

2層透過性または遊水部をもつ直立消波護岸の理論と実験

井 島 武 士*・奥 蘭 英 明**・坂 井 久 雄***

1. はし か き

著者らは前論文¹⁾において、遊水部をもつ直立消波護岸の特性について主として理論的に検討し、これが波長の長い波に対して著しい消波機能を有することを示したが、本論文は遊水部が透過性物質で占められている二層の透過性護岸および防波堤について長波理論による簡単な計算法を示す。

また、実験によって前論文に述べた遊水部護岸に関する種々の推論がほぼ誤りないこと、また類似の傾向が上記の2層防波堤についても見られることを述べるものである。

2. 解 析 法

(1) 直立2層透過性護岸

図-1に示すように一定水深 h の海域に不透過鉛直壁があり、その前面に空けき率を異にする幅 l_1 および l_2 の透過堤体 I, II があって、右方より周波数 σ ($=2\pi/T$, T は周期) の波長の長い波が入射するものとする。堤体 I の前面静水面上に原点 0, 水平に x 軸, 鉛直上方に z 軸を取り、不透過面は $x = -(l_1 + l_2)$, 堤体 I と II の境界面は $x = -l_1$ にあるとする。

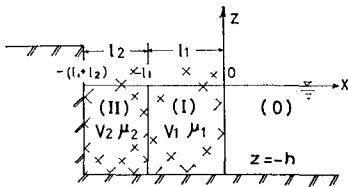


図-1 Definition Sketch

($x \geq 0$) の領域を (0) とするとここは流体だけの領域で、領域 (I) ($0 \geq x \geq -l_1$) では空けき率と抵抗係数は V_1 および μ_1 , 領域 (II) ($-l_1 \geq x \geq -(l_1 + l_2)$) ではそれぞれ V_2 および μ_2 で、各領域で異なった流体運動が起こる。その運動は波長が水深に比べて長いとすれば、水面変動と水平流速は $\zeta(x) \cdot e^{i\sigma t}$ および $u(x) \cdot e^{i\sigma t}$ の形で表わされる。各領域における値を添字 0, 1, 2 によって区別すれば、次のようになる。

a) 領域 0; ($x \geq 0$)

重力の加速度を g とすると長波近似理論より、連続および運動の方程式は

$$\frac{\partial \zeta_0}{\partial t} = -h \frac{\partial u_0}{\partial x}, \quad \frac{\partial u_0}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta_0}{\partial x} \dots (1), (2)$$

入射波と反射波の振幅をそれぞれ a_0, b_0 とすると、水面変動 ζ_0 は次のように表わされる。

$$\zeta_0(x, t) = (a_0 e^{ik_0 x} + b_0 e^{-ik_0 x}) e^{i\sigma t} \dots (3)$$

すると式 (2) より水平流速 u_0 は次のようになる。

$$u_0(x, t) = -\frac{gk_0}{\sigma} (a_0 e^{ik_0 x} - b_0 e^{-ik_0 x}) e^{i\sigma t} \dots (4)$$

また、式 (1) から k_0 は次のように表わされる。

$$(k_0 h)^2 = \frac{\sigma^2 h}{g} \dots (5)$$

b) 領域 I; ($0 \geq x \geq -l_1$)

この領域では空けき率と抵抗があり、連続と運動の方程式は式 (1), (2) に対応して次のように表わされる。

$$\frac{\partial \zeta_1}{\partial t} = -\frac{h}{V_1} \cdot \frac{\partial u_1}{\partial x} \dots (6)$$

$$\frac{1}{V_1} \cdot \frac{\partial u_1}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta_1}{\partial x} - \frac{\mu_1}{V_1} \cdot u_1 \dots (7)$$

水面変動 ζ_1 を次のようにおく。

$$\zeta_1(x, t) = (a_1 e^{ik_1(x+l_1)} + b_1 e^{-ik_1(x+l_1)}) e^{i\sigma t} \dots (8)$$

すると水平流速と $k_1 h$ とは次のように表わされる。

$$u_1(x, t) = -\frac{gk_1}{\sigma} \cdot \beta_1 (a_1 e^{ik_1(x+l_1)} - b_1 e^{-ik_1(x+l_1)}) e^{i\sigma t} \dots (9)$$

$$(k_1 h)^2 = (1 - i\nu_1) \cdot (k_0 h)^2 = (1 - i\nu_1) \cdot \frac{\sigma^2 h}{g} \dots (10)$$

ここで、

$$\beta_1 = V_1 / (1 - i\nu_1), \quad \nu_1 = \mu_1 / \sigma \dots (11)$$

c) 領域 II; ($-l_1 \geq x \geq -(l_1 + l_2)$)

領域 I と全く同様にして次のように表わされる。

$$\zeta_2(x, t) = (a_2 e^{ik_2(x+l_1+l_2)} + b_2 e^{-ik_2(x+l_1+l_2)}) e^{i\sigma t} \dots (12)$$

$$u_2(x, t) = -\frac{gk_2}{\sigma} \cdot \beta_2 (a_2 e^{ik_2(x+l_1+l_2)} - b_2 e^{-ik_2(x+l_1+l_2)}) e^{i\sigma t} \dots (13)$$

$$(k_2 h)^2 = (1 - i\nu_2) \cdot (k_0 h)^2 = (1 - i\nu_2) \cdot \frac{\sigma^2 h}{g} \dots (14)$$

$$\beta_2 = V_2 / (1 - i\nu_2), \quad \nu_2 = \mu_2 / \sigma \dots (15)$$

d) 境界条件

* 正会員 工博 九州大学教授 工学部水工土木学教室
 ** 正会員 九州大学助手 同
 *** 文部技官 九州大学工学部水工土木学教室

上記の各領域の運動は境界面 $x=0$, $x=-l_1$ で互いに連続であり, $x=-(l_1+l_2)$ では不透透壁のため水平流速は0であるから, 次の条件式が成立する。

$$x=-(l_1+l_2) \quad \text{で} \quad u_2=0 \cdots \cdots (16)$$

$$x=-l_1 \quad \text{で} \quad \zeta_1=\zeta_2, \quad u_1=u_2 \cdots \cdots (17)$$

$$x=0 \quad \text{で} \quad \zeta_0=\zeta_1, \quad u_0=u_1 \cdots \cdots (18)$$

e) 反射率

上式に式(3), (4), (8), (9), (12), (13)を用いると式(16), (17)から

$$a_2=b_2; \quad a_1=\alpha_2 a_2, \quad b_1=\bar{\alpha}_2 a_2 \cdots \cdots (19), (20)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} \alpha_2 &= \cos \gamma_2 + i \frac{k_2 \beta_2}{k_1 \beta_1} \sin \gamma_2 \\ \bar{\alpha}_2 &= \cos \gamma_2 - i \frac{k_2 \beta_2}{k_1 \beta_1} \sin \gamma_2 \\ \gamma_2 &= k_2 l_2 \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (21)$$

式(18)から

$$a_0=R_0 a_2, \quad b_0=\bar{R}_0 a_2 \cdots \cdots (22)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} R_0 &= \alpha_1 \alpha_2 + \bar{\alpha}_1' \bar{\alpha}_2, & \bar{R}_0 &= \alpha_1' \alpha_2 + \bar{\alpha}_1 \bar{\alpha}_2 \\ \alpha_1 &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{k_1 \beta_1}{k_0} \right) e^{i r_1}, & \bar{\alpha}_1 &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{k_1 \beta_1}{k_0} \right) e^{-i r_1} \\ \alpha_1' &= \frac{1}{2} \left(1 - \frac{k_1 \beta_1}{k_0} \right) e^{i r_1}, & \bar{\alpha}_1' &= \frac{1}{2} \left(1 - \frac{k_1 \beta_1}{k_0} \right) e^{-i r_1} \\ r_1 &= k_1 l_1 \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (23)$$

ゆえに入射波振幅 a_0 が与えられると式(19), (20), (22)より

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= \frac{\bar{R}_0}{R_0} \cdot a_0, & a_1 &= \frac{\alpha_2}{R_0} \cdot a_0 \\ b_1 &= \frac{\bar{\alpha}_2}{R_0} \cdot a_0, & a_2 &= b_2 = \frac{1}{R_0} \cdot a_0 \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (24)$$

としてすべての定数が決まる。

水深 h と周波数 σ (または周期 T) が与えられると式(5)により $k_0 h$ が決まり, 空げき率と抵抗係数 V_1, V_2, μ_1, μ_2 が与えられると式(11), (15)により β_1, β_2 が決まり, 式(10), (14)により $k_1 h, k_2 h$ が決まるから, 式(24)により入射波振幅 a_0 に対して各領域の運動が確定することになる。

また長波運動であるから流体圧力は静水圧的で $p=\rho g \zeta$ の関係で与えられる。

a_0 を実数値とすると, 式(3)の第1項から入射波形状 ζ_i は次式で表わされる。

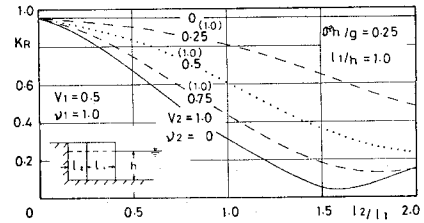
$$\zeta_i(x, t) = a_0 \cos(kx + \sigma t) \cdots \cdots (25)$$

そこで反射率 K_R は反射波振幅 b_0 と入射波振幅 a_0 の比の絶対値で式(24)から次のようである。

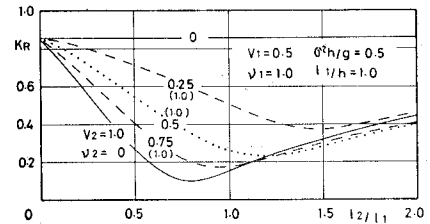
$$K_R = \left| \frac{b_0}{a_0} \right| = \left| \frac{\bar{R}_0}{R_0} \right| \cdots \cdots (26)$$

f) 計算結果

堤体Iの幅 l_1 と水深 h が等しいとき ($l_1/h=1.0$) その空げき率 V_1 を0.5, 抵抗係数 μ_1 を1.0として置き, 堤体IIの幅 l_2 と空げき率 V_2 を変化させたときの反射率の様子を調べて見る。($V_2=1.0$ のときの抵抗係数 μ_2 は0とする。すなわち堤体IIの部分が遊水部のときは抵抗はないとし, それ以外の V_2 に対しては $\mu_2=\mu_1=1.0$ とする。また, $V_2=0$ のときは堤体IIは空げきがないから $l_2=0$, したがって堤体Iだけの場合に相当する。)



図—2 Reflection Coefficient of Double Layer Seawall



図—3 Reflection Coefficient of Double Layer Seawall

こうして $\sigma^2 h/g=0.25$ と 0.5 の場合について $V_2=0, 0.25, 0.50, 0.75$ および 1.0 のときの反射率の計算結果を示すと 図—2, 3 のようになり, 堤体IIの空げき率が大きいほど反射率は小さくなり遊水部になった場合 ($V_2=1.0$) が最も小さいことがわかる。すなわち堤体Iに比べてIIの空げき率が大きい方が消波護岸として有効で遊水部護岸の場合が最も良く, 図—3 でよくわかるように V_2 が大きいほど最小反射率は l_2/l_1 の小さいところで現われることになり, V_2 を大きくしたほうが堤体IIの幅は狭くてすむことになる。

$V_2=0.5$ の場合は堤体IとIIの性質が同じであるから堤体Iの幅を上げたときの反射率低下を示すことになるが, 透過堤体の幅を上げるよりもその部分を遊水部にした方が有利であることもわかる。

(2) 直立2層透過防波堤

図—4 に示すように一定水深 h の海域に遊水幅 $2l$ をへだてて空げき率を異にする2つの透過堤体I, IIIがあり, 右方より周波数 σ の波長の長い波が入射する場合を考える。

遊水部の中央静水面上に原点 0, 水平に x 軸, 鉛直上方に z 軸をとる。ここでは透過堤体 I と III の幅は相等し

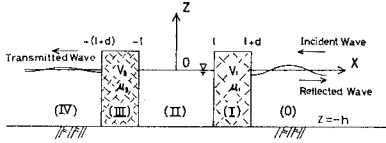


図-4 Permeable Breakwater by Double Walls

く d とし, 遊水部との境界面はそれぞれ $l, -l$ にあるとする。流体域を図のように, 領域 0 ($x \geq l+d$), 領域 I ($l+d \geq x \geq l$, 空げき率は V_1 , 抵抗係数は μ_1), 遊水部領域 II ($l \geq x \geq -l$), 領域 III ($-l \geq x \geq -(l+d)$, 空げき率 V_3 , 抵抗係数 μ_3), 領域 IV ($x \leq -(l+d)$) にわけける。

直立 2 層透過性護岸の解析法と同様に各領域での, 連続方程式, 運動方程式, 水面変動, 水平流速および境界条件は表-1 のように表わされる。

それぞれの ζ, u を境界条件式に代入して得られる 8 個の方程式より, 次のようにして通過率 K_T , 反射率 K が求められる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\beta_1 k_1}{k_0} &= \alpha_1, & \frac{k_0}{\beta_1 k_1} &= \frac{1}{\alpha_1} \\ \frac{\beta_3 k_3}{k_0} &= \alpha_3, & \frac{k_0}{\beta_3 k_3} &= \frac{1}{\alpha_3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (27)$$

とおくと

$$a_3 = \frac{a_4}{2} \left(1 + \frac{1}{\alpha_3} \right) e^{i\{k_3(l+d) - k_0(l+d)\}} \dots\dots\dots (28)$$

$$b_3 = \frac{a_4}{2} \left(1 - \frac{1}{\alpha_3} \right) e^{-i\{k_3(l+d) + k_0(l+d)\}} \dots\dots\dots (29)$$

$$a_2 = \frac{a_4}{4} \left\{ \left(1 + \frac{1}{\alpha_3} \right) (1 + \alpha_3) e^{i(-k_0 d + k_3 d)} + \left(1 - \frac{1}{\alpha_3} \right) (1 - \alpha_3) e^{i(-k_0 d - k_3 d)} \right\} \dots\dots\dots (30)$$

$$b_2 = \frac{a_4}{4} \left\{ (1 - \alpha_3) \left(1 + \frac{1}{\alpha_3} \right) e^{i(k_3 d - 2k_0 l - k_0 d)} + (1 + \alpha_3) \left(1 - \frac{1}{\alpha_3} \right) e^{i(-k_3 d - 2k_0 l - k_0 d)} \right\} \dots (31)$$

$$a_1 = \frac{a_4}{8} \left\{ \left(1 + \frac{1}{\alpha_1} \right) \left(1 + \frac{1}{\alpha_3} \right) (1 + \alpha_3) e^{i(k_0 l - k_0 d - k_1 l + k_3 d)} + \left(1 + \frac{1}{\alpha_1} \right) \left(1 - \frac{1}{\alpha_3} \right) (1 - \alpha_3) e^{i(k_0 l - k_0 d - k_1 l - k_3 d)} + \left(1 - \frac{1}{\alpha_1} \right) (1 - \alpha_3) \left(1 + \frac{1}{\alpha_3} \right) e^{i(-3k_0 l - k_0 d - k_1 l + k_3 d)} + \left(1 - \frac{1}{\alpha_1} \right) (1 + \alpha_3) \left(1 - \frac{1}{\alpha_3} \right) e^{i(-3k_0 l - k_0 d - k_1 l - k_3 d)} \right\} \dots\dots\dots (32)$$

$$b_1 = \frac{a_4}{8} \left\{ \left(1 - \frac{1}{\alpha_3} \right) \left(1 + \frac{1}{\alpha_3} \right) (1 + \alpha_3) e^{i(k_0 l - k_0 d + k_1 l + k_3 d)} + \left(1 - \frac{1}{\alpha_1} \right) \left(1 - \frac{1}{\alpha_3} \right) (1 - \alpha_3) e^{i(k_0 l - k_0 d + k_1 l - k_3 d)} + \left(1 + \frac{1}{\alpha_1} \right) (1 - \alpha_3) \left(1 + \frac{1}{\alpha_3} \right) e^{i(-3k_0 l - k_0 d + k_1 l + k_3 d)} + \left(1 + \frac{1}{\alpha_1} \right) (1 + \alpha_3) \left(1 - \frac{1}{\alpha_3} \right) e^{i(-3k_0 l - k_0 d + k_1 l - k_3 d)} \right\} \dots\dots\dots (33)$$

$$a_0 = R_0 a_4 \dots\dots\dots (34)$$

表-1 直立 2 層透過防波堤の基礎式および境界条件

	領域 I	領域 III	領域 0, II, IV
連続方程式	$\frac{\partial \zeta_1}{\partial t} = -\frac{h}{V_1} \cdot \frac{\partial u_1}{\partial x}$	$\frac{\partial \zeta_3}{\partial t} = -\frac{h}{V_3} \cdot \frac{\partial u_3}{\partial x}$	$\frac{\partial \zeta_i}{\partial t} = -h \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x}$
運動方程式	$\frac{1}{V_1} \cdot \frac{\partial u_1}{\partial t} = -\sigma \cdot \frac{\partial \zeta_1}{\partial x} - \mu_1 u_1$	$\frac{1}{V_3} \cdot \frac{\partial u_3}{\partial t} = -\sigma \cdot \frac{\partial \zeta_3}{\partial x} - \mu_3 u_3$	$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -\sigma \cdot \frac{\partial \zeta_i}{\partial x} \quad (i=0, 2, 4)$
水面変動	$\zeta_1(x, t) = (a_1 e^{i k_1 x} + b_1 e^{-i k_1 x}) e^{i \sigma t}$	$\zeta_3(x, t) = (a_3 e^{i k_3 x} + b_3 e^{-i k_3 x}) e^{i \sigma t}$	$\zeta_0(x, t) = (a_0 e^{i k_0 x} + b_0 e^{-i k_0 x}) e^{i \sigma t}$
水平流速	$u_1(x, t) = -\beta_1 \frac{\sigma k_1}{\sigma} (a_1 e^{i k_1 x} - b_1 e^{-i k_1 x}) e^{i \sigma t}$ $\beta_1 = \frac{V_1}{1 - i \nu_1}, \quad \nu_1 = \frac{\mu_1 V_1}{\sigma}$ $(k_1 h)^2 = (1 - i \nu_1) (k_0 h)^2 = (1 - i \nu_1) \frac{\sigma^2 h}{g}$	$u_3(x, t) = -\beta_3 \frac{\sigma k_3}{\sigma} (a_3 e^{i k_3 x} - b_3 e^{-i k_3 x}) e^{i \sigma t}$ $\beta_3 = \frac{V_3}{1 - i \nu_3}, \quad \nu_3 = \frac{\mu_3 V_3}{\sigma}$ $(k_3 h)^2 = (1 - i \nu_3) (k_0 h)^2 = (1 - i \nu_3) \frac{\sigma^2 h}{g}$	$u_0(x, t) = -\frac{\sigma k_0}{\sigma} (a_0 e^{i k_0 x} - b_0 e^{-i k_0 x}) e^{i \sigma t}$ $\zeta_2(x, t) = (a_2 e^{i k_0 x} + b_2 e^{-i k_0 x}) e^{i \sigma t}$ $u_2(x, t) = -\frac{\sigma k_0}{\sigma} (a_2 e^{i k_0 x} - b_2 e^{-i k_0 x}) e^{i \sigma t}$ $\zeta_4(x, t) = a_4 \cdot e^{i k_0 x} \cdot e^{i \sigma t}$ $u_4(x, t) = -\frac{\sigma k_0}{\sigma} \cdot a_4 e^{i k_0 x} \cdot e^{i \sigma t}$ $(k_0 h)^2 = \frac{\sigma^2 h}{g}$
境界条件	$\left(\begin{array}{ll} x=l+d & \text{で } \zeta_0=\zeta_1, \quad u_0=u_1 \\ x=l & \text{で } \zeta_1=\zeta_2, \quad u_1=u_2 \\ x=-l & \text{で } \zeta_2=\zeta_3, \quad u_2=u_3 \\ x=-(l+d) & \text{で } \zeta_3=\zeta_4, \quad u_3=u_4 \end{array} \right.$		

$$\begin{aligned}
 R_0 = \frac{1}{16} & \left\{ (1+\alpha_1) \left(1+\frac{1}{\alpha_1}\right) (1+\alpha_3) \left(1+\frac{1}{\alpha_3}\right) e^{i(-2k_0d+k_1d+k_3d)} + (1+\alpha_1) \left(1+\frac{1}{\alpha_1}\right) (1-\alpha_3) \left(1-\frac{1}{\alpha_3}\right) e^{i(-2k_0d+k_1d-k_3d)} \right. \\
 & + (1+\alpha_1) \left(1-\frac{1}{\alpha_1}\right) (1-\alpha_3) \left(1+\frac{1}{\alpha_3}\right) e^{i(-4k_0l-2k_0d+k_1d+k_3d)} + (1+\alpha_1) \left(1-\frac{1}{\alpha_1}\right) (1+\alpha_3) \left(1-\frac{1}{\alpha_3}\right) e^{i(-4k_0l-2k_0d+k_1d-k_3d)} \\
 & + (1-\alpha_1) \left(1-\frac{1}{\alpha_1}\right) (1+\alpha_3) \left(1+\frac{1}{\alpha_3}\right) e^{i(-2k_0d-k_1d+k_3d)} + (1-\alpha_1) \left(1-\frac{1}{\alpha_1}\right) (1-\alpha_3) \left(1-\frac{1}{\alpha_3}\right) e^{i(-2k_0d-k_1d-k_3d)} \\
 & \left. + (1-\alpha_1) \left(1+\frac{1}{\alpha_1}\right) (1-\alpha_3) \left(1+\frac{1}{\alpha_3}\right) e^{i(-4k_0l-2k_0d-k_1d+k_3d)} + (1-\alpha_1) \left(1+\frac{1}{\alpha_1}\right) (1+\alpha_3) \left(1-\frac{1}{\alpha_3}\right) e^{i(-4k_0l-2k_0d-k_1d-k_3d)} \right\} \quad (35)
 \end{aligned}$$

$$b_0 = \bar{R}_0 a_4 \dots \dots \dots (36)$$

$$\begin{aligned}
 \bar{R}_0 = \frac{1}{16} & \left\{ (1-\alpha_1) \left(1+\frac{1}{\alpha_1}\right) (1+\alpha_3) \left(1+\frac{1}{\alpha_3}\right) e^{i(2k_0l+k_1d+k_3d)} + (1-\alpha_1) \left(1+\frac{1}{\alpha_1}\right) (1-\alpha_3) \left(1-\frac{1}{\alpha_3}\right) e^{i(2k_0l+k_1d-k_3d)} \right. \\
 & + (1-\alpha_1) \left(1-\frac{1}{\alpha_1}\right) (1-\alpha_3) \left(1+\frac{1}{\alpha_3}\right) e^{i(-2k_0l+k_1d+k_3d)} + (1-\alpha_1) \left(1-\frac{1}{\alpha_1}\right) (1+\alpha_3) \left(1-\frac{1}{\alpha_3}\right) e^{i(-2k_0l+k_1d-k_3d)} \\
 & + (1+\alpha_1) \left(1-\frac{1}{\alpha_1}\right) (1+\alpha_3) \left(1+\frac{1}{\alpha_3}\right) e^{i(2k_0l-k_1d+k_3d)} + (1+\alpha_1) \left(1-\frac{1}{\alpha_1}\right) (1-\alpha_3) \left(1-\frac{1}{\alpha_3}\right) e^{i(2k_0l-k_1d-k_3d)} \\
 & \left. + (1+\alpha_1) \left(1+\frac{1}{\alpha_1}\right) (1-\alpha_3) \left(1+\frac{1}{\alpha_3}\right) e^{i(-2k_0l-k_1d+k_3d)} + (1+\alpha_1) \left(1+\frac{1}{\alpha_1}\right) (1+\alpha_3) \left(1-\frac{1}{\alpha_3}\right) e^{i(-2k_0l-k_1d-k_3d)} \right\} \dots (37)
 \end{aligned}$$

通過率 K_T および反射率 K_R はそれぞれ式 (34), (36) により次式のようにになる。

$$K_T = \left| \frac{a_4}{a_0} \right| = \left| \frac{1}{R_0} \right|, \quad K_R = \left| \frac{b_0}{a_0} \right| = \left| \frac{\bar{R}_0}{R_0} \right| \quad (38), (39)$$

3. 実験

(1) 実験方法

長さ 22 m, 幅 80 cm, 高さ 80 cm の 2 次元造波水路において, 透過堤体部分として金網のわくにモルタル製異形ブロック (体積 500 cm³ のテトラポッド, 中空三角, ホーロスケアー模型), または碎石 (粒径 2 cm ~ 4 cm) を詰めたものを用い, 抵抗線式波高計を用いて Healy の方法により反射率を測定した。遊水部護岸の場合は, 水深を一定 ($h=50$ cm) とし $\sigma^2 h/g=0.25, 0.375, 0.50$ の 3 種類の波に対して, 背後の直立板を移動することにより遊水部の幅を変化させて, 反射率の変化を測定し, 直立 2 層透過防波堤の場合は, 同じ条件で浜側の透過堤体 (異形ブロック, または碎石をつめた金網わく) を移動させて, 透過堤体の間隔による反射率, 通過率の変化を測定した。

(2) 実験結果

a) 遊水部をもつ直立消波護岸

図-5, 6, 7 は $l/h=0.5$ 実測空け率 $V=0.63$ (異形ブロック) の場合 $\sigma^2 h/g=0.5, 0.375, 0.25$ に対する遊水部をもつ護岸の反射率の測定結果を示したもので, 波長の長い波に対してそれぞれ最小反射率を与える最適遊水幅の存在が認められ, また波長が長くなると最適遊水幅は広くなるが反射率は逆に低くなることがわかる。

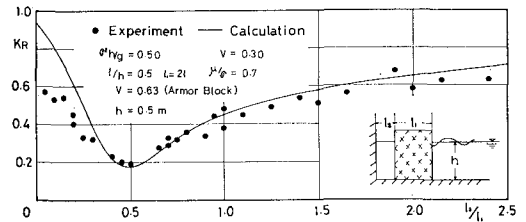


図-5 Reflection Coefficient for Sea Wall with Reservoir

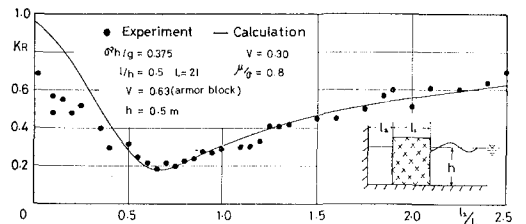


図-6 Reflection Coefficient for Sea Wall with Reservoir

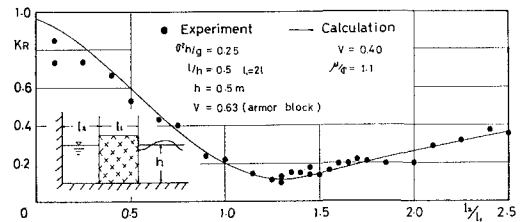


図-7 Reflection Coefficient for Sea Wall with Reservoir

また, $l/h=0.25$ に対する 図-8 と同じ波に対する 図-5 を比較すると l/h が大きいほど最適遊水幅は狭くなるが最小反射率は大きくなることがわかる。さらに $l/h=0.25$ で $\sigma^2 h/g$ が小さくなると $l_2/l_1=2.0$ ぐらい

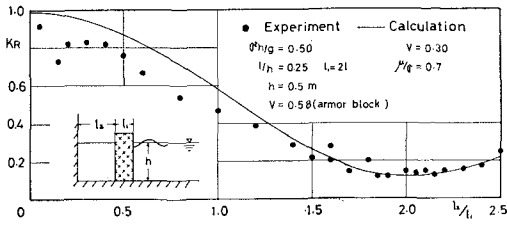


図-8 Reflection Coefficient for Sea Wall with Reservoir

では遊水部効果はあらわれなくなる。これらの特性は前論文⁷⁾において予測した事項の正しいことを示している。

b) 直立2層透過防波堤

図-9, 10 は沖側と浜側の防波堤の空げき物質が同一の場合である。図-9 では $V_1 = V_2 = 0.45$ (砕石, 粒径 2 cm ~ 4 cm) で, 通過率は 0.2 前後とかなり低いが, 反射率が 0.7 前後とかなり高い。図-10 は $V_1 = V_2 = 0.60$

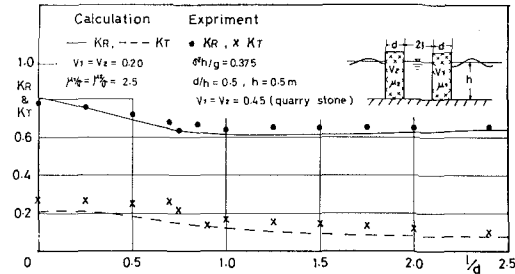


図-9 Reflection Coeff. & Transmission Coeff. Permeable Breakwater by Double Walls

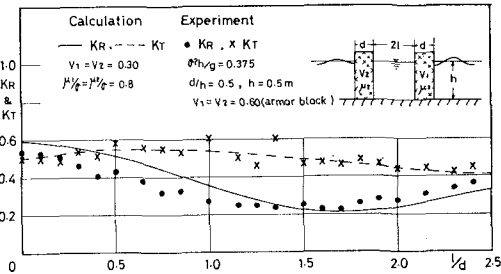


図-10 Reflection Coeff. & Transmission Coeff. of Permeable Breakwater by Double Walls

(異形ブロック)の場合で通過率が 0.5 程度あって防波堤としては有効ではない。この両者を比較した場合, 空げき率の差がわずか 0.15 であるのにかわらず著しい相違を示すのは, のちに述べるように空げき物質の形状に起因するもので, 500 cm³ の異形ブロック模型と粒径 2 cm ~ 4 cm の砕石の相違が現われていると考えられる。

そこで, 遊水部効果によって反射率を低減し, また透過波を小さくするため, 沖側の空げき率を大きく, 浜側を小さくした場合を示したのが 図-11, 12, 13 である。

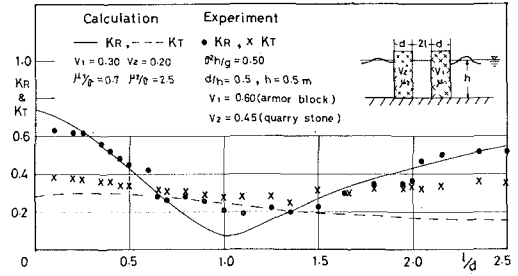


図-11 Reflection Coeff. & Transmission Coeff. of Permeable Breakwater by Double Walls

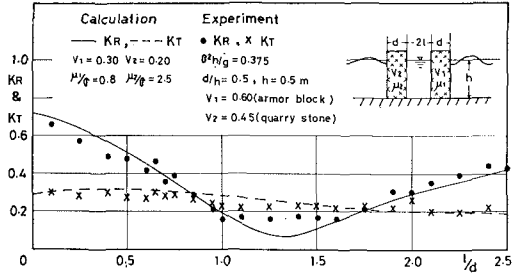


図-12 Reflection Coeff. & Transmission Coeff. of Permeable Breakwater by Double Walls

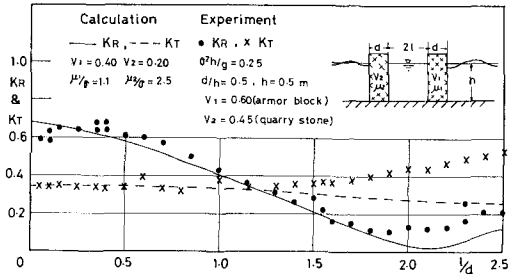


図-13 Reflection Coeff. & Transmission Coeff. of Permeable Breakwater by Double Walls

この3つの図を比較してみると反射率については, 先に述べた遊水部をもつ護岸の場合と全く同じ性質を表わしていることがわかる。すなわち最小反射率を与える最適遊水幅が存在すること, 波長が長くなると最適遊水幅は広くなるが消波効果が良くなることである。また, 通過率はほとんど 0.3 以下であり, 防波堤として有効である。

c) 空げき物質の形状の相違による消波効果への影響

図-9, 10 より空げき物質の形状によって消波効果が著しく異なることがわかったが, このことは遊水部護岸においても見られることで, 図-14 はその一例で, 透過堤体として, 砕石, 異形ブロックおよびコンクリート壁体に水平な円孔を設けたものについての反射率の測定値を示している。 $(D+B)/h = 1.5$ 付近において砕石と異形ブロックとの最小反射率の差はきわめて著しく, また,

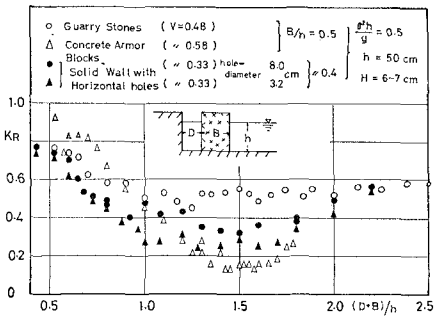


図-14 Reflection Coeff. of Seawall with Reservoir (Experiment)

水平孔をあけたパイプウォール(1), $\phi 8.0$ cm (●印), パイプウォール(2), $\phi 3.2$ cm (▲印) の2つは真の空げき率はともに $V=0.33$ であるが, 孔径の違いによる効果が現われており, 入射波高 ($H=6.2$ cm) に比べて $\phi 8.0$ cm は過大であることがわかる。

(3) 実験値と計算値の比較

次にこの実験値をもとに, この解析に用いた空げき率 V , 抵抗係数 μ/σ を推定して見る。

図-15は $V=0.30$ のとき u/σ を 0.5, 0.8, 1.0, 1.5 とした場合および $u/\sigma=0.8$ のとき $V=0.3, 0.4, 0.5$ とした場合の反射率を示すが, μ/σ が一定のとき V が小さくなれば最小反射率を与える l_2/l_1 は小さく, V が一定で μ/σ がある値をとるとき最小反射率は極小値を与える ($l/h=0.5$, $\sigma^2 h/g=0.375$, $V=0.30$ の場合は $\mu/\sigma=0.6$ で最小反射率は 0.05 となる)。

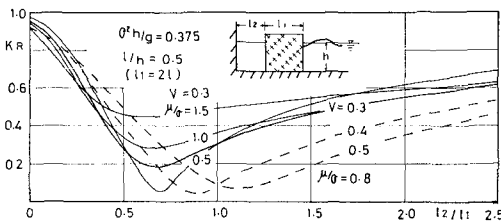


図-15 Reflection Coeff. for Various V & μ/σ

そこで V については 0.05, u/σ については 0.1 ごとに計算して最も良く実験値と一致するものを求めたものが図-5~9の実線(反射率), 破線(通過率)である。図-10~13は図-5~9で決定した V , μ/σ を使って計算し実験値と比較したものである。

この結果次のことがわかる。

① 実際の空げき率よりも計算に用いた空げき率の方がかなり小さい。

② 図-5, 6, 7より $\sigma^2 h/g$ が小さくなるにしたがって, 計算上の空げき率と抵抗係数がやや大きくなる傾向にある。

③ 図-9の碎石と図-10の異形ブロックの計算上

の抵抗係数を比較すると, 碎石の μ/σ が異形ブロックに比べて非常に大きい。

④ 図-5と図-8より堤体形状 l/h は計算上の V と u/σ には影響しない。このことは図-6と図-10を比較してもわかる。

⑤ 図-12の2層透過防波堤(沖側を異形ブロック, 浜側を碎石にした場合)の $\sigma^2 h/g=0.375$ において, 図-6の $V_1=0.30$, $\mu/\sigma=0.8$, 図-9の $V_2=0.20$, $\mu^2/\sigma=2.50$ を用いて計算した反射率, 通過率がともに非常に良く実験値と一致している(図-11, 図-13も同様である)。

4. ま と め

以上述べたことをまとめると次のようになる。

(1) 直立2層透過性護岸の場合, 波長の長い波に対して堤体の陸側の空げき率を大きくする方が消波効果を大きくする。極端な場合として遊水部を設けると最良の効果が期待される。

(2) 遊水部をもつ護岸の場合, 波長の長い波に対して波長と水深および透過堤体の幅に対応して反射率を最小ならしめる最適遊水幅が存在し, 反射率は0.2程度まで低下する。

(3) 波長が長くなるほど, 最適遊水幅は広くなるが, それにつれて最小反射率は低下する。

(4) 透過堤体の幅についても l/h が大きいほど最適遊水幅は狭くなるが最小反射率は大きくなり, 逆に l/h が小さいほど最適遊水幅は広くなり, 最小反射率は小さくなる。しかし, 透過堤体幅があまり広いか, または狭いときには遊水部の効果は現われにくくなる。

(5) 直立2層透過防波堤については, 空げき率を沖側が大きく, 浜側が小さくなるように適当にとると反射率は遊水部をもつ護岸と同じような性質をもち, 通過率は0.3以下に低下させることができる。

(6) 実験値と最も良く適合する計算上の空げき率は実際の透過堤体の平均空げき率とかなり異なった値となるが, これは計算上の V および u/σ がいずれも仮想の量であり, 堤体内エネルギー消費は平均空げき率よりもむしろ空げきの実際の形状および大きさ, ならびに波高と密接に関係していることによるものと考えられる。しかし, このような仮想の V および μ/σ によって透過性堤体の反射率および通過率はかなり正確に表現することができる。

5. む す び

以上, 遊水部をもつ直立消波護岸, および直立2層透過防波堤について検討を行なったが, いずれも沖側の透過性物質による“せき止め効果”とそれにつづく遊水部の適当な流体収容能力とによって, 透過性物質前後面に

大きな水面勾配を生じ、水平流速を大きくして、最大量の流体を流過せしめそれによるエネルギー損失により入射波のエネルギーを吸収するものと考えることができる。

このように、入射波の性質、設置水深などを考えあわせた適当な空げき率をもった適当幅の透過堤体の背後に適当な幅の遊水部を設けると、波長の長い波に対して有

効な直立の消波護岸、あるいは防波堤を実現することができよう。

参 考 文 献

- 1) 井島武士・奥藺英明・湯村やす・坂井久雄(1972)
：遊水部をもつ直立消波防波堤と護岸，第19回海岸工学学会演論文集，昭和47年11月。