

# 水深変化による孤立波の変形と碎波に及ぼす斜面の影響

安田孝志\*・榊原幸雄\*\*・北村 茂\*\*\*

## 1. 緒 言

著者らは、これまで、一様傾斜面や矩型ステップでの孤立波の碎波について調べ、水深変化が斜面やステップと異なっている、入射波に対しては水深変化量そのものが問題であり、水深変化の仕方はほとんど関係がないことを明らかにして来た(安田ら, 1990, 1991)。しかし、なお次のような疑問が水深変化の影響を評価する上で残されていた。i) 一様斜面上の孤立波の場合、斜面勾配  $\tan \theta$  が緩やかになるに従って波高に対する浅水効果は増大する (Camfield & Street, 1969) が、水深変化量を  $\tan \theta$  とすると、水深変化量が小さくなるに従って変形が増大するというのは奇妙ではないか。ii) 浅水化が穏やかであれば、波は十分安定的に水深変化に対応でき、定常状態を保ちつつ碎波に至るが、浅水化が急になると非定常性を強めて碎波することになり、碎波限界に何らかの相違が生じるのではないか。iii) 傾斜面を持つ傾斜ステップや台形潜堤における斜面をどのように評価すべきか、著者らのこれまでの結果では、斜面そのものの影響が十分に検討されて来なかったこともあり、これらの点が必ずしも明確にされていない。

そこで、本研究では、斜面による水深変化の影響を明らかにし、これらの疑問点を水解させると同時に、傾斜面を持つ傾斜ステップや台形潜堤による碎波を包含するより一般的な支配法則の拡張を図るため、斜面を含む種々の水深変化による孤立波の変形計算を BIM によって行う。なお、ここで用いる BIM によって碎波限界まで正しく記述できることは既に示されており (安田ら, 1989, 1990)、これによって得られる計算結果は流体力学的にはば厳密であると考えてよい。

## 2. 一様斜面と矩形ステップによる変形と碎波

ここでは、水深が連続的に変化する一様斜面と不連続に変化する矩形ステップ上での孤立波の伝播計算を行い、波形変化と碎波に及ぼす斜面の影響を明らかにする

ことにより、斜面による水深変化の意味を明確にしたい。

### 2.1 波高の浅水変化

著者らは碎波の支配パラメーター $\xi_s$ の導出において一様斜面の水深変化量を  $\tan \theta$  としたが、これは、静水面からの水位を  $\eta$ 、峰高を  $\eta_0$  としたときの 1 個の孤立波の幅 ( $\eta/\eta_0 \geq 0.1$  の区間に相当) 内の水深変化の平均量に相当していた。入射波に対する摂動の強さの微分的指標としてはこれで良いが、碎波に至るまでの水深変化の影響がすべて入射波に累積されると考えれば、碎波点までの水深変化の総量  $S$  (碎波水深を  $h_b$  とすると、勾配が  $\tan \theta$  の一様斜面では  $S = (h_1 - h_b)^2 / 2 \tan \theta$ 、高さが  $R$  およびステップ肩先から碎波点までの距離が  $X_b$  のステップでは  $S = RX_b$ ) を積分的指標として併せて用いる必要がある。そこで、まず、一様斜面上での波高の浅水変化を水深変化の総量  $S$  によって捉え直し、浅水変化に及ぼす斜面の影響について調べる。

図-1 は、入射波高  $H_1/h_1 = 0.4$  の孤立波を  $\tan \theta = 1/30, 1/50$  および  $1/100$  の一様斜面上を進ませ、そのときの波高の浅水変化と碎波点(実線の終端)を示したものである。図中の 1 点および 2 点鎖線は比較のために  $h^{-1}$  および  $h^{-1/4}$  による波高変化をそれぞれ示したものであり、破線は同一の孤立波 ( $H_1/h_1 = 0.4$ ) を高さ  $R$  の矩形ステップに入射させたときの碎波限界波高  $H_b$  と碎波水深  $h_b$  (ステップ上の水深  $h_1 - R$  に等しい) の関係を示したも

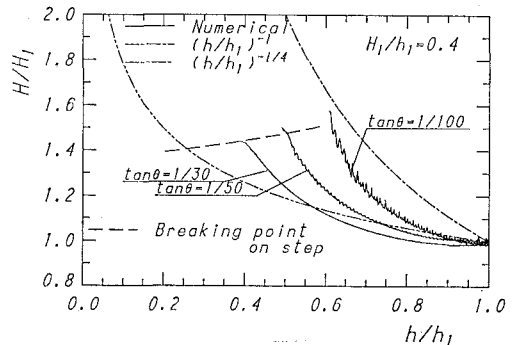


図-1 初期波高  $H_1/h_1 = 0.4$  の波高の浅水変化と碎波点

\* 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

\*\*\* 正 会 員 日立製作所

のである。

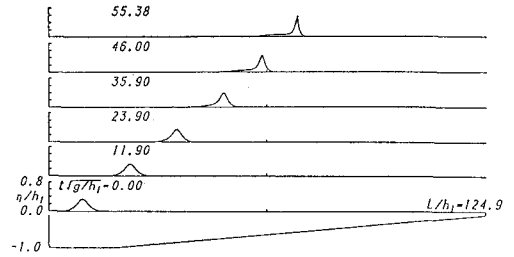
$\tan \theta = 1/30$  の斜面の場合に浅水化の初期段階で  $H/H_1$  の値が1を下回っているのは、すでに斜面上のソリトン解(安田ら, 1985)を用いて示されているように shelf\* や反射波の励起によって入射波のエネルギーの一部が奪われるためである。1/50 の斜面になると、それが無視できる程度に留まるため、 $H/H_1$  はほぼ単調増加と見なせるようになる。波高の浅水変化に対する斜面勾配の影響を水深  $h$  の点に至るまでの水深変化の総量  $S = (h_1 - h)^2/2 \tan \theta$  によって捉え直すと、同じ浅水変化  $h/h_1$  であっても緩斜面の方が  $S$  の値は大きくなるため、入射波はより大きな水深変化の影響を受けることになる。これによって、水深変化量を総量  $S$  とすることにより、前述の i) の問題が容易に氷解されるだけでなく、水深の変化率である斜面勾配それ自体は入射波の変形に対して何ら直接的意味は持たず、水深変化の総量  $S$  を介して間接的に意味を持つに過ぎないと解釈されることになる。これは、入射波に対する水深変化の影響はその形態に依らないというこれまでの結果に沿ったものといえる。

ついで、砕波点について見ると、波高の浅水変化と同様、緩斜面になるに従って  $H_b/H_1$  の値も増大している。これは、緩斜面上の入射波の方が水深変化に対して平衡し易く、より大きな波高を保つことの結果とも見える。しかし、 $\tan \theta = 1/30$ ,  $1/50$  および  $1/100$  の各斜面による砕波点までの  $S$  の値がそれぞれ 5.53, 6.25 および 11.79 になることからすれば、波高の浅水変化と同様、単に水深変化の総量が緩斜面になるに従って増大することの結果と見る方が自然である。この結果を、破線で示される矩形ステップの  $H_b/H_1$  および  $h_b(=h_1 - R)/h_1$  と比較すると、初期波高  $H_1/h_1(=0.4)$  が等しく、砕波水深  $h_b/h_1$  も等しければ、 $H_b/H_1$  の値は比較的近い値となることがわかる。

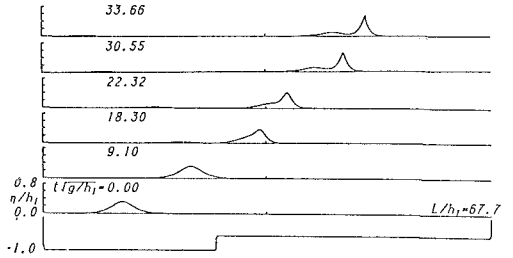
## 2.2 波形変化と砕波限界

ここでは、入射波高  $H_1/h_1$  と砕波水深  $h_b/h_1$  だけでなく、砕波点に至るまでの水深変化の総量  $S$  もできるだけ等しくなるように一様斜面と矩形ステップ上での孤立波の変形計算を行ない、両者の波形の比較より斜面勾配の影響を明らかにし、上述の ii) の疑問に答えたい。

図-2 は、 $H_1/h_1 = 0.332$  の孤立波を勾配が  $\tan \theta = 1/117.6$  の一様斜面に、また、 $H_1/h_1 = 0.320$  の孤立波を高さが  $R/h_1 = 0.4$  の矩形ステップにそれぞれ入射させ、砕波に至る過程での波形変化を示したものである。このときの一様斜面上での砕波水深  $h_b/h_1$  は 0.55 であり、矩形ステップの 0.6 に一致しておらず、水深変化の総量  $S$  も矩形ステップの 8.99 に対し、11.90 と異なっている。こ



(a) 一様斜面



(b) 矩形ステップ

図-2 入射波高  $H_1/h_1$  および水深変化量  $S$  がほぼ等しい一様斜面および矩形ステップ上での波形変化

のため、これらの諸量の差異を考慮する必要があるが、水深変化の仕方が一様斜面と矩形ステップでは大きく異なっているにも拘わらず、その影響は反射波や shelf に留まり、主波(透過波の主要部)に関しては砕波に至る過程を含めてほとんど相違は見られない。

この点をより明確にするため、図-3 および 4 に shelf を含んだ砕波限界波形および反射波の波形の比較を示す。これから、確かに両者の波形の差異は反射波および shelf に関して著しいが、主波部分についてはほとんど一致しており、斜面上の波の方が  $H_1/h_1$  および  $S$  共にほんの少し大きいこともあり、極くわずかに波高が高くなっているに過ぎないことがわかる。

この結果は、主波の変形および砕波が水深変化の総量  $S$  によってほぼ決まっており、水深変化の仕方(斜面による連続的あるいはステップによる不連続的)にほとんど依っていないことを示している。したがって、水深変化に対して波が反応する速度は水深変化の緩急には関係なく、波自体の特性によって決まると言える。そうであれば、波の非定常性は水深変化に対する波の反応速度によって決まり、浅水化の緩急とは無関係となるため、上述の ii) の疑問は氷解する。

しかし、反射波や shelf は水深の変化率に大きく支配され、これらに関しては水底形状の影響が問題となる。また、反射波や shelf の発達は主波からのエネルギーの分散によるため、主波自体はその分だけ安定となるが、前述したように反射波や shelf の発達に伴って主波の波

\* 水深化などのせつ動を受けた孤立波やクノイド波の背面に形成される棚状の波動成分を意味する。

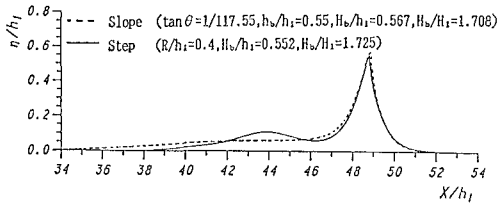


図-3 図-2 の場合の碎波限界波形の比較

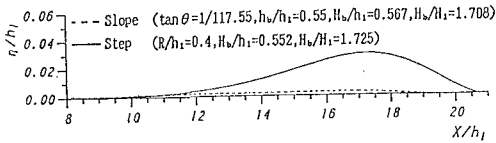


図-4 図-2 の場合の反射波の波形の比較

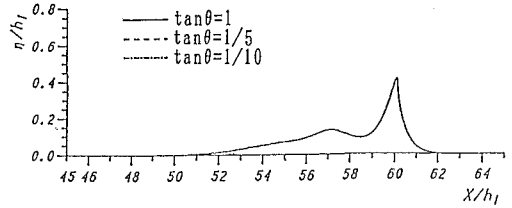
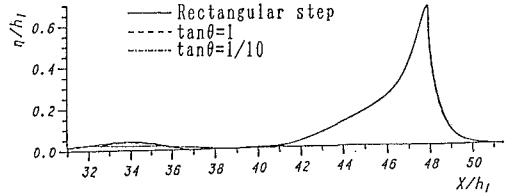
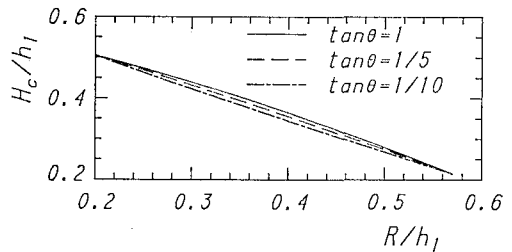
(a)  $H_1/h_1=0.22$ ,  $R/h_1=0.57$ (b)  $H_1/h_1=0.50$ ,  $R/h_1=0.40$ 

図-5 傾斜ステップ上での碎波限界波形の比較

図-6 臨界入射波高  $H_c/h_1$  と  $R/h_1$  の関係

$$\tan \theta = 1/5: H_c/h_1 = 0.622 - 0.794(R/h_1)^{1.190} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\tan \theta = 1/10: H_c/h_1 = 0.687 - 0.787(R/h_1)^{0.903} \quad \dots\dots\dots (3)$$

によるものである。臨界波高  $H_c/h_1$  はステップを碎波せずに透過する限界(上限)の入射波高  $H_1/h_1$  を示すが、これについても斜面勾配の影響はほとんど認められず、碎波の有無は傾斜面に関係なく、ステップの高さ  $R/h_1$  のみで決まっていると言ってよい。したがって、ステップによって入射波を碎波させる場合、必要となるものはその高さであり、傾斜面は碎波の有無に対して何ら意味を持たないと考えた方がよい。

以上の結果は、主波に対して斜面勾配が何の影響も及ぼしていないと言うだけでなく、傾斜部そのものが機能していないことを示すものと言える。そこで、傾斜部を無視し、矩形ステップと同様なパラメーター  $\xi_s^* = (R/h_1)^{0.1}/(H_1/h_1)^{0.4}$  を傾斜ステップに対して仮定し、これと碎波限界波高  $H_b/h_1$  との関係について調べる。図-7 はその結果を示したものであり、図中の実線は次式の回帰式による。

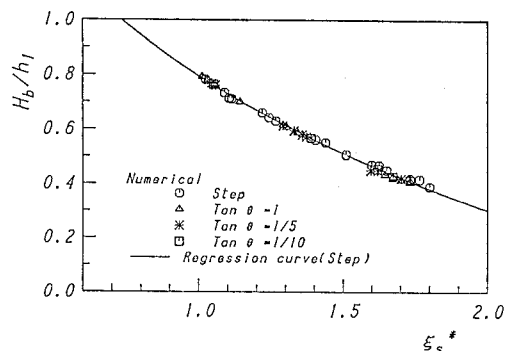
高は低下することになり、斜面の影響が間接的に反射波や shelf を通して主波にも顕れてくる。ただし、反射波や shelf の波高自体が図-3 および 4 からわかるように小さいため、それらの主波に対する影響は小さく無視できよう。したがって、斜面それ自体の主波に対する影響は、反射波や shelf の発生に伴う間接的なものに留まり、水深変化の総量  $S$  を通して顕れるに過ぎないと言ってよい。

### 3. 傾斜ステップによる変形と碎波

ここでは、最後に残った前述の iii) の疑問に答えるため、先端に勾配が  $\tan \theta = 1, 1/5$  および  $1/10$  の一様斜面を持つ傾斜ステップに入射する孤立波の変形計算を行ない、碎波に至る過程での波形変化および碎波限界について調べる。図-5 は、その結果を碎波限界波形について比較したものである。特にいずれの波形も shelf まで含めてほぼ完全に一致しており、ステップ先端の傾斜面は入射波に対してほとんど意味を持たないことがわかる。ただし、図の (b) の反射波の波形からわかるように、反射波は傾斜面の勾配の影響を受けるが、 $\tan \theta = 1$  の傾斜ステップと  $\tan \theta = \infty$  の矩形ステップの反射波の波形はほとんど一致しており、 $\tan \theta = 1$  程度では反射波に対してさえ傾斜面としての効果を持たず、機能的には鉛直壁と何ら変わらないことになる。

図-6 は、 $\tan \theta = 1, 1/5$  および  $1/10$  の 3 通りの斜面を持つ傾斜ステップに入射する孤立波の臨界入射波高  $H_c/h_1$  とステップの高さ  $R/h_1$  の関係を回帰曲線によって示したものである。図中の各回帰曲線は、それぞれ計算結果より導かれた回帰式

$$\tan \theta = 1: H_c/h_1 = 0.583 - 0.844(R/h_1)^{1.474} \quad \dots\dots\dots (1)$$

図-7 碎波限界波高  $H_b/h_1$  と  $\xi_s^*$  の関係

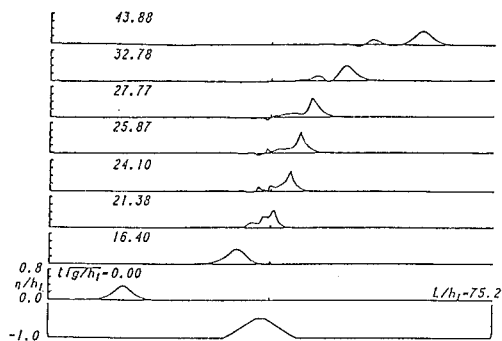
$$H_b/h_1 = 5.885 - 5.090 \xi_s^{*0.133} \dots \dots \dots (4)$$

これから、碎波限界波高  $H_b/h_1$  は  $\tan \theta$  に関係なく  $\xi_s^*$  のみによってほぼ一義的に決まっており、回帰式によって  $H_b/h_1$  を精度良く推定できることがわかる。

#### 4. 台形潜堤による変形と碎波

傾斜ステップでは傾斜面の存在そのものが入射波の波形変化や碎波に対してほとんど影響していないことを示したが、ここでは、勾配  $\tan \theta$  の傾斜面を両側に持つ、高さ  $R/h_1$  および天端幅  $B/h_1$  の台形潜堤に入射する孤立波の変形計算を行ない、傾斜ステップの場合と同様な検討を試みる。

図-8 は、碎波せずに透過する場合の波形変化の1例を示したものであり、最終的には透過波は shelf から転化したソリトンを伴うソリトン列として伝播して行くが、その過程で複雑な波形変化が生じていることがわかる。 $t\sqrt{g/h_1} = 21.38$  や  $24.10$  における波形はステップや矩型潜堤の場合(安田ら, 1991)では見られなかったものであり、傾斜法面の影響と推察される。しかし、これらの変化は一過性のものであり、それを過ぎれば矩型潜堤

図-8 台形潜堤による孤立波の波形変化(碎波しない場合,  $H_1/h_1=0.38$ ,  $R/h_1=0.525$ ,  $B/h_1=1.5$ ,  $\tan \theta=1/10$ )

の場合と同様な波形となっている。

図-9 は、潜堤を通過後に碎波する場合の代表的な波形変化の例を示したものである。図の (a) は、矩型潜堤の場合でも見られる波峰前面での擾乱の発生とこの擾乱との相互干渉を経て碎波に至る主波の波形変化の様子を示す。これから、一樣斜面やステップの場合と異なり、擾乱の影響が主波だけでなく shelf にも及び、それが波形を複雑にしていることがわかる。図の (b) および (c) は、これよりさらに複雑な波形変化を示し、傾斜面が擾乱の発生およびそれと主波との相互干渉に大きな影響を及ぼしていることがわかる。また、(b) の  $t\sqrt{g/h_1}=23.28$  での波形は通常の碎波限界波形に近く、崩れ波型と見ることが出来るが、(c) の碎波限界波形は通常のものとは大きく異なり、従来の碎波形式の分類の枠を大きく踏み越えたものとなっている。こうした複雑な波形変化と碎波のメカニズムについては、水理実験を含めたさらに詳細な検討が必要である。

図-10 は、台形潜堤に対する臨界入射波高  $H_0/h_1$  とパラメーター  $\gamma = [B/h_1 + (R/h_1)/2 \tan \theta]^{0.4} (R/h_1)$  の関係を

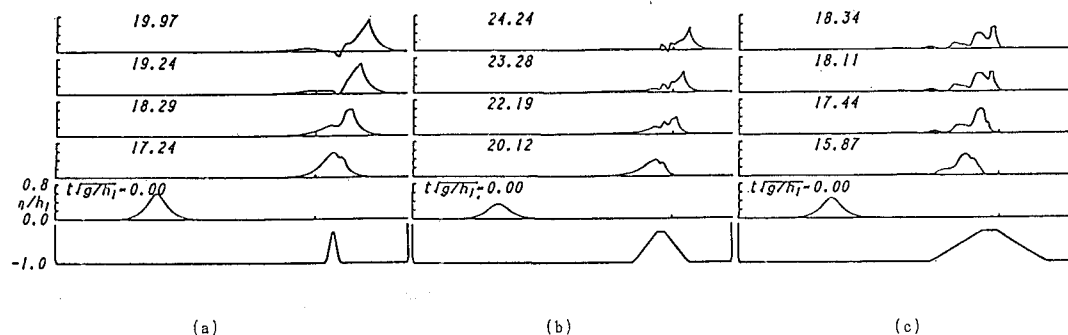
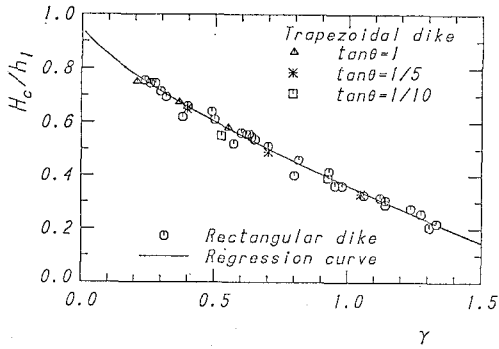
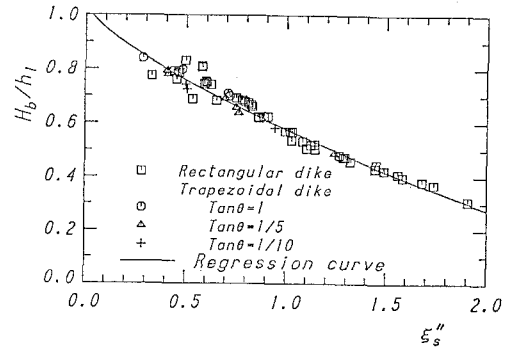
(a)  $H_1/h_1=0.61$ ,  $R/h_1=0.70$ ,  $B/h_0=0.2$ ,  $\tan \theta=1$ (b)  $H_1/h_1=0.34$ ,  $R/h_1=0.70$ ,  $B/h_0=1.0$ ,  $\tan \theta=1/5$ (c)  $H_1/h_1=0.46$ ,  $R/h_0=0.70$ ,  $B/h_0=2.0$ ,  $\tan \theta=1/10$ 

図-9 台形潜堤による孤立波の碎波に至る波形変化

図—10 臨界入射波高  $H_c/h_1$  と  $\gamma$  の関係図—11 砕波限界波高  $H_b/h_1$  と  $\xi_s''$  の関係

示したものであり、図中の実線は次式による回帰式

$$H_c/h_1 = 0.952 - 0.591 \gamma^{0.70} \dots\dots\dots (5)$$

による。また、図中には  $\tan \theta$  が  $\infty$  となる矩形ステップの場合の  $H_c/h_1$  も比較の為に示してあるが、いずれの場合も図中の回帰曲線にほぼ沿っており、潜堤に対する臨界入射波高  $H_c/h_1$  が式(5)によって統一的に与えられることがわかる。また、 $H_c/h_1$  は  $\gamma$  を介して傾斜面の勾配  $\tan \theta$  に依存しているのがわかる。 $\gamma$  はこのとき的水深変化の総量  $S[(B+R/\tan \theta)R]$  そのものではないが、それに近いパラメーターであり、臨界入射波高は斜面勾配それ自体ではなく斜面による水深の変化量に依っていると考える。

図—11 は、台形潜堤による孤立波の砕波限界波高  $H_b/h_1$  と次式で定義するパラメーター  $\xi_s''$

$$\xi_s'' = (B/h_1 + (R/h_1)/3.5 \tan \theta)^{0.3} \cdot (R/h_1)/(H_1/h_1)^{0.4} \dots\dots\dots (6)$$

との関係を示したものである。図中の実線は回帰式

$$H_b/h_1 = -0.463 \xi_s''^{0.731} + 1.039 \dots\dots\dots (7)$$

によるものである。また、図中には矩型潜堤の場合の  $H_b/h_1$  の値も示してあるが、いずれも回帰曲線に沿って分布しており、傾斜面の勾配に関係なく、潜堤による限界波高が式(7)によって統一的に評価できる事がわかる。

## 5. 結 語

本研究では、斜面による水深変化の入射波に及ぼす影響について調べ、以下のことを明らかにした。

i) 一樣斜面上の砕波を含む変形は、水深変化の総量  $S$  によって決まり、この  $S$  を介して間接的に斜面勾配の影響を受けるに過ぎない。 $S$  は斜面勾配と反比例の関係にある為、緩斜面になるに従って  $S$  の値が増し、この結

果として波高に対する水深効果や砕波限界波高が増大するのであり、斜面勾配それ自体の影響によるものではない。

ii) 一樣斜面と矩形ステップでは水深の変化の仕方が大きく異なるが、入射波高、砕波水深および砕波点までの水深変化の総量がほぼ等しければ、生じる波形変化は反射波や shelf を除いて砕波限界まで含めてほとんど一致し、斜面の影響は反射波や shelf に顕れるに過ぎない。これによって、砕波限界は水深変化の緩急には依らず、水深変化量そのものによって決まることが明確となった。

iii) 傾斜ステップの傾斜面法面勾配は、波形変化だけでなく砕波の有無や砕波限界に対してほとんど影響しておらず、矩形ステップとして扱うことができる。

iv) 台形潜堤では、潜堤によって励起された擾乱と主波との相互作用に傾斜面法面が関与し、法面勾配の影響が波形変化に顕れるが、臨界入射波高や砕波限界波高に対して矩型潜堤を含めた統一的取り扱いが可能となる。

## 参 考 文 献

- 安田孝志・原 正典・田中光宏 (1989): ステップおよび潜堤を通過する孤立波の変形と砕波指標, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 51-55.
- 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ー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.
- 安田孝志・三島豊秋・土屋義人 (1985): 傾斜海岸上におけるソリトンとその変形, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 109-113.
- Camfield, F. and R. Street (1969): Shoaling of solitary waves on small slopes, Proc. ASCE, Vol. 95, No. WW1, pp. 6360-6388.