

分離堤に作用する木材の荷重

高 隆 二*

1. はじめに

木材港分離堤は、形状・構造・弾性・重量・抵抗等に応じ、水面投下木材の運動エネルギーを弾性波・慣性力・弾性力・摩擦力等に変換して吸収する。

以下、(鉄筋)コンクリート堤・防衛工・鋼管・鎖・膜・網等分離堤の形式毎にその過程を解析する。

2. 木材の運動

木材の水中軌跡は、木材の長さ l ・径 d ・密度 σ ・釣角度 α ・落下条件等により、型式Ⅰ(深く潜り最深点・最遠点に到達後、再び投入点方向に戻り loop 状に浮上)及び型式Ⅱ(浅く潜り最深点に到達後投入点から離れつつ放物線を描き浮上)に分かれる¹⁾。

下端の最深点・最遠点(型式Ⅰ)以内にある分離堤に対し、木材は荷重を与える。

(1) 着水衝撃

木材は水面において、付加質量の発生及び浮力により水没中急速に運動量を失う。

a) $\alpha = \pi/2$ (木材は水平)

木材の質量 m 、付加質量 $m' = C_M m$ 、着水前後の速度 $v = \sqrt{2gh}$ 、 $v' = \beta v$ (C_M : 付加質量係数、 h : 落下高、 β : 減速比)、水没中の平均速度 $\bar{v} = (v + v')/2$ 、平均浮力 $f = f'/2$ (水没の瞬間は 0、水没後 $f' = (\rho/\sigma - 1)mg$)、浮力の作用時間 $\tau = d/\bar{v}$ 等を、運動量方程式

$$mv = (m + m')v' + f\tau \quad \dots\dots\dots(1)$$

に代入し、減速比は

$$\beta = \frac{C_M}{2(1 + C_M)} \cdot \left[\sqrt{1 + 4 \frac{1 + C_M}{C_M^2} \left\{ 1 - \frac{d}{2h} \left(\frac{\rho}{\sigma} - 1 \right) \right\}} - 1 \right] \quad \dots\dots\dots(2)$$

となる (ρ : 水の密度)。着水前後の運動エネルギー E 、 E' の比は、

$$\frac{E'}{E} = (1 + C_M)\beta^2 \quad \dots\dots\dots(3)$$

である。

例 1] $\rho = 1$, $\sigma = 0.7$, $C_M = 1$, $d/h = 0.1$ に対し $E'/E = 0.486$

b) $\alpha = 0$ (木材は鉛直)

木材下端の深さ z は、運動方程式

$$(m + m')\ddot{z} = -\frac{\rho}{\sigma}mg\frac{z}{l} \quad \dots\dots\dots(4)$$

を初期条件 $t = 0$ で $z = 0$, $\dot{z} = v_0 = v(1 + C_M)$ の下に解き

$$\left. \begin{aligned} z &= \frac{v_0}{\omega} \sin \omega t \\ \omega &= \sqrt{\frac{\rho}{\sigma} \frac{1}{1 + C_M} \frac{g}{l}}, \quad C_M = \frac{1}{3} \frac{\rho}{\sigma} \frac{d}{l} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(5)$$

となる (付加質量を木材と同径半球の水塊と見なす)。

浮力による力積は、木材上端の水没時刻 $t_0 = \frac{1}{\omega} \sin^{-1} \frac{l\omega}{v_0}$ 迄積分し、

$$\int_0^{t_0} \frac{\rho}{\sigma} mg \frac{z}{l} dt = mv(1 - \cos \omega t_0) \quad \dots\dots\dots(6)$$

$v' = v_0 \cos \omega t_0$ により

$$\frac{E'}{E} = \frac{1}{1 + C_M} \left\{ \cos \sin^{-1} \sqrt{\frac{1 + C_M}{2} \frac{\rho}{\sigma} \frac{l}{h}} \right\}^2 \quad \dots\dots\dots(7)$$

である。上端は

$$\frac{h}{l} \geq \frac{1}{2} \frac{\rho}{\sigma} (1 + C_M) \quad \dots\dots\dots(8)$$

で水没する。

例 2] $\rho = 1$, $\sigma = 0.7$, $d/l = 0.1$, $C_M = 0.012$ の水没条件は $h/l = 0.72$ 。 $h/l = 1$ に対し $E'/E = 0.274$ 。

c) $0 < \alpha < \pi/2$

状況により大幅に変動し、詳細は観測ないし実験によっても、 E'/E は型式Ⅰで概略 65%、型式Ⅱで 25% 程度である¹⁾。

(2) 鉛直運動

着水衝撃によって運動エネルギーを減じた木材は、重心の最深点 Z_1 迄沈下する¹⁾。浮力・質量力・抗力を含めた見掛けの加速度 g' を用い、重心の深さ Z は、

$$\left. \begin{aligned} E' &= (m + m')g'Z_1 \\ Z &= v't - \frac{1}{2}g't^2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(9)$$

なる運動方程式で記述される。

着水衝撃により発生した回転速度も一様ではないが、先端の速度 $l\dot{\phi}/2$ (ϕ : 木材と鉛直とのなす角) は大略 v' 程度として良い。回転エネルギー E_R は

$$\frac{E_R}{E'} = \frac{(1+k')m(l\dot{\phi})^2/24}{(1+C_M)mv'^2/2} \approx 10^{-1} \quad \dots\dots\dots(10)$$

程度に過ぎない (k' : 付加慣性モーメント係数)。

(3) 水平運動

水平速度 u は着水の瞬間から急増し、水没中に最大となる。水平運動エネルギー比

$$\gamma = \frac{m(1+C_M)u^2/2}{mgh} = (1+C_M)\left(\frac{u}{v}\right)^2 \quad \dots\dots\dots(11)$$

を表-1 に示す。上端の水没と共に水平速度は直ちに減少し、比較的長時間定速で進行する。

表-1 水平運動エネルギー

α	$\pi/9$	$2\pi/9$	$\pi/3$
γ	0.248	0.198	0.103

投下点より木材長程度以上距れば、 $\gamma=5\sim 10\%$ と推定され、実用上は公式

$$E_K=0.1Wh, \quad u=0.45\sqrt{gh} \quad \dots\dots\dots(12)$$

により運動エネルギーを算定して良からう (W : 木材の重量)。

3. 分離堤

(1) 剛構造

a) コンクリート方塊

水平運動をする木材は、コンクリート鉛直面に衝突すると、接触面に衝撃圧

$$p=\sigma'C'\frac{\sigma Cu}{\sigma C+\sigma'C'}\frac{A}{A_0} \quad \dots\dots\dots(13)$$

を生じ、両者に弾性波を伝達する²⁾ (σ' : 分離堤の密度, $C(=\sqrt{E/\sigma})$, $C'(=\sqrt{E'/\sigma'})$: 木材及び分離堤の縦波速度, E : 木材の Young 率, A , A_0 : 木材及び接触面の断面積)。

衝撃圧は木材中を弾性波が往復する時間 $\tau=2l/C$ の間作用し、木材の圧縮強度 $250\sim 700\text{ kg/cm}^2$ 程度に保つ迄塑性変形によって接触面積を拡げる。

分離堤は、くさび型の木材先端による局部破壊、衝撃波の三次元的伝播や繰返し荷重による亀裂の発生等に関し、時には破壊力学の援用を要するであろう。

b) (鉄筋) コンクリート版

波動伝播を表わさないが、波頭付近を除けば実験と比較的一致する Bernoulli-Euler 式を用いる³⁾。

鉛直な薄い無限版 (厚さ h') 上に木材の衝突点を原点とする円筒座標を定め、版の水平変位 $w(r, z, t)=w(r, t)$ を

$$D\nabla^4 w + \sigma'h'\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad \dots\dots\dots(14)$$

と表わす。ここで、

$$\left. \begin{aligned} D &= \frac{E'h'^3}{12(1-\nu^2)} \quad (\nu: \text{Poisson 比}) \\ \nabla^4 &= \frac{\partial^4}{\partial r^4} + \frac{2}{r} \frac{\partial^3}{\partial r^3} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r^3} \frac{\partial}{\partial r} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(15)$$

である。 t に関し Laplace 変換

$$w(r, t) \supset W(r, s) = \int_0^\infty w(r, t) e^{-st} dt \quad \dots\dots\dots(16)$$

を施す。初期条件

$$w(r, 0)=0, \quad \left(\frac{\partial w}{\partial t}\right)_{t=0}=0 \quad \dots\dots\dots(17)$$

を参照し、

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \supset s^2 W - sw(r, 0) - \left(\frac{\partial w}{\partial t}\right)_{t=0} = s^2 W \quad \dots\dots\dots(18)$$

を式 (14) に代入すると

$$\frac{d^4 W}{dr^4} + \frac{2}{r} \frac{d^3 W}{dr^3} - \frac{1}{r^2} \frac{d^2 W}{dr^2} + \frac{1}{r^3} \frac{dW}{dr} + \omega s^2 W = 0 \quad \dots\dots\dots(19)$$

となる ($\omega=12(1-\nu^2)\sigma'/E'h'^2$)。

$$W(r, s) = A_0(s) + A_1(s)r + A_2(s)r^2 + \dots \quad \dots\dots\dots(20)$$

の無限級数に展開し、係数の関係から

$$\left. \begin{aligned} W &= W_1(r, s)A_0 + r^2 W_2(r, s)A_2 \\ W_1 &= 1 - \frac{\omega s^2}{64}r^4 + \frac{\omega^2 s^4}{147,456}r^8 - \dots \\ W_2 &= 1 - \frac{\omega s^2}{576}r^4 + \frac{\omega^2 s^4}{3,686,400}r^8 - \dots \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(21)$$

と表わされ、無限遠で収束する。

境界条件

$$w(0, t)=w_0(t), \quad \left(\frac{\partial w}{\partial r}\right)_{r=0}=0 \quad \dots\dots\dots(22)$$

より、 $w_0(t) \supset W_0(s)$ として

$$W(0, s) = W_0(s) = A_0(s) \quad \dots\dots\dots(23)$$

となる ($(dW/dr)_{r=0}=0$ は自然に満足)。

衝撃条件

$$\left. \begin{aligned} p_0(t) &= p(0, t) = \frac{E}{C}\left(u - \frac{\partial w}{\partial t}\right) \\ \lim_{d \rightarrow 0} \left(\frac{\pi d^2}{4} p - \pi d Q_a\right) &= 0 \\ Q_a &= -D \left[\frac{\partial^3 w}{\partial r^3} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial w}{\partial r} \right]_{r=d/2} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(24)$$

の Laplace 変換

$$P_0(s) = \frac{E}{C}\left(\frac{u}{s} - sA_0\right) = \omega s^2 D A_0 \quad \dots\dots\dots(25)$$

より、

$$A_0 = \frac{bu}{s^2(s+b)}, \quad P_0 = \frac{Eu}{C} \frac{1}{s+b} \quad \dots\dots\dots(26)$$

となり、原空間に戻すと

$$\left. \begin{aligned} p_0(t) &= \frac{Eu}{C} e^{-bt} \\ a_0(t) &= \frac{u}{b} (e^{-bt} - 1 + bt) \cap A_0(s) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(27)$$

と定まる ($b = E/C\sigma'h'$). 最大圧力は衝突時 $t=0$ に生じ、

$$p_{\max} = \frac{Eu}{C} = \sigma Cu \quad \dots\dots\dots(28)$$

であり、 t の小さい範囲では $a_0(t) \doteq ubt^2/2$ となる。

版裏面の張力 $p'(r, h'/2, t) \cap P(r, h'/2, s)$ は、曲げモーメントの釣合

$$\left. \begin{aligned} \frac{P'h'^2}{6} &= -D \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{d^2 W}{dr^2} + \nu \frac{1}{r} \frac{dW}{dr} \right) \\ &= -2(1+\nu)DA_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(29)$$

を満足する。衝突面に関する運動方程式

$$\frac{\pi}{4} d^2 p_0 - \pi d Q_d = \sigma' h' \frac{\pi d^2}{4} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad \dots\dots\dots(30)$$

を Laplace 変換し、式 (21), (24), (26) を参照すれば、

$$\left. \begin{aligned} A_2 &= -\frac{4bu}{d^2} \frac{1}{s^2(s+b)} \\ P' &= 48(1+\nu) \frac{Dbu}{d^2 h'^2} \frac{1}{s^2(s+b)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(31)$$

原空間に戻して

$$\left. \begin{aligned} p'(t) &= \frac{4}{1-\nu} \frac{E'}{E} \left(\frac{h'}{d} \right)^2 C\sigma'u (e^{-bt} - 1 + bt) \\ &\dots\dots\dots(32) \end{aligned} \right\}$$

となる。前面圧力との比は極めて高く、時刻 τ において

$$\frac{p'_{\max}}{p_{\max}} = \frac{p'(\tau)}{p(0)} = \frac{8}{1-\nu} \left(\frac{C'}{C} \frac{l}{d} \right)^2 \quad \dots\dots\dots(33)$$

と最大になり、衝突速度及び版の厚さとは関連しない。

尚、一方向にのみ応力の伝わるスリットケーソンの棧に対しては、

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{Eu}{C} e^{\tau/\mu^2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\tau}}{\mu} \right) \\ p' &= \sqrt{3} \frac{E'u}{C'} \left\{ 1 - e^{\tau/\mu^2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\tau}}{\mu} \right) \right\} \\ \mu &= 2\sqrt{2} \frac{E'A'C}{EAC'}, \quad \tau = \sqrt{\frac{A'}{I}} C't \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(34)$$

で与えられる⁴⁾ (A', I' : 棧の断面積及び断面二次モーメント, erfc は余誤差関数)。

衝撃荷重と木材自重との比

$$n = \frac{p_{\max} A}{mg} = \frac{Cu}{lg} \quad \dots\dots\dots(35)$$

は、例えば $l=10\text{m}$, $C=4,500\text{m/sec}$ に対し式 (12) を参照して

$$n = 46u = 65\sqrt{h} \quad (m\text{-sec 単位}) \quad \dots\dots\dots(36)$$

と見掛け静荷重に換算される。

c) 防 衝 工

分離堤前面に厚さ D の弾性体 (初期 Young 率 E_0) を設けると、変位 z により生じる圧力は

$$p = \frac{E_0}{3} \left\{ 1 + \varepsilon - \frac{1}{(1+\varepsilon)^2} \right\} \quad \dots\dots\dots(37)$$

である⁵⁾ ($\varepsilon = z/D$)。運動エネルギーの釣合

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m(1+C_M)u^2 &= \int_0^{-z_0} p A dz \\ &= \frac{E_0 A D}{6} \frac{(3+\varepsilon_0)\varepsilon_0^2}{1+\varepsilon_0} \quad \dots\dots\dots(38) \end{aligned}$$

を満足する歪 $\varepsilon_0 (=z_0/D < 0)$ は、三次方程式

$$\varepsilon_0^3 + 3\varepsilon_0^2 - b_0\varepsilon_0 - b_0 = 0 \quad \dots\dots\dots(39)$$

の根である ($b_0 = 3m(1+C_M)u^2/E_0AD$)。防衝工の最大反力は

$$R = -\frac{E_0 A}{3} \left\{ 1 + \varepsilon_0 - \frac{1}{(1+\varepsilon_0)^2} \right\} \quad \dots\dots\dots(40)$$

で与えられる。

(2) 柔 構 造

a) 鋼 管

通常、最大反力は

$$R = \sqrt{k(1+C_M)mu} \quad \dots\dots\dots(41)$$

と算出される (k : バネ定数)。

b) 網, 膜

載荷前の分離堤面 A (高さ H , 幅 B) 周辺 L の単位長に働らく張力 T と面 A とのなす角を ϕ とする。発生する張力 F_T , 抗力 F_D 及び質量力 F_M を

$$\left. \begin{aligned} F_T &= \oint_L T \sin \phi dL \\ F_D &= \frac{\rho}{2} \int_A K z^2 dA \\ F_M &= \rho \int_A w \ddot{z} dA \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(42)$$

と表わす (K : 抵抗係数, w : 慣性長)。以下各力を試算し、その程度を評価する。

A. 張 力

分離堤は、衝突した木材により中心 (変位 Z) を頂点とし周辺 L を底辺とする低い四角錐を保ちつつ変形すると見なす。底面積 A と側面積 A' との差は $Z \ll B, H$ として

$$\Delta A = A' - A \doteq \left(\frac{H}{B} + \frac{B}{H} \right) Z^2 \quad \dots\dots\dots(43)$$

となる。張力 $T = k \Delta A^n$ (k, n : 定数) は周辺上で一様、 $\phi_1 = \tan^{-1}(2Z/B)$, $\phi_2 = \tan^{-1}(2Z/H) \ll \pi/2$ で実用上 $n=1$ と仮定し、張力は

$$F_T \doteq 4k \left(\frac{H}{B} + \frac{B}{H} \right)^2 Z^3 \quad \dots\dots\dots(44)$$

と書ける (図-1)。

B. 抗力 (網)

抵抗係数を一定, $X=B/2$, $Y=H/2$ とし、直ちに

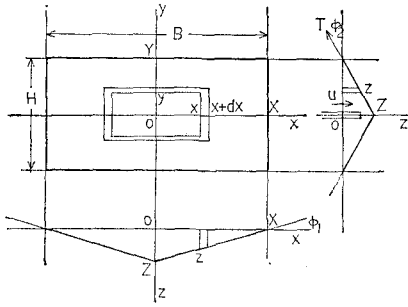


図-1 抗力と張力

表-2 抗力係数

ノリ付着	$R_0 (= \dot{z}d/\nu)$	C_D
無	$1 \sim 10^3$	$10R_0^{-1/3}$
	$10^3 \sim 10^5$	1.0
	$10^5 \sim$	$3.16 \times 10^7 R_0^{-3/2} \geq 0.5$
有	—	$0.017 \exp(12.3 W_L)$

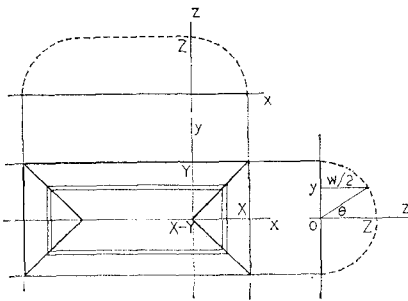


図-2 質量力

$$F_D = \frac{\rho}{2} K \int_0^X \left\{ \left(1 - \frac{x}{X} \right) \dot{Z} \right\}^2 8 \frac{Y}{X} x dx = \frac{\rho}{12} K A \dot{Z}^2 \quad (45)$$

を導く。抵抗係数 $K = \kappa C_D d/s$ (d : 網糸の径, s : 網目間隔, κ : 干渉係数 (≈ 1.0)), 抗力係数 C_D は R_0 数及び付着ノリ風乾重量 W_L (kg/m^2) に左右される⁶⁾ (表-2)。

C. 質量力 (膜)

慣性長の厳密な把握を避け、周辺 L に接し面 A に関して対称な半径 Y の複合円柱水塊を一応付加質量と見なす (図-2)。 $X > Y$ として、 $\dot{z}$; w ; dA にそれぞれ $(1-x/X)\dot{Z}$, $(1-y/Y)\dot{Z}$; $2Y \cos \sin^{-1} \{x-(X-Y)\}/Y$, $2Y \cos \sin^{-1} y/Y$; $4\{x-(X-Y)\}dx$, $4(X/Y)ydy$ の一方を代入し、 $F_M = m'\ddot{Z}$ により付加質量 $m' = \rho \bar{w} A$ ($\bar{w}$: 等価慣性長)

$$m' = \left[\left\{ 1 + \left(\frac{H}{B} \right)^2 \right\} \int_0^1 (s-s^2) \cos \sin^{-1} s ds + \int_0^{1-H/B} (1-s) ds \int_0^s \cos \sin^{-1} t dt + \int_{1-H/B}^1 (1-s) ds \int_{(B/H)(s-1)+1}^s \cos \sin^{-1} t dt \right] \cdot \rho A H \quad (46)$$

は数値積分により容易に算定される ($H/B=1$ に対し $\bar{w}$

$= 0.2614H$)。網においては一応 $\rho \bar{w} A d/s$ とし、実測にて検証する。

D. 力の釣合

木材の運動方程式

$$m\ddot{Z} = -F_T - F_D - F_M \quad (47)$$

に式 (44)~(46) を代入し (K , m' は実測して評価),

$$\ddot{Z} + K_1 \dot{Z}^2 + K_2 Z^3 = 0$$

$$K_1 = \frac{\rho K A}{12(m+m'+m'')},$$

$$K_2 = \frac{4k}{m+m'+m''} \left(\frac{H}{B} + \frac{B}{H} \right)^2$$

(m'' : 網, 膜の質量)

を初期条件 $t=0$ で $Z=0$, $\dot{Z}=u_0=(m/(m+m'+m''))u$ として最大変位

$$Z_0 = u_0 t_0 - \frac{K_1}{2} u_0^2 t_0^2 - \frac{K_2}{20} u_0^3 t_0^5 \quad (49)$$

各力の吸収するエネルギー並びに単位長さ当り最大張力

$$E_T = k \left(\frac{H}{B} + \frac{B}{H} \right)^2 Z_0^4$$

$$E_D = \frac{1}{240} \rho K A u_0^3 t_0 (20 - 30 K_1 u_0 t_0 - 7 K_2 u_0^2 t_0^4)$$

$$E_M = \frac{1}{2} (m' + m'') u_0^2$$

$$T = k \left(\frac{H}{B} + \frac{B}{H} \right) Z_0^2$$

.....(50)

と表わされる (最大変位の時刻 t_0 は $1 - K_1 u_0 t_0 - (K_2/4) u_0^2 t_0^4 = 0$ の根)。

4. おわりに

投下木材の運動エネルギーは、分離堤の形式により異なった形態のエネルギーとして吸収される。弾性力・抗力・質量力・弾性波圧等はかなり高い精度で予測されるので、各形式の特色を活かして設計し得る。

全世界で所得向上による木材消費形式の変化、開発途上非産油国での人口増加による薪炭材需要の急増等、今世紀末に木材消費量は 40 億 m^3 /年 を越し、石油と共に資源の危機を招くと懸念される⁷⁾。北方先進国を含めた森林資源の保護等により、丸太を取扱う木材港の中心は消費国から生産国に移行して行くであろう。

参考文献

- 1) 高 隆二・木村 弘・菊池 孝: 投下木材の水中挙動, 第 25 回海岸工学講演会論文集, 1979
- 2) Kamel, A. M.: Shock Pressure on Coastal Structures, Proc. ASCE WW Vol. 96, No. 3, 1971
- 3) 中原一郎: 衝撃応力問題の研究の動向, 日本機械学会誌 68 巻 552 号, 日本機械学会, 1965
- 4) 中原一郎・松本浩之: 弾性波の伝ばと衝撃応力, 日本機械学会誌 69 巻 575 号, 日本機械学会 1966
- 5) 日本鉄道車輛工業会: 防振ゴム, 現代工学社, 1975
- 6) 建設産業調査会: 農林水産土木ハンドブック, 1977
- 7) 神足勝浩: 世界森林会議に見る第三世界の思想, 国際開発ジャーナル, 1979