

複合断面の海浜における不規則波の碎波変形特性

間 瀬 肇*・岩 垣 雄 一**

1. ま え が き

パー型海浜あるいはステップ型海浜といった複合断面の海底地形上での不規則波の浅水・碎波変形計算法についての研究は少なく、わずかに Battjes ら¹⁾、水口ら²⁾、佐藤ら³⁾、Thornton ら⁴⁾のものがあるくらいである。これらの計算法はそれぞれ一長一短があり、まだ確定的なものはない。複合断面の海浜における不規則波の浅水・碎波変形についての実験的研究も少なく、また主に波高変化に重点が置かれていて、詳しい検討はされていない。本研究は、複合断面の海浜における不規則波の浅水・碎波変形のいくつかの特性、すなわち、波の変形の様子、代表波高、波高の頻度分布、代表周期、skewness、kurtosis および wave grouping が距離とともにどのように変化するかを実験的に検討する。特に、海岸構造物の設計に当たって重要な波高については、波別解析法に基づいた計算モデルを作成し、これによってどの程度実測値を推算できるかを調べる。

2. 複合断面の海浜における不規則波の波高変化モデル

ここで用いる波高変化モデルは、ゼロアップクロス法で定義される個々の波をそれぞれ規則波で置きかえ、それらの波高変化の計算結果を重ね合わせて不規則波の波高変化を求めるものである。一様勾配の海底地形の場合には、既に著者ら⁵⁾によって発表されており、実測結果と計算結果は良く一致することがわかっている。

ここでは一様勾配の海底地形に用いた計算法を複合断面の地形上の計算法に拡張する。

個々の波の波高変化は以下のように定式化する。

(1) 碎波前の波高変化は、次式で表わされる微小振幅波理論により算定する。

$$\frac{H}{H_0} = \left[\left\{ 1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)} \right\} \tanh \frac{2\pi d}{L} \right]^{-1/2} \tag{1}$$

ここで、 H_0 は沖波波高、 d は平均水深、 L は波長である。

不規則波の波高変化モデルには、碎波前の個々波あるいは代表波の波高変化に対して、微小振幅波理論を用いたもの^{1),4),5)}と、有限振幅波理論を用いたもの^{2),3)}がある。著者らも以前個々波に対して有限振幅波理論を用いて不規則波の波高変化を計算したことがあるが、沖波波形勾配が 0.01 以下の場合には、計算結果は実験結果よりも大きすぎ、微小振幅波理論を用いて計算した方が実験結果をうまく表わせることがわかった^{5),6)}。また、沖波波形勾配が大きくなるほど、海底勾配が小さくなるほど、微小振幅波、有限振幅波のどちらの理論を用いても、計算結果はあまり変わらないことがわかっている⁵⁾。

(2) 碎波限界波高 H_b の算定には、合田の碎波限界式の係数を変えた次式を用いる。

$$\frac{H_b}{L_0} = 0.16 \left[1 - \exp \left\{ -1.5 \frac{\pi d}{L_0} (1 + 15 \tan^{4/3} \theta) \right\} \right] \tag{2}$$

ここで、 $\tan \theta$ は海底勾配、 L_0 は深海での波長である。

この式は一様勾配海底地形に対するもので、パーが存在するような地形が急変する影響を考慮した碎波限界式はない。そこで、ここでは海底勾配が不連続になる地点で式(2)の係数を 0.14 とするとともに、 $\tan \theta$ としては海底勾配の不連続点の沖側の勾配を用いることにする。

(3) 碎波後の波高変化は Battjes⁷⁾ の bore モデルを用いて定式化する。

図-1 は碎波後の波の模式図である。(a) および (b) のように、沖から岸に向かって水深が直線的に減少する順勾配地形や一定水深地形に、碎波した波が進行していく場合については、それぞれ次のように解かれている。

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{H}{H_b} \right)^{-4} &= \left(1 - \frac{4}{9} K \right) \left(\frac{d}{d_b} \right) + \frac{4}{9} K \left(\frac{d}{d_b} \right)^{-7/2}, \\ K &= \left(\frac{2}{\pi} \right)^{1/2} B \gamma^{1/2} \xi_0^{-1} \end{aligned} \right\} \tag{3}$$
$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{H}{H_1} \right)^{-4} &= 1 + 2A \left(\frac{x}{d_1} \right), \\ A &= \frac{2Bd_1}{\gamma^3 T \sqrt{gd_1}} \left(\frac{H_1}{d_1} \right)^4 \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

* 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学教室
** 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

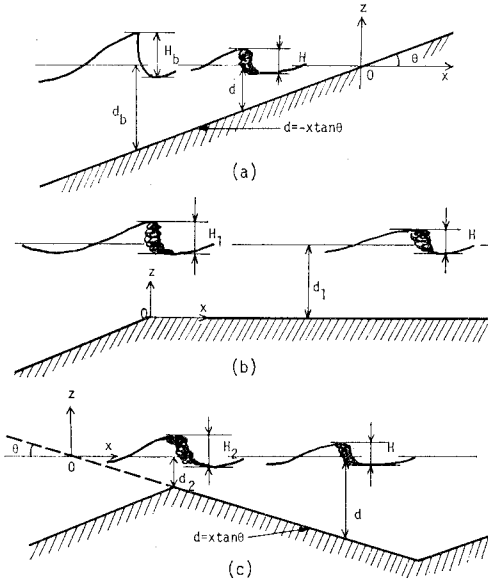


図-1 砕波後の波の模式図

ここで、 B は $O(1)$ の係数、 $\gamma = 0.7 + 5 \tan \theta$ ($0.01 \leq \tan \theta \leq 0.1$)、 ξ_0 は沖波を用いた surf similarity parameter、 H_b と d_b は砕波点における波高と水深、 H_1 と d_1 は一定水深が始まる地点における波高と水深、 x は水平距離、 T は周期である。

図-1(c)のように、沖から岸に向かい水深が直線的に増加する逆勾配地形に、砕波した波が進行していく場合には、解は次のようになる⁵⁾。

$$\left(\frac{H}{H_2}\right)^{-4} = \left(1 + \frac{4}{9}K\right)\left(\frac{d}{d_2}\right) - \frac{4}{9}K\left(\frac{d}{d_2}\right)^{-7/2} \quad \dots\dots\dots(5)$$

これは式(3)において K の符号を考えたもの、すなわち、 $\tan \theta$ のかわりに $-\tan \theta$ と置いたものとなっている。

(4) 砕波後の波の再生条件として $H \leq 0.5d$ を用いる。

(5) 式(1)~(5)に現われる水深には、サーフビートの水位変動や平均水位の変化を加え合わせる⁵⁾。

以上の各式と手法を用いて、不規則波の浅海域における波高変化を次のように計算する。

(1) 砕波前のある地点(ここでは模型海浜の斜面先端)の水位記録からゼロアップクロス法で個々波を定義し、微小振幅波理論よりそれぞれの沖波波高を計算する。

(2) 最初、各地点の平均水位の変化は0とし、静水深にサーフビートの変動を加えた水深を用い、すべての個々波に対して(3)の計算を行う。(2回目以降は、(5)で得られる平均水深にサーフビートの変動を加えた水深を用い、すべての個々波に対して(3)の計算を行う。)

(3) 砕波限界の式(2)の条件に達するまでは式(1)で波高を計算する。砕波限界に達した後は式(3)を用

いる。その後、波が進行して一定水深地形や逆勾配地形になる場合は、それぞれ式(4)、(5)を用いて波高を計算する。再生条件を満たした場合、その地点の波高 H と浅水係数 K_s より新たに沖波波高を H/K_s と考えて、その後の波高変化を同様に計算する。

(4) (3)の計算結果から各地点の2乗平均波高を求め、それらを用いて各地点の平均水位の変化 $\bar{\eta}$ を計算する。

(5) (4)で求めた $\bar{\eta}$ を各地点の静水深に加えて平均水深とし、(2)にもどる。平均水位の変化量の計算結果が収束すれば、(2)にもどらず計算を終える。

なお、式(3)~(5)に含まれる係数 B については、前論文^{5),6)}と同様水深によって変化させたが、 $B=2$ と一定にしても計算結果はほとんど変わらないことがわかった。

3. 実験装置および実験方法

実験は、一端に電気油圧式不規則波発生機が設置されている、長さ 27 m、幅 50 cm、深さ 75 cm の両面ガラス張り水槽で行った。

模型海浜として、バー型海浜 2 種類 (Bar Type 1 と 2) とステップ型海浜 1 種類 (Step Type) を用いた。模型海浜は 3 種類とも造波板から 10 m 離れた地点から斜面先端が始まるように設置した。

用いた不規則波は、Pierson-Moskowitz 型スペクトルを持つようにシミュレートしたものであり、ピーク周波数は約 0.6、0.8 および 1.0 Hz の 3 種類である。

水位変動は、浅海域に 10 台、斜面先端部に 1 台の計 11 台の容量式波高計で計測し、14 チャンネルデータレコーダーに記録した。その記録は 0.04 sec ごとに A-D 変換し、サンプリング個数は、ピーク周波数が 0.6 Hz の不規則波のケースで 60 000 個、他は 30 000 個とした。

一樣水深部の水深は 45 cm と一定にした。

4. 複合断面の海浜における不規則波の砕波変形特性

実験結果を整理するに当たり、以前の著者ら⁵⁾の研究と同様、得られた水位変動記録からピーク周波数の 0.5 倍以下の水位変動成分を除去し、この補正した水位変動記録を用い、個々波はゼロアップクロス法で定義した。

4.1 浅海域における不規則波の波高変化

沖から水深が浅くなるにつれて砕波する波の数が増加し、バー頂部の少し汀線よりの地点で砕波が顕著である。沖波波形勾配が小さい場合には、バー頂部に達する前に既に砕波してた波、あるいはバー頂部付近で砕波した波が気泡を連行しながら進行していくうちに、その波の背面にもう一つの峰が現われる(いわゆるソリトン分裂と呼ばれる)。背面に現われた波も、水深が減少するにつれ波高を増大し、砕波して汀線に達する。

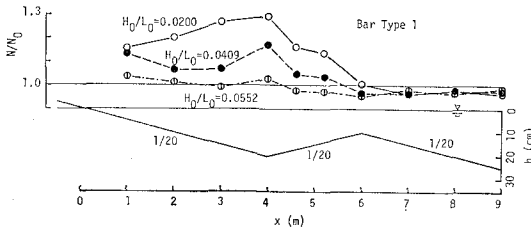


図-2 浅海域における個々波の数の変化

図-2 は浅海域における個々波の数を斜面先端における波の数との比で示したものであるが、これより沖波波形勾配が小さいと、バーを通過後、波の数が増加しているのがわかる。このような個々波の増加は、ソリトン分裂の他に、砕波後の微小かく乱波もその原因である。

気泡を連行しながら進行していく波は、そのまま汀線に達することもあるが、ほとんどの場合、乱れによるエネルギー減衰がおさまって波が再生し、その波が再び浅水変形、砕波、砕波後の波高減衰というパターンで進行する様子が見られる。

図-3 は Bar Type 1 の海浜における代表波高の変化の一例を示したものであり、図中の点は実験結果、曲線

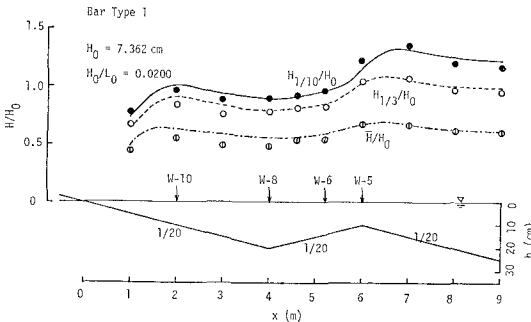


図-3 バー型海浜における代表波高の変化

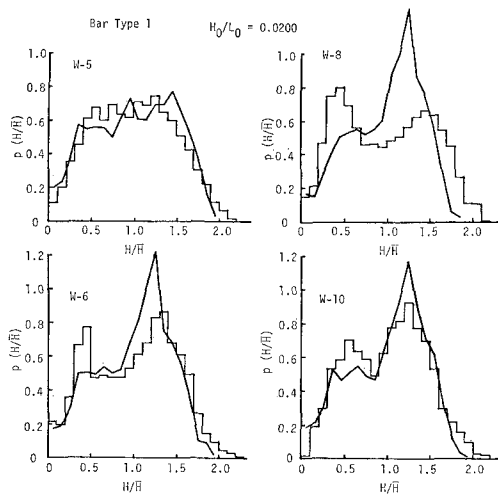


図-4 波高の頻度分布

は 2. で述べた波高変化モデルによる計算結果である。この図から、平均波高については計算結果は実験結果より若干大きくなっているが、先に述べたソリトン分裂を考慮していないにもかかわらず、代表波高についての両者の一致は良いのがわかる。しかし、図-4 の波高の頻度分布（ヒストグラムが実験結果、折線が計算結果）を見ると、佐藤ら³⁾と同様、実験結果は 2 つの顕著なピークを持つ場合があり、計算結果と合わないことがある。

一様勾配海底地形の場合にも、波をゼロダウンクロス法で定義すると、2 つのピークを持つ波高分布となるが、このような場合には、波高分布の 2 つのピークのうちの 1 つは $H/\bar{H}$ が非常に小さい所に現われるもので、本実験結果のように $H/\bar{H} \approx 0.5$ にピークを持つ場合とは異なる。図-4 のように波高の頻度分布が 2 つのピークを持つのはソリトン分裂に関係しているものと思われる。W-8 の地点における波高の頻度分布の計算結果と実験結果の一致は悪いが、それ以外は比較的両者の対応は良い。

沖波波形勾配が大きく、図-2 に見られるように、個々波の数があまり変化しない場合には、実験および計算による代表波高、波高の頻度分布は良く一致する³⁾。

図-5 は Step Type の海浜における代表波高の変化の一例を示したものである。バー型海浜の場合には実験結果と計算結果の一致は概して良かったが、図-5 では、計算結果は順勾配から一定水深に入って波高が一旦減少し、その後あまり変化しないのに対し、実験結果の方はほぼ直線的に減少しており、両者の一致が悪い。

実験を良く観察すると、バー型海浜では順勾配地形から逆勾配地形に進行する時に砕波する波は、その砕波点がバーの頂部の少し汀線よりの地点に集中しているのに対し、ステップ型海浜の場合には、一定水深地形に進行した直後に砕波するものや、一定水深の領域をかなり進行した後に砕波する波もあり、砕波点が広く散らばっているのがわかった。一方、計算においては、順勾配地形と一定水深地形の接続地点で砕波条件を越えた波に対し

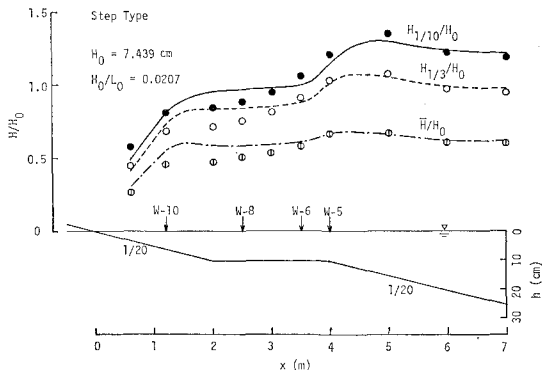


図-5 ステップ型海浜における代表波高の変化

て、その接続地点から波高減衰の計算をするため、実験値との一致が良くなかったものと思われる(今回用いた砕波限界式では、接続点で砕波条件を満たさなければ、一定水深の全領域にわたって砕波しないことになるので、実験で観察されるような一定水深領域での砕波を表わすことができない)。

最後に、上に述べた以外の計算結果について考察する。

計算モデルでは、バーの頂部あるいは一定水深が始まる地点における砕波限界として、式(2)の係数を0.14と小さくしている。これを0.16のままにしておくと、砕波条件を越える波が少なくなり、その後の波高変化は浅水係数で支配されるようになる。その結果、バー頂部あるいは一定水深の開始地点から汀線にかけて計算結果は実験結果より大きくなり、実験結果の波高減衰を表わすことができないことがわかった。

波の再生条件に現われる係数0.5を0.2あるいは0.8と変えても、計算結果はほとんど変わらなかった。

また、本計算モデルでは、不規則波の個々波の波高と周期を入力するので、周期の分布も考慮していることになるが、これらの個々波の周期をすべて有義波周期で代表させ、一定周期として計算した結果も、図-3および5の計算結果とほとんど同じであった。したがって、この計算モデルには周期の分布はあまり重要ではないことがわかった。沖波有義波高で無次元化した Rayleigh 分布をいくつかの区間に分けて、それぞれの区間の代表値とその出現率を入力とした(周期分布を考えない)計算法を用いて、琵琶湖における現地波浪の波高変化を計算した結果、実測値と良く合う⁹⁾ことから言えよう。

4.2 浅海域における不規則波の周期変化

図-6は浅海域における有義波周期の変化の一例を示したもので、斜面先端部での有義波周期で無次元化してある。一樣勾配の海底地形の場合も含めて、浅海になると沖での値より一般に大きくなるが、ソリトン分裂によって小さくなる地点がある。平均周期については、沖波波形勾配が小さいほど沖の値に比べて小さくなる。これは図-2に見られるように沖波波形勾配が小さいほど個

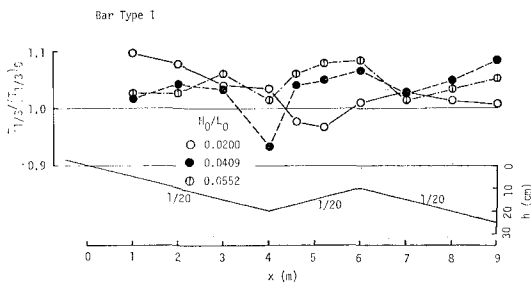


図-6 浅海域における有義波周期の変化

々波の数が増加するためである。

4.3 浅海域における非線形性パラメーターの変化

図-7は、波の非線形性を表わす指標の1つである skewness の変化について調べたものである。何れの場合も、沖から水深が浅くなるにつれて skewness の値が大きくなり、その傾向は沖波波形勾配が小さいほど顕著である。(a)のバー型海浜の場合、skewness が最も大きくなるのはバーの頂部から少し汀線側の付近であり、砕波が顕著な地点である。言い換えれば、砕波が顕著な地点で skewness は最も大きくなる。しかし、(b)のステップ型海浜の場合には、一定水深領域ではほぼ一定値となり、顕著な最大値を持たない。これは4.1に述べたように、砕波地点が一定水深領域のかかりの幅に広がっており、バー型海浜のように顕著な砕波地点がないことと関係していると思われる。バー型海浜の場合には、最大値を取った後、減少し、二次砕波に伴って再び増加する。

ここでは示さなかったが、kurtosis の変化の傾向も skewness のそれと同様の結果が得られている⁸⁾。

非線形性パラメーターおよび次に述べる wave grouping の変化の傾向から、ステップ型海浜とバー型海浜における波の変形は、かなり異なっていることが推測される。

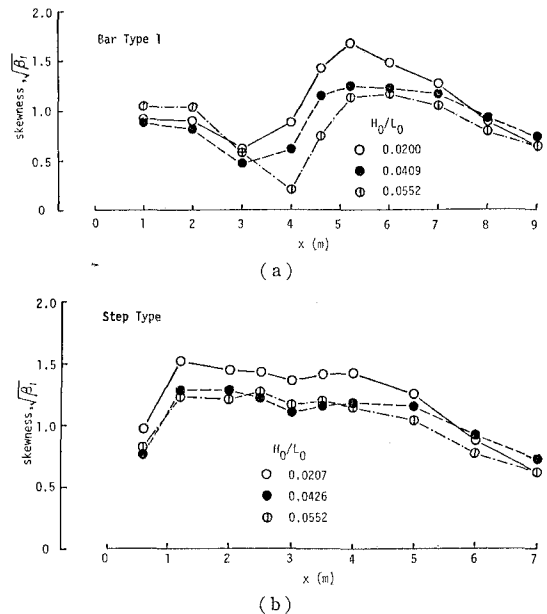
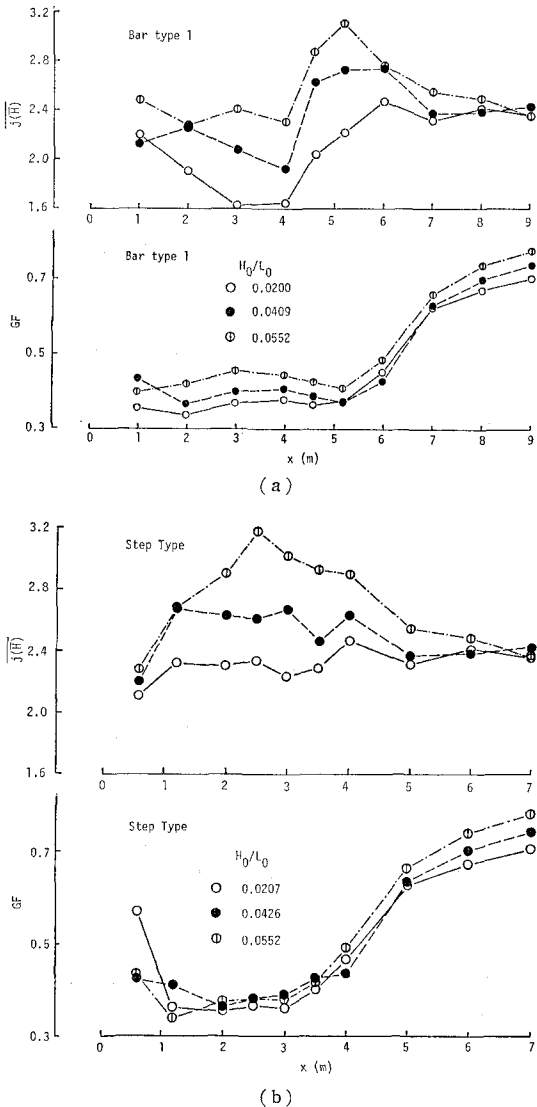


図-7 浅海域における skewness の変化

4.4 浅海域における wave grouping の変化

波高の平均連長 $\bar{j}(\bar{H})$ と groupiness factor GF の変化を同時に調べることで、波の連なり状態の変化をおおよそ推定することができる⁹⁾。

図-8は $\bar{j}(\bar{H})$ と GF の変化を調べたものである。何れの場合も、GF は波が砕波するのに伴い小さくな



図—8 浅海域における wave grouping の変化

り、その後約 0.4 とほぼ一定になる。 $j(\bar{H})$ は沖から水深が浅くなるにつれて大きくなるが、その傾向は沖波波形勾配が大きいほど顕著である。(a) のバー型海浜では、バーの頂部から少し汀線よりの地点、すなわち非

線形性パラメーターが最大となる時、 $j(\bar{H})$ は最大となる。(b) のステップ型海浜では、沖波波形勾配が 0.055 のケースで、一定水深を伝播するにつれ $j(\bar{H})$ が一旦大きくなるが、他のケースでは非線形性パラメーターと同様に、一定水深に入ってからその値はほぼ一定値となる。

5. あとがき

本研究は、複合断面の海浜における不規則波の浅水・碎波変形特性を実験的に調べ、あわせて波高変化計算モデルを提案した。そして、ステップ型海浜における不規則波の変形特性はバー型海浜とは異なること、計算モデルはバー型海浜に対してはかなり有効であること、ステップ型海浜に対しては碎波点の算定が重要であることを示した。

より詳しい実験結果および考察については文献 8) を参照されたい。

最後に、本研究は文部省科学研究費奨励研究 (A) による研究の一部であることを付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Battjes, J. A. and J. P. F. M. Janssen: Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proc. 16th Coastal Eng. Conf., pp. 569~587, 1978.
- 2) 水口 優・松田仲次: 現地不規則波浪の浅海変形について, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 134~138, 1980.
- 3) 佐藤道郎・小部直人: バー型海浜における不規則波の碎波変形, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 104~108, 1983.
- 4) Thornton, E. B. and R. T. Guza: Transformation of wave height distribution, Jour. Geophys. Res., Vol. 88, pp. 5925~5938, 1983.
- 5) 岩垣雄一・間瀬 肇・古室健史: 不規則波の碎波変形特性に関する研究, 京大防災研究所年報, 第 26 号 B-2, pp. 559~575, 1983.
- 6) 岩垣雄一・間瀬 肇・田中 剛: 不規則波の浅海変形モデルについて, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 104~108, 1981.
- 7) Battjes, J. A.: Energy dissipation in breaking solitary and periodic waves, Manuscript, Delft University of Technology, 1978.
- 8) 岩垣雄一・間瀬 肇: 複合断面を有する海底地形上の不規則波の碎波変形特性に関する研究, 京大防災研究所年報, 第 27 号 B-2, 1984 (印刷中).