

テキスタイル消波構造物の波浪制御特性の解析と実験

加藤 雅也*・浜中建一郎**・佐藤 幸雄***

1. 緒 言

没水型波浪制御構造物の一つである没水水平板に関しては古くから研究され、既に多くの知見が得られている(例えば、井島ら、1970; 余ら、1991; 小島ら、1992)。一方、シートを波浪制御構造物に利用することに関しては、加藤ら(1969)によるシート型浮防波堤の消波効果に関する研究等があり、十分な消波効果を得るためには、その係留条件により、入射波の波長の2~10倍のシート長が必要であることが示されている。また渡会ら(1987)は、テキスタイルシートを水中に水平に固定した構造物(以下ではテキスタイル消波構造物と記す、図-1参照)について二次元水理模型実験を行い、シート長が入射波の波長の2倍以下と短い場合でも水平板と同等な消波機能を有し、没水深が深くなると水平板よりも消波効果が高い場合があることを示している。著者らは、テキスタイル消波構造物の波浪制御特性を系統的に調べるために線形ポテンシャル理論に基づく解析を行い、解析的にもテキスタイル消波構造物が有効な波浪制御特性を有する可能性があることを示してきた(加藤ら、1992)。しかしながら、これまでに行った実験結果と解析結果を透過率、反射率により比較すると、解析結果はテキスタイル消波構造物の波浪制御特性を十分に表現しているとはいえない。これは、これまでの解析に、実験において観察された波の分裂現象や構造物周辺でのエネルギー損失の効果を考慮していないためであると考えられる。そこで本研

究においては、透過率や反射率に大きく影響すると考えられるシートの運動に伴うエネルギー損失を考慮した解析を行い、その結果を実験により検証すると共に剛な水平板との比較を含めてテキスタイル消波構造物の波浪制御特性について検討する。

2. 理論解析

2.1 1スパンタイプ

図-2(a)に示すようにテキスタイル消波構造物周辺波浪場を4領域に分割する。また、解析を簡略化するために以下に示す仮定をする。

- 1) 流体は非圧縮性完全流体で非回転運動である。
- 2) 表面波ならびにシート運動は微小振幅である。
- 3) シートには十分な初期張力がかけられている。
- 4) シートの変位は空間的には正弦形で、時間的には調和振動である。

上記仮定のうち2)~4)により、自由表面およびシート運動に関する境界条件が線形化される。各領域の速度ポテンシャルは、未定係数である複素振幅 $A_j, B_j, \dots, F_j$ を用いて以下のように表すことができる。

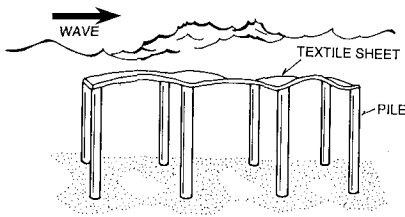
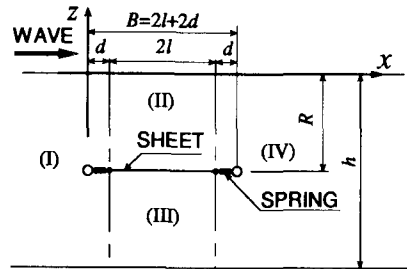
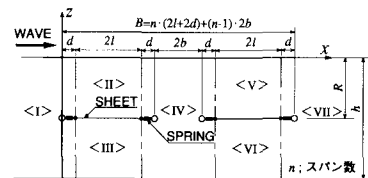


図-1 テキスタイル消波構造物概念図



(a) 1スパンタイプ



(b) 多スパンタイプ

図-2 領域分割

* 正会員 東急建設(株) 土木技術部技術第4課
 ** 正会員 工博 北海道大学助手 工学部土木工学科
 *** 正会員 北見工業大学助教授 工学部土木工学科

領域 (I)

$$\begin{aligned} \Phi_I = & \left[\sum_{j=0}^{\infty} A_j \exp\{k_j(x-d)\} \times \frac{\cos k_j(z+h)}{\cos k_j h} \right. \\ & \left. + a \exp\{-k_0(x-d)\} \frac{\cos k_0(z+h)}{\cos k_0 h} \right] \exp(i\omega t) \end{aligned} \quad (1)$$

領域 (II)

$$\begin{aligned} \Phi_{II} = & \left[\sum_{j=0}^{\infty} [B_j \exp\{\lambda_j(x-2l-d)\} \right. \\ & + C_j \exp\{-\lambda_j(x-d)\}] \frac{\cos \lambda_j(z+R)}{\cos \lambda_j R} \\ & + [I \exp\{\nu(z+R)\} + J \exp\{-\nu(z+R)\}] \\ & \left. \times \cos \nu(x-l-d) \right] \exp(i\omega t) \end{aligned} \quad (2)$$

領域 (III)

$$\begin{aligned} \Phi_{III} = & \left[\sum_{j=1}^{\infty} [D_j \exp\{\mu_j(x-2l-d)\} \right. \\ & + E_j \exp\{-\mu_j(x-d)\}] \cos \mu_j(z+h) \\ & + G + H(x-l-d) + K \cos \nu(x-l-d) \\ & \left. \times \frac{\cosh \nu(z+h)}{\cosh \nu h} \right] \exp(i\omega t) \end{aligned} \quad (3)$$

領域 (IV)

$$\begin{aligned} \Phi_{IV} = & \left[\sum_{j=0}^{\infty} F_j \exp\{-k_j(x-2l-d)\} \right. \\ & \left. \times \frac{\cos k_j(z+h)}{\cos k_j h} \right] \exp(i\omega t) \end{aligned} \quad (4)$$

(1)～(4)式中の波数 k_j , λ_j は以下の分散関係を満たす。ただし, ω は角周波数, g は重力加速度である。また, ν , μ_j は以下の(6), (7)式で示される。

$$\left. \begin{aligned} \omega^2/g &= k \tanh kh = -k_j \tan k_j h \\ &= \lambda \tanh \lambda R = -\lambda_j \tan \lambda_j h \\ &\quad (j=1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$k_0 = ik, \quad \lambda_0 = i\lambda$$

$$\nu = \frac{\pi}{2l+2d} \quad (6)$$

$$\mu_j = \frac{j}{h-R} \quad (j=1, 2, 3, \dots) \quad (7)$$

未定係数 A_j , B_j , …… F_j は, 境界上で未定係数と同数の点を選び, 以下に示す境界条件から未定係数と同数の線形方程式が得られることにより求めることができる(吉田ら, 1990)。

- 1) 領域 (I) と (II), (I) と (III), (II) と (IV), (III) と (IV) で, 速度ポテンシャルが連続である。
- 2) 領域 (I) と (II), (I) と (III), (II) と (IV), (III) と (IV) で, 水平水粒子速度が連続である。
- 3) 領域 (II) で水面の力学および運動学的境界条件

が成り立つ。

- 4) シートに関して力学的および運動学的境界条件が成り立つ。

ここで, シートに関する運動学的境界条件とは, シートの上下面で鉛直水粒子速度が等しいことを示している。また, シートに関する力学的境界条件はシートに関する運動方程式で, シートの質量を無視すると, シート上下の圧力差とシートに働く張力の鉛直成分が釣り合うことを示している。さらに, シート周辺でのエネルギー損失効果を取り入れるために, シートの鉛直変位速度に比例する抵抗が作用すると仮定すると, シートに関する運動方程式は, 以下に示す(8)式となる。

$$\Delta p = T_0 \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} - \gamma \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (8)$$

ここで η はシート変位, Δp はシート上下の圧力差, T_0 は初期張力, γ は抵抗係数で, η , Δp は領域 (II), (III) の速度ポテンシャルを用いて以下のように示される。

$$\eta = \int \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial z} dt = \int \frac{\partial \Phi_{III}}{\partial z} dt \quad (9)$$

$$\Delta p = -\rho \left(\frac{\partial \Phi_{II}}{\partial t} - \frac{\partial \Phi_{III}}{\partial t} \right) \quad (10)$$

また γ は, 任意定数 C を用いて以下のようにモデル化する。

$$\gamma = \frac{T_0 \nu^2}{\omega} C \quad (11)$$

各領域の速度ポテンシャル中の複素振幅が決定されると反射率 K_r , 透過率 K_t は以下に示すとおりとなる。

$$K_r = |A_0/a| \quad (12)$$

$$K_t = |F_0/a| \quad (13)$$

2.2 多スパンタイプ

多スパンの場合, 図-2(b)に示すように, 1 スパンの場合には無かったシート間の領域ができる。この領域に対しては, 未定係数 P_j , Q_j を用いて下式(14)のように速度ポテンシャルを仮定することができる。

$$\begin{aligned} \Phi = & \left[\sum_{j=0}^{\infty} [P_j \exp\{k_j(x-2l-d-2b)\} \right. \\ & + Q_j \exp\{k_j(x-2l-d)\}] \\ & \left. \times \frac{\cos k_j(z+h)}{\cos k_j h} \right] \exp(i\omega t) \end{aligned} \quad (14)$$

未定係数の決定法は, 2.1 で示した 1 スパンの場合と同様である。

3. 実験方法

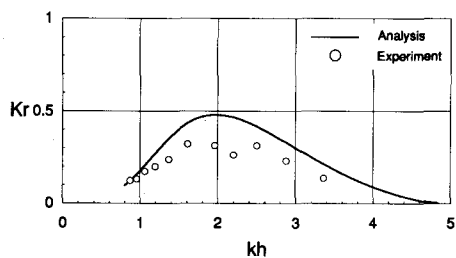
実験は, 長さ 22.0 m, 幅 0.25 m, 深さ 0.5 m の 2 次元造波水路の造波板から 9.0 m の水平床上に構造物模型を設置して行った。実験条件は表-1 に示すとおり。シートに作用する初期張力は $T_0 = 0.023 \text{ tf/m}$ (0.225 kN/m)

で、入射波の波高は1.0~3.0 cmで微小振幅の範囲内である。

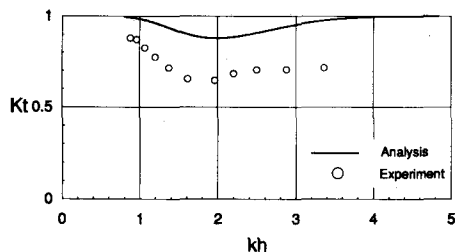
4. 解析結果および考察

図-3に1スパンタイプのテキスタイル消波構造物の $R/h=0.3$ ($h=0.3$ m)の場合の相対水深 kh と K_r , K_t の関係を示す。短周期側での K_t を除いて、 $C=0.5$ の場合の解析結果が実験結果と概ねよい一致を示している。解析結果と実験結果の若干の相違は、本解析のエネルギー損失モデルが剝離を伴うエネルギー損失等を正確には表現していないためであると考えられる。図-4に図-3と同一条件での1スパンタイプの水平板の K_r と K_t を示す。水平板の K_r はテキスタイル消波構造物の K_r に比べて若干小さくなるものの、 K_t については、テキスタイル消波構造物の方が水平板に比べて10~45%程度小さくなる。

図-5に1スパンタイプのテキスタイル消波構造物の $R/h=0.5$ ($h=0.3$ m)の場合の K_r と K_t を示す。この場合も、 $C=0.5$ の解析結果と実験結果が概ね一致してい



(a) 反射率



(b) 透過率

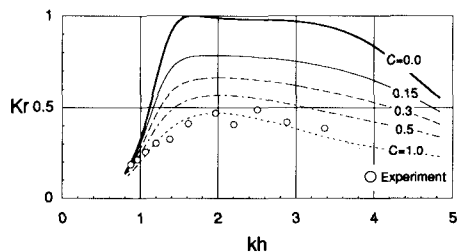
図-4 水平板波浪制御特性 (1スパン, $R/h=0.3$)

表-1 実験条件

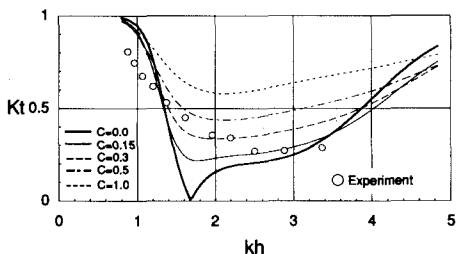
	h (m)	R/h	T (sec)	$2l$ (m)	d (m)	スパン数	$2b$ (m)
テキスタイル消波構造物	0.30	0.3	0.6~1.2	0.26	0.046	1	0.0
		0.5				2	0.015
		0.7					
水平板	0.35	0.3			0.0	1	0.0
		0.5					

る。また同一条件での水平板の場合(図-6)に比べ、テキスタイル消波構造物は高い消波効果を有することがわかる。

図-4と図-5を比較すると、 $R/h=0.5$ の場合のテキスタイル消波構造物の消波効果は、 $R/h=0.3$ の場合の水

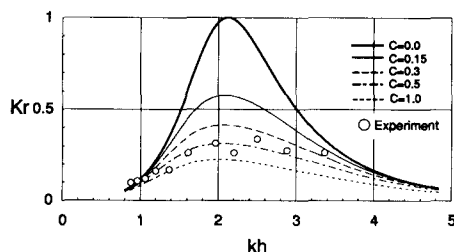


(a) 反射率

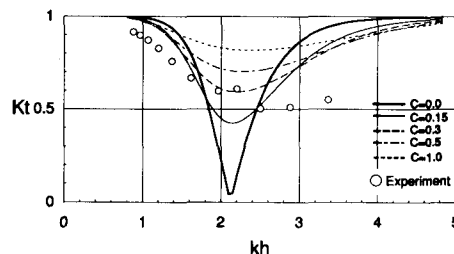


(b) 透過率

図-3 テキスタイル消波構造物波浪制御特性 (1スパン, $R/h=0.3$)

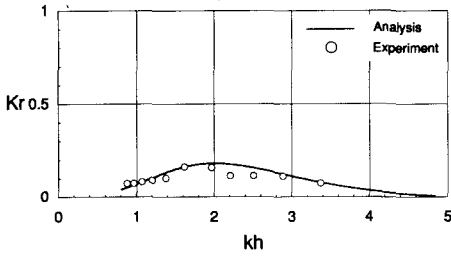


(a) 反射率

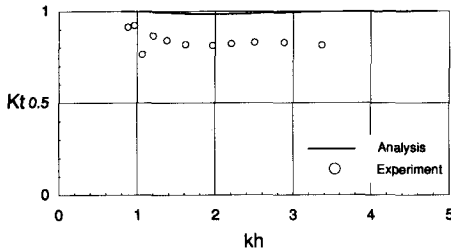


(b) 透過率

図-5 テキスタイル消波構造物波浪制御特性 (1スパン, $R/h=0.5$)

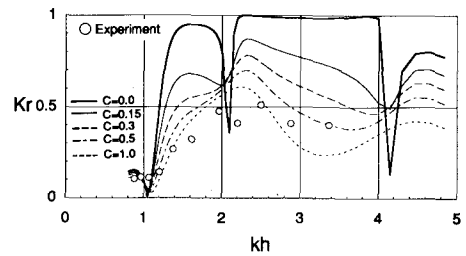


(a) 反射率

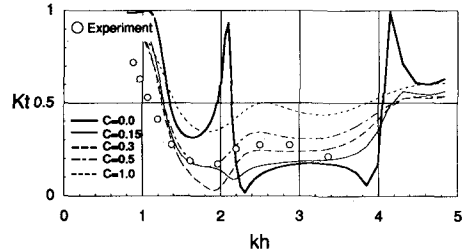


(b) 透過率

図-6 水平板波浪制御特性 (1 スパン, $R/h=0.5$)

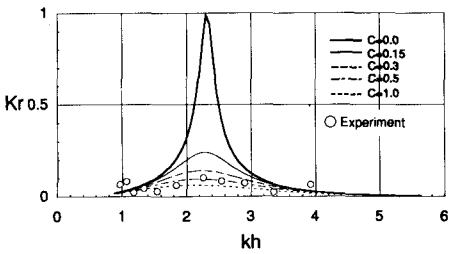


(a) 反射率

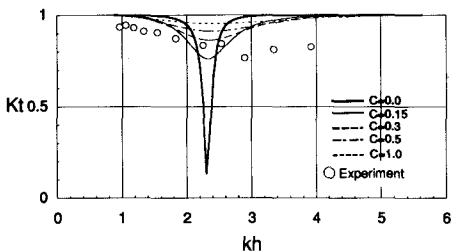


(b) 透過率

図-8 テキスタイル消波構造物波浪制御特性 (2 スパン, $R/h=0.3$)



(a) 反射率



(b) 透過率

図-7 テキスタイル消波構造物波浪制御特性 (1 スパン, $R/h=0.7$)

平板の消波効果とほぼ同じであることがわかる。さらに、テキスタイル消波構造物の没水深を深く、 $R/h=0.7$ ($h=0.35$ m) とした場合 (図-7), 消波効果は大変小さくなるが、図-6 と比較すると、 $R/h=0.5$ の場合の水平板と同程度の消波効果は維持できることがわかる。以上の点

から、テキスタイル消波構造物は水平板に比べて没水深を深くすることができるので、構造物上の海域の有効利用を考える上で有利であるといえる。

多スパン化によりテキスタイル消波構造物の波浪制御特性がどのように変化するかを調べるために、2 スパンタイプのテキスタイル消波構造物の場合の結果の一例 ($R/h=0.3$, $h=0.30$ m) を図-8 に示す。 $C=0.5$ の場合の解析結果と実験結果がよく一致している。1 スパンタイプの場合、没水深によらず、 kh に対して K_r や K_t は1つの極値をもつ特性であったのに対して、2 スパンタイプの場合には、2 つ以上の極値をもつ複雑な特性を示す。これは、2 枚のシートの運動とシート上やシート間の波動とが複雑な共鳴現象を起しているためであると考えられる。エネルギー損失を考慮しない解析ではこの特性が顕著に表れる。しかしながら実現現象では、実験結果にみられるようにこの特性は緩やかになり、その結果2 スパンタイプは1 スパンタイプに比べて有効な周波数範囲が広がっている。エネルギー損失を考慮した解析はこの特性をよく表している。

5. 結 言

テキスタイル消波構造物に対して、シートの運動に伴うエネルギー損失を考慮した解析を行い、実験結果と比較したところ、適当な比例定数 C を用いることにより解析結果と実験結果は概ねよい一致を示した。また、解析と実験の結果、テキスタイル消波構造物は、没水深が深

く入射波が構造物上で碎波しない場合でも水平板に比べてエネルギー損失が大きく、幅広い周波数帯で透過率が小さくなることがわかった。今後は、剝離を伴う乱れ等について、より正確なエネルギー損失の見積り法を検討していきたい。

参 考 文 献

- 井島武士・尾崎重雄・江口泰彦・小林 彰 (1970): 水平板による防波堤と岸壁に関する理論的研究(2), 第17回海岸工学講演会論文集, pp. 97-108.
- 加藤重一・乃万俊文・荻野静也 (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.
- 加藤雅也・渡会英明・仲倉道雄・浜中建一郎 (1992): テキスタイル消波構造物の波浪制御特性, 海洋開発論文集, Vol. 8, pp. 295-300.
- 小島治幸・中村哲也・入江 功・吉田明徳 (1992): 没水水平板に作用する線形および非線形波力の特性, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 751-755.
- 余 錫平・磯部雅彦・渡辺 晃 (1991): 没水水平板に作用する波力に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 671-675.
- 吉田明徳・小島治幸・鶴本良博 (1990): 波動境界値問題におけるポテンシャル接続法の選点解法, 土木学会論文集, 第417号, pp. 265-274.
- 渡会英明・大橋康広・長崎作治 (1987): テキスタイルを利用した消波構造物の開発—消波特性に関する実験的研究—, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 502-506.
-