

近岸波浪破碎区不规则波浪的数值模拟

唐军¹, 沈永明¹, 崔雷¹, 邱大洪¹

(1 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 基于近岸不规则波浪传播的抛物型缓坡方程和两类波浪破碎能量损耗因子, 对近岸波浪破碎区不规则波浪的波高分布进行了数值模拟, 并结合实验结果对数值模拟结果进行了验证分析, 结果表明采用两类波浪破碎能量损耗因子所模拟的破碎区波高与实测值吻合良好, 波浪破碎能量损耗因子及波浪破碎指标对破碎区波浪波高分布影响较明显。

关键词: 不规则波浪; 抛物型缓坡方程; 破碎波; 波能损耗

中图分类号: TV139.2; X143

文献标识码: A

文章编号: 0253-4193(2008)02-0147-06

1 引言

近岸区域是人类经济活动最为活跃的区域, 同时又是各种水动力因素最为复杂的地区, 近岸水动力要素与近岸的生产、生活活动密切相关。波浪是近岸区域最为重要的水动力要素之一, 从外海传播过来的随机波浪受近岸地形和海岸线的影响, 波浪的折射、绕射、汇聚等各种效应非常显著, 近岸区域的波浪要素分布较外海更为复杂。波浪向近岸传播中受水深浅化效应影响通常会发生破碎, 破碎区水体的紊动非常强烈, 波浪能量急剧耗散, 波浪辐射应力变化较大, 驱动近岸水体发生沿岸或离岸运动, 形成沿岸流或裂流等近岸流。近岸波浪破碎区波浪、近岸流等相互影响使泥沙及污染物等的分布运动也异常复杂。研究近岸波浪传播破碎的过程是研究近岸流、近岸泥沙及各类污染物运动规律的基础, 同时分析近岸区域波浪的传播过程对海岸带开发和近岸工程设计、了解近岸污染物的输运过程及近岸地形的冲淤演变等有重要的工程应用价值。

应用相对较多的近岸波浪传播的数学模型主

要有缓坡方程、Boussinesq 方程、波能平衡方程等模型, 其中缓坡方程数值计算效率相对 Boussinesq 类方程要高, 而且椭圆型缓坡方程综合考虑了波浪的反射、折射、绕射等效应, 但由于该类方程数值计算中涉及到大规模复数矩阵的求解, 计算工作量较大, 对此一些研究者在此基础上分别提出了抛物型缓坡方程和双曲型缓坡方程。抛物型缓坡方程是在椭圆型缓坡方程基础上忽略波浪的反射效应而得到的, 其计算效率远较椭圆型缓坡方程的高, 多被用于反射效应相对较小的近岸海域波浪场的数值模拟中; 双曲型缓坡方程考虑了波浪的反射效应, 数值计算效率介于椭圆型和抛物型缓坡方程之间, 但波浪斜向入射时边界处的波浪反射效应较为显著, 不易处理。考虑海底地形底磨擦、波浪破碎等造成的波能损耗及风能等波能输入均可以通过在缓坡方程中加入相应的能量损耗项或能量输入项来考虑。本文基于考虑波浪不规则性的抛物型缓坡方程和两类波浪破碎能量损耗因子, 对波浪破碎区能量损耗因子和波浪破碎指标对破碎区波高分布的影响进行了数值模拟研究, 并结合实验结果对数值模拟结果进行了分

收稿日期: 2007-01-06; 修订日期: 2007-09-03。

基金项目: “九七三”国家重点基础研究发展计划资助项目(2006CB403302); 国家自然科学基金资助项目(50709004; 50779006); 上海交通大学海洋工程国家重点实验室研究基金资助课题。

作者简介: 唐军(1976—), 男, 宁夏回族自治区中宁县人, 博士, 从事近岸环境水动力学研究。E-mail: jtang@dlut.edu.cn

析验证。

2 数值模型

2.1 数学模型

近岸波浪的随机性很大,对于不规则波浪目前大都采用波浪谱将入射的不规则波浪离散为一系列规则波浪通过线性波浪叠加法进行研究,具体采用哪种波浪谱应依据当地风浪场而定。本文结合如下改进的 Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) 谱^[1]采用等分频率法对单向不规则波浪进行离散:

$$S(f) = \beta_j H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}(T_p f)^{-4}\right] \times \gamma^{\exp[-(f/f_p - 1)^2/2\sigma^2]}, \quad (1)$$

式中,

$$\beta_j \approx \frac{0.06238}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} \times (1.094 - 0.01915\ln\gamma);$$

$$T_p \approx \frac{T_{H_{1/3}}}{1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}};$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & f \leq f_p; \\ 0.09 & f > f_p; \end{cases}$$

其中, f 为波浪频率; f_p 为谱峰频率; T_p 为谱峰周期; $T_{H_{1/3}}$ 为有效周期, $H_{1/3}$ 为有效波高; γ 为谱峰因子,文中按平均 JONSWAP 谱取 3.30。为了避免所模拟的组成波浪频率呈周期性重复,在各频率划分区间范围内随机选取频率作为该区间的代表频率。

抛物型缓坡方程综合考虑了波浪传播的折射、绕射等效应,数值求解效率相对较高,沈永明等^[2]通过数值模拟手段对其适用性进行了较详细的研究。考虑到近岸波浪的不规则性及破碎造成的波能损耗,可在 Kirby^[3]的抛物型缓坡方程基础上采用如下方程来模拟破碎区不规则波浪的传播过程:

$$\sum_{n=1}^N C_{gn} \frac{\partial A_n}{\partial x} + \sum_{n=1}^N \left[E'_n + \frac{1}{2} \frac{\partial C_{gn}}{\partial x} \right] A_n - \sum_{n=1}^N \frac{b_1}{\omega_n k_n} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left[C_n C_{gn} \frac{\partial A_n}{\partial y} \right] + \sum_{n=1}^N F'_n \frac{\partial}{\partial y} \left[C_n C_{gn} \frac{\partial A_n}{\partial y} \right] = 0, \quad (2)$$

式中,

$$E'_n = i(k_n - a_0 k_n) C_{gn} + \frac{i C_{gn}}{2} D_n |A_n|^2 + \frac{1}{2} \varepsilon;$$

$$F'_n = \frac{i}{\omega_n} \left[a_1 - b_1 \frac{\bar{k}_n}{k_n} \right] + \frac{b_1}{\omega} \left[\frac{(k_n)_x}{k_n^2} + \frac{(C_{gn})_x}{2k_n C_{gn}} \right];$$

非线性项 D 的表达式为

$$D_n = k_n^3 \frac{C_n [\cosh(4k_n h) + 8 - 2 \tanh^2(k_n h)]}{C_{gn} 8 \sinh^4(k_n h)};$$

x 向为波浪传播主方向; y 向为与主方向正交的坐标方向; i 为虚数单位; N 为划分的波浪总份数; a_0, a_1, b_1 为根据波浪最大可偏离主传播方向角度 θ_0 而确定的系数; h 为静水深度; A_n 为随空间变化的第 n 份波浪的复振幅; k_n 为第 n 份波浪的波数; k_n 为沿 y 方向上 k_n 的平均值; ω_n 为第 n 份波浪的角频率; $C_n = \omega_n / k_n$, 为第 n 份波浪的相速度; $C_{gn} = \partial \omega_n / \partial k_n$, 为第 n 份波浪的群速度; ε 为考虑波浪破碎作用的波浪能量损耗因子,不同研究者所给表达式^[4-8]的差别也较明显,本文分别采用两类表达式来计算波浪破碎的能量损失率^[7],其一为

$$\varepsilon = \frac{K C_g}{h} \left(1 - \frac{E_s}{E} \right), \quad (3)$$

其中 $K \approx 0.15$, 为经验系数; E_s 为波浪稳定能量,可取为水深 $(0.3 \sim 0.4)h$ 处以下的波浪能量; $E = 1/8 \rho g H^2$, 为波浪能量。数值模拟中采用波浪谱将不规则波浪要素按等分频率法划分为 N 份。波浪破碎的能量损失率也可采用下式来计算^[8]:

$$\varepsilon = \frac{2\alpha_1}{T} \left(1 - \frac{H_b^2}{H^2} \right), \quad (4)$$

式中, $\alpha_1 \approx 1$, 为校正系数; H_b 为该点最大破碎波高,由

$$H_b = \min(\gamma_b h, 0.14 L \tan k h) \quad (5)$$

模型给出,其中, γ_b 为波浪破碎指标,一般可取为 $(0.4 \sim 0.8)$,本文中参考 Goda^[5]提出的公式,取

$$\gamma_b = 0.40 \exp(4.2 \tan \beta), \quad (6)$$

β 为地形坡度,考虑到上式的使用范围,可取

$$\tan \beta = \begin{cases} 10^{-2} & \tan \beta < 10^{-2}; \\ \tan \beta & 10^{-2} \leq \tan \beta \leq 10^{-1}; \\ 10^{-1} & \tan \beta > 10^{-1}. \end{cases} \quad (7)$$

数值模拟破碎区波浪传播过程时首先计算出不考虑能量损失率的波高,如果算出的波高大于该点最大破碎波高,则考虑破碎波浪的能量损失率后重新计算该点波高,当波浪再次停止破碎时,波能损耗率为 0。各计算点的波高可由各点的均方根波高给出:

$$H = 2 \sqrt{\sum_{n=1}^N |A_n|^2}. \quad (8)$$

2.2 数学模型的数值离散

采用有限差分 C-N 格式,对控制方程(2)进行

如下形式的离散:

$$\sum_{n=1}^N \left[(C_{gn})_{i+1/2,j} \frac{(A_n)_{i+1,j} - (A_n)_{i,j}}{\Delta x} \right] +$$

$$\sum_{n=1}^N \left[(E_n')_{i+1/2,j} + \frac{(C_{gn})_{i+1,j} - (C_{gn})_{i,j}}{2\Delta x} \right] \times$$

$$\left[\frac{(A_n)_{i+1,j} + (A_n)_{i,j}}{2} \right] - \sum_{n=1}^N \left\{ \frac{b_1}{\omega_h(k_n)_{i+1/2,j} \Delta x (\Delta y)^2} \times \right.$$

$$\left. \left[(C_n C_{gn})_{i+1,j+1/2} (A_n)_{i+1,j+1} - (A_n)_{i+1,j} \right] - \right.$$

$$\left. (C_n C_{gn})_{i+1,j-1/2} [(A_n)_{i+1,j} - (A_n)_{i+1,j-1}] - \right.$$

$$\left. (C_n C_{gn})_{i,j+1/2} [(A_n)_{i,j+1} - (A_n)_{i,j}] + \right.$$

$$\left. (C_n C_{gn})_{i,j-1/2} [(A_n)_{i,j} - (A_n)_{i,j-1}] \right\} +$$

$$\sum_{n=1}^N \frac{(F_n')_{i+1/2,j}}{2(\Delta y)^2} \{ (C_n C_{gn})_{i+1,j+1/2} [(A_n)_{i+1,j+1} -$$

$$(A_n)_{i+1,j}] - (C_n C_{gn})_{i+1,j-1/2} [(A_n)_{i+1,j} - (A_n)_{i+1,j-1}] +$$

$$(C_n C_{gn})_{i,j+1/2} [(A_n)_{i,j+1} - (A_n)_{i,j}] -$$

$$(C_n C_{gn})_{i,j-1/2} [(A_n)_{i,j} - (A_n)_{i,j-1}] \} = 0, \quad (9)$$

式中, Δx , Δy 分别为 x , y 向空间网格步长; i, j 分别

为 x, y 向网格节点编号。数值计算中对抛物型缓坡方程一般在单位波长布置 3~4 个计算节点即可, 本文在 x, y 向均布置等间距计算网格。可看出, 上式离散后可形成三对角矩阵, 结合 TDMA 算法可快速求解。

3 数值模型的验证

本文通过对在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开展的斜向入射波浪在沿岸坡度为 1:100 和 1:40 的平直地形上传播破碎实验^[9] 的部分工况^[10] 进行数值模拟来分析验证文中的数值模型。表 1 给出了各计算工况的参数, 其中 h_0 为波浪入射位置的静水深度, θ 为波浪入射位置波浪传播方向, H_s 为入射波浪有效波高, T_s 为入射波浪的有效周期。实验中采用平均 JONSWAP 谱作为波浪输入谱。每组实验数据均包含了沿岸平行布置的三个测量断面的数据。

表 1 近岸波浪场实验工况

计算工况	沿岸坡度	h_0/m	$\theta/^\circ$	H_s/m	T_s/s
1	1:40	0.45	30	0.05	1.0
2	1:40	0.45	30	0.08	1.0
3	1:40	0.45	30	0.05	2.0
4	1:40	0.45	30	0.08	2.0
5	1:100	0.18	30	0.03	1.0
6	1:100	0.18	30	0.05	1.0
7	1:100	0.18	30	0.03	2.0
8	1:100	0.18	30	0.05	2.0

数值模拟时依据采用的 JONSWAP 谱按等分频率法将入射波浪要素划分为 50 份(在模拟波浪谱时分别截去了高频和低频外各 0.2% 的波能, 并对其进行了适当光滑)。图 1 给出了各计算工况的输入波浪谱和理论谱, 可看出在谱峰的输入波浪谱值略小于理论谱值, 这主要是对输入谱的适当光滑造成的, 但两者总体吻合较好。

波浪在破碎区的波高分布与波浪破碎指标及波能耗散率密切相关, 破碎区波高衰减随着波能耗散率的增大而加快。数值模拟中分别采用式(3)和(4)所给的波浪破碎区波能损耗因子对破碎区波高进行了模拟。图 2 给出了各计算工况中数值模拟结果和

实测值, 可以看出分别采用式(3)和(4)所给的破碎区波能损耗因子计算所得破碎区波高与实测值整体均吻合良好。在工况 1, 2, 5 和 6 中分别采用式(3)与式(4)计算所得破碎区波高分布较为接近, 两者几乎没有明显差别; 在工况 3, 4, 7 和 8 中入射波浪周期相对大于前述工况中的周期, 可看出分别结合式(3)与式(4)计算所得破碎区波高分布有所差异, 采用式(4)计算所得破碎区波高略大于采用式(3)计算的, 但也难分辨出两者的优劣性。在式(3)中波能耗散率与该点的稳定波能相关, 但对不同的区域不易给出一个适用性较好的稳定波能表达式, 而式(4)的应用显得相对较为简便些。图 3 表示在工况 1 和 2

中采用式(4)所给波浪破碎能量损失率在不同校正系数 α_1 取值下模拟所得的破碎区波高分布,可以看出在一定程度下该系数的取值变化对破碎区波高分布影响不很明显。

为考察波浪破碎指标对破碎区波高分布的影响,取最大破碎波高等于 $\gamma_b h$,并结合式(4)所给波浪破碎能量损失率对工况 1 和 2 进行了模拟。图 4 为工况 1 和 2 中波浪破碎指标 (γ_b) 取值变化时模拟所得的波高,从中可看出破碎区波高分布受波浪破碎指标影响很明显,可见波浪破碎指标对破碎区波浪传播起

着重要影响。由于波浪传播过程及破碎机理的复杂性,在给定波浪破碎的波能耗散率和波浪破碎指标时,要视计算区域波浪传播破碎的具体形态和过程而定,各类波浪破碎指标和波浪破碎的波能耗散率表达式差别较大,所得计算结果有明显差异。就本文计算结果看,波浪破碎的波能耗散率表达式和波浪破碎指标对破碎区波高分布影响较明显,因此合理地确定波浪破碎的波能耗散率表达式及波浪破碎指标对合理模拟破碎区波浪传播破碎过程非常重要。

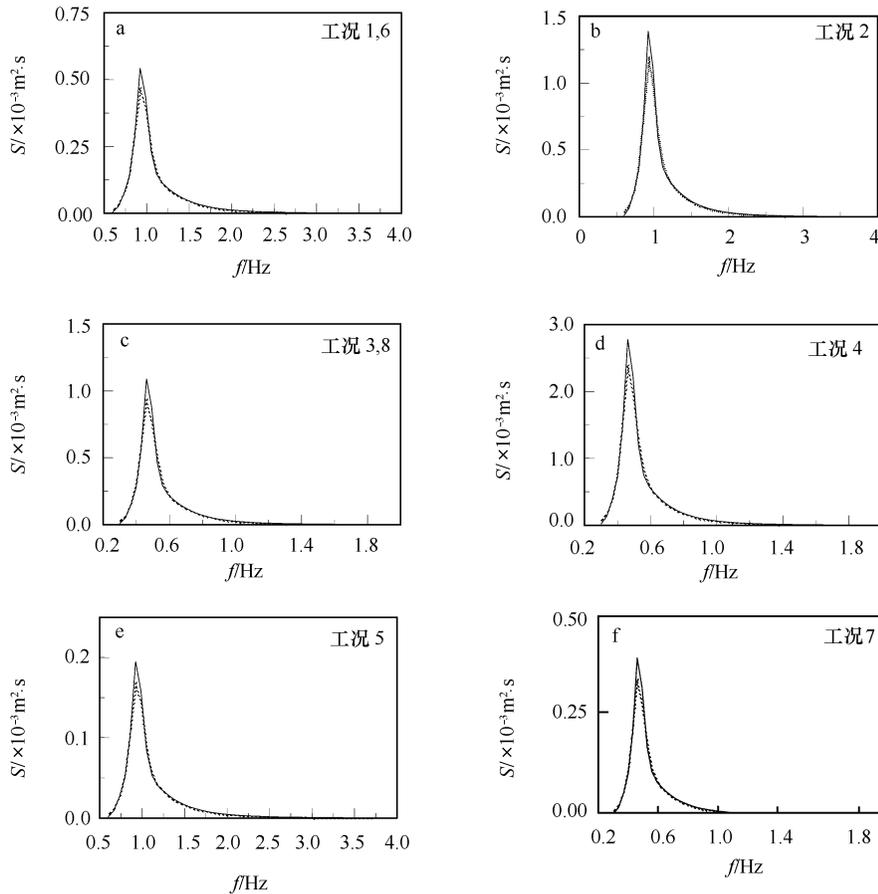


图 1 模拟的输入波浪谱与理论谱的比较

.....输入谱, ——理论谱

4 结论

由外海向近岸传播的不规则波浪受岸坡地形和海岸线的共同作用,波浪传播的折射、绕射等效应非常显著。受水深浅化效应的影响在近岸缓坡区域波浪通常会发生破碎,波浪在破碎区的传播与波浪破碎指标及

波能耗散率密切相关。基于考虑波浪不规则性的抛物型缓坡方程和两类波浪破碎能量损耗因子,对近岸破碎区波浪传播过程进行了数值模拟,并结合实验结果对数值结果进行了分析验证。数值模拟结果表明文中所采用的两类波浪破碎能量损耗因子模拟所得破碎区波高与实测值均吻合良好,波浪破碎能量损耗因子及波浪破碎指标对破碎区波高分布影响较明显。

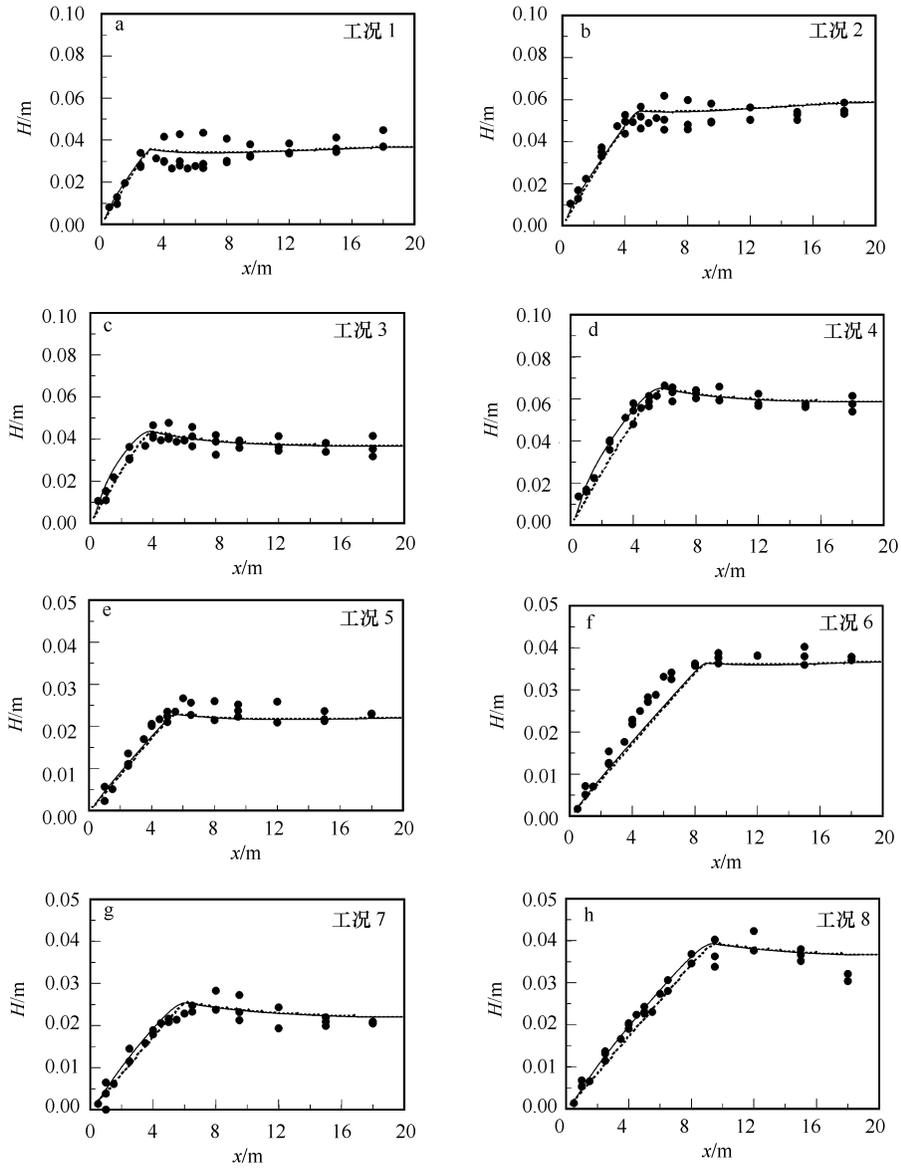


图 2 数值模拟所得波高分布与实测波高的比较
 -----结合式(3)的数值模拟, ———结合式(4)的数值模拟,实测

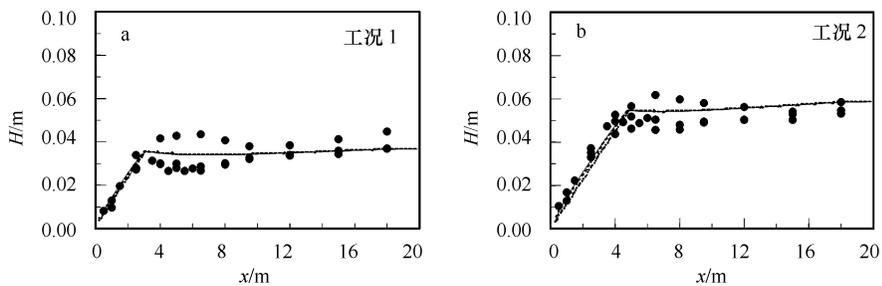


图 3 式(4)中波能耗散率校正系数取不同值时波高的模拟值与实测值的比较
 - · - · - $\alpha_1 = 4.0$, ——— $\alpha_1 = 1.0$, - - - $\alpha_1 = 2.0$,实测

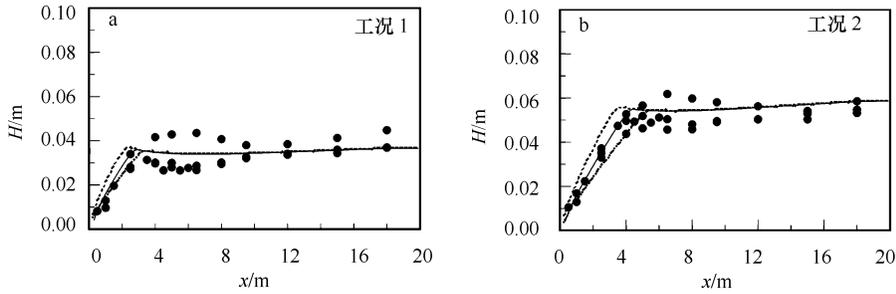


图 4 波浪破碎指标取不同值时波高模拟值与实测值的比较

- · - · - $\gamma_b = 0.4$, — $\gamma_b = 0.5$, - - - $\gamma_b = 0.6$, 实测

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, 2000
- [2] 沈永明, 郑永红, 吴修广. 抛物型缓坡方程的数值研究[J]. 中国工程科学, 2004, 6(3): 30—35
- [3] KIRBY J T. Rational approximations in the parabolic equation method for water waves[J]. Coastal Engineering, 1986, 10: 355—378
- [4] GRASMEIJER B T, RUESSINK B G. Modelling of waves and currents in the nearshore parametric vs probabilistic approach [J]. Coastal Engineering, 2003, 49: 185—207
- [5] GODA Y. Irregular wave deformation in the surf zone [J]. Coastal Engineering in Japan, 1975, 18: 13—26
- [6] ZHENG Yong-hong, SHEN Yong-ming, WU Xiu-guang, et al. Determination of wave energy dissipation factor and numerical simulation of wave height in the surf zone [J]. Ocean Engineering, 2004, 31: 1083—1092
- [7] KIRBY J T, DALRYMPLE R A. Modeling waves in surf zones and around islands [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1986, 112: 78—93
- [8] VAN RIJN L C, WIJNBERG K M. One-dimensional modeling of individual waves and wave-induced longshore currents in the surf zone [J]. Coastal Engineering, 1996, 28: 121—145
- [9] 邹志利, 常梅, 邱大洪, 等. 沿岸流的实验研究[J]. 水动力学研究与进展(A), 2002, 17(2): 174—180
- [10] 王淑平. 沿岸流的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2001

Numerical simulation of irregular water waves in coastal surf zones

TANG Jun¹, SHEN Yong-ming¹, CUI Lei¹, QIU Da-hong¹

(¹ State Key Laboratory of Coastal and Off shore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: On the basis of the parabolic mild-slope equation for irregular water waves and two wave energy dissipation factors due to breaking wave effect, the distribution of breaking wave heights has been numerically simulated, and the numerical results have been analyzed and validated by experimental data. It is shown that the two wave energy dissipation factors due to wave breaking effect adopted here can both achieve a good agreement between the numerical and experimental results, and the breaking water wave energy dissipation factor and breaking wave index parameter play important roles on the distribution of breaking wave heights in surf zones.

Key words: irregular water wave; parabolic mild-slope equation; breaking water waves; wave energy dissipation