

· 综合 ·



深水破碎波周期变化的试验研究*

梁书秀, 常艳玲, 孙昭晨

(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: 海洋中波浪周期的表达及准确预测一直是个难题, 对于周期推算过程中的影响因素目前缺少系统的研究。根据室内试验, 重点分析深水极限波浪传播及破碎过程各特征周期的演化规律。在实验室二维水槽中, 基于相速度聚焦方法生成深水聚焦波和破碎波, 并通过逐渐增加聚焦波幅使波浪破碎强度增大。由实测的波面序列统计计算跨零点周期和谱平均周期, 结果表明, 谱平均周期在传播过程中很稳定; 波浪聚焦未破碎时聚焦区域前后周期变化率小于1%; 波浪破碎后周期明显增大, 且增量 ΔT 随实测波陡(破碎强度)增大而增大; 从稳定性和波浪非线性机理的角度分析 $T_{0.2}$ 的变化规律最能体现深水极限破碎波浪周期的演化特征。

关键词: 能量聚焦; 波浪破碎; 谱平均周期; 上跨零点法

中图分类号: TV 139.2⁺5; U 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)06-0012-06

Experimental study on evolution characteristics of wave period of deep-water breaking waves

LIANG Shu-xiu, CHANG Yan-ling, SUN Zhao-chen

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

Abstract: The expression and accurate prediction of the ocean wave period is a knot. Factors affecting the wave period are often ignored in the simulation and there is no detailed analysis on influencing factors. The evolution characteristics of the wave period of deep-water breaking waves are experimentally studied. Deep-water breaking waves are generated by the method of energy focusing in a 2D wave flume and the intensity of wave breaking is toned by changing input wave amplitude. The spectral averaging period and the average period \bar{T} and effective period $T_{H_{0.2}}$ based on Zero-up crossing method are computed for surface elevations. It is concluded that the four kinds of spectral averaging periods are stable outside the focusing area. When focusing waves don't break, the variation rate of wave periods is less than 1%. Breaking causes wave period's increasing and the increment is more appreciable when the wave breaking is stronger. Through comprehensive analysis from the stability and the wave nonlinear mechanism, the variation of $T_{0.2}$ along the flume could reveal the evolution characteristics of the wave period in the process of deep-water wave breaking.

Keywords: energy focusing; wave breaking; spectral averaging period; Zero-up crossing

海浪要素(如波高、周期)是工程设计普遍关注的重要环境条件, 特别是有效波高和有效周期是至关重要的设计波要素^[1]。而海洋中波浪周期的表达及准确预测一直是个难题。目前, 在海洋工程环境条件计算中越来越盛行利用海浪数值模式计算海浪要素, 如SWAN、WAVEWATCH可以直接输出有效波高, 输出的特征周期为积分海

浪谱得到的平均周期。但由此得到的周期预测值和实测值之间存在很大的差异, 在周期推算过程中往往忽略掉许多因素。

近些年来, 人们开始关注海洋中随机产生的具有强大破坏力的极限波(或称畸形波、异常波), 其波高极大, 能量很集中。关于极限波的产生机理、演化过程及其对建筑物作用等方面的研

收稿日期: 2015-12-28

*基金项目: 国家自然科学基金(51279028); 国家重点基础研究计划(2011CB013701)

作者简介: 梁书秀(1972—), 女, 博士, 副教授, 从事海洋环境数值模拟及海洋信息化数值化研究。

究, 对海上船只和结构物的设计和防护意义重大。大量研究表明波能聚焦是其产生的重要机理, 许多学者已把相位聚焦方法应用到了模型试验^[2-6]和数值模拟^[7-8]中来研究极限波的性质。Rapp 等^[2]在实验室中利用聚焦波理论产生了深水破碎波浪, 分析了波浪在水槽传播过程中的波谱演化特性。Ma 等^[3]用小波变换方法分析研究了聚焦波浪在中等水深情况下的非线性演化过程以及初始波浪参数对波浪非线性的影响。柳淑学等^[4]采用两种不同频谱形式(等波陡和等波幅), 通过波浪聚焦的方法在水池中产生多向破碎波, 研究了破碎波的波面特性和破碎指标。

尽管国内外学者对聚焦波浪以及破碎波浪的波面特性、非线性特性、频谱演化进行了大量的研究, 但主要是集中在浅水或中等水深, 文献[2, 5-6]提到的深水波浪也只是组成波的部分满足深水波浪, 其次对于波浪破碎后周期变化的研究极少。本文主要讨论深水极限破碎波周期的演化特征。在实验室中, 基于相位聚焦法生成完全的深水破碎波浪, 由实测的波面数据采用跨零点法统计平均周期和有效周期; 并根据快速傅里叶变换得到的频谱计算谱平均周期。通过对波浪特征周期演化情况的研究, 为认识深水破碎波浪的周期变化规律及改进现有海浪数值模型提供依据。

1 试验方法及设备

1.1 聚焦波的生成

在实验室中采用 Longuet-Higgins^[9]提出的相位聚焦方法生成深水破碎波浪。基于长波传播快、短波传播慢的原理, 在指定时刻 t_b 聚焦于位置 x_b 的二维聚焦波浪的波面可写成:

$$\eta(x, t) = \sum_{n=1}^N a_n \cos [k_n(x - x_b) - \sigma_n(t - t_b)] \quad (1)$$

式中: N 为组成波个数; a_n 、 k_n 、 σ_n 为各组成波的振幅、波数、频率。其中波数 k_n 与频率 σ_n 满足色散关系。 a_n 取决于波浪的频谱分布形式, 假设把 A 定义为聚焦点处的波浪振幅, 则有:

$$A = \sum_{n=1}^N a_n \quad (2)$$

另外假设离散频率 f_n 均匀分布在频率区间 $[f_{\min}, f_{\max}]$ 内, 频率区间的宽度 $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$, 中心频率 $f_c = \frac{1}{2}(f_{\min} + f_{\max})$ 。根据 New wave 理论^[10], 则组成波的振幅可表示为:

$$a_n = \frac{AS_n(f)\Delta f_n}{\sum_{n=1}^N S_n(f)\Delta f_n} \quad (3)$$

式中: $S_n(f)$ 为输入能量谱; Δf_n 为频率间距; A 为线性聚焦波幅。

1.2 试验装置

试验是在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室的波流水槽内进行的, 水槽长 69 m、宽 4 m、深 2.5 m, 最大工作水深 2.0 m。水槽的一端配有引进美国 MTS 公司的不规则波造波机, 在水槽的末端布置吸波装置。通过沿水槽中心波浪传播方向布置的 22 个浪高仪测量波面时间过程线, 其具体位置见图 1, 并令造波板中心位置 $x=0$ 。浪高仪采用天津水利科学研究所研制的电阻式波高测量仪。浪高仪在正式试验前, 均经过严格的检测和率定, 性能可靠。浪高仪采集频率为 100 Hz, 采集次数为 16 384, 即采集间隔为 0.01 s, 采集时长为 163.84 s。每次试验需有 8~10 min 的时间间隔, 以保证水槽水面恢复平静。

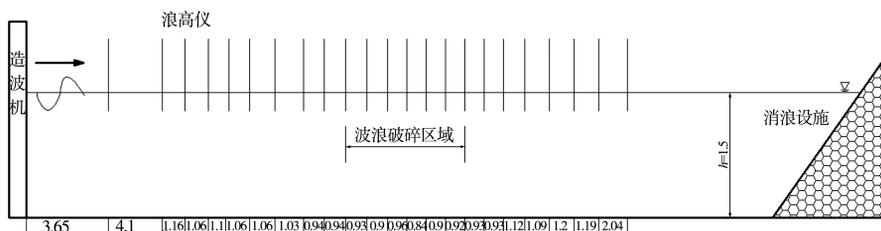


图 1 试验布置 (单位: m)

1.3 试验参数设置

试验中采用 P-M 谱, 水深 $h=1.5$ m, 频率数 $N=64$, 中心频率 $f_c=1.019$ Hz, 相对频率宽度 $\Delta f/f_c=0.46$ 。试验中通过增加输入的聚焦波幅 A 使各组次波浪由聚焦不破碎、崩破发展到极强卷破, 输入聚焦波幅 A 的变化范围为 $10\sim 13.9$ cm。根据输入的频率参数及水深, 利用色散关系, 可得到 $k_{\min}h=3.72$, 满足 $kh\gg 1$, 即生成的波浪为深水波。每组工况重复进行 3 次, 取 3 次的平均值作为试验结果。

2 试验结果讨论

2.1 特征波参数定义

2.1.1 整体波陡

此处采用与 Tian 等^[1]相同的定义方法, 首先采用“谱权重波频”作为特征波频 f_s , 根据 f_s 按照线性深水色散方程得出相应的特征波数 k_s , 由 k_s 计算入射波浪整体波陡, 计算公式如下:

$$f_s = \frac{\sum (f_n a_n^2) (\Delta f)_n}{\sum (a_n^2) (\Delta f)_n} \quad (4)$$

$$(2\pi f_s)^2 = g k_s \tanh(k_s h) \quad (5)$$

$$S = k_s \sum a_n \quad (6)$$

式中: a_n 、 f_n 分别表示第 n 个组成波的振幅、频率; $(\Delta f)_n$ 表示各组成波的频率差, 此处取常值, 这些参数均由波面数据谱分析得出的振幅谱进行选取。Tian 指出相比中心频率和谱峰频率, 选用“谱权重波频”更能代表波列中含能段的频率, 用其计算的整体波陡更好地表征波浪破碎强度。为保证波形的稳定性, 入射波波陡 S 是由 $x=8.91$ m (距造波板约 $3L_{\max}\sim 4L_{\max}$) 处的浪高仪数据进行谱分析计算得到。试验中各组次波浪的输入聚焦波幅、实测入射波波陡及试验现象见表 1。聚焦波幅 A 越大, 实测入射波波陡 S 越大, 波浪破碎强度越大, 可知由上式计算的波陡表征破碎强度是合理的。

表 1 试验参数及现象

聚焦波幅 A/cm	实测波陡 S	破碎形态	破碎次数	破碎 位置/m
10.0	0.276 7	未破碎		
10.4	0.279 9	未破碎		
10.7	0.292 6	微弱崩破	1	19.5
10.9	0.297 1	崩破	1	18.5
11.6	0.316 6	崩卷之间	1	18.5
12.1	0.341 8	崩卷之间	3	17~20.5
12.7	0.351 2	崩卷之间	3	17~20.5
13.3	0.365 8	卷破	1	17.5~20
13.9	0.369 9	卷破	2	17.5~21

2.1.2 谱平均周期

由谱矩计算波浪周期有多种公式, $T_{0,1}$ 和 $T_{0,2}$ 为目前海浪数值模式输出的谱平均周期。为了比较周期的不同表达形式, 计算 4 种谱平均周期, 计算公式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{0,1} = \frac{m_0}{m_1} \\ T_{0,2} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \\ T_{0,-1} = \frac{m_{-1}}{m_0} \\ T_{0,-2} = \sqrt{\frac{m_{-2}}{m_0}} \end{array} \right. \quad (7)$$

其中: m_r 为谱的 r 阶矩, 其定义为

$$m_r = \int_0^{\infty} f^r S(f) df \quad (8)$$

式中: f 为组成波频率; $S(f)$ 为波浪频谱。

2.1.3 跨零点周期

对于不规则波, 通常采用上跨零点法统计计算。平均周期 \bar{T} : 波列中所有波浪的平均周期; 有效周期 $T_{H_{1/3}}$: 按波高大小次序排列后, 取前面 $1/3$ 个大波的平均周期。

在计算上述特征参数时, 对浪高仪记录的波面数据以最大波高为中心, 左右对称截取 40.96 s 分析。取试验组次 $A=11.6$ cm 为例, $x=8.91$ m 处浪高仪采集和分析时截取的波面时间过程线见图 2、3。这样截取既能包含所有主要的波成分, 又能避免由于分析时间过长而掺入反射波的影响。

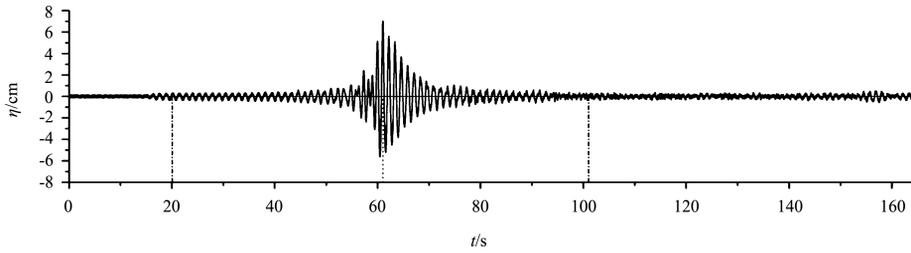


图 2 $x=8.91\text{ m}$ 处浪高仪采集的波面序列 (时间长度: 163.84 s)

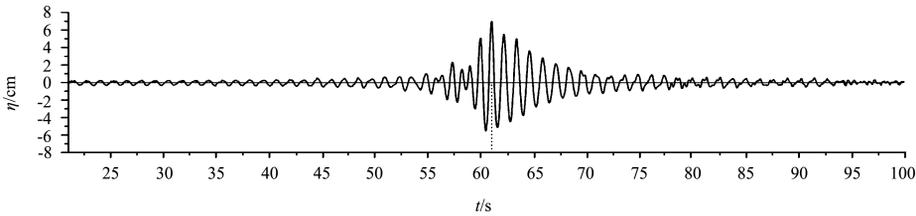
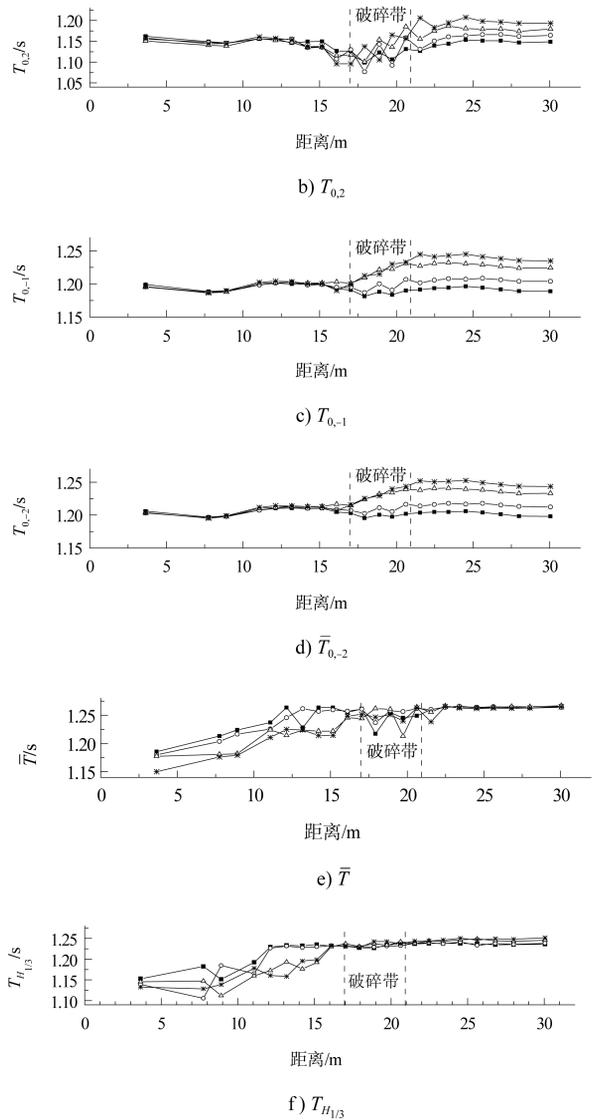


图 3 $x=8.91\text{ m}$ 处浪高仪采集数据经截取后的波面序列 (时间长度: 81.92 s)

2.2 周期沿程演化规律

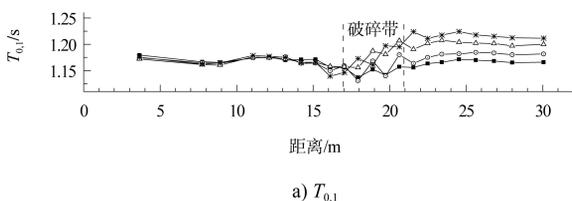
研究不同入射波陡的波浪特征周期的沿程演化规律, 如图 4 所示, $S=0.2767$ 时, 波浪聚焦不破碎, $S=0.2971$ 、 0.3512 、 0.3699 对应波浪在聚焦后分别发生 1 次崩破、3 次破碎 (崩、卷之间)、2 次卷破。分析图 4 可得到以下规律: 谱平均周期 $T_{0,1}$ 、 $T_{0,2}$ 、 $T_{0,-1}$ 、 $T_{0,-2}$ 在聚焦区域或破碎带上游沿程较稳定, 且各特征周期在不同波陡下保持一致; $x=17\sim 21\text{ m}$, 波浪聚焦或破碎, 周期变化无规律性; 在 21 m 之后破碎带下游周期沿程保持稳定, 相对于聚焦不破碎情况 ($S=0.2767$), 破碎波浪周期较大, 且波陡 S 越大, 破碎强度越大时周期越大。

平均周期 \bar{T} 和有效周期 $T_{H_{1/3}}$ 在破碎带上游很不稳定; 在破碎带下游 \bar{T} 和 $T_{H_{1/3}}$ 沿程保持稳定, 与不破碎波浪 ($S=0.2767$) 相比, 波浪破碎对 \bar{T} 和 $T_{H_{1/3}}$ 影响很小。 \bar{T} 和 $T_{H_{1/3}}$ 不稳定主要与波浪个数偏少有关, 应用上跨零点法统计分析时通常采用大约连续 100 个波作为一个标准段进行计算, 试验中波浪个数 $N=64$, 达不到统计上的要求, 故上跨零点法不适用于本试验所研究的聚焦波浪。



注: \blacksquare - $S=0.2767$; \circ - $S=0.2971$; \triangle - $S=0.3512$; $*$ - $S=0.3699$ 。

图 4 不同入射波陡下各特征周期沿程变化



a) $T_{0,1}$

下面将定量分析聚焦区域(或破碎带)前后周期变化 ΔT 及变化率 $\Delta T/T_{上游}$ 与入射波陡的关系,计算结果列于表2、3中。试验中波浪破碎发生在 x 为17~21 m内,计算周期增量及变化率时, $\Delta T = T_{下游} - T_{上游}$,上游取14.22~16.10 m平均值,下游取23.41~25.62 m平均值。

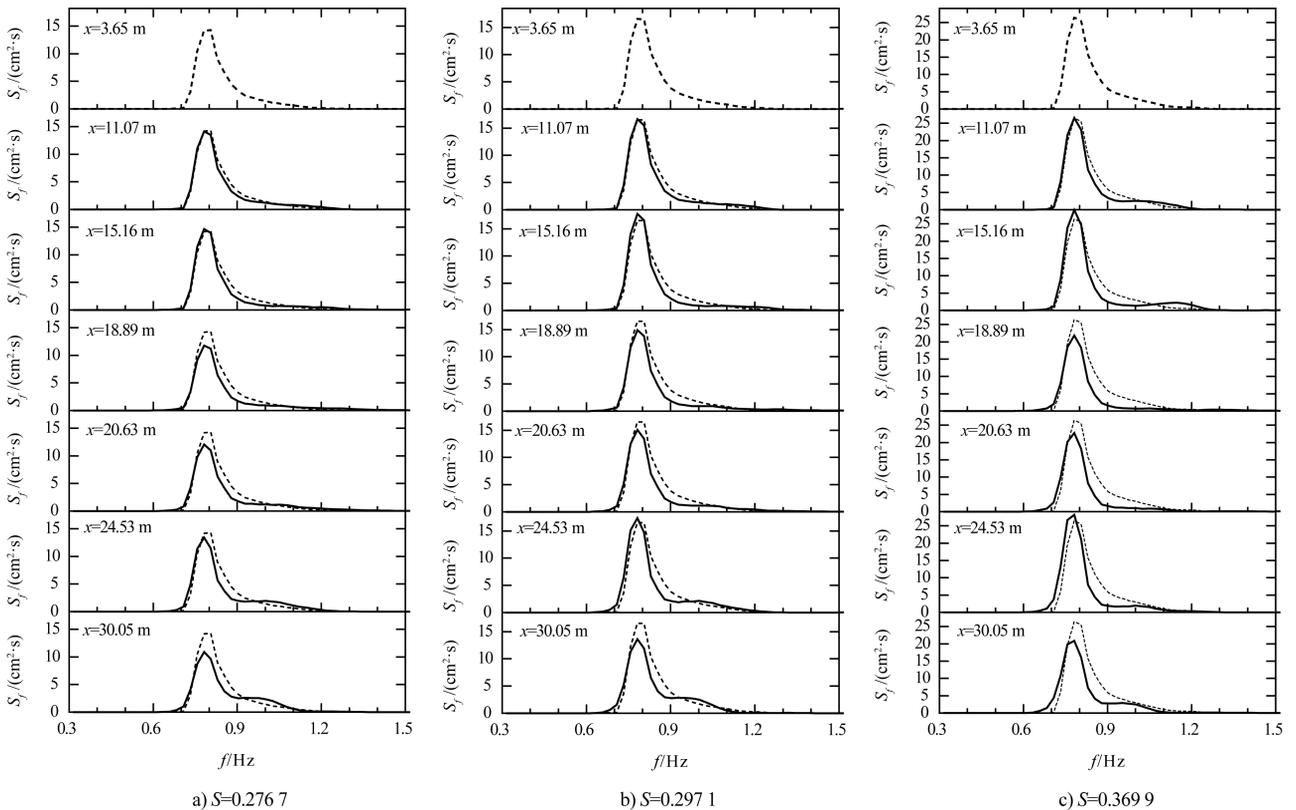
表2 不同波陡波浪聚焦或破碎后周期增量 ΔT

S	增量/s			
	$\Delta T_{0,1}$	$\Delta T_{0,2}$	$\Delta T_{0,-1}$	$\Delta T_{0,-2}$
0.276 7	0.002 8	0.007 9	-0.002 3	-0.003 4
0.279 9	0.004 2	0.011 2	-0.002 4	-0.003 4
0.292 6	0.006 9	0.013 3	0.001 4	0.000 6
0.297 1	0.023 4	0.037 5	0.010 4	0.007 5
0.316 6	0.038 4	0.051 9	0.024 5	0.020 8
0.341 8	0.046 5	0.061 1	0.030 3	0.025 6
0.351 2	0.041 5	0.052 7	0.028 9	0.025 3
0.365 8	0.051 3	0.058 3	0.040 0	0.035 7
0.369 9	0.063 0	0.076 5	0.046 2	0.040 4

表3 不同波陡波浪聚焦或破碎后周期变化率 $\Delta T/T_{上游}$

S	$\Delta T/T_{上游} / \%$			
	$\Delta T_{0,1}/T_{0,1上游}$	$\Delta T_{0,2}/T_{0,2上游}$	$\Delta T_{0,-1}/T_{0,-1上游}$	$\Delta T_{0,-2}/T_{0,-2上游}$
0.276 7	0.24	0.69	-0.20	-0.28
0.279 9	0.36	0.98	-0.20	-0.28
0.292 6	0.59	1.16	0.12	0.05
0.297 1	2.02	3.33	0.87	0.62
0.316 6	3.32	4.60	2.05	1.72
0.341 8	4.04	5.49	2.54	2.12
0.351 2	3.56	4.66	2.40	2.08
0.365 8	4.40	5.12	3.34	2.95
0.369 9	5.45	6.81	3.86	3.34

由表2、3分析可知,周期增量 ΔT 及变化率随波陡 S 增大而增大。 $S=0.276 7$ 、 $0.279 9$ 时波浪聚焦未破碎, $T_{0,1}$ 、 $T_{0,2}$ 、 $T_{0,-1}$ 、 $T_{0,-2}$ 变化很小,较上游变化率为 $-0.20\% \sim 0.98\%$; $S=0.369 9$ 时,波浪发生大卷破,4种谱平均周期均增大, ΔT 为 $0.04 \sim 0.08$ s时,较上游增加了 $3\% \sim 7\%$ 。因为频谱的变化会直接影响由谱矩计算的谱平均周期,下面将分析不同波陡的波浪频谱沿水槽演化情况(图5)。



注:虚线为初始位置处($x=3.65$ m)的谱;其中 $x=11.07$ 、 15.16 m是破碎前位置, $x=18.89$ 、 20.63 m为破碎带位置, $x=24.53$ 、 30.05 m为破碎后位置。

图5 频谱沿水槽的演化

图 5a) $S=0.2767$, 波浪聚焦未破碎。初始入射波能量主要分布在一次谐波频率范围内。随着波浪向聚焦位置处传播, 组成波之间的非线性作用增强, 一次谐波频率内能量有所减小, 频率范围逐渐拓宽, 且主要是高频部分频率逐渐拓宽; 经过聚焦点后, 频率范围逐渐恢复; 经过一段距离后 ($x=24.53\text{ m}$), 组成波之间的非线性作用减弱, 谱型与初始谱型接近, 高频部分能量有所减少。在整个聚焦波传播过程中, 低频部分保持相对稳定, 聚焦区域外非线性作用较弱, 因此, 波浪聚焦前后周期无明显变化。

由图 b)、c) 可得到与 Rapp 等一致的结论: 随着波浪向破碎区域传播, 由于波浪间相互作用导致能量明显向高频部分转移, 一次谐波高频部分逐渐拓宽。破碎导致高频部分能量损失, 谱峰频率变小。且破碎强度越大, 能量损失越显著, 峰频变小越明显。频谱的沿程演化规律充分地解释了破碎强度越大则破碎后周期越大的现象。

图 6 为破碎后周期的增量 ΔT 及 $\Delta T/T_{\text{上游}}$ 与实测入射波波陡 S 的关系, 可发现: $\Delta T_{0,2} > \Delta T_{0,1} > \Delta T_{0,-1} > \Delta T_{0,-2}$, $\frac{\Delta T_{0,2}}{T_{0,2}} > \frac{\Delta T_{0,1}}{T_{0,1}} > \frac{\Delta T_{0,-1}}{T_{0,-1}} > \frac{\Delta T_{0,-2}}{T_{0,-2}}$, 且有 $\Delta T_{0,2}/T_{0,2} \cong 2 \Delta T_{0,-2}/T_{0,-2}$ 。这可由谱平均周期的定义和波能谱的演化规律来解释: 随着使用的谱矩阶次提高, 高频组成波对谱平均周期的贡献增大。在聚焦波传播及破碎过程中, 高频部分变化明显, 低频能量部分保持相对稳定。因高频组成波对 $T_{0,2}$ 贡献最大, 导致 $T_{0,2}$ 在破碎带前后的变化幅度最大。

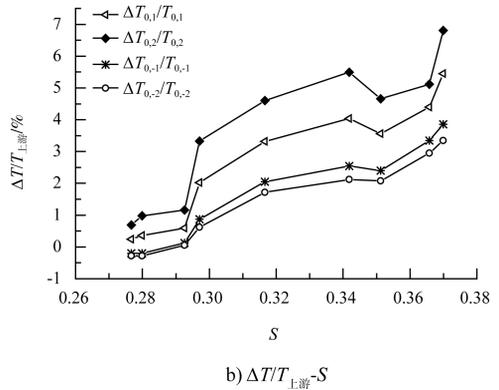


图 6 破碎带前后的 ΔT 及 $\Delta T/T_{\text{上游}}$ 与实测入射波波陡 S 的关系

3 结论

基于聚焦波浪理论生成了深水聚焦波, 并通过增加聚焦波幅使波浪发生不同强度的破碎。分析波浪周期的演化特征, 发现聚焦波浪在传播及破碎过程中, 聚焦区域上、下游谱平均周期均比较稳定, 聚焦区域变化较混乱; 通过对比不同破碎强度下谱平均周期演化情况, 发现波浪不破碎时, 周期变化率小于 1%, 波浪破碎后 4 种谱平均周期均增大, 且破碎强度越大, ΔT 和变化率越大。在发生大卷破时, $T_{0,2}$ 变化率可达到 7%, 并从频谱沿程演化特征分析了这种现象。

不同表达形式的谱平均周期大小关系为: $T_{0,-2} > T_{0,-1} > T_{0,1} > T_{0,2}$; 破碎带上下游的稳定性: $T_{0,-2}$ 最稳定, $T_{0,2}$ 在破碎带附近变化幅度最大; 破碎带前后变化率: $\Delta T_{0,2}/T_{0,2}$ 最大, 且谱矩阶次越小, 变化率越小, 聚焦波传播及破碎过程中波谱的演化特征对 $T_{0,2}$ 影响最显著。从沿程稳定性和聚焦波非线性机理的角度综合分析, $T_{0,2}$ 的变化规律最能体现深水极限波浪破碎过程周期的演化特性。

参考文献:

[1] 俞聿修. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1999.
 [2] Rapp R J, Melville W K. Laboratory measurements of deep-water breaking waves[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1990, 331: 735-800.

