

新型汚濁防止膜の係留張力と運動に関する数値モデルの適用性

田端竹千穂* ・ 播 本 一 正** ・ 北 川 俊 治**・平 石 哲 也***
中 川 寛 之****・溝 口 忠 弘*****・宮 里 一 郎*****

1. はじめに

波漂や埋立等の海洋工事では、濁った海水の拡散を防止するため汚濁防止膜が展張される。一般的に使用される汚濁防止膜はゴム製のフローターをつないでその下部に膜を取り付けた構造となっているため、高波浪中の耐波性能に問題があり、さらにゴム材が高価なため設置費用が高コストになる。

著者らはこれらの問題点を解決するため、新型汚濁防止膜を開発し水理模型実験および現地海域における実証試験を行ってきた。この新型汚濁防止膜は、浮き玉にワイヤーを通し、それを円筒部（係留管）に接続させ係留させる構造様式であるため、従来のゴム製フローターによる汚濁防止膜に比べ構造強度が向上しており、さらに従来型に比べフレキシブル性が高く耐波安定性に優れている（田端ら、2000）。

また、著者らはこの新型汚濁防止膜の開発を通じて、新たな簡易張力算定モデルの提案も併せて行った。この新張力算定モデルは、波によるフロートの運動エネルギーと係留ロープの弾性エネルギーとの静的釣合方程式より構成されるモデルである。しかし、この新張力算定モデルには、水理模型実験から求まる質量係数が含まれており、実験条件の範囲外においての検証が不十分である。さらに、新型汚濁防止膜はフレキシブルな構造様式であるため、実海域のように複雑な波・流れの状況下における係留管およびフロートの運動を考慮しうる数値モデルが必要とされた。

本研究は、新型汚濁防止膜の係留張力と運動に関する数値モデルを構築し、水理模型実験（田端ら、1999）および現地実証試験（田端ら、2000）結果との比較により数値モデルの検証を行った後、高波浪下における新型汚濁防止膜の張力の発生特性について検討することを目的としたものである。

2. 新型汚濁防止膜の係留張力と運動の数値モデル

(1) 運動方程式

図-1 に示すような座標系に対し、浮体の運動方程式は次式で表される。

$$m_i \ddot{X}_i + b_i \dot{X}_i + k_i X_i = f_{Ri} + f_{Wi} + f_{Ci} + f_{Si} \cdots \cdots (1)$$

ここで、 m_i ：浮体の質量と付加質量の和、 b_i ：減衰力係数、 k_i ：復元力係数、 f_{Wi} ：波力、 f_{Ci} ：潮流力、 f_{Ri} ：アンカーロープおよび水平ロープによる係留反力、 f_{Si} ：膜による外力である。なお、 X_i は係留管およびフロートの変位を表しており、係留管に関しては $(x_i, y_i, z_i, \phi_i, \theta_i, \psi_i)$ の 6 モード、フロートに関しては (x_i, y_i, z_i) の 3 モードとした。

(2) 係留反力

i) アンカーロープ

アンカーロープによる係留反力 $f_R(\ell_k, \ell_z)$ は、アンカー点座標 X_a 、係留点座標 X_m より鉛直距離 ℓ_k および水平距離 ℓ_z の変位を算出し、ワイヤーの伸びを考慮したカタナリー特性より求めた。ここに

$$\ell_z = z_m - z_a \cdots \cdots (2)$$

$$\ell_k = \sqrt{(x_m + x_a)^2 + (y_m - y_a)^2} \cdots \cdots (3)$$

である。

ii) 水平ロープ

水平ロープの係留反力 f_R は、次式に示す線形ばねモデルにより算出する。

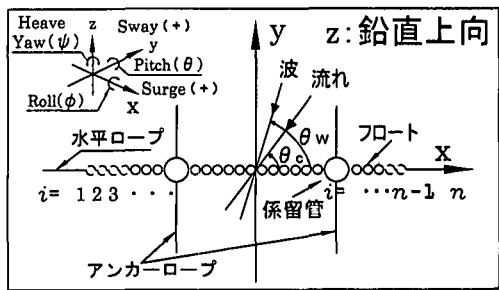


図-1 座標系

* 正会員 工修 財団法人国際臨海開発研究センター
** 関西国際空港株式会社工務部設計課
*** 正会員 工博 独立行政法人港湾空港技術研究所波浪研究室長
**** 工修 株式会社三井造船昭島研究所事業統括部
***** 正会員 株式会社エコー環境水理部横浜分室
***** 正会員 工修 株式会社エコー環境水理部横浜分室

$$f_R = k\Delta\ell \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 k : 浮体間のバネ定数、 $\Delta\ell = \ell - \ell_0$: 浮体間の変位である (ℓ : 変位後の長さ、 ℓ_0 : 初期の長さ)。

なお、係留管とフロート間の変位を求める際には、係留管の回転を考慮する。

$$x_m = x_C + \Re x_L \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 x_m : 係留点座標 (地球固定座標)、 x_C : 係留管重心座標 (地球固定座標)、 x_L : 係留点座標 (物体固定座標)、 $\Re$: 座標変換行列 (物体固定→地球固定) である。

$$\Re(\phi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} 1 & \phi & -\theta \\ -\phi & 1 & \phi \\ \theta & -\phi & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

(3) 波浪による強制力

時刻 t における不規則波が次式で表されるとき、

$$\zeta = \sum_{i=1}^N a_i e^{i(\omega_i t + \epsilon_i)} \dots\dots\dots (7)$$

波強制力のモード ($j=1\sim 6$) に対して以下の波強制力が働く。

$$f_{wj} = \sum_{i=1}^N a_i e_{wi,j} e^{i(\omega_i t + \epsilon_i + \epsilon_{i,j})} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $e_{wi,j}$: 波強制力振幅 (円周波数 i , モード j)、 $\epsilon_{i,j}$: 波強制力位相 (円周波数 i , モード j)、 ω_i : 円周波数、 a_i : 素成波振幅 ($=\sqrt{2S\Delta\omega_i}$)、 ϵ_i : 素成波位相 (ランダム)、 S : 不規則波のスペクトラム (Bretschneider—光易型) である。ここで、係留管に作用する流体力は領域分割法により算出した (例えば、合田ら、1976)

また、水平面内モード (surge, sway, yaw) に対しては、Hsu ら (1970) の方法により波漂流力 (2 次強制力) を考慮した。

(4) 浮体に作用する潮流力

x および y 方向の相対流速をそれぞれ U_x および U_y とすると、フロートおよび係留管に作用する潮流力 f_c は次式で示される。

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}\rho C_D U_x |U_x| S \\ -\frac{1}{2}\rho C_D U_y |U_y| S \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 S : 投影面積、 C_D : 抗力係数である。

(5) 係留管およびフロートの復元力

浮体に変位すると、浮体を元の静止位置に戻そうとする復元力が作用する。この復元力は、鉛直方向の変位と水平軸回りの回転運動によって生じる。本数値モデルでは、係留管の復元力として z 方向および回転、フロートの復元力として z 方向のみを考慮する。

i) 係留管の復元力

係留管の z 方向復元力を次式に示す。

$$F_z = (\rho(\nabla - zA_w) - M)g \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 ρ : 水の密度、 ∇ : 静止水面での排水容積、 z : Heave、 A_w : 水線面積、 M : 浮体質量、 g : 重力加速度である。

回転に対する復元力は、 x および y 軸まわりのモーメントを M_x , M_y とすると、次式となる。

$$M_x = -Mg\overline{GM}\phi \quad M_y = -Mg\overline{GM}\theta \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 $\overline{GM}$: メタセンタ高さである。

ii) フロートの復元力

フロートの z 方向復元力を次式に示す。

$$F_z = \rho g(\zeta - z)A_w \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度、 ζ : フロート位置の波高、 A_w : プイの水線面積、 z : Heave である。

(6) 膜による外力

i) 膜の変形のモデル化

膜の変形のモデル化として、①膜自体の慣性力は考慮しない (ある瞬間における静的釣合位置を求める)、②膜は時刻において x - z 平面内にある、③膜は z 軸回りに大きな変位はしない、という仮定のもと図-2 に示すモデル化を行う。膜における力の釣合は、地球固定座標系を用いると以下の通りとなる。

$$\begin{cases} F_x = T_{Hx[i,j]} + T_{Hx[i-1,j]} + T_{Vx[i,j]} + T_{Vx[i,j-1]} + F_{x[i,j]} = 0 \\ F_y = T_{Hy[i,j]} + T_{Hy[i-1,j]} + T_{Vy[i,j]} + T_{Vy[i,j-1]} + F_{y[i,j]} = 0 \\ F_z = T_{Hz[i,j]} + T_{Hz[i-1,j]} + T_{Vz[i,j]} + T_{Vz[i,j-1]} + F_{z[i,j]} - mg = 0 \end{cases} \dots\dots\dots (13)$$

ここに、横方向 ($i-1 \leftrightarrow i+1$ の方向) については、

$$\begin{aligned} \text{長さ: } \ell_{H[i,j]} &= \sqrt{(x_{i-1,j} - x_{i,j})^2 + (y_{i-1,j} - y_{i,j})^2 + (z_{i-1,j} - z_{i,j})^2} \\ \text{伸び: } \Delta\ell_{H[i,j]} &= \ell_{H[i,j]} - \ell_{0H[i,j]}, \quad \text{張力: } T_{H[i,j]} = k\Delta\ell_{H[i,j]} \end{aligned}$$

である。 T_V に関しても、 T_H と同様にかかる。

ここで、 F_x , F_y , F_z は膜に対する波粒子速度による外力であり、法線方向にのみ力が作用するものと仮定すると、図-2 に示すように xy および xz 面への投影面積 S_x および S_y より、膜に作用する外力は次式となる。

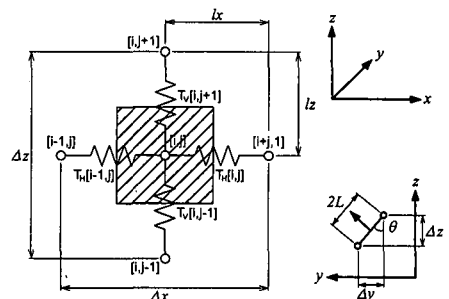


図-2 膜のモデル化および座標系

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.5\rho \cdot C_D \cdot S_y \cdot U_n |U_n| \\ 0.5\rho \cdot C_D \cdot S_y \cdot U_n |U_n| \end{bmatrix} \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 U_n ：波粒子速度、 S ：投影面積、 C_D ：抗力係数である。

一方、本数値モデルでは小田ら (1996) および青木ら (1998) による膜の有効高さの簡易式 (式 (18) 参照) より、 y 方向に作用する抗力を簡易的に求めることも可能とした。以下に、潮流および波による簡易抗力算定式を示す。

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{2}\rho C_D (U_c \sin \chi_c) |U_c \sin \chi_c| S_i \\ -m_i g \end{bmatrix} \dots\dots\dots (15)$$

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{2}\rho C_D \alpha \left(\frac{H_{1/3}}{2} \frac{2\pi}{T_{1/3}} \right) \left| \frac{H_{1/3}}{2} \frac{H_{1/3}}{T_{1/3}} \right| S_i \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (16)$$

ここに、 U_c ：潮流速度、 χ_c ：流れの向き、 $H_{1/3}$ ：有義波高、 $T_{1/3}$ ：有義波周期、 m_i ： i 番目浮体の下の膜及び錘の水中重量の合計、 g ：重力加速度、 S_i ： i 番目浮体の下の有効面積 ($=l_{Hi} \times d_e$)、 l_{Hi} ： i 番目浮体の下の膜幅、 d_e ：簡易式より求まる有効膜丈長、 C_D ：抗力係数、 α ：実験定数である。

(7) 浮体の係留張力および運動の解析

式 (2)～(16) で求められた波浪強制力、造波減衰力、係留力および復元力を式 (1) の運動方程式に代入すれば、次式に示す浮体の運動に関する連立方程式が求まる。

$$\ddot{X} = M^{-1}F \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 M ：質量行列、 X ：浮体の変位列ベクトル、 F ：外力の列ベクトルである。式 (17) に示す加速度を時間積分する事により、浮体の座標が求まる。なお、時間積分の手法としては、Runge-Kutta 法を用いた。

3. 水理実験および現地観測結果による数値モデルの検証

(1) 実験結果との比較

i) 膜の変形計算

図-3 に、膜の有効高さの実験値と数値モデルによる計算値の比較を示す。計算条件としては、膜の単位長さあたりの空中重量 $W=34.6 \text{ kgf/m}$ (339.1 N/m)、膜丈長 5.0 m とした。なお、図中実線は (18) 式に示す膜の有効高さの簡易式による計算結果である。

ここで、小田ら (1996) は β に 1.1 を提案しているが、水理実験では $\beta=1.5$ となるものと判断された。この β は数値モデル中に含まれる膜の抗力係数であり、本数値モデルの抗力係数を $C_D=1.5$ として計算を行った。

$$d_e = -\frac{W}{\sigma} \sin\left(\frac{\sigma d}{W}\right) \quad \sigma = \frac{1}{2}\beta\rho\bar{U}^2 = \frac{1}{2}\beta\rho\left(\frac{\bar{U}h}{h-d_e}\right)^2 \dots\dots\dots (18)$$

ここに、 W ：膜の空中重量、 σ ：膜単位長さあたりの流体力、 $\bar{U}$ ：膜下部での縮流した平均流速、 β ：実験定数、 h ：膜設置水深である。

図より、実験結果と数値モデルによる計算結果を比較すると、両者は比較的よく一致している。特に、水理実験では重鎮を膜に均等に取り付けているため、簡易式に比べ膜の有効高さが小さめに見積もられていたが、数値モデルにおいても膜に対し中間シンカーを取り付ける形で計算を行うことにより、より厳密に膜のふかれ変形を求めることが可能な計算モデルとなっている。

ii) 波・流れ共存場における係留力

図-4 は (17) 式中に含まれる実験定数 α の推定結果である。計算条件は、 $H_{1/3}=2.8 \text{ m}$ 、 $T_{1/3}=6.2 \text{ s}$ 、 $U_c=0.0 \text{ m/s}$ 、 θ_w 、 $\theta_c=90.0^\circ$ とした。ここで、 α の推定に際しては、アンカーロープ張力を用いて行っている。表-1 に浮体および係留索の諸元を示す。

図より、 $\alpha=0.175$ において実験結果と計算結果が一致しており、実験定数としては $\alpha=0.175$ とすることがよいものと判断される。

図-5 は、水平ロープおよびアンカーロープ張力の実験結果と計算結果の比較図である。ここで、データを比較する際には、時系列データより、有義片振幅を算出し比較を行った。なお、水理実験では防止膜の両端が支柱により支持されているため、端部の係留管については膜方向に対し、 15 kN/m の線形パネを考慮し計算を行っている。

図より、計算結果と実験結果を比較すると、流速 0.75

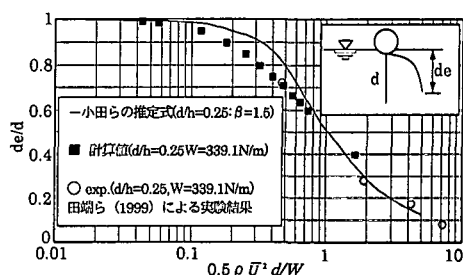


図-3 膜の有効高さの実験値と計算値の比較

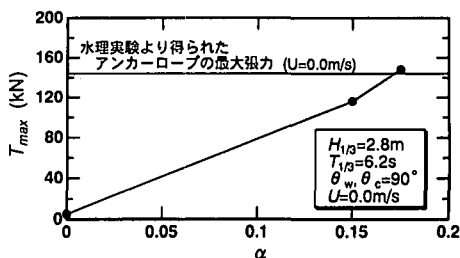


図-4 実験定数 α の推定結果

表-1 浮体および係留索の諸元

項 目	水理 実験	現地 観測
係留管直径 (m)	2.0	1.5
係留管の喫水 (m)	1.25	1.25
係留管の重心高さ (m)	0.315	0.315
係留管の質量 (kg)	3767.0	1938.0
重心から水平ロープまでの高さ (m)	0.935	0.935
重心からアンカーロープまでの高さ (m)	-0.30	-0.30
フロート直径 (m)	0.80	0.80
フロート質量係数	0.5	0.5
係留管抗力係数	1.17	1.17
フロート抗力係数	0.5	0.5
水平ロープ・アンカーロープヤング率 (Gpa)	236.2	137.3
水平ロープ初期張力 (kN)	10.0	10.0
アンカーロープ呼び径 (mm)	30.0	40.0
アンカーロープ単位長さあたり水中重量 (N/m)	—	45.8
アンカーロープ長さ	43.1	47.0

*水理模型実験については、現地量に換算した値を用いている

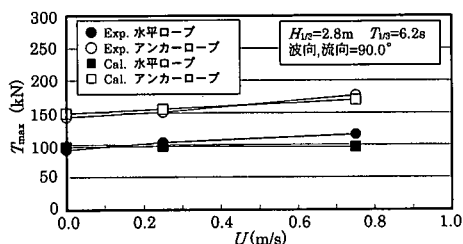


図-5 張力の計算結果と実験結果の比較

m/s時のテンション部の張力が僅かに小さい値を示しているものの、その他の条件に関してはほぼ一致しており、本数値モデルは波・流れ共存場においても十分な精度を持って張力を算出することが可能であるものと判断される。

(2) 現地観測結果との比較

図-6に計算結果と現地観測結果の比較図を示す。データの比較に際しては、水理実験の比較と同様、時系列データ(20分間)より有義片振幅を算出し比較を行った。浮体および係留索の諸元を表-1に、現地観測時の波浪諸元を表-2に示す。ここで、実験定数は $\alpha=0.175$ として計算を行った。なお、現地海域における防止膜の展帳条件については、田端ら(2000)を参照。

図より、冬期風浪時に関しては、観測結果と計算結果が比較的よく一致しており、実験定数 $\alpha=0.175$ を用いることで現地海域における新型汚濁防止膜の運動および係留張力が算定可能であるものと判断される。一方、台風時に関しては冬期風浪時と比較して一致度がそれほど

表-2 波浪諸元(現地観測)

観測波浪諸元	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	U_c (m/s)	θ_w (deg.)	θ_c (deg.)
冬期風浪時	0.88	3.5	0.08	124.0	5.6
台風時(T9918)	2.11	5.7	0.04	171.0	160.0

高くなく、特に、Heaveが観測結果と計算結果で大きく異なっている。

ここで、台風時の波長(L)を求めると約50mとなる。係留管の直径を D とすると $L/D=33.3$ となり、係留管直径に対し波長が十分長くなる。このような条件下におけるHeaveの応答振幅比(応答値を波幅で割った値)は、通常1.0に近い値を示す(いわゆる波に乗った状態)。台風時における観測値および計算値より係留管の応答振幅比を求めると、観測値は0.05、計算値は0.66となり、計算値が1.0に近い値を示している。このことから、数値モデルより求めたHeaveが実際の運動に近い状態を表しているものと推測される。現地観測では、加速度計を用いて浮体の動揺計測を行っているが、係留管が波により傾いた際、鉛直方向成分の加速度が過小に見積もられたものと推測される。

一方、係留張力が大きく異なっている要因として、今回、実験定数を $\alpha=0.175$ として計算を行っているが、これは膜に直角方向に波・流れが作用する場合の定数であり、台風時のように防止膜に対し平行に近い波・流れの状況下では、膜に作用する定常力が小さくなるものと推測される。

図-7に α を変化させた場合の張力の算定結果を示す。図より、アンカーロープ張力については、 $\alpha=0.09$ とすることで観測値とほぼ同程度の値が得られている。一

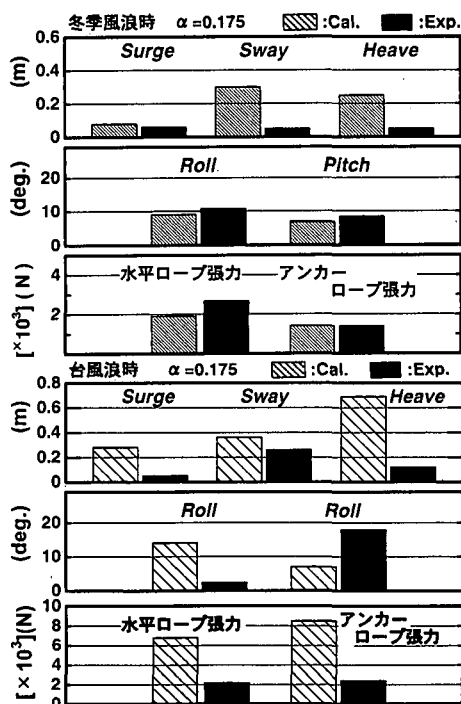
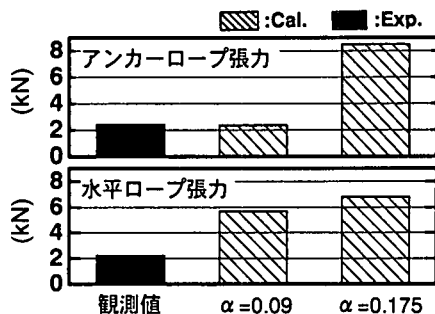


図-6 張力の計算結果と現地観測結果の比較
(上図:冬期風浪時, 下図:台風時)

図-7 α の変化による張力の変化

方、水平ロープ張力については、 α の変化させたことによる張力の変化がアンカーロープ張力に比べ小さい。

水平ロープ張力は、浮体の Surge 運動が大きく影響しており、本数値モデルは膜に対し平行に近い波が作用する場合の膜のふかれ状況や膜の剪断方向に作用する波の強制力が考慮されていないことが要因として考えられる。

以上のことから、今回構築された数値モデルは、防止膜に対し平行に近い波・流れの条件下では、上記に示す課題が残されているものの、波・流れが防止膜に対し直角方向に近い条件下においては、比較的精度良く係留張力および運動が算定可能であるものと判断される。

4. 高波浪下における新型汚濁防止膜の張力特性

図-8 は、数値モデルにより高波浪下における新型汚濁防止膜の張力特性について検討した結果である。ここで、縦軸に示す張力は 1000 波中の最大期待値より求めた張力である。また、防止膜の展帳条件、浮体および係留索の諸元については、現地観測時の諸元と同様とした。

図より、張力の発生状況としては、 $H_{1/3}=5.0$ m でアンカーロープ張力が約 10.2 tf (100 kN)、水平ロープ張力が約 5.1 tf (50 kN) となっている。ここで、海洋工事汚濁防止協会 (1993) による張力算定式 (以下、海防協式と略記) よりアンカーロープ張力を求めると約 25 tf (245 kN) となり、本数値モデルによる計算結果の約 2 倍の値となる。海防協式は、膜を平板と仮定し波・流れによる抗力が膜全体に作用するものとして計算を行っている。しかし、本来防止膜は流れ等によってふかれが生じるため、海防協式のように膜全体に抗力が作用するという状況は考えにくく、高波浪の条件になるほど張力の算定結果が過大評価となる。

ここで、水平ロープ張力はアンカーロープ張力に比較して波高変化による張力増加の割合がそれほど明確ではない。これは、防止膜の変形度合 (弓型) が波長に比べ小さいため、波を 90° 方向から入射させる場合、各浮体に

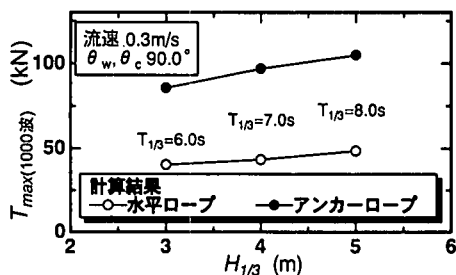


図-8 入射波高と発生張力の関係 (数値モデル)

作用する波の位相のズレは小さくなく、フロートおよび係留管の相対運動が波高に対してそれほど大きく変化しないためであると考えられる。

5. おわりに

本研究から得られた主要な結論を以下に示す。(1) 水理実験および現地観測結果との比較・検証により、新型汚濁防止膜の係留張力と運動に関する数値モデルの有効性が確認された。今後、この数値モデルを用いることにより、様々な波浪の条件下での係留張力および運動が算定可能となる。ただし、波・流れが防止膜に平行に近い条件下での、膜のふかれ状況や膜の剪断方向に対する波の強制力については、今後適切な評価手法を確立する必要がある。(2) 本数値モデルを用いて $H_{1/3}=5.0$ m の高波浪条件下における係留張力を算出した結果、アンカーロープ張力が約 10.2 tf (100 kN)、水平ロープ張力が約 5.1 tf (50 kN) となった。

最後に、本研究を行うにあたって、鳥取大学上田茂教授を座長とする検討会において御指導、御意見を賜った。ここに、委員各位をはじめ関係諸機関に感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 青木伸一・岡野 聡・樺木 亨 (1998): 自立式汚濁防止膜の有効高さと係留力の実用算定法, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 796-800.
- 小田一紀・重松孝昌・野口達矢・武田将英 (1996): 汚濁防止膜周辺の物質拡散の高精度予測手法に関する研究, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 1151-1155.
- 海洋工事汚濁防止協会 (1993): 汚濁防止膜の設計・施工要領, 65 p.
- 合田良實・鈴木康正・笹田 正 (1976): 波浪中の直立円柱浮体に働く流体力とその運動, 港研報告, 15 巻, 2 号, pp. 167-210.
- 田端竹千穂・八母明彦・播本一正・相澤幹男・平石哲也・永松宏一 (1999): 垂下型汚濁防止膜の係留力に関する模型実験, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 846-850.
- 田端竹千穂・清水勝義・播本一正・相澤幹男・平石哲也・溝口忠弘・宮里一郎 (2000): 新構造汚濁防止膜の係留力に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 991-995.
- Hsu, F. A. and K. A. Blenkarn (1970): Analysis of Peak Mooring Forces by Slow Vessel Drift Oscillations in Random Seas, OTC 1159.