

水表面に展張した膜体による波浪制御とその係留力に関する研究

安井章雄*・宮本崇広**・出口一郎***

1. ま え が き

波浪制御を行う構造物としては, 一般にコンクリートブロックや捨石などの重力式構造物が用いられている。しかし, 大水深や軟弱地盤での施工は工期も長く, 建設費も多くかかるばかりではなく広い面積が必要であり, 船舶航行が多く比較的小規模な施設への適用には問題が多いと考えられる。たとえば, マリーナや養殖施設は比較的静穏な水域に建設されているが, 暴浪時には高い波が入り込み, 被害を受けることがある。そこで, 膜構造物による波浪制御を考える。膜体は軽量で嵩張らず比較的容易に施工できる利点があり, これまでにも波浪制御に適用した研究がいくつか行われている。

これまでの研究はいずれも重力式のような常設構造物の代替工として検討されてきた。透過率 K_t を 0.5 以下にするためには Wiegel (1962) は無次元膜長 a/L が 5 以上, 加藤ら (1969) は膜を 4 点係留して a/L が 2 以上と, 消波効果を得るためには長い膜長が必要と報告している。しかし, これらの研究では膜の係留力については検討されておらず, 未だ実用化もされていない。

そこで, 本研究では, 常設ではなく, 高波浪の襲来が予測される場合に展張するポータブルタイプの膜体消波工として, 水面に展張された膜体を 2 点係留することによって得られる波浪制御効果とその制御機構ならびに膜体に作用する係留力について規則波および不規則波を用いた実験を行うことによって検討したものである。

2. 水表面に展張した膜体による波浪制御と係留力に関する二次元実験

(1) 実験装置の概要

図-1 に示す二次元造波水槽に設置した水平床上で水槽ほぼ中央の水表面に膜体を設置し, 膜体による波浪制御と膜体に作用する係留力の実験を行った。実験水槽の長さは 30 m, 幅は 0.7 m, 高さは 0.9 m である。膜体は造波側に設けた 2 つの片持ち梁型係留力測定装置から係

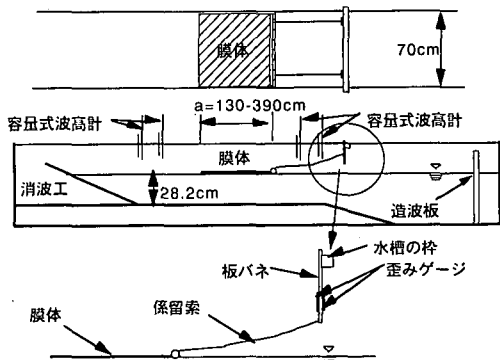


図-1 実験水槽および装置

留索 (糸) を介して水表面に展張した。実験に用いた膜体は 0.2 mm 厚ポリエチレン製シートで, 膜の岸沖両端部には $\phi 1$ cm のフロートを取り付けた。なお, 膜の動きは波の進行方向には拘束されるが, 鉛直方向には自由に動くことができる。なお水槽端部には, 消波のため勾配 1/10 の移動床を設置してある。

(2) 実験方法と実験条件

実験は規則波とブレッドシュナイダー光易型スペクトルを有する不規則波で行った。水深 h は 28.2 cm 一定とし, 規則波は, 周期 $T=0.8$ s, 1.0 s 及び 1.2 s の 3 種類に対し, それぞれ入射波高 $H=2\sim 10$ cm の間で変化した 12 ケースで, 膜長 a は 130 cm, 250 cm, 390 cm とした。不規則波は有義波高 $H_s=2.3\sim 5.3$ cm, 有義周期 $T_s=1.1\sim 1.3$ s の間の 12 ケースで, $a=130$ cm 及び 390 cm の膜体に対して実験を行った。波高は膜体の沖側と岸側に各 2 台, ほぼ 1 m の間隔を置いて設置した容量式波高計で入射波高と透過波高を測定した。膜体と波高計の距離はほぼ 1 m である。

所定の波高を造波し, 沖側波高計に水位変動が現れる直前からほぼ 1 分 (規則波) $\sim$ 5 分 (不規則波) の水位変動, 波力の計測を行い, 全ての計測は 0.1 s 間隔で行い, A-D 変換した。

反射率 K_r は膜の沖側波高から合田の方法で, 透過率 K_t は入射波高と透過波高の比として求めた。

* 正 会 員 太陽工業株式会社 開発本部
** 学生会員 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻
*** 正 会 員 工博 大阪大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻

3. 膜体による波浪制御効果

図-2に比水深 h/L をパラメータにとった場合の透過率 K_t と無次元シート長 a/L の関係を示す。

図中□印は、不規則波実験で得られた透過率で、横軸は有義波長を用いて計算した値である。また、すべての実験は $h/L < 0.18$ の領域にある。図中には、表面展張した膜体をその両端を4点係留した場合に、加藤 (1969) らによって測定された透過率も示してある。

図-2より規則波を用いた実験では a/L の増加に伴い、 h/L には関わらず K_t は減少し、 $a/L \sim 4.0$ で $K_t \sim 0.5$ まで減少することがわかる。不規則波の場合も波別解析で計算される有義波を用いても平均波を用いても規則波と同様の結果となった。この結果は、係留方法の異なる加藤らの実験結果とほぼ同じ傾向を示している。

図-3は比水深 h/L をパラメータにとった場合の反射率 K_r と無次元シート長 a/L の関係を示したものである。

K_r は a/L が小さい場合にはばらつきが大きい、全体的に 0.15 以下であり、 a/L に対して明確な変化は示さない。このことは入射波のエネルギーが a/L の増加と共に保持されなくなることを示す。ここでは、このエネルギー逸散の機構について、表面の水粒子運動の拘束及

び、界面摩擦の2つを取り上げ、検討する。

浜田 (1977) は、Lamb の表面境界層の理論に基づき、表面波の表面での水平方向の水粒子速度が任意に束縛あるいは増幅せられたときの表面運動の粘性効果による時間減衰率 α_t を次式で与えている。

$$\eta = a_0 \exp(\alpha_t t) \cos(kx - \alpha_t t) \dots\dots\dots (1)$$

$$\alpha_t = \frac{k}{2\sqrt{2}} \sqrt{\nu a_0 (K-1)} - 2\nu k^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$\alpha_r = a_0 + \frac{k}{2\sqrt{2}} \sqrt{\nu a_0 (K-1)} \dots\dots\dots (3)$$

$$a_0^2 = gk + T' k^3 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 a_0 は表面の振幅、 k は波数、 ν は動粘性係数、 g は重力加速度、 T' は表面張力、 K は表面拘束の状態を表すパラメーター ($K=0$ で完全拘束、 $K=1$ で拘束なし) である。

実験で得られた透過率から同様の時間減衰率 α_{mea} は、

$$\alpha_{mea} = \ln(K_t) \frac{C}{a} \dots\dots\dots (5)$$

で求められる。ここで K_t は実験で求められた透過率、 C は波速、 a は膜長である。

図-4は $\nu = 0.015 \text{ (cm}^2/\text{s)}$ 、 $T' = 75 \text{ (dyn/cm)}$ 、 $K = 0$ において式 (2) から求めた α_{cal} と実験からの α_{mea} を比較したものである。

実験値から求めた減衰係数は5倍程度大きい値となる。このことから表面拘束による粘性以外の効果が作用していると考えられる。

膜及び海底に作用するせん断力を考慮したエネルギー保存則は次式で表される。

$$\frac{1}{8} \rho g H^2 C_0 (\tau_s a u_s + \tau_b a u_b) = \frac{1}{8} \rho g H^2 C_\theta \dots\dots\dots (6)$$

ここで $\tau_s = \frac{1}{2} \rho f_s u_s^2$ 、 $\tau_b = \frac{1}{2} \rho f_b u_b^2$ より

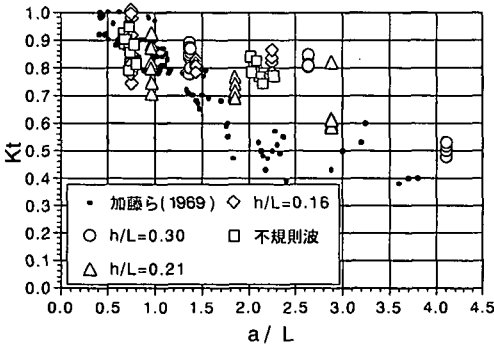


図-2 無次元膜長 a/L と透過率 K_t の関係

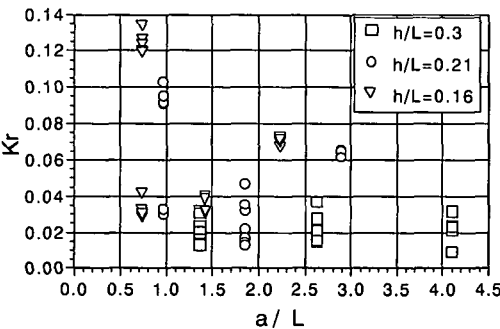


図-3 無次元膜長と反射率 K_r の関係

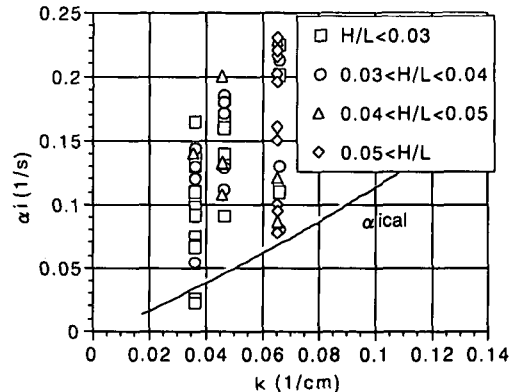


図-4 計算と実験の時間減衰率

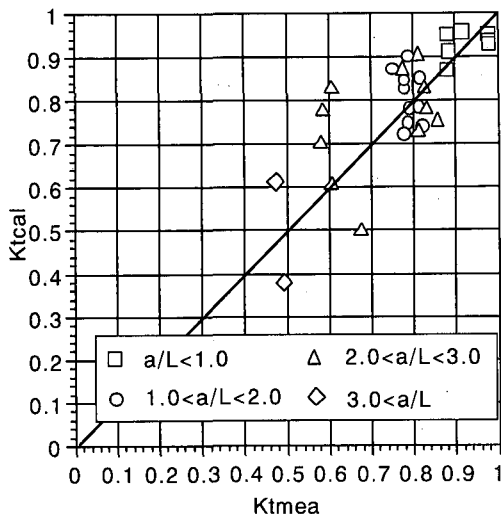


図-5 透過率 K_t の実験と計算の比較

$$K_{tcal} = \frac{H_t}{H_i} = \sqrt{1 - \frac{4a}{H_i^2 g C_g} (f_b u_b^2 + f_s u_s^2)} \dots\dots (7)$$

となる。ここで、 C_g は群速度、 u_s は表面での水粒子速度振幅、 u_b は水底での水粒子速度、 f_s 、 f_b はそれぞれ表面及び海底での摩擦係数である。

図-5 に摩擦係数 $f_s = 0.10$ とした時の K_{tcal} と実験から得られた K_{tmea} の比較を示す。なお、底部摩擦係数は、層流境界層理論から求めたが、その大きさは 0.05～0.12 である。

図-5 よりバラツキはあるもののほぼ K_{tcal} と K_{tmea} は一致する。しかし、計算に用いた f_s の値の妥当性などについてさらに検討を加える必要がある。

4. 膜体に作用する流体力

図-6、7 に規則波および不規則波入射時に測定された水位と係留力の時系列を示す。水位変動は、膜体に最も近い造波機側波高計(間隔ほぼ 1 m)で測定されたものである。

図-6 から明らかなように、表面に展張された膜体は、波が入射すると波進行方向に変位し、数波入射した後に波力の時間変動が定常になる。また、膜には常に波の進行方向に定常力が作用する。

一方、図-7 に示す不規則波が作用した場合も、膜体に波浪入射してからしばらくして展張力が作用し始める。しかし、発生する係留力と水位変動は明確には対応せず、必ずしも大きな水位変動に対応して大きな係留力が発生するわけではない。そこで、不規則波による係留力の発生機構を明らかにするため、水位変動及び係留力の時系列に対して様々な統計解析を行った。その結果、係留力の時系列は、水位変動の SIWEH 時系列と明確に対応す

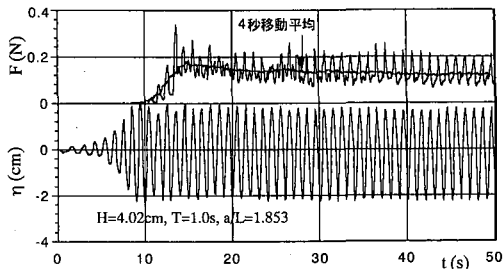


図-6 水位と係留力の時系列(規則波)

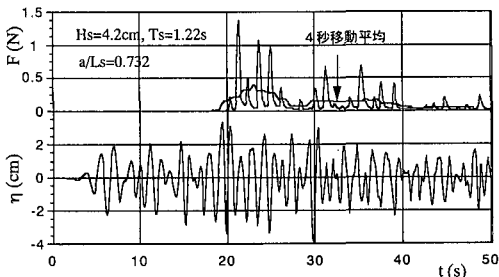


図-7 水位と係留力の時系列(不規則波)

ることが明らかになった。SIWEH は、Funke-Mansard (1980) によって提案された平均化した波エネルギーの時間変化曲線で、式 (8) で表される。

$$E(t) = \frac{1}{T_p} \int_{-\infty}^{\infty} \eta^2(t+\tau) Q(\tau) d\tau \dots\dots\dots (8)$$

$$Q(\tau) = 1 - \frac{|\tau|}{T_p} \quad |\tau| > T_p$$

$$= 0 \quad |\tau| < T_p$$

ここに、 T_p : スペクトルのピーク周期、 $\eta(t)$: 水位変動、 τ : タイムラグ、 $Q(\tau)$: 三角形ウィンドウ、である。

図-8 は、入射波波形と係留力の時系列の対応をより明確に示すため、式 (8) から計算される入射及び透過波形の SIWEH (SWI, SWT) 及び係留力時系列 (F) の 4 秒間の移動平均値を比較したものである。

図より明らかなように、係留力の移動平均は、入射波及び透過波 SIWEH の移動平均と同様の時間変動を示す。このことから、係留力は入射波エネルギーが増加することに伴って発生するものと予想される。そこで、つぎに入射波高と係留力の関係について考察した。

図-9 に入射波高 H_i と単位面積当たりの平均係留力 $F_{mean}/a/b$ の関係を示す。

図中不規則波については有義波高を用いて整理した。規則波の平均係留力は、ほぼ作用係留力が定常となった後の時間平均値として、不規則波では係留力が発生してから全体の平均値を時間平均係留力と定義した。図より、波進行方向の平均係留力は入射波高の 2 乗に比例し、

h/L が大きいほど大きくなることわかる。このことから係留力は入射波浪エネルギーに比例することが確認される。

つぎに、図-9 に示される時間平均係留力の推定方法について考える。浮体構造物によって入射波浪場が変形を受ける場合、反射率及び透過率をそれぞれ K_r , K_t とすると次式で表される漂流力 F_d が作用する (例えば、榎木, 1991)。

$$F_d = \frac{\rho g}{16} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) H_t^2 (1 + K_r^2 - K_t^2) \quad \cdots \cdots (9)$$

エネルギー逸散がない場合は $K_r^2 + K_t^2 = 1$ となり式 (9) は式 (10) のようになる。

$$F_d = \frac{\rho g}{8} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) H_t^2 \quad \cdots \cdots (10)$$

式 (9) から明らかなように、漂流力は透過率が小さい方が大きな値となる。また、見方を変えるとエネルギー逸散が大きいほど漂流力は大きい。透過率とエネルギー逸散が同じ場合は、 h/L が小さい方が漂流力は大きい。一方、図-9 に示したように、単位面積当たりの時間平均係留力は同じ波高でも h/L が大きい方が大きい。この点では、式 (9) で示される漂流力の特性とは異なる。しかし、先に述べたように膜によるエネルギー損失は、 a/L が大きくなるにつれて増加し、実験で求められた透過率 K_t

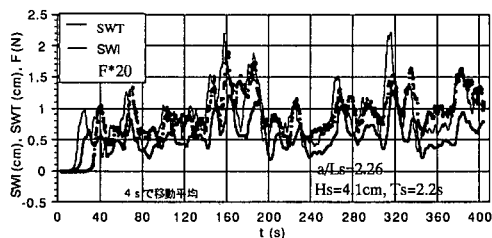


図-8 入射・透過波水位変動の SIWEH と係留力時系列の比較

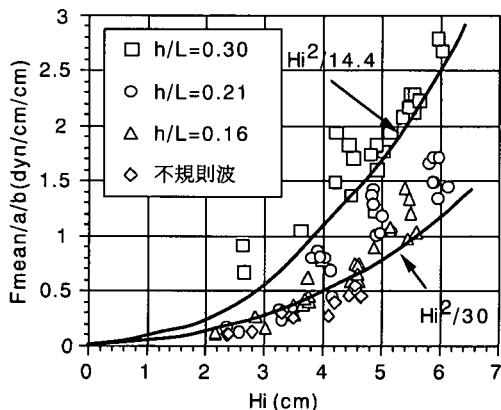


図-9 入射波高と平均係留力

の中にはエネルギー損失の影響も含まれている。また、図-2 に示したように、実測された透過率は、 h/L に大きく依存しない。したがって、式 (9) を用いて計算される漂流力と平均係留力の関係について検討する。

図-10 に規則波実験結果から求めた単位幅当たりの平均係留力 F_{mean}/b と式 (9) から求めた漂流力 F_d/b の関係を示す。図から平均係留力 F_{mean}/b は、 h/L の値に関わらず漂流力 F_d/b と線形の関係があり、漂流力のほぼ $1/2$ となる。

最後に、図-11 に単位幅当たりの平均係留力と最大係留力の比較を示す。規則波の最大係留力は計測された係留力がほぼ定常となった後の最大係留力の 10 波平均、不規則波の最大係留力は、全測定値の中の最大値とした。最大係留力は設計時に重要なファクターであるが、規則波と不規則波で大きく値が異なる。

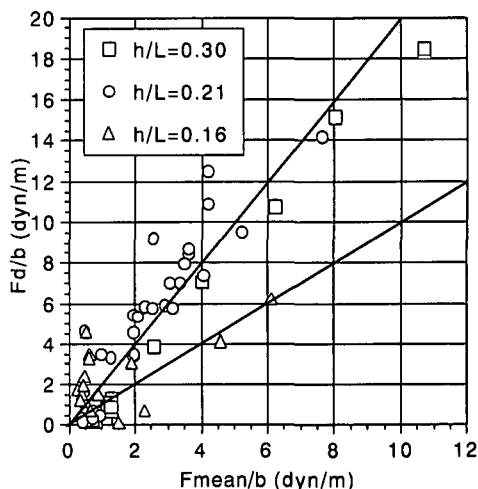


図-10 平均係留力と漂流力の関係

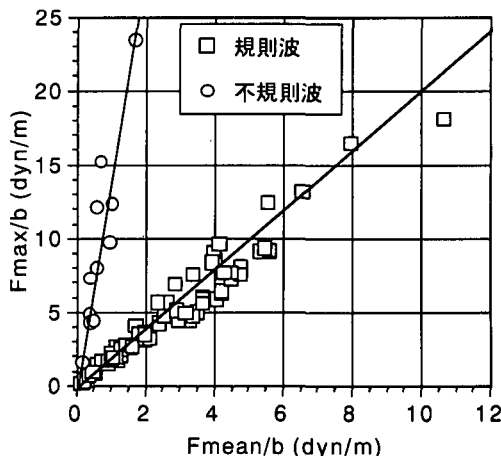


図-11 最大係留力と平均係留力

規則波によって発生する最大係留力は平均係留力の約2倍である。しかし、不規則波では先に述べたように、波力の出現が間欠的であり、時間平均値が小さい割には最大値が大きく、14倍程度となる。

5. 結 論

水表面に展張した膜体による波高制御効果と膜体に作用する係留力について実験的に検討を加えた。得られた結論は次の通りである。

1) 規則波を用いた実験では無次元膜長 a/L の増加に伴い、透過率は減少し、 $a/L \sim 4.0$ で $K_t \sim 0.5$ まで減少する。不規則波の場合も波別解析で計算される有義波を用いても平均波を用いても規則波と同様の結果となった。

2) a/L が増加するにつれて表面展張した膜による入射波のエネルギー逸散が増加する。実測されたエネルギー逸散量が底部摩擦と水面と展張膜間の表面摩擦で生ずると考えると摩擦係数が0.10程度の大きな値となることから、他に何らかのエネルギー逸散機構を考える必要がある。

3) 表面に展張された膜体は規則波、不規則波を問わず、波が入射すると同時に波進行方向に変位し、波進行方向に定常な力が作用する。しかし実測された係留力の

時系列は規則波と不規則波で大きな差異が見られる。すなわち規則波の場合は波力の移動平均値の周りにほぼ同じ振幅で係留力が変動するのに対し、不規則波の場合はSIEWHが大きい場合にのみ波進行方向に大きな波力が出現する。

4) 波進行方向の平均係留力は規則波、不規則波を問わず、入射波高の2乗に比例し、 h/L が大きいほど大きい。規則波においてエネルギー逸散を伴う場合の漂流力を計算したところ、実測された平均係留力のほぼ2倍程度の値となり、最大張力は平均張力の約2倍になることもわかった。

参 考 文 献

- 加藤重一・乃万俊文・萩野静也 (1969): シート型浮防波堤の消波効果について, 第16回海岸工学講演会論文集, pp. 297-299.
- 榎木 亨 (1991): 波と漂砂と構造物, 技報堂出版, pp. 112-113.
- 浜田徳一 (1977): 表面波の表面運動の粘性効果, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 1-4.
- Funke, E. R. and E. P. D. Mansard (1980): On the synthesis of realistic sea states, Proc. 17th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 2974-2991.
- Wiegel, R. L. (1962): Oceanographical Engineering, Chapter VI, Effect of structures on waves, pp. 137-141.