

II-43 弾性波理論に基づいた流木衝撃力の評価

秋田大学 学生員○池田弘樹 正員 松富英夫

1. まえがき 弾性理論のみに基づいた理論¹⁾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²⁾。弾性波理論のみに基づいた理論³⁾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。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導くことにある。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に挟まれた水によるものを考える。

2. 理論 流木衝撃力に関する研究例^{1)~6)}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。

表-1 流木の衝撃力理論

これ等理論の特徴を簡単に

種 類	研 究 者
運動量理論	菅我部・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・池田 (1992)

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、複数列の事柄（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、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、等であろう。

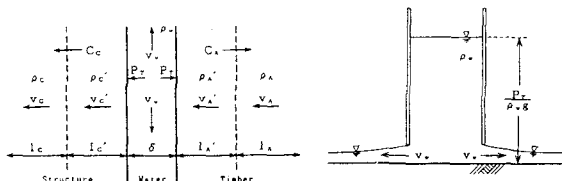


図-1 モデルと記号

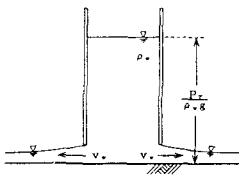


図-2 水部分のモデル

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、Kameiの理論³⁾に他ならない。本来、Kamei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^{2), 4), 5)}。

弾性波理論に基づく構造物と流木での連続式と運動量式は次の通りである。

$$\rho_a(v_a + C_a) = \rho_a'(v_a' + C_a) \quad \dots\dots\dots(1)$$

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

$$\rho_a(v_a + C_a)v_a = p_T + \rho_a'(v_a' + C_a)v_a' \quad \dots\dots(3)$$

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

ここで、 ρ は密度、 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、

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

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（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。

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

ここで、 v_w は流木外周での水の水速、 ρ_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。

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

ここで、 k は流木径Dと水の厚さ δ 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。

$$p_T = \rho_w k^2(1+f)(v_a' - v_c')^2/2 \quad \dots\dots\dots(8)$$

本問題において、未知量は ρ_a' 、 ρ_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。

$$p_T = \rho_c C_c l_1 [v_a + l_2 - \{(v_a + l_2)^2 - v_a^2\}^{1/2}] \dots\dots(9)$$

$$l_1 = \rho_a (v_a + C_a) / \{ \rho_a (v_a + C_a) + \rho_c C_c \}$$

$$l_2 = \rho_c C_c l_1 / k^2 (1+f) \rho_w$$

一般に、 $C_a \gg v_a (> v_a' > v_c')$ なので、式(9)は簡略化でき、

$$p_T = \rho_c C_c l_3 [v_a + l_4 - \{(v_a + l_4)^2 - v_a^2\}^{1/2}] \quad \cdots \cdots (10)$$

$$l_3 = \rho_a C_a / (\rho_a C_a + \rho_c C_c)$$

$$l_4 = \rho_c C_c l_3 / k^2 (1+f) \rho_w$$

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、即ち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、砕波段波に伴う場合については、適用範囲は狭いが、松富の実験式²⁾がある。

3. 計算例と考察

図-3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。これは以下の計算でも同じである。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 kg/cm^2 、 $E_c = 21$ 万 kg/cm^2 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 が大きくなる事が判断される。

k 値、換言して δ の特定が問題の一つとして残されて

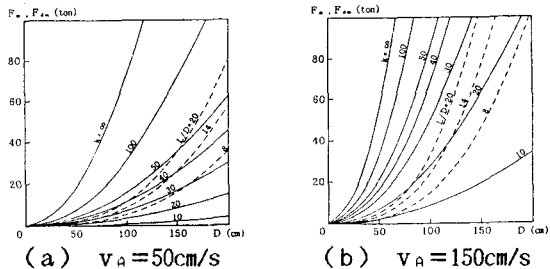


図-3 流木径による流木衝撃力の変化例

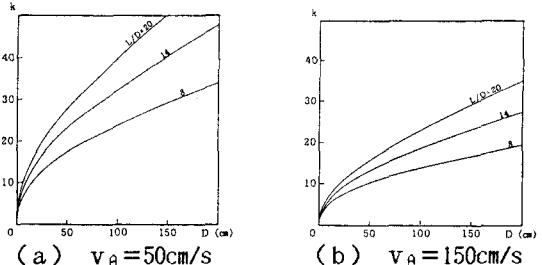


図-4 流木径による k 値の変化例

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や弾性係数、等によると思われる。以下、その値の定性的検討を試みる。

著者等の一人は、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²⁾。

$$F_{dm} = 3.71 \times 10^{-8} (\rho_a / \rho_w) (0.0113 \lambda + 0.42) \cdot (L/D)^{0.888} D^{2.829} v_a \quad (\text{ton}) \quad \cdots (12)$$

ここで、 λ は構造物の開度[%]、 L/D は細長比、 D と v_a の単位は各々[cm]と[cm/s]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能が加わるからである²⁾。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。

$$F_{dm} = 5.75 \times 10^{-8} (\rho_a / \rho_w) \cdot (L/D)^{0.888} D^{2.829} v_a \quad (\text{ton}) \quad \cdots (13)$$

$L/D = 8, 14, 20$ とした場合の式(13)の計算例を破線で図-3中に示す。式(13)は正しい値を与えると仮定すれば、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。勿論、単位に注意しながら式(11)と(13)を等置すれば、次式が得られ、

$$k = (2 l_5 l_6 F_{dm})^{1/2} / (v_a - l_6 F_{dm}) \quad \cdots \cdots (14)$$

$$l_5 = \rho_c C_c l_3 / (1+f) \rho_w$$

$$l_6 = 4 / \pi D^2 \rho_c C_c l_3$$

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に式(14)の計算例を示す。

最後に、本理論値は、①エネルギー損失係数 f が大きくなるにつれて、大きくなること、②流木と構造物の密度(ρ_a 、 ρ_c)や弾性係数(E_a 、 E_c)にあまり依存しないことを断っておく。

《参考文献》 1)水原・他：新砂防、1980。2)松富：津波工学研究報告、1991。3)Kamel, A.M.: ASCE, 1970。4)曾我部・他：第28回海講論文集、1981。5)高：第26回海講論文集、1979。6)堀川：文部省科学研究費研究成果、No.A-58-2, 1983。