

I-12 海中ケーブルによる浮体構造に関する研究

東北大学工学部 ○ 学生員 大本 晋士郎
 東北大学工学部 正員 倉西 茂
 東北大学工学部 正員 岩熊 哲夫

1. まえがき

近年、浮力を構造物の反力に利用した海上構造物の建設設計画が注目されている。このような浮体構造は、ケーブルやチェーンによって海中に固定される緊張方式と呼ばれる物が一般的である。浮体を基礎として利用するにはその安定性の解析が重要な問題となるが、浮体の挙動は結局ケーブル等の力学的性質と浮体の浮力との相互作用により決まり、そのケーブルの力学的挙動が本質的に非線形であるため簡単には求められない。構造自体を浮体で作る、あるいは浮体を基礎として利用する事に関する研究は少なく、特に、海中ケーブルを取り扱った問題のほとんどが浮遊した浮体を（船やブイなど）係留する際のケーブルの挙動に関するものである。しかしこれらの解析例には軸力による伸びを無視したり、浮力を正しく取り扱っていないものも見受けられる¹⁾。そこで海上構造物の基礎となる浮体構造の挙動について、正しく浮力、伸びをモデル化したケーブルを上記のような係留問題から実際の浮体構造に即した多点係留問題に拡張し、そのケーブルについての微分方程式を導きだし、解析することにする。

2. ケーブル微小要素に働く力について

一般的に物体に働く浮力とは、見かけ上その物体が排除した水の重量分だけ物体の自重が軽くなることと考えられているが、物理現象的には物体表面に働く静水圧の差により発生する力²⁾である。そのためケーブルのような連続した部材の微小要素に働く静水圧の合力は、微小要素断面に静水圧が働かないため、鉛直成分に加え、水平成分を持つ力となる。ケーブルは張力のみに抵抗する力学要素であり、一般には伸びの影響が無視されることが多いが、ここではより正確な取扱いをするためにフックの法則にしたがった伸びを考慮する。潮流力は主に、圧力による形状抵抗によって生じるケーブル軸線の法線方向の力と、主に、摩擦による表面抵抗によって生じるケーブル軸線の接線方向の力が考えられる³⁾。

3. つり合い式

図1に示したケーブル要素に、2.で述べた外力とケーブル張力Tとのつり合い、幾何形状から以下のような無次元変数 $\xi = s/L$ についての、無次元化された微分方程式が導かれる。

$$d\phi/d\xi = 1/t \{-k_1(1+t)\cos\phi + 1/2 \cdot k_2(1+t)\cos(\psi-\alpha)\sin^2\phi + \cos(\psi-\alpha)\} + \omega k_1$$

$$d\psi/d\xi = 1/t \{1/(2\cos\phi) \cdot C_{NT} k_2(1+t)\sin(\psi-\alpha) + \sin(\psi-\alpha)\}$$

$$dt/d\xi = \omega k_1 \sin\phi + k_2(1+t)\cos(\psi-\alpha)\cos\phi + \cos(\psi-\alpha)\cos\phi$$

$$d\eta_x/d\xi = (1+t)\cos\phi\cos\psi$$

$$d\eta_y/d\xi = (1+t)\cos\phi\sin\psi$$

$$d\eta_z/d\xi = (1+t)\sin\phi$$

ただしこれら式は

$$\phi = \phi(\xi), \psi = \psi(\xi), t(\xi) = T/EA$$

$$\eta_x(\xi) = x(s)/L, \eta_y(\xi) = y(s)/L$$

$$\eta_z(\xi) = z(s)/L, k_1 = \gamma L/E$$

$$k_2 = \gamma/g \cdot C_{DN} D L V^2 / EA$$

$$\omega = W/\gamma A, C_{TN} = C_{DT}/C_{DN}$$

で定義される。ここで L =ケーブル長、 A =ケーブル断面積、 D =ケーブル直径、 γ =水の単位体積重量、 C_{ND}, C_{NT} =軸線の法線方向抗力係数、軸線の接線方向抗力係数、 w =ケーブルの単位長さ重量、 V =流速

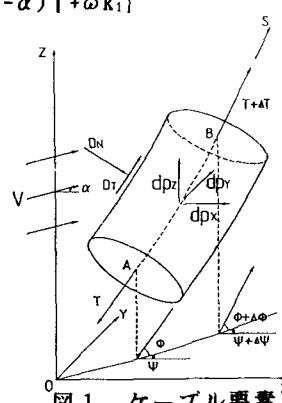


図1 ケーブル要素

4. 数値解析例

図2に示した4点係留構造モデルについて、x軸回りのモーメント荷重をかけたときの浮体の回転について数値計算を行なった結果を以下に示す。計算方法は $\mu=0$ でのケーブル定着点の位置、 $\mu=1$ での浮体に作用する外力とケーブル張力のつり合いの幾何的、力学的境界条件を与えた境界値問題としてAdjoint-Method⁴⁾で数値解析的に解く。この構造系に作用する力は図に示す通りで浮体の鉛直荷重－沈下関係が線形の範囲では、連成しないとし、それぞれ独立に扱うこととする。各パラメーターは3.で述べたようにLについて k_1 を、Vについては k_2 を変化させた。基準となる鉛直荷重は、各 k_1 について鉛直荷重－浮体重心沈下曲線から0.2%off setを用いて得られた最大載荷荷重 f_{zmax} でその大きさは $k_1=5.10 \times 10^{-6}$ については浮力の97%、 $k_1=7.65 \times 10^{-6}$ では浮力の95.5%である。

図4は $k_1=5.10 \times 10^{-6}$ で鉛直荷重を変化させたときの $M_x - \theta_x$ 曲線を描いたものである。鉛直荷重が小さくなると傾きが小さくなるのは、モーメントに抵抗しているケーブル張力が減るため回転がおきやすくなるためである。またモーメントが大きくなるにつれ、傾きが小さくなる。浮体の回転がおきるのはケーブル係留点が引っ張り側で上方に、圧縮側では下方に移動するためと浮体自体が沈下するためであり、浮体に沈下が起こり始めると $M_x - \theta_x$ 関係の線形が徐々に崩れる。

図4は $k_1=5.10 \times 10^{-6}$ で f_z, k_2 を変えたものであるが、 f_z が同じであれば $M_x - \theta_x$ 関係は k_2 が変わってもまったく同じ曲線になる。つまりケーブルに十分張力が与えられれば、潮流力によるケーブルのたわみは $v=0$ の時と殆ど変わらず、そのため潮流はまったく影響しないことが分かる。

図5は $M_x - \theta_x$ 関係に対する f_x の影響について示しているが、 f_x が変化してもにそれほど影響が見られない。

5. 結果

x軸回りの $M_x - \theta_x$ 関係については実用範囲では線形でありパネ定数は、鉛直荷重により最も影響される。またそれ以外の外力については潮流力はまったく、x軸方向力は殆ど影響しないことが分かった。

参考文献

- 1)宮崎・大室・松田：潮流力をうける係留ケーブルの静的解析、年次学術講演概要集、I-91, 1975.
- 2)藤井・倉西・岩熊：水中係留基礎に関する研究、年次学術講演概要集、I-11, 1990.
- 3)福本・中西・波田：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：土木学会論文集、No.356/I-3, 1985.4.
- 4)Roberts,S.M. and Shipman,J.S.:Two-Points Boundary Value Problems; Shooting Method, pp.17-49, ELSEVIR, 1972.

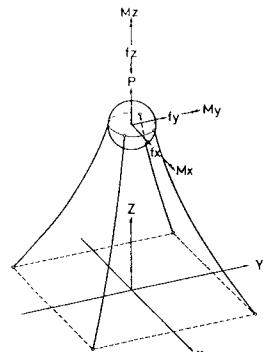


図2 構造モデル

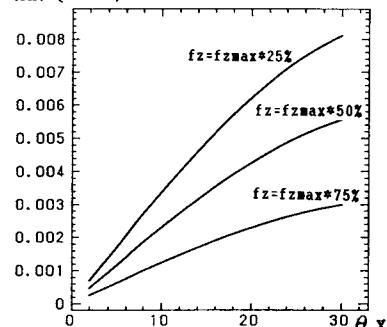


図3 鉛直荷重による影響

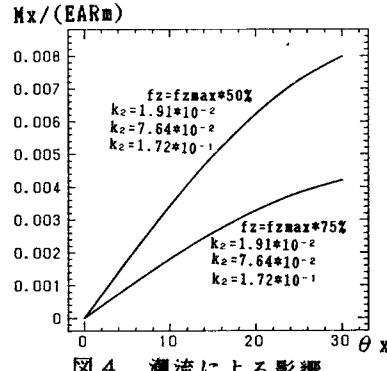


図4 潮流による影響

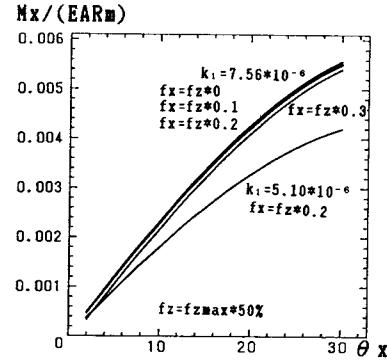


図5 x軸方向力による影響