

ラセン繊維ポラス材の消波・流体力特性

Study on Wave Transmission and Wave Forces for Spiral-Fibered, Highly Porous Barrier

瀬戸 雅文*・糸刈 長敬*・邵 仙玉**・橋本 剛**・中村 充***

Masabumi Seto, Chohei Itosu, Shao Xianyu, Tuyoshi Hashimoto and Makoto Nakamura

A theory is developed for estimating the wave transmission, wave reflection and wave forces for a spiral-fibered, highly porous barrier used well for submerged biofilter. Theory is based upon the law of momentum flux and energy flux conservation and Morison's equation. The solution is compared with result of model tests, in case of upright wave-absorbing-type and floating wave-absorbing-type, and agrees well.

Keywords: porous structure, wave force, transmission coefficient, reflection coefficient

1. はじめに

従来より浄化槽の接触酸化用の充填材あるいは土木工事の暗渠用資材として、高分子繊維をシュロやヘチマ繊維のように纏めたポラス材が広く用いられている。今回取り上げるラセン繊維ポラス材はポリプロピレン樹脂製の直径1～2mm程度の線材をカールさせ、ラセン構造に配置し積み重ねて相互接点を溶着成形して一体化させたもので、空隙率90%以上と極めてポラスな素材となっている。従って、これを停滯水域の港湾や養殖場の外郭施設などに用いれば施設内に外海水を透過させ海水交換が阻害されない一方、本素材自体が排水処理接触酸化充填材として多くの実績をもっていることから、生物膜による接触海水自体の浄化にも寄与できるものと考えられる。また、本素材のラセン構造の一単位は、数cm程度と極めて細かいため、これを養殖魚介類の直接の囲いとして使用することもできる。このように、施設自体に環境浄化機能を備えたまったく新しい性質の海洋構造物を開発するための基礎的段階として、糸刈ら¹⁾は水面上より水底まで直立した矩形形状のポラス材構造物に対する波及び波力特性について理論を構築した。さらに、瀬戸ら²⁾は、ポラス材を浮き消波堤として使用した場合の基礎的研究として、水面付近にこれが固定された場合について理論を発展させている。本論文はこれらの結果を統一的に整理することによって、本素材の波特性および波力に関する諸特性を取りまとめたものである。

2. 理論的考察

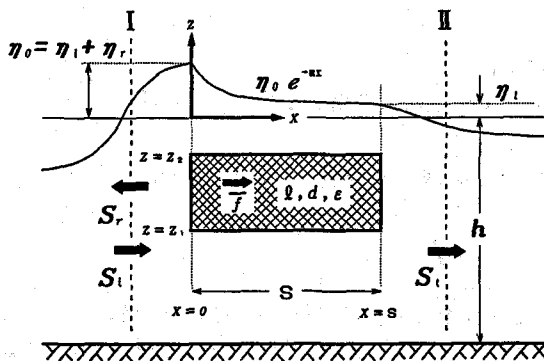


図-1 運動量流束の約合

図-1に示すように一様水深 h の2次元水域内の静水面上で波の進行方向に x 軸、水面から鉛直方向に z 軸をとり、 $z=z_1 \sim z_2$ の区間に矩形形状のラセン繊維ポラス材が波方向に幅 S に渡って固定設置されている場合を考える。ポラス材は内部に繊維が均一にラセン構造に配置されているものとして、繊維の直径を d 、繊維の単位体積当たりの長さを l とする。また、 ε はポラス材の空隙率の逆数で $\varepsilon = (1 - \pi d^2 l / 4)^{-1}$ によって定義される。透過性構造物内の波高の減衰についてはこれまでいくつかの知見あり、例えば金山ら³⁾は直径数cmのガラス球を構成要素とする透過性構造物を幅1.0mに渡って配置した鉛直透過堤を用いて構造物内の波の減衰特性について調べた結果、構造物内で波高は指数関数的に減衰することを示した。さらに、近藤ら⁴⁾はパイプを外径と同じ隙間を空けて格子状に組み立てた理想的な鉛直透過堤模型を試作して実験を行い、透過率が透過堤の波方向の幅の増加とともに指数的に減少することを指摘している。従って、本研究においてもポラス材の内部、或いは上部において水位 η は指数関数的に減衰するものとして以下の式によって減衰係数 m で内部水位を表現する。

$$\eta = \eta_0 \exp(-mx) \quad 0 \leq x \leq S$$

ここに、 η_0 は構造物前面における水位で $\eta_0 = \eta_i + \eta_r$ で定義される。また、図中の各記号の添字 i , r , t はそれぞれ入射波、反射波および透過波におけるものを意味している。

*正会員 東京水産大学水産学部海洋生産学科 (108 東京都港区港南 4-5-7)

** 東京水産大学大学院海洋生産学専攻

***正会員 福岡県立大学生物資源学部海洋生物資源学科

2.1 運動量流束の保存

図-1に示すように構造物前・後に検査面Ⅰ、Ⅱをとり、検査面内部の単位幅当たりの運動量の収支を考える。波周期平均量を考えれば検査面内部の状況は定常であるから図中の記号を用いて

$$\mathcal{S}_1 - (-\mathcal{S}_r) - \mathcal{S}_2 = \overline{f_1} + \overline{f_2} \quad (1)$$

ここに、 $\mathcal{S}$ は単位幅当たりの各波成分における余剰運動量流束 (Radiation stress) の波向き成分で、例えば入射波成分について示すと以下になる。

$$\mathcal{S}_1 = E_1 \left(2n - \frac{1}{2} \right), \quad E_1 = \frac{\rho g H_1^2}{8}, \quad n = \frac{C_g}{C} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (2)$$

ここに、 E_1 は入射波の単位水面積当たりの平均エネルギー、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 H_1 は入射波高、 C 、 C_g は波の位相速度およびエネルギー速度、 k は波数 ($2\pi/L$)、 L は波長である。

また、波周期平均されたポーラス材に作用する流体力は、ポーラス材前後の水位差より生じる圧力 f_1 およびポーラス材を波が透過するときの流体抵抗力 f_2 の波周期平均値の和として与えられる。

2.1.1 構造物前後の水位差による力

(1)式は波周期平均して残存するオーダ量の釣合式であるから、構造物に作用する圧力についても第2次近似の圧力について考える必要がある。構造物内の任意の垂直断面 x (波高値 H_x) に作用する圧力の波周期平均値 $\overline{f_{rx}}$ は単位体積当たりのポーラス材の射影面積が ld であることを考慮して

$$\overline{f_{rx}} = \int_{-z_1}^{z_2} (-\rho \overline{w^2}) dz = \frac{\rho g ld H_1^2}{16 \sinh 2kh} \{ \sinh 2k(z_1+h) - \sinh 2k(z_2+h) - 2k(z_1-z_2) \} \quad (3)$$

この圧力が構造物内の任意縦断面の単位幅当たりに作用している。ポーラス材に作用する圧力をモデル化するためには構成繊維の構造物内での配置様式を定義する必要があるが、単位幅内に存在する直径 d の線材に作用する水平方向の圧力の釣合を(3)式で考えれば、構造物内の単位幅断面当たりに作用する圧力の波周期平均値 $\overline{f_{1x}}$ は

$$\overline{f_{1x}} = \frac{\rho g ld H_1^2}{8 \sinh 2kh} (1+K_r)^2 e^{-2mx} \sinh md \{ \sinh 2k(z_1+h) - \sinh 2k(z_2+h) - 2k(z_1-z_2) \} \quad (4)$$

ここに、 K_r は構造物の反射率で $K_r = H_r/H_1$ で定義される。

(4)式を構造物の幅に渡って $x=0 \sim S$ まで積分することによって構造物に作用する波周期平均圧力 $\overline{f_1}$ は

$$\overline{f_1} = \frac{\rho g ld H_1^2}{16 m \sinh 2kh} (1+K_r)^2 \sinh md (1-e^{-2mS}) \{ \sinh 2k(z_1+h) - \sinh 2k(z_2+h) - 2k(z_1-z_2) \} \quad (5)$$

2.1.2 構造物に作用する流体力

対象とするポーラス材は構成線材の直径が数mm程度と極めて細かく、さらに空隙率90%以上と超ポーラスであるため流れ場内における線材間の相互干渉は小さいものと考えられる。このような場合には、線材に作用する抗力に対する仮想質量力の割合は d/H_1 のオーダの微小量となり省略できる⁹⁾。従って、ポーラス材の単位体積当たりに作用する流体力 $f_{2,unit}$ は

$$f_{2,unit} = \frac{1}{2} C_D ld \rho |u|u \quad (6)$$

ここに、 C_D は線材の抗力係数である。本論文で取り上げたポーラス材は、その構成線材が円柱で近似できるため円柱の抗力係数 $C_D=1.0$ を採用した。(6)式においても(1)式で釣合を考える場合、第2次近似の流速を用いなければならない。すなわち、波による第1次近似の水粒子の運動を周期積分することにより求まる2次のオーダの残留速度を用いて、(6)式を構造物全体に渡って積分すると

$$\overline{f_2} = \frac{\alpha \rho \sigma^2 k H_1^4 (1+K_r)^4}{2048 S \sinh^4 mkh} (1-e^{-4mS}) \{ \sinh 4k(z_2+h) - \sinh 4k(z_1+h) + 4k(z_2-z_1) \} \quad (7)$$

ここに σ は角周波数である。また、 α は構造物の形状特性に関する無次元数で

$$\alpha = (1/2) C_0 S l d \varepsilon^2 \quad (8)$$

(2)、(5)、(7)式を(1)式に代入することによって、運動量流束の釣合式が以下のように求まる。

$$\begin{aligned} & (4n-1) \{1+K_r^2 - (1+K_r)^2 e^{-2ms}\} \\ &= \frac{l d (1+K_r)^2 \sinh m d}{m \sinh k h} (1 - e^{-2ms}) \{ \sinh 2k(z_1+h) - \sinh 2k(z_2+h) - 2k(z_1-z_2) \} \\ &+ \frac{\alpha k^2 H_1^2 (1+K_r)^4}{128 S \sinh^3 k h \cosh k h} (1 - e^{-4ms}) \{ \sinh 4k(z_2+h) - \sinh 2k(z_1+h) - 4k(z_1-z_2) \} \end{aligned} \quad (9)$$

2.2 エネルギー流束の保存

図-1と同様に、構造物前後の検査面 I、II を流出入するエネルギー流束の釣合を考えると

$$W_i = W_t + W_r + W_l \quad (10)$$

ここに、 W_i 、 W_t 、 W_r はそれぞれ入射波、透過波、反射波のエネルギー流束、 W_l は構造物内を透過する流れによる消費エネルギーでこれらはそれぞれ次式で示される。

$$W_i = \frac{\rho g H_1^2}{8} n C \quad \text{etc.、} \quad W_l = \overline{f_z u} \quad (11)$$

運動量流束の場合と同様にしてこれらを定式化した上で(10)式に代入することによって

$$\begin{aligned} & n m \{1-K_r^2 - (1+K_r)^2 e^{-2ms}\} \sinh 2k h = \\ & \frac{l d (1+K_r)^2 \sinh m d}{2} (1 - e^{-2ms}) \{ \sinh 2k(z_1+h) - \sinh 2k(z_2+h) + 2k(z_1-z_2) \} \\ & + \frac{\alpha \varepsilon H_1^4 (1+K_r)^4 k^4}{384 S \sinh^4 k h} (1 - e^{-4ms}) \left\{ \frac{1}{3} \{ \sinh^3 2k(z_2+h) - \sinh^3 2k(z_1+h) \} + \sinh 2k(z_2+h) - \sinh 2k(z_1+h) \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

2.3 透過率、反射率および最大波力

(9)式および(12)式を連立して解くことによって反射率 K_r および波高減衰係数 m を求めることができる。また、透過率はこれらより以下の式で計算される。

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = (1+K_r) \exp(-ms) \quad (13)$$

さらに、構造物に作用する最大波力は、水位差による成分および流体力による成分の和による1次のオーダー量として次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} f_{max} = & \frac{2\rho g l d H_1 (1+K_r)}{m k \cosh k h} \sinh \left(\frac{m d}{2} \right) (1 - e^{-ms}) \{ \sinh k(z_2+h) - \sinh k(z_1+h) \} \\ & + \frac{\alpha \rho g H_1^2 (1+K_r)^2}{16m S \sinh 2k h} (1 - e^{-2ms}) \{ \sinh 2k(z_2+h) - \sinh 2k(z_1+h) + 2k(z_2-z_1) \} \end{aligned} \quad (14)$$

2.4 基礎式の単純化

(9)、(12)式は何れも高次の方程式であり、これを連立して数値近似的に解くことになるが、構造物が重力式の直立消波堤のように水底より水面上まで連続しており、さらに構造物の幅 S が設定波の波長に対して比較的小さい、或いはポーラス材が構造物の一部として用いられるような場合には基礎式はさらに単純化される¹⁾。この場合の詳細については省略するが、(9)、(12)式に対応する結果式を示すと

$$E_i \left(2n - \frac{1}{2} \right) (1+K_r^2 - K_t^2) = \frac{E_i}{2} \{ (1+K_r)^2 - K_t^2 \} + \frac{4\alpha g E_i H_1}{3\pi C^2} K_t^2 \quad (\text{運動量流束の保存}) \quad (15)$$

$$1 - K_r^2 - K_t^2 = \frac{3\alpha \varepsilon g E_1}{2\rho n C^4} K_t^2 \quad (\text{エネルギー流束の保存}) \quad (16)$$

また、透過性構造物においては反射波が比較的小さく、さらに今回取り上げたラセン織條ポーラス材においては、波浪水槽の波消し材として広く使われていることなどを考慮してこれを省略すれば、(15)式より透過率 K_t が解析的に求まり、これをもとに最大波力 f_{max} は下式より求めることができる。

$$K_t = \left\{ \frac{4\alpha g H_1}{3\pi C^2(2n-1)} + 1 \right\}^{-1/2} \quad (17)$$

$$f_{max} = E_1 \left\{ (1 - K_t) \left(\frac{4h}{H_1} + 1 + K_t \right) + 2\alpha K_t^2 n \right\} \quad (18)$$

3. 矩形断面固定浮体への適用

(9), (12)式の妥当性を確かめるために、葦原造成地前面の波消しとして設置予定の浮き式消波施設の縮尺1/2模型を製作して水理実験を行った。

3.1 実験方法

実験は長さ26.5m、幅1.0m、高さ1.5mの波浪水槽を用いて行った。図-2に示すように、造波水槽内に矩形形状(縦100cm、横40cm、高さ25cm)のポーラス材を50cm間隔で2連に設置した。水槽内中央部を水路幅が42.5cmとなるように12mの区間を瀬割り、各ポーラス材は、アクリル板に挟みつけた上でアルミ棒で串刺しにして固定した。これを水槽上部よりステンレス製の支持棒2本で模型上部が水面下2.5cmに沈むように固定した。支持棒には歪ゲージが張り付けてあり、流れ方向及びこれに垂直方向の流体力2成分を分離計測できるようになっている。容量式波高計を模型前方に2基、模型間に1基、後方に1基設置し、前方2基の波高値より合田の方法で入射波を分離した。実験条件を表-1に示す。計測データは何れも50HzでA/D変換後パーソナルコンピュータで解析した。

表-1 実験条件

設定波	
設定水深(h cm)	75
設定周期(T sec)	1.0~3.0
理論波長(L cm)	155~768
入射波高(H _i /L)	2.2~19.9
Steepness(H _i /L)	0.009~0.094
相対水深(h/L)	0.098~0.483
ポーラスメディア	
線材長(l cm/cm ²)	3.01 1.41
線材径(d mm)	1.3 1.5
空隙率(ε ⁻¹)	0.957 0.973

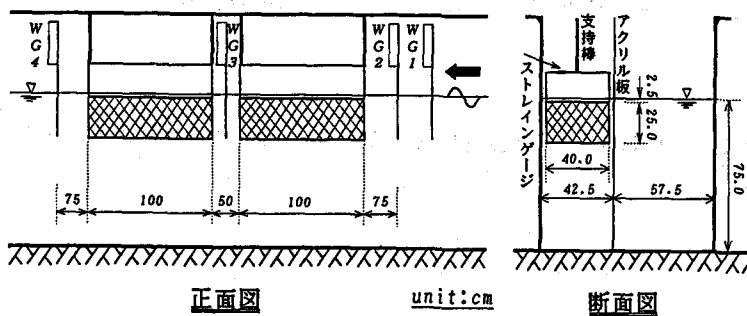


図-2 実験装置

3.2 実験結果

2連の構造物による透過率 K_t 、反射率 K_r の無次元周波数($\sigma^2 h/g$)による変化を示すと図-3となる。

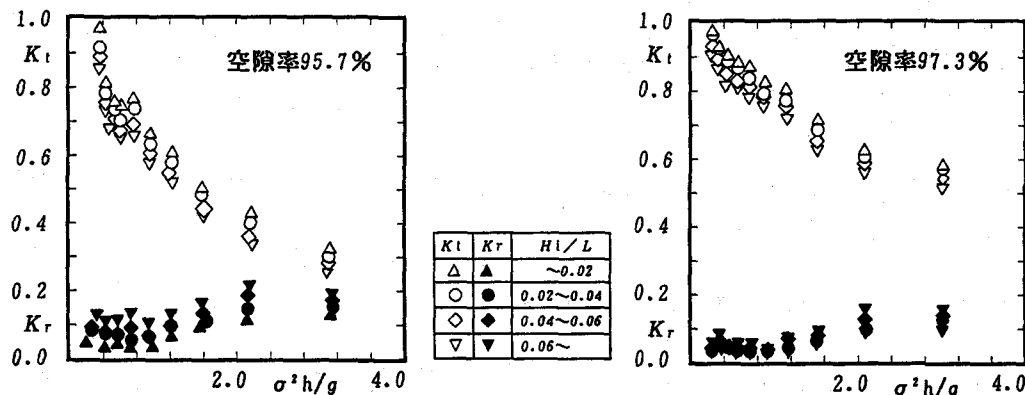


図-3 $K_t \cdot K_r$ の $\sigma^2 h/g$ による変化

これより透過（反射）率は周期の増大とともに増加（減少）する傾向が認められる。また、空隙率の違いは透過率の違いに顕著に現れ、空隙率が高い方が透過率も増大するが、反射率については何れも 0.2 程度以下で小さな値となる。透過率、反射率の理論値を実験値と比較したものが図-4 である。

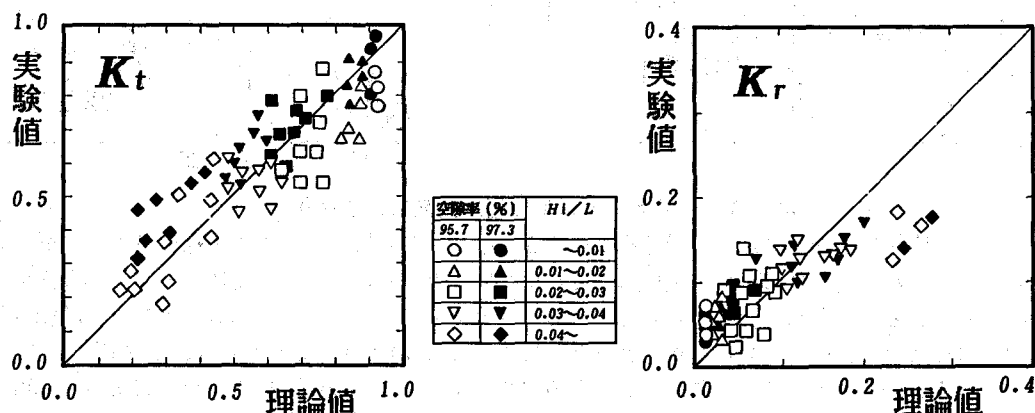


図-4 K_t ・ K_r の理論値と実験値の比較

これより、透過率、反射率ともに理論値に対して実験値は多少のバラツキが認められ、さらに反射率においては Steepness の増大とともに計測値が線形理論よりはずれてくるため理論値がやや大きめに計算されるが、波の推算より考えれば安全側に作用することになる。さらに、実験結果に空隙率による差異は認められないことから、矩形固定浮体としてポーラスメディアを用いた場合の透過率、反射率の推算に(9)、(12)式が有効であることが検証された。

4. 矩形断面柱体への適用

(17)、(18)式の妥当性を確かめるために、設定波の波長に対して波方向の構造物幅の小さい矩形形状のポーラス構造物について水理実験を行った。

4.1 実験方法

上述の波浪水槽を用いて、図-5 に示すように水路中央部に矩形形状のポーラス材構造物を設置した。

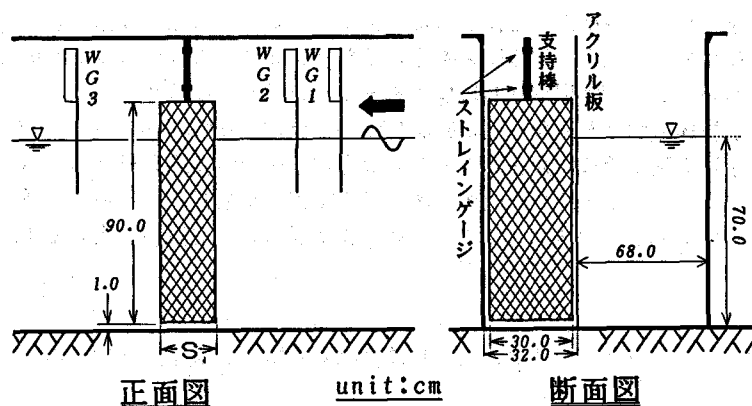


図-5 実験概要図

実験では、水深 h を 70cm、ポーラス材構造物の横幅 B を 30cm に固定し、厚み S を 10cm、20cm、30cm の 3 通りに変化した。ポーラス材は幅 2.0cm のステンレス製矩形枠で四隅を固定し、構造物が直接水槽側壁、底面に接触しない（各 1cm の間隔を保つ）ように枠の上部に 20mm のステンレス製支持棒 2 本を接続し、これを実験台車（水槽に固定）より吊り下げた。支持棒には各 4 枚ずつ歪ゲージを貼り、ブリッジ回路を構成することにより構造物に作用する推力のみを分離計測できるようになっている。実験条件を表-2 に示す。

4.2 実験結果

まず、ポーラス材の波特性について、透過率、反射率の相対波高による変化を周期 $T=1.6, 2.0, 2.4, 2.8$ 秒につ

表-2 実験条件

設定波	
設定水深(h cm)	70
設定周期(T sec)	1.2~3.0
理論波長(L cm)	217~745
入射波高(Hi)	3.0~25.0
Steepness(Hi/L)	0.007~0.075
相対水深(h/L)	0.094~0.323
ポーラスメディア	
線材径(d mm)	1.3
線材長(l cm/cm³)	3.01
空隙率(ϵ^{-1})	0.957

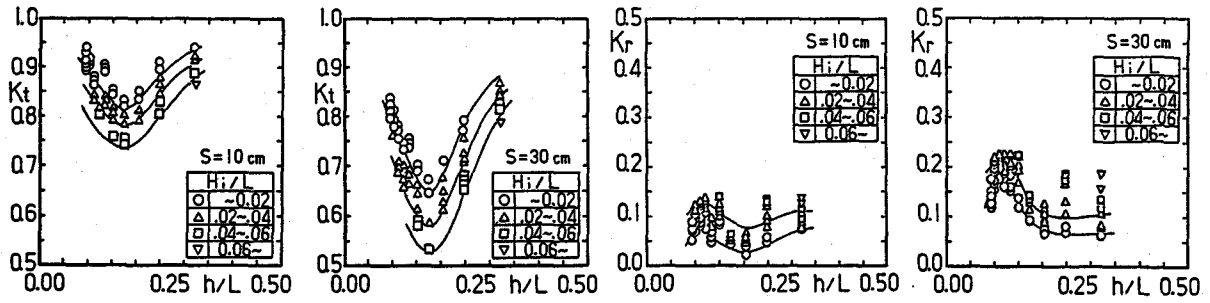


図-6 透過率・反射率の相対波高による変化

これより、周期の変化によらず透過率は構造物の厚み S 、相対波高の増加とともに一様に減少し、反射率は逆の傾向を示すこと、何れの周期においても反射率は0.2程度以下となり、さらに周期によっては最大値に収束しているようにも思われることから、実用上これを無視しても大差無いものと考えられる。実験より計測された透過率 (K_t) および最大波力 (f_{max}) と簡単化された理論式(17)、(18)より計算される理論値 ($K_{t\sim}$ 、 $f_{max\sim}$) とを比較すると図-7、図-8となる。これより、若干のバラツキはあるものの理論式は十分実用に供し得るものと考えられる。

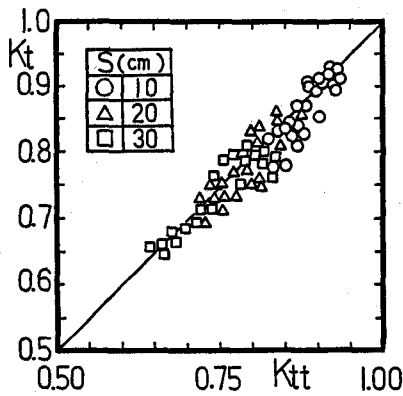


図-7 透過率の理論値と実験値の比較

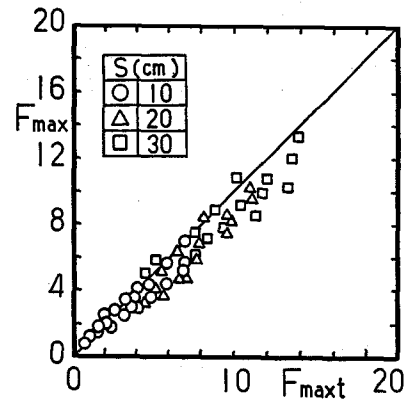


図-8 最大波力の理論値と実験値の比較

6. おわりに

以上にポーラス材を用いた防波、消波構造物の設計に必要な波の透過率、反射率、構造物に作用する最大波力の推算法について実用理論式を導き、これを水理模型実験によって検証した。また、紙面の都合上で今回は触れなかったが、理論式(17)式、(18)式をもとに模型縮尺に関する相似律を導くこともできる¹⁾。これによって、ポーラス材を用いた複雑な形状の消波構造物についても水理模型実験的に検討することが可能となる。

今回、取り上げたポーラス材は、浮体形状、柱体形状ともに反射率は0.2程度以下と自然海浜並みに小さく、さらに海水交換機能を有すると同時に海水との接触面積が極めて大きいことから微生物の接触酸化用資材としても優れており、今後この方面で検討を行うことによって、水質環境の改善・浄化機能を備えた素材として新たな展開が期待される。最後に、本研究に御援助頂いたコーケン香料(株)、新光ナイロン(株)に対し記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 糸刈長敬・瀬戸雅文・邵仙玉・中村充、1992、ポーラスメディアの消波特性に関する研究、海岸工学論文集、第39巻、pp. 606-610.
- 2) 瀬戸雅文・糸刈長敬・邵仙玉・橋本剛・中村充、1993、ポーラスメディアの波特性に関する研究Ⅱ－矩形断面固定浮体への適用－、平成5年度日本水産工学会学術講演会論文集、pp. 171-172.
- 3) 金山和雄・藤原輝男・有木敏幸、1975、透過性構造物内の波の運動に関する研究－特に非定常下の流体抵抗について－、第22回海岸工学講演会論文集、pp. 539-544.
- 4) 近藤 郎・藤間聡、1970、透過性構造物の水理特性、第17回海岸工学講演会論文集、pp. 155-162.
- 5) 中村 充、1991、改訂水産土木学、工業時事通信社、pp. 486-488.