

海底摩擦による波高減衰の基礎的研究(2)

—— 底面摩擦力の測定について ——

岩垣雄一*・土屋義人**・坂井順行***

1. 結 言

前報において¹⁾、著者の一人は、浅海における波浪予知の重要性から、海底摩擦による波高減衰の基礎的研究が必要であることをのべ、層流境界層にもとづく波高減衰の理論式を、水深が一定の場合と、距離とともに直線的に変化する場合の両者について導き、前者に対しては、Savage の実験結果と比較して、Keulegan の方法により、側壁の影響を取り除いても、波高減衰は実験値のほうが理論値よりも大きいことを見出した。その後、Eagleson^{2),3)} は、波による底面摩擦応力を直接測定することを試みたが、その結果をみても、底面の平均摩擦係数の値は、測定値が理論値より約2～14倍も大きく、その理由は十分に説明されていない。

このように、底面の摩擦応力を直接測定しても、また波高減衰を測定して間接的に底面摩擦を求めても、いずれの場合も層流境界層にもとづく理論値とかなり相違し、なぜそのような両者が大きく違うのか、その原因が明確でない。そこで著者らは、Eagleson と同様、モーメント計を利用した底面摩擦応力を直接測定する装置を作製し、本当に測定値が理論値の2倍以上も大きくなるのかどうかを検討するとともに、波高減衰の測定をも実施して、それから間接に求められる底面摩擦との関連性を調べてみた。

2. 波による底面摩擦応力と波高減衰に関する理論式

(1) 底面摩擦応力に関する理論式

周期的な運動をする流体の層流境界層については、Lin⁴⁾ の理論があり、彼は Navier-Stokes の運動方程式より、微小項を省略し、結局、 u_b を境界層外縁の流速、 u を境界層内の流速、 ν を水の動粘性係数、 z を底面からの高さ、 t を時間としてあらわされるつぎの方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u_b}{\partial t} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

から、

$$u = u_{b\max}(x) \{ \sin \sigma t - \exp(-\beta z) \sin(\sigma t - \beta z) \}$$

の解を得た。ここに、

$$\beta = \sqrt{\sigma/2\nu} \quad (2)$$

であり、また

$$u_b = u_{b\max}(x) \sin \sigma t \quad (3)$$

とした。式(2)の右辺の第2項は、減衰振動の形をしており、その振幅は $u_{b\max} \exp(-\beta z)$ で、底面からの高さ z に関して指数的に振幅が減衰することを意味している。これは、半無限の流体が無限の長さをもつ平板の振動によっておこる粘性流体の運動として解かれた Stokes⁵⁾ の解であって、 $\sqrt{2\nu\sigma}$ の伝播速度をもつ shear-wave とよばれるものである。

いま、波動運動による層流境界層内の流速分布について考えれば、式(4)の u_b の代わりに、微小振幅波理論による

$$u_b = u_{b\max} \sin(kx - \sigma t), \quad (4)'$$

$$u_{b\max} = kcH/2 \sinh kh \quad (5)$$

を適用して、式(2)はつぎのようにあらわされる⁶⁾。

$$u = u_{b\max} \{ \sin(kx - \sigma t) - \exp(-\beta z) \sin(kx - \sigma t + \beta z) \} \quad (2)'$$

ここに、 $k=2\pi/L$ 、 $\sigma=2\pi/T$ 、 H : 波高、 c : 波速、 h : 水深、 L : 波長、 T : 周期であって、 β は式(3)がそのまま適用される。したがって、底面に働く摩擦応力 τ_0 は $\mu(\partial u/\partial z)_{z=0}$ に等しいから、

$$\begin{aligned} \tau_0 &= (\mu\beta kcH/2 \sinh kh) \{ \sin(kx - \sigma t) \\ &\quad - \cos(kx - \sigma t) \} \\ &= (\sqrt{2} \mu\beta kcH/2 \sinh kh) \sin(kx - \sigma t - \pi/4) \end{aligned} \quad (6)$$

であらわされ、 $\tau_{0\max}$ は

$$\frac{\tau_{0\max}}{\rho g H} = \frac{\sqrt{2\nu}}{g \sinh kh} \left(\frac{\pi}{T} \right)^{3/2} \quad (7)$$

となる。ここに、 μ : 水の粘性係数、 g : 重力加速度、 ρ : 水の密度である。式(6)から、摩擦応力 τ_0 は、波形および境界層外の流速 u_b に対して、位相が $\pi/4$ だけずれることがわかる。

(2) 層流境界層内のエネルギー損失による波高減衰の理論式

いま二次元を考え、波のエネルギーは粘性による摩擦によってのみ消費されるものとすれば、

*正会員 工博 京都大学 教授 防災研究所

**正会員 工博 京都大学 助教授 防災研究所

***正会員 工修 運輸省 港湾局

$$\frac{d}{dx}(C_g E) = -\bar{E}_{fb} \quad (8)$$

が成立する。ここに、 C_g ：群速度、 E ：単位面積当りの波のエネルギー、 $\bar{E}_{fb}$ ：底面摩擦によって単位面積当たり、単位時間に消費する平均の損失エネルギーである。前報では、 $\bar{E}_{fb}$ を

$$\bar{E}_{fb} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} \tau_0 u_b dt \quad (9)$$

によって求めたが、厳密には代表流速として、 u_b をとってよいかどうか問題となる。結果的には一致するが、ここでは、層流境界層を取り扱い、粘性流体のエネルギー逸散という立場で $\bar{E}_{fb}$ を求めることにする。

一般に単位体積の流体が単位時間に粘性のために逸散する損失エネルギー ϕ は、二次元の場合、

$$\phi = \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left\{ \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\}^2 \right] \quad (10)$$

によってあらわされる⁹⁾。いま、流速の鉛直成分 w を無視し、さらに $\partial u / \partial x$ を小さいとして省略すれば、層流境界層内で、単位面積当りに逸散するエネルギー $\bar{E}_{fb}$ は近似的に、

$$\bar{E}_{fb} = \frac{1}{L} \int_0^L \int_0^{\delta} \phi dz dx \approx \frac{\mu}{L} \int_0^L \int_0^{\delta} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 dz dx \quad (11)$$

であらわされる。ここに、 δ は境界層の厚さで、shear-wave の 1 波長の長さ $2\pi/\beta$ に等しくとれば近似的には十分である。式 (11) に式 (2)' を代入して計算すれば、結局、つぎの関係が得られる。

$$\bar{E}_{fb} \approx \frac{\mu}{2} \beta \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 \operatorname{cosech}^2 kh \quad (12)$$

さらに、 $C_g = (1 + 2kh \operatorname{cosech} 2kh)/2$ 、 $E = \rho g H^2/8$ の関係と式 (12) を用いて、式 (8) を $x=0$ で $H=H_0$ という条件で積分すれば、次式が求められる。

$$H = H_0 \exp(-\epsilon_b x/L), \quad (13)$$

ここに、

$$\epsilon_b = 4\pi^2/\beta L (\sinh 2kh + 2kh). \quad (14)$$

この式は Eagleson³⁾ が求めており、 ϵ_b を無次元減衰率 (dimensionless decay modulus) とよんでいる。

なお、波高減衰の実験において、水槽の幅が水深にくらべて小さい場合には、側壁による摩擦損失が入るので、その補正をする必要がある。 y 軸を側壁に垂直にとれば、側壁における層流境界層内の流速分布は、式 (2)' を参照して、

$$u = \left(\frac{\pi H}{T} \right) \frac{\cosh kz}{\sinh kh} \{ \sin(kx - \sigma t) \exp(-\beta y) \sin \times (kx - \sigma t - \beta y) \}, \quad (15)$$

$$w = - \left(\frac{\pi H}{T} \right) \frac{\sinh kz}{\sinh kh} \{ \cos(kx - \sigma t) - \exp(-\beta y) \times \cos(kx - \sigma t - \beta y) \} \quad (16)$$

とあらわされる。両側壁の単位面積当たり単位時間に逸散するエネルギー $2\bar{E}_{fw}$ は、

$$2\bar{E}_{fw} = \frac{2\mu}{Lh} \int_0^h \int_0^L \int_0^{\delta} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} dy dx dz \quad (17)$$

によって求められるから、この式に式 (15) および (16) を代入して積分すれば、つぎの関係式が得られる。

$$2\bar{E}_{fw} \approx \frac{\mu}{kh} \beta \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 \coth kh, \quad (18)$$

いま、水槽の幅を B とし、底面でのエネルギー損失と両側面における損失の比を ψ とすれば、

$$\psi = \frac{\bar{E}_{fb} B}{2\bar{E}_{fw} h} = \frac{kB}{\sinh 2kh} \quad (19)$$

となり、これは Savage の論文⁸⁾ にのべられている Keulegan の方法とよばれているものに一致する。

底面のほかに、両側壁による摩擦損失が加わると、式 (8) の代わりに、

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx}(C_g EB) &= -(\bar{E}_{fb} B + 2\bar{E}_{fw} h) \\ &= -\bar{E}_b B_j \left(1 + \frac{1}{\psi} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

を用いなければならない。したがって、底面と両側壁の摩擦にもとづく減衰率を $\epsilon_{(b+w)}$ とすれば、 ϵ_b との関係はつぎのようにあらわされる。

$$\epsilon_b = \{ \psi / (\psi + 1) \} \epsilon_{(b+w)} \quad (21)$$

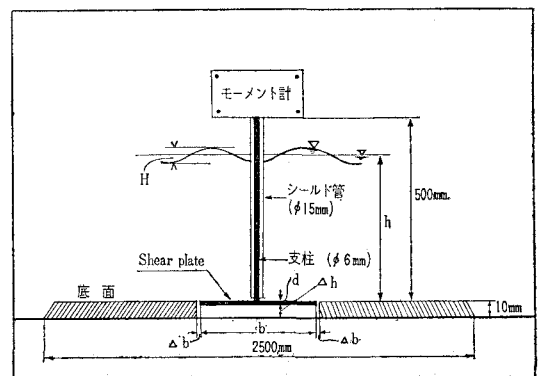
3. 底面摩擦応力の測定

底面の摩擦応力を実験的に見出す方法として、層流境界層の場合、 $\tau_0 = \mu(\partial u / \partial z)_{z=0}$ の関係を利用して、流速分布の測定から間接的に τ_0 の値を求める方法と表面の摩擦力を直接測定する方法とがあるが、前者の方法は波の運動の場合には多くの困難点があるので、ここでは後者の方法を採用することにして、測定装置を製作した。

(1) 測定装置の特性

図一は最初に製作した測定装置であって、モーメン

図一 底面の摩擦応力測定装置

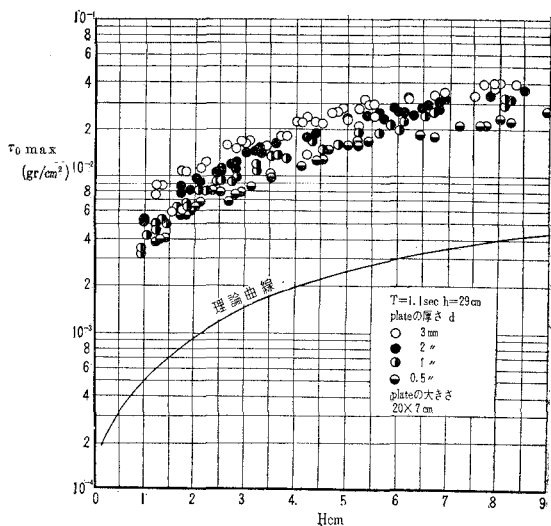


ト計と支柱部分および shear plate とよばれる平板の三つの主要部分からなっている。これは Eagleson³⁾ が用いたものとほとんど同一であるが、彼は水平力の測定に門型 (portal-type) のゲージを用いたのに対して、著者らは U ゲージを内蔵したモーメント計を使用したこと、また彼は 24×6 in で厚さが 1/4 in, あるいは 1/8 in の大きくて厚い shear plate を用いたのに対し、著者らは後述するようにずっと薄くて小さい shear plate を使ったことが相違している。なお、初め著者らは shear plate の下に水銀を置かないで測定装置の特性を調べた。この装置の原理は、図を見れば明らかであるが、shear plate に作用する摩擦力を、支柱を通してモーメント計に伝え、この力が U ゲージによってひずみとして電氣的に増幅され、ペン書きオシロに自記されるようになっている。モーメント計は最大 1000 g・cm までのモーメントが測定可能で、温度変化に対する誤差は 19~50°C の範囲で ±10 % 以内である。なお、支柱は波力を受けないようにしたシールド管で囲まれている。

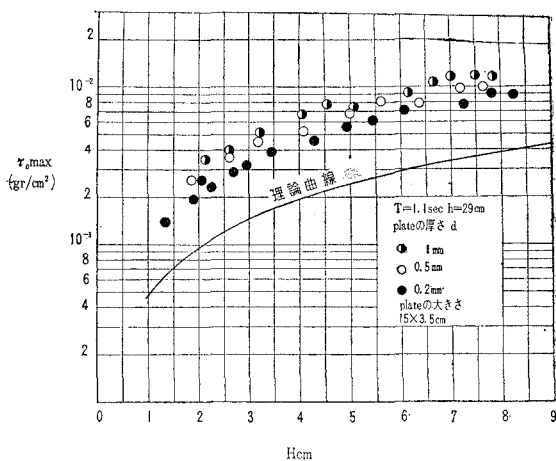
まず、装置の動的特性を単振子の強制振動として、解析的に調べた結果、強制力の周期がこの実験の場合 0.8~1.3 sec であるから、強制力の振動数と装置の自由振動の振動数との比の値は、shear plate として長さ 20 cm, 幅 7 cm, 厚さ 3.0 mm のアルミ板を使用した場合、最大約 0.5 となり、また、装置の減衰抵抗係数と臨界減衰抵抗係数との比の値は 0.045~0.146 となるので、強制振動の振幅は最大 30 % も大きく見積られ、また位相のずれは 10° 程度遅れることが予想された。したがって、極力 shear plate および支柱の重量を減少させるようにすることが望ましいことがわかった。

ついで、shear plate の鉛直方向の位置の底面からのずれの影響、shear plate の下の空げきの影響、shear plate と底面との間げきの影響、shear plate の厚さの影響、shear plate の大きさの影響および shear plate の幅の影響を幅 50 cm, 高さ 70 cm, 長さ 70 m の波浪実験水槽を利用して実験的に調べた。これらの詳細についてはここでは省略するが、これによって判明したことは、① shear plate が底面より上方へずれると、plate 側面に働く抗力によって、摩擦応力が大きく見積られるが、下方へずれた場合には、あまりその影響は顕著でない、② shear plate 直下の空げき dh が大きいほど、摩擦応力の実験値は小さくなり、理論値に近づく傾向がある、③ shear plate と底面との間げき db が小さいほど実験値は小さくなり理論値に近づく、④ shear plate の厚さ d は、薄ければ薄いほど、実験値は小さく、理論値に近づく、⑤ shear plate の長さを短かくして大きさを小さくし、かつ支柱の重量を軽くすれば、実験値は小さくなり理論値に近づく、⑥ shear plate の幅 b の影響はほとんどないが、あまり b を小さくすればシールド管

図—2 shear plate の厚さと大きさが摩擦応力の実験値におよぼす影響



(a)

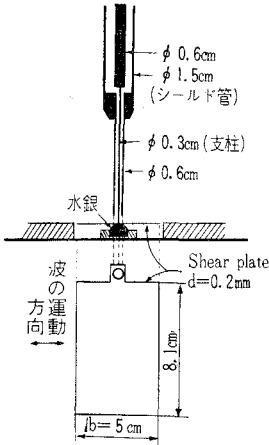


(b)

の影響をうける傾向が見られる。

図—2 は shear plate の厚さと大きさの影響を示したもので、図の (a) は長さ 20 cm, 幅 7 cm の大きさのアルミ板を shear plate として用い、厚さ d を 0.5, 1, 2 および 3 mm に変えて行なった実験結果を示したもので、縦軸には最大摩擦応力 $\tau_{0\max}$, 横軸には波高 H をとってあらわしてある。この場合、厚さを 0.5 mm としても、なお実験値は式 (7) にもとづく理論値の約 5 倍も大きくなっている。図の (b) は shear plate をステンレス板とし、大きさを長さ 15 cm, 幅 3.5 cm に小さくし、かつ支柱も直径 6 mm, 重量 105 g の黄銅の棒を、直径 6 mm, 重量 22.9 g のアルミ管に変えて、shear plate の厚さの影響を調べた結果である。このように shear plate の大きさを小さくし、厚さを薄くすれば、図の

図-3 摩擦応力の測定に採用した shear plate と、その取り付け方法



(a) のときよりさらに理論値に近づくが、 $d=0.2$ mm の場合でもなお実験値は理論値の約 2 倍も大きい。この理由はつぎのように考えられる。すなわち、shear plate や支柱の重量がこの程度に軽くなると、前述した単振子としての慣性力の効果は無視できる程度となるので、shear plate に作用する外力に、摩擦力以外の力、たとえば圧力勾配によって、shear plate の両端に作用する力、

shear plate の周りの流体が加速度をもって運動することによる仮想質量力、shear plate の下の空げき内の流体が運動することにより shear plate におよぼす力、などが働いているためと考えられる。このような理由から、まず shear plate の下の空げき内の流体の運動を止めるため、Eagleson と同様、図-3 に示すように空げき内に幅 3 mm の溝を作り、そこに水銀を入れて plate の中央部に接触させることにした。また shear plate の幅を小さくすると、plate の中央に連結したシールド管の影響があらわれる傾向があるので、図に示すように、plate の端に支柱をとりつけるようにし、かつ支柱およびシールド管の先端部分を細くして、シールド管の影響がなるべく shear plate におよばないようにした。そして結局、shear plate として長さ 8.1 cm、幅 5 cm、厚さ 0.2 mm のステンレス板を採用することにした。

(2) 実験方法

実験に用いた波の特性と水深は表-1 に示すようである。周期および水深を一定としておき、プランジャー

表-1 摩擦応力の測定に用いた波の特性と水深

周期 T (sec)	波高 H (cm)	水深 h (cm)
0.85	0.63~3.64	8.2~29.3
0.95	0.48~3.64	9.0~34.3
1.10	0.77~3.75	9.0~29.0
1.30	0.65~3.03	11.0~34.1

型造波機のスロークを変え、種々の波高について、底面の摩擦応力を測定した。波高をあまり大きくすると、シールド管に作用する波力によって、測定装置全体が振動し、それが摩擦力と一緒に記録されるので、表-1 に示す波高より大きい波については測定しなかった。なお、波高は抵抗線式波高計を用いてペン書きオシロに記録させ、それを読みとった。

摩擦応力の測定を始める前に、実験波について、水底

の圧力変動、水粒子の速度および軌道を測定し、微小振幅波理論と比較した結果、少なくとも表-1 に示す範囲では十分微小振幅波理論が適用できることが確認された。

(3) 実験結果

前述したように、shear plate に働く外力 F' は、底面の摩擦力と圧力勾配の存在によって plate の両側面に作用する圧力差および仮想質量力の三つの力の和に等しいと考えられる。しかし、shear plate の下の空げきは、水銀を置くことによって、そこでの水の運動はとめられているので、plate に仮想質量力が働くかどうかは疑問であり、ここでは、いちおう摩擦力以外の力として圧力勾配による力のみをとりあげることにする。

いま、shear plate の表面積を A 、厚さを d とすれば、plate に作用する摩擦力は式 (6) より、

$$\tau_0 A = \mu \frac{A k c \beta H}{2 \sinh k h} \{ \sin(kx - \sigma t) - \cos(kx - \sigma t) \} \quad \dots\dots\dots (22)$$

となり、圧力勾配による力は、

$$-A d \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\rho g k H A d}{2 \cosh k h} \cos(kx - \sigma t) \quad \dots\dots\dots (23)$$

とあらわされるから、shear plate に作用する単位面積当たりの水平力 F の時間的変化は、plate の位置を $x=0$ とおいて、

$$F = F'/A = -CH(\sin \sigma t + \cos \sigma t) - DH \cos \sigma t \\ = -\sqrt{C^2 + (C+D)^2} H \sin(\sigma t + \epsilon) \quad \dots\dots\dots (24)$$

ここに、

$$C = \frac{\mu k c \beta}{2 \sinh k h}, \quad D = \frac{\rho g k d}{2 \cosh k h}, \quad \dots\dots\dots (25), (26)$$

$$\epsilon = \tan^{-1} \{ 1 + (D/C) \} \quad \dots\dots\dots (27)$$

とあらわされる。したがって、実際に測定される単位面積当たりの水平力 F の最大値 $F_{\max}$ と、求めようとする摩擦応力の最大値 $\tau_{0\max}$ との関係は、式 (24) と式 (6) より、つぎのようになる。

$$\tau_{0\max} = \left[\frac{2}{1 + \{ 1 + (D/C) \}^2} \right]^{1/2} F_{\max} \quad \dots\dots\dots (28)$$

この式 (28) を用い、測定結果を補正して $\tau_{0\max}$ を求め、各周期をパラメーターとして $\tau_{0\max}/\rho g H$ と h/L_0 との関係をプロットしたものが図-4 である。図中、各点における矢印は、測定値のちらばりの範囲を示し、丸印の点は、同じ条件の各測定値の平均値を示す。また図の曲線は式 (7) にもとづく理論曲線であって、測定値はほぼ理論曲線と一致しているものと考えてよい。

4. 波高減衰の実験

(1) 実験装置と実験方法

実験に用いた水槽、造波機および波高計は、3. の底面摩擦応力の測定に際して用いたものと同じで、実験に用いた波の特性と水深は表-2 に示すとおりである。波高

図-4 補正した摩擦応力の測定結果と理論曲線の比較

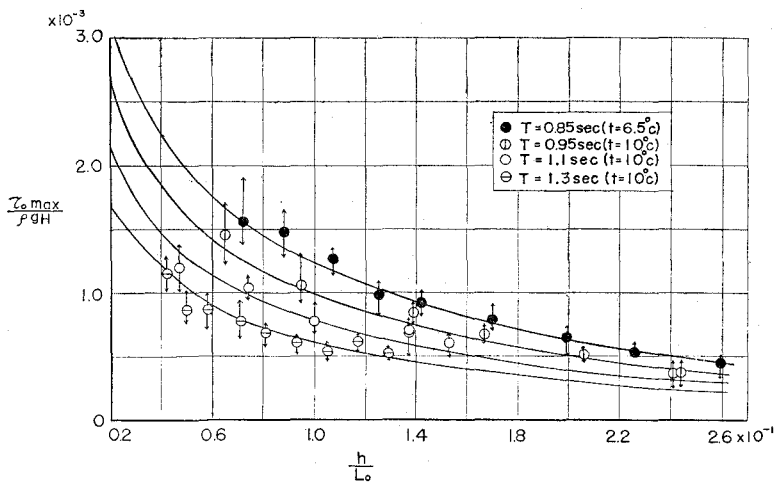
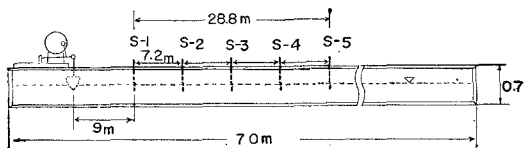


図-5 波高測定箇所



の測定箇所は、図-5に示すように、造波機から9m離れたところをS-1とし、それより7.2mごとにS-2、S-3、S-4およびS-5の5カ所とした。波高は最

表-2 波高減衰の実験に用いた波の特性と水深

周期 T (sec)	波高 H (cm)	水深 h (cm)
0.80	1.66~6.00	10.8~24.6
1.00	1.53~7.03	12.0~28.5
1.10	4.50~6.85	25.9
1.30	2.40~6.06	16.3~30.0

初この5点で同時記録させたが、計器の都合上この方法をやめ、各測点で同じ波を再現させ個々に波高を測定した。そして波高がほぼ一様な波列の場合には10波を、少し乱れた波列のときには20波を平均して、その測点の波高とした。

(2) 実験結果

表-2に示す各周期ごとに、水深を変えて、縦軸に波高比の対数を、横軸に距離 x をとって実験値をプロットすれば、ある程度のばらつきはあるが、ほぼ直線的に減少し、式(13)に示すように

$$H/H_0 = \exp(-\alpha_{(b+w)} x) \quad (29)$$

の関係が成立することがわかった。ここに、 $\alpha_{(b+w)}$ は底面および側壁の影響を含んだ減衰係数である。具体的に $\alpha_{(b+w)}$ の値を実験値から求めるのには、基準となる2点における波高 H_0 および H と2点間の距離 x を選ぶ必要がある。いまの場合、5カ所の波高を測定したわけであるが、それぞれに種々の誤差が含まれているので、平均操作をする意味で、基準波高を(S-1とS-5)、(S

1とS-4)および(S-2とS-5)の位置の波高の3組に決め、式(29)にもとづいて、減衰係数 $\alpha_{(b+w)}$ を求めた。 $\alpha_{(b+w)}$ と $\epsilon_{(b+w)}$ 、 α_b と ϵ_b の関係は

$$\alpha_{(b+w)} L = \epsilon_{(b+w)} \quad (30)$$

$$\alpha_b L = \epsilon_b \quad (31)$$

であるから、式(21)より α_b と $\alpha_{(b+w)}$ との関係は ϵ_b と $\epsilon_{(b+w)}$ の関係と同じく

$$\alpha_b = \{\psi/(\psi+1)\} \alpha_{(b+w)}$$

となる。図-6は式(32)にもとづいて、側壁の影響を取り除いた減衰係数 α_b の値を h/L_0 に対して周期ごとにプロットしたもので図中の理論曲線という

のは、式(14)と式(31)から求められる。

$$\alpha_b = 4\pi^2/\beta L^2 (\sinh 2kh + 2kh) \quad (33)$$

の関係を示したものである。この図からわかるように、実験値は全体的にばらついており、いずれの周期の場合にも傾向はよく似ているが、実験値のほうが理論値より40%程度大きくなっている。

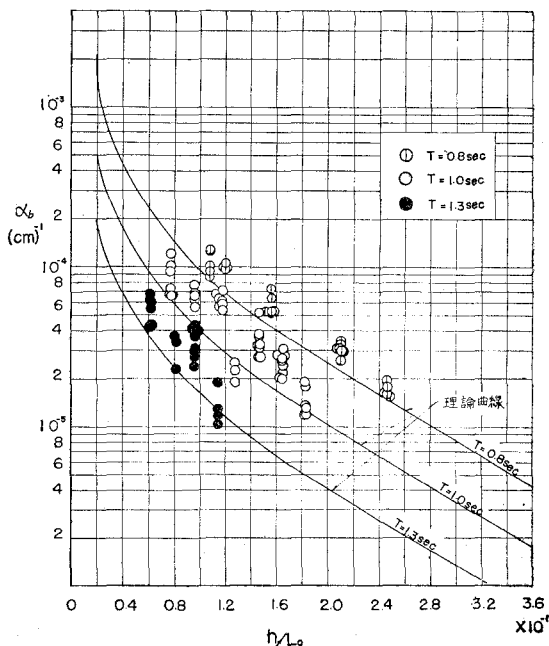
5. 底面の摩擦係数と波高減衰率

いま、Eaglesonにしたがって、底面の摩擦係数 $\bar{C}_f$ をつぎのように定義する。

$$\bar{C}_f = 2\bar{\epsilon}_b/\rho u_b^2 \quad (34)$$

ここに、 $\bar{\epsilon}_b$ および u_b^2 は、それぞれ式(6)に示す τ_0 お

図-6 波高減衰係数の理論値と実験値との比較



よび式 (4)' に示す u_b の自乗を, $\tau_0=0$ となる位相 θ から $\theta+\pi$ まで時間的に平均したもので, これらを計算すれば式 (24) はつぎのようになる。

$$\begin{aligned}\bar{C}_f &= 8\sqrt{2/\pi} (u_{b\max} H/\nu)^{-1/2} (u_{b\max} T/H)^{-1/2} \\ &= 6.39 R_{eT}^{-1/2} \dots \dots \dots (35)\end{aligned}$$

ここに,

$$R_{eT} = u_{b\max}^2 T/\nu$$

図-7 は 3. でのべた摩擦応力の測定結果から $\bar{C}_f$ を求

め, R_{eT} に対してプロットしたもので, (a) は圧力勾配による水平力を測定値から取り除いて補正したものの, (b) は何ら補正を加えないで, 測定値をそのままプロットしたものである。補正した (a) の場合には, 式 (35) であらわされる層流境界層の場合の $\bar{C}_f$ と R_{eT} の関係によく一致していることがわかる。(b) の場合は, 測定値は理論値より 30 ~ 40 % 程度大きく,

$$\bar{C}_f = 8.95 R_{eT}^{-1/2} \dots \dots \dots (36)$$

によってあらわされる。

なお, 図-7 の (b) には Eagleson の測定結果を示したが, 著者らの測定値よりもはるかに大きく, しかもかなりちらばっている。これは Eagleson が使用した shear plate の大きさが著者らのものよりはるかに大きくて厚く, そのために底面に働く摩擦外力以外の力が支配的となり, その補正が適切でなかったことによるものと思われる。

波高減衰率 ϵ_b は式 (14) であらわされ, また α_b との関係は式 (31) で示されるから, 図-6 の α_b と h/L_0 の関係を図-8 のように ϵ_b と $(\beta L/\pi^2) (\sinh 2kh + 2kh)$ との関係でプロットしなおすことができる。図には, 著者らの実験結果のほか, Watson-Martin, Grosch-Lukasik および Eagleson の結果をもプロットしてある。また破線は Eagleson が提案した実験式を示したもので, $\bar{C}_f$ の場合と同様, 著者らの実験値や Grosch-Lukasik のものより, かなり大きい値を与えることがわかる。結局, 波高減衰の実験からは, ϵ_b の実験値は式 (14) にもとづく理論値より 40% 程度大きいことがわかるが, この理由についてはいまのところ明確ではない。

6. 結 語

以上, 著者らは底面摩擦応力の測定装置によって, 波による底面の摩擦を測定するとともに, 波高減衰の実験から減衰係数や減衰率を求め, 層流境界層にもとづく理論値と比較した結果, 底面の摩擦応力は, 圧力勾配によって shear plate の両端に働く水平力を測定値より差し引いて補正すれば実験値と理論値とよく合うが, 補正しなければ実験値のほうが 30~40% 程度大きいこと, 波高減衰のほうは, 側壁の影響を取り除いて求めた減衰率の実験値は, 側壁の影響がほとんど無視できる水槽で得た Grosch-Lukasik の実験値とともに, 理論値より約 40% 程度も大きいことなどがわかった。これは, 実際に底面に作用する摩擦力そのものが理論値よりも大きいのか, 摩擦力によるエネルギーの損失機構が理論式であらわされるものと異なるのか, などの点がまだ明らかになっていない。こうした問題点の解決は, 摩擦応力測定装置の改良や波高減衰のさらに詳細な実験によって,

図-7 摩擦係数 $\bar{C}_f$ と R_{eT} との関係

- (a) 測定結果を補正した場合
(b) 測定結果を補正しない場合

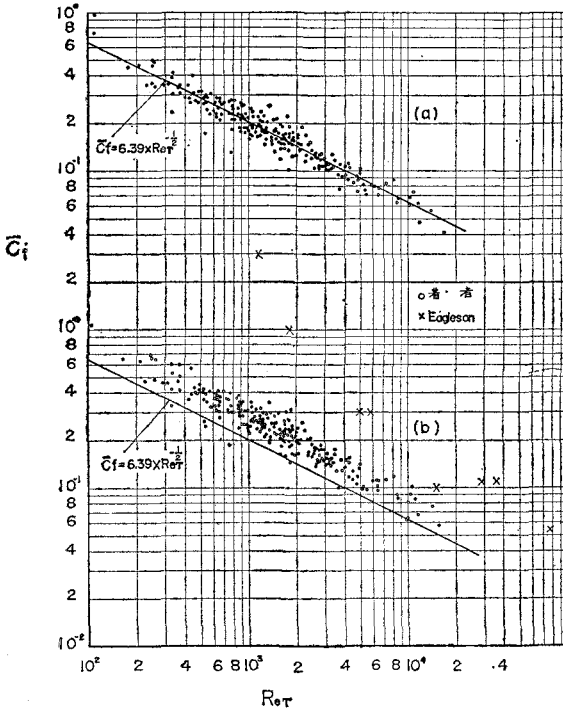
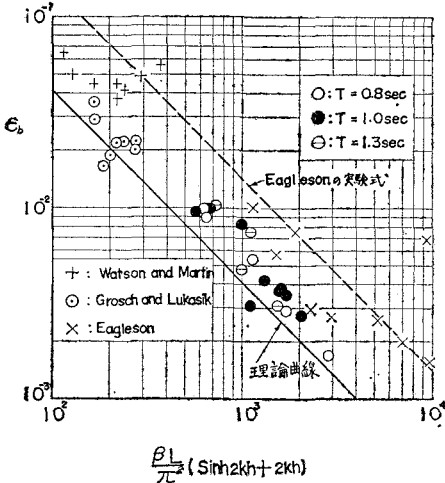


図-8 波高減衰率の理論値と実験値との比較



達成されるものと考えられる。今後さらにこれらの点について検討を進めていくつもりである。

最後にこの研究が文部省試験研究費による研究の一部であることを明記するとともに、実験や資料整理に助力をして頂いた海岸災害研究室の諸氏に深謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 土屋義人・井上雅夫：海底摩擦による波高減衰の基礎的研究 (1)，第 8 回海岸工学講演会講演集，pp. 19~24，昭 36.9.
- 2) Eagleson, P.S. : The Damping of Oscillatory Waves by Laminar Boundary Layers, MIT, Hydrodynamics Laboratory, Tech. Rep. No. 32, 1959.
- 3) Eagleson, P.S. : Laminar Damping of Oscillatory Waves, Proc. ASCE, Vol. 88, No. HY 3, pp. 155~181, 1962.
- 4) Lin, C.C. : Motion in the Boundary Layer with a Rapidly Oscillating External Flow, Proc. 9th Intern. Congress Appl. Mech., Brussels, Vol. 14, p. 155, 1957.
- 5) Lamb, H. : Hydrodynamics, 6th ed. Cambridge, p. 622, 1957.
- 6) Grosch, C.E. : Laminar Boundary Layer under a Wave, Physics of Fluids, Vol. 5, No. 10, pp. 1163~1167, 1962.
- 7) 5) の p. 580.
- 8) Savage, R.P. : Laboratory Study of Wave Energy by Bottom Friction and Percolation, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 31, 1953.