

垂下式汚濁防止膜に発生する衝撃展張力のモデル化

The Modelization of Impact Tensional Force on Floating Silt Curtains

榎木 亨*・青木伸一*・劉 海波**

Toru SAWARAGI, Sinichi AOKI and Haibo LIU

When a dredging or reclaiming is carried out in a sea, turbidity is usually generated. To prevent the surrounding sea from pollution by turbidity, silt curtains are usually used. When the silt curtains are placed in the sea, impact tensional forces are often generated on upper and lower cables which fix the silt curtain. From the engineering point of view, it is necessary to estimate the magnitude of the impact force in the design of the silt curtain. In this study, a numerical model for predicting impact force on the cable is proposed, and the applicability of the model is tested through experiment. Keyword: silt curtain, impact tensional force, calculation model, experiment

1. まえがき

近年、海洋土木工事に於いて発生した濁りを拡散させないように、図-1に示すような垂下式汚濁防止膜を使用することが多い。このような海面上のフロートからある深さまでカーテンを垂下する形式の汚濁防止膜が、波浪中で緊張と弛緩を繰り返しながら運動する場合には、膜が緊張する際に展張ケーブルに衝撃的に大きな張力が発生する¹⁾。このような衝撃力は、膜が緊張することにより流れの運動量が急変し、その反作用として衝撃的な流体力が膜に作用するために発生すると考えられる。この衝撃張力は、垂下式汚濁防止膜の設計において最も重要な要素であると思われるが、その大きさはケーブルの材質(弾性係数)の影響を強く受けることが水理実験より明かにされており、相似則の問題が解決されなければ、実験結果を実際設計に取り入れることが難しい。

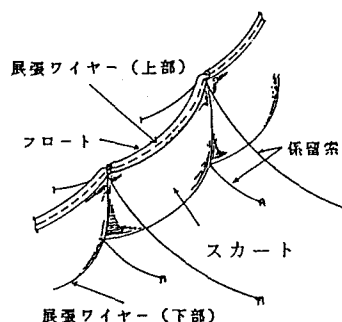


図-1 汚濁防止膜の概略

本研究は、図-1に示すような垂下式汚濁防止膜が一様な定常流中で緊張する際に、上下の展張ケーブルに発生する衝撃的な張力(衝撃展張力と呼ぶ)のモデル化を行い、水理実験の結果と比較することによってその妥当性を調べるものである。さらに提案したモデルを用いてケーブルの材質の影響を明らかにし、水理実験の際に重要となる無次元パラメータを提案する。さらにモデルを発展させることにより、垂下式汚濁防止膜が波浪中で緊張と弛緩を繰り返しながら運動する際に発生する衝撃展張力の特性を明らかにし、最終的には波浪中での垂下式汚濁防止膜の設計法を確立することを目的としている。

2. 流れの中での膜体の実験¹⁾

垂下式汚濁防止膜が波浪中で緊張と弛緩を繰り返しながら運動する際、緊張時に展張ケーブルに衝撃的に発生する張力について、水理模型実験によりその特性を明らかにした¹⁾。いま、簡単のために図-2水槽断面及び模型の状態一様な定常流中で膜がたるんだ状態から流れによって押し流されて緊張する場合を考えて、定常流中で生じる衝撃展張力の測定を行う。実験は2次元の流れ水槽で行った。図-2にその断面及び模型を示している。模型は図-1の係留索にはさまれた1スパンのみを取り出したものの、上下とも展張ケーブルを配してある。それぞれのケーブルにリングを介して取り付けであり、衝撃展張力を測定する。実験では、水深 h 及び水路幅 B を一定であり、膜の深さ d 及び膜長 l をそれぞれ

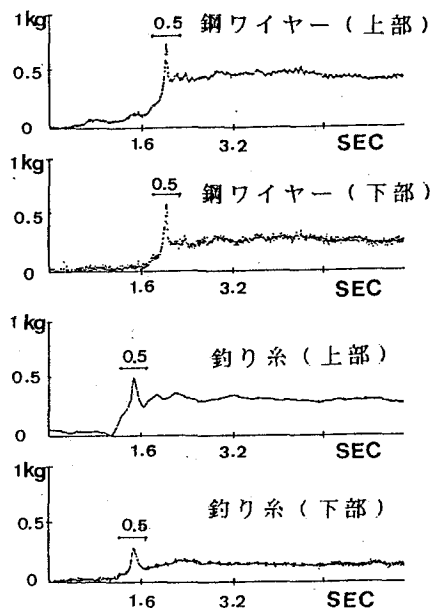
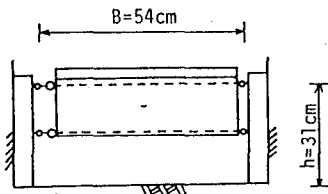


図-3 展張力の時系列

* 正会員 大阪大学工学部土木工学科

** 学会員 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒565 吹田市山田丘2-1)

3通り変えた。また衝撃展張力に及ぼす展張ケーブルの材質の影響を調べるために、展張ケーブルとして鋼ワイヤーと釣り糸の2種類を用いた。この衝撃展張力は、膜が緊張する際に流体運動が急激に止められ、流体の持つ運動量が急変することに起因していると考えられ、波浪中で発生する衝撃展張力とその発生機構は類似の性質を持つと思われる。定常流で考えることにより、緊張時の流速がはっきりしていること、波高・周期などの影響を考えずにすむこと、および緊張時の位相等の不明な要素を除去できることなどの利点があり、現象を単純化して考えることができる。

図-3に実験ケースの代表的な展張力の時系列の一例を示すが、膜の解放と同時に上下の展張力ともに緩やかに増加し、膜が緊張する瞬間に鋭いピークが発生している。その後展張力はある位置まで減少して定常な値を示す。上下の展張ケーブルの衝撃力は同時に発生し、その時系列もほぼ似ている。同じ実験条件では、展張ケーブルが鋼ワイヤーを使うときには、ピークがさらに鋭く、大きく現れる。定常力については、展張ケーブルの種類の変化による影響が小さいのに対して、衝撃力についてはその影響が大きく現れている。したがって衝撃力はケーブルの材質に大きく依存することがわかる。このため、水理模型実験の結果を現地に適用するためには、どのような相似則を用いればよいかを明らかにしておく必要がある。

3. 衝撃展張力の予測モデル

3-1. 衝撃展張力の発生機構

一樣流中で膜が緊張する場合、緊張する瞬間に流れは急激に変化し、流れの運動量が短時間に变化する。したがって、衝撃的な流体力はその反作用として発生すると考えることができる。さらに、流れとともに移動する座標系からみれば、この現象は膜が緊張した瞬間から静止流体中を膜が流れと反対方向に急激に運動し始めるようにみえる。本研究で提案するモデルは、以上のような考えに基づき、衝撃展張力を膜が流れの運動量を急変させることによって発生する力であるとみなし、その大きさを決定づける運動量の時間変化を膜またはケーブルの弾性的な変形に求めるものである。

3-2. 膜体のスカート部に働く付加質量力

以上に述べたように衝撃的に発生する展張力を予測するためには、水面付近で急激な加速度運動を行う膜面（スカート部）に作用する流体力を算定する必要がある。ただし、一般に運動の加速度が大きい場合には、水面付近の物体についても無限流体中と同様に運動の加速度に比例する流体力成分（付加質量力）のみを考慮すればよい。そこで、本研究では、スカート部（二次元断面）の水平運動に対する付加質量（周波数 $\omega = \infty$ の付加質量に対応）の特性を理論解析および数値計算の両面から検討した。

(A) 理論解析

図-4に示すような自由表面のある無限水深中の鉛直の平板の場合には、Labdweber and Macagno²¹⁾の方法を用いて付加質量を解析的に求めることができる。これを M_0 と表すと次式で表される。

$$M_0 = 2\rho d^2 / \pi \quad (1)$$

この付加質量の計算結果に基づいて、展張ケーブルに比べてスカート部の変位及び変形を無視できるような場合の衝撃展張力の計算モデルに発展することができる。

(B) 数値計算

スカート部が緊張する際、実際には図-5に示すようにわん曲した形をしている。このようなスカート部の剛体的な運動およびFlexibleな変形に伴う付加質量を求めるためには、数値計算が必要となる。今回用いた数値計算法は一般的に用いられる境界要素法であるがスカート部となる膜面の厚さが非常に薄いことを考慮して、図に示すように領域をIおよびIIの二つに分割して計算を行った。

図-6はスカートの形状が直線BCで表される平板の場合の付加質量 M および造波減衰 N の周波数 ω による変化を示したものである。ただしこれらは(1)式で表される M_0 を用いて無次元化している。図から、周波数が大きくなるにつれて付加質量は理論値に漸近しており、数値計算の妥当性が確認できる。

図-7は、スカート部を図-5に示すような円弧（円の中心をO、Oまでの距離をsとする）とし、これが水平方向に剛体運動する場合の付加質量（十分大きな ω に対するもので、これは ω によらずほぼ一定値とみなせる）を、 s/d に対して示したものである。ただし、 $s/d = 0$ のときスカートの形状は半円

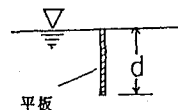


図-4 無限水深中の平板

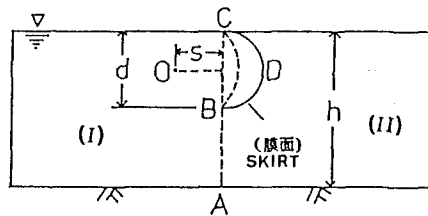


図-5 わん曲した膜面及び計算領域

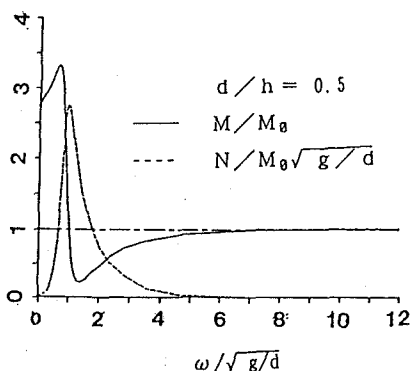


図-6 付加質量及び減衰係数の周波数応答

であり、 $s/d \rightarrow \infty$ のときスカート部は平板になる。図よりスカート部が半円までわん曲することによって、付加質量は平板の場合の1.4倍程度まで増大することがわかる。

図-8はスカート部の膜面の伸び変形、(例えば図-5の点線の円弧で示したスカートが実線で示したスカートに変形するような場)に伴う付加質量を示したものである。この伸び変形は、円の中心Oの水平移動として表すことができるので、ここでは、付加質量を中心Oの移動加速度に対する比例定数として定義した。ただし、この場合も M_0 の算定には d の代わりに膜の深さ l を用いている。図より、付加質量は s/d の増大に伴って、すなわちスカートが平板に近づくほど小さくなっており、 s/d が小さい場合でも M_0 に比べるとかなり小さい値を示すことがわかる。

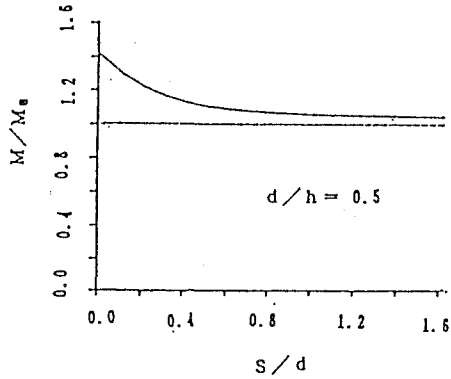


図-7 剛体運動による付加質量に対する膜面のわん曲の影響 (d が一定)

この付加質量の計算結果を用いることによりスカート部の変位及び変形を考慮した衝撃展張力のモデル化に発展させることができる。

3-3. 流体力による膜の変形と張力³⁾

ここでは膜の部材に流体力が作用したときの、展張ケーブルまたはスカート部の静的な変形および張力を算定する。膜に働く流体力と部材力の関係を示したのは図-9である。流体によってスカートに σ_s なる圧力が作用するとする。この圧力によってスカートの単位長さ当りに T_s なる張力が発生し、この T_s によって展張ワイヤの張力 T_c が決定されることになる。

(A) スカートの張力の算定法

ここではスカートに流体力が作用したときの、スカート部の張力を算定する。

図-10示すように $x-y$ 平面を考え、流れは y 軸の正方向から y 軸に平行に存在するとする。スカートには流体力が直応力 σ_s (単位幅当たりの力であり、水深方向に一様であると仮定する)として作用し、従ってスカート内部の張力 T_s は到るところで一定である。スカート部の伸びを考慮し、スカートに働く力の釣合より次式が得られる。

$$\sinh \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{R_E} \right) = \frac{R_{gs}}{2\tau_s} \quad (2)$$

ただし、 $\sigma_s = T_s / (\sigma_s d)$, $R_E = E_s A_s / (\sigma_s d)$, $R_{gs} = d_0 / d$, E_s はヤング率, A_s はスカートの断面積である。(2)式より R_{gs} , R_E を与えて τ_s を求めることができる。また、 σ_s と T_s の水平方向の分力 F_c は以下のような関係がある。

$$\frac{F_c}{\sigma_s d} = \frac{R_{gs}}{2} \quad (3)$$

(B) ケーブルの伸びを考慮するときの変形と展張力

図-11は展張ケーブルの様子を示す。流れは y 軸の正方向から y 軸に平行に存在するとする。ケーブルには一様分布の直応力 F_c (T_s の水平分力)が作用し、従って展張ケーブルの張力は到るところで一定である。ケーブルの伸びを考慮し、ケーブルに働く力の釣合より次式が得られる。

$$\frac{1}{2R_E} = \sinh \frac{R_{gc}}{2\tau_c} - \frac{1}{2\tau_c} \quad (4)$$

ただし、 $\tau_c = T_c / (\sigma_c l)$, $R_E = E_c A_c / (\sigma_c l)$, $R_{gc} = B / l$, 添字“c”はケーブルの意味を表す以外は、上と同じである。(4)式より R_{gc} ,

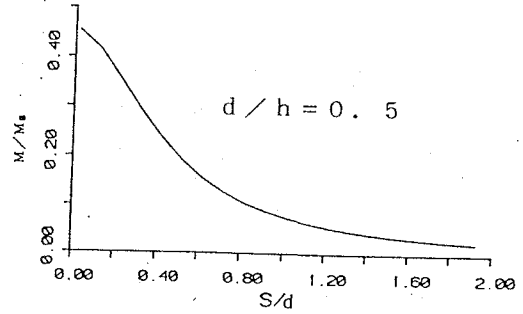


図-8 伸び変形による付加質量に対する膜面のわん曲の影響

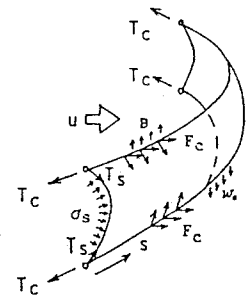


図-9 膜に及ぼす流体力と部材力の関係

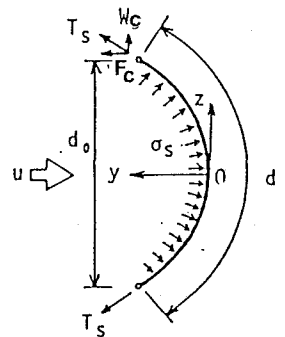


図-10 スカート部に及ぼす力と座標系

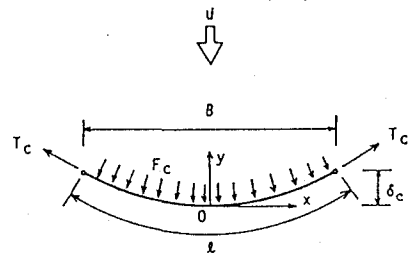


図-11 展張ケーブルにかかる力と座標系

R_E を与えて τ_c を求めることができる。

さらに、ケーブルのたわみ量は次式で与えられる。

$$\delta(x) = \frac{T_c}{\sigma_c} \left(c \cosh \frac{\sigma_c B}{T_c} - c \sinh \frac{\sigma_c}{T_c} x \right) \quad (5)$$

(C) ケーブルの伸びを考慮しないときの展張力

ケーブルの伸びを考慮しないときの展張力については、 $E_c = \infty$ を(4)式に代入して次式で表すことができる。

$$\tau_c \sinh \frac{R_{\sigma c}}{2\tau_c} = \frac{1}{2} \quad (6)$$

3-4. 衝撃展張力の計算モデル

汚濁防止膜は展張ケーブルと膜面のスカートから構成されており、緊張する際にはケーブルとスカートともに伸びおよび変形を生じる。ただし材質が異なるため、それぞれの変形量が異なる。また両方の変形を同時に考慮し、モデル化することが難しいので、ここでは以下のように分けて考えることとする。

(A) スカート部の変形及び伸びを無視する場合(以後モデルAと呼ぶ)

スカートの伸び剛性がケーブルより大きい場合(展張ケーブルが釣り糸、スカート部がポリエステルの場合)には、スカートの伸び変形が無視できると考えられる。この場合の衝撃力の発生機構は次のように解釈できる。図-12は流れ場にある膜体を示している。いま、 $y-z$ 平面に平行な2次元断面を考え(図-13参照)、スカート部が変形せずに水平方向に剛な運動をする。膜が緊張した瞬間を $t=0$ とし、微小な時間 $t=\Delta t$ 内にこの膜体が y 方向に δ だけ変位したとする。この間の加速度が一定とみなせる程度に Δt を十分小さくとれば、この δ の仮定により膜体の断面の加速度($du/dt=2(\delta-U_0\Delta t)/\Delta t^2$)が決定される。この運動にともなう、膜体に作用する流体力 F は、移動座標系で考え、かつ運動加速度が十分大きいとすると、付加質量 m を用いて、 $F=m \cdot du/dt$ のように表すことができる(膜は初期流速 U から u に変化するものとする)。したがって膜の中央断面における流体力 σ_c は次式で与えられる。 $\sigma_c = -Fc$

ただし、付加質量 m については、平板の水平運動の付加質量の計算式、つまり3-2(A)の(1)式より算出する。

次にケーブルの弾性的な変位を考える。上に述べた流体力が膜の流れと平行な各断面に作用し、その総和としてケーブルに発生する張力が決定される。つまり、作用する流体力とケーブルの諸元が与えられれば、ケーブルの張力および変形量(伸び)が決定されることになる。しかもこの伸び δ' は先に仮定した変位量 δ と一致しなければならない。もし $\delta' \neq \delta$ であるなら伸び δ を仮定しなおして計算を繰り返し、 $\delta' = \delta$ となればこのときの伸びおよび張力を採用して次のステップに進む。このようにして、順次 Δt をとって最後まで計算を続ける。

したがって、流体力は Δt 時間内の膜の変位量(加速度)によって決まり、逆に膜の変位量は加速度から決まる流体力によって決定されるため、展張力は両者のつりあい関係を解くことによって求められることになる。

(B) ケーブルの伸びを無視する場合(以後モデルBと呼ぶ)

ケーブルの伸び剛性がスカート部より大きい(ケーブルは鋼のワイヤ、スカート部はポリエステル)場合には、ケーブルの伸び変形がスカート部と比べたら無視できると考えられ、スカート部の弾性変形から衝撃力を求める。またスカートが円形を維持しながら変形すると仮定する。

図-12の $y-z$ 平面に平行な2次元断面を考え(図-14参照)、上と同様に、 $t=\Delta t$ 内にスカートが円弧の形で点線で示した膜面に変形し、この伸び変形は円の中心の水平移動として表すことができるので、円心の変位は δ とすると、この δ の仮定により円弧形のスカートの円心の加速度 du/dt が決定される。この運動にともなう、膜体に作用する流体力 F は、 $F=m \cdot du/dt$ のように表すことができる(膜は円心の初期流速 U_0 から u に変化するものとする)。ただし、付加質量 m については、3-2(B)で計算されたスカート部の円心運動の付加質量 m を用いている。

モデルAと同じに3-3(A)からスカートの張力を計算する。スカート部の張力は最終的にケーブルにかかっているため、3-3(C)のケーブルの伸びを考慮しない計算式からケーブルの展張力を計算する。

4. モデル(A)の計算結果と実験結果の比較

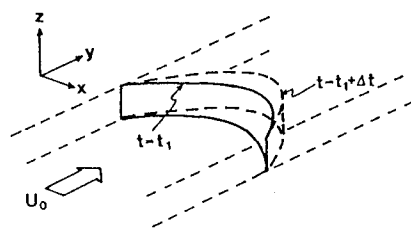


図-12 膜の変形

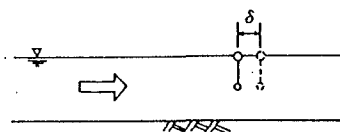


図-13 膜の断面の変位

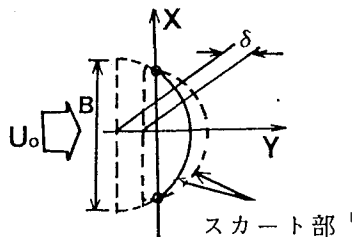


図-14 スカート部の伸び変形

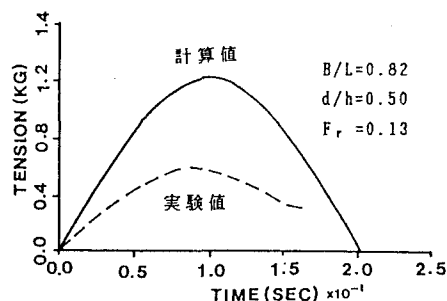


図-15 展張力の時系列の比較

4-1. 実験結果と計算結果

数値モデルでの衝撃展張力と実験値との比較を時系列でみてみたのが図-15である。なお図-15はケーブルとしてつり糸を用いたときのものである。これによると、つり糸のケースでは、計算値の方がやや大きめのピークを示すものの、おおよそその時系列変化は実験値を説明していると言えよう。ただし実験値と計算値とを合わせるために、展張力については上部および下部のケーブルの張力の和として採用し、また、図-3の時系列のピーク値から抗力の影響であると見なせる値を差し引いたものを衝撃展張力と定義した。

また、図-16は、実験で得られた衝撃展張力を縦軸に取り、それに対応する計算値を横軸に取って比較したものであるが、この図からも、計算結果がやや大きめの値を示すもののほぼ実験値に近い値を予測していることがわかる。

以上の結果から、本モデルAはつり糸の場合には適用可能であることと判断できる。なおケーブルが鋼の場合については後述する。

4-2. 無次元展張力に及ぼす種々の無次元パラメータの影響

無次元衝撃力 C_T (次式で示す) について、今回の実験でその影響を考えられるパラメータとしては次のようになる。

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho_w u^2 B d} = f \left(\frac{u}{\sqrt{g h}}, \frac{d}{h}, \frac{B}{l}, \frac{\sqrt{E_{cb} A / \rho_w}}{h \sqrt{g h}} \right) \quad (7)$$

ただし、上式で $\sqrt{E_{cb} A / \rho_w} / h \sqrt{g h}$ はコーシー数を流速 u を用いずに表したものであるが、このパラメータを以後 C_E とする。

図-17は、ケーブルを釣り糸とした場合の C_T のフルード数に対する影響を計算値と実験値とを比較して示したものである。これらの図より、計算値は実験値よりも過大に評価しているものの、

変化傾向は

一致しており、

本モデルは実験値

を定性的に

説明している。

C_T の B

/ l に対する

影響につ

いては、図

-18に示

しており、

実験値のデ

ータ不足に

より明らかにすることは困難であったが、計算の結果によると、 B/l の大きいところでは C_T は B/l に対してほぼ比例関係を示す。図-19は、 C_T の d/h に対する影響を計算値と実験値とを比較して示したものである。

計算値の示す C_T は d/h にはほとんど影響されないという傾向が実験値にも若干うかがえた。

4-3. 衝撃展張力に及ぼすケーブルの材質の影響

ここでは、本計算モデルが適用できる範囲でのケーブルの材質の影響について考える。式(7)の C_T と C_E の関係を計算によって求めると図-20が得られる。図に示したように、本モデルでは、無次元衝撃展張力 C_T はケーブルの伸び剛性の平方根に比例する。したがって、ケーブルが伸びやすい材質であればあるほど衝撃展張力は小さくなることがわかる。これこの事実は実験結果と定性的に一致している。また本モデルが直接適用できない場合でも、衝撃展張力が本モデルで考えたようなメカニズムで発生すると考えられる場

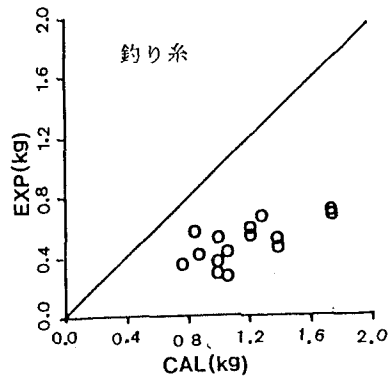


図-16 衝撃展張力のピーク値の比較

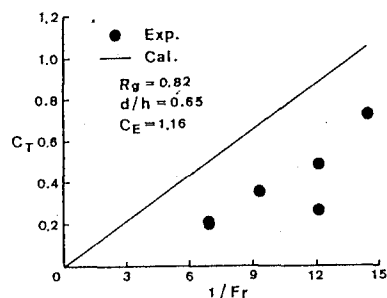


図-17 C_T に及ぼすフルード数の影響の実験値と計算値の比較

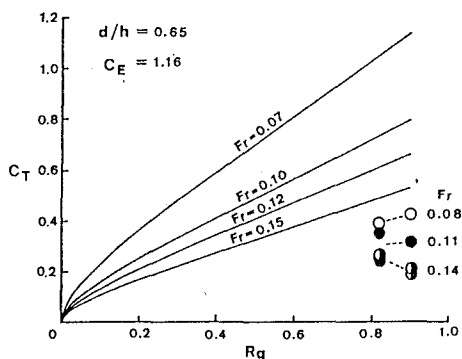


図-18 C_T に及ぼす R_g の影響の実験値と計算値の比較

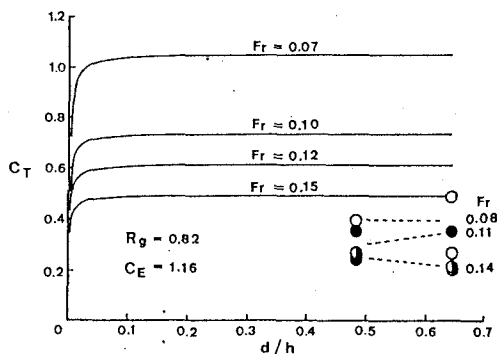


図-19 C_T に及ぼす d/h の影響の実験値と計算値の比較

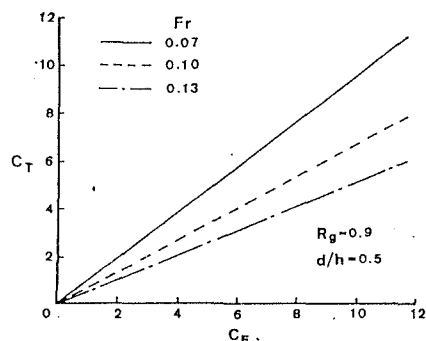


図-20 C_T に及ぼす C_E 数の影響

合には、すなわちケーブルの伸びが支配的な要因であると見なされる場合には、無次元パラメーター C_E が実物と等しくなるような模型を用いることにより、実物と力学的に相似な模型実験を行うことができる。すなわち、模型に対する添字を m 、実物に対する添字を p とし、 $(C_E)_m = (C_E)_p$ より、縮尺を $1/S$ とすると、次式が成り立てばよい。

$$\frac{(E_{cb}A)_m}{(E_{cb}A)_p} = \left(\frac{1}{S}\right)^3 \quad (8)$$

従って、水理模型実験を行う際には、ケーブルの伸び剛性を縮尺の3乗にあわせておけばよいことが分かる。

4-4. 予測モデルAの問題点

モデルAは、種々の仮定を設けることによって構成されているため、結果にはいくつかの問題点がある。

① 膜（ケーブル）の変形は静的であるとしたが、ここで対象とするような衝撃的な現象に対しては本来は動的な解析を必要とする。

② 膜の変形の算定において、ケーブルに作用する直応力 $F_c(x)$ を、 $F_c(x) = \sigma_c \cdot c \cdot \cos^2 \theta$ （ここに、 θ は x 軸と $f(x)$ とのなす角）とおいた。これには膜の各部分の加速度が同じであるという前提条件があり、妥当な仮定かどうかは疑問である。

③ 2次元断面で膜体を考えた際、膜体を平板として付加質量を算定している。実際の現象では膜はたわみを生じている。このことは、予測モデルでは付加質量を過大に評価することになると思われる。

④ 膜を平板として捉えることはまた、流体力が作用しても膜のカーテン部に伸びは生じず、ケーブルのみが伸びを生じていることと考えていることになるが、現実にはカーテン部でも伸びが生じておりケーブルの負担する張力は予測モデルのそれよりも小さいことがわかる。

⑤ 水理模型実験では上部及び下部にケーブルを配した膜体を用いているが、上部と下部ではケーブルに発生する衝撃展張力の大きさが異なっている。しかし、予測モデルでは上部と下部の展張ケーブルに発生している衝撃展張力の和が1本のケーブルに発生しているものとしているので、個々のケーブルの張力を別々に算定することはできない。

⑥ ケーブルが緊張を開始した時の膜体に及ぼす流速（初期流速）として平均流速を与えているが、弛緩状態から緊張を開始するまでに膜の移動速度は平均流速よりもやや小さくなっていることが考えられる。つまり、初期速度を大きく与え過ぎていることとなり、これもまた衝撃展張力を過大に評価することになる。

4-5. 結論

本研究では垂下式汚濁防止膜が一様流中で緊張する場合を取り上げ、ケーブルに発生する衝撃的な展張力の発生モデルを構築し、特に、膜体の構成部材になる展張ケーブルとスカートの内、展張ワイヤーの伸び性が顕著の場合について、水理模型実験の結果と比較することによってその妥当性を検討した。さらに、提案したモデルAを用いてケーブルの材質の影響を明らかにし、水理模型実験の際に重要となる無次元パラメータを提案した。

ここに本研究で得られた主要な知見を要約して、結びとする。

① 膜のスカート部の断面に対する付加質量を、理論解析および数値計算によって明らかにした。

② 展張ケーブルがスカートに比べて伸び剛性が小さい場合には、展張ケーブルの伸びから膜の衝撃展張力を求める本モデル(A)の方法で、衝撃張力の大きさおよび立ち上がり時間がある程度予測できる。

③ 本モデル(A)によれば、衝撃展張力は、流速・スカート深さに比例し、伸び剛性の平方根に比例する。さらに膜の展張幅と膜長の比の関数となる。この傾向は実験結果にも見られる。

④ 水理模型実験を行って衝撃展張力を求めようとする際、衝撃力の発生機構が本モデル(A)と同様であると考えられる場合には、ケーブルの伸び剛性を実物の $1/S^3$ ($1/S$ は縮尺) にしておけばよい。

5. モデル(B)の計算について

計算モデル(B)の対象は、膜体の構成部材になる展張ケーブルとスカートの内、スカート部の伸び性が顕著の場合である。例えば、展張ケーブルが鋼ワイヤーのケース(スカートの材料はポリエステルの場合)、カーテン部の伸び変形量から衝撃力を計算することになっておるが、ポリエステルの材料の膜体のヤング率が現段階では未確認であるため、今回は計算結果の算出するまでには行かなかった。今後スカート部となる膜面のヤング率を調べてさらにモデル(B)の研究を進める。

参考文献

- 1) 榎木 亨・青木伸一・劉 海波・山下 真：波浪中に張られた垂下式汚濁防止膜の展張ケーブルに発生する衝撃展張力特性，海洋開発論文集、土木学会，Vol. 6, pp. 311-316, 1990.
- 2) Landweber, L. and M. C. de Macagno: Added Mass of Two-Dimensional Forms Oscillating in a Free Surface, Jour. of Ship Research, November, pp. 20-30, 1957.
- 3) 榎木 亨・青木伸一：流れの中に張られた汚濁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，土木学会，Vol. 3, pp. 203-208, 1988.