

# 非平整港池的多向不规则波试验研究

张海明<sup>1,2</sup>, 陶爱峰<sup>1,2\*</sup>, 严士常<sup>1,2</sup>, 杨越<sup>2</sup>

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210024;  
2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 基于三维组合式抛石防波堤物理模型, 开展了多向不规则波作用的港池试验, 分析6组波浪条件所对应的遮蔽区域测点比波高分布图, 得到主要结论: 6组波浪条件所对应的测点比波高整体呈现从口门到遮蔽区域逐渐减小趋势, 最大比波高位置在口门附近; 当波周期 $T_p=7\text{ s}$ 、 $12\text{ s}$ 、 $16\text{ s}$ 时, 不同水深 $h$ 所对应的遮蔽区域测点比波高分布图的变化趋势基本一致, 最大比波高位置分别在口门偏北方向、口门中心处、口门偏南方向, 整体呈现随 $T_p$ 增大而向口门南方偏移趋势; 当 $h=14.8\text{ m}$ 、 $17.1\text{ m}$ 时, 遮蔽区域内同一测点比波高呈现随 $T_p$ 增大而增大趋势。

**关键词:** 港池试验; 多向不规则波; 抛石防波堤; 遮蔽区域; 比波高

中图分类号: U652.3; TV139.2 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2021)02-0024-05  
doi: 10.7640/zggwjs202102006

## Experimental study on multi-directional irregular waves in irregular harbor basin

ZHANG Hai-ming<sup>1,2</sup>, TAO Ai-feng<sup>1,2\*</sup>, YAN Shi-chang<sup>1,2</sup>, YANG Yue<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China)

**Abstract:** Based on the physical model of three-dimensional composite rubble mound breakwater, the harbor basin experiments of multi-directional irregular waves were carried out. By analyzing the distribution maps of wave height ratio of the measured points in the sheltered area under six groups of wave conditions, the following conclusions are obtained: the wave height ratio of the six groups of wave conditions decreases gradually from the entrance to the sheltered area, and the maximum wave height ratio is near the entrance; when the wave period  $T_p = 7\text{ s}$ ,  $12\text{ s}$ , and  $16\text{ s}$ , the change trends of distribution maps of the wave height ratio in sheltered area corresponding to different water depths  $h$  are basically the same, and the location of maximum wave height ratio appears in the north of the entrance, the center of the entrance, and the south of the entrance respectively, and the overall trend is shifted to the south of the entrance with the increase of  $T_p$ ; when water depth  $h=14.8\text{ m}$  and  $17.1\text{ m}$ , the wave height ratio of the same measured point in the sheltered area increases with the increase of  $T_p$ .

**Key words:** harbor basin experiment; multi-directional irregular wave; rubble mound breakwater; sheltered area; wave height ratio

## 0 引言

针对波浪问题, 目前国内外学者研究较多的是规则波问题, 对于不规则波尤其是多向不规则波的研究较少。在20世纪60年代, Cartwright<sup>[1]</sup>便提出海浪具有复杂性和随机性。之后, 不规则波

浪的变形及作用成为研究热点。在20世纪90年代, 我国为确定广东大亚湾港口布置合理方案, 首次采用多向不规则波进行整体模型试验研究<sup>[2]</sup>。近几十年来, 国内外学者采用数学模型、物理模型或者两者相结合的方式对不规则波浪的变形及

收稿日期: 2020-10-18 修回日期: 2021-01-14

作者简介: 张海明(1997—), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 港口、海岸及近海工程专业, 从事水波动力学研究。

\*通讯作者: 陶爱峰, E-mail: aftao@hhu.edu.cn

传播进行研究,并强调波浪不规则性对涉海工程设计的重要性。参考文献[3-7]针对不规则波传播变形用数学模型方法探究。波浪传播采用数值模拟虽然具有简单高效、成本较低等优点,但是物理模型试验更具有直观性和可信性。参考文献[8-10]借助防波堤物理模型试验,探究不规则波作用下水力特性问题。吴月勇等<sup>[9]</sup>利用港池试验探究不规则波浪条件下掩蔽区域测点波高随波向、谱峰周期的变化规律,但并未从掩蔽区域测点比波高分布图的角度去分析。

考虑到前人研究的不足之处,本文通过某港区物理模型试验,分析组合式抛石防波堤所形成的掩蔽区域比波高与水深、波周期之间的变化规律,研究结果可为日后研究不同水深、不同波周期波浪条件下最大比波高发生位置提供参考,具

有工程实用价值。

## 1 试验概况

### 1.1 物理模型

本次试验是关于某港口防波堤稳定性三维物理模型试验,在浙江大学舟山校区港工馆的波-流动床浑水港池内进行,港池长70 m,宽40 m,深1.5 m,最大试验水深1.0 m,配备34 m×56 m的L形造波机。港池周边布置有多层消浪栅,用以减少波浪反射。按照中交第四航务工程勘察设计院提供的防波堤布置图纸,采用1:39.5的长度比例,在港池内修建地形以反映真实水深情况。如图1所示,港池内地形等深线从-17.5 m变化到-14.5 m,模型中的地形从-19 m等深线开始模拟,并延伸至港池末端。地形制作采用断面板法,允许误差±1 mm。

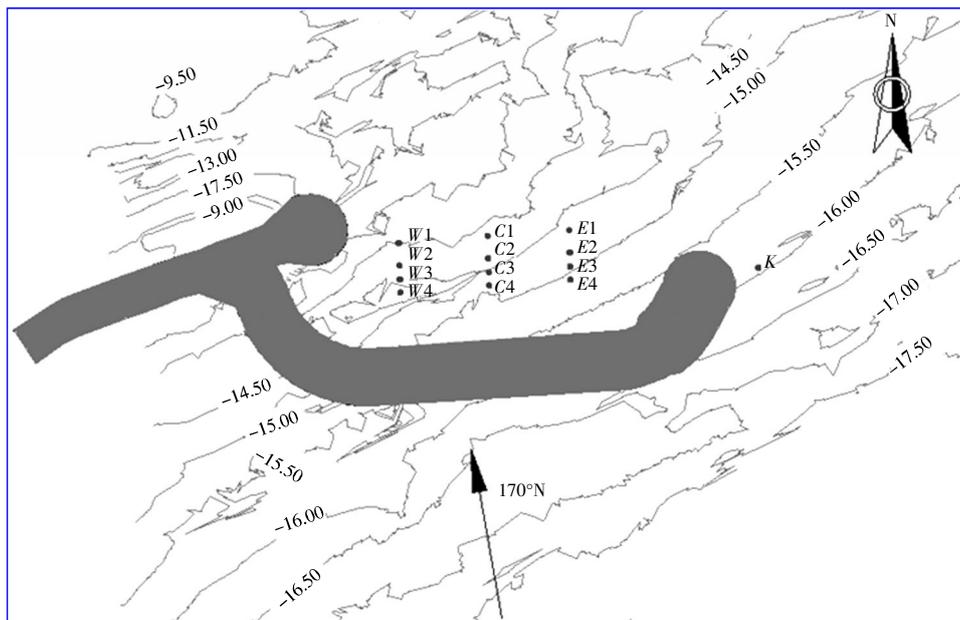


图1 组合式防波堤平面布置图

Fig. 1 The layout of composite rubble mound breakwater

### 1.2 波浪条件

多向不规则波采用频谱为JONSWAP谱,其中,控制JONSWAP谱峰尖度的峰升因子 $\gamma=3.0$ 。多向不规则波方向谱函数 $S(f, \beta)$ 可表示为频谱 $S(f)$ 和方向分布函数 $G(f, \beta)$ 的乘积:

$$S(f, \beta) = S(f)G(f, \beta)$$

$$G(f, \beta) = A \cos^{2n}(\theta - \theta_0)$$

式中: $f$ 、 $\beta$ 分别为频率、角度参量; $A$ 为方向分布

函数系数; $n$ 为方向分布参数, $n$ 越小代表波浪能量的方向分布宽度越宽,波浪多向性越强; $\theta$ 为随机波浪的方向; $\theta_0$ 为入射波浪的主方向。在本次模型试验中 $n$ 取4,对应的方向分布角度为 $19^\circ$ ,即 $|\theta - \theta_{0\max}| = 19^\circ$ 。

为了试验减少误差,每组波浪条件进行2次试验。试验采用LG1型电容式波高仪和DJ800型多功能监测系统收集测点波高数据,统计发现2

次波高数据相差不大，取2次数据均值作为该组波浪条件的有效波高。物理模型主要研究由2道圆形堤头抛石防波堤形成掩蔽区域，如图1所示，其中各点为波高仪测点位置。港池区域总共布置13个测点：口门附近布置K点，掩蔽区域内布置12个测点分别用字母W、C、E和数字1~4组合来表示，W、C、E表示含义是相对于口门位置K点的西侧、中间、东侧。

试验采用的波浪条件为丹麦DHI公司通过其自主开发的Mike 21计算得到。实验设置6组波浪条件，均采用多向不规则波。为探究不同水深 $h$ 和不同波周期 $T_p$ 对掩蔽区域比波高的影响，保证6组波浪条件的有效波高 $H_0$ 和波向 $Dir$ 不变，统一设置 $H_0=3.03\text{ m}$ ， $Dir=170^\circ\text{N}$ 。170°N指的是

海图方位角，正北向为0°N，沿顺时针方向旋转，正东向为90°N，正南向为180°N，正西向为270°N。170°N波向与正北向0°N的夹角为10°N。在研究波浪经口门进入掩蔽区域过程中，波高变化采用K测点的设计波浪要素作为计算掩蔽区域各点比波高的依据。

### 2 掩蔽区域测点比波高变化规律分析

为探究掩蔽区域测点比波高定点变化规律，对6组波浪条件下12个测点波高数据进行分析。通过掩蔽区域测点比波高分布图，分析组合式防波堤形成掩蔽区域在不同的波周期 $T_p$ 和不同水深 $h$ 作用下比波高变化。

6组波浪条件所对应的掩蔽区域测点比波高分布图如图2所示。

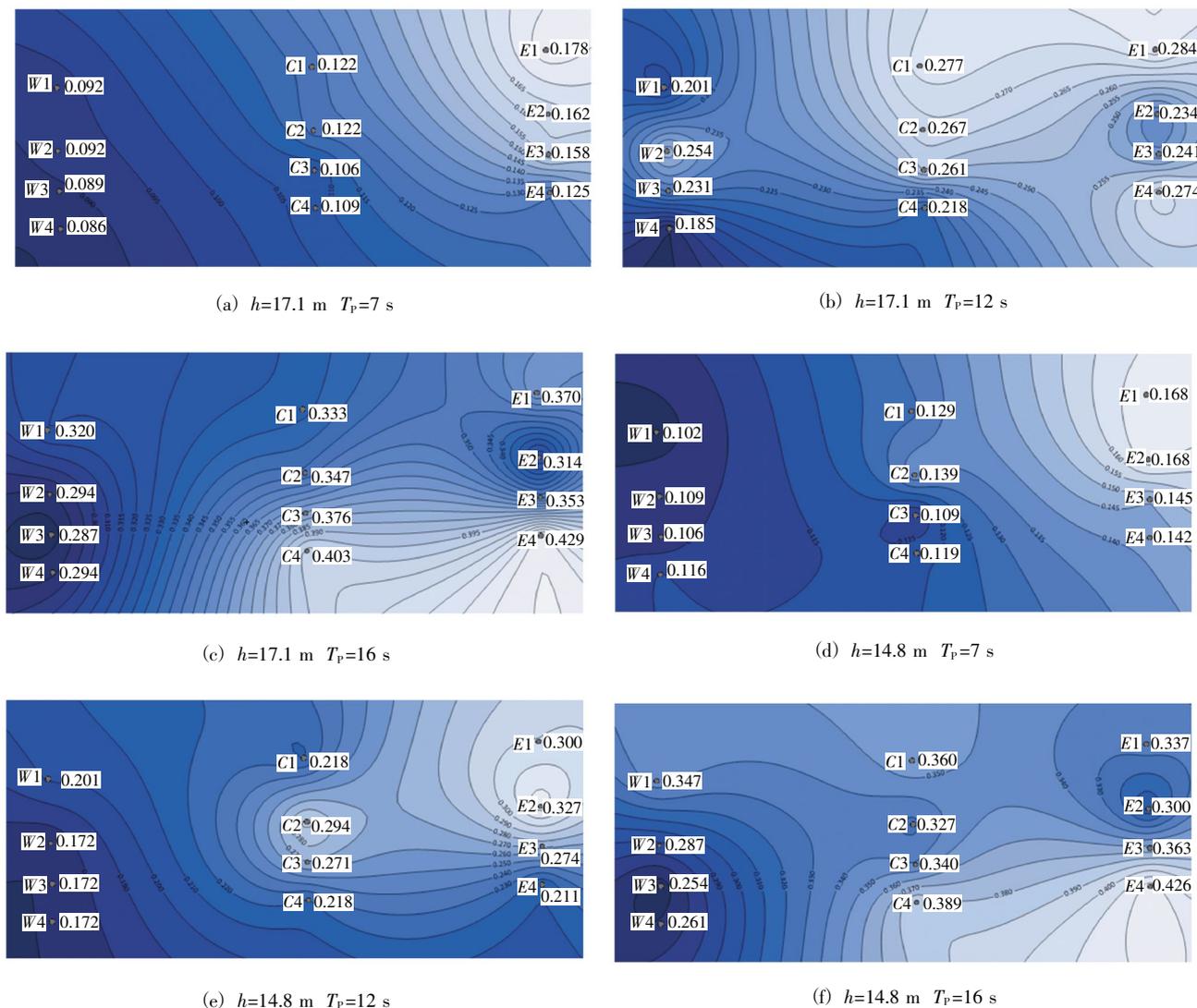


图2 掩蔽区域测点比波高分布图

Fig. 2 The distribution maps of wave height ratio of the measured points in the sheltered area

由图 2(a)可知,当  $h=17.1\text{ m}$ 、 $T_p=7\text{ s}$  时,掩蔽区域测点比波高分布范围是 0.086~0.178,最大比波高出现在口门  $E1$  附近,测点比波高呈现从口门到掩蔽区域逐渐减小趋势,最大比波高位置在口门偏北方向;由图 2(b)可知,当  $h=17.1\text{ m}$ 、 $T_p=12\text{ s}$  时,掩蔽区域测点比波高分布范围是 0.185~0.284,最大比波高出现在口门  $E1$  附近,同时掩蔽区域中心  $C1$  附近出现比波高的极大值,出现口门与掩蔽区域中心处测点比波高均较大的现象,同时测点比波高整体呈现从口门到掩蔽区域逐渐减小趋势,最大比波高位置在口门中心处;由图 2(c)可知,当  $h=17.1\text{ m}$ 、 $T_p=16\text{ s}$  时,掩蔽区域测点比波高分布范围是 0.287~0.429,最大比波高出现在口门  $E4$  附近,  $C4\sim E4$  范围内测点比波高整体偏大,测点比波高整体呈现从口门到掩蔽区域逐渐减小趋势,最大比波高位置在口门偏南方向。

结合图 2(a)~图 2(c),在  $H_0=3.03\text{ m}$  和  $h=17.1\text{ m}$  不变条件下,从  $T_p=7\text{ s}$ 、 $12\text{ s}$ 、 $16\text{ s}$  掩蔽区域测点比波高分布范围可以发现,在其他波浪条件相同时,掩蔽区域测点比波高随着波周期  $T_p$  的增大呈明显的增大趋势。同时可以发现,最大比波高位置在口门的位置会随着波周期  $T_p$  增大而向南偏移,当  $T_p=12\text{ s}$ 、 $16\text{ s}$  时,整体来看口门和掩蔽区域中心处的比波高均较大。

由图 2(d)可知,当  $h=14.8\text{ m}$ 、 $T_p=7\text{ s}$  时,掩蔽区域测点比波高分布范围是 0.102~0.168,最大比波高出现在口门  $E1$  附近,测点比波高呈现从口门到掩蔽区域逐渐减小趋势,最大比波高位置在口门偏北方向;由图 2(e)可知,当  $h=14.8\text{ m}$ 、 $T_p=12\text{ s}$  时,掩蔽区域测点比波高分布范围是 0.172~0.327,最大比波高出现在口门  $E2$  附近,同时掩蔽区域中心  $C2$  附近出现比波高的极大值,出现口门与掩蔽区域中心处测点比波高均较大的现象,同时测点比波高整体呈现从口门到掩蔽区域逐渐减小趋势,最大比波高位置在口门中心处;由图 2(f)可知,当  $h=14.8\text{ m}$ 、 $T_p=16\text{ s}$  时,掩蔽区域测点比波高分布范围是 0.254~0.426,最大比波高出现在口门  $E4$  附近,  $C4\sim E4$  范围内测点比波高整体偏大,测点比波高整体呈现从口门到掩蔽区域逐渐减小趋势,最大比波高位置在口门偏南方向。

结合图 2(e)~图 2(f)在  $H_0=3.03\text{ m}$  和  $h=14.8\text{ m}$  不变条件下,从  $T_p=7\text{ s}$ 、 $12\text{ s}$ 、 $16\text{ s}$  掩蔽区域测点比波高分布范围可以发现,在其他波浪条件相

同时,掩蔽区域测点比波高随着波周期  $T_p$  的增大呈明显的增大趋势。同时可以发现,最大比波高位置在口门的位置会随着波周期  $T_p$  增大而向南偏移,当  $T_p=12\text{ s}$ 、 $16\text{ s}$  时,整体来看口门和掩蔽区域中心处的比波高均较大。对比图 2(a)~图 2(c)与图 2(e)~图 2(f)的掩蔽区域测点比波高分布图,可以发现  $h$  变化对相同  $T_p$  的掩蔽区域测点比波高的最大值和最小值有影响,但不同  $h$  下掩蔽区域测点比波高变化趋势基本一致。

由图 2(a)与图 2(d)可知,当  $T_p=7\text{ s}$  时,在不同水深条件下  $h=17.1\text{ m}$ 、 $14.8\text{ m}$ ,掩蔽区域内测点比波高分布范围比较接近,掩蔽区域测点比波高分布图也很相似。当  $h=14.8\text{ m}$  时最小比波高在  $W1$  测点为 0.102,而  $h=17.1\text{ m}$  时最小比波高在  $W4$  测点为 0.086,可知最小比波高位置都处于  $W$  测点附近,但在  $h$  较小时最小比波高偏大。当  $h=14.8\text{ m}$  时最大比波高在  $E1$  测点为 0.168,而  $h=17.1\text{ m}$  时最大比波高在  $E1$  测点为 0.178,可知最大比波高位置都处于口门偏北附近,但在  $h$  较大时最大比波高偏大。

由图 2(b)与图 2(e)可知,当  $T_p=12\text{ s}$  时,在不同水深条件下  $h=17.1\text{ m}$ 、 $14.8\text{ m}$ ,掩蔽区域内测点比波高分布范围差距较大,掩蔽区域测点比波高分布图也很相似。当  $h=14.8\text{ m}$  时最小比波高在  $W$  测点为 0.172,而  $h=17.1\text{ m}$  时最小比波高在  $W4$  测点为 0.185,可知最小比波高位置都处于  $W$  测点附近,但在  $h$  较大时最小比波高偏大。当  $h=14.8\text{ m}$  时最大比波高在  $E2$  测点为 0.327,而  $h=17.1\text{ m}$  时最大比波高在  $E1$  测点为 0.284,可知最大比波高位置都处于口门附近,但在  $h$  较小时最大比波高偏大。

由图 2(c)与图 2(f)可知,当  $T_p=16\text{ s}$  时,在不同水深条件下  $h=17.1\text{ m}$ 、 $14.8\text{ m}$ ,掩蔽区域内测点比波高分布范围差距较大。当  $h=14.8\text{ m}$  时最小比波高在  $W3$  测点为 0.254,而  $h=17.1\text{ m}$  时最小比波高在  $W3$  测点为 0.287,可知最小比波高位置都处于  $W$  测点附近,但在  $h$  较大时最小比波高偏大。当  $h=14.8\text{ m}$  时最大比波高在  $E4$  测点为 0.426,而  $h=17.1\text{ m}$  时最大比波高在  $E4$  测点为 0.429,可知最大比波高位置都处于口门偏南附近,两种水深条件下最大比波高基本一致。

### 3 结论与展望

在非平整港池的多向不规则波作用下,分析

掩蔽区域内测点比波高变化规律。分析6组波浪条件所对应的掩蔽区域测点比波高分布图,得到以下结论:

1) 6组波浪条件所对应的测点比波高整体呈现从口门到掩蔽区域逐渐减小趋势,最大比波高位置在口门附近;

2) 当  $T_p=7\text{ s}$ 、 $12\text{ s}$ 、 $16\text{ s}$  时,不同  $h$  所对应的掩蔽区域测点比波高分布图的变化趋势基本一致,最大比波高位置分别在口门偏北方向、口门中心处、口门偏南方向,整体呈现随  $T_p$  增大而向口门南方偏移趋势;

3) 当  $T_p=12\text{ s}$ 、 $16\text{ s}$  时,不同  $h$  所对应的掩蔽区域测点比波高整体呈现口门和掩蔽区域中心处的比波高均较大趋势;

4) 当  $T_p=12\text{ s}$ 、 $16\text{ s}$  时,不同  $h$  所对应的最大和最小比波高基本呈现在  $h=17.1\text{ m}$  时最小比波高偏大、最大比波高偏小,而在  $h=14.8\text{ m}$  时最小比波高偏小、最大比波高偏大的变化规律;

5) 当  $h=14.8\text{ m}$ 、 $17.1\text{ m}$  时,掩蔽区域内同一测点比波高呈现随  $T_p$  增大而增大趋势。由于非平整港池内的波浪动力条件复杂,存在波浪绕射、反射、折射、浅水变形的影响,不同测点位置的比波高的影响因素有待进一步探究。

参考文献:

[1] CARTWRIGHT D E. Analysis and statistics[J]. The Sea, 1962(1): 567-589.

[2] 俞聿修,柳淑学. 港口整体模型的多向不规则波试验研究[J]. 港口技术,1994(1):1-10.  
YU Yu-xiu, LIU Shu-xue. Three-dimensional model test of harbour engineering with multi-directional waves[J]. Port Engineering Technology, 1994(1): 1-10.

[3] 张娜,郭科,王旭辉. MIKE21-BW 模型在日照港总平面设计方案可行性研究中的应用[J]. 中国港湾建设,2007,27(1):32-34.

ZHANG Na, GUO Ke, WANG Xu-hui. Application of MIKE 21-BW model to feasibility study of general plan layout of Rizhao Port [J]. China Harbour Engineering, 2007, 27(1): 32-34.

[4] 刘远超,赵红军,许凡,等. 单向和多向不规则波作用下港域波浪数值研究[J]. 水运工程,2018(5):40-43.  
LIU Yuan-chao, ZHAO Hong-jun, XU Fan, et al. Numerical study of wave conditions in harbor under unidirectional and multi-directional irregular waves[J]. Port & Waterway Engineering, 2018 (5): 40-43.

[5] 刘思,张永良. 多向不规则波群传播的数值模拟[J]. 清华大学学报:自然科学版,2015,55(12):1 289-1 295.  
LIU Si, ZHANG Yong-liang. Numerical simulation of multi-directional irregular wave group propagation[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2015, 55(12): 1 289-1 295.

[6] 李孟国,李文丹,时钟. 非缓坡非均匀流场中多向不规则波传播数学模型的建立[J]. 水道港口,2006,27(5):279-283.  
LI Meng-guo, LI Wen-dan, SHI Zhong. Development of mathematical model for irregular multi-directional wave propagation in rapidly varying topography and uneven currents[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2006, 27(5): 279-283.

[7] 柳淑学,俞聿修,赖国璋,等. 多向不规则波绕射的数值模拟[J]. 海洋工程,2000,18(3):39-45.  
LIU Shu-xue, YU Yu-xiu, LAI Guo-zhang, et al. Numerical modelling of multi-directional irregular waves through breakwaters[J]. The Ocean Engineering, 2000,18(3): 39-45.

[8] 顾倩. 波浪对双层水平板防波堤作用试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2017.  
GU Qian. The experimental study for the effect of waves on the twin-plate breakwater[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.

[9] 吴月勇,陈国平,严士常,等. 不规则波作用下的港域波浪条件试验研究[J]. 水运工程,2017(9):94-98,107.  
WU Yue-yong, CHEN Guo-ping, YAN Shi-chang, et al. Experimental study on wave conditions in harbor area under irregular wave[J]. Port & Waterway Engineering, 2017(9): 94-98,107.

[10] 柳玉良,倪琦,夏运强,等. 陡变地形边坡变化对波浪传递影响试验研究[J]. 中国港湾建设,2017,37(6):32-35.  
LIU Yu-liang, NI Qi, XIA Yun-qiang, et al. Experimental study on influence of the change of steep slope on wave[J]. China Harbour Engineering, 2017, 37(6): 32-35.

