

1. まえがき

弾性理論のみに基づいた理論<sup>1)</sup>では、流木の衝撃力を過大評価することは、すでに指摘した<sup>2)</sup>。弾性波理論のみに基づいた理論<sup>3)</sup>でも、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、これ等理論で実際的な大きさの衝撃力を得るには、何等かの流木緩衝機構を導入せざるを得まい。

本研究の目的は、流木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、段波等に比べ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。流木緩衝機構としては、構造物と流木の間挟まれた水によるものを考える。これまで、弾性波理論を用い、流木緩衝機構を取り入れた研究例はないように思われる。

2. 理 論

従来の流木衝撃力に関する研究<sup>1)-6)</sup>を、その抛り所としている理論で分類すれば、表-1のようになろう。これ等理論の特徴を簡単に述べれば、

① 運動量理論では、実際的な大きさの衝撃力が得られ得るが、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、適用範囲が限られ、マッシブ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ブなものを考える。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層からなるものを考える。構造物と流木の2層からなるものは、Kamelの理論<sup>3)</sup>に他ならない。本来、Kamelの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<sup>2), 4), 5)</sup>。

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、

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

構造物での連続式は、

\*秋田大学鉱山学部土木環境工学科

$$\rho_c l_c + \rho_c' l_c' = \rho_c (l_c - C_c) + \rho_c' (l_c' - v_c' + C_c)$$

より、

$$\rho_c C_c = -\rho_c' (v_c' - C_c) \dots\dots\dots(2)$$

流木での運動量式は、

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

より、

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

構造物での運動量式は、

$$p_T = -\rho_c' l_c' v_c' + \rho_c' (l_c' - v_c' + C_c) v_c'$$

より、

$$p_T = -\rho_c' (v_c' - C_c) v_c' \dots\dots\dots(4)$$

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、

$$C = \left(\frac{E}{\rho}\right)^{1/2} \dots\dots\dots(5)$$

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、ベル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。

$$v_w = \left\{ \frac{2 p_T}{\rho_w (1+f)} \right\}^{1/2} \dots\dots\dots(6)$$

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。

$$v_w = k (v_A' - v_c') \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 $k$ は流木径Dと水の厚さ $\delta$ の比(=D/ $\delta$ )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。

$$p_T = \frac{1}{2} \rho_w k^2 (1+f) (v_A' - v_c')^2 \dots\dots\dots(8)$$

本問題において、未知変量は $\rho_A'$ 、 $\rho_c'$ 、 $v_A'$ 、 $v_c'$ 、 $p_T$ 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。

$$\begin{aligned} p_T &= \rho_c C_c v_c' \\ &= \rho_c C_c \frac{\rho_A (v_A + C_A)}{\rho_A (v_A + C_A) + \rho_c C_c} [v_A \\ &\quad + \frac{1}{k^2(1+f)} \frac{\rho_c}{\rho_w} \\ &\quad \cdot \frac{\rho_A (v_A + C_A) C_c}{\rho_A (v_A + C_A) + \rho_c C_c} \\ &\quad - \{v_A + \frac{1}{k^2(1+f)} \frac{\rho_c}{\rho_w} \\ &\quad \cdot \frac{\rho_A (v_A + C_A) C_c}{\rho_A (v_A + C_A) + \rho_c C_c}\}^2 - v_A^2]^{1/2} \end{aligned} \dots\dots\dots(9)$$

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。

$$p_T \approx \rho_c C_c \frac{\rho_A C_A}{\rho_A C_A + \rho_c C_c} [v_A + \frac{1}{k^2(1+f)} \frac{\rho_c}{\rho_w} \frac{\rho_A C_A C_c}{\rho_A C_A + \rho_c C_c} - \{v_A + \frac{1}{k^2(1+f)} \frac{\rho_c}{\rho_w} \cdot \frac{\rho_A C_A C_c}{\rho_A C_A + \rho_c C_c}\}^2 - v_A^2]^{1/2} \quad (10)$$

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。

$$F_m = p_T A = \frac{\pi}{4} D^2 p_T \quad (11)$$

本理論では、流木長  $L$  の影響が式(10)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、砕波段波に伴う場合については、適用範囲は狭く、適用度もまだ定かでないが、松富の実験式<sup>2)</sup>がある。

### 3. 計算例

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  $\rho_A/\rho_w = 0.6$ 、 $\rho_c/\rho_w = 2.3$ 、 $E_A = 10$  万  $\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $E_c = 21$  万  $\text{kg}/\text{cm}^2$  である。勿論、水の単位体積重量は  $1 \text{ g}/\text{cm}^3$  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、流木

移動速度  $v_A$  や  $k$  値が大きくなるにつれて、衝撃圧  $p_T$ 、ひいては  $F_m$  が大きくなることが判断される。

$k$  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、その値の定性的検討を試みる。

著者は、流木移動速度を陽に組み込んだ形で流木の最大衝撃力  $F_{dm}$  の評価式として、次式を提案している<sup>2)</sup>。

$$F_{dm} = 3.30 \rho_A g (0.38 + 0.0197 \lambda - 8.4 \times 10^{-6} \lambda^2) \cdot \{1.01 - 0.269 (0.910)^\lambda\}^{-1} \cdot (\Delta H/h_0)^{0.054} (L/D)^{0.756} \cdot D^3 (V_A^2/gD)^{0.293} \quad (12)$$

ここで、 $g$  は重力加速度、 $\lambda$  は構造物の開度 [%]、 $\Delta H$  は段波波高、 $h_0$  は段波下流の静水深、 $L/D$  は細長比である。式(12)は砕波段波に伴う場合の実験で得られたもので、水の緩衝機構が本研究の場合とやや異なる。段波の場合、段波衝突後、上方に大きく投げ出された流体による緩衝機構が加わるからである<sup>2)</sup>。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、 $\lambda = 100\%$  を採用することにすれば、式(12)は次式となる。

$$F_{dm} \approx 5.41 \rho_A g \left(\frac{L}{D}\right)^{0.756} D^3 \left(\frac{V_A^2}{gD}\right)^{0.293} \quad (13)$$

$L/D = 8, 14, 20$  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 流木径が大きくなるにつれて、 $k$  値は大きくなる。
- ② 細長比が大きくなるにつれて、 $k$  値は

大きくなる。

③ 流木移動速度が大きくなるにつれて、 $k$ 値は小さくなる。

④  $k$ 値は実際的には10～50程度の範囲で変化する、等である。勿論、式(11)と(13)を等置すれば、次式が得られ、

$$k = \frac{(2 I_1 I_2 F_{dm})^{1/2}}{v_A - I_2 F_{dm}} \dots\dots\dots(14)$$

$$I_1 = \frac{1}{(1+f)} \frac{\rho_c}{\rho_w} \frac{\rho_A C_A C_c}{\rho_A C_A + \rho_c C_c}$$

$$I_2 = \frac{4 (\rho_A C_A + \rho_c C_c)}{\pi D^2 \rho_A \rho_c C_A C_c}$$

任意条件に対して、具体的に $k$ 値が得られることになる。図-4(a)～(d)に式(14)の計算例を示す。これ等の図より、前述の考察の妥当性が容易に確認される。

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。

図-6(a)～(d)に流木の密度 $\rho_A$ と弾性係数 $E_A$ 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100cm、構造物の特性値は $\rho_c/\rho_w=2.3$ 、 $E_c=21$ 万kg/cm<sup>2</sup>としている。各図で、縦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、流木の密度と弾性係数にあまり依存しないことが判断される。本理論値は、構造物の密度 $\rho_c$ と弾性係数 $E_c$ にもあまり依存しないことを断っておく。

#### 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 マッシブな構造物を対象に、水の流木緩衝機能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した。本理論は本質的にKamel理論の拡張である。

② 流木の移動速度 $v_A$ や流木径 $D$ と水の厚さ $\delta$ の比に依存する $k$ 値が大きくなるにつれて、衝撃圧 $p_T$ 、ひいては衝撃力 $F_m$ は大きくなる。

③ 流木径が大きくなるにつれて、 $k$ 値は大きくなる。

④ 細長比 $L/D$ が大きくなるにつれて、 $k$ 値は大きくなる。

⑤ 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。

⑥  $k$ 値は実際的には10～50程度の範囲で変化するようである。

⑦ 本理論値は、エネルギー損失係数 $f$ に大きく依存し、その値が大きくなるにつれて、大きくなる。

⑧ 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：計算、図面作成等に助力頂いた本学卒業研究生 池田弘樹君に感謝の意を表する。

#### 参 考 文 献

- 1) 例えば、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) — 柵状構造物における流木の衝撃力と堰止率 —, 新砂防, No. 114, pp. 9-16, 1980.
- 2) 松富英夫：碎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, 1992 (投稿中).
- 3) Kamel, A. M. : Shock pressure on coastal structures, ASCE, Vol. 96, No. WW3, pp. 689-699, 1970.
- 4) 曾我部隆久・布施谷寛・福家敬泰・四宮 征一・麻植政行：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, 1981.

5) 高 隆二: 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, 1979.

6) 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.

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	Kamei (1970)、高(1979)、松富(1992)

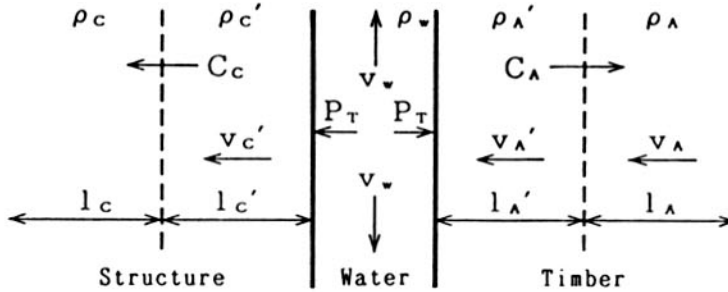


図-1 モデルと記号

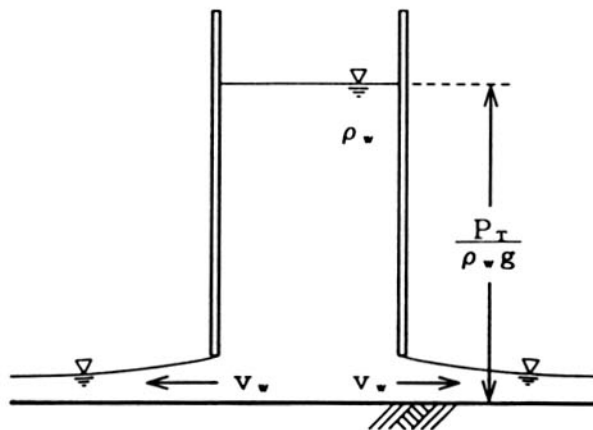
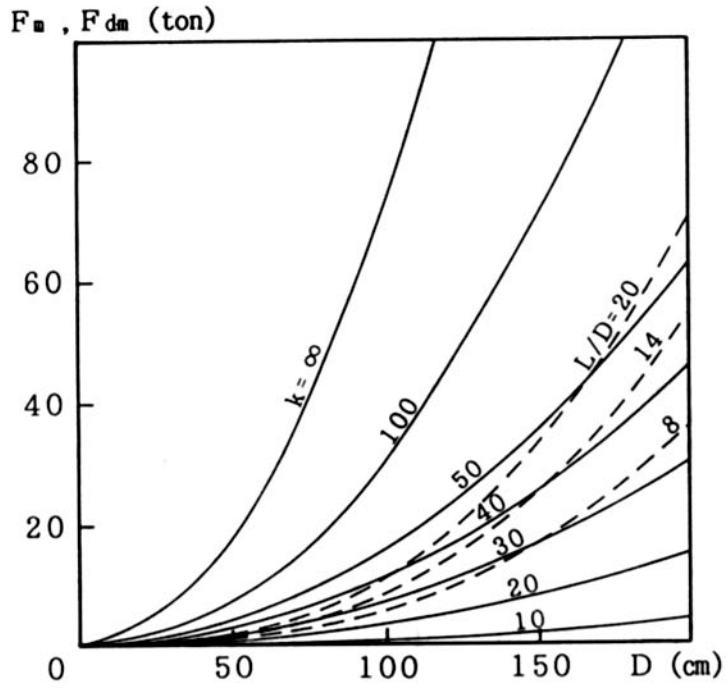
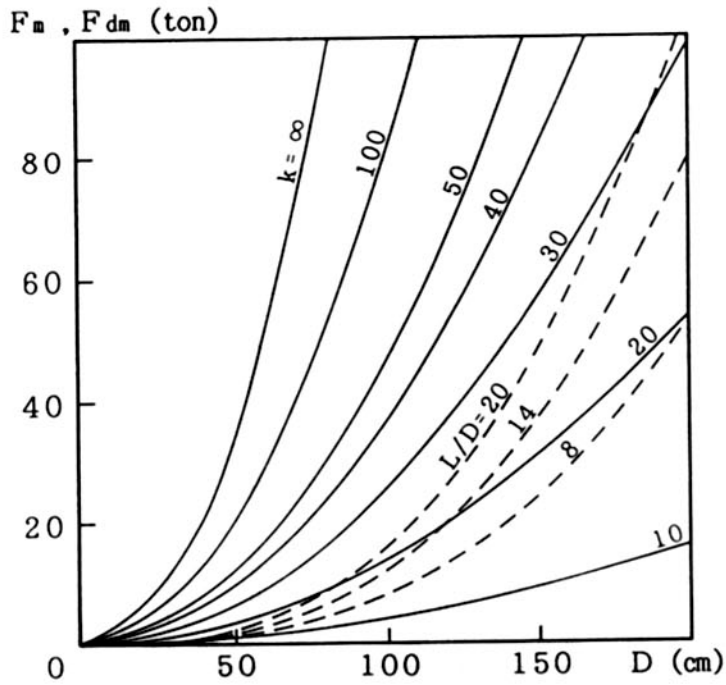


図-2 挟まれた水部分のモデル化

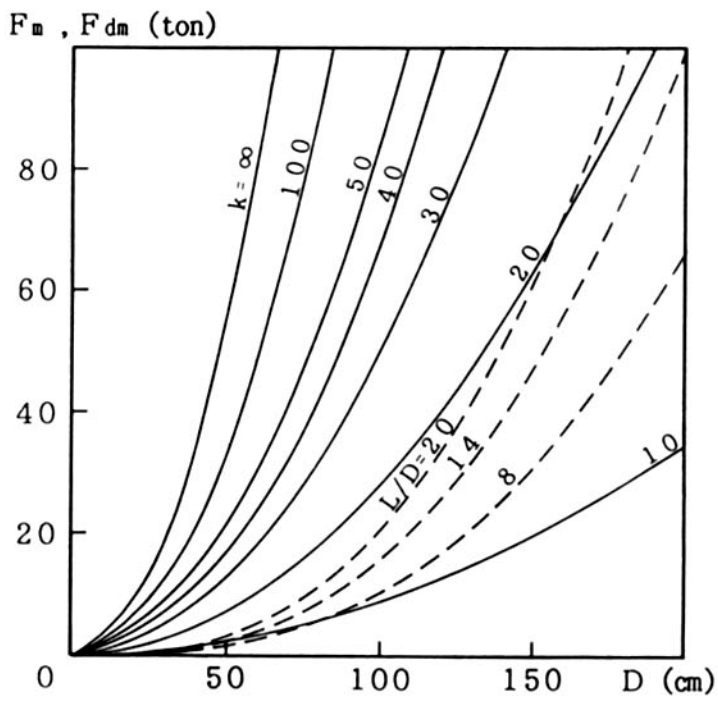


(a)  $v_A = 50 \text{ cm/s}$

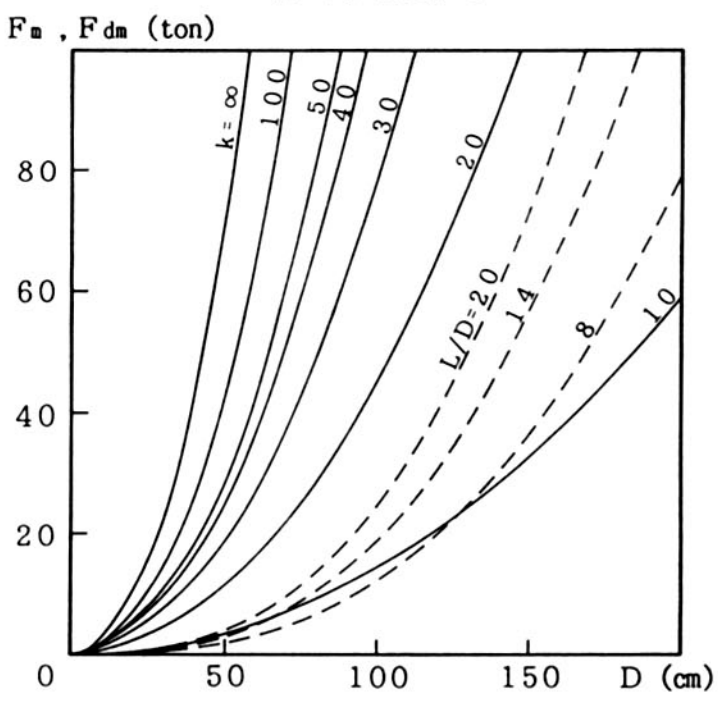


(b)  $v_A = 100 \text{ cm/s}$

図-3 流木径とK値に

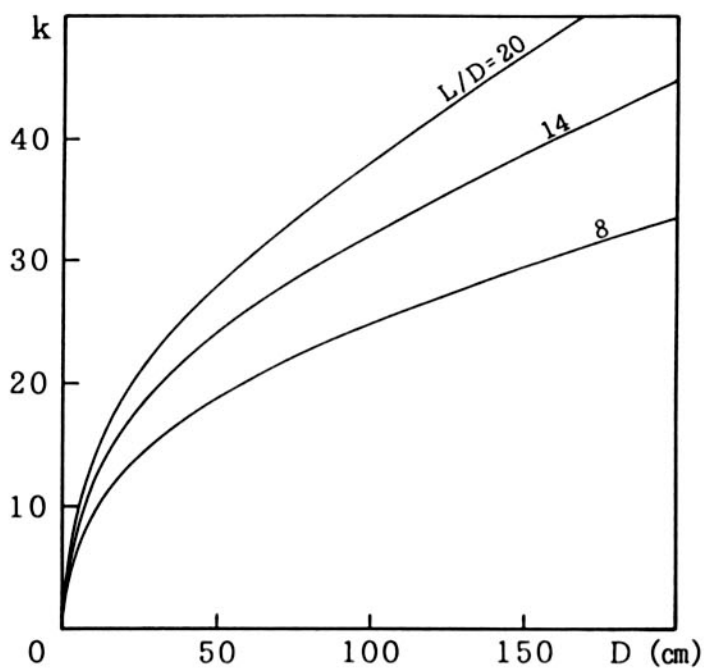


(c)  $v_A = 150 \text{ cm/s}$

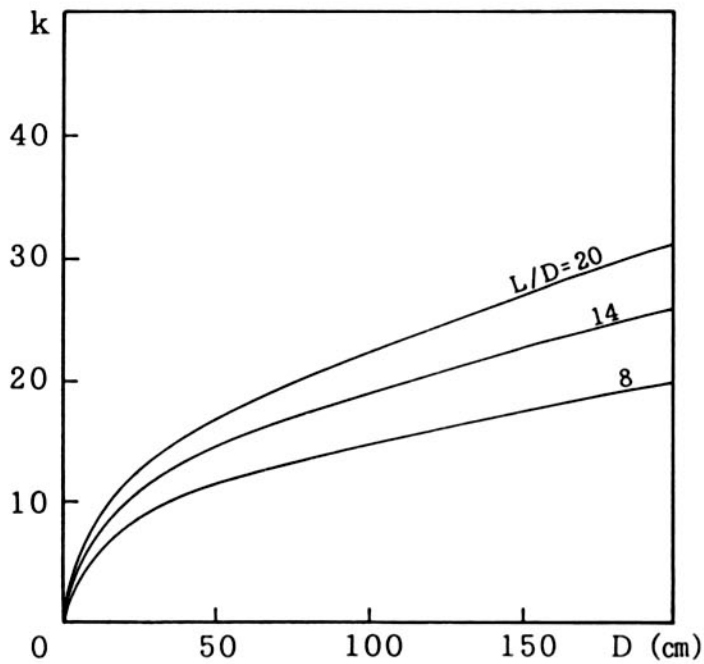


(d)  $v_A = 200 \text{ cm/s}$

よる流木衝撃力の変化例



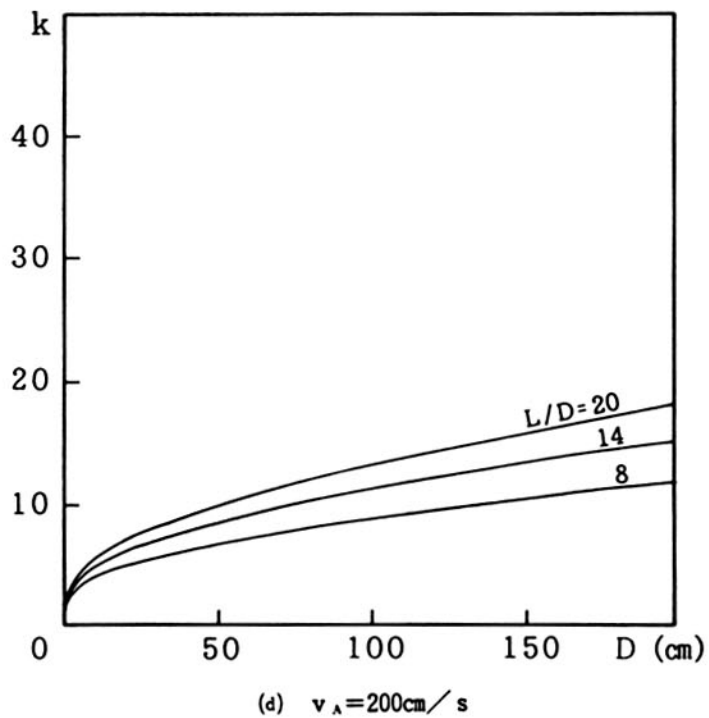
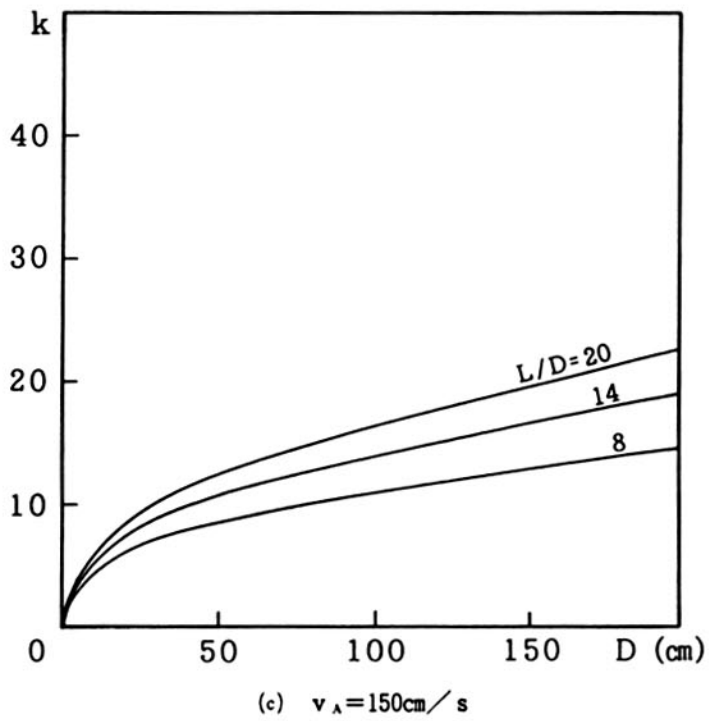
(a)  $v_A = 50 \text{ cm/s}$



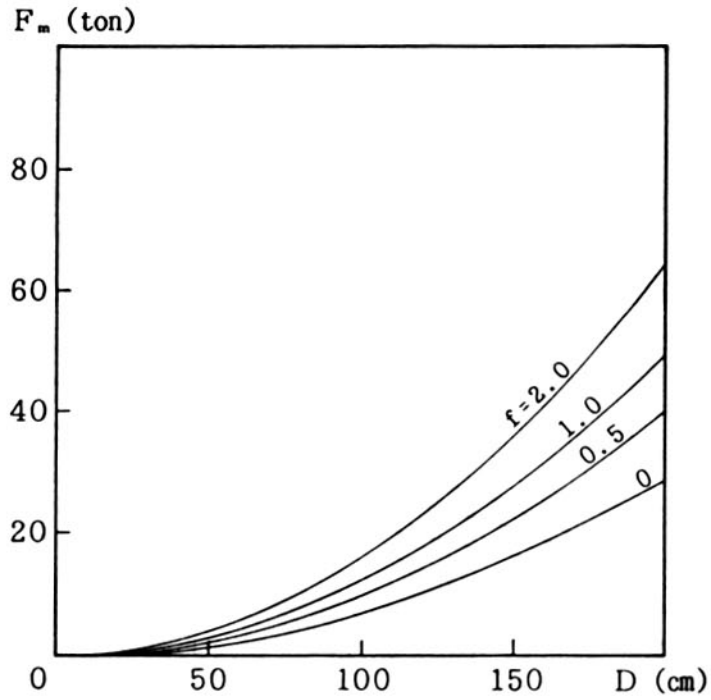
(b)  $v_A = 100 \text{ cm/s}$

図-4 流木径と細長

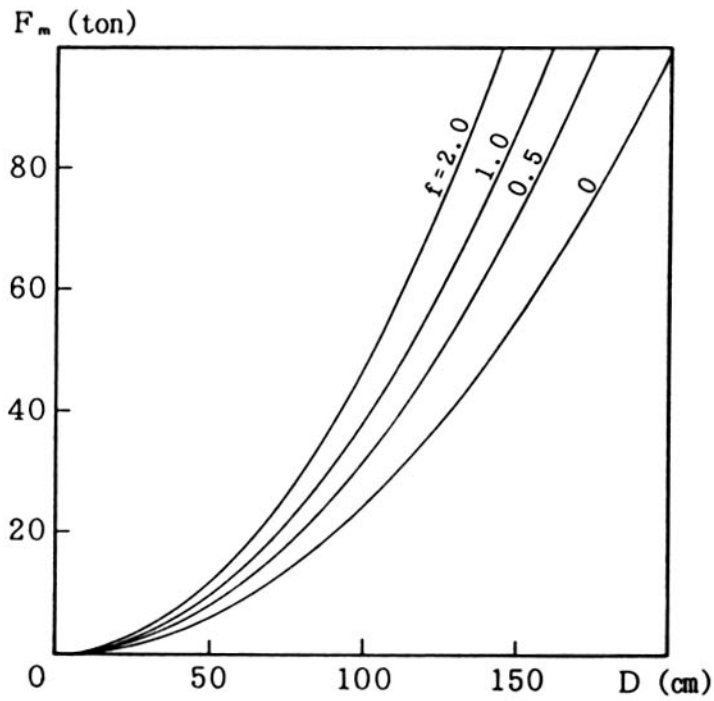




比による  $k$  値の変化例

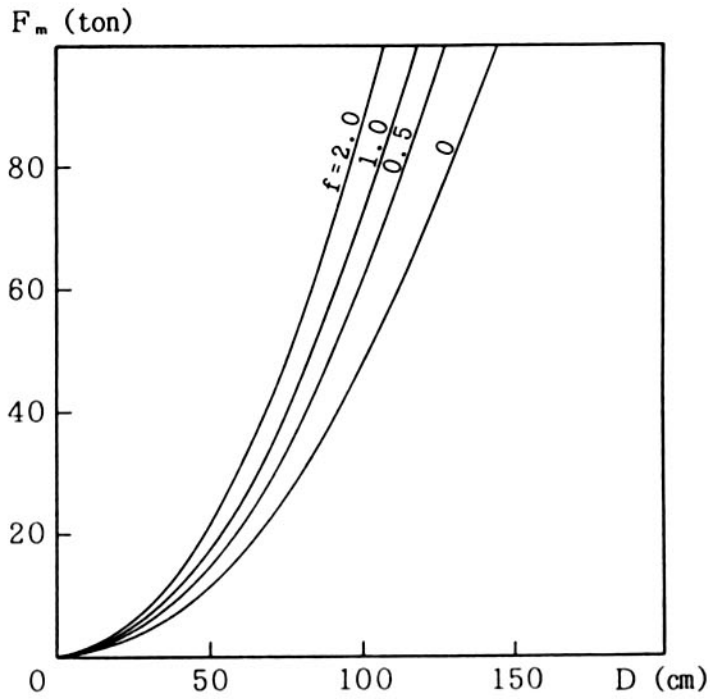


(a)  $v_A = 50 \text{ cm/s}$

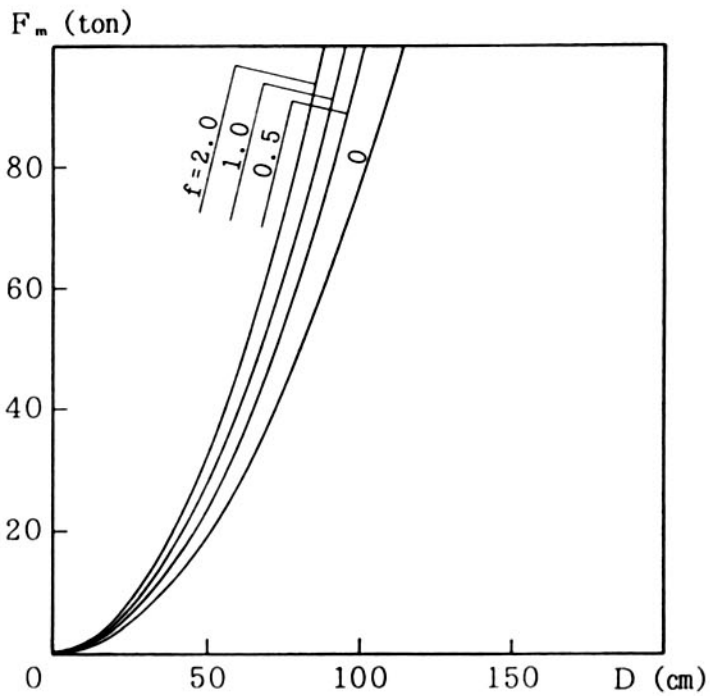


(b)  $v_A = 100 \text{ cm/s}$

図-5 流木径とエネルギー損失係数



(c)  $v_A = 150 \text{ cm/s}$



(d)  $v_A = 200 \text{ cm/s}$

による流木衝撃力の変化例 ( $k = 30$ )

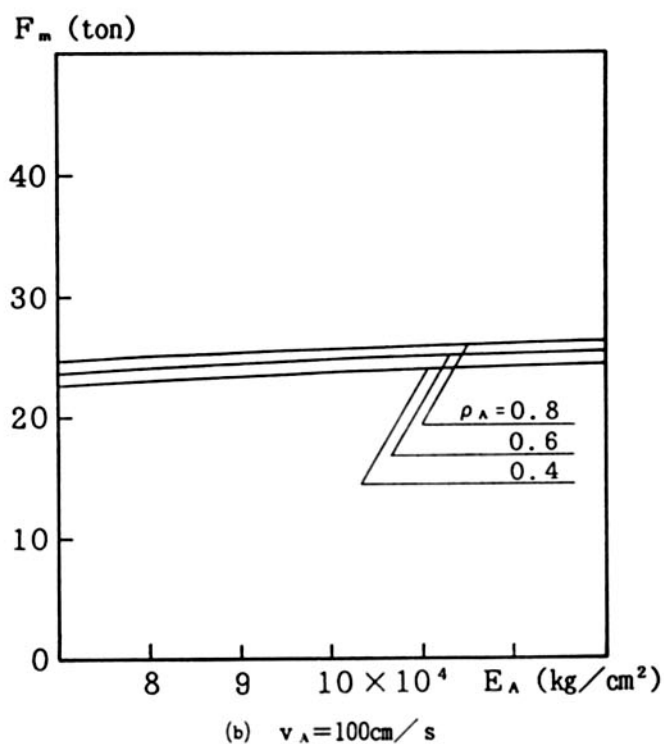
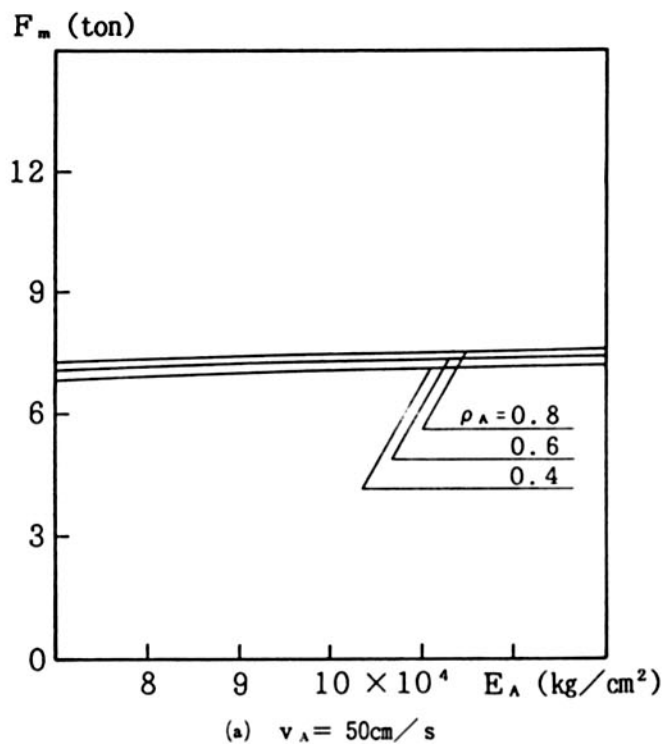
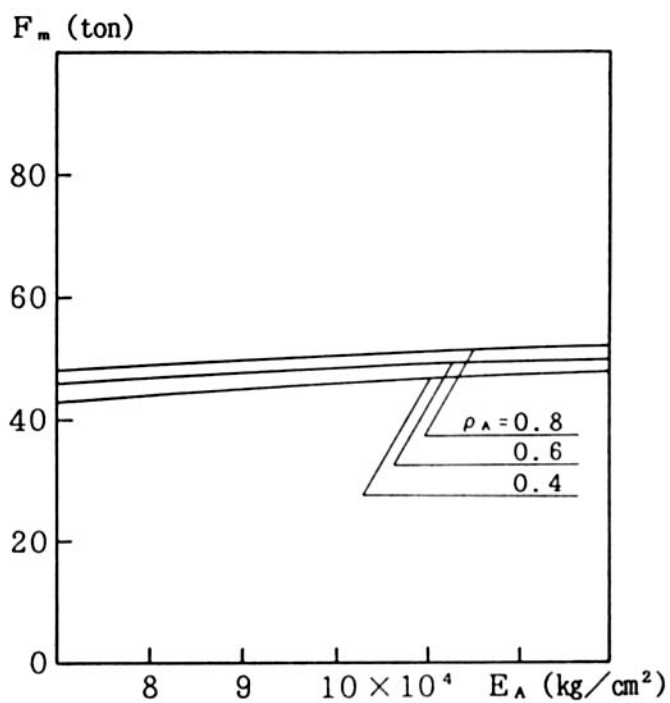
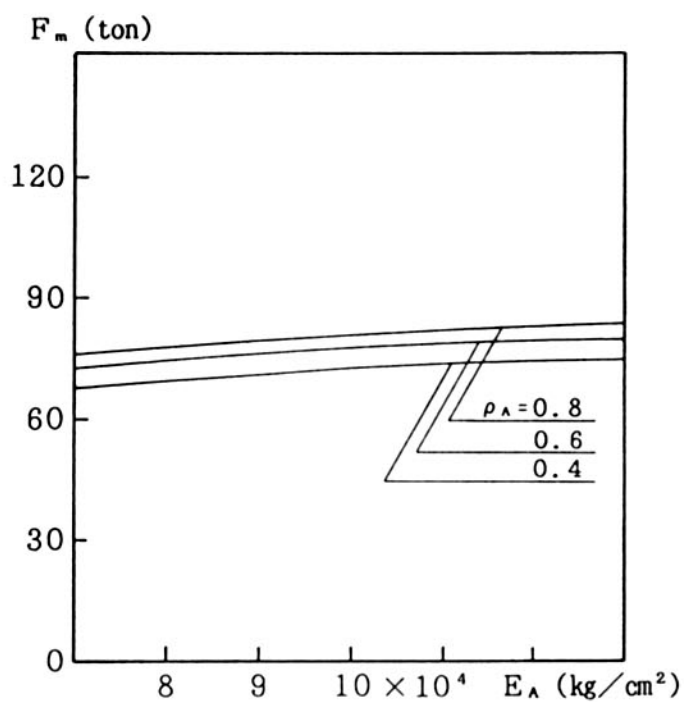


図-6 流木の弾性係数と密度による流木衝撃力の変化例



(c)  $v_A = 150 \text{ cm/s}$



(d)  $v_A = 200 \text{ cm/s}$

( $k = 30$ ,  $D = 100 \text{ cm}$ ,  $\rho_c / \rho_s = 2.3$ ,  $E_c = 21 \text{ 万 kg/cm}^2$ )