

· 港口 ·



# 不同圆弧半径直立堤胸墙 波浪力的试验与分析\*

李雪艳<sup>1</sup>, 程永舟<sup>2</sup>, 王 岗<sup>3</sup>

(1. 鲁东大学 海岸研究所, 山东 烟台 264025; 2. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410004;  
3. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为比较直立堤胸墙圆弧半径对其所受波浪力的影响, 设计半径分别为 45、67、98 cm 共 3 种弧形胸墙以及直立式胸墙进行相关物理模型试验。通过将胸墙迎浪面不同测点波浪压力进行积分获得波浪总力, 讨论相对波高、相对波长和圆弧半径对胸墙波浪力的影响。研究表明, 胸墙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。相同波浪要素条件下, 弧形胸墙波浪力较直立式大; 在 3 种弧形胸墙中, 波浪力随圆弧半径的增大而减小, 半径为 45 cm 的弧形墙受力最大。

**关键词:** 胸墙; 圆弧半径; 波浪力; 直立堤; 试验研究

中图分类号: U 656. 2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)03-0040-06

## Test and analysis of wave load on different crest walls of vertical breakwater

LI Xue-yan<sup>1</sup>, CHENG Yong-zhou<sup>2</sup>, WANG Gang<sup>3</sup>

(1. Coast Institute, Ludong University, Yantai 264025, China;

2. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China;

3. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** To compare the effects of the arc radius of different vertical breakwater crest walls on its wave load, we carry out the physical model experiment about the three arc crest walls with the arc radius of 45 cm, 67 cm and 98 cm respectively and the vertical crest wall, and obtain wave loads from the integral of the wave pressures on different measure locations of crest walls. Then, we analyze the relationship between the wave load and the relative wave height, relative wave length and the arc radius. The research results show that the wave loads increase with the increase of the relative wave height and they present the variation trend of firstly increase-then decrease-finally increase with the increase of the relative wave length. For the same wave conditions, the wave loads on the arc crest walls are bigger than those on the vertical crest wall. Among the three arc crest walls, the wave loads decrease with the increase of the arc radius and the maximum occurs on the arc crest wall with the arc radius of 45 cm.

**Keywords:** crest wall; arc radius; wave load; vertical breakwater; experimental investigation

防波堤因其具有阻断波浪的冲击力、维持港内水面平稳、保护港口免受恶劣天气的影响、方

便船舶安全停泊和作业等优点, 目前在海岸工程设施中得到广泛应用。为了减小堤身断面尺寸从

收稿日期: 2015-09-11

\*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, 博士, 讲师, 从事波浪与海洋结构物作用。

而降低造价,堤坝顶部通常会设置胸墙。胸墙的稳定性对其后方掩护水域有着举足轻重的作用,因此胸墙的受力研究显得尤为重要。Anand等<sup>[1]</sup>对随机波作用下曲线形式防浪墙的水动力进行了研究。Nørgaard等<sup>[2]</sup>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>[3]</sup>和王登婷<sup>[4]</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。王颖<sup>[5]</sup>利用安置在胸墙上的三分力天平,直接测得胸墙所受到的波浪力,并分析了不同胸墙和堤坝组合对其所受波浪力和越浪量的影响。Kortenhaus等<sup>[6]</sup>比较系统地研究了直立堤弧形胸墙对其越浪量和波浪力的影响,通过改变胸墙的几何尺寸来降低越浪量并减小波浪力。李雪艳等<sup>[7-8]</sup>就直立堤弧形墙开展了部分相关的水动力数值模拟研究。上述研究或是针对直立墙、或是针对单一的弧形墙开展,而综合比较不同结构形式弧形墙的研究还较为少见,因此,进一步开展此类相关研究对于指导弧形胸墙的工程设计具有一定实际意义。

## 1 模型设计与试验参数

试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室溢油水槽中进行,水槽尺寸为23 m × 0.8 m × 0.8 m,造波周期为0.5 ~ 3.0 s。水槽前端装有实验室自制的DL-3型液压驱动造波机,可产生平稳、重复性好的规则波,水槽末端安装有消能网用于吸收波浪能量、减少波浪反射<sup>[9]</sup>。

直立堤胸墙结构采用有机玻璃制作,弧形胸墙圆弧部分的高度 $d_2 = 32$  cm,半径 $R$ 分别为45、67、98 cm,圆心到胸墙圆弧起点的水平距离分别为45、67、98 cm,圆心到胸墙圆弧起点的垂向距离为7 cm(图1)。下部堤体采用木板制成高40 cm的堤体,内部用沙石填满,保证堤体稳定<sup>[8]</sup>。胸墙迎浪面中心线处每间隔3.5 cm布置1个压力传感器,以胸墙模型底部为坐标原点,从下至上测点距离底部高程依次为42.0、45.5、49.0、52.5、56.0、59.5、63.0、66.5、70.0 cm(图2)。直立堤胸墙放置于溢油水槽末端消能网前方约1 m处(图3)。

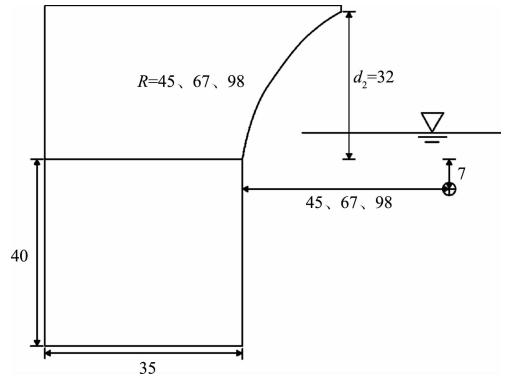


图1 直立堤胸墙结构(单位:cm)



图2 直立堤弧形胸墙试验模型

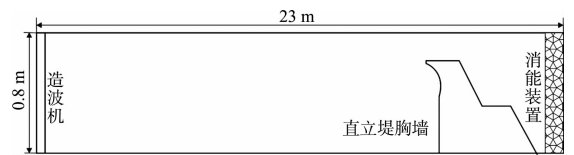


图3 试验整体布置

试验的入射波浪为规则波,入射波高 $H$ 分别为6、8、10、12 cm,周期 $T$ 分别为1.0、1.2、1.5、1.8、2.0 s,试验的水深 $d$ 分别为40、45 cm。将周期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 胸墙波浪力历时曲线

根据每一瞬时弧形胸墙迎浪面不同测点上的波浪压力,得到每一测点所代表的波浪压力作用面积上的波浪力,作用面积的宽度为两个压力传

感器圆心的距离, 约为 3.5 cm。将波浪力沿水平和垂直方向进行分解, 并进行同步积分求和得到每一瞬时弧形胸墙迎浪面所受到的水平和垂直波浪力, 同时求得相应的波浪力矩, 具体的计算方法可参见文献[8]。据此得到  $R=45\text{ cm}$ 、 $d=40\text{ cm}$ 、 $T=1.2\text{ s}$ 、 $H=12\text{ cm}$  时胸墙所受水平波浪力、垂直波浪力和波浪力矩历时曲线的试验结果, 圆弧半径为 45 cm 胸墙波浪力历时曲线见图 4。

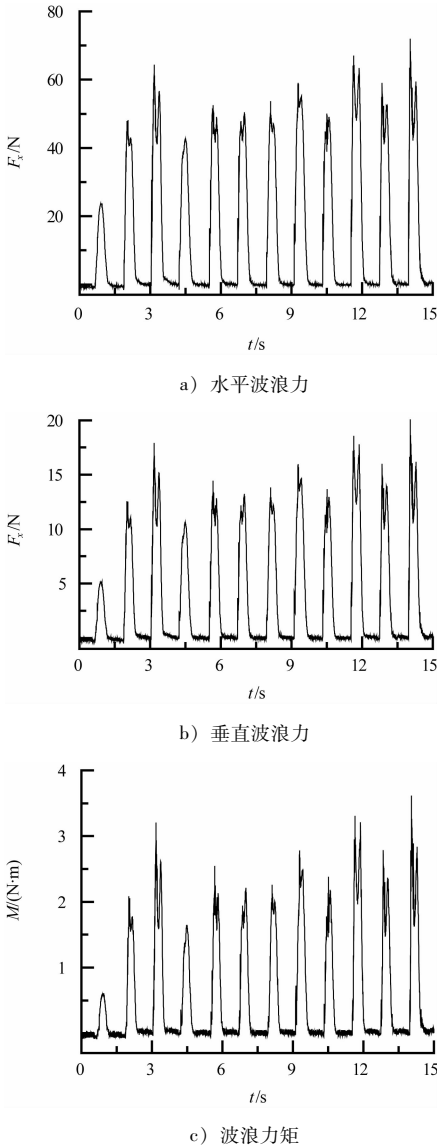


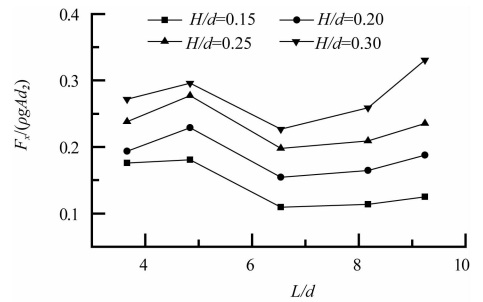
图 4 圆弧半径为 45 cm 胸墙波浪力历时曲线

### 2.2 相对波高与相对波长对波浪力的影响

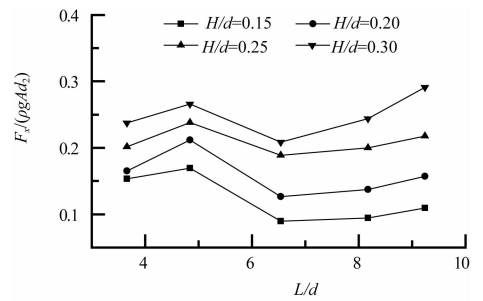
图 5 ~ 7 给出了相对波长  $L/d$  与相对波高  $H/d$  对胸墙结构所受波浪力的影响。其横坐标为入射波相对波长, 纵坐标为胸墙无量纲化的波浪力  $F/(\rho g A d_2)$  或波浪力矩  $M/(\rho g A d d_2)$ 。其中  $\rho$  为

水体密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $g$  为重力加速度( $\text{N}/\text{kg}$ ),  $A$  为波幅( $\text{m}$ ),  $L$  为波长( $\text{m}$ ),  $d$  为水深( $\text{m}$ ),  $d_2$  为胸墙高( $\text{m}$ )。

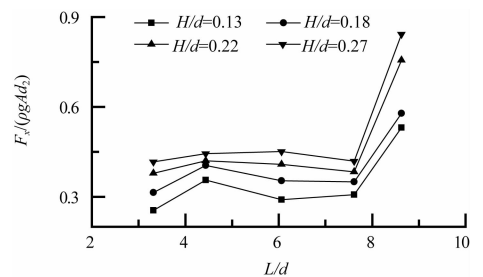
入射波相对波高  $H/d$  在 0.13 ~ 0.30 变化时, 胸墙水平波浪力、垂直波浪力以及波浪力矩, 均随着相对波高的增大而增大(图 5 ~ 7)。具体而言, 水深  $d=40\text{ cm}$ 、相对波高  $H/d=0.30$  时, 4 种胸墙结构水平波浪力均达到最大值, 圆弧半径为 45、67 cm 时值分别为 0.33、0.29; 水深  $d=45\text{ cm}$ 、相对波高  $H/d=0.27$  时, 4 种胸墙结构水平波浪力均达到最大值, 圆弧半径为 45、67 cm 时值分别为 0.93、0.87(图 5)。相对波高  $H/d=0.30$  时, 圆弧半径为 45、67 cm 时胸墙结构的垂直波浪力均达到最大值, 其值分别为 0.099、0.061(图 6)。水深  $d=40\text{ cm}$ 、相对波高  $H/d=0.30$  时, 以及水深  $d=45\text{ cm}$ 、相对波高  $H/d=0.27$  时, 4 种胸墙结构波浪力矩均达到最大值(图 7)。



a)  $R=45\text{ cm}$



b)  $R=67\text{ cm}$



c)  $R=98\text{ cm}$

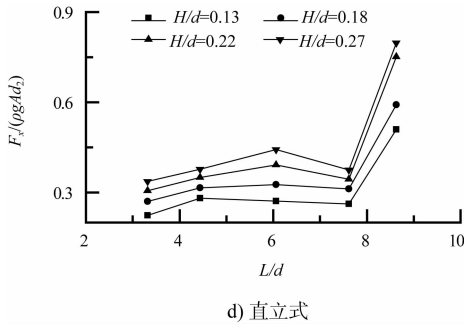


图5 不同圆弧半径胸墙水平波浪力与入射波相对波长和相对波高的关系

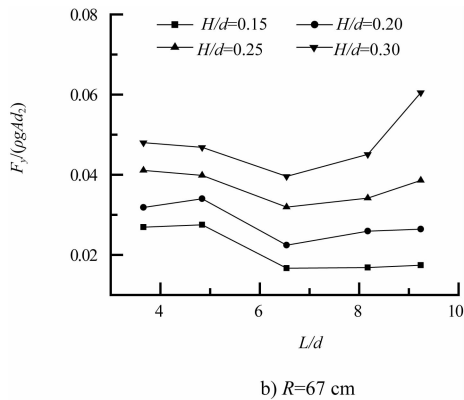
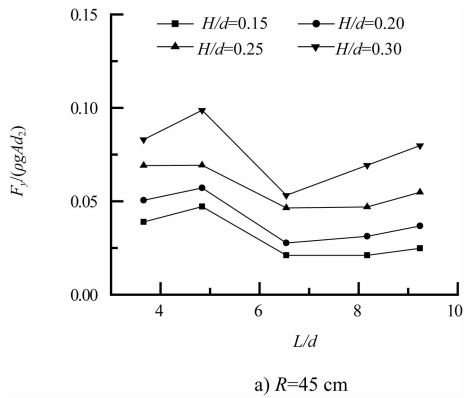


图6 不同圆弧半径胸墙垂直波浪力与入射波相对波长及相对波高的关系 (d = 40 cm)

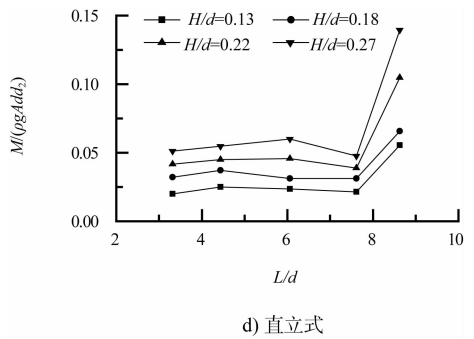
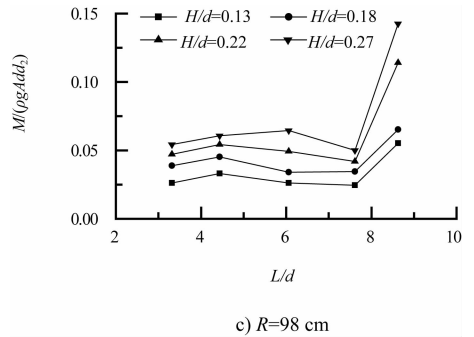
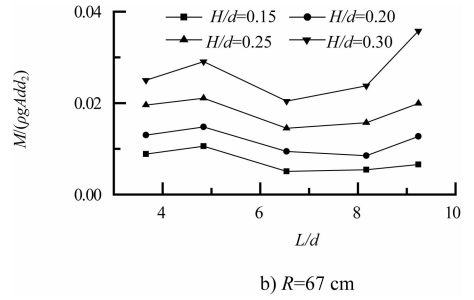
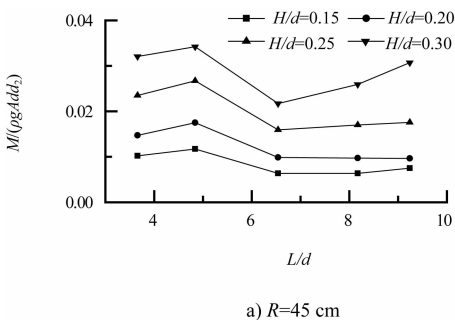


图7 不同圆弧半径胸墙波浪力矩与入射波相对波长和相对波高的关系

入射波相对波长  $L/d$  在 3.32 ~ 9.24 变化时, 胸墙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5)。具体而言, 水深  $d = 40$  cm 时, 相对波高  $H/d = 0.30$  情境下, 胸墙水平波浪力峰值出现在相对波长  $L/d = 9.24$  时, 此时圆弧半径为 45 cm 胸墙水平波浪力最大为 0.33; 相对波高  $H/d = 0.15、0.20、0.25$  情境下, 胸墙水平波浪力峰值出现在相对波长  $L/d = 4.84$  时。其中, 圆弧半径为 45 cm 胸墙水平波浪力最大为 0.24。水深  $d = 45$  cm 时, 不同相对波高条件下, 胸墙水平波浪力峰值均出现在相对波长  $L/d = 9.24$  时(图5)。

本文仅就圆弧半径为 45、67 cm 两种胸墙所受垂直波浪力进行讨论。入射波相对波长  $L/d$  在 3.32 ~ 9.24 变化时, 胸墙迎浪面所受垂直波浪力随着相对波长的增大同样呈现先增大、后减少、再增大的变化趋势 (图 6)。圆弧半径为 45 cm 胸墙, 不同相对波高条件下, 垂直波浪力峰值均出现在相对波长  $L/d = 4.84$  时。圆弧半径为 67 cm 胸墙, 在相对波高  $H/d = 0.30$  情境下, 胸墙垂直波浪力峰值出现在相对波长  $L/d = 9.24$  时; 相对波高  $H/d = 0.15$ 、0.20、0.25 情境下, 胸墙垂直波浪力峰值出现在相对波长  $L/d = 4.84$  时 (图 6)。

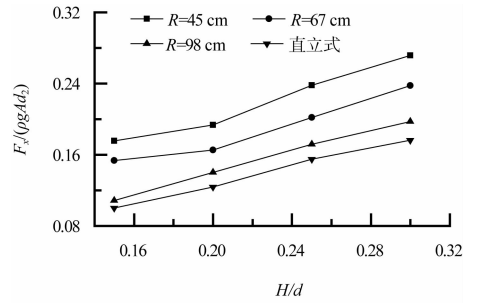
胸墙迎浪面所受波浪力矩随着相对波长的增大呈现先增大、后减少、再增大的变化趋势 (图 7), 与水平波浪力的变化趋势基本一致。具体而言, 水深  $d = 40$  cm 时, 相对波高  $H/d = 0.30$  情境下, 胸墙波浪力矩峰值出现在相对波长  $L/d = 9.24$  时 (圆弧半径为 45 cm 胸墙除外); 相对波高  $H/d = 0.15$ 、0.20、0.25 情境下, 胸墙波浪力矩峰值出现在相对波长  $L/d = 4.84$  时。其中, 圆弧半径为 45 cm 胸墙的波浪力矩最大为 0.0267。水深  $d = 45$  cm 时, 不同相对波高条件下, 胸墙波浪力矩的峰值均出现在相对波长  $L/d = 9.24$  时 (图 7)。

从入射波相对波高与相对波长对胸墙所受波浪力 (矩) 影响结果可以看出, 相对波高与相对波长均对胸墙所受波浪力 (矩) 影响显著。在本次试验范围内, 胸墙迎浪面所受水平、垂直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, 具有非线性的变化特征。胸墙所受水平、垂直波浪力和波浪力矩均随着相对波高的增大而增大。

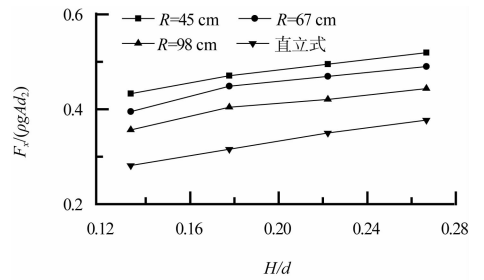
### 2.3 胸墙圆弧半径对波浪力的影响

胸墙迎浪面所受波浪力 (矩) 随着胸墙圆弧半径的增大而减小。圆弧半径为 45 cm 胸墙所受波浪力 (矩) 最大, 直立式胸墙所受波浪力 (矩) 最小。具体而言, 圆弧半径为 45 cm 胸墙水平波浪力是直立式胸墙的 1.16 ~ 1.76 倍, 波浪力矩是直立式胸墙的 1.22 ~ 2.03 倍; 圆弧半径为 67 cm 胸墙水平波浪力是直立式胸墙的 1.12 ~ 1.53 倍, 波

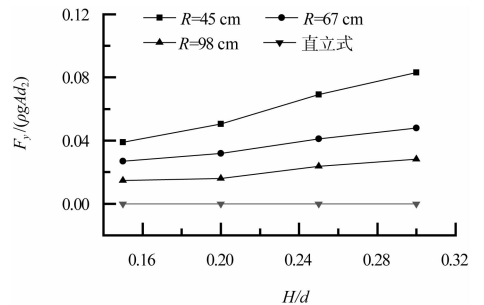
浪力矩是直立式胸墙的 1.15 ~ 1.76 倍; 圆弧半径为 98 cm 胸墙水平波浪力是直立式胸墙的 1.02 ~ 1.36 倍, 波浪力矩是直立式胸墙的 1.05 ~ 1.32 倍。此外, 胸墙水平波浪力和波浪力矩随圆弧半径增大而减小的速率较垂直波浪力随其变化的速率慢 (图 8)。



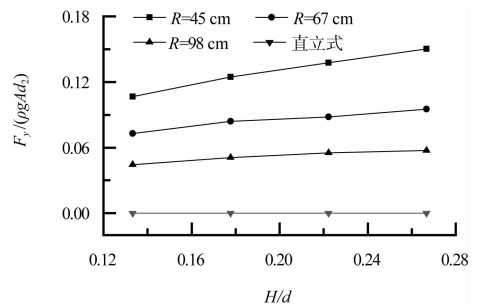
a)  $d=40$  cm,  $T=1.0$  s时  $F_x$



b)  $d=45$  cm,  $T=1.2$  s时  $F_x$



c)  $d=40$  cm,  $T=1.0$  s时  $F_y$



d)  $d=45$  cm,  $T=1.2$  s时  $F_y$

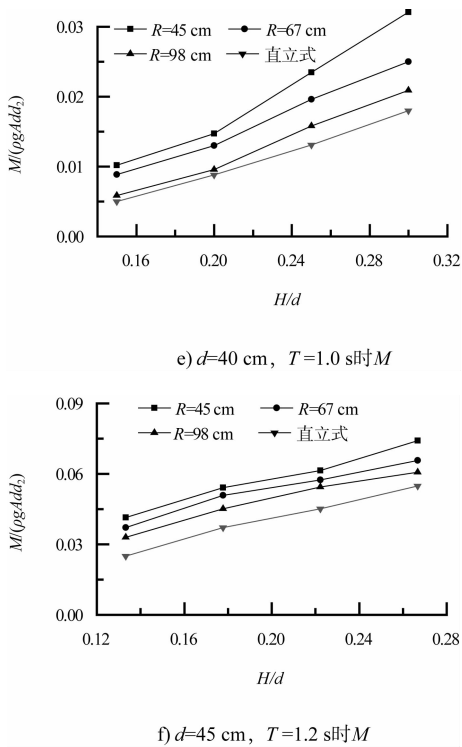


图8 不同圆弧半径胸墙迎浪面所受波浪力(矩)比较

从上述不同圆弧半径胸墙迎浪面所受波浪力(矩)的分析结果可以看出,胸墙的圆弧半径大小对其迎浪面所受波浪力(矩)影响显著。圆弧半径最小的45 cm胸墙所受波浪力(矩)最大,随着圆弧半径增大至无穷大(直立式),胸墙所受波浪力(矩)呈现单调减小的变化趋势,直立式胸墙所受波浪力(矩)最小。这主要是由于弧形胸墙的圆弧面具有聚能作用,半径越小聚能效果越好。

### 3 结论

1) 胸墙迎浪面所受波浪力(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。随着相对波高的增大而单调增加。

2) 胸墙的圆弧半径对其迎浪面所受波浪力(矩)影响显著。胸墙所受波浪力(矩)随着圆弧半径的增大呈现减小的变化趋势,弧形胸墙迎浪面所受波浪力(矩)明显大于直立式胸墙所受波浪力(矩),圆弧半径为45 cm胸墙所受波浪力(矩)最大,而直立式胸墙受力(矩)最小。

3) 圆弧半径为45、67、98 cm胸墙所受水平波浪力分别是直立式胸墙的1.16~1.76倍、1.12~1.53倍和1.02~1.36倍,其所受波浪力矩分别是直立式胸墙的1.22~2.03倍、1.15~1.76倍和1.05~1.32倍。

致谢:本论文的研究工作曾得到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等的热心帮助,同时也受益于与鲁东大学王庆教授的多次讨论,在此向上述各位教授及匿名评阅人表示诚挚地感谢!

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 王登婷. 弧形防浪墙的模型试验[J]. 水运工程, 2004(7): 1-5.
- [5] 王颖. 弧形防浪墙波浪力的试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [6] Kortenhaus A, Allsop N W H, Pearson J, et al. Influence of parapets and recures on wave overtopping and wave loading of complex vertical walls [C]//Coastal Structures 2003-Proceedings of the Conference. USA: American Society of Civil Engineers, 2003.
- [7] Li X Y, Ren B, Wang G Y, et al. Numeical simulation of hydrodynamic characteristics on an arc crown wall using volume of fluid method based on BFC [J]. Journal of Hydrodynamics: Ser B, 2011, 23(6): 767-776.
- [8] 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.
- [9] 杨彪, 陈智杰, 王国玉, 等. 双浮箱一双水平板式浮式防波堤试验研究[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 2014, 29(1): 40-49.

(本文编辑 武亚庆)