

I-11

水中係留基礎に関する研究

J R 西日本 ○正 員 藤井 昌隆
 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

浮力を生み出す係留体をケーブルで係留する浮遊構造物は、係留体やケーブルの力学的挙動がいまだ充分に解明されていない。係留ケーブルの研究はこれまでに、Berteaux¹⁾、Chang and Pilkey²⁾、宮崎等³⁾によって行われ、1点係留問題に対し、張力によるのびや潮流力を考慮した微分方程式が提案されている。しかしいずれの研究も、多点係留問題への拡張がなされておらず、浮力の考慮も充分ではない。そこで本研究では、まず浮力を正しく評価した微分方程式を誘導し、これを2点境界値問題として解く。さらに2点係留構造物を対象に、係留体に鉛直荷重と水平荷重の組合せ荷重が作用した場合のケーブル、及び係留体の挙動を明らかにする。

2. 浮力の算定

浮力は静水圧の差によって発生する力であり、軸方向に連続なケーブル構造ではケーブル断面には静水圧が作用しない。したがって、あるケーブル要素には鉛直力だけでなく水平力も発生する。従来の研究では本来作用するはずのない断面に作用する静水圧も考え、水中重量という形で浮力を考慮してきたが、この概念では大きく変位したケーブルを正しく取り扱うことができない。本研究では浮力として、ケーブル周囲に作用する静水圧のみを考える。

3. ケーブル方程式

いま、図-1のようなケーブル要素を考える。ここで $\psi = 0$ とすると要素の力のつりあいと幾何形状から次のケーブル方程式が誘導される。

$$d\phi/ds = 1/T \{ [W - A_T(1+T/EA)] \cos \phi + R_N(1+T/EA) \sin^2 \phi \}, \quad (1)$$

$$dT/ds = [W - R_T(1+T/EA) \cos \phi] \sin \phi, \quad (2)$$

$$dx/ds = (1+T/EA) \cos \phi, \quad (3)$$

$$dz/ds = (1+T/EA) \sin \phi, \quad (4)$$

ここで $R_N = 1/2 \gamma C_N DV^2$, $R_T = 1/2 \gamma C_T DV^2$, T : ケーブル張力, W : ケーブルの空中重量, D : 直径, A : 断面積, EA : 伸び剛性, ϕ : ケーブル軸とX軸のな角度, であり, C_T , C_N はそれぞれ軸方向、軸直角方向の抗力係数である。

4. カテナリー曲線との比較

図-2は1本のケーブルを解いた場合の、カテナリー曲線との形状を比較したものである。①は初期条件をカテナリーと一致させた場合で、②は自由端での張力と角度を一致させた場合である。②は2点境界値問題であり、これは Adjoint Method⁴⁾ を用いて解いている。①はカテナリーとよく似た形状であるが、自由端で約2.6%のずれがある。②は自由端をカテナリーと同じ力で引っ張っているにもかかわらず、実際には定着点付近で接地するような形状となっている。よって、従来の水中重量の概念は浮力を過大評価していたことがわかる。

また、張力はいずれも自由端で最大値をとるため、実構造物では係留体との接続点が応力的に一番不利となる。よって、補修、補強のための作業は水深の浅い場所となり、海底部で応力最大となる固定構造物に比べ有利となる。

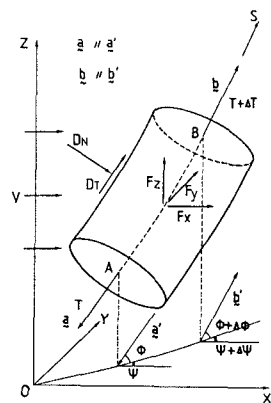


図-1 ケーブル要素

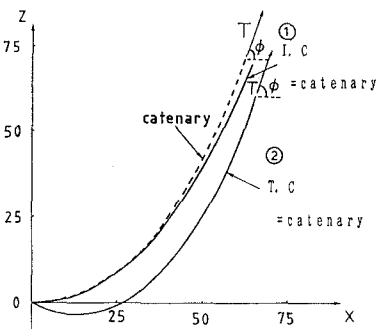


図-2 カテナリーとの比較

5. 解析方法及び結果

図-3のような2点係留構造の係留体の重心に鉛直荷重と水平荷重の組合せ荷重が作用した場合の重心の変位を解析する。いま係留体は直径 $R = 15\text{m}$ の剛な球体とし、係留体の回転は拘束されているものとする。ケーブルの初期長さは $l = 200\text{m}$ 、直径 $D = 0.3\text{m}$ で、潮流力はケーブルと係留体に作用するものとする。計算は式(1)~(4)を2本ずつ用いて、8元連立微分方程式として解けばよい。境界条件は定着点の座標、重心に作用する浮力、及び自由端での座標の関係で以下の式で与えられる。

$$x_R(0) = x_{R0}, \quad z_R(0) = z_{R0}, \quad x_r(0) = x_{r0}, \quad z_r(0) = z_{r0},$$

$$x_R(l) + R = x_r(l), \quad z_R(l) = z_r(l),$$

$$T_R(l) \sin \phi_R(l) + T_r(l) \sin \phi_r(l) = F - P,$$

$$T_R(l) \cos \phi_R(l) + T_r(l) \cos \phi_r(l) = H + h.$$

ここで、 F は係留体浮力で、本解析では 2000t としている。 P 、 H はそれぞれ重心に作用する鉛直荷重及び水平荷重で、 h は係留体に作用する潮流力である。また添字 r 、 l はそれぞれ右、左のケーブルを表す。鉛直荷重 P と水平荷重 H とは図-3のように角度 α で関係づけられ、 α が小さいほど同じ鉛直荷重に対する水平荷重が大きくなる。

図-4(a)は、荷重と鉛直変位の関係を示したもので、潮流は $V = 2\text{m/s}$ である。これより、荷重-鉛直変位の関係は、はじめはほぼ線形であるが、ある荷重に達すると急激に変位が増大するのがわかる。またその荷重は水平荷重が大きくなるほど小さくなっていく。図-4(b)は荷重-水平変位の関係を示しており、潮流は $V = 0\text{m/s}$ である。水平変位も鉛直変位と同様、ある荷重に達すると急激に変位が増大する。ただし水平荷重が作用しない場合 ($\alpha = 90^\circ$) には水平変位は生じない。図4-(c)は潮流が $V = 2.0\text{m/s}$ の場合の荷重と水平変位の関係であるが、この場合水平荷重が作用しない時でも、潮流力によってある荷重に達すると水平変位をおこす。図4-(a)と(c)を比較すると、変位が増大する荷重がほぼ等しいことがわかる。よって、死荷重が載った状態がグラフの原点とし、設計活荷重をこの荷重より小さい荷重とすれば、構造物の鉛直変位、水平変位と荷重の関係は線形と見なすことができ、作用荷重に対する変位を容易に求めることができる。

6. 参考文献

- 1) Berteaux, H.O. : Design of deep-sea mooring lines, Marine Tech. Soc. J., May-June, 1970.
- 2) Chang, P.Y. and Pilkey, N.D. : The analysis of mooring lines, OTC-1502, 1971.
- 3) 宮崎・大室・松田：潮流力を受ける係留ケーブルの静的解析、年次学術講演会概要集、I-91、1975.
- 4) Roberts, S.M. and Shipman, J.S. : Two-Point Boundary Value Problems ; Shooting Method, pp.17-49, ELSEVIER, 1972.

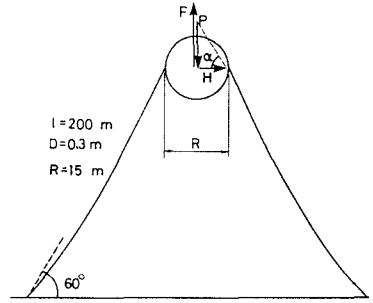


図-3 2点係留構造

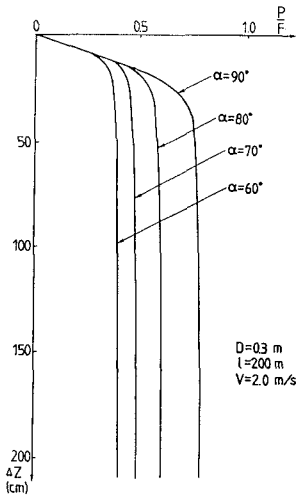


図-4(a) 荷重-鉛直変位

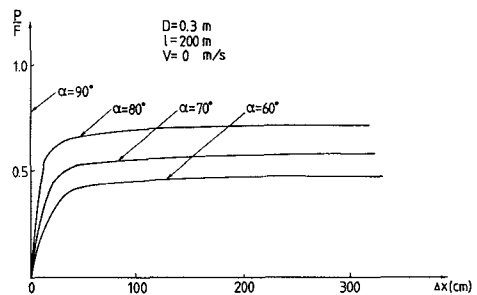


図-4(b) 荷重-水平変位 (v=2m/s)

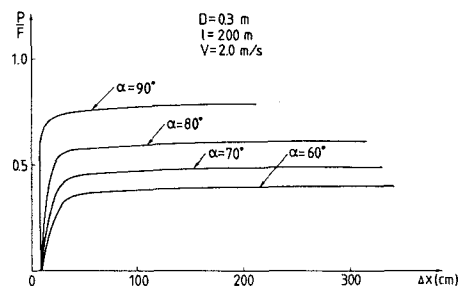


図-4(c) 荷重-水平変位 (v=2m/s)