

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 19

NO. 2



JUNE 1980

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



正 誤 表

頁	欄	行	誤	正
73	式 (2.3)		$(m_1+m_2)\frac{d^2y_1}{dt^2}+m_2\frac{d^2y_2}{dt^2}+c_1y_1$ $-m_2l\frac{d^2\theta}{dt^2}=0$	$(m_1+m_2)\frac{d^2y_1}{dt^2}+m_1\frac{d^2y_1}{dt^2}+c_1y_1$ $-m_1l\frac{d^2\theta}{dt^2}=P_w$
81	右	下から 4	のうちに	のように
83	左	上から 4	3200 tf/cm	3200 tf/m
84	"	"	衝衝速度	衝突速度
88	"	" 9	考慮	考察

頁	欄	行	誤	正
115		上から 8	0.01~5 Hz の周波数の	0.01~5 Hz の周波数の
119	右	下から 6	模擬の	模擬の
120	図-2.1			削除
123	左	上から 5	$-2\rho g d \overline{BG} M \varphi$	$-2\rho g d \overline{BG} M \varphi$
124	右	下から 5	橋りょう梁などの	橋りょうなどの
"	"	" 2	春一番のとき風速の	春一番のときの風速の
126	図-3.3			削除
135	右	上から 7	ベキ指数	べき指数
136	"	下から 9	16.3 m/s ²	16.3 m/s,
139	"	上から 8	時々刻々と	時々刻々と
142	"	" 9	シミュレーションモデルに	シミュレーションモデルに
143	"	" 14	高さ 25 m がとすると	高さが 25 m とすると
"	"	下から 13	10 ² ~10 ³ 程度の	10 ² ~10 ³ 程度の
145	"	" 7	風荷重などの	風荷重などの
147	"	" 6	シミュレーショ	シミュレーショ
150	"	上から 5	シミュレーション	シミュレーション
"	"	" 11	シミュレーション	シミュレーション
151	表-7.5 (その 1)	ケース番号 1	49,340	49,390
"	"	"	23,400	23,480
"	" (その 2)	ケース番号	13	13
153	表-7.7 (その 1)	表題	パネの変位 (その 1)	パネの変位 (その 1) Y 方向
"	" (その 2)	"	パネの変位 (その 2)	パネの変位 (その 2) X 方向
155	左	下から 4	5,675 tf·m	5,678 tf·m
"	"	" 2	49.6 cm	49.5 cm
155	右	上から 4	0.86 × 10 ⁻³	1.28 × 10 ⁻³
"	"	"	4 cm 程の	6 cm 程の
156	左	下から 1	シミュレーション	シミュレーション
"	右	" 8	シミュレーション	シミュレーション

頁	欄	行	誤	正
177	右	下から 4	内節近 0 を	内節点 0 を
179	式 (3.29)		$W_0 = \{\delta_e\}^T [K] \{\delta_e\}$	$W_0 = \{\delta_e\}^T [K] \{\delta_e\}$
183	図-4.2 左	ω 厳密解	1.0	1.0 × 10 ⁻¹
"	" 右	"	1.00	1.00 × 10 ⁻¹
184	図-4.2	"	1.132	4.13 × 10 ⁻¹

港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第19巻 第2号 (Vol. 19, No. 2), 1980年6月 (June 1980)

目 次 (CONTENTS)

1. 埋立護岸における裏込砂の浄化効果に関する実験……………門 司 剛 至………… 3
(Experimental Study on Purification Effect of Backfilling Sand Used for Revetments
for Reclaimed Land……………Takeshi MONJI)
2. けい留中の大型タンカーの衝突力……………上 田 茂・佐藤喜………… 67
(Impact Force by VLCC Moored to Dolphin……………Shigeru UEDA and Kiichi SATOH)
3. 海上風の性質とそれによるく(矩)形浮体の動揺解析……………清 宮 理………… 115
(The Properties of Wind above Sea and the Oscillation Analysis of Floating Bodies
(Rectangular Cross Section) subjected to Wind Force ……………Osamu KIYOMIYA)
4. 有限要素法による鉄筋コンクリートスラブの弾塑性解析……………関口信一郎………… 169
(Elasto-plastic Analysis for Reinforced Concrete Slabs by Finite Element Method
…………… Shin-ichiro SEKIGUCHI)

2. けい留中の大型タンカーの衝突力

上 田 茂*・佐 藤 喜 一**

要 旨

超大型タンカー用のけい船施設（シーバース）は、航路および水深の確保の必要から、外海の波の影響を受ける場所に立地することがある。この場合、けい留中の大型タンカーは、風や外海の波の作用を受けて動揺し、けい船施設に繰返して衝突する。この衝突力は、場合によっては、接岸時のそれと同等もしくはそれ以上となる。外海の波の影響を受けるけい船施設の設計に際しては、この様なけい留船舶の衝突力についても十分な配慮を払わねばならない。

本報告では、けい留船舶が、波や風の作用を受けて動揺するときの、防げん材およびドルフィンの変形量ならびに衝突力の算定式を示した。また、この算定式による計算結果と稼働中のシーバースにおける現地観測結果との比較を行った。

さらに、けい留中の大型船舶が衝突する際の防げん材およびドルフィンの変形量と、風、波、船舶の水深喫水比および排水量などとの関係、ならびに、衝突時の船舶の仮想質量係数についても考察を加えた。

その結果明らかになった事項は以下のとおりである。

- (1) ドルフィンおよび防げん材の変形量の計算値と実測値とはほぼ一致した。
- (2) 風速がおおよそ 10 m/s 以下では、けい留船舶の衝突によって生ずるけい船施設の変形量は、風よりむしろ波の影響を受ける。また、風速が 15~20 m/s になっても、風向が船舶に対し真横でない場合には、風が船舶の動揺に及ぼす影響が小さいことが確認された。
- (3) 波はけい留船舶の動揺に大きな影響を及ぼすが、とくに、周期 10 秒以上の波の影響が大きいことが確認された。
- (4) 船舶の動揺周期の計算値はけい留施設の変形周期の実測値と一致することが確認された。
- (5) けい船施設の変形量の度数分布曲線はレーリー分布に従う。また、けい船施設の変形量の有義値と最大値との関係は、ほぼ $y_{\max}=(1.5\sim 1.6)y_{1/3}$ となる。これは、レーリー分布において、標本数が数 10 程度の有義値と最大値との関係とほぼ一致する。
- (6) けい留中の船舶が動揺する場合の、スウェイ運動に対する仮想質量係数はほぼ 1.7~2.0 としてよい。

* 構造部 海洋構造研究室長

** 前構造部 海洋構造研究室

Impact Force by VLCC Moored to Dolphins

Shigeru UEDA*

Kiichi SATOH**

Synopsis

Theoretical solution of impact force by VLCC moored to dolphins in irregular waves is obtained. Also observation are carried out at the presently operating berth. Computed values are confirmed to agree with observed values.

On the other hand, observed values are analyzed in order to obtain the relations between deflections of fenders and dolphins and the effects of wind and waves. Consequently, followings are cleared.

- (1) Deflection of mooring facilities by impact force of VLCC moored to dolphins are affected by waves than wind when wind velocity is less than 10 m/s. And even if wind velocity is in the range from 15~20 m/s, it does not affect so much when the wind direction is not laterally to ship's hull.
- (2) Moored VLCC moves in the period coincides to the natural period of the mooring systems.
- (3) Histograms of deflection of mooring facilities agree with Rayleigh's distribution. Relation between maximum values and significant values expressed as $y_{\max}=(1.5\sim 1.6)y_{1/3}$.
- (4) Virtual mass coefficient in sway motion of VLCC moored to dolphins are assumed as 1.7~2.0.

* Chief of Offshore Structures Laboratory, Structures Division

** Ex-Member of Offshore Structures Laboratory, Structures Division

目 次

1. ま え が き	71
2. 衝突力の検討手順	72
2.1 調査研究の全体計画	72
2.2 けい留船舶の衝突の数式モデル	72
2.3 現地調査の実施	74
2.4 調査記録の解析手順	75
3. けい留中の大型タンカーの衝突力	76
3.1 調査実績	76
3.2 けい留施設の変形量と船舶の衝突力	78
3.3 けい留系の固有周期	79
3.4 仮想質量係数の推定	80
3.5 実測変形量と計算変形量との比較	83
4. けい留施設の変形量と風および波との関係	84
4.1 調査時の気象海象条件	84
4.2 けい留施設の変形量と風との関係	84
4.3 けい留施設の変形量と波との関係	89
4.4 ドルフィンおよび防げん材の最大変形量	93
4.5 結果に対する考察	94
5. 結 論	96
6. あ と が き	96

1. まえがき

近年、海上輸送の効率化を図るため、タンカーや一般貨物船の大型化の傾向が著しく、それに伴って、航路や泊地の水深が深くなってきている。また、新しく開発される臨海性工業地区は、東京湾や大阪湾のような湾奥部ではなく、たとえば、鹿島港や苫小牧港などのように、直接外洋に面する地域に立地するようになってきている。その場合には、海岸線を掘込み、けい船施設を設け、これらを大規模な防波堤でしゃへいする掘込式の港湾が建設されることとなる。しかしながら、そのような港湾においては、タンカーなどの大型船用のけい船施設を掘込部の奥に設けることは、経済性、操船性、海難防止などの見地から困難である。したがって、大型船用のバースは、港口に近い、外洋の波の影響を受けやすい位置に設置される。たとえば、鹿島港の場合には、20万 DWT 原油タンカーバースは、図-1.1(註) に示すように、N 方

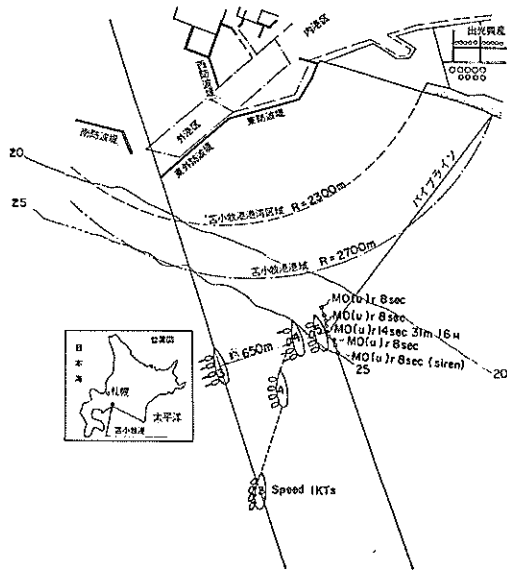


図-1.2 出光北海道シーバース位置図

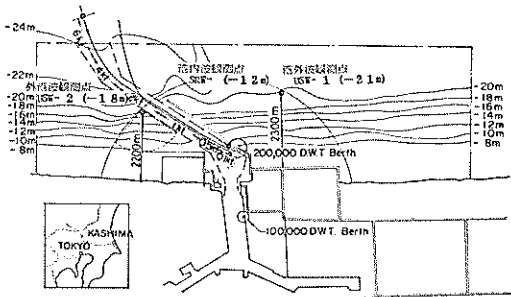


図-1.1 鹿島石油シーバース位置図

向に延長約 3060 m 伸びた南防波堤の隅角部から 500 m の位置にある。また、苫小牧港の場合には、図-1.2 に示すように、25 万 DWT 原油タンカーバースは、苫小牧港の南沖合約 2 km の位置にあって、バースは直接外洋に面しており、全くしゃへいされていない。鹿島港のシーバースでは、冬季の季節風や春先の台湾坊主などの影響で N 系統の風が数時間吹き続けると、鹿島港外の波向が $N40^{\circ} \sim 70^{\circ} E$ となり、南防波堤で回折して侵入してくる波と、北海浜で反射された波との合成波が生じ、けい留船舶には船尾側から約 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ の角度をもって作用する。このため、けい留船舶は波の作用を受けて動揺する。また、苫小牧港のシーバースでは、台風期にけい

留船舶はうねりを受けて動揺することがあるので、プレスティングドルフィンの設計荷重は動揺に伴う衝突力とされている。このように、けい留中のタンカーは外洋の波の影響を受けて動揺し、その結果繰返してけい船施設に衝突する。けい留船舶が動揺することによってけい船施設に及ぼす衝突力は、接岸時のそれと同等もしくはそれ以上になることがある。

かって、けい留中の船舶が、波や風の作用を受けて動揺し、船舶およびけい船施設に多大の損害をもたらした事例は多く、なかでも、ロシアアンゼルス港やケープタウン港の例は有名である。これらの港湾では、外かく施設などの整備増強によりその改善を図ってきた。港湾施設の改善に際しては、まず船舶の動揺量と風や波との相関関係を定量的に把握し、港内船舶の動揺量ひいては衝突による衝突力を少なからしめる施設配置や、船舶の係留方法などを検討することが本質的に重要である。この数年、この分野における技術の進展には著しいものがある。その主なものは、港内回折波の計算法やけい留船舶の動揺計算法の開発と改良、現地におけるけい留船舶の挙動の現地観測や模型実験が実施されたこと、その結果、けい留船舶の動揺計算法に種々の改良が加えられ、計算結果の信頼性が高くなってきたことなどである。

本研究では、けい留中の大型タンカーの衝突力の算定式を示し、ついで、鹿島港原油タンカーバースで実施し

註) 調査当時のもので現況とは異なる。現在の延長は 3600 m

た、けい留中の 20 万 DWT タンカーの衝突力の実測値との比較をすることによって、モデルの妥当性を検討した。また、実測値を解析して、けい留中の大型タンカーの衝突力と風、波、船舶の排水量などとの相関関係について検討を加えた。さらに、けい留中の船舶が動揺する際の船舶の仮想質量について検討した。以上の検討の結果、数式モデルによる計算値と現地における観測値とは良い一致を示すことが確認された。

本研究の成果は、けい留船舶の動揺計算法の確立に寄与し、ひいては、けい留船舶の安全性の確保、荷役効率の向上などに貢献するものと期待される。

2. 衝突力の検討手順

2.1 調査研究の全体計画

本報告では、以下の手順でけい留中の大型タンカーの衝突力について検討する。図-2.1 は、検討手順を大まか

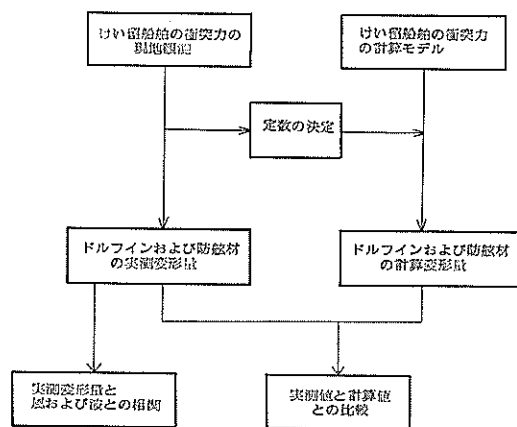


図-2.1 調査のフローチャート

に示したフローチャートである。各ブロックの検討項目の詳細については以下の節で詳述するので、ここでは簡単に記述する。

- (1) まず、けい留船舶の衝突現象を数式モデルで表示する。このモデルでは、船舶およびドルフィンそれぞれ剛体および質点とみなし、船舶がドルフィンに衝突した瞬間から再び離れるまでの間は、船舶はドルフィンを経して地盤に、かつ、船舶、ドルフィンおよび地盤の間には線形バネが存在しているものとする。この仮定に基づいて運動方程式を立て、初期条件として衝突時の変位および速度を与えて、ドルフィンおよび防げん材の変形量、船舶の衝突力、ならびに、けい船施設の反力を計算する。

- (2) つぎに、この計算法の妥当性を検討するために、現地観測を実施する。現地観測は、鹿島港の鹿島石油 20 万 DWT 原油タンカーバースで実施された。調査項目は、数式モデルの入力としての、船舶の排水量 (喫水)、船長、ドルフィンおよび防げん材のパネ定数、船舶の衝突速度を、数式モデルの出力としての、ドルフィンおよび防げん材の変形量と、船舶の衝突後これらの変形が最大になるまでの時間、および、調査実施時の気象・海象条件である。

- (3) 調査結果の解析では、まず実測されたドルフィンおよび防げん材の変形量から種々の定数を定める。すなわち、防げん材の変形量から防げん材の反力を求める。この反力が船舶の衝突力に相当する。この衝突力は当然のことながら、防げん材と直列に接続しているドルフィンの反力と等しい。ドルフィンの反力と変形量との関係からドルフィンのパネ定数を求める。また、防げん材およびドルフィンの変形記録から衝突速度を求める。さらに、有効衝突エネルギーと吸収エネルギーとは等しいとする関係から、衝突時の船舶の仮想質量係数を求める。

- (4) 以上の結果得られたドルフィンのパネ定数や衝突時の仮想質量係数を用いて、ドルフィンおよび防げん材の変形量を数式モデルから計算し、現地での観測値と比較検討し数式モデルの妥当性を実証する。

- (5) さらに、実測された防げん材およびドルフィンの変形量と気象海象条件との関係を調べる。

- (6) 上の数式モデルでは、大型タンカーの動揺に及ぼす波の影響はすべて衝突速度に反映されているものとしている。そこで、規則波による強制動揺シミュレーションを行い衝突速度を求め、これと実測された衝突速度とを比較する。

2.2 けい留船舶の衝突の数式モデル

(1) 運動方程式の設定

けい留船舶の衝突を力学的にモデル化し、衝突時のけい船施設および防げん材の変形量と衝突力を算定する方法を述べる。

いま、船舶の衝突の状態を 図-2.2 に示すようにモデル

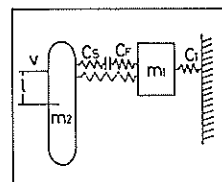


図-2.2 船舶の衝突モデル

化する。このモデルでは、質量 m_1 のけい船施設は地盤に線形バネで結合されているとする。このバネ定数は、たとえばドルフィンの場合には、くい横抵抗力を計算して求めるが、その線形性については 3. で吟味する。船舶は剛体と仮定し、付加質量を考慮した仮想質量を m_2 とする。けい留船舶は波や風の影響を受けて動揺し、けい船施設に取付けられた防げん材に衝突する。この場合、船舶の衝突エネルギーは、船舶の外板の弾性変形と防げん材およびけい船施設の変形によって吸収されるものとする。けい船施設のバネ定数を c_1 、防げん材のバネ定数を c_F 、船舶の外板のバネ定数を c_S とする。防げん材の質量は、船舶およびけい船施設の質量に比べて無視し得るので、防げん材と船舶の外板のバネ定数を合成し c_2 とする。

$$\frac{1}{c_2} = \frac{1}{c_S} + \frac{1}{c_F} \quad (2.1)$$

一般に、船舶の外板の弾性変形による吸収エネルギーは、全吸収エネルギーの 10% 以下であるといわれているので、以下の解析では、 $c_2 \doteq c_F$ とする。船舶の衝突によるけい船施設および防げん材の変形量をそれぞれ、 y_1 および y_2 、船舶重心から衝突点までの距離、すなわち、衝撃の偏心を l とする。船舶の衝突による上下方向の変形は無視することができるので、つぎの二次元運動方程式を得る。なお、大型船舶のけい留中のローリング量は小さい。また、ローリングによって生ずる水平方向の変位は小さいのでローリングは無視して考えることとする。

$$m_2 \left(\frac{d^2 y_1}{dt^2} + \frac{d^2 y_2}{dt^2} - l \frac{d^2 \theta}{dt^2} \right) + c_2 y_2 = P_w \quad (2.2)$$

$$(m_1 + m_2) \frac{d^2 y_1}{dt^2} + m_2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} + c_1 y_1 - m_2 l \frac{d^2 \theta}{dt^2} = 0 \quad (2.3)$$

$$\omega^2 = \frac{C_E(c_1 + c_2)m_2 + c_2 m_1 \pm \sqrt{\{C_E(c_1 + c_2)m_2 + c_2 m_1\}^2 - 4C_E c_1 c_2 m_1 m_2}}{2C_E m_1 m_2} \quad (2.11)$$

式 (2.11) の根号の中は、 m_1 および m_2 のいかなる値に対しても正であるので、 ω^2 として解が 2 個存在する。したがって、 ω としては絶対値の等しい 2 組の値が存在することになる。これらの正值をとって、これを ω' 、 ω'' とする。

一方、 r_1 および r_2 は

$$r_1 = C_E m_2 \omega^2 \quad (2.12)$$

$$r_2 = -(m_1 + C_E m_2) \omega^2 + c_1 \quad (2.13)$$

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} + c_2 l y_2 = M_w \quad (2.4)$$

ここに、 θ は重心回りの回転角、 I は重心回りの慣性モーメント、 P_w は波力、 M_w は波力モーメントである。

重心回りの慣性モーメント I は、環動半径 r を用いて

$$I = m_2 r^2 \quad (2.5)$$

と表わせる。

(2) 運動方程式の解

ここでは、一般のけい船施設について、けい船施設の変形量を求める。この場合、まず式 (2.2) および式 (2.4) において、 P_w および M_w を 0 とした自由振動の解を求める。その場合、初期条件として衝突速度 V を与える。この衝突速度は、波や風の影響を受けて船舶が動揺することにより生ずるものである。後に示すように、船舶の動揺周期は固有周期にほぼ近いので、この衝突速度を初期条件として自由振動の解を求めれば、ほぼ船舶の波浪中の動揺および衝突力を表わしているものとみなされる。この衝突速度の実測値とシミュレーション計算による衝突速度との比較検討は 4.5 で行う。

式 (2.2)~(2.4) の自由振動の解は次式で与えられる。

$$y_1 = r_1' k' \sin(\epsilon' + \omega' t) + r_1'' k'' \sin(\epsilon'' + \omega'' t) \quad (2.6)$$

$$y_2 = r_2' k' \sin(\epsilon' + \omega' t) + r_2'' k'' \sin(\epsilon'' + \omega'' t) \quad (2.7)$$

ここに、 k_1' 、 k_1'' 、 ϵ' 、 ϵ'' は未定定数であるが、 $t=0$ における初期条件を $y_1=0$ 、 $y_2=0$ 、 $dy_1/dt=0$ 、 $(dy_1/dt + dy_2/dt)=V$ とすると以下のように与えられる。

$$\epsilon' = 0, \quad \epsilon'' = 0 \quad (2.8)$$

$$k' = -\frac{r_1'' V}{(r_1' r_2'' - r_1'' r_2') \omega'} \quad (2.9)$$

$$k'' = \frac{r_1' V}{(r_1' r_2'' - r_1'' r_2') \omega''} \quad (2.10)$$

ここに ω' および ω'' は次式より求められる。

ここに C_E は集中係数で次式で与えられる。

$$C_E = \frac{1}{1 + \left(\frac{l}{r}\right)^2} \quad (2.14)$$

(3) けい船施設がドルフィンの場合の解

けい船施設がドルフィンの場合には、ドルフィンの質量は船舶の質量に比べて無視し得るほど小さい。したがって、 $m_1/m_2 \doteq 0$ とおくことができる。そうすると、

$$c_1 y = c_2 y_2 \quad (2.15)$$

初期条件を $t=0$ で $y=0$,
 $dy_1/dt + dy_2/dt = (c_2/c_D) \cdot dy_2/dt = V$ とすると解は

$$y_1 = \frac{V}{\beta} \cdot \frac{c_D}{c_1} \sin \beta t \quad (2.16)$$

$$y_2 = \frac{V}{\beta} \cdot \frac{c_D}{c_2} \sin \beta t \quad (2.17)$$

となる。ここに c_D はドルフィンと防げん材の合成バネ定数である。また β は次式で与えられる。

$$\beta = \sqrt{\frac{c_D}{CEm_2}} \quad (2.18)$$

2.3 現地調査の実施¹⁾

(1) 調査の目的

2.2 で求めた、けい留船舶の衝突の数式モデルの妥当性を検討するために稼働中のシーバースにおいて調査を実施することとした。調査項目は

- a) 船舶の諸元
 - b) ドルフィンの変形量
 - c) 防げん材の変形量
 - d) 気象・海象条件
 - e) 防げん材の特性
 - f) けい留索の配置
- である。

上記の調査項目についての取得値を整理解析することにより以下の事項が明らかとなる。

- イ. 船舶の衝突力、すなわち、ドルフィンおよび防げん材の相互作用力
- ロ. ドルフィンの水平方向のバネ定数
- ハ. けい留船舶の衝突時の仮想質量係数
- ニ. ドルフィンおよび防げん材の変形量の実測値と計算値との比較
- ホ. ドルフィンおよび防げん材の変形量と風向、風速、および、波高、波周期との関係

(2) 調査対象施設

調査は茨城県鹿島港内神栖地区の鹿島石油(株)所有の20万トン原油タンカーバースで実施した。バースの構造は、**図-2.3**に示すように、ローディングプラットフォームが斜組ぐい式、プレッシングドルフィンが直ぐい式である。両ドルフィンとは渡り橋により連絡されている。

プレッシングドルフィンは、**図-2.4**に示すように、1基につき、 $\phi 1500$ mm, $t=20\sim 24$ mm, $l=48.0$ m の鋼管ぐい(STK41, SM50)6本を使用している。プレッシングドルフィン前面には、西武ポリマー化成(株)製の

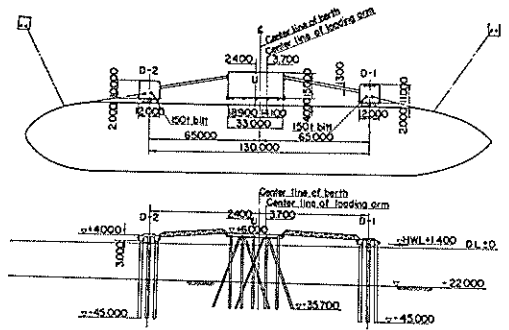


図-2.3 鹿島石油シーバース一般構造図

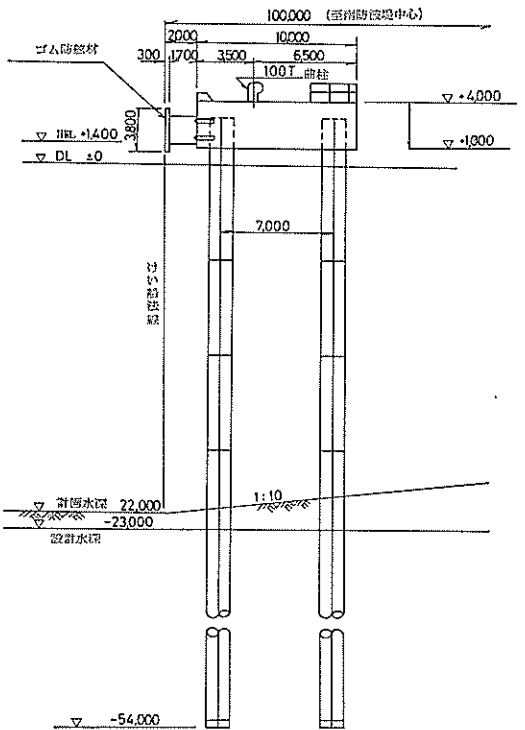


図-2.4 プレッシングドルフィン構造図

H型ゴム防げん材(1700H×1750L)が2個取付けられている。船舶の衝突エネルギーは、ドルフィンと防げん材の変形で吸収される。

(3) 船舶の諸元

船舶の諸元として以下のものを調べた。

- a) 全長(LOA)
- b) 垂線間長(LPP)
- c) 型幅(b)

- e) 満載喫水 (d_f)
- d) 測定時喫水 (船首, 船尾) (d_0)
- f) 排水トン数 (入港時およびけい留中) (DT)

(4) ドルフィンおよび防げん材の変形量

ドルフィンおよび防げん材の変形量は、ロードセルを用いた変位形により測定した。変位計の配置は図-2.5に示すとおりである。

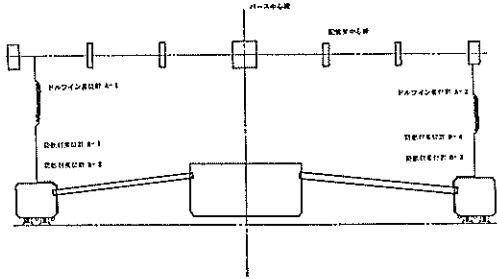


図-2.5 変位計配置図

ドルフィンの変形量の測定に際しては、バース後方の送油配管橋を固定点とみなし、ドルフィンと送油配管橋との相対変位を測定した。送油配管橋はバース法線から50m 後方にあり、プレッシングドルフィンとは全く独立した構造になっているので、十分に固定点とみなすことができる。また、防げん材の変形量としては、ドルフィンとの相対変位を測定した。この場合、変位計は、防げん材の中心にセットした。各ドルフィンには2個の防げん材が取付けられているので、それぞれに1個づつの変位形を取付けた。

ドルフィンと防げん材変位計はひずみゲージタイプの荷重計を利用したものである。測定の際には、あらかじめコイルバネに初期張力を与えておいて、ドルフィンまたは防げん材の変形による張力の減少分を検出する。ドルフィンおよび防げん材の変位計の最大変位量は30cm である。なお変位計については文献(1)に詳細が示されているので参照されたい。

変位計の記録は、ワーキングプラットフォーム上のコントロールハウス内で行った。変換器と記録部はタフレックスケーブルで結ばれている。記録は動ひずみ測定器で増幅し、電磁オシログラフに描かせた。

(5) その他の調査項目

a) 気象・海象条件, 風向, 風速, 波高, 波周期は鹿島港工事事務所で観測記録を利用した。風向, 風速は、バースの対岸の船だまり背後で観測された値である。また、波高および波周期は、港外および港内での

観測値である。港外波の観測には、南海浜沖合 2310 m の水深 21 m に設置された超音波式波高計を用いている。また、港内波の観測には、バース付近に設置された階段抵抗式波高計を用いている。(図-1.1 参照)

- b) 防げん材の特性は、防げん材の圧縮試験に基づいた荷重・変位特性*より設定した。
- c) けい留索については、材質, 径, 長さ, 配置等を調査した。

2.4 調査記録の解析手順

調査記録は図-2.6のフローチャートに従って解析した。詳細は以下のとおりである。

- (1) 防げん材の特性を線形化する。
- (2) 防げん材の変形量から反力を算定する。
- (3) ドルフィンの反力と変形量の関係を図化し、最小自乗法によりドルフィンのバネ定数を求める。また、その結果を Chang (チャン) の方法³⁾による計算値と比較する。
- (4) 船舶の係留状態を整理し、船舶とドルフィンおよび防げん材, ならびにけい留索からなるけい留系の固有周期を求める。
- (5) 計算上の固有周期と観測値との比較検討を行う。
- (6) 船舶の排水量を調べる。
- (7) 船舶の衝突速度をドルフィンおよび防げん材の変形速度から推定する。
- (8) 有効衝突エネルギーおよび吸収エネルギーを算定する。
- (9) 仮想質量係数を推定する。
- (10) 以上の結果得られた、ドルフィンおよび防げん材のバネ定数, 船舶の仮想質量, 集中係数, 衝突速度を用いて、ドルフィンおよび防げん材の変形量を計算し、観測値と比較する。
- (11) 調査を実施した時刻の風向および風速を整理する。
- (12) ドルフィンおよび防げん材の変形量と風向・風速との関係を整理する。
- (13) 調査を実施した時刻の波の記録を整理する。
- (14) 波と風との相関関係について調べる。
- (15) ドルフィンおよび防げん材の変形量と波高および波周期との関係を整理する。
- (16) シミュレーション計算を実施して衝突速度を求

* 鹿島港 20 万 DWT 原油タンカーバース設計書より転載

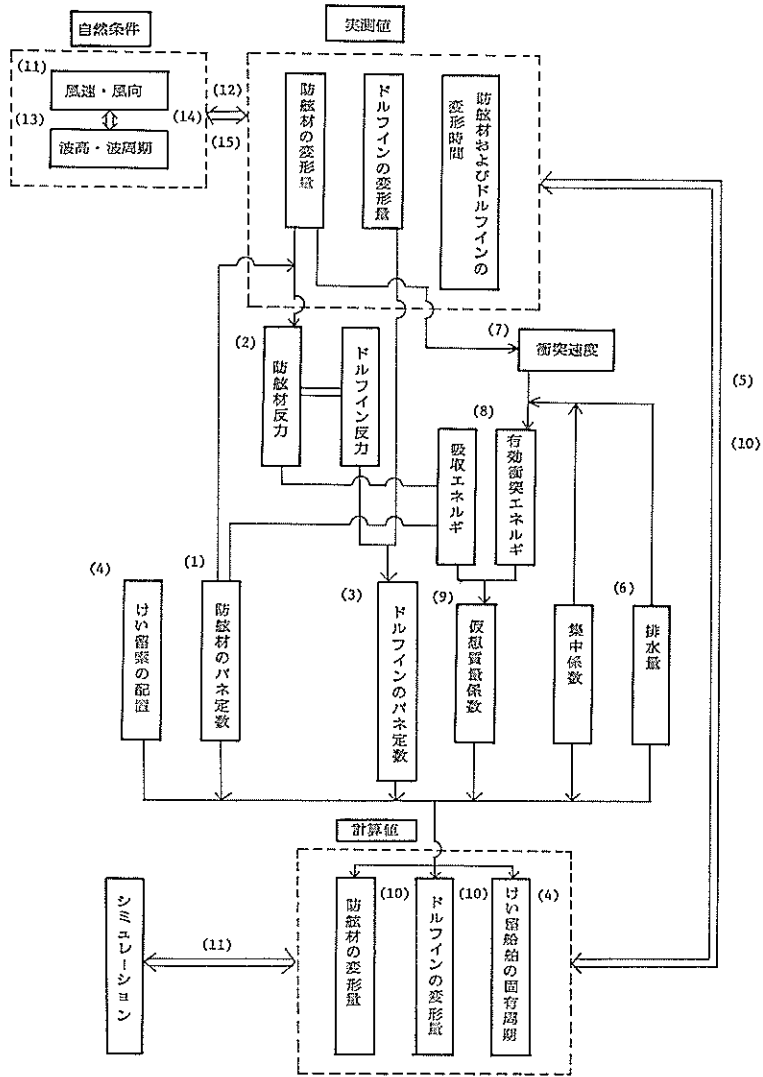


図-2.6 現地観測結果の解析手順

め、これと実測値との比較を行う。

3. けい留中の大型タンカーの衝突力

3.1 調査実績

調査を実施した船舶は合計 12 船である。各船舶に対しては、原則として、昼間のみ 2 時間おきに数回測定を実施した。1 回の計測時間は 20 分である。

船舶は原油の揚荷を行っているので、各計測回数毎に喫水が変化する。したがって、排水トン数が増える。原油の揚荷は、各タンク毎に順次実施されるので、実際

には、船首と船尾の喫水が異なっている。このような場合、排水トン数を厳密に算定するのは非常に困難であるので、ここでは近似的に計算することとした。すなわち、船首と船尾の喫水の平均を求め、この喫水で船舶がイーブンキールにあると仮定をする。しかる後に、満載喫水と調査時の喫水との差に相当する排水量を満載排水トン数から差し引いて調査時の排水トン数とした。喫水変化に伴う排水量の変化量は、船舶のブロック係数* c_B を

* 船体を船長 L 、船幅 b 、喫水 d なる直方体とみなしたとき、実際の排水量とこの直方体の排水量との比。

けい留中の大型タンカーの衝突力

用いて、(垂線間長)×(型幅)×(喫水差)×1.03× c_B とし
て計算した。

このようにして得られた調査対象船舶の諸元をとりま
とめると、表-3.1 のようになる。

表-3.1 調査対象船舶諸元

Case No.	船 船 諸 元						
	排水トン [t]	ブロック係数	垂線間長 [m]	型 幅 [m]	満載喫水 [m]	喫 水 [m]	H/d
KA47- 1-1	217,200	0.82	320	54.5	19.59	14.70	1.43
-2	118,550	"	"	"	"	8.00	2.63
KA47- 2-1	147,970	"	"	"	"	10.00	2.10
KA47- 4-1	151,960	"	300	50.0	19.44	11.90	1.76
KA47- 7-1	178,760	0.82	320	54.5	19.59	12.09	1.74
-2	173,600	"	"	"	"	11.74	1.79
-3	168,740	"	"	"	"	11.41	1.84
KA47- 8-1	154,220	0.84	"	53.6	19.74	10.48	2.00
-2	147,240	"	"	"	"	10.01	2.10
-3	142,640	"	"	"	"	9.70	2.16
KA47- 9-1	142,700	0.82	270	44.0	14.12	14.16	1.48
-2	138,090	"	"	"	"	13.70	1.53
-3	95,440	"	"	"	"	9.45	2.22
KA47-10-1	174,630	"	320	54.5	19.59	11.81	1.78
-2	170,070	"	"	"	"	11.50	1.83
-3	165,500	"	"	"	"	11.19	1.88
KA48- 1-1	228,100	"	"	"	"	15.44	1.36
-2	225,160	"	"	"	"	15.24	1.34
-3	215,880	"	"	"	"	14.61	1.44
-4	154,600	"	"	"	"	10.45	2.01
-5	150,040	"	"	"	"	10.14	2.07
KA48- 4-1	163,250	0.83	"	"	21.03	11.02	1.91
KA48- 7-1	141,040	"	310	53.0	19.45	10.12	2.08
KA48- 9-1	236,060	0.82	320	54.5	19.59	15.98	1.31
-2	183,330	"	"	"	"	12.40	1.69
-3	183,330	"	"	"	"	12.40	1.69
KA48-11-1	243,420	"	"	"	"	16.48	1.27

3.2 けい留施設の変形量と船舶の衝突力

(1) 衝突力の算定

けい留中の船舶の衝突力は、防げん材の特性曲線を用いて求めた。この場合、防げん材の特性は、防げん材の圧縮試験による荷重変形特性を用いて線形化した。以下に、衝突力の算定法およびその結果を述べる。

(2) 防げん材の特性

防げん材の特性は 図-3.1 に示す荷重変形特性を用いて定めた。防げん材の荷重変形特性は船舶が衝突すると

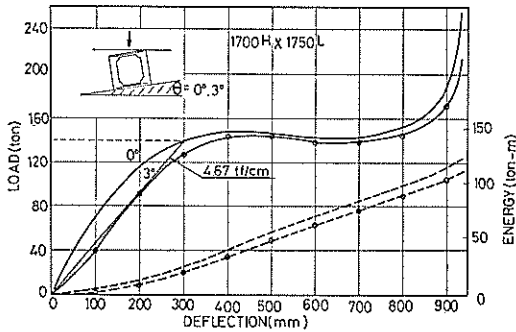


図-3.1 防げん材の圧縮特性曲線

きの角度によって異なる。たとえば、船舶がけい留施設の法線に対し 3° 傾斜していたとすると、変形量 100 mm の場合の反力は、傾斜していない場合の約 60% となり、防げん材はかなり軟かい特性を有することになる。しかし、変形量が増大するとその差は小さくなり、 200 mm の変形に対しては約 80% 、 300 mm の変形に対しては約 86% となるが、 400 mm 以上の変形に対してはほとんど差がなくなる。後述するように、調査記録では防げん材の変形量が 300 mm を越えることがなかったので、防げん材の特性をこの区間で近似的に線形とみなすことにした。変形量が 300 mm までの間は、図に示すような座屈型の荷重変形特性を有する防げん材でも、ほぼ線形化し得る特性を有している。なお、特性の線形化に当っては、大型タンカーの衝突角度の実績が最大 3° であることを考慮し、 0° と 3° の特性曲線の間で設定することとした。

いま、傾斜角 0° の特性曲線上で、

変形量が 300 mm の点と原点とを結ぶ直線をもって防げん材の特性とする。この直線のこう配は、前述の 3° の特性曲線の変形量が 200 mm の点と原点とを結ぶ直線のこう配とほとんど同一である。船舶がけい留岸の法線にまったく平行に衝突する場合には、この直線のこう配をもって防げん材のバネ定数とするのはやや過小かと思われるが、 0° で衝突するような事例は少い。また、傾斜角 3° の特性曲線は変形量 200 mm 付近で上に凸であるので、この直線のこう配は傾斜角 3° の特性より硬めである。したがって、この直線は、傾斜角 0° と 3° の特性の中間の特性を線形化しているものと思われる。その結果、防げん材のバネ定数は1個当り 4.67 tf/cm となる。ドルフィン1基当り2個の防げん材がついているので、ドルフィン1基当りの防げん材のバネ特性は 9.34 tf/cm となる。

(3) ドルフィンの特性

ドルフィンは $\phi 1500\text{ mm}$ の鋼管ぐい6本で支持された構造であるので、荷重変形特性は線形とみなすことができる。この場合、土質条件からぐいの横抵抗を算定し、ドルフィンのバネ定数を求める方法が考えられるが、ここでは、むしろ、これを検証に用いることとし、防げん材の反力から求めた荷重とドルフィン変位の実測値との関係から、最小自乗法によって決めることとした。

図-3.2 は全データをプロットしたドルフィンの荷重

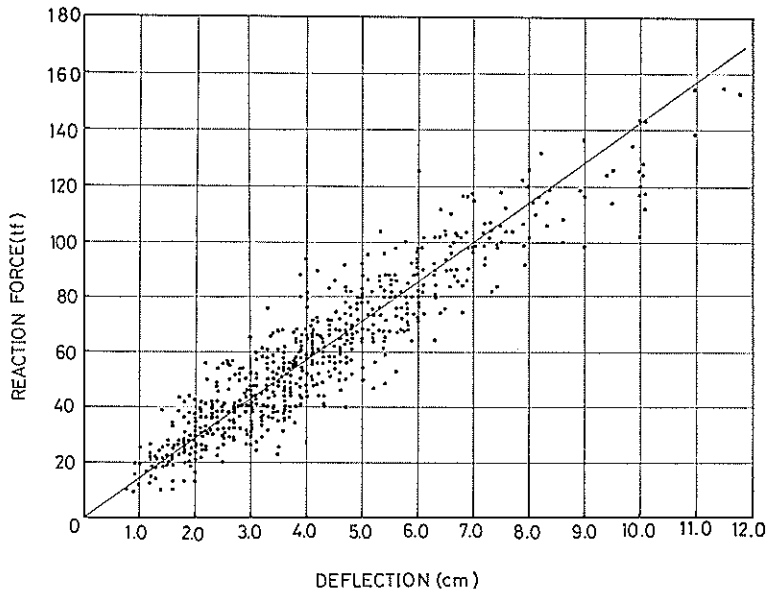


図-3.2 ドルフィンの変形と反力の関係

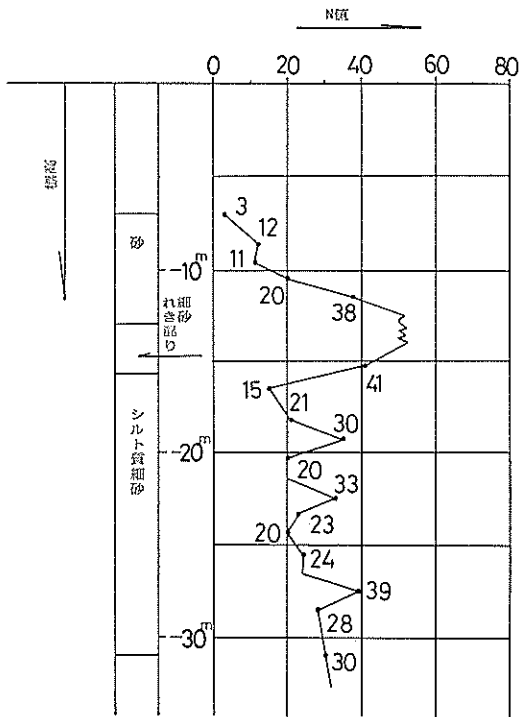


図-3.3 土質柱状図

と変形の相関図である。この図から、最小自乗法を用いて、原点を通る直線を求めると、14.2 tf/cm となる。

一方、鹿島石油 20 万トン原油タンカーバース付近の土質は、図-3.3 の柱状図に示すように、-23.0m 以深はシルト質細砂で N 値 17.5 以上の良好な地盤である。したがって、平均 N 値を 20 とし、横方向地盤反力係数 k_h を求めると、 3.0 kg/cm^2 *) と推定し得る。表-3.2 に示すくい諸元を用いて、Chang の方法でくいの横抵抗を計算して求めたい 1 本当りのバネ定数は 2.51 tf/cm であるから、ドルフィンのバネ定数は 15.1 tf/cm となる。

以上の結果、実測値から求めたドルフィンのバネ定数と土質定数から求めたバネ定数がほぼ等しいので、ドルフィンのバネ定数を 14.2 tf/cm とする。

3.3 けい留系の固有周期

船舶が防げん材とけい留索とで合成されたバネで拘束

*) 鹿島石油 20 万 DWT 原油タンカーバース設計書では 2.0 kg/cm^2 としている。この場合、バネ定数は 14.3 tf/cm である。

表-3.2 くいの諸元

	くいの諸元
ϕ	1500 mm
t	20~24 mm
h	24.3 m
I_0	$2.41 \times 10^6 \text{ cm}^4$
EI_0	$5.10 \times 10^{12} \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$
E_s	450 kgf/cm^2
β	0.217 m^{-1}
K_P	2.51 tf/cm
K_D	15.1 tf/cm

されているとして、けい留系の固有周期 T_{n0} を求めると表-3.3 に示すように、ほぼ 40 秒から 50 秒程度になる。また、これとは別に、けい留施設の変形記録(図-3.5 参照)を用いて、けい留施設が変形を開始してから最大変形に達するまでの時間を求め、これを 4 倍したものを船舶の動揺周期の実測値 T_{nc} とする。 T_{nc} と T_{n0} との関係が水深喫水比 H/d に対して図示すると図-3.4 となる。全般的に T_{nc} は T_{n0} より大きく、しかも、 H/d が増加するに従ってその傾向が大きくなる。この中で、 T_{nc}/T_{n0} が 1.1 より大きいものはすべて軽荷時の船舶である。実際のけい留系は、防げん材とけい留索のパネ定数とが異なる非対称けい留系である。船舶がバースに押付けられる

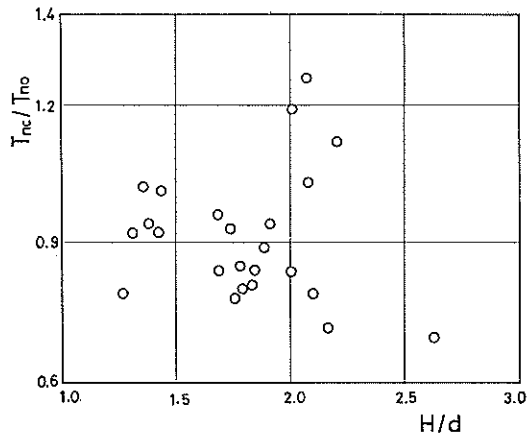


図-3.4 実測変形周期と計算固有周期の比と水深喫水比との関係

表-3.3 実測変形周期 T_{no} と計算固有周期 T_{nc}

Case No.	T	$T_{no \text{ mean}}$ [s]	$T_{no 1/3}$ [s]	T_{nc} [s]
KA47- 1-1		50.5	61.6	56.6
-2		56.4	56.8	40.6
KA47- 2-1		32.4	40.0	44.8
KA47- 4-1		43.6	43.2	41.5
KA47- 7-1		34.8	52.8	49.1
-2		40.4	60.8	48.4
-3		43.6	60.0	43.3
KA47- 8-1		43.6	53.6	45.0
-2		42.8	55.6	44.0
-3		43.6	60.0	43.3
KA47- 9-1		34.8	42.4	—
-2		38.4	56.0	—
-3		30.4	42.0	—
KA47-10-1		41.6	57.6	48.7
-2		43.6	59.2	48.1
-3		38.0	53.3	47.4
KA48- 1-1		43.6	54.4	55.6
-2		47.2	58.8	55.2
-3		41.6	53.6	54.1
-4		31.6	38.4	45.8
-5		29.2	35.6	45.1
KA48- 4-1		42.4	50.0	36.8
KA48- 7-1		29.6	37.2	38.5
KA48- 9-1		53.2	61.2	56.4
-2		40.0	51.6	49.7
-3		42.0	59.2	49.7
KA48-11-1		64.0	72.8	57.6

注) — は欠測

ときは防げん材が働き、逆に、離されるときはけい留索が働くことになる。一般にけい留索のバネ定数は防げん材のバネ定数より小さいので、船舶はバースから離れる

方向には大きく変形することになる。したがって、船舶の運動中心がバース法線より外側にずれていることになる。その結果、船舶は T_{nc} より長い周期で運動することになる。また、 T_{nc} は防げん材またはドルフィンが変形している時間に基いて計算されているので、けい留索のバネ定数が防げん材およびドルフィンのバネ定数より軟いということを考慮に入れると、実際の船舶の運動周期は T_{nc} よりさらに長いものと思われる。

以上のことから、けい留船舶はけい留索の固有周期が卓越するような状態で運動を行っていることがわかる。この現象は鹿島港におけるけい留中の大型タンカーの動揺調査報告でも明らかにされている³⁾。

3.4 仮想質量係数の推定

(1) 有効衝突エネルギーおよび吸収エネルギー

船舶の有効衝突エネルギーは、ドルフィンおよび防げん材で吸収されるものとする。したがって、つぎの関係をj得る。

$$\frac{1}{2} C_E \times m_2 V^2 = \frac{P^2}{2c_D} \quad (3.1)$$

式(3.1)を変形し、仮想質量係数 C_m を用いて書直すj式(3.2)を得る。

$$P = \sqrt{C_m \cdot c_D C_E m_a} \cdot V \quad (3.2)$$

ここに、仮想質量係数 C_m は、

$$C_m = \frac{m_2}{m_a} \quad (3.3)$$

である。また、 P は衝突力、 m_a は船舶の排水質量である。

(2) 衝突速度

けい留中の船舶の衝突速度は、ドルフィンおよび防げん材の変形記録からつぎのようにして求める。

ドルフィンおよび防げん材の変形記録は、たとえば、図-3.5 に示すようにオシログラフに記録される。いま、ドルフィンの質量が船舶の質量に比べて無視できる

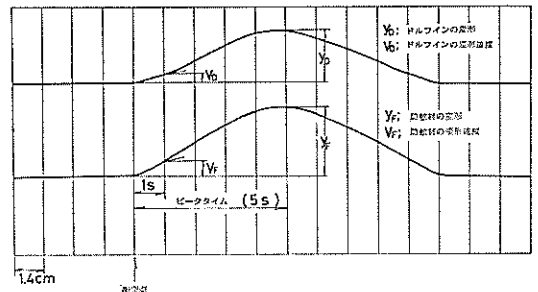


図-3.5 ドルフィンおよび防げん材の変形記録の一例

けい留中の大型タンカーの衝突力

ほど小さいので、船舶の衝突速度はドルフィンの変形速度と防げん材の変形速度との和と考えてよい。厳密には船舶がけい留施設に衝突した時の速度が必要である

表-3.4 衝突速度 V

Case No.	H/d	データ数 N	V [cm/s]		
			Max	1/3 平均	Mean
KA47- 1-1	1.43	31	7.11	4.01	2.49
-2	2.63	30	2.02	1.36	0.93
KA47- 2-1	2.10	9	4.24	4.04	2.57
KA47- 4-1	1.76	14	1.53	1.41	1.09
KA47- 7-1	1.74	16	4.50	4.03	2.37
-2	1.79	39	2.96	2.32	1.55
-3	1.84	47	4.56	2.77	1.71
KA47- 8-1	2.00	25	2.55	2.07	1.37
-2	2.10	25	1.77	1.52	1.22
-3	2.16	2.16	2.00	1.62	1.28
KA47- 9-1	1.48	21	2.86	2.42	1.90
-2	1.53	17	4.28	2.91	1.93
-3	2.22	24	4.57	3.40	2.24
KA47-19-1	1.78	25	3.02	2.20	1.65
-2	1.83	31	3.19	2.23	1.70
-3	1.88	36	4.53	2.69	1.94
KA48- 1-1	1.36	22	3.41	2.66	1.84
-2	1.38	28	4.18	2.55	1.67
-3	1.44	26	3.57	2.79	1.97
-4	2.01	33	3.33	2.91	1.98
-5	2.07	46	5.18	2.81	1.97
KA48- 4-1	1.91	7	0.57	0.57	0.44
KA48- 7-1	2.08	17	4.73	4.08	2.87
KA48- 9-1	1.31	27	2.33	1.74	1.30
-2	1.69	27	3.16	2.68	1.93
-3	1.69	24	3.64	2.65	1.96
KA48-11-1	1.27	18	1.36	1.20	0.89

が、これは、オシログラフの記録では衝突した点における接線のこう配に相当する。しかし、このようにして、接線のこう配から衝突速度を求めるのは大きな誤差を含むおそれがあるので、ここでは、オシログラフの記録で衝突後 1 秒の時点の変形量を読み取り、これをもって衝突速度とした。このようにして得た衝突速度をとりまとめたものが表-3.4 である。表には最大速度、3 分の 1 最大速度 (有義値) および平均速度などを示した。

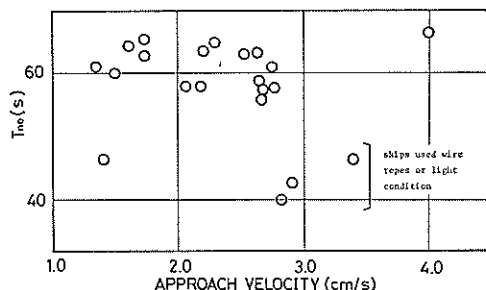


図-3.6 衝突速度と実測の固有周期の関係

図-3.6 は衝突速度の有義値 $V_{1/3}$ と T_{no} との関係を示したものであるが、衝突速度のいかんにかかわらず、運動周期はほぼ一定であることが判る。したがって、衝突速度は船舶の動揺振幅にほぼ比例しているとみてよい。図-3.6 で、固有周期が 40 秒程度のものは排水量が小さい船舶およびワイヤーを用いた船舶のものである。

(3) 仮想質量係数の推定

仮想質量係数は式 (3.3) で定義されたので、式 (3.2) から仮想質量係数を推定する。

式 (3.2) を変形して式 (3.4) を得る。

$$V = \frac{1}{\sqrt{C_D}} \cdot \frac{P}{C_D} \cdot \sqrt{\frac{C_D}{C_E m_a}} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{P}{C_D} \cdot \frac{1}{\sqrt{C_E}} \cdot \frac{2\pi}{T_n} \quad (3.4)$$

ここに、 m_a は船舶の排水質量、 T_n はけい留系の空中での固有周期、 α は仮想質量係数の平方根である。

水中の船舶の運動周期は、水の粘性抵抗などの影響により空中のそれより大きくなる。一般に、水の粘性抵抗は非線形であるから取扱いがやや面倒である。したがって、この周期の増加をあたかも船舶の質量が増加したかのうに取扱うのが便利である。このみかけの質量の増加分を付加質量という。また、船舶の排水質量と付加質量を加えたものを仮想質量という。水の粘性抵抗は船舶の周辺の水の流れに大きく影響されるので、水深喫水比

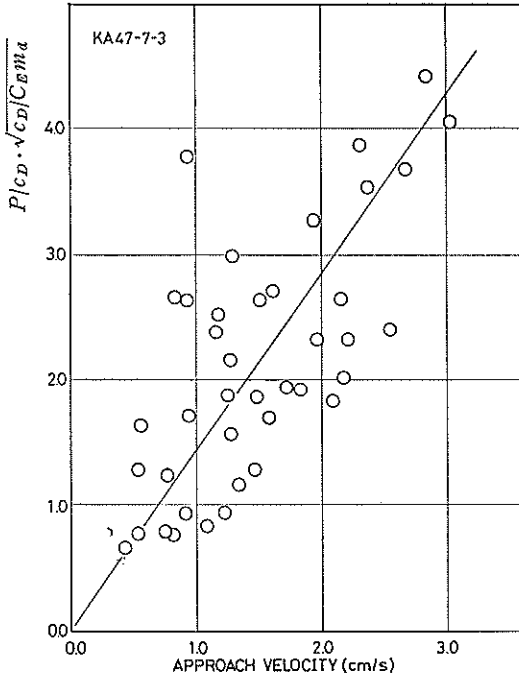


図-3.7 衝突速度と $\frac{P}{c_D} \cdot \sqrt{\frac{c_D}{C_{EMa}}}$ との関係

H/d が小さいと付加質量は大きくなる。また、船舶の運動が緩慢であれば、付加質量が大きくなる。

図-3.7 は式 (3.4) の関係を KA47-7-3 について図示したものである。横軸には衝突速度、縦軸には式 (3.4) の右辺の内 $1/\alpha$ を除いた値すなわち、

$$\frac{P}{c_D} \cdot \sqrt{\frac{c_D}{C_{EMa}}} \quad (3.5)$$

をとっている。したがって、図中の直線のこう配が α となる。この直線は図中にプロットされた点から、最小自乗法によって求めたものである。ここでは、KA47-7-3 のみ例示する。

このようにして得られた α の値をとりまとめたものが表-3.5 である。ただし、標本数が少ないもの、衝突速度の有義値が 2 cm/s 以下のものについては、ばらつきが大きいので除外した。

図-3.8 は、 α と水深喫水比 H/d との関係を示したものである。今回の調査では、入港船舶の喫水が浅く、 H/d が 1.35~2.2 と比較的軽荷状態であった。 α の値は H/d が大きくなるとやや減少気味であるが、ほぼ 1.4 程度である。したがって、仮想質量係数は約 2.0 とな

表-3.5 仮想質量係数の平方根 α

Case No.	$V_{1/3}$ [cm/sec]	H/d	α	データ数 N
KA47- 1-1	4.01	1.43	1.15	31
-2	1.36	2.63	1.92	30
KA47- 2-1	4.04	2.10	0.97	9
KA47- 4-1	1.41	1.76	2.03	14
KA47- 7-1	4.03	1.74	1.25	16
-2	2.32	1.79	1.65	39
-3	2.77	1.84	1.43	47
KA47- 8-1	2.07	2.00	1.16	25
-2	1.52	2.10	1.10	25
-3	1.62	2.16	1.29	37
KA47- 9-1	2.42	1.48	1.44	21
-2	2.91	1.53	1.39	17
-3	3.40	2.22	1.62	24
KA47-10-1	2.20	1.78	1.43	25
-2	2.23	1.83	1.44	31
-3	2.69	1.88	1.38	36
KA48- 1-1	2.66	1.36	1.59	22
-2	2.55	1.38	1.82	28
-3	2.79	1.44	1.40	26
-4	2.91	2.01	1.23	33
-5	2.81	2.07	1.34	46
KA48- 4-1	0.57	1.91	1.71	7
KA48- 7-1	4.08	2.08	1.08	17
KA48- 9-1	1.74	1.31	1.58	27
-2	2.68	1.69	1.53	27
-3	2.65	1.69	1.41	24
KA48-11-1	1.20	1.27	2.13	18

る。

同図には 50 万トンタンカーの 50 分の 1 の模型を用いて行った接岸力の実験から得られた α の値を示して

けい留中の大型タンカーの衝突力

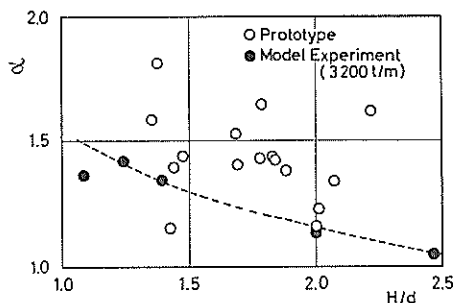


図-3.8 水深喫水比と α との関係

いる。実験値は透過性のけい船施設に対するものであるが、今回の実船観測はドルフィンバースで実施されているので対応するデータと判断される。ただし、実験に用いたバネ定数は実機換算して約 3200 tf/cm であって、実際のドルフィンおよび防げん材の合成バネ定数よりかなり大きい。仮想質量係数はバネ定数が大きくなると減少する傾向があるので、実験値が実船による実測値よりやや下回っていることが理解される。

図-3.9 は α と運動周期との関係を示したものであるが、この周期の範囲内では α はほぼ一定である。

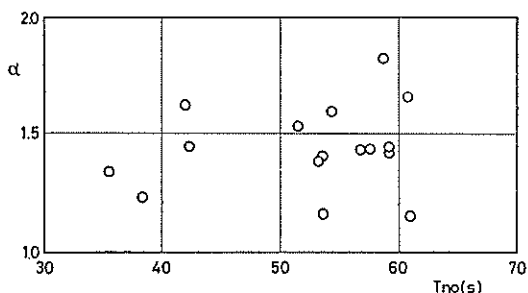


図-3.9 α と実測変形周期と T_{n0} の関係

α と衝突速度との関係* は図-3.10 のように表わされる。衝突速度が 3 cm 以下では α の平均値は 1.4 であり、1.3~1.6 程度の間にはばらついている。しかし、衝突速度が大きくなるにしたがって α は減少気味である。衝突速度が小さい場合は有効衝突エネルギーも小さいので設計上問題にならない。したがって、けい留中の船舶が動揺する場合の、スウェイ運動に対する仮想質量係数はほぼ 1.7~2.0 としてよい。

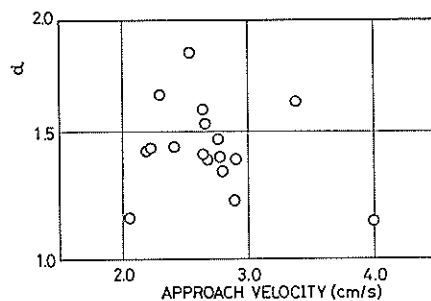


図-3.10 衝突速度と α との関係

3.5 実測変形量と計算変形量との比較

以上の考察の結果、けい留施設のバネ定数、船舶の仮想質量 ($2ma$ とする)、衝突位置、衝突速度が明らかとなったので、式 (2.16) および式 (2.17) にもとづいて計算変形量を求め実測変形量と比較する。

図-3.11 および 図-3.12 は、ドルフィンおよび防げん

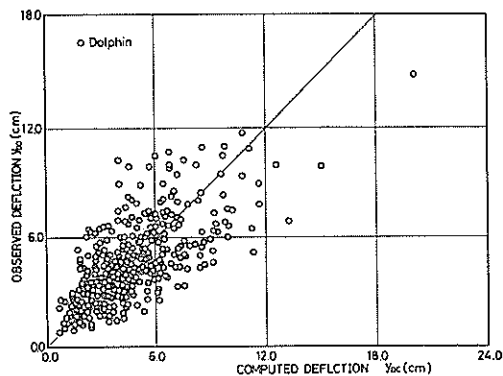


図-3.11 実測変形量と計算変形量との関係 (ドルフィン)

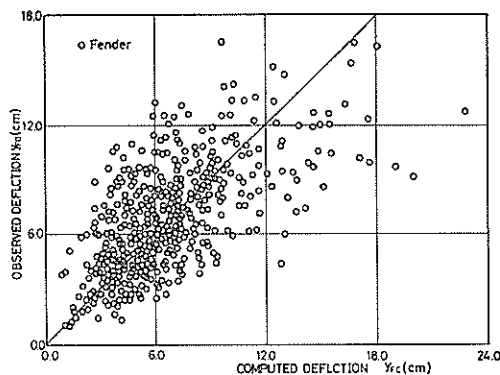


図-3.12 実測変形量と計算変形量との関係 (防げん材)

* 共に代表値同志の比較である。ここでは代表値として 3分の1 最大平均値をとっている。

材について、計算値と実測値を比較したものである。両者は比較的良く一致している。しかし、変形量が小さい場合にややばらつきが大きいようである。変形量が小さいデータについては衝突速度が小さいが、衝突速度が小さいと、記録の解析上速度そのものの誤差が大きくなるので、変形量のばらつきが大きくなるものと思われる。

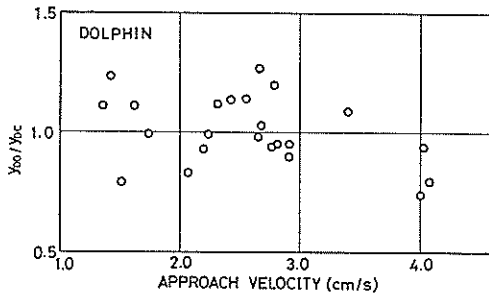


図-3.13 実測変形量と計算変形量の比と衝突速度との関係 (ドルフィン)

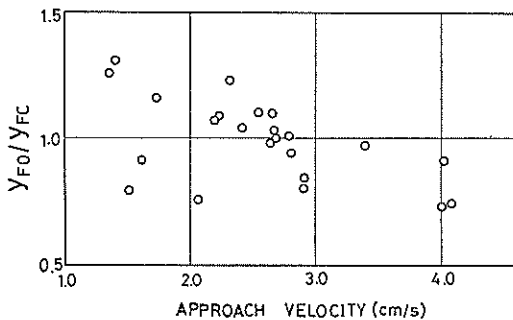


図-3.14 実測変形量と計算変形量の比と衝突速度との関係 (防げん材)

図-3.13 および 図-3.14 は、横軸に衝突速度、縦軸に(実測変形量/計算変形量)を示したものである。衝突速度が 2 cm/s 以下の場合には、計算値と実測値との差が大きい。これは、衝突速度 2 cm/s 以下のデータについては衝突速度の測定上のばらつき、仮想質量係数のばらつきなどが大きいためである。衝突速度が 3 cm/s を越えると計算値と実測値との差は比較的小さくなってくる。

4. けい留施設の変形量と風および波との関係

4.1 調査時の気象海象条件

鹿島石油シーバースの調査は、12 月から 3 月を中心に行なった。その理由は、冬季の季節風や春先の台湾坊

主などの影響で、N系統の風が数時間吹き続けると、鹿島港外の波向が N40°~70° E となり、南防波堤先端で回折して侵入してくる波と北海浜で反射された波* との合成波が生じ、けい留船舶には船尾側から約 20°~30° の角度をもって入射する。したがって、この時期が 20 万トン原油タンカーバースに係留中の船舶にとって、波や風による影響が最も大きいものと判断したからである。

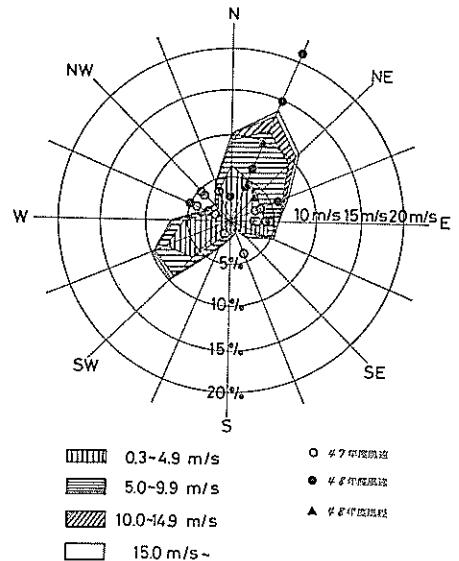


図-4.1 鹿島港風配図および調査時の風向・風速

図-4.1 は鹿島港の風配図である。同図には調査を実施した時の風向・風速も合わせて記入した。調査実施日には NNE からの風速が大きかったことを示している。なお、NNE 以外の風向の場合にも、調査実施直前まで N 系統の風が吹き続けていた例が多い。そのような場合には、余波として、N から E 方向のうねりが残っている。なお、調査日の天気概況については、参考文献 (4) を参照されたい。

4.2 けい留施設の変形量と風との関係

測定時の風速は 図-4.1 にも示したように、ほとんどが 5 m/s 以下であり、風速 10 m/s を越えるような事例は、KA48-9 の 2 回目および 3 回目の測定の場合のみである。したがって、風と船舶の動揺との相互関係を全

* 現在は、南防波堤が 3600 m に延長されている。また、北海浜前面には消波護岸が設けられ反射波は少なくなっている。

けい留中の大型タンカーの衝突力

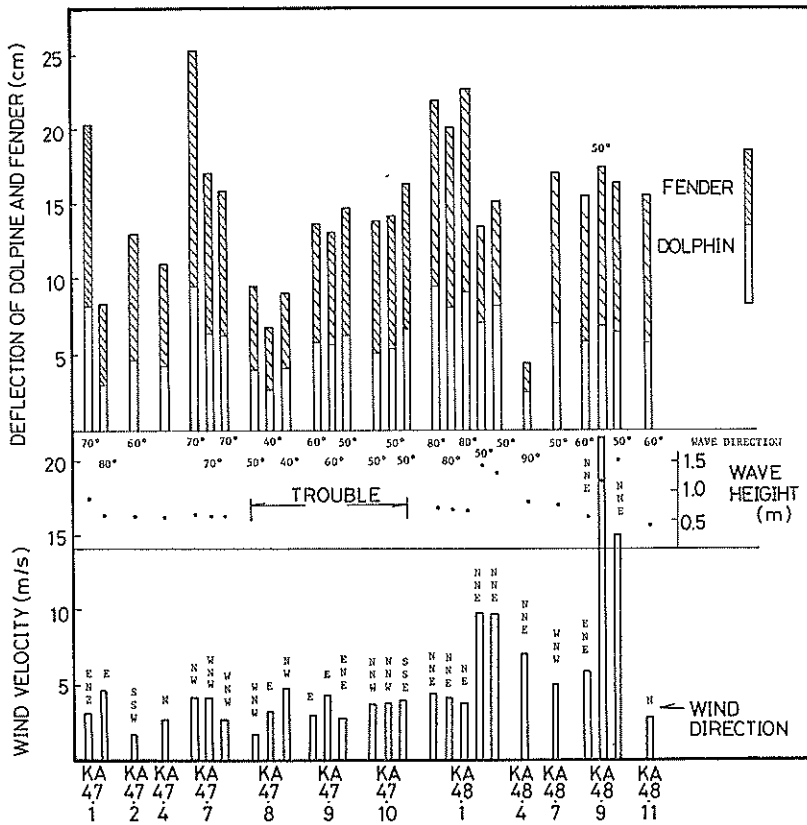


図-4.2 ドルフィンおよび防げん材の変形量と風向・風速波向・波高との関係

面的に論ずるには、風は少々弱すぎるくらいはある。このような限界はあるけれども、とりあえず、風と船舶の衝突によるけい船施設の変形量との関係をつかむために、測定時の風向、風速、喫水、けい留状況などの要因について検討してみよう。

そこで、測定時の風向、風速、波高、波向、防げん材およびドルフィンの変形量を一括して取まとめ、図-4.2を描くこととする。ここで、風向は16方位、風速は平均風速でm/s、波高は有義波高m、波向はNから時計回りに測定する。

防げん材およびドルフィンの変形量としては、代表値として3分の1最大平均値(有義値)で示した。測定回数、同一船舶について2回以上ある場合には、2回目以降の測定時の喫水は通常順次小さくなっていることに注意されたい。

船舶が最も大きな風圧力を受ける風向は、当然のことながら船舶に対して真横である。パース法線は防波堤法

線と平行であるので、これらはEまたはWの風である。Eの風は船体をパースから離す方向に、また、Wの風は逆に押着ける方向に作用する。このようなことを考えて図-4.2を眺めてみても、E~ENE、W~WNWの風向の場合でも特に防げん材およびドルフィンの変形が大きいというわけでもない。また、風速が大きい時でもやはり変形が大きいというわけでもない。

なお、波については、波向が90°の場合、東からの波となり、本来ならば船舶の動揺に大きな影響をもつ波であるが、防波堤がほぼNの方向に向いているので、この波は防波堤によりしゃ断されてしまい、実体としては影響は小さい。また、図-4.2ではこの傾向が明白にでている。

風向とけい留施設の変形との関係を詳細に検討するために、図-4.3にドルフィンおよび防げん材の変形量と風荷重との比 $(y_{1/3}/V_w^2)(A \cos^2 \theta + B \sin^2 \theta) \sin \theta$ を各風向ごとにプロットしたものである。ただし、 $y_{1/3}$ は変形量の

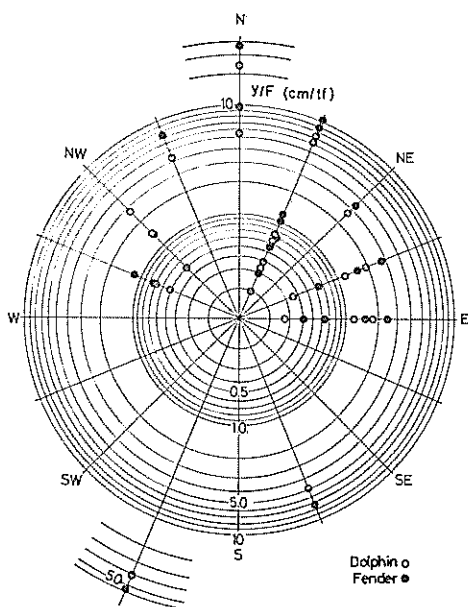


図-4.3 ドルフィンおよび防げん材の変形量と単位横方向風圧力との関係

有義値である。また、 A は船舶の正面投影面積、 B は側面投影面積であり、それぞれ式 (4.1) および式 (4.2) で与えられる。

$$A = C_1 b^2 \quad (4.1)$$

$$B = C_2 L_{pp}^2 \quad (4.2)$$

ここに、 b は船幅 (m)、 L_{pp} は垂線間長 (m) である。また、 C_1, C_2 はそれぞれ式 (4.3) および式 (4.3) より求める^{*)}。

$$C_1 = -3.6p \times 10^{-3} + 0.72 \quad (4.3)$$

$$C_2 = -6.2p \times 10^{-4} + 0.098 \quad (4.4)$$

ここに p は満喫比 (%) である。

図-4.3 は、いかえると、船体を受ける横方向の単位風圧力に対する変形量を表わしていることになる。プロットされた点は、同一風向に対してもかなりばらついているが、E または W の風の場合よりも、N または S の風の場合の方が大きな値を示している。このことは、船舶の動揺量には、風以外の要因がかなり強く影響していることを示している。

図-4.4 は、風圧力合力に対するドルフィンおよび防げん材の変形量の風向別表示である。図-4.4 は 図-4.5 と全く同じ傾向を示している。風圧力合力は 図-4.5 に

* 文献 (5) より回帰式を求めて示した。

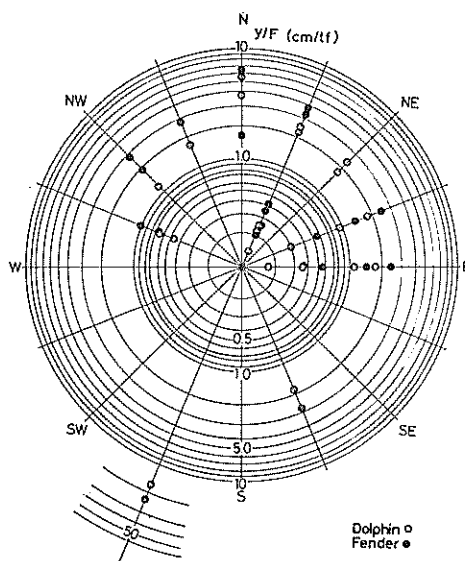


図-4.4 ドルフィンおよび防げん材の変形量と単位風圧力合力との関係

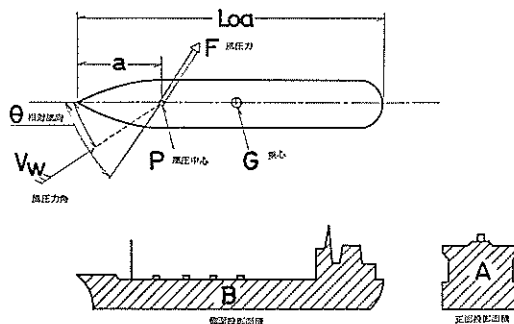


図-4.5 風圧力計算要素

示すように、船舶に作用する全風荷重を示す。船舶の横方向の動揺を検討するのに、風圧力合力を指標とするのは必ずしも適切ではないが、ドルフィンや防げん材の変形量には、斜め風によるモーメントの影響が入っていると考えられるので一応の目安を得るという観点にたてば妥当な処置といえよう。

表-4.1 には、調査船毎の風圧力合力および横方向風圧力を示した。風圧力合力の最大値は、KA48-5-2 の 72.4 tf、横方向風圧力の最大値は KA48-5-2 の 27.7 tf である。ほとんどの横方向風圧力は数トンと小さい。

風荷重による、けい留船舶の動揺量には、防げん材およびドルフィンの外に、けい留索のバネ定数などが影響を及ぼす。各船舶についてけい留索の縦方向および横方

けい留中の大型タンカーの衝突力

表-4.1 風圧力合力および横方向風圧力

Case No.	風向	角度	風速 V_w [m/s]	風圧力 合 力 [tf]	横方向 風圧力 [tf]
KA47- 1-1	ENE	112.5°	3.2	3.5	3.2
-2	E	90°	4.7	12.4	12.4
KA47- 2-1	SSW	-22.5°	1.8	0.2	-0.1
KA47- 4-1	N	180°	2.8	0.7	0
KA47- 7-1	NW	-135°	4.2	5.0	-3.6
-2	WNW	-112.5°	4.2	7.2	-6.7
-3	WNW	-113.5°	2.8	3.3	-3.1
KA47- 8-1	WNW	-112.5°	1.8	1.4	-1.3
-2	E	90°	3.3	5.5	5.5
-3	NW	-135°	4.8	7.4	-5.2
KA47- 9-1	E	90°	3.0	2.4	2.4
-2	E	90°	4.2	3.9	3.9
-3	ENE	112.5°	3.8	4.5	4.2
KA48-10-1	NNW	-157.5°	3.7	2.2	-0.8
-2	NNW	-157.5°	3.8	2.8	-0.9
-3	SSE	22.5°	4.0	2.6	1.0
KA48- 1-1	NNE	157.5°	4.4	2.6	1.0
-2	NNE	157.5°	4.2	2.4	0.9
-3	NE	45°	3.8	3.6	2.5
-4	NNE	157.5°	9.7	16.1	6.2
-5	NNE	157.5°	9.7	16.1	6.2
KA48- 4-1	NNE	157.5°	7.0	8.4	3.2
KA48- 7-1	WNW	-112.5°	5.1	11.0	10.1
KA48- 9-1	ENE	112.5°	6.0	11.6	10.7
-2	NNE	157.5°	21.5	72.4	27.7
-3	NNE	157.5°	15.0	35.3	13.8
KA48-11-1	N	180°	2.8	0.7	0

向のバネ定数を計算すると 表-4.2 となる。なお各船舶のけい留状況およびけい留索のバネ定数算定の詳細は、付録として巻末に掲載する。

表-4.2 けい留索の各船舶別の縦・横方向バネ定数

Case No.	横方向バネ 定 [tf/m]	縦方向バネ 定 [tf/m]	けい留施設の 合成バネ定数 [tf/m]
KA47- 1-1	33.7	48.3	563.0
-2	"	"	"
KA47- 2-1	32.1	46.3	"
KA47- 4-1	147.7	124.5	"
KA47- 7-1	34.0	49.7	"
-2	"	"	"
-3	"	"	"
KA47- 8-1	49.8	110.0	"
-2	"	"	"
-3	"	"	"
KA47- 9-1	—	—	"
-2	—	—	"
-3	—	—	"
KA47-10-1	29.5	54.1	"
-2	"	"	"
-3	"	"	"
KA48- 1-1	31.8	48.2	"
-2	"	"	"
-3	"	"	"
-4	"	"	"
-5	"	"	"
KA48- 4-1	36.4	57.4	"
KA48- 7-1	203.3	373.9	"
KA48- 9-1	35.0	61.6	"
-2	33.1	"	"
-3	"	"	"
KA48-11-1	28.4	65.4	"

表-4.2 によると、けい留索の横方向のバネ定数は、一部の船舶でワイヤーロープを使用している場合を除いて 30 tf/m から 40 tf/m の間にあり、防げん材とドルフィン

の合成バネ定数 563 tf/m に較べると極めて小さい。したがって、けい留索は船舶が岸壁から遠ざかるような動きに対しては働くが、逆に近づくような動きに対してはドルフィンおよび防げん材バネが主体となって働くことになる。したがって、表-4.1 に示したような小さい風荷重が船舶をドルフィンに押しつけても、ドルフィン等の変形量はほとんどの場合 1 cm 程度であり、図-4.2 に示されている 10~20 cm にくらべてはなほ小さい。つぎに、風速とドルフィン等の変形量との関係を考慮してみよう。図-4.2 を一べつただけで両者の間に密接な関係がないことは判るが、一応 図-4.6 に風速と単位横方向風圧力当たりの変形量との関係を図示する。風速のいかんにかかわらずけい船施設の動揺量があまり変化しないから、風速が大きい場合には $y_{mean}/V_w^2(A \cos^2 \theta + B \sin^2 \theta) \sin \theta$ の値が相対的に小さくなってくる。

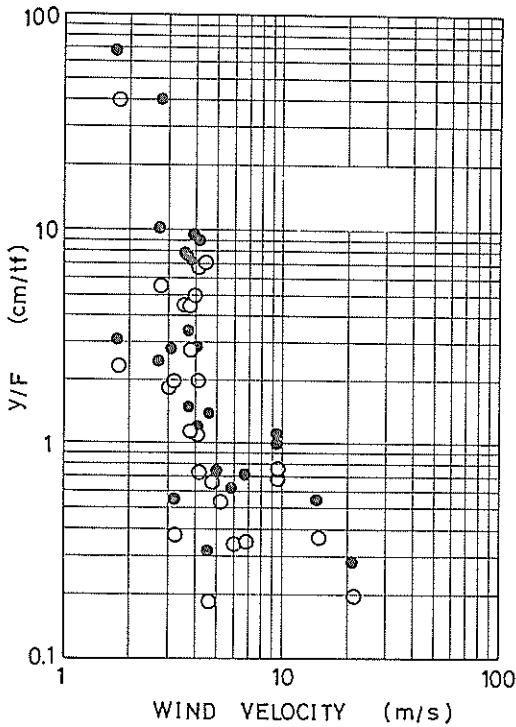


図-4.6 風速と単位横方向風圧力あたりの変形量との関係

以上の結果、風速 10 m/s 程度の風は、船体動揺に対し大きな影響を及ぼしてはいないことが判る。たとえば、最も風圧力が大きいと思われる KA48-5-2 および

表-4.3 風圧力による船体動揺量

	KA48-5-2	KA47-1-2
風 向	NNE	E
角 度	157.5°	90°
風 速	21.5 m/s	4.7 m/s
風 圧 力 合 力	72.4 tf	12.4 tf
横 方 向 風 圧 力	27.7 tf	12.4 tf
横 方 向 バ ネ 定 数	33.1 tf/m	33.4 tf/m
船 体 移 動 量	80 cm	37 cm
衝突速度 (計算値)	2.3 cm/s	0.79 cm/s
衝突速度 (実測値)	2.7 cm/s	2.8 cm/s

KA47-1-2 について、風圧力や船体移動量などを静的に計算すると 表-4.3 のようになる。

KA48-5-2 では、船舶は約 27.7 tf の横方向風圧力を受ける。船体がバースから離されるとすれば、けい留索の横方向バネ定数が 33.1 tf/m であるから、船舶は約 80 cm バースから離されることになる。船体がバースに押付けられるとすると、けい留施設とけい留索の合成バネ定数が約 600 tf/m であるので、けい留施設は 4.6 cm 変形することになる。また、船体がバースから離され、80 cm 移動した状態から自由振動をしたとすると、つぎにけい留施設に衝突するときの速度は、けい留索のみによるけい留系の固有周期を 215 秒として、約 2.3 cm/s となる。実測値の有義値は、衝突速度が 2.7 cm/s、ドルフィンの変形量が 6.9 cm、防げん材が 10.5 cm、合計 17.4 cm である。これらの値は静的に計算した数値よりも大きい。

KA47-1-2 では、船舶は約 12.4 tf の横方向の風圧力を受ける。けい留索の横方向のバネ定数は 33.4 tf/m であるから、船舶は約 37 cm バースから離されることになる。固有周期が約 240 秒であるから、衝突速度の計算値は 0.79 cm/s となる。ところが実測の衝突速度の有義値は 2.8 cm/s である。

以上のように、風速を支配的な要因と考えて、静的な計算のみ行って船舶の移動量を算定すると過小評価する可能性がある。

いままでは、静的な検討を行ったが、実際の風は息づいており、変動風としての考慮を払う必要がある。変動風のスペクトルとしては Davenport (ダーベンポート)

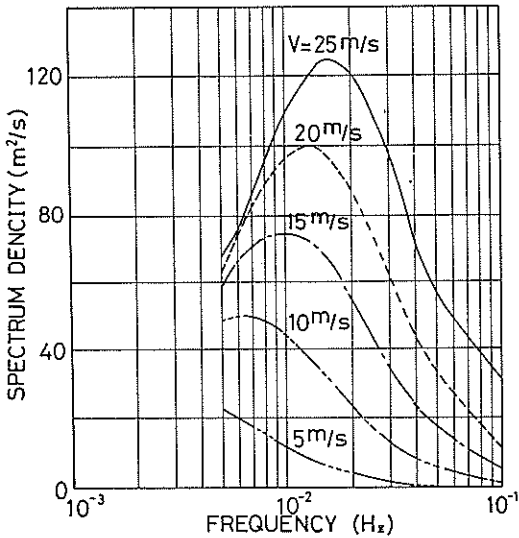
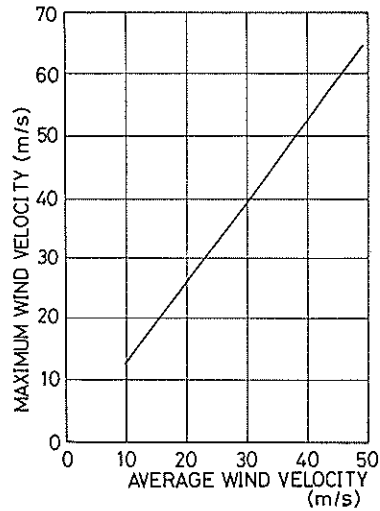


図-4.7 ダーベンポートによる変動風のスペクトル

の式が一般的によく用いられる。図-4.7は、風速毎に計算した変動風のスペクトルである。スペクトルのピーク値を与える周波数は風速によって異なるが、非常に低周波であり、風速 25 m/s の場合で 0.016 Hz (周期 62.5 秒) である。これより小さい風速については、さらに低周波数となる。図-4.8は、同じ変動風スペクトルを用いて平均風速に対する最大風速の比、すなわち、ガスト率を求めたものである。平均風速が 30 m/s 以上になるとガスト率は 1.32 となりほぼ一定である。これ以下の風速では、20 m/s で 1.3、10 m/s で 1.28 となる。したがって、ガスト率を 1.3 とすると、瞬間的には表-3.3 の約 1.7 倍の風圧力を受けていることになる。風速が小さい場合には、ガスト率が風圧力に及ぼす影響は小さいが、風速が 20 m/s 以上になるとこの影響はかなり大きくなる。前出の KA48-5-2 の場合、平均風速に対する横方向風圧力は 27.7 tf であったが、ガストを考慮すると 47.1 tf となる。したがって、船舶の動揺量や衝突速度に影響を及ぼすことになる、とくに、真横から風を受ける船舶にとっては、風速が 20 m/s 以上になるとかなり大きな影響があるものと思われる。しかし、今回の調査では真横風を受ける船舶が少なかったこと、風速 20 m/s 以上のケースが少なかったことなどにより、風の変動特性が船舶の動揺量やけい留施設に及ぼす影響はあまりみられない。たとえば、真横風を受ける KA47-1-2 では、ガストを考慮して静的に計算した衝突速度は 1.34 cm/s であり、実測値の有義値の 50% にも満たない。



Max. Wind Velocity in 5 min.
G.R. = Ave. Wind Velocity in 5 min.

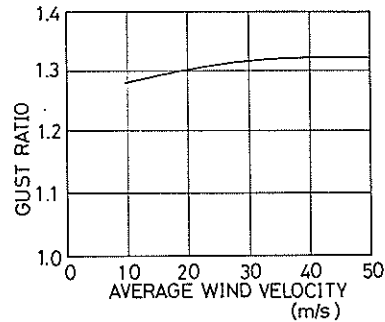


図-4.8 最大風速およびガスト率

風の変動特性が船舶の動揺に及ぼす影響については、今後一層の研究が必要であると思われるが、今回の調査記録の解析に当っては考慮する必要は小さいと思われる。

4.3 けい留施設の変形量と波との関係

(1) 波高および波周期

前項での検討の結果、船舶の動揺によるけい留施設の変形は、波の影響を大きく受けていることが判った。そこで、けい留施設の変形量と波との関係を調べる。

表-4.4は調査実施時のけい留施設の変形量、風および波の記録をとりまとめたものである。残念ながら、波高記録はしばしば欠測しているが、鹿島港工事事務所における数年間にわたる波高観測調査の結果から、港外波と港内波との間に、

$$H_{1/3}(\text{港内}) \approx 0.4 H_{1/3}(\text{港外}) \quad (4.5)$$

表-4.4 風・波の記録とけい留施設の変形量

Case	港外波高				港内波高				風向・風速			y_{max} [cm]		$y_{1/3}$ [cm]		y_{mean} [cm]	
	H_{max}	T_{max}	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	H_{max}	T_{max}	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	風向	風速	風程	ドルフィン	防げん材	ドルフィン	防げん材	ドルフィン	防げん材
KA74- 1-1	3.28	6.0	2.34	8.6			0.88*		ENE	3.2		14.8	18.5	8.2	12.2	5.7	8.8
-2	2.42	8.7	1.56	8.6			0.60*		E	4.7		3.4	6.5	3.0	5.3	2.4	3.9
KA47- 2-1	2.18	9.1	1.48	10.2			0.58*		SSW	1.8		5.2	8.8	4.7	8.2	5.2	6.0
KA47- 4-1	1.99	8.9	1.33	9.0			0.53*		N	2.8		5.0	8.8	4.2	6.8	3.4	5.5
KA47- 7-1	2.18	12.8	1.48	12.6			0.58*		NW	4.2		11.8	16.5	9.4	13.9	5.5	7.9
-2	2.34	12.4	1.40	12.7			0.55*		WNW	4.2		10.7	14.1	6.4	10.6	3.9	6.3
-3	2.26	12.4	1.40	12.1			0.55*		WNW	2.8		10.8	15.3	6.3	9.6	3.8	5.7
KA48- 8-1									WNW	1.8		5.7	7.3	4.0	5.5	2.6	3.6
-2									E	3.3		3.9	5.7	2.7	4.1	2.0	2.9
-3									NW	4.8		5.8	7.6	0.4	5.0	3.1	3.5
KA47- 9-1									E	3.0		6.7	6.7	5.7	7.9	4.1	5.5
-2									E	4.2		6.8	8.0	5.6	7.5	3.8	5.7
-3									ENE	3.8		7.9	9.7	6.2	8.4	4.5	6.4
KA47-10-1									NNW	3.7		8.0	15.0	5.0	8.8	3.3	5.5
-2									NNW	3.8		6.6	16.3	5.3	8.9	3.8	6.0
-3									SSE	4.0		9.4	14.7	6.6	9.7	4.2	6.4
KA48- 1-1					0.90	8.0	0.65	10.3	NNE		4.4	10.3	14.3	9.4	12.5	5.9	8.8
-2					0.85	10.5	0.63	10.1	NNE		4.2	11.5	16.6	8.1	12.0	5.9	9.0
-3					0.80	12.0	0.60	10.3	NE		3.8	10.5	13.6	9.1	11.6	5.8	8.3
-4					2.20	8.5	1.35	9.8	NNE		9.7	6.5	10.7	5.3	8.2	4.2	6.1
-5					1.70	14.5	1.23	9.8	NNE		9.7	8.0	12.8	6.1	9.1	4.4	6.4
KA48- 4-1	1.79	5.3	1.32	5.1	0.90	9.0	0.76	6.1	NNE	7.0	6.5	1.5	3.0	1.5	3.0	0.8	1.5
KA48- 7-1	2.50	32.3	1.79	11.1			0.70*		WNW	5.1	6.0	8.6	11.0	7.0	10.0	5.1	7.1
KA48- 9-1	2.65	9.5	1.71	9.2	0.70	9.5	0.49	8.3	ENE	6.0	6.2	5.4	11.2	4.8	8.7	3.4	5.9
-2	4.45	7.7	3.04	7.6	1.70	10.0	1.11	6.9	NNE	21.5	15.4	9.5	13.4	6.9	10.5	4.5	7.9
-3	5.62	8.3	3.59	7.8	2.10	6.5	1.49	7.1	NNE	15.0	13.9	8.1	11.7	6.5	9.9	4.4	7.3
KA48-11-1	1.09	12.0	0.78	9.8	0.60	12.5	0.35	10.0	N	2.8	3.7	6.3	13.4	5.7	9.8	3.6	6.5

注) 空欄は欠測, * は式 (4.5) から求めたもの。

なる関係が見出されているので、港外波の記録があるものについては、式(4.5)から港内波高を推定した。ただし、周期については港外波の周期と同一とした。このようなデータには*を付した。

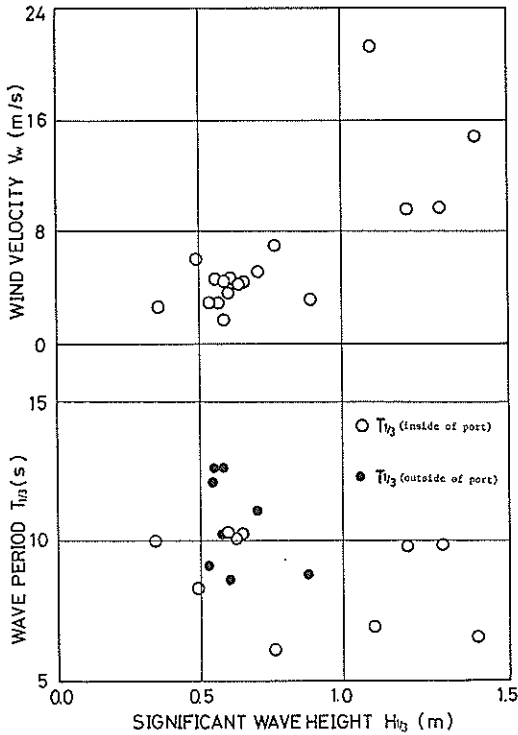


図-4.9 有義波高と有義周期および風速との関係

図-4.9 は波高と波周期および風速との関係を示したものである。波高は有義波高 $H_{1/3}$ 、波周期は有義周期 $T_{1/3}$ である。図から、波高と風速とはほぼ比例関係にあることが判る。しかし、調査実施日の気象海象条件は船舶が入港し接岸し得る状態であるから、有義波高で 1.5 m を越えるようなことはなかった。逆に、調査実施日の前日までに風が強かったような場合には、調査時の風速が小さくても 50 cm 以上の波高が観測されている。

波周期と波高との相関は大きくないが、波高が小さいときに長周期波成分が卓越している傾向がある。波高が小さいときには、誤差として長周期波成分を捨てる可能性があるとしても、この傾向は注目に値する。波周期は波高 0.5 m から 1.5 m の間でほぼ 8 秒から 10 秒程度である。

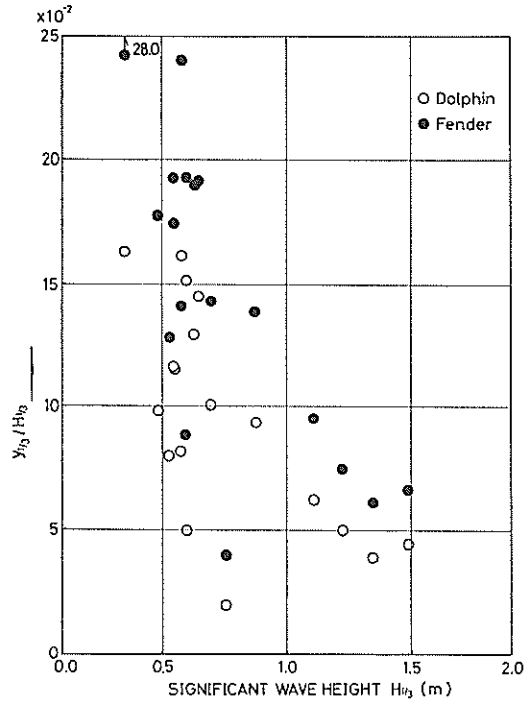


図-4.10 単位波高あたりの変形量と有義波高との関係

(2) けい留施設の変形量

図-4.10 は単位波高当りのドルフィンおよび防げん材の変形量の有義値と有義波高との関係を示したものである。けい留施設の単位波高当りの変形量は有義波高が大きくなるに従って減少する。この原因としては、波高が小さい場合に長周期波成分が多かったことが考えられる。

図-4.11 は単位波高当りのドルフィンおよび防げん材の変形量の有義値と有義周期との関係を示したものである。この図をみると、長周期波に対しては単位波高当りのドルフィンおよび防げん材の変形量が大きく増幅されていることが判る。

図-4.12 は、横軸に波長船長比 (λ/L_{pp}) をとって、ドルフィンおよび防舷材の変形量を図示したものである。 λ/L_{pp} は波周期の自乗の関数であるから、図示された傾向は図-4.11 のものとほぼ同一である。 λ/L_{pp} が 0.38 あたりで、縦軸の値がやや小さくなっている。この傾向は図-4.14 で、周期約 9.8 秒のところで応答値が小さくなっている現象と一致する。これは、船長と波長との関係から、船舶が受ける波力が小さくなっているために生ずるものと理解される。

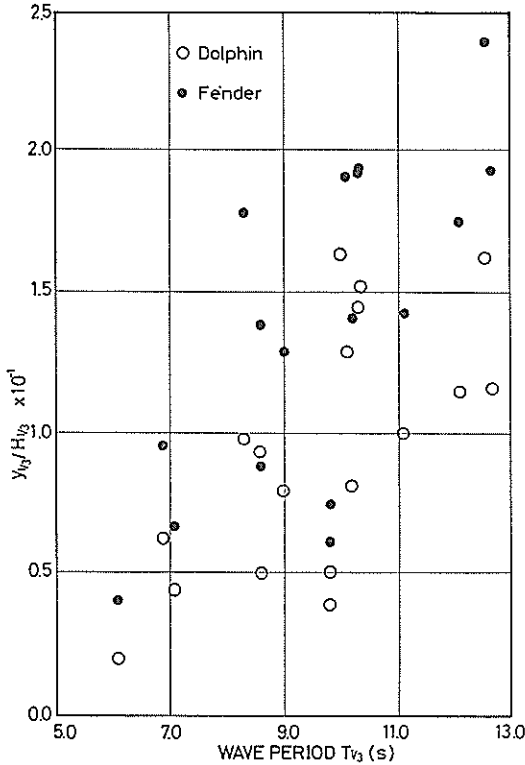


図-4.11 単位波高あたりの変形量と有義周期との関係

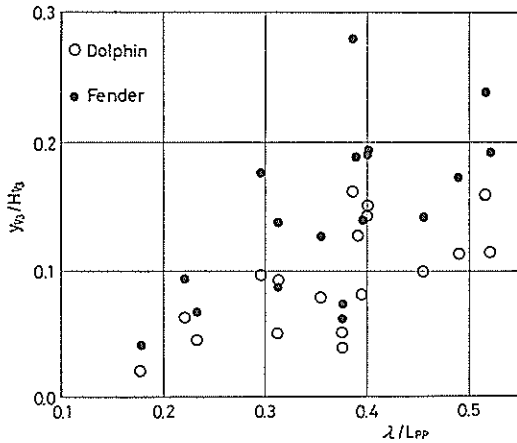


図-4.12 単位波高あたりの変形量と波長船長比との関係

図-4.13 は、波周期 $T_{1/3}$ と動揺周期の実測値 T_{no} の比 $T_{1/3}/T_{no}$ を横軸にとって、単位波高当りのドルフィンおよび防げん材の変形量を図示したものである。 T_{no} は

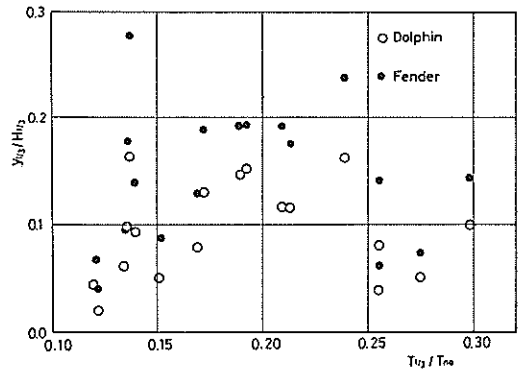


図-4.13 単位波高あたりの変形量と波周期と実測変形周期比との関係

全船にわたってほぼ一定であるので、図-4.13 の傾向は図-4.12 の傾向と同一である。すなわち、 $T_{1/3}/T_{no}$ が 0.25 あたりで応答値が小さくなっているが、これは、図-4.12 で、 λ/L_{pp} が 0.38 付近で小さくなっている傾向と一致する。

船体動揺量には波力の影響が大きいものと思われるので、単位波高当りの波力の指標として $y_{1/3}/(d \cdot H_{1/3})$ を計算し、波周期に対してプロットすると図-4.14 を得る。図示された傾向は前掲の図-4.12 や図-4.13 とほぼ同じ

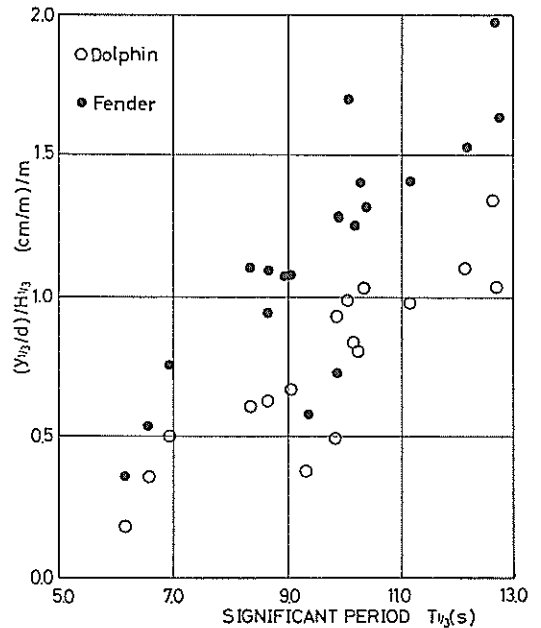


図-4.14 単位波高あたりの変形量（喫水調整したもの）と有義周期との関係

けい留中の大型タンカーの衝突力

であるが、図-4.14 では各標本値のばらつきは小さくなっている。

以上のように、けい留中の船舶の動揺に対しては波の影響が大きく、とくに長周期波に対する船舶の動揺量、したがって、けい船施設の変形量は増大する。大型タンカーの場合には、波周期が 10~12 秒とすると、波高 1 m 当りのけい船施設の変形量は、ドルフィンで 0.16 m、防げん材で 0.28 m 程度であるといえる。

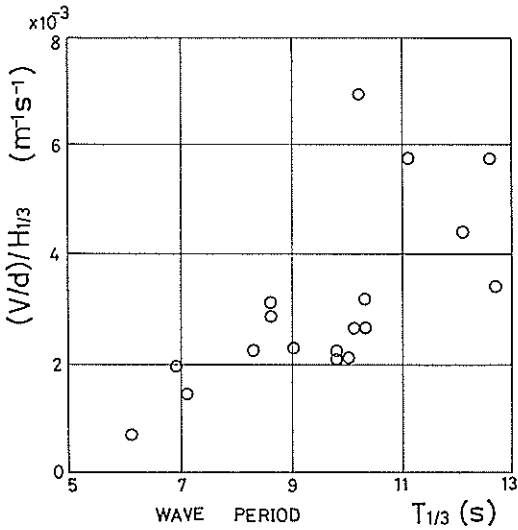


図-4.15 単位波高あたりの衝突速度と有義周期との関係

図-4.15 は波周期と単位波高当りの衝突速度との関係を示したものである。長周期波の作用を受けるけい留船舶の衝突速度が相対的に大きい、これは図-4.14 で示したけい留施設の変形量と有義周期との関係と同一である。すなわち、けい留船舶の衝突速度には波が影響し、長周期波に対しては相対的に大きな衝突速度を示すことが明らかとなった。

4.4 ドルフィンおよび防げん材の最大変形量

いままでの解析では、ドルフィンおよび防げん材の変形量として有義値を用いてきた。しかしながら、実際の構造物を設計したり、あるいは、その安全性を確認するためには、けい留船舶の動揺によるドルフィンおよび防げん材の最大変形量を知っておく必要がある。そこで、各測定ケース毎に、けい船施設の変形量の有義値に対する、最大変形量、平均変形量、平均値まわりの分散などを計算し表-4.5 のようにとりまとめた。また、図-4.16 はそれらを図示したものである。この図から、最大変形

表-4.5 有義変位に対する最大変位・平均変位・分散

Case No.	最大変位/有義変位		平均変位/有義変位		分散	
	ドルフィン	防げん材	ドルフィン	防げん材	ドルフィン	防げん材
KA47- 1-1	1.80	1.52	0.70	0.72	5.4	27.0
-2	1.13	1.23	0.80	0.74	0.4	6.9
KA47- 2-1	1.11	1.07	0.68	0.73	2.0	15.2
KA47- 4-1	1.19	1.29	0.81	0.81	0.6	8.6
KA47- 7-1	1.26	1.19	0.59	0.57	11.4	54.8
-2	1.67	1.33	0.61	0.59	4.6	30.2
-3	1.71	1.59	0.60	0.59	4.9	28.7
KA47- 8-1	1.43	1.33	0.65	0.65	1.3	9.6
-2	1.44	1.39	0.74	0.71	0.5	2.5
-3	1.45	1.52	0.78	0.70	0.8	7.3
KA47- 9-1	1.18	1.23	0.72	0.70	1.8	13.5
-2	1.21	1.07	0.68	0.76	2.4	11.1
-3	1.27	1.15	0.73	0.76	2.0	12.5
KA47-10-1	1.60	1.70	0.66	0.63	2.4	20.5
-2	1.25	1.83	0.72	0.67	1.5	16.3
-3	1.42	1.52	0.64	0.66	3.9	22.7
KA48- 1-1	1.10	1.14	0.63	0.70	6.7	9.2
-2	1.42	1.38	0.73	0.75	4.2	7.5
-3	1.15	1.17	0.64	0.72	6.9	8.9
-4	1.23	1.30	0.79	0.74	1.0	3.6
-5	1.31	1.41	0.72	0.70	2.1	4.7
KA48- 4-1	1.00	1.00	0.53	0.50	0.3	1.4
KA48- 7-1	1.23	1.10	0.73	0.71	3.7	8.5
KA48- 9-1	1.13	1.29	0.71	0.68	1.5	5.7
-2	1.38	1.28	0.65	0.75	4.1	6.0
-3	1.25	1.18	0.68	0.74	3.1	5.0
KA48-11-1	1.11	1.37	0.63	0.66	3.2	9.3
合計	35.42	35.58	18.55	18.63	82.7	355.9

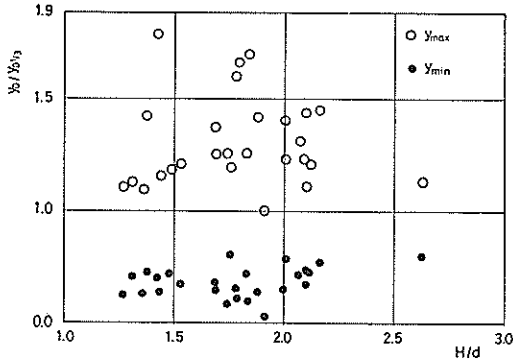


図-4.16 (a) 変形量の有義値に対する最大値および平均値の関係 (ドルフィン)

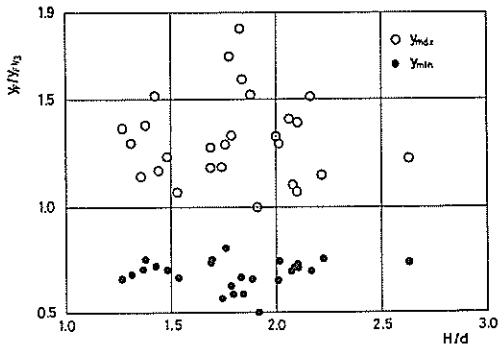


図-4.16 (b) 変形量の有義値に対する最大値および平均値の関係 (防げん材)

量または平均変形量と有義値との関係式として式 (4.6) を得る。

$$\left. \begin{aligned} y_{\max} &= 1.31 y_{1/3} \\ y_{\text{mean}} &= 0.62 y_{1/3} \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

図-4.15 から明らかなように、最大変形量についてはややばらつきが大きく、 $y_{\max}=(1.0\sim 1.83)y_{1/3}$ の間に分布している。しかしながら、大部分は $y_{\max}=1.5y_{1/3}$ 以内にあるので、通常の波に対しては、最大変形量として有義値の約 1.5 倍を考慮しておけばよい。

図-4.17 はドルフィンおよび防げん材の変形量を単位波高当りの値に換算して求めたひん度分布である。これをみると、ドルフィンおよび防げん材の変形量の分布はレーリー分布をしていることが判る。

4.5 結果に対する考察

ここでは、けい留中の大型タンカーの規則波による動揺シミュレーションを実施し衝突速度の計算値を求め、これと、実測された衝突速度との比較を行う。また、永

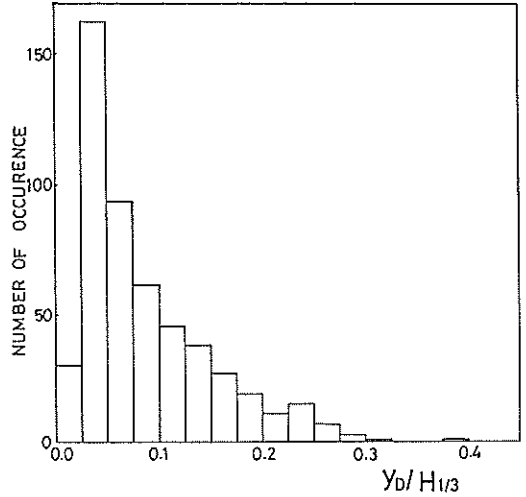


図-4.17 (a) ドルフィンの変形量のひん度分布

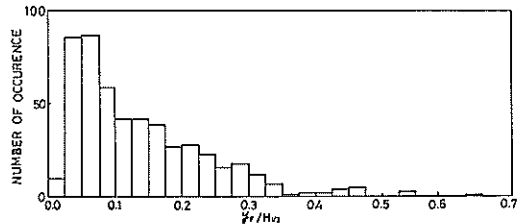


図-4.17 (b) 防舷材の変形量のひん度分布

井⁶⁾らは横波を受ける大型タンカーの衝突力について理論解析および実験を行っているので、本報告の結果と比較する。

(1) 計算および実測衝突速度の比較

式 (2.2)~式 (2.4) において波強制力 P_w およびモーメント M_w を考慮して運動方程式を解き、その結果得られる衝突速度の計算値と実測値とを比較する。計算に際しては、シミュレーション手法を用いる。この手法は非線型なけい留系にけい留された船舶の不規則波中の動揺を解析するために作成されたものであるが⁷⁾、線形なけい留の船舶の規則波応答を求める場合にも使用できる。

図-4.18 は $H/d=1.5$ および 2.0 の場合の計算衝突速度と実測衝突速度とを示したものである。全般的にやや実測値の方が大きい。しかし、周期が 10 秒以上になるとその差はほとんどなくなる。周期が短い場合に実測値が計算値を上回る理由は、実際の現象では長周期の成分波の影響を受けて、応答値が増幅されているためである。したがって、より厳密には不規則波の応答シミュレ

けい留中の大型タンカーの衝突力

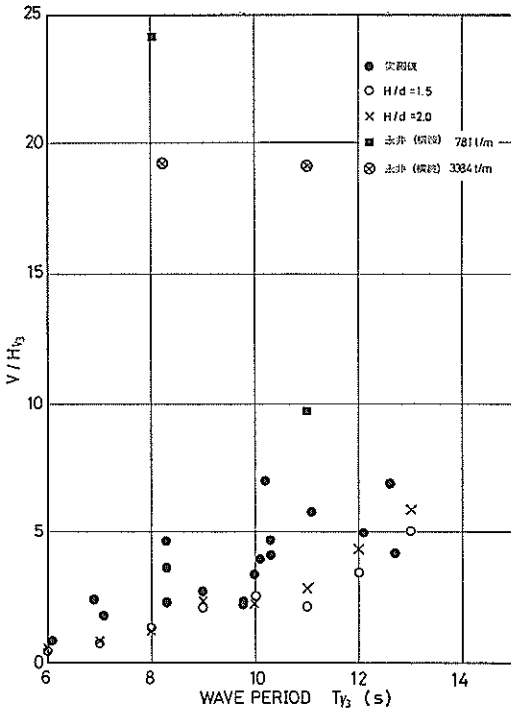


図-4.18 計算衝突速度と実測衝突速度との比較

ーシヨンを行って計算衝突速度を求めると良いと思われる。

(2) 永井らの結果との比較

図-4.18には、永井らが横波を受ける20万D.W.Tタンカーの1/40模型で実験を行った際の周期8秒、8.2秒および11秒の規則波に対する、船舶の衝突速度を実機換算したものである。ややばらつきは大きい、いずれも今回の実測値よりかなり大きい。これは、真横波と斜め波による波力の差に起因する。表-4.6は、90°(真横波)と20°(斜め波)の波力の相異を示したものである。真横波による波力は斜め波による波力の20倍以上

表-4.6 真横波と斜め波による波力

θ	H/D	$T=8\text{ s}$	$T=11\text{ s}$
20°	1.69	174 tf	169 tf
90°	"	6,000 tf	6,870 tf
20°	2.01	154 tf	145 tf
90°	"	5,320 tf	5,970 tf

もの値を示している。20°の斜め波による衝突速度の計算値にはおよそ20~25%のヨウイングによる成分が含まれており、真横波にはヨウイングの影響がないこと、および衝突速度が波力に比例することなどを考えると、両実験値はともにばらついているものの、永井の実験による衝突速度と筆者らのシミュレーション計算による衝突速度との対応がつく。

つぎに、単位波高当りの変形量について調べてみる。表-4.7は周期8秒および11秒の波に対する単位波高当

表-4.7 けい船施設の単位波高当り変位 $y/H_{1/3}$

	計 算 値		永井の実験値
	$H/d=2.0$	$H/d=1.69$	
8 s	1.5 cm	1.5 cm	104 cm
11 s	4.9 cm	3.7 cm	90 cm

T	実 測 値	T	実 測 値
8.6	31.5 cm	10.3	29.8 cm
8.6	11.5	9.8	14.1
10.2	39.5	9.8	13.7
9.0	14.9	6.1	21.2
12.6	43.4	11.1	4.7
12.7	26.0	8.3	45.3
12.1	30.4	6.9	15.2
10.3	24.9	7.1	11.2
10.1	29.7	10.0	25.1

りの変形量の計算値と永井らの実験値をとりまとめたものである。ここでいう計算値は波向が20°の場合の値であるから、衝突速度の場合と同じように変形量が波力に比例することを考えると、真横波に対してはこの計算値を30~40倍してやればよい。そうすると、計算値と永井の実験値とが同一のレベルで評価できることになる。

一方、実測値は波向が20°の場合であっても単位波高当りのけい留施設の変形量が30cm程度になっている。すなわち、船舶の動揺周期がけい留系の固有周期に近いので、船舶はあたかも自由振動をしているような状態になっている。したがって、規則波の強制振動解を求める

だけでは不十分である。それよりも、むしろ、規則波の強制振動の解として衝突速度を求め、これを初期条件として自由振動の解を求めて、変形量を計算する方が、より実測値と対応している。

(3) 実際問題への適用

以上の結果、けい留中の大型タンカーの衝突力を机上で簡便に求めることができる。

- 規則波による船体への作用波力およびモーメントを求める。(文献(6)参照)
- 図-4.18 などにより衝突速度を推定する。ただし図-4.18 は 20° の波に対する図であるから、角度が異なる場合は当該角度の波力およびモーメントを参考にして衝突速度を求める。
- 式(2.16)および式(2.17)によりドルフィンおよび防げん材の変形量を求める。この場合、最大変形量を設計値とする場合は、計算値を 1.5~1.6 倍する。
- 衝突力を算定する。

以上の手順は、設計において防衛工の規模および性能を試算する場合に有効に使われるものと思われる。このように防げん材などが選定された後、改めて不規則波のシミュレーション計算を実施して安全性を確かめればよい。

5. 結 論

本調査研究の結果、以下のことが明らかとなった。

- ドルフィンおよび防げん材の変形量の計算値と実測値とはほぼ一致した。
- 風速がおおよそ 10 m/s 以下では、けい留船舶の衝突によって生ずるけい留施設の変形量は、風よりむしろ波の影響を受ける。また、風速が $15\sim 20 \text{ m/s}$ になっても、風向が船舶に対し真横でない場合には、風が船舶の動揺に及ぼす影響が小さいことが確認された。
- 波はけい留船舶の動揺に大きな影響を及ぼすが、とくに、周期 10 秒以上の波の影響が大きいことが確認された。
- 船舶の動揺周期の計算値はけい留施設の変形周期の実測値と一致することが確認された。
- けい留施設の変形量の度数分布曲線はレーリー分布に従う。また、けい留施設の変形量の有義値と最大値との関係は、ほぼ、 $v_{\max} = (1.5\sim 1.6)v_{1/3}$ となる。これはレーリー分布において、標本数が

数 10 程度の有義値と最大値との関係とほぼ一致する。

- けい留中の船舶が動揺する場合のスウェイ運動に対する仮想質量係数はほぼ $1.7\sim 2.0$ としてよい。

6. あとがき

本調査は、外洋の波の影響を受けるシーバースにけい留中の船舶が動揺することにより、けい留施設に与える衝突力についてとりまとめたものである。現地調査の記録は、種々の要因の影響でかなりばらつきが多い。しかしながら今回の調査結果から、けい留船舶が波の影響を受けて動揺していることが明らかとなり、また、その動揺特性についても詳細な検討がなされた。

ただし、今回の調査における船舶の動揺に伴うけい留施設の変形量は、防げん材の荷重変位特性を線形とみなし得る範囲にあった。風速がさらに大きくなると、けい留施設の変形量は非線形領域に入ることになる。そのような場合の計算方法についてはさらに検討を加える必要がある。検討の方法としては、防げん材の特性を非常に軟かくし、容易に非線形な変形をなすようにして現地観測する方法や、実験による方法がある。現地調査は、自然条件、船舶の運航に左右されるので、必ずしも効率的でないし、特性を弱くした防げん材を用いた場合の安全性の保障は難しい。また、非常に多くの人力を必要とする。したがって、今後、このような現地観測を繰返すことはかなり困難であろう。

その意味で、模型実験を実施することが望まれる。その場合には、現象の非線形性に着目して適切なパラメータを選ぶ必要がある。また、防げん材の特性、水深喫水比、波向などについて十分な注意を払って実験がなされねばならない。

おわりに、本調査に御協力いただいた。鹿島石油株式会社、ジャパンライン株式会社、日本郵船株式会社、出光タンカー株式会社、岡田商船株式会社、大阪商船三井船舶株式会社、鹿島水先区水先人協会、鹿島埠頭株式会社、山九運輸機工株式会社、第二港湾建設局、同鹿島港工事事務所、同横浜調査設計事務所、および、その関係者の方々に深甚なる謝意を表する次第である。なお、本調査の実施には、当時海洋構造研究室長であった現那覇港工事事務所の大谷博包氏、および研究員であった現山梨県の市川建氏の甚大なる御努力があったことを付記する。

けい留中の大型タンカーの衝突力

記号表

A : 船舶の正面投影面積 (m^2)

B : 船舶の側面投影面積 (m^2)

C_1 : 船舶の正面投影面積に関する係数

C_2 : 船舶の側面投影面積に関する係数

C_m : 船舶の左右動(スウェイ)に対する仮想質量係数

C_B : 集中係数 $1 / \left(1 + \left(\frac{l}{r} \right)^2 \right)$

D : くい直径 (m)

DT : 船舶の排水トン数 (tf)

E : 鋼材のヤング率 (kgf/cm^2)

I : 船舶の重心回りの慣性モーメント ($tf \cdot m \cdot s^2$)
またはくいの断面次モーメント (m^4)

LOA : 船舶の全長 (m)

LPP or L_{pp} : 船舶の垂線間長 (m)

H : 水深 (m)

$H_{1/3}$: 有義波高 (m)

M_w : 波力モーメント ($tf \cdot m$)

P : 船舶の衝突力またはドルフィンおよび防げん材の反力 (tf)

P_w : 波力 (tf)

$T_{1/3}$: 有義波に対する波周期 (s)

T_n : けい留系の空中での固有周期 (s)

T_{no} : けい留系の固有周期の計算値 (s)

T_{n0} : けい留系の固有周期の実測値 (s)

V : 船舶の衝突速度 (m/s)

V_w : 風速 (10 分間平均風速) (m/s)

b : 船幅 (m)

c_1 : けい船施設のパネ定数 (tf/m)

c_2 : 防舷材および船側外板の合成パネ定数 (tf/m)

c_B : ブロック係数

c_D : けい船施設および防げん材の合成パネ定数 (tf/m)

c_F : 防げん材のパネ定数 (tf/m)

c_S : 船側外板のパネ定数 (tf/m)

d : 船舶の喫水 (m)

d_f : 船舶の満載喫水 (m)

d_0 : 船舶の入港時喫水 (m)

k_h : 横方向地盤反力係数 (kgf/cm^2)

l : 船舶重心から衝突点までの距離 (m)

m_1 : けい船施設の質量 ($tf \cdot m^{-1} \cdot s^2$)

m_2 : 船舶の仮想質量 ($tf \cdot m^{-1} \cdot s^2$)

m_d : 船舶の排水質量 ($tf \cdot m^{-1} \cdot s^2$)

p : 船舶の満喫比 (%)

r_1 : $= C_E m_2 \omega^2$ (tf/m)

r_2 : $= -(m_1 + C_E m_2) \omega^2 + c_1$ (tf/m)

y_1 : けい船施設の変形量 (m)

y_2 : 防げん材の変形量 (m)

y_{D0} : ドルフィンの変形量の計算値 (m)

y_{D0} : ドルフィンの変形量の実測値 (m)

y_{F0} : 防げん材の変形量の計算値 (m)

y_{F0} : 防げん材の変形量の実測値 (m)

α : 仮想質量係数 C_m の平方根

β : $= \sqrt{c_D / C_E m_2}$ または, Chang の方法の特性値
 $\beta = \sqrt[3]{D k_h / 4 E I}$

γ : $= \sqrt{c_2 / C_E m_2}$

ω : けい船施設または防げん材の変形角周波数

λ : 波長または応答倍率

参考文献

- 1) 大谷博包・上田 茂・市川 建・杉原賢正: “大型タンカーの接岸力調査”, 港湾技術研究所資料 No. 176, 1974.3 月
- 2) たとえば, 横山幸満: “くい構造物の計算法と計算例”, 山海堂, 1977 年 3 月, pp. 33~47
- 3) 上田 茂・柳沢雄博: “超大型タンカーのけい留時動揺特性”, 第 25 回海岸工学講演会論文集, 1978 年 11 月, pp. 602~606
- 4) 上田 茂・, 柳沢雄博: “出入港における大型タンカーの操船および航跡について”, 港湾技術研究所報告, 第 18 巻 3 号, 1979 年, 9 月
- 5) VLCC 研究会: VLCC に関する十章——操船のポイント——, 成山堂書店, 1977 年 3 月
- 6) 永井莊七郎・小田一紀・重藤宗之: “横波を受けるシーバータンカーの drifting, swaying, および rolling によってドルフィンに働く衝撃に関する研究”, 第 16 回海岸工学講演会講演集, 1969
- 7) 運輸省港湾局・運輸省港湾技術研究所: “大型船けい留避泊地整備計画調査報告書”, 1979

付録. けい留索のパネ定数算定の詳細

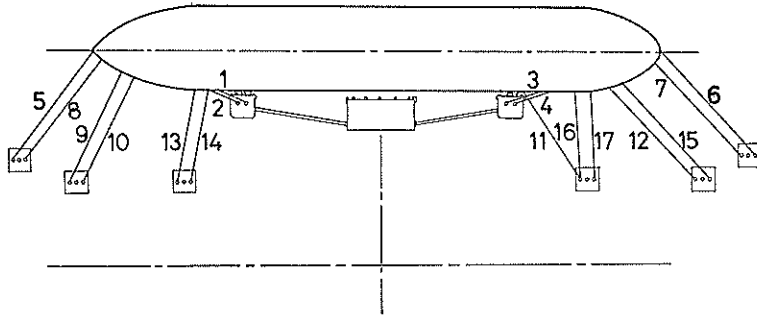
けい留索のパネ定数の算定法を KA47-1-1 を別に示す。まず, 付図-1 から, けい留索の長さ, 水平角度を求める。また, けい留索の材質, 径を調べる。これらをまとめて 付表-1 に示す。

ロープ張力と伸びは線形関係にあるとし, 伸率はナイロンロープの場合は張力 10 tf から破断荷重までの間で 20%, ワイヤロープの場合は破断荷重 (B.P.) で 3% として計算した。

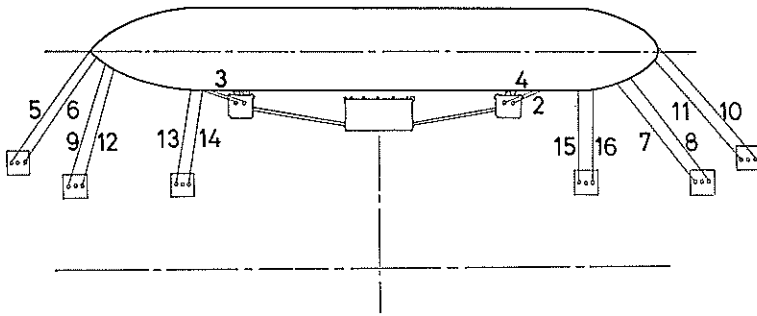
〔計算例〕 $\phi 75$ mm のナイロンロープの破断荷重は
 71.0 tf であるから、長さ l m、角度 θ のロープの
 パネ定数は

$$k = \frac{(71.0 - 10.0)}{0.2l} = 305/l \quad (\text{tf/m})$$

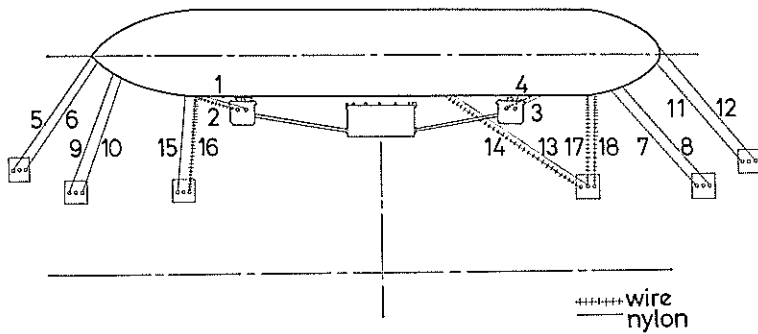
以下、同様にして、付図-2~13、付表-2~13 に示す。



付図-1 けい留索配置図 KA47-1-1~2

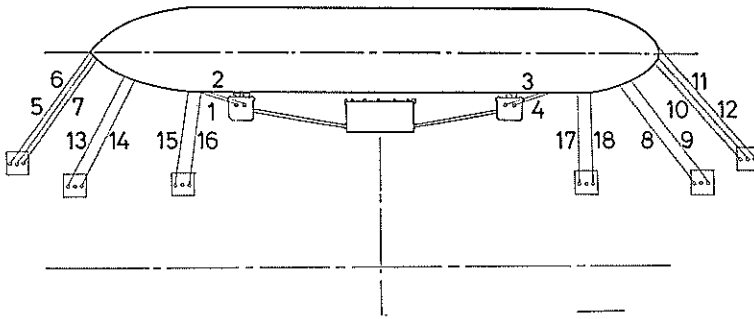


付図-2 けい留索配置図 KA47-1-2

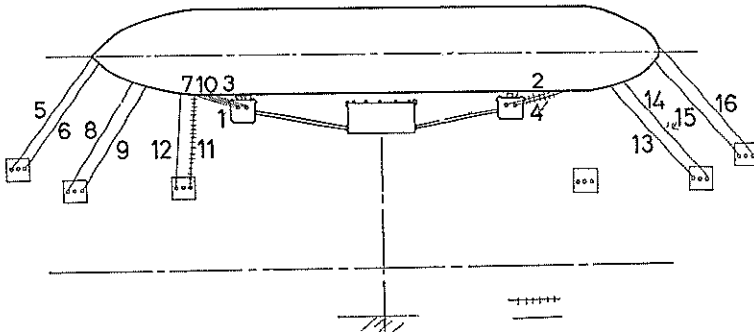


付図-3 けい留索配置図 KA47-4-1

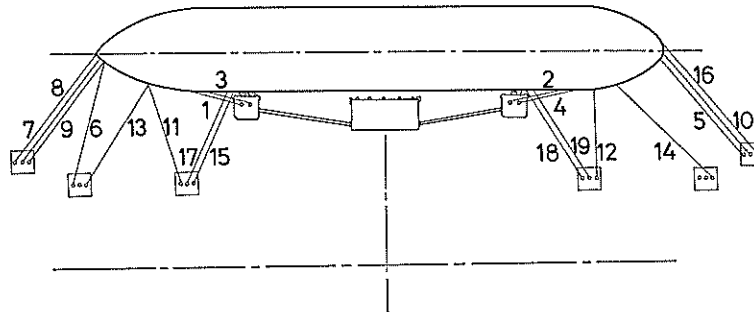
けい留中の大型タンカーの衝突力



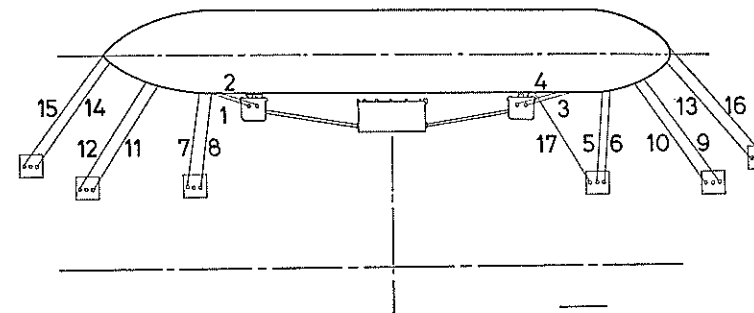
付図-4 けい留索配置図 KA47-7-1~3



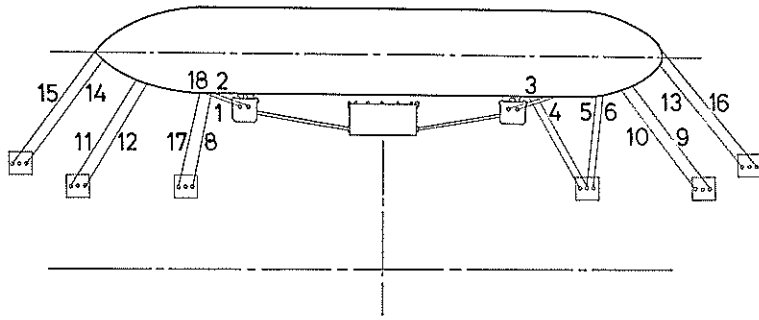
付図-5 けい留索配置図 KA47-8-1~3



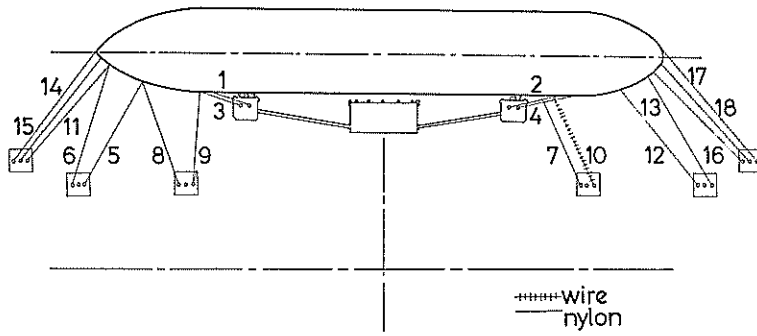
付図-6 けい留索配置図 KA47-13-1~3



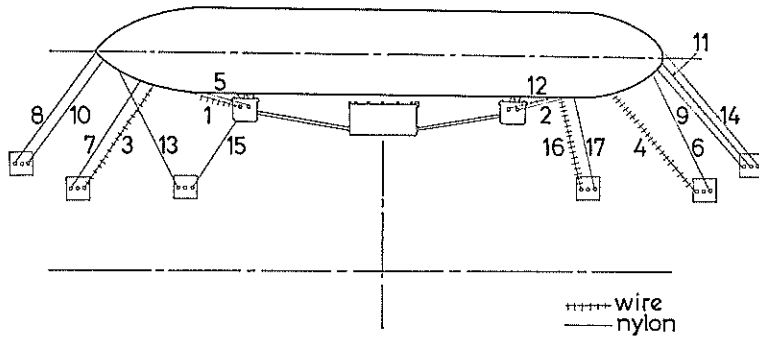
付図-7 けい留索配置図 KA48-1-1~3



付図-8 けい留索配置図 KA48-1-4~5

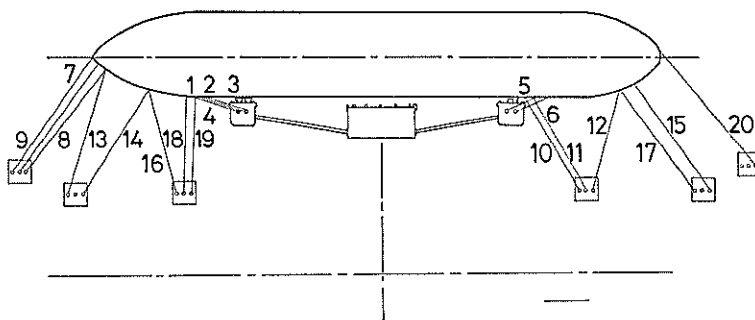


付図-9 けい留索配置図 KA48-4-1

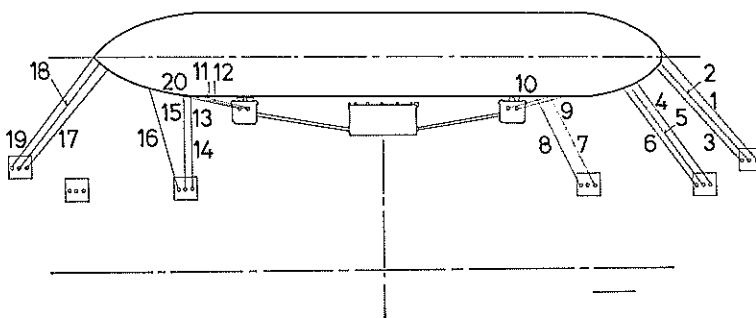


付図-10 けい留索配置図 KA48-7-1

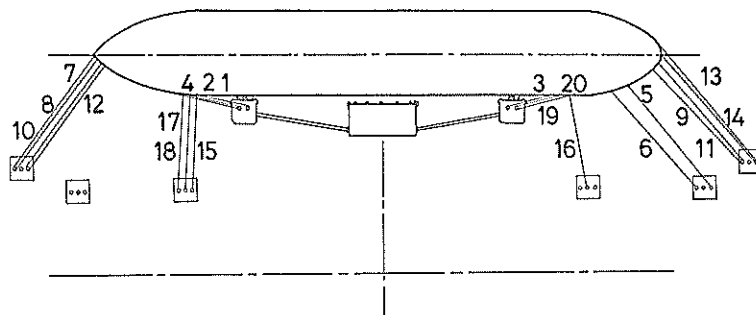
けい留中の大型タンカーの衝突力



付図-11 けい留索配置図 KA48-9-1



付図-12 けい留索配置図 KA48-9-2~3



付図-13 けい留索配置図 KA-48-11-1

付表-1 けい留索ばね定数算定表 KA47-1-1~2

No.	材質	l [m]	ϕ [mm]	θ	$B.P$ [t]	k [t/m]	$\sin \theta$	$\cos \theta$	LINE 名
1	ナイロン	53.0	75.0	10.0	71.0	5.75	1.00	5.66	Spring
2	"	"	"	"	"	"	"	"	"
3	"	44.0	"	13.0	"	6.93	1.56	6.75	"
4	"	39.0	"	"	"	7.82	1.76	7.62	"
5	"	145.0	"	25.0	"	2.10	0.89	1.90	Bow
6	"	169.0	"	33.0	"	18.0	0.98	1.51	Spring
7	"	"	"	"	"	"	"	"	"
8	"	145.0	"	23.0	"	2.10	0.82	1.93	Bow
9	"	116.0	"	49.0	"	2.63	1.73	1.73	"
10	"	"	"	"	"	"	"	"	"
11	"	118.0	"	38.0	"	2.58	2.59	2.03	"
12	"	99.0	"	45.0	"	3.08	2.18	2.18	Stern
13	"	74.0	"	62.0	"	4.12	4.12	1.93	Breast
14	"	"	"	"	"	"	"	"	"
15	"	99.0	"	45.0	"	3.08	2.18	2.18	Stern
16	"	78.0	"	75.0	"	3.91	3.73	1.01	Breast
17	"	"	"	"	"	"	"	"	"
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
Total							33.74	48.27	

けい留中の大型タンカーの衝突力

付表-2 けい留索ばね定数算定表 KA47-2-1

No.	材質	l [m]	ϕ [mm]	θ	$B.P$ [t]	k [t/m]	$\sin \theta$	$\cos \theta$	LINE 名
1	ナイロン	53.0	75.0	10.0	71.0	5.75	1.00	5.66	Spring
2	"	39.0	"	13.0	"	7.83	1.76	7.62	"
3	"	53.0	"	10.0	"	5.75	1.00	5.66	"
4	"	44.0	"	13.0	"	6.93	1.56	6.75	"
5	"	145.0	"	24.0	"	2.10	0.85	1.92	Bow
6	"	"	"	"	"	"	"	"	"
7	"	99.0	"	45.0	"	3.08	2.18	2.18	Stern
8	"	"	"	"	"	"	"	"	"
9	"	116.0	"	49.0	"	2.63	1.98	1.73	Bow
10	"	169.0	"	33.0	"	1.80	0.98	1.51	Stern
11	"	"	"	"	"	"	"	"	"
12	"	116.0	"	49.0	"	2.63	1.98	1.73	Bow
13	"	74.0	"	62.0	"	4.12	3.64	1.93	Breast
14	"	"	"	"	"	"	"	"	"
15	"	78.0	"	75.0	"	3.91	3.78	1.01	"
16	"	"	"	"	"	"	"	"	"
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
Total							31.14	46.25	

付表-3 けい留索ばね定数算定表 KA47-4-1

No.	材質	l [m]	ϕ [mm]	θ	$B.P$ [t]	k [t/m]	$\sin \theta$	$\cos \theta$	LINE 名
1	ナイロン	45.0	75.0	6.5	71.0	6.78	0.77	6.74	Spring
2	ワイヤー	"	38.0	"	72.0	45.93	5.20	45.63	"
3	ナイロン	38.0	75.0	13.0	71.0	8.03	1.81	7.82	"
4	ワイヤー	"	38.0	"	72.0	54.39	12.24	53.00	"
5	ナイロン	130.0	75.0	27.0	71.0	2.35	1.07	2.09	Bow
6	"	"	"	"	"	"	"	"	"
7	"	170.0	"	26.0	"	1.79	0.78	1.61	Stern
8	"	"	"	"	"	"	"	"	"
9	"	86.0	"	45.0	"	3.55	2.51	2.51	Bow
10	"	"	"	"	"	"	"	"	"
11	"	96.0	"	34.0	"	3.18	1.78	2.64	Stern
12	"	"	"	"	"	"	"	"	"
13	"	143.0	"	26.0	"	2.13	0.93	1.91	Spring
14	ワイヤー	"	38.0	"	72.0	14.45	6.33	12.99	"
15	ナイロン	67.0	75.0	70.0	71.0	4.55	4.28	1.56	Breast
16	ワイヤー	"	38.0	"	72.0	30.85	28.99	10.55	"
17	"	55.0	"	85.0	"	37.58	37.44	3.28	"
18	"	"	"	"	"	"	"	"	"
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
Total							147.71	164.46	

けい留中の大型タンカーの衝突力

付表-4 けい留索ばね定数算定表 KA47-7-1~3

No.	材質	l [m]	ϕ [mm]	θ	$B.P$ [t]	k [t/m]	$\sin \theta$	$\cos \theta$	LINE 名
1	ナイロン	53.0	75.0	10.0	71.0	5.75	1.00	5.66	Spring
2	"	"	"	"	"	"	"	"	"
3	"	44.0	"	13.0	"	6.93	1.56	6.75	"
4	"	39.0	"	"	"	7.82	1.76	7.62	"
5	"	145.0	"	24.0	"	2.10	0.85	1.92	Bow
6	"	"	"	"	"	"	"	"	"
7	"	"	"	"	"	"	"	"	"
8	"	99.0	"	45.0	"	3.08	2.18	2.18	Stern
9	"	"	"	"	"	"	"	"	"
10	"	169.0	"	33.0	"	1.80	0.98	1.51	"
11	"	"	"	"	"	"	"	"	"
12	"	"	"	"	"	"	"	"	"
13	"	116.0	"	49.0	"	2.63	1.98	1.73	Bow
14	"	"	"	"	"	"	"	"	"
15	"	74.0	"	62.0	"	4.12	3.64	1.93	Breast
16	"	"	"	"	"	"	"	"	"
17	"	78.0	"	75.0	"	3.91	3.78	1.01	"
18	"	"	"	"	"	"	"	"	"
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
Total							33.97	49.68	

付表-5 けい留索ばね定数算定表 KA47-8-1~3

No.	材質	l [m]	ϕ [mm]	θ	$B.P$ [t]	k [t/m]	$\sin \theta$	$\cos \theta$	LINE 名
1	クレモナ	110.0	80.0	18.0	50.5	1.84	0.75	1.75	Spring
2	ワイヤー	150.0	40.0	4.0	80.0	15.55	1.08	15.51	"
3	"	110.0	"	18.0		21.21	6.55	20.17	"
4	"	150.0	"	4.0		15.55	1.08	15.51	"
5	クレモナ	145.0	80.0	24.0	50.5	1.40	0.57	1.28	Bow
6	"	"	"	"	"	"	"	"	"
7	ワイヤー	150.0	40.0	4.0	80.0	15.55	1.08	15.51	Spring
8	クレモナ	116.0	80.0	49.0	50.5	1.75	1.32	1.15	Bow
9	"	"	"	"	"	"	"	"	"
10	ワイヤー	150.0	40.0	4.0	80.0	15.55	1.08	15.51	Spring
11	"	74.0	"	62.0	"	31.53	27.84	14.80	Breast
12	クレモナ	"	80.0	"	50.5	2.74	2.42	1.14	"
13	"	99.0	"	45.0	"	2.05	1.45	1.45	Stern
14	"	"	"	"	"	"	"	"	"
15	"	146.0	"	31.0	"	1.39	0.72	1.19	"
16	"	"	"	"	"	"	"	"	"
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
Total							49.82	110.04	

けい留中の大型タンカーの衝突力

付表-6 けい留索ばね定数算定表 KA47-13-1~3

No.	材 質	l [m]	ϕ [mm]	θ	$B.P$ [t]	k [t/m]	$\sin \theta$	$\cos \theta$	LINE 名
1	ナイロン	44.0	75.0	13.0	71.0	6.93	1.56	6.75	Spring
2	"	39.0	"	"	"	7.82	1.76	7.62	"
3	"	53.0	"	10.0	"	5.75	1.00	5.66	"
4	"	"	"	"	"	"	"	"	"
5	"	169.0	"	33.0	"	18.0	0.98	1.51	Bow
6	"	116.0	"	49.0	"	2.63	1.98	1.73	Stern
7	"	145.0	"	24.0	"	2.10	0.82	1.93	Bow
8	"	"	"	"	"	"	"	"	"
9	"	"	"	"	"	"	"	"	"
10	"	169.0	"	33.0	"	1.80	0.98	1.51	
11	"	74.0	"	62.0	"	4.12	3.64	1.93	Stern
12	"	78.0	"	75.0	"	3.91	2.78	1.01	"
13	"	132.0	"	2.70	"	2.31	1.05	2.06	Bow
14	"	99.0	"	45.0	"	3.08	2.18	2.18	Stern
15	"	103.0	"	30.0	"	2.96	1.48	2.56	Breast
16	"	169.0	"	33.0	"	1.80	0.98	1.51	Stern
17	"	103.0	"	30.0	"	2.96	1.48	2.56	Breast
18	"	118.0	"	38.0	"	2.58	1.59	2.03	"
19	"	"	"	"	"	"	"	"	"
20									
21									
22									
23									
24									
25									
Total							29.49	54.10	

付表-7 けい留索ばね定数算定表 KA47-1-1~3

No.	材質	l [m]	ϕ [mm]	θ	$B.P$ [t]	k [t/m]	$\sin \theta$	$\cos \theta$	LINE 名
1	ナイロン	53.0	75.0	10.0	71.0	5.75	1.00	5.66	Spring
2	"	"	"	"	"	"	"	"	"
3	"	39.0	"	13.0	"	7.82	1.76	7.62	"
4	"	44.0	"	"	"	6.93	1.56	6.75	"
5	"	78.0	"	75.0	"	3.91	3.78	1.01	Breast
6	"	"	"	"	"	"	"	"	"
7	"	122.0	"	40.0	"	2.50	1.61	1.92	"
8	"	"	"	"	"	"	"	"	"
9	"	99.0	"	45.0	"	3.08	2.18	2.18	Stern
10	"	"	"	"	"	"	"	"	"
11	"	116.0	"	49.0	"	2.63	2.63	1.98	Bow
12	"	"	"	"	"	"	"	"	"
13	"	169.0	"	33.0	"	1.80	0.98	1.51	Stern
14	"	145.0	"	24.0	"	2.10	0.85	1.92	Bow
15	"	"	"	"	"	"	"	"	"
16	"	169.0	"	33.0	"	1.80	1.80	0.98	Stern
17	"	118.0	"	38.0	"	2.58	1.59	2.03	Spring
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
Total							31.69	48.23	

けい留中の大型タンカーの衝突力

付表-8 けい留索ばね定数算定表 KA47-1-4~5

No.	材質	l [m]	ϕ [mm]	θ	$B.P$ [t]	k [t/m]	$\sin \theta$	$\cos \theta$	LINE 名
1	ナイロン	53.0	75.0	10.0	71.0	5.75	1.00	5.66	Spring
2	"	"	"	"	"	"	"	"	"
3	"	39.0	"	13.0	"	7.82	1.76	7.62	"
4	"	44.0	"	"	"	6.93	1.56	6.75	"
5	"	78.0	"	75.0	"	3.91	3.78	1.01	Breast
6	"	"	"	"	"	"	"	"	"
7	"	122.0	"	40.0	"	2.50	1.61	1.92	"
8	"	"	"	"	"	"	"	"	"
9	"	99.0	"	45.0	"	3.08	2.18	2.18	Stern
10	"	"	"	"	"	"	"	"	"
11	"	116.0	"	49.0	"	2.63	2.63	1.98	Bow
12	"	"	"	"	"	"	"	"	"
13	"	169.0	"	33.0	"	1.80	0.98	1.51	Stern
14	"	145.0	"	24.0	"	2.10	0.85	1.92	Bow
15	"	"	"	"	"	"	"	"	"
16	"	169.0	"	33.0	"	1.80	1.80	0.98	Stern
17	"	118.0	"	38.0	"	2.58	1.59	2.03	Spring
18	"	53.0	"	10.0	"	5.75	1.00	5.66	"
19	"	118.0	"	38.0	"	2.58	1.59	2.03	"
20									
21									
22									
23									
24									
25									
Total							33.40	50.30	

付表-9 けい留索ばね定数算定表 KA48-4-1

No.	材 質	l [m]	ϕ [mm]	θ	$B.P$ [t]	k [t/m]	$\sin \theta$	$\cos \theta$	LINE 名
1	ナイロン	53.0	72.0	10.0	71.0	5.75	1.00	5.66	Spring
2	"	44.0	"	13.0	"	6.93	1.56	6.75	"
3	"	53.0	"	10.0	"	5.75	1.00	5.66	"
4	"	39.0	"	18.0	"	7.82	1.76	1.71	"
5	"	132.0	"	27.0	"	2.31	1.05	2.06	"
6	"	116.0	"	49.0	"	2.63	1.98	1.73	Bow
7	"	118.0	"	38.0	"	2.58	1.59	2.03	Spring
8	"	74.0	"	62.0	"	4.12	3.64	1.93	Breast
9	"	122.0	"	40.0	"	2.50	1.61	1.92	"
10	ワイヤー	118.0	38.0	38.0	72.0	17.52	10.79	13.81	Spring
11	ナイロン	145.0	72.0	23.0	71.0	2.10	0.82	1.93	Bow
12	"	99.0	"	45.0	"	2.08	2.18	2.18	Stern
13	"	"	"	60.0	"	"	2.67	1.34	"
14	"	145.0	"	24.0	"	2.10	0.85	1.92	Bow
15	"	"	"	"	"	"	"	"	"
16	"	146.0	"	31.0	"	2.09	1.08	1.79	Stern
17	"	169.0	"	33.0	"	1.80	0.98	1.51	"
18	"	"	"	"	"	"	"	"	"
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
Total							36.39	57.36	

けい留中の大型タンカーの衝突力

付表-10 けい留索ばね定数算定表 KA48-7-1

No.	材質	l [m]	ϕ [mm]	θ	$B.P$ [t]	k [t/m]	$\sin \theta$	$\cos \theta$	LINE 名
1	ワイヤー	47.0	42.0	6.5	88.0	55.32	6.26	54.96	Spring
2	ナイロン	130.0	90.0	27.0	101.3	3.51	1.59	3.13	Bow
3	"	"	"	"	"	"	"	"	"
4	ワイヤー	37.0	42.0	13.0	88.0	70.27	15.81	68.47	Spring
5	ナイロン	130.0	60.0	27.0	101.3	3.51	1.59	3.13	Bow
6	"	96.0	"	34.0	"	4.76	2.66	3.95	Stern
7	"	"	"	"	"	"	"	"	"
8	ワイヤー	67.0	42.0	70.0	88.0	38.81	36.47	13.27	Breast
9	"	55.0	"	46.0	"	47.27	34.00	32.84	Spring
10	"	67.0	"	70.0	"	38.81	36.47	13.27	Breast
11	"	55.0	"	46.0	"	47.27	34.00	32.84	Spring
12	"	45.0	"	6.5	"	57.78	6.54	57.41	"
13	ナイロン	116.0	90.0	29.0	101.3	3.94	1.91	3.45	"
14	ワイヤー	39.0	42.0	13.0	88.0	66.67	15.81	68.47	Spring
15	ナイロン	114.0	90.0	29.0	101.3	4.00	1.94	3.50	"
16	"	170.0	"	26.0	"	2.76	1.18	2.42	Stern
17	"	143.0	"	"	"	3.19	1.40	2.87	Spring
18	"	144.0	"	"	"	3.17	1.39	2.85	"
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
Total							203.27	373.91	

付表-11 けい留索ばね定数算定表 KA48-9-1

No.	材質	l [m]	ϕ [mm]	θ	$B.P$ [t]	k [t/m]	$\sin \theta$	$\cos \theta$	LINE 名
1	ナイロン	53.0	75.0	10.0	71.0	5.75	1.00	5.66	Spring
2	"	"	"	"	"	"	"	"	"
3	"	56.0	"	8.0	"	5.45	0.76	5.40	"
4	"	"	"	"	"	"	"	"	"
5	"	44.0	"	13.0	"	6.93	1.56	6.75	"
6	"	39.0	"	"	"	7.82	1.76	7.62	"
7	"	145.0	"	24.0	"	2.10	0.89	1.90	Bow
8	"	"	"	"	"	"	"	"	"
9	"	"	"	"	"	"	"	"	"
10	"	118.0	"	38.0	"	2.58	1.59	2.03	Spring
11	"	"	"	"	"	"	"	"	"
12	"	91.0	"	64.0	"	3.35	3.01	1.47	Stern
13	"	116.0	"	49.0	"	2.63	1.98	1.73	Bow
14	"	132.0	"	27.0	"	2.31	1.05	2.06	"
15	"	99.0	"	45.0	"	3.08	2.18	2.18	Stern
16	"	83.0	"	84.0	"	3.67	3.65	0.38	Breast
17	"	99.0	"	45.0	"	3.08	2.18	2.18	Stern
18	"	74.0	"	62.0	"	4.12	3.64	1.93	Breast
19	"	"	"	"	"	"	"	"	"
20	"	169.0	"	33.0	"	1.80	0.98	1.51	Stern
21									
22									
23									
24									
25									
Total							35.0	61.62	

けい留中の大型タンカーの衝突力

付表-12 けい留索ばね定数算定表 KA48-9-2~3

No.	材質	l [m]	ϕ [mm]	θ	$B.P$ [t]	k [t/m]	$\sin \theta$	$\cos \theta$	LINE 名
1	ナイロン	169.0	75.0	33.0	71.0	1.80	0.98	1.51	Stern
2	"	"	"	"	"	"	"	"	"
3	"	"	"	"	"	1.85	1.00	1.55	"
4	"	99.0	"	45.0	"	3.08	2.18	2.18	"
5	"	"	"	"	"	"	"	"	"
6	"	"	"	"	"	"	"	"	"
7	"	118.0	"	38.0	"	2.58	1.59	2.08	Spring
8	"	"	"	"	"	"	"	"	"
9	"	44.0	"	13.0	"	6.93	1.56	6.75	"
10	"	39.0	"	"	"	7.82	1.76	7.62	"
11	"	53.0	"	10.0	"	5.75	1.00	5.66	"
12	"	"	"	"	"	"	"	"	"
13	"	56.0	"	8.0	"	5.45	0.76	5.40	"
14	"	74.0	"	62.0	"	4.12	3.64	1.93	Breast
15	"	"	"	"	"	"	"	"	"
16	"	83.0	"	84.0	"	3.67	3.65	0.38	"
17	"	145.0	"	24.0	"	2.10	0.89	1.90	Bow
18	"	"	"	"	"	"	"	"	"
19	"	"	"	"	"	"	"	"	"
20	"	56.0	"	8.0	"	5.45	0.76	5.40	Spring
21									
22									
23									
24									
25									
Total							33.12	61.6	

付表-13 けい留索ばね定数算定表 KA48-11-1

No.	材 質	l [m]	ϕ [mm]	θ	$B.P$ [t]	lc [t/m]	$\sin \theta$	$\cos \theta$	LINE 名
1	ナイロン	53.0	75.0	10.0	71.0	5.75	1.00	5.66	Spring
2	"	"	"	"	"	"	"	"	"
3	"	44.0	"	13.0	"	6.93	1.56	6.75	"
4	"	56.0	"	10.0	"	5.45	0.98	5.37	"
5	"	99.0	"	45.0	"	3.08	2.18	2.18	Stern
6	"	"	"	"	"	"	"	"	"
7	"	136.0	"	23.0	"	2.24	0.88	2.06	Bow
8	"	145.0	"	24.0	"	2.10	0.82	1.93	"
9	"	146.0	"	31.0	"	2.09	1.08	1.79	Stern
10	"	145.0	"	24.0	"	2.10	0.82	1.93	Bow
11	"	146.0	"	31.0	"	2.09	1.08	1.79	Stern
12	"	136.0	"	23.0	"	2.24	0.88	2.06	Bow
13	"	169.0	"	33.0	"	1.80	0.98	1.51	Stern
14	"	"	"	"	"	"	"	"	"
15	"	122.0	"	40.0	"	2.50	1.61	1.02	Breast
16	"	118.0	"	38.0	"	2.58	1.59	2.03	"
17	"	122.0	"	40.0	"	2.50	1.61	1.92	"
18	"	74.0	"	62.0	"	4.12	3.64	1.93	"
19	"	39.0	"	13.0	"	7.82	1.76	7.62	Spring
20	"	"	"	"	"	"	"	"	"
21									
22									
23									
24									
25									
Total							28.36	65.42	