.00
1	0.26	7.7	11.3	1.70	1.29	0.00
2				1.50	1.00	0.00

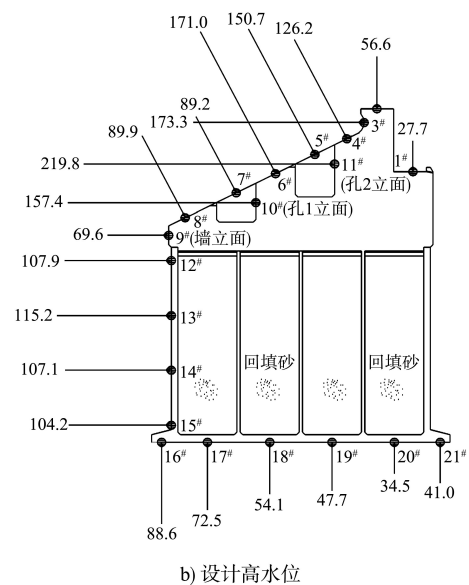
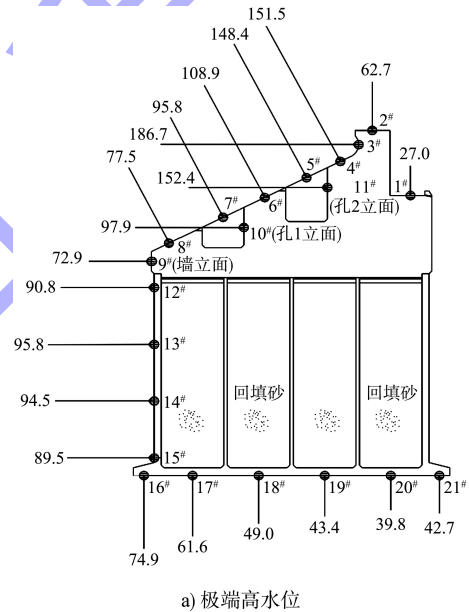
从表中统计数据可以看出, 水位高程的增加所对应的有效波高有所提升, 总体而言, 水位对防波堤结构的水动力响应较为显著, 极端高水位和设计低水位的高程差距达到 4.1 m, 对应的最大水舌厚度相差近 60%, 堤后波高相差近 50%, 设计低水位下几乎不发生越浪。

从原始方案、优化方案 1 和优化方案 2 之间的结果对比可以看出, 随着堤顶高程的不断提高, 防波堤的水舌厚度、堤后波高、越浪量等水动力参数显著降低。根据防波堤结构设计规范, 结构在设计高水位下的越浪量应低于 $0.05 \text{ m}^3/(m \cdot s)$, 在设计高水位 3.20 m 对应 50 a 一遇波浪作用下,

方案 2 的越浪量为 $0.04 \text{ m}^3/(m \cdot s)$, 满足规范要求。

3.3 防波堤结构波压力

波浪压力分布是开展流固耦合作用效应研究的基础资料, 也是分析并判断结构抗倾抗滑稳定性的重要依据。通过模型试验, 提取不同测点位置在 3 种设计水位对应 50 a 一遇波浪作用下的波浪压力峰值, 其中原始方案的越浪不满足要求, 因此不作研究, 优化方案 2 是在优化方案 1 的基础上仅仅增加了顶部高程, 因此波压力数据仅提取优化方案 1 的结果, 见图 8。



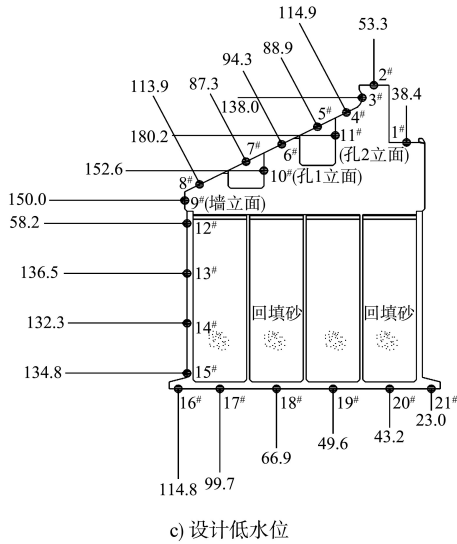


图8 方案1在50 a一遇波浪作用下的压力峰值分布 (单位: kPa)

从图中的波压力测量值可以看出, 极端高水位 4.34 m 对应的波浪作用下, 防浪墙上部 1#~4# 测点受波浪作用最强, 挡墙弯弧面实测最大值为 186.7 kPa; 设计高水位 3.20 m 对应的波浪作用下, 胸墙斜坡中部及消浪孔正面受波浪作用最强, 孔 2 立面实测值为 219.8 kPa; 设计低水位 0.26 m 对应的波浪作用下, 波浪越过堤顶的水量减少, 水体大部分作用在沉箱迎浪侧, 使得 2.95 m 高程处的防浪墙立面 9# 测点及沉箱迎浪侧 12#~15# 测点所受的波浪力相比较前 2 种水位增大, 12# 测点实测值最大为 158.2 kPa。

从分析结果可知, 在 3 种设计水位作用下, 最大波压力峰值均出现在沉箱上部胸墙测点中, 且随着设计水位的下降, 波压力最大位置逐渐下移; 沉箱底部的浮托压力呈梯形分布, 最大浮托压力出现在沉箱外侧底部, 随后向尾部逐渐减小。

4 结论

1) 基于本文所建立的模型, 验证了结构原始方案在极端高、设计高和设计低水位下的防波堤结构稳定性。研究表明, 在极端高水位和设计高水位条件下, 原始方案护底块体发生移动; 在设计低水位条件下沉箱结构发生显著累积位移, 因此结构设计需要进一步加强。

2) 基于模型试验中的越浪量分析结果, 原始

方案越浪量过大, 影响港内泊稳条件; 优化方案通过提高胸墙堤顶高程加强了防波堤的挡浪设计, 有效降低了越浪量。根据模型试验结果, 优化方案 2 (堤顶高程 15.0 m) 可以满足防波堤的越浪设计要求。

3) 在不同设计水位对应的波浪条件作用下, 防波堤受到的最大波压力峰值均出现在沉箱上部胸墙测点中, 且随着设计水位的下降, 最大波压力位置逐渐下移; 沉箱底部的浮托压力呈梯形分布, 最大浮托压力出现在沉箱外侧底部, 随后向尾部逐渐减小。基本规律与经验保持一致。

参考文献:

- [1] MURAKAMI K, KAMIKUBO Y, KATAOKA Y. Hydraulic performances of non-wave overtopping type seawall against sea level rise due to global warming[C]//The proceedings of the eighteenth (2008) international offshore and polar engineering conference (ISOPE-2008). Vancouver: International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 2008: 706-712.
- [2] 高占学, 王芳. 深弧型防浪墙在堤防工程中的应用[J]. 水运工程, 2010(3): 77-80.
- [3] MARTIN F L, LOSADA M A, MEDINA R. Wave loads on rubble mound breakwater crown walls [J]. Coastal engineering, 1999, 37(2): 149-174.
- [4] ROMAŃCZYK W. Instability of nonlinear standing waves in front of a vertical wall [J]. Journal of fluids and structures. 2006, 23(5): 733-753.
- [5] 李雪艳, 付聪, 范庆来, 等. 斜坡堤典型胸墙波浪力的影响因素[J]. 海洋科学, 2015, 39(12): 118-129.
- [6] 李成强, 张志, 孔友南. 中外斜坡堤胸墙波浪力计算对比[J]. 水运工程, 2020(5): 212-217.
- [7] 李玉龙. 不同掩护程度弧形胸墙波压力及越浪量试验研究[J]. 海岸工程, 2010, 29(2): 17-22.
- [8] 姜云鹏, 陈汉宝, 赵旭, 等. 长周期波浪冲击下胸墙受力试验[J]. 水运工程, 2018(5): 35-39.
- [9] 任云, 钟雄华. 波浪作用下斜坡式护岸反射系数试验[J]. 水运工程, 2018(9): 33-37.
- [10] 赵刘群, 赵汝博, 马玉祥. 波浪的非线性对斜坡堤反射和透射性能影响的试验研究[J]. 水运工程, 2021(8): 18-23.

(本文编辑 王传瑜)