

# CIRCLE 型 防 舷 材 の 特 性

高 隆 二\*・田 川 昌 宏\*\*

## 1. 沿 革

丸木船から超大型 tanker に至る船の歴史において、最も単純な形態の防舷材は出現後約 200 年、ことに今日多用されているゴム製防舷材も短いながら 40 年の実績を有している<sup>1)</sup>。産業革命を契機とする小型木船から鉄船への移行、第二次大戦後船舶の巨大化に伴う港湾施設の多様化は防衛工の必然的な発達を促した。木材、古タイヤ、マニラ麻、コルク等を経て、耐久性、耐老化性等の面からゴム防舷材の優位はすでに立証され、防衛工の主流を占めている。昭和 36 年運輸省は定反力で吸収(むしろ大半は貯溜)エネルギーをゴムの座屈により増大させる画期的な V 型防舷材の開発に貢献した。しかし、防舷材および船舶外板の被災は、比較的静穏度の低い港では少なからず見られる。現行設計法では、防衛工は主に船舶の接岸時繫船岸に与える衝撃力を対象としている<sup>2)</sup>。繫留時船舶の動揺に起因する力をも設計条件に採用すべきであり、さらに単なる面反力(単位面積当りの反力)に代り船舶の外板の構造を考慮した許容反力の導入を上記被災例は要請している。設計に際し、接岸時は必要条件、繫留時は十分条件と見なされる。繫留時船舶の外板および防舷材の保全を意図して開発された CIRCLE 型防舷材は、外板と平行面内で等方性(必須条件は多方性、ただし明確な規定は困難)を有し、V 型防舷材の一方方向性欠陥を改善すると期待される。

## 2. 外 力

通常起り得る最悪の状況を本来の設計条件とするならば、現行設計法に規定された静水中の接岸に加えて、荒天時の接岸<sup>3)</sup>あるいは繫留時を想定すべきである。繫留時には人為的に船舶を水平移動させるほか、潮汐・潮流・風・波および副振動により、防舷材には船側と平行および垂直な周期的あるいは非周期的変位や回転を伴い、反力を惹起する。港内水面は、風波・うねり・長周期波等の出現状況、港の平面形および水際線の構造等の影響を受けて変動し、船舶は繫留位置および状態により

異なる強制運動および自由運動を行う。不規則な波浪および副振動に対する港内波ならびに船舶運動の平面的分布を明らかにし、外力の正確な評価は初めて可能になる。以下、各種運動の規模を概算し、防舷材の設計に資す。

### (1) 防 舷 材

#### a) 接 岸 力

常用される防舷材の性能は、図-1 に示す反力(荷重)一たわみ曲線で表示される。比例限界  $S_e \approx 0.2D$ 、設

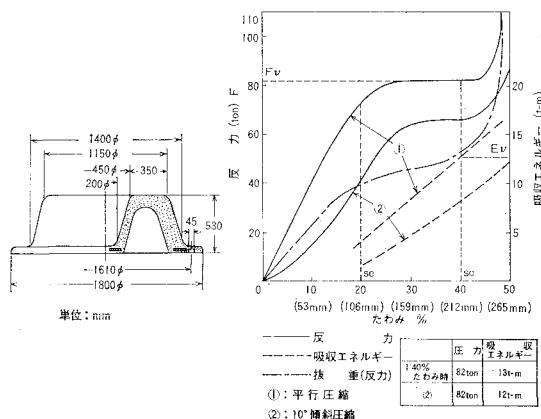


図-1 防舷材の性能

計限界  $S_0 \approx 0.4D$  とし、吸収エネルギーを

$$E_v = \frac{1}{2} M v_*^2 = \frac{1}{2} (1 + C_M) C_B \rho b l d v_*^2$$

$$\approx \frac{K}{2} S_0 (2S_0 - S_e) = 0.06 D^2 K \dots \dots \dots (1)$$

と表わす。ただし、 $M$ : 船の仮想質量 ( $=m+m'=m(1+C_M)$ ),  $m$ : 船の質量,  $m'$ : 付加質量,  $C_M$ : 付加質量係数,  $v_*$ : 接岸速度,  $D, K$ : 防舷材の厚さおよび弾性係数,  $C_B$ : 方形係数(水面下船体容積と  $bld$  との比),  $b, l, d$ : 船の幅員, 長さ, 喫水である。最大反力は

$$F_v = K S_e \dots \dots \dots (2)$$

で与えられる。抜重時船舶に換元される貯留エネルギーは  $0.57E_v$ , 真の吸収エネルギーは  $0.43E_0$  となる。角度  $10^\circ$  で傾斜圧縮すると同一反力に対し吸収エネルギーは数 % 低下する(図-1)。

\* 正会員 工修 日本港湾コンサルタント水理部長  
 \*\* 正会員 工修 日本港湾コンサルタント水理研究所

b) せん断力

試験結果を参照すると、防舷材と外板の摩擦係数は0.60~0.75にあり、接岸力と等しい静的垂直力を作させた時、滑動時最大水平変位、力および吸収エネルギーは  $x=0.56D$ ,  $F_h=(0.6\sim0.75)F_v$ ,  $E_h=0.71E_v$  とする(図-2~4)。

c) 回転モーメント

接岸力と等しい垂直力に対し、回転角  $\theta=0.17\text{ rad}=9.8^\circ$  で最大曲げモーメントに達し、その後外周から順

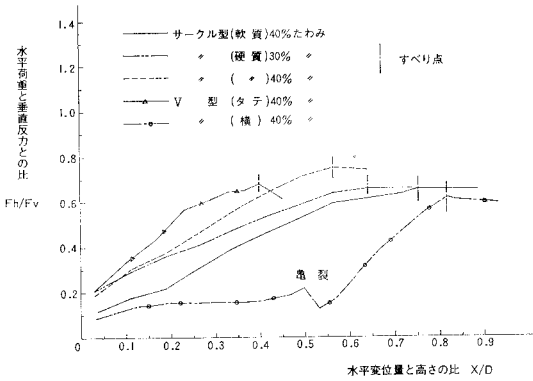


図-2 摩擦係数

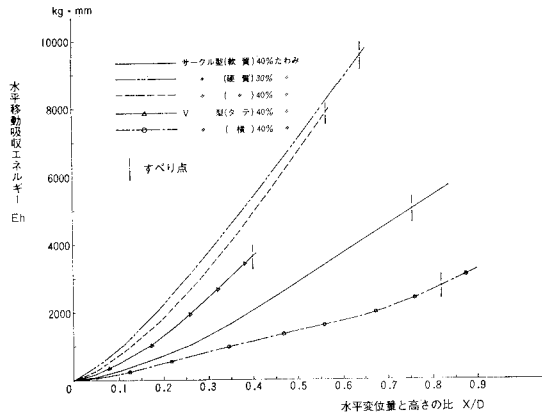


図-3 水平吸収エネルギー

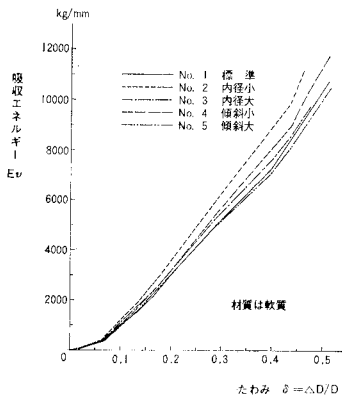


図-4 垂直吸収エネルギー

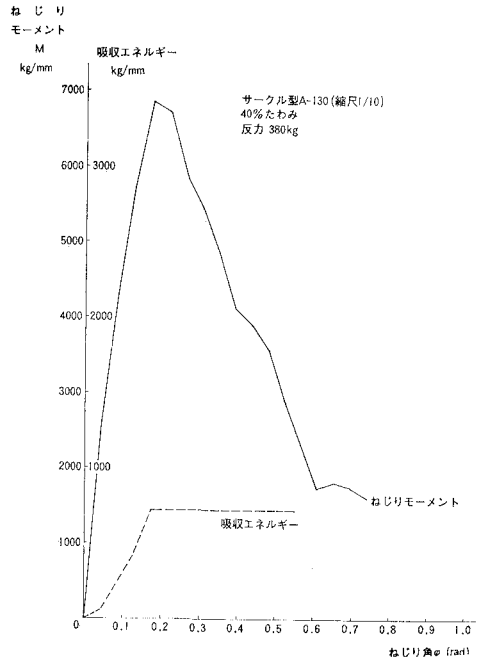


図-5 モーメント

次滑動を生じている(図-5)。

(2) 風

a) 風圧

船側と垂直な風圧力

$$F_1 = \frac{\rho'}{2} C_b S' U^2$$

に空気密度  $\rho' = 1.2 \times 10^{-3} \rho$ ,  $C_b = 1.3^2$ , 受圧面積  $S' = ld'$  ( $d'$ : 水面上船側高) を代入すると,

$$= 7.8 \times 10^{-4} \rho l d' U^2 \dots\dots\dots (3)$$

となる ( $U$ : 風速)。

b) 漂流

自由に漂流すると、風圧と抗力のつりあい

$$F_2 = \frac{\rho'}{2} C_b S' U^2 = \frac{\rho}{2} C_D S v^2$$

から  $C_D = 2.0^4$  として、漂流速度は

$$v = 2.8 \times 10^{-2} U \sqrt{\frac{d'}{d}} \dots\dots\dots (4)$$

と表わされる。

(3) 潮流

a) 船側と垂直

流速  $v$  で流れる潮流の抗力

$$F_3 = \rho l d v^2 \dots\dots\dots (5)$$

b) 船首尾方向<sup>2)</sup>

$$F_4 = 1.35 \times 10^{-3} \rho b d v^2 \dots\dots\dots (6)$$

(4) 潮 汐

a) 浮 力

固定した船に対し、潮差  $\Delta$  による鉛直力および位置エネルギー

$$F_5 = \rho g b l \Delta \dots\dots\dots (7)$$

$$E_1 = \frac{1}{2} \rho g b l \Delta^2 \dots\dots\dots (8)$$

( $g$ ; 重力加速度)

b) 復 元 力

繫留点を固定した時の復元力<sup>5)</sup> および位置エネルギー

$$F_6 = \frac{1}{3} \rho g b l \Delta \dots\dots\dots (9)$$

$$E_2 = \frac{1}{6} \rho g b l \Delta^2 \dots\dots\dots (10)$$

(5) 波<sup>6)</sup>

a) Heaving

船の上下運動は  $l/L \leq 0.25$  で波高と同程度,  $l/L > 0.7$  で約 1/10 に低下するから, 潮汐に準じて鉛直力を算定し得る (図-6)。

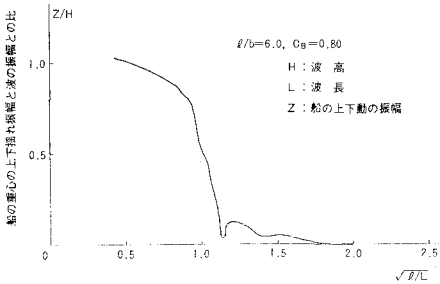


図-6 Heaving

b) Pitching

図-7 から heaving と同様に結論される。角度  $\phi$  だけ傾いた船の復元モーメント

$$M_1 = \frac{\rho g b l^3}{12} \phi \dots\dots\dots (11)$$

1/4 点接触とすると復元力は

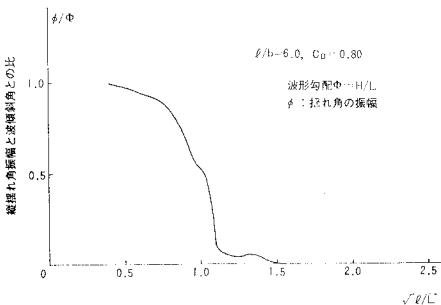


図-7 Pitching

$$F_7 = \frac{\rho g b l^2}{6} \phi \dots\dots\dots (12)$$

c) Drifting

① 船軸方向<sup>7)</sup>

pitching と surging の二次干渉や, 船体による波の回折等により,  $l/L$  の増加とともに増速し, 波の質量輸送速度

$$U_m = \frac{\pi H^2}{4hT} \coth \frac{2\pi h}{L} \dots\dots\dots (13)$$

をはるかに上まわり, 船軸方向の運動エネルギーを有する。

② 船側に垂直<sup>8)</sup>

船側による波の反射率  $K_R$ , 伝達率  $K_T$  を用い

$$F_8 = \left( \frac{1}{80} \sim \frac{1}{40} \right) \rho g l (1 - K_T^2) (1 + K_R^2) H^2 \leq (0.05 \sim 0.1) \rho g l H^2 \dots\dots\dots (14)$$

d) Swaying<sup>9)</sup>

$$F_9 = (1.1 \sim 1.4) \frac{\rho g l}{2k} \times \left\{ \tanh kh - \frac{\sinh k(h-d)}{\cosh kh} \right\} (1 + K_R) H \times \sqrt{1 + K_R^2 - 2K_R \cos kb} \leq (0.24 \sim 0.31) \rho g l L H \tanh kh \sqrt{1 - \cos kb} \dots\dots\dots (15)$$

$(k = 2\pi/L)$

繫留時の Rolling は繫留索や防舷材の状況により異なり, 岸壁あるいは棧橋ではそれぞれ大略重複波および進行波の限界波形勾配 (傾斜角  $0.15 \text{ rad} = 9.5^\circ$ ) 程度に留まり, yawing の顕著な発達も抑制されるであろう。

(6) 副 振 動

重複波となった長波は, 最大水平および鉛直流速

$$u_{\max} = H \sqrt{\frac{g}{h}} \cos kx \dots\dots\dots (16)$$

$$w_{\max} = \frac{2\pi H}{T} \sin kx \dots\dots\dots (17)$$

を有する。半周期の移動距離は

$$l = \int_0^{T/2} \sqrt{u_{\max}^2 + w_{\max}^2} \sin \omega t dt = 2H \sqrt{\frac{gT^2}{4\pi^2 h} \cos^2 kx + \sin^2 kx} \dots\dots\dots (18)$$

$(\omega = 2\pi/T)$

となり, 水粒子は傾斜角

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{2\pi}{T} \sqrt{\frac{h}{g}} \tan kx \right)$$

の直線上を往復する。節では

$$\frac{HT}{\pi} \sqrt{\frac{g}{h}}$$

表-1 外力の規模

外力	条件	算定法	限界値	備考
接岸力		式(1)	$v=0.062$ m/sec	$l=240$ m, $b=36.8$ m, $d=15.6$ m (満載) $C_B=0.8, C_M=0.42$
せん断力		図-2~4	$x=0.4$ m $F_h=102$ t $E_h=22$ t-m	$R=146$ t $D=0.71$ m $E=31$ t-m $\mu=0.7$
回転力		図-5	$\theta=9.8^\circ$ $M=25$ t-m $E_r=5.14$ t-m	
風圧		式(3)	$U=23.8$ m/sec	$d'=13.1$ m (軽荷)
漂流		式(4)	$U=2.4$ m/sec	$d=7.5$ m (軽荷), $v_s=0.090$ (軽荷)
潮流	船側と垂直	式(5)	$v=0.61$ m/sec	
潮汐	浮力*	式(7) 式(8)	$F_5=3,640$ t $E_1=728$ t-m	
	復元力	式(9) 式(10)	$F_6=1,213$ t $E_2=243$ t-m	
波	Heaving*	図-6	$H=1.6$ m	$h=16$ m, $L=240$ m ( $T=20$ sec)
	Pitching*	式(11)	$H=1.6$ m	1/4 点接触 $x=0.40$ m
		式(12)	$M_1=6,550,000$ t-m $F_7=55,000$ t	$\phi=0.15$ 重心接触 1/4 点接触
	Drifting (船軸方向)*	式(13)	$H \ll 6.5$ m	$\mu=0.7$
	Drifting (船側と垂) 直	式(14)	$H=2.5 \sim 3.5$ m	
	Swaying	式(15)	$H > 0.03 \sim 0.04$ m	
Rolling	式(10)	$E_3=243$ t-m		
副振動	水平流速	式(16)	$H=0.079$ m	
	移動距離*	式(18), 図-6	$H=0.4$ m	鉛直 $l \leq 0.6$ $D=0.4$ m, $T=60$ sec
式(18)		$H=0.018$ m	水平	

\* 印は滑動限界

(水平), 腹では  $2H$  (鉛直) だけ移動する。感覚的に把握するため, CIRCLE 型防舷材 A-310 に対する 10 万 DWT 級 tanker を例とし, 各外力の規模を以下試算する(表-1)。

以上, 防舷材に作用する外力は, i) 船側と垂直, ii) 船側と平行 (鉛直, 水平を含む全方向), iii) 船側と多少傾斜 (軸は船側面の全方向), iv) 船側面内の回転等に区分される。以下静荷重で代用し, おのおのに対応して, i) 平行圧縮, ii) 圧縮せん断, iii) 傾斜圧縮, iv) 圧縮回転等の試験を行う。

### 3. 特性

#### (1) Rheology

ゴムは弱い凝集力場でマイクロ・ブラウン運動を行うイソプレンの長鎖状分子から成り, Poisson 比ほぼ 0.5, Rheological には非圧縮性液体に近く, Young 率は絶対温度に比例する。伸長に伴う entropy の減少に基づく entropy 弾性を呈し, 吸収エネルギーは熱に変わる<sup>9)</sup>。外部摩擦係数は, 荷重の減少および接触面積の増加とともに

増大する高分子材料の通性を有し, Coulomb-Amontons の法則 (摩擦係数は荷重・接触面積・速度によらず一定) に従わない<sup>9)</sup>。応力ひずみ曲線は加重と抜重で異なり, 硫黄原子で鎖間に架橋した加硫ゴムにおいても若干の hysteresis loop を書き, 実用的には第3回載荷まで

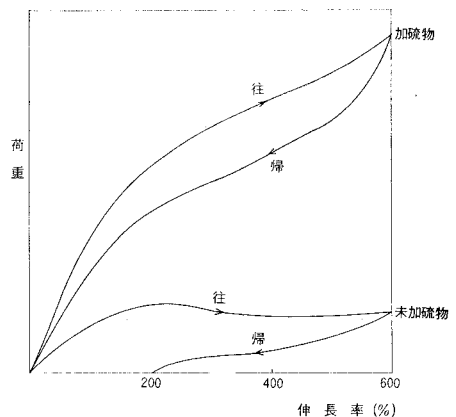


図-8 加硫および未加硫天然ゴムの応力-ひずみ図

に永久変形を完了する (図-8)。

(2) 基礎試験

幾何学的に単純で厚さの等しい円, 正方形, 三角形および長方形の断面を有する充実ゴム供試体に関し平行圧縮を行った (図-9)。円, 正方形, 長方形, 三角形の順に応力集中の影響により単位面積当り反力は増加し, それに伴い単位面積当り吸収エネルギーも増す (図-10~12)。図-13 を参照し, Young 率  $E_r$  は

$$\frac{F_h}{A \left(1 + \frac{\Delta b}{B}\right)^2} = E_r \frac{\Delta D}{D}$$

に Poisson 比  $\nu$ ,  $\delta = \Delta D/D$  を代入し,

$$E_r = \frac{F_h}{A \delta (1 + \nu \delta)^2} \dots \dots \dots (19)$$

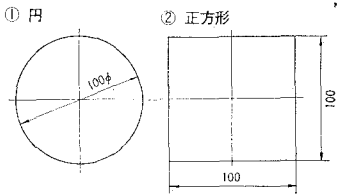


図-9 断面形状供試体

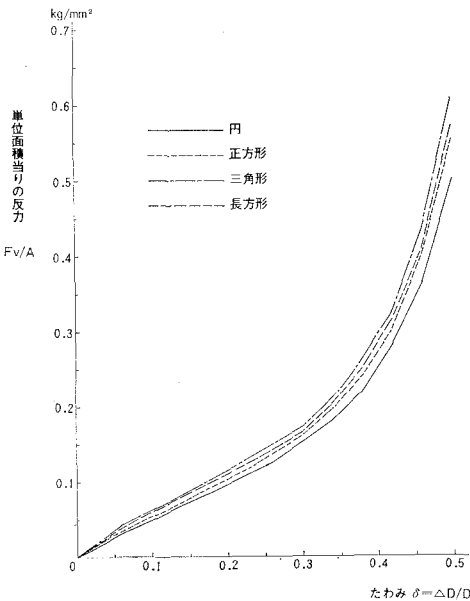


図-10 反力 (平行圧縮)

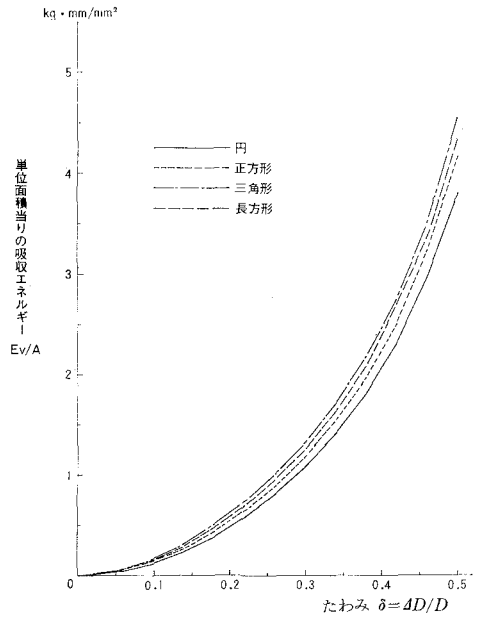


図-11 吸収エネルギー (平行圧縮)

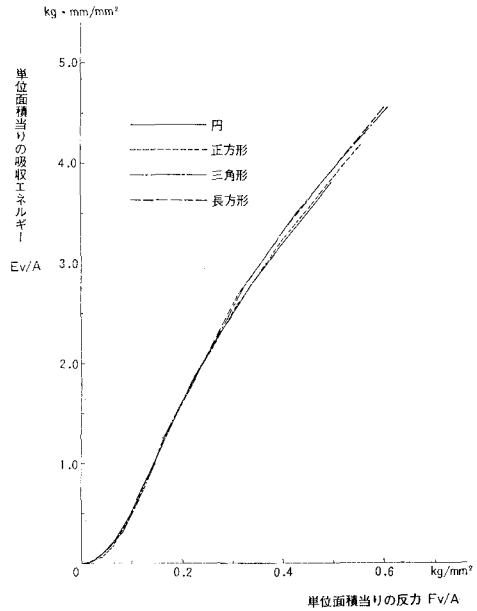


図-12 反力と吸収エネルギー (平行圧縮)

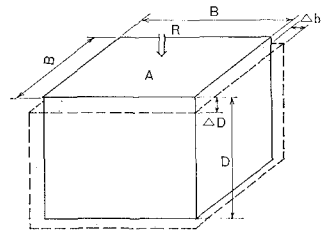


図-13 圧縮変形

$\nu=0.5$ とし、図-5から導いた Young 率は、 $A/l^2$  ( $A$ : 接触面積、 $l$ : 周辺長)で定義する形状係数の増加とともに減少する(図-14, 15)。圧縮した供試体は上下接触面の摩擦により太鼓状を呈する。

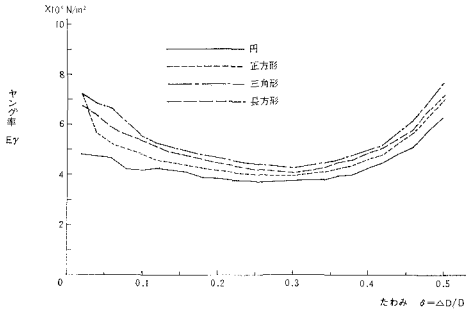


図-14 Young 率

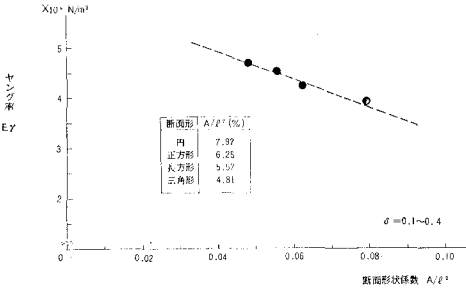


図-15 Young 率と断面形状係数

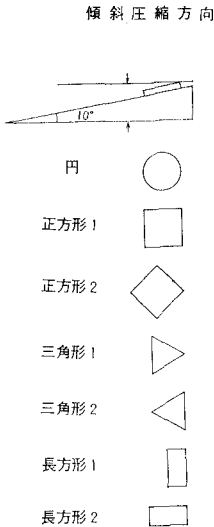


図-16 傾斜圧縮

次に傾斜角  $10^\circ$  で圧縮試験を行った(図-16)。円は単位面積当りの反力、吸収エネルギーともに最も小さく、長方形1および三角形で高い値を示す(図-17, 18)。

(3) CIRCLE 型防舷材

圧縮応力最小の円形断面を選定し、充実ゴムに代りエ

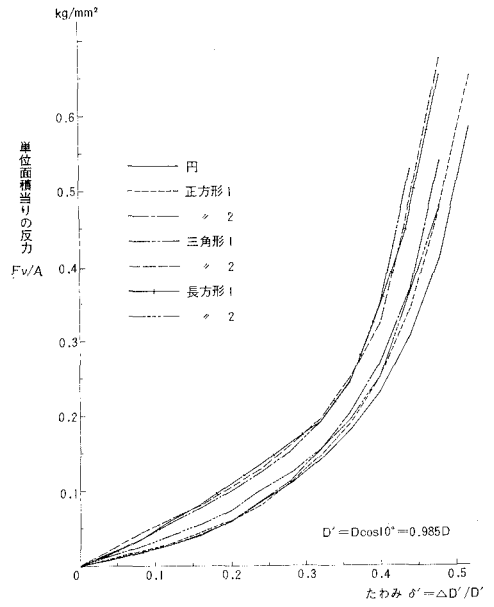


図-17 反力(傾斜圧縮)

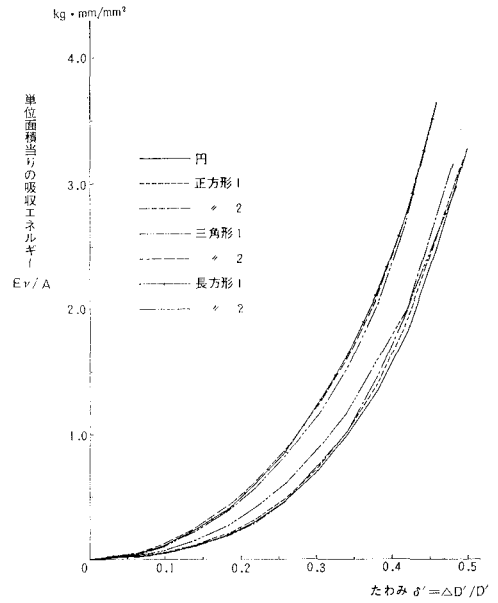


図-18 吸収エネルギー(傾斜圧縮)

ネルギー吸収性能の向上を座屈に期待して、図-19に示す CIRCLE 型模型に関する試験を行った。模型の材質は現物に比して軟質であり、座屈中に反力は若干低下するため最適形状を決定するに至らない。吸収エネルギーは初期の接触面積にほぼ比例する(図-20, 21)。接触面は座屈後急激に広がり、また応力も均等ではない(図-22)。

現物と同質の V 型防舷材は横(長軸と垂直)方向せん断に対し亀裂を生じ、水平力をいったん減少させ、縦方向では最も早く滑動する(図-23, 24)。材質は 45%

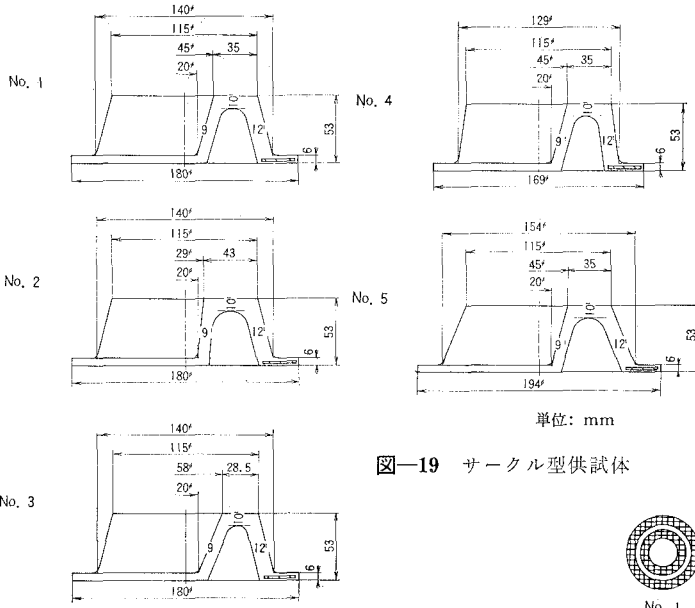


図-19 サークル型供試体

単位: mm

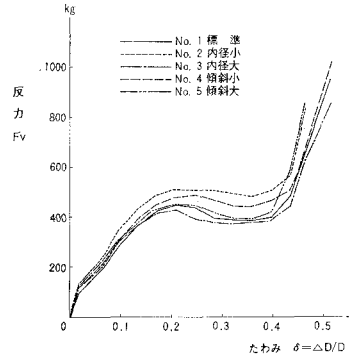


図-20 反力 (サークル)

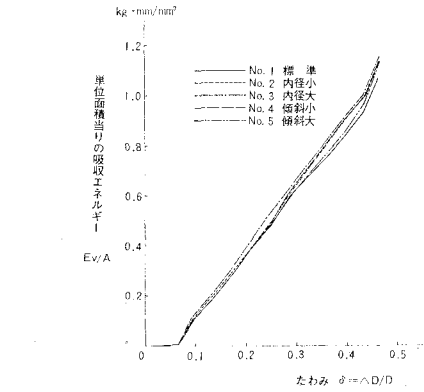


図-21 吸収エネルギー (サークル)

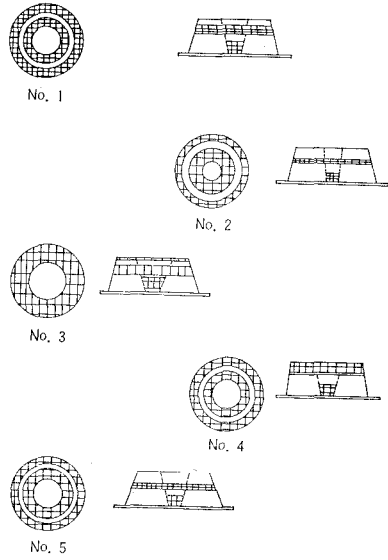


図-22 接触面 (たわみ  $\delta=50\%$ )

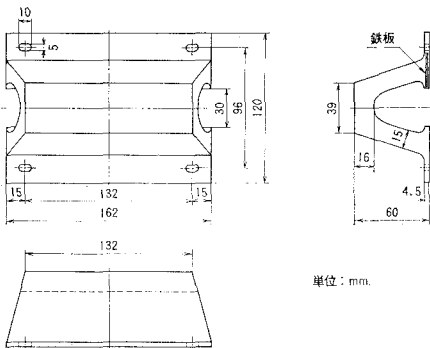


図-23 V型防眩材供試体

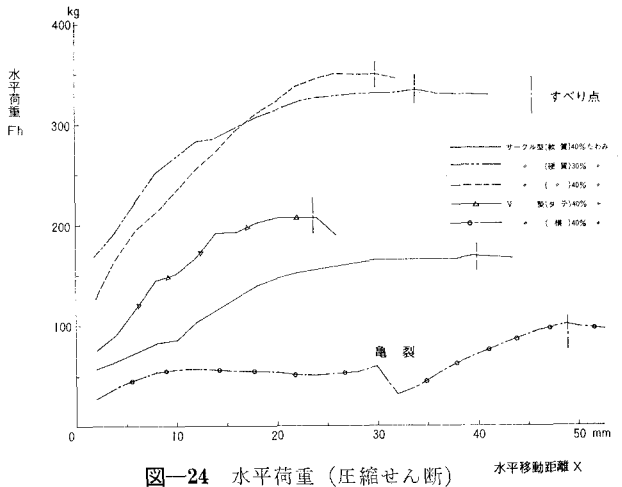
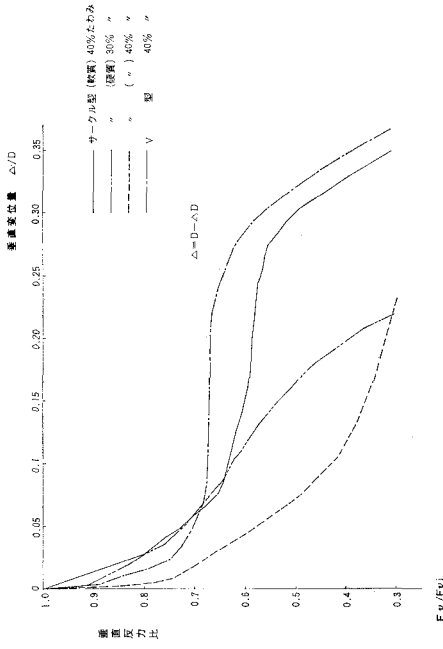
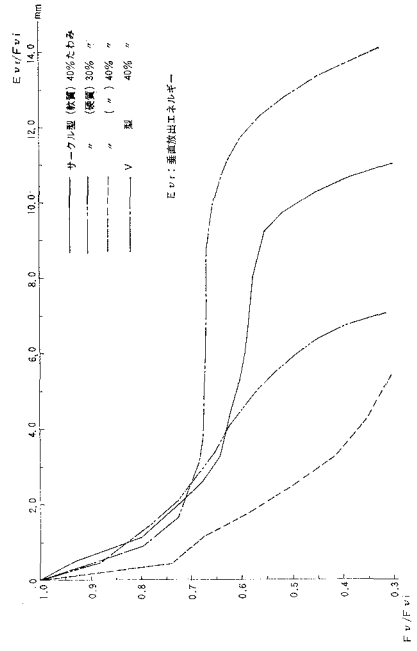


図-24 水平荷重 (圧縮せみ断)

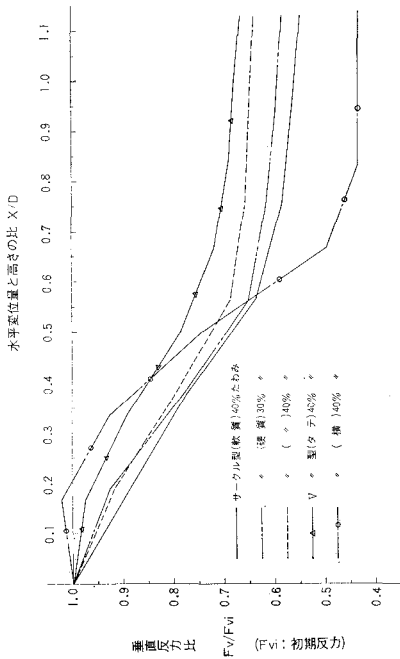
水平移動距離  $\times$



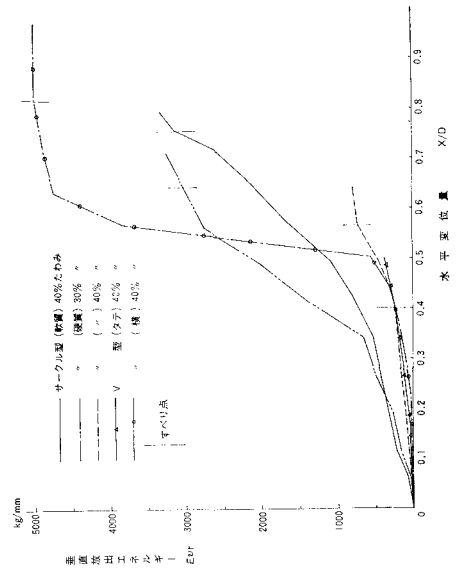
図—27 抜重時の反力



図—28 垂直反力と放出エネルギー



図—25 垂直反力の変化



図—26 垂直放出エネルギー



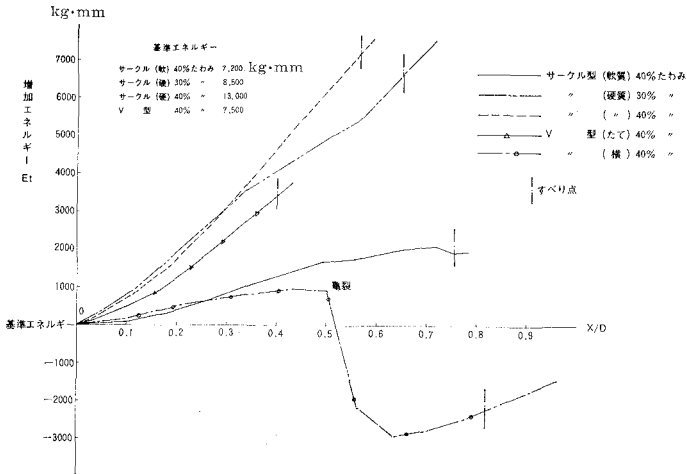


図-29 水平荷重によるエネルギー増加

表-2 せん断試験結果

防 舷 材	たわみ	初期垂直反力 $F_{0.1}$	すべり時水平変位	摩擦係数	水平方向吸収エネルギー	垂直方向放出エネルギー	全吸収エネルギー
	%	kg			kg·mm	kg·mm	kg·mm
サークル型 (軟質)	40	440	0.755	0.654	5000	3140	1860
サークル型 (硬質)	30	800	0.642	0.655	9520	3010	6510
サークル型 (硬質)	40	680	0.566	0.748	7840	720	7120
V 型 (タテ方向)	40	360	0.400	0.677	3640	240	3400
V 型 (横方向)	40	370	0.827	0.615	2730	4940	-2210

ただし、すべり時変位量=x/D、エネルギーは皆すべり時の値

たわみで CIRCLE 型硬 (67 t/m<sup>2</sup>), 軟 (42 t/m<sup>2</sup>), V 型 (96 t/m<sup>2</sup>) である。

接触面に対する水平変位に伴い垂直荷重は V 型 (横) では速やかに減少し、滑動までの放出エネルギーは最も大きく、CIRCLE 型、V 型 (縦) の順で続く (図-25, 26)。最大反力の増加とともに屈屈により抜重時の反力は急減し、ことに CIRCLE 型は放出エネルギーを増大させて真の吸収エネルギーを増加させ、船に対する反発

力軽減にも有効である (図-27, 28)。これに比して V 型は剛性大 (縦), あるいは引張力を含む応力集中 (横) を生じやすい (図-29, 表-2)。

#### 4. 外板強度

船側は 1 万 DWT を越す tanker では縦肋骨式, これ以下の tanker および貨物船で横肋骨式構造を有する。CIRCLE 型防舷材は肋骨および外板にほぼ均等に荷重

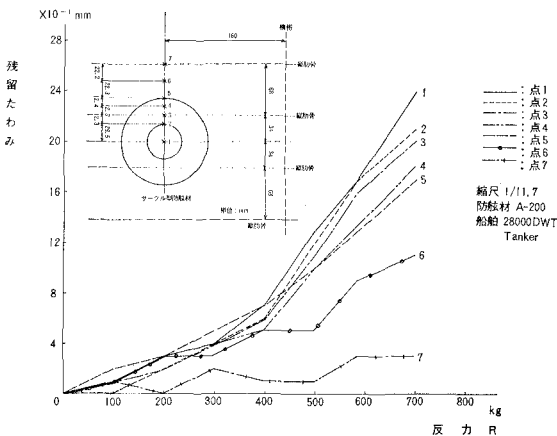


図-30 (a) 船側の変形

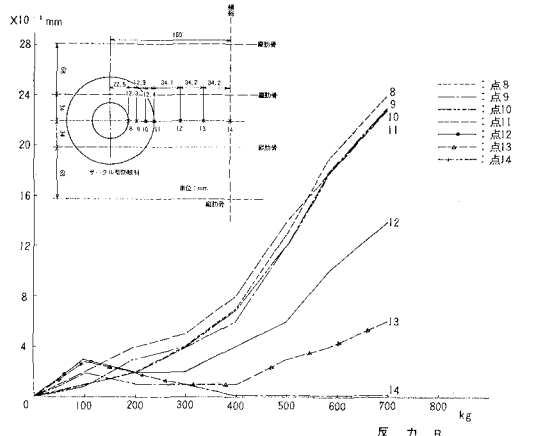


図-30 (b) 船側の変形

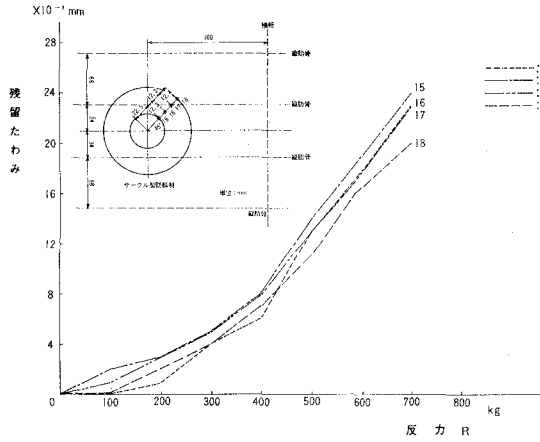


図-30 (c) 船側の変形

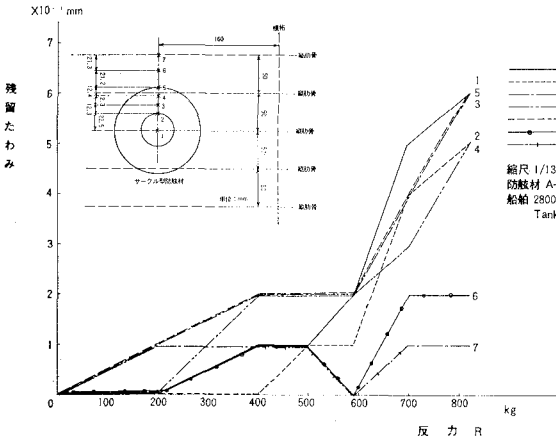


図-31 (a) 船側の変形 (外板)

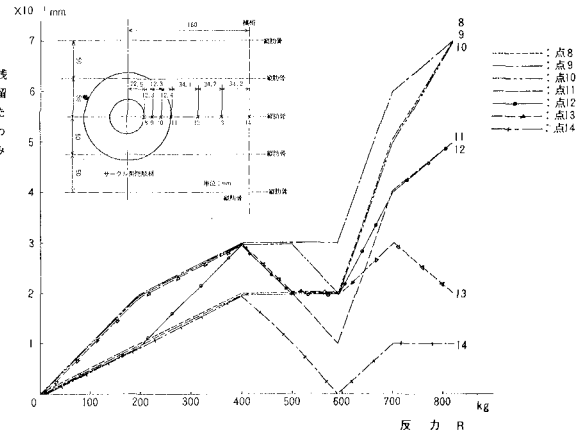


図-31 (b) 船側の変形 (縦肋骨)

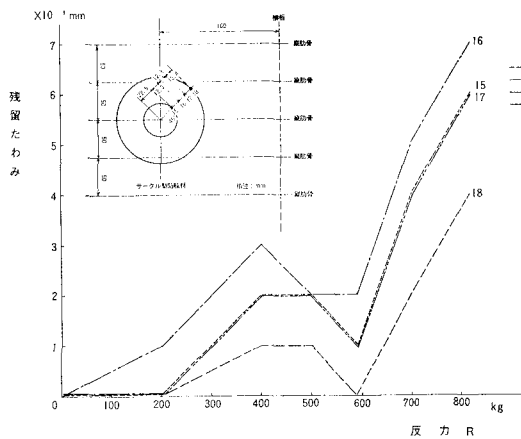


図-31 (c) 船側の変形 (外板)

を与え、降伏応力  $28 \text{ kg/mm}^2$  前後で残留たわみは急増する (図-30)。ただ、外板の永久変形を許さない反力は接岸時の約 1/2 とは言え、海難損傷と認められる永久変形を生じる外力の 1/10 程度に過ぎない<sup>10)</sup> (図-31)。

### 5. 結 言

現行設計法に従い設計条件を接岸時に限れば、CIRCLE 型防舷材は V 型防舷材と同等であり、特定の船舶

を対象とする静穏な繫船岸においては、外板強度の面からむしろ劣性である<sup>10)</sup>。しかし、現実には防舷材に作用する各種の複雑な外力を考慮すれば、単純化した外力に対する安定性は模型試験によっても明らかであり、今後現地における使用例から優劣は正当に評価されるものと期待される。

昭和48年10月以降の1年間、海難審判所で取り扱った船舶の防波堤を含む岸壁、棧橋等の衝突事件は27件におよんでおり、いずれも船員の不注意あるいは機関整備不良のため、繫船岸とほぼ直角に衝突している<sup>11)</sup>。審判に付されない事件は当然はるかに多く、防舷材はその都度耐え難い過酷な外力に晒される。防舷材はますます改良されるとしても、圧倒的な各種外力に独力で対抗し自らを保全することは至難の業である。

なお昭和49年日本海事協会受検の船級船延べ3,770隻中956隻25.4%は接岸時に損傷(限界25mm又は板厚の2倍)を受けている<sup>12)</sup>。

## 参 考 文 献

- 1) 橋間・奥村：防舷材の現状，OCEAN AGE Vol. 6, No. 7, オーシャン・エイジ社，1974.
- 2) 日本港湾協会：港湾構造物設計基準，1967.
- 3) 永井・小田・重藤：横波を受けるスーパータンカーの drifting, surging および rolling によってドルフィンに働く衝撃力に関する研究，第16回海岸工学講演集，土木学会，1969.
- 4) 日本港湾コンサルタント：防衝工調査研究，1975.
- 5) 本間 仁：水理学，丸善 1954.
- 6) 栗須義明：港工学，森北出版，1974.
- 7) 土木学会：土木技術者のための振動便覧，1966.
- 8) 砂川重信：エネルギーの物理学，河出書房，1972.
- 9) 中川鶴太郎：レオロジー，岩波，1970.
- 10) 川上益男：船側構造保護効果に対する防舷材の比較に関する研究，広島大学工学部，1975.
- 11) 石川晴一：海難の実例における防舷材の効用に関する調査，1975.
- 12) 津嘉山朝邦：船舶の接岸に対する強度，日本海事協会々誌 No. 151, 1975.