I-364　浮体係留基礎に関する研究

鹿島建設（株）　○正員　伊藤　寧
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

海上構造物を建設する際に最も重要となるのは、支持地盤の問題である。良好な地盤が容易に得られることは希であり、基礎の施設のためには海底地盤の改良をはじめとする大規模な施工を余儀なくされる。そこで、広い海峡の間を横断するような長大橋梁の基礎として複数のケーブルによって海底に定着された水中浮体を利用することを考える。ケーブルによる浮体係留構造に対しては動的な非線形解析を行うのが一般的であるが、ここでは基礎としての構造特性を考慮して、その静的安定性と耐力の解析を中心とする。浮体係留基礎の研究としては、2 次元解析の例[1]や変位制御による 3 次元解析の例[2]が存在するが、後者の場合も浮体の回転を同一軸回りの回転に限定しているために、基礎としての安定性を評価する上では必ずしも現実的でない条件での解析となる場合がある。そのためここでは同一軸回りの回転に限られない浮体回転を考慮した荷重制御解析によって、浮体係留構造の 3 次元挙動の解析を行った。

2. ケーブルの支配方程式

浮体を係留するケーブルは引っ張りのみに抵抗するものとし、1 次元のHookeの法則にしたがった伸びを考慮するが、断面の変形については考えない。作用する外力として浮力と潮流力を考慮したケーブルの支配方程式は 2) より次の無次元化された式で表される。

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

$$d\phi/d\xi = 1/t\ \{1/(2\cos\phi)\cdot C_{TN} k_1 k_2 (1+t)\sin(\psi-\alpha)\,|\sin(\psi-\alpha)|\}$$

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

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

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

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

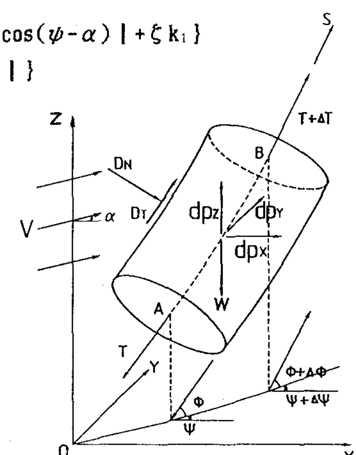

図-1 ケーブル要素モデル

ここに変数 ξ はケーブル軸に沿った s 軸をケーブル長 L で無次元化したものである。 またその他の変数は次のように定義される。

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

$$\eta_x(\xi) \equiv x(s)/L,\ \eta_y(\xi) \equiv y(s)/L,\ \eta_z(\xi) \equiv z(s)/L$$

$$\zeta \equiv AW/\gamma,\ k_1 \equiv \gamma L/E,\ k_2 \equiv C_{DN} D V^2/(gA)$$

$$C_{TN} \equiv C_{DT}/C_{DN}$$

ここに 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_{DN},C_{DT} = 軸線の法線方向および接線方向の抗力係数, ケーブルの単位長さ単位体積重量, V = 一様定常な潮流の流速

3. 解析モデル

実際の数値計算に用いたモデルは図-2 に示す 4 点係留構造である。ケーブル 1 本に対する方程式は 6 本であるのでこの問題は 24 元連立微分方程式となるが、これに対する境界条件は ξ = 0 でのケーブル定着点の座標、浮体に作用する外力と ξ = L での張力のつり合いおよび ξ = L でのケーブル座標相互の関係によって与えられるため、 2 点境界値問題として解けばよい。数値解析法として Adjoint-Method[3] を使用した。実際の数値計算ではケーブル長 L = 100m 、浮体の浮力は 10000t とし、作用外力として浮体重心に作用する水平外力、鉛直外力と浮体重心を通る軸回りのモーメントを考えている。α はモーメントの向き

を表す角度であり、ここでは $\alpha = 0°, 15°, 45°$ の場合について、モーメントとその軸方向の水平外力が作用するときの例を示す。水平外力は潮流力をモデル化したものであるが、ケーブル自体に作用する潮流力の影響は、浮体に作用する潮流力の影響に比べて小さいことが 2) からわかっているため考慮しない。なお 2) より $L = 100m$ のときの最大載荷荷重 $(f_z)_{max}$ は 9700t である。図-3 はモーメントをケーブルの剛性と浮体の半径で無次元化したものと モーメント軸回りの回転角 θ の関係を示したものである。ケーブル配置によってその非線形性に違いがあり、また f_h によって受ける影響にも一定の傾向は見られないが、モーメントが大きくなるにつれて回転に対する剛性が 低下していくのが全体的な傾向である。$\alpha = 0°$ の場合と $\alpha = 15°$ の場合では変形直後に一次的に剛性が高くなり、その後ある点を変曲点として減少に向かうのがわかる。

図-4は鉛直軸を基準とした回転角 ϕ を $M/(EAR_m)$ に対してプロットしたものである。ϕ は M と仕事をしない角度であり、浮体がどれだけ倒れたかを表わす。この図から、M によって浮体の面外への回転にも影響がでることがわかる。初期状態での角度は f_h のみによって生じた浮体回転を表している。$\alpha = 45°$ の場合で $f_h = (f_z)_{max} \times 10\%$ のときはあるモーメントレベルまで回転角に変化が起きないが、その後急速に剛性を失う。このことと図-3 とを合わせて考えると、初期状態での ϕ を保ったままで z 軸回りの回転が生じていることがわかる。つまり M によって浮体ケーブル系に z 軸回りのねじれが生じ、ケーブル張力の状態が変化したことによって モーメント に対する抵抗を失ったのである。

図-5 はモデル B に関しての f_h によるケーブル張力の変化を示したものである。水平外力がない場合はモーメントがあるレベルに達すると No.2,3 ケーブルの張力が零になり、No.1,4 ケーブル 2 本だけで モーメント に抵抗することがわかる。そしてこの瞬間が図-3 における曲線の変曲点となっている。f_h が作用する場合は 4 本のケーブル全てがモーメントに対する抵抗を分担し、ケーブル張力が零となることはない。しかし剛性はこの場合の方が低くなる。

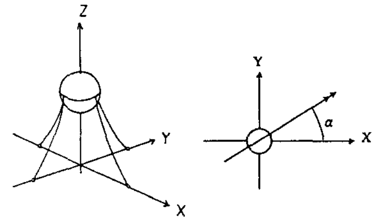

図-2 4点係留モデル

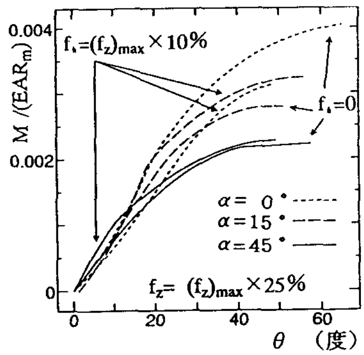

図-3 M /(EAR$_m$) – θ 関係

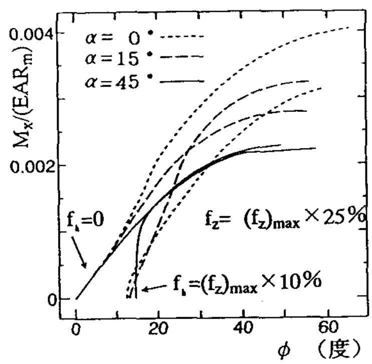

図-4 M /(EAR$_m$) – φ 関係

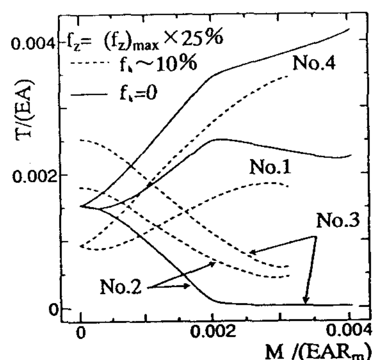

図-5 f_hを受けるときの張力の変化
($\alpha=0°$)

参考文献

1) 藤井・倉西・岩熊：水中係留基礎に関する研究、年次学術講演会概要集　I-11,1990

2) 大本・倉西・岩熊：海中ケーブルによる浮体構造に関する研究、年次学術講演会概要集　I-13,1991

3) Roberts,S.M.and Shipman,J.S.:Two-Points Boundary Varue Problems;Shooting Method,pp.17-49,ELSEVIR,1972