

水平板付スリット型海域制御構造物の 消波および波力特性

三井建設(株)	高木春生
三井建設(株) 正会員	吉川雅人
三井建設(株)	田村直明
建設省土木研究所 正会員	宇多高明
建設省土木研究所 正会員	村井禎美

1. まえがき

近年、海洋性レクリエーションへの需要の高まりとともに、全国各地で種々の環境整備が進められるようになった。しかし、外洋に面した海岸は波浪が高く、また流れ、漂砂が活発なために、そのままの形では海浜利用がなかなか難しいのが現状である。一方、こうした海岸では侵食等の災害を受けている所も多く、海岸保全も緊急の課題となっている。侵食対策としては、従来、海岸線近くに異形ブロックを設置する離岸堤工法が広く用いられてきた。この工法は、確かに有効ではあるが、景観が良好でなく、大水深には不向きで利用空間が狭い等の欠点がある。自然環境の保全を図りつつ沿岸域を有効に利用するためには、水深がかなり大きい海域でも建設が可能で、通常用いられている離岸堤と同程度の消波効果を持った透過性海域制御構造物の開発が必要である。

本研究では、乱れと反射を利用して静穏域を造り出すことのできる、水平板と鉛直スリット壁から成る水平板付スリット型海域制御構造物の消波特性について検討する。最初に、2次元水理模型実験を実施し、水平板および鉛直スリットの空隙率を変化させた場合の規則波に対する消波特性を明らかにするとともに、全体波力についても検討した。更に、実用化の可能性の高い基本モデルを選定し、不規則波の作用下での消波特性を調べた。

2. 規則波実験

2.1 実験方法

実験には、建設省土木研究所の不規則波造波水路（全長142m、幅0.6m、高さ1.4m）を用いた。水路床は、図-1に示すように、造波板から約88mの地点まで水平床で、そこから30mを勾配1/50の一樣斜面とし、さらにこれより先10mを水平床とした。また、水平床より先6mは勾配1/10の一樣斜面としてあり、水路端には消波装置を設けている。模型の設置位置は、造波板から123mの地点であり、この部分は片面ガラス張りで側面からの観察が可能である。透過および反射特性を調べるための波高の測定は、模型前後の水深100cmの

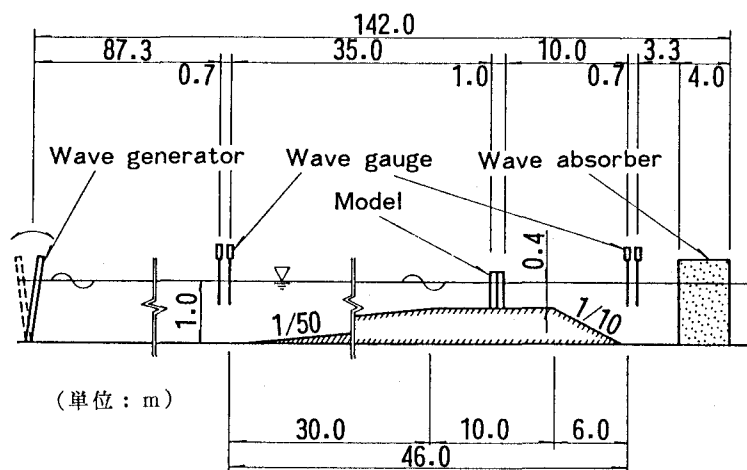


図-1 実験装置

2地点にそれぞれ2台の容量式波高計を70cm間隔に設置し、同時測定を行った。反射波は入・反射波分離推定法により算定した。一方、波力実験では、三分力検出器により波力を測定すると共に構造物模型の前後10cmの位置に設置した容量式波高計により波形を測定した。実験の縮尺は1/25である。実験波としては、消波性能の検討に11波浪を、波力特性の検討にその内の5波浪（○印）を選定した（表-1参照）。

構造条件を表-2に示す。水平板の枚数、鉛直壁の空隙率（ ϵ_v ）、水平板の空隙率（ ϵ_H ）等を変えて4種類の構造ケースを選定した。主な特徴として、ケース①、②、③では不透過の水平板を設け、ケース④ではこの水平板に空隙を設けている。また水平板枚数はケース①、②が2枚、ケース③、④が1枚である。鉛直スリットの下部堤体幅は水深と等しく $B' = 40\text{cm}$ とし、構造上の理由からスリットの枚数を3枚としたほかは、スリット壁の空隙率、吃水深等は、前年度に建設省土木研究所で実験を行った水平板のない通常のスリット構造の場合¹⁾と同様とし、結果の比較ができるようにした。

表-1 水理条件

実験波 番号	周 期 T (sec)	沖波波高 H ₀ (cm)	沖波波長 L ₀ (cm)	沖波波形 勾配 H ₀ /L ₀	波 高 H (cm)	波 長 L (cm)	波形勾配 H/L	相対水深 h/L
1	1.2	4	225	0.018	3.7	194	0.019	0.206
2	1.2	8	225	0.036	7.3	194	0.038	0.206
3	1.4	8	306	0.026	7.3	239	0.031	0.167
4	1.4	16	306	0.052	14.7	239	0.061	0.167
⑤	1.6	12	399	0.030	11.2	283	0.040	0.141
6	1.6	16	399	0.040	14.9	283	0.053	0.141
⑦	2.0	4	624	0.006	3.9	369	0.011	0.108
⑧	2.0	8	624	0.013	7.9	369	0.021	0.108
⑨	2.0	12	624	0.019	11.8	369	0.032	0.108
10	2.8	8	1,223	0.006	8.9	535	0.017	0.075
⑪	2.8	12	1,223	0.010	13.3	535	0.025	0.075

表-2 構造条件

構 造 ケース	構造条件			実験模型諸量	記 号
	水平 板 枚数	d/h	ϵ_v		
①	2	0.1	0.3	0.0	
②	2	0.1	0.4	0.0	
③	1	-	0.4	0.0	
④	1	-	0.4	0.1	

2. 2 透過および反射特性

実験では波高計で計測した水位変動から透過，入射，反射波高を求め，さらに水路の摩擦による波の減衰を考慮して，模型設置位置での透過波高 H_T ，入射波高 H_I ，反射波高 H_R を算定した。次に，その値から，透過率 K_T (H_T/H_I)，反射率 K_R (H_R/H_I)を求めた。

(1) 相対幅 B/L と K_T ， K_R の関係

波長 L と水平板の幅 B の比を相対幅 B/L として， B/L と各々の構造タイプの K_T ， K_R の関係を図-2に示す。ここに，図中の各線は実験値の平均を示す。 K_T は， B/L の増加に伴い，各タイプともほぼ同じ傾向で減少し，特に， $B/L \geq 0.2$ で減少傾向が著しい。一方， K_R は， B/L の増加に伴い K_T とは逆に増加する。鉛直スリットの空隙率の異なるケース① ($\epsilon_v = 0.3$)とケース② ($\epsilon_v = 0.4$)とを比較すると， $B/L > 0.3$ の場合を除けば，ケース①の K_T の方がケース②よりも約5%小さくなり，反射率に関してはこれと逆の傾向となった。ケース①，②で条件が異なるのは鉛直スリットの空隙率のみであって，ケース①の方がケース②よりも0.1だけ空隙率が小さい。したがって，上述の特徴は鉛直スリット板の空隙率の影響を表している。

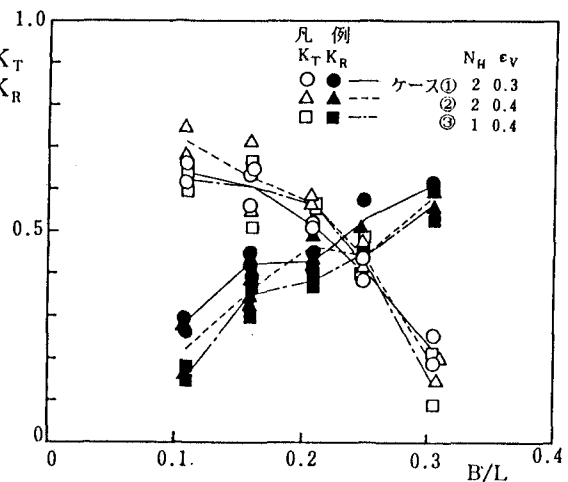


図-2 水平板付スリット型 (ケース①，②，③) の K_T ， K_R と B/L の関係
($B/h=1.5$, $h_2/h=0.7$, $N_v=3$, $\epsilon_H=0$)

次に、各々の構造タイプについて、エネルギー損失率 $K_L^2 (1 - K_T^2 - K_R^2)$ と相対幅 B/L の関係を図-3に示す。実験の範囲内では、 B/L の増加とともに K_L^2 は緩やかな増加傾向を示し、 $K_L^2 \geq 0.4$ となっている。

(2) 水平板とスリットの相互作用

水平板とスリットの相互作用を調べるために、吃水比を $h_2/h=0.7$ 、空隙率を $\epsilon_v=0.4$ と一定にし、水平板の空隙率を変化させたケース④ ($\epsilon_H=0.1$) とケース③ ($\epsilon_H=0$) の実験結果を図-4に示す。また同図には参考のため水平板を持たず、2枚の鉛直スリット壁から成るスリット模型の実験結果も併せて示した。水平板の空隙率の異なるケース③ ($\epsilon_H=0$) とケース④ ($\epsilon_H=0.1$) を比較すると、ケース④の K_T は、平均的に約0.1増加したが、相対幅 B/L の増加にともなう K_T の減少傾向には変化がない。水平板としての機能はほぼ確保されている。水平板のないスリット型の K_T は、 B/L の増加とともになだらかな減少傾向を持つ。図-4は鉛直スリット壁が2枚の場合の実験結果 K_T を示すが、スリット板が3枚に増えても K_T K_R の緩やかな減少傾向には変わりがない¹⁾。この点を考慮して図-4を参照すると、本実験のケース③、④では B/L が大きいときの K_T の減少割合が著しく大きいことが分かる。水平板の消波効果は水平板上部の進行波（碎波後の流れを含む）と水平板下部の進行波（流れ）の位相差による乱れに起因していることから、水平板は比較的波長の短い波に有効であることがわかる。

一方、反射率については、相対幅 $B/L \approx 0.1$ で0.16（ケース③）、0.19（ケース④）と同程度の値を持つが、 B/L の増加にともなう K_R の増加率は、ケース④の方が著しく低くなっている。このように、水平板に空隙を設けることにより、 B/L の増加にともなう反射率の増加傾向は不透過板に比べて緩やかにすることができる。ところで、スリット型の K_R は B/L の増加にともない減少し、 $B/L=0.25$ 付近で極小値を持つ。ところが、水平板のある場合の K_R はこのような傾向を示さない。これは、主として水平板を設置したために、前面と後面の鉛直スリットから発生した二つの反射波の相互干渉が実験の範囲内で起こりにくくなったためと考えられる。

次に、相対幅 B/L とエネルギー損失率 K_L^2 の関係を図-5に示す。スリット模型のエネルギー損失率は、相対幅 $B/L=0.25$ 付近で極大値を示す。ところが、水平板のある場合、エネルギー損失率は $B/L=0.25$ 付近で極大値を持たない。これは、

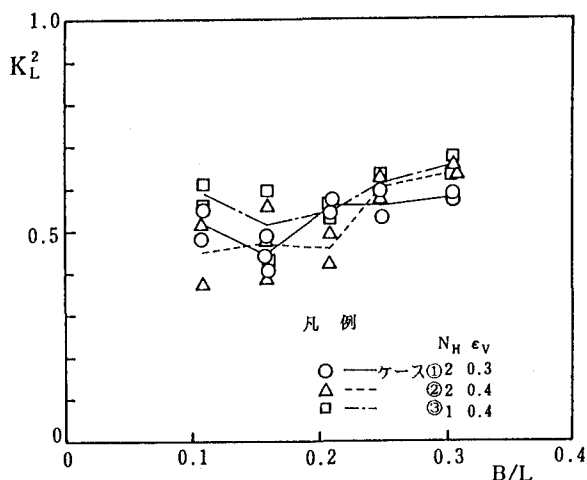


図-3 水平板付スリット型（ケース①，②，③）の K_L^2 と B/L の関係
($B/h=1.5, h_2/h=0.7, N_v=3, \epsilon_H=0$)

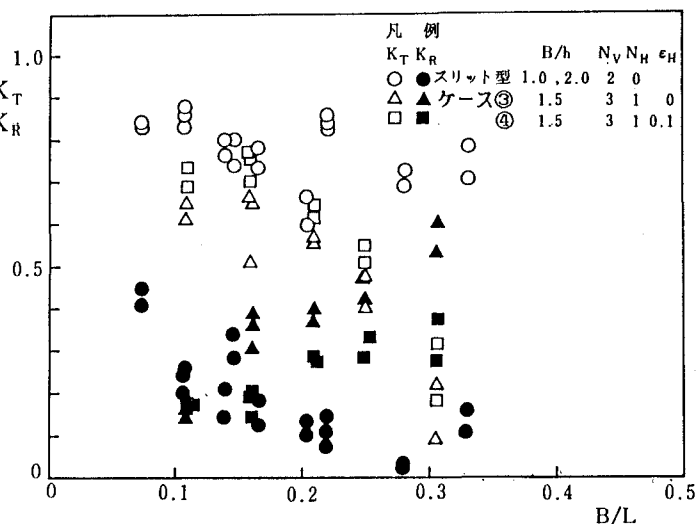


図-4 水平板付スリット型（ケース③，④）および2枚スリット型の K_T 、 K_R と B/L の関係
($h_2/h=0.7, \epsilon_v=0.4$)

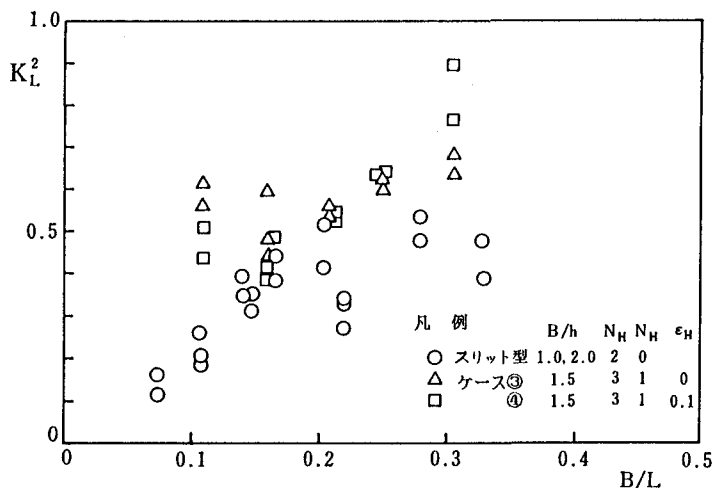


図-5 水平板付スリット型（ケース③，④）および2枚スリット型の K_L^2 と B/L の関係
($h_2/h=0.7, \epsilon_v=0.4$)

水平板を取り付けたことで反射率が極小値を持たなくなったためである。

結局、水平板付スリット構造は水平板とスリットの特性を合わせ持ち、長波長の波に対しては鉛直スリットによる乱れと反射が、比較的短波長の波に対しては水平板上部の進行波（砕波後の流れを含む）と水平板下部の進行波（流れ）の位相差による乱れと反射がそれぞれ支配的となっていることが明らかである。

2. 3 波力特性に関する実験結果

模型に作用する全波力を測定し、水平波力については、鉛直壁に作用する合田波力と比較し、鉛直波力については、等分布と仮定した波力を考え検討した。

(1) 波力の作用状況

ケース④模型に $H_0 = 12\text{cm}$ 、 $T = 2.8$ 秒の波浪を作用させた場合の模型前、後面の水位変動 η_1 、 η_2 と模型全体に作用する水平波力 F_x 、鉛直波力 F_z の時間波形を図-6に示す。図中、位相関係を見易くするために、 η_1 が最大となる位相を直線で示した。 η_1 、 F_x はほぼ同位相で変動しており、模型の前面の水位が最大になったとき岸向き最大水平力が働く。このとき上向きに鉛直波力が作用しているが、岸向き水平波力と上向き鉛直波力が最大となる時刻は一致しない。一方、模型の前面の水位が最小になったときは、岸向き水平波力は最小となっている。こうした模型前面水位と岸向き水平波力の関係は、他の模型においても同様であった。

(2) 波力特性

鉛直スリットの空隙率 ϵ_v の波力に対する影響を調べるために、無次元波力 f_x/w_0H と相対幅 B/L との関係を図-7に示す。ここに、 f_x は平均水平波力強度で岸向きを正とする。ここでは $\epsilon_v = 0.3$ のケース①と $\epsilon_v = 0.4$ のケース④を比較した。岸向き無次元波力は、通常の直立堤のように B/L が小さくなる、つまり波長が長くなるに従って増大する傾向が認められる。また鉛直スリットの空隙率 ϵ_v が 0.3 と 0.4 では、 $\epsilon_v = 0.3$ の方が平均35%程度波力が大きい。一方、沖向き無次元波力は、 B/L に関する顕著な傾向を持たず、また、空隙率が変化しても、ほとんど差は見られない。

水平板の空隙率 ϵ_H の波力に対する影響を調べるために、無次元波力 f_z/w_0H と相対幅 B/L との関係を図-8に示す。ここに、 f_z は平均鉛直波力強度で上向きを正とする。水平板に空隙のないケース③と水平板の空隙率が $\epsilon_H = 0.1$ のケース④を比較した。 f_z/w_0H は B/L による顕著な変化は認められず、その値も同程度であり、その上限値はケース③で約0.37、ケース④で約0.24である。水平板にわずかに空隙（ $\epsilon_H = 0.1$ ）を設けると、空隙のないものに比べ無次元鉛直波力は約35%と大きく減少することがわかる。

(3) 合田波力との比較

水平波力の実験値 F_x と合田式による全水平波力 F_{gx} の比と B/L との関係を図-9に示す。 F_x/F_{gx} は B/L に関係なくほぼ一定の値を示し、それぞれの上限值は岸向きで約0.35、沖向きで約0.2である。

一方、鉛直波力については、水面付近の水平板には等分布波力が作用するものと考え、 αw_0H と表すと、図-8より、ケース④の α は約0.2となった。

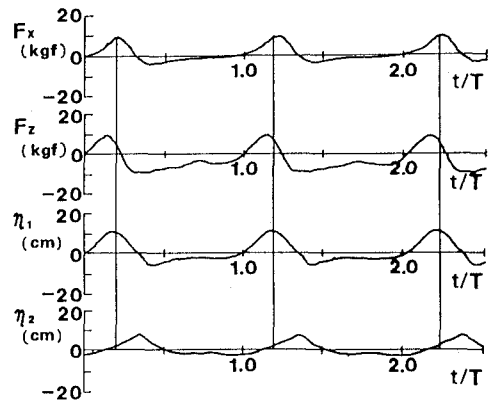


図-6 水平板付スリット型模型の波力と水位の時刻歴波形
(ケース④, $T=2.8\text{SEC}$, $H_0=12\text{cm}$)

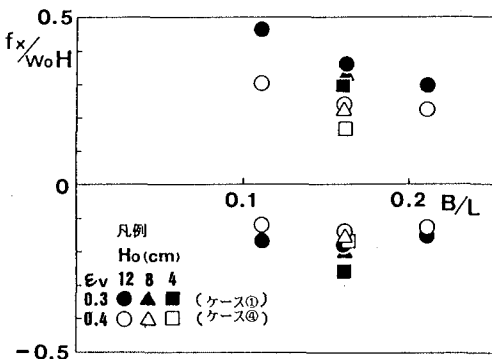


図-7 水平板付スリット型（ケース①，④）の f_x/w_0H と B/L の関係

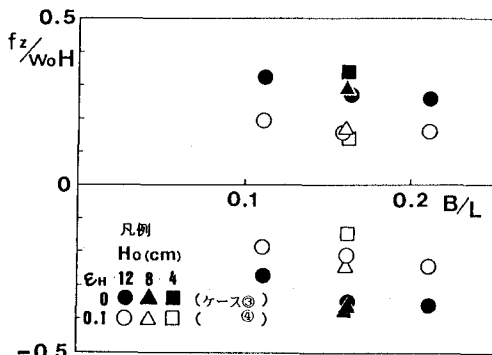


図-8 水平板付スリット型（ケース③，④）の f_z/w_0H と B/L の関係

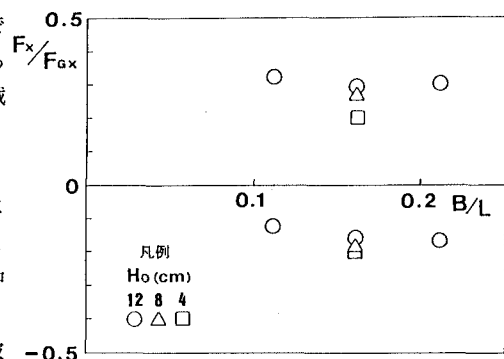


図-9 水平板付スリット型（ケース④）の F_x/F_{gx} と B/L の関係

3. 不規則波実験

3. 1 実験方法

実験は、規則波実験と同じ水路を用いて行った（図-1 参照）。実験モデルとしては、規則波実験で最も波力が小さかったケース④を採用した。入射波は模型設置位置で Bretschneider・光易型のスペクトル特性を有するものとし、有義波高・有義波周期を変化させ、表-3 に示す4種類の波浪条件を選定した。

3. 2 実験結果

水位変化は、模型設置地点に2台の容量式波高計を設置して測定した。データの解析は、合田らの方法による入・反射波スペクトルの分離計算、およびゼロアップクロス法によった。反射率、透過率とも有効周波数帯に含まれるそれぞれのエネルギー比の平方根として定義した。また、各成分波ごとの見かけの透過率 K_T' 、反射率 K_R' を各成分波ごとの入射、透過、および反射波のスペクトル密度の比の平方根として求め、不規則波を構成する各々の成分波に対する構造物の消波特性についても検討した。

(1) 不規則波実験と規則波実験との K_T 、 K_R の比較

K_T 、 K_R と相対幅 B/L の関係を図-10に示す。 K_T は規則波の場合と同様に B/L が大きくなるにつれて減少する。ただし、規則波で見られた $B/L \geq 0.2$ での急激な減少は見られず、全体的に緩やかな減少傾向を示す。 K_T の値は0.4～0.5であり、 $B/L \approx 0.20$ では規則波より0.15程度小さく、 $B/L \approx 0.30$ では逆に規則波より0.15程度大きい。このように規則波での K_T の変化に比べて不規則波での K_T の変化が平均化された理由は次のように考えられる。まず、不規則波は、有義波相当の周波数を持つ波以外にも種々の周波数の成分波を含んでいる。一方、規則波実験の結果によると、水平板付スリット型は低周波数の波に対して透過率が大きく、高周波数の波ほど透過率が小さいという消波特性を有している。そのため、この模型では短周期成分波ほど効率良く消波されるから、有義波周期が長い場合は、有義波相当の規則波に比べ不規則波の K_T が小さくなる。逆に有義波周期が短い場合は、透過率が大きい長周期成分波の影響で、不規則波の K_T は大きな値となる。その結果、規則波実験で波力は小さいが、低周波域で透過率が0.6以上となるケース④の構造でも透過率が0.6以下となった。一方、 K_R は、規則波の場合と同様に緩やかな増加傾向を示し、規則波の場合とほぼ同等な値となった。

(2) 周波数別の消波特性

スペクトル形状の変化に関し、 $H_{1/3} = 6.46\text{cm}$ 、 $T_{1/3} = 1.24\text{sec}$ の場合を1例として図-11に示す。反射波スペクトルは、入射波のエネルギーレベルを全体的に低下させたものとなっている。透過波スペクトルも入射波のエネルギーレベルを全体に下げた形に近いが、 $f \geq 1.1\text{Hz}$ では、透過波のエネルギーレベルが高くなっている。これは、水平板上で

表-3 水理条件

諸元 実験波	$(H_{1/3})_{1/3}$ cm	$(T_{1/3})_{1/3}$ s
1	4	1.2
2	4	1.6
3	8	1.6
4	8	2.0

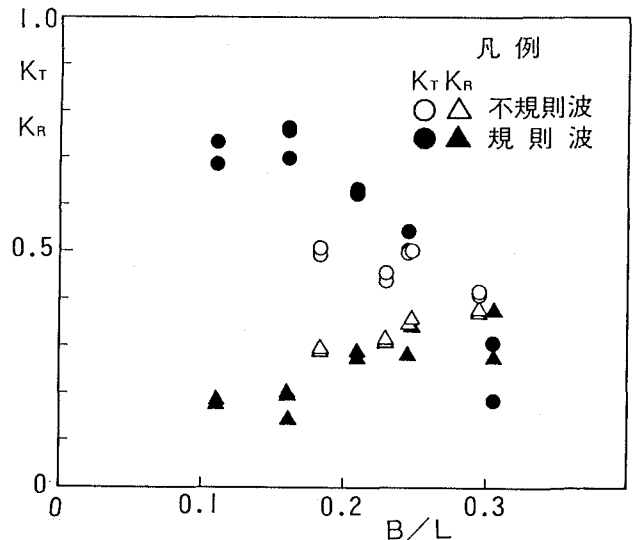


図-10 不規則波実験と規則波実験の K_T 、 K_R と B/L の関係

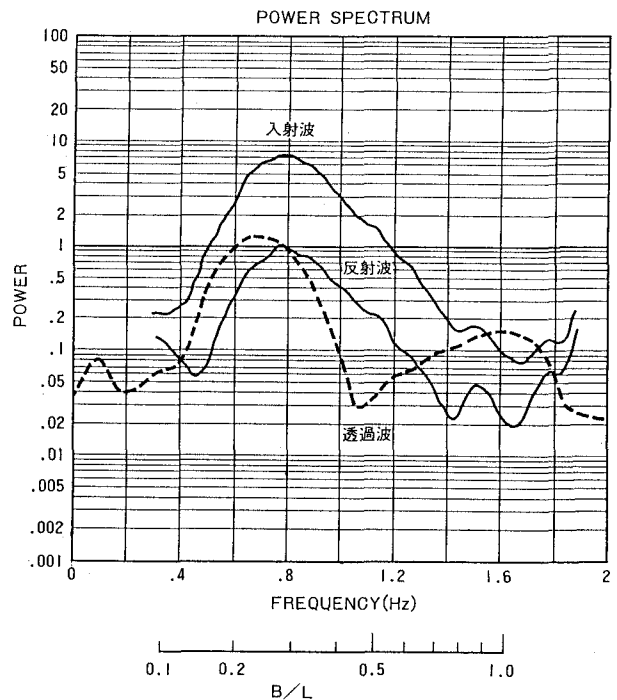


図-11 入射、透過、反射波のスペクトル密度
($H_{1/3} = 6.46\text{cm}$, $T_{1/3} = 1.24\text{sec}$)

起こる碎波、乱れ等の影響で、低周波成分から高周波成分へのエネルギーの移行が生じているためと考えられる。また、入射波のスペクトルピークに比べて、透過波のスペクトルピークは低周波側へ移動している。これは、入射波スペクトルのピークより高周波数側の成分波が低周波側の成分波より効率よく消波されたからと考えることができる。

(3) K_T' , K_R' と周波数の関係

見掛けの透過率 K_T' 、反射率 K_R' を図-12に示す。 K_T' は0.5Hz から高周波になるにつれて減少し、1.1Hz 付近で極小となり、さらに高周波域では増加している。高周波域での K_T' の増加の理由は、水平板上で起こる碎波乱れ等によって高周波成分へのエネルギーの移行が起こったためである。 K_R' は周波数が高くなるにしたがい徐々に増加する。これは、規則波実験の結果とよく一致している。

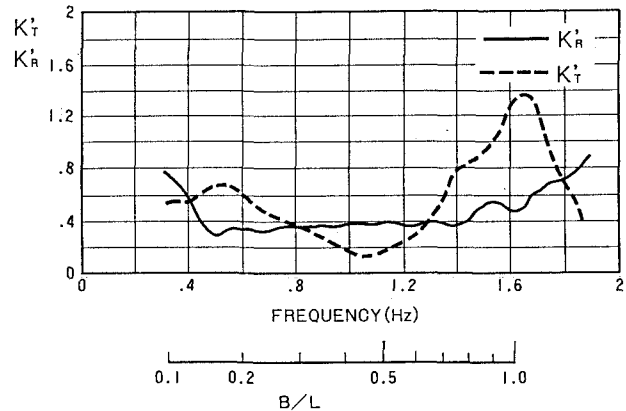


図-12 見掛けの透過率 K_T' 、反射率 K_R'
($H_{1/3}=6.46\text{cm}$, $T_{1/3}=1.24\text{sec}$)

4. 結論

本研究では水面付近に設置された水平板と鉛直スリット壁から成る水平板付スリット型海域制御構造物の規則波作用下での消波特性と全体波力、および不規則波作用下での消波特性について検討を行った。この結果、規則波実験からは結論①～⑥が、また不規則波実験からは⑦～⑨が得られた。

- ①当模型の K_T は、 B/L の増加に伴い減少し、特に、 $B/L \geq 0.2$ で急激な減少傾向を示す。一方、反射率 K_R は、 B/L の増加に伴い増加するが、その増加傾向は緩やかである。
- ②スリットの空隙率を $\varepsilon_v = 0.4$ から $\varepsilon_v = 0.3$ と小さくしたとき、 K_T は平均して約0.05小さく、 K_R は約0.05大きくなった。
- ③水平板に空隙 ($\varepsilon_h=0.1$) を設けた場合、 K_T は平均して約0.1増加した。ただし、 B/L の増加に伴う K_T の減少傾向は不透過水平板と同様の傾向であった。一方、 B/L の増加に伴う K_R の増加傾向は不透過水平板に比べて緩やかであり、水平板を透過性にすることにより反射率をかなり小さくすることができる。
- ④鉛直スリットの空隙率を0.4から0.3に変化させると、水平波力強度は平均35%程度増加した。
- ⑤水平板の空隙率を0.1とすると、空隙なしに比べ平均35%程度鉛直波力が低減した。
- ⑥実用化の可能性の高い基本モデルとしては、透過率はやや劣るが低反射で作用波力の小さいケース④模型があげられる。
- ⑦不規則波実験の場合も K_T が B/L の増加につれて減少する傾向は同じであるが、規則波実験で見られた $B/L \geq 0.2$ での急激な減少傾向は見られず、規則波に対する K_T の変化が平均化され、全体的に緩やかな減少傾向を示す。その結果、実験の範囲内では透過率の最大値は $K_T \approx 0.5$ となった。
- ⑧ K_R は B/L が増加するにつれて緩やかに増加し、最大で $K_R \approx 0.4$ である。これは、規則波実験の場合とほぼ一致している。
- ⑨不規則波の各周波数成分波ごとの透過、反射特性は、規則波実験の結果とよく一致する。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所河川部海岸研究室：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号，1987。
- 2) 建設省土木研究所河川部海岸研究室：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号，1988。