

延縄式養殖施設の波浪応答に関する研究

鳥取大学工学部 正員 野田英明
鳥取大学工学部 正員 松原雄平
昭和電気建設 正員 ○田中英利

1. はじめに: 著者らは、この数年来、延縄式養殖施設の波浪応答に関して理論的ならびに実証的な検討を加えてきた。すでに波浪応答解析モデルとして、離散化要素法による解析モデルを提案するとともに、模型実験ならびに現地での実証実験を行って、モデルの算定精度について検討している。しかしながら従来の解析法は、必ずしも全ての実験結果を説明するまでに至ってなく、ある特定の波浪条件下では、収斂が遅い場合や、発散する場合がみられた。そこで、この研究では、新たに、有限要素法によって施設と等価なケーブルモデルを導入し、個々のケーブル要素の運動方程式を導き施設の応答量を算定する解析モデルを導こうとするものである。

2. 有限要素法による動的応答解析: 図-1は、山陰沖の日本海で実際に係留されている延縄式養殖施設を模式的に示したものである。養殖用の籠は、メインロープ上から等間隔に係留ロープによって垂下されている。また、メインロープから垂下係留される養殖籠の水中重量と、ほぼ釣り合うように浮力用のブイが設置されることから、モデル化に当たっては、個々のメインロープ部を水中重量0kgfのケーブルによって置き換え、メインロープ部の運動方程式を導く。運動方程式を誘導するに際し、さらに次の仮定を設けた。

- 1) 波は微小振幅波で表され、施設は波向きに平行に係留されている。
- 2) メインロープ部に作用する流体力は、ケーブルに作用する流体力で代用される。
- 3) ケーブルの運動は波の進行方向を含む二次元に限られ、両端ブイの水平ならびに鉛直方向の変位は、微小で一種の固定端とみなす。

図-2は、延縄式養殖施設のメインロープの微小区間 ds を取り出し、局所座標へ座標変換を行い、このロープに作用する外力を模式的に示したものである。そこで、形状関数 $N = (N_1, N_2) = (1 - \xi, \xi)$ を導入する、ロープ要素両端の運動方程式は以下のように与えられる。

$$[M] \ddot{\xi} = F + [K] \cdot \xi$$

ここに、 $[M]$: 質量行列、 F : モリソン波力ベクトル、 $[K]$: 剛性行列、 ξ : 位置ベクトル、 $\ddot{\xi}$: 加速度ベクトルである。以下では、各項について示す。

- i) 質量行列: 今、ケーブルの断面積は ξ 方向に変化しないとすると、質量行列は次のように表される。

$$[M_{ij}] = \rho_s \cdot A \int_0^1 N_i N_j J d\xi \quad (i, j=1, 2)$$

ここに $J = [(N' X_m)^2 + (N' Y_m)^2]^{0.5}$ であり、 $'$ は ξ に関する微分を表す。 X_m および Y_m は、それぞれ $X_m = (x_1, x_2)^T$ 、 $Y_m = (y_1, y_2)^T$ であり、要素 m の静止時の節点座標を表す。

- ii) 付加質量行列: モリソン式の付加質量項を移項し局所座標系 X, Y 軸に座標変換すると次のようになる

$$[M_{\text{aj}}] = \int_0^1 B^T D B J^* d\xi \quad (i, j=1, 2) \quad \text{ここで} \quad B = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 \end{bmatrix}, \quad D = \rho_s C_{am} \cdot A (P_1 + e_1 e_1^T)$$

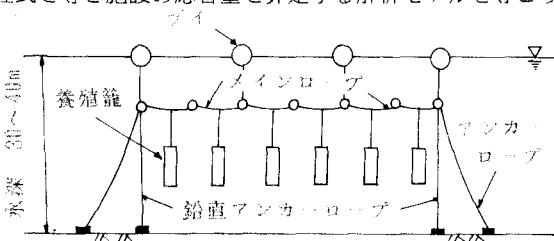


図 1 延縄式養殖施設

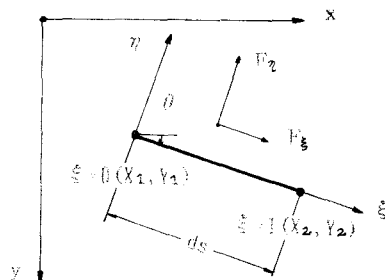


図 2 ロープに作用する力と座標変換

$J^* = \{ (N' X_m^*)^2 + (N' Y_m^*)^2 \}^{1/2}$, X_m^* および Y_m^* はそれぞれ $X_m^* = \{x_1^*, x_2^*\}^T$, $Y_m^* = \{y_1^*, y_2^*\}^T$ で変動時の節点座表を表す。また $e_i = \{N' X_m^* / J^*, N' Y_m^* / J^*\}$ である。したがって最終的に行列 M は、実質量行列と付加質量行列との和で与えられる。

iii) 剛性行列：要素のばね係数を k とし静止時にばねは伸びていないとすると、ばねに働く力および剛性行列は

$$F_k = k \left\{ \int_0^1 J^* d\xi - \int_0^1 J d\xi \right\}, \quad [K] = k \left\{ 1 - \frac{J}{J^*} \right\} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{と表される。}$$

iv) 流体力による減衰行列：モリソン式の抗力項を、流体の運動による要素に作用する抗力成分と要素の運動にともなう流体抵抗成分とに分離し流体力による減衰行列を求めると次のようになる。

$$[C] = \frac{1}{2} \rho C_D D \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix}, \quad C_{11} = \int_0^1 N_1 N_1 \sin \theta X a J^* d\xi, \quad C_{13} = \int_0^1 N_1 N_2 \sin \theta X a J^* d\xi \\ C_{12} = -\cos \theta C_{11}, \quad C_{14} = -\cos \theta C_{13} \\ C_{21} = -\int_0^1 N_1 N_1 \sin \theta Y a J^* d\xi, \quad C_{23} = -\int_0^1 N_1 N_2 \sin \theta Y a J^* d\xi, \quad C_{31} = C_{13} \\ C_{22} = -\cos \theta C_{21}, \quad C_{24} = -\cos \theta C_{23}, \quad C_{32} = C_{14} \\ C_{33} = \int_0^1 N_2 N_2 \sin \theta X a J^* d\xi, \quad C_{41} = C_{23}, \quad C_{43} = -\int_0^1 N_2 N_2 \sin \theta Y a J^* d\xi \\ C_{34} = -\cos \theta C_{33}, \quad C_{42} = C_{24}, \quad C_{44} = -\cos \theta C_{43}$$

ただし、 $X a = \sin \theta \left\{ \begin{array}{l} \sin^2 \theta \left\{ N_1 (u_1 - \dot{X}_1^*) + N_2 (u_2 - \dot{X}_2^*) \right\} - \sin \theta \cos \theta \left\{ N_1 (w_1 - \dot{Y}_1^*) + N_2 (w_2 - \dot{Y}_2^*) \right\} \\ \sin \theta \cos \theta \left\{ N_1 (u_1 - \dot{X}_1^*) + N_2 (u_2 - \dot{X}_2^*) \right\} - \cos^2 \theta \left\{ N_1 (w_1 - \dot{Y}_1^*) + N_2 (w_2 - \dot{Y}_2^*) \right\} \end{array} \right\}$

$Y a = \cos \theta \left\{ \begin{array}{l} \sin^2 \theta \left\{ N_1 (u_1 - \dot{X}_1^*) + N_2 (u_2 - \dot{X}_2^*) \right\} - \sin \theta \cos \theta \left\{ N_1 (w_1 - \dot{Y}_1^*) + N_2 (w_2 - \dot{Y}_2^*) \right\} \\ \sin \theta \cos \theta \left\{ N_1 (u_1 - \dot{X}_1^*) + N_2 (u_2 - \dot{X}_2^*) \right\} - \cos^2 \theta \left\{ N_1 (w_1 - \dot{Y}_1^*) + N_2 (w_2 - \dot{Y}_2^*) \right\} \end{array} \right\}$

v) 流体力ベクトル：モリソン式の慣性力項および上記の抗力項の減衰力を除いた抗力より求める。

これらのことより応答解析の基礎式を有限要素で離散化された系について書き表すと次のようになる。

$$[M] \ddot{x} + [C] \dot{x} + [K] x = F$$

ここに $[M]$ ：質量行列， $[C]$ ：減衰行列， $y(\text{cm})$

$[K]$ ：剛性行列， F ：流体力ベクトル

$\ddot{x}$ ：加速度ベクトル， $\dot{x}$ ：速度ベクトル，

x ：位置ベクトルである

また、時間積分には New mark の β 法を適用した。

3. 応答計算例

図-3 ならびに図-4 は、有限要素解析から得られた応答解析結果であり、最大変位点の包絡線で示したものである。図-3 は水深 45cm、波高 5.54cm、周期 0.92sec、一方、図-4 は、波高 4.42cm、周期 1.3sec の波浪条件から得られた結果であり、いずれにおいても、慣性力係数 $C_M y(\text{cm}) = 2.0$ 、抗力係数 $C_D = 1.17$ 、付加質量係数 $C_{Am} = 1.0$ とし、ばね定数 $k = 2\text{gf/cm}$ に設定している。計算時間の刻み幅は、試行錯誤的に種々の値で計算を行った結果、周期の 1/50 程度とした。図-3 から、動揺振幅は場所的に大きな差はないこと、相対的に岸側において中立点より下向きの動揺量が大きくなる。同様に図-4 では、 $x=160\text{cm}$ 付近に最小の動揺点が見られるが、必ずしも明確ではない。最大変位点は $x=180\text{cm}$ あたりに現れ、その値は 4cm 程度である。従来の結果との詳細な比較は講演時に譲る。

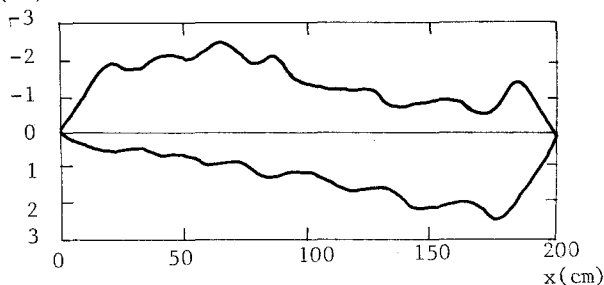


図-3 最大変位包絡線図 (計算例 1)

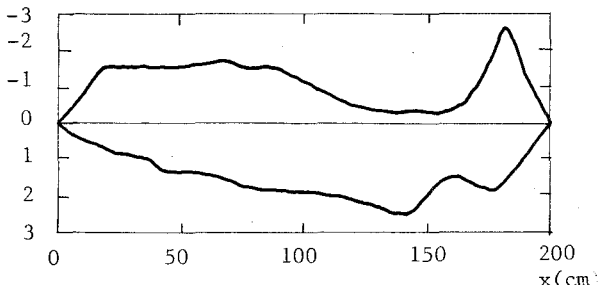


図-4 最大変位包絡線図 (計算例 2)