

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

大阪大学工学部土木工学科 正会員 榎木 亨
大阪大学工学部土木工学科 正会員 青木伸一
太陽工業株式会社 安井章雄

1. まえがき

近年我が国においては、関西国際空港などの大規模な国家的プロジェクトに加え、ウォーターフロントの利用や海洋レジャーのための沿岸域の開発が盛んに行われるようになってきた。これに伴って種々の海洋土木工事が計画・施工されているが、規模の大小にかかわらず、埋立・浚渫などによって発生する浮遊土砂粒子によるごりの周辺海域への拡散が沿岸漁業との関連において大きな問題となっている。このような場合我が国では、にごりの拡散防止のために、汚濁防止膜を工事区域の周辺に張り巡らせて工事を行うのが通例である。

汚濁防止膜は、フロート、カーテン膜及び係留装置からなり、大別すると、海上のにごりの拡散を防止するために海上のフロートからある水深までカーテンを垂下・係留する海上式と、海底付近で発生するにごりの拡散防止のために、カーテン上部に取り付けた浮力体により海底に沈めたシンカーから立ち上げる自立式の2種類に分けられる。汚濁防止膜を設計する際には、効果的なにごりの拡散防止¹⁾が第一目的となることは言うまでもないが、より海象条件の厳しい海域での海洋工事が増えるにつれ、その安全設計が大きな課題となってきている。汚濁防止膜は、膜面を有する構造物という意味で膜体構造物と呼ぶことができるが、このようなフレキシブルな(外力の作用によって変位するだけでなく構造物自体が変形するような)構造物に対する設計法はほとんどないのが現状である。便宜的には剛な構造物に対する設計法を援用することが考えられるが、過大あるいは過小な設計となることが容易に想像される。すなわちこのような構造物については、構造物の変形特性を考慮した設計法の確立が望まれる。^{2) 3) 4)}

本研究は上述の2種類の汚濁防止膜のうち、自立式汚濁防止膜を対象とし、種々の波浪条件下においてシンカー部に発生する膜張力を測定し、その特性を明らかにしようとしたものである。

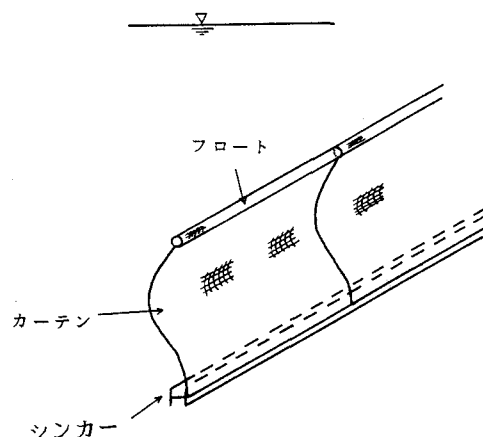


図-1 自立式汚濁防止膜

2. 水理模型実験の概要

対象とする自立式汚濁防止膜は膜長数十m(長手方向)の単体が単位となっているが、これは通常図-1に示すようにいくつか互いに連結されるので、膜の法線に対して垂直に入射してくる波に対しては現象はほぼ2次元であると思われる。そこで模型実験では2次元造波水路を使用した2次元実験とするが、水路幅が十分にとれないため、どうしても水路横断方向の膜の変形が一樣でなく、3次元的な変形を生じてしまう。従って、実験は完全な2次元実験とは言えず、実験結果には膜が有限長であることの影響、言い換えれば水路幅の影響が含まれていることに注意しなければならない。

模型諸元及び実験諸元を表-1に示す。カーテンのヤング率については、本来、模型と実物のコーシー数が同じになる

表-1 模型及び実験の諸元

curtain depth (cm) : 47.0
water depth (cm) : 113.0
wave height (cm) : 10.0 - 20.0
wave period (sec) : 1.0 - 2.8
thickness of a curtain canvas (mm) : 0.08
Young's modulus of a curtain canvas (kgf/mm ²) : 300 - 800
density of a curtain canvas (g/cm ³) : 1.38
type of a float CS-S : a line of 48 spheres of expandable polystyrene with a diameter of 3cm, buoyancy of unit length = 4.68(gf/cm) CS-C20 : a cylinder of expandable polystyrene with a diameter of 2cm, buoyancy of unit length = 3.80(gf/cm) CS-C15 : a cylinder of expandable polystyrene with a diameter of 1.5cm, buoyancy of unit length = 1.73(gf/cm)

ように縮尺する必要があるが、このとき同時にカーテンの密度も模型と実物で一致させる必要があり、そのような材料を見つけることは難しい。今回はカーテンに衝撃的な力は発生せず、また膜の曲げ剛性は無視できるので、コーシー数の影響は小さいと考え、カーテンの密度を実物と一致させて（実際の汚濁防止膜と同じ材質を用いて）実験を行った。さらに実験では、フロートの影響を調べるために、表に示すような3種類のフロートを使用した。

“CS-S”は浮力の大きなモデルであるが、フロートに発泡スチロールの球を用いているため水槽横断方向の変形が大きい。“CS-C20”は、フロートをシリンダー状（柱状）の発泡スチロールとし、水槽横断方向の変位を小さくしようとしたものである。また、“CS-C15”はさらにフロート径を小さくしたものである。ただし、CS-C20、CS-C15ともCS-S程ではないが、水槽横断方向の変形がかなり発生する。実験ケースとしては、3種類の膜についてそれぞれ周期を8種類、波高は3種類変化させている。図-2には実験に使用した造波水路と膜の設置状況の概略を示している。水槽端部には消波装置が設置されており、反射率は10%前後である。

今回の実験は2次元実験であるので、膜張力は単位長さ当りの張力として取り扱わなければならない。ところが実際、単位長さ当りの膜張力を測定することは非常に難しいので、今回は水底に幅10cmの固定点を3ヶ所設け、その部分に作用する張力を測定し、それら3つの力の合力を膜長で除すことにより単位長さ当りの張力を求めることにした。

膜張力の測定装置は、図-3に示すような薄鋼板を逆T型に組み合わせたものにA-Fの歪ゲージを図のように貼り付けたもので、上端にかかる力の水平方向成分（X）および鉛直方向成分（Y）が別々に取り出せるようになっている。すなわちA、Bのゲージのひずみ量からXが、C-Fのゲージのひずみ量からYが求められる。また測定装置はアクリル製の枠で固定されており、これを図-4に示すように、水槽横断方向に埋め込んだ細長いボックスの中に差し込み、張力計の上端に膜の下端を取り付けることにより、水底に突起物をおくことなく膜張力の測定が可能となる。

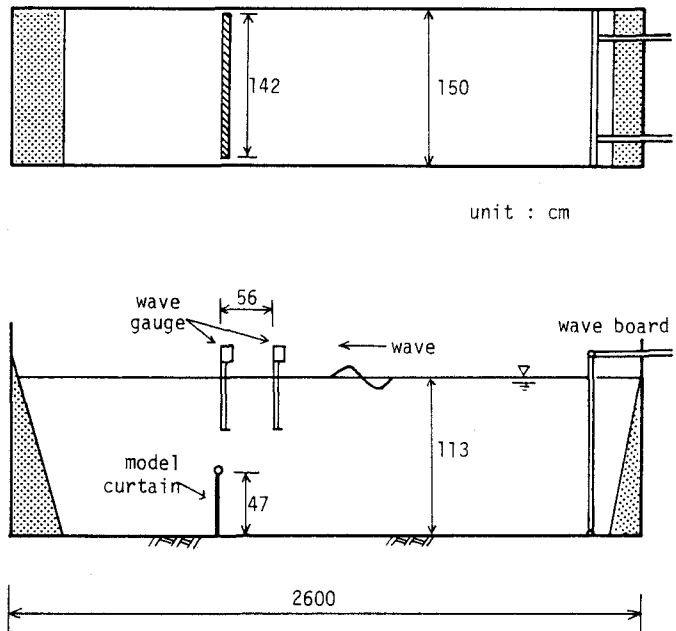


図-2 2次元造波水路

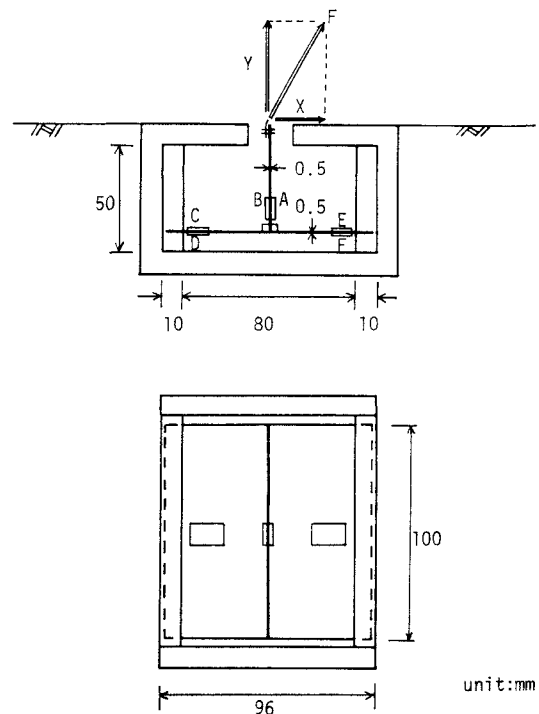


図-3 2成分張力計

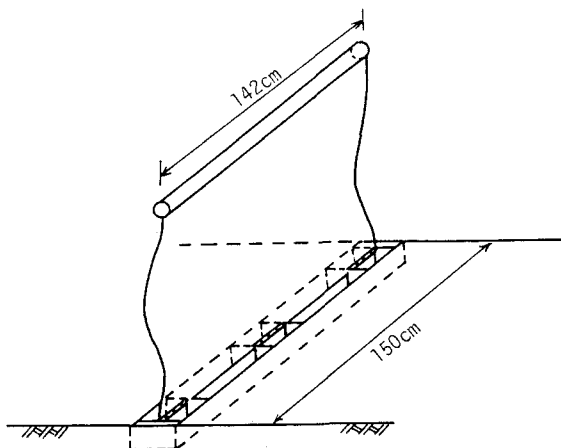


図-4 張力計の設置状況

3. 実験結果と考察

(1) シンカーに作用する膜張力の特性

張力の大きさについて論じる前に、張力の定性的な特性について触れておく。図-5は波が作用し始めてから張力が定常状態に達するまでの張力の典型的な変化の様子を示した模式図である。これより、張力の時系列は原点からいくらかシフトした位置で振動しており、張力には定常成分と変動成分が存在することがわかる。この定常成分を $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 、振動成分の全振幅を X_a 、 Y_a として以下の議論を進める。

図-6は図-4に示す3つの張力計に現れた水平力の同時記録の一例を示したものである。張力は常に水槽中央部に設置した張力計において最も大きく現れるが、3つの張力計ともほぼ同位相で変動しており、単位長さ当りの変動張力 X_a 、 Y_a は3つの張力計の全振幅の値を単純にたし合わせた後膜の全長で除すことにより求めることが可能であることがわかる。

図-7は水位変動 η 、張力の水平方向成分 X 及び鉛直方向成分 Y の同時記録の一例を示したものである。周期が短く波高の小さなケースでは張力の変動周期は波の周期と同じであるが、周期が長く波高の大きなケースでは張力の波形に高周波数成分が現れており、特に鉛直方向成分において顕著である。また水位変動と張力変動の位相を見ると、 Y に関しては高周波数成分の発生によって明瞭ではないが、 X については波のピークと外力のピークはほぼ一致していることがわかる。

(2) 変動張力成分について

ここではまず、張力の変動成分 X_a 、 Y_a の特性について考察する。図-8は波高に対する X_a 、 Y_a の変化の一例を周期別に示したものである。これらより、いくつかの例外を除けば、張力の水平及び鉛直成分 X_a 、 Y_a は共に波高に対してほぼ線形的に変化していることがわかる。

次に X_a 、 Y_a が波高に比例するという仮定のもとに、 X_a 、 Y_a を次式のように無次元化し、無次元張力の周波数応答特性を調べる。

$$\frac{X_a}{\rho g d H} \cdot \frac{Y_a}{\rho g d H} \quad (1)$$

ここには水の密度、 g は重力加速度、 d は膜の高さ、 H は波高である。図-9、図-10は無次元張力の無次元周期 $T\sqrt{g/h}$ に対する変化を示したものである。同一の $T\sqrt{g/h}$ の値についてプロットされた点は波高の違うケースを示しており、このばらつきが大きいほど、波高に対する線形性が低いことを示している。また図中の実線は、各周期の値の平均値を結んだものである。これらの図より、どのケースについても、周期が長くなるにつれて無次元張力は増大していることがわかる。これは周期が長くなるほど波動運動の影響が水深方向に次第に大きく及ぶようになるためであると考えられる。そこでこの周波数応答特性を次のような簡単なモデルで説明することを試みる。

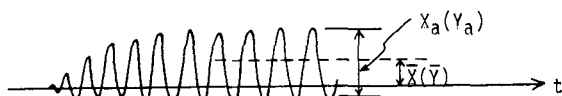


図-5 張力の時系列の模式図

$$T = 2.33 \text{ sec}$$

$$H = 11.7 \text{ cm}$$

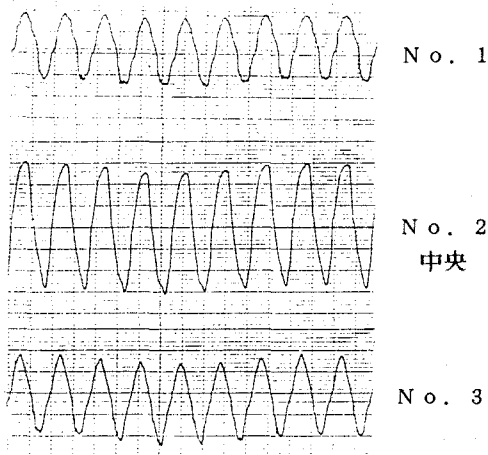


図-6 張力計の同時記録（水平力）

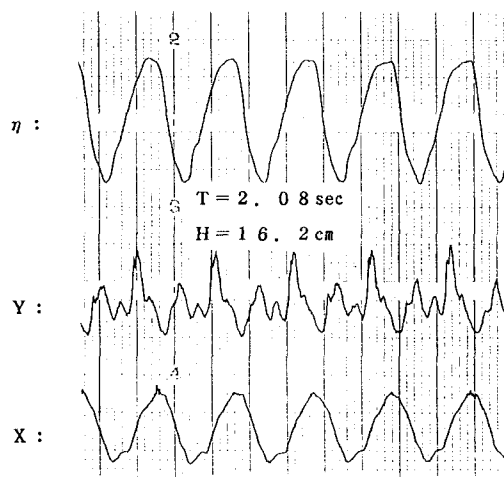
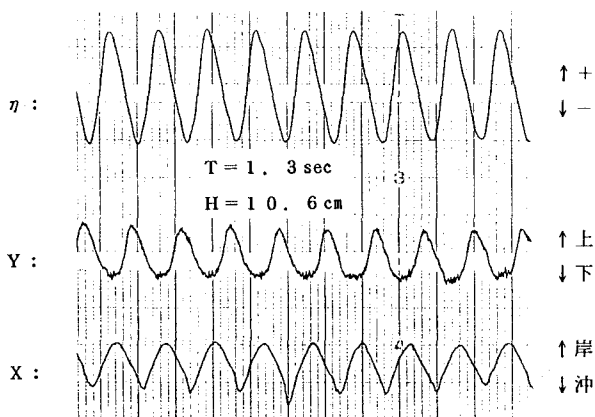


図-7 水位変動及び張力の時系列

周波数 σ 、波高 H の進行波による水深 h の地点での変動圧力の最大値（振幅） p_{max} は z の関数として次式で与えられる。

$$p_{max}(z) = \frac{\rho g H}{2k} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \quad (2)$$

ここに k は波数であり、 $\sigma^2 = gk \tanh(kh)$ を満たす値をとる。この変動圧力の最大値を水底から膜上端（ $z=d-h$ ）まで積分する。

$$P_{max} = \int_{-h}^{d-h} p_{max} dz = \frac{\rho g H}{2k} \frac{\sinh kd}{\cosh kh}$$

..... (3)

さらに張力を次式のように表現する。

$$X_a = \alpha_x P_{max}, \quad Y_a = \alpha_y P_{max} \quad (4)$$

すなわち、 α_x 、 α_y は、膜のないときの膜体部分の変動圧力の積分値と膜張力の全振幅との比を表す係数とみることができる。

この時無次元張力は次式で表される。

$$\frac{X_a}{\rho g d H} = \alpha_x \frac{\sinh kd}{2kd \cosh kh} \quad (5)$$

$$\frac{Y_a}{\rho g d H} = \alpha_y \frac{\sinh kd}{2kd \cosh kh} \quad (6)$$

図-9、図-10中の破線は実験値にfitするように α_x 、 α_y の値を適当に選んで(5)、(6)式から計算した無次元張力であるが、ほぼ傾向を説明している。

さらに図-11はフロートの浮力 f_B の違いによる α_x 、 α_y の変化を示したものである。これより、 f_B の増大にともなって α_x 、 α_y は増大する傾向を示しており、“CS-S”のケース（図中に*印で示す）はフロートに発泡スチロールの球を用いていることを考慮すれば、 α_x 、 α_y は浮力に比例して増大する傾向にあるといえよう。

(3) 定常張力成分について

図-12は、定常成分が比較的大きなケースについて、波高の変化にともなう定常成分 $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ の変化を周期別にプロットした例である。図中縦軸の符号で、+の符号は、 X については沖側（波のくる方向）を、 Y については鉛直上方

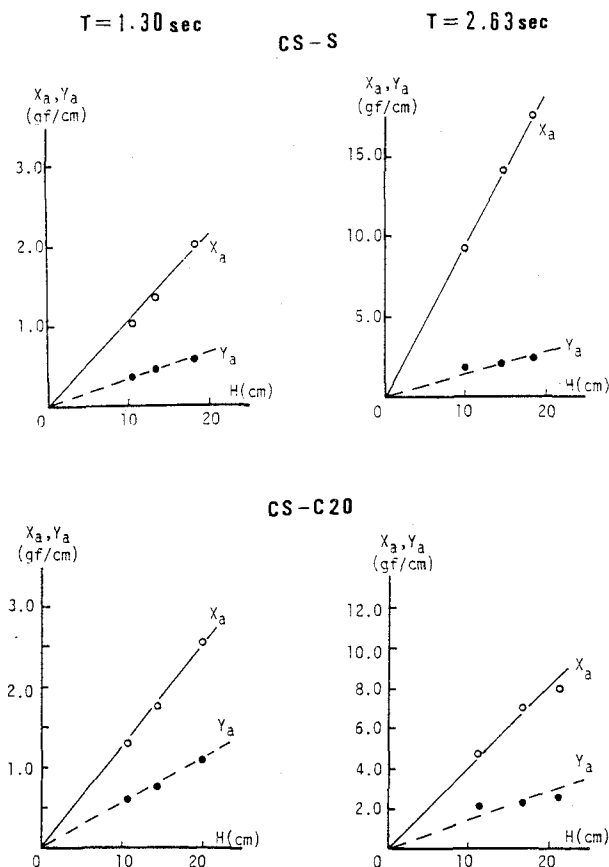


図-8 変動張力と波高の関係

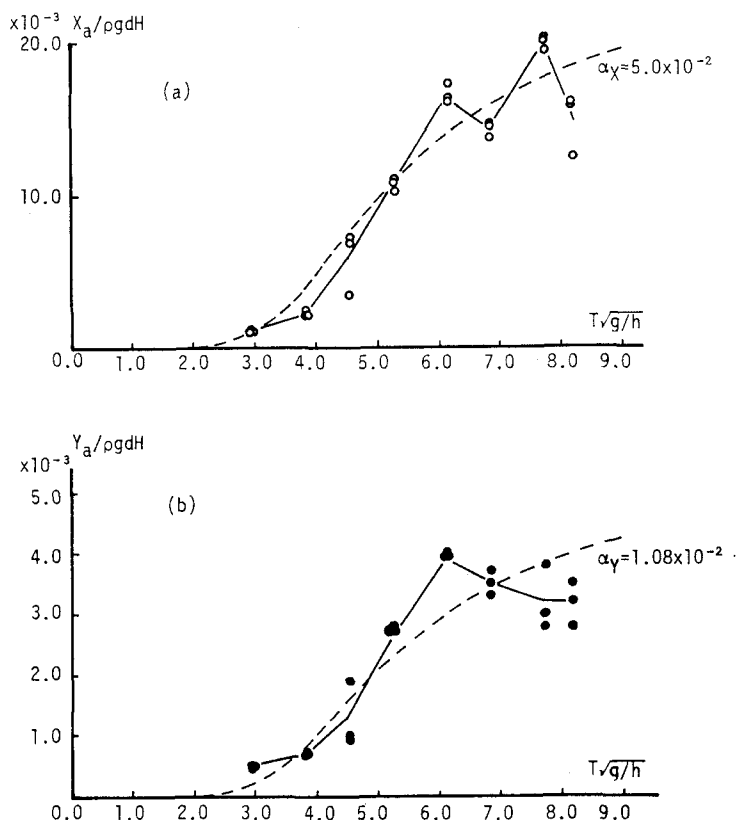


図-9 無次元張力の周期応答 (CS-S)

を示している。また図中のシンボルに添えた数字は定常成分の変動成分に対する比 $|\bar{X}|/X_a$, $|\bar{Y}|/Y_a$ の値を示している。多くの実験ケースにおいて膜はつりあい位置より沖側、かつ鉛直上方に定常力を受けており、また定常成分が変動成分の20%を越えるケースはあまり多くない。また定常成分も変動成分と同様、波高の増大に対して増大する傾向にはあるが、変動成分のように必ずしも波高に線形に増大するのではなく、むしろ波高のべき乗に比例して増大しているように見える。このような定常力の発生原因としては、(1)波による質量輸送の補償流として沖側に戻る流れ (2)波による非線形波力の定常成分(波漂流力) (3)波形の非対称性に対応した沖方向流速と岸方向流速の非対称性などが考えられるが、これらはいずれも波の非線形性に起因するものであり、波高に線形に現れる現象ではない。さらに(1)については造波水路特有の現象を含むと考えられるので、X, Y の特性を一概に議論することはできない。

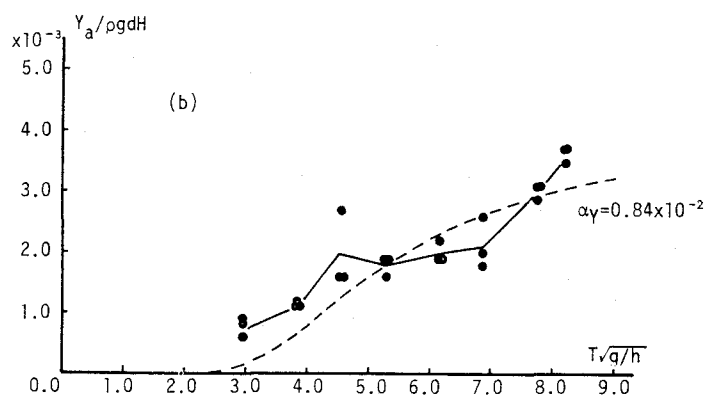
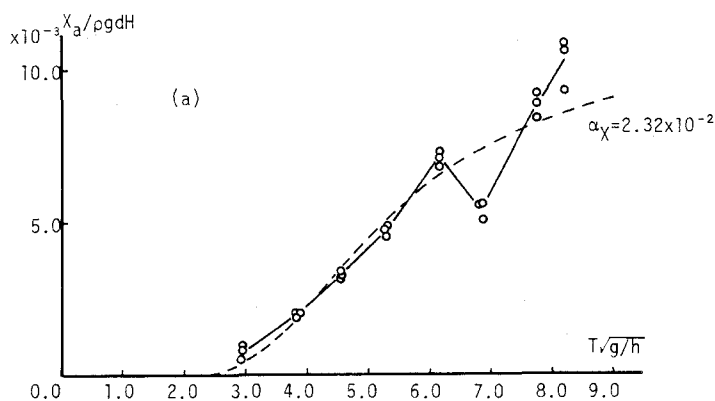


図-10 無次元張力の周期応答(CS-C15)

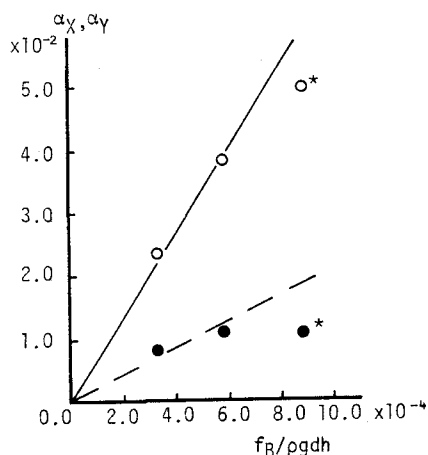


図-11 浮力による係数の変化

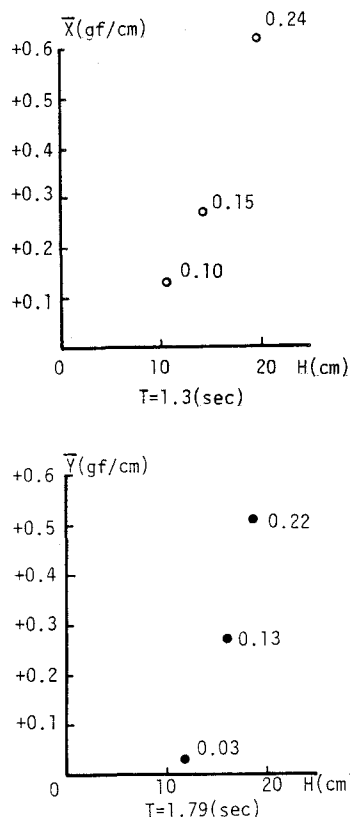


図-12 定常成分と波高の関係

4. あとがき

本研究では、波の作用によって自立式汚濁防止膜に発生するシンカー部の膜張力の特性を水理実験により調べた。主要な知見は以下の通りである。

- (1) 膜張力には波周期あるいはそれより短周期で振動する変動成分と定常成分が存在する。定常成分は変動成分に比べて小さい。
- (2) 変動成分の振幅は水平力、鉛直力ともに波の周期が一定の場合、波高の増大に対してほぼ線形的に増大する。
- (3) 無次元化した変動張力振幅の波周期による変動は、水平力 (X_a)、鉛直力 (Y_a) とともに膜がない場合の進行波の圧力を海底から膜上端まで積分した力の振幅 P_{max} の変動と類似しており、 $X_a = \alpha_x P_{max}$, $Y_a = \alpha_y P_{max}$ と表すことができる。
- (4) α_x , α_y の値はフロートの浮力が大きくなるにつれてほぼ線形的に増大する。

本論文で紹介した実験以外にもカーテンの膜厚の影響を調べるために膜の厚さを10倍程度にしたものについても実験を行った。それによると、波高及び周期に対する張力の変動特性は膜厚の小さい場合とほぼ同じであるが、 α_x , α_y の値はフロートの浮力が同じ場合、約2倍から3倍程度になることがわかった。このことは、貝や海藻の付着により膜厚及び膜の重量が増大することが膜の安定性低下につながることを意味している。また今回の実験では膜の大きさが1種類に限定されているので、他のパラメーター、例えば膜の高さと水深の比などの影響については調べることができなかった。今後は理論的な検討を含めてさらに研究を進めていく予定である。

最後に本研究を行うに当たり、模型作製など多大の御協力を頂いた太陽工業株式会社の諸氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 加納敬, 本城豊, 川本博文: 半水深二重敷設汚濁防止膜の効果に関する研究, 海洋開発論文集, vol. 3, 1978.
- 2) Milgram, J. H.: Forces and Motions of a Flexible Floating Barrier, Journal of Hydraulics, vol. 5, No. 2, 1971.
- 3) JFB Scientific Corporation: An Analysis of the Functional Capabilities and Performance of Silt Curtains, Technical Report D-78-39, U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station, Environmental Laboratory, 1978.
- 4) 榎木 亨, 青木伸一: 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, 1978.