

基于波浪数值水槽的辐射应力理论的比较研究^{*}李 硕¹, 李 锐^{1,2}, 管长龙¹

(1. 中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛 266100; 2 国家海洋局北海预报中心, 山东 青岛 266100)

摘 要:关于辐射应力的计算存在不同的理论解, 目前对这些理论的验证较为匮乏。本文基于 CFD 软件 FLUENT, 建立二维数值波浪水槽模型, 计算得到与理论解符合良好的波动过程。利用数值结果, 研究辐射应力的垂向结构。结果表明, 辐射应力值在波峰至波谷区域存在突变, 其表层积分值与表层以下辐射应力不连续。基于线性波动理论, 针对不同的入射波参数设计实验, 检验现有辐射应力理论的适用性。结果发现, 不同情况下适用的辐射应力理论不同。在实际应用中, 应当根据不同波动类型和计算区域选取合适的辐射应力理论。

关键词:波浪; 辐射应力; 数值波浪水槽

中图分类号: P731.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-6482(2017)01-014-09

DOI: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2017.01.002

引 言

辐射应力的概念最早由 Longuet-Higgins & Stewart (简称 LHS) 提出, 表示由波浪运动产生的剩余动量通量^[1]。LHS 探讨了辐射应力的物理机制并用它来解释波浪增水、流场对重力波产生的影响等现象^[2]。随后, 一些学者通过实验数据验证了 LHS 的理论并将其应用到近岸流系的分析中^[3-6]。近年来, 随着海洋模式的发展, 学者们将辐射应力加入到环流模式中, 以体现波浪对流场的作用^[7-9]。

LHS 理论所计算的辐射应力是一个垂向积分的结果, 无法应用到有垂向结构的流场中。而在实际海洋中, 特别是在近岸区域, 流场的垂向结构对物质输运有重要作用。Xia 等^[10]基于微幅波理论, 将 LHS 理论中的辐射应力沿水深求导, 得到其从海底到平均海面的分布, 并计算了斜坡地形下波生流, 与实验结果符合良好。Xia 等的垂向分布理论被广泛应用到浪流耦合模式中^[11-12]。Zhang^[13]同样在线性波动和 LHS 理论前提下, 推导了辐射应力的垂向分布结构, 但在表层压强和流速的处理上与 Xia 的方法不同, 其理论也被应用到耦合模式中^[14-15]。Mellor^[16]在拉格朗日观点下, 基于线性波假设, 推导了三维环流方程和表面波动方程, 得到了辐射应力表达式。随后, Mellor 对压强项进行了修正^[17-18], 得到表层与下层不连续的辐射应力表达式。其修正后的结果被应用到环流模式中, 能更好模拟近岸流动的垂向结构^[19-20]。

目前, 对垂向辐射应力理论的验证多数是通过检验利用辐射应力计算出的流场的准确性, 不能直接验证理论本身。同时, 实验室观测的手段很难精确测量波峰到波谷区域的水质点速度和压强。而利用计算流体力学软件(CFD), 可以很好的解决上述问题。本文建立了二维数值水槽, 通过模拟不同深度情形下微幅波的传播过程, 给出自表至底的流速和压强数据, 并用来计算的辐射应力, 最终将计算结果与已有的理论作比较。

1 数值模型

1.1 控制方程

二维波浪数值水槽采用不可压缩黏性流体的 N-S 方程和连续方程。动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \vec{v} \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (1)$$

^{*} 基金项目: 国家科技支撑计划课题资助(2011BAC03B01)资助

第一作者简介: 李硕(1991-), 男, 硕士, 主要从事海浪数值模拟方面的研究。E-mail: lishuo1991@163.com

收稿日期: 2016-05-09

方程中 τ 表示流体的粘性作用, F 表示在模型中加入的动量源和汇。

连续方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (2)$$

其中 S_m 表示在在模型中加入的质量源汇项。

数值模型中考虑波动引起的湍流效应, 采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型, 湍动能 k 方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

湍动能耗散率 ϵ 方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] + c_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (4)$$

方程中 $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$ 是常数, 在这里分别取值为 1.44、1.92、0.09。 σ_k 和 σ_ϵ 分别是 k 和 ϵ 的普朗特常数, 分别取值为 1.0 和 1.3。 S_k 和 S_ϵ 是用户添加的湍动能和湍动能耗散率源项。 μ_t 为湍粘性系数。

在水-气界面处, 模型采用流体体积函数方法 (VOF)。体积函数 α_q 定义为单元网格内第 q 相流体所占体积与该网格体积之比。在每一个网格中两相流体的体积分数之和为 1, 且 α_q 满足连续方程

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \frac{\partial (u_1 \alpha_q)}{\partial x} + \frac{\partial (u_2 \alpha_q)}{\partial y} = 0 \quad q=1, 2 \quad (5)$$

数值水槽的入射波采用边界造波的方法, 通过定义入射边界处水质点速度和网格 VOF 值给出。利用 FLUENT 自带的边界条件 Open Channel Wave BC, 采用线性波理论。

1.2 消波方法

在水槽的末端, 通过在动量方程中添加动量源项的方式进行消波。使用 UDF 文件在 FLUENT 中添加用户自定义的消波函数。消波前后的水质点速度和压强为

$$u_m = C u_j, v_m = C v_j, p_m = (1 - C) \rho g z + C p_j \quad (6)$$

式中下标 m 和 j 分别表示消波后和消波前物理量。 C 为平滑函数, 表达式为

$$C(x) = \cos(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} * \frac{\pi}{2}) \quad (7)$$

其中 $x_1 \sim x_2$ 表示消波区域。

添加动量源项的动量方程为 (忽略湍流等)

$$\rho \frac{u_m^{n+1} - u_j^n}{t} + \rho u_j \frac{\partial u_j}{\partial x} + \rho v_j \frac{\partial u_j}{\partial y} = - \frac{\partial p_j}{\partial y} = - \frac{\partial p_j}{\partial x} + S_x \quad (8)$$

未添加动量源项的动量方程为

$$\rho \frac{u_m^{n+1} - u_m^n}{t} + \rho u_m \frac{\partial u_m}{\partial x} + \rho v_m \frac{\partial u_m}{\partial y} = - \frac{\partial p_m}{\partial x} \quad (9)$$

将两式联立, 可以求得 x 方向的动量源项 S_x 的表达式

$$S_x = \rho \frac{1}{t} (C - 1) u_j + \rho [(1 - C^2) u_j \frac{\partial u_j}{\partial x} - C C' u_{2j}] + \rho (1 - C^2) v_j \frac{\partial u_j}{\partial y} + (1 - C) \frac{\partial p_j}{\partial x} - C' p_j + C' \rho g z \quad (10)$$

同样方法可以求得 y 方向的动量源项 S_y , 表达式为

$$S_y = \rho \frac{1}{\Delta t} (c - 1) v_j + \rho [(1 - c^2) u_j \frac{\partial v_j}{\partial x} - c c' u_j v_j + \rho (1 - c^2) v_j \frac{\partial v_j}{\partial y} + (1 - c) \frac{\partial p_j}{\partial y} + (1 - c) \rho g]$$

2 实验设计

本研究分别针对有限水深、深水、浅水情形, 建立数值模型, 设置入射波参数, 模拟线性波动在水槽中的传播过程。

2.1 有限水深波动实验

水槽模型如图 1 所示, 长 200m, 高 9m, 水深 5.5m, 上部空气 3.5m, 末端 20m 为消波区。水槽左边

界设置为入射波边界条件,右边界和底边界为固壁边界条件,上边界为压强出口边界条件。

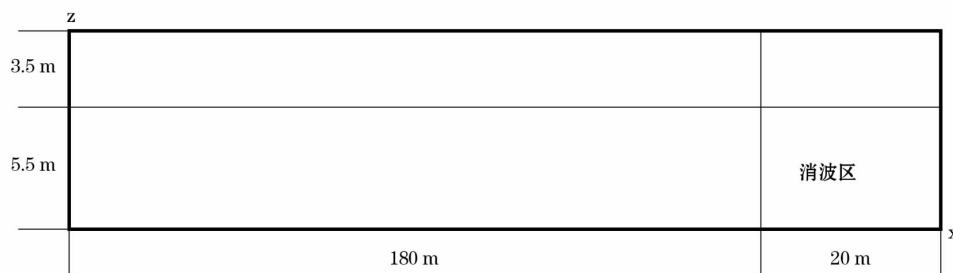


图 1 水槽模型示意图

Fig. 1 Two dimensional numerical wave tank

网格划分采用正交网格, x 方向上分辨率为 0.1m , z 方向上在水-气界面附近网格得到加密,最小分辨率为 0.01m ,在上下边界处,分辨率为 0.05m 。

左边界设置入射波波高为 0.5m ,波长 16m ,周期 3.24s ,采用单频波动。湍流模型选取标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,利用 VOF 方法计算水-气分界面,采用 PISO 算法求解流速和压强。在初始时刻,设置水面静止。计算时间步长为 0.02s ,共计算 70s 。

计算过程中,在 x 等于 4 倍波长的位置输出波面高度数据和 x 断面的流速、压强数据。在 4 倍波长的位置,波动已经达到稳定,并且远离消波区域,避免消波过程对此位置计算结果的影响。

2.2 深水波动实验

深水实验的水槽参数和网格划分与有限水深实验设置相同。

左边界入射波波高为 0.18m ,波长 10m ,周期 2.53s 。其他设置与有限水深实验设置相同。

2.3 浅水波动实验

浅水实验所用水槽长 200m ,高 2m ,水深 0.8m ,末端 20m 为消波区。

网格划分采用正交网格, x 方向上分辨率为 0.1m , z 方向上在水-气界面附近网格得到加密,最小分辨率为 0.002m ,在上下边界处,网格分辨率为 0.01m 。

左边界入射波波高为 0.04m ,波长 16m ,周期 5.80s 。模型的其他设置与有限水深实验设置相同。

3 结果与分析

3.1 有限水深实验

首先,利用本次实验验证数值水槽计算线性波动的有效性。取 $t=68\text{s}$ 时刻水槽中的波动液面高度(见图 2)。可以看出水槽内形成了稳定波动,各个波形形状基本一致。在 x 等于 180m 的地方,波动能量得到有效削弱,到水槽末端,液面趋于水平,表明消波作用有效。计算过程中输出 $x=64\text{m}$ 处波面高度数据(见图 3)。由图可知,初始液面高度等于水深,之后波动传播到该位置处,并逐渐形成稳定波动。稳定后的波形与理论解符合良好,表明可以用数值水槽计算线性波动。

其次,利用模拟结果计算垂向积分的辐射应力,并验证其有效性。选取 $t=51.86\text{s}$ 至 $t=55.10\text{s}$ 一个波动周期内, $x=64\text{m}$ 截面处的水质点速度和压强数据,图 3 方框所示。LHS 对辐射应力的定义为

$$S_{xx} = \overline{\int_{-h}^{\zeta} (p + \rho u^2) dz} - \int_{-h}^{\zeta} p_0 dz \quad (12)$$

其中 h 代表水深, ζ 代表波面高度, p_0 表示无波浪运动情形下的静压强, p 代表有波浪传播时的水体压强,上划线表示在一个周期内的平均。将水槽输出的数据带入公式中,可以求得垂向积分的辐射应力 $S_{xx}=457\text{ N/m}$ 。LHS 推导出的辐射应力垂向积分公式为:

$$S_{xx} = E \left(\frac{2kh}{\sinh(2kh)} + \frac{1}{2} \right) \quad (13)$$

可得 $S_{xx} = 436 \text{ N/m}$, 二者相对误差为 4.6% 。误差的来源有以下 2 点: LHS 在推导计算公式时, 省略了一些高阶项导致公式计算结果偏低; 在利用定义计算辐射应力时, p (量级为 10^4) 与 u (量级为 1) 的共同运算也会造成误差。误差在可接受范围内, 所以认为可以利用模拟结果计算辐射应力。

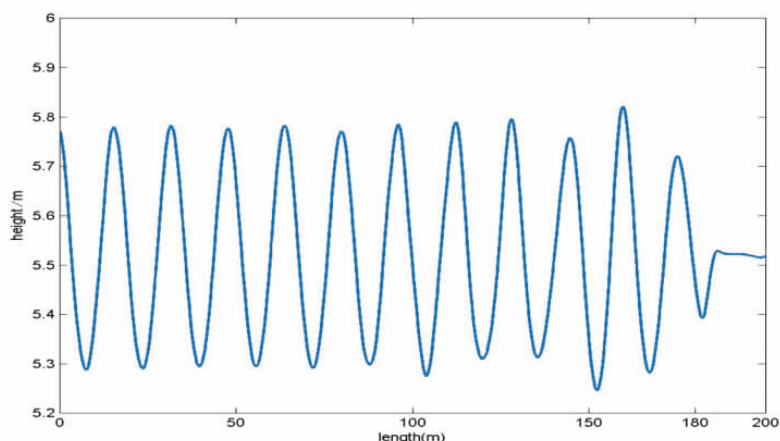


图 2 $t=68\text{s}$ 时刻水槽内液面高度

Fig. 2 Height of free surface at $t=68\text{s}$

将 LHS 所提出的辐射应力概念沿垂向求导, 即可得到其随水深的变化。将数值水槽计算的 $x=64\text{m}$ 截面处的水质点速度和压强带入, 可得 $S_{xx}(z)$ 大小, 再由 LHS 提出的公式求得的积分值 S_{xx} 无量纲化 (见图 4)。由图可知, 从水槽底层到波谷的位置, 辐射应力逐渐变大, 但增速缓慢。从波谷到平均水面, 辐射应力急剧增大, 这主要是由于表层波动使得相平均的压强项增大引起的。另外, 此区域水质点速度比波谷以下水质点速度大, 也会引起辐射应力的增大。从平均水面到波峰, 辐射应力急剧减小, 这是由于在此区域内随着 z 增加, 水体的不连续性加剧, 所以辐射应力值理应减小至零。显然, 从波谷至波峰区域的辐射应力与下层的值是不连续的, 故可将表层的辐射应力积分为 1 个值。

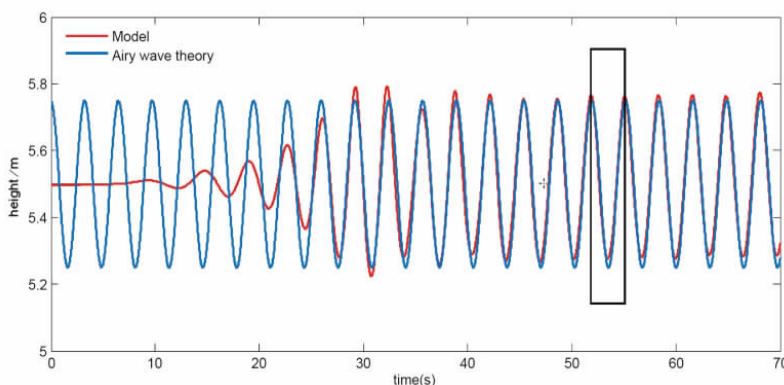


图 3 $x=64\text{m}$ 处波面高度时间序列

Fig. 3 Time series of wave height at $x=64\text{m}$

本研究的主要目的在于比较垂向分布的辐射应力理论, 即 Xia 理论 (简称 X04)、Zhang 理论 (简称 Z04)、Mellor 理论 (简称 M08)。将数值水槽得到的波浪要素带入理论公式中, 可以得到辐射应力的垂向分布。其中 X04 公式为

$$S_{xx}(z) = E \frac{k}{\sinh 2KD} [\cos 2k(z+d) + 1] \cos^2 \theta - E \frac{k}{\sinh 2KD} [\cos 2k(z+D) - 1] - \frac{Ez}{D^2} + E \frac{k(z+D) \sinh k(z+D)}{D \cosh kD} - \frac{E}{D} \left[1 - \frac{\cosh k(z+D)}{\cosh kD} \right] \quad (14)$$

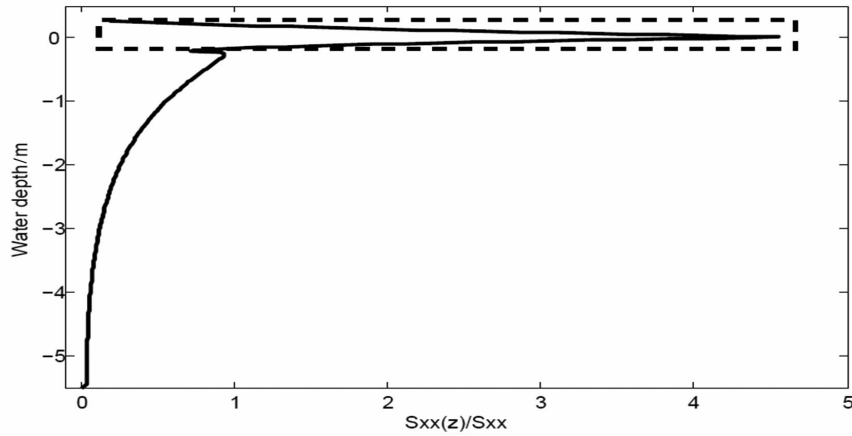


图4 辐射应力垂向分布

Fig. 4 Vertical profile of radiation stress

其中 E 为波浪能量, k 为波数, D 为水深, θ 为波向。Z04 的计算公式为

$$S_{\alpha\beta} = E \frac{k_{\alpha} k_{\beta} C_g}{|k|^2 C} \frac{2|k| \cosh^2 |k|(z+h)}{|k|h + \sinh |k|h \cosh |k|h} + \delta_{\alpha\beta} \left[\frac{E|k|}{2 \sinh^2 |k|h} \sinh 2|k|(z+h) - \frac{2E|k|}{\sinh 2|k|h} \sinh^2 |k|(z+h) \right] \quad (15)$$

其中 C_g 为群速度, C 为相速度, M08 的计算公式为

$$S_{\alpha\beta} = E \frac{k_{\alpha} k_{\beta}}{k^2} F_{cs} F_c - \delta_{\alpha\beta} F_{sc} F_{ss} + \delta_{\alpha\beta} E_D \quad (16)$$

其中 E_D 为狄拉克函数, 在海水表层 $E_D = E/2$, 在表层以下 $E_D = 0$, F_{ss} , F_{cs} , F_{sc} , F_{cc} 公式为

$$F_{ss} = \frac{\sinh k(z+h)}{\sinh kD}, F_{cs} = \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kD}, F_{sc} = \frac{\sinh k(z+h)}{\cosh kD}, F_{cc} = \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kD} \quad (17)$$

计算结果(见图5)。可以看出, X04 计算的结果向底层略有增大的趋势, 与实际不相符, 而 Z04 计算结果在底部与水槽计算结果符合良好。从底层向上, X04 与 Z04 计算结果与水槽计算结果趋势一致, X04 的结果大于数值结果, 而 Z04 的结果则小于数值结果。M08 在推导过程中单独考虑了平均水面以上区域, 所以得到了不连续的辐射应力值。表层辐射应力(红色圆圈)与数值水槽计算结果相近, 但是在表层以下, M08 计算结果不随水深变化, 且计算的辐射应力值很小。

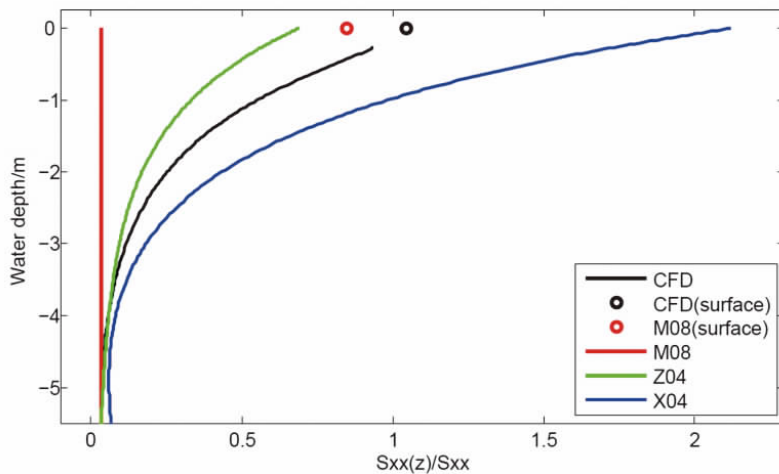


图5 垂向辐射应力对比

Fig. 5 Comparison between radiation stress theories

综上所述,在表层,M08 理论计算结果与数值水槽结果较为接近;在表层以下,Z04 能较好地反映辐射应力的变化趋势。

3.2 深水波动实验

在深水情形下,取 $x=50\text{m}$ 位置处液面高度随时间变化,并与理论解作对比,(见图 6)。可以看出,波形稳定后,水槽模拟的波形与理论结果符合良好。取 $t=48.16\text{s}$ 至 $t=50.68\text{s}$ 一个波动周期内水质点速度和压强的断面数据,计算辐射应力的垂向结构。

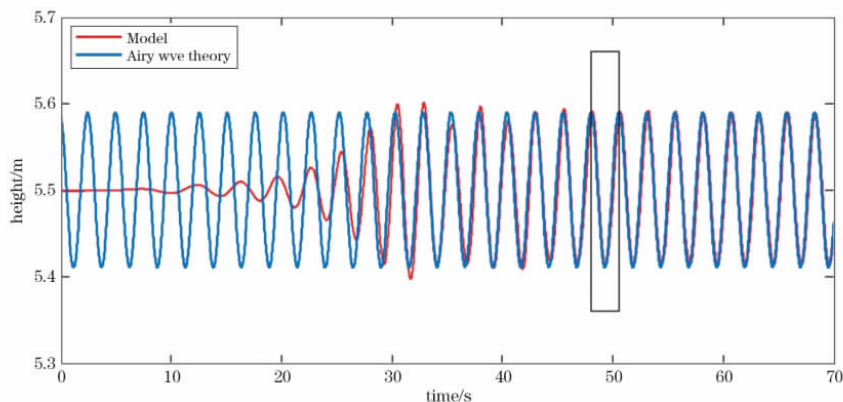


图 6 $x=50\text{m}$ 处波面高度时间序列

Fig. 6 Time series of wave height at $x=50\text{m}$

利用 LHS 定义计算的辐射应力垂向分布(见图 7)。由图可知,自底层向上,辐射应力缓慢增加。在表层,辐射应力突然变大,在平均水面位置达到极值,然后又迅速减小至零。

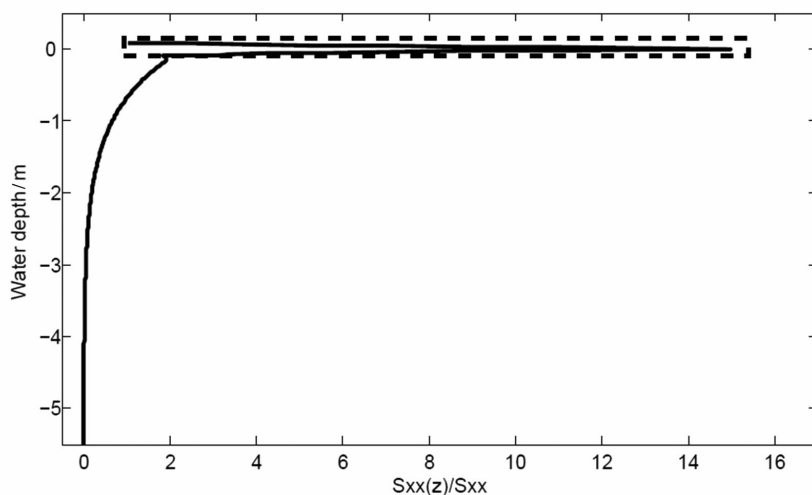


图 7 辐射应力垂向分布

Fig. 7 Vertical profile of radiation stress

由于在表层辐射应力的不连续性,将其在薄层内积分(见图 8 中黑色圆圈)。另外,将数值水槽计算的波浪要素带入理论公式,可得辐射应力垂向分布。可以看出,M08 理论值在表层以下不随水深变化,在表层计算结果比水槽计算结果小。X04 理论解向底层变大,且在一定深度出现负值,与实际不相符。在上层区域,X04 计算结果总体上大于水槽模拟结果。Z04 理论值在底部与模拟值符合良好,向上小于模拟结果。在平均水面,Z04 理论解与模拟值较为接近。

综上,对于深水线性波动,Z04 理论能较好反映辐射应力垂向结构。

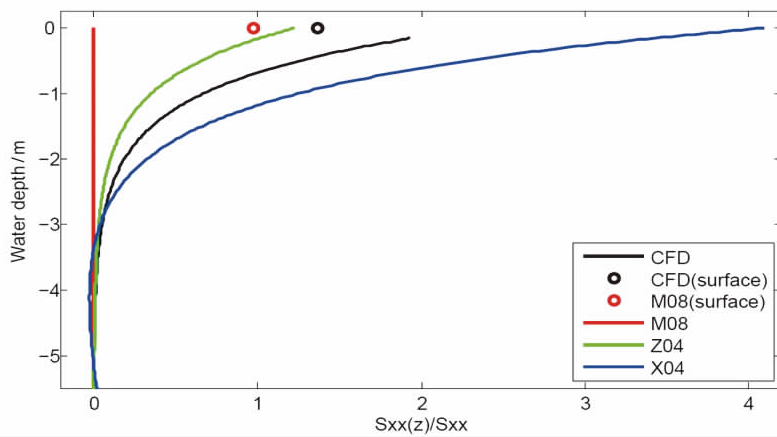
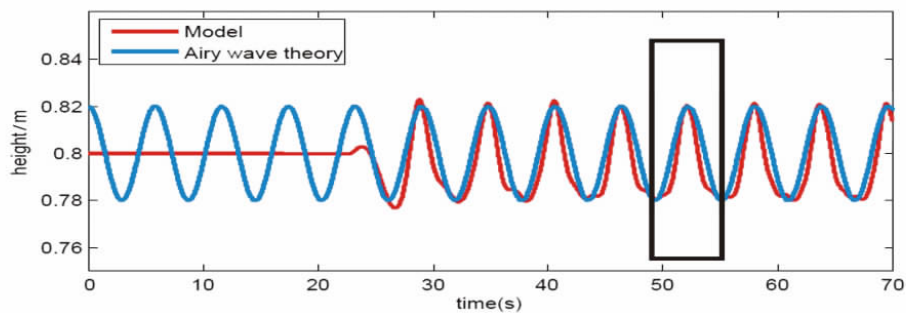


图8 垂向辐射应力对比

Fig. 8 Comparison between radiation stress theories

3.3 浅水波动实验

在浅情形下,取 $x=64\text{m}$ 位置处液面高度随时间变化,并与理论解作对比(见图9)。可以看出,波形稳定后,水槽模拟的波形与理论结果总体符合较好,波动在波谷处可能受水槽底部的影响使得波形与理论波形有所差异。取 $t=49.36\text{s}$ 至 $t=55.14\text{s}$ 一个波动周期内水质点速度和压强的断面数据,计算辐射应力的垂向结构。

图9 $x=64\text{m}$ 处波面高度时间序列Fig. 9 Time series of wave height at $x=64\text{m}$

利用 LHS 定义计算的垂向辐射应力分布(见图10)。可以发现,自底层向上,辐射应力增幅很小。在表层,辐射应力突然变大,在平均水面位置达到极值,然后又迅速减小至零。

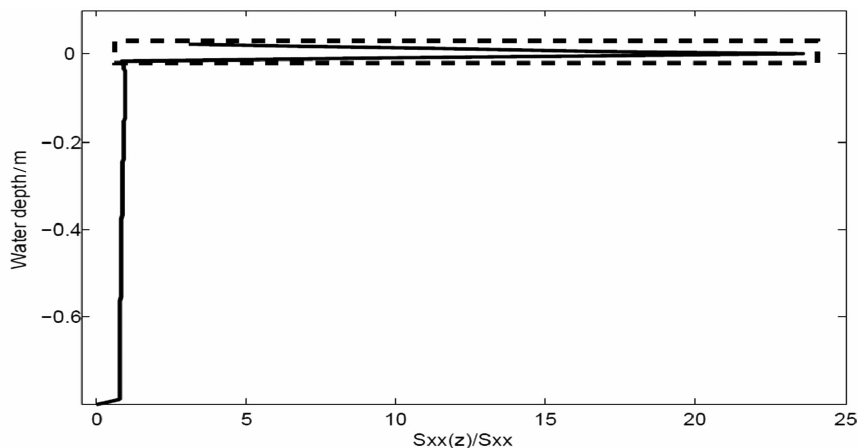


图10 辐射应力垂向分布

Fig. 10 Vertical profile of radiation stress

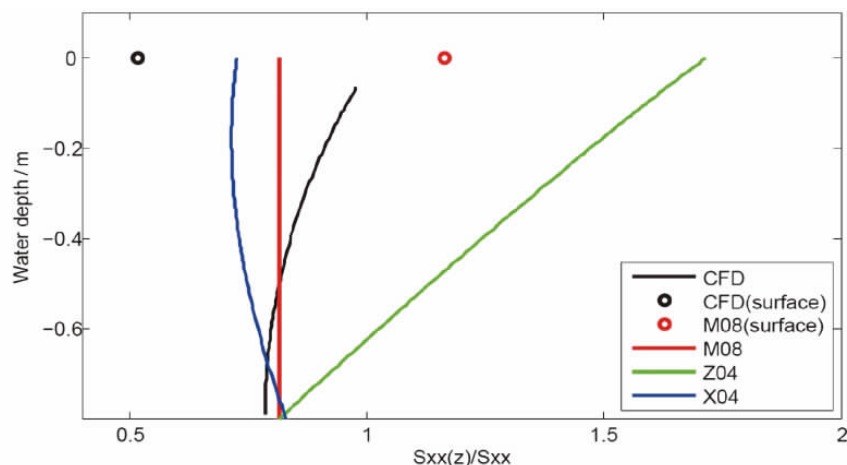


图 11 垂向辐射应力对比

Fig. 11 Comparison between radiation stress theories

由于表层内辐射应力的不连续性, 将其在薄层内积分 (见图 11 中黑色圆圈)。将一个波动周期内模拟数据带入理论公式, 可得辐射应力垂向分布结构。可以看出, X04 理论解自底层向上逐渐减小, 在表层有所增加, 与水槽模拟结果差别较大, 说明 X04 不适合用于浅水波情形。Z04 理论得到向上逐渐增大的辐射应力结构, 与水槽计算结果趋势一致, 但结果偏大。M08 理论值在表层以下不随水深变化, 大小与水槽计算结果接近, 在表层位置理论结果偏大。

综上, 对于浅水小振幅波动, 采用 M08 理论能较好计算垂向辐射应力大小。

4 结论

本文通过建立波浪数值水槽, 计算了不同入射波情形下波浪辐射应力, 发现对辐射应力的计算应分为两部分, 波峰至波谷区域和波谷以下区域。将数值水槽数据带入 3 种垂向辐射应力理论中, 可以发现对于有限水深线性波动, M08 理论在表层较为适用。在表层以下, Z04 理论更能反映辐射应力的垂向结构; 对于深水线性波动, Z04 理论在表层及以下的计算结果优于其它两种理论解; 对于浅水线性波动, M08 理论计算结果更符合实际。为了进一步验证上述理论的有效性, 可考虑增加个例数量, 如更改入射波参数, 设置不同湍流方案等。

参考文献

- [1] Longuet-Higgins M S, Stewart R W. Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1960, 8(4):565-583.
- [2] Longuet-Higgins M S, Stewart R W. Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications[J]. Deep Sea Research & Oceanographic Abstracts, 1964, 11(4):529-562.
- [3] J. Bowen, D. L. Inman, V. P. Simmons. Wave 'set-down' and set-Up[J]. Journal of Geophysical Research, 1968, 73(8):2569-2577.
- [4] Thornton E B. Variation of Longshore Current Across the Surf Zone[C]// Coastal Engineering (1970). ASCE, 2013.
- [5] Longuet-Higgins, M. S. Longshore currents generated by obliquely incident sea waves: 1[J]. Journal of Geophysical Research, 1970a, 75, 6778-6789.
- [6] Longuet-Higgins, M. S. Longshore currents generated by obliquely incident sea waves: 2[J]. Journal of Geophysical Research, 1970b, 75, 6790-6801.
- [7] Cobb M, Blain C A. Simulating wave-tide induced circulation in Bay St. Louis, MS with a coupled hydrodynamic-wave model[C]// Oceans. 2002:1494 -1500.
- [8] Choi J, Yoon S B. Numerical simulations using momentum source wave-maker applied to RANS equation model[J]. Coastal Engineering, 2009, 56(10):1043-1060.
- [9] Xie L, Liu H, Peng M. The effect of wave current interactions on the storm surge and inundation in Charleston Harbor during Hurri-

- cane Hugo 1989[J]. *Ocean Modelling*, 2008, 20(3):252-269.
- [10] Xia H, Xia Z, Zhu L. Vertical variation in radiation stress and wave-induced current[J]. *Coastal Engineering*, 2004, 51(4):309-321.
- [11] Cucco A, Sinerchia M, Ribotti A, et al. A high-resolution real-time forecasting system for predicting the fate of oil spills in the Strait of Bonifacio (western Mediterranean Sea)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(64):1186-200.
- [12] Ferrarin C, Roland A, Bajo M, et al. Tide-surge-wave modelling and forecasting in the Mediterranean Sea with focus on the Italian coast[J]. *Ocean Modelling*, 2012, 61(1):38-48.
- [13] Zhang D. Numerical simulation of large-scale waves and currents[J]. *Masters*, 2005.
- [14] Liang B C, Li H J, Zhang J. Study of wave induced radiation stress and vertical mixing in the Yellow River runoff diffusion[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2010, 22(5):97-100.
- [15] 东野大明, 武国相, 等. 垂向变化的波浪辐射应力影响下流场数值研究[J]. *海岸工程*, 2010, 29(3):1-10.
- [16] Mellor G. The Three-Dimensional Current and Surface Wave Equations[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2005, 33(9):1978-1989.
- [17] Mellor, G. L. Corrigendum[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2005, 35, 2304-2304.
- [18] Mellor G L. The Depth-Dependent Current and Wave Interaction Equations: A Revision[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2008, 38(11):2587.
- [19] Haas K A, Warner J C. Comparing a quasi-3D to a full 3D nearshore circulation model: SHORECIRC and ROMS[J]. *Ocean Modelling*, 2009, 26(1 2):91-103.
- [20] Wang J H, Shen Y M. Development and validation of a three-dimensional, wave-current coupled model on unstructured meshes[J]. *Science China Physics Mechanics & Astronomy*, 2011, 54(1):42-58.

Study of Radiation Stress Theories Based on Numerical Wave Flume

LI Shuo, LI Rui, and GUAN Changlong

(1. College of Oceanic and Atmosphere Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;
2. North China Sea Marine Forecasting Center of State Oceanic Administration,
Qingdao 266100, China)

Abstract: There exist several theories about the vertical profile of wave radiation stress, and the verification of these theories is seldom done. In the present paper, an idealized numerical wave flume is established based on Computational Fluid Dynamics (CFD) software FLUENT, upon which the linear waves are simulated. The results show that the proposed numerical wave tank is effective in simulation. The vertical structure of wave radiation stress is studied and it is concluded that the radiation stress in surface experiences a dramatic change due to wave action. It is shown that the integration of radiation stress in surface region is discontinuous with that within fluid. The validity of the above-mentioned theories is tested in experiments with different incident waves on the basis of linear wave theory. The comparison between numerical outcome and theoretical ones is conducted and it is shown that the validity of theories depends on both wave type and calculation region.

Key words: ocean wave; radiation stress; numerical wave flume