

缓坡地形拍岸浪数值模拟研究^{*}

李训强¹, 杨家轩^{1,2}, 朱首贤³, 于利军¹, 张亚行⁴, 钟 凯⁵

(1. 解放军理工大学 气象海洋学院, 江苏 南京 211101; 2. 海军工程大学 振动与噪声研究所, 湖北 武汉 430033;
3. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 4. 中国人民解放军 95137 部队, 广东 广州 511430;
5. 中国人民解放军 73159 部队, 福建 泉州 362100)

摘 要: 采用基于完全非线性 Boussinesq 方程建立的精细化海浪数值模型——Funwave-TVD 模式及水槽实验数据进行拍岸浪数值模拟研究, 并对不同入射情况拍岸浪进行数值模拟得出: 拍岸浪缓坡传播过程中, 均符合波高先增大直至破碎后迅速减小这一现象; 在典型坡度 1.91° ($1:30$) 情况下, 进行了大量数值模拟, 当仅入射波高增大时, 破碎波高增大, 破碎位置向深水区移动; 当仅入射周期增大时, 除上述特征外, 当周期增大到一定程度时, 这种趋势显著减弱; 同时, 当入射周期和波高较大时, 非线性效应增强, 模拟结果出现不稳定。下一步将利用实验与数值模拟相结合的优势, 对前人拍岸浪预报方法和理论进行深入分析研究, 为实现拍岸浪精细化预报提供优化解决方案。

关键词: Funwave-TVD; 拍岸浪; 数值模拟; 波浪破碎; 破碎指标

中图分类号: P731

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2015)01-0155-09

海浪由深水区域向浅水区域或岸边传播过程中, 由于水深变浅受海底强烈摩擦的影响, 使波形和波速发生显著变化, 波浪破碎拍击海岸形成拍岸浪。拍岸浪区是近岸海浪作用与人类活动联系最密切的区域, 是人类活动频繁的区域, 此处水域的环境状况与人类有密切的关系, 而近岸的海浪则是构成近岸水域环境状态的重要方面, 因此对于石油平台、海港建设、海岸防护和近岸航运等, 拍岸浪的分析和研究非常重要。近岸海域是拍岸浪作用最主要的区域, 近岸海域的环境直接影响到沿海经济的开发与建设, 海滩浴场、码头海港等周围海域环境建设防护都离不开拍岸浪研究。同时, 拍岸浪区也是各种水动力因素最复杂的地区之一, 由于拍岸浪具有强大的动力并与海岸直接接触, 所以是海岸演变与侵蚀研究的一个重要方面^[1]。在极端条件下, 拍岸浪的危害极强, 观察、预测拍岸浪对防灾减灾具有指导意义。

拍岸浪过程是一个在复杂地形和复杂边界上的波浪传播过程, 对于复杂的波浪传播变形的研究方法主要包括现场观测^[2]、物理实验、数值模拟^[3-4]。然而伴随着计算机软件、计算机技术以及计算方法的快速发展, 利用数值模型来模拟近岸波浪的传播变形变得简单有效, 已逐渐变成近岸波浪研究的主要手段^[5-6]。

近年来, 国内外学者在波浪数值模型的研究和应用上取得了很大的进展, 通过建立波浪运动的数值模型, 求解了波浪在不同地形上传播变形、越波、增(减)水和破碎等^[7]问题。这些模型主要可划分为 3 种, 即: 缓坡方程模型; Navier-Stokes 方程(简称 N-S 方程)模型; Boussinesq 方程模型。

缓坡方程克服了以往分别考虑折射和绕射方法的缺点, 在海岸工程中已得到广泛的应用。然而由于缓坡方程是一个椭圆型偏微分方程, 必须给出所有的边界条件, 问题才可以求解。另外, 对于椭圆型方程, 域中任意一点的解都受到整个区域的影响。因此在离散求解时, 要同时求解一个很大的方程组, 直接用于解决实际问题难度太大; N-S 方程从动量守恒定律出发, 可以描述全水深、任意坡度的线性和非线性的波浪传播变形, 而且可计算速度的垂向分布, 但是将 N-S 方程应用于实际还有很多工作要做; Boussinesq 方程考虑了波

^{*} 收稿日期: 2013-12-06

资助项目: 国家自然科学基金——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)和长江冲淡水扩展区域低盐水团动力机制(40906044); 中央高校基本科研业务费项目——流和温盐垂向异构坐标的新型海洋模式研制及其应用(2011B05714)

作者简介: 李训强(1962-), 男, 江苏睢宁人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事海洋动力学与数值模拟方面研究。

E-mail: lixunqiang@sina.com

浪的非线性及色散性特征,运动保持质量和动量守恒,因此能较好地模拟波浪传播过程中多种因素的相互作用,其适用性广泛,同时计算精度高。随着计算方法的逐渐成熟,Boussinesq 方程已得到越来越广泛的应用与发展,特别是在拓展和改进模型的非线性及频散特征方面取得了较大的进步。

基于 Boussinesq 方程在近岸区域实际应用的优势,美国特拉华大学建立了 Funwave 数值模式^[8]。本文以水槽实验数据为检验资料,利用该模式最新版 Funwave-TVD 模拟拍岸浪。同时设计了拍岸浪数值模型,针对不同入射条件,对拍岸浪近岸传播变形特征进行分析,为实现近岸拍岸浪的精确预报提供参考方案。

1 Funwave-TVD 模式简介

Funwave-TVD 是美国特拉华大学史峰岩、Kirby 等^[8]在前人 Funwave 模式基础上建立的新版本。Funwave 模式最初是 Kirby 等^[9]建立的完全非线性 Boussinesq 波浪模型(The fully nonlinear Boussinesq wave model),Gobbi 等^[10]、Kennedy 等^[11]、Shi 等^[12]、Chen^[13]等学者为其发展做了许多贡献。杨家轩等^[14]采用该模式对随机波浪近岸传播进行数值模拟,模拟结果与实验数据吻合程度较好。

目前最新版本的 Funwave-TVD 模式具备了更完整的完全非线性 Boussinesq 方程,同时在求解和捕捉破浪破碎、干湿边界处理等方面都有改进与创新。Tissier 等^[15]和 Mara 等^[16]采用该模式进行了大量工作,效果均比较理想。模型可以由下述方程进行描述。

1.1 控制方程

Funwave-TVD 模式采用 Boussinesq 方程,它不但能综合考虑波浪的折射、绕射、反射和变浅效应等的影响,而且也能用来模拟波浪、水流和浅水长波的三波相互作用以及波浪与结构物等相互作用的现象。采用 Wei 等^[17]建立的模型:

$$\eta_t + \nabla \cdot \left\{ (h + \eta) \left[\vec{u}_a + \left(z_a + \frac{1}{2}(h - \eta) \right) \nabla (\nabla \cdot h \vec{u}_a) + \left(\frac{1}{2} z_a^2 - \frac{1}{6}(h^2 - h\eta + \eta^2) \right) \nabla (\nabla \cdot \vec{u}_a) \right] \right\} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \vec{u}_{at} + (\vec{u}_a \cdot \nabla) \vec{u}_a + g \nabla \eta + z_a \left\{ \frac{1}{2} z_a \nabla (\nabla \cdot \vec{u}_a + \nabla (\nabla \cdot (h \vec{u}_a))) \right\} + \nabla \left\{ \frac{1}{2} (z_a^2 - \eta^2) (\vec{u}_a \cdot \nabla) (\nabla \cdot \vec{u}_a) + \right. \\ \left. \frac{1}{2} [\nabla \cdot (h \vec{u}_a) + \eta \nabla \cdot \vec{u}_a]^2 \right\} + \nabla \left\{ (z_a - \eta) (\vec{u}_a \cdot \nabla) (\nabla \cdot (h \vec{u}_a)) - \eta \left[\frac{1}{2} \eta \nabla \cdot \vec{u}_a + \nabla \cdot (h \vec{u}_a) \right] \right\} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中, η 为表面高度; h 为静止水深; $\vec{u}_a$ 为水深 $z = z_a = -0.531h$ 处的水质点的水平速度矢量; $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ 为水平梯度算子; g 为重力加速度; 下标 t 为对时间的偏导。

1.2 波浪破碎

借鉴 Kennedy 等^[18]的研究,采用 (F_{br}, G_{br}) 反映波浪破碎模型,主要是利用动量混合方程描述浅水区域波浪破碎时的能量损耗,其具体表达式为

$$F_{br} = \frac{1}{h + \eta} \left[(v((h + \eta) u_a)_x)_x + \frac{1}{2} (v(((h + \eta) u_a)_y + ((h + \eta) v_a)_x))_y \right] \quad (3)$$

$$G_{br} = \frac{1}{h + \eta} \left[(v((h + \eta) v_a)_y)_y + \frac{1}{2} (v(((h + \eta) v_a)_x + ((h + \eta) u_a)_y))_x \right] \quad (4)$$

式中,下标 x, y 为空间导数; u_a, v_a 为水深 z_a 处的水质点速度; v 为破碎波前部的局部湍粘性应力,对于非线性波的计算,这个参数 v 是非常重要的。

1.3 移动海岸线的处理

岸线的处理是通过假设具有窄缝或可渗透边界,把研究区域看作是可流入流出的活动型区域,从而代替

跟踪波起波落的动边界^[19]。窄缝技术最初由 Madsen 等^[20]在 Boussinesq 方程计算质量通量和自由表面波的项中采用缝技术,这种方法的理论基础是将没有水或只有薄层水覆盖的固体底边界替换成可渗透的海床,或把固体海底假设具有窄缝,使得溢出的水位不会超过海滩高度。该技术是通过改变质量方程实现的:

$$\kappa = \begin{cases} \delta + (1 - \delta)e^{\lambda \frac{(\eta - z^*)}{h_0}} & (\eta \leq z^*) \\ 1 & (\eta > z^*) \end{cases} \quad (5)$$

$$\Lambda = \begin{cases} \delta(\eta + h_0) + \frac{(1 - \delta)h_0}{\lambda} (e^{\lambda \frac{(\eta - z^*)}{h_0}} - e^{-\lambda \frac{(h_0 + z^*)}{h_0}}) & (\eta \leq z^*) \\ (\eta - z^*) + \delta(z^* + h_0) + \frac{(1 - \delta)h_0}{\lambda} (1 - e^{-\lambda \frac{(h_0 + z^*)}{h_0}}) & (\eta > z^*) \end{cases} \quad (6)$$

式中, κ 为单位宽度海滩上的窄缝宽; δ 为最小缝宽; λ 为窄缝的形状参数,使窄缝宽从 1 到 δ 光滑变化; h_0 为窄缝起始的水深值; Λ 为考虑窄缝影响后的等效水深,也称为化引水深^[21]; z^* 为相对于陆地高程 z^s 的函数,其表达式为

$$z^* = \frac{z^s}{1 - \delta} + h_0 \left(\frac{\delta}{1 - \delta} + \frac{1}{\lambda} \right) \quad (7)$$

2 Funwave-TVD 模式对拍岸浪水槽实验的模拟检验

2.1 单斜坡拍岸浪水槽实验的模拟检验

Hansen 和 Svendsen 设计了一个实验室斜坡水槽实验^[22]——浅滩波浪近岸传播和破碎。波浪产生在左边平直底部水深为 0.36 m 处,右边是坡度为 1.67° ($1:34.26$) 的平缓斜坡。本文就 Hansen 实验的一个实例进行模拟验证,其入射波波高 6.7 cm,周期 1.67 s。实验结果如图 1 所示,波浪从右至左传播。

图 1 中可以看出波浪由于地形浅化作用,在近岸区域发生堆积破碎,即波高出现先增大后减小的趋势。同时, Funwave-TVD 模式模拟结果与水槽实验结果基本一致,说明该模式可以模拟较缓斜坡地形的水槽实验。

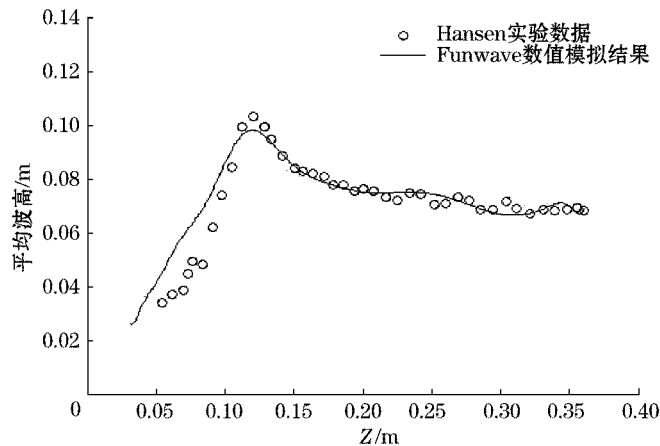


图 1 波高数值模拟与 Hansen 实验数据的比较

Fig. 1 Simulated wave heights by Funwave model versus Hansen's experimental data

2.2 双斜坡拍岸浪水槽实验的模拟检验

该实验为自主设计实验,实验在解放军理工大学风浪流水槽中进行,实验设计如图 2 所示,左边水深为 0.500 m,右边是坡度为 21.80° ($1:2.5$) 的较陡斜坡连接一个坡度为 1.43° ($1:40$) 的平缓斜坡,连接处高度为 0.225 m。斜坡以铁质框架固定木板制成,斜坡表面用 0.02 m 厚的水泥整平;斜坡底座用袋装砂石填充

固定。整个传播区域设置了若干个测点,实验中根据波浪破碎进行适当调整。

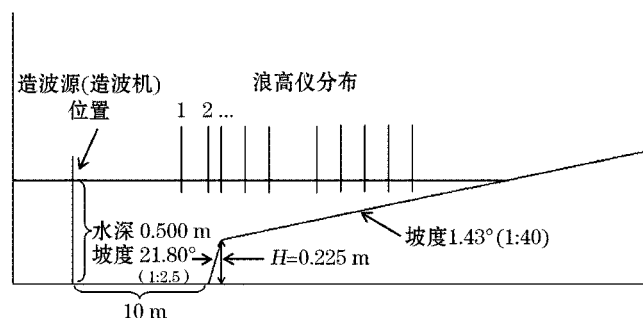


图2 波浪水槽实验设计与布局

Fig. 2 Sketch of the experimental setup in the wave flume

本文采用 Funwave-TVD 模式对上述拍岸浪水槽实验进行数值模拟。数值模式的地形配置与拍岸浪水槽实验完全相同,网格间距为 0.025 m。造波源设置为数值模式的波浪入射边界,由于造波为双向造波,因此在造波源位置后侧设置海绵边界进行消波;同时,在斜坡上设置了更符合实际情况的漫滩边界。由静止状态开始计算波浪运动,模式运行 20 s 后,波面呈现很有规律的变化,波高基本稳定,将数值模式稳定后 20 s 内的平均波高模拟数据与观测数据比较。

图 3 为波高 $H_w=0.05$ m,周期 T_0 为 1.0 s,沿 x 正方向传播的规则波入射情况下,数值模拟与实测数据对比结果。由图可知,模拟结果与实验数据趋势一致,当入射波刚到达斜坡前 2 m 时,即 1 号测点位置,平均波高略有增大,这是由于斜坡较陡,反射较强,能量在斜坡前堆积;继续传播至缓斜坡后,即第 2 个测点及其以后,平均波高基本不变,直至接近破碎位置时,波高迅速增大后破碎。

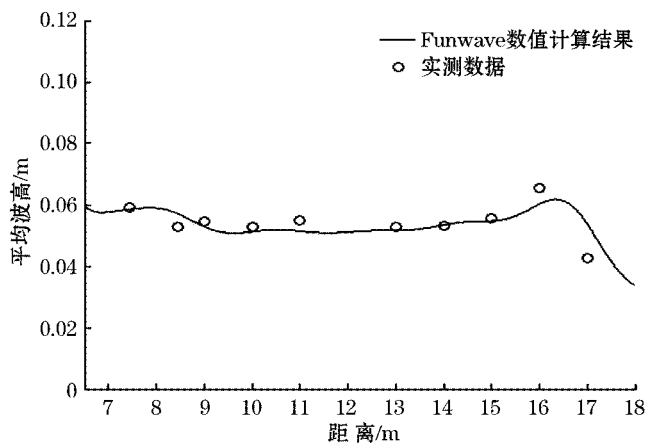


图3 $H_w=0.05$ m 和 $T_0=1$ s 入射条件下实测数据与 Funwave-TVD 数值计算结果对比

Fig. 3 Simulated wave heights by Funwave-TVD model versus the experimental data with incident waves of $H_w=0.05$ m and $T_0=1$ s

3 不同入射条件下拍岸浪数值模拟与分析

基于上述研究表明, Funwave-TVD 模式模拟拍岸浪缓坡传播效果较好。由于双斜坡地形对于拍岸浪定量特征分析并不具有代表性,而单斜坡地形更为简化,同时对单一入射条件变化的讨论更具有普适性。为进一步研究不同入射条件拍岸浪的特征,现利用 Funwave-TVD 模式,对缓坡地形条件下不同波高、不同波周期以及不同平底水深下的拍岸浪进行数值模拟,从而对不同入射条件下拍岸浪变化特征进行对比分析。

3.1 模拟地形及参数设置

数值模拟实验设计如图 4,地形为一平底连接一个缓坡模型,坡度为 $1.91^\circ(1:30)$;模型设计了 2 种平底地形,水深分别为 0.35 m 和 0.20 m,网格间距为 0.025 m。造波类型为规则波,设计了 3 种不同周期,分别为 1,2,3 s;0.35 m 水深情况下设计了 0.04,0.06,0.08,0.10,0.12 和 0.14 m 六种波高情况。由于模式采用双向造波,为了消除反向造波的影响,需要模式中对造波后侧进行了海绵边界处理,以吸收反射能量。

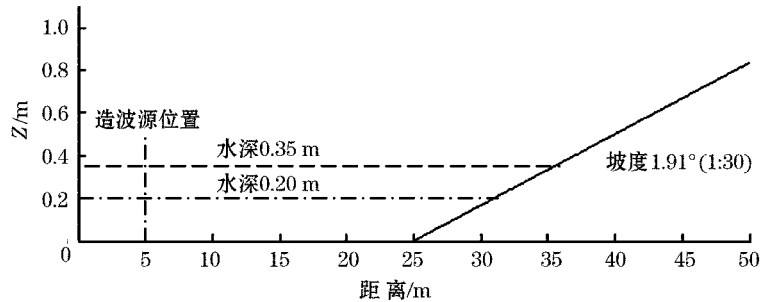


图 4 数值模拟方案水深地形设计图

Fig. 4 Topography setup in the numerical simulation experiments

3.2 模拟结果分析

图 5 给出的是拍岸浪数值模拟某一时刻的瞬时波面图,图中以平底水深 0.35 m,入射波高 0.04 m,周期 2.0 s 为例,待模拟稳定后,给出采集后第 35 秒的瞬时波面图。图 5 中,波浪在平底段与斜坡段有明显区别,平底段波峰较平缓,波长较大,波面比较规则;当波浪传播到斜坡上,波峰变陡,波长变小,直至破碎,破碎后波面趋于平缓。对比水槽实验结果,这种趋势符合拍岸浪缓坡传播过程。

考虑到不同入射条件下,拍岸浪近岸传播发生变化,现对不同波高、波周期入射下的拍岸浪数值模拟结果进行比较。

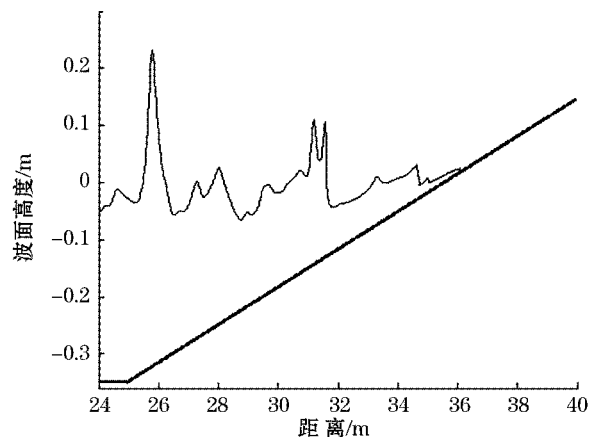


图 5 第 35 秒数值模拟瞬时波面图

Fig. 5 Snapshot of the simulated surface elevation at 35 seconds

图 6 中,给出同样的初始设置条件下,入射波周期为 1.0 s 保持不变,入射波高从下至上依次为 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12 和 0.14 m 的拍岸浪数值模拟结果。由图 6 可知,当入射周期 T_0 保持 1.0 s 不变时,不同的入射波高下均可以看出拍岸浪在缓坡上迅速增大后破碎的过程。同时,随着入射波高增大,破碎波高增大,破碎位置向深水区移动,在整个过程,发生了一次破碎。

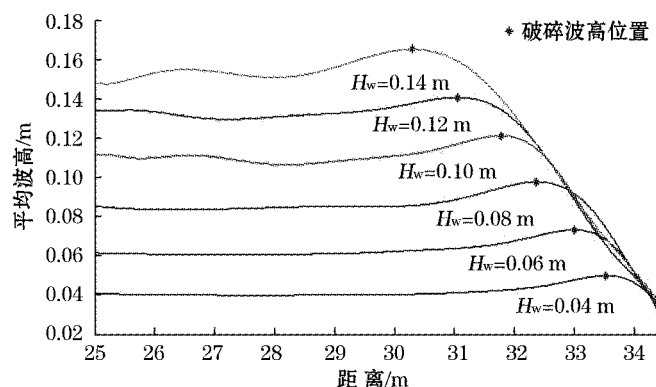


图 6 $T_0=1.0$ s 不同入射波高条件下拍岸浪数值模拟结果

Fig. 6 Shoaling wave simulation with incident waves of $T_0=1.0$ s and different heights

图 7 为入射周期为 2 s 时不同入射波高条件下拍岸浪数值模拟结果,其余设置与图 6 相同。由图 7 可知,除得到图 6 的上述结论外,当入射波高较小时,仅发生一次破碎,当入射波高增大时,会出现 2 个峰值,即发生双破碎现象,入射波高较大时两次破碎也越来越明显,当入射波高为 0.10 m 时,波高先期出现小的波浪破碎后接着出现明显的波浪破碎,这是由于波浪第一次破碎不完全,能量继续堆积后发生大的破碎;在 0.14 m 入射波高条件下,也发生了两次破碎,但其第一次破碎大于第二次,这是由于波浪刚达到斜坡就发生破碎,破碎较为充分,能量衰减明显,随后虽有小的能量积聚,但总体能量较小,导致二次破碎波高较小。

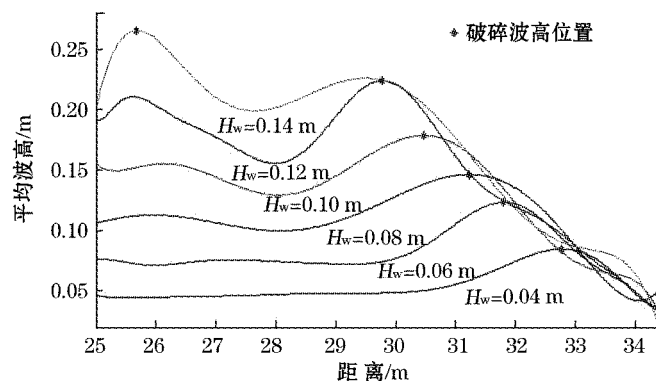


图 7 $T_0=2.0$ s 不同入射波高条件下拍岸浪数值模拟结果

Fig. 7 Shoaling wave simulation with incident waves of $T_0=2.0$ s and different heights

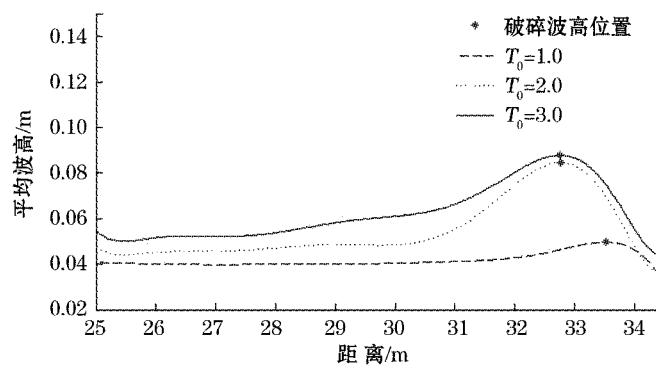


图 8 $H_w=0.04$ m 不同入射周期条件下拍岸浪数值模拟结果

Fig. 8 Shoaling wave simulation with incident waves of $H_w=0.04$ m and different periods

图 8 参照上述设置不变,入射波高 H_w 为 0.04 m 保持不变,入射周期 T_0 分别为 1.0, 2.0, 3.0 s。图中可以看出,随着周期增大,破碎波高增大,波浪爬高更明显,破碎后破碎能量衰减更明显,比较 1.0~2.0 s, 2.0~3.0 s 两者之间图形,破碎位置距离差与破碎波高差,前者明显大于后者,即入射周期由 1.0 s 增大到 2.0 s 时破碎波高增大比较显著,但从 2.0 s 增大到 3.0 s,破碎波高略有增大,变化不明显。

综上所述:拍岸浪近岸传播过程中,周期不变时,入射波高增大,破碎波高增大,破碎位置前移;在较大周期、较大波高入射条件下,波浪会发生两次破碎现象。当波高保持不变时,周期增大,破碎波高增大,破碎位置前移,当周期增大到一定程度,这种趋势变化减弱。

由于破碎波高在海岸建筑物设计、波高变形计算和岸滩演变分析中非常重要,因而对破碎波高的研究也一直受到重视,破碎波高的大小意味着波浪破碎强度的大小,强度不同的破碎波浪会引起不同程度的拍岸浪运动。一般将破碎波高 H_b 与破碎水深 h_b 之比定义为破碎指标 γ_b ,通常将破碎指标作为判断波浪破碎的重要依据。一般将 γ_b 取为常数^[23],可根据以下公式确定波浪破碎指标:

Boussinesq 公式:

$$\gamma_b = H_b/h_b = 0.73 \quad (8)$$

McCowan 公式:

$$\gamma_b = H_b/h_b = 0.78 \quad (9)$$

Gwyther 公式:

$$\gamma_b = H_b/h_b = 0.83 \quad (10)$$

Packham 公式:

$$\gamma_b = H_b/h_b = 1.03 \quad (11)$$

根据上述公式,结合数值模拟结果,分别给出 4 种情况下 H_b 与 h_b 的线性关系,如图 9 所示。

在图 9 中,“*”表示平底水深 d 为 0.20 m 破碎点对应值,“o”表示平底水深 d 为 0.35 m 平底水深破碎点对应值。整体破碎点主要集中在 Packham 公式计算值与 McCowan 公式计算值之间,可以得出模拟结果符合破碎指标情况,进一步证明 Funwave-TVD 模式模拟效果较好,数值模拟得到的破碎指标与理论公式计算结果的趋势较为一致。

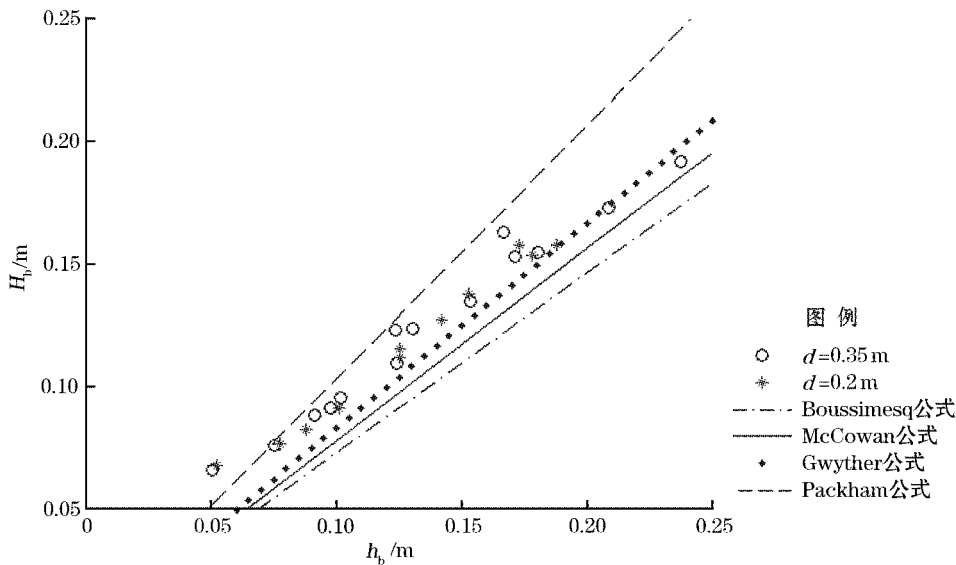


图 9 破碎指标经验公式与数值模拟结果的比较

Fig. 9 Comparison of wave breaking criterions between empirical equations and numerical simulation results

4 结 论

Funwave-TVD 模式能够较好地模拟拍岸浪在近岸缓坡的传播过程中,平均波高出现先增大至破碎、后迅速减小的现象。通过对 $1.91^{\circ}(1:30)$ 坡度下拍岸浪数值模拟的研究,对改变单一入射条件情况的拍岸浪进行数值模拟得出:1)仅改变入射波高,当周期为 1.0 s 时,入射波高增大,破碎波高增大,破碎位置前移;当周期为 2.0 s 时,随着入射波高增大,除上述特征外,部分较大的入射波高条件下出现二次破碎现象;2)保持初始条件不变,仅改变入射波周期,当入射周期增大时,破碎波高增大,破碎位置前移,当入射周期增大到 2.0 s 后,这种趋势显著减弱。

同时,利用前人公式对模拟结果中给出的破碎指标进行检验,发现数值模拟得到的破碎波高与破碎水深与破碎指标公式趋势较为一致;但是,在数值模拟中发现以下问题:1)只增大入射周期时,发现入射波高也相应增大,这主要是由于入射周期增大,非线性效应增强,相应参数需要修正;2)模式在数值模拟中,对网格精度要求较高,对于较小区域模拟效果较好,当应用到大区域时,需要克服计算量大,耗时较长以及网格间距等问题。上述问题给直接利用拍岸浪数值模拟进行大范围拍岸浪预报带来困难,下一步将利用实验与数值模拟的优势,并结合前人拍岸浪预报方法和理论进行深入分析研究,为实现拍岸浪精细化预报提供优化解决方案。

参考文献(References):

- [1] ZHANG H W, TAO J H. Numerical modeling of sand beach evolution around coastal structures under the action of nearshore wave and currents[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2000, 22(1):117-124. 张海文,陶建华. 近岸浪、流作用下结构物附近海岸演变的数值模拟[J]. 海洋学报, 2000, 22(1):117-124.
- [2] LI Z Q, CHEN Z S, LI Z L. Statistical analysis and comparison on wave characteristics during wave propagating in nearshore zone[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2010, 30(4):43-47. 李志强,陈子燊,李志龙. 近岸带波浪传播过程中波性质的统计对比分析[J]. 广东海洋大学学报, 2010, 30(4):43-47.
- [3] FANG K Z, LIU Z B, ZOU Z L, et al. Numerical simulation of longshore currents[J]. Advances in water science, 2013, 24(2):258-265. 房克照,刘忠波,邹志利,等. 波生沿岸流数值模拟[J]. 水科学进展, 2013, 24(2):258-265.
- [4] CUI L, TANG J, SHEN Y M. Numerical simulation of wave field and coastwise current in alongshore zone[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(12):1340-1325. 崔雷,唐军,沈永明. 近岸波浪及沿岸流数值模拟研究[J]. 水利学报, 2008, 39(12):1340-1325.
- [5] LI M G, WANG Z L, JIANG D C. A review on the mathematical models of wave transformation in the nearshore region[J]. The Ocean Engineering, 2002, 20(4):43-57. 李孟国,王正林,蒋德才. 近岸波浪传播变形数学模型的研究与进展[J]. 海洋工程, 2002, 20(4):43-57.
- [6] FENG M, SHA W Y, LI Y, et al. Development of study on waves offshore[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science, 2004, 5(6):70-76. 冯芒,沙文钰,李岩,等. 近海近岸海浪的研究进展[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版, 2004, 5(6):70-76.
- [7] YOU T. Study of the wave transformation and breaking on the slope and longshore currents[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. 游涛. 波浪在斜坡上的传播破碎及沿岸流研究[D]. 天津:天津大学, 2004.
- [8] SHI F Y, KIRBY J T, TEHRANIRAD B. Funwave-tvd-1.0 manual[M]. Newark: University of Delaware, 2011.
- [9] KIRBY J T, WEI G, CHEN Q, et al. FUNWAVE 1.0, Fully nonlinear Boussinesq wave model. Documentation and users manual[C]// KIRBY J T. Center for Applied Coastal Research. Delaware: University of Delaware, 1998.
- [10] GOBBI M F, KIRBY J T, WEI G. A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. II. Extension to $O(kh^4)$ [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 405:181-210.
- [11] KENNEDY A B, KIRBY J T, CHEN Q, et al. Boussinesq-type equations with improved nonlinear performance[J]. Wave Motion, 2001, 33:225-243.
- [12] SHI F Y, DALRYMPLE R A, KIRBY J T, et al. A fully nonlinear Boussinesq model in generalized curvilinear coordinates[J]. Coastal Engineering, 2001, 42:337-358.
- [13] CHEN Q. Fully nonlinear Boussinesq-type equations for waves and currents over porous beds[J]. Journal of Engineering Mechanics,

- 2006,132(2):220-230.
- [14] YANG J X, ZHU S X, LI X Q, et al. The effect of the swash boundary on the numerical calculation of wave[J]. *Advances in Marine Science*, 2013, 31(3):305-312. 杨家轩, 朱首贤, 李训强, 等. 波浪漫滩边界对波浪数值计算的影响[J]. *海洋科学进展*, 2013, 31(3):305-312.
- [15] TISSIER M, BONNETON P, MARCHE F, et al. A new approach to handle wave breaking in fully non-linear Boussinesq models[J]. *Coastal Engineering*, 2012, 67:54-66.
- [16] MARA T, MARCO P. Shock-capturing Boussinesq model for irregular wave propagation[J]. *Coastal Engineering*, 2012, 61:8-19.
- [17] WEI G, KIRBY J T, GRILLI S T, et al. A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves: Part 1. Highly nonlinear unsteady waves[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1995, 294:71-92.
- [18] KENNEDY A B, CHEN Q, KIRBY J T, et al. Boussinesq modeling of wave transformation, breaking and runup. I: 1D[J]. *Coastal and Ocean Engineering*, 2000, 126(1):39-47.
- [19] TAO J H. Numerical modelling of wave runup and breaking on the beach[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1984, 6(5):692-700. 陶建华. 波浪在岸滩上的爬高和破碎的数学模拟[J]. *海洋学报*, 1984, 6(5):692-700.
- [20] MADSEN P A, SRENNSEN O R. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2. A slowly-varying bathymetry[J]. *Coastal Engineering*, 1992, 18(3-4):183-204.
- [21] SUN Q, SUN X G, LI R J, et al. Application of the slot method in numerical modeling of suspended sediment transport in estuaries[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2001, 32(3):296-301. 孙琪, 孙效功, 李瑞杰, 等. 窄缝法在河口区悬沙输运数值计算中的应用[J]. *海洋与湖沼*, 2001, 32(3):296-301.
- [22] HANSEN J B, SVENDSEN I A. Regular waves in shoaling water experimental data[R]. Denmark: Technical University of Denmark, 1979:21.
- [23] WEN S C, YU Z W. Theory and calculation principle of wave[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.

Numerical Simulations of Surfing Waves on Mild Slopes

LI Xun-qiang¹, YANG Jia-xuan^{1,2}, ZHU Shou-xian³, YU Li-jun¹, ZHANG Ya-hang⁴, ZHONG Kai⁵

(1. *Institute of Meteorology and Marine, PLA University of Science and Technology*, Nanjing 211101, China;

2. *Institute of Noise & vibration, Naval University of Engineering*, Wuhan 430033, China;

3. *College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University*, Nanjing 210098, China;

4. *Units No. 95137 of PLA*, Guangzhou 511430, China;

5. *Units No. 73159 of PLA*, Quanzhou 362100, China)

Abstract: Funwave-TVD model is used to simulate surf based on flume experiments in this paper. Further, the model is applied to simulate surf on typical mild slope 1:30 with different incident conditions, with varying heights, periods and water depths. The results show that: as waves propagate in shallow water, numerical simulations are consistent with the observed phenomenon that the wave height increases at first and rapidly decreases after breaking. When the incident height or period is increased, the height of breaking wave will also increase, while the location of breaking point moves towards deep water area. However, if the incident period goes up to a certain large value, the increasing trend velocity of wave breaking height will diminish. Meanwhile, when the incident height or period is large enough, the result of the model will be unstable because of the enhancement of the nonlinear effect. Next, both theories and methods of surf forecasting by previous researches will be studied with the experimental and numerical methods, in order to accurately forecast the process of surfing waves in large regions.

Key words: Funwave-TVD; surf; numerical simulation; wave breaking; the criterion of wave breaking

Received: December 6, 2013