

(昭和 34 年 11 月造船協会秋季講演会において講演)

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)

正員 長 沢 準*

Hull Strength on the Ship's Contact with the Quay-wall

By Hitoshi Nagasawa, Member

Abstract

This paper deals with the impact force which the ship receives from quay-wall when she is pulled into the pier. Several possible means of avoiding or decreasing the heavy shock of the ship's contact are then to be considered in order to avoid damages of the ship.

Theoretical calculation tells that even the low rotation opposite to the quaywall reduces the impact force greatly. Another way of reducing the impact force due to existence of fender is also discussed.

1. 緒 言

船が入港し岸壁へ接岸する際に、船体が岸壁と接触し、その衝撃力によつて船体が損傷する事故が多いが、この原因としては操船上の過失による場合もあるが、荒天時の場合などは接岸速度は比較的大きくなることを予想しなければならず、船体はこれに耐えるだけの強度を有していることが必要である。本論文はこの接岸による事故防止のため、接岸圧力が接岸時の船の運動、岸壁構造によつていかに変化するかを計算によつて求めたものである。

2. 接岸エネルギーの吸収

(1) 接岸時の船の運動

大型船が接岸する場合は、まず岸壁から 10~20 m 離れた位置に岸壁に平行して一旦停止し、それから数隻の曳船が船首をおして平行に近い状態で岸壁につける。したがつて気象が平穏であれば大体望みどおりの小さい速度で船をつけることができる。しかし常に平穏であることは望めず、最も危険な場合として強風が海側から岸壁に直角に吹きつける場合が考えられる。この状態では船は曳船によらず風力による漂流で接岸することになり速度の調節が不可能である。この最悪の場合の接岸速度 V は、風力を F 、水の抵抗を F_w とし船体の見掛けの質量を M_T とすれば、

$$F - F_w = M_T \cdot dV/dt \quad (1)$$

ここに見掛け質量は、船体の質量と附加質量の和と定義する。

岸壁において実際に接岸速度を測定した記録⁽¹⁾によると一般には中小貨客船以上の場合で 10 cm/sec 以下の速度で接岸しているようであつて、なにか事故のあつた場合には 20 cm/sec 以上に達していることが多い。

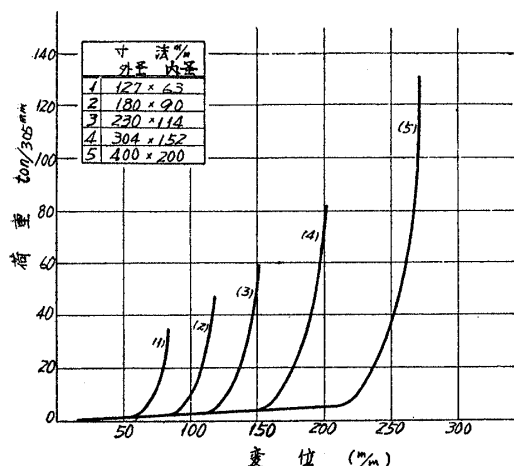
(2) 接岸エネルギーの吸収

船舶がある接近速度で岸壁に衝突する場合を考えると、船舶の運動エネルギーは船舶のローリングによつて一部吸収され、残りは縦方向の回転および船体と岸壁との変形によつて吸収される。船のローリングによるエネルギーの吸収は岸壁の反力が船の重心の高さより上下につれることによつて水平軸の周りに回転モーメントを生ずるもので、一般には極めて小さい。縦方向の回転は船の接近速度の方向が船体と岸壁との接触点と船の重心を結ぶ方向と一致しない限りおこるので、一般にはこの回転による吸収を考えねばならない。つぎに船体の接岸圧力による変形としては船全体の梁としての撓みによる変形と、岸壁との接触部分における局部的変形が考えられ

原稿受付 昭和 34 年 7 月 10 日

* 運輸技術研究所船舶構造部

るが、船体が梁として撓む変形は、船体自身の剛性に比して接岸圧力による曲げモーメントは極めて小さいのであまり問題にならない。局部的変形は岸壁側の剛性との関係によって変化し、岸壁の剛性が小であれば船体の変形



第1図 ゴム防舷材（中空円筒型）の荷重変位曲線

は小さくなる。一般には防舷材を有する岸壁では船体の剛性は岸壁の剛性よりは遙かに大きく、したがって船体の吸収するエネルギーは極めて小さくなる。接岸時の損傷を防止するためにはこのように繫船施設に接岸エネルギーを吸収できればよいわけである。

繫船施設には岸壁、棧橋、ドルフィン等の種類があり、さらにそれに使用する防舷材も多種多様であるが、繫船施設としての剛性は防舷材のパネ係数を k_f 、岸壁構造を k_s' とすると

$$1/k_s = 1/k_f + 1/k_s' \quad (2)$$

なるパネ係数 k_s であらわされ、また船体の変形も含めた接岸時のパネ係数は一般に

$$k = 1/\sum(1/k_i)$$

であらわすことができる。以上のべた岸壁の剛性についての一例を第1図に示した。

3. 接岸圧力に関する理論

(1) 厳密解

船体が岸壁にある速度で接近し、岸壁に接触した場合の船体の運動およびそれに伴う接岸圧力を求める。接岸によつて船体のうける圧力は比較的周期は長いので、いわゆる瞬間的な衝撃力としての圧力ではなく、静的圧力と考えてよい。第2図に示したように座標軸 X , Y 軸を岸壁に直角および平行にとり原点を船体が岸壁に接触した瞬間の船体の重心にとる。また ξ , η 軸を船体の慣性主軸方向にとる。

記号

M : 船体の質量

$M_{\Delta\xi}, M_{\Delta\eta}, M_{\Delta\zeta}$: ξ , η , ζ 方向の運動に対する船体の附加質量

$M_{V\xi}, M_{V\eta}, M_{V\zeta}$: ξ , η , ζ 方向の運動に対する船体の見掛け質量

I_ξ, I_η, I_ζ : ξ , η , ζ 軸の周りの船体の慣性モーメント

$I_{\Delta\xi}, I_{\Delta\eta}, I_{\Delta\zeta}$: ξ , η , ζ 軸の周りの船体の附加慣性モーメント

l : 接岸点を C とすると OC の長さ

θ, θ', ϕ : OC と OY 軸, $O\xi$ と OY 軸および船の重心の進行方向と $O\xi$ 軸のなす角度

θ_a : 接岸した瞬間からの船体の ζ 軸を中心とする回転角

v_ξ, v_η, v_ζ : ξ , η , ζ 方向の船の速度成分

p, q, w : ξ , η , ζ 軸を中心とする船体の角速度

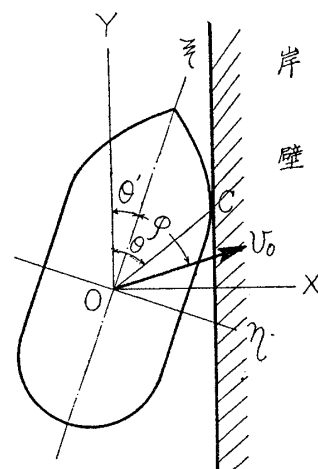
k, k_ξ, k_η : x, ξ, η 方向変位に対する接岸時のパネ係数

流体中で船体が運動する場合は真空中における運動のように重心の直進運動と重心の周りの回転として考えることはできないが、真空中のこの重心に相当する点は、船体の重心と見掛け質量の重心を ξ , η 方向にそれぞれ船体質量とその方向の附加質量の比に分つ見掛け重心として与えられる。しかしここでは近似的にこの点を船体の重心と見なして計算を行なつた。

この重心に関して船体自身の運動エネルギー T_1 は

$$2T_1 = M(v_\xi^2 + v_\eta^2 + v_\zeta^2) + I_\xi p^2 + I_\eta q^2 + I_\zeta w^2 \quad (3)$$

また附加する流体の運動エネルギー T_2 は



第2図 座標軸

$$2 T_2 = M_{A\xi} \cdot v_\xi^2 + M_{A\eta} \cdot v_\eta^2 + M_{A\zeta} \cdot v_\zeta^2 + I_{A\xi} \cdot p^2 + I_{A\eta} \cdot q^2 + I_{A\zeta} \cdot \omega^2 \quad (4)$$

この2つを加えて全系の運動エネルギーは

$$T = T_1 + T_2 \quad (5)$$

さて、流体中で運動する物体の運動方程式は次式で与えられる。

$$\begin{cases} d/dt \cdot \partial T / \partial v_\xi = \omega \cdot \partial T / \partial v_\eta - q \cdot \partial T / \partial v_\zeta + X \\ d/dt \cdot \partial T / \partial v_\eta = p \cdot \partial T / \partial v_\zeta - \omega \cdot \partial T / \partial v_\xi + Y \\ d/dt \cdot \partial T / \partial v_\zeta = q \cdot \partial T / \partial v_\xi - p \cdot \partial T / \partial v_\eta + Z \\ d/dt \cdot \partial T / \partial p = v_\zeta \cdot \partial T / \partial v_\eta - v_\eta \cdot \partial T / \partial v_\zeta + \omega \cdot \partial T / \partial q - q \cdot \partial T / \partial \omega + L \\ d/dt \cdot \partial T / \partial q = v_\xi \cdot \partial T / \partial v_\zeta - v_\zeta \cdot \partial T / \partial v_\xi + p \cdot \partial T / \partial \omega - \omega \cdot \partial T / \partial p + M \\ d/dt \cdot \partial T / \partial \omega = v_\eta \cdot \partial T / \partial v_\xi - v_\xi \cdot \partial T / \partial v_\eta + q \cdot \partial T / \partial p - p \cdot \partial T / \partial q + N \end{cases} \quad (6)$$

ここに X, Y, Z および L, M, N は ξ, η, ζ 方向の船体のうける圧力成分および ξ, η, ζ 軸の周りの圧力モーメントである。

接岸の場合は回転運動はほとんど一軸のみに限られ、また ζ 方向の運動は無視できるから (6) 式の第1, 第2, および第6式以外は0となる。したがって (3), (4), (5) の運動エネルギーを (6) 式に代入し、 $v_\xi = d\xi/dt$, $v_\eta = d\eta/dt$ および $\omega = d\theta_a/dt$ なる関係を用いると運動方程式は次のようになる。 $I_\xi + I_{A\xi} = I_V$ として

$$\begin{cases} M_{V\xi} \cdot d^2\xi/dt^2 = M_{V\eta} \cdot d\eta/dt \cdot d\theta_a/dt + X \\ M_{V\eta} \cdot d^2\eta/dt^2 = -M_{V\xi} \cdot d\xi/dt \cdot d\theta_a/dt + Y \\ I_V \cdot d^2\theta_a/dt^2 = (M_{V\xi} - M_{V\eta}) \cdot d\xi/dt \cdot d\eta/dt + N \end{cases} \quad (7)$$

接岸時に船体に加わる圧力は岸壁側の反力と、流体の圧力の和となり、 ξ, η 方向のこの圧力成分をそれぞれ P_ξ, P_η および X_w, Y_w, ζ 軸の周りの流体の圧力のモーメントを N_w とすれば、

$$\begin{cases} X = -P_\xi + X_w \\ Y = -P_\eta + Y_w \\ N = -\{P_\eta l \cos(\theta - \theta' + \theta_a) - P_\xi l \sin(\theta - \theta' + \theta_a)\} + N_w \end{cases} \quad (8)$$

ここで簡単な場合として接岸による岸壁の反力が変位に比例する場合を仮定すると P_ξ, P_η は

$$\begin{cases} P_\xi = k_\xi \{\xi + l\theta_a \sin(\theta - \theta' + \theta_a)\} \\ P_\eta = k_\eta \{\eta + l\theta_a \cos(\theta - \theta' + \theta_a)\} \end{cases} \quad (9)$$

また、接岸時には船体の速力は非常に小さいから岸壁の反力に比して流体の圧力は一般には無視しても差支えない程度と考えられる。したがってこれを省略し、 $\theta - \theta' + \theta_a \approx \theta - \theta'$ と近似すると (8), (9) 式を (7) 式に代入し次式がえられる。

$$\begin{cases} M_{V\xi} \cdot d^2\xi/dt^2 = M_{V\eta} \cdot d\eta/dt \cdot d\theta_a/dt - k_\xi \xi - k_\xi l \sin(\theta - \theta') \theta_a \\ M_{V\eta} \cdot d^2\eta/dt^2 = -M_{V\xi} \cdot d\xi/dt \cdot d\theta_a/dt - k_\eta \eta - k_\eta l \cos(\theta - \theta') \theta_a \\ I_V \cdot d^2\theta_a/dt^2 = (M_{V\xi} - M_{V\eta}) \cdot d\xi/dt \cdot d\eta/dt - k_\eta \eta l \cos(\theta - \theta') + k_\xi \xi l \sin(\theta - \theta') \\ \quad - k_\eta l^2 \cos^2(\theta - \theta') \theta_a + k_\xi l^2 \sin^2(\theta - \theta') \theta_a \end{cases} \quad (10)$$

上式を解けば接岸時の船体の運動を求めることができる。

v_0, w_0 なる接岸速度および回転速度で岸壁に接触したときの慣性主軸方向の変位および回転角を ξ, η および θ_a とすれば、岸壁と船体との接触点 C における船体の X 方向変位は

$$x = l \cos \theta \cdot \theta_a + \xi \sin \theta' + \eta \cos \theta' \quad (11)$$

となりこれから接岸圧力 P が求まる。

$$P = k(l \cos \theta \cdot \theta_a + \xi \sin \theta' + \eta \cos \theta') \quad (12)$$

(10) 式は非線型の連立微分方程式であつて、一般的に解くことは難しいので、一階の連立微分方程式におきかえて Kutta の Simpson 則を用いて数値解法を行なうと次章の第6図の如き曲線となる。

(2) 近 似 解

(1) においては船体の運動によつて附加する流体の見掛け質量が回転速度によつて変化することを考慮して計算したが、この方法で岸壁の剛性が変化する場合について接岸圧力を求めることは複雑になるので、ここで船が任意の方向に運動する場合の見掛け質量を近似的に (13) 式の如く船体の慣性主軸方向の見掛け質量から定まると仮定して計算を行なう。すなわち、 $M_{V\phi}$ を船の進行方向がその慣性主軸と ϕ なる角度の場合の船体の見掛け質量とすると

$$M_{V\phi} = M_{V\phi} \cos^2 \phi + M_{V\eta} \sin^2 \phi \quad (13)$$

接岸による船体の運動方程式は、(1)の場合と同様に接岸により船体のうける反力が変位に比例するものと仮定すると、 $\theta \gg \theta_a$ として $\cos(\theta + \theta_a) \approx \cos \theta$ と近似して次の運動方程式が求まる。

$$\begin{cases} d^2x/dt^2 + k/M_{V\phi} \cdot x + kl \cos \theta / M_{V\phi} \cdot \theta_a = 0 \\ kl \cos \theta / I_V \cdot x + d^2\theta_a/dt^2 + kl^2 \cos^2 \theta / I_V \cdot \theta_a = 0 \end{cases} \quad (14)$$

上式を $t=0$ における運動の初期条件 $x=0$, $\theta_a=0$, $v=v_0$ および $\omega=\omega_0$ を与えて解けば変位および回転角が求まる。

$$\begin{cases} x = 1/(I_V + l^2 \cos^2 \theta \cdot M_{V\phi}) \cdot \{ -(\omega_0 I_V - l \cos \theta \cdot M_{V\phi} v_0) l \cos \theta t + (v_0 + l \cos \theta \cdot \omega_0) I_V / \sqrt{K} \cdot \sin \sqrt{K} t \\ \theta_a = 1/(I_V + l^2 \cos^2 \theta \cdot M_{V\phi}) \cdot \{ (\omega_0 I_V - l \cos \theta \cdot M_{V\phi} v_0) t + (v_0 + l \cos \theta \cdot \omega_0) l \cos \theta \cdot M_{V\phi} / \sqrt{K} \cdot \sin \sqrt{K} t \end{cases} \quad (15)$$

ここに

$$K = k(1/M_{V\phi} + l^2 \cos^2 \theta / I_V) \quad (16)$$

これから接岸圧力 P を求めることができる。

$$P = k(v_0 + l \cos \theta \cdot \omega_0) / \sqrt{K} \cdot \sin \sqrt{K} t \quad (17)$$

したがって最大接岸圧力を P_M とすると

$$P_M = k(v_0 + l \cos \theta \cdot \omega_0) / \sqrt{K} \quad (18)$$

上式についての数値計算例を前節の例とともに次章に示した。計算結果によると近似解の方が接岸圧力はやや小さい傾向である。

特別の場合として船体が岸壁に平行で回転を併わずに接岸する場合を考えると、 $\omega_0=0$ となり、 $\phi=90^\circ$ であるから $M_{V\phi}=M_{V\eta}$ となり、最大接岸圧力は

$$P_M = \alpha v_0 \sqrt{kM} \quad \text{ここに } \alpha \equiv \sqrt{M_{V\phi}/M} \quad (19)$$

したがってこの場合は最大接岸圧力は接岸速度および船体の質量、岸壁のバネ係数の平方根に比例して増加する。

以上は何れも岸壁のバネ係数が変位に比例すると仮定した場合であるが、実際は必ずしもそうでない場合も多いと考えられるので、次章でこのバネ係数が変化する場合の計算を行なった。

(3) 岸壁の剛性が変化する場合

一般に岸壁構造に防舷材があるような場合、接岸速度がある程度大きくなると防舷材の変位が大きくなり、最初主として防舷材の変位によつて吸収された接岸エネルギーは防舷材のバネ係数が急激に増大するので、防舷材のみでなく船体あるいは岸壁構造の変形による吸収が大きくなる。

今、この岸壁のバネ係数を第3図のごとく近似的に2つの部分にわけ、それぞれバネ係数を一定として接岸圧力を計算する。接岸方法は簡単な場合として $\omega_0=0$ で $\theta'=0$ 、すなわち船体が回転を伴わずに岸壁に平行に接岸する場合について計算し、岸壁のバネ係数が一定の場合との比較を行なった。

第3図で (a), (b) の範囲で岸壁のバネ係数をそれぞれ k , k' とすると船体の運動方程式は

$$\begin{cases} M_{V\eta} \cdot d^2x/dt^2 = -kx & \text{for } 0 < x < x_1 \\ M_{V\eta} \cdot d^2x/dt^2 = -kx_1 - k'(x - x_1) & \text{" } x_1 < x \end{cases} \quad (20)$$

第3図 変位と反力との関係 上式の解は $0 < x < x_1$ に対しては前節と同じである。 $x_1 < x$ に対しては $t=t_1$ における運動の条件 $x=x_1$ および $v=v_0 \cos \sqrt{K} t_1$ を与えて解くと

$$\begin{cases} x = v_0 / \sqrt{K} \cdot \sin \sqrt{K} t & \text{for } 0 < x < x_1 \\ x = A \cos \sqrt{K'} t + B \sin \sqrt{K'} t + (1 - k/k') x_1 & \text{" } x_1 < x \end{cases} \quad (21)$$

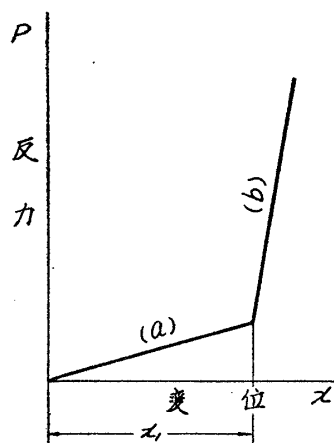
ここに

$$A \equiv v_0 / K' \cdot (\sqrt{K} \sin \sqrt{K} t_1 \cos \sqrt{K'} t_1 - \sqrt{K'} \cos \sqrt{K} t_1 \sin \sqrt{K'} t_1)$$

$$B \equiv v_0 / K' \cdot (\sqrt{K} \sin \sqrt{K} t_1 \sin \sqrt{K'} t_1 + \sqrt{K'} \cos \sqrt{K} t_1 \cos \sqrt{K'} t_1)$$

$$K' \equiv k' / M_{V\eta}$$

(21) 式を k が一定の場合と比較すると第4図のごとくバネ係数の増加に伴つて変位が減少する。つぎに変位



が最大になる時間を $t = T_1$ とすれば

$$\sin \sqrt{K'} T_1 = B / \sqrt{A^2 + B^2} \quad (22)$$

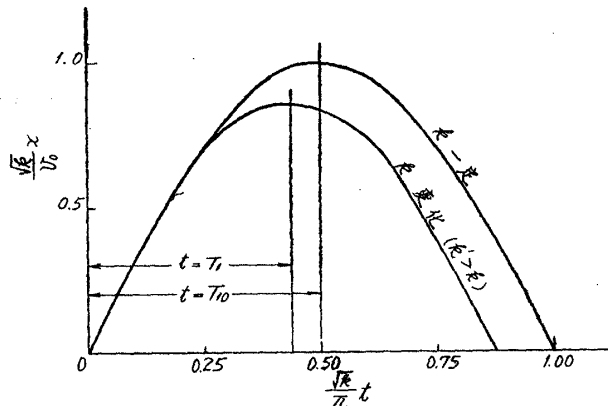
このときに接岸圧力は最大となり

$$P_M = \alpha v_0 \sqrt{k M} \sqrt{\sin^2 \sqrt{K'} t_1 + k'/k \cdot \cos^2 \sqrt{K'} t_1} \quad (23)$$

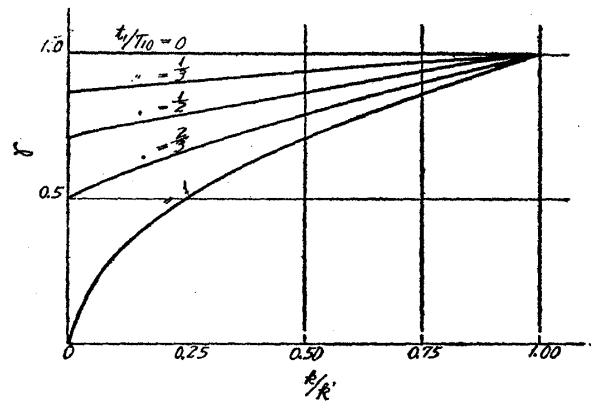
あるいは

$$= \alpha v_0 \sqrt{k' M} \sqrt{k/k' \cdot \sin^2 \sqrt{K'} t_1 + \cos^2 \sqrt{K'} t_1} \quad (24)$$

この最大接岸圧力を k 一定の場合と比較すると k' による接岸力の増加は (23) 式の右辺の附加係数で与えられ、逆に接岸時のバネ係数が k' である岸壁に、バネ係数 k の防舷材を設けたと考えると、防舷材による接岸圧



第4図 k が一定の場合と変化する場合の変位の比較



第5図 防舷材による接岸圧力減少率

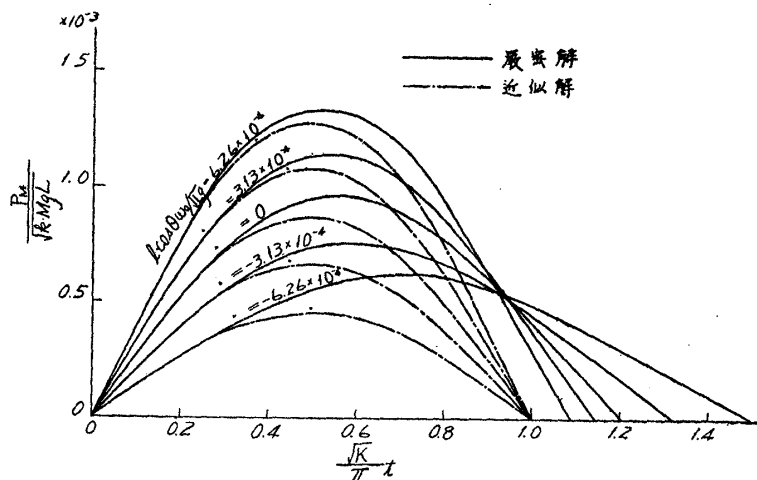
力の減少が (24) 式から求まる。今この減少率を γ とすれば

$$\gamma = \sqrt{k/k' \cdot \sin^2 \sqrt{K'} t_1 + \cos^2 \sqrt{K'} t_1} \quad (25)$$

これを計算すると第5図のごとくなる。すなわち接岸圧力の減少率は k/k' および t_1 によつて変化し、これを知れば減少率が計算できる。第5図に示した T_{10} は k 一定のときの接岸の半周期とする。

4. 数 値 計 算

接岸により船体のけうける反力が変位に比例する場合についての接岸圧力は前節の(12)および(17)式を用いて求められる。これらの式を用い一例として長さ 132.10m, 幅 18.20m, 深さ 11.72m および方形肥瘠係数 0.741 なる実船について接岸圧力の計算を行なつた。 $M_{V\theta}$, $M_{V\eta}$ については同船の 1/22 寸法の金属製相似模



第6A図 数値計算例, $\phi = 75^\circ$, $\theta' = 15^\circ$: $v_0 / \sqrt{L g} = 1.3 \times 10^{-3}$

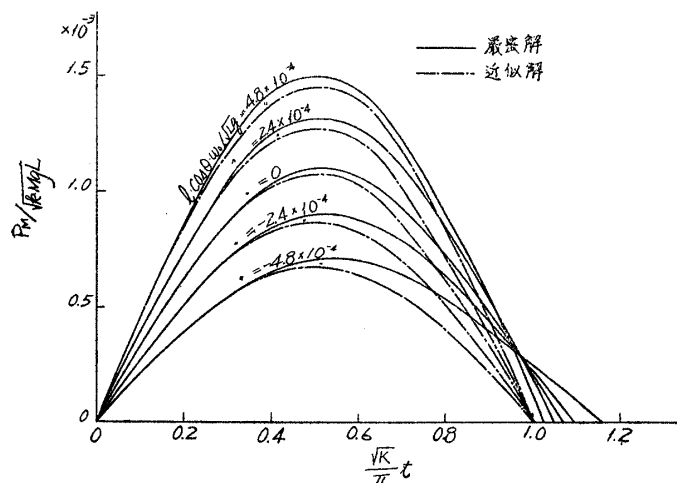
型船を使用して水槽内での模型実験から求めた資料を用い、 I_V については元良氏の実験結果⁽³⁾を用いたもので、これらの実験値は

$$M_{V\theta}/M = 1.08, \quad M_{V\eta}/M = 2.07,$$

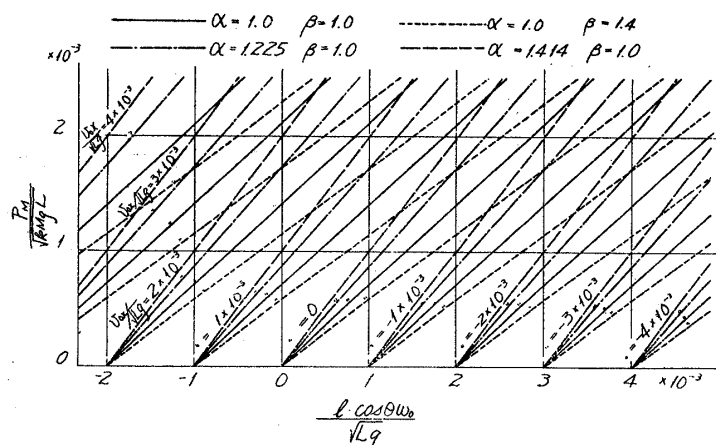
$$I_V/I = 1.66$$

である。第6図はこの値を用い $\phi = 75^\circ$ で $\theta' = 15^\circ$ および $\phi = 60^\circ$ で $\theta' = 30^\circ$ の2つの場合について接岸圧力を計算したものである。同図で L は船の長さ、 g は重力の加速度である。また縦軸は接岸圧力を無次元化して表現したものである。この両方の値を比較すると近似解の方がや

や小さい傾向であるが、大体においてかなりよく一致している。第6C図はこの計算値と模型実験の結果の比較である。この例から実験値は厳密解に近いが、しかし複雑な剛性の岸壁には近似解を用いて近似してもかなり近

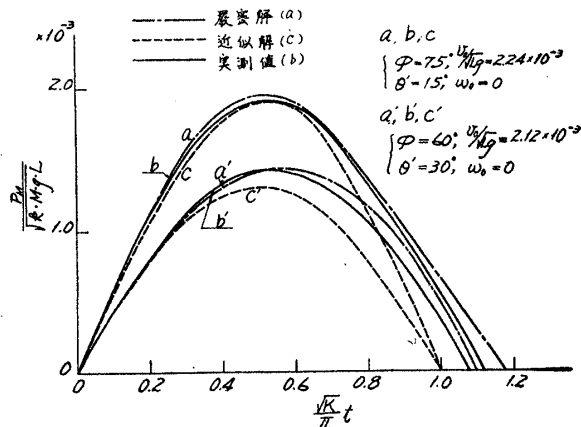


第6b図 数値計算例, $\varphi=60^\circ, \theta'=30^\circ : v_0/\sqrt{Lg}=1.3 \times 10^{-3}$



第7図 v_{0x}, ω_0 と最大接岸圧力との関係

$$P_M / \sqrt{k M g L} = \sqrt{\alpha^2 / (1 + \beta^2)} \cdot (v_0 + l \cos \theta \cdot \omega_0) / \sqrt{L g}$$



第6c図 計算値と実測値との比較

い値をうることがわかる。つぎに任意の接近速度と回転運動で接岸する場合の最大接岸圧力を(18)式を用いて計算した結果を第7図に示した。同図の v_{0x} は接岸速度の x 方向成分で $v_{0x} = v_0 \sin(\varphi + \theta')$ であり、運動の相似性を成立たせるフルード数を一定にした場合の接岸圧力を無次元化して表わした。また $\alpha \equiv \sqrt{M v_\phi / M}$, $\beta \equiv l \cdot \cos \theta / r$ および $r \equiv \sqrt{I v / M v_\phi}$ とする。この場合 (18) 式は

$$(26)$$

5. 結 語

本論文においては、船体が接岸時に岸壁と衝突する場合の船体のうける接岸圧力を求める計算式を誘導し、この計算式にもとづいて接岸圧力が接岸時船舶の接近速度、岸壁の剛性および接岸角度等によつていかに変化するかを検討した。接岸圧力は船体の岸壁への接近速度に伴つて増加するが、上の計算式により適当な回転運動を伴えば接岸圧力を非常に小さくすることができる。また岸壁に防舷材を設けた場合の効果を計算によつて求めた。

なお本論文で求めた計算式を実験と比較するため、引続き模型船を用いて系統的模型実験を行なつて岸壁の剛性の影響、水深および側壁の影響等について研究を行ない、さらにこの接岸圧力に対する船体の強度についての研究を行なう予定である。

終りにのぞみ、本研究は日本造船協会第23部会の研究の一部である。委員会において種々御討論を頂いた吉識教授、寺沢教授、山本助教授ならびに委員各位、直接御指導を受けた秋田部長にお礼申し上げるとともに、計算を手伝つて頂いた運研の谷、東両君に感謝する次第である。

参 考 文 献

1. “接岸衝撃実験について” 日本造船研究協会 23 部会資料
2. Lamb : “Hydrodynamics”
3. 元良誠三 : “船体運動に対する附加質量及び附加慣性モーメントについて” 造船協会論文集 105 号