

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張力の特性

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
 大阪大学大学院工学研究科 学生員 劉 海波
 太陽工業株式会社 正会員 山下 真

1. まえがき

我が国では、埋立などの沿岸海洋工事において発生した濁りを周辺海域に拡散させないように、工事区域の周辺に汚濁防止膜を敷設して工事を行うことが多い。最も一般的な汚濁防止膜は、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垂下式汚濁防止膜で、図-1に示すように、通常はカーテンの上部あるいは上部と下部に配された展張ケーブルから、一定の間隔で海底のアンカーに係留されている。

このようなフレキシブルな構造物に対しては、今のところ確立された設計法はなく¹⁾²⁾³⁾、やむを得ず剛な構造物に対する設計法を援用しているのが現状である。一般には、剛な構造物としての設計は、フレキシブルな構造物に対して安全側の設計を与えると考えられがちであるが、本研究で取り上げる衝撃張力のように、波力の発生機構が剛な構造物と全く異なる場合には、むしろ危険側となる可能性が十分にある。

本研究では、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着目し、水理模型実験によりその特性を明らかにした。ただし、今回は実験の都合上、上部下部とも展張ケーブルを配したタイプのものを対象とし、図-1の係留索にはさまれた1スパンのみを取り出した模型膜体を用いている。

2. 実験装置及び方法

実験は、長さ30m、幅0.7mの2次元水槽を用いて行った。模型膜体は、図-2に示すように、水路の両側壁に、上下の展張ケーブルをそれぞれ直径2cmのアルミニウム製リングゲージを介して取り付けられている。リングゲージの固有周波数は約90kHzであり、前もって静的な載荷試験を行っておくことにより、衝撃張力の測定が可能であると判断した。膜体設置位置での水深は31cmである。実験では、表-1に示すように、膜の深さ及び膜長をそれぞれ3通り変えた、計9種類の膜体を用いている。また衝撃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つり糸の2種類を用いた。波浪諸元としては周期を1.3~2.5秒の範囲で13種類、波高を約10~20cmの範囲で3種類変化させている。

3. 実験結果及び考察

(1) 展張力の時系列特性

代表的な展張力の時系列を、水位変動の時系列 η とともに図-3~図-5に示す。図中 T^u は上部展張ケーブルの張力を、 T^l は下部展張ケーブルの張力を示している。ただし水位の計測点は、図-2に示すように、膜の取り付け点から $S=120\text{cm}$ だけ離れているので、測定された水位の時系列を S/C (C は波速で、微小振幅波理論より求める) だけ進め、 A 点での同時記録となるように描いている。また図中の T^u_{max} および T^l_{max} は、測定時間(約20秒)内の張力の最大値である。

図-3および図-4は展張ケーブルに鋼ワイヤーを用いた場合のもので

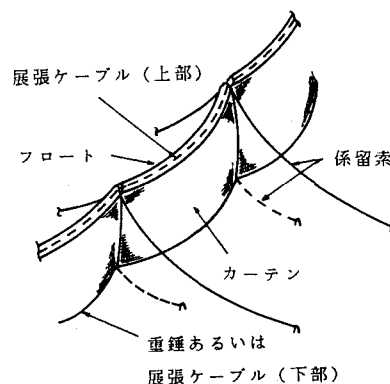


図-1 垂下式汚濁防止膜の概略

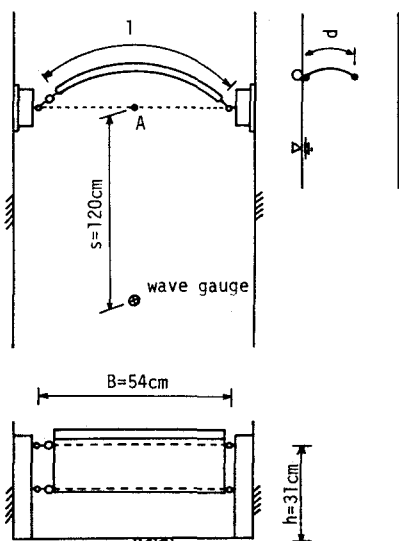


図-2 模型膜体の設置状況

表-1 模型膜体の諸元

膜の深さ(d)	10cm, 15cm, 20cm
膜長(l)	57cm, 60cm, 66cm
70- ϕ 径(ϕ_r)	3.0 cm(発泡スチロール)
カーテンの厚さ(t_c)	0.08 mm
密度(ρ_c)	1.38 gf/cm ³
ヤング率(E_c)	300~800 kgf/mm ²
ワイヤーの径(ϕ_{wi})	0.5 mm
密度(ρ_{wi})	7.86x10 ³ kg/m ³
ヤング率(E_{wi})	21x10 ¹⁰ N/m ²
つり糸径(ϕ_n)	0.5 mm
密度(ρ_n)	1.12x10 ³ kg/m ³
ヤング率(E_n)	約 0.2x10 ¹⁰ N/m ²
展張幅(B)	54 cm

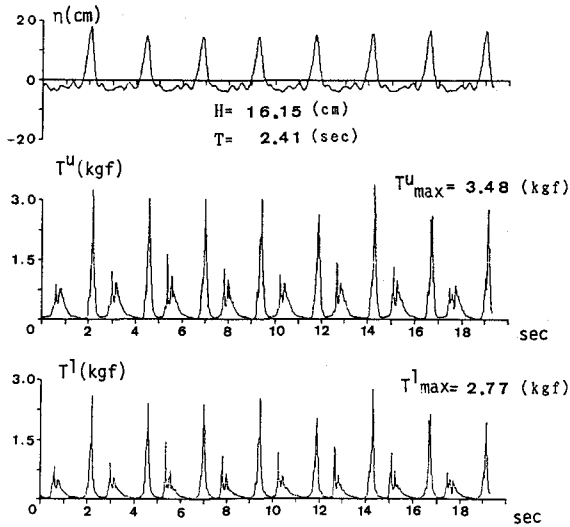


図-3 展張力の時系列 (鋼ワイヤ, $l=57, d=15$)

ある。また図-5は、展張ケーブルにつり糸を用いた場合の時系列で、図-3にはば対応するケースである。図-3は波高及び周期が比較的大きい場合の時系列で、上部及び下部のケーブルとも、ほぼ同時に衝撃的な張力が発生していることがわかる。また衝撃張力が発生する際の波の位相に着目すると、いずれの場合も水位変動が正（流速が岸向）の位相で大きな衝撃力が現れており、膜が岸向に変位して緊張する際に大きな張力が発生していることがわかる。一方、図-4は膜が緊張していないと思われる場合の時系列で、衝撃的な張力は現れていない。また図-5の、展張ケーブルにつり糸を用いた場合を図-3の鋼ワイヤを用いた場合と比較すると、展張力の鋭いピークが消えて丸みを帯びており、最大値も1/3程度に減少していることがわかる。

(2) 衝撃展張力の発生限界

a) 膜の緊張を支配するパラメーター Pt の提案

前述したように、衝撃的な展張力が発生すると展張力は著しく大きくなるので、衝撃展張力の発生限界を明らかにしておくことは実際設計上極めて重要である。衝撃展張力は、膜がたるんだ状態から緊張状態に移行する瞬間に発生するため、その発生限界は、膜が緊張する限界と考えられる。そこで以下では、膜が緊張するか否かを表すパラメーターを提案し、その意味を考える。

微小振幅波理論によれば、水位変動 η が(1)式で表される波に対して、水粒子の水面上での水平方向の変位量 ξ は次式で与えられる。

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \sigma t \quad (1)$$

$$\xi = \frac{H}{2} \coth kh \sin \sigma t \quad (2)$$

ここに H は波高、 k は波数、 σ は角周波数であり、 $\xi > 0$ のとき、水粒子は波の進行方向に変位していることを意味する。(2)式より、水面上での水粒子の最大移動距離 e は次式で与えられる。

$$e = |\xi| = \frac{H}{2} \coth kh \quad (3)$$

一方、膜は緊張時には円弧状に変形するが、いま簡単のために膜の形状を図-6に示すように三角形で近似する。このとき、膜中央部の変位 f は次式で与えられる。ただし、 l_0 は膜の取り付け部の長さを示している。

$$f = \frac{1}{2} \sqrt{(l+l_0)^2 - B^2} \quad (4)$$

ここで、緊張するか否かを表すパラメーターとして、次式で与えられる Pt を定義する。

図-4 展張力の時系列 (鋼ワイヤ, $l=66, d=15$)

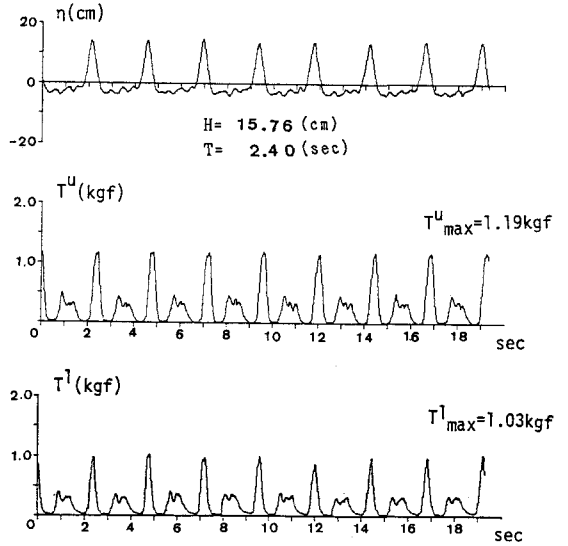


図-5 展張力の時系列 (つり糸, $l=57, d=15$)

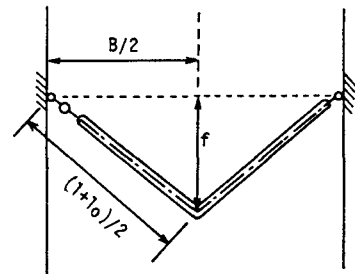


図-6 膜変形の仮定

$$P_t = \frac{e}{f} = \frac{H \coth kh}{\sqrt{(l+l_0)^2 - B^2}} \quad (5)$$

膜の中央部が水粒子に追従して位相差なく運動していると仮定すれば、 $P_t > 1.0$ のとき膜は緊張と弛緩状態を繰り返し、 $P_t < 1.0$ のとき常に弛緩したままの状態が続くことになる。

次に、 $\xi = f$ となる場合、すなわち緊張する瞬間の水平方向水粒子速度を P_t で表すことを考える。(1)式に対応する波の水平水粒子速度 u は次式で与えられる。

$$u = \frac{H}{2} \sigma \coth kh \cos \sigma t \quad (6)$$

(2)式で $\xi = f$ とおき、これと(6)式から時間項を消去すれば、緊張時($\xi = f$ となる時)の u の値 u_t が次式で与えられる。

$$u_t = \sigma f \sqrt{P_t^2 - 1} \quad (7)$$

u の振幅 $|u|$ と u_t の比をとると、次式を得る。

$$\frac{u_t}{|u|} = \frac{\sigma f \sqrt{P_t^2 - 1}}{\sigma f P_t} = \sqrt{1 - \frac{1}{P_t^2}} \quad (8)$$

(8)式より、 $P_t \rightarrow 1$ のとき $u_t \rightarrow 0$ となって、緊張時の流速がゼロとなり、 $P_t \rightarrow \infty$ のとき $u_t \rightarrow |u|$ となって膜は最大流速を示す位相で緊張することになる。

b) 衝撃展張力の発生限界

図-7～図-9は、展張ケーブルに鋼ワイヤーを用いた場合について、 P_t と上部展張ケーブルの最大展張力 T^u_{max} の関係を示したものである。各図には膜長の等しい約100個のデータがプロットしてある。ただし P_t を計算する際、(5)式中のリングゲージの取り付け部の長さ l_0 は、5cmとしている。図より、膜が短いほど展張力は全体的に大きくなっており、特にその差異は $P_t > 0.8$ の領域で顕著である。 $l=57$ cmおよび $l=60$ cmのケースでは、 $P_t=0.8$ を境にして大きな展張力が発生しており、 $P_t > 0.8$ ではほとんどの場合、衝撃展張力が発生しているものと思われる。これに対して、 $l=66$ cmのケースでは、展張力は P_t によってほとんど変化を示しておらず、衝撃展張力はほとんど発生していないことがわかる。ただし $l=66$ cmの場合でも、展張力の時系列を調べると、衝撃的な形状をしたものもいくつか見られるが、その場合でもピーク値はあまり大きくない。したがって、衝撃展張力の発生領域と非発生領域を P_t のみによって明確に区分することはできないが、少なくとも P_t が0.8以上になると衝撃展張力の発生確率が著しく高くなることは間違いないようである。

図-10は、 $l=57$ cmで、展張ケーブルにつり糸を用いた場合について、 P_t と T^u_{max} の関係を示したもので、図-7に対応している。これより、つり糸を用いた場合には、鋼ワイヤーを用いた場合に比べて、展張力はかなり小さな値になってはいるものの、やはり $P_t > 0.8$ の領域で展張力が大きくなっていることがわかる。

(3) 衝撃展張力の特性

ここでは、衝撃展張力が発生していると考えられるケースのみを抽出し、その特性を調べる。図-7～図-10より明らかなように、衝撃展張力が明確に発生しているケースは $l=57$ cmおよび $l=60$ cmの場合なので、以下ではこれらのケースに限って考察を進める。さらに、これらのケースの中から、衝撃展張力が発生しているもののみを取り出すために、 $P_t > 0.8$ という制約条件を設け、さらにこの領域内であっても緊張していないと思われるケースを除くために、 $l=57$ cmで鋼ワイヤーを用いた場合には $T^u_{max} > 1.0$ kgfあるいは $T^l_{max} > 0.75$ kgfのいずれかを満足するものを、 $l=57$ cmでつり糸を用いた場合および $l=60$ cmで鋼ワイヤーを用いた場合には $T^u_{max} > 0.5$ kgfを満足するものを採用した。以下では、この様にして抽出したデータのみを用いて、衝撃展張力の特性を検討する。

a) 衝撃展張力の無次元化

上部及び下部の無次元衝撃展張力（以下衝撃展張力係数と呼ぶ）を次式で定義する。

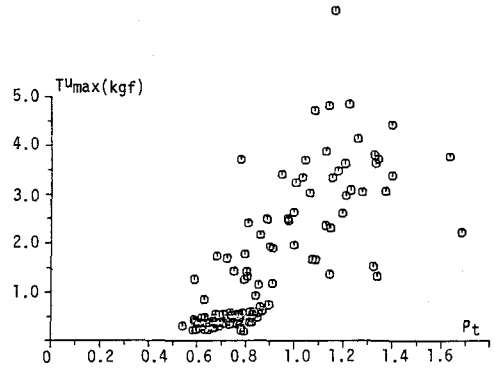


図-7 P_t と T^u_{max} の関係（鋼ワイヤ- $l=57$ ）

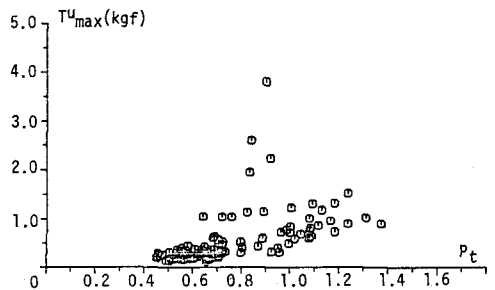


図-8 P_t と T^u_{max} の関係（鋼ワイヤ- $l=60$ ）

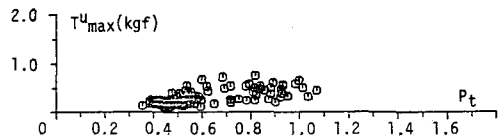


図-9 P_t と T^u_{max} の関係（鋼ワイヤ- $l=66$ ）

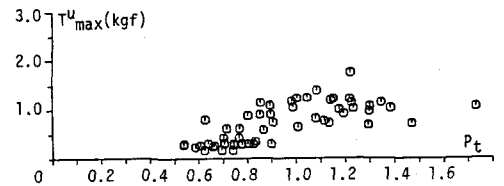


図-10 P_t と T^u_{max} の関係（つり糸- $l=57$ ）

$$C_T^{u(t)} = \frac{T_{max}^{u(t)}}{\frac{1}{2} \rho_w |u|^2 B d} \quad (9)$$

ただし、代表流速 u としては、(6)式で与えられる微小振幅波理論による流速を用いる。

衝撃展張力係数 C_T に影響を及ぼすパラメーターとしては、波形勾配 H/L 、比水深 h/L 、 d/h 、 B/l 、ケーブルの材質など種々のものが考えられるが、ここでは膜の緊張を支配するパラメーター P_t との関係調べる。

図-11及び図-12は、鋼ワイヤーを用いた場合の P_t と上部展張ケーブルの衝撃展張力係数 C_T^u の関係を、膜深さ毎に示したものである。これらより、 P_t と C_T^u の間には一定の関係はみられず、膜長、膜深さによって傾向がかなり異なっている。

この理由としては、(9)式中の流速 $|u|$ が代表流速であり、実際に膜が緊張する際の流速ではないことが考えられる。上述の理論に従うとすれば、緊張時の流速 u_t は P_t の増大とともに $|u|$ に漸近する。従って、衝撃展張力が u_t の増大とともに大きくなるとすれば、 P_t が大きいほど $|u|$ で無次元化した C_T も大きくななければならないことになる。しかし図から明かなように、実際には P_t の増大にともなって C_T は増大していない。この理由として、膜の運動が水粒子の運動に完全には追従していないことが考えられるので、以下ではこの点について考える。

b) 緊張時の波の位相

ここでは図-13に示すように、展張力が最大値を示す時間と水位変動が最大となる時間のずれ ΔT に着目する。上述の理論に従うとすれば、 ΔT と波周期との比 $\Delta T/T$ は P_t のみで表され、 P_t の増大にともなって $\Delta T/T$ は減少することになる。そこで実験で得られた時系列から $\Delta T/T$ を算出し、 P_t との関係調べる。ただし、図-3～図-5の時系列では、図-2に示すA点での水位変動を示したが、 ΔT を求めるに当たっては、A点から $l/2$ だけ岸側の点での水位変動を用いた。図-14および図-15は、鋼ワイヤーの場合の P_t と $\Delta T/T$ の関係を示したもので、それぞれ図-11および図-12に対応するものである。

ここで $\Delta T/T$ の値について考える。図-16に示すように、水位変動（あるいは流速）の時系列と水粒子の水平変位は $\pi/2$ だけ位相がずれている。いま、膜が水粒子に完全に追従して運動しているとすれば、岸向に緊張できる

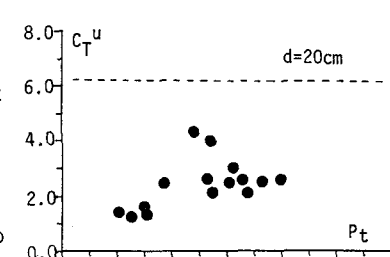
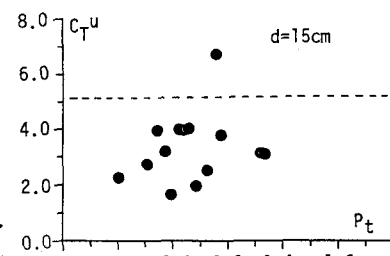
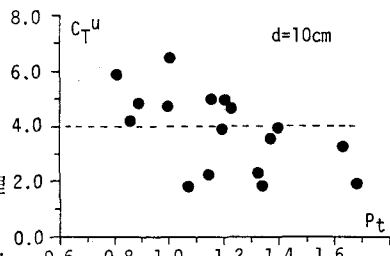


図-11 P_t と C_T^u の関係 ($l=57$)

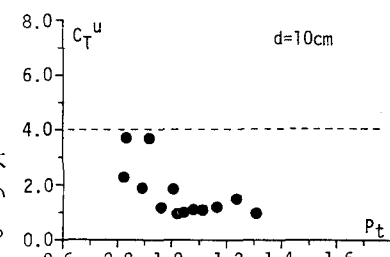


図-12 P_t と C_T^u の関係 ($l=60$)

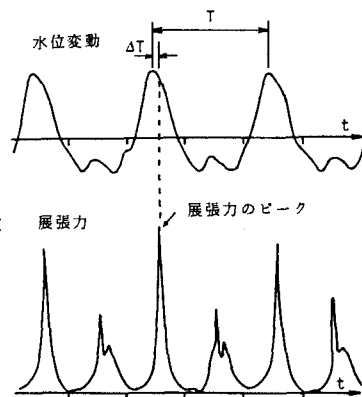


図-13 ΔT の定義

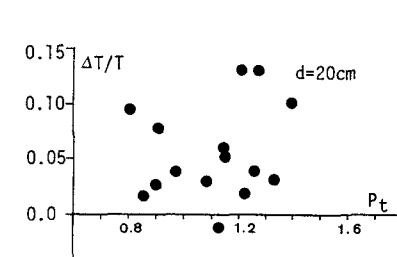
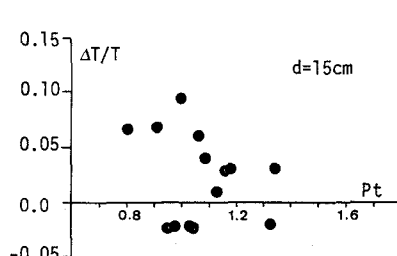
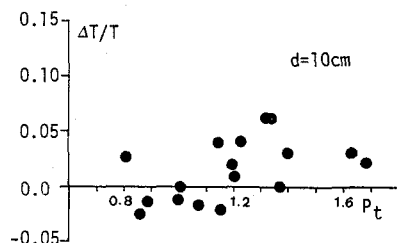


図-14 P_t と $\Delta T/T$ の関係 ($l=57$)

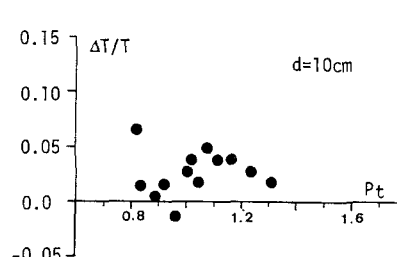


図-15 P_t と $\Delta T/T$ の関係 ($l=60$)

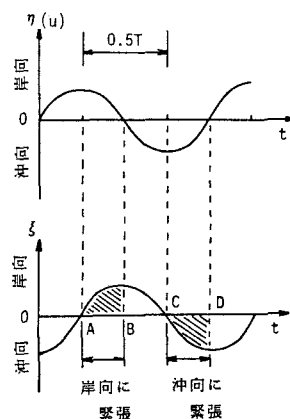


図-16 緊張時の位相

のは、流速・水粒子の変位とも岸向の場合で、A～B間に限られ、逆に沖向に緊張できるのはC～Dの間に限られる。すなわち、 $\Delta T/T$ の値は、0～0.25（岸向）か0.5～0.75（沖向）のいずれかの範囲に納まらなければならないことになる。

図-14および図-15より、 $\Delta T/T$ の値は、そのほとんどが0～0.1の間にあり、最大展張力は岸向に膜が緊張する場合に生じていることがわかる。図には $\Delta T/T$ の値が負になっている場合も見受けられるが、この理由としては、膜が水粒子に追随していないことに加えて、波高計設置点の水位変動から代表点での水位変動に変換する際、波形をそのまま波速で移動させていることなどが考えられる。いずれにしても、 $|\Delta T/T|$ が小さな値をとるときには、膜はほぼ水位変動がピークとなる位相で緊張していると考えられることができる。

図-14および図-15からわかるように、 $\Delta T/T$ の値は上述のように P_t の増大にともなって減少する傾向は示しておらず、 P_t に対してばらついた値をとっている。ただし、これらの図をそれぞれ図-11および図-12と比較すると、明確ではないものの、 $\Delta T/T$ と C_T とは P_t に対して逆の傾向を有しているようにみえる。すなわち、 C_T が大きな値を示している点では、 $\Delta T/T$ は0に近い値を示しており、 C_T の大きさは、膜が緊張する際の波の位相に関係が深いことがわかる。ただし、 $\Delta T/T$ が何故 P_t に対して単調減少せず、ばらついた値をとるのかについては、膜の運動と水粒子の運動がどの様に関わっているのかを明らかにする必要がある、現段階では不明である。

（4）上部展張力と下部展張力の関係

本論文では省略するが、上部展張力と下部展張力は、時系列の形状、 P_t に対する変動特性ともほぼ相似であり、衝撃展張力の発生の有無に関係なく、上部展張力は下部展張力の1～2倍程度であった。

4. 定常流中での衝撃展張力

著者ら⁴⁾は、これまでに述べた波浪中での実験に先立ち、予備の実験として、定常流中で生じる衝撃展張力及び定常展張力の測定を行った。実験は、定常流中に図-2と同様に膜体を設置し、まず膜体を手で支えて弛緩状態を作り、その後手を放して膜体を解放し、流れによって緊張させるというものである。図-17は手を放してから静止するまでの展張ケーブルの張力の時間変化の一例を示したものである。波浪中での実験と同様、膜が緊張する際には衝撃的な張力が発生し、その後ほぼ一定の張力が続いている。図より、上部と下部の展張力の変化はほぼ相似であり、衝撃張力も同時に発生している。またつり糸を用いた場合には、鋼ワイヤーを用いた場合に比べて鋭いピークが現れず、ピーク値は小さくなっていることがわかる。

定常流中で発生する衝撃張力は、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同じであると思われる。定常流中で実験を行うことにより、緊張時の流速がはっきりしていること、および波高や周期といったパラメーターを考えなくてすむ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。以下では、図-17中に示す展張力のピーク値を衝撃展張力 T_i 、張力がほぼ定常になった後の平均的な張力を定常展張力 $\bar{T}$ として取り扱う。

（1）定常展張力について

図-18は、展張ケーブルに鋼ワイヤーを用いた場合の上部のケーブルに発生する定常展張力 $\bar{T}^u$ の無次元量 $C_T^u = \bar{T}^u / \frac{1}{2} \rho_w U^2 B d$ （ U は流速）と膜による遮蔽率 d/h の関係を示したものである。ただし図中のシンボルはフルード数の異なるデータを平均したものであり、フルード数によるばらつきの範囲はシンボルにつけた腕で示してある。さらにシンボルは展張幅と膜長の比 B/l で区別してある。この図より、 C_T^u は、ばらつきは大きいものの、 d/h の増大とともに増大し、今回の実験の範囲内では、その変化はほぼ線形的であることがわかる。この傾向は下部の展張ケーブルについても同様であり、またケーブルの種類による相違は現れなかった。

（2）衝撃展張力について

図-19は、鋼ワイヤーおよびつり糸毎に、横軸に定常展張力 $\bar{T}$ 、縦軸に衝

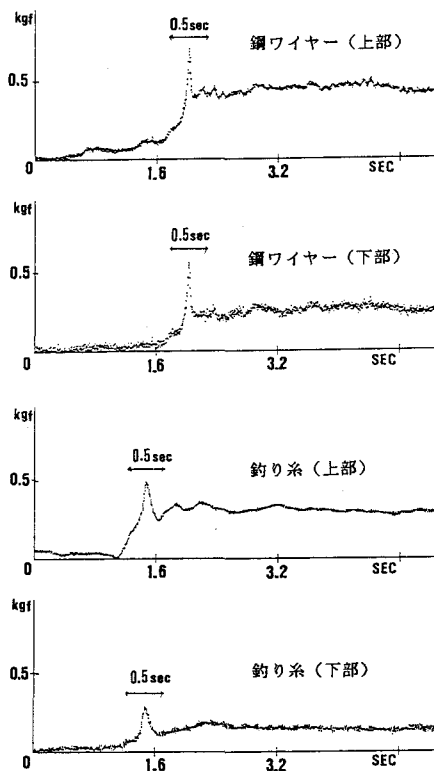


図-17 展張力の時系列 ($l=75, d=15, U=22$)

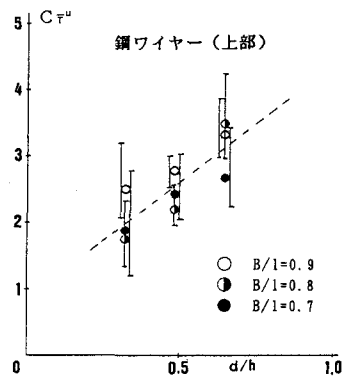


図-18 C_T^u と d/h の関係

撃展張力 T_i^u をとって全データをプロットしたものである。図より、定常展張力と衝撃展張力はほぼ比例関係にあり、張力の小さい領域を除けば、鋼ワイヤーの場合には定常力の1.5～3倍程度、つり糸の場合には1～2倍程度の範囲内におさまることがわかる。以上のことより、衝撃展張力は定常展張力の定数倍として、言い換えれば衝撃係数($T_i/\bar{T}$)として予測することが可能であり、図-18から明らかなように、 d/h によっておおよその予測が可能であると思われる。

図-11および図-12に示した破線は、定常流中での実験から得られた実験式から求めた衝撃展張力係数 C_{Ti}^u を示している。これより、定常流中の実験式を用いても波浪中の C_T のおおよその値は予測可能であるが、 d が大きくなるにつれて C_{Ti}^u の値は C_T よりも大きくなっており、定常流中でみられた、 d/h の増加に伴う C_T および C_{Ti} の増加傾向は、波浪中では現れておらず、むしろ減少する傾向にあることがわかる。これは膜の運動と関係があるものと思われるが、はっきりした理由はわからない。

5. あとがき

本研究では波浪中に張られた垂下式汚濁防止膜に発生する衝撃張力について実験的考察を行った。より詳細に明らかにするためには、さらに多くの実験データをもとに検討を加える必要があるが、ここに本研究で得られた主要な知見を要約し、今後続く問題点を指摘して結びとする。

- 1) 波浪中で膜が緊張と弛緩を繰り返す場合には、緊張時に大きな展張力が衝撃的に発生する。
- 2) 衝撃展張力は、本研究で提案したパラメーター P_t が0.8以上のとき、その発生確率が高くなる。
- 3) 微小振幅波理論による流速を用いて無次元化した衝撃展張力（衝撃展張力係数） C_{Ti} の大きさは、膜が緊張する際の波の位相によって異なるようであるが、 P_t のみの関数とはならない。
- 4) 波の場合の C_T は、定常流中の C_{Ti} のように d/h による増加傾向がみられず、むしろ減少傾向にある。
- 5) 上部展張ケーブルの展張力と下部展張ケーブルの展張力は、時系列、 P_t への依存性ともほぼ相似であり、その大きさは、上部の展張力の方が1～2倍程度大きい。
- 6) 展張ケーブルにつり糸を用いた場合には、展張力のピークは鋼ワイヤーを用いた場合ほど鋭くはならず、最大展張力は鋼ワイヤーの場合の1/3程度まで減少する。

上記2)の結論より、垂下式汚濁防止膜を設計する際には P_t をできるだけ小さくして、衝撃的な張力を発生させないようにすることが肝要であることがわかるが、波浪と同時に流れが存在する場合には、netの流速が一方に存在するため、膜長が十分大きい場合でも膜は弛緩したままの状態では存在し得ないことになる。波動成分が小さく、流れが反転しないような場合には問題はないが、流れが反転する場合には膜は緊張状態と弛緩状態を交互に繰り返し、緊張時に衝撃的な張力が発生するものと思われる。海洋では大なり小なり流れが存在するため、汚濁防止膜の設計にはやはり衝撃的な張力を考慮する必要があるのではないかと考える。そのためにも今後は、波浪条件や膜の諸元によって C_T が変動する理由を明らかにすることが必要である。特に、膜長及び展張ケーブルの材質が C_T に及ぼす影響をより詳細に検討し、設計において合理的に C_T を与える方法を開発することが望まれる。

最後に、本研究を行うに当たり終始御協力頂いた、安井章雄氏をはじめ太陽工業株式会社の諸氏に深く感謝致します。また、研究当時大阪大学学部4年生であった、前田真君（現在熊谷組）および浅野恒平君（現在東洋建設）には実験及びデータ整理において御尽力頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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. 3，1987。
- 2) 榎木 亨・青木伸一・安井章雄：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研究，海洋開発論文集，vol. 4，1988。
- 3) 榎木 亨・青木伸一・劉 海波：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，vol. 36，1989。
- 4) 榎木 亨・青木伸一・劉 海波：海上式汚濁防止膜に発生する衝撃張力について，土木学会関西支部年次学術講演会，1989。

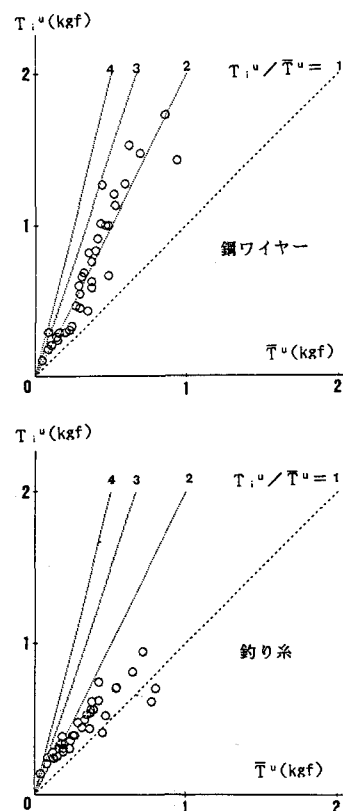


図-19 定常展張力と衝撃展張力の関係