

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

松 富 英 夫*・白 鳥 雅 之**

1. ま え が き

北海道南西沖地震津波における被害の特徴の一つは、漂流物による家屋被害が目立ったことである。例えば、奥尻島青苗漁港の臨港地区では漁船や箱型作業船が漂流して家屋群を破壊した。

地震・津波の予想される東海地方沿岸には、全国有数の規模を持つ漁港や貯木場(松富ら, 1993a)が複数存在し、青苗で起こったような漂流物災害が大規模に生じる可能性がある。

津波による流木の漂流パターンは、①段波先端部に伴う場合、②サージ・フロントに伴う場合、③それ等のかかり背後、つまり定常的な流れに伴う場合の三つに大別されよう。前二者での流木衝撃力は急変不定流でのもので、流速と流木の移動速度が異なり、しかも水の緩衝機能が重要な要素であり、流木衝撃力の評価には実験的検討が是非とも必要である。そして、段波に伴う場合の流木衝撃力については既に検討を行った(松富, 1993b)、定常的な流れでの流木衝撃力は、最も危険な場合を想定し、流速=流木の移動速度と考えて、既存の評価法(例えば、松富ら, 1994)を利用すればよからう。

そこで、本研究は、サージ・フロントに伴う流木を対象に、構造物の配置間隔(以下、開度と呼ぶ)による見かけの質量係数、流木の移動速度、衝撃力継続時間の変化特性について実験的検討を行い、対象流木の最大衝撃力の評価実験式を導くと共に、段波の場合との比較・検討を行うものである。

2. 実 験

実験に使用した水路は高さ0.5 m、幅0.3 m、長さ11 mの水平に設置された鋼製矩形水路で、水路下流側の10 m部分が両面ガラス張りのものである。ガラスの片面には、サージ・フロントや流木等の挙動読み取りのため、5 cm間隔のメッシュが刻まれている。サージ・フロントはゲート急開により発生させた。ゲートは、厚さ12 mmの塩化ビニール樹脂製で、手動の引き揚げ式である。そ

れは水路下流端から6 mの所に位置している。実験装置の概略を図-1に示す。

対象力の測定には、全力 F のみ測定可能な自作の波力計を用いた(松富, 1988)。この波力計はしっかりと固定されたL型鋼棒と受圧壁からなり、受圧壁の取り替えは可能となっている。鋼棒の諸元は断面 40×70 mm、水平部長さ330 mm、鉛直部長さ970 mmである。測定原理は、防水ひずみゲージで鋼棒鉛直部のひずみを測定し、それを力に換算するというものである。波力計の測定精度の良さは確認済みである(松富, 1991)。

実験でのサージ・フロント発生条件を表-1に示す。 h_1 と h_0 は各々初期ゲート上・下流側の水深である。

各実験において、流木は1本のみとし、実験初期のその配置条件は中心軸を流れ方向に向け(以下、縦置きと呼び、この状態での衝突を縦衝突と呼ぶ)、重心に関してゲートからの距離 $x=2.55$ mの所に静置とした。縦置き、縦衝突とした理由は、既報(松富, 1989)の流木の挙動分類結果に基づき、単位幅当たりで最も大きな衝撃力が働き得るという判断による。使用流木の諸元をまとめて表-2に示す。 D は流木径、 L は流木長、 L/D は細長比、 W は湿潤状態での流木の重量である。

衝撃力の測定は、既報と同じく(松富, 1989, 1990,

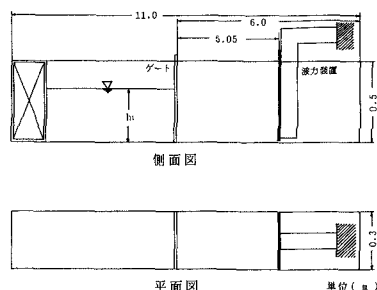


図-1 実験装置

表-1 サージ・フロント発生条件

h_1 (m)	h_0 (m)
0.15, 0.20, 0.25, 0.40	0

* 正会員 工博 秋田大学助手 鉱山学部土木環境工学科

** 日本舗道(株)

表一2 流木諸元

D (cm)	L (cm)	L/D	W (gf)
5.8~12	46.4~160	8, 12, 16	565~8615

1993), $x=5.05$ mで行った。受圧壁として、厚さ 10 mm, 開度 $\lambda=2, 20, 33, 50, 70, 87$ %のアクリル樹脂板を用いた。ただし、開度 87 %の場合は波力計の受圧壁を固定する L 型鋼棒の鉛直部そのもの(受圧幅 40 mm), 開度 2 %の場合は受圧壁幅を水路幅より少し狭くした連続壁である。その他の場合は縦スリット壁で、その下端は厚さ 2 mm の鋼板で剛結した。また、縦スリット壁の隙間部の上端は、サージ・フロント衝突後の水面がそこまで達しない高さにした。

各ケース、有効な実験が 10 回となるまで実験を繰り返した。ここで、有効な実験とは、流木が壁の中心、つまり鋼棒または壁背後が鋼棒部分に衝突した場合を指す。

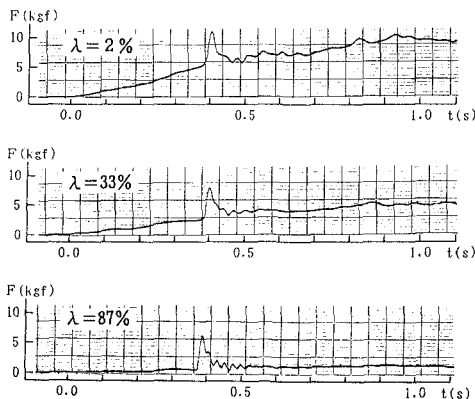
測定項目は全力 F の他に、サージ・フロント衝突前後の壁近傍でのサージ・フロントの水深と挙動、流木の移動速度と挙動である。これ等の測定にはビデオ・システムを用いた。ビデオの解析には、1/60 秒まで読み取り可能なビデオ・モーション・アナライザーを用いた。全力の経時変化の記録には、ペン・レコーダーを用いた。

3. 実験結果とその考察

3.1 流木の衝撃力

図一2 に開度 λ 別の全力 F の代表的な経時変化例を示す。サージ・フロント衝突時を $t=0$ と同期している。開度以外の条件は全て同じである。本条件は、初期ゲート下流側水深を除き、段波での検討例(松富, 1993 b)のものと同じである。図中、 $t \approx 0.4$ s での突出部が流木衝突によるものである。図より次のことが判断される。

- ① 流木の衝撃力は、サージ・フロントそのものによ



図一2 全力の経時変化例(D=5.8 cm, L/D=8, $h_1=0.40$ m)

る波力に比べて、無視できない。

- ② 開度が大きい時、流木の衝撃力が支配的となる。
- ③ 段波の場合に比べて、衝突後、上方に投げ出される流体の緩衝機能が弱い(次節の考察を参照)。

3.2 見かけの質量係数

図一3 に開度 λ による見かけの質量係数 C_{MA} の変化を示す。図中の各実験値は 10 回の平均である。以下、実験値は全てそうである。ただし、見かけの質量係数は次式で評価されている。

$$\int F_d dt = C_{MA} M u_w \dots\dots\dots (1)$$

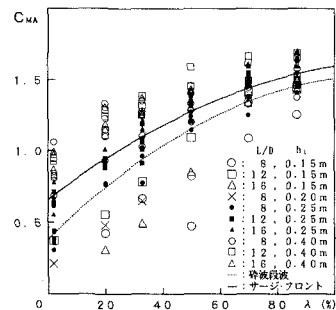
ここで、 F_d は流木の衝撃力(図一7 参照)、 t は時間、 M は流木湿潤時の質量、 u_w は壁から約 50 cm 上流での流木先端部の水平移動速度である。流木の移動速度として上記を選んだ理由は、①一般に、現象変化の激しい壁近傍を除いた流れ場での平均的な水量のみが予め推定可能であること、②この移動速度は壁近傍での過渡現象の影響を受けていないこと、等による。本来ならば、壁近傍での過渡現象の影響を受けた流況でのものを採用すべきである。しかし、現段階では、その流況や流木の衝突時刻等を正確に推定することは難しく、無理である。図一3 によると、実験値に散らばりがみられるが、細長比による規則性はみられない。式(1)で定義された見かけの質量係数は、開度に対して、放物分布することも判る。実線は次式に示される実験値の回帰曲線である。

$$C_{MA} = -6.0 \times 10^{-5} \lambda^2 + 0.0154 \lambda + 0.66 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 λ は%表示である。点線は次式に示される段波での回帰曲線である(松富, 1993b)。

$$C_{MA} = -8.4 \times 10^{-5} \lambda^2 + 0.0197 \lambda + 0.38 \dots\dots\dots (3)$$

λ が小さくなるにつれて、サージ・フロントでの見かけの質量係数は段波でのものより大きくなる傾向にある。これは、例えば流木の諸元と移動速度が同じ時、フロントでの水位変化率はサージの方が小さく、上方に投げ出される流体の緩衝機能が小さくなることから、推測つくことである。



図一3 開度による C_{MA} の変化

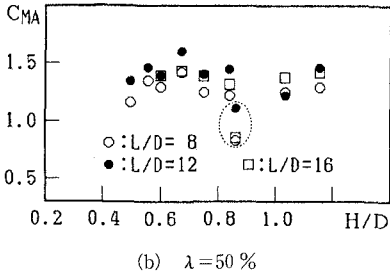
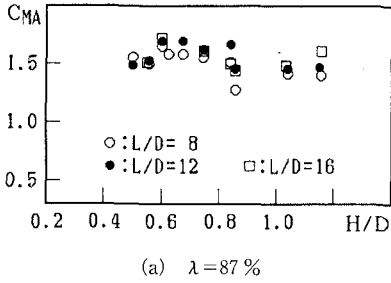


図-4 C_{MA} の H/D への依存性

見かけの質量係数は、次節以下に示す次元解析結果からも想像付くように、サージ・フロントの水深（定義は次節参照）と流木径の比 H/D に依存するかもしれない、その検討を行う必要がある。検討結果例を図-4(a)と(b)に示す。これ等の図は各々 $\lambda=87$ と 50% のものであるが、他の開度でも図の傾向は同じである。破線で囲まれた実験値は、初期ゲート上流側水深 $h_1=0.15\text{ m}$ の場合のもので、流速と流木が小さい場合のものである。図-3と4より、見かけの質量係数は H/D と L/D にほとんど依存せず、式(2)で評価されてよいことが判断される。

$\lambda=100\%$ の時、 C_{MA} は本来の質量係数 C_M と解釈される。サージ・フロントでのその値は約 1.6、砕波段波での値は約 1.5 であり、両者共に従来の報告値（後藤ら、1982；堀川、1983）とほぼ同じである。これは、流木の移動計算（例えば、中川ら、1994）に用いる仮想質量係数として、0.5~0.6 程度を採用すればよいことを示唆している。

3.3 流木の移動速度

流木の移動速度 u_w は流木とサージ・フロントの諸元でほぼ決まると思われる。前節での定義により、流木の移動速度は開度に依存しない。流木の移動速度に影響する因子として、流木と流体の特性値を除けば、他には流木径 D 、流木長 L 、入射水深 H 、重力加速度 g 等が考えられる。本研究では、入射水深として、初期ゲート上流側水深 h_1 毎の流木衝突直前での流木重心での水深の平均値を採用することにする。他に種々の入射水深が考えられるが、この水深での実験値の整理が一番良くまとま

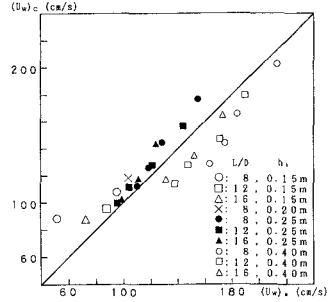


図-5 流木移動速度の計算値と実験値の比較

ったからである。参考までに、実験での入射水深の範囲は 3.8~6.7 cm であった。これ等の因子間で次元解析を行えば、次式を得る。

$$u_w^2/gD = f(H/D, L/D) \dots\dots\dots (4)$$

実験値より流木移動速度の回帰式を求めれば、次式を得る。

$$u_w = 4.23(H/D)^{1.123}(L/D)^{-0.298}(gD)^{0.5} \dots\dots\dots (5)$$

段波での流木移動速度は次式である。

$$u_w = 0.979(\Delta H/h_0)^{0.484}(\Delta H/D)^{0.719} \cdot (L/D)^{-0.261}(gD)^{0.5} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 ΔH は段波波高である。べき指数が若干異なるが、流木移動速度の水深や細長比への依存性は、両者共に同じ傾向である。式(5)の計算値と実験値の比較を図-5に示す。縦軸が式(5)の計算値で（以下、単に計算値と呼ぶ）、横軸が実験値である。計算値と実験値の区別は各々に添字 c と e を付けることで行っている。これ等は以下の計算値と実験値の比較でも同じである。図によると、両者の一致度は良く、式(5)は妥当な流木移動速度の評価式と判断される。

3.4 衝撃力継続時間

図-6(a), (b), (c)に径別の流木による衝撃力の時間波形例を示す。全図、横方向の1目盛が 0.05 s で、図-2と同じであり、縦方向の1目盛は上から順に約 2.8, 5.6, 12.5 kgf である。開度 $\lambda=87\%$ のもので、径以外は全て同じ条件である。各波形中の小さな振動は波力計の固有振動で、振動数は約 42 Hz、減衰係数は約 0.022 である。また、図-7に本研究での衝撃力継続時間 Δt の定義を示す。これ等の図より次のことが判断される。

- ① 流木衝撃力の時間波形はほぼ三角形で近似できる。
 - ② 諸条件が同じであれば、衝撃力継続時間の変動性は小さく、ほぼ同じ値を示す。
 - ③ 同じく図-7に定義されている流木の最大衝撃力 F_{dm} が大きくなるにつれて、衝撃力継続時間は長くなる。上記の①, ②, ③は段波の場合と変わらない。
- 衝撃力継続時間 Δt の開度 λ による変化を図-8に示

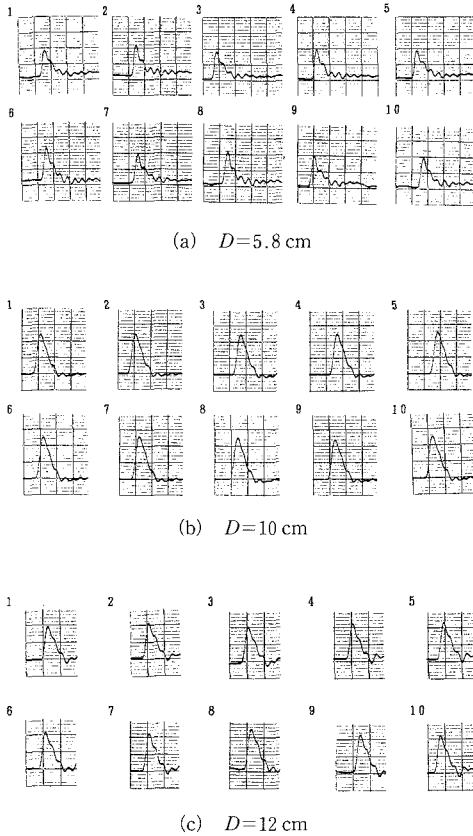


図-6 流木による衝撃力の波形例 ($h_1=0.4$ m, $L/D=8$, $\lambda=87\%$)

す。ただし、 Δt_a で無次元化されており、サージ・フロントでの Δt_a は初期ゲート上流側水深 h_1 と流木諸元毎の全 λ での Δt の平均値、段波での Δt_a は h_1 と流木諸元毎の $\lambda \geq 20\%$ での Δt の平均値である。図より、 $h_1=0.15$ mの場合のように流速が小さく、かつ流木が小さい場合を除けば、サージ・フロントでの衝撃力継続時間は開度に関係なくある一定の値を示すことが判る。点線は段波の場合の回帰曲線で、開度の小さい所で両者の傾向に差があることが判る。

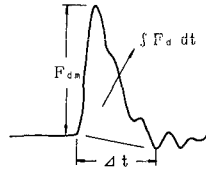


図-7 Δt と F_{dm} の定義

衝撃力継続時間に影響する因子として、流木と流体の特性値を除けば、他には D , L , 入射水深 H , 流木の移動速度 u_w 等が考えられる。これ等の因子間で次元解析を行えば、次式を得る。

$$u_w \Delta t / D = f(H/D, L/D) \dots \dots \dots (7)$$

実験値より衝撃力継続時間の回帰式を求めれば、次式を得る。

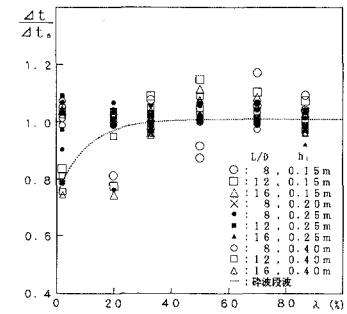


図-8 開度による衝撃力継続時間の変化

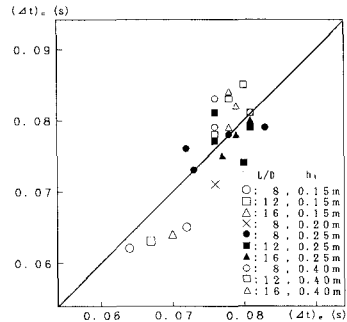


図-9 衝撃力継続時間の計算値と実験値の比較

$$\Delta t = 0.850(H/D)^{0.390}(L/D)^{0.048}(D/g)^{0.5} \dots \dots \dots (8)$$

段波での衝撃力継続時間は次式である。

$$\Delta t = 0.472\{1.01 - 0.269(0.910)^\lambda\} \cdot (\Delta H/h_0)^{0.147}(\Delta H/D)^{0.298} \cdot (L/D)^{0.136}(D/g)^{0.5} \dots \dots \dots (9)$$

段波の場合に比べて、衝撃力継続時間の細長比への依存度が非常に小さいことが判る。実際的な細長比の範囲内では、衝撃力継続時間は細長比にあまり依存しないと言える。同じことは段波の場合にも言えよう。

式(8)の計算値と実験値の比較を図-9に示す。図によると、計算値と実験値の一致度は比較的良く、式(8)は妥当な衝撃力継続時間の評価式と判断される。

3.5 最大衝撃力

前節での考察結果に基づき、流木の衝撃力 F_a に関して三角形分布を仮定すれば、式(1)より最大衝撃力 F_{dm} として次式を得る。

$$F_{dm} = 2.0 C_{MA} M u_w / \Delta t \dots \dots \dots (10)$$

式(10)を式(2), (5), (8)を用いて書き直せば、最終的な最大衝撃力の評価式として次式を得る。

$$F_{dm} = 7.81 \gamma (-6.0 \times 10^{-5} \lambda^2 + 0.0154 \lambda + 0.66) \cdot (H/D)^{0.733}(L/D)^{0.654} D^3 \dots \dots \dots (11)$$

ここで、 γ は流木の単位体積重量である。段波での最大衝撃力の評価式は次式である。

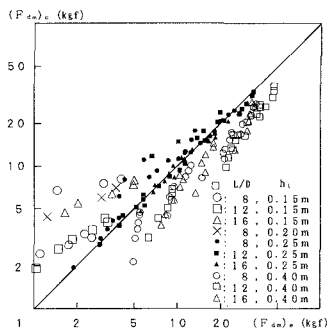


図-10 最大衝撃力の計算値と実験値の比較

$$F_{dm} = 3.26\gamma(-8.4 \times 10^{-5}\lambda^2 + 0.0197\lambda + 0.38)\{1.01 - 0.269(0.910)\lambda\}^{-1} \cdot (\Delta H/h_0)^{0.337}(\Delta H/D)^{0.421} \cdot (L/D)^{0.603} D^3 \dots\dots\dots (12)$$

べき指数が若干異なるが、最大衝撃力の水深や細長比への依存性は、両者共に同じ傾向である。

式(11)は、①前節までの実験値の整理方法から容易に想像付くように、生じ得る最大でなく、平均的な最大衝撃力を与え、②鋼製の波力計を用いた実験から得られているので、波力計の弾性係数より小さい木造やコンクリート造の構造物に対しては、最大衝撃力を過大評価する傾向を持つ。②の理論的根拠が松富ら(1994)により示されている。

図-10に式(11)の計算値と実験値の比較を示す。実験での最大衝撃力の変動係数(標準偏差/平均)は、最大衝撃力が大きくなるにつれて小さくなる傾向にあった。図によると、初期ゲート上流側水深 $h_1 = 0.15$ m の場合を除いて、計算値と実験値の一致度は比較的良好い。式(11)は妥当な流木の最大衝撃力評価式と判断される。

流木の衝撃力は、構造物と流木の特性値、流木の衝突角度や回転角速度等を除けば、開度、流木の諸元と移動速度で決まると思われる。式(11)を可能な限り流木の移動速度 u_w で表現するようにすれば、次式となる。

$$F_{dm} = 3.05\gamma(-6.0 \times 10^{-5}\lambda^2 + 0.0154\lambda + 0.66) \cdot (L/D)^{0.849} \{u_w^2/gD\}^{0.326} D^3 \dots\dots\dots (12)$$

段波では次式となる(松富ら, 1992)。

$$F_{dm} = 3.62\gamma(-8.4 \times 10^{-5}\lambda^2 + 0.0197\lambda + 0.38)\{1.01 - 0.269(0.910)\lambda\}^{-1} \cdot (L/D)^{0.756} (u_w^2/gD)^{0.293} D^3 \dots\dots\dots (13)$$

サージ・フロントでの方が細長比と流木移動速度への依存度が大きい。しかし、この程度の差は実験誤差の範囲

内と言えるかもしれない。

4. むすび

本研究で得られた主な結論は次の通りである。

- ① サージ・フロントに伴う流木の見かけの質量係数 C_{MA} 、移動速度 u_w 、衝撃力継続時間 Δt と最大衝撃力 F_{dm} の一評価実験式を示した。
- ② 見かけの質量係数は開度 λ に対して放物分布し、段波の場合に比べて大き目である。
- ③ 流速と流木が小さい場合を除けば、段波の場合と異なり、正規化された衝撃力継続時間は開度に関係なくほぼ一定である。
- ④ 流木の衝撃力は、サージ・フロントそのものによる波力に比べて無視できず、開度が大きいと支配的になる。

謝辞: 本学卒業研究生 酒井裕二君より実験等の助力を頂いた。本研究の一部は文部省科学研究費一般研究(C)により行われた。また、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.
 中川 一・井上和也・池口正晃・坪野考樹(1994): 流木群の流動と堰止めに関する研究, 水工学論文集, 第38巻, pp. 543-550.
 堀川清司(1983): 浮遊物の衝突による破壊力, 文部省科学研究費自然災害特別研究研究成果, No. A-58-2, pp. 85-92, 1983.
 松富英夫(1988): 砕波段波衝突による衝撃波力について, 土木学会論文集, No. 399, pp. 147-155.
 松富英夫(1989): 流木を伴う砕波段波衝突による波力について一段波波高に比べ流木径が小さい場合一, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 574-578.
 松富英夫(1990): 流木を伴う砕波段波衝突による波力について一段波波高と流木径が同程度の場合一, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 654-658.
 松富英夫(1991): 砕波段波衝突時の圧力分布と全波力, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 626-630.
 松富英夫・池田弘樹(1992): 水の緩衝機能を考慮した弾性波理論に基づく流木衝撃力の評価, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 691-695.
 松富英夫・里中嘉樹・池田弘樹(1993a): 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(1993b): 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・池田弘樹(1994): 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.