

(論文)

斜板とスリット板を複合した人工リーフ消波構造の水理特性

Characteristics of Wave Energy Dissipating Structures Incorporating Multi-slit Walls and a Slanted Ceiling Panel



宇津野秀夫*(工博)
Dr. Hideo Utsuno



織田 剛*
Tsuyoshi Oda



埴 洋二*
Yoji Hanawa



濱崎 義弘**
Yoshihiro Hamazaki



竹鼻 直人**
Naoto Takehana



奥村 昌好**
Masayoshi Okumura

Wave energy dissipating structures with multi-slit walls and a slanted ceiling panel were investigated. The wave transmission coefficient, wave reflection coefficient, and wave set-up were measured in a two-dimensional channel. The wave energy dissipating capacity of the new structure was compared with those of a rock mound artificial reef and a pre-cast concrete block mound artificial reef. The new structure, which is more compact than the other structures, proved to be equally effective in dissipating wave energy. A four-sensor technique is also discussed to identify the slit wall transfer matrix. Numerical analysis using the level set method was used to predict the wave transmission coefficient.

まえがき = 日本の海岸線は総延長 35 000km におよび、そのおよそ 30% に人工的な構造物が設置されている。これらの構造物が設置されて数十年が経過した近年では、海岸線に沿った砂の自然な移動が遮られたため自然海浜の後退が報告¹⁾され始めている。また地球温暖化が進むと 100 年後には水位が数 10cm 上昇し、台風時などの浸水の危険性が高まるとの指摘もある。1990 年代初頭に平穏な海域を創出する目的でマリン・マルチ・ゾーン構想²⁾が計画された。同構想は沖合いに離岸堤などの海域制御構造物を設置することで、背後に平穏な海域の創出を目的としている。海域制御構造物で波の波高が低減されると海岸侵食や護岸の越波も低減されることになる。同構想ではスリット板式や斜板式、潜堤式など多数の海域制

御構造物が提案されているが、図 1 に示すような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。同図の消波構造は、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、まずはじめに重要な構成要素であるスリット板の水理特性を 4 点波高計測法を用いて同定した。次にレベルセット法を用いて自由表面を表現しながら Navier-Stokes 方程式を解くことで、提案する消波構造の透過率を計算した結果を示す。最後に 2 次元水槽を用いて提案する消波構造の透過率、反射率、ウェーブセットアップを測定し、望ましい形状を検討するとともに、異型ブロック消波工や斜板式消波工と比較して提案する構造の優位点を示す。

1. スリット板の水理特性

1.1 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 離れた 2 点 A, B 間の水面変動 と水平方向粒子速度 u の関係式は、微小振幅波理論を前提に Neumann の伝達行列³⁾で表される。

$$\begin{pmatrix} u_A \\ \eta_A \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos ks & j \frac{C}{g} \sin ks \\ j \frac{g}{C} \sin ks & \cos ks \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_B \\ \eta_B \end{pmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 k 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。

$$k = \frac{\omega}{C}, C = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kh} \dots\dots\dots(2)(3)$$

図 2 に示す水路において伝達行列を用いると、点 1A,



図 1 斜板とスリット板を複合した消波構造
Fig. 1 Wave energy dissipating structures with multi slit walls and a slant-ceiling panel

*技術開発本部 機械研究所 **都市環境・エンジニアリングカンパニー 構造技術部

1B の水面変動を利用して、消波工前面の点 1 における水面変動と粒子速度とを次式⁴⁾で表すことができる。

$$\eta_1 = \frac{1}{1A} \left\{ \frac{1B}{1A} \frac{\sin k(s_1 + s_0)}{\sin ks_1} - \frac{\sin ks_0}{\sin ks_1} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

$$u_1 = \frac{jg}{1A C} \left\{ \frac{1B}{1A} \frac{\cos k(s_1 + s_0)}{\sin ks_1} - \frac{\cos ks_0}{\sin ks_1} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

同様に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。

1.2 スリット板の伝達行列の同定⁵⁾

波長に比べて十分に薄い板厚のスリット板消波工は、スリット板前後の水平方向粒子速度の連続性と運動量保存により、次式の伝達行列⁶⁾で関連づけられる。

$$\begin{pmatrix} \eta_1 \\ u_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j \frac{L_a}{g} + \frac{C_1}{2g} \frac{8}{3} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \eta_2 \\ u_2 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(6)$$

ここで $L_a = \frac{0.52}{3(w/S)^{0.46}}$, $C_1 = \dots$

は空隙率, w は板厚, S はスリット幅である。本論文では式(6)の伝達行列の未知項を η とし、4 点の波高計測データから同定した。表 1 に実験条件を示す。一例として図 3 に空隙率 = 15%, 周期 2 秒の条件における η の同定結果 (η : 実数部, η : 虚数部) を示す。実数部は式(6)に示したように動圧抵抗を意味し、粒子速度に比例する関係が見られる。図中に示した $y = 0.024x$ は最小 2 乗近似式である。種々の波浪条件下で実験を行い、最終的に慣性係数 L_a と損失係数 C_1 を次式で表現した。

$$\text{Re}[\eta] = \frac{C_1}{2g} \frac{8}{3} |u_2| = \frac{|u_2|}{2g} \frac{0.44}{2.3(w/S)^{0.46}} \dots\dots\dots(7)$$

$$\text{Im}[\eta] = \frac{2}{g} \frac{f}{g} \frac{w}{g} = \frac{2}{g} \frac{f}{g} \frac{1.4w}{g} \dots\dots\dots(8)$$

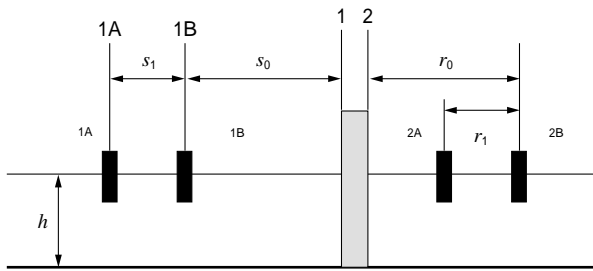


図 2 4 点波高計測法の概念図
Fig. 2 Experimental apparatus of 4-sensor measuring technique for 2-dimensional channel

表 1 スリット板の実験条件
Table 1 Experimental condition of single slit panel

Water depth	h (cm)	18
Wave height	H (cm)	1, 2, 3, 4
Frequency	f (Hz)	0.5, 0.75, 0.9
Wave length	L (m)	2.57, 1.65, 1.33
Panel thickness	w (cm)	1
Porosity	(%)	15, 25, 35
Slit width	S (cm)	1.6

消波工前面と後面の波高と粒子速度が定まると、消波工の反射率 K_r と透過率 K_t は次式で計算できる。

$$\frac{\eta_1}{u_1} = X_1 + jY_1, \frac{\eta_2}{u_2} = X_2 + jY_2 \dots\dots\dots(9)(10)$$

$$K_r = \sqrt{\frac{(X_1 - C/g)^2 + Y_1^2}{(X_1 + C/g)^2 + Y_1^2}} \dots\dots\dots(11)$$

$$K_t = \sqrt{\frac{(X_2 + C/g)^2 + Y_2^2}{(X_1 + C/g)^2 + Y_1^2}} \frac{|u_2|}{|u_1|} \dots\dots\dots(12)$$

表 1 に示した全条件に対し、スリット板の反射率の計算値と測定値を図 4 に比較する。また透過率を図 5 に比較する。越波しないことが前提ではあるが、相関係数は極めて 1 に近い値を示しており、スリット板の伝達行列が正しく同定されていることが確認される。表 2 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。波は開口率が変化した場所で必ず反射が起きるため、開口率の差を階段状に漸減することで、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。種々の空隙率の組合わせを計算し、反射率と透過率がともに 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。

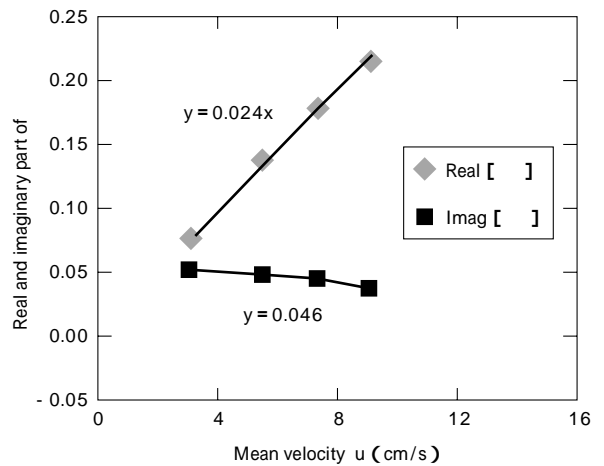


図 3 未知係数 η の同定例
Fig. 3 Identification of unknown parameter

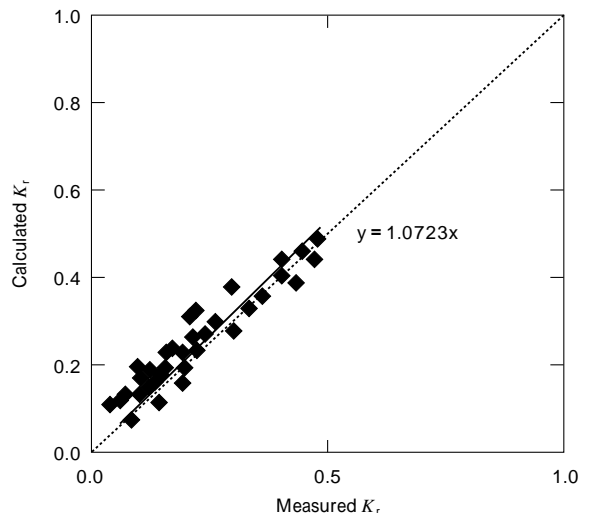


図 4 1 列スリット板の反射率の比較
Fig. 4 Comparison of wave reflection coefficient for single slit panel

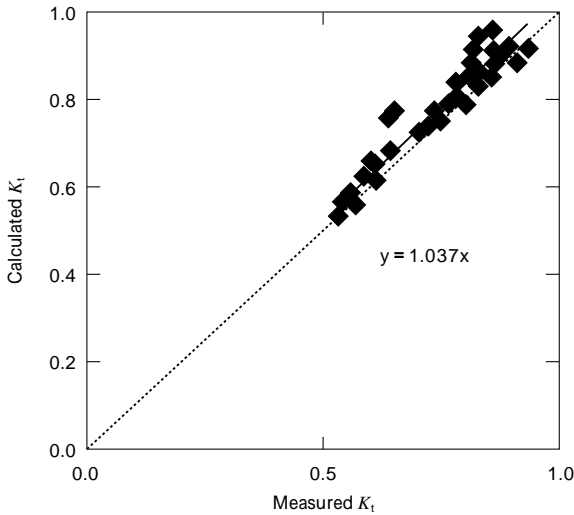


図5 1列スリット板の透過率の比較
Fig. 5 Comparison of wave transmission coefficient for single slit panel

表2 3列スリット板の反射率と透過率計算結果
Table 2 Calculation of K_r and K_t for 3-layered slit panels

Water depth $h = 18\text{cm}$				
Frequency f (Hz)	Length L (m)	Height H (cm)	Calculated K_r	Calculated K_t
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

2. 波浪現象の2次元数値解析

2.1 基礎式と数値解析手法⁷⁾

2次元の波浪現象を対象に、レベルセット法を用いて自由表面を表現しながら Navier-Stokes 方程式を解くことを考える。連続の式と動圧損失項を含む運動量保存式は次式となる。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \frac{1}{\rho} \{ -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} - \mathbf{1} |u|u \} + \mathbf{g} \quad \dots\dots(14)$$

ここで $\mathbf{1}$ は4点波高計測法で同定した式(7)を用いる。また、 ρ は密度、 p は圧力、 \mathbf{u} は流速ベクトルである。

$$\mathbf{1} = \frac{\rho}{2g} \frac{0.44}{2.3(w/S)^{0.46}}$$

レベルセット移流方程式は次式で示される。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \phi = 0 \quad \dots\dots\dots(15)$$

レベルセット関数 ϕ は、海水面となる気液界面からの符号付き距離関数で、気体領域を $\phi > 0$ 、液体領域を $\phi < 0$ で定義している。

式(13)~(15)をセル中心にすべての変数を定義した直交格子系で離散化し、有限体積法を用いて解く。詳細は文献7)に示すが、移流項には2次精度のENO法を、

拡散項には中心差分法を用いる。また生成項と移流項の時間積分には Adams-Bashforth 法を、拡散項と圧力損失項の時間積分には陰解法である Crank-Nicolson 法を用いて計算を行った。

2.2 スリット型構造物透過率の数値解析

2次元計算ではあるが、定在波を生じさせるまでには長時間を要する。このためここでは反射波の影響が生じない計算開始後第1波の波形から透過率を求めることにした。ただし比較した実験結果は定常解である。さらに、移流項における人工粘性のために波が伝播する間に数値上の波高自然減衰を生じる。減衰の度合いは格子解像度に依存し、同一格子間隔では周波数が高いほど減衰も大きい。そこで、すべての計算条件に対してスリット型構造物がある場合とない場合の2条件を行って、数値上の波高自然減衰の影響を除外する。すなわち、図6に示すようにスリット構造物ありとなしのそれぞれの条件に対して、スリットを挟んで岸側の第1波最大波高 h_{AS} 、 h_{AN} と沖側の第1波最大波高 h_B が得られた場合、透過率 K_T を次式により求める。

$$K_T = \frac{h_{AS}}{h_{AN}} = \frac{h_{AS}}{h_B} \frac{h_B}{h_{AN}} = \frac{K_{TS}}{K_{TN}} \quad \dots\dots\dots(16)$$

ここで、 $K_{TS} = h_{AS}/h_B$ (スリットありでの波高比)、 $K_{TN} = h_{AN}/h_B$ (スリットなしでの波高比)である。

図7に1列スリット板の計算モデルを示す。横8m、高さ700mmの領域で両方向とも格子間隔は10mmとし

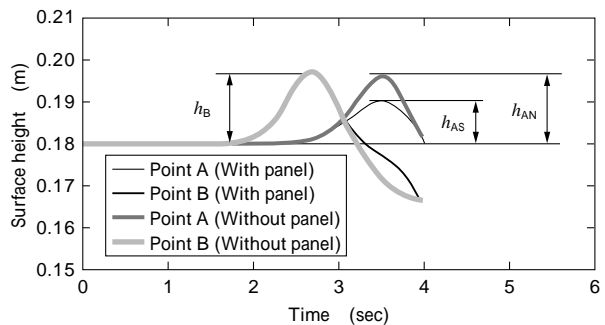


図6 第1波の時間波形と透過率の関係
Fig. 6 Time data of first transmitting wave

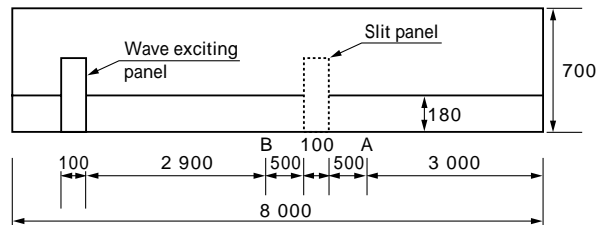


図7 1列スリット板の計算モデル
Fig. 7 Numerical model of slit panel in channel

表3 1列スリット板の透過率計算条件
Table 3 Simulation condition for slit panel

Water depth	0.18m
Frequency	0.5Hz
Wave length	2.57m
Porosity	0.15, 0.25, 0.35

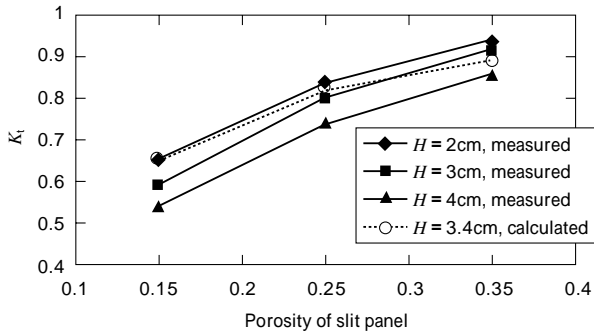


図8 1列スリット板の透過率計算結果
Fig. 8 Calculation results of K_t for slit panel

た。計算条件は表3に示すように、水深18cm、周波数0.5Hzとし、開口率15、25、35%の3種類のスリット板の透過率を計算した。図8に透過率の計算結果と実験結果との比較を示す。造波板～波形観測点Bの間にも計算上の自然減衰が生じるので、波形観測点Bにおける波高を計算における波高としている。ここでは波高0.034mであった。透過率の計算結果は実験結果を良く模擬しており、誤差は20%以内であった。

次に本論文で提案するスリット板と斜板で構成される消波構造の透過率を計算する。図9に消波工構造のモデル図を、図10に数値計算に用いた計算モデルを示す。また表4に計算条件を示す。図11に透過率の計算結果と実験結果を比較する。周波数に対する計算結果と実験結果の傾向は定性的に一致していると言える。

3. 斜板とスリット板を複合した消波構造の水理特性

3.1 消波工模型と実験条件

図9に示した3列のスリット板と斜板を組合わせた消波構造の性能を2次元水槽実験で調べた。写真1に消波工モデルを示す。スリット板は、前節で検討したように沖側から空隙率を40%、30%、20%と順次絞っている。

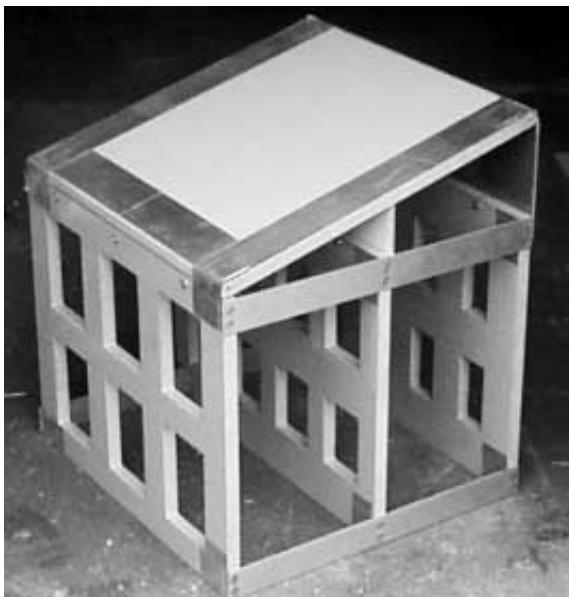


写真1 スリット板と斜板を複合した消波工模型
Photo 1 Present model with multi slit walls and a slant-ceiling panel

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。

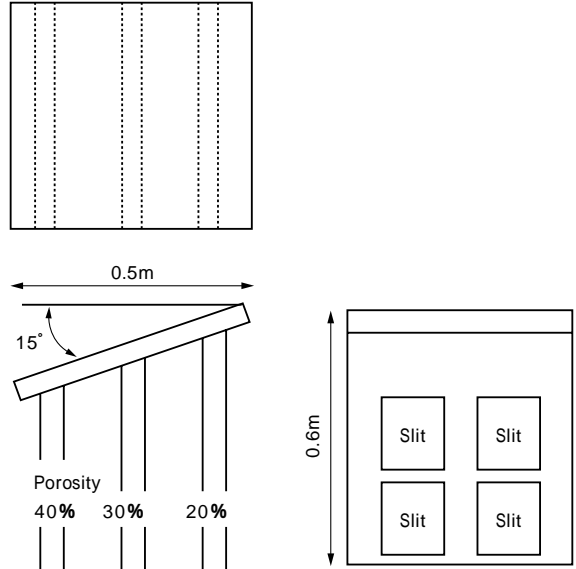


図9 提案する消波工のモデル図
Fig. 9 Present model of wave energy dissipative structure

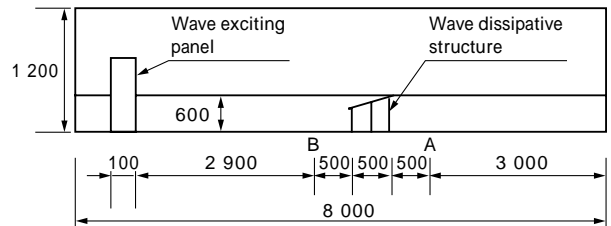


図10 消波構造の計算モデル
Fig.10 Numerical model of present model

表4 消波構造の計算条件
Table 4 Simulation condition for present model

Water depth	0.6m
Width	0.5m
Porosity	20%, 30%, 40%
Frequency	1Hz, 0.84Hz, 0.69Hz, 0.54Hz, 0.38Hz

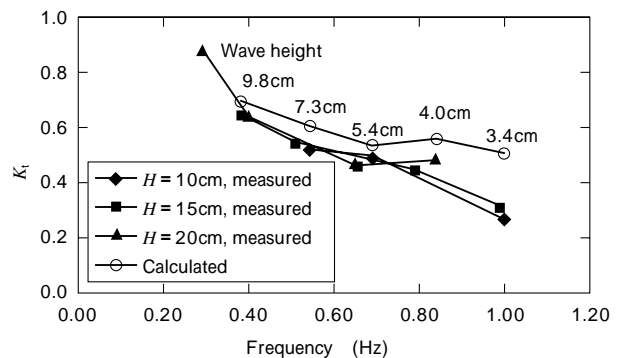


図11 消波工透過率の計算結果
Fig.11 Calculation results of K_t for present model

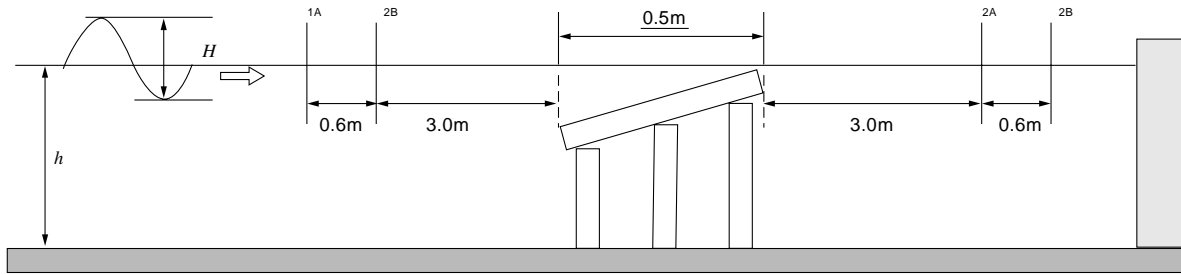


図12 水槽実験装置の配置図

Fig.12 Experimental apparatus for present model in 2-dimensional channel

表5 スリット板と斜板消波工の実験条件

Table 5 Experimental condition of present model

Water depth h	0.6m, 0.7m
Wave height H	0.10, 0.15, 0.20 m
Wave steepness H/L	0.025, 0.035, 0.065, 0.095
Wave length L	1 ~ 8 m
Depth of top R	0, 0.1m
Panel thickness w	2 cm
Porosity	40, 30, 20%

図12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。

3.2 消波性能の比較

文献8)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13, 14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ている。図14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15には本消波工の反射率を示す。反射率は0.1~0.3程度で十分に小さな値である。図16に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 ζ とし、入射波高で除して整理している。文献8)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、本提案の消波工は石積み人工リーフの約1/3のウェーブセットアップ量であり、異型ブロックと比較しても良好と言える。

スリット板を取除き斜板を単独で用いた場合の透過率を図17に、反射率を図18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

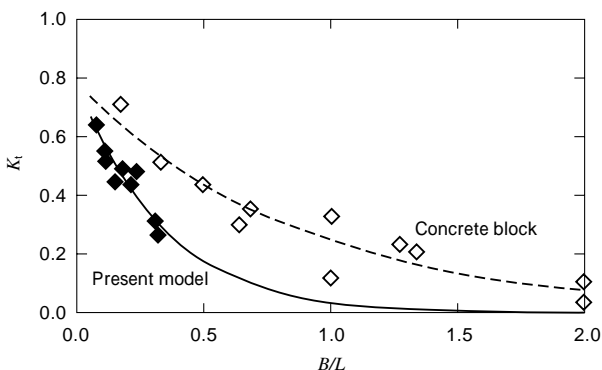


図13 透過率の比較 (天端水深 $R=0m$)

Fig.13 Comparison of K_t ($R=0m$)

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。反射率に関してはスリット板が悪影響することは少なく、斜板単独と同程度の反射率となった。

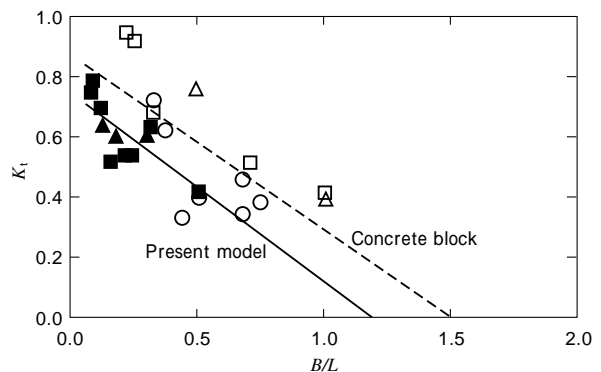


図14 透過率の比較 (天端水深 $R=0.1m$)

Fig.14 Comparison of K_t at $R=0.1m$

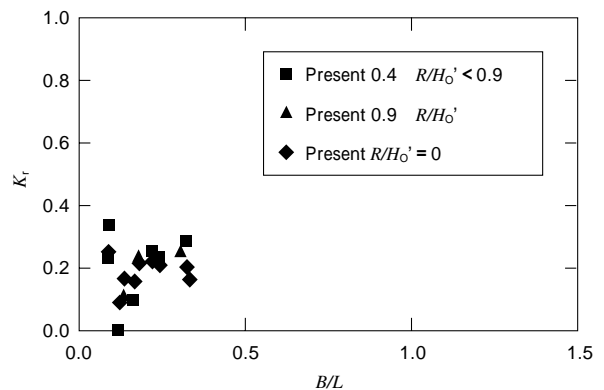


図15 反射率の測定結果

Fig.15 K_r measured for present model

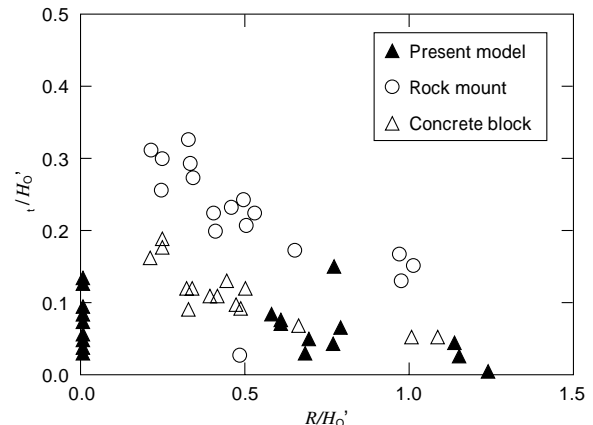


図16 ウェーブセットアップ測定結果

Fig.16 Wave set-up measured for present model

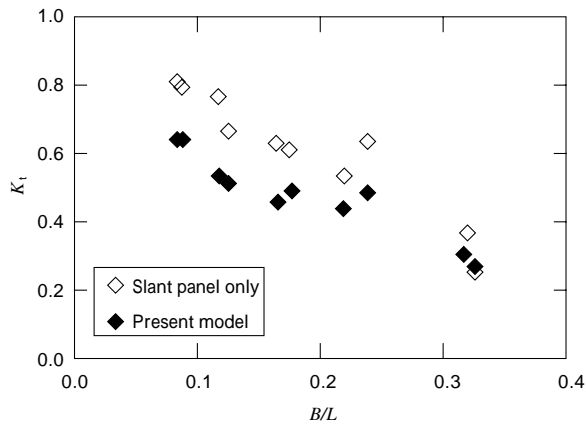


図17 斜板単独消波工との比較 (天端水深 $R=0\text{m}$)
Fig.17 Comparison of K_t with slant panel ($R=0\text{m}$)

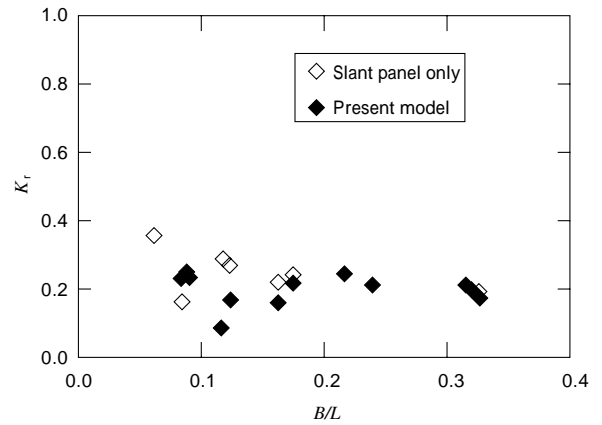


図18 斜板単独消波工との比較 (天端水深 $R=0$)
Fig.18 Comparison of K_r with slant panel ($R=0\text{m}$)

むすび=スリット板と斜板で構成される消波構造の性能を数値計算と実験を併用して検討した。

- 1) まず初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。
- 2) 次にレベルセット法を用いて自由表面を表現しながら Navier-Stokes 方程式を解くことで、1列スリット板と提案する消波構造の透過率を計算し、実験と同様な傾向を示すことを確認した。斜板とスリット板を組合せた本研究の消波構造においても計算と実験の傾向は良く一致した。
- 3) 最後に2次元水槽を用いて、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。石積み人工リーフや異形ブロック人工リーフと比較したところ、提案する消波構造は従来の約50%の消波工幅で同等の透過率を実現できることがわかった。また反射率とウェーブセットアップは、石積み人工リーフの1/3と小さく、異形ブロック人工リーフや斜板式消波工と同等の性能を示すことがわかった。
- 4) 従来構造との比較より、スリット板の空隙率を傾斜させて波を消波構造体内に導くことで反射率を低減

し、スリット板間の多重反射と斜板の碎波現象を利用して伝達率を低減する本提案の消波機能が具現化できていると考えられる。

本論文では、斜板とスリット板で構成される消波工の概念設計を実施した。今後は、実海岸の波浪条件のもとに数値解析と実験とを併用して、試設計を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 宇多高明：日本の海岸侵食，(1997)，p.11，山海堂。
- 2) 建設省：海洋利用空間の創生・保全技術の開発報告書(1992)，p.62。
- 3) 堀川清司：海岸工学，(1973)，p.121，東京大学出版会。
- 4) 宇津野秀夫ほか：海岸論文集，第46巻(1999) p.771。
- 5) 宇津野秀夫ほか：海洋開発論文集，第18巻(2002) p.317。
- 6) 近藤俊郎ほか：消波構造物，(1983) p.70，森北出版。
- 7) 織田 剛ほか：海洋開発論文集 第18巻(2002) p.323。
- 8) 全国海岸協会：人工リーフの設計の手引き，(1992) p.27。