

· 港 口 ·



波浪作用下矩形沉箱墩群 受力规律试验研究^{*}

张亚敬, 刘海源, 刘鸣洋, 陈汉宝

(交通运输部天津水运工程科学研究所, 港口水工建筑技术国家工程研究中心,
工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

摘要: 墩柱式透空码头在波浪作用下的结构受力较复杂, 对于矩形沉箱墩, 国内现行的港口工程规范只解析了波浪正向和45°斜向作用下单个沉箱所受水平总力, 并无墩群中波浪力衰减规律的计算方法, 已有研究也少见相关成果。以茂名某重力墩式散货码头工程为例, 通过开展三维物理模型试验, 研究波浪作用下矩形沉箱墩周围的波高分布及沿程衰减规律、代表性沉箱墩所受水平、侧向和浮托总力及倾覆力矩沿程衰减规律。结果表明: 本工程首先受到波浪作用的5个沉箱墩范围内波高衰减幅度最大; 不同沉箱所受波浪力的沿程衰减幅度, 呈现出与波高沿程衰减一致的规律; 规范中的圆柱形墩的群墩系数计算方法不适用于矩形沉箱墩群结构。

关键词: 波浪力; 矩形沉箱; 墩群; 模型试验

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0055-08

Experimental study of force law on rectangular caisson pier group under waves

ZHANG Ya-jing, LIU Hai-yuan, LIU Ming-yang, CHEN Han-bao

(Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, National Engineering Research Center for Port Hydraulic Construction Technology,

Key Laboratory of Engineering Sediment, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: The structure of pier-column permeable wharf is often exposed to complex forces under the action of waves. For rectangular caisson piers, the current domestic port engineering codes only analyze the total horizontal force of a single caisson under the action of forward and 45° oblique waves. There are neither calculation methods for the attenuation law of wave forces in pier groups, nor related results in existing studies. Taking a bulk cargo terminal project with gravity caissons in Maoming as an example, we carry out three-dimensional physical model experiments to study the wave height distribution around rectangular caisson piers and attenuation laws along the way, and analyze the horizontal, the lateral and the uplift forces and the overturning moment, as well as the attenuation law of wave force along the way of representative caisson piers. The results show that the wave height attenuation amplitude is the largest within the 5 caisson piers firstly exposed to the waves. The attenuation amplitude of the wave force on different caissons along the way shows the same trend as the wave height attenuation. The calculation method for the coefficient of cylindrical pier group in the code is not suitable for the rectangular caisson pier group.

Keywords: wave force; rectangular caisson; caisson array; model experiment

收稿日期: 2021-11-23

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52101316); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(TKS20210405); 天津市科技计划项目(21JCQNJC00480)

作者简介: 张亚敬(1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事海岸与近海工程研究。

通讯作者: 刘鸣洋(1988—), 男, 博士, 助理研究员, 从事海岸与近海工程研究。E-mail: liu_ming_yang@sina.cn

随着港口工程大型化以及深水岸线资源的缺乏，离岸深水码头建设越来越多。重力式码头要求地基基础好，同时深水海域浪大、流急导致施工困难，结构断面庞大且造价高，因此墩柱式透空结构或桩基结构码头成为相对较好的结构形式。由于墩柱式透空结构码头的沉箱墩并不是孤立存在，波浪传播至墩群中时存在墩间反射、绕射，使得群墩之间的波高分布呈现出不同于单墩周围的波高分布规律，从而影响码头面高程设计以及沉箱墩受力计算。我国现行规范对透空式码头面高程的设计并未考虑群墩效应，定义群墩中波浪力衰减程度的群墩系数也仅适用于圆柱形墩，并不能反映矩形墩群中的波浪力变化规律。

关于群墩波浪力分布规律，已有许多研究者开展了相关研究。季新然^[1]通过物理模型试验分析多向不规则波与群墩作用时波浪在大尺度圆形墩柱上的正向力、横向力和爬高，同时建立多向不规则波浪与大尺度墩柱及群墩结构作用的计算方法，给出不同布置形式的群墩系数，发现了不规则波作用下的波浪俘获现象；许佳^[2]建立数值计算方法，对多向不规则波与大尺度群墩结构的作用进行模拟计算，分析不同布置形式群墩受横向力和正向力的变化规律；任效忠等^[3]通过物理模型试验研究不规则波对准椭圆沉箱群墩结构的作用力，分析入射波向、周期、相对间距等因素与沉箱所受波浪力之间的关系，之后又进一步开展模型试验^[4]研究规则波对准椭圆沉箱群墩结构的波浪力，发现与正向波浪力相比，群墩效应对横向波浪力的影响更大，对于大型结构准椭圆沉箱，波浪非线性的影响不容忽视；王永学^[5]提出求解任意截面群墩结构波浪荷载的数值计算方法，对 2 个方形等截面群墩的系数进行研究，探讨群墩截面几何形状不同与群墩间相互影响的关系；周枝荣等^[6]通过物理模型试验，研究矩形重力墩及墩间面板在斜向波浪作用下的波浪力大小及其

群墩折减情况，提出矩形重力墩结构上最大总水平波浪力简化计算公式。可以看出，已有研究绝大多数揭示的是圆柱形群墩受力规律，针对矩形群墩的受力规律研究则远不及对圆柱形墩的研究丰富。因此，需要开展模型试验研究，观察和揭示矩形群墩式码头的墩间波高分布规律以及波浪力在墩间的衰减规律。

本文以茂名某墩式散货码头工程为例，通过开展三维物理模型试验，研究波浪作用下矩形沉箱墩群周围的波高分布及沿程衰减规律，研究代表性沉箱墩所受水平、侧向和浮托总力以及倾覆力矩，研究波浪力沿码头轴线方向的衰减规律。

1 工程概况

本工程位于茂名港博贺新港区大宗干散货作业区中突堤东侧岸线，中突堤西侧岸线为已建的粤电项目配套码头工程。从南向北连续建设 1 个 20 万吨级（M7）、1 个 10 万吨级（M8）和 1 个 5 万吨级散货泊位（M9），水工结构分别按照 30 万、20 万和 10 万吨级预留。拟建工程码头结构总长度 960 m，其中 20 万吨级泊位长度 447 m，10 万吨级泊位长度 276 m，5 万吨级泊位长度 237 m，栈桥结构长度 401.7 m，均采用透空式墩台结构，墩台之间采用大跨度预应力梁连接。距离码头前沿线 102.4 m 处为已建的粤电防波堤。工程位置如图 1 所示，工程区域平面布置见图 2。



图 1 工程位置

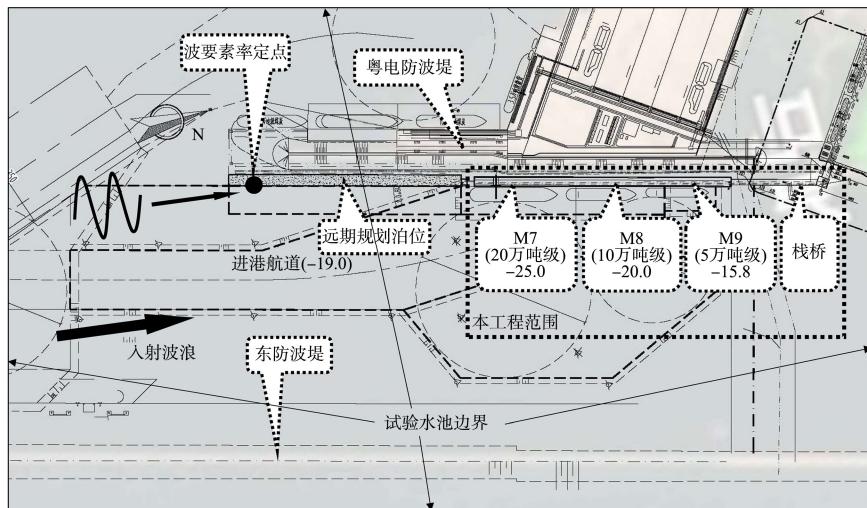


图2 工程平面布置 (单位: m)

本工程的码头和栈桥结构形式为重力式沉箱墩结构。码头顶面高程 9.0 m, 码头前沿设计底高程依泊位等级不同分别为-25.0、-20.0 和-15.8 m。沉箱墩之间主要采用预应力箱梁连接, 轨道梁高 3.8 m, 其余箱梁高 2.5 m。端头系缆墩与码头之间采用人行钢桥连接。码头沉箱墩布置见图3, 代表性矩形沉箱墩结构(M7 泊位)见图4。本工程 M7 和 M8 泊位沉箱墩有单沉箱和双沉箱两种形式, 其中双沉箱为两个单沉箱并列排放组成。单沉箱主体截面长、宽分别为 27.55、15.4 m, 底板长、宽分别为 31.55、19.4 m; 两个单沉箱组合成双沉箱结构以后, 主体截面在沿码头轴线方向的尺寸为 30.9 m(对应底板尺寸为 34.9 m), 沿码头前后方向尺寸与单沉箱长度一致, 即 27.55 m(对应底板尺寸为 31.55 m)。所有泊位沉箱胸墙前部结构底面高程为 1.5 m, 后部结构底面高程为 2.5 m。拟建工程码头后方的粤电码头防波堤建设初期兼顾陆域堆场形成和抵抗外海波浪作用, 但现状条件下已建的港区东防波堤和西防波堤(抛石斜坡堤结构, 内坡护面为扭王字块体或大块石)对粤电防波堤附近的水域形成了良好的掩护条件, 波浪水文条件已明显改善。在东西防波堤的掩护下, 外海波浪传播至本工程水域时, 波要素分布变得相对集中。根据相关物理模型试验报告^[7], 粤电防波堤堤头附近的测点(图2)波高出现最大值对应的波浪方向为偏向该防波堤并与其轴线夹角为

10°。该测点在不同设计水位下的波要素, 如有效波高 $H_{13\%}$ 和平均周期 T 等波要素见表1。

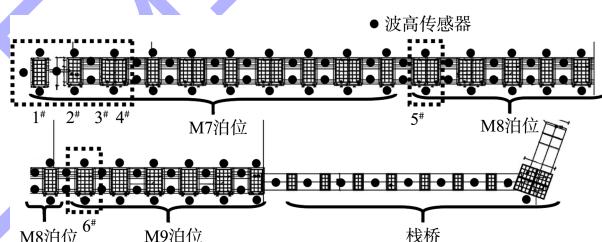
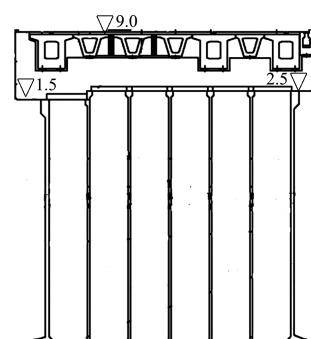
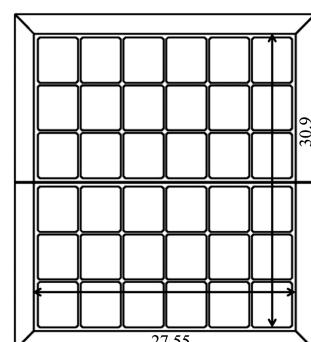


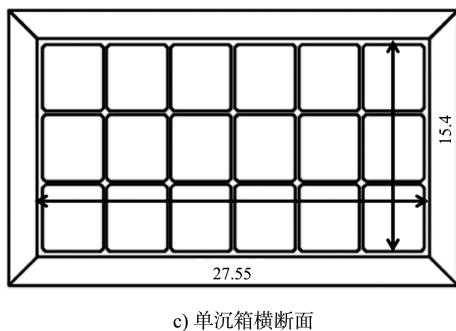
图3 沉箱墩布置及波高传感器分布



a) 沉箱纵断面



b) 双沉箱横断面



c) 单沉箱横断面

图 4 代表性沉箱墩(M7 泊位)结构断面(单位: m)

表 1 率定点波要素

水位/m	重现期/a	$H_{13\%}/m$	\bar{T}/s
极端高水位 4.34	50	5.4	11.3
	10	4.4	10.0
设计高水位 3.20	50	4.9	11.3
	10	4.3	10.0
设计低水位 0.26	50	4.3	11.3
	10	4.2	10.0

2 试验方法与试验工况

2.1 模型制作

模型试验在交通运输部天津水运工程科学研究院综合试验厅中完成。模型按重力相似准则设计,采用正态、定床模型。试验场地为 55 m × 42.5 m × 1 m(长×宽×高)的矩形水池(试验水池边界见图 2),采用几何比尺 λ_L 为 55。模型中粤电防波堤、东西防波堤和本工程沉箱墩的护底以及沉箱墩与粤电防波堤之间的护坡结构中的各种块石按重力比尺挑选,粒径级配符合《防波堤与护岸设计规范》^[8]以及《波浪模型试验规程》^[9]的要求。本工程港池内的水底地形包括航道、码头前沿以及天然地形,按照试验规程采用水准仪进行高程控制,偏差控制在 ±1 mm 以内;工程区域所有结构的平面尺寸及位置偏差控制在 ±1 cm 以内。矩形沉箱墩、预应力箱梁和码头面板等根据设计图纸采用木板组装制作,并根据试验规程和设计水位在沉箱墩的侧立面和底板预留安装压强传感器的孔位。

2.2 试验设备及方法

造波采用可移动摇板式造波机及其控制系统。模型造波时,由计算机根据输入的造波参数计算出目标波浪的板前波浪信号,并按一定算法将其

转换成相当于造波板运动速度和位置的数据,由伺服驱动器输出脉冲信号控制伺服电机的转速和转动的角度,从而造出期望的波浪。本模型试验研究采用不规则波进行,不规则波根据《港口与航道水文规范》^[10]采用 JONSWAP 谱进行频谱模拟,其解析式为:

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

$$\beta_j = \frac{0.06238}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9+\gamma)^{-1}} \cdot (1.094 - 0.01915\ln\gamma) \quad (2)$$

$$T_p = T_s / [1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}] \text{ 或 } \bar{T} / [1 - 0.532(\gamma + 2.5)^{-0.569}] \quad (3)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & (f \leq f_p) \\ 0.09 & (f > f_p) \end{cases} \quad (4)$$

式中: γ 为谱峰因子,取 3.3; f_p 为峰频,是谱峰周期 T_p 的倒数; $S_\eta(f)$ 为风浪频谱($m^2 \cdot s$); $H_{1/3}$ 为有效波高(m); f 为频率(s^{-1}); T_s 为有效周期(s); \bar{T} 为平均周期(s)。

本试验水位采用表 1 的设计水位。根据试验要求,各个试验水位依据给定的波浪要素进行率定,率定误差控制在 0%~5% 范围内,产生严格控制的正向偏差以保证实际造波波要素偏差的一致性。每组波要素的波列都保持波个数在 100 以上,将最后得到的造波参数存储在计算机中。正式试验前,均应用小波持续作用一段时间。模型试验采用 TK-2008 型动态水位测量系统(仪器精度为 1.0 mm)对波高进行采集分析。波高传感器布置在每个沉箱的前沿、后沿以及之间(图 3),以记录波浪在沉箱之间的分布情况和沿程衰减规律。

各个矩形沉箱墩所受前后向、侧向和浮托总力采用两种测力方式取得,其一为利用 2010 型总力仪直接测量总力;其二为利用布置在沉箱侧立面和底板的若干压强传感器,测得压强值与其代表面积进行积分得到各个方向的总力。总力仪测力原理为:在两个平整的刚性矩形面板之间的 4 个角上分别布置 4 个三维测力天平,其中一个矩形

面板与所测结构刚性固接, 另一个矩形面板与刚性足够大的固定支架固接, 所测结构形心在平面上的投影与传感器矩形面板的形心重合; 结构所受的力传递到与其固接的总力仪时, 每个测力天平可测得其所受的 3 个分力 F_{xn} 、 F_{yn} 和 F_{zn} ; 根据六分力原理, 由所有测力天平上的共计 12 个分力可计算得出结构整体所受的 6 个分力, 即水平总力 F_x 、侧向总力 F_y 、浮托总力 F_z 、 x 轴力矩 M_x 、 y 轴力矩 M_y 和 z 轴力矩 M_z 。各个力的关系见式(5), 力的分布见图 5。

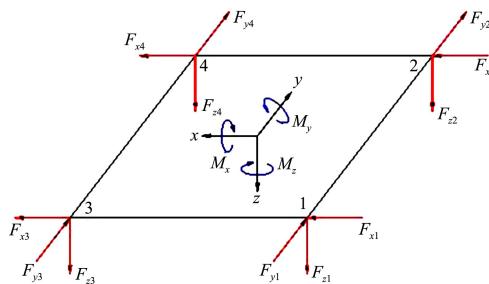


图 5 总力仪原理

$$\left\{ \begin{array}{l} F_x = F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4} \\ F_y = F_{y1} + F_{y2} + F_{y3} + F_{y4} \\ F_z = F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} + F_{z4} \\ M_x = \frac{1}{2} [(F_{z2} + F_{z4}) - (F_{z1} + F_{z3})] L_y \\ M_y = \frac{1}{2} [(F_{z3} + F_{z4}) - (F_{z1} + F_{z2})] L_x \\ M_z = \frac{1}{2} [(F_{y3} + F_{y4}) - (F_{y1} + F_{y2})] L_x + \frac{1}{2} [(F_{x1} + F_{x3}) - (F_{x2} + F_{x4})] L_y \end{array} \right. \quad (5)$$

式中: L_x 和 L_y 分别为每个力传感器之间在 x 和 y 方向上的距离。

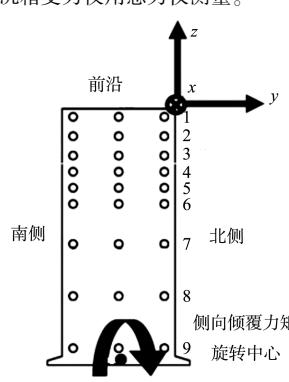
对于由压强值积分得到总力的方式, 依据《波浪模型试验规程》和试验技术要求, 在沉箱结构的底面和侧面布置相应数量的压强传感器, 其中沉箱上部静水面附近布置的传感器密度比下部大, 综合考虑不同设计水位, 并保证能够准确捕捉到波峰波谷变化导致的沉箱壁面所受波压强的变化。波压力数据通过 SG2008 型数据采集系统进行采集分析, 试验中连续采集至少 100 个波作用的波压

力过程, 模型采样的时间间隔均为 0.01 s。试验时在静水条件下, 对所有测点标零, 在静水面以下的测点以此时的静水压强作为对应测点的零点, 在静水面以上的测点以此时的大气压强作为零点。试验采集到的压强值为测点实际压强与标零时测点对应压强的差值。将沉箱置于 x 、 y 、 z 坐标轴所构成的三维直角坐标系内, 然后将各测点所代表的压强和面积在该坐标系 x 、 y 、 z 3 个方向分别进行投影, 再由各测点测得压强过程线, 利用积分得到在 x 、 y 、 z 3 个方向所受到的波浪力, 最后统计其所受总的水平力 F_x 、侧向力 F_y 和浮托力 F_z 。对于力的方向规定为: F_x 与 x 轴正方向相同为正, 反之为负, F_y 和 F_z 的规定与 F_x 相同。将沉箱沿前后和两侧方向的倾覆力矩的旋转中心定义为沉箱底板两个方向的中心线, 则结合每个测点受力所对应的力臂, 可以得到沉箱在前后以及两侧的总倾覆力矩, 即 M_y 和 M_x 。压强传感器的布置方式如图 6 所示, 图中箭头所指方向分别定义了 x 、 y 、 z 3 个方向的总力以及沿前后和两侧倾覆力矩的正方向。同时, 将总力仪得到的力和力矩与图 6 所示坐标系相统一。

表 2 试验工况

泊位	沉箱位置	极端高水位	设计高水位	设计低水位
M7	1#	✓	✓	✓
	2#	✓	✓	✓
	3#	✓	✓	✓
	4#	✓ *	✓ *	✓ *
M8	5#	✓	✓	✓
M9	6#	✓	✓	✓

注: * 为该沉箱受力仅用总力仪测量。



a) 前沿立面

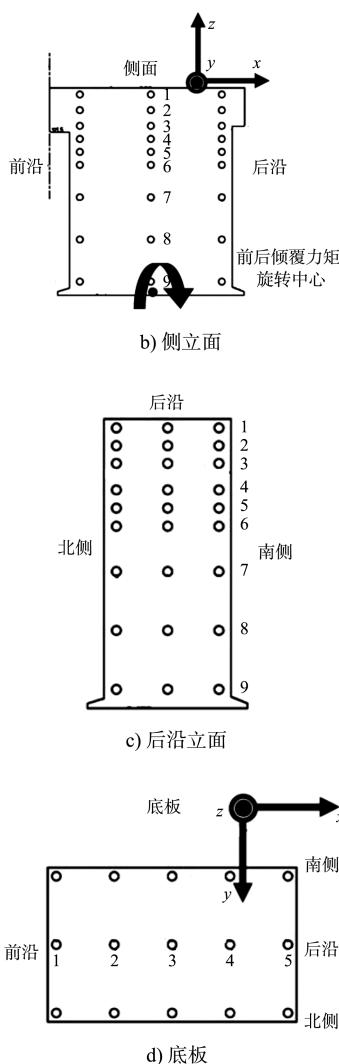


图 6 压强传感器布置方式以及本文定义坐标系

2.3 试验工况

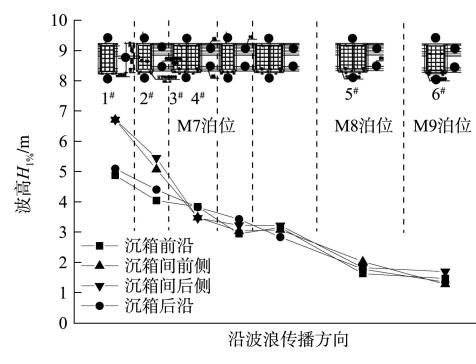
本文针对该工程实例的不同泊位的沉箱间波高分布以及代表性沉箱墩所受的波浪力变化规律进行研究。观察在极端高水位、设计高水位和设计低水位，重现期为 50 和 10 a 的波浪条件下，沉箱间波浪传播现象和波高沿程衰减规律，揭示各泊位代表性矩形沉箱墩所受波浪力的沿程变化规律。对于沉箱间波高分布，本模型试验的沉箱墩上均不放置预应力箱梁，以排除预应力箱梁与水体接触对沉箱间波高产生的干扰。对于波浪力，沿码头轴线方向选取 M7 泊位的系缆墩沉箱、第 1 个单沉箱、第 1 个双沉箱南侧沉箱和第 1 个双沉箱北侧沉箱，选取 M8 泊位第 1 个双沉箱南侧沉箱，选取 M9 泊位第 1 个单沉箱，以进行墩群中波浪力沿程变化规律的研究。将上述代表性沉箱按

顺序进行编号 1#~6#，其位置如图 3 中虚线框和标记所示，试验工况和组次见表 2。

3 试验结果与分析

3.1 沉箱间波高分布

试验中对港区的波浪传播情况进行观察，发现港池和航道存在挖深的情况下，加上粤电防波堤的影响，波浪经过率定点后传至本工程区域时，其传播方向基本与码头轴线方向一致。通过波高传感器所采集的数据发现，不同水位不同重现期波浪条件下，该码头沉箱墩区域波高沿程分布呈现出相似的规律，即：受沉箱侧面的阻水和反射的影响，沿码头轴线方向，位于 M7 泊位南端 5 个沉箱墩范围内波高衰减幅度最大。以最不利的极端高水位重现期 50 a 的波浪作用为例，M7 泊位 1# 墩南侧测点 $H_{1\%} = 7.38 \text{ m}$ ，随后沿码头轴线方向逐渐衰减，至 M7 泊位第 6 个沉箱时 $H_{1\%} = 3.07 \text{ m}$ ，波高衰减 58.4%；至 M8 泊位的 5# 墩时 $H_{1\%} = 1.87 \text{ m}$ ，波高衰减 74.7%；至 M9 泊位所有沉箱 $H_{1\%}$ 均在 1.40 m 左右，波高衰减 81.0%。极端高水位重现期 50 a 波浪条件下代表性沉箱四周 $H_{1\%}$ 分布沿程变化如图 7 所示，其中图 7b) 为归一化的波高值，其定义为该沉箱的前沿、后沿、沉箱间前侧或沉箱间后侧位置的波高与 M7 泊位 1# 墩四周相应位置波高的比值。对波高沿程衰减幅度最大的 M7 泊位南端 5 个沉箱区域的波高分布进行观察可知：受相邻沉箱侧壁的入射波与反射波叠加的影响，波高分布呈现两沉箱间波高 > 沉箱前沿波高 > 沉箱后沿波高的规律；而随着波高由南向北沿程衰减，其余位置各沉箱四周波高差别也逐渐减小。



a) $H_{1\%}$

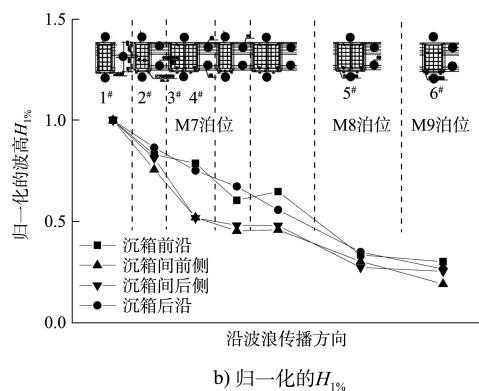


图 7 极端高水位重现期 50 a 波浪条件下代表性沉箱 $H_{1\%}$ 波高沿程变化

3.2 沉箱受力

根据表 2 所列试验工况, 对选取的不同泊位的沉箱进行受力测量, 结果见表 3、4。其中表 3 为首先受到波浪作用的 M7 泊位系缆墩(1#墩)的受力结果, 可以看出, 由总力仪直接测量得到的沉箱在各个方向所受波浪力和力矩, 与由压强传感器所测压强值积分所得结果较为接近, 且呈现出的随设计水位和波浪重现期的变化规律是一致的, 即沉箱所受的水平力 F_x 、侧向力 F_y 、浮托力 F_z 以及侧向倾覆力矩 M_x 和前后倾覆力矩 M_y 均与设计水位和波高呈正相关。以上结果也验证了本文采用的模型试验方法以及试验过程。

表 3 M7 泊位 1#墩受力结果

水位	重现期/ a	F_x/MN		F_y/MN		F_z/MN		$M_x/(\text{MN}\cdot\text{m})$		$M_y/(\text{MN}\cdot\text{m})$	
		总力仪 测量	压强传感 器积分	总力仪 测量	压强传感 器积分	总力仪 测量	压强传感 器积分	总力仪 测量	压强传感 器积分	总力仪 测量	压强传感 器积分
极端高水位	50	13.16	11.19	33.97	29.84	10.06	9.04	591.31	486.59	226.42	215.20
	10	8.92	7.90	23.68	22.76	6.91	7.12	413.34	319.19	164.38	148.44
设计高水位	50	9.69	8.91	25.09	22.83	8.31	8.21	462.45	402.33	169.24	141.71
	10	8.70	7.98	19.88	17.69	5.99	5.85	313.75	285.39	150.62	133.39
设计低水位	50	8.68	8.42	19.77	16.38	5.17	5.22	322.89	302.17	146.11	137.69
	10	7.98	7.09	15.19	13.50	3.73	3.34	244.92	224.08	128.98	112.00

表 4 为所有选取的代表性沉箱(1#~6#墩)在极端高水位和重现期 50 a 的波浪条件下, 所受波浪力的对比。极端高水位重现期 50 a 波浪条件下代表性沉箱受力沿程变化如图 8 所示, 其中纵坐标为归一化的各沉箱受力值, 其定义为该沉箱在某个方向的总力(F_x 、 F_y 或 F_z)或倾覆力矩(M_x 或 M_y)与 M7 泊位 1#墩所受相应的力或力矩的比值。可

以看出, 不同沉箱所受波浪力的沿程衰减幅度, 呈现出与沉箱周围波高沿程衰减情况一致的规律, 即: 作用在 M7 泊位 3#和 4#墩的波浪力相比 M7 泊位 1#墩所受波浪力已经发生了很大程度的衰减; 从 M7 泊位 3#和 4#墩开始沿码头轴线方向向北, 直到 M8 和 M9 泊位, 沉箱所受波浪力不再有明显衰减。

表 4 极端高水位下重现期 50 a 波浪的不同泊位代表性沉箱墩受力结果

泊位	沉箱位置	F_x/MN		F_y/MN		F_z/MN		$M_x/(\text{MN}\cdot\text{m})$		$M_y/(\text{MN}\cdot\text{m})$	
		总力仪 测量	压强传感 器积分	总力仪 测量	压强传感 器积分	总力仪 测量	压强传感 器积分	总力仪 测量	压强传感 器积分	总力仪 测量	压强传感 器积分
M7	1#	13.16	11.19	33.97	29.84	10.06	9.04	591.31	486.59	226.42	215.20
	2#	6.81	5.75	25.57	24.29	9.83	8.82	580.33	515.65	96.63	97.24
	3#	6.05	5.19	16.63	14.10	5.74	5.01	296.79	263.74	71.54	62.60
	4#	5.93	-	12.56	-	5.46	-	253.73	-	69.75	-
M8	5#	4.97	4.27	6.52	5.57	4.31	3.66	120.74	108.50	69.87	67.41
M9	6#	4.22	3.63	6.26	5.50	4.12	3.52	105.89	93.68	60.53	56.85

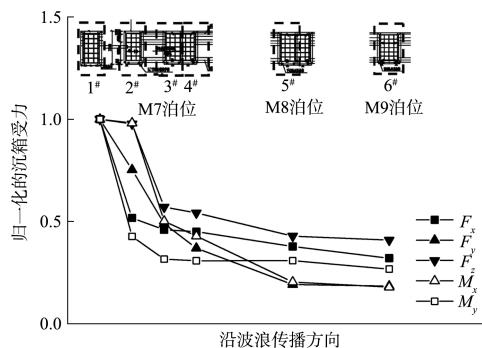


图 8 极端高水位重现期 50 a 波浪条件下
代表性沉箱受力沿程变化

3.3 波浪力衰减规律

本文的矩形沉箱墩形成了串列式的墩群，波浪在矩形沉箱墩组成的墩群中的衰减导致的沉箱所受波浪力的衰减规律，尚未有试验进行研究。本文针对 M7 泊位 1#~3# 墩的串列结构进行群墩系数计算。由于波浪入射方向与码头轴线走向非常接近，故本文研究 y 方向的波浪侧向总力 F_y 的变化规律。根据《港口与航道水文规范》中群墩系数的定义和计算方法，对以上选取的 3 个沉箱墩结构所受 y 方向的波浪总力 F_y 的沿程衰减情况进行计算，并与模型试验所得结果进行对比。《港口与航道水文规范》定义的参数 k （由谱峰周期 T_p 对应的波长 L_p 定义的波数， $k = 2\pi/L_p$ ，得 0.03）和 D （圆柱体直径，本文定义为矩形沉箱上垂直于码头轴线方向的尺度，即矩形沉箱沿码头前后方向的长度，取 27.55 m），对于本文矩形沉箱的 $kD = 0.83$ 。则根据规范计算所得群墩系数为：M7 泊位 2# 墩（距离 1# 墩 45 m），群墩系数为 0.99；M7 泊位 3# 墩（距离 1# 墩 90 m），群墩系数为 0.96。然而，本文模型试验得到的对应沉箱在 y 方向所受侧向力 F_y 的归一化结果分别为 0.75 和 0.49，与规范计算所得结果相差较大。这是因为矩形沉箱墩存在较大面积的直立壁面，一方面阻水面积较大，另一方面波浪在沉箱间多次反射，致使波能衰减的幅度相比在圆柱形墩群中明显更大。因此，针对矩形沉箱组成结构的群墩系数计算，《港口与航道水文规范》的圆柱形墩的群墩系数计算方法不再适用。在后续工作中应开展系统性的试验研究，以得到适用于矩形沉箱的群墩系数计算方法。

4 结论

1) 受沉箱侧面的阻水和反射的影响，沿码头轴

线方向，位于 M7 泊位南端 5 个沉箱墩范围内波高衰减幅度最大；受相邻沉箱侧壁的入射波与反射波叠加的影响，波高分布呈现两沉箱间波高 > 沉箱前沿波高 > 沉箱后沿波高的规律，随着波高由南向北沿程衰减，其余位置各沉箱四周波高差别逐渐减小。

2) 不同沉箱所受波浪力的沿程衰减幅度，呈现出与沉箱周围波高沿程衰减情况一致的规律。作用在 M7 泊位 3# 和 4# 墩的波浪力相比 M7 泊位 1# 墩所受波浪力已经发生了很大程度的衰减；从 M7 泊位 3# 和 4# 墩开始沿码头轴线方向向北，直到 M8 和 M9 泊位，沉箱所受波浪力不再有明显衰减。

3) 矩形沉箱墩阻水面积较大，且波浪在沉箱间多次反射，致使波能衰减的幅度相比在圆柱形墩群中明显更大。针对矩形沉箱组成结构的群墩系数计算，规范中的圆柱形墩的群墩系数计算方法不再适用。

参考文献：

- [1] 季新然.多向不规则波浪与大尺度群墩作用的研究[D].大连:大连理工大学, 2015.
- [2] 许佳.多向波浪对群墩作用的模拟研究[D].大连:大连理工大学, 2018.
- [3] 任效忠, 王永学, 王国玉.准椭圆沉箱群墩结构波浪力试验研究[J].大连理工大学学报, 2009, 49(6): 944-950.
- [4] 任效忠, 于博, 马玉祥, 等.规则波作用下准椭圆沉箱群墩波浪力试验分析[J].船舶工程, 2015, 44(2): 125-129, 135.
- [5] 王永学.大尺度方形群墩结构的波浪荷载[J].海洋通报, 1991, 10(4): 66-71.
- [6] 周枝荣, 邹颋.斜向波作用下矩形重力墩式码头波浪力研究[J].中国港湾建设, 2019, 39(9): 32-36.
- [7] 大连理工大学.茂名港博贺新港区东区化工码头工程 E10~E13 泊位波浪整体物理模型试验研究报告[R].大连:大连理工大学, 2017.
- [8] 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.
- [9] 南京水利科学研究院.波浪模型试验规程: JTJ/T 234—2001[S].北京: 人民交通出版社, 2001.
- [10] 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.

(本文编辑 王璁)