Bull. Korean Fish. Soc. 20(4), 370~378, 1987

韓水誌 20(4), 370~378, 1987

防波堤 基礎 mound部의 反射波 制御機能에 關한 研究

柳 青 魯·金 種 仁*

釜山水産大學 海洋工學科, *韓國電力公社 技術研究院

(1987년 6월 4일 수리)

Wave Reflection Control Functions of Mounds for a Foundation of Breakwaters

Cheong-Ro RYU and Jong-In KIM*

Department of Ocean Engineering, National Fisheries University of Pusan, Pusan, 608 Korea

* Research Center of Korea Electric Power Corporation, Dong-gu, Daejŏn, 300 Korea

(Received June 4, 1987)

Wave reflection control functions of mound for the foundation of composite and perforated breakwaters were investigated through the theoretical considerations. The theory developed is based on a simple summation of components of reflected waves. The applicability of the theory is assured by the comparative studies of the theoretical calculation and experimental data on the sea surface elevation in front of a breakwater.

It is found that the reflection is mainly controlled by depth and width of the mound. In the design of composite type perforated breakwaters, the width of perforated part of the upright section can be decreased to less than half of the conventional design width for the same reflection by using the reflection control function of mound part and the reflection can be reduced until less than 30% of that in the composite breakwaters.

Using the results, a design method of mounds is proposed, by which the reduction of wave reflection is assured under the given wave conditions.

序 論

港灣은 天然 또는 人工的으로 外海로부터 來襲하는 波浪을 遮斷하여 船舶을 安全하게 碇泊시키는 場所이다. 産業의 發達과 貿易의 增大에 따라 港灣의 規模는 크게 擴張되고 있으며, 産業施設의 臨海化 및 海岸域의 綜合開發·利用에 따라 人工構造物에 의한 積極的인 波浪制御가 이루어지고 있다.

즉, 從來의 港灣保護라는 單一目的의 防波堤에 있어서는 入謝波를 反射시키든 碎波시키든 波浪을 막아 주면 되었지만, 最近에는 海域의 綜合開發이라는 次元에서 海域全體의 静穏化를 追求하게 되어 構造物로부터의 反射波에 의한 災害가 問題視되고 있다. 여기서 構造物 建設에 의한 反射波災害의 增大를 막기 위해서, 波浪을 反射시키는 遮蔽方法으로부터 波浪에너지를 吸收 또는 波浪의 位相差를 利用한 反射波制御工法이 現場에서 應用되고 있다 (椹木等[1)~5)]).

現在 많이 使用되고 있는 工法으로서는 漁港 등의 防波堤 外海쪽에 消波블록으로 傾斜堤의 形態를 만듦으로써 捨石堤와 같이 波浪의 碎波 및 에너지吸收가 일어나도록 하는 工法과, 遊水部를 가지는 低反射構造物 등에 의해 波浪의 位相을 조절함으로써 前方의 水面變動을 작게 하는 工法이 대표적인 것이다.

이러한 反射波 制御의 必要性과 現況으로부터 本研究에서는 이제까지 論議된 바 없는 低基混成防波堤 및 低反射防波堤의 새로운 反射波 制御工法으로서 마운드部를 利用하는 것에 대한 妥當性을 理論解析과 水理實驗資料에 의해 檢討하고 이 마운드部의 反射波 制御機能面에서의 最適設計斷面에 대해 論議하고자 한다.

混成防波堤의 反射波에 대한 影響 parameter

混成堤 및 遊水部를 가진 케이슨을 사용한 低反射堤의 反射波에 의한 海域의 最大 水面變動量은 각각 다음과 같은 水理量에 의해 지배를 받는다.

$$f(h_1,\ h_0,\ l_B,\ L,\ H,\ H_{cax},\ \theta_1,\ \theta_2)=0 \qquad (1)$$

for composite type breakwater

$$f\left\{\begin{matrix} h_1,\ h_0,\ l_{B1},\ l_{B2},\ L,\ H, \\ H_{cmmax},\ \theta_1,\ \theta_2,\ m,\ B,\ d \end{matrix}\right\}=0 \qquad (2)$$

for composite type perforated breakwater

여기서, h_1 : mound부의 水深

h_0 : 방파제 先端의 水深

l_B : 混成堤의 mound 幅

l_{B1} : 低反射堤의 mound 幅

l_{B2} : 低反射堤의 遊水部 幅

L : 波長

H : 波高

θ_1 : mound 部의 斜面傾斜

θ_2 : 海底傾斜

m : slit 의 空隙率

d : slit 의 幅

B : slit 의 두께

H_{cmax} : 방파제 前方의 合成最大波高

防波堤 全體의 反射波 低減效果를 나타내는 指標로서 H_{cmax}/H를 도입하면, 次元解析으로부터 混成堤에 대해서는,

$$\frac{H_{cmax}}{H}=f\left(\frac{h_1}{h_0},\ \frac{l_B}{L},\ \frac{h_1}{H},\ \frac{H}{L},\ \theta_1,\ \theta_2\right) \qquad (3)$$

低反射堤에 대해서는

$$\frac{H_{cmax}}{H}=f\left\{\begin{matrix} \dfrac{h_1}{h_0},\ \dfrac{(l_{B1}+l_{B2})}{L},\ \dfrac{l_{B1}}{l_{B2}},\ \dfrac{h_1}{H}, \\ \dfrac{H}{L},\ \theta_1,\ \theta_2,\ \dfrac{B}{d},\ \dfrac{d}{h_0},\ m \end{matrix}\right\} \qquad (4)$$

와 같은 無次元 水理量의 지배를 받는다.

Mound部의 反射波 制御에 관한 理論解析

1. 無限反復反射理論

本 研究에서 導入한 理論은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 混成低反射堤의 直立不透過壁(B1)과 透過壁(B2) mound 平坦部先端(B3)에서 入射波가 反復反射하고, 이 反復反射에 따라 防波堤 前方의 水面變動이 결정된다는 假定 아래 解析한 것이다.

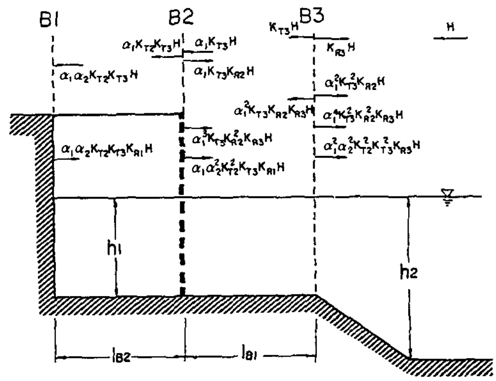

Fig. 1. Schematic diagram of reflection.

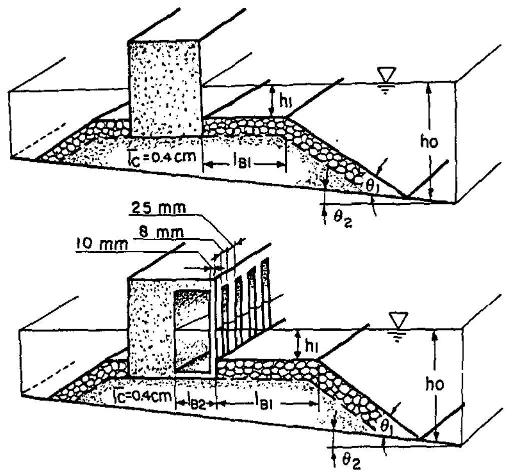

Fig. 2. Breakwater models of composite (upper) and composite type perforated breakwaters (lower).

다음 式(5)와 같이 入射波, 反射率, 透過率, 減衰率을 나타내고 Fig. 1과 같은 槪念으로 Fig. 2와 같은 model 防波堤에서의 無限反復反射를 생각하면 防波堤前方의 時·空間 水理變動量 $\eta_C(x,t)$는 式(6)과 같이 誘導할 수 있다.

$$\left.\begin{aligned} &\text{入射波}:\overline{H}=H\exp\{(kx+\sigma t)_i\} \\ &\text{反射率}:\overline{K}_{Rj}=K_{Rj}\exp(i\theta_{Rj}),\ \ j=1,2,3 \\ &\text{透過率}:\overline{K}_{Tj}=K_{Tj}\exp(i\theta_{Tj}),\ \ j=1,2 \\ &\text{減衰率}:\overline{\alpha}_p=\alpha_p\exp(-2\pi xi/L),\ \ P=1,2 \\ &\qquad\qquad \alpha_p=(-\mathcal{E}_px/L),\ \ P=1,2 \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

여기서,

$j=1$: 不透過壁(Fig. 1의 Boundary 1)에서의 값

$j=2$: 透過壁(Fig. 1의 Boundary 2)에서의 값

$j=3$: mound 平坦部 끝(Fig. 1의 Boundary 3)에서의 값

$p=1$: mound 平坦部 끝에서 透過壁 사이의 값

$p=2$: 透過壁과 不透過壁 사이(遊水部)의 값

R : 反射에 관한 값

T : 透過에 관한 값

θ : 位相의 遲刻

L : mound 上에서의 波長

x : mound 平坦部 끝을 原點으로 하여 外海쪽을 (+)로 한 水平距離

σ : 角周波數$(2\pi/T)$

k : 波數$(2\pi/L)$

l_{B1} : mound 平坦部 끝에서 透過壁까지의 距離

l_{B2} : 遊水部幅

$$\eta_C(x,t)=\frac{\overline{H}}{2}+\frac{H}{2}\Big[\overline{K}_{R3}+\overline{K}_{T3}^2\overline{K}_{R2}\overline{\alpha}_1^2 \sum_{n=1}^{\infty}(\overline{\alpha}_1^2\overline{K}_{R2}\overline{K}_{R3})^{n-1}+\overline{\alpha}_1^2\,\overline{\alpha}_2^2\overline{K}_{R1}\overline{K}_{T2}^2\,\overline{K}_{T3}^2 \cdot\left\{\sum_{n=1}^{\infty}(\overline{\alpha}_2^2\overline{K}_{R1}\overline{K}_{R2})^{n-1}\right\}\left\{\sum_{n=1}^{\infty}(\overline{\alpha}_1^2\overline{K}_{R2}\overline{K}_{R3})^{n-1}\right\}^2 \cdot\sum_{n=1}^{\infty}\{\overline{\alpha}_1^2\,\overline{\alpha}_2^2\overline{K}_{R1}\overline{K}_{R3}\overline{K}_{T2}^2\cdot\sum_{n=1}^{\infty}(\overline{\alpha}_1^2\overline{K}_{R2}\overline{K}_{R3})^{n-1} \cdot\sum_{n=1}^{\infty}(\overline{\alpha}_2^2\overline{K}_{R1}\overline{K}_{R2})^{n-1}\}^{n-1}\Big]\cdot\exp\{(-kx+\sigma t)i\} \tag{6}$$

式(6)의 우변 제1항은 入射波, 제2항은 mound 平坦部 끝에서의 反射波, 제3항은 低反射堤의 透過壁을 통과하지 않은 경우의 反射波, 제4항은 透過壁을 통과한 경우의 反射波를 나타내고 있다. 式(6)을 定理하면,

$$\eta_C(x,t)=\frac{\overline{H}}{2}+\frac{H}{2}\Big[\overline{K}_{R3}+\overline{\alpha}_1^2\overline{K}_{R2}\overline{K}_{T3}^2\Lambda +\overline{\alpha}_1^2\,\overline{\alpha}_2^2\overline{K}_{R1}\overline{K}_{T2}^2\,\overline{K}_{T3}^2\frac{1}{1-\overline{\alpha}_2^2\overline{K}_{R1}\overline{K}_{R2}}\Lambda^2 \cdot\frac{1}{1-\overline{\alpha}_1^2\,\overline{\alpha}_2^2\overline{K}_{R1}\overline{K}_{R3}\overline{K}_{T2}^2\dfrac{1}{1-\overline{\alpha}_1^2\overline{K}_{R1}\overline{K}_{R3}}\Lambda}\Big] \cdot\exp\{(-kx+\sigma t)i\} \tag{7}$$

여기서, $\Lambda=\dfrac{1}{1-\overline{\alpha}_1^2\,K_{R2}\,\overline{K}_{R3}}$

式(7)로부터 實數部를 整理하면

$$\eta_C(x,t)=\frac{H}{2}\sqrt{C^2+D^2}\cos(\sigma t+\theta^{**}) \tag{8}$$

여기서, $\theta^{**}=\tan^{-1}\dfrac{D}{C}$ (9)

$$C=\cos kx+K_{R3}\cos(\theta_{R2}-kx) +\frac{\alpha_1^2K_{R2}K_{T3}^2\{\cos\theta_1-\alpha_1^2K_{R2}K_{R3}\cos(\theta_1-\theta_2)\}}{1-2\alpha_1^2K_{R2}K_{R3}\cos\theta_2+\alpha_1^4K_{R2}^2K_{R3}^2} +\frac{1}{\sqrt{X^2+Y^2}}\{K_1\cos(\theta_3-\theta^*)-K_2\cos(\theta_4-\theta^*) -K_3\cos(\theta_5-\theta^*)+K_4\cos(\theta_6-\theta^*)\} \tag{10}$$

$$D=\sin kx+K_{R3}\sin(\theta_{R2}-kx) +\frac{\alpha_1^2K_{R2}K_{T3}\{\sin\theta_1-\alpha_1^2K_{R2}K_{R3}\sin(\theta_1-\theta_2)\}}{1-2\alpha_1^2K_{R2}K_{R3}\cos\theta_2+\alpha_1^4K_{R2}^2K_{R3}^2} +\frac{1}{\sqrt{X^2+Y^2}}\{K_1\sin(\theta_3-\theta^*)-K_2\sin(\theta_4-\theta^*) -K_3\sin(\theta_5-\theta^*)+K_4\sin(\theta_6-\theta^*)\} \tag{11}$$

$$\left.\begin{aligned}
\theta_1&=-4\pi\frac{l_{B1}}{L}+\theta_{R2}+\theta_{T3}-kx\\
\theta_2&=-4\pi\frac{l_{B2}}{L}+\theta_{R2}+\theta_{R3}\\
\theta_3&=-4\pi\frac{l_{B1}+l_{B2}}{L}+\theta_{R1}+2\theta_{T2}+2\theta_{T3}-kx\\
\theta_4&=-8\pi\frac{l_{B1}}{L}-4\pi\frac{l_{B2}}{L}+\theta_{R1}+\theta_{R2}\\
&\quad+\theta_{R3}+2\theta_{T2}+2\theta_{T3}-kx\\
\theta_5&=-4\pi\frac{l_{B1}}{L}-8\pi\frac{l_{B2}}{L}+2\theta_{R1}+\theta_{R2}+2\theta_{T2}\\
&\quad+2\theta_{T3}-kx\\
\theta_6&=-8\pi\frac{l_{B1}+l_{B2}}{L}+2\theta_{R1}+2\theta_{R2}+\theta_{R3}\\
&\quad+2\theta_{T2}+2\theta_{T3}-kx
\end{aligned}\right\} \tag{12}$$

$$\left.\begin{aligned}
K_1&=\alpha_1^2\,\alpha_2^2\,K_{R1}\,K_{T2}^2\,K_{T3}^2\\
K_2&=K_1\,K_5\\
K_3&=K_1\,K_7\\
K_4&=\alpha_1^4\,\alpha_2^4\,K_{R1}^2\,K_{R2}^2\,K_{R3}\,K_{T2}^2\,K_{T3}\\
\theta^*&=\tan^{-1}\frac{Y}{X}
\end{aligned}\right\} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
X=1&-K_5\{3\cos(J_1)-3K_5\cos(2J_1)+K_5^2\cos(3J_1)\}\\
&-2K_5\cos(J_2)+K_5K_7\{4\cos(J_3)\\
&+3K_5K_7\cos(2J_3)\}\\
&-\frac{K_5^2K_7}{K_{R2}^2K_{R3}}\cos(J_4)\{1-5K_{R2}^2K_{R3}\}\\
&+2K_5^3K_7\cos(J_5)\ -K_5K_7^2\{2\alpha_1-1\}\cos(J_6)\\
&+K_7^2\cos(J_7)+K_5^3K_7^2\cos(J_8)\\
&-\frac{K_1K_{R3}}{K_{T3}^2}\cos(J_9)\\
&+2\frac{K_5^2K_{T2}^2}{K_{R2}^2}\cos(J_{10})-\frac{K_7K_{T2}^2}{K_{R2}}\cos(J_{11})\\
&+\frac{K_1K_7K_{R3}}{K_{R2}^2}\cos(J_{12})-2\frac{K_9^2K_7K_{T2}^2}{K_{R2}^2}\cos(J_{13})\\
&+\frac{K_5^3K_{T2}^2}{K_{R2}^2}\cos(J_{14})
\end{aligned} \tag{14}$$

$$\left.\begin{aligned}
K_5&=\alpha_1^2K_{R2}K_{R3}\\
K_6&=\alpha_1^2K_{R2}K_{R3}^2\\
K_7&=\alpha_2^2K_{R1}K_{R2}
\end{aligned}\right\} \tag{15}$$

$$\left.\begin{aligned}
J_1 &= -4\pi\frac{l_{B1}}{L}+\theta_{R2}+\theta_{R3}\\
J_2 &= -4\pi\frac{l_{B2}}{L}+\theta_{R1}+\theta_{R2}\\
J_3 &= -4\pi\frac{l_{B1}+l_{B2}}{L}+\theta_{R1}+2\theta_{R2}+\theta_{R3}\\
J_4 &= -8\pi\frac{l_{B1}}{L}-4\pi\frac{l_{B2}}{L}+\theta_{R1}+3\theta_{R2}+2\theta_{R3}\\
J_5 &= -12\pi\frac{l_{B1}}{L}-4\pi\frac{l_{B2}}{L}\theta_{R1}+4\theta_{R2}+3\theta_{R3}\\
J_6 &= -4\pi\frac{l_{B1}}{L}-8\pi\frac{l_{B2}}{L}+2\theta_{R1}+3\theta_{R2}+\theta_{R3}\\
J_7 &= -8\pi\frac{l_{B2}}{L}+2\theta_{R1}+2\theta_{R2}\\
J_8 &= -12\pi\frac{l_{B1}}{L}-8\pi\frac{l_{B2}}{L}+2\theta_{R1}+5\theta_{R2}+3\theta_{R3}\\
J_9 &= -4\pi\frac{l_{B1}+l_{B2}}{L}+\theta_{R1}+\theta_{R3}+2\theta_{T2}\\
J_{10} &= -8\pi\frac{l_{B1}}{L}-4\pi\frac{l_{B2}}{L}+\theta_{R1}+\theta_{R2}+2\theta_{R3}+2\theta_{T2}\\
J_{11} &= -12\pi\frac{l_{B1}}{L}-4\pi\frac{l_{B2}}{L}+\theta_{R1}+2\theta_{R2}+3\theta_{R3}+2\theta_{T2}\\
J_{12} &= -4\pi\frac{l_{B1}}{L}-8\pi\frac{l_{B2}}{L}+2\theta_{R1}+\theta_{R2}+\theta_{R3}+2\theta_{T2}\\
J_{13} &= -8\pi\frac{l_{B1}+l_{B2}}{L}+2\theta_{R1}+\theta_{R2}+2\theta_{R3}+2\theta_{T2}\\
J_{14} &= -12\pi\frac{l_{B1}}{L}-8\pi\frac{l_{B2}}{L}+2\theta_{R1}+3\theta_{R2}+3\theta_{R3}+\theta_{R3}
\end{aligned}\right\} \tag{16}$$

$$Y=X^*-1 \tag{17}$$

여기서, X^*는 式(14) 중의 cosine 項을 sine 項으로 치환한 값이다.

위의 式(8)~(17)로부터 防波堤 前方의 距離 x인 地點의 最大水面變動量 $\eta_C(x)$를 구하기 위하여 $\cos(\sigma t+\theta^{**})=1.0$으로 놓으면, 式(8)은

$$\eta_c(x)=\frac{H}{2}\sqrt{C^2+D^2} \tag{18}$$

이 된다. 式(18)에서 다시 可視反射率($H_C(x)/H$)로써 反射率의 指標로 하면 防波堤 前方의 反射率은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{H_C(x)}{H}=\sqrt{C_2+D^2} \tag{19}$$

2. 有限反復反射理論

式(6)에서 $\overline{\alpha}_1^6\overline{K}_{R2}^2\overline{K}_{R3}^2\overline{K}_{T3}^2$ 以上의 項은 微小項이므로 생략하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\eta_C(x,t)&=\frac{\overline{H}}{2}+\frac{H}{2}\{\overline{K}_{R3}+\overline{\alpha}_1^2\overline{K}_{R2}\overline{K}_{T3}^2\\
&+\overline{\alpha}_1^2\,\overline{\alpha}_2^2\overline{K}_{R1}\overline{K}_{T2}^2\,\overline{K}_{T3}^2\\
&+\overline{\alpha}_1^4\,\overline{K}_{R2}^2\,\overline{K}_{R3}\,\overline{K}_{T3}^2\}\cdot\exp\{(-kx+\sigma t)i\}\end{aligned} \tag{20}$$

여기서 우변 제1항은 入射波 제2항은 mound 平坦部 끝에서의 反射波, 제3항은 透過壁으로부터 1회째의 反射波, 제4항은 不透過壁으로부터의 1회째 反射波 제5항은 透過壁으로부터의 2회째 反射波를 나타내고 있다.

防波堤 前方의 時·空間 水面變動量 $\eta_C(x,t)$는 式(20)의 실수 부분을 취하여 다음 式으로부터 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}\eta_C(x,t)&=\frac{H}{2}\{\cos(kx+\sigma t)+K_{R3}\cos(\sigma t-kx+\theta_{R3})\\
&+\alpha_1^2K_{T3}^2\,K_{R2}\cos(\sigma t-kx\\
&-4\pi\frac{l_{B1}}{L}+2\theta_{T3}+\theta_{R2})\\
&+\alpha_1^2\,\alpha_2^2\,K_{T3}^2\,K_{T2}^2K_{R1}\cos(\sigma t-kx\\
&-4\pi\frac{l_{B1}+l_{B2}}{L}+2\theta_{T3}+2\theta_{T2}+\theta_{R1})\\
&+\alpha_1^4\,K_{T3}^2K_{R2}K_{R3}\cos(\sigma t-kx-8\pi\frac{l_{B1}}{L}\\
&+2\theta_{T3}+2\theta_{R2}+\theta_{R3})\}\end{aligned} \tag{21}$$

式(21)은 간단한 계산과정을 거쳐서

$$\left.\begin{aligned}\alpha&=\cos kx+K_{R3}\cos(-kx+\theta_{R3})+\\
&\alpha_1^2K_{R2}K_{T3}^2\cos(-kx-4\pi\frac{l_{B1}}{L}+2\theta_{T3}+\theta_{R2})\\
&+\alpha_1^2\alpha_2^2K_{R1}K_{T2}^2\,K_{T3}^2\cos(-kx\\
&-4\pi\frac{l_{B1}+l_{B2}}{L}+2\theta_{T2}+\theta_{R1})\\
&+\alpha_1^4\,K_{T3}^2\,K_{R2}^2K_{R3}\cos(-kx\\
&-8\pi\frac{l_{B1}}{L}+2\theta_{T3}+2\theta_{R2}+\theta_{R3})\\
\beta&=\sin kx+K_{R3}\sin(-kx+\theta_{R3})\\
&+\alpha_1^2K_{R2}K_{T3}^2\sin(-kx-4\pi\frac{l_{B1}}{L}\\
&+2\theta_{T3}+\theta_{R2})\\
&+\alpha_1^2\alpha_2^2K_{R1}K_{T2}^2\,K_{T3}^2\sin(-kx\\
&-4\pi\frac{l_{B1}+l_{B2}}{L}+2\theta_{T2}+\theta_{R1})\\
&+\alpha_1^4\,K_{T3}^2\,K_{R2}^2K_{R3}\sin(-kx\\
&-8\pi\frac{l_{B1}}{L}+2\theta_{R2}+2\theta_{T3}+\theta_{R3})\end{aligned}\right\} \tag{22}$$

라 놓으면,

$$\eta_C(x,t)=\frac{H}{2}\sqrt{\alpha^2+\beta^2}\cos(\sigma t+\theta^*) \tag{23}$$

가 된다. 여기서,

$$\theta^*=\tan^{-1}\frac{\beta}{\alpha}$$

以上으로부터 x地點의 最大水面變動量은

$$\eta_C(x)=\frac{H}{2}\sqrt{\alpha^2+\beta^2} \tag{24}$$

가 된다. 윗식으로부터 可視反射率은

$$\frac{H_C(x)}{H}=\sqrt{\alpha^2+\beta^2} \tag{25}$$

로부터 구할 수 있다.

이상의 理論式 誘導는 透過壁을 가진 低反射堤에 대한 것이나, 混成堤의 경우에는 $K_{R2}=0$, $K_{T2}=1.0$, $\theta_{R2}=0$, $\theta_{T2}=0$로 놓고, l_{B1}과 l_{B2}에 대해서는 混成堤 mound幅 l_B에 대하여 $l_{B1}+l_{B2}=l_B$의 조건을 만족하도록 하면, 위의 理論式은 그대로 混成堤에 대해서도 적용할 수 있다. 결과적으로, 無限의 反復反射를 고려할 경우에는 式(19)로부터 有限의 反復反射를 고려할 경우에는 式(25)으로부터 防波堤 前方 임의거리(x)에서의 수면변동량을 計算할 수 있으며, 水面變動의 最大値를 보이는 x에서의 變動量으로부터 反射率(H_{cmax}/H)을 구할 수 있다.

Mound部의 反射波 制御機能

1. 防波堤 前方의 水面變動

理論解析에서 論議한 水面變動推定法의 妥當性을 檢證하기 위하여 防波堤 前方의 水面變動量에 관한 柳·椹木[7]의 實驗結果와 비교검토하였다.

式(16) 및 式(25)로부터 거리 x에서의 水面變動量을 理論的으로 구할 수 있다. 그러나 實際計算에 있어서는 K_{R1}, K_{R2}, K_{T3}, θ_{R1}, θ_{R2}, θ_{T2}, θ_{R3}, θ_{T3}, ε_1, ε_2, l_{B1}, l_{B2}, L등 많은 變數 및 係數들을 斷面形狀과 波浪特性에 따라 變化시켜 주지 않으면 안되는데, 이들 係數는 理論解에 의해 正確히 計算할 수 없는 것이 대부분이다. 따라서 本 硏究에서는 Table 1과 같은 가정하에 各 係數를 導入하여 理論計算을 實施하였다.

Fig. 3은 無限反復反射 및 有限反復反射에 대한 理論計算値와 柳[6], 柳·椹木[7]의 實驗値를 동시에 나타낸 것이다.

Table 1. Coefficients used in the theoretical calculation

Coefficient	Source
$K_{R1}=1.0$	
$K_{R2}=0.3$	Sawaragi et al.[1)~4)]
$K_{T2}=0.7$	
K_{R3}	Experimental value by Ryu and Sawaragi[7)]
K_{T3}	Experimental value by Ryu[6)]
θ: Neglect	
α: Neglect	
$L=L_{h=20\,cm}$	Wave length at 20 cm water depth calculated by small amplitude wave theory

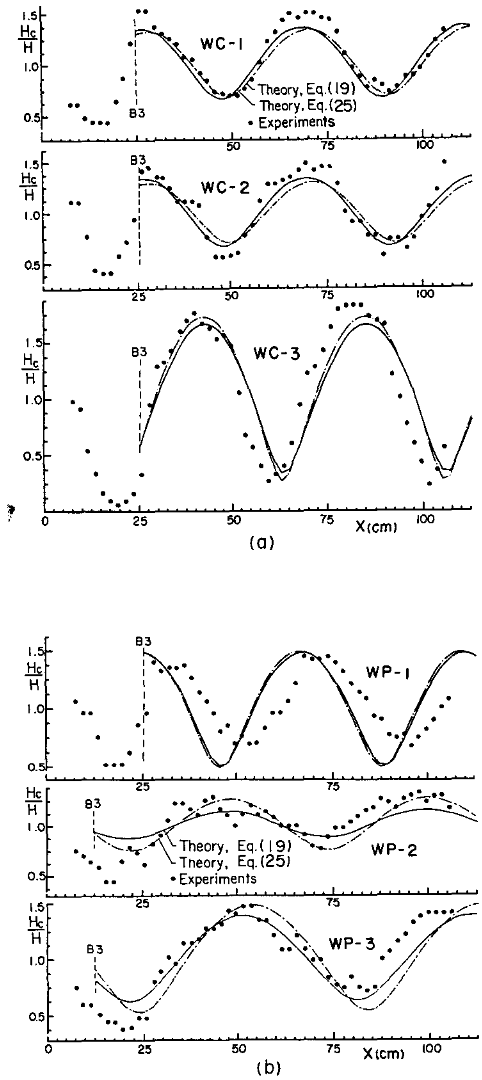

Fig. 3. Sea surface elevation in front of the composite breakwaters(a) and of the composite type perforated breakwaters(b).

入射波條件 및 計算上 주어진 係數는 Table 2에 나타나 있으며, 計算條件은 柳·椹木[7]의 實驗條件에 맞도록 한 것이다.

Table 1과 같은 假定에도 불구하고 防波堤 前方의 最大水面變動에 대한 理論値는 無限反復反射를 고려한 式(19)와 有限反復反射를 고려한 式(25)에 의한 水面變動의 計算値가 모두 實驗値와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 단지 Fig. 3(a)에서와 같이 最大値

Table 2. Coefficients and conditions used in the theoretical calculation of sea surface elevation

Type of breakwater	Case	l_B	$l_{B1}+l_{B2}$	h_0	h_1	H	T	K_{R1}	K_{R2}	K_{T2}	K_{R3}	K_{T3}
Composite	WC-1	25		20	5	4.3	0.8	1.0			0.5	0.5
	WC-2	25		20	5	4.8	0.8	1.0			0.5	0.5
	WC-3	25		20	15	2.1	0.8	1.0			0.1	0.9
Perforate	WP-1		25	20	5	4.0	0.8	1.0	0.3	0.7	0.5	0.5
	WP-2		12.5	20	10	3.1	1.0	1.0	0.3	0.7	0.2	0.8
	WP-3		12.5	20	15	3.2	1.0	1.0	0.3	0.7	0.1	0.9

의 絶對値가 약간 달라지는 경우가 있고, Fig.3(b)와 같이 理論値와 實驗値의 peak에 대한 위상차가 나타나는 경우도 있으나 이것은 Table 2에서 無視한 位相遲刻의 항과 計算上 mound部 反射點의 決定方法의 差에 의한 것이라고 생각할 수 있다. 이러한 實驗値와 理論値의 差는 反射率의 論議에는 큰 問題가 되지않을 정도의 크기이며 理論式에서 有限反復反射의 경우와 無限反復反射의 경우가 거의 유사한 結果 나타나서, 어느 쪽을 使用하여도 反射率論議에 有用로 함을 알 수 있다. 이러한 結果는 Ryu and Sawaragi[8]의 複合斷面捨石堤에 대한 硏究結果와 관련지워서 응용할 수 있을 것으로 생각된다.

2. Mound幅 및 遊水部幅에 의한 反射率의 變化

理論式의 적용성은 앞에서 論議한 바와 같으나, 특히 K_{R3}, K_{T3}, $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$는 mound部의 水深에 크게 영향을 받는 변수라 생각할 수 있다. 여기서 이들 4개의 變數를 變化시킴에 따른 反射率 變化를 理論計算을 통해 나타낸 것이 Fig.4와 Fig.5이다.

Fig.4는 K_{R3}를 parameter로 하여 mound幅의 變化에 따른 Hcmax/H의 變化를 나타낸 것이다. 이 그림에서 Fig.4 (a)의 a-2와 Fig.4 (b)의 b-2, b-4는 無限反復反射, Fig.4 (a)의 a-1과 Fig.4 (b)의 b-1, b-3은 有限反復反射에 대한 計算結果를 나타내고 있다. 이들을 비교해 보면 全體的인 傾向變化는 거의 없으나 混成堤에 있어서는 $l_B/L \fallingdotseq 0.0$ 및 $l_B/L \fallingdotseq 0.5$, 低反射堤에 대해서는 $(l_{B1}+l_{B2})/L \fallingdotseq 0.0$ 근방에서 反射率(Hcmax/H)의 絶對値에 많은 差異를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 反射率의 極小値는 그다지 變化가 없으며, $2.0<\{l_B/L$ or $(l_{B1}+l_{B2})/L\}<3.0$의 범위에서 나타남을 알 수 있다.

다음에, 波浪의 에너지 消散率($\mathcal{E}=\mathcal{E}_1=\mathcal{E}_2$)을 고려하여 mound幅 變化에 따른 反射率의 計算結果를 나타낸 것이 Fig.5이다. 여기서도 a-1, b-1은 式(25),

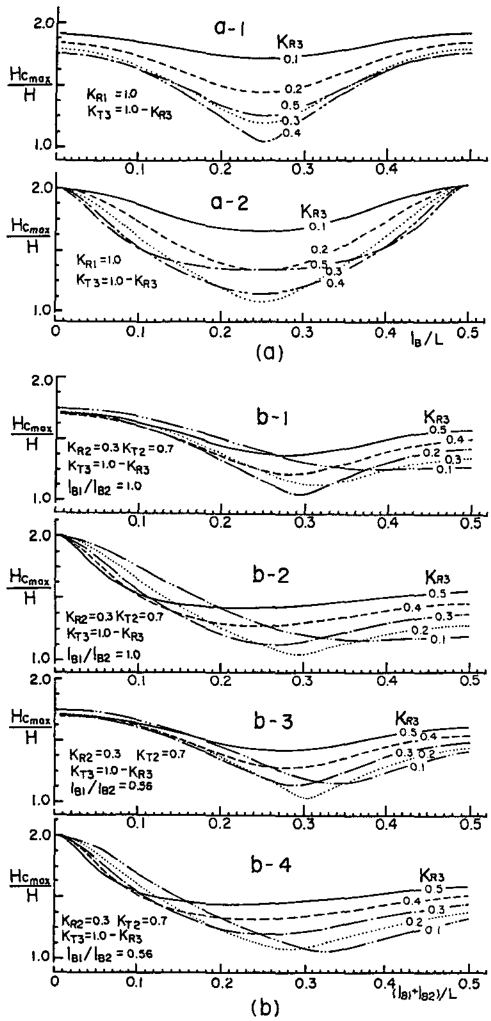

Fig. 4. Variation of the reflection coefficient due to the berm width and K_{R3} for the composite breakwaters(a) and for the composite type perforated breakwaters(b).

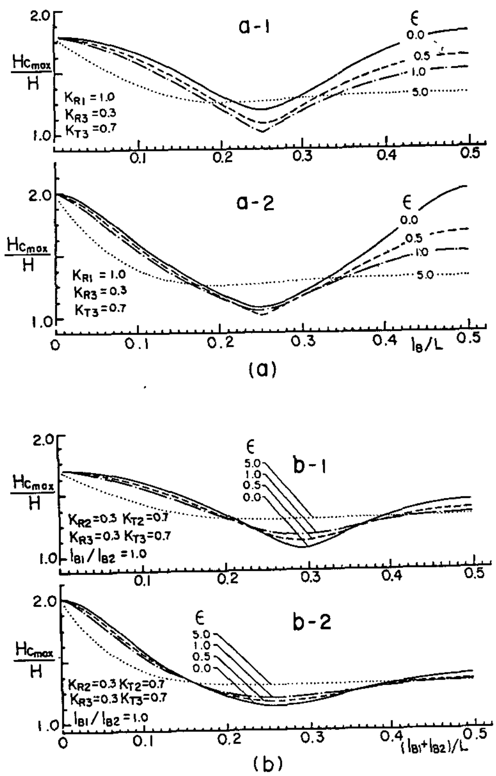

Fig. 5. The effect of energy dissipation on the mounds for the reflection in the composite breakwaters (a) and in the compsite type perforated breakwaters(b).

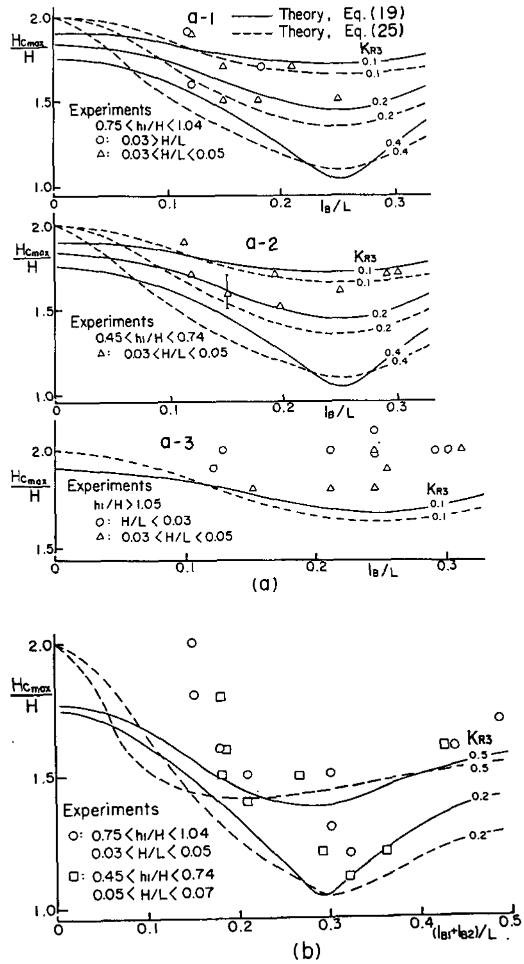

Fig. 6. Theoretical and experimental results of reflection control function of mounds of the composits breakwaters (a) and of the composite type perforated breakeres(b).

a-2는 式(19)로부터 ε를 고려하여 계산한 것이며, Fig. 5(b)는 $\varepsilon_1=\varepsilon_2=\varepsilon$로 놓고 계산한 결과이다. 한편, Sawaragi 등[1)~4)]의 碎波實驗에 의하면 遊水部幅이 本 硏究의 경우와 유사한 경우, spilling breaker에서 ε $=0.5\sim1.4$ 정도이고, $\varepsilon=5.0$과 같은 큰 감쇠는 거의 발생하지 않는다고 한다. 이러한 結果와 Fig. 5를 비교해 보면 反射率에 미치는 mound部의 에너지 消散率의 영향은 생각했던 것보다 작은 것을 알 수 있다.

mound 部의 相對水深(h_1/H)과 波形傾斜를 parameter로 하여 反射率과 mound 部 幅(l_B/L 또는 $(l_{B1}+l_{B2})/L$)의 관계에 관한 柳·椹木[7)]의 實驗値와 式(19)와 식(25)에 의한 理論値를 나타낸 것이 Fig. 6이다. 이들 그림으로부터 理論値와 實驗値는 그 絶對値에 관해 論議할 경우 K_{R3}의 決定方法과 實驗値의 分散에 관한 문제가 남아 있으나, 全體的인 경향은 잘 표현되어 反射率이 最小値를 보이는 영역은 잘 나타내고 있다고 할 수 있다. 한편 Fig. 6 (a)의 a-3은 反射率의 變化에 mound幅의 영향이 나타나지 않고 있는데, 이것은 상대수심(h_1/H)이 크기 때문에 mound 平坦部 끝(Boundary 3)에서의 反射가 거의 없기 때문이다.

이상 mound의 幅 및 遊水部의 幅에 의한 反射率의 變化에 대해서 實驗値와 理論値를 비교하여 보았다. 이들 結果로부터 本 硏究의 理論解析 方法은 유용한 것으로 結論지울 수 있으며 混成堤 mound部로써 反射率을 제어하기 위해서는 mound의 幅을 $\frac{1}{4}$波長정도로 함이 좋다는 것을 알 수 있다. 또한 mound 平坦部 끝에서의 反射率을 slit 구조물과 같이 투과벽의 공극율로 조절할 수 없기 때문에, mound 부의 깊이를 變化시키는 것에 의해 조절할 수 밖에 없다.

混成堤에 있어서 K_{R3}의 變化에 따라 反射率의 絶對値는 變하지만 最小値를 나타내는 영역 등의 경향은 變化하지 않으므로 反射率을 고려하여 K_{R3} 즉, mound 部의 수심과 mound 幅을 타당하게 결정하면 합리적일 것이다.

반면, 低反射堤에 있어서는 Fig.6(b)에서와 같이 K_{R3}의 증대, 즉 h_1이 얕아 질수록 反射率이 가장 작은 $l_{B1}+l_{B2}$는 짧아지는 경향을 가졌다. 이는 低反射堤의 mound 部 깊이가 消波効果에 미치는 영향이 매우 큰 것을 意味하며 最適 mound 形狀을 결정하기 위해서는 mound 部 先端에서의 反射率·誘過率에 대한 檢討가 충분히 이루어져야 할 必要가 있다.

Mound部의 最適設計에 관한 檢討

mound 部의 反射波 制御機能을 고려하여 反射率을 極小化하기 위한 混成堤 mound 部의 제원은 앞에서 論議된 바와 같이 相對 mound 幅(l_B/L)과 相對水深(h_1/H)에 의해 決定되어짐을 알 수 있다.

즉, h_1/H가 일정한 條件에서 mound 幅이 $l_B/L≒0.25$일 경우 反射率에 관한 理論値와 實驗値가 모두 최소인 것은 일반적인 사항으로 말할 수 있었다.

그러나 h_1/H의 効果는 mound 部 끝에서의 反射率을 左右하는 것으로서, 이 K_{R3}는 일반적인 低反射堤의 slit 전면에서의 反射率의 最適値와 같이 $0.3<K_{R3}<0.4$가 되도록 h_1/H를 조절할 必要가 있다. 이 K_{R3}의 조건을 만족하기 위해서는 本 研究의 計算結果 및 柳·椹木[7]의 實驗結果를 고려하여 $0.5<h_1/H<1.0$ 정도가 타당한 것으로 나타났다.

한편, 低反射堤에 있어서 $(l_{B1}+l_{B2})/L$의 반사파 制御効果는 h_1/H에 따라 달라진다. 즉, h_1/H가 충분히 큰($h_1/H>1.0$) 영역에서는 l_B/L의 効果만이 反射率 變化에 영향을 미치게 된다. h_1/H가 작아짐에 따라($l_{B1}+l_{B2})/L$이 작은 영역에서 反射率의 최소치를 나타내게 되어, h_1/H의 조절에 따라 l_{B2}, 즉 유수부 幅을 1/2 이상까지 작게 하여도 반사파의 低減効果는 충분하게 된다.

이들 結果로부터 mound 部의 反射波制御機能을 고려한 反射波制御工法으로서 mound를 이용할 경우에는 다음과 같은 構造物 諸元을 가지는 것이 바람직함을 結論지을 수 있었다.

$$\text{混成堤의 경우} : \left.\begin{array}{l} 0.5<h_1/H<1.0 \\ l_B/L≒0.25 \end{array}\right\} \quad (26)$$

$$\text{低反射堤의 경우} : \left.\begin{array}{l} 0.5>h_1/H<1.0 \\ 0.2\leq\frac{l_{B1}+l_{B2}}{L}\leq 0.3 \end{array}\right\} \quad (27)$$

要約 및 結論

低基 混成防波堤 및 低反射防波堤의 새로운 反射波制御工法으로서, mound 部를 利用하는 것에 대한 妥當性을 理論解析을 중심으로 論議하고 他의 實驗結果를 參照하여 이 mound 部의 反射波制御機能을 고려한 設計斷面의 決定에 대해 論議하였다.

理論的 解析은 mound 上部에서의 波浪의 反復反射理論을 적용한 것이며, 有限 및 無限反復反射를 고려한 防波堤 前方의 水面變動에 관한 計算式을 유도하였다.

이 理論에 의한 前方 水面變動의 計算結果를 他의 實驗結果와 비교하여 理論의 적용성을 입증하였으며 有限反復反射理論이나 無限反復反射 理論이나 그 計算結果에는 有意할 만한 差가 없었다. 이러한 理論의 妥當性을 確認한 後, 計算結果로부터 얻어진 mound의 波浪制御機能을 極大化하기 위한 設計諸元은 다음과 같이 結定할 수 있었다.

混成堤의 경우 mound 先端에서의 反射率을 0.3～0.4 정도로 조절하기 위하여 mound 部의 水深은 $0.5<h_1/H<1.0$ 정도로 하여야 하며, mound 幅은 $(l_B/L)≒0.25$로 하면 反射波制御機能을 極大化할 수 있다.

한편 低反射堤의 경우는 mound 部 水深(h_1/H)을 조절함에 따라 slit 케이슨의 遊水部幅(l_{B1})을 1/2 이하로 작게 할 수 있어서 mound 部의 反射波 低減効果를 충분히 應用할 수 있음을 알 수 있었다.

이 경우는 $0.5<h_1/H<1.0$, $0.2<(l_{B1}+l_{B2})/L<0.3$으로 해야만 바람직한 反射波 制御効果를 기대할 수 있다.

謝　辭

本 研究는 韓國科學財團의 1985年度 後半期 차관 연구비 지원과제인 "海岸構造物의 安定性과 波浪制御機能을 考慮한 最適化 設計法"에 관한 研究의 細部課題로 이루어진 것이며, 財團에 深甚한 感謝의 뜻을 표한다.

文　　献

1. 樹木亨・岩田好一朗. 1973. 多孔壁式消波岸壁の水理特性に關する二, 三の考察. 土木學會論文報告集 220, 53—63.
2. 椹木亨・岩田好一朗. 1975. 横スリット型防波堤の消波効果と現地への適用條件について. 土木學會論文報告集 237, 63—74.
3. 椹木亨・岩田好一朗. 1977. 二重透過壁を有する鉛直消波岸壁の消波効果について, 土木學會論文報告集 262, 41—53.
4. 椹木亨・岩田好一朗・富士川洋一. 1977. 不規則波に對する鉛直消波岸壁の消波効果. 土木學會論文報告集 263, 63—76.
5. 椹木亨・柳青魯. 1983. 捨石防波堤の複合断面設計に關する基礎的研究. 第30回海岸工學講演會論文集 30, 361—365.
6. 柳青魯. 1984. 捨石防波堤の水理學的最適設計に關する基礎的研究. 大阪大學博士學位論文. p. 165.
7. 柳青魯・椹木亨. 1987. 混成防波堤基礎 mound 部の安定性と反射波制御機能. 第34回 海岸工學講演會論文集(印刷中).
8. Ryu, Cheong-Ro and Toru Sawaragi. 1986. Wave control functions and design principles of composite slope rubble mound structures. Coastal Engineering in Japan 29, 227—240.