

重合した波浪場における砕波について

渡 辺 晃*・原 哲**・堀 川 清 司***

1. 緒 言

発生域の異なるうねりの交差，複雑な地形上での波の屈折，構造物による反射や回折などにもない，進行方向が互いに異なる複数の波が沿岸域において共存することはまれではない．このような条件での沿岸の波浪・海浜流場や海浜変形を精度良く予測するためには，方向の異なる波が重合した場合の砕波条件を正しく評価する必要がある．

本研究では，沿岸域波浪場の数値解析への応用を前提として，斜交波を含む一般的な重合波に適用可能な砕波指標を提示する．また，得られた砕波指標を斜交重合波に対する水槽実験結果を用いて検証するとともに，数値解析への応用手法についても考察する．

2. 重合した波の砕波指標

(1) 従来の砕波指標の問題点

斜面上を伝播する単一進行波の砕波に関しては，これまでに多くの研究がなされているが，砕波条件としては合田¹⁾による砕波指標が用いられることが多い．この砕波指標は主に実験データに基づいて求められたもので，沖波の波高と波長および水底勾配が与えられたときに，砕波水深や砕波波高を評価するのに利用されてきた．

ところで，構造物からの反射や回折などのために進行方向の異なる複数の波が重合する場合には，相互の位相関係により波高が局所的に変動する．例えば，同一波高の2つの波が重合する時，同位相線上では見かけの波高が倍になるが，このような場合に従来の砕波指標をそのまま適用すると砕波水深をきわめて過大に評価してしまうことになる．また，重合する各波の波高が互いに異なったり，流れの影響によって波高や波長が変化する場合には，従来の砕波指標を直接適用することは不可能である．

(2) 砕波指標の一般化

さて，斜面上の波の砕波については，浅い水域に進行

するにつれて波速が次第に減じ，一般に波高は逆に増大して，波峰での水平流速が波速を越えるような条件で波形が不安定となり砕波すると考えるのが，簡単ではあるが実際現象に近い解釈であろう．複数の波が重合している場合や流れが存在する場合でも，同様に波峰での合成水平流速が水面波形の伝播速度を越える条件で砕波が生じると考えるのが合理的と思われる（ただし，完全重複波の砕波にはこの考え方は適用できない）．

そこで，砕波条件を規定する基本パラメーターとして波峰での水平流速 u_b と波速（波峰の伝播速度） C_b の比を選び，単一進行波に対する合田の砕波指標を表現し直すことにする．ここでは，波浪場の数値解析への応用を念頭においており，複雑な地形・構造物条件に対する波浪場計算は少なくとも当分は線形理論に基づいてなされるものと考えられることから，砕波指標の変換も微小振幅波理論によって行うのが，合理的である．線形理論に基づく波浪場計算では，いずれにせよ非線形性が無視できない砕波点近傍での波高は精度良く評価できないが，海浜流場の計算等への応用を考えるならば，砕波位置をできるだけ正確に評価することが不可欠と考えられる．

微小振幅波理論によれば，砕波点での波峰下水平流速 u_b と波速 C_b の比 u_b/C_b は次式で与えられる．

$$\frac{u_{b0}}{C_b} = \pi \frac{H'_0}{L_0} \cdot \frac{H_b}{H'_0} \frac{\cosh^2 k_b h_b}{\sinh^2 k_b h_b} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{u_{bc}}{C_b} = \pi \frac{H'_0}{L_0} \cdot \frac{H_b}{H'_0} \frac{\cosh^2 k_b h_b}{\sinh^2 k_b h_b} \times \cosh k_b \left(h_b + \frac{H_b}{2} \right) \dots\dots\dots (2)$$

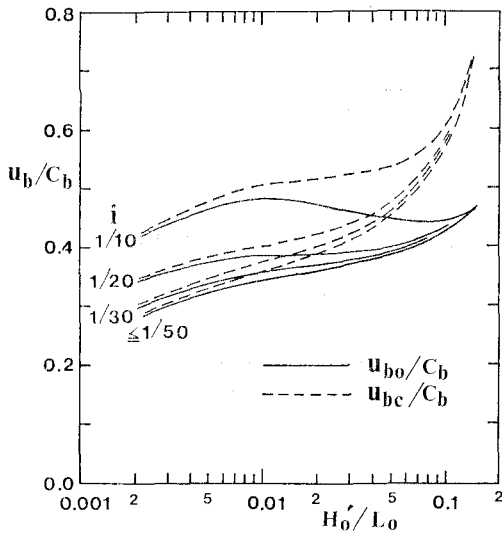
ここで， u_{b0} は波峰下静水位での水平流速， u_{bc} は波頂での水平流速， H_b は砕波波高， h_b は砕波水深， k_b は砕波点での波数， H'_0 は換算沖波波高， L_0 は沖波波長である．さらに $k_b H_b/2 = \pi (H'_0/L_0) (H_b/H'_0) (L_0/L_b)$ であり， $k_b h_b$ ， H_b/H'_0 および L_0/L_b はすべて $h_b/L_0 = (H'_0/L_0) (h_b/H'_0)$ の関数として与えられるので，合田の砕波指標のうち h_b/H'_0 と H_b/L_0 の関係は， u_{b0}/C_b あるいは u_{bc}/C_b と H'_0/L_0 あるいは h_b/L_0 の関係に変換できる．

このようにして求めた砕波指標を 図-1 および 図-2

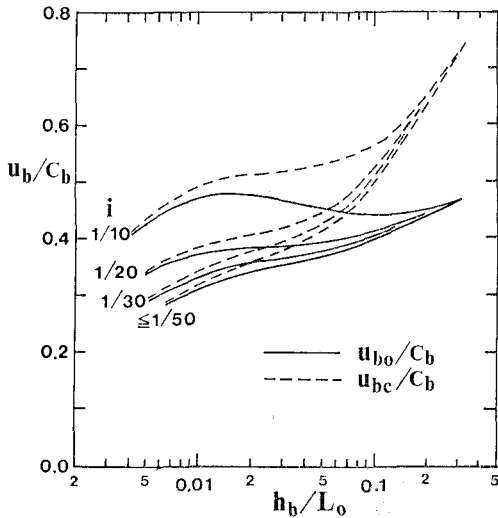
* 正 会 員 工 博 東京大学助教授 工学部土木工学科

** 学生会員 東京大学大学院 工学系研究科

*** 正 会 員 工 博 東京大学教授 工学部土木工学科



図一 流速波速比と沖波波形勾配による砕波指標



図二 流速波速比と相対砕波水深による砕波指標

に示す。図中の i は水底勾配である。微小振幅波理論を用いているので、 u_b/C_b の値は一般に 1.0 よりかなり小さくなっているが、特に静水位上の波峰下流速を用いた u_{b0}/C_b の値の変化域は 0.3~0.5 と狭いのが特徴的である。なお、これらの砕波指標は微小振幅波理論を用いて合田の砕波指標から直接変換することにより得られたものであるから、単一進行波の線形計算に適用する限り、合田の指標を用いた場合と同一の砕波点を与える（ただし、変換に際し底面摩擦による波の減衰は考慮されていない）。重合した波の場合への適用については、4 および 5 において述べる。

3. 斜交波の砕波の実験

新たに提案した上記の砕波指標の重合波への適用性を

検討するために、水槽実験を行なった。典型的な重合波浪場として、周期と波高が等しく、一様水深部で互いに直交する二組の入射波が重合して、一様勾配斜面上で屈折し砕波する場合を対象とした。図-3 に示すように、長さ 600 cm、幅 120 cm、深さ 25 cm の平面水槽を用い、岸側に 1/20 勾配斜面を設置した。V 字型直交造波板により互いに直交する 2 組の波を発生させたが、発生して斜めに伝播する波は両側壁面ではほぼ完全に反射するので、波長が造波板の片翼の長さとも一致するように水深と周期を調整すれば、無限に長い波峰線を有する 2 組の波が重合した斜交波の条件を作ることができる。この条件を満足するように、一様水深部の水深を 16 cm、入射波の周期を 0.81 s とした。

図-4 はこの条件に対する斜交重合波の、ある瞬間の水位分布を微小振幅波理論により求めたものである。図中の斜交する実線と破線は、発生した各組の波の波峰線と波谷線を示す。一方、同心円状に描かれた曲線は重合波の水位分布を沖波波高の 0.2 倍間隔の等水位線として示したもので実線は正、破線は負の水位を意味する。また x 軸と y 軸に平行な点線は静水位線に対応し、ハッチの部分は重合波の波峰を表わす。この図に示したような水位分布を有する水面形が、全体として x 軸に平行に負の方向へ伝播することになる。したがって、2 組の波が同位相で重なる水槽の中心線 ($y=0$) と側壁 ($y=\pm 60$ cm) に沿っては波高が大きく、その中間の $y=\pm 30$ cm の線上では逆位相となるので、それぞれの波が正弦波であれば水位変動は常に 0 となる。

一様水深部での入射波波高 H_i を、4.1 cm, 3.8 cm, 2.5 cm, 1.3 cm, 0.6 cm の 5 段階に変化させて、それぞれの条件での砕波位置を測定した。なお、この入射波波高は斜交するそれぞれの波についての値であり、一様水深部の水槽中心線上での実測波高を 2 で割って求めたものである。また、 $H_i=3.5$ cm の条件に対して、容量式波高計により砕波帯内外の波高分布を求めた。さらに単一進行波が汀線に直角に入射する場合の砕波位置の測定も行なった。

測定中、砕波帯内にはかなり強くしかも時間的変動も大きい流れが発生し、このため、砕波位置や各点の波高の変動も大きかった。したがって、砕波位置を実験中に目視記録をするのは容易ではない。 x 軸に平行な各測線上に数台の波高計を設置して、1 波ごとに波高が最大となる点を砕波点と定めて、数分間の平均砕波位置を求める方法を試みたが、2 組の波の位相がずれて重合して波高が小さくなる測線上では、砕波位置を明確に定め、難かった。そこで、水面に岸側から光をあて、水槽の真上からビデオカメラで撮影すると、波が砕けたところは光が乱反射して白く光ることを利用して砕波点を定めた。

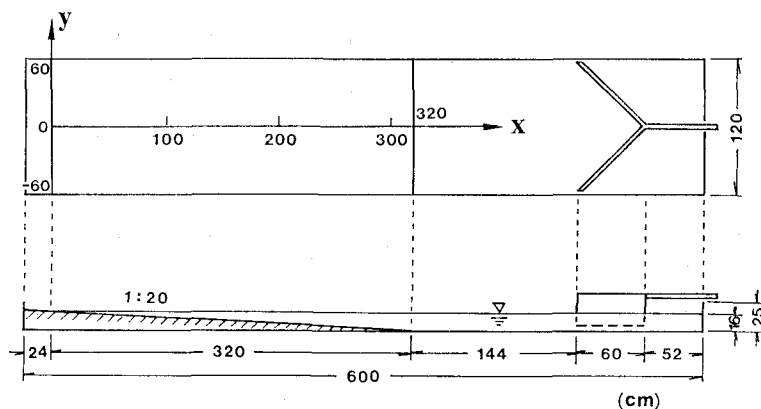


図-3 実験装置の概要と座標系

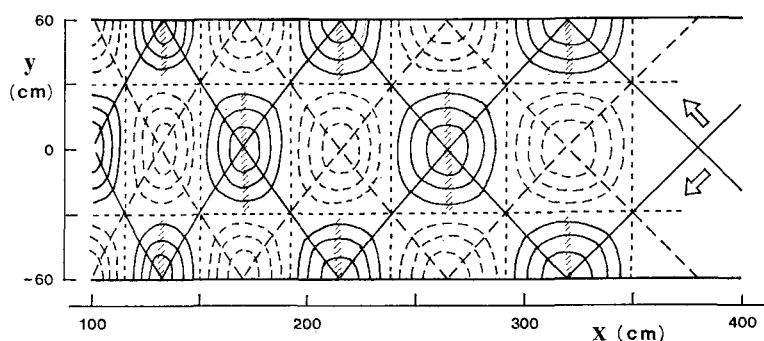


図-4 斜面上の斜交重合波の模式図

このようにして求めた砕波位置と、前述の波高最大点として定まる砕波位置との差は、水槽中心線上での比較によれば 5~10cm 以内である。なお、以下の議論には、約 5 分間 (400 波) の平均値を用いるが、入射波高の大きいケースで 50cm, 小さいケースでも 10cm 程度の砕波位置の有意な変動があったことに留意しておく必要がある。

4. 斜交重合波への砕波指標の適用性

(1) 砕波位置の比較による検証

今回の実験の条件では図-4のハッチ部で示される重合波の波峰は、次式による波速 C で x の負方向に伝播する。

$$C = L / (T \cos \alpha) \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 T は周期、 L と α は個々の波の波長および波峰線が汀線となす角度である。また、重合波の波峰下では合成流速も x の負方向を向き、静水位の高さでは、

$$u_0 = \frac{2\pi K_s K_r H_0}{T \tanh kh} \cos \alpha \cos \left(\frac{2\pi y}{B} \right) \dots \dots \dots (4)$$

の大きさをもつ。ただし、 K_s は浅水係数、 K_r は屈折係数、 h は水深、 B は水槽幅である。波頂での流速についても同様の表示が得られる。

水槽実験における入射波条件から各測線上の波速と流速の変化を計算し、図-1 あるいは図-2 の砕波指標を適用して求まる砕波位置を、実測砕波位置と比較したものが図-5 である。各図で上半分は図-1, 下半分は図-2 の砕波指標を適用したものであり、それぞれ実線は静水位での波峰下流速、破線は波頂流上流速を用いたときの結果である。▲印で示された実測砕波位置は、実際には $y = 0 \sim 60$ cm の範囲でのみ測定したものを $y = 0 \sim 60$ cm の範囲にも折返して図示してある。

各砕波指標による差異は、屈折の影響等の相違によるが余り顕著な差ではなく、砕波現象の変動性を考えるならば応用の便から判断して、適当な指標を選べばよいものと思われる。水槽中心線 ($y = 0$) および側壁 ($y = \pm 60$ cm) の近傍における砕波位置の沿岸方向分布形状はかなり良く再現されている。その中間 ($y = \pm 30$ cm) では

2 組の波が逆位相で重なるために、正弦波を仮定した計算では重合波の波高は 0 となり砕波が生じないことになる。しかし実際には水深が浅くなるにつれて波が変形し、孤立波に近い波形で重合するため、この測線上では個々の波が単一進行波のようにして砕波する。よって単一進行波として求めた図中点線の砕波線にむしろ近くなる。

図-6 は、 $y = 0$ および 60 cm における実測砕波位置より求めた u_0/C_b と H_0/L_0 の関係を、砕波指標と直接比較したものである。図中には 1/20 勾配斜面上での単一進行波に対する Iversen²⁾ や豊島ら³⁾ および今回の実験によるデータも示してある。単一進行波に対するデータのばらつきから判断すれば、ここに提示した砕波指標の重合波への適合度は満足できるものと言えよう。

(2) 砕波帯内の波高場

今回提案した砕波指標は、浅水変形に従って u/C の値が増加し限界値 u_b/C_b に達した時に砕波するという考えに基づいている。この考えを砕波帯内にも適用し砕波帯内では u/C が u_b/C_b を越えないように波高減衰が生じるものと仮定する。微小振幅波理論により波の屈折、浅水変形、重合の計算を行ない、砕波帯内には上記の仮定を適用すれば、砕波帯内外の波高分布を求めることができる。波高分布の実測値が得られている $H_0 = 3.5$

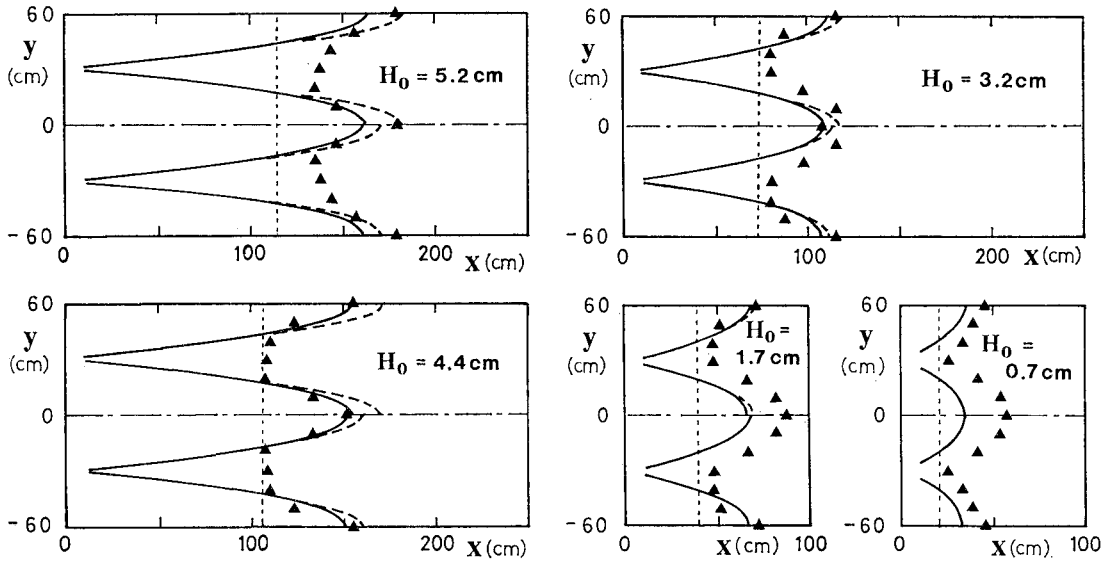


図-5 砕波位置の実測値と計算値の比較

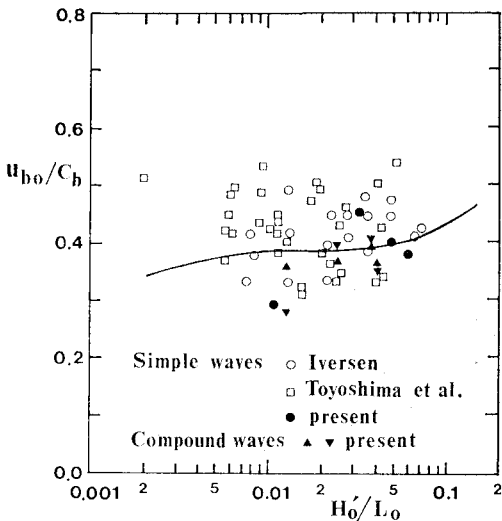


図-6 流速波速比の実験値と砕波指標の比較

cm のケースに対して波高分布を求め、図-7 に沿岸方向分布、図-8 に岸沖方向分布を比較した。有限振幅性の強い砕波位置近傍、および計算上波高が 0 となる $y = 30$ cm の線上を除いては、計算値と実測値はよい一致を示している。

5. 数値計算への応用について

著者らは前報¹⁾において、砕波帯をも含む構造物周辺の波浪場計算への数値波動解析法の応用を試みたが、砕波条件や砕波後の波高の評価法は必ずしも合理的なものとは言えなかった。今回提案した砕波指標は、線形波動理論と組合わせて用いることを前提としているので、

数値波動解析法に組み込むことができれば、一般的な波浪場に対しても合理的な砕波条件を与えるものと期待される。

屈折や反射・回折を含む一般の波浪場においては、今回の実験条件の場合とは異なり、各点での波に対応する換算沖波波形勾配 H_0'/L_0 を評価するのは困難であり、評価し得たとしてもそれが局所的な砕波条件を支配するとは考えにくい。従って、図-2 に示した u_b/C_b と h_b/L_b の関係で表示されている砕波指標を用いるのが適当であろう。また、 u_{b0}/C_b のほうが u_b/C_b よりも変化の範囲が狭く、計算も若干容易であるので使い易いと思われる。

さて、数値波動解析法によれば、各点での水位と線流量の時間変化が求まる。よって各点において水位が最大となる位相での水平流速、すなわち波峰下流速の大きさ u_0 と方向を容易に算定できる。これに対し、各点での波向きや波速は一般には一意的に定まらない。しかし、ここで用いている考え方からすれば、波速としては波峰下流速の方向への水面波形の伝播速度をとるのが合理的である。数値波動解析法の解より、水面波形の空間的な位相分布も比較的容易に求まるので、その位相角の波峰下流速の方向への勾配（すなわちその方向の波数）を入射波の角周波数で除した値を波速 C とすればよい。こうして求まる流速・波速比 u_0/C が限界値 u_{b0}/C_b と一致する点が砕波点と評価されることになる。

流れが存在する場合への数値波動解析法の拡張については、流れによる移流項を基本式に含める方法を前報⁴⁾で検討した。ここで提案した砕波指標を流れが共存する場合に適用するためには、流速 u_0 および波速 C としてそ

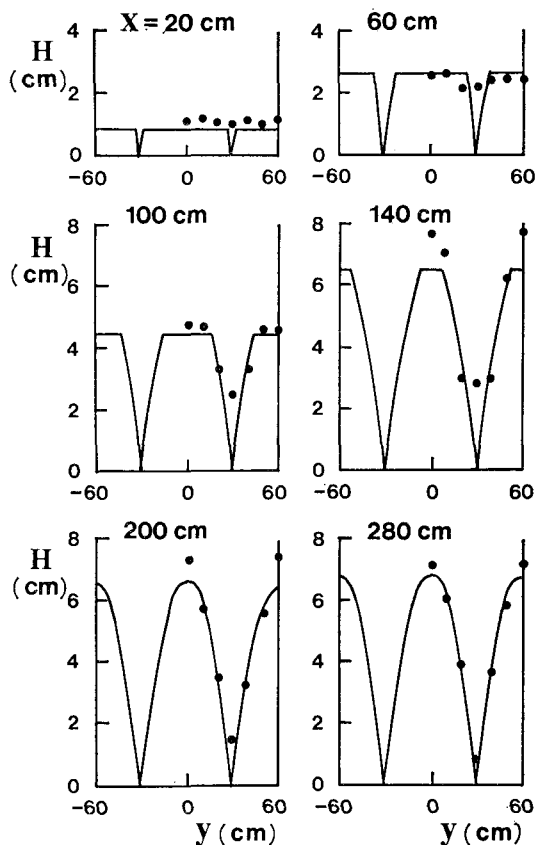


図-7 斜交重合波の波高の沿岸方向分布

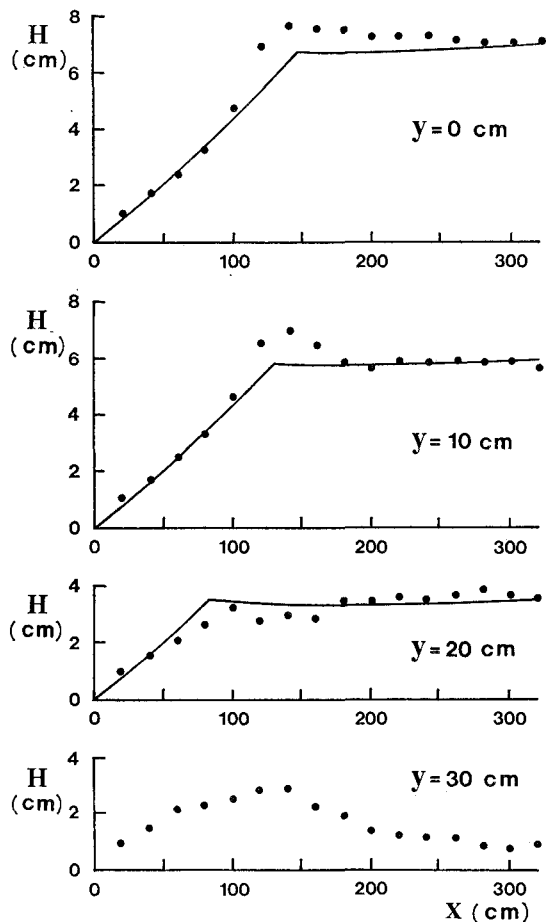


図-8 斜交重合波の波高の岸沖方向分布

れぞれ流れに相対的な値を用いればよい。

なお、4.(2) に示した砕波帯内の波高場計算法は、一般的な地形条件には適用できないものと思われる。数値波動解析法の基本式である運動方程式中に減衰項を含めることにより、砕波帯内の波高場を求めるのが最も合理的であると考えられるので、現在その定式化を検討中である。

このたび提案した砕波指標は、合田の指標と同じく水底勾配をパラメーターとして含んでいる。一般の波浪場において各点の波が感知する水底勾配をどのように評価するかが問題であるが、今後の検証計算の過程で検討を続ける予定である。

6. 結 語

重合した波浪場の砕波という複雑な現象に対して、きわめて簡単な考え方によって砕波条件の評価方法を提示した。線形理論に基づく数値計算への応用を前提としたため若干の問題が残っているが、新たに提案した砕波指

標が斜交重合波の砕波に対して実用上満足すべき精度で適用できることが検証された。また、一般的な地形・構造物配置で流れが存在する条件をも含めて、数値波動解析法等に取入れる方法についても示した。

基礎的な実験データを加えることにより、砕波指標そのものの精度を向上させる余地が残されている。一般的な条件での検証とあわせて、今後の課題としたい。

参 考 文 献

- 1) 合田良実：砕波指標の整理について，土木学会論文報告集，第180号，pp. 39～49，1970.
- 2) Iversen, H. W.: Laboratory study of breakers, Proc. Symp. on Gravity Waves, U.S. National Bureau of Standard, Circular 521, pp. 9～32, 1951.
- 3) 豊島 修・富永正照・橋本 宏：砕波後の波の変形に関する実験的研究，土木研究所報告，第133号，pp. 121～129，1968.
- 4) 渡辺 晃・塩崎正孝：構造物周辺の波浪・海浜流場について，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 110～114，1982.