

荒天時の係岸避泊の限界条件と係船付帯設備の設計手順について

上 田 茂*・小 熊 康 文**

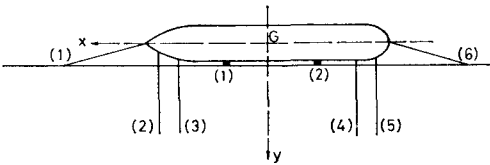
1. ま え が き

本論文においては、荒天時において船舶が港内で係岸避泊を行うに必要な港湾の施設整備の方策を立案するための一助として、係岸船舶の動揺シミュレーションを行って、係岸避泊が可能となる限界の波と風の条件を検討した結果を述べる。また、防衝工および係船柱などの係船付帯設備の設計手順を提案する。

2. 検討の手順

ここでは、10 000 DWT 級（船長 $L_{pp}=120.9\text{m}$ ）5 000 DWT 級（船長 $L_{pp}=97.7\text{m}$ ）および 3 000 DWT 級（船長 $L_{pp}=80.3\text{m}$ ）の一般貨物船について係岸避泊の限界条件を調べることにする。その手順は以下のとおりである。

- (1) 対象船舶が装備する係船装置（ボラード、ウィンチなど）にとりうる最大の強度の係留索を選定し配置する。各船舶に対する係留索配置は 図一1、その許容張力（破断強度の 3.8 分の 1）は 表一1 に示すとおりである。
- (2) 設計平均風速（ここでは一応 35 m/s とする）による船舶に作用する風荷重を求め、防舷材に作用する荷重を求める。この場合、風向を変えて数例計算し、また、防舷材の配値を適当に仮定して計算する。
- (3) 防舷材には二種の変位復元力特性を有するものがあるが、ここでは、後述する方法に従って 表一2 に示す防舷材をとりつけたものとして検討する。なお、表中の



図一1 係留索および防舷材の配置

許容反力とは、定反力型防舷材については変形量が全高の 35%、また、反力漸増型防舷材については同じく 50% のときの反力である。

(4) (1) および (3) で決めた係留系に対し、波浪条件（波向、周期、波高）、風の条件（風向、平均風速）を変えて計算を行い、係岸船舶の動揺量および防舷材の反力、係留索の張力などを調べる。ここでは、風向は 図一2 に示す七通り、波向は同じく三通りとした。なお、船舶は空載状態、係岸岸の構造は直立壁とするが、後に満載状態および透過性係岸岸についても検討する。また、波はブレットシュナイダー光易の周波数スペクトルを用いて発生させた不規則波、風はダーベンポートの周波数スペクトルを用いて発生させた変動風とする。動揺計算に用いた数値シミュレーション手法は、港湾技術研究所で開発したものである¹⁾。

(5) 計算結果のうち係留索張力および防舷材反力が 表一1 および 表一2 に示した許容値以内にあるか否かによって係岸避泊の可能性を検討する。ただし、船舶の動揺量がかなり大きくなるが、船間距離を十分とる様にす

表一1 係留索の配置と許容張力

	10 000 DWT					5 000 DWT					3 000 DWT				
	本数 (本)	径 (mm)	長さ (m)	破断強度	許容張力	本数 (本)	径 (mm)	長さ (m)	破断強度	許容張力	本数 (本)	径 (mm)	長さ (m)	破断強度	許容張力
1	6	50	46.8	216.0	68.7	6	50	47.8	216.0	68.7	6	40	34.3	168.6	44.4
2	1	45	44.7	34.5	9.1	1	40	45.0	28.1	7.4	1	40	38.1	28.1	7.4
3	3	45	44.7	103.5	27.2	3	40	45.0	84.3	22.2	3	40	36.1	84.3	22.2
4	3	45	44.1	103.5	27.2	3	40	43.1	84.3	22.2	3	40	35.3	84.3	22.2
5	1	45	44.1	34.5	9.1	1	40	43.1	28.1	7.4	1	40	36.6	28.1	7.4
6	6	50	52.2	261.0	68.7	6	50	48.2	261.0	68.7	6	40	34.2	168.6	44.4

* 正会員 運輸省港湾技術研究所構造部海洋構造研究室長
** 運輸省港湾技術研究所構造部海洋構造研究室

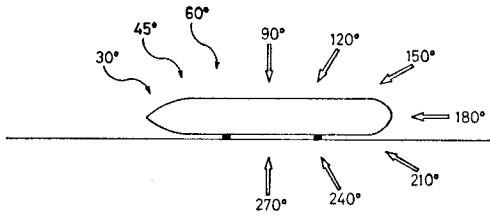


図-2 検討する風向と波向

表-2 防舷材の大きさ、配置と許容反力

	定 反 力 型		反力漸増型	
	サイズ個数	許容変位 及び反力	サイズ個数	許容変位 及び反力
10 000 DWT	1 600 mm 2 個	560.0 mm 147.7 tf	2 000 mm 2 個	1 000 mm 191.5 tf
5 000 DWT	1 250 mm 2 個	437.5 mm 94.2 tf	1 800 mm 2 個	900 mm 156.4 tf
3 000 DWT	1 150 mm 2 個	402.5 mm 78.2 tf	1 500 mm 2 個	750 mm 109.4 tf

るものとして、これに対してはとくに制限をしていない。

以下に主要な検討結果を示す。

3. 検討の結果

(1) 風向に対する検討

ここでは、平均風速を 30 m/s とし、風向を 90°～270° の間で七通りとして係岸船舶の動揺量と防舷材の反力および係留索の張力を調べた結果を示す。ただし、後に述べる理由により波向 30°、周期 10 s、波高 50 cm とする。また、防舷材としては定反力型防舷材を使用するが、後に反力漸増型防舷材についても検討する。(それぞれの変位復元力特性は、図-6 を参照。)

図-3 は、船舶の動揺量を示したものである。風向が 90°～180° まではスウェーイングが小さく、これに対しサージングが 120°～180° の間では大きい。しかし風向が 210°～270° の間では、スウェーイングの係船岸から離される側の動揺量が大きくなり、逆にサージングは減少する。また、ヨウイングは船舶が係船岸から離されているときに大きく、この計算では風向 210° の場合に最大である。風向 210° の場合の方が風向 270° の場合よりヨウイングが大きいのは、風向 210° の場合には係留索の伸びが風向 270° の場合より小さいので、相対的に柔軟な変位復元力特性の領域で動揺しているためでヨウイングが拘束されないためであると考えられる。この点は、サージングとスウェーイングの関係にもみられ、風向 210°～270° の間では、スウェーイングの動揺量が増加しているのに対し、サージングはドリフト量は増加しているが振幅は逆に減少してきている。しかしながら動揺量はサージングで 9 m～12 m、スウェーイングで 12 m～

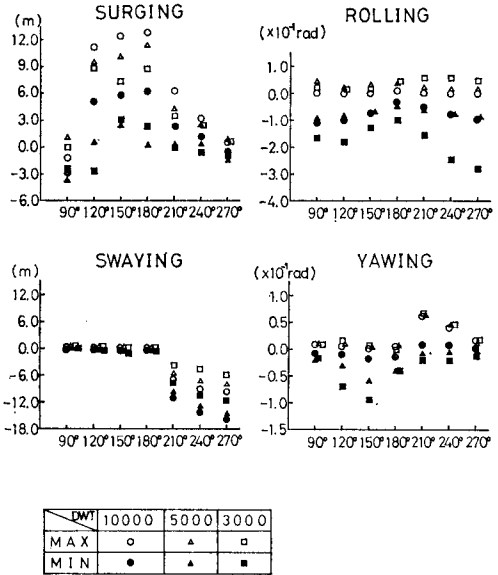


図-3 風向と動揺量の関係

15 m とかなり大きい。したがって、バース配置上は船間距離に留意する必要がある。また、3 000 DWT 級の貨物船ではローリングがかなり大きいので、船舶の復元力特性について検討しておく必要がある。

表-3 は、防舷材の反力と係留索の張力を示したものの

表-3 防舷材の反力および係留索の張力（風向に対し）

貨物船の種類	風 向	防舷材 (1) (tf)	防舷材 (2) (tf)	係留索 (2) (tf)	係留索 (3) (tf)	係留索 (4) (tf)	係留索 (5) (tf)
10 000 DWT	90°	137	139	0.03	0.07	0.07	0.03
	120°	118	138	0.16	0.57	0.54	0.15
	150°	60	138	0.41	1.52	1.46	0.32
	180°	55	82	0.55	1.96	1.79	0.46
	210°	0	0	3.88	13.03	27.54	10.05
	240°	0	0	8.78	27.67	43.63	17.03
	270°	0	0	11.78	36.20	45.29	16.07
5 000 DWT	90°	90	92	0.08	0.20	0.12	0.05
	120°	89	91	0.17	0.49	0.48	0.15
	150°	90	91	3.38	5.68	0.85	0.23
	180°	38	76	0.61	1.84	1'50	0.44
	210°	0	0	3.54	10.47	17.02	6.16
	240°	0	0	6.44	19.48	26.31	9.00
	270°	0	0	8.74	26.35	30.13	10.06
3 000 DWT	90°	75	76	0.04	0.11	0.08	0.03
	120°	76	76	0.56	1.50	0.71	0.20
	150°	0	76	1.21	3.08	0.38	0.10
	180°	0	62	0.65	1.92	0.99	0.24
	210°	0	0	3.12	9.20	14.66	4.88
	240°	0	0	5.49	17.48	23.54	7.47
	270°	0	0	7.46	23.53	28.43	8.75

であるが、これを見ると風向 $210^{\circ} \sim 270^{\circ}$ においては係留索 (2), (3), (4), (5) の張力が許容値を越える。現行の鋼船規則に従って設置されている船舶の係船装置は、せいぜい風速 $15\text{ m/s} \sim 20\text{ m/s}$ 程度の風による風圧力に対する強度しかないということを考えれば、これは当然の結果ではあるが、防風対策として船舶の係船装置を増強すること、上屋などの防風効果を期待すること、ウィンドスクリーンを設置することなどを検討する必要がある。風向 $90^{\circ} \sim 180^{\circ}$ に対しては、防舷材の反力と係留索の張力は許容値以内にある。

(2) 波向に対する検討

ここでは、風速 30 m/s 、風向 120° として、周期 10 s 、波高 50 cm で、波向を 30° 、 45° 、 60° と変えて計算した結果を示す。

図-4 は、船舶の動揺量を示したものである。波向が大きくなるとスウェイングとヨウイングの動揺量が大きくなる。

表-4 は、防舷材の反力と係留索の張力を示したものであるが、 $10\,000\text{ DWT}$ 級貨物船では波向 60° になると、防舷材 (2) の反力が許容値を越える。また、 $5\,000\text{ DWT}$ 級および $3\,000\text{ DWT}$ 級貨物船では、 45° および 60° のときに防舷材 (2) または (1) の反力が許容値を越える。波向 30° 以上の場合にも係留しうるようにしようとするれば、防舷材を大きくすればよいが、波向 30° のときでも $1\,600\text{ mm} \sim 2\,000\text{ mm}$ のものを用いていることになるので、現状と比べるとかなり大きい。防舷材の価格を考えると、これ以上のサイズのものを用いることについては総合的な経済比較が必要であろう。

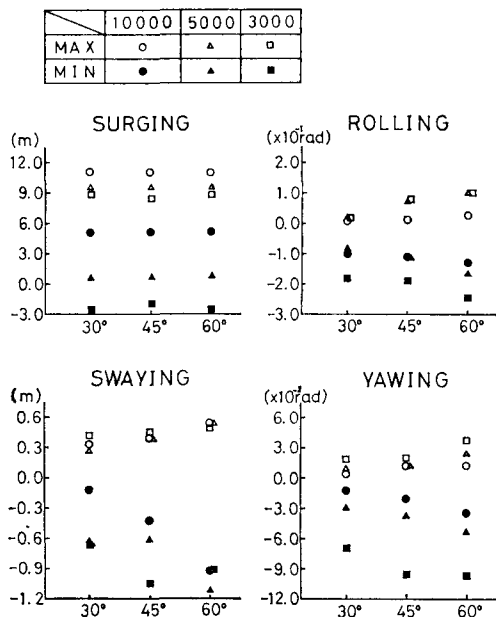


図-4 波向と動揺量の関係

表-4 防舷材の反力および係留索の張力 (波向に対し)

貨物船の種類	波 向	防舷材 (1) (tf)	防舷材 (2) (tf)	係留索 (2) (tf)	係留索 (3) (tf)	係留索 (4) (tf)	係留索 (5) (tf)
10 000 DWT	30°	118	137	0.16	0.60	0.54	0.15
	45°	134	145	0.28	0.74	0.56	0.16
	60°	141	236	0.56	1.33	0.77	0.18
5 000 DWT	30°	89	91	0.17	0.49	0.48	0.15
	45°	90	96	0.24	0.65	0.53	0.16
	60°	94	195	0.55	1.44	0.88	0.33
3 000 DWT	30°	76	76	0.56	1.50	0.70	0.20
	45°	76	77	1.04	2.34	0.84	0.24
	60°	79	124	0.94	2.36	1.06	0.32

(3) 波高に対する検討

ここでは、風速 30 m/s 、風向 120° として、波向 30° 、周期 10 s 、波高 50 cm 、 70 cm 、 100 cm として係岸船舶の動揺量、防舷材の反力および係留索の張力を調べる。スウェイング、ヒーピング、ローリング、ピッチング、ヨウイングは波高に比例して大きくなっている。波高 100 cm のときでは、スウェイング $-0.80\text{ m} \sim -0.45\text{ m}$ 、ヒーピング $-0.92\text{ m} \sim -0.96\text{ m}$ 、ローリング $-11.92^{\circ} \sim -4.35^{\circ}$ である。また、サージンは主として風荷重によって生じているので波高によってあまり変化がなく $-2.80\text{ m} \sim -11.22\text{ m}$ である。

防舷材の反力と係留索の張力は、いずれも表-1, 2 に示した許容値以内にある。

(4) 防舷材の特性に対する検討

ここでは、風向 120° 、風速 30 m/s および 35 m/s 、波向 30° 、周期 10 s 、波高 50 cm として、定反力型防舷材および反力漸増型防舷材を用いた場合の係岸船舶の動揺量、防舷材の反力および係留索の張力を調べる。

図-5 は、風速 30 m/s として計算した結果を、サージニング、スウェイング、ローリング、ヨウイングについて船型別に比較して示したものである。サージニング、ローリング、ヨウイング、また、図には示していないが、ヒーピング、ピッチングなどの動揺に及ぼす防舷材の特性の影響は小さい。しかし、スウェイングについては、

表-6 防舷材の反力および係留索の張力 (防舷材の特性に対し)

貨物船の種類	防舷材の種類	防舷材 (1) (tf)	防舷材 (2) (tf)	係留索 (2) (tf)	係留索 (3) (tf)	係留索 (4) (tf)	係留索 (5) (tf)
10 000 DWT	定反力型	118	138	0.16	0.57	0.54	0.15
	反力漸増型	67	123	0.17	0.63	0.54	0.14
5 000 DWT	定反力型	89	91	0.17	0.49	0.48	0.15
	反力漸増型	54	93	0.16	0.54	0.54	0.16
3 000 DWT	定反力型	76	76	0.56	1.50	0.70	0.20
	反力漸増型	50	106	0.29	0.73	0.46	0.13

	定反力型防舷材	反力漸増型防舷材
MAX	○	△
MIN	●	▲

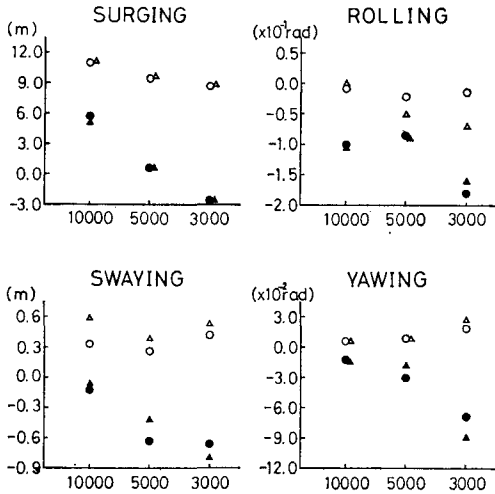


図-5 防舷材の特性と動揺量の関係

僅かではあるがその影響がある。すなわち、反力漸増型防舷材の場合には防舷材が圧縮される方向の動揺量がやや大きいのにに対し、係船岸から離される方向の動揺量がやや小さい点である。防舷材の反力および係留索の張力は表-5に示すとおりであるがいずれも許容値以内に入っている。

(5) 係留索の特性に対する検討

前項までの動揺計算結果をみると、スウェイングについては、風が船舶を係船岸に寄せる方向に作用する場合には船舶の動揺に対し防舷材が有効に働いているので、係船岸船舶のスウェイングの動揺量は小さく抑えられているが、風が係船岸側から作用する場合には係留索の伸びが大きくなって係船岸からかなり離される。そこで、ここでは係留索に初期張力をかけた場合および係留索の変位復元力特性が繰返し使用によって硬化した場合について計算を行うことにする。係留索の変位復元力特性は以下の三種とする。すなわち、

- 新品の係留索を用い、初期張力を0とした場合。
 - 係留索が硬化していると考えた場合で、伸びが30%~40%の間の変位復元力特性を用いた場合。
 - 新品の係留索を用い、初期張力をかけた場合。
- ただし、初期張力は10% ひずみに相当する値とする。計算条件は、風向 270°、風速 30 m/s および 35 m/s、波向 30°、周期 10 s、波高 50 cm とした。

初期張力をかけたり、または係留索が硬化していると考えると、サージングおよびスウェイングのドリフト量が減少する。また、動揺振幅もやや小さくなっている。また、風速 30 m/s 以上では係留索 (2), (3), (4), (5) の

張力が許容値を越えるので、やはり現状のように船舶が装備する係船装置および係留索では、係船岸側からの風に対しては係留が困難である。

(6) 満載の条件に対する検討

満載時については、風向 120°、風速 30 m/s、波向 30°、周期 10 s、波高 50 cm として検討を行ったが、空載時の場合と比べて、サージング、ローリングは大きい、スウェイング、ピッチング、ヨウイングは小さく、ヒーピングは差がない。

(7) 係船岸の構造に対する検討

ここでは、ドルフィンなど透過性係船岸について、風向 120°、風速 30 m/s、波向 30°、周期 10 s、波高 50 cm として検討を行ったが、非透過性係船岸の場合と比べてヒーピングとピッチングは小さく、スウェイングとヨウイングは大きい、サージングとローリングは差がない。

(8) 限界条件のまとめ

以上のことから、荒天時の係岸避泊については風が海側から吹く場合には防舷材を適切に選ぶことによって、風向 120°、平均風速 35 m/s、波向 30°~45°、周期 10 s、波高 50 cm~100 cm の条件まで係岸避泊が可能となるが、風が係船岸側から吹く場合には現在船舶が装備する係船装置および係留索では強度が不十分である。また、係留索の変位復元力特性が柔らかいので伸びが大きく、サージングやスウェイングのドリフト量が大きくなる。係船岸側からの風に対して船舶を係留しようとするれば、今後、

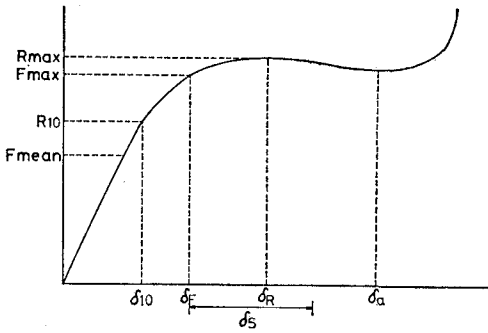
- 上屋等の防風効果を期待するか、あるいは防風壁を設備する。
 - 船舶の係船装置を増強する。
 - 荒天時係留システムの抜本的見直し。
- の事項について検討する必要がある。

4. 防舷材の選定の手順

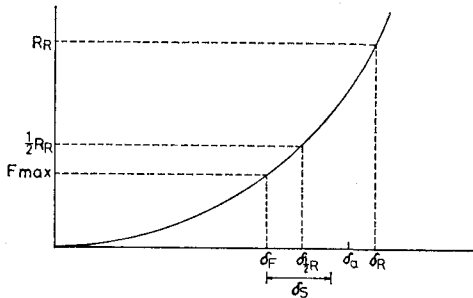
ここでは、定反力型および反力漸増型防舷材について防舷材の選定の手順を示すことにする。ここで示した手順に従って求めた防舷材を用いて数値シミュレーションを行った結果、防舷材の反力が許容値以内にあることが確認されている。

(1) 定反力型防舷材 (図-6, イ) 参照)

- 防舷材の配置を仮定する。
- 設計平均風速を求め、船舶に作用する風荷重を求める。風向は 30°~150° とし、スウェイング方向の反力および鉛直軸回りのモーメントを求める。
- b) で求めた風荷重に対し、防舷材の変位復元力特性を線形と仮定して防舷材に作用する荷重 (F_{mean}) を計算する。
- この防舷材荷重 (F_{mean}) が選定しようとする防舷



イ) 定反力型防舷材



ロ) 反力漸増型防舷材

図-6 防舷材の選定

材の 10% ひずみ (δ_{10}) に対する反力 (R_{10}) を越えないようにする。

e) ガスト率 1.3 として最大瞬間風速に対する防舷材荷重 (F_{max}) を求める。この防舷材荷重 (F_{max}) が、選定しようとする防舷材の最大反力 (R_{max}) を越えないようにする。

f) 無係留船舶の波による動揺を計算し、スウェイング、ヨウイング、ローリングによる防舷材位置の船舶の動揺量 (δ_s) を求める。最大瞬間風速に対する防舷材に作用する荷重 (F_{max}) による変形量 (δ_F) にこの動揺量 (δ_s) を加えた値が、防舷材の許容変位 (δ_a) 内にるように

適当な防舷材を選定する。

(2) 反力漸増型防舷材 (図-6, ロ) 参照)

a) 設計平均風速に対しガスト率 1.3 として最大瞬間風速を求め、この風速に対する風荷重および防舷材に作用する荷重 (F_{max}) を求める。この荷重 (F_{max}) が選定しようとする防舷材の定格変位 (δ_R) に対する反力の $1/2$ ($1/2 R_R$) を越えないようにする。

b) 最大瞬間風速に対する防舷材に作用する荷重 (F_{max}) による防舷材の変形量 (δ_F) に、(1), f) に示した船舶の動揺量 (δ_s) を加えた値が、防舷材の許容変位 (δ_a) 内にるように適当な防舷材を選定する。

5. 結 論

10 000 DWT 級, 5 000 DWT 級, 3 000 DWT 級の船舶について港内避泊の限界条件を検討した。その結果以下のことが明らかになった。

(1) 波については、周期 10 s の波として係船岸に対する波向が $30^\circ \sim 45^\circ$ 、波高 50 cm の条件で風が海側から吹く場合には、風速 35 m/s まで係岸避泊が可能であると考えられる。しかし、風が陸側から吹く場合には現行の鋼船規則に従って船舶が装備している係船装置および係留索では、風速 30 m/s でも船舶を安全に係留することができない。

(2) 風向によっては、スウェイングやサージの動揺量が 10 m ~ 15 m にもなるので、船間距離を十分にをとるとともに防衛工の配置などに留意する必要がある。

(3) 動揺シミュレーションを実施するに当たっては、係船付帯設備としての防衛工をあらかじめ選定する必要があるが、その選定手順を定反力型防舷材および反力漸増型防舷材について示し、その選定方法が妥当であることを確認した。

参 考 文 献

- 1) 上田 茂・白石 悟: 係留船舶の動揺計算法とその評価, 港湾技術研究所報告, 第 22 卷 4 号, 1983, pp. 181 ~ 218.