

# 自立式汚濁防止膜の有効高さと係留力の実用算定法

青木伸一\*・岡野 聡\*\*・樫木 亨\*\*\*

## 1. ま え が き

浮遊土砂の発生を伴う海洋工事においては、工事区域の周りに汚濁防止膜を展張して濁りの拡散を防止することが近年一般的となっている。汚濁防止膜やオイルフェンスのような膜体構造物に働く流体力については、既にいくつかの研究例(樫木, 1991)があるものの、研究成果を実際設計へ応用するまでには至っておらず、現在用いられている設計法(海洋工事汚濁防止協会, 1993, 1994)は依然として膜体を剛な平板として取り扱った従前の方法である。膜体構造物と剛な構造物との大きな違いは、流れによる膜のふかれや波による変形運動などにみられるように、膜体では流体抵抗を小さくするように構造物が変形する点であり、流体力に構造物が抵抗するという剛な構造物に対する力のとらえ方とは全く異なった視点が必要である。

汚濁防止膜の形式を大別すると、水面のフロートからカーテンを吊り下げる垂下式と、海底のアンカーからフロートでカーテンを立ち上げる自立式とに分けることができる。本研究は、埋め立て護岸建設の際の土砂投入などに用いられる自立式汚濁防止膜を対象とし、汚濁防止機能上重要となる膜の有効高さおよびアンカーの設計に必要な係留力に対して、実際設計に用いることを念頭においた簡便な算定式を提案するものである。

垂下式に比べて、自立式汚濁防止膜に関する研究はこれまであまり行われていない。波による係留力については、樫木ら(1988)によりその特性が初めて報告され、簡単な算定式が提案されているが、実際設計にはデータが不十分である。また樫木ら(1989)は、ポテンシャル理論により係留力の算定を試みているが、実験定数を与える必要があるなど、不明な点が残されている。一方、有効高さについては、小田・重松ら(1996)が有効な算定法を示しているが、若干の数値計算を必要とすること、および検証データが少ないなどの問題がある。

## 2. 現行設計法とその問題点

現行設計法では、有効高さについては事実上考慮されていないので、ここでは係留力に関する設計法について簡単に紹介し、その問題点を指摘する。自立式汚濁防止膜は長手方向に一樣な構造となるので、2次元断面内での設計となる(図-1参照)。水平方向係留力  $F_x$  および鉛直方向係留力  $F_z$  の算定式は以下のとおりである。

$$F_x = F_c + F_w \dots\dots\dots (1)$$

$$F_z = B - W_c \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $F_c$  は流れによる流体力、 $F_w$  は波による流体力、 $B$  はフロートの浮力、 $W_c$  はカーテンの水中重量である。また、 $F_c$ 、 $F_w$  は次式で与える。

$$F_c = C_D \cdot 0.5 \rho d' U^2 \dots\dots\dots (3)$$

$$F_w = C_D \cdot 0.5 \rho \int_{-h}^{-h+d'} u^2(z) dz \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\rho$  は水の密度、 $h$  は水深、 $d'$  はフロート径を含めたカーテン長、 $U$  は流れの平均流速、 $u(z)$  は波(有義波)による流速振幅であり、抗力係数  $C_D$  には 1.2 を与えている。カーテンの張力  $T$  は、水平および鉛直方向係留力の合力として求め、アンカーの水中重量  $W_a$  は、次式を満足するように決定する。

$$K(W_a - F_z) > F_x \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $K$  は把駐力係数である。ただし、カーテン強度

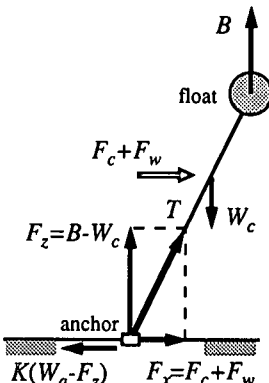


図-1 現行設計法における係留力の概念図

\* 正 会 員 工 博 豊橋技術科学大学助教授 建設工学系  
\*\* 豊橋技術科学大学大学院 建設工学課程  
\*\*\* フェロー 工 博 大阪産業大学工学部教授 土木工学科

およびアンカー重量には適当な安全率を考慮する。

以上のように、現行設計法ではカーテンを変形しない剛な板と仮定して水平力を算定した後、力の釣合条件から張力および係留力を求めているので、これらはいずれも流速の増大とともに大きくなる。しかしながら、実際には流速が大きくなるとカーテンの変形（ふかれ）が顕著になり、流れ方向の投影面積が小さくなって流体力が低減するが、設計法にはこの影響が考慮されていない。また、波による流体力としては抗力しか考慮されておらず、さらに抗力についても、流れと波を別々に扱っている点や抗力係数の値の根拠など、不明な点が多い。

### 3. 水理模型実験

模型実験は、図-2に示すような、長さ20m、幅0.8mの造波水路に、循環流発生装置を付置して行った。膜の設置水深は40cmで、平均流速は0～5cm/sの範囲で数種類変化させた。膜模型は、水底から10cmかさ上げた台上に設置し、台の下部には係留力測定装置を4台固定し、それに膜を直接係留した。係留力測定装置は、図-3に示すような、L字型に曲げた幅5cm、厚さ0.3mmのアルミ板に4枚の歪ゲージを貼り、これらの歪量と荷重との関係を用いて測定するもので、水平方向の荷重と鉛直方向の荷重を別々に測定することができる。なお膜の有効高さの測定は、水槽側面からの目視によった。

実験に用いた膜（ポリエステル製、単位面積当り質量 $4.78 \times 10^{-3} \text{g/cm}^2$ ）は、膜高さ（ $d=10, 20, 30 \text{cm}$ ）およびフロート径（ $\phi=8, 10, 15 \text{mm}$ ）を変えた計9種類で

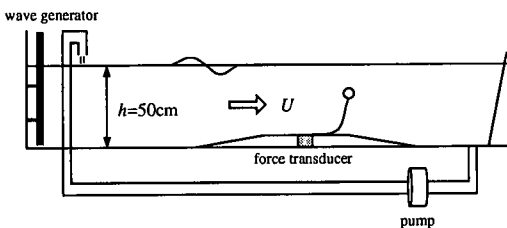


図-2 実験水槽

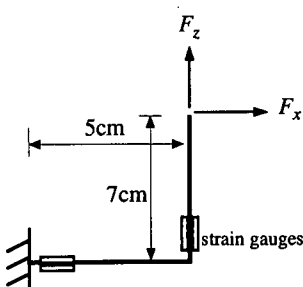


図-3 係留力測定装置

ある。実験ケースは、流れのみの実験では各膜体模型に対して、平均流速  $U=2, 3, 3.5, 4, 4.5, 5 \text{ cm/s}$  の6種類の流れを作用させた（54ケース）。波のみの実験では、各膜体に対して、波高を4種類（ $H=2, 4, 6, 8 \text{ cm}$ ）、周期を5種類（ $T=0.7, 0.9, 1.1, 1.3, 1.5 \text{ s}$ ）変化させて実験を行った（180ケース）。波・流れの実験では、 $\phi=10, 15 \text{ mm}$ 、 $d=10, 20, 30 \text{ cm}$ の各膜体模型に対して、波高を3種類（ $H=4, 6, 8 \text{ cm}$ ）、周期を3種類（ $T=0.7, 1.1, 1.5 \text{ s}$ ）、流れは1種類（ $U=5 \text{ cm/s}$ ）で実験を行った（54ケース）。

### 4. 有効膜高さの算定法について

#### (1) 簡易計算式の誘導

ここでは、自立式汚濁防止膜の流れによるふかれに伴う膜高さの変化（有効高さ）を算定するための簡単な理論式を誘導する。誘導の前提条件として以下の仮定を設ける。ア）膜の水中重量は無視できる（通常フロート浮力の数%程度である）。イ）流体力は膜面に垂直に作用する。ウ）流体力は膜面上で一定で、流速の2乗に比例する。エ）フロートに働く流体力は無視できる。

仮定エ）より、膜上端での膜面の接線方向は鉛直上向きとなるので、膜の変形を記述する座標系として、図-4に示すように、膜上端（フロート部）を原点にとり、 $x$ の正方向を水底方向にとる。膜の形状を  $y=f(x)$  で表し、膜単位長さ当たりの流体力を  $\sigma$  とする。せん断力を考えていないので、膜の張力  $T$  はフロートの浮力  $B$  に等しく一定である。膜の長さ（高さ）を  $d$ 、膜の有効高さを  $d_e$  とする。膜面の微分方程式、

$$B \frac{d^2 f}{dx^2} - \sigma \left\{ 1 + \left( \frac{df}{dx} \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}} = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

を  $x=0$  で  $f(0)=f'(0)=0$  のもとに解くと、次式を得る。

$$y = \frac{B}{\sigma} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{\sigma}{B} \right)^2 x^2} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

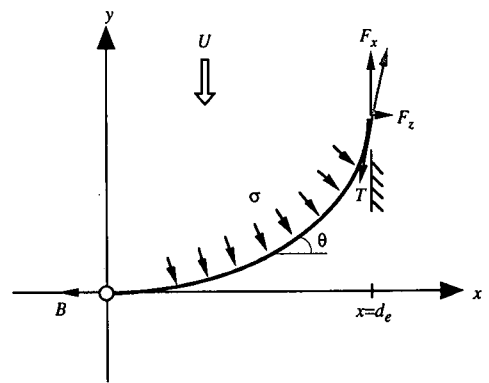


図-4 有効高さ算定のための座標系

上式を変形すると、膜は中心が  $(0, B/\sigma)$ 、半径  $B/\sigma$  の円弧の一部となっていることがわかる。(7)式より、膜高さ  $d$  は次式で求められる。

$$d = \int_0^{d_e} \sqrt{1+y'^2} dx = \frac{B}{\sigma} \sin^{-1} \left( \frac{\sigma d_e}{B} \right) \quad (8)$$

したがって、次式で有効高さ  $d_e$  が求められる。

$$d_e = \frac{B}{\sigma} \sin \left( \frac{\sigma d}{B} \right) \quad (9)$$

$\sigma$  については、小田・重松ら (1996) にならって、次式のようにおく。

$$\sigma = \alpha \cdot \frac{1}{2} \rho U'^2 = \alpha \cdot \frac{1}{2} \rho \left( \frac{Uh}{h-d_e} \right)^2 \quad (10)$$

ここに  $U'$  は膜上部で縮流した流れの平均流速である。また  $\alpha$  は実験定数で、小田らは 0.955 を用いている。上式を (9) 式に代入して繰り返し計算により  $d_e$  を求めればよい。ただし、これらが適用できるのは、 $f(x)$  が一価関数の場合のみであり、これが成り立つのは  $d_e$  が次の範囲内にある場合である。

$$2d/\pi \leq d_e \leq d \quad (11)$$

上式の範囲を越えるとき、膜は海底を這うことになり、このとき  $d_e$  は次式で与えられる。

$$d_e = B/\sigma \quad (12)$$

上記の計算式を用いると、次式のような形の無次元表示式を得る。

$$\frac{d_e}{d} = \text{func} \left( \frac{d}{h}, \frac{0.5 \rho U'^2 d}{B} \right) \quad (13)$$

すなわち、有効率  $d_e/d$  は 2 つの無次元パラメータ、相対膜高さ  $d/h$  および無次元流速 (動圧と浮力の比)  $0.5 \rho U'^2 d/B$  の関数となることがわかる。

## (2) 実験結果との比較

図-5 は、小田・重松らの有効高さの実験結果に今回の実験結果を合わせて示し、計算値 ( $\alpha=0.955$  と  $\alpha=1.7$  の

両者) と比較したものである。ケース数が少ないものの、小田・重松らの実験結果は彼等の提案する係数値  $\alpha=0.955$  を用いた計算結果とほぼ一致しており、膜の重量を無視した本計算法の妥当性が確認できる。今回の実験結果は、その変化特性については理論値とよく一致しているものの、小田・重松のものとは比べると全体的に有効高さが小さくなっており、今回の実験結果を説明するには、 $\alpha=1.7$  程度にとる必要があることがわかる。この理由としては、流速のとり方の違い (最大でも 10% 程度と思われる)、流速分布の相違の他、縮尺効果 (小田・重松らは今回の実験の 2 倍程度のスケール) が考えられるが、はっきりした理由はわからない。

## 5. 係留力の算定法について

### (1) 流れによる係留力

流れのみによる係留力については、有効高さの算定法を用いると、図-4 に示した係留力  $F_x$  (水平方向) および  $F_z$  (鉛直方向) が次式で与えられる。

$$F_x = B \sin \theta_{x=d_e} = \sigma d_e \quad (14)$$

$$F_z = B \cos \theta_{x=d_e} = \sqrt{B^2 - (\sigma d_e)^2} \quad (15)$$

ただし、 $d_e$  が (11) 式の範囲を越えるときは、係留力は次式で与えられる。

$$F_x = B, \quad F_z = 0 \quad (16)$$

無次元係留力として、 $F_x/B, F_z/B$  を定義すると、これらも (13) 式と同様に 2 つの無次元パラメータの関数となる。

図-6 は、係留力について実験値と計算値 ( $\alpha=1.7$ ) を比較したものであるが、計算値は実験値をよく説明していることがわかる。鉛直方向係留力のばらつきが大きいのは、今回用いた係留力測定装置では、鉛直力成分は歪ゲージの出力から水平力成分の寄与を分離して求める必要があり、測定精度が悪くなるためと思われる。図中には、現行設計法の式 (1) および (2) による計算値を同時に示している。

前述したように、現行設計法では水平係留力は流速の 2 乗に比例して増大することになるが、実際には水平力は浮力と同程度の値で上限が抑えられていることが確認できる。これは流体力を受けて変形する膜体に特有のものであり、膜張力は流速の増大につれて大きくなるのではなく、張力一定の下に釣合い位置まで変形すると解釈しなければならない。したがって、鉛直係留力は水平係留力の増大とともに減少し、膜が水底を這うようになるとほとんど 0 となる。現行設計法では、無次元流速 0.5

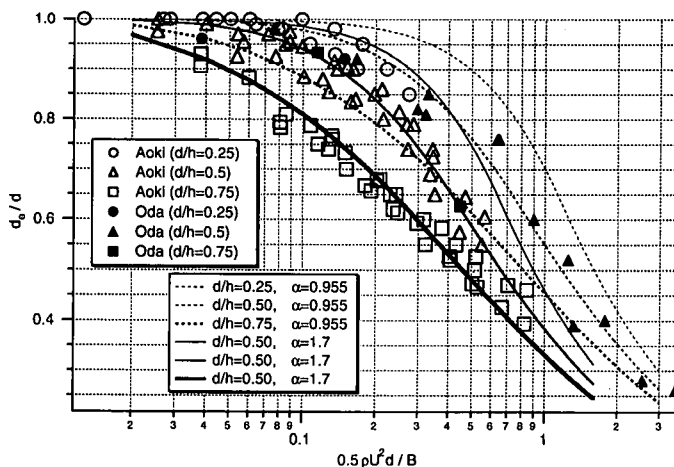


図-5 有効高さの実験値と計算値の比較

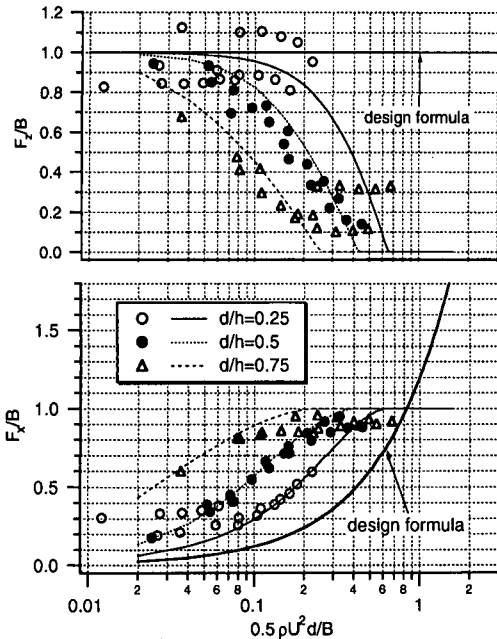


図-6 流れによる係留力の実験値と計算値の比較

$\rho U^2 d/B$  が 0.8 より小さな領域で、特に相対膜高さ  $d/h$  が大きい場合に過小評価となり、無次元流速が大きくなると係留力を過大評価することがわかる。

## (2) 波による係留力

ここでは、波による係留力について、実験値に基づいた算定式を構築する。実験値としては、今回行った実験で得たデータの他に、樫木ら (1988) のデータを用いた。これは、水深 113 cm、膜高さ 47 cm、フロート径 1.5 cm および 2 cm について、波の諸元を種々変えて係留力の測定を行ったもので、今回の実験に比べて模型スケールが約 2 倍である。以下では、波による変動係留力の全振幅 ( $|F_x|$ : 水平係留力,  $|F_z|$ : 鉛直係留力) について考察する。

図-7 は、今回の実験のうち、膜高さ  $d = 30$  cm、フロート径  $\phi = 1$  cm の場合の水平係留力について、その全振幅と波高の関係性を波周期をパラメータとして示したものである。図中の実線で結んだシンボルは波のみが作用する場合の実験値である。これより、変動振幅は波高にほぼ線形的に増大すること、および周期が長くなると大きくなることがわかる。この傾向は樫木ら (1988) にもみられたものである。図中には破線で浮力  $B$  の 2 倍の値を示しているが、係留力が大きくなると、係留力の片振幅が浮力と同程度の力になることがわかる。ただし、他のケースの図をみると、流れの場合のように浮力で頭打ちになるわけではなく、浮力を越えても波高にほぼ線形に増大している。同様の図を異なる  $d$  および  $\phi$  について描くと、膜高さの影響はほとんどみられないこと、浮力の増

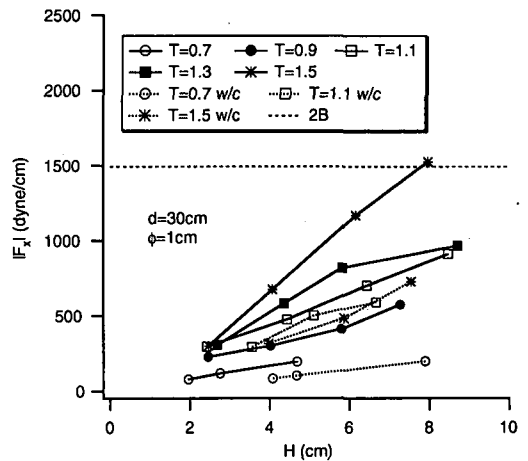


図-7 水平係留力の全振幅と波高の関係 (流れ有, 無)

大にもなると係留力は大きくなるが、浮力に線形的ではないことがわかった。

膜運動の慣性力が無視できる場合、流れに対する係留力から類推して、波による係留力についても次式のような表現式が考えられる。

$$|F_x| = 2B \sin \theta_0, \quad |F_z| = B(1 - \cos \theta_0) \quad \cdots (17)$$

ここに、 $\theta_0$  は膜が水平方向に最も変位したときの鉛直軸と膜のなす角である。また、 $F_z$  については、0 と  $B$  の間で変動すると仮定してある。前述したように、水平および鉛直係留力はそれぞれ  $2B$  および  $B$  よりも大きくなることもあることから、(17) 式では十分説明できないことがわかっているが、 $\theta_0$  がどのような諸量で決まるかを調べることににより、ある程度実験式の形を類推することができる。膜の変形 ( $\theta_0$ ) に対する個々の諸元の影響は以下のように考えられる。ア) 波高に比例して変形が大きくなる。イ) 浮力が小さいほど変形は大きくなる。ウ) 周期が大きいのほど変形は大きくなる。エ) 膜高さが大きいほど膜上端の変位は大きい、 $\theta_0$  にはあまり影響しない。これらの性質は上記の実験結果とも対応している。以上のことを考慮してデータ整理を行ったところ、 $A$  を定数として次式のような表現式を用いれば比較的よくまとまることわかった。

$$\frac{|F_x|}{\rho g H \phi}, \quad \frac{|F_z|}{\rho g H \phi} = A \coth kh \quad \cdots (18)$$

上式では係留力の無次元化にフロート径  $\phi$  を用いているが、フロートが間隔をおいて設置される場合には、 $\phi$  の代りに浮力  $B$  を用いた代表フロート径  $\phi' = \sqrt{4B/\pi \rho g}$  を用いればよい。

図-8 は、水平係留力振幅の無次元値と  $\coth kh$  の回帰直線を求めたものである。ばらつきは大きい、今回の実験値および樫木ら (1988) の実験値ともほぼ同様の傾向を示している。鉛直方向係留力については、今回の実

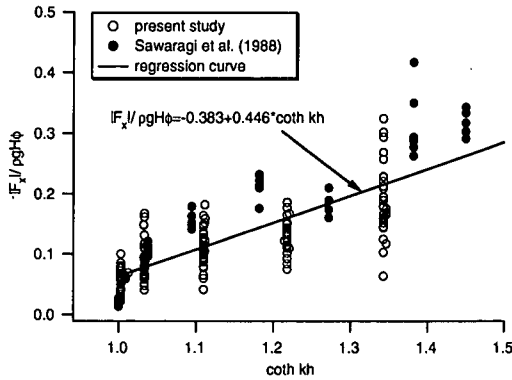


図-8 無次元水平係留力の直線回帰

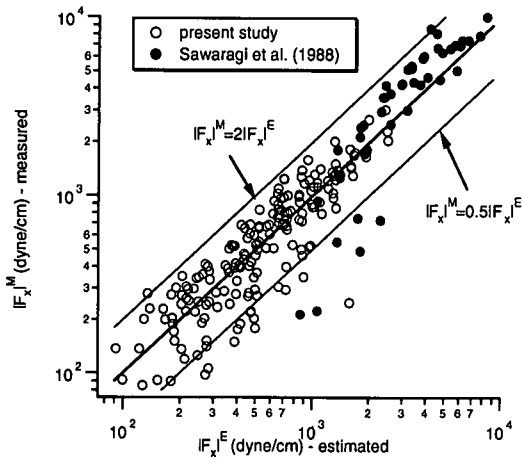


図-9 水平方向係留力の予測値と実験値の比較

験値は浮力の2倍程度に達する値もみられ、榎木ら(1988)に比べて2倍程度大きくなっており、同一の回帰直線を求めることができなかった。以下に、水平方向係留力の回帰式(19)および、鉛直方向係留力の回帰式のうち、今回の実験値を用いた式(20)と榎木ら(1988)の実験値を用いた式(21)を示す。

$$|F_x| = \rho g H \phi (-0.383 + 0.446 \coth kh) \dots\dots\dots (19)$$

$$|F_z| = \rho g H \phi (-0.111 + 0.213 \coth kh) \dots\dots\dots (20)$$

$$|F_z| = \rho g H \phi (-0.130 + 0.165 \coth kh) \dots\dots\dots (21)$$

図-9は、(19)式を用いて計算した水平係留力の予測値 $|F_x|^E$ と実験値 $|F_x|^M$ を比較したものである。予測値の0.5～2倍の範囲内に両方の実験値とも収まっており、ばらつきは大きいものの、実用的な算定式として使用できるものと考えられる。鉛直方向係留力については、2つの実験の回帰式が大きく異なる理由がはっきりしないが、測定装置の問題も考えられる。なお、(20)および(21)式を別々に用いた場合には、予測値は0.5～2倍の範囲内にほぼ収まる。

### (3) 波・流れ共存場での係留力

図-7中に示した点線で結んだシンボルは、平均流速 $U=5\text{ cm/s}$ の場合の波流れの実験結果である。流れが共存する場合には、ふかれの影響で膜の高さが減少し、変動振幅のみを取り出した場合には流れがない場合よりも小さくなっていることが分かる。これは、他のケースについても同様であり、鉛直方向係留力についても同じであった。また、波が重合する場合の係留力の定常成分は、流れのみの場合とほぼ同程度であった。したがって、実際設計においては、流れによる係留力と波による係留力を別々に求めておき、それらの合力として係留力を算定すれば安全側となることがわかった。

## 6. あとがき

本研究では、水理模型実験と簡単な理論解析から、自立式汚濁防止膜の係留力の実用的な算定法について検討した。得られた知見は以下の通りである。(1)流れによる有効高さの変化および係留力は、相対膜高さ $d/h$ および無次元流速 $0.5\rho U^2 d/B$ をパラメータとして算定できる。ただし、流体力に関する実験定数を用いる必要がある。(2)波による係留力の変動振幅の算定式を実験結果より構築した。水平係留力については、ほぼ実用に供しうる算定式を得たが、鉛直方向係留力については、なお検討を要する。(3)波と流れが共存する場合には、流れのみ、波のみによる係留力を別々に求めておき、それらの合力として設計すれば安全側となる。

本研究を行うに当たり、大阪市立大学重松孝昌助手には貴重なデータを提供していただいた。また、関西空港(株)の諸氏には多大なるご協力を得た。さらに本研究は科学研究費基盤研究(B)(2)「波・流れ共存場に展張される膜構造物の設計法に関する研究、代表者：前野賀彦、課題番号：09555159」の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 小田一紀・重松孝昌・野口達夫・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. 1151-1158.
- 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.
- 海洋工事汚濁防止協会(1994): 自立式汚濁防止膜構造設計算書, 6 p.
- 榎木 亨・青木伸一・安井章雄(1988): 波浪中に張られた自立式汚濁拡散防止膜に発生する張力に関する水理実験, 海洋開発論文集, Vol. 4, pp. 313-318.
- 榎木 亨・青木伸一・劉 海波(1989): 自立式汚濁防止膜による波の変形と波力の解析, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 559-563.
- 榎木 亨(1991): 波と漂砂と構造物, 技報堂出版, pp. 340-350.