

不規則波に対する重力式カーテン防波堤 の波浪制御効果について

WAVE REFLECTION AND TRANSMISSION ABOUT A GRAVITY-TYPE CURTAIN-WALLED BREAKWATER FOR IRREGULAR WAVES

中村孝幸¹・中村文彦²・川部正司²・井上温人³・森本 睦³

Takayuki NAKAMURA, Fumihiko NAKAMURA, Shouji KAWABE, Nukuto INOUE and Mutumi MORIMOTO

¹正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科(〒790 愛媛県松山市文京町3番)

²正会員 兵庫県土木部(〒650 兵庫県神戸市中央区下山手通5-10-1)

³正会員 工修 (株)ニュージェツク(〒542 大阪府大阪市中央区島之内1-20-19)

Wave reflection and transmission characteristics about a curtain-walled breakwater of gravity-type were examined in both regular and irregular wave environments. At first, the representative wave analysis for a group of irregular waves with different statistical properties was adopted to examine reflection and transmission coefficients of the breakwater. These coefficients were also obtained for regular waves and compared with each other. Secondary, frequency characteristics of reflected and transmitted waves about the breakwater were examined through the use of spectral analysis. Reflection and transmission coefficients as a system function of a linear system were obtained and again compared with those of regular waves. It was confirmed that the reflection and transmission coefficients for regular waves can be used for the case of irregular waves if the significant wave is used as a representative wave. However, it must be noted that frequency characteristics of incident and transmitted waves are different about the breakwater.

Key Words: Gravity-type breakwater, curtain-walled breakwater, irregular wave, wave reflection and transmission, representative wave analysis, spectral analysis

1. 序論

従来、カーテン防波堤は、比較的波の静穏な内海や内湾を中心にして利用され、一般に杭式構造で支持されることが多い。このような支持方式は比較的小水深の海域で使用されているが、内海や内湾に面する港湾でも、大水深となる場合も見られ、このとき杭式の支持構造を利用することはモーメント長が長くなることなどから不経済になる。また、従来よりの重力式の混成堤では、消波対象波から考えて過大投資になりやすい。

既に著者らは、内海や内湾で、しかも大水深にある港湾域の防波施設として、上記した2つの形式の防波堤の折衷形式として、重力式カーテン防波堤を新たに提案した。この防波堤は、概略的には従来のカーテン防波堤を下部コンクリート構造体に剛結したついで方式にしたもので、主に下部構造体の重量で抵抗する重力式の防波堤である。

本研究は、主に現地で見られる不規則波を対象にして、重力式カーテン防波堤による透過波および反

射波の実態を模型実験により明らかにすると共に、その予測法についても規則波に関する理論的な成果や実験結果に基づき検討する。特に、ここでは、有義波高に代表されるような波高特性およびスペクトルに代表されるような周期特性の両者に着目する。この際、模型堤体には、上部工矩形体、支持鋼管および下部コンクリート構造体などを正確に再現して、現地の構造物に即した模型を用いた。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

実験には、長さ28m、幅1m、高さ1.25mの2次元水槽を用いた。この水槽の一端には、サーボ式モータを動力源とする反射波吸収式の造波装置が、他端には端部からの再反射波を防ぐために砕石からなる1/5勾配の消波工が設けてある。

模型堤体には、原型の重力式カーテン防波堤を1/23.6に縮尺した模型を用いた。この堤体は、図-1に示すように、上部矩形堤およびカーテン版を支えるための鋼管を下部コンクリート構造体に剛結

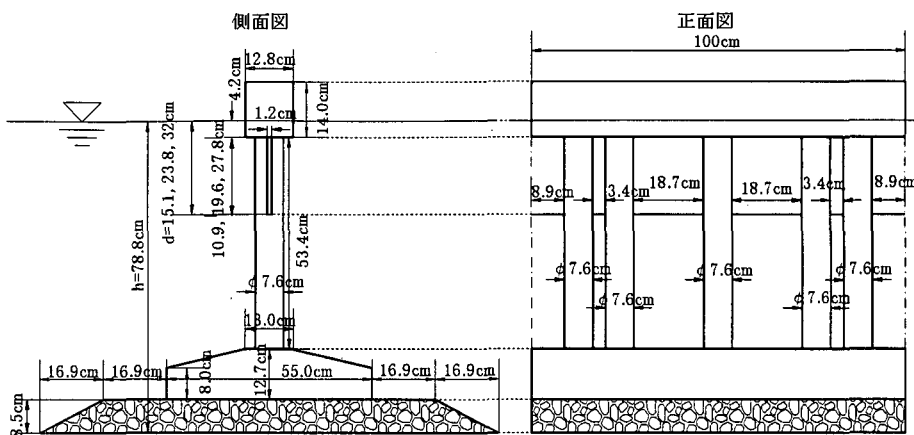


図-1 重力式カーテン防波堤の模型(高潮位時を想定)

したついで方式の構造体である。このとき支持鋼管は、現地を想定して図中に示すように水路幅の方向に全部で5本設けた。また、下部コンクリート構造体は、粒径 5~10mm の採石を締め固めた基部マウンド上に設置した。

(2) 実験条件

実験では、カーテン壁部分を取り替えることで吃水を3種類に、また設置水深を高潮位と低潮位に対応する2種類に変化させた。以下では、高潮位を想定した設置水深 $h=78.8\text{cm}$ のときの結果のみについて紹介する。作用波には、不規則波と規則波の両者を用い、不規則波では、各種のピーク周波数およびパワーをもつブレッグシュナイダー・光易のスペクトルを標的スペクトルとして造波した。一方、規則波実験では、波高 H がほぼ 6.5cm と 12.5cm の2種類、周期 T が $0.72\text{s} \sim 1.75\text{s}$ の範囲の8種類を用いた。

不規則波実験では、造波板よりの再反射波の影響が少なくなるように、反射波吸収方式で造波した。このとき、入・反射波の分離推定が容易となるように、堤体の反射側には計3台の波高計を $1/4$ 波長および $1/8$ 波長の間隔で配置した。また、作用させた不規則波の特性を精確に把握するため、模型堤体のない状況下で入射波の測定実験も別途に実施した。なお反射波は、不規則波、規則波の場合共に入・反射波の分離推定法¹⁾を介して求めた。

3. エネルギー的な特性量に基づく反射・透過率

従来、不規則波に対する反射率 C_r ・透過率 C_t は、周波数スペクトルの積分量であるエネルギー Spektrum に基づき推定されてきている¹⁾。エネルギー Spektrum は、水面変動量の分散量 σ^2 に等しく、ここでも同様の定義による透過率 C_t ・反射率 C_r を求めてみた。これらは、次式で定義される。

$$C_r = \sqrt{\frac{\sigma_r^2}{\sigma_i^2}}, \quad C_t = \sqrt{\frac{\sigma_t^2}{\sigma_i^2}} \quad (1)$$

ここに、 σ_i^2 、 σ_r^2 、 σ_t^2 ：それぞれ入射波、反射波、透過波の水面変動の分散量で、入射波および反射波の分散量については、入・反射波の分離推定法により、透過波のそれは直接測定により求めた。

式(1)による反射・透過率は、1波群の不規則波に対する代表量として定義されており、規則波のように周期別の詳細な検討は難しい。以下では、式(1)による反射・透過率をエネルギー的な特性量に基づく反射・透過率と呼ぶことにしたい。

図-2~図-4は、エネルギー的な特性量に基づく反射・透過率の相対水深 $h/L_{1/3}$ (h ：設置水深、 $L_{1/3}$ ：有義波の波長) による変化を示し、各図は吃水深 d (カーテン壁および上部矩形堤の吃水の和) が順次深くなるときに対応する。なお、これらの図は、各吃水深のケースに対して、表-1に示す各種の不規則波を作用させたときの結果に相当する。

図中には、中村・井手²⁾による減衰波理論による算定結果についても併せ示した。このとき、算定に必要な線形抵抗係数 fc には、非減衰波に相当する $fc=0.0$ と中村ら³⁾によりカーテン防波堤に対する適用性が検討されている $fc=0.15$ の両者を用いた。また、算定に必要なもう一つの量である減衰波領域の広さについても、中村らと同様に堤体前後の $1/8$ 波長の領域とした。ただし、このような算定結果は、あくまでも規則波に対するもので、しかも断面2次元解析に基づくことから、模型堤体で設置されている鋼管杭の影響は考慮できない。

これらの図より、 C_r 、 C_t の実験結果は、吃水深 d に関係なく、相対水深 $h/L_{1/3}$ が増大して短周期の条件になると、反射率は増加、透過率は減少する傾向が認められる。そして、当然のことながら、吃水深 d

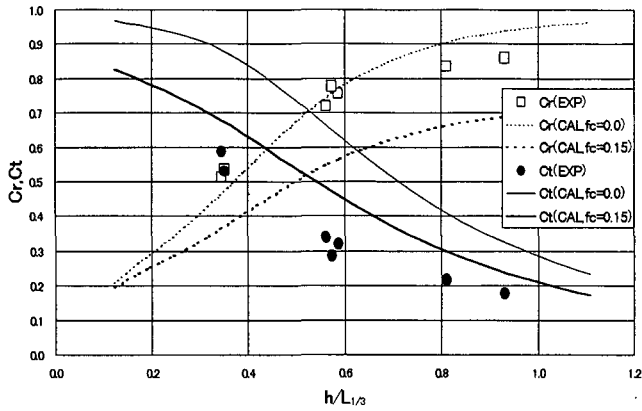


図-2 エネルギー的な特性量に基づく反射・透過率
($d=15.1\text{cm}$, $h=78.8\text{cm}$, $d/h=0.192$)

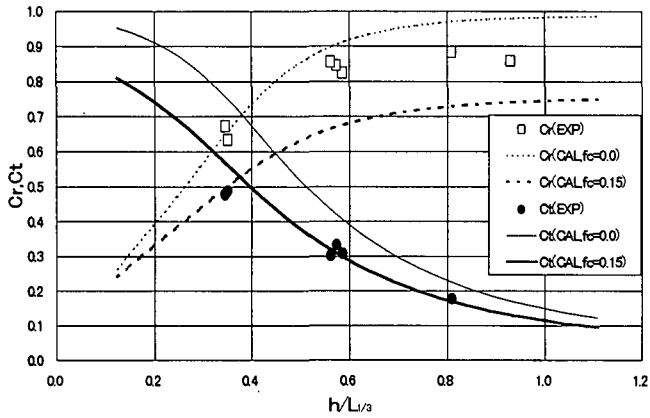


図-3 エネルギー的な特性量に基づく反射・透過率
($d=23.8\text{cm}$, $h=78.8\text{cm}$, $d/h=0.302$)

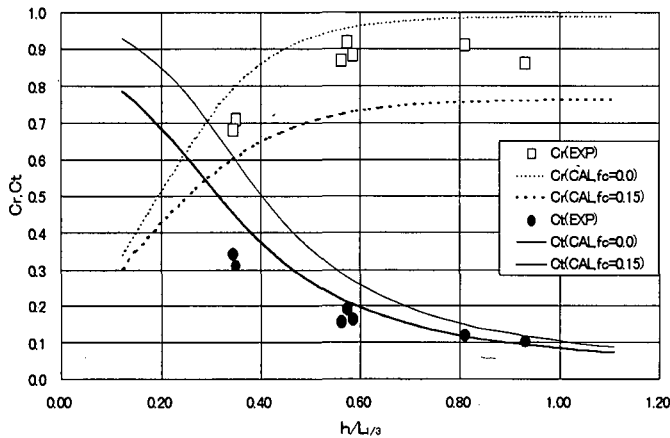


図-4 エネルギー的な特性量に基づく反射・透過率
($d=32.0\text{cm}$, $h=78.8\text{cm}$, $d/h=0.406$)

が深いケースでは、浅いケースのそれに比較して、 $h/L_{1/3}$ の全般にわたり透過率が低下し、反射率は増加することなども分かる。入射波実験で測定された有義波高は、表-1に示すように各種のものが採用してあるが、有義波高によるCr, Ctの有意な差異はほとんど認められず、カーテン防波堤による波変形に対して線形現象の強いことが示唆される。

次に、減衰波理論による算定結果と実験結果を比較すると、透過率については、図-2の最も吃水の

表-1 実験に用いた不規則波の諸量

$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (cm)	分散(cm^2)	$h/L_{1/3}$
0.74	2.7	0.5	0.930
0.79	3.1	0.6	0.810
0.93	5.0	1.6	0.585
0.94	2.9	0.5	0.573
0.95	6.3	2.4	0.561
1.22	11.0	7.5	0.351
1.23	13.2	11.0	0.346

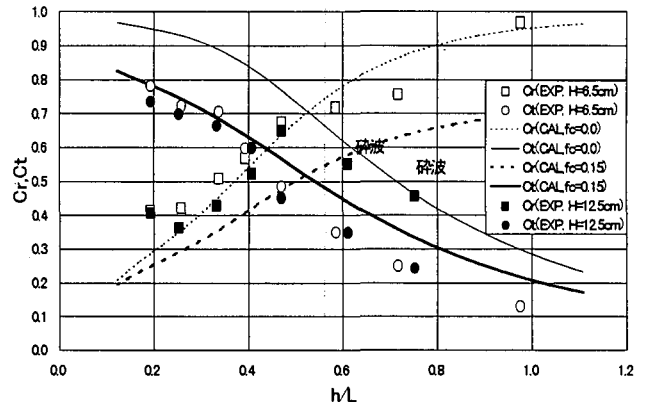


図-5 規則波に対する反射・透過率
($d=15.1\text{cm}$, $h=78.8\text{cm}$, $d/h=0.192$)

浅い条件を除けば、概略的に両結果は定性的にも定量的にもほぼ一致している。ただし、実験結果の方が、算定結果よりも小さくなる傾向が強く、これは解析で考慮されていない鋼管杭の影響と推測される。最も吃水の浅い条件のときに差異が見られるのは、スラミング現象など波変形に及ぼす上部矩形堤の影響が強く現れることによると考えられる。

一方、反射率は、実験結果が $fc=0.0$ とした非減衰波と $fc=0.15$ とした減衰波のときの算定結果の間にあり、どちらかと言えば、非減衰波のときの算定結果の方がより実態に近い。

図-5～図-7は、規則波に対する反射・透過率の結果を上記の不規則波の場合と同様にして示す。図中には、やはり減衰波理論による算定結果を併せ示した。これらの規則波に対する反射・透過率の実験結果と前出の不規則波に対する結果を比較すると、吃水深により多少の差はあるが、絶対値はほぼ等しく、相対水深による変動傾向も一致している。

また、規則波に対する実験結果と算定結果を比較すると、不規則波のときと同様に、透過率は $fc=0.15$ とした減衰波理論による算定結果と、また反射率は $fc=0.0$ とした非減衰波理論によるそれと対応がよい。

以上の検討より、不規則波に対するエネルギー的な特性量に基づく反射・透過率は、不規則波の代表波として有義波を用いると、概略的に規則波に対す

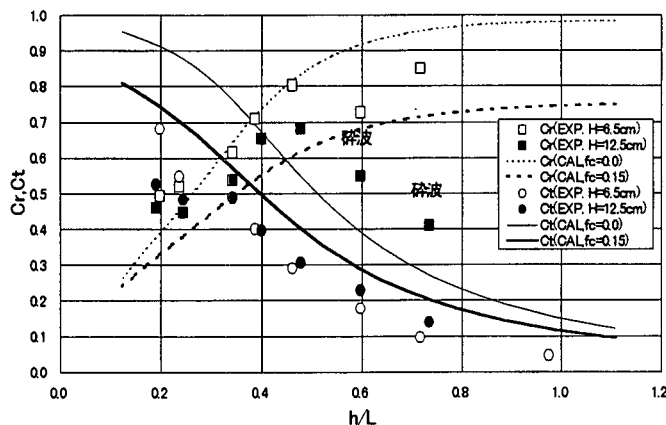


図-6 規則波に対する反射・透過率
($d=23.8\text{cm}$, $h=78.8\text{cm}$, $d/h=0.302$)

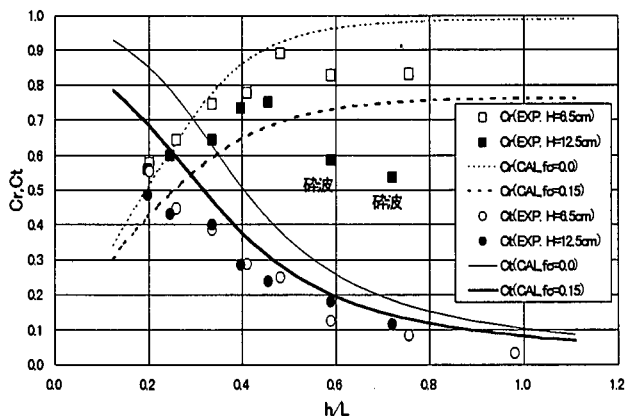


図-7 規則波に対する反射・透過率
($d=32\text{cm}$, $h=78.8\text{cm}$, $d/h=0.406$)

る結果と酷似しており、規則波に対する実験結果がほぼ準用できることや、減衰波理論による算定では、反射率と透過率の推定に異なる線形抵抗係数を用いる必要のあることなどが確認された。

4. 透過波および反射波のスペクトル

上記では、代表波として有義波を用いると、エネルギー的な特性量に基づく反射・透過率の推定に規則波の結果がほぼ準用できることが確認された。しかしながら、これはあくまでも波高値に関する特性であり、周期特性については不明である。ここでは、このような周期特性に関する検討を行うため、入射波および反射・透過波のスペクトルに着目してみる。

図-8～10は、吃水深 d が順次深くなるときの入射波および反射・透過波のスペクトルを示す。ここで、入射波に用いた不規則波は、スペクトル形状など同一の統計量をもつものに固定してある。図中には、次式で定義される線形システムを仮定したときのシステム関数的な透過率 $C_t(f)$ 、前出の規則波に対する実験結果および減衰波理論による算定結果も再度併せ示した。

$$C_t(f) = \sqrt{\frac{S_t(f)}{S_i(f)}} \quad (2)$$

ここに、 $S_i(f)$ 、 $S_t(f)$ ：それぞれに入射波、透過波のスペクトルである。そして、このシステム関数的な透過率 $C_t(f)$ は、入力と出力の間のシステムが線形るとき、すなわち入射波がカーテン防波堤に作用するときの透過波の出現が線形現象ならば、規則波を入力とするときの結果と一致すべきものである。

これらの図より、吃水深を深くすると、透過波のスペクトルは低減することや、その傾向は各吃水深において高周波数側で顕著であることが分かる。こ

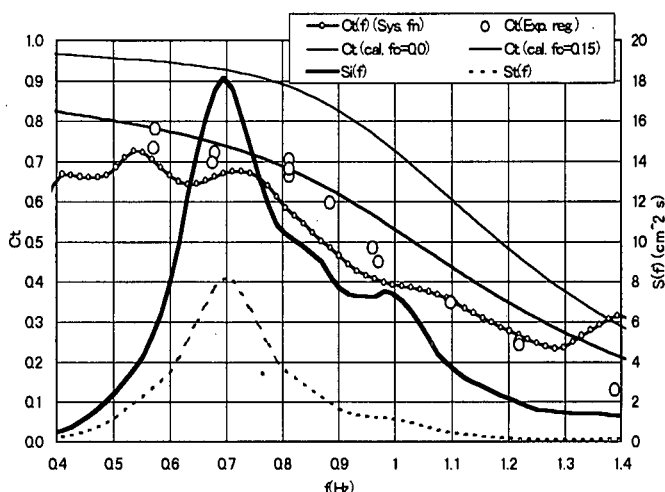


図-8 入射波、透過波のスペクトル及び透過率
($d=15.1\text{cm}$, $h=78.8\text{cm}$, $d/h=0.192$, $H_1/3=11.0\text{cm}$, $T_{1/3}=1.22\text{s}$)

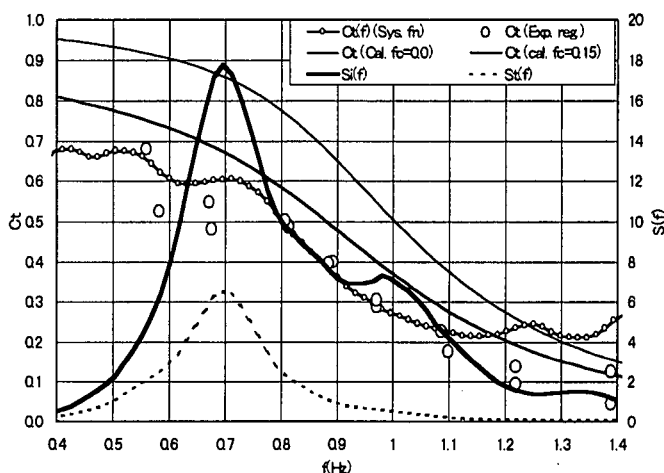


図-9 入射波、透過波のスペクトル及び透過率
($d=23.8\text{cm}$, $h=78.8\text{cm}$, $d/h=0.302$, $H_1/3=11.0\text{cm}$, $T_{1/3}=1.22\text{s}$)

れは、図中の減衰波理論の算定結果に見られるように、カーテン防波堤では、吃水深が深くなるほど、また高周波数の成分ほど、入射波をより強く低減させるためである。

図中のシステム関数的な透過率 $C_t(f)$ と規則波に対する透過率の実験結果を比較すると、規則波の結果の方が多少大きくなる傾向はあるが、図-9の中吃

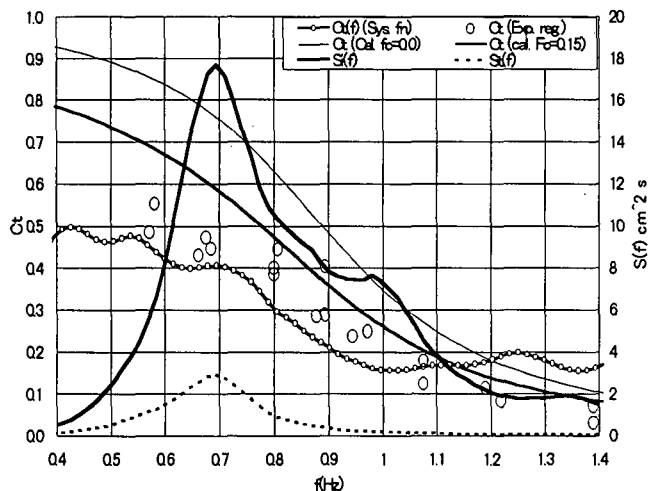


図-10 入射波、透過波のスペクトル及び透過率
($d=32\text{cm}$ $h=78.8\text{cm}$ $d/h=0.406$ $H_1/3=11.0\text{cm}$ $T_{1/3}=1.22\text{s}$)

水の例のように両者がほぼ一致する場合も見られる。また、減衰波理論による算定結果とシステム関数的な透過率 $C_t(f)$ を比較すると、上記の 2. の結果と同様に、 $fc=0.15$ とした算定結果の方が $C_t(f)$ により近いが、 $C_t(f)$ はこれよりさらに低く現れている。

図-11 は、透過波の有義波周期 $T_{t1/3}$ と入射波のそれ $T_{1/3}$ の比を入射波を対象にした相対水深 $h/L_{1/3}$ による変化で示す。図中には、各吃水深の結果を一括して示す。この図より、透過波の $T_{t1/3}$ は入射波の $T_{1/3}$ より大きく、透過波の周期特性は入射波のそれより長周期側に移行することがわかる。そして、この傾向は、吃水深の深い場合により顕著になることも認められる。このような周期特性の変化は、前述したスペクトルの変形特性を考えれば容易に推測できる。このように、カーテン防波堤では、不規則波に対して、透過波の波高特性のみならず、周期特性も変化することに注意する必要がある。一般の平面波浪計算では、単に透過率や反射率のみを入力することがよく行われるが、このような便宜的な取り扱いでは不十分で、回折計算のように周期特性を踏まえた算定が必要といえよう。

最後に、図-12～14 は、各吃水深のときの入射波と反射波のスペクトルを示す。これらの図は、それぞれ図-8～10 に対応する反射波の結果である。これらの図中には、透過波の場合と同様に、システム関数的な反射率 $C_r(f)$ 、前出の規則波に対する実験結果および減衰波理論による算定結果が示してある。システム関数的な反射率 $C_r(f)$ は、式(2)で透過波スペクトルの代わりに反射波スペクトル $S_r(f)$ を代入することで求められる。これらの図より、反射波のスペクトルは、透過波のスペクトルとは逆に、吃水深が深くなるほど、また高周波数成分になるほど増加することがわかる。また、システム関数的な反射率 $C_r(f)$ は、概略的には、規則波の結果と同

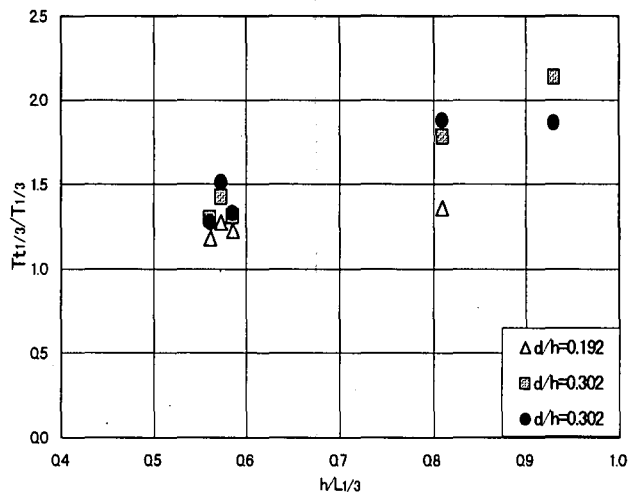


図-11 透過波と入射波の有義波周期の比

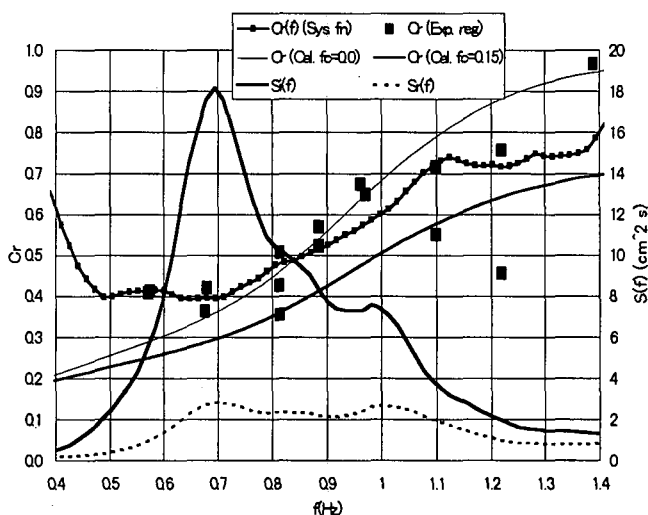


図-12 入射波、反射波のスペクトル及び反射率
($d=15.1\text{cm}$ $h=78.8\text{cm}$ $d/h=0.192$ $H_1/3=11.0\text{cm}$ $T_{1/3}=1.22\text{s}$)

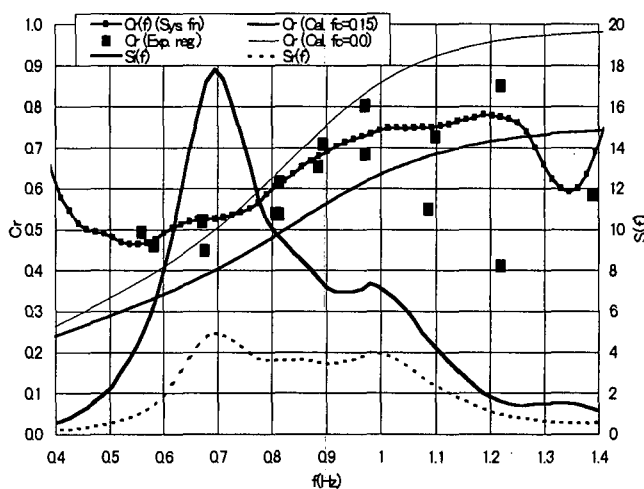


図-13 入射波、反射波のスペクトル及び反射率
($d=23.8\text{cm}$ $h=78.8\text{cm}$ $d/h=0.302$ $H_1/3=11.0\text{cm}$ $T_{1/3}=1.22\text{s}$)

様な変動傾向を示すことなども認められる。ただし、規則波の結果では、重複波の碎波の発生により、高周波数側で反射率が低下するが、不規則波ではその

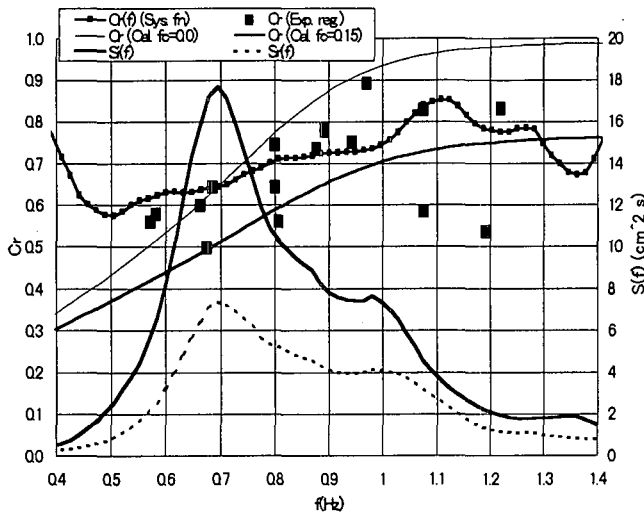


図-14 入射波、反射波のスペクトル及び反射率
($d=32\text{cm}$, $h=78.8\text{cm}$, $d/h=0.406$, $H_1/5=11.0\text{cm}$, $T_{1/3}=1.22\text{s}$)

ような傾向はあまり顕著に見られない。

5. 結語

(1) 水面変動の分散量に基づき求められる不規則波の反射率および透過率は、代表波として有義波を用いると、概略的に規則波に対する結果と酷似しており、規則波に対する実験結果がほぼ準用できる。また、これら反射・透過率の推定には、減衰波理論が利用できるが、反射率と透過率の推定には異なる線形抵抗係数を用いる必要がある。

(2) 周波数領域の解析で求められるシステム関数的な透過率、反射率は、減衰波理論により求められる算定結果と定性的に一致する。特に透過率については、定量的な対応も比較的よい。また、規則波による実験結果と比較すると、システム関数的に求められる透過率、反射率の方が若干低く現れる。

(3) カーテン防波堤では、不規則波に対して、透過波の波高特性のみならず、周期特性も変化することに注意する必要がある。そして、一般の不規則波を対象にした平面波浪計算では、透過波や反射波の取り扱いに対して、回折計算のように周期特性を踏まえた算定が望ましい。

参考文献

- 1) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治：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, 24p., 1976.
- 2) 中村孝幸・井手善彦：波の逸散現象を利用した隅角物体まわりの波変形と作用波力の算定法、海洋開発論文集、第13巻、pp177~182, 1997.
- 3) 中村孝幸・中村文彦・川部正司・井上温人・森本暁・後藤大介：重力式カーテン防波堤による波変形と作用波力におよぼす上・下部工の影響について、海岸工学論文集、第45巻、pp781~785, 1998.

(1999. 4. 19受付)