

斜面上における不規則波の碎波に関する研究

岩垣 雄一*・木村 晃**・岸田 典史***

1. 緒 言

規則波の碎波現象に対しては、従来より非常に数多くの理論的、実験的研究が行われており、実用的にはほぼ十分な結果が得られているといってもよい。また、最近になり、これらの規則波の結果をもとにして、不規則波の碎波に関する研究も始められた。中でも、代表的なものとして、Collins¹⁾、Battjes²⁾、郭・郭³⁾、合田⁴⁾の研究を挙げることができる。これらの研究では、不規則波に含まれる個々の波は、同じ波高、周期をもつ規則波と同じ碎波特性を有するという前提で論議を進めており、碎波条件としては、それぞれ次のような式を用いている。Collins は Le Méhauté および Koh による次式を用いた。

$$H_b/H_0 = 0.76i^{1/7}(H_0/L_0)^{-1/4} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 H は波高、 i は斜面勾配、 L は波長であり、添字の 0 および b はそれぞれ深海ならびに碎波点での値であることを示す。Battjes は次式で示す Miche、浜田による最高波の理論式を用いている。

$$H_b/L_b = 0.142 \tanh(2\pi h_b/L_b) \dots\dots\dots(2)$$

一方、郭らは実測値をもとに検討し、次式の関係を推定している。

$$H_b/h = 0.63 \dots\dots\dots(3)$$

また、合田は以前彼が規則波に対して与えた碎波指標の近似的な表現である次式を用いた。

$$H_b/L_0 = A[1 - \exp\{-1.5\pi(h_b/L_0) \times (1 - 1.5 \tan^4 \theta)\}] \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 θ は斜面の傾斜角であり、 $A=0.17$ である。

しかし、これらの研究に共通していえることであるが最も基本的な仮定である zero-up-cross 法で定義した波を同じ波高、周期をもつ規則波と等価であると見なし得るかどうかの検証が十分でない。この研究は、この点を明らかにするため、不規則波の個々の波の碎波に関して実験的な研究を行い、前述した碎波条件との適合性を検討したものである。

2. 実験装置および方法

実験は長さ 27 m、幅 50 cm、深さ 75 cm の両面ガラス張り水槽を用いて行った。この水槽の一端には電気油圧式不規則波発生機が設置してある。図-1 に示すように、水槽の中央部に 1/10 (ケース I) あるいは 1/20 (ケース II) の斜面を設置した。また一様水深部 ($h=50$ cm) から斜面上にかけて、1 m 間隔で (ケース I は 6 台、ケース II は 12 台) 波高計を設置した。各波高計の設置水深は、ケース I では 50 cm 2 台、40 cm から 10 cm まで 10 cm きざみで 4 台、ケース II では、50 cm 4 台、45 cm から 10 cm まで 5 cm きざみで 8 台である。そして、予備実験で確認した平均的な碎波点付近 3 m の間 (ケース I では水深 40~10 cm、ケース II では水深 25~10 cm) を検査区間とした。この前部ガラス面には後の解析のため静水面と一致するように約 3 mm 幅の黒ビニールテープを張った。そして水槽後面より照明し、前面に設置したモータードライブ付 35 mm カメラおよび 16 mm シネカメラを用いて水面を撮影した。

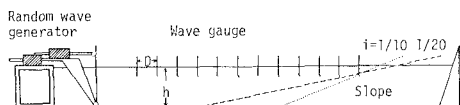


図-1 実験装置

以上のような装置により測定した記録にもとづいて、碎波時の波の諸特性を次のように定義した。すなわち碎波時の波の周期 T_b は、碎波点より沖側の最も近い波高計の記録から zero-up-cross 法で読み取り、碎波高および碎波長は 35 mm カメラ (5 コマ/sec) のフィルムから図-2 に示すように、静水面を示す黒ビニールテープを利用して空間的に zero-up-cross 法で定義した。しかし、35 mm カメラでは碎波の瞬間をのがす場合もあり得るので碎波点は 16 mm フィルムから読み取った。この写真撮影により碎波高を決定する方法は、通常の規則波に対する決め方と若干異なるが、予備実験の結果では、

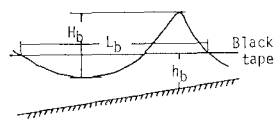


図-2 波高・波長・水深

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

** 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学教室

*** 正会員 工修 五洋建設 調査設計部技術システム課

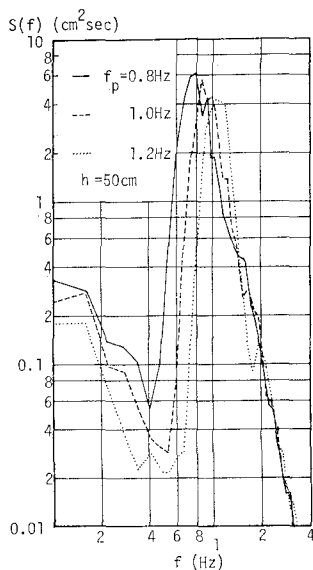


図-3 スペクトル

I-1 のように示す。これは 1/10 勾配斜面上に $f_p=0.8\text{ Hz}$ の波を作用させた実験であることを意味する。

3. 実験結果ならびに考察

(1) 斜面上の不規則波のスペクトル

表-1 に実験ケースと測定した波の平均的な碎波水深を示した。表からもわかるように、I の各ケースでは、平均的な碎波水深は 13 cm 付近であり、25 cm より深い部分での碎波はあまりみられなかった。また II の各ケースでは水深 15~25 cm の間で碎波するものが多かった。ここで各ケースとも、波高の小さい波あるいは碎波後の再生成波などは水深 5 cm から汀線の間で碎波するものが多かったが、この部分は検査区間からはずれること、後にふれるがサーフビートの影響を受けることなどの理由から、今回の実験では測定の対象から除外した。

碎波の形状は各ケースとも巻き波型の碎波をするものが多く、崩れ波型の碎波は、水深の比較的大きい部分で時折みられたが数は少なかった。

図-4 は碎波点付近での水深変化にともなう不規則波のスペクトルの変化の 1 例であり、ケース I-1 の実験結果を示したものである。図より、水深 30 cm まではスペ

普通の方法と大きな差異はみられなかった。

実験は著者ら⁵⁾によるシミュレーションシステムを利用して、図-3 に示すような一様水深部でのスペクトルをもつ 3 種の不規則波を発生させて行った。各スペクトルの形状に大差はないが、ピーク周波数 f_p が (1) 0.8 Hz, (2) 1.0 Hz および (3) 1.2 Hz と少しずつ異なる。

以後、実験ケースを

クトルに大きな変化はないが、水深 20 cm 付近より、ピーク付近でのエネルギーの低下、0.4 Hz 以下ならびに 1.0 Hz より高周波側でのエネルギーの増加がみられ、スペクトル解析の結果も、この付近で水面にかなり急激な変化がおこっていることを示している。

(2) 碎波長

不規則波の碎波実験に先立って、同じ 1/10 および 1/20 の勾配の斜面を用いて規則波の碎波に関する実験も行った。図-5 はその実験の結果得た碎波長 L_b と、周

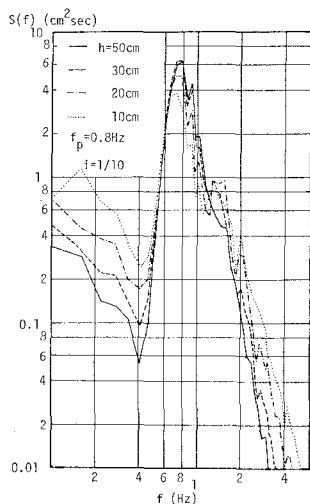


図-4 スペクトルの変形

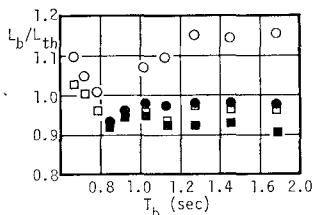


図-5 碎波時の規則波の波長

深 h_b から微小振幅波理論を用いて計算した波長の理論値 L_{th} との比を示したものである。図中○印は 1/10、●印は 1/20 勾配斜面での実験結果を示す。図から、1/20 勾配での実験値は理論値と非常に良好な対応を示しているが、1/10 勾配の結果は、いずれも実験値の方が理論値に比して幾分か大きい結果を与えていることがわかる。これは波長の計算に波の峰の位置での水深を用いたためであり、この影響は水深の変化が急なほど大きい。そこで図-2 に示す波の中央の位置の水深を用いて波長を補正し、実験値との比を示したものが図-5 中の□印(1/10)と■印(1/20)である。実験値の方が若干小さい値を示してはいるが、理論値との対応は良好であり、斜面勾配による差はほとんど見られない。次に、図-6 (a) および (b) はそれぞれ 1/10 および 1/20 の各ケースの不規則波の碎波時の波長と理論値との比を示したものである。ただし両図とも波長に対し、水深変化による補正はしていない。実験値は若干ばらついてはいるが、規則波の実験結果と同様、1/10 勾配での波長の理論値よりも幾分か大きく、1/20 勾配の場合は理論値よりも幾分か小さい値が多い。しかし、さらに詳細に検討すると、各実験値は周期の増加にともない L_b/L_{th} の値が徐々に減少していることがわかる。図中にひいた各ケースの平均的な直線はスペクトルのピーク周波数の増加にともない次第に周期

表-1

Case No.	i	f_p (Hz)	h_b (cm)
I-1	1/10	0.8	14
I-2	1/10	1.0	12
I-3	1/10	1.2	13
II-1	1/20	0.8	21
II-2	1/20	1.0	21
II-3	1/20	1.2	19

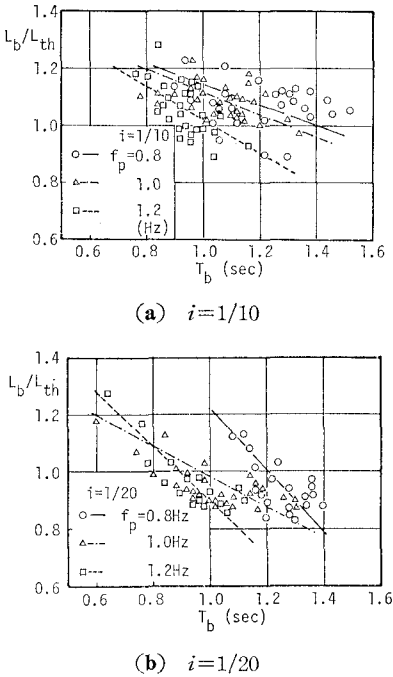


図-6 砕波時の不規則波の波長

の小さい方へ移動してゆくが、これらの傾向は著者ら⁶⁾による水平床での実験結果と同じである。また、図-6 (a)と(b)の比較から、この平均的な直線の勾配は1/20勾配斜面の方がより急であることがわかる。両図に対して、前と同様水深による補正をほどこせば、図-5と同様多くの実験値が $L_b/L_{th} < 1.0$ の領域に下ってくるが、データ相互の関係にはあまり変化はない。

(3) 砕波特性

Miche ならびに浜田は、浅水面波の砕波条件式として(2)式を提案したが、図-7 は不規則波の実験に先だって行った規則波の実験結果と、(2)式を比較したものである。1/20での実験結果が実線で示した(2)式に比して若干小さい値を示しているが、1/10勾配の実験結果はかなり良く一致している。次に図-8 (a)および(b)はそれぞれ1/10および1/20勾配斜面で不規則波を用いて行った実験の結果を示したもので

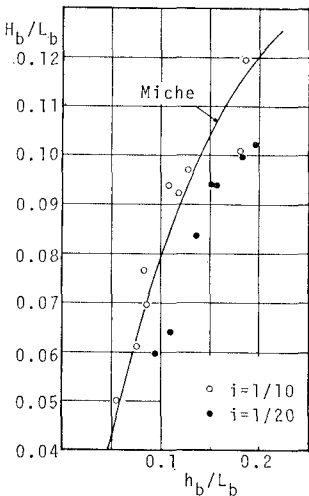


図-7 $H_b/L_b \sim h_b/L_b$ (規則波)

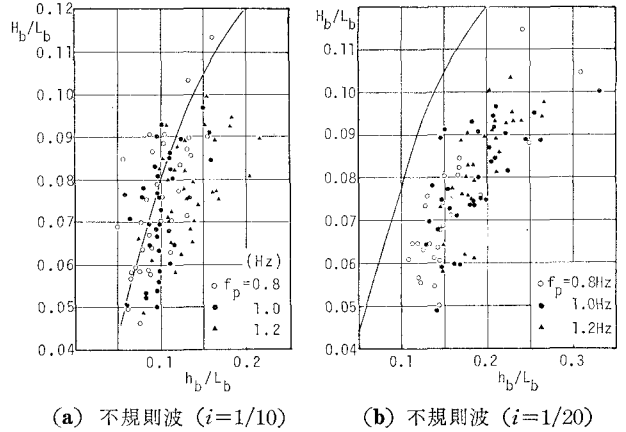


図-8 $H_b/L_b \sim h_b/L_b$

ある。両図とも実験値はかなりばらついてはいるが、平均的には(2)式と同様 h_b/L_b の増加にともない砕波時の波形勾配が大きくなっていることがわかる。また、両図ともスペクトルのピーク周波数による実験結果の差はみられないが、ケースIIの実験値が理論値に比して約30%程度小さく、ケースIの結果と明確に異なることがわかる。このことから、不規則波の砕波に対しても斜面勾配の影響は無視できず、図-7の結果と比較すればむしろ、規則波よりも勾配の影響は大きいことがわかる。

次に、こうした斜面勾配による影響を検討するため、合田⁷⁾による砕波指標と比較検討した。図-9は図-7と同じ規則波の実験結果を砕波指標と比較したものである。図よりわかるように、実験値は砕波指標より幾分小さい値を示している。また、不規則波の実験結果と砕波指標との比較を示したものが、図-10 (a)(ケースI)および(b)(ケースII)である。横軸の沖波波長 L_0 は周期 T_b から微小振幅波理論を用いて求めた。図より明らかなように、ケースI、IIとも実験値はばらついてはいるが、 h_b/L_0 の増加にともない H_b/h_b の値は徐々に減少している。したがって、この領域の波に対しては、クノイド波や孤立波のように、 $H_b/h_b = \text{const}$ という砕波条件は適当でないことがわかる。しかし、両図とも、実験値は

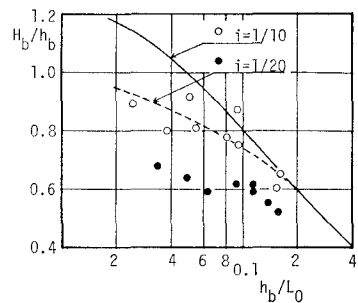
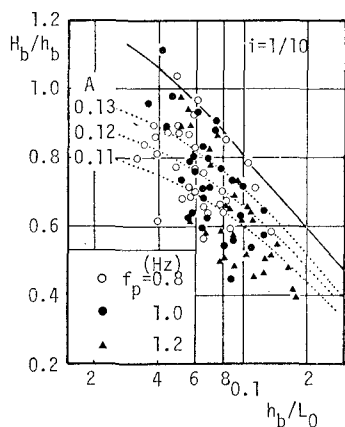
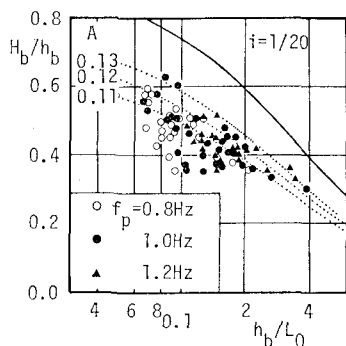


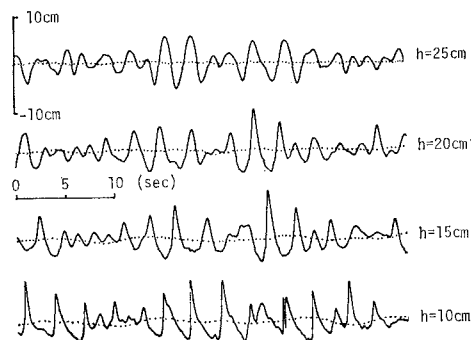
図-9 砕波指標との比較(規則波)

(a) 不規則波 ($i=1/10$)(b) 不規則波 ($i=1/20$)

図—10 碎波指標との比較

実線で示した碎波指標よりいく分小さく、その差は碎波指標に比してケース I で約 30%，ケース II で約 40% 程度にもなる。したがって、これらの結果より、zero-up-cross 法で定義した波は、同じ波高、周期をもつ規則波より碎波しやすいといえよう。郭ら³⁾も実験値あるいは現地波浪の観測記録を解析し、碎波条件として (3) 式を与えているが、これは Laitone がクノイド波に対して与えた碎波条件 $H_b/h_b=0.73$ や McCowan による孤立波の碎波条件 $H_b/h_b=0.78$ に比して 14%~20% 程度小さい。図—10(a), (b) に点線で示した各曲線は (4) 式の定数 A の値を 0.11, 0.12, 0.13 と変化させて計算したものであるが、(a) では $A=0.12$, (b) では $A=0.11$ の場合が実験値と良い対応を示す。

合田⁴⁾はサーフビートによる水深の変化が、不規則波の碎波に大きな影響を与えることを示したが、その点について検討したものが図—11 である。この図はケース II-1 の各水深における水位変動 (実線) と low pass filter を用いて 0.35 Hz 以上の周波数成分をカットしたいわゆるサーフビートの波形 (点線) を示したものである。図より、水深 10 cm の点においては 2 cm 程度の振幅をもつ長周期の変動がみられるが、水深の増加とともに



図—11

に振幅は次第に小さくなり、水深 25 cm の点ではほとんど見られなくなっている。表—1 で示したように、このケースの波の平均的な碎波水深は 20 cm 付近であり、サーフビートによる水深の変化はほぼ無視し得ると考えられる。その他のケースもほぼ同じような状況であった。

このほか、不規則波であるが故に規則波と異なる原因として非定常なもどり流れ、ならびに radiation stress による平均水位の変化などの影響も考えられなくはないが、不規則波におけるこれらの現象が必ずしも明らかでない現在、定量的な影響の評価は困難である。

4. 結 言

この研究は、斜面を遡上、碎波する不規則波を 35 mm カメラと 16 mm シネカメラを用いて撮影し、不規則波の個々の波の碎波特性について検討したものである。その結果、以下のような結果が得られた。

1) shoaling にともなうスペクトルの変形は特に碎波点付近で著しく、ピーク付近のエネルギーが減少し、低周波ならびに高周波域でのエネルギーの急激な増加が見られた。

2) $H_b/L_b \sim h_b/L_b$ の関係は Miche の理論と比較して、1/10 勾配の場合はほぼ一致するが、斜面勾配が 1/20 の場合には理論値に比して約 30% 程度小さくなり、不規則波の碎波に対しても斜面勾配の影響は無視し得ない。

3) $H_b/h_b \sim h_b/L_0$ の関係を合田による碎波指標と比較した結果、1/10 および 1/20 勾配斜面とも、実験値の方が碎波指標に比して平均 30~40% 程度小さい。合田の与えた碎波指標の近似式中の定数 A の値は、今回の実験値に対しては $A=0.11 \sim 0.12$ の値が適当であった。

最後に、一部実験に協力していただいた上総周平君 (京都大学大学院) に感謝するとともに、この研究は文部省科学研究費による研究の一部であることを付記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Collins, J. I.: Probabilities of breaking wave characteristics, Proc. 12th Coastal Engg. Conf., pp. 399-414, 1970.
 - 2) Battjes, J. A.: Set-up due to irregular waves, Proc. 13th Coastal Engg. Conf., pp. 1993-2004, 1972.
 - 3) 郭金棟・郭秀吉: 風波による碎波の波高減衰と波高の確率分布, 第19回海岸工学講演会論文集, pp. 303-307, 1972.
 - 4) 合田良実: 浅海における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告第14巻第3号, pp. 57-106, 1975.
 - 5) 岩垣雄一・木村 晃: 不規則波発生機による現地波浪のシミュレーションシステム, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 231-235, 1974.
 - 6) 岩垣雄一・木村 晃: 波別解析法に基づく不規則波の波長・波速に関する研究, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 406-409, 1976.
 - 7) 合田良実: 碎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.
-