

# 砕波後の波の底面摩擦力に関する実験的研究

——砕波の内部機構に関する基礎的研究 第4報——

榎 木 亨\*・岩田 好一朗\*\*・松 本 昇\*\*\*

## 1. 緒 言

著者らはここ数年来砕波の内部機構の解明にとり組んでいるが、前回<sup>1)</sup>著者らは砕波後のマクロ的な乱れの特徴を水理実験により明らかにし、さらに plunging breaker の場合砕波後の波高減衰の 12%~30% が horizontal roller によりもたらされることを明らかにした。そしてこれらの結果より horizontal roller 以外の要素が砕波後の波高減衰に大きく影響することを指摘したが、その要素の一つに底面摩擦力の効果があげられる。波高減衰に及ぼす底面摩擦力の効果については著者の榎木・岩田<sup>2)</sup>らがすでに段波理論を用いて数値計算を行いその効果のきわめて小さいことを述べてきたが、その際底面摩擦力の評価の妥当性については十分論議されていない。したがって、砕波後の波による底面摩擦力の実態を明らかにするため今回底面摩擦応力測定装置を試作し水理実験を行い、砕波後の波による底面摩擦力の特性を明らかにし、さらに砕波後の波高減衰に及ぼす底面摩擦力の効果に検討を加えたので、その結果を報告する次第である。

## 2. 実験装置、実験方法と解析方法

### (1) 実験装置

i) 実験水槽：実験は大阪大学工学部土木工学教室の屋内2次元鋼製造波水槽（長さ）30 m×（高さ）1.0 m×（幅）0.8 m（片面ガラス張り）を用いて行った。模型海浜は前回<sup>1)</sup>同様前端部が 1/18 の一様勾配傾斜面を持つ水平床を用い、水深変化に伴う shoaling 効果と return flow, wave set-up の効果をほとんど考慮しないでいい状況の下での実験である。

ii) 底面摩擦応力測定装置（shear meter）：すでにこの種の摩擦応力測定装置は、Eagleson<sup>3)</sup>、岩垣・土屋<sup>4)</sup>、松梨<sup>5)</sup>と Brebner<sup>6)</sup>などによって製作されそれぞれの測定装置の特性および計測された底面摩擦力について報告されている。著者らの shear meter は上述の既応の研究成果を参考にして試作されたもので、図-1 に示すように shear plate に作用する力を shear plate 下面鉛直方

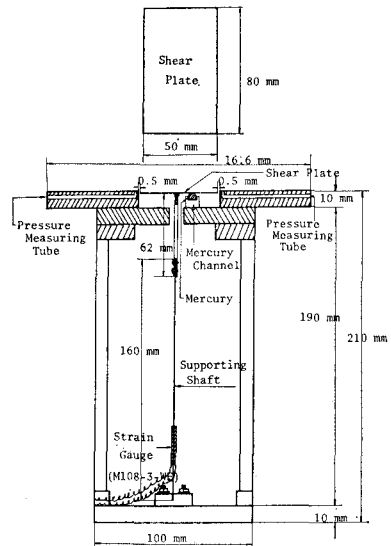


図-1 底面摩擦応力測定装置

向に取りつけられた支柱でモーメントに変換し、支柱下端部に貼りつけられたひずみゲージ(M108—3—WP)で測定する方法である。この受感部は図-1に示すように縦 10 cm×横 10 cm×高さ 21 cm のアクリライト製の箱の中に収納されており、測定時には shear plate に作用する力以外の余分な力が入らないようになっている。したがって、Eagleson<sup>3)</sup>らの装置と異なり支柱が底面の上の水中にないため、砕波のような強い衝撃力を持つ波に対しても精度高く底面摩擦力を測定することができると考えられる。支柱部材は 0.6 mm(厚さ)×0.92 cm(横幅)×16 cm(高さ)1枚と 0.6 mm(厚さ)×0.55 cm(横幅)×6.2 cm(高さ)2枚の鋼で作られている。shear plate の寸法は既往の研究成果と著者らの行った予備実験より 8.0 cm(水路幅方向)×5 cm(波の進行方向)×0.3 mm(厚さ)のステンレス板を用いた。また、shear plate は底面より下方にわずかずらし、shear plate 直下の空隙は 0.8 cm とし、shear plate と底面との間隔はすべて 0.5 mm とした。

shear plate に作用する力は底面摩擦応力以外に圧力勾配により shear plate 両端に作用する力、shear plate の周りの流体が加速度を持って運動することによる仮想質量力、shear plate の下の空隙内の流体が運動すること

\* 正会員 大阪大学教授 工学部土木工学教室

\*\* 正会員 大阪大学講師 工学部土木工学教室

\*\*\* 正会員 兵庫県庁土木部港湾課

により shear plate に及ぼす力があると指摘されている<sup>3),4)</sup>。圧力勾配による力は砕波後の波動表示式がないため計測波形より算出できない。したがって、図-1 に示すように shear plate 両端に相対する支持棒に2カ所受圧管を埋め込みこの両方の受圧管に作用する圧力差を差圧計により計測して圧力勾配による力を抽出する。この方法を微小振幅浅水波に対して検討したところ 表-1

表-1 差圧計による圧力勾配抽出例

| $h$  | $T$     | $H$   | $\left(Ad \frac{\partial p}{\partial x}\right)_{理}$ | $\left(Ad \frac{\partial p}{\partial x}\right)_{実}$ |
|------|---------|-------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 29cm | 1.0 sec | 1.2cm | 0.017                                               | 0.020                                               |
| "    | "       | 2.4   | 0.033                                               | 0.036                                               |

( $A$ : shear plate 面積,  $d$ : shear plate 厚,  $p$ : 圧力, 添字 実=実験値, 理=微小振幅理論値)

に示すように微小振幅浅水波理論値とほぼ一致したため砕波後の波に対しても正確な圧力勾配の抽出が可能であると判断した。この場合 shear plate の下での水の流れを止めないと, shear plate 上面と下面での波動に伴う圧力勾配が異なりそのため波動が本来作用する方向と逆方向の力が shear plate に作用するため, shear plate に作用する力の位相が波の位相より遅れるといった矛盾を生じることが判明したため<sup>3)</sup>, Eagleson<sup>3)</sup>, 岩垣・土屋<sup>4)</sup>らと同様, shear plate 下に水銀を設置して shear plate 下の流れを止めて行った。この下の流れの停止状態は粉末ミルクを溶かした液を shear plate 下に注入しトレーサーにして可視することにより確認している。なお水銀の設置位置は中心より若干ずれているが, 中心に入れなくても摩擦力にほとんど影響しないことが予備実験で確認している。また, shear plate に仮想質量力が働くか否か疑問があるが, ここでは無視し得るものとする<sup>4)</sup>。したがって, shear plate 下に水銀を置くことにより, shear plate に作用する力は底面摩擦力と圧力勾配により両端に作用する力の合力として取扱い以後の実験値の解析を行っていく。なお, 本実験で用いた shear meter の固有振動数は 5.6 Hz であり, 減衰抵抗係数と臨界減衰抵抗係数比は 0.111 となるので強制振動の振幅は後述する実験波に対し 5% 大きく見積られることになるが, これは実験誤差の範囲内に入るので本論では振幅の修正は行っていない。

表-2 実験諸元

|           |                 |
|-----------|-----------------|
| $h$ cm    | 7.0, 11.0, 14.0 |
| $T$ sec   | 0.8, 1.0, 1.2   |
| $H_0$ cm  | 3.4 ~ 10.2      |
| $H_0/L_0$ | 0.018 ~ 0.095   |
| $h/L$     | 0.0704 ~ 0.1494 |

## (2) 実験方法と解析方法

実験は horizontal bed での水深  $h=7$  cm, 11 cm, 14.0 cm

の三種類, 実験波の周期  $T$  は 0.8 sec, 1.0 sec, 1.2 sec の3種類, 沖波波高  $H_0$  はおのおの周期に対して plunging breaker と spilling breaker とが生じるように 3.4 cm ~ 10.2 cm 間で選んだが, その実験諸元は 表-2 に示す。

実験は shear meter を砕波帯の測定地点に設置し, それと同地点に電気抵抗線式波高計 1 個とピトー管型差圧流速計を 2 個設置する。まず水深を十分深くして砕波しない微小振幅波を生起させて最大底面摩擦力の実測値と式 (1) で与えられる層流境界層理論値<sup>4)</sup>の一致度合を

$$\tau_{b \max} = \left[ \frac{2}{1 + [1 + D/C]^2} \right]^{1/2} \cdot F_{\max}, \quad C = \frac{\mu k c \beta}{2 \sinh k h},$$

$$D = \frac{\rho g k d}{2 \cosh k h}$$

$$\left. \begin{array}{l} F_{\max}: \text{shear plate に作用する力の最大値, } \mu: \\ \text{分子粘性係数, } k=2\pi/L, c: \text{波速, } h: \text{静水深,} \\ \rho: \text{流体密度, } g: \text{重力加速度, } d: \text{shear plate 厚,} \\ \beta = \sqrt{\sigma/2\nu}, \sigma=2\pi/T, \nu: \text{流体の動粘性係数,} \\ T: \text{波の周期.} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

確認した後 (実測値と理論値の比較を 表-3 に一例として示されている), 所要の水深に減少させて砕波後の波による shear plate に作用する力, 流速, 波形の計測を行う。計測はほぼ  $x/L \leq 2.5$  ( $x$ : 砕波点からの波の進行方向への距離,  $L$ : 水深  $h$  での波長) の範囲での 6~8 地点で行う。なお, plunging breaker の場合は horizontal roller の形成領域で正確な shear が計測できない場合があるため, この領域での底面摩擦力の計測はほとんど行っていない。shear meter で計測される摩擦力には高周波数成分が含まれるため, Low pass filter (10 Hz 以上カット) を通して電磁オシログラフ (visigraph) に記録させた。なお, 波動は電気抵抗線式波高計により計測し, shear-force

表-3 砕波しない浅水波による底面摩擦応力の測定

| $h$                   | 28cm (8°C)                         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------------------|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $T$                   | 0.8 sec                            |         | 1.0 sec |         | 1.2 sec |         |         |         |
| $h/L_0$               | 0.28                               |         | 0.179   |         | 0.124   |         |         |         |
| $H$                   | 0.4 cm                             | 1.25 cm | 1.0 cm  | 1.16 cm | 1.56 cm | 0.66 cm | 1.19 cm | 1.57 cm |
| $(F_{b \max})_{実}$    | 0.260 <sup>gr</sup>                | 0.920   | 0.690   | 0.868   | 1.13    | 0.521   | 1.137   | 1.389   |
| $(\tau_{b \max})_{実}$ | 0.164 <sup>gr/cm<sup>2</sup></sup> | 0.572   | 0.454   | 0.570   | 0.743   | 0.354   | 0.723   | 0.944   |
| $(\tau_{b \max})_{理}$ | 0.176 <sup>gr/cm<sup>2</sup></sup> | 0.500   | 0.500   | 0.520   | 0.780   | 0.376   | 0.678   | 0.895   |
| $(\tau_{b \max})_{実}$ | 0.942                              | 1.140   | 0.982   | 0.982   | 0.953   | 0.942   | 1.07    | 1.05    |
| $(\tau_{b \max})_{理}$ |                                    |         |         |         |         |         |         |         |

( $F_{b \max}$ =Shear plate に作用する最大の力,  $\tau_{b \max}$ =底面最大摩擦応力, 添字: 実=実験値, 理=滑面層流境界層理論値)

とピトー管型差圧流速計の記録と同記録紙上に同時記録させている。また、記録は造波板始動開始の第1波から第20波目までとし、解析は第10波目から第14波目の5波に対して行い、その5波間で値の変動があるときはその平均値を採用している。一方、底面摩擦力は計測された合力より差圧計で得られた圧力勾配による力を記録紙上で  $0.01 \text{ sec} \sim 0.1 \text{ sec}$  間隔で引き算をして算出する。

底面摩擦係数および波高減衰に及ぼす底面摩擦力の効果

を算定するには底面流速の時間変化を求めておかなければならない。現在のところ精度高く定点の流速の時間変化を求める計器がないため、著者らは次の方法で求めた。まず、水と同比重のトレーサー（四塩化炭素とキシレンで合成する）を水中に投入し

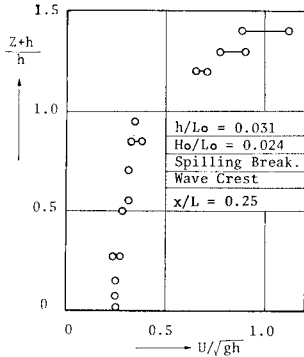


図-2 波峰位相での水平方向水粒子速度の鉛直分布

16 mm 高速シネカメラ (100 コマ/sec $\sim$ 200 コマ/sec) でトレーサーの動きを撮影する。この 16 mm フィルムの写真解析は 2 コマ $\sim$ 3 コマとばして行い、同一の粒子をフィルムモーションアナライザーで追跡して水平方向の水粒子速度を求めるが、波の峰の位相での解析結果の一例を示すと図-2 のようになる。この操作を波一周周期当りほぼ  $\pi/4 \sim \pi/5$  間隔で行い底面流速の時間変化を求める。なお、この写真解析で得られた流速は波の進行方向および逆方向の両方に同地点に設置されたピトー管型差圧流速計で得られた値とつき合せて確認しているが、その結果両者の最大流速はよく一致していることが認められたが今回は主として写真解析より底面流速の時間変化を求めた。なお、写真撮影に際しては、トレーサーの水槽横方向の動きを少なくするため水路を二分割し、狭いほうの 30 mm 幅の水路にトレーサーを投入している。また、用いたレンズは 25 mm の標準レンズで、焦点深度は一番浅くしている。16 mm 高速シネカメラはフォトソニックであり、用いたフィルムはコダックカラー EF 7242 で、倍感度現象を行っている。

### 3. 実験結果とその検討

#### (1) 最大底面摩擦応力 $\tau_{b \max}/\rho g H$

図-3 は砕波後の波とその波により shear plate に生じる底面摩擦応力の時間波形を示した一例であるが、一般的に言えることは、沖波波形勾配  $H_0/L_0$  が大きい plunging breaker の波は spilling breaker より底面摩擦応力の時間波形は前傾して非対称性が著しく、波の伝播

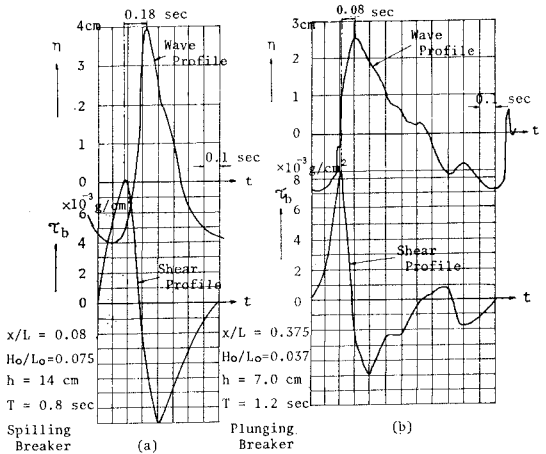


図-3 計測波形の一例

方向に作用する最大底面摩擦応力は大きい、その後間もなく逆方向の最大底面摩擦応力が生じてその両極値の生ずる時間間隔はたとえば 図-3 (b) に示す場合には  $1/6 T$  ( $T$ : 波の周期) 程度ときわめて短い。逆方向の最大値の後は底面摩擦応力は 0 近傍の小さな値をとるが、この作用時間は 図-3 (b) については  $1/4 T$  と比較的長い。一方、spilling breaker の場合は 図-3 (a) に示すように plunging breaker の場合より非対称性はあまり大きくない。

図-4 は波の伝播に伴う波の進行方向とその逆方向に

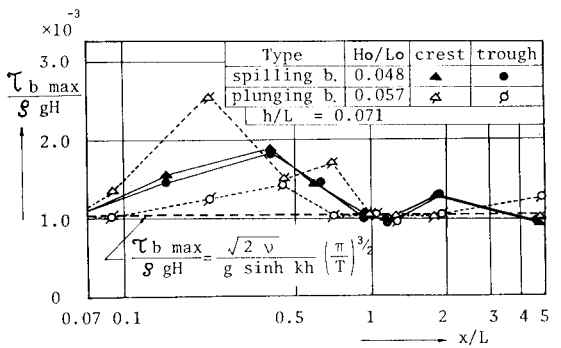
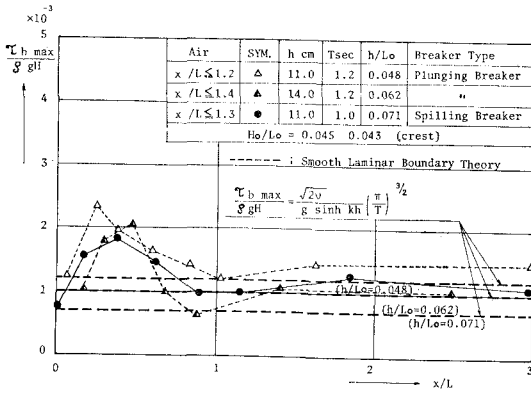
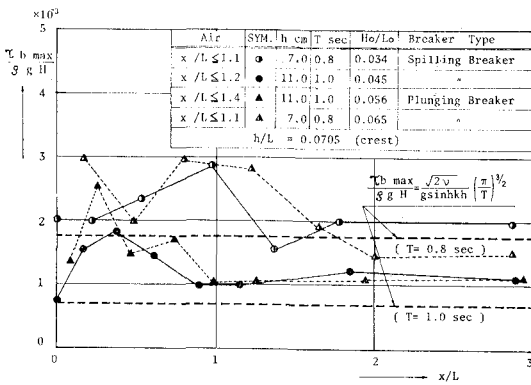


図-4  $\frac{\tau_{b \max}}{\rho g H}$  と  $x/L$  の関係

作用する最大底面摩擦応力  $\tau_{b \max}/\rho g H$  の変化を砕波型別に示した一例であり、図-5, 6 は波の伝播に伴う  $\tau_{b \max}/\rho g H$  と比水深  $h/L_0$  の関係及び沖波波形勾配  $H_0/L_0$  の関係を示した一例である。なお、同図には比較のため式 (2) で与えられる微小振幅滑面層流境界層理論値<sup>4)</sup>が示されているが、この層流理論値との比較理由は後述する。

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

図-5  $\frac{\tau_{b \max}}{\rho g H}$  と  $x/L$  と  $h/L_0$  の関係図-6  $\frac{\tau_{b \max}}{\rho g H}$  と  $x/L$  と  $H_0/L_0$  の関係

前回<sup>1)</sup>すでに指摘したように、砕波後の乱れの規模が砕波型により著しく異なるため、砕波後の波による  $\tau_{b \max}/\rho g H$  の特性も砕波型と乱れの規模により著しく異なる。砕波型の差異が明確に認められるのはたとえば図-4に示すような砕波点から気泡連行を伴う領域で ( $x/L \leq x_A/L$ ) であり、それ以後の気泡連行を伴わない領域では砕波型別の差異は明確ではない。図-4によれば、 $H_0/L_0 = 0.048$  の波に対しては  $x/L \leq x_A/L = 1.2$ 、 $H_0/L_0 = 0.057$  の波に対しては  $x/L \leq x_A/L = 1.4$  が気泡連行領域に相当するが、この領域では plunging breaker のほうが spilling breaker の波より  $\tau_{b \max}/\rho g H$  が大きいこと、また、plunging breaker の crest の  $\tau_{b \max}/\rho g H$  が trough のそれより大きく、たとえば、 $x/L = 0.21$  では前者は後者の2.3倍もの値をとっていること、一方 spilling breaker は crest と trough の  $\tau_{b \max}/\rho g H$  の差は plunging breaker と比して小さいことなどが認められる。なお、crest: 波の伝播方向, through: 波の伝播と逆方向を意味する。また、図-5, 6によれば、砕波後の気泡連行領域での  $\tau_{b \max}/\rho g H$  は気泡連行を伴わない領域より大きいこと、 $h/L_0$  と  $H_0/L_0$  に関係なく気泡連行のない領域での  $\tau_{b \max}/\rho g H$  の変化はきわめてわずかであることな

どが明らかであるが、 $\tau_{b \max}/\rho g H$  に及ぼす  $h/L_0$  および  $H_0/L_0$  の系統的な傾向ははっきりしない。

図-4~6には滑面層流境界値が同時に示されているが、気泡連行領域では実験値のほうが理論値よりも大きく、最大で理論値の3倍も大きくなる場合があって、層流境界層理論の適用の不可能なことは明白である。一方気泡連行のない乱れの小さな領域では、上述の気泡連行領域より層流理論値に近い値をとるものの実験値との差異が大きい場合もあり後述するように Reynolds 数  $Re_T = (u_{b \max}^2 \cdot T/\nu)$  によればこの領域が層流境界層領域にあるにもかかわらず、著者らの実験領域  $x/L \leq 5.0$  では完全な層流理論値の適用には疑問が残されている。

## (2) 底面摩擦係数

従来、底面摩擦係数として定義されてきたものとしては次の3つの式で示される値があげられる。

$$f = \tau_b / \rho U_b^2, \quad (\text{Bretschneider}^{8)}) \cdots (3)$$

$$\begin{aligned} \bar{C}_f &= 2\tau_b / \rho U_b^2, & (\text{Eagleson}^{9)}) \\ &\cong 6.39 Re_T^{-1/2}, & (Re_T = U_{b \max}^2 \cdot T/\nu) \\ & & (\text{岩垣・土屋}^{4)}) \end{aligned} \cdots (4)$$

$$\hat{C} = \tau_b / \rho \hat{U}^2 \quad (\text{梶浦}^{9)}) \cdots (5)$$

式(3)で与えられる  $f$  は主に現地海岸に対して用いられるもので  $\tau_b$  と  $U_b$  の位相が考慮されていない。また、式(4)、(5)は正弦波を想定しているため、砕波後の波のような非対称的な波形波に対しては、そのまま適用することはできない。したがって、著者らは Eagleson の考え方を基にして次に示すように底面摩擦係数  $\hat{C}_f$  を新しく定義する。

$$\begin{aligned} \hat{C}_f &= \frac{1}{2\pi} \{ \theta_c \hat{C}_{f0} + \theta_t \hat{C}_{ft} \} \\ \hat{C}_{f0} &= 2 \frac{|\tau_{b0}|}{\rho U_{b0}^2}, \quad \hat{C}_{ft} = 2 \frac{|\tau_{bt}|}{\rho U_{bt}^2}, \\ \theta_c + \theta_t &= 2\pi \end{aligned} \cdots (6)$$

なお、上式で添字  $c$  と  $t$  はおのの波の進行方向とその逆方向の位相を示し、 $-$  はその位相区間平均を示す。したがって、 $|\tau_{b0}| = \frac{1}{\theta_c} \int_{\theta_c}^{\theta_c + \theta_c} |\tau_b| d\theta$  として定義されている。なお、 $\theta_0$  は  $\tau_b = 0$  となる位相である。

以下  $U_b$  と  $\tau_b$  の実測値から計算された、 $\hat{C}_f$ ,  $\hat{C}_{f0}$ ,  $\hat{C}_{ft}$  の特性について述べ、さらに  $f$ ,  $\bar{C}_f$  との関連性について述べていく。なお、本実験の Reynolds 数  $Re_0 = U_b^2 \cdot T/\nu = 0.5 \times 10^4 \sim 2.5 \times 10^4$  の範囲であり、 $U_b^2$  の代りに  $U_{b \max}^2$  を用いて定義された Reynolds 数  $Re_T$ <sup>4)</sup> で示すとこの範囲は  $Re_T = U_{b \max}^2 \cdot T/\nu = 0.5 \times 10^4 \sim 6.67 \times 10^4$  となる(ただし、1ケースのみ  $Re_T = 10.26 \times 10^4$  となる場合がある)。Collins<sup>10)</sup>によれば層流境界層から乱流境界層への移行限界は  $Re_T = 8.04 \times 10^4$  で与えられる。したがって、これによれば本実験は乱流境界層でなく層流境界層領域あるいは遷移境界領域となっていることとなる。

図-7は砕波後の波の伝播に伴う底面摩擦係数  $\hat{C}_f$  の

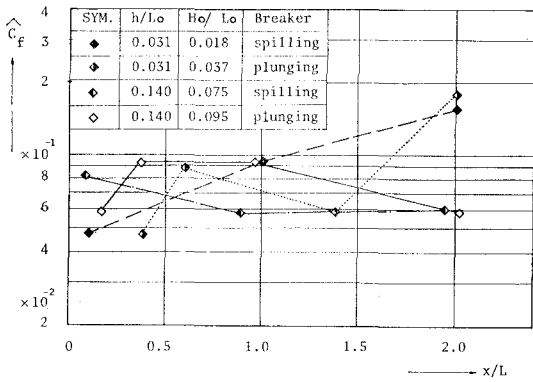


図-7  $\hat{C}_f$  と  $x/L$  の関係

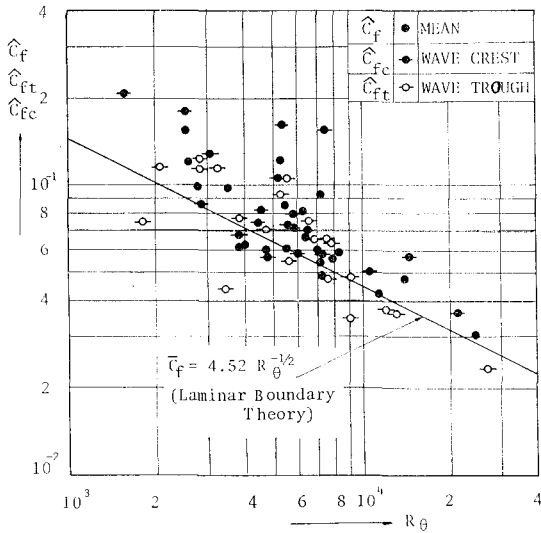


図-8  $\hat{C}_f$ ,  $\hat{C}_{f_0}$ ,  $\hat{C}_{f_t}$  と  $R_0$  の関係

値を示したものである。同図によれば  $\hat{C}_f = 0.046 \sim 0.18$  の値をとるが波の伝播に伴い増加したり減少したりして変動が激しい。このことは砕波後の波の進行に伴う底部流速は波高同様必ずしも一様な変化をしないことを意味している。この  $\hat{C}_f$  と  $\hat{C}_{f_t}$  と  $\hat{C}_{f_0}$  と  $R_0$  の関係を示したのが 図-8 であり、同図には層流理論値  $\bar{C}_f = 4.52 R_0^{-1/2}$  が比較のため示されている。同図によれば、 $\hat{C}_f$ ,  $\hat{C}_{f_t}$ ,  $\hat{C}_{f_0}$  とも Reynolds 数  $R_0$  が大きくなるにつれて小さくなり、逆に  $R_0$  が小さくなると、 $\hat{C}_f$ ,  $\hat{C}_{f_t}$ ,  $\hat{C}_{f_0}$  とも大きくなっており  $R_0$  の関数として表示できると推察されるが、 $R_0 < 0.6 \times 10^4$  の小さな領域では層流理論値の 2~3 倍もの大きな値を取る場合もあり、既往の層流理論値では砕波後の波の底面摩擦係数の特性を当然説明することはできない。なお、図-8 によれば  $\hat{C}_f$ ,  $\hat{C}_{f_0}$ ,  $\hat{C}_{f_t}$  の差異は明確ではないが、 $\hat{C}_f$  は  $\hat{C}_{f_t}$  と  $\hat{C}_{f_0}$  のほぼ中間の値となっている。一方、式(3)で定義される  $f$  と  $Re_T (= U_{\max}^2 \cdot T/\nu)$  の関係を示したのが 図-9 である。本実験で得られた  $f$  は  $f = 0.0075 \sim 0.098$  の範囲の値を

とるが、 $Re_T$  が小さくなるにつれて  $f$  は大きくなる。しかし、同図に示した層流理論値  $f = 2.08 Re_T^{-1/2}$  よりはるかに大きく、 $Re_T < 1.5 \times 10^4$  の範囲では実験値は 2~4 倍も理論値より大きな値をとっている。

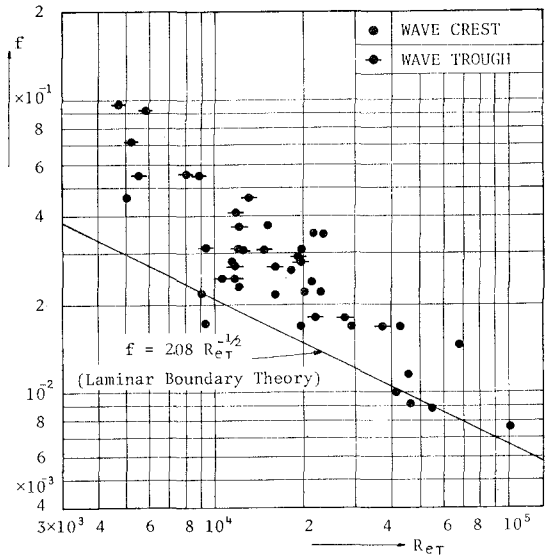


図-9  $f$  と  $Re_T$  の関係

### (3) 波高減衰に及ぼす底面摩擦力の効果

エネルギー保存則によれば砕波後の波に対して式(7)が成立する。

$$\frac{d}{dx}(C_g E) = \overline{E_{fb}} + \overline{E_{f0}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

なお、 $E$ : 波のエネルギー、 $C_g$ : 群速度、 $\overline{E_{fb}}$ : 単位時間単位面積当たり底面摩擦力により消費される波の平均エネルギー損失、 $\overline{E_{f0}}$ : 底面摩擦力以外のすべての要素による単位時間単位面積当たり消費される波の平均エネルギー損失を意味する。このうち、 $\overline{E_{fb}}$  は式(8)で与えられるものとする。

$$\overline{E_{fb}} = \frac{1}{T} \int_0^T \bar{\tau}_b \cdot \bar{U}_b \cdot dt \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $\bar{\tau}_b$ ,  $\bar{U}_b$  は既述したように波の進行方向、あるいは逆方向に働く位相区間での時間平均を意味する。いま、 $E = (1/8) \rho g H^2$ ,  $C_g = C$  (伝播速度) と仮定し、さらに式(8)を用いて、式(7)の左辺と右辺第1項の比  $\epsilon$  をとると式(9)のように与えられる。なお、 $C$  は区間  $dx$  で一定として取扱う。

$$\epsilon = \frac{\overline{E_{fb}}}{\frac{d}{dx}(C_g \cdot E)} = \frac{4 \int_0^T \bar{\tau}_b \cdot \bar{U}_b \cdot dt}{\rho g H \cdot T \cdot C \cdot \left( \frac{dH}{dx} \right)} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式(9)より  $\epsilon$  の値を求めた一例を表-4 に示す。なお、表-4 で示した地点  $x/L$  別の値  $\epsilon$  は、その地点前

表—4  $\varepsilon$  と  $x/L$  との関係

| RUN | $h$ cm | $T$ sec | $H_0^m$ | $H$ cm | $x/L$ | $c/\sqrt{gh}$ | $\varepsilon \times 10^2$ | Breaker  |
|-----|--------|---------|---------|--------|-------|---------------|---------------------------|----------|
| 5   | 7      | 1.2     | 5.0     | 4.4    | 0.25  | 1.07          | 0.8                       | Spilling |
|     | "      | "       |         | 2.7    | 1.40  | 0.97          | 4.0                       |          |
|     | "      | "       |         | 2.6    | 2.10  | 0.94          | 8.9                       |          |
| 6   | 7      | 1.2     | 8.0     | 5.0    | 0.30  | 1.07          | 0.6                       | Plunging |
|     | "      | "       |         | 3.2    | 1.50  | 1.14          | 4.2                       |          |
|     | "      | "       |         | 2.7    | 2.20  | 1.03          | 5.5                       |          |
| 13  | 14     | 0.8     | 6.3     | 5.4    | 0.85  | 0.87          | 1.7                       | Spilling |
|     | "      | "       |         | 4.9    | 1.30  | 0.99          | 2.2                       |          |
|     | "      | "       |         | 4.6    | 2.00  | 0.94          | 7.7                       |          |
| 14  | 14     | 0.8     | 9.5     | 5.4    | 0.95  | 0.94          | 1.0                       | Plunging |
|     | "      | "       |         | 5.0    | 1.30  | 0.99          | 1.9                       |          |
|     | "      | "       |         | 4.7    | 2.05  | 0.94          | 2.6                       |          |

( $H_0$ =砕波波高)

後の最も近い二点の波高より  $dH/dx$  を計算してその地点での  $dH/dx$  と置いて求めたものである。同表より plunging breaker と spilling breaker とでは波高減衰に及ぼす底面摩擦力の効果はほぼ同程度であること、砕波点から伝播するにつれて ( $x/L$  が大きくなる)  $\varepsilon$  が大きくなり、波高減衰に及ぼす底面摩擦力の効果が大きくなることが認められるが、その効果はたとえば、 $x/L=2.1$  地点で高々 9% 程度ときわめて小さい。したがって、この事実から砕波後の気泡連行を伴う乱れた領域では底面摩擦力は波高減衰に大きく寄与しないといっても過言ではなからう。

#### 4. 結 語

本論では、まず底面摩擦応力測定装置を製作し、砕波後の波の底面摩擦力を実測して、砕波後の底面摩擦力、底面摩擦係数の特性を明らかにした。ついで砕波後の波高減衰について検討を加え、気泡連行を伴う乱れの大きい領域では底面摩擦力は波高減衰にほとんど寄与しないことを明らかにした。したがって、砕波後の急激な波高低減は前回報告した horizontal roller および今回報告した底面摩擦力以外の要素に帰因することが明白になった。再々著者らは指摘しているように、波高低減の大き

い領域では常に気泡の連行を伴っているため、この連行気泡量の波高低減効果を明確にしなければならない。著者らはこの点につき目下検討中であり、この結果については後日報告するつもりである。なお、本実験は神戸商船大学久保雅義助手の協力を得て行ったものであることを記しここに謝意を表する次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) 榎木 亨・岩田好一朗・松本 昇: 砕波後の波の変形に及ぼす乱れの効果について—砕波の内部機構に関する基礎的研究第3報一, 第20回海岸工学講演会論文集, 1972.
- 2) 榎木 亨・岩田好一朗・中辻啓二: 砕波の内部機構に関する基礎的研究(第2報), 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要, 昭和45年.
- 3) Eagleson, P.S.: Laminar Damping of Oscillatory Waves, Proc. of A.S.C.E., Vol. 88, No. HY3, 1962.
- 4) 岩垣雄一・土屋義人・坂井順行: 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—, 第11回海岸工学講演会講演集, 1964.
- 5) 松梨順三郎・川谷 健: 波による海底の変形に関する基礎的研究—底面摩擦応力の測定について—, 第12回海岸工学講演会講演集, 1965.
- 6) Riedel, H.D., Kamphuis, J.W. and Brebner, A.: Measurement of Bed Shear Stress under Waves, Proc. of 13th Conf. on Coastal Eng., 1972.
- 7) 榎木 亨・岩田好一朗・久保雅義: 底面及び側壁の波による摩擦応力について—滑面層流の場合—, 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要, 昭和49年度.
- 8) Bretschneider, C.L.: Field Investigation of Wave Energy Loss of Shallow Water Ocean Waves, BEB., Tech. Memo., No. 46, 1954.
- 9) Kajiura, K.: A Model of the Bottom Boundary Layer in Water Waves, Bull. Earthquake Res., Inst., Univ. of Tokyo, Vol. 46, 1968.
- 10) Collins, J.I.: Inception of Turbulence at the Bed under Periodic Gravity Waves, J. of Geophys. Res., Vol. 68, 1963.
- 11) 岩垣雄一・土屋義人・陳 活雄: 海底摩擦による波高減衰の基礎的研究(3)—層流境界層方程式の非線型の影響について—, 第12回海岸工学講演会講演集, 1965.