

斜坡堤胸墙结构反浪效果的试验研究^{*}

李雪艳,王 庆

(鲁东大学 海岸研究所,山东 烟台 264025)

摘 要:为客观评价胸墙结构型式的合理性,针对前仰式、深弧式、后仰式和直立式四种胸墙结构开展了相关物理模型试验。采用压力传感器测量胸墙波浪压力,通过积分求和获取波浪总力。采用数码相机记录不同结构型式胸墙的反浪效果,同时利用称重法获得不同波浪要素条件下胸墙越浪量。试验结果表明:弧形胸墙的反浪效果明显优于直立式,但其受力较直立式大。3种弧形胸墙中,前仰式具有较好的反浪效果且受力较小。由此,建议工程设计采用前仰式胸墙结构。

关键词:胸墙;反浪效果;波浪力;斜坡堤

中图分类号: U656.2 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1002-3682.2015.04.004

斜坡堤因其具有防御波浪侵袭、维护后方掩护水域平稳、对波浪反射弱、对地基不均匀沉降不敏感和施工较简单等优点,目前在海岸工程中得到了广泛应用。而为了减小堤身断面尺寸从而降低造价,堤坝顶部通常会设置胸墙^[1]。

有关胸墙受力和墙顶越浪的研究已取得了较多成果。曾婧扬等^[2]和张金牛等^[3]分别采用数值模拟和物理模型试验方法对胸墙越浪进行了研究。Tuan^[4]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。Nørgaard等^[5]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^[1,6]和王登婷^[7]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的关系。李雪艳等^[8-9]就直立堤弧墙进行了部分相关水动力数值模拟研究。前人研究^[4-5,8]多是针对单一直立堤或斜坡堤胸墙,而针对多种不同结构型式胸墙受力和越浪的研究还少见报道。因此,开展此类相关研究对于指导工程设计具有一定的参考价值。

1 试验概况

斜坡堤胸墙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中进

^{*} 收稿日期:2015-09-14

资助项目:国家自然科学基金项目——最近 50 年来莱州湾东部侵蚀砂岸动力地貌演变研究(41471005);山东省高等学校科技计划项目——最近 60 年来莱州湾东岸典型人类活动对海岸侵蚀的影响(J14LH02);烟台市科技发展计划项目——胶东半岛西北部岬间海湾稳定性与防护(2014ZH075);鲁东大学人才引进科研基金项目——波浪对复杂结构型式防浪墙水动力特性的数值模拟(LY2013025)

作者简介:李雪艳(1980-),女,博士,讲师,主要从事工程结构物试验与数值模拟方面研究. E-mail:yanzi03@126.com

(王佳实 编辑)

行,水槽的长、宽和高分别为 23.0,0.8 和 0.8 m,造波周期 0.5~3.0 s(图 1)。压力传感器由交通部天津水运工程科学研究院生产,自振频率 500 Hz,采样间隔 0.003 s(图 2)。胸墙结构采用有机玻璃制作,具体型式与尺寸见图 3。斜坡堤堤身高 40 cm,宽 80 cm,堤心用碎石堆砌;斜坡坡度为 1.75;护面采用重约 0.5 kg 的扭王字块体规则排列,护面下层为 9~14 g 的块石(图 4)。胸墙迎浪面中心线两侧间隔布置 2 排共 7 个压力传感器,其边缘距离中心线各 0.5 cm(图 4)。胸墙模型放置在水槽后半部分,距离消能网 1 m 处(图 5)。试验入射波浪为规则波,入射波高 H 分别为 6,8,10 和 12 cm,周期 T 分别为 1.0, 1.2,1.5,1.8 和 2.0 s,试验水深 d 分别为 40 cm 和 45 cm。每一个胸墙模型不同水深 d 、波高 H 和周期 T 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。

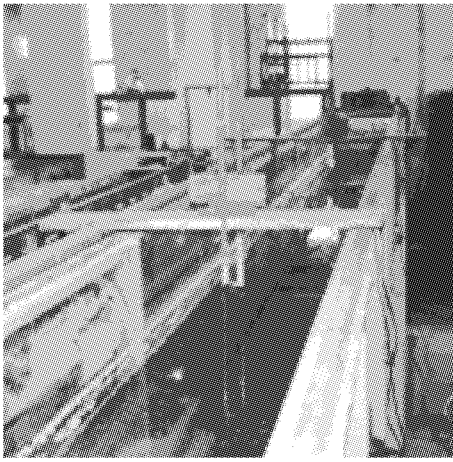


图 1 试验水槽

Fig. 1 Wave flume for the experiment

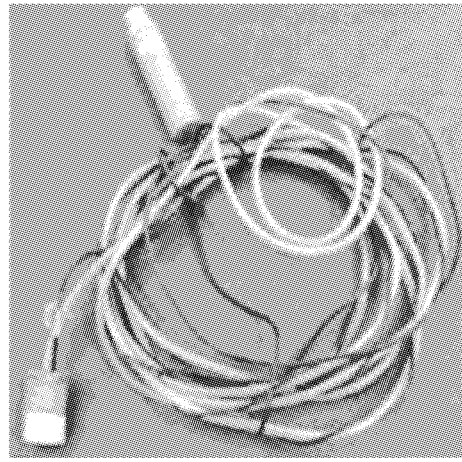


图 2 压力传感器

Fig. 2 Pressure transducer

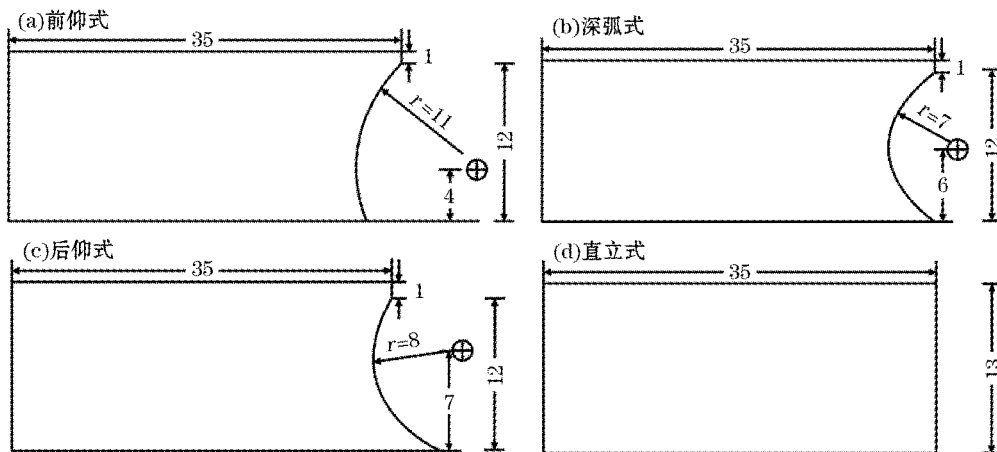


图 3 不同结构型式胸墙示意图(cm)

Fig. 3 A sketch of different structural types of crown walls (cm)

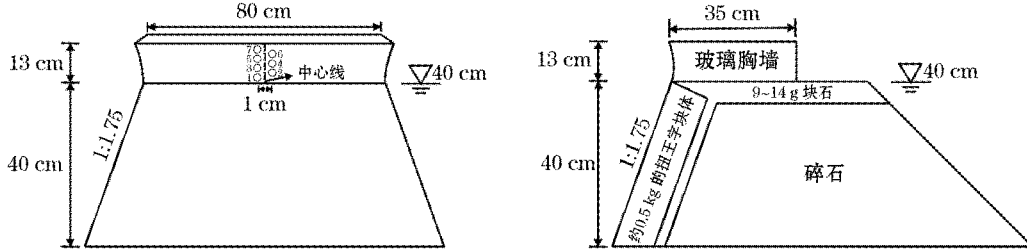


图 4 斜坡堤结构示意图

Fig. 4 A sketch of the structure of sloping breakwater

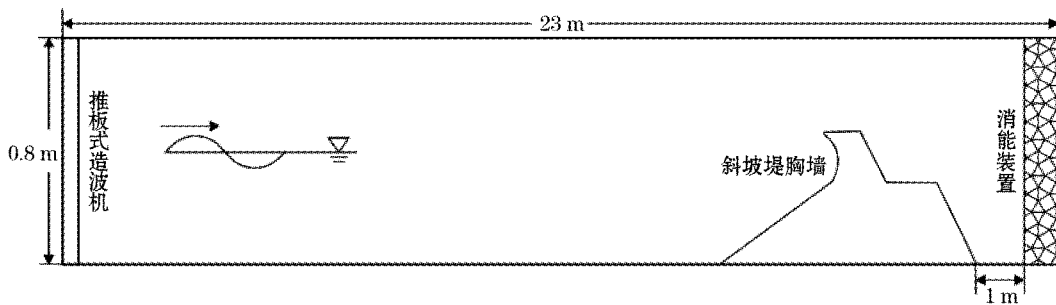


图 5 试验布置示意图

Fig. 5 A sketch of the experiment layout

2 试验结果与讨论

2.1 胸墙波浪力

根据每一瞬时弧形胸墙迎浪面不同测点波浪压力,得到每一测点所代表的波浪压力作用面积上的波浪力,将波浪力沿水平和垂直方向进行分解,并沿水平和垂直方向对其进行同步积分求和,得到每一瞬时弧形胸墙所受水平和垂直波浪力。波浪力与对应的力臂相乘可得胸墙波浪力矩^[9]。由表 1 可见,水深分别为 40 cm 和 45 cm 时,周期 1.0 s 和波高 6 cm 情境下,4 种胸墙结构不同测点的波浪压力实测值。由图 6 可见,不同结构型式胸墙水平波浪力和波浪力矩的比较,其横坐标为入射波相对波高 H/d ,纵坐标为胸墙无量纲化的水平波浪力 $F_x/(\rho g A d_2)$ 或波浪力矩 $M/(\rho g A d d_2)$ 。其中, ρ 为水体密度 (kg/m^3), g 为重力加速度 (N/kg), A 为波幅 (m), d 为水深 (m), d_2 为胸墙高 (m)。

由图 6 可见,不同结构型式胸墙所受波浪力(矩)差异显著。弧形胸墙所受波浪力(矩)明显大于直立式胸墙,这是由于弧形胸墙的圆弧面有聚能作用。而在 3 种弧形胸墙中,以挑檐最长的前仰式胸墙受力最小,更易引导水体上爬的后仰式胸墙受力最大,深弧式胸墙受力居中。胸墙所受波浪力(矩)随相对波高的增大而增大。具体而言,水深 40 cm 时,不同结构型式胸墙所受波浪力(矩)随相对波高增大的速率近似相等;水深 45 cm 时,3 种弧形胸墙所受波浪力(矩)随相对波高增大的速率近似相等,而直立式胸墙所受波浪力(矩)随相对波高增大的速率较弧形胸墙波浪力(矩)增大的速率显著减小。

表1 不同结构型式胸墙波压力值

Table 1 Wave pressures on the different structural types of crown walls

胸墙 型式	水深/cm	压力/kPa						
		测点1	测点2	测点3	测点4	测点5	测点6	测点7
前仰式	40	0.478 7	0.344 7	0.224 7	0.159 7	0.071 0	0.088 3	0.084 7
深弧式		0.476 7	0.449 3	0.509 0	0.253 3	0.205 3	0.103 0	0.085 3
后仰式		0.681 0	0.710 0	0.573 0	0.426 3	0.276 0	0.191 3	0.111 3
直立式		0.347 0	0.183 3	0.145 0	0.073 7	0.056 3	0.067 0	0.057 0
前仰式	45	0.405 3	0.426 3	0.438 0	0.398 3	0.307 0	0.203 3	0.130 7
深弧式		0.406 3	0.436 7	0.451 3	0.483 7	0.387 7	0.285 7	0.193 3
后仰式		0.515 7	0.525 3	0.513 0	0.525 7	0.450 0	0.367 0	0.250 0
直立式		0.401 7	0.420 0	0.437 3	0.345 0	0.257 7	0.155 3	0.104 0

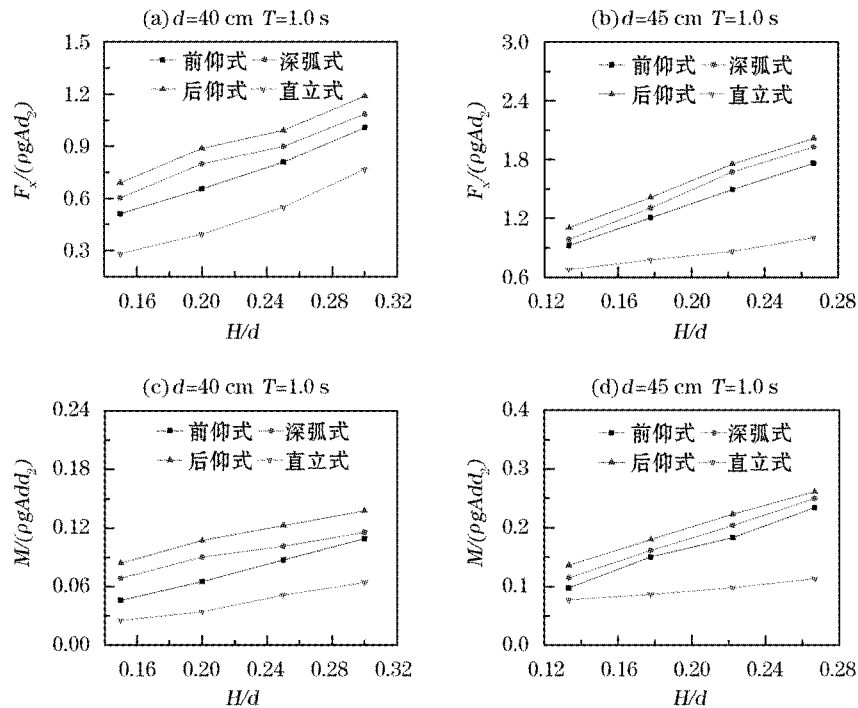


图6 不同结构型式胸墙水平波浪力和波浪力矩比较

Fig. 6 Comparison of horizontal wave forces and wave moments among the different structural types of crown walls

2.2 胸墙反浪效果

图7给出了水深 $d=40$ cm, 入射波周期 $T=1.2$ s, 波高 $H=10$ cm 时, 试验得到的前仰式胸墙结构附近各个瞬时的流场。由图7所示的各个瞬时流场变化趋势可以看出, 当 $t=9.0$ s 时, 弧形胸墙结构附近的水体较为平静, 处于沿着圆弧面爬升阶段; 约有 $1/2$ 的圆弧面被水体淹没。此时, 可以清晰地观察到部分压力传感器的位置; 当 $t=9.2$ s 时, 部

分水体已经爬上胸墙圆弧面的顶端,且沿着圆弧切线方向导回;胸墙前方水位略有抬升,约有 $2/3$ 的圆弧面被水体淹没。此时,压力传感器完全浸没于水中;当 $t=9.4$ s 时,更多水体持续涌向胸墙圆弧面,胸墙前方水位明显抬升,圆弧面整体被水体淹没,较多水体沿着圆弧切线方向导回,少量水体跌入槽内;当 $t=9.6$ s 时,更多水体仍持续涌向胸墙圆弧面,胸墙圆弧面前方的水体厚度显著增大,更多水体沿着圆弧切线方向导回,部分水体跌入槽内;当 $t=9.8$ s 时,胸墙圆弧面前方水体厚度略有增加,水体基本完全回落,强烈冲击槽内水面,水花四溅。此时,压力传感器仍被水体淹没;当 $t=10.2$ s 时,胸墙圆弧面前方水体完全回落,水位明显下降,水体趋于平静,下一个波即将到达。此时,压力传感器几乎全部露出水面。由上述前仰式胸墙附近流场运动过程可以看出,前仰式胸墙能够有效地将来浪全部导回槽内,具有很好的反浪效果。

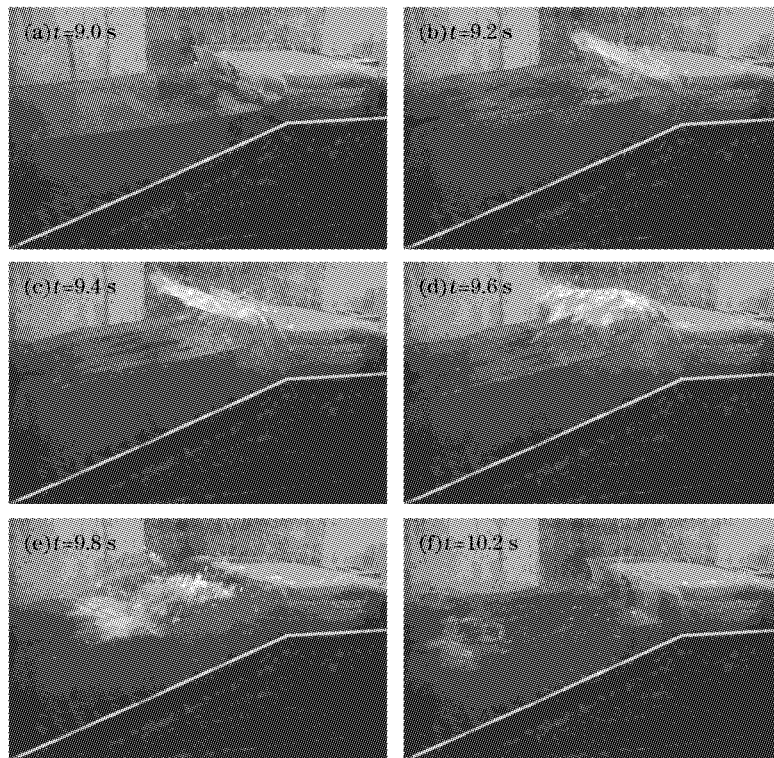


图 7 前仰式胸墙结构不同瞬时的局部流场照片

Fig. 7 Photos showing the local flow field around the forward-incline-arc crown wall at different time

在水深 $d=40$ cm、周期 $T=1.2$ s 和波高 $H=8$ cm 时,前仰式胸墙前的全部水体均沿着圆弧切线方向返回槽内,在空中形成漂亮的圆弧反浪图,水槽内的水体有规律地向胸墙推进。深弧式胸墙前几乎全部水体均被导回槽内,存在少量的水花喷溅,槽内水体略显紊乱。后仰式胸墙前水体在胸墙顶端附近散落,水花四溅,槽内水体更加紊乱。直立式胸墙前水体在惯性作用下沿着直墙垂直上抬,形成喷泉景观,少量水体散落于胸墙顶部(图 8)。由此可见,与直立式胸墙相比,弧形胸墙能够将部分或全部水体导回,具有较好的反浪效果。在 3 种弧形胸墙中,前仰式胸墙的反浪效果最好,深弧式次之,后仰式略差。

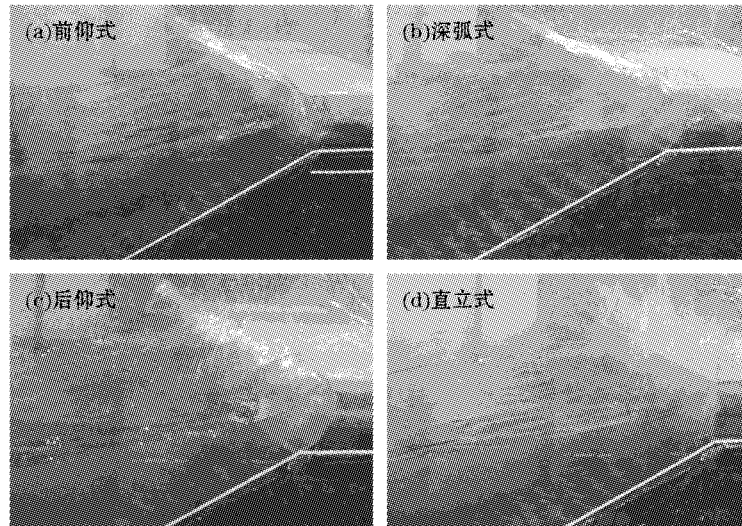


图8 不同结构型式胸墙反浪效果照片($d=40\text{ cm}$, $T=1.2\text{ s}$, $H=8\text{ cm}$)

Fig. 8 Photos showing the sheltering effect of the different structural types of crown walls
($d=40\text{ cm}$, $T=1.2\text{ s}$, $H=8\text{ cm}$)

2.3 胸墙越浪量

本研究采用特制的接浪装置对不同波浪要素条件下胸墙墙顶越浪进行了采集,利用称重法得到各工况下的墙顶越浪量。接浪装置采用不锈钢制成槽状,一端开口用于接浪。采集时间间隔为 0.03 s ,采集时间为 10 s ,接浪宽度为 0.17 m 。每次试验均将接浪装置的开口段与胸墙对接,用来接收越浪。每一试验组次重复采样 3 次,取 3 次的平均值作为越浪结果。单宽平均越浪量采用 $q=V/(b \cdot t)$ 计算。式中, q 为单宽平均越浪量,单位为 $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$; V 为 1 个波列作用下的总越浪量,单位为 m^3 ; b 为收集越浪量的接水宽度,单位为 m ; t 为 1 个波列作用的持续时间,单位为 s 。由此计算出有越浪工况下的胸墙单宽越浪量列于表 2。由于胸墙的宽度大于接浪装置的宽度,而胸墙顶部的越浪厚度不完全一致,因此本试验接收的越浪量与实际越浪量之间有一定的差别。但本研究比较的是不同胸墙的单宽越浪量,因此并不影响相关结论。

在临界越浪条件下,胸墙越浪量与水深、波高和周期密切相关。在其他波浪要素一定的情况下,墙顶越浪量随水深、波高和周期的增大均呈显著增大的趋势。与直立式胸墙相比,弧形胸墙能显著减少越浪量,提高临界越浪条件。水深 $d=40\text{ cm}$ 、周期 $T=1.0\text{ s}$ 和波高 $H=12\text{ cm}$ 时,仅直立式胸墙发生越浪。水深 $d=40\text{ cm}$ 、周期 $T=2.0\text{ s}$ 和波高 $H=12\text{ cm}$ 时,仅前仰式胸墙未发生越浪,深弧式、后仰式和直立式胸墙均发生越浪。其中,弧形胸墙墙顶越浪量较直立式显著减少。水深 $d=45\text{ cm}$ 时,除周期 $T=1.8\text{ s}$ 外,其余各周期下,波高 $H=12\text{ cm}$ 时胸墙墙顶均有越浪发生。此外,周期 $T=2.0\text{ s}$ 、波高 $H=10\text{ cm}$ 时 4 种胸墙均发生越浪。与直立式胸墙相比,前仰式胸墙最高可降低 95% 的越浪量,深弧式和后仰式胸墙对应的数值分别是 94% 和 85% 。

在 3 种弧形胸墙中,后仰式胸墙墙顶越浪量最大,前仰式胸墙越浪量最小,深弧式胸

墙居中。前仰式胸墙最高可降低深弧式胸墙越浪量的 17%,最高可降低后仰式胸墙越浪量的 67%。由此可见,圆弧前沿的挑檐对胸墙越浪量影响显著,挑檐设置得长一些,可有效降低墙顶越浪量,显著提高临界越浪条件,这与琚烈红^[1,6]结论一致。因此,在对胸墙越浪要求较高的情况下,可以适当考虑前仰式胸墙结构,在降低工程造价的同时,在一定条件下有效防止越浪。

表 2 不同结构型式胸墙越浪量比较

Table 2 Comparison of wave overtopping among the different structural types of crown walls

d/cm	T/s	H/cm	单宽平均越浪量/ $[\times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}]$			
			前仰式	深弧式	后仰式	直立式
40	1.0	12	0	0	0	3.95
	2.0	12	0	0.79	2.47	13.6
45	1.0	12	0.92	1.11	2.80	18.4
	1.2	12	3.30	3.60	8.22	26.9
	1.5	12	12.7	12.9	17.3	31.0
	2.0	10	22.8	26.4	32.0	47.2
	2.0	12	41.0	44.0	54.1	60.8

3 结 论

1) 斜坡堤胸墙的结构型式对胸墙迎浪面所受波浪力(矩)和墙顶越浪量影响均非常显著。与直立式胸墙相比,弧形胸墙反浪效果显著增强,墙顶越浪量显著减少,临界越浪条件显著提高,但其所受波浪力(矩)显著增大。

2) 在 3 种弧形胸墙中,前仰式胸墙的反浪效果明显优于深弧式与后仰式胸墙;在相同波浪要素条件下,前仰式胸墙墙顶越浪量最少,迎浪面所受波浪力(矩)最小。与后仰式胸墙相比,深弧式胸墙的反浪效果较好,墙顶越浪量较少,迎浪面所受波浪力(矩)较小。

3) 工程设计中,应结合当地的实际条件,尽量选择前仰式胸墙结构,既能有效减少越浪量且又不至于使得所受波浪力(矩)过大。

致谢:大连理工大学任冰教授、王永学教授、王国玉副教授和李广伟高级工程师对论文工作的帮助!

参考文献:

- [1] 琚烈红. 斜坡堤防浪墙型式合理性试验研究[J]. 水运工程, 2006, (5): 1-3.
- [2] 曾婧扬, 吴卫, 刘桦. 孤立波斜坡堤堤顶及后坡越浪流数值分析[J]. 力学季刊, 2013, 34(2): 181-190.
- [3] 张金牛, 吴卫, 刘桦, 等. 孤立波作用下斜坡堤越浪量的实验研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2014, 29(6): 656-662.
- [4] TUAN T Q. Influence of low sea-dike crown-walls on wave overtopping discharge[J]. Coastal Engineering Journal, 2013, 55(4): 1-26.

- [5] 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.
- [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.
- [7] 王登婷. 弧形防浪墙的模型试验[J]. *水运工程*, 2004, (7): 1-5.
- [8] 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*, 2011, 23(6): 767-776.
- [9] 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.

An Experimental Study on Sheltering Effect of Crown Wall of Sloping Breakwater

LI Xue-yan, WANG Qing

(Coast Institute, Ludong University, Yantai 264025, China)

Abstract: In order to evaluate the rationality of the structural types of crown wall objectively, related physical model experiments have been carried out for four structural types of crown walls, which include forward-incline-arc type, upright-arc type, backward-incline-arc type and vertical type. The wave load is obtained through the integral summation of the wave pressures that are measured with pressure transducers. The sheltering effects of the different types of crown walls are recorded by using a digital camera and the wave overtopping of the crown walls under different wave conditions are obtained by means of weighing method. The experimental results show that the arc-shaped crown walls have higher sheltering effect than the vertical crown wall, but their wave load is relatively bigger. Among the three arc-shaped crown walls, the forward-incline-arc crown wall has better sheltering effect than the other two types and has a smaller wave load. It is therefore suggested that the forward-incline-arc crown wall should be a good choice for the engineering design.

Key words: crown wall; sheltering effect; wave load; sloping breakwater