

一様斜面上での不規則波の碎波率に関する一考察

西 隆一郎*・佐藤 道郎**・Nicholas C. Kraus***

1. ま え が き

規則波が平行等深線を持つ一様勾配の海浜上を伝搬すれば、波長と波速は減少し波高は徐々に増加する。そしてある特定の地点（水深）において規則波は碎波し、その後、水深が浅くなるにつれて波高を減少させていくので規則波の碎波点は比較的明瞭に認識できる。一方、規則波の碎波とは対照的に、不規則波は波高・周期ともに様々な成分の波により構成されているので、波の列が海岸に近づくにつれて、最も波高の大きな波が沖で砕けそして中ぐらいの大きさの波が沿岸砂州の沖側斜面や頂部で砕け、最終的に最も波高の小さい波が汀線近傍で砕ける。それ故、不規則波の場合は白い水塊で特徴づけられる幅の広い碎波帯が存在し、波はそこでほとんどのエネルギーを消散する。従って、沿岸砂州の頂部付近や潜堤頂部付近でうねり性の波が碎波する場合を除いては、規則波のように唯一の碎波点を定める事は不可能であり一つの碎波波高を定義する事も困難と思われる。

海岸工学に携わる技術者にとり、海浜上での不規則な入射波の碎波の割合つまり碎波率を知る事は、例えば、浅海域での波高分布、沿岸流速分布、そしてそれに関連した漂砂量と海浜地形の変化等の問題を解く助けになる。加えて、碎波帯内の任意の地点において碎波している波の数とその波高頻度分布が分かれば、波力の評価を向上させられるだろうし、単一の条件に基づいた規則波の碎波点、波高分布を用いるよりも精度の良い経済的な海岸構造物の設計を可能ならしめると思われた。

不規則波の碎波率を求めようとした場合、その碎波機構が複雑であるために、研究者によって碎波率の定義が若干異なっているように思える。本論文では、Goda (1978, 1983), Battjes・Janssen (1978), Thornton・Guza (1983), そして、Larson・Kraus (1992) によるモンテカルロ法を用いて碎波率を調べる事にした。Goda モデルにおいては、碎波率自体は定義されていないが、彼の碎波モデルに基づいて碎波率を定義した。またモンテカル

ロ法については個々波の“breaking”, あるいは“broken wave”という概念を用いて、全体の入射波の碎波率を定義した。

本論文では始めに、Ebersole・Hughes (1987) によって得られた DUCK 85 の現地観測データに基づき碎波率を求める方法について述べ、そして具体的に碎波率の空間分布を調べる事にする。次いで、一様勾配斜面を対象に上記 4 つのモデルを用いて数値計算を行い、それぞれのモデルの違いや特性について考える事にする。

方向スペクトルを持つ不規則波の、任意地形上での三次元モデルを開発する前に、狭帯域のスペクトルを持ち入射角が汀線に直角の場合の波の変形を第 1 段階として扱った。従って、本研究では、波の屈折・回折そして反射についてはモデル中で考慮していない。

2. 現地波浪のデータ解析

現地海浜で見られる不規則波の碎波率を求めるには、容量式波高計やフォトポールを用いた水位の直接記録が必要になる。本研究では、この自由水面記録として DUCK 85 により得られた現地データを用いた。これは VTR 画像を読み取りデジタル値に変換したデータを、CERC の Ebersole 氏より提供して頂いたものである。不規則波の碎波率を求める上で、各計測地点での波数を等しくするために水位記録を目視によるゼロクロス法で個々波に分解し、それぞれに番号を付けて、沖側からトレース出来るようにした。この方法と、Ebersole (1987) の方法と、全くフィルターを用いていないゼロクロス法による結果を図-1 に示す。図-1 には有義波高を実線で、平均波高を破線で示してある。今回用いた目視による方法と、Ebersole (1987) による方法はかなり一致した結果となっているが、フィルターを用いない場合のゼロクロス法の結果とはかなり異なっている。一連のデータ処理方法については Ebersole (1987) に詳しく述べられている。

目視で個々波に水位記録を分割するのと並行して、波が unbroken, breaking, broken 等のカテゴリーに分類し、そして、入射波数で breaking と broken wave の波数の和を割る事により碎波率を求めた。その碎波率の例

* 正会員 工修 鹿児島大学助手 海洋土木工学科

** 正会員 工博 鹿児島大学教授 海洋土木工学科

*** Prof. Texas A & M University-Corpus Christi

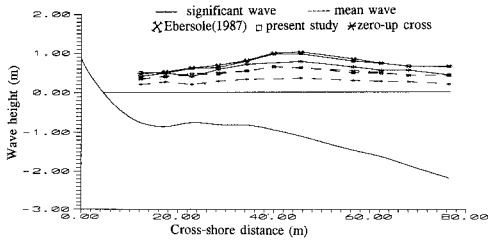


図-1 代表波高の岸沖分布

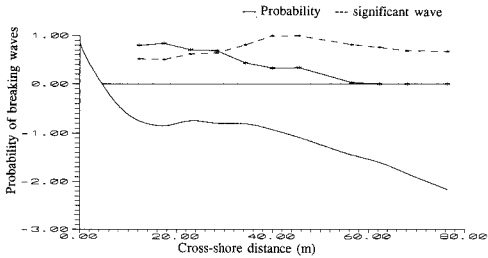


図-2 碎波率の岸沖方向分布

を図-2に示す。図中、実線が碎波率を点線が有義波高を表しているが、有義波高が最大になる辺りで3割強の入射波が砕けている事が分かる。

3. 碎波率の計算モデル

不規則波の碎波変形モデルについては、多くの研究者により提案されてきたがここでは、その内、Godaモデル Battjes・Janssenモデル(B-Jモデル)、Thornton・Guza(T-Gモデル)、モンテカルロ法(M.C.法)を用いて、不規則波の碎波率について考察していく。ただし、本文中ではこれ以降Gモデル、B-Jモデル、T-Gモデル、M.C.法として略称していく。図-3にそれぞれのモデルの碎波の概念を模式的に示した。各モデルの詳細については原論文を参照してもらうこととし、ここでは概要について述べる。

3.1 Godaモデル

このモデルでは沖から入射してくる不規則波は波高がレーリー分布 $p_0(\xi)$ に従うと仮定し、各水深において波高頻度分布を求め、次いで各代表波高を求めるものである。

$$p_0(\xi) = 2a^2 \xi \cdot \exp[-a^2 \xi^2] \dots \dots \dots (1)$$

この波高分布に従う波の内、最も大きい波が砕け始めると、浅海域で碎波していない波の波高分布は、(1)式で示されるレーリー分布より斜線で示す碎波している波の領域を引けば良いので、結局(2)式で示す $p_r(\xi)$ で与えられる。

$$\begin{aligned} p_r(\xi) &= p_0(\xi); \xi \leq \xi_2 \\ &= p_0(\xi) - \frac{\xi - \xi_2}{\xi_1 - \xi_2} p_0(\xi); \xi_2 < \xi \leq \xi_1 \\ &= 0; \xi_1 < \xi \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

また、図-3(a)中斜線で示した碎波している波の波高分布は(3)式で与えられる。

$$\begin{aligned} p_{br}(\xi) &= \left(\frac{\xi - \xi_2}{\xi_1 - \xi_2} \right) p_0(\xi); \xi_2 < \xi < \xi_1 \\ &= p_0(\xi); \xi > \xi_1 \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

ただし、 ξ_1 と ξ_2 は上限と下限の碎波指標である。従って、ある地点 x での不規則波の碎波率は碎波している波の領域面積と碎波していない波の領域面積をそれぞれ $A_1(x), A_2(x)$ とすると、次式で碎波率 $p_{br}(x)$ は求まる。

$$p_{br}(X) = \frac{A_1(X)}{(A_1(X) + A_2(X))} \dots \dots \dots (4)$$

本モデルは、バー型斜面等の負の勾配を持つ断面に対しては碎波指標を適用しにくい問題があるが、それについては勾配項の絶対値を用いる方法が佐藤・小部(1983)により用いられている。

3.2 Battjes-Janssenモデル

本モデルは、Battjes・Janssen(1978)により碎波する波群の波高分布が図-3(b)に示すようになると仮定し、平均エネルギー密度と自乗平均波高 H_{rms}^2 が単位体積当たりのエネルギー逸散から求まると考えた。エネルギー逸散についてはboreモデルを用いて、(5)式に示すエネルギー保存則を導き平均波高を求めた。

$$\frac{\partial(EC_g)}{\partial X} + D = 0 \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 EC_g は波のエネルギーフラックス、そして X は岸沖座標、 D が時間平均した波の逸散率である。波の碎波率を求めるために彼らは与えられた地点において碎波あるいは砕けている波の波高はその地点での最大波高 H_m に等しいと仮定した。深海においてGモデルと同様にレーリー分布を仮定し、波の碎波率 Q_b は次の超越方程式を解く事により求めた。

$$\frac{1 - Q_b}{\ln Q_b} = - \left(\frac{H_{rms}}{H_m} \right)^2 \dots \dots \dots (6)$$

3.3 Thornton-Guzaモデル

Thornton・Guzaは、B-Jモデルの碎波の概念に改良を加え沖合いから海浜への自乗平均波高の変化を求めるために、以下のようなエネルギー保存式を用いた。

$$\frac{\partial(EC_g)}{\partial X} = \langle \epsilon_b \rangle \dots \dots \dots (7)$$

ただし、 $\langle \epsilon_b \rangle$ は碎波した波による集合平均逸散である。平均エネルギー減衰を求めるために、碎波している波の割合はレーリー分布に重みを掛けた重み関数 $W(H)$ で図-3(c)に示される。そして、碎波している波の割合 A_b

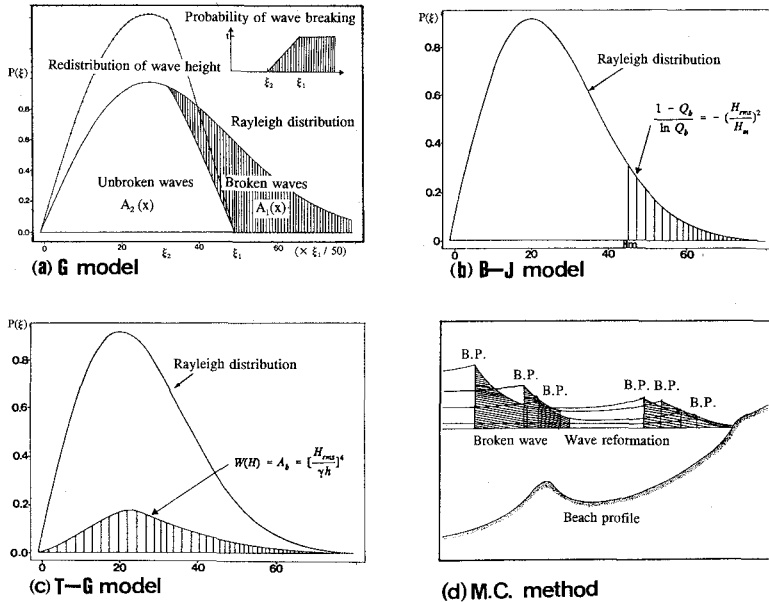


図-3 砕波モデルの模式図

は (8) 式で示される。

$$A_b = \int_0^\infty p_b(H) dH = \int_0^\infty W(H) \cdot p(H) dH = W(H) \dots\dots\dots (8)$$

そして、彼らは、砕波率が自乗平均波高 H_{rms}^2 と、局所水深 h にだけ依存すると仮定し (9) 式で砕波率を求めた。

$$W(H) = A_b = \left(\frac{H_{rms}}{\gamma h} \right)^4 \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 γ は 0.4 程度の値を取る。

3.4 Monte-Carlo 法

Larson・Kraus (1992) は、不規則波による沿岸流速分布を求めるのにモンテカルロ法を用いた。この M.C.法は深海域において波高分布がレーリー分布に従うように一連の個々波をランダムに入射させるものである。個々波はそれぞれ浅水変形し異なった地点で砕波し、また再生していく。ここで個々波の変形に用いた式は Dally (1980), Dally et al. (1984, 1985) により提案された (10) 式を用いている。

$$\frac{\partial(EC_g)}{\partial X} = \frac{\kappa}{d}(EC_g - EC_{gs}) \dots\dots\dots (10)$$

ここで d は局所全水深、 κ は経験的な無次元定数、そして EC_{gs} は安定波のエネルギーフラックスで浅海域においては次式により与えられる。

$$EC_{gs} = \frac{1}{8} \rho g (\Gamma h)^2 \sqrt{gh} \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 Γ は 0.4 程度の値を取る。

砕波率を求めるためには、個々波のそれぞれが任意の

水深で砕波あるいは砕けているかを波の変形計算の途中でチェックしておき、各地点で砕波している波数を通過波数で割り砕波率を定義するので、目視による砕波率の定義と手法的に同じである。個々波が任意の水深で砕けているかどうかについては、任意の地点でのエネルギーフラックスが安定波のエネルギーフラックスより大きいかどうかを判定して決める。この M.C.法自体は、入射波浪として任意の波高・周期の組み合わせを持つ入射波列を用いられる利点がある。

4. 数値実験の結果と考察

1/20 勾配斜面上での各モデルによる砕波率の数値計算結果を、それぞれ図-4(a), (b), (c), (d) に示す。それぞれ沖合いで砕波率が 0 で、水深が徐々に浅くなるにつれて砕波率が増加し最終的に 1 になる。また G モデルと M.C. 法による砕波率は凸型の曲線で増加するが、B-J モデルと T-G モデルは凹型の曲線で増加している。B-J モデルにおいては、原論文でも指摘されているように砕波帯内で最大波高と平均波高が一致するようになると、砕波率が 1 になりモデルとして改良の余地がある。G モデルについては砕波波高を求める合田式の係数 A を変更する事によって、M.C.法の結果とほぼ等しくする事が可能と思われる。

さて、M.C.法については周波数スペクトルを持った条件にそのまま拡張できるので、ここでは DUCK 85 で得られた地形上でケース 59050955 の沖波を条件に選び砕波率の計算を行った。入射波として用いた沖波の波高分

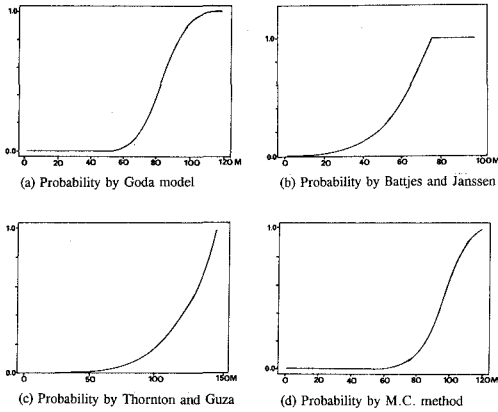


図-4 碎波率の空間分布

布は図-5に示す。図より水深が徐々に浅くなるにつれて碎波率が増加し平坦部ではほぼ一定の値を保ち、そして水深が深くなったトラフ地形部で急激に碎波率が零に減少している。そして再び、汀線近傍の水深が浅くなる地点で急激に碎波率が増加している事が分かる。このように碎波率が急激に増加したり減少したりするのは、少し奇妙な感じがする。そこで、この原因を調べるために海浜断面上で碎波している波数と碎けている波数の分布を図-7に示した。図中破線が碎波数で、実線が碎けている波の数である。入射波の内小さい波を除き、ほとんどの波が断面の海側斜面上の異なる地点で波高・周期・局所水深の違いに応じて碎波している。そして、一旦碎波した波が海側斜面上や平坦部で碎けて進行しており、平坦部で碎波している波はほとんどない事が分かる。その後波がトラフ部にさしかかり、一旦水深が深くなると、波が再生し始めている。そして既に碎波している波は、ほぼ水深により波高が支配されるので、汀線近傍では規則波に近い状況になり、ほとんどの波が汀線近傍の同一地点で碎ける。その結果、碎波率が急激に1に近くなるわけである。このような碎波変形の状況を調べるために図-8にそれぞれの個々波の変形の状況を示す。この図からもトラフ域で波が再生した後に、汀線近傍で波がまとまって碎けている事が分かる。しかしながら、現地における個々波の波浪変形は、図-8に比べるとかなり散らばっており、計算で示すほど滑らかな波高変化ではなかった。

計算に従えば、上述したような説明が可能であるが、波が碎けている場合には白い水塊や泡などの影響でトラフ部でも割合徐々に碎波率が減少、増加するように思われる。逆に周期の長い波のトラフが通過する場合にはトラフ地形上でも青色の水のままで白い水塊や泡は見られなかったりするようにも思える。実際本モデルは、碎波

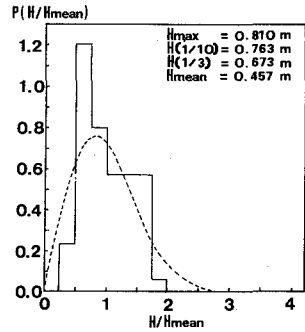


図-5 計算に用いた沖波条件

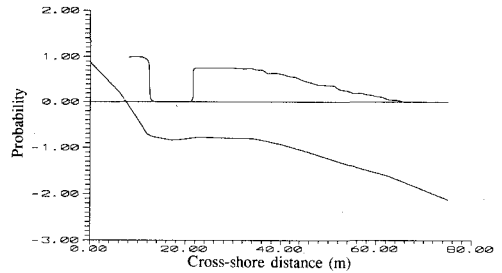


図-6 碎波率の空間分布

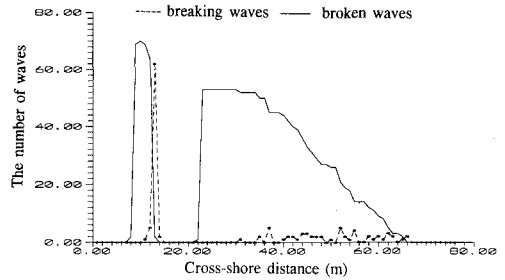


図-7 breaking と broken wave の波数の分布

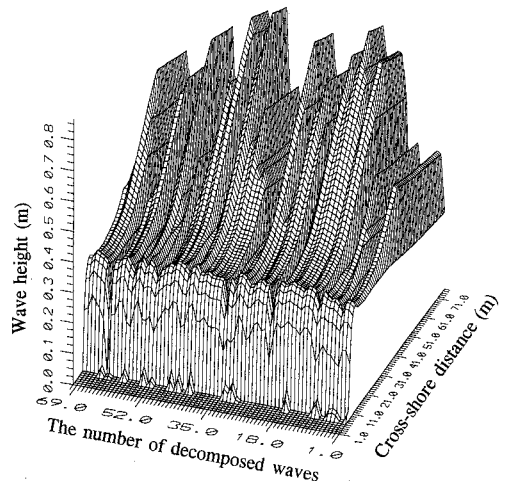


図-8 各入射波の波高分布の様子

によるエネルギー逸散にだけ依存しているので更に水平渦等の効果を取り込めば、目視でみられる白い水塊等の効果を考慮できるかもしれないが、それについては今後の課題と考えられる。またそれぞれの個々波の進行速度が異なるので波の追いつき等による砕波も起こり得るがこれについてもここではまだ考慮していない。

5. 結 語

本研究では、数値計算に基づき一様勾配斜面での不規則波の砕波率について主に考察した。また DUCK 85 により得られた同期の取れた水位データについても、目視で個々波に分解し波高・周期を求めた後、砕波率についても空間分布を求めた。目視による方法は、時間も手間もかかるが、個々波を沖から追跡できる利点がある事、入射波の数を各計測地点で同一に出来る事の利点がある。この方法による代表波高の分布については Ebersole (1987) のものとほとんど変わらなかった。一様勾配斜面上での砕波率については G モデルと M. C. 法, B-J モデルと T-G モデルがそれぞれ類似の結果を示していた。また周波数分布を持つ波への応用として、M. C. 法を用いて計算した砕波率の一例を示し、モデルがトラフ部で若干問題が残っている事を示した。バー型斜面への各モデルの適用については、今後の課題と考えられる。

謝辞：本研究の M. C. 法については Lund 大学 Larson 博士により貴重な助言を頂き感謝しています。また、特に第 1 著者は、Texas A & M 大学の Conrad Blucher Institute for Surveying and Science に滞在中、本計算を行うに当たり計算機の使用など様々な助力をスタッフの方に仰ぎここに感謝の言葉を記させて頂きます。更に、CERC の Ebersole 氏には貴重なデータの提供をして頂き深湛の謝意を表させて頂きます。

参 考 文 献

- Battjes, J. A. and Janssen, J. P. F. M. (1978): Energy loss and set-up due to breaking wave, Proc. 16th ICCE, ASCE, pp. 596-587.
- Dally, W. R. (1980): A numerical model for beach profile evolution, M. S. Thesis, University of Delaware, Newark, DE., 122 p.
- Dally, W. R., Dean, R. G., and Dalrymple, R. A. (1984): Modelling wave transformation in the surf zone, Miscellaneous paper, CERC-84-8, US Army Waterway Experiment Station, Coastal Engineering research Center, 44 p.
- Dally, W. R., Dean, R. G., and Dalrymple, R. A. (1985): A model for breaker decay on beaches, Proc. 19th ICCE, ASCE, pp. 82-98.
- Goda, Y. (1978): The observed joint distribution of periods and heights of sea waves, Proc. 16th ICCE, ASCE, pp. 225-246.
- Goda, Y. (1983): Random seas and design of maritime structures, Tokyo, University of Tokyo Press, 323 p.
- Ebersole, B. A. and Hughes, S. A. (1987): DUCK85 photopole experiment, Miscellaneous paper CERC-87-18, US Army Engineer Waterway Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, 62 p.
- Ebersole, B. A. (1987): Measurement and prediction of wave height decay in the surf zone, Proc. Coastal Hydrodynamics '87, ASCE, pp. 225-246.
- Kraus, N. C. and Larson, M. (1991): NMLONG: Numerical model for simulating the longshore current, Technical Report DRP-91-1, Coastal Engineering research Center, US Army Engieer Waterway Experiment Station, 143 p.
- Larson, M. and Kraus, N. C. (1991): Numerical model of longshore current for bar and trough beaches, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 117, No. 4, pp. 307-325.
- Thornton, E. B. and Schaeffer, G. (1978): Probability density functions of breaking waves, Proc. 16th ICCE, ASCE, pp. 505-519.
- Thornton, E. B. and Guza, R. T. (1989): Wind wave transformation, chapter 8, in Seymour, R. J. (ed.), Nearshore Sediment Transport, Plenum Press, Newark, 418 p.