

海岸構造物への木材衝撃力について

曾我部隆久*・布施谷 寛**・福家 敬泰***
四宮 征一****・麻植 政行*****

1. ま え が き

台風時等において、波浪や流れにより漂流している木材を原因とする海岸及び港湾構造物の被害がしばしば発生しており、構造物の設計に当っては、これら漂流木材が構造物に衝突する際の衝撃力について考慮しておく必要がある。しかし、この漂流木材の衝突時の挙動及び衝撃力の大きさについてはほとんど明らかにされておらず、合理的な設計が困難な状況にある。このため、実物大の原木木材を用い陸上及び海上においてコンクリートと木材の衝突実験を試みた。本研究は衝撃力の設計基礎資料を得るために行った一つの実験における衝突木材の弾性波周期、衝突速度、衝撃加速度、衝撃力の作用時間等の諸元の値とそれら相互の関係について整理解析したものである。

2. 衝撃力の機構

運動量理論によれば衝突により生じる衝撃力は、衝突前後の運動量の変化分に等しい力積として式(1)により表わすことができる。

$$m(v'-v) = \int_0^{\tau} p dt \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに m ; 木材の質量

v ; 木材の衝撃時速度

v' ; 木材の反発時初速度

p ; 衝撃力

τ ; 衝撃力の作用時間

木材の反発時初速度 v' は反発係数を e とすれば $v' = -ev$ であり、衝撃力 p は衝撃時の加速度を α とすれば $p = m\alpha$ であるから、これらを式(1)に代入して式(2)を得る。

$$-m(1+e)v = \int_0^{\tau} m\alpha dt$$

$$\therefore -(1+e)v = \int_0^{\tau} \alpha dt \quad \dots\dots\dots(2)$$

衝撃時の加速度 α は時間的に変化する。加速度の最大値を $\alpha_{\max}$ とし、 $0 < t < \tau$ の範囲で、ある分布形を仮定すると一般的に加速度の積分値は、式(3)で表わすことが出来る。

$$\int_0^{\tau} \alpha dt = \frac{1}{n} \alpha_{\max} \tau \quad \dots\dots\dots(3)$$

n ; 分布形によって定まる定数

これを式(2)に代入して式(4)を得る。

$$\alpha_{\max} = -n(1+e)v \frac{1}{\tau} \quad \dots\dots\dots(4)$$

負号は衝突速度と逆向きに力が作用することを示す。

木材の密度を ρ_A 、長さを l 、断面積を A_0 とすると木材の質量は $m = \rho_A A_0 l$ であるから、木材の衝突によって生じる衝撃力の最大値は、負号を略して式(5)で表わすことができる。

$$P_M = m \alpha_{\max} = \rho_A A_0 l n (1+e) \frac{v}{\tau} \quad \dots\dots\dots(5)$$

一方弾性波理論にもとづき Kamel, A. M.¹⁾ は固体と液体の衝突について図-1のようなモデルを考え式(11)を導きだした。

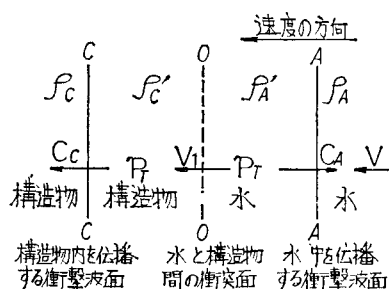


図-1 弾性波理論としてのモデル

A-A及びC-Cに2つの衝撃面がある。A-Aは衝突面O-OからC_Aなる速度で、C-Cは同じくC_Cなる速度vで遠ざかっている。A-A面の先では液体は一定速度で動いておりC-C面の先では固体は静止、背後では固体が一定速度v₁で動いているとする。ρは密度、pは圧力を示す。A-A及びC-Cにおいて質量保存則から

$$\rho_A(v+C_A) = \rho_A'(v_1+C_A) \quad \dots\dots\dots(6)$$

* 正会員 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所所長

** 正会員 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所次長

*** 運輸省第三港湾建設局工事課補佐官

**** 正会員 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所建設専門官

***** 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所工事専門官

$$-\rho c C_0 = \rho c'(v_1 - C_0) \dots\dots\dots (7)$$

運動量保存則から

$$\rho_A(v + C_A)^2 = p_T + \rho_A'(v_1 + C_A)^2 \dots\dots\dots (8)$$

$$\rho c C_0^2 = p_T + \rho c'(v_1 - C_0)^2 \dots\dots\dots (9)$$

式 (6)~(9) から衝撃圧力 p_T は、式 (10) と表わされる。

$$p_T = \rho c C_0 \frac{[\rho_A(v + C_A)v]}{\rho_A(v + C_A) + \rho c C_0} \dots\dots\dots (10)$$

$v/C_A \ll 1$ のとき、式 (10) は次のようになる。

$$p_T \approx \rho c C_0 \frac{\rho_A C_A v}{\rho c C_0 + \rho_A C_A} \dots\dots\dots (11)$$

式 (11) をコンクリートと木材の衝突に適用し弾性波によって生じる衝撃力 P_D は、衝撃時の接触面積 A を用いて式 (12) のように表わせる。

$$P_D = p_T A = \rho c C_0 \frac{\rho_A C_A v}{\rho c C_0 + \rho_A C_A} A \dots\dots\dots (12)$$

また衝撃力の作用時間は衝撃面の位置から最も近い自由表面まで音波が進行し、元の位置に帰るまでに要する時間である。従って木材の長さを l とすれば式 (13) により表わせる。

$$\tau = 2l/C_A \dots\dots\dots (13)$$

3. 実験設備と実験方法

(1) 陸上実験

埋立地内の旧防波堤上部コンクリート上面に、表—1

表—1 陸上実験の木材諸元

材 種	比 重	形状寸法 (m)		重量 (tf)
		中 径	長 さ	
米 松	0.68	0.49	8.05	1.03
ラ ワ ン	1.04	0.66	5.97	2.02

に示す原木木材の長軸が垂直になるように落下衝突させた。衝突速度は 1 m/s~6 m/s 間で変化させた。

第 1 回目の衝突及び反発速度は、木材に標尺を張り付け 16 ミリ高速度カメラによる撮影記録より読み取った。また木材中に埋込んだ 2 個の加速度計記録より第 1 回目の反発速度、第 2 回目の衝突速度、反発速度、弾性波周期、衝撃加速度及び衝撃力の作用時間を読み取った。

(2) 海上実験

静穏な海面に表—2 に示す原木木材を浮べ、岸壁の上部コンクリート側面 (鉛直) に木材の長軸方向が水平になるよう強制的に誘導引込みを行ない衝突させた。

衝突速度は 0.5 m/s~6 m/s の間で変化させた。第 1 回目の衝突速度、弾性波周期、衝撃加速度、衝撃力の作用時間については木材中に埋込んだ加速度計を各 1 個づ

表—2 海上実験の木材諸元

材 種	比 重	形状寸法 (m)		重量 (tf)
		中 径	長 さ	
米 松	0.63	0.49	8.05	0.95
ラ ワ ン	0.61	0.74	6.08	1.60

つ衝突速度測定用と衝撃加速度測定用に調整し測定記録を読み取った。なお、16 ミリ高速度カメラによる標尺の撮影可能な衝突速度については、同カメラによる測定も併用した。

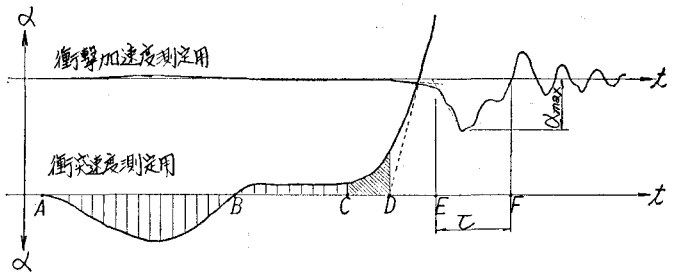
4. 実験結果及び解析

(1) 衝突木材の挙動

陸上実験では自由落下した木材は、第 1 回目の衝突後バウンドし 2 回、3 回と衝突を繰り返した。第 1 回目の衝突と第 2 回目の衝突のデータについて整理したが、16 ミリ高速度カメラによる測定記録よりも加速度計記録による測定記録の方がバラツキも少く信頼性も高いと考えられるので後述する陸上実験の結果は、加速度計記録による第 2 回目の衝突についてのものを示すこととする。

海上実験では木材の運動に対して海水が影響を与える。今回海上実験に用いた木材の細長比 l/d (l : 木材の長さ、 d : 木材の中径) は米松で 6.5、ラワンで 8.2 であり付加質量係数²⁾は 0.03 以下となり付加質量は概ね無視できる程度のものであった。しかし、図—2 の加速度記録模式図に示すように木材がコンクリート面に接近すると両者の衝突面に挟まれた部分の海水によって衝突速度が抑制されると共に、海水を通しての間接的な衝突が始まる。

このため明確な衝突点が見い出せず後述する海上実験の結果は、C 点における見掛の衝突速度を用いて整理す



図—2 加速度記録模式図

ることとした。

(2) 木材中を伝播する弾性波周期

木材中を伝播し木材の両端面で反射を繰り返す弾性波の固有周期 τ_0 は、木材の材質 (E_A : 弾性係数、 ρ_A : 密度) によって定まる弾性波の波速 C_A と木材の長さ l により計算される。

$$C_A = \sqrt{E_A / \rho_A} \dots\dots\dots (15)$$

表-3 弾性波波速及び固有周期

衝突条件	材 種	密 度 (g/cm ³)	弾性係数 (g/cm ³ ・s ²)	弾性波波速 (m/s)		固 有 周 期 (s)	
				計算値	実測値	計 算 値	実 測 値
陸上実験	米 松	0.68	154.8×10 ⁹	4 772	4 954	3.37×10 ⁻³	3.34×10 ⁻³
	ラワン	1.04	220.5×10 ⁹	4 605	4 326	2.59×10 ⁻³	2.76×10 ⁻³
海上実験	米 松	0.63	133.3×10 ⁹	4 600	4 849	3.50×10 ⁻³	3.32×10 ⁻³
	ラワン	0.61	127.4×10 ⁹	4 570	4 013	2.66×10 ⁻³	3.03×10 ⁻³

$$\tau_0 = 2l/C_A \dots \dots \dots (16)$$

実験に用いた木材の密度 ρ_A を重量と体積から算出し、弾性係数 E_A は農林省林業試験場調査³⁾の結果を参考にして固有周期を計算したものと、陸上及び海上実験において実測したものを表-3に示す。

計算値と実測値はほぼ一致しており衝突速度に関係なく一定値を示した。

(3) 反発係数

陸上実験における衝突速度と反発係数の関係を表わしたのが図-3である。

衝突速度が米松で 1 m/s, ラワンで 2 m/s 程度までの場合反発係数 e は 0.6 程度の一定値を示すが、それ以

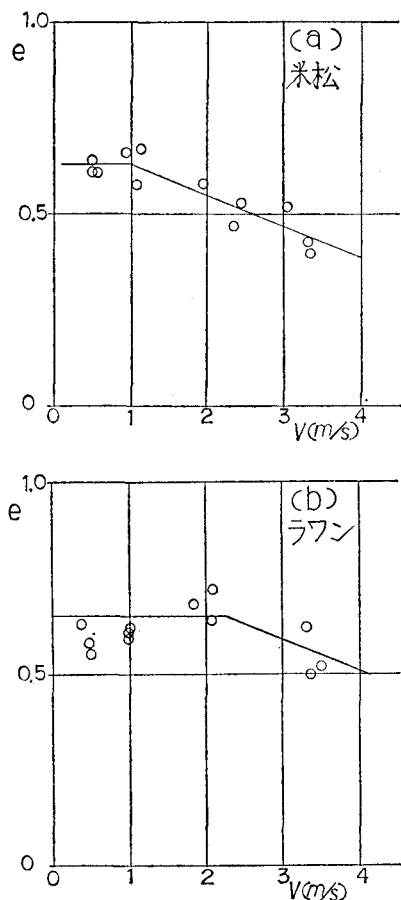


図-3 衝突速度と反発係数

上の衝突速度になると米松, ラワン共衝突速度の増加と共に反発係数 e は減少する傾向を示している。

海上実験については反発速度の測定できるケースが少なかったため反発係数の十分な解析ができていない。

(4) 衝撃力の作用時間

陸上実験における衝突速度と衝撃力の作用時間の関係を表わしたのが図-4である。

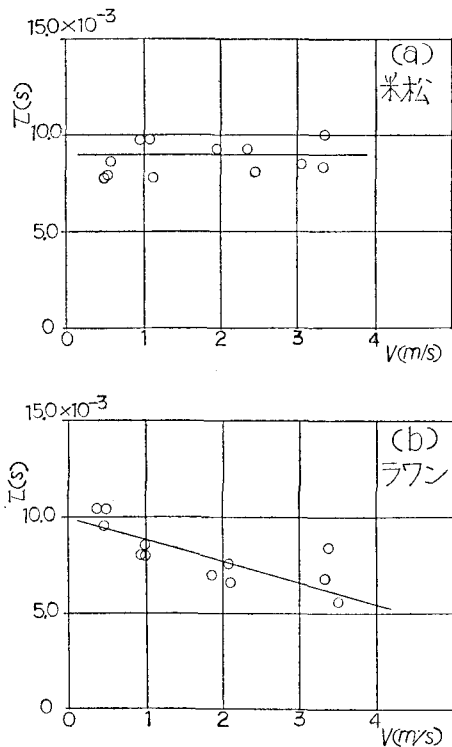


図-4 衝突速度と衝撃力の作用時間

衝撃力の作用時間 τ は米松で $(7 \sim 10) \times 10^{-3}$ s 程度の一定値を示し、ラワンでは衝突速度の増加と共に減少する傾向を示した。

海上実験における衝撃力の作用時間 τ は米松で 1×10^{-2} s, ラワンで 0.9×10^{-2} s 程度の一定値を示した。また衝撃力の作用時間 τ の値は陸上及び海上実験においても木材中を伝播する弾性波の固有周期 τ_0 の値に対し 2~3 倍の値となっており、木材の衝突面が塑性変形していることをうかがわせた。なお、式 (5) 及び式 (12) を等しいと置いた時の衝突時の接触面積は断面積の 70~150% 程度と非現実的な値となり完全な弾性衝突でなかったことが推定される。

(5) 衝撃加速度

陸上実験における衝突速度と衝撃加速度の関係を表したのが図-5である。

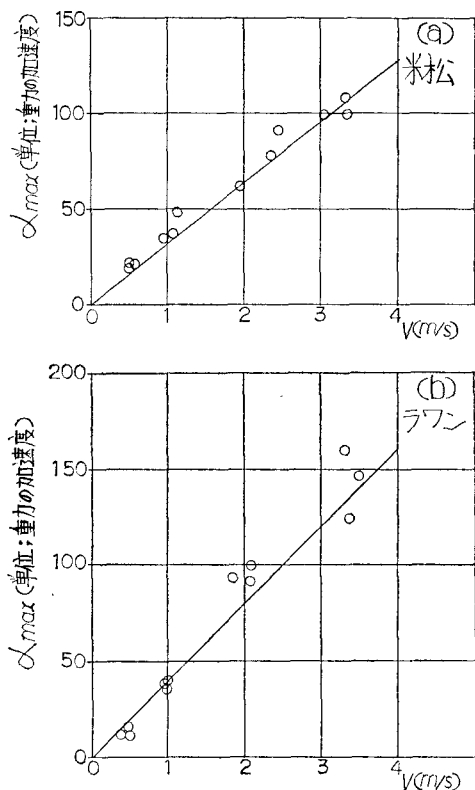


図-5 衝突速度と衝撃加速度

衝撃加速度 $\alpha_{\max}$ は衝突速度 v にほぼ比例している
と近似でき $\alpha_{\max} = kv$ とおいた時の k の値は 表-4 に
示す値となった。

表-4 k ($k = \alpha_{\max}/v$) の値

衝突条件	材 種	k
陸 上 実 験	米 松	46.4
	ラ ワ ン	51.2
海 上 実 験	米 松	19.0
	ラ ワ ン	22.5

海上実験に用いた衝突速度 v の値は、図-2 の C 点
における見掛の衝突速度になっていることに注意を要す
るが、海上実験の k の値は陸上実験の 1/2 以下であり
海水による緩衝効果の存在を示した。

(6) 衝撃加速度の分布形

図-6 は陸上実験の結果を式 (4) の負号を略し、衝撃
加速度 α の分布形を式 (17) に示す無次元量により表
わし、衝突速度との関係を示したものである。

$$n = 9.8\alpha_{\max}\tau/v(1+e) \dots\dots\dots(17)$$

無次元量 n の値は矩形波で $n=1$ 、三角形波で $n=2$ 、
正弦波で $n=1.57$ の値をもつ。陸上実験の米松では n
 $=2$ 、ラワンでは $n=1.9$ となり衝突によって生じる加
速度の分布形は、三角形波で近似できることが明らかと

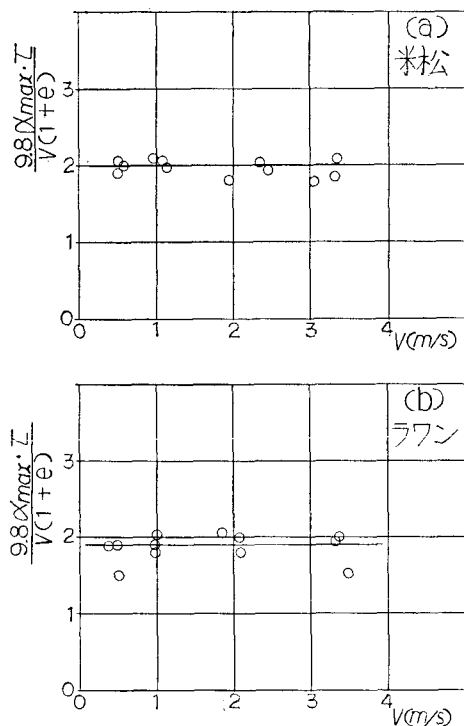


図-6 衝突速度と衝撃加速度の分布形

なった。

海上実験においては反発係数の値に信頼できるデータ
を得ていないので陸上実験の反発係数 $e=0.6$ を、また
衝突速度は 図-2 の C 点における衝突速度を用い見掛の
 n を計算した。この結果米松、ラワン共 $n=1.1$ 前後の
値となり衝突のピークが緩和されていることが推定され
る。

5. ま と め

(1) 木材中を伝播する弾性波の固有周期は木材の弾
性係数と密度を用いて計算した値と実測値がほぼ一致し
た。

(2) 反発係数は木材の材質、衝突速度、衝突角（接
触面積に関係）によって変化し、陸上実験においてはあ
る衝突速度より大きくなると衝突速度の増加と共に減少
する傾向が得られた。また衝撃力の作用時間は弾性波固
有周期の 2~3 倍程度の値となり、木材の衝突面が塑性
変形していることをうかがわせた。

(3) 衝撃最大加速度は概ね衝突速度に比例しており
その比例係数は、海上実験の場合見掛の衝突速度で比較
すると陸上実験の 1/2 以下の値となり、海水による緩衝
効果の存在を示した。

(4) 衝突により発生する加速度の変化を表わす指標
としての無次元量 n は、陸上実験において $n \approx 2$ の結
果が得られ三角形波として近似できることが判った。な

お海上実験においては、海水を通して間接的な衝突が接触前から始まることが明らかになり、衝突速度、衝撃力の作用時間等木材の運動に及ぼす海水の影響について今後さらに検討を加える必要が判明した。また衝撃力を設計に取り入れていくためには、木材が波浪によって衝突する場合等の実際に起る現象についてもさらに把握する必要がある。

最後に本実験の実施は日本港湾コンサルタント（株）青野尚氏、菊池孝氏が熱意を持って担当された。また実験場所の確保に当っては兵庫県港湾課の多大な協力を頂いた。

参 考 文 献

- 1) Kamel, A. M.: Shock Pressure on Coastal Structures, Proc. of A.S.C.E., WW Vol. 96, No. 3, pp. 689~699, 1970.
- 2) Lamb, H.: Hydrodynamics, Sixth Edition, Cambridge University Press, p. 155, 1932.
- 3) 岡田 清・明石外世樹 他: 土木材料学, 国民化学社, p. 42, 1967.
- 4) 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.
- 5) 第三港湾建設局: 木材の衝撃力調査報告書 (陸上編), p. 82, 1980. 3.
- 6) 第三港湾建設局: 木材の衝撃力調査報告書, p. 273, 1980. 9.