

係留システムの改善による船体運動および 船舶の接岸エネルギーの低減化

榎 木 亨^{*}・久保雅義^{**}・青木伸一^{***}

1. ま え が き

外洋に面した港湾においては、うねりの侵入や荒天時の風浪等によって円滑な荷役が阻害されたり、時には港内係留船の安全な停泊がおびやかされたりする場合も少なくない。このような港において船体運動低減化のために従来から用いられてきた方法は主に防波堤の延長、低反射岸壁の設置などである。このような対策は港内に侵入する波浪を制御し船舶に作用する外力を小さくして船体運動を低減させようとするものであるが、これらの建設には莫大な費用がかかる反面その投資効果も明確であるとは言い難い。一方著者らは先に、実際の港湾における係留システムは係留索とフェンダーのバネ定数の比が1:100~1:1000にもおよびこのような係留系の非対称性が船体運動を著しく増大させることを指摘した¹⁾。従って船体運動が問題となる港においては、係留システムを改善することによってより直接的にその運動の低減化を図ることのほうが有効であると考えられる。本論文ではこのような観点から一様直線岸壁前面に係留された船舶をとりあげ、係留システムの非対称性が船体運動におよぼす影響を確認するとともに、係留システムの1つとして dash-pot を付加的に用いた場合の低減効果を明らかにした。さらに係留システムを変化させる際に問題となる船舶の接岸についても十分考慮した上で、港内係留船にとって最適な係留システムを模索している。これらの研究はすべて規則波を対象とし、数値シミュレーションにより行なったものである。

2. 計算条件および計算方法

港内係留船モデルとして、船長 $L_s=144$ m, 船幅 $B=27.3$ m, 型深さ $D=18$ m, 喫水 $d=5.4$ m, 重量 $W=22\,000$ ton の矩形船が図-1のように岸壁係留されている場合を対象としてとりあげ、本シミュレーションにおいてはこれが正横より波を受ける場合について計算を行なった。従って取り扱った運動モードは Sway, Heave,

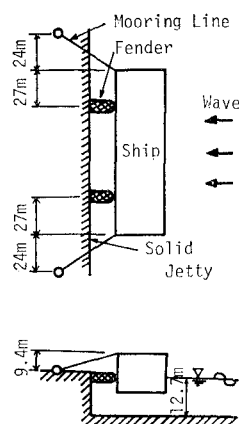


図-1 係留モデル

Roll のみである。

今回対象としているのは船舶が非線型（非対称）な係留系に係留されている場合であるため、規則波の作用下でも船舶は規則的には運動しない。従って計算では運動を時系列で追っていく必要があるが、この際問題となるのは運動する浮体におよぼす流体抵抗すなわち付加質量と減衰係数をいかに与えるかということである。すなわち、一般にはこれらは運動周波数の関数

として与えられるため、不規則に運動する船舶あるいは接岸時の船舶に対してどの周波数の値を用いればよいかが問題となる。本研究においてはこの問題を消去するために、Cummins²⁾によって与えられた運動方程式（式(1)）を Oortmerssen³⁾ が Open Jetty に適用したのと同様の方法で Solid Jetty に拡張して計算を行なった。その詳細については文献 2), 3) を参照して頂きたい。

$$\sum_{j=1}^6 \left[(M_{kj} + m_{kj}) \ddot{x}_j + \int_{-\infty}^t K_{kj}(t-\tau) \dot{x}_j(\tau) d\tau + c_{kj} \dot{x}_j \right] = f_k(\omega) \cos \omega t \dots\dots\dots (1)$$

$$(k=1, 2, \dots, 6)$$

ここに M_{kj} は慣性マトリックスの、 c_{kj} は静水力学的反力係数の $k-j$ 要素である。また m_{kj} , $K_{kj}(t)$ はそれぞれ不変付加質量、遅延関数と呼ばれるものであり、次式で与えられる。

$$K_{kj}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b_{kj}(\omega) \cos \omega t d\omega \dots\dots\dots (2)$$

$$m_{kj} = a_{kj}(\omega') + \frac{1}{\omega'} \int_0^{\infty} K_{kj}(t) \sin \omega' t dt \dots\dots\dots (3)$$

ここに $a_{kj}(\omega)$, $b_{kj}(\omega)$ は周波数領域での付加質量および減衰係数である。すなわち岸壁前面での $a_{kj}(\omega)$, $b_{kj}(\omega)$ および波浪強制力 $f_k(\omega)$ が判れば、式(1)を用いて運

^{*} 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

^{**} 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 工修 大阪大学助手 工学部土木工学科

動を計算できるということになる。これらの算定には先に著者らが直線岸壁前面での規則波による浮体の運動を計算する際に用いた手法を使用した。この手法は井島らによる3次元浮体運動理論を岸壁がある場合へ拡張したものであるが、詳しくは文献4)を参照して頂きたい。ここでは紙面の都合上 Sway モードの付加質量と減衰係数のみを図-2に示す。ここに付加質量は船の質量 ρdBL_s (ρ : 水の密度) で、減衰係数は ρdBg (g : 重力加速度) でそれぞれ無次元化している。(a₁₁, b₁₁) また横軸には角周

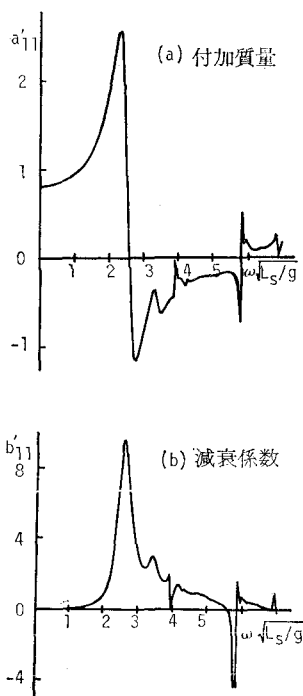


図-2 付加質量および減衰係数 (Sway)

波数 ω を無次元表示したものを用いている。(a), (b) いずれの図においても高周波数側で曲線の滑らかさが失なわれているが、これは周波数が大きくなると計算精度が低下するためである。これらの図より岸壁前面の浮体の付加質量および減衰係数は周波数による変動が大きいことがわかる。この傾向は他のモードについても同様であり、このことからしてもこれらの係数がある特定の周波数に固定して近似的に計算を行なうことは不合理であるといわざるをえない。

次に以上のようにして求めた付加質量と減衰係数を用いて、式(2), (3)より m_{kj} と $K_{kj}(t)$ を決定するわけであるが、前述のように計算上の問題から減衰係数 $b_{kj}(\omega)$ を高周波数領域まで正確に計算することはできない。したがってこれらを決定するためには $b_{kj}(\omega)$ の高周波数近似を考える必要がある。この近似理論については文献2)を参照して頂くと、ここでは Sway についての遅延関数 $K_{11}(t)$ を図-3に示すにとどめる。以上の計算により式(1)の各係数が決定されたので、これにさらに係留系からの反力を考慮して運動の時系列を求めている。

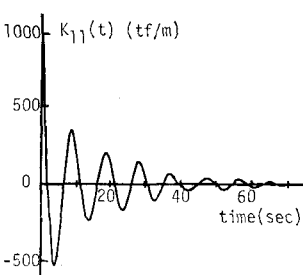


図-3 遅延関数 (Sway)

けばよいわけであり、今回の計算には Newmark の β 法を用いた。なおこの数値計算の妥当性を検証するために、文献4)で示した定常解析の解および前述の浮体を1/60に縮尺して行なった実験値と比較したが、いずれもよい一致を示した。図-4にその検証の一例として非対

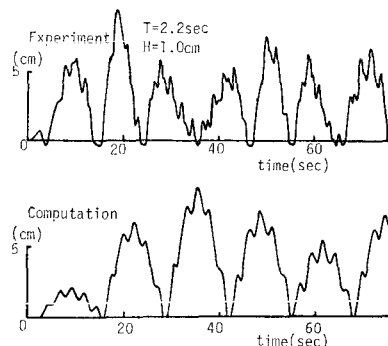


図-4 運動波形 (Sway)

称係留の場合の Sway の実験および計算の運動波形を示す。これより計算結果は非対称係留の場合に顕著となる Sway の Subharmonic Motion をその振幅に関してはよく再現していることが判明する。

3. シミュレーション結果とその考察

(1) 係留系の非対称性が船体運動に及ぼす影響

ここでは係留系の非対称性を表わす指標として、先に述べたフェンダーのパネ定数と係留索のパネ定数の比を用いる。ただし文献1)で示したように非対称係留でその運動が問題となるのは Sway のみであるため、ここでは係留索のパネ定数の Sway 方向成分の和 k'_i とフェンダーのパネ定数の和 k'_f の比 k'_f/k'_i をもって非対称の程度を表わすことにする。

図-5は、 $k'_i=3.7$ tf/m に固定し、 k'_i を変化させた場合のパネ定数比 k'_f/k'_i と、Sway の最大振幅および係留索とフェンダーの最大反力との関係を示したものである。図中実線

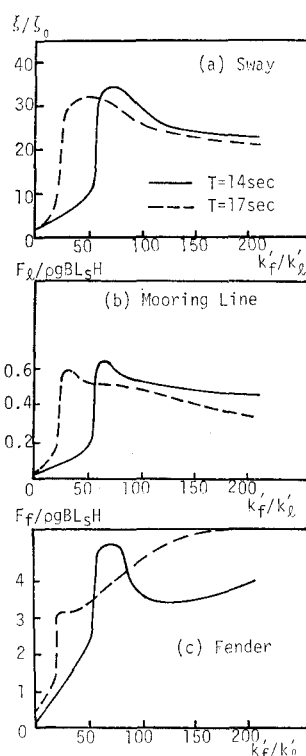


図-5 船体運動および係留力に及ぼす非対称性の影響

は入射波周期 $T=14$ 秒, 破線は $T=17$ 秒の場合である. なお Sway の最大振幅 ξ は入射波振幅 $\xi_0=H/2$ (H : 波高) で, 係留力 F_L およびフェンダー反力 F_F は $\rho g B L_s H$ でそれぞれ除して無次元化している. これらの図よりどちらの周期についてもバネ定数比がある値に達すると Sway の最大振幅, 係留力, フェンダー反力ともに急増していることがわかる. そしてバネ定数比がその値よりも大きくなるとフェンダー反力を除いてはあまり変化しない. ただしここにとりあげたのは比較的周期の長い波で Subharmonic Motion が顕著に現われる場合であり, すべての周期の波に対してこのような傾向があるかどうかは確かめていないが, このようなピーク値が存在することは興味深い.

(2) 船体運動の低減化について

a) 係留システムの対称化

図—5 から明らかなように, 非対称な係留システムは Sway において 図—4 のような Subharmonic Motion を引き起こし船体運動を著しく増大させる. そこで何らかの方法により係留システムを対称に近づけることができれば, 運動を大幅に低減させることが可能となることが予想される. その方法としては, (i) 係留索のバネ定数を上げる (ii) フェンダーのバネ定数を下げる (iii) 係留索に大きな初期張力を与える 等が考えられるが, 係留施設への反力などを考慮すると (ii) のフェンダーのバネ定数を下げる方法が最も実用的であろう. しかしながらフェンダーは船舶の接岸の際にそのエネルギーを吸収して船舶および係船岸を保護するという重要な役割を担っているため, むやみにバネ定数を下げることにはできない. 従ってフェンダーのバネ定数を下げて係留システムの対称化を図る際には, 接岸エネルギーの問題についても十分考慮しなければならない.

b) dash-pot による船体運動の低減化

著者らは先に, 船体運動を低減させるために係留システムに直接的な減衰機能をもたせることが有効であると考え, dash-pot を係留システムに付加することを提案している⁹⁾. そこでここでも 図—1 に示した係留索とフェンダー両方に並列に dash-pot を付加したモデルを考え, その低減効果を明らかにする.

図—6 は, $k'_L=3.7$ tf/m, $k'_F=2880$ tf/m すなわち $k'_F/k'_L=778$ の場合について, dash-pot の減衰係数の変化に伴って船体運動および反力がどのように変化するかを示したものである. ただしこの場合, dash-pot の減衰係数 C_d は係留索, フェンダーとも等しくし, この値を横軸にとっている. また船体運動については入射波振幅を用いて無次元化している. これらの図より, 減衰係数を増大させても Heave, Roll の運動振幅はほとんど変化しないが, Sway はその増大とともに急激に減少しある点を境にまた増加する. またこの極小となる点では係留

索 dash-pot の張力はさほど大きくないが, この点をこえると急増することがわかる. このように減衰係数の小さい範囲で運動の極小点が存在するということは, 運動低減化のための最適な減衰係数の存在を示唆している.

この傾向は $k'_F/k'_L=195$ の場合についても同様であった. なお図—6 (b) で dash-pot を付加した場合の方がフェンダー反力が増大しているのは, 運動の中心が岸壁側へずれるためである.

(3) 船舶の接岸について

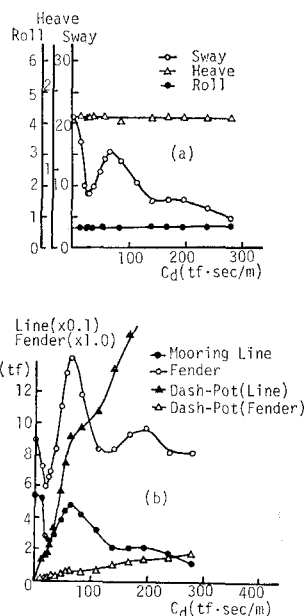
ここでは船舶が岸壁に平行に接岸する場合の数値シミュレーションを行ない, フェンダーのバネ定数と吸収エネルギーの関係を明らかにしておこう. またフェンダーのバネ定数を下げるための対策としてフェンダーに dash-pot を組み込んだモデルを想定しその効果も見てみよう.

計算方法は船体運動の計算と同様に式 (1) を用いて時系列で求めていく方法を用いた. 接岸モデルとしては, 図—7 に示すように離岸距離 4.8m の位置を基準とし, フェンダー 衝突時に接岸速度 15 cm/sec となるように初速度を調整して行なっている.

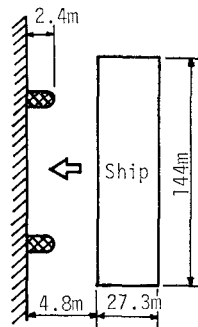
図—8 はこのようにして計算した接岸エネルギー (フェンダーの吸収エネルギー) E , フェンダーひずみ ϵ およびフェンダーの最大反力 F_F をフェンダーのバネ定数 k'_F を変えて示したものである. ただし接岸エネルギーは $\frac{1}{2}MV^2$ (M : 船舶の質量, V : 接岸速度) で無次元化しており, 図中の実線が dash-pot を付加していない場合のものである. ここに C_{dF} は 2 個の dash-pot の減衰係数の和である. また 図—8 (a) 中の点線は一般に設計の際に用いられる式,

$$E = WV^2/2g \quad (4)$$

を用いて計算した接岸エネルギーを示している. ただし船舶の仮想重量 W の算定にはステルソンの式を用い



図—6 船体運動および係留力に及ぼす dash-pot の効果



図—7 接岸モデル

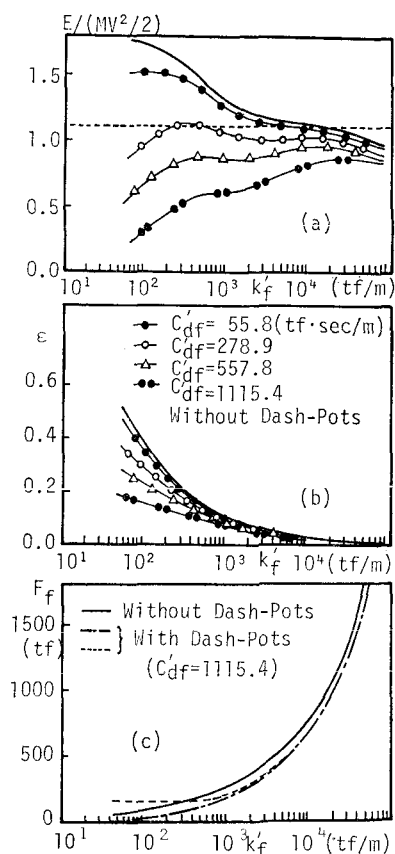


図-8 接岸エネルギーおよび接岸力とそれに及ぼす dash-pot の効果

た。図 (a) の実線より dash-pot のない場合の接岸エネルギーはフェンダーのパネ定数が小さくなるにつれて増大していることがわかる。これはフェンダー側への変位が大きくなると造波抵抗が低下するためであろう。また式 (4) より求めた接岸エネルギーは $k_f=10\,000$ tf/m 以上になってはじめて実線より大きくなり安全側となる。すなわち設計の際接岸エネルギーを過小評価している恐れがある。また図 (b) はフェンダーのひずみを、図 (c) はフェンダーの最大反力を示しているが、パネ定数の低下とともにひずみは増大し、反力は減少することがわかる。以上のことよりフェンダーのパネ定数を下げることによって係留システムの対称化を図ろうとすれば、フェンダーのエネルギー吸収能が低下する上に接岸エネルギーそのものも増大することになり好ましくない。そこでフェンダーに dash-pot を組み込んだ場合のシミュレーションをいくつかの減衰係数について行ない、その結果を図中に同時に示してある。図 (a) より dash-pot の減衰係数を上げていくことによって接岸エネルギーのフェンダーによる吸収量は低下することがわかる。そしてこれはフェンダーのパネ定数が小さい領域で顕著であり、dash-pot の減衰係数が大きくなるとパネ定数の小さい所

の方が吸収エネルギーは小さくてすむようになる。dash-pot にこのような効果があることより、dash-pot をフェンダーに組み込むことによってフェンダーのパネ定数を下げることが可能になると考えられる。さらに図 (c) には $C_{df}=1\,115.4$ tf·sec/m の場合のフェンダー反力と dash-pot 反力の合力の最大値を点線で、フェンダーのみの反力を一点鎖線で示してある。これより $k_f=300$ tf/m 以下では dash-pot を付加する前よりも反力は大きくなっているが、これは dash-pot を付加せずフェンダーのパネ定数が大きい場合の反力に比べれば問題にならない程度の値しか示していない。

以上のように、フェンダーに dash-pot を組み込むことによって接岸時のフェンダーの吸収エネルギーをパネ定数の小さい領域で著しく減少させることが可能となり、これを利用してフェンダーのパネ定数を低下させれば、反力も小さくなることがわかる。

(4) 係留システムの改善に関する提案

これまでのシミュレーションにより次のような事実を指摘することができる。

- (i) 船体運動を低減するためには、係留システムの対称化を図ることが望ましい。
- (ii) 係留システムへの dash-pot の挿入は、非対称係留時の Sway の Subharmonic Motion を低減させるのに有効である。
- (iii) フェンダーのパネ定数を下げることによって生じる接岸エネルギーの吸収の問題はフェンダーに dash-pot を組み込むことによって補うことができる。

このような結果をふまえて、ここでは次の4種類の係留システムをとりあげ、接岸時 ($V=15$ cm/sec) および船体動揺時 ($T=14$ sec, $H=1.2$ m) の計算を行ないその良否を比較検討する。(A) $k'_f=3.7$ tf/m, $k_f=2\,939$ tf/m の実際の港湾に見られるような非対称な係留システム (B) $k'_f=3.7$ tf/m, $k_f=73.4$ tf/m にまでフェンダーのパネ定数を下げて対称化を図ったもの (C) (B) の状態にさらにフェンダーに $C_{df}=279$ tf·sec/m の dash-pot を付加したシステム (D) (C) の状態にさらに係留索にも同じ減衰係数の dash-pot を付加したシステム

これらのシミュレーション結果を表-1に示す。これより (A) のような非対称性の著しい係留システムから (B) のような対称に近い係留システムに変更した場合、船体運動は1オーダー程度減少し、フェンダーおよび係留索にかかる力も著しく減少する。しかしながらフェンダーの吸収エネルギーは (A) の場合の2倍程度にまで増大し、それに伴ってフェンダーの最大変位も大きくなり、このようなフェンダーでは接岸に対して安全でないことがわかる。そこでこのような点を改善するために (C) のようなフェンダーに dash-pot を付加したシステ

表-1 係留システムの比較

		(A)	(B)	(C)	(D)
接岸時	フェンダーの吸収エネルギー (tf・m)	29.6	44.3	13.6	—
	フェンダーの最大反力 (tf)	208.5	40.4	22.3	—
	フェンダーの最大変位 (m)	0.14	1.10	0.60	—
	dash-pot の最大反力 (tf)	—	—	41	—
船体動揺時	Sway 振幅 (m)	27.9	2.5	4.1	2.6
	フェンダーの最大反力 (tf)	1 300	24.2	24.2	20.3
	係留索の最大張力 (tf)	97.0	4.6	7.1	3.5
	フェンダー dash-pot の最大反力 (tf)	—	—	163.1	152.1
	係留索 dash-pot の最大反力 (tf)	—	—	—	50.7

ムを考える。この場合 (B) に比べて Sway および係留索の張力は逆に増加している。これは減衰システムを取り入れたことに対して矛盾した結果であるが、船体運動が大きくない場合には他の運動との関連によってこのような結果が現われることも考えられる。いずれにしてもこの程度の増加は (A) に比べれば問題にならない。それにもましてフェンダーの吸収エネルギーは (B) の場合の 1/3 以下に減少しており、この程度ならば接岸に十分耐えうると判断してさしつかえない。この場合、dash-pot の最大反力が大きくなってはいるが (A) のフェンダー最大反力に比べればはるかに小さい。(D) はさらに船体運動を低減させる目的で係留索にも dash-pot を付加した場合であり (C) よりも向上しているがその効果はそれほど大きくない。この係留システムは Roll の共振周期付近の波に対しては効果的であると考えられるがここでは考慮していない。ただしこの場合は係留索 dash-pot の張力が増大するものと思われる。以上のようなことを考えあわせると、係留システム改善の際には (C) のような係留システム、すなわちフェンダーのバネ定数

を下げて対称化を図るとともにフェンダーに何らかの形で dash-pot のような減衰機能をもたせることが最も効果的かつ現実的であろう。ただしこの減衰機能はフェンダーのもつヒステリシス特性程度では不十分である。

4. あとがき

数値シミュレーションにより最適な係留システムを模索してきたがなお理論上不完全な点も数多く残されている。今後このような点を改善するとともに、斜め入射波、不規則波についても考察を進め、より現実 に即した形でのシミュレーションに発展させる必要があろう。またこのようなシミュレーション結果を現場に生かし、新しい係留システムが開発されることを願ってやまない。

最後に、本研究を行なうにあたり尽力いただいた大阪大学大学院生角野隆君に感謝の意を表する。

なお、本研究の一部は文部省科学研究費自然災害特別研究 (1) (神戸商船大学 久保雅義助教授代表) によって付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 榎木 亨・久保雅義: 荷役限界からみた港内静穏度に関する研究 (第1報), 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 610~614, 1977.
- 2) Cummins, W. E.: The Impulse Response Function and Ship Motions, D.T.M.B. Report 1661, Washington D.C., 1962.
- 3) Oortmerssen, G. Van: The motion of a moored ship in waves, Publication No. 510, Netherlands Ship Model Basin, Wageningen, The Netherlands, 1976.
- 4) 榎木 亨・久保雅義: 荷役限界からみた港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.
- 5) 榎木 亨・久保雅義・青木伸一: Dash-pot による長周期船体運動の低減化に関する研究, 土木学会第37回年次学術講演会講演概要集, pp. 811~812, 1982.