

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 —

A STUDY ON THE COLLISION FORCES INDUCED BY
THE FLOATING VESSELS WASHED ONTO THE APRON BY TSUNAMIS
- ON THE EFFECTS OF TSUNAMI PROFILES -

増田光弘¹・増田光一²・居駒知樹³・樋口直人⁴
Mitsuhiro MASUDA, Koichi MASUDA, Tomoki IKOMA
and Naoto HIGUCHI

¹学生会員 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 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

³博(工) 日本大学専任講師 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)

The present paper describes the effects of tsunami profiles to collision forces induced by the floating vessels washed onto the apron by tsunamis using the MPS method. The effectiveness of application is also verified.

The two dimensional MPS method is used in this paper. It explains the governing equations and the modeling of behavior of floating body in the MPS method in the beginning. Afterwards, the spatial resolutions, the collision forces, and the effects of tsunami profiles are examined. The spatial resolutions are examined by adjusting the Inter-particle distance. The collision forces are examined by comparing between the numerical results and the experimental results. Finally, the floating body washing onto the apron is examined by using various tsunami profiles and the effects of tsunami profiles are discussed.

Key Words : *Tsunami, MPS method, Floating vessel, spatial resolution, Collision force, tsunami profile, Water tank experiment*

1. 緒言

沿岸域に津波が来襲した場合、岸壁近傍に設置された船舶を含む浮体は係留索の破断によって、岸壁へ遡上し、陸域へ漂流する可能性がある。さらに、津波によって陸域に漂流した浮体が陸上の建築物や、そこに暮らす人々に対して被害を及ぼすことが予想される。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、津波のような大波高の波による岸壁への浮体の遡上や、その後の漂流、建築物との衝突といった現象は、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、まず後藤ら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。また、五十里ら³⁾は津波氾濫による桁橋の被災過程に関して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っている。また、廉ら⁵⁾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。しかし、津波による浮体の係留索の破断や転覆、岸壁への遡上、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。著者ら⁶⁾は、2次元MPS法を用いて、模擬津波として採用した孤立波の波形と岸壁遡上後の水位、孤立波が岸壁に入射した際の流体圧力、孤立波による浮体の岸壁への遡上や漂流を精度よく計算できることを確認した。また、MPS

法における係留索影響の導入方法を提案した。しかし、本問題にMPS法を適用するにあたって、空間解像度の違いが計算精度に与える影響については十分に検討が行われていなかった。また、岸壁に乗り上がった浮体と岸壁上に設置された建築物との衝突に関しても十分な検討が行われていなかった。さらに、これまでの研究では模擬津波として孤立波を採用してきたが、浅海域における津波の波形形態は孤立波だけではなく、段波や極浅海波といったいくつかの波形形態として模擬できると考えられたため、それらを考慮する必要があると考えられる。

本研究の目的は、岸壁近傍に設置された浮体が津波によって陸上に遡上し、漂流した後、建築物に衝突する一連の現象の予測に対するMPS法の適用性を明らかにすることである。そこで、まず計算精度を大きく左右する空間解像度の違いが計算結果に与える影響について考察を行う。また、岸壁に遡上した浮体と、岸壁上に設置された建築物の衝突力について、水槽実験結果との比較によって考察を行う。さらに、孤立波、段波、極浅海波といった3つの模擬津波を用いて、津波の波形形態の違いが岸壁近傍に設置された浮体の挙動に与える影響について、シミュレーションを実施し、考察を行う。

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。

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

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

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。以降の離散化及びモデル化は越塚ら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、浮体のモデル化については、以下に解説を行う。

(2) 浮体運動

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 $\vec{r}_g$ 、慣性モーメント I を求める。

$$\vec{r}_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{r}_i \quad (3)$$

$$I = \sum_{i=1}^N m \left| \vec{r}_i - \vec{r}_g \right|^2 \quad (4)$$

ここで、粒子 i の座標を $\vec{r}_i$ 、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。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 $\vec{r}_g'$ と回転角の変化量 θ を保たれるようにする。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。

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

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

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

$$\theta' = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^N m \vec{r}_i' \times (\vec{r}_i^k - \vec{r}_g^{k+1}) \quad (11)$$

$$\vec{r}_i' = \vec{r}_g' + \begin{bmatrix} \cos \theta' - 1 & \sin \theta' \\ -\sin \theta' & \cos \theta' - 1 \end{bmatrix} (\vec{r}_i^k - \vec{r}_g^{k+1}) \quad (12)$$

$$\vec{u}_i^{k+1} = \frac{\vec{r}_i'}{\Delta t} \quad (13)$$

$$\vec{r}_i^{k+1} = \vec{r}_i^k + \vec{r}_i' \quad (14)$$

岸壁近傍に設置された船舶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⁶⁾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、本研究では津波による浮体の岸壁への遡上およびその後の衝突の再現性について検討を行うため、係留索影響は考慮していない。また、物体の物性や構造についても考慮していない。

3. 空間解像度の検証

(1) 数値計算

2次元MPS法を用いて数値計算を行った。計算対象は津波を模擬した孤立波の入射波形であり、空間解像度が計算結果に対してどのような影響を与えるのか検討を行った。MPS法における空間解像度は粒子間距離によって決定される。計算モデルを図-1に示す。水槽長さを3.0mとし、水深を0.11mとした。造波境界にはピストン式造波板を採用し、計測対象は造波板から1.5m離れた位置での孤立波の入射波形とした。計算の諸元を表-1に示す。ここでは、これまでの研究においてよい精度で計算を行うことができた粒子間距離0.005mを基準とし、波高を0.35m、0.5mとした2ケースを用いて考察を行った。それぞれのケースで常に同じ造波データを用いて造波板を制御し、粒子間距離は0.01m, 0.075m, 0.005m, 0.0025m, 0.002mの5ケースとした。

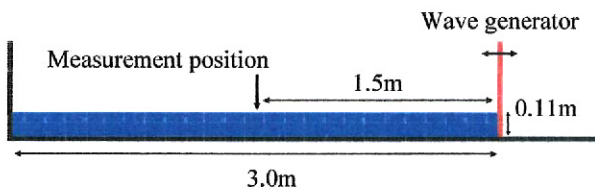


図-1 計算モデル

表-1 計算条件

Case 1		
Wave height [m]	Particle number [number]	Particle distance [m]
0.035	6,069	0.01
	10,088	0.0075
	21,129	0.005
	78,249	0.0025
	120,309	0.002
Case 2		
Wave height [m]	Particle number [number]	Particle distance [m]
0.05	6,069	0.01
	10,088	0.0075
	21,129	0.005
	78,249	0.0025
	120,309	0.002

(2) 数値計算結果および考察

図-2～図-5はそれぞれのケースの時系列波形を表したグラフである。図-2、図-4は0.01m, 0.075mの2ケース、図-3、図-5は0.005m, 0.0025m, 0.002mの3ケースを比較したグラフである。

図-2を見ると、図-3の基準とした0.005mの結果に比べて波形が荒く、波高も小さくなっていることがわかる。特に0.01mのケースでは波形が大きく崩れている。それに対して、図-4を見ると、若干波高が小さくなり、0.01mのケースでは波形が痩せてはいるものの、図-5の解像度の高いケースに比べてそれほど大きな違いは見られない。これは、波高に対して粒子間距離が十分ではなかったことが原因である。それは、図-3、図-5のケースのように徐々に粒子間距離が細くなるにしたがって波形が安定していくことからわかる。図-3、図-5を見てもわかるように粒子間距離が0.005m以下になると、ほとんど同じ波形を描いている。特に図-5の0.0025mと0.002mのケースを見るとほとんど波形が重なっており、2.3秒付近以降は完全に重なっている。それに対して、0.005mのケースは波形が若干荒いことがわかる。これらのことから、より精度の高い計算を行うには0.0025m程度の粒子間距離で計算を行うことが望ましいと考えられる。しかし、解像度が高くなるということは粒子数が増加するということであり、粒子数の増加が招く計算時間の増大を考慮すると、これまでの研究や本結果から粒子間距離が0.005m程度であればある程度の計算精度で計算を行うことができるといえる。本研究やこれまでの研究から、粒子間距離は波高を基準にして決定できることがわかった。波高に対して粒子間距離が1/10程度であればある程度よい計算精度で計算を行うことができ、1/20程度であれば十分な計算精度で計算を行うことができる。

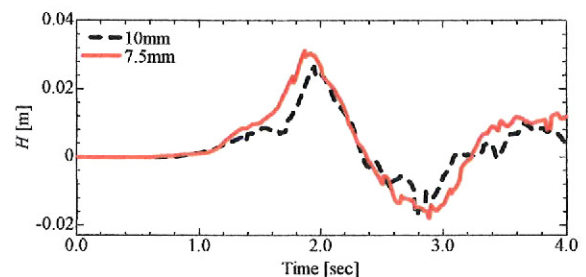


図-2 粒子間距離0.01m, 0.075mの入射波形（Case 1）

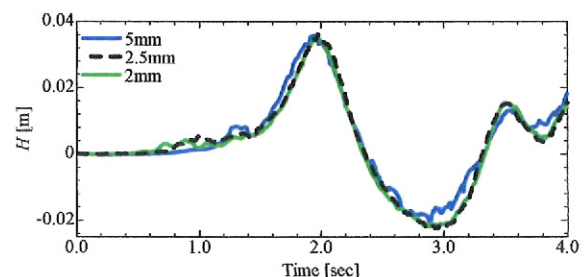


図-3 粒子間距離0.005m, 0.0025m, 0.002mの入射波形（Case 1）

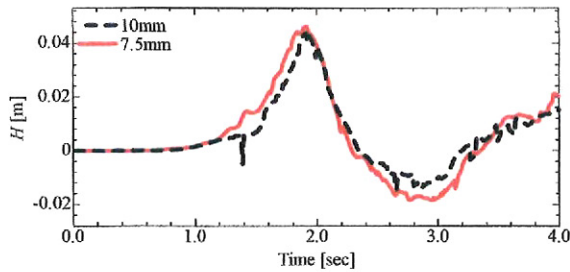


図-4 粒子間距離0.01m, 0.075mの入射波形 (Case 2)

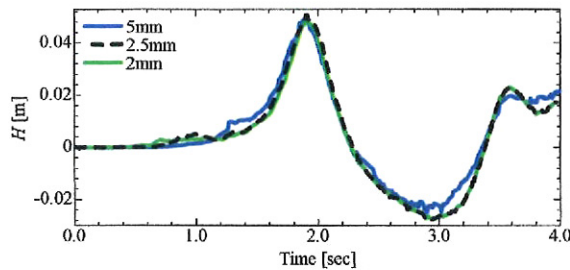


図-5 粒子間距離0.005m, 0.0025m, 0.002mの入射波形 (Case 2)

4. 岸壁に遡上した浮体による衝突力の検証

(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。計測対象は模擬津波によって岸壁に遡上した浮体と岸壁に設置した建築物との衝突力である。水槽実験の配置図を図-6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0.49m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、岸壁との離岸距離がない状態で設置した。岸壁端部から建築物模型までの距離 x を0.25m, 0.30m, 0.35mの3ケースとし、検力計によって浮体が衝突した際、建築物にかかる衝突力を計測した。建築物は幅0.2m、高さ0.13m、奥行き0.50mであり、岸壁底面から0.1m浮いた位置に設置した。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。

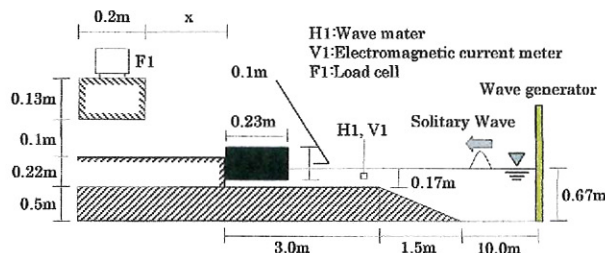


図-6 実験配置図

(2) 数値計算

数値計算では、2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-6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。この時、粒子間距離は0.005m、総粒子数は25,337個である。

なお、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、ここでは浮体および建築物の破壊や変形は考慮されていない。

(3) 水槽実験結果と数値計算結果の比較・考察

図-8は、岸壁に遡上し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。図-9は岸壁端部から建築物までの距離 x を0.25m、図-10は x を0.30m、図-11は x を0.35mとした時の浮体と建築物との衝突力を比較したグラフである。尚、本水槽実験では時間刻みを0.01秒で計測した。MPS法では、出力時の時間刻みを0.005秒としたが、水槽実験結果に合わせて時間刻みを0.01秒で表している。ただし、MPS法の結果の最大値は時間刻みを0.01秒で表しても変わらない。

図-8から、MPS法は津波によって岸壁に遡上し、そのまま押し流され、建築物に衝突する一連の現象を精度よく解析することができていることが確認できる。図-9の $x=0.25m$ の時の衝突力は、衝突した瞬間の最大値がよく一致している。ただし、水槽実験の値とは最大値の出る時刻と力積に差が見られる。これは、水槽実験では建築物と検力計を固定している実験器具が設置の都合上、浮体模型の衝突により振動してしまったことに起因している。ただし、浮体と建築物の衝突は0.02秒と一瞬の現象であり、瞬間的なピーク値がよく合っていることから、実用上問題のない範囲でよい一致を示しているといえる。図-10、図-11を見ると、衝突する瞬間の時間経過は非常によく一致している。しかし、建築物が岸壁から徐々に離れるにしたがってMPS法の方の値が小さくなっていく。これは、水槽実験は3次元的な影響が存在するため、MPS法に比べて岸壁に遡上する水量が多く、MPS法での計算結果に比べて岸壁後方の速度の低下が少ないためだと考えられる。

これらの結果から、MPS法は浮体と建築物の衝突をよい精度で解析できると考えられるが、衝突のような現象は物体の物性や構造も大きく影響してくるため、今後は物体の物性や構造を考慮する手法を検討していく必要がある。また、MPS法での衝突力が、時間刻みを荒くしても最大値は変わらなかったこと

から、本研究結果は妥当なものだと考えられるが、衝突力は瞬間的な現象であるため、今後はより細かい時間刻みで検討を行う必要がある。

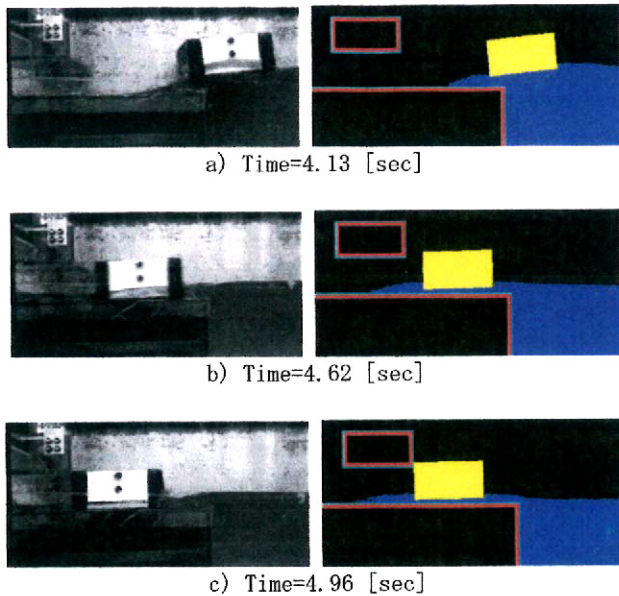


図-8 スナップショットによる数値計算結果と水槽実験結果の比較 ($x=0.35\text{m}$)

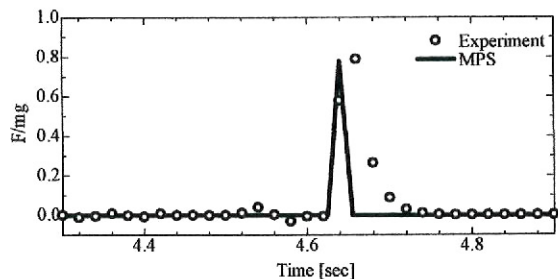


図-9 衝突力の比較 ($x=0.25\text{m}$)

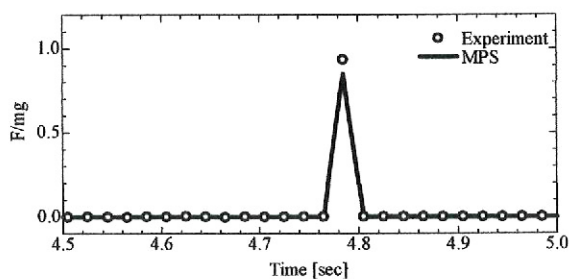


図-10 衝突力の比較 ($x=0.30\text{m}$)

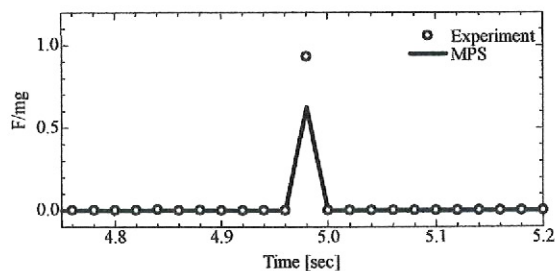


図-11 衝突力の比較 ($x=0.35\text{m}$)

5. 津波波形の影響を考慮した浮体の遡上シミュレーション

(1) 数値シミュレーション

津波波形の影響を考慮した浮体の遡上シミュレーションを行った。模擬津波には、孤立波、段波、極浅海波の3つの形態を用いた。計算モデルは前章で用いたものと同じものである。ただし、段波は図-12のように設置した水柱を崩壊させることにより、造波した。水柱の規模は、幅0.5m、高さ0.145mとした。また、実際の津波は2波目、3波目の波高の方が高くなるといわれていることから、極浅海波については3波造波した。ここでの粒子間距離は、0.005mとした。前章で用いた波高0.065mの孤立波を基準とし、段波および極浅海波の1波目の波高を孤立波の波高と同じ高さになるようにした。

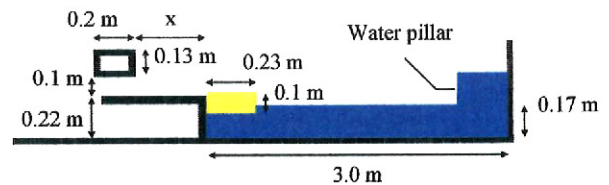


図-12 計算モデル

(2) 数値計算結果および考察

図-13は、孤立波、段波、極浅海波それぞれの形態の入射波形を比較したグラフである。図-14は岸壁に遡上した各模擬津波の最大水位を比較したグラフである。図-15は、各模擬津波によって岸壁に遡上する際の浮体の重心位置の軌跡を比較したグラフである。図-16は各模擬津波によって岸壁に遡上した浮体と建築物との衝突力を表したグラフである。 η は入射波形、 η_{max} は各波高計の最大波高、 D は岸壁の先端からの距離、 h は水深を示している。

図-13から、段波は孤立波に比べて瘦せた波形になっていることがわかる。これは、孤立波がソリトンの性質を有している波であるのに対して、段波は崩れながら進行する波であるからである。また、孤立波と極浅海波を比較すると、極浅海波は瘦せた波形になっている。これは、極浅海波は h/L が1/20以下であるため、浅水変形による底面の影響を強く受ける特性をもっているためである。図-14を見ると、極浅海波の岸壁遡上水位は、1波目は孤立波、段波とそれほど大きな違いはないものの、2波目、3波目になるにつれて水位が高くなっている。特に3波目は約3倍以上にもなっている。これは、岸壁に入射した際、重複波となり、波高が高くなったためである。図-15を見ると、孤立波では浮体はそのまま岸壁に遡上し、段波では岸壁に浮体底面を引っ掛けた後、そのまま元の位置に落下した。これは、前述したとおり、孤立波はソリトンの性質を有しているため波形が崩れにくく、段波は波形が徐々に崩れていく

ことに起因している。極浅海波では、2波目までは岸壁に遡上しないものの、3波目で浮体は岸壁に遡上する。この時、図-14に示したとおり、岸壁遡上水位も高くなり、孤立波に比べて陸域後方への浮体の漂流距離は約1.5倍も長くなった。岸壁に遡上した浮体が建築物と衝突した際の衝突力は、図-16のようになっている。極浅海波の方が漂流距離は長くなるが、孤立波の衝突力の方が2倍以上も大きくなっている。これらの結果から、模擬津波として浮体に最も大きな影響を与えるのは孤立波であることが確認でき、浮体の岸壁への遡上の被害をシミュレーションする上では、安全性を重視する場合、孤立波が有効であるといえる。

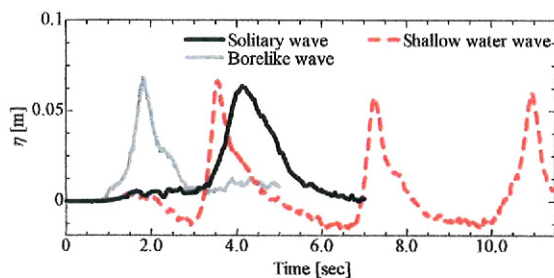


図-13 各津波形態の入射波形

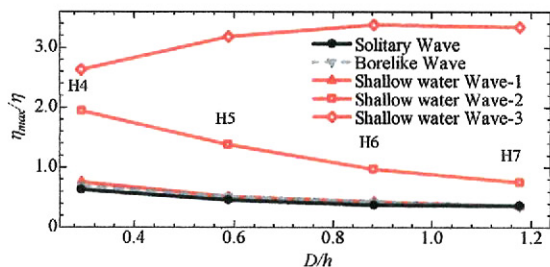


図-14 各津波形態の岸壁遡上水位

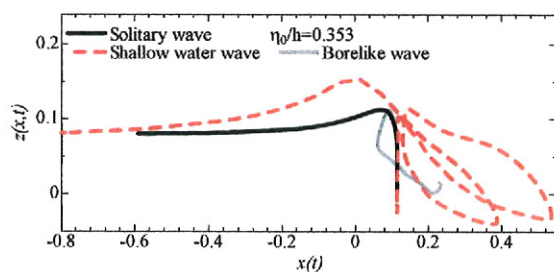


図-15 各津波形態での浮体の遡上の軌跡

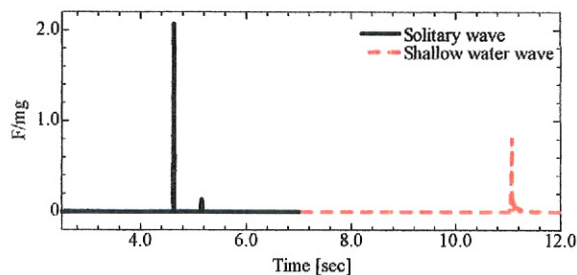


図-16 各津波形態での衝突力

6. 結言

本研究では、以下のような知見を得た。

- 1) 空間解像度の違いが計算結果に与える影響について検討を行った。MPS法ではより粒子間距離が細かいほど高精度な計算を行うことができるが、粒子間距離を細かくすると計算時間の増大を招くため、計算のスケールごとに粒子間距離を調整する必要がある。本研究やこれまでの研究から、波高に対して粒子間距離が1/10程度であればある程度よい計算精度を保証でき、1/20程度であれば十分な計算精度を保証できることがわかった。
- 2) 岸壁に遡上した浮体と建築物の衝突力について検討を行った。それにより、MPS法は浮体と建築物の衝突をよく再現できる可能性があることがわかった。今後は、より詳細な時間刻みでの検討や、3次元影響の考慮、物体の物性や構造の考え方など、様々な点から検討を行っていく必要がある。
- 3) 孤立波、段波、極浅海波といった複数の津波波形の違いを考慮した浮体の遡上シミュレーションを行った。それにより、極浅海波は複数回押し寄せることで孤立波や段波を超える遡上水位に達するが、1波の津波としては、孤立波が最も浮体の乗り上がり挙動や建築物との衝突力に与える影響が大きいことがわかった。今後は、段波および極浅海波を用いた水槽実験との比較・考察を行うことによって、さらなるMPS法の有用性を示していく必要がある。

謝辞: 本研究は文部科学省科学研究費補助金基盤研究Bによって行われたことを付記いたします。

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) 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.
- 4) 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.
- 5) 康慶善, 水谷法美, 白石和陸, 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.
- 6) 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, 海洋開発論文集, Vol.24, pp.999-1004, 2008.