

混成防波堤基礎 mound 部の安定性と反射波制御機能

柳 青 魯*・ 樺 木 亨**

1. ま え が き

混成式防波堤 mound 部の捨石重量の算定に関しては、二、三の設計図および算定式が提案されているが、いずれも波の周期および mound 部の肩幅の影響をうまく取り入れていない^{(1),(2),(3)}。特に、最近関心が高まっている反射波制御の問題等と関連づけて mound 部の反射波制御機能の利用可能性もありうるが、このような考え方を生かそうと思うと mound 部の設計諸元が従来の混成堤とはちがって波浪特性により変化してくるものと考えられる。反射波制御の面からの合理的断面諸元特に mound 部の深さと幅等の決定方法とこの変化の大きい mound の諸元に適用できる捨石の重量算定式の開発が必要になろう。また、これまで利用してきた低反射防波堤を混成式にする場合も考えられる。この時、低反射堤の直立部と mound 部を合体とした反射波制御機能の極大化方法と mound 部捨石の安定性の評価方法の定立が必要であらう。

本研究では混成防波堤及び混成式低反射堤 mound 部の被覆石の安定性に対して検討し mound 部の反射波制御機能に関する理論解析と水理実験による検討を行うことにする。そして反射波制御工法として mound 部を利用する場合の mound 部の最適形状及び被覆石の安定性について検討する。

2. Mound 部の反射波制御 及び 捨石の安定に 対する影響因子

混成堤及び遊水部を持つケーソンを上部構造物とした低反射堤の反射波による防波堤前方の最大水面変動量および mound 部捨石の安定性は次式のような水理諸量によって影響を受ける。

$$\frac{H_{c\max}}{H} = f \left\{ \frac{h_1}{h_0}, \frac{l_{B1} + l_{B2}}{L}, \frac{l_{B2}}{l_{B1}}, \frac{H}{h_1}, \frac{H}{L}, \frac{B}{d}, \frac{d}{h_0}, m, \theta_1, \theta_2 \right\} \dots\dots\dots (1)$$

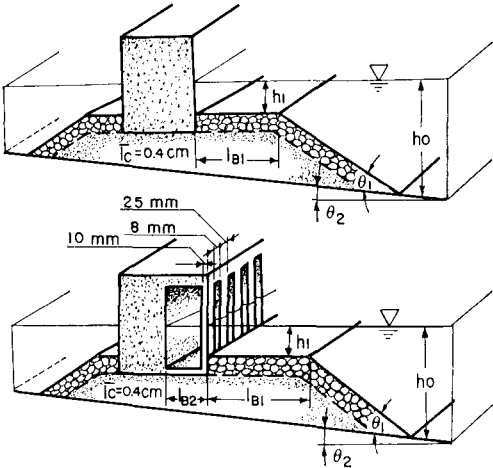
$$N_s = f \left\{ \frac{h_1}{h_0}, \frac{l_{B1} + l_{B2}}{L}, \frac{l_{B2}}{l_{B1}}, \frac{H}{h_1}, \frac{H}{L}, \frac{B}{d}, \frac{d}{h_0}, m, \theta_1, \theta_2, D \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$N_s = \gamma_r^{1/3} H / \{ (\gamma_r / \gamma_w - 1) W_a^{1/3} \} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 D は破壊率、 m は slit の空げき率であり、ほかの記号は図一及び表一の通りである。

3. 水 理 実 験

式 (1)～(3) の関係を実験的に検討するために図一のような構造型式に対して表一、二のような実験諸元と条件で模型実験を行なった。模型の mound 部構成においては core 部材の外部に被覆層を構成し、できるだけ人為的誤差が入らないように水中で自然落下させて構築した。



図一 混成堤と混成式低反射堤の模型

安定性の評価のための破壊率の算定は定義の仕方が困難なため、破壊個数 5 個以内の初期破壊時の調査に重点をおいた。また、反射波に関しては入射波の一波長分程度の距離にわたる各地点での水面変動量を測定し、防波堤前方の最大水面変動量と入射波との割合 ($H_{c\max}/H$) をもって可視反射率とした。一方、表二のような不規則波による反射波特性の検討においては合田ら⁽⁴⁾の二点

* 正会員 工博 韓国釜山水産大学助教授 海洋工学科
** 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

表-1 規則波に対する実験条件

Case	l_{B1} (cm)	l_{B2} (cm)	h_1 (cm)	h_0 (cm)	w_a (g)	θ_1	H (cm)	T (sec)
CR-1	25	0	0	20	20	1:1.5	2.0~9.9	0.8~1.8 (10cases)
CR-2	25	0	5	20	20	1:1.5	2.0~10.9	0.8~2.0 (9cases)
CR-3	25	0	10	20	10	1:1.5	2.5~13.0	0.8~1.6 (9cases)
CR-4	25	0	15	20	10	1:1.5	2.1~10.1	0.8~1.5 (6cases)
SR-1	25	25	5	20	20	1:1.5	1.9~10.1	0.8~2.0 (10cases)
SR-2	12.5	12.5	5	20	20	1:1.5	2.5~10.9	0.8~2.0 (10cases)
SR-3	7	12.5	5	20	20	1:1.5	2.1~11.0	0.8~1.6 (9cases)
SR-4	12.5	10	20	20	20	1:1.5	2.0~11.0	0.8~1.7 (9cases)
SR-5	12.5	12.5	10	20	10	1:1.5	6.5~11.2	0.8~1.6 (9cases)
SR-6	12.5	12.5	15	20	10	1:1.5	2.0~11.9	0.8~1.6 (8cases)

h_1 : Water depth of berm, h_0 : Depth at the toe of breakwater,
 w_a : Weight of armour stone, θ_1 : Slope of mound,
H: Incident wave height, T: Incident wave period,
 l_{B1} : Berm width of mound, l_{B2} : Width of perforated part,
 γ_r : Specific weight of stone (=2.65).

表-2 不規則波に対する実験条件

Case	l_{B1} (cm)	l_{B2} (cm)	h_1 (cm)	h_0 (cm)	S.S.
CI-1	25	0	5	10	P-M
CI-2	25	0	5	20	N
SI-1	12.5	12.5	5	20	P-M
SI-2	12.5	12.5	5	20	N

S.S.: Spectrum shape, P-M: Pieson-Moskowitz spectrum,
N: Neuman spectrum.

測定法によって反射率を算定した。そのために防波堤前方の1波長以上離れた地点に20cm間隔の2本の波高計をおき水面変動を data recorder に集録, FFT 法により spectrum 解析を行なった。

4. Mound 部の反射波制御機能

4.1 防波堤前方の水面変動に関する理論解析

波の位相論によって堤防前方の時空間水面変動を図-2のような考え方で表わすと次式のようになる^{5),6)}。

$$\eta_0(x, t) = \frac{\bar{H}}{2} + \frac{H}{2} \left[\bar{K}_{R3} + K_2 \sum_{n=1}^{\infty} (K_2')^{n-1} + \left(\sum_{n=1}^{\infty} K_2'^{n-1} \right) \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (K_3')^{n-1} \right\}^2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} K_3 \left(\frac{K_{R3}}{K_{T3}} \right) \sum_{n=1}^{\infty} (K_2')^{n-1} \sum_{n=1}^{\infty} (K_3')^{n-1} \right] \cdot \exp\{(-kx + \sigma t)i\} \quad (4)$$

ここで,

$$\left. \begin{aligned} \bar{H} &= H \exp\{(kx + \sigma t)i\} \\ \bar{K}_{Rj} &= K_{Rj} \exp(i\theta_{Rj}), \quad j=1, 2, 3 \\ \bar{K}_{Tj} &= K_{Tj} \exp(i\theta_{Tj}), \quad j=2, 3 \\ \bar{\alpha}_p &= \alpha_p \exp\{i(-2\pi x/L)\}, \quad p=1, 2 \\ \alpha_p &= (-\varepsilon_p \cdot x/L), \quad p=1, 2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

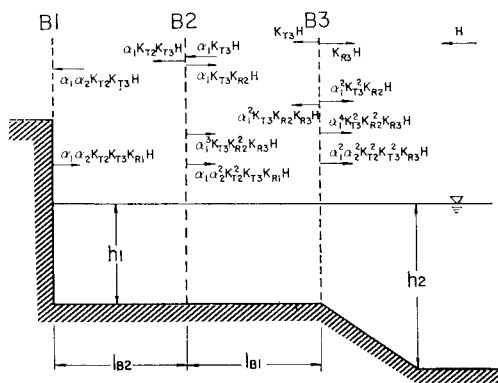


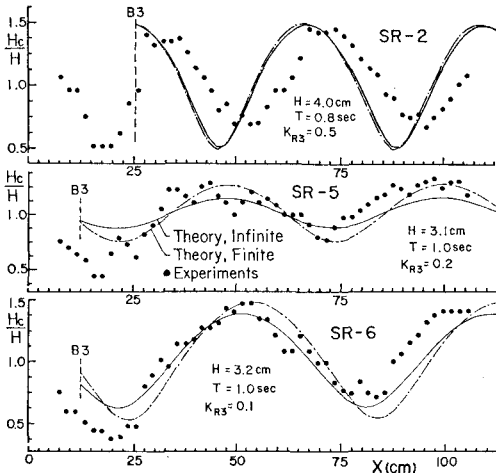
図-2 Mound 上の反復反射概念図

$$\left. \begin{aligned} K_2 &= \bar{K}_{R3}^2 \bar{K}_{R2} \bar{\alpha}_1^2 \\ K_2' &= \bar{\alpha}_1^2 \bar{K}_{R2} \bar{K}_{R3} \\ K_3 &= \bar{\alpha}_1^2 \bar{\alpha}_2^2 \bar{K}_{R1} \bar{K}_{T2}^2 \bar{K}_{T3}^2 \\ K_3' &= \bar{\alpha}_2^2 \bar{K}_{R1} \bar{K}_{R2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

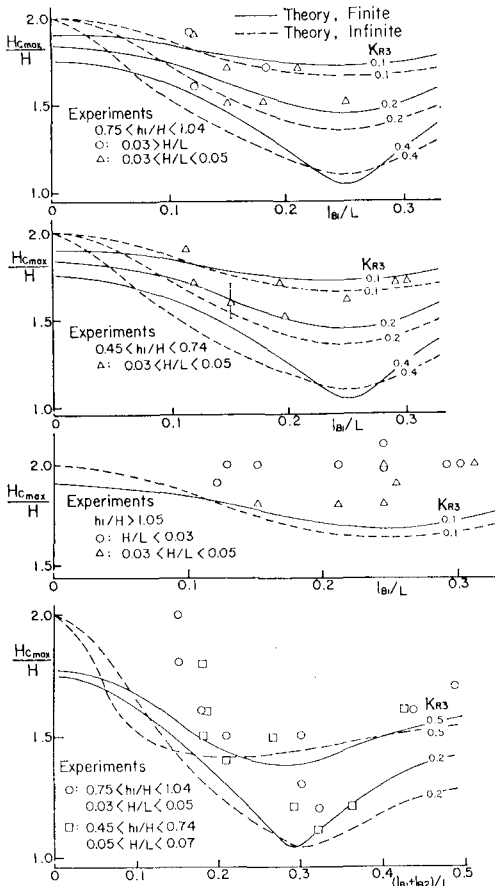
上式で添字 $j=1, 2, 3$ は図-2の $B1, B2, B3$ で表わした boundary での値であり, $P=1, 2$ は mound 部と遊水部での値を各々表わしている。また, R は反射, T は透過に関する値, θ は位相のずれ, $i = \sqrt{-1}$, ε_p は各区間での波の energy 消散に関する定数である。

4.2 防波堤前方の水面変動に関する実験結果

図-3は式(4)で記された理論の適用性を検討するために防波堤前方の距離 x での水面変動量に関する実験値と計算値を比較せしめたものである。理論値は無限反復反射を考慮した場合と $\bar{\alpha}_1^6 \bar{K}_{R3}^2 \bar{K}_{T3}^2 \bar{K}_{R3}^2$ 以上の項を省略した有限反復反射を考慮し混成式低反射堤に対して計算した結果である。計算においては $K_{Rj}, K_{Tj}, \theta_{Rj}, \theta_{Tj} (j=$

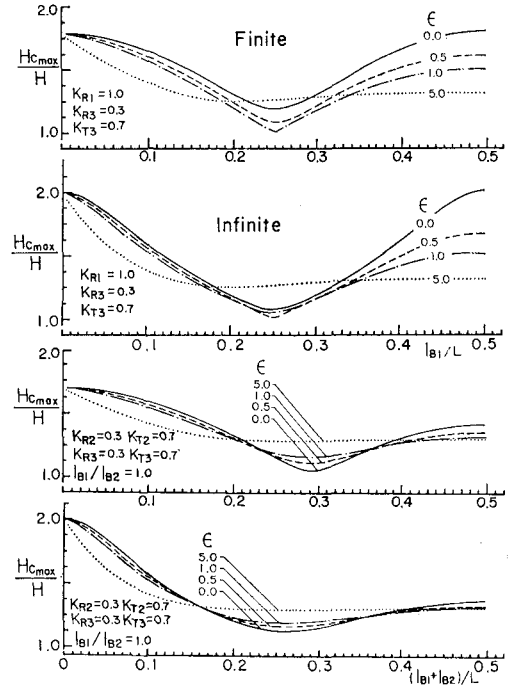


図—3 防波堤前方の水面変動



図—4 Mound 幅の変化と可視反射率

1, 2, 3), ϵ_p ($p=1, 2$) を断面形状, 波の特性によって与えなければならないが本研究では以下のような大胆な仮定を交えて係数を与えた結果である。 $K_{R1}=1.0$, K_{R2} と



図—5 可視反射率と mound 幅の関係におよぼすの影響

K_{T2} は potential theory から求められる $K_{R2}=0.3$, $K_{T2}=0.7$, K_{R3} と K_{T3} は半無限の天端幅をもった深さ 5 cm, 10 cm, 15 cm の傾斜潜堤による反射率の実験値を与えた ($K_{T3}=1-K_{R3}$)。一方, θ_{Rj} , θ_{Tj} , ϵ_p は無視し, lb_1 の決定においては mound の肩先を境界面とした。ほかの条件は実験ケースに対する表—1 の値である。この図では大胆な仮定にもかかわらず水面変動に関する理論値と実験値は比較的によく一致している。このことから式 (4) の適用性が十分検証されるものと考えられる。

また, 可視反射率, 即ち空間的水面変動量の無次元最大値 (H_{cmax}/H) の mound 肩幅による影響を式 (1) の関係を考慮して示したものが図—4 である。図—4 では混成堤の場合と混成式低反射堤の場合 (下) に対して h_1/H と H/L を parameter として実験値と K_{R3} の値を多少変化させた理論値を同時に示した。理論値と実験値は定量的に正確にあわないが, いずれも傾向の同一性は十分認められ, 可視反射率は mound の幅 lb_1/L (混成堤) と $(lb_1+lb_2)/L$ (混成式低反射堤) により変化することが分る。

図—5 は式 (4) による計算結果を示した一例で energy 消散項 ϵ による影響を調べたものである。 $\epsilon=0$ の場合は energy 消散がない場合で $\epsilon=5$ 程度の場合は碎波が mound 上部でおこり初める程度の割合である。この図から碎波が mound 上でおこらない場合には, 肩幅の変化による反射率の変化から見ると可視反射率は lb_1/L と

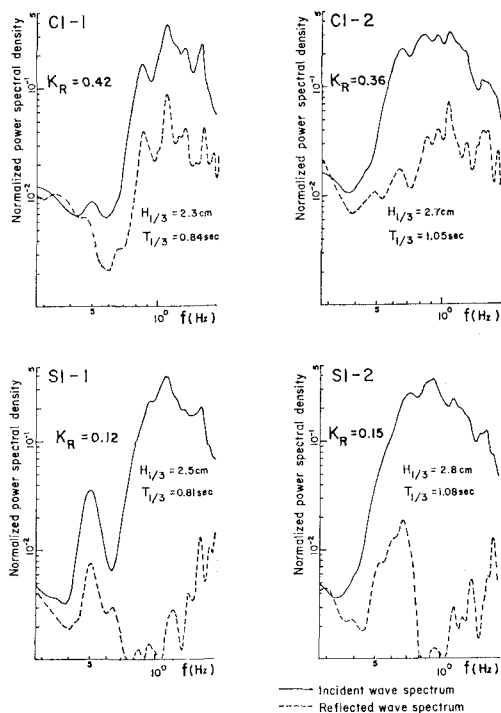


図-6 不規則波に対する反射波制御効果

$(l_{B1}+l_{R2})/L$ の値が 0.2 から 0.3 の間で最小になることが認められる。また 図-4, 図-5 ともに有限反復と無限反復理論の結果において最小値を示す領域等の傾向にさほど大きい差が見られない。図-4 を見ると K_{R3} の変化による H_{cmax}/H の変化は大きく、この K_{R3} の影響に関して調べると K_{R3} が混成堤の場合 0.3 から 0.4 の間、低反射堤の場合 0.2 から 0.3 の値を取る場合、もっとも水面変動が小さくなる。この K_{R3} は mound 部の水深と幅により決定されるもので上の条件をみたすためには本研究の実験結果と他の実験結果を幅広く考慮して考えると、結局、mound 部の反射波制御機能を極大化するためには以下の条件をみたす必要がある。

$$0.5 < \frac{h_1}{H} < 1.0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$0.2 < \frac{l_{B1}+l_{B2}}{L} \quad \text{or} \quad \frac{l_{B1}}{L} < 0.3 \quad \dots\dots\dots (8)$$

図-6 は不規則波に対する mound 部の効果を調べた結果の一例で、各ケースに対する入・反射波 Spectrum と反射率を算定しておいたものである。反射率は従来の混成堤に比べて非常に小さくなり良好な反射波制御機能が不規則波に対しても検証されたといえよう。

5. Mound 部捨石の安定性

安定性に関する式 (2) のような影響因子があるが、表-1 の実験条件を考慮して N_s の変化を調べた。

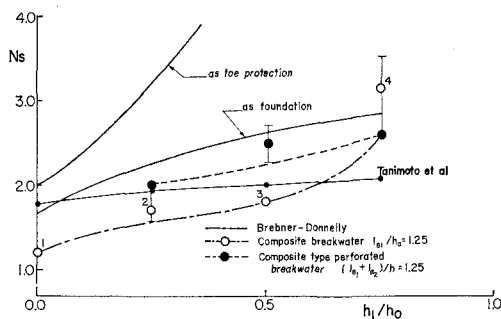
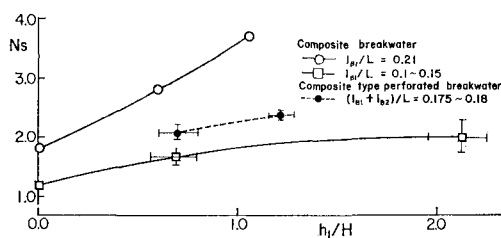
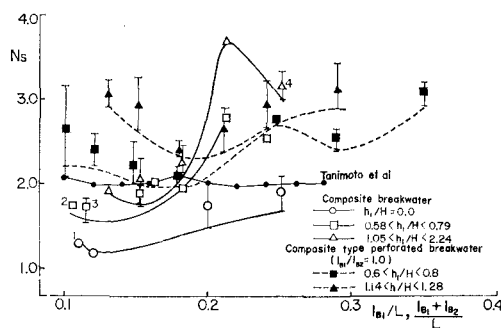

 図-7 捨石の安定係数と h_1/h_0 の関係

 図-8 捨石の安定係数と h_1/H の関係


図-9 捨石の安定係数におよぼす mound 幅の影響

mound 部捨石の重量はこの N_s を用いて Hudson 式⁷⁾ のような次式から求められる。

$$W_a = \frac{\gamma_r}{N_s^3 (\gamma_r/\gamma_w - 1)^3} H_{1/3}^3 \quad \dots\dots\dots (9)$$

図-7 は N_s と相対水深 h_1/h_0 の関係を示したもので図中には従来によく用いてきた Brebner-Donnelly, Tanimoto et al. の結果も同時に表わしている。当然のことながらいずれの結果も h_1/h_0 が大きくなるほど N_s は大きくなる傾向であるが、三者の結果はすこし異なっている。本研究の結果は混成堤の場合と低反射ケーソンを使用した場合に対して調査したものであるが、低反射堤の場合が混成堤の場合に比べて 20% ほど安定側になっていることが分る。また波高に対する相対水深と安定性の関係を示したものが 図-8 である。ここでも mound 部水深が深くなる程 N_s が増大していく傾向は混成堤、

低反射堤とも同じである。しかし異なった l_{B1}/L に対する N_s の差は非常に大きくなっており、これは mound の安定性に対する mound 部幅の影響が大きいことを意味する。

図-8はこのような mound 幅の変化による安定性の変化を示したものであり、Tanimoto et al. の結果も同時に示している。この図と可視反射率に関する図-4、図-5から見ると、捨石の安定係数の最小値を示す不安定領域はいずれも重複波高が大きい領域の l_{B1}/L および $(l_{B1}+l_{B2})/L$ となっており、安定性の高い領域は反射率の小さい領域になっている。以上、mound 部の水深と肩幅によって変化する安定性を考慮して反射波制御機能の面から決定した mound 断面に対する捨石重量の算定が可能であろう。

6. 結 語

以上、混成堤及び混成式低反射堤 mound 部の反射波制御機能を実験及び理論的に検討してきた。この mound 部の反射波制御機能を利用する場合、断面特に mound 部の深さと幅の決定が重要であり、その決定方法を提案した。また定められた mound 諸元に対する捨石の安定

性を検討し、捨石重量の算定が可能な設計図を提案することにより今後混成式構造形式をもつ海岸構造物の低反射波化にこの方法が応用できよう。

参 考 文 献

- 1) Tanimoto, K., T. Yagu, and Y. Goda: Irregular wave tests for composite breakwater foundations, Proc. 18th Int. Conf. Coastal Engg., pp. 2144~2163, 1982.
- 2) Brebner, A. and D. Donnelly: Laboratory study of rubble foundation for vertical breakwaters, Proc. 8th Int. Conf. Coastal Engg., pp. 408~429, 1962.
- 3) 鹿島遼一・斉藤昭三・長谷川 寛: 混成式防波堤の基礎 mound を被覆するコンクリート方塊の所要重量, 電研技術第二研究所報告, 7022, 1971.
- 4) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治: 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾資料, No. 248, pp. 3~24, 1976.
- 5) 榎木 亨・岩田好一朗: 多孔壁式消波岸壁の水理特性に関する二, 三の考察, 土木学会論文報告集, 第 220 号, 1973.
- 6) 榎木 亨・岩田好一朗: 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, 土木学会論文報告集, 第 237 号, 1975.
- 7) Hudson, T. Y.: Laboratory investigation of rubble mound breakwaters, Proc. of ASCE, WW3, 93~121, 1959.