

不規則波に対する透過性防波堤の消波特性に関する数値算定法

小島 治 幸*・中牟田直昭**・吉田 明 徳***・木 原 力****

1. はじめに

透過性防波堤は、消波機能や海水交換機能を有しており静穏度の向上や水質保全を必要とする海域の防波堤として採用されつつあり、その水理特性を理論的に解析する研究も盛んに行われている。しかし従来の研究は、規則波に対する場合に限られており、不規則波にまで対応した数値算定法に関する研究は皆無と言ってよい。そこで本研究は、不規則波に対する堤体の構造条件と水理特性との関連を明らかにするため、透過性防波堤の一種である縦スリット式防波堤を対象として、著者らが開発した単一周期における規則波の理論解析¹⁾によって算出される通過率、反射率を線形重ね合わせすることにより不規則波に対する通過率と反射率等の水理量を求める算定法を提案し、その妥当性を水理実験により検証することを目的とする。さらに、実際の防波堤を想定して、縦スリット壁体二列および三列における壁体間の距離や壁体の厚さ、開口率を変えた場合の消波特性を検討した。

2. 不規則波に対する通過率・反射率の数値算定法

不規則波は、単一周期の規則波が重なり合ったものと考えられるので、波の各周波数成分に対する規則波の通過率と反射率に関する解を線形重ね合わせすることにより、不規則波に対する通過率(K_t)と反射率(K_r)（これらは波群全体としての平均的な値を表すものとして有効通過率および有効反射率と呼ぶ。）を算定することが可能である。いま、単一入射方向（ここでは垂直入射）の入射波のスペクトル密度分布 $S(f)$ を分割し、その i 番目の領域に含まれるエネルギー $E(i)$ と入射波の全エネルギー E_0 との比 $\Delta E(i) = E(i)/E_0$ を各分割領域の重みとし、それとその領域の代表周波数 $f(i)$ に対する規則波の通過率 $K_{t0}(i)$ と反射率 $K_{r0}(i)$ を用いて、 K_t と K_r は次式で推定できる。

$$K_t = \left[\sum_{i=1}^M \Delta E(i) \cdot K_{t0}(i)^2 \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$K_r = \left[\sum_{i=1}^M \Delta E(i) \cdot K_{r0}(i)^2 \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

$$\Delta E(i) = \int_{f_i'}^{f_{i+1}'} S(f) df / \int_0^\infty S(f) df \quad \dots\dots (3)$$

であり、 M は分割個数で、 f_i' と f_{i+1}' は分割された各領域の下限と上限の周波数である。

この場合、分割の方法として下記に示す2つの方法が考えられる。

算定法 1 (Method 1):

分割した面積が等しくなる、つまり $\Delta E(i)$ が等しくなるように分割する方法である。すると、式 (1)、(2) は式 (4)、(5) のようになる。

$$K_t = \left\{ \left[\sum_{i=1}^M K_{t0}(i)^2 \right] / M \right\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$K_r = \left\{ \left[\sum_{i=1}^M K_{r0}(i)^2 \right] / M \right\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

このとき、入射波の目標スペクトルとして、式 (6) で与えられる Bretschneider-光易型を採用すると、各分割領域の代表周波数 $f(i)$ は式 (7) で求められる²⁾。また、式 (3) における入射波の全エネルギー E_0 を求める積分の範囲を無限大まで取ることはできないので、ある有限な周波数で打ち切ねばならない。ここでは、エネルギーが十分小さく、 $K_{t0}(i)$ と $K_{r0}(i)$ を計算するときに安定した解が得られる限界周波数を $f_{\max} = 2.5 \text{ Hz}$ と設定し、重ね合わせ計算を行うこととした。

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \cdot \exp[-1.03 (T_{1/3} f)^{-4}] \quad \dots\dots\dots (6)$$

(f : 周波数, $T_{1/3}$: 有義周期, $H_{1/3}$: 有義波高)

$$f(i) = \frac{1.007}{T_{1/3}} \{ \ln [2M / (2i - 1)] \}^{-1/4} \quad \dots\dots\dots (7)$$

算定法 2 (Method 2):

分割する周波数が等間隔になるように分け、分割領域の面積を台形則によって求める方法 (Method 2-A) である。各分割領域の代表周波数は領域における周波数の中央値と定めた。ここで算定法を検証する場合、実験値と比較することになるが、通過率と反射率の測定値を推定

* 正会員 Engr. 九州大学助手 工学部水工土木学科

** 正会員 工修 清水建設 土木本部設計部

*** 正会員 工博 九州大学助教授 工学部水工土木学科

**** 正会員 運輸省第四港湾建設局下関調査設計所所長

するとき後述する推定法によると有効周波数の範囲を設定する必要があり、重ね合わせ計算における周波数の範囲をそれに一致させる方法(Method 2-B)が考えられる。また、実験では目標スペクトルを完全には再現することができないため、入力スペクトル形として水理実験より得られる測定値を採用する方法(Method 2-C)が考えられる。

これらの算定法の比較および分割数 M を 10, 20, 50, 100 に変えて分割個数による計算結果の違いを検討した。また、式 (6) を入射波スペクトル形としたとき、縦スリット式防波堤による通過波と反射波が持つであろうスペクトル密度分布の理論値は、次式によって求められる。

$$\left. \begin{aligned} S_T(f_i) &= S(f_i) \cdot K_{t_0}(i)^2 \\ S_R(f_i) &= S(f_i) \cdot K_{r_0}(i)^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

各周波数における通過率 $K_{t_0}(i)$ と反射率 $K_{r_0}(i)$ については、著者らにより提案されたスリット部での流体運動を流速とその加速度に比例するものとして抗力項を線形化した運動方程式で表わし、0 次の第一種のハンケル関数をグリーン関数とした周辺積分法¹⁾により求めることができる。抵抗係数 μ_1, μ_2 は規則波実験と理論解析によって決められており、 μ_1 に関しては開口率 $\varepsilon = W/W_0$ (W : スリット幅, W_0 : スリット間隔) とスリット幅と壁体厚 (B) との比 W/B で与えられ、 μ_2 に関しては $\mu_2 = 0$ という結果が得られている。

3. 水理実験の方法と解析

(1) 反射率と通過率の測定法

不規則波としての入射波が持つ全エネルギーを E_I 、堤体による反射波の持つ全エネルギーを E_R 、堤体を通過して進行して行く通過波の全エネルギーを E_T とすると、 E_I, E_R, E_T はそれぞれの波高の自乗に比例しているはずであるから波高比で定義される反射率 K_r と通過率 K_t はそれぞれ次式によって推定される。

$$\left. \begin{aligned} K_r &= [E_R/E_I]^{1/2} \\ K_t &= [E_T/E_I]^{1/2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

これらの反射率と通過率は波群全体としての平均的な値を表し、数値算定法のところで定義した有効反射率、有効通過率である。実際に、 E_I, E_R, E_T を求めるには造波水路内に形成されている合成波から入射波と反射波、通過波をそれぞれ分離する必要がある。ここでは、合田らが提案した分離推定法³⁾を用いることとする。この方法は、近接する2波高計(間隔 Δl)における同時水位波形を有限フーリエ級数で表示し、2測点間の位相差を利用して各成分波ごとに入射波と反射波、通過波の振幅を求めるものである。しかし、この方法は、与えられた波高計間隔 Δl に対して分離可能な周波数域が限定されるため有効周波数範囲 ($f_{\min}, f_{\max}$) を設定し、この範囲に含まれている入射波と反射波、通過波の各エネルギーを

フーリエ級数の各成分波ごとのスペクトル密度を用いて計算することになる。

また、重み付き平滑化関数(フィルター)を用いて各成分波の入射波および反射波、通過波の推定スペクトル $S_I(f_i), S_R(f_i), S_T(f_i)$ を算出し、それより各成分波ごとの反射率、通過率(見かけの反射率、通過率と呼ばれている。)を次式によって求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} K_r'(f_i) &= [S_R(f_i)/S_I(f_i)]^{1/2} \\ K_t'(f_i) &= [S_T(f_i)/S_I(f_i)]^{1/2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

なお、フィルターとしては、桑島、永井の結果⁴⁾にしたがい、放物線型フィルターを使用した。

(2) 実験の方法と条件

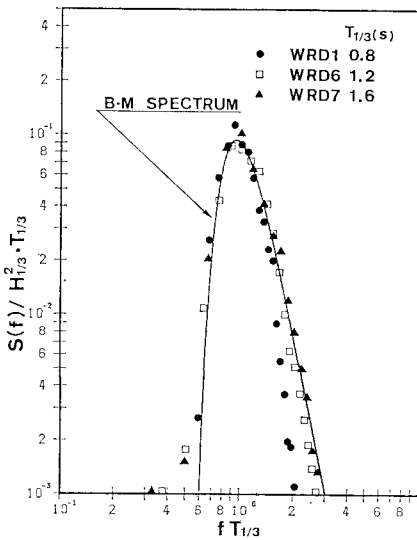
実験は、全長 27 m, 水路幅 0.3 m, 高さ 0.5 m の不規則波造波水路を用い、造波機は低慣性直流電動駆動のピストン型造波機である。実験に使用した不規則波は、目標スペクトル形として式(6)で表される Bretschneider-光易型スペクトルを用いて、表-1 に示す 8 種類である。表-1 には実現した不規則波の有義波波高と周期をも示している。実験波によっては、有義波波高と周期が目標値とやや異なる場合もあるが、その差異は小さいのでこれ以後の図や表および文中では、有義波波高と有義波周期あるいはそれに対応する周波数の値として目標値を用いることとする。また、表-1 には、解析に用いた各実験波における有効周波数範囲が示されている。

図-1 に一例として 3 種類の実験波のスペクトル形を示す。横軸と縦軸は周波数 f とスペクトル密度 $S(f)$ を無次元化したものである。実線は目標スペクトルを表しており、高周波領域を除いて実験波のスペクトルが目標スペクトルをよく表現していることが分かる。高周波領域では、スペクトル密度が目標スペクトルより小さいものとなっている。特に、有義波周期の短い波ほどその傾向が大きく現れている。また、実験波の波高頻度分布は、ほぼレーリー分布に従っていることが確認されている。

実験ケースは、1 列壁体および 2 列壁体、3 列壁体の場合を行い、1 列壁体の場合は、開口率を 0.1, 0.2, 0.3 とし、各開口率において壁体の厚さを 3 種類変えて、合計 9 ケースとした。2 列壁体の場合は、開口率と壁体厚

表-1 不規則波の諸元と有効周波数範囲

波 種	有義波周期 $T_{1/3}(\text{sec})$		有義波波高 $H_{1/3}(\text{cm})$		分 離 計 算	
	目標波	実現波	目標波	実現波	$f_{\min}(\text{Hz})$	$f_{\max}(\text{Hz})$
WRD 1	0.8	0.824	3.0	2.815	0.558	1.675
WRD 2	0.9	0.900	3.0	2.980	0.558	1.675
WRD 3	0.8	0.830	4.5	4.070	0.558	1.675
WRD 4	0.9	0.876	4.5	4.140	0.558	1.675
WRD 5	1.0	0.973	4.5	4.340	0.558	1.675
WRD 6	1.2	1.173	4.5	4.345	0.359	1.675
WRD 7	1.6	1.629	4.5	4.550	0.359	1.675
WRD 8	2.0	1.902	4.5	4.800	0.359	1.675



図—1 実験波のスペクトル形

を一定として壁体間隔を変えたケースを行い、3列壁体の場合は、壁体間隔を一定として前後壁の開口率と壁体厚を変えた3ケースを行った。各ケースにおける実験は、水深を0.35mの一定として、縦スリット壁体を水路のほぼ中央に設置し、表—1に示した8種類の不規則波を作用させ、堤体から入射波側と通過波側5mの位置に設置した2組の2本の波高計($dl=0.2$ m)により計測された水面変位のデータを造波開始2分後からデータレコーダに記録した。このうち、実験値としての通過率と反射率を求めるために使用したデータは、造波開始4～6分後から0.05秒間隔で A/D 変換された2048個のデータである。各波種において同じ実験を2回あるいは3回を行い、有効通過率、反射率はそれらの測定値の平均とした。

4. 結果と考察

(1) 計算値と実験値の比較

不規則波に対する数値計算の各算定法の比較とその検

証をするため1列壁体の壁体厚が $B/h=0.343$ で開口率が0.2の結果を表—2にまとめ、1列、2列、3列壁体における数値計算結果と実験結果をそれぞれ図—2, 3, 4に示す。2列壁体は、前後壁とも開口率を $W_1/W_0=W_2/W_0=0.2$ 、壁体厚を $B_1/h=B_2/h=0.343$ とした場合で、3列壁体は、開口率を0.2、壁体厚を水深の0.17倍と一定にし壁体間隔を $SD_1/h=SD_2/h=0.5$ としたケースである。図は、縦軸に有効通過率(K_t)と反射率(K_r)を取り、横軸に周波数(f)と相対水深(h/L)を取っている。不規則波の計算値、実験値とも有効波周期に対応する周波数および相対水深で図示しており、実験値の有効通過率を●で、有効反射率を○で示している。また比較の意味で、規則波における通過率を▲で、反射率を△でプロットしてある。計算結果は、算定法1と算定法2-Bをそれぞれ一点鎖線と実線で示し、重ね合わせて計算の基本データとなる単一周期の規則波に対する計算値を破線で示した。

表 2 より各算定法の比較を行うと、分割領域の面積が等しくなるようにした算定法1と周波数を等間隔に分割する算定法2-Aでは計算結果に違いはほとんどみられず、分割の仕方による計算結果への影響はないことが分かった。また、算定法2-Bと2-Cを比べると、有義波周期の小さいつまり周波数の大きいところで通過率、反射率とも若干差異が生じるが、大差はない。これより、実験波程度に目標スペクトルを再現していれば入射波の入力スペクトルとして実験値を採用しなくても良いものと思われる。最後に算定法1と算定法2-Bを比較すると、有義波周波数の小さいところでは両者の違いはほとんどないが、周波数が大きくなるにしたがって算定法2-Bによる算定値の方が通過率、反射率とも実験値に近づく結果となった。従って、計算値を実験値と比較する場合、重ね合わせ計算の周波数範囲を測定値の有効周波数範囲に合わせる必要がある。また、分割個数による計算結果への違いは、1列壁体のように基本データとなる規

表—2 各算定法による通過率と反射率および測定値

	$T_{1/3}$	0.8 (S)		0.9 (S)		1.0 (S)		1.2 (S)		1.6 (S)	
算 定 法	M	K_t	K_r	K_t	K_r	K_t	K_r	K_t	K_r	K_t	K_r
1	10	0.248	0.875	0.291	0.846	0.331	0.818	0.400	0.765	0.507	0.674
	50	0.249	0.874	0.292	0.846	0.331	0.818	0.401	0.766	0.507	0.676
2-A	10	0.258	0.867	0.299	0.840	0.337	0.814	0.405	0.763	0.508	0.675
	50	0.256	0.868	0.297	0.841	0.335	0.814	0.403	0.764	0.508	0.675
2-B	10	0.287	0.842	0.320	0.820	0.353	0.797	0.415	0.750	0.513	0.668
	50	0.287	0.842	0.320	0.820	0.353	0.797	0.415	0.750	0.512	0.668
2-C	10	0.295	0.836	0.327	0.815	0.353	0.796	0.417	0.750	0.511	0.670
	50	0.295	0.836	0.326	0.815	0.352	0.797	0.417	0.751	0.510	0.670
規 則 波		0.275	0.846	0.322	0.814	0.367	0.777	0.443	0.720	0.553	0.619
測 定 値		0.336	0.768	0.367	0.743	0.339	0.736	0.420	0.714	0.558	0.646

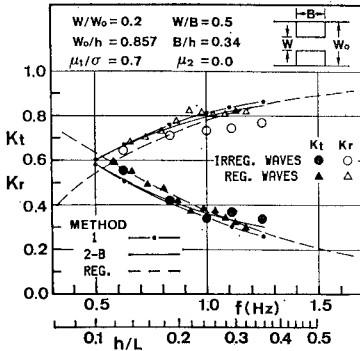


図-2 1列壁体の計算値と実験値

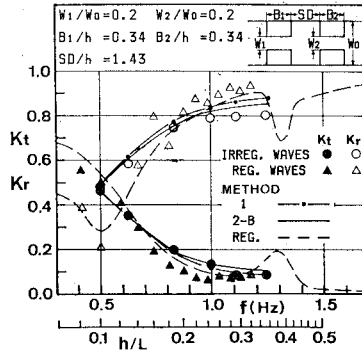


図-3 2列壁体の計算値と実験値

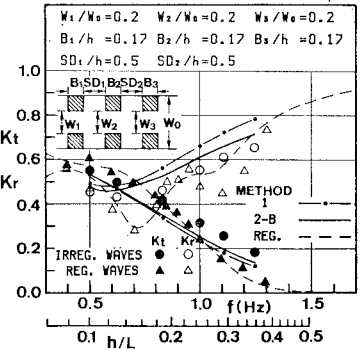


図-4 3列壁体の計算値と実験値

則波における通過率と反射率の周波数特性が図に示されるようにほぼ一様に変化する場合は、重ね合わせ計算の分割数を10程度に取れば十分であるが、2列および3列壁体のように規則波に対する通過率と反射率が特定の周波数で急変するような周波数特性を持つ場合は分割数によって値に若干の違いが生じた。ただし、 $M=50$ 以上になれば計算結果は安定する。図には $M=50$ の計算結果を図示している。

不規則波に対する計算法の妥当性を検討すると、1列、2列、3列壁体とも線形重ね合わせ計算による結果が通過率に関しては実験値よりもやや小さめに、反射率に関しては大きになっているが、計算値と実験値との一致はほぼ満足の行くものと思われる。ただし、1列壁体では、単一周期の規則波による計算結果の方が、不規則波を対象とした重ね合わせ計算によるそれより有義波周波数でプロットされた不規則波の実験値によく合うという興味深い結果が得られた。2列壁体および3列壁体の場合は、規則波に対する通過率と反射率の周波数特性が均されたような値となる。

実験より得られる入射波および反射波、通過波のそれぞれのスペクトル分布と式(8)で与えられる理論値としてのそれぞれのスペクトル分布の比較を試みた。図-5に図-2に対応する1列壁体の波種WRD6の結果を一例として図示している。入射波および反射波、通過波とも理論値と実験値のスペクトル密度分布は非常に一致がみられ、このことから算定法の妥当性が検証された。

(2) 見かけの通過率と反射率

式(10)で表される不規則波の各成分波の見かけの通過率と反射率の一例を2列および3列壁体について図示したものが図-6, 7である。有義波周期0.9秒と1.6秒の不規則波における各成分波の通過率をそれぞれ●と○で、反射率をそれぞれ○と●で表し、規則波の通過率に関しては実験値と計算値をそれぞれ▲と実線で、反射率に関してはそれぞれ△と破線で表している。不規則波

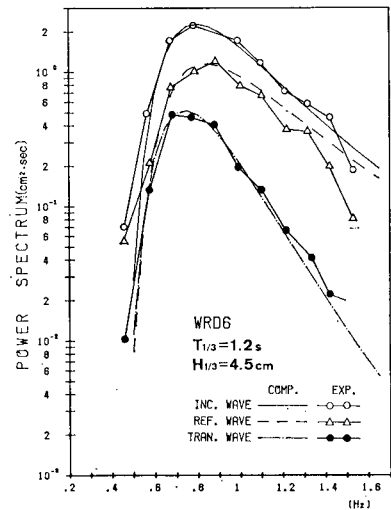


図-5 スペクトル分布の実験値と理論値の比較

における各成分波の通過率、反射率とも高周波数側を除いたところでは、規則波に対する周波数特性の傾向および値ともよく一致している。全般的には、各成分波の通過率は規則波のそれと比べやや大きく反射率は逆に小さくなっているが、各有義波周波数 ($f_{1/3}=0.625$ Hz, 1.1 Hz) の近傍では各々の不規則波に対する成分波の値が規則波のそれと非常に近い値を示している。従ってこのことより、堤体には有義波周期の異なる2~3種類の不規則波を作用することによって、その堤体の消波に関する周波数特性を知ることができるものと思われる。

(3) 消波特性

前後壁体の開口率 ($W_1/W_0=W_2/W_0=0.2$) と壁体厚 ($B_1/h=B_2/h=0.17$) を一定とし壁体間隔 (SD) を水深の0.5, 1.0, 1.5倍とした場合の結果を図-8に示す。壁体間隔が大きくなるほど、ほとんどの有義波周期にかかわりなく、通過率は小さくなり、反射率は大きくなる傾向を示した。ただし、 $f_{1/3}>1.1$ Hz のとき $SD/h=1.0$ の通

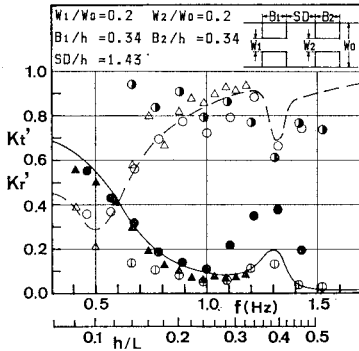
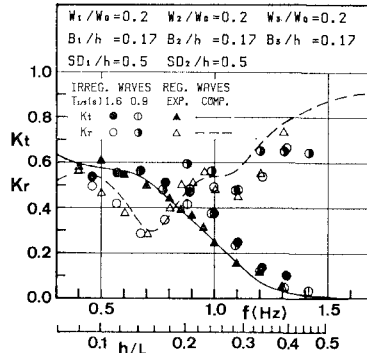
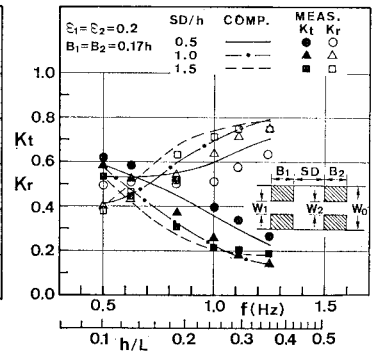
図-6 2列壁体の K_t' と K_r' 図-7 3列壁体の K_t' と K_r' 

図-8 不規則波に対する2列壁体の消波特性

過率の方が $SD/h=1.5$ のそれよりも小さくなり、 $f_1/3 > 0.625$ Hz ところでは $SD/h=0.5$ の反射率が間隔の広い $SD/h=1.0$ や 1.5 の反射率よりも大きくなるという逆の傾向が見られた。計算結果においてもこの傾向がよく表われている。

図-9 は、3列壁体において、開口率と壁体厚を一定にした場合(丸印)、壁体厚を一定とし開口率を前列から後列に小さく変えていった場合(三角印)および開口率を一定とし壁体厚を変えた場合(四角印)の結果である。これより、開口率が一定で後ろの2列の壁体の厚さを薄くした場合の K_t , K_r は、3列とも壁体厚を $B/h=0.17$ とした場合のそれらとほとんど同じ値を示した。また、壁体厚を一定として開口率を前から後ろへ小さくした場合が、3ケースのうちで通過率、反射率とも最も小さな値を示し、消波効果が最も良い結果を与えている。これについては規則波に対しても同様な結果が得られている。従って、複数列縦スリット式防波堤の消波特性に関し、壁体厚については前列の壁体の厚さが消波効果に最も影響を及ぼすのに対して、開口率については前列から後列にいくにしたがってその大きさを小さくする組合せが重要であり、その組合せによって通過率および反射率とも低く抑えることが可能である。

5. ま と め

以上の研究から次のことを明らかにした。

(1) 1列, 2列, 3列壁体において、規則波の通過率、反射率を線形重ね合わせすることによって得られる計算値と実験値とはよく一致しており、本算定法の妥当性が確かめられた。この際、計算値を実験値と比較するためには、重ね合わせ計算を行う周波数の範囲を測定値を推定するときの周波数範囲と同じにする必要がある。入射波のスペクトル分布を分割する方法の違いによる影響はない。また、分割数は50以上取るのが望ましい。

(2) 1列壁体のように規則波に対する通過率と反射率の周波数特性が一様に変化する場合、単一周期にお

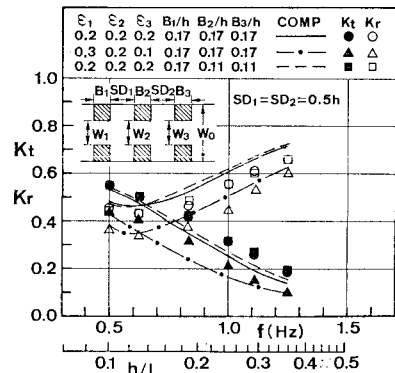


図-9 不規則波に対する3列壁体の消波特性

ける規則波としての計算から得られる通過率と反射率の方が、重ね合わせ計算によって得られる値よりも不規則波実験における波群全体としての平均的な通過率や反射率とよく合うという興味ある結果が得られた。

(3) 複数列縦スリット式防波堤において、開口率を前列よりも後列の方を小さくする組合せによって通過率および反射率とも低くすることが可能である。

最後に、本研究を遂行するに当たり、当時学部学生であった古瀬修三君(現在、オオバ)より実験に関して多大な協力を得た。また、井島武士九州大学名誉教授から貴重な助言を頂いた。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 小島治幸, 井島武士, 田口陽一, 安永達朗: 縦スリット式防波堤の水理特性の算定法に関する研究, 第33回海岸工学講演会論文集, 1986, pp. 402-406.
- 2) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 1977, pp. 1-237.
- 3) 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射波・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, 1976.
- 4) 桑島 進, 永井康平: 任意個数資料のFFT算法とそのスペクトル解析への応用, 港湾技研資料, No. 155, 1973年.