

不规则波在斜坡地形破碎区波高分布的数值试验研究*

程赵德, 朱良生, 罗天翔

(华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘要:在近岸浅水波浪分布的研究中, 格鲁霍夫斯基给出适用于深水波至破碎波的整个浅水域(相对水深 $\eta > 2$) 的波高经验分布公式, 但该式在波浪发生破碎后的适用性研究欠缺。基于 FLOW-3D 软件对深水不规则波传播到斜坡地形上波浪发生破碎进行模拟, 验证波高沿程分布与试验值的一致性, 并模拟在 1:30 斜坡地形条件下波浪从有限水深传播到近岸破碎区的沿程波高分布变化。结果表明, 在该坡度相对水深 $\eta < 2.75$ 情况下, 格鲁霍夫斯基经验分布公式出现较大误差, 不再适用; 破碎区各累积率波高与平均波高的比值随相对水深变小呈递减趋势, 经验公式值与之相比, 总体上呈现出大波偏大、小波偏小的情况。

关键词: 斜坡地形; 不规则波; 波浪破碎; 波高分布; 累积率波高

中图分类号: P 731; U 652.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)01-0007-06

Numerical experiment study on wave height distribution of irregular wave in slope topography breaking area

CHENG Zhao-de, ZHU Liang-sheng, LUO Tian-xiang

(School of Civil Engineering & Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: On the study of wave distribution in shallow water near the shore, Grukhsosky gives an empirical wave height distribution formula from deep-water to the entire shallow water area ($\eta > 2$), but the applicability study of the formula after wave breaking is lacking. Based on FLOW-3D software, we carry out a simulation of deep-water irregular wave propagating to slope topography breaking area, verify the consistency between the wave height distribution along the path with the test value, and simulate the change of wave height distribution along the way when the wave propagates from the finite water depth to the near shore breaking area under the condition of slope topography of 1:30. The results show that under the condition of this slope and the relative water depth $\eta < 2.75$, there is a large error and the empirical formula is inapplicable. The ratio of each cumulative rate wave height to the average wave height in the breaking area shows a decreasing trend as the relative water depth becomes smaller. The values of the empirical formula compare with the numerical experiment values, these of the big wave are larger and these of the wavelet are smaller.

Keywords: slope topography; irregular wave; wave breaking; wave height distribution; cumulative rate wave height

近岸波浪是防波堤冲刷、岸滩冲淤动力产生的主要因素。受地形影响, 波浪在传到近岸过程

中会发生变形、破碎、折射等一系列变化。近岸浅滩波浪的细致研究, 对近岸工程设计施工、渔

收稿日期: 2021-03-23

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51909096)

作者简介: 程赵德(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为近海与近岸环境动力学。

通讯作者: 朱良生(1963—), 男, 博士, 教授, 从事波浪模型、近海近岸工程研究。E-mail: lshzhu@scut.edu.cn

业养殖等生产活动具有重要意义。

深水波浪破碎理论已经十分成熟，对于深水波，普遍认为风成波波列中波面振幅符合瑞利分布，相应给出了累积率波高 H_p 与平均波高关系参考值^[1]。虽然一些学者认为瑞利分布可用于浅水域，但实测资料证明水深 D 或相对水深 η 对波高分布具有一定影响，水深变浅时波高较符合基于实测资料提出的格鲁霍夫斯基经验分布^[2]，该分布适用于深水至破碎波的浅水域 ($\eta=2\sim+\infty$)。

在浅水波浪破碎的相关研究中，Munk^[3] 利用孤立波原理，从理论上导出波浪破碎时的极限水深。在此基础上，曹祖德^[4] 根据波能流和波浪周期不变性，导出当波浪传入浅水区后，波浪发生扭曲破碎的极限水深。李玉成等^[5] 通过试验分析和理论计算，认为波浪的破碎指标仍可采用合田良实^[6] 的相对波高极值与 Miche^[7] 的极限波陡指标，并利用该破碎指标分析计算缓坡上不规则波在水流作用下的谱变形。李玉成^[8] 利用波作用守恒原理分析波浪谱在水流作用下的变形，提出研究浅滩上波浪谱变形及破碎的新方法以及用以计算破后波的流体体积法 (volume of fluid, VOF)。Li 等^[9] 通过不规则波在斜坡地形上的破碎试验，研究不规则波的破碎特性，得到不规则波的破碎指标计算公式。Goda^[10] 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^[11] 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，拟合出适用于不规则波的计算参数。贾伟等^[12] 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，给出适用于三维透镜地形上破碎指标计算公式中的参数。

以往波浪在近岸浅水区斜坡地形发生破碎，研究工作多着眼于波浪在平台上稳定后的状态以及对破碎指标，对不规则波破碎过程的波高分布缺乏研究，在工程实践中，现行相关规范在浅水域使用不便。本文将通过斜坡地形条件下波浪在破碎区分布变化，探讨格鲁霍夫斯基波高经验分

布公式的适用性。

1 数学模型

基于 FLOW-3D 软件，采用基于黏性流体假设的 Navier-Stokes 方程的 $k-\varepsilon$ 紊流模型不可压缩 RANS 方程 (Reynolds-average Navier-Stokes, 雷诺平均 N-S 方程)，采用有限差分数值离散方法。使用正交网格处理技术，有效克服有限差分程序对复杂边界拟合较差的缺点。通过采用 VOF 方法从造波、传播到消波的运动过程对自由液面进行追踪，实现了适用 VOF 方法的边界条件造波及水槽末端消波。

1.1 控制方程

FLOW-3D 采用 N-S 方程控制流体运动，对于不可压缩黏性流体，连续方程为：

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 \tag{1}$$

动量方程为：

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \end{cases} \tag{2}$$

式中： u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向上的速度分量； A_x 、 A_y 、 A_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的面积函数； V_F 为体积分数； ρ 为流体密度； p 为压强； t 为时间； G_x 、 G_y 、 G_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的加速度； f_x 、 f_y 、 f_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的黏性加速度。

1.2 紊流模型

紊流动能 k_T 的方程为：

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + vA_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + wA_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) = P_T + G_T + \text{diff}_T - \varepsilon_T \tag{3}$$

紊流能耗散率 ε_T 方程为：

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + vA_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + wA_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) = \frac{\text{CDIS1} \cdot \varepsilon_T}{k_T} (P_T + \text{CDIS2} \cdot G_T) + \text{diff}_\varepsilon - \text{CDIS3} \cdot \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \tag{4}$$

式中: G_T 为浮力紊动项; diff_T 为扩散项; diff_e 为耗散扩散项; CDIS1、CDIS2、CDIS3 为经验参数, 分别取 1.42、0.20、1.92; P_T 为速度梯度引起的紊动能产生项, 表达式为:

$$P_T = \text{CSPRO} \left(\frac{u}{\rho V_F} \right) \left[2A_x \frac{\partial u}{\partial x} + 2A_y \frac{\partial v}{\partial y} + 2A_z \frac{\partial w}{\partial z} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \left(A_x \frac{\partial v}{\partial x} + A_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(A_z \frac{\partial u}{\partial z} + A_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \left(A_z \frac{\partial v}{\partial z} - A_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \quad (5)$$

式中: CSPRO 为紊动参数, 默认为 1。扩散项表达式为:

$$\text{diff}_T = \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(v_k A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_k A_y \frac{\partial k_T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_k A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) \right] \quad (6)$$

$$\text{diff}_e = \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(v_e A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_e A_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_e A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) \right] \quad (7)$$

式中: v_k 、 v_e 为扩散系数。

在所有的紊流模型中, 运动黏滞系数 ν_T 的表达式为:

$$\nu_T = \text{CNU} \cdot \frac{k_T^2}{\varepsilon_T} \quad (8)$$

式中: CNU 为常数, 取 0.085, 在 FLOW-3D 中用户可自定义该常数。

为了避免计算过程中对流体带来巨大的能量耗散, 在该紊流模型中需要一个 ε_T , 并对其加以限制。

1.3 边界条件

FLOW-3D 中边界条件有 Symmetry、Specified pressure、Outflow、Wave、Wall 等 10 种。本文数值水槽采用以下边界设置。

入口边界: 根据相关波浪理论采用边界造波法进行造波, 在网格边界提供能够定义波浪生成的边界条件, 输入试验过程中的波要素, 就可以在模型中生成设定条件下的对应波浪。

出流边界: 为了能让波浪顺利流过出流边界,

并且在出流边界不发生反射干扰计算域里面波浪, 选择流出 (Outflow) 的边界条件。

自由液面: 自由液面所使用的力学边界条件的压力值 p_a 取大气压力 (101.325 kPa), 同时自由表面上沿着法向的所有速度矢量梯度为 0, 即在该表面上的切应力数值为 0。

底部边界: 底部边界设置为墙 (Wall) 边界, 底部具有粗糙度, 接近实际海底地形条件。

其他边界: 设置对称 (Symmetry) 边界, 这个边界上流量数值等于 0, 边界上的流体剪切应力等于 0, 在模拟计算过程中判定为边界两侧均有流体, 相比于物理模型试验, 该设置更接近实际海况条件。

2 模型验证

2.1 不规则波造波

使用 FLOW-3D 软件自带的边界造波, 造波模块的理论基础是依据波浪理论中的线性波理论的速度入口法进行造波。由于在模型中底部边界的选取使得水槽底部不平整, 且流体具有黏滞性, 因此采用线性波叠加造波的不规则波在传播一段距离后, 非线性增强, 本文采用 P-M (Pierson-Moscowitz) 谱造波, 公式为:

$$S(\omega) = \frac{0.78}{\omega^5} \exp \left(-\frac{3.11}{\omega^4 H_s^2} \right) \quad (9)$$

式中: $S(\omega)$ 为波能; H_s 为有效波高; ω 为角频率, 令 $\frac{\partial S(\omega)}{\partial \omega} = 0$ 可得谱峰角频率 $\omega_p = \frac{1.256}{\sqrt{H_s}}$ 。

在 FLOW-3D 中, P-M 谱设置唯一的参数是风速, $\omega_p = \frac{0.855g}{v_{10}}$, 其中 v_{10} 是高于平均海平面 10 m 处的风速。由此可得 $H_s = 0.0224 v_{10}^2$ (适用于小尺度水槽)。

设定数值水槽长 50 m、宽 0.01 m、水深 1.0 m, 在出口边界设置长 5 m、宽 0.1 m、高 1.5 m 的海绵层用以消波, 1~2 倍的波长的消波长度可以很好地吸收大部分波能。采用有效波高为 0.067 2 m, 谱峰周期为 1.27 s 的 P-M 谱造波, 边界条件同 1.3 节。

计算模型运行 300 s，时间步长 0.01 s，对稳定后的波列进行统计分析，共 215 个波。得到的数值谱与理论靶谱的谱要素见表 1，有效波高 0.064 6 m，误差为 3.87%，谱峰周期误差 0.79%，分析可知，FLOW-3D 对随机波的模拟很好地满足精度要求，可用于数值试验。文献[13]对其造波的可靠性进行过充分的验证。

表 1 靶谱和数值谱有效波高和谱峰周期		
类型	有效波高/m	谱峰周期/s
靶谱值	0.067 2	1.27
Flow-3D 数值模拟值	0.064 6	1.26
误差/%	3.87	0.79

2.2 不规则波破碎

在对 FLOW-3D 进行波浪斜坡传播破碎验证时，数值模型采用 Demirbilek 等^[14]按照关岛东南海岸某珊瑚礁设计的物理试验模型，见图 1，右边界为爬坡边界，坡度为 1:12。深水区水深 0.531 m，经过一个复合形状斜坡过渡到水平礁坪，平均坡度 1:10.2，礁坪上水深 0.031 m。入射随机波谱峰周期 1.40 s，有效波高 $H_s=0.075$ m。

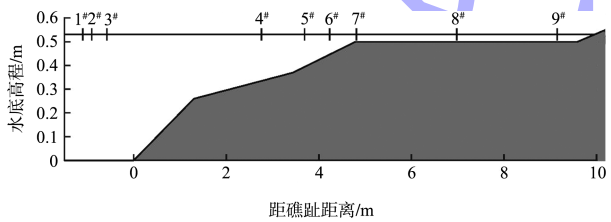


图 1 Demirbilek 的试验地形和测波仪位置

沿程设置 9 个测点，测点位置见表 2。模型运行 500 s，取稳定后的 400 s 数据进行分析。截取最大水深处波面过程线见图 2，具有很强的非线性。物理试验值与本文 FLOW-3D 数值试验沿程波高对比见图 3，可以看出，浪传播到斜坡后波高会先有所增大后破碎，破碎位置和物理模型试验基本一致。在 9 个测点处，FLOW-3D 对随机波的破碎模拟值和物理模型试验值一致性较好，平均误差为 3.23%，数据具有高度一致性，数值试验值虽略低，实际上反映出其造波精度更高。通过对比分析，该模型能够准确地捕捉波浪破碎位置，

模拟波高沿程变化，本文基于 FLOW-3D 进行波浪破碎的相关研究是可靠的。

表 2 测点距坐标 0 点的距离及模型试验值和数值试验值有效波高

测点	距 0 点 距离/m	模型试验值 H_{s-e}/cm	数值试验值 H_{s-f}/cm	误差/%
1 [#]	-1.10	7.98	7.51	5.89
2 [#]	-0.95	7.53	7.48	0.66
3 [#]	-0.60	7.53	7.52	0.13
4 [#]	2.75	—	7.57	—
5 [#]	3.65	7.20	7.47	3.75
6 [#]	4.20	7.85	7.63	2.80
7 [#]	4.80	5.02	4.68	6.77
8 [#]	7.00	2.73	2.49	8.79
9 [#]	9.15	2.63	2.51	4.56

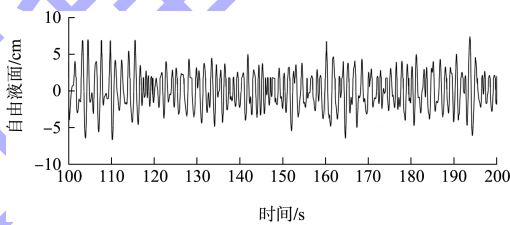


图 2 $x=-10$ m 处波面过程线

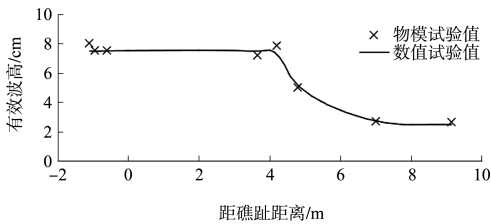


图 3 有效波高的物理模型试验值与数值试验值对比

3 数值试验及结果分析

所采用的数值水槽地形见图 4，最大水深 1.55 m，斜坡顶部最小水深 0.05 m，在右边界设置长 6 m、高 2 m 的海绵层用于消波。在斜坡后段破碎区设置均匀测点，造波采用 P-M 谱边界造波法，设置海平面上 10 m 处风速 2 m/s，对应的谱峰周期 $T_p=1.50$ s，有效波高 $H_s=0.089$ 6 m，计算运行时间为 500 s，各测点按照一定规则取 245~249 个波。按照上述初始条件模拟深水不规则波传播到斜坡地形上的破碎过程，对波高进行统计，分析其沿程分布变化，以最大波高作为各测点截止波高大致确定破碎比例。

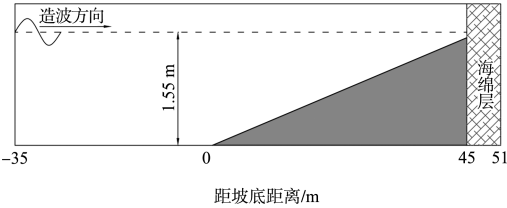


图 4 数值水槽地形

在深水到浅水水域不规则波波高分布可用格鲁霍夫斯基经验分布表示：

$$p\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)=\exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(1+\frac{1}{\sqrt{2\pi\eta}}\right)^{-1}\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^{\frac{2}{1-\frac{1}{\eta}}}\right]\quad(10)$$

式中： p 为超值概率； H 为波高； \bar{H} 为平均波高； η 为相对水深。

有限水深超值概率数值试验值曲线与格鲁霍夫斯基分布公式曲线见图 5。可以看出，输入波波高超值概率分布曲线与格鲁霍夫斯基分布公式曲线一致性较高。

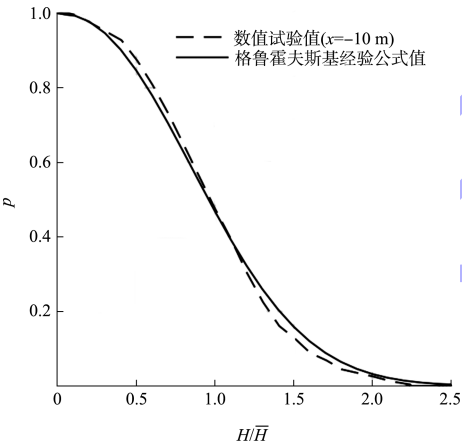
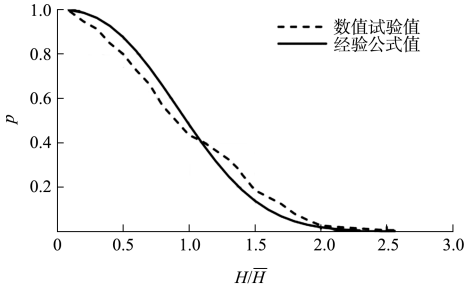


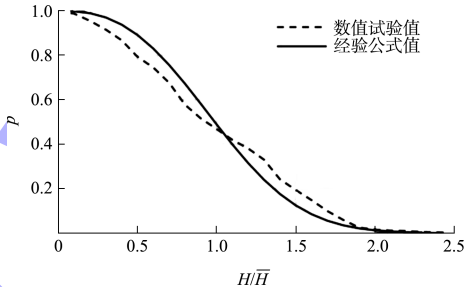
图 5 $x=-10\text{ m}$ 处超值概率曲线与格鲁霍夫斯基分布曲线对比

破碎区沿程波高超值概率分布曲线见图 6。可以看出，当波浪从有限水深传入浅水发生破碎后，波浪超值概率曲线发生明显的变化，数值试验概率值较格鲁霍夫斯基分布公式值，大波、次大波偏大，小波偏小，与文献[4]给出的波高分布图基本一致。分布曲线主要变化特征表现为随着波浪向破碎区传播，曲线约 $H/\bar{H}=1.25$ 处凸起明显，概率值增大，随着破碎程度增大，曲线凸起位置渐移至约 $H/\bar{H}=0.8$ 处。大波破碎后，次大波增多，平均波高减小，小波与平均波高比值增大，在曲线上反映为凸起位置左移。破碎程度加剧， $2<\eta<5.27$ 时，数值试验值分布曲线与格鲁霍夫斯基分布曲线拟合质

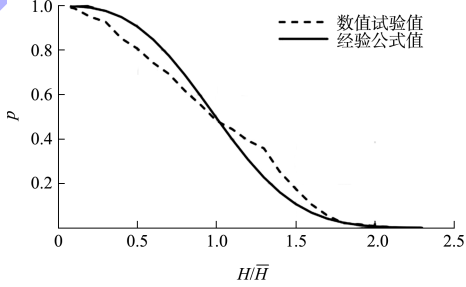
量越来越差。当超过 11.65% 的波发生破碎 ($2<\eta<2.79$) 时，可认为不满足该分布。在 53.41% 的波发生破碎 ($\eta=1.52$) 时，破碎后最大波高与水深比值较规范偏差大，须进一步研究分析。



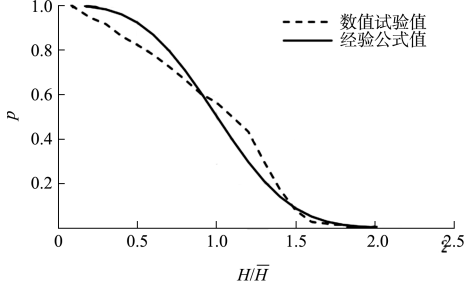
a) $x=40\text{ m}$, $\eta=5.27$



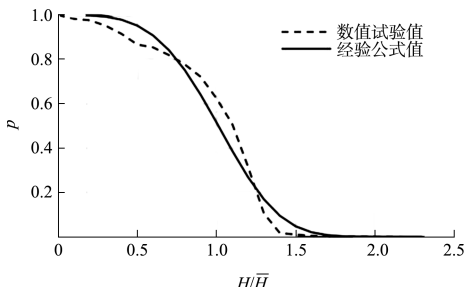
b) $x=41\text{ m}$, $\eta=4.12$



c) $x=42\text{ m}$, $\eta=3.36$



d) $x=43\text{ m}$, $\eta=2.79$



e) $x=44\text{ m}$, $\eta=2.13$

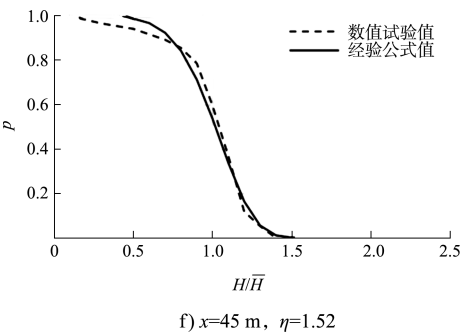


图6 破碎区沿程各点超值概率曲线与
格鲁霍夫斯基分布曲线对比

破碎区各处波浪特征值以及累积率波高与平均波高比值的数值试验结果与经验公式结果见表3。由数值试验结果可看出,破碎区有效波高、平均波高随水深变浅呈递减趋势,在相对水深5.27、4.92、4.12、3.36、2.79、2.13处1%、5%、13%累积率波高与平均波高比值平均误差分别为9.02%、8.92%、7.56%、4.91%、6.09%。各特征累积率波高与平均波高的比值随水深变浅、破碎程度增加,也呈现出显著的递减趋势,格鲁霍夫斯基分布公式计算得到的比值与之相比,大波偏大、小波偏小。

表3 各破碎点波浪特征值及累积率波高与平均波高比值的结果

类型	测点	相对水深 η	静水深 h/m	破碎比例/%	有效波高 H_s/m	平均波高 \overline{H}/m	$H_{1\%}/\overline{H}$	$H_{5\%}/\overline{H}$	$H_{13\%}/\overline{H}$	$H_{30\%}/\overline{H}$
数值试验结果	1 [#]	5.27	0.217	4.02	0.067 9	0.041 2	2.41	1.90	1.67	1.34
	2 [#]	4.12	0.183	5.62	0.070 9	0.044 4	2.16	1.83	1.64	1.34
	3 [#]	3.36	0.150	8.03	0.057 3	0.044 6	2.02	1.71	1.56	1.35
	4 [#]	2.79	0.117	11.65	0.060 9	0.042 0	1.92	1.56	1.44	1.30
	5 [#]	2.13	0.083	16.06	0.050 3	0.039 0	1.54	1.36	1.29	1.21
	6 [#]	1.52	0.050	53.41	0.039 3	0.032 5	1.45	1.26	1.19	1.13
格鲁霍夫斯基经验公式结果	1 [#]	5.27	—	—	0.067 9	0.041 2	2.45	2.21	1.51	1.22
	2 [#]	4.12	—	—	0.070 9	0.044 4	2.36	1.72	1.49	1.21
	3 [#]	3.36	—	—	0.057 3	0.044 6	2.23	1.67	1.46	1.21
	4 [#]	2.79	—	—	0.060 9	0.042 0	2.09	1.60	1.43	1.20
	5 [#]	2.13	—	—	0.050 3	0.039 0	1.67	1.49	1.35	1.17
	6 [#]	1.52	—	—	0.039 3	0.032 5	1.51	1.31	1.25	1.12

4 结 语

1)通过数值试验分析, FLOW-3D 可以准确地模拟随机波在斜坡的破碎, 其模拟试验的结果是可靠的。

2)不规则波从过渡水深传播到近岸斜坡地形破碎区发生破碎后, 随着破碎程度增加, 概率曲线凸点由 $H/\overline{H}=1.25$ 处渐移至约 $H/\overline{H}=0.8$ 处, 数值试验超值概率分布曲线与格鲁霍夫斯基经验分布公式曲线拟合质量越来越差。在该坡度条件下, $2.79<\eta<5.27$ 时应谨慎使用该公式, 在 $2.00<\eta<2.79$ 时, 不再满足该分布。

3)初步得到破碎区各累积率波高与平均波高比值关系, 在破碎区随着波破比例的增大, 各累积概率与平均波高的比值递减趋势明显, 格鲁霍夫斯基经验分布公式计算得到的比值与之相比, 大波偏大、小波偏小。

4)不同坡度地形条件下波高分布特征以及 $1<\eta<2$ 时的破碎指标须进一步研究。

参考文献:

[1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.海港水文规范: JTS 145-2—2013[S].北京: 人民交通出版社, 2013.

[2] 李玉成, 董国海.缓坡上波浪谱的变形及破碎[J].海洋学报(中文版), 1994(5): 112-125.

[3] MUNK W H.The solitary wave theory and its application to surf problem[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 1949, 51(3): 376.

[4] 曹祖德.浅水中波浪破碎深度的确定[J].水利学报, 1958(2): 53-61.

[5] 李玉成, 董国海.用流函数理论计算缓坡上波浪的破碎位置[J].海岸工程, 1991(4): 1-7.

[6] 合田良实.港工建筑物的防浪设计[M].刘大中, 孙巨才, 译.北京: 海洋出版社, 1984.

(下转第 65 页)