

アンカーに繫留された浮体の挙動

Behaviors of Moored Structures on the Sea

浦 環*・戸島 敏雄*・高橋 幸伯*
Tamaki URA, Toshio TOSHIMA and Yukinori TAKAHASHI

1. はじめに

アンカーによって繫留された船舶や海洋構造物等が、風や潮流にさらされ走錨を起こすことは、海難防止や沿岸の環境保全の観点から大きな問題とされてきた。走錨現象を解析的に取り扱うには、海底のアンカー、水中の鎖、海上の浮体3者を同時に考えねばならず困難な面が多い。それぞれ個々の挙動の研究および端点を固定した鎖や浮体の挙動の研究はこれまでになされてはいるが、これらを一つの系として考え、また走錨での重要な要素となる鎖の海底面上の変形をも考慮した3次元解析は行われてはいない。ここではまず、繫留系の運動解析法を述べ、次に突風を受ける繫留系のシミュレーションを行う。

2. 数値解析法

係留鎖を図1のように m 個の要素に分割し、質量および外力を $m+1$ 個の節点に離散化させる。鎖の伸び、曲げおよび振り剛性による影響は小さく、ここでは無視する。各質点での運動方程式を、座標 X と張力 T を未知数として、両端での境界条件と、各要素の長さは不変という等長条件とを用いて解く。

k 点は繫留鎖の海底との接点であり、領域 C_B は海底上にあり海底土より力を受け、運動は xy 平面内に拘束されている。 j 点は移動する要素としない要素の境界であり、領域 C_{BN} は静止しており、 C_{BS} は海底上を移動する。領域 C_S は、流体中を3次元運動する。ここで、 j および k は運動により変化することに注意する。

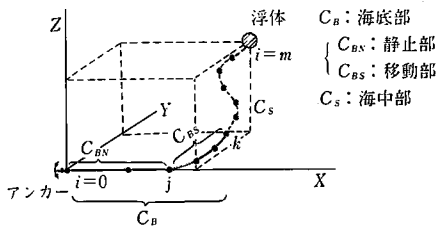


図1 繫留系の離散化

*東京大学生産技術研究所 第2部

離散化された運動方程式および等長条件は、

$$[M]_i \ddot{X}_i = T_{i+1} C_{i+1} - T_i C_i + F_i \quad i = 0 \sim m \quad (1)$$

$$l_{i+1}^2 = (X_{i+1} - X_i)^2 \quad i = 0 \sim m-1 \quad (2)$$

鎖の内部減衰は無視する。ここで、

$[M]_i$: 付加質も考慮した質量マトリックス

C_i : 要素 i の方向余弦 E_i : 外力

T_i : 要素 i の張力 l_i : 要素 i の長さ

X_i : 座標ベクトル

時間間隔を Δt として時間ステップ n での(1)式を、中心差分を用いて書き直すと、

$$X_i^{n+1} - 2X_i^n + X_i^{n-1} = T_{i+1}^n S_i^n - T_i^n R_i^n + U_i^n \quad (3)$$

$$S_i^n = [M_i]^{-1} C_{i+1}^n \times (\Delta t)^2$$

$$R_i^n = [M_i]^{-1} C_i^n \times (\Delta t)^2$$

$$U_i^n = [M_i]^{-1} F_i^n \times (\Delta t)^2$$

$X_i^n, X_i^{n-1}, S_i^n, R_i^n, U_i^n$ を与えて、 X_i^{n+1} と T_i^n を求める。 $X_i^{n+1} - X_i^n = \Delta X_i^{n+1}$ を微小だとして、(2)、(3)式を変形すれば、

$$\Delta X_i^{n+1} = X_i^n - X_i^{n-1} + T_{i+1}^n S_i^n - T_i^n R_i^n + U_i^n \quad (4)$$

$$l_{i+1}^2 = (X_{i+1}^n - X_i^n)^2 + 2(X_{i+1}^n - X_i^n)(\Delta X_{i+1}^n - \Delta X_i^n) \quad (5)$$

(5)式に(4)式を代入して、漸化式

$$D_i T_{i+2}^n + E_i T_{i+1}^n + F_i T_i^n + G_i = 0 \quad (6)$$

を得る。ここで、

$$D_i = 2(X_{i+1}^n - X_i^n) S_{i+1}^n$$

$$E_i = -2(X_{i+1}^n - X_i^n)(R_{i+1}^n + S_i^n)$$

$$F_i = 2(X_{i+1}^n - X_i^n) R_i^n \quad (7)$$

$$G_i = 3(X_{i+1}^n - X_i^n)^2 + 2(X_{i+1}^n - X_i^n)(U_{i+1}^n - U_i^n) - l_{i+1}^2$$

漸化式(6)は、

$$T_{i+1} = \alpha_{i+1} T_{j+1} + \beta_{i+1}$$

$$\alpha_{i+2} = -(E_i \alpha_{i+1} + F_i \alpha_i) / D_i$$

$$\beta_{i+2} = -(E_i \beta_{i+1} + F_i \beta_i + G_i) / D_i$$

とおくと、満足される。

アンカーが移動するとき $i = j = 0$ の境界条件は、 $\alpha_j = 0, \alpha_{j+1} = 1, \beta_j = 0, \beta_{j+1} = 0$ で満足される。アンカーが移動しないとき ($j \geq 0$) の境界条件は、 $\alpha_{j+1} = 1, \alpha_{j+2} = -c/b, \beta_{j+1} = 0, \beta_{j+2} = -a/b$ で表される。

ここで、

$$\begin{aligned}
 a &= (X_{j+1}^{n+1} - X_j^n)^2 + 2(X_{j+1}^{n+1} - X_j^n)U_{j+1}^n - l_{j+1}^2 \\
 b &= 2(X_{j+1}^{n+1} - X_j^n)S_{j+1}^n \\
 c &= -2(X_{j+1} - X_j)R_{j+1}^n
 \end{aligned}$$

得られた座標、張力は1次の近似値であり、以下の手続きにより修正する。修正値を $\delta X_i^{n+1}, \delta T_i^n$ とすると、

$$\begin{aligned}
 (3), (2) \text{式より} \\
 \delta X_i^{n+1} = \delta T_i^n S_i^n - \delta T_i^n R_i^n \quad (8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 l_{i+1}^2 &= (X_{i+1}^{n+1} + X_i^{n+1})^2 \\
 &+ 2(X_{i+1}^{n+1} - X_i^{n+1})(\delta X_i^{n+1} - \delta X_i^{n+1}) \quad (9)
 \end{aligned}$$

(9)式に(8)式を代入すると、(6)式と同様に

$$\tilde{D}_i \delta T_{i+2}^n + \tilde{E}_i \delta T_{i+1}^n + \tilde{F}_i \delta T_i^n + \tilde{G}_i = 0 \quad (10)$$

なる漸化式を得る。 $\tilde{D}_i, \tilde{E}_i, \tilde{F}_i$ は(7)式において X_i^n を $X_i^n + \delta X_i^{n+1} = \tilde{X}_i^{n+1}$ に置き換えて得られる。ただし、 $\tilde{G}_i = (X_{i+1}^{n+1} - X_i^{n+1})^2 - l_{i+1}^2$ である。

3. 系に作用する外力、付加慣性力、および減衰力

3.1 海中部

領域 C_s の要素(i)に作用する力 F_i^* は、浮力、重力、および動的な流体力 F_{wi}^* であり、

$$\begin{aligned}
 F_{wi}^* &= f_{Ti}^* + f_{Ni}^* \\
 f_{Ti}^* &= \rho C_T d_i |V_{Ti}| |V_{Ti}| / 2 \\
 f_{Ni}^* &= \rho C_N d_i |V_{Ni}| |V_{Ni}| / 2 \\
 V_{Ni} &= V_{ri} - (V_{ri} \cdot C_i) C_i \\
 V_{Ti} &= (V_{ri} \cdot C_i) C_i, \quad V_{ri} = V_{wi} - V_C
 \end{aligned} \quad (11)$$

と表すことができる。ただし、 f_{Ti}^* : 接線方向流体力、 f_{Ni}^* : 法線方向流体力、 ρ : 流体密度、 d_i : 要素直径、 C_T : 接線方向抵抗係数、 C_N : 法線方向抵抗係数、 V_T : 接線方向速度ベクトル、 V_N : 法線方向速度ベクトル、 V_C : 流速、 V_{wi} : 質点 i と $i+1$ の平均速度ベクトルである。なお以下の計算では、 $C_T=0.1, C_N=1.4$ とする³⁾。

要素(i)に作用する付加慣性力 F_{ci}^* は、

$$F_{ci}^* = e_i [B]_i$$

と表せ、 $e_i = C_w \rho A_i l_i, [B]_i = C_i^* C_i^{*T}, C_i^*$ は C_i の直交ベクトルであり、 A_i : 断面積、 C_w : 付加質量係数である。以下の計算では、 $C_w = 0.01$ とする。

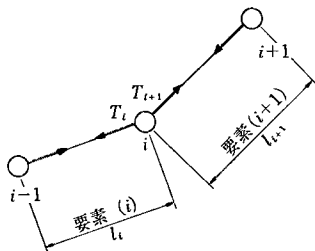


図2 添字*i*の定義

3.2 海底面

領域 C_{BS} で土より受ける抵抗力 $F_{Si}^* = (F_{Sxi}, F_{Syi}, 0)$ は、図3に示される実験結果より、

$$\begin{aligned}
 F_{Sxi} &= F_{Ni} \sin \phi - F_{Ti} \cos \phi \\
 F_{Syi} &= -F_{Ni} \cos \phi - F_{Ti} \sin \phi \\
 F_{Ni} &= C_{SN} W l_i \sin(\theta - \phi) / 2 \\
 F_{Ti} &= C_{ST} W l_i \cos(\theta - \phi) / 2
 \end{aligned} \quad (13)$$

で与えられる。ここに、 F_N : 法線方向抵抗力、 F_T : 接線方向抵抗力、 C_{SN} : 法線方向抵抗係数、 C_{ST} : 接線方向抵抗係数、 W : 単位長重量である。 C_{SN}, C_{ST} は、図3の2種類の値の平均をとって $C_{SN}=2.0, C_{ST}=1.0$ とする。付加慣性力は無視する。

3.3 浮体に作用する力

ここでは簡単のために、風による外力 F_{WD} だけが浮体に作用すると考え、

$$F_{WD} = 0.076 \times A_W \times (V_W - V_F)^2 \quad (14)$$

ここに、 A_W : 風圧面積、 V_W : 風速、 V_F : 浮体速度である。

3.4 アンカーに作用する力

移動するアンカーには、把駐力 F_A と、付加慣性力 F_{Ai} が作用する。アンカーに作用する付加慣性力に関する詳しい議論はこれまでなされていないが、ここでは簡単のために、海底土とアンカーとが一体となって摩擦角 ϕ で海底を滑ると考え

$$F_{Ai} = -F_A \ddot{X}_0 / (\tan \phi \cdot g) \quad (15)$$

とする。 \ddot{X}_0 はアンカーの加速度、 g は重力加速度である。以後の計算では、 $\phi = 34.4^\circ$ とする。

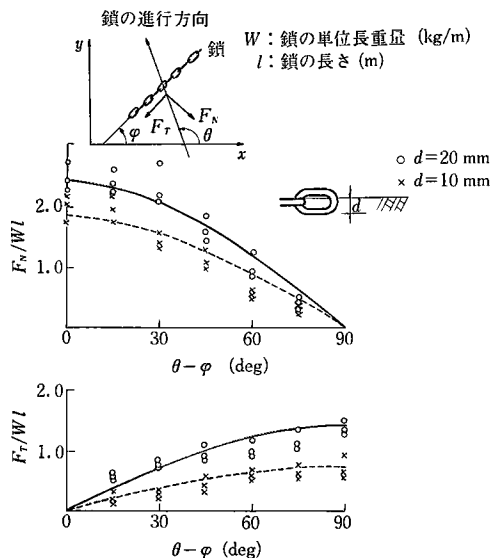


図3 海底面上で鎖に作用する力

研究速報

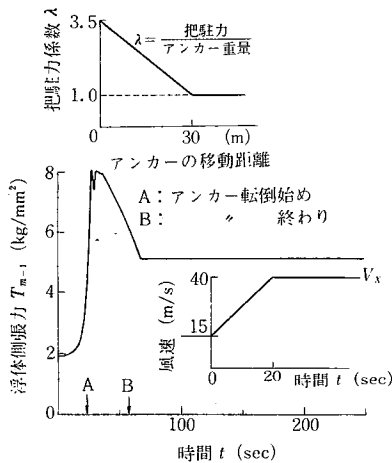
4. 走錨のシミュレーション

表1に示す船を想定した球を水深20mの海上に繋留した場合を考える。計算条件として、 $m=16$, $\Delta T=0.01$ secを用い、 x 方向に15 m/sの風がある時の定常状態(静的平衡状態)を初期条件とする。

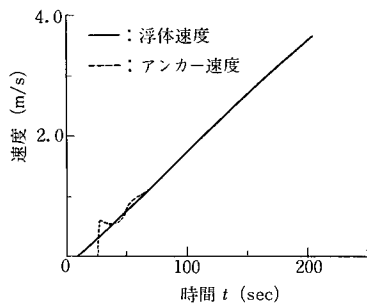
Case 1: x 方向に突風が吹く場合を想定した2次元問題を解析する。JIS型アンカーのように不安定なアンカーは爪の長さの10倍程度移動することによって、シ

表1 繋留系の詳細

浮体	DWトン数	9000 (t)
	風圧面積	218 (m ²)
	艀装数	1090
繋留鎖	単位長重量	72 (kg/m)
	呼び径	5.8 (cm)
	全長	200 (m)
アンカー	重量	4 (t)
	把駐力係数	3.5



(a) 浮体側張力の変化 (Case 1)

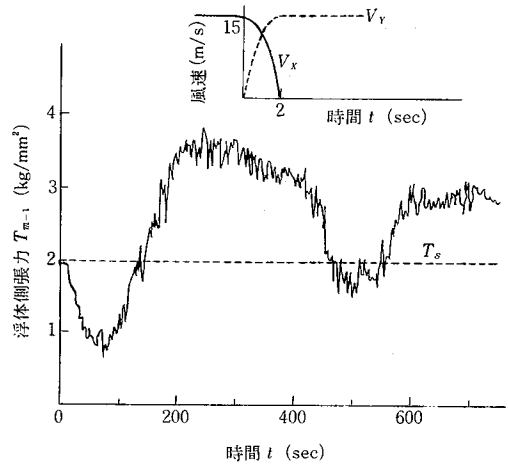


(b) 速度変化 (Case 1)

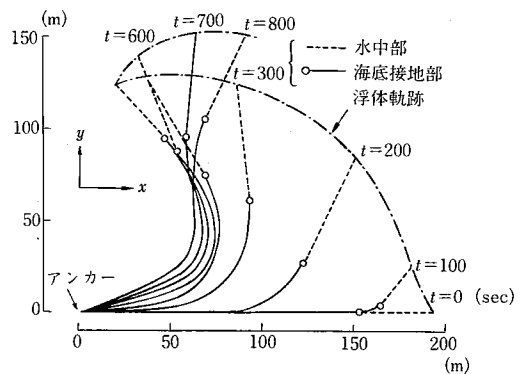
図4

ャックまわりに回転し、転倒する。このとき図4に示すように、移動距離に対し把駐力が減少する。浮体側張力 T_{m-1} を図4(a)に、浮体とアンカーの速度を(b)に示す。アンカーは動き始めると急に浮体側に引き寄せられ、浮体より速くなったところで速度が落ち、同時に張力も減少する。その後、アンカーと浮体が並進運動を始めると急に張力は一定となる。

Case 2: 風向きが x 方向から y 方向へと大きさ一定で、2 sec 以内に変わる場合の T_{m-1} を図5(a)に示す。図5(b)は、鎖の変形形状の xy 平面投影図である。最初 x 方向の力の減少により鎖がゆるみ T_{m-1} は少くなるが、やがて浮体の y 方向への変位が増し、浮体の大きな慣性力のために、 T_{m-1} は同じ外力下での静的張力 T_s の約 1.8 倍にも達する。その後張力は、 T_s のまわりを振動しながら収束して定常状態になる。またこの程度の風速ではアンカーは移動しないので、海底面上



(a) 浮体側張力の変化 (Case 2)



(b) 浮体・鎖の移動図 (Case 2)

図5

に鎖が湾曲したままになっていることに注意する。

Case 3: Case 2 で y 方向の風速を 30 m/s とした場合で、アンカー端の張力が把駐力より大きくなり、走錨が起る。ここではアンカーは転倒しない安定なアンカーとする。Case 2 と同様のグラフを図 6 (a), (b) に示す。 $t = 84$ sec で走錨が始まり、その後しばらくして張力はほぼ一定値となる。その時繫留系を上から見ると直線状をしており、その方向に浮体とアンカーは等加速度で並進する。

Case 4: Case 3 と同じ条件で風向きが変化し、 $t = 250$ sec において風速が 30 m/s から 20 m/s にステップ状に落ちた場合の解析結果を図 6 (a) に破線で示す。図 7 は浮体およびアンカーの鎖方向の移動速度 V_T を示す。浮体の慣性力の影響のために、外力が小さくなくても張力は急には変化しない点に注意する。

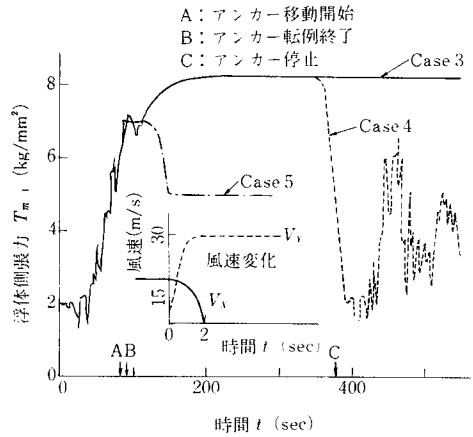
Case 5: 外力条件は Case 3 と同じだが、Case 1 のようにアンカーは移動により転倒する。 T_{m-1} を図 6(a) に鎖線で示すが、Case 1 と同様に、張力はアンカー転倒後減少し、その後急に一定となる。またその後、Case 4 と同様に、風速が 20 m/s に下がったとしても、アンカーが転倒しているために把駐力が小さく、アンカーは止まらずに走錨が続く。

5. ま と め

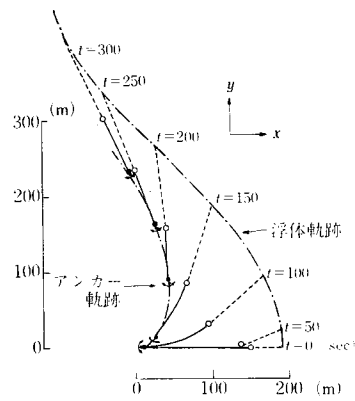
以上、浮体-繫留鎖-アンカーからなる繫留系の運動解析を、懸垂線理論を用いた数値解法により行った。浮体に作用する力、アンカーに作用する力等に簡略化を行ったが、繫留鎖の海底面上での面内変形の様相、走錨時の浮体の運動、張力変動等がここで明確にされた。解析例から、繫留された浮体に作用する風力、潮力が方向変化すると、浮体の慣性力により大きな張力が生じることが示された。またいったん走錨すると、不安定なアンカーに繫留された浮体は、把駐力減少のために容易に停止しないことが示された。(1979年11月15日受理)

参 考 文 献

- 1) Walton, T. S. and Polachek, H., "Calculation of Transient Motion of Submerged Cable" Mathematics of Computation 14, 1960, pp.69 ~ 72.
- 2) Richtmyer, R. D. and Morton, K. W., "Difference Method for Initial Value Problem" Interscience, 1967.
- 3) 吉田, 米家「有限要素法による水中線状構造の応答解



(a) 浮体側張力の変化 (Case 3, 4, 5)



(b) 浮体・鎖・アンカーの移動図 (Case 3)

図 6

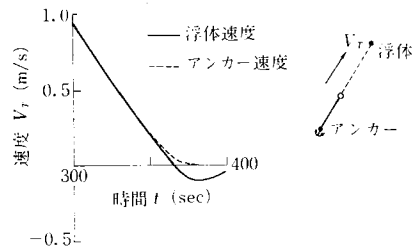


図 7 速度変化 (Case 4)

析」日本造船学会論文集 Vol. 144, 1978, pp 195 ~ 204

- 4) 浦, 山本「アンカーの安定性の研究」東京大学生産技術研究所報告, Vol. 27, No. 4, 1978.