# 津波漂流物の構造物への衝突力に関する研究 COLLISION FORCE OF TSUNAMI DRIFTING OBJECTS AGAINST STRUCTURES

野島 和也\*・櫻庭 雅明\*・高瀬 慎介\*\* Kazuya NOJIMA, Masaaki SAKURABA and Shinsuke TAKASE

During the Tohoku Tsunami in 2011, drifting objects collided with buildings and structures while colliding with each other. These collisions were factors that expanded the damage caused by the tsunami. Predicting the damage to buildings and civil engineered structures needs to be based not only the depth of flooding but also the influence of drifting objects. In this research, the collision forces by multiple drifting objects was obtained by hydraulic model experiments and numerical simulations. The characteristics of collision of multiple drifting objects of different sizes and shapes were examined. The 2-D shallow water model and the tsunami drift model which is based on the DEM were used to calculate the tsunami wave force and the impact force of drifting objects.

Keywords : Tsunami, Tsunami Force, Tsunami Drift, Collision Force

# 1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震では、船舶や自動車、 倒壊した家屋により生じたがれきが漂流物化し、建物や土木 構造物の衝突被害が広範囲に発生した。津波被害想定およ び対策の検討は、津波による浸水被害だけでなく、漂流物の 浸水域での移動・滞留・接触状況を推定することが重要であ る。最近では、津波漂流物被害の予測に関するガイドライン<sup>1)</sup> が公表され、具体的な漂流物被害の推定および対策指針が 示されるようになった。しかし、漂流物の衝突力に関する検討 は、単体の漂流物を対象としたもの<sup>2)~4)</sup> がほとんどで、複数 の津波漂流物が作用する場合の事例は少ない。

漂流物の移動を予測する方法には、①漂流物を質点として モデル化し、従来の2次元の津波シミュレーションの結果を用 いて挙動を求める方法<sup>5),6)</sup>、②2次元の結果から漂流物を剛 体として扱い運動過程を表現する方法<sup>7),8)</sup>、③個別要素法を 用いた水域・陸域での摩擦や漂流物同士の衝突・接触を考 慮した方法<sup>9)</sup>、④流体運動を含めて3次元解析で行う方法<sup>10)</sup> などが提案されている。①、②の2次元解析による方法は、 漂流物が流体から受ける力を漂流物の表面に働く圧力ではな く、計算式により間接的に表現する必要があるが、流体運動 の鉛直分布を計算しないため、計算負荷が軽く、広範囲に長 時間の挙動解析を行うことができる。3次元解析による方法は、 漂流物の形状や様々な物理過程を厳密に取り扱うことが可能 であるが、計算量が膨大になるために対象とする解析範囲に 制約がある。実務においては、街や沿岸地域などを対象とし て被害の推定を行うため、広範囲に漂流物の移動過程を扱う 必要性と計算負荷の観点から、2次元のシミュレーション結果 から漂流物の運動を解析する方法が適している。

本研究では、水理模型実験および漂流物の数値シミュレー ションにより、大きさや配置の異なる漂流物が構造物に衝突す る際の力を求めた。漂流物シミュレーション手法は、著者ら<sup>9)</sup> が提案した津波に関する流体運動と漂流物運動の相互干渉や 漂流物による流れの阻害を考慮でき、波力や漂流物の衝突力 をシミュレーションの過程で算出される個別要素に働く力から 容易に求めることが可能な、2次元の津波シミュレーションと個 別要素法を用いた。数値シミュレーションによる波力算出の妥 当性は、水理模型実験と数値実験による結果の比較を行い確 認した。

# 2. 水理実験

### (1) 実験条件

陸上に置かれた漂流物に津波が作用する状況を想定して、 2次元実験水路において水理実験を実施した。実験には、八 戸工業大学構内の長さ16m、幅0.6mの実験水路を用いた。 図-1から図-3に実験装置の概要を示す。模型縮尺は 1/50を想定した。津波を模した段波は、水路沖側の貯水タン クに水を溜め、ゲートを急開することで水路を遡上する仕組み とした。漂流物の模型は、比重0.95の樹脂材を用い、10 cm × 10 cm × 5 cm と 5 cm × 5 cm の2 種類の大きさ のものを作成した(図-1参照)。建物をイメージした構造物 の模型は15 cm × 15 cm × 40 cm の角柱とし、アクリル材を

<sup>\*</sup> 技術本部 先端研究開発センター

<sup>\*\*</sup> 八戸工業大学 土木建築工学科

用い作成し、上部に設置した分力計を通して水路に固定した (図-2参照)。ゲートから5mの位置に構造物を設置し、そ の沖側に漂流物の模型を15cm間隔で配置した。漂流物は、 漂流物同士の接触や衝突を考慮するため、水路上流方向に 複数(3個)配置し、また、建物の前面に一様に分布してい る状態を想定し、水路横断方向にも複数(3個)配置した。

実験は、表-1に示す4ケースを実施した。図-4に、各 実験ケースに漂流物の配置状況を示す。入射波は、通過の 波高が構造物の周囲で5cmとなる段波を発生させた。水路 沖側の貯水タンクの水位は、漂流物および構造物の模型を設 置しない予備実験により求め、18cmに設定した。実験は各 ケース3回実施した。

#### (2) 実験結果

実験結果は、図-5、図-6に示す。図-5は、各ケースにおける構造物に作用する荷重の時系列である。荷重は、入射波による波力と漂流物の衝突力の両方が含まれている。 図-6は、構造物位置における通過波による水位、流速、Fr 数の時系列を示す。各グラフ横軸は入射波が沖側の漂流物に 到達した時点をt=0(s)とした経過時間である。



図-1 漂流物模型(左:10cm幅、右:5cm幅)



図-2 構造物模型(左)および分力計(右)



表-1 漂流物の配置

ケース名	漂流物の配置条件
Case1	漂流物を配置しない場合
Case2	5cm幅の漂流物のみを配置する場合
Case3	ゲート側の1列を10cm幅の漂流物に
	置き換える場合
Case4	構造物側の1列を10cm幅の漂流物に
	置き換える場合



5cm幅の漂流物のみを配置したCase2では、大きな衝突 力が計測されず、Case1と比較して波が構造物に到達した瞬 間の荷重が小さい。このケースでは入射波が漂流物と漂流物 の間をすり抜けて、漂流物よりも速く進む様子が確認された。 また、入射波は漂流物が構造物に衝突する前に、構造物前 面でせり上がりが生じ、それが漂流物の衝突の緩衝材となった ため、漂流物と構造物の接触がなかったと考えられる。また、 構造物の前面に配置された漂流物が波の流れを阻害したこと が、構造物への到達直後の荷重を低減させたと考えられる。

10 cm の漂流物を配置した Case 3 および Case 4 の 10 cm の漂流物を配置したケースでは、入射波が構造物に到達した 直後にスパイク状の衝撃力が計測された。全てのケースで荷 重は、入射波が構造物に到達して 0.5 秒~1.0 秒経過後に 同じ挙動を示した。漂流物により荷重が増加するのは非常に 短時間であり、すぐに動水により生じる波力が支配的になるこ とが分かる。荷重は、全てのケースで t = 7 (s) 以降に減衰が 始まり、数値も概ね一致する。 通過波の流速は、0.8m/s 前後であり、t=8(s) 以降に減 速する傾向となった。通過波の水位は、5cm 程度であり、実 験の波高条件値を示している。Fr 数は、流速の減少とともに t=9(s)の前後で1を下回り、射流から常流に遷移している。 この状況から、t=8(s) 以降の荷重の変化は、波の減衰によ るものであると考えられる。

図-5において、Case3とCase4の、同じ10cm幅の漂 流物を用いたケースであっても、10cm幅の漂流物を構造物 の近くに配置するよりも、遠くに配置した場合に衝突力が大き くなることが明らかとなった。これは、漂流物が流れから受け る力に差があったためと考えられる。Case3とCase4では、 漂流物の流れ受圧面は同じであるが、図-7に示すように、 5cm幅の漂流物が上流にあるCase4では、5cm幅の漂流物 により流れが減速・分散され、10cm幅の漂流物に流れが作 用しない状況となる。その結果、Case3よりもCase4より漂流 物の衝突力が小さくなったと考えられる。

# 3. 数値シミュレーション

## (1) シミュレーション手法

津波の陸上遡上に関する数値シミュレーションは、平面2 次元の浅水流モデルを用いて実施した。計算手法にはLeap-Frog法に基づく差分法<sup>11)</sup>を適用した。基礎方程式である運 動方程式(式(1)、式(2))に、津波と漂流物の相互干渉 効果を考慮するため、流体が漂流物から受ける力の項(右辺 第3項)を付加した。

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} &+ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) \\ &= -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gn^2}{D^{\frac{7}{3}}} M \sqrt{M^2 + N^2} - F_x \end{aligned} \tag{1}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D}\right) 
= -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gn^2}{D_3^2} N \sqrt{M^2 + N^2} - F_y$$
(2)

ここに、 $\eta$  は水位、M、N は、それぞれx 方向、y 方向の 単位幅あたりの流量、D は全水深、n は Manning の粗度係 数、g は重力加速度( $m/s^2$ )であり、 $F_x$ 、 $F_y$  は流体が漂流 物から受ける力である。

漂流物は、円柱状の複数の漂流物要素の集合として表現 (野島ら<sup>9)</sup>)し、漂流物の挙動は個別要素法により計算した。 漂流物は、大きさの小さい要素を多数用いることで、詳細な 形状を再現することができる。しかし、この方法は、漂流物を 物体の外周に要素を配置するため、半径の小さい要素を使用 した場合に漂流物の内部に空洞が生じる。そこで、本研究で は、漂流物の外周部だけではなく、内側にも円柱状の要素を 配置できる仕組みとし、半径の小さい要素を使用した場合でも、



漂流物の内部に空洞が生じないようにした(**図** – 8)。漂流物 の各要素に対して、流体力(動水による力および静水圧によ る力)、摩擦力、地形勾配による重力の水平方向成分、他の 漂流物との接触力を考慮した。このうち、漂流物が動水により 流体から受ける力を、流体が漂流物から受ける力として  $F_x$ 、 $F_y$ に反映した。個々の漂流物要素にかかる動水による力は式 (3)、(4) に示す Morison 式で算出した。

$$F_{fx} = \frac{1}{2}\rho_f C_d A_x |n_x| (u - u_t) \cdot |u - u_t|$$
(3)

$$F_{fy} = \frac{1}{2} \rho_f C_d A_y |n_y| (v - v_t) \cdot |v - v_t|$$
(4)

ここで、 $\rho_f$ は流体の密度、 $C_d$ は抗力係数、 $A_x$ 、 $A_y$ は漂流物 要素の水没部分の x 軸方向、y 軸方向の投影面積、 $n_x$ 、 $n_y$ は 漂流物表面の外向き法線ベクトルの x 軸、y 軸成分、u、v およ び $u_t$ 、 $v_t$ はそれぞれ、流体の流速の x 軸、y 軸成分、および、 漂流物要素の移動速度の x 軸、y 軸成分を示す。なお、漂 流物の内部に配置された要素や流れの下流側にある要素に関 しては、 $F_{fx}=F_{fy}=0$ として、漂流物全体への力が重複しない ようにした(**図**-9)。



図-9 動水による力を受ける要素と受けない要素



図-10 漂流物および構造物の個別要素モデル

#### (2) 計算条件

津波伝播・遡上シミュレーションおよび漂流物の移動シミュ レーションは、水理模型実験で用いた水路と同じ寸法の解析 領域を作成して実施した。津波シミュレーションは、建物の形 状や漂流物の形状を考慮できるように、2cm幅の計算格子を 使用して実施した。時間増分量Δtは、津波シミュレーション、 漂流物シミュレーションともに1×10<sup>-4</sup>秒とした。

図-10に示すように、5cm×5cm×5cmの大きさの漂流物は、9個の半径0.83cm×高さ5cmの円柱状の個別要素を用いて表現し、10cm×10cm×5cmの大きさの漂流物は、25個の半径1.0cm×高さ5cmの円柱状要素を用いて表現した。抗力係数 $C_d$ は、後藤<sup>5)</sup>の流木に対する式( $[0.91 + 32.5R_e^{-1/2}]^2 + 0.1F_r^{0.25}$ )を参考として設定し、値は1程度となる。なお、本検討では漂流物は剛体として扱い、変形しないものとした。水路中央の構造物も円柱形の要素で構成し、24個の半径1.07cm×高さ40.0cmの円柱要素で表現した。構造物へ作用する力は、計算の過程で構造物を構成する各個別要素に生じる力を足し合わせて算出した。

#### (3) 計算結果

10cm 幅の漂流物を構造物側に配置した Case4の水理実 験および数値シミュレーションにおける構造物衝突前後のス ナップショットを図-11 に示す。数値計算と水理実験の漂流 挙動は、概ね再現していると考えられる。

数値計算により算出した構造物にかかる荷重の時系列変化 を図-12に示す。数値計算結果は、実験による津波荷重を 概ね再現していることが確認できる。水理実験では、Case3と Case4の衝突力の比較において、Case3の衝突力が大きく なったが、数値計算においては、Case3とCase4でほぼ同 等の衝突力となり、Case3の衝突力の方がわずかに大きくなっ た。Case2においては、衝突力が計測されなかった実験と異 なり、漂流物の衝突の影響が確認される結果となった。Case 1からCase4の全ケースにおいて、荷重の時刻歴は、計算 の方が実験と比べると、t=3(s)以降のピーク持続時間が短く、 振動が少ない。これは、水路壁面による造波の影響が計算の 方が実験と比較して小さかったことが考えられる。 Case1の波力のみが構造物にかかる場合について、通過 波の水位や流速を用いた津波波力算定式<sup>12),13)</sup>による津波荷 重と本研究の結果を比較した。

次に示す、式(5)を算定式1、式(6)において a=1.0と したものを算定式2、式(6)において a=3.0としたものを算定 式3とする。式(5)は、ファウジら<sup>12)</sup>による Morison 式を基 とした算定式である。式(6)の水圧を元とした算定式であり、 水深係数 aを 1.0とした場合は、静水圧による波力算定式、 水深係数 aを 3.0とした場合は、朝倉ら<sup>13)</sup>による算定式となる。

$$F = \frac{C_{D1}}{2} \rho B(h_i(t)v_i(t)^2)_{\text{max}} ,$$
  

$$C_{D1} = 2.0 + \frac{5.4h_{\text{imax}}}{D}, \left(0.01 < \frac{h_{\text{imax}}}{D} < 0.17\right)^{(5)}$$

$$F = \frac{a^2}{2}\rho Bgh_{\rm max}^2 \tag{6}$$

ここに、Fは荷重、Bは建築物の幅(m)、 $h_i(t)$ は入射津 波の浸水深の時系列(m)、 $h_{max}$ は入射津波の最大浸水深、  $v_i(t)$ は入射津波の流速の時系列(m/s)、 $\rho$ は水の密度(t/ m<sup>3</sup>)、gは重力加速度(m/s<sup>2</sup>)、Dは海岸線(貯水タンク端) からの距離(m)、aは水深係数を示し、()<sub>max</sub>はカッコ内の 最大値を取る。

図-13に本研究の実験結果、数値計算結果と各算定式の 比較を示す。なお、各算定式では時系列における最大値が 算定波力となり、本来は一定値となるが、比較のため、時系 列のままグラフに示す。算定式による結果では、算定式1に よる荷重が、実験結果に最も近い結果となった。静水圧を基 とした算定式2、算定式3による荷重は実験値とは異なる結果 となっている。数値計算による荷重は、各算定式による荷重の



図-11 実験と数値計算の挙動の比較(Case4) 左:入射波の漂流物到達時(t=0.0(s))、中:入射波の構造 物到達時(t=0.5(s))、右:入射波の構造物到達直後(t=1.0(s))



最大値と時刻歴を比較しても、実験結果に最も近いことが確認 できる。

## 4. おわりに

津波漂流物による衝突力について、水理実験および数値シ ミュレーションにより検討を行った。数値シミュレーションは、従 来の2次元の津波シミュレーションと個別要素法による漂流物 共同シミュレーションによる手法を用いた。水理実験は実験水 路により、漂流物の衝突力を含む津波による作用力を計測し た。その結果、以下の結論が得られた。

- 水理模型実験による津波漂流物の構造物への衝突力 を計測では、大きさと個数が同じ組み合わせであっても、 配置により作用力が異なる場合があることを明らかとした。特に、大きな漂流物を対象とする構造物の近くに 配置するよりも、離れた位置に配置する場合に、構造 物に作用する衝突力が大きくなる性質を確認することが できた。
- 計算は、実務で用いられている2次元浅水長波モデル に個別要素法の漂流物数値モデルを導入することで、 津波波力および漂流物の衝突力を概ね再現することが できることを確認した。また、計算負荷の高い3次元モ デルと違い、全て平面2次元モデルで解析を行ってい るため、現地実地形や広範囲における漂流物の衝突力 の算出へ適用が期待できる。

本検討は、限られた漂流物配置パターンや入射波での検討 であった。今後、漂流物の配置パターンを変えた場合、漂流 物数を増加させた場合、漂流物の形状を変化させた場合、入 射波の大きさや向きを変えた場合などの条件で、水理実験お よび数値解析を実施し、より多くの漂流物の衝突特性を明らか にしていく必要がある。

#### 参考文献

- 水産庁漁港漁場整備部:漁港の津波漂流物対策施設設計ガイド ライン(案)、119p、2016
- 池野正明、森信人、田中寛好:砕波段波津波による波力と漂流物の挙動・衝突力に関する実験的研究、海岸工学論文集、vol.48、 pp.846-850、2001
- 池野正明、田中寛好:陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する 実験的研究、海岸工学論文集、vol.50、pp.721-725、2003
- 4) 池谷毅、稲垣聡、朝倉良介、福山貴子、藤井直樹、大森政則、武 田智吉、柳沢賢:津波による漂流物の衝突力の実験と評価方法の 提案、海岸工学論文集、vol.53、pp.276-280、2006
- 5) 後藤智明:津波による木材の流出に関する計算、第 30 回海岸工
   学講演会論文集、pp.594-597、1983
- 野島和也、桜庭雅明、小園裕司:津波バリアの影響を考慮した実務的な津波漂流物計算モデルの開発、土木学会論文集b2(海岸 工学)、vol.71、no.2、pp.i\_283-i\_288、2015
- 7) 橋本貴之、越村俊一、小林英一、藤井直樹、高尾誠:津波来襲時における船舶漂流・座礁モデルを用いた臨海都市域危険度マップの開発、土木学会論文集b2(海岸工学)、vol.66、no.1、pp.236-240、2010
- 8) 鴫原良典、許松、多田毅:津波漂流物モデルの現地スケール 問題への適用に関する考察、土木学会論文集b2(海岸工学)、 vol.72、no.2、pp.i\_427·i\_432、2016
- 9) 野島和也、桜庭雅明、小園裕司:建物や捕捉工などの影響を考慮した津波漂流物解析モデルの開発、土木学会論文集b2(海岸工学)、vol.73、no.2、pp.i\_343-i\_348、2017
- 米山望、永島弘士:複雑な移動・回転を考慮した津波漂流物の 三次元数値解析手法の開発、土木学会論文集b2(海岸工学)、 vol.65、no.1、pp.266-270、2009
- 11)後藤智明、小川由信:leap-frog法による津波の数値計算法、東 北大学土木工学科資料、52p、1982
- 12) ファウジアフマド、鴫原良典、藤間功司、水谷法美:陸上構造物に 作用する津波波力の推定手法に関する考察、土木学会論文集b2 (海岸工学)、vol.b2-65、no.1、pp.321-325、2009
- 13) 朝倉良介、岩瀬浩二、池谷毅、高尾誠、金戸俊道、藤井直樹、大 森政則:護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究、海 岸工学論文集、vol.47、pp.911-915、2000