

I-402 潮流力作用下の水中橋梁に関する考察

鳥取大学工学部 正 員 神部 俊一
鳥取大学大学院 学生員 加藤 孝志

1. まえがき

メッシナ海峡連絡路の一試案として水中橋梁が提案されて久しいにもかかわらず、未だに世界で建設された実績はない。この構造形式は、完全に没水する構造本体の排水量に起因する浮力を荷重を支持するための極めて有力な手段とするので、力学的な観点からは魅力があるが、解決すべき多くの課題を抱えており未来を志向するものであるのは確かなようである。水中橋梁に関しては、解説や総説以外に公表された論文¹⁾は筆者等の知る限り極めて少ない。本稿では、一組のロッドから構成される係留系によって支持され一様な潮流の中に置かれた水中橋梁に対して、潮流による流体力とこの流体力の作用によって引き起こされる動揺を記述する基礎方程式とについて考察する。

2. 係留系の初期張力

係留作業時において隣接する二つの係留系の間の函体部分に作用する浮揚力を F_B 、函体の係留点における鉛直方向上向きの剛体変位を Δ_B 、係留系の第 j -番目のロッドに生じる初期張力を T_j 、当該ロッドの剛性影響係数を λ_j とすれば、図-1を参照して当該のロッドの応力-変位関係式と函体に関する平衡条件式は次のように書かれる。

$$\mathbf{T}_j = T_j \mathbf{e}_j = \lambda_j \Delta_B \mathbf{e}_j \quad (1)$$

$$F_B = \sum_j (\mathbf{T}_j \cdot \mathbf{e}_y) = \Delta_B \sum_j \beta_j \lambda_j \quad (2)$$

ここに、 $\beta_j = (\mathbf{e}_j \cdot \mathbf{e}_y)$ である。

そこで、両式より Δ_B を消去すると初期張力 T_j が次式により求まる。

$$T_j = F_B \frac{\lambda_j}{\sum_j \beta_j \lambda_j} \quad (3)$$

3. 係留系の復元力

初期張力 T_j が導入された第 j -番目のロッドに対して、函体の動揺に伴い生じる伸縮と傾き角の増減に注意すると、剛性マトリックス $[\mathbf{K}_j]$ の成分である線形化された復元力係数は次のようになる²⁾。

$$\begin{aligned} k_{xx}^{(j)} &= \lambda_j \alpha_j^2 + (T_j / L_j) \beta_j^2 \\ k_{yy}^{(j)} &= \lambda_j \beta_j^2 + (T_j / L_j) \alpha_j^2 \\ k_{xy}^{(j)} &= (\lambda_j + T_j / L_j) \alpha_j \beta_j = k_{yx}^{(j)} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $\alpha_j = (\mathbf{e}_j \cdot \mathbf{e}_x)$ である。

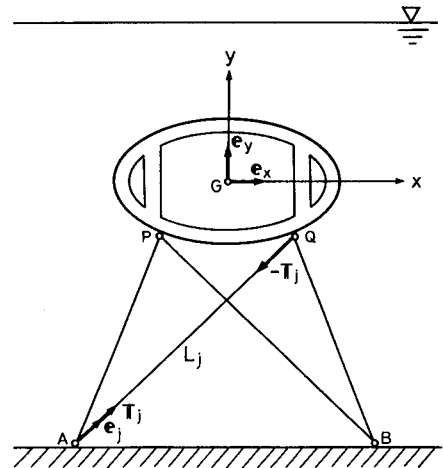


図-1 水中橋梁の係留系

当該ロッドの剛性方程式は、函体との結合点における反力ベクトル $\{\mathbf{F}_j\}$ と変位ベクトル $\{\mathbf{u}_j\}$ とを用いて次のように書かれる。

$$\{\mathbf{F}_j\} = [\mathbf{K}_j] \{\mathbf{u}_j\} \quad (5)$$

次に、結合点の座標を (x_j, y_j) として、函体の重心Gの剛体変位ベクトル $\{\mathbf{u}_G\}$ を結合点の変位ベクトル $\{\mathbf{u}_j\}$ に関連付ける変換行列 $[\mathbf{R}_j]$

$$[\mathbf{R}_j] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_j \\ 0 & 1 & x_j \end{bmatrix} \quad (6)$$

を用いると、次の反傾関係が成り立つ。

$$\{\mathbf{u}_j\} = [\mathbf{R}_j] \{\mathbf{u}_G\} \quad (7)$$

$$\{\mathbf{F}_G\} = -[\mathbf{R}_j]^T \{\mathbf{F}_j\} \quad (8)$$

ここに、 $\{F_G\}$ は $\{F_J\}$ から点Gに関する力-偶力系に変換された力系を意味する。そこで、式(5)、(7) および (8) を組み合わせて、係留系の復元力が点Gに及ぼす影響を考慮に入れた剛性方程式を求めると次式ようになる。

$$\{F_G\} = -[K_G]\{u_G\} \quad (9)$$

ここに、

$$[K_G] = \sum_J [R_J]^T [K_J] [R_J] \quad (10)$$

4. 潮流力の算定

離散渦法は、剥離剪断層が発生する鈍体周りの高レイノルズ数領域における流れ場を効率良く解析できる有用な方法である。境界層と剥離剪断層を代表する有限個の渦系を特異点とするポテンシャル流として、流れ場は解析されるので、この流れ場に適切な等角写像を施せば、これらの特異点と共に他の流れ場に写像される。しかるに、円柱断面における乱流境界層の剥離点は渦み点からの角度にしておよそ $\theta=115^\circ$ の点であることが知られている。そこで、この剥離点近傍の渦放出点をジュウコフスキー変換により楕円柱体表面近傍の点に写像し、離散渦法を用いて厚み比が2の楕円柱体周りの流れ場を解析した。迎え角を $0^\circ, 3^\circ$ および 5° に変えて計算により得られた抗力係数 C_D と揚力係数 C_L を図-2に示す。この場合、楕円柱体の長径を $a=20m$ 、潮流の一樣流速を $U=1.35 \text{ m/s}$ とした。しかるに、 10°C における海水の動粘性係数は $\nu=1.31 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ であるのでレイノルズ数は $Re=1.03 \times 10^7$ となる。

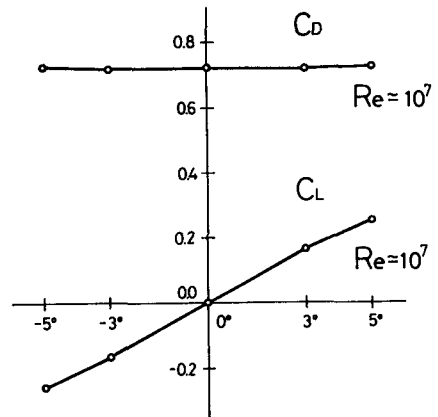


図-2 楕円柱体の流体力係数

5. 運動方程式

構造本体にダランベールの原理を適用して運動方程式を求めると、次式により表される。

$$[L]\{u_G\} + ([M] + [m])\{\ddot{u}_G\} + [C]\{\dot{u}_G\} + \sum_k [K]\{u_G\} \delta(z - d_k) = \{F_H\} \quad (11)$$

ここに、 $[L]$: 曲げ剛性と捩じり剛性を係数とする微分演算子、 $[M]$: 函体の質量マトリックス、 $[m]$: 付加質量マトリックス、 $[C]$: 構造本体と係留系の線形化された減衰マトリックス、 $\{F_H\}$: 流体力ベクトル、 $\delta(z)$: デルタ関数、 d_k : 係留系の設置間隔 である。

なお、楕円柱体のように簡単な形状の横断面に対しては、付加質量係数はポテンシャル理論に基づいて閉じた形で求められている。

6. おわりに

水中橋梁の動的応答解析を的確に行うには、実験を実施するのが困難である 10^7 以上の高レイノルズ数領域において鈍頭物体に作用する流体力をできるだけ正確に評価する必要がある。離散渦法には多くの不確定なパラメータが含まれているが、これらを適切に選ぶことができれば、上記の流れ場の解析手法として有用であると期待できる。鈍頭物体に対しては、高レイノルズ数領域において渦励振動による不安定現象の発生する可能性が予想されるので、この現象に関する研究を進める必要があると考えられる。

参考文献

- 1) F.Brancaleoni, A.Castellani and P.D'Asdia : The response of submerged tunnels to their environment, Eng. Struct. 1989, Vol. 11, January, pp. 47~56.
- 2) M.H.Patel and E.J.Lynch : Coupled dynamics of tensioned buoyant platforms and mooring tethers, Eng. Struct. 1983, Vol. 5, October, pp. 299~308.