

岸壁前面係留船の船体運動へのストリップ法の拡張

久保雅義*・斎藤勝彦**・榎原繁樹***

1. 緒 言

東京湾や大阪湾等には台風時多数の船舶が避泊しているが、最近では数々の沖合人工島構想が立案されている。このため今後の避泊水面は減少することが予想されるので、安全な港内避泊の実現に向けての検討が必要となっている。また港湾計画において、岸壁係留船の運動を計算しておくことは、安全な係留および安全な荷役のために不可欠なものであると考えられる。港内係留船の船体運動は岸壁前面での三次元運動であり、岸壁の影響を考慮した三次元動揺解析が必要である。しかしながら、岸壁前面係留船の三次元任意形状船体の船体運動は取り扱いが複雑になり、必ずしも実用的ではない。一方、ストリップ法¹⁾は三次元の船体運動解析においても取り扱いが簡便で実用的であるとされているが、これまで岸壁がある場合には流体力の評価がなされていなかったため、無限水深、岸壁なしの状況における流体力係数を用いた近似的な取り扱いが行なわれているのが実情であると考えられる。そこで本研究ではストリップ法を岸壁がある場合にも適用できるように理論を拡張し、水理実験により理論の検証を行っている。

2. 理論解析

2.1 運動方程式

計算および実験は図-1に示すように鉛直岸壁前面に弾性索(長さ 18.5 cm, バネ定数 31.0 gf/cm)で対称係留された模型船を用いている。船体がないときの速度ポテンシャル Φ は次式で与えられる。

$$\Phi = \frac{g\zeta_0}{\sigma} [e^{i(k_0 x \cos \omega + k_0 y \sin \omega)} + K_r e^{i[-k_0(x-2xb) \cos \omega + k_0 y \sin \omega]}] \cdot \frac{\cosh k_0(z+h)}{\cosh k_0 h} e^{i\sigma t} \quad (1)$$

ここに、 ω は波の入射角、 ζ_0 は入射波振幅、 σ は角周波数、 xb は岸壁の x 座標、 K_r は岸壁の反射率、 g は重

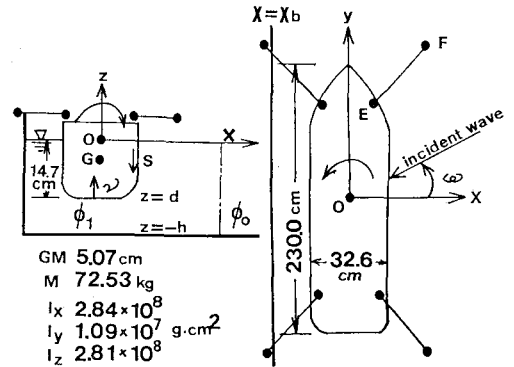


図-1 座標系の設定および模型船の諸元

力加速度を表し、 k_0 は次式で与えられる波数である。

$$\sigma^2 = gk_0 \tanh k_0 h \quad (2)$$

ここに、 h は水深である。

船体の運動方程式は、ある断面に作用する j モードの Radiation 力(モーメント: 以下同様)を $P_j^{(R)}$ 、波浪強制力を $P_j^{(EX)}$ 、静的復原力を $P_j^{(S)}$ とし、船体に作用する j モードの係留力を $F_j^{(MF)}$ とすると、次式で表される。

$$\begin{aligned} M\ddot{X}_1 &= \int_L \{P_1^{(R)} + P_1^{(EX)}\} dy + F_1^{(MF)} \\ 1.1M\ddot{X}_2 &= \int_L P_2^{(EX)} dy + F_2^{(MF)} \\ M\ddot{X}_3 &= \int_L \{P_3^{(R)} + P_3^{(EX)} + P_3^{(S)}\} dy + F_3^{(MF)} \\ I_x\ddot{X}_4 &= \int_L y \{P_3^{(R)} + P_3^{(EX)} + P_3^{(S)}\} dy + F_4^{(MF)} \\ I_y\ddot{X}_5 &= \int_L \{P_5^{(R)} + P_5^{(EX)} + P_5^{(S)}\} dy + F_5^{(MF)} \\ I_z\ddot{X}_6 &= - \int_L y \{P_1^{(R)} + P_1^{(EX)}\} dy + F_6^{(MF)} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $\ddot{\cdot}$ は時間に関する二階微分、添字 1~6 はそれぞれ Sway, Surge, Heave, Pitch, Roll, Yaw を意味し、 M は船体の質量、 I_x , I_y , I_z はそれぞれ x , y , z 軸まわりの慣性モーメントを示し、 X_j は j モードの運

* 正会員 工博 神戸商船大学助教授 船貨輸送研究施設

** 正会員 商船修 神戸商船大学助手 船貨輸送研究施設

*** 神戸商船大学院生商船学研究科

動を表し、それぞれの複素振幅を ξ^* , η^* , ζ^* , ω_1^* , ω_2^* , ω_3^* とすると次式の関係をもつ。

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \xi^* e^{i\omega t}, & X_2 &= \eta^* e^{i\omega t}, & X_3 - \bar{z}_0 &= \zeta^* e^{i\omega t} \\ X_4 &= \omega_1^* e^{i\omega t}, & X_5 &= \omega_2^* e^{i\omega t}, & X_6 &= \omega_3^* e^{i\omega t} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\bar{z}_0$ は重心の高さ (−6.48 cm) である。

2.2 Radiation 力

$P_{jk}^{(R)}$ を k モードによる j モードの断面に作用する Radiation 力とすると、

$$P_{jk}^{(R)} = -M_{jk}\ddot{X}_k - N_{jk}\dot{X}_k \quad (j, k=1, 3, 5) \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 M_{jk} は断面における付加質量または付加慣性モーメント、 N_{jk} は減衰係数であり、両者を総称して流体力係数と呼ばれている。本来、流体力係数は浮体の形状、水深、岸壁の形状により固有のものであり、それぞれの条件の下で算定されなければならない。そこで本論文においては、井島らによるグリーン公式を用いた積分方程式法³⁾によって岸壁前面任意形状断面の流体力係数を求めている³⁾。これより断面に作用する Radiation 力は次式により求められる。

$$P_{jk}^{(R)} = \sum_k P_{jk}^{(R)} \quad (j, k=1, 3, 5) \dots\dots\dots (6)$$

式 (3)、式 (6) により Radiation 力は Surge を除いたすべてのモードで連成することがわかる。

2.3 波浪強制力

a) 従来のストリップ法による方法¹⁾

従来のストリップ法では波浪強制力を Froude Kriloff 力と Diffraction 力の和として次式のように与える。

$$P_j^{(EX)} = P_j^{(FK)} + \sum_{k=1,3} P_{jk}^{(D)} \quad (j=1, 3, 5) \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $P_j^{(FK)}$ は j 方向に働く Froude Kriloff 力、 $P_{jk}^{(D)}$ は k モードの流体運動によって j モードに働く Diffraction 力である。Froude Kriloff 力は、式 (1) のポテンシャルを用いて次式で与えられる。

$$P_j^{(FK)} = \left\{ \begin{aligned} & -i\sigma\rho \int_{SH} \Phi \cos(\nu, j) dS : j=1, 3 \\ & -i\sigma\rho \int_{SH} \Phi \{-x \cos(\nu, 3) \\ & + (z - \bar{z}_0) \cos(\nu, 1) : j=5 \end{aligned} \right. \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $\cos(\nu, 1)$, $\cos(\nu, 3)$ はそれぞれ x 軸、 z 軸方向の方向余弦、 ρ は流体の密度、添字 SH は船体断面の境界を表す。つぎに、Diffraction 力は船体がある速度 (船体断面と水粒子との相対速度: 以下等価相対速度と称す) をもって運動しているときの Radiation 力として求め、次式のように表される。

$$P_{jk}^{(D)} = -M_{jk}\dot{\bar{v}}_k - N_{jk}\bar{v}_k : j=1, 3, 5, k=1, 3 \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $\bar{v}_k$, $\dot{\bar{v}}_k$ は等価相対速度および加速度で、 $\bar{v}_1$ は

$(x, z) = (0, d/2)$, $\bar{v}_3$ は $(x, z) = (0, A(y)/B(y))$ で代表される流体の速度の符号が反転したものである。ここに、 d は喫水、 $A(y)$ は断面積、 $B(y)$ は断面の幅である。

b) 新たに提案する波浪強制力

船体に作用する波のうち断面成分が船体断面に作用すると仮定し、波浪強制力を求める際速度ポテンシャル Φ_0 を次式のようにする。

$$\Phi_0 = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \phi_0 e^{i\omega t} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、

$$\phi_0 = (e^{ik_0 \cos \omega x} + K_r e^{-ik_0 \cos \omega x}) \cdot \frac{\cosh k_0(h+z)}{\cosh k_0 h} \dots\dots\dots (11)$$

式 (10) を船体断面から十分離れた領域での速度ポテンシャルとして、流体力係数を求めるのと同様な方法³⁾を用いる。そこで、 j モードの波浪強制力 $P_j^{(EX)}$ は次式により表す。

$$P_j^{(EX)} = \left\{ \begin{aligned} & -i\rho g \zeta_0 e^{ik_0 y \sin \omega} \cdot \int_{SH} \phi_1 \\ & \cdot \cos(\nu, j) dS \cdot e^{i\omega t} : j=1, 3 \\ & -i\rho g \zeta_0 e^{ik_0 y \sin \omega} \cdot \int_{SH} \phi_1 \\ & \cdot \{-x \cos(\nu, 3) + (z - \bar{z}_0) \\ & \cdot \cos(\nu, 1) dS \} e^{i\omega t} : j=5 \end{aligned} \right. \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 ϕ_1 は流体領域中の船体断面上の無次元速度ポテンシャルである。以上のようにして、この方法では波浪強制力と流体力係数は計算上並行して求められる。

c) Surge に作用する力

ストリップ法では Surge 方向の力 $P_1^{(EX)}$ を求めることができないので、船体のある断面に作用する水圧の前後方向の成分を波浪強制力として次式で表す⁴⁾。

$$P_1^{(EX)} = \zeta_0 \gamma \rho g k_0 \sin \omega (1 + K_r e^{2ik_0 x b \cos \omega}) \cdot A(y) \cdot e^{ik_0 \sin \omega y} \cdot e^{i\omega t} \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 γ は有効波傾斜係数である。

3. 水理実験による検証

3.1 実験装置および実験方法

上述の理論解析の検証のため、係留船の船体運動の実験を神戸商船大学の水槽 (長さ 60 m, 幅 6 m, 深さ 2 m) で行った。実験中の水深は 21.1 cm とし、船体は鉛直壁より 8 cm 離して係留した。波が斜めより入射する場合は、岸壁からの反射波が水槽側壁に反射して再び係留船に影響を及ぼさないように、図-2 に示すような消波工を施した配置とした。ここで、水槽側壁の影響の度合を確認するため、入射角 60° で矩形浮体を図-2 のように係留した場合の実験値と、大阪大学の水槽 (長さ 30 m, 幅 20 m, 深さ 0.6 m) で行った実験値⁵⁾を比較し

た結果の一例が図-3である。図は Pitch の例であるが、他の運動モードも同様の傾向を示した。これより、今回使用した水槽による実験値は平面水槽の実験値よりもばらつきがあることがわかった。

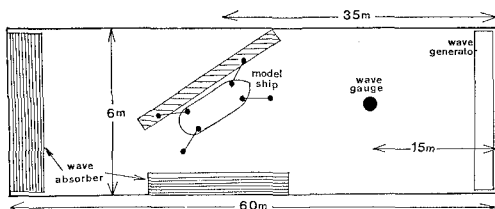


図-2 斜め波の場合の実験状況

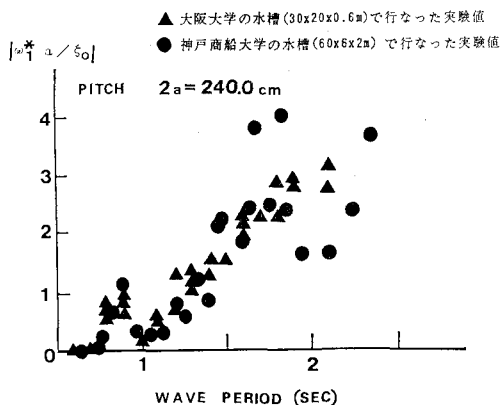


図-3 係留船の運動におよぼす水槽側壁の影響

3.2 計算の方法

数値計算において、船体は図-4のように21断面を考える。また流体力係数や波浪強制力を算出する際の断面

の分割は最短入射波長の 1/10 程度にとり、船体断面での分割点は・印で示すようになるべく断面を忠実に再現できるようにした。また船体長軸方向の積分は、各断面で得られた値をシンプソン計算⁶⁾することにより求めた。

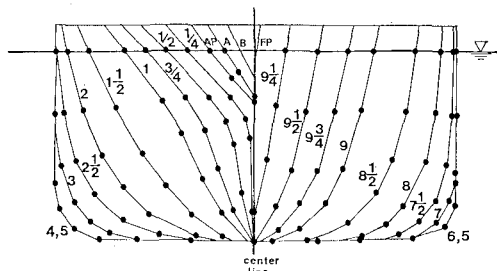


図-4 計算に使用する船体断面と分割点

3.3 正横より波を受ける場合

正横 ($\omega=0$) より波を受ける場合の各モードの無次元運動振幅の実験値および計算値を図-5に示す。横波の場合に卓越する Sway, Heave, Roll について新たに提案した波浪強制力を用いた方がより実験値と合っている。Pitch はいずれの方法によっても精度よく運動を再現できていないが固有周期 0.8 sec にピークが存在することを示しており、運動そのものが小さいことを考慮すれば実用上問題ないと思われる。Surge については外力の評価が近似的であるため計算では運動が再現されないが、Pitch と同様に運動そのものが小さく実用上問題ないと思われる。Yaw については Pitch との連成が大きく見積られすぎているようである。

3.4 斜めより波を受ける場合

入射角 30° の場合を図-6、入射角 60° の場合を図-

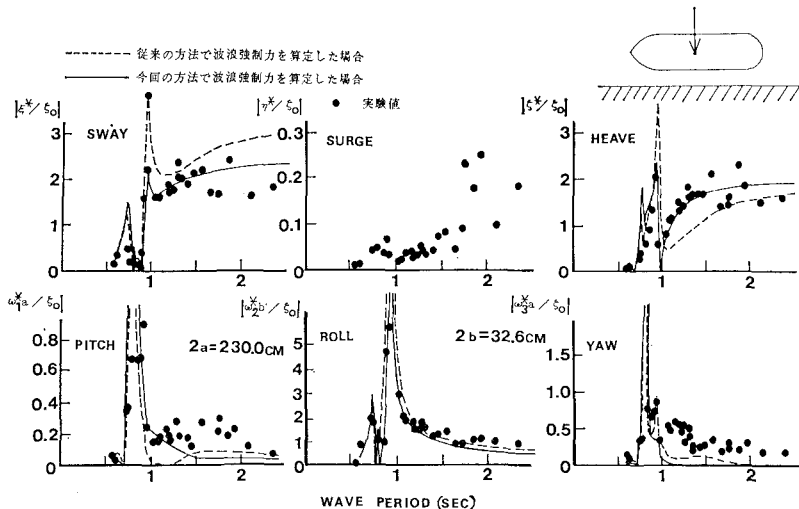


図-5 正横より波を受けた場合の船体運動

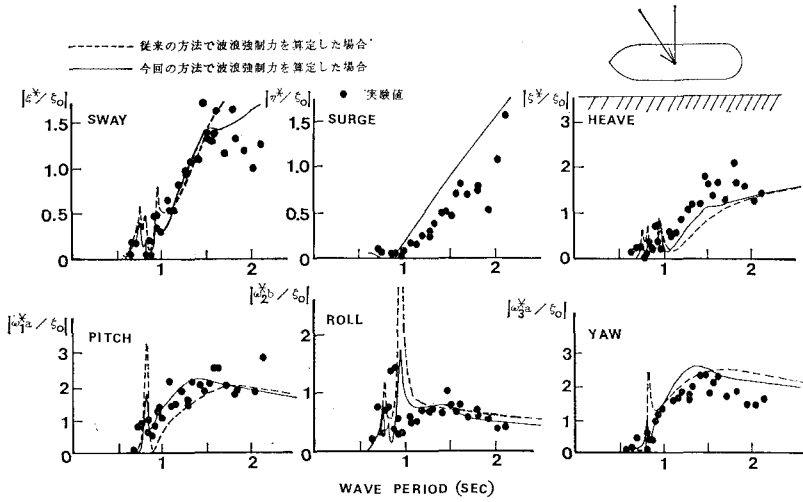


図-6 波の入射角 30° の場合の船体運動

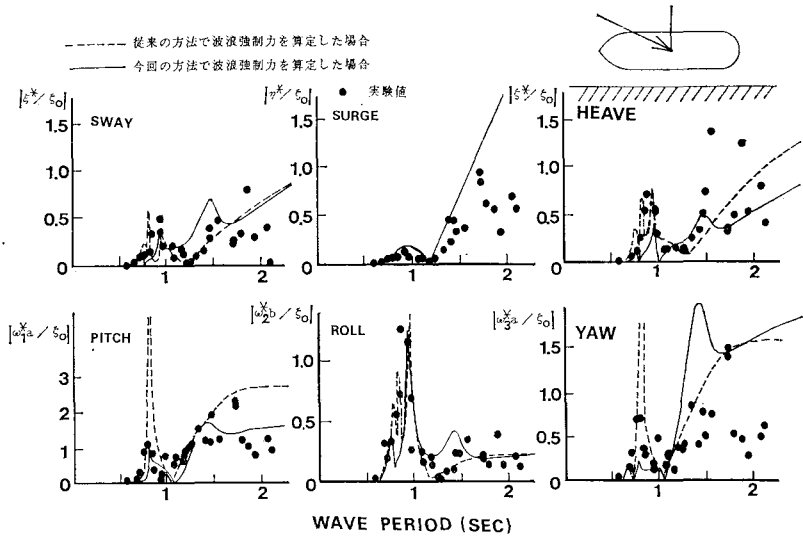


図-7 波の入射角 60° の場合の船体運動

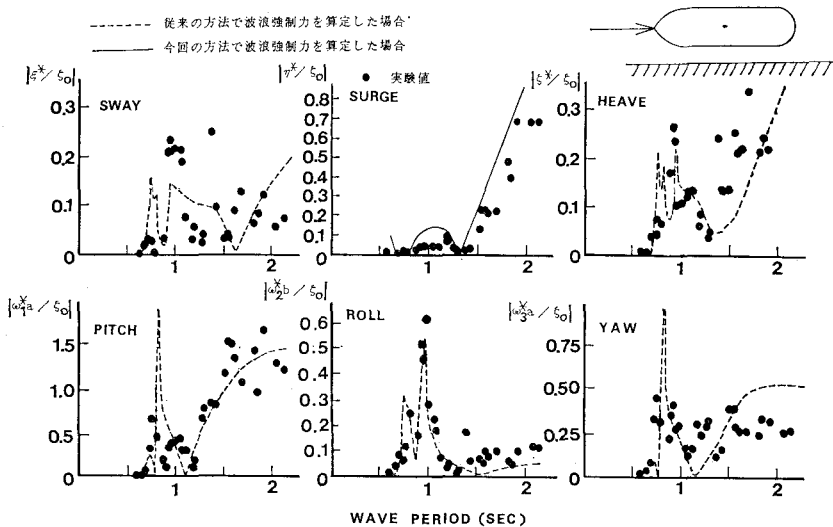


図-8 船首より波を受けた場合の船体運動

7, 船首($\omega=90$)より波を受ける場合を図-8に示す。これらの図によれば波浪強制力を新たに提案した方法による計算値が必ずしも実験値と合っていない。また入射角, 運動モードによっても計算精度が違ってくるようである。このように斜め波の場合に計算精度はやや落ちるが, この原因としては岸壁の船体との反復反射の影響が考えられ, これについてはさらに検討を加えたく考えている。しかし, 従来の岸壁前面係留船の三次元計算が非常に複雑であったのに比べ, 今回の方法によればかなり簡単に船体運動をある程度まで表現できることがわかった。

4. 結 語

岸壁がある場合にも適用できるようにストリップ法の理論を拡張し, 実船模型による数値計算と水理実験の比較により理論を検証した。その結果, 取り扱いの簡単なストリップ法によりある程度計算可能であることが示された。今後, 斜め入射の場合の波浪強制力の改善により, 船体運動の計算精度を向上させたく考えている。

最後に, 大阪大学工学部榎本亨教授, 青木伸一助手に

は終始貴重な御意見を賜った。また, 九州大学応用力学研究所柏木正助教授により, 本研究を行うにあたり貴重な資料をいただいた。ここに諸氏に対し厚くお礼申し上げる次第である。

なお, この研究の一部は文部省科学研究費重点領域研究(1): 異常時風浪に対する港湾区域の防災力とその向上システムに関する研究(名古屋大学工学部岩田好一郎教授代表)によったことを付記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 高石敏史・黒井晶明: 波浪中船体運動の実用計算法, 第2回耐航性に関するシンポジウム, pp. 109~133, 1977.
- 2) 井島武士・吉田明德・山本哲夫: 任意断面浮体の二次元係留問題と波の変形, 土木学会論文報告集, 第272号, pp. 55~63, 1978.
- 3) 久保雅義・斎藤勝彦・榎原繁樹: 岸壁構造による流体力係数の違いについて, 日本航海学会論文集, 第79号(投稿中), 1988.
- 4) 上田 茂・白石 悟: 係留船舶の動揺計算法とその評価, 港湾技術研究報告, 第22巻, 第4号, pp. 181~218, 1983.
- 5) 榎本 亨・久保雅義: 荷役限界からみた港内静内静穏度に関する研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 307~311, 1980.
- 6) 大串雅信: 理論船舶工学(上巻), 海文堂, pp. 25~31, 1971.