

津波による漂流物の衝突力の実験と評価方法の提案

池谷 毅¹・稲垣 聡²・朝倉良介³・福山貴子²
 藤井直樹⁴・大森政則⁴・武田智吉⁵・柳沢 賢⁵

津波により船舶が漂流して陸上構造物に衝突する場合の、漂流挙動および陸上構造物への衝突力を水理模型実験により計測し、その衝突力の発生メカニズムを把握するとともに、衝突力の評価手法を提案した。船舶と陸上構造物との力のやり取りをばね反力としてモデル化し、船体の運動方程式を数値積分することによって、船舶の挙動および衝突力を表現することが可能となった。また、外力として与える津波波力としては、慣性力および抗力を考慮することが重要であり、さらに船舶の付加質量および付加減衰を適切に与えることにより、精度を向上することができることが明らかになった。また、本手法を用いることによって、実際の漂流物の荷重変位特性を与えれば、衝突力を評価することが可能となった。

1. はじめに

津波による災害の1つとして、船舶や木材などの漂流物が陸上構造物へ衝突することによって発生する被害が指摘されている。この被害を予測するためには、漂流物による衝突力を適切に評価することが重要である。

津波による漂流物の研究例としては、流木を対象として、松富 (1999) や、池野・田中 (2003) の研究等があるものの、船舶を対象とした衝突力に関する研究例は少ない。そこで本研究では、停泊している船舶に津波が作用して漂流し、陸上構造物へ衝突するときの衝突力の発生メカニズムを水理実験により明らかにし、さらに、その評価手法を提案することを目的とした。

2. 水理模型実験

(1) 実験装置および実験条件

実験では、図-1 に示す、津波発生装置を備えた平面水槽 (長さ 58 m, 幅 20 m, 深さ 1.6 m) を用いた。平面水槽内には 1/100 海底勾配を模擬した斜面を設置しており、背面には陸上部を設けてある。陸上部には、構造物を護岸から 50 cm の位置に設置した。陸上構造物の下方には水中 6 分力計を設置しており、陸上構造物に作用する力を計測することができる。

実験で使用した船体模型を図-2 に示す。船体模型は 500G.T. クラスのタンカー船を参考にし、簡略化したものを使用した。船体の諸元を表-1 に示す。また、実験で使用した津波条件を表-2 に示す。

(2) 実験方法

a) 衝突力および漂流挙動計測実験

図-3 に示すように、護岸から 2.0 m 離れた地点 (位置 A)、もしくは護岸前面 (位置 B) に、船体模型をセットして津波を作用させた。船体が陸上へ遡上して、陸上構造物へ衝突したときの衝突力を 6 分力計により計測した。また同時に、船体模型の漂流挙動を、ステレオビ

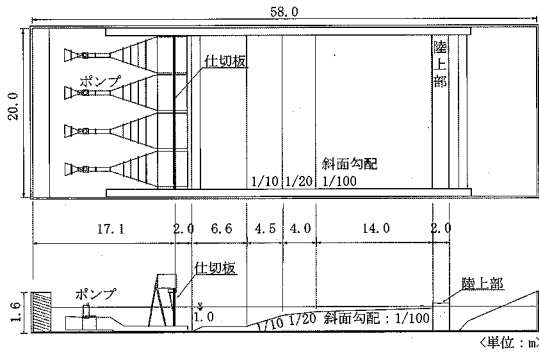


図-1 実験水槽

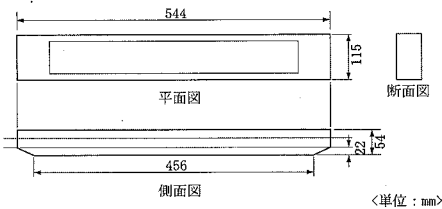


図-2 船体模型

表-1 船体模型の諸元

項目		満載時	軽荷時
寸法	長さ (cm)	54.4	
	幅 (cm)	11.5	
	高さ (cm)	5.4	
喫水 (cm)		4.0	2.2
質量 (kg)		2.41	1.28

1 フェロー 工博 鹿島建設(株)技術研究所
 2 正会員 工修 鹿島建設(株)技術研究所
 3 正会員 工修 鹿島建設(株)東京土木支店
 4 正会員 東電設計(株)港湾・海岸部
 5 正会員 工修 東京電力(株)原子力技術・品質安全部

表-2 津波条件

波名称	周期 (s)	波高 (cm)	初動位相
wave1	30	7.5	押し
wave2	90	10.0	押し
wave3	90	7.5	押し
wave4	90	5.0	押し
wave5	180	7.5	押し
wave6	30	7.5	引き
wave7	90	7.5	引き
wave8	180	7.5	引き

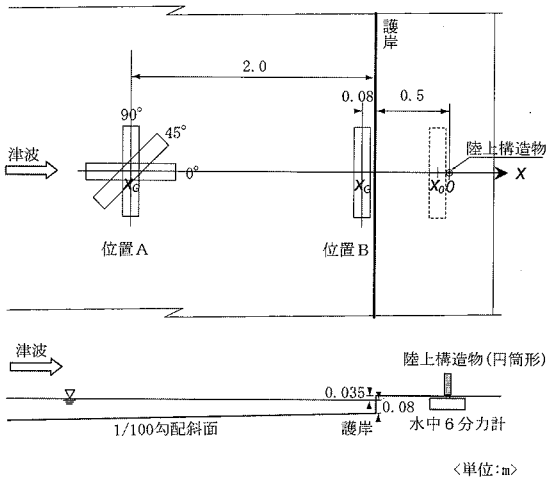


図-3 船体模型初期設置位置

表-3 陸上構造物模型の諸元

構造物の形状	幅 (内径) (cm)	高さ (cm)	奥行き (cm)
直方体	15	15	15
円筒形	2	6	—

デオトラッカーシステムを用いて計測した.

船体の喫水は表-1 に示す軽荷時と満載時の 2 種類、陸上構造物は表-3 に示す直方体および円筒形の 2 種類とした。また、図-3 に示すように、位置 B では波向に対して 90° のみ、位置 A では波向に対して 0° 、 45° 、 90° について実験を行った。

b) 載荷試験

船体と陸上構造物との衝突時の荷重変位特性（船体と陸上構造物との間のばね特性）を明らかにするために、載荷試験を行った。なお、衝突部分の材料特性を極力、実物に近づけるために、清宮ら（1994）を参考に、初期変位の特性に近いD型ゴムを、船体の衝突部分に取り付けて実験を行っている。載荷は50Nまで行い、荷重と変位の関係を求めた。

表-4 実験ケース

case	波条件	初期地点		船舶の重量 (噸水)	陸上構造物 の形状	衝突力 (N)	
		位置	角度				
01	wave2	A	0	輕荷	円筒形	30.7	
02	wave2					23.2	
03	wave2		45			14.7	
04	wave2					13.6	
05	wave2					11.3	
06	wave2		90			5.7	
07	wave3					8.2	
08	wave1	B	90			直方体	45.1
09	wave2						11.6
10	wave1						46.0
11	wave1						53.0
12	wave2						18.9
13	wave2						20.1
14	wave5						11.8
15	wave1			21.8			
16	wave1			11.0			
17	wave2			11.0			
18	wave2			11.0			
19	wave3	14.6					
20	wave2	A	45	満載	円筒形		24.6
21	wave2		90				9.8

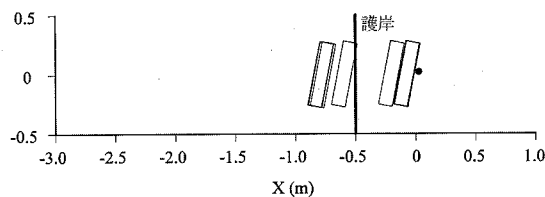
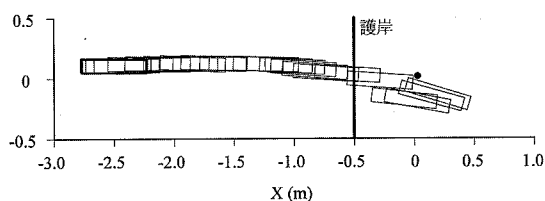
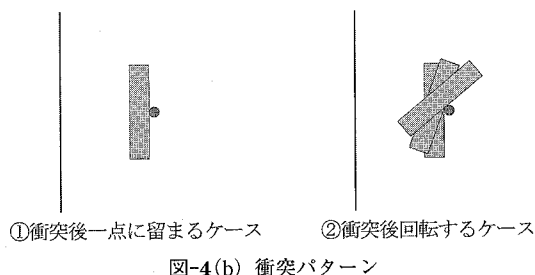
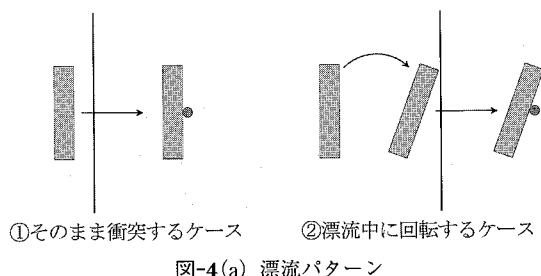
(3) 実験結果

a) 衝突力および漂流挙動計測実験

実験を実施したケースのうち、表-4に示す21ケースにおいて、船体が陸上へ遡上して陸上構造物に衝突し、その衝突力を計測することができた。なお、表-4には船体の陸上構造物への衝突力のピーク値も併せて示す。また、図-4には代表的な漂流挙動のパターンを示す。本実験における船体の漂流挙動はこのパターンのいずれかの組合せになっている。しかし、同じ初期条件、波条件のケース、例えば、case01とcase02においても、船体の初期角度の僅かなずれにより漂流挙動は異なり、衝突力にも差が生じることが分かった。そこで本研究では、まずは最も単純なケースとして、漂流物が直線上を回転せずに漂流し、陸上構造物にそのまま衝突するケースについて漂流挙動および衝突力をモデル化することにした。その代表的なケースとして、case01およびcase11の漂流挙動計測結果を図-5に示す。

b) 載荷試験

陸上構造物が円筒形の場合の載荷試験の結果を、図-6に示す。載荷試験の結果、荷重と変位の関係は式(1)に示す3直線で良好に近似できる。



$$F_M = \begin{cases} 1000 \cdot x_M & (x_M \leq 0.009) \\ 24000/7 \cdot x_M - 153/7 & (0.009 < x_M \leq 41/3000) \\ 15000 \cdot x_M - 180 & (41/3000 < x_M) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

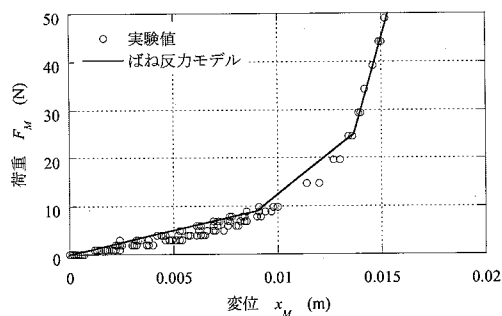
F_M : 荷重 (N)

x_M : 変位 (m) ($=x_G - x_0$)

x_G : 船体の重心位置 (m)

x_0 : 船体が構造物に最初に接触する位置 (m)

である。



3. 衝突力の評価方法

陸上構造物へ作用する力は、直接作用する流体力を無視すると、船体による衝突力のみである。そこで本研究では、船体と陸上構造物との間の力のやり取りをばねでモデル化することによって、船体が陸上構造物に衝突するときの船体に加わる衝突荷重を、陸上構造物への衝突力と考えることにした。

本研究では、図-5に示す case01 および case11 のように、船体の挙動が津波進行方向の一次元 (x 軸のみ) で考えられ、円筒形で構造物への直接作用する流体力を無視できるケースについて検討を行った。このとき、船体の運動方程式を書くと式 (2) となる。

$$(M + m_a) \cdot \ddot{x}_G + N \cdot \dot{x}_G + F_M(x_G) = F_T \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

M : 船体質量 (kg)

m_a : 付加質量 (kg)

N : 付加減衰 (kg/s)

$\dot{x}_G$: 船体の速度 (m/s)

$\ddot{x}_G$: 船体の加速度 (m/s^2)

$F_M(x_G)$: ばね反力 (N) (= 陸上構造物への衝突力)

F_T : 流体力 (N)

である。船体の運動に対する外力となる流体力については、池谷ら (2005) を参考に、慣性力および抗力を考慮した次式で与える。

$$F_T = \rho/2 \cdot C_D \cdot (u - \dot{x}_G) \cdot |u - \dot{x}_G| \cdot A + C_M \cdot \rho \cdot DLB \cdot \ddot{u} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

ρ : 流体密度 (kg/m^3)

C_D : 抗力係数

C_M : 慣性力係数

u : 船の位置の流速 (m/s)

$\ddot{u}$: 船の位置の流れ加速度 (m/s^2)

A : 船体の津波方向に対する断面積 (m^2)

D : 喫水 (m)

L : 船長 (m)

B : 船幅 (m)

である。流体力を算出するための流速および加速度については、藤井ら (2005) の方法により平面 2 次元の津波遡上計算を行って得られた結果を使用する。

4. 計算結果

(1) 計算結果と実験結果との比較

式 (2) を Runge-Kutta-Gill 法で数値積分し、船体の挙動および衝突力を求めた。なお、計算時間間隔は実験計測間隔と同じ 1/60 秒とした。case11 について、付加質量および付加減衰、流体力の慣性力項を無視して船体の変位と陸上構造物への衝突力を計算した結果と、実験結果との比較を図-7 に示す。また、図-8 には、付加質量および付加減衰を無視して変位と衝突力を計算した結果を、図-9 には、井島ら (1972) のポテンシャル接続法から得られた付加質量および付加減衰を用いて計算した結果を示す。

図-7 より、従来のように津波の流体力を抗力のみで考えると、津波のフロントが通過するときの船体の挙動の追随性が悪くなってしまうため、実験結果に比較して変位の変化が遅くなっていることが分かる。これに対し、図-8 に示すように流体力を抗力と慣性力の和とした場合、船体の挙動速度が図-7 に比べて速くなっている。しかしながら、付加質量および付加減衰を無視しているため、船体の速度が実験値に比べて速い結果となっている。そこで、付加質量および付加減衰を考慮した図-9 の結果を見ると、計算による船体の挙動は実験結果をほぼ再現している。さらに、衝突力も、ピーク値が発生した後、船体が津波による流体力を受けて構造物に力を作し続けている点など、ほぼ実験結果を再現している。

そこで、case01 について、上記と同様に、井島のポテンシャル理論から算出した付加質量および付加減衰を使用して、計算をした結果を図-10 に示す。ただし、case01 の実験では、船体が陸上構造物に衝突して跳ね返った後、直線上からぶれたため、一回目の衝突後の、跳ね返りのピークまでを計算の対象とした。比較の結果を見ると、case11 ほどは、特に衝突力の評価において、実験結果を再現できていないことが分かる。これは、case11 が津波方向に対して船体が船舷方向であるのに対し、case01 では船体が津波の向きに対して長手方向に向いているため、長手方向に流体の速度に差がある影響を考慮せず、重心位置での流速で代表させて外力を計算しているためであると考えられる。このため、津波のフロント通過時や、陸上に遡上して流速が急激に速くなる位置などにおいて、船体の挙動が流体の運動に追随しきれていないものと考えられる。

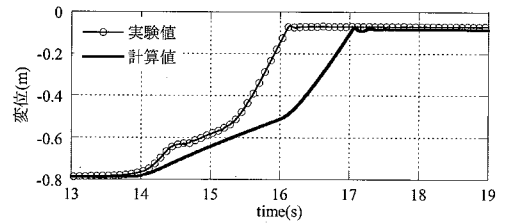


図-7 計算値と実験値との比較
(case11, 付加質量・付加減衰・慣性力なし)

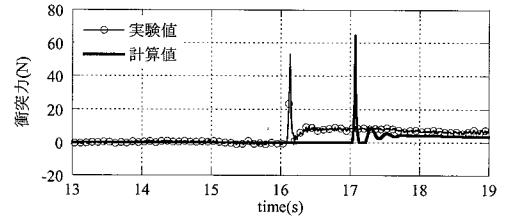


図-8 計算値と実験値との比較
(case11, 付加質量・付加減衰なし)

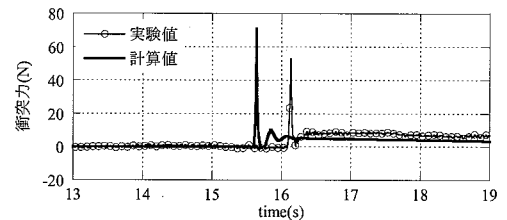
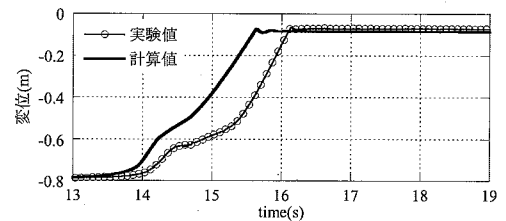


図-9 計算値と実験値との比較 (case11)

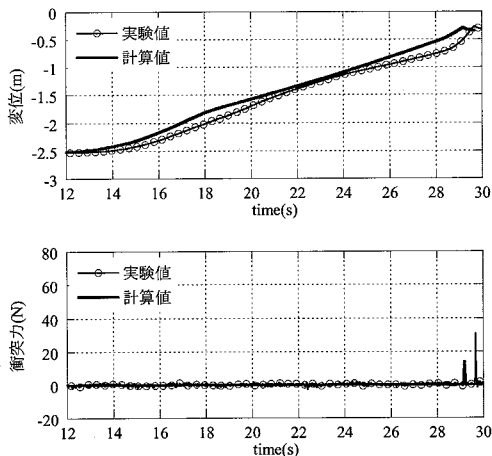


図-10 計算値と実験値との比較 (case01)

(2) 荷重変位特性の影響

本手法は、対象とする漂流物の荷重変位特性を入力すれば、その衝突力を評価することが可能である。例として、実験で用いた D 型ゴムではなく、一般の船舶の変形を想定し、図-11 に示すように、ある程度変形した後荷重が一定値を保ち (清宮 (1994))、その後、0 になるケース (図中①)、荷重が一定値を保ち続けるケース (図中②)、荷重が大きくなるケース (図中③) について計算を行った。なお、荷重変位特性以外は case11 の場合と同じ条件で計算した。計算結果を図-12 に示す。挙動および衝突力に違いが生じることが分かり、このような船舶をはじめ、漂流物の荷重変位特性の把握が衝突力の評価に重要であることが分かる。

5. おわりに

本研究の結果得られた知見は以下の通りである。

- (1) 船体 (漂流物) の変位量および陸上構造物への衝突力について実験を行い、衝突の荷重変位特性を考慮した船体の運動方程式の数値解析により評価するモデルを構築した。適切なパラメータの設定により、実験漂流挙動を概ね再現することができ、また、衝突力に関しては、船体が構造物に衝突してピーク値が発生した後、船体が津波による流体力を受けて構造物に力を作用し続ける点など、ほぼその現象を再現することができた。同時に、各パラメータが結果に与える影響を明らかにした。
- (2) 本評価手法では陸上構造物への衝突力を船体 (漂流物) のばね反力として考えているため、評価対象とする船体 (漂流物) の荷重変位特性を考慮してその衝突力を評価することが可能となった。

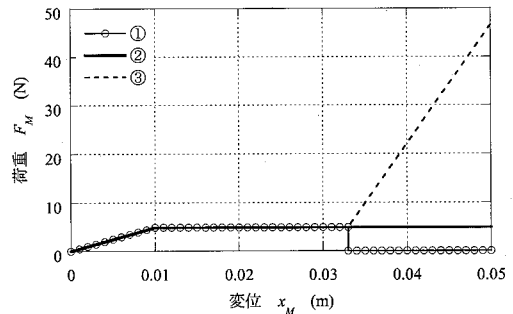


図-11 荷重変位特性の設定例

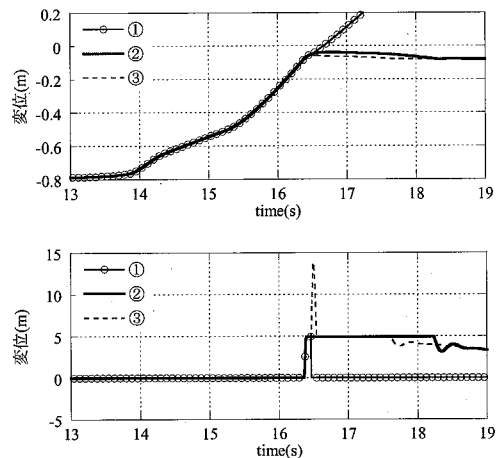


図-12 図-11 の荷重変位特性時の計算結果

参考文献

- 池野正明・田中寛好 (2003) : 陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究, 海工論文集, 第 50 巻, pp. 721-725.
- 池谷毅・朝倉良介・藤井直樹・大森政則・武田智吉・柳沢賢 (2005) : 浮体に作用する津波波力の実験と評価方法の提案, 海工論文集, 第 52 巻, pp. 761-765.
- 井島武士・田淵幹修・湯村やす (1972) : 有限水深の波による矩形断面物体の運動と波の変形, 土木学会論文集, 第 202 巻, pp. 33-48.
- 清宮理 (1994) : 構造工学シリーズ 6, 構造物の衝突挙動と設計法, 土木学会, pp. 294-298.
- 藤井直樹・大森政則・池谷毅・朝倉良介・武田智吉・柳沢賢 (2005) : 港湾における津波漂流物の数値解析, 海工論文集, 第 52 巻, pp. 296-300.
- 松富英夫 (1999) : 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, II-47, pp. 111-127.
- 水谷法美・高木祐介・白石和陸・宮島正悟・富田孝史 (2005) : エプロン上のコンテナに作用する津波力と漂流衝突力に関する研究, 海工論文集, 第 52 巻, pp. 741-745.