

膜構造物の抗力係数に及ぼす膜の透過性の影響

前野 賀彦*・石川 元康**・飛田 義人***・熊谷 裕児***

1. 序 論

汚濁防止膜やオイルフェンス等の膜構造物を海洋に設置しようとする場合には、膜構造物に作用する波・流れによる流体力の把握が、それらの安定性を検討する上から重要な問題となる。設計論の立場から、波・流れ共存場における膜構造物の抗力係数の推定法の確立は有意義である。しかしながら、この種の研究としては、実際の構造物への適用には注意を要する模型実験による研究が散見されるにすぎず(青木ら, 1998; 榎木ら, 1988; 鶴谷ら, 1991), 現地観測に基づく研究は国内外共にほとんど見受けられない。現地観測に基づくものとして、前野ら(1996)は海洋工事に伴う汚濁拡散防止のために設置される垂下型汚濁防止膜に着目して、暴浪下における膜の係留索張力および海面変動・風速・流速に加え、激しい潮流下における膜周辺の流速分布、膜の舞い上がり(ふかれ)および水平方向のたわみについて現地観測を行い、垂下型汚濁防止膜の抗力係数の推定を行っている。しかしながら、ふかれと流速の関係が広範囲の流速に対して明示されていないことや、対象とした膜構造物が垂下式の不透過型汚濁防止膜のみで透過型の膜構造物に対する検討がなされていないことなどが問題点として指摘される。そこで、不透過型に加えて透過型の汚濁防止膜について、広範囲の流速に対する係留張力と流速分布ならびに膜体のふかれ形状を現地測定し、現行の汚濁防止膜の設計法での取り扱いに従い本来静止物体に対して用いられる抗力係数を不透過型および透過型の膜体について推定した。

2. 現地観測の概要

現地測定は、1999年3月11日および13日に図-1に示す東京湾葛西沖の水深14.3mから17.2mの海域にて実施した。垂下型汚濁防止膜は不透過型(ポリエステル製、膜幅20.0m、膜長7.0m、フロート径600mm)と透過型(ポリエチレン製、膜幅20.0m、膜長7.0m、目

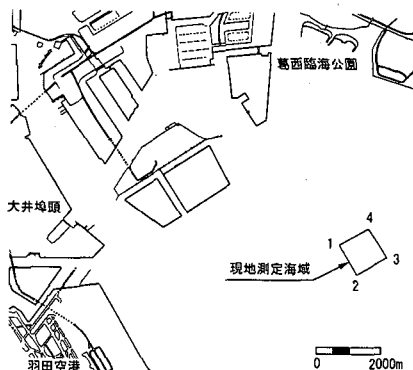


図-1 現地測定地点

合い25mm、糸径2.7mm、フロート径600mm)を用いた。不透過型については膜下端のウエイト重量が30kgf/m(294N/m)、透過型については30kgf/m(294N/m)、20kgf/m(196N/m)、10kgf/m(98N/m)の3種の条件下で測定を行った。

図-2に示す通り汚濁防止膜に作用する係留索張力は張力傾斜計を用いて、膜前面・後面の流速分布は超音波式ドップラー流速計(ADCP)を用いて測定した。また、膜下端の水深はカーテン下端に取り付けた圧力計により静水圧から求めた。膜の変形は超音波式測深機によりふかれ形状を測定した。以上述べた現地測定結果に基づき、①水平張力と流速との関係、②相対有効膜高 $d/d_0(=K)$ と流速との関係、③流れに対する抗力係数 C_d と流速との関係、④ $C_d \cdot K$ と流速との関係を透過型と不透過型の汚濁防止膜について比較検討した。

3. 汚濁防止膜の抗力係数の推定法

定常流れ中の膜構造物の抗力係数の算定に際しては、膜に作用する流体力と膜の変形形状を知る必要がある。膜構造物に作用する流体力については、流れの作用を受ける膜の係留力を測定することにより与えられる。また、膜の変形については、超音波測深機により直接変形形状を測定すると共に、圧力計により測定した有効膜高(膜がふかれ上がることにより減少する流体力の受圧面に対応した膜高)も併せて与えた。このように実測した膜に

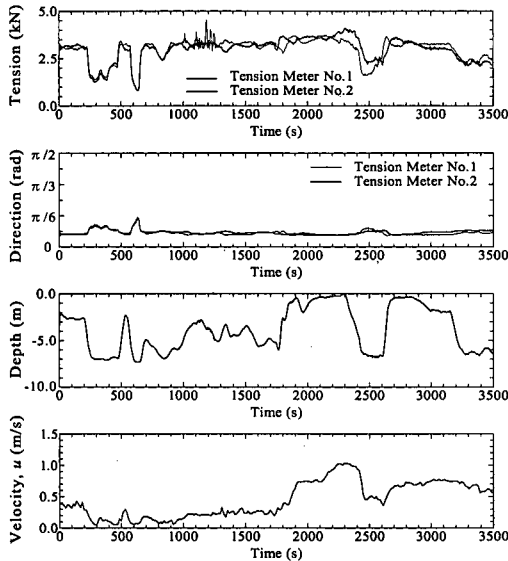
* 正会員 農博 日本大学教授 理工学部土木工学科
** 正会員 工修 日本大学専任講師 短期大学部食物栄養学科
*** 海洋工事汚濁防止協会

4. 結果と考察

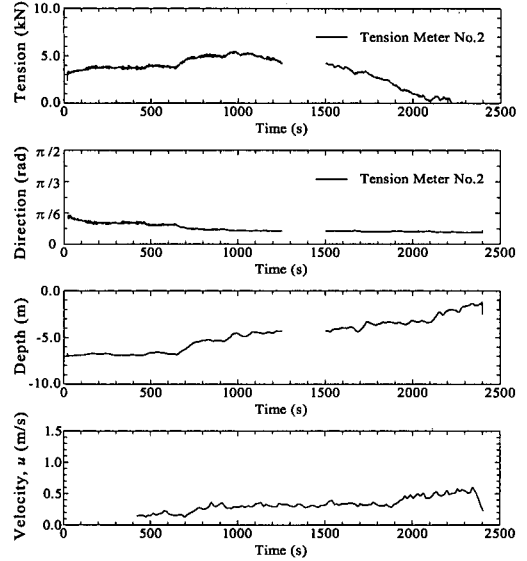
4.1 係留索張力と流速の測定結果

不透過型および透過型汚濁防止膜について張力、係留索設置角度、膜下端水深および平均流速の時系列を膜下端のウエイト重量ごとに図-5に整理して示した。なお、図-5(a)に示す不透過型汚濁防止膜については、張力計、傾斜計共に計測結果が得られているが、図-5(b)から(d)に示す透過型汚濁防止膜については、No.1の張力傾斜計が故障したため計測結果が得られていない。ま

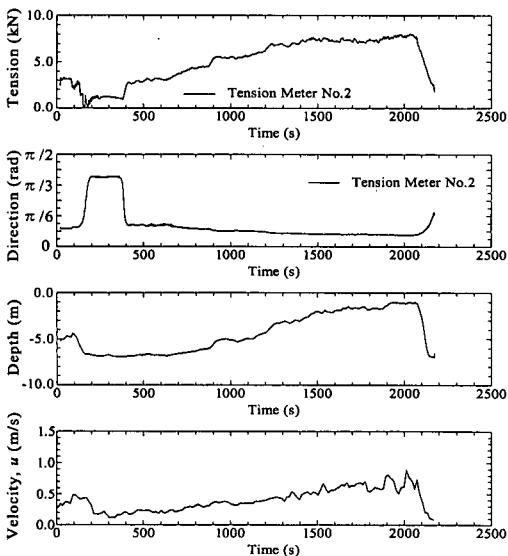
た、平均流速については、水深7.0 mまでの平均とした。図-5(a)に示されるように、一部の個所を除き、張力値は膜の両端でほぼ同様の値を示していることが分かる。張力値の違いが認められるところでは、潮流の影響により流れが斜めに膜に作用したものと考えられる。係留索の傾き角については、膜の両端が台船に固定されていることから、すべての実験条件において緊張状態では 14° から 15° ($0.244 \sim 0.262$ rad)の値を示している。膜下端の水深については、汚濁防止膜の膜高が7.0 mであることから、全くふかれ上がりが無い状態で7.0 mを示し、水



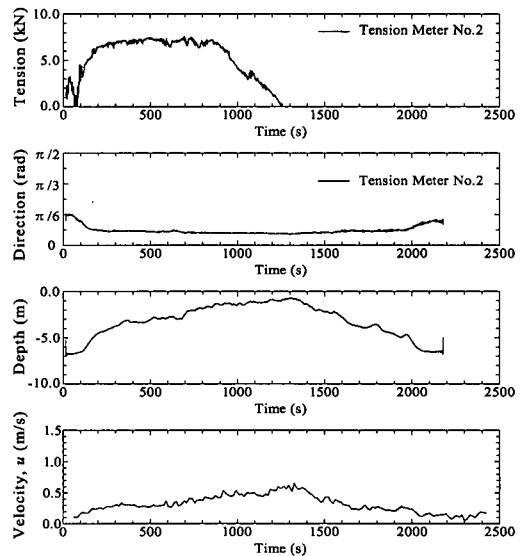
(a) 不透過型 ($W=294$ N/m)



(b) 透過型 ($W=294$ N/m)



(c) 透過型 ($W=196$ N/m)



(d) 透過型 ($W=98$ N/m)

図-5 係留張力、係留索設置角、膜下端水深および流速の時系列

面までふかれ上がった状態で0 mを示す。この、膜下端の水深は、平均流速と同様の变化傾向を示すことが分かる。

4.2 係留索張力と流速の関係

不透過型の膜体では、図-6に示した通り流速の増加に伴う水平張力増加の立ち上がりが早く、流速 $u=0.1$ m/s でほぼ水平張力 $T_{FH}=4.0$ kN に達している。その後も徐々に水平張力の値は増加しているが、その増加の割合はさほど大きくはなく、流速 $u=1.0$ m/s に達しても水平張力 $T_{FH}=5.0$ kN 程度である。このように膜体が一且ふかれて舞上がってしまうと流速が増加しても膜体の受圧面積が増加しないので流体力の増加の割合はわずかなものに留まるものと考えられる。また、透過型の膜体については、図-6に示す通り水平張力は不透過型に比べてゆっくりと流速の増加に伴い増加し、透過型のほぼ倍程度の $T_{FH}=8.0\sim 10.0$ kN に達すると増加の割合が小さくなる。さらに流速が増加しても水平張力の増加はわずかである。因みに、ウエイト重量 $W=294$ N/m では流速 $u=0.5$ m/s で水平張力 $T_{FH}=8.0\sim 10.0$ kN に達しており、 $W=98$ N/m では流速 $u=0.3$ m/s で水平張力 $T_{FH}=7.0\sim 9.0$ kN に達している。若干ではあるが透過型ではウエイト重量が軽い程到達する水平張力の値が小さい。また、この流速の増加に対する水平張力の増加の割合は、図-6の比較から明らかなように膜体を安定させるためのウエイトが重たくなるに従い小さくなっている。これは、透過型の場合には海水が膜体の間隙を通過することにより膜体が完全にふかれ上がりにくいためと考えられる。ウエイトが重い程その傾向が顕著であり、膜をふかれ上がらせるのに必要な流体力を発揮させる大きな流速が求められることを意味している。

4.3 相対有効膜高 d/d_0 と流速との関係

不透過型と透過型のウエイト重量を3段階に変化させたものの3種の併せて4種類について、相対有効膜高 d/d_0 と流速の関係を図-7に示した。それによれば、不透過型

の膜体では、相対有効膜高 d/d_0 は流速の増加に伴い急激に減少し流速 $u=1.0$ m/s 付近でゼロに漸近している。それに対して透過型では、海水が膜体の間隙中を通過することから膜体は完全にふかれ上がらないので、不透過型に比べて全体的に相対有効膜高 d/d_0 の値は大きくなっている。この傾向は、透過型の膜体のウエイト重量を変化させて検討した結果によれば、ウエイト重量が減少するに従い膜がふかれ上がりやすくなるため、不透過型の膜体の場合の相対有効膜高 d/d_0 と流速の関係に近づいている。ウエイト重量 $W=98$ N/m ではほぼ不透過型の傾向に一致する。このように透過型では、ウエイト重量の軽重により膜体の流れによるふかれ形状が異なるため、相対有効膜高 d/d_0 も不透過型とは異なってくる。

4.4 流れに対する抗力係数と流速の関係

不透過型の膜体については、図-8に示す通り流れに対する抗力係数は流速の増加に伴い急激に減少し流速 $u=0.5$ m/s 程度で抗力係数 $C_d=1.0$ に漸近しているが、流速 $u=0.5$ m/s を超えるとかえって増加するなど不安定になっている。これは、膜体が完全にふかれ上がった後流速の増加に伴ってたなびくなど、不安定になることによるものと考えられる。透過型の膜体についても同様であり、ウエイト重量 $W=294$ N/m, 196 N/m の場合には、流速 $u=0.4$ m/s 程度で抗力係数 $C_d=1.0$ に漸近し、さらに流速が増加すると抗力係数が一定せず不安定になっている。特に、ウエイト重量が小さい $W=98$ N/m の場合には、ふかれ上がった膜体がたなびきやすく不安定に変形するので、抗力係数は流速の増加と共に減少傾向にあるものの一定の抗力係数に漸近しているとは認め難い。

4.5 $C_d \cdot K$ と流速との関係

前野ら (1996) は膜体の流れによりふかれ流体力を受ける受圧面積が減少することから、有効膜高を膜高で除した相対有効膜高 $K(=d/d_0)$ を導入して、式 (12) で与えられる $C_d \cdot K$ とレイノルズ数との関係を示した。

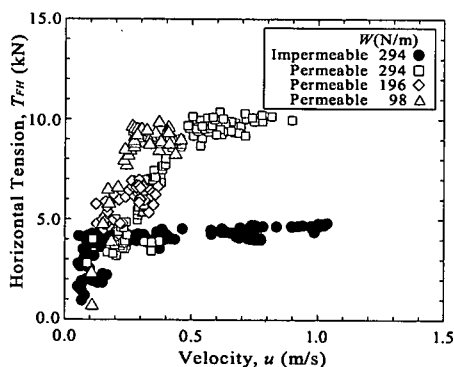


図-6 張力水平成分と流速との関係

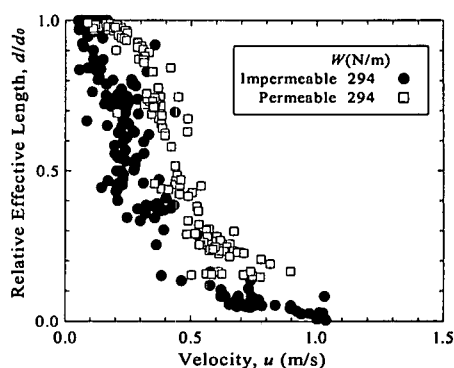
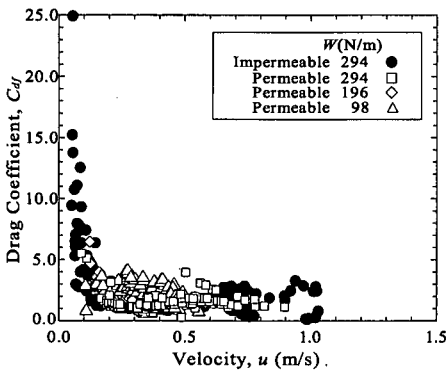
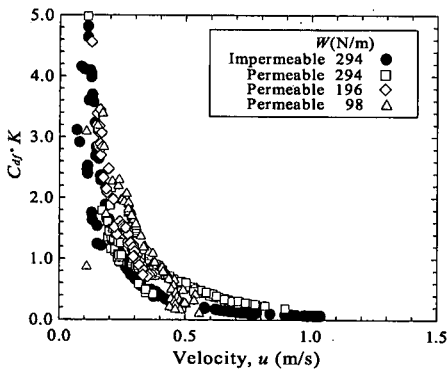


図-7 相対有効膜高と流速との関係



図—8 流れに対する抗力係数と流速との関係

図—9 $C_d \cdot K$ と流速との関係

$$C_d \cdot K = \frac{2\sigma_c}{\rho_w u^2 d_0} \dots\dots\dots (12)$$

その結果によれば、レイノルズ数の増加に伴いパラメータ $C_d \cdot K$ が減少する相関関係が得られている。

本研究においても、 $C_d \cdot K$ とレイノルズ数と本質的に同じ意味合いの $C_d \cdot K$ と流速との関係を、図—9 に示した。それによれば、不透過型の膜体では、流速が増加するに従い $C_d \cdot K$ は急激に減少し、流速 1.0 m/s 付近でゼロに漸近している。この傾向は透過型の場合にも認められ、ウエイト重量 $W=294$ N/m の場合にはほぼ透過型と同様であるが、流速 $u=0.4$ m/s を超えたあたりでは不透過型よりも大きくなっている。これは、膜体がふかれ上がりたなびくことによるものと思われる。ウエイト重量が軽くなるに従って、 $C_d \cdot K$ の値は流速の増加に伴いより直線的に減少しており、流速 $u=0.5$ m/s 程度でゼロになる傾向を示している。前野ら (1996) において述べているように膜体のふかれを考慮したパラメータ $C_d \cdot K$ と流速との関係から膜体のふかれと流速の関係が不明であったとしても、流速 u が与えられれば膜構造物の抗力を推定することが可能である。

5. 結 論

本研究により得られた結論を以下に示す。

1. 不透過型も透過型も膜体が一旦ふかれ上がってしまうと流速が増加しても膜体の受圧面積が増加しないので、流体力の増加の割合はわずかなものに留まる。透過型は不透過型に比べて水平張力が降伏する流速が大きい。それは海水が膜体の間隙を通過するため膜体が完全にふかれ上がりにくいことによる。また、その傾向はウエイトが重い程顕著である。
2. 不透過型の膜体では、相対有効膜高 d/d_0 は流速の増加に伴い急激に減少し、流速 $u=1.0$ m/s 付近ではゼロに漸近している。それに対して透過型では、海水が膜体の間隙中を通過することから膜体は完全にふかれ上がらず、不透過型に比べて全体的に相対有効膜高 d/d_0 の値は大きくなっている。
3. 不透過型の膜体では、流れに対する抗力係数は流速の増加に伴い急激に減少し、流速 $u=0.5$ m/s 程度で抗力係数 $C_d=1.0$ に漸近しているが、流速 $u=0.5$ m/s を超えるとかえって増加するなど不安定になっている。これは、膜体が完全にふかれ上がった後流速の増加に伴ってたなびくなど、不安定になることによるものと考えられる。透過型の膜体についても同様であるが、不安定になる流速は若干小さくなる。また、ウエイト重量が小さくなると不安定性が増す。
4. 本研究で得られた膜体のふかれを考慮したパラメータ $C_d \cdot K$ と流速 u との関係をを用いることにより、膜構造物のふかれと流速との関係が必ずしも明確でない場合であっても、設計において例えば汚濁防止膜のような膜構造物の抗力を与えることが可能となる。

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計算法, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 796-800.
- 樺木 亨・青木伸一 (1987): 流れの中に張られた汚濁拡散防止膜に及ぼす流体力と有効深さの計算法について, 海洋開発論文集, Vol. 3, pp. 203-208.
- 樺木 亨・青木伸一・安井章雄 (1988): 波浪中に張られた自立式汚濁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.
- 鶴谷広一・惟住智明・渡邊 弘 (1991): 汚濁拡散防止膜に働く流れの流体力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 786-790.
- 前野賀彦・石川元康・田中克往・東 博之・川本博文 (1996): 現地観測に基づく汚濁防止膜の抗力係数に関する一考察, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 996-1000.
- Milgram, J. H. (1971): Forces and Motions of a Flexible Floating Barrier, J. Hydronautics, Vol. 5, No. 2, pp. 41-51.