実規模木材の水中・気中衝突実験

甲斐田 秀樹¹・木原 直人¹・高畠 大輔¹・柴山 淳¹・宮川 義範¹

¹正会員 (一財)電力中央研究所 地球工学研究所
(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
E-mail:h-kaida@criepi.denken.or.jp

津波漂流物の被害を受けることが想定される臨海部の構造物・施設等の設計・リスク評価においては、その挙動および衝突力の適切な評価が肝要である。本報では、これらに関する各種知見の確立・高度化に向けた検討のベースとすべく、衝突力計測が可能な鋼板に実規模木材を気中・水中で衝突させる大規模実験を行った。まず、気中衝突実験の結果を用いて、既存の衝突力推定式の精度を確認した。次いで、初期水位や最大流速の異なる5種類の遡上津波を用いた木材の水中衝突実験により、遡上津波中の作用を受けて漂流する木材の挙動および衝突時の特徴について検討を行い、被衝突体前面における反射波や木材の初期配置方向、木材が置かれた地点の初期水位が漂流物の漂流・衝突挙動に影響を及ぼすことを示した。

Key Words : tsunami inundation, tsunami debris, debris motion, collision experiment, impact force

1. はじめに

遡上津波により漂流する木材や車両等の衝突により、臨海部の構造物は深刻な損傷を受ける場合がある¹⁾。このことから、臨海部の構造物の設計や、津波に対するリスク評価を行う際には、その衝突力の適切な評価に加え、漂流物の挙動評価による衝突可能性の検討が重要となる。

既に多くの衝突力推定式が既に提案されている^{2,3,4,5)}が、実際の設計やリスク評価においては、各推定式の精度や適用性を十分理解した上で、数ある衝突力推定式の中から最も適したものを選定することが肝要となる。また既往の研究から、漂流物の衝突角度^{4,6)}や被衝突体前面で発達する反射波^{7,8,9)}が漂流物の衝突力に影響を与えることが示されており、実際の衝突力評価時にはこれらの影響を考慮する必要がある。一方、漂流物挙動の評価においては、漂流物が移動を開始し、津波中を漂流して被衝突体へと接近・衝突する一連の挙動に関する知見が重要となる。上記のような各種知見の確立・高度化に向けた検討のベースとして、遡上津波中における大規模な漂流物の漂流・衝突実験が有効であると考えられるが、その例は決して多くはない。

そこで本研究では、まず実規模木材を用いた気中衝突実験を行い、既往の衝突力推定式の精度を検証した。次いで、遡上津波中に実木材を漂流させる水中衝突実験を行い、被衝突体へ接近・衝突するまでの挙動の分析と衝突力の計測を行い、津波中を漂流する漂流物の衝突力を評価する際に考慮すべき諸要因について検討した。

2. 実験の概要

実験には、長さ20m、幅4m、高さ2.5mの開水路を有し、陸上遡上した津波を大規模に再現することができる津波・氾濫水路（（一財）電力中央研究所）¹⁰⁾を用いた。同水路は、この水路内に、衝突力を計測可能な鋼板^{11,12)}を設置し、気中・水中での漂流物の衝突力を計測した（図-1）。同図中には、本報における座標系の定義もあわせて示した。本実験では、xy平面上において、木材の長軸方向とy軸がなす角度を衝突角度 θ として定義した。鋼板の背後には鋼棒（直径20mm）を高さ方向に300mm間隔で5本、幅方向には400mm間隔で8本の合計40本取り付け付けた。鋼棒の中心の裏面と表面に2軸ひずみゲージ（共和電業：KFG-2-120）をそれぞれ貼付した。これらのひずみゲージに対してブリッジ回路を組み、鋼棒に発生する軸ひずみを計測し、これに鋼棒の縦弾性係数と断面積を乗じることによって軸力を得、その総和をもって反力（＝衝突力）とした。上記の計測機構・適用範囲については、高畠ら¹³⁾に詳しい。気中・水中衝突試験の対象とする漂流物として、表-1に示す3種類の木材を用いた。以降、簡単のために、同表中に記した名称で各木材を呼称することとする。なお、スペースの都合上詳述しないが、本報で示す衝突実験が、鋼板を用いて衝突力評価が可能であることを事前に確認している。

(1) 気中衝突実験

クレーンを用いて開水路上で木材を吊り、人力で押す

図-1 実験水路の平面図、立面図および、衝撃力計測に用いた装置の概要図。平面図中の赤丸・緑丸位置にて水位・流速を計測した。流速計は $z = 100\text{mm}$ に設置した。

表-1 木材の諸元。有効軸剛性 k および衝撃力作用時間 Δt は、各木材の気中衝突試験 ($\theta = 90^\circ$) から得た。

木材の種類	長さ $L(\text{m})$	質量 $m(\text{kg})$	直径 $D(\text{m})$	有効軸剛性 k (10^6N/m)	衝撃力作用時間 $\Delta t(\text{s})$
マツ2m	2m	179	0.42	9.70	0.011
スギ1m	1m	72	0.38	7.73	0.009
スギ2m	2m	156	0.38	15.70	0.007

表-2 水中試験の実施ケース。最大流速は、木材を漂流させない実験で計測したもの。

	初期貯水位 $h(\text{m})$	水路内初期水深(m)	$x=2.5\text{m}$ における最大流速 (m/s)
Type1	1.3	0	3.54
Type2		0.2	2.64
Type3	1.7	0	4.68
Type4		0	5.21
Type5		0.2	4.13

ことで木材を鋼板へ衝突させ、その衝撃力を計測した。木材の種類、衝突速度および角度 θ をパラメータに計643回の試験を行った。試験を繰り返し行うことによる衝撃力・衝撃力作用時間等への影響は確認されなかった。木材の衝撃力作用時間は0.01s程度であることから²⁾、衝撃力の時刻歴が十分な解像度で得られるよう、鋼棒の軸ひずみは100kHzのサンプリング周波数でデータロガー（共和電業（株）、EDX-3000A）に収録した。さらに、鋼板直上に設置した2台の高速度カメラ（400fps）により、鋼板へ木材が衝突する様子を記録し、3次元ステレオ解析を通じて、木材の3次元座標値を時々刻々取得した。

(2) 水中衝突実験

本実験では、水路のゲートを急開することによるゲート急開流れを用いた。木材を開水路上に初期配置し（図-1）、ゲート急開流れを受けた木材が鋼板に向かって漂流する際の挙動および、衝突時の衝撃力を計測した。木

材の鋼板周辺における挙動を鋼板直上の高速度カメラで撮影するとともに、 $x=3\text{m}$ 、 7m に設置したビデオカメラ（GoPRO、100fps）により、津波中を木材が漂流する様子を記録した。木材の初期配置方向は $\theta = 0^\circ$ と $\theta = 90^\circ$ の2種類とし、初期配置方向によらず、実験開始時の木材の中心位置は $x = 5.2\text{m}$ とした。木材の初期配置方向、開水路内の初期水位、ゲート上流側の貯水位を組み合わせ計47回の実験を行った。鋼棒の軸ひずみは10kHzのサンプリング周波数でデータロガーに収録した。

また、木材を漂流させずに流れのみを生成する実験を行い、図-1に示した各点において、超音波変位センサ（オムロン（株）、E4PA-LS400-M1-N）と電磁流速計による水位・流速計測を実施し、100Hzのサンプリング周波数でデータロガーに収録した。

3. 実験結果

(1) 気中衝突実験

図-2に、マツ2m・スギ1m・スギ2mの各木材の気中衝突試験で得られた衝突速度と衝撃力の関係を示す。なお、本節におけるデータは、実験において計測された値に対して1kHzのローパスフィルタを施したものである。同図より、木材の衝突速度の増加と対応して、その衝撃力がほぼ線形に増加することが分かる。また、衝突角度 θ が小さくなるにつれて、衝突速度が同等であっても、衝撃力が小さくなることが分かる。この点において、今回の実験結果は既往の知見^{3),7)}と整合する。

ここで、本試験結果を代表的な既往の衝撃力推定式と比較することにより、既往推定式の妥当性を検証する。

松富²⁾は、流木模型を使用した水理実験と実大の木材を使用した気中試験により、流木の衝撃力推定式を次式の通り提案している。

$$\frac{F}{\gamma D^2 L} = 1.6 C_{MA} \left\{ \frac{v}{(gD)^{0.5}} \right\}^{1.2} \left(\frac{\sigma_f}{\gamma L} \right)^{0.4} \quad (1)$$

ここで、 F : 衝撃力[N]、 v : 漂流物の衝突速度[m/s]、 γ : 木材の単位体積重量[N/m³]、 D : 木材の直径[m]、 L : 木材の長さ[m]、 σ_f : 木材の降伏応力[N/m²] (= 0.0044E, E : 木材の縦弾性係数[N/m²])、 C_{MA} : 付加質量係数である。本報では、マツの縦弾性係数として11[kN/mm²]を、スギの縦弾性係数として7.1[kN/mm²]をそれぞれ用いた¹³⁾。

有川ら³⁾は、Hertzの弾性接触理論に基づき、コンクリート製テトラポットと鋼板の衝突実験結果を用いて、コンクリート製テトラポットと鋼板間の衝撃力推定式を以下のように提案している。

$$F = \gamma_p \chi^{\frac{2}{5}} \left(\frac{5}{4} m \right)^{\frac{3}{5}} v^{\frac{6}{5}} \quad (2)$$

図-2 気中衝突試験における衝突速度と衝突力の関係。ここで、*：ASCE(2010)による推奨値の衝突力作用時間 $\Delta t=0.03s$ ，および、FEMA(2012)¹⁴⁾による有効軸剛性の推奨値 $k=2.4\times 10^6(N/m)$ により計算された衝突力，+：気中衝突試験で得られた各々の衝突力作用時間 Δt の平均値，および，実験データの回帰分析から求めた有効軸剛性 k から計算された衝突力。

ここで、 m_1 ：漂流物の質量、 γ_p ：衝突物の塑性化によるエネルギー減衰の効果を表す実験係数、 χ ：衝突する接触面の形状により定まる係数であり、木材の半径、ポアソン比 ν 、木材の弾性係数により計算される。本報では有川ら³⁾に倣い、 $\nu=0.4$ 、 $\gamma_p=0.25$ とした。

Haehnel and Daly⁴⁾は、構造物が剛である（漂流物の剛性に比べて、衝突を受ける構造物の剛性が十分に大きい）と仮定した1自由度系モデルの運動方程式を解くことにより、以下の式を提案している。

$$F = v \sqrt{k(m + C m_f)} \quad (3)$$

ここで、 m_f ：漂流物の移動に伴って押しのけられた流体の質量、 C ：付加質量係数である。気中衝突試験においては、 m_f 、 C ともに0である。

ASCE⁵⁾では、漂流物の衝突による力積が衝突の前後における漂流物の運動量変化に等しいという考え方に基づき、以下の式が提案されている。

$$F = \frac{\pi}{2} \frac{v m}{\Delta t} \quad (4)$$

ここで、 Δt の定義は衝突体の接触時刻から衝突力が最大となるまでの時間であり、 $\Delta t=0.03s$ を与えることが推奨されている（詳細はASCE⁵⁾の264頁を参照）。式(4)は流体の影響を考慮しない運動量理論から得られる式であるが、ASCE⁵⁾では、水深やブロッキング効果¹⁵⁾を加味する係数を乗じることにより、流体の影響が生じ得る状況へ適用することを提案している⁵⁾。

上記の代表的な既往の衝突力推定式により、各木材の衝突力を計算した結果を図-2に併記した。

松富²⁾や有川ら³⁾による推定式は、木材の種類によらず、 $\theta=90^\circ$ で衝突する木材の衝突力を良好に推定している。Haehnel and Daly⁴⁾およびASCE⁵⁾の衝突力推定式を用いる際には、漂流物の有効軸剛性や衝突力作用時間の設定が重要となる。これらに対して、FEMA¹⁴⁾やASCE⁵⁾がそれぞれ推奨する値を用いた場合、木材の種類に依らず、実験値を過小評価する傾向がある。気中衝突試験により得ら

れた、各木材の有効軸剛性および衝突力作用時間を表-1に記した。ここで、有効軸剛性は、各実験データに最小二乗法を適用して求めた原点を通る近似直線から得た。衝突力作用時間は、各木材の衝突力が、その鋼板への衝突速度によって大きく変化しないことを確認した上で、各木材の全気中衝突実験の平均値とした。こうして取得した入力パラメータを与えることにより、これらの推定式によって衝突力が概ね良好に再現された（図-2）。各木材の有効軸剛性に着目すると（表-1）、スギ1mの k はスギ2mの k の半分程度であり、種類が同じであっても長さが異なれば軸剛性の値も異なることが分かる。これは、太さの等しい木材の縦弾性係数が木材の長さに正比例するという既往の知見と整合する¹⁶⁾。一方、長さが同じであっても、木材の種類により有効軸剛性は顕著に異なる。このことから、FEMA¹⁴⁾が既往の実験結果⁴⁾を基に定めた木材の軸剛性に関する軸剛性値（ $2.4\times 10^6 N/m$ ）と、本実験により得た軸剛性の差異は、実験に供した木材の種類の違い、および、実験形態の相違に起因するものと考えられる。

一方、運動量理論に基づく式(4)から、 Δt が小さい程有効軸剛性は大きくなるものと考えられる。しかしながら、マツ2mの Δt は、マツ2mと比べて大きな軸剛性を有するスギ2mの Δt をやや上回っている。このことから、 Δt と k の関係が式(4)とは異なり、質量以外の木材固有の因子の影響を受けることが示唆される。

また、非減衰の1自由度系モデルの振動方程式を解くことにより式(5)が得られる。第2式を式(4)に代入すると付加質量効果を考慮しない式(3)が得られることから、1自由度系非減衰振動方程式に基づく式(3)と運動量理論に基づく式(4)が理論的に等価であるとされる⁴⁾。

$$k = \frac{F^2}{v^2 m} \quad (5)$$

$$k = m \left(\frac{\pi}{2 \Delta t} \right)^2$$

実験値を式(5)の両式に代入することにより、各式に

図-3 1自由度系の非減衰振動方程式と運動量理論の関係から導かれる有効軸剛性の計算結果（マツ 2mを用いた気中試験結果による）。破線は両式が等しいことを示す。

よる k を求めたところ、両者間の乖離が生じた（図-3）。この原因として、木材と被衝突体間の衝突力作用時間が短いことから、減衰の影響を考慮していないことなどが考えられるが、その原因の究明は今後の課題としたい。

(2) 水中衝突実験

表-2中の各Typeの水利条件の計測結果を図-4に示す。なお、計測された各データに対し、カットオフ周波数10Hzのローパスフィルタを施している。流れの生成に伴って、 $x = 2.5\text{m}$ では、津波先端が到達した後の時間において、鋼板に到達した津波により形成された反射波が上流側へと伝播することに伴う水位上昇が認められる。その影響の程度は構造物等の幅と流路幅の比等の影響を受ける¹⁵⁾。また、下流から上流に向かって水位が徐々に上昇していることから、上述の反射波が上流側へと伝播する様が確認される。加えて、水位を制御しないゲート急開流れであることから、特に上流側の計測点では、反射波到達前の時間における水位の緩やかな上昇とともに、徐々に流速が低下している様子が確認される。なお、Type4については、水位が一度上昇したのち低下して、再度上昇するコブ状の時間変化が確認されるが、これは、鋼板に衝突した水塊の跳ね上がりに対して超音波水位センサが反応したためと考えられる。また、初期貯水位が同じであれば、初期水位が低いほど流速が高くなる傾向が認められる。

次に、木材に表-2の流れを作用させた実験の結果から、水中における木材の挙動や鋼板への衝突時挙動、および、その衝突力について述べる。

$\theta = 90^\circ$ で木材を初期配置した場合、初期貯水位が高く、試験水路内で高流速を伴う流れが生成されるType4を除いて木材の鋼板への衝突が生じなかった。一方、 $\theta = 0^\circ$ で木材を初期配置した場合、水路内の初期水位が0であるType1, Type3, Type4で鋼板への衝突が生じたが、

図-4 各 Type における水位 (a)・(b) および流速 (c)・(d) の時系列。

水路内に初期水位を与えたケース (Type2, Type5) では、木材の鋼板への衝突は生じなかった。この差異が生じた原因など、遡上津波中における木材の挙動については次章で定性的に議論する。

鋼板上に設置した高速度カメラで撮影した画像から木材の鋼板への衝突挙動を記録することを試みたが、鋼板の上流側で発達する反射波に木材が入りこむことにより、これが困難となるケースが多く生じた。よって本報では、水中衝突試験における漂流物の代表速度として、 $x = 1.0\text{m} \sim 1.5\text{m}$ における速度の平均値を接近速度を定義し、衝突力の推定等にこれを用いることとした。

式(3)による衝突力の推定結果と、鋼板により計測された衝突力の関係を図-5に示す。鋼板には津波波力と漂流物衝突力が重畳して作用する。そのため本報では、漂流物の衝突に伴って生じる荷重極大値から漂流物の衝突直前に鋼板に作用していた津波波力を差し引いた値を漂流物の衝突力とした。衝突力を推定する際、有効軸剛性には表-1に示した値を、漂流物の衝突速度には上記の接近速度を用いた。なお、付加質量効果は考慮していない（詳細はFEMA¹⁴⁾の88頁参照）。すなわち、式(3)中の m_f および C は気中衝突実験と同様に0と仮定した。また、既往の知見⁹⁾に倣い、初期配置時の木材の $\theta = 0^\circ$ のケースにおいては、その衝突力に1/2を乗じることにより、衝突角度が衝突力に与える影響を簡単に考慮した。なお、鋼板への木材の衝突角度は、初期配置時の角度から大きく変わらないことを確認している。

図-5より、推定式から得られた衝突力が実験で計測された衝突力を過大評価していることがわかる。これは、

図-5 水中試験における木材衝突力の計測値（横軸）と、Haehnel and Daly⁴⁾から推定された衝突力の関係。

図-6 鋼板で計測された衝突力を用いて式(3)から推定された衝突速度と接近速度の関係。図中の線は、縦軸と横軸の比を示している。

既往の知見^{7,8,9)}や実験の様子から、前述の反射波の影響により、木材が減速しながら鋼板へ接近・衝突したためであると考えられる。実験で得られた有効軸剛性を用いた式(3)による衝突力推定が妥当なものであるという仮定の下、反射波による速度低下の程度を定量化すべく、実験時に計測された衝突力と表-1の有効軸剛性を用いて、式(3)から木材の鋼板への衝突速度を推定し、これと接近速度の関係を図-6に示した。鋼板近傍における速度低下の割合は実験ごとにばらついているが、接近速度の1/4程度まで衝突速度が低下したと推定されるケースが多数を占めている上、最も衝突速度が低下した群では、木材の衝突速度が接近速度の10%程度にまで低下した。上記のような木材の漂流速度の大幅な低下は、本実験における被衝突体幅が水路幅に対して広がったために流れの閉塞が生じ、これに伴って反射波の発達がより顕著になったことに起因すると考えられる。

4. 遡上津波中を漂流する木材の漂流時挙動に関する考察

遡上津波の作用を受けて木材が漂流を始める際、流れに対する受圧面積が木材の初動および加速に対して多大な影響を及ぼすことは自明である。図-7に示す通り、初期配置方向が $\theta = 0^\circ$ のケースでは津波の先端が木材に到達したのち、木材は速やかに加速し、津波の先端部から大きく遅れることなく鋼板へと接近する。一方、 $\theta = 90^\circ$ のケースでは、流れに対する受圧面積が $\theta = 0^\circ$ のケースに比べて小さいため、木材へ津波が到達した後も暫くの間は初期配置位置から動かず、鋼板への接近が津波の先端から大幅に遅れる。木材の鋼板への到達時間が津波の先端部から遅れるほど、鋼板上流側では反射波が発

図-7 Type1 の流れを受けて漂流する木材の様子。(a)～(c)：マツ 2m・初期配置方向 $\theta = 0^\circ$ ，(d)～(f)：マツ 2m・初期配置方向 $\theta = 90^\circ$ 。

達するため、 $\theta = 90^\circ$ のケースでは木材が鋼板へ衝突し難い状況が生じたものと考えられる。ただし、Type4では、 θ によらず鋼板への衝突が生じている。これは、Type4の流れがその他の流れに比べて強い波力を木材に作用させたために、津波先端部の鋼板への到達時間と木材の到達時間の差が小さくなったことによると考えられる。以上の通り、漂流物初期位置の水深や漂流物の初期配置方向やブロック比¹⁵⁾により、被衝突体近傍における漂流物の挙動に対する反射波の影響程度は変化する。

次に、水路内の初期水位を0.2mとしたケースにおいて、木材の初期配置方向に依らず鋼板への木材の衝突が生じなかった原因を実験映像から考察する。実験映像を確認したところ、津波の先端が木材に到達するとほぼ同時に木材が移動し始めるものの、初期水位が0mmのケースとは異なり、津波の先端部が木材への衝突とほぼ同時に木材を乗り越え、木材が津波先端部のやや上流側で加速する様子が確認された。そのため、鋼板への最接近時には、木材と鋼板前面の間に反射波が形成されている上、鋼板前面の水深上昇に伴って木材が浮き上がるため、鋼板の木材への衝突が生じなかったものと考えられる。

5. まとめ

実規模木材を用いた気中衝突実験の結果との比較から、複数の既往の漂流物衝突力推定式について、適切な入力パラメータの設定を行うことにより、衝突力を良好に推定可能なことを確認した。また、評価対象の漂流物が木材の場合、衝突力推定式の入力パラメータの一つである有効軸剛性が、その長さや木材の種類より変化することを確認した。式(3)⁴⁾によれば、衝突力是有効軸剛性の平方根に比例するため、実際の評価にあたっては、上記の

点に十分留意する必要があると言えよう。

水中衝突試験の結果から、被衝突体前面における漂流物の衝突速度の低下、および、遡上津波の作用を受けて漂流する木材の漂流時の挙動について検討した。被衝突体前面で生じた反射波の影響による木材の漂流速度の低下は著しく、衝突力評価に及ぼすその影響は無視できない。また、漂流物初期位置の水深や漂流物の初期配置方向により、被衝突体近傍における漂流物の挙動に対する反射波の影響程度が変化することが分かった。

参考文献

- 1) 高橋重雄, 戸田和彦, 菊池喜昭, 菅野高弘, 栗山善昭, 山崎浩之, 長尾毅, 下迫健一郎, 根本貴史, 菅野甚活, 富田孝史, 河合弘泰, 中川康之, 野津厚, 岡本修, 鈴木高二朗, 森川嘉之, 有川太郎, 岩波光保, 水谷崇亮, 小濱英司, 山路徹, 熊谷兼太郎, 辰巳大介, 鷺崎誠, 泉山拓也, 関克己, 廉慶善, 竹信正寛, 加島寛章, 伴野雅之, 福永勇介, 作中淳一郎, 渡邊祐二: 2011 年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報, 港湾空港技術研究所資料, No.1231, 111p, 2011.
- 2) 松富英夫: 流木衝突力の実用的な評価式と変化特性, 土木学会論文集, No.621, pp.111-127, 1999.
- 3) 有川太郎, 織田朋哉, 黒田豊和, 下迫健一郎: 消波高によるケーソン壁面衝突力に関する大規模実験, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.716-720, 2003.
- 4) Haehnel R.B and Daly F.D.: Maximum Impact Force of Woody Debris on Floodplain Structures, *Journal of Hydraulic Engineering*, 130, No.2, pp.112-120, 2004.
- 5) American Society of Civil Engineers (ASCE): Minimum design loads for buildings and other structures, ASCE/SEI 7-10, 376p, 2010.
- 6) Ikeno, M., Takabatake, D., Kihara, N., Kaida, H., Miyagawa, Y., and A. Shibayama: Improvement of Collision Force Formula for Woody Debris by Airborne and Hydraulic Experiments, *Coast. Eng. J.*, Vol. 58, , 164022, doi:10.1142/S0578563416400222, 2016.
- 7) 池田剛, 有川太郎: 数値波動水槽と DEM の連成モデルを用いたコンテナ漂流解析に関する検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.331-335, 2014.
- 8) 宮川義範, 柴山淳, 高島大輔, 木原直人: 段波の先端付近を漂流する丸太とコンクリート壁の衝突実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.91-96, 2015.
- 9) 甲斐田秀樹, 木原直人: 陸上遡上津波中の漂流物挙動に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, pp.I_1159-I_1164, 2016.
- 10) Kihara, N., Ota, K., Takabatake, D., and Matsuyama, M.: A New Physical Flume of Tsunami-Inundation Flow. *The Proceedings of the 25th International Offshore and Polar Engineering Conference*, 4p, 2015.
- 11) 高島大輔, 木原直人, 宮川義範: 漂流物による衝撃力計測手法に関する数値的検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.1491-1495, 2014.
- 12) 高島大輔, 木原直人, 甲斐田秀樹, 宮川義範, 柴山淳, 池野正明: 大規模水理実験による津波フラジリティ評価手法の高度化(その 2) —津波漂流物の衝突力評価手法の適用性検証—, 電力中央研究所報告 O15003, 53p, 2015.
- 13) 嶋津孝之, 福原安洋, 在永末徳, 松尾彰, 中山昭夫, 蓼原真一: 建築材料(第 3 版), pp.26-27, 森北出版, 2001.
- 14) Federal Emergency Management Agency (FEMA): Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis Second Edition, FEMA-646, 176p, 2012.
- 15) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 小林俊彦, 大田和正: 定常自由表面流中の正角柱に働く流体力, 水工学論文集, 第 46 巻, pp.827-832, 2002.
- 16) 川上和貴, 岩井哲: 打撃音法を用いた木材の弾性係数の非破壊検査測定精度の調査, 広島工業大学研究紀要, 第 42 巻, pp.199-206, 2008.

(2017.3.15 受付)

FULL-SCASLE WATERBORNE AND AIRBORNE COLLISION EXPERIMENTS OF WOOD LOG

Hideki KAIDA, Naoto KIHARA, Daisuke TAKABATAKE,
Atsushi SHIBAYAMA and Yoshinori MIYAGAWA

Design and risk assessment of structures to resist the tsunami-driven debris requires a conservative and reasonable estimation of the forces generated at debris impact. In order to investigate the behavior of wood log on the tsunami inundation flow and quantify the forces generated, full-scale waterborne and airborne collision experiments of wood log have been conducted. Accuracy of previously proposed estimation equations of debris impact force is investigated based on the result of airborne collision experiment. By conducting the waterborne collision experiment, it is showed that initial water depth where debris were set and initial direction of wood log have considerable impact on the motion of wood log. Moreover, reflected wave generated in front of the wall installed in the experimental flume cause the reduction of debris impact speed which lead to the reduction of the debris impact force.