

多孔壁式防波堤の水理特性

服 部 昌 太 郎*

1. ま え が き

透過性防波堤は、堤体に働く波力を減少させ堤体の軽構造化を図るため、防波堤背後の遮へい水域内に減勢された波高の小さい波の透過を許容する形式の防波堤である。したがって、このような形式の防波堤では、その水理特性を十分解明しておく必要があり、従来より各種形式の透過性防波堤の水理特性に関する研究が行なわれている。筆者も、透過性防波堤の一形式である透過性鋼管防波堤水理特性に対して、理論的・実験的研究を行なっている^{1), 2), 3)}。

Jarlan は、前面が多孔直立壁、後面が不透過壁よりなる多孔式防波堤 (perforated breakwater) を提案し、その水理的機能について理論的研究を行ない⁴⁾、Marks は多孔式防波堤の設計基準をうるため模型実験を行なっている^{5), 6)}。この他に、多孔式防波堤の水理特性に関する研究は、Terrett ら⁷⁾ と Richey ら⁸⁾のものがある。

多孔式防波堤の消波効果にとって、防波堤前面に使用する多孔壁は重要な機能を有している。Marks と Jarlan は、多孔壁の消波効果は壁厚と孔径との比と壁体の開孔部と不透過部との面積比とに關係することを指摘している⁹⁾。そこで、透過性防波堤体の基本的モデルの一つとして、直立壁面に一様に孔をあけた多孔壁体を考え、この多孔壁体が単体として一様水深の海中に設置された場合の水理特性を解明することを目的として本研究を行なった。

本研究では、多孔壁の水理特性を表わす量として、多孔壁における透過波および反射波の波高と入射波の波高との比で定義される多孔壁体の透過率と反射率とに着目して、多孔壁の水理特性に関する理論的研究を行ない、理論の妥当性を模型実験によって検討した。

2. 多孔壁の水理特性に関する理論

一様水深の海中に設置された多孔壁付近の波は微小振幅浅水波であると仮定し、図-1 に示すように多孔壁に波が直角に入射する、2次元の場合について理論計算を行なう。

入射波、反射波、透過波の速度ポテンシャルと波形は、それぞれ次のように与えられる。

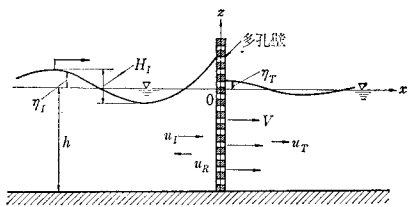


図-1 座 標 系 と 記 号

$$\left. \begin{aligned} \phi_I &= \frac{a_I g}{\sigma_I} \frac{\cosh k_I(h+z)}{\cosh k_I h} \cos(\sigma_I t - k_I x) \\ \phi_R &= \frac{a_R g}{\sigma_R} \frac{\cosh k_R(h+z)}{\cosh k_R h} \cos(\sigma_R t + k_R x) \\ \phi_T &= \frac{a_T g}{\sigma_T} \frac{\cosh k_T(h+z)}{\cosh k_T h} \cos(\sigma_T t - k_T x) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

および、

$$\left. \begin{aligned} \eta_I &= a_I \sin(\sigma_I t - k_I t) \\ \eta_R &= a_R \sin(\sigma_R t + k_R t) \\ \eta_T &= a_T \sin(\sigma_T t - k_T t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 ϕ : 速度ポテンシャル、 η : 自由水面の静水面からの変位、 a : 波の振幅、 $k=2\pi/L$ 、 $\sigma=2\pi/T$ 、 L : 波長、 T : 周期、 h : 水深、 t : 時間、 g : 重力の加速度、添字、 I, R, T : 入射波、反射波、透過波に関する量であることを示す添字である。

多孔壁にかけられる孔は、壁面全面に均一にかけられていると仮定し、多孔壁の開孔比 ε を次のように定義する。

$$\varepsilon = A_p / (A_s + A_p) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 A_p と A_s はそれぞれ図-2 に示されるような、

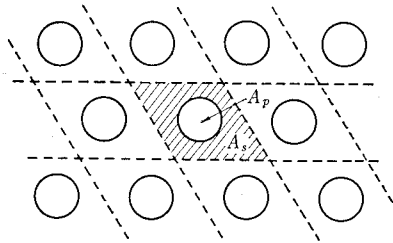


図-2 多孔壁開孔部の配置

多孔壁開孔部と不透過部の表面積である。
多孔壁前後面での、流体に関する連続方程式は、
$$(A_s + A_p)(U_I + U_R) = C A_p V$$
$$= (A_s + A_p) U_T \dots\dots\dots (4)$$

*正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

ここに、 U : 波動により生ずる流速の水平方向成分の水深に関する平均で、

$$U = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 u dz = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 \frac{\partial \phi}{\partial x} dz \dots\dots\dots (5)$$

V : 多孔壁開孔部よりの流出噴流の流速、 C : 孔の流量係数。

多孔壁開孔部より流出する噴流の流速は、ベルヌーイの式より次のように計算される。

$$\frac{V^2}{2g} = \eta_I + \eta_R - \frac{\beta}{g} \left[\frac{\partial \Phi_I}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_R}{\partial t} \right] + \frac{\alpha}{2g} (U_I + U_R)^2 - \frac{p}{w_0} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 Φ : 水深方向に平均した速度ポテンシャル、 p : 噴流の縮流断面に働く圧力、 w_0 : 水の単位重量、 α と $\beta^{(10)}$ はそれぞれ流速と $\partial \phi / \partial t$ の平均値を使用するための補正係数で、

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{h} \int_{-h}^0 \frac{u^3}{U^3} dz \\ \beta &= \frac{1}{h} \int_{-h}^0 \frac{\frac{\partial \phi}{\partial t} u}{\frac{\partial \phi}{\partial t} U} dz \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

多孔壁開孔部より流出する噴流の縮流断面に働く圧力 p は、図-3の破線で示される支配断面に、運動量方程

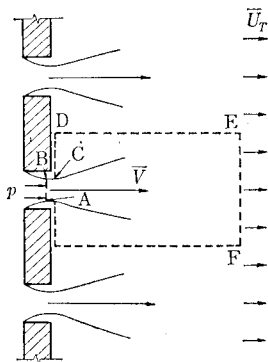


図-3 運動量方程式を適用する支配断面

式を適用することにより計算する。波動の半周期間に、図-3に示される支配断面を通過する、水平方向の単位時間当りの運動量は、

$$\rho C A_p \bar{V}^2 - \rho (A_s + A_p) \bar{U}_T^2 = \rho (A_s + A_p) \left(\frac{1}{C \epsilon} - 1 \right) \bar{U}_T^2 \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 ρ : 水の密度、 $\bar{}$ は波動の半周期間の時間平均を表わす。

図-3中の AB と CD には平均圧力 $\bar{p}$ が作用し、 EF 部分には透過波によって誘起される平均圧力 $(\rho g \bar{\eta}_T - \rho \beta \partial \Phi_T / \partial t)$ が作用すると考えると、運動量方程式は次のように表わされる。

$$\rho (A_s + A_p) \left(\frac{1}{C \epsilon} - 1 \right) \bar{U}_T^2 = (A_s + A_p) \left\{ \bar{p} - \left(\rho g \bar{\eta}_T - \rho \beta \frac{\partial \Phi_T}{\partial t} \right) \right\} \dots\dots (9)$$

式(6)を波動の半周期間にわたって積分し、式(4)の關係を用いて書き直すと、

$$\frac{\bar{p}}{w_0} = \bar{\eta}_I + \bar{\eta}_R - \frac{\beta}{g} \left[\frac{\partial \Phi_I}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_R}{\partial t} \right] + \frac{1}{2g} \left[\alpha - \frac{1}{(C \epsilon)^2} \right] (\bar{U}_I + \bar{U}_R)^2 \dots\dots (10)$$

式(9)と(10)とより、

$$\bar{\eta}_I + \bar{\eta}_R - \bar{\eta}_T - \frac{\beta}{g} \left[\frac{\partial \Phi_I}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_R}{\partial t} - \frac{\partial \Phi_T}{\partial t} \right] - \frac{1}{2g} \frac{\pi^2}{8} \left[\left\{ \frac{1}{(C \epsilon)^2} - \alpha \right\} + 2 \left(\frac{1}{C \epsilon} - 1 \right) \right] \bar{U}_T^2 = 0 \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 $\bar{U}^2 / \bar{U}_T^2 = 8 / \pi^2$ の關係を使用している。

多孔壁の反射率と透過率を、次のように定義する。

$$r_R = H_R / H_I = a_R / a_I \dots\dots\dots (12)$$

$$r_T = H_T / H_I = a_T / a_I \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 H : 波高

いま、 $k_I = k_R = k_T \equiv k$, $\sigma_I = \sigma_R = \sigma_T \equiv \sigma$ と仮定すると、式(4)と(12)とより次の關係をうる。

$$r_R + r_T = 1 \dots\dots\dots (14)$$

式(11)は、式(1)と(2)および式(12)~(14)を用いると、多孔壁の透過率を与える式(15)に書直される。

$$\frac{\theta}{4\pi} \left(\frac{H_I}{h} \right) \frac{\tanh kh}{kh} r_T^2 + (r_T - 1) \left(1 + \beta \frac{\tanh kh}{kh} \right) = 0 \dots\dots\dots (15)$$

ここに、

$$\theta = \frac{\pi^2}{8} \left[\left\{ \frac{1}{(C \epsilon)^2} - \alpha \right\} - 2 \left(\frac{1}{C \epsilon} - 1 \right) \right] \dots\dots (16)$$

式(15)と(14)とより、多孔壁の透過率と反射率とを計算すると、

$$r_T = \frac{2\pi}{\theta} \frac{h}{H_I} \left(\beta + \frac{kh}{\tanh kh} \right) \times \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{\theta}{\pi} \frac{H_I}{h} \frac{1}{(\beta + kh/\tanh kh)}} \right] \dots\dots\dots (17)$$

$$r_R = 1 - r_T \dots\dots\dots (18)$$

をうる。式(17)中の α と β は、式(1)より次のように計算される。

$$\alpha = \left(\frac{kh}{\sinh kh} \right)^2 \left(1 + \frac{\sinh^2 kh}{3} \right) \dots\dots\dots (19)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \frac{kh}{\tanh kh} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \dots\dots\dots (20)$$

多孔壁開孔部より流出する噴流の平均流速 $\bar{V}$ は、式(4)と(6)とより計算される。

$$\bar{V} = \frac{1}{C \epsilon} \sqrt{\frac{4 g r_R H_I}{\pi \theta} \left(1 + \beta \frac{\tanh kh}{kh} \right)} \dots\dots (21)$$

多孔壁によって損失するエネルギーは、多孔壁開孔部より流出する噴流の拡がりによるエネルギー損失が支配的であると考えられる。そこで、多孔壁によるエネルギー損失は、多孔壁開孔部より流出する流速の速度水頭に比例すると仮定して計算を行なう。

多孔壁面にあけられた孔は、均一に分布しているとの仮定から、静水面下にある多孔壁単位長さ当りの孔の数は、

$$N/B = \epsilon h/A_p$$

ここに、 N ：多孔壁表面積 $B \times h$ にあけられた孔の数。入射波の半周期間に、多孔壁の孔 1 個当りで損失するエネルギーを多孔壁開孔部よりの噴流の平均流速で表わすと、

$$f \left(w_0 C A_p \bar{V} \times \frac{T}{2} \right) \frac{\bar{V}^2}{2g} \dots\dots\dots (23)$$

ここに、 f ：多孔壁開孔部のエネルギー損失係数。

入射波の半周期間に多孔壁単位長さ当りで生ずるエネルギー損失 E_{loss} は、式 (22) と (23) とより、

$$E_{\text{loss}} = f C \epsilon \frac{w_0 h T}{2} \frac{\bar{V}^3}{2g} \dots\dots\dots (24)$$

となる。多孔壁への入射波の、単位幅、半波長当りの波エネルギー E_I は、 $E_I = w_0 a_I^2 L/4$ で与えられるから、 E_{loss}/E_I は、

$$\frac{E_{\text{loss}}}{E_I} = f C \epsilon \frac{8kh}{H_I^2 g} \frac{\bar{V}^3}{2g} \dots\dots\dots (25)$$

式 (21) を (25) に代入すると、多孔壁でのエネルギー損失を与える式 (26) をうる。

$$\frac{E_{\text{loss}}}{E_I} = \frac{32f}{(C\epsilon)^2} \left[\frac{h}{H_I} \frac{kh}{\tanh kh} \right]^{1/2} \times \left[\frac{r_R}{\pi\theta} \left(1 + \beta \frac{\tanh kh}{kh} \right) \right]^{3/2} \dots\dots\dots (26)$$

一方、多孔壁前後面でのエネルギーの連続条件は、

$$E_I = E_R + E_T + E_{\text{loss}} \dots\dots\dots (27)$$

したがって、式 (12) と (13) を使用すると、

$$E_{\text{loss}}/E_I = 1 - r_R^2 - r_T^2 \dots\dots\dots (28)$$

式 (14) の関係を用い、式 (26) と (28) とより多孔壁のエネルギー損失係数を与える式 (29) をうる。

$$f = \frac{(C\epsilon)^2 r_T}{16} \cdot \left(\frac{H_I}{r_R h} \frac{\tanh kh}{kh} \right)^{1/2} \times \left[\frac{\pi\theta}{1 + \beta(\tanh kh/kh)} \right]^{3/2} \dots\dots\dots (29)$$

以上の理論計算によって、多孔壁の透過率、反射率、多孔壁開孔部からの噴流流速、エネルギー損失係数を与える解をえた。理論式中の多孔壁開孔部の流量係数は、開孔部の幾何学的形状、 Re 数に關係するものと考えられ、実験によって検討する必要がある。

3. 実験装置と実験方法

前節でえた理論結果の妥当性、多孔壁開孔部の幾何学

的形状と流量係数およびエネルギー損失係数との関係などを検討するため、2次元波動水槽による模型実験を行なった。

実験は、長さ 30 m、幅 0.80 m、高さ 0.70 m の 2次元波動水槽内に、厚さ 20 mm の塩化ビニール板を用いた多孔壁模型を設置して行なった。図-4 は、実験装置の一般的配置を、また表-1 は実験に使用した 3 種類の

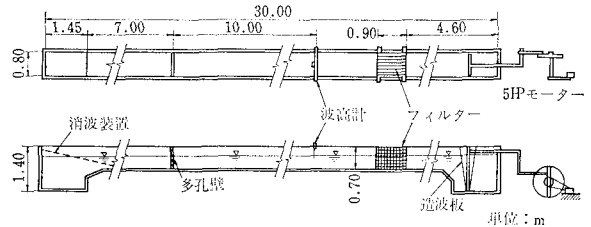


図-4 実験装置の一般的配置

表-1 実験に使用した模型多孔壁の形式特性

多孔壁	開孔比 ϵ	孔径 $d(\text{mm})$	壁厚・孔径比 b/d
I	0.250	10	2.0
II	0.125	40	0.5
III	0.0625	20	1.0

多孔壁の形状特性を示したものである。

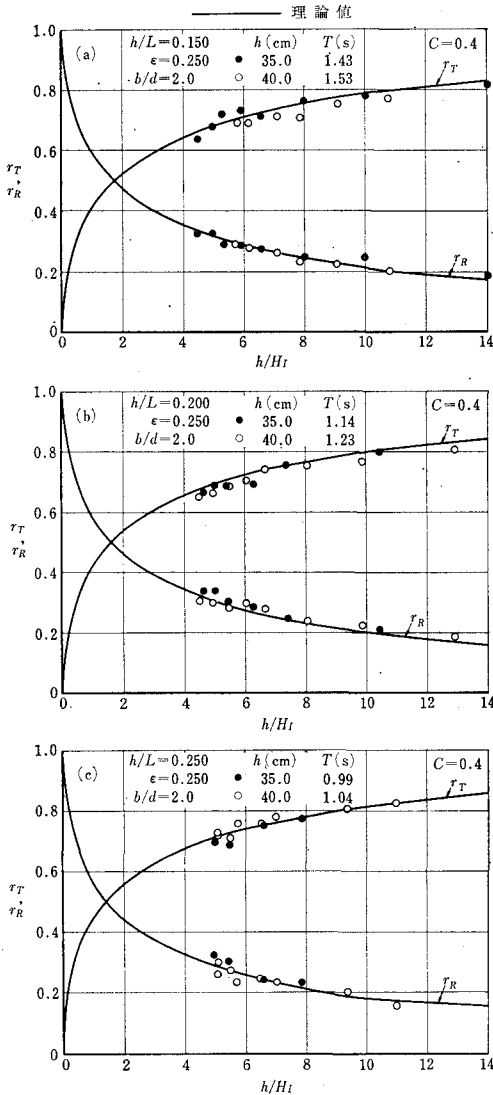
入射波と透過波の波高は、多孔壁の前方 10 m と後方 1 m の 2 個地点に設置した電気抵抗式波高計により検出し、ペン書きオシログラフによって記録する。多孔壁の反射率は、波高計を多孔壁前面約 2.5 m の区間を移動して、多孔壁前面に発生する部分重複波の波高分布を記録し、Healy の方法⁹⁾によって計算した。

4. 実験結果

多孔壁の透過率と反射率に関する実験結果と理論結果との比較を行なったものが、図-5~7 に示される。図-5~7 中に示される理論結果は、多孔壁開孔部の流量係数が各実験条件に対して一定であるとして、式 (17) と (18) とより計算したものである。理論値の計算に使用した多孔壁開孔部の流量係数は、実験結果に最もよく一致するように決定され、それらの値は一括して表-2 に示される。図-5~7 に見られるように、理論と実験との一致は非常に良好であり、本研究の理論の妥当性が確かめられた。

多孔壁開孔部の流量係数は、多孔壁の水理特性に対して重要な効果をおよぼす。表-2 に見られるように、多孔壁開孔部の流量係数は開孔比と壁厚・孔径比に關係するが、また開孔部よりの噴流流速に関する Re 数 ($\bar{V}d/\nu$) にも關係するものと考えられる。

図-8 は、管路に挿入したオリフィス板の流量係数と

図-5 透過率と反射率 ($\epsilon=0.250$ の場合)

Re 数との関係を示したものである¹⁰⁾。図中の d/D は、オリフィス口径と管径との比で、 $(d/D)^2$ は本研究で定義した開孔比 ϵ に相当する。図-8 に見られるように、オリフィスの流量係数は Re 数と d/D に関係し、 $Re > 10^4$ では d/D の値ごとにほぼ一定となっている。

多孔壁開孔部からの噴出水流の流速は周期的に変動することから、各瞬間での開孔部の流量係数は図-8 のように変化するものと考えられる。したがって多孔壁開孔部の流量係数は、開孔比の値によって $Re > 10^4$ での流量係数の値より若干増減することは、図-8 の関係から説明しうる。

図-9 は多孔壁のエネルギー損失係数と Re 数との関係を示した実験結果である。多孔壁のエネルギー損失係数と開孔部よりの噴出水流の平均流速は、図-5~7 に

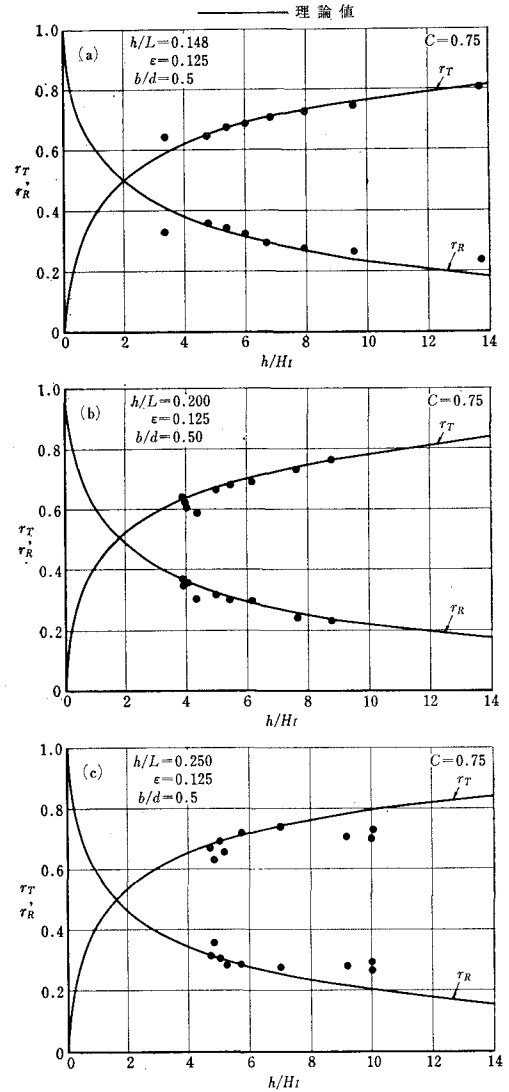
図-6 透過率と反射率 ($\epsilon=0.125$ の場合)

表-2 実験より定められた多孔壁開孔部の流量係数

開孔比 ϵ	壁厚・口径比 b/d	流量係数 C	レイノルズ数の範囲 $Re = \bar{V}d/\nu$
0.250	2.0	0.4	$(3 \sim 8) \times 10^3$
0.125	0.5	0.75	$(14 \sim 33) \times 10^3$
0.0625	1.0	0.6	$(8 \sim 20) \times 10^3$

示される透過率と反射率の実験結果を用いて、式 (29) と (21) とよりそれぞれ計算した。図-9 中の実線は、各実験条件に対する多孔壁のエネルギー損失係数の理論値で、式 (17), (18), (19) より計算した。実験値は図-9 に示されるように多少のばらつきはあるが、理論値と同様にほぼ一定であり、両者の一致の程度は比較的良好である。

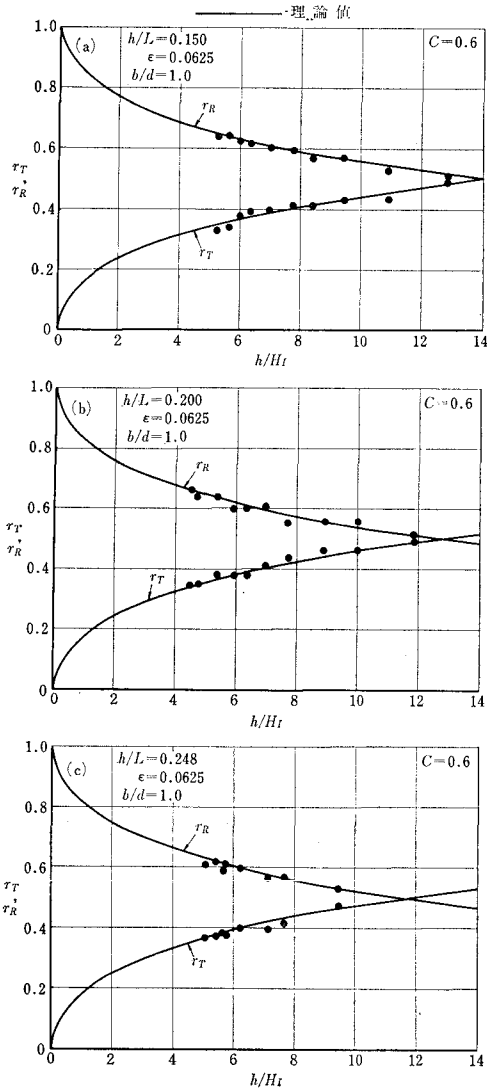


図-7 透過率と反射率 ($\epsilon=0.0625$ の場合)

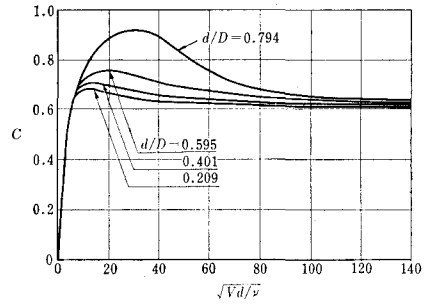


図-8 オリフィスの流量係数と Re 数との関係

5. 結 論

透過性防波堤の基本的なモデルの一つとして、直立壁表面に孔を一樣にあけた多孔壁の水理特性について理論計算を行ない、実験によって理論の妥当性を確かめた。

本研究では多孔壁の水理特性を表わす量として、多孔壁の透過率および反射率に着目して理論式 (17) と (18) をえた。また多孔壁開口部より流出する噴流の平均流速は式 (21)、エネルギー損失係数は式 (29) で与えられる。

理論と実験とは、図-5~7 と図-9 に示されるように、多孔壁の透過率、反射率、エネルギー損失係数に対して良好な一致を示しており、本研究での理論の妥当性が確かめられた。

多孔壁開口部の流量係数は、多孔壁の水理特性に対して重要な因子である。実験結果によると、多孔壁開口部の流量係数は多孔壁の開口比と壁厚・孔径比に関係し、Marks らが指摘したと同様の結果をえた。

透過性構造物の水理特性に関する模型実験では、構造物透過部の流量係数と構造物のエネルギー損失係数を、実物と模型との間で同等のものとする必要がある。本研究では、透過性構造物としては形式の単純な多孔壁を対象としたが、透過性構造物の模型実験においては Re 数の範囲だけでなく、構造物の間げき比 (開口比) と間げ

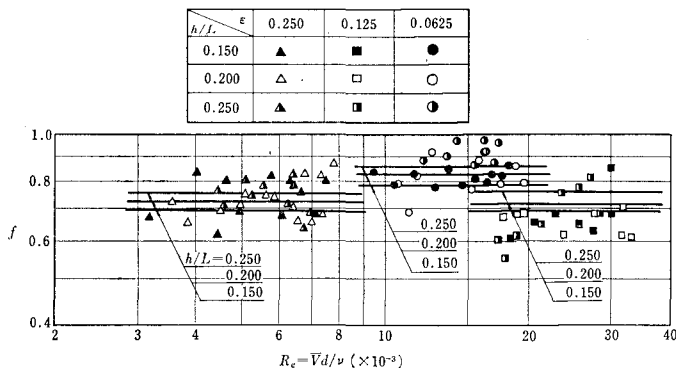


図-9 多孔壁のエネルギー損失係数と Re 数との関係

きの形状にも流量係数は影響されることを、十分考慮する必要があることが明らかとなった。

終りに、本研究を行なうにあたり有益なご助言を賜った、中央大学 林 泰造教授に感謝の意を表する。また、本研究に熱心に協力された岩崎安夫君、実験を行なった当時の中央大学学生 田中芳男(久保田建設)、坂本洋二(三井共同コンサルタント)、新井義充(三井港湾)の3君に謝意を表する。本研究の一部は、昭和45・46年度文部省特定研究「海岸災害の防止対策に関する研究」(研究代表者 北海道大学 尾崎 晃教授)によって行なったことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 林 泰造・服部昌太郎・白井増次郎：透過性鋼管防波堤の水理，土木学会第13回海岸工学講演会講演集，昭和41年，pp. 97~101.
- 2) 林 泰造・服部昌太郎・白井増次郎：透過性鋼管防波堤と底質の移動について，土木学会第14回海岸工学講演会講演集，昭和42年，pp. 173~198.
- 3) 林 泰造・服部昌太郎：透過性鋼管防波堤とその基部洗掘，土木学会第15回海岸工学講演会講演集，昭和43年，pp. 292~296.

- 4) Jarlan, G.E. : A perforated vertical wall breakwater, The Dock and Harbour Authority, No. 4, 1961, pp. 394~398.
- 5) Marks, W. : A perforated mobile breakwater for fixed and floating application, Proc. of 10th Conf. on Coastal Engineering, Chapter 64, 1966, pp. 1079~1129.
- 6) Marks, W. and G.E. Jarlan : Experimental studies on a fixed perforated breakwater, Proc. of 11th Conf. on Coastal Engineering, Chapter 71, 1968, pp. 1121~1140.
- 7) Terrett, F.L., J.D.C. Osorio, and G.H. Lean : Model studies of a perforated breakwater, Proc. of 11th Conf. on Coastal Engineering, Chapter 70, 1968, pp. 1104~1120.
- 8) Richey, E.P. and C.K. Sollitt : Wave attenuation by porous walled breakwater, Proc. ASCE, Vol. 96, WW 3, 1970, pp. 643~663.
- 9) 前出 6) と同じ
- 10) Jaeger, Ch. : Engineering Fluid Mechanics, Blackie & Son Lit., London, 1957, pp. 82~83.
- 11) Healy, J.J. : Wave damping effect of beach, Proc. of Minnesota International Hydraulic Convention, IAHR, 1953, pp. 213~220.
- 12) Rouse, H. : Fluid Mechanics for Hydraulic Engineer, McGraw-Hill, 1938, p. 260.