

有孔水平板の水理特性に関する研究

東洋建設（株） 正会員 芳田利春
同 上 同 上 倉田克彦
（株）間組 同 上 沖 政和
若築建設（株） 遠部一己

1. はじめに

著者らは海上作業の稼働率の向上、水産施設の防護、海洋性レクリエーション施設の稼働率の向上などを目的として、図1に示す空気潜袋消波堤を研究開発してきた。

空気潜袋の消波原理は、空気潜袋の変形運動により透過波と逆位相の波を発生させ、透過波と相殺させることであり、その消波性能、特性については良好な結果を得ている。¹⁾ 空気潜袋消波堤を実海域に設置する場合の問題点の一つとして、その係留方法が挙げられる。消波堤に作用する鉛直下向き波力が消波堤の余剰浮力より大きい場合、消波堤は押し下げられ、係留索に緩みが生じ、消波堤が元の位置に復帰する時に、係留索に衝撃的な力が作用する。従って、係留索に衝撃力を作用させないためには、鉛直下向き波力を余剰浮力より小さくしなければならない。そのため、空気潜袋を取り付けているボンツーン部に空隙を設け、波力の受圧面積を減少させることを考えた。

そこで、波力の減少程度を調べるため、最も単純なモデルである没水有孔水平板について、水理模型実験ならびに理論検討を行った。

2. 水理模型実験

実験には長さ40.0m、幅1.0m、高さ1.6mの2次元造波水路を用いた。

水平板は合板により表1のように製作し、等間隔に円形の孔をあけた。また、実験波の諸元を表2に示す。ここで、波高は模型設置位置における通過波高である。

水平板に作用する波力は、水平板を支持する4本の鋼管のそれぞれに働く鉛直力の合力として求まる。各支持柱に働く鉛直力は、鋼管頂部に取り付けたアクリルパイプの軸方向歪を測定して求めた。

また、反射率は入射分離推定法を用いて求め、透過率は水平板設置位置での通過波と岸側での透過波のエネルギー比（全周波数成分）の平方根をとった。

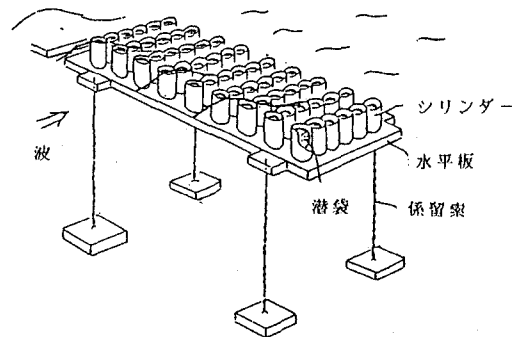


図1 空気潜袋消波堤

表1 水平板の諸元

板幅 B(cm)	板厚 h'(cm)	空隙		
		空隙率 ε(%)	孔径 φ(cm)	孔中心間隔 (cm)
65	7.5	0	---	波進行方向
		5	4.2	13.0
		10	6.0	波進行方向と直角方向
		15	7.0	15.0

3. 理論解析

非圧縮性完全流体の2次元運動として、角周波数 σ ($= 2\pi/T$; T は周期) を持つ微小振幅波を考える。

図2に示すように水平板の中央に単一の孔がある場合、流体域を(I)～(VII)の領域に分け、各領域における速度ポテンシャルの一般解を求め、領域境界 $x = l_1 + b$ 、 $l_1 - b$ 、 $l_2 + b$ 、 $l_2 - b$ において連続性を維持するように未知数を確定する。

速度ポテンシャルは次の形をもつとする。

$$\Phi(x, y, t) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \phi(x, z) \cdot e^{i\sigma t} \quad (1)$$

ここで、 ζ_0 は入射波振幅である。

領域(I)では右からの入射波と右への反射波および散乱波が存在し、領域(VII)では通過波と散乱波があり、各領域の速度ポテンシャルは $\phi_1 \sim \phi_7$ として次の形の一般解をもつ。

表2 実験波の諸元

水深 h(cm)	板上水深 d(cm)	波浪	
		周期 T(sec)	波高 H(cm)
75	15~25	0.89	5~20
		1.12	
		1.34	
		1.57	
		1.79	

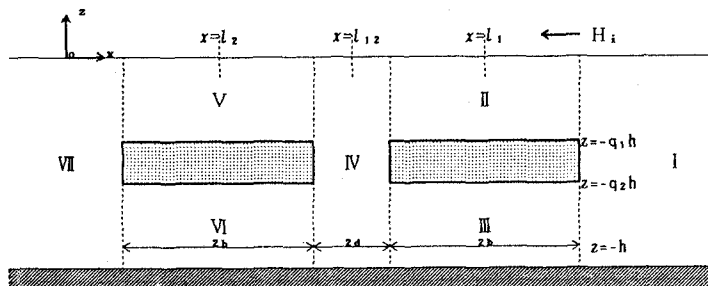


図2 単一孔モデル

$$\phi_1(x, z) = \{ e^{i k_0(x-l_1)} + A_0 e^{-i k_0(x-l_1)} \} f_0(z) + \sum A_n e^{i k_n(x-l_1)} f_n(z) \quad (2)$$

$$\phi_2(x, z) = \{ B_0 \frac{\cosh k_0(x-l_1)}{\cosh k_0 l_1} + B_0^* \frac{\sinh k_0(x-l_1)}{\sinh k_0 l_1} \} g_0(z) + \sum \{ B_n \frac{\cosh k_n(x-l_1)}{\cosh k_n l_1} + B_n^* \frac{\sinh k_n(x-l_1)}{\sinh k_n l_1} \} g_n(z) \quad (3)$$

$$\phi_3(x, z) = C_0 + C_0^* \frac{x-l_1}{l_1} + \sum \{ C_n \frac{\cosh M_n(x-l_1)}{\cosh M_n l_1} + C_n^* \frac{\sinh M_n(x-l_1)}{\sinh M_n l_1} \} e_n(z) \quad (4)$$

$$\phi_4(x, z) = \{ D_0 \frac{\cosh k_0(x-l_1)}{\cosh k_0 l_1} + D_0^* \frac{\sinh k_0(x-l_1)}{\sinh k_0 l_1} \} f_0(z) + \sum \{ D_n \frac{\cosh k_n(x-l_1)}{\cosh k_n l_1} + D_n^* \frac{\sinh k_n(x-l_1)}{\sinh k_n l_1} \} f_n(z) \quad (5)$$

$$\phi_5(x, z) = \{ E_0 \frac{\cosh k_0(x-l_1)}{\cosh k_0 l_1} + E_0^* \frac{\sinh k_0(x-l_1)}{\sinh k_0 l_1} \} g_0(z) + \sum \{ E_n \frac{\cosh k_n(x-l_1)}{\cosh k_n l_1} + E_n^* \frac{\sinh k_n(x-l_1)}{\sinh k_n l_1} \} g_n(z) \quad (6)$$

$$\phi_6(x, z) = F_0 + F_0^* \frac{x-l_1}{l_1} + \sum \{ F_n \frac{\cosh M_n(x-l_1)}{\cosh M_n l_1} + F_n^* \frac{\sinh M_n(x-l_1)}{\sinh M_n l_1} \} e_n(z) \quad (7)$$

$$\phi_7(x, z) = G_0 e^{i k_0(x-l_1)} f_0(z) + \sum G_n e^{i k_n(x-l_1)} f_n(z) \quad (8)$$

ここで、

$$\begin{aligned} f_0(z) &= \frac{\cosh k_0(z+h)}{\cosh k_0 h}, & f_n(z) &= \frac{\cosh k_n(z+h)}{\cosh k_n h} \\ g_0(z) &= \frac{\cosh k_0(z+q_1 h)}{\cosh k_0 q_1 h}, & g_n(z) &= \frac{\cosh k_n(z+q_1 h)}{\cosh k_n q_1 h} \\ e_n(z) &= \cos M_n(z+h), & M_n &= s\pi/(l_1-q_2)h, \quad s: \text{整数} \end{aligned} \quad (9)$$

また、 k_0 、 k_n および K_0 、 K_n は次式による固有値（波数）である。

$$k_0 h \tanh(k_0 h) = -k_0 h \tan(k_0 h) = \sigma^2 h / g \quad (10)$$

$$K_0 q_1 h \tanh(K_0 q_1 h) = -K_0 q_1 h \tan(K_0 q_1 h) = \sigma^2 q_1 h / g$$

仮想境界面 $x = l_1 + b$ 、 $x = l_2 + b$ においては、運動の連続性により ϕ および $\partial \phi / \partial x$ は連続でなければならない。

(a) $x = l_1 + b$ では

$$\begin{aligned} \partial \phi_1 / \partial x &= \partial \phi_2 / \partial x \quad (0 > z > -q_1 h) & \phi_1 &= \phi_2 \quad (0 > z > -q_1 h) \\ \partial \phi_1 / \partial x &= 0 \quad (-q_1 h > z > -q_2 h) & \phi_1 &= \phi_2 \quad (-q_1 h > z > -h) \\ \partial \phi_1 / \partial x &= \partial \phi_2 / \partial x \quad (-q_2 h > z > -h) \end{aligned} \quad (11)$$

(b) $x = l_1 - b$ では

$$\begin{aligned} \partial \phi_4 / \partial x &= \partial \phi_5 / \partial x \quad (0 > z > -q_1 h) & \phi_4 &= \phi_5 \quad (0 > z > -q_1 h) \\ \partial \phi_4 / \partial x &= 0 \quad (-q_1 h > z > -q_2 h) & \phi_4 &= \phi_5 \quad (-q_1 h > z > -h) \\ \partial \phi_4 / \partial x &= \partial \phi_5 / \partial x \quad (-q_2 h > z > -h) \end{aligned} \quad (12)$$

(c) $x = l_2 + b$ では

$$\begin{aligned} \partial \phi_1 / \partial x &= \partial \phi_3 / \partial x \quad (0 > z > -q_1 h) & \phi_1 &= \phi_3 \quad (0 > z > -q_1 h) \\ \partial \phi_1 / \partial x &= 0 \quad (-q_1 h > z > -q_2 h) & \phi_1 &= \phi_3 \quad (-q_1 h > z > -h) \\ \partial \phi_1 / \partial x &= \partial \phi_3 / \partial x \quad (-q_2 h > z > -h) \end{aligned} \quad (13)$$

(d) $x = l_2 - b$ では

$$\begin{aligned} \partial \phi_4 / \partial x &= \partial \phi_6 / \partial x \quad (0 > z > -q_1 h) & \phi_4 &= \phi_6 \quad (0 > z > -q_1 h) \\ \partial \phi_4 / \partial x &= 0 \quad (-q_1 h > z > -q_2 h) & \phi_4 &= \phi_6 \quad (-q_1 h > z > -h) \\ \partial \phi_4 / \partial x &= \partial \phi_6 / \partial x \quad (-q_2 h > z > -h) \end{aligned} \quad (14)$$

関数列 $f_0(z)$ 、 $f_n(z)$ 、 $g_0(z)$ 、 $g_n(z)$ および $e_0(z)$ 、 $e_n(z)$ の直交性を利用して、(2)～(8) 式より変数を消去する。これより得られる連立方程式を解けば、波力、透過率などを次式により求めることができる。

(a) 水平板に作用する鉛直力 ($l_1 = -l_2$)

$$\begin{aligned} \left[\frac{P}{4\pi g b^2 \sigma_0} \right]_{z=-l_2} = -i \left\{ (B_0 + E_0) \frac{\sin k_0(l_1-b) - \sin k_0(l_1+b)}{4k_0 b \cosh k_0(l_1+b) \cosh k_0 b} - (B_0^* - E_0^*) \frac{\cos k_0(l_1-b) - \cos k_0(l_1+b)}{4k_0 b \sinh k_0(l_1+b) \cosh k_0 b} \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{\infty} \{ (B_n + E_n) \frac{\sinh k_n(l_1+b) - \sinh k_n(l_1-b)}{4k_n b \cosh k_n(l_1+b) \cosh k_n b} + (B_n^* - E_n^*) \frac{\cosh k_n(l_1+b) - \cosh k_n(l_1-b)}{4k_n b \sinh k_n(l_1+b) \cosh k_n b} \} \right\} e^{i\omega t} \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left[\frac{P}{4\pi g b^2 \sigma_0} \right]_{z=-l_2} = -i \left\{ \frac{C_0 + F_0}{2} + (C_0^* - F_0^*) \frac{l_1}{2} \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left\{ (C_n + F_n) \frac{\sinh M_n(l_1+b) - \sinh M_n(l_1-b)}{4M_n b \cosh M_n(l_1+b)} + \frac{\cosh M_n(l_1+b) - \cosh M_n(l_1-b)}{4M_n b \cosh M_n(l_1+b)} \right\} \right\} e^{i\omega t} \quad (16) \end{aligned}$$

(b) 反射率 $Kr = |A_0|$ 、透過率 $Kt = |G_0|$ (17)

以上が単一孔の場合であるが、多孔の場合、無孔の場合についても同様にして波力、透過率などを求めることができる。

4. 結果と考察

4.1 鉛直波力

図3 (a) ~ (c) に空隙率と鉛直波力の最大値を水平板の外形寸法と入射波高で除した最大平均波圧係数との関係を示す。正の値は水平板に対して鉛直下向き、負の値は鉛直上向き波力である。同図より水平板に作用する鉛直波力は、空隙による受圧面積の減少以上に小さくなるといえる。その減少率は空隙率 $\varepsilon = 15\%$ で無孔板 ($\varepsilon = 0\%$) の値に対して、実験値で約50%、計算値ではそれ以上である。そして、鉛直下向き波力は d/h 、 ε に関わらず $B/L \approx 0.25$ で最大である。

実験値と計算値を比較すると、空隙のある場合比較的良好に一致するが、無孔板では計算値の方が実験値より大きい。これは波の有限振幅性のためか、もしくは水路側壁と模型の間の約5mmの空隙から圧力が逃げるためとも考えられる。また、鉛直上向き波力と下向き波力とを比較すると、計算値ではその仮定から両者は同じ値を示すが、実験値では $d/h = 0.2$ では上向き波力のほうが大きく、 $d/h = 0.333$ ではほぼ同じ値である。また、実験値では d/h が変わっても鉛直下向き波力は殆ど同じであるが、計算値では d/h が大きくなると減少する。これらの点より微小振幅波理論を適用するには、板上水深がある程度以上なければならないといえる。

無孔板の最大平均波圧係数の実験値はほぼ0.2~0.4である。これは谷本らの実験結果²⁾とその条件の差異はあるがほぼ同じ値である。

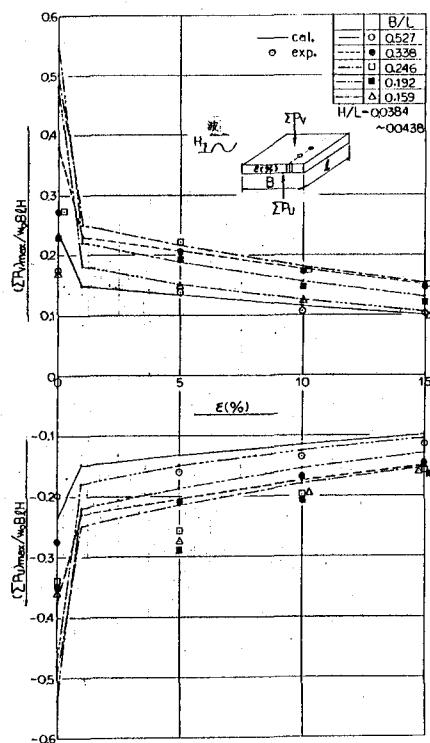


図3 (a) 空隙率と鉛直波力 ($d/h = 0.2$)

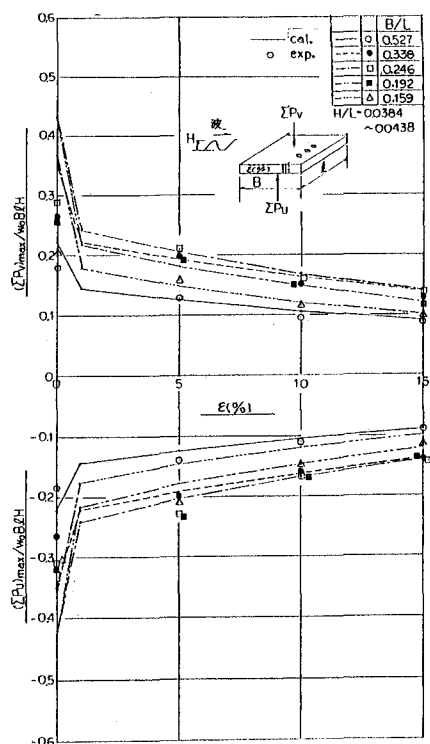


図3 (b) 空隙率と鉛直波力 ($d/h = 0.267$)

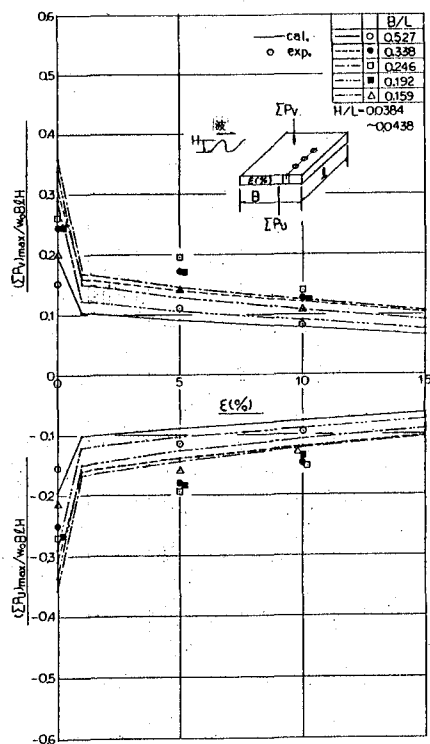


図3 (c) 空隙率と鉛直波力 ($d/h = 0.333$)

空隙全面積が同じで孔個数が異なる場合の計算結果を図4に示す。これより周期、空隙率に関わらず孔個数が大きい方が鉛直力の最大波圧係数は小さくなるのがわかる。従って、同一空隙率で鉛直波力の低減を考える場合、孔列を増やす、すなわち、小さな孔を多く配列する方が良いといえる。

4.2 反射率および透過率

数値計算と実験により求めた反射率、透過率と相対板幅との関係を図5(a)～(c)に示す。同図より無孔板では、 $d/h=0.2$ 、 $B/L<0.3$ の場合を除き、反射率、透過率とも実験値と計算値とは良く一致している。 $d/h=0.2$ 、 $B/L<0.3$ では反射率、透過率とも実験値の方が計算値より小さい。ここで、反射率、透過率と波形勾配との関係を図6にみると波形勾配が大きくなると反射率、透過率とも減少している。これは計算値では考慮していない波形勾配の影響、すなわち、板上水深が浅く波高が大きくなると水平板上での波は有限振幅性が強くなり、水平板後端部、水平板岸側で碎波するためである。また、図5より無孔板の場合、 $B/L=0.2\sim0.3$ の間において反射率が最大、透過率が最小となるといえる。

水平板に空隙を設けた場合、図5の計算値をみると透過率はほぼ1.0と大きくなり反射率は小さくなるが、相対板幅に対する傾向は無孔板と変わらない。一方、実験値をみると反射率を無孔板の場合と比較すると、 $B/L\approx0.2$ 近くで小さく、 $B/L\approx0.5$ で大きく、その他の B/L ではほぼ同じである。また、透過率は板上水深が大きい $d/h=0.267$ 、 0.333 の場合、ばらつきはあるが空隙の有無による差は殆どないが、板上水深の小さい $d/h=0.2$ では空隙率が大きくなると透過率は大きくなる。この計算値と実験値の差異は、計算値では板周辺でのエネルギー損失を考慮していないが、実際には空隙を流れる往復流、水平板前後端部での乱れによる波エネルギー損失があるためと思われる。

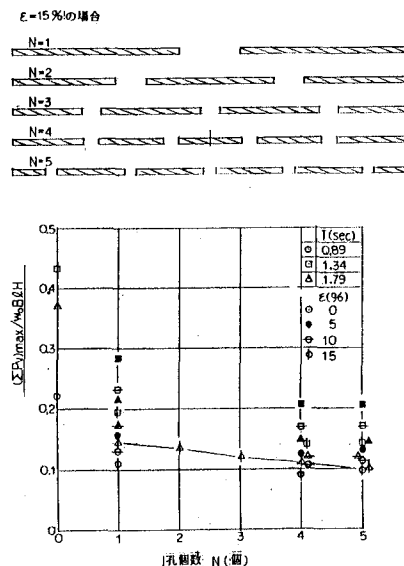


図4 孔個数と鉛直波力

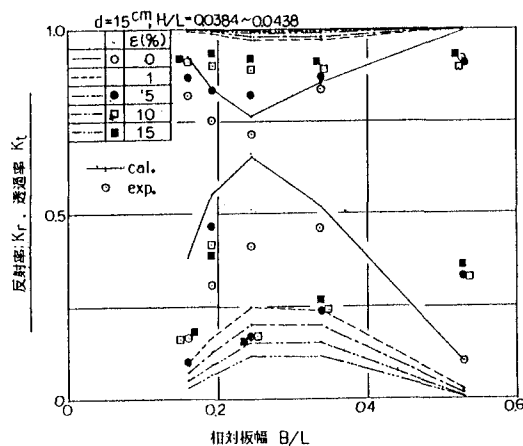


図5 (a) 相対板幅と反射率、透過率 ($d/h=0.2$)

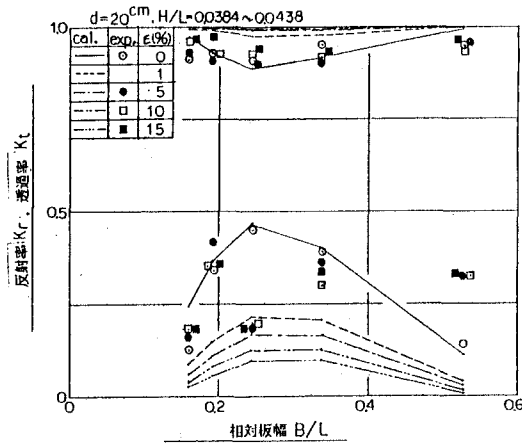


図5 (b) 相対板幅と反射率、透過率 ($d/h=0.267$)

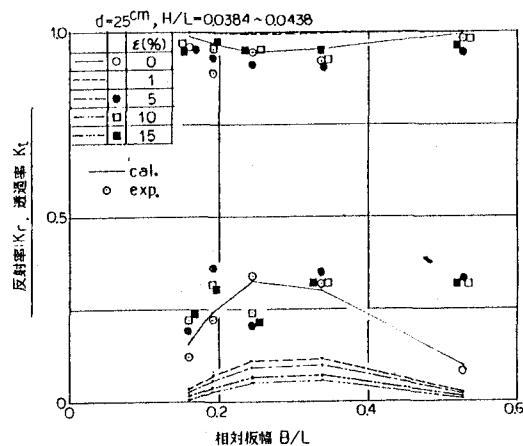


図5 (c) 相対板幅と反射率、透過率 ($d/h=0.333$)

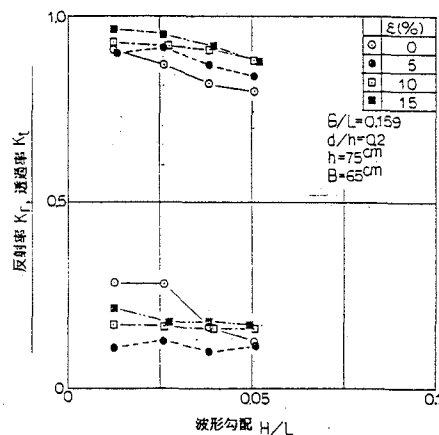


図6 波形勾配と反射率、透過率 ($d/h=0.2$)

5. まとめ

多孔水平板の水理特性について、数値計算結果と実験結果を比較しながら検討したが、その中で得た主な結果を以下に挙げる。

- 1) 水平板に鉛直孔を設けることにより、波力は空隙率の値以上に減少し、空隙率15%の場合、実験値、計算値のいずれにおいても無孔の場合の約50%である。
- 2) 最大波圧係数の値は波長(周期)により異なり、板幅と波長の比が0.2~0.3で最大となる。
- 3) 鉛直波力の実験値と計算値は比較的良く一致しており、没水有孔水平板の鉛直波力を理論式により求めることが可能といえる。
- 4) 理論計算によれば、空隙率が一定の場合、孔個数を増やす、すなわち、小さい孔を多く設けるほど鉛直波力の低減が図れる。
- 5) 鉛直波力の最大値を水平板の外形寸法と波高で除した最大波圧係数は、無孔板の場合板の没水深比により異なるが、実験値ではほぼ0.2~0.4となる。
- 6) 無孔板の場合、計算値と実験値の反射率、透過率はよく一致する。しかし、空隙を設けた場合、反射率特性に大きな差異がある。

以上の検討の中で今後の課題として残るのは、以下の現象を取り込んだ解析法の開発である。

- 1) 水平板前後端部、空隙部でのエネルギー損失
- 2) 水平板上での波の有限振幅性

最後に、本研究を遂行するにあたり終始ご指導を頂いた九州大学名誉教授井島先生に謝意を表します。

参考文献

- 1) 下村、沖：空気潜袋消波堤の消波効果に関する実験的研究、第17回海岸工学講演会論文集、1970
- 2) 谷本、吉本ほか：大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(その1)、港湾技研資料No.516、1985