

名古屋大学工学部 正員 岩田 好一朗

日立造船株式会社 正員 清野 博

1. はじめに：港湾構造物の前面水域に形成される重複波の砕波特性は、構造物の設計外力のみならず、地方港湾における小型船舶の安全航行および異常波浪時の港内避泊の安全性に対し重要な影響を及ぼす。例えば、港口部における小型船舶の転覆・損傷の大きな要因の一つに重複波の砕波が挙げられる。不規則波の重複波の砕波については従来ほとんど論議されていなく、防災工学の面からも早急に解明すべき問題の一つになっている。本報告では、不規則波に先立ち、二成分合成波の重複波の砕波現象を水理実験により検討したので、その結果の一部を報告する。

2. 水理実験：実験は名古屋大学工学部土木工学教室の片面ガラス張りの二次元鋼製造波水槽（ $1^{\text{m}} \times 0.75^{\text{m}} \times 25^{\text{m}}$ ）で行なわれた。水路を長さ方向に2分割し、ガラス面のある水路に反射板（木製不透過板）を設置して重複波の砕波を作った。他方の水路には反射体を設置しないで、進行波のみの状態にした。入射波と重複波の水位変動は6台の電気容量式水位計で計測し、全て磁気テープに収録した。砕波点、砕波波高などの砕波時の特性は16 mm 高速シネカメラ（54コマ/秒）で撮影した写真の解析および水位の時間波形記録を用いて決定した。実験波は多成分波合成器により作ったが、その際の二つの基本周期は $T_1=1.0$ 秒、 1.2 秒、 1.6 秒と $T_2=0.9T_1$ 、 $0.8T_1$ 、 $0.7T_1$ である。また、二つの基本波の波高はほぼ等しくした。静水深は 33^{cm} である。

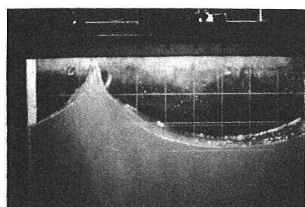
3. 実験結果とその考察：(1) 砕波状況：水理実験によれば砕波状況は三つに大別される。つまり、(i)重複波型砕波：波峰はほとんど移動せず、水粒子が鉛直方向に飛び出す形で砕波（写真1）、(ii)入射進行波型砕波：波峰が入射波の進行方向に移動しながら砕波（写真2）と(iii)反射進行波型砕波：波峰が反射波の進行方向に移動しながら砕波（写真3）。なお、写真1～3は不規則波に対する砕波状況を示したものであるが、二成分波についても同様であるので参考として示した。この三つの砕波型は線型理論で求まる砕波点での入射波の包絡波の振幅 η_{e1} と反射波の包絡波の振幅 η_{er} の比 K_{re} （式(1)）により、 $K_{re} \approx 1$ で重複波型砕波、 $K_{re} < 1$ で入射進行波型砕波、 $K_{re} > 1$ で反射進行波型砕波となる（図-3参照）。また、後述する無次元波峰移動速度 α により、 $\alpha \approx 0$ は重複波型、 $\alpha > 0$ は入射進行波型、 $\alpha < 0$ は反射進行波型砕波と分類できる（図-1、-2参照）。

$$K_{re} = \frac{\eta_{er}}{\eta_{e1}} = \sqrt{\frac{a_1^2 + 2a_1a_2 \cos(-\Delta k x_b + \Delta \sigma t_b) + a_2^2}{a_1^2 + 2a_1a_2 \cos(\Delta k x_b + \Delta \sigma t_b) + a_2^2}} \quad (1)$$

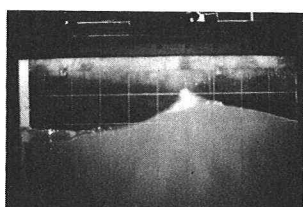
なお、式(1)で、 a ：振幅、 t ：時間、 x は反射板を原点とし反射波の進行方向を正軸とする距離、 Δk ：成分波の波数差、 $\Delta \sigma$ は成分波の角周波数差、下添字1と2は二つの基本構成波、下添字 b は砕波点を示す。なお、 η_{er} は η_{e1} が不透過板で完全反射するものとして求めている。また、式(1)の誘導に際しては、二成分合成進行波は式(2)のように与えている。式(2)で θ は位相、 $\Delta \theta$ は位相差である。

$$\eta_1 = a_1 \cos(k_1 x + \sigma_1 t + \theta_1) + a_2 \cos(k_2 x + \sigma_2 t + \theta_2) \\ = \sqrt{a_1^2 + 2a_1a_2 \cos(\Delta k x + \Delta \sigma t) + a_2^2} \sin(k_1 x + \sigma_1 t + \theta_1 + \delta), \quad \delta = \tan^{-1} \left\{ \frac{a_1 + a_2 \cos(\Delta k x + \Delta \sigma t + \Delta \theta)}{-a_2 \sin(\Delta k x + \Delta \sigma t + \Delta \theta)} \right\} \quad (2)$$

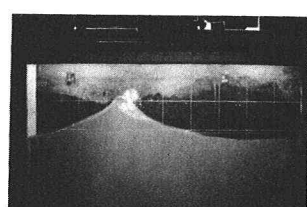
(2) 砕波限界：二成分重複波の砕波は上述したように進行波型砕波から完全重複波型砕波の幅広い砕波型をとるが、砕波限界は砕波時の波峰の移動速度と密接な関係があり、図-1に示すように、実験的にはば式(3)で近似的に表現できる。なお、式(3)の α は計測された砕波時の波峰の水平方向の移動速度 C_c をゼロ・アップクロス法で定義された砕波の波長と同じ波長を有する微小振幅進行波（規則波）の伝播速度 C_s で無次元化した値である。式(2)より誘導された C_c （式(4)参照）を用いた計算値 α_c は、図-2に示されるように、実験値 α_m と比較的よく一致する。なお、式(4)は $x=0$ で $\theta_1=\theta_2=0$ となる時刻を t として誘導した。



(1) 重複波型砕波



(2) 入射進行波型砕波



(3) 反射進行波型砕波

不規則重複波の砕波状況

$$H_b/L_b = (0.229 - 0.117|\alpha|) \tanh(2\pi h_b/L_b), \quad \alpha = C_c/C_s \quad (3)$$

$$C_c = \frac{\sum_{i=1}^2 a_i k_i \sigma_i \{ \cos(k_i x_b - \sigma_i t_b) - \cos(k_i x_b + \sigma_i t_b) \}}{\sum_{i=1}^2 a_i k_i^2 \{ \cos(k_i x_b - \sigma_i t_b) + \cos(k_i x_b + \sigma_i t_b) \}} \quad (4)$$

また、式(3)で定義される α と式(1)で定義される K_{RE} は関数関係にある。本報では実験値よりこの両者の関数関係を求めると、図-3に示すように、式(5)で近似す事が可能である。

$$\alpha = 3.86(1 - K_{RE}) / (1 + K_{RE}) \quad (5)$$

このように、入射波の波形(式(2))が与えられると、式(3)と式(4)により二成分重複波の限界波形勾配が推算できる。

なお、図-1～図-3で●印は重複波型砕波、○印は入射進行波型砕波、◇印は反射進行波型砕波を示している。

4. 結言：以上、本論では二成分重複波の砕波について検討した。二成分重複波の砕波は入射波の時系列特性に大きく支配されること、また砕波限界は線型理論によりある程度予測できる事を明らかにした。今後、不規則波の重複波の砕波機構について検討していく所存である。本研究は自然災害特別研究(1)〔岩田(名大)代表〕による研究である。

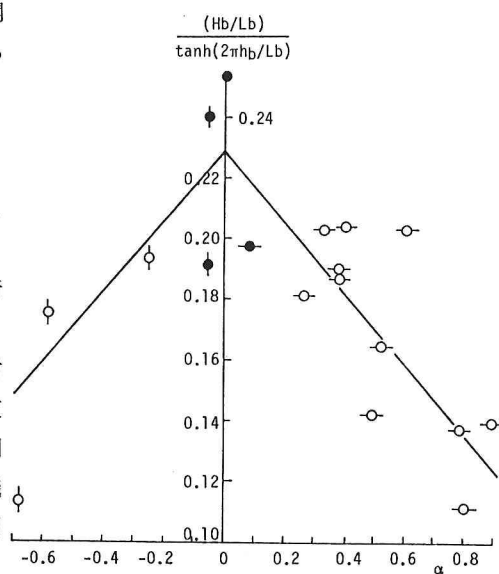


図-1 砕波限界

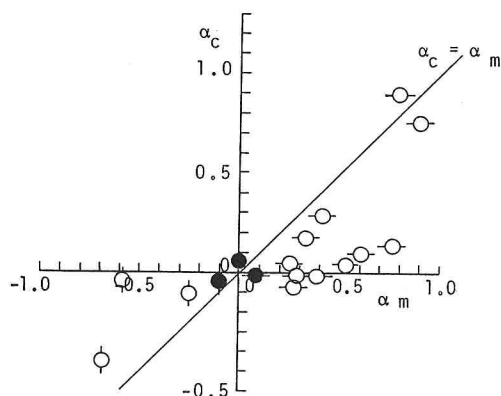


図-2 計算値と実測値の比較

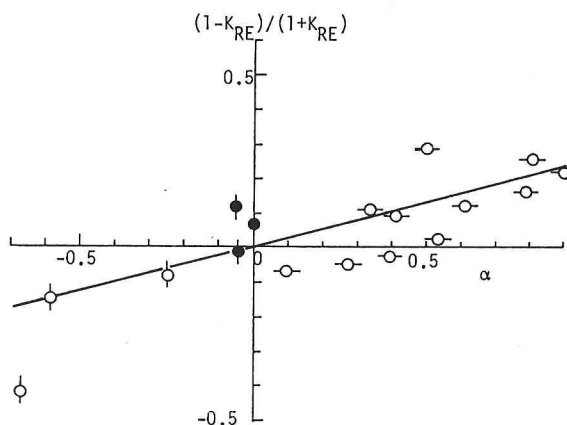


図-3 K_{RE} と α の関係