

## 砕波段波に伴う流木の最大衝撃力に関する実験的研究

松 富 英 夫\*

### 1. まえがき

津波は、緩斜面の海岸や河川等を遡上する時、たびたび砕波段波を形成する。その上、二次災害の原因ともなる木材や船舶等の浮遊物を伴う場合もある。にもかかわらず、浮遊物の衝撃に関する研究はほとんどなされていない。その諸特性を知ることは、今後の津波の防災・減災工学上、重要であろう。

ところで、水面貯木場・木材整理場においては、木材の流出防止のため、必要に応じて流出防止柵・係留用杭を設けることになっている<sup>1)</sup>。その際、木材の流出要因として、通常は風・潮流・波浪を考え、津波を考慮しない。そのため、津波来襲時には木材の流出が考えられる。事実、1983年日本海中部地震津波では、係留用杭が設けられていたにもかかわらず、秋田港で多数の木材が流出した。この状況に鑑み、東海地震津波の予想される静岡県下では、流出木材（以下、流木と呼ぶ）による災害の防止・軽減のため、貯木場・木材整理場周囲に防護柵を設ける気運にある。しかし、流木の破壊力に関する知見がほとんど得られていないため、その設計指針がないのが実状である。

防護柵の問題だけに止まらない。運悪く市街地等に流出した場合のことも考える必要がある。この場合の木材の破壊力は、上記防護柵の場合と異なり、家屋等の構造物群の配置間隔（以後、開度と呼ぶ）にも影響されると思われる。開度次第で、構造物近傍での流況が大きく変化するからである。この問題は、

我々の生命・財産の損失に直接関わるにもかかわらず、これまで検討されたことがほとんどなく、得られている知見も皆無に等しい。

一般に、衝撃（波）力は構造物等の滑動に対する安全性に関係し、力積はその滑動量に関係すると言われている。よって、第一義的には力積よりも衝撃（波）力を知る必要がある。津波による流木の破壊力に関する研究は緒についたばかりであるが、これまで主に力積が議論されている<sup>2), 3), 4)</sup>。これは、一つには対象構造物の形式（剛結されていない）や使用材料の種類（コンクリート）等に起因している（換言すれば、エネルギー保存則の適用が難しいということ）。その他として、実験スケールでの衝撃力なら比較的容易に議論できようが、その相似則（支配無次元量と書いてもよい）を明らかにしなければならないこと、実スケールとなると測定等が大変で、実行が容易でないこと、等が考えられる。砂防分野で衝撃力を対象とした研究（理論）例がないでもないが、海岸構造物や家屋群等と異なり、鋼製で、下端固定の片持ち梁的構造物に対するものである<sup>5)</sup>。しかも、実験的検証がなされておらず、その有用性も定かでないければ、流況も大いに異なる。

そこで、本研究は、砕波段波に伴う流木（入射段波波高と流木径は同程度）を対象に、構造物の開度による見かけの質量係数と衝撃力継続時間の変化特性、流木径による衝撃力継続時間の変化特性等について実験的検討を行い、対象流木による最大衝撃力の評価方法の開発を試みるものである。

\*秋田大学鉱山学部土木工学科

## 2. 実験

段波はゲート急開により発生させた。実験に使用した水路は、高さ0.5m、幅0.3m、長さ11.0mの水平に設置された鋼製矩形水路で、水路下流側の10m部分が両面ガラス張りのものである。ガラスの片面には、段波や流木等の挙動読み取りのため、5cm間隔のメッシュが刻まれている。ゲートとして、手動の引き揚げ式のもの（塩化ビニール樹脂製で、厚さ12mm）を用いた。水路下流端から6mのところと位置している。ゲート下流側水深調節のため、水路下流端に取り外し可能な堰も取り付けた。実験装置の概要を図-1に示す。

対象波力の測定には、受圧壁の取り替えが可能で、全波力Fのみ測定可能な自作の波力計を用いた。その詳細については文献6)を参照されたい。波力計の測定精度が問題となるが、波圧計による全波力の測定（波圧分布の積分）を別個に行い、その測定精度を検討した。結果の一例を図-2に示す。流木を伴わない場合で、実線は波圧計、破線は波力計で求めたものであり、各々11回と10回の平均である。図より、キャリブレーションさえ適切であれば、波力計の測定精度が相当良いことが判断される。この検討結果の詳細については文献4)を参照されたい。

実験での段波発生条件を表-1に示す。 $h_1$ は初期ゲート上流側水深、 $h_0$ と $u_0$ は各々初期ゲート下流側の水深と水平流速である。発生段波は全て移動跳水発生条件<sup>7)</sup>を満足するもので、その波高 $\Delta H$ は約10~12cmであった。ここで、 $\Delta H$ は段波下流の静水面から上流のはほぼ一様な水深部の水面までの高さである<sup>7)</sup>。受圧壁の開度 $\lambda = 2\%$ の場合、下記の流木を衝突させるには、この程度の $h_1$ を必要とした。

各実験において、流木は1本のみとし、初期、その中心軸を流れ方向に向け（縦置きと呼び、この状態での衝突を縦衝突と呼ぶことにする）、ゲートからの距離 $x = 2.55\text{m}$ （流

木中心）のところに静置した。縦置き・縦衝突とした理由は、既報の流木の挙動分類結果に基づき、単位幅当りで最も大きな衝撃力が生じ得るという判断による<sup>3)</sup>。また、 $x = 2.55\text{m}$ という比較的ゲート下流に静置した理由は、段波の発生させ方に起因する固有の水理現象をできるだけ除去する（換言すれば、できるだけ安定した再現性の高い段波を木材に遭遇させる）ためである<sup>7)</sup>。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、Wは湿潤状態での流木の重量である。表-3に使用流木の浸水時の比重 $\sigma$ の経時変化例を示す。この結果は両対数紙上ではほぼ直線分布する。D=2.4cmの場合を除き、初期、流木は水路底面に接する。参考までに、秋田港での貯木の諸元は、平均でD $\approx 57\sim 60\text{cm}$ 、L $\approx 11\text{m}$ 、大きいものでD $\approx 1.5\text{m}$ 、L $\approx 11\text{m}$ である。湿潤時の比重は0.8~0.9（昔は0.5~0.6）である。本実験での細長比（L/D）は大きいもののそれにはほぼ対応している。

波力測定は、既報<sup>3)</sup>と同じく、 $x = 5.05\text{m}$ で行った。受圧壁として、厚さ10mm、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鋼棒（受圧幅4.0cm）そのものであり、開度2%の場合をも除いたその他の場合は縦スリット壁で、それ等の下端は厚さ2mmの鋼板で剛結した。一例として、開度33%の場合を図-3に示す。この隙間部の配置パターンは全ての縦スリット壁と同じである。また、隙間部上端は段波衝突後の水面がそこまで達しない高さにしたことを断っておく。

各ケース、有効な実験が10回以上となるまで実験を繰り返した。流木が衝突しない場合があるからである。しかも、強い衝突<sup>3)</sup>の場合のみを有効な実験とした。

測定項目は全波力の他に、段波衝突前後の壁近傍での段波と流木の挙動、壁設置位置直前での流木の移動速度である。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。全波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-4に開度 $\lambda$ による全波力 $F$ の代表的な経時変化例を示す。段波先端衝突時を $t=0$ と同期している。開度以外の条件は全て同じである。図中、 $t=0.3\sim 0.5$ 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。

i) 開度が大きくなるにつれて、流木そのものによる衝撃力は大きくなり、段波そのものの衝撃力に比べて、無視できなくなる。これは、段波衝突後、上方に投げ出された流体の緩衝効果の強弱によるものである<sup>1)</sup>。

ii) ある開度で、流木衝突時と上方に投げ出された流体落下時( $t\approx 0.6$ s)の全波力が同じになる。

iii) ある開度以上で、流木そのものによる衝撃力が支配的となる。

図からは、開度が大きくなるにつれて、流木の衝突時間位置が遅れる傾向にあるように見える。実際はそうでなく、不規則である。ただし、 $\lambda=2\%$ の場合、衝突が遅れる状況になると衝突しにくく、どうしても早めの傾向となる。

#### 3.2 見かけの質量係数

開度 $\lambda$ による見かけの質量係数 $C_{MA}$ の変化例を図-5に示す。ただし、 $C_{MA}$ は次式で評価されている<sup>2), 4)</sup>。

$$\int F_s dt = C_{MA} M u_s \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $F_s$ : 流木による衝撃力(定義は図-8を参照)、 $t$ : 時間、 $M$ : 流木湿润時の質量、 $u_s$ : 流木衝突直前での流木後端部( $L > 46.4$ cmの場合は、壁から約50cm手前での流木

先端部)の水平移動速度。流木の移動速度として上記を選んだ理由は、

i) 一般に、壁等が存在しない時の流れ場の平均的な水理量のみが予め与えられること、

ii) 壁の存在の影響を受けていないこと、等による。本来ならば、壁の存在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、容易でない。図中、三角、丸と四角印は実験値(各々10回の平均。以下、特に断らない限り、実験値は全てそうである)、 $L/D=8$ の実験値に付いたI印は標準偏差(他の細長比の場合も、その傾向はほぼ同じ)で、実線は次式で示される回帰曲線である。

$$C_{MA} = 0.0113\lambda + 0.42 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\lambda$ は%表示である。図より、式(1)で定義された $C_{MA}$ はほぼ開度に比例することが判る。開度(=87%)、段波の強さ、細長比が同じ場合、 $C_{MA}$ は流木径にあまり関係しなかったことを断っておく。

$\lambda=100\%$ の時、 $C_{MA}$ は本来の質量係数 $C_M$ と解釈される。その値は約1.6であり、従来の報告値とはほぼ同じである<sup>2), 4)</sup>。よって、 $C_{MA}$ 、 $C_M$ 、 $\lambda$ の関係は次式となる。

$$C_{MA} = C_M + 0.0113\lambda - 1.13 \quad \dots\dots\dots (3)$$

厳密には、式(3)の数値はもちろんのこと、 $C_M$ も段波の強さ、細長比<sup>3)</sup>等によることに注意されたい。後藤・佐々木・首藤の $C_M$ の評価式によると<sup>3)</sup>、細長比( $L/D=8\sim 20$ )による $C_M$ の変化は高々3%程度であることを付け加えておく。ただし、彼等の評価式は定常流に伴う流木で得られたものである。

#### 3.3 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。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(約42Hz)は波力計の固有振動である。また、図-7に図-8で定義され

た衝撃力継続時間 $\Delta t$ の $\lambda$ による変化例を示す。図中、丸と四角印は共に実験値で、それ等の標準偏差は、 $\lambda$ が大きくなるにつれて小さくなる傾向にあり、その値は0.001~0.008 sであった。これ等の図より次のことが判断される。

i) 流木の衝撃力波形はほぼ三角形で近似できる。

ii) 諸条件が同じであれば、風波の場合と異なり(変動が大きい)<sup>10)</sup>、 $\Delta t$ はほぼ同じ値を取る。

iii) 流木の最大衝撃力 $F_m$ (図-8で定義)が大きくなるにつれて、 $\Delta t$ は長くなる。

iv) 開度が大きくなるにつれて、 $\Delta t$ は長くなる。ただし、開度が約20%を超えると、ほぼ一定値となる。

データの変動性と実スケールのデータ不足から、風波の衝撃波圧の場合でさえ、 $\Delta t$ の相似則について論じた研究例はないように思われる。光易<sup>10)</sup>の「Froudeの相似則が成立するだろう」という定性的な言及がある程度であろう。流木の場合はもちろんのことである(流木の試験では、Froudeの相似則を用いるのが一般的のようである<sup>11)</sup>)。しかし、図-6から判断されるように、流木の場合、縦衝突などと衝突形態を決めてしまえば、その変動性は小さく、定量的検討を行い易い。 $\Delta t$ を選ぶもう一つの理由は、衝撃力に比べて、測定精度に不安が少ないからである。

図-9に流木径 $D$ による $\Delta t$ の変化例を示す。参考までに、 $D=2.4\text{cm}$ の場合を除いて、実験値の標準偏差は0.001 s程度で、非常に小さい。図中、丸と四角印は実験値、1/2勾配線はFroudeの相似則、実線は回帰曲線で、次式で示される。

$$\Delta t = 0.0570 D^{0.171} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $D$ の単位は $\text{cm}$ である。図より、次のことが判断される。

i) 流木の場合、 $\Delta t$ にFroudeの相似則は成立しないようである。

ii) 実際の細長比( $L/D$ )の範囲内

(8~20)では、 $\Delta t$ は( $L/D$ )にあまり関係しない( $L/D$ )が大きくなるにつれて、 $\Delta t$ がやや大きくなるという系統的な傾向は見られるが)。

i) は、実験において、たとえFroudeの相似則で流木径と共に入射段波波高を変えても、同じであろう。両者間に勾配差があり過ぎるからである。ii) は、流木の運動に摩擦抵抗が二次的であることを考えれば<sup>1)</sup>、容易に想像つくことである。

$\Delta t$ に影響を与える因子として、流体と流木の密度、入射段波波高 $\Delta H$ を除けば、他には $D$ 、 $L$ 、 $u_*$ 、重力加速度 $g$ 等が考えられよう。これ等の因子間で次元解析を行えば、次式を得る。

$$u_* \Delta t / D = f(L/D, gD/u_*^2) \dots\dots\dots (5)$$

図-10に( $u_* \Delta t / D$ )と( $gD/u_*^2$ )の関係に関する実験結果例を示す。図によると、実験値のパラッキは比較的小さく、これ等は対象物理量を規定する良い無次元量と判断される。回帰曲線を求めると、

$$u_* \Delta t / D = 0.793 (gD/u_*^2)^{-0.201} \dots\dots\dots (6)$$

これ等の関係も細長比にあまり依存しないことが判断される。

式(4)・(6)より、本実験範囲内での $u_*$ の実験式として、次式が提案される。

$$u_* = 235 D^{-0.311} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $u_*$ の単位は $\text{cm/s}$ である。参考までに、式(7)による流木の移動速度と実験によるものとの比較例を図-11に示す。図によると、 $\Delta t$ の場合に比べて、 $u_*$ の場合は細長比の影響がやや目立っている。このことは、 $u_*$ が $\Delta H/L$ 等の影響を受け易い(上記ii)の説明の裏返し)ことを物語っていると言えよう。式(7)に頼らず、現段階では最悪の場合を想定して、 $u_*$ に理想段波理論で計算される段波内の断面平均流速(一般に、過大評価となる)を採用する方法も考えられよう。

式(4)と(7)の両辺での次元の差に注意された

い。これ等については、今後のデータの蓄積等を待って解決したい。

### 3.4 最大衝撃力

前節での考察結果に基づき、 $F_m$ に関し三角形分布を仮定すると、式(1)より最大衝撃力 $F_m$ として、次式が得られる。

$$F_m = 2.0 C_{MA} M u_w / \Delta t \quad \dots\dots (8)$$

よって、式(8)を式(2)・(4)・(7)を用いて書き直せば、本研究での最終的な最大衝撃力評価式として次式を得る。

$$F_m = 0.00661 \sigma (0.0113 \lambda + 0.42) \cdot (L/D) D^{2.111} \quad \dots\dots (9)$$

ここで、 $F_m$ の単位はkgである。

図-12と13に式(9)と実験結果との比較例を示す。式(9)において、 $\sigma$ は0.6が採用されている。図-12は開度 $\lambda$ を、図-13は流木径 $D$ を独立変数とした場合のものである。これ等の図より、式(9)が比較的適用度の良い実験式であることが判断されよう。

次に、適用範囲外であるかも知れないが、 $D=1\text{m}$ 、 $L=11\text{m}$ 、 $\lambda=87\%$ 、 $\sigma=0.6$ の条件で、入射段波波高と流木径が同程度の場合の計算例を示そう。式(2)・(4)・(7)・(8)より、

$$C_{MA} = 0.0113 \times 87 + 0.42 = 1.40 \quad \dots\dots (10)$$

$$\Delta t = 0.0570 \times 100^{0.111} = 0.125 \text{ s} \quad \dots\dots (11)$$

$$u_w = 235 \times 100^{-0.111} = 54.3 \text{ cm/s} \quad \dots\dots (12)$$

$$F_m = 2.0 \times 1.40 \times 0.5^2 \times \pi \times 11 \times 0.6 \times 0.543 / 9.8 / 0.125 = 6.4 \text{ ton} \quad \dots\dots (13)$$

以上の計算より、流木の衝撃力が相当なものであることが、容易に想像つく。参考までに、日本では、港湾構造物で流木の衝撃力を考慮する場合、一律に8 ton程度を採用しているようである<sup>12)</sup>。

さらに、従来の理論との比較例を示そう。ここでは水原等<sup>1)</sup>の理論との比較を示す。彼等の理論は、鋼製で、下端固定の片持ち梁の構造物に対するもので、弾性理論に基づいて

おり、次式で示される。

$$F_m = u_w (3WEI/gz^2)^{1/2} \quad \dots\dots (14)$$

ここで、 $E$ :構造物の弾性係数、 $I$ :構造物の断面二次モーメント、 $z$ :構造物固定端から流木衝突位置までの高さ。 $D=0.4\text{m}$ 、 $L=5\text{m}$ 、 $u_w=4.8\text{m/s}$ 、 $\sigma=0.8$ の場合<sup>1)</sup>、水原等の理論値は、

$$F_m = 19.8 \text{ ton} \quad \dots\dots (15)$$

ただし、 $E=2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、構造物断面を $15 \times 15 \text{ cm}$ の正方形、 $z=2\text{m}$ としている。本研究の場合は、弾性係数、構造物の断面形と流木の衝突高さに関係なく(この点で、本研究成果は式(14)より劣っていると思われるかもしれない。しかし、多くの構造物で弾性理論が適用できないことを考慮されたい)、

$$C_{MA} = 0.0113 \times 100 + 0.42 = 1.55 \quad \dots\dots (16)$$

$$\Delta t = 0.0570 \times 40^{0.111} = 0.107 \text{ s} \quad \dots\dots (17)$$

$$F_m = 2.0 \times 1.55 \times 0.2^2 \times \pi \times 5.0 \times 0.8 \times 4.8 / 9.8 / 0.107 = 7.1 \text{ ton} \quad \dots\dots (18)$$

本研究値は理論値の約4割である。この割合は弾性係数、構造物の断面形と流木の衝突高さに大きく左右されるので、その結果に対して直接には何も言えない。混成防波堤への波力では、捨石マウンドや海底地盤の弾性変形によるエネルギー吸収効果により、水平有効波力が相当軽減されることが指摘されている<sup>13)</sup>。本実験でも、波力の測定系で同様なことが生じている可能性があること、流木の変形によるエネルギー吸収も考えられること等より、妥当な結果と言えるかもしれない。これについては今後の検討課題としたい。

## 4. むすび

砕波段波に伴う流木を対象に、任意開度を有する構造物近傍での見かけの質量係数、同構造物への衝撃力継続時間等について実験的検討を行い、対象流木による最大衝撃力の評価方法の開発を試みた。限られた実験条件で

のものであるが、本研究で得られた主要な結論は次の通りである。

1) 構造物の開度 $\lambda$ 、段波波高と流木径の比 $(\Delta H/D)$ など次第で、流木の衝撃力 $F_0$ は、段波そのものの衝撃力に比べて、無視できない。

2) 段波波高と流木径が同程度の時、流木の質量係数 $C_M$ は約1.6であった。この値は堀川の評価値(1.5~1.6)とほぼ同じである。

3) 式(1)で定義された段波に伴う流木の見かけの質量係数 $C_{M\lambda}$ はほぼ $\lambda$ に比例する。

4)  $\lambda$ が大きくなるにつれて、図-8で定義された流木の衝撃力継続時間 $\Delta t$ は長くなる。ただし、 $\lambda > 20\%$ ではほぼ一定である。

5) 流木の衝撃力継続時間には、Froudeの相似則は成立しないようである。

6) 段波波高と流木径が同程度であれば、流木の衝撃力継続時間は細長比 $(L/D)$ にあまり関係しない。

7) 限られた条件の実験に基づき、第一近似的なものであるが、流木による最大衝撃力 $F_{\max}$ の一評価方法を提案した。

今後は、データの蓄積と共に、 $\Delta t$ や $F_{\max}$ 等の理論的検討を行いたい。また、サージ・フロントに伴う場合についても検討したい。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、東北大学工学部 首藤伸夫教授より有益なるご意見を賜った。ここに記して深甚なる感謝の意を表す。また、実験等に助力頂いた本学卒業研究生 渡辺英祐君(現NTT)にも感謝の意を表す。なお、本研究の一部は(財)建設工学研究振興会と(財)防災研究協会の奨励金により行われたことを付記する。

## 参 考 文 献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1979.
- 2) 堀川清司：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.
- 3) 松富英夫：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. 574-578，1989.
- 4) 松富英夫：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. 654-658，1990.
- 5) 水原邦夫・武居有恒・南哲行：流木の流下阻止に関する基礎的研究(II)一柵状構造物における流木の衝撃力と堰止率一，新砂防，No. 114，pp. 9-16，1980.
- 6) 松富英夫：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. 147-155，1988.
- 7) 松富英夫：移動跳水(波状段波非)発生条件の検討，第33回水理講演会論文集，pp. 271-276，1989.
- 8) 後藤智明・佐々木順次・首藤伸夫：津波による木材の流動，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 491-495，1982.
- 9) 佐藤昭二・合田良實：海岸・港湾，彰国社，p. 372，1972.
- 10) 光易 恒：波圧論，土木学会水理委員会水工学シリーズ，pp. 1-25，1965.
- 11) 水山高久・石川芳治・矢島重美：透過型砂防ダムによる流木捕捉効果，土木技術資料，30-11，pp. 623-628，1988.
- 12) 岡 貞行氏(財)漁港漁村建設技術研究所)との意見交換による。
- 13) 合田良實：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，p. 237，1977.

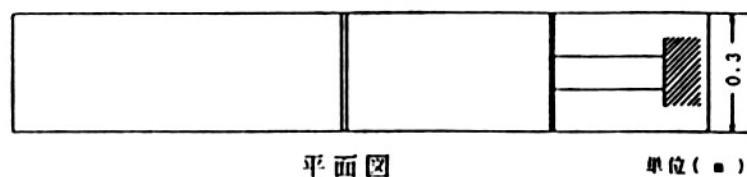
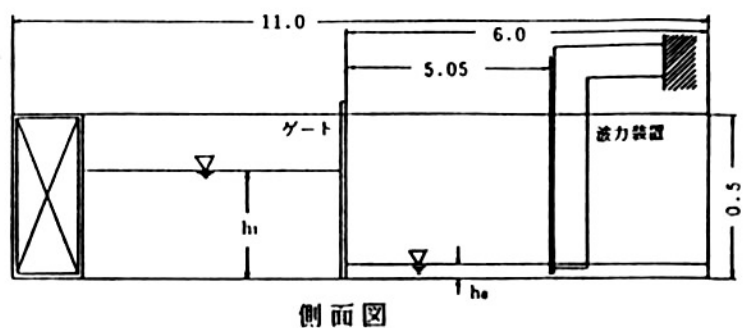


図-1 実験装置

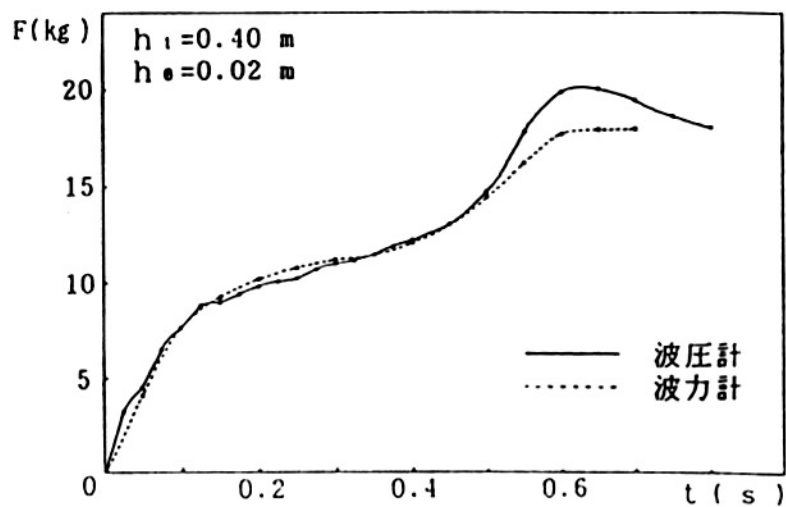


図-2 流木を伴わない場合の全波力の比較例

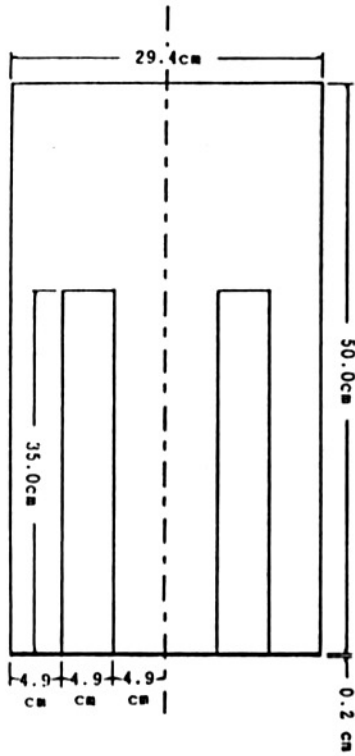


図-3 開度33%の縦スリット壁

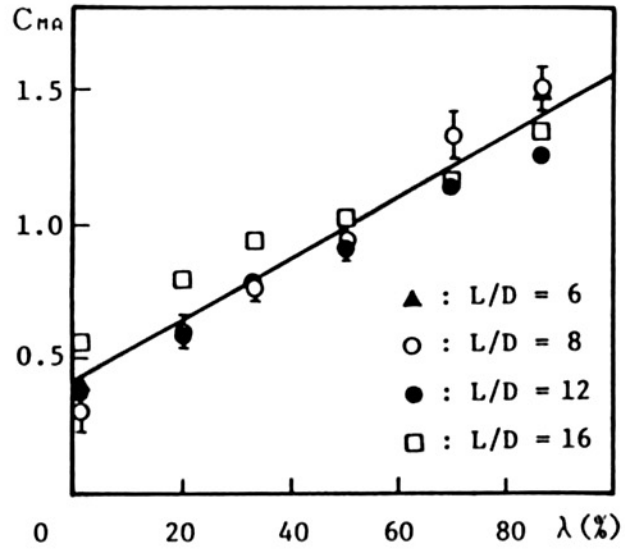


図-5 開度による  $C_{DA}$  の変化

( $h_1=0.4\text{m}$ ,  $h_0=0.02\text{m}$ ,  $D=5.8\text{cm}$ )

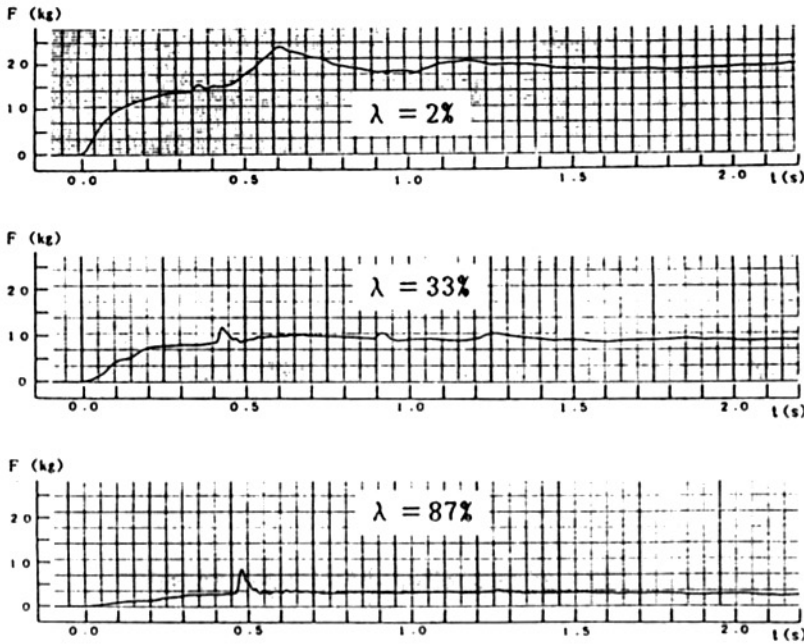
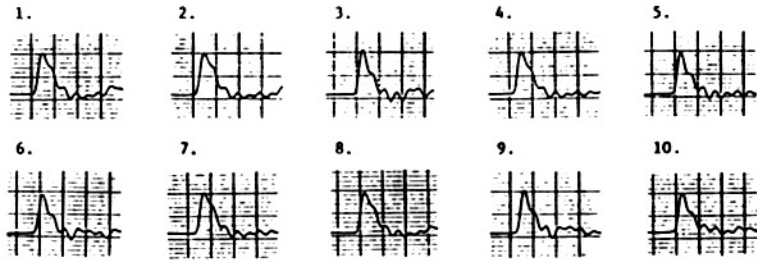
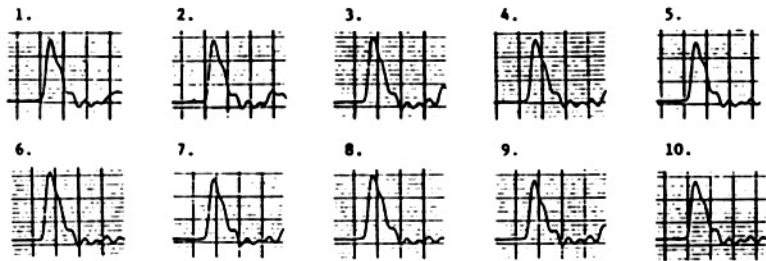


図-4 全波力の経時変化例 ( $h_1=0.4\text{m}$ ,  $h_0=0.02\text{m}$ ,  $D=5.8\text{cm}$ ,  $L/D=8$ )

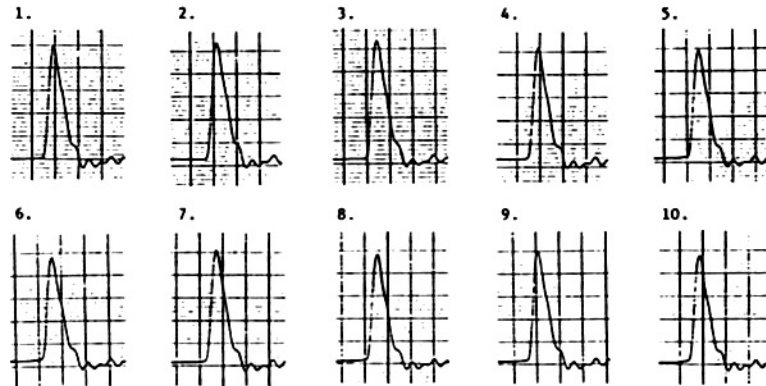




(a)  $D = 8 \text{ cm}$



(b)  $D = 10 \text{ cm}$



(c)  $D = 12 \text{ cm}$

図-6 流木による衝撃力部の波形例 ( $h_1 = 0.4 \text{ m}$ ,  $h_0 = 0.02 \text{ m}$ ,  $L/D = 8$ ,  $\lambda = 87\%$ )

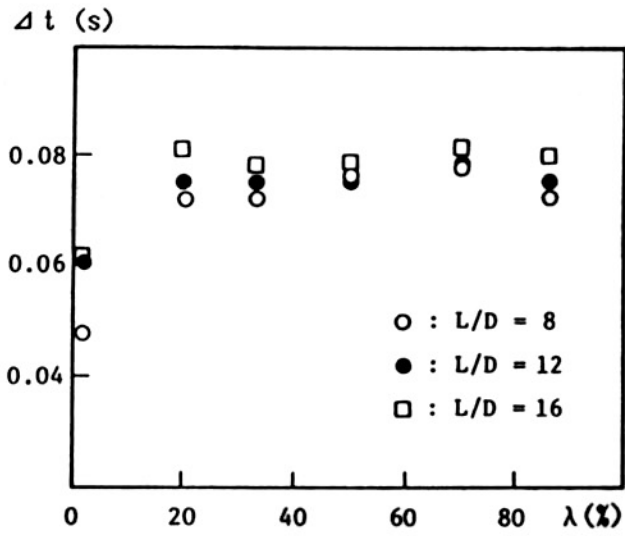


図-7 開度による衝撃力継続時間の変化  
( $h_1=0.4\text{m}$ ,  $h_0=0.02\text{m}$ ,  $D=5.8\text{cm}$ )

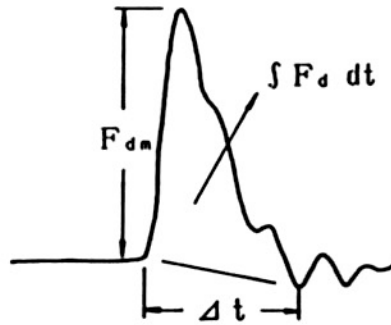


図-8  $\Delta t$ と $F_{dm}$ の定義

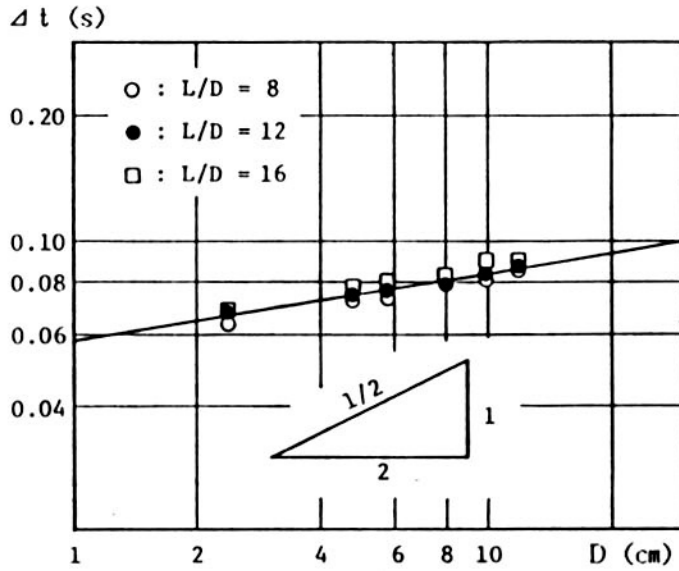


図-9 衝撃力継続時間の流木径による変化  
 ( $h_1=0.4\text{m}$ ,  $h_0=0.02\text{m}$ ,  $\lambda=87\%$ )

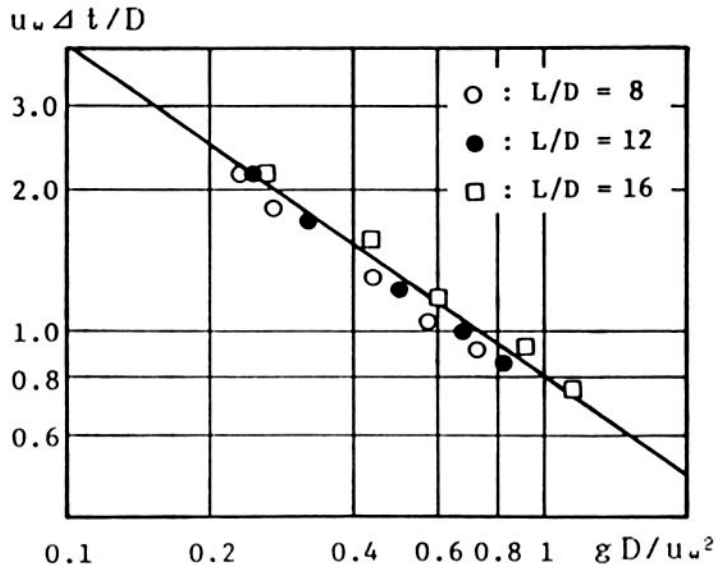


図-10  $(u_w \Delta t / D)$  と  $(gD / u_w^2)$  の関係  
 ( $h_1=0.4\text{m}$ ,  $h_0=0.02\text{m}$ ,  $\lambda=87\%$ )

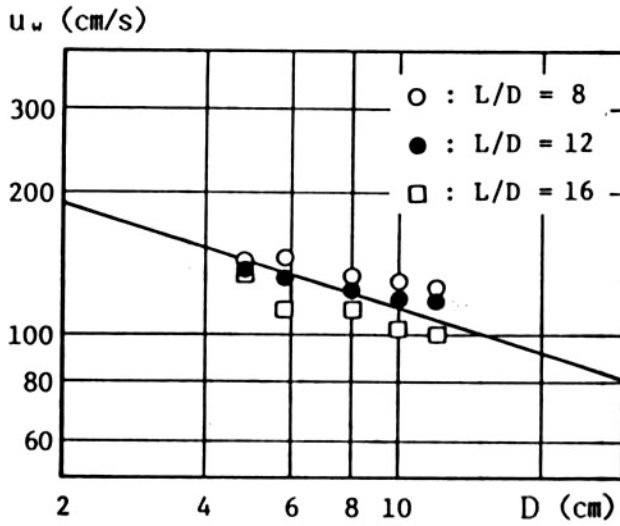


図-11 式(7)と実験結果との比較  
 ( $h_1=0.4\text{m}$ ,  $h_0=0.02\text{m}$ ,  $\lambda=87\%$ )

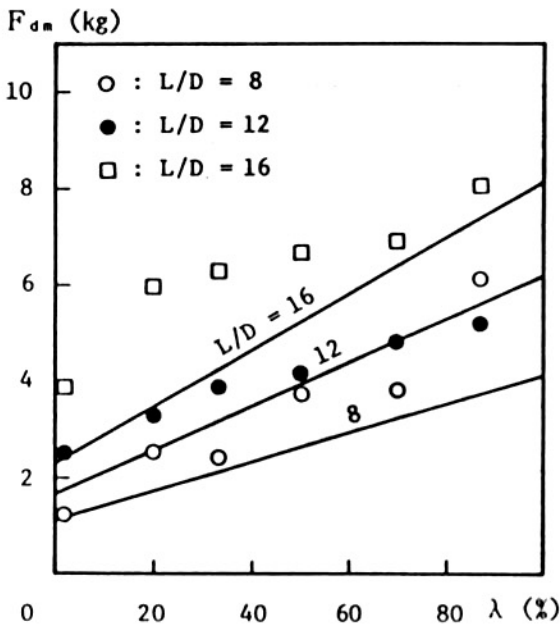


図-12 式(9)と実験結果との比較  
 ( $h_1=0.4\text{m}$ ,  $h_0=0.02\text{m}$ ,  $D=5.8\text{cm}$ )

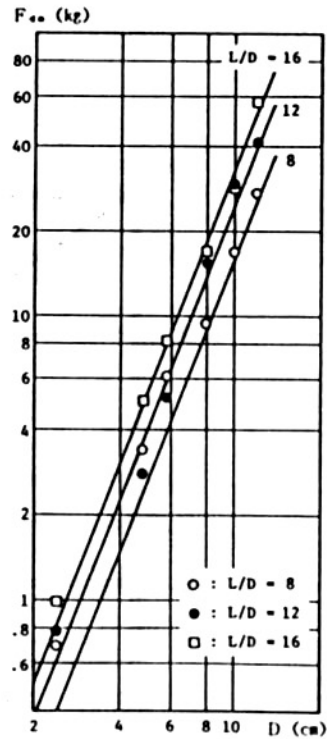


図-13 式(9)と実験結果との比較  
 ( $h_1=0.4\text{m}$ ,  $h_0=0.02\text{m}$ ,  $\lambda=87\%$ )

表-1 段波発生条件

$h_1$ (m)	$h_0$ (m)	$u_0$ (m/s)
0.40 , 0.45	0.02	0

表-2 流木諸元

D (cm)	L (cm)	(L/D)	W (g)
2.4~12.0	14.4~192	6.8, 12, 16	48~13780

表-3 浸水時の流木比重の経時変化例 (D=5.8cm, L/D=8)

t (hr)	0	1	2	4	8	24	48	96	144
$\sigma$	0.49	0.52	0.53	0.54	0.54	0.55	0.56	0.57	0.58

$\lambda = 87\%$