

# 水平板式直立消波堤に関する研究

萩原 運弘\*・源波 修一郎\*\*

## 1. 緒 言

近年、船舶の大型化、入港する船舶の増加に伴って大規模港湾の建設および港域内の静穏化が強く叫ばれてきた。こうした場合、従来の傾斜型ブロック工法ではブロックの大量化により費用がかさみ効率が悪くなるため、それ自体に消波機能を有し、水深の大小にかかわらず直立壁として設置できる直立消波堤が注目され、研究開発が活発に行なわれている。

周知のように、この種の構造形式は 1961 年 Jarlan<sup>1)</sup> が音響学の理論を応用して多孔壁型の消波堤を提案して以来、外国では新しい工法として注目を集め、カナダのコモ湾などで採用されてきた。一方、我国においても井島<sup>2)</sup>、榎木・岩田<sup>3)</sup>、永井ら<sup>4)</sup>によって各種構造形式の消波堤が理論的、実験的に研究されており、最近、多孔壁型やスリット壁型の直立消波堤が実際に施工されるに至っている。

著者ら<sup>5)</sup>はすでに直立消波堤の一形式として前面が複数の水平板と多列柱体の透過体で背後に遊水部をもつ水平板式直立消波堤を提案し、その消波特性と理論的な取り扱いについて若干の考察を加えてきたので、本研究ではひきつづき、理論解析の適合性について検証を行うとともに、水平板式直立消波堤の耐波安定性の面から消波堤全体に作用する水平波力および鉛直波力について、また部材設計面から水平板および遊水部背後の不透過壁に作用する波圧について検討することにする。

## 2. 理論の概要

著者らがすでに発表した水平板式直立消波堤の理論はラプラスの方程式の解としての各領域の速度ポテンシャルを、水面と水底の条件を満足するような水面からの深さ  $z$  に関する直交関数系により、未定定数を係数とする無限級数に展開しておき、これらの係数を相接する仮想境界面での 2 つの力学的連続条件を満たすように決めるという方法<sup>6)</sup>によるもので、その概要を述べると次の通

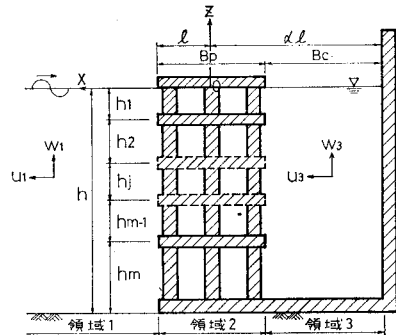


図-1 解析モデル

りである。図-1に示すように、長さ  $B_p (=2l)$  の水平板が水深  $h$  の海域に静水面から水底まで  $h_j$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) の間隔で  $m$  枚配置され、直径  $d_p$  の柱体で支持されており、 $x=-al$  の位置には不透過鉛直壁が設置されている場合を考える。各領域に分けられた流体域の速度ポテンシャルを  $\Phi_s(x, z; t) = \phi_s(x, z)e^{i\sigma t}$  ( $s=1, 2, 3$ ) の形で表わすと、 $\phi_s$  は各領域での境界条件を満足するラプラスの方程式の一般解として次のように求められる。ただし  $\sigma$  は周波数である。

(i) 領域 1 ( $l \leq x \leq \infty$ )

$$\phi_1(x, z) = (Ae^{ik(x-l)} + Be^{-ik(x-l)}) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-k_n(x-l)} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \quad (1)$$

ここで、 $A, B, C_n$  は複素定数で、 $k$  および  $k_n$  は  $g$  を重力の加速度とすると、次式で決まる波数である。

$$kh \tanh kh = -k_n h \tan k_n h = \sigma^2 h / g \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

(ii) 領域 3 ( $-al \leq x \leq -l$ )

$$\phi_3(x, z) = F \frac{\cos k(x+al)}{\cos \alpha' kl} \cdot \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{n=1}^{\infty} G_n \frac{\cosh k_n(x+al)}{\cosh \alpha' k_n l} \cdot \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \quad (3)$$

ここで、 $\alpha' = \alpha - 1$ 、 $F$  および  $G_n$  は複素定数である。

\* 正会員 清水建設(株)研究所

\*\* 正会員 清水建設(株)海洋開発部

(iii) 領域 2 ( $|x| \leq l$ )

$$\phi_2(x, z) = \sum_{r=0}^{\infty} \left( D_r^{(j)} \frac{\cosh R_j x}{\cosh R_j l} + E_r^{(j)} \frac{\sinh R_j x}{\sinh R_j l} \right) \cdot \cos R_j \left( z + \sum_1^j h_j \right) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $D_r^{(j)}$ ,  $E_r^{(j)}$  は複素定数、 $R_j = r\pi/h_j$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) で、 $h = \sum_{j=1}^m h_j$  の関係にある。

この領域においては水平板の間が杭によって満たされているため、領域内の流体運動を空隙率  $\varepsilon$  をもつ一様透過堤体内の流れとみなし、流速の 2 乗に比例する抵抗係数およびそれを線形化し流速に比例するとした抵抗係数をおのおの  $\mu$ ,  $\mu'$  と仮定すると、式 (4) の  $\phi_2$  により領域内の流速  $u_2$ ,  $w_2$  および圧力  $P_2$  は次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} u_2 &= e^{i\sigma t} \partial \phi_2 / \partial x, & w_2 &= e^{i\sigma t} \partial \phi_2 / \partial z \\ P_2 &= i\rho\sigma\beta\phi_2(x, z)e^{i\sigma t} - \rho g z \\ \beta &= (1 - i\mu'/\sigma)/\varepsilon \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $\rho$  は流体密度である。また領域 1, 3 での流速、流体圧力および水面変動  $\eta$  は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} u_s &= e^{i\sigma t} \partial \phi_s / \partial x, & w_s &= e^{i\sigma t} \partial \phi_s / \partial z \\ P_s &= i\rho\sigma\phi_s(x, z)e^{i\sigma t} - \rho g z \\ \eta_s &= -i(\sigma/g)\phi_s(x, 0)e^{i\sigma t} \quad (s=1, 3) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

以上の各領域の速度ポテンシャルは  $x = \pm l$  での境界面において力学的に連続に接続しなければならない。したがって次の境界条件が満足されるべきである。

$$\left. \begin{aligned} x=l: & \quad \partial \phi_1 / \partial x = \partial \phi_2 / \partial x \\ & \quad \phi_1 = \beta_j \phi_2^{(j)} \\ x=-l: & \quad \partial \phi_3 / \partial x = \partial \phi_2 / \partial x \\ & \quad \phi_3 = \beta_j \phi_2^{(j)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

$(j=1, 2, \dots, m)$

式 (7) に式 (1), (3), (4) を代入し、完全直交関数系の性質を利用して計算を行えば、最終的には  $D_r^{(j)}/A$ ,  $E_r^{(j)}/A$  に関する次の連立方程式を得る。

$$\sum_{j=1}^m \sum_{r=0}^{\infty} P_{0r}^{(j)} \left\{ (\beta_j - T_{0r}^{(j)}) \frac{D_r^{(j)}}{AN_0 \sinh \lambda_0} + (\beta_j - iS_{0r}^{(j)}) \frac{E_r^{(j)}}{AN_0 \sinh \lambda_0} \right\} = 2 \dots\dots\dots (8)$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{r=0}^{\infty} P_{0r}^{(j)} \left\{ \left( \beta_j - \frac{T_{0r}^{(j)}}{\tan \alpha' k l} \right) \frac{D_r^{(j)}}{AN_0 \sinh \lambda_0} - \left( \beta_j - \frac{S_{0r}^{(j)}}{\tan \alpha' k l} \right) \frac{E_r^{(j)}}{AN_0 \sinh \lambda_0} \right\} = 0 \dots\dots\dots (9)$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{r=0}^{\infty} P_{nr}^{(j)} \left\{ (\beta_j + T_{nr}^{(j)}) \frac{D_r^{(j)}}{AN_0 \sinh \lambda_0} + (\beta_j + S_{nr}^{(j)}) \frac{E_r^{(j)}}{AN_0 \sinh \lambda_0} \right\} = 0 \quad (n=1, 2, \dots) \dots\dots\dots (10)$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{r=0}^{\infty} P_{nr}^{(j)} \left\{ \left( \beta_j + \frac{T_{nr}^{(j)}}{\tanh \alpha' k n l} \right) \frac{D_r^{(j)}}{AN_0 \sinh \lambda_0} - \left( \beta_j + \frac{S_{nr}^{(j)}}{\tanh \alpha' k n l} \right) \frac{E_r^{(j)}}{AN_0 \sinh \lambda_0} \right\} = 0 \quad (n=1, 2, \dots) \dots\dots\dots (11)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} \lambda_0 &= kh, & \lambda_n &= knh, & N_0 &= (1 + 2\lambda_0 / \sinh 2\lambda_0) / 2, & N_n &= (1 + 2\lambda_n / \sinh 2\lambda_n) / 2 \\ P_{0r}^{(j)} &= \frac{(-1)^r \sinh k(h - \sum_1^j h_{j-1}) - \sinh k(h - \sum_1^j h_j)}{1 + (R_j/k)^2}, & T_{0r}^{(j)} &= (R_j/k) \tanh R_j l \\ & & S_{0r}^{(j)} &= (R_j/k) \coth R_j l \\ P_{nr}^{(j)} &= \frac{(-1)^r \sin kn(h - \sum_1^j h_{j-1}) - \sin kn(h - \sum_1^j h_j)}{1 - (R_j/k_n)^2}, & T_{nr}^{(j)} &= (R_j/k_n) \tanh R_j l \\ & & S_{nr}^{(j)} &= (R_j/k_n) \coth R_j l \\ h_0 &= 0, & j &= 1, 2, \dots, m, & n &= 1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

上式を解けば  $D_r^{(j)}/A$ ,  $E_r^{(j)}/A$  が求まり、 $B/A$ ,  $F/A$ ,  $C_n/A$ ,  $G_n/A$  が得られる。したがって各領域の速度ポテンシャルが確定し、反射率、水面変動、堤体に作用する波力等を求めることができる。実際の理論計算においては、次式により流速の 2 乗に比例する抵抗係数を、抵抗が流速に比例すると仮定した場合の抵抗係数に引き直す必要がある。

$$\mu' = \frac{4u_0}{3\pi B_p} \left( \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right) f \dots\dots\dots (13)$$

ここで  $u_0$  は透過堤体内の最大流速、 $f$  は次の形に表現される抵抗係数である。

$$F_* = \rho f u_*^2 / 2 \dots\dots\dots (14)$$

この場合  $F_*$  は単位面積あたりの流体抵抗力、 $u_*$  は透過体内の流速である。また前述の抵抗係数  $\mu$  と  $f$  の間には次の関係式が成り立つ。

$$\mu = (1 - \varepsilon) f / 2B_p \dots\dots\dots (15)$$

### 3. 消波および波圧特性に関する実験

#### (1) 実験装置と実験方法

実験は長さ 30 m, 幅 0.9 m, 高さ 1 m の 2 次元造波水路で行った。模型は、透過体部分が厚さ 2 cm の水平板を 4 cm 間隔で、千鳥状に配置した直径 4.8 cm の支柱で保持した形状であり、後壁として厚さ 2 cm の不透過板を固定したものである。反射率は移動用の台車に波高計を取り付け、台車を移動することによって堤体前面に形成される部分重複波を測定し、Healy の方法により求めた。一方、波圧の測定には受圧面直径 5 mm の防水型半導体ゲイジタイプの波圧計を用い、静水面上の板、静水面直下の水中板および遊水部背後の不透過壁につい

表-1 実験条件

| 諸 量       | 数 量                                     |
|-----------|-----------------------------------------|
| 水 深 (cm)  | 30*, 36, 42                             |
| 周 期 (sec) | 0.8*, 1.0, 1.2*, 1.34, 1.5, 1.62, 1.76* |
| 波 高 (cm)  | 5*, 8.5, 10.5*                          |
| 遊水部幅 (cm) | 4, 14, 24*                              |
| 透過体幅 (cm) | 26*                                     |

\* 波圧実験時の条件

て実施したが、波圧計の個数の関係上、これらは別々に行った。本実験の条件は、いずれも越波状態が発生しない場合の実験で、表-1 に示すとおりである。

## (2) 実験結果の検討

消波構造物の反射率は多くの要因により支配されるが、本実験では透過体部の形状が一定(静水面上に1枚、水中に3枚の板が等間隔に配置されている)の場合を取り扱っているので遊水部・波長比  $B_0/L$  の関係について示したのが 図-2 である。図は  $h=30$  cm,  $H=5$  cm の場合で、遊水部幅を3種類、周期を7種類に変化させている。この結果を対象の周期が決まっていて遊水部幅の影響を調べるという観点からみると、 $B_0/L \approx 0.05 \sim 0.06$  で反射率は極小値をとり、これより遊水部幅が小さくなっても、大きくなっても反射率は増大している。このことは、特定の周期の波に対して反射率が最も小さくなる最適な遊水部幅が存在するという直立消波堤特有の傾向を示しているが、また透過堤体にある程度厚みを持たせることにより遊水部幅を小さく抑え、堤体全体幅も小さくできる可能性を示唆していよう。次に理論解析の適合性を検証するため 図-3 (a), (b) に反射率についての理論値と実験値を比較した。全体的な傾向としては両者はかなりよく一致しているが、絶対値についてみると  $H=8.5$  cm の場合の適合度が悪く、実験値は理論値よりも小さくなっている。また  $H=5.0$  cm の場合でも、極小値付近では比較的良好に一致しているが、その範囲を外れると実験値は理論値よりも小さくなり適合性が低下する傾向にある。したがって微小振幅波の条件が満足され、し

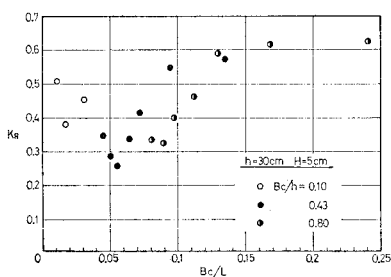


図-2 反射率と遊水部幅波長比との関係

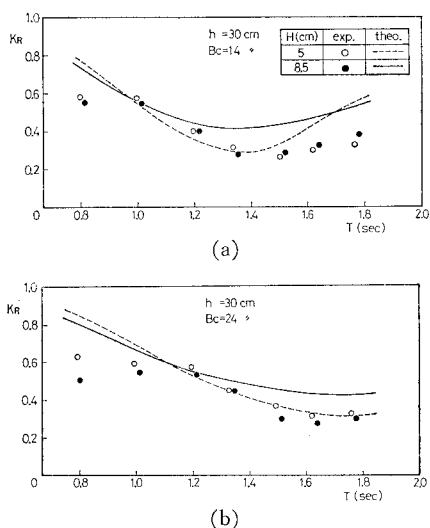


図-3 反射率に関する実験値と理論値との比較

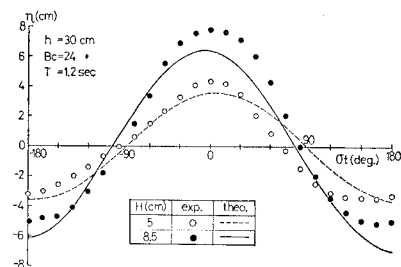
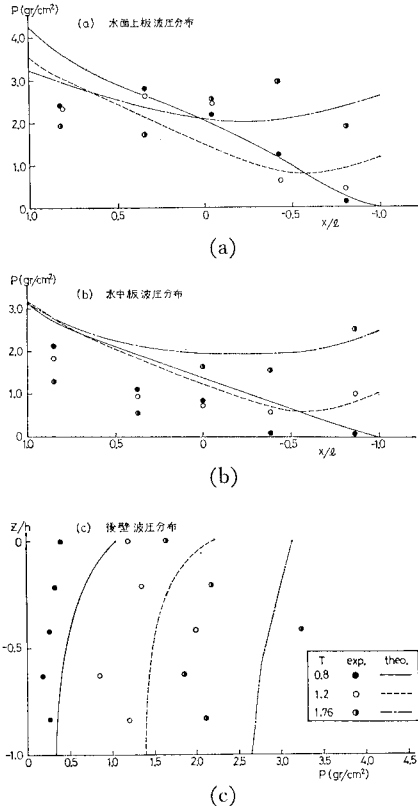


図-4 堤体前面の水位変動に関する実験値と理論値との比較

かも遊水部幅が波の位相差による消波機能を十分に発揮するように選ばれ、透過堤体内部での流出入に伴うエネルギー損失も有効に行われる場合には理論式の妥当性は十分認められる。また 図-4 は透過堤体前面での水面波形の時間的変動の1例について計算結果と実験結果を比較したものである。波高の測定は透過堤前面約1cmのところで行っているため、波が衝突して跳ね上がった水脈のようなものは記録されておらず、実験値は水位の実質部分の昇降全振幅を表わしている。図によると、実験波形には非線形性が認められ波谷部分では実験値が理論値よりも小さくなっているが、逆に波峰部分では実験値の方が理論値よりも若干大きい傾向にある。一方消波堤の部材を構成している静水面上の板、静水面直下の水中板および遊水部後壁の最大平均波圧について理論値と実験値の比較を試みたのが 図-5 (a), (b), (c) である。まず静水面上の板と水中板の波圧についてみる。縦軸は波圧値、横軸は波圧計の取り付け位置を示し、半板長  $l$  で無次元化したものである。波は  $x/l=1.0$  から  $x/l=-1.0$  の方向へ進行する。理論値は実験値よりも若干大きくなっているが、全般的には類似の傾向を示し比較的良好に一致して



図—5 波圧分布に関する実験値と理論値との比較

いる。この場合周期が長くなるにつれ、波のエネルギーが透過体を通過して遊水部へ入り込むようになるため、波圧分布は三角分布から中くぼみを伴った台形分布、一様分布へと移行するのが認められる。次に後壁波圧の場合、縦軸は計器の取り付け位置を示し、横軸は波圧値を示す。図によると理論値と実験値は必ずしも一致していない。すなわち理論値は実験値よりも全般的に大きく静水面から水底に向かって減少する分布になっているが、実験値は中間部分で極大値を示し、水底付近でもその影響を受けて若干大きくなる傾向を示している。

#### 4. 全体波力に関する実験

##### (1) 実験装置と実験方法

実験には前述した長さ 30 m、幅 0.9 m、高さ 1 m の造波水路を使用した。堤体模型を 3 基製作し、透過体前面が造波板より 20 m の位置になるように水路幅方向に並べて設置した。両側の 2 基はダムー模型で、マウンド上に固定し、測定模型との間隙は互いに接触するのを防ぐため約 1 cm 程度あけた。全体波力の測定に使用した検力装置は水平力と鉛直力を完全に分離して取り出すため、水平方向および鉛直方向にスライド可能な水平スライド軸と鉛直スライド軸により構成され、それぞれの端

部には円形リングにストレインゲージを接着した検出器が取り付けられている。実験条件としては模型の透過体幅  $B_p$  を 40 cm、遊水部幅  $B_e$  を 33.5 cm および脚堤水深  $d$  を 36.5 cm に保ち、入射波の波高および周期を 3～5 種類に変えて測定を行った。

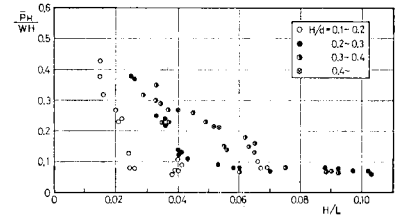
##### (2) 実験結果の検討

消波堤体に作用する水平波力は透過体部と遊水部後壁に位相差をもって作用するが、これを透過体部分が不透過な壁と仮定し、これにすべての水平波力が作用するものと考え次式により平均波圧強度  $\bar{p}_H$  を算定する。

$$\bar{p}_H = \frac{P_H}{B_*(d+0.85H)} \quad \dots\dots\dots(16)$$

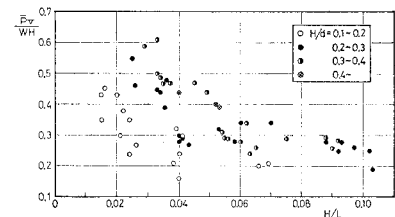
ここで  $P_H$  は水平波力、 $B_*$  は法線方向の堤体幅で静水面上  $0.85H$  の高さまで波圧が作用するものとする。また鉛直波力は個々の水平板に作用するものと堤体床版に作用するものの和と考えられるが、すべて堤体床版に作用するものと考え、堤体前趾で波圧強度  $\bar{p}_V$ 、後趾で零となる三角分布を仮定し、波圧強度  $\bar{p}_V$  を次式により算出する。

$$\bar{p}_V = \frac{2P_V}{(B_p+B_e) \cdot B_*} \quad \dots\dots\dots(17)$$

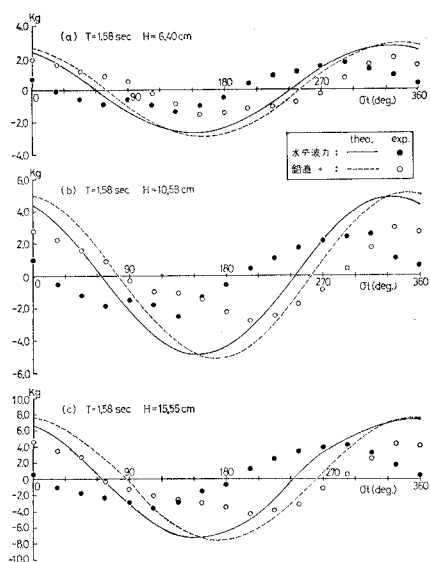


図—6 消波堤に作用する水平波力

ここで  $P_V$  は堤体全体に作用する鉛直波力である。図—6 は水平波力について、波高と堤脚水深の比  $H/d$  をパラメータにして波力係数  $\bar{p}_H/wH$  ( $w$ : 水の単位体積重量) と波形こう配  $H/L$  の関係を示したものである。 $\bar{p}_H/wH$  は  $H/L$  が大きくなるほど減少し、 $H/L > 0.07$  では  $H/d$  に無関係に  $\bar{p}_H/wH \approx 0.08$  になっている。しかし  $H/L < 0.07$  の範囲では  $H/d$  によって傾向が異なり、 $H/d$  が小さいほど  $H/L$  の小さい値で一定値に近づく。実験条件の違いがあるので一概に言えないが、一般にこれらの結果は従来のケーソン式混成堤や消波ブロック被覆



図—7 消波堤に作用する鉛直波力



図—8 波力の時間変動に関する実験値と理論値との比較

堤<sup>7)</sup>などに比べて小さい傾向を示している。一方、図—7は鉛直波力について示したもので、縦軸は堤体前趾の平均波圧強度  $\bar{p}_r$  を  $wH$  で割った無次元量である。この結果は水平波力の場合と同様の傾向を示しており  $\bar{p}_r/wH \approx 0.2$  に漸近している。しかし  $H/d$  の小さい範囲では、 $H/L$  の増加に対して水平波力の場合ほど急激な減少は示していない。次に理論解析により求められる波力波形が、実験から得られたものに比べて、どの程度類似しているかを調べた1例が図—8 (a), (b), (c) である。実験の波力波形は波谷部分でかなり不規則になっており、最大値も理論結果の方が実験結果よりも若干大きくなっている。また位相差について理論値と実験値を比較すると、鉛直波力については両者は比較的良好に一致しているが、水平波力については実験波形の方が理論波形よりも  $50^\circ \sim 60^\circ$  前後先行しているように見うけられる。

## 5. 結 言

以上、本研究では直立消波堤の一形式である水平板式直立消波堤について、その消波特性、部材に作用する波圧分布および消波堤全体に働く波力等を理論的、実験的に検討してきた。その結果、線形ポテンシャル理論による計算結果は完全に正しい定量的な結果を得るまでにはいたらなかったが、実用の範囲内では十分正しい近似解を与えることがわかった。今後、水平板式直立消波堤の消波および波力特性に複雑に関係している諸因子について、系統的な実験を行うことにより、それらの関係を明らかにし直立消波堤としての実用化を図って行く予定である。

最後に本実験に協力して頂いた東海大学工学部水工研究室の諸先生方に感謝する次第であります。

## 参 考 文 献

- 1) Jarlan, G. E.: A perforated vertical wall breakwater, The Dock & Harbour Authority, Vol. XII, No. 486, 1961.
- 2) 井島武士・奥蘭英明・湯村やす・坂井久雄: 遊水部をもつ直立消波堤と護岸, 第19回海岸工学講演会論文集, pp. 185~192, 1972.
- 3) 榎木 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二, 三の考察, 土木学会論文報告集, 220号, pp. 53~63, 1973.
- 4) 永井莊七郎・角野昇八: スリット型防波堤に関する研究, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 100~105, 1976.
- 5) 小林 浩・源波修一郎・萩原運弘: 水平板式透過性防波堤および護岸に関する実験的研究, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 95~99, 1976.
- 6) 井島武士: 最近の波浪理論における境界値問題の解法とその応用, 1971年度水工学に関する夏期研修会講義集, Bコース, 1971.
- 7) 谷本勝利: 混成防波堤に作用する波力について, 昭和51年度港湾技術研究所講演会講演集, pp. 1~26, 1976.