

大規模実験に基づく流木衝突力の評価法

松 富 英 夫*・池 田 弘 樹**

1. ま え が き

著者ら(1993a, 1994c)は、水路実験に基づいて、流木衝突力の評価法を考案してきた。水路実験に基づくものは、水の緩衝機能を考慮した見かけの質量係数や水理量と結びつけた流木衝突速度が議論できるなどの利点がある反面、流木の降伏応力や衝突角度の影響の議論が難しいなどの欠点がある(流木衝突力には被衝突物の剛性ばかりでなく、流木の降伏応力も大きく関係する)。また、水路実験では実験規模を小さくせざるを得ず、衝突力やその測定精度に不安が残る。これらを少しでも解消する一方法として、空中での大規模実験が考えられる。

そこで、本研究は、空中での実規模に近い衝突力実験を行い、水路実験での知見を加味して、総合的かつ実用的な流木衝突力の評価法を考案するものである。

2. 実 験

実験は、規模が大きいため空中実験とし、次の手順で行った。①足場パイプで檣を組む。②細いワイヤーで檣に流木を水平に吊る。吊り方は流木前後部の2点でヒンジ吊りとし、その際に流木衝突角度を考慮する。各ヒンジは流木移動方向と直行する方向にV字形に張られたワイヤーに結ばれているため、移動中に衝突角度が変わることはほとんどない。③流木を被衝突物(鋼板)に対して垂直に引き離すように引っ張る。④引っ張りを解除して、固定された鋼板に衝突させる。実験装置の概略を図-1に示す。

測定項目は流木の衝突力 F_m 、衝突力立ち上がり時間 Δt_p 、衝突前後の移動速度、衝突による鋼板との接触面積 A である。図-2に衝突力波形の模式図と前二者の定義を示す。

衝突力の評価は鋼板の歪を測定することで行った。その鋼板は、堅固なコンクリート製の溝に据え、前後の隙間に同幅の背丈の低い鋼板を入れて、4個の豆ジャッキで固定した。片持ち部となった鋼板の諸元は厚さ7cm、幅25cm、高さ50cmで、理論固有振動数は約231Hzで

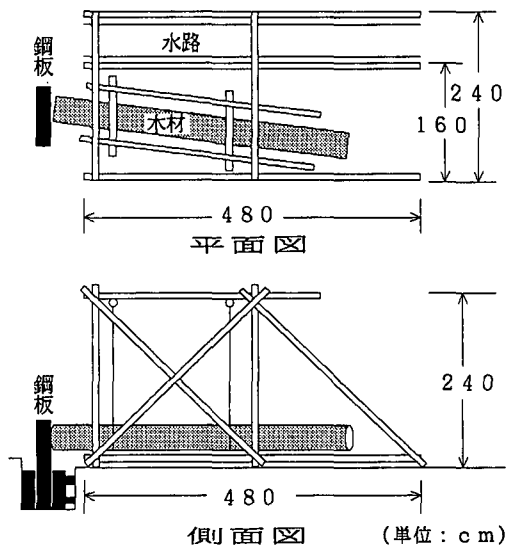


図-1 実験装置の概略

ある。記録機の性能の関係で(後述)、固有振動数の実測は行っていない。衝突力のキャリブレーションは、秤量1tfの吊り秤とチェーン・ブロックを用いて行った。それは実験日ごと、実験開始前と終了後の2回行った。ただし、実験では衝突力が4.5tf程度に達するものまでを行っており、キャリブレーションの範囲が狭いことを断っておく。衝突力の経時変化の記録にはペン・レコーダーを用いた。その公称の周波数応答性能は50Hzで、衝突力立ち上がり時間が5ms以上であれば、レコーダーは現象へ追従可能である。データ・レコーダーでも記録を行ったが(サンプリング間隔1ms)、両者の結果はほぼ同じであった。

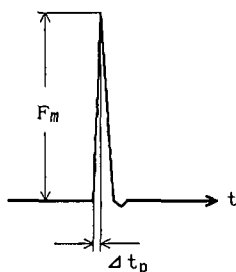


図-2 F_m と Δt_p の定義

流木移動速度の評価は上方からのストロボ撮影に基づく写真判定法によった。そのため、衝突高さに置かれた長さスケールが写真に写るようにした。また、衝突速度

* 正会員 工博 秋田大学助教授 鉱山学部土木環境工学科

** 正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ(株)

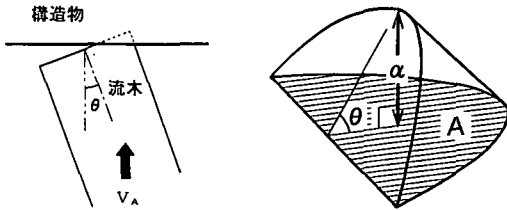
図-3 接触面積 A 、衝突角度 θ と変形量 α の定義

表-1 実験条件

$D(\text{cm})$	$\theta(^{\circ})$	$v_{A0}(\text{cm/s})$	L/D	$W(\text{kgf})$	樹種	備考
20	5	100~250	6~20 (0.25)	24~81	カラ松	
	10	〃	〃 (〃)	29~118	〃	
	15	〃	〃 (〃)	32~110	〃	
	20	100~200	8~14 (〃)	31~55	〃	
30	5	50~200	6~14 (0.25)	84~253	カラ松	一部ラワン
	10	100~250	6~13 (〃)	66~208	ラワン	〃 カラ松
	20	50~200	6~10 (0.25)	78~134	カラ松	

や移動方向が判定し易いように、流木先端部の上面に目印を付けた。ストロボの閃光開始には赤外センサー・スイッチを、発光回数（4回）の調節にはシグナル・コントローラーを用いた。衝突速度の調節は流木の背後への引っ張り距離で行った。

接触面積の評価は、衝突により流木の押し潰れた部分をトレシングペーパーにトレースし、それをプランメーターで計測する方法によった。本研究での流木の接触面積、衝突角度と変形量（後述）の定義を図-3に示す。

使用流木の諸元と衝突条件をまとめて表-1に示す。 D は流木径、 L は流木長、 W は実験時の流木重量、 θ は衝突角度で、流木長軸と被衝突物面の鉛直線とがなす水平角、 v_{A0} は目標とした衝突速度で、きざみ幅は基本的に50 cm/sである。（ ）内の数値は細長比のきざみ幅である。樹種は一部がラワンで、大部分がカラ松である。参考までに、日本沿岸の貯木は松とラワンが大半である（松富ら、1993 b）。

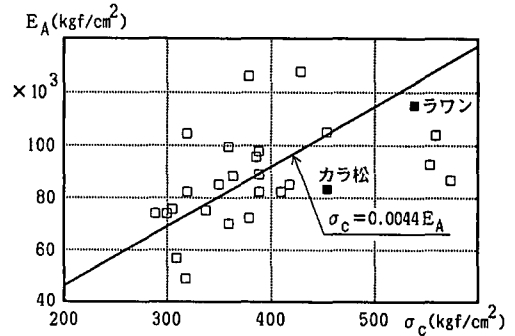
3. 実験結果とその考察

本実験結果からは衝突力立ち上がり時間や反発係数などの検討も可能である。しかし、本研究では衝突力のみの検討を行うことにする。

3.1 衝突力の各種無次元量への依存性

理論によれば（松富ら、1994 b）、流木の衝突力は降伏応力と弾性係数の両方に依存する。種々樹種の圧縮強度 σ_c と弾性係数 E_A の関係を図-4に示す。通常の静的載荷試験によるもので、両者には強い相関がみられ、平均的に次式の関係がある。

$$\sigma_c = 0.0044 E_A \dots \dots \dots (1)$$

図-4 木材の圧縮強度 σ_c と弾性係数 E_A の関係（静的載荷試験）

木材の場合は圧縮強度＝降伏応力と考えてよいので、衝突力評価における木材の力学的性質は降伏応力で代表させてよいことになる。ただし、本研究での降伏応力は衝突力÷被衝突物と流木端部の接触面積と定義する。

流木衝突力は流木の衝突速度と諸元でほぼ決まると思われる。衝突力 F_m に影響する因子として、被衝突物の固定方法、構造や特性値などを除けば、衝突速度 v_{A0} 、流木径 D 、流木長 L 、降伏応力 σ_f 、衝突角度 θ 、密度 ρ_A 、重力加速度 g などが考えられる。これらの因子間で次元解析を行えば、次式を得る。

$$F_m / \gamma D^2 L = f\{v_{A0} / (gD)^{0.5}, L/D, \sigma_f / \gamma L, \theta\} \dots (2)$$

ここで、 γ は流木の単位体積重量である。式(2)の左辺は衝突力と流木重量の比と考えればよい。

樹種や木材の状態ごとに流木衝突力の回帰式を求めるのは厄介である。樹種や木材の状態ごとの特性は降伏応力と単位体積重量で代表させることにすればよさそう。よって、実験結果の検討にあたっては、カラ松とラワンの両データを用いることにする。

無次元衝突力 ($F_m / \gamma D^2 L$) の無次元衝突速度 $\{v_{A0} / (gD)^{0.5}\}$ 、細長比 (L/D)、無次元降伏応力 ($\sigma_f / \gamma L$)、衝突角度 θ への依存性を各々図-5～8に示す。凡例は図-5に代表させて示している。

図-5より、次のことが判断される。①無次元衝突速度が大きくなるにつれて、無次元衝突力は大きくなる。②流木径が大きくなるにつれて、無次元衝突力が大きくなる傾向にある。ただし、何れの流木径グループも、無次元衝突速度への依存性の程度を示すそのべき指数はほぼ同じであることを断っておく。無次元衝突速度の実験範囲が実際に対応できる程であることも断っておく。

図-6からは、無次元衝突力は細長比にほとんど依存しないことが判断される。

図-7からは、図の左側から右側下部にかけてのデータが多く、無次元降伏応力が大きくなるにつれて、無次元衝突力は小さくなるように判断される。しかし、衝突

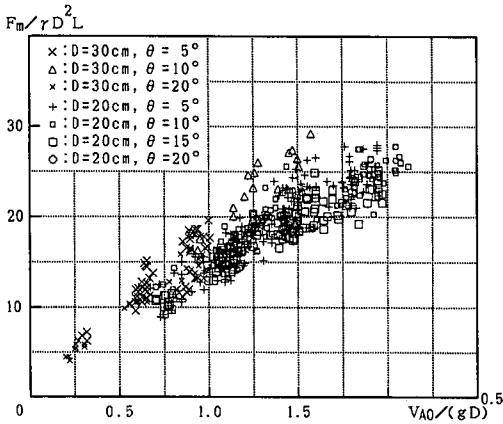


図-5 無次元衝突力の無次元衝突速度への依存性

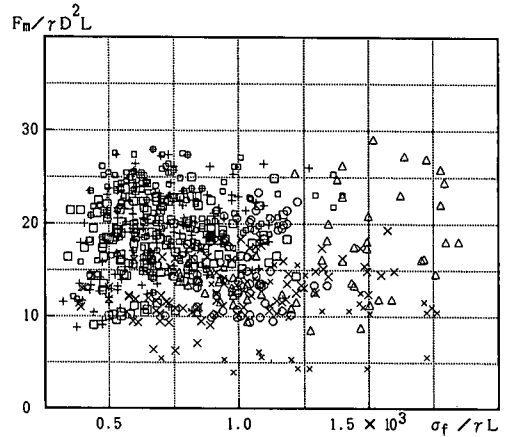


図-7 無次元衝突力の無次元降伏応力への依存性

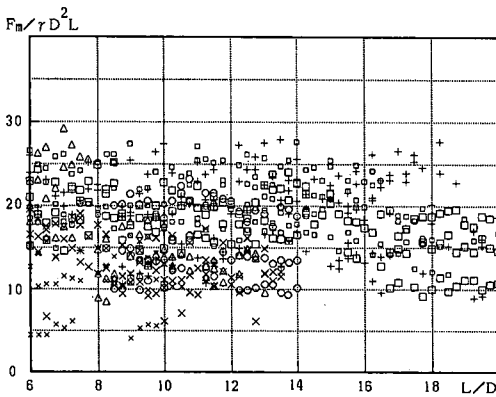


図-6 無次元衝突力の細長比への依存性

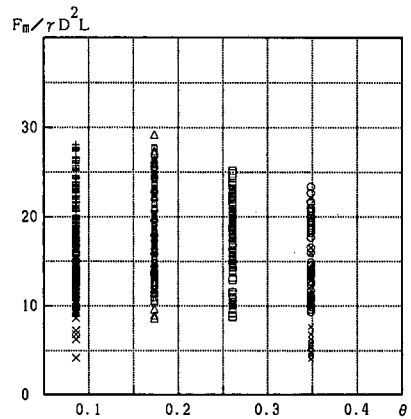


図-8 無次元衝突力の衝突角度への依存性

速度（これで無次元衝突力の大きさはほぼ決まる）を考慮しながら凡例ごとに見ると、そうではない。このことは、例えば流木径ごとというように、実験データをグループ分けして検討する必要があることを示唆している。

図-8 からは、衝突角度ごとの衝突速度範囲（表-1 参照）をも考慮すれば、衝突角度が大きくなるにつれて、無次元衝突力は小さくなることが判断される。

図-7 での考察に基づき、流木径ごとに回帰式を求め、実験データ量を重みとして各無次元量のべき指数の修正を行うと、次式となった。

$$F_m / \gamma D^2 L \sim \{ (v_{A0} / (gD))^{0.5} \}^{0.90} (L/D)^{0.06} \cdot (\sigma_f / \gamma L)^{0.19} \theta^{-0.05} \dots \dots \dots (3)$$

式（3）は、①無次元衝突力は細長比にほとんど依存しないこと、②降伏応力が大きくなるにつれて、衝突力が大きくなること、③衝突力は衝突角度にほとんど依存しないこと、などを示している。②と③は理論（松富ら、1993 b）の傾向と一致する。

無次元衝突力を縦軸、式（3）の右辺（= X_1 ）を横軸

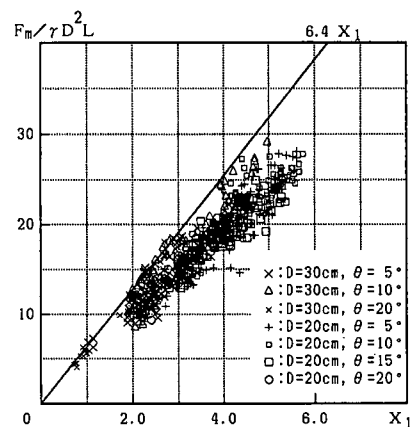


図-9 無次元衝突力と式（3）の右辺との関係

にとって実験データを整理したものを図-9 に示す。図によると、データの集中度は非常に良く、式（3）は妥当な回帰式と判断される。参考までに、次元解析に基づい

た実験データの整理による流木衝突力の評価式を導いておく。危険側を考慮して、実験値の上限を与える係数を採用することになると、次式を得る。

$$F_m/\gamma D^2 L = 6.4 \{v_{A0}/(gD)^{0.5}\}^{0.90} (L/D)^{0.06} \cdot (\sigma_f/\gamma L)^{0.19} \theta^{-0.05} \dots (4)$$

図-9 中の実線が式 (4) である。

3.2 衝突力の評価式

衝突力評価の基礎式として次式が考えられる(松富ら, 1993b)。

$$F = -C_M M dv_A/dt - (\pi\beta D^2/2) \cdot (C_M \rho_A E_A)^{0.5} (v_A - d\delta/dt) \dots (5)$$

ここで、 F は経時的な衝突力、 C_M は質量係数 ($=1+$ 付加質量係数)、 M は流木の質量、 v_A は衝突中の流木移動速度、 β は流木の減衰定数、 δ は被衝突物の撓み量である。

式 (5) を流木の諸元を用いて書き直せば、

$$\begin{aligned} F/\gamma D^2 L &= (\pi C_M/4g) dv_A/dt - (\pi\beta/2L) \cdot (C_M E_A/\gamma g)^{0.5} (v_A - d\delta/dt) \\ &= (\pi C_M/4g) dv_A/dt - (\pi\beta/2L) \cdot (C_M E_A/\gamma g)^{0.5} v_A \\ &\sim (1/g) dv_A/dt - C_1 (v_A/L) (E_A/\gamma g)^{0.5} \dots (6) \end{aligned}$$

ここで、 $C_1 = 2\beta/C_M^2$ 最大衝突力時を考えることにすれば、式 (6) は次式のように表現されよう。

$$F_m/\gamma D^2 L \sim (1/g) v_{A0}/\Delta t_p - C_1 (v_{A0}/L) (E_A/\gamma g)^{0.5} \dots (7)$$

ここで、 v_{A0} は衝突開始時の流木移動速度、 Δt_p は衝突力立ち上がり時間である。これらの量と流木の最終変形量 α (図-3 参照) の間には次式の関係があらう。

$$v_{A0} \Delta t_p \sim \alpha \dots (8)$$

また、弾性係数 E_A は α を用いて次式のように表現されよう。

$$\begin{aligned} E_A &= (4F/\pi D^2) (L/\Delta L) \sim (F_m/D^2) (L/v_{A0} \Delta t_p) \\ &\sim (F_m/D^2) (L/\alpha) \dots (9) \end{aligned}$$

ここで、 ΔL は一般的に定義される木材の歪量である。よって、式 (7) は次式のように変形される。

$$F_m/\gamma D^2 L \sim v_{A0}^2/g\alpha - \{v_{A0}/(g\alpha)^{0.5}\} (F_m/\gamma D^2 L)^{0.5} \dots (10)$$

一方、 α と接触面積 A には次式の関係がある(松富ら, 1993b)。

$$\alpha \sim A^{2/3} D^{-1/3} f_1(\theta) \dots (11)$$

降伏応力の定義から $A = F_m/\sigma_f$ と表現されるので、式 (11) は次式となる。

$$\alpha \sim (F_m/\sigma_f)^{2/3} D^{-1/3} f_1(\theta) \dots (12)$$

よって、式 (10) は次式となる。

$$\begin{aligned} F_m/\gamma D^2 L &\sim (v_{A0}^2/gD) (F_m/\gamma D^2 L)^{-2/3} (\sigma_f/\gamma L)^{2/3} \\ &\cdot f_2(\theta) - \{v_{A0}/(gD)^{0.5}\} (F_m/\gamma D^2 L)^{1/6} \\ &\cdot (\sigma_f/\gamma L)^{1/3} f_3(\theta) \dots (13) \end{aligned}$$

式 (13) は $(F_m/\gamma D^2 L)^{5/6}$ の 2 次方程式で、容易に解けて、最終的に次式を得る。

$$F_m/\gamma D^2 L \sim \{v_{A0}/(gD)^{0.5}\}^{6/5} (\sigma_f/\gamma L)^{2/5} f(\theta) \dots (14)$$

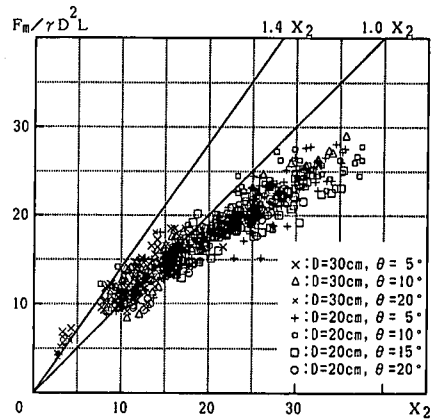


図-10 無次元衝突力と式 (15) の右辺との関係

式 (14) は無次元衝突力が細長比に依存しないことを示している。これは前節に示した実験結果、図-7 と整合している。式 (5) の右辺第 2 項を無視した場合の結果も、 θ への依存性は異なるが、式 (14) と同じになる。式 (14) の無次元量の組み合わせも、次元解析から得られたものと同じである。

衝突角度 θ に関する情報も理論的考察から得られるが、簡単な表現のものは得られない。そこで、前項の回帰式の結果を用いることにすれば、無次元衝突力は次式に依存することになる。

$$F_m/\gamma D^2 L \sim \{v_{A0}/(gD)^{0.5}\}^{1.2} (\sigma_f/\gamma L)^{0.4} \theta^{-0.05} \dots (15)$$

無次元衝突力を縦軸、式 (15) の右辺 ($=X_2$) を横軸にとって実験データを整理したものを図-10 に示す。図によると、原点を通る一直線上にデータは集中しないが、その傾向にはある。危険側を考慮して、実験値の上限を与える係数を採用することになると、流木衝突力の評価式として次式を得る。

$$F_m/\gamma D^2 L = (1.0 \sim 1.4) \{v_{A0}/(gD)^{0.5}\}^{1.2} \cdot (\sigma_f/\gamma L)^{0.4} \theta^{-0.05} \dots (16)$$

図-10 中の実線が式 (16) の上・下限である。

衝突角度への依存性が非常に小さいことから、実用には衝突角度を無視した次式がより便利と思われる。

$$F_m/\gamma D^2 L = (1.2 \sim 1.5) \{v_{A0}/(gD)^{0.5}\}^{1.2} \cdot (\sigma_f/\gamma L)^{0.4} \dots (17)$$

図-11 中の実線が式 (17) の上・下限で、 X_3 は式 (17) の係数を除いた右辺である。

実際の流木では水の緩衝機能も加味された見かけの質量係数 C_{MA} が掛かることになり、式 (17) は次式となる。

$$F_m/\gamma D^2 L = (1.2 \sim 1.5) C_{MA} \{v_{A0}/(gD)^{0.5}\}^{1.2} \cdot (\sigma_f/\gamma L)^{0.4} \dots (18)$$

孤立構造物へ衝突する時の平均的な見かけの質量係数は、段波に伴う場合が 1.5 程度(松富, 1993a)、サージに伴う場合が 1.6 程度(松富ら, 1994c)、定常流に伴う場

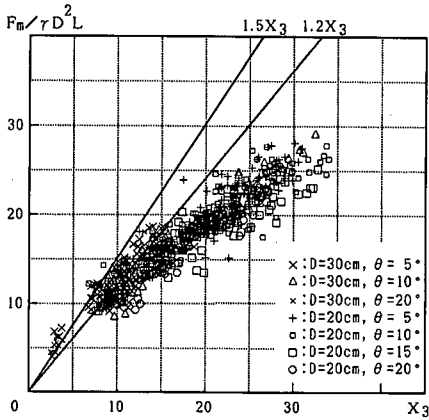


図-11 衝突角度を無視した場合の無次元衝突力

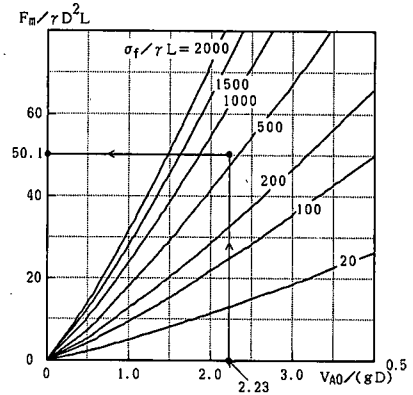


図-12 流木衝突力の推定図

合が1.8程度(後藤ら, 1982)である。

4. 流木衝突力の推定図

被衝突物にとって最も危険側の係数値1.5を採用した時の式(17)の計算図を図-12に示す。この図の利用法の説明を兼ねて、以下に流木衝突力の推定例を示す。

流木の樹種としてカラ松, その諸元として秋田港における貯木の平均的な値, $\gamma=0.7\text{ tf/m}^3$, $D=0.6\text{ m}$, $L=11\text{ m}$ を採用する(松富ら, 1993b)。衝突速度 v_{A0} は, 陸上浸水深を1.5 mと想定して, 流速と同じ5.4 m/sとする(松富ら, 1994a)。そして, 降伏応力 σ_f としてカラ松の平均的な圧縮強度 $\sigma_c=450\text{ kgf/cm}^2$ を採用すれば(衝撃的載荷時の木材の降伏応力がこれでよいかは, 今後の検討課題である), 無次元衝突速度 $v_{A0}/(\gamma D)^{0.5}=2.23$, 無次元降伏応力 $(\sigma_f/\gamma L)=580$ となるので,

$$F_m/\gamma D^2 L=50.1 \quad (19)$$

よって, 衝突力は,

$$F_m=50.1 \times 0.7 \times (0.6)^2 \times 11=139\text{ tf} \quad (20)$$

式(20)の推定値が妥当かどうかは判らない。参考までに, $\sigma_f=450\text{ kgf/cm}^2$ として, 式(1)から推定される弾性係数 E_A を採用した時の同一衝突条件下での理論値(松富ら, 1993b)は110 tfとなる。ただし, 不確定要素の一つである流木の減衰定数 β は0.03を採用している($\beta=0$ の時は114 tfで, β の影響は小さい)。式(17)において, 下限の係数値1.2を採用した時の推定値は111 tfで, 理論値とほとんど一致する。 $\gamma=0.7\text{ tf/m}^3$, $\sigma_f=450\text{ kgf/cm}^2$, $\theta=5^\circ$, $\beta=0.03$ と固定し, $D=0.2\sim 1.4\text{ m}$, $L/D=6\sim 20$, $v_{A0}=1\sim 5\text{ m/s}$ と変化した時の理論値と式(17)右辺の係数を除いたものの計算値 X_3 との比は1.6~0.9の間で変化した。つまり, D の小さい間は理論は過大評価傾向, 大きくなるにつれてほぼ同じとなる傾向を示した。上記は σ_f を固定した上での比較なので, こ

の結果から直ちに理論や実験式の良否を判断することはできない。

5. むすび

本研究で得られた主な結論は次の通りである。

- ① 係数値に曖昧さを残したが, 流木衝突力 F_m の評価式(18)を得た。
- ② 流木衝突力は, 本実験の範囲内(衝突角度 $\theta \leq 20^\circ$)では, θ にほとんど依存しなかった。
- ③ 無次元流木衝突力 $(F_m/\gamma D^2 L)$ は細長比 (L/D) にほとんど依存しない。換言すれば, 流木衝突力は細長比の1乗にほぼ比例する。このことは理論的考察からも確認された。

謝辞: 本研究は平成6・7年度文部省科学研究費(代表: 東北大学 首藤伸夫教授)によって行われた。本研究をまとめるに当り, 首藤伸夫教授から多くの御助言を賜った。本論文の公表に当たり, 小川記念基金の補助を受けた。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 後藤智明・佐々木順次・首藤伸夫(1982): 津波による木材の流動, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 491-495.
 松富英夫(1993a): 砕波段波に伴う流木の最大衝撃力に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 467, pp. 19-28.
 松富英夫・里中嘉樹・池田弘樹(1993b): 沿岸貯木場の実態について, 津波工学研究報告, 第10号, pp. 29-42.
 松富英夫・首藤伸夫(1994a): 津波の浸水深, 流速と家屋被害, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 246-250.
 松富英夫・池田弘樹(1994b): 弾塑性理論に基づく流木衝撃力の評価, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 806-810.
 松富英夫・白鳥雅之(1994c): サージ・フロントに伴う流木の最大衝撃力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 811-815.