

テキスタイル消波構造物の波浪制御特性

Wave Characteristics of Textile Sheet Structure

加藤雅也*・渡会英明*・仲倉道雄*・浜中健一郎**

Masaya. Kato, Hideaki. Watarai, Michio. Nakakura, Ken-ichiro. Hamanaka

A theoretical analysis is given to the wave characteristics of a textile sheet structure which is proposed as a submerged flexible breakwater. The analysis is based on a two-dimensional linear potential theory. The numerical results have good agreements with experimental observations. It is found that the flexible type structure is much more effective as a breakwater than the non-flexible one.

Keywords: textile sheet, submerged flexible breakwater, potential theory, characteristics of wave dissipating

1. まえがき

近年、沿岸域の高度利用のための種々の構造物が考案されている。特に景観を考慮した没水型の波浪制御構造物としては、没水水平板、人工リーフ、フレキシブルマウンド等が考案され、その波浪制御特性が調べられてきている（青山ら(1988)、宇多ら(1984)、大山ら(1988)）。そのような波浪制御構造物の一つとして著者らはすでにテキスタイルシートを用いた波浪制御構造物（ここではこの構造物をテキスタイル消波構造物と呼ぶ）（図-1）を提案し、実験によりその消波効果を確認してきた。その結果、シートの長さが波長の0.5～1.5倍程度でも十分な消波機能を有し、没水深が大きな場合にはむしろ剛な没水水平板よりも消波効果が高い場合があることが分っている（渡会ら(1987)）。しかしながら、その最適な構造や規模を知るには多くの系統的な実験やテキスタイル消波構造物の周りの波動場を解析的に解く方法を確認することが必要となる。これまでの実験研究からこのテキスタイル消波構造物は波長の数分の一の長さを1スパンとして、いくつか結合した多スパン構造が効果的であることが分っているが、本研究においては単スパン構造について解析を行い、消波に関わる各パラメータと消波効果の関係について検討を行った。

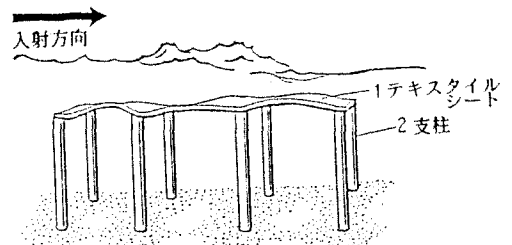


図-1 テキスタイル消波構造物概念図

2. 解析方法

2. 1. 解析仮定

図-2に示すように、一定の水深 h の2次元波動場中に両端を固定された長さ $B(=2\ell)$ のシートが没水深 R の位置に設置されている。解析は線形ポテンシャル理論に基づいた領域分割法（井島(1971)）を用いる。解析に用いた主な仮定は以下の通りである。

- ①流体は非圧縮性完全流体で、流体の運動は非回転である。
- ②微小振幅表面波
- ③シートの振動は微小振幅である。
- ④シートの変位は両端を固定点とする正弦形である。
- ⑤シートには十分なプリテンションがかけられている。
- ⑥シートは調和変動する。

以上の仮定のうち、④はシートの長さが波長に比べて適当に短ければ妥当であると考えられる。また、⑥は③、④、⑤が成り立つことにより保証される。

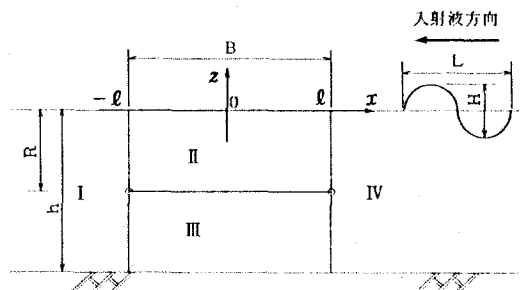


図-2 解析諸元

2. 2. 速度ポテンシャル

①～⑥の仮定に基づき各領域での速度ポテンシャルを以下のように仮定する。

$$\Phi_1 = \phi_1 e^{i\omega t}, \quad \Phi_2 = \phi_2 e^{i\omega t}, \quad \Phi_3 = \phi_3 e^{i\omega t}, \quad \Phi_4 = \phi_4 e^{i\omega t}, \quad \Phi_5 = \phi_5 e^{i\omega t}$$

$$\phi_1 = \sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{k_n(x+\ell)} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} + a e^{-k_0(x+\ell)} \frac{\cos k_0(z+h)}{\cos k_0 h}$$

* 正会員 東急建設(株)土木技術部技術開発課 (150 東京都渋谷区渋谷1-15-21)

** 正会員 北海道大学工学部土木工学科

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ B_n e^{\lambda_n(z-\ell)} + C_n e^{-\lambda_n(z+\ell)} \right\} \frac{\cos \lambda_n(z+R)}{\cos \lambda_n R} + I \cos \lambda' x \frac{\cos \lambda'(z+R')}{\cos \lambda' R'} \\ \phi_2 &= \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ D_n e^{\mu_n(z-\ell)} + E_n e^{-\mu_n(z+\ell)} \right\} \cos \mu_n(z+h) + G + Hx + J \cos \lambda' x \frac{\cos \lambda'(z+h)}{\cos \lambda' h} \\ \phi_3 &= \sum_{n=0}^{\infty} F_n e^{k_n(z-\ell)} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h}\end{aligned}$$

ここで、 $A_n, a, B_n, C_n, D_n, E_n, F_n, G, H, I, J$ は複素振幅、 k_n, k_0 は水深 h 、周期 T での波数、 λ_n は水深 R 、周期 T での波数、 R' は周期 T で波数が λ' となる仮想水深、 $\lambda' = \frac{\pi}{2\ell}$ 、 $\mu_n = n\mu = n \frac{\pi}{h-R}$ である。

また、以下のような分散関係が成り立つ。

$$\begin{aligned}\frac{\omega^2}{g} &= k \tanh kh = -k_n \tanh k_n h \quad (n=1, 2, \dots) \quad \text{ただし、} \quad k_0 = ik \quad (i^2 = -1) \\ \frac{\omega^2}{g} &= \lambda \tanh \lambda h = -\lambda_n \tanh \lambda_n h \quad (n=1, 2, \dots) \quad \text{ただし、} \quad \lambda_0 = i\lambda \quad (i^2 = -1) \\ \frac{\omega^2}{g} &= \lambda' \tanh \lambda' R'\end{aligned}$$

2. 3. 解の接続

2. 3. 1. 流体間の接続

各領域の境界で速度ポテンシャルと水平方向の水粒子速度が連続であることから、

$$\phi_1 = \phi_2, \quad \frac{\partial \phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \quad (x = -\ell, -R \leq z \leq 0) \quad \dots (1)$$

$$\phi_1 = \phi_2, \quad \frac{\partial \phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \quad (x = -\ell, -h \leq z \leq -R) \quad \dots (2)$$

$$\phi_2 = \phi_3, \quad \frac{\partial \phi_2}{\partial x} = \frac{\partial \phi_3}{\partial x} \quad (x = \ell, -R \leq z \leq 0) \quad \dots (3)$$

$$\phi_2 = \phi_3, \quad \frac{\partial \phi_2}{\partial x} = \frac{\partial \phi_3}{\partial x} \quad (x = \ell, -h \leq z \leq -R) \quad \dots (4)$$

2. 3. 2. シート上下の接続

シートの上下で水粒子の変位が等しいことから、

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial z} = \frac{\partial \phi_2}{\partial z} \quad (x=0, z=-R) \quad \dots (5)$$

シートの上下で圧力差とシートの張力が釣り合うことから、シートの初期張力を T_0 とすると

$$p = T_0 \frac{\partial^2 \eta_s}{\partial x^2}$$

ここで、シートの上下の圧力差 p は $p = -\rho \left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial t} - \frac{\partial \Phi_2}{\partial t} \right)$ 、シートの変位 η_s は $\eta_s = \int \frac{\partial \Phi_2}{\partial z} dt$ であるので、

$$\rho \omega (\phi_1 - \phi_2) = \frac{T_0}{\omega} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial \phi_2}{\partial z} \right) \quad (x=0, z=-R) \quad \dots (6)$$

2. 4. 選点解法

2. 3. で得られた方程式は選点解法 (吉田ら (1989)) を用いて解くことができる。選点解法は 2. 3. で得られた式 (1)～式 (6) が各々の解の接続を行った水深の範囲で成り立つことから適当な接続点 (選点) を選ぶことにより未知数の数と等しい数の方程式が得られ、未知数が決定できるものである。

3. 解析結果の検討

3. 1. 水理実験結果との比較

実験は東急建設 (株) 海洋水理実験場の 2 次元造波水路 (長さ 50m × 幅 0.8m × 高さ 1.0m) を用いて行った (図-3)。実験に用いたシートはパブリック遮水シート #300 (旭化成工業 (株) 製、厚さ 1.0mm、重量 1200g/m²) であり、両端をステンレス製の水平部材に直接取り付け水槽上部から鉛直部材により水平に吊り下げた。表-1 に実験条件を示す。

反射率 K_R 、透過率 K_T はシート沖側、岸側の各々 2 台の波高計を用いて求めた。また、シートの最大振幅 Y_s はビデオカメラで撮影したデータを読み取った。実験では初期張力のデータが得られていないので、実験値と解析解との比較は Y_s が等しくなる無次元初期張力 $T_0/\rho gh^2$ で行う。

図-4 に $R/h=0.3$ 、 $H/h=0.1$ の場合の (a) h/L と Y_s/B の関係、(b) h/L と K_T の関係、(c) h/L と K_R の関係を示す。解析解については $T_0/\rho gh^2$ をパラメータとして示してある。ここで、 L は入射波の波長である。

図-4 (a) によれば、実験により測定されたシートの Y_s と解析により計算された Y_s が等しくなる $T_0/\rho gh^2$ は $T_0/\rho gh^2 = 0.2 \sim 0.3$ である。解析においては前述した解析上の仮定により、シートが変動しても初期張力が保たれシートは一定の正

弦運動をするのに対して、実験においてはシートの変動にともない張力が変化し非線形なシート運動となる等、シート運動に若干の違いがあるにも関わらず、 K_T については、図-4 (b)に示すとおり解析解と実験値はほぼ一致している。一方 K_R は、図-4 (c)に示すとおり解析解は実験値に比べ高周波数側で大きな値を示すが、定性的には h/L の増加にともない K_R が増加する傾向がほぼ一致している。このように K_T については定量的にもほぼ一致しながら K_R については解析解>実験値となるのは、前述したシート運動の違いに加え、本解析においては常に $K_T^2+K_R^2=1$

となるのに対して実験においては $K_T^2+K_R^2<1$ であることから、実験においては、解析では考慮していないシート端部での渦の発生等によるエネルギー損失が起きているためであると考えられる。

同様に、図-5、6に各々 $R/h=0.5$ 、 $H/h=0.2$ の場合と $R/h=0.7$ 、 $H/h=0.2$ の場合の(a) h/L と Y_s/B の関係、(b) h/L と K_T の関係、(c) h/L と K_R の関係を示す。 $R/h=0.5$ 、 $R/h=0.7$ のいずれの場合も $R/h=0.3$ の場合と同様に、 K_T については解析解と実験値はほぼ一致している。 K_R については高周波数側で解析解>実験値となるが、定性的には h/L の増加にともない K_R が増加する傾向がほぼ一致している。

以上の結果から、本解析は適当な初期張力を与えることによりテキスタイル消波構造物の消波特性を表現し得るものと考えられる。そこで以下では消波に関わると考えられる各パラメータと消波効果の関係について解析解により検討する。ただし、解析解については常に $K_T^2+K_R^2=1$ となるので以下では K_T について検討する。

3. 2. 波長水深比と消波効果の関係

図-7に $R/h=0.5$ 、 $B/h=1.0$ 、 $H/h=0.2$ の場合の(a) h/L と Y_s/B の関係、(b) h/L と K_T の関係を、 $T_0/\rho gh^2$ をパラメータとして示す。図には比較のため剛な没水水平板の解析結果も合わせて示してある。図-7に示すとおり、テキスタイル消波構造物の場合にも没水水平板と同様に h/L が増加すると K_T は減少するので、周期の短い波ほど消波効果が大きくなる。ただし、 $T_0/\rho gh^2=0.15$ の場合、 $h/L=0.25$ 付近で K_T は最小となりさらに h/L が増加すると K_T は増加している。このようなピークは一種の共振周期と考えられる。また、 $T_0/\rho gh^2$ が小さくなり、シートの変位量が大きくなるに従い K_T が大きくなることから、シートの運動により消波効果が向上しているといえる。

3. 3. シート長と消波効果の関係

図-8に $R/h=0.5$ 、 $h/L=0.21$ 、 $H/h=0.2$ の場合の(a) B/h と Y_s/B の関係、(b) B/h と K_T の関係を、 $T_0/\rho gh^2$ をパラメータとして示す。図には比較のため剛な没水水平板の解析結果も合わせて示してある。図-8に示すとおり、テキスタイル消波構造物の場合、 B/h が増加すると K_T は減少し、ある B/h で K_T は最小となりさらに B/h が増加すると K_T は増加している。この傾向は没水水平板と同様であるが、没水水平板の場合に比べてテキスタイル消波構造物の場合は K_T の最小値は小さく、また、 $T_0/\rho gh^2$ が小さくなるに従い K_T が最小となる B/h の値が小さくなる。以上の結果から、同一の消波効果を得るためには、テキスタイル消波構造物は没水水平板に比べてその長さを短くできる可能性があることが分る。

3. 4. 没水深と消波効果の関係

図-9に $B/h=1.0$ 、 $h/L=0.21$ 、 $H/h=0.2$ の場合の(a) R/h と Y_s/B の関係、(b) R/h と K_T の関係を、 $T_0/\rho gh^2$ をパラメータとして示す。図には比較のため剛な没水水平板の解析結果も合わせて示してある。図-9に示すとおり、テキスタイル消波構造物の場合にも没水水平板と同様に R/h が増加すると K_T は増加する。本解析によればテキスタイル消波構造物と没水水平板の消波効果は R/h が小さい時に顕著な差が見られるが、実際には R/h が小さい場合、本解析に考慮されていない碎波による消波が支配的となるので、テキスタイル消波構造物と没水水平板の消波効果の差はこれほど大きくはならないと考えられる。しかしながら、テキスタイル消波構造物の場合、入射波が碎波しないような R/h が大きい場合にも、適当な $T_0/\rho gh^2$ を与えることにより、良い消波効果を得ることができる。

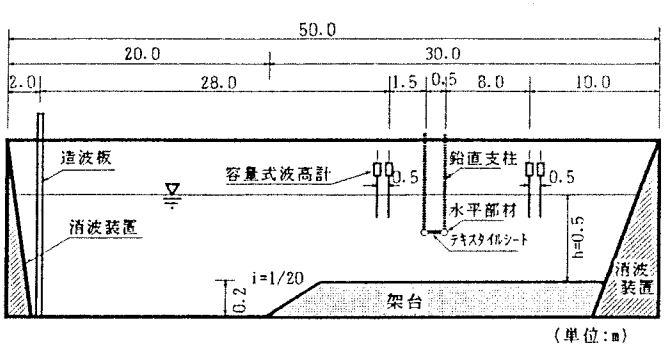


図-3 実験装置

表-1 実験条件

水 深 h (m)	0.50
没水深 R (m)	0.30, 0.50, 0.70
波 高 H (m)	0.05, 0.10
周 期 T (sec)	1.01 ~ 2.68
シート長 B (m)	0.50

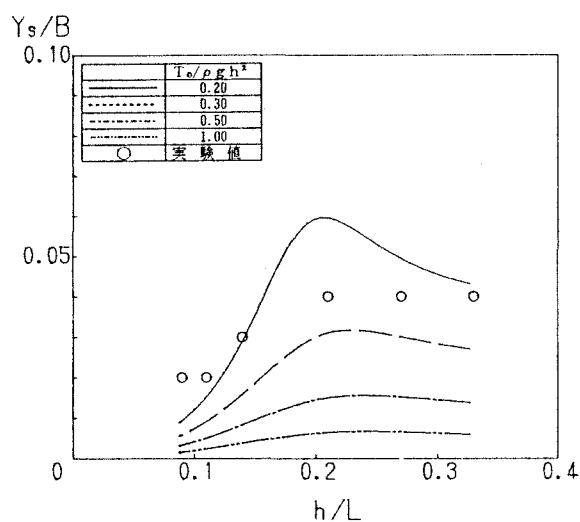


図-4 (a) h/L と Y_s/B の関係 ($R/h=0.3, H/h=0.1$)

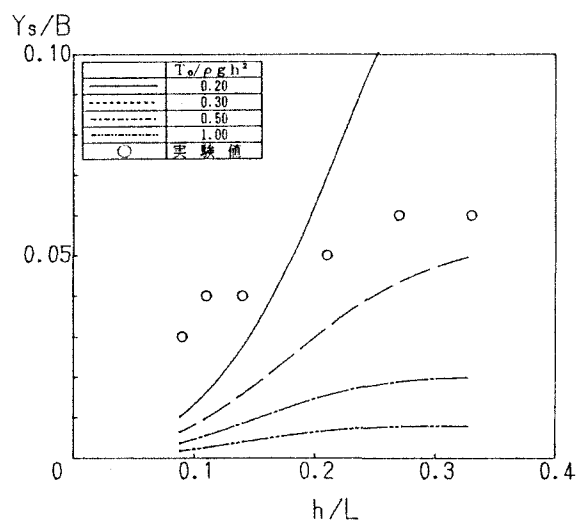


図-5 (a) h/L と Y_s/B の関係 ($R/h=0.5, H/h=0.2$)

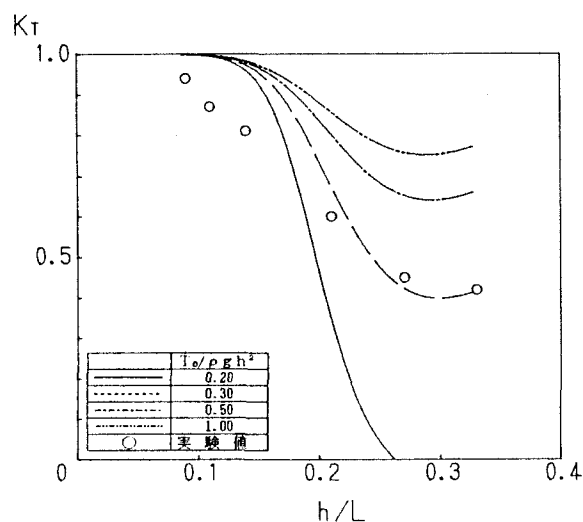


図-4 (b) h/L と K_τ の関係 ($R/h=0.3, H/h=0.1$)

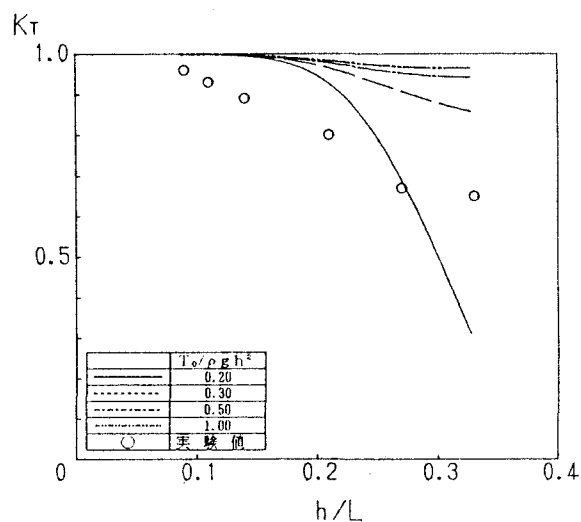


図-5 (b) h/L と K_τ の関係 ($R/h=0.5, H/h=0.2$)

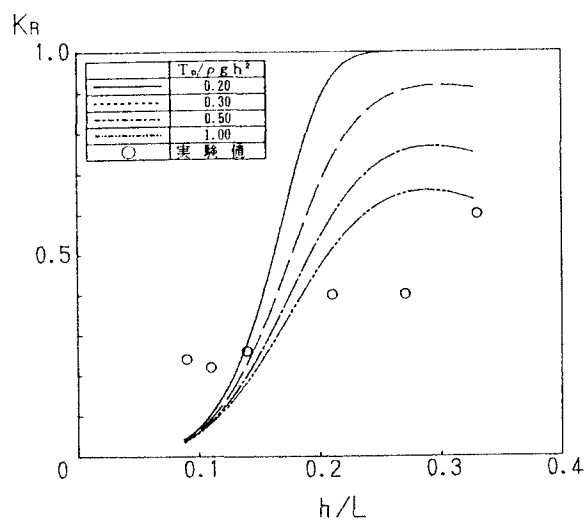


図-4 (c) h/L と K_R の関係 ($R/h=0.3, H/h=0.1$)

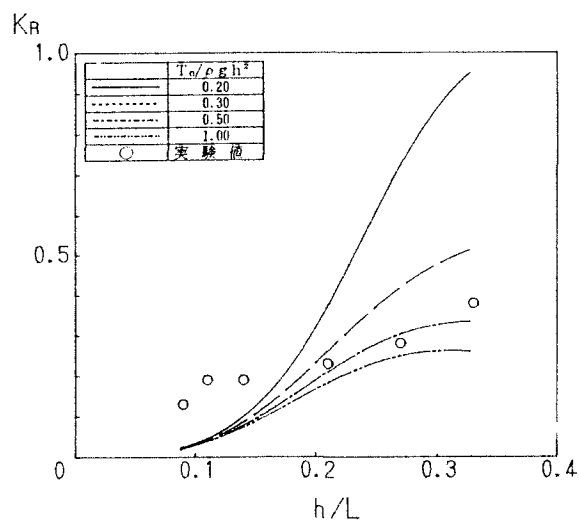


図-5 (c) h/L と K_R の関係 ($R/h=0.5, H/h=0.2$)

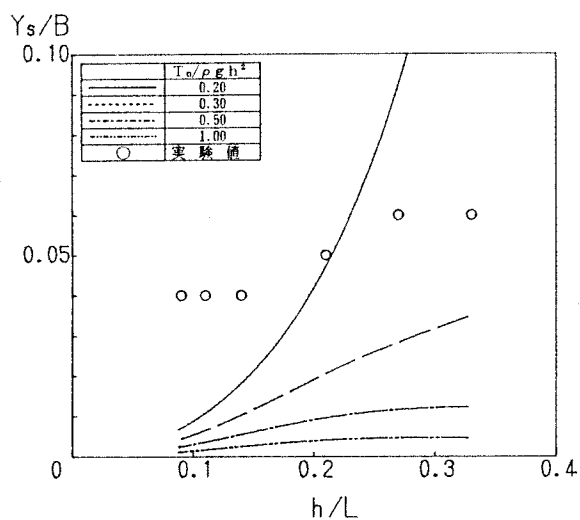


図-6 (a) h/L と Y_s/B の関係 ($R/h=0.7, H/h=0.2$)

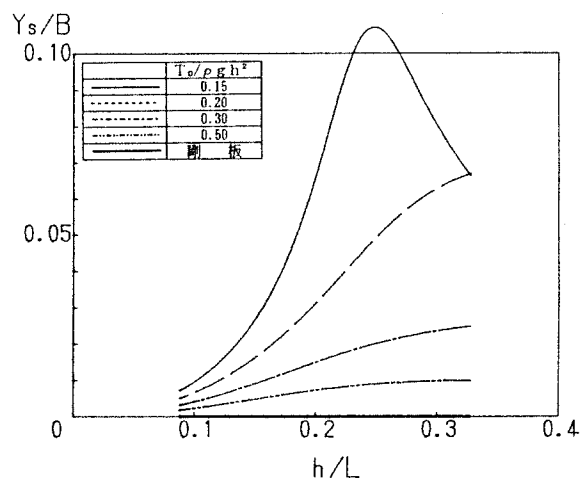


図-7 (a) h/L と Y_s/B の関係 ($R/h=0.5, B/h=1.0$)

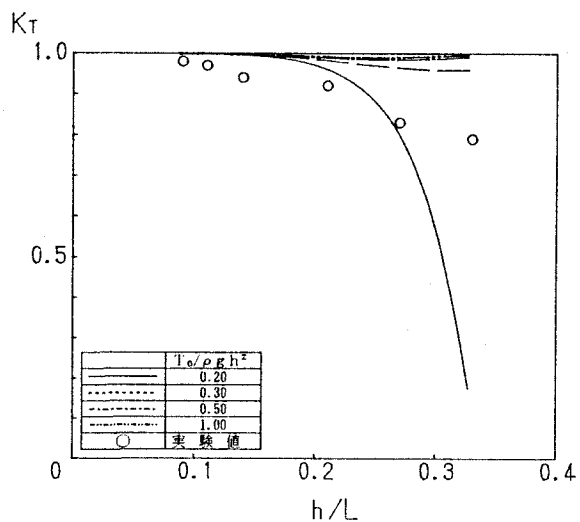


図-6 (b) h/L と K_τ の関係 ($R/h=0.7, H/h=0.2$)

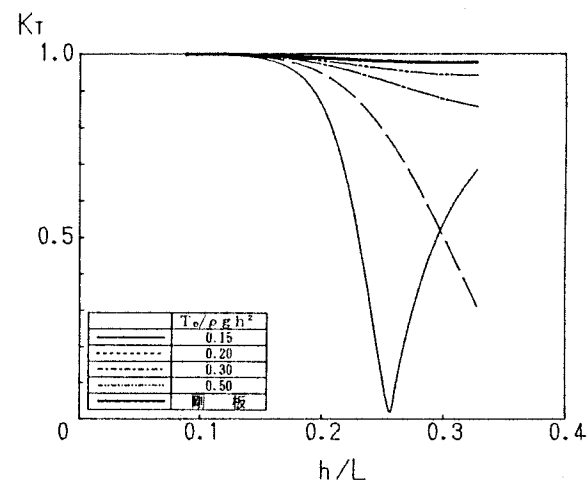


図-7 (b) h/L と K_τ の関係 ($R/h=0.5, B/h=1.0$)

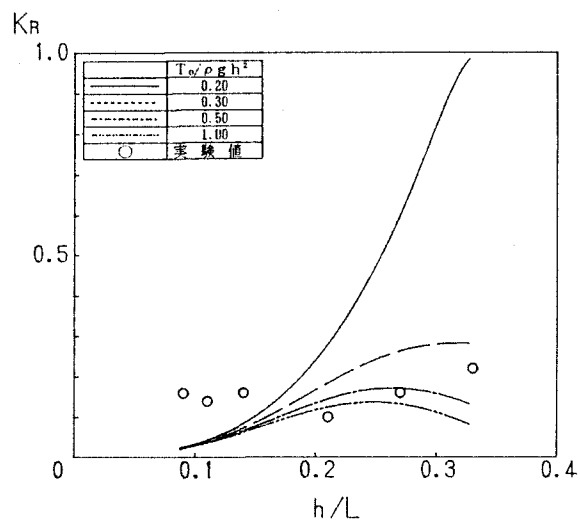


図-6 (c) h/L と K_R の関係 ($R/h=0.7, H/h=0.2$)

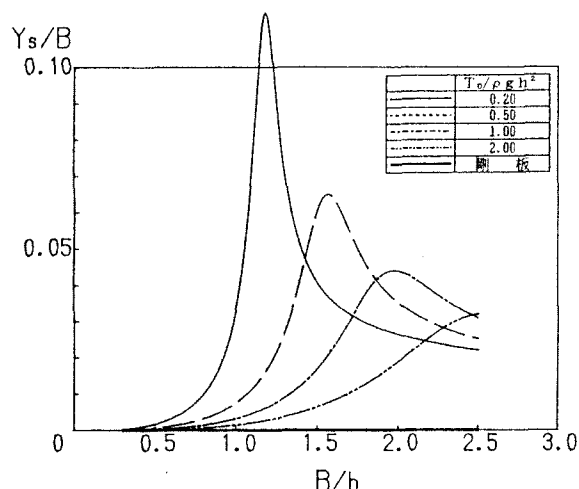


図-8 (a) B/h と Y_s/B の関係 ($R/h=0.5, h/L=0.21$)

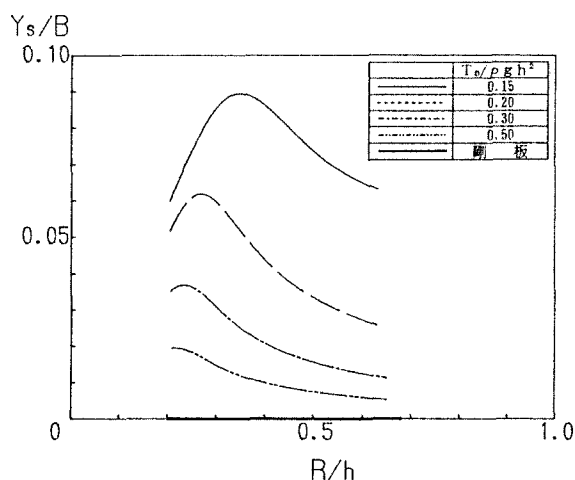


図-9 (a) R/h と Y_s/B の関係 ($B/h=1.0, h/L=0.21$)

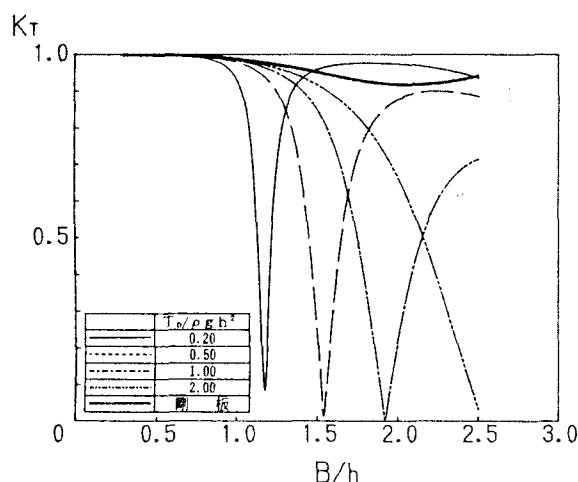


図-8 (b) B/h と K_τ の関係 ($R/h=0.5, h/L=0.21$)

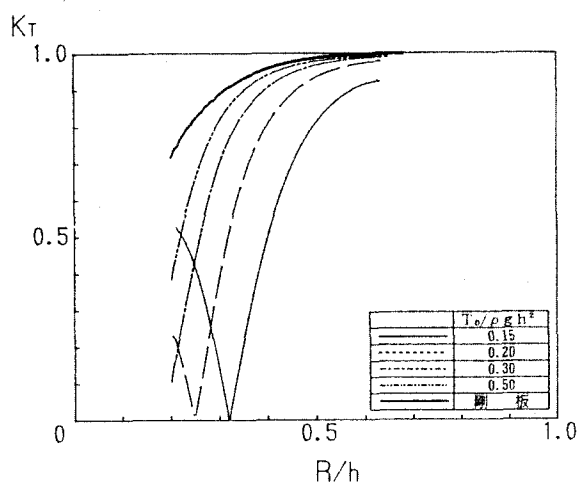


図-9 (b) R/h と K_τ の関係 ($B/h=1.0, h/L=0.21$)

4. あとがき

線形ポテンシャル理論による領域分割法を用いることにより、テキスタイル消波構造物の理論解析を行い、水理実験との比較から、解析解は適当な初期張力を与えることによりテキスタイル消波構造物の消波特性を表現し得ることが確認された。さらに本解析により、テキスタイル消波構造物は剛な没水水平板に比較して良い消波効果が得られること、特に、入射波の周期が短い場合にその差が顕著となること、構造物の長さが短い場合や没水深が深くなった場合でも適当な初期張力を与えることにより消波効果を期待し得ることが分った。

今後は、本解析の多スパン構造への拡張や、シートの伸び等を考慮した非線形解析を行い、実験で観察されている波の分裂等についても検討したいと考えている。

参考文献

- 青山哲也・磯部雅彦・泉宮尊司・渡辺晃(1988)：没水平板による波浪制御法に関する基礎的研究,第35回海岸工学講演会論文集,pp. 507～511.
- 宇多高明・田中茂信・筒井保博(1984)：人工リーフによる波浪と漂砂の制御,第31回海岸工学講演会論文集,pp. 340～344.
- 大山巧・田中正博・清川哲志・宇多高明・村井植美(1988)：フレキシブルマウンドの反射・透過特性の解析,第35回海岸工学講演会論文集,pp. 562～566.
- 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.
- 井島武士(1971)：最近の波浪理論における境界値問題の解法とその応用,水工学に関する夏期研修会講義集Bコース,pp. B-1-1～B-1-31.
- 吉田明德・小島治幸・鶴本良博(1989)：ポテンシャル接続法の選点解法,海岸工学論文集第36巻,pp. 474～478.