

# 直立式消波堤の三次元消波，越波特性に関する研究

尾崎 晃\*・鴻上雄三\*\*・永田 慧\*\*・中込國喜\*\*  
松崎勝夫\*\*\*・田崎邦男\*\*\*\*

## 1. まえがき

筆者らは、図-1 に示す構造の改良型直立式消波堤を外郭防波堤として実用化するための水路実験を数年前から継続中であり、消波機能および波力に対する安定性の結果は報告済みである<sup>1),2)</sup>。

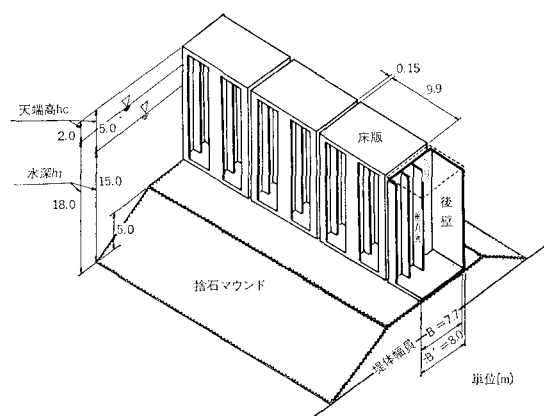


図-1 直立式消波堤概要図

この報文は、外郭防波堤としての適用範囲を広げるため、

- 任意の方向からの入射波に対する直立式消波堤の理論解析および
- 水路実験結果との比較
- 0~45°の斜め入射波に対する実験結果との比較

## b. 越波特性の実験

を行って考察を加えたものである。

なお、斜め入射波の反射率については、遊水部をもつ護岸に関する井島の研究例<sup>3)</sup>があるが、筆者らの直立式消波堤は、内部に4.8mごとの隔壁が設けられており、さらに堤体前面から堤幅の1/2までの間に垂直翼がある

ので遊水部としての機能は小さいとみられる。

## 2. 消波特性の理論

図-2 において、領域1, 2の速度ポテンシャルを一般に

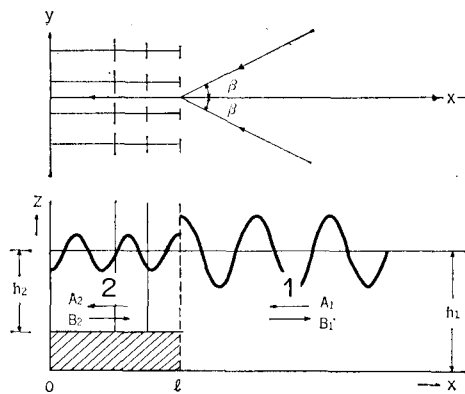


図-2 理論モデル

$$\phi(x, y, z; t) = \phi(x, y, z) e^{i\sigma t} \quad (1)$$

$$\sigma = 2\pi/T, \quad T; \text{周期}$$

で表わすと、式(2), (3)の水面条件、水底条件よりLaplaceの方程式を満足する第1次近似解は、入射波、反射波、入射角をそれぞれA, B,  $\beta$ とすると式(4), (5)で表わされる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\sigma^2 \phi}{g}, \quad \text{at } z=0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad \text{at } z=-h \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \phi_1 &= (A_1 e^{ik_1(x \cos \beta + y \sin \beta)} + B_1 e^{-ik_1(x \cos \beta - y \sin \beta)}) \\ &= \frac{\cosh k_1(z+h_1)}{\cosh k_1 h_1} \quad (4) \end{aligned}$$

$$\phi_2 = (A_2 e^{ik_2 x} + B_2 e^{-ik_2 x}) \frac{\cosh k_2(z+h_2)}{\cosh k_2 h_2} \quad (5)$$

$$\frac{\sigma^2 h_1}{g} = k_1 h_1 \tanh k_1 h_1,$$

$$\frac{\sigma^2 h_2}{g} = k_2 h_2 \tanh k_2 h_2, \quad L_1, L_2; \text{波長}$$

\* 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 鹿島建設技術研究所

\*\*\* 日本海上工事(株)技術研究所

\*\*\*\* 正会員 同上

境界条件として不透壁での完全反射，透過壁での流量の連続と Terrett らが穴あき防波堤の解析に用いた形に準じた透過壁の抵抗を用いる。これらの条件はそれぞれ次式で表わされる。

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial x} = 0, \quad \text{at } z=0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\int_{-h_1}^0 \left( \frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right) dz = \int_{-h_2}^0 \left( \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \right), \quad \text{at } x=l \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{1}{g} \left\{ \left( \frac{\partial \phi_1}{\partial t} \right) - \left( \frac{\partial \phi_2}{\partial t} \right) \right\}_{z=0} + \frac{f}{h_2} \int_{-h_2}^0 \left( \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \right) = 0, \quad \text{at } x=l \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$f = \frac{8k^*}{3\pi} \left| \frac{1}{h_2} \int_{-h_2}^0 \left( \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \right) \right|, \quad \text{at } x=l \quad \dots\dots\dots (9)$$

$k^*$ : 抵抗係数

式(6)より

$$A_2 = B_2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

また，式(7)～(9)に式(4)，(5)を代入すると次式が得られる。(ただし  $y=0$ )

$$\cos \beta \{ A_1 e^{ik_1 l \cos \beta} - B_1 e^{-ik_1 l \cos \beta} \} \tanh k_1 h_1 = A_2 (e^{ik_2 l} - e^{-ik_2 l}) \tanh k_2 h_2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\{ A_1 e^{ik_1 l \cos \beta} + B_1 e^{-ik_1 l \cos \beta} - A_2 (e^{ik_2 l} + e^{-ik_2 l}) \} = \frac{f A_2 \tanh k_2 h_2}{\sigma h_2} (e^{ik_2 l} - e^{-ik_2 l}) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$f = \frac{16k^*}{3\pi h_2} |A_2| \tanh k_2 h_2 \sin k_2 l \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで入射波の波形を  $\eta = (H/2) \cos(k_1 x + \sigma t)$  とする

と

$$A_1 = \frac{iHg e^{ik_1 l}}{2\sigma} \quad \dots\dots\dots (14)$$

式(11)～(14)を加減整理すると反射率  $K_R$  が得られる。

$$K_R = \frac{|B_1|}{|A_1|} = \frac{\left\{ 1 + \left( \frac{1}{k_2 h_2} \cdot \frac{f}{C_2} - \frac{1}{\cos \beta \tanh k_1 h_1} \right)^2 \tanh^2 k_2 h_2 \cdot \tan^2 k_2 l \right\}^{1/2}}{\left\{ 1 + \left( \frac{1}{k_2 h_2} \cdot \frac{f}{C_2} + \frac{1}{\cos \beta \tanh k_1 h_1} \right)^2 \tanh^2 k_2 h_2 \cdot \tan^2 k_2 l \right\}^{1/2}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここに

$$1 + \left( \frac{1}{k_2 h_2} \cdot \frac{f}{C_2} + \frac{1}{\cos \beta \tanh k_1 h_1} \right)^2 \tanh^2 k_2 h_2 \cdot \tan^2 k_2 l = \left\{ \frac{8k^* H \tan k_2 l}{3\pi h_2 (f/C_2)} \right\}^2 \quad \dots\dots\dots (16)$$

なお，隔壁がないとした場合の解は，式(5)の代りに

$$\phi_2 = \{ A_2 e^{ik_2(x \cos \beta + y \sin \beta)} + B_2 e^{-ik_2(x \cos \beta - y \sin \beta)} \} \cdot \frac{\cosh k_2(z+h_2)}{\cosh k_2 h_2} \quad \dots\dots\dots (17)$$

とおいて得られ，反射率  $K_R$  は，次式で表わされる。

$$K_R = \frac{|B_1|}{|A_1|} = \frac{\left\{ 1 + \left( \frac{\cos \beta}{k_2 h_2} \cdot \frac{f}{C_2} - \frac{1}{\tanh k_1 h_1} \right)^2 \tanh^2 k_2 h_2 \cdot \tan^2(k_2 l \cos \beta) \right\}^{1/2}}{\left\{ 1 + \left( \frac{\cos \beta}{k_2 h_2} \cdot \frac{f}{C_2} + \frac{1}{\tanh k_1 h_1} \right)^2 \tanh^2 k_2 h_2 \cdot \tan^2(k_2 l \cos \beta) \right\}^{1/2}} \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここに

$$1 + \left( \frac{\cos \beta}{k_2 h_2} \cdot \frac{f}{C_2} + \frac{1}{\tanh k_1 h_1} \right)^2 \tanh^2 k_2 h_2 \cdot \tan^2(k_2 l \cos \beta) = \left\{ \frac{8k^* H \cos \beta \cdot \tan(k_2 l \cos \beta)}{3\pi h_2 (f/C_2)} \right\}^2 \quad \dots\dots\dots (19)$$

### 3. 消波特性の実験

直角入射波に関する消波特性のうち，水深を 9 m とした場合の実験結果はすでに報告済みであるが，新たに水深を 18 m と大きくとった場合の実験を行って反射率を測定し，2. の理論解析に基づく計算値と比較検討した。

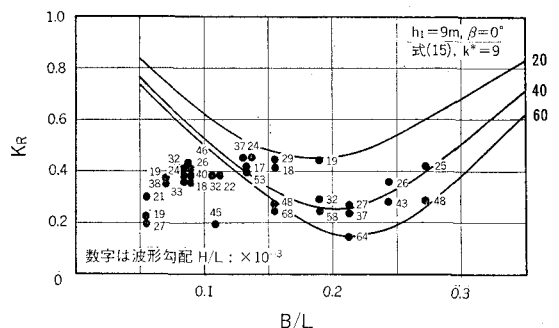
#### (1) 二次元消波特性

##### a) 実験設備と実験条件および測定条件

水深 18 m の実験に用いた模型は，堤脚水深および捨石マウンドの高さを水深 9 m の場合の 2 倍程度とした。また，越波特性を調べるため天端高は 2 m と小さくとした。その他の条件は，報告ずみのもの<sup>1)</sup>に準じたので省略する。

#### b) 実験結果と考察

水深を 9 m とした場合の実験結果から，直立式消波堤の反射率  $K_R$  には，主として相対幅員  $B/L$  ( $B$ ,  $L$  は



図—3 反射率と相対幅員 (理論値と実験値)

それぞれ理論解析の  $l, L_1$ ), および  $H/L$  の双方が影響することが判明している. そこで, 2. の理論解析に基づく計算を行って実験結果と比較する場合も,  $H/L$  をパラメータとして  $K_R$  と  $B/L$  との関係図を作成した.  $H/L$  を 0.2, 0.4, 0.6 とした場合の計算値と実験値とを水深 9 m, 18 m の場合についてそれぞれ 図-3, 4 に示す. なお, これらの図中の計算値の  $k^*$  は,  $H/L = 0.04$  の実験値にほぼ適合するものとして  $h_1 = 9$  m では  $k^* = 9$ ,  $h_1 = 18$  m では  $k^* = 25$  を選んだ.

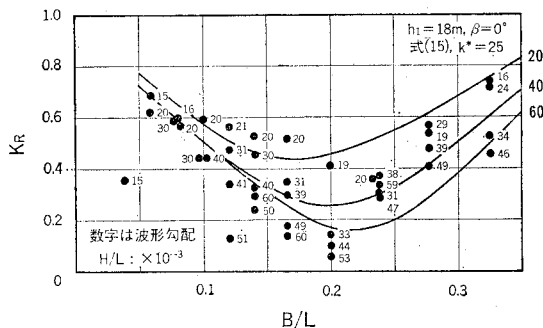


図-4 反射率と相対幅員 (理論値と実験値)

計算値と実験値とを対比すると,  $h_1 = 9$  m の場合の  $K_R$  が  $B/L = 0.20 \sim 0.25$  で極小値 0.2~0.4 をとり, また  $H/L$  の増加とともに  $K_R$  が減少している点で両者はほぼ一致している. また,  $h_1 = 18$  m の場合の  $K_R$  は, 実験値と計算値との間に  $\pm 0.1$  程度の相違がみられるが, 全体的には,  $h_1 = 9$  m の場合と同様, 計算値, 実験値とも  $B/L = 0.20 \sim 0.25$  で極小値を示し, また  $H/L$  の増加とともに  $K_R$  が減少している.

$h_1 = 9$  m の場合の実験値は,  $B/L < 0.13$  で  $K_R$  が減少する傾向を示し計算値と適合していないが, これは前報で述べたとおり, この領域では堤体内で垂直翼の存在による碎波が促進されているためとみられる. また,  $h_1 = 18$  m の場合の実験値は,  $B/L = 0.3$  付近ではほぼ一定になっているが, 観察結果によるとこれは垂直翼間の渦の生成が促進されるためとみられる.

以上の結果から,  $B/L$  が 0.1 程度と小さいか, 0.3 程度と大きく複雑な水理現象が顕われる領域外では,  $k^*$  を適当に選ばば, 直立堤の反射率は, 前面のスリットと隔壁の効果を考慮に入れた理論モデルで評価することができる.

## (2) 三次元消波特性

### a) 実験設備と実験条件

実験は,  $58 \times 20 \times 1.5$  m の平面水槽に, 縮尺 1/30 の模型堤体 (45 函) を設置し, 規則波により 36 台の波高計を用いて行った. 実験装置平面図および実験条件をそれぞれ 図-5, 表-1 に示す.

### b) 測定方法

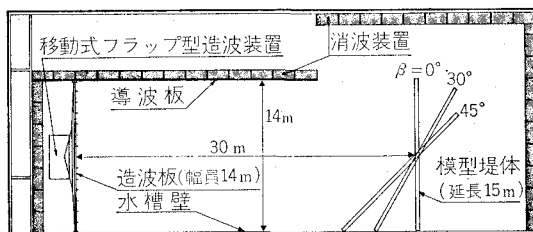


図-5 実験装置平面図

表-1 実験条件

| $h_1 = 18$ m |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $H$ (m)      | 4.0  | 5.0  | 6.0  | 7.0  | 9.0  | 12.0 | 15.0 |
| $T$ (sec)    | 1.00 | 1.56 | 1.08 | 1.42 | 2.00 | 1.49 | 1.88 |
|              |      | 2.34 | 2.16 | 2.83 |      | 2.90 |      |
|              |      |      | 3.24 |      |      |      |      |

入, 反射波の合成波高の測定に先立ち, あらかじめ堤体沿いの打上げ高が極大, 極小となる位置を目視によって求めておき, それぞれの位置から法線に直角に測線を設け, 等間隔に波高計を設置した.

得られた波形記録から, 第2番目の腹とこれに続く節の波高を求めた. 反射率は, Healy の方法で分離した反射波高と無堤時の入射波高を用いて算定した.

### c) 実験結果と考察

#### 1) 波形勾配の影響

入射角  $\beta = 0 \sim 45^\circ$  のすべてのデータをとり出し, 反射率  $K_R$  と波形勾配  $H/L$  との関係を消波堤, 直立堤別に描いたものを 図-6 に示す.

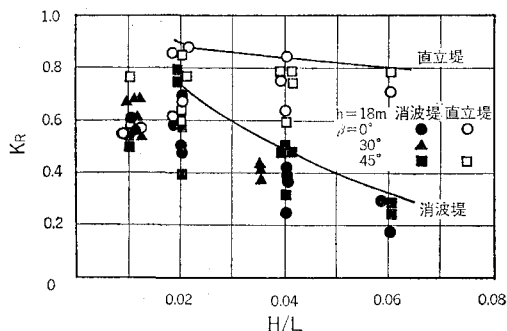


図-6 反射率と波形勾配

直立堤の反射率は, 既往の資料のとおり 0.7~1.0 である. これに比し, 消波堤の反射率は  $\beta$  にほぼ無関係に  $H/L$  が 0.02~0.06 へと増加するに従って 0.8~0.3 へと著しく減少している.

#### 2) 斜め $45^\circ$ の入射波の反射特性

1) で述べた事柄を考慮して, 斜め  $45^\circ$  の入射波について  $H/L = 0.02, 0.04, 0.06$  ごとに  $K_R$  を計算し,  $B/L$  との関係を描き実験結果と対比したものを 図-7 に示す. 図中の実線は, 式 (15) すなわち, 隔壁の効果が十

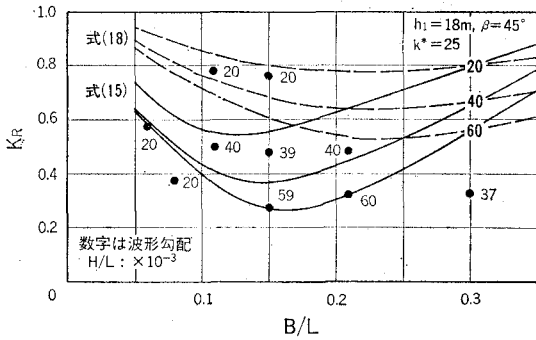


図-7 反射率と相対幅員（理論値と実験値）

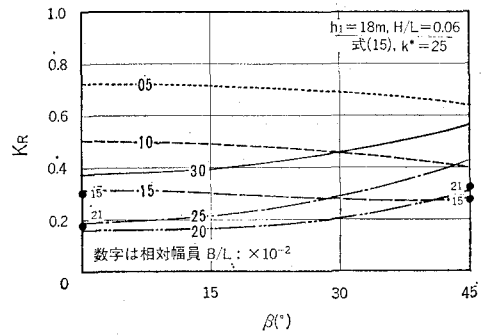


図-10 反射率と入射角（理論値と実験値）

分あるとした場合の理論式に基づくものであり，点線は式(18)すなわち，隔壁が全くないとした場合の理論式に基づくものである．実験値と対比すると，点線は明らかに実験値とはかけ離れており，実線の方は， $H/L = 0.04$  以上では，実験値とほぼ適合している．なお， $H/L = 0.37$ ， $B/L = 0.3$  の実験値が計算値より小さくなっているが，これは，3 (1) b) で述べたと同じ理由によるとみられる．

### 3) 入射角の影響

$H/L = 0.02$ ， $0.04$ ， $0.06$  ごとに， $B/L = 0.05 \sim 0.30$  をパラメーターにとって入射角  $\beta$  と  $K_R$  との関係を描き実験値と対比したものを 図-8～10 に示す．

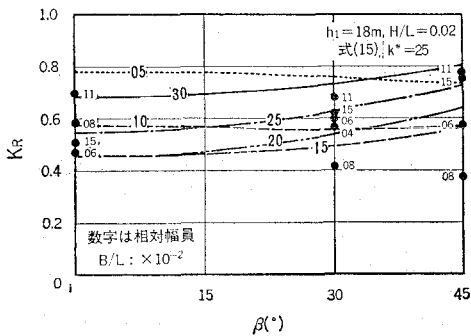


図-8 反射率と入射角（理論値と実験値）

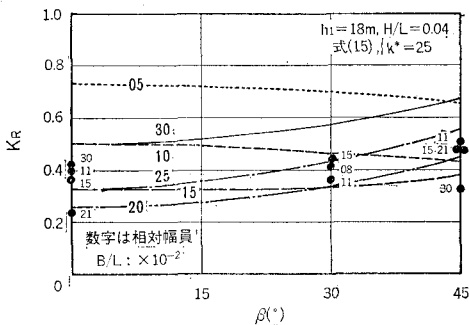


図-9 反射率と入射角（理論値と実験値）

計算値は全体的に  $B/L \leq 0.10$  では右下がり， $B/L = 0.20$  では右上がりの曲線となっており， $B/L = 0.15$  では右上がりのものと右下がりのものがある．従って計算値からは，相対幅員を小さめにとった場合は，斜め入射波に対する反射率がむしろ減少することになる．

次に，実験値と対比すると  $H/L \geq 0.04$ ， $B/L = 0.15 \sim 0.20$  では計算値と同様な右上がりまたは右下がりの傾向を示し， $K_R$  の値も計算値とほぼ一致しているが， $B/L = 0.10$  付近では計算値と異った傾向を示している．また， $H/L = 0.02$  の場合， $B/L = 0.15$  では計算値と同様に右上がりの傾向を示しており，また  $B/L = 0.10$  付近でも実験値のパラツキが大きい，全体的には計算値と同様の傾向を示している．

以上の結果から，入射角  $\beta$  が反射率  $K_R$  に及ぼす影響をまとめると次のとおりである．すなわち，二次元の場合と同様  $B/L$  が  $0.1$  程度と小さいか， $0.3$  程度と大きい場合は，計算値と実験値が適合しない場合があるが，全体的には  $\beta = 45^\circ$  と  $\beta = 0^\circ$  との反射率の差は  $0.1 \sim 0.2$  と小さい．従って，実用的には，斜め入射波についても直角入射波の場合とほぼ同等な消波効果を期待することができる．

## 4. 越波特性の実験

この実験は，消波堤の越波防止機能を調べるため，直角入射波について直立堤との越波量の相違を概略測定したものであるが，詳細については現在，検討中である．

### (1) 実験設備と実験条件

実験設備および模型は，2. (2) a) と同一である．越波量の測定には升 ( $125 \times 50 \times 50$  cm) を用いた．実験条件を表-2 に示す．

### (2) 測定方法

連続する堤体の中央部 5 函を対象とし，越波した水塊を升に貯留して水位上昇を測定した．越波量は，有効測定時間内の安定した波群による，単位時間あたりの平均越波量  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{sec}/\text{m}$ ) で表わした．

表-2 実験条件

$h_1=18\text{ m}$ ,  $h_c=2\text{ m}$ , 越波 ○ あり, × なし

| 周期 $T$ (sec) | 波高 $H$ (m) | 沖波波高 $H_0$ (m) | 消波堤 | 直立堤 |
|--------------|------------|----------------|-----|-----|
| 5.0          | 1.68       | 1.71           | ×   | ○   |
|              | 2.19       | 2.24           | ○   | ○   |
|              | 2.73       | 2.79           | ○   | ○   |
|              | 3.24       | 3.31           | ○   | ○   |
| 6.0          | 1.71       | 1.80           | ×   | ○   |
|              | 2.16       | 2.27           | ×   | ○   |
|              | 2.58       | 2.72           | ○   | ○   |
|              | 3.03       | 3.19           | ○   | ○   |
|              | 3.45       | 3.63           | ○   | ○   |
| 7.0          | 2.22       | 2.39           | ○   | ○   |
|              | 2.97       | 3.19           | ○   | ○   |
|              | 3.36       | 3.61           | ○   | ○   |
|              | 3.72       | 4.00           | ○   | ○   |
| 9.0          | 2.85       | 3.10           | ○   | ○   |
|              | 3.06       | 3.32           | ○   | ○   |
|              | 3.30       | 3.59           | ○   | ○   |

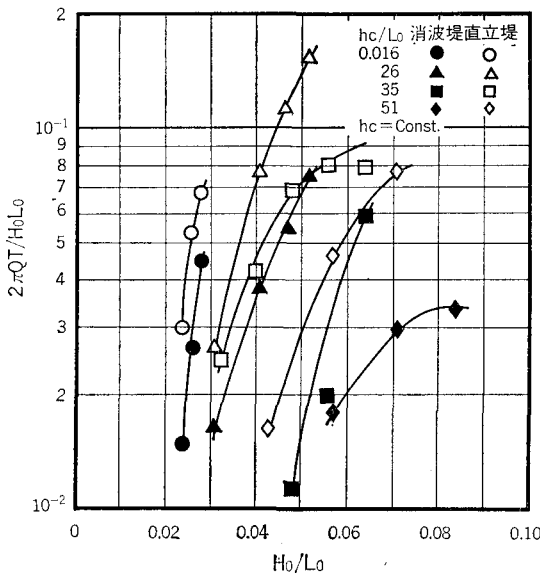


図-11 越波量

### (3) 実験結果と考察

越波量( $Q$ )を沖波1波あたりの流量に対する相対越波量( $2\pi QT/H_0L_0$ )で表示したものと、沖波波形勾配( $H_0/L_0$ ), 相対天端高( $h_c/L_0$ )との関係を 図-11 に示す。

直立堤, 消波堤とも相対越波量は,  $h_c/L_0$  が減少し,  $H_0/L_0$  が增大するに従って増加している。また, 消波堤と直立堤とを比較すると, 全体的に消波堤の相対越波量は直立堤のその 1/2 以下であり, とくに  $h_c/L_0$  が大きい場合ほど, 消波堤の越波防止機能が顕著である。なお, 消波堤では, 堤内の空間が水塊を包含し, 堤前の上位上昇を妨げていることが観察された。

### 5. む す び

以上の研究により, 直立式消波堤の三次元消波特性, 越波特性について

- 直立式消波堤の消波特性は, 前面のスリットと隔壁の効果を考慮に入れた理論モデルで評価できる。
- $0\sim 45^\circ$ の間では, 入射角による反射率の変化は0.1程度と小さいので, 実用上は, 斜め入射波に対する消波効果は, 直角入射波に対するものとはほぼ同等とみなして差しつかえない。
- 消波堤の越波量は, 直立堤のそののほぼ 1/2 である。

などの結果が得られた。今後は, 消波効果をさらに向上させるため, 堤体の構造, 形状を一部改造した模型により実験を行う予定である。

### 参 考 文 献

- 尾崎 晃・鴻上雄三・永田 慧・荻谷広見・松崎勝夫: 直立式消波堤の開発と水理特性, 第24回海講論文集 (1977. 11)
- 尾崎 晃・鴻上雄三・中込國喜・荻谷広見・田崎邦男: 直立式消波堤の波力に対する安定性, 第25回海講論文集 (1978. 11)
- 井島ほか: 遊水部をもつ護岸に作用する斜め入射波の反射率について, 九大工学会報第51巻第3号, 昭和53年6月
- F. L. Terrett, J. D. C. Osorio and G. H. Lean: Model Studies of a Perforated Breakwater. Proc. of 11th Conf. on Coastal Engng., Part 3 (1968), pp. 1104~1120.