

令和元年6月17日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06588

研究課題名（和文）津波による漂流物が建築物に与える衝撃荷重特性と被災規模の定量的評価

研究課題名（英文）Quantitative evaluation of impact load characteristics and damage scale of buildings by tsunami drifting objects

研究代表者

増田 光一（MASUDA, Koichi）

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：10120552

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究で開発した被衝突構造体を仮想弾性境界上の解析解で近似し、粒子法に組み込んだハイブリットMPS法は、被衝突体から戻り流れを考慮できないという弱点があった。平成30年度は、昨年度までに開発した数値解析法の弱点を克服すべく、次の2つの研究目標を設定した。第1の目標は、昨年度開発したハイブリットMPS法にミラー境界を導入することによって被衝突体からの反射流の影響を考慮できる数値解析法を開発し、反射流の影響を考慮した解析を可能にした。第2の目標である被衝突体・漂流物・津波遡上流の3つの連成（3連成モデル）を考慮できる3連成モデルMPS法を開発し、水槽実験との比較により本解析法の有用性を明確にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により津波発生から陸上遡上に伴う、海上と陸上それぞれから発生しうる漂流物が、建築物にどの程度の被害をもたらすのかを大まかに理解できるようになる。また、開発された手法により様々な条件・状態に対する衝突事象を再現することで、必要な減災対策をより低コストで検討することができるようになる。現状では、同様の検討は若干実施されている程度であり、個々の特性の把握にとどまる。地域全体の被災・損害を被災後に必要な修繕・修復まで検討するための材料はあまりにも少なく、本研究はそれを補完できる成果を提供する。本研究はさらに複雑な被災状況の再現・評価のための基礎技術を開発するという側面もある。

研究成果の概要（英文）：The hybrid MPS method which approximates the collided structure developed in 2017 with virtual elastic boundary can not consider return flow from the collided structure. It is the weak point of hybrid MPS method. The following two research goals are set up to overcome the weaknesses of the numerical analysis method developed by last year. The goal of first is to develop a numerical analysis method that can consider the influence of the reflected flow from the collided object by introducing a mirror boundary to the hybrid MPS method developed and enabled. As second target, we develop the MPS method considered three coupling of a colliding body-a drifting object-upstream of a tsunami, and the numerical results by developed the MPS method are compared with the experimental results and it is clarified that the two numerical analysis methods proposed in this research can estimate the collision load due to the tsunami drifting object with sufficient accuracy for practical use.

研究分野：建築工学（海洋建築学、構造）

キーワード：津波漂流物 漂流物の衝突荷重 反射流 粒子法によるシミュレーション 水槽実験 衝突荷重の予測

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2011年に東北地方を中心とする太平洋沿岸を襲った大津波は我々に大きな衝撃を与えた。その後、津波発生メカニズム、津波伝播、海岸構造物、そして陸上への津波遡上とそれによる衝撃荷重を含めた建築物への津波荷重評価などいくつかの分野で研究が進められた。歴史的には大津波が陸上の建築物や居住地域を襲うことは理解されていたが、結果的にその対策が十分であったとはいえず、事実、近い将来の発生が確実視されている南海・東南海・東海連動地震を想定した大津波への対策も数多く研究されているのが現状である。

波による陸上の建物の被災の評価のためには、津波発生、津波伝播、陸への遡上、陸の地形を考慮した浸入、建物への津波荷重評価、といったプロセスをたどる必要があり、さらにその中には漂流する物体の振る舞いとそれらが建造物に衝突するなどの様子が考慮されるべきである。漂流物には船舶、コンテナや自動車がある。船舶が津波によって陸上に打ち上げられ、それがさらに漂流するという点については必ずしも数多くの研究が行なわれているとはいえない。

津波を原因とする、建物に対する危険事象は流体荷重だけでなく、上述した漂流物の衝突といった事象も想定されるべきである。その際、これらの事象の取り扱いとして考慮されるべきは海水という流体の存在である。その方法としては幾つかのアプローチが考えられる。

まず、衝突荷重の扱いとしては、1)漂流物が建物に衝突する慣性力のみを考慮する、考え方と、2)流体荷重を同時に考慮する、方法である。次に、衝突された建物の応答として、a)周辺の流体の存在は考慮しない、b)周辺の流体の存在は定数として付加質量的に考慮する、c)建物の変形・崩壊を流体の振舞いと合わせて計算する、といったアプローチが考えられる。これらの組み合わせも可能である。1-a や 1-b の組み合わせは例えばモリソン式や個別要素法といった手法により対応が可能であるが、津波の遡上流を予測する必要があり、精度を上げるためには、津波伝播・遡上といった数値計算が有効である。それに従えば、衝突先の建物との複雑な流体力学的相互影響は無視したうえで、2)の流体荷重を考慮することも可能である。しかし、より実際に近い状況、すなわち時々刻々と変化する漂流物と流体と建物との相互影響を考慮するためには数値計算力学(CFD)的手法が必要である。津波漂流物の衝突力は、時々刻々と変化する流体との相互作用の影響を考慮する必要がある。建築物荷重指針・同解説(2015)<sup>1)</sup>には、漂流物による衝突荷重についていくつかの評価式が示されているが、未だに構造物の応答特性に応じた流体力変化による衝突力の時刻歴変化の傾向それ自体に不明な点が多い。この問題を明らかにするために、ひいては建築物の津波防災・減災を実現するためには、津波漂流物の衝突が構造物に与える影響を合理的に評価可能な数値シミュレーション手法を開発する必要がある。津波漂流物の衝突現象を再現できる有力な手法として、Koshizuka ら<sup>2)</sup>によって提案された MPS (Moving particle semi-implicit) 法がある。村田<sup>3)</sup>は越塚ら<sup>4)</sup>が提案した厚肉弾性体モデルを用い、構造物に作用する津波漂流物の衝突力を評価した。この研究では、津波流体と漂流物の複合的な力積の関係を示しているが、構造物ではなく漂流物を弾性体として扱っている。津波漂流物の衝突時の構造物の応答を解析するためには構造物特有の境界条件を弾性体モデルに導入し、数値解析手法として構築する必要がある。

### 引用文献

- 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)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.
- 4)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.

### 2. 研究の目的

本研究では、津波漂流物の衝突時の構造物の応答を解析するために、流体 - 漂流物 - 構造物連成を実現できる MPS 法の解析手法を開発し、衝突実験との衝突力、衝突時間、構造物変位の比較を通じ、その適用性を示す。

### 3. 研究の方法

構造物の計算には越塚らが提案した厚肉弾性体モデルを用いる。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。ここで、 $\rho$ :密度、 $\varepsilon^\gamma$ :体積ひずみ、 $\delta^{\alpha\beta}$ :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  $E$ :ヤング率および  $\nu$ :ポアソン比と次の関係になる。

$$\rho \frac{Dv^\alpha}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x^\beta} (\lambda_{els} \varepsilon^{\gamma\gamma} \delta^{\alpha\beta} + 2\mu_{els} \varepsilon^{\alpha\beta}) \quad (1)$$

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

$$\mu_{els} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

### (1) 衝突実験概要

津波漂流物の衝突力と漂流物の衝突速度を計測するために、日本大学理工学部テクノプレース 15 の二次元水槽で実験を行った。構造物、漂流物模型、岸壁模型は図 1 に従い設置した。岸壁から造波板側に 2.0m 離れた場所で波高が 0.15m となる孤立波を造波し、図 1 に示す H と V の地点で波高と流速を計測した。漂流物模型は斜路上端から 2.7m 離れたところに位置する高さ 0.2m の岸壁先端部に接するよう設置した。漂流物模型は大型船舶を想定したが、水槽の幅の制限から長さを 0.5m、幅を 0.1m、高さを 0.1m、吃水を 0.10m とした縮尺模型をファルカタ材で製作して使用した。岸壁への乗り上がり時に模型がロール方向へ回転するのを防ぐため、重心高さを模型底面から 3.0cm の位置になるよう設定した。構造物模型は直径 0.013m、長さ 0.89m、質量 1.2kg の丸鋼を使用し、岸壁先端から 0.60m の位置に上端部を万力で固定した状態で設置した。実験では孤立波により、漂流物模型を岸壁に乗り上げさせ、岸壁先端から 0.6m 離れた構造物に衝突させた。その時の漂流物の挙動と衝突速度および構造物のたわみを、ビデオトラッカーを用いて計測し、計測した構造物のたわみから(4)、(5)式を用いて衝突力を求めた。

$$F = kx \quad (4)$$

$$k = \frac{3EI}{l^3} \quad (5)$$

ただし、 $F$  : 漂流物の衝突力、 $k$  : 漂流物が衝突することで変形した構造物部材の有効剛性係数、 $x$  : 構造物の変位、 $E$  : 構造物のヤング率、 $I$  : 構造物の断面二次モーメント、 $l$  : 漂流物の衝突位置とする。

### (2) 三次元衝突計算概要

まず、図 1 と同様の計算格子を作成し、剛体として設定した構造物へ漂流物が衝突する直前までを計算した。

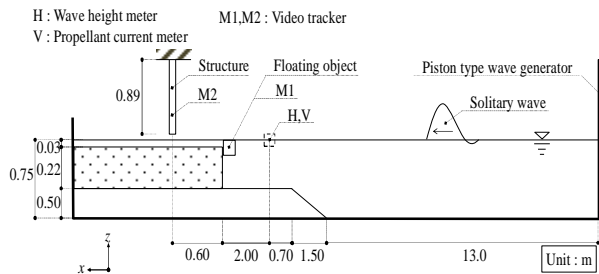


図 1 水槽実験概要

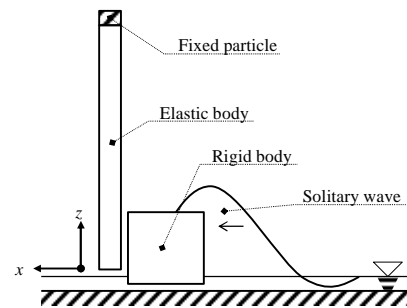


図 2 構造物弾性応答計算概要

表 1 構造物弾性応答計算諸元

計算時間	[sec]	0.38
計算時間刻み	[sec]	$5.0 \times 10^{-5}$
粒子間距離	[m]	0.01
MPS で入力した剛性	[N/m]	10.03

次に、構造物を弾性体として設定し、衝突現象を計算した。図 2 に構造物弾性応答計算概要図、表 1 に構造物弾性応答計算諸元を示す。計算時間刻みを  $5.0 \times 10^{-5}$  s とし MPS 法で入力した剛性を 10.03N/m とした。入力した剛性値は、速度を変化させた 7 ケースの片持ち梁への剛体衝突の数値実験を実施し、入力した剛性値と片持ち梁の振動周波数から得られた剛性の関係から、水槽実験で用いた片持ち梁の剛性と一致するよう補正をして定めた。

### 4. 研究成果

(1) 図 3 の左図に衝突位置での構造物変位の比較を示す。最大変位は実験値が 0.075m であるのに対し MPS では 0.087m と実験値より MPS の方が多少大きかった。衝突時間は実験値が 0.35s に対し MPS が 0.33s であり、衝突時間は実験値の方が 0.02s ほど長かった。しかしながら、時系列波形は非常に良い一致を示していることから、最大変位および衝突時間は MPS 法で再現できていることが確認できる。図 3 の右図に津波漂流物による時系列衝突力の比較を示す。MPS 法による衝突力は 2 種類の方法で

求めた。一つは構造物表面全体の粒子を圧力積分して求めた衝突力であり、もう一つは MPS で計測された変位と水槽実験で得られた鋼材の剛性を用いて(4)式に代入し求めた衝突力である。

(2) 図3右図中黒線で示す MPS の圧力積分による最大衝突力は 392.91N であり、実験値の 2.13 倍の値となった。これは構造物粒子と漂流物粒子の間に流体粒子が挟まることで、衝突面の粒子数密度が上昇し、圧力値が過大に計算されたことが原因であると考えられる。図4に流体粒子が構造物と漂流物に挟まれているときの可視化結果を示す。

(3) 図3右図中青線で示す、変位から求めた最大衝突力は 203.67N となった。実験に比べて、MPS 法による結果は多少過大であるが、両者は非常に良く一致していることが確認された。これらの結果から MPS 法の弾性体モデルを適用した構造物に対し、漂流物に作用する流体の影響を考慮した衝突による構造物変位、衝突力の再現が可能になったといえる。

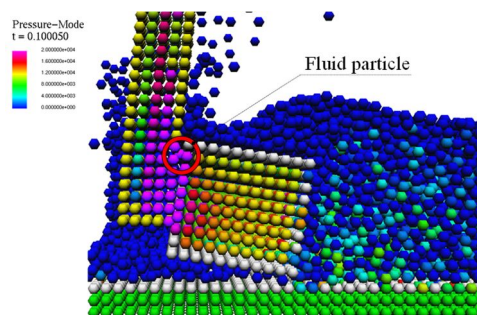
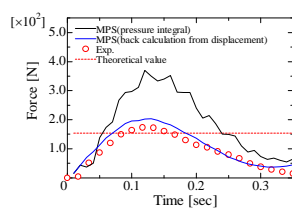
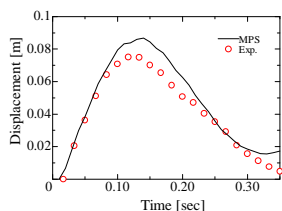


図3 構造物弾性応答計算結果(左図:衝突位置の構造物変位の比較,右図:時刻歴衝突力の比較図)

図4 衝突時の漂流物と構造物間に位置する流体粒子の圧力の可視化結果

(4) MPS 法の弾性体モデルを用いた衝突実験の結果、衝突時間と変位は精度よく再現できた。一方、圧力積分で求めた衝突力は実験に比べて過大に評価される場合があるが、補正を導入した剛性を設定した片持ち梁の変位から逆算した衝突力は実験値と良く一致し、衝突力を精度よく再現できることを確認した。本研究では流体 - 漂流物 - 構造物連成が実現できる MPS 法の解析手法を開発し、津波漂流物の衝突現象に適用できることを示した

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

増田光一, 村田一城, 居駒知樹: MPS 法による大型船舶の津波中挙動と構造物に作用する衝突荷重特性に関する研究(社)日本建築学会 構造系論文集第 741 号 pp.1823-1833, (2017), 査読有

増田光一, 相田康洋, 居駒知樹, 惠藤浩朗: 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 仮想弾性境界の有用性について, (社)日本建築学会 構造系論文集第 722 号 pp.813-823, (2016), 査読有

〔学会発表〕(計3件)

村田大地, 相田康洋, 増田光一, 居駒知樹, 惠藤浩朗: 30 MPS 法を用いた津波漂流物による衝突荷重算定に関する基礎的研究(社)日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会 第 27 回海洋工学シンポジウム, OES27-042, CD-ROM, (2018)

村田一城, 居駒知樹, 増田光一, 相田康洋, 惠藤浩朗, 松岡晃弘: MPS 法による沿岸域構造物に作用する津波漂流物の衝撃力と漂流挙動特性に関する研究 その 2 仮想弾性境界と FEMA 式の適用性の評価に関する検討 (特非)日本沿岸域学会 研究討論会講演概要集 No.29, (2016)

松岡晃弘, 居駒知樹, 増田光一, 惠藤浩朗, 村田一城: MPS 法による沿岸域構造物に作用する津波漂流物の衝撃力と漂流挙動特性に関する研究 その 1 構造物規模に対する漂流速度変化の検討と FEMA 式による衝撃力の評価 (特非)日本沿岸域学会 研究討論会講演概要集 No.29, (2016)

## 6. 研究組織

該当なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。