

接岸時の船舶の衝撃力

中央大学教授 工学博士 林 泰 造

§1. 緒 言

船舶の接岸時の衝撃力の評価は繫船岸設計上重要な事柄である。船舶のもたらす運動のエネルギーを吸収する機構として考えられているものはつぎの4つである。

- 船舶の縦方向回転
- 船舶の変形
- 繫船施設（防衝工も含めて）の変形
- 船舶のローリング

このうち、d. によるものは、その影響が極めて小さいとして、従来の理論的取り扱いにおいては無視されている。

しかし、そのような仮定の妥当性は未だ数量的には検討されていないように思われるので、本研究においては、その影響（ローリング）をも考慮した一般理論を樹て、この問題につき種々検討する。

§2. 基本方程式

図一1 のような座標系をとる。すなわち、

y : 繫船施設全体（防舷材を含む）の変形

θ : 船舶が繫船岸となす角度

φ : 船舶の傾き

h : 船舶の重心と防舷材との鉛直距離

y_G : 繫船岸に垂直な方向への船舶重心の変位

である。

重心 G の併進運動の方程式は

$$M \ddot{y}_G = -cy \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

M : 船舶の質量（仮想質量を含む）

c : 繫船施設全体（防舷材を含む）と船舶の各変形を合わせた合成バネ係数

であり、いま、

防舷材のバネ係数を c_f

繫船構造物のバネ係数を c_s

船舶の変形のバネ係数を c_v

とすれば、合成バネ係数 c は次式で計算される：

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_f} + \frac{1}{c_s} + \frac{1}{c_v} \quad \dots\dots\dots (2)$$

つぎに、 y_G と y とを結ぶ関係として、図一1 から明らかに、

$$y_G - a\ddot{\theta} - h\ddot{\varphi} = \dot{y} \quad \dots\dots\dots (3)$$

が成立つから、この関係式を(1)に代入して、 y_G を消去すれば、

$$M(\ddot{y} + a\ddot{\theta} + h\ddot{\varphi}) = -cy \quad \dots\dots\dots (4)$$

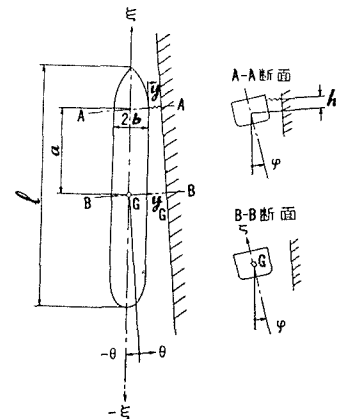
つぎに、平面形の回転（縦回転）に関する運動の方程式は、

$$I_\zeta \ddot{\theta} = cy \cdot a \cos \theta \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、

$I_\zeta = MR^2$: ζ 軸まわりの船舶（仮想質量を含む）の慣性モーメント

図一1 使用する座標系



R : 同上の慣性半径

接岸時に船舶が繫船岸となす角度 θ については、これが小な場合だけを取扱うならば、

$$\cos \theta \doteq 1$$

したがって、(5)は

$$I_{\xi} \ddot{\theta} = cy \cdot a \dots \dots \dots (5')$$

一方、ローリング (ξ 軸 (G を過る) まわりの回転) に関する運動の方程式は、

$$I_{\xi} \ddot{\varphi} = cyh - Wk\varphi \dots \dots \dots (6)$$

ただし、

$I_{\xi} = Mr^2$: ξ 軸まわりの船舶 (仮想質量を含む) の慣性モーメント

r : 同上の慣性半径

W : 船舶の総重量

h : メタセンター高さ

である。

(4), (5'), (6)を書直すと、それぞれ

$$\ddot{y} + (c/M)y + a\ddot{\theta} + h\ddot{\varphi} = 0 \dots \dots \dots (7)$$

$$\ddot{\theta} - (ca/I_{\xi})y = 0 \dots \dots \dots (8)$$

$$\ddot{\varphi} + (Wk/I_{\xi})\varphi - (ch/I_{\xi})y = 0 \dots \dots \dots (9)$$

となり、これら 3 式が所要の基本式となる。

特殊の場合として、もし船舶が重心で防舷材に当たる時 ($a=0$, $h=0$) には、これらの 3 式はそれぞれつぎのようになる：

$$\ddot{y} + \frac{c}{M}y = 0 \dots \dots \dots (10)$$

$$\ddot{\theta} = 0 \dots \dots \dots (11)$$

$$\ddot{\varphi} + \frac{Wk}{I_{\xi}}\varphi = 0 \dots \dots \dots (12)$$

そこで、いま、

ω_y : 船舶が重心で防舷材に当たった場合の繫船施設の変位の変位角速度

ω_{φ} : 船舶が重心で防舷材に当たった場合の船舶ローリングの変位角速度

とおけば、(10)および(12)から明らかに、これらは次式で与えられる：

$$\omega_y = \sqrt{c/M} \dots \dots \dots (13)$$

$$\omega_{\varphi} = \sqrt{Wk/I_{\xi}} \dots \dots \dots (14)$$

§ 3. 基本方程式の処理

一般式(7), (8), (9)の 3 式から、 θ と y とを消去して φ だけの式を導くことを考える：

まず(8)を(7)に代入すると、

$$\ddot{y} + \left(\frac{ca^2}{I_{\xi}} + \frac{c}{M} \right) y + h\ddot{\varphi} = 0 \dots \dots \dots (15)$$

一方、(9)から

$$y = \frac{I_{\xi}}{ch} \left(\ddot{\varphi} + \frac{Wk}{I_{\xi}}\varphi \right) \dots \dots \dots (16)$$

(16) を (15) に代入して整理すると、

$$\ddot{\varphi} + \left[\frac{Wk}{I_{\xi}} + \left(\frac{ca^2}{I_{\xi}} + \frac{c}{M} \right) + \frac{ch^2}{I_{\xi}} \right] \ddot{\varphi} + \left(\frac{ca^2}{I_{\xi}} + \frac{c}{M} \right) \frac{Wk}{I_{\xi}} \varphi = 0 \dots \dots \dots (17)$$

をうる。この式に、既出の諸関係式 $\frac{c}{M} = \omega_y^2$, $\frac{Wk}{I_{\xi}} = \omega_{\varphi}^2$, $I_{\xi} = Mr^2$, $I_{\xi} = MR^2$ を代入すると、

$$\ddot{\varphi} + \left[\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega_{\varphi}^2 \right] \ddot{\varphi} + \omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} \right) \omega_{\varphi}^2 \varphi = 0 \dots \dots \dots (18)$$

を得、これが所要の基本式となる。

§ 4. 基本式の解

(18)の解を求めるために

$$\varphi \propto e^{i\omega t} \dots\dots\dots (19)$$

と仮定して (18) に代入すると、

$$\begin{aligned} \omega^4 - \left\{ \omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega_\varphi^2 \right\} \omega^2 + \omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} \right) \omega_\varphi^2 &= 0 \\ \therefore \omega^2 = \pm \sqrt{\frac{\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega_\varphi^2 \pm \sqrt{\left\{ \omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega_\varphi^2 \right\}^2 - 4\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} \right) \omega_\varphi^2}}{2}} \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

したがって、

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega_\varphi^2} + \sqrt{\left\{ \omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega_\varphi^2 \right\}^2 - 4\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} \right) \omega_\varphi^2} \dots\dots\dots (21)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega_\varphi^2} - \sqrt{\left\{ \omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega_\varphi^2 \right\}^2 - 4\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} \right) \omega_\varphi^2} \dots\dots\dots (22)$$

とおけば、

$$\omega = \pm \omega_1, \pm \omega_2 \dots\dots\dots (23)$$

である。いま、簡単のために

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega_\varphi^2 \\ A &= \left\{ \omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega_\varphi^2 \right\}^2 - 4\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} \right) \omega_\varphi^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (25)$$

と記せば、

$$A = \left\{ \omega_\varphi^2 - \omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} \right) \right\}^2 + 2 \left\{ \omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} \right) + \omega_\varphi^2 \right\} \cdot \omega_y^2 \frac{h^2}{r^2} + \left(\omega_y^2 \frac{h^2}{r^2} \right)^2 > 0 \dots\dots\dots (26)$$

また、明らかに

$$A_1 \pm \sqrt{A} > 0 \dots\dots\dots (27)$$

したがって、 ω_1, ω_2 はともに実数であり、したがって(23)で与えられる ω の4つの根はすべて実数であることがわかる。

したがって、(23)を(18)に代入すると、(18)の一般解としての次式をうる：

$$\varphi = A \sin \omega_1 t + B \cos \omega_1 t + C \sin \omega_2 t + D \cos \omega_2 t \dots\dots\dots (28)$$

ただし、 A, B, C, D は積分常数である。

そこで、この(28)を(16)に代入することにより y が求められてつぎのようになる：

$$y = \frac{I \xi}{ch} \left\{ (-\omega_1^2 + \omega_\varphi^2) A + (-\omega_1^2 + \omega_\varphi^2) B + (-\omega_2^2 + \omega_\varphi^2) C + (-\omega_2^2 + \omega_\varphi^2) D \right\} \dots\dots\dots (29)$$

(28) および (29) の中の4個の積分常数 A, B, C, D は、4個の初期条件により定められる。船舶がローリングなしに速度（接触点への垂直速度） v_0 で防舷材に当たる場合には

$$(\varphi)_{t=0} = 0, (\dot{\varphi})_{t=0} = 0, (y)_{t=0} = 0, (\dot{y})_{t=0} = v_0 \dots\dots\dots (30)$$

この初期条件により4個の積分常数を定めれば、 y および φ は(29)および(28)からそれぞれつぎのようになる：

$$y = \frac{v_0}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \left\{ \frac{\omega_1^2 - \omega_\varphi^2}{\omega_1} \sin \omega_1 t + \frac{\omega_\varphi^2 - \omega_2^2}{\omega_2} \sin \omega_2 t \right\} \dots\dots\dots (31)$$

$$\varphi = \frac{v_0}{r} \frac{h}{r} \frac{\omega_y^2}{\omega_1(\omega_1^2 - \omega_2^2)} \left\{ \omega_1 \sin \omega_2 t - \sin \omega_1 t \right\} \dots\dots\dots (32)$$

防舷材を用いる場合には、ほとんど一般に

$$\omega_y < \omega_\varphi \dots\dots\dots (33)$$

となるものと考えられるから、以後考察の対象をそのような場合に限ることとする。

特殊の場合として、船舶が重心で防舷材に当たる場合 ($a=0, h=0$) には、(21)および(22)はそれぞれ、

$$(\omega_1)_{a=h=0} = \omega\varphi \dots\dots\dots (34)$$

$$(\omega_2)_{a=h=0} = \omega_y \dots\dots\dots (35)$$

に帰し、また、(31)および(32)はそれぞれつぎのようになる：

$$(y)_{a=h=0} = \frac{v_0}{\omega_y} \sin \omega_y t \dots\dots\dots (36)$$

$$(\varphi)_{a=h=0} = 0 \dots\dots\dots (37)$$

また、一般式(31)、(32)の示す t が小なる時（衝撃の初期）の挙動は、式中の $\sin$ 関数を t のべき級数に展開することにより検討することができて、つぎのようである：

$$y = \frac{v_0}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \left\{ \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_1} \left\{ \omega_1 t - \frac{(\omega_1 t)^3}{3!} + \dots \right\} + \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{\omega_2} \left\{ \omega_2 t - \frac{(\omega_2 t)^3}{3!} + \dots \right\} \right\} = v_0 t + O(t^3) \dots\dots\dots (38)$$

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{v_0}{r} \cdot \frac{h}{r} - \frac{\omega_y^2}{\omega_1(\omega_1^2 - \omega_2^2)} \left\{ \omega_2 \left\{ \omega_2 t - \frac{(\omega_2 t)^3}{3!} + \dots \right\} - \left\{ \omega_1 t - \frac{(\omega_1 t)^3}{3!} + \dots \right\} \right\} \\ &= \frac{v_0}{r} \cdot \frac{h}{r} - \frac{\omega_y^2}{3!} t^3 + O(t^5) \dots\dots\dots (39) \end{aligned}$$

ただし、 $O(t^3)$ は t^3 の程度の量であることを示す。

§ 5. $\omega\varphi$, ω_y , ω_1 , ω_2 の大小関係

繫船施設には一般に必ず防舷材を附し、その場合には防舷材の軟かいバネ係数により、変位 y の変位角速度 ω_y が小になつて、既述のように、一般に

$$\omega_y < \omega\varphi$$

となるから、考察の対象をそのような場合に限る。

そこで、 ω_1 , ω_2 と ω_y , $\omega\varphi$ の大小関係を検討するのであるが、まず(21)から

$$\begin{aligned} \omega_1^2 &= \frac{1}{2} \left[\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega\varphi^2 + \sqrt{\left\{ \omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega\varphi^2 \right\}^2 - 4\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} \right) \omega\varphi^2} \right] \\ &= \frac{1}{2} \left[\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega\varphi^2 + \sqrt{\left\{ \omega\varphi^2 - \omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} \right) \right\}^2 + 2 \left\{ \omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} \right) + \omega\varphi^2 \right\} \cdot \omega_y^2 \frac{h^2}{r^2}} \right] \\ &> \frac{1}{2} \left[\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega\varphi^2 + \sqrt{\left\{ \omega\varphi^2 - \omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} \right) \right\}^2} \right] \end{aligned}$$

したがつて、もし $\omega\varphi > \sqrt{1 + (a/R)^2} \omega_y$ ならば、上式から、

$$\omega_1^2 > \omega\varphi^2 + \frac{1}{2} \omega_y^2 \frac{h^2}{r^2} > \omega\varphi^2$$

また、もし $\omega\varphi < \sqrt{1 + (a/R)^2} \omega_y$ ならば(21)から直接に、

$$\omega_1^2 > \frac{1}{2} \left[\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega\varphi^2 \right] > \omega\varphi^2$$

したがつて、いずれにしても

$$\omega_1 > \omega\varphi$$

つぎに、(22)から

$$\begin{aligned} \omega_2^2 &= \frac{1}{2} \left[\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega\varphi^2 - \sqrt{\left\{ \omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega\varphi^2 \right\}^2 - 4\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} \right) \omega\varphi^2} \right] \\ &= \frac{1}{2} \left[\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega\varphi^2 - \sqrt{\left\{ \omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega\varphi^2 - 2\omega_y^2 \right\}^2 + 4\omega_y^2 \left\{ \omega_y^2 \left(\frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega\varphi^2 \right\}} \right] \\ &< \frac{1}{2} \left[\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega\varphi^2 - \sqrt{\left\{ \omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega\varphi^2 - 2\omega_y^2 \right\}^2} \right] \\ &= \omega_y^2 \end{aligned}$$

したがつて、

$$\omega_1 \geq \omega\varphi > \omega_y \geq \omega_2 \dots\dots\dots (40)$$

ただし、等号が成立するのは、 $a=h=0$ のときだけである。

(40)および(34), (35) から, ローリングと繫船施設のバネとの連成作用によって ω_φ の変成されたものが ω_1 , 同じく ω_y の変成されたものが ω_2 と考えることができる。したがって, y および φ の式の内容はつぎのように考えられる:

$$y = \frac{v_0}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \left[\underbrace{\frac{\omega_1^2 - \omega_\varphi^2}{\omega_1} \sin \omega_1 t}_{\text{ローリングから変成されたもの}} + \underbrace{\frac{\omega_\varphi^2 - \omega_2^2}{\omega_2} \sin \omega_2 t}_{\text{バネの変位から変成されたもの}} \right]$$

$$\varphi = \frac{v_0}{r} \frac{h}{r} \frac{\omega_y^2}{\omega_1(\omega_1^2 - \omega_2^2)} \left[-\sin \omega_1 t + \frac{\omega_1}{\omega_2} \sin \omega_2 t \right]$$

y および φ の変化を, それぞれ, v_0/ω_y および $(v_0/r)/\omega_\varphi$ に対する比值として表わしたものの数例が, 図-2, 3, 4 に示される。

§ 6. ω_2/ω_1 と ω_y/ω_φ との関係

(21)と(22)とから,

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \sqrt{\frac{\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2}\right) + \omega_\varphi^2 - \sqrt{\left[\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2}\right) + \omega_\varphi^2\right]^2 - 4\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2}\right) \omega_\varphi^2}}{\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2}\right) + \omega_\varphi^2 + \sqrt{\left[\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2}\right) + \omega_\varphi^2\right]^2 - 4\omega_y^2 \left(1 + \frac{a^2}{R^2}\right) \omega_\varphi^2}}}$$

$$= \frac{\left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2}\right) \lambda^2 + 1 - \sqrt{\left[\left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2}\right) \lambda^2 + 1\right]^2 - 4\left(1 + \frac{a^2}{R^2}\right) \lambda^2}}{2\sqrt{1 + \frac{a^2}{R^2}} \lambda} \quad (41)$$

ただし

$$\lambda = \omega_y/\omega_\varphi \quad (42)$$

(41)により, ω_2/ω_1 の値を計算したものの一例が図-5, 6 に示される。

λ が小なる間は ω_2/ω_1 の値はほぼ λ の値に比例して増大するが, λ の値が 0.5 程度以上になると, ω_2/ω_1 の値は λ の値に關係が少くなる。これはその範囲では防舷材のバネ係数を連続的に変えても, (31) の 2 つの正弦波のモードの重なり方の相互關係が, あまり変化しないことを示している。

図-2 y と φ ($\lambda=0.6$, $a/R=1.0$, $h/r=0.2$ の場合)

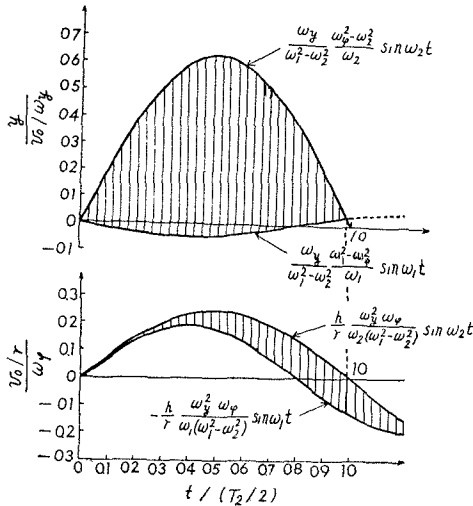


図-3 y と φ ($\lambda=0.6$, $a/R=1.0$, $h/r=0.6$ の場合)

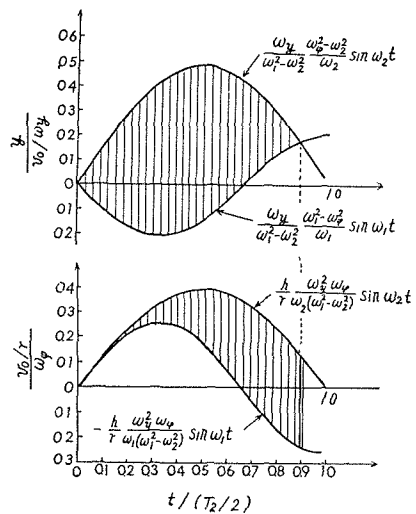
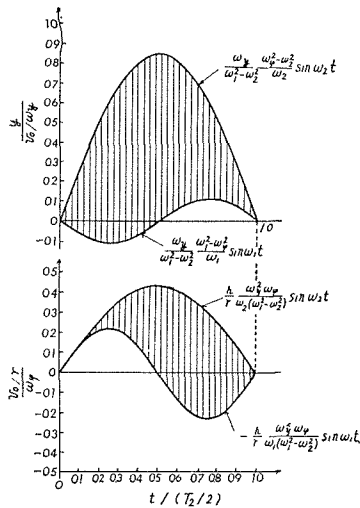
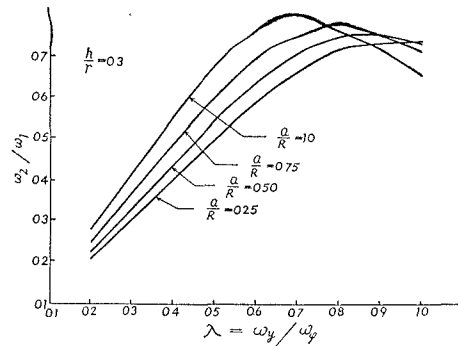
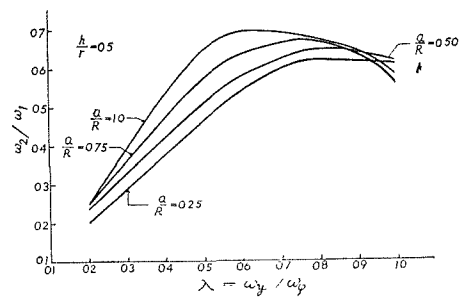


図-4 y と φ ($\lambda=0.6$, $a/R=0$, $h/r=0.6$ の場合)図-5 ω_2/ω_1 と λ の関係 ($h/r=0.3$ の場合)図-6 ω_2/ω_1 と λ の関係 ($h/r=0.6$ の場合)

§7. 平面回転およびローリングによる衝撃減少の割合

y の最大値は(31)において $\dot{y}=0$ すなわち

$$(\omega_1^2 - \omega_\varphi^2) \cos \omega_1 t + (\omega_\varphi^2 - \omega_2^2) \cos \omega_2 t = 0 \quad \dots\dots\dots (43)$$

を満足する時間 t の瞬間に現われる。上式を書直すと

$$(\lambda_1^2 - 1) \cos 2\pi \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{t}{T_2} = -(1 - \lambda_2^2) \cos 2\pi \frac{t}{T_2} \quad \dots\dots\dots (44)$$

となる。ただし、

$$\lambda_1 = \frac{\omega_1}{\omega_\varphi} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[1 + \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) \lambda^2 + \sqrt{\left(1 + \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) \lambda^2 \right)^2 - 4 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} \right) \lambda^2} \right] \quad \dots\dots\dots (45)$$

$$\lambda_2 = \frac{\omega_2}{\omega_\varphi} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[1 + \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) \lambda^2 - \sqrt{\left(1 + \left(1 + \frac{a^2}{R^2} + \frac{h^2}{r^2} \right) \lambda^2 \right)^2 - 4 \left(1 + \frac{a^2}{R^2} \right) \lambda^2} \right] \quad \dots\dots\dots (46)$$

$$T_2 = \frac{2\pi}{\omega_2} \quad \dots\dots\dots (47)$$

である。

与えられた λ , a/R および h/r の値に対して(44)を満たす t の値は、(44)の両辺の $\cos$ 曲線を書き、その両曲線の交点として図式に求められる。そのようにして求められた t の値を t_m とおくと、 y の最大値は(31)に $t=t_m$ を代入して、

$$y_{max} = \frac{v_0}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \left\{ \frac{\omega_1^2 - \omega_\varphi^2}{\omega_1} \sin 2\pi \frac{\omega_1}{\omega_2} \frac{t_m}{T} + \frac{\omega_\varphi^2 - \omega_2^2}{\omega_2} \sin 2\pi \frac{t_m}{T} \right\}$$

あるいは、これを書直して、

$$y_{max} = \frac{v_0/\omega_\varphi}{\lambda_1^2 - \lambda_2^2} \left\{ \frac{\lambda_1^2 - 1}{\lambda_1} \sin 2\pi \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{t_m}{T} + \frac{1 - \lambda_2^2}{\lambda_2} \sin 2\pi \frac{t_m}{T} \right\} \quad \dots\dots\dots (48)$$

一方、船舶が重心で防舷材に当たる場合には、この時の y_{max} は(36)から明らかなように、

$$(y_{max})_{a=h=0} = \frac{v_0}{\omega_y} \quad \dots\dots\dots (49)$$

したがって、(48)と(49)とから、

$$\frac{y_{max}}{(y_{max})_{a=h=0}} = \frac{1}{\lambda_1^2 - \lambda_2^2} \left[\frac{\lambda_1^2 - 1}{\lambda_1} \sin 2\pi \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{t_m}{T} + \frac{1 - \lambda_2^2}{\lambda_2} \sin 2\pi \frac{t_m}{T} \right] \quad \dots\dots\dots (50)$$

そこで、いま、

$$\mu = \frac{\text{繫船施設が吸収する衝撃エネルギー}}{\text{船舶が重心で当たった場合に繫船施設に加わるべき衝撃エネルギー}}$$

とすれば、船舶の平面回転およびローリングの影響が大になる程 μ の値は1より小になるはずである。このように

して、 μ は船舶が重心で当る時繫船施設に加わるべき衝撃エネルギーが、船舶の平面回転およびローリングによる減少する割合を表わす比值と考えることもできる。上の定義から明らかに、

$$\mu = \frac{\frac{1}{2} c y_{max}^2}{\frac{1}{2} c \left[(y_{max})_{a=h=0} \right]^2} \dots\dots\dots (51)$$

したがって、上式に (50) を代入すれば次式をうる：

$$\mu = \left\{ \frac{\lambda}{\lambda_1^2 - \lambda_2^2} \left(\frac{\lambda_1^2 - 1}{\lambda_1} \sin 2\pi \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{t_m}{T} + \frac{1 - \lambda_2^2}{\lambda_2} \sin 2\pi \frac{t_m}{T} \right) \right\}^2 \dots\dots\dots (52)$$

上式は、要するに λ 、 a/R および h/r の3個の比值のみの関数であるから、この3比值の組合せにより、あらゆる場合の μ の値を計算することができる。

實際上起りうる範囲は

$$\lambda = 0.5 \sim 1, \quad a/R = 0 \sim 1, \quad h/r = 0 \sim 0.6$$

であると考えて、その範囲について μ の値を示したものが図-7 ないし 図-12 である。また、図-13 ないし 図-18 は、それぞれ 図-7 ないし 図-12 を立体座標の形で書直したものである。

これらの諸図を見ると、この範囲では μ の値は、 a/R と h/r の値により、 λ の値にはほとんどよらないことが認められる。 μ が h/r に対して変化する割合は、 a/R の値が小なる時は大であるが、 a/R の値が増大するにつれて減少している。このことから、 $a/R \sim 0$ のような接岸の時には、 μ の値に対するローリングの影響は無視しうるものではないが、 $a/R = 1$ 程度の離心接岸の時には、ローリングの影響は平面回転の影響に比べてかなり小さなものになると認められる。

なお、特殊の場合としてローリングの影響を無視する場合には、(44)、(45) および (46) に $h/r = 0$ を代入することにより、それらの式からそれぞれ、

$$(t_m)_{h=0} = T/4$$

$$(\lambda_1)_{h=0} = 1$$

$$(\lambda_2)_{h=0} = \sqrt{1 + \frac{a^2}{R^2} \cdot \lambda}$$

したがって(52)から

$$(\mu)_{h=0} = \frac{1}{1 + \frac{a^2}{R^2}} \dots\dots\dots (53)$$

をうる。(53) は Pages の研究結果²⁾ と一致するものである。

§8. 数値計算例

基本諸数値をつぎのようなものとする：

$W = Mg = 58,000$ ton (大型タンカー)

$k = 3.60$ m, $h = 6$ m または 0 m,

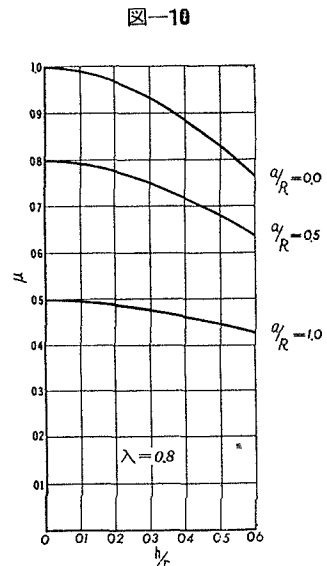
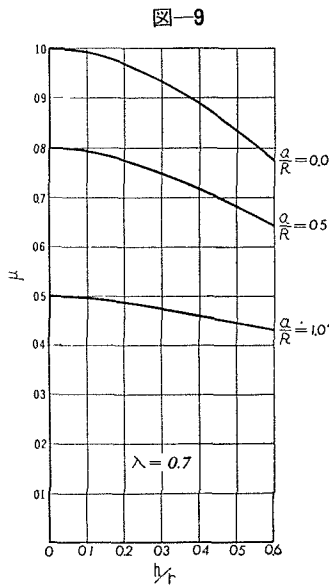
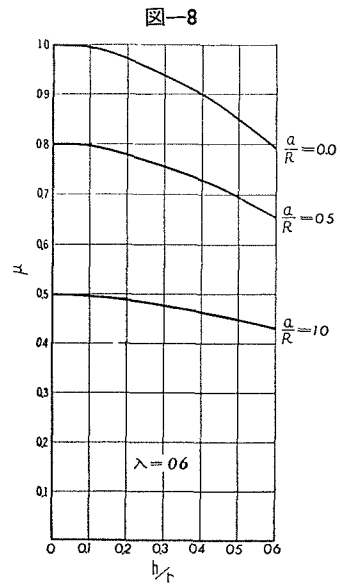
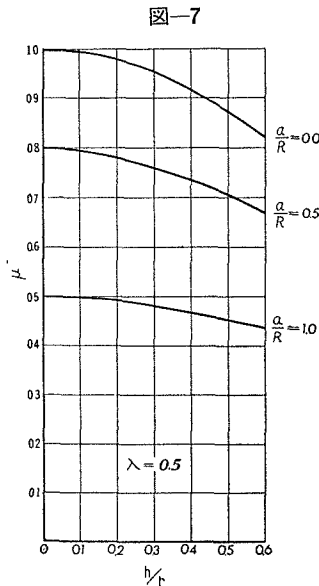


図-11

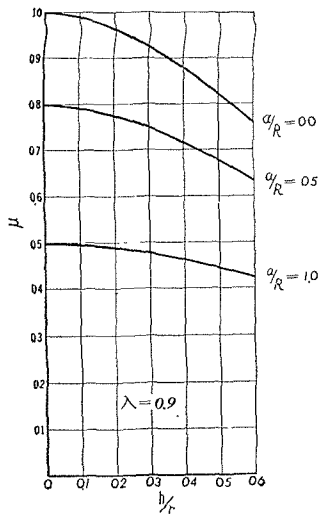


図-12

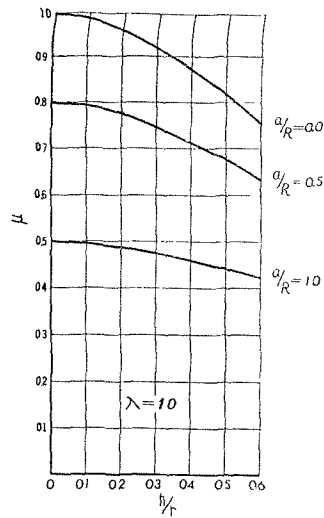


図-13

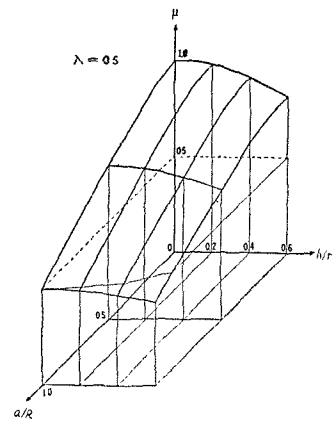


図-14

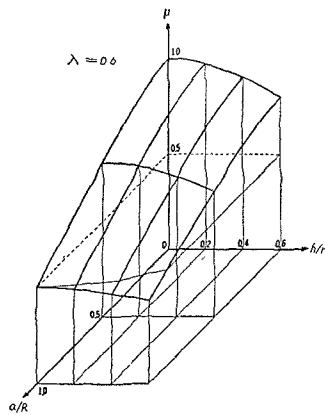


図-15

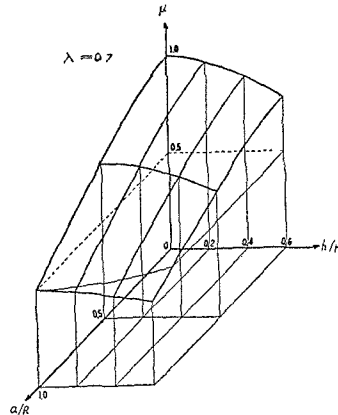
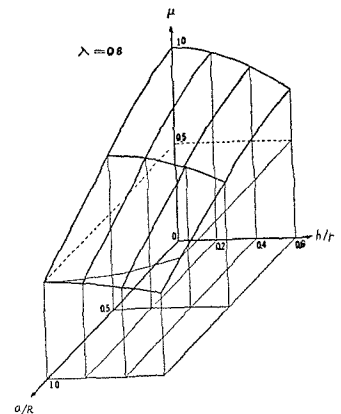


図-16



$R=70$ m, $r=10$ m,

$c=500$ ton/m ないし $2,000$ ton/m,

$a=60$ m (ほぼ $\frac{1}{4}$ 点衝撃), および 0 m

これらの数値によりつぎのように計算される:

$$\omega\varphi = \sqrt{\frac{Wk}{Mr^2}} = \frac{\sqrt{gk}}{r} = \frac{\sqrt{9.8 \times 3.60}}{10}$$

$$= 0.594 \text{ rad/s}$$

$$T\varphi = 2\pi/\omega\varphi = 2\pi/0.594 = 10.59 \text{ s}$$

$$a/R = 0.857 \text{ および } 0$$

$$h/r = 6/10 = 0.6 \text{ および } 0$$

そこで, いろいろな c の値に対して μ の値を図-13, 図-15, または図-18 により求めると表-1 のようになる。

図-17

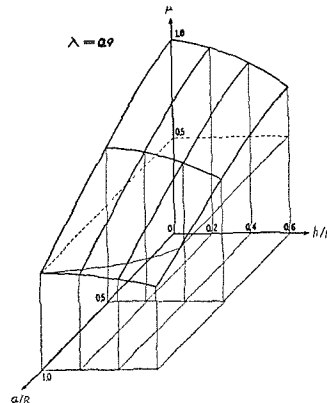


図-18

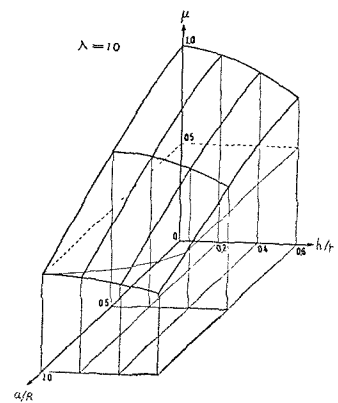


表 1

c (ton/m)	$\omega_y = \sqrt{c/M}$ (rad/s)	$T_y = 2\pi/\omega_y$ (s)	$\lambda = \omega_y/\omega\varphi$	μ					μ の読取りに使用するグラフ
				$a=0\text{m}$ ($a/R=0$)		$a=60\text{m}$ ($a/R=0.857$)		⑧/⑦	
				$h/r=0$	$h/r=0.6$	$h/r=0$	$h/r=0.6$		
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
500	0.294	21.4	0.495	1.000	0.819	0.595	0.510	0.872	図—13
1,000	0.416	15.1	0.699	1.000	0.770	0.588	0.493	0.836	図—15
2,000	0.588	10.7	0.990	1.000	0.752	0.580	0.478	0.824	図—18

欄⑥は $a=0$ のときにおけるローリングによる影響を示すものであり、また、欄⑧は $a=60\text{m}$ の場合におけるローリングの影響を示すものである。一方、欄⑦は $h=0$ のときの離心接岸の影響を示すもので、⑥または⑧と比べると、離心接岸の影響がローリングの影響より4割増し程度顕著なものであることが認められる。

§ 9. 結 論

本研究の範囲内で認められた主な事からはつぎのようである：

1) 船舶の接岸時における衝撃計算の基本式は③および③'で与えられる。これらの式は、繫船施設の変形、船舶の縦方向の回転、およびローリングを考慮して導かれたものであるが、船舶に作用すべき水中の摩擦抵抗は考慮していない。

2) この理論によれば、衝撃減少率は⑤により与えられる。同式は要するに、 λ 、 a/R および h/r の3個の無次元数だけで表わされており、多くのパラメーターを整理してこの3数だけで表示し得ている点が本論文の理論的取扱いの主要点である。

3) μ を、この3個の無次元数について図示したものが図-7 ないし図-12、または図-13 ないし図-18 である。(実際上の使用には図-13 ないし図-18 の方が便利である。)

4) $\lambda=0.5\sim 1$ の間では、 μ の値は λ の値にほとんど無関係である。したがって、 $\lambda=0.5$ に対するグラフ(図-13) だけを取上げて、これを λ の他の値の場合に使用しても実用上はほとんど差支えがない。

5) ローリングの影響は h/r の値が大にな程大きくなる。 h/r の値の範囲は $0\sim 0.6$ の程度と考えられるので、最もローリングの影響が顕著に現われる $h/r=0.6$ の場合についてみれば、 μ の値は $a=0$ の接岸方式のときに $0.75\sim 0.82$ の程度、また $a=0.86$ (ほぼ $1/4$ 点衝撃) のときにローリングによる減少比(表-1 ⑨に当るもの)は $0.82\sim 0.88$ の程度である。

6) このように、ローリングの影響は一般にも決して無視しうる程度のものではないが、平面形回転の影響よりは顕著なものではないことが認められる。

なお、本研究には考慮しなかつた諸要素、例えば船舶の水中部分に作用する水の抵抗、等が μ の値に与えるべき補正の研究等のため、この問題についての実験も目下実施中である。

本研究は、大成建設株式会社技術研究部友人白井増次郎氏との討議の間になされたものであつて、同氏より与えられた数多くの有益な御助言に対して深謝する。

また、本研究の数値計算に終始協力された中央大学学生成行惇、土屋一の両君の労にも厚く謝意を表する。

引 用 文 献

- 肥後春生：繫船岸の防衛工について、土木学会誌，昭和 33 年 10 月。
- 運輸省港湾局：港湾技術要報 No. 9 (第 18 回国際航路会議特集)，1954 に紹介されている Eggink の論文。
- 1) 中に紹介されている Pages の論文 (Annales des Ponts et Chaussées 1952)。
- 長沢 準：接岸時の船体損傷防止に関する研究 (第 1 報 接岸時の船体運動と接岸圧力)，造船協会論文集，第 106 号，1960。
- R. R. Minikin: Winds, waves and maritime structures, 1950 (Griffin, London)。
- H. F. Cornick: Dock and harbour engineering, Vol. 2, The design of harbours, 1959 (Griffin, London)。