

# 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

松 富 英 夫\*・池 田 弘 樹\*\*

## 1. ま え が き

弾性理論のみに基づいた理論では(例えば, 水原ら, 1980), 流木の衝撃力を過大評価することは, すでに指摘した(松富, 1992). 弾性波理論のみに基づいた理論でも(Kamel, 1970), 過大評価することは, 実際に計算を行ってみれば明らかである. その計算例を 図-3(a)~(d) に示す. 図中の  $k=\infty$  の曲線がそれである. よって, これ等理論で実際の大きさの衝撃力を得るには, 何等かの流木の緩衝機構を導入せざるを得ない.

そこで, 本研究の目的は, 流木の緩衝機構を取り入れた弾性波理論に基づき, 流木衝撃力の評価式を誘導することにある. 対象流木は, 段波等比べて相対的に非定常性と流動性の小さい水運動に伴う流木とする. 流木の緩衝機構としては, 構造物と流木の間に挟まれた水によるものを考える.

## 2. 理 論

従来の流木衝撃力に関する研究を, その拠り所としている理論で分類すれば, 表-1 のようになる. これ等理論の特徴を簡単に述べれば, 次のようである.

①運動量理論では, 実際の大きさの衝撃力が得られるが, 複数個の事柄, 例えば反発係数, 質量係数, 衝撃力波形, 衝撃力継続時間, 流木移動速度, 等について実験的検討を行わねばならず, 最終的に実験係数が入らざるを得ない.

②弾性理論や弾性波理論では, 完全に解析的に取り扱い得るが, その場合, 過大なものが得られる.

③弾性波理論は, 適用範囲に限られ, マッシュな構造物にしか適用できない, 等である.

衝撃力を受ける構造物として, コンクリート方塊のようなマッシュなもの考える. また, 流木が構造物に真正面から衝突する場合を考える.

流木衝撃時のモデルとして, 図-1 に示すように, 構造物・水・流木の3層からなるもの考える. 構造物と

表-1 流木の衝撃力理論

| 種 類   | 研 究 者                              |
|-------|------------------------------------|
| 運動量理論 | 曾我部・他 (1981)、堀川 (1983)、松富 (1992)   |
| 弾性理論  | 水原・他 (1980)                        |
| 弾性波理論 | Kamel (1970)、高 (1979)、松富・池田 (1992) |

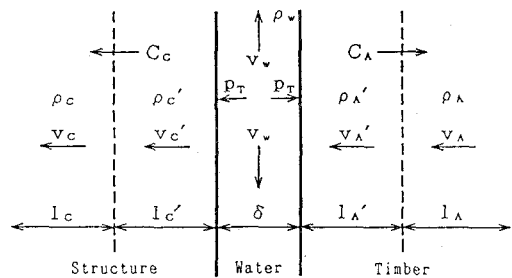


図-1 モデルと記号

流木の2層からなるものは, Kamel 理論 (1970) に他ならない. 本来, Kamel 理論は流木を対象としたものでないが, 容易に流木と拡張解釈できるからである. 著者等のこのモデル化は, 流木の衝撃過程において, 構造物と流木の間に挟まれた水に, 緩衝機能のあることが指摘されていることによる(曾我部ら, 1981; 松富, 1992).

弾性波理論に基づく流木と構造物での連続式と運動量式を誘導する. 図-1 に示す諸記号を用いて, 流木での連続式は,

$$\rho_A l_A + \rho_A' l_A' = \rho_A (l_A - v_A - C_A) + \rho_A' (l_A' + v_A' + C_A)$$

より,

$$\rho_A (v_A + C_A) = \rho_A' (v_A' + C_A) \quad \dots\dots\dots (1)$$

構造物での連続式は,

$$\rho_C l_C + \rho_C' l_C' = \rho_C (l_C - C_C) + \rho_C' (l_C' - v_C' + C_C)$$

より,

$$\rho_C C_C = -\rho_C' (v_C' - C_C) \quad \dots\dots\dots (2)$$

流木での運動量式は,

$$p_T = \rho_A l_A v_A + \rho_A' l_A' v_A' - \rho_A (l_A - v_A - C_A) v_A - \rho_A' (l_A' + v_A' + C_A) v_A'$$

\* 正会員 工博 秋田大学助手 鉱山学部土木環境工学科

\*\* 学生員 秋田大学大学院 鉱山学研究科

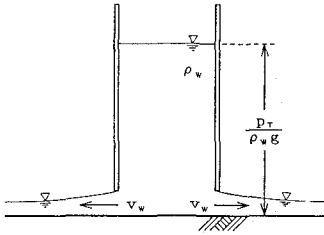


図-2 挟まれた水部分のモデル化

より,

$$\rho_A(v_A + C_A)v_A = p_T + \rho_A'(v_A' + C_A)v_A' \quad \cdots \cdots (3)$$

構造物での運動量式は,

$$p_T = -\rho_C l' v_C' + \rho_C' (l' - v_C' + C_C) v_C'$$

より,

$$p_T = -\rho_C' (v_C' - C_C) v_C' \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで,  $\rho$  は密度,  $l$  は領域長,  $v$  は個体の移動速度,  $C$  は弾性波速度,  $p_T$  は衝撃圧, 添字  $A$  と  $C$  は流木と構造物の別,  $'$  は弾性波通過領域内での量であることを示す.  $C$  は弾性係数  $E$  と次式の関係があり,

$$C = (E/\rho)^{1/2} \quad \cdots \cdots (5)$$

個体の種類を特定してしまえば, 容易に評価され得るものである.

水の部分では, ①挟まれた水は流木外周から容易に流出し得るので, 非圧縮であり, ②得られる衝撃圧の一価性, 換言して定常性より, ベイヌーイの定理の適用も可能と仮定すれば, 次式が得られる.

$$v_W = \{2p_T/\rho_W(1+f)\}^{1/2} \quad \cdots \cdots (6)$$

ここで,  $v_W$  は流木外周での水の速度,  $\rho_W$  は水の密度,  $f$  は何等かの原因に起因するエネルギーの損失係数である. 挟まれた水部分のモデルを図-2に示す. ベルヌーイの定理を流木外周のどの位置で適用するかにより, 高度水頭が異なってくる. その差異は, 衝撃圧力水頭に比べれば非常に小さいと思われるので, 式(6)の誘導では無視されている. また, 水の連続性から, 次式が得られる.

$$v_W = k(v_A' - v_C') \quad \cdots \cdots (7)$$

ここで,  $k$  は流木径  $D$  と水の厚さ  $\delta$  の比, 厳密には  $D/4\delta$  に依存する未知係数である. 結局, 式(6)・(7)より, 水の部分では次式が得られることになる.

$$p_T = \rho_W k^2 (1+f) (v_A' - v_C')^2 / 2 \quad \cdots \cdots (8)$$

本問題において, 未知量は  $\rho_A'$ ,  $\rho_C'$ ,  $v_A'$ ,  $v_C'$ ,  $p_T$  の5個, 独立な方程式群は式(1), (2), (3), (4), (8)の5本で, 問題は閉じている. 上式群を解けば, 例えば衝撃圧  $p_T$  に関して次式が得られる.

$$p_T = \rho_C C_C v_C' \\ = \rho_C C_C I_1 [v_A + I_2 - \{(v_A + I_2)^2 - v_A^2\}^{1/2}] \quad \cdots \cdots (9)$$

$$I_1 = \rho_A (v_A + C_A) / \{\rho_A (v_A + C_A) + \rho_C C_C\}$$

$$I_2 = \rho_C C_C I_1 / \rho_W k^2 (1+f)$$

一般に,  $C_A \gg v_A (> v_A' > v_C')$  なので, 式(9)は次式のように簡略化できる.

$$p_T \doteq \rho_C C_C I_3 [v_A + I_4 - \{(v_A + I_4)^2 - v_A^2\}^{1/2}] \quad \cdots \cdots (10)$$

$$I_3 = \rho_A C_A / (\rho_A C_A + \rho_C C_C)$$

$$I_4 = \rho_C C_C I_3 / \rho_W k^2 (1+f)$$

本研究では, 次章の計算例も含めて, 最終結果として式(10)を採用する. 式(9)・(10)において  $k$  を無限大, つまり水の厚さを零とすれば, Kamel の理論式と一致する.

流木の衝撃力  $F_m$  は次式で評価される.

$$F_m = p_T A = \pi D^2 p_T / 4 \quad \cdots \cdots (11)$$

本理論では, 流木長  $L$  の影響が式中に陽に現れていない. その影響は予め与えられるとしている流木の移動速度  $v_A$  に現れるものである. よって,  $v_A$  の評価が今後の問題となるが, 碎波段波に伴う場合については, 適用度はまだ定かでないが, 松富(1992)の実験式がある.

### 3. 計算例

#### (1) 流木の衝撃力

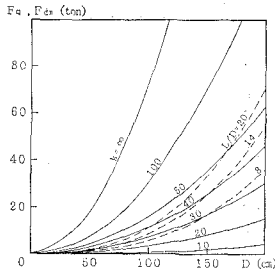
図-3(a)~(d)に実線で式(11)の計算例を示す.

$k$  をパラメータに, 流木径  $D$  による衝撃力  $F_m$  の変化を見たものである. 計算において, エネルギー損失係数  $f$  は零としている. これは, 特に断らない限り, 以下の計算例でも同じである. また, 構造物としてコンクリート構造物を考えている. 採用した諸特性値は  $\rho_A/\rho_W = 0.6$ ,  $\rho_C/\rho_W = 2.3$ ,  $E_A = 10 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ ,  $E_C = 21 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$  である. 勿論, 水の単位体積重量  $\gamma_W$  は  $1 \text{ g/cm}^3$  としている. これ等の諸特性値も, 特に断らない限り, 以下の計算例で同じである. これ等の図より,  $k$  値, 流木径や流木の移動速度  $v_A$  が大きくなるにつれて, 衝撃圧  $p_T$ , ひいては衝撃力  $F_m$  が大きくなることが判断される.

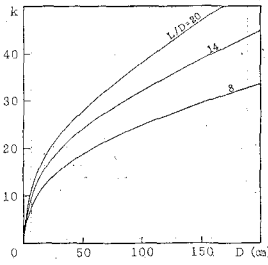
#### (2) $k$ 値の検討

$k$  値, 換言して水の厚さ  $\delta$  の特定が今後の問題の一つとして残されている. その値は流木径, 流木長, 流木移動速度, 流木と構造物の密度, 流木と構造物の弾性係数等によると思われる. 以下, 式(11)とすでに提案されている流木衝撃力の評価式との比較により, その値の定性的検討を試みることにする.

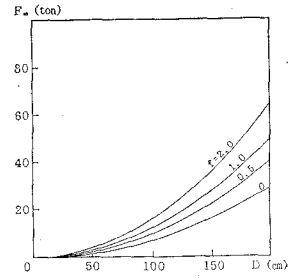
実際的な大きさの値を与え得る流木衝撃力の評価式はあまり存在しない. その状況下で, 松富(1992)は, 流木の移動速度  $v_A$  を陽に組み込んだ形での流木の最大衝撃力  $F_{dm}$  の評価式として, 次式を提案している.



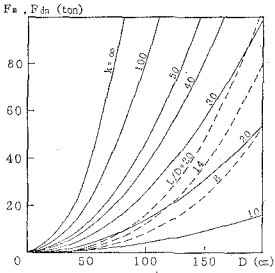
(a)  $v_A=50$  cm/s



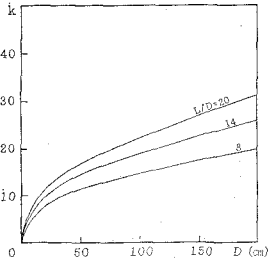
(a)  $v_A=50$  cm/s



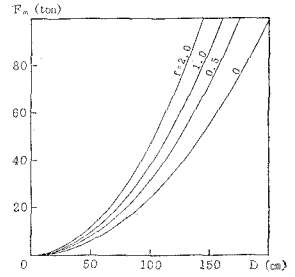
(a)  $v_A=50$  cm/s



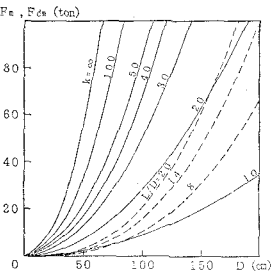
(b)  $v_A=100$  cm/s



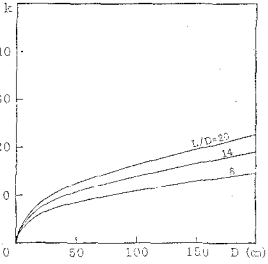
(b)  $v_A=100$  cm/s



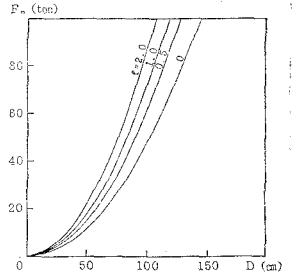
(b)  $v_A=100$  cm/s



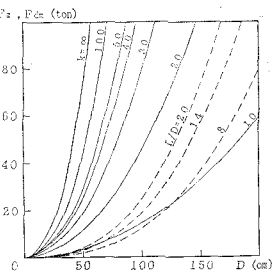
(c)  $v_A=150$  cm/s



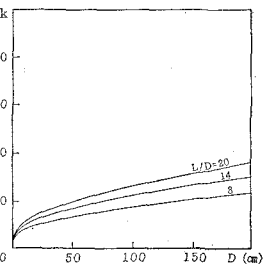
(c)  $v_A=150$  cm/s



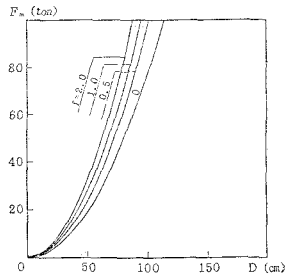
(c)  $v_A=150$  cm/s



(d)  $v_A=200$  cm/s



(d)  $v_A=200$  cm/s



(d)  $v_A=200$  cm/s

図-3 流木径と  $k$  値による流木衝撃力の変化例

図-4 流木径と細長比による  $k$  値の変化例

図-5 流木径とエネルギー損失係数による流木衝撃力の変化例 ( $k=30$ )

$$F_{am} = 3.30\gamma_A(-8.4 \times 10^{-5}\lambda^2 + 0.0197\lambda + 0.38)\{1.01 - 0.269(0.910)^{\lambda}\}^{-1} \\ \times (\Delta H/h_0)^{0.054}(L/D)^{0.756} \\ \times D^3(gD)^{-3.298}v_A^{0.536} \dots\dots\dots(12)$$

ここで、 $\gamma_A$  は流木の単位体積重量、 $\lambda$  は構造物設置位置での流水断面積と水面下の構造物横断面積の合計に対

する流水断面積の割合（以下、これを開度と呼ぶ）、 $\Delta H$  は段波波高、 $h_0$  は段波下流の静水深、 $L/D$  は流木の細長比、 $g$  は重力加速度である。開度の単位は % である。

式 (12) は碎波段波に伴う流木の実験で得られたものである。同式において、段波の強さ  $\Delta H/h_0$  のべき指数が小さい。流木の最大衝撃力が、開度、流木の特性値、

諸元と移動速度ではほぼ決まることを示している。これは、式 (11) の衝撃力が、構造物の特性値を除けば、流木の特性値、諸元と移動速度で決まることと一致している。式 (12) において、 $\Delta H/h_0$  の因子が残っている理由は、同式が実験値の回帰式であるが故かもしれない。そこで、式 (12) の利用においては、実験での段波の強さの平均値  $\Delta H/h_0 \div 5.5$  を採用し (松富, 1992), 同式から  $\Delta H/h_0$  の因子を除去することにする。

碎波段波に伴う流木に対する水の緩衝機構は、本研究の場合とやや異なる。段波の場合、段波衝突後、上方に投げ出された水による緩衝機能が加わるからである (松富, 1992)。そこで、式 (12) の利用においては、本研究での衝突状況にできるだけ近付けるべく、開度  $\lambda=100\%$  を採用することにする。 $\lambda=100\%$  ならば、水が上方に投げ出されることはないと思われるからである。

以上より、本研究で用いる式 (12) の最終形は、

$$F_{am} = 5.41 \gamma_A (L/D)^{0.756} \times D^3 (gD)^{-0.298} v_A^{0.586} \dots\dots\dots (13)$$

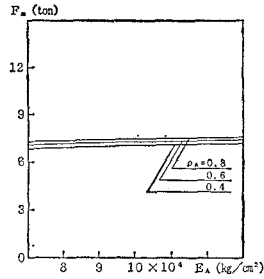
流木の特性値、諸元と移動速度が同じであれば、式 (13) は式 (11) と比較し得ると思われる。本研究では、それ等の値は予め与えられるとしている。

$L/D=8, 14, 20$  とした場合の式 (13) の計算例を図-3 (a) ~ (d) 中に破線で示す。式 (13) は正しい値を与えると仮定すれば、これ等の図より次のことが判断される。

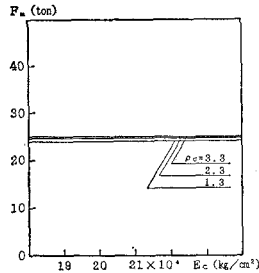
① 流木径や細長比が大きくなるにつれて、 $k$  値は大きくなる。

② 流木の移動速度が大きくなるにつれて、 $k$  値は小さくなる。

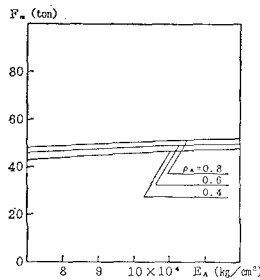
③  $k$  値は実際的には 5~50 程度の範囲で変化する、等である。



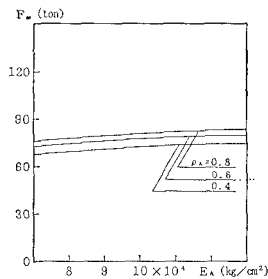
(a)  $v_A=50$  cm/s



(b)  $v_A=100$  cm/s

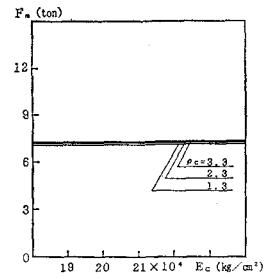


(c)  $v_A=150$  cm/s

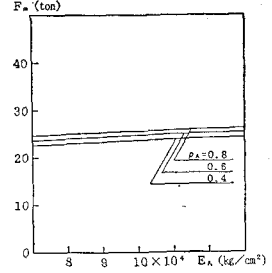


(d)  $v_A=200$  cm/s

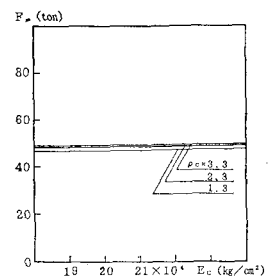
図-6 流木の弾性係数と密度による流木衝撃力の変化例 ( $k=30, D=100$  cm,  $\rho_A/\rho_W=2.3, E_C=21 \times 10^4$  kg/cm<sup>2</sup>)



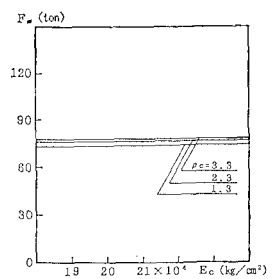
(a)  $v_A=50$  cm/s



(b)  $v_A=100$  cm/s



(c)  $v_A=150$  cm/s



(d)  $v_A=200$  cm/s

図-7 構造物の弾性係数と密度による流木衝撃力の変化例 ( $k=30, D=100$  cm,  $\rho_A/\rho_W=0.6, E_A=10 \times 10^4$  kg/cm<sup>2</sup>)

勿論、式 (11) と (13) を等置すれば、次式が得られ、

$$k = (2I_3 I_6 F_{am})^{1/2} / (v_A - I_6 F_{am}) \dots\dots\dots (14)$$

$$I_3 = \rho_C C_0 I_3 / \rho_W (1+f)$$

$$I_6 = 4/\pi D^2 \rho_C C_0 I_3$$

任意条件に対して、具体的に  $k$  値の評価ができることに

なる。図-4(a)~(d)に式(14)の計算例を示す。これ等の図より、上述①~③の考察の妥当性が容易に確認される。

### (3) エネルギー損失係数の影響

図-5(a)~(d)にエネルギー損失係数  $f$  による衝撃力  $F_m$  の変化例を示す。計算において、 $k$  値は30としている。これ等の図より次のことが判断される。

①本理論値は、エネルギー損失係数が大きくなるにつれて、大きくなる。

②本理論値はエネルギー損失係数に大きく依存する、等である。

### (4) 流木と構造物の特性値の影響

図-6(a)~(d)に流木の弾性係数  $E_A$  と密度  $\rho_A$  による衝撃力  $F_m$  の変化例を示す。計算において、 $k$  値は30、流木径  $D$  は100 cm、構造物の特性値は  $\rho_C/\rho_W=2.3$ 、 $E_C=21 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$  としている。各図で、縦軸のスケールが異なっていることに注意されたい。これ等の図より、本理論値は、流木の弾性係数と密度にあまり依存しないことが判断される。

図-7(a)~(d)に構造物の弾性係数  $E_C$  と密度  $\rho_C$  による衝撃力  $F_m$  の変化例を示す。計算において、 $k$  値は30、流木の径と特性値は  $D=100 \text{ cm}$ 、 $\rho_A/\rho_W=0.6$ 、 $E_A=10 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$  としている。これ等の図より、本理論値は、構造物の弾性係数と密度にもあまり依存しないことが判断される。

## 4. む す び

本研究で得られた主要な結論は次の通りである。

①水の緩衝機能を考慮した弾性波理論に基づき、マッソプな構造物に対する流木衝撃力  $F_m$  の評価式を誘導し

た。ただし、流木径  $D$  と水の厚さ  $\delta$  の比に依存する  $k$  値の特定が、今後の問題として残された。

②衝撃圧  $pr$ 、ひいては衝撃力は、 $k$  値、流木径や流木の移動速度  $v_A$  が大きくなるにつれて、大きくなる傾向を持つ。

③  $k$  値は、流木径や細長比  $L/D$  が大きくなるにつれて、大きくなる傾向を持つ。

④  $k$  値は、流木の移動速度が大きくなるにつれて、小さくなる傾向を持つ。

⑤  $k$  値は実際的には5~50程度の範囲で変化するようである。

⑥本理論値は、エネルギー損失係数  $f$  に大きく依存し、 $f$  が大きくなるにつれて、大きくなる傾向を持つ。

⑦本理論値は、流木と構造物の密度 ( $\rho_A$ ,  $\rho_C$ ) や弾性係数 ( $E_A$ ,  $E_C$ ) にあまり依存しない。

謝辞：本論文の公表に当たり、小川記念基金の補助を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- 高 隆二 (1979)：分離堤に作用する木材の荷重，第26回海岸工学講演会論文集，pp. 442-445.
- 曾我部隆久・布施谷寛・福家敬泰・四宮征一・麻植政行 (1981)：海岸構造物への木材衝撃力について，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 584-588.
- 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.
- 松富英夫 (1992)：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 (投稿中)。
- 水原邦夫・武居有恒・南 哲行 (1980)：流木の流下阻止に関する基礎的研究 (II) 一柵上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.
- Kamel, A. M. (1970)：Shock pressure on coastal structures, ASCE, Vol. 96, No. WW3, pp. 689-699.