

ステップによる孤立波の砕波形式の定量的評価と 支配法則について

安 田 孝 志*・柳 原 幸 雄**

1. 緒 言

砕波は、渦やラディエーション応力の生成を通して海浜流や漂砂などに大きな影響を及ぼすほか、波力・波圧や越波量を格段に増大させるなど海岸工学的に極めて重要な現象である。こうした砕波の影響は砕波の形態、いわゆる砕波形式に大きく依存するため、単に砕波の有無や砕波限界波高を知るだけでは不十分であり、同時に砕波形式を明らかにし、その予測法を確立する必要がある。

一樣斜面上での周期波の砕波形式については、Galvin (1968) や Battjes (1974) による数多くの水理実験結果に基づく分類が現在も広く用いられている。一樣斜面上の場合、パラメータが沖波波形勾配 H_0/L_0 および海底勾配 $\tan \theta$ のみであり、砕波形式も崩れ波型から巻き波型に連続的に遷移するために相対評価が可能となり、砕波波形データに基づく定量的指標がなくても H_0/L_0 と $\tan \theta$ の比によって分類ができた。これに対し、任意底面境界上の砕波については、入射波を孤立波とした場合の著者らの一連の研究 (1990, 1991) はあるものの砕波限界自体に対する研究の絶対数が少なく、かつそれぞれ個別に行われており、砕波形式の分類を行うには至っていない。しかしながら、沿岸海域の利用や開発の進展によっては多様な形状を持つ海底断面の出現も予想され、任意底面境界上での砕波形式は今後問題となって来よう。

そこで、本研究では、非一樣斜面としては最も単純なステップに着目する一方、前の波の影響がない孤立波を入射波とすることにより、これまで著者らが用いて来た BIM (1990) によってステップに入射する孤立波の砕波に至る伝播過程の計算を行う。この結果を基に、砕波限界波形を調べ、砕波形式を定量的に評価するための指標を見い出すとともに、その支配式を導き、ステップ上の孤立波の砕波形式に対する定量的分類法を確立したい。

2. 計算手法と条件

砕波形式の分類を定量的に行うには、砕波時の空間波

形データが必須となる。ここで用いる BIM によれば、砕波限界の瞬間 (前述の著者らの一連の研究では、波頂前面が鉛直に突っ立ち、巻き込みが始まる瞬間と定義) まで非回転波動の基礎式をほぼ厳密に解くことができるため、得られた砕波限界波形は流体力学的にほぼ厳密と考えてよい。

計算は、初期波として水深 h_1 の一定水深部において波高の定常孤立波を厳密解によって与え、勾配 $\tan \theta$ の法面を持つ高さ R のステップに入射させ、砕波限界に到達するまで行った。ここで用いる砕波限界自体の定義は、上述の様に相対的なものであり、必ずしも絶対的なものではないが、数ある砕波限界の定義の中では砕波の実態に最も即したものと考えられる。したがって、この点に任意性は残るが、数値解それ自体はほぼ厳密と考えられるので、このときの砕波問題を H_1/h_1 , R/h_1 および $\tan \theta$ のみの関係で扱うことが可能となる。

計算は、 $\cot \theta = 0, 1, 5, 10$, $R/h_1 = 0.2, 0.3, 0.4, 0.57$, $H_1/h_1 = 0.22 \sim 0.70$ と変化させ、これらを組み合わせた 61 通りの場合について行った。

3. ステップ上の孤立波の砕波形式

3.1 砕波形式指標

砕波形式の分類は砕波時の空間波形 η を基に行われており、波頂部が局所的に巻き込まれる砕波は崩れ波型、波峰全体の前傾に伴って波頂部が大きく巻き込まれて行く砕波は巻き波型と一般に分類されている。このような分類を定量的に行うため、著者らは砕波形式指標 β_4 (安田ら, 1990)

$$\beta_4 = -\frac{1}{2B} \int_{-B}^B \eta_x dx = \frac{\eta(-B) - \eta(B)}{2B} \dots\dots (1)$$

を定義した。ここに、 B は波頂を中心とした波峰幅であり、孤立波の静水面上の峰高を η_0 としたとき、波峰前面の水位が $0.2 \eta_0$ の高さを切る点から波頂直下までの水平距離として定義される。

この β_4 が砕波形式の適切な指標となることは、一樣斜面上の孤立波の支配パラメータ ξ_S との間に回帰式

$$\beta_4 = 6.92 \xi_S^{1.11} + 0.0477, \quad \xi_S = \tan \theta / (H_1/h_1)^{0.4} \dots\dots (2)$$

* 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 豊田工業高等専門学校助手 土木工学科

に従う関係があることによって明らかとなっている。

すなわち、 ξ_s が砕波形式の支配パラメータとなることは Papanicolaou・Raichlen (1988) の実験結果を用いて明らかにされており、その ξ_s が β_4 との間に式 (2) の関係を有していることから、 β_4 は ξ_s によって支配される砕波形式の指標になる。この結果、砕波形式と β_4 の関係が次の様に導かれる (安田ら, 1990)。

$$\left. \begin{array}{l} \text{崩れ波型: } 0.12 \geq \beta_4 \\ \text{遷移型: } 0.12 \geq \beta_4 \geq 0.17 \\ \text{巻き波型: } 0.17 \leq \beta_4 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

なお、ここでの β_4 の値は砕波限界時の波形に対するものであり、砕波形式が明瞭になった段階におけるものではない。しかしながら、水深変化による砕波は入射波と底面境界条件のみで決まる決定系であり、砕波限界時の β_4 の値とその後の波形が一義的に対応している (安田ら, 1990) ことから、砕波形式は式 (3) における分類に従うと考えてよい。

ところで、 ξ_s はあくまで一様斜面の孤立波に対するものであるが、 β_4 にはそのような適用上の制約はなく、任意の砕波限界波形に適用できると考えられる。また、砕波限界波形に何らかの普遍性が存在するというのであれば、砕波の原因が水深変化によるものである限り、一様あるいは非一様斜面を問わず β_4 によって砕波形式を統一的に表示できるはずである。

表一は、一様斜面およびステップ上の砕波の中で砕波限界波形の β_4 の値が近いケースを選び、これらの入射波および底面境界条件と β_4 の値を示したものである。また、図一はこのときの波形の比較を示す。Run 1 以外は初期波高が一致していないため、砕波限界波高にも差異が生じているが、波形自体はほぼ相似形を有している。このため、初期波高が一致していなくても、 β_4 によって波形を捉える限り、一様斜面とステップ上の砕波の間に差異が生じていない。このことは、 β_4 が単に底面境界だけでなく、入射波高にも依らない普遍性を持った指標であることを示している。したがって、 β_4 を用いれば、波高の大小に関係なく、ステップに入射する孤立波の砕波形式を統一的に評価できることになる。

表一 砕波限界波形がほぼ相似となる孤立波および底面境界の条件

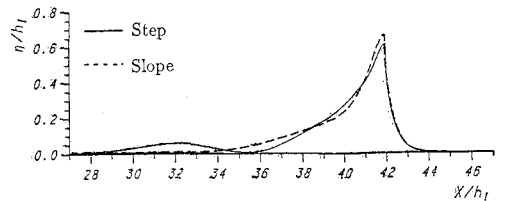
Run	海底形状	H_i/h_i	$\tan\theta$	R/h_i	β_4
1	スロープ	0.5	1/30		0.282
	矩形ステップ	0.5	∞	0.525	0.278
2	スロープ	0.5	1/30		0.282
	傾斜ステップ	0.4	1/5	0.57	0.274
3	スロープ	0.5	1/100		0.115
	傾斜ステップ	0.41	1	0.40	0.114

3.2 砕波波形の定量的評価

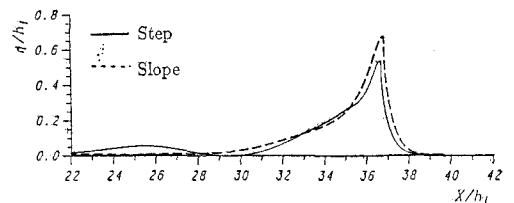
式 (1) で定義された β_4 は、前述の Papanicolaou・Raichlen による砕波形式の分類結果を基にして、スロープ上の砕波形式の分類を定量的に行うために定義されたものであるが、ステップ上の砕波に対しても用いることができる。このことをここで行った 61 ケースの計算結果を用いて確認するため、図一に代表的な砕波限界波形とその β_4 の値を示す。この図から、 β_4 の値が増大するにしたがって確かに砕波限界時の波形の前傾も強くなって行く様子が分かる。そして、上述の式 (3) に示した β_4 による砕波形式の分類結果と対応すれば、 β_4 の値が 0.17 を越える 図一2 の (d) および (e) は巻き波型砕波と分類される。これらに対し、 β_4 の値が 0.12 以下となる 図一2 の (a) および (b) は崩れ波型砕波と分類されるが、上述の (d) および (e) の波形と比べればこのことは明瞭である。

4. 砕波形式の支配パラメータと定式化

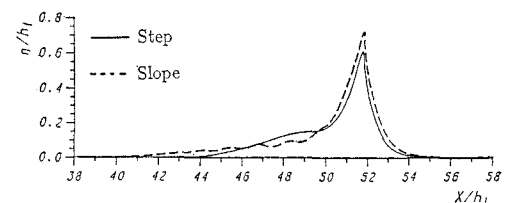
斜面上の孤立波の砕波の場合、支配パラメータ ξ_s と砕波形式指標 β_4 との間に前述の回帰式 (2) に従う関係がある。ステップ上の砕波の場合についても、このときの支配パラメータ $\xi_s^* = (R/h_i)/(H_i/h_i)^{0.4}$ と砕波形式



(a) Run 1



(b) Run 2



(c) Run 3

図一 一様斜面およびステップ上の砕波限界波形の比較

指標 β_4 との間に同様な関係があれば、 β_4 によって表わされる砕波形式を ξ_{S^*} の関数として定式化できることになる。この点を明らかにするために、図-3 に β_4 と ξ_{S^*} の関係を示す。図中の○, △および+印は、それぞれ法面勾配 $\tan \theta$ が 1, 1/5 および 1/10 のものを示す。これから、 β_4 と ξ_{S^*} の間には斜面上の砕波におけるよ

うな一義的対応は認められず、 ξ_{S^*} は砕波限界波高などの支配パラメータとはなり得ても、砕波形式の支配パラメータとはなり得ないことが分かる。

そこで、ステップの高さ R/h_1 が 0.2, 0.4 および 0.57 となるケースを対象とし、それぞれの高さごとに β_4 と H_1/h_1 の関係について調べることにした。図-4 はその結果を示し、図中の記号は図-3 におけるものと同じであるが、矩形ステップのものを×印として加え、ステップの法面勾配をそれぞれ区別している。また、図中の実線は全て同一の回帰式

$$\beta_4 = [1.567(R/h_1)^{1.812} + 0.160] \sqrt{(H_1^2 - H_0^2)/h_1^2}, \quad \dots\dots\dots (4)$$

によるものである。ここで、 H_0/h_1 は次式 (安田ら, 1991)

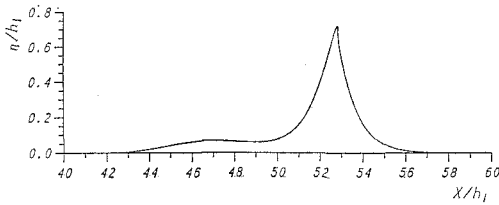
$$H_0/h_1 = 1.012 - 1.063(R/h_1)^{0.46} \dots\dots\dots (5)$$

で与えられるステップに対する臨界入射波高であり、 H_1/h_1 が H_0/h_1 を下回れば、入射波は砕波せずに透過する。これより、入射波がステップ上で砕波する条件は

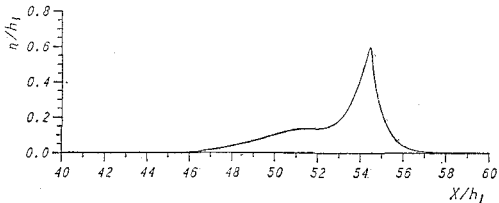
$$H_1/h_1 \geq H_0/h_1 \dots\dots\dots (6)$$

となる。いずれの場合もシミュレーション結果と回帰式の対応は良く、ステップの高さを一定とした場合、ステップの法面角度に関係なく β_4 は入射波高 H_1/h_1 のみで決まると言ってよい。したがって、ステップの砕波形式は H_1/h_1 および R/h_1 のみに支配されており、 β_4 は回帰式 (4) を通して H_1/h_1 および R/h_1 と結び付いていると言える。図-5 は、式 (4) の左辺を $\hat{\beta}_4$ と置き、これと砕波限界波形より式 (1) によって計算される β_4 との関係をここで行った全計算例について示したものである。図中の実線は $\hat{\beta}_4 = \beta_4$ によるものであり、全ての結果がほぼこの実線上に分布していることが分かる。したがって、式 (4) によって $\hat{\beta}_4$ の値を H_1/h_1 および R/h_1 より計算すれば、 $\beta_4 = \hat{\beta}_4$ と置く事によって直ちに砕波形式の推定が可能となる。

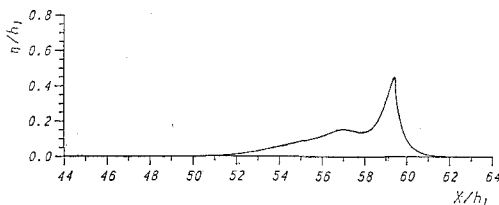
さらに、前述の Papanicolaou・Raichlen の実験結果を基に導かれた式 (3) の β_4 による砕波形式の区分に式



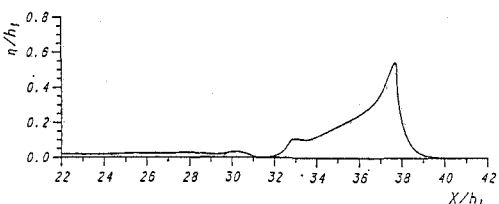
(a) $\tan \theta = 1, R/h_1 = 0.20, H_1/h_1 = 0.51, \beta_4 = 0.043$



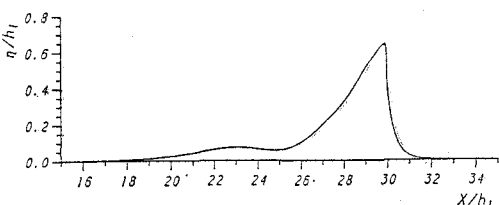
(b) $\tan \theta = 1/5, R/h_1 = 0.40, H_1/h_1 = 0.39, \beta_4 = 0.101$



(c) $\tan \theta = 1/5, R/h_1 = 0.57, H_1/h_1 = 0.26, \beta_4 = 0.139$



(d) $\tan \theta = 1/10, R/h_1 = 0.57, H_1/h_1 = 0.40, \beta_4 = 0.252$



(e) $\tan \theta = 1, R/h_1 = 0.57, H_1/h_1 = 0.60, \beta_4 = 0.412$

図-2 ステップ上の孤立波の砕波限界波形と β_4 の値

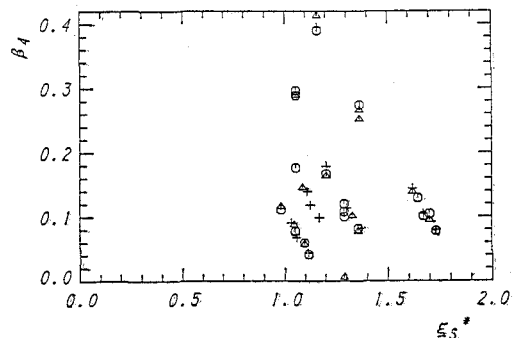


図-3 パラメータ ξ_{S^*} と砕波形式指標 β_4 の関係

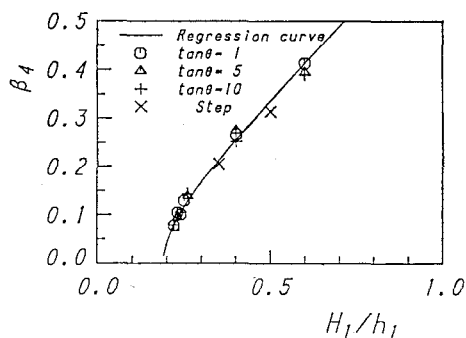
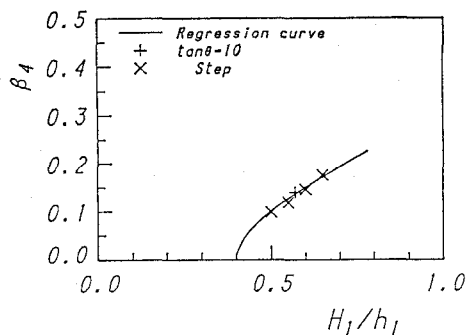
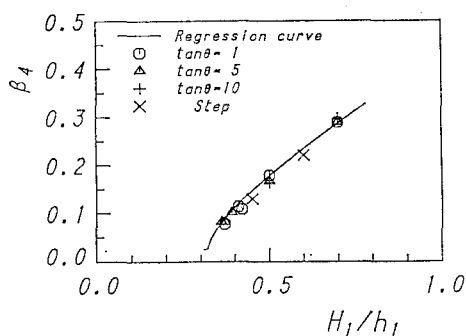
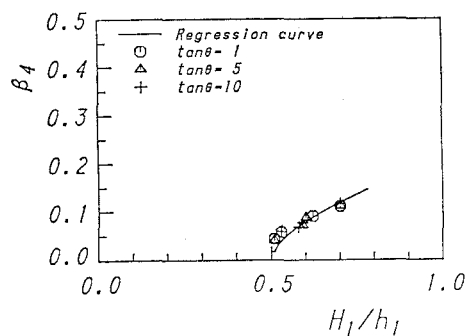
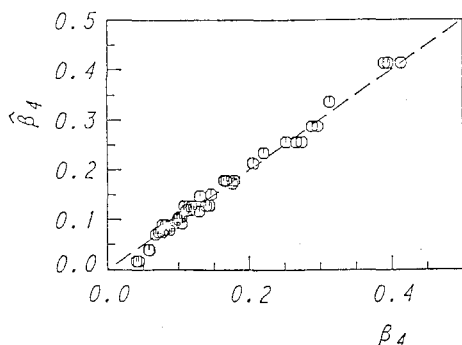
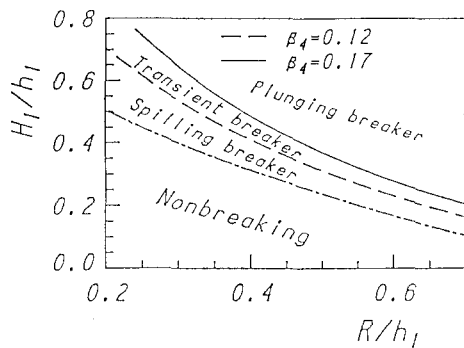
(a) $R/h_1=0.57$ (c) $R/h_1=0.30$ (b) $R/h_1=0.40$ (d) $R/h_1=0.20$ 図-4 砕波形式指標 β_4 と入射波高 H/h_1 およびステップ法面勾配 $\tan \theta$ との関係図-5 ステップ上の砕波限界波形による β_4 と回帰式による $\hat{\beta}_4$ との関係

図-6 ステップによる孤立波の砕波に対する砕波形式区分

(4) を代入し、これを不等式として解けば、巻き波型および崩れ波型の領域が H_1/h_1 および R/h_1 に関して決定できる。図-6 はその結果を式 (5) によって計算される非砕波領域とともに示したものであり、これはこの種のものとしてはこれまで唯一のものであった一様斜面上での周期波の砕波形式の区分図に相当する。これによ

って、ステップによる砕波形式についても一様斜面上の場合と同様な区分図による分類が可能となり、非砕波および砕波の場合の砕波形式の区分が簡便に行えるようになる。

5. 結 語

BIM を用いた数値シミュレーションによってステッ

ブに入射する孤立波の砕波限界波形を調べ、このときの砕波形式が指標 β_* によって定量的に評価でき、 β_* が入射波高や底面境界によらない普遍的な砕波形式指標となることを示した。さらに、この砕波形式指標 β_* がステップ前面の法面勾配に無関係に入射波条件 H_1/h_1 およびステップ条件 R/h_1 のみの関数として定式化できることを示すとともに、これを用いることによって、これまで一様斜面上以外ではほとんど不明であった砕波形式に対し、ステップという限られた底面境界の下ではあるが、砕波形式の定量的分類および予測が可能になることを示した。

最後に、本研究での数値計算に対してご協力を頂いたタキヨー株式会社の松原正典氏（当時、本学4年生）に深謝するとともに、本研究が文部省科学研究費一般B(04452233) および（財）中部電力基礎技術研究所研究助成による成果であることを付記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- 安田孝志・原 正典・榊原幸雄(1990): 水深変化による砕波の支配パラメータと砕波形式について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 61-65.
- 安田孝志・原 正典・榊原幸雄(1991): BIMを用いたステップによる孤立波の砕波を伴う変形とその法則, 土木学会論文集, No. 429/II-15, pp. 74-83.
- Battjes, J. A. (1974): Surf similarity, Proc. 14th ICCE, pp. 466-480.
- Galvin, C.(1968): Breaker type classification on three laboratory beaches, J. Geophys. Res, Vol. 73, pp. 3651-3659.
- Papanicolaou, P. and F. Raichlen (1988): Wave and bubble characteristics in the surf zone, in Sea Surface Sound (Ed. B. R. Kerman, Kluwer Academic Pub.), pp. 97-109.
- Yasuda, T., M. Hara and M. Tanaka (1990): A computational method of the deformation including overturning of a solitary wave over a submerged obstacle, in Numerical Methods in Fluid Dynamics II (Eds. M. Yasuhara et al., JSCFD), pp. 919-924.