

網状浮体構造物のふかれ変形と作用する係留力に関する研究

安井章雄*・宮本崇広**・幾田正一郎***・出口一郎****

1. はじめに

水深方向に展張する繊維を用いた浮体構造物は、オイルフェンス、汚濁防止膜のように膜体を用いたものと生簀、遊泳用サメ避けフェンスのように網を用いたものが使用されている。これらの構造物は繊維の可撓性から流れによりふかれ変形するため、初期高さに比べて変形後の有効高さは減少し、その効果や作用する係留力に対して大きな影響を与える。したがって、ふかれ変形を予測し、作用する係留力を求めることは設計上、極めて重要である。膜体構造物のふかれ変形や作用する係留力に関しては、鶴谷ら(1991)、小田ら(1996)、青木ら(1998)、田端(1999)らによってその重要性が指摘され、研究も行われているものの、提案された実験定数はそれぞれに異なり、ふかれ変形と作用する係留力もそれぞれ独立して検討されている。また、重錘の取り付け配置を変えた場合や網状構造物については、ほとんど検討されていない。

そこで、本研究では、重錘の取り付け配置や重量を変えた網状および膜体構造物の流れによるふかれ変形や係留力を求めるために、実験的な検討を加えると同時に、それらを予測する数値モデルを適用した解析を行い、解析方法の妥当性について検討した。

2. ふかれ変形と係留力に関する水理模型実験

(1) 実験装置の概要

実験は図-1に示す長さ 30 m、幅 0.7 m、高さ 0.9 m の二次元水槽で行った。水槽の上部には長さ方向にレールが設置してあり、その上を台車が滑らかに移動できる。膜体および網状構造物は、台車に設置した 2 つの片持ち梁式張力計から係留索を介して水面から垂下した。膜および網の上部には直径 5 cm の発泡スチロール製のフロートを設け浮力を与えると同時に変形を防止し、下部には重錘を取り付けた。実験に用いた膜体は、0.08 mm 厚ポリエステル製繊維布(単位面積当たり重量 1.13×10^{-4} N/cm²)で、網は線径 3 mm、目合 20 mm、50 mm、65 mm

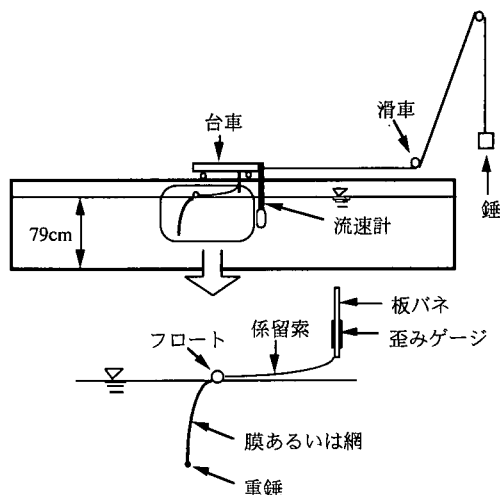


図-1 実験装置

のポリエチレン製有結節漁網である。ただし、結び目間を剛体棒とするため、網には直径 4 mm のストローをかぶせ、曲がりが生ずるのを防いでいる。

(2) 実験方法と実験条件

流れによるふかれ変形と作用する係留力の実験を行った。流れを作用させる代わりに膜体および網状構造物を係留した台車を任意の速度で移動させることにより行った。ロープの一端をその台車に、他端には錘を繋ぎ、滑車を介して錘を落下させる事により台車を移動させた。

流速は台車に設置した電磁流速計によって測定し、計測期間中に出現した最大流速とその流れに対する変動係留力の中の最大値の関係について検討した。水深 h は 79 cm 一定とした。膜および網の形状の解析は、台車に設置したビデオカメラを用い、水槽側面から撮影した画像によって行った。

膜体および網状浮体構造物の幅は $b=65 \sim 70$ cm であり、高さは $d=40 \sim 70$ cm、重錘重量は $W=1.2 \times 10^{-2} \sim 1.54 \times 10^{-1}$ N/cm、流速は $U=8 \sim 210$ cm/s の範囲で数種類変化させた。重錘は膜(網)の下部両端に配置するケースと膜(網)の下部横断方向に均等に配置するケースの 2 種類とした。また、網の場合においては、目合が菱形と正方形の 2 種類で行った。全ての計測は 0.05 s 間隔

* 正会員 博(工) 太陽工業(株) 空間技術研究所
** 正会員 修(工) 東亜建設工業(株) 横浜支店
*** 兵庫県浜坂土木事務所
**** 正会員 工 博 大阪大学大学院教授 工学研究科

表-1 実験と計算の諸元

ケース	諸元
Cal	計算 ($d/h=0.6, \beta=1.5$)
Case-1	実験 (膜体, 両端)
Case-2	実験 (膜体, 均等)
Case-3	実験 (網状 65 mm, 菱形, 両端)
Case-4	実験 (網状 50 mm, 正方形, 両端)
Case-5	実験 (網状 20 mm, 正方形, 両端)
Case-6	実験 (網状 65 mm, 菱形, 均等)
Case-7	実験 (網状 50 mm, 正方形, 均等)
Case-8	実験 (網状 20 mm, 正方形, 均等)

で行い、A-D 変換した。

以下の考察に用いた実験ケースとその諸元を表-1 にまとめて示す。

なお、ふかれ変形は、流速の増大と共に大きくなる。また、流速と係留力の時系列を比較すると、流速の増加と共に係留力も増加し、最大流速時に係留力も最大となる。したがって、本研究では、最大流速時のふかれ変形と最大係留力を検討に用いる。

3. 膜体および網状浮体構造物のふかれ変形

重錘を均等配置した場合は、膜(網)に均等な影響を与えているため、有効高さは横断方向に一樣な変形を示す。一方、重錘を両端設置した場合は、膜(網)両端の変形は小さく中央部で大きくふかれることで、3次元の変形になり、横断方向に有効高さが変化する。この場合の有効高さ d_e は、膜(網)の下端中央部と端部の有効高さの平均とした。

膜のふかれ変形に伴う有効高さ d_e は小田ら(1996)、青木ら(1998)、田端ら(1999)にならって、次式から算出する。

$$d_e = \frac{W}{\sigma} \sin\left(\frac{\sigma d}{W}\right) \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma = \beta \frac{1}{2} \rho U^2 = \beta \frac{1}{2} \rho \left(\frac{Uh}{h-d_e}\right)^2 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 W は単位幅当りの重錘重量、 σ は膜の単位長さ当たりの流体力、 U は膜下部で縮流した流れの平均流速、 d は膜の高さ、 β は実験定数、 h は膜の設置位置での水深である。式(1)および(2)から、式(3)の無次元表示式が得られる。

$$\frac{d_e}{d} = \text{func}\left(\frac{d}{h}, \frac{0.5\rho U^2 d}{W}\right) \dots\dots\dots (3)$$

また、膜体の係留力(水平力) F_x は、青木ら(1998)の自立式汚濁防止膜にならうと、

$$\begin{aligned} F_x &= W \sin \theta_{x=d_e} = \sigma d_e & 2d/\pi \leq d_e \leq d \\ F_x &= W & 2d/\pi > d_e < d \end{aligned} \dots\dots (4)$$

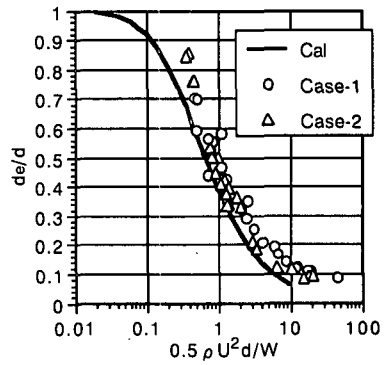


図-2 膜の有効高さの実験値と計算値の比較

で推定される。ここで、 $\theta_{x=d_e}$ は、膜が d_e に変位したときの鉛直軸(水深方向)と膜のなす角である。

図-2に、膜の有効高さの実験値と式(1)に基づく計算値の比較を示す。小田ら(1996)は β に 1.1 を、田端ら(1999)は β に 1.5 を与えることで実験結果と一致すると述べている。

本実験においても、 $d/h=0.6$ 、 β に 1.5 を用いた計算結果は、流速が大きい場合に多少実験値の方が大きい値となっているものの、非常によく一致しており、膜の場合には十分な精度で有効高さの予測ができることが確認された。なお、重錘配置による平均有効高さの差異は特に認められない。

図-3に、網の有効高さの実験値と式(1)に基づく計算値の比較を示す。計算には、膜の場合と同様に $d/h=0.6$ 、 $\beta=1.5$ を用いた。この場合には、全てのケースにおいて d_e/d は最大で 10 倍程度大きな値を示し、計算値とは大きく異なっている。これは、膜体はほぼ不透過であるのに対し、網は高い透水性を持ち、流体力が作用する投影面積が膜と比較して非常に小さいことから、作用する流体力も小さくなるためである。

重錘配置による有効高さは膜体の場合と同様に、大き

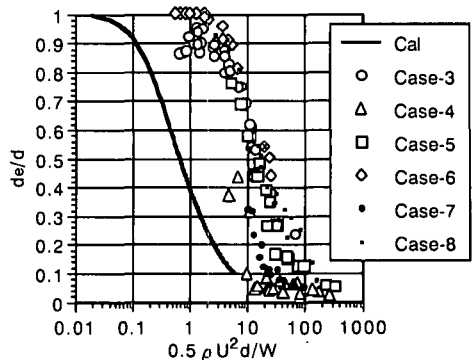


図-3 網の有効高さの実験値と計算値の比較

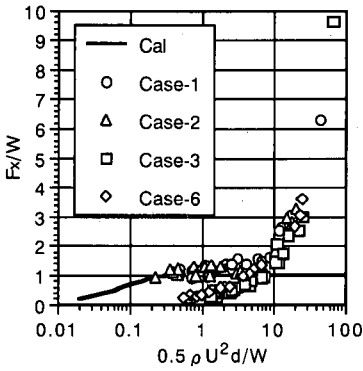


図-4 流れによる係留力の実験値

な違いは見られない。なお、無次元流速が大きい場合、ばらつきが大きい、両端配置の方が d_e/d が高くなる傾向が見られる。均等配置の場合には、網下端での変形が拘束され、受圧面積が大きくなることや重錘の投影面積が大きいため有効高さが小さくなったと考えられる。実験の範囲内では網の目合の大きさや菱形か正方形目合かの影響は顕著には認められない。

無次元流速に対する網の有効高さの変化は、膜の場合と類似して、無次元流速の増加とともに有効高さは減少するため、適当な実験定数を与えることで予測することは可能と考えられる。

4. 膜体および網状浮体構造物に作用する係留力

図-4に、膜体および網状浮体構造物に作用した係留力（水平力）の実験値および式（4）に基づく計算値と流速の関係を示す。なお、網の場合は、低流速から高流速までデータを採取した Case-3 および Case-6 を選択した。係留力は単位幅当りの重錘重量で除した無次元係留力 F_x/W とした。

図-4より、係留力は無次元流速が小さい場合には膜に作用する係留力の方が大きいものの無次元流速の増大と共に、膜と網による差がなくなることがわかる。また、重錘配置も係留力へは大きな影響を与えない。式（4）で推定される膜体構造物に作用する係留力（水平力）は、 $F_x/W \leq 1$ であることから、本実験結果は従来の予測式では再現できないことを示している。

5. ふかれ変形と作用する係留力の数値予測モデル

（1）数値予測モデルの概要

網状浮体構造物のふかれ変形と作用する係留力の数値予測モデルの概要を述べる。数値予測モデルの原型は、網状構造物を1本の剛体棒と自由に回転する連結部との

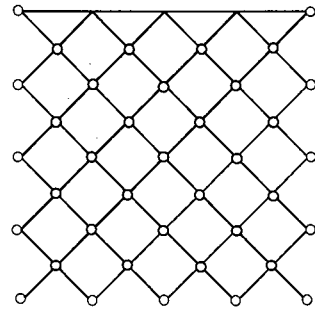


図-5 網状浮体構造物のモデル化

集合としてモデル化したもので、Le Bris ら (1999) により提案された。流体運動場は、網の存在によって、大きく影響を及ぼさないという仮定のもとで導かれている。

網状浮体構造物をモデル化した概略図を図-5に示す。剛体棒は伸縮しないと、連結部は質量を持たない点であると仮定する。未知数は連結部の変位 $\overline{OM}_i$ と剛体棒の張力 T_{ik} である。連結部 i での運動方程式は式（5）のように表される。

$$\left(\sum_{k=n_1(i)}^{n_2(i)} \frac{1}{2} m_{ik} \right) \ddot{\vec{r}}_i = \sum_{k=n_1(i)}^{n_2(i)} \left(T_{ik} \frac{\overline{M}_i \overline{M}_k}{l_{ik}} + \frac{1}{2} \vec{F}_{ik} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 m_{ik} は剛体棒の質量、 $\ddot{\vec{r}}_i$ は連結部 i の加速度、 T_{ik} は剛体棒 ik の張力、 l_{ik} は剛体棒 ik の長さ、 $\vec{F}_{ik}$ は剛体棒 ik に作用する全流体力である。

剛体棒を仮定しているので、棒の長さは一定である。このことから、隣り合う連結部 i と j の距離が棒の長さとなるから式（6）が成り立つ。

$$\|\overline{M}_i \overline{M}_j\|^2 = l_{ij}^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

連結部 i に関して、時間ステップ $n+1$ での変位 $\overline{OM}_i^{n+1}$ は n ステップ目の変位 $\overline{OM}_i^n$ と $n+1$ ステップ目の連結部 i の移動速度 $\vec{V}_i^{n+1}$ と dt を用いて式（7）で表される。

$$\overline{OM}_i^{n+1} = \overline{OM}_i^n + dt \vec{V}_i^{n+1} \quad \dots\dots\dots (7)$$

また、連結部 i に関して時間ステップ $n+1$ での移動速度 $\vec{V}_i^{n+1}$ は式（8）で表される。

$$\vec{V}_i^{n+1} = \vec{V}_i^n + \frac{dt}{M_i} \left\{ \sum_{k=n_1(i)}^{n_2(i)} \left(T_{ik}^{n+1} \frac{\overline{M}_i \overline{M}_k^n}{l_{ik}} + \frac{1}{2} \vec{F}_{ik}^n \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

棒の長さの保存則 式（6）は時間 t_{n+1} の時、

$$\|\overline{OM}_j^{n+1} - \overline{OM}_i^{n+1}\|^2 = \|\overline{M}_i \overline{M}_j^n\|^2 + dt(\vec{V}_j^{n+1} - \vec{V}_i^{n+1}) \cdot dt(\vec{V}_j^{n+1} - \vec{V}_i^{n+1}) = l_{ij}^2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

となり、連結部 i と j で表現されるそれぞれの式（8）を式（9）に代入することによって、時間 t_{n+1} の張力が未知の非線形方程式が得られる。 dt^3 と dt^4 の項を無視することにより式（10）で表される線形方程式が得られる。

$$[A]^n \vec{T}^{n+1} = \vec{B}^n \quad \dots\dots\dots (10)$$

計算は棒の長さの保存則に矛盾しない初期形状から始める。計算が終了すると式(8)と式(9)から次のステップの連結部の移動速度と変位が求められる。この繰り返し計算を定常になるまで行う。

流体力は慣性力 A_n と要素に対して垂直方向に働く抗力 T_n と接線方向の摩擦力 F_n に分けられ、式(11)～式(13)で求められる。

$$\vec{A}_n = -\rho \frac{\pi D^2}{4} l C_m \vec{F}_n \dots\dots\dots (11)$$

$$\vec{T}_n = -\frac{1}{2} \rho (l \cdot D) C_d \|\vec{V}_n\| \vec{V}_n \dots\dots\dots (12)$$

$$\vec{F}_t = -f \cdot \frac{1}{2} \rho (l \cdot D) C_d \|\vec{V}_t\| \vec{V}_t \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 ρ は水の密度、 D は剛体棒の直径、 l は剛体棒の長さ、 C_m は慣性係数、 C_d は抗力係数、 f は摩擦係数、 $\vec{F}_n$ は剛体棒の加速度、 $\vec{V}_n$ は剛体棒の鉛直方向移動速度、 $\vec{V}_t$ は剛体棒の接線方向移動速度である。

(2) 実験値との比較

棒の長さ $l=50$ mm、棒の直径 $D=4$ mm とし、このモデルの妥当性を検討する。作用する流体力の算定で用いる抗力係数は $C_d=2.0$ 、摩擦係数は $f=0.02$ 、慣性係数は $C_m=1.0$ とした。数値計算での計算時間間隔は $\Delta t=0.01$ s とし、全ての計算は網の変形と張力が定常状態になる300 stepまで行った。実験では膜の上部に棒状のフロートを設置したため、このモデルでも網の上部は完全に固定するように条件を与え、携まないものとした。網の両サイドおよび下部は全く拘束されていない。

計算は、実験と同様に重錘を両端配置するケースと均等配置するケースとし、網の目合は菱形形状とした。その他の条件としては流速および重錘重量を変化させた。膜長は $d=40$ cm、膜幅は $b=50$ cm とした。

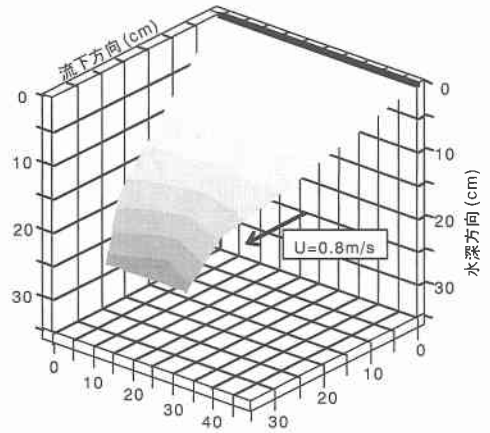


図-7 網状浮体構造物の有効高さの計算結果
(重錘：両端配置 Cal-3)

図-6, 7に本予測法で計算された重錘を両端配置のケースと均等配置のケースにおける有効高さの三次元変形状の一例を示す。

解析結果は、実験における重錘配置の違いによる膜の形状をよく再現している。つまり、両端配置では両端でのふかれ変形が小さく、中央部で大きくふかれた三次元的な変形を示し、均等配置の場合は、水平方向の変形はなく二次的なふかれ変形が示されている。また、いずれのケースも網の下端部ほど、水平方向に縮小する形状も再現されている。このように、任意の位置に重錘を配置しても、三次元的に変形状が解析できる。

図-8に網の有効高さとの流速の関係についての実験値と計算結果を比較して示す。計算と実験ケースの諸元を表-2にまとめて示す。なお、重錘を両端配置した場合の有効高さは、計算では網目毎に求められた有効高さの平均値とした。

図-8より、計算結果は重錘重量が同一であれば、重錘配置による影響は小さい。しかし、重錘重量により d_e/d

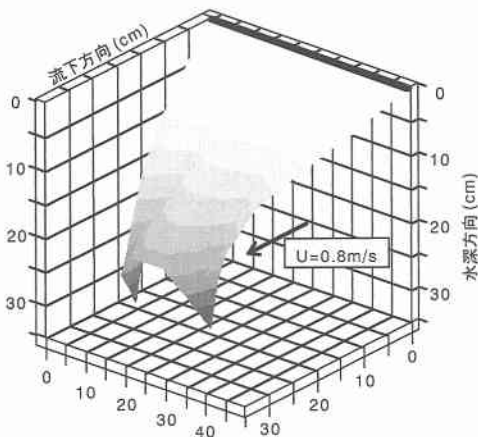


図-6 網状浮体構造物の有効高さの計算結果
(重錘：両端配置 Cal-1)

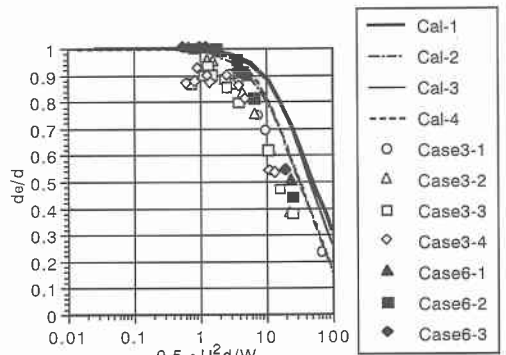


図-8 有効高さの実験値と計算値の比較

表-2 有効高さの計算と実験の諸元

ケース	諸元
Cal-1	計算 ($W=2.94 \cdot 10^{-2}$ N/cm, 両端)
Cal-2	計算 ($W=5.78 \cdot 10^{-2}$ N/cm, 両端)
Cal-3	計算 ($W=2.94 \cdot 10^{-2}$ N/cm, 均等)
Cal-4	計算 ($W=5.78 \cdot 10^{-2}$ N/cm, 均等)
Case 3-1	実験 ($W=1.27 \cdot 10^{-2}$ N/cm, 両端)
Case 3-2	実験 ($W=2.65 \cdot 10^{-2}$ N/cm, 両端)
Case 3-3	実験 ($W=3.92 \cdot 10^{-2}$ N/cm, 両端)
Case 3-4	実験 ($W=5.29 \cdot 10^{-2}$ N/cm, 両端)
Case 6-1	実験 ($W=2.65 \cdot 10^{-2}$ N/cm, 均等)
Case 6-2	実験 ($W=3.92 \cdot 10^{-2}$ N/cm, 均等)
Case 6-3	実験 ($W=5.29 \cdot 10^{-2}$ N/cm, 均等)

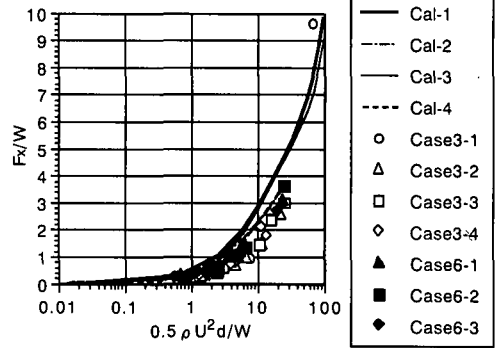


図-9 係留力の実験値と計算値の比較

は影響を受け、重錘重量で無次元化した流速に対しては重錘重量が大きい方が d_e/d は小さくなっている。

一方、実験結果は重錘重量で無次元化した流速に依存し、重錘重量による違いは見られない。計算値と実験値を比較すると、均等配置の実験値は $W=5.78 \times 10^{-2}$ N/cm の計算結果とよく合致している。両端配置の場合には、材料の比重の影響で、低流速域における実験値の d_e/d が小さくなっているが、流速の増加と共に d_e/d が減少する傾向がよく再現されている。

図-9 に係留力と流速の関係について実験値と計算結果を比較して示す。

先のふかれ変形と同様、計算値は無次元流速の増大と共に、係留力も大きくなっており、高流速時には両端配置の方が大きくなるものの、重錘配置には大きく関わらない。また、重錘重量が大きい方が係留力は小さくなる傾向が見られる。一方、実験結果は重錘重量で無次元化した流速に依存し、重錘重量や配置による影響は小さい。計算値と実験値を比較すると、均等配置の実験値は $W=5.78 \times 10^{-2}$ N/cm の計算結果とよく合致している。

以上より、この数値モデルは係留力も十分予測できることがわかる。

6. おわりに

本研究では、網状浮体構造物のふかれ変形と作用する係留力について実験的な検討と数値モデルによる検討を行った。また、従来から提案されている汚濁防止膜の予測モデルが網状浮体構造物へも適用可能かどうかの検討も行った。その結果、以下の内容が明らかになった。

1) 膜体構造物の変形形状は従来から提案されている予測式により、十分な精度で予測される。しかし、重錘配置を変えた場合の三次元的な変形予測ができないことや網状浮体構造物については投影面積が小さいため、そのままの形では予測できない。

2) 係留力については、流速が小さい場合には膜体に

も網状浮体構造物にも適用できるが、流速が大きい場合には係留力が小さく見積られる傾向がある。

3) 本研究で用いた数値モデルは、網状浮体構造物においてふかれ変形と作用する係留力を並行して解析できる。網状浮体構造物は流体運動場に大きな影響を及ぼさないという仮定に基づいているが、本研究の条件であれば、ふかれ変形形状がよく再現でき、有効高さも予測できる。

4) 重錘配置を変えた網状浮体構造物に作用する係留力についても、幅広い流速条件で予測できる。

今後さらに、

- 1) 斜めから流れが作用する場合のふかれ変形と係留力
 - 2) 波・流れ共存場でのふかれ変形と係留力
 - 3) 複数連結した場合のふかれ変形と係留力
 - 4) 構造物により変形を受ける流体運動場の解析とそれを用いたふかれ変形と係留力
- 等について検討を加える予定である。

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 と係留力の实用算定法, 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. 1151-1155.
- 田端千穂・八尋明彦・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.
- 鶴谷広一・惟住智昭・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.
- Le Bris, F. and D. Marical (1999): Numerical and experimental study of submerged flexible nets, Proc. of the 9th ISOPE Conf., Vol. 3, pp. 749-755.