

横スリット型防波堤の消波効果と現地への適用条件について*

WAVE DISSIPATING EFFECT OF A HORIZONTAL SLIT-TYPE BREAKWATER
AND SOME CONSIDERATIONS OF ITS CONSTRUCTION IN THE FIELD

榎木亨**・岩田好一朗***
By Toru SAWARAGI and Koichiro IWATA

1. 緒 言

防波堤および岸壁などの海岸構造物は常時風浪の作用下にあるため、その防波効果の高いことと同時に耐久性があり、かつその維持補修が容易であることが従来より望まれてきたのは周知の事実である。こういった防波構造物として耐久性の面から従来コンクリート構造物が主体であったが、近年鋼材の耐久性の増加および施工の迅速性、補修の容易さから鋼材を主体とした透過性防波堤が用いられるようになり、この種の透過性防波堤の形式とその水理特性について種々検討が加えられてきている。この中でも鋼管パイプ防波堤¹⁾、カーテンウォール型防波堤^{2),3)}、パイル型防波堤⁴⁾などの水理特性について、従来より多くの実験的ならびに理論的検討が加えられてきているが、横スリット型防波堤の水理特性（消波効果）についてはほとんど論議されていない。

したがって、本論ではこの横スリット型防波堤（短さく型の板をある間隔をもって水平にかつその主軸が波の進行方向に直角となるように配置）をとりあげて、その消波効果について理論的ならびに実験的な検討を加える。まず、防波堤1基の場合を

とりあげて、その消波特性を明らかにするとともに、カーテンウォール型防波堤および透過性鋼管パイプ防波堤との消波効果について理論的ならびに実験的な検討を加える。まず、防波堤1基の場合を

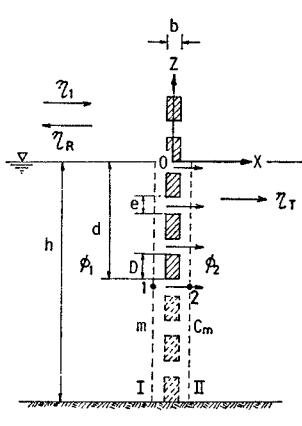


図1 記号の説明

果の差異について検討を加える。ついで、防波堤2基設置する場合をとりあげ、防波堤を適当な間隔に配置すると透過率と反射率を同時にきわめて小さくできることを明らかにし、さらに現地の不規則な波浪に対する適用条件などを明らかにするものである。

2. 理論解析

(1) 横スリット型防波堤の反射率と透過率（単列の場合）

解析に際して次の仮定を設ける。① 波により防波堤は振動しない。② スリット部材幅 b （図1参照）は波長に比して無視できる。③ 防波堤での反射波と透過波の入射波に対する位相のずれは無視できる。④ 波動は長波近似のきく微小振幅浅水波とする。

入射波 η_I 、反射波 η_R 、透過波 η_T を次のように与える。

$$\left. \begin{array}{l} \eta_I = a \sin(kx - \sigma t) \\ \eta_R = a\tau_R \sin(kx + \sigma t) \\ \eta_T = a\tau_T \sin(kx - \sigma t) \end{array} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで、 $k=2\pi/L$ 、 L =水深 h での波長、 $\sigma=2\pi/T$ 、 T =周期、 τ_R =反射率、 τ_T =透過率である。

この、 η_I 、 η_R 、 η_T を用いると、図1に示す合成波領域での速度ポテンシャル ϕ_1 と透過波の速度ポテンシャル ϕ_2 はおのおの次の式で与えられる。

$$\left. \begin{array}{l} \phi_1 = \frac{a\sigma}{k} \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \cos(kx - \sigma t) \\ \quad - \frac{a\tau_R \sigma}{k} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \cos(kx + \sigma t) \\ \phi_2 = \frac{a\tau_T \sigma}{k} \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \cos(kx - \sigma t) \end{array} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

さらに、図1に示す1地点2地点間でのペルヌイのエネルギー保存式と防波堤前後での流量保存式はおのおの

* 一部 La Houille Blanche に投稿中

** 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学教室

*** 正会員 工修 大阪大学講師 工学部土木工学教室

の次式で与えられる。

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{1}{2g} \left(-\frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{g} \left(-\frac{\partial \phi_1}{\partial t} \right) = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{1}{2g} \left(-\frac{\partial \phi_2}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{g} \left(-\frac{\partial \phi_2}{\partial t} \right) + \xi \frac{V^2}{2g} \quad \dots(3)$$

$$\int_{-h}^0 \left(-\frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right)_{x=-0} dz = \int_{-h}^0 \left(-\frac{\partial \phi_2}{\partial x} \right)_{x=+0} dz \\ = \left\{ \int_{-d}^0 m C_m V \cdot dz + \int_{-h}^{-d} C_m V \cdot dz \right\}_{x=0} \quad \dots(4)$$

ただし、上式で、 ξ ：損失係数、 ρ ：流体密度、 g ：重力加速度、 $m = e/(e+D)$ で定義される間隔比、 e ：スリット部材と部材との間隔、 D ：スリット部材の高さ、 V ：スリット間隙部での流速、 d ：スリット部材の潜水深さ、 C_m ：流量係数、なお式(4)ではスリット部材のない水深 $-d > z \geq -h$ でも仮想のスリット部材を考えて、その部分では $m=1$ としての流量係数 C_m が存在するとして取り扱っている（本来、スリットのない部分での流量係数はスリットの部材部分での流量係数 C_m と異なるものと推定されるが、計算がきわめて煩雑になること、また C_m と採用することによる差異は結果的には後述する実験定数 C_f の中に含まれてしまうので、ここではスリット部材のない場合も C_m が存在するとして取り扱うものとする）。式(2)を式(3)に代入し、さらに $\cosh k(h+z) \approx 1 + \frac{1}{2}k^2(h+z)^2 + \frac{1}{4}k^4(h+z)^4$ 、 $P_1 - P_2 = \rho g(\eta_I + \eta_R - \eta_T)$ を用いて流速 V を求め、これを式(4)に代入すると γ_T と γ_R はおのおの次の式で与えられる*。

$$\gamma_T = \frac{2}{a} \{ -\epsilon_0^2 C_m^2 N^2 M + \sqrt{\epsilon_0^4 C_m^4 N^4 M^2 + a \epsilon_0^2 C_m^2 N^2 M} \} \quad \dots(5)$$

$$|\gamma_R| = 1 - \gamma_T \quad \dots(6)$$

ただし、

$$\begin{aligned} N &= 1 + \left(\frac{d}{h} \right) (m-1), \\ M &= \frac{(kh)^2}{\sigma^2} \left\{ g + \frac{\sigma^2}{k \sinh kh} + \frac{\sigma^2 (kh)^2 \theta}{6 k \sinh kh} \right\}, \\ \theta &= \frac{m \left(\frac{d}{h} \right)^3 + (1-m) \left(1 - \frac{d}{h} \right)^3}{1 + \left(\frac{d}{h} \right) (m-1)}, \\ \epsilon_0^2 &= 1/\xi \end{aligned} \quad \dots(7.a)$$

ϵ_0 と C_m は d/h 、 m 、 h/L 、などにより複雑に変化すると考えられる。特に C_m については理論値と実験値間の補正項としての性格をもつため、詳細な水理実験を行

* γ_T を求める際の時間項の処理の仕方については参考文献 5) を参照していただきたい。

って、その関数形を決める方法、あるいは適当な関数形を仮定してそれより得られる結果を水理実験で検証する方法などが考えられる。上式ではこの C_m が $\epsilon_0 C_m$ の積の型として現われているため、著者らは、後述の水理実験結果を参照して $\epsilon_0 C_m$ を次の式(7.b)で与えられるものと仮定し、補正係数 C_f を水理実験で決めるとした。

$$\epsilon_0^2 C_m^2 \cong C_f^2 \cdot \left\{ 1 - 2 \left(\frac{d}{h} \right) + 3 \left(\frac{d}{h} \right)^2 \right\} \quad \dots(7.b)$$

図-2、図-3 は式(5)、式(6)で与えられる γ_T と γ_R の値を示した一例である。図-2 によれば入射波の波形勾配 H/L が大きいほど、 γ_R が大きくなりしたがって γ_T が小さくなること、図-3 よりスリット部材の潜水比 d/h が大きいほど、また、 m が小さいほど γ_T の低減に有効であることが判明する。しかし、 γ_R と γ_T を同時にきわめて小さくすること（たとえば、 $\gamma_R, \gamma_T \leq$

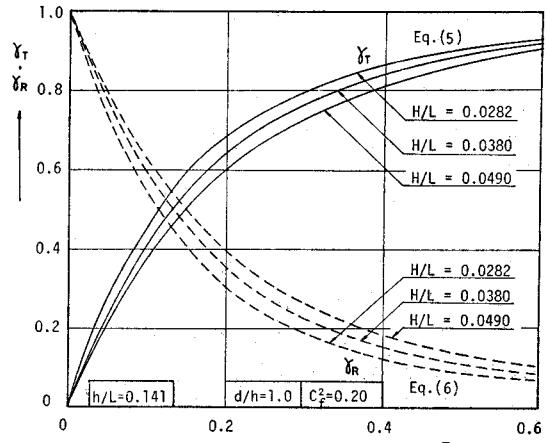


図-2 γ_T と γ_R に及ぼす H/L と m の効果

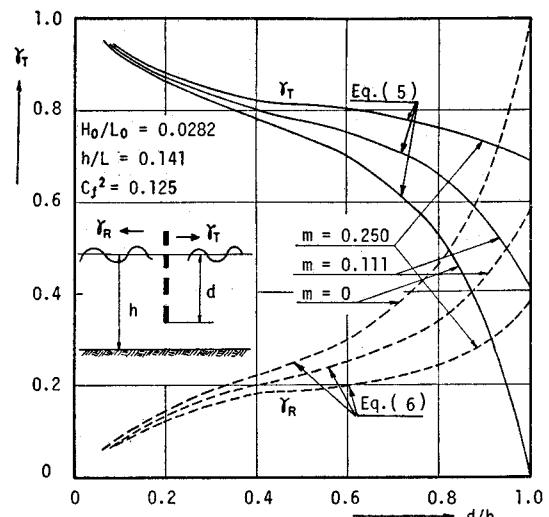


図-3 γ_T および γ_R に及ぼす d/h と m の効果

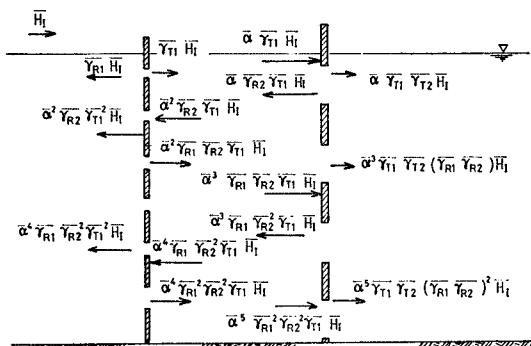


図-4 反復反射状況

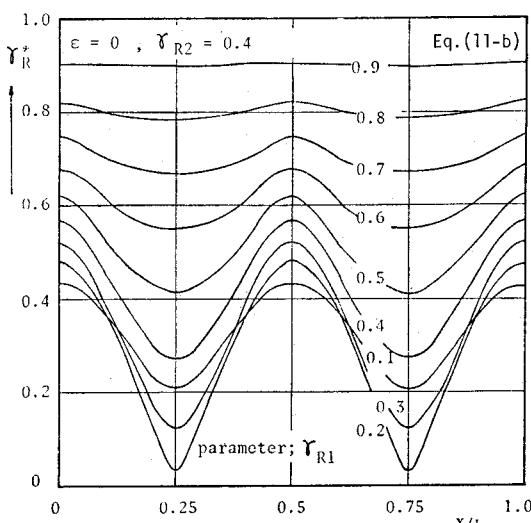
0.3) ができない。また、 r_T を 0.3 以下にするために m をきわめて小さい値にしなければならないことから、港内波浪をできるだけ小さくし、かつ反射をも小さくするためにこの防波堤を 2 列配列する方法が考えられる。この方法について以後検討する。

(2) 2 列横スリット防波堤の反射率と透過率

この場合の反射率と透過率は基本的には著者らがすでに示した方法³⁾に基づくものとする。つまり、式(8)で示す複素ベクトル表示の波を用いて、図-4 に示すような横スリット間での波の反復反射を無限に考える。

$$\left. \begin{array}{l} \text{入射波: } H_I = H_I \exp(i\theta_I) \\ \text{反射率: } \bar{r}_R = r_R \exp(i\theta_R) \\ \text{透過率: } \bar{r}_T = r_T \exp(i\theta_T) \\ \text{減衰率: } d = \alpha \exp(-2\pi x/L \cdot i) \\ \alpha = \exp(-\epsilon x/L) \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots(8)$$

ただし、 ϵ : 減衰係数、 x : 第 1 番目の防波堤からの距離、 L : 水深 h での波長、 $\theta_I, \theta_R, \theta_T$: 位相差、 $i = \sqrt{-1}$ で

図-5(a) r_R^* と x/L の関係 ($r_{R2}=0.4$ の場合)

ある。したがって図-4 に示した波を加え合わせると、反射波 H_{R*} と透過波 H_{T*} はおのおの式(9)、式(10)で与えられる。

$$\begin{aligned} H_{R*} &= H_I \cdot \bar{r}_{R1} + H_I \bar{r}_{T1}^2 d^2 \bar{r}_{R2} \\ &\quad + H_I \bar{r}_{T1}^2 d^4 \bar{r}_{R2} \bar{r}_{R1} + H_I \bar{r}_{T1}^2 d^6 \bar{r}_{R2}^3 \bar{r}_{R1}^2 + \dots \\ &= H_I \left\{ \bar{r}_{R1} + \frac{\bar{r}_{T1}^2 d^2 \bar{r}_{R2}}{1 - d^2 \bar{r}_{R2} \bar{r}_{R1}} \right\} \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{T*} &= H_I d \bar{r}_{T1} \bar{r}_{T2} + H_I d^3 \bar{r}_{T1} \bar{r}_{T2} (\bar{r}_{R1} \bar{r}_{R2}) \\ &\quad + H_I \bar{r}_{T1} \bar{r}_{T2} (\bar{r}_{R1} \bar{r}_{R2})^2 + \dots \\ &= H_I \{ d \bar{r}_{T1} \bar{r}_{T2} / (1 - d^2 \bar{r}_{R1} \bar{r}_{R2}) \} \dots\dots\dots(10) \end{aligned}$$

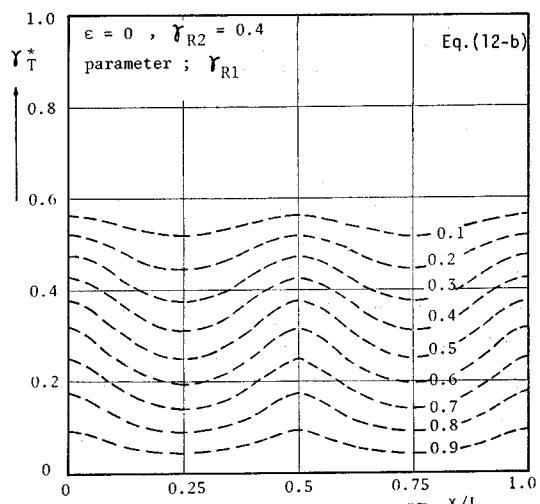
したがって、2 列配列のスリット防波堤全体としての反射率 r_{R*} と透過率 r_{T*} はおのおの式(11)、式(12)で与えられる。

$$r_{R*} = \left| \frac{H_{R*}}{H_I} \right| = \left| \bar{r}_{R1} + \frac{d^2 \bar{r}_{R2} \cdot \bar{r}_{T1}^2}{1 - d^2 \bar{r}_{R2} \cdot \bar{r}_{R1}} \right| \dots\dots\dots(11 \cdot a)$$

$$= \sqrt{ \frac{\bar{r}_{R1}^2 + d^4 \bar{r}_{R2}^2 (\bar{r}_{R1}^2 - \bar{r}_{T1}^2)}{1 - 2 d^2 \bar{r}_{R1} \cdot \bar{r}_{R2} \cos 4\pi x/L} } * \\ * \frac{-2 d^2 \bar{r}_{R1} \cdot \bar{r}_{R2} (\bar{r}_{R1}^2 - \bar{r}_{T1}^2) \cos \frac{4\pi x}{L}}{+ d^4 \bar{r}_{R1}^2 \bar{r}_{R2}^2} \quad (\text{位相差を無視する}) \dots\dots\dots(11 \cdot b)$$

$$r_{T*} = \left| \frac{H_{T*}}{H_I} \right| = \left| \frac{d \bar{r}_{T1} \bar{r}_{T2}}{1 - d^2 \bar{r}_{R1} \bar{r}_{R2}} \right| \dots\dots\dots(12 \cdot a)$$

$$= \frac{d \bar{r}_{T1} \cdot \bar{r}_{T2}}{\sqrt{1 - 2 d^2 \bar{r}_{R1} \bar{r}_{R2} \cos \frac{4\pi x}{L} + d^4 \bar{r}_{R1}^2 \bar{r}_{R2}^2}} \quad (\text{位相差を無視する}) \dots\dots\dots(12 \cdot b)$$

図-5(b) r_T^* と x/L の関係 ($r_{R2}=0.4$ の場合)

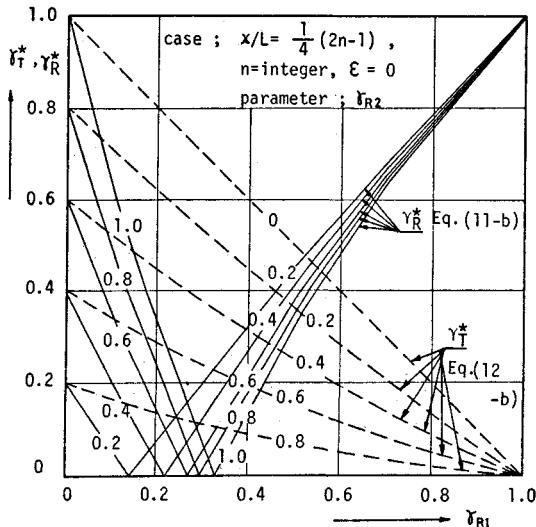


図-6 r_r^* と r_t^* に及ぼす r_{R1} と r_{R2} の効果
($x/L=1/4(2n-1)$ の場合)

なお、式(11)、式(12)の添字1は第1番目の防波堤(入射波が最初に通過する防波堤)、添字2は第2番目の防波堤での値を示している。また、 x は防波堤間の設置距離である。なお、同式中の α は碎波しない波に対しては $\alpha=1.0$ として扱うものとする。したがって本論では碎波しない波を対象としているので、同式による解析値はすべて $\alpha=1.0$ に対する値を用いている。また碎波の場合はそのときの波高減衰係数 ϵ を用いて計算する必要があることはいうまでもない。式(11-b)、式(12-b)によれば、 r_r^* 、 r_t^* は r_{T1} 、 r_{T2} (あるいは r_{R1} 、 r_{R2})と x/L の関数になっており、図-5に示すように、 r_r^* と r_t^* はこの x/L の値により著しく異なり、 $x/L=1/4(2n-1)$ 、($n=1, 2, 3, \dots$)の時、 r_r^* と r_t^* は極小値をとり、 $x/L=1/2(n-1)$ の時極大値を取る。また、同図によれば、 r_r^* と r_t^* は r_{R1} の値により著しく異なることが認められ、このことより x/L 、 r_{R1} (あるいは r_{T1})、 r_{R2} (あるいは r_{T2})はともに r_r^* と r_t^* を規定する重要な要素であることがわかる。したがって、 r_r^* (あるいは r_{T1})、 r_{R2} (あるいは r_{T2})、 x/L の三者と r_r^* と r_t^* の関係、すなわち式(11-b)と式(12-b)を図表化しておけば所要の r_r^* と r_t^* を与える r_{R1} 、 r_{R2} と x/L の関係が明らかとなり便利である。この一例を図-6に示す。図-6は防波堤設置間隔 $x/L=0.25, 0.75, \dots, 1/4(2n-1)$ の場合についての r_r^* 、 r_t^* と r_{R1} と r_{R2} の関係を示したものであり、この場合の r_t^* は r_{R1} と r_{R2} が大きいほど小さな値をとり、したがって r_t^* の低減のためには r_{T1} と r_{T2} を小さくするほど有効である。一方、 r_r^* については r_{T1} と異なり、 r_{R1} と r_{R2} が、

$$r_{R1} = \frac{r_{R2}}{1+2r_{R2}} \quad \dots \dots \dots (13)$$

を満たす場合には $r_{R1}=0$ の極小値をとる興味ある結果が得られる。また、この図よりたとえば、 $r_{T1}=0.2$ 、 $r_{T2}=0.2$ にする場合は $r_{R1}=0.4$ ($r_{T1}=0.6$)、 $r_{R2}=0.6$ ($r_{T2}=0.4$)とすればよいことが明らかである。

(3) 多列(3列以上)横スリット型防波堤の反射率と透過率

この場合について、上述の2列の場合の考え方を拡張でき、したがって、横スリットを N 個配置する場合の反射率 $r_{R(N)}$ と透過率 $r_{T(N)}$ は式(11-a)、式(12-a)をもとに式(14)、式(15)で与えられる(図-7参照)。

$$r_{R(N)} = \left| \bar{r}_{R(N-1)} + \frac{\bar{\alpha}^2 \bar{r}_{T(N-1)}^2 \cdot \bar{r}_{RN}}{1 - \bar{\alpha}^2 \bar{r}_{R(N-1)}^2 \cdot \bar{r}_{RN}} \right| \dots \dots (14)$$

$$r_{T(N)} = \left| \frac{\bar{\alpha} \cdot \bar{r}_{T(N-1)}^2 \cdot \bar{r}_{TN}}{1 - \bar{\alpha}^2 \bar{r}_{R(N-1)}^2 \cdot \bar{r}_{RN}} \right| \dots \dots \dots (15)$$

なお上式で、 $\bar{r}_{R(N-1)}$ 、 $\bar{r}_{T(N-1)}$ は($N-1$)列の場合の反

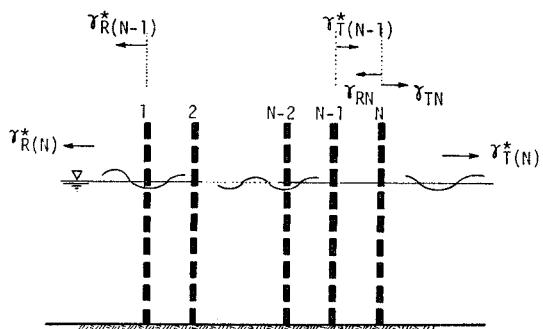


図-7 記号の説明

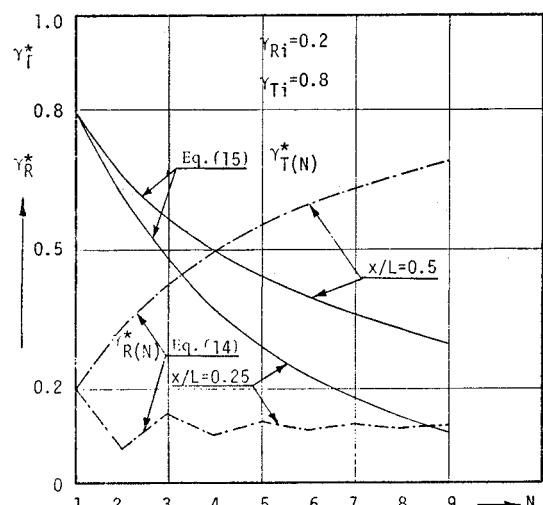


図-8 r_r^* と r_t^* と N の関係 ($r_{R1}=0.2$,
 $r_{T1}=0.8$ の場合)

射率と透過率、 τ_{RN} 、 τ_{TN} は第 N 番目の横スリット防波堤の反射率と透過率を示すものである。なお、入射波に対する $\tau_{R(N-1)}$ と $\tau_{T(N-1)}$ の位相差が無視できる場合には、式 (14)、式 (15) はおのおの式 (11・b)、式 (12・b) で $\tau_{R1}=\tau_{R(N-1)}$ 、 $\tau_{R2}=\tau_{RN}$ 、 $\tau_{T1}=\tau_{T(N-1)}$ 、 $\tau_{T2}=\tau_{TN}$ と置換したものに等しくなる。

この式 (14) と式 (15) の値を示した一例が 図-8 である。なお、図-8 は $N=9$ (9 列まで) の場合であり、おのおの横スリット防波堤は同一の τ_R と τ_T を持つ場合である。同図によれば、 τ_T^* に関しては防波堤の数の増加とともに効果が顕著にあらわれてくるが、 τ_R^* はその防波堤の配置間隔が $x/L=0.25$ にとれば、防波堤の数がふえてもほとんど増加しないことがわかるであろう。

3. 水理実験

(1) 実験装置と実験方法

実験は大阪大学工学部土木工学教室の片面ガラス張りの屋外二次元造波水槽（長さ 50 m × 幅 0.65 m × 高さ 1.0 m）で行われた。用いた造波機は plunger 型であり、波形は電気抵抗線式波高計で計測した。反射率は入射波の 1/2 波長間の合成波高より Healy の方法で求め、透過率は防波堤背後より 1/4 波長にあたる地点での波高で算定した。これらの実験諸元を 表-1 に示す。

表-1 実験諸元

SYM.	Values
h (cm)	12.0, 22.5, 30.0, 45.0
H_0 (cm)	2.48, 4.6, 6.0
T_0 (sec)	1.2
D (cm)	2.0, 4.0, 6.0
b (cm)	0.5, 1.0, 1.5, 2.0
m	0.015~0.50
d/h	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0
h/L	0.097, 0.141, 0.1427, 0.170, 0.223
x/L	0~0.75

(2) 防波堤 1 基の場合の実験結果とその考察

著者らは τ_T と τ_R の算定式はおのおの式 (5)、式 (6) で与えられることを導いたが、同式には b (スリット部材幅) および D (スリット部材高) (図-1 参照) の効果を含んでいない。しかし、たとえば τ_R について考えてみると (τ_T についても同様)，次元解析により式 (16) で示される

$$\tau_R = f(H/L, b/D, D/H, m, h/L, d/h) \dots (16)$$

m (部材間隔比)、 H/L 、 b/D 、 h/L 、 d/h 、 D/H の 6 つの要素により支配されていることがわかる。したがって、ここではまず、算定式の中に含まれていない b/D と

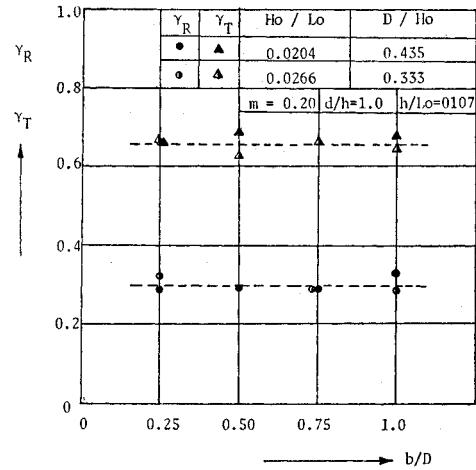


図-8 r_R と r_T に及ぼす b/D の効果
($m=0.20$ の場合)

D/H の効果について検討を行い、ついで、式 (5)、式 (6) に含まれる諸要素の効果について考察をすすめていく。

a) b/D と D/H の効果

図-9 は τ_R と τ_T における b/D の効果、図-10 は τ_R と τ_T における D/H の効果を示した一例であり、両方とも $d/h=1.0$ の場合に対する値である。図-9 より、 $b/D \leq 1.0$ の場合には τ_T と τ_R はほとんど変化しないことが認められ、この場合には b/D の効果は考慮しなくてよいことが検証された。なお $b/D \gg 1$ の場合には τ_R と τ_T は b/D により著しく変化すると考えられるが、 $b/D \gg 1$ の場合は水平壁型防波堤に属し、本論の対象としている横スリット型防波堤でないためここでは論議しない。一方、 D/H の効果は図-10 に示されているように、実験を行った $0.48 \leq D/H \leq 1.5$ の

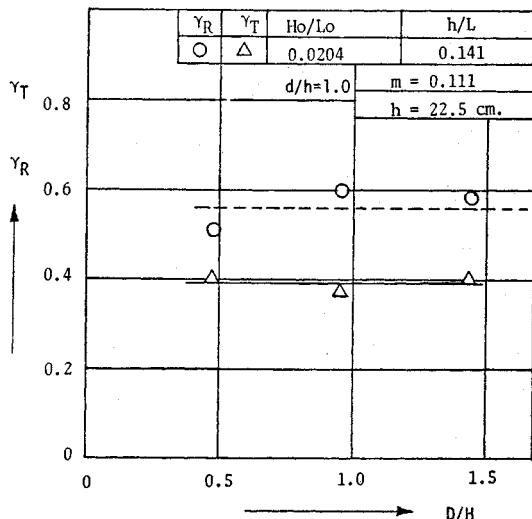


図-10 r_R と r_T に及ぼす D/H の効果
($m=0.111$ の場合)

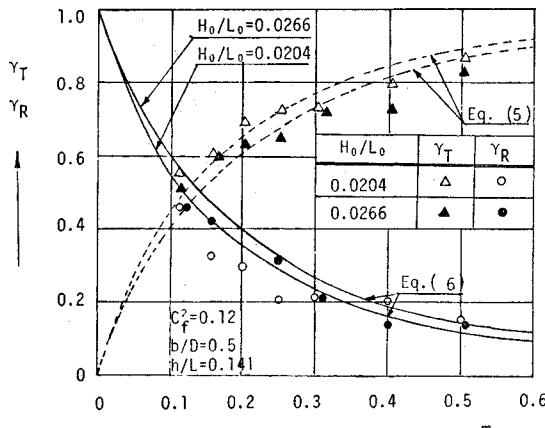


図-11 r_T と r_R に及ぼす m と H_0/L_0 の効果
($h/L=0.141$ の場合)

範囲で、 r_T と r_R は若干変化するもののその差はきわめて小さいことが認められ重要な要素と考えなくともいいように思われる。

b) m と H/L の効果

図-11 に示すように、 r_T と r_R は間隔比 m により著しく変化する。特に $m \leq 0.4$ の範囲ではその変化が大きく、 m が小さくなるにつれて急激に r_T が小さくなり、 r_R が大きくなっていくことが認められる。したがって、 r_T の低減のためにはスリット部材間隔比 m を小さくすることはきわめて有効であるといえる。また、同図に示した理論値と実験値とはかなりよく一致していることから、たとえば、 $r_T \leq 0.5$ にするには $m \leq 0.1$ に、 $r_T \leq 0.3$ にするには $m \leq 0.05$ にする必要があることが推定できる。一方、 r_R については r_T と逆の挙

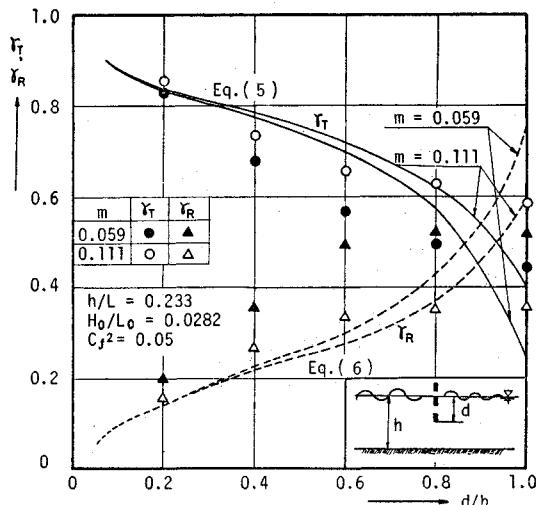


図-13 r_R と r_T に及ぼす d/h の効果
($h/L=0.233$ の場合)

動を示し、当然 m が小さくなると r_R が大きくなっていく。また、図-11 によれば、 H/L が大きくなると、 r_R が大きくなり、逆に r_T は小さくなることが実験的に認められると同時にこの値は理論値式(5)と式(6)にはほぼ一致している。

したがって、これらのことより、 m と H/L の効果は比較的精度よく式(5)と式(6)で評価されているといえよう。

c) d/h と h/L の効果

上述したように、間隔比 m は r_T と r_R に重要な寄与をする。したがって、ここでは特に $r_T \leq 0.5$ (現地施工時に必要とされる) の場合に着目し、そのため m として、0.111 と 0.059 の二つの場合をとりあげて r_T と r_R における d/h と h/L の効果について検討してみる。

図-12、図-13 に示すように、スリット部材の潜水比 d/h は m 同様、 r_T の低減に重要な寄与をすることが認められる。同図より、 d/h が大きくなるにつれて、 r_T は低減し、 r_R は増加するが、その効果は防波堤設置位置の比水深 h/L により異なってくる。つまり、 $h/L=0.141$ と $h/L=0.233$ の場合を比較してみると、比水深の小さい $h/L=0.141$ の場合は d/h の増加とともに r_T は一様に低減するが、比水深の大きい $h/L=0.233$ の場合は、 $d/h \geq 0.7$ となると $d/h=1.0$ に大きくしても、 r_T の低減はきわめて小さい。これは波動の鉛直方向エネルギー分布と密接な関係があるものといえよう。つまり、比水深が浅くなるほど、波動は長波性となるため、エネルギーの鉛直分布が静水面から水底までほぼ一定となり、 d/h を大きくするにともないほぼ一様に入射

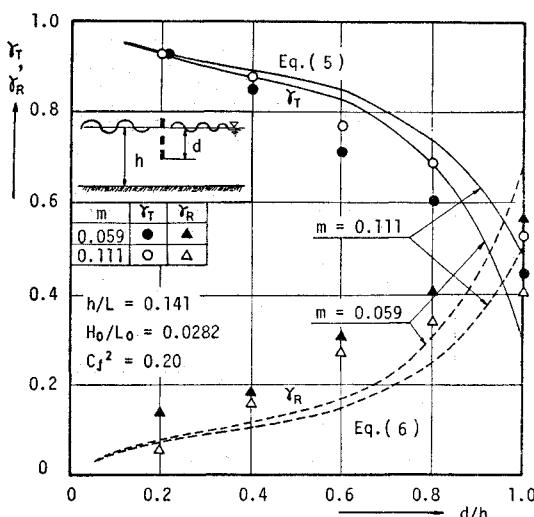


図-12 r_R と r_T に及ぼす d/h の効果
($h/L=0.141$ の場合)

表-2 C_f の値

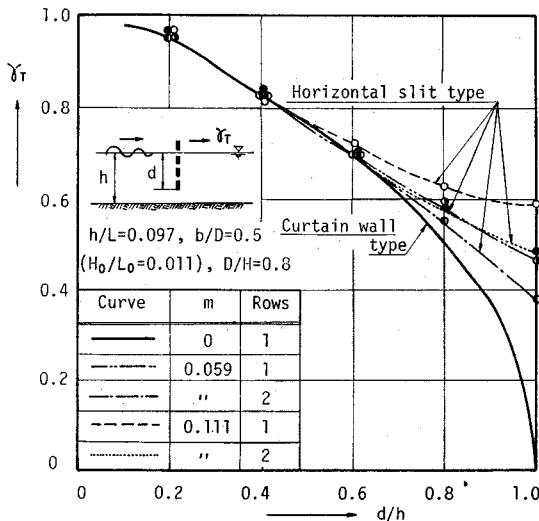
H/L	0.078	0.100	0.141	0.155
0.010	0.450	0.390	0.280	0.265
0.020	0.500	0.500	0.390	0.345
0.030	0.635	0.635	0.450	0.390

 $(m=0.059 \sim 0.111)$

波のエネルギーが遮断されるのに対し、 h/L が大きくなると、波動エネルギーが水表面近傍に集中してくるため、エネルギー遮断に有効な潜水比 d/h があって、それ以上 d/h を大きくしても r_T の低減にはほとんど効果がないためであろう。そして $h/L=0.233$ の場合にはこの有効潜水比は $d/h=0.7$ と推定される。また、図-12、図-13 には理論値式(5)と式(6)の値も同時に示してある。図-12 に示す、 $h/L=0.141$ の場合、理論値は実験値と差異は若干あるものの定性的には充分一致している。一方、図-13 に示す $h/L=0.233$ の場合には実験値と理論値の差異が大きい。これは式(5)、式(6)を導くとき用いた

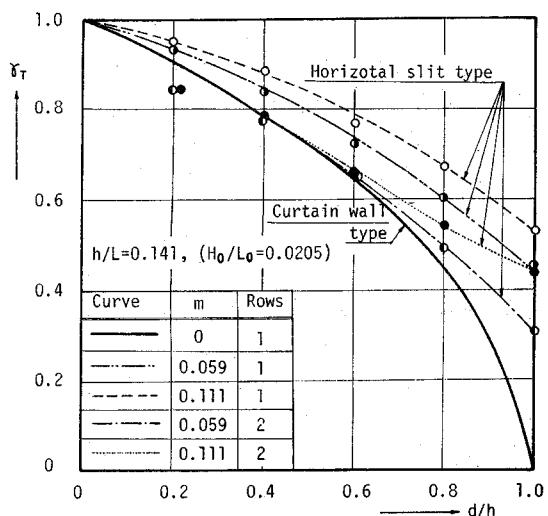
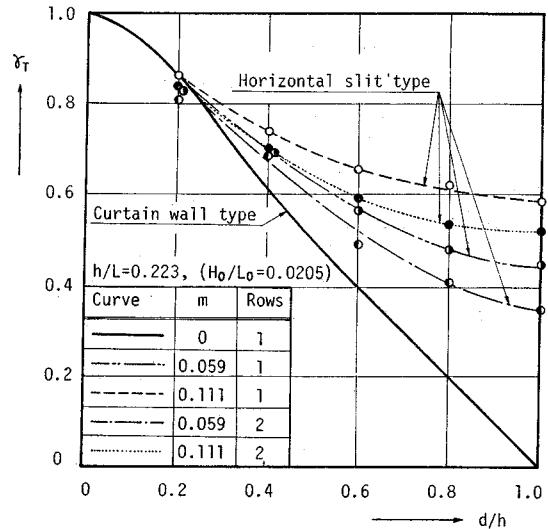
$$\cosh k(h+z) \equiv 1 + \frac{1}{2} k^2(h+z)^2 + \frac{1}{4} k^4(h+z)^4$$

の近似が $kh(1+z/h) < 1$ に対してのみ成立すること、つまり h/L に直すと、 $h/L < 0.159$ に対してのみ成立することから、 $h/L=0.233$ は理論式の適用の範囲外となるため大きな差異が生じたもので、 $h/L \geq 0.159$ の領域への式(5)と式(6)の適用はできないことは明白である。また式(5)と式(6)の実験定数 C_f は、porosity $m=0.059 \sim 0.111$ に対して表-2 に示すように与えられる。同表によれば C_f は比水深 h/L が小さくなるにつれて大きな値をとり、また、 H/L が大きくなるにつれて大きな値をとることになる。

図-14 カーテンウォール型防波堤との比較
($h/L=0.097$ の場合)

以上、横スリット防波堤 1 基のみの場合をとりあげてその消波効果におよぼす各要素の影響について理論と実験結果より論議してきた。この横スリット型防波堤のスリット部材の配置間隔比 $m=0$ とするとカーテンウォール型防波堤となる。また部材を鉛直方向に配置すると縦スリット型防波堤（透過性鋼管パイプ型防波堤）となることはいうまでもない。ここでは上記 2 種類の型の防波堤と本論で論議してきた横スリット型防波堤の消波効果（特に r_T についてのみ）の差異について比較しておく。

図-14、図-15 と 図-16 はカーテンウォール防波堤と横スリット防波堤の伝達率 r_T の実験曲線の一例を

図-15 カーテンウォール型防波堤との比較
($h/L=0.141$ の場合)図-16 カーテンウォール型防波堤との比較
($h/L=0.233$ の場合)

示したものである。カーテンウォール防波堤については森平ら³⁾の実験曲線をもって示したが、図-16に示す $h/L=0.233$ のカーテンウォール防波堤の実験曲線のみ $h/L=0.235$ の値で代用させている。また図中に示した横スリット防波堤の実験値で $xw=2$ は同じ r_T と r_R を持つ防波堤 2 基設置した場合の値で、その設置間隔 x/L は、 $h/L=0.097$ で $x/L=0.033$, $h/L=0.141$ で $x/L=0.025$, $h/L=0.233$ で $x/L=0.020$ ときわめて小さい場合である。同図より、比水深 h/L と潜水比 d/h 別の両者の差異が判明するが、いうまでもなく $m=0$ に対応するカーテンウォール型防波堤の方が明らかに横スリット防波堤 ($m=0.059$ と $m=0.111$) より r_T の低減効果が大きいが、その効果が明確になるのは、 $h/L=0.233$ で $d/h > 0.3$, $h/L=0.141$ で $d/h > 0.4$, $h/L=0.097$ で $d/h > 0.6$ であり、比水深 h/L が小さくなるにつれて両者の差異が明確になる d/h は大きくなっている。これは既述したように、波動エネルギーの鉛直分布型に帰因することは明白である。また同図によれば横スリット防波堤を 2 基設置すると 1 基の場合より r_T は小さくなるものの 1 基の防波堤の透過率 r_{T1} の積として、つまり、 r_{T1}^2 にまで低減していないことが認められる。これは後述するが、同図に示したような防波堤設置間隔 x/L が 0.033 以下ときわめて小さい場合は後述の式 (17) を満たさないためで、こういった場合には 2 列防波堤でもその消波効果は r_{T1}^2 (以後こういう場合を“相乗効果”とよぶ)、つまり相乗的にはきいてこないことに注意を要する。

図-17 は透過性鋼管パイプ型防波堤(縦スリット型防波堤)と横スリット型防波堤の r_T の相違を示した一例である。同図に示した透過性钢管パイプ型防波堤の実

験値は、著者ら⁶⁾と林・服部¹⁾(図面より著者らが読みとった)の値であり、横スリット防波堤の実験値はすべて $d/h=1.0$ の場合の値である。なお、同図には示されていないが、透過性钢管パイプ型防波堤に対する著者らの実験では $D/H=1.0$, $b/D=1.0$ である。両者の実験条件はすべて一致していないが、その中で比較的一致する場合を比較すると、その差異は小さく、このことから、縦スリット型防波堤と横スリット型防波堤では、鋼材の配置間隔比 m を等しくすれば、透過率 r_T はほとんど差異がないと考えてよかろう。

以上のように、横スリット防波堤の消波特性をカーテンウォール型防波堤と透過性钢管パイプ型防波堤との比較において明らかにしてきたが、この防波堤を用いて、 $r_T \leq 0.3$ という透過性防波堤としてかなりきつい条件を満たすためには $d/h=1.0$ にしても、 $m < 0.05$ にしなければならず、したがって現地施工に際してはかなり困難となる場合も生じると考えられる。また r_T を低減させることは逆に r_R の増大に直結するため、防波堤からの反射率 r_R も同時に小さくすることを期待する場合にはこの横スリット防波堤 1 基のみでは所要の消波効果を期待することはできないことは明白である。この場合の一方法として波の位相差を利用する防波堤を 2 基設置する方法が考えられるため、2. の理論解析の妥当性の検討も含めて以下論議をすすめる。

(3) 防波堤 2 基の場合の実験結果とその検討

図-18 は r_{T*} と r_{R*} における防波堤の設置距離 x/L の効果を示したものであり、実験値と理論値、式 (11-b) と式 (12-b) が同時に示されている。同図によれば、理論値と実験値がよく一致しており、すでに 2.

述べてきたように 2 つの構造物の間で波の反復反射が起こりそのために生じる波の位相差により r_{T*} と r_{R*} は著しく変化している。つまり、入射波と反復反射波の波の位相差が $(2n-1)\pi$, ($n=1, 2, 3, \dots$) ずれるとき、つまり $x/L=1/4(2n-1)$, ($n=1, 2, 3, \dots$) で r_{R*} と r_{T*} は極小となり、入射波と反復反射波の波の位相差が $2(n-1)\pi$, ($n=1, 2, \dots$) ずれるとき(位相差がないとき)、つまり、 $x/L=1/2(n-1)$, ($n=1, 2, \dots$) で極大となっている。したがって、この事実より、防波堤 2 基設置して消波効果を高める場合にはその設置距離 x が入射波長 L との関連で $x/L=1/4(2n-1)$, ($n=1, 2, \dots$) となるように決めなければならない。さらに、この設置距離 x/L 以外に第 1 番

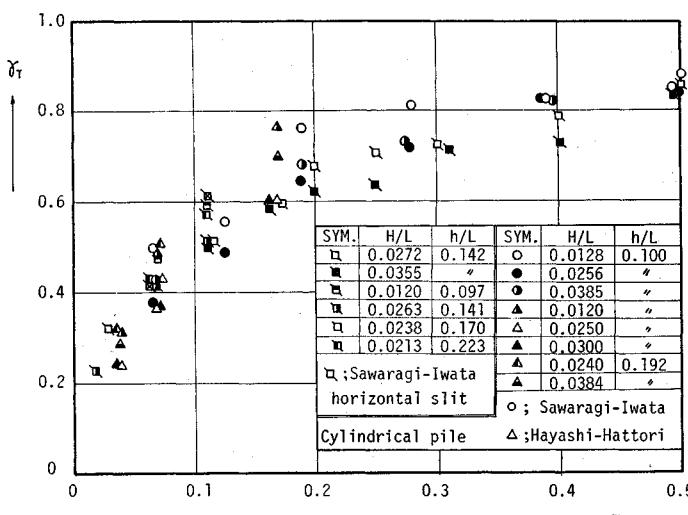


図-17 透過性钢管パイプ型防波堤との比較

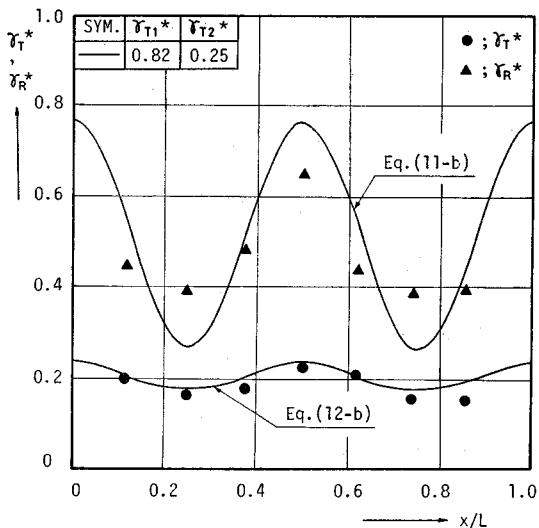


図-18 r_T^* と r_R^* に及ぼす x/L の効果
($r_{T1}=0.82$, $r_{T2}=0.25$ の場合)

目の防波堤（入射波が最初に入射する防波堤）と第2番目の防波堤の消波特性（つまり、 r_{T1} , r_{T2} あるいは r_{R1} , r_{R2} ）によっても著しく変化するが、2列防波堤全体としての透過率 r_T^* と反射率 r_R^* の変化の様子を $x/L=0.25$ で $r_{R2}=0.252$ の場合について示したのが図-19で、 $x/L=0.5$ で $r_{R2}=0.252$ と $r_{R2}=0.662$ の場合について示したのが図-20である。これらの図によれば、実験値と理論値がよく一致しており、このことより2.で示した理論値式(11-b), 式(12-b)の妥当性が検証することができる。また、図-19に示されているように、特に式(13)を満たすように r_{R1} と r_{R2} を決めるとき、2つの防波堤による反射率 r_R^* を0.1程

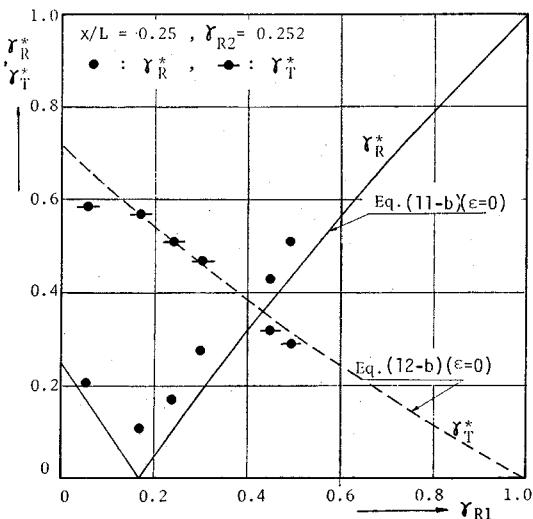


図-19 r_T^* と r_R^* に及ぼす r_{R1} の効果
($x/L=0.25$, $r_{R2}=0.252$ の場合)

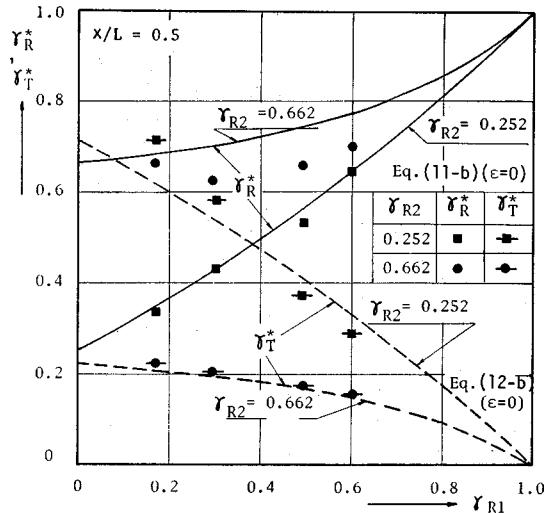


図-20 r_T^* と r_R^* に及ぼす r_{R1} の効果
($x/L=0.5$, $r_{R2}=0.252$ の場合)

度（実験的に）にきわめて小さくすることもできることが判明する。したがって、このことより、防波堤2基用いて所要の r_R^* と r_T^* をうるには式(11-b)と式(12-b)より x/L , r_{R1} と r_{R2} （あるいは r_{T1} と r_{T2} ）の組合せを決めればよいことになる。

この場合問題になるのは、実際の海洋波浪は異なった周期成分を有する不規則波浪であるため、ある代表的な周期波に対して $x/L=0.25, 0.75, \dots, 1/4(2n-1)$, ($n=1, 2, 3, \dots$)となるように防波堤間距離 x を決定した場合に、他の周期の波に対して $x/L=0.5, 1.0$ といった r_T^* と r_R^* ともに極大になる一番危険な場合が生じることであろう。ここでは r_T^* をとりあげて、上述の種種の周波数成分を有する波に対する消波効果を検討してみよう。

防波堤2基用いる場合消波面で望まれることは、防波堤2基による透過率 r_T^* がおのおのの防波堤の透過率 r_{T1} と r_{T2} の積、つまり相乗効果が認められることである。つまり、

$$r_T^* \leq r_{T1} \cdot r_{T2} \quad \dots \dots \dots (16)$$

であることが望ましい。この式(16)に式(12-b)を代入して整理すると、式(17)が導かれる。

$$\cos \frac{4\pi x}{L} \leq \frac{1}{2} (1 - r_{T1})(1 - r_{T2}) \quad \dots \dots \dots (17)$$

つまり、式(17)を満たす設置間隔 x/L に対して $r_T^* \leq r_{T1} \cdot r_{T2}$ となる。この式(17)の関係を満たす x/L を具体的に、 $r_{T1}=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, \dots, 0.9$, $r_{T2}=0.1, 0.2, 0.3, \dots, 0.9$ のおのおの9種類の組合せに対して求めてみると表-3のようになる。なお表-3の値は $x/L \leq 0.5$ の範囲に対して示したものであるが、 $x/L \geq 0.5$ の範囲に対しては $x/L \leq 0.5$ に対して得られた上限値と

表-3 $r_T^* \leq r_{T_1} \cdot r_{T_2}$ を満たす x/L の範囲

r_{T_1}	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
r_{T_2}	0.0919 0.4081	0.0959 0.4034	0.0995 0.4005	0.1031 0.3969	0.1070 0.3930	0.1106 0.3894	0.1142 0.3858	0.1178 0.3822	0.1214 0.3786
	0.2	0.0991 0.4009	0.1027 0.3973	0.1054 0.3946	0.1090 0.3910	0.1122 0.3878	0.1154 0.3846	0.1186 0.3814	0.1218 0.3782
	0.3		0.1054 0.3946	0.1082 0.3918	0.1110 0.3890	0.1138 0.3862	0.1166 0.3834	0.1194 0.3806	0.1222 0.3778
	0.4			0.1106 0.3894	0.1130 0.3870	0.1154 0.3846	0.1178 0.3822	0.1202 0.3798	0.1226 0.3774
	0.5				0.1150 0.3850	0.1170 0.3830	0.1190 0.3810	0.1210 0.3790	0.1230 0.3770
	0.6					0.1186 0.3814	0.1202 0.3782	0.1218 0.3767	0.1233 0.3763
	0.7						0.1214 0.3786	0.1226 0.3774	0.1237 0.3763
	0.8							0.1233 0.3767	0.1241 0.3759
	0.9								0.1245 0.3755

表-4 $r_T^* \leq r_{T_1} \cdot r_{T_2}$ を満たす h と T の関係 ($r_{T_1} = r_{T_2} = 0.5$ の場合)

$T(\text{sec})$	12	11	10	9	8	7	6	5	4	$x (\text{m})$
$h(\text{m})$										
4	0.118* (0.0959)	0.129* (0.104)	0.141* (0.114*)	0.160* (0.128*)	0.181* (0.146*)	0.210* (0.169*)	0.250* (0.201*)	0.312* (0.250*)	0.416 (0.335*)	8.7 (7.0)
	0.114* (0.090)	0.125* (0.098)	0.139* (0.109)	0.156* (0.122*)	0.177* (0.139*)	0.207* (0.163*)	0.250* (0.196*)	0.317* (0.250*)	0.441 (0.346*)	10.2 (8.0)
6	0.110 (0.085)	0.121* (0.094)	0.135* (0.104)	0.152* (0.117*)	0.174* (0.134*)	0.219* (0.160*)	0.250* (0.190*)	0.324* (0.250*)	0.466* (0.359*)	11.3 (8.7)
	0.103 (0.077)	0.113 (0.084)	0.127* (0.094)	0.143* (0.107*)	0.166* (0.124*)	0.198* (0.148*)	0.250* (0.186*)	0.335* (0.250*)	0.506 (0.378*)	12.6 (9.4)
Upper values [without ()] : x/L ; x is decided to satisfy $x/L=0.25$ only for the wave of 6.0 sec. period.										
Lower values [with ()] : x/L ; x is decided to satisfy $x/L=0.25$ only for the wave of 5.0 sec. period.										

下限値に 0.5 ずつ加えていけば式 (17) を満たす x/L の値が得られることは表-3 に示した図から容易にわかる。また表-3 に示した式 (17) を満たす x/L の値の中心となっている $x/L=0.25$ では r_T^* は最小値 $r_{T_1} \cdot r_{T_2} / (1 + (1 - r_{T_1})(1 - r_{T_2}))$ ($\epsilon=0$ の場合) をとることも式 (12-b) から明らかである。

この表-3 で与えられる x/L の範囲を具体的に現地波で検討するために次の状況を考える。つまり防波堤設置水深 (h) を 4.0 m, 6.0 m, 8.0 m, 12.0 m の 4 種類とし、各水深に対して 12.0 sec, 11.0 sec, 10.0 sec, 9.0

sec, 8.0 sec, 7.0 sec, 6.0 sec, 5.0 sec, 4.0 sec の 9 種類の波浪が来襲してくるものとする。そして防波堤の設置距離 x を各水深で 6.0 sec の波に対して $x/L=0.250$ となるように決めた場合 (たとえば、 $h=4.0$ m で $x=8.7$ m, $h=12.0$ m で $x=12.6$ m), 他の周期の波に対して x/L がいかなる値になるかを示したのが表-4 の上段の値 (() なし) であり、また各水深で 5.0 sec の波に対して $x/L=0.250$ となるように x を決めた場合、他の周期の波に対して x/L がいかなる値となるかを示したのが表-4 の下段の値 (() つき) である。したが

って、表-3 と表-4 を組合せると、第1番目の防波堤の r_{T1} と第2番目の防波堤の r_{T2} の種種の組合せに対して、周期 6 sec あるいは 5 sec の波に対して $x/L=0.250$ を満たすように x を決めた場合、各水深ごとに、他のいかなる周期の波に対して $r_T^* \leq r_{T1} \cdot r_{T2}$ が満たされているかが判明する。そこで、いまたとえば、 $r_{T1}=r_{T2}=0.5$ の場合について考えてみると、表-3 より $r_T^* \leq 0.25$ となる範囲は $0.115 \leq x/L \leq 0.385$ であるため、表-4 で *印をつけた周期波に対して $r_T^* \leq 0.25$ が充分期待できることになる。すなわち、 $h=6.0\text{ m}$ の場合をとりあげて具体例を示すと、6.0 sec の波に対して $x/L=0.25$ となるように決めた設置距離 x に対しては、12~5 sec 程度の周期をもつ波に $r_T^* \leq 0.25$ が満たされ、また同じ $h=6.0\text{ m}$ の水深で 5.0 sec の波に対して $x/L=0.25$ となるように決められた x に対しては 9.0~4.0 sec の波に対して $r_T^* \leq 0.25$ となることが認められる。このことにより不規則波浪の卓越周期波浪以外の周期の波に対しても充分“相乗効果”が認められるといえよう。したがって、この種の工法の現地施工への適用の可能性がきわめて強いことが指摘できよう。また、式(17)を満たさない x/L の領域では当然“相乗効果”は期待できず、このことは既述の図-14、図-15、図-16 より明白である。

以上、 r_T のみについて具体的に論じてきたが、 r_R についても同様の論議ができるることを付加しておきたい。

4. 結 論

以上、横スリット型防波堤の消波特性について理論的ならびに実験的な検討を加えてきた。得られた結果を要約すれば次のとおりである。

(1) 防波堤1基用いる場合について

a) 反射率 r_R と透過率 r_T は部材の間隔比 m と潜水比 d/h により著しく変化し、 m が小さいほど、また、 d/h が大きいほど、 r_R が大きく、 r_T は小さくなる。

b) r_T の低減のためには間隔比 m を小さくするのが一番有効であり、 $d/h=1.0$ の場合には、 h/L により若干異なるが、 $r_T \leq 0.5$ を得るには $m \leq 0.1$ 、 $r_T \leq 0.3$ を得るには $m < 0.05$ とする必要がある。

c) 本論で r_T は式(5)で r_R は式(6)で与えられることを解析的に示した。この理論値は $\epsilon_0 C_m$ の仮定に若干問題はあるものの比較的よく実験値と一致する。

d) $m=0$ に相当するカーテンウォール型防波堤は $m=0.059$ と $m=0.111$ の横スリット型防波堤より当然 r_T の低減効果が高いが、その差異が明確になる潜水比 d/h は比水深 h/L が小さくなるほど大きくなる (h/L

=0.233 のときは $d/h > 0.3$ であるが $h/L=0.097$ で $d/h > 0.6$ となる)。

(2) 防波堤2基用いる場合について

a) 横スリット防波堤1基のみでは透過率と反射率を同時にきわめて小さくすることができないが、防波堤2基用いることにより反射率 r_R^* と透過率 r_T^* を同時に小さくすることができて、 r_R^* は式(11・b)で r_T^* は式(12・b)で与えられる。

b) 式(11・b)と式(12・b)によれば防波堤の設置間隔 x が重要な要素となり、入射波長との関係で、 $x/L=0.25, 0.75, \dots, 1/4(2n-1)$, ($n=1, 2, 3, \dots$) にすると r_T^* と r_R^* は極小値を、また $x/L=0.5, 1.0, \dots, 1/2(n-1)$ にすると r_T^* と r_R^* は極大値をとる。したがって後者の設置方法は避けなければならない。

c) $r_T^* \leq r_{T1} \cdot r_{T2}$ 、つまり“相乗効果”を期待する場合は式(17)を満たすように x を決めなければならない。また、式(17)によれば、 $x/L=1/4(2n-1)$ となるようにある代表的な周期に対して x を決めた場合、 $r_T^* \leq r_{T1} \cdot r_{T2}$ が期待できる波の周期が判明する。この具体例が表-3 に示されており、同表によれば、現地不規則波浪で大きなパワー・スペクトルを示す周波数範囲に対して充分低減効果を示すことがわかる。

d) 反射率 r_R^* のみをきわめて小さくするには、 $x/L=1/4(2n-1)$, ($n=1, 2, \dots$) とし、 r_{T1} と r_{T2} を式(13)を満たすように組合せるとよく、実験によれば $x/L=0.25$ で $r_R^*=0.1$ 程度となる（なお理論値は $r_R^*=0$ である）。

ここで示した防波堤2基設置する場合の反射率 r_R^* と透過率 r_T^* は式(11・b)と式(12・b)でおのおの与えられるが、この解析値は横スリット防波堤のみに限定されるものではなく、透過性構造物が2基設置され、各構造物で、入射波に対し反射波と透過波の位相差がほとんど無視される場合にそのまま適用できる適用範囲の広い式である。また位相差が無視できない場合は若干の補正をする必要があることを付加しておきたい。

なお、本論で示した実験は、本学大学院生 森永勝登君（修士課程）と国費研究留学生 ホセ・カルロス・ペニア君（スペイン）の労によるところが多く謝意を表するとともに、この研究にご協力を賜わった住友金属工業建材開発部の方々に謝意を表する次第である。

最後に、この研究の一部は文部省科学研究費（自然災害特別研究（I）：代表者・京大工・岩垣雄一教授）によったことを付記する。

参考文献

- 1) 林 泰造・服部昌太郎：透過性防波堤とその基部洗掘、第

- 15回海岸工学講演会講演集, 1968.
- 2) Wiegel, R.L.: Transmission of Waves Past a Rigid Vertical Thin Barrier, Proc. of ASCE, WH. Vol. WW 1, March, 1960.
 - 3) 森平倫生・柿崎秀作・合田良実: カーテン防波堤とその特性について, 港研技報, Vol. 3, No. 1, 1964.
 - 4) Ippen, A.T. and E.L. Bourardimos: Breakwater Characteristics of Open tube System, Hydrodynamic Laboratory, Dep. of Civil. Eng., MIT. Rep. No. 73, July, 1964.
 - 5) 樋木 亨・岩田好一朗: 多孔壁式鉛直消波岸壁の水理特性に関する 2, 3 の考察, 土木学会論文報告集, No. 220, 1973.
 - 6) 樋木 亨・岩田好一朗: 透過性構造物による波の変形について, 第19回海岸工学講演会論文集, 1972.
(1974.10.1・受付)
-