

# 斜板とスリット板を複合した 消波構造物の実験的研究

Experimental research of wave energy dissipating structure with multi slit walls and slant-ceiling panel

宇津野秀夫<sup>1</sup>・片岡保人<sup>2</sup>・竹鼻直人<sup>3</sup>・奥村昌好<sup>3</sup>・榎原健男<sup>4</sup>

Hideo UTSUNO, Yasuto KATAOKA, Naoto TAKEHANA,  
Masayoshi OKUMURA, Takeo SAKAKIBARA

<sup>1</sup>正会員 工博 (株) 神戸製鋼所 機械研究所振動音響研究室 (〒651-2271 神戸市西区高塚台 1-5-5)

<sup>2</sup>正会員 工博 (株) 神戸製鋼所 機械研究所 (〒651-2271 神戸市西区高塚台 1-5-5)

<sup>3</sup>正会員 工修 (株) 神戸製鋼所 構造技術部 (〒657-0845 神戸市灘区岩屋中町 4-4-8)

<sup>4</sup> (株) コベルコ科研 エンジニアリング オフィス事業部 振音流動技術室(〒660-0083 尼崎市道意町 6-32)

Wave energy dissipating structures with multi slit walls and a slant-ceiling panel are studied experimentally. Wave transmission coefficient, wave reflection coefficient, and wave set-up are measured in 2-dimensional channel. Wave energy dissipating capacity of the hybrid structure presented are compared with that of rock mound artificial reef, with that of pre-cast concrete block mound artificial reef, and wave energy dissipating structure with slant ceiling panel. The present structure is more compact than those of structures compared, to achieve similar wave energy dissipating capacity. Four-sensor technique is also discussed to identify transfer matrix of slit walls. Wave energy dissipating capacity of the multi-slit walls are calculated using transfer matrix identified and compared with experiment s. Good agreements suggest that wave energy dissipating structure with multi-slit walls can be predicted using transfer matrix without wave overtopping condition.

*Key Words* : wave dissipating structure, wave setup, wave transmission coefficient, artificial reef

## 1. はじめに

マリン・マルチ・ゾーン構想<sup>1)</sup>に基づき、静穏な海域を創出する目的で、多数の海域制御構造物が提案されている。これらの構造物には、スリット式や斜板式、潜堤式などがあるが、図1に示す様に斜板とスリット板を複合した消波構造は提案されていない様である。同消波構造は、斜板で海面付近の波を、3列のスリット板で海面下部の波を減衰する機能があり、幅方向にも高さ方向にもコンパクトな構造で優れた消波性能を実現すると期待される。そこで本研究では、斜板とスリット板を複合した消波工の消波性能を二次元水槽を用いて測定し、望ましい形状を検討すると共に、異型ブロック消波工データや斜板式消波工データと比較することを目的とする。

本論文では、まず始めにスリット板の前側2点、

後側2点の計4点で同時に波高を計測し、種々のスリット板の伝達行列を同定した。次に同定した伝達行列を用い、2列および3列の多層スリット板の透過率と反射率を計算し、実験と比較して多層スリット消波工の消波性能を計算できることを確認した。

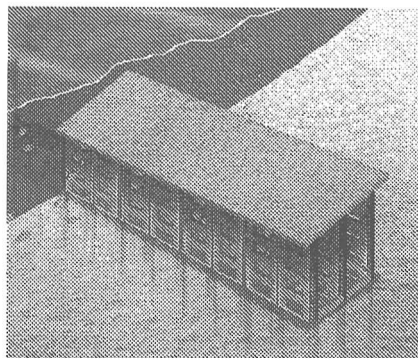


図-1 斜板とスリット板を複合した消波構造

続いてスリット板の上部を越波する波を抑制する目的で、スリット板の上部に斜板を設けた消波工模型を作製し、各種の波浪条件で透過率、反射率、ウェーブセットアップを測定した。最後に提案する消波工の測定結果を、石積み人工リーフ、異形ブロック人工リーフ、斜板式消波工と比較した。

## 2. スリット板の伝達行列

### (1) 一定水深の水路の伝達行列

水深  $h$  の水路において、距離  $s$  はなれた 2 点間の水面変動と粒子速度の関係式を導く。微小振幅波理論を前提に、水面変動  $\eta$  を正弦状の進行波と反射波の和とする。

$$\eta = A_1 \exp[i(\sigma t - kx)] + A_2 \exp[i(\sigma t + kx)] \quad (1)$$

ここで  $A_1, A_2$  は進行波と反射波の振幅を意味する未定係数である。  $x=0, s$  における重複波の水面変動をそれぞれ  $\eta_A, \eta_B$  とすると

$$\eta_A = [A_1 + A_2] \exp(i\sigma t) \quad (2)$$

$$\eta_B = [A_1 \exp(-iks) + A_2 \exp(iks)] \exp(i\sigma t) \quad (3)$$

ここで、 $\sigma$  は角周波数、 $k$  は波数、 $C$  は波速であり、重力加速度  $g$  を使用して、次の関係にある。

$$k = \frac{\sigma}{C}, \quad C = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kh} \quad (4), (5)$$

速度ポテンシャル  $\phi$  を用いると、水平方向粒子速度  $u$  と、水面変動  $\eta$  は次式で関係づけられる。

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_{z=0} + g\eta = 0 \quad (6), (7)$$

上式より、水面  $z=0$  における粒子速度  $u$  と水面変動  $\eta$  との間に次式の関係が成り立つ。

$$u = -g \int \frac{\partial \eta}{\partial x} dt = \frac{g}{C} [A_1 \exp(-ikx) - A_2 \exp(ikx)] \exp(i\sigma t) \quad (8)$$

水面変動と同様に 2 点の粒子速度の重複波は次式となる。

$$u_A = \frac{g}{C} [A_1 - A_2] \exp(i\sigma t) \quad (9)$$

$$u_B = \frac{g}{C} [A_1 \exp(-iks) - A_2 \exp(iks)] \exp(i\sigma t) \quad (10)$$

式(2),(3),(9),(10)より、未定係数  $A_1, A_2$  を消去すると、最終的に Neumann<sup>2)</sup> と同じ伝達行列を得る。

$$\begin{pmatrix} \eta_A \\ u_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos ks & \frac{iC}{g} \sin ks \\ \frac{ig}{C} \sin ks & \cos ks \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta_B \\ u_B \end{pmatrix} \quad (11)$$

### (2) 4 点波高計測<sup>3)</sup>による伝達行列の同定

図 2 に示す水路において、間隔が  $s_1$  および  $s_0$  離れた点 1A, 1B, 1 の 3 点を考える。各点の水面変動と粒子速度は、前節の伝達行列表記(11)を用いて、次の関係が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} \eta_{1A} \\ u_{1A} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos ks_1 & \frac{iC}{g} \sin ks_1 \\ \frac{ig}{C} \sin ks_1 & \cos ks_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta_{1B} \\ u_{1B} \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{pmatrix} \eta_B \\ u_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos ks_0 & \frac{iC}{g} \sin ks_0 \\ \frac{ig}{C} \sin ks_0 & \cos ks_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta_1 \\ u_1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

両式を変形すると、点 1A, 1B における水面変動を用いて、点 1 の水面変動と粒子速度とを次式で表すことができる。

$$\eta_1 = \eta_{1A} \left\{ \frac{\eta_{1B}}{\eta_{1A}} \frac{\sin k(s_1 + s_0)}{\sin ks_1} - \frac{\sin ks_0}{\sin ks_1} \right\} \quad (14)$$

$$u_1 = \eta_{1A} \frac{ig}{C} \left\{ \frac{\eta_{1B}}{\eta_{1A}} \frac{\cos k(s_1 + s_0)}{\sin ks_1} - \frac{\cos ks_0}{\sin ks_1} \right\} \quad (15)$$

点 1 を消波工前面にとれば、消波工前面の水面変動と粒子速度とを算定することになる。また消波工浜側の水域で、2 点の水面変動を測定すれば、消波工後面の水面変動と粒子速度とを算定することができる。ただし消波工前後では、波が水路幅方向に完全に一様とは限らないため、本計算値は一様な領域の値から外挿した値と理解すべきである。

### (3) スリット板の伝達行列

文献<sup>4)</sup>を参考に、スリット板消波工の波動伝播特性を整理する。波長に比べて十分に薄い板厚のスリット板消波工の伝達行列は、スリット板前後の水平方向粒子速度の連続性より次式が成立つ。

$$(hu)_1 = (hu)_2 \quad (16)$$

スリット板前後の運動量は保存され次式が成り立つ。

$$\eta_1 = \eta_2 + \frac{L_a}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{C_l}{2g} |u_2| u_2 \quad (17)$$

これよりスリット板前後の水面変動と水平方向粒子速度は、次式の伝達行列で関連づけられる。

$$\begin{pmatrix} \eta_1 \\ u_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & i\sigma \frac{L_a}{g} + \frac{C_l}{2g} \frac{8}{3\pi} |u_2| \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta_2 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$\text{ここで } L_a = \frac{\tau}{\lambda} w, \quad C_l = \frac{0.52}{\lambda^3 (w/S)^{0.46}}$$

は  $\lambda$  は空隙率、 $w$  は板厚、 $\tau$  は慣性係数、 $S$  はスリット幅である。

スリット板の伝達行列は解析的には式(18)で表され、損失計数  $C_l$  は定常流における実験で求められる。

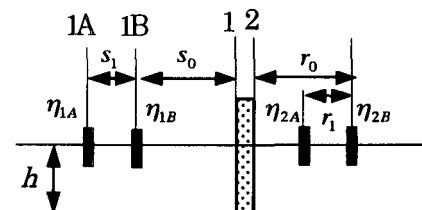


図-2 4点波高計測法の配置図

また慣性係数は実験に合うように決めているようである。本論文では4点波高計測法を用い、次式で示される多孔板伝達行列の未知数 $\alpha, \beta$ を同定する。

$$\begin{pmatrix} \eta_1 \\ u_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha \\ 0 & \beta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \eta_2 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (19)$$

表1に実験に用いたスリット板の条件を示す。水深は18cmで、空隙率15,25,35%の3種類のスリット板に対し、波高条件 $H=1,2,3,4$ cm, 周波数条件 $f=0.5, 0.75, 0.9$ Hzの正弦波を発生させ、4点波高計測法で多孔板前後の $\eta$ と粒子速度 $u$ を算定し、式(19)の $\alpha, \beta$ を同定した。同定結果の一例として空隙率15%, 周波数0.5Hz条件の $\beta$ を図3に示す。 $\beta$ の値は複素平面上で(1,0)に集中しており、ほぼ理論どおりの結果となっている。図4には、粒子速度 $u$ を横軸にとり、 $\alpha$ の実数部 $\blacklozenge$ と虚数部 $\blacksquare$ を示す。 $\alpha$ の実数部は式(18)に示したように動圧抵抗を意味し、粒子速度

との間に明確な線形の関係が見られる。図中に示した $y=0.024x$ は最小2乗近似式である。一方、虚数部は粒子速度との相関が低く、測定結果の平均値 $y=0.046$ を図中に示している。表2に $\alpha$ の実数部の傾き $a$ と虚数部の平均値 $b$ を整理して示す。図5に傾き $a$ と空隙率 $\lambda$ の関係を示す。本測定結果では傾きは $\lambda$ の2.3乗の逆数に比例する関係と言える。図6には平均値 $b$ と $f/\lambda$ の関係をプロットした。両者はほぼ線形な関係にあり、慣性係数を同定することができる。図5,6の適合曲線の係数値を用い、式(18)を参考に損失係数 $C_l$ と慣性係数 $\tau$ を算出して次式を得た。

$$\text{Re}[\alpha] = \frac{C_l}{2g} \frac{8}{3\pi} |u_2| = \frac{|u_2|}{2g} \frac{0.44}{\lambda^{2.3} (w/S)^{0.46}} \quad (20)$$

$$\text{Im}[\alpha] = \frac{2\pi f}{g} \frac{\tau w}{\lambda} = \frac{2\pi f}{g} \frac{1.4w}{\lambda} \quad (21)$$

表-1 スリット板の実験条件

水深 $h$	18cm
入射波高 $H$	1,2,3,4 cm
周波数 $f$	0.5, 0.75, 0.9 Hz
波長 $L$	2.57, 1.65, 1.33 m
板厚 $w$	1 cm
空隙率 $\lambda$	15, 25, 35 %
スリット幅 $S$	1.6 cm

表-2  $\alpha$ の実数部の傾き $a$ と虚数部の平均値 $b$

$\lambda$	15%			25%			35%		
$f$ Hz	0.5	0.75	0.9	0.5	0.75	0.9	0.5	0.75	0.9
$a$	0.024	0.022	0.022	0.007	0.007	0.007	0.003	0.003	0.003
$b$	0.046	0.066	0.093	0.029	0.046	0.055	0.022	0.024	0.047

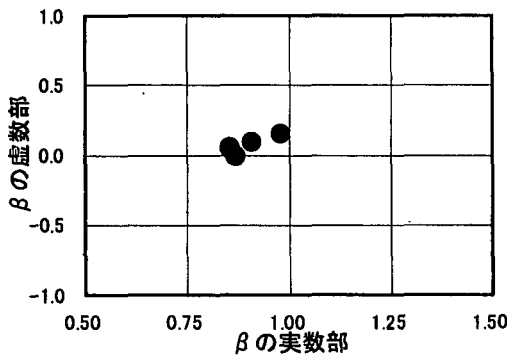


図-3 スリット板の同定値 $\beta$  ( $\lambda=15\%$ ,  $f=0.5$ Hz)

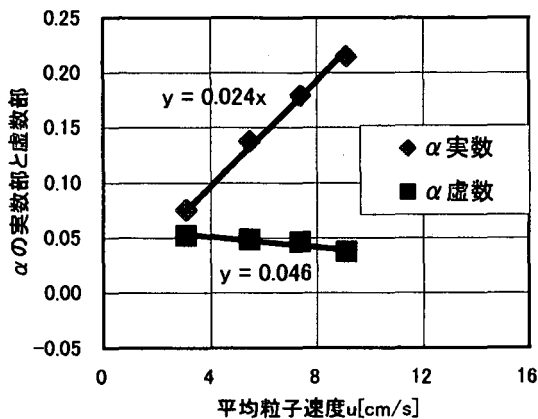


図-4 スリット板の同定値 $\alpha$  ( $\lambda=15\%$ ,  $f=0.5$ Hz)

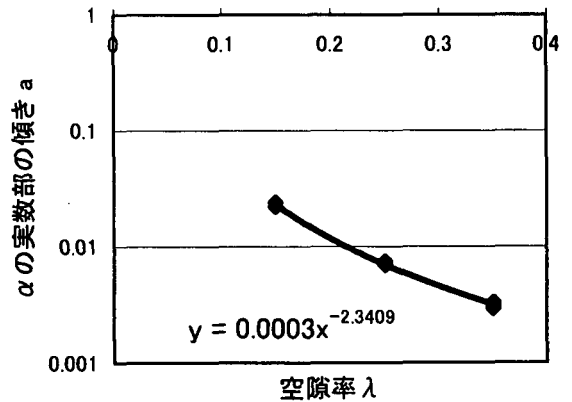


図-5  $\alpha$ の実数部の傾き $a$ と $\lambda$ の関係

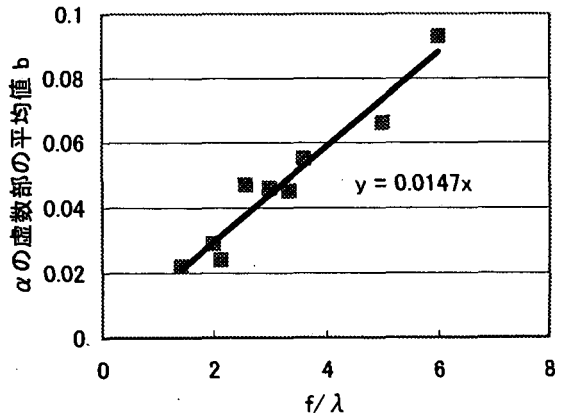


図-6  $\alpha$ の虚数部の平均値 $b$ と $f/\lambda$ の関係

#### (4) スリット板の透過率と反射率

文献<sup>9)</sup>によれば、スリット板消波工の反射率  $Kr$  と透過率  $Kt$  は計算可能で、測定値との一致度も高いことが示されている。本論文では、消波工の伝達行列式(18)と実験で同定した式(20),(21)を用い、入射波の波高  $H$  が設定値になるまで繰り返し計算を実施した。ただしスリット板の後面のインピーダンスは無反射条件とした。以下に計算式をまとめて示す。

$$\frac{\eta_1}{u_1} = \Gamma_1 = X_1 + jY_1 \quad (22)$$

$$\frac{\eta_2}{u_2} = \Gamma_2 = X_2 + jY_2 \quad (23)$$

$$\eta_1^+ = \frac{C/g + \Gamma_1}{2\Gamma_1} \eta_1 \quad (24)$$

$$Kr = \sqrt{\frac{(X_1 - C/g)^2 + Y_1^2}{(X_1 + C/g)^2 + Y_1^2}} \quad (25)$$

$$Kt = \sqrt{\frac{(X_2 + C/g)^2 + Y_2^2}{(X_1 + C/g)^2 + Y_1^2}} \left| \frac{u_2}{u_1} \right| \quad (26)$$

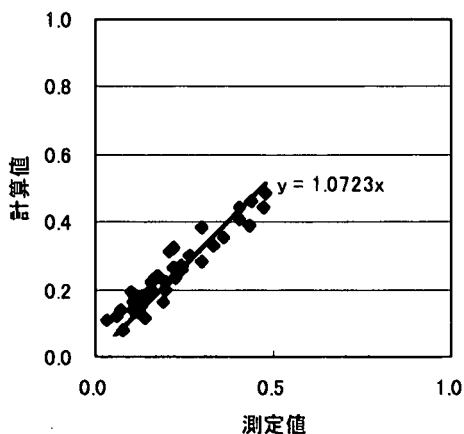


図-7 単列スリット板の反射率比較

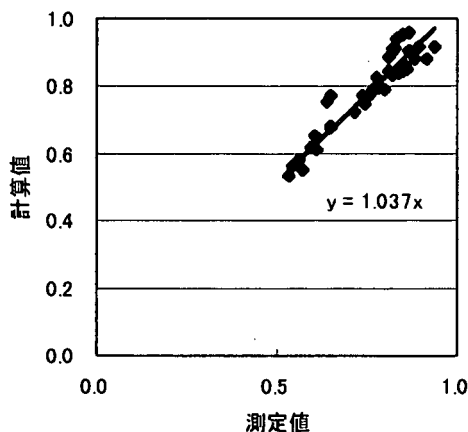


図-8 単列スリット板の透過率比較

ここで  $\eta_1^+$  は表面波形の進行波成分、 $\Gamma$  は水面変動を水平方向粒子速度で除したインピーダンス、 $X, Y$  はそれぞれインピーダンスの実数部と虚数部を表す。

表1に示した全実験条件に対し、スリット板の反射率の計算値と測定値の関係を図7に、透過率の関係を図8に示す。越波しないことが前提ではあるが、相関係数は極めて1に近い値を示している。表3にはスリット板を10cmの間隔を設けて2列用いた場合の消波性能の計算値と測定値を比較する。2列の場合にも実験条件の範囲内で反射率、透過率とも精度良く計算できることが分る。表4には沖側から空隙率を40%、30%、20%と順番に絞って3列のスリット板を用いた場合の計算結果を示す。波はインピーダンスが変化した場所で必ず反射が起きるため、インピーダンスの差を階段状に漸増することで、消波工最前部で反射する波を減らし、消波工内に波を呼び込み、内部で多重反射させて波のエネルギーを消散する機構である。種々の空隙率組合せを計算し、反射率と透過率が共に0.5以下となる寸法形状の一例として、空隙率40%、30%、20%を例示している。

表-3 2列スリット板消波工

沖側スリット板 $\lambda=35\%$ 板厚 $t=1\text{cm}$ スリット板間隔 $d=10\text{cm}$ 浜側スリット板 $\lambda=15\%$ 板厚 $t=1\text{cm}$ 水深 $h=18\text{cm}$						
f [Hz]	波長 L [m]	波高 H [cm]	反射率 Kr		透過率 Kt	
			計算	実験	計算	実験
0.5	2.65	0.98	0.26	0.15	0.78	0.75
0.5	2.65	2.00	0.33	0.30	0.67	0.62
0.5	2.65	3.12	0.39	0.40	0.60	0.59
0.5	2.65	4.16	0.43	0.45	0.55	0.52
0.75	1.63	1.06	0.29	0.31	0.76	0.69
0.75	1.63	1.98	0.34	0.33	0.66	0.63
0.75	1.63	3.00	0.39	0.37	0.59	0.59
0.75	1.63	4.08	0.42	0.38	0.54	0.55
0.9	1.33	0.96	0.31	0.17	0.75	0.65
0.9	1.33	1.96	0.34	0.24	0.65	0.57
0.9	1.33	3.08	0.38	0.30	0.58	0.53
0.9	1.33	4.20	0.40	0.34	0.52	0.50

表-4 3列スリット板消波工

沖側1枚目スリット板 $\lambda=40\%$ 板厚 $t=1\text{cm}$ 遊水層 $d=9\text{cm}$ 2枚目スリット板 $\lambda=30\%$ 板厚 $t=1\text{cm}$ 遊水層 $d=9\text{cm}$ 3枚目スリット板 $\lambda=20\%$ 板厚 $t=1\text{cm}$ 水深 $h=18\text{cm}$				
周波数 f [Hz]	波長 L [m]	入射波高 H [cm]	反射率 計算 Kr	透過率 計算 Kt
0.5Hz	2.65	4.0	0.36	0.48
0.5Hz	2.65	8.0	0.45	0.36
0.75Hz	1.63	4.0	0.33	0.46
0.75Hz	1.63	8.0	0.39	0.34
0.9Hz	1.33	4.0	0.28	0.45
0.9Hz	1.33	8.0	0.33	0.33

### 3. 斜板とスリット板を複合した消波構造物

#### (1) 消波工模型と実験条件

図9に示す3列のスリット板と斜板を組合せた消波構造の性能を2次元水槽実験で調べた。スリット板は、前節で検討した様に沖側から空隙率を40%、30%、20%と順次絞っている。斜板の角度は $\theta=15^\circ$ に固定し、消波工の幅は0.5m、最頂部の高さ0.6mである。本論文では潜堤を想定したため、水深 $h=0.6m$ で天端水深 $R=0m$ 、水深 $h=0.7m$ で $R=0.1m$ の2条件の水深で実験を行っている。波浪条件を表5に示す。入射波高は $H=10, 15, 20cm$ の3種類とし、規則波を

用い波形勾配 $H/L=0.025, 0.035, 0.065, 0.095$ とした。図10に波高計の配置を示す。波高計間隔は0.6m、消波工端部から最も近い波高計までの距離は3mとした。

#### (2) 消波性能の比較

文献<sup>6)</sup>に示された異型ブロック人工リーフと本提案の消波工の透過率を図11,12に比較する。天端と水深が等しい $R=0$ 条件では、異型ブロックの約40%の幅で同等の透過率を実現できるようなのである。図12には天端が海面より0.1m低い場合を示すが、この場合も異型ブロックより狭い幅で同等の透過率を実現できている。図13には本消波工の反射率を示す。反射率は0.1~0.3程度と小さな値であった。

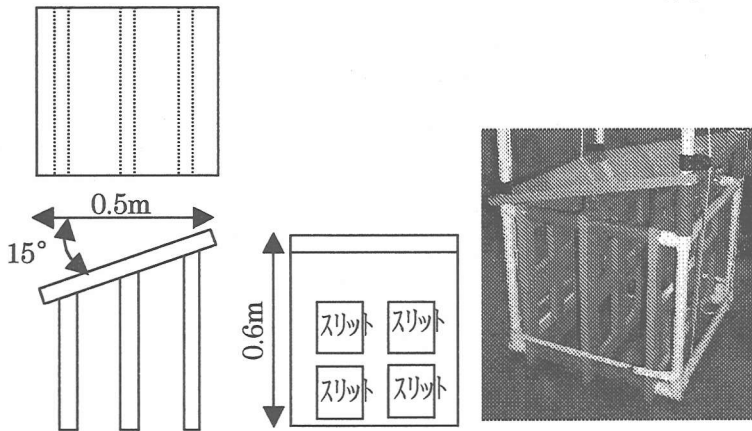


表-5 スリット板と斜板消波工の実験条件

水深 $h$	0.6m, 0.7m
波高 $H$	0.10, 0.15, 0.20 m
波形勾配 $H/L$	0.025, 0.035, 0.065, 0.095
波長 $L$	1 ~ 8 m
天端水深 $R$	0, 0.1m
板厚 $w$	2 cm
空隙率 $\lambda$	沖より 40, 30, 20%

図-9 スリット板と斜板を複合した消波工模型と写真

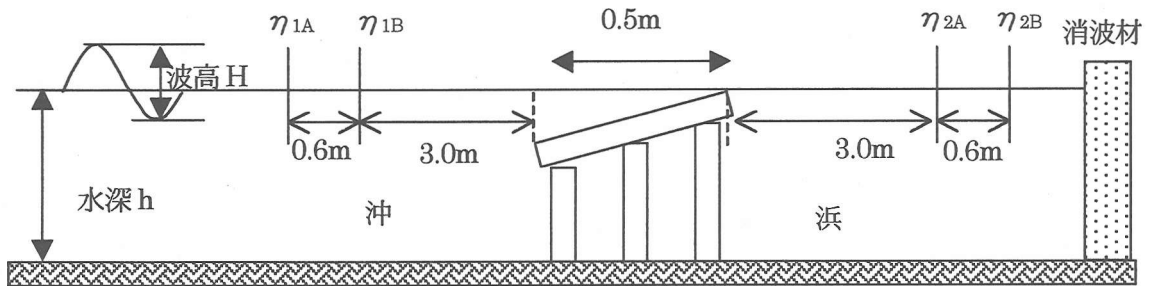


図-10 水槽実験装置の配置図

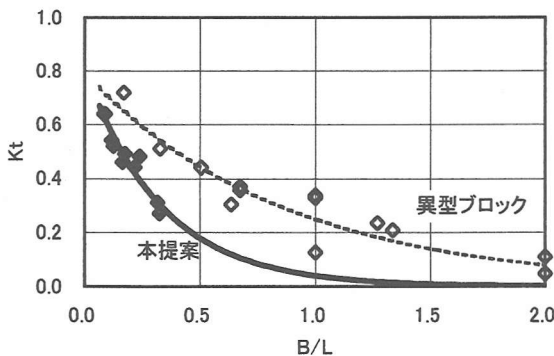


図-11 透過率の比較(天端水深 $R=0$ )

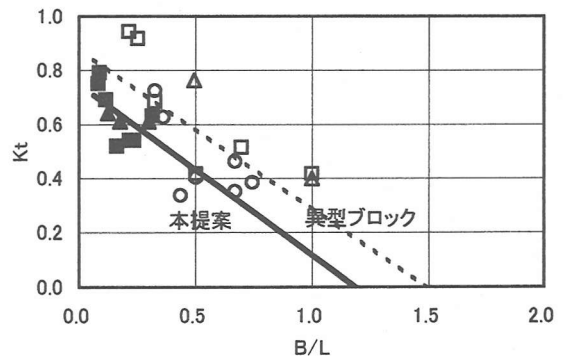


図-12 透過率の比較(天端水深 $R=0.1m$ )

図 14 にはウェーブセットアップを示す。同測定は、200 周期程度の計測期間における消波工前側 2 点と後側 2 点の波高計の平均水位の差を  $\eta_1$  とし、入射波高で除して整理している。文献<sup>9)</sup>に示された石積み人工リーフや異型ブロック人工リーフのウェーブセットアップ量と比較したが、本提案の消波工は異型ブロックより若干良好と考えられる。

スリット板を取り除き斜板を単独で用いた場合の透過率を図 15 に、反射率を図 16 に示す。天端水深  $R=0$  の条件であるが、透過率 0.5 で両者を比較すると、斜板単独の場合に比べ約半分の消波工幅で同等の性能が得られる様である。反射率に関してはスリット板が悪影響する事は少なく、斜板単独と同程度の反射率と考えられる。

## 6. まとめ

スリット板と斜板で構成される消波構造の性能を実験的に検討した。まず始めに種々のスリット板の伝達行列を 4 点波高計測法で同定し、望ましいスリット板の空隙率組合せを見出した。

次にスリット板の上部を越波する波を抑制する目的で、スリット板の上部に斜板を設けた消波工模型を作製し、各種の波浪条件で透過率、反射率、ウェーブセットアップを測定した。提案する消波工の実験結果を、石積み人工リーフ、異型ブロック人工リ

ーフ、斜板式消波工と比較した。前二者の人工リーフの約 40%、斜板式の約 50%の消波工幅で同程度の透過率を実現できる結果を得た。また反射率とウェーブセットアップは、異形ブロック人工リーフや斜板式消波工と同程度の結果を得た。

本論文では、斜板の角度や天端水深などに特定の条件を設定して、主に実験的な研究開発を実施した。ところで著者らは、レベルセット法を用いた数値解析でも本消波工の性能解析を実施している。今後は、数値解析と実験を併用し、本消波工構造の最適化を図っていく予定である。

## 参考文献

- 1) 建設省:海洋利用空間の創生・保全技術の開発報告書, pp. 62-172, 1992.
- 2) 堀川清司:海岸工学,東京大学出版会, pp.121-128, 1973.
- 3) 宇津野他 3 名:伝達行列を用いた消波工の消波性能の検討,海岸論文集,第 46 巻, pp.771-775, 1999.
- 4) 近藤俊郎・竹田英章:消波構造物,森北出版, pp. 70-114, 1983.
- 5) 建設省:海洋利用空間の創生・保全技術の開発報告書, pp. 1027-1036, 1992.
- 6) 全国海岸協会:人工リーフの設計の手引き, pp. 27-39, 1992.

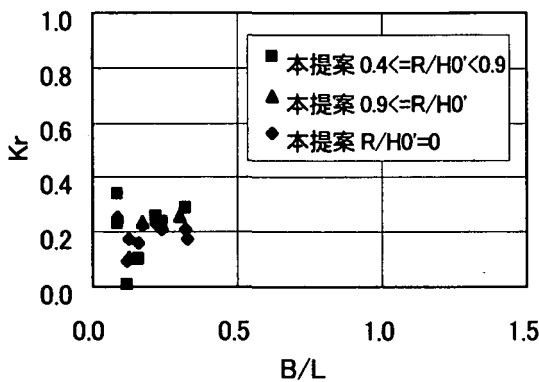


図-13 提案した消波工の反射率測定結果

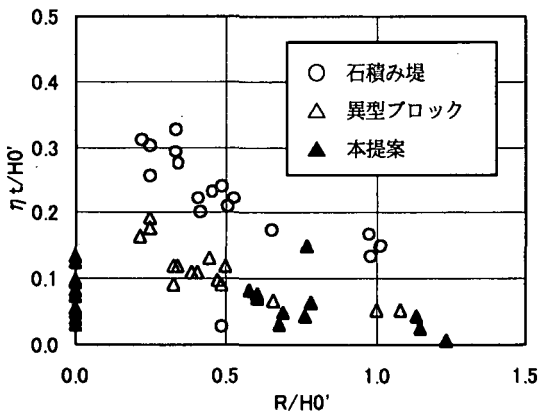


図-14 提案した消波工のウェーブセットアップの比較

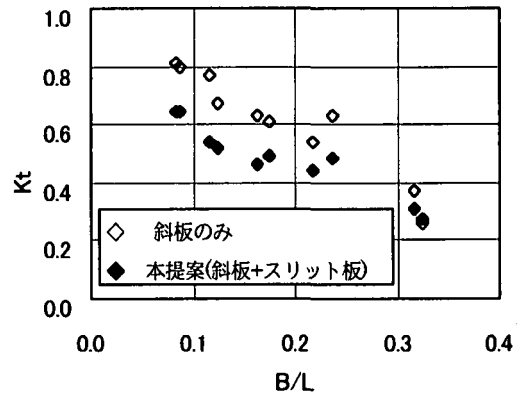


図-15 斜板単独消波工との比較(R=0)

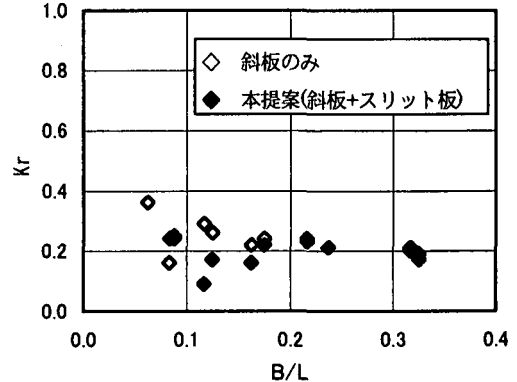


図-16 斜板単独消波工との比較(R=0)