



沉箱开孔形式对波浪反射的影响试验研究

刘 强¹, 卓文雅¹, 宋晓龙^{2,3}

- (1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;
2. 天津大学, 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350;
3. 天津大学, 河流海岸工程泥沙研究所, 天津 300350)

摘要: 为了降低码头前沿的波浪反射作用、改善船舶靠泊作业的泊稳条件, 开孔沉箱越来越多地被应用在直立码头工程中, 但相关行业规范尚缺少对沉箱开孔形式的系统性说明。以大连港大窑湾港区四期工程为例, 通过物理模型试验, 重点分析不同沉箱开孔形式对不规则波作用下码头前沿波高反射系数的影响。结果表明: 短周期波浪通常比设计波浪情况下的反射系数要小; 试验断面的消浪性能在设计低水位附近最为理想; 沉箱胸墙设置消浪腔对减小断面波浪反射的效果不明显; 波浪反射系数主要取决于开孔率。

关键词: 直立码头; 开孔沉箱; 波浪反射

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)06-0032-06

Effects of opening types of caissons on wave reflection

LIU Qiang¹, ZHUO Wenya¹, SONG Xiaolong^{2,3}

- (1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;
2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China;
3. Institute for Sedimentation on River and Coastal Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: To reduce the wave reflection at the front of the wharf and improve the berthing stability of ships, more and more perforated caissons are used in quay wall projects, but there still is a lack of systematic explanation on caisson opening types in relevant codes of practice. Taking the fourth phase project of Dayaowan Port area of Dalian Port as an example, we use the physical model experiment to emphatically analyze the effects of different caisson opening types on wave height reflection coefficients at the front of the wharf under the action of irregular waves. The results show that the wave height reflection coefficient is usually smaller driven by short-period wave than designed wave. The wave attenuation performance of test section is best in designed low water level. The wave cavity of caisson parapets takes less effects on reducing the wave reflection. The wave reflection coefficient is mainly dependent on percentage of opening.

Keywords: quay wall; perforated caisson; wave reflection

开孔沉箱能够有效降低波浪反射作用, 进而达到消浪效果, 实现船舶的泊稳作业。对于沉箱前壁和横、纵隔墙角度而言, 圆形和椭圆形开孔对结构受力更佳, 各向受力更趋于均衡,

不会使某一方向的受力过于集中; 从消浪效果看, 我国试验的结果认为矩形开孔更好; 日本标准 *Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan*^[1] 也是推荐采

收稿日期: 2022-08-23

作者简介: 刘强 (1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口水工结构设计。

用矩形长条开孔方案。采用矩形或条形开孔形式主要在于开孔沉箱的消浪理论是基于波浪反射叠加效应, 而不是采用 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》^[2]斜坡防波堤护面块体稳定质量的消浪原理。矩形或条形开孔能最大程度保证同一波向线上通过开孔的波浪断面是一致的, 尽量避免通过断面不一致造成的波能集中或破碎。

对于采用重力式沉箱结构的泊位, 码头前沿一般为较大型或大型的深水岸线泊位, 造成码头前沿的波浪形态大多数为立波——“驻波”。驻波最大的特点是相位相差 0.5 倍波长时, 两个行进方向相反的波列在同一波面上正好相互抵消, 这也就是 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》^[3]规定消能室与入射波波高之比上限采用 0.25 的原因, 可确保码头前沿处入射波与反射波相位正好相差 0.5 倍波长, 但是现实中很少有沉箱消能室宽度达到 0.25 倍波长的情况, 一般将消能室宽度范围取 0.125~0.250 倍波长。

本文以大连港大窑湾港区四期工程 (22[#]~23[#]

泊位) 为例, 通过物理模型试验, 重点分析不同沉箱开孔形式在不规则波作用下的码头前沿波高反射系数, 以确定合理的码头结构优选方案, 为类似工程设计提供参考。

1 模型试验设计

1.1 模型实例

大连港大窑湾北岸地区位于大连市核心区东侧、大窑湾港区北侧的大地半岛区域, 地理位置坐标 (121°54'E, 34°00'N), 属于大连保税区。全湾泊位岸线可分为南岸、北岸和湾底 3 部分。北岸共有 15 个泊位, 集装箱泊位编号由湾底至口门依次为 22[#]~33[#]泊位 (22[#]~23[#]泊位已建成), 连接汽车码头 5[#]~7[#]泊位 (7[#]泊位已建成); 南岸集装箱泊位编号由口门至湾底依次为 1[#]~21[#]泊位 (1[#]~18[#]泊位已建成), 湾底由南至北为汽车码头 1[#]~4[#]泊位 (1[#]~3[#]泊位已建成), 见图 1。大窑湾口面向 SE 方向, 外海波浪传播到工程水域, 经过南北航道、口门、防波堤和地形联合作用, 将发生变形、破碎、波能集中等一系列复杂演化过程。



图1 大连大地半岛大窑湾港区

1.2 试验波要素组合

试验波要素组合见表 1。极端高水位为 5.10 m,

设计高水位为 4.00 m, 设计低水位为 0.44 m。波向为 ENE、E、ESE、SE、SSE 向。

表 1 大连港大窑湾港区湾口外-30 m 处波浪要素

重现期/a	波向	$H_{4\%}/\text{m}$	周期 T/s
50	ENE	4.3	7.1
	E	5.1	7.6
	ESE	5.8	8.8
	SE	6.4	9.4
	SSE	5.5	9.0
25	ENE	3.7	6.7
	E	4.3	7.1
	ESE	4.9	8.2
	SE	5.4	8.7
	SSE	4.8	8.4
10	ENE	2.9	6.2
	E	3.3	6.4
	ESE	3.8	7.3
	SE	4.4	7.8
	SSE	3.9	7.5
5	ENE	2.3	5.7
	E	2.6	5.8
	ESE	3.1	6.5
	SE	3.6	6.9
	SSE	3.3	6.7
2	ENE	1.5	4.9
	E	1.7	4.8
	ESE	2.2	5.4
	SE	2.6	5.6
	SSE	2.4	5.4

2 模型制作

2.1 设备和仪器

2.1.1 波浪水池

试验在交通部天津水运工程科学研究所塘沽工农村试验小区的 120 m×90 m×1 m(长×宽×深)大港池中进行。最大试验水深为 0.7 m。港池配备 1 组可移动式不规则波造波机(每组宽 6 m, 共 8 组), 可造最大波高 0.3 m, 周期 0.5~3.0 s。试验水池见图 2。水池对应造波机尾部和侧面安装了消能网等消能设备, 以尽量避免波浪反射。



图 2 整体波浪模型试验水池

2.1.2 波高测量仪器

波高测量采用北京水科院研制生产的 DS30 型浪高水位仪测量系统。采集仪内置模/数转换器, 巡回采集各通道数据, 单点采样时间间隔为 1.5 ms (约 666 Hz); 64 通道最小采样时间间隔为 10 ms (100 Hz); 128 通道最小采样时间间隔为 20 ms (50 Hz)。该系统可同步测量多点波面过程并进行数据分析, 已经在多个物理模型试验中应用, 准确可信, 每次试验前进行标定, 标定线性度均大于 0.999。

2.2 模型比尺

模型按重力相似准则设计。考虑到港池的尺寸和试验区域范围, 确定模型比尺 1:100。其他比尺为: 长度比尺 $\lambda_L = 100$, 时间比尺 $\lambda_t = \lambda_L^{1/2} = 10$, 波高比尺 $\lambda_H = \lambda_L = 100$, 波周期比尺 $\lambda_T = \lambda_L^{1/2} = 10$, 力比尺 $\lambda_F = \lambda_L^3 = 10^6$, 单宽流量比尺 $\lambda_q = \lambda_L^{2/3} = 10 \sqrt[3]{10}$ 。

2.3 开孔沉箱的制作

开孔沉箱用于南岸小港池西侧泊位岸线和北岸未建设泊位区岸线(结构优化方案)。模型采用木材制作外轮廓(保证外形几何尺寸), 内部加碎石(保证质量及重心位置相似)。模型见图 3。



图 3 开孔沉箱模型实物

2.4 海床地形的制作

考虑由外海-30 m 至大窑湾湾底范围过大, 本文采用 2 次控制方法控制外海波浪: 第 1 次为制作外海-30~-18 m 范围内的海底地形, 模拟试验得到-20 m 等高线水域的外海波浪, 地形模拟范围约为 8.5 km×5.5 km(长×宽); 第 2 次为制作

外海-20 m 工程全域范围内的海底地形和边界, 模拟试验得到工程全水域波浪参数。地形模拟范围约为 $4.5\text{ km} \times 8.8\text{ km}$ 。两次地形模拟范围见图 4。

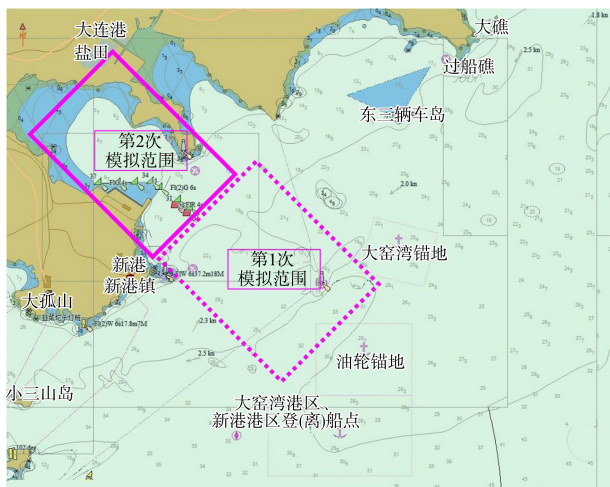


图 4 地形模拟范围

波浪由外海传播至工程水域, 将受到海底地形、岸域边界、周围水工结构物及航道的影响而发生变化; 因此, 在试验过程中, 海底地形的模拟完全按照几何比尺, 将海图地形制作在试验水池中。模型地形由水泥制作, 高程控制网边长设置为 1.0 m , 局部高程变化剧烈区高程控制网边长加密为 0.5 m 。控制点高程由水准仪逐点测量, 控制点高程绝对误差小于 0.1 mm 。控制点之间海底高程依靠人工自然过渡的方法。

2.5 造波边界地形的制作

造波边界波浪视为由外海传播到某一指定水深的波浪。由深水区过渡到真实海底地形的区间内的地形称为造波边界地形。它由 -45 m 水平地形通过斜坡逐步过渡到 -30 m 水平地形, 使得造波机生成的波浪平稳传播到真实海床起始边界。

两次造波边界地形的水平地形均设定宽度为 6 m 。斜坡地形坡度控制在 $1:12 \sim 1:10$, 斜坡至天然海底高程局部依靠人工自然过渡的方法。

3 试验工况组合

3.1 试验结构形式

方案 1 为沉箱开 1 排大孔, 胸墙设置消浪腔, 见图 5a); 方案 2 为沉箱开 3 排小孔, 胸墙设置消

浪腔, 见图 5b); 方案 3 为沉箱开 1 排大孔, 胸墙取消消浪腔, 其他均保持与方案 1 一致; 方案 4 为沉箱开 3 排大孔, 胸墙取消消浪腔, 其他均保持与方案 2 一致。



a) 方案1



b) 方案2

图 5 沉箱模型

3.2 反射系数测量方法

考虑到不同波浪序列可能对反射系数产生一定影响, 对同样频谱波浪, 采用 2 种波浪序列(改变随机种子)进行试验。考虑反射系数分离计算时计算精度受观测位置的影响有一定的波动, 故试验时设置 3 台浪高仪测量, 采用两点法^[4-5]进行分析, 第 1 台浪高仪布置在断面前 2.5 m 处, 与第 2 台间距 $0.2 \sim 0.3$ 倍平均波长, 第 2 台与第 3 台间距 $0.1 \sim 0.2$ 倍平均波长。在不同水位下, 同步记录波面过程, 每组试验重复 3 次, 取 3 次试验结果分析的平均值作为最终反射系数试验结果。

4 试验结果分析与讨论

4.1 试验结果分析

由于地形的影响, 即使在同一等深线上, 不

同位置的波要素也有一定的差别,单个测点波要素代表性不足。因此,试验设置了如图 6 所示的代表 20 m 海图水深处的一个 2[#]测点,和代表 22.5 m

海图水深处的 2 个 3[#]测点 (3-1[#]和 3-2[#])。4 个沉箱开孔方案在不同设计水位、不同入射波浪条件下的反射系数试验结果见图 7。

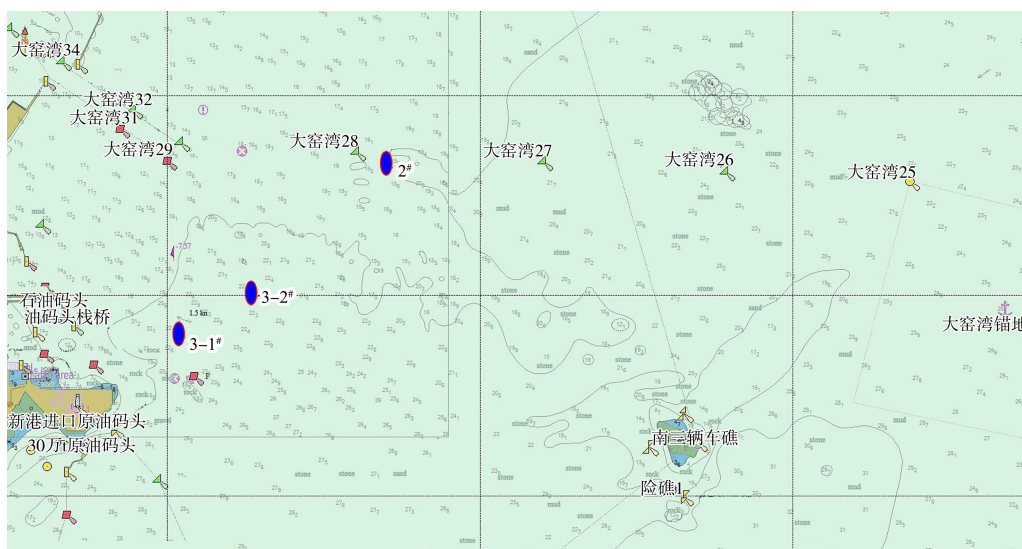
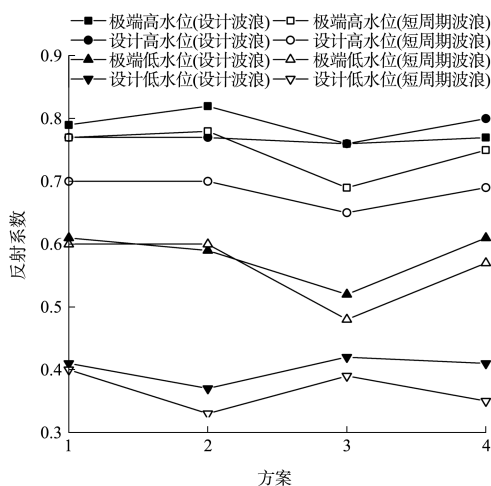
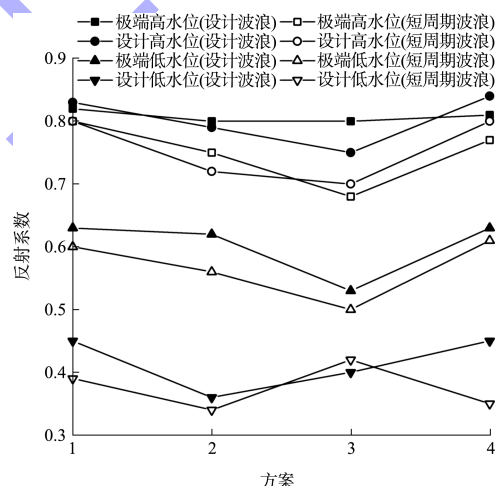


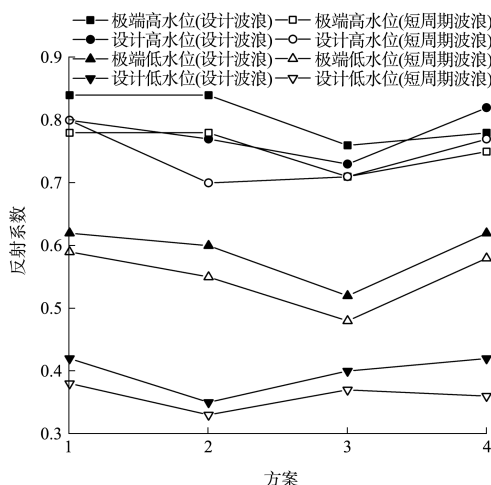
图 6 -30~-18 m 外海地形上部分波浪测量点位置



a) 3-1[#]测点



c) 2[#]测点



b) 3-2[#]测点

图 7 不同沉箱结构方案下的反射系数试验结果

由图 7 可看出: 1) 由于沉箱开孔纵向尺寸与入射波长之比变大, 在不同方案下, 短周期波浪均比设计波浪情况下的反射系数要小, 最大达 5%; 2) 由于设计低水位正好处于消浪孔中间区域, 因而在设计低水位处的波浪反射系数最小 (低于 0.5), 表明了试验断面的消浪性能在该水域附近最为理想; 3) 从方案 1 与 3、方案 2 与 4 的对比可以看出, 沉箱胸墙设置消浪腔, 对减小断面波浪反射的效果不明显, 故可以认为如果不考虑节约胸墙混凝土用量, 胸墙可以不设置消浪腔; 4) 从方案 1

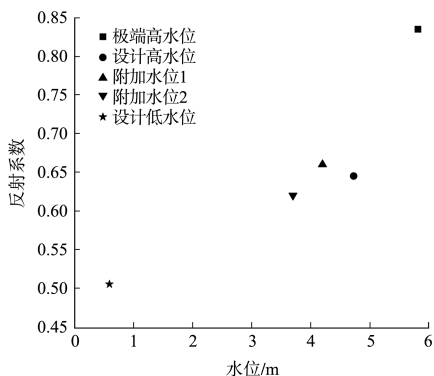
与2、方案3与4的对比可看出, 沉箱胸墙开1排大孔和开3排小孔, 断面波浪反射系数差别很小(不超过6%), 故可以认为2种开孔方案无显著差别, 即波浪反射系数主要取决于开孔率。

4.2 讨论

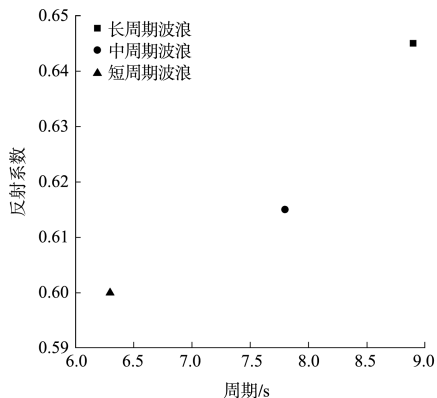
除大连港大窑湾港区采用开孔沉箱外, 在很多工程上都采用了开孔沉箱方案, 如青岛港董家口港区海业莫科瑞通用码头工程、港投通用一/二期工程、华能码头二期工程、日照港石臼港区西区四期工程和威海新港区三/四期工程等。青岛港董家口港区与日照港区地理位置相近, 波浪条件基本一致, 其开孔沉箱方案并未进行物理模型研究, 而是参照日照港石臼港区西区四期工程的物理模型试验结果进行设计。威海港区由于波浪并不大, 采用开孔沉箱除了减少港区的波浪振荡之外, 更多的是起到降低基床顶面应力作用, 因此也并未进行物理模型试验。为了对比分析, 将日照港石臼港区西区四期工程进行的开孔沉箱结构对波浪反射影响物理模型研究结果绘图, 见图8。可以看到, 与图7所示的大连港大窑湾港区开孔沉箱物理模型试验结果类似: 试验断面的消浪性能在设计低水位附近最为理想; 相同水位情况下, 波浪周期越短, 反射系数越小。



a) 沉箱模型



b) 长周期波浪时不同设计水位下的反射系数



c) 设计高水位时不同设计周期波浪下的反射系数

图8 日照港石臼港区西区四期工程的沉箱开孔对波浪反射影响物理模型试验结果

5 结语

- 1) 短周期波浪均比设计波浪情况下的反射系数要小, 最大达5%。
- 2) 由于设计低水位正好处于消浪孔中间区域, 试验断面的消浪性能在该水域附近最为理想。
- 3) 沉箱胸墙设置消浪腔的消浪效果不佳, 可不予采用, 可节约胸墙混凝土用量。
- 4) 波浪反射系数主要取决于开孔率。
- 5) 本文不但强化了开孔沉箱结构本身的优点, 为大连港大窑湾港区四期工程节省了大量投资, 还可为其他类似防波堤结构设计提供参考。

参考文献:

- [1] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan [S]. Tokyo: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2002.
- [2] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [3] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [4] 杨明. 入反射波浪分离方法分析研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [5] 邵利民. 入、反射波浪的分离与反射系数的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2003.

(本文编辑 王璁)