

海中で係留された線状構造物の波浪応答解析について

Dynamic response of a submerged line structure moored by cables under the action of waves

水澤 富作*・金原 茂行**

Tomisaku Mizusawa, Shigeyuki Kinbara

This paper presents dynamic response of a submerged line structure under the action of periodical waves using the finite element method. The effects of wave period, wave height and bouancy force on the dynamical behaviors of submerged floater and mooring cables are analysed.

Key Words: Dynamic Response, Wave, Submerged Line Structure, Cable, FEM

1. はじめに

柔軟なテジョン構造である海洋ケーブル、パイラー、パイプラインや海中トンネルなどの線状構造物は、海洋構造物の主要な構造要素として用いられてきている。このような海中で係留された線状構造物の波浪応答解析では、複雑な環境荷重や大変形に伴う幾何学的非線形性などを考慮しなければならない。また、このような構造物の固有周期が、海洋波の卓越周期に近いので、波浪応答性状を知ることが、設計上重要になってくる。これまでも、ガリ-理論、フット・マス法、有限要素法を用いた理論的研究や実験的研究が行われてきているが¹⁻³⁾、線形問題としての周期応答を取り扱ったものが主である。

本研究では、Fig. 1に示すような2点で係留された浮力の大きな線状構造物の波浪応答特性を、質点とケーブル構造から成る2次元モデルを用いて解析している。係留ケーブルの幾何学的非線形性や非保存力としての抗力を考慮した有限要素モデルを、仮想仕事の原理より導いている。なお、波浪荷重は、Airy波理論を用いて求めている。初期つり合形状は、Viscous Relaxation法を、また動的応答解析には、反復法を組合わせたNewmark法を用いている。本手法を用いて、水中浮力体とケーブル構造から成る2次元モデルの波浪応答解析より、水中浮力体や係留ケーブルの変位応答や張力応答に与える波周期、波高や浮力などの影響について明らかにしている。

2. 式の定式化

ケーブルにより2点係留された水中浮体の運動方程式を、3次元有限変位弾性理論、Total Lagrangian表現と仮想仕事の原理より導き、これに基づくケーブル要素の定式化について述べる。式の定式化にあたり、次の解析仮定を設ける。(1) ケーブルの断面は十分小さく、また単軸応力を仮定する。(2) ケーブルの曲げとねじりの影響は無視する。(3) ケーブル軸に垂直な平面は、変更後もこの軸に垂直である。(4) 無応力でのケーブルの初期形状を、変形後の形状における応力とひずみの表現に用いる(Total Lagrangian表現)。(5) 構造減衰は流体減衰に比べて小さいのでこれを無視する。(6) 水中浮力体は剛球体であり、波長にくらべて十分小さい。

2.1 ケーブルの形状、応力とひずみ⁴⁾

Fig. 2に示すように、全体座標系として、基底ベクトル e_1, e_2, e_3 を持つ直交座標系 (X_1, X_2, X_3) を用いる。いま、時刻 t_0 でのケーブル要素の初期形状を C_0 とし、外力の作用により時刻 t での変形後の形状を C とする。また、 C_0 上の任意の点 P_0 が C 上の P に変位するものとする。ケーブルを曲線座標系 (ξ_1, ξ_2, ξ_3) で表せば、 C 上の点 P は、 C_0 上の P_0 の座標と同じ値で表せる。 P_0 と P の位置ベクトルを全体座標系で r と R で表せば、次式で与えられる。

$$r = X_i e_i, \quad R = Y_i e_i; \quad i=1, 2, 3 \quad \dots (1)$$

ここで、 X_i と Y_i は、それぞれ P_0 と P の座標値を示す。また、 P_0 から P に変位した場合の変位ベクトル u は、次のように与えられる。

$$u = u_i e_i, \quad R = r + u \quad \dots (2)$$

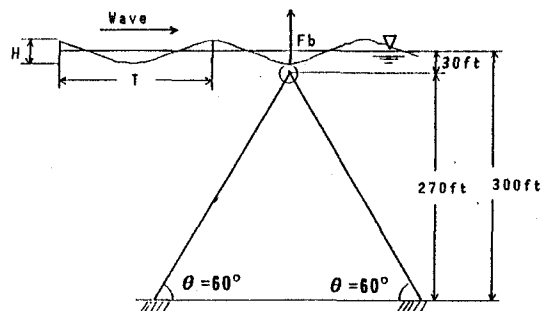


Fig. 1 ケーブルで係留された水中浮力体構造

* 正会員 大同工業大学工学部建設工学科 (457 名古屋市南区白水町40番地)

** 東洋建設株式会社

$$\text{ここで、 } \mathbf{r} = \mathbf{r}(\xi_1, \xi_2, \xi_3), \mathbf{R} = \mathbf{R}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, t), \mathbf{u} = \mathbf{u}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, t) \quad \dots (3)$$

$$\text{である。また、ひずみテンソル、} \gamma_{ij} \text{は、次式で定義される。 } \gamma_{ij} = (1/2)(G_{ij} - g_{ij}) \quad \dots (4)$$

共変メトリックテンソルより求められる3つのひずみ不変量は、

$$I_1 = \mathbf{g}^{rs} G_{rs}, I_2 = G^{rs} g_{rs}, I_3 = G/g; r, s=1, 2, 3 \quad \dots (5)$$

で与えられる。ここで、 $G = \det |G_{rs}|$ 、 $g = \det |g_{rs}|$ である。

$\mathbf{g}^{rs}$ 、 G^{rs} は、反変メトリックテンソルであり、それぞれ次式で定義される。

$$\mathbf{g}^{rs} g_{rt} = \delta_{st}, G^{rs} G_{rt} = \delta_{st}, \delta_{st} = \begin{cases} 1 & ; s=t \\ 0 & ; s \neq t \end{cases} \quad \dots (6)$$

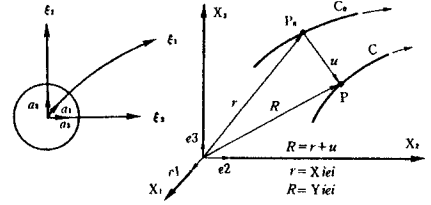


Fig. 2 ケーブルの変形前と変形後の形状と座標系

応力を定義する場合、一般に2つの表現が用いられている。すなわち、

Cauchyの応力テンソル σ^{ij} は、変形後の変位に基づき定義される。一方、Kirchhoffの応力テンソル τ^{ij} は、変形前の形状で定義される。これらの応力テンソル間には、次の関係式が成立する。 $\tau^{ij} = \sqrt{I_3} \sigma^{ij} \quad \dots (7)$

次に、Cauchyの応力テンソルとGreenのひずみテンソルを用いて、等方性弾性材料の構成式を示すと、次式で与えられる。 $\sigma^{ij} = \{E\nu/(1+\nu)/(1-2\nu)\} g^{ij} g^{kl} + \{E/2(1+\nu)\} (g^{ik} g^{jl} + g^{il} g^{jk}) \gamma_{kl} \quad \dots (8)$ ここで、EはYoung係数、 ν はPoisson比である。

C₀上のケーブル要素の初期形状は、ケーブル軸と一致した曲線座標で示される。

$$\mathbf{r}^1 = \mathbf{r}^1(\xi_1) \quad \dots (9)$$

$$\text{したがって、ケーブルの任意点は、次式で与えられる。 } \mathbf{r} = \mathbf{r}^1(\xi_1) + \xi_2 \mathbf{a}_2 + \xi_3 \mathbf{a}_3 \quad \dots (10)$$

ここで、 $\mathbf{a}_2$ 、 $\mathbf{a}_3$ は、曲線座標系での単位ベクトルである。したがって、共変基底ベクトル $\mathbf{g}_1$ は、

$$\mathbf{g}_1 = \partial \mathbf{r} / \partial \xi_1 = \mathbf{r}_{,1}^1 + \xi_2 \mathbf{a}_{2,1} + \xi_3 \mathbf{a}_{3,1} \quad \dots (11)$$

$$\text{で与えられ、またケーブル軸線では、} \xi_2 = \xi_3 = 0 \text{より、} \mathbf{g}_1 = \mathbf{r}_{,1}^1 = \mathbf{a}_1, \mathbf{g}_i = \mathbf{a}_i; i=2, 3 \quad \dots (12)$$

で示される。同様に、変形後の形状Cでのケーブル軸線は、 $\mathbf{R}^1 = \mathbf{R}^1(\xi_1) \quad \dots (13)$ で定義される。したがって、C上の点は、

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}^1(\xi_1) + \xi_2 \mathbf{A}_2 + \xi_3 \mathbf{A}_3 \quad \dots (14)$$

で与えられる。ここで、 $\mathbf{A}_2$ と $\mathbf{A}_3$ は、垂直ベクトルであるが、必ずしも単位ベクトルとはかぎらない。よって、ケーブル軸線上では、 $\mathbf{G}_1 = \mathbf{R}_{,1}^1 = \mathbf{A}_1, \mathbf{G}_i = \mathbf{A}_i; i=2, 3 \quad \dots (15)$

である。ここで、円形ケーブルの断面伸び比を λ_c とし、次式で定義する。 $\lambda_c = D/D_0$ 。ただし、 D_0 とDは、変形前後での直径である。したがって、ケーブル軸線C₀とC上では、

$$g_{11} = a_{11}, g_{22} = g_{33} = 1, g_{ij} = 0 (i \neq j); i, j=1, 2, 3,$$

$$\text{また、} G_{11} = A_{11}, G_{22} = G_{33} = \lambda_c^2, G_{ij} = 0 (i \neq j); i, j=1, 2, 3 \quad \dots (16)$$

となる。単軸応力の仮定より、 τ^{11} のみが存在するので、等方性線形弾性材料の構成式は、次式で与えられる。

$$\tau^{11} = E a^{11} a^{11} \gamma_{11} \quad \dots (17) \quad \text{ただし、} a^{11} = 1/a_{11} \text{である。}$$

2. 2 アイソパラメトリック・ケーブル要素

仮想変位の原理より導かれる高次の補間式を用いたケーブル要素の剛性方程式が次式で与えられる。

$$\int_{s_0} \tau^{11} \delta \gamma_{11} A_0 ds_0 + \int_{s_0} \rho_0 A_0 \ddot{\mathbf{u}}_i \delta \mathbf{u}_i ds_0 - \int_{s_0} \rho_0 A_0 b_{0i} \delta \mathbf{u}_i ds_0 - \int_{s_0} t_{0i} \delta \mathbf{u}_i ds_0 = 0 \quad \dots (18)$$

ここで、第1項は、内力による仮想仕事を示し、第2項以下は、それぞれ慣性力による仕事、物体力(b_{0i})による仕事及び表面力(t_{0i})による仮想仕事を示す。ただし、 ρ_0 は、密度、 A_0 と s_0 は、C₀上でのケーブルの初期断面積と初期長さである。アイソパラメトリック要素モデルでは、座標関数と変位関数に同じ補間関数を用いられる。すなわち、 $\mathbf{u}_i(\xi_1) = \mathbf{L}^1(\xi_1) \mathbf{u}_i^1, \mathbf{X}_i(\xi_1) = \mathbf{L}^1(\xi_1) \mathbf{X}_i^1 \quad \dots (19)$

で仮定される。ただし、Iは要素の節点数を示す。 $\mathbf{L}^1(\xi_1)$ は、補間多項式である。よって、

$$\mathbf{a}_i = (\mathbf{X}_i; \mathbf{e}_i), \mathbf{a}_{i,1} = \mathbf{L}_{,1}^1 \mathbf{X}_i^1; \mathbf{e}_i, \mathbf{A}_i = [(\mathbf{X}_i + \mathbf{u}_i)], \mathbf{A}_{i,1} = \mathbf{L}_{,1}^1 (\mathbf{X}_i^1 + \mathbf{u}_i^1) \mathbf{e}_i; i=1, 2, 3, \dots, N \quad \dots (20)$$

したがって、 $a_{11} = \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_1 = \mathbf{L}_{,1}^1 \mathbf{X}_1^1; \mathbf{e}_1, A_{11} = \mathbf{A}_1, \mathbf{A}_1 = \mathbf{L}_{,1}^1 \mathbf{L}_{,1}^1 (\mathbf{X}_1^1 + \mathbf{u}_1^1) (\mathbf{X}_1^1 + \mathbf{u}_1^1)$ が得られる。また、ひずみ γ_{11} は、 $\gamma_{11} = (1/2) \mathbf{L}_{,1}^1 \mathbf{L}_{,1}^1 (\mathbf{X}_1^1 \mathbf{u}_1^1 + \mathbf{X}_1^1 \mathbf{u}_1^1 + \mathbf{u}_1^1 \mathbf{u}_1^1) \quad \dots (21)$

で与えられる。以上の結果より、仮想ひずみ $\delta \gamma_{11}$ 、仮想変位 $\delta \mathbf{u}_i$ 、 $\ddot{\mathbf{u}}_i$ 及び ds_0 は、次式で与えられる。 $\delta \gamma_{11} = \mathbf{L}_{,1}^1 \mathbf{L}_{,1}^1 (\mathbf{X}_1^1 + \mathbf{u}_1^1) \delta \mathbf{u}_1^1, \delta \mathbf{u}_i = \mathbf{L}^1 \delta \mathbf{u}_i^1, \ddot{\mathbf{u}}_i = \mathbf{L}^1 \ddot{\mathbf{u}}_i^1, ds_0 = \sqrt{a_{11}} d\xi_1 \quad \dots (22)$

これらを式(18)に代入すれば、

$$\left\{ \int \tau^{11} \mathbf{L}_{,1}^1 \mathbf{L}_{,1}^1 (\mathbf{X}_1^1 + \mathbf{u}_1^1) A_0 \sqrt{a_{11}} d\xi_1 + \int \rho_0 A_0 \mathbf{L}^1 \mathbf{L}^1 \ddot{\mathbf{u}}_i^1 \sqrt{a_{11}} d\xi_1 - \int \rho_0 A_0 b_{0i} \mathbf{L}^1 \sqrt{a_{11}} d\xi_1 - \int t_{0i} \mathbf{L}^1 \sqrt{a_{11}} d\xi_1 \right\} \delta \mathbf{u}_i^1 = 0 \quad \dots (23)$$

が得られる。 $\delta \mathbf{u}_i^1$ は仮想変位あるので、 $\{ \}$ がケーブル要素の運動方程式を与える。

式(22)を、全要素について重ね合わせ、マトリックス表示すれば次式で表される。

$$[\mathbf{M}] \{\ddot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{K}] \{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{f}\} \quad \dots (24)$$

[M] は質量マトリックスを、[K_T] は接線剛性マトリックスを示す。{f} は外力ベクトルであり、{u}, { $\ddot{u}$ } は、それぞれ変位及び加速度ベクトルである。

2. 3 ケーブルに作用する流体力

ケーブル要素に作用する流体力は、次式で与えられる。 $F_i^1 = \int f_i L^1 \sqrt{A} d\xi_1$; $i=1, 2, \dots, N$... (25)
ただし、 f_i は、変形後のケーブル形状における単位長さ当りの流体力の成分を示す。Nは、節点数である。ここでは、Morisonの一般式⁵⁾を用いて、流体抗力及び流体慣性力を表す。特に、流体抗力は非保存力であり、ケーブルの変形形状に依存する。この非線形抗力は、ケーブル軸線に垂直方向の成分（垂直抗力） f_n と接線方向の成分（接線抗力） f_t に分けられる。また、流体の速度及び加速度を定義するために、Airyの線形微小振幅波理論を用いている。なお、浮力体に作用する流体力もMorisonの式より求められる。 f_n のみを示すと、次のようになる。
 $f_n = (1/2) C_{dn} D_o \rho_w |v_n - \dot{u}_n| (v_n - \dot{u}_n) + \rho_w [A_o \dot{v}_n + A_o C_m (\dot{v}_n - \ddot{u}_n)]$... (24)
ここで、 f_n =ケーブル軸に垂直な単位当りの流体力ベクトル、 C_{dn} =垂直抗力係数、 D_o =ケーブル直径、 A_o =ケーブルの断面積、 ρ_w =流体の密度、 v_n =ケーブル軸に垂直な流体速度ベクトル、 $\dot{u}_n$ =ケーブル軸に垂直なケーブルの速度ベクトル、 C_m =付加質量係数、 $\dot{v}_n$ =ケーブル軸に垂直な流体の加速度ベクトル、 $\ddot{u}_n$ =ケーブル軸に垂直なケーブルの加速度ベクトルである。ただし、 $f_n = f_{ni} e_i$; $i=1, 2, 3$ で表される。

2. 4 Viscous Relaxation法^{6,7)}

幾何学的非線形問題として取り扱われるケーブルの初期つり合い形状を求めるために、Websterにより提案されたViscous Relaxation法¹⁷⁾を適用する。この方法は、静的つり合い方程式に仮想的な減衰項を付け加えた方程式をNewton法で解く手法である。いま、本問題の非線形剛性方程式を増分式で示すと、次式で与えられる。

$$[{}^k K_T] \{\Delta u\} = \{{}^{k+1} P\} - \{{}^k F\} \quad \dots (27)$$

ここで、 $\{{}^{k+1} P\}$ = 外力ベクトル、 $\{{}^k F\}$ = 内力ベクトル、 $k+1$ は $(k+1)$ 次荷重増分ステップを示す。

$\{\Delta u\} = \{{}^{k+1} u\} - \{{}^k u\}$ である。式(27)に、仮想的な減衰項を付加し、また $k+1$ を $t + \Delta t$ に置き換えると次式が得られる。
 $[{}^t C] \{{}^{t+\Delta t} \dot{u}\} + [{}^t K_T] \{\Delta u\} = \{{}^{t+\Delta t} P\} - \{{}^t F\}$... (28)

ここで、 $[{}^t C]$ は、仮想減衰マトリックスである。 $\{{}^{t+\Delta t} \dot{u}\} = \{\Delta u\} / \Delta t$ であるので、式(28)は、次のようにも表せる
 $[(1/\Delta t) [{}^t C] + [{}^t K_T]] \{\Delta u\} = \{{}^{t+\Delta t} P\} - \{{}^t F\}$... (29)

ただし、 Δt は仮想時間増分を示す。したがって、式(29)を数値積分法を用いて解けば、減衰項が零になったときに、静的解が求められる。ただし、初期値として任意に仮定された変位が用いられる。さらに、解の収束性を高めるために、 $[{}^t C] = C(t) [I]$ とし、減衰係数 $C(t)$ を次式のように各時間ステップで変化させている。

$${}^{t+\Delta t} C = {}^{t+\Delta t} \mu^\circ C, \quad {}^{t+\Delta t} \mu = \mu^\circ \gamma \sqrt{\sum ({}^t u_i - {}^{t-\Delta t} u_i)^2 / \sum ({}^t u_i)^2} \quad \dots (30)$$

ここで、 $[I]$ = 単位マトリックスである。また、パラメーター、 $\mu^\circ, \gamma, {}^\circ C$ はそれぞれ任意に仮定される。

2. 5 ケーブル構造の運動方程式の解法

増分・反復法において、増分値を時間ステップで置き換えれば、ケーブル構造の非線形運動方程式が導ける。すなわち、時刻 $t + \Delta t$ における $(k+1)$ 回反復での運動方程式は、次のように表せる。

$$([Mo] + [M]) \{{}^{t+\Delta t} \ddot{u}\}_{k+1} + [{}^{t+\Delta t} K_T]_k \{\Delta u\} = \{{}^{t+\Delta t} P\}_{k+1} - \{{}^{t+\Delta t} F\}_k \quad \dots (31)$$

ここで、 $[{}^{t+\Delta t} K_T]$ = 全体接線剛性マトリックス、 $[Mo]$ = 付加質量マトリックス、 $[M]$ = 浮力体の質量も含めた全体質量マトリックス、 $\{\Delta u\}$ = 増分変位ベクトル、 $\{{}^{t+\Delta t} \ddot{u}\}$ = 加速度ベクトル、 $\{{}^{t+\Delta t} P\}$ = 外力ベクトル、 $\{{}^{t+\Delta t} F\}$ = 内力ベクトルである。ただし、 $\{\Delta u\} = \{{}^{t+\Delta t} u\}_{k+1} - \{{}^t u\}_k$ で示される。

式(31)で示される運動方程式を、Newmark's β 法を用いて解いている。また、各時間ステップでの残差を最小化するためにNewton法を適用している。すなわち、時刻 $t + \Delta t$ での速度と加変位ベクトルは、次式で定義される。

$${}^{t+\Delta t} \dot{u} = {}^t \dot{u} + [(1-\alpha) {}^t \ddot{u} + \alpha {}^{t+\Delta t} \ddot{u}] \Delta t, \quad {}^{t+\Delta t} u = {}^t u + {}^t \dot{u} \Delta t + [(1/2-\beta) {}^t \ddot{u} + \beta {}^{t+\Delta t} \ddot{u}] \Delta t^2 \quad \dots (32)$$

ここで、 ${}^t u$ 、 ${}^t \dot{u}$ 、 ${}^t \ddot{u}$ = 時刻 t における変位、速度及び加速度ベクトル、 ${}^{t+\Delta t} u$ 、 ${}^{t+\Delta t} \dot{u}$ = 時刻 $t + \Delta t$ 及び $(k+1)$ 回反復での変位と加速度ベクトルを示す。 α, β は、Newmarkの積分定数であり、 $\alpha = 1/2$, $\beta = 1/4$ を用いている。式(32)を書きかえると、

$${}^{t+\Delta t} \ddot{u} = a_0 ({}^{t+\Delta t} u - {}^t u) - a_1 {}^t \dot{u} - a_2 {}^t \ddot{u}; \quad a_0 = 1/(\beta \Delta t^2), \quad a_1 = 1/(\beta \Delta t), \quad a_2 = 1/(2\beta) - 1 \quad \dots (33)$$

で表される。式(33)を式(31)に代入すると、
 $[{}^{t+\Delta t} K_T] \{\Delta u\} = \{{}^{t+\Delta t} \bar{P}\} - \{{}^t F\}$... (34)
が得られる。ここで、 $[{}^{t+\Delta t} \bar{K}_T]$ は修正接線剛性マトリックスであり、

$$[{}^{t+\Delta t} \bar{K}_T] = [{}^{t+\Delta t} K_T] + a_0 ([M] + [Mo]) \quad \dots (35)$$

$$\{{}^{t+\Delta t} \bar{P}\} = \{{}^{t+\Delta t} P\} - ([M] + [Mo]) \{a_0 ({}^{t+\Delta t} u - {}^t u) - a_1 {}^t \dot{u} - a_2 {}^t \ddot{u}\} \quad \dots (36)$$

で与えられる。したがって、 $\{\Delta u\}$ について解けば、解が求められる。なお、 $t=0$ での初期変位は、Viscous relaxation法で求められた初期つり合い形状を用いている。

3. 数値計算例及び考察

本手法の静的及び動的解析の精度については、すでに検討済みであるので^{3,7)}、次のような解析条件のもとに、動的応答解析を行う。すなわち、(1) 浮力体の浮力は時間に関係なく一定である。(2) 進行波は水中で初期つり合いにある係留ケーブル構造に作用する。Fig. 1に示すように、水深が300 ftで、静水面より30ft下で長さ311.8 ftの2本のケーブルで係留された水中浮力体の2次元動的応答解析を行い、浮力体の運動やケーブルの変動張力応答に与える波周期、 T 、波高、 H や浮力、 F_b などの影響について検討する。なお、数値計算では、積分時間幅 Δt は、0.001secとし、feet-pound単位(1 ft=0.3049 m, 1 lb=4.448 N)を用いている。また、計算に用いた寸法、材料特性や流体係数などは、Table 1に示してある。

3. 1 浮力体及びケーブルの動的応答に与える波周期、 T の影響

Fig. 3に示すように、各係留ケーブルを14個の要素に分割された離散化モデルを用いて、浮力 $F_b=400$ lbs、波高 $H=5$ ftと仮定した場合の浮力体の鉛直運動、水平運動と係留ケーブルの変動張力応答に与える波周期の影響について示す。この初期つり合い形状解析では、Viscous Relaxation法を用いて、13回の反復計算で収束値を得ている。波周期は5, 10, 15secと変化させている。Fig. 4-a), b)には、それぞれ浮力体の水中での初期つり合い位置からの鉛直変位応答と水平変位応答に与える波周期の影響が示されている。これより、進行波が静止した係留ケーブル構造に作用するので、かなり非定常な運動が見られるが、時間の経過とともに波周期と同じ定常運動を示している。一方、水平運動では、最初の数秒間に急激な水平移動を伴うが、その後の水平変位応答では波周期による影響がほとんど見られない。また、Fig. 5, 6には、それぞれ右ケーブルの両端部の変動張力(F_1, F_{14})と浮力体部での左右のケーブルの変動張力応答(F_1, F_{15})に与える波周期の影響が示されている。ただし、 F_i はiケーブル要素での

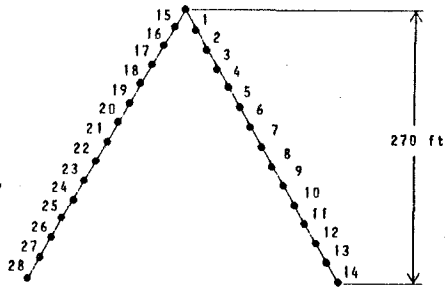


Fig. 3 2点係留ケーブルの要素番号

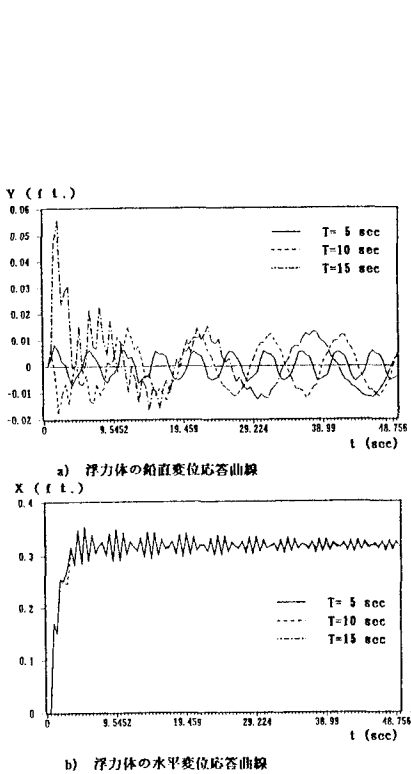


Fig. 4 水中浮力体の運動に与える波周期、 T の影響； $F_b=400$ lbs, $H=5$ ft

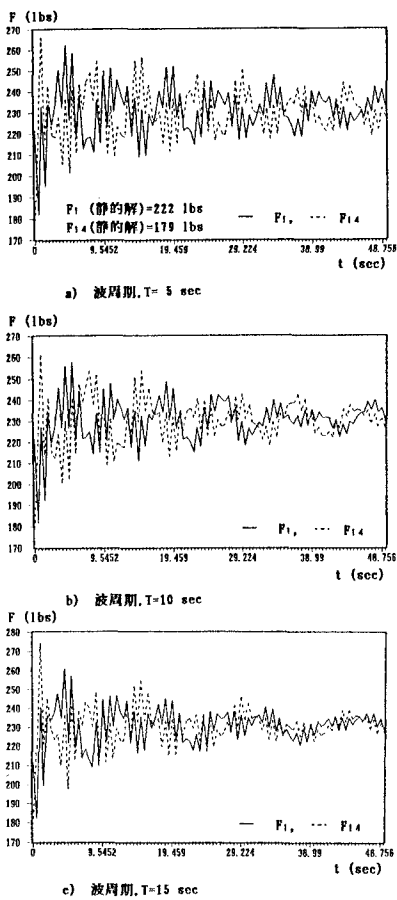


Fig. 5 右係留ケーブルの張力応答、 F に与える波周期、 T の影響； $F_b=400$ lbs, $H=5$ ft

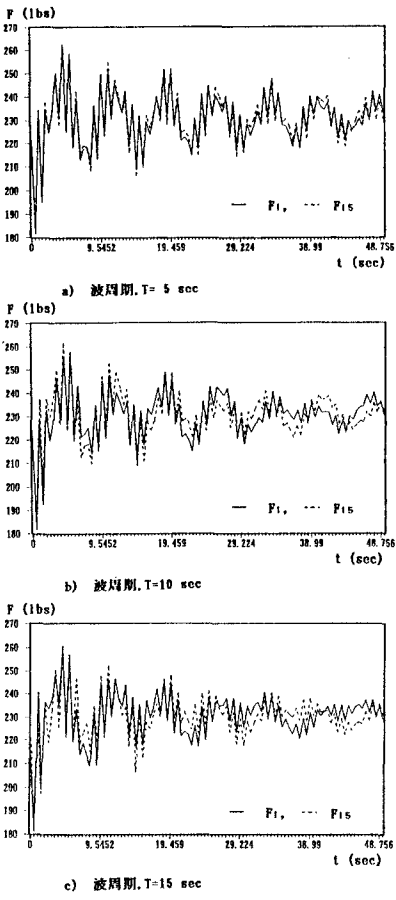


Fig. 6 左右係留ケーブルの張力応答、 F に与える波周期、 T の影響； $F_b=400$ lbs, $H=5$ ft

張力応答を示す。これより、最初の衝撃応答を除くと、ケーブルの張力応答では、顕著な波周期の依存が見られないが、ケーブルの緩みと緊張の繰り返しにより、複雑な履歴応答を示している。

3. 2 浮力体及びケーブルの動的応答に与える波高, H の影響

波周期が10 sec, 浮力が400 lbsと仮定した場合の浮力体の運動と係留ケーブルの変動張力応答に与える波高の影響について検討する。ただし、波高, H は5, 10, 15 ftと変化させている。Fig. 7-a), b) は、それぞれ浮力体の初期つり合位置からの鉛直変位応答と水平変位応答に与える波高の影響を示している。これより、上下運動は、つり合位置より上下同じ振幅で運動し、また波高の増大と共に大きくなる。一方、水平運動では、最初の数秒間に急激な水平移動を伴うが、その後の水平変位応答は、両ケーブルの緩みと緊張の影響により複雑な性状を示している。Fig. 8, 9には、それぞれ右ケーブルの両端部の変動張力(F_1, F_{14})と浮力体部での左右のケーブルの変動張力応答(F_1, F_{15})に与える波高の影響が示されている。これより、最初の衝撃応答を除くと、ケーブルの張力応答では、顕著な波高の影響が見らる。Fig. 8より、波高が大きくなると各ケーブルが張られ、ケーブルの両端部での変動差が見られなくなる。また、Fig. 9より、波高が大きくなると浮力体部での左右のケーブル張力の位相差が顕著に見られる。この位相差は、Fig 10に示すように、左右でのケーブルの変形モードが異なるためと思われる。

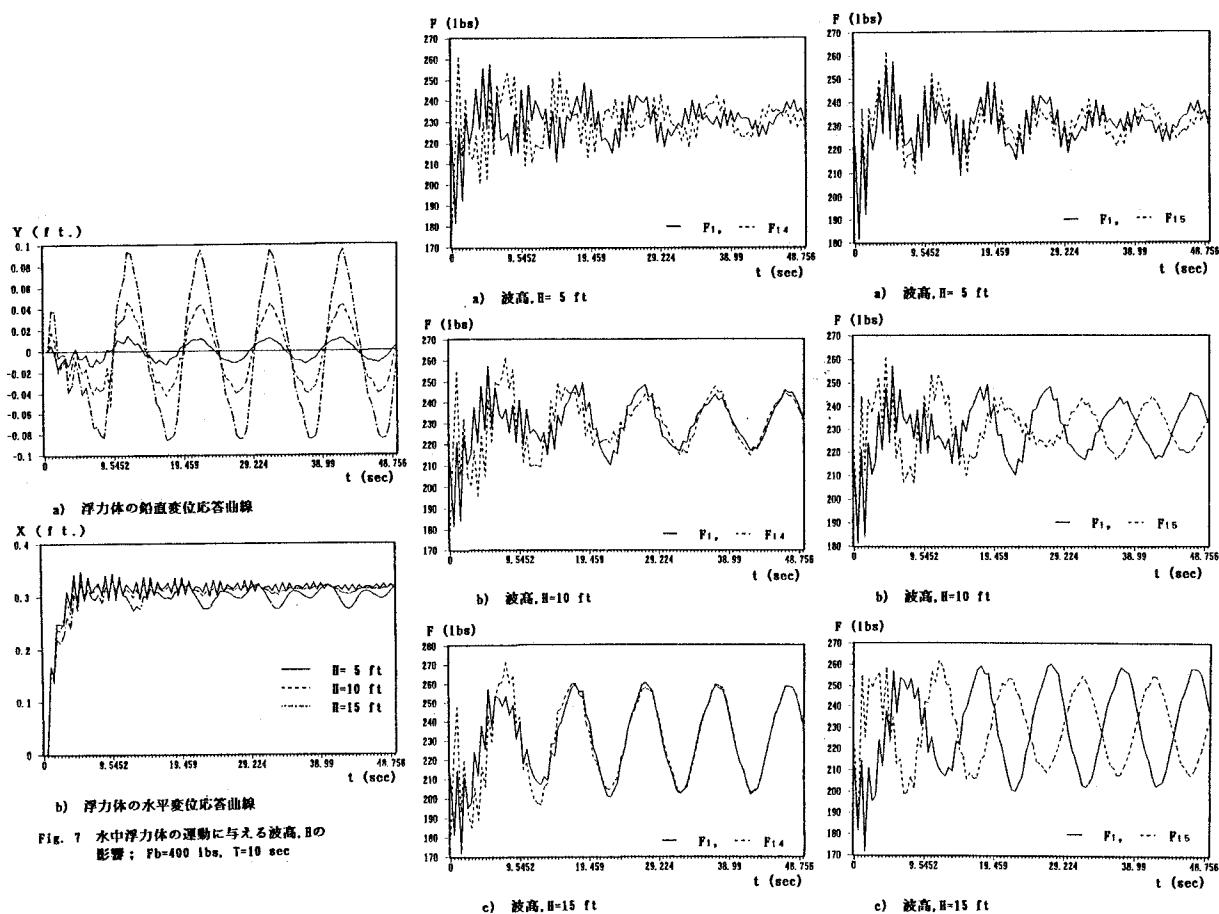


Fig. 7 水中浮力体の運動に与える波高, H の影響; $F_b=400$ lbs, $T=10$ sec

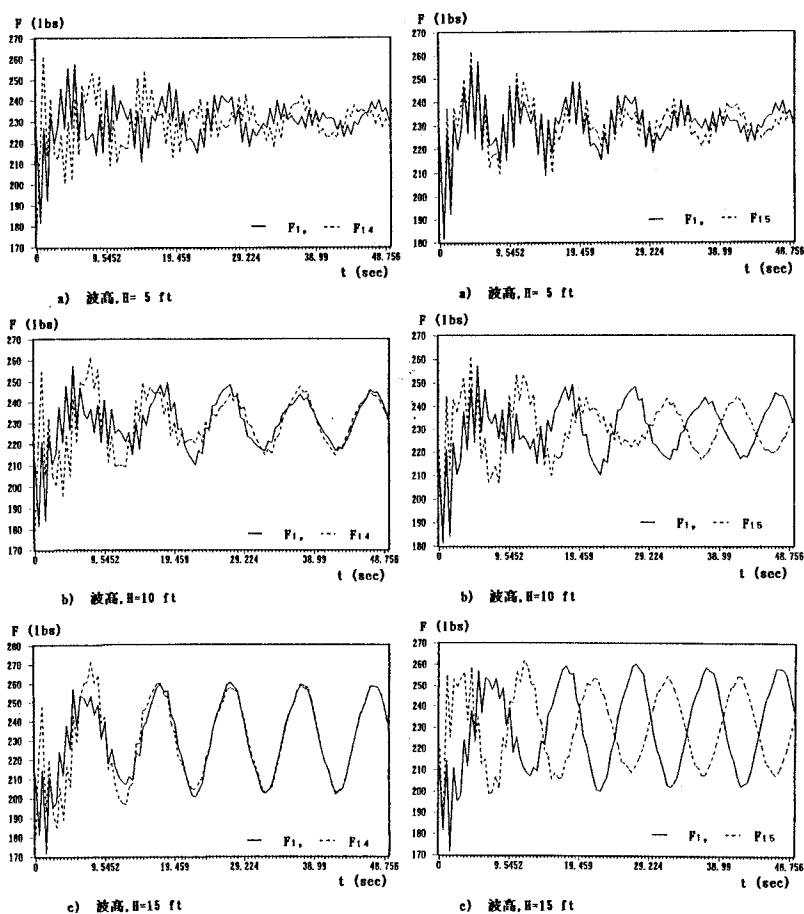


Fig. 8 右係留ケーブルの張力応答, F に与える波高, H の影響; $F_b=400$ lbs, $T=10$ sec

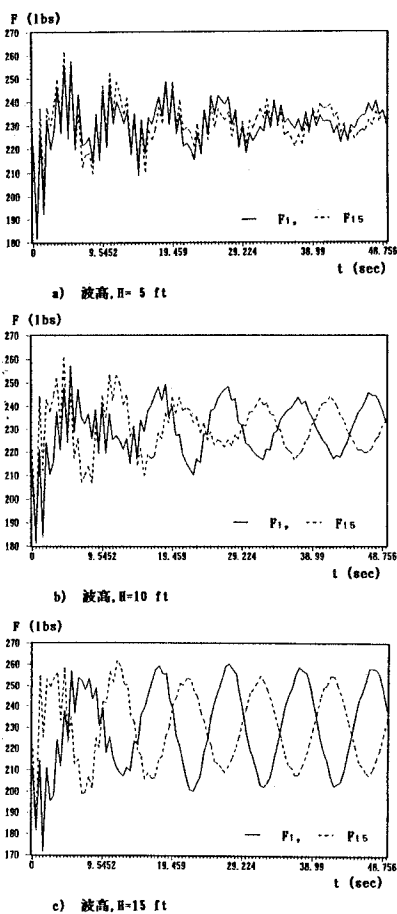


Fig. 9 左係留ケーブルの張力応答, F に与える波高, H の影響; $F_b=400$ lbs, $T=10$ sec

3. 3 浮力体及びケーブルの動的応答に与える浮力, F_b の影響

波高 $H=5$ ft, 波周期 $T=10$ sec と仮定した場合の浮力体の運動と係留ケーブルの変動張力応答に与える浮力の大きさの影響を解析する。ただし、浮力体の浮力, F_b は、200, 400 lbsの場合について検討している。Fig. 11-a), b) には、それぞれ浮力体の初期つり合位置からの鉛直変位応答と水平変位応答に与える浮力の大きさの影響が示されている。上下運動では、最初の非定常な運動を除くと、この影響はあまり大きく見られない。一方、水平運動では、最初の数秒間に急激な水平移動を伴い、その大きさは浮力の大きさに依存している。また、Fig. 12, 13には、それぞれ右ケーブルの両端部の変動張力(F_1, F_{14})と浮力体部での左右のケーブルの変動張力応答(F_1, F_{15})に与える浮力の影響が示されている。これより、最初の衝撃応答を除くと、ケーブルの変動張力は、浮力が小さいほど張力の変動幅が小さく生じてくるが、履歴応答にはさほど大きな変化が見られない。

Table 1. 解析及び計算条件

水深: $d=300$ ft
 浮力体の係留位置: 静水面下 30 ft
 ケーブルの初期長さ, $L_0=311.8$ ft
 ケーブルの係留傾斜角: $\theta=60^\circ$
 ケーブル直径: $D_0=0.35$ in
 ケーブル断面剛性: $EA_0=1.92E5$ lbs
 水中での重さ: $W_0=0.169$ lbs/ft
 ケーブルの垂直抗力係数: $C_{dn}=1.5$
 ケーブルの接線抗力係数: $C_{dt}=0.03$
 浮力体(剛球体)の直径: $D=1$ ft
 浮力体の水中重量: $W=580.9$ lbs
 浮力体の抗力係数: $C_d=0.6$
 浮力体の付加質量係数: $C_m=0.5$
 $\mu=0.01$
 $\gamma=0.5$
 $^{\circ}C=1.0E7$

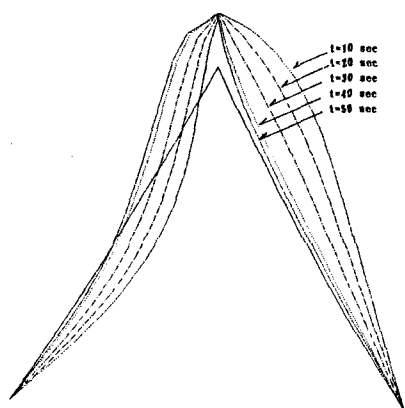


Fig. 10 各時刻における係留ケーブルの変形形状:
 $P_b=400$ lbs, $H=10$ ft, $T=10$ sec

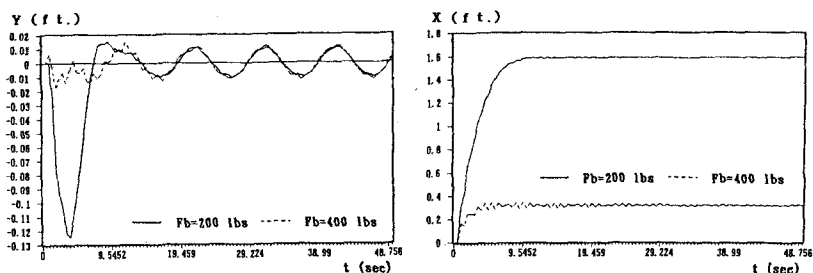
4. あとがき

本研究では、周期波浪を受ける水中で係留された浮力体の動的応答解析を行い、浮力体の運動や係留ケーブルの変動張力に与える波周期、波高や浮力の影響を解析し、定性的な動力学性状について検討した。得られた主な結果をまとめると、次のようになる。

1. 浮力体の鉛直運動は、波周期と同じ周期で運動しているが、水平運動は、その影響が顕著に見られない。一方、係留ケーブルの変動張力にもさほど顕著な波周期の影響は見られないが、複雑な履歴曲線を示す。
2. 波高は、浮力体の運動やケーブルの張力応答に顕著な影響を与える。波高の増大に伴いケーブルが緊張してくるので、ケーブル間の張力位相差などが大きく生じてくる。
3. また、浮力の大きさは、浮力体の鉛直運動では大きな変化が見られないが、水平運動に大きな変化が見られる。一方、ケーブルの張力応答では、浮力が小さいほど張力の変動幅が小さく生じてくるが、履歴応答にはさほど大きな変化が見られない。

参考文献

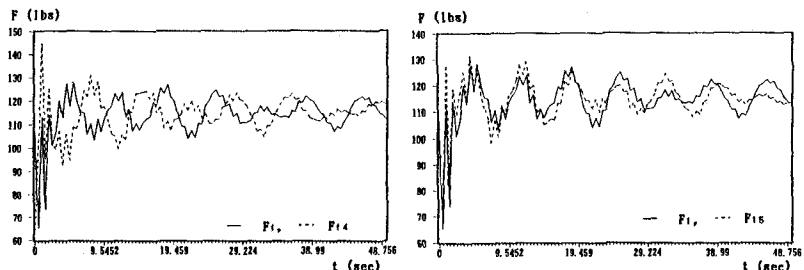
- 1) 吉田宏一郎、米家卓也、飯田国広:有限要素法による水中線状構造物の応答解析. 日本造船学会論文集、第144号、1979, pp. 195-204.
- 2) 福元裕彦、中西宏、波田凱夫: 海中ケーブル構造の波浪応答解析とその計算プログラム. 土木学会論文報告集、第356/1-3, 1985, pp. 455-464.
- 3) 水澤富作、前島正彦、事口壽男: 海洋ケーブルの動的非線形挙動について. 第9回海洋工学シンポジウム論文集、日本造船学会、1989, pp. 309-316.
- 4) Green, A.E. and Adkins, J.E.: Large elastic deformation and nonlinear continuum mechanics. Clarendon Press, London, 1960.
- 5) Morison, J.R. et al.: The forces exerted by surface wave on pile. American Institute of Mining Metallurgical and Petroleum Engineers, Vol. 189, 1950, pp. 149-157.
- 6) Webster, R.L.: On the static analysis of structures with strong geometric nonlinearity. Comput. Struct., vol. 11, 1980, pp. 137-145.
- 7) 水澤富作、Leonard, J.W.: Viscous Relaxation法を用いた海洋ケーブル構造の静的非線形解析について. 大同工業大学紀要, Vol. 26, pp. 95-106, 1990.



a) 浮力体の鉛直変位応答曲線

b) 浮力体の水平変位応答曲線

Fig. 11 水中浮力体の運動に与える浮力, P_b の影響; $H=5$ ft, $T=10$ sec



a) 浮力, $P_b=200$ lbs

a) 浮力, $P_b=200$ lbs

b) 浮力, $P_b=400$ lbs

b) 浮力, $P_b=400$ lbs

Fig. 12 右係留ケーブルの張力応答, F に与える浮力, P_b の影響; $H=5$ ft, $T=10$ sec

Fig. 13 左右係留ケーブルの張力応答, F に与える浮力, P_b の影響; $H=5$ ft, $T=10$ sec