

防 舷 材 の 諸 特 性

—CIRCLE 型を中心に—

高 隆 二*・田 川 昌 宏**

1. 緒 言

座屈により定反力を保ちつつ吸収エネルギーを増加させるV型防舷材は、発展史上一時代を画したとはいえ、繫留船舶の動揺により、側面元付や接触面に長手方向の亀裂を生じ、あるいは固定ボルトの破断により脱落しやすい欠陥は免れ難い¹⁾。外板強度はむしろ tanker に勝る反面、高度の効率、安全性を要求される建造費の高価な LNG および LPG 専用船を対象とした開発過程で判明した防舷材の諸特性に関し、CIRCLE 型を中心に概説を試みる。

2. 変 形

空隙に注入したシリコンゴムの形状から判定した圧縮時の変形を 図-1 に示す。座屈と大変形により外力を吸収するため、予期通り応力は不均一で、船舶の動揺に伴い時間的にも極めて複雑な分布を呈するであろう。

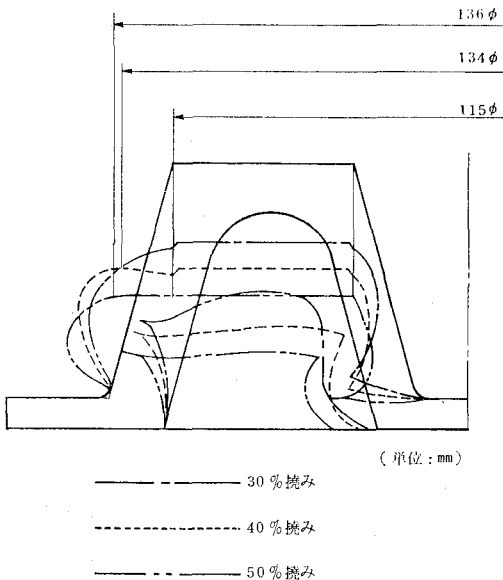


図-1 圧縮時断面形状

3. 載 荷 速 度

通常、载荷速度 50 mm/分程度で行う平行圧縮試験より得た反力-たわみ曲線で防舷材の性能を表示し、船舶の接岸力に準用している。時間-温度等価性を利用し、換算変数法により換算したゴムの粘弾性は、急速载荷では鎖員の緩和と対応した“くさび型”分布の energy 弾性、緩速で鎖のからみ合いを表わす“箱型分布”の

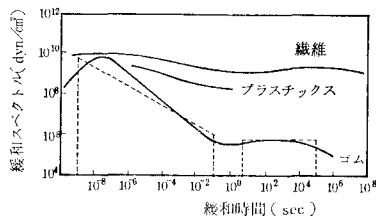


図-2 高分子物質の緩和スペクトル (常温付近)

表-1 载荷後の回復

時 刻	荷 重	高 さ	備 考
一 分	0 t	531 mm	無 載 荷
負	82	319	40% たわみ
0	0	525	脱 荷 重
5	〃	528	復 元 中

entropy 弾性に従う (応力) 緩和 spectrum を有する²⁾ (図-2)。本来 (ひずみ) 遅延 spectrum で表示される加硫ゴムに対し、ここでは表-1 に示す除荷後の形状回復を参照し、防舷材を三要素粘弾性模型で近似する (図-3)。

船舶の慣性力による力のつり合いは

$$P = -m \frac{d^2(x+x')}{dt^2} = k'x' = kx + \mu \frac{dx}{dt} \dots (1)$$

(P: 外力, m: 船舶の見かけ質量)

$$\therefore \ddot{x} + a\ddot{x} + b\dot{x} + cx = 0 \left. \begin{aligned} a &= \frac{k+k'}{\mu}, \quad b = \frac{k'}{m}, \quad c = \frac{kk'}{\mu m} \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

(変位 x, x' , ばね定数 k, k' , 粘性係数 μ は 図-3 参

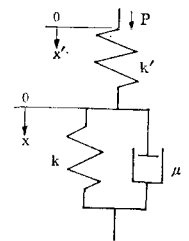


図-3 三要素模型

* 正会員 工博 (株) 日本港湾コンサルタント 調査役
** 正会員 工修 (株) 日本港湾コンサルタント 水理研究所

照)

となる。

座屈し始める 20% たわみ時に添字 0 を付す。Circle 型 A-130 に対し, 9300 DWT 貨物船 (船長 119 m, 幅員 18 m, 吃水 9.3 m, 方形係数 0.8, 付加質量係数 0.42, 質量 2.33×10^4 t) を対象とすると, $\dot{x}_0 = 50$ mm/min, $x_0 = 6$ mm, $x'_0 = 100$ mm, $P = 82$ t, $k = 1.34 \times 10^5$ t/sec, $k' = 8.04 \times 10^3$ t/sec², $\mu = 2.79 \times 10^7$ t/sec, $a = 5.09 \times 10^{-3}$ sec⁻¹, $b = 3.44 \times 10^{-1}$ sec⁻², $c = 1.65 \times 10^{-3}$ sec⁻³ 等を代入し, 初期条件, i) $x(0) = 0$, ii) $x'(0) = 0$, iii) $\dot{x}(0) + \dot{x}'(0) = v_*$ (v_* : 接岸速度) を満たす解

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= 4.0(1 - e^{-at} \cos \omega t) \\ x'(t) &= 60.7(1 - e^{-at} \cos \omega t) \\ &\quad + 8.19 \times 10^3 e^{-at} \sin \omega t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

(単位: mm, $\alpha = 3.6 \times 10^3$ sec⁻¹, $\omega = 0.59$ sec⁻¹)

を得る。座屈荷重に達した時刻 $t_0 = 0.62$ sec は短かく, $x(t_0) = 0.3$ mm, $x'(t_0) = 99.7$ mm, すなわち 18.8% たわみとなり, 載荷試験による 20% たわみと比較し, 付加質量に影響を及ぼすとしても粘弾性効果を過大視するには及ばない。

4. 付加質量

棧橋において比例範囲内での防舷材の変位は

$$\begin{aligned} S(\alpha, \beta, t) &= \frac{1}{\beta} \left[S_1 \left\{ \frac{1}{\alpha} + \int_0^t f(t) e^{\alpha t} S_2 dt \right\} \right. \\ &\quad \left. - S_2 \int_0^t f(t) e^{\alpha t} S_1 dt \right] \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

から定まる³⁾ (ここで, $\beta = \sqrt{4k - \alpha^2}/2$, 他の記法は文献 3) 参照)。特定の船舶および棧橋に対し α は一定, $\dot{S} = 0$ を満足する時刻 t_0 における最大変位

$$S(\beta, t_0) = \frac{2e^{-\alpha t_0/2}}{\alpha \sin \beta t_0 - 2\beta \cos \beta t_0} \int_0^{t_0} f(t) e^{\alpha t} S_1 dt \dots\dots\dots (5)$$

付加質量係数は

$$C_M = \frac{Ks^2}{mv_*^2} - 1 = k\alpha^2 \{S(\beta, t_0)\}^2 - 1 \dots\dots\dots (6)$$

で与えられ, 式 (5) より

$$\frac{dS(\beta, t_0(\beta))}{d\beta} = \frac{\partial S}{\partial \beta} + \frac{\partial S}{\partial t_0} \frac{dt_0}{d\beta} = 0$$

を成立させる β_0 において C_M は最大である。きわめて硬い防舷材

$$\frac{2\beta}{\alpha} = \sqrt{\frac{4k}{\alpha^2} - 1} \rightarrow \infty$$

では

$$S(t_0) = \frac{1}{\sqrt{k\alpha}}, \quad C_M \rightarrow 0 \dots\dots\dots (7)$$

となる。他方, 防舷材が存在しなくても, 周囲の非定常流により船舶は負の慣性力を受け

$$\ddot{S} = \alpha(v_0 - v) < 0 \quad \therefore v > v_0$$

すなわち, 前面で正, 背面で負の段波を生じ

$$\left. \begin{aligned} \lim_{t_0 \rightarrow \infty} S(t_0) &= v_* \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{2}{a^2} \right) \\ a &= -\frac{\ln f(t)}{\sqrt{t}} = 1.092 \sqrt{\frac{2v_*}{l}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

で, $C_M = -1$ となる⁴⁾。付加質量を 0 とするには, $v = v_0$ として防舷材の非線形ばね定数は

$$k(S) = \frac{\alpha^3}{4\sqrt{t}} \frac{1}{e^{\alpha\sqrt{t}} - \sqrt{t} - 1} \dots\dots\dots (9)$$

で表示され, 粘弾性構造物となろう。

5. 繰返し荷重

載荷時, 防舷材は複雑な引張・圧縮応力分布を呈し, 伸長に伴うエントロピーの減少, 圧縮では内部エネルギーあるいは自由エネルギーの増加等のため昇温する。繰返し荷重による応力は hysteresis loop を描き, 防舷材・船側・繋船岸等の熱伝導・大気の熱伝達の影響を受け, 温度は周期的・場所的に変動する。

簡単のため, 表面温度一定, 一樣厚さ D 方向に距離 x を測ると, 熱伝導方程式は

$$K \frac{d^2 \theta}{dx^2} = -q \dots\dots\dots (10)$$

(K : 熱伝導係数, θ : 時間的平均温度, q : 単位体積単位時間当り発熱量)

となる。式 (10) を解けば, 温度分布および最高上昇温度は

$$\theta(x) = \frac{q}{K} \left(D - \frac{x}{2} \right) x, \quad \theta_{\max} = \frac{qD^2}{8K} \dots\dots\dots (11)$$

となる。Circle A-130 では, $K = (3 \sim 4) \times 10^{-4}$ cal/cm $\cdot$ sec $\cdot$ deg, 40% たわみ時真の吸収エネルギー $E_0 = 0.43 \times 13$ t $\cdot$ m = 5.6 t $\cdot$ m, 一周期 T 時間の吸収エネルギー $E = \alpha E_0$ 等を代入し,

$$\theta_{\max} = 2.5 \times \frac{\alpha}{T} \times 10^3 {}^\circ\text{C} \dots\dots\dots (12)$$

$T \approx 10$ sec, α は外力により著しく変動し, たとえば $\alpha = 0.1$ に対しては

$$\theta_{\max} = 25 {}^\circ\text{C}$$

程度中央で昇温する。

6. 安 定

波浪下の最悪条件をそれぞれ rolling, 接岸力ないし波力, heaving・pitching を主因とする傾斜圧縮せん断と推定し, 接岸時と等しいたわみ, 船側の接触傾斜角 10° の条件でせん断試験を行った (図-4)。繋船岸と垂直および平行な荷重 F_v, F_h , 船側および繋船岸と防舷材の摩擦係数 $\mu = 0.60, \mu' = 0.65$, ボルトのせん断力と軸力 S, T 等を用い

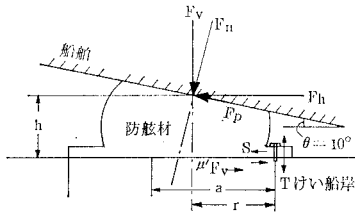


図-4 傾斜圧縮せん断

$$\left. \begin{aligned} \frac{F_h}{F_v} &= \frac{\mu + \tan \theta}{1 - \mu \tan \theta} \leq \mu' + \frac{S}{F_v} \\ hF_h &= (a-r)F_v + aT \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

のつり合いから、 $\theta \leq 6^\circ$ で $S=0$ 、 $\theta=10^\circ$ で $S/F_h \approx 0.25$ となる。ボルトに作用するせん断応力 7.2 kg/mm^2 およ

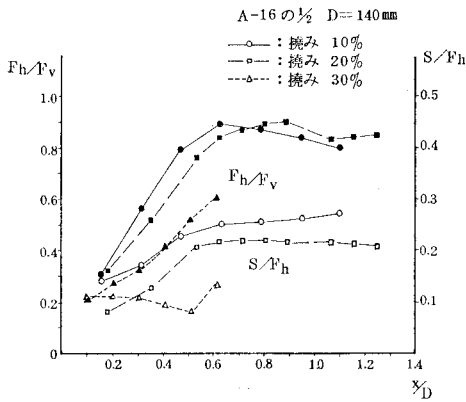


図-5 せん断荷重とボルトのせん断力

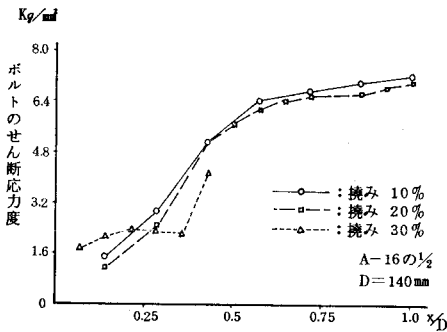


図-6 取付ボルトのせん断応力度

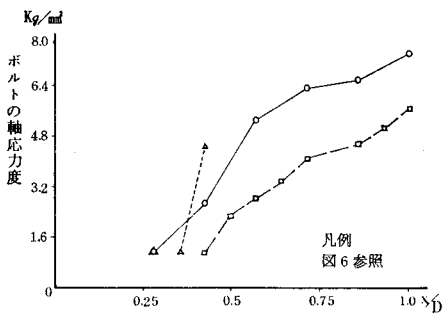
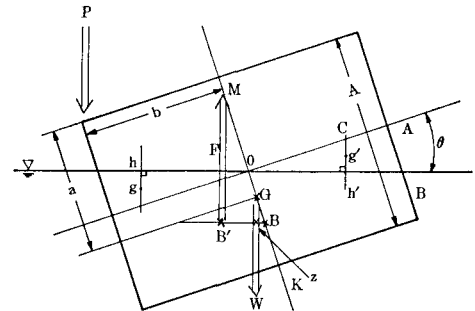


図-7 取付ボルトの軸応力度

び引張応力 6.4 kg/mm^2 は、各々許容値 $7.2 \sim 9.6 \text{ kg/mm}^2$ 、 28 kg/mm^2 に比し充分余裕を残して滑動し、破壊に対し安定である（図-5~7）。なお、ボルトから合力作用点までの距離は $a/r=1.25$ となる。

7. 舳の突上げ

潮位の上昇と共に、たまたま防舷材下に潜込んだ舳の突上げによる破壊も皆無ではない（図-8）。つり合い条件



- G : 舳の重心（積荷も含む）
 B, B' : 浮心
 g, g' : 移動排水容積の重心
 z : 舳重量の作用線とBB'の交点
 W : 舳の重量
 F : 浮力
 P : 舳の復元力
 $I = \frac{\pi}{8} b^3 L$
 : 水線面2次モーメント
 V_0 : Pが作用しない時の排水容積
 M : 傾心

図-8 舳による突上げ

$$\left. \begin{aligned} F &= W + P \\ (a \sin \theta + b \cos \theta) P &= \overline{Bz} \cdot F \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

から、舳の復元力は無荷時の傾心 M_0 を用いて

$$P = \frac{\overline{BM}_0 \left(\cos \frac{\theta}{2} / \cos \theta \right)^2 - \overline{GB}}{A - \overline{KB} + b \tan \theta} W \dots\dots\dots (15)$$

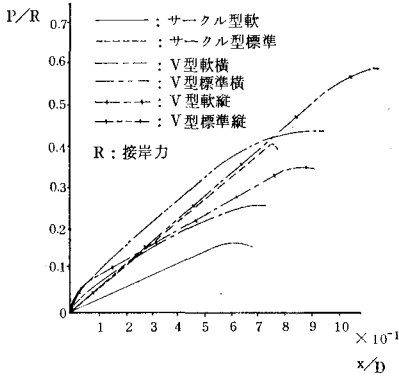
となる⁵⁾。海水流入および離脱限界は舳の規模ならびに吃水に左右され、海水流入角 $10 \sim 20^\circ$ 、標準材質の離脱

表-2 舳の復元力

重量 (t)	排水量 (t)	L (m)	B (m)	A (m)	d (m)	θ_0 (°)	$\overline{BM}_0$ (m)	$\overline{GB}$ (m)	P (t)
100	133	20.5	5.5	1.8	1.3	10.3	2.19	0.25	16.4
	83				0.81	19.8	3.51		23.0
150	200	22.5	6.3	2.1	1.5	10.8	2.40	0.30	24.5
	125				0.94	20.2	3.84		49.8
200	267	25.0	6.6	2.2	1.6	10.3	2.30	0.30	28.3
	167				1.00	20.0	3.68		60.0
300	399	30.0	6.9	2.6	2.0	9.9	2.11	0.30	35.0
	249				1.25	21.4	3.38		83.2

L: 船長, B: 幅員, A: 高さ, d: 吃水, θ_0 : 海水流入角

時反力は Circle A-130 (33 t), V 型横 (36 t), 同縦 (48 t) の順に増大し艇の復元力を越さない範囲で離脱可能である⁴⁾ (表—2, 図—9)。Circle A-130 では, 離脱時ボルトの平均せん断応力 4.8 kg/mm² は許容値の 1/2 余りである。



図—9 防舷材の艇に対する反力

8. 船側の変形

縦肋骨の大型船では水平, 横肋骨の中小型船に対し鉛直に設置する V 型防舷材に比して, CIRCLE 型は船側保護の面で有利である⁶⁾。理論的に算定困難な外板ならびに肋骨の塑性変形は

$$\delta = \left\{ c_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_Y} - 1 \right) + c \left(\frac{\sigma}{2\sigma_Y} - 1 \right) E \left(\frac{\sigma}{2\sigma_Y} - 1 \right) \right\} \gamma \quad \dots\dots\dots (16)$$

(c, c_0 : 定数, σ_Y : 降伏応力, σ : 弾性理論による最大応

力, E : Heaviside の単位関数, γ : 可撓性と関連する定数)

で表わされ, 慣用の許容応力 28 kg/mm² を越すと永久ひずみを生じ, 2 倍の応力で激増する⁷⁾。CIRCLE 型の常用応力約 90 t/m² における外板の変形は, 日本海事協会の規定する損傷限界の数 % 程度に過ぎない (表—3)。

9. 結 言

防舷材に作用する外力を単純化した模型実験の範囲では, CIRCLE 型は, 肋骨の荷重分担¹⁾と接触円周ひいては面積の増加 (図—1) に伴う船側損傷の軽減²⁾, 短かい接触長は艇の復元を容易にし (図—9, 表—3), 端部を欠く形状は応力集中を弱め, 反力上昇・亀裂発生を妨げ⁴⁾, 材質・外板摩擦を勘案した経験的に適度の剛性は動揺船舶による破損に対し安定である (図—5~7)。応力・温度分布, 粘弾性, 老化, ことに疲労に関する実用性の検証を現地観測を通じて行い, 外力と相似則を評価すべきである。

船舶の付加質量は現行設計値を上回り, 操船者に与える心理的效果からか接岸速度はこれを下回り, 大略設計値以内にあるとされる接岸エネルギー⁴⁾は防舷材を弾性体として算定したもので, 粘弾性あるいは非線型ばね定数を用い付加質量の低下を計り, 繋船岸の種別・平面形と外力に応じて防舷材の最適性状を決定することとなるう。

参 考 文 献

- 1) 高 隆二・田川昌宏: CIRCLE 型防舷材の特性, 第 22 回海岸工学講演会論文集, 1975.
- 2) 中川鶴太郎: レオロジー, 岩波書店, 1970.
- 3) 高 隆二・田川昌宏: 船舶の接岸時付加質量, 第 22 回海岸工学講演会論文集, 1975.
- 4) 日本港湾コンサルタント: 防衛工の研究, 1976.
- 5) 川上益男・信川 寿・田中一雅・倉沢淳五: 防舷材からの反力 (箱船々型の場合), 1975.
- 6) 同: 船側構造強度と防げん材との関係について, 広島大学工学部研究報告, 第 24 巻第 1 冊, 1975.
- 7) 同: 船側構造の損傷防止を考えた防げん材の必要機能について, 1975.

表—3 船側の永久変形

DWT t	船種	Circle	変 形 mm			限界応力 t/m ²	
			外 板	肋 骨	限 界	外 板	肋 骨
1 050	貨	A-16	1.0	2.4	19	204	185
2 000	油	"-25	0.8	2.4	22	215	215
28 000	"	"-200	1.8	12.0	25	243	108
100 000	"	"-310	0.4	7.4	"	400	125
220 000	"	"	0.3	4.0	"	484	144