Ⅱ～24

波高減衰率と海底摩擦係数との関連について

京都大学防災研究所　正会員　土屋義人
〃　〃　〃　○陳　活雄

海底摩擦によって波のエネルギーが消散し，波高が減衰する現象は，浅海波の変形の問題として，波浪予知および設計波の決定という工学的観点から，最近とくに重要視されるようになり，すでにいくつかのすぐれた研究が進められてきたが，その機構については，いまだ十分に明らかにされていない現状である。従来，底面摩擦による波高減衰に関する実験的研究においては，層流境界層理論にもとづいて導かれる波高減衰率 ϵ_b について，理論値と実験値との比較検討が行なわれてきた。一方現地観測による波高減衰の研究においては，Bretschneider らが定義した海底の摩擦応力に対する関係を用いて，海底摩擦係数 f の推定が行なわれてきた。ここでは，波高減衰率 ϵ_b と海底摩擦係数 f との関連について，層流境界層内でのエネルギー損失という立場から，若干の考察を行なうとともに，著者らが行なった波高減衰に関する実験結果にもとづいて検討した結果について述べる。

一般に，波高減衰の理論式を導く場合に用いられる波のエネルギー保存の関係は，底面摩擦によるエネルギー損失のみを対象とすれば，つぎのようにあらわされる。

$d(C_gE)/dx = -E_{fb}$ ……(1)　ここに，E：単位面積当りの波のエネルギー，C_g：群速度，E_{fb}：底面摩擦によって単位面積当り単位時間に消散する平均の損失エネルギー。損失エネルギーとして，線型層流境界層理論にもとづく結果($\bar{E}_{fb}$)および Bretschneider らの定義にもとづく結果($\bar{E}'_{fb}$)をかけば，それぞれつぎのようにあらわされる。

$$\bar{E}_{fb} = (\mu\beta/2)\{(\pi H/T)/\sinh kh\}^2 \cdots\cdots(2), \quad \bar{E}'_{fb} = (4/3\pi)\rho f\{(\pi H/T)/\sinh kh\}^3 \cdots\cdots(3)$$

ここに，μ：粘性係数，$\beta=(\pi/\nu T)^{1/2}$，ν：動粘性係数，T：周期，H：波高，h：水深，$k=2\pi/L$，L：波長，ρ：水あるいは海水の密度，f：海底摩擦係数。いま，(2)式と(3)式とを相等しいとおけば，f に対するつぎの関係が与えられる。　$f = (3\pi/\sqrt{\pi}/8)\,Re_T^{-1/2}$ ……(4)

ここに，$Re_T^{1/2} = \sqrt{\pi}\beta H/\sinh kh$。なお，(2)および(3)式を(1)式へ代入し，$x=0$ で波高 $H=H_0$ として積分した結果は，それぞれつぎのようになる。すなわち(2)式に関して

$$H/H_0 = e^{-\epsilon_b x/L}, \quad \epsilon_b = 4\pi^2/\beta L(\sinh 2kh + 2kh) \cdots\cdots(5),(6),$$

(3)式に関しては　$H/H_0 = 1-(8/3\pi\sqrt{\pi})f\epsilon_b Re_T^{1/2}(x/L)$ ……(7)　となる。また(4)式および(6)式とから，ϵ_b と f との関係をもとめると，つぎのようになる。

$$f = (3/32\pi)\epsilon_b(H/L)^{-1}\{\sinh kh(\sinh 2kh + 2kh)\} \cdots\cdots(8)$$

波高減衰の実験結果を用い，Bretschneider らの方法によって f の値を算出する場合，エネルギー保存の関係式はつぎのようになる。

$$B(C_gE_1 - C_gE_2) = l\{\bar{E}'_{fb}B + 2\bar{E}_{fw}h\} \cdots\cdots(9),$$

ここに，B：水槽の幅，E_1 および E_2：波高測定点1および2における単位面積当りの波のエネルギー，l：波高測定点間の距離および $2\bar{E}_{fw}$：両側壁の摩擦によるエネルギー損失であって，著者らがさきに非線型項の影響を考慮して理論解析した結果を適用した。すなわち，

$$2\bar{E}_{fw} \fallingdotseq (\mu\beta/kh)(\pi H/T)^2\coth kh\{1 + 1.086\varepsilon\,\mathrm{sech}\,kh\}$$

ここに，$\varepsilon = (H/L)\pi/\sinh kh$

図-1(a) は このようにして算出した f の値と (4)式 の理論結果とを比較したものである。実験値は理論値より全般的に大きく，かなり散乱していることがわかる。この理由として，前者に対してはこれまで著者らが検討してきたものであり，また後者は f の推定に対して波高測定の精度が大きく関係することを示している。つまり，滑面水槽を用いた著者らの波高減衰の実験によれば，波高は距離とともに指数的に減少していくことが確認されたので，いま波高減衰に指数法則が適用できるものとし，かつ波高については，波高測定区間の中間地点における波高の値をもって，その区間の平均波高とみなして，この区間の距離のとり方により f の値がどのように変化するかを検討してみよう。いま 波高測定点 1，2 および両者の中間点における波高をそれぞれ H_1, H_2 および H_m とし，中間点から測点 1 および 2 までの距離を Δx で表わせば，波のエネルギー減少に対するつぎの表示が与えられる。

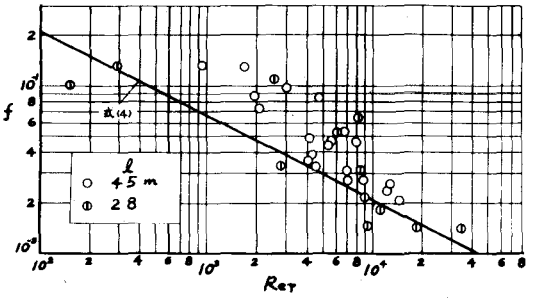

図-1(a) 海底摩擦係数 f と波のレイノルズ数 R_{eT} との関係

$$\Delta(C_g E)/2\Delta x = (\rho g/4)\, C_g H_m^2 (\epsilon_b L)\sinh 2\epsilon_b \Delta x/L / 2\epsilon_b \Delta x/L) \quad (10)$$

したがって，(10)式と(3)式とを等しいとおいて f に対するつぎのような関係が与えられる。

$$f/f_0 = \sinh 2\epsilon_b \Delta x/L \,/\, 2\epsilon_b \Delta x/L \quad \cdots\cdots (11)$$

ここに，$f_0 = (3\sqrt{\pi}/8) R_{eT}^{-1/2}$ であり，R_{eT} の中に含まれる波高は H_m である。この結果によれば，$(\epsilon_b \Delta x/L)$ の値が大きくなるとともに，f の値はかなり増大することがわかる。図-2は，平均波高として H_m を用い，(4)式の関係で算出した f の実験結果と，(11)式であらわされる理論結果とを比較したものである。この結果から著者らの実験の範囲内では，f に及ぼす $(\epsilon_b \Delta x/L)$ の影響は明らかではないが，$\Delta x/L$ の値が100程度になると顕著になると考えられる。なお図-1(b)は，H_m を用いた場合の f を図-1(a)と同様 R_{eT} との関係で図示したものであるが図-2の結果からも明らかなように，Δx による明確な傾向を見いだすことはむずかしい。以上から明らかなように，海底摩擦係数の推定にあたっては，波高測定の精度が大きく影響するので，これらの実験結果にもとづいてさらに詳細な検討をするには，適当な誤差評価をしなければならない。

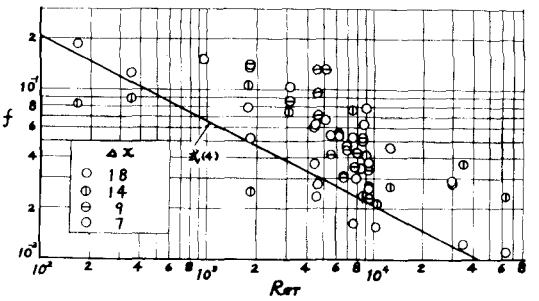

図-1(b) 海底摩擦係数 f と波のレイノルズ数 R_{eT} との関係

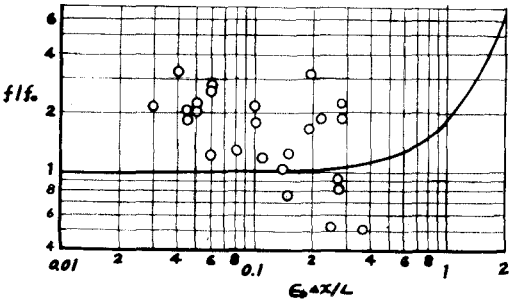

図-2 f におよぼす $\epsilon_b \Delta x/L$ の効果

最後に，この研究にあたり終始御指導をいただいた岩垣教授に謝意を表明する。この研究が文部省特定研究費による研究の一部であることを付記する。