

## MPS 弾性体モデルを用いた津波の流体衝撃力による構造物の弾性応答に関する基礎的研究 A Fundamental Study on Elastic Responses of a Structure by Tsunami Impact loads Using MPS Elastic Model

○村田大地<sup>1</sup>, 居駒知樹<sup>2</sup>, 相田康洋<sup>2</sup>, 増田光一<sup>2</sup>  
\*Daichi Murata<sup>1</sup>, Tomoki Ikoma<sup>1</sup>, Yasuhiro Aida<sup>2</sup>, Koichi Masuda<sup>2</sup>

Abstract: In The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, damage caused by tsunami drifting was confirmed more frequently for coastal structures. Mass, stiffness, and shape of containers, ships, cars, etc. which are drifting tsunamis are various, and it is difficult to calculate accurate collision loads when designing a structure. Therefore, in such a problem, it is necessary to grasp the collision load by numerical simulation that can handle the drifting behavior of the floating body in the tsunami, collision phenomena and so on. In this study, elastic response of the structure by the MPS method introducing the elastic body model was calculated.

### 1. 研究背景

2011年3月11日に発生した東日本大震災による津波によって、多くの沿岸域構造物が津波漂流物による衝突によって全半壊などの被害を受けた。日本建築学会は建築物荷重指針・同解説(2015)<sup>1)</sup>で津波荷重指針を定めた。津波荷重指針では流体力である津波波力だけでなく漂流物による衝突荷重についての評価式や解説も含まれている。しかしながら、この評価式での対象とされた漂流物は、縮尺模型実験で再現されたコンテナと流木のみであり、船舶や車などは基本的に考慮されていない。このことから漂流物による構造物への衝突荷重を再現するには流体-漂流物-構造物の相互作用を考慮した数値シミュレーション手法の開発が必要である。構造物に対する津波漂流物の衝突による衝突荷重の再現に有力な手法として、Koshizukaら<sup>2)</sup>によって提案されたMPS(Moving particle semi-implicit)法がある。MPS法では浮体を剛体として取り扱った際には、衝突角度や速度によって浮体粒子が壁粒子をすり抜けてしまう場合があるため増田ら<sup>3)</sup>は仮想弾性境界モデルを導入し津波漂流物の構造物への衝突力を実験値と比較することでそのモデルが有用であることを示した。ただし、仮想弾性境界モデルは、流体粒子に対して作用しないため流体の攪乱による漂流物の衝突速度の低下が考慮されていない。松岡<sup>4)</sup>は、仮想弾性境界の背後に粒子で構成した構造物を設置し、流体の攪乱による浮体の漂流挙動および衝突力に対する影響を求めた。しかし流体の攪乱による衝突力への影響自体は確認できたものの、仮想弾性境界と構造物の距離が1粒子間距離しかないため衝突荷重が小さく評価された。また、松岡は有限要素法を用いて構造物の衝突時弾性応答計算を行っているが、有限要素法とMPS法の完全な流体-浮体-構造連成解析は実現できていない。

MPS法で弾性体モデルを導入した流体-構造体解析として村田<sup>5)</sup>は越塚ら<sup>6)</sup>が提案した厚肉弾性体モデルを用いて構造物に対する津波漂流物の衝突力の評価を検討した。しかし弾性体モデルは浮体に導入を行っているため構造物の弾性応答計算は行われていない。

### 2. 研究目的

本研究の目的は、構造物に弾性体モデルを適用した流体-構造連成解析を行うための第一段階として、構造物に津波の流体衝撃力を作用させた際の数値計算上の課題点を把握し、その解決方法を明らかにすることとする。

### 3. 研究手法

本研究ではMPS法を用いて津波による流体衝撃力について計算を行う。また、構造物の計算には越塚らの厚肉弾性体モデルを用いて計算を行う。

#### 3.1 MPS法

本研究では流体を非圧縮性として扱っている。MPS法の支配方程式を(1)、(2)式に示す。(1)式は質量保存則である連続の式である。(1)式は、密度の時間変化がゼロであり、密度が時間に対して一定であることを意味している。(2)式は運動量保存則より導かれるナビエーストークス方程式である。(2)式の第一項は圧力勾配項、第二項は粘性項、第三項は重力項を意味している。

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (1)$$

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

ただし、 $\rho$  : 流体密度、 $Dt$  : 時間刻み、 $\mathbf{u}$  : 速度ベクトル、 $P$  : 圧力、 $\nu$  : 動粘性係数、 $\mathbf{g}$  : 重力による加速度ベクトルとする。

1 : 日大理工・院(前)・海建, Department of Oceanic Architecture and Engineering, CST., Graduate School of Nihon University

2 : 日大理工・教員・海建, Department of Oceanic Architecture and Engineering, CST., Nihon-U

### 3. 2 弾性体モデル

弾性体として定義する粒子に対してフック弾性体の速度  $v^\alpha$  に関する支配方程式を与える。

$$\rho \frac{Dv^\alpha}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x^\beta} (\lambda_{els} \varepsilon^{\alpha\beta} + 2\mu_{els} \varepsilon^{\alpha\beta}) \quad (3)$$

ここで、 $\rho$ は密度、 $\varepsilon^{\alpha\beta}$ は体積ひずみ、 $\delta^{\alpha\beta}$ はクロネッカーシンボルである。また、 $\lambda_{els}$ と $\mu_{els}$ はラメの弾性定数で、順にヤング率  $E$  およびポアソン比  $\nu$  と次の関係になる。

$$\lambda_{els} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1+2\nu)} \quad (4)$$

$$\mu_{els} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5)$$

MPS 法では重み関数を用いて、勾配(gradient)や発散(divergence)などの微分演算子に対して粒子間相互作用モデルを用意する。そして、弾性体の支配方程式に現れる微分演算子に、これらの粒子間相互作用モデルを適用すると、以上のような粒子の運動方程式が得られる。実際本手法では発散モデルしか用いないが、このようにして MPS 法では計算メッシュを一切用いることなく偏微分方程式を離散化する。

### 4. 弾性体モデルの試計算

村田の導入した MPS 弾性体モデルは浮体粒子に定義されたものである。そのため固定端の導入や応力の出力、理論解とのバリデーションによって構造物の計算を行えるようにする必要がある。そこで固定端について 1 計算ステップごとに粒子の座標と速度の更新を行わないことで固定端の設定を行い、試計算として底面を完全固定された弾性体として定義された構造物に対し水柱崩壊による流体衝撃力を与える計算を行った。結果として固定端の境界条件は実現できたが、弾性体の剛性を高めると計算が破綻してしまうことが確認された。これは剛性を高めることにより弾性体の粒子の密度波の伝達が速くなることでクーラン数が大きくなり結果として計算が安定しなくなったためと思われる。

そこで次に時間刻み幅を細かくして剛性を一般圧延鋼材と同等のものにして計算を行った。結果として 3.0 秒間の計算のうち約 1.0 秒のところで計算は破綻した。なぜこの時間で破綻が生じたのかは分析中であるが 1.0 秒まで計算ができたことから、少なくともクーラン数に問題があることが明確になった。しかし時間刻み幅を細かくしたことで今度は圧力の計算が正しく行われていない結果となった。剛性と時間刻み幅の違いによる可視化結果を Figure 1 に示す。

Table 1. Simulation conditions

	Case1	Case2
総粒子数 [個]	4,753	
計算時間 [sec]	3.0	
粒子間距離 [m]	0.01	
時間刻み幅 [sec]	$5.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-6}$
弾性体粒子の密度 [ $\text{kg/m}^3$ ]	500	7,900
ヤング率 [Pa]	$4.0 \times 10^3$	$206 \times 10^9$
ポアソン比 [-]	0.48	0.3

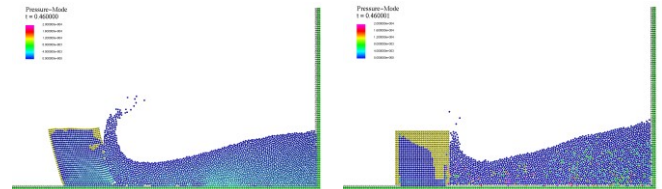


Figure 1. Results due to difference in rigidity and time step

### 5. 結言

水柱崩壊による試計算の結果、MPS 法で弾性体を解くにあたり構造物の剛性が低いと計算が破綻することなく正常に粒子の圧力の計算が行われ、逆に剛性の高い場合には計算が破綻した。これに対し、クーラン数を下げることで計算が破綻しにくくなったがそのために時間刻み幅を細かくしたことで流体粒子、構造物粒子ともに圧力の計算が正常に解けないことが確認された。剛性の高い計算を行うにはクーラン数を低くするほか、疑似圧縮性の値を下げることで流体粒子の圧力異常は解決されると考えられる。

### 6. 参考文献

- [1] 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説<2015>, p585, 第 5 版, 2015
- [2] S. Koshizuka and Y. Oka, Moving-Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid. NuclSci.Eng, 123, pp421-434, 1996.
- [3] 増田光一, 相田康洋, 居駒知樹, 惠藤浩朗：仮想弾性境界の有用性について津波漂流物と構造物の衝突問題への MPS 法の応用に関する研究その 1, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, NO.722, pp.813-823, 2016
- [4] 松岡晃弘：被衝突物による流体の攪乱を考慮した津波漂流物の衝突に関する研究, 日本大学修士論文, 2018
- [5] 村田一城：MPS 法による津波中の浮体挙動および衝突力の推定に関する研究, 日本大学博士論文, 2017.
- [6] 越塚誠一, 近澤佳隆, 岡 芳明：弾性体に対する陽的な粒子計算モデルの開発, 日本計算工学会計算工学講演会論文集, Vol.4, pp.33-37,1999.