

砕波後の波動エネルギーに及ぼす連行気泡量の効果について

- 名古屋大学工学部 正会員 岩田好一朗
 東急建設株式会社 正会員 布藤 省三
 日本テラポッド(株) 正会員 小山 裕文

1. 緒言: 砕波は気泡と連行する臭で非砕波の波と本質的に異なる。本報では、砕波している波は気泡連行領域の流体の平均密度は気泡と連行しない領域より小さいという観点に基づき、連行気泡量と考慮したエネルギー流束の平衡式を誘導する。ついで、水理実験を行なった気泡連行域と水粒子速度の計測を行なって波動エネルギーと波動エネルギー流束を算定する。そして、連行気泡量の寄与について検討しようとするものである。

2. エネルギー平衡式: 二次元(x - z 平面)の現象を取り扱う。連続式(式(1))と N - S 方程式(式(2)と式(3))よりエネルギー平衡式を誘導する。なお、 ρ : 流体密度、 x と z : 水平軸と鉛直軸、 u と w : 水平方向と鉛直方向の水粒子速度、 μ : 分子粘性、 P : 圧力、 g : 重力加速度、 ∇^2 : ラプラスアン、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (1), \quad \rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \quad (2)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\rho g - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \nabla^2 w + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (3)$$

である。よに、水深は一定水深とし、水底は $z = -h$ と与えるものとする。さて、式(2)と式(3)を水底 $z = -h$ から自由表面 η まで積分し、水底条件と自由表面での力学および運動学的条件を満足しながら変形した後、 N 周期の時間平均をとると、エネルギー流束の保存則は次式で与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^{\eta} \left\{ \frac{1}{2} \rho (u^2 + w^2) + \rho g z \right\} dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} \left\{ u \left\{ \frac{1}{2} \rho (u^2 + w^2) + \rho g z - P \right\} \right\} dz = - \int_{-h}^{\eta} P \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dz \\ + \int_{-h}^{\eta} \mu [u \nabla^2 u + w \nabla^2 w] dz + \int_{-h}^{\eta} \frac{1}{3} \mu \left[u \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + w \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] dz \quad (4)$$

式(4)の右辺のエネルギー消散項は砕波後の波に対してそのまゝ適用できないが、式の展開上そのまゝ示した。つぎに、波動内部の $-ha(x) \leq z \leq \eta$ (但し $-\eta < ha(x) < h$) の範囲に気泡が連行され、この領域の平均流体密度が $k\rho$ ($0 < k \leq 1$) と与えられるとする。圧力 P は 2 次オーダーの近似で充分なので、気泡連行を考慮する場合のエネルギー流束の平衡式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial t} (E) + \frac{\partial}{\partial x} (F) - (1-k) \left[\frac{\partial}{\partial t} (E_a) + \frac{\partial}{\partial x} (F_a) \right] = E_d \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{すなわち、} \quad E &= \int_{-h}^{\eta} \left\{ \frac{1}{2} \rho (u^2 + w^2) + \rho g z \right\} dz, \quad E_a = \int_{-ha}^{\eta} \left\{ \frac{1}{2} \rho (u^2 + w^2) + \rho g z \right\} dz \\ F &= \int_{-h}^{\eta} u \left\{ \frac{1}{2} \rho (u^2 + w^2) + \rho g \eta \right\} dz, \quad F_a = \int_{-ha}^{\eta} u \left\{ \frac{1}{2} \rho (u^2 + w^2) + \rho g \eta \right\} dz + \int_{-h}^{-ha} u \rho g (ha + \eta) dz \end{aligned} \right\}$$

E_c はエネルギー逸散項であり、その表示式についてはいまだ触れぬ。式(5)の左辺の3項と右辺の4項は気泡を連行する場合に考慮すべき補正項であり、気泡連行のない場合($k=1$)は消滅する項である。

3. 水理実験: 実験は名古屋大学工学部土木工学科の室内循環二次元造波水槽(25m×0.9m×0.178m)で行われた。前端部が1/8勾配のstep型水平床で碎波の実験が行った。実験波は波形勾配(H_0/L_0 ; H_0 と L_0 は沖波波高と沖波波長)0.051, 0.096と0.114の3種類の規則波である。水面波形は電気容量式水位計で、流速はキャンティレバー型流速計で計測された。流速は碎波直前から碎波後の範囲内の200地点で計測された。碎波領域は16mm高速シネカメラ(60コマ/秒)で撮影し、写真解析より決定した。図-1はheavy plunging breaker ($H_0/L_0=0.114$ の波)に対する4波平均の気泡連行領域の下限値 $h_a(x)$ を模式的に示したものであるが、実験に於いては、次式で近似できた。

$$\left. \begin{aligned} -h_a(x) &= \eta_{bc}(1 - x/x_p) & 0 \leq x \leq x_p \\ -h_a(x) &= h_{amax}(x - x_a)/(x_a - x_p) - h_{amax} & x > x_p \end{aligned} \right\} (6)$$

式(6)で、 η_{bc} は碎波点における波頂高さ(静水面上の値)、 x_p は碎波点からplunging pointまでの水平距離、 x_a は碎波点から気泡が最も深く進入する地点までの水平距離で、その時の空気連行水深を h_{amax} とする。なお、spilling breakerの場合には、式(6)とは異なり $h_a(x)$ の表示式が必要とする。

4. 実験結果とその考察: 図-2と図-3はheavy plunging breakerの場合のエネルギー流束 F_c^* とエネルギー E_c^* の変化を示したものである。図-2に於いて、 F_{cB}^* と E_{cB}^* はそれぞれ碎波点におけるエネルギー流束とエネルギーを示す。また、 $F_c^* = F - (1-k)F_a$ 、 $E_c^* = E - (1-k)E_a$ である。気泡連行領域の k の値が正確に判らないので、 $k=1, 0.9$ と0.8と三種類変化させて計算を行った。図-2に於いて、 $k=1, 0.9, 0.8$ と小さくなるにつれて F_c^*/F_{cB}^* は小さくなり、連行気泡の効果が認められる。この連行気泡の効果は本実験で行ったheavy plunging breakerの場合に $k=0.8$ で最大で F_{cB}^* の12~14%に及びることが認められる。

一方、図-3に示すエネルギー E_c^* の場合についても同様の事が認められ、 $k=0.8$ の場合、 E_c^* は最大で碎波点の値 E_{cB}^* の15%程度の補正しなければならず、連行気泡量の効果は場合によっては無視できないと指摘できよう。

5. 結言: 以上、エネルギーとエネルギー流束に及ぼす連行気泡量の効果について述べたが、空気連行領域の流体の平均密度 ρ の正確な推算が必要とされる。継続して検討を加えていく。参考文献: 1) 岩田・布藤・奥田; 中部支部年報, 1985, 2) 岩田・小山・布藤; 海講演文集, 1984。

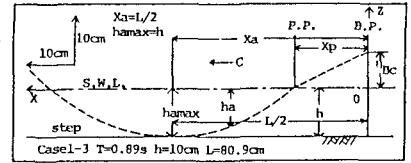


図-1 気泡混入領域

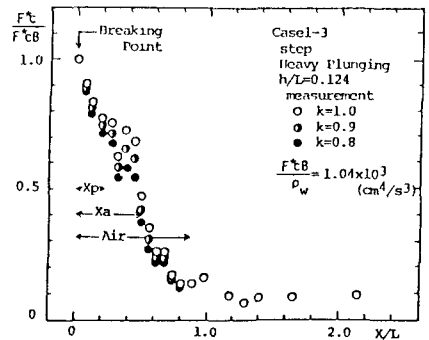


図-2 エネルギー流束の変化

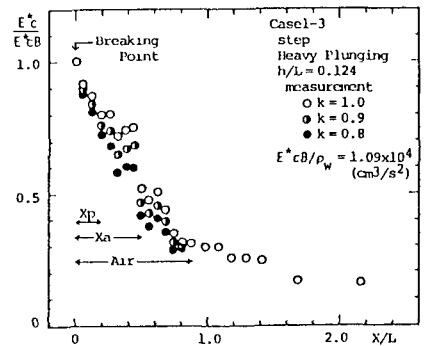


図-3 波動エネルギーの変化