

船舶衝突時の浮遊式海洋構造物に作用する 衝突力と係留力の変動

井上 令作*・岩井勝美*・山川賢次*

Impact Force and Mooring Force on Floating Offshore Structure by Ship Collision

By

Reisaku INOUE, Masami IWAI and Kenji YAMAKAWA

Abstract

It is very important to investigate the phenomena of ship collisions with offshore structures not only from viewpoint of safety but also for the purpose of designing the effective buffer equipments to protect offshore structures.

There are a number of reports on the ship collisions with nuclear powered ships or oil tankers. The collisions between ships and offshore structures have been mainly studied for fixed type structures. This report describes the impact force and the increase of mooring force of structure when a ship collide with a moored floating offshore structure. In the analysis of the equations of motion on the ship collisions, the whole hydrodynamic forces on the striking ship and the struck structure were converted into equivalent added mass, because inertia force dominates the phenomena of ship collisions in comparison with other forces.

The experiments were carried out using a box type structure model which was about six times in weight as striking ship model. The structure model was moored by the three different kinds of mooring types. They were spring mooring, taut mooring and slack mooring. The forms of external force in ship collision, which showed the relations between penetration of striking ships and impact force, were approximated with linear coil spring of the buffer model equipped on the front of structure model.

Based on the experimental results, the calculation methods of mooring force for the three kinds of mooring types and the added mass coefficients of box type floating structure were established.

目 次

1. ま え が き	3.1.1 バネ係留
2. 実 験 方 法	3.1.2 Taut 係留
2.1 実験の種類	3.1.3 Slack 係留
2.1.1 衝突船模型および構造物模型	3.2 無係留構造物への衝突
2.1.2 衝突力の性状	3.3 固定構造物への衝突
2.1.3 構造物の係留方式	4. 付加質量の考察および係留力の計算値と実験値の比較
2.2 実験方法	4.1 衝突船の付加質量
3. 衝突力と係留力の計算式	4.2 被衝突箱型構造物の付加質量
3.1 係留された構造物への衝突	4.3 バネ係留状態における係留
	4.4 Taut 係留状態における係留力

* 海洋開発工学部

原稿受付: 昭和57年8月30日

4.5 Slack 係留状態における係留力

1. まえがき

船舶が海洋構造物に衝突した場合の運動機構や破壊機構をしらべ、海洋構造物を衝突から保護するための緩衝工や係留装置等の強度をきめることは安全上きわめて重要である。

海上での衝突に対する研究は、主として原子力船や大型タンカーなどに対する船舶対船舶の衝突についてのものである^{1)~5)}。また、海洋構造物に対する衝突の研究は固定式構造物に対するものが多く^{6)~9)}、浮遊式構造物に対する研究は少ない^{9),10)}。

本報告は、係留された浮遊式構造物の緩衝工に船舶が衝突した場合の衝突力と引き続いておこる係留力の変動について述べたものである。一般に衝突時の船舶や構造物の挙動では、慣性力が支配的であると考えられるので、流体力はすべて付加質量として効くものとした等価付加質量^{1),2)}を用いた簡易計算式で解析を行った。実験には、箱型構造物で衝突船との重量比が約 6 : 1 の模型を使用した。また、船舶の衝突位置は構造物の重心線に正面から衝突する重心衝突とした。

一般に、衝突時の船側や格子型などの緩衝工の破壊形式、すなわち衝突力の性状は食込型と座屈型に分けられる^{3)~7)}。本研究では、これらの性状を線型バネを用い近似的に模型化した。また、浮遊式構造物の係留方式としては、Taut 係留、Slack 係留および係留力の変動を基礎的にしらべるために線型バネを用いたバネ係留の三種類を採りあげ、それぞれに対して係留力の計算式を導き、計算値と実験値の比較を行った。計算に必要な衝突船と構造物の付加質量および係留力の計算式などは実験値をもとに考察した。

2. 実験方法

2.1 実験の種類

2.1.1 衝突船模型および構造物模型

衝突船模型と構造物模型の重量はそれぞれ 6.67 kg, 39.55 kg で、両者の重量比を約 1 : 6 とした。構造物模型の形式は箱型である。両者とも木製で衝突時の衝撃に耐えるように内部を補強した。衝突船模型と構造物模型の上下方向の重心点は吃水面と一致させた。寸法等を表-1 に示し(形状は図-2 参照)、構造物模型の写真写真-1 に示した。

5. むすび

表-1 衝突船模型と箱型構造物模型の寸法

	衝突船	構造物
重量 (kg)	6.67	39.55
質量 (kg·sec ² /cm)	0.00681 (m_0)	0.0404 (M_0)
長さ (cm)	80.0 (L)	50.0
幅 (cm)	16.0	80.0
吃水 (cm)	5.79	9.89

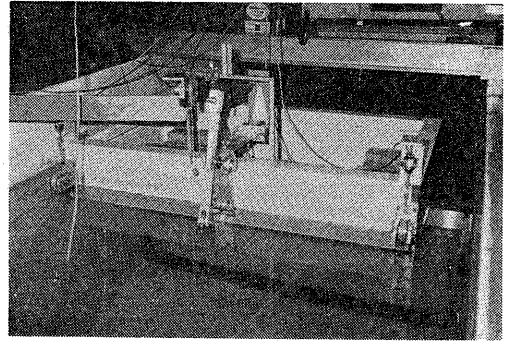


写真-1 箱型構造物模型

2.1.2 衝突力の形状

一般に衝突時における船側や格子型などの緩衝工の破壊形式には食込型と座屈型がある^{3)~7)}。食込型は衝突船の突入量に比例して衝突力が増加するような値で近似でき、座屈型は衝突力が突入量によって変化しな

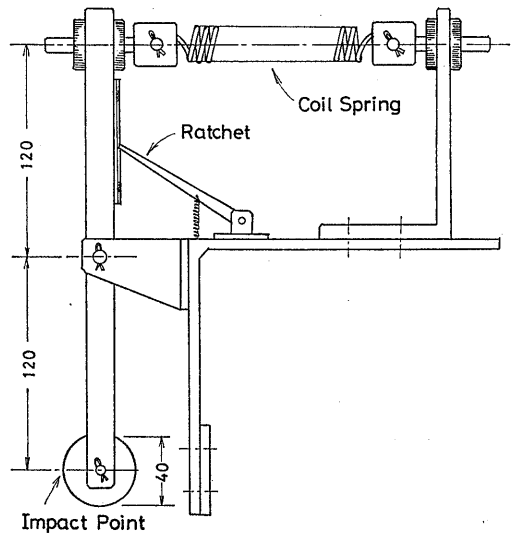


図-1 緩衝工模型

表-2 衝突力の性状

	バネ定数		初期力	衝突力の形状		
	k (kg/cm)	$\sqrt{k/m_0}$ (sec ⁻¹)	F_0 (kg)	作用時間 —衝突力	突入量 —衝突力	$F(t)$
食込型	0.324	6.90	0			kw
	0.666	9.89	0			
	1.379	14.23	0			
	2.810	20.32	0			
			0			
弾性型	0.324	6.90	0			kw
	0.666	9.89	0			
	1.379	14.23	0			
	2.810	20.32	0			
			0			
食込・座屈混合型	0.0906	3.65	0.41			$F_0 + kw$
	0.3470	7.14	1.60			

い一定値で概略近似できるような破壊形式である⁵⁾。本実験では、これらをもとに図-1に示した緩衝工模型の線型バネ力で近似し、表-2に示したような三種類の形状を用いた。これらをそれぞれ食込型(Crank Type)、弾性型(Elastic Type)および食込・座屈混合型(Compound Type)と呼ぶ。食込型では表-2に示すように、衝突力 $F(t)$ は衝突船の突入量 w に比例して増加し、突入時間に対しては正弦関数で表わせるが、衝突力が最高値になると同時に0となるような形状である。これは図-1に示した緩衝工模型のラチェットを作動させ反発力が働かないようにしたものである。弾性型は食込型に反発が加わった形状であり、衝突船と構造物には反発力が作用する。混合型は初期力 F_0 の上に食込型が加わった型である。これらはいずれも表-2に示したようにバネの強さ k と、混合型では初期力 F_0 を変えて実験を行った。

2.1.3 構造物の係留方式

構造物の係留方式は表-3に示したように三種類と

した(図-2参照)。バネ係留は衝突時の係留力の変化を基礎的にしらべるために、線形バネで水平方向に係留したもので、バネ定数 K を四種類かえて実験を行った。Taut 係留は、径 0.5 mm のステンレスワイヤを用い衝突側二本、反対側二本で係留し、水平面と係留索のなす角度 θ_0 を 45° とした。係留索の剛性 K_i は索の取り付け金具などの剛性も含め一本あたりの値として示した。表-3の水平方向バネ定数 K_{bh} は係留した構造物を水平方向に引っ張り、加えた力と水平変位から求めた係留索のバネ定数の実測値である。このバネ定数は構造物の浮力の変化によって生じるものであり、変位が大きくなると一定値にはならないが、実験の範囲では一定値としてもさしつかえない。 K_{bh} の求めかたは Appendix に示した。Slack 係留には、水中重量 30.8 g/m のアルミニウム製の鎖を使用した。係留方法は図-2に示した。

これらのほかに、構造物を完全にフリーにした状態、すなわち無係留状態での衝突実験と構造物を完全に固

表-3 構造物の係留方式

バネ係留		Taut 係留	Slack 係留
水平方向バネ定数		● 係留索の長さ 1.41 m	● 係留鎖の外径 1.2×0.8 cm
K (kg/cm)	$\sqrt{K/M_0}$ (sec ⁻¹)	● 係留角度 45°	● 水中重量 30.8 g/m
		● 係留本数 4本	● 係留鎖の長さ 2.5 m
0.52	3.59	● 係留索の剛性 (K_i) 8.37 kg/cm/本	● 係留本数 4本
1.02	5.03	● 水平方向バネ定数 (K_{bh}) 1.16 kg/cm	
2.06	7.14	● 初期張力 1.015 kg/本	
3.98	9.93		

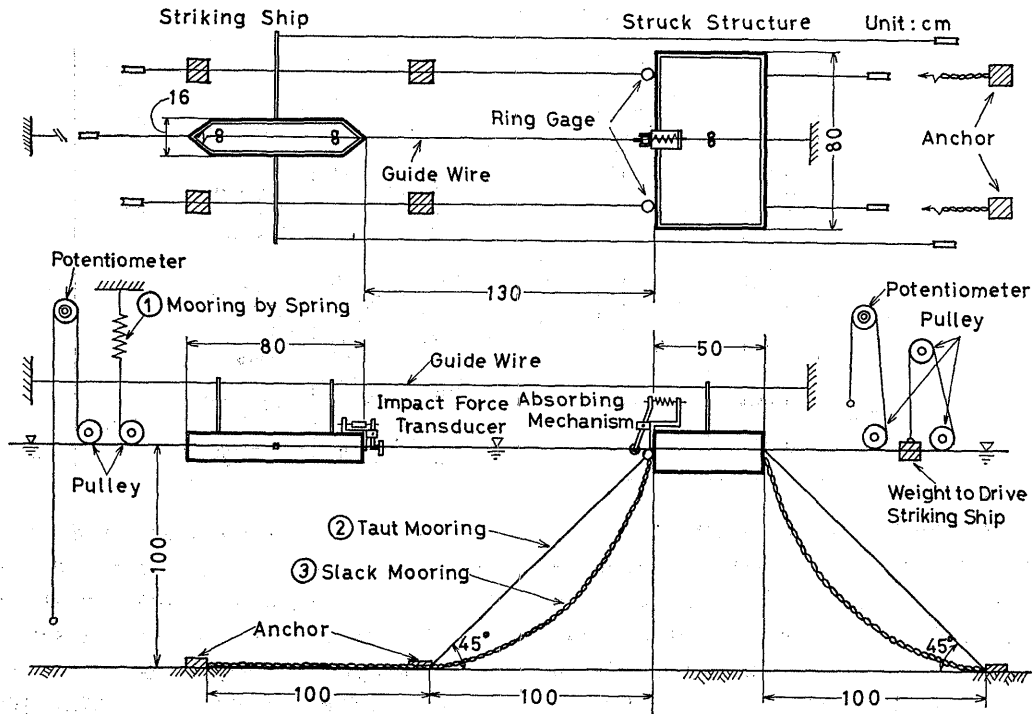


図-2 実験方法

定した固定物衝突の実験を行い、これらの実験値をもとに衝突船と構造物の付加質量などを検討した。

2.2 実験方法

実験状態の概要を 図-2 に示した。この実験は係留された構造物模型に模型船を一定速度で衝突させ、そのときの衝突力と係留力の変化を計測する実験である。実験は、長さ 13m、幅 1m、深さ 1m の二次元水槽で行った。

衝突船は重錘の落下速度を利用して曳航加速し一定速度で構造物の正面の重心位置にとり付けた緩衝工模型に衝突させた。重錘による力は衝突直前に除去できるようにした。衝突船の速度は重錘の重さを変えることにより変化させた。また、衝突船を正確に衝突点に衝突させるために、ガイドラインを設け、それにそって衝突船を曳航した。衝突力は衝突船の前面に取り付けた衝突力計で計測した。また、緩衝工模型の衝突点の変位が計測できるようになっているので、それにバネ定数を乗じて衝突力を求めることもできる。衝突速度と構造物の変位はポテンシヨメーターで計測した。係留力の変動は係留ラインを構造物にとり付けた位置でリングゲージを使用して計測した。

3. 衝突力と係留力の計算式

3.1 係留された構造物への衝突

係留された浮遊式構造物に船舶が衝突した場合、衝突船と構造物に装備された緩衝工（緩衝工のない場合には構造物本体）の間には衝突力が作用し、両者の破壊がおこる。それと同時に係留ラインの張力の増加が

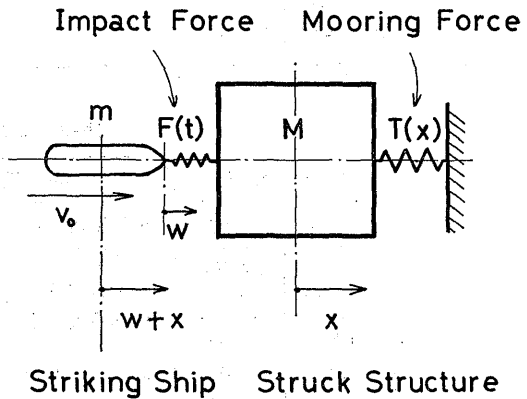


図-3 係留された構造物に対する船舶衝突のモデル化

ひきおこされる。

係留された構造物の重心位置に水平に船舶が正面より衝突した場合の力学モデルは、 $F(t)$ を衝突力、 $T(x)$ を係留ラインによる復原力として、図-3 のように表わすことができる。また、衝突時の船舶と構造物の挙動は慣性力が支配的であるので、減衰力は付加質量として効くものとし、衝突後の構造物の運動は水平方向のみとすると、衝突の基本式は 図-3 をもとに次のように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{x} + T(x) &= F(t) \\ m(\ddot{x} + \ddot{w}) &= -F(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、

m, M : 付加質量を含んだ衝突船と構造物の質量。
一般に時間の関数となるが²⁾、ここでは一定値と考える。これは 4. でくわしく検討する。

$F(t)$: 作用する外力、すなわち衝突力。

$T(x)$: 係留ラインによる復原力の水平分力。

w : 衝突船の突入量

x : 構造物の水平移動量

$x+w$: 衝突船の水平移動量

上式の $F(t)$ と $T(x)$ の形状をきめれば式 (1) の解を求めることができる。

3.1.1 バネ係留

係留力の水平分力が線型バネ力 $T(x)=Kx$ として表わされる場合であり、実験でも衝突時の係留力を基礎的にしらべるために行った係留法の一つである。また、後で述べる Taut 係留の解析においても、この状態が基本となる。以下、2.1.2 に示した衝突力の三つの性状に対して解を求める。

(1) 衝突力

(i) 食込型 $F(t)=kw$

2.1.2 で述べたように衝突時の破壊形状が食込型の場合には、衝突力は突入量に比例するとした線型バネ力 $F(t)=kw$ で近似できるものとする式 (1) の解は次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} w &= \frac{v_0}{k(\omega_1^2 - \omega_2^2)} \left\{ \omega_1(k - m\omega_2^2) \sin \omega_1 t \right. \\ &\quad \left. - \omega_2(k - m\omega_1^2) \sin \omega_2 t \right\} \\ \dot{w} &= \frac{v_0}{k(\omega_1^2 - \omega_2^2)} \left\{ \omega_1^2(k - m\omega_2^2) \cos \omega_1 t \right. \\ &\quad \left. - \omega_2^2(k - m\omega_1^2) \cos \omega_2 t \right\} \\ x &= \frac{(k - m\omega_1^2)(k - m\omega_2^2)v_0}{km(\omega_1^2 - \omega_2^2)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} &\times \left\{ \frac{1}{\omega_1} \sin \omega_1 t - \frac{1}{\omega_2} \sin \omega_2 t \right\} \\ \dot{x} &= \frac{(k - m\omega_1^2)(k - m\omega_2^2)v_0}{km(\omega_1^2 - \omega_2^2)} \left\{ \cos \omega_1 t - \cos \omega_2 t \right\} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} \omega_1^2 &= \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{k}{m} + \frac{k+K}{M} \right) \right. \\ \omega_2^2 &\quad \left. \mp \sqrt{\left(\frac{k}{m} + \frac{k+K}{M} \right)^2 - \frac{4kK}{mM}} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式 (2), (3) をもとに衝突力の作用時間や最大衝突力を求めると、

衝突力の作用時間 t_0

$\dot{w}=0$ とする t の値、すなわち

$$\frac{\cos \omega_2 t}{\cos \omega_1 t} = \frac{\omega_1^2(k - m\omega_2^2)}{\omega_2^2(k - m\omega_1^2)} \quad \text{とする } t \text{ の値} \quad (5)$$

最大突入量

$$w_{\max} = w(t_0) \quad (6)$$

最大衝突力

$$F_{\max} = kw_{\max} \quad (7)$$

(ii) 弾性型 $F(t)=kw$

弾性型は食込型に反発力が加わった形であり、基本式および w, \dot{w}, x, \dot{x} などすべて食込型と同じ式で表わされ、衝突力、最大突入量、最大衝突力なども同じ式となる。しかし、衝突力の作用時間 t_0 は食込型に反発時間が加算されるので次式となる。

衝突力の作用時間 t_0

$w=0$ とする t の値、すなわち

$$\frac{\sin \omega_2 t}{\sin \omega_1 t} = \frac{\omega_1(k - m\omega_2^2)}{\omega_2(k - m\omega_1^2)} \quad \text{とする } t \text{ の値} \quad (8)$$

(iii) 食込・座屈混合型 $F(t)=F_0+kw$

混合型では表-2 に示したように、 $F(t)=F_0+kw$ となるから、食込型の解に $F(t)=F_0$ の解を重ね合わせればよい。食込型の解の記号を $w_a, \dot{w}_a, x_a, \dot{x}_a$ で表わすと、混合型の解は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} w &= w_a - \frac{F_0}{k} \left[1 - \frac{1}{k(\omega_1^2 - \omega_2^2)} \left\{ \omega_1^2(k - m\omega_2^2) \cos \omega_1 t \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \omega_2^2(k - m\omega_1^2) \cos \omega_2 t \right\} \right] \\ \dot{w} &= \dot{w}_a + \frac{F_0}{k^2(\omega_1^2 - \omega_2^2)} \left\{ -\omega_1^2(k - m\omega_2^2) \sin \omega_1 t \right. \\ &\quad \left. + \omega_2^2(k - m\omega_1^2) \sin \omega_2 t \right\} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$x = x_a + \frac{(k - m\omega_1^2)(k - m\omega_2^2)F_0}{k^2m(\omega_1^2 - \omega_2^2)} (\cos \omega_1 t - \cos \omega_2 t)$$

$$\dot{x} = \dot{x}_a + \frac{(k - m\omega_1^2)(k - m\omega_2^2)F_0}{k^2 m(\omega_1^2 - \omega_2^2)} \times (-\omega_1 \sin \omega_1 t + \omega_2 \sin \omega_2 t) \quad (10)$$

衝突力の作用時間 t_0

$$\frac{\alpha_1 \cos(\omega_1 t - \beta_1)}{\alpha_2 \cos(\omega_2 t - \beta_2)} = \frac{\omega_2^2(k - m\omega_1^2)}{\omega_1^2(k - m\omega_2^2)} \text{ とする } t \text{ の値} \quad (11)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \sqrt{v_0^2 + (F_0 \omega_1 / k)^2} \\ \alpha_2 &= \sqrt{v_0^2 + (F_0 \omega_2 / k)^2} \\ \beta_1 &= \tan^{-1}(-F_0 \omega_1 / k v_0) \\ \beta_2 &= \tan^{-1}(-F_0 \omega_2 / k v_0) \end{aligned}$$

最大突入量

$$w_{\max} = w(t_0) \quad (12)$$

最大衝突力

$$F_{\max} = F_0 + k w_{\max} \quad (13)$$

(2) 係留力

図-4 に示すように、係留力は時間 t が $0 < t \leq t_0$ と $t > t_0$ の範囲、すなわち衝突力が作用している間とそうでないときの計算式は異なる。

(i) $0 < t \leq t_0$ での係留力の計算

この範囲では式(3)や式(10)で求めた x の値に K を乗じて求めることができる。

$$T = Kx \quad (14)$$

(ii) $t > t_0$ での係留力の計算

この範囲での係留力は次式を解いて求めることがで

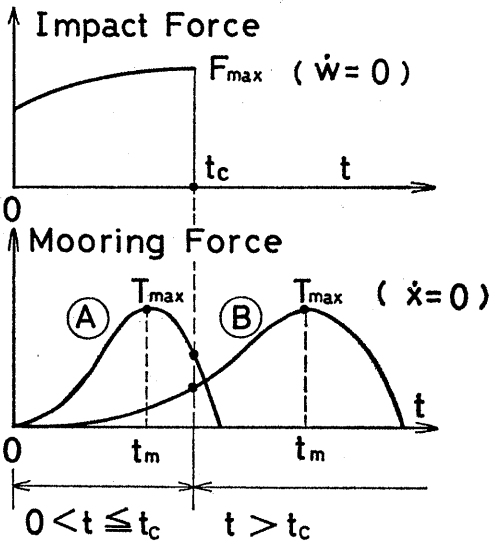


図-4 最大係留力の求め方

きる。

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{x} + Kx &= 0 \\ t = t_0 \text{ で } x &= x_{t_0}, \dot{x} = \dot{x}_{t_0} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

ここで、 x_{t_0} 、 \dot{x}_{t_0} は式(3)および式(10)で $t = t_0$ として求めた x と \dot{x} の値である。式(15)の解は次のように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} x &= x_{t_0} \cos \sqrt{\frac{K}{M}}(t - t_0) \\ &+ \dot{x}_{t_0} \sqrt{\frac{M}{K}} \sin \sqrt{\frac{K}{M}}(t - t_0) \\ \dot{x} &= \dot{x}_{t_0} \cos \sqrt{\frac{K}{M}}(t - t_0) \\ &- x_{t_0} \sqrt{\frac{K}{M}} \sin \sqrt{\frac{K}{M}}(t - t_0) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

したがって、係留力は上式の x に K を乗じて求めることができる。

$$T = Kx \quad (17)$$

(iii) 最大係留力の求め方

係留力は図-4 に示したように、衝突力の作用時間内に最大値 T_{\max} が発生する場合 ㉔ とそれを過ぎてから発生する場合 ㉕ がある。㉔ か ㉕ かの判別は、衝突力の作用時間 t_0 と係留力が最大値となる時間、すなわち $\dot{x} = 0$ とする t の値 t_m の大小を比較すればよい。

㉔ の場合の最大係留力

式(3)や式(10)で $\dot{x} = 0$ とする t の値 t_m を求め、それを x に代入し、 x の最大値 x_{\max} を求めると、最大係留力は次式であたえられる。

$$T_{\max} = Kx_{\max} \quad (18)$$

㉕ の場合の最大係留力

式(16)より $\dot{x} = 0$ とする t の値を求めると、

$$t_m = t_0 + \sqrt{\frac{M}{K}} \tan^{-1} \left(\frac{\dot{x}_{t_0}}{\sqrt{K/M} x_{t_0}} \right)$$

これを式(16)の x に代入し x_{\max} を求めると、 T_{\max} は次式であたえられる。

$$T_{\max} = Kx_{\max} \quad (19)$$

3.1.2 Taut 係留

(1) 係留力

Taut 係留された構造物に船舶が衝突した場合の係留ラインの変動張力は図-5 に実験記録の一例として示したように、比較的振動数の低い変動張力と振動数の高い変動張力が合成された形状となる。振動数の高い変動張力は、係留ラインの剛性によるものであり、振動数の低い変動張力は、構造物の浮力の変化によって生じるものである。この図で $T_{i \max}$ は衝突時に最

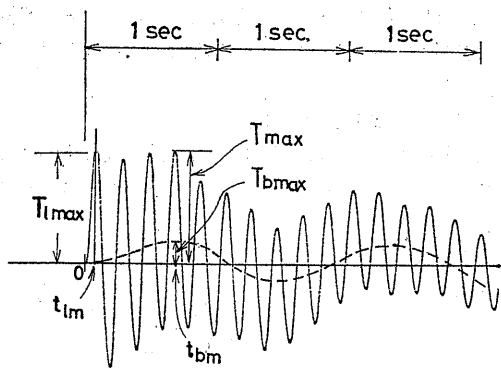


図-5 Taut 係留ラインの係留力の変動

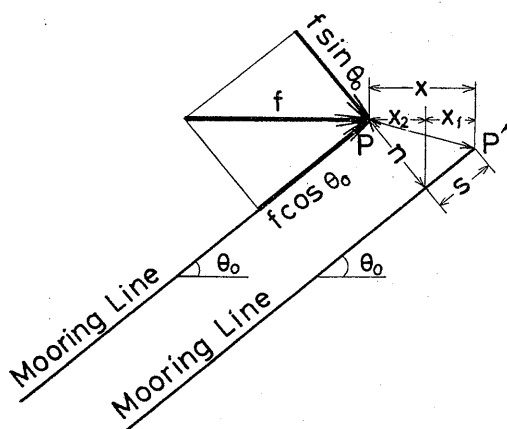


図-6 係留力の分解

初に生じる係留ラインの剛性による変動張力の最大値、 $T_{b \max}$ は構造物の浮力の変化によって生じる変動張力の最大値、 T_{\max} はすべての変動張力の最高値である。この現象は図-6で説明できる。

いま、構造物に船舶が衝突し、係留角度 θ_0 の係留ラインの上端係留点 P に f なる力が作用したとする。この力 f は係留ラインの接線方向の分力 $f \cos \theta_0$ と法線方向の分力 $f \sin \theta_0$ に分解される。力 f が作用することにより P 点は P' 点に変位するが、 PP' は係留ラインの長さに対して小さいので θ_0 は変化しないものとする。この二方向の分力の中で、 $f \cos \theta_0$ は係留ラインを引きのばす力であり、 $f \sin \theta_0$ は構造物を動かす力である。すなわち、前者は図-5で述べたように、振動数の高い変動張力をひきおこし、後者は振動数の低い変動張力をひきおこす力である。図-6をもとにして次の式を導びくことができる。

$$\left. \begin{aligned} f \cos \theta_0 &= K_t s \\ f \sin \theta_0 &= K_b n \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

ここで、

K_t : 係留ラインの剛性による係留ライン方向のバネ定数。

K_b : 構造物の浮力の変化による係留ラインと直角方向のバネ定数。

s : 係留ラインののび。

n : 係留ライン上端のラインと直角方向の変位。

したがって、係留ラインの剛性による水平方向のバネ定数 K_{tn} と浮力の変化によって生じる水平方向のバネ定数 K_{bn} はそれぞれ次のように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} K_{tn} &= \frac{2K_t}{\cos^2 \theta_0} \\ K_{bn} &= \frac{2K_b}{\sin^2 \theta_0} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

上式のバネ定数が2倍になっているのは、衝突側とその反対側も同じ係留ラインで係留されているからである。 K_{bn} は Appendix に示した方法で計算することができる。

式(21)で水平方向のバネ定数がきまったので、バネ係留の場合の x の計算式(3)(10)(16)を用いて、水平方向の変位 x_1, x_2 (図-6参照)およびその最大値 $x_{1 \max}, x_{2 \max}$ を求めることができる。

一方、式(20)より、

$$f = \sqrt{\left(\frac{K_t}{\cos \theta_0}\right)^2 x_1^2 + \left(\frac{K_b}{\sin \theta_0}\right)^2 x_2^2}$$

とおけるから、係留ラインの剛性による変動張力は次式で求められる。

$$T_i = f \cos \theta_0 = \sqrt{\left(\frac{K_t}{\cos \theta_0}\right)^2 x_1^2 + \left(\frac{K_b}{\sin \theta_0}\right)^2 x_2^2} \cos \theta_0 \quad (22)$$

しかし、 $T_{i \max}$ は衝突時に最初に発生する変動張力の最大値であり、この時には構造物の変位量は小さく、 x_2 の値は無視することができる。したがって、式(22)から、

$$T_{i \max} \doteq K_t x_{1 \max} \quad (23)$$

として計算してもさしつかえない。

一方、浮力の変化による変動張力の最大値 $T_{b \max}$ を求めるときには、係留ラインののびを考慮しなくてもよいから $x_1 \doteq 0$ と考え、 $T_b = f \sin \theta_0$ から、

$$T_{b \max} \doteq K_b x_{2 \max} \quad (24)$$

として計算できる。

また、全体での係留力の最大値 T_{\max} は実験値からみると、緩衝工の剛性が大きい場合には、 $T_{i \max}$ が T_{\max} となるが、剛性が小さい場合には、 $T_{b \max}$ が発生する時間 t_{bm} 付近の T_i が最大値となる(図-5参

照)。したがって、後者の場合には、変動張力 T_i の減衰率を α とすると、

$$T_{\max} = T_{b \max} + T_{i \max} \exp(-\alpha t_{bm}) \quad (25)$$

で計算することができる。また、

$$T_{\max} \doteq T_{b \max} + T_{i \max} \quad (26)$$

で計算すれば、常に安全側で計算できる。これらは 4. で実測値と比較してくわしく検討する。

(2) 衝突力

Taut 係留された構造物に対する衝突力は、前項で述べた、係留ラインの剛性による水平方向のバネ定数 K_{lu} の値を用いて、バネ係留時の衝突力と同様に、すなわち、3.1.1 (1) で述べた方法で計算できる。

3.1.3 Slack 係留

(1) 係留力

一般に Slack 係留における係留力の最大値は、図-4 の区分によれば ③ すなわち $t_m > t_0$ の範囲で発生し、しかも t_m は t_0 よりもかなり大きい。一方、Slack 係留の場合の係留力による復原力 $T(x)$ はこれまでのように x の一次関係で表わすことはできない。したがって、上記のことを考慮し、次式で求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{x} + T(x) &= 0 \\ t &= t_0 \text{ で } x = x_{t_0}, \dot{x} = v_0 \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

ここで、 x_{t_0} 、 v_0 は同一構造物が係留されていないとした場合の衝突力の作用時間 t_0 における構造物の移動量と速度。実験によると Slack 係留ラインが衝突力におよぼす影響は無視できるので、次節 3.2 で求める無係留構造物における x_{t_0} 、 v_0 を用いてよい。式 (27) を解くと、

$$\dot{x} = \sqrt{v_0^2 - \frac{2}{M} \int_{x_{t_0}}^x T(x) dx} \quad (28)$$

となる。ここで、 $T(x)$ の形がわかれば上式を解いて係留力を求めることができる。一般に $T(x)$ は静的にはカテナリ曲線として計算できる。実験によると、係留ラインの動的な影響はほとんど無視できるので、特に速度が速くないかぎり、静的な $T(x)$ を用いてもさしつかえない。 $T(x)$ を x の高次関数で近似すると解析が容易である。

また、係留力の最大値 T_{\max} は式 (28) で $\dot{x} = 0$ となる x の値 x_{\max} を求めることにより計算できる。

(2) 衝突力

(1) で述べたように Slack 係留状態における衝突力は同一構造物を無係留状態 ($K=0$) とした場合の衝突力とまったく同一と考えられる。すなわち、係留

ラインは衝突力にほとんど影響を与えない。無係留構造物に対する衝突力は、次節 3.2 で求める式を用いて計算できる。

3.2 無係留構造物への衝突

無係留構造物では、バネ係留での計算式で $K=0$ とおいた式からすべて計算できる。以下、衝突力などの式を列記する。

(i) 食込型

衝突力

$$F(t) = \frac{kv_0}{\sqrt{\frac{k(m+M)}{mM}}} \sin \sqrt{\frac{k(m+M)}{mM}} t$$

衝突力の作用時間

$$t_0 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{mM}{k(m+M)}}$$

最大衝突力

$$F_{\max} = \frac{kv_0}{\sqrt{\frac{k(m+M)}{mM}}}$$

$t=t_0$ における構造物の速度

$$v_0 = \frac{m}{m+M} v_0$$

(29)

(ii) 弾性型

t_0 と v_0 をのぞけばすべて食込型と同じである。

$$t_0 = \pi \sqrt{\frac{mM}{k(m+M)}}$$

$$v_0 = \frac{2m}{m+M} v_0$$

(30)

(iii) 混合型

$$F(t) = \frac{kv_0}{\sqrt{\frac{k(m+M)}{mM}}} \sin \sqrt{\frac{k(m+M)}{mM}} t$$

$$+ F_0 \cos \sqrt{\frac{k(m+M)}{mM}} t$$

$$t_0 = \frac{1}{\sqrt{\frac{k(m+M)}{mM}}} \tan^{-1} \left(\frac{kv_0/F_0}{\sqrt{\frac{k(m+M)}{mM}}} \right)$$

$$F_{\max} = \sqrt{F_0^2 + \left(\frac{v_0 k}{\sqrt{\frac{k(m+M)}{mM}}} \right)^2}$$

$$v_0 = \frac{m}{m+M} v_0$$

(31)

3.3 固定構造物への衝突

完全に固定された構造物に対する衝突では、3.2 で述べた無係留構造物での計算式で、 $M=\infty$ として求

めることができる。式の記述は省略する。

4. 付加質量の考察および係力力の 計算値と実験値の比較

4.1 衝突船の付加質量

実験に使用した衝突船の付加質量をきめるために、固定物に対する衝突実験を行った。3.3 で述べた固定物に対する最大衝突力の計算式を用いると、食込型と弾性型の衝突船の付加質量係数 C_m は次式で表わされる。

$$C_m = \frac{F_{max}^2}{m_0 k v_0^2} - 1 \quad (32)$$

ここで、 m_0 は付加質量を含まない衝突船の質量である。図-7 は食込型と弾性型の最大衝突力 F_{max} (最大衝突力は食込型と弾性型と同一である) の実測値を、横軸に $m_0 k v_0^2$ を、縦軸に F_{max}^2 をとりプロットしたものである。この図をもとに実験に用いた衝突船の平均の付加質量係数を求めると $C_m=0.1$ となる。図では実線が $C_m=0.1$ の値であり、一般に衝突船の付加質量係数として用いられる値に一致している。したがって、以下の計算においては、衝突船の付加質量係数は $C_m=0.1$ を用いる。

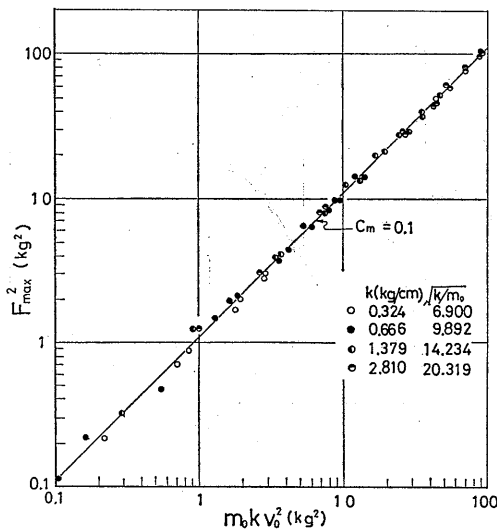


図-7 衝突船の付加質量 (最大衝突力より)

4.2 被衝突箱型構造物の付加質量

図-8 は無係留状態の箱型構造物に対する食込型と弾性型の最大衝突力の実測値を無次元化して衝突速度 v_0 (v_0/\sqrt{gL} の g は重力の加速度、 L は衝突船の船長) に対してプロットしたものである。これらの実測

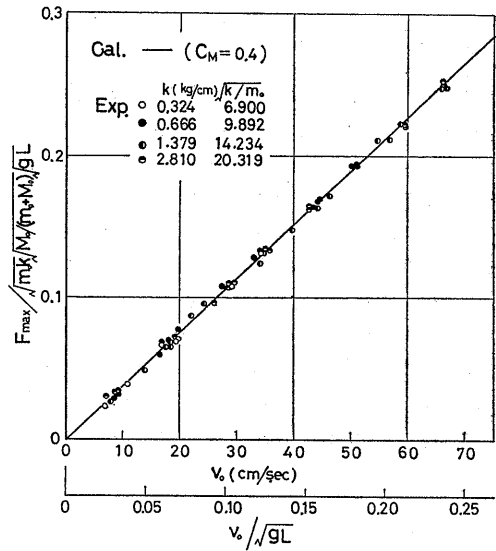


図-8 箱型構造物の付加質量 (最大衝突力より)

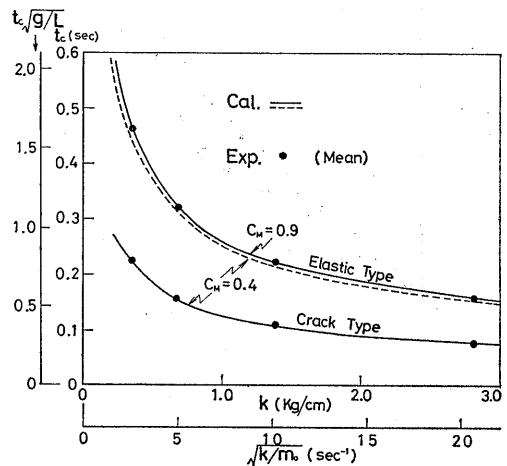


図-9 箱型構造物の付加質量 (衝突力の作用時間より)

値はほとんど一直線上に分布していて、構造物の付加質量係数 $C_M=0.4$ として、式 (29) を用いて計算した値に一致している。したがって、この実験で使用した構造物模型 (表-1 参照) と縦、横、吃水比などの寸法比がほぼ同一で、重量が衝突船の 5、6 倍程度の箱型構造物であれば、 $C_M=0.4$ を用いて計算できる。この値は、船舶対船舶の衝突力の計算に用いられている被衝突船の付加質量の値と同程度である。図-9 は食込型と弾性型における衝突力の作用時間 t_0 の実測値の平均値 (t_0 の値は v_0 に無関係に一定値をとるた

めに、 k に対してプロットすると一点に実測値が集中するので平均値で示した)を k に対してプロットしたものである。構造物の付加質量係数 C_M を食込型で 0.4, 弾性型で 0.9 として計算した値によく一致している。このように弾性型の C_M は食込型の C_M よりも大きくなる。これは弾性型が食込型よりも衝突力の作用時間が長いだけばかりではなく、衝突船が反発されるときエネルギー損失が大きいと認められ、そのために多めの付加質量を加算しなければならないことになる。また、図-9 に $C_M=0.4$ で計算した値を破線で示した。この計算値は実測値より幾分小さくなるが、弾性型における衝突力の作用時間も最大衝突力と同様に $C_M=0.4$ で計算しても実用上さしつかえないと考えられる。

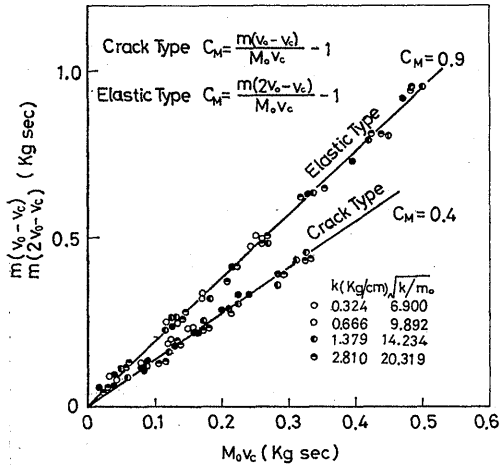


図-10 箱型構造物の付加質量 (構造物の移動速度より)

図-10 は無係留構造物で $t=t_c$ における構造物の移動速度 v_0 の実測値から、式 (29), (30) を用いて食込型と弾性型について C_M を逆算して示したものである。これによると C_M の平均値は食込型で 0.4, 弾性型で 0.9 を示している。

したがって、係留力を計算する場合の付加質量としては、図-4 で示した ㊸ の範囲の最大係留力に対しては少なくとも食込型では 0.4, 弾性型では 0.9 が必要であり、㊸ の範囲ではすべて 0.4 として計算してさしつかえないと考えられる。これらについては次節以降で考察する。

以上、食込型と弾性型について説明したが、混合型における付加質量は食込型とまったく同様である。

4.3 バネ係留状態における係留力

衝突力の最大値 F_{max} は式 (7), (13) を用い、 $C_m=0.1$, $C_M=0.4$ として正確に計算できる。図-11 は一例として混合型での最大衝突力を計算値と実測値を比較して示した。計算値は係留ラインのバネ定数 K の値によりほとんど変化しないので、一本の線で表わされるが、実測値も K の値に関係なく $C_M=0.4$ とした計算値によく一致している。

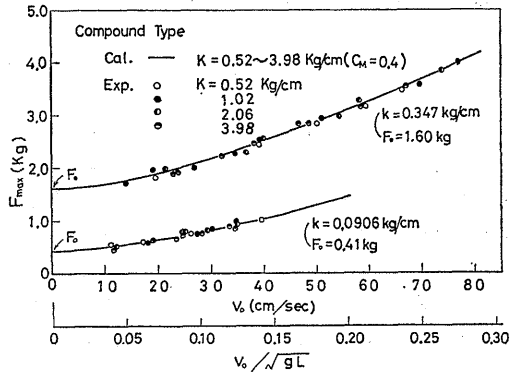


図-11 最大衝突力の計算値と実測値の比較 (混合型)

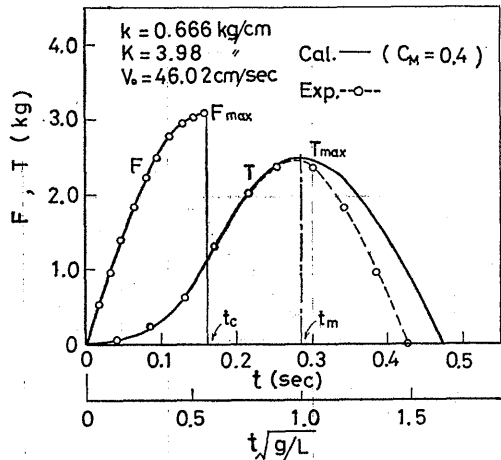


図-12 衝突力と係留力の計算値と実測値の比較

衝突力と係留力の形状を実測値と計算値で比較し、一例として図-12 に示した。衝突力も係留力も $C_m=0.1$, $C_M=0.4$ として、それぞれ式 (3), (14), (17) を用いて計算した値である。係留力は最大値 T_{max} までは計算値と実測値は一致するが、最大値をこえると一致しなくなる。しかし、ここで注目しているのは係留力の最大値であるので、このずれは問題にしないこと

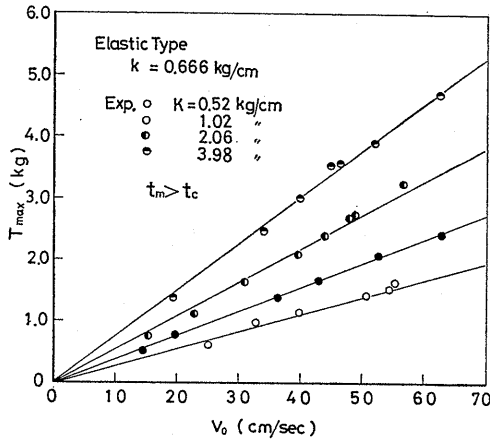


図-13 衝突速度に対する最大係留力の実測値

にする。

図-13 に実測値の一例として示したように、最大係留力 T_{max} も衝突速度に比例して増加する。このようにして求めた直線の勾配 T_{max}/v_0 を、緩衝工のバネ定数 k ($\sqrt{k/m_0}$ の値は衝突船の質量と緩衝工のバネ定数で表わした固有振動数) ごとに、係留ラインのバネ

定数 K ($\sqrt{K/M_0}$ の値は構造物の質量と係留ラインのバネ定数で表わした固有振動数) についてプロットしたものが 図-14 の丸印の値である。実線は式 (19) を用いて計算した値である (弾性型で、 $\sqrt{k/m_0} = 6.90 \text{ sec}^{-1}$, $K = 3.97 \text{ kg/cm}$ の一点は 図-4 の分類で ㉔ の範囲に属するので式 (18) で計算した)。構造物の付加質量係数 C_M は食込型で 0.4, 弾性型で 0.9 を用いた。この図からわかるように最大係留力は緩衝工のバネ定数 k によってほとんど変化しないが、 k が大きいほど実測値と計算値は近づく。いずれの場合も計算値が実測値よりも大きいのが、4.2 で説明したように 図-4 の ㉔ の範囲での最大係留力の計算では食込型で $C_M = 0.4$, 弾性型で 0.9 とすれば常に安全側で計算できる。

図-15 は 図-14 の実測値に計算値が一致するように C_M を逆算して求めたものである。これらの値は $\sqrt{k/m_0}$ と $\sqrt{K/M_0}$ の積を横軸にとりプロットすると、一本の線で表わされ、 $\sqrt{k/m_0} \cdot \sqrt{K/M_0}$ が小さくなるにしたがって、食込型では 0.4, 弾性型では 0.9 の値に近づく。

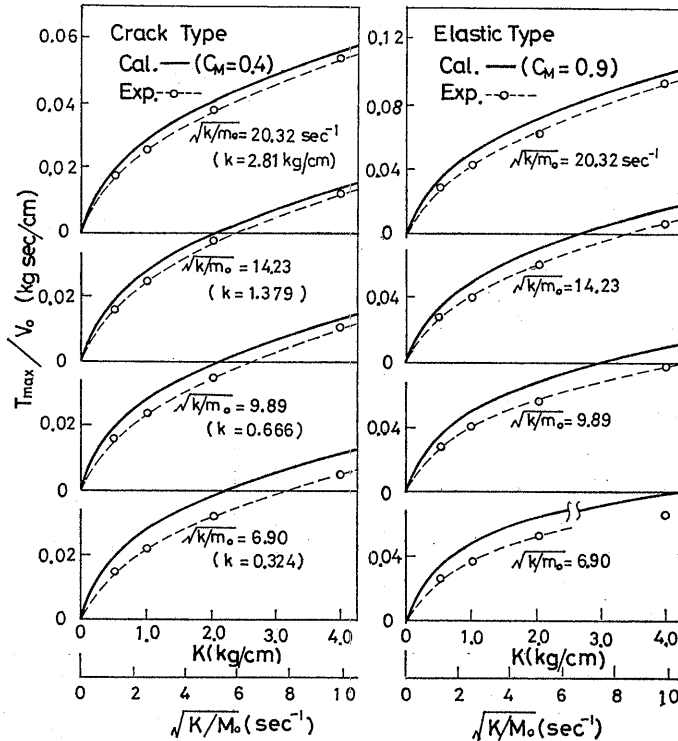


図-14 最大係留力の計算値と実測値の比較

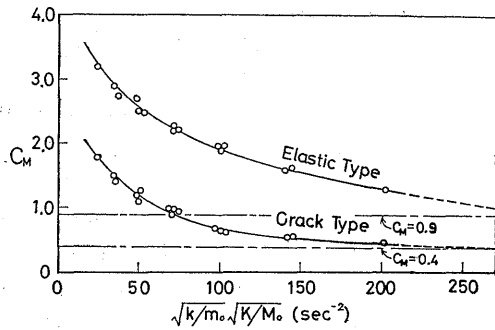


図-15 最大係留力の実測値から逆算した付加質量

以上は食込型と弾性型について比較したが、混合型では、食込型と同様に $C_M=0.4$ を用いて計算すると食込型と同じ結果になるので説明を省略する。

4.4 Taut 係留状態における係留力

Taut 係留された構造物に対する衝突力は 3.1.2 (2) で述べた方法で計算し実測値と一致するので、ここでは記述を省略し、以下係留力について述べる。

図-16 は衝突船が構造物に衝突し、まず最初にあらわれる係留ラインの剛性による係留力の極大値 T_{lmax} (図-5 参照) を食込型と弾性型について実測値と計算

値を比較して示したものである。計算は 3.1.2 (1) に示した方法で行った。計算に必要な係留ラインの剛性による水平方向バネ定数 K_{lh} は、係留索のバネ定数の実測値 $2K_l=16.74 \text{ kg/cm}$ (衝突側の 2 本の係留ラインの和) から、式 (21) を用いて計算すると 66.96 kg/cm となる。

T_{lmax} の実測値は $k=0.324, 0.666, 1.379 \text{ kg/cm}$ では、食込型と弾性型の値が一致しているが、 $k=2.810 \text{ kg/cm}$ では異なっている。これは、係留力 T_{lmax} の発生点 (図-4 参照) によるものであり、図中にその発生点を、①~⑥の番号で表示した k の値に対応させて示した。これによると、食込型 ① ②, 弾性型 ① ② ④ ⑥ はすべて衝突力の作用時間内 (図-4 で ④ の範囲) に T_{lmax} が発生し、食込型の ③ ⑤ は衝突が終了した後 (③ の範囲) で発生している。したがって、前者は式 (18) で後者は式 (19) で計算した。このために、① $k=0.324 \text{ kg/cm}$ と ② $k=0.666 \text{ kg/cm}$ の計算値は同一の値となるが、 $k=1.379 \text{ kg/cm}$ では ③ と ④ に、 $k=2.810 \text{ kg/cm}$ では ⑤ と ⑥ の直線で示した値となる。構造物の付加質量係数は、弾性型に ③ の範囲での発生点がないので、食込型も弾性型もすべて 0.4 として計算できる。計算値と実測

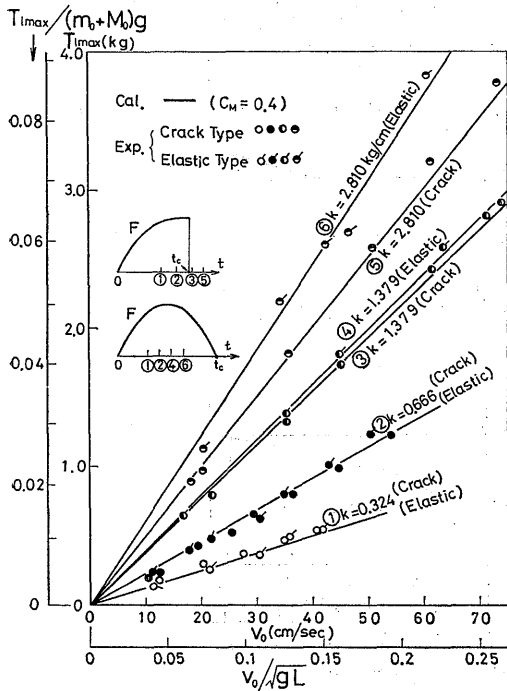


図-16 Taut 係留における係留力 (T_{lmax})

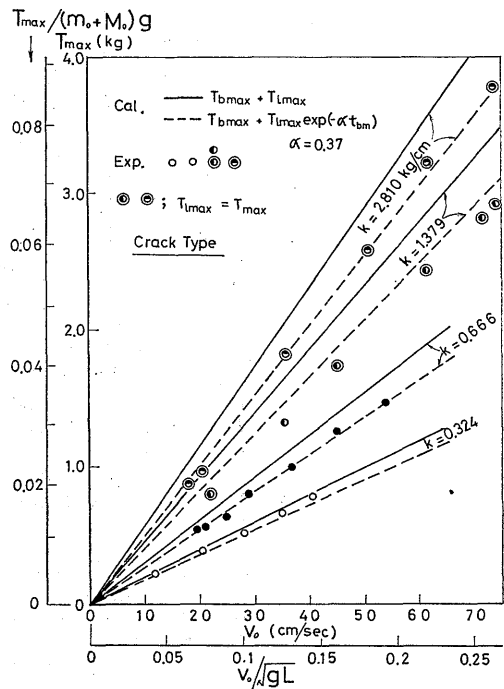


図-17 Taut 係留における係留力 (T_{max})

値はよく一致し、3.1.2 (1) で述べた計算法および付加質量係数の妥当性を示している。

緩衝工模型のパネ定数 k の値が大きい場合には $T_{i\max}$ の値が係留力全体での最大値 T_{\max} となるが、 k が小さくなると、 $T_{b\max}$ の発生点 t_{bm} 付近の値が最大値 T_{\max} となる (図-5 参照)。図-17 に示した食込型の実測値の中で 2 重丸で表わした値が $T_{i\max} = T_{\max}$ となったものである。したがって、図-17 で $k=2.810, 1.379 \text{ kg/cm}$ の実測値は図-16 の値と同一であるが、 $k=0.666, 0.347$ の値は図-16 の値よりかなり大きい。実線で示した計算値は、 $T_{\max} = T_{b\max} + T_{i\max}$ (式 (26)) を用いて計算した値であり、当然のことながら実測値より大きい。しかし、 $T_{i\max}$ に t_{bm} までの減衰を考慮した式 (25) (実測減衰率 $\alpha=0.37$) で計算した値 (点線) は実測値と一致する。したがって Taut 係留の最大係留力は、 $T_{i\max} = T_{\max}$ となることが判別できるときには、式 (23) を用いて、それ以外のときには式 (25) を用いて計算できるが、式 (26) を用いて計算すれば 10% 程度安全側で計算することができる。

4.5 Slack 係留状態における係留力

Slack 係留された構造物に対する衝突力は、3.1.3 (2) で述べたように無係留状態での衝突力の計算式 (29) を用いて計算し、実測値と一致するのでここでは記述を省略する。

係留力は 3.1.3 (1) で述べた式で計算できる。図-18 は、表-3 や図-2 で示した Slack 係留状態における最大係留力の実測値と計算値を比較して示したもので

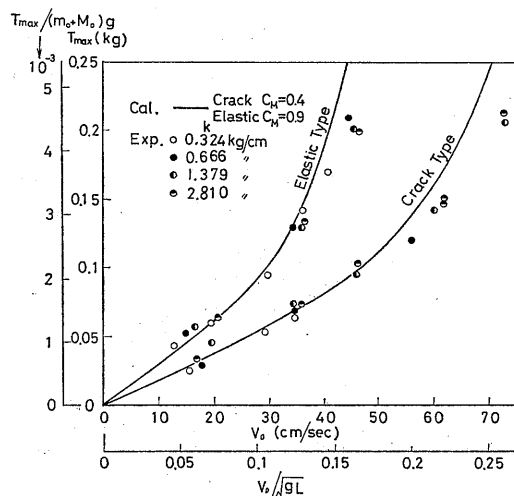


図-18 Slack 係留における最大係留力

ある。計算式は式 (28) を用い、計算に必要な v_0, x_{ic} は無係留状態で計算した値を用いた。係留力の最大値の発生は、図-4 の ㊸ の範囲である。したがって構造物の付加質量係数 C_M は食込型で 0.4、弾性型で 0.9 を用いた。係留力による復原力 $T(x)$ は静的に求めた実験値 (カタナリー曲線) を 5 次の高次関数で近似したものをを用いた。Slack 係留時の最大係留力は緩衝工のパネ定数 k の値にほとんど影響されないので計算値は一本の線となる。衝突速度 v_0 が小さい範囲では、実測値と計算値は一致するが v_0 が大きくなると計算値がはるかに大きくなる。食込型で $v_0=60 \text{ cm/sec}$ 、弾性型で 30 cm/sec 付近以上では復原力 $T(x)$ の曲線は急激に増加し (カタナリー曲線の特徴)、係留力の計算値も急激に増加するので、実測値がそれに追従できなくなっている。しかし、実際には衝突速度 v_0/\sqrt{gL} が 0.15 程度以上になる可能性は少ないので、この値以下であれば式 (28) で計算できる。0.15 以上の速度になっても常に安全側で計算できる。

5. むすび

これまでに、浮遊式構造物の緩衝工に船舶が正面より重心位置に衝突した場合の衝突力と係留力について、等価付加質量を用いた簡易計算法を述べた。そして、衝突船模型と浮遊式箱型構造物模型との重量比が約 1:6 の場合について衝突実験を行い計算法と計算に必要な付加質量を検討した。これらの結果をまとめると次のようになる。

- 1) 衝突力は等価付加質量による方法で正確に計算できる。構造物の付加質量は構造物の構造形態や衝突力の力学的性状によって変ると考えられるが、この実験で用いた構造物模型と縦、横、吃水などの寸法比がほぼ同一で、重量が衝突船の 5, 6 倍程度の箱型構造物に対し、最大衝突力と衝突力の作用時間の計算に必要な付加質量係数 C_M は 0.4 として計算できる。
- 2) 最大係留力は等価付加質量による方法で実用的に十分な精度で計算できる。付加質量係数 C_M は、最大係留力の発生時間 t_m と衝突力の作用時間 t_0 の関係が $0 < t_m \leq t_0$ の範囲では、最大衝突力を計算するときの値 (この実験では $C_M=0.4$) を用いるとよい。また、 $t_m > t_0$ の範囲では、構造物の移動速度 v_0 を計算するときの C_M (この実験では、食込型と混合型で 0.4、弾性型で 0.9) を用いるとよい。この場合最大係留力は常に安全側で計算できる。
- 3) 線形パネでおきかえることができる係留方式の最

大係留力は、上記 2) で示した C_M を用いて計算すると実測値より幾分大きくなるが、緩衝工のバネ定数 k が大きくなるほどよく一致し、小さい場合でも常に安全側で実用的に計算できる。

4) Taut 係留された構造物の係留力の変動は、係留ラインの剛性によっておこる振動数の高い係留力と、構造物の浮力の変動によっておこる振動数の低い係留力とが重ね合せた形状となる。したがって、最大係留力の計算では、それぞれの水平方向のバネ定数を求め、バネ係留での方法を用いて計算し、両者を合成すればよい。

5) Slack 係留された構造物における最大係留力は衝突力の作用が終了してから発生するので、 $t_m > t_0$ の範囲での付加質量 C_M を用いて計算できる。最大係留力は Taut 係留の場合にくらべ非常に小さい。また、衝突速度が大きくなると計算値が実測値よりもはるかに大きくなるが、衝突速度が特に速くないかぎり安全側で実用的な精度で計算できる。

本研究では、一種類の箱型構造物について、衝突力の性状と係留法を変え、そのときの衝突力と係留力について実験を行って考察した。今後は、浮遊式構造物の種類、衝突船と構造物の重量比、衝突位置と方向などを変化させた場合について実験を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) V. U. Minorsky: An Analysis of Ship Collisions with Reference to Protection of Nuclear Power Plants, Journal of Ship Research, Vol. 3, No. 2, 1959.
- 2) 元良誠三, 藤野正隆, 杉浦正憲, 杉田松次: 衝突時の等価付加質量について, 日本造船学会論文集, No. 126, 1969.
- 3) 有田喜久雄, 北村勝英: 原子力船耐衝突構造の研究について, 日本造船学会誌, 第 521 号, 1972.
- 4) 安藤文隆, 有田喜久雄, 在田正義: 衝突時の船体破壊強度の研究 (第 1 報), 船舶技術研究所報告, 10 巻 3 号, 1973.
- 5) 安藤文隆, 郷田国夫, 有田喜久雄, 在田正義, 竹本博安, 島田尚信: 衝突時の船体破壊強度の研究 (第 2 報), 船舶技術研究所報告, 10 巻 4 号, 1973.
- 6) 長沢 準, 有田喜久雄, 谷 政明, 岡 修二: 通航船舶の橋脚衝突時の圧壊強度について, 日本造船学会論文集, 第 142 号, 1977.
- 7) 長沢 準, 有田喜久雄, 谷 政明, 岡 修二: 通航船舶の橋脚衝突時の圧壊強度について (第 2 報), 日本造船学会論文集, 第 146 号, 1979.
- 8) Olav Furnes and Jorgen Amdahl: Computer

Simulation Study of Offshore Collisions and Analysis of Ship-Platform Impacts, Applied Ocean Research, Vol. 2, No. 3, 1980.

- 9) Erik Pettersen and Kaare R. Johnsen: New Non-Linear Methods for Estimation of Collision Resistance of Mobile Offshore Units, Offshore Technology Conference, 1981.
- 10) 片山正敏, 宇野木賢一: 浮防衝堤への船舶衝突時の運動機構に関する基礎的研究, 第 24 回海岸工学講演会論文集, 1977.
- 11) Martin J. Petersen and Preben T. Pedersen: Collisions between Ships and Offshore Platforms, Offshore Technology Conference, 1981.

—Appendix—

浮力の変化によるバネ定数 (K_{bh})

Taut 係留された構造物に船舶が衝突し、係留点 P に f なる力が作用し、図-a に示すように構造物が点線の部分まで移動したとする。 f の係留ライン方向の成分 $f \cos(\theta_0 - \theta_1)$ は係留ラインを引きのばそうとする力であり、直角成分 $f \sin(\theta_0 - \theta_1)$ は構造物を移動させる力である。いま、係留ラインののびを無視すると、 $f \sin(\theta_0 - \theta_1)$ の水平方向成分は $f \sin^2(\theta_0 - \theta_1)$ であり、つり合いの式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} f \sin^2(\theta_0 - \theta_1) &= (T_0 + \Delta T_1) \cos(\theta_0 - \theta_1) \\ &\quad - (T_0 - \Delta T_2) \cos(\theta_0 + \theta_2) \\ T_0 \sin \theta_0 + \Delta B_1 &= (T_0 + \Delta T_1) \sin(\theta_0 - \theta_1) \\ T_0 \sin \theta_0 - \Delta B_2 &= (T_0 - \Delta T_2) \sin(\theta_0 + \theta_2) \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで、 T_0 は係留ラインの初期張力。 ΔT_1 , ΔT_2 はそれぞれ衝突側と反対側の係留ラインの増加張力。 ΔB_1 , ΔB_2 は構造物が移動することによっておこる浮力の変化量。その他の記号は図-a 参照。

また、構造物の水平方向および鉛直方向の移動量 x , y_1 , y_2 は係留ライン長 l を用い次式で表わされる。

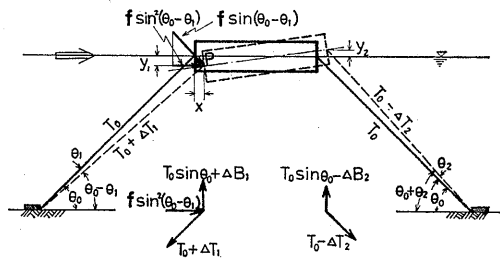


図-a

$$\left. \begin{aligned} x &= l\{\cos(\theta_0 - \theta_1) - \cos \theta_0\} \\ y_1 &= l\{\sin \theta_0 - \sin(\theta_0 - \theta_1)\} \\ y_2 &= l\{\sin(\theta_0 + \theta_1) - \sin \theta_0\} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

また、浮力の変化量 ΔB_1 , ΔB_2 を近似的に次式で表わすと、

$$\left. \begin{aligned} \Delta B_1 &= \frac{1}{4} \gamma_w y_1 A = \frac{1}{4} \gamma_w l A \{\sin \theta_0 - \sin(\theta_0 - \theta_1)\} \\ \Delta B_2 &= \frac{1}{4} \gamma_w y_2 A = \frac{1}{4} \gamma_w l A \{\sin(\theta_0 + \theta_1) - \sin \theta_0\} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 γ_w は水の単位体積重量、 A は衝突前の構造物の水線面積である。

また、 $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ とおいて、式(1), (2), (3) から x と f の関係は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} f \sin^2(\theta_0 - \theta) &= \frac{1}{\tan(\theta_0 - \theta)} (T_0 \sin \theta_0 + \Delta B_1) \\ &\quad - \frac{1}{\tan(\theta_0 + \theta)} (T_0 \sin \theta_0 - \Delta B_2) \\ x &= l\{\cos(\theta_0 - \theta) - \cos \theta_0\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)から x と $f \sin^2(\theta_0 - \theta)$ の関係を求めるとよい。 x の小さい範囲では直線で表わされるので、この勾配が浮力の変動による水平方向のバネ定数 K_{bn} となる。