

ラセン織條ポーラス材構造物の水理実験における相似律

邵 仙玉* ・糸 洌長敬** ・橋 本 剛***
 瀬 戸 雅文**** ・大 竹 臣哉***** ・中 村 充*****

1. はじめに

糸洌ら(1992)は消波機能を有するが、海水の透過を阻害しない高ポーラスな素材を停滞水域の港湾や養殖場の外郭消波構造物に用いることを想定し、透過率、最大波力の実用計算式を導いた。ここでは透過率及び最大波力の相似則を導き、実験でその妥当性を検証することを目的とする。

2. 実験方法

実験は東京水産大学所有の波浪水槽を用いて行った。水槽の幅、長さ及び高さはそれぞれ1.0 m, 26.5 m, 1.5 mである。水槽の中央部12 mの区間をアクリル板で水路幅32 cmとなるように背割りをし、矩形状透過性構造物を造波板より11 m離れた所に設置した(図-1)。

相似則の検討には実物実験計測値と模型実験計測値を比較することが望ましいが、現場実験は困難なので幾何学的縮尺の異なる2つの模型を製作し、後で導くファクターを乗じて検討する。以後の議論では便宜上、原型と見なす物をType 1、これの模型をType 2と呼ぶことにする。

これらの規模などは表-1に示すようである。幾何学

的縮尺は2/3である。波の諸元はこの縮尺を基にフルード相似則によって計算される。

ここに、 B, S, h はそれぞれ構造物の横幅、厚みおよび実験水深である。 T は実験波の周期である。また、入射波高 H_i は6~24 cmとした。

容量式波高計は、構造物の前・後方にそれぞれ2基設置した。前方2基の波高計より得たデータをもとに合田の方法によって入射波、反射波に分離し、後方の波高計のデータより透過波を計測分離した。各波に対して、基本周期に対応する入射波高 H_i 、反射波高 H_r 、透過波高 H_t を算出した。

また、流体力測定は次に示すように水平力だけを分離計測できるように工夫した。

図-2(a)に示すように、上端を固定した棒に、二組の歪みゲージを貼り付ける。外力 F が作用した場合、歪みゲージ R_2 と R_4 は伸び、逆に R_1 と R_3 は縮む。その歪み量は曲げモーメントに比例する。 R_1 と R_2 の間の電圧差を e_1 、 R_3 と R_4 の電圧差を e_2 とし、これに対応するゲージの抵抗値変化量を r_1, r_2 とすると

表-1 実験諸元

	B (cm)	S (cm)	h (cm)	T (s)
Type 1	30	30	70	1.00~3.00 (0.20間隔)
Type 2	30	20	47	0.82~2.45 (0.16間隔)

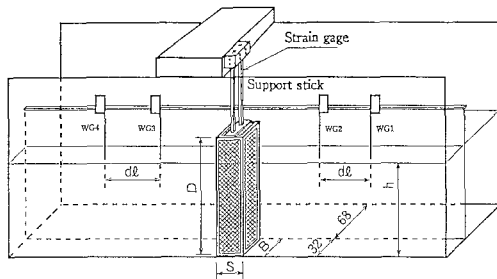


図-1 実験装置

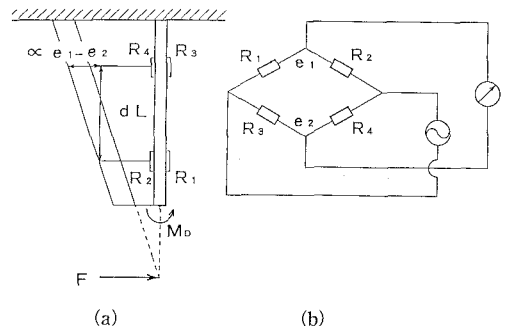


図-2 測定機構

- * 水修 東京水産大学大学院 海洋生産学科
- ** 正会員 農博 東京水産大学助教授 海洋生産学科
- *** 学生会員 東京水産大学大学院 海洋生産学科
- **** 正会員 水博 北海道中央水産試験場
- ***** 正会員 水修 福井県立大学助手 海洋生物資源学科
- ***** 正会員 農博 福井県立大学教授 海洋生物資源学科

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= R + r_1 \\ R_2 &= R - r_1 \\ R_3 &= R + r_2 \\ R_4 &= R - r_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 R はゲージの基本抵抗値とする。

$R_1 \sim R_4$ を図-2(b)のようにブリッジ配線すると R_1 と R_2 及び R_3 と R_4 を流れる電流 I_1, I_2 は次の式で表せる。

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_2}, \quad I_2 = \frac{E}{R_3 + R_4} \dots\dots\dots (2)$$

さらに、 R_1 と R_2 及び R_3 と R_4 の間における電圧差は

$$e_1 = \frac{ER_1}{R_1 + R_2}, \quad e_2 = \frac{ER_3}{R_3 + R_4} \dots\dots\dots (3)$$

となる。したがって入力電圧 E に対する出力電圧 e_0 は

$$\begin{aligned} e_0 &= \left\{ \frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right\} E \\ &= \frac{1}{2R} (r_2 - r_1) \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

となり、出力電圧 e_0 は歪みゲージ量の差 $r_2 - r_1$ に比例することになる。ただし、四つの歪みゲージのゲージ率が同じでなければならない。

図-2(a)のように、 $R_{1,2}, R_{3,4}$ の間隔を dL とし、 dL が一定とすれば、任意の作用点に生じる抗力は、棒端にモーメント (M_0) が生じて、その勾配 ($e_2 - e_1$) は変わらない。故に、

$$F \propto \frac{r_2 - r_1}{dL} \propto (r_2 - r_1) \dots\dots\dots (5)$$

となり、流体力の水平分力が測定できる

3. Scaling factor の誘導

(1) 透過率の Scaling factor

Scaling factor を導く前に、糸洸ら (1992) が導出した透過率の実用計算式を略述する。

図-3 に示すようにポラスメディア構造物の前・後面に検査面 I, II をとり、I, II 面間の流体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の状況は定常であるから、図-3 の記号を用いて

$$S_i - (-S_r) - S_t - \bar{f} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 S_i, S_r, S_t はそれぞれ入射波、反射波、透過波の余剰運動量流束 (Radiation stress)、 \bar{f} は構造物に作用する流体力の波周期平均値、さらに、 \bar{f}_1 を構造物前後の水位差で生じる圧力、 \bar{f}_2 を波が構造物を透過するときの流体の抵抗力とすると、式(6)は

$$S_i - (-S_r) - S_t = \bar{f}_1 + \bar{f}_2 \dots\dots\dots (7)$$

Radiation stress 項は例えば入射波成分については

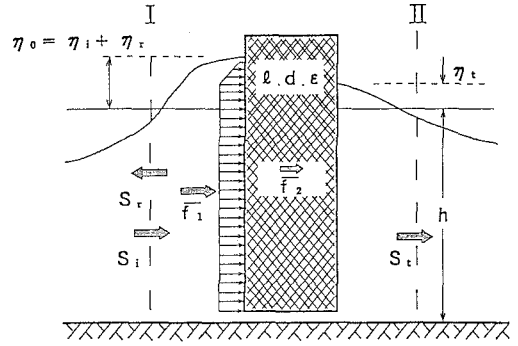


図-3 運動量流束の釣合

$$\left. \begin{aligned} S_i &= E_i (2n - 1/2) \\ E_i &= \rho g H_i^2 / 8 \\ n &= C_c / C = (1 + 2kh / \sinh 2kh) / 2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 E_i 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_i は入射波高、 C, C_c は波の位相速度及びエネルギー速度、 k は波数 ($2\pi/L$)、 L は波長、 h は水深である。

図-3 における前後面圧力差を静水圧で近似すると、実際より若干大きめの値として

$$\begin{aligned} f_i &= (\rho g \eta_i^2) (1 + K_r \cos \theta - K_t) \\ &\quad \times (1 + K_r \cos \theta + K_t + 2h/\eta_i) / 2 \end{aligned}$$

ここに、 θ は反射波の位相遅れ、 η_i は入射波による水位変化であり、正弦波で与えると $\eta_i = H_i \sin(kx - \sigma t)$ 、 σ は角周波数 ($2\pi/T$)、 T は波周期である。従って、

$$\begin{aligned} \bar{f}_i &= \frac{1}{T} \int_0^T f_i dt \\ &= \frac{E_i}{2} [(1 + K_r \cos \theta)^2 - K_t^2] \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

また、最大波力 $f_{i \max}$ は

$$\begin{aligned} f_{i \max} &= (\rho g H_i^2) (1 + K_r \cos \theta - K_t) \\ &\quad \times (1 + K_r \cos \theta + K_t + 4h/H_i) / 8 \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ここに、 K_r, K_t はそれぞれ反射率、透過率を表す。ポラスメディアを構成する線材の直径を d 、単位体積中の線材長さを l とし、超ポラス (空隙率 90% 以上) で線材間の相互作用が少ないとき、線材に作用する抗力に対する仮想質量力の割合は d/H_i のオーダーの微小量 (中村, 1979) となり省略できる。よって f_2 は

$$f_2 = \int_{-h}^h \frac{1}{2} C_D S l d \rho |u| u dz \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 S は構造物の厚さ、 C_D は線材の抗力係数、構造物内の流速 u は流量の連続条件から透過波側の流速

u_t に依存するものとしてポーラスメディアの空隙率の逆数を ϵ とすると

$$\left. \begin{aligned} u &= \epsilon u_t, \quad u_t = K_t a t_i \\ u_t &= \frac{H_i \sigma \cosh k(z+h)}{2 \sinh kh} \sin(kx - \sigma t) \\ \epsilon &= (1 - \pi d^2/4)^{-1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

式(12)を式(11)に代入し、積分して時間平均を取り、

$$\alpha = C_D S l d \epsilon^2 / 2$$

とすると

$$\bar{f}_2 = \frac{1}{T} \int_0^T f_2 dt = \frac{4 \alpha g K_t^2 E_i H_i}{3 \pi C^2} \dots\dots\dots (13)$$

また、 f_2 の最大値 f_{2max} は

$$\begin{aligned} f_{2max} &= \frac{\alpha K_t^2 E_i}{\sinh 2kh} \left\{ 2k \left(\frac{H_i}{2} + h \right) \right. \\ &\quad \left. + \sinh 2k \left(\frac{H_i}{2} + h \right) \right\} \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

運動量流束の保存に関する式(7)に式(8),(9),(13)を代入し、反射波による運動量流束を省略すれば、

$$K_t = \left\{ \frac{2 C_D S l d g \epsilon^2 H_i}{3 \pi (2n-1) C^2} + 1 \right\}^{-1/2} \dots\dots\dots (15)$$

矩形形状構造物を設置する場合、透過率は相似律と関係なく現場における構造物及び波諸要素を透過率の計算式に代入して計算する。さらに、透過率と最大波力との関係式を使って構造物に作用する波力を計算することになる。これらの計算を簡単化するために、ここではヘチマロン#510 (空隙率 $\epsilon^{-1} = 95.7\%$, 線材直径 $d = 1.3 \text{ cm}$, 単位体積の線材長 $l = 3.01 \text{ cm/cm}^3$) という透過性素材を構造物の素材として、透過性構造物の透過率と波諸要素との関係を構造物の厚み毎に計算し、図-4に示す。

ここに、 S は構造物の波方向における厚みで、2~8 m の範囲を 1 m ずつ変化させる。 P は波に関する無次元数で

$$P = g H_i / [(2n-1) C^2]$$

となる。

図-4をさらに普段よく使われる範囲つまり $P < 1.0$ を取り出して拡大すると図-5となる。

先に矩形形状構造物における透過率は直接調べられるようにしたが消波構造物として矩形形状以外のいろいろな形状が考えられ、その場合の透過率を計算するために、相似式が必要となる。

式(13)にFroudeの相似則を適用して、幾何学的縮尺(無歪)を $\lambda = L_m / L_p$ とすると波速 C , 入射波高 H_i , 構造物の厚み S の縮尺はそれぞれ式(16)となる。

$$\left. \begin{aligned} \text{波速} : [C]_r &= [C]_m / [C]_p = \lambda^{-1/2} \\ \text{入射波高} : [H_i]_r &= [H_i]_m / [H_i]_p = \lambda \\ \text{構造物の厚さ} : [S]_r &= [S]_m / [S]_p = \lambda \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

ここに、添字 r は模型 m と実物 P の比を示す。

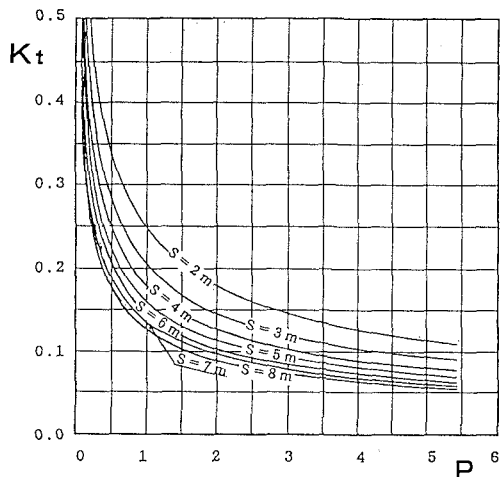


図-4 透過率 K_t と無次元数 P の関係

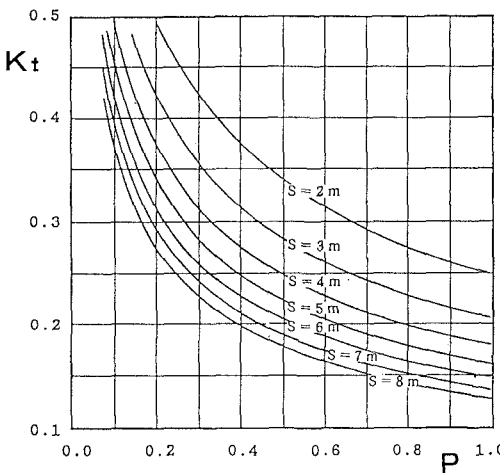


図-5 透過率 K_t と無次元数 P の関係

また実物と模型で同じ材料を用いるため式(17)となる。

$$[C_D l d g \epsilon^2]_r = [A_s]_r = 1 \dots\dots\dots (17)$$

さらに

$$n = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right\}$$

についても歪なしのFroudeの模型であるためその相似係数 $[n]_r$ は式(18)のように得られる。

$$[n]_r = [n]_m / [n]_p = 1 \dots\dots\dots (18)$$

また、

$$A = \frac{2 C_D l d g \epsilon^2}{3 \pi (2n-1)}$$

とすると

$$[A]_r = [A]_m / [A]_p = 1 \dots\dots\dots (19)$$

となる。

いま、実物の透過率を $[K_t]_p$ とすると

$$[K_t]_p = \left\{ \frac{2[A_s]_p[S]_p[H_i]_p}{3\pi(2[n]_p-1)[C]_p^2} + 1 \right\}^{-1/2} \dots\dots\dots (20)$$

のように表すことができる。

式(16)~(19)を式(20)に代入して整理すると

$$[K_t]_p = \left\{ \frac{2[A_s]_m[S]_m[H_i]_m}{3\pi(2[n]_m-1)[C]_m^2\lambda} + 1 \right\}^{-1/2} \dots\dots\dots (21)$$

さらに

$$\frac{[S]_m[H_i]_m}{[C]_m^2} = W_m$$

とおくと、 $[K_t]_p$ は式(22)で表される。

$$[K_t]_p = \left\{ \frac{AW_m}{\lambda} + 1 \right\}^{-1/2} \dots\dots\dots (22)$$

故に透過率の Scaling factor は

$$[K_t]_r = \frac{[K_t]_m}{[K_t]_p} = \left\{ \frac{AW_m/\lambda + 1}{AW_m + 1} \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (23)$$

のように導くことができる。

(2) 最大波力の Scaling factor

構造物に作用する最大波力は式(10)、式(14)より式(24)のように導かれる。

$$\begin{aligned} f_{\max} &= f_{\max 1} + f_{\max 2} \\ &= E_i \left\{ (1 - K_t) \left(\frac{4h}{H_i} + 1 + K_t \right) + \frac{\alpha K_t^2}{\sinh 2kh} \right. \\ &\quad \left. \times \left(2k \left(\frac{H_i}{2} + h \right) + \sinh 2k \left(\frac{H_i}{2} + h \right) \right) \right\} \\ &\dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

さらに、式(24)において $H_i/2 \ll h$ の場合、最大波力は式(25)より計算できる。

$$\begin{aligned} F_{\max} &= \frac{\rho g B H_i^2}{8} \left\{ (1 - K_t) \right. \\ &\quad \left. \times \left(\frac{4h}{H_i} + 1 + K_t \right) + A_r S K_t^2 \right\} \dots\dots\dots (25) \end{aligned}$$

ここに、

$$A_r = C_0 l d e^2 n$$

透過率と同様に、幾何学的縮尺(無歪)を $\lambda = L_m/L_p$ とし、また模型に使った素材は実物と同一のものであるので、 $[A_r]_r$ は式(26)で示される。

$$[A_r]_r = 1 \dots\dots\dots (26)$$

式(25)において、入射波高、構造物の厚み S の縮尺は透過率の場合と同様である。また水の密度 ρ 、構造物の横幅 B および水深 h の縮尺は以下のように表せる。

水の密度 ρ :

$$[\rho]_r = \begin{cases} 1.03 & (\text{海中構造物}) \\ 1.00 & (\text{淡水構造物}) \end{cases} \dots\dots\dots (27)$$

$$\text{構造物の横幅 } B : [B]_r = \lambda$$

$$\text{水深 } h : [h]_r = \lambda$$

さらに、透過率 K_t の Scaling factor $[K_t]_r$ と $[K_t]_m$ で最大波力 $[F_{\max}]_p$ を表すと式(28)となる。

$$\begin{aligned} [F_{\max}]_p &= \left\{ \frac{[\rho]_p g [B]_m [H_i]_m^2}{8\lambda^3} \right. \\ &\quad \times \left\{ \left(1 - \frac{[K_t]_m}{[K_t]_r} \right) \left(\frac{4[h]_m}{[H_i]_m} + 1 + \frac{[K_t]_m}{[K_t]_r} \right) \right. \\ &\quad \left. \left. + A_r \frac{[S]_m}{\lambda} \left(\frac{[K_t]_m}{[K_t]_r} \right)^2 \right\} \right\} \dots\dots\dots (28) \end{aligned}$$

したがって、最大波力の Scaling factor $[F_{\max}]_r$ は式(29)よりもとまる。

$$\begin{aligned} [F_{\max}]_r &= \frac{[F_{\max}]_m}{[F_{\max}]_p} \\ &= [\rho]_r \lambda^3 \frac{D_{1m} \cdot D_{2m} + D_{3m}}{D_{1p} \cdot D_{2p} + D_{3p}} \dots\dots\dots (29) \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned} D_{1m} &= 1 - [K_t]_m \\ D_{2m} &= \frac{4[h]_m}{[H_i]_m} + 1 + [K_t]_m \\ D_{3m} &= A_r \lambda [S]_m [K_t]_m^2 \\ D_{1p} &= 1 - \frac{[K_t]_m}{[K_t]_r} \\ D_{2p} &= \frac{4[h]_m}{[H_i]_m} + 1 + \frac{[K_t]_m}{[K_t]_r} \\ D_{3p} &= A_r \frac{[S]_m}{\lambda} \left(\frac{[K_t]_m}{[K_t]_r} \right)^2 \end{aligned} \dots\dots\dots (30)$$

4. 実験結果

(1) 透過率

Type 2 と Type 1 のポラス線構造物の諸元を用いて相似則の式(23)で Type 2 の透過率と Type 1 の透過率との相似係数 $[K_t]_r$ を計算できる。この係数と Type 2 の実験値を用いて、Type 1 の実験値に対応する理論計算値 K_{t2} が得られる。

Type 1 の実験値 K_{t1} と K_{t2} との関係を周期 1.0 s から 3.0 s までのすべての値をまとめて波形勾配毎に示すと図-6 となる。

ここには示されていないが、周期 1.4 s、1.6 s の場合は相似則で計算された値より Type 1 の方がやや大きくなっているが 1.6 s より大きい場合は理論値と実験値が一致する。

これより、相似式で換算した値は若干小さめであるがほぼ妥当な値を示すものと思われる。

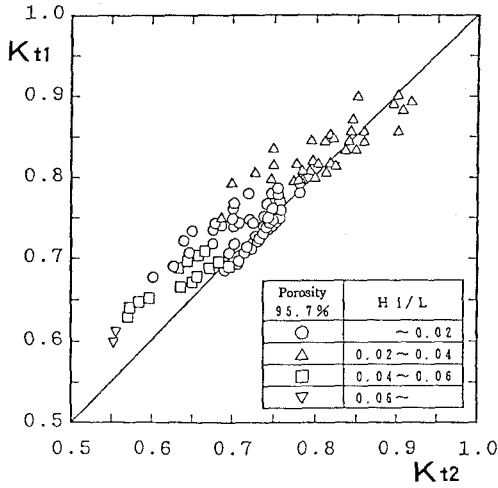


図-6 透過率の比較

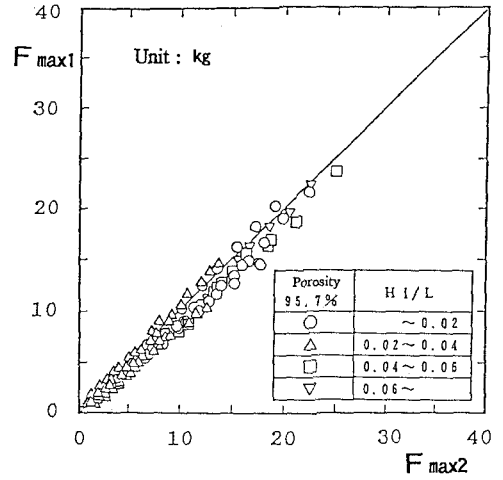


図-7 最大波力の比較

(2) 最大波力

図-7は相似則の式(29)をもちいて透過率と同様に Type 1の最大波力の値と Type 2の実験値からの換算値の比較を示したものである。

これより Type 1の値 F_{max1} と Type 2よりの理論計算値 F_{max2} とはほぼ一致していることがわかる。また、 H_1/L の範囲別からみると H_1/L の値によらず理論値と実験値

とは一致することがわかる。

参考文献

糸渕長敬・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, 海岸論文集, 第39巻, pp. 606-610.
 中村 充 (1979): 水産土木学, 工業時事通信社, pp. 456-457.