

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

A STUDY ON PREDICTION OF BEHAVIOR OF FLOATING STRUCTURES IN
THE VICINITY OF A WHARF INDUCED BY TSUNAMIS

増田光弘¹・増田光一²・居駒知樹³・前田久明⁴
Mitsuhiro MASUDA, Koichi MASUDA, Tomoki IKOMA,
and Hisaaki MAEDA

¹大学院生 日本大学大学院 理工学研究科海洋建築工学専攻
(〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

²工博 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科

³博士(工学) 日本大学専任講師 理工学部海洋建築工学科

⁴工博 日本大学教授 総合科学研究所

The present paper describes the application of the moving particle semi-implicit method (MPS method) to a prediction of drifting distance and a collision force of a floating structure running on a wharf by a tsunami. And effectiveness of the application is verified.

The two-dimensional MPS method is compared with results of the two-dimensional water tank experiment. Solitary waves are applied to simulated tsunamis in numerical simulations with the MPS method and to the model experiment. A pontoon type floating body is used in numerical simulations. The results of the numerical simulation and the applicability of MPS method is discussed by comparing between the numerical results and experimental results. After the grounding on a wharf by the tsunami, the characteristics of drifting distance and a collision force of a floating body are discussed.

Key Words : *Tsunami, floating structure, grounding on a wharf, drifting distance, collision force, mps method, water tank experiment, two dimension*

1. 緒言

津波が港湾内に侵入してきた場合、岸壁近傍に係留された船舶を含む浮体式構造物は係留索の破断や転覆、岸壁への乗り上がり、陸域への漂流、衝突といった事態が想定される。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。しかし、上述したような現象は非線形性が強く、水槽実験や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。そこで著者らは上述したような非線形性の強い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MPS法に着目した。

津波による浮体挙動の把握にMPS法を適用した研究では、まず後藤ほか¹⁾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なっている。また、五十里と後藤²⁾は津波氾濫による桁橋の被災過程についてのシミュレーションを行なっている。他の研究手法では、廉ほか³⁾は陸上溯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なっている。また、熊谷ほか⁴⁾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なっている。しかし、津波による浮体式構造物の係留索の破断や転覆、岸壁への乗り上げ、漂流、衝突といった一連の現象を取り扱った研究例は著者らの知る限り見当たらない。著者ほか⁵⁾はこれまでに2次元MPS法を用いて岸壁近傍に設置した浮体式構造物の乗り上がり挙動とMPS法における係留索の取り扱いについて検討を行なってきた。しかし、定性的な適用性の検討に留まっており、詳細な検討は行なわれていなかった。

本研究は岸壁に設置された浮体式構造物が津波によって陸上に乗り上がり、漂流し、建築物に衝突する一連の現象の予測に対してMPS法を適用することを目的としている。そこで本論文では、水槽実験との比較を通して津波来襲時の岸壁近傍の浮体の挙動予測に対するMPS法の適用性の検討及び、浮体の漂流と衝突に関する数値シミュレーションを行い、その妥当性を検証する。

2. MPS法

MPS法の支配方程式は以下の連続の式とナビエーストックス方程式である。

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

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

MPS法は非圧縮性流れである。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表している。式(2)のナビエーストッ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。以降の離散化及びモデル化は越塚と岡⁶⁾の論文や浅沼ほか⁷⁾の論文に詳細が記載されているため、ここでは割愛する。

3. 浮体運動のモデル化

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計算開始時での浮体形状、重心座標 r_g 、慣性モーメント I を求める。

$$r_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i \quad (3)$$

$$I = \sum_{i=1}^N m |r_i - r_g|^2 \quad (4)$$

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。

次に剛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。そして、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ない、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。ここで、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。

$$\vec{u}_i^{k+1} = \vec{u}_i^k + \Delta t \vec{a}_i^k \quad (5)$$

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

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(7)のように各剛体粒子が受ける加速度の平均値とする。

$$\vec{a}_g^k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{a}_i^k \quad (7)$$

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 r_g' と回転角の変化量 θ' を保たれるようにする。

$$\vec{r}_i' = \vec{r}_i^{k+1} - r_g^k \quad (8)$$

$$r_g^{k+1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{r}_i^{k+1} \quad (9)$$

$$r_g' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{r}_i' \quad (10)$$

$$\theta' = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^N m r_i' \times (r_i^k - r_g^{k+1}) \quad (11)$$

$$r_i' = r_g' + \begin{bmatrix} \cos\theta' - 1 & \sin\theta' \\ -\sin\theta' & \cos\theta' - 1 \end{bmatrix} (r_i^k - r_g^{k+1}) \quad (12)$$

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。

$$u_i^{k+1} = \frac{r_i'}{\Delta t} \quad (13)$$

$$r_i^{k+1} = r_i^k + r_i' \quad (14)$$

岸壁近傍に設置された浮体式構造物は実際には係留されている場合がほとんどである。著者ら³⁾は、係留索を模擬した拘束条件を浮体モデルの係留点と係留索の基点となる係留点との2点の粒子間に作用する線形ばねとして導入する手法を用いて係留力を表現した。しかし、本研究では浮体の乗り上がりの挙動やそれに伴う陸域への漂流を中心に解析を行うため、係留索はすでに破断しているものとして解析を行う。

4. 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が有する2次元水槽にて実施した。実験の対象は津波による浮体の乗り上げである。2次元水槽は、水槽長さ30m、高さ1.5m、奥行き0.6mであり、造波位置の水深は0.67mとした。水槽内には高さ0.5mの斜路と仮底を設けた。仮底部分の水深は0.17mである。さらに斜路から3.0mの位置に長さ2.0m、高さ0.22m、奥行き0.6mの岸壁模型を設置した。模擬津波には孤立波を採用した。

水槽実験の配置図を図-1に示す。計測項目は水面変位、流速、流体圧力、浮体運動である。水面変位は図-1におけるH1～H7に設置した波高計を用いて計測した。H1は斜路後方0.5m, H2は岸壁手前0.3mに設置した。岸壁上での波高計及び圧力センサーの詳細な配置を図-2に示す。岸壁上では波高計を岸壁先端からH3～H7の順に0.05m置きに設置した。流速は斜路直後0.5m, V1の位置で流速計により計測した。流体圧力は図-2に示すように圧力センサーを用いて岸壁にかかる圧力をP1の位置で計測した。P1の圧力センサーは仮底底面から0.1mの位置に設置した。浮体運動はビデオトラッカーを用いて、浮体の中心の軌跡を計測した。浮体模型は長さ0.23m, 高さ0.1m, 奥行き0.49m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、岸壁との離岸距離をゼロとした状態で設置した。尚、本水槽実験は完全な2次元ではなく、岸壁模型と水槽側面両側の間に0.02m程度、浮体と水槽両側面の間に0.06m程度の隙間が存在する。

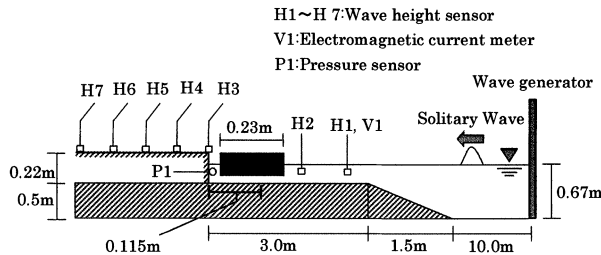


図-1 実験配置図

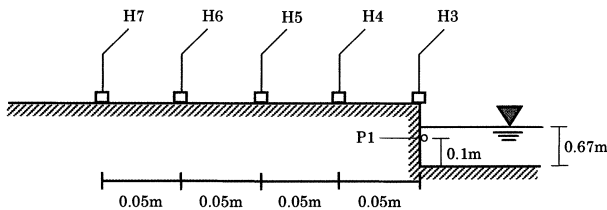


図-2 岸壁における波高計と圧力センサーの配置図

(2) 数値計算

数値計算では津波による浮体の岸壁への乗り上げを対象として、2次元MPS法による実験の再現を行った。計算モデルの諸元は図-1と同様である。ただし、造波板を岸壁から3.0m手前の位置に設置し、実験時に図-1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の造波板の水平変位として入力した。計算における座標系を図-3に示す。

MPS法の計算精度を検討するにあたり、水槽実験の再現を行なった。ここでは入射波高及び岸壁上の最大水位の再現性と、浮体の岸壁への乗り上げを対象とした。ここでの粒子間距離は5mmとし、総粒子数は25,199個である。

計算精度の検討の後、表-1に示した入射波波高3ケースを用いて、浮体の喫水を3パターン変化させた計算を行う。それにより、浮体の乗り上がり及び漂流距離が浮体の喫水と波高の変化によってどのように影響を受けるのか検討する。さらに岸壁上に建築物を想定した固定物体を設置し、浮体と建築物との衝突について検討する。

尚、衝突力 F_c は以下の式を用いて算出した。

$$F_c = \sum_{i=1}^N P_i \cdot \Delta S_i \quad (15)$$

P_i は固定物体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。尚、浮体及び固定物体の破壊や変形等は考慮していない。

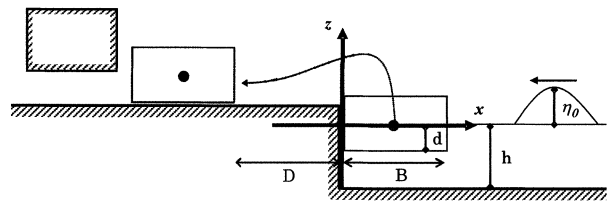


図-3 座標系

表-1 数値計算における波高、喫水、粒子数

	Wave height of H3 (m)	draft (m)	Number of particle (number)
case 1	0.063	0.025	27149
		0.035	
		0.045	
case 2	0.079	0.025	27103
		0.035	
		0.045	
case 3	0.124	0.025	26965
		0.035	
		0.045	

(3) 結果の比較及び検討

以下に実験時のH3での最大波高が0.065mの時の入射波高、岸壁溯上後の水位、流体圧力、浮体運動を比較した結果の一部を示す。

図-4はH3で計測した最大波高である。本研究では岸壁を設置しない状態で計測したH3での最大波高を入射波高と定義する。本模擬津波は波高計に入射してから通過するまでに2秒程度を要する。この結果から、MPS法は孤立波が入射し、水位が最大になる過程が非常によく再現できている。それ以降で差異が見られるが、これは数値計算では造波板の距離が水槽実験よりも近く設定されているためである。しかし、浮体の乗り上がり現象では、水位の最大上昇量が支配的であるため、浮体の乗り上げを評価する上では本結果は問題のない範囲でよい一致を示していると考えられる。

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ものである。 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。この結果から、岸壁に孤立波が溯上してから 0.1m までは非常に良い一致を示していることが確認できる。しかし、0.15m 以降、水位が低くなるにつれて差異が生じてくる。また、図-6~図-7 は岸壁上に設置した H4~H7 の波高計で計測した最大水位を時系列で示したものであるが、これらの結果からも 0.15m 以降、計算値と実験値にズレが見られる。これは水槽実験では岸壁模型と 2 次元水槽の側面の壁との間に隙間が存在したため、それによって孤立波が岸壁に入射した際、その隙間に水が流れ込み、岸壁後方に進む毎に波高が低くなっていったことが原因だと考えられる。実際にこの現象は水槽実験の際に確認されている。よって、本結果から MPS 法の計算精度が低いわけではなく、むしろ 2 次元空間における値の正確性という意味では MPS 法の方が正しいと考えることができる。

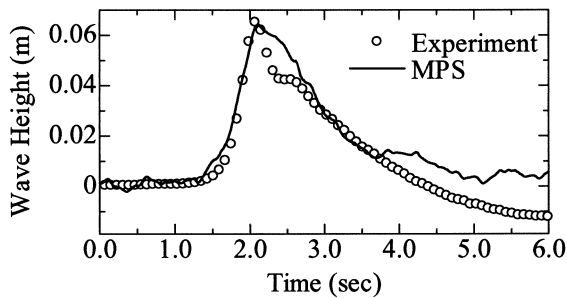


図-4 入射波高の比較

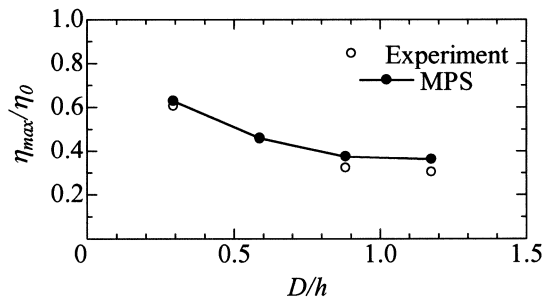


図-5 岸壁上での最大水位分布の比較

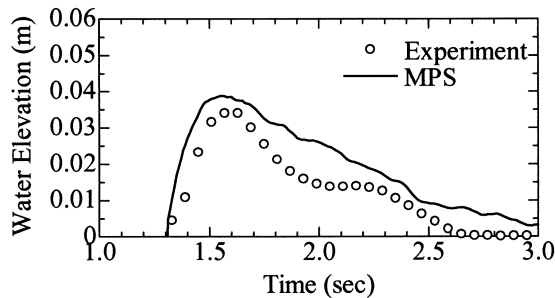


図-6 岸壁上 H4 での最大水位の比較

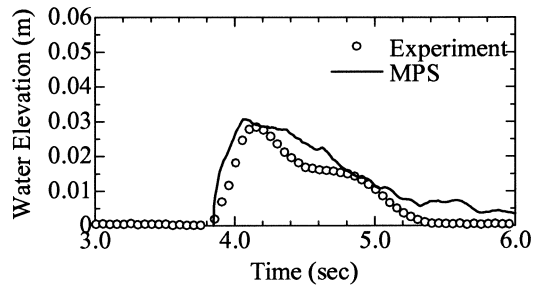


図-7 岸壁上 H5 での最大水位の比較

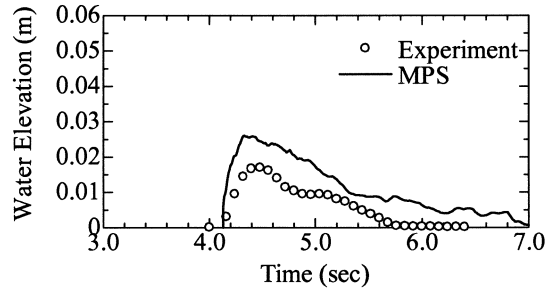


図-8 岸壁上 H6 での最大水位の比較

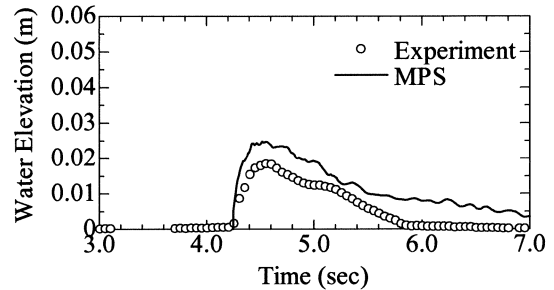


図-9 岸壁上 H7 での最大水位の比較

図-10 は岸壁にかかる流体圧力を無次元化して比較した結果である。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-10 から MPS 法では圧力が振動するため最大値が多少大きく評価されているが、その問題を考慮しても数値計算と水槽実験の結果がよい精度で一致していることが確認できる。

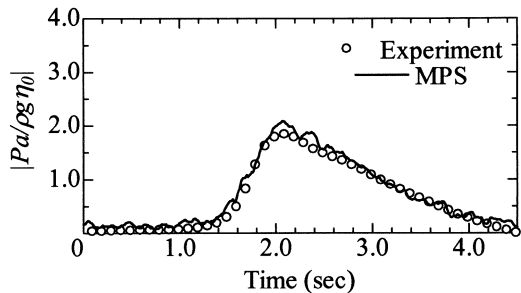


図-10 流体圧力の比較

図-11, 図-12 はそれぞれ岸壁に乗り上がる際の浮体の中心の水平変位, 鉛直変位の結果を比較したものである。図-13 は岸壁に乗り上がる際の浮体の中心の軌跡を比較したものである。図-14 は浮体の乗り上がりを見ながらスナップショットで比較したものである。孤立波によって岸壁に乗り上がった浮体は岸壁端部から 0.4m 程度押し流された後, そこに留まる。図-11~図-14 から, 数値計算と水槽実験の結果が非常に一致を示していることが確認できる。図-12, 図-13 を見ると岸壁溯上後の鉛直変位と軌跡に多少の差異が見られるが, これは前述した水槽実験での岸壁模型と 2 次元水槽の側面の壁との間の隙間と水槽側面と浮体の間の隙間に浮体下面の水が逃げたためである。

図-14 は浮体の乗り上がりを見ながらスナップショットで比較したものである。この結果からも大波により浮体が岸壁に乗り上がる様子が非常に精度よく解析できていることがわかる。

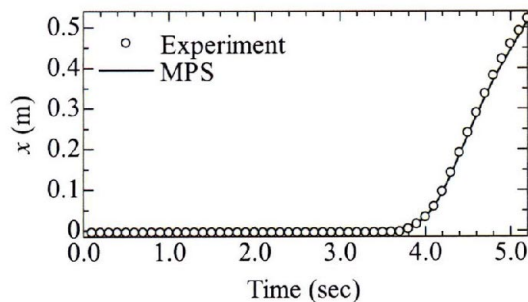


図-11 浮体の水平変位の比較

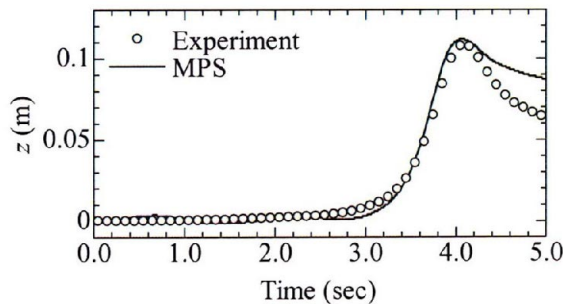


図-12 浮体の鉛直変位の比較

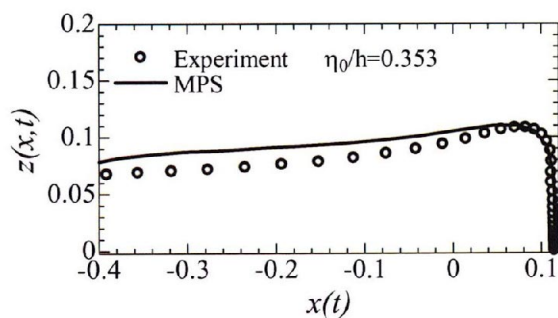


図-13 浮体の軌跡の比較

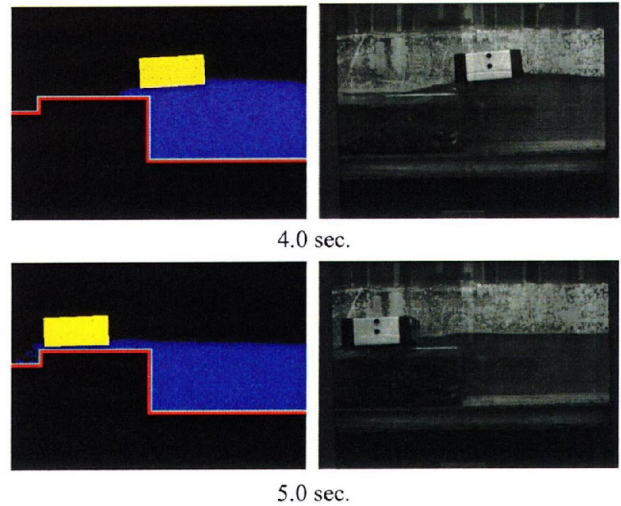


図-14 浮体の乗り上がりのスナップショットの比較

(4) 数値計算による漂流距離と衝突力の検討

前節において津波による岸壁近傍の浮体式構造物の乗り上がり問題に対する2次元MPS法の適用性について水槽実験と比較・検討を行ない, その有用性を確認することができた。そこで津波により岸壁に乗り上がった浮体が岸壁上を漂流する際の漂流距離と岸壁上に建築物が存在した場合の浮体と建築物の衝突力についてMPS法により検討を行なった。

図-15は表-1に示した3ケースの漂流距離についての結果であり, 波高に対して喫水の変化がどのように影響するのか検討した。無次元化に使用したパラメータは図-3のとおりである。図-15から波高が高くなると直線的に漂流距離が増加し, 最大で浮体幅の10倍近く漂流することが確認できる。さらに喫水の変化は波高の変化に比べて, 漂流距離にはほとんど影響しないという結果を得た。本研究では模擬津波として孤立波を採用したが, 実際の津波は波というより川の流れに近い現象であり, 漂流距離はより増加すると考えられる。そして, それにより建築物との衝突といった問題が起こることが想定される。

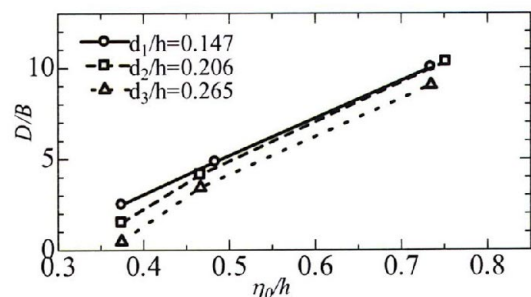


図-15 波高と喫水の変化による漂流距離の比較

表-1におけるCase 3の模擬津波を用いて, 岸壁上に建築物が存在した場合の浮体と建築物の衝突力についてシミュレーションを行なった。岸壁端部からピロティ形式の建築物を模擬した固定物体までの距

離は0.5mである。図-16は岸壁に乗り上がった浮体モデルが固定物体に衝突する様子のスナップショットである。また、図-17は浮体モデルが固定物体に衝突した際の固定物体にかかる衝突力を示したグラフである。図-16のように模擬津波によって岸壁に乗り上がった浮体はそのまま押し流され固定物体に衝突する。図-17からMPS法での解析結果では固定物体に浮体モデルが衝突した際、固定物体には44N程度の衝突力がかかっていた。このことからMPS法によって浮体が構造物に衝突した際の衝突力の性状を定性的にはあるが捉えることができたと考えられる。しかし、今後は水槽実験との比較を行うなど、衝突力の性状や衝突のメカニズム、計算結果の妥当性についてさらなる検討を行なう必要がある。

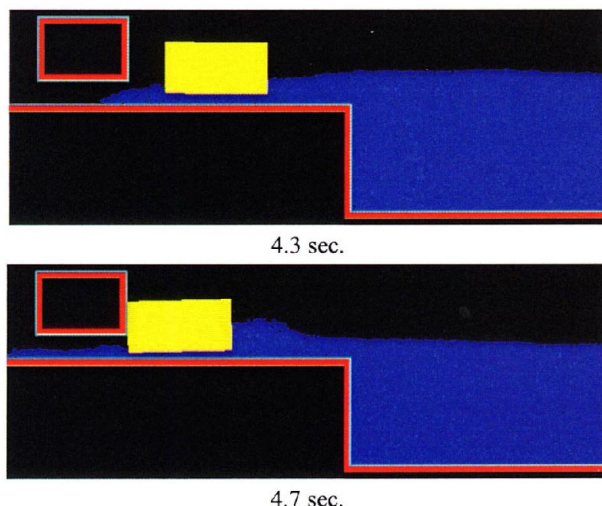


図-16 浮体と固定物体の衝突のスナップショット

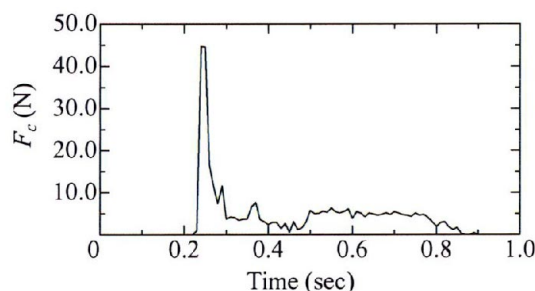


図-17 固定物体の衝突面にかかる衝突力

9. 結言

本研究では津波による浮体式構造物の岸壁への乗り上がりの挙動予測に対する2次元MPS法プログラムコードの適用性を水槽実験との比較を通して検討し、以下のような知見を得た。

- 1) 岸壁近傍での浮体の乗り上がり挙動に関してMPS法と水槽実験とで比較を行った。その結果、波高、流体圧力、浮体の乗り上がりにおいて、それぞれの結果はよい一致を示した。

- 2) 岸壁上に乗り上がった浮体式構造物の漂流距離及び建築物との衝突力について検討を行なった。その結果、津波によって岸壁上に乗り上がった浮体は最大で浮体幅の10倍近くも漂流し、陸上の建築物と衝突する可能性が十分にあることが確認できた。そして建築物と浮体が衝突する様子をシミュレーションによって捉えることができた。

本研究により、MPS法は2次元問題における津波による浮体式構造物の乗り上がり現象を精度よく解析できるということが確認できた。今後は、津波による浮体式構造物の乗り上がり挙動予測法として本シミュレーション手法を確立するために、係留索の影響の考慮、衝突力の水槽実験等とのより詳細な比較・検討及び物体の物性や構造の考慮、3次元問題での検討などを行っていく必要がある。

謝辞: 本研究は文部科学省科学研究費補助金基盤研究B及び笹川科学研究助成によって行われたことを付記いたします。また本研究を行なうにあたり、実験及び計算に協力していただいた鈴木雄太氏（研究当時、本学大学院生）、伊藤雅文氏（研究当時、本学卒研生）に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 五十里洋行，後藤仁志：津波氾濫による桁橋被災過程の数値シミュレーション，海岸工学論文集，第54巻，pp.211-215，2007。
- 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：陸上溯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) 増田光弘，増田光一，居駒知樹，鈴木雄太，大塚文和：MPS法による船舶の岸壁への乗り揚げり挙動に関する研究，第33回海洋開発シンポジウム，2008。
- 6) Koshizuka, S. and Oka, Y.: Moving-Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid, *Nucl. Sci. Eng.*, 123, pp.421-434, 1996.
- 7) Maeda, H., Asanuma, T., Nishimoto, K., Tsukamoto, M. M., Masuda, K. and T. Ikoma.: Numerical Analysis for Hydrodynamic Motions of Floating Structure Using MPS Method, *Proc. of OMAE'04*, 51435, 2004.
- 8) (社) 日本海難防止協会：海難防止の調査研究事業報告書 ー地震に伴う津波に対する安全防災対策の調査研究一，1981。