

防舷材からみた船舶係留システムの安全性について

久保 雅 義*・榊 原 繁 樹**

1. 緒 言

近年防舷材の選定において、船舶の接岸エネルギーだけでなく、係留船舶の動揺を考慮して防舷材の選定を行う場合がでてきている。これは係留船舶の荷役稼働率の向上と波・風等の様々な外力下での係留索や防舷材といった係留系の安全性を把握するためのものである。一般に係留船舶の動揺量や係留系に発生する荷重の把握は、数値シミュレーション（上田，1984；榎木ら，1980，1985）によって行われており、この結果にもとづき適切な係留系の設計が行われている。しかし実際の船舶の係留は、過大な外力下で行われていたり、また係留索のとり方や防舷材と本船の位置関係の変化など設定係留条件と異なる場合がある。したがって場合によっては、係留索の切断や防舷材の破損のおそれもある。特に防舷材が破損すると、岸壁や船体の損傷など大きな災害を生じる危険性もある。

小田ら（1985）は、シミュレーション内に船体動揺に対応した模型防舷材の圧縮特性を組み入れるシミュレーション手法を提示している。この研究は、シミュレーション手法の精度向上としては有効であるが、上述のような外力設定や実際の岸壁に設置されている防舷材の特性を把握することの難しさから、本来の動揺シミュレーションの目的の1つである船舶係留系の安全性の把握が達成できない可能性もある。そこで直接、係留系への負荷をリアルタイムに現地で測定し、かつこれをシミュレーション内にフィードバックできる手法が確立されるならば、船舶係留システムにとって有効な安全対策となる。

洋上石油蓄備では、定反力型防舷材を用いた係留系の設計が行われた。この大型貯蔵船の係留システムは、台風通過時という過大な外力下においても損傷を生じず、その係留システムの安全性が実証されている。この主な原因は、その係留システムが定反力型防舷材のみで構成され、係留系の対称性が確保されていたためである。一方船舶の係留は、防舷材だけではなく、係留索と合わせて行われる。したがってこの場合、係留系の対称性が確

保できないおそれがあり、その係留システムの安全性や船舶の荷役稼働率に影響を与えるものと考えられる。

以上をふまえて本研究では、一般に荷役可能と考えられる穏和な外力条件と荒天時の状況を設定して、反力漸増型と定反力型の防舷材タイプの違いによる係留系への負荷および係留船舶の動揺量の比較をシミュレーションで算定する。そして、現地での防舷材反力生データを使った、係留系の安全性を把握する“船舶係留監視システム”を提示し、検討を行う。

2. 防舷材タイプの違いによる係留船舶の動揺の比較

(1) 対象船舶・計算条件

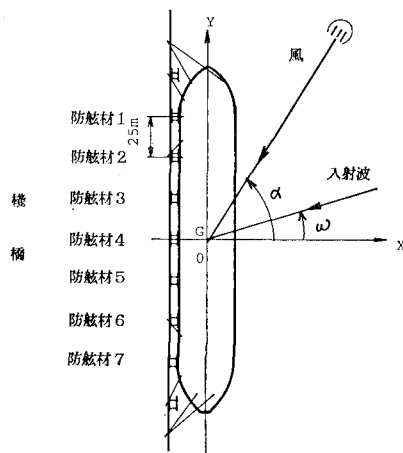


図-1 係留状況（60,000 DWT 石炭運搬船）

図-1に示すように、棧橋に係留された60,000 DWT石炭運搬船の空載時（船長 $L=211$ m, 船幅 $B=34$ m, 型深さ $D=18.3$ m, 喫水 $d=7$ m, 重量 $W=42,000$ ton）について動揺シミュレーションを行った。係留系は防舷材と $\phi 60$ mm ナイロンロープとした。防舷材は反力漸増型空気式 $\phi 1800 \times 1800^H-1.2^K$ と定反力型 1450^H 防舷材を本船満載時の接岸エネルギー（ $E=75.5$ tf・m）から選定した。係留索は、荷役時にはバウライン、スタンラインおよびスプリングラインの12本で係留し、荒天時

* 正会員 工博 神戸商船大学教授 船貨輸送研究施設

** 横浜ゴム(株) 産業資材技術部

にはプレストラインなどの増し取りによる 20 本係留とした。防舷材の特性は、図-2 に示す。また外力条件は、表-1 に示す 5 ケースを設定した。

いる。

表-2 船体動揺量 (Sway)

		ケース No.				
防舷材種類	Sway(m)	①	②	③	④	⑤
反力漸増型	max.	0.62	0.30	0.35	5.04	3.88
	min.	-0.15	-0.25	-0.88	-0.00	-0.24
定反力型	max.	2.23	1.68	0.95	5.09	3.92
	min.	-0.12	-0.19	-0.43	-0.00	-0.05

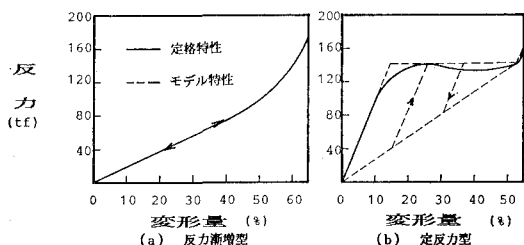


図-2 防舷材の特性

表-1 外力条件

ケース No.	①	②	③	④	⑤
波	$H_{1/3}$ (m)	0.5	0.5	1.0	1.0
	$T_{1/3}$ (sec)	8	8	8	8
	ω (deg)	0	0	0	-60
風	U_{10} (m/s)	...	15	30	30
	α (deg)	...	-30	0	180
備考	荷役時		荒天時		

ここに、不規則および変動風速は各々 Bretschneider 一光易型スペクトル、Davenport スペクトルを用いて時系列を作成した。また動揺シミュレーションは、Cummins によって提案された時間領域の運動方程式を解く時系列解析を用い、流体力の算定は三次元領域分割法(楳木ら, 1980)で行った。

(2) 防舷材タイプによる係留船舶の動揺の違い

a) 船体動揺

防舷タイプによる Sway 動揺量の比較を表-2 に示す。荷役許容動揺量は、文献(上田ら, 1988; Brunn, 1981)より沖側へ 1m 程度と言える。

ケース①②の場合、反力漸増型では許容動揺量内であるが、定反力型では沖側へ 2m 程度の荷役限界を越える動揺を生じている。1 例として図-3 に、ケース②の Sway の時系列結果を示す。定反力型でみられる沖側への大きな動揺は、よく知られているサブハーモニックモードである。サブハーモニックモードは、係留系の非対称性の強弱に起因する現象で、定反力型の場合は、この非対称性が強いために顕著に生じている。一方反力漸増型では、初期低反力の特性をもつため、係留系の非対称性が弱くこの現象が現われていない。ケース③の場合、沖側からの強風を受けて沖側への動揺が押さえられている。ケース④⑤の場合、強風が棧橋側から吹くため、両防舷材タイプ共に大きな沖側への動揺が生じて

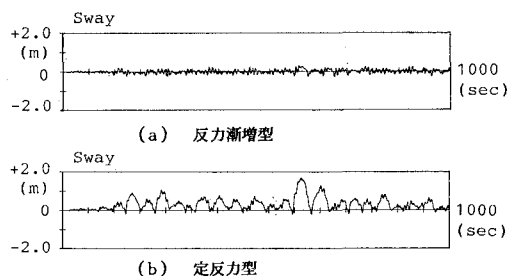


図-3 ケース②の Sway 時系列

b) 係留系

表-3 に、防舷材 7 に発生した最大反力とそのときの变形量を示す。また表-4 には、バウ・スプリングに生じた最大張力を示す。

表-3 防舷材 7 の最大反力 (tf)・圧縮率(%)

ケース No.	①	②	③	④	⑤
防舷材種類					
反力漸増型	tf	19.5	33.5	109.9	0.1
	%	9.9	17.4	53.1	0.0
定反力型	tf	140.7	141.0	141.3	0.2
	%	16.2	30.4	48.9	0.0

表-4 バウ・スプリング最大張力 (tf)

ケース No.	①	②	③	④	⑤
防舷材種類					
反力漸増型	3.5	6.7	2.5	39.4	21.3
定反力型	12.0	17.9	7.7	38.8	20.5

ケース①②③の場合、定反力型では大きな防舷材反力と係留索張力を生じている。一方反力漸増型ではかなり小さい。図-4 に、ケース②での防舷材 7 に発生した反力時系列を示す。ケース④⑤の場合、防舷材にはほとんど接触せず、係留索にかなり大きな張力が生じている。

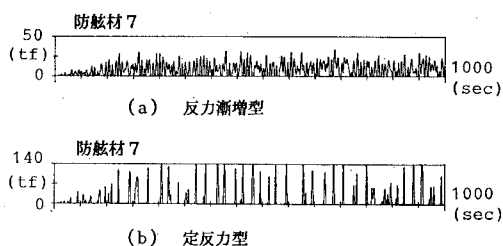


図-4 ケース②での防舷材7の反力時系列

(3) 係留系の安全性評価

本シミュレーションで用いている防舷材の定格変形量は、反力漸増型で 65%, 定反力型では 52.5% である。また係留索の破断荷重は 60 tf である。

船体動揺にサブハーモニックモーションが生じると、沖側への動揺量が大きくなる。したがって、係留索に負担を生じる傾向となる。また防舷材への負荷を各々の定格変形量に対する変形量でみると、サブハーモニックモーションの生じる定反力型の方が大きい。したがって、サブハーモニックモーションを生じさせないような係留系の設計は、係留系の安全性にとっても有効なものとなる。

強風が沖側から吹く場合、防舷材にはかなりの負荷が作用する。ケース③の定反力型防舷材の場合では、防舷材に定格変形量を越える変形 (56.2%) を生じていた。これは防舷材の特性に起因するもので、変形が定反力部にまで達すると若干のさらなる負荷で定格変形量を超過しやすいためである。一方反力漸増型では、発生反力も比較的小さく、定格変形量にまで至らなかった。これは、反力が防舷材の変形と共に上昇して、外力に対応した反力を発生できるためである。したがって、定反力型防舷材を用いて係留船舶の動揺を考慮した防舷材選定を行う場合には、接岸エネルギーから選定したサイズに対して熟慮を要する場合があると言える。

ケース④⑤の強風が棧橋側から吹く場合、表-2 より 4~5 m の沖側への Sway 動揺が生じていた。この結果は係留索のとり方によってかなり変化すると考えられるが、このように風が陸側から吹く場合には、係留索に大きな負荷が生じるおそれがあることは留意すべきである。

3. 船舶の係留監視システム

(1) 係留監視システムの必要性

船舶係留系の安全性の把握には、数値シミュレーションが有効な手段となる。この数値シミュレーションは、水槽実験においては精度のよい結果が得られることが知られている。しかし前節のようなシミュレーションは、設定した外力や防舷材特性などに対して行われるため、

この条件が異なれば誤った判断をするおそれがある。また波向や係留索の影響により、シミュレーションと実測を一致させることがかなり難しいと報告されている (上田ら, 1984)。

係留系の安全性の面から言えば、直接現地で、係留系への負荷を測定した方が有利である。そして、この測定値をシミュレーション内にフィードバックすればより確かなシミュレーションが可能となる。

LPG, LNG といった危険物積載船用岸壁には、係留索の張力を測定・検知するシステムがある。このシステム設置の背景には、係留索切断による本船流出・二次災害を生じたときの膨大な損害に対する配慮がある。しかし防舷材については、このようなシステムは現行皆無である。係留索に比べ防舷材が破損した場合の方が、復旧に時間を要し、かつ応急処置が難しいことから、このような危険予知システムは防舷材に対してこそ必要である。防舷材に対してこのようなシステムがない原因としては、防舷材の変形量測定に手間がかかること、また汎用ゴム製防舷材ではその特性をゴムの物性や形状によって異なるため、経年変化や防舷材に発生している傷やき裂の度合に伴う実際の性能を、正確に把握することが困難なためである。

一方、空気式防舷材は、その特性を空気弾性によっている。このことから、防舷材発生反力や防舷材への負荷は、防舷材内に充てんされている空気圧力 (内圧) を測定することで把握できるものと考えられる。

そこで、空気式防舷材の内圧と防舷材反力の一意性を確認するために各種圧縮試験を行った。そして、空気式防舷材を使った船舶係留監視システムを提示する。

(2) 圧縮試験による防舷材反力と内圧の一意性の確認

a) 平行圧縮・剪断圧縮試験

圧縮試験には、岸壁固定型空気式防舷材 $200 \times 200^H - 1.2^K$ (初内圧) を用いた。前節シミュレーションでの空気式防舷材と同型である。

図-5 に、変形量に対する防舷材反力と内圧の測定結果を示す。実線が通常の圧縮状態である平行圧縮を示している。破線が Sway, Surge を同時に伴って圧縮された場合の剪断圧縮を表わしている。剪断圧縮には、 15° の傾きを設けている。実際、防舷材前面には受衝板や樹脂パッドが設けられていることから、これほどの剪断変形が生じることは稀であろう。

図-5 によると、平行圧縮および剪断圧縮の各々では、それぞれの防舷材反力と内圧には一意性がある。しかし実際の船舶係留中の防舷材圧縮は、両者の中間的な状態で行われると考えられる。したがって防舷材の変形状態を考慮して内圧を測定する必要があるが、たとえ

ば測定内圧 3 kgf/cm^2 のとき、平行圧縮時の防舷材反力は 1.1 tf 、剪断圧縮時では 0.97 tf である。両圧縮で若干の差はみられるが、実用上、一意性が確保されていると言えよう。

ｂ) 繰返し圧縮試験

船舶係留中の防舷材は、繰返し圧縮・復元を強いられる。そこで、空気式防舷材 $\phi 200 \times 200^H - 0.8^K$ (初内圧) を用い、圧縮率 10%, 30%, 50% について、各々連続10回の繰返し圧縮を行い、その特性変化を調べた。

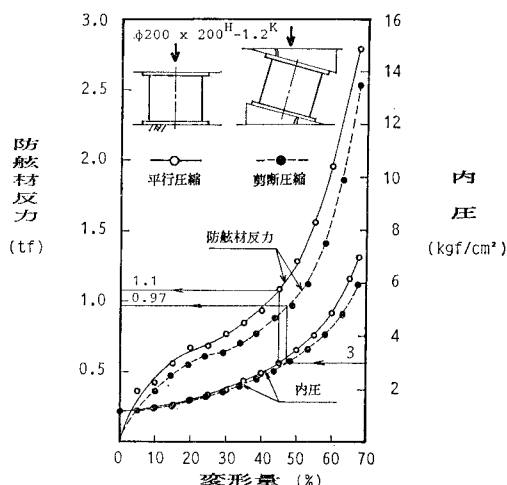


図-5 平行・剪断圧縮試験

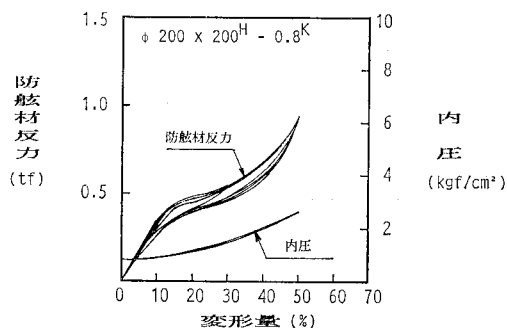


図-6 繰返し圧縮試験

図-6 に繰返し圧縮試験結果を示す。防舷材反力および内圧共に、若干のヒステリシスがみられる。しかし繰返しに伴う性能変化はほとんどなく、性能は安定しており、防舷材反力と内圧には実用上問題ない程度に一意性のあることがわかった。

(3) 空気式防舷材を用いた係留監視システム

上述のように空気式防舷材には、防舷材反力と内圧に一意性のあることが確認できた。このことから、その内

圧を測定することにより、防舷材に作用している負荷や発生反力を把握できることがわかった。したがって、空気式防舷材を用いることにより、船舶係留システムの安全性の把握は、現行の係留索のみならず、容易に防舷材についても可能となる。

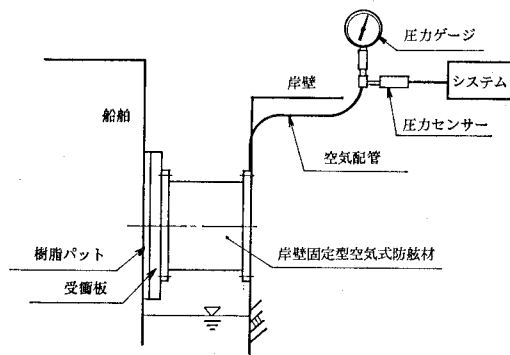


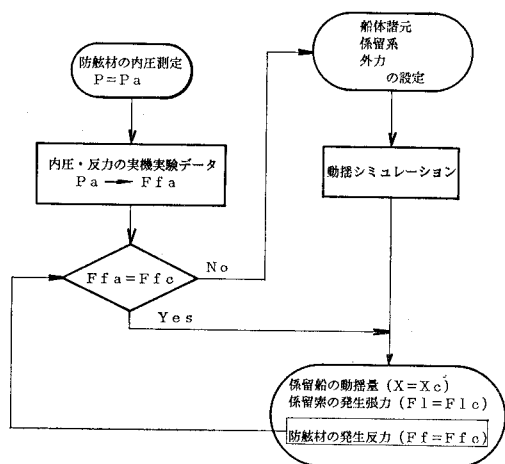
図-7 内圧測定方法

ここに、現地での内圧測定方法の1例を示す。図-7に示すように、岸壁に設置された防舷材本体から岸壁上もしくは任意の測定場所まで空気配管を行い、圧力ゲージあるいはペンレコーダ出力により内圧を検知する。このように、容易に内圧測定は可能である。

動揺シミュレーションは、船舶係留システムの安全性の把握にとって有効な手段となっている。通常、そのシミュレーション結果は、統計値として出力・検討されている。船体動揺を考慮した防舷材の設計が、統計処理されたシミュレーション結果にもとづき行われることは適切なことである。しかし、実際現地で、今現在、防舷材にどれだけの負荷が作用しているのか、あるいはどれだけの余裕があるのかを把握することも重要である。また現行のシミュレーションによっても、時系列出力の段階で、現地の船体動揺や係留系の負荷についてシミュレーション結果と一致させることはかなり難しい。この原因の1つには、数値シミュレーション中に、現状とシミュレーション結果とを照合するフィードバック機構が設けられていないことがあげられる。つまり、設定した波・風などの外力や計算条件に対しては、精度のよい計算結果が得られるものの、その設定条件は様々な外乱により変化しやすく、実際と異った入力に対して出力を求めてしまうことが多いためである。

そこで、空気式防舷材の特性を利用して、フィードバック機構をもつ動揺シミュレーションを使用する係留監視システムを提示する。図-8 にその流れ図を示す。

まず従来の動揺シミュレーションと同様に、充分考慮して設定された船体諸元、係留系および外力に対して、動揺シミュレーションを行う。シミュレーション結果と



図—8 船舶の係留監視システムの流れ図

して得られる係留船の動揺量や係留索・防舷材に発生する張力・反力は、時系列のかたちで出力する。これと同時に、図—7 に示すように、岸壁に設置された空気式防舷材の内圧を測定する。そしてこの内圧データを防舷材反力データに変換し、防舷材反力の実測時系列を作成する。次に、防舷材反力の時系列についての実測値とシミュレーション結果とを比較して、ほぼ一致していれば、そのシミュレーションの妥当性が確認できる。しかし、著しく異なる場合は、そのシミュレーションの設定が現状と異っていたとみなして、設定条件を変更して再度シミュレーションを行う。

このような手順で、従来の動揺シミュレーションにフィードバック機構を与え、順次シミュレーション結果の妥当性を確認していくのである。

4. 結 語

以上、防舷材からみた船舶係留システムの安全性につ

いて検討を行った。その結果を要約すると次のようになる。

① 係留船舶に、サブハーモニックモーションを生じさせない係留系の設計は、係留システムの安全性の面から有効である。

② 防舷材と係留索から構成される係留系において、サブハーモニックモーションを生じさせないようにするためには、防舷材に反力漸増型を用いることが有効である。

③ 空気式防舷材の特性である防舷材反力と内圧の一意性を用いることにより、現地の防舷材に作用する負荷を測定することができ、かつ従来の動揺シミュレーションにフィードバック機構を組み入れる係留監視システムを確立できた。

本研究で提示した係留監視システムは、空気式防舷材を用いて行ったが、今後汎用ゴム製防舷材についても検討を加えたく考える次第である。

参 考 文 献

- 上田 茂 (1984): 係留船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究, 港研資料 No. 504.
- 上田 茂・白石 悟 (1984): 係留船舶の動揺に及ぼす波向と係留索の影響について, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 451-455.
- 上田 茂・白石 悟 (1988): The Allowable Ship Motions for Cargo Handling at Wharves, 港研報告, 第27巻, 第4号.
- 小田一紀・石上昌男・秋山 斉 (1985): ハイブリット型シミュレーション法による荒天時船体動揺解析, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 662-666.
- 榎木 亨・久保雅義 (1980): 荷役限界からみた港内静穏度に関する研究—直線岸壁および Slip 内係留船の運動特性—, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 307-311.
- 榎木 亨・青木伸一 (1985): 不規則波中での港内係留船の運動予測法に関する一考察—流体力特性からみた検討—, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 667-671.
- Brunn, P. (1981): Breakwater or Mooring System, The Dock and Harbour Authority, pp. 126-129.