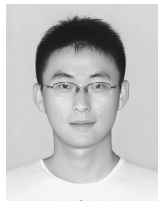


· 综 合 ·



# 波浪能量在浅化过程中的参数化研究

陈洪洲, 马玉祥, 董国海

(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:** 基于物理模型试验, 对近岸随机波浪在传播过程中由于受非线性相互作用而发生的谐波能量变化进行了研究。为了讨论岸底坡度对波浪能量传递的影响, 进行了3组不同底坡 ( $\beta = 1/15, 1/30, 1/45$ ) 的试验, 对一组基于 JONSWAP 谱的入射波浪传播过程进行采集分析, 获取试验结果。重点考虑了波浪在变浅过程中的主频部分以及高频部分能量的变化特征, 并且使用参数化手段对这些能量变化过程进行拟合, 得到一组关于这些能量参数与当地水深参数之间的变化关系。通过对不同底坡下得到的拟合结果进行比较, 发现波浪主频以及高频部分能量的变化受底坡坡度影响明显, 因此, 在最终的经验公式中考虑了坡度的影响。

**关键词:** 随机波浪; 变浅效应; 非线性相互作用; 参数化

中图分类号: P 731.22

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0013-04

## Parameterization of wave energy in shoaling process

CHEN Hong-zhou, MA Yu-xiang, DONG Guo-hai

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

**Abstract:** The wave energy transfer caused by nonlinearity in the coastal region is investigated based on the physical experiment. Three bottom slopes ( $\beta = 1/15, 1/30, 1/45$ ) are installed in the flume and a set of random wave simulations based on JONSWAP spectra is generated to implement this experiment for the purpose of grasping the effect of topography. The evolution of energy for different frequency bands including the primary and higher harmonics is discussed based on the energy spectrum. Several empirical formulae regarding these dimensionless energy parameters as a function of local water depth are derived based on the data measured on each slope. The results indicate that the bottom slope plays a crucial role in the variation of the energy for the primary and higher harmonic waves. Therefore, the effect of bottom slope is considered in the final empirical formulae.

**Keywords:** random wave; shoaling effect; nonlinear interaction; parameterization

由于近岸波浪在变浅过程中受到越来越强的非线性相互作用的影响, 其能量谱变化过程与深水下相比表现出截然不同的变化特征, 对波浪能量在这一非线性过程中的变化进行研究将有助于深入了解不同波浪成分之间的能量传递现象<sup>[1-2]</sup>。此外, Van der Meer 等<sup>[3]</sup>指出, 鉴于大量结构物需要被构筑在近岸区域, 对临近建筑区域的波浪能量进行有效的经验估算不仅可以在这类建筑选址

时提供有效指导, 还有助于评估此类建筑物的安全性和稳定性。因此, 有必要对波浪在近岸区域传播时的能量变化过程开展研究。

Battjes<sup>[4]</sup> 早先注意到海浪谱在经过一段天然礁石带的过程中会出现重谱现象, 随后这一现象被大量研究者关注。Kojima 等<sup>[5]</sup> 使用一块安置在水槽底部的不透水金属板模拟了波浪的变浅过程, 系统地研究了入射波浪谱的变化过程, 揭示出高

收稿日期: 2015-10-11

作者简介: 陈洪洲 (1986—), 男, 博士研究生, 从事近岸波浪非线性特征的研究。

次谐波的产生原因与非线性相互作用密切相关。Dattatri 等<sup>[6]</sup>使用类似的研究方法,用具有可渗透性的碎石材料更加精确地对真实海岸进行模拟,得到了相较以往更加复杂的能量谱变化特征。然而,文献中所涉及到的研究主要集中在对不同频率成分间能量交换现象的讨论,并没有对这些发生交换的能量做出定量分析,因此并不清楚交换前后的这部分能量在总体中的分布发生过哪些变化。Zanuttigh 等<sup>[1]</sup>提出,分别用两组函数,即主波部分以及高次谐波部分的变化量作为参考值来描述波浪的能量谱变化过程,因此,本文将借助这一组能量参数展开对波浪能量变化过程的研究。此外,底坡地形因素对近岸波浪传播具有十分重

要的影响,在先前的相关研究中却鲜有考虑,因此,底坡坡度对波浪能量变化会产生哪些影响将作为另一个研究内容。

## 1 试验介绍

### 1.1 试验设备

试验在大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室的海洋环境水槽中完成。水槽长 50 m、宽 3 m、深 1 m,最大工作水深为 0.7 m,该试验采用的设计水深为 0.52 m。在水槽尾端安装有消浪设备,以减轻波浪反射对试验的影响。在整个水槽的中段部分,分别设置 3 组不同坡度大小的混凝土浅堤模型 ( $\beta = 1/15, 1/30, 1/45$ ),试验布置见图 1。

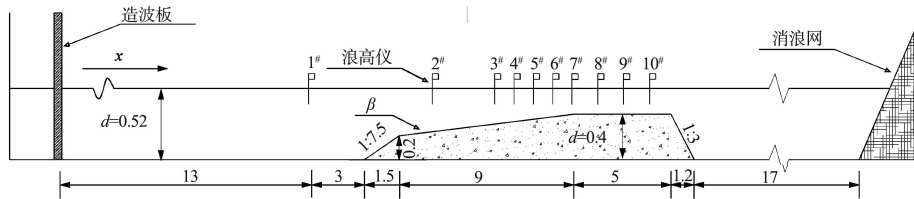


图 1 试验断面 (单位: m)

### 1.2 波况参数

试验采用的随机波浪谱型是基于 Goda 改进后的平均 JONSWAP 型谱。所研究波浪为重力波范畴,谱峰周期范围定为  $T_p = 1 \sim 2$  s,色散参数  $kh = \omega^2 h/g$  的范围被界定在  $0.7 \sim 1.9$ ,满足了波浪传播范围从有限水深到浅水区的界定。经过综合考虑,最终确定了 15 组具有不同谱峰周期以及特征波高的不规则波浪以获取需要的能量参数。波浪的采样时间间隔  $\Delta t$  为 0.02 s,每组序列长度为 163.84 s,大约包含 100 ~ 160 个波浪成分。为确保足够多数数据以满足拟合精度要求,每组试验重复进行 3 次。试验波列要素见表 1,其中  $H_{rms0}$  表示对应每组谱峰周期的深水有效波高,采用浅水系数通过对 1# 浪高仪采集到的波浪数据进行换算得到。

表 1 试验波况

波况	$T_p/s$	$H_{rms0}/cm$
1	1.0	4.89
2	1.2	5.68
3	1.4	6.06
4	1.4	8.29
5	1.4	8.80
6	1.6	6.38
7	1.6	9.68
8	1.6	10.44
9	1.8	7.37
10	1.8	9.85
11	1.8	10.58
12	2.0	8.10
13	2.0	8.41
14	2.0	10.14

## 2 结果讨论

尽管文献[1,4-5]对波浪在变浅过程中的能量谱变化做过大量的研究工作,然而对这一过程中所发生变化的能量的详细量化统计却鲜有涉及。

此外,有关底坡坡度变化对非线性能量传递所带来的影响也没有相关的成果发表。为了更深入地讨论波浪不同频带上分布的能量在浅化过程中的变化特征,分别对波浪主频部分以及高频部分能

量进行无因次化处理, 采用 Van der Meer 等<sup>[3]</sup>提出的对频率域进行积分的计算方法, 即主频部分能量( $E_p$ )通过对  $0.5f_p \sim 1.5f_p$  范围内的能量谱值积分得到, 高频部分能量( $E_H$ )则通过对  $1.5f_p \sim 3.5f_p$  内的能量谱值积分得到, 而当地波浪总势能值( $E_N$ )的积分区间则定义在  $f < 3.5f_p$  区间上。

图2给出的是不同坡度下所有波浪组次无因次化后的主频部分能量参数  $E_p/E_N$  相对水深变化的分布结果, 其中水深参数  $d$  用当地有效波高  $H_s$  做了无因次化处理。可以看出,  $E_p/E_N$  的值在深水处达到最大值, 随着水深变浅而不断减小, 且水深越浅  $E_p/E_N$  值减小越快, 这一现象说明波浪在近岸传播时, 主波能量在整体中所占的比例会随着水深减小而出现衰减的趋势。根据数据点所表现出的饱和特征, 采用式(1)所示的双曲正切函数来拟合  $E_p/E_N$  与  $d/H_s$  之间的经验关系:

$$\frac{E_p}{E_N} = -\gamma(\beta) \tanh\left(\frac{1}{0.3x}\right) + \alpha \quad (1)$$

式中:  $\gamma(\beta)$  是与坡度  $\beta$  相关的经验系数, 通过对破碎带以外的数据进行拟合得到, Zanuttigh 等指出对于离岸较远的深水入射波浪而言, 集中在主频率带上的能量平均可以达到总能量的 70%。因此, 本文在考虑经验公式时将  $\alpha = 0.7$  作为深水情况下的极限值。拟合结果见图2实线(拟合相关系数  $R^2$  均大于 0.8), 系数  $\gamma$  的详细情况在表2中列出。

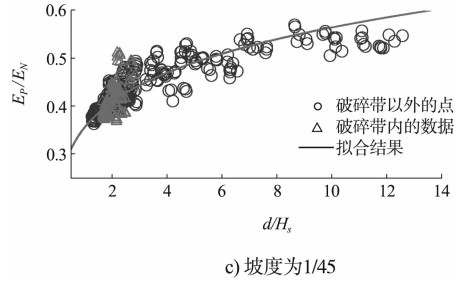
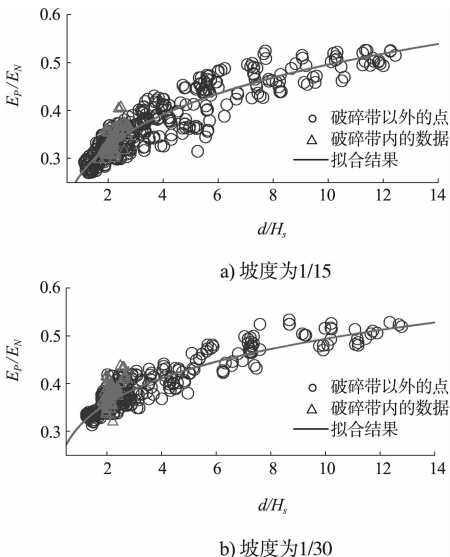


图2  $E_p/E_N$  与  $d/H_s$  的变化关系

表2 不同坡度下对式(1)中  $\gamma$  的拟合结果

$\beta$	1/15	1/30	1/45
$\gamma$	0.34	0.28	0.23

对  $\beta$  与  $\gamma$  的关系进行二次拟合, 最后给出考虑坡度因子  $\beta$  的主频能量变化经验公式:

$$\frac{E_p}{E_N} = -0.76\beta^{0.3} \tanh\left(\frac{10H_s}{3d}\right) + 0.7 \quad (2)$$

图3为高频部分能量参数  $E_H/E_N$  在不同坡度下的变化特征, 相较主频能量参数而言, 高频能量在总体所占比例表现出比较复杂的变化过程, 从图3可以看出, 当波浪位于  $d/H_s > 4$  区间段内时,  $E_H/E_N$  值随水深变浅表现出减小的趋势; 当水深减小至  $d/H_s < 4$  区间内时,  $E_H/E_N$  值开始逐渐增大。

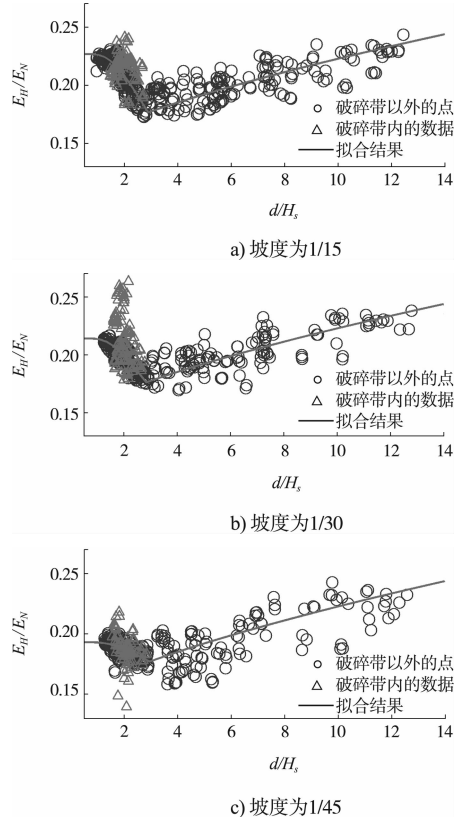


图3  $E_H/E_N$  与  $d/H_s$  的变化关系

为比较  $E_H/E_N$  在不同坡度下得到的结果之间的差异，将 3 组试验结果放在一起进行对比(图 4)。为更清楚地显示这一结果，横坐标采用对数坐标。可以发现：在  $d/H_s > 4$  区间内，不同坡度下的数据表现出基本相同的变化趋势，即随着水深变浅不断减小，这说明坡度因素在这个区间内的影响因素可以被忽略；然而当进入更浅的  $d/H_s < 4$  区间时，坡度作用就开始凸显出来了，可以看出随着水深进一步变浅，较陡的 1/15 坡度下的  $E_H/E_N$  增长幅度要明显大于另外两组较缓坡度下的结果。

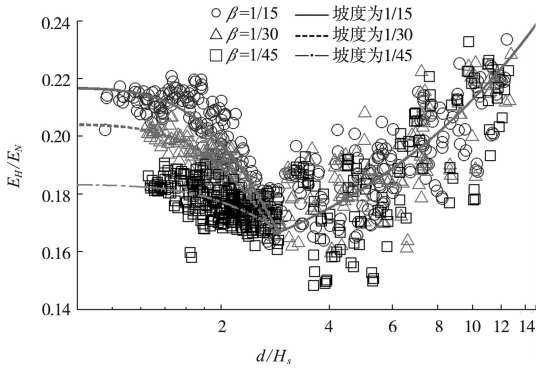


图 4  $E_H/E_N$  与  $d/H_s$  的变化关系 (3 组试验结果)

Zanuttigh 等<sup>[1]</sup>指出，深水波浪条件下，位于  $1.5f_p \leq f \leq 3.5f_p$  频率带内的高频波浪能量平均可以占到总能量的 25%，因此 25% 被当做深水极限情况考虑进拟合中去。由于在水深区间  $d/H_s > 4$  范围内  $E_H/E_N$  值并不受坡度影响，因此可以用统一的经验公式来描述这一区间内的情况：

$$\frac{E_H}{E_N} = 0.12 \tanh\left(\frac{d}{10H_s}\right) + 0.13 \quad (3)$$

当  $d/H_s \leq 4$  时就必须考虑坡度因素的影响，同样采用式(1)对这个区域内的  $E_H/E_N$  值进行拟合，得到的结果见表 3。

表 3 当  $d/H_s \leq 4$  时不同坡度下  $E_H/E_N$  的拟合结果

$\beta$	$\gamma$	$\alpha$
1/15	0.28	-0.021
1/30	0.22	0.026
1/45	0.09	0.138

### 3 结论

基于物理模型试验，对波浪沿光滑底坡传播

时的能量变化过程进行了研究，针对波浪主频和 高频部分上的能量分布变化情况进行了讨论。结果表明：1) 随着水深变浅，主频部分能量在波浪总能量中所占比例也在不断减小，而高频部分能量则表现为先减小后增大的较为复杂的趋势。2) 本文使用参数化手段对这些能量的变化过程进行了拟合，得到了一组关于这些能量参数与当地水深之间的经验关系，通过对比不同坡度底坡上得到的结果，发现坡度因素在波浪能量传递过程中起到重要的影响作用。3) 结果显示，坡度越陡，则波浪主频部分能量增长越剧烈；而对于高频部分能量而言，当水深区间位于  $d/H_s > 4$  时，底坡坡度对其影响很小，基本可以被忽略，而当  $d/H_s \leq 4$  时，坡度影响比较剧烈，且坡度越陡，高频能量增长越剧烈。

### 参考文献：

- [1] Zanuttigh B, Martinelli L. Transmission of wave energy at permeable low crested structures[J]. Coastal Engineering, 2008, 55(12): 1 135-1 147.
- [2] Saprykina Y, Kuznetsov S, Andreeva N, et al. Scenarios of nonlinear wave transformation in the coastal zone [J]. Oceanology, 2013, 53(4): 422-431.
- [3] Van der Meer J W, Regeling H J, De Waal J P. Wave transmission: Spectral changes and its effect on run-up and overtopping[C]//Proceedings of the 27th International Conference of Coastal Engineering. Australia: [s. n.], 2000: 2 156-2 168.
- [4] Battjes J A. Surf similarity [C]//Proceedings of the 14th International Conference of Coastal Engineering. USA: [s. n.], 1974: 1 419-1 438.
- [5] Kojima H, Ijima T, Yoshida A. Decomposition and interception of long waves by a submerged horizontal plate[C]//Proceedings of the 22th International Conference of Coastal Engineering. Neitherland: [s. n.], 1990: 1 228-1 241.
- [6] Dattatri J, Raman H, Shankar N J. Performance characteristics of submerged breakwaters[C]//Proceedings of the 16th International Conference of Coastal Engineering. Germany: [s. n.], 1978: 2 153-2 171.