

基于波浪水槽实验建立陡坡-礁盘地形的 拍岸浪统计计算模型

聂 屿¹, 朱首贤^{2*}, 李训强¹, 张文静¹, 汪 鸿¹

(1. 国防科技大学 气象海洋学院, 江苏 南京 211101; 2. 河海大学 海洋学院, 江苏 南京 210098)

摘 要:目前的拍岸浪统计计算模型主要针对缓坡地形,对于陡坡-礁盘地形拍岸浪计算模型的研究还非常少。本文中整理了国际上多种拍岸浪统计计算模型,利用波浪水槽实验数据检验了这些模型在陡坡-礁盘地形上的适用性,推荐 Komar 模型用于陡坡拍岸浪计算。基于波浪水槽实验对比分析了缓坡地形和陡坡-礁盘地形上的拍岸浪演变特征,初步提出了礁盘地形上一种新型拍岸浪统计计算模型,它和 Komar 模型组合,对陡坡-礁盘地形的拍岸浪具有较强的模拟能力。计算得到陡坡段和礁盘段破碎波高的平均相对误差分别为 4.45% 和 5.04%。本文研究成果可以为岛礁地形上拍岸浪的预报及相关数值模拟研究等提供数据和参考。

关键词:陡坡;礁盘;拍岸浪;统计计算模型

中图分类号:P731

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2018)03-0374-10

doi:10.3969/j.issn.1671-6647.2018.03.004

波浪传播到近岸时,由于水深变浅,波高增大,波长变小,当波陡不断增大到极限,波浪发生倒卷和崩塌,破碎波浪向海岸拍击,这种现象称为拍岸浪。拍岸浪对港工建筑物、岸滩冲淤、船只航行、人员涉水活动等都有非常严重的影响,受到人们的广泛关注^[1]。

近岸拍岸浪计算可以采用基于水动力方程的数值模式,例如折射-绕射方程模式、Boussinesq 方程模式、Navier-Stokes 方程模式。折射-绕射方程模式主要用于坡度平缓的简单地形。Boussinesq 方程模式和 Navier-Stokes 方程模式可以用于复杂地形,但是这两类模式要求时间步长远小于波浪周期、空间步长远小于波长,因而计算量非常大,在实际海域应用也有一定局限性^[2-3]。近岸拍岸浪计算还可以采用统计计算模型,它们给出拍岸浪与深水区波浪的统计关系式。目前已有多种类型的拍岸浪统计计算模型^[4-16],这些模型主要是针对地形平缓变化的海岸。但是,很多岛礁的地形是陡峭的,例如我国南海东沙、西沙、中沙、南沙的珊瑚岛礁,地形坡度在 1:12~1:4,陡坡又和比较平缓的浅水礁盘相连。对于陡坡-礁盘地形的拍岸浪统计计算模型,目前的研究非常少。

本研究采用刘宁^[17]完成的波浪水槽实验的实验数据,分析国际上已有拍岸浪统计计算模型在陡坡-礁盘上的适用性。对比国防科技大学自主设计的缓变地形下拍岸浪的传播实验数据,初步自主设计陡坡-礁盘的拍岸浪统计计算模型,期望为我国海洋事业发展,尤其是南海岛礁建设和海洋水文保障等提供参考。

1 现有拍岸浪统计计算模型在陡坡-礁盘的适用性分析

波浪破碎是拍岸浪的重要特征,目前的拍岸浪统计计算模型大多数是给出破碎波高与深水波浪的统计

收稿日期:2017-04-14

资助项目:国家自然科学基金项目——引入波浪漫滩边界的近岸海域悬沙输运数值模式及其应用(41076048)

作者简介:聂 屿(1992-),男,河北张家口人,硕士研究生,主要从事海洋动力学与数值模拟方面研究. E-mail: nieyu2016@sina.com

* 通讯作者:朱首贤(1972-),男,湖北罗田人,副教授,博士,主要从事海洋动力学与数值模式、河口海岸水沙运动及遥感方面研究。

E-mail: zhushouxian@vip.sina.com

(李 燕 编辑)

关系。国内外的多种破碎波高计算模型基本可以分为 2 大类。

第一类破碎波高计算模型称为直接计算模型,它们直接给出破碎波高与深水区波浪要素的统计关系。

Oyegoke^[4]根据能量守恒原理,结合微振幅波理论,得到破碎波高表达式:

$$H_b = K g^{\frac{1}{3}} (H_0^2 T)^{\frac{2}{3}}, \quad (1)$$

式中, H_b 为破碎波高, H_0 为入射波高(即深水区波高), T 是波周期, g 是重力加速度, K 是经验系数, Oyegoke 取 $K=0.42$ 。Munk^[5]依据能量守恒原理计算破碎波高,其公式为

$$\frac{H_b}{H_0} = 0.303 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

式中, L_0 为深水区波长。Komar 和 Gaughan^[6]依据小振幅波理论,结合能通量守恒方程,得到半理论半经验公式:

$$\frac{H_b}{H_0} = 0.563 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-\frac{1}{5}}. \quad (3)$$

Le Méhauté 与 Koh^[7]收集大量实验资料,并结合坡度的影响,提出公式:

$$\frac{H_b}{H_0} = 0.76 s^{\frac{1}{7}} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-\frac{1}{4}}, \quad (4)$$

式中, s 为坡度。式(4)的适用范围为 $\frac{1}{50} < s < \frac{1}{5}$, $0.002 < \frac{H_0}{L_0} < 0.09$ 。Sunamura 和 Horikawa^[8]根据波浪水槽实验数据,得到经验公式:

$$\frac{H_b}{H_0} = s^{\frac{1}{5}} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-\frac{1}{4}}. \quad (5)$$

第二类破碎波高计算模型称为间接计算模型。这类模型首先根据深水区波浪要素计算波浪破碎前波高随水深的变化,根据波浪破碎判据确定破碎位置和破碎波高。

不考虑波浪破碎前的波动能量耗散,波浪传播过程中的波高变化公式可以表示为^[9]

$$H = H_0 \sqrt{\frac{n_0 c_0}{nc}} = H_0 \sqrt{\frac{n_0 L_0}{nL}}, \quad (6)$$

式中, n 为波能传递率, c 为波速, L 为波长。下标“0”表示深水区波参数。 $n_0 = \frac{1}{2}$, $L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$, 波能传递率 n 的表达式为

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\frac{4\pi h}{L}}{\text{sh} \frac{4\pi h}{L}} \right), \quad (7)$$

式中, h 为水深。波长 L 用迭代法进行计算,计算公式为

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}, \quad (8)$$

一般将破碎波高与波浪破碎位置水深之比称为破碎指标 γ_b , 破碎指标所满足的统计关系式称为破碎判据。国内外有多种类型的破碎判据。一些学者^[10]将破碎指标 γ_b 取为常数:

$$\text{Boussinesq 公式: } \gamma_b = H_b/h_b = 0.73, \quad (9)$$

$$\text{McCowan 公式: } \gamma_b = H_b/h_b = 0.78, \quad (10)$$

$$\text{Gwyther 公式: } \gamma_b = H_b/h_b = 0.83, \quad (11)$$

$$\text{Packham 公式: } \gamma_b = H_b/h_b = 1.03, \quad (12)$$

式中, h_b 为破碎水深。

Miche^[11]在考虑破碎波高与破碎水深相关的基础上,加入了破碎位置波长 L_b 的影响,提出破碎指标公式:

$$\frac{H_b}{h_b} = A \frac{L_b}{h_b} \tanh \frac{2\pi h_b}{L_b}, \quad (13)$$

一般将 A 取为 0.142。Weggel^[12]结合实验数据,提出破碎指标公式:

$$\frac{H_b}{h_b} = 1.361 \left(1.0 + 5.929 \frac{L_b}{h_b} \tanh \frac{2\pi h_b}{L_b} \right)^{-1}. \quad (14)$$

也有一些学者考虑深水区波长对波浪破碎的影响。Ostendorf 和 Madsen^[13]提出公式:

$$H_b = \begin{cases} 0.14L_0 \tanh \left[(0.8 + 5s) \frac{2\pi h_b}{L_b} \right] & (s \leq 0.1) \\ 0.14L_0 \tanh \left[1.3 \frac{2\pi h_b}{L_b} \right] & (s > 0.1) \end{cases}. \quad (15)$$

Sunamura^[16]提出公式:

$$H_b = 1.09s^{0.19} L_0^{0.1} h_b^{0.9}. \quad (16)$$

Goda^[14]由海底坡度 $\geq 1:50$ 的规则波理论及实验研究成果提出波浪破碎判据,并推广到缓坡,其公式为

$$\frac{H_b}{L_0} = 0.17 \left\{ 1 - \exp \left[-1.5\pi \frac{h_b}{L_0} (1 + 15 \tan^{\frac{4}{3}} \theta) \right] \right\}, \quad (17)$$

式中, θ 为海底坡度的角度。

一般将破碎强度参数定义为

$$\xi_0 = s / \sqrt{H_0/L_0}. \quad (18)$$

Svendsen 和 Hansen^[15]认为破碎指标与破碎强度参数有关,得到公式:

$$H_b/h_b = 1.9[\xi_0/(1 + \xi_0)]. \quad (19)$$

Sunamura^[16]结合水槽实验,得到经验公式:

$$H_b/h_b = 1.1(\xi_0)^{\frac{1}{6}}. \quad (20)$$

大连理工大学进行了一些陡坡-礁盘的波浪水槽实验^[17],本文采用这些实验数据检验上述拍岸浪统计计算模型的适用性。实验设计如图 1 所示,坡度 1:5 的斜坡连接 30 m 长的礁盘(坡面为图 2 中加粗实线),礁盘高度为 0.5 m,斜坡和礁盘表面为抹平的光滑混凝土。布置了 18 个波高仪测量波高。平底水深(h_1)分别取为 0.625, 0.715 和 0.835 m,相应的礁盘水深(h_2)分别为 0.125, 0.215 和 0.335 m,礁盘和平底水深之比(h_2/h_1)近似为 0.2, 0.3 和 0.4。对于各种水深,都设计多种入射波高和波周期,测量波浪向陡坡和礁盘传播过程中的波高变化。

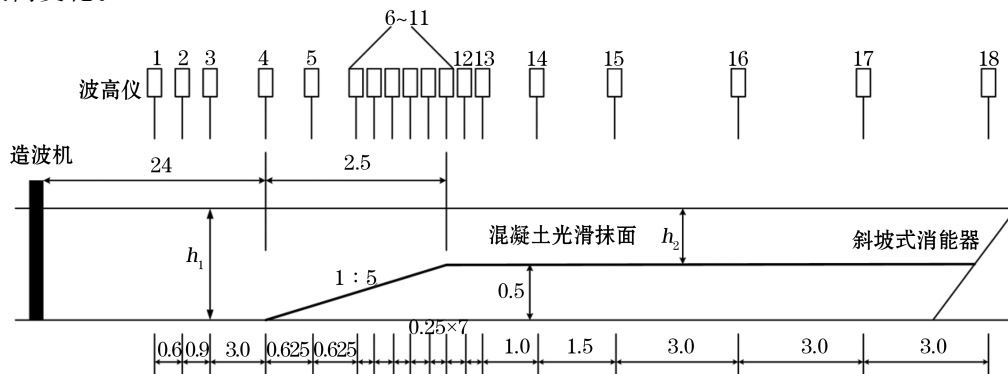


图 1 陡坡-礁盘地形的波浪水槽实验 (m)

Fig.1 Diagram of flume experiments with steep slope and reef terrain(m)

实验结果如图 2 所示,其中编号 0.2-1.3-6 代表: $h_2/h_1=0.2$,波周期 $T=1.3\text{ s}$,入射波高 $H=6\text{ cm}$ 。其他编号的含义与此类似。这些实验结果可以分为 2 类:一类是波浪在斜坡上破碎,具体实验包括 0.2-1.3-14, 0.2-2.0-12, 0.3-1.6-18, 0.3-2.0-20, 0.3-2.0-24, 0.4-2.0-28(图 2 中红色字体标注的组次);另一类是波浪在礁盘上破碎,图 2 中的其它实验都属于这种类型。对于这些实验破碎波高的确定,刘宁^[17]直接取破碎位置邻近波高仪的测量值或相邻 2 个波高仪测量值的插值。考虑破碎波高一般指波浪破碎时的最大波高,本文取破碎位置相邻 2 个波高仪测量的最大波高。

对于斜坡上波浪破碎的实验,分别利用第一类和第二类模型计算,并统计破碎波高误差,其结果见表 1。表 1 中,有些第二类模型标注了“*”,它们对部分实验计算的波浪破碎位置并不在斜坡上,我们设置一段延伸的虚拟斜坡,计算的波浪破碎位置落在虚拟斜坡上;还有些第二类模型标注了“**”,它们对每个实验计算的波浪破碎位置都落在虚拟斜坡上。从表 1 可以看出,对于斜坡上破碎的破碎波高计算而言,Oyegoke 模型和 Sunamura-1 模型的误差较大,超过 30%;Komar, McCowan, Gwyther, Packham, Miche, Weggel, Sunamura-2, Goda, Svendsen 和 Sunamura-3 模型的误差比较小,都小于 10%。

对于礁盘上波浪破碎的实验,仍然可以采用第一类模型计算。本文还忽略礁盘的存在,将斜坡进行虚拟延伸,利用礁盘上波浪破碎实验的入射波参数,基于第二类模型计算了破碎波高。这两类模型计算的破碎波高与礁盘上实际破碎波高的平均误差统计也在表 1 中,Oyegoke 模型的误差最大,接近 50%;Komar, Boussinesq, McCowan, Gwyther, Packham, Miche, Weggel, Sunamura-2, Goda, Svendsen 和 Sunamura-3 模型的误差都较小,都小于 10%。

表 1 各种拍岸浪统计计算模型对陡坡-礁盘波浪水槽实验的计算误差

Table 1 Mean relative errors of surf breaking height on steep slope and reef simulated by different models

计算模型	模型分类	斜坡上破碎波高的平均计算误差/%	礁盘上破碎波高的平均计算误差/%
Oyegoke(式 1)	直接	31.13	45.86
Munk(式 2)	直接	20.85	19.87
Komar(式 3)	直接	5.19	5.19
Koh(式 4)	直接	20.19	21.93
Sunamura-1(式 5)	直接	44.25	45.83
Boussinesq(式 9)	间接	10.12	9.18
McCowan(式 10)	间接	9.28	8.50
Gwyther(式 11)	间接	8.28	7.86
Packham(式 12) *	间接	5.07	5.50
Miche(式 13)	间接	8.96	8.36
Weggel(式 14) *	间接	4.71	4.67
Ostendorf(式 15) **	间接	17.80	19.74
Sunamura-2(式 16) *	间接	4.71	4.91
Goda(式 17) **	间接	5.89	8.76
Svendsen(式 19) *	间接	6.21	5.67
Sunamura-3(式 20) *	间接	4.71	4.85

注:“*”表示该公式对部分实验计算的破碎位置落在虚拟斜坡上;“**”表示该公式对全部实验计算的破碎位置均落在虚拟斜坡上

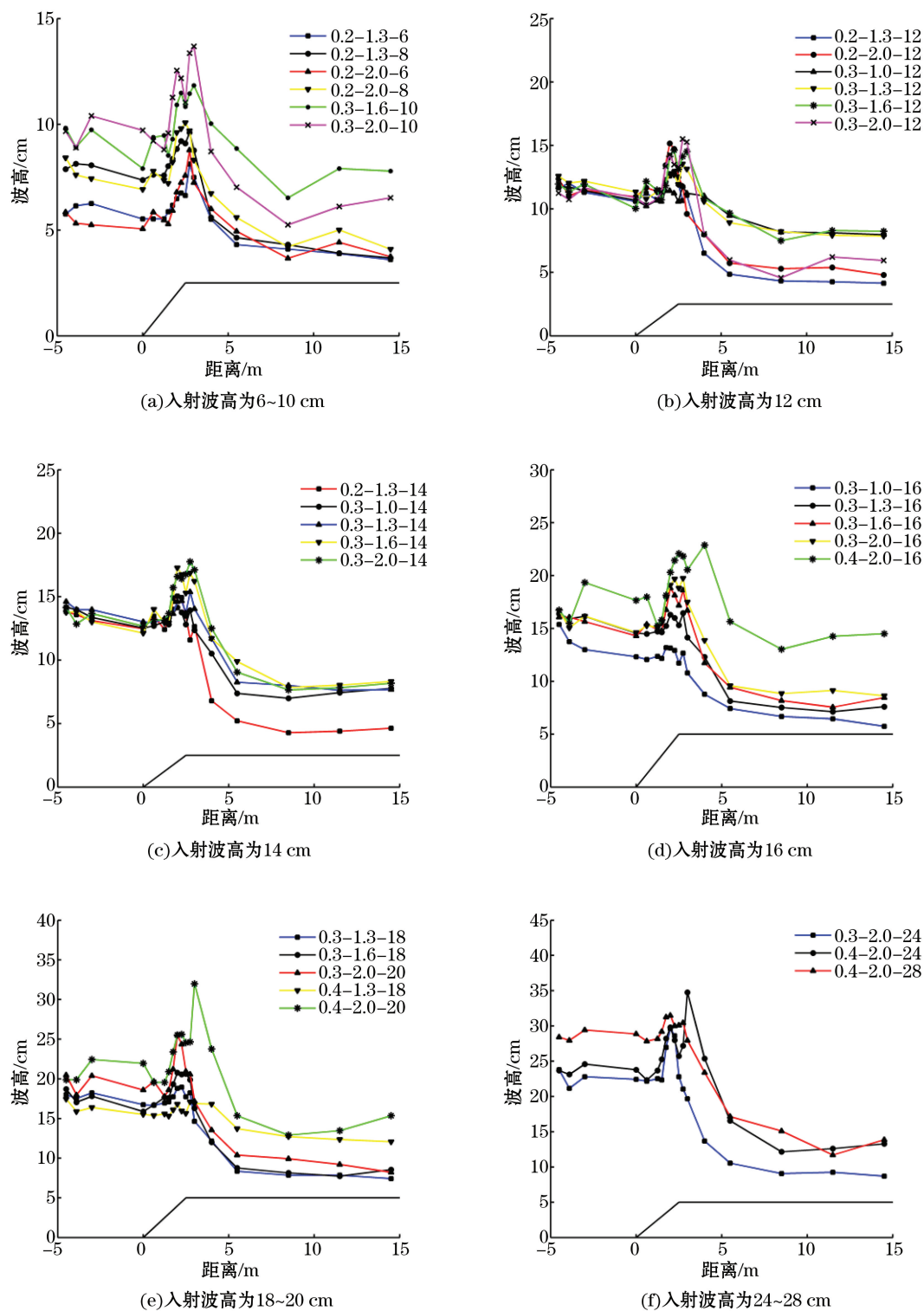


图2 陡坡-礁盘地形上各种入射波浪的波高实验结果

Fig.2 Results of flume experiments with different incident surf heights on steep slope and reef terrain

2 缓变地形和陡坡-礁盘地形上拍岸浪特征的对比分析

为了更好地建立和应用陡坡-礁盘拍岸浪统计计算模型,本文进一步通过波浪水槽实验比较缓变地形和陡坡-礁盘地形上拍岸浪演变特征。

解放军理工大学自主设计了在缓变地形下拍岸浪的传播实验,如图 3 所示。地形由两个斜坡构成(坡面为图 3 中加粗实线),其中较陡的斜坡坡度为 $1:2.5$,较平缓的斜坡坡度取 $1:30$ 或 $1:40$,2 个坡度连接处的高度为 0.225 m 。斜坡用木板制成,以铁质框架固定,表面用 2 cm 厚的水泥平整。其中平底水深 h_1 取 0.50 或 0.60 m 。

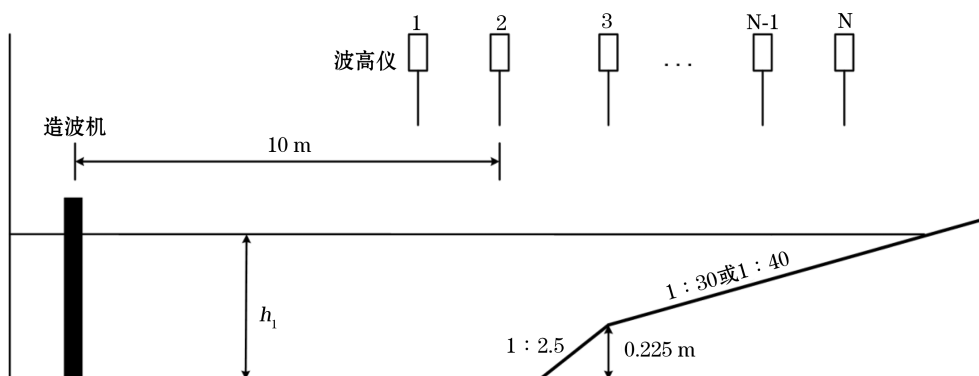


图 3 缓坡地形的波浪水槽实验

Fig.3 Diagram of flume experiment on a gentle slope terrain

图 4 给出了缓坡地形上拍岸浪的部分实验结果,编号 50-1.0-7 代表水深 $h_1=50\text{ cm}$,入射波周期 $T=1.0\text{ s}$,入射波高 $H=7\text{ cm}$,其他编号的含义与此类似。由图 4 可以看出,在缓坡地形上,随着水深变浅,波高增大,然后波浪破碎,波高迅速减小。在临近破碎前,一般波高增长迅速,但也有个别实验,例如图 4a 中的 50-1.0-7 实验,波高增长速度比较均匀。在图 2 中的陡坡-礁盘地形上,波浪向陡坡传播时,开始阶段波高增大不明显,然后波高快速增大,波浪发生破碎,波高迅速减小。波浪破碎位置有些在陡坡上,也有些在礁盘上,但是都离陡坡顶部(即礁盘边缘)很近。图 2 和图 4 比较,在陡坡-礁盘地形上波浪破碎前增长速度比缓坡地形上更快,破碎位置更集中。

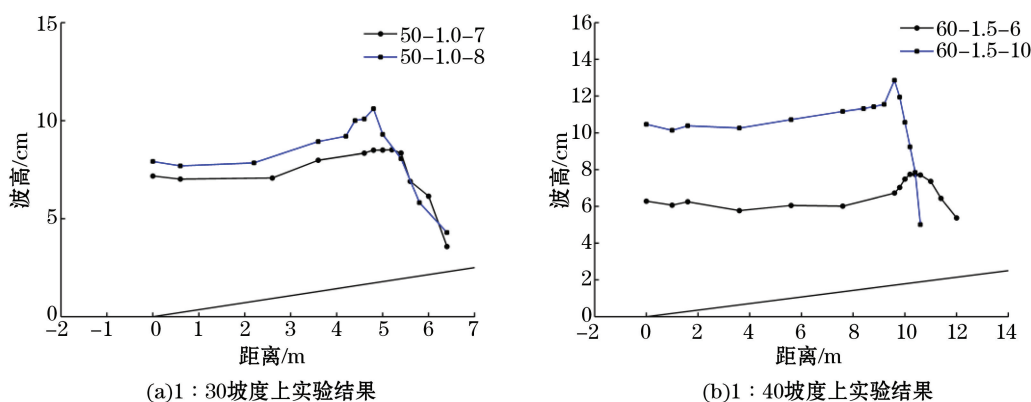


图 4 缓坡地形上波浪水槽实验结果

Fig.4 Experiment results on gentle slope terrain

我们前面整理的第二类拍岸浪统计计算模型,首先利用式(6)计算斜坡上水深变浅导致的波高增大,然后判断波高与水深之比是否达到波浪破碎判据条件,从而确定破碎波高。图5给出了利用式(6)对陡坡上波浪破碎实验的计算波高,当计算波高与水深之比满足式(17)的破碎判据时,停止计算。图5中的红线代表虚拟斜坡,如果计算波高在实际陡坡上没有破碎时,计算波浪在虚拟斜坡上继续传播的波高。从图5可以看出,在陡坡上式(6)计算的波浪破碎前波高增长速度都比实验结果慢。在表1中,以式(6)和波浪破碎判据组合的各种第二类拍岸浪统计计算模型,并不是因为比较准确地计算出了陡坡上波高增长过程而使得破碎波高计算结果比较准确,而是以破碎位置靠后的计算误差换得比较小的破碎波高计算误差。对于波浪在礁盘上破碎的情况,为了采用第二类拍岸浪统计计算模型,忽略了礁盘,对斜坡做了虚拟延伸,这也不符合实际情况。因此,对于陡坡-礁盘拍岸浪统计计算模型的发展和应用,我们优先考虑第一类模型。

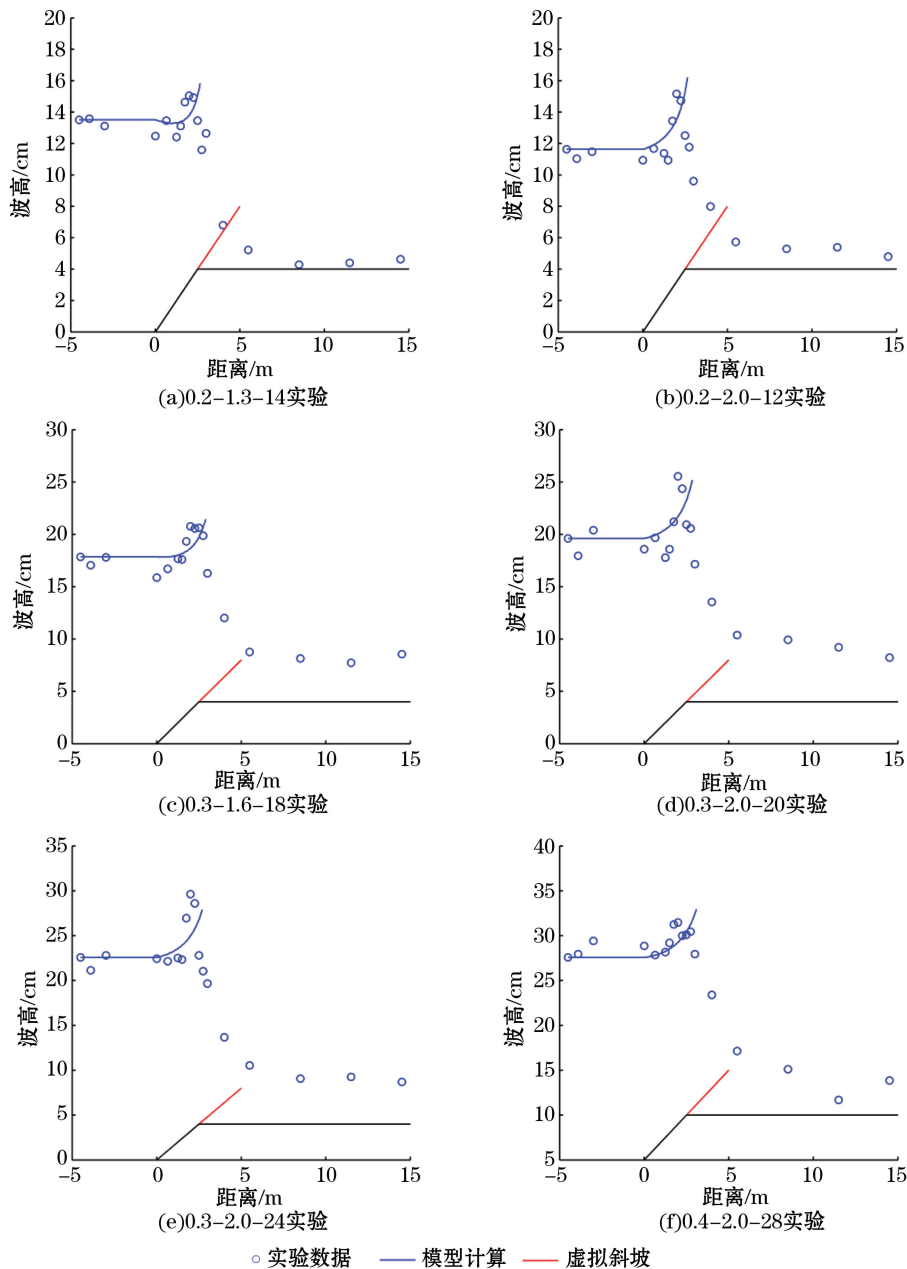


图5 陡坡上波浪破碎实验的观测和计算波高

Fig.5 Observed and simulated wave breaking height on steep slope

3 陡坡-礁盘地形上一种新的拍岸浪统计计算模型设计

目前的第一类拍岸浪统计计算模型是针对斜坡地形的,没有考虑礁盘水深。实际上礁盘水深对波浪破碎有重要影响。本文区分波浪在陡坡和礁盘破碎,并考虑礁盘水深的影响,建立陡坡-礁盘拍岸浪统计计算模型。

Yao 等^[18]通过对岛礁地形上波浪破碎实验数据的分析,提出判别波浪破碎位置的变量为 $\frac{d_b}{H_0}$,即礁盘水深与深水区波高之比,并提出陡坡-礁盘破碎判据:当 $\frac{d_b}{H_0} < 1.2$ 时,波浪在陡坡上破碎;当 $\frac{d_b}{H_0} \geq 1.2$,波浪在礁盘上破碎。采用该判据检验图 2 的实验数据,除了 0.2-1.3-12 和 0.3-1.3-18 实验外,对其他实验都给出了准确的判断,准确率达到 93%。采用该判据区分波浪在陡坡和礁盘破碎。

对于陡坡上波浪破碎的情况,图 2 给出的实验个例很少,不足以建立新模型。综合前面的分析,直接采用式(3)(Komar 模型)计算陡坡上波浪破碎的破碎波高。对于礁盘波浪破碎的情况,提出如下形式的礁盘破碎波高计算公式:

$$H_b = f H_0^\alpha L_0^\beta d_b^{1-\alpha-\beta} \quad \left(\frac{d_b}{H_0} \geq 1.2 \right), \quad (21)$$

式中, f, α, β 是待定参数。利用图 2 中礁盘上波浪破碎的 24 组实验数据,根据最小二乘法拟合式(21)的系数,得到:

$$H_b = 0.633 \ 5 H_0^{0.769 \ 1} L_0^{0.169 \ 7} d_b^{0.061 \ 2} \quad \left(\frac{d_b}{H_0} \geq 1.2 \right). \quad (22)$$

进一步检验式(22)的回归效果。回归效果可以用复相关系数来表示,其表达式为

$$R = \sqrt{\frac{U}{U+Q}}, \quad (23)$$

式中, $U = \sum_{i=1}^n (H_{bi} - \bar{y})^2$ 为回归平方和; $Q = \sum_{i=1}^n (y_i - H_{bi})^2$ 为残差平方和; $n = 24$ 为符合礁盘段破碎判据的水槽实验总数; H_{bi} 表示式(22)对每组入射条件计算得到的破碎波高; y_i 表示每组水槽实验的破碎波高数据; $\bar{y}$ 表示实验数据中 24 组礁盘段破碎的破碎波高的平均值。计算得到复相关系数 $R = 0.92$, 接近于 1, 回归效果较好。

采用上述陡坡-礁盘拍岸浪统计计算模型重新检验对图 2 实验的计算效果,如图 6 所示。根据 $\frac{d_b}{H_0} = 1.2$ 的陡坡-礁盘破碎判据,图 2 的 30 组实验中,有 8 组被判断为陡坡破碎,采用式(3)计算破碎波高,其平均绝对误差为 1.10 cm,平均相对误差为 4.45%。另外 22 组被判断为礁盘破碎,采用式(22)计算破碎波高,其平均绝对误差 1.06 cm,平均相对误差 5.04%。

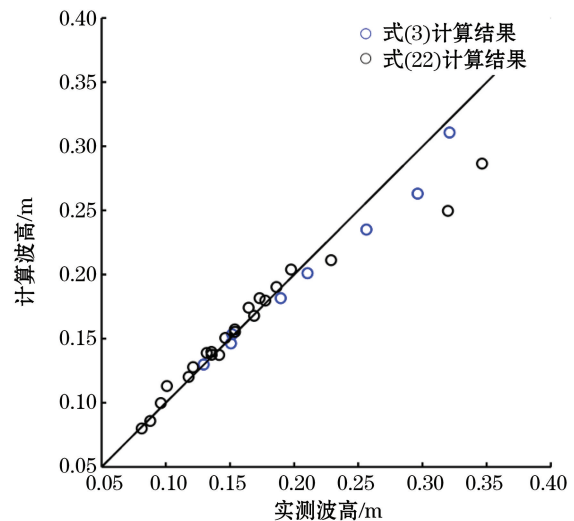


图 6 陡坡-礁盘拍岸浪统计计算模型的检验
Fig.6 Theoretical wave heights versus those simulated by new statistical model

4 结 论

基于国际上现有研究成果,介绍了2种类型的拍岸浪统计计算模型:第一种直接根据深水区波浪要素计算破碎波高;第二种根据波动能量守恒和波浪频散关系计算波浪破碎前波高随水深的变化,根据波浪破碎判据确定破碎波高。两类计算模型多数是针对近岸缓坡地形。本文利用波浪水槽实验数据检验了这些模型在陡坡-礁盘地形的适用性,其中第一类的 Komar 模型和第二类的 Boussinesq, McCowan, Gwyther, Packham, Miche, Weggel, Sunamura-2, Sunamura-3, Goda 和 Svendsen 模型对陡坡和礁盘上波浪破碎实验的破碎波高计算误差比较小。但是,第二类模型借助虚拟斜坡才能计算陡坡-礁盘上的波浪破碎,不能考虑实际礁盘水深对波浪的影响,而且对陡坡上波高的增长过程及破碎位置的计算误差很大。因此,对于这些国际模型,在实际应用中本文建议可以优先考虑采用 Komar 模型。对于 Komar 模型也没有考虑礁盘水深的理论缺陷,则需要做进一步的完善。

本研究还基于国防科技大学和大连理工大学的波浪水槽实验,对比分析了缓坡地形和陡坡-礁盘地形上波浪演变特征,初步设计了一个陡坡-礁盘拍岸浪计算模型:采用陡坡-礁盘破碎判据确定波浪破碎位置,对于在陡坡破碎的情况采用 Komar 模型计算破碎波高,对于在礁盘破碎的情况采用本研究建立的礁盘破碎波高计算公式。该模型对波浪水槽实验检验效果良好。研究成果可以为南海岛礁建设和海洋水文保障等提供参考。

目前,国际上拍岸浪统计计算模型基本上都是基于波浪水槽实验建立的。但是波浪水槽实验仍有很多局限性,不能给出更复杂地形和波况的拍岸浪,这对本研究评估国际模型和自主建立模型都有影响。下一步将设计更多波浪水槽实验,尤其注重现场观测和数值模拟,综合利用这些数据,进一步评估国际模型在更复杂地形和波况的适用范围和精度,并完善本研究提出的陡坡-礁盘拍岸浪统计计算模型。

参考文献(References):

- [1] ZHENG C W, LI C Y. Development of the island and reefs in the South China Sea: wind climate and wave climate analysis[J]. Periodical of Ocean University of China(Natural Science), 2015, 45(9): 1-6. 郑崇伟, 李崇银. 中国南海岛礁建设:重点岛礁的风候、波候特征分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(9): 1-6.
- [2] FENG M, SHA W Y, ZHU S X. Study on some numerical methods calculation waves in shore[J]. Marine Forecasts, 2003, 20(1): 52-59. 冯芒, 沙文钰, 朱首贤. 近岸海浪几种数值计算模型的比较[J]. 海洋预报, 2003, 20(1): 52-59.
- [3] SMIT P, JANSSEN T, HOLTHUIJSEN L, et al. Non-hydrostatic modeling of surf zone wave dynamics[J]. Coastal Engineering, 2014, 83(1): 36-48.
- [4] OYEGOKE E S. The invariants of waves breaking on coastal structures with venable slopes[D]. Nigeria: University of Lagos, 1982.
- [5] MUNK W H. The solitary wave theory and its application to surf problems[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2006, 51(3): 376-424.
- [6] KOMAR P D, GAUGHAN M K. Airy wave theory and breaker height prediction[C]//International Conference on Coastal Engineering. Washington DC: ASCE Press, 1972(1): 405-418.
- [7] MÉHAUTÉ L, KOH R C Y, HWANG L. A synthesis on wave run-up[J]. Waterways and Harbors Division, 1968, 94(WW1): 77-92.
- [8] SUNAMURA T, HORIKAWA K. Two-dimensional beach transformation due to waves[C]//Proceedings of Symposium on ICCE. Washington: ASCE Press, 1974: 923-938.
- [9] DONG S. An introduction to ocean engineering environment[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2005. 董胜. 海洋工程环境概论[M]. 青岛:中国海洋大学出版社, 2005.
- [10] WEN S C, YU Z W. Ocean wave theory and computation principle[M]. Beijing: Science Press, 1984. 文圣常, 余宙文. 海浪理论与计算原理[M]. 北京:科学出版社, 1984.
- [11] MICHE R. Le Pouvoir Réfléchissant des Ouvrages Maritime Exposés à L'action de La Houle[J]. Annale Ponts et Chaussées, 1951: 285-319.

- [12] WEGGEL J R. Maximum breaker height for design[C]//Proceedings of Symposium on ICCE. Washington DC: ASCE Press, 1972: 419-432.
- [13] OSTENDORF D W, MADSEN O S. An analysis of longshore currents and associated sediment transport in the surf zone[M]. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1979.
- [14] GODA Y. A synthesis of breaker indices[C]//Symposium of ASCE. Washington DC: ASCE Press, 1970:39-49.
- [15] SVENDSEN I A, HANSEN J B. Deformation up to Breaking of Periodic Waves on a Beach[C]//Proceedings of Symposium on ICCE. Washington DC: ASCE Press, 1976: 477-496.
- [16] SUNAMURA T. Determination of breaker height and depth in the field[R]. Tsukuba: University of Tsukuba, 1983: 53-54.
- [17] LIU N. Experimental research on wave propagation characteristics under reef terrain[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014. 刘宁. 波浪在岛礁地形上传播特性的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [18] YAO Y, HUANG Z, MONISMITH S G, et al. Characteristics of monochromatic waves breaking over fringing reefs[J]. Journal of Coastal Research, 2013, 29(1): 94-104.

A Statistical Model for Surf Shoaling and Breaking on Reefs With Steep Bathymetry Based on Flume Experiments

NIE Yu¹, ZHU Shou-xian², LI Xun-qiang¹, ZHANG Wen-jing¹, WANG Hong¹

(1. PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China;

2. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Existing statistical models for surf shoaling and breaking are mostly for bathymetry with gentle slope. However, models for reefs with steep topography are still lacking. In this study, different surf statistical models from existing literatures are collected and tested with flume experiments, in which the slope of the topography at reef is steep. It shows that the Komar model has the best performance. The surf on steep topography around reefs is compared with that on gentle slope topography by means of wave flume experiments. Then a new statistical model for surf shoaling and breaking on reefs is built in combination with the Komar model. The new model improves the simulation of the surf on steep topography around and on reefs, remarkably. The mean relative errors of breaking height on steep slope and reef are 4.45% and 5.04%, respectively.

Key Words: steep slope; reef; surf; statistical model

Received: April 14, 2017