

# 斜坡堤典型胸墙波浪力的影响因素

李雪艳<sup>1</sup>, 付 聪<sup>1</sup>, 范庆来<sup>1</sup>, 王 岗<sup>2</sup>

(1. 鲁东大学海岸研究所, 山东 烟台 264025; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为探求斜坡堤典型胸墙迎浪面所受波浪力大小的影响因素, 设计前仰式、深弧式、后仰式和直立 4 种结构型式胸墙进行相关的物理模型试验。通过在典型胸墙迎浪面间隔布置压力测点, 获取所受波浪压力, 并将其进行积分求和, 得到胸墙所受波浪力, 进而讨论相对波高、相对波长、斜坡坡度和胸墙结构型式对波浪力的影响。结果表明, 相对波高与相对波长对胸墙所受波浪力影响显著; 波浪力随着相对波高的增大而增大, 随着相对波长的增大呈现先增大、后减小、再增大的变化趋势; 波浪力随着斜坡坡度的增大而减小。斜坡堤弧形胸墙所受波浪力明显大于直立胸墙所受波浪力; 在斜坡堤弧形胸墙中, 前仰式胸墙受力较其余两种型式胸墙受力小。研究结果将加深波浪对斜坡堤胸墙作用力的理解, 为后续工程设计提供理论指导。

**关键词:** 典型胸墙; 波浪力; 影响因素; 斜坡堤; 试验

中图分类号: P753 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2015)12-0118-12

doi: 10.11759/hyxx20150122001

斜坡堤本身具有对波浪反射弱、对地基不均匀沉降不敏感、施工较简单等优点, 目前在筑港、海洋、河流和城市护岸中广泛应用。考虑到堤顶设置胸墙结构可以大大降低工程造价, 节省工程材料, 同时堤顶可作为通道或码头, 因此成为目前我国斜坡堤中较为常用的防浪结构之一。由于斜坡堤堤顶胸墙的受力情况, 直接影响其后方掩护水域的平稳和工程设施的安全, 系统探讨胸墙迎浪面所受波浪力的影响因素, 对于保护工程设施的安全运行和保证工程建成后的经济效益具有重要的实际意义。

关于胸墙越浪量、受力和稳定性等方面的研究, 国内外学者已做了较多的工作。在胸墙越浪量方面, 罗兴远<sup>[1]</sup>采用图像分析法获取弧形胸墙斜坡式护岸的越浪量结果, 并与传统称重法的结果进行了对比。Kortenhaus 等<sup>[2]</sup>比较系统地研究了直立堤时曲线形式防浪墙对其越浪量和波浪力的影响, 通过改变防浪墙的几何尺寸来降低越浪量与减少波浪力。Tuan 等<sup>[3-5]</sup>基于浅水方程(NLSW)和雷诺时均诺维斯托克斯(RANS)方程建立了评估斜坡堤直立墙越浪量特性的数值模型, 并与物理模型试验结果进行了对比。陈国平等<sup>[6]</sup>针对坡面的护面结构形式、胸墙高度和墙趾超高等对胸墙越浪量的影响进行了研究。在胸墙受力和稳定性方面, Anand<sup>[7]</sup>等对随机波作用下曲线形式防浪墙的水动力进行了研究。Nørgaard<sup>[8]</sup>等对深水和浅水波入射条件下, 堆石防波

堤直立墙所受波浪力进行了数值模拟。琚烈红<sup>[9]</sup>和王登婷<sup>[10]</sup>采用模型试验获取斜坡堤胸墙迎浪面不同测点的波浪压强, 比较了斜坡堤弧形胸墙与直立墙的受力, 并分析了越浪与受力之间相互影响关系。李玉龙等<sup>[11]</sup>、吴苏舒等<sup>[12]</sup>、焦颖颖等<sup>[13]</sup>也针对弧形防浪墙的受力做了较多研究。李雪艳等<sup>[14-15]</sup>就直立堤弧墙进行了部分相关的水动力数值模拟研究。前人主要对某一直立堤或斜坡堤胸墙的越浪量、受力和稳定性等进行相关的数值或物理模型试验研究, 鲜有针对斜坡堤不同结构型式胸墙所受波浪力影响因素进行较为系统地分析与讨论。因此, 有针对性地开展此类研究对于斜坡堤胸墙的工程设计具有一定的指导意义。

本文在前期研究工作的基础上, 针对前仰式、深弧式、后仰式和直立 4 种较为常见的胸墙结构, 开展一系列的物理模型试验, 旨在探求典型胸墙结构所受波浪力的影响因素, 分析不同影响因素与胸墙受力的关系, 从而为实际工程设计提供理论指导与参考。

收稿日期: 2015-01-22; 修回日期: 2015-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51209081); 山东省高等学校科技计划项目(J14LH02); 烟台市科技发展计划项目(2014ZH075); 鲁东大学人才引进科研基金项目(LY2013025)

作者简介: 李雪艳(1982-), 女, 山东烟台人, 讲师, 博士, 从事波浪与结构物相互作用研究, 电话: 0535-6697523, E-mail: yanzi03@126.com

# 1 试验设计

## 1.1 试验设备和仪器

典型胸墙模型试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室的溢油水槽(图 1)中进行。水槽长 23 m, 宽 0.8 m, 高 0.8 m。水槽的前端为实验室自制的 DL-3 型液压驱动造波机, 可产生波形平稳、重复性好的规则波, 造波周期为 0.5~3.0 s。水槽的末端安装有消能网, 用以吸收波浪能量以减少波浪反射。



图 1 试验水槽

Fig.1 Experimental wave flume setup

模型试验开展前, 采用试验室研制生产的 DLY-1 型波高、滤波、应变混合式测量仪(图 2)和浪高仪(图 3)进行波浪要素的测定和湊波。波高测量范围不小于 30 cm, 绝对误差小于 1 mm, 试验前进行标定, 标定线性度大于 0.999。采用天津水运科学研究所生产的 SG-2000 型多点压力测量系统(图 4), 通过在胸墙测点的迎浪面钻孔安装压力传感器(图 5), 测量其波浪压强。压力传感器的自振频率为 500 Hz, 采样间隔为 0.003 s。典型胸墙模型放置在水槽的末端, 消能网前方约 1 m 左右的位置(图 6)。

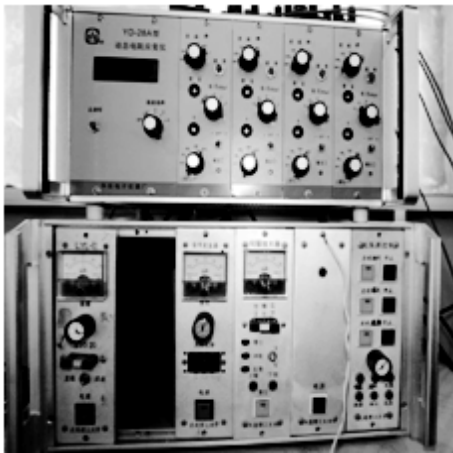


图 2 波高、滤波、应变混合式测量仪

Fig.2 Wave height, filtering, and strain measuring apparatus

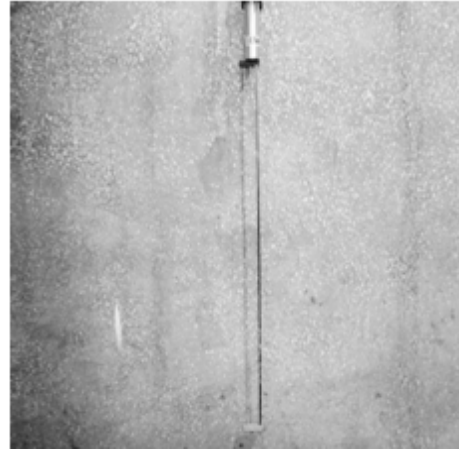


图 3 浪高仪

Fig.3 Wave gauge



图 4 多点压力采集系统

Fig.4 Multipoint pressure acquisition system



图 5 压力传感器

Fig.5 Pressure transducer

## 1.2 模型设计

为了增强防波堤的掩护效果, 减少工程投资,

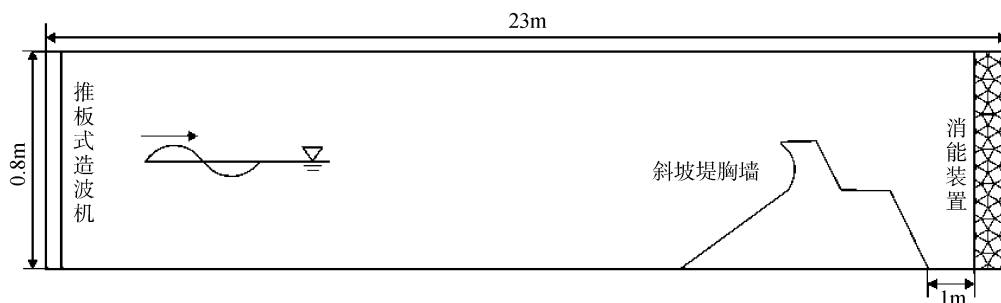


图 6 模型断面布置示意图  
Fig.6 Schematic of the experiment setup

针对目前实际工程中所采用的胸墙断面型式，共设计前仰式、深弧式、后仰式 3 种斜坡堤弧形胸墙结构。作为对比，同时考虑了直立式胸墙结构。其中，前仰式胸墙圆弧前倾，对初始作用水体的方向改变较其它胸墙大；后仰式胸墙圆弧后倾，且胸墙下部与斜坡护面相切；深弧式胸墙弧形上下对称。通过分析具有不同结构特点胸墙的受力影响因素，为工程

设计提供理论指导和技术支持。

胸墙均采用有机玻璃制作，圆弧部分的高度  $d_2=12\text{ cm}$ ，圆弧上部距离胸墙顶  $1\text{ cm}$ 。前仰式胸墙半径  $R=11\text{ cm}$ ，圆心到胸墙圆弧起点的垂直距离为  $4\text{ cm}$ ；深弧型胸墙半径  $R=7\text{ cm}$ ，圆心到胸墙圆弧起点的垂直距离为  $6\text{ cm}$ ；后仰式胸墙半径  $R=8\text{ cm}$ ，圆心到胸墙圆弧起点的垂直距离为  $7\text{ cm}$ (图 7)。

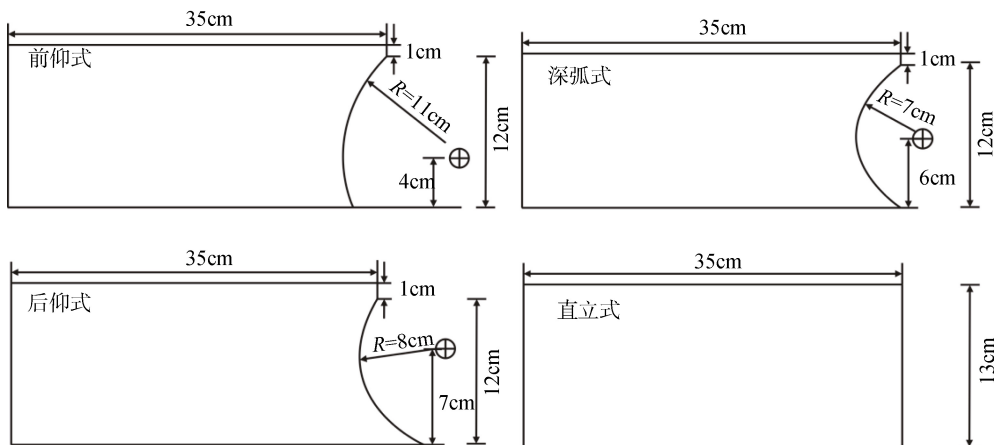


图 7 典型胸墙结构示意图  
Fig.7 Schematic of typical crest walls

斜坡堤堤身高  $40\text{ cm}$ ，宽  $80\text{ cm}$ ，共设计 3 个斜坡坡度，分别为  $1.25$ 、 $1.75$ 、 $2.25$ 。护面采用重约  $0.5\text{ kg}$  的扭王字块体，采用规则排列，保证波浪作用时斜坡不受损坏；护面块体下方为  $9\sim 14\text{ g}$  的块石。胸墙迎浪面中心线两侧间隔布置两排共 7 个压力传感器，其边缘距离中心线  $0.5\text{ cm}$ (图 8)；由于受压力传感器的大小限制，不同胸墙起始点压力传感器的坐标位置不同，7 个压力测点的具体坐标值列于表 1。

### 1.3 试验组次

本文的试验水深  $d$  分别为  $40\text{ cm}$  和  $45\text{ cm}$ ，规则波的波高  $H$  分别为  $6\text{ cm}$ 、 $8\text{ cm}$ 、 $10\text{ cm}$  和  $12\text{ cm}$ ，周期

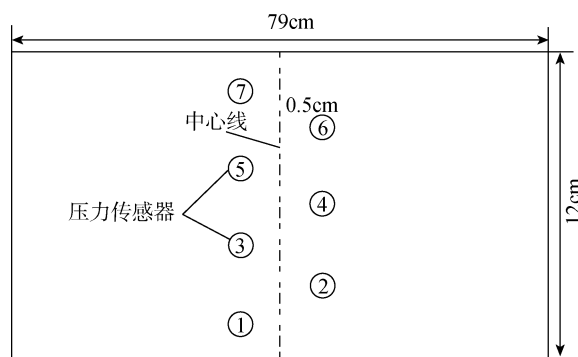


图 8 胸墙迎浪面点压力传感器布置示意图  
Fig.8 Schematic of pressure transducers on the surface of crest walls

表 1 4 种结构型式胸墙不同压力测点的坐标值  
Tab.1 Location of pressure transducers for four types of crest walls

测点号	测点坐标(cm)			
	前仰式	深弧式	后仰式	直立式
1	41.5	42.0	42.5	42.5
2	43.5	43.0	43.5	43.5
3	44.5	44.5	44.5	44.5
4	46.5	45.5	46.0	46.0
5	47.5	47.0	47.0	47.0
6	48.5	48.0	48.5	48.5
7	49.5	49.5	49.5	49.5

$T$  分别为 1.0、1.2、1.5、1.8 和 2.0 s。将周期  $T$  代入线性微幅波理论公式计算出其代表波长。40 cm 水深时, 波长  $L$  分别为 1.464、1.937、2.616、3.269、3.695 m; 45 cm 水深时, 波长  $L$  分别为 1.493、1.998、2.728、3.428、

3.884 m。每一个胸墙模型不同水深、波高和周期进行组合, 共确定 40 个试验组次, 每个组次至少重复试验 3 次。

## 2 试验结果分析与讨论

### 2.1 斜坡堤胸墙波浪力历时曲线

根据胸墙迎浪面每一瞬时不同测点上的波浪压强, 积分求和得到每一瞬时胸墙迎浪面所受波浪力和波浪力矩, 具体的计算方法可参见文献[14]。以斜坡坡度 1.75 的前仰式胸墙为例, 其波浪力历时曲线见图 9 所示。图 9a、图 9b 和图 9c 分别为胸墙所受水平波浪力  $F_x$ 、垂直波浪力  $F_y$ 、波浪力矩  $M$  历时曲线的试验结果, 垂直波浪力正值表示胸墙受到垂直向下的作用力。图 9 横坐标为时间  $t$ 。

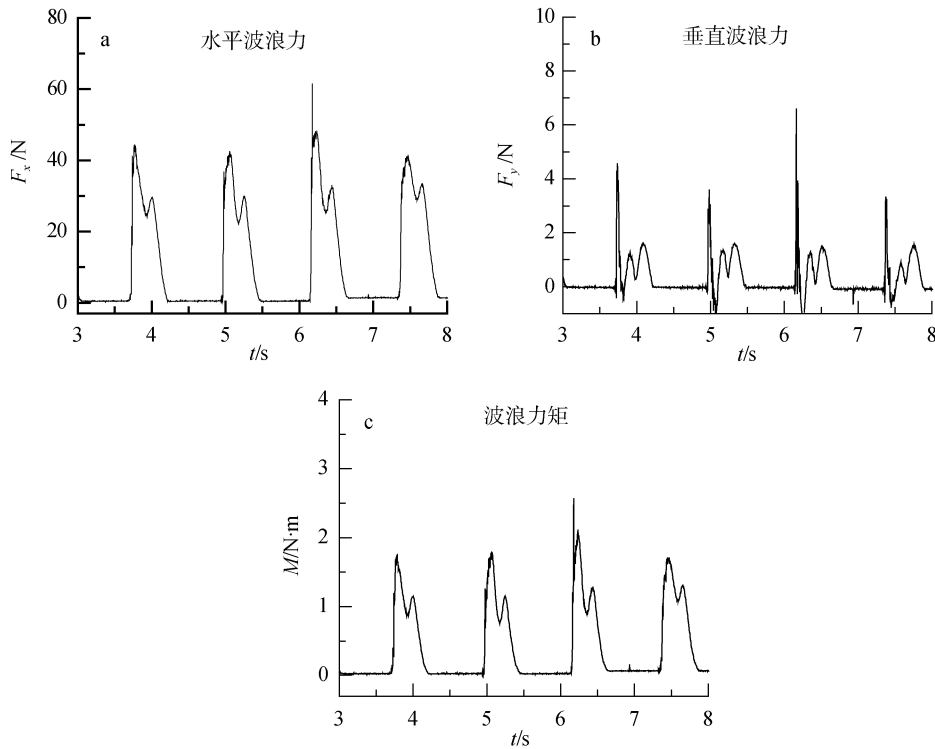


图 9  $d=40\text{cm}$ ,  $T=1.2\text{s}$ ,  $H=10\text{cm}$  情况下前仰式胸墙所受波浪力历时曲线

Fig.9 Time series of wave forces on a leaning-front crest wall when,  $d=40\text{cm}$ ,  $T=1.2\text{s}$ , and  $H=10\text{cm}$

由图 9a 可以看出, 本试验测得的前仰式胸墙上的水平波浪力历时曲线与嵒烈红<sup>[9]</sup>和王颖<sup>[16]</sup>测量得到的弧形胸墙上的波浪力历时曲线呈现相似的现象, 一个周期内胸墙所受水平波浪力的变化共有 2 个阶段: 第一个阶段是波浪在行进过程中受到胸墙的阻碍, 对胸墙的第一次冲击而形成比较大的作用力; 第二个阶段是波浪沿着胸墙上涌, 部分动能转化为

势能, 当波浪达到最高点回落时, 再次对胸墙作用而形成第二次冲击。由于第一次波浪冲击作用及上升过程动能的损耗, 第二次冲击相对第一次较小。

由图 9b 可以看出, 垂直方向波浪力历时曲线较水平波浪力复杂, 在一个周期内共出现 3 个峰值。在波浪冲击胸墙的初始阶段, 便产生一个较大的瞬时冲击力。随着后续水体的上涌, 出现第二个峰值。在

波浪回落过程时由于水流重力的作用,胸墙出现第三个峰值。由于胸墙迎浪面所受波浪力主要为沿水槽来波方向的作用力,因此胸墙所受波浪力矩主要与所测得的水平波浪力相关。结合图 9a 和图 9c 也可以看出,胸墙波浪力矩历时曲线与水平波浪力历时曲线的变化过程非常相似,也包括两个变化阶段,且水平波浪力达到最大时波浪力矩也达到最大值<sup>[9, 16]</sup>。

值得一提的是,由于本文后续工作主要是讨论胸墙波浪力的影响因素,考虑到文章篇幅的限制,本文暂不考虑垂向力随相关因素的变化,在后续研究中将进行分析讨论。

## 2.2 相对波高与波长对波浪力的影响

以斜坡坡度 1.75 为例,图 10 和图 11 分别给出了前仰式、深弧式、后仰式和直立式胸墙相对波高与波长对其所受波浪力和波浪力矩的影响。其横坐标为入射波相对波长  $L/d$ ,纵坐标为胸墙无量纲化的波浪力  $F/(\rho g A d_2)$  或波浪力矩  $M/(\rho g A d d_2)$ 。其中  $\rho$  为水体密度( $\text{kg/m}^3$ ),  $g$  为重力加速度( $\text{N/kg}$ ),  $A$  为波幅(m),  $L$  为波长(m),  $d$  为水深(m),  $d_2$  为胸墙高(m)。

入射波相对波高  $H/d$  在 0.13~0.3 的范围内变化时,胸墙所受水平波浪力随着相对波高的增大而增大(图 10)。具体而言,水深  $d=40$  cm,相对波高  $H/d=0.3$  时,4 种胸墙结构所受水平波浪力均达到最大值,前仰式、深弧式、后仰式和直立式所受水平波浪力极值分别为 1.25、1.35、1.38 和 0.90(图 10a~图 10d)。水深  $d=45$  cm,相对波高  $H/d=0.27$  时,前仰式、深弧式、后仰式和直立式胸墙所受水平波浪力均达到最大值,对应极值分别为 2.24、2.31、2.40 和 1.72(图 10e~图 10h)。

入射波相对波长  $L/d$  在 3.32~9.24 的范围内变化时,斜坡堤典型胸墙迎浪面所受水平波浪力随着相对波长的增大呈现先增大、后减少、再增大的变化趋势(图 10)。具体而言,水深  $d=40$  cm 时,前仰式与直立式胸墙在相对波高  $H/d=0.20$ 、0.25 和 0.30 情境下,胸墙水平波浪力的峰值出现在相对波长  $L/d=9.24$ ,在相对波高  $H/d=0.3$  时对应的极值分别为 1.25 和 0.90;在相对波高  $H/d=0.15$  情境下,胸墙水平波浪力的峰值出现在相对波长  $L/d=4.84$ ,对应的极值分别为 0.61 和 0.43。深弧式与后仰式胸墙在相对波高  $H/d=0.3$  情境下,胸墙水平波浪力的峰值出现在相对波长  $L/d=9.24$ ,对应的极值分别为 1.35 和 1.38;在相对波高  $H/d=0.15$ 、0.20 和 0.25 情境下,胸

墙水平波浪力的峰值出现在相对波长  $L/d=4.84$ ,在相对波高  $H/d=0.25$  时对应的极值分别为 1.07 和 1.13(图 10a~图 10d)。水深  $d=45$  cm 时,不同相对波高条件下,前仰式、深弧式、后仰式和直立式胸墙所受水平波浪力的峰值均出现在相对波长  $L/d=9.24$ ,在相对波高  $H/d=0.27$  时对应的极值分别 2.24、2.31、2.40 和 1.72(图 10e~图 10h)。

入射波相对波高  $H/d$  在 0.13~0.3 的范围内变化时,胸墙所受波浪力矩随着相对波高的增大而单调增加(图 11)。具体而言,水深  $d=40$  cm,相对波高  $H/d=0.3$  时,4 种胸墙结构所受波浪力矩均达到最大值,前仰式、深弧式、后仰式和直立式所受波浪力矩极值分别为 0.16、0.18、0.17 和 0.11(图 11a~图 11d)。水深  $d=45$  cm,相对波高  $H/d=0.27$  时,前仰式、深弧式、后仰式和直立式胸墙所受波浪力矩均达到最大值,对应极值分别为 0.27、0.30、0.31 和 0.21(图 11e~图 11h)。

入射波相对波长  $L/d$  在 3.32~9.24 的范围内变化时,斜坡堤典型胸墙迎浪面所受波浪力矩随着相对波长的增大同水平波浪力的变化趋势相似,也呈现先增大、后减少、再增大的变化趋势(图 11)。具体而言,水深  $d=40$  cm 时,前仰式与直立式胸墙在相对波高  $H/d=0.20$ 、0.25 和 0.30 情境下,胸墙波浪力矩的峰值出现在相对波长  $L/d=9.24$ ,在相对波高  $H/d=0.3$  时对应的极值分别为 0.16 和 0.11;在相对波高  $H/d=0.15$  情境下,胸墙波浪力矩的峰值出现在相对波长  $L/d=4.84$ ,对应的极值分别为 0.055 和 0.043。深弧式胸墙在相对波高  $H/d=0.30$  情境下,胸墙波浪力矩的峰值出现在相对波长  $L/d=9.24$ ,对应的极值为 0.18;在相对波高  $H/d=0.15$ 、0.20 和 0.25 情境下,胸墙波浪力矩的峰值出现在相对波长  $L/d=4.84$ ,在相对波高  $H/d=0.25$  时对应的极值为 0.13。后仰式胸墙在相对波高  $H/d=0.15$ 、0.25 和 0.3 情境下,胸墙波浪力矩的峰值出现在相对波长  $L/d=4.84$ ,在相对波高  $H/d=0.3$  时对应的极值为 0.17;在相对波高  $H/d=0.2$  情境下,胸墙波浪力矩的峰值出现在相对波长  $L/d=9.24$ ,对应的极值为 0.11(图 11a~图 11d)。水深  $d=45$  cm 时,不同相对波高条件下,前仰式、深弧式、后仰式和直立式胸墙所受波浪力矩的峰值均出现在相对波长  $L/d=9.24$ ,在相对波高  $H/d=0.27$  时对应的极值分别 0.27、0.30、0.31 和 0.21(图 11e~图 11h)。

从入射波相对波高与波长对斜坡堤胸墙所受波浪力(矩)影响的结果可以看出,相对波高与波长均

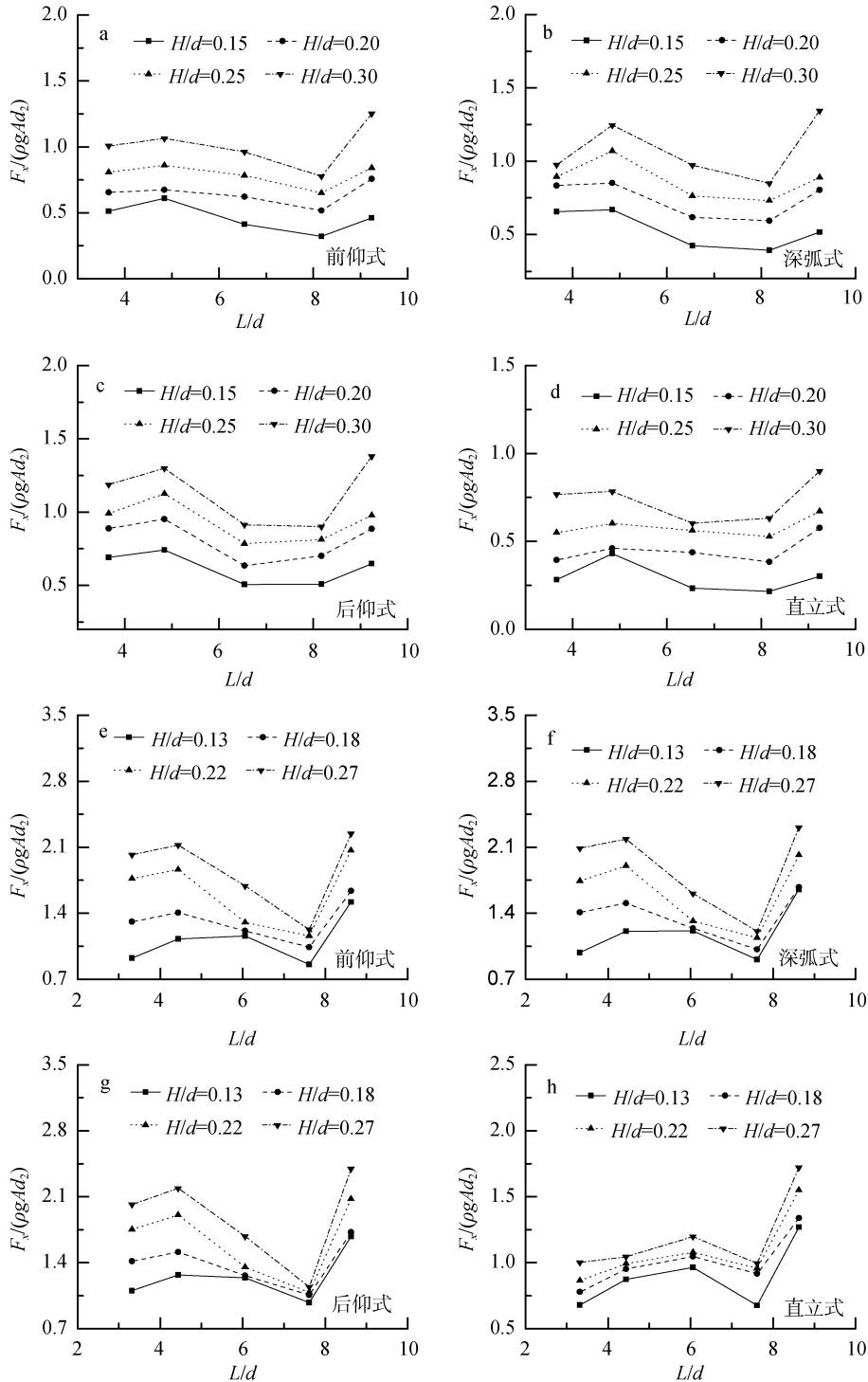


图 10 不同结构型式胸墙所受波浪力与入射波相对波高与波长的关系

Fig.10 Wave forces versus relative wave heights and wave lengths of different crest walls  
a-d:  $d=40$  cm; e-h:  $d=45$  cm

对斜坡堤胸墙所受波浪力(矩)影响显著。在本次试验范围内, 胸墙迎浪面所受波浪力和波浪力矩均随着相对波长的增大呈现先增大、后减少、再增大的变化趋势。而斜坡堤胸墙所受波浪力和波浪力矩均随着相对波高的增大呈现单调增加的变化趋势。

### 2.3 斜坡坡度对波浪力的影响

以前仰式胸墙为例, 图 12 和图 13 分别给出了水深  $d=35$  cm 条件下, 斜坡坡度为 1.25、1.75 和 2.25 时, 胸墙所受波浪力和波浪力矩与斜坡坡度的关系。

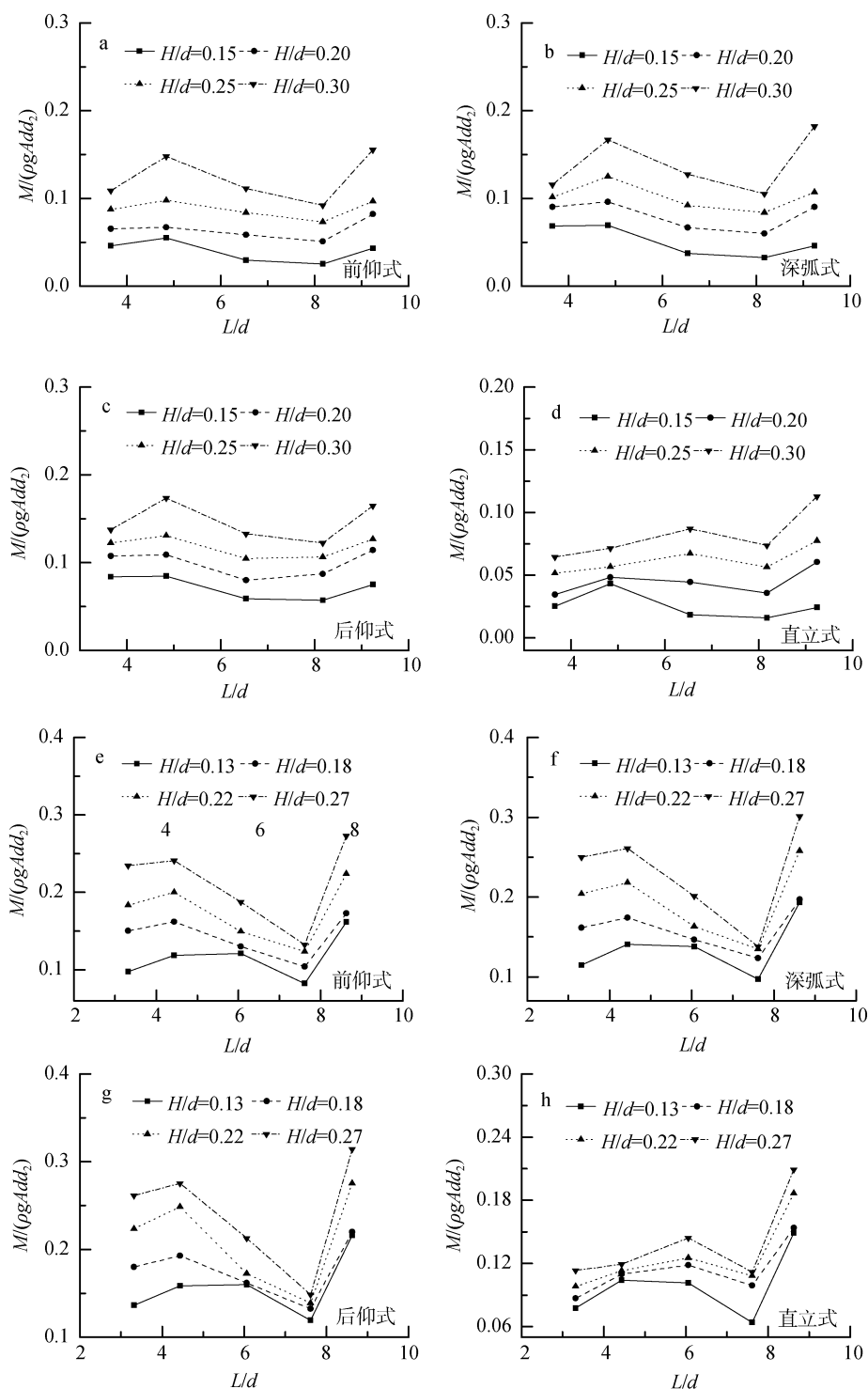


图 11 不同结构型式胸墙所受波浪力矩与入射波相对波高和波长的关系

Fig.11 Wave moments versus relative wave heights and wave lengths of different crest walls  
a-d:  $d=40\text{cm}$ ; e-h:  $d=45\text{cm}$

其横坐标为斜坡坡度  $i$ , 纵坐标为前仰式胸墙无量纲化的波浪力  $F/(\rho g A d_2)$  或波浪力矩  $M/(\rho g A d_2)$ , 各变量含义如前所述。

斜坡坡度  $i$  在 1.25~2.25 的范围内变化时, 前仰

式胸墙迎浪面所受波浪力和波浪力矩随着斜坡坡度的增大而减小。具体而言, 在周期  $T=1.0\text{ s}$ , 相对波高  $H/d=0.29$  和  $0.34$  条件下, 胸墙所受波浪力和波浪力矩随斜坡坡度增大而减小的速率较相对波高  $H/d=0.17$

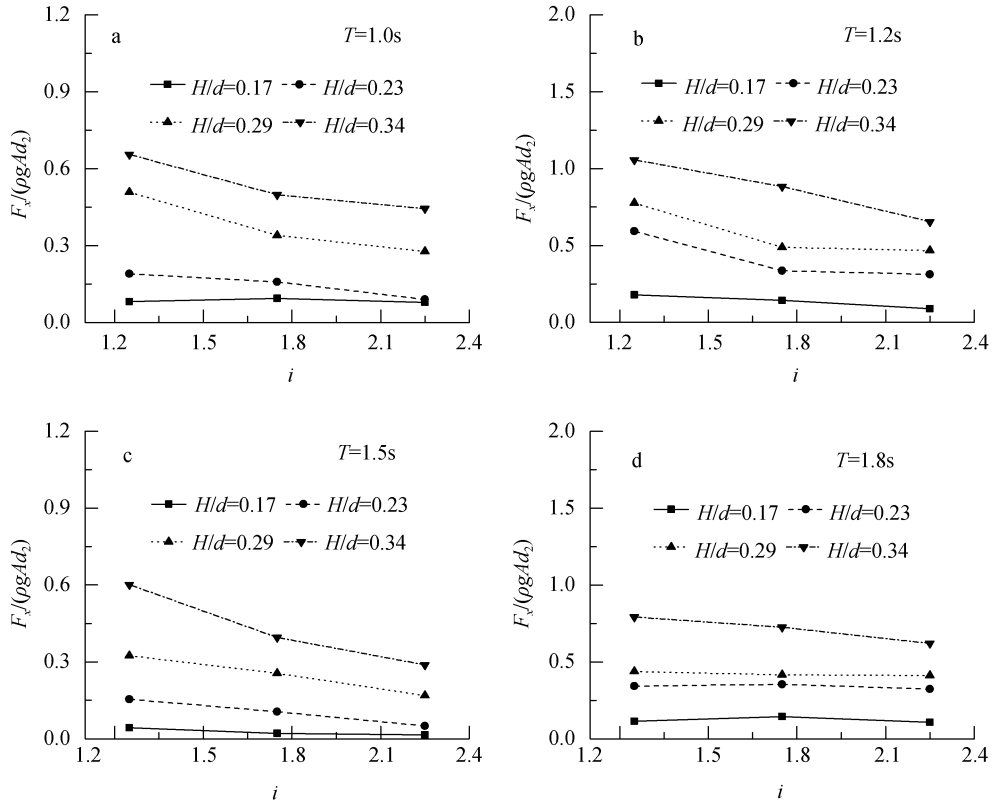


图 12 前仰式胸墙所受波浪力与斜坡坡度关系

Fig.12 Wave forces on the leaning-front crest wall versus the slope

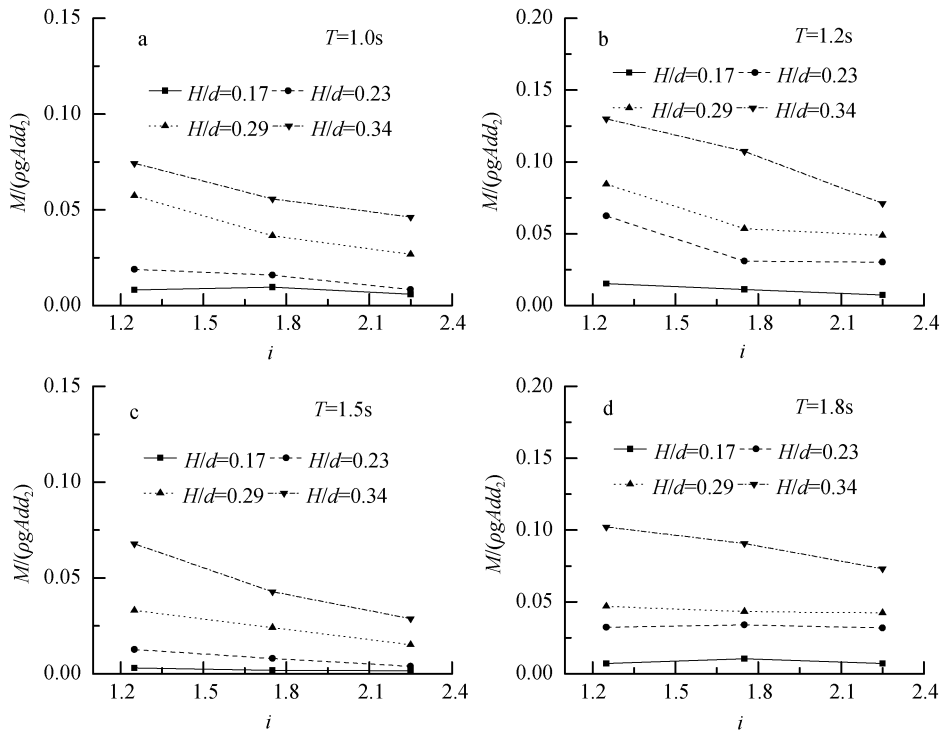


图 13 前仰式胸墙所受波浪力矩与斜坡坡度关系

Fig.13 Wave moments on the leaning-front crest wall versus the slope



和 0.23 时大。周期  $T=1.2$  s、1.5 s 和 1.8 s, 相对波高  $H/d=0.34$  时, 胸墙所受波浪力和波浪力矩随斜坡坡度增大而减小的速率较相对波高  $H/d=0.17$ 、0.23 和 0.29 时大。此外, 周期  $T=1.8$  s、不同相对波高条件下, 胸墙所受波浪力和波浪力矩随斜坡坡度增大而减小的速率较  $T=1.0$  s、1.2 s 和 1.5 s 时小。

由不同波浪要素条件下, 前仰式胸墙所受波浪力和波浪力矩随斜坡坡度变化的分析结果可以看出, 斜坡坡度对胸墙所受波浪力和波浪力矩影响显著。胸墙所受波浪力和波浪力矩均随着斜坡坡度的增大而呈现减小的变化趋势。这是由于波浪在上升相同高度的情况下, 较缓坡度的斜坡长度较长, 因此损耗的波浪能量较大, 作用到胸墙上的波浪力会相对地减小。

#### 2.4 斜坡堤胸墙结构型式对波浪力的影响

图 14 和图 15 分别给出了斜坡堤胸墙结构型式与其所受波浪力和波浪力矩的关系。其横坐标为相对波高  $H/d$ , 纵坐标为斜坡堤胸墙无量纲化的波浪力  $F/(\rho g A d_2)$  或波浪力矩  $M/(\rho g A d d_2)$ , 各变量含义如前所述。

斜坡堤胸墙的结构型式对其所受波浪力影响显著。斜坡堤弧形胸墙所受波浪力明显大于直立式胸墙。在斜坡堤弧形胸墙中, 前仰式胸墙所受波浪力最小而后仰式胸墙所受波浪力最大。具体而言, 小周期 ( $T=1.0$  s 和  $T=1.2$  s) 作用时, 前仰式、深弧式和后仰式胸墙所受波浪力的递增速率与大周期 ( $T=1.5$  s、 $T=1.8$  s 和  $T=2.0$  s) 作用时相比略大。此外, 相同波高与周期条件下, 与小水深 ( $d=40$  cm) 作用时相比, 大水深 ( $d=45$  cm) 作用时, 弧形胸墙所受波浪力远大于直立式胸墙所受波浪力。

斜坡堤胸墙的结构型式对其所受波浪力矩影响也显著。与对胸墙所受波浪力的影响相似, 斜坡堤弧形胸墙所受波浪力矩明显大于直立式胸墙, 在斜坡堤弧形胸墙中, 前仰式胸墙所受波浪力矩最小而后仰式胸墙所受波浪力矩最大。具体而言, 在本试验水深条件下 ( $d=40$  cm、 $d=45$  cm), 与大周期 ( $T=1.5$  s、 $T=1.8$  s 和  $T=2.0$  s) 作用时相比, 小周期 ( $T=1.0$  s 和  $T=1.2$  s) 作用时, 弧形胸墙所受波浪力矩远大于直立式胸墙所受波浪力矩。

由斜坡堤胸墙结构型式对胸墙所受波浪力和波浪力矩的影响分析结果可以看出, 相同波浪要素条件下, 斜坡堤弧形胸墙迎浪面所受波浪力(矩)大于

直立式胸墙迎浪面所受波浪力(矩)。这是由于斜坡堤弧形胸墙能够改变上涌水体的运动方向, 水体在运动过程中的速度方向发生改变, 甚至水体水平方向速度与来波方向相反, 从而对弧形胸墙产生更大的反作用力。在斜坡堤弧形胸墙中, 后仰式胸墙迎浪面所受波浪力(矩)最大, 前仰式胸墙受力最小, 深弧式胸墙受力居中。这是由于后仰式胸墙整体后倾, 且其下部与斜坡护面相切, 有效减少了后仰式胸墙前的壅水, 便于引导更多的水体爬上后仰式胸墙, 并对其产生较大的冲击作用。前仰式胸墙下部与斜坡护面存在一定的角度, 沿斜坡上爬的破碎水体首先冲击前仰式胸墙底部, 损耗部分能量后进而沿着胸墙上爬, 对前仰式胸墙产生冲击作用。在实际工程中, 应特别注意前仰式胸墙底部的冲刷, 确保胸墙的稳定。

通过对不同结构型式胸墙受力进行统计分析可以得出, 前仰式胸墙迎浪面所受水平波浪力是直立式胸墙的 1.16~1.81 倍, 所受波浪力矩是直立式胸墙的 1.05~2.07 倍; 深弧式胸墙迎浪面所受水平波浪力是直立式胸墙的 1.18~2.14 倍, 所受波浪力矩是直立式胸墙的 1.23~2.71 倍; 后仰式胸墙迎浪面所受水平波浪力是直立式胸墙的 1.21~2.45 倍, 所受波浪力矩是直立式胸墙的 1.28~3.55 倍。

### 3 结论

本文通过规则波物理模型试验, 对不同结构型式斜坡堤胸墙所受波浪力的影响因素进行了研究。在本次试验条件范围内, 主要得出以下结论:

1) 入射波相对波长  $L/d$  在 3.32~9.24 的范围内变化时, 斜坡堤胸墙迎浪面所受到的波浪力和波浪力矩随着相对波长的增大, 呈现先增大、后减少、再增大的变化趋势。入射波相对波高  $H/d$  在 0.13~0.30 的范围内变化时, 斜坡堤胸墙所受到的波浪力和波浪力矩随着入射波波高的增大而增大。

2) 斜坡坡度对胸墙迎浪面所受波浪力和波浪力矩影响显著。斜坡坡度  $i$  在 1.25~2.25 的范围内变化时, 胸墙迎浪面所受波浪力和波浪力矩均随着斜坡坡度的增大而减小。

3) 相同波浪要素条件下, 斜坡堤弧形胸墙迎浪面所受波浪力(矩)大于直立式胸墙所受波浪力(矩)。在斜坡堤弧形胸墙中, 后仰式胸墙迎浪面所受波浪力(矩)较其它两种胸墙(深弧式和前仰式)迎浪面所受波浪力(矩)大。

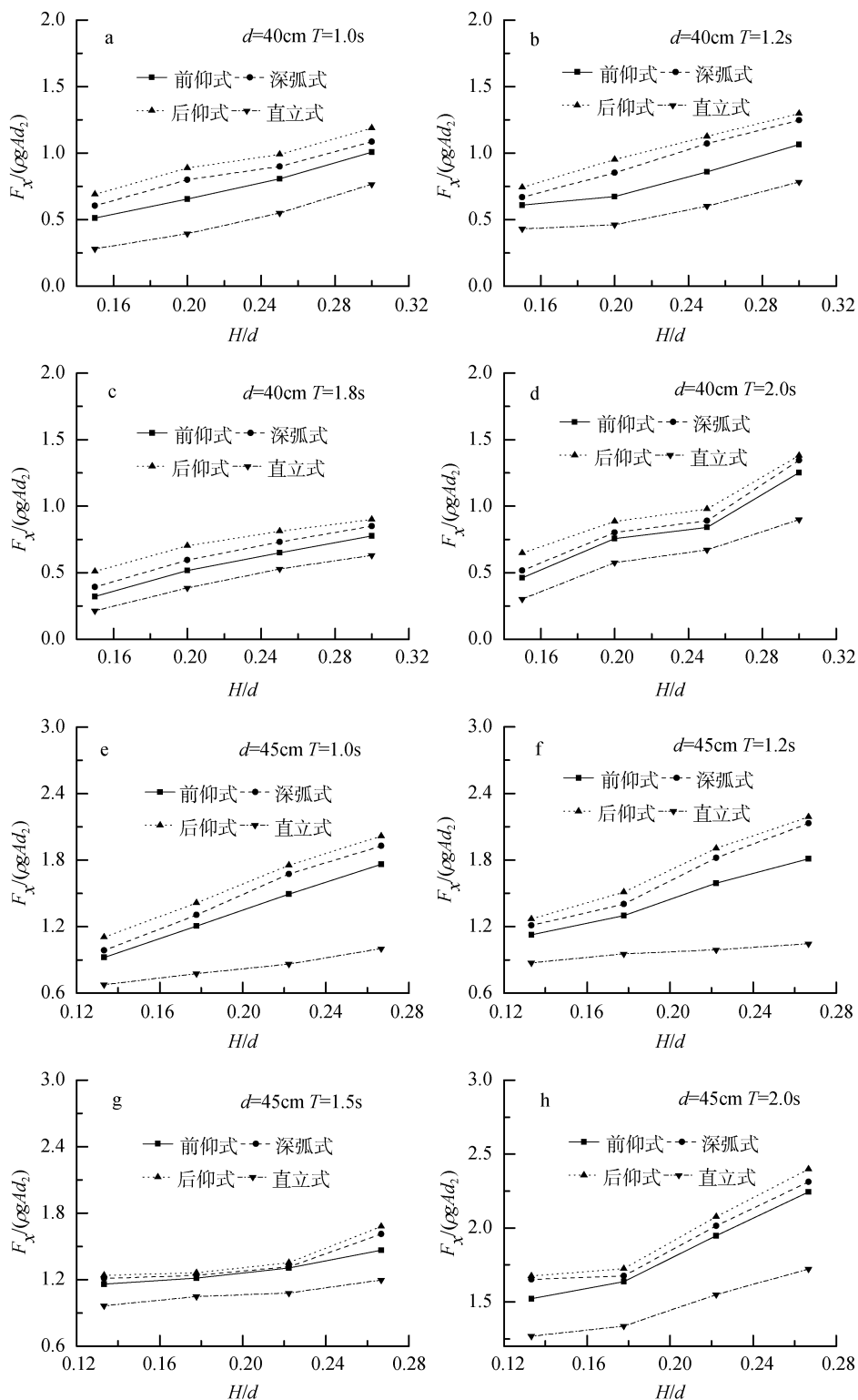


图 14 不同结构型式胸墙所受波浪力比较

Fig.14 Comparison of wave forces on different types of crest walls

4) 前仰式胸墙迎浪面所受水平波浪力是直立式胸墙的 1.16~1.81 倍, 所受波浪力矩是直立式胸墙的 1.05~2.07 倍; 深弧式胸墙迎浪面所受水平波浪力是

直立式胸墙的 1.18~2.14 倍, 所受波浪力矩是直立式胸墙的 1.23~2.71 倍; 后仰式胸墙迎浪面所受水平波浪力是直立式胸墙的 1.21~2.45 倍, 所受波浪力矩是

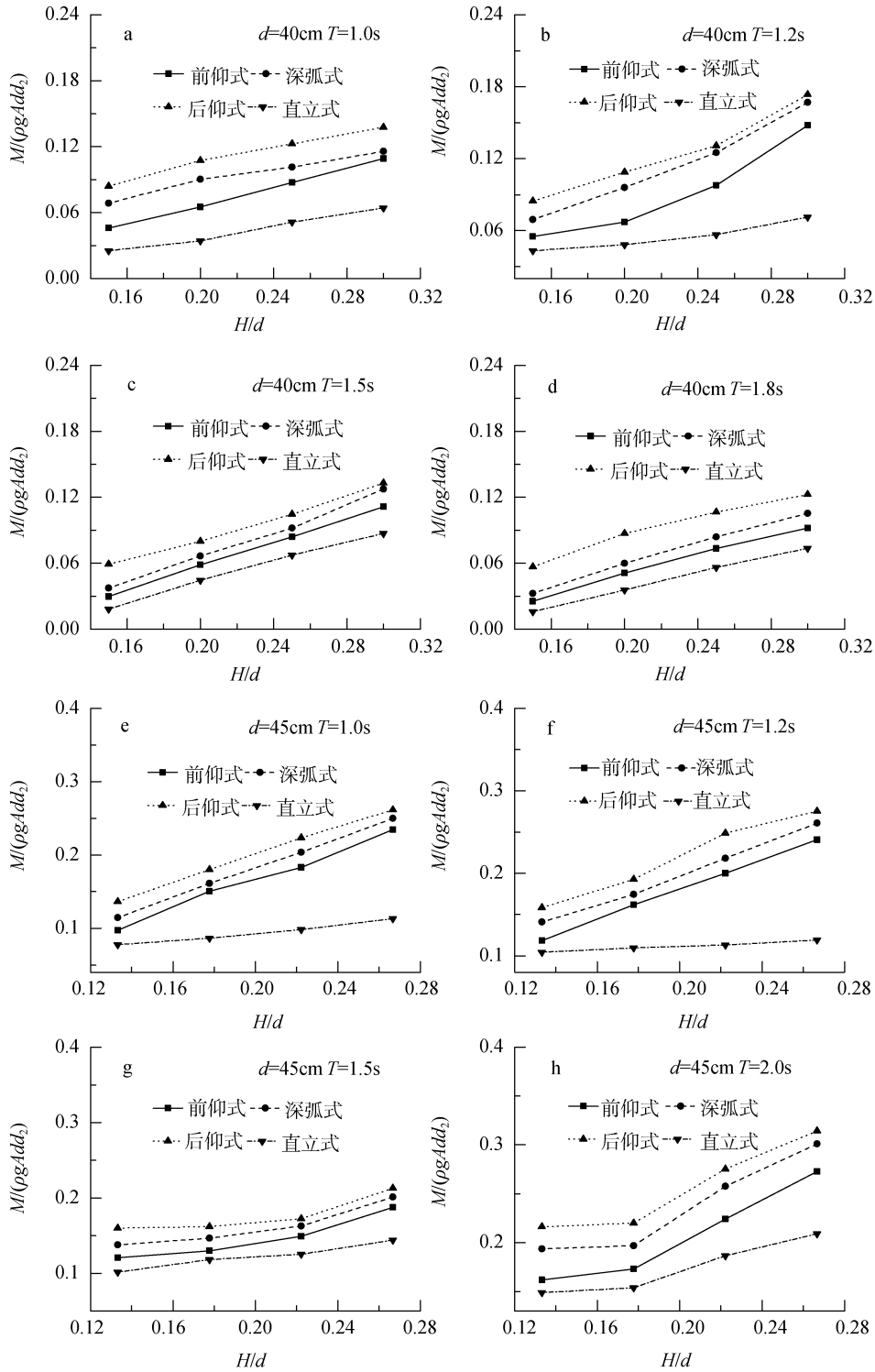


图 15 不同结构型式胸墙所受波浪力矩比较

Fig.15 Comparison on of wave moments on different types of crest walls

直立式胸墙的 1.28~3.55 倍。

致谢: 非常感谢大连理工大学任冰教授、王永学教授、王国玉副教授和高级工程师李广伟老师对论文工作的帮助, 同时非常感谢鲁东大学王庆教授对论文写作思路的耐心

指导, 也非常感谢匿名评阅人和编辑的辛苦工作!

参考文献:

[1] 罗兴远. 弧型胸墙斜坡护岸越浪量及新测量方法的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.

- [2] Kortenhaus A, Pearson J, Bruce T, et al. Influence of parapets and recurves on wave overtopping and wave loading of complex vertical walls[C]//American Society of Civil Engineers. Coastal Structures 2003. Coastal Structures 2003 - Proceedings of the Conference, Portland, ASCE, 2003: 369-381.
- [3] Tuan T Q, Thin N V. Numerical study of wave overtopping on sea-dikes with crown-walls[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2014, 8(4): 367-382.
- [4] Tuan T Q, Oumeraci H. A numerical model of wave overtopping on sea-dikes[J]. Coastal Engineering, 2010, 57(8): 757-772.
- [5] Tuan T Q. Influence of low sea-dike crown-walls on wave overtopping discharge[J]. Coastal Engineering Journal, 2013, 55(4): 1-26.
- [6] 陈国平, 周益人, 琚烈红. 海堤护面型式对波浪爬高和越浪的影响[J]. 水运工程, 2005, 10: 28-30.
- [7] Anand K V, Sundar V, Sannasiraj S A. Dynamic pressures on curved front seawall models under random waves[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2010, 22(5): 538-544.
- [8] Nørgaard J Q H, Andersen T L, Burcharth, H F. Wave loads on rubble mound breakwater crown walls in deep and shallow water wave conditions[J]. Coastal Engineering, 2013, 80: 137-147.
- [9] 琚烈红. 典型胸墙的波浪力和越浪量物理模型试验与分析[D]. 南京: 南京水利科学研究所, 2004.
- [10] 王登婷. 弧形防浪墙的模型试验[J]. 水运工程, 2004, 7: 1-5.
- [11] 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.
- [12] 吴苏舒, 张玮. 引导式弧形胸墙返浪效果研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(7): 668-671.
- [13] 焦颖颖, 郭晓宇, 王本龙, 等. 规则波中弧形返浪墙的非线性水动力载荷数值模拟[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2007, 22(4): 434-441.
- [14] 李雪艳. 弧形防浪墙水动力特性的试验研究与数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [15] Li X Y, Ren B, Wang G Y, et al. Numerical simulation of hydrodynamic characteristics on an arc crown wall using volume of fluid method based on BFC[J]. Journal of Hydrodynamics, 2011, 23(6): 767-776.
- [16] 王颖, 薛雷平, 刘桦. 弧形防浪墙波浪力的试验研究[J]. 水道港口, 2007, 28(2): 81-85.

## Factors influencing wave load on typical crest walls of sloping breakwaters

LI Xue-yan<sup>1</sup>, FU Cong<sup>1</sup>, FAN Qing-lai<sup>1</sup>, WANG Gang<sup>2</sup>

(1. Coast Institute, Ludong University, Yantai 264025, China; 2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Received: Jan., 22, 2015

Key words: crest wall; wave load; influencing factor; sloping breakwater; experiment

**Abstract:** To determine factors influencing the wave load on typical crest walls of sloping breakwaters, we performed a physical model experiment on four types of crest walls: the leaning-front, deep-arc, leaning-back, and vertical types. We obtained the wave load from the integral of the wave pressure at different locations on the crest walls. Then, we analyzed the relation between the wave load and relative wave height, relative wave length, slope, and type of crest wall. The research results show that, the relative wave height and length significantly affect the wave load. The wave load increases with an increase in the relative wave height and presents a variation trend in which it first increases, then decreases, and finally increases with an increase in the relative wave length. However, wave loads decrease with an increase in the slope. For the same wave conditions, the wave load on an arc crest wall of sloping breakwaters is greater than that on a vertical crest wall. Moreover, among arc crest walls, the wave load on a leaning-front crest wall is less than those on deep-arc and leaning-back crest walls. These research results expand our knowledge about wave loads on the crest walls of sloping breakwaters and provide theoretical direction for subsequent engineering designs.

(本文编辑: 李晓燕)