

投下木材の水中挙動

高 隆 二*・木 村 弘**・菊 池 孝***

1. はじめに

我国の木材需要は昭和48年を最高として年々減少し、昭和50年には総量9750万 m^3 (国産材3531万 m^3 、外材6219万 m^3)となり、以後ほぼ同水準を保っている¹⁾。外材の内丸太は3565万 m^3 を占め、南洋材(インドネシア・マレーシア・フィリピン外)49.1%、米材26.8%、ソ連材21.8%、ニュージーランド材1.4%から成る。西マレーシア、桟組壁工法を推進している西経100°以西の米国とカナダのBritish Columbia州では丸太輸出は禁止され、フィリピンでも制限を受けるが、森林資源造成に関する国際協力の下に、再生可能な唯一の建材である原木は安定した輸入を続けるであろう。

木材港において水面貯木場や整理場を一般水域と仕切る分離堤は比較的脆弱な構造で、専用船から水面に投下される木材の衝撃力を設計の対象とする。長さ l 、径 d 、密度 σ 等不揃な木材の投下条件は、水面上の高さ h 、釣角度 α 、拘束(等速)落下と自由落下の別等様々である。特定条件下に行われた水理模型実験結果²⁾をも参照し、木材の軌跡に関し検討を加える(図-1)。

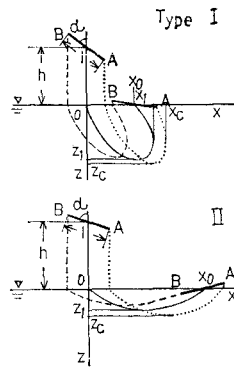


図-1 軌跡の分類

2. 理 論

木材を含む鉛直面内で、木材重心の着水点を原点、水面上に下端方向を x 軸、鉛直下方を z 軸とする。任意時刻 t における重心位置 $\mathbf{X}$ 、鉛直とのなす角 φ 、作用する力を $\mathbf{F}$ とし、抗力・質量力・重力・浮力に各添字 $D \cdot M \cdot G \cdot F$ を付す。木材(質量 m 、体積 V 、慣性モーメント I)の運動方程式は

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{\mathbf{X}} &= \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_M + \mathbf{F}_G + \mathbf{F}_F \\ I\ddot{\varphi} &= M_D + M_M + M_G + M_F \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる。

(1) 空 中

空気の影響を無視し、 D, M, F の各項を消す。

1) 自由落下

重力加速度 $\mathbf{g}(0, g)$ を用い $\mathbf{F}_G = m\mathbf{g}$

$$\therefore z = -h + \frac{1}{2}gt^2 \quad (0 \leq t \leq t_a) \dots\dots\dots (2)$$

木材下端の着水時刻 t_a は $\sqrt{(2h - l \cos \alpha)/g}$ である。

2) 等速落下

重心より上端側距離 δ の釣点を拘束しつつ等速 v_0 で落下させる。 $\ddot{\mathbf{X}} = 0$, $M_G = -mg\delta \sin \varphi$ から

$$z = -h + v_0 t \dots\dots\dots (3)$$

$$-\int_{\alpha}^{\varphi} \frac{d\varphi}{\sqrt{\cos \varphi - \cos \alpha}} = \frac{\sqrt{24g\delta}}{l} t$$

通常の h に対しては $\varphi \approx \alpha$ と見て良いから

$$\varphi = \alpha - \frac{6g\delta \sin \alpha}{l^2} t^2 \dots\dots\dots (4)$$

着水時刻 t_a は $\left(h - \frac{l}{2} \cos \varphi_a\right) / v_0$ (φ_a : 着水時傾斜角)となる。

(2) 着水時(水没中)

1) 弾性波

着水の瞬間、剛体でない木材は圧縮されて弾性波(波速 $C = \sqrt{E/\sigma}$ の縦・横波、 E : Young率), 水中にも縦波(波速 $C_w = \sqrt{E_w/\rho}$, $E_w \cdot \rho$: 水の体積弾性率・密度)を生じる。弾性波の圧力 $\sigma C(v - v')\rho C_w / (\sigma C + \rho C_w)$ (v, v' : 弾性変形前後の速度)³⁾、作用時間を用い運動量方程式

$$\sigma A l (v - v') = \frac{\sigma C}{\sigma C + \rho C_w} \rho C_w v A' \frac{l}{C} \dots\dots\dots (5)$$

から(A, A' : 木材断面積及び着水面積),

$$v' = \left(1 - \frac{\rho C_w}{\sigma C + \rho C_w} \frac{A'}{A}\right) v \dots\dots\dots (6)$$

となる。水中で縦波は三次元的に拡がり、鉛直落下($\alpha = 0$)を除くと $A' \ll A$ であるから $v' \approx v$ 、更に現地と模型で同一材料を使用すれば相似は保たれる。したがって、弾性変形を特に考慮せず、剛体として取扱う。

2) 質量力

木材下端は周辺の静止水塊(質量 m')を微小時間に

* (財) 国際臨海開発研究センター 主任研究員
 ** (株) 日本港湾コンサルタント 水理部第三課長
 *** (株) 日本港湾コンサルタント 水理研究所

速度 v で運動させ、水面の Cauchy-Poisson 波や乱れを生起する。これらを質量力で代表し、重力および木材の水中部に働く浮力と慣性力の釣合を解く。質量力

$$F_M = -\frac{d}{dt}(m'\dot{X}) = -(m'\ddot{X} + \dot{m}'\dot{X}) \dots\dots\dots (7)$$

は次第に増大し、鉛直上方から木材とほぼ垂直上方へと方向も刻々変わる。付加質量は幾何学的に定まり、Froude 則に従う模型では現地と相似になる。

(3) 水 中

$$F_G = \sigma Vg, \quad F_F = -\rho Vg, \quad M_G = M_F = 0 \dots\dots (8)$$

木材の長手および径方向に運動を分解し各添字 1, 2 を付す。抗力係数を C_D とすると

$$\left. \begin{aligned} F_{D1} &= -\frac{\rho}{2} C_{D1} \frac{\pi}{4} d^2 |\dot{X}_1| \dot{X}_1, \\ F_{D2} &= -\frac{\rho}{2} C_{D2} l d |\dot{X}_2| \dot{X}_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

通常 l/d は 20 前後にあり $C_{D1} \doteq 4$ [$Re = 10^3$ (模型) $\sim 10^5$ (現地)], ただし $Re = 10^5 \sim 10^6$ の超臨界領域で C_D は半減する危険もある⁴⁾。同様に $C_{D2} \doteq 1.2$, $Re = 10^5 \sim 10^6$ の範囲で亜臨界域から超臨界域への遷移は表面粗度の影響を受ける⁴⁾。

付加質量係数を C_M とし質量力 F_M を

$$F_{M1} = -\rho C_{M1} V \ddot{X}, \quad F_{M2} = -\rho C_{M2} V \ddot{X} \dots\dots (10)$$

に分解すると、 $l/d \approx 20$ に対し、 $C_{M1} = 0.7\%$ 、 $C_{M2} = 99\%$ となる⁵⁾。着水時の衝撃により回転モーメント (反時計廻りを正) を与えられた木材は、周囲の水に付加モーメント $M' = \rho \frac{\pi}{48} k' \phi d^2 l^3$ (k' : 付加慣性モーメント係数, $l/d = 20$ で 96% ⁵⁾) を誘起する。右手系に取った y 軸 (紙面手前側) 上の単位ベクトルを j 、木材の進行方向後方の任意点 0 と重心との距離を s とする。角運動量の保存則から、進行方向と垂直な運動量 $q = -M'/s$ を生じる。木材の長手方向と $\dot{X}$ のなす角 β 、運動量の方角への投影面積 $dl \cos \beta + \frac{\pi}{4} d^2 \sin \beta$ を用い、水の流速

$$V = \left\{ M' / \rho \dot{X}^2 \left(dl \cos \beta + \frac{\pi}{4} d^2 \sin \beta \right) \right\} \dot{X} \times j \dots\dots\dots (11)$$

と同一速度で逆行する木材は蛇行しつつ斜め上方に進む。並進する木材は長手および径方向に各 $\rho k_1 V |\dot{X}| \cos \beta$ 、 $\rho k_2 V |\dot{X}| \sin \beta$ の運動量を生じ、 $\dot{X}$ と垂直な成分

$$\begin{aligned} J &= -\rho k_2 V |\dot{X}| \sin \beta \cos \beta + \rho k_1 V |\dot{X}| \cos \beta \sin \beta \\ &= -\frac{1}{2} \rho (k_2 - k_1) V |\dot{X}| \sin 2\beta \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

の点 0 に関するモーメント増加率 $J\dot{s}$ を打消すモーメント

$$M_M = \frac{1}{2} \rho (k_2 - k_1) V \dot{X}^2 \sin 2\beta \dots\dots\dots (13)$$

により、木材は回転し流れと直交する傾向を示す⁶⁾。

二次元不連続流としての抗力

$$F_D = -\frac{\rho}{2} C_{D2} |\dot{X}_2| \dot{X}_2 dl, \quad C_{D2} = \frac{2\pi \sin \beta}{4 + \pi \sin \beta} \dots\dots\dots (14)$$

および重心から作用点までの距離

$$\delta_0 = \frac{3}{4} \frac{\cos \beta}{4 + \pi \sin \beta} l \dots\dots\dots (15)$$

を参照し、木材に作用する抗力モーメントは

$$M_D = \varepsilon |F_D| \delta_0 = \varepsilon \frac{3\pi}{4} \frac{\sin 2\beta}{(4 + \pi \sin \beta)^2} \rho \dot{X}_2^2 dl \dots\dots (16)$$

で与える⁵⁾。実験より定まる補正係数 ε を含め、模型上の各要素は Re 数の影響を除き現地と相似と見られよう。

3. 実 験⁷⁾

落下条件 (自由・等速) 別に結果を $h/l \cdot h'/l = \left(\frac{v_0^2}{2g} + \frac{l}{2} \cos \alpha \right) / l \cdot \alpha$ の関数で表示し、記法を統一して各図の凡例は省略した。

型式 I、II の限界は $k = \alpha^2 / (h_0/l) = 0.07$ 及び $k' = \alpha^2 / (h'_0/l) = 6$ 付近にある (図-2, 3)。浮力のみを復元力とする重心の最深点 $h'_0 = h' / \left(\frac{\rho}{\sigma} - 1 \right)$ に対し、着水速度の増加と共に抗力・質量力は増大し、着水衝撃による損失も著しい (図-4, 5)。型式 I における重心最速点も等速落下では極めて近い (図-6)。木材の最深・最速 (型式 I) 点は投下域の水深と分離堤位置の選定に役立つ (図-7~9)。

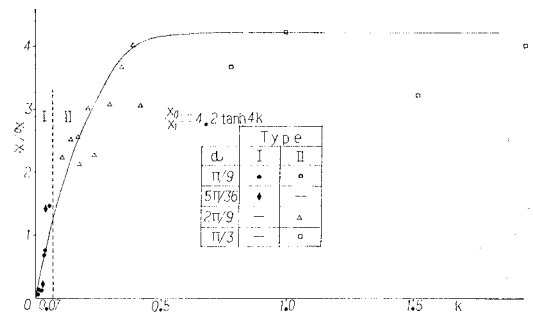


図-2 水面への浮上 (自由)

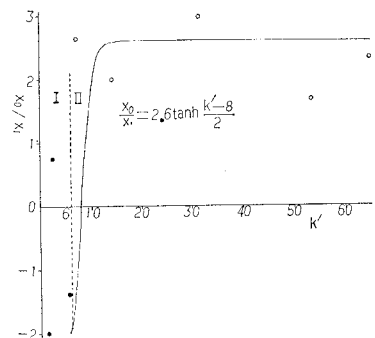


図-3 水面への浮上 (等速)

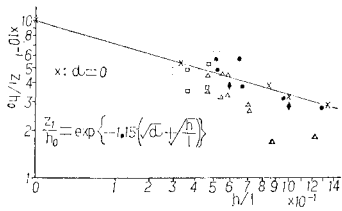


図-4 重心の最深点 (自由)

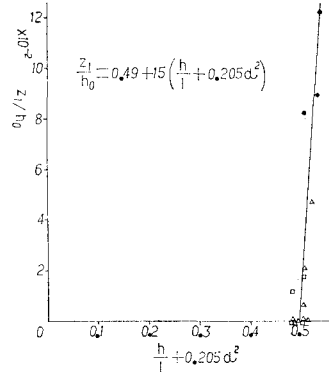


図-5 重心の最深点 (等速)

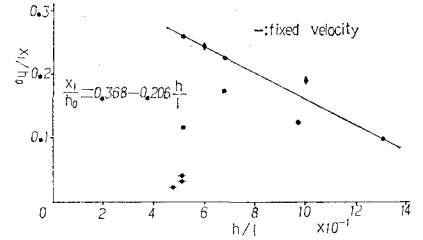


図-6 重心の最遠点

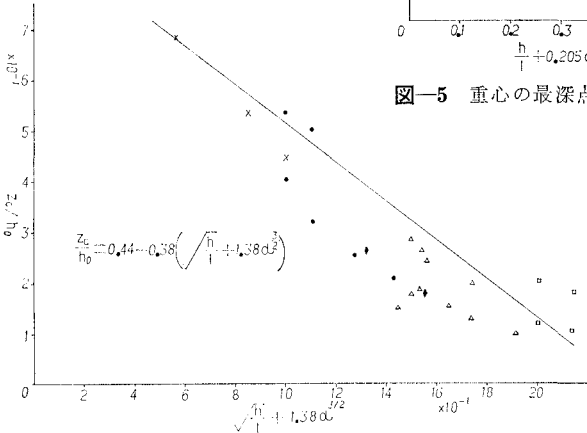


図-7 下端の最深点 (自由)

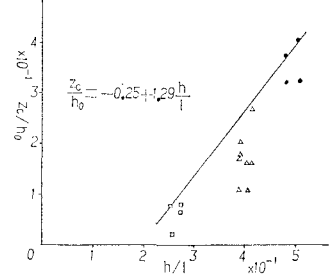


図-8 下端の最深点 (等速)

表-1 木材の運動

α	型式	r/h_0	$\theta/\frac{\pi}{2}$	$(\varphi-\alpha)/(\frac{\pi}{2}-\alpha)$
小	I	急増後、漸減 (0→0.2~0.3→0)	単調増加 (増加率減少) (0→1)	沈下中一定、浮上時急増 (0→0.6~0.8→1)
中	II	単調増加 (増加率減少) (0→0.3→)	一様増加 (増加率一定) (0→1)	急増後収束 (0→1)
大	"	増加 (極大、極小有) (0→0.2→0.15→)	同上	同上

木材重心の極座標 r, θ および傾斜角の時間 (h_0) に達する時間 $t_0 = \sqrt{\frac{2h}{g}} \left(\frac{\rho}{\sigma} - 1 \right)$ を基準に無次元化) 的变化と付加質量・慣性モーメントを考慮し、分離堤の構造に応じた外力を把握し得る (表-1)。水没中 ($t/t_0 < 0.25$) の全エネルギー E_T/E_0 (E_0 : 着水時全エネルギー) 損失

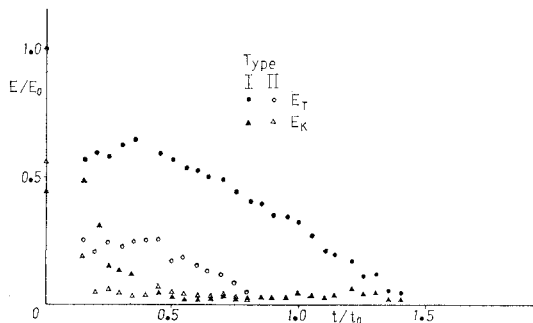


図-10 エネルギー変化

は型式IIで 75% と著しく、型式Iでは 35% 程度に留まる (図-10)。運動 (並進) エネルギー E_K/E_0 は 5~10% であり、回転エネルギー $E_R = \frac{1+k'}{24} m(\dot{\phi}l)^2$ を加えてもほぼ 15% 以内と推定される。

4. おわりに

木材の運動エネルギーを分離堤の形状・構造・弾性・重量・抵抗等に応じ弾性波・慣性力・弾性力・摩擦力等に変換する多様な過程は、コンクリート塊・防衛工・鋼管・鎖・布・網等形式ごとに個別の取扱いを要し、引続き解析中である。

参考文献

- 1) 農林統計協会: 昭和52年度, 林業白書, 日本林業協会, 1978.
- 2) 第三港湾建設局: 投下木材の挙動に関する実験報告書, 1975.

- 3) Kamel, A. M.: Shock Pressure on Coastal Structures, Proc. ASCE, WW, Vol. 96, No. 3, 1970.
 - 4) 土木学会: 水理公式集, 昭和46年度改訂版, 1971.
 - 5) Lamb, H.: Hydrodynamics, Camb. Univ. Press, 1932.
 - 6) 藤本武助: 流体力学, 養賢堂, 1957.
 - 7) 日本港湾コンサルタント: 分離堤の研究, 1978.
-