

ステップおよび潜堤を通過する孤立波の変形と碎波指標

安田孝志*・原 正典**・田中光宏***

1. 緒 言

碎波帯内の水理現象の解明は近年急速に進んで来ているが、任意のせつ動の下での碎波機構については未解明な点が多い。碎波を波浪制御の観点から積極的に活用して行くには、碎波の発生を簡単に制御できることが必要となり、そのためには種々のせつ動の下での碎波機構を解明し、実用的な碎波指標を確立する必要がある。

このような観点から、著者らは任意の境界条件の下での碎波変形を流体力学的に厳密に計算できる BIM (境界積分法) の開発を進めて来た (Yasuda ら, 1989)。ここでは、制御の対象となる暴浪の一波を孤立波として扱い、これに加わるせつ動としてステップおよび潜堤による水深の急変を考え、このときの孤立波の碎波変形に対する上述の BIM の精度を実験的に検証する。同時に、このときの孤立波の変形特性および碎波限界について検討を行ない、この結果を基にステップを通過する孤立波の碎波指標の確立を図る。

2. BIM による数値解の精度と碎波点

(1) BIM による計算の概略

ここで用いる手法は、任意の海底形状の場での波動問題が解けるように Dold・Peregrine(1986)の計算法を基に開発されたものである。非圧縮完全流体場での非回転波動を考えることにより、2次元実平面 (x, y) 上での波動問題は Laplace 方程式を満足した複素平面 $(z=x+iy)$ 上の問題に置き換えられる。ついで、Cauchy の積分公式を用いることにより、固定境界条件の下で Laplace 方程式を解く問題は次式を解く問題に帰着される。

$$\begin{aligned} \Phi_n + i\psi_n = & \frac{1}{i\pi} \oint \frac{Z_s}{Z' - Z} \Phi'_n ds' \\ & + \frac{1}{\pi} \oint \frac{Z_s}{Z' - Z} \Phi'_s ds' \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

ここに、

$$\Phi_s - i\psi_n = (dZ^*/ds)^{-1} (\Phi_x - i\psi_y) \dots\dots\dots(2)$$

であり、 $\cdot$ および $*$ はそれぞれ s' の関数および複素共役であることを示し、 Φ は速度ポテンシャル、 s は境界に沿った弧長、 n はそれに垂直な座標、および $\oint$ は Cauchy の主値積分を意味する。式 (1) および (2) より求めた Φ を用いれば、自由表面上の速度ポテンシャル Φ および水粒子の位置ベクトル Z の時間発展が自由表面上の境界条件を満足させて計算できる。

(2) 水理実験

BIM による数値解の精度の検証としては、ポテンシャル流体の基礎方程式に対する精度を問題にするよりも、碎波を含めた実際の流体現象をどこまで正確に記述できるかについて行なう方が工学的には意味がある。そこで、数値解を水理実験結果と直接比較することによって、計算手法の精度検証を行なうことにする。

そのための実験は、図-1 に示すように水槽内 (高さ 1 m×幅 1 m×長さ 54 m) 内にアクリル製のステップ (8 cm×100 cm×200 cm) および潜堤 (8 cm×100 cm×48 cm) を設置し、この上をサーボ式造波装置によって起こした完全な孤立波を通過させることにより行なった。水深 h は 14 cm に固定し、計測には 3 台の容量式波高計を用い、アナログおよびデジタルの両方で記録した。なお、碎波発生の有無や碎波点の位置については、波峯での泡 (白波) の発生に着目して行なった。ただし、泡の発生の有無の判断や発生点の決定は目視では困難なため、CCD カメラによって波形を撮影し、それを CRT 上にコマ送り再生して行なった。こうして碎波点を決定した後、この点を測点 P.3 と定め、碎波点での時間波形を計測した。なお、実験においては雑音の影響を極力排除するよう心掛けたが、雑音の影響をより完全に除去するため、同一の条件下での実験を数回ずつ行

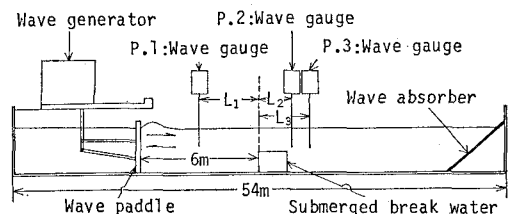


図-1 実験装置の概略

* 正 会 員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科
 ** 学生会員 岐阜大学大学院工学研究科
 *** 理博 岐阜大学助手 工学部共通講座

表—1 実験条件と波高計の位置

Run	A/h	L ₁ /h	L ₂ /h	L ₃ /h	Break or not
1	0.33	7.21	4.15	5.83	Nonbreak
2	0.38	7.21	4.15	5.83	Break
3	0.40	7.21	4.15	5.83	Break
4	0.36	7.21	3.56	7.70	Break
5	0.40	7.21	3.56	6.70	Break

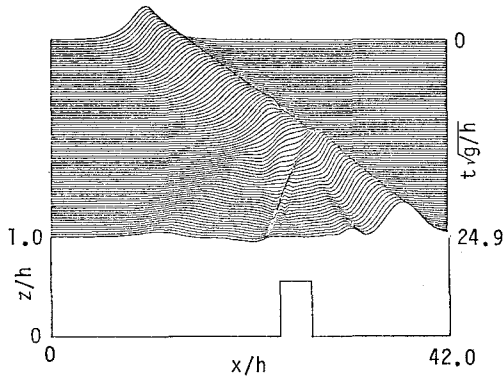
い、再現性が認められる実験結果を用いることにした。表—1 は、このようにして行なわれた実験の測点 P.1 での振幅 A と碎波の有無を示す。表中の L_1 , L_2 およ

び L_3 は上述の 図—1 に示した潜堤（ステップ）による水深急浅点から各測点までの距離を示す。

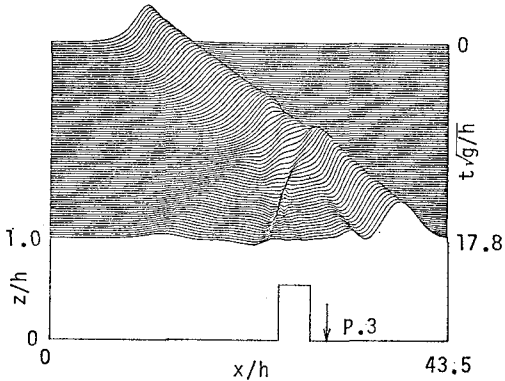
(3) 計算条件および結果

計算法自体は上述の通りである。境界条件については、両側面とも鉛直反射境界が用いられている点を除いて水理実験におけるものと同一である。初期条件については、造波境界によって厳密に大振幅孤立波を与えることは難しいため、一様水深部では厳密解 (Tanaka, 1985) によって孤立波を与え、潜堤やステップのある領域では孤立波の影響はまだ及んでいないとして静水状態を仮定する。節点数は、計算開始時に両側面とも 10、底面では 69 および自由表面では 90 とし、質量およびエネルギー保存則に対する誤差が常に 4.5% 未満となるように計算の過程で時間刻みとともに適宜変化させた。

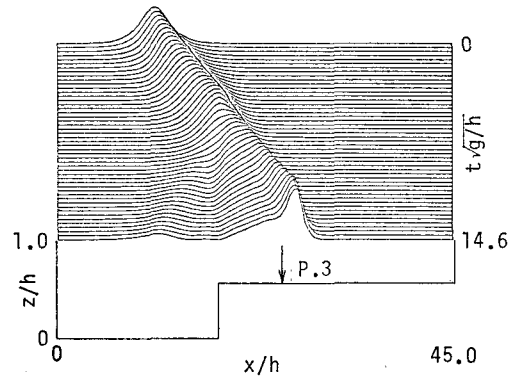
図—2 は、表—1 の初期波に対して行なった数値計算の結果を刻々の水面形状として示したものである。図中の P.3 は上述のようにして決定した実験上の碎波点を示す。測点 P.3 を通過するまで数値解に何ら異常は生じておらず、保存則に対して 4.5% までの誤差を許してはいるが、ここで用いた BIM によって実験上の碎波点までの記述が可能となっていることがわかる。また、



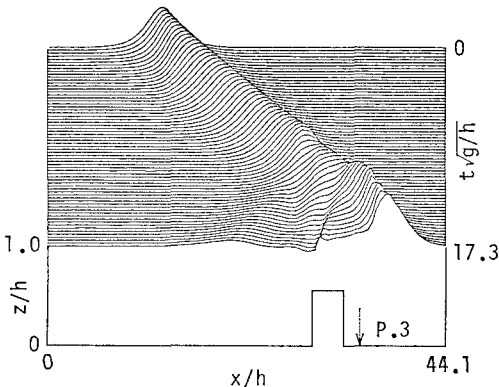
(a) Run 1



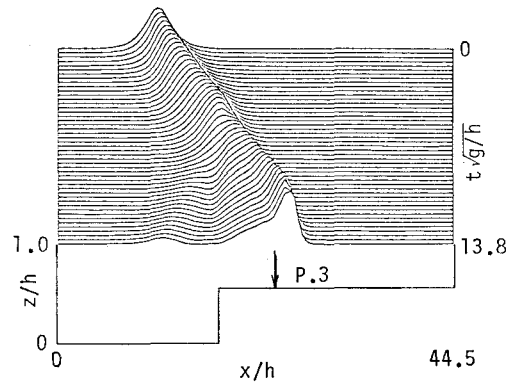
(b) Run 2



(d) Run 4



(c) Run 3



(e) Run 5

図—2 潜堤（ステップ）上を孤立波が進むときの水面形状の時間的变化

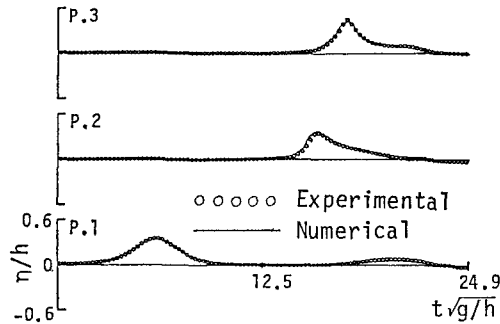
このときの波形から、潜堤やステップによって孤立波の一部が反射するものの大部分はそのまま伝播しており、孤立波がこのような強いせつ動の下でも安定な波動モードとなっていることがわかる。ただし、波形変化自体は小さくても潜堤上では逆に峰高が低下しており、このときの孤立波の振舞いを定常解から類推する事は出来ない。いずれにしろ、孤立波に近い性質を持つ波の制御を潜堤などによる反射によって行なうことは余り効果的とは言えない。

(4) 実験結果との比較および碎波条件

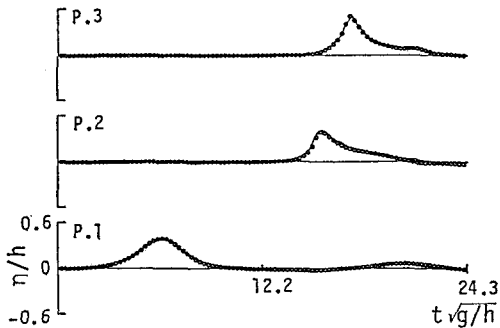
数値解の比較の対象となる実測波形は図一1に示した3測点での水面の時間的変動を表すため、数値解からこれら3測点での時間波形を求め、これとの比較を行なった。図一3はその結果を示す。いずれの場合も数値解と

実験結果は碎波点での波形や反射波の位相まで含めて完全に一致している。これによって、数値解はポテンシャル波動の仮定に基づいてはいるものの、水槽内で実際に生じる孤立波の碎波に至る変形過程が厳密に記述可能となっていることがわかる。しかしながら、数値解が碎波点まで含めて厳密であると言うには、数値解においても水理実験における泡の発生に対応した何らかの微候が生じ、両者の発生点が一致する必要がある。碎波の発生を局所的な微候によって判定することには疑問もあるが、泡の発生を碎波と捉えるならば、波峰に生じる泡はそこでの何らかの変化によるものであり、その変化を碎波の微候として捉えることが出来よう。

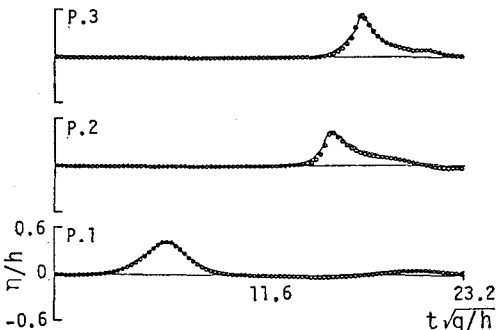
図一4は、このときの孤立波の峰高 η_0/h および波峰での水平水粒子速度 $U_0/\sqrt{gh}$ 、および波峰前面での傾き角 θ (水平方向から反時計回りの角度で表示) のそれぞれの変化を示す。これらの図において2点鎖線で示した矢印は潜堤あるいはステップ前端および潜堤後端の、また、図中の実線の矢印は測点 P.3 の波峰通過時刻をそれぞれ示す。 U_0 および η_0 の変化について見ると、いずれの場合も波峰が潜堤あるいはステップに到達する



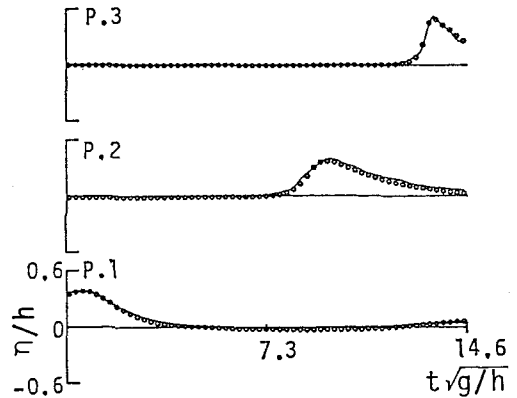
(a) Run 1



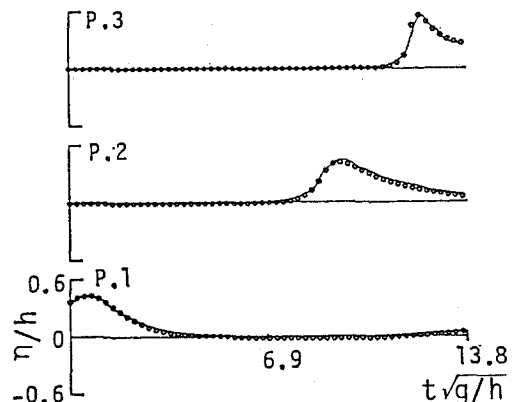
(b) Run 2



(c) Run 3



(d) Run 4



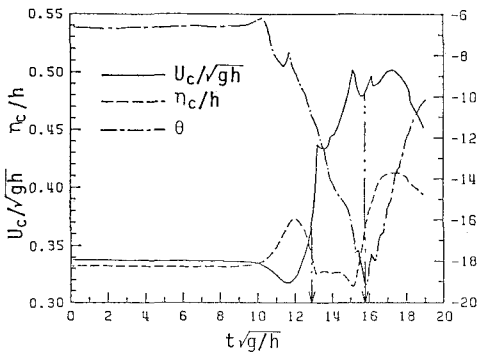
(e) Run 5

図一3 時間波形に関する数値解と実験結果との比較

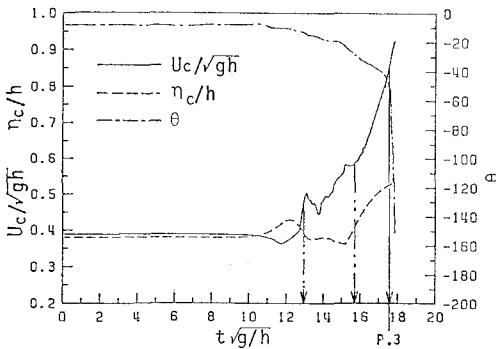
前に、まず、 η_0 は増大、 U_0 は減少を始め、到達直前にこの関係が逆転し、図-2 において見られたように η_0 は減少するが、 U_0 は増大に転じる。そして、潜堤の場合にはこのような U_0 と η_0 の相反した振舞いが潜堤通過直前で続き、その後は両者とも増大に転じる。Run 1 のように砕波せずに透過する場合、極大点が現れ、その後は一様な減少が続くが、Run 2 および 3 のように砕波する場合には極大点は現れず、そのまま増大を続けて測点 P.3 を通過する。これに対し、ステップの場合では、波峰がステップ上を進み始めてすぐに U_0 および η_0 ともに増大に転じ、極大点が現れないまま測点 P.3 を

通過している。このように、 U_0 および η_0 は波峰が潜堤あるいはステップに到達する前から互いに相反した増減を示すが、測点 P.3 前後で砕波を示す格別の徴候は見られない。また、P.3 通過時の $U_0/\sqrt{gh}$ および η_0/h はそれぞれ 0.8~0.95 および 0.4~0.6 の範囲に分布している上に、 U_0 や η_0 の臨界値と実験において観察される泡の発生とを結び付ける物理的機構が不明なため、これらに関して臨界値を特定することが困難となっている。

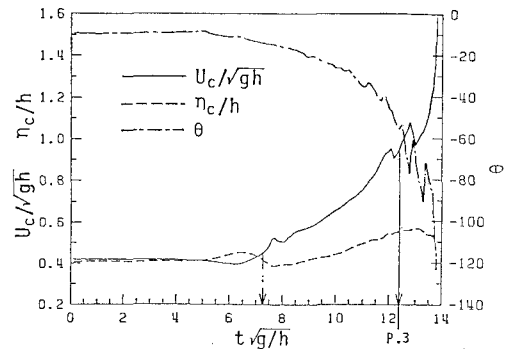
一方、波峰の傾き角 θ について見ると、砕波せずに透過する Run 1 の場合は波峰の潜堤通過時に極小となり、その後は再び元に戻っているが、それ以外の場合では傾き角 θ は負側に増大を続け、測点 P.3 付近でそのまま -90° を越えている。 θ が -90° を越えるということは、物理的には波峰が overturning を始めたことを示し、それがそのまま続くと、Run 3 の場合の overturning の様子を示す図-5 からわかるように、波峰前面への plunging が生じ、実験において観察された泡が発生することになる。なお、非回転仮定に基づく BIM では plunging までの記述は不可能であるため、その直前で計算を止めている。overturning から plunging までに若干の時間差があるとは言え、両者は瞬時に連続的に生じるため、計算上 $\theta = -90^\circ$ の点を砕波点と定義することは



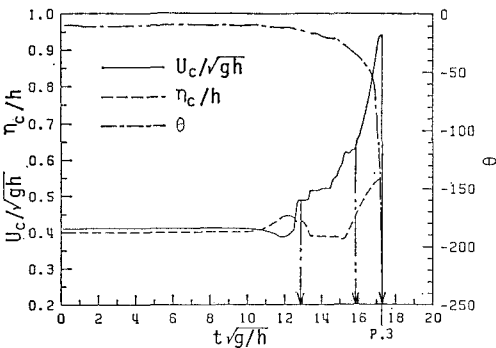
(a) Run 1



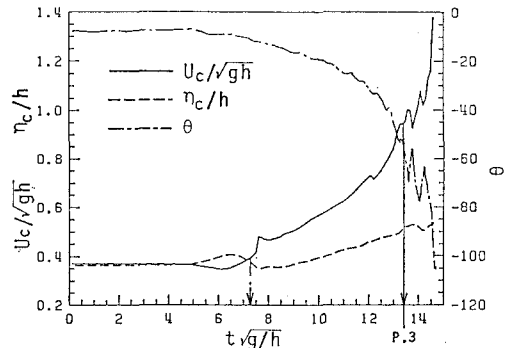
(b) Run 2



(d) Run 4



(c) Run 3



(e) Run 5

図-4 潜堤(ステップ)を通過する孤立波の波峰における諸量の時間的変化

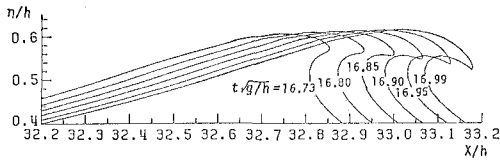


図-5 overturning から plunging に至る過程

十分に妥当と考えられる。また、ステップの場合に θ が -90° に達する前に測点 P.3 を通過する場合が見られるが、潜堤の場合は $\theta = -90^\circ$ と測点 P.3 の通過時刻はほぼ一致しており、実験上の碎波点位置における誤差などを考慮すれば、 $\theta = -90^\circ$ を計算上の碎波点とすることは実験的にも検証されたと判断できる。

3. ステップを通過する孤立波の碎波指標

ここでは、 $\theta = -90^\circ$ を碎波限界とし、 θ が -90° を越えれば碎波、極小点が現れて -90° を越えない場合は非碎波とし、碎波限界における孤立波の初期振幅 A/h とステップ高さ R/h の関係について検討する。

図-6 は A/h および R/h の各組み合わせごとに碎

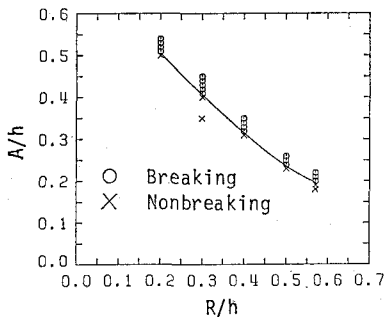


図-6 碎波の有無と孤立波の初期振幅およびステップ高との関係

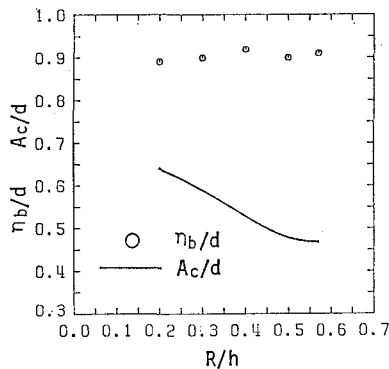


図-7 ステップ上で碎波する孤立波の峰高と初期振幅

波の有無を示したものであり、碎波および非碎波の境界を連ねた実線が碎波限界曲線となる。当然ながら、ステップ高さ R/h が高くなるに従って、碎波せずに透過する孤立波の初期振幅 A/h が一様に減少しており、両者の関係はほぼ逆比例となっていることがわかる。

図-7 は、 θ が -90° を越えた瞬間の峰高 η_b および碎波限界曲線を与える初期振幅 A_c のステップ上の水深 $d (=h-R)$ に対する比 η_b/d および A_c/d と R/h との関係を示したものである。孤立波は前述の図-4 に示したようにステップ到達直前に峰高を一度低下させるが、碎波限界に達したときの峰高は初期波のものよりも 40% 以上大きくなっており、特に、 $R/h > 0.35$ になると η_b/d と A_c/d との差が増え、ステップによる浅水効果が R/h とともに増大する傾向にあることがわかる。また、 η_b/d について見ると、ステップの高さに関係なくほぼ 0.9 となっており、定常孤立波の限界峰高 0.78 をかなり上回っている。これは、ステップ上の孤立波のように非定常な波動に対しては定常解から導かれる碎波限界は何ら意味を持たないことを示している。従って、各種せつ動が原因となる碎波の指標を定常解の碎波限界から類推する場合には注意が必要と言える。

4. 結 語

水理実験結果との比較によって、著者らが開発した BIM を用いれば、任意の海底形状（ここでは、ステップおよび潜堤のある海底）の場での孤立波の碎波点の決定まで含めた変形過程の厳密な計算が可能となることを実証した。そして、このときの孤立波の変形の様子から、その振舞いは定常解のものとは一致しないが、孤立波がステップや潜堤による水深の急変下でも極めて安定な波動であることを見出した。さらに、この手法を用いてステップによる孤立波の碎波指標を導き、ステップ上での碎波限界波峰 η_b/d はステップの高さに無関係にほぼ 0.9 であり、定常孤立波の 0.78 をかなり上回ることを明らかにした。

参 考 文 献

- Dold, J. and D. Peregrine (1986): An efficient boundary integral method for steep unsteady water waves, Num. Methods for Fluid Dynamics. II (eds. K. Morton & M. Baines), Clarendon Press, pp. 671~679.
- Tanaka, M. (1986): The stability of solitary waves, Phys. Fluids, Vol. 29, pp. 650~655.
- Yasuda, T., M. Hara and M. Tanaka (1989): A computational model of the solitary wave over a submerged obstacle (to be presented at ISCFD-Nagoya).