

· 综 合 ·



# 多向不规则波在三维透镜地形上的 破碎指标研究\*

贾 伟, 柳淑学, 李金宣, 徐嘉忆

(大连理工大学, 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 为了研究地形不均匀性对波浪破碎的影响, 通过物理模型试验, 对正向、斜向和多向不规则波在三维透镜地形上的破碎指标进行研究。将试验结果与二维地形的计算公式进行对比, 从而研究两种地形上破碎指标的区别。结果表明: 受透镜地形的波浪聚焦作用, 三维透镜地形的破碎指标大于现有公式的计算值。进一步基于现有破碎指标的通用形式对试验数据进行拟合, 给出了适用于三维透镜地形上破碎指标计算公式中的参数。研究结果可为工程设计提供依据。

**关键词:** 不规则波; 波浪破碎; 破碎指标; 透镜地形

中图分类号: U 652

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0021-06

## Study on the multidirectional irregular wave breaking indices of three-dimensional lens topography

JIA Wei, LIU Shu-xue, LI Jin-xuan, XU Jia-yi

(State Key laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** In order to study the effects of topographic inhomogeneity on wave breaking process, a series of experiments were conducted with normal, oblique and multidirectional irregular waves breaking on three-dimensional lens topography to study the breaker indices. The existing formulas of wave breaking on two-dimensional topography were compared with the experimental results to study the differences of breaker indices of the two topographies. The results showed that the values of breaker indices of three-dimensional lens topography were larger than the calculated values, which was caused by the wave focusing effect of lens topography. Further, the general forms of existing formulas were used to fit the experimental data and the parameters in the calculation formula of the crushing index suitable for three-dimensional lens topography were given. The results can provide the basis for engineering designing.

**Keywords:** irregular wave; wave breaking; breaker indices; lens topography

波浪破碎问题是海洋工程中的重要研究课题。波浪的破碎特性不仅与波浪类型有关, 也受到地形条件的影响, 因此较为复杂。波浪的破碎指标是海洋工程设计中的重要参数, 因此对该问题的研究具有重要的实际意义。

由于波浪破碎问题的复杂性, 在不同的波浪参数、地形条件下, 破碎指标难以采用统一的公式进

行描述。对于波浪在平底地形、均匀斜坡地形上的破碎指标, 众多学者提出了不同的计算公式。Miche<sup>[1]</sup>对于有限水深下规则波在平底地形上的破碎问题, 提出了计算极限波陡  $H_b/L_b$  的半经验公式; Munk<sup>[2]</sup>基于孤立波在平底地形上的破碎问题, 通过理论推导, 提出了基于破碎波高与入射波高比值  $H_b/H_0$  的破碎指标; Goda<sup>[3]</sup>提出了基于破碎波高与

收稿日期: 2020-04-15

\*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51879037、51739010)

作者简介: 贾伟(1989—), 男, 博士研究生, 从事海岸工程研究。

通讯作者: 柳淑学(1965—), 男, 研究员, 从事海岸工程研究。E-mail: liusx@dlut.edu.cn。

深水波长比值  $H_b/L_0$  的破碎指标；而 Sunamura<sup>[4]</sup> 提出了基于破碎波高与破碎水深比值  $H_b/d_b$  的经验公式。此外，对于波浪在平底地形、均匀斜坡地形上的破碎问题，众多学者对以上 4 种破碎指标提出了不同改进的计算公式或改进了公式中的参数。

但是目前关于波浪破碎指标的研究，大多基于规则波，而对于不规则波破碎指标的研究较少。Kamphuis<sup>[5]</sup> 通过物理模型试验，研究了不规则波在斜坡上的破碎，并基于已有的规则波破碎指标计算公式，拟合了计算参数；Li 等<sup>[6]</sup> 通过不规则波在地形上的破碎试验，研究不规则波的破碎特性，并得到了不规则波的破碎指标计算公式；Goda<sup>[7]</sup> 通过对文献中的大量试验数据重新分析，对已有计算公式进行修正，得出不规则波的破碎指标；柳淑学等<sup>[8]</sup> 通过物理模型试验，研究正向、斜向及多向不规则波在均匀斜坡地形上的破碎，通过已有破碎指标的通用形式，拟合了适用于不规则波的计算参数。

然而上述研究对象大多为二维斜坡地形，实际的海岸地形往往非常复杂，并非是均匀的斜坡地形，在纵向上具有很大的变化，这种地形在纵向上的变化对于波浪的传播具有较大的影响。但是关于波浪在三维地形上的破碎研究还很少。Jia 等<sup>[9]</sup> 通过物理模型试验研究规则波在三维透镜地形上的破碎，与二维地形的规则波破碎指标进行对比，结果表明三维透镜地形上波浪的传播特性较二维地形更为复杂，可用于研究地形纵向的不均匀性对波浪破碎指标的影响。

本文通过物理模型试验，研究正向、斜向和多向不规则波在三维透镜地形上的破碎指标，将试验结果与二维斜坡地形的计算公式进行对比，并基于现有破碎指标的通用形式对试验数据进行拟合，给出适用于三维透镜地形上破碎指标计算公式中的参数。

## 1 试验布置和参数

试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室的三维水池中进行。水池长 40 m、宽 24 m，水池一侧安装有分段式推板造波系统，造

波板宽 0.34 m，共 70 块造波板。水池其他 3 侧安装了消浪装置，以防止波浪反射。

图 1 为三维透镜地形试验布置。该地形的水平剖面为矩形前端凸出一个半径为 3 m 的半圆。地形前端的坡度为 1:15，地形顶部高度为 0.4 m。地形的中心线上布置了 12 个浪高仪，并在试验前通过率定，保证全部浪高仪的相关系数误差小于 1‰。其中，1、2 号浪高仪用于测量入射波浪参数，在破碎位置附近加密布置浪高仪（6~12 号）从而测量破碎区内的波浪信息。试验中采用的水位为 0.4 m，即静水面与地形顶部齐平，波浪在地形前端的斜坡上破碎，即 6~12 号浪高仪处。

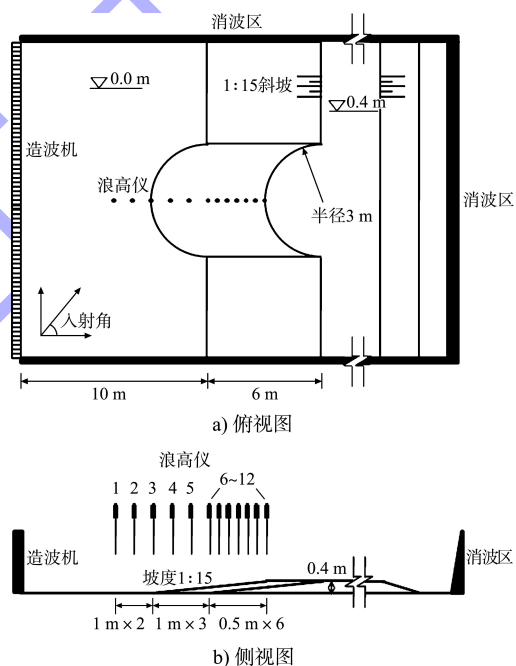


图 1 试验布置

试验中，浪高仪的采样间隔为 0.02 s，数据采集长度大于 100 个波浪周期，每组参数至少进行 2 次重复试验。试验中的不规则波频谱采用改进的 JONSWAP 谱<sup>[10]</sup>，谱峰升高因子取 3.3。正向及斜向不规则波、多向不规则波的入射波浪参数见表 1、2。表中的入射角定义方式见图 1a)。当入射角为 0° 时，入射波浪为正向不规则波；当入射角为 15° 时，入射波浪为斜向不规则波。试验中多向不规则波的主波向均为 0°，多向不规则波的方向分布集中度参数  $s_d$  反映了波浪方向分布的宽度， $s_d$  越大，方向分布越窄<sup>[11]</sup>。

表 1 单向不规则波入射参数

入射角 $\theta/(^{\circ})$	有效周期 $T_s/s$	有效波高 $H_s/m$
0	1.0	0.064, 0.099
	1.5	0.085, 0.103
	2.0	0.063, 0.104
	2.5	0.043, 0.070, 0.136
15	1.0	0.068, 0.103
	1.5	0.059, 0.107
	2.0	0.069, 0.112
	2.5	0.071, 0.130

表 2 多向不规则波入射参数

方向集中度 $s_d$	有效周期 $T_s/s$	有效波高 $H_s/m$
25	1.5	0.040, 0.060, 0.078, 0.105
	2.0	0.043, 0.064, 0.090, 0.117
40	1.5	0.047, 0.060, 0.080, 0.106
	2.0	0.043, 0.064, 0.090, 0.119
75	1.5	0.037, 0.061, 0.081, 0.107
	2.0	0.042, 0.064, 0.088, 0.118

2 试验结果分析

2.1 波浪沿程变化

由于静水面与地形顶部等高, 波浪在坡上传播的过程中水深逐渐减小, 最终在斜坡上发生破碎, 图 2 为试验典型波浪破碎。与规则波破碎不同, 不规则波的破碎通常发生在一个区域, 破碎点并不固定。本文参考 Kamphuis 和 Goda 等的做法, 将初始破碎位置判定为破碎点。图 3 给出了试验中的典型波高沿程变化。对于图中正向不规则波, 从距离造波机 7 (坡脚) ~ 11 m 的区域内, 波浪由于浅化作用波高逐渐增大; 而在 11 ~ 13 m (坡顶) 的区域内, 波高由于波浪破碎逐渐减小。初始破碎位置定义为两个区域的交点, 该点处的波高为沿程最大波高。

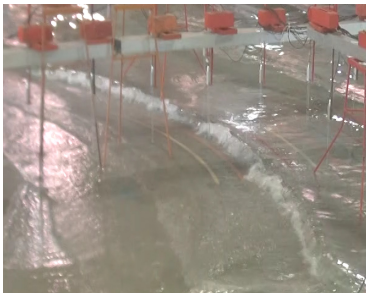


图 2 试验典型波浪破碎

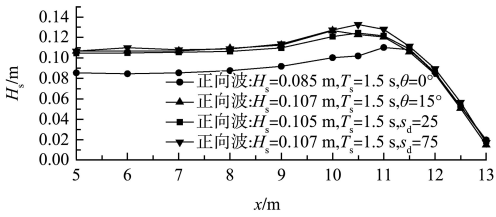


图 3 波高沿程变化

2.2 不规则波浪破碎指标计算公式

现有不规则波的破碎指标计算公式主要包括关于  $H_b/L_b$ 、 $H_b/L_0$  的两类公式, 均基于均匀斜坡地形试验结果提出。Kamphuis 在规则波破碎指标的基础上, 提出了关于  $H_b/L_b$  的计算公式, 该类型公式的通用形式为:

$$\frac{H_b}{L_b} = \alpha(s) \tanh \left[ \beta(s) \cdot \frac{2\pi d_b}{L_b} \right]$$

(1)

式中:  $H_b$  为初始破碎位置处的有效波高;  $L_b$  为谱峰周期对应的破碎波长;  $d_b$  为破碎水深;  $\alpha(s)$ 、 $\beta(s)$  分别为关于坡度  $s$  的参数。不同学者采用公式(1)形式所得到的参数见表 3。考虑本文的透镜地形上波浪正向入射时的坡度为 1:15, 所以表中同时列出了  $\alpha(s)$ 、 $\beta(s)$  在坡度为 1:15 时的值。

另外, Goda 提出的破碎指标  $H_b/L_0$  的计算公式的通用形式为:

$$\frac{H_b}{L_0} = \alpha \left\{ 1 - \exp \left[ -1.5 \beta(s) \cdot \frac{\pi d_b}{L_0} \right] \right\}$$

(2)

式中:  $L_0$  为深水波长;  $\alpha$  为系数。Goda 首先基于规则波试验得到公式中相应的参数; 之后 Li 等、Goda 等进行了不规则波破碎指标的研究, 对公式中的系数进行修正, 用于计算不规则波的破碎指标。不同学者研究所得的关于不规则波破碎指标  $H_b/L_0$  计算公式中的参数见表 4。

需要说明的是, 表 3 和表 4 中, 柳淑学等的结果基于坡度 1:15 的均匀斜坡试验得到, 其水深亦为 0.4 m, 而且与本文类似, 水深与坡顶齐平。

表 3 破碎指标  $H_b/L_b$  的相关公式

研究者	适用坡度	$\alpha(s)$	$\beta(s)$	$\alpha(s=1:15)$	$\beta(s=1:15)$
Kamphuis	$1/40 \leq s \leq 1/10$	$0.095e^{4s}$	1.0	0.124	1.00
柳淑学等	$s = 1:15$			0.075(正向)	1.83(正向)
				0.071(斜向)	2.14(斜向)
				0.053(多向 25)	2.90(多向 25)
				0.056(多向 40)	2.70(多向 40)
				0.060(多向 75)	2.45(多向 75)

注：多向 25、多向 40、多向 75 分别表示方向集中度  $s_d$  为 25、40、75 的多向不规则波。

表 4 破碎指标  $H_b/L_b$  的相关公式

研究者	适用坡度	$\alpha$	$\beta(s)$	$\alpha$	$\beta(s=1:15)$
Li 等	通用	0.12	$1+15s^{4/3}$	0.120	1.405
Goda	通用	0.12	$1+11s^{4/3}$	0.120	1.297
柳淑学等	$s = 1:15$			0.100(正向)	1.867(正向)
				0.100(斜向)	2.000(斜向)
				0.065(多向 25)	3.200(多向 25)
				0.068(多向 40)	3.067(多向 40)
				0.070(多向 75)	3.000(多向 75)

2.3 正向、斜向不规则波试验结果分析

图 4 为三维透镜地形上试验结果与表 3 中所列计算公式计算结果的比较。可以看出，当  $d_b/L_b < 0.11$  时，本文试验值  $H_b/L_b$  整体上大于各公式的计算值；当  $d_b/L_b \geq 0.11$  时，试验值小于 Kamphuis 公式的计算值、大于柳淑学等公式的计算值。

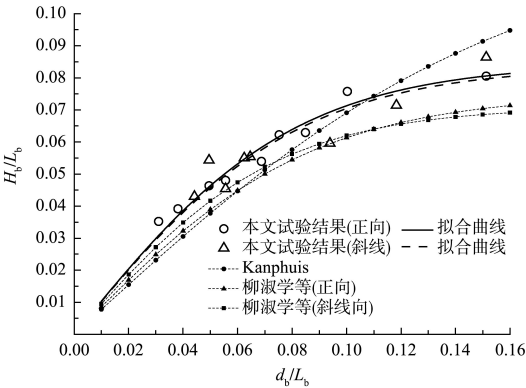


图 4 正向和斜向不规则波试验结果与表 3 中计算公式计算结果的比较

需要说明的是，Kamphuis 的试验包括大量沙质地形及少量混凝土地形上的试验数据，并且斜坡坡度与本试验不同；在柳淑学等的均匀斜坡试

验中，水位、地形坡度、地面条件与本试验均相同，并且波浪入射参数与本试验的波浪参数极为接近，因此  $H_b/L_b$  随  $d_b/L_b$  的变化趋势与本试验结果较为接近。通过与柳淑学等的公式对比可以看出，在相同条件下，三维透镜地形的破碎指标  $H_b/L_b$  大于斜坡地形上的试验结果，其原因可能是三维透镜地形对波浪的聚焦作用引起的。如图 5 所示，由于波浪的折射作用，其传播方向与岸线趋于垂直，因此透镜地形具有对波浪的聚焦作用，从而使得破碎波高增大。

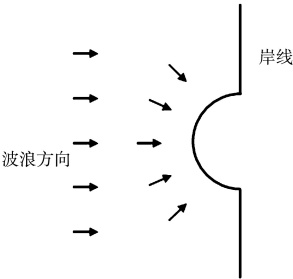


图 5 波浪折射引起的聚焦作用

由于试验数据的破碎指标  $H_b/L_b$  随  $d_b/L_b$  的变化趋势与现有公式基本一致，因此采用最小二乘



法对公式(1)进行了拟合。其中正向不规则波的拟合结果为  $\alpha = 0.085$ 、 $\beta = 1.960$ ，与柳淑学等的正向规则波数值较为接近，但数值稍大一些。斜向不规则波的拟合结果为  $\alpha = 0.084$ 、 $\beta = 1.952$ ，与正向规则波拟合参数较为接近，尤其是当  $d_b/L_b$  较小时，两条拟合曲线几乎重合。

图 6 为本文三维透镜地形上的试验结果与表 4 中所列公式计算结果的比较。可以看出，当  $d_b/L_0$  较小时，受地形对波浪的聚焦作用， $H_b/L_0$  的试验值一般较大，大于现有公式计算值；当相对破碎水深较小时，波浪的破碎位置更靠近岸线，由波浪聚焦作用引起的破碎波高的增大也更为明显。因此图中  $d_b/L_0$  较小区域，试验值整体上大于公式计算值；而当  $d_b/L_0$  较大时，受地形对波浪的聚焦作用较弱，本文试验值与均匀斜坡破碎公式的计算结果较为接近。

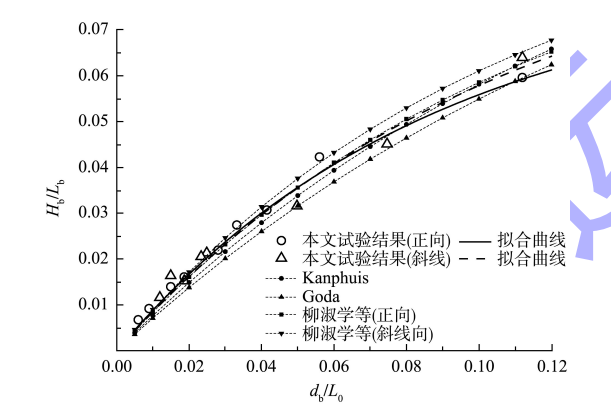


图 6 正向和斜向不规则波试验结果与表 4 中所列计算公式计算结果的比较

同样，采用公式(2)的形式对试验结果进行拟合，正向规则波的拟合结果为  $\alpha = 0.082$ 、 $\beta = 2.409$ ，斜向规则波的拟合结果为  $\alpha = 0.095$ 、 $\beta = 1.975$ 。由图 6 可见，当  $d_b/L_0$  小于 0.07 时，两条拟合曲线几乎重合，这与上文结论是一致的。事实上，虽然公式(2)和公式(1)中右侧表达式中的波长参数分别采用了深水波长  $L_0$  与破碎波长  $L_b$ ，但两个公式函数值的变化是一致的，因此两类公式的曲线变化趋势及结论也是一致的。

2.4 多向不规则波试验结果分析

图 7 给出了三维透镜地形多向波试验结果与

表 3 中计算公式计算结果的比较。由于试验中的多向波主波向均为  $0^\circ$ ，为了便于比较，上文得到的正向不规则波拟合曲线也在图中列出。通过与柳淑学等计算公式的对比可以看出，三维透镜地形上  $H_b/L_b$  随相对破碎水深  $d_b/L_b$  的变化趋势与斜坡地形较为类似，但由于地形聚焦作用的影响，三维透镜地形的  $H_b/L_b$  值大于斜坡地形的计算值。

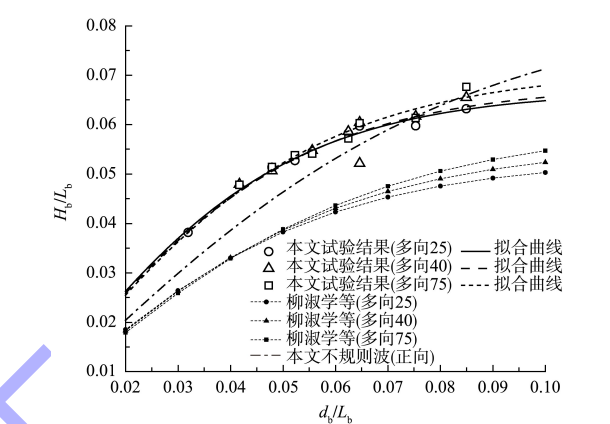


图 7 多向不规则波试验结果与表 3 中计算公式计算结果的比较

通过与正向不规则波的结果对比可以看出，当  $d_b/L_b < 0.075$  时，多向不规则波的  $H_b/L_b$  值整体上大于正向不规则波结果。采用公式(1)对试验数据进行拟合，方向集中度为 25、40 和 75 的多向波拟合结果分别为  $\alpha = 0.067$ 、 $\beta = 3.298$ ， $\alpha = 0.068$ 、 $\beta = 3.184$ ， $\alpha = 0.071$ 、 $\beta = 2.984$ ，参数均大于表 3 中对应的 1:15 斜坡地形上的拟合值。由于正向不规则波可以视为方向集中度为  $+\infty$  的极限情况，其拟合参数为  $\alpha = 0.085$ 、 $\beta = 1.960$ ，因此随着方向集中度的增大，公式(1)中的拟合参数  $\alpha$  逐渐增大，而  $\beta$  值逐渐减小。当  $d_b/L_b > 0.085$  时，正向不规则波的  $H_b/L_b$  值大于多向不规则波，并且  $H_b/L_b$  随着方向集中度的增大而增大。此外，由图 7 还可以看出，当  $d_b/L_b < 0.06$  时，方向集中度为 25、40、75 的结果差别较小。

类似的，多向不规则波试验结果与表 4 中计算结果的比较见图 8。当  $d_b/L_0$  较小时，波浪受地形的聚焦作用较强， $H_b/L_0$  的试验值整体上大于柳淑学等在均匀斜坡地形上所得结果；当  $d_b/L_0$  较大时，波浪受地形对波浪的聚焦作用较弱，试验值

与斜坡地形结果较为接近。同样采用公式(2)对试验数据进行拟合,方向集中度为25、40和75的多向波拟合结果为 $\alpha = 0.044$ 、 $\beta = 6.182$ ,  $\alpha = 0.049$ 、 $\beta = 5.273$ ,  $\alpha = 0.051$ 、 $\beta = 5.054$ 。与正向不规则波(相当于方向集中度参数为无穷大)的拟合参数 $\alpha = 0.082$ 、 $\beta = 2.409$ 对比可以看出,当方向集中度增大时,公式(2)中的参数 $\alpha$ 逐渐增大,而 $\beta$ 值逐渐减小。当 $d_b/L_0$ 较小时,方向集中度为25、40和75的3条曲线差别较小,多向不规则波的 $H_b/L_0$ 值大于正向不规则波;当 $d_b/L_0$ 大于0.043时,多向不规则波的 $H_b/L_0$ 值小于正向不规则波,并且 $H_b/L_0$ 随着方向集中度的增大而增大。

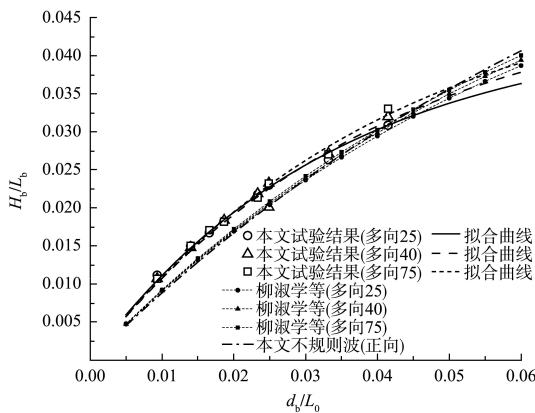


图8 试验数据与表4计算公式的比较

### 3 结论

1)总结了二维地形上关于不规则波破碎指标 $H_b/L_b$ 和 $H_b/L_0$ 的两类计算公式,与试验结果分别进行对比。当相对破碎水深较小时,受透镜地形的波浪聚焦作用影响,透镜地形上的破碎指标大于现有基于均匀缓坡所得公式的计算值。并基于两类计算公式,给出了适用于三维透镜地形的破碎指标计算的参数。

2)当相对破碎水深较小时,正向不规则波与斜向不规则波的破碎指标较为接近,多向不规则波的破碎指标大于正向不规则波。当相对破碎水深较大时,正向不规则波的破碎指标较大,且多向不规则波的破碎指标随方向集中度

参数的增大而增大。随着多向波方向集中度参数的增大,两类公式中的参数 $\alpha$ 逐渐增大,而 $\beta$ 值逐渐减小。

### 参考文献:

- [1] MICHE A. Mouvements ondulatoires de la mer en profondeur croissante ou décroissante[R]. Paris: Annales Des Ponts Et Chaussées, 1944.
- [2] MUNK W H. The solitary wave theory and its applications to surf problems[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 1949, 51(3): 376-424.
- [3] GODA Y. A synthesis of breaker indices[J]. Transactions of the Japan Society of Civil Engineers, 1970, 2(2): 39-49.
- [4] SUNAMURA T. A laboratory study of offshore transport of sediment and a model for eroding beaches [C]//17th International Conference on Coastal Engineering. Sydney: ASCE, 1980: 1051-1070.
- [5] KAMPHUIS J W. Incipient wave breaking[J]. Coastal engineering, 1991, 15(3): 185-203.
- [6] LI Y C, DONG G H. Wave breaking phenomena of irregular waves combined with opposing current[J]. China ocean engineering, 1993, 7(2): 197-206.
- [7] GODA Y. Reanalysis of regular and random breaking statistics[J]. Coastal engineering journal, 2010, 52(1): 71-106.
- [8] 柳淑学, 胡书义, 李金宣, 等. 斜向和多向波浪的破碎指标研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2017, 32(4): 423-432.
- [9] JIA W, LIU S X, LI J X. Experimental investigation of wave breaking on lens topography [C]//The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes: ISOPE, 2016: 1349-1354.
- [10] GODA Y. A comparative review on the functional forms of directional wave[J]. Coastal engineering journal, 1999, 41(1): 1-20.
- [11] 俞聿修, 柳淑学. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2011.

(本文编辑 武亚庆)