

スリットケーソンの反射率に及ぼす諸要因の影響

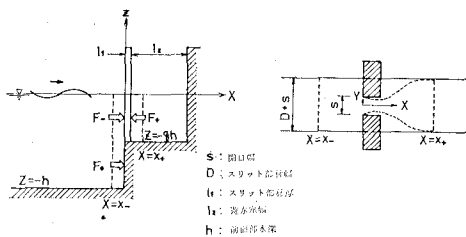
谷 本 勝 利*・吉 本 靖 俊**

1. ま え が き

透過壁と遊水室を有する消波ケーソンは、直立構造であって反射波を軽減するところに著しい特徴があり、近年各地で岸壁や護岸等に用いられるようになってきた。しかし、消波ケーソンの反射率は構造及び水理条件等多くの要因によって変化し、透過壁の開口率や深さ、遊水室の幅等、条件に応じて最適構造を決定しなければならない。そのため、これまでも各種の構造を対象として数多くの理論的あるいは実験的研究が行なわれてきているところであるが、透過壁の深さの影響等必ずしも十分に明らかにされているとはいえない。そこで、本研究は、我が国において実施例の多い縦スリットケーソンを対象とし、理論解析と実験の結果に基づいて反射率に及ぼす諸要因の影響を考察するものである。用いた理論は要因の影響を比較的簡単なかたちで把握することを目的としたもので、微小振幅波でかつ無限級数項を省略した近似理論である。以下、その概要及び実験の結果について述べる。

2. 反射率推定の近似理論

図一は対象とした構造と座標軸を示したものである。



図一 対象とする構造と座標軸

る。すなわち、 x 軸を入射波の進行方向にとり、 $x=0$ の地点に部材幅 D 、厚さ l_1 、開口幅 s の縦スリット壁があり、 $x=l_1+l_2$ に不透過壁があるものとする。そして z 軸を静水面上上向きにとり、水底面は $x \leq 0$ で $z=-h$ 、 $x \geq 0$ で $z=-qh$ とする。したがって、 $x=0$ において、

$-h \leq z \leq -qh$ の範囲は不透過壁、 $z \geq -qh$ が透過壁である。また、透過壁の開口比を次の式で定義する。

$$\varepsilon = s/(D+s) \dots \dots \dots (1)$$

さらに、理論的取り扱いをするうえで、透過壁の厚さは薄いものとし、 $x=0$ での不連続性の影響が $x < x_0 < x_+$ の範囲に限られ、しかも波長に比べてその範囲は非常に小さいものと仮定する。

このとき、 $x \leq x_-$ (領域 I) 及び $x_+ \leq x \leq l_1+l_2$ (領域 II) における速度ポテンシャル ϕ_I, ϕ_{II} を通常の減衰定常波のほか、Mei et al.¹⁾ が指摘しているように、非線型損失項によって生じる高次波成分も含めて一般的に表わしておく次のようになる。

$$\begin{aligned} \phi_I = & \frac{g}{\sigma_1} \frac{\cosh k_1(z+h)}{\cosh k_1 h} a_{I1} e^{-i(k_1 x - \sigma_1 t)} \\ & + \sum_m \frac{g}{\sigma_m} \frac{\cosh k_m(z+h)}{\cosh k_m h} a_{Rm} e^{i(k_m x + \sigma_m t)} \\ & + \sum_m \sum_j \frac{g}{\sigma_m} \frac{\cos k_{mj}(z+h)}{\cos k_{mj} h} a_{S_{mj}} e^{i(k_{mj} x + \sigma_m t)} \end{aligned} \dots \dots \dots (2)$$

$$\begin{aligned} \phi_{II} = & \sum_m \frac{g}{\sigma_m} \frac{\cosh k'_m(z+qh)}{\cosh k'_m qh} a_{Cm} \cos k'_m x \\ & - (l_1 - l_2) e^{i\sigma_m t} \\ & + \sum_m \sum_j \frac{g}{\sigma_m} \frac{\cos k'_{mj}(z+qh)}{\cos k'_{mj} qh} a_{H_{mj}} \cosh k'_{mj} x \\ & - (l_1 - l_2) e^{i\sigma_m t} \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

ここに

$$\sigma_m^2 = g k_m \tanh k_m h = -g k_{mj} \tan k_{mj} h \dots \dots (4)$$

$$\sigma_m^2 = g k'_m \tanh k'_m qh = -g k'_{mj} \tan k'_{mj} qh \dots (5)$$

$$\sigma_m = m \sigma_1, \quad m = 1, 2, 3, \dots \dots \dots (6)$$

であり、 a_{I1}, σ_1 は入射波の振幅及び角周波数、 t は時間である。また、 $a_{Rm}, a_{S_{mj}}, a_{Cm}, a_{H_{mj}}$ はそれぞれ領域 I における反射波及び減衰定常波、領域 II における定常波及び減衰定常波の複素振幅であり、未知数である。

さて、領域 I と II の接続条件であるが、 $x < x_0 < x_+$ の領域に対する連続方程式と運動量方程式から $kx_-, k'x_+$ が非常に小さいことを考慮して次の式を得る。

$$\left. \begin{aligned} u_-(x_-, z, t) &= u_+(x_+, z, t), \quad -gh \leq z \leq 0 \\ u_- &= 0, \quad -h \leq z \leq -qh \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部防波堤研究室長
** 工修 運輸省港湾技術研究所水工部防波堤研究室

$$p_- - p_+ = \frac{1}{\varepsilon^2} \frac{1}{2} \rho f u_+ |u_+| + \frac{1}{\varepsilon} \rho \delta \frac{\partial u_+}{\partial t} \quad \dots\dots(8)$$

ここに、 u , p はそれぞれ水粒子速度の x 方向成分及び圧力を表わし、添字 $-$ は $x=x_-$, $+$ は $x=x_+$ での値であることを示す。 ρ は流体の密度である。また、 f , δ は水粒子速度成分として狭作部の噴流速度を用いたときの損失係数及び有効慣性長²⁾であり、これらの値については実験により検討する。

以上、基本となる式を示したが、まえがきで述べたように減衰定常波に対する無限級数項、及び高次波成分の項を無視した近似式を展開する。その際厳密理論と同様に $\cosh k(z+h)$ あるいは $\cosh k'(z+qh)$ を接続条件の両辺に乗じて水深方向に積分する方法を用いる。また、非線形損失項に対しては一周期にわたる仕事量が等しくなるように係数を求めて時間項について線型化したかたちで扱う。ただし、振幅については自乗の項が残るので、楕口ほか³⁾はこれを擬非線形の扱いと呼んでいる。こうした扱いによって、噴流の運動エネルギーが渦の生成に使用され、すべて消失するとしたときのエネルギー保存の関係を保持した結果を得ることができる。最終結果のみを示すと以下のとおりである。

$$\gamma^2 K_0^4 + 2\alpha\gamma K_0^3 + (\alpha^2 + \beta^2) K_0^2 - 4 = 0 \quad \dots\dots(9)$$

$$K_R^2 = 1 - \alpha\gamma K_0^3 \quad \dots\dots(10)$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} K_R &= a_R/a_I \\ K_0 &= a_0/a_I \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(11)$$

$$\alpha = \frac{f(kh, k'qh)}{n_1} \sin k'l_2 \quad \dots\dots(12)$$

$$\beta = \frac{n_2}{f(kh, k'qh)} \left\{ \frac{k}{k'} \cos k'l_2 - \frac{k\delta}{\varepsilon} \sin k'l_2 \right\} \quad \dots\dots(13)$$

$$\gamma = \frac{1}{\varepsilon^2} \frac{4f}{3\pi} \frac{1}{f(kh, k'qh)} \frac{\sinh^2 k'qh + 3}{3 \sinh k'qh \cosh k'qh} \times k a_1 [\sin k'l_2] \sin k'l_2 \quad \dots\dots(14)$$

$$\left. \begin{aligned} f(kh, k'qh) &= \frac{kk'}{k'^2 - k^2} \frac{\sinh kh(1-q)}{\sinh kh \cosh k'qk} \\ &= n_1, \quad q=1 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(15)$$

$$\left. \begin{aligned} n_1 &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \\ n_2 &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2k'qh}{\sinh 2k'qh} \right) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(16)$$

以上の式において、 a_R , a_0 は前出の式(2), (3)の中の a_{Rm} , a_{cm} についての $m=1$ に対する項の振幅に相当し、それぞれ反射波及び $x=l_1+l_2$ での重複波の半振幅である。また、 k , k' は式(4), (5)で表わされる m

$=1$ のときの波数である。

式(9)は K_0 についての4次方程式であるが、唯一の正の実根をもつことが確認され、Eulerの方法あるいはFerrariの方法等によって解くことができる。 K_0 が求まれば式(10)によって反射率 K_R を求めることができる。

近似理論の解から反射率 K_R は次のような無次元パラメータの関数であることがわかる。

$$K_R = F\left(\frac{h}{L} \text{ or } \frac{qh}{L_2}, \frac{H_I}{L}, \frac{l_2}{L} \text{ or } \frac{l_2}{L_2}, q, \varepsilon, f, \frac{\delta}{L}\right) \quad \dots\dots(17)$$

ここに、 L , L_2 はそれぞれ水深 h , qh における波長、 H_I は入射波の波高である。

これらの要因のうち、 f 及び δ/L はさらに開口部の形状等の関数と考えられるから、消波ケーソンの反射率に及ぼす要因は多く、非常に複雑であることが予想される。

3. 実験の方法

実験は図-2に示す中型造波水路で行った。水深 h は60 cm の一定とし、構造及び波浪条件を以下の範囲で種

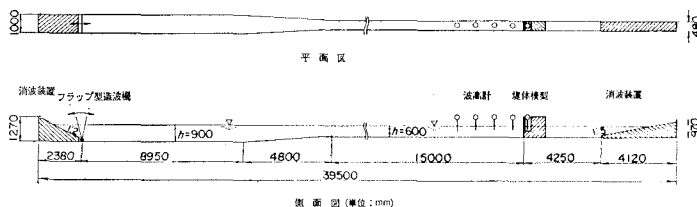


図-2 実験水路

々に変化させた。

$$l_1/D = 0.5 \sim 1.5 \quad \varepsilon = 0.14 \sim 0.40$$

$$q = 0.33 \sim 1.0 \quad l_2/h = 0.28 \sim 1.62$$

$$h/L = 0.0864 \sim 0.534 \quad H_I/L = 0.0091 \sim 0.062$$

ただし、縦スリットの部材幅 D は6 cm で一定である。

反射率は $L/16$ ごとに1ないし2波長の範囲で波高を測定し、Healyの方法で求め、有限振幅性の影響を補正した⁴⁾。

4. 実験及び計算結果

(1) f と δ の検討

損失係数及び有効慣性長あるいは見掛けオリフィス長さについてはこれまで、Richey and Sollitt⁵⁾, Mei et al.⁶⁾ 及び近藤・佐藤⁷⁾ 等による検討があるが、ここでは近似理論における未定係数として、実験結果に基づいてこれらの値を求めてみる。それには、反射率 K_R と遊水室不透過壁での重複波高比 K_0 を測定することによって、各

条件ごとの f と δ とを決定することが可能であるが、 K_R の値には理論で省略した無限級数項等の影響、さらには有限振幅性の影響が大きいことのため、 K_R の値のみによってこれを検討する。すなわち、 f と δ については適当な関数形を定め、その中での定数を反射率に関する実験データと近似理論による推定値との差の分散が最小となるように求める。したがって、基本となる関数形をどのように与えるかが、結果の適否を左右する重要な点となる。これについては既往の研究等をも参照し、以下のように考えた。

まず、損失係数 f についてであるが、この値には開口比 ε が最も影響すると考え、 ε だけの関数形で表す。図-3 の実験値は、 ε を変化させたときの結果から各周

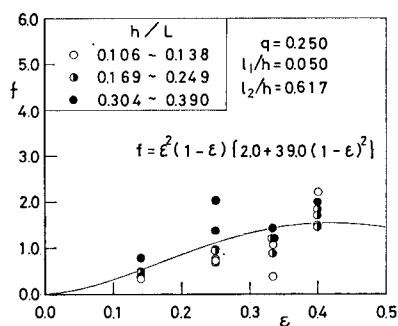


図-3 ε と f の関係

期条件ごとに最適の f と δ の値を求めて、そのうち f の値をプロットしたものである。結果はばらついているが、 $\varepsilon=0.4$ 程度までは ε が大きくなるにつれて f の値は大きくなる傾向が認められる。これと接続条件式の誘導において $f \propto \varepsilon^2(1-\varepsilon)C_D$ (C_D : 抗力係数、角柱に対し 2.0 を与える。) の関数が得られることを考慮して関数形を次のように定めた。

$$f = \varepsilon^2(1-\varepsilon) \{2.0 + A(1-\varepsilon)^2\} \quad \text{.....(18)}$$

一方、 δ については式 (17) では波長 L で割った無次元量で示しているが、これを δ/l_1 のかたちで無次元化し、その各種条件での最適値を l_2/L_2 に対してプロットしてみたのが図-4 である。結果は著しくばらついているが、 l_2/L_2 が大きくなるにつれて δ/l_1 は小さくなって 0

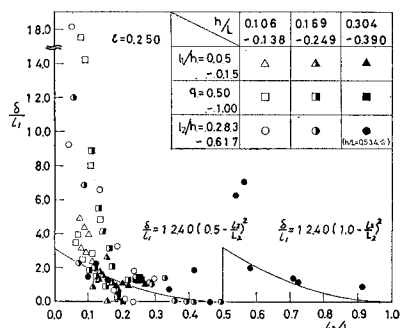


図-4 l_2/L_2 と δ/l_1 の関係

に近づき、0.5 を超すと再び大きくなってその変化を繰り返す傾向が認められる。そこで、 δ/l_1 について次の関数形を与える。

$$\frac{\delta}{l_1} = B \left(0.5 - \frac{l_2}{L_2} \right)^2 : 0 \leq \frac{l_2}{L_2} < 0.5 \quad \text{.....(19)}$$

ただし、 $l_2/L_2 > 0.5$ では、式 (19) が繰り返すものとする。

以上の式 (18), (19) 中の定数 A, B の最適値を $l_2/L_2 = 0, 0.5, 1.0$ の近傍を除く全データに対して求めると $A=39.0$ $B=12.4$

となる。前出の図-3, 4 にはこれを用いたときの f と δ/l_1 の値を曲線で示しておいた。特に図-4 の $l_2/L_2=0 \sim 0.15$ 付近で非常に大きい実験値があるが、このような条件では δ/l_1 を相当小さく与えても K_R の計算値はそれほど変化しない。

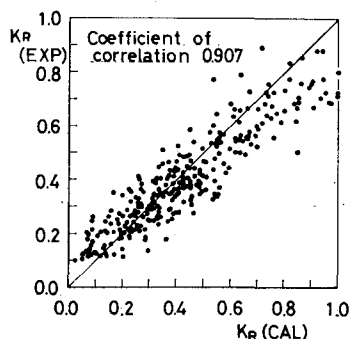


図-5 理論と実験による反射率の相関

図-5 は全ケースについて、以上のように決定した f と δ を用いて近似理論により計算した反射率 $K_R(\text{CAL})$ と実験値 $K_R(\text{EXP})$ の相関を示したものである。この時の相関係数は 0.907 である。また計算値と実験値の差の標準偏差は 0.10 であり、全データの 70% は次の範囲に納まっている。

$$K_R(\text{EXP}) = K_R(\text{CAL}) \pm 0.10 \quad \text{.....(20)}$$

以下、各種要因ごとに計算と実験による反射率の変化を述べる。

(2) 波浪条件による反射率の変化

図-6 は $\varepsilon=0.25$, $q=0.5$, $l_1/h=0.05$, $l_2/h=0.617$ の条件で、4 種の周期に対し波高を変化させたときの反射率を示したものである。計算、実験ともに極小の反射

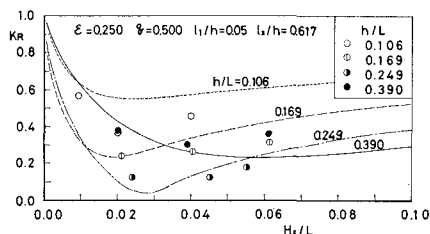


図-6 波高による反射率の変化

率を持つ変化が認められ、波高が大きくなるにつれて反射率は小さくなったり、大きくなったりするようである。しかし、 $h/L=0.106$ のデータを除いて計算値の変化の方がやや大きく、実験値は波高によってそれ程変化しないことがわかる。 $h/L=0.106$ のときの計算と実験の差はやや大きい。

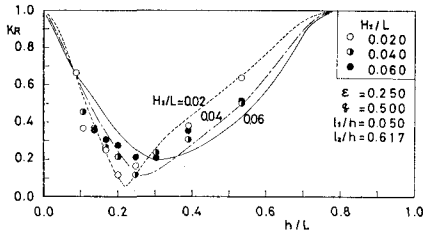


図-7 周期による反射率の変化

図-7は図-6と同条件での周期による反射率の変化を示したものである。ただし、波高は波形勾配 H_1/L が 0.02, 0.04, 0.06 となるように周期によって変化させており、実験値は波高による反射率の変化から推定している。この場合、周期によって h/L が変化するとともに l_2/L が変化するので、反射率の変化は大きい。計算及び実験ともに極小反射率を持つ変化を示し、波形勾配が大きくなるにつれて極小条件での周期は短くなり、反射率は大きくなる傾向を示す。計算と実験値を比較すると $H_1/L=0.02$ の条件ではよく合っているが、0.06 の条件ではやや差が大きい。

(3) 構造条件による反射率の変化

遊水室幅を変化させたときの K_R と K_O の変化を図-8に示す。 $\epsilon=0.25$, $q=0.5$, $l_1/h=0.05$, $H_1/L=0.04$ の条件での結果であるが、 $l_2/h=0.617$ の条件ではスリット壁厚を変化させたときの実験値も示している。

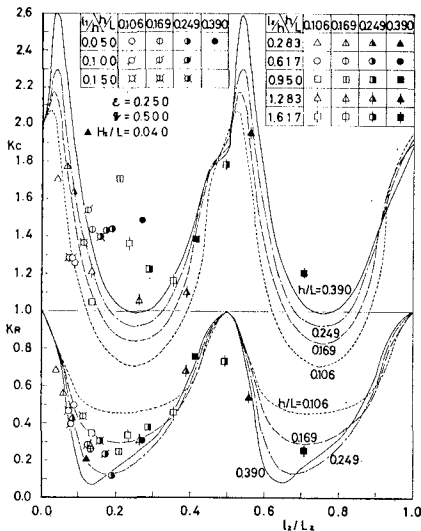


図-8 遊水室幅の影響 (1)

計算では特に極小反射率の付近で h/L による変化が大きく、 h/L が小さくなるほど極小反射率が大きくなって、その時の l_2/L_2 の値も大きくなる。一方、実験値ではその傾向は認められるものの計算値ほどの違いはなく、 h/L よりも l_2/L_2 の影響が大であることがわかる。 K_O の実験値は遊水室内数点で波高を測定し、その分布から不透過壁面位置での値を推定して求めたものであるが、計算値と差の大きいデータも多い。

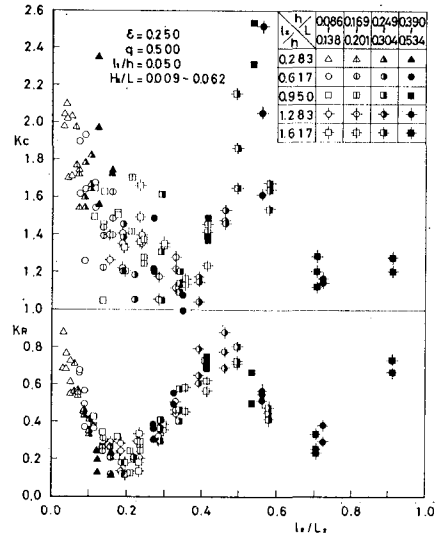


図-9 遊水室幅の影響 (2)

図-9は $\epsilon=0.25$, $q=0.5$, $l_1/h=0.05$ の条件で l_2 を変えた全ての実験データを示したものである。 K_R は $l_2/L_2=0.2$ 前後で、 K_O は 0.3 前後でそれぞれ極小となり、 $l_2/L_2=0$ 及び 0.5 付近ではともに大きな値となることが認められる。特に、 K_O は l_2/L_2 が 0 あるいは 0.5 よりやや大きいとき 2.0 を超すような値となることがあり、前出の図-8の計算の傾向と一致している。

$q=0.5$, $l_1/h=0.05$, $l_2/h=0.617$, $H_1/L=0.04$ の条件で、開口比 ϵ を変化させたときの反射率を図-10に示す。 $\epsilon=0$ 及び 1.0 では計算による反射率は 1.0 となり、その間で極小値を持つような変化を示す。特に $h/L=0.249$ ($l_2/L_2=0.189$) のように最適遊水室幅に近い条件では ϵ による反射率の変化が大きく、それからはずれるにつれて極小反射率がやや大きくなるため、変化は緩

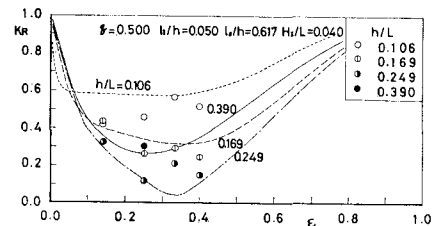


図-10 開口比の影響

やかとなる。 $h/L=0.249$ の場合、計算による最適開口比は 0.33 程度である。一方、実験値はややばらついており、特に $\varepsilon=0.33$ の条件で全体的に反射率が高くなっている。概して、 $q=0.5$ の場合 $\varepsilon=0.2\sim 0.4$ の範囲であれば反射率はそれほど大きく変化しないといえる。ただし、 $h/L=0.106$ の条件では実験値によると $\varepsilon=0.14$ と開口比を相当小さくした方が反射率は小さくなっている。

開口比は前出の式 (1) のように、透過壁の部分だけで定義しているので、最適開口比は q によって変化する。

図-11 は計算だけであるが、これを示したもので、 $h/L=0.249$ 、 $H_1/L=0.04$ の例である。 $q=1.0$ の場合の最適開口比は 0.20 と、 $q=0.5$ の場合より小さくなっている。

図-12 は $\varepsilon=0.25$ として q を変化させたときの反射

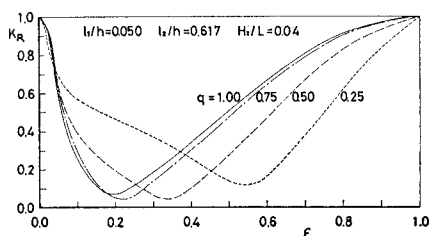


図-11 開口比と遊水室水深の影響

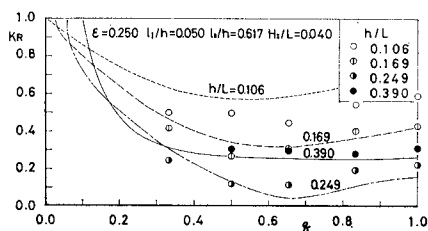


図-12 遊水室水深の影響

率を示したものである。一般に q が大きくなるにつれて反射率が減少するが、 $q=0.5\sim 0.7$ を境いに逆にやや増大する。 $h/L=0.249$ については、計算では $q=0.65$ で極小となり、実験では変化がやや緩やかとなるが、 $q=0.6$ 程度のとき極小となっている。

5. 結 論

- (1) 反射率に影響する構造諸元のうち主要なものは、遊水室の幅と透過壁の開口比及びその深さである。開口比については $q=1.0$ のときには 0.15~0.25 程度がよい。 q が小さく、すなわち透過壁下部の不透過部分が増すにつれて開口比はやや大きくなり、 $q=0.5$ のときには 0.25~0.40 がよい。
- (2) 遊水室の幅については、波形勾配等によって若干異なるが、遊水室内の波長に対する遊水室幅の比 l_2/L_2 が 0.2 程度のとき反射率が極小となる。
- (3) 透過壁下部に $q=0.50\sim 0.75$ 程度となるように不透過壁を設けることも効果的である。

参 考 文 献

- 1) Mei, C. C., P. L. F. Liu and A. T. Ippen: Quadratic loss and scattering of long waves, Proc. ASCE, Vol. 100, WW3, pp. 217~239, 1974.
- 2) Richey, E. P. and C. K. Sollitt: Wave attenuation by porous walled breakwater, Proc. ASCE, Vol. 96, WW3, pp. 643~663, 1970.
- 3) 堀口孝男・中道峰夫: 多孔壁式防波堤の消波機構と波力, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 89~94, 1976.
- 4) Goda, Y. and Y. Abe: Apparent coefficient of partial reflection of finite amplitude waves, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 7, No. 3, 58 p., 1968.
- 5) 前出 2)。
- 6) 前出 1)。
- 7) 近藤俊郎・佐藤隆一: 多孔壁の損失係数と見掛けオリフィス長さの推定, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 333~337, 1979.