3次元MPS法による岸壁近傍に設置された 浮体式構造物の津波中挙動予測法に関する研究

A STUDY ON THE PREDICTION METHOD OF BEHAVIOR OF
FLOATING STRUCTURES IN THE VICINITY OF A WHARF IN TSUNAMIS
USING THE 3D-MPS METHOD

増田光弘¹・増田光一²・居駒知樹³・庄司邦昭⁴

Mitsuhiro MASUDA, Koichi MASUDA, Tomoki IKOMA
and Kuniaki SHOJI

¹正会員 博(工) 東京海洋大学助教 海洋工学部海事システム工学科
(〒135-8533 東京都江東区越中島7-24-1)

²工博 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

³博(工) 日本大学准教授 理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

⁴工博 東京海洋大学教授 海洋工学部海事システム工学科 (〒135-8533 東京都江東区越中島7-24-1)

In recent years, the floating facilities for the ocean space utilization such as the marine disaster prevention base and the floating restaurant are planned and some of those facilities are actually built. Most of these facilities are the pontoon type floating structure, and the mooring system is a mooring dolphin. In the design of such facilities, the forecast of the movement of the pontoon type floating structure supported by the mooring dolphin is important. In this research, the 3D-MPS method is applied, and the solitary wave and the bore like wave are applied as an assumed tsunami. The heaving motion on floating body in the tsunami is paid to attention, and it reports on the result of examining the detaching from mooring dolphin of floating body.

Key Words : *Tsunami, 3D-MPS method, Floating structure, Mooring dolphin, Grounding on a wharf, Water tank experiment*

1. 緒言

沿岸域に来襲した津波によって岸壁近傍に設置された船舶を含む浮体式構造物は、津波の陸域への遡上に伴い、係留索の破断や岸壁への乗り上がり、陸域への漂流、建築物との衝突といった被害をもたらす。それらは、陸上の建築物やそこに暮らす人々に対して甚大な被害をもたらすと共に、経済活動に対しても深刻な打撃を与えるものである。したがって、これらの一連の現象をより正確に把握することは、防災、あるいは減災の観点から極めて重要であるといえる。しかし、岸壁への浮体の乗り上がりや、その後の漂流、建築物との衝突といった一連の現象が連鎖していく本研究対象は、強非線形な現象であり、線形理論を用いた数値計算法ではその予測が困難である。本研究では、上述したような現象を解析可能な数値計算法として、強非線形な物理現象を直接的に解くことに特化している粒子法の一つである越塚ら¹⁾の開発した MPS 法 (Moving Particle Semi-implicit method) に着目した。

津波による浮体挙動の把握にMPS法を適用した研究では、後藤ら²⁾の研究が存在する。後藤らはMPS法を用いて、浮体群を伴った津波氾濫流と構造物の衝突過程のシミュレーションを行っている。他の研究手法では、熊谷ら³⁾は個別要素法を用いて津波によるコンテナの漂流と衝突に関して評価を行っている。また、廉ら⁴⁾は陸上遡上津波によるコンテナの漂流挙動と漂流衝突力に関して水槽実験と構造解析ツールによって検討を行っている。米山⁵⁾らは、係留船舶の応答特性と係留施設へ及ぼす影響について模型実験と数値計算を行っている。しかし、津波による浮体式構造物の係留索の破断、転覆、岸壁への乗り上がり、漂流、衝突といった一連の現象を統一的に取り扱った研究例は著者らの知る限り見当たらない。著者ら^{6), 7)}は、浮体式構造物の津波中挙動予測のためのMPS法プログラムを独自に作成し、これまでその適用性と有用性について検討を行ってきた。これまでの研究では、2次元的に模擬津波として採用した孤立波や岸壁近傍に設置した浮体の乗り上が

り挙動，衝突力，空間解像度の違いが計算精度に与える影響などについて検討を行ってきた。しかし，津波は広範囲に被害をもたらす現象であり，3次元的に検討を行っていく必要がある。

本研究では，MPS法プログラムを3次元に拡張し，その実用性について水槽実験との比較により検討を行った。さらに，3次元MPS法を用いて岸壁近傍にドルフィン方式で係留された浮体式防災基地の津波中挙動シミュレーションを実施した。浮体式防災基地は地震の影響を受けにくく，緊急時には被災地に直接曳航することが可能であり，避難生活および復旧活動を支援する拠点として期待されている。ただし，津波が港湾内に来襲した場合，大きな影響を受けると考えられるため，津波の来襲によって浮体式防災基地がどのような影響を受けるのか考察を行った。

2. MPS法

(1) 支配方程式

MPS法の支配方程式は以下の連続の式とナビエーストークス方程式である。

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

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

ここでは流体を非圧縮性流れとして扱っている。式(1)の連続の式は時間 t に対して密度 ρ が一定であることを意味している。式(2)のナビエーストークス方程式の左辺は速度ベクトル $\vec{u}$ に対するラグランジュ微分であり，右辺第1項は圧力勾配項，第2項は粘性項，第3項は重力項である。 ν は動粘性係数となっている。以降の離散化およびモデル化については越塚ら¹⁾の論文に詳細が記載されているためここでは割愛するが，本論文で重要な重み関数と浮体のモデル化，計算の高速化について以下に記載する。

(2) 重み関数

各粒子は，常に式(3)の重み関数 ω にしたがって近傍の粒子と相互作用する。

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

r は粒子間距離であり， r_e は重み関数の影響半径である。影響半径を設定することにより，それより遠方に存在する粒子の影響をなくし，計算時間を短縮することができる。ただし，影響半径を小さくしすぎると計算が不安定になるため，影響半径は経験的に粒子間距離の2～4倍としている。

(3) 浮体のモデル化

本研究では浮体モデルを粒子の連続体として流体と相互作用させつつ，剛体として運動させる。

まず， N 個の粒子で表された浮体モデルの浮体形状，重心座標 r_g ，慣性モーメント I を求める。

$$r_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i \quad (4)$$

$$I = \sum_{i=1}^N m |r_i - r_g|^2 \quad (5)$$

ここで，粒子 i の座標を r_i ，粒子1個の質量を m とする。慣性モーメントは計算開始時に計算し，以降は同じ値を使い続ける。

次に浮体モデルと流体との相互作用はあまり大きくないと仮定し，非圧縮性流れの半陰的アルゴリズムの中で陽的に相互作用させる。第一段階として，各時間ステップにおいて流体粒子と剛体粒子を区別することなく，非圧縮性流れの計算を行い，新しい時刻 $k+1$ での速度 $\vec{u}_i^{k+1}$ と位置 $\vec{r}_i^{k+1}$ を求める。その際，非圧縮性流れの計算によって各剛体粒子は加速度 $\vec{a}_i^k$ を受けて流体として運動する。

$$\vec{u}_i^{k+1} = \vec{u}_i^k + \Delta t \vec{a}_i^k \quad (6)$$

$$\vec{r}_i^{k+1} = \vec{r}_i^k + \Delta t \vec{u}_i^{k+1} \quad (7)$$

この時，剛体粒子も流体粒子と同様に運動するため剛体粒子の相対的な位置関係が変化するが，クーラン条件により時間刻み幅は大きくないため，位置の変化はあまり大きくない。また，加速度 $\vec{a}_i^k$ は浮体モデルの重心の加速度であり，式(8)のように各剛体粒子が受ける加速度の平均値とする。

$$\vec{a}_g^k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{a}_i^k \quad (8)$$

次に剛体粒子間の相対位置関係を元に戻す。この時，浮体モデルの重心の座標変化量 $\vec{r}_g'$ と回転角の変化量 θ' が保たれるようにする。浮体モデルの回転には3次元の回転行列を用いた。最後に剛体粒子の速度と位置の修正を行い，それが終了したら次の時間ステップに進む。

$$\vec{r}_i' = \vec{r}_i^{k+1} - \vec{r}_i^k \quad (9)$$

$$\vec{r}_g^{k+1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{r}_i^{k+1} \quad (10)$$

$$\vec{r}_g' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{r}_i' \quad (11)$$

$$\theta' = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^N m \vec{r}_i' \times (\vec{r}_i^k - \vec{r}_g^{k+1}) \quad (12)$$

$$\vec{r}_i' = \vec{r}_g' + \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} & r_{xz} \\ r_{yx} & r_{yy} & r_{yz} \\ r_{zx} & r_{zy} & r_{zz} \end{bmatrix} (\vec{r}_i^k - \vec{r}_g^{k+1}) \quad (13)$$

$$r_x = \begin{pmatrix} a_x a_x (1 - \cos \theta) + \cos \theta \\ a_x a_y (1 - \cos \theta) + a_z \sin \theta \\ a_z a_x (1 - \cos \theta) - a_y \sin \theta \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$r_y = \begin{pmatrix} a_x a_y (1 - \cos \theta) - a_z \sin \theta \\ a_y a_y (1 - \cos \theta) + \cos \theta \\ a_y a_z (1 - \cos \theta) + a_x \sin \theta \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$r_z = \begin{pmatrix} a_z a_x (1 - \cos \theta) + a_y \sin \theta \\ a_y a_z (1 - \cos \theta) - a_x \sin \theta \\ a_z a_z (1 - \cos \theta) + \cos \theta \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\vec{u}_i^{k+1} = \frac{\vec{r}_i'}{\Delta t} \quad (17)$$

$$\vec{r}_i^{k+1} = \vec{r}_i^k + \vec{r}_i' \quad (18)$$

(4) 計算の高速化

MPS 法では粒子間の距離計算を毎時間ステップごとに行う必要がある。しかし、これをすべての粒子に対して行くと、その計算量は総粒子数 N に対して N^2 に比例する。

そこで本プログラムでは、図-1 のように計算領域をセルと呼ばれる格子状の小領域に分割する手法を用いた。本手法は、あらかじめ粒子がどの分割領域に入っているかを登録することで検索する近傍粒子の数を限定し、毎時間ステップごとによすべての粒子について距離計算を行うことを避けることができる。この時、2次元問題における正方格子の場合、粒子 i を含むセルとその隣接セルの合計 9 セルに含まれる粒子だけ距離計算を行えばよい。3次元問題においては立方格子の場合、粒子 i を含むセルと、隣接する 26 セルの合計 27 セルに含まれる粒子だけ距離計算を行えばよい。本手法では空間を細かく分割すればするほど計算量を少なくできるが、セルの幅は重み関数の影響半径より小さくすることはできないため、セルの幅を重み関数の影響半径 r_e としている。

図-1 領域分割の概念

3. 水槽実験と数値計算の比較

(1) 水槽実験

水槽実験は、日本大学理工学部で2次元水槽にて実施した。ただし、本水槽実験は2次元ではなく、浮体と水槽両側面の間に0.035m程度の隙間が存在する。水槽実験の配置図を図-2に示す。造波位置の水深を0.67mとした。水槽内には高さ0.5mの斜路と仮底が存在し、仮底部分の水深は0.17mである。模擬津波には波高0.065mの孤立波を適用した。浮体模型は長さ0.23m、高さ0.1m、奥行き0.53mであり、模型質量は2.5kgである。浮体模型の喫水は0.025mであり、岸壁との離岸距離がない状態で設置した。

計測項目は水面変位、流速、流体圧力、浮体運動、衝突力とした。水面変位は図-2における波高計H1～H7を用いて計測した。H1は斜路後方0.5m、H2は岸壁手前0.3mに設置した。岸壁上では波高計を岸壁先端からH3～H7の順に0.05mおきに設置した。流速は斜路直後0.5mの位置で流速計V1により計測した。流体圧力は仮底底面から0.1mの位置に設置した圧力センサーP1を用いて、岸壁にかかる圧力を計測した。浮体運動はビデオトラッカーを用いて、浮体の重心位置の軌跡を計測した。衝突力は岸壁端部から0.25mの位置に設置した浮体と建築物の衝突力を検力計F1によって計測した。建築物は幅0.2m、高さ0.13m、奥行き0.53mであり、岸壁底面から0.1m浮いた位置に設置した。

図-2 実験配置図

(2) 数値計算

数値計算では、3次元MPS法による実験の再現を行った。諸条件は水槽実験と同様であるが、計算負荷を軽減するために造波板を岸壁から3.0m手前の位置に設置し、実験時に図-2におけるV1で計測した水平流速データを時間積分して、ピストン式造波板の水平変位として入力した。粒子間距離は0.01mとし、この時の総粒子数は507,694個である。計算における座標系を図-3に示す。

なお、衝突力 F は以下の式を用いて算出した。

$$F = \sum_{i=1}^N P_i \cdot \Delta S_i \quad (19)$$

P_i は建築物の衝突面の粒子の圧力であり、 ΔS_i は粒子間距離、 N は衝突面の粒子数である。なお、ここでは物体の破壊や変形は考慮されていない。

図-3 座標系

(3) 水槽実験結果と数値計算結果の比較・考察

図-4は、入射波形を比較したグラフである。図-5は岸壁上H4～H7での最大水位を無次元化して比較したグラフである。 η_{max} は各波高計の最大水位であり、それ以外のパラメータは図-3に示したとおりである。図-6は岸壁にかかる流体圧力を無次元化して比較したグラフである。MPS法の値は図-2におけるP1と同じ位置の粒子の圧力を計測した。MPS法の圧力値は圧力が振動するため7ステップ分の時間平均を取っている。図-7は浮体の重心位置の鉛直変位を比較したグラフである。図-8は浮体と建築物の衝突力を比較したグラフである。図-9は岸壁に乗り上がった浮体が建築物に衝突する様子を比較したスナップショットである。

3次元的な計算を行うにあたり、粒子数が大幅に増加したため、計算時間や計算機性能を考慮して粒子間距離を0.01mとして計算を行った。図-4、図-5を見ると、入射波高と遡上後の最大水位が水槽実験と非常によく一致を示していることがわかる。さらに、図-7、図-9を見ると、浮体の乗り上がり挙動についてもよく一致を示していることがわかる。図-6の流体圧力の結果を見ると、MPS法の波形に若干乱れが見られる。これはMPS法の課題点である圧力振動によるものだが、波の入射による圧力値の上昇の傾向および、その最大値がよく一致を示している。また、図-8の衝突力のグラフを見るとMPS法の最大値の方が大きくなっている。ただし、衝突力の発生から収束までの傾向をよく再現できており、最大値についてもMPS法の計算は衝突力を安全側に評価していることが確認できる。これらの結果から、3次元に拡張した本MPS法プログラムも、これまでの2次元MPS法プログラムを用いた既存の研究^{6), 7)}と同様に水槽実験に対して良好な結果を得ることができていることを確認できた。

図-4 入射波形の比較

図-5 岸壁上での最大水位の比較

図-6 流体圧力の比較

図-7 浮体の鉛直変位の比較

図-8 衝突力の比較

図-9 乗り上がりおよび衝突のスナップショットの比較

4. 浮体式防災基地の乗り上がりシミュレーション

(1) 数値計算

岸壁近傍に設置された浮体式防災基地に津波が来襲した状況を想定してシミュレーションを行った。概要図を図-10に示す。浮体式防災基地は長さ100m、高さ3.0m、奥行き200mであり、喫水は1.0mである。浮体式防災基地は両端に設置された長さ10m、高さ8.0m、奥行き10mの係留ドルフィンによって係留されている。離岸距離は10mとした。水深は6.0mである。粒子間距離は1.0mとし、この時の総粒子数は1,445,778個である。模擬津波は、波高を東京湾での最大津波高さ3.0m⁸⁾とし、岸壁から400m後方に設置した造波板によって3.0mの孤立波を3回入射させることで、段波のような性質を持つ孤立波よりも長周期な波を造波した。

図-10 シミュレーション概要図

(2) シミュレーション結果および考察

図-11は、岸壁から110mの浮体の先端と同じ位置での模擬津波の入射波形を表したグラフである。

図-12は浮体式防災基地の重心位置の鉛直変位を、図-13は水平変位を表したグラフである。図-12は浮体が係留ドルフィンから離脱した範囲に、図-13は浮体が係留ドルフィンに乗り上げた範囲に色をつけて示している。図-14は浮体式防災基地に津波が来襲する様子と、係留ドルフィンから浮体が離脱した状態を表したスナップショットである。

図-11のような津波が来襲した場合、岸壁近傍に設置された浮体式防災基地は、津波の来襲によって図-12のように徐々に持ち上がり、57秒付近で係留ドルフィンから離脱し、図-13のように水平方向に流され始める。ただし、そのまま岸壁に乗り上がることはなく、津波は陸域に遡上していくものの、浮体は岸壁からの反射波によって沖側に押し返される。その後、82秒付近でさらに入射してくる津波によって再度岸壁方向へ押し戻され、最終的に元の位置に戻る。その様子は図-14からも確認できる。このように浮体が元の位置に戻った要因としては、津波の波高が3.0m程度であったことと、周期が数十秒単位であったためであると考えられる。ただし、実際の津波はより長周期かつ、予期せず大波高の大津波になることもあるため、そのような場合には浮体が岸壁に乗り上がり、陸域に押し流されていく可能性がある。しかし、今回用いたような模擬津波であっても、一度係留ドルフィンから離脱した浮体は係留ドルフィンの上を往復した後に元の位置に戻っており、こうなった場合、浮体および係留ドルフィンに大きなダメージを与えるものと考えられる。

図-11 津波の入射波形

図-12 浮体の鉛直変位

図-13 浮体の水平変位

a) Time = 70.0 sec.

b) Time = 82.0 sec.

図-14 津波来襲時の係留ドルフィンからの浮体の離脱のスナップショット

5. 結言

本研究によって、以下のような知見を得た。

- 1) これまで2次元的に検討を行ってきたMPS法プログラムを3次元に拡張し、計算速度の高速化を行った。それにより、膨大な粒子数を必要とする計算を行うことが可能になるとともに、3次元的な検討を行うことが可能となった。
- 2) 3次元に拡張したMPS法プログラムの実用性を検討するために、浮体の乗り上げりの水槽実験と比較を行った。それにより、3次元MPS法プログラム

はこれまで用いてきた2次元MPS法プログラムと同様に、津波の入射波形および遡上水位、流体圧力、浮体の乗り上がり挙動、衝突力を精度よく再現できることがわかった。

- 3) 東京湾に設置された浮体式防災基地に波高3.0mの津波が来襲した状況を想定して3次元MPS法プログラムを用いてシミュレーションを行った。それにより、波高3.0mの津波が来襲した場合、浮体式防災基地は係留ドルフィンから離脱し、係留ドルフィンに大きなダメージを与える可能性があることがわかった。

今後は、より大波高かつ長周期な津波を用いるとともに、入射角度の違いが船舶を含む浮体の津波中挙動に与える影響や、係留された船舶の係留索の破断を含めた挙動のシミュレーションなどを行っていく予定である。

謝辞： 本研究は文部科学省科学研究費補助金基盤研究Bによって行われたことを付記いたします。また本研究を行うにあたり、実験および計算に協力していただいた伊藤雅文氏（研究当時、日本大学大学院生）、樋口直人氏（日本大学大学院生）に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) Koshizuka S. and Oka Y., Moving-Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid, *Nucl. Sci. Eng.*, 123, pp.421-434, 1996.
- 2) 後藤仁志, 五十里洋行, 酒井哲郎, 奥謙介; 浮体群を伴う津波氾濫流の3Dシミュレーション, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 196-200, 2006.
- 3) 熊谷兼太郎, 小田勝也, 藤井直樹; 津波によるコンテナの漂流・衝突シミュレーションと衝突力の評価, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 236-240, 2007.
- 4) 廉慶善, 水谷法美, 白石和睦, 宮島正悟, 富田孝史; 陸上遡上津波によるコンテナの漂流挙動と漂流衝突力に関する研究, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 851-855, 2007.
- 5) 米山治男, 大垣圭一, 津田宗男, 栗原明夫, 平石哲也, 青野利夫; 津波が係留船舶に及ぼす影響に関する模型実験と数値計算, 港湾空港技術研究所, No.1213, 2010.
- 6) 増田光弘, 増田光一, 居駒知樹, 前田久明; 津波による岸壁近傍に設置された浮体式構造物の挙動予測に関する研究, 海洋開発論文集, Vol.25, pp.81-86, 2009.
- 7) 増田光弘, 増田光一, 居駒知樹, 樋口直人; 津波により岸壁に遡上した浮体による衝突力に関する研究 — 津波波形の影響について —, 海洋開発論文集, Vol.26, pp.261-266, 2010.
- 8) 国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所（財）沿岸技術研究センター; 津波対策検討調査報告書, 2005.