

係留鎖の動的挙動を考慮した浮体動揺と係留鎖張力の計算方法

MOTION OF FLOATING BODY AND MOORING LINE TENSION WITH DYNAMIC EFFECT

山崎 晶*・小田 晃*・加来謙一**・新田良典***

By Akira YAMAZAKI, Akira ODA, Kenichi KAKU and Yoshinori NITTA

Under severe storm condition, mooring system of a floating body will become taut condition. To estimate motion and mooring tension on such condition, a practical calculation method considering dynamic effect of mooring line is presented. Also experimental study on a floating cylinder moored by relatively small chain is carried out and following conclusions are derived.

Based on simple formulations, presented method can predict experimental results with fairly good agreement. On the other hand, results obtained by static calculation disagree with not only mooring tension but also motion of a floating body.

Keywords : floating body, mooring tension, mooring line, dynamic calculation

1. はじめに

波浪中の浮体動揺は、速度ポテンシャルを仮定した線形理論で良好に推定できる。また、非線形性を有する粘性減衰力が効く浮体固有周期付近の動揺も、自動動揺試験などで補正を行えば、合理的な推定が可能である¹⁾。しかしながら、係留浮体の動揺と係留鎖張力の推定には多くの問題があり、本論文はその中の係留鎖の動的挙動の問題を扱う。

通常海洋構造物は緩やかな(スラック)状態で係留されるので、平常時の穏やかな海象条件では浮体の動揺は小さく、着鎖点の変位からカタナリ理論で鎖張力を求める静的解析が適用できる。しかし係留の設計で最も重要な暴風雨時などの厳しい海象条件では、浮体は大きな定常変位を起こし、強い(トート)係留状態で大変位の動揺を行う。この際の浮体動揺と係留鎖張力を評価するには、係留鎖の動的挙動を考慮した解析が必要である。

係留鎖の動的挙動を考慮して、中嶋ら²⁾は質点系モデルによる方法で浮体と係留鎖の相互作用を含めた詳細な

研究を行い、この方法の有効性を述べている。小田ら³⁾も同様の方法で着鎖点を強制動揺させた場合の検討を行っている。質点系モデルによる方法は厳密ではあるが、浮体と係留鎖との相互作用を扱う場合には定式化が複雑で多大な演算時間がかかるなどの実務計算としての欠点がある。

浮体動揺および係留鎖各点の動揺が微小であると仮定し、着鎖点の速度・加速度に線形な形で鎖各点の速度・加速度を計算し、動的な鎖張力を求める近似計算法がある。これは、小寺山⁴⁾や島田ら⁵⁾が提案した方法であるが、こうした研究ではスラック状態の係留鎖で着鎖点の強制動揺実験を行い理論の検討をしているのみで、トート状態での検討や浮体動揺と係留鎖張力の相互作用の検討は行っていない。

以上を背景として本論文では次の事項を扱う。まず、トート状態の係留鎖について、近似計算法と同様な仮定により着鎖点の運動より鎖に作用する動的張力を求める方法の定式化を行う。ついで、動的張力を考慮した浮体動揺と係留鎖張力の相互作用の問題の解法を示す。また係留鎖の動的影響が比較的少ないと考えられる細く軽量の係留鎖を用い、トート状態に係留した円柱浮体の波浪中動揺実験を実施し、提案した方法の妥当性とカタナリ理論による静的解析の問題点を検討する。

* 正会員 工修 (株)熊谷組技術研究所水理研究部
(〒300-22 つくば市鬼ヶ窪下山1043)

** 正会員 工修 (株)熊谷組技術研究所海洋技術開発部
(〒162 新宿区津久戸町2-1)

*** 正会員 (株)熊谷組技術研究所水理研究部

2. 係留鎖の動的挙動を考慮した鎖張力の計算方法

次の仮定をもとに近似計算方法の定式化を行う。

- ① 浮体動揺は微小振幅であり、そのため係留鎖各点も微小振幅の動揺を行う。
- ② 動揺中の係留鎖は、静的計算によるカタナリ形状を保持する。
- ③ 係留鎖の動的外力としては、浮体動揺による鎖の運動で生じる慣性力と抗力を考え、波や流れによる水粒子運動による力を考えない。
- ④ 係留鎖の弾性的な伸縮は考えない。

(1) 係留鎖の初期状態

以後、本章では暴風時のトート状態の係留鎖を考える。Fig. 1のように、係留鎖長さを l_0 、初期の浮体着鎖点の座標を y_0, z_0 と書けば、アンカーより距離 l の点の座標 y, z は式 (1) を解いて求まる a を用いて以下のように書ける⁶⁾。

$$2a \sinh(y_0/2a) = \sqrt{l_0^2 - z_0^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$y' = a \sinh^{-1} \left[\frac{z_0}{2a \sinh(y_0/2a)} \right] - \frac{y_0}{2} \dots\dots\dots (2)$$

$$z' = a(\cosh(y'/a) - 1) \dots\dots\dots (3)$$

$$l' = a \sinh(y'/a) \dots\dots\dots (4)$$

$$y = a \sinh^{-1} \frac{l+l'}{a} - y' \dots\dots\dots (5)$$

$$z = a \left(\cosh \frac{y+y'}{a} - 1 \right) - z' \dots\dots\dots (6)$$

(2) 着鎖点の動揺で生じる鎖各点の動揺

本節の定式化は、島田ら⁵⁾が行ったものと同様であるが、他節で参照するので式の展開を記す。

仮定①を用い、着鎖点が微小変位 $\Delta z_0, \Delta y_0$ を起こしたときの係留鎖パラメーターの変化を考える。式 (1) を微分すると、 $B_0 = y_0/2a$ として、

$$\Delta a = \frac{1}{2(B_0 \cosh B_0 - \sinh B_0)} \left\{ \frac{z_0}{\sqrt{l_0^2 - z_0^2}} \cdot \Delta z_0 + \cosh B_0 \cdot \Delta y_0 \right\} \dots\dots\dots (7)$$

式 (4) と (5) を微分して、

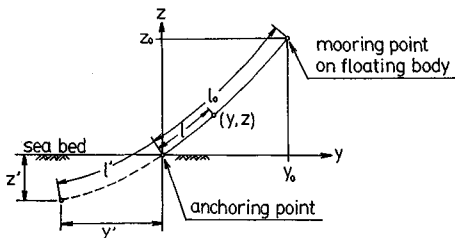


Fig. 1 Initial taut mooring condition.

$$\Delta y' = \left\{ \frac{y_0}{z_0} \cosh \frac{y_0+y'}{a} + \frac{y'}{a} - \frac{l_0}{z_0} \right\} \cdot \Delta a - \frac{a}{z_0} \cosh \left(\frac{y_0+y'}{a} \right) \cdot \Delta y_0 \dots\dots\dots (8)$$

式 (4) を微分して、

$$\Delta l' = \left\{ \frac{l'}{a} - \frac{y'}{a} \cosh \frac{y'}{a} \right\} \cdot \Delta a + \cosh \frac{y'}{a} \cdot \Delta y' \dots\dots (9)$$

となり、 a, y', l' の変化が求まる。さらに鎖上の位置のパラメーター $A = (l+l')/a$ を用いて、式 (3) と (6) を微分し式 (8) を用いれば、

$$\Delta z = \frac{1}{\sqrt{1+A^2}} \left\{ 1 - \sqrt{1+A^2} \cosh \frac{y'}{a} + \frac{l'y'}{a^2} \sqrt{1+A^2} + \frac{A \cdot l'}{a} - \frac{A \cdot y'}{a} \cosh \frac{y'}{a} \right\} \cdot \Delta a + \frac{1}{\sqrt{1+A^2}} \left\{ A \cdot \cosh \frac{y'}{a} - \frac{l'}{a} \sqrt{1+A^2} \right\} \cdot \Delta y' \dots\dots\dots (10)$$

また、式 (5) を微分して、

$$\Delta y = -\frac{1}{\sqrt{1+A^2}} \{ \sqrt{1+A^2} \sinh^{-1} A - A \} \cdot \Delta a + \frac{1}{\sqrt{1+A^2}} \cdot \Delta l' - \Delta y' \dots\dots\dots (11)$$

と鎖各点の変位が求まる。

以上をまとめると、係留鎖の初期状態 (a, y', z', l') および鎖上の位置 (l) のみの関数 $f_{zz}, f_{zy}, f_{yz}, f_{yy}$ を係数として、

$$\left. \begin{aligned} \Delta z &= f_{zz} \cdot \Delta z_0 + f_{zy} \cdot \Delta y_0 \\ \Delta y &= f_{yz} \cdot \Delta z_0 + f_{yy} \cdot \Delta y_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

と鎖各点の変位が着鎖点変位に線形な形で表わされる。

ここで、仮定②を用いると変位と同様に鎖各点での速度・加速度も、着鎖点での値に線形な形で以下のように求まる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{z} &= f_{zz} \cdot \dot{z}_0 + f_{zy} \cdot \dot{y}_0 \\ \dot{y} &= f_{yz} \cdot \dot{z}_0 + f_{yy} \cdot \dot{y}_0 \\ \ddot{z} &= f_{zz} \cdot \ddot{z}_0 + f_{zy} \cdot \ddot{y}_0 \\ \ddot{y} &= f_{yz} \cdot \ddot{z}_0 + f_{yy} \cdot \ddot{y}_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

(3) 鎖に作用する動的外力

仮定③に記したように、鎖に作用する動的外力として、浮体動揺による鎖の運動で生じる慣性力と抗力のみを考える。

慣性力として、鎖の質量に比例した通常の慣性力と、鎖が水中で運動して生じる付加質量に比例した慣性力を考える。前者は、鎖の鉛直および水平方向の運動を、後者は鎖の法線方向の運動を対象に計算する。

Fig. 2 に示す鎖の微小部分の法線方向加速度 \ddot{v} は、 ϕ_i を鎖が水平軸となす角として、

$$\ddot{v} = \ddot{z} \cos \phi_i - \ddot{y} \sin \phi_i \dots\dots\dots (14)$$

となるので、鎖の付加質量による慣性力 T_i は、

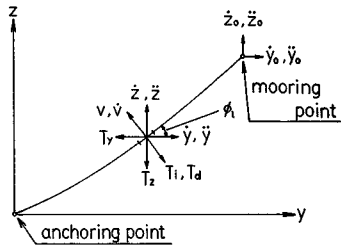


Fig. 2 Coordinate system for calculating line tension.

$T_l = C_m \rho V (\dot{z} \cos \phi_l - \dot{y} \sin \phi_l) \dots \dots \dots (15)$
 ただし、 C_m ：鎖の付加質量係数（モリソン式の質量係数を C_M として、 $C_m = C_M - 1$ ）、 ρ ：流体の密度、 V ：鎖の単位長さ当たり体積

と書ける。この分力を考え、さらに通常の慣性力を加えれば、

$$\left. \begin{aligned} T_{lx} &= m_a \dot{z} + C_m \rho V \cos \phi_l (\dot{z} \cos \phi_l - \dot{y} \sin \phi_l) \\ T_{ly} &= m_a \dot{y} - C_m \rho V \sin \phi_l (\dot{z} \cos \phi_l - \dot{y} \sin \phi_l) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (16)$$

ただし、 m_a ：鎖の単位長さ当たり気中質量と慣性力項が求まる。

抗力についても、以下のように同様に計算される。

$$T_d = \frac{1}{2} \rho C_D D_e (\dot{z} \cos \phi_l - \dot{y} \sin \phi_l) \cdot |\dot{z} \cos \phi_l - \dot{y} \sin \phi_l| \dots \dots \dots (17)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{dx} &= T_d \cos \phi_l \\ T_{dy} &= -T_d \sin \phi_l \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (18)$$

ただし、 C_D ：鎖の抗力係数、 D_e ：鎖の等価直径 ($D_e = \sqrt{4V/\pi}$)

以上から、鎖の微小部分 dl に作用する動的外力は、

$$\left. \begin{aligned} T_x dl &= (T_{lx} + T_{dx}) dl \\ T_y dl &= (T_{ly} + T_{dy}) dl \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (19)$$

と求まる。

(4) 着鎖点の張力

鎖全体に作用する動的外力は、式 (19) を積分して、

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \int_0^{l_0} T_x dl \\ F_y &= \int_0^{l_0} T_y dl \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (20)$$

と求まる。

着鎖点の張力を求めるために、Fig. 3 のように鎖に作用する力のつり合いを考える。鎖には、式 (20) で与えられる動的外力、鎖の自重 $w l_0$ (w ：鎖の水中単位長さ当たり重量)、および端部のアンカー点・着鎖点での反力が作用する。

鎖が水平軸となす角 ϕ_l は、式 (5)、(6) を用いて、

$$\tan \phi_l = \frac{dz}{dy} = \frac{l+l'}{a} \dots \dots \dots (21)$$

と書ける。着鎖点で動揺したときの端部での反力に、仮

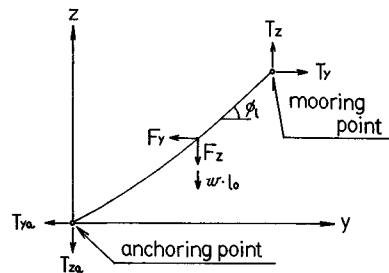


Fig. 3 Forces acting on mooring line.

定②に基づいて式 (21) を適用すると、

$$\left. \begin{aligned} \frac{T_z}{T_y} &= \frac{l_0 + l' + \Delta l'}{a + \Delta a} \\ \frac{T_{za}}{T_{ya}} &= \frac{l' + \Delta l'}{a + \Delta a} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (22)$$

が成立する。z 方向、y 方向の力のつり合いを考えると、

$$\left. \begin{aligned} T_z &= F_z + w l_0 + T_{za} \\ T_y &= F_y + F_{ya} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (23)$$

が成り立ち、式 (22)、(23) を連立させ高次項を無視すると、島田ら⁵⁾と同様に下式により着鎖点の張力が求まる。

$$\left. \begin{aligned} T_z &= w(l_0 + l') + w \Delta l' + \frac{l_0 + l'}{l_0} F_z - \frac{l'(l_0 + l')}{a l_0} F_y \\ T_y &= w a + w \Delta a + \frac{a}{l_0} F_z - \frac{l'}{l_0} F_y \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (24)$$

上式第 1 項は着鎖点で動揺していないときの初期張力を、第 2 項はカタナリー理論による着鎖点変位に線形な静的張力 (文献 6) の線形ばね定数による張力と同じ) を、そして第 3、4 項が鎖の動的張力を示す。

以上述べた定式化は、トート状態の係留鎖に対するものであるが、スラック状態についても同様な議論が可能である。

3. 浮体動揺と係留鎖の相互作用の計算方法

前章で求めた動的鎖張力を考慮し、浮体動揺と係留鎖の相互作用を考える。以下の検討は、より一般的な条件でも可能だが、問題を単純化して次の条件で定式化する。浮体は前後対称に各 1 本の鎖でカタナリー係留され二次元的動揺をし、定常外力は作用しないとする。

(1) 係留鎖の慣性力が浮体に及ぼす力

Fig. 4 の後方の係留鎖を考える。2. の検討より浮体着鎖点に作用する鎖の慣性力による力は、着鎖点での加速度に線形な次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} T_{zr} &= A_{zz} \cdot \ddot{z}_r + A_{zy} \cdot \ddot{y}_r \\ T_{yr} &= A_{yz} \cdot \ddot{z}_r + A_{yy} \cdot \ddot{y}_r \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (25)$$

ここで、 A_{zz} などは係留鎖の物性および初期状態で決まる定数である。一方、浮体重心でのサージ、ヒープ、ピッ

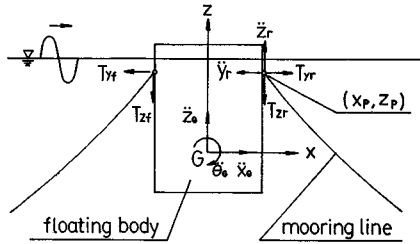


Fig. 4 Forces exerted by mooring line.

チ方向の加速度を、 $\ddot{x}_c, \ddot{z}_c, \ddot{\theta}_c$ と書くと、

$$\left. \begin{aligned} \ddot{z}_r &= \ddot{z}_c - x_p \ddot{\theta}_c \\ \ddot{y}_r &= -\ddot{x}_c - z_p \ddot{\theta}_c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (26)$$

となり、これと類似の関係が前方の係留鎖にも成立する。着鎖点に作用する力を浮体重心回りの力として表わすと、

$$\left. \begin{aligned} G_x^i &= T_{yr} - T_{yf} \\ G_z^i &= -T_{xr} - T_{zf} \\ G_\theta^i &= z_p(T_{yr} - T_{yf}) + x_p(T_{xr} - T_{zf}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (27)$$

となるので、式 (25), (26) を用いて、

$$\left. \begin{aligned} G_x^i &= -2 A_{yy} \ddot{x}_c - 2 |x_p A_{yz} + z_p A_{yy}| \ddot{\theta}_c \\ G_z^i &= -2 A_{zz} \ddot{z}_c \\ G_\theta^i &= -2 |x_p A_{zy} + z_p A_{yy}| \ddot{x}_c \\ &\quad - 2 |x_p^2 A_{zz} + x_p z_p (A_{yz} + A_{zy}) + z_p^2 A_{yy}| \ddot{\theta}_c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (28)$$

と整理される。

(2) 浮体動揺方程式の解法

以上より、係留鎖の動的挙動を考慮した浮体動揺方程式は、次のようにマトリックス表示される。

$$\begin{aligned} & \{[M] + [A] + [G^i]\} \{\ddot{x}\} + \{[B]\} \{\dot{x}\} + \{[C]\} \{x\} \\ & + \{F^v(\dot{x})\} + \{F^{MD}(\dot{x})\} + \{F^{MC}(x)\} \\ & = \{F^E(t)\} + \{F^S(t)\} \dots\dots\dots (29) \end{aligned}$$

ここに、 $[M]$ ：浮体の質量係数、 $[A]$ ：浮体の付加質量係数、 $[G^i]$ ：係留鎖の慣性力係数で式 (28) の-を+に入れかえたもの、 $[B]$ ：浮体の造波減衰係数、 $[C]$ ：浮体の復元力係数、 $\{F^v(\dot{x})\}$ ：浮体の粘性減衰力、 $\{F^{MD}(\dot{x})\}$ ：係留鎖の抗力、 $\{F^{MC}(x)\}$ ：係留鎖の静的復元力、 $\{F^E(t)\}$ ：浮体に作用する波強制力、 $\{F^S(t)\}$ ：浮体に作用する定常外力であり、下線部が係留鎖の動的影響項である。

式 (29) は、

$$\{[M] + [A] + [G^i]\} \{\ddot{x}\} = \{F(\dot{x}, x, t)\} \dots\dots\dots (30)$$

と書けるので、ルンゲ・クッタ・ジル法などの数値積分により容易に解が求まる。

4. 円柱浮体の波浪中動揺実験と理論解析

(1) 実験方法

実験は Fig. 5 に示す前後各 1 本の鎖で係留した円柱模型を用いて行った。模型は塩化ビニール製で、Table 1

の諸元を有する。

係留鎖の物性値および係留状態を、Table 2 に示す。

1. で述べたように、係留鎖の動的挙動が浮体動揺に与える影響を検討した実験は、中嶋ら²⁾が実施したものなどに限られている。中嶋らの実験は今回の模型とほぼ同程度の大きさの模型を用いているが、係留鎖は水中単位長さ質量が 194 g/m、1 リンクの長さが 34.5 mm と比較的大きなサイズを使用している。今回使用した鎖は上記の値がおおの 34 g/m、6 mm であり、比較的細く軽量の係留鎖の動的影響の検討を実験目的の 1 つにした。また、係留鎖のカテナリー理論による静的復元力特性を Fig. 6 に示す。図中の I, P 点が係留鎖の初期状態であり、かなりトートな張り方であるのがわかる。

実験は周期 1.1~1.4 s、波高 3.3~3.5 cm の規則波を用いて行った。同じ条件で複数回の実験を行った場合もあるが、実験の再現性は良好であった。なお入射波高は模型を設置しない状態であらかじめ計測した値を用いた。

模型は重心位置にポテンシオメーター式の動揺計を取り付け変位量を計測した。模型の動揺中は、動揺計可動部もこれと同様な運動をするので、理論解析では動揺計可動部の質量を考慮して計算した。また、動揺計可動部

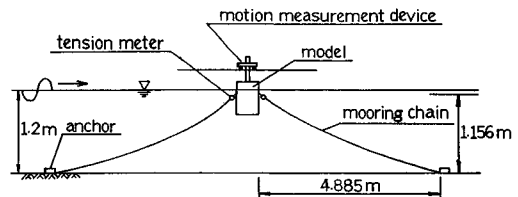


Fig. 5 Configuration of experiment.

Table 1 Specification of model.

Diameter	31.8 cm
Draft	29.8 cm
Height of C.G. above bottom	11.7 cm
Mass	23.68 kg
Radius of gyration	12.8 cm

Table 2 Specification of mooring line.

Length	5.037 m
Init. vertical distance	1.156 m
Init. horizontal distance	4.885 m
Mass per unit length (in air)	0.0343 kg/m
Ditto (in water)	0.0298 kg/m
Volume per unit length	$4.47 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}$
Init. tension	5.26 N
Length of unit rink	6.0 mm
Breadth of unit rink	4.0 mm

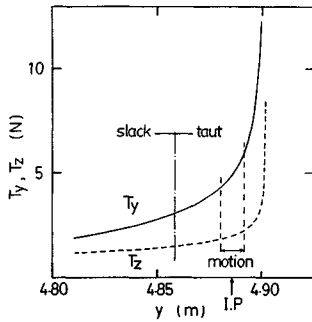


Fig. 6 Static reaction curve of mooring line.

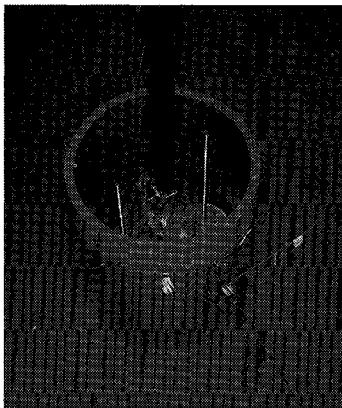


Photo 1 Moored floating cylinder.

の摩擦も計測したが、模型に作用する波強制力の2%以下と無視できる値であった。係留鎖張力は着鎖点近傍に容量5 kgf (49.1 N) のリング式張力計を設置して計測した。こうした計測器はA/D変換器と接続し、0.05 s間隔でサンプリングした計測値をデジタル化し、結果の処理を行った。

実験時の円柱模型の状況を Photo 1 に示す。

(2) 理論計算方法

2., 3. で定式化した係留鎖の動的解析法について、実験結果と比較するための理論計算を行う。

動的解析に必要な係留鎖の付加質量係数 C_m および抗力係数 C_D は、鎖の強制動揺実験から求めるのが最善だが、今回これは実施していないので、既往の研究を参考に決めた。安藤⁷⁾ は1リンクの長さが3, 21, 42 cmの鎖の強制動揺実験を行い、3 cmの鎖は計測した力が小さく信頼できるデータが得られないとしているが、他の場合から $C_D=2.0\sim 3.0$, $C_m=2.0\sim 2.5$ と推定している。今回用いたような小型の鎖について既往の実験・計算で C_D , C_m を報告した例はないので、安藤⁷⁾ の実験結果とほぼ等しい島田ら⁵⁾・安藤ら⁸⁾ が計算で使った $C_D=2.2$, $C_m=1.87$ を用いて計算を行う。また C_D および C_m を変化させて計算を行い、こうしたパラメーターが鎖の動的挙動に与える影響も検討する。

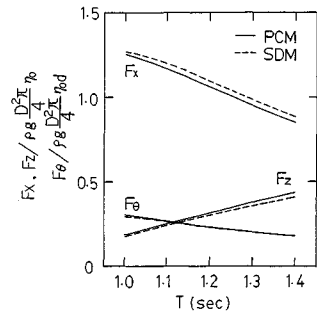


Fig. 7 Comparison between PCM and SDM.

浮体の流体力係数および波強制力は、厳密解が得られる円柱に対する領域分割法 (Potential Continuation Method, PCM) により求めた。Fig. 7にはPCMによる波強制力を、円柱を88要素に分割して行った特異点分布法 (Singularity Distribution Method, SDM) による計算結果と比較したが、両者がよく一致するのがわかる。波漂流力については、今回実験した波浪条件では、波長に比べ浮体寸法が小さいのでこれを無視した。

さらに、ヒーブとピッチ動揺の固有周期が使用した波周期に近い場合、自由動揺実験⁶⁾ を行い速度を \dot{x} とすると $A\dot{x} + B|\dot{x}|\dot{x}$ (A, B 定数) なる形の非線形な粘性減衰力を求めて計算で考慮した。

(3) 実験値と計算値の比較

a) 実験の着鎖点変位による鎖張力の検討

実験で計測された重心での浮体変位より、着鎖点での変位・速度・加速度を求め、これを用いてカテナリー理論による静的鎖張力および2.の方法による動的鎖張力を計算し、実験の鎖張力と比べた。

まず、重心での浮体変位から式(26)と同様の変換を行い着鎖点での変位を求める。速度・加速度を求めるには変位データが時間 Δt 間隔の離散値のため数値微分が必要である。通常の差分式でこれを行うと、計測誤差が増幅され特に加速度でばらつきが著しくなる。そのため、ここでは連続する5個の変位データに最小2乗法で放物線をあてはめ、この関数を微分することで平滑化した速度・加速度を求めて⁹⁾、鎖張力の計算に使った。

① 係留鎖の動的挙動の影響

入射波周期1.25, 1.4 s時の前後の係留鎖について、着鎖点での変位、静的解析による張力と実験時の張力の比較、動的解析による張力と実験時の張力の比較を、Fig. 8 に示す。

上段は着鎖点変位の図であるが、Fig. 6 のようになりトートな係留をしているので、着鎖点の水平変位 Δy はわずかであり、鉛直変位 Δz が大きいのがわかる。

中段の図は、カテナリー理論で着鎖点変位から非線形な静的張力を求め、実験時の張力と比べたものである。

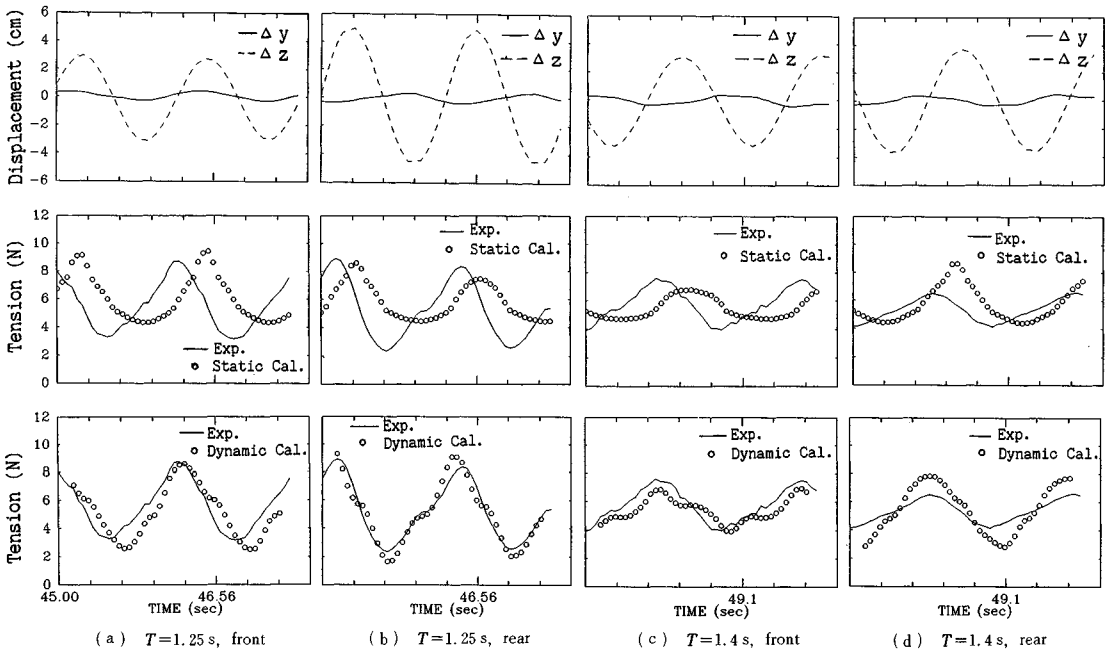


Fig. 8 Comparison of mooring line tension based on mooring point displacement in the experiment.

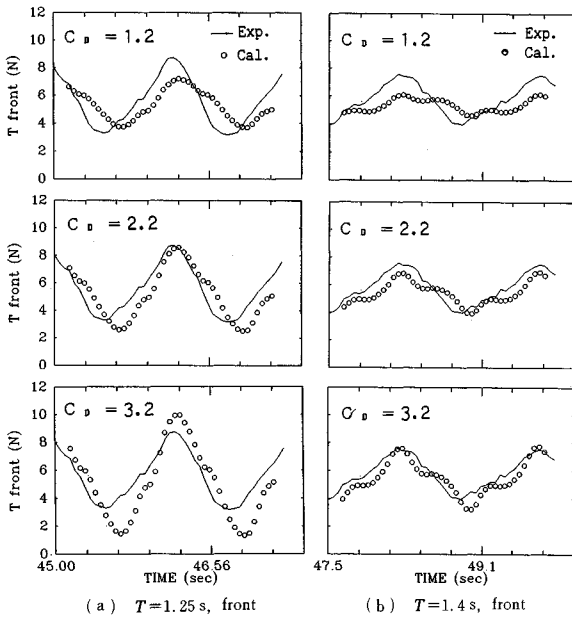


Fig. 9 Effect of C_D on mooring tension ($C_m=1.87$).

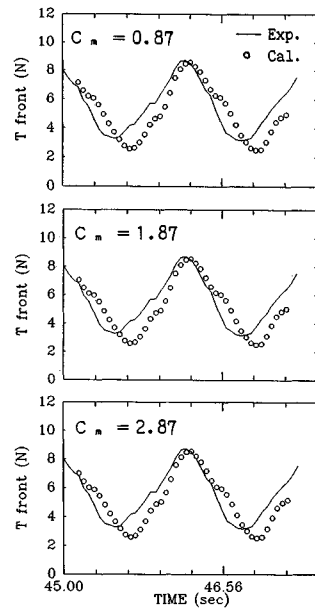


Fig. 10 Effect of C_m on mooring tension ($T=1.25$ s, front, $C_D=2.2$).

静的張力は着鎖点変位と軌を一にして増減しているが、実験時の張力と比べるとすべてのケースで約 90° 位相が進んでおり、トートな係留をした場合に静的解析で張力を求める方法に根本的な問題があるのがわかる。

下段の図は、2. で示した動的解析を適用した場合の実験値との比較である。静的解析時に顕著だった位相の

ずれが解消しており、速度・加速度を求める際の誤差や C_D , C_m に含まれる誤差を考えると、提案した動的解析が良好に実験値を推定しているのがわかる。

② 動的鎖張力の計算に与える C_D , C_m の影響

C_D の影響をみるために Fig. 9 に $C_m=1.87$ を一定にして、 C_D を 1.2, 2.2, 3.2 と変化させて動的計算をし

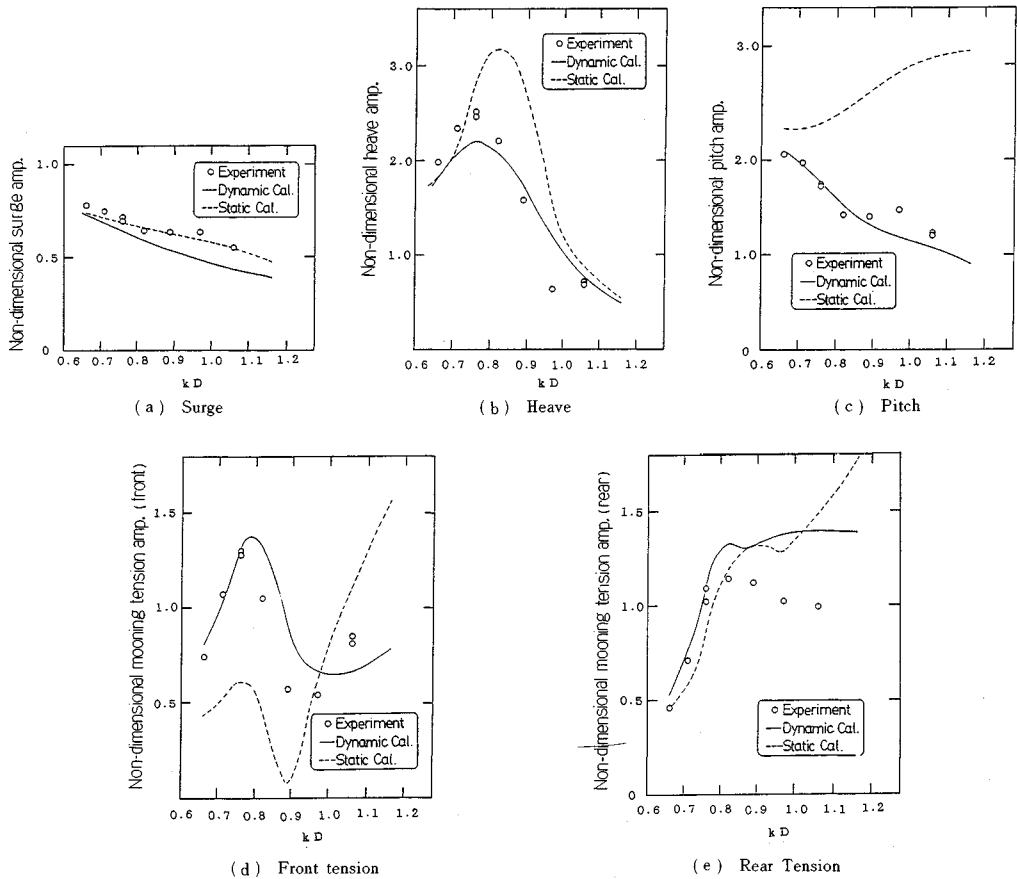


Fig. 11 Response of motion and mooring line tension.

た場合の結果を示す。 C_D が増加するにつれて、張力の振幅が増加することがわかる。

次に C_m の影響をみるために、 Fig. 10 に $C_D=2.2$ と一定にして、 C_m を 0.87, 1.87, 2.87 と変化させた場合の結果を示す。計算された張力はあまり変化しておらず、鎖張力に与える C_m の影響が小さいことがわかる。これについては、小田ら³⁾も質点系モデルによる解析で同様の知見を述べている。

このように動的鎖張力は C_D 値によって敏感に変化するるので、計算に用いる C_D は精度の高い値を用いる必要がある。

b) 浮体動揺と係留鎖張力の比較

(2) に述べた条件のもと 2., 3. の定式化で得られた式 (29) を、ルンゲ・クッタ・ジル法により時間領域で解いて動揺量と鎖張力を計算した。0.01 s および 0.05 s の時間刻み幅で計算したところ、両者の結果に有意な差はなかったため、0.05 s を用いて解析した。 Fig. 11 に浮体重心での動揺変位および係留鎖張力の定常応答値について、動的解析結果および静的解析結果と実験値を比

較した。グラフ縦軸は、動揺の両振幅変動値を入射波高（ピッチについては、波数×入射波高）で、または張力の両振幅変動値を初期張力 (5.26 N) で無次元化して示した。

図からわかるように、動的解析方法は非常に単純な定式化を行っているにもかかわらず、実験値を十分良好に推定している。

また、鎖の動的挙動を考慮せずカタナリー理論による静的張力を用いて応答解析を行うと、 Fig. 11 (d), (e) の係留鎖張力の応答のみならず、(b), (c) の浮体動揺の応答についても、実験と著しく異なった結果となってしまう。

5. 結 語

暴風時などに生じるトートな係留状態での浮体動揺と係留鎖張力の推定において、鎖の動的挙動を考慮した簡便な計算方法を提案した。そして、今までの研究で用いられたものより細く軽量の係留鎖を用いた円柱浮体の波浪中動揺実験を行って、提案した動的解析方法の妥当性、

鎖の抗力係数・付加質量係数が動的張力に及ぼす影響およびカタナリー理論による静的解析方法の問題点について検討した。

きわめて単純な定式化を行っているにもかかわらず、本法は良好に実験値と一致し、実用計算法として有益と思われる。

また、静的解析法では、係留鎖張力の推定だけでなく、浮体動揺量の推定でも大きな誤りを犯すおそれがある。

参 考 文 献

- 1) 山崎 晶：浮体の対称性を利用したグリーン関数計算の効率化，土木学会論文集，第 405 号，pp.255～258，1989.
- 2) 中嶋俊夫・元良誠三・藤野正隆：係留浮体の運動を考慮した係留ラインの動的挙動について，日本造船学会論文集，第 150 号，pp.266～277，1981.
- 3) 小田一紀・富岡健一：係留鎖の動的張力に関する基礎的研究，第 27 回海岸工学講演会論文集，pp.275～279，1980.
- 4) 小寺山亘：係留浮体の運動と係留鎖張力について，西部造船学会報，第 53 号，pp.85～107，1976.
- 5) 島田 潔・小林正典・日根野元裕：係留ラインの張力に対する動的影響について，西部造船学会報，第 60 号，pp.113～127，1980.
- 6) 元良誠三監修：船体と海洋構造物の運動学，成山堂書店，pp.79～82，1982.
- 7) 安藤定雄：索・鎖の流体力について（その 1 部分模型），西部造船学会報，第 50 号，pp.99～110，1975.
- 8) 安藤定雄・加藤俊司：鉄鎖係留ラインの静的張力特性と動的変動張力特性について，西部造船学会報，第 66 号，pp.191～207，1983.
- 9) C.R.ワイリー（富久泰明訳）：工業数学上，ブレイン図書出版，pp.131～133，1970.

(1989.8.7・受付)