

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

片山正敏*・宇野木賢一**

1. ま え が き

安全性を厳しく要求される海上原子力発電プラント、海上貯油（CTS）システムなどの海洋構造物の計画にあたって、中小型船舶の衝突を防護するための一手段として、浮防衝堤システムの設置が検討されている。ここでとりあげた浮防衝堤システムは、多数のブイをフレキシブルなジョイントで連結し、係留するもので、船舶衝突時には、その側壁の構造変形・係留ラインのばね力・浮防衝堤周りの流体効果などにより、衝突エネルギーを柔軟に吸収するとともに、船舶の損傷をも防ごうとするものである。

本研究では、流体力の効果、防舷材の変形、浮防衝堤の構造変形、係留ラインのばね力などを考慮した船舶衝突時の運動機構に関する理論的考察を行い、水槽実験による検討を行うとともに、系統的な数値計算により、船舶衝突時のエネルギー吸収機構に関して、流体力、防舷材、側壁構造変形、係留ラインのばね力などがどのように寄与しているかを明らかにした。

2. 船舶衝突時の運動機構に関する理論的考察

(1) 衝突時の運動機構

水上に浮かぶ二つの物体の衝突、あるいは水中構造物に対する浮体の衝突という現象は非常に複雑であり、その運動機構の解明にあたっては大別して二つの方向が考えられる。すなわち“非弾性衝突として取扱う挙動解析”、“弾性衝突として取扱う挙動解析”である。

実際の衝突現象は、非弾性的挙動と弾性的挙動が複雑に絡み合っているものと思われるが、非弾性衝突として取扱ったものに船舶の衝突解析例がある¹⁾。

また、弾性衝突として取扱ったものに沖合ドルフィンに係留された船舶の波による運動にもとづいて、船体がドルフィンに衝突して与える衝撃力についての解析例がある²⁾。

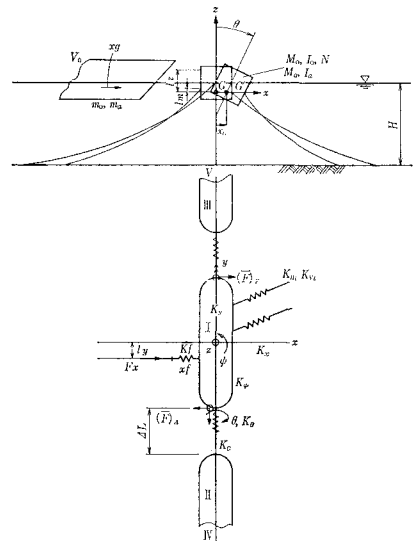
著者らは、検討の対象としている浮防衝堤への船舶衝突時の挙動解析にあたって、その運動機構を、“弾性衝

突とする”、“衝突時に運動量が保存される”と仮定した。またその挙動は船舶対船舶などの衝突に比べて、比較的衝突継続時間が長く、かつ衝突力も小さいので衝突力、慣性力、減衰力、復原力からなる運動方程式（平水中）を作成し、解析することとした。

(2) 船舶衝突時の運動方程式

a) 記号、座標系

図—1 に記号、座標系を示す。



図—1 記号、座標系

衝突船舶

進行方向のみの1次元運動とし、 m_0 : 質量（船舶）、 m_a : 付加質量（船舶）、 n_x : 減衰定数、 F_x : 衝突反力、 V_0 : 衝突速度、 x_g : 変位量、 T : スラスト力（推力）とする。

浮防衝堤本体

左右揺れ（sway）、横揺れ（roll）、船首揺れ（yaw）の運動を考え、連成は無視できるものとする。記号は、 M_0 , M_{ax} : 質量（浮防衝堤）および付加質量¹⁾（ x 方向）、 $I_{0\theta}$, $I_{0\phi}$: 質量2次モーメント（ θ, ϕ 方向）、 $I_{a\theta}$, $I_{a\phi}$: 付加質量2次モーメント（ θ, ϕ 方向）、 N_x, N_θ, N_ϕ : 減衰力係数³⁾（ x, θ, ϕ 方向）、 K_x, K_θ, K_ϕ : 復原力係数（ x, θ, ϕ 方向）、

* 正会員 三菱重工業（株）広島研究所 海洋開発研究室

** 三菱重工業（株）広島研究所 海洋開発研究室

$(\bar{F}_x, \bar{F}_y, \bar{F}_z)_F$: 前側連結部伝達力, $(\bar{F}_x, \bar{F}_y, \bar{F}_z)_A$: 後側連結部伝達力, L : 長さ, B : 幅, l_y : 偏心衝突レバー, l_z : 重心-衝突点間距離, GM_y : roll メタセンタ高さ, x_G : sway 量 (重心), θ : roll 量, ϕ : yaw 量とする。

防舷材

図-2 のように理想化し, x_f : たわみ量, F_x : 反力, K_f : ばね定数, $x_{f \min}$: 線形部最大たわみ量, $x_{f \max}$: 最大たわみ量, $P_{\max}$: 最大たわみ時反力とする。

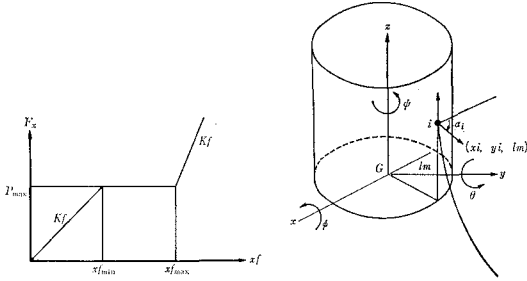


図-2 防舷材反力特性

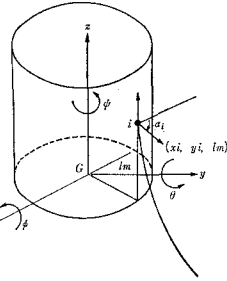


図-3 係留索配置図

係留索

図-3 のように理想化し, w : 水中単位重量, H : 水深, T_{H0} : 初期水平張力, α_i : 張角度 (水平面), K_{Hi} , K_{Vi} : 単一索の水平および垂直ばね定数, K_H , K_V : 複合索の水平および垂直ばね定数, l_m : 取付高さ, K_{xM} , $K_{\theta M}$, $K_{\phi M}$: 重心に関するばね定数 (x, θ, ϕ 方向), x_i, y_i : 取付位置とする。

連結部

緩衝材, チェーン, 中間ブイなどからなるフレキシブルな連結部を図-4 のように理想化する。

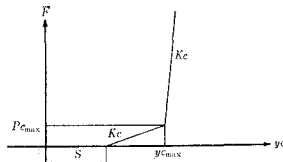


図-4 連結部伝達力特性

記号は, K_c : ばね定数,

S : 不感帯長さ, y_c : 変位量, $y_{c \max}$: 最大変位量, $P_{c \max}$: 最大変位時反力, l_c : 着力点高さ, ΔL : 連結部間隔, $\bar{F}$: 伝達力とする。

b) 運動方程式

衝突船舶の運動方程式は次式で表わされる。

$$(m_0 + m_a) \cdot \ddot{x}_G + n_x \cdot \dot{x}_G = -F_x + T \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} x_G &= x_f + x_G + l_z \cdot \theta + l_y \cdot \phi & (F_x \neq 0) \\ x_G &= x_G & (F_x = 0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

同様に, 浮防衛堤の運動方程式も次式で表わされる。

衝突された浮防衛堤 (I) に関して,

sway 方向

$$\begin{aligned} (M_0 + M_{ax}) \cdot \ddot{x}_G + N_x \cdot \dot{x}_G + K_x \cdot x_G \\ = F_x + (\bar{F}_{xF} - \bar{F}_{xA}) \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

roll 方向

$$\begin{aligned} (I_{\theta\theta} + I_{a\theta}) \cdot \ddot{\theta} + N_\theta \cdot \dot{\theta} + K_\theta \cdot \theta \\ = F_x \cdot l_x + (\bar{F}_{xF} - \bar{F}_{xA}) \cdot l_C \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

yaw 方向

$$\begin{aligned} (I_{\phi\phi} + I_{a\phi}) \cdot \ddot{\phi} + N_\phi \cdot \dot{\phi} + K_\phi \cdot \phi \\ = -F_x \cdot l_y - (\bar{F}_{xF} - \bar{F}_{xA}) \cdot L/2 \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} K_x &= K_{xM}, \\ K_\theta &= K_{\theta M} + M_0 \cdot g \cdot GM_y, \quad K_\phi = K_{\phi M} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

また, 衝突されない浮防衛堤 (II, III, ...) については, (3)(4)(5) 式を $F_x = 0$ として解析すればよい。

防舷材に関しては,

$$\left. \begin{aligned} F_x &= K_f \cdot x_f & (0 < x_f \leq x_{f \min}) \\ F_x &= P_{\max} & (x_{f \min} < x_f \leq x_{f \max}) \\ F_x &= K_f \cdot (x_f - x_{\max}) + P_{\max} & (x_f < x_{f \max}) \\ F_x &= 0 & (x_f \leq 0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

また, 複合係留索のばね定数は,

$$\left. \begin{aligned} K_{xM} &= \sum_i (K_{Hi} \cdot \cos^2 \alpha_i) \\ K_{\theta M} &= \sum_i (K_{Vi} \cdot x_i^2) + l_m^2 \sum_i (K_{Hi} \cdot \cos^2 \alpha_i) \\ K_{\phi M} &= \sum_i (K_{Hi} \cdot y_i^2 \cdot \cos^2 \alpha_i) + \sum_i (K_{Hi} \cdot x_i^2 \cdot \sin^2 \alpha_i) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

と表わせる。

ただし, (8) 式は初期状態でのばね定数であり, 実際の計算では, 各時刻 (ステップ) ごとの係留索取付点の変位に対して個々にばね定数を求め, 1 ステップの間では一定として係留力を求める。

連結部伝達力を図-4 に示した特性から, 多重連結 (いわゆるマルチユニット方式) 効果を考慮して, 直接的に計算するのは, 非常に煩雑となるため, 次のような近似解法を検討する。すなわち, 連結部の一端をピン固定と考え, 等価な連結部長さを仮定することにより, 多重連結効果を考慮する。

c) 初期条件および解析

衝突時の初期条件は, 運動量保存則を適用することにより, 次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} (m_0 + m_a) \cdot V_0 \\ = (m_0 + m_a) \cdot (\dot{x}_G + \dot{x}_f + l_z \cdot \dot{\theta} + l_y \cdot \dot{\phi})_{t=0} \\ \quad + (M_0 + M_{ax}) \cdot (\dot{x}_G)_{t=0} \\ (m_0 + m_a) \cdot l_z \cdot V_0 \\ = (m_0 + m_a) l_z \cdot (\dot{x}_G + \dot{x}_f + l_z \cdot \dot{\theta} + l_y \cdot \dot{\phi})_{t=0} \\ \quad + (I_{\theta\theta} + I_{a\theta}) \cdot (\dot{\theta})_{t=0} \\ (m_0 + m_a) \cdot l_y \cdot V_0 \\ = (m_0 + m_a) l_y \cdot (\dot{x}_G + \dot{x}_f + l_z \cdot \dot{\theta} + l_y \cdot \dot{\phi})_{t=0} \\ \quad + (I_{\phi\phi} + I_{a\phi}) \cdot (\dot{\phi})_{t=0} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

ここで, $(\dot{x}_f)_{t=0} = V_1$, $V_2 = V_0 - V_1$ とすると

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_G \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}_{t=0} = \begin{bmatrix} \frac{M_0 + M_{ax} + m_0 + m_a}{m_0 + m_a}, & l_z, & l_y \\ 1, & \frac{I_{0\theta} + I_{a\theta} + (m_0 + m_a)l_z^2}{(m_0 + m_a)l_z}, & l_y \\ 1, & l_z, & \frac{I_{0\phi} + I_{a\phi} + (m_0 + m_a)l_y^2}{(m_0 + m_a)l_y} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_2 \\ V_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

また、

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_G &= -\{N_x / (M_0 + M_{ax})\} \cdot \dot{x}_G \\ \ddot{\theta} &= -\{N_\theta / (I_{0\theta} + I_{a\theta})\} \cdot \dot{\theta} \\ \ddot{\phi} &= -\{N_\phi / (I_{0\phi} + I_{a\phi})\} \cdot \dot{\phi} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

以上の初期条件から Runge-Kutta-Gill 法により解を求める。

3. 船舶衝突実験

前章に述べた解析法を検証するため、1/50 縮尺の 5 体連結模型を用いて、重心衝突および偏心衝突の水槽実験を実施した。

実験結果と解析結果を比較すると次の通りである。

a) 衝突力

図-5 に実験値と計算値を実機換算値（以下同様）で示す。各実験ケースとも実験値，計算値はよく一致している。

b) 浮防衝突の挙動と連結部伝達力

浮防衝突の水平変位，ロール加速度，ヨー加速度，連結部伝達力の実験値と計算値を 図-6～図-9 に示す。

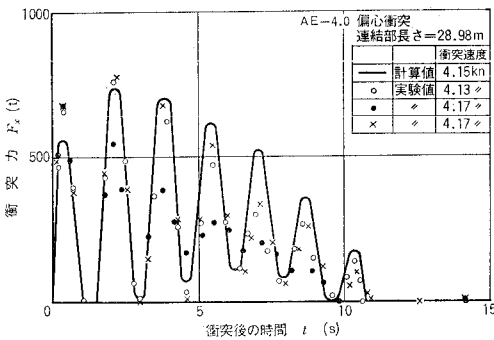


図-5 衝突力

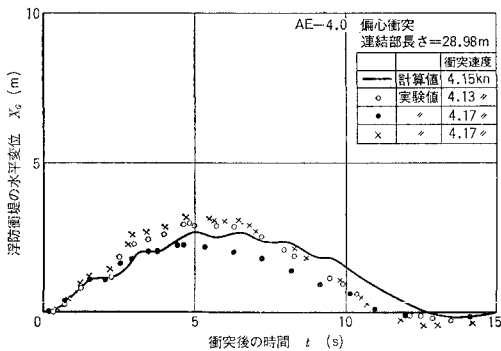


図-6 浮防衝突堤の水平変位

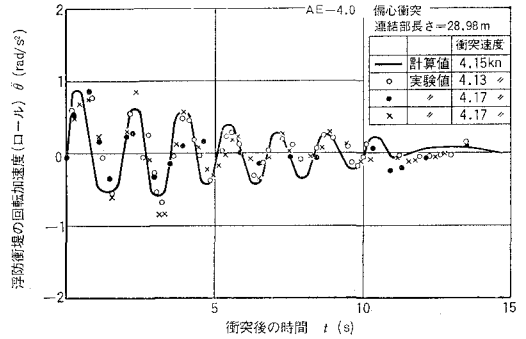


図-7 ロール加速度

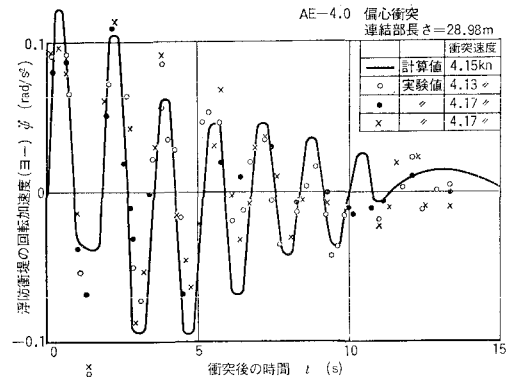


図-8 ヨー加速度

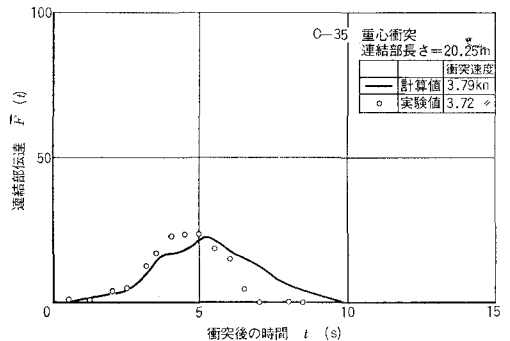


図-9 連結部伝達力

以上のことから，前章に述べた理論計算式，多重連結方式の近似的解法も，十分実用的であると思われる。

4. 衝突エネルギー吸収機構

計算プログラムによる系統的な数値解析の結果，衝突

エネルギー吸収機構に関する特性が、次のように明らかとなった。

(1) 浮防衛堤規模と衝突力および変位の関係

a) 衝突力 (図-10)

浮防衛堤規模 (浮防衛堤質量/衝突船舶質量 = M_0/m_0 , 以下同様) が大きくなると, 衝突力は大きくなり, 衝突継続時間は短くなる. M_0/m_0 が 1/3 程度より大きくなると, 衝突力のピークは1度となり, これは防舷材, 浮防衛堤側壁構造の剛性により定まる. M_0/m_0 が 1/3 程度より小さくなると, 衝突力のピークは2度以上になり, 最初のピークは防舷材, 浮防衛堤側壁構造の剛性によるものであるが, それ以降のピークは浮防衛堤に作用する減衰力および復原力によるものである. 衝突力のピークは M_0/m_0 が小さくなるにつれて浮防衛堤に作用する減衰力および復原力によるピークのほうが大きくなり, いわゆる“柔らかく”なる現象を示す.

b) 変位 (図-10)

M_0/m_0 が小さくなると, 水平変位は大きくなるが復原は早くなる. 減衰力, 復原力項などが非線形であるため, 水平変位量は, M_0/m_0 に単純に反比例して増大することはない. $M_0/m_0=1$ と $M_0/m_0=10$ の場合を比較すると, 本数値計算例では水平変位は約2倍となっている.

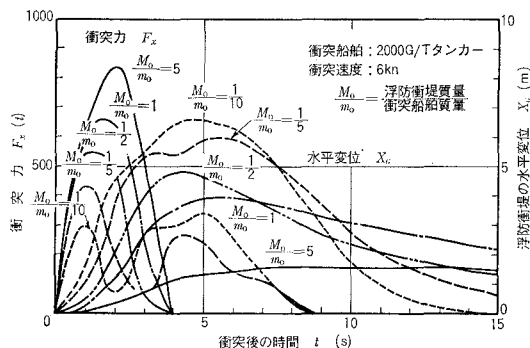


図-10 真横重心衝突時の浮防衛堤規模と衝突力および水平変位の関係

(2) 浮防衛堤ばね系規模と衝突力および変位の関係

a) 衝突力 (図-11)

係留索によるばね系が強くなると, 衝突力のピークのうち浮防衛堤の減衰力および復原力によるものが大きくなり, ピークとなる時間も早くなる. 衝突力のピークのうち防舷材, 浮防衛堤側壁構造の剛性によるもの (最初のピーク) は, 係留索のばね系の影響を受けない. 係留索の初期張力を増大し, 係留索ばね定数を大きくすることにより, 減衰力および復原力によるものを大きくすることができる.

b) 変位 (図-11)

係留索の初期張力を増大させると水平変位量は減少

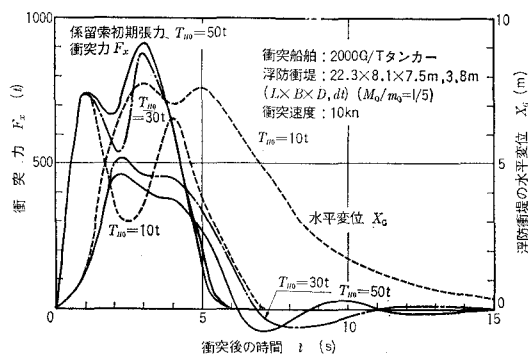


図-11 真横重心衝突時の浮防衛堤ばね系規模 (係留索初期張力) と衝突力および水平変位の関係

し, 復原も早くなる. 水平変位が最大となる時点で衝突力は極小となり, このとき係留索に作用する力は最大となる.

(3) 浮防衛堤システムによる吸収エネルギー

(図-12)

船舶衝突後まず浮防衛堤の慣性力による衝突エネルギー吸収が行われ, 続いて復原力および減衰力による衝突エネルギー吸収が行われ, やがて減衰力による衝突エネルギー吸収が支配的となる.

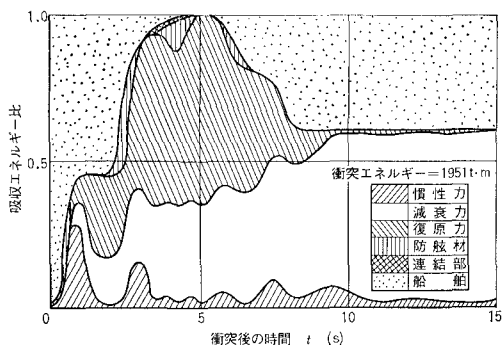


図-12 吸収エネルギー

5. む す び

(1) 浮防衛堤周囲の流体効果, 防舷材, 側壁構造変形, 係留ラインのばね力などを考慮した近似解析法を導くとともに, 水槽実験によって, 実用上十分な精度で合うことを確かめた.

(2) 上記近似解析法による系統的な数値計算により, 船舶衝突時のエネルギー吸収機構に関して, 流体力, 防舷材, 側壁構造変形, 係留ラインのばね力などがどのように寄与しているかを明らかにした.

最後に本研究は, 通商産業省より日本海洋開発産業協会 (JOIA) が委託を受けて実施している“石油の海洋備

蓄システムの開発調査'の一環として実施されたものであることを付記し、関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Minorsky, V.U.: An analysis of ship collision with reference to protection of nuclear power plants, Journal of Ship Research, Vol. 3, No. 2, pp. 1~4, 1959.
- 2) 永井莊七郎・小田一紀・重藤宗之: 横波を受けるスーパータンカーの drifting, swaying および rolling によってドルフィンに働く衝撃力に関する研究, 第 16 回海岸工学講演会論文集, pp. 341~351, 1969.
- 3) 藤井 斉・高橋 雄: 強制動揺法による横方向運動方程式の係数の計測結果, 日本造船学会論文集, 第 130 号, pp. 131~140, 1971.