

基于 MPS 方法的楔形体入水冲击问题研究

张友林, 唐振远, 杨亚强, 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 20040)

摘要: 高速航行或恶劣海况下船体的入水冲击问题是船舶与海洋工程领域需要研究的重要问题之一。目前, 少有采用 MPS 方法对该问题的研究。在本文中, 采用 MPS 法求解器 MParticle-SJTU 对楔形船体的入水过程进行了数值模拟, 获得了楔形体所受水面的冲击压力及加速度、速度等结果数据, 并能够与物理试验结果吻合良好, 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); 楔形体; 入水冲击

1 引言

船舶航行于恶劣海况时, 难免因周期性的波浪而产生大幅纵摇运动。此时, 船体将与海面发生高速入水冲击作用, 此过程伴随有巨大的瞬时冲击压力, 不仅影响到船舶的航行性能, 甚至会对船体结构带来严重的局部破坏。故而, 国内外众多学者致力于船体入水冲击问题的研究。

由于砰击现象主要发生在可近似为楔形体的船体首部, 研究人员通常以结构简单的楔形体为物理对象进行入水冲击问题的研究。自 von Karman (1929) 和 Wagner (1932) 的开创性研究以来, 人们对此问题的探讨手段日益多样。其中, 无网格粒子法因其能够方便地描述自由面的大变形而在近年来成为对该问题研究的重要手段。例如, G. Oger et al. (2006) 采用可变粒子间距的 Smoothed Particles Hydrodynamics (SPH) 方法对楔形体的入水过程进行了数值模拟, 在其研究成果中能够清晰观察到因冲击作用而形成的自由面射流现象。H. Liu et al. (2012) 基于 SPH 方法对楔形体较为完整的入水过程进行了数值模拟, 并与试验中的自由面变化过程进行了对比。通过数值模拟手段再现了试验中的自由面射流、楔形体两侧波面的冲击等现象。L. Ma et al. (2014) 在 SPH 方法中引入了两相流方法对楔形体的入水冲击过程进行了数值仿真, 探索了楔形体两侧波面在冲击、融合过程中气穴中的速度变化过程。A. Amicarelli et al. (2015) 采用 SPH 方法分别模拟了对称和非对称的楔形体入水过程, 并考虑了楔形体的质量对冲击压力的影响作用。然而, 上述研究主要采用了 SPH 方法, 由

Koshizuka and Oka (1996) 提出的较新的 Moving Particle Semi-implicit (MPS)无网格方法在入水冲击问题上的应用案例较为少见。近年来,随着研究人员((Khayyer et al., 2009), (Tanaka et al., 2010), (Lee et al., 2011), (Antonio et al., 2013), (Zhang et al., 2014), (Ikari et al., 2015)等)对 MPS 方法计算精度的不断改进,逐渐出现一些基于 MPS 方法进行入水冲击问题的探索研究。例如, B.H. Lee et al. (2010) 采用 MPS 方法分别研究了方形体和平板结构自由落体时与水面间的冲击作用。余谦等(2013) 将亚粒子雷诺应力项引入到动量方程,采用改进的 MPS 方法对楔形体的入水冲击问题进行了探索。Zhe Sun et al. (2015) 采用 MPS 方法模拟了楔形体的入水冲击过程,并将 MPS 与模态叠加法相结合,考察了冲击压力给楔形体带来的结构变形影响。

本文采用课题组自主研发的求解器 MLParticle-SJTU 对楔形体的入水冲击问题进行研究。该求解器是在 Koshizuka and Oka (1996)提出的原始 MPS 方法基础上做了系列的改进:(1)采用了无奇点的核函数模型;(2)采用了(Zhang et al., 2011a)基于自由面粒子分布的非对称性而提出的全新自由面判断方法;(3)采用了守恒形式的压力梯度模型;(4)在压力 Poisson 方程中采用了混合源项法(Tanaka et al., 2010)。

2 数值方法

2.1 控制方程

对于粘性不可压缩流体,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 是运动粘性系数。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 et al., 2012)提出的一种较新的核函数

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

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

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

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

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

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

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

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

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 et al., 2010)提出的混合源项法, 表达形式如下

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

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(Zhang et al., 2012)中, 首先定义矢量

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

再计算 \mathbf{F} 的模 $|\mathbf{F}|$ 。当粒子满足

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

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

3 数值试验及结果分析

在上述数值计算方法的基础上，本文针对二维的楔形体入水问题进行数值试验研究，考察所采用的求解器 MLParticle-SJTU 在此类问题中的适用性。

3.1 数值试验模型

为了与 WILS JIP-III 所提供的物理试验进行对比，本文数值试验采用了与之相同的模型尺寸参数。数值试验水槽的长为 3m，水深为 1m。楔形体上端平面长 0.6m，斜升角为 30° ，下缘顶角距水面的初始高度为 0.5m，重量为 85.375kg。楔形体仅能够在垂向自由落体运动，限制了其在其它方向的运动。为监测结构所受到的入水冲击载荷，在斜边上分别布置了压力和结构的局部合力监测点，数值水槽及监测点布置信息如图 1、图 2 所示。

本文中计算模型的粒子间距为 0.0125m，整体粒子数目为 21081，其中流体粒子数目为 19120，计算采用的时间步长为 0.0005s。计算的液体密度为 1000kg/m^3 ，重力加速度为 9.8m/s^2 。

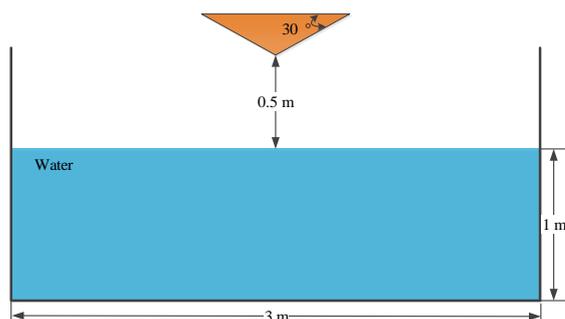


图1. 数值水槽示意图

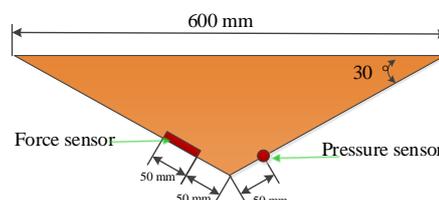


图2. 楔形体表面监测点示意图

3.2 数值结果分析

楔形体受力及其运动

图 3 为楔形体在入水过程中所受的冲击压力时历曲线。由图可见，楔形体经历 0.32s 的自由落体运动后，与自由面发生砰击作用，楔形体斜边测点处所受的冲击压力急剧增大，峰值接近 40Kpa。在此后的 0.05s 内，楔形体继续下沉，冲击压力逐渐缓和。从图中压力变化的整体趋势可见，使用改进的 MPS 方法数值模拟的压力数据能够与 WILS JIP-III 所公布的试验数据很好地吻合。

图 4 为楔形体在入水过程中局部所受的冲击载荷时历曲线。从图中可见，楔形体侧边合力传感器监测区域内所受水面的冲击载荷与上图的冲击压力具有相似的变化趋势，并与试验数据吻合良好。

图 5 为楔形体在入水过程中垂向运动加速度时历曲线。由图可见，楔形体在 0.32s 时加

速度的值急剧增大，加速度方向瞬间转变为自由落体的反方向。在此后的 0.05s 内，楔形体由于所受的冲击压力逐渐缓和，其加速度也随之下降。在 0.38s~0.5s 的时间内，楔形体所受合力相对稳定，其加速度也稳定在 5m/s^2 左右。

图 6 为楔形体垂向运动速度时历曲线。由图可见，楔形体首先经历了 0.32s 左右的自由落体运动。此后，其垂向运动速度因自由面的砰击作用而逐渐降低。在 0.38s~0.5s 的时间内，楔形体以近似恒定的向上加速度做减速运动。

综上所述，采用改进的 MPS 方法数值模拟的楔形体所受冲击压力及其运动变化均与物理试验结果吻合良好。

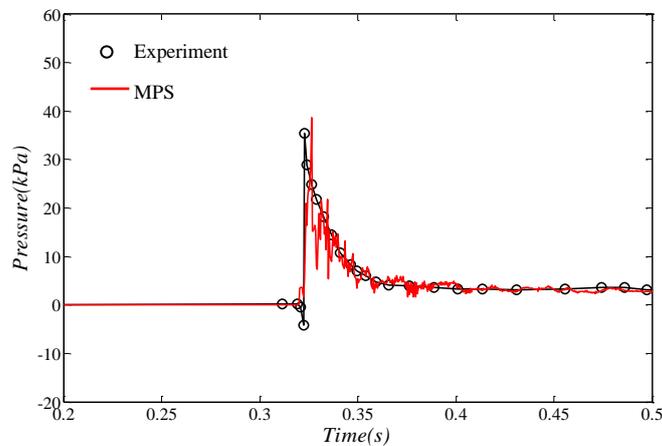


图3. 冲击压力时历曲线

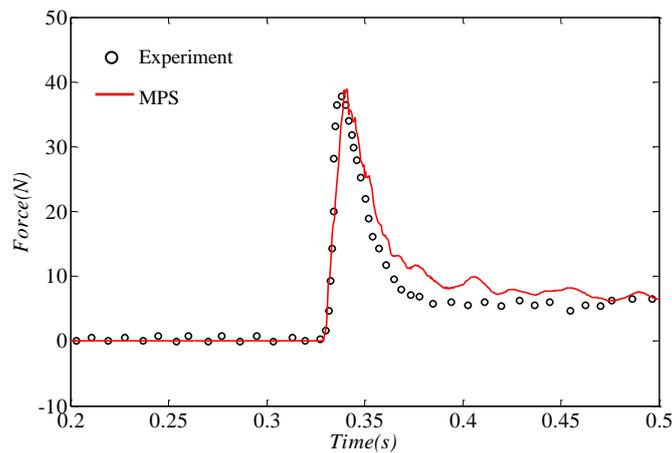


图4. 冲击载荷时历曲线

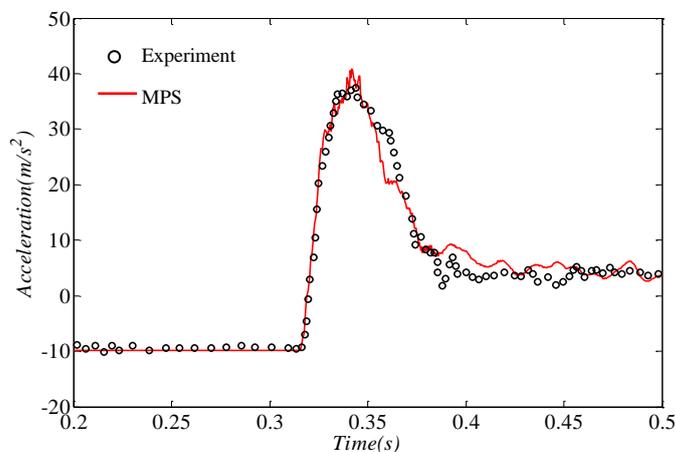


图5. 楔形体垂向运动加速度时历曲线

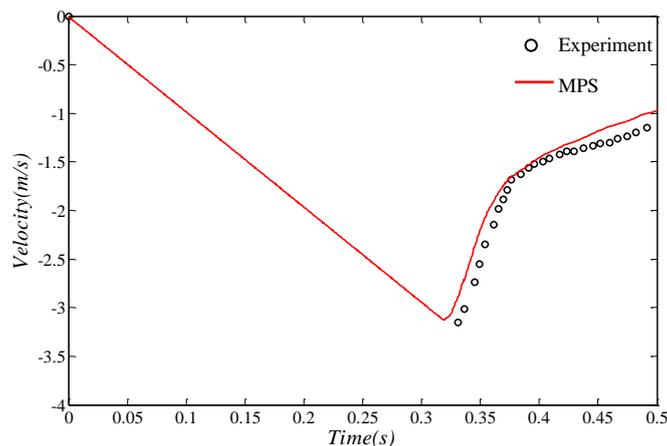


图6. 楔形体垂向运动速度时历曲线

自由面变化结果

图 7 为楔形体入水过程的自由面变化情况。由图中可知，自由面在楔形体的入水过程中可分为四个演变阶段。首先，可将 $t=0.325\sim 0.375\text{s}$ 时段称为砰击阶段。该阶段自由面与楔形体下顶角位置发生冲击作用，围绕楔形体下顶角位置的局部流场出现较大的压力梯度变化现象，楔形体两侧斜边处的自由面粒子因结构施加的较大动能而产生局部射流飞溅。其次， $t=0.375\sim 1.0\text{s}$ 时段可称为过渡阶段。该阶段内，随着楔形体的继续下沉，自由液面呈现 V 型。随后， $t=1.0\sim 1.5\text{s}$ 时段可称为 V 型自由面的瓦解阶段。该阶段内，楔形体两侧顶角处的自由液面首先向结构的上表面发生翻卷，此后逐步向结构的对称面附近运动，至 $t=1.5\text{s}$ 时刻结构两侧的水头发生碰撞并形成向上的射流。最后，在 $t=1.5\text{s}$ 之后的时段可称为自由面碰撞后阶段。

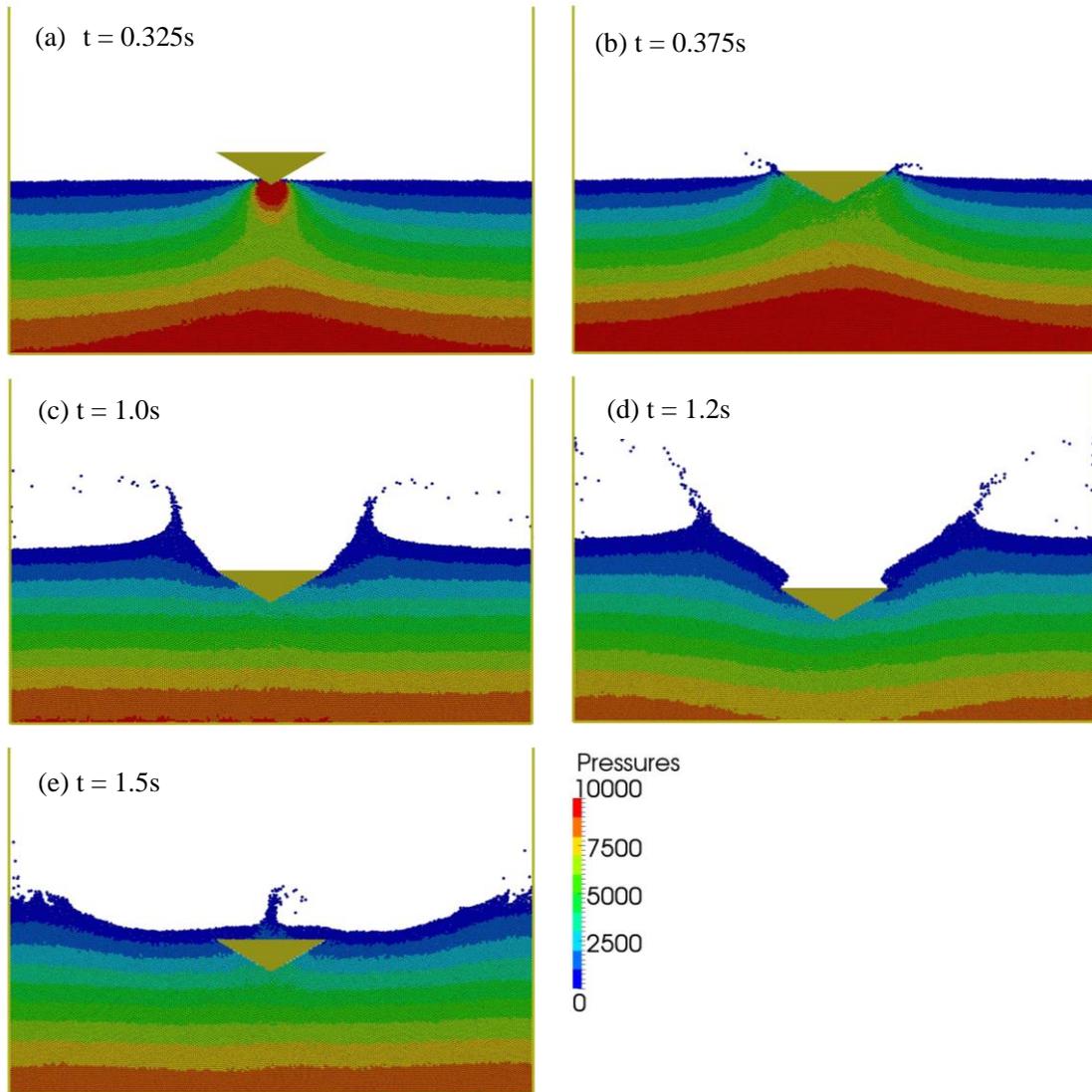


图7. 自由面变化过程

4 结论

本文介绍了课题组自主研发的 MPS 方法求解器 MLParticle-SJTU，并将之应用于二维楔形体入水冲击问题的研究。通过数值模拟可见，自由落体的楔形体在与水平液面发生碰撞的瞬间，结构表面压力及局部区域所受的合力值急剧增大。与此同时，楔形体垂向运动加速度量值急剧增大，但方向向上，垂向运动速度随之降低。通过将数值计算得到的冲击压力、局部合力、结构运动的加速度及速度结果与 WILS JIP-III 提供的物理试验结果进行

对比可见，二者在趋势和量值上均吻合良好。此外，本文展示了楔形体入水过程中自由面的变化情况。通过数值模拟，捕捉到物理试验中楔形体两侧的局部射流飞溅现象，再现了结构两侧自由面的翻卷及两侧水头的碰撞过程。本文的工作说明，基于 MPS 方法的求解器 MLParticle-SJTU 能够应用于楔形体的入水冲击问题。

参 考 文 献

- 1 Antonio S.I., Fabricio M., Leo M.G., Jose L. On the consistency of MPS [J]. *Computer Physics Communications*, 2013, 184:732-745.
- 2 Ikari H., Khayyer A., Gotoh H. Corrected higher order Laplacian for enhancement of pressure calculation by projection-based particle methods with applications in ocean engineering [J]. *J. Ocean Eng. Mar. Energy*, 2015, 1:361-376.
- 3 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.
- 4 Lee B.H., Park J.C., Kim M.H., Hwang S.C. Step-by-step improvement of MPS method in simulating violent free-surface motions and impact-loads [J]. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 2011, 200:1113-1125.
- 5 Lee B.H., Park J.C., Kim M.H., Jung S.J., Ryu M.C., Kim Y.S. Numerical simulation of impact loads using a particle method [J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37:164-173.
- 6 Sun Z., Xing J.T., Djidjeli K., Cheng F. Coupling MPS and Modal Superposition Method for Flexible Wedge Dropping Simulation [C]. *Proceedings of the Twenty-fifth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Hawaii, USA, 2015.
- 7 Tanaka M., Masunaga T. Stabilization and smoothing of pressure in MPS method by Quasi-Compressibility [J]. *Journal of Computational Physics*, 2010, 229:4279-4290.
- 8 Zhang Y.X., Wan D.C. Apply MPS method to simulate liquid sloshing in LNG tank [C]. *Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, 2012, 381-391.
- 9 Zhang Y.X., Wan D.C., Hino, Takanori. Comparative study of MPS method and level-set method for sloshing flows [J]. *Journal of hydrodynamics*, 2014, 26(4):577-585.
- 10 余谦, 张怀新. 改进的移动粒子半隐式法模拟楔形体入水砰击 [J]. *海洋工程*, 2013, 31(6):9-15.

Simulation of a free-falling wedge entering water surface by MPS method

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

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China.

Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai, China.

*Corresponding author: dcwan@sjtu.edu.cn)

Abstract: In the past, Moving Particle Semi-Implicit (MPS) method is rarely used to study the water entry problems. In the present study, water entry of a free-falling wedge is investigated by our in-house particle solver MLParticle-SJTU based on MPS method. Trend of time history of pressure on the impact side, together with acceleration and velocity, is compared with experimental data in the literature, and shows good agreement. The evolution of free surface is divided into four stages and details of slamming, transition, collapse and post-closure stages are presented.

Key words: MPS method; free-falling wedge; water entry.