

スリット型海域制御構造物の透過率, 反射率 および全波力の解析

萩原 運弘*・藤原 隆男*・宇多 高明**

1. ま え が き

スリット型海域制御構造物は, 海象条件の厳しい沿岸域において海洋性レクリエーション等を可能にする静穏な利用空間を創り出すための直立なスリット壁を有する透過性構造物である。この構造形式では, 透過率だけでなく反射率も同時に小さくし, かつ洗掘を防止するために開口比の異なる三枚のスリット壁が, 有限な吃水深のところまで設置されているところに特徴がある。こうした多重のスリット壁で構成されるカーテンウォール型の透過性構造物は新しい形式であり, 理論的に取り扱った研究例も見当たらない。

著者の一人は既に着底式の透過性構造物に対して, 透過壁での未知の水平流速を導入し積分方程式に帰着して解析する方法を示している¹⁾が, 本研究ではスリット型海域制御構造物の透過率, 反射率および非砕波時波力を解析する方法として, 透過壁以外の部分にも未知の水平流速を導入し, これらも未知関数として積分方程式に帰着して解く方法を提案する。そして透過率, 反射率および非砕波時波力に及ぼす構造条件や波浪条件の影響について検討した結果と本解析法の検証結果について示す。

2. 解析方法

図-1 に示すように, 静水面上に原点O, 入射波の進行方向に x 軸, 鉛直上向きに z 軸をとり, $x=0, l_1$ および l_2 の位置に, 吃水深が $z=-d$ である壁厚 b の透過壁が設置されているものとする。流体域を(I)~(IV)に分け, 周波数 σ の波が入射する場合を考える。完全流体の微小幅波に対して各領域での速度ポテンシャルを $\phi_r(x, z; t) = \phi_r(x, z) e^{i\sigma t}$ ($r=1, 2, 3, 4$) と表せば, ϕ_r は次のようになる。

$$\begin{aligned} \phi_1 &= (\bar{A} e^{-ikx} + \bar{B} e^{ikx}) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \bar{C}_n e^{k_n x} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \dots\dots\dots (1) \\ \phi_2 &= \left\{ \bar{D} \frac{\cos k(x-l_1)}{\cos kl_1} + \bar{E} \frac{\sin k(x-l_1)}{\sin kl_1} \right\} \end{aligned}$$

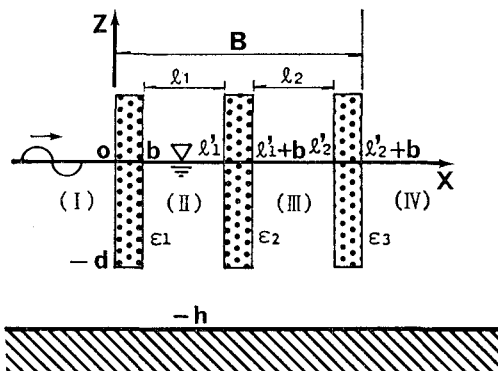


図-1 構造と座標系

$$\begin{aligned} &\times \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \bar{F}_n \frac{\cosh k_n(x-l_1)}{\cosh k_n l_1} \right. \\ &+ \bar{G}_n \frac{\sinh k_n(x-l_1)}{\sinh k_n l_1} \left. \right\} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \dots (2) \\ \phi_3 &= \left\{ \bar{H} \frac{\cos k(x-l_2)}{\cos kl_2} + \bar{I} \frac{\sin k(x-l_2)}{\sin kl_2} \right\} \\ &\times \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \bar{J}_n \frac{\cosh k_n(x-l_2)}{\cosh k_n l_2} \right. \\ &+ \bar{K}_n \frac{\sinh k_n(x-l_2)}{\sinh k_n l_2} \left. \right\} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \dots (3) \\ \phi_4 &= \bar{L} e^{-ik(x-l_2-b)} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \bar{M}_n e^{-k_n(x-l_2-b)} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \dots (4) \end{aligned}$$

ここに, $\bar{A}$: 入射波で既知, また $\bar{B}$: 反射波, $\bar{L}$: 透過波, $\bar{D}, \bar{E}, \bar{H}$ および $\bar{I}$: 定常波, $\bar{C}_n, \bar{F}_n, \bar{G}_n, \bar{J}_n, \bar{K}_n$ および $\bar{M}_n$: 散乱波を表す複素定数であり, 未知数である。さらに, l_1, l_2 : 遊水室幅であり, k, k_n は次式で決まる固有値である。

$$\sigma^2 = gk \tanh kh = -gk_n \tanh k_n h$$

g : 重力の加速度, $n: 1, 2, \dots$ (5)

さて, 各透過壁 ($-d < z < 0$) の開口部および各透過壁と水底間 ($-h < z < -d$) での水平流速を $U_s(z)$ ($s=1, 2, 3$) とすれば, 流量の連続性より次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} U_s(z) &= \frac{1}{\varepsilon_s} \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \bigg|_{x=l_{s-1}} = \frac{1}{\varepsilon_s} \frac{\partial \phi_{s+1}}{\partial x} \bigg|_{x=l_s-1+b} \\ &(-d < z < 0) \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

* 正会員 工修 清水建設(株)技術研究所

** 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長

$$U_s(z) = \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \Big|_{x=l'_s-1} = \frac{\partial \phi_{s+1}}{\partial x} \Big|_{x=l'_s-1+b} \quad (-h < z < -d) \dots\dots\dots (7)$$

ここに, ε_s は透過壁の開孔比であり, また $l'_0=0$ である.

一方, 透過壁および透過壁と水底間に運動量保存則を適用すれば次式が成り立つ.

$$P_s - P_{s-1} = \rho \left\{ \frac{1}{2} C_s^* \left| U_s e^{iat} \right| U_s e^{iat} + \frac{\partial}{\partial t} (U_s e^{iat}) \right\} \quad (-d < z < 0) \dots\dots\dots (8)$$

$$P_s - P_{s-1} = 0 \quad (-h < z < -d) \dots\dots\dots (9)$$

ここに, $s=1, 2, 3$ で P_s : 流体圧力, ρ : 流体密度である. また, C_s^* および L_s^* は透過壁の損失係数と見掛けのオリフィス長さであるが, これらは波力算定式中の抗力係数 D_{Ds} および質量係数 C_{Ms} を用いれば, 次のように関係づけられる²⁾.

$$\left. \begin{aligned} C_s^* &= C_{Ds}(1 - \varepsilon_s) \\ L_s^* &= \varepsilon_s [1 + C_{Ms}(1 + \varepsilon_s)/\varepsilon_s] b \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

上式の抗力係数や質量係数は透過壁の構造形状に応じて実験的に求める必要があるが, スリット型海域制御構造物の場合には, 模型実験結果からスリット壁での C_{Ds} および C_{Ms} を次のように定式化した.

$$\left. \begin{aligned} C_{Ds} &= 11.14(h/L)\sqrt{\varepsilon_s(1 - \varepsilon_s)} \\ C_{Ms} &= 0.247/(1 - \varepsilon_s)^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

ここに, L は波長である.

式(8)の非線形抵抗項を線形抵抗項で置き換えた後, 式(8)および式(9)を速度ポテンシャルを用いて表すとそれぞれ次のようになる.

$$\phi_{s+1}|_{x=l'_s-1+b} - \phi_s|_{x=l'_s-1} + \beta_s \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \Big|_{x=l'_s-1} = 0 \quad (-d < z < 0) \dots\dots\dots (12)$$

$$\phi_{s+1}|_{x=l'_s-1+b} - \phi_s|_{x=l'_s-1} = 0 \quad (-h < z < -d) \dots\dots\dots (13)$$

ただし, $s=1, 2, 3$ であり, β_s は次式で定義される.

$$\beta_s = \frac{1}{\varepsilon_s} \left(i \frac{\gamma_s^*}{\sigma} - L_s^* \right) \dots\dots\dots (14)$$

ここに, γ_s^* は線形抵抗係数 ($= 4C_s^* U_{s0}/3\pi$), U_{s0} は最大流速振幅である.

計算手順の詳細については紙面の都合上省略せざるえないが, まず式(6), (7)の境界条件に式(1)~(4)の速度ポテンシャルを代入し, 各項に $\cosh k(z+h)$ あるいは $\cos k_n(z+h)$ を乗じて各々の区間で積分して加え合わせるにより, 未定複素定数 $U_s(z)$ を用いて表す. 次に, これらを, もう一方の境界条件式(12), (13)に代入して z の変域を考慮して加え合わせて整理すると, 最終的に次のような第1種 Fredholm 型の連立積分方程式を得る.

$$\left. \begin{aligned} & \int_{-d}^0 \varepsilon_1 R_1(z, \xi) U_1(\xi) d\xi + \int_{-h}^{-d} R_1^*(z, \xi) U_1(\xi) d\xi \\ & + \int_{-d}^0 \varepsilon_2 R_2(z, \xi) U_2(\xi) d\xi + \int_{-h}^{-d} R_2^*(z, \xi) U_2(\xi) d\xi \\ & = \bar{A} f(z) \\ & \int_{-d}^0 \varepsilon_1 S_1(z, \xi) U_1(\xi) d\xi + \int_{-h}^{-d} S_1(z, \xi) U_1(\xi) d\xi \\ & + \int_{-d}^0 \varepsilon_2 S_2(z, \xi) U_2(\xi) d\xi + \int_{-h}^{-d} S_2^*(z, \xi) U_2(\xi) d\xi \\ & + \int_{-d}^0 \varepsilon_3 S_3(z, \xi) U_3(\xi) d\xi + \int_{-h}^{-d} S_3^*(z, \xi) U_3(\xi) d\xi \\ & = 0 \\ & \int_{-d}^0 \varepsilon_2 T_2(z, \xi) U_2(\xi) d\xi + \int_{-h}^{-d} T_2(z, \xi) U_2(\xi) d\xi \\ & + \int_{-d}^0 \varepsilon_3 T_3(z, \xi) U_3(\xi) d\xi + \int_{-h}^{-d} T_3^*(z, \xi) U_3(\xi) d\xi \\ & = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

ここに,

$$\begin{aligned} f(z) &= \frac{2 \cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ R_1(z, \xi) &= \frac{i + k\beta_1 + \cot kl_1}{N_0 \cosh kh} \cosh k(z+h) \\ &\quad \times \cosh k(\xi+h) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - k_n\beta_1 + \coth knl_1}{N_n \cos knh} \\ &\quad \times \cos k_n(z+h) \cos k_n(\xi+h) \\ R_2(z, \xi) &= -\frac{\operatorname{cosec} kl_1}{N_0 \cosh kh} \cosh k(z+h) \\ &\quad \times \cosh k(\xi+h) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\operatorname{cosech} knl_1}{N_n \cos knh} \\ &\quad \times \cos k_n(z+h) \cos k_n(\xi+h) \\ S_1(z, \xi) &= R_2(z, \xi) \\ S_2(z, \xi) &= \frac{k\beta_2 + \cot kl_1 + \cot kl_2}{N_0 \cosh kh} \\ &\quad \times \cosh k(z+h) \cosh k(\xi+h) \\ &\quad + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{kn\beta_2 - \coth knl_1 - \coth knl_2}{N_n \cos knh} \\ &\quad \times \cos k_n(z+h) \cos k_n(\xi+h) \\ S_3(z, \xi) &= -\frac{\operatorname{cosec} kl_2}{N_0 \cosh kh} \cosh k(z+h) \\ &\quad \times \cosh k(\xi+h) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\operatorname{cosech} knl_2}{N_n \cos knh} \\ &\quad \times \cos k_n(z+h) \cos k_n(\xi+h) \\ T_2(z, \xi) &= S_3(z, \xi) \\ T_3(z, \xi) &= \frac{i + k\beta_3 + \cot kl_2}{N_0 \cosh kh} \\ &\quad \times \cosh k(z+h) \cosh k(\xi+h) \\ &\quad - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - kn\beta_3 + \coth knl_2}{N_n \cos knh} \\ &\quad \times \cos k_n(z+h) \cos k_n(\xi+h) \end{aligned}$$

また、 $R_1^*(z, \xi)$, $S_2^*(z, \xi)$ および $T_3^*(z, \xi)$ は、それぞれ $R_1(z, \xi)$, $S_2(z, \xi)$ および $T_3(z, \xi)$ において $\beta_s=0$ ($s=1, 2, 3$) と置いたものに等しい。さらに、 N_0, N_n は次式で定義されるものである。

$$N_0 = \frac{\sinh 2kh + 2kh}{4 \cosh kh}, \quad N_n = \frac{\sin 2k_n h + 2k_n h}{4 \cos k_n h}$$

式(15)の左辺を数値積分することにより、 $U_s(z)$ を求める。なお、定数 $\bar{A}$ は入射波を $\eta = (H_i/2)\cos(kx - \sigma t)$ と表せば、 $\bar{A} = iH_i g/2\sigma$ で与えられる。 $U_s(z)$ が求まると未定複素定数が決まり、透過率 K_T 、反射率 K_R および速度ポテンシャル ϕ_r ($r=1, 2, 3, 4$) が計算できる。なお、スリット型海域制御構造物全体に作用する水平波力は各壁面に作用する波力の合成和として求めるものとし、壁面に作用する波圧強度を次式より算定する。

$$p = -\rho g z + \rho g \zeta \left\{ 1 + \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} - \frac{\cosh k(\zeta+h)}{\cosh kh} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

ここに、 p : 波圧強度、 ζ : 壁面における表面水位である。

3. 透過率、反射率および全波力の計算結果

スリット型海域制御構造物の透過率 K_T 、反射率 K_R および水平全波力 F_X は次に示す無次元パラメータに支配される。

$$K_T, K_R, F_X = f(H_i/L, h/L, B/L, l_1/l_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, d/h, b/L) \dots\dots (17)$$

ただし、本論文では遊水室の広さは等しく、かつスリット壁の壁厚は波長に比べて十分小さいものとし l_1, l_2 および b/L については議論しない。

(1) 透過率、反射率

$H_i/L=0.03$, $h/L=0.141$, $d/h=0.8$ の条件での透過率 K_T と反射率 K_R を、 B/L に対して示したのが図-2 である。図中のパラメータは ε_s の組み合わせに対応したもので、①は②より ε_2 が、②は③より ε_3 が、さらに④は③より ε_1 が小さい場合であり、また②は④に比べて ε_1 は大きい、 ε_3 が小さい場合である。 K_T については、いずれの開口比の組み合わせに対しても $B/L \approx 0.15$ 程度で極大値をとる傾向を示し、全体的に①、②、④、③の順に小さくなっている。すなわち、 K_T を低減させるためには ε_3 を小さくする必要がある。一方 K_R については、いずれの開口比の組み合わせに対しても $B/L \approx 0.25$ 程度で極小値をとる傾向を示し、全体的に②の場合が他の場合に比べて小さくなっている。すなわち K_R の低減のためには、波長に対して適切な堤体幅を選び、開口比の組み合わせを $\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \varepsilon_3$ にすればよい。次に図-3 に、 $H_i/L=0.03$, $h/L=0.141$, $\varepsilon_1=0.3$, $\varepsilon_2=0.2$, $\varepsilon_3=0.1$ の条件で、 $d/h=0.6, 0.7, 0.8$ および

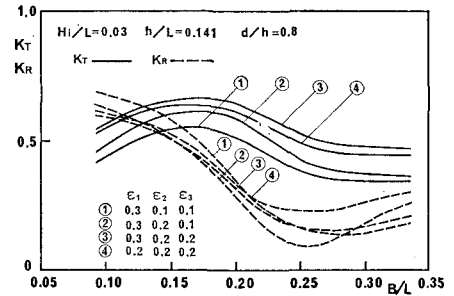


図-2 透過率・反射率に及ぼす開口比と相対幅の影響

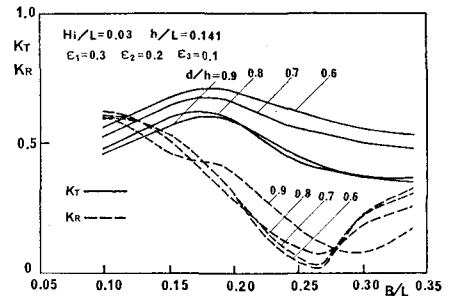


図-3 透過率・反射率に及ぼす吃水比の影響

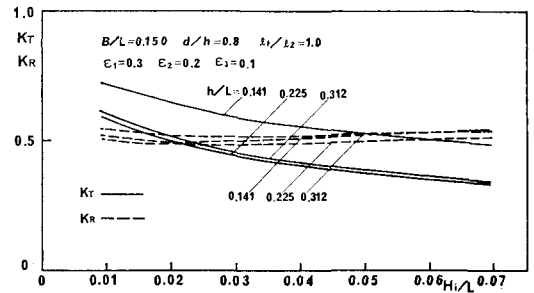


図-4 透過率・反射率に及ぼす波形勾配と相対水深の影響

0.9 の場合の K_T と K_R を、 B/L に対して示す。 d/h が変化しても K_R には顕著な相違は認められないが、 K_T は $d/h=0.8$ 程度までは、 d/h が大きくなるにつれて減少するようになる。したがって、 K_T を小さくするためには d/h をある程度大きくとり、通過する波エネルギーを阻止する面積を大きくする必要がある。また図-4 には、 $B/L=0.15$, $\varepsilon_1=0.3$, $\varepsilon_2=0.2$, $\varepsilon_3=0.1$, $d/h=0.8$ の場合に K_T , K_R と H_i/L , h/L との関係を示す。 K_R については H_i/L や h/L に対して顕著な変化は認められないが、 K_T は H_i/L が大きくなると緩やかに減少する傾向を示し、また長波性の強い $h/L=0.1$ の値が大きくなっている。

(2) 全波力

$H_i/L=0.03$, $h/L=0.207$, $\varepsilon_1=0.3$, $\varepsilon_2=0.2$, $\varepsilon_3=0.1$ の条件で、 $d/h=0.7, 0.8$ および 0.9 の場合の無次元

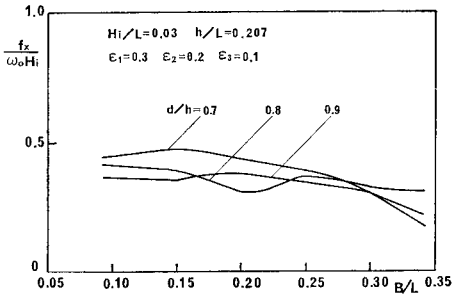


図-5 波力係数に及ぼす吃水比の影響

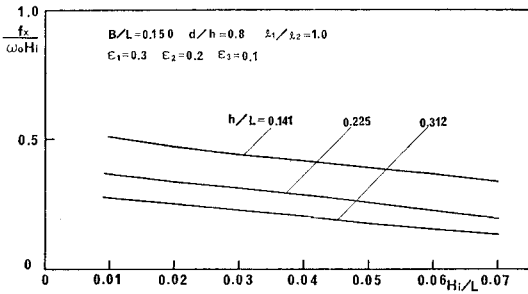


図-6 波力係数に及ぼす波形勾配と相対水深の影響

波力強度 f_x/w_0H_i を B/L に対して示したものが図-5 である。ここに、 $f_x = F_x/D(\eta+d)$ であり、 D : 構造物法線方向幅、 η : 波力の作用高さ、 w_0 : 水の単位積重量である。 f_x が全波力を水深方向の平均した値であるため、 $d/h=0.7$ での f_x/w_0H_i の値は $d/h=0.8, 0.9$ のそれに比べて大きくなる傾向を示す。また B/L に対しては f_x/w_0H_i の値に若干変動が見られるが、全体的には B/L が大きくなるにつれて減少する傾向が認められる。次に、 $B/L=0.15, \epsilon_1=0.3, \epsilon_2=0.2, \epsilon_3=0.1, d/h=0.8$ の条件での f_x/w_0H_i と $H_i/L, h/L$ との関係を図-6 に示す。 H_i/L が大きい急峻な波形勾配をもつ波ほど、また h/L が小さく長波性の強い波ほど f_x/w_0H_i の値は大きくなっている。一方、開口比 ϵ_s ($s=1, 2, 3$) の影響についてはここでは示さないが、 $\epsilon_1=\epsilon_2=\epsilon_3$ の場合には ϵ_s が小さいほど f_x/w_0H_i は大きく、また $\epsilon_1=0.3, \epsilon_2=0.2, \epsilon_3=0.1$ と $\epsilon_1=0.2, \epsilon_2=0.2, \epsilon_3=0.2$ では、ほぼ同程度の f_x/w_0H_i の値をとることを付記しておく。

4. 模型実験による検証

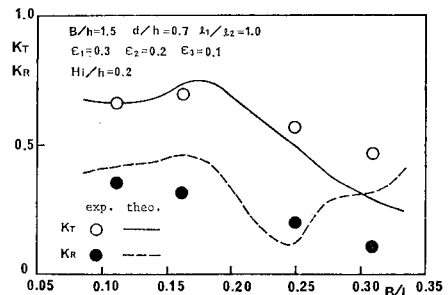
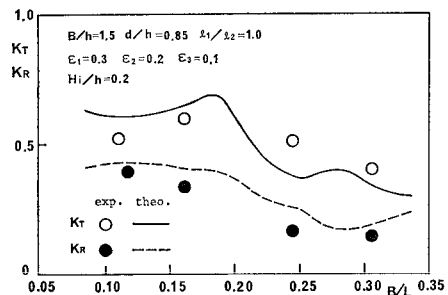
(1) 実験方法

実験は、長さ 142 m、幅 0.6 m、高さ 1.4 m の二次元水路に 1/50 の斜面とそれに続く長さ 10 m の水平床をつくり、造波板から 123 m 離れた水平床上に模型を設置して消波特性実験³⁾と全波力実験⁴⁾を別々に実施した。いずれの実験においても木製の模型を使用し、堤体幅 $B=0.6$ m、壁厚 $b=0.06$ m、水路方向幅 $D=0.585$

m、遊水室幅比 $l_1/l_2=1.0$ 、開口比 $\epsilon_1=0.3, \epsilon_2=0.2, \epsilon_3=0.1$ を一定とし、各波浪条件に対して吃水比を $d/h=0.7, 0.85$ の二種類変化させた。また、模型設置地点の水深も $h=0.4$ m 一定とした。理論の検証のために用いた波浪条件は、消波特性実験では波高 $H_i=8$ cm の一種類、周期 $T=1.2, 1.4, 2.0, 2.8$ 秒の四種類である。そして入射波および反射波を模型の沖側 5 m に、また透過波を模型の岸側 10 m に取り付けけた各々 2 台の波高計の記録から入・反射波分離推定法⁵⁾により求めた。一方、全波力実験での波浪条件は波高 $H_i=12$ cm の一種類、周期は $T=1.6, 2.0, 2.8$ 秒の三種類であり、模型に作用する水平全波力は模型上端に取り付けた三分力計により検出した。

(2) 実験結果との比較

$d/h=0.7$ および 0.85 の場合の K_T, K_R の実験結果と計算結果の比較を図-7、図-8 に示す。この場合周期を変化させているため、 B/L だけでなく h/L や H_i/L が同時に変化していることに注意する必要がある。 $d/h=0.7$ および 0.85 の場合とも K_T の計算値は $B/L < 0.18$ では大差はなく、 $B/L=0.18$ 前後で極大値をとった後、 B/L の増加とともに減少する傾向を示す。これは、前述したように B/L が大きくなるにつれて h/L や H_i/L を同時に大きくなるためである。実験値の個数は少ないが、全体的な傾向は両者とも比較的類似している。

図-7 透過率・反射率の実験結果との比較 ($d/h=0.7$ の場合)図-8 透過率・反射率の実験結果との比較 ($d/h=0.85$ の場合)

一方 K_R については、計算値は $d/h=0.7$ および 0.85 の場合ともスリット壁でのエネルギー損失と遊水室での位相効果が最も発揮される $B/L=0.25$ 前後で最小値をとる傾向を示す。そして $d/h=0.7$ のように吃水深が浅い場合には、長波性が強くなる B/L すなわち h/L が小さい範囲で K_R は再び減少する傾向を示す。実験値の個数が少ないため、実験結果には計算値のような急激な変化は認められないが、 $d/h=0.7$ の場合の $B/L=0.305$ の実験値を除けば両者の傾向は比較よく類似している。また、 K_R の計算値は実験値よりも若干大きい傾向を示す。次に、 $d/h=0.7$ と 0.85 の場合の f_x/w_0H_i の計算結果と実験結果を比較して図-9 に示す。計算値および実験値とも B/L が大きい、すなわち周期の短い波ほど f_x/w_0H_i は小さくなる傾向を示すが、実験値の減少割合は計算値に比べて急激であり、 B/L が小さい、すなわち周期の長い波では両者の差異が大きくなっている。また全体的に実験値の大きいことが認められる。スリット型海域制御構造物のようにカーテンウォール型の透過性構造物の透過壁周辺の水 flow の動きは渦の発

生等により非常に複雑であることは実験中にも観察され、中村ら⁶⁾ も指摘しているように長周期の波ほど透過壁前後の波圧分布に堤体下端部からの剝離流れの影響が強く及ぼされ、ポテンシャル理論による計算結果との差異が大きくなったものと考えられる。

5. あとがき

本研究では、まずカーテンウォール型の透過性構造物に対して、透過壁および透過壁・水底間に未知の水平流速を導入し積分方程式に帰着して透過率、反射率および速度ポテンシャルを求める解析方法を示した。次に、本解析法を適用して、透過率、反射率および全波力に及ぼす相対幅、開口比、吃水比、波形勾配、相対水深の影響について検討し、透過率の低減には開口比と吃水比を、また反射率の低減には相対幅と開口比を適切に選択することが重要であることを示した。最後に、計算結果を模型実験結果と比較することにより、本解析法の妥当性を確かめた。

参考文献

- 1) 萩原運弘：多重円筒型防波堤の反射率・透過率の解析と諸要因の影響，土木学会論文集，第363号/II-4，pp. 185～194，1985。
- 2) 前出 1)。
- 3) 宇多高明他：海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書 (1)，土木研究所資料，No. 2454，pp. 47～88，1987。
- 4) 宇多高明他：海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書 (4)，土木研究所資料，No. 2577，pp. 53～81，1988。
- 5) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 始：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，No. 248，pp. 1～24，1976。
- 6) 中村孝幸・久保達郎・福島隆史：カーテン防波堤まわりのはく離流れと作用波力の特性について，第34回海岸工学講演会論文集，pp. 556～560，1987。

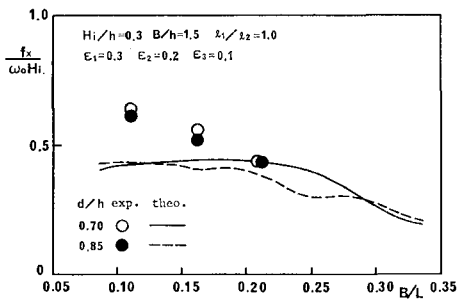


図-9 波力係数の実験結果との比較