

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2020.03.010

基于 MPS-FEM 方法数值模拟孤立波与垂直板的相互作用*

许彦章, 万德成

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室 船海计算水动力学研究中心 (CMHL), 上海 200240, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn)

摘要: 该文采用基于 MPS-FEM 方法自主开发的无网格法流固耦合求解器 MPSFEM-SJTU, 数值模拟孤立波与水下垂直板的相互作用。流体部分计算采用 MPS 方法, 结构部分计算采用 FEM 方法, 二者在接触面处采用核函数插值进行耦合。首先做了数值造波验证, 孤立波采用推板造波。然后对比分析了孤立波分别与垂直刚性板和弹性板相互作用的差异。最后讨论分析板的弹性模量对孤立波与垂直板相互作用的影响。结果表明, 弹性板对孤立波演化的影响与刚性板不同, 同时板受到的压力也因为板的弹性模量的变化而不一样。

关键词: MPSFEM-SJTU 求解器; 孤立波; 垂直板

中图分类号: O352

文献标志码: A

Application of MPS-FEM method to numerical simulate the interaction between solitary wave and a vertical plate

XU Yan-zhang, WAN De-cheng

(Computational Marine Hydrodynamics Lab (CMHL), State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: This paper investigates the interaction between solitary wave and vertical plate by our in-house MPSFEM-SJTU solver based the Moving Particle Semi-implicit and Finite element method (MPS-FEM). The fluid domain is calculated by MPS method, while the solid domain is computed by FEM method. The kernel function-based interpolation technique is implemented to deal with the coupling interface. First, the piston-type wave-maker is employed to generated the solitary wave and the accuracy of wave generations is tested. Then, the interaction between solitary wave and an elastic vertical plate is compared with

* **收稿日期:** 2019-11-23(2019-11-30 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879159, 51809169), 国家重点研发计划项目(2019YFB1704200, 2019YFC0312400), 长江学者奖励计划(T2014099), 上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300)

作者简介: 许彦章(1993-), 男, 湖北荆州人, 硕士研究生。

通讯作者: 万德成, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

Received: November 23, 2019 (**Revised** November 30, 2019)

Project supported by foundations: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51879159, 51809169), the National Key Research and Development Program of China (2019YFB1704200, 2019YFC0312400), Chang Jiang Scholars Program (T2014099) and the Shanghai Excellent Academic Leaders Program (17XD1402300)

Biography: XU Yan-zhang (1993-), Male, Master Candidate.

Corresponding author: WAN De-cheng, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

that between solitary wave and a rigid vertical plate. Finally, the interaction between solitary wave and elastic plates with different Young modulus is conducted to study the influence of plates' Young modulus on the interaction. The result shows that differences between the influence of a rigid plate and that of an elastic plate on the wave evolution and pressure impacted on the plate changes along with the change of the plate's Young modulus.

Key words: MPSFEM-SJTU solver; solitary wave; vertical plate

引言

波浪与结构物的相互作用是船舶与海洋工程领域被广泛关注的问题。一方面波浪的砰击作用会对结构物造成破坏, 这严重影响海洋结构物的使用。另一方面, 结构物的存在又会影响波浪的演化。因此, 关于结构物与波浪的相互作用的研究对近海工程和海洋结构物的设计具有实际意义。由于该过程伴随着自由面的剧烈变化, 例如波浪翻卷和破碎等, 这给相关的研究带来了困难。

相关的研究包括实验研究和数值仿真已经取得了很大的成果。Seiffert等^[1]进行了大量实验, 研究了孤立波与水平板的砰击作用, 重点考察了不同水深、波高和甲板净空对砰击压力的影响, 结果表明最大砰击压力与波高近似成正比, 但是水深变化对砰击压力的影响并不显著。Allsop等^[2]通过实验, 研究了斜坡上波浪破碎对竖直壁面的砰击压力, 分析了斜坡形状参数对砰击过程的影响, 结果表明砰击压力的最大值发生在波浪与壁面接触的位置附近。Nelli等^[3]对规则波与漂浮板的相互作用进行了实验, 分析了弹性板对波浪传递和反射的影响, 实验结果表明由于上浪和破碎导致的波浪能量耗散, 规则波的波幅在经过弹性板后显著降低。刘明^[4]研究了波浪对弹性支撑平板结构冲击作用。数值仿真包括网格法和无网格法。网格类方法在波浪砰击问题中被广泛应用, 并取得了许多成果。其中, Seiffert等^[5]采用开源CFD软件OpenFOAM, 基于有限体积法, 数值模拟了孤立波对水平板的砰击作用, 研究了数值水池水深、平板距离水面的距离以及孤立波波高等参数对砰击载荷的影响, 结果表明平板距离水面越近和波高越大则平板所受的砰击合力越大。马哲^[6]采用有限体积法与有限单元法结合的方法, 数值模拟了波浪对不同倾斜角平台甲板的砰击作用。范从军等^[7]借助线性势流理论, 对波浪与竖直板的相互作用进行了分析。Liu^[8]采用边界元法(BEM)和有限元法结合的方法, 模拟了二维弹性板在波浪载荷下的水弹性响应。

然而, 上述网格法在处理自由面的非线性和物质的不连续问题时, 例如波浪的翻卷和破碎等现象时, 仍然存在一些困难。无网格粒子方法基于流体的拉格朗日描述, 能够很好地处理这些自由面大变形以及强非线性的现象。Sriram等^[9]通过改进后的MLPG_R (Meshless Local Petrov Galerkin method

with Rankine source solution)方法数值模拟了波浪破碎对弹性结构物的砰击。Gomez-Gesteira等^[10]采用SPH方法数值模拟了平板的上浪问题, 主要分析了平板对波浪演化的影响。郑坤^[11]采用SPH方法数值模拟了三维规则波对水平板的砰击作用, 研究了规则波波高、周期和相对净空对砰击压力的影响, 并分析了砰击压力的幅值。Rao等^[12-14]采用MPS与FEM结合的方法, 数值模拟了二维孤立波对弹性水平板的砰击作用。Yang等^[15]采用SPH-FEM方法模拟了流固耦合现象。Khayyer等^[16-20]提出了修正的光滑粒子半隐式方法, 然后采用多相流不可压缩方法研究了波浪与板之间的砰击。本文基于之前对波浪与板相互作用问题的研究成果, 采用自主开发的无网格法流固耦合求解器MPSFEM-SJTU^[21-26], 研究了孤立波与垂直刚性板和垂直弹性板的相互作用, 并分析了板的杨氏模量对孤立波与平板相互作用的影响。

1 数值方法

1.1 光滑粒子半隐式方法

1.1.1 控制方程

MPS方法采用的控制方程是针对黏性不可压缩流体, 由连续性方程和动量方程组成, 其表达是如下

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{V}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{V} + \mathbf{g} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度, p 为压强, \mathbf{V} 为速度矢量, \mathbf{g} 为重力加速度, ν 为动力黏性系数, t 为时间。在MPS方法中, 我们借助核函数来建立起不同粒子间的相互关系, 从而近似得出控制方程中的微分算子。

1.1.2 粒子相互作用的模型

在粒子法中, 粒子间的相互影响是通过核函数来实现的, 它是关于粒子间距 $W(r)$ 的函数, 具有单调递减的性质。核函数的形式可以有很多种, 而且不同形式核函数对数值结果影响重大。本文使用的MLParticle-SJTU求解器中, 采用了改进的核函数(Zhang等^[21]), 如下所示

$$W(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{0.85r + 0.15r_e} - 1 & 0 \leq r < r_e \\ 0 & r_e \leq r \end{cases} \quad (3)$$

式中： r_e 为粒子的影响半径，在本文中取为2.1倍的初始粒子间距， r 为不同的粒子间的距离。该核函数的优点就是能够避免零点处的奇异性。

1.1.3 数学算子模型

在MPS方法中，粒子相互之间的作用还涉及到梯度模型，散度模型和拉格朗日模型。本文采用的模型分别如下

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{D}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{\phi_j + \phi_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \cdot W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (4)$$

$$\langle \nabla \cdot \mathbf{V} \rangle = \frac{D}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{(\mathbf{V}_j - \mathbf{V}_i)}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \cdot W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \right] \quad (5)$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2D}{n^0 \lambda_i} \sum_{j \neq i} (\phi_j - \phi_i) \cdot W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2}{\sum_{j \neq i} W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)} \quad (7)$$

式中： D 为维度， r 为位置矢量， λ 的引入是为了使数值结果与扩散方程的解析解相一致， n^0 为初始粒子数密度。在MPS方法中，粒子数密度定义为

$$\langle n \rangle_i = \sum_{j \neq i} W(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (8)$$

梯度模型方程(5)与拉普拉斯模型(7)被用来离散流体的连续性方程(1)以及动量方程(2)，其中梯度模型被用来近似方程中的一阶导数项，而拉普拉斯模型被用来离散控制方程中的二阶导数项。散度模型方程(6)被用来离散速度梯度项。

1.1.4 不可压缩模型

在MPS方法中，粒子的压力是通过求解泊松方程(Poisson's pressure equation)获得的。本文采用混合源项的泊松压力方程，该方法将速度散度和粒子数密度组合成右端源项，其表达式如下

$$\langle \nabla^2 P^{n+1} \rangle_i = (1 - \gamma) \frac{\rho}{\Delta t} \nabla \cdot \mathbf{V}_i^* - \gamma \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{\langle n^* \rangle - n^0}{n^0} \quad (9)$$

式中： Δt 为计算时间步长， n 和 $n+1$ 为物理量在第 n 和 $n+1$ 之间的变化。 γ 为泊松方程源项中，粒子数

密度的权重。若取较小的 γ 值，则速度散度所占的权重越大，求解获得的压力场越光滑。然而，过小的 γ 往往带来一些问题，如流体体积的不守恒。这是因为速度散度在数值计算中难免会存在误差。在本文中， γ 的取值范围为0.01-0.05。

1.1.5 自由表面粒子判断

自由表面条件包括运动边界条件和动力边界条件。在MPS方法中，流体为单相流动，因此相对于内部流场而言，自由液面附近处的粒子通常具有较小的粒子数密度。在传统的MPS方法中，基于该特点来判断自由表面粒子。当粒子被判定为自由面粒子，然后在求解压力Poisson方程时，该自由面粒子的压力被设为零，以满足自由面的动力学边界条件。本文采用一种改进的自由面判断方法，该方法基于邻居粒子不对称性进行自由面的判断，矢量函数 \mathbf{F} 被引入来表示粒子分布的不对称性，如下所示

$$\langle \mathbf{F} \rangle_i = \frac{D}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) W(r_{ij}) \quad (10)$$

若粒子满足 $\langle \mathbf{F} \rangle_i > \alpha$ ，则被判定为自由面粒子。 α 通常取为 $0.9|\mathbf{F}|^0$ ， $|\mathbf{F}|^0$ 初始时刻自由面粒子的 $|\mathbf{F}|$ 值。

1.1.6 MPS求解流程

MPS方法中的一个时间步的计算过程分成两步，包括基于质量力和黏性力的显式修正，以及压力的隐式修正。其具体求解过程如下。

以黏性力和质量力为源项对粒子速度进行显式修正，获得临时速度 \mathbf{V}_i^* ，并使粒子按照该速度移动至临时位置 \mathbf{r}_i^*

$$\mathbf{V}_i^* = \mathbf{V}_i^k + \Delta t (\nu \nabla^2 \mathbf{V} + \mathbf{g}) \quad (11)$$

$$\mathbf{r}_i^* = \mathbf{r}_i^k + \Delta t \cdot \mathbf{V}_i^* \quad (12)$$

式中： Δt 为时间步长。

①计算粒子在临时位置处的粒子数密度；②求解压力Poisson方程，获得下一时刻的压力；③根据求得的压力，对速度和粒子位置进行隐式修正

$$\mathbf{V}_i^{k+1} = \mathbf{V}_i^* - \frac{\Delta t}{\rho} \nabla P^{k+1} \quad (13)$$

$$\mathbf{r}_i^{k+1} = \mathbf{r}_i^k + \Delta t \cdot \mathbf{V}_i^{k+1} \quad (14)$$

1.2 有限元理论

根据有限单元法的理论，结构离散化后，节点

的动力平衡方程可以写成如下的形式

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{y}} + \mathbf{K} \mathbf{y} = \mathbf{F}(t) \quad (15)$$

$$\mathbf{C} = \alpha_1 \mathbf{M} + \alpha_2 \mathbf{K} \quad (16)$$

式中: \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 和 \mathbf{K} 分别为结构的质量、阻尼以及刚度矩阵。 $\mathbf{F}(t)$ 为结构的外力矩阵, 通常随着时间而变化。 \mathbf{y} 为节点的位移。 α_1 与 α_2 分别为与自然频率和结构阻比相关的阻尼系数。本文采用Newmark- β 方法求解结构动力学问题。求解过程如下。

- ① 根据流体粒子压力获得结构单元力矩阵 $\mathbf{F}(t + \Delta t)$;
- ② 形成结构系统的质量矩阵 \mathbf{M} , 阻尼矩阵 \mathbf{C} 以及刚度矩阵 \mathbf{K} 。其中阻尼矩阵为 \mathbf{M} 和 \mathbf{K} 的线性组合;
- ③ 获得已知节点的坐标 \mathbf{y}_i , 速度 $\dot{\mathbf{y}}_i$ 以及加速度 $\ddot{\mathbf{y}}_i$;
- ④ 将控制方程转换成单一形式 $\bar{\mathbf{K}} \cdot \mathbf{y}_{t+\Delta t} = \bar{\mathbf{F}}^n$, 其中 $\bar{\mathbf{K}}$ 和 $\bar{\mathbf{F}}^n$ 分别为有效刚度矩阵和有效力矩阵;
- ⑤ 求解上述线性方程组并获得下一时间步的节点坐标 $\mathbf{y}_{t+\Delta t}$;
- ⑥ 根据节点坐标求得相应的节点速度 $\dot{\mathbf{y}}_{t+\Delta t}$ 和加速度 $\ddot{\mathbf{y}}_{t+\Delta t}$ 。

1.3 流固耦合策略

本文采用分区耦合的方式求解流固耦合问题, 其中结构和流体域的计算分别采用移动粒子半隐式和有限单元法。在MPS-FEM耦合方法中, 流体域被离散为许多个粒子, 而结构域被离散为有限单元, 然后在界面处通过核函数插值技术进行插值实现耦合。流固耦合界面处信息传递如图1所示。

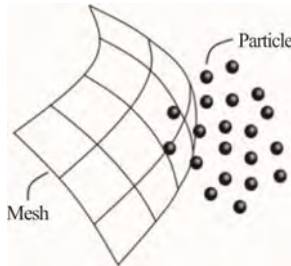


图1 流体和结构域的交界面
Fig.1 The fluid-structure boundary

首先, 流体域采用MPS方法, 为了得到结构节点上所受的流体粒子的合力, 边界层粒子的作用力需要做一个平均。如下式所示

$$\mathbf{F}_n = \frac{\sum_i \mathbf{F}_i \cdot w(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_n|)}{\sum_i w(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_n|)} \quad (17)$$

$$F_i = P_i l_0^2 \quad (18)$$

式中: F_n 为结点 n 受到的流体总力, F_i 为流体粒子的流体力, P_i 为流体粒子 i 的压力, l_0 为流体粒子间的初始间距, 核函数 $w(|\mathbf{r}_n - \mathbf{r}_i|)$ 为粒子 i 的流体力对单元结点 n 的权重。

其次, 结构域通过FEM计算, 固-液交界面处满足不可穿透条件, 即流体在边界的法向速度与结构相同, 因此在交界面处需要对粒子施加强制位移。在此同样用到了上一节的核函数插值技术

$$\delta_i = \frac{\sum_m \delta_m \cdot w(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_m|)}{\sum_m w(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_m|)} \quad (19)$$

式中: δ_i 为流体粒子 i 的强制位移, δ_m 为粒子作用半径内结点 m 对流体粒子 i 贡献的位移, 核函数 $w(|\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_i|)$ 为单元位移插值过程中的权重。

2 数值模拟

本节借助MPSFEM-SJTU求解器, 数值模拟了孤立波与垂直板的相互作用。水槽的几何模型以及垂直板如图2所示。水槽长2.5 m, 水深(H)0.114 m。

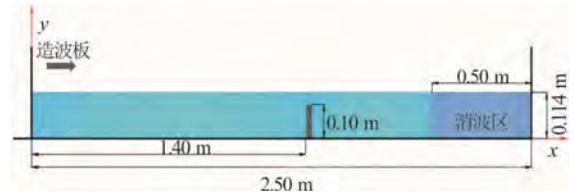


图2 (网上彩图) 二维数值水池模型
Fig.2 (Color online) 2D numerical tank model

2.1 数值造波

数值造波的准确性是后续研究孤立波与垂直板相互作用的基础。本小节在没有垂直板的空水槽中进行数值造波验证, 其中孤立波采用推板造波。不同波高(A)的孤立波, $A/H=0.25$ 、 $A/H=0.35$ 、 $A/H=0.45$ 和 $A/H=0.55$ 分别在水槽中产生, 并将沿水槽长度方向不同位置监测的波高与理论值进行比较。表1为二维数值造波计算参数。

图3对比了数值模拟与理论值的孤立波波峰, 尽管两者仍存在一些细微差别, 但是通过对比可以看出本求解器产生的孤立波波峰与理论值吻合较好, 而且孤立波波峰在传播过程中保持良好, 并无明显衰减。因此, 本求解器能够产生较为理想的二维孤立波。

表 1 二维数值造波计算参数

Table 1 The computational parameters of 2D wave making

参数	值
密度/kg·m ⁻³	1 000
水深/m	0.144
运动粘度/m ² ·s ⁻¹	1×10 ⁻⁶
重力加速度/m·s ⁻²	9.81
粒子间距/mm	0.2
流体粒子数	71 193
总粒子数	76 167

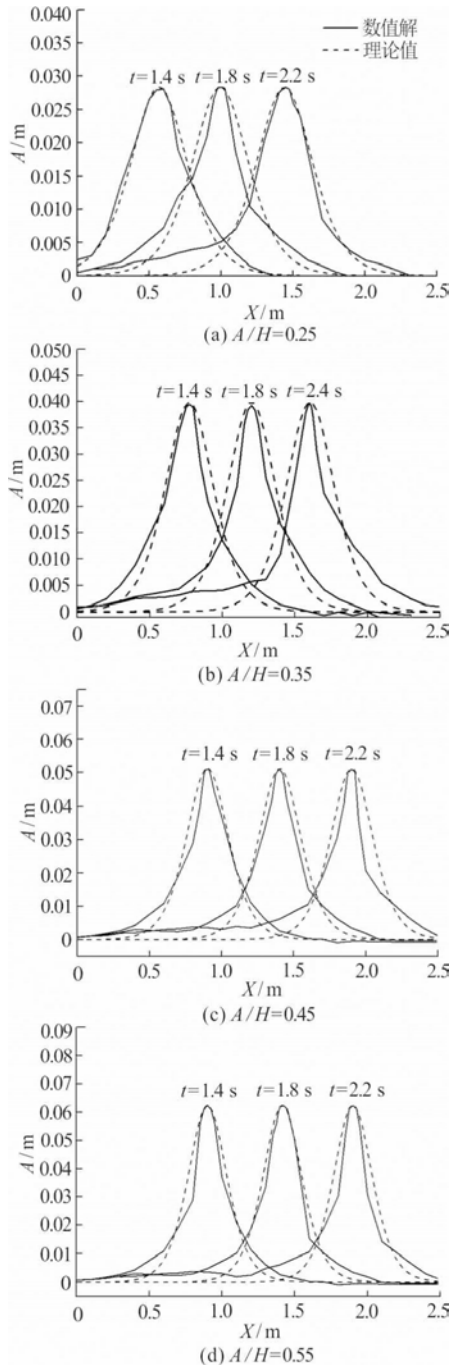


图 3 数值孤立波波形与理论值
Fig.3 The comparison between the theoretical solutions and numerical results

2.2 孤立波与刚性板的相互作用

本节研究了不同波高 $A/H=0.25$ 、 $A/H=0.35$ 、 $A/H=0.45$ 和 $A/H=0.55$ 下孤立波与垂直刚性板的相互作用。表2给出了孤立波与垂直板的相互作用的计算参数，此时垂直板取为刚性。图4给出了孤立波与垂直板相互作用的过程。当 $t=1.5$ s时，孤立波的波峰接近垂直板，当 $t=1.6$ s- 1.7 s时，孤立波经过垂直板，由于板的存在，孤立波骤然接触到板左端，传递过程受阻，波高会有抬升，其后，由于板的存在导致能量耗散，孤立波的波峰有所减弱，并且出现第二个波峰。当孤立波完全通过垂直板时，波峰有较大减弱，且波面伴随着破碎的现象。由此可以看出，垂直板的存在影响了孤立波的传递，耗散了孤立波的能量。

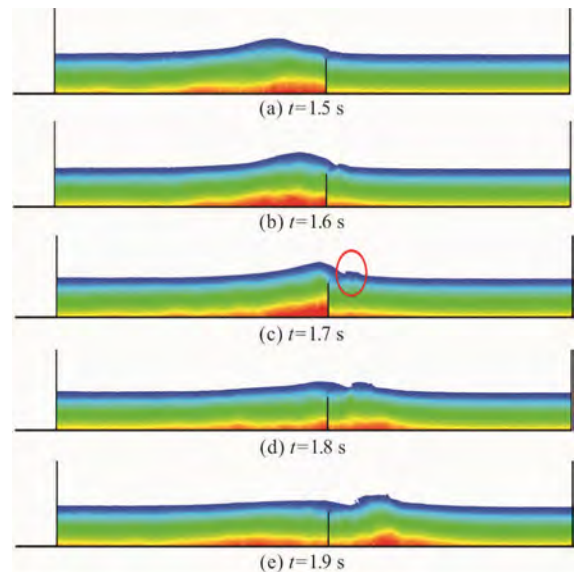


图 4 (网上彩图)孤立波与结构物相互作用的过程($A/H=0.45$)
Fig.4 (Color online) The interaction between solitary wave and vertical plate ($A/H=0.45$)

图5给出了不同波高的孤立波与刚性板的相互作用的速度矢量图。当孤立波高较小时($A/H=0.3$)垂直板的存在对孤立波的演化存在影响，但是影响不明显，且当孤立波经过垂直板后，波浪的破碎现象不显著。但是随着波高的增加，垂直板的存在对孤立波的影响增加，孤立波在经过垂直板时波峰有明显的下降，同时孤立波通过垂直板后，伴随有明显的破碎。特别是在 $t=2.0$ s- 2.1 s时($A/H=5.5$)，波浪出现空穴和较大破碎，这都耗散了波浪的能量。因此在实际应用中可以设置类似的结构去消耗波浪的能量，减弱波浪对后续结构物的破坏，如设置结构物保护河岸免受波浪的侵蚀等。

2.3 孤立波与弹性板的相互作用

本节研究了不同波高 $A/H=0.25$ 、 $A/H=0.35$ 、 $A/H=0.45$ 和 $A/H=0.55$ 下孤立波与垂直弹性板的相互

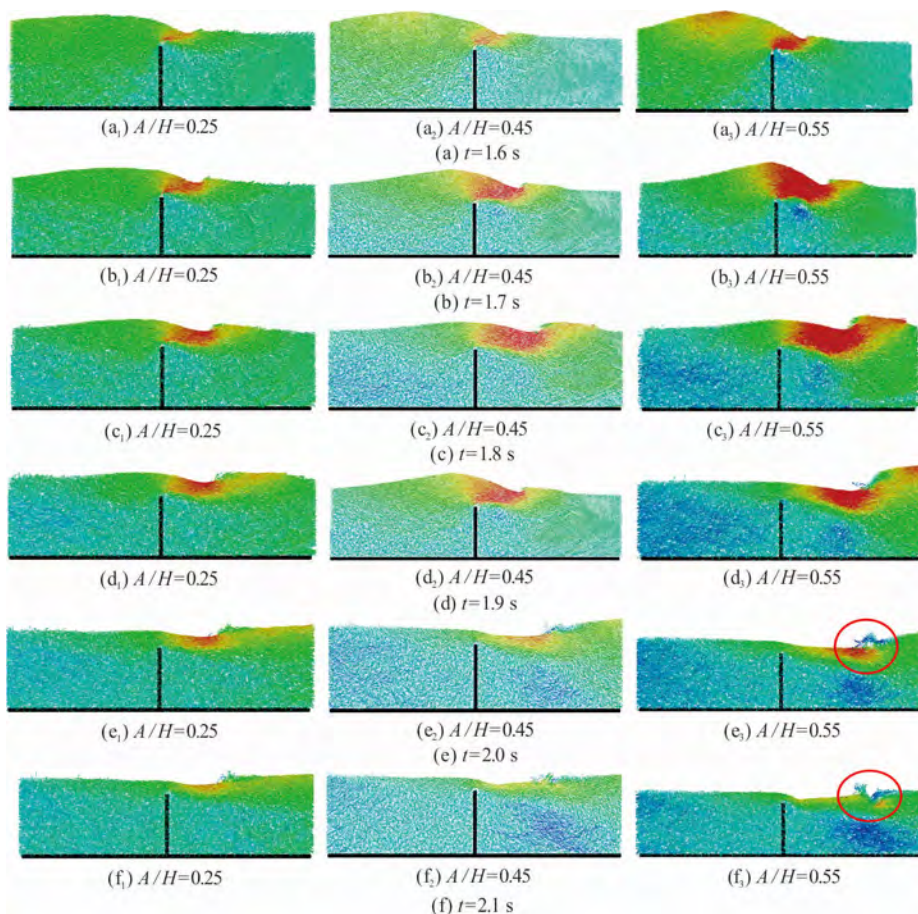


图 5 (网上彩图)不同波高下孤立波与水平板相互作用

Fig.5 (Color online) The interaction between solitary with different wave height and vertical plate

作用。并研究了弹性板杨氏模型对孤立波与弹性板相互作用的影响。表2给出了孤立波与垂直板相互作用的计算参数, 此时板取为弹性, 弹性模量为 15 Mpa。

表 2 孤立波与垂直板相互作用的计算参数

Table 2 The computational parameters of interaction between solitary wave and vertical plate

参数		值
流体	密度/kg·m ⁻³	1 000
	水深/m	0.114
	运动黏度/m ² ·s ⁻¹	1×10 ⁻⁶
	重力加速度/m·s ⁻²	9.81
	粒子间距/mm	0.2
	流体粒子数	71 193
结构	结构密度/kg·m ⁻³	1 100
	横截面积/m ²	0.012
	惯性矩/m ⁴	1.44×10 ⁻⁷
	单元数	32
	阻尼系数 α ₁	0
	阻尼系数 α ₂	0.025

2.3.1 孤立波与弹性板和刚性板相互作用对比

本小节研究了孤立波与弹性垂直板的相互作用, 并对比了孤立波与刚性板的相互作用, 计算参

数如表2所示。图6给出了孤立波与弹性板相互作用的过程。当t=1.5 s, 孤立波波峰接近垂直板, 由于水面的上升, 垂直弹性板两边存在一个压力差, 弹性垂直板发生弯曲。当t=1.6 s-1.7 s时, 孤立波经过

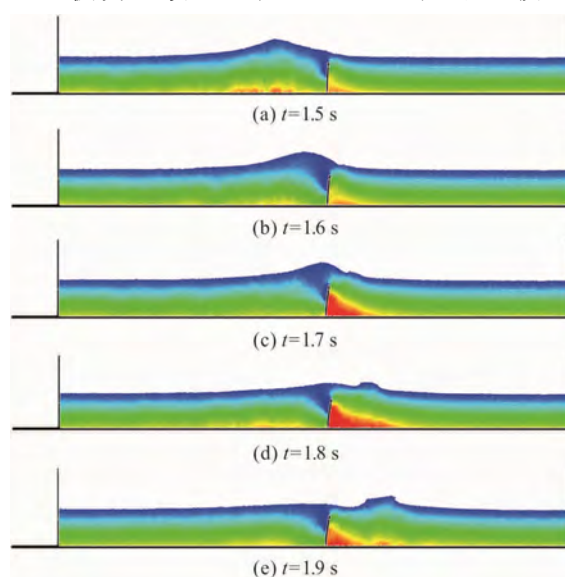


图 6 (网上彩图)孤立波与弹性结构物的作用(A/H=0.55)

Fig.6 (Color online) The interaction between solitary wave and elastic vertical plate (A/H=0.5)

垂直板，同样可以看到孤立波出现第二个波峰，这是由于板的存在影响了波的传播，孤立波峰值减弱，且弹性板发生较大弯曲。当孤立波完全通过垂直板后，孤立波峰值减弱。图7给出了垂直板端点的位移时历曲线。可以看出当 $t=1.7$ s时，孤立波经过垂直板，此时垂直板端点发生较大位移。

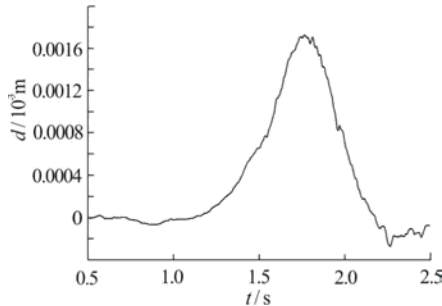


图7 弹性板中点处的位移时历曲线

Fig.7 The displacement of midpoint of the elastic vertical plate

图8给出了弹性垂直板与刚性垂直板分别与孤立波相互作用的速度矢量图。弹性板和刚性板对孤立波的传播均有明显的影响。但是相比于刚性板，孤立波在通过弹性垂直板后并没有明显的破碎，波面比较平滑，原因是板的弹性变形缓解了板对孤立波骤然的阻断，随着板的持续变形，孤立波平滑地传过板。但是板的存在都会导致波浪能量的耗散。

2.3.2 弹性模量对孤立波与弹性板相互作用的影响

本小节研究了垂直板的弹性模量对板与孤立波相互作用的影响。表3给出了改变弹性模量的计算工况。

表3 孤立波与弹性板相互作用的计算工况

Table 3 The computational cases of interaction between solitary wave and elastic vertical plate

工况	弹性模量 E /Mpa	波高 A/H
1	35	0.35
2	35	0.45
3	35	0.55
4	25	0.35
5	25	0.45
6	25	0.55
7	15	0.35
8	15	0.45
9	15	0.55

图9给出了不同弹性模量的弹性垂直板与孤立波相互作用的速度矢量图。板的存在会影响孤立波的传播，当孤立波经过垂直板时，由于板的阻碍，会产生第二个波峰，孤立波经过垂直板后，孤立波的幅值会减小，这是因为板的存在导致波能的消耗。当弹性模量较小时，垂直板产生较大变形，孤立波与垂直板的相互作用由于板的变形而变得缓和，孤立波经过垂直板后，尾部没有出现波浪破碎和空穴，但是随着弹性模量变大，板的变形变小，弹性板的作用越来越接近刚性板，波浪的第二个峰值越

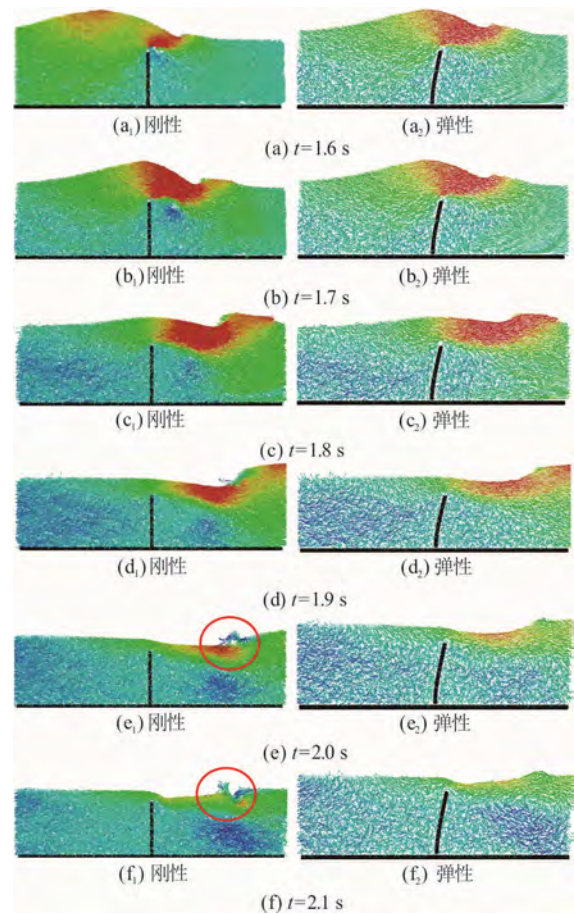


图8 (网上彩图)速度矢量图(左边为刚性, 右边为弹性, $A/H=0.55$)

Fig.8 (Color online) The interaction between solitary wave and elastic vertical plate ($A/H=0.5$)

来越明显，同时当孤立波经过垂直板后，会发现尾部开始逐渐出现波浪破碎的现象。说明在一定的波浪作用下，当板的弹性模量达到一定值时，弹性板的效用就可以近似为刚性板。

图10给出了不同弹性模量的垂直板在不同波高的孤立波作用下板端点受到的最大压力，可以发现当弹性模量较小时，即波的作用力会导致板产生较大变形时，此时板端点受到的最大压力较小，这是因为板的变形吸收了部分能量，减少了作用在板端点的压力。但随着弹性模量的增大，板的变形越来越小，此时板的作用就相当于刚性板，则此时垂直板端点受到的最大压力变大，逐步接近刚性板受到的压力。

3 结论

本文采用MPS-FEM方法数值模拟了垂直板与孤立波的相互作用。首先进行数值造波，并将波高的数值解与理论值进行对比，验证了采用自主开发

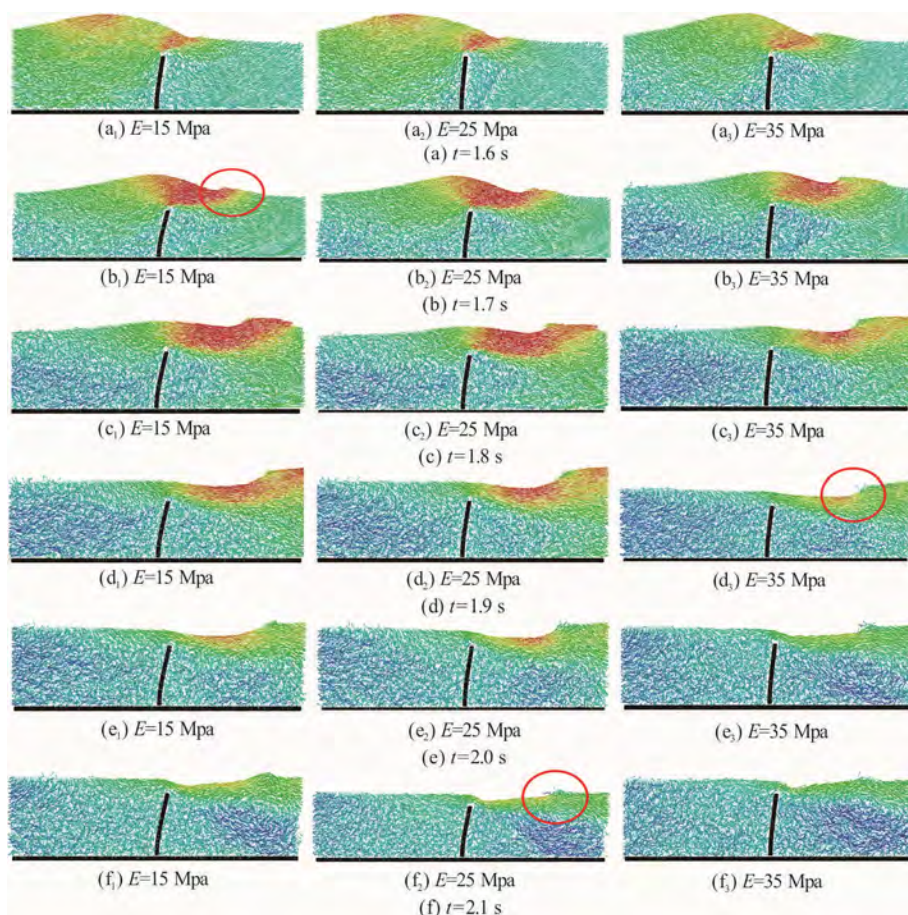


图 9 (网上彩图)孤立波与不同弹性模量垂直板的相互作用(从左到右依次是 15 Mpa, 25 Mpa, 35 Mpa)
Fig.9 (Color online) The interaction between solitary wave and elastic vertical plate with different Young modulus (from left to right, $E=15$ Mpa, 25 Mpa, 35 Mpa)

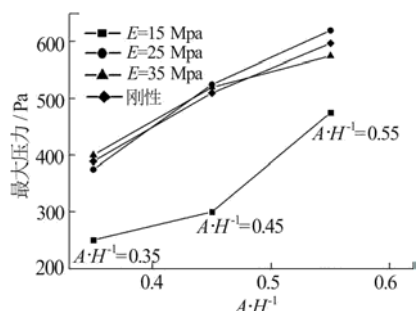


图 10 不同弹性模量板端点受到的最大压力
Fig.10 The max pressure acting on the plate with different elastic modulus

了不同弹性模量的板与孤立波的相互作用。结论表明, 在一定的波浪作用力下, 随着板弹性模量的增加, 板的弹性效应越来越弱, 存在一个临界弹性模量, 此时板的作用和刚性板相同。同时随着板弹性模量的增大, 作用在板端点的压力会逐步增大, 最终接近刚性板端点受到的压力。

致谢

本文工作还得到工信部数值水池创新专项课题(2016-23/09)资助项目。在此一并表示感谢!

参 考 文 献:

[1] SEIFFERT B, HAYATDAVOODI M, ERTEKIN R C. Experiments and computations of solitary-wave forces on a coastal-bridge deck. Part I: Flat plate[J]. Coastal Engineering, 2014, 88: 194-209.

的无网格法流固耦合求解器MPSFEM-SJTU造波模块的准确性。然后模拟了垂直刚性板与孤立波的相互作用, 发现垂直板的存在影响孤立波传播, 孤立波与垂直板的骤然接触会导致波高短暂增加, 接着由于板的存在导致波的能量耗散, 尾部出现波浪破碎, 空穴, 孤立波的幅值明显减小。接着对比了弹性板和刚性板分别与孤立波的相互作用, 发现弹性板对孤立波的作用相比刚性板缓和一些, 孤立波经过弹性垂直板后没有出现波浪破碎和空穴现象, 原因是弹性板的变形缓和了板和孤立波的相互作用。因此孤立波可以平稳地传过垂直板。最后分析

- [2] ALLSOP N W H, VICINANZA D, CALABRESE M, et al. Breaking wave impact loads on vertical faces[C]. Proceedings of the 6th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Los Angeles, USA, 1992.
- [3] NELLI F, BENNETTS L G, SKENE D M, et al. Reflection and transmission of regular water waves by a thin floating plate[J]. *Wave Motion*, 2017, 70: 209-221.
- [4] 刘明. 波浪对弹性支撑平板结构冲击作用的实验研究[D]. 大连理工大学, 大连, 中国, 2016.
LIU Ming. Experimental study of wave slamming on flat plate construction with elastic support[D]. Dalian University of Technology, Dalian, China, 2016.
- [5] SEIFFERT B, HAYATDAVOODI M, ERTEKIN R C. Experiments and computations of solitary-wave forces on a coastal-bridge Deck. Part I: Flat plate[J]. *Coastal Engineering*, 2014, 88: 194-209.
- [6] 马哲. 极端波浪作用下深水半潜式平台砰击与流固耦合效应[D]. 大连理工大学, 大连, 中国, 2014.
Ma Zhe. Wave slamming and its interaction effects with deepwater semi-submersible platforms under extreme wave conditions[D]. Dalian University of Technology, Dalian, China, 2014.
- [7] 范从军, 梁书秀, 孙昭晨. 时域内规则波作用下竖直板的水弹性响应[J]. *海洋工程*, 2013, 31(5): 37-44.
FAN Cong-jun, LIANG Shu-xiu, SUN Zhao-chen. Hydroelastic response of a vertical plate under regular wave action in time domain[J]. *The Ocean Engineering*, 2013, 31(5): 37-44.
- [8] LIU X D. Time domain analysis on the dynamic response of a flexible floating structure to waves[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2002, 128(1): 48-56.
- [9] SRIRAM V, MA Q W. Improved MLPG_R method for simulating 2D interaction between violent waves and elastic structures[J]. *Journal of Computational Physics*, 2012, 231(22): 7650-7670.
- [10] GÓMEZ-GESTEIRA M, CERQUEIRO D, CRESPO C, et al. Green water overtopping analyzed with a SPH model[J]. *Ocean Engineering*, 2005, 32(2): 223-238.
- [11] 郑坤. 基于 SPH 方法的波浪对水平板冲击作用研究[D]. 大连理工大学, 大连, 中国, 2010.
ZHENG Kun. Study on wave impact on horizontal plate based on SPH method[D]. Dalian University of Technology, Dalian, China, 2010.
- [12] RAO C P, WAN D C. Numerical study of the wave-induced slamming force on the elastic plate based on MPS-FEM coupled method[J]. *Journal of Hydrodynamic*, 2018(30): 70-78.
- [13] RAO C P, ZHANG Y L, WAN D C. Numerical simulation of the solitary wave interacting with an elastic structure using MPS-FEM coupled method[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2017(1-2): 1-10.
- [14] RAO C P, ZHANG Y L, WAN D C. FSI analysis of solitary wave interacting with horizontal flexible plate by MPS-FEM method[C]. Proceedings of the 27th International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE), San Francisco, USA, 2017.
- [15] YANG Q, JONES V, MCCUE L. Free-surface flow interactions with deformable structures using an SPH-FEM model[J]. *Ocean Engineering*, 2012, 55(15): 136-147.
- [16] KHAYYER A, GOTOH H. Modified moving particle semi-implicit methods for the prediction of 2D wave impact pressure[J]. *Coastal Engineering*, 2009, 56: 419-440.
- [17] KHAYYER A, GOTOH H. A higher order laplacian model for enhancement and stabilization of pressure calculation by the MPS method[J]. *Applied Ocean Research*, 2010, 32: 124-131.
- [18] KHAYYER A, GOTOH H. Enhancement of stability and accuracy of the moving particle semi-implicit method[J]. *Journal of Computational Physics*, 2011, 230: 3093-3118.
- [19] KHAYYER A, GOTOH H. A multiphase compressible-incompressible particle method for water slamming[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2016, 26: 20-25.
- [20] KHAYYER A, GOTOH H, FALAHATY H et al. An enhanced ISPH-SPH coupled method for simulation of incompressible fluid-elastic structure interactions[J]. *Computer Physics Communications*, 2018, 232: 139-164.
- [21] 张友林, 邹璐, 万德成. MPS-FEM 数值分析带自由面的流固耦合问题[J]. *计算力学学报*, 2017, 34(3): 330-335.
ZHANG You-lin, ZOU Lu, WAN De-cheng. Simulation of fluid-structure interaction with violent free surface by MPS-FEM coupled method[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2017, 34(3): 330-335.
- [22] ZHANG G Y, CHEN X, WAN D C. MPS-FEM coupled method for study of wave-structure interaction[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2019, 18(4): 387-399.
- [23] CHEN X, ZHANG Y L, WAN D C. Numerical study of 3-D liquid sloshing in an elastic tank by MPS-FEM coupled method[J]. *Journal of Ship Research*, 2019, 63(3): 143-153.
- [24] 田鑫, 万德成. MPS 方法模拟三维圆柱形液舱晃荡问题[J]. *中国舰船研究*, 2019, 14(3): 116-121.

- TIAN Xin, WAN De-cheng. Simulation of sloshing in three-dimensional cylindrical tank by MPS method[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019,14(3): 116-121.
- [25] CHEN X, WAND C. GPU accelerated MPS method for large-scale 3-D violent free surface flows[J]. Ocean Engineering, 2019, 171: 677-694.
- [26] 陈翔, 万德成. MPS 与 GPU 结合数值模拟 LNG 液舱晃荡[J]. 力学学报, 2019, 51(3): 714-729.
- CHEN Xiang, WAN De-cheng. Numerical simulation of liquid sloshing in LNG tank using GPU-accelerated MPS method[J]. Chinses Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(3): 714-729