

基于 MPS 方法的孤立波与平板结构相互作用问题研究

张友林, 唐振远, 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,
高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

*通信作者 Email: dcwan@sjtu.edu.cn

摘要: 表面孤立波与海洋结构物的相互作用常伴随有砰击、上浪等现象, 是船舶与海洋工程领域需要研究的重要问题之一。本文采用 MPS 法求解器 MLParticle-SJTU 对孤立波与平板结构相互作用问题进行研究。使用求解器的推板造波模块, 分别模拟了二维和三维孤立波对平板的冲击作用过程, 得到的平板受力与实验结果吻合良好, 验证了该求解器在处理此类问题上的可行性。

关键词: 半隐式移动粒子法(MPS); 孤立波; 自由面流动; CFD

1 引言

在过去的一个多世纪里, 人类对表面孤立波这种具有强非线性的波浪进行了大量的研究。在船舶与海洋工程中, 孤立波常被用来探索海啸、风暴引起的巨浪等极端海况的产生机理。这种极限波浪作用在海岸、海上栈桥、桩基码头、采油平台等结构物上时, 常常伴随有波浪上涌、波面破碎等现象。结构物在该种波浪作用下, 可能因砰击、甲板上浪而造成严重的破坏, 进而威胁到人身及经济安全。

在以往的工作中, 实验是研究孤立波对结构物作用的重要而有效的手段。例如: Betsy Seiffert 等^[1]研究了孤立波对放置于水面以上、水线面处及浸没在水中时平板的垂向和水平力。然而, 实验研究通常需要较长的周期、高昂的费用, 并且仅能获取有限的流场信息。近年来, 随着计算机硬件技术的迅速发展, 越来越多的研究人员采用 CFD 方法来探索孤立波对海洋结构物的作用问题。其中, 无网格粒子法是一种新颖的 CFD 仿真方法, 而光滑粒子法(SPH)和半隐式移动粒子法(MPS)是两种应用最为广泛的无网格方法。相较于网格类方法, 粒子法能够较容易地捕捉到自由面的大变形, 特别是在研究溃坝^[2]、液舱晃荡^[3]、射流^[4]、入水砰击、波浪与物体相互作用^[5]等问题上更具有优势。其中, 在表面孤立波与结构物相互作用问题上, Liang Dongfang 等^[6]采用 SPH 方法考察了三维的海啸波浪对三种不同结构的岸基房屋建筑的冲击作用。Parviz Ghadimi 等^[7]采用 SPH 方法进行了二维的孤立波造

波模拟,研究了波高和水深对斜坡面上波面爬升的影响。Huang Yu 等^[8]采用改进的 MPS 方法数值分析了海啸对海防堤岸的冲击压力、描述了波面爬升及越堤的演化过程,并将仿真结果与实验数据进行了比较,结果吻合良好。Zhang Yuxin 等^[9]采用并行的 MPS 方法对甲板上浪问题进行了数值模拟,完整地展示了液面与物体相互作用的流场变化过程。

本文基于 MPS 方法考察孤立波对静水面以上平板结构的冲击作用,分析平板所受冲击载荷的变化趋势及孤立波与结构相互作用的流场演化过程。本文的数值模拟工作均采用了上海交通大学自主研发的求解器 MLParticle-SJTU,分别通过二维和三维算例验证了该求解器在波浪与结构物相互作用问题上的可靠性。

2 数值方法

2.1 控制方程

对于黏性不可压缩流体,连续性方程和 N-S 方程分别为

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

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

其中: ρ 为流体密度, P 为压力, \mathbf{V} 为速度向量, \mathbf{g} 为重力加速度向量, ν 是运动黏性系数。式(1)和式(2)的时间导数项是以物质导数的形式给出的。在粒子法中,粒子的位置和其他物理量都是基于拉格朗日描述法表达的,因此不需要计算对流项。

2.2 核函数

在 MPS 方法中,粒子间的相互作用是通过核函数来实现的。核函数能够影响计算的精度和稳定性,故而在计算时应当慎重选取。本文采用的是 Zhang 等^[2]提出的一种较新的核函数

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

其中: $r = |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|$ 为两个粒子间的距离,而下标 i 和 j 表示粒子编号; r_e 为粒子作用域的半径。

2.3 粒子作用模型

本文所采用的粒子作用模型包括梯度模型、散度模型、Laplacian 模型,定义如下

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

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

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

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} W(|r_j - r_i|) |r_j - r_i|^2}{\sum_{j \neq i} W(|r_j - r_i|)} \quad (7)$$

其中 i, j 为粒子编号, D 为空间维数, r 为粒子的位置矢量, n^0 为初始粒子数密度, 其定义如下

$$\langle n \rangle_i = \sum_{j \neq i} W(|r_j - r_i|) \quad (8)$$

2.4 不可压缩条件

在 MPS 方法中, 流场的不可压缩条件通常用粒子数密度保持常量来表示。本文所采用的不可压缩条件是由 Tanaka^[10]提出的混合源项法, 表达形式如下

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

其中 k 为时间步, γ 为粒子数密度在源项中的权重系数, 取值于 0~1 之间。

2.5 自由面条件

在 MPS 方法中, 自由液面的准确判断对计算的精度和稳定性十分重要。在本文采用的自由面判断方法^[2]中, 首先定义矢量:

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

再计算 F 的模 $|F|$ 。当粒子满足

$$\langle |F| \rangle_i > \alpha \quad (11)$$

时即被判定为自由面粒子, 其中 α 为一参数。本文取 $\alpha = 0.9|F|^0$, $|F|^0$ 为初始时自由面粒子的 $|F|$ 值。

2.6 孤立波模型

孤立波是一种奇特的波浪, 纯粹的孤立波全部波剖面在静水面以上, 波长为无限长。根据势流理论, 孤立波的自由面形状可表示为^[11]

$$\eta = H \operatorname{sech}^2[k(x-ct)] \quad (12)$$

$$k = \sqrt{3H/4d^3} \quad (13)$$

$$c = \sqrt{g(H+d)} \quad (14)$$

其中: H 为孤立波高, d 为水深, x 为水平坐标, c 为波速, g 为重力加速度, t 为时间。

本文采用推板造波方式生成孤立波, 根据 Goring^[12]的研究, 推板的运动速度可表示为

$$U(t) = \frac{dX(t)}{dt} = \frac{cH \operatorname{sech}^2[k(X-ct)]}{d + H \operatorname{sech}^2[k(X-ct)]} \quad (15)$$

由上式可得到 t 时刻推板的位置为

$$X(t) = \frac{H}{kd} \tanh(k(ct - X)) \quad (16)$$

根据上式, 取 $t = +\infty$ 与 $t = -\infty$ 时刻的推板位置之差得到推板的冲程为

$$S = \sqrt{\frac{16Hd}{3}} \quad (17)$$

近似的造波周期为

$$T \approx \frac{2}{kc} \left(3.8 + \frac{H}{d} \right) \quad (18)$$

经过一个周期的运动, 造波板达到最大位置处, 此后保持静止状态。

3 数值结果及分析

3.1 孤立波验证

本小节首先对 MLParticle-SJTU 求解器推板造波模块的孤立波生成功能进行数值验证, 计算工况参数见表 1。

表1. 工况参数

参数	值
水密度/(kg/m ³)	1000
水槽深度h/m	0.114
孤立波高a/m	0.0343
粒子间距dp/m	0.002
流体粒子数	71193
粒子总数	75855

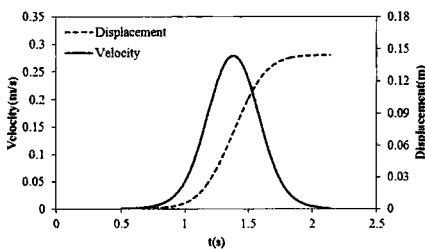


图1 造波板位移和速度

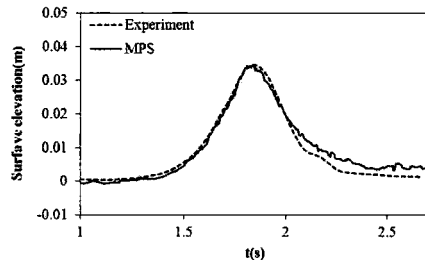


图2 波高时历曲线

依据孤立波理论模型, 造波板在水平方向的位移及速度变化如图 1 所示。生成的波高时历曲线如图 2 所示。数值模拟得到的波高时历曲线与 Betsy Seiffert 等^[1]的实验测量值在整体上较为吻合, 数值模拟的波峰高度达到了实验测量高度, 故而本文求解器的孤立波生成模块能够用于后续的孤立波对平板的冲击作用问题研究。

3.2 二维孤立波与平板相互作用

海啸等极端波浪对位于静水面以上的海洋平台、桩基码头等结构具有强烈的冲击力，此类结构物可近似为平板结构。本节考察二维孤立波对安置于水面以上平板的冲击作用问题。数值计算采用 Betsy Seiffert 实验的平板模型及孤立波条件，模型如图 3 所示，计算波高 $a=0.0343\text{m}$ 。

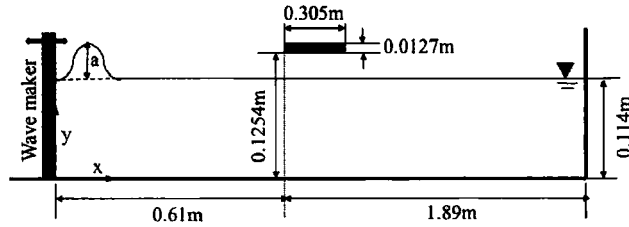


图3 计算模型示意图

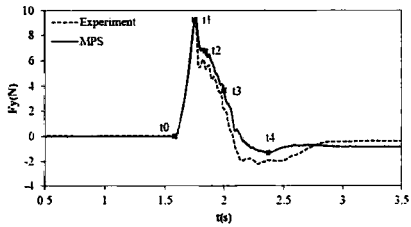


图4 孤立波对平板的垂向冲击力

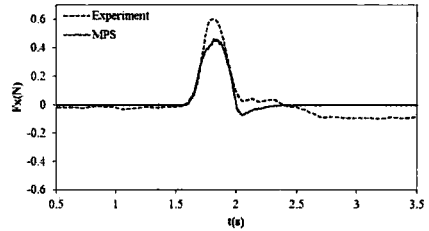


图5 孤立波对平板的水平冲击力

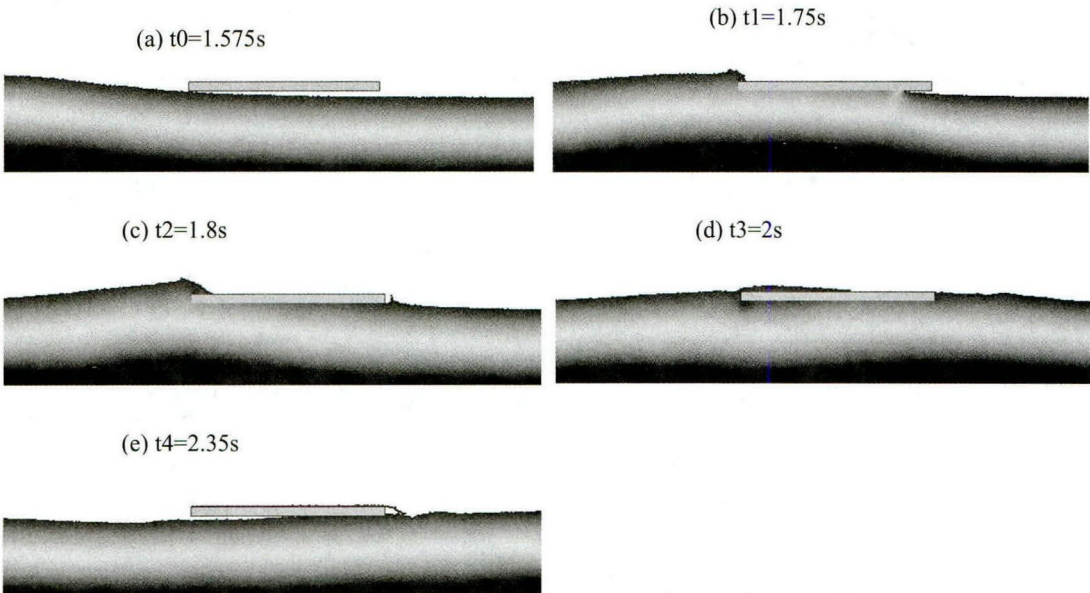


图6 孤立波对平板冲击作用的二维流场瞬时变化

图 4 与图 5 分别为孤立波对平板的垂向和水平方向冲击力时历曲线。为了分析波浪对平板冲击的详细过程,图 4 中标记了 5 个典型时刻,分别对应的时间为 $t_0=1.575s$, $t_1=1.75s$, $t_2=1.8s$, $t_3=2s$, $t_4=2.35s$ 。由图 4 可见 MPS 方法数值模拟得到的平板垂向力与实验测量的时历曲线整体上基本吻合,尤其在波浪与平板接触的初期阶段 ($t_0\sim t_1$) 吻合良好; $t_1\sim t_2$ 阶段,垂向力曲线出现了明显的跳跃; $t_2\sim t_4$ 阶段,平板所受垂向力逐渐降低。

图 6 为孤立波对平板冲击作用的不同瞬时流场波形。 t_0 之前阶段,孤立波峰尚未到达平板安置处,但随着波面的抬升,自由面在 t_0 时刻开始接触平板下表面的左侧角点; $t_0\sim t_1$ 阶段,波面不断抬升并与平板的接触面积逐渐增加,波面抬升高度超过平板上表面,直到 t_1 时刻开始出现波面的翻卷,此阶段内平板主要受到波面向上的浮力作用; $t_1\sim t_2$ 阶段,随着波面的翻卷破碎,水体迅速下坠形成对平板的向下冲击力,故而印证了图 4 中孤立波对平板的垂向力时历曲线在此时出现的跳跃现象; $t_2\sim t_3$ 阶段,随着孤立波峰经过平板,更多的水体留在了平板上表面,平板所受合力因上浪水体的重力作用而降低; $t_3\sim t_4$ 阶段,随着孤立波峰远离平板,波面逐步下降,平板受到的向上浮力逐渐降低。

3.3 三维孤立波与平板相互作用

本节在前述工作的基础之上,建立了基于 MPS 方法的三维波浪水槽,用于考察三维孤立波对水平板的冲击作用。水槽尺寸、平板的布置位置、水槽深度及目标孤立波高均与二维水槽相同,水槽宽度为 $0.2m$,平板宽度为 $0.1m$ 。

图 7 为孤立波对平板冲击作用的不同瞬时三维流场波形变化过程。从侧视图可以看出,流场依次经历了波面在平板上逐渐爬升、翻卷、上浪直至波面离开平板的过程,与前述二维流场的演化过程基本一致,但从三维视图可看到三维流场的演化过程稍有差别。 $t_1\sim t_3$ 时段内,波面从平板前端爬升至平板上表面过程中出现了明显的局部水体堆积,同时波面从平板的内外两侧向上表面爬升,湿表面呈现 U 型,具有明显的三维特征。

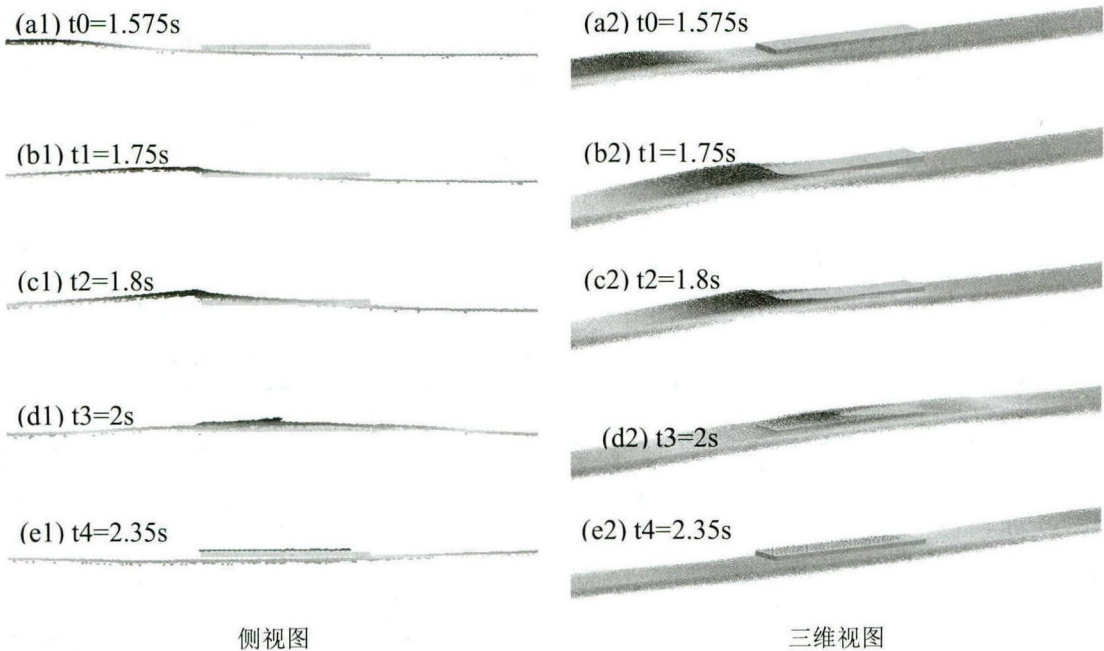


图 7 孤立波对平板冲击作用的三维流场瞬时变化

4 结论

本文将 MPS 方法应用于二维及三维的孤立波对平板结构的冲击问题研究。在二维的数值模拟中,波高曲线、平板受到的垂向和水平方向冲击力时历曲线与实验数据吻合较好。根据垂向力时历曲线可知,平板依次经历了向上垂向力的逐渐增大、跳跃、逐渐降低阶段。结合流场的变化过程可知,平板在入射孤立波逼近阶段与自由面的接触面积逐渐增大,所受向上浮力随之增加;波面抬升超过平板上表面后出现了翻卷现象,当翻卷波尖冲击平板上表面时,平板所受垂向合力急剧下降,表现出跳跃现象;随着入射孤立波经过平板,更多的水体涌上平板上表面,平板所受垂向合力继续降低。在三维的数值模拟中,在波面爬升时平板上首部出现了水体堆积。同时,波面从平板的内外两侧向上表面爬升,在平板上形成 U 型湿表面。该现象具有明显的三维特征,说明对此类问题进行三维数值模拟很有必要。本文工作说明 MLParticle-SJTU 求解器能够应用于孤立波对平板结构的冲击问题。

致谢

本文工作得到国家自然科学基金项目 (Grant Nos 51379125, 51490675, 11432009, 51411130131), 长江学者奖励计划 (Grant No. 2014099), 上海高校特聘教授 (东方学者) 岗位跟踪计划 (Grant No. 2013022), 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (Grant No. 2013CB036103), 工信部高技术船舶科研项目的资助。在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- 1 Betsy Seiffert, Masoud Hayatdavoodi, R. Cengiz Ertekin. Experiments and computations of solitary-wave forces on a coastal-bridge deck. Part I: Flat Plate [J]. Coastal Engineering, 2014, 88:194-209
- 2 Zhang Yuxin, Tang Zhenyuan, Wan Decheng. A parallel MPS method for 3D dam break flows [C]. 8th International Workshop on Ship Hydrodynamics, Seoul, Korea, 2013
- 3 Zhang Yuxin, Wan Decheng. Apply MPS method to simulate liquid sloshing in LNG tank [C]. Proc. 22nd Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE-2012, Rhodes, Greece, 381-391
- 4 唐振远, 万德成. MPS方法在冲击射流问题中的应用 [C]. 2014颗粒材料计算力学会议, 中国, 兰州, 2014,456-460
- 5 Bouscasse B, Colagrossia A, Marrone S, Antuono M. Nonlinear water wave interaction with floating bodies in SPH [J]. Journal of Fluids and Structures, 2013, 42:112-129
- 6 Liang Dongfang, Thusyanthan N I, Madabhushi S P G, Tang Hongwu. Modelling Solitary Waves and Its Impact on Coastal Houses with SPH Method [J]. China Ocean Engineering, 2010, 24(2):353-368
- 7 Parviz Ghadimi, Shahryar Abtahi, Abbas Dashtimanesh. Numerical Simulation of Solitary Waves by SPH Method and Parametric Studies on the Effect of Wave Height to Water Depth Ratio [J]. International Journal of Engineering and Technology, 2012, 1(4):453-465
- 8 Huang Yu, Zhu Chongqiang. Numerical analysis of tsunami-structure interaction using a modified MPS method [J]. Nat Hazards, 2015, 75:2847-2862
- 9 Zhang Yuxin, Wang XY, Tang Zhenyuan, Wan Decheng. Numerical simulation of green water incidents based on parallel MPS method [C]. 23rd International Offshore and Polar Engineering Conference, Alaska, United States, 2013, 931-938
- 10 Tanaka M, Masunaga T. Stabilization and smoothing of pressure in MPS method by Quasi-Compressibility [J]. J Comp Phys, 2010, 229:4279-4290
- 11 Boussinesq JV. Theorie des ondes et des remous qui se propagent le long d'un canal rectangulaire horizontal, en communiquant au liquide contenu dans ce canal des vitesses sensiblement pareilles de la surface au fond [J]. J Math Pures Appl, 1872, 17(2):55-108

- 12 Goring DG. Tsunamis: the propagation of long waves onto A Shelf [D]. Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, 1979

Simulation of solitary wave interacting with flat plate by MPS method

ZHANG You-lin, TANG Zhen-yuan, WAN De-cheng*

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration,
Shanghai 200240, China)

*Corresponding author, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

Abstract: In the present study, interaction between solitary wave and structure is investigated by our in-house particle solver MLParticle-SJTU based on Moving Particle Semi-Implicit (MPS) method. Two-dimensional solitary wave acting on a flat plate is simulated. Wave forces of the flat plate are in good agreement with experimental data in the literature. Wave elevation on the flat plate is presented detailedly. Furthermore, three-dimensional solitary wave acting on a flat plate is also simulated. The course of wave running up the plate is much different from two-dimensional simulation, and U-type wetted surface of the plate is observed.

Key words: MPS; Solitary wave; Free surface flow; Computational Fluid Dynamics.