

斜面上の不規則波の碎波限界について

木 村 晃*・瀬 山 明**

1. はじめに

斜面上で碎波する規則波の碎波限界は、波高・周期ならびに海底勾配を与えるとほぼ一義的に決定される。一方、不規則波の場合、通常この種の検討に用いられるゼロアップ（ダウン）クロス法で定義した諸元だけではその特性を十分把握出来ず、この定義法による波高・周期が等しい場合でも個々の波の碎波限界には大きな差異が見られる。すでに“この方法で定義した不規則波の碎波特性は平均的には規則波のそれに等しい”として浅海域での不規則波の変形を取り扱っている研究（例えば Battjes¹⁾）もあるが、例えば著者ら²⁾、磯部ら³⁾、樫木ら⁴⁾らは、不規則波が同じ諸元を持つ規則波に比して若干碎波し易いことを報告しており、岩田ら⁵⁾も合成波が規則波に比してやはり碎波し易いことを示している。一方では、堀田ら⁶⁾の現地観測の結果のように規則波より碎波しにくい場合のあることも報告されており、不規則波の碎波限界は現在もおおむねしも明確でなく、規則波における碎波指標のような確立された碎波限界式はない。この研究は 1/10 から 1/50 までの 4 種類の斜面上で測定した約 4000 波の碎波特性を検討し、最終的に斜面上での不規則波の碎波限界式を与えることを目的として行ったものである。

2. 実験ならびに解析方法

2.1 実験装置

実験に用いた水槽は長さ 29m、幅 50cm、深さ 75cm の両面ガラス張り水槽である。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おり、他端には一様勾配のスロープを設置した。実験に用いた不規則波は Pierson-Moskowitz 型のスペクトルを持つもので、ピーク周波数を $f_p=0.7\text{ Hz}$ から 1.0 Hz の間で 4 種類変化させたものを用いた。また一様勾配斜面としては 1/10、1/20、1/30 及び 1/50 の 4 種類を用いた。斜面上における波の碎波状況は側面からビデオ撮影した。静水位の位置、スケールならびに時間もあわせてビデオ画面に写し

込んだ。記録した画面はマイコンのスーパーポーズ機能を用いて碎波時の波の諸元を読み取った。

2.2 波の定義

著者らの 1 人が以前行った研究²⁾では波の定義法としてゼロアップクロス法を用いた。ゼロアップクロス法とゼロダウンクロス法のいずれが合理的であるか現在必ずしも結論が与えられている訳ではないが⁷⁾、(1) 多くの研究でゼロダウンクロス法が用いられていること⁸⁾、(2) 斜面上では波は多少とも前傾する傾向を示すため、ゼロアップクロス法では峰が最前部に位置し、影響があると考えられるその前の波の谷の特性を取り込むことが出来ない、などの理由からここではゼロダウンクロス法を用いて波の諸元を定義した。碎波高、周期および水深は以下の手順で読み取った。(1) ビデオ画面をスロー再生しながら碎波点を決め、画面を止めて碎波水深を読み取る。(2) 画面を少し戻してコマ送りしながら(1)の点での水位変動のゼロクロス点の時刻、その間の水位の最大・最小値を読み取り、ゼロダウンクロス法で波高・周期を決定した。ここで碎波とは実質部分の最終的な碎波につながるものとした。波の峰付近で泡が発生するものの、波の実部に変化のないものは除外した。表-1 にケースごとの実験条件を示した。

表-1 実験条件

Case	斜面勾配	f_p (Hz)	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	データ数
1	1/10	0.7, 0.9	8.2, 8.0	1.33, 1.01	800
2	1/20	0.7, 1.0	8.2, 7.9	1.33, 0.95	1010
3	1/30	0.8	7.5	1.11	1004
4	1/50	0.8	7.5	1.11	1007

3. 実験結果および考察

3.1 実験結果

図-1 は実験に用いた不規則波の水平床でのスペクトルを示したもので(a)1/10 と (b) 1/30 の 2 つの斜面を用いた実験ケースの結果を示したものである。ピーク周波数は $f_p=0.7\text{ Hz}$ (a)、 0.9 Hz (b) である。図からわかるように、比較的強い反射が予想される(a)図にもその存在を示す固有の振動⁹⁾が見られず、(a)、(b)ともに

* 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部海洋土木工学科

** 正会員 工博 鳥取工学教授 工学部海洋土木工学科

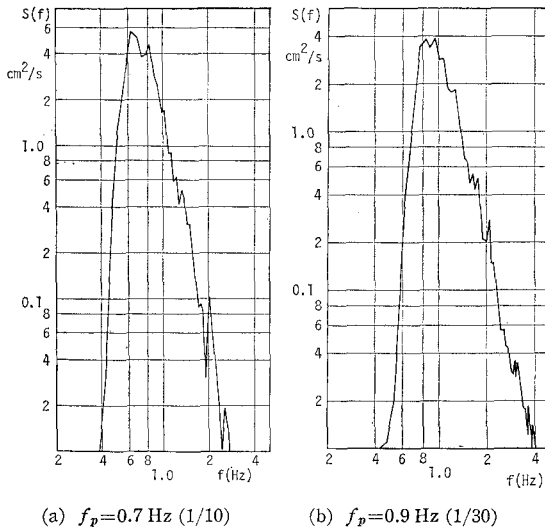


図-1 パワースペクトル

低周波領域に大きなエネルギーは存在していない。

図-2 (a), (b), (c), (d) はそれぞれケース 1, 2, 3, 4 の実験結果で、碎波高/碎波水深と碎波水深/沖波波長の関係を示したものである。図中には合田による規則波の碎波指標を併せて示した。図からわかるように不規則波の実験値の多くは碎波指標より下に分布している。しかし、斜面勾配が急であるほどその割合は減少するものの碎波指標より上にプロットされるデータも存在する(堀田ら⁶⁾)。また、斜面勾配が緩やかになるほど、 h_b/L_0 の大きい部分 ($h_b/L_0 > 0.1$) で碎波指標より上にプロットされるデータが増加する傾向が見られる。

3.2 水深の補正

図-2 の各図にみられるように、データはかなり広く分散しており、特に勾配の急な 1/10 のケースで顕著である。こうしたバラつきが生じる最大の原因はやはり波の定義法にあると考える。Herbers¹⁰⁾、榎木ら⁴⁾、磯部ら³⁾ は碎波特性のバラつきの原因を局所的な波形あるいは前後の波の不規則性に求めている。本研究でもこれらの研究で指摘された要因について検討を行ったが、判定が困難であること、それだけでは図-2 のバラつきを縮小させることが出来なかったこと、複雑な判定条件を用いて碎波特性を論議することは实际的でないこと等の理由で、ゼロダウクロス法で定義される諸元以外は考慮しないこととした。ただし、つぎに説明する水深補正はデータのバラつきの補正にかなり効果があった。すなわち、ゼロダウクロス法による波高・周期が等しい場合でも波の峰・谷の位置は相互に大きく異なる。Herbersらのように峰高の差ととらえることも可能であるが、ここでは両者の違いは波高中分点の位置にあり、結果とし

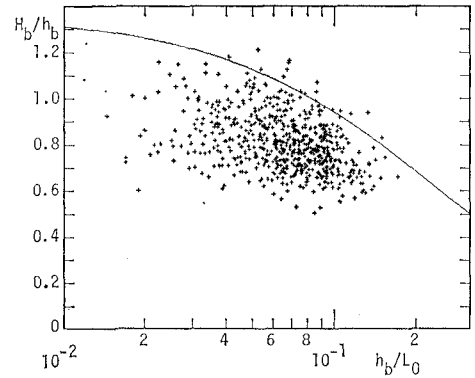
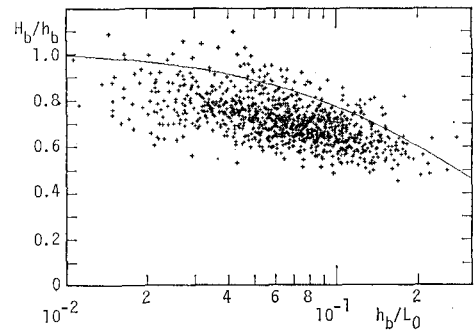
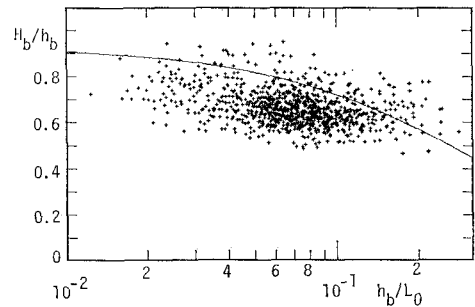
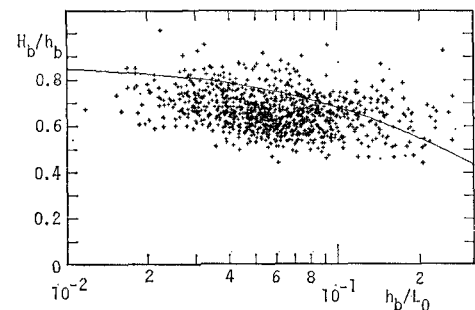

 (a) $i=1/10$

 (b) $i=1/20$

 (c) $i=1/30$

 (d) $i=1/50$

図-2 不規則波の碎波限界

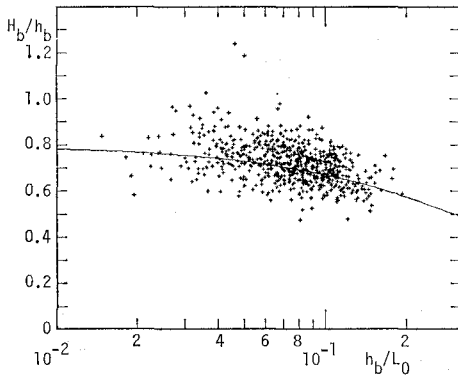
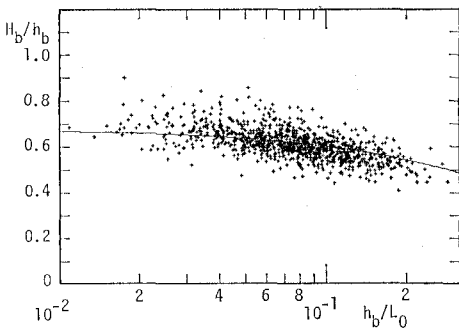
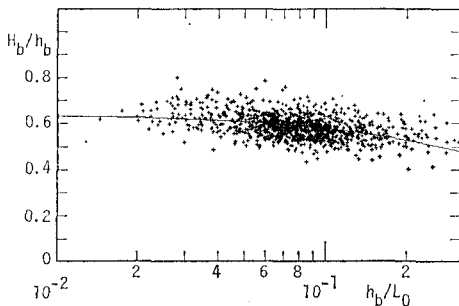
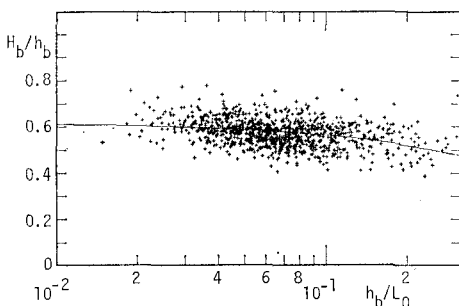
(a) $i=1/10$ (b) $i=1/20$ (c) $i=1/30$ (d) $i=1/50$

図-4 不規則波の碎波限界(水深補正)

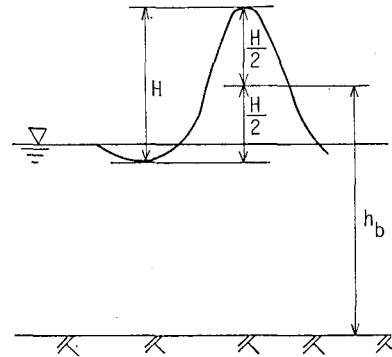


図-3 水深の補正法

て水深が違うと考えた。したがって図-3の h_b を新たな碎波水深とした。図-4 (a), (b), (c), (d) は図-2の各図に対応するもので、図中の実線は後述する碎波限界式である。図からわかるようにバラつきがかなり改善されていることがわかる。特に斜面勾配の緩やかなケースでは良好な補正ができていいる。しかし斜面勾配の急なケースでは依然としてかなりのバラつきが残っている。データの読み取りの際の印象では、先行する波の碎波による擾乱が大きく残っている場合、全体的な波形の変化(特に巻き波碎波の場合)から“体験的”に予測される碎波の瞬間とずれる場合があった。斜面勾配が急であるほど碎波点のバラつきが結果に与える影響は大きいこと、今回の実験では斜面勾配が急であるほど巻き波碎波の割合が多かったことと岩田⁵⁾らの結果とをあわせて考えると、この微小擾乱がバラつきの要因となっている可能性がある。しかし、その影響を評価することは煩雑であるのでここではこれ以上の検討は行わなかった。ここで用いた水深補正はサーフビート等長周期波が重畳した場合にもその影響の除去等に有効に使える方法である。

3.3 不規則波の碎波指標

碎波限界の定式化の方法には大別すると(1)限界波形勾配を与えるタイプ、(2)限界波高水深比を与えるタイプの2通りある。本研究では図-2, 4からわかるようにデータの読み取りをほぼ $h_b/L_0 > 0.01$ の範囲に限ったので上の(1)の形式による定式化を試みた。このタイプによる定式化にもいくつかの方法があるが、ここでは合田による碎波指標と同じ方式を用いる。合田の式は一般的に次のように表すことが出来る。

$$H_b/h_b = A[1 - \exp\{-B\pi(h_b/L_0)(1 + 15 \tan \theta^{4/3})\}] \times (L_0/h_b) + C \quad \dots\dots\dots (1)$$

碎波指標は $A=1.7$, $B=1.5$, $C=0$ である。式(1)で A は曲線の傾き, B は曲率, C は曲線の平行移動量を表す。

図-4 に示した実験結果に対してデータの傾向が最も良く近似出来るように決定した実験式が次式である。

$$H_b/h_b = 0.16[1 - \exp\{-0.8\pi(h_b/L_0)(1 + 15 \tan \theta^{4/3})\}] \times (L_0/h_b) - 0.96 \tan \theta + 0.2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

図-4 の各図の実線が式 (2) である。式 (2) は若干煩雑であるので、より簡単な式で近似を試みた結果が式 (3) である。

$$H_b/h_b = (-1.49 \tan \theta - 0.062) \log(h_b/L_0) + 0.46 \quad \dots\dots\dots (3)$$

図-5 に (2) 式による H_b/h_b と h_b/L_0 の関係を取りまとめて示した。図からわかるように斜面勾配が緩やかになるほどデータの平均的な傾向は平坦になってきており、たとえば $1/50$ では h_b/L_0 によるデータ変化はほとんどみられない。 $1/60$ の斜面も用いた郭・郭⁽¹⁾の実験で得られた結果 ($H_b/h_b = 0.63$) とほぼ一致するので、これ以上の緩斜面では斜面勾配の影響は小さいと考えられる。したがってここでは $1/50$ より緩やかな斜面での碎波限界として次の碎波限界式

$$H_b/h_b = -0.062 \log(h_b/L_0) + 0.46 \quad \dots\dots\dots (4)$$

を提案する。これは式 (3) の $\tan \theta$ を 0 とおいて得られる式である。ただしここで得られた各式は $0.01 < h_b/L_0 < 0.3$ の範囲のデータをもとにしたものであるので、各式の適用範囲も自ずからこの範囲に限られる。

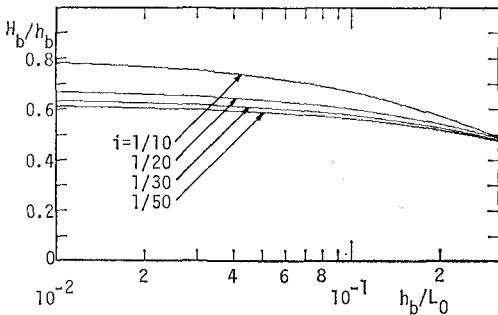


図-5 不規則波の碎波限界

4. 碎波限界の分布

3.2 でも若干触れたが、ゼロクロス法で取り扱う限り不規則波の碎波特性のバラつきは避け難い。この研究ではバラつきもその固有の特性と考えて検討を行った。図-4 のデータを h_b/L_0 の 0.01 毎の微小区間に区分けしたものについて、区間毎の H_b/h_b の確率特性を検討したところ、データ数が少なく判別が困難な部分を除いて正規分布との良好な対応が確認出来た。図-6 は結果の一例で、非超過確率を正規確率紙上にプロットしたものである。図からデータは若干の凹凸はあるもののいずれもほぼ直線に載っており、正規分布と見なし得ることがわかる。図-7 はケース毎のデータの標準偏差値を示

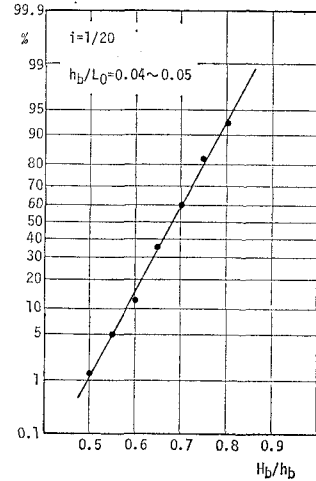


図-6 碎波限界の非超過確率

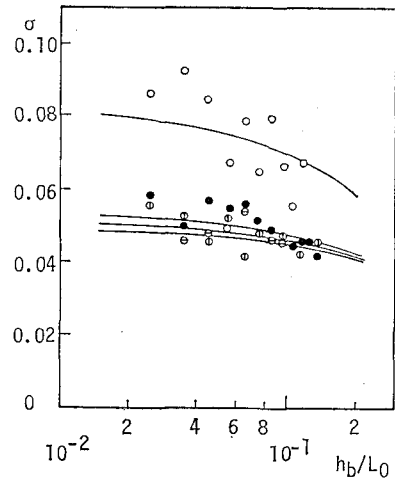


図-7 碎波限界の分布の標準偏差

したものである。ただし、データ数が少ない範囲は除いた。図中の $\circ$, $\bullet$, $\ominus$, $\oplus$ はそれぞれ順にケース 1, 2, 3, 4 の結果を示す。図中の曲線はデータの平均的な傾向を示したもので、式 (2) に定数を掛けて得られた次の関係式である。

$$\sigma(H_b/h_b) = C \times \text{式}(2) \quad \dots\dots\dots (5)$$

C の値としては $i \leq 1/20$ の場合 0.08, $i = 1/10$ のケースでは 0.11 程度が適当であった。つまり不規則波の碎波限界 (H_b/h_b) は平均値が式 (2)、標準偏差が式 (5) で与えられる正規分布をする。

5. 碎波形式

碎波形式についても検討を行った。しかし斜面勾配が急になるほど巻波碎波の比率が増加することが確認できたものの、surf similarity parameter 等による碎波形

式の明確な分類は困難であった。

6. おわりに

水深の補正を行うことで不規則波の碎波限界のバラつきをかなりの程度小さくすることが出来た。このことは逆に, surf beat, wave set-up など平均水位(水深)を変化させる要因はすべて碎波限界に影響を与えることを予想させる。すでに合田¹²⁾はこれら長周期水位変化の影響をそれらの平均値を用いて評価している。しかし, 不規則波の場合, 両者とも短周期波の数倍から十数倍の周期で変動する量であり, 平均値ではその影響を十分評価出来ないと考える。近年これら長周期の水位変動が短周期波の波群特性と関係することが明らかにされつつあり, 将来これらの現象の, 更に詳細な影響も併せた碎波特性の検討が可能になると考える。

最後に本研究に協力していただいた新谷真清, 岡崎久弥の両君(当時学部学生)に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Battjes, J. A: Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves, Proc. 19th ICCE, pp. 649~660, 1984.
- 2) 岩垣雄一・木村 晃・岸田典史: 斜面上における不規則波の碎波に関する研究, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 102~106, 1977.
- 3) 磯部雅彦・西村仁嗣・柄登志彦: 不規則波の碎波変形に関する実験的研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 139~142, 1980.
- 4) 榎木 亨・岩田好一朗・石井敏之: 不規則波の碎波変形に関する実験的研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 143~147, 1980.
- 5) 岩田好一朗・片岡純久・水谷法美: 二成分波の碎波限界に関する研究, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 46~49, 1985.
- 6) 堀田新太郎・磯部雅彦・泉宮尊司・遠藤真人: 現地波浪の碎波限界, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 44~48, 1984.
- 7) たとえば合田良実: 波浪の統計的性質に関する二, 三の数値的検討, 港湾技研報告第24巻第4号, pp. 65~102, 1985.
- 8) IAHR Working Group on wave generation and analysis: IAHR list of sea state parameters (final draft), 1985.
- 9) 石田 昭・井本久仁吉: 不規則波の反射現象と反射率について, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 288~292, 1978.
- 10) Herbers, T. H. C.: The breaking of wind waves in deep water, Delft Univ. of Tech. Rept. No. 8~84, 1984.
- 11) 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.
- 12) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 237p., 1977.