



## 不规则波作用下堤顶防浪墙波浪力试验研究\*

杨雨树<sup>1</sup>, 刘德振<sup>1</sup>, 张万威<sup>1,2,3</sup>, 周伊帆<sup>4</sup>, 李国库<sup>1</sup>, 严士常<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学, 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

3. 河海大学 水科学研究院, 江苏 南京 210098; 4. 河海大学 海洋学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 针对堤顶挡水前沿防浪墙高程较高、视线效果较差的问题, 通过物理模型试验进行不规则波作用下堤顶防浪墙波浪力试验研究, 系统地测量在不同波要素、水深和防浪墙位置条件下防浪墙的水平波浪力和浮托力, 并与规范给出的公式计算值进行对比分析。试验结果表明, 在试验条件下, 不规则波作用于防浪墙迎浪面产生的相对压强随防浪墙相对高度增加先增大后减小, 在相对高度为0.5左右达到峰值, 底部相对压强分布并无明显规律; 由于护岸工程的消波作用, 水平总波浪力和浮托力实测值普遍小于理论值; 水平总波浪力和浮托力总体随周期、波高、墙前水深的增大而增大; 防浪墙相对位置后移0.1, 水平波浪总力减少约14%, 浮托力减少约5%。总结得出的防浪墙受力规律可为实际工程设计提供参考。

**关键词:** 海堤; 防浪墙; 不规则波; 波浪力; 物理模型试验

中图分类号: U656.31+4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)08-0047-10

### Experimental study of wave force on roof wall of a levee under irregular wave action

YANG Yushu<sup>1</sup>, LIU Dezhen<sup>1</sup>, ZHANG Wanwei<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Yifan<sup>4</sup>, LI Guoku<sup>1</sup>, YAN Shichang<sup>1,2</sup>

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of Coastal Disaster and Protection of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Institute of Water Science and Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China;

4. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Addressing the issues of poor visibility and high elevation at the forefront of the wave wall on the top of the embankment, an experimental study on the wave forces acting on the embankment wave wall under irregular waves is conducted through physical modeling tests. The horizontal wave forces and uplift forces on the wave wall are systematically measured under different wave parameters, water depths, and wave wall positions, and compared with the calculated values obtained from established formulas. The experimental results indicate that, under the test conditions, the relative pressure exerted by irregular waves on the wave-facing side of the wave wall initially increases and then decreases as the relative height of the wave wall increases, peaking at a relative height of approximately 0.5, with no discernible pattern in the distribution of relative pressure at the bottom. Due to the wave dissipation effect of the revetment project, the measured values of total horizontal wave force and uplift force are lower than the theoretical values. The total horizontal wave force and uplift force generally increase with the increase in wave period, wave height, and water depth in front of the wall. When the relative position of the wave wall is moved backward by 0.1, the total horizontal wave force decreases by about 14%, and the uplift force decreases by about 5%. The force distribution patterns of the wave wall are summarized, providing a reference for practical engineering design.

**Keywords:** seawall; wave wall; irregular wave; wave force; physical modeling test

收稿日期: 2024-11-13

\*基金项目: 国家大学生创新训练项目(202410294065z)

作者简介: 杨雨树(2004—), 男, 从事波浪与建筑物相互作用研究。

通信作者: 严士常(1980—), 男, 副教授, 从事波浪与建筑物相互作用研究。E-mail: yanshichang@hhu.edu.cn

海堤临海而筑,主要用于保护临海陆地免受海水侵蚀破坏,是抵御潮水、防御台风的重要设施。当护岸后方为陆域或者堤顶做通道、堤内侧兼做码头时,常在堤顶临海侧设置防浪墙,其所受的外力主要为波浪力<sup>[1]</sup>。根据国内外理论及试验研究,影响斜坡堤防浪墙波浪力的主要因素有波浪要素、墙底高程、肩宽大小、掩护情况、斜坡堤坡度5个方面<sup>[2]</sup>。对比国际目前最常用的波浪力计算公式可得:1)适用范围上,国标公式和Martin公式<sup>[3]</sup>适用范围较广,其余公式均有一定的限制范围。2)计算参数上,Martin公式和改进的Pedersen公式计算参数均涵盖了以上5个方面的因素,而Jensen & Bradbury公式仅通过试验得出的不同结构类型的经验系数考虑上述因素的影响,指导性不足<sup>[4-5]</sup>。

堤顶防浪墙波浪力研究多集中于不同形式防浪墙的受力情况及不同波要素对波浪力的影响,据烈红<sup>[6]</sup>通过物理模型试验发现,直立式防浪墙在入射波作用下产生的压强沿防浪墙迎浪面不是均匀分布的。Anand等<sup>[7]</sup>对随机波作用下弧形防浪墙的水动力学特性进行研究,比较了2种不同结构形式防浪墙上波浪压强的分布特征。李玉龙<sup>[8]</sup>对不同掩护程度弧形防浪墙上的波浪压强和越浪量进行试验研究。范可等<sup>[9]</sup>通过规则波试验,对直立防浪墙和不同倾角的挡浪板式防浪墙在不同条件下波浪力的影响进行分析比较。于珍等<sup>[10]</sup>和雷雪莲等<sup>[11]</sup>基于开源软件OpenFOAM数值模拟对防浪墙波压力分布和波浪荷载进行研究。于龙基等<sup>[12]</sup>利用FLUENT软件的二次开发功能开展对不同断面形式防浪墙迎浪面波压力的数值研究。总体而言,国内外学者对不同位置防浪墙所受波浪力的研究较少。

JTS 145—2015(2022版)《港口与航道水文规范》<sup>[13]</sup>中斜坡堤堤顶防浪墙波浪力的计算方法是

基于河海大学的研究成果制定的,并未系统考虑斜坡堤坡度与形式、护面人工块体形式及防浪墙位置等因素<sup>[14]</sup>。JTS-154—2018《防波堤与护岸设计规范》<sup>[15]</sup>指出,当防浪墙前有块体或块石掩护且掩护的宽度至少为2排、高度形成全掩护时,水平波浪力可折减0.6~0.7。对于重要的防波堤或海堤工程,应进行断面物理模型试验对其波浪力进行测定,以保证工程安全<sup>[16]</sup>。

本文在波浪水槽中进行不规则波试验,系统考虑波要素、水深和防浪墙位置等因素对波浪力的影响。针对防浪墙波浪力进行试验研究,测得不同影响因素下防浪墙上各点的波浪压强,计算出水平波浪总力和浮托力,与规范公式计算结果进行比对分析。

## 1 物理模型试验概述

### 1.1 试验设备及研究方法

试验在河海大学港口航道工程与海岸科学实验中心波浪水槽中进行,水槽长70 m、宽1.0 m、高1.5 m,一端安装不规则造波机,另一端设置消波系统。水槽纵向分为两部分,一部分铺设试验断面,另一部分用以消除波浪的二次反射。

研究遵循JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》<sup>[17]</sup>进行试验设计。试验采用不规则波作为入射波,具体采用JONSWAP谱生成波形,谱峰参数 $\gamma=3.3$ 。波高测量采用高精度电容式波高仪,采用DS30多功能自动采集系统采集;波压力采用点压力仪量测,采用DJ800多功能自动采集系统采集;由计算机进行数据统计分析。

试验中防浪墙模型高120 mm、底宽117 mm,见图1。迎浪面和底部均等距布置5个压力探头。将率定后的特征波要素输入计算机,产生造波讯号,控制造波机产生相应的不规则波序列,每组试验重复3次,共进行153组试验,试验中波浪冲击防浪墙瞬间见图2。

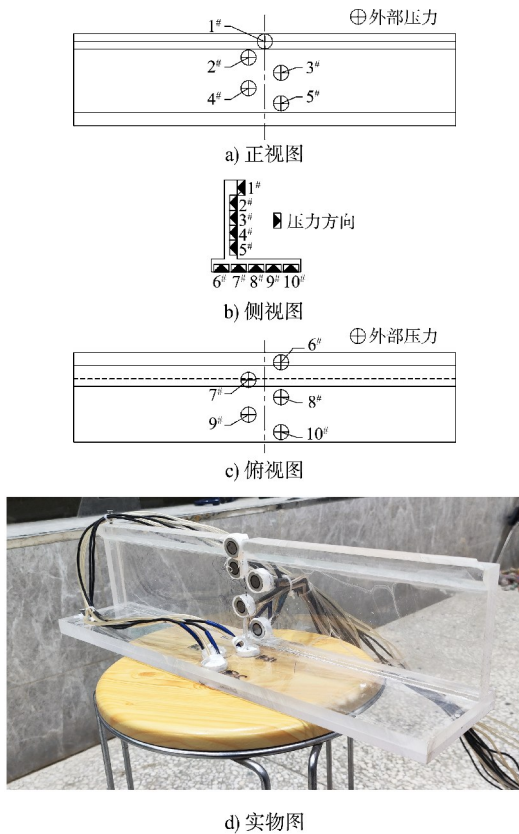


图 1 安装压力探头的防浪墙模型

Fig. 1 Model of the wave wall with pressure probe installed

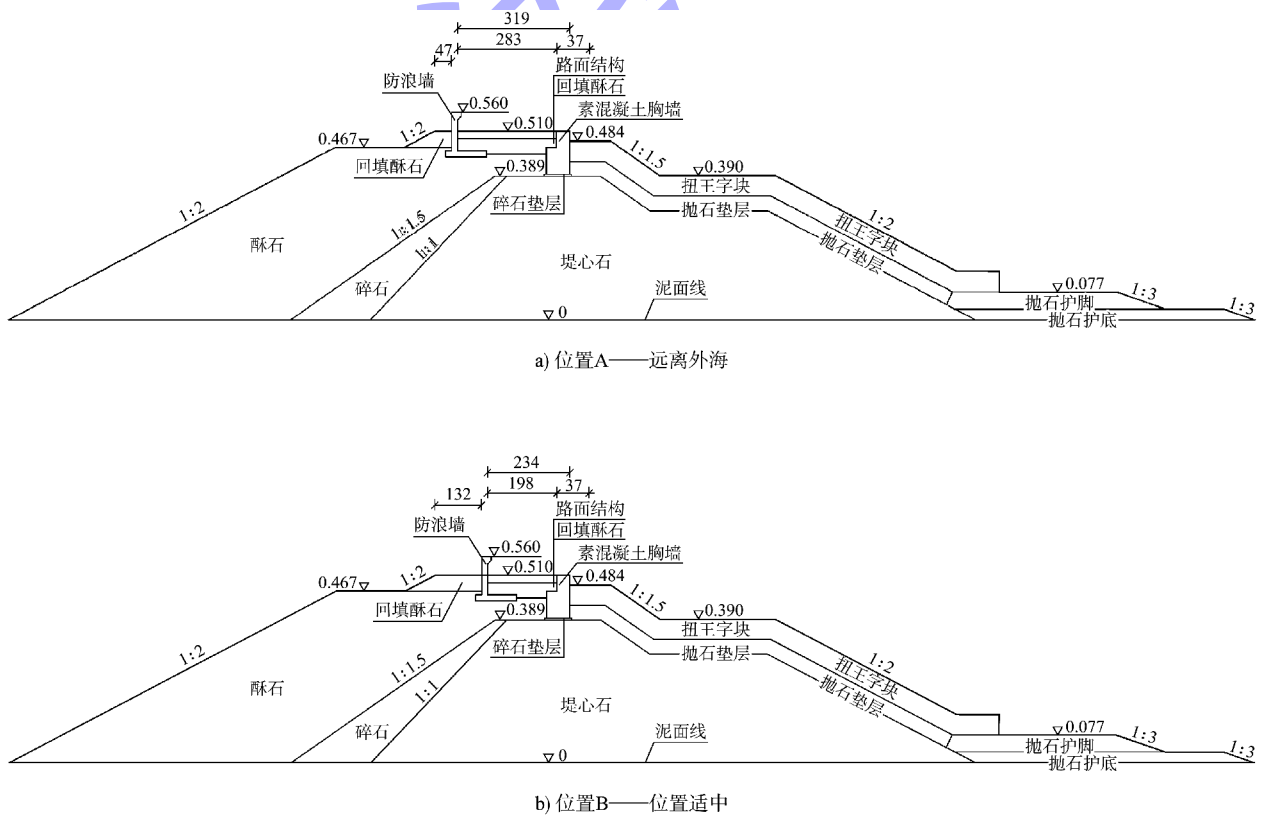


图 2 波浪冲击防浪墙瞬间

Fig. 2 Moment of wave impacting wave wall

### 1.2 试验断面结构

试验模型断面见图 3, 堤顶高程 0.510 m, 迎浪面设置 1:1.5 和 1:2.0 斜坡, 斜坡上采用扭王护面, 其下设置垫层块石, 坡脚 0.077 m 高程处铺设扭王字块体; 背浪面设置 1:2.0 酥石斜坡。在堤顶选取 3 个不同的防浪墙位置, 位置 A、B、C 距素混凝土胸墙前沿分别 0.319、0.234、0.150 m, 防浪墙顶部高程 0.560 m。试验整体布置见图 4。



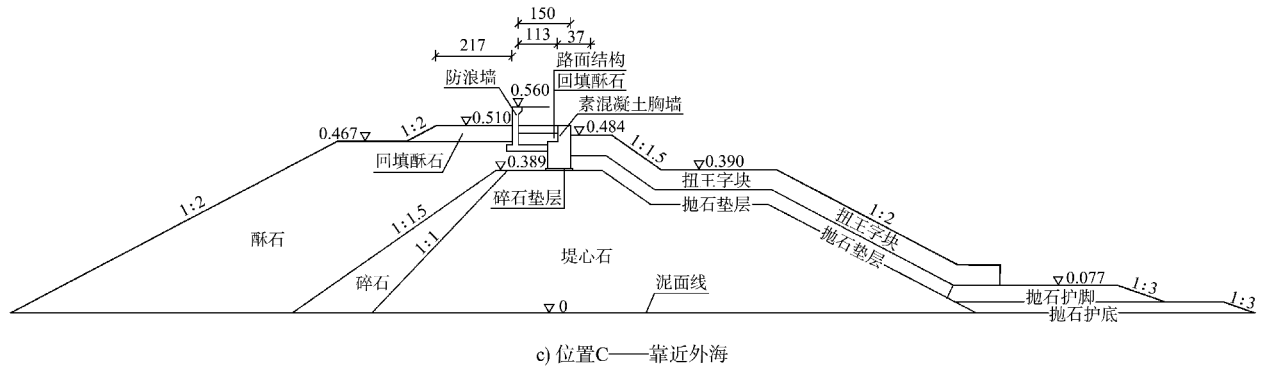


图3 不同防浪墙位置的模型断面 (单位: m)

Fig. 3 Model cross-sections of different locations of the wave wall (unit: m)

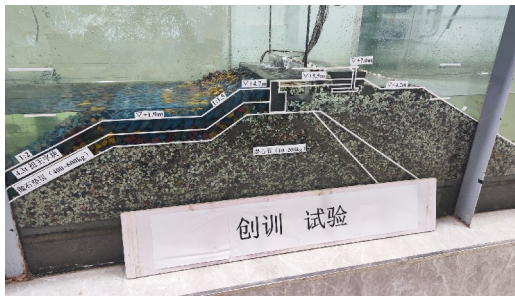


图4 试验整体布置

Fig. 4 Overall layout of experiment

### 1.3 试验组合与试验设计

不同组次试验的波浪要素见表1。试验分别研究防浪墙波压力分布和波浪力与相对墙前水深、波要素、防浪墙相对位置的关系。定义：相对压强为  $P/(\gamma H_s)$ ， $P$  为平均波压强， $\gamma$  为水的重力密度， $H_s$  为有效波高；相对高度为迎浪面底部高度  $y$  与防浪墙高度  $a$  之比；相对底宽为防浪墙底部到远海端距离  $x$  与防浪墙底宽  $b$  之比；相对水平总波浪力为  $F_x/(\gamma H_s^2)$ ，相对浮托力  $F_y/(\gamma H_s^2)$ ，其中  $F_x$  为水平总波浪力、 $F_y$  为浮托力；相对墙前水深为墙前水深  $d_1$  与有效波高  $H_s$  之比；防浪墙相对距离为防浪墙到堤顶胸墙前沿水平距离  $l$  与堤顶胸墙前沿到抛石护脚底端水平距离  $S$  之比。

表1 模型试验波浪要素

Tab. 1 Wave parameters used in model experiments

位置	水位 $h/cm$	$d_1/cm$	$H_s/cm$	周期 $T_m/s$	波长 $L/m$
	61.8	-4.6	16	1.5	2.600
	63.3	-3.1	16	1.5	2.636
A、B、C	64.8	-1.6	10	1.5	2.671
	64.8	-1.6	12	1.5	2.671
	64.8	-1.6	14	1.5	2.671

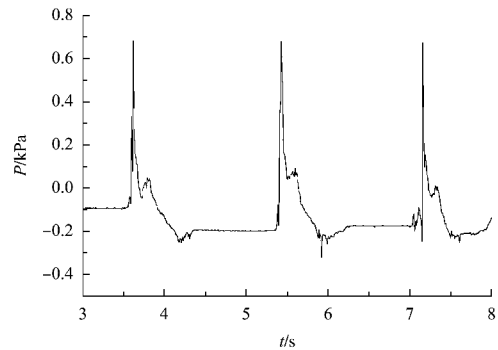
续表1

位置	水位 $h/cm$	$d_1/cm$	$H_s/cm$	周期 $T_m/s$	波长 $L/m$
	64.8	-1.6	16	1.5	2.671
	64.8	-1.6	12	1.2	1.967
	64.8	-1.6	12	1.8	3.346
	64.8	-1.6	12	2.1	4.004
	66.3	-0.1	16	1.5	2.704
A、B、C	67.8	1.4	16	1.5	2.736
	67.8	1.4	10	1.5	2.600
	67.8	1.4	12	1.5	2.636
	67.8	1.4	14	1.5	2.671
	67.8	1.4	12	1.2	2.001
	67.8	1.4	12	1.8	3.439
	67.8	1.4	12	2.1	4.123

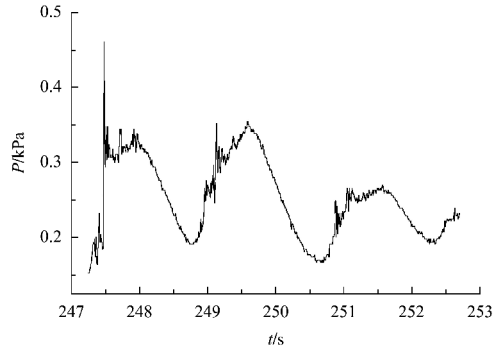
## 2 试验结果及分析

### 2.1 防浪墙波压力时程变化特征

在  $h=67.8\text{ cm}$ 、 $H_s=16\text{ cm}$ 、 $T_m=1.5\text{ s}$  工况下，2#、7#测点测得的波压力时间过程曲线见图5。2#测点的水平波压力主要表现为一个瞬时冲击部分和一个缓慢变化部分，这与波浪直接冲击和之后水体上涌引起的波面壅高有关。由于7#测点的底部波浪力并未直接承受波浪作用，变化较为缓慢，且大小明显小于水平波压力。



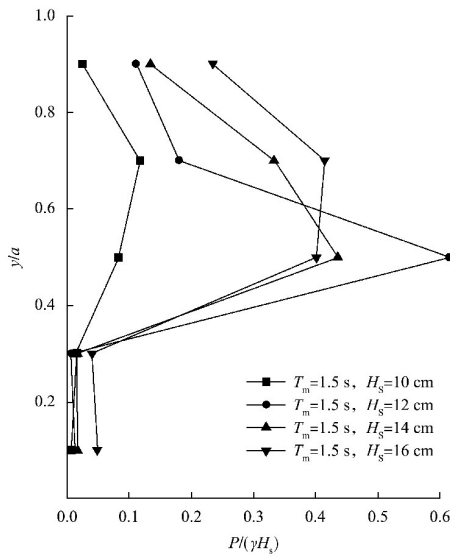
a) 2#测点



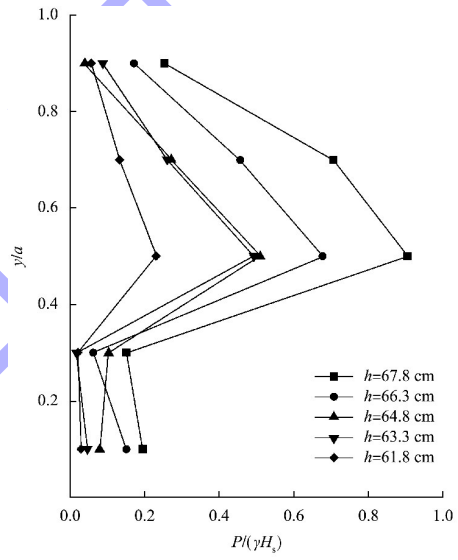
b) 7#测点

图 5 波压力时间过程曲线

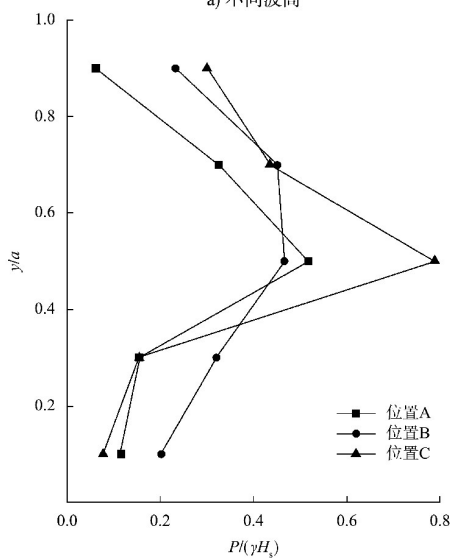
Fig. 5 Process curve of wave pressure with time



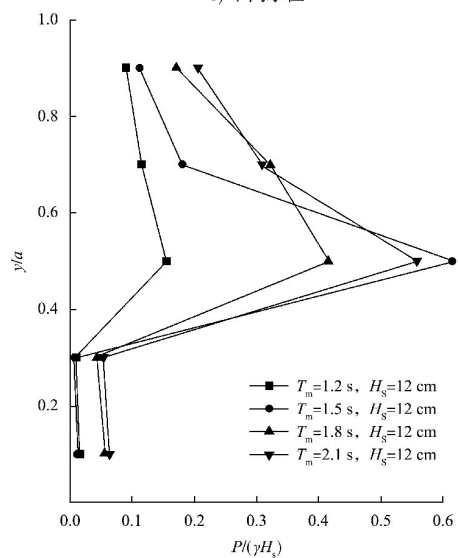
a) 不同波高



b) 不同水位



c) 不同位置



d) 不同周期

注: 压力测点 1#~5# 分别对应相对高度 0.9、0.7、0.5、0.3、0.1。

图 6 防浪墙迎浪面相对压强分布

Fig. 6 Relative pressure distribution on wave-facing side of the wave wall

## 2.2 防浪墙波压力分布情况

### 2.2.1 防浪墙迎浪面压力分布

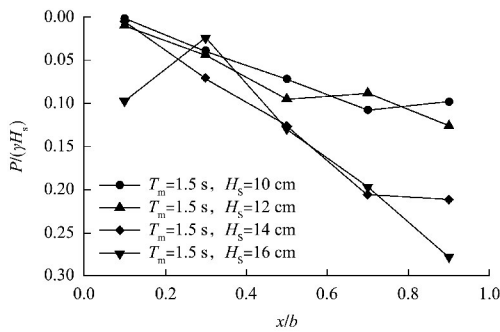
在不规则波作用下, 波压强在防浪墙迎浪面的分布随高度变化而变化。不同条件下防浪墙迎浪面的相对压强分布见图 6。

由图 6 分析可知, 当相对高度小于 0.3 时, 由于并未直接受到波浪冲击, 波浪压强明显低于直接受波浪冲击的区域; 相对高度超过 0.3 时, 波浪压强迅速增大, 并在相对高度约为 0.5 的位置达到极大值(即最大压强点), 这是因为波浪冲击和反射效应的叠加所致; 此后, 随着相对高度增加, 相对压强逐渐降低。

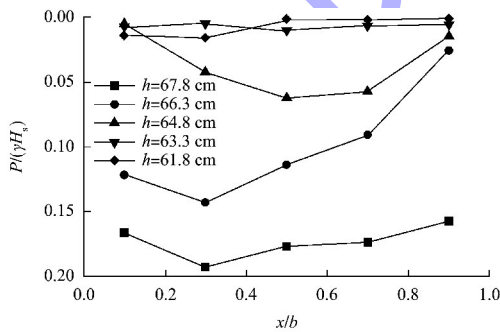
当波高较低、水位较低及防浪墙位置较远时，相对压强随防浪墙相对高度的增加而迅速减小。这是因为防浪墙高度已超出波浪的主要作用范围，波浪破碎后的水流沿着防浪墙上涌所形成的压强比波浪直接冲击所产生的压强小得多。

### 2.2.2 防浪墙底部波压力分布

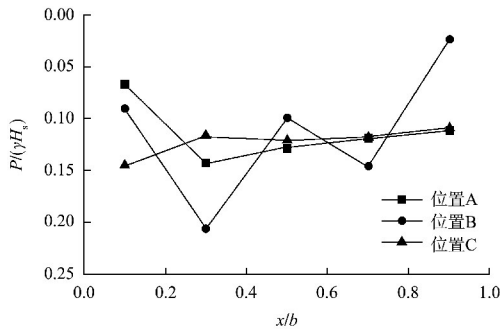
防浪墙通常设置在石垫层上，在波浪作用下，水体会透过缝隙传递压强，产生对防浪墙的浮托力，形成倾覆力矩。不同条件下防浪墙底部浮托力压强分布见图 7。由图可知，试验条件下，浮托力压强明显小于迎浪面波压强。浮托力压强随周期、波高、水位的增加而增大，但相较于水平波浪力而言变化较小。



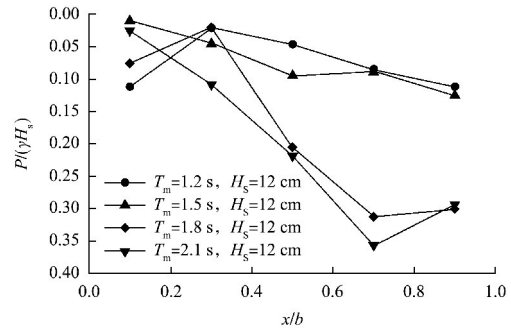
a) 不同波高



b) 不同水位



c) 不同位置



d) 不同周期

注：压力测点 6#~10# 分别对应相对底宽 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9。

图 7 防浪墙底部相对压强分布

Fig. 7 Relative pressure distribution at the bottom of the wave wall

### 2.3 国标防浪墙波浪力计算方法

JTS 145—2022《海港与航道水文规范》提出的防浪墙波浪力计算方法是国内海堤堤顶防浪墙的设计依据，其中单位强度防浪墙水平波浪总力  $P$  计算规定如下：

$$P = \bar{p}(d_1 + Z) \quad (1)$$

其中：
$$\bar{p} = 0.24\gamma HK_p \quad (2)$$

$$d_1 + Z = H \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) K_z \quad (3)$$

式中： $\bar{p}$  为平均压强，kPa； $K_p$  为与无因次参数  $\xi$  和波坦  $L/H$  有关的平均压强系数； $d_1$  为防浪墙前水深； $Z$  为防浪墙波浪压强分布图的顶部距静水面的高度，m； $H$  为建筑物所在处进行波波高，m； $K_z$  是与  $\xi$  和  $L/H$  有关的波压力作用高度系数； $d$  为建筑物前水深，m； $L$  为波长，m。

规范中单位长度防浪墙底面的浮托力  $P_u$  计算规定如下：

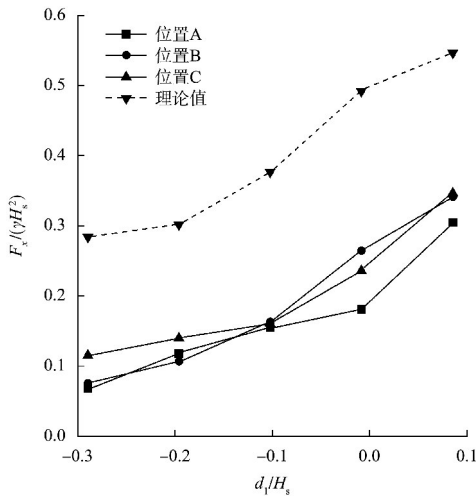
$$P_u = \mu \frac{b\bar{p}}{2} \quad (4)$$

式中： $\mu$  为波浪浮托力的折减系数，取为 0.7(防浪墙前无掩护块体)； $b$  为防浪墙底宽，m。该计算公式是针对墙前无掩护情况。JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》已给出墙前全掩护条件下波浪折减规定。本试验视为墙前无掩护情况，计算中波浪力均未进行折减，后续文中所述理论值均由该式计算得出。

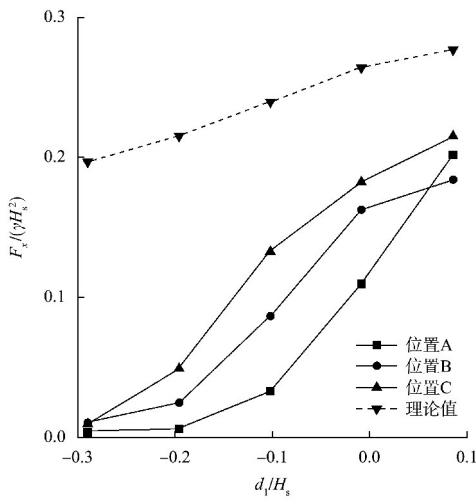
### 2.4 波浪力与墙前水深的关系

影响防浪墙波浪力的众多因素中，防浪墙前

水深的影响极为重要,  $T_m = 1.5\text{ s}$ 、 $H_s = 16\text{ cm}$  条件下, 相对水平总波浪力和相对浮托力与相对墙前水深之间的关系见图 8。



a) 相对水平总波浪力随相对墙前水深变化



b) 相对浮托力随相对墙前水深变化

图 8 相对波浪力随相对墙前水深变化关系

Fig. 8 Relationship between relative wave force and relative water depth in front of the wall

由图 8 分析可知, 试验条件下, 防浪墙单位长度上所受的相对水平总波浪力和相对浮托力均随相对墙前水深的增加而增大。相对水平总波浪力实测值约小于规范公式计算值 50%, 相对浮托力实测值也显著偏小, 这一现象主要是由于海堤上设置了扭王字块结构, 消能防浪, 有效降低波浪力。

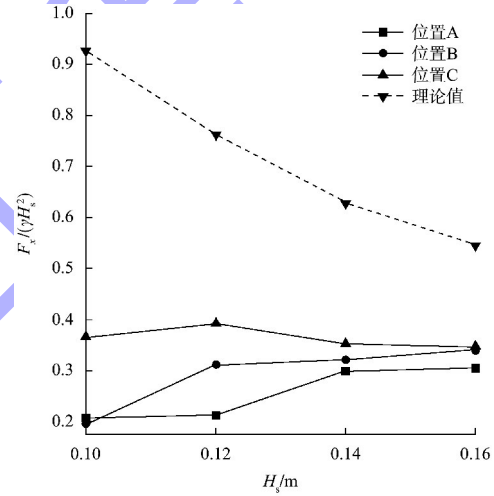
在相对墙前水深较低的情况下, 相对水平总波浪力随相对墙前水深的变化较为平缓, 当超过某一临界值时 (当防浪墙在挡水前沿时, 相对墙

前水深临界值为  $-0.1$ ; 当防浪墙远离外海侧时, 临界值为  $0$ ), 相对水平总波浪力会迅速跃升, 增长速率变为原来 2~3 倍。

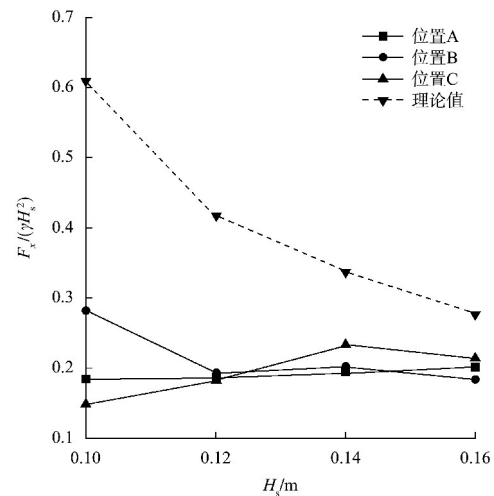
## 2.5 波浪力与波要素的关系

### 2.5.1 波高的影响

$h = 67.8\text{ cm}$ 、 $T_m = 1.5\text{ s}$  时相对水平总波浪力和相对浮托力与波高之间的关系见图 9。由图可知, 试验条件下, 由于护岸工程的消波作用, 水平波浪总力实测值普遍小于理论值 50%, 且波高越小, 理论与实测值之差越小。随波高的增大, 相对水平波浪总力和相对浮托力实测值变化不大, 但理论值大幅减小。



a) 相对水平总波浪力随波高变化



b) 相对浮托力随波高变化

图 9 相对波浪力随波高变化关系

Fig. 9 Relationship between relative wave force and wave height

### 2.5.2 周期的影响

其他条件相同时，周期越大波长越长，一个周期内相应的能量更大。 $h=67.8\text{ cm}$ 、 $H_s=16\text{ cm}$  时防浪墙所受相对水平总波浪力和相对浮托力随周期变化关系见图 10。由图可知，随着周期逐渐增大，相对水平波浪总力也逐渐增大，但周期超过 1.8 s 后，相对水平总波浪力随周期增长缓慢或略微减小；相对浮托力随周期增大总体呈增加趋势，且速率大致相同；随周期增大，水平总波浪力实测值从理论值的 65% 变为 35%，说明试验条件下，周期越大，消波作用越明显。

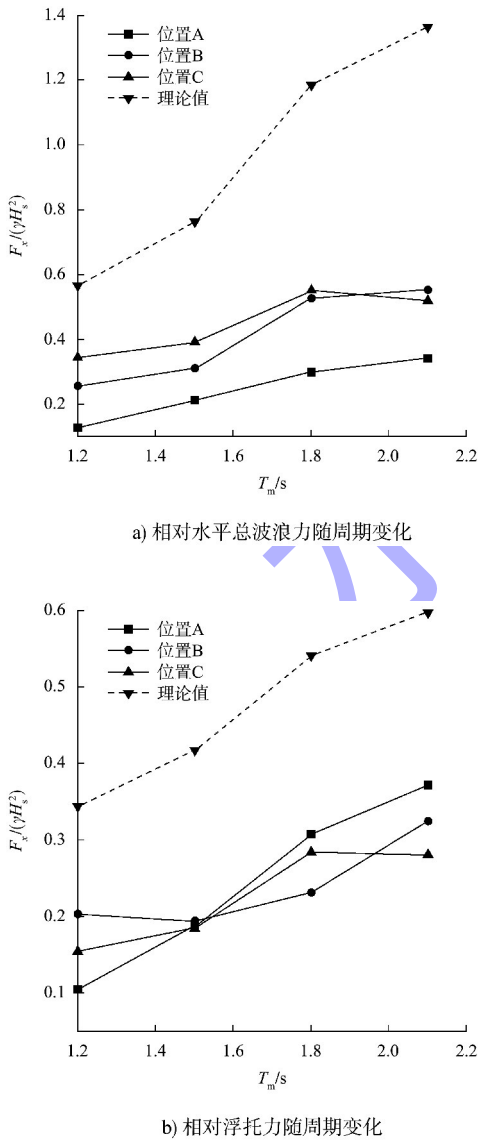


图 10 相对波浪力随周期变化关系

Fig. 10 Relationship between relative wave force and period

### 2.6 波浪力与防浪墙位置的关系

防浪墙位置不同，防浪墙所受波浪力也会随之变化。防浪墙相对水平总波浪力和相对浮托力与防浪墙相对距离之间的关系见图 11。

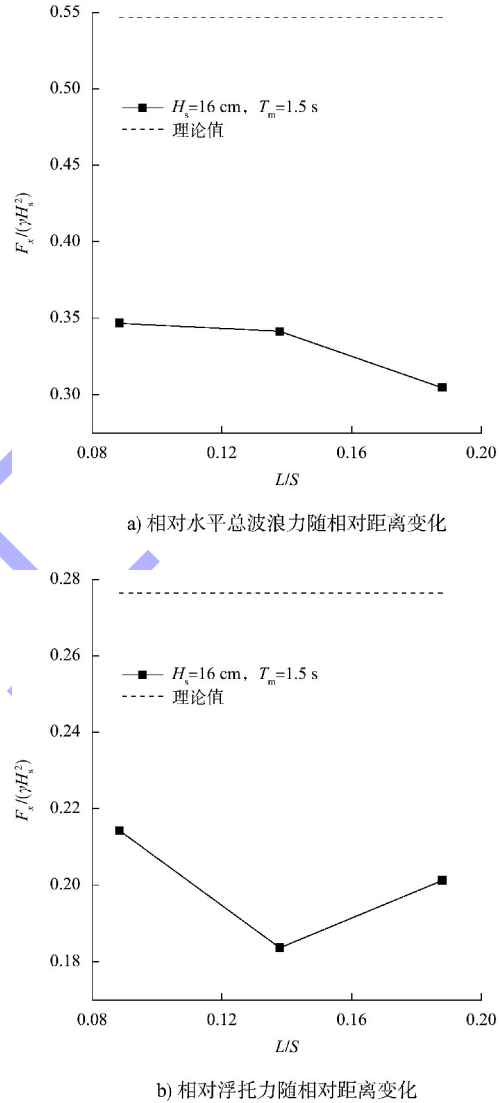


图 11 相对波浪力随防浪墙相对距离变化关系

Fig. 11 Relationship between relative wave force and relative distance of the wave wall

由图 11 分析可知，随着防浪墙与外海之间相对距离的增大，相对水平总波浪力逐渐减小，当相对距离超过 0.14 后，减小速率显著加快；相对浮托力则随相对距离的增加先减小后增大；随着防浪墙相对位置从 0.09 变为 0.19，相对水平总波浪力实测值从理论值的 65% 变为 56%，相对浮托力实测值从理论值的 77% 变为 73%，适当后移防浪



墙可有效降低波浪力,水平总波浪力减少约14%,浮托力减少约5%。

结合前文,防浪墙水平总波浪力与防浪墙到外海的距离之间并非简单的负相关关系。原因在于:波浪在堤顶挡水前沿发生破碎,波浪能量大量损失,因此,在一定范围内,波浪力随距离的增大而减小;随着波浪继续流动,其势能转化为动能,波浪力又会逐渐增大;最终,随着机械能的不断耗散,波浪力降低至0。

### 3 结论

1) 不规则波作用于防浪墙迎浪面产生的相对压强随防浪墙相对高度增加先增大后减小,在相对高度为0.5左右达到峰值,底部相对压强分布无明显规律。

2) 总体而言,迎浪面水平总波浪力和浮托力随周期、波高、水位的增加而增大。水平总波浪力和浮托力实测值相较于规范公式计算值小30%~50%,这一现象主要是由于海堤上设置了扭王字块结构,消能防浪,有效地降低了防浪墙所承受的波浪力。

3) 防浪墙迎浪面上的波浪压强与防浪墙到外海的距离之间并非简单的负相关关系。原因在于:波浪在堤顶挡水前沿发生破碎,波浪能量大量损失,因此,在一定范围内,波浪力随距离的增大而减小;随着波浪继续流动,其势能转化为动能,波浪力又会逐渐增大;最终,随着机械能的不断耗散,波浪力降低至0。

4) 防浪墙相对位置增加0.1,防浪墙所受水平总波浪力减少约14%,浮托力减少约5%。在实际工程中,可以通过适当后移防浪墙的方式,有效减少防浪墙所受波浪力。

5) 建议后续规范编写时,防浪墙波浪力计算公式中兼顾考虑斜坡堤坡度与形式、护面人工块体形式以及防浪墙位置等因素。

### 参考文献:

- [1] 林朝霞,姜宁林,王君辉. 中长周期波作用下防浪墙前波浪力分析[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(5): 7-10, 34.  
LIN Z X, JIANG N L, WANG J H. Analysis of wave force

in front of wave wall under the action of medium long period wave[J]. Chinaharbour engineering, 2020, 40(5): 7-10, 34.

- [2] 李少斌,丁建军,余神光,等. 国内外斜坡堤挡浪墙水平波浪力计算研究[J]. 港工技术, 2023, 60(1): 20-24.  
LI S B, DING J J, YU S G, et al. Research on calculation for horizontal wave force acting on wave-retaining wall of rubble mound breakwater based on Chinese and overseas guidelines[J]. Port engineering technology, 2023, 60(1): 20-24.
- [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] Delft University of Technology. Experimental research into the effect of freeboard on the stability of a crown wall on a rubble mound breakwater[R]. Netherlands: TU Delft, 2017.
- [5] Construction Industry Research and Information Association. Rock manual: the use of rock in hydraulic engineering[M]. 2nd Ed. London: CIRIA, 2007.
- [6] 据烈红. 典型胸墙的波浪力和越浪量物理模型试验与分析[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2004.  
JU L H. Typical physical model tests and analysis of wave forces and overtopping volumes on seawalls[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2004.
- [7] ANAND K V, SUNDAR V, SANNASIRAJ S A. Dynamic pressures on curved front seawall models under random waves[C]//9th International Conference on Hydrodynamics. Shanghai: [s. n. ], 2010: 538-544.
- [8] 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.  
LI Y L. Experimental research on wave force and overtopping discharge of arc parapet with different covertures[J]. Coastal engineering, 2010, 29(2): 17-22.
- [9] 范可, 刘子涵, 陈达. 规则波作用下挡浪板式防浪墙波浪力研究[J]. 水运工程, 2014(10): 7-12.  
FAN K, LIU Z H, CHEN D. On wave forces of wave wall with wave boards under action of regular wave[J]. Port & waterway engineering, 2014(10): 7-12.
- [10] 于珍, 李雪艳, 程志, 等. 基于 OpenFOAM 的弧形防浪墙受力特性的数值模拟研究[J]. 水运工程, 2022(11): 29-36, 55.

- YU Z, LI X Y, CHENG Z, et al. Numerical simulation of force on arc crown wall based onOpenFOAM[J]. Port & waterway engineering, 2022(11): 29-36, 55.
- [11] 雷雪莲, 那鑫宇, 孙亮, 等. 弧形防浪墙上波浪荷载的数值模拟[J]. 水运工程, 2022(7): 8-14, 22.
- LEI X L, NA X Y, SUN L, et al. Numerical simulation of wave loads on arc crown walls [J]. Port & waterway engineering, 2022(7): 8-14, 22.
- [12] 于龙基, 杨森, 张华昌, 等. 弧形防浪墙的迎浪面波压力数值模拟[J]. 水运工程, 2017(11): 29-35.
- YU L J, YANG S, ZHANG H C, et al. Numerical simulation of wave pressure on upright section of arc crown wall[J]. Port & waterway engineering, 2017(11): 29-35.
- [13] 港口与航道水文规范: JTS 145—2015(2022 版) [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.
- Code of hydrology forharbour and waterway: JTS 145-2015(2022 edition) [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2022.
- [14] 卢少彦. 斜坡堤挡浪墙波浪力计算方法比较[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(1): 16-20.
- LU S Y. Comparison of wave force calculation methods for wave-retaining wall of slope breakwater[J]. Chinaharbour engineering, 2022, 42(1): 16-20.
- [15] 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.
- Code of design for breakwaters and revetments: JTS 154-2018 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.
- [16] 高晨晨, 严士常, 尹亚军, 等. 无掩护的弧形挡浪墙波浪力研究 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16 (12): 141-148.
- GAO C C, YAN S C, YIN Y J, et al. Study on wave forces on arc parapet wall under no protection of armor block on sloping breakwater [J]. Science technology and engineering, 2016, 16(12): 141-148.
- [17] 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
- Technical code of modelling test for port and waterway engineering: JTS/T 231-2021 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.
- (本文编辑 王传瑜)
- ~~~~~
- (上接第 46 页)
- [23] 王凯, 侯一筠, 冯兴如, 等. 福建沿海浪潮耦合漫堤风险评估: 以台风天兔为例 [J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(1): 51-58.
- WANG K, HOU Y J, FENG X R, et al. Risk assessment of overtopping seawall under waves and surges for Fujian coast: a case study of typhoon Usagi [J]. Oceanologia et limnologia sinica, 2020, 51(1): 51-58.
- [24] 张博文. 基于参数化风场的南海北部风暴潮、波浪数值模拟[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- ZHANG B W. Numerical simulation of storm surge and wave in the northern South China Sea based on parametric wind field [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [25] 李健, 侯一筠, 孙瑞. 台风模型风场建立及其模式验证[J]. 海洋科学, 2013, 37(11): 95-102.
- LI J, HOU Y J, SUN R. Surge model caused by 0814 Typhoon and mold wind field established [J]. Marine sciences, 2013, 37(11): 95-102.
- [26] HOLLAND G J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes [J]. Monthly weather review, 1980, 108(8): 1212-1218.
- [27] 杨万康, 尹宝树, 伊小飞, 等. 基于 Holland 风场的台风浪数值计算[J]. 水利水运工程学报, 2017(4): 28-34.
- YANG W K, YIN B S, YI X F, et al. Numerical calculation and research of typhoon waves based on Holland wind field [J]. Hydro-science and engineering, 2017(4): 28-34.
- (本文编辑 赵娟)