

透過壁体の流体抵抗と直立消波防波堤への適用

井 島 武 士*・奥 蘭 英 明**

1. はし が き

著者らは先に透過性防波堤の水理特性に関し、堤体内部の流体運動に対する抵抗が流速に比例すると仮定して理論解析を行い(1971)、この結果を実験値と比較して抵抗係数を推定した。これらの問題については類似の研究が行われているが(たとえば、首藤(1969)、尾崎(1971)、Madsen(1974))、理論計算に常に関連する抵抗係数については未だ不明確な点が多く、また非定常な波運動に関連する付加質量係数に関してはほとんど知られていない。本研究ではまず抵抗係数について検討するために、従来行われてきたような透過性の物体に流れを作用させるのではなく、静水中で透過壁体を一定速度で移動させ、それに作用する流体抵抗力を測定し、流れの二乗に比例する抵抗係数を求めた。

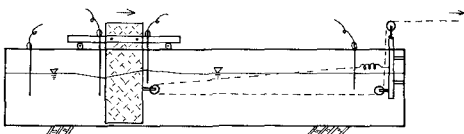
次に、この抵抗係数を用いて線型化を行い、先の計算方法(1971)¹⁾により透過性防波堤への適用を試み、さらに反射率・通過率・全水平力の実験による検証を行った。

2. 透過壁体の流体抵抗

(1) 実験装置および方法

実験は幅 80cm、長さ 22m、高さ 80cm の水路で水深を 50cm とし、図一1 のように水路方向に水平に走る台車に水路幅一杯の透過壁体を固定し、それを無段変速機に取り付けたドラムにワイヤを巻き取ることにより一定速度で移動させた。

ワイヤの他端は壁体に取り付けた滑車を介し、モーター付近に固定したスプリングバランスに取り付け、透過壁体の全抵抗力を読み取った。



図一1 流体抵抗測定の実験装置

表一1 使用壁体

	孔 径 d (cm)	壁 厚 L (cm)	空 隙 率 ϵ	抵抗係数 β
パイプ・ウォール	5.0	22.5	0.394	2.3551
	5.0	46.8	0.394	3.0951
	8.2	22.2	0.400	2.1845
	8.2	46.3	0.400	2.8328
一樣透過壁体		25.0	0.510	22.9156
		50.0	0.510	41.7245

使用壁体は表一1 に示すとおりで、発泡スチロール板に水平孔をあけた「pipe wall」と直径 8.2cm、高さ 4.8cm の円柱状の発泡スチロールを金網籠に詰めた「一樣透過壁体」を用いた。

また、壁体前後面と水路両端の水位を抵抗線式水位計で測定し、水位計とスプリングバランスが定常な値を示す水路中央部 2m を測定区間とした。

(2) 計 算 式

本文で用いる諸数値を表一2 のように表わす。流体抵抗が壁体内流速の二乗に比例すると仮定し、抵抗係数を

表一2

B ; 水路幅 (=0.80 m)	[L]
d ; 水平孔の直径	[L]
F_0 ; 流体抵抗力	[MLT ⁻²]
F_* ; 単位面積当りの流体抵抗力	[ML ⁻¹ T ⁻²]
f ; 抵抗係数	
g ; 重力加速度 (=9.796 m/s ²)	[LT ⁻²]
h_0 ; 水路の水深 (=0.50 m)	[L]
h_1, h_2 ; 壁体前面および後面での水深	[L]
h_* ; 平均水深 (= ($h_1 + h_2$)/2)	[L]
Δh ; 水位差 (= $h_1 - h_2$)	[L]
h_f ; 損失水頭	[L]
L ; 壁体の厚さ	[L]
Q ; 流量	[L ³ T ⁻¹]
Re ; Reynolds 数	
R ; 径深	[L]
U_{err} ; 壁体内部の平均流速	[LT ⁻¹]
v_0 ; 壁体の移動速度	[LT ⁻¹]
v_1, v_2 ; 壁体前面および後面での流速	[LT ⁻¹]
w_0 ; 単位体積当りの水の重量	[ML ⁻² T ⁻²]
β ; 抵抗係数	
ϵ ; 空隙率	
ν ; 動粘性係数 (= 1.4×10^{-6} m ² /s, 約 8°C)	[L ² T ⁻¹]
ρ ; 流体密度	[ML ⁻³]
ϕ ; 物体に働く力	[MLT ⁻²]

* 正会員 工博 九州大学教授 工学部水工土木工学教室

** 正会員 九州大学助手 工学部水工土木工学教室

β とすると、単位面積あたりの抵抗力 F_* は次のようになる。

$$F_* = \frac{F_0}{Bh_*(1-\varepsilon)} = \frac{\rho}{2} \beta U_{eff}^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

$$v_* = \frac{1}{2}(v_1+v_2), \quad h_* = \frac{1}{2}(h_1+h_2) \dots\dots (2), (3)$$

$$Q = v_* \cdot Bh_*, \quad U_{eff} = \frac{Q}{Bh_*\varepsilon} = \frac{v_*}{\varepsilon} \dots (4), (5)$$

一方、損失水頭 h_f は

$$h_f = \Delta h + \frac{1}{2g}(v_1^2 - v_2^2) \dots\dots\dots (6)$$

第2項は水位差 Δh に比べて低次のため省略し、損失水頭より求まる無次元の抵抗係数を f とすると、次の式が成り立つ。

$$h_f = \Delta h = f \frac{L}{4R} \cdot \frac{U_{eff}^2}{2g} \dots\dots\dots (7)$$

そこで、壁体の前後面に検査面を考えると、運動量の保存則により壁体に働く力 ϕ は次のようになる。

$$\phi = \frac{w_0}{g} B \left[(h_2 v_2^2 - h_1 v_1^2) - \frac{g}{2} (h_1^2 - h_2^2) \right] \dots\dots (8)$$

また、連続の式より

$$h_0 v_0 = h_1 v_1 = h_2 v_2 \dots\dots\dots (9)$$

式(8),(9)より、壁体の抵抗力は次のようになる。

$$F_0 = -\phi = \rho B \Delta h (gh_* - v_1 v_2) \dots\dots\dots (10)$$

式(10)に式(1),(7)を代入し整理すると

$$f = (1-\varepsilon) \frac{4R}{L} \cdot \frac{\beta}{\{1 - (v_1 v_2 / gh_*)\}} \dots\dots\dots (11)$$

$v_1 v_2 / gh_*$ は1に比べて低次で、これを省略すると f と β の関係式を得る。

$$f = (1-\varepsilon) \frac{4R}{L} \beta \dots\dots\dots (12)$$

(3) 実験結果

図-2, 3はそれぞれ pipe wall および一様透過壁体に対する実験値で、壁体内部の平均流速の二乗を横軸に、流体力を縦軸に示したもので、各記号は図中に示すとおりである。直線は最小二乗法により求めた実験式で、いずれの場合にも F_* と U_{eff}^2 とは比例関係にあり、個々の壁体について抵抗係数 β が決定される。

図-4, 5はレイノルズ数 Re を横軸に、それぞれの点についての β を縦軸に示したもので、いずれの場合にも Re 数が大きくなるにしたがって β は一定値に近づく傾向にあるが、一様透過壁体の方が pipe wall よりも低い Re 数でこの傾向があらわれる。pipe wall において、 β は径深 R の関数になっているものと考えられ、孔径 $d (=4R)$ の小さいものほど β は大きい値を示す。また、壁厚が2倍になれば β は1.3倍程度となる。一様透過壁体の場合は、pipe wall と比較して空隙率 ($\varepsilon = 0.510$) が大きいにもかかわらず、 β の値は10倍程度と

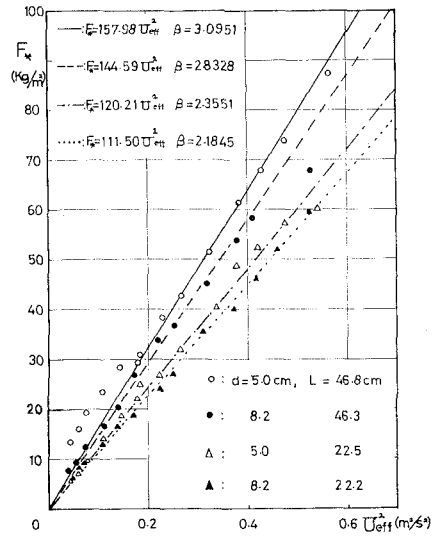


図-2 $F_* - U_{eff}^2$ の関係 (pipe wall)

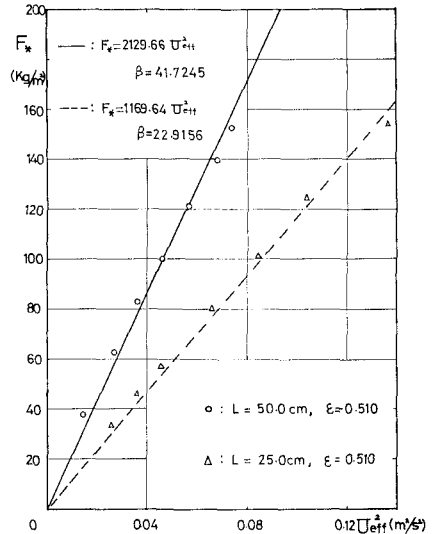


図-3 $F_* - U_{eff}^2$ の関係 (一様透過壁体)

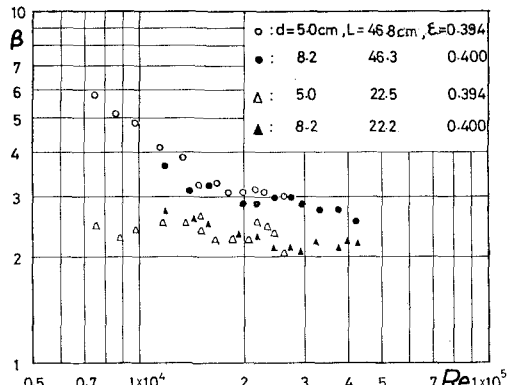


図-4 抵抗係数 β (pipe wall)

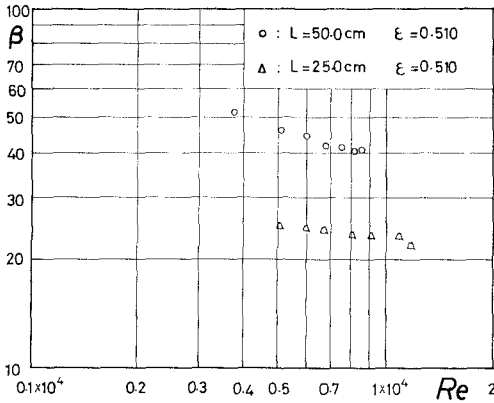


図-5 抵抗係数 β (一様透過壁体)

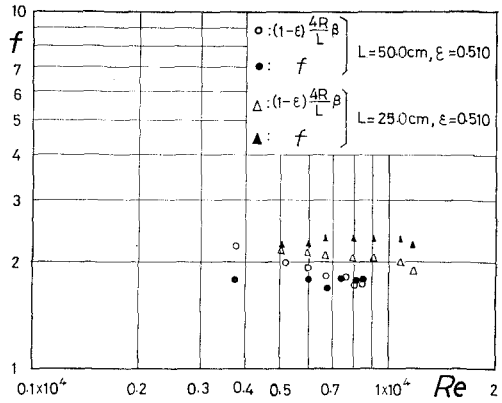


図-8 f と β の関係 (一様透過壁体)

なり、壁厚が2倍になると β は 1.8 倍程度になる。このような壁体については流れは低い Re 数で乱流となり、形状抵抗が大きく効いてくると考えられる (ここで $Re = U_{eff} \times 4R/\nu$, $R = \epsilon V/S$, V は壁体の全体積, S は詰めた材料の表面積で, pipe wall の場合 $d=4R$)。

次に、図-6, 7, 8 は式(12)に求めた損失水頭からの抵抗係数 f と流体力からの β の関係を示したもので、図-6 は径 5.0cm, 図-7 は径 8.2cm の pipe wall で、

図-8 は一様透過壁体の場合である。黒点が f の値、白点がそれに対応する $(1-\epsilon) \frac{4R}{L} \beta$ の値を示す。いずれの場合にも、この二つの値は良い一致を示しており、今回の実験で求めた抵抗係数 β は妥当な値であることがわかる。

3. 直立消波防波堤への適用

(1) 線型化および計算

透過壁体に波が作用する場合の理論計算には、上述の抵抗係数 β を計算上、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。

定常運動に対する、線型および非線型の方程式は、抵抗係数をそれぞれ μ_1, μ_2 とすると次のようになる。

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\mu_1}{\epsilon} u, \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\mu_2}{\epsilon^2} u^2 \quad \dots \dots \dots (13), (14)$$

一方、この場合には

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{F_0/Bh_*}{L} \quad \dots \dots \dots (15)$$

式(15)を式(14)に代入し、式(1)を導入すると、 μ_2 が β によって次のように表わされる。

$$\mu_2 = \frac{1}{2L} (1-\epsilon)\beta \quad \dots \dots \dots (16)$$

次に、微小体積 δV に作用する線型および非線型の流体抵抗 δF_0 はそれぞれ次のようになる。

$$\delta F_0 = -\rho \mu_1 \frac{u}{\epsilon} \delta V, \quad \delta F_0 = -\rho \mu_2 \frac{u^2}{\epsilon^2} \delta V \quad \dots \dots \dots (17), (18)$$

ここで、波の一周りにわたる損失エネルギーは線型の場合と非線型の場合とは等価であり、それぞれの損失エネルギーは

$$E_{D1} = \int_0^T dt \int_V \rho \mu_1 \frac{u^2}{\epsilon^2} \delta V \quad \dots \dots \dots (19)$$

$$E_{D2} = \int_0^T dt \int_V \rho \mu_2 \frac{u^3}{\epsilon^3} \delta V \quad \dots \dots \dots (20)$$

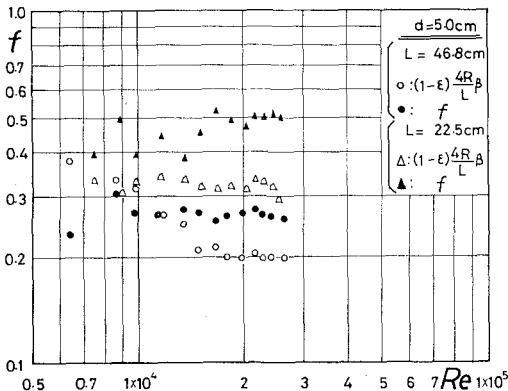


図-6 f と β の関係 (pipe wall 径 5.0cm)

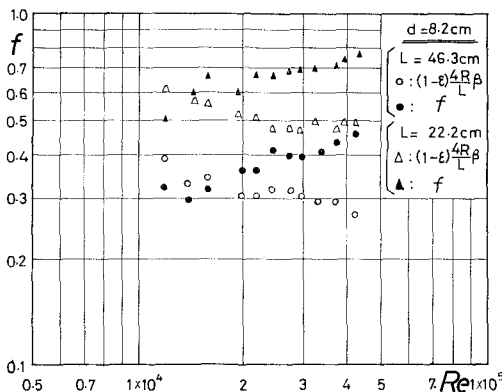


図-7 f と β の関係 (pipe wall 径 8.2cm)

である。流速を $u = u_0 \cos \sigma t$ とおき、 $E_{D1} = E_{D2}$ とすれば、 μ_1 と μ_2 は次の関係にあることがわかる。

$$\mu_1 = \frac{8}{3\pi} \cdot \frac{u_0}{\varepsilon} \mu_2 \dots\dots\dots (21)$$

式(21)に式(16)を代入すれば

$$\frac{\mu_1}{\sigma} = \frac{4a_0}{3\pi L} \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \left(\frac{u_0}{a_0\sigma} \right) \beta \dots\dots\dots (22)$$

ここで、 a_0 は入射波の振幅である。

かくして、計算に使用する抵抗係数 μ_1/σ は、実験によって求められた β によって表わされるが、それはまた流速 u_0 の関数でもある。この u_0 は透過性防波堤の計算においては、逆に μ_1/σ をパラメーターとして求められるものである。したがって実際計算においては、まず適当な μ_1/σ を仮定して堤体内流速 u_0 を求め、この u_0 に対する式(22)の μ_1/σ が初め仮定した値と一致することを確認しなければならない。

図-9 は、この手続きによる μ/σ を示したもので、横軸に $\sigma^2 h/g$ を示す。これは通過率測定による文献 1) の 図-11 に示したと類似の傾向にあり、 μ/σ は $\sigma^2 h/g$ の増加とともに減少し、一定値に近づき、堤体形状 l/h が大きくなると小さくなるのがわかる。このようにして決定した μ/σ を用いて、透過性防波堤の反射率・通過率および全水平力を計算し、これを実験値と比較する。

(2) 実験

この実験は β の実験と同じ造波水路および壁体について同じ水深で行った。波高測定には抵抗線式波高計を用い、ペン書きオシログラフに記録させ、反射率は Healy の方法により測定した。

全水平力については、図-10 に示すように透過壁体を水路上方のより下げた4本のワイヤに取り付け、壁体が水路壁に接触しないように戸車をつけ、水路方向に滑らかに動くようにし、壁体後面にストレインゲージを貼付したリング状張力計を取り付けて測定した。さら

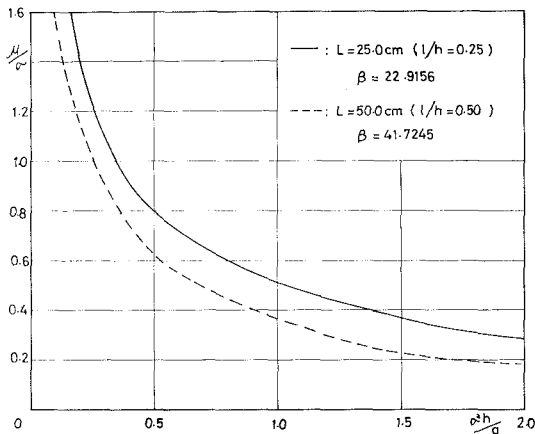


図-9 μ/σ の $\sigma^2 h/g$ による変化 (一様透過壁体)

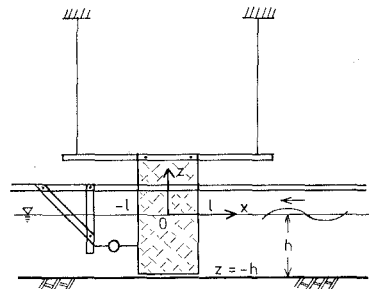


図-10 全水平力測定の実験装置

に入射波高は常に 4.6 cm となるように造波装置のクラックを調整した。

(3) 計算値と実験値との比較

まず、実際的空隙率 $\varepsilon = 0.510$ を用いて計算してみると、 $P_H/\rho g a h$ は実験値よりも 20% 程度小さな値となり、 K_R は小さめ、 K_T は大きめの値となる。そこで、仮想の空隙率を仮定して、壁厚 $L = 25.0$ cm の壁体については $\varepsilon = 0.35$ 、 $L = 50.0$ cm では $\varepsilon = 0.30$ として計算

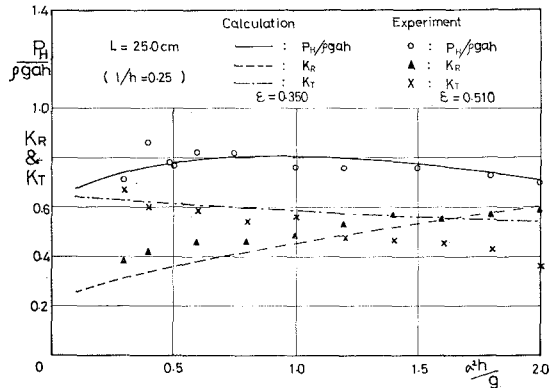


図-11 計算値と実験値との比較 (全水平力、反射率、通過率)

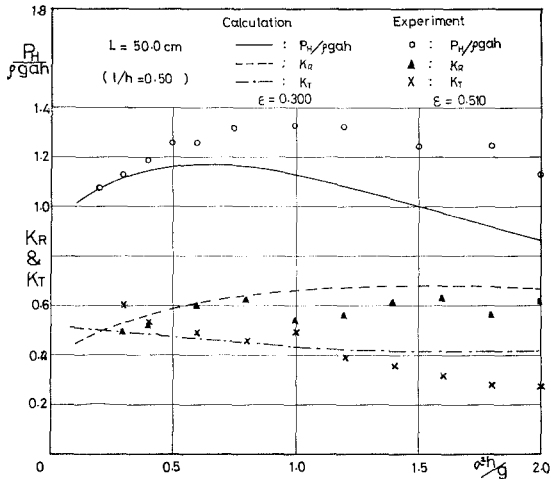


図-12 計算値と実験値との比較 (全水平力、反射率、通過率)

した結果は 図-12, 13 に示すようである。 $L=50.0\text{ cm}$ の場合 $P_H/\rho g a h$ は $\sigma^2 h/g$ の大きい所でやや異なった値となるが、 $L=25.0\text{ cm}$ の場合では $K_R, K_T, P_H/\rho g a h$ すべてにおいて非常に良い一致を示している。

4. む す び

以上のように、流速の二乗に比例する抵抗係数 β を実験より求め、これを用いて透過性防波堤の反射率、通過率等の計算を行った。この結果はほぼ満足すべきものであるが、透過壁体の抵抗係数はその形状によって非常に異なった傾向を示しているため、実際にはさらに一般的な表現が望まれる。また、図-12, 13 に示した計算では、実際とは異なる空隙率を用いることにより、実験との一致を得たが、これは波が壁体に作用する場合、流体は加速度運動をするため、仮想質量の概念を導入することが

必要なことを示唆している。これらについてさらに詳細な実験と検討を行う予定である。

【付 記】本文の実験は当時九州大学工学部学生であった百田博宣、古賀文博、川原田秋彦、虎石龍彦の各君の協力を得て行われたものである。

参 考 文 献

- 1) 井島武士・江口泰彦・小林彰：透過性防波堤と岸壁に関する研究，第18回海岸工学講演会論文集，1971。
- 2) 首藤伸夫：消波ブロックの抵抗について，第16回海岸工学講演会論文集，1969。
- 3) 尾崎 晃・猪狩興一・平松勝二：捨石構造における空隙の効果に関する基礎的研究（I），第22回年次学術講演会，1971。
- 4) Madsen, O.S.: "Wave Transmission through Porous Structures," Journal of the Waterways Harbours and Coastal Engineering Division, ASCE, Vol. 100, No. WW3, August, 1974.