

塑性を考慮した場合の流木衝撃力

松 富 英 夫*・池 田 弘 樹**

1. ま え が き

弾性波理論(Kamel, 1970)や弾性理論(水原ら, 1980)のみに基づいた理論では、流木衝撃力を過大評価してしまう。現実的な衝撃力を得るため、松富ら(1992)は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一評価方法を示した。その理論は、流木が構造物に対して垂直に衝突する場合を対象としたものである。しかし、実際現象を考えると、そのような場合は稀であろう。衝突後の流木先端部が塑性変形することも容易に想像できる。これまで、流木の塑性を考慮して、流木衝撃力を論じた研究例はないと思われる。表一1に流木衝撃力の評価の際に拠り所とする理論の分類と研究例を示す。

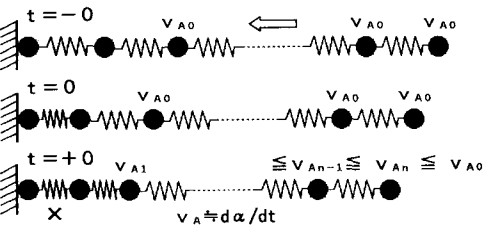
そこで、本研究の目的は、流木衝撃力の緩衝機能として流木の塑性を考え、簡単な弾塑性モデルを用いて、マッシブな構造物に任意角度で衝突する流木の最大衝撃力と衝撃力継続時間の一評価方法を示すことにある。

2. 理 論

構造物はマッシブで、その弾性係数や降伏応力は、流

表一1 流木衝撃力の理論

種 類	研 究 者
運動量理論	曾我部・他 (1981), 堀川 (1983), 松富 (1993)
弾 性 理 論	水原・他 (1980)
弾塑性理論	松富・池田 (1993)
弾性波理論	Kamel (1970), 高 (1979), 松富・池田 (1992)



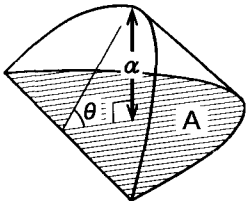
図一1 流木モデル

木のそれ等に比べて、非常に大きいとする。よって、構造物の弾塑性変形は考えないことにする。

流木衝突時の現象を説明するため、流木を多数の質点とバネからなる弾性体と考える。そのモデルを図一1に示す。衝撃問題では度々このモデルが用いられる(例えば, Wolf et al., 1978)。図中、質点は全て同じ質量と考えており、 v_{A0} は衝突前の質点の移動速度、 v_{Ai} は衝突後の各質点の移動速度、バネ下の×印はバネ機能の破壊を示す。実際現象では、流木が構造物に衝突した直後のしばらくの間($-0 \leq t < 0$)は弾性変形が生じ、降伏応力 σ_f に達した後、つまり構造物側の第一番目のバネが弾性限度に達した後($t \geq 0$)に塑性変形が生じるとされる。しかし、本理論では簡単化のため、流木の衝突直後から塑性変形が生じると仮定する。

剛で、マッシブな構造物へ衝突した流木は必ず反発する(曾我部ら, 1981)。衝突後の流木と構造物の接触部は、流木が反発し出すまでに、塑性体から弾性体に移す。流木が反発するには、弾性体となって歪エネルギーを流木内部に蓄積する必要があるからである。塑性体から弾性体に移すとは、遷移時から応力 σ に変化が始まるということである。一方、塑性変形した流木要素は接触面積や力に関与しないと仮定すれば、流木の変形量 α や接触面積 A は、流木が反発し出すまで、必ず単調増加する。図一2に本研究の流木変形モデルを示す。図中、 θ は流木の構造物への衝突角度である。流木の衝撃力 F は $\sigma \times A$ で評価されるので、遷移時から F の傾向に急激な変化が見られることになる。以上を模式的に示したものが図一3である。

最大衝撃力時には、少なくとも接触部の移動速度は零でなければならない。塑性体から弾性体へ遷移する時、



図一2 流木の変形モデル

応力は σ_f からある $\sigma(<\sigma_f)$ へ連続的に変化する。応力が連続的に変化するには、弾性限度に達したバネの一つ後ろのバネは弾性限度近くに達していなければならない。弾性を

* 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 鉱山学研究所

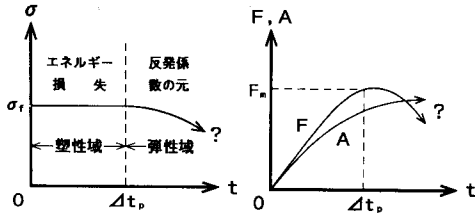


図-3 弾塑性モデル

必ず保持し、弾性限度近くに達した接触部はそれ以上歪み得ず、その移動速度は零と考えられる。

以上の考察より、塑性体から弾性体への遷移時は、接触部の移動速度が零で、最大衝撃力時と考えられる。本研究では、この時の衝撃力を最大衝撃力 F_m 、この時までの時間を衝撃力継続時間 Δt_p として、それ等の変化特性等を議論することにする。

直径 D 、長さ L 、質量 M 、移動速度 v_{A0} の流木が、構造物の法線方向に対して、角度 θ を持って衝突する場合を考える(図-2 参照)。 $t \leq \Delta t_p$ の時、流木の運動方程式は次式のように表現される。

$$Mdv_A/dt = -F = -\sigma_f A \quad (1)$$

ここで、 v_A は流木全体の平均的移動速度($=\sum v_{Ai}/n$ 、 n は移動質点数)である。接触面積 A と変形量 α の間には次式の関係がある。

$$A = D^2 [\sin^{-1}(1-B^2)^{1/2} - B(1-B^2)^{1/2}] / 4 \cos \theta \\ \approx D^{1/2} \alpha^{3/2} / (\cos \theta \sin^{3/2} \theta) \quad (2)$$

ここで、 $B = 1 - 2\alpha/D \sin \theta$ で、 θ は 5° 程度より大を想定している。元々、 $\theta = 0^\circ$ の時は、衝突直後から接触面積が流木の断面積となり、接触面での応力が降伏応力に達することは考えられず、式(2)は適用され得ない。実際に比べて小さめと思われるが、流木全体の平均的移動速度として次式を採用すれば、

$$v_A \approx da/dt \quad (3)$$

式(1)は次式となる。

$$2\alpha^{5/2}/5 \approx -\gamma(da/dt)^2/2 + \text{const.} \quad (4)$$

ここで、 $\gamma = M \cos \theta \sin^{3/2} \theta / (\sigma_f D^{1/2})$ である。 $t=0$ の時、 $\alpha=0$ 、 $da/dt = v_{A0}$ の初期条件を用いれば、式(4)は次式となる。

$$da/dt \approx v_{A0}(1 - \beta\alpha^{5/2})^{1/2} \quad (5)$$

ここで、 $\beta = 4/(5\gamma v_{A0}^2)$ である。式(5)を解けば、任意時間 t における α 、 A 、衝撃力 F が求められることになる。本研究では、式(5)を4次の Runge-Kutta 法を用いて数値的に解くことにする。

次の問題は式(5)の計算打ち切り時刻、つまり Δt_p の評価である。それはエネルギー保存則を用いて評価することにする。図-3に示したように、流木の持つエネルギーは塑性変形時のみに失われる。その量 W は次式で評価される。

$$W = Mv_{A0}^2(1-e)/2 = \int_0^{\Delta t_p} Fv_A dt \quad (6)$$

ここで、 e は流木の反発係数の2乗で、0より大きく、1より小さい値である。式(6)を満たす t が Δt_p で、この時の F が最大衝撃力 F_m である。

3. 計算例

3.1 経時変化

図-4に、流木の衝突角度 θ をパラメータに、塑性変形

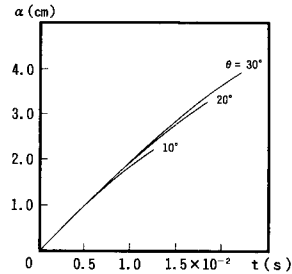


図-4 塑性変形量の経時変化 ($D=1$ m, $L/D=14$, $\gamma_A=0.6$, $v_{A0}=200$ cm/s, $\sigma_f=200$ kgf/cm², $e=0.4$)

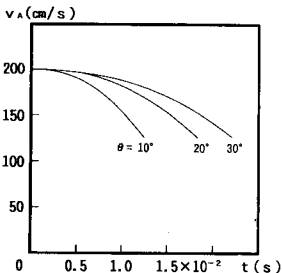


図-5 流木移動速度の経時変化 ($D=1$ m, $L/D=14$, $\gamma_A=0.6$, $v_{A0}=200$ cm/s, $\sigma_f=200$ kgf/cm², $e=0.4$)

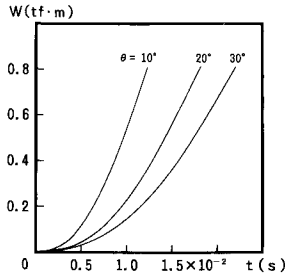


図-6 エネルギー損失の経時変化 ($D=1$ m, $L/D=14$, $\gamma_A=0.6$, $v_{A0}=200$ cm/s, $\sigma_f=200$ kgf/cm², $e=0.4$)

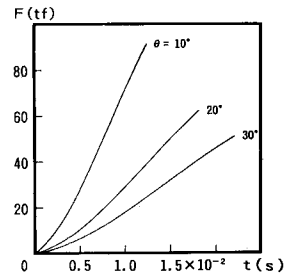


図-7 衝撃力の経時変化 ($D=1$ m, $L/D=14$, $\gamma_A=0.6$, $v_{A0}=200$ cm/s, $\sigma_f=200$ kgf/cm², $e=0.4$)

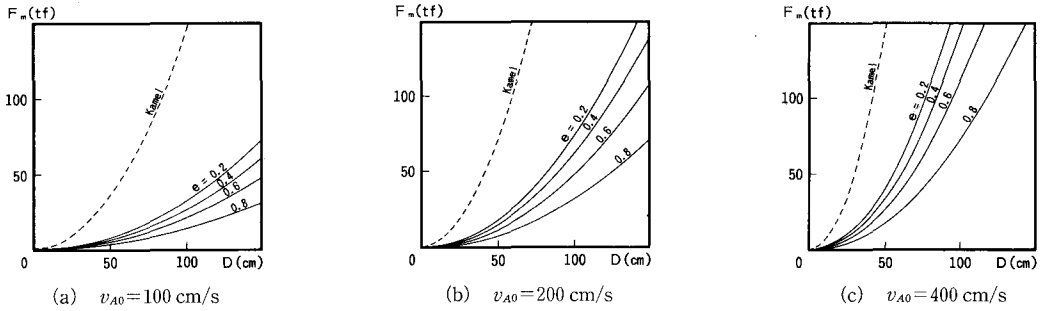


図-8 流木径，反発係数による最大衝撃力の変化 ($\gamma_A=0.6$, $\sigma_f=200 \text{ kgf/cm}^2$, $\theta=20^\circ$, $L/D=14$)

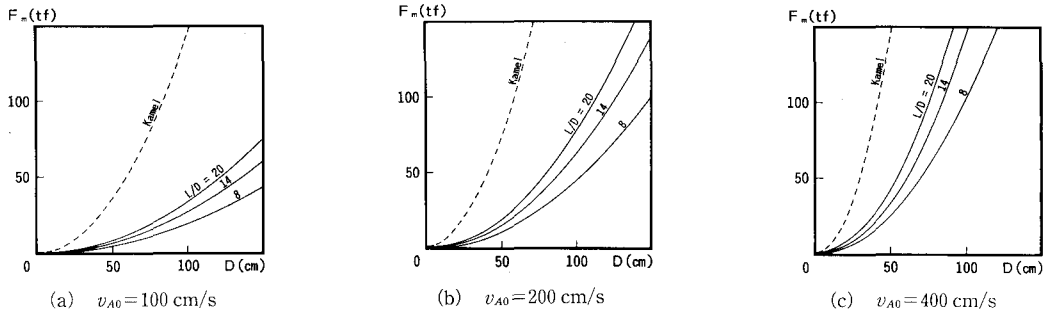


図-9 流木径，細長比による最大衝撃力の変化 ($\gamma_A=0.6$, $\sigma_f=200 \text{ kgf/cm}^2$, $\theta=20^\circ$, $e=0.4$)

量 α の経時変化例を示す。計算は最大衝撃力 F_m の発生時刻 $t = \Delta t_p$ までに行っている。計算において採用した値は流木径 $D=1 \text{ m}$ ，細長比 $L/D=14$ ，流木の比重 $\gamma_A=0.6$ ，衝突前の流木移動速度 $v_{A0}=200 \text{ cm/s}$ ，流木の降伏応力 $\sigma_f=200 \text{ kgf/cm}^2$ ，反発係数の2乗 $e=0.4$ である。これ等の値は，特に断らない限り，以下の計算例でも同じである。参考までに，曾我部ら (1981) によれば，陸上での原木の反発係数は0.4～0.6程度とのことである。図より，次のことが判断される。①衝突角度が小さくなるにつれて，塑性変形量は小さくなる。②初期段階の塑性変形量の進行度は衝突角度に依らないが，その後は衝突角度が小さくなるにつれて，小さくなる。

図-5，6と7に図-4と同じ計算条件での流木移動速度 v_A ，流木の塑性変形によるエネルギー損失 W と衝撃力 F の経時変化例を示す。これ等の図より，次のことが判断される。①衝突角度が小さくなるにつれて，流木移動速度の減少率は大きくなる。②反発係数を同じにしているため，最終的なエネルギー損失は衝突角度に依らないが，衝突角度が小さくなるにつれて，エネルギー損失率は大きくなる。③衝突角度が小さくなるにつれて，衝撃力とその増加率は大きくなる。

3.2 最大衝撃力

図-8(a)～(c)と9(a)～(c)に実線で最大衝撃力 F_m の計算例を示す。各々反発係数の2乗 e と細長比 L/D をパラメータに，流木径 D と衝突前の流木移動速度 v_{A0} に

よる最大衝撃力の変化をみたものである。計算において採用した値，流木の比重 $\gamma_A=0.6$ ，降伏応力 $\sigma_f=200 \text{ kgf/cm}^2$ ，衝突角度 $\theta=20^\circ$ は両図とも同じで，図-8では $L/D=14$ ，図-9では $e=0.4$ としている。図中には，破線で，次式のKamel理論 (1970) の計算値も示されている。

$$F_m = \pi \rho_c C_c v_{A0} D^2 / 4 (1 + \rho_c C_c / \rho_A C_A) \dots\dots\dots (7)$$

ここで， ρ は密度， C は弾性波速度，添字 A と C は流木と構造物の別を示す。構造物の密度と弾性係数として，各々 2.3 gf/cm^3 と $21 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ が採用されている。これ等の図より，次のことが判断される。①流木径，衝突前の流木移動速度や細長比が大きくなるにつれて，最大衝撃力は大きくなる。②反発係数が大きくなるにつれて，最大衝撃力は小さくなる。③本理論はKamel理論より実際的である。

図-10，11と12に，各々反発係数，衝突前の流木移動速度と細長比をパラメータに，衝突角度による最大衝撃力の変化例を示す。これ等の図より，次のことが判断される。①衝突角度が大きくなるにつれて，最大衝撃力とその減少率は小さくなる。②反発係数が大きくなるにつれて，最大衝撃力は小さくなる。③衝突前の流木移動速度や細長比が大きくなるにつれて，最大衝撃力は大きくなる。ただし，その傾向は衝突前の流木移動速度の方で顕著である。②と③は図-8と9の考察でも言えたことである。

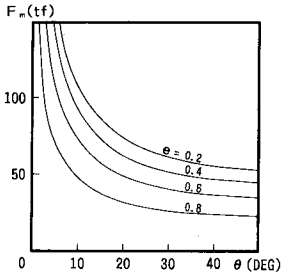


図-10 衝突角度、反発係数による最大衝撃力の変化 ($D=1$ m, $L/D=14$, $\gamma_A=0.6$, $v_{A0}=200$ cm/s, $\sigma_f=200$ kgf/cm²)

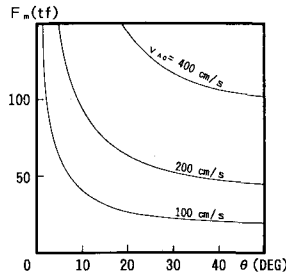


図-11 衝突角度、衝突前の流木移動速度による最大衝撃力の変化 ($D=1$ m, $L/D=14$, $\gamma_A=0.6$, $\sigma_f=200$ kgf/cm², $e=0.4$)

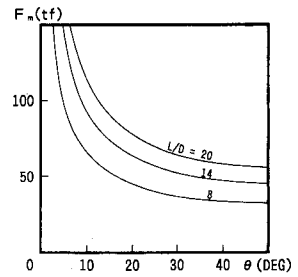
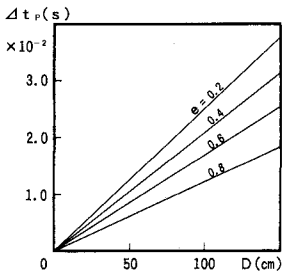
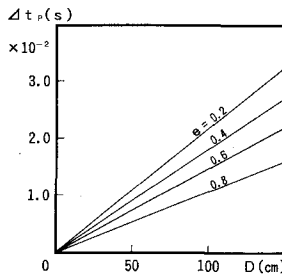


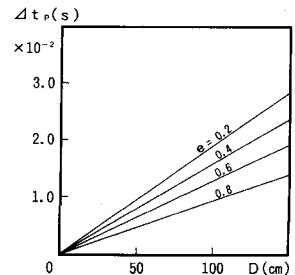
図-12 衝突角度、細長比による最大衝撃力の変化 ($D=1$ m, $\gamma_A=0.6$, $v_{A0}=200$ cm/s, $\sigma_f=200$ kgf/cm², $e=0.4$)



(a) $v_{A0}=100$ cm/s

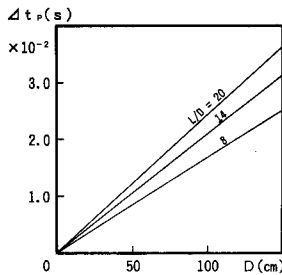


(b) $v_{A0}=200$ cm/s

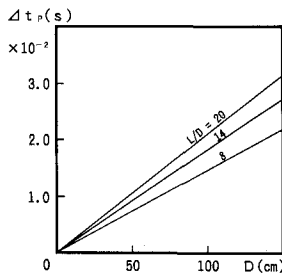


(c) $v_{A0}=400$ cm/s

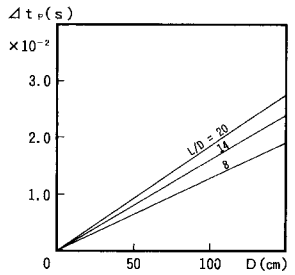
図-13 流木径、反発係数による衝撃力継続時間の変化 ($\gamma_A=0.6$, $\sigma_f=200$ kgf/cm², $\theta=20^\circ$, $L/D=14$)



(a) $v_{A0}=100$ cm/s



(b) $v_{A0}=200$ cm/s



(c) $v_{A0}=400$ cm/s

図-14 流木径、細長比による衝撃力継続時間の変化 ($\gamma_A=0.6$, $\sigma_f=200$ kgf/cm², $\theta=20^\circ$, $e=0.4$)

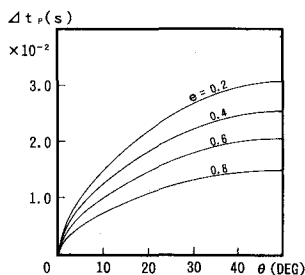
3.3 衝撃力継続時間

図-13(a)～(c)と14(a)～(c)に衝撃力継続時間 Δt_p の計算例を示す。各々反発係数の2乗 e と細長比 L/D をパラメータに、流木径 D と衝突前の流木移動速度 v_{A0} による衝撃力継続時間の変化をみたものである。計算において採用した値は、各々図-8と9でのそれと同じである。これ等の図より、次のことが判断される。①衝撃力継続時間は、流木径に対して、直線的に変化する。②流木径や細長比が大きくなるにつれて、衝撃力継続時間は長くなる。③反発係数や衝突前の流木移動速度が大きくなるにつれて、衝撃力継続時間は短くなる。

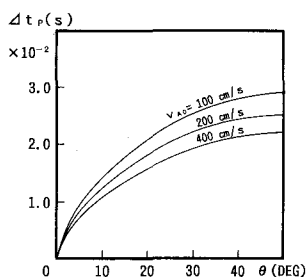
図-15, 16と17に、各々反発係数、衝突前の流木移動

速度と細長比をパラメータに、衝突角度による衝撃力継続時間の変化例を示す。これ等の図より、次のことが判断される。①衝突角度が大きくなるにつれて、衝撃力継続時間は長くなるが、その増加率は小さくなる。②反発係数や衝突前の流木移動速度が大きくなるにつれて、衝撃力継続時間は短くなる。ただし、その傾向は反発係数の方で顕著である。③細長比が大きくなるにつれて、衝撃力継続時間は長くなる。②と③は図-13と14の考察でも言えたことである。

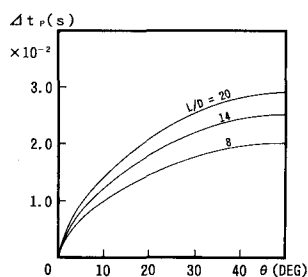
最後に、図-18に衝撃力継続時間に関する理論値と実験値(曾我部ら, 1981)の比較例を示す。縦軸が理論値で、横軸が実験値である。理論での流木の諸元や特性値



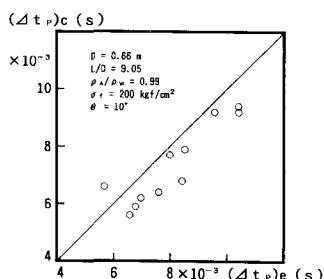
図—15 衝突角度、反発係数による衝撃力継続時間の変化 ($D=1\text{ m}$, $L/D=14$, $\gamma_A=0.6$, $v_{A0}=200\text{ cm/s}$, $\sigma_f=200\text{ kgf/cm}^2$)



図—16 衝突角度、衝突前の流木移動速度による衝撃力継続時間の変化 ($D=1\text{ m}$, $L/D=14$, $\gamma_A=0.6$, $\sigma_f=200\text{ kgf/cm}^2$, $e=0.4$)



図—17 衝突角度、細長比による衝撃力継続時間の変化 ($D=1\text{ m}$, $\gamma_A=0.6$, $v_{A0}=200\text{ cm/s}$, $\sigma_f=200\text{ kgf/cm}^2$, $e=0.4$)



図—18 衝撃力継続時間の理論値と実験値の比較

は $D=0.66\text{ m}$, $L/D=9.05$, $\gamma_A=\rho_A/\rho_w=0.99$, $\sigma_f=200\text{ kgf/cm}^2$ としている。実験での衝突角度は、ほぼ正面と思われるが、定かでない。理論での衝突角度は便宜的に適用限界に近い 10° としている。図によると、理論値と実験値は比較的良好に一致しており、本理論はかなり妥当なものと判断される。

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簡単な弾塑性モデルを用いて、マッシブな構造物に任意角度 θ で衝突する流木の最大衝撃力 F_m と衝撃力継続時間 Δt_p の一評価方法を示した。最大衝撃力に関しては Kamel 理論との比較、衝撃力継続時間に関しては実験値との比較により、その有用性を確認した。

②衝突角度が小さくなるにつれて、流木移動速度 v_A の減少率、エネルギー損失 W の率と衝撃力 F の増加率は大きくなる。

③流木径 D 、衝突前の流木移動速度 v_{A0} や細長比 L/D が大きくなるにつれて、最大衝撃力は大きくなる。

④反発係数が大きくなるにつれて、最大衝撃力は小さ

くなる。

⑤衝突角度が大きくなるにつれて、最大衝撃力とその減少率は小さくなる。

⑥流木径や細長比が大きくなるにつれて、衝撃力継続時間は長くなる。

⑦反発係数や衝突前の流木移動速度が大きくなるにつれて、衝撃力継続時間は短くなる。

⑧衝突角度が大きくなるにつれて、衝撃力継続時間は長くなるが、その増加率は小さくなる。

謝辞：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

- 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・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(1993): 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.
- 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)―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.
- Kamel, A. M. (1970): Shock pressure on coastal structures, ASCE, Vol. 96, No. WW 3, pp. 689-699.
- Wolf, J. P., K. M. Bucher and P. E. Skrikerud (1978): Response of equipment to aircraft impact, Nuclear Eng. and Desing, Vol. 47, 169-193.