

緩斜面上における不規則波の砕波の連なりに関する研究

岩田好一朗*・片岡純久**・伊藤俊治**

1. 緒 言

不規則波は波高と周期が一波一波異なるので、同一水深で全ての波は砕けることはない。したがって、浅海域における不規則波の砕波の確率、および砕波の連なりとその繰り返し長さの特性を正確に算定することは海岸・港湾構造物の設計に重要な寄与ををするはずである。

斜面上における不規則波の砕波の確率の算定手法は種種提案されてきているが¹⁾、水深変化に伴う砕波確率の計算値と実験値の対応性について詳細な検討をした研究は少ない。また、砕波の連なり、つまり連続して砕波する波数、と砕波の繰り返し長さ、つまり砕波して一旦非砕波になりその後再び砕波するまでの波数、についてはほとんど論議されていない。本論は、緩斜面上での水深変化に伴う不規則波の砕波の確率、砕波の連なりとその繰り返し長さの変化の実態を明らかにするとともに、その予測モデルについて検討しようとするものである。

2. 計算モデル

波別解析された不規則波の一波一波に対して、下記の式を使うことにする。

(i) 浅水変形計算式：微小振幅波理論を使う。

$$\left. \begin{aligned} \frac{H}{H_0} &= K_s \\ K_s &= [1 + (2kh/\sinh 2kh) \tanh kh]^{-1/2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

なお、 H_0 ；沖波波高、 H ；水深 h における波高、 k ($\equiv 2\pi/L$)；波数、 L ；水深 h における波長、 g ；重力加速度、である。

(ii) 砕波限界式：係数を小さくした合田の式²⁾を使う。

$$\left. \begin{aligned} \frac{H_b}{L_0} &= A \left[1 - \exp \left\{ -1.5 \left(\frac{\pi h_b}{L_0} \right) (1 + 15S^{4/3}) \right\} \right] \\ A &= 0.15 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

なお、 H_b ；砕波波高、 h_b ；砕波水深、 L_0 ；沖波波長、 S ；水底勾配、である。また、係数の 0.15 は後述の水理実験により実験値にベスト・フィットするように決めた値である。

(iii) 砕波する波の連長と繰り返し長さの計算式：砕波する波というのは、ある与えられた水深 h で丁度砕波する波を意味する。本論では、波相互の相関関係を考えない確率モデル³⁾を使う。

$$\left. \begin{aligned} P_1(J) &= p_{JB}^{J-1} \times q_{NB}, \quad \bar{J}_1 = \sum_{J=1}^{\infty} J P_1(J) = \frac{1}{1 - p_{JB}} \\ Q_1(l) &= \left(\frac{p_{JB} \times q_{NB}}{p_{JB} - q_{NB}} \right) (p_{JB}^{l-1} - q_{NB}^{l-1}), \\ \bar{l}_1 &= \sum_{l=2}^{\infty} l Q_1(l) = \frac{1}{p_{JB}(1 - p_{JB})}, \\ p_{JB} + q_{NB} &= 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

$P_1(J)$ ；水深 h で J 波が連続して砕波する確率、

$Q_1(l)$ ；水深 h で波が砕波し、そのうち非砕波になり再び砕波するまでの波数が l である確率、

$\bar{J}_1$ ；水深 h で連続して砕波する波の平均連長、

$\bar{l}_1$ ；水深 h で砕波する波の平均繰り返し長さ、

p_{JB} ；水深 h における砕波確率、

q_{NB} ；水深 h における非砕波確率、

である。

(iv) 砕波している波の連長と繰り返し長さの計算式：砕波している波というのは、ある与えられた水深 h で丁度砕波する波と水深 h より深い水深で既に波が砕けて気泡を連行した乱れた波形をしている波の両方を含むものとする。

$$\left. \begin{aligned} P_2(J) &= p_B^{J-1} \times q_N, \quad \bar{J}_2 = \sum_{J=1}^{\infty} J P_2(J) = \frac{1}{1 - p_B} \\ Q_2(l) &= \left(\frac{p_B \times q_N}{p_B - q_N} \right) (p_B^{l-1} - q_N^{l-1}), \\ \bar{l}_2 &= \sum_{l=2}^{\infty} l Q_2(l) = \frac{1}{p_B(1 - p_B)}, \\ p_B + q_N &= 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

* 正会員 工博 助教授 名古屋大学工学部土木工学科

** 学生員 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻

$P_2(J)$; 水深 h で J 波が連続して砕波している確率,
 $Q_2(I)$; 水深 h で一旦波が砕波している状態になり,
 そのうち砕波していない状態になり, 再び砕
 波している状態になるまでの波の数が l であ
 る確率,
 $\bar{J}_2$; 水深 h で連続して砕波している波の平均連
 長,
 $\bar{l}_2$; 水深 h で砕波している波の平均繰り返し長
 さ,
 p_B ; 水深 h で波が砕波している確率,
 q_N ; 水深 h で波が砕波していない確率,

である。

計算はつぎのようにして行なう。すなわち、与えられ
 た沖波(波別解析された波)一波一波に対して式(1)で
 水深変化に伴う波高変化 H を計算する。そして、式
 (2)を使って水深 h で丁度砕波する確率 p_{JB} と波が砕
 波している確率 p_B (丁度砕波する確率 p_{JB} も含む)を
 計算する。なお、 p_B の算定は砕波した後の波は全て砕波
 している波とみなして行なうものとする。このようにし
 て求めた、 p_{JB} と p_B を使って、式(3)と式(4)から、
 $P_1(J)$, $Q_1(I)$, $\bar{J}_1$, $\bar{l}_1$, $P_2(J)$, $Q_2(I)$, $\bar{J}_2$, $\bar{l}_2$ を計算する。

3. 水理実験

3.1 実験装置と実験方法

水理実験は、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水槽(0.95m×0.7m×25m)で
 行なわれた。実験に用いた斜面は1/15の一様勾配斜面
 である。造波装置は油圧サーボを駆動力とするフラップ
 式造波機であり、造波板背後は水のない乾燥した状態に
 なっている。発生波は表一に示されるような4種類の
 不規則波であり、W.-2~W.-4の波は Bretschneider—
 光易型スペクトルを期待スペクトルとする波、W.-1は
 高周波数側の勾配が f^{-6} (f ; 周波数)に比例するような
 尖ったパワー・スペクトル形状を持つ波である。

水位の計測は6台の電気容量式水位計で行ない、全て
 磁気テープに収録した。水位の計測地点は造波板前面水

域 ($h=63$ cm) から、汀線近傍の水深 5 cm までの間の
 23 地点(水深間隔約 2.5 cm)である。

W.-1~W.-4の全ての波の砕波状況を 16mm 高速シ
 ネカメラで撮影した。このうち、W.-1とW.-4の2つ
 の波については、特に造波時間を約15分と長くして、
 一地点の撮影時間を10分間とした。なお、使用した16
 mm 高速カメラは400 フィート用マガジン付き Bolex
 H16 であり 25 コマ/秒で撮影した。

3.2 解析方法

計測された水位記録波形を、原則として、ゼロ・ダウ
 ンクロス法で波別解析した。16mm 高速シネカメラで
 撮影された観測波はフィルムモーション・アナライザー
 で解析し、撮影範囲内に設置された5台の電気容量式水
 位計の記録波と対応づけると同時に、全ての観測波を、
 丁度砕波する波(Just break), と砕波している波(Break-
 ing wave)と非砕波の三つに分類した。また、砕波時の
 波の特性諸量, 例えば砕波波高などもフィルムモーシ
 ョンアナライザーの解析で求めた。砕波の連長と繰り返し
 長さの論議は W.-1とW.-4の二つの波に限定した。
 なお、W.-1とW.-4の二つの波の波別解析の波数は h
 $=63$ cm の水深で、それぞれ 420 波と 520 波であった。

4. 実験結果、計算結果とその考察

4.1 砕波状況と砕波限界

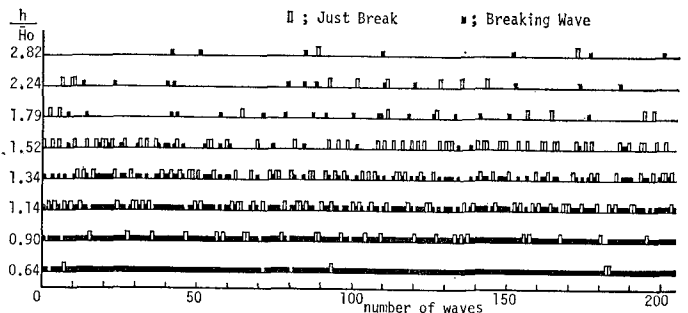
図一は連続した200波を取り挙げ、水深減少に伴な
 う砕波する波(Just break; 図中□印)と砕波している
 波(Breaking wave; 図中■印)の出現の時系列特性を
 示した一例である。なお、図中で□印や■印のない部
 分の波は非砕波の波である。同図に示すように、 $h/\bar{H}_0 \cong$
 1.5 近傍で砕波(Just break; 図中□印)する波が多く、
 汀線近傍の $h/\bar{H}_0 \cong 0.4$ では大部分の波が砕波してい
 る状況が理解できよう。このことは後述の図一3と図一4
 からもしっかり認められる。

ところで、不規則波の砕波は大別すると、単独波が砕
 けるような“規則波型砕波”と波速の早い波が波速の遅
 い波に追いついたり、追い越した時に、波速の早い波、

表一 実験波

WAVE	$H_{1/3}$ (cm)	$\bar{H}$ (cm)	$T_{1/3}$ (sec)	$\bar{T}$ (sec)	Q_p	H_0 (cm)	H_0/L_0
W.-1	13.9	11.2	1.3	1.4	3.89	14.9	0.057
W.-2	3.7	2.5	1.2	1.0	1.69	4.0	0.019
W.-3	7.3	4.6	1.0	0.9	1.99	7.5	0.047
W.-4	9.3	6.1	1.1	1.0	1.94	9.6	0.051

$H_{1/3}$: 有義波高, $\bar{H}$: 平均波高, $T_{1/3}$: 有義周期,
 $\bar{T}$: 平均周期, Q_p : スペクトル尖鋭度, H_0 : 沖波波
 高, H_0/L_0 : 沖波波形勾配



図一 砕波する波と砕波している波の時系列特性

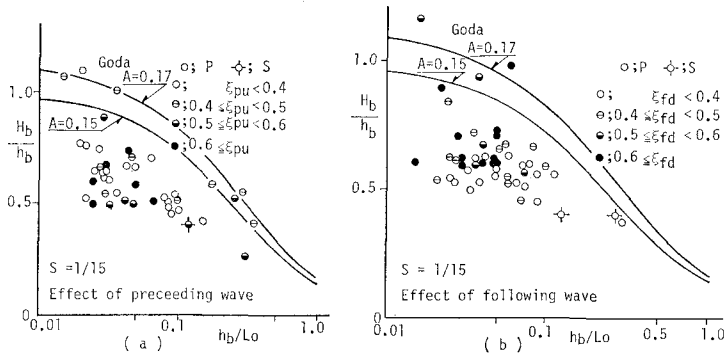


図-2 着目波の碎波限界に及ぼす前後波の影響

あるいは波速の遅い波が砕ける“追いつき碎波”に分類できる¹⁾。いうまでもなく、不規則波は規則波と異なり、波の規模が一波一波異なる。図-2は着目波の碎波限界に及ぼす前後の波の効果を Surf Similarity Parameter⁴⁾ $\xi (=S/\sqrt{H/L_0})$ をパラメーターにして示したものである。図中の下つき p, f, d, u はおのおのの先行波、後続波、ゼロ・ダウncロス波とゼロ・アップクロス波、また○印は Plunging 型碎波、○-印は Spilling 型碎波を示す。図-2に示すように、着目波の碎波限界 (H_b/h_b) は、先行波より後続波の影響を結構受ける。すなわち、後続波の ξ_{fa} が大きくなるにつれて着目波の (H_b/h_b) が大きくなる傾向が指摘できる。つまり、着目波の後続波の波形勾配が小さいほど着目波の碎波相対波高 (H_b/h_b) が大きくなり砕けにくいのに対し、後続波の波形勾配が大きくなると、着目波の (H_b/h_b) が小さくなり砕け易くなることが“指摘”できる。したがって、碎波確率などの計算に際しては、波相互の相関関係を考慮する必要がある。

あると考えられる。

碎波限界値は、図-2に示した実験値以外にも加えてプロットするとゼロ・ダウncロス波についてもかなりばらつき、合田が規則波に対して提案した値よりも小さくなる。本論では紙面の制限のため図示しないが、既述の式(2)でほぼ平均的な値は与えられることが認められた。

4.2 碎波確率

図-3(a)は、水深減少に伴う碎波する確率 p_{JB} 変化を示したものである。W.-1とW.-4の両方の

波の碎波確率 $p_{JB} = h/\bar{H}_0 \approx 1.5$ 前後で最大になり、4波のうち一波は砕けることが認められる。同図には、式(1)と式(2)を使って計算した値(図中 Eqs. (1) & (2))も示されている。実験値と計算値の対応性はある程度よいことが認められる。また、式(1)の代りに首藤の有限振幅波理論⁵⁾(式(5))を使った計算値(図中 Eqs. (2) & (5))も示されているが、微小振幅波理論に基づく式(1)を使用した計算値との大差はなさそうである。実験値と計算値にずれがあるが、波相互の相関関係を考慮すれば、計算値に近づくものと著者らは考えている。

$$\left. \begin{aligned} gHT^2/h^2 &\leq 30 \text{ で } H/H_0 = K_s \text{ (式(1)参照)} \\ 30 < gHT^2/h^2 &\leq 50 \text{ で } Hh^{2/7} = \text{const.} \\ 50 < gHT^2/h^2 &\text{ で } \\ &Hh^{5/2} [\sqrt{gHT^2/h^2} - 2\sqrt{3}] = \text{const.} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

図-3(b)は、水深減少に伴う碎波している波の確

率 p_B の変化を示したものである。式(1)を使った微小振幅波理論に基づく値(図中 Eqs. (1) & (2))と有限振幅波理論(式(5))に基づく値(図中 Eqs. (2) & (5))に差異はあるが、実験値との対応性については大差がないように判断される。同図によれば、 p_B は水深減少につれて大きくなり、 Q_p の大きい W.-1 の波の場合は、 $h/\bar{H}_0 \approx 1.1$ で $p \approx 0.85$ となり、大部分の波は砕けて乱れた波になっている。一方、 Q_p の小さい W.-4 の波については、 $h/\bar{H}_0 \approx 0.82$ で $p_B \approx 0.73$ であり、 Q_p の大きい場合に比して砕け

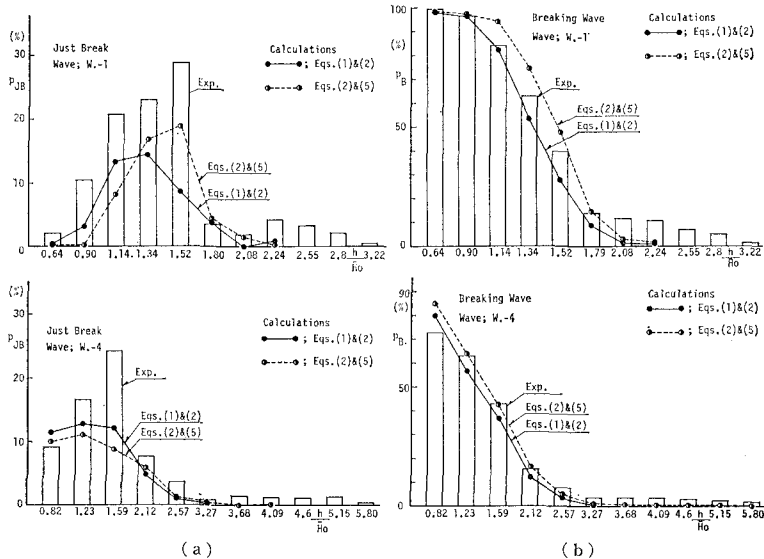


図-3 水深変化に伴う碎波確率の変化

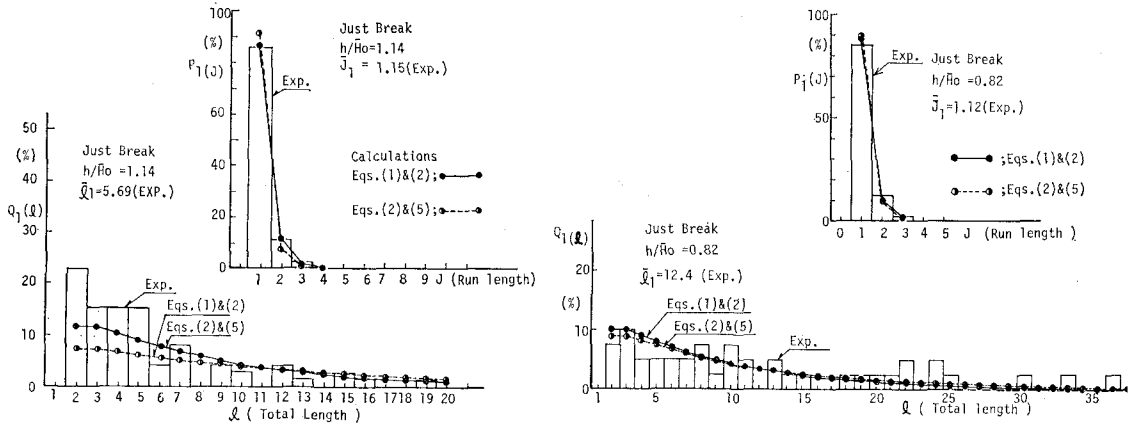


図4 砕波 (Just break) の連長と繰り返し長さの確率分布

ている波の割合は若干小さい。なお、計算値の対応性については p_{JB} より p_B の方がよいことが指摘できよう。

4.3 砕波 (Just break) の連長と繰り返し長さ

図-4 は砕波の連長が J である確率密度 $P_1(J)$ と砕波の繰り返し長さが l である確率密度 $Q_1(l)$ を示した二例である。図-4 に示されているように、 $J=1$ 、つまり一波のみが砕波する確率密度 $P_1(J=1)$ が最も大きく、その次が二波連続して砕ける確率密度 $P_1(J=2)$ が大きい、 $P_1(J=2)$ の値は $P_1(J=1)$ の値の $1/4$ 以下である。このため、砕波 (Just break) の平均連長 $\bar{J}_1$ は図-5 示すように、最も砕波確率の大きい $h/\bar{H}_0 \approx 1.5$ の地点でも $\bar{J}_1 \geq 2.0$ になることはなく、平均的に二波連続して砕波しない。この砕波の平均連長 $\bar{J}_1$ は水深変化に伴って大きく変化しないことも図-5 より判明する。 $P_1(J)$ の計算値は、実験値とよく対応している。

一方、砕波の繰り返し長さの確率密度 $Q_1(l)$ は、水深の深い地点 ($h/\bar{H}_0 \geq 2.8$) では、砕波確率が小さいので、 $l \geq 10$ に対する値 $Q_1(l)$ ($l \geq 10$) が大きくなる (図示されていない)。水深が浅くなり砕波確率が大きくなると、図-4 に示されているように、 $h/\bar{H}_0 \approx 1.1$ の地点では、

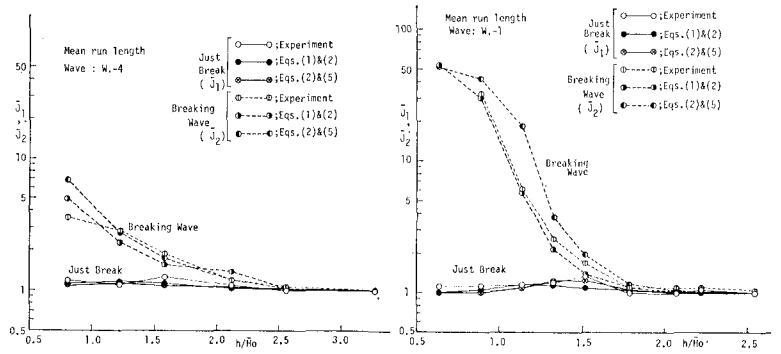


図5 砕波 (Just break) する波と砕波している波 (Breaking wave) の平均連長

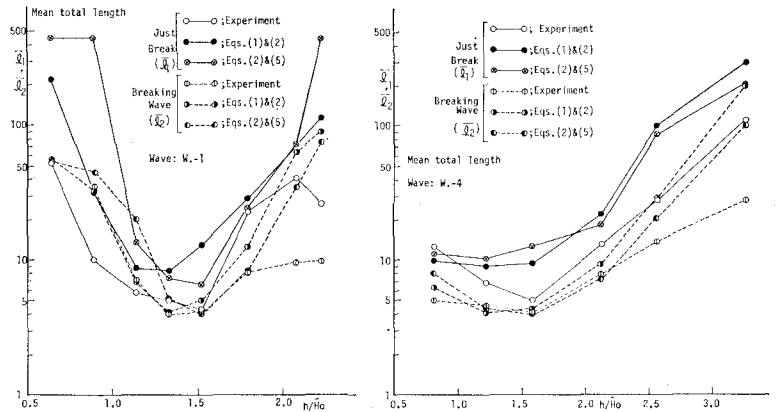


図6 砕波 (Just break) する波と砕波している波 (Breaking wave) の平均繰り返し長さ

$l_1=2 \sim 7$ に対する確率密度が大きくなる。更に、水深の浅い $h/\bar{H}_0=0.82$ の地点では、 $l \geq 8$ の大きな値に対して $Q_1(l)$ は大きくなり、汀線に近づくにつれて、 $h/\bar{H}_0 \geq 2.8$ の深水域同様、 $l > 10$ の長い繰り返し長さに対する値 $Q_1(l)$ が大きくなる。なお、本論で提案した計算モデル (図中 Eqs. (1) & (2)) は実験値と必ずしも充分対応

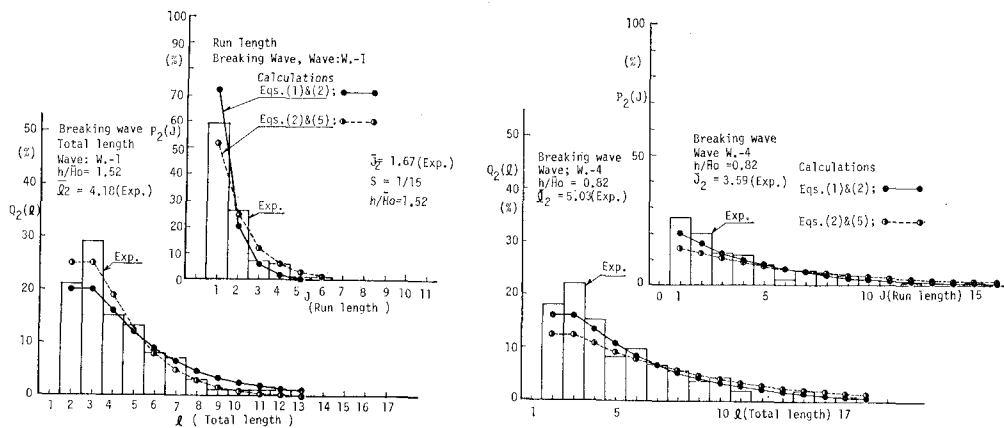


図-7 碎波している波の連長と繰り返し長さの確率分布

していない。この原因の一つとして、式(1)と式(2)のあるいは式(2)と式(5)では碎波確率を正確に算定できないことがあげられよう。

碎波の平均繰り返し長さ $\bar{l}_1$ は、図-6 に示されているように、 $\bar{l}_1$ が最大になる地点 ($h/\bar{H}_0 \approx 1.5$ 前後) で最も小さくなる ($\bar{l}_{\min} = 5 \sim 6$)。そして、汀線方向あるいは深水域に向うにつれて大きくなる。本論の提案モデルの計算値は $h/\bar{H}_0 = 1.25 \sim 1.56$ の範囲で実験値とよく対応しているが、 $h/\bar{H}_0 < 1.0$ と $h/\bar{H}_0 > 2.0$ ではかなりの差異がある。大きな原因の一つとして、 $h/\bar{H}_0 < 1.0$ と $h/\bar{H}_0 > 2.0$ では実験資料が極端に少なくなるので、実験値の統計的信頼度が極端に低くなることがあげられる。

4.4 碎波している波の連長と繰り返し長さ

図-7 は、碎波している波 (Breaking wave) の連長 J と繰り返し長さの確率密度 $P_2(J)$ と $Q_2(l)$ の値を示したものである。上述した $P_1(J)$ と $Q_1(l)$ に比して、連長 J が3以上になる確率 $P_2(J) (J \geq 3)$ はかなり大きくなること、また、繰り返し長さ l が2~5 (2波~5波) になる確率 $Q_2(l) (l=2 \sim 5)$ の結構大きいことが、 $1.0 \leq h/\bar{H}_0 \leq 2.0$ の範囲に対して認められる。また、式(1)と式(2)を使って計算した $P_2(J)$ と $Q_2(l)$ の値 (図中 Eqs. (1) & (2)), あるいは、式(2)と式(5)を使って計算した値 (図中 Eqs. (2) & (5)) と実験値はかなりよく一致していることが認められる。

碎波している波の平均連長 $\bar{l}_2$ は、図-5 に示されているように、汀線に向かうにつれて大きくなっていく。これは、図-1 に一例として示されているように、汀線に向かうにつれて碎波している波の数が増大するため当然といえる。また、水深変化 ($h/\bar{H}_0$) にともなう碎波している波の平均繰り返し長さ $\bar{l}_2$ の変化特性は、既述の $\bar{l}_1$ (丁度碎波する波の平均繰り返し長さ) と同様の傾

向を示す。そして、碎波確率 (丁度碎波する確率) が最も大きくなる地点 ($h/\bar{H}_0 \approx 1.5$ 前後) で $\bar{l}_2$ は最小になる。最小値は $(\bar{l}_2)_{\min} \approx 4 \sim 5$ であり、 $(\bar{l}_1)_{\min} = 5 \sim 6$ の値より一波程度短くなっている。これは、碎波 (Just break) はある 特定の水深に 限定されるのに対し、一旦碎けた波はしばらくの間、あるいは場合によっては汀線まで碎けた波 (Breaking wave) として伝播するので平均的に碎けている波の出現頻度が大きいためである。計算値は $0.8 \leq h/\bar{H}_0 \leq 1.7$ の範囲では実験値とよく一致するが、 $h/\bar{H}_0 \geq 2.0$ と $h/\bar{H}_0 < 0.8$ の領域では、かなりの差異がある。この原因の一つに、既述の $\bar{l}_1$ 同様、実験値が少なくなってしまうので統計的信頼度が極端に低下したことがあげられる。

5. 結 言

本論では、斜面上における不規則波の碎波の連なりと繰り返し長さの実態を水理実験により明らかにするとともに、その予測手法について検討してきた。提案された計算モデルである程度実験事実を説明することができたが、まだ改良の余地が残されており、ひき続き検討を加えていく所存である。

参 考 文 献

- 1) 岩田好一朗: 斜面上への不規則波のそ上, 水工学シリーズ 82-B-5, 土木学会水理委員会, 1982.
- 2) 合田良実: 浅海域における波浪の碎波波形, 港研技報, Vol. 14, 1975, 59~106.
- 3) 合田良実: 波の連りの統計的性質について, 港研技報, Vol. 15, 1976, pp. 3~9.
- 4) Battjets, J. A.: Surf similarity, Proc. 16th ICCE, 1978, pp. 466~480.
- 5) 首藤伸夫: 非線型長波の変形—水路幅, 水深の変化する場合, 第21回海論論文集, 1974, 22. 57~63.