

急勾配斜面上の碎波に関する実験的研究

Experimental Study of Waves Breaking on Steep Slopes

増田 亨* 坂田年隆**
 宮本義憲*** 武内智行****

Toru MASUDA, Toshitaka SAKATA,
 Yoshinori MIYAMOTO and Tomoyuki TAKEUCHI

勾配 1 : 10 以下の緩やかな斜面における波高の変化や碎波変形などを算定する式は防波堤構造物の設計要領などにも提示され、すべてに実際の現象とほぼ対応している。しかし、1 : 10 より急な勾配ではそれらの算定式の適用範囲を越えてしまうので、その現象の定量的な傾向の把握が困難になる。

本研究は、このような適用限界を補うような資料を得るために大型二次元水路を用いて数種類の急勾配斜面模型上の碎波による諸現象の中で波の変形、打上げ高、底層の流れの3項目に注目して実験を行い解析した。その結果、急勾配斜面上に防波堤構造物などを建設する際に必要な諸元を求めるのに基礎となる若干の知見を得ることができた。

《急勾配斜面；碎波；打上げ高；底層の流れ》

Diagrams of wave height variation and transformation of breakers on slopes gentler than 1 : 10 are given in manuals for designing breakwaters. The calculated values agreed well with the field data. But the calculated values on slopes steeper than 1 : 10 exceed the limits where the diagrams apply, so it is difficult to estimate these phenomena quantitatively.

In this paper, we studied the transformation of waves, runup and bottom currents on several steep slopes in a large scale two-dimensional wave flume and analyzed experimental results to extend the limits of applications. As a result, we obtained observations to enable calculation of the necessary numerical values for constructing breakwaters on steep slopes.

Keywords : steep slope, wave breaking, runup, bottom current.

はじめに

通常、ある一定の勾配の斜面（海底）上を進行する波は、水深が波長の 1/2 より浅い海域に移ると海底の影響を受けて次第にその様相（波高、波長、波形など）が変化していくことは理論計算によって解析され、また造波水路内の模型である程度再現される。このような変形過程については過去にさまざまな実験や研究が行われ、勾配 1 : 10 以下の緩勾配における理論式や図表などは充実しているといえる。このことは、現行の防波堤設計の中の沖波から設計波を算出する過程に盛込まれており、大

部分の防波堤が現地の激しい波浪に耐えていることから、これらの理論式や図表は実際の現象と十分対応していることがわかる。

しかし、勾配 1 : 10 より急な勾配、いわゆる急勾配斜面（海底）上では、その反射波や戻り流れなどが波の変形過程に影響を及ぼすため、前述のような理論式や図表の適用が困難になる。このような適用限界を補間するような急勾配斜面（海底）上での波の変形過程を取扱った研究例は数少なく、いまだ解明するにいたっていない。本研究は、海底勾配の急峻な条件下での防波堤構造物を

*水産土木研究室員 **前水産土木研究室員 現札幌開発建設部深川農業開発事業所 ***同室長 ****同室副室長

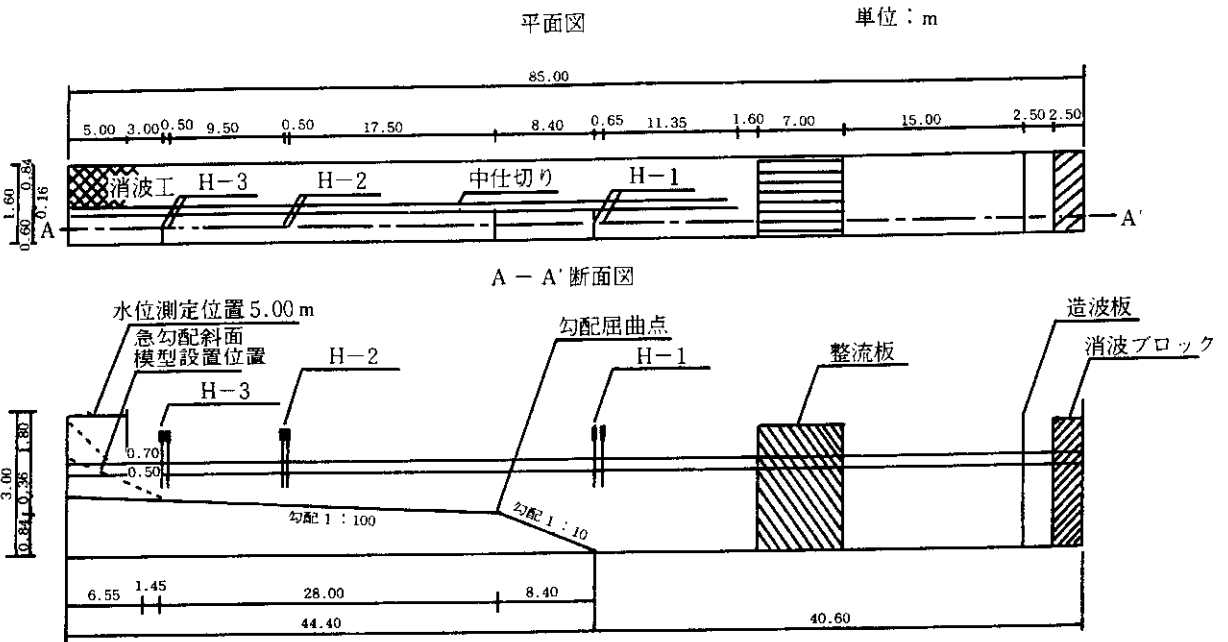


図-1 大型 2 次元水路

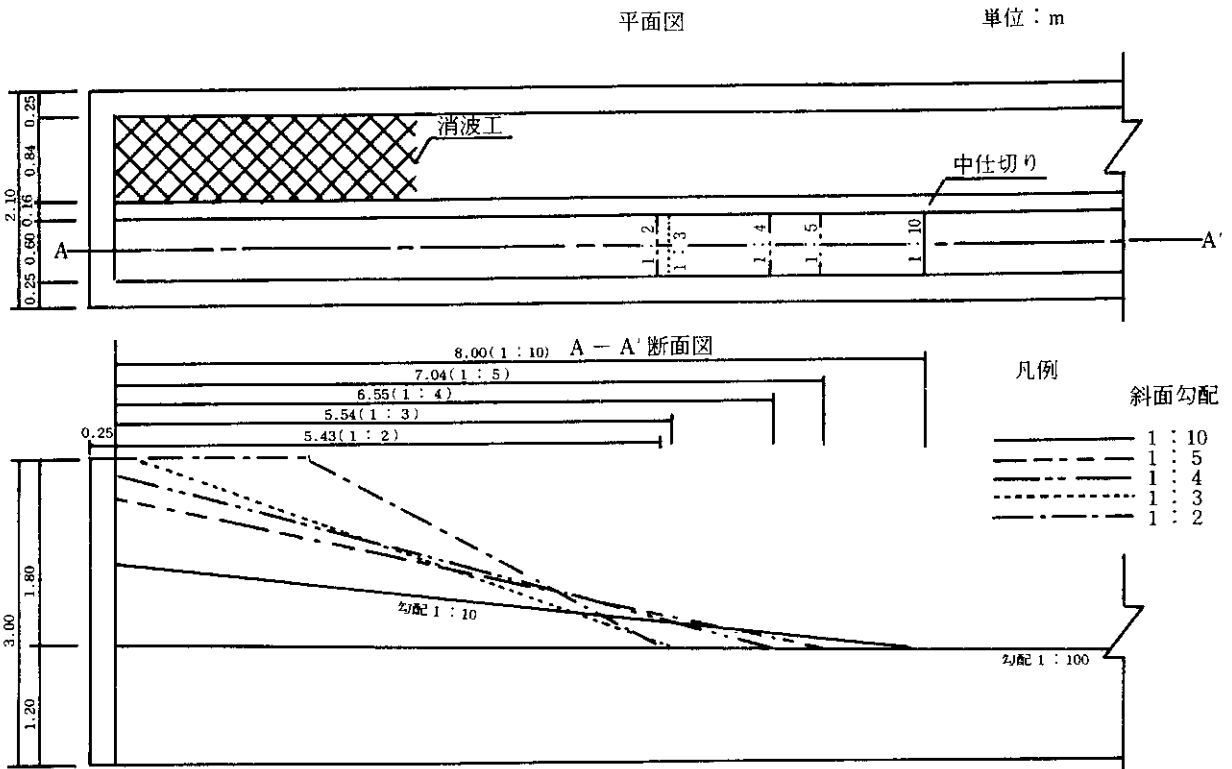


図-2 急勾配斜面模型

設計する場合に重要となる波の変形，打上げ高，底層の流れなどについて基礎的なデータを得るために，勾配 1 : 10 以上の数種類の急勾配斜面について行った実験結果¹⁾ について報告するものである。

1. 実験概要

1.1 実験施設

(1) 造波水路

当研究所の第四実験棟港湾実験室内にある大型 2 次元水路 (85 m × 1.6 m × 3 m) を使用した(図-1 参照)。造波機は大型 2 次元水路に既設のピストン型造波機 (最大波高：0.5 m，周期：0.5～7.0 秒) で，規則波と不規則

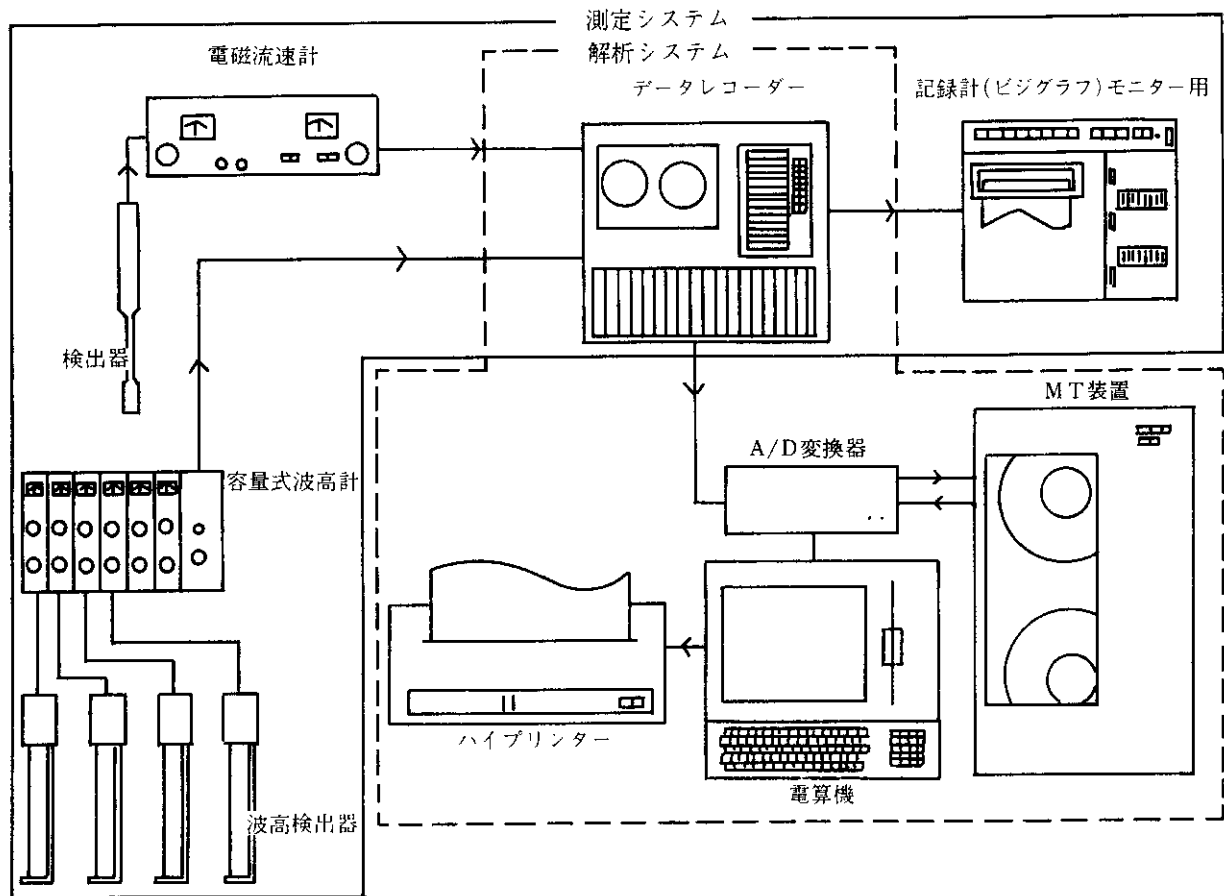


図-3 測定・解析機器

波の両方とも発生させることができる。

(2) 模 型

模型は図-2 に示すように、既設の勾配 1 : 100 の模型地形上に 1 : 2 ~ 1 : 10 の 5 種類の急勾配斜面模型を製作した。このうち、1 : 2 および 1 : 3 の斜面についてはモルタル (厚さ 3 cm) 面上にベニヤ板仕上げとし、1 : 4 ~ 1 : 10 の斜面についてはモルタル仕上げとした。また、斜面の位置は観測ピット内のガラス面で碎波変形などの全容が把握できるように設定した。

(3) 測定・解析機器

本実験に用いた測定・解析機器類を図-3 に示す。図中実線で囲った機器類が波高および流速の測定システムであり、破線で囲った機器類が解析システムである。測定システムのフローチャートを述べると、次のようになる。まず、波高または流速検出器からそれぞれの変換器を経て、出力された信号をデータレコーダーの記録用テープにいったん取込むと同時に、ビジグラフでリアルタイムのモニターをし、記録がまちがって行われていないか確認する。また、ビジグラフによって記録されたデータは、データレコーダーを用いた解析時のバックデータとして使用した。

表-1 実験条件

実験勾配	1 : 10, 1 : 5, 1 : 4, 1 : 3, 1 : 2
水深 (cm)	80 ~ 120
波高 (cm)	3.4 ~ 29.2
周期 (秒)	0.80, 1.00, 1.25, 1.75, 2.00, 2.50, 3.00

解析システムのフローチャートは、次のようになる。あらかじめ、波高または流速データの記録してあるテープをデータレコーダーにかけ再生する。再生されたデータは、A/D 変換器を経て MT 装置にいったん収録される。収録されたデータは A/D 変換器でアナログデータからデジタルデータに変換され、それと直結の電子計算機へ転送される。転送されたデータは電子計算機の解析用プログラムにより処理され、内臓のディスプレイまたは接続されているハイプリンターへ解析結果として出力される。

1.2 実験条件

(1) 実験波

実験波の概略を示すと、表-1 のようになる。実験波高および各実験勾配において波の変形、打上げ高、底層の流れなどの碎波に係わる諸現象を把握するのに必要な諸

元を設定した。なお、各実験項目におけるケース数はほぼ100で合計約300ケースになる。

(2) 実験項目

実験は通過波、波の変形、打上げ高、底層の流れの4項目について行った。以下に、実験項目についての概略を述べる。

○通過波

本実験に先立ち、造波機の振幅ダイヤル値と起波波高の関係を知るために水路内の3点で通過波を測定し、造波機の起波性能および実験波の特性を調べた。

○波の変形

急勾配斜面上に2～7本の波高計を設置し、波高変化と概略の碎波位置を測定し、波の変形状況を調べた。

○打上げ高

急勾配斜面上を這上がる波の高さを測定するため、斜面上にメジャーを取りつけ、目視による観測と同時にビデオ撮影による解析を行った。

○底層の流れ

急勾配斜面上での波の特性によって変化する碎波位置辺りに電磁流速計を設置し、碎波位置付近の底層流速を測定した。また、電磁流速計と同じ水深に波高計を設置し、碎波波高として測定した。

(3) 実験波の解析基準

実験波の解析は、次のような基準で行った。図-4の中のA波形が測定波形の中で最初の最大波形であり、このA波形から数えて6波形目のB波形からC波形間の5波形が解析基準である。これらを、すべての実験における実験波の解析基準とした。理由として、通過波などの波形を観察したところ、波形は最大波が最初に出現してから安定した波形が約10波程度得られること、有効測定波数が周期の最も大きいもので10数波しかなく、すべての実験において実験波を解析する範囲を設定する必要があったので、このような基準を定めた。

1.3 実験手法

(1) 通過波

本実験に先立ち、実験に用いる波の通過波の測定を行うとともに、造波機の起波性能および実験波の特性を観

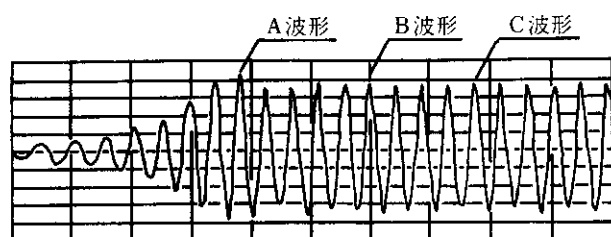


図-4 測定波の波形

測した。なお、通過波の実験周期は5周期 ($T = 1.25, 1.50, 2.00, 2.50, 3.00$ 秒) とし、実験ケース数は、水深50 cmで5周期×15波高(振幅ダイヤル値:20~270)の75ケース、水深70 cmで5周期×4波高(振幅ダイヤル値:50~250)の20ケースのそれぞれ3測点で、通過波の波高を測定した。

実験方法は、振幅ダイヤル値を所定の値にセットしたときの造波機から発生した波を容量式波高計で検出し、データレコーダーに収録すると同時にビジュグラフでモニター用の波形を描いた。データレコーダーで収録した記録は、MT装置からA/D変換装置によってデジタル量のデータ(サンプリング間隔50 ms)に変換し、電子計算機を用いて入反射分離法²⁾により、各測点のデータ解析を行い平均波高を求めた。

(2) 波の変形

測定方法は、勾配・周期・水深の組合わせ別に目標波高を設定し、碎波位置付近に2～7本の容量式波高計を設置・測定すると同時に、ビデオにより波の変形状況を撮影し、得られた測定結果を波の変形の実験値とした。解析方法は、造波機より発生させた波を容量式波高計で測定し、データレコーダーに収録すると同時に、記録計(ビジュグラフ)でモニター用の波形を描いた。データレコーダーにより収録した記録は、MT装置からA/D変換装置を通して電子計算機による入反射分離法で各測点のデータ解析を行った。なお、データのサンプリング間隔は50 msである。

ビデオによる解析は、あらかじめ観測ピットのガラス面に5 cm間隔の格子を書いておき、再生したときにそれを基準として碎波水深、碎波波高を測定した。

(3) 打上げ高

急勾配斜面と周期の変化による波の這上がり高さを測定するにあたっては、波が来襲して急勾配斜面で反射しても、斜面前面の海底は変形を起こさないこと、根固め工や基礎工に相当するものはなく、波返しもついていない状態で測定を行った。

測定は造波機より発生させた有効波数20~25程度について、急勾配斜面上の汀線側から取りつけたスチールテープの日盛りを目視すると同時に、ビデオ撮影による測定を行った。測定波のうちで安定している5波についてそれぞれの這上がり距離を求めた。入射波の側定位置は、通過波での測定位置と同位置で測定を行った。また、這上がり距離の測定は、実験用水路幅(60 cm)の中央部における波の這上がりの最高到達点を測定結果(斜路距離)とした。なお、打上げ高とは、各勾配ごとの測定結果(斜路距離)を垂直距離に換算したものである。

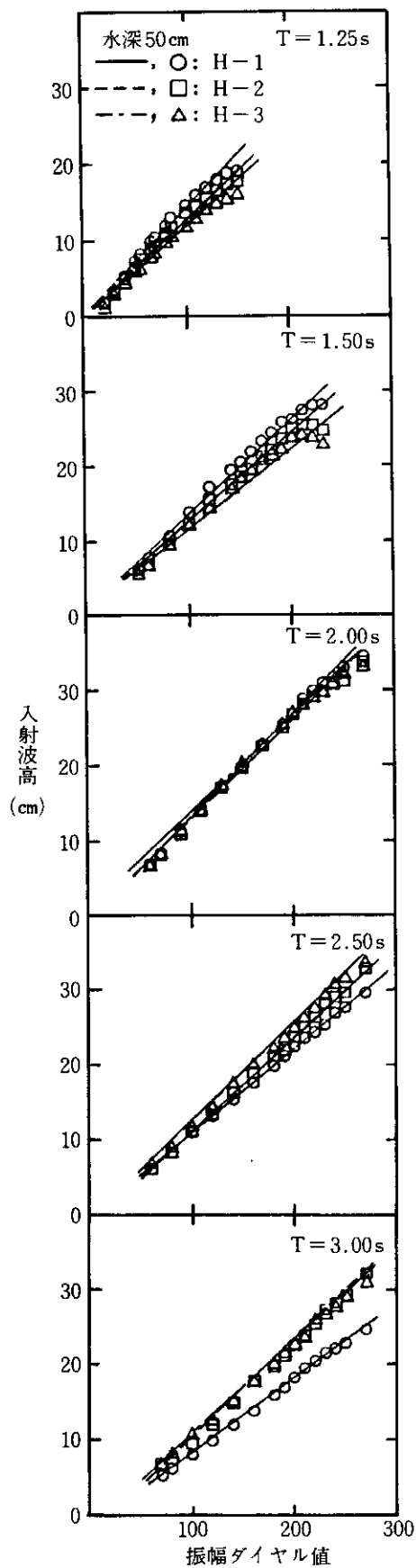


図-5 振幅ダイヤル値と入射波高の関係 (水深 50 cm) およびその回帰直線

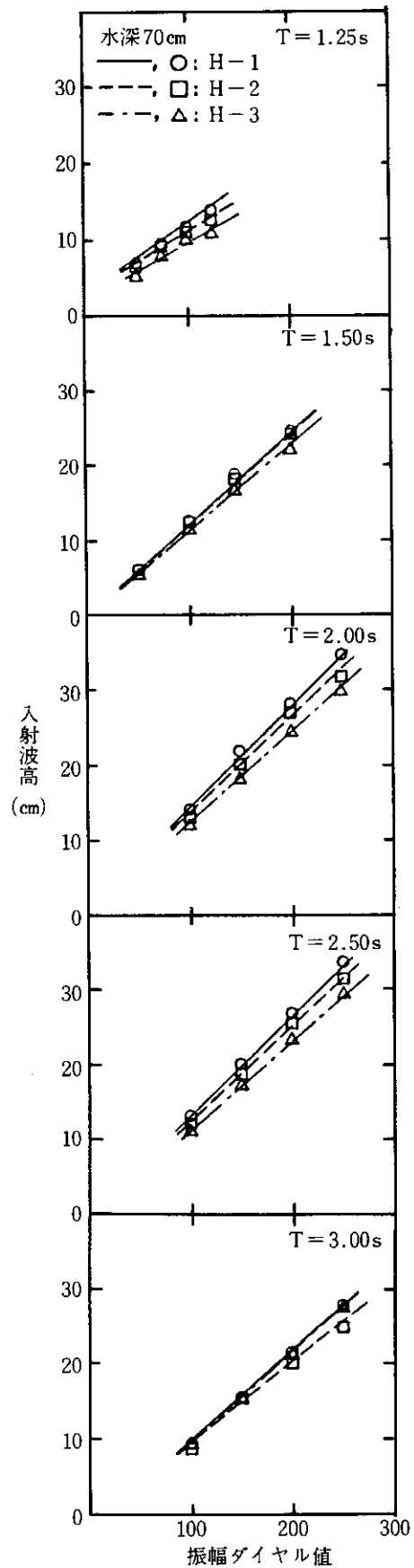


図-6 振幅ダイヤル値と入射波高の関係 (水深 70 cm) およびその回帰直線

(4) 底層の流れ

波の変形より得られた急勾配斜面における砕波点近傍の底層流速（急勾配斜面上3 cm）を測定するため、電磁流速計を用いて測定を行った。同時に流速計設置位置と同水深に波高計を設置し、砕波点周辺の波高測定も行った。底層流速の測定時間は、造波10秒後から有効測定波（20～30波）が電磁流速計を通過するまでを測定範囲とした。そのうち解析範囲は、測定開始から終了までの観測波形中の最大流速波形より数えて6～16波形の10波形の流速を解析した。なお、実験装置の都合上解析された流速はすべて水平成分の流速を表わしている。

2. 実験結果および考察

2.1 通過波

通過波測定時の波高計の設置位置は、次のようになる（図-1参照）。水平の水路床から1：10で立上がる模型地形の斜面の始点に1点（H-1）、続いて模型地形の勾配1：100の斜面のほぼ中間地点上に1点（H-2）、そして勾配1：100の模型地形の上に製作する急勾配斜面の始点上に1点（H-3）の合計3点において通過波を測定した。ここで、波高検出器が1点につき2本必要なのは測

定した波を入射分離法により解析するためである。

測定結果を示すと図-5, 6のようになる。図は横軸に振幅ダイヤル値、縦軸にそれぞれの点での波高をとり、水深、周期別にプロット（H-1：○, H-2：□, H-3：△）し、その観測地点ごとの回帰直線（H-1：——, H-2：-----, H-3：----）を描いたものである。全体的に直線から大幅に離れている点はなく、振幅ダイヤル値と波高がほぼ直線的な関係を示している。

周期が1.25～2.00秒において、振幅ダイヤル値が小さな領域では振幅ダイヤル値の増加とともに波高が大きくなる直線的な関係を示しているが、振幅ダイヤル値が大きな領域では、振幅ダイヤル値が増加しても波高があまり大きくならない曲線的な関係を示しており、水深が浅いとその傾向は強く、深いと弱い。

周期が2.50秒以上では、振幅ダイヤル値が実験範囲内での発生波高とほぼ直線的な傾向を示している。水深が50 cmのケースでは、浅水変形の影響を強く受けて浅くなるほど波高が大きくなり、水深70 cmのケースではその傾向がみられなくなっている。

2.2 波の変形

(1) 浅水変形

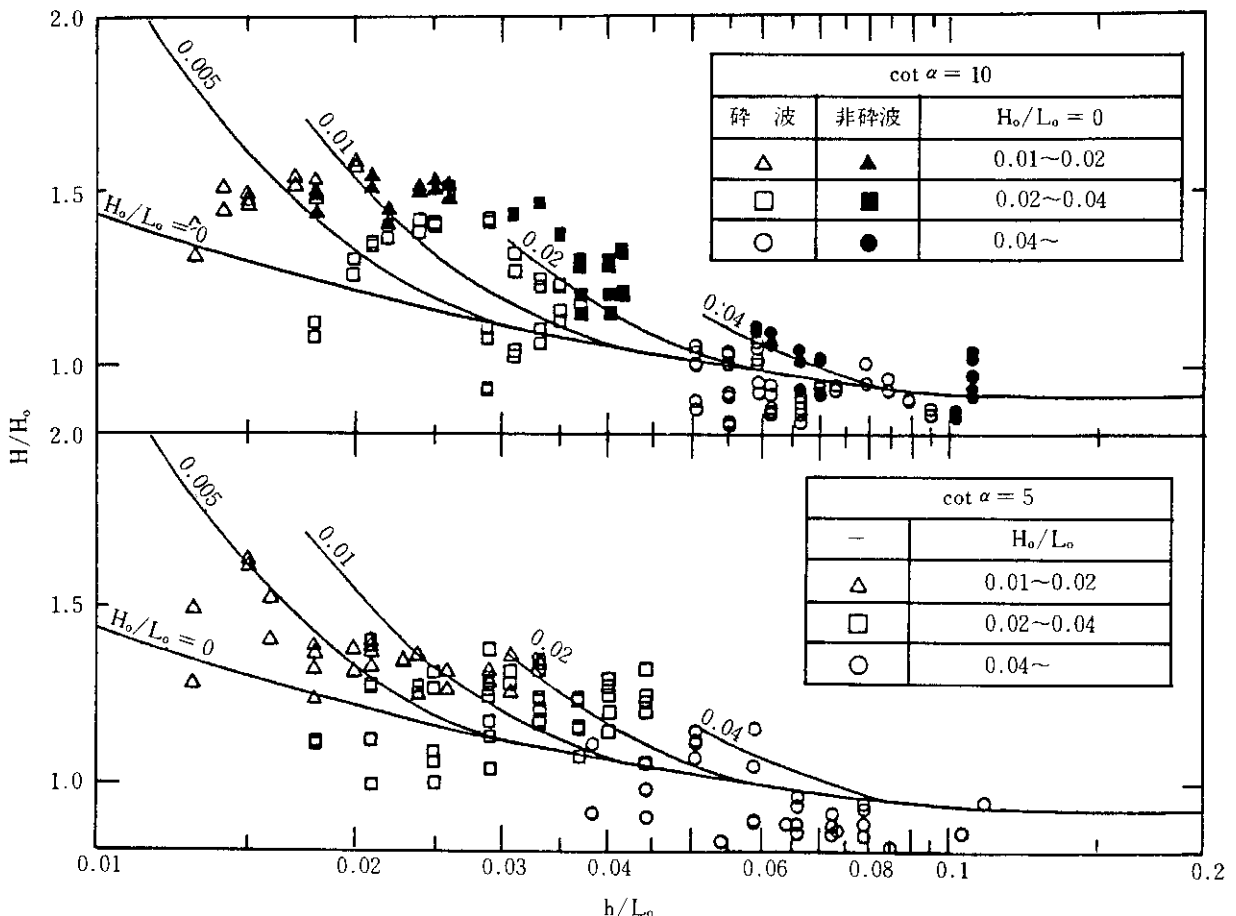


図-7 浅水係数の実験結果と首藤による浅水係数曲線との比較

図-7は、勾配1:10および1:5における波の変形に関する測定結果を水深波長比 (h/L_0) と浅水係数 (H/H_0) の無次元量で表わしプロットしたものである。なお、測定結果を表わすグラフには、有限振幅性を考慮して求めた首藤による浅水係数曲線³⁾も与えている。また、勾配1:10の測定結果に関してのみ沖波の波形勾配 (H_0/L_0) と波高の測定水深から合田の碎波指標⁴⁾を用いて碎波・非碎波の判定を行って図に表わしている。図中 H_0/L_0 の値をマークにより区別し、三角形が $0.01 \leq H_0/L_0 < 0.02$ 、四角形が $0.02 \leq H_0/L_0 < 0.04$ 、丸形が $0.04 \leq H_0/L_0$ で、白抜きが碎波後の波、黒塗りが非碎波の波を示している。

図の勾配1:10における実験結果をみると、 H_0/L_0 が0.04より大きなもので非碎波を示す黒塗りのマークは、数点を除いて $H_0/L_0 = 0.04$ の浅水係数曲線より H/H_0 が大きな領域に分布している。同様に、 H_0/L_0 が0.02~0.04と0.01~0.02の実験結果について非碎波を示す黒塗りのマークは、そのほとんどがそれぞれの H_0/L_0 の浅水係数曲線に挟まれるような領域に分布している。

また、碎波後の波を示す白抜きのマークは、碎波変形により波高が減少したため、○が $H_0/L_0 = 0.04$ 、□が $H_0/L_0 = 0.02$ 、△が $H_0/L_0 = 0.01$ の浅水係数曲線より H/H_0 の小さな領域に大部分が分布している。しかし、非碎波と判定された白抜きのマークでも、それぞれの H_0/L_0 の浅水係数曲線より大きな H/H_0 の領域に分布しているものが2、3点ある。これらの点は計算上碎波と判断されているが、恐らく実際は破碎はせず、浅水変形の途中の状態で測定されたものと思われる。逆に非碎波と判断されながら、それぞれの H_0/L_0 の浅水係数曲線より H/H_0 の小さな点も数点あり、これも実際は碎波により波高が減衰したものと推測される。この原因として、碎波という現象自体の複雑性などがあげられるが、詳細については後述する。

これらのことから、勾配1:10の波の変形に関する実験結果について次のようなことがいえる。碎波しない波の H/H_0 は浅水係数曲線とほぼ対応しており、碎波後の波については、碎波により波高が減衰したため、その H_0/L_0 に対応する浅水係数曲線より H/H_0 の小さな領域に分布することがわかった。

それでは1:10より急な勾配はどうか。前述のように、1:10より急な勾配では合田の碎波指標の適用範囲外であるので、実験結果については碎波・非碎波の判定を行わず、浅水係数曲線のみ与えている。また、 H_0/L_0 の区分の範囲は勾配1:10のときと同様である。図から h/L_0 と H_0/L_0 の測定範囲が勾配1:10のときと同程

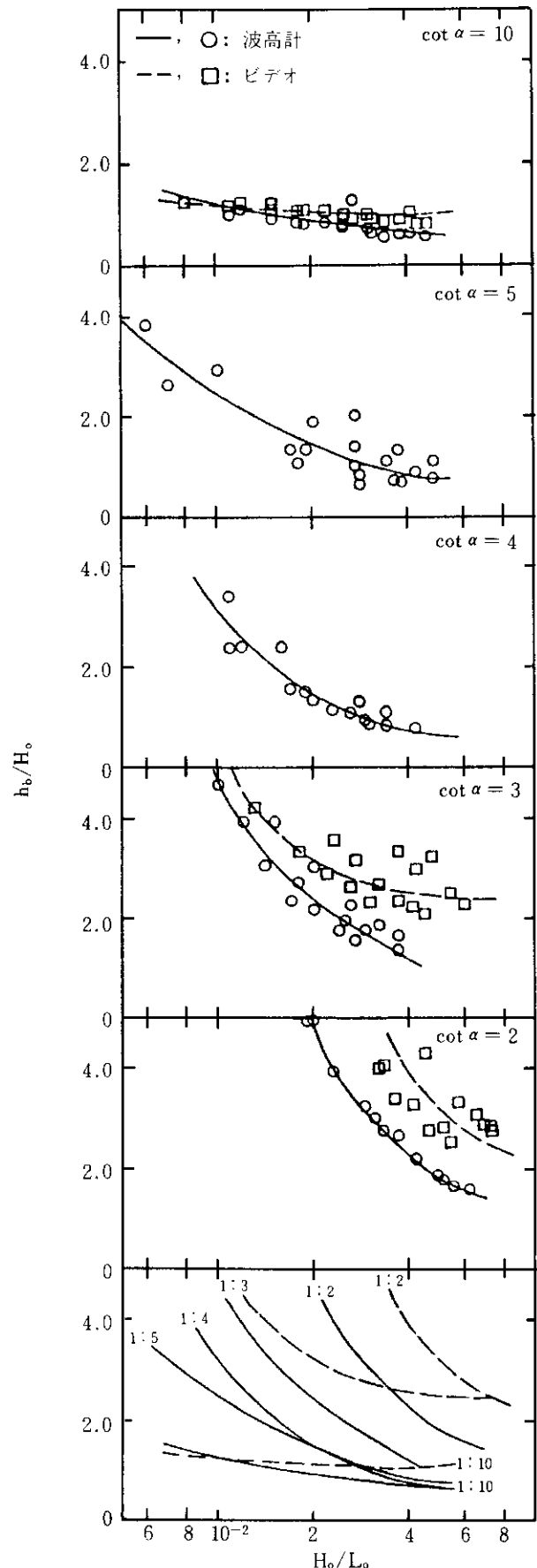


図-8 波形勾配と碎波水深の関係

度であるにもかかわらず、それぞれのマークの H_0/L_0 の浅水係数曲線に挟まれる領域内に分布している点数が少ない傾向にある。このことから、大部分の波が碎波しており、それぞれのマークに対応する H_0/L_0 の浅水係数曲線に挟まれる領域内に分布しているわずかな点が非碎波の波であると推測することができる。

勾配 1 : 5 は 1 : 10 に比べ角度がほぼ 2 倍あり、それだけ波が海底の影響を受ける度合いが強くなる。また、浅水係数曲線を与える算出式を導入する際に海底の傾斜は急でないとの仮定をたてており³⁾、勾配が 1 : 10 より急になればなるほど、実験結果と浅水係数曲線との相関性がみられなくなる可能性が高い。そして、勾配が急になると斜面からの反射波の影響を考慮しないわけにはいなくなり、部分重複波的な要素が多少含まれてくるものと考えられるので、それだけ変形過程の解析により複雑性を増してくる。

1 : 5 より急な勾配の実験を観察したところ、斜面からの反射波により部分重複波となっているケースもあったが、大部分が碎波していた。それも波高計の設置位置付近で破波するものが多く、碎波位置は一定せず、碎波後の白い泡の位置付近に設置されている波高計もあった。計測しているデータは、浅水変形による波高変化の域を脱し、どちらかというとな碎波変形に近いものであったように思われる。したがって、勾配 1 : 4 ~ 1 : 2 における実験結果 (碎波変形の項で使用) はあえて掲載しないことにする。

(2) 碎波変形

図-8 は、各勾配における実験結果を H_0/L_0 および碎波水深と沖波波高の比 (h_b/H_0) の無次元量で表わし、プロットしたものである。図中の曲線は、その両側にプロットされた点のばらつきが均等になるよう目算で描いたものである。また、勾配 1 : 10, 1 : 3, 1 : 2 については、ビデオによる解析も行ったのでそれも併記する。波高計による測定結果を \bigcirc で表わし、それらから得られた曲線を実線で、ビデオによる測定結果を \square で表わし、それらから得られた曲線を破線で与えている。

各勾配のプロットされた点の分布状況から、 H_0/L_0 が大きくなると h_b/H_0 が減少する傾向にあり、勾配の変化にかかわらずその傾向は変わらない。勾配によってはプロットされた点がかかなりばらついているものもあり、斜面からの反射波や戻り流れがその主な原因であると考えられる。

勾配 1 : 10 ~ 1 : 2 の実験結果の曲線を照らし合わせてみると、図-8 の最下段のようになる。図から、勾配の変化による H_0/L_0 と h_b/H_0 の傾向の変化を見ると、 H_0

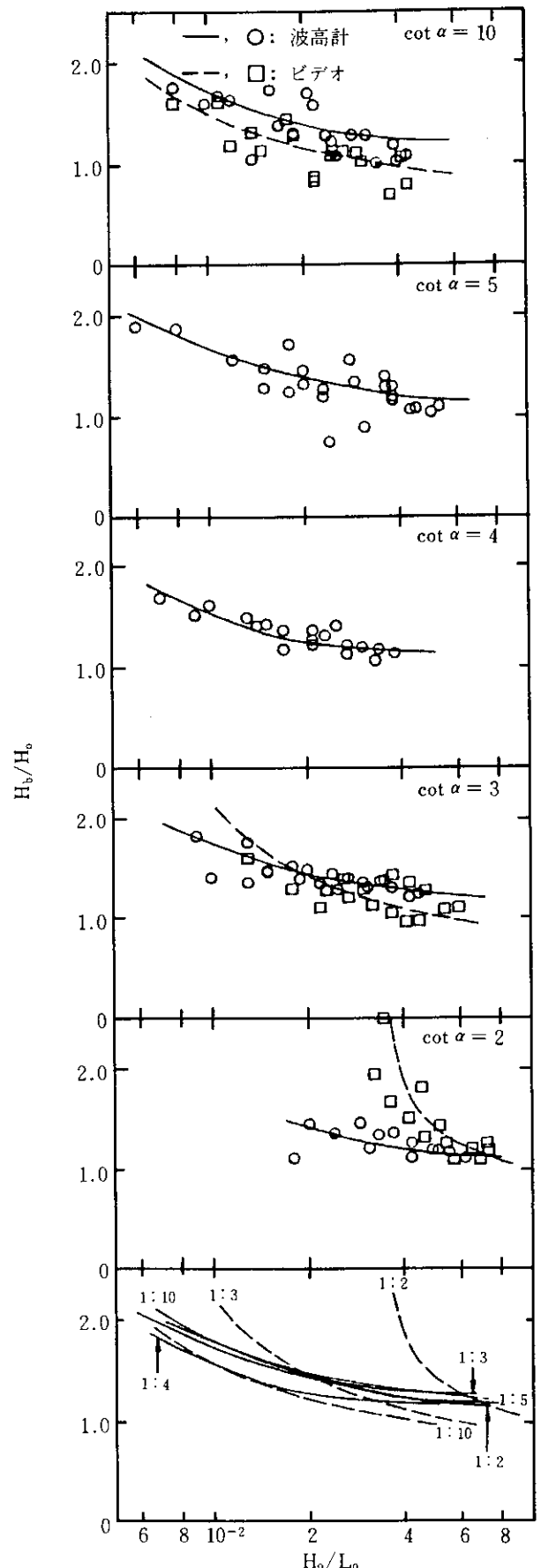


図-9 波形勾配と碎波波高の関係

L_0 。一定の場合、勾配が急になるとより大きな h_b/H_0 で碎波が起きる。この傾向は、波高計による解析結果からもビデオによる解析結果からも同様にいえることである。

勾配 1 : 10 の波高計およびビデオによる解析結果を用いた実験曲線どうしを比較してみると、曲線の交差しているごく限られた領域以外同様の値を示しているとはいえない。その誤差は H_0/L_0 が大きくなると増大し、最大で約 30% となる。勾配 1 : 3 と 1 : 2 における波高計とビデオによる解析結果を比較すると、プロットされた点の分布状況やそれらから得られる曲線がかなり相違している。実験波高より逆算すると、その差は水平距離で約 40~60 cm にも及ぶ。

実験を観察したところ、碎波波高、碎波水深は規則波実験であるにもかかわらず、反射波や戻り流れが大きな原因となり一波ごとに違っていた。そのような状態で目視により碎波点を見きわめると、ビデオ装置を駆使して碎波点を見きわめるとではでてる結果に相違が生ずるのは当然のことであり、その最たる結果が勾配 1 : 3 や 1 : 2 の解析方法の違いによる曲線の相違であると考えられる。

図-9 は、各勾配の実験結果を波形勾配および碎波波高と沖波波高の比 (H_b/H_0) の無次元量で表わしたものをプロットしたものである。曲線は、その両側にプロットされた点のばらつきが均等になるよう目算で描いたものである。また、勾配 1 : 10, 1 : 3, 1 : 2 についてはビデオによる解析も行ってみたので、それも併記する。図中のマークおよび線の表示は、図-8 と同様である。

波高計を用いた解析結果によると、各勾配のプロットされた点の分布状況から、 H_0/L_0 が大きくなると H_b/H_0 が減少するという傾向がある。プロットされた点がばらついているのは、前述のように斜面からの反射波と戻り流れが主な原因であると考えられる。図-9 の最下段から、波高計を用いた観測結果において勾配が 1 : 10 より急になっても各勾配の実験結果の曲線どうしが相互に交差しあって、 H_0/L_0 と H_b/H_0 の関係の変化を顕著に見いだすことはできない。

ビデオを用いた観測結果による勾配 1 : 10, 1 : 3, 1 : 2 のプロットされた点の分布状況から、得られる H_0/L_0 と H_b/H_0 の関係は、波高計を用いた観測結果のそれと同様の傾向を示しているが、図-9 の最下段より、ビデオを用いた観測結果から得られる勾配 1 : 10, 1 : 3, 1 : 2 の 3 本の曲線の間には勾配の変化による H_0/L_0 と H_b/H_0 の関係の変化に傾向があるようである。その傾向は H_0/L_0 が一定の場合、勾配が急になるとより大きな H_b/H_0 で碎波する。

実験では本観測に臨む前、予備的に波をかけてみて概略の碎波点を確認し、その付近に波高計を設置して本観測を行った。設置した波高計から観測された碎波波高および碎波水深は概略の値であって、正確な値をとらえているとはいえず、そこに実験方法による限界のようなものがあると思われる。しかし、定性的な傾向はつかんでいるものと判断される。今後はビデオ装置による解析もおり混ぜて、より充実した結果が得られるようにしたいと考えている。

2.3 打上げ高

一様勾配斜面への波の打上げ高についての研究は以前から数多くあり、Hunt は 1 : 10 以下の勾配における実験的研究の結果⁵⁾ から次の式を提案している。

$$\frac{R}{H_0} = 1.01 \tan \alpha \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 α : 斜面と水平とのなす角、 R : 打上げ高である。

また、高田⁶⁾ が、Miche や Hunt の式を参考に提案したのが次の式である。

$$\left. \begin{aligned} \frac{R}{H_0} &= \left(\sqrt{\pi/2\alpha} + \frac{h_0}{H} \right) K_s && ; \alpha \geq \alpha_c \\ \frac{R}{H_0} &= \left(\sqrt{\pi/2\alpha_c} + \frac{h_0}{H} \right) K_s \left(\frac{\cot \alpha_c}{\cot \alpha} \right)^{2/3} && ; \alpha < \alpha_c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 H_0, L_0 : 深水波の波高および波長、 H : 堤脚水深 h での入射波高、 K_s : 浅水係数、 h_0 : 重複波の静水面上中分面の高さ、 α_c : Miche による完全反射の限界角。そして、 h_0/H および α_c は次式で与えられる。

$$\frac{h_0}{H} = \pi \frac{H}{L} \cot h \frac{2\pi h}{L} \left\{ 1 + \frac{3}{4 \sin h^2(2\pi h/L)} - \frac{1}{4 \cos h^2(2\pi h/L)} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$\sqrt{2\alpha_c/\pi} \frac{\sin^2 \alpha_c}{\pi} = \frac{H_0}{L_0} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 L : 水深 h での入射波の波長。

上記の式、(1) および (2) の 2 式で与えられる曲線と実験結果を比較してみる。なお、式 (2) を計算する際のパラメータとして、 H_0/L_0 と α のほかに h/L_0 があるが、 H_0/L_0 と α が一定で、実験を行った範囲内での h/L_0 の変化による R/H_0 の変化はごくわずかなので、図には中間的な値の h/L_0 における曲線を与えている。横軸に H_0/L_0 を、縦軸に R/H_0 をとり勾配別に実験結果をまとめてプロットしたのが図-10 である。図中式 (1) で計算した結果を実線、式 (2) で計算した結果を破線で与えて表わしている。

図から勾配 1 : 10 では、式 (2) の曲線より式 (1) の曲線

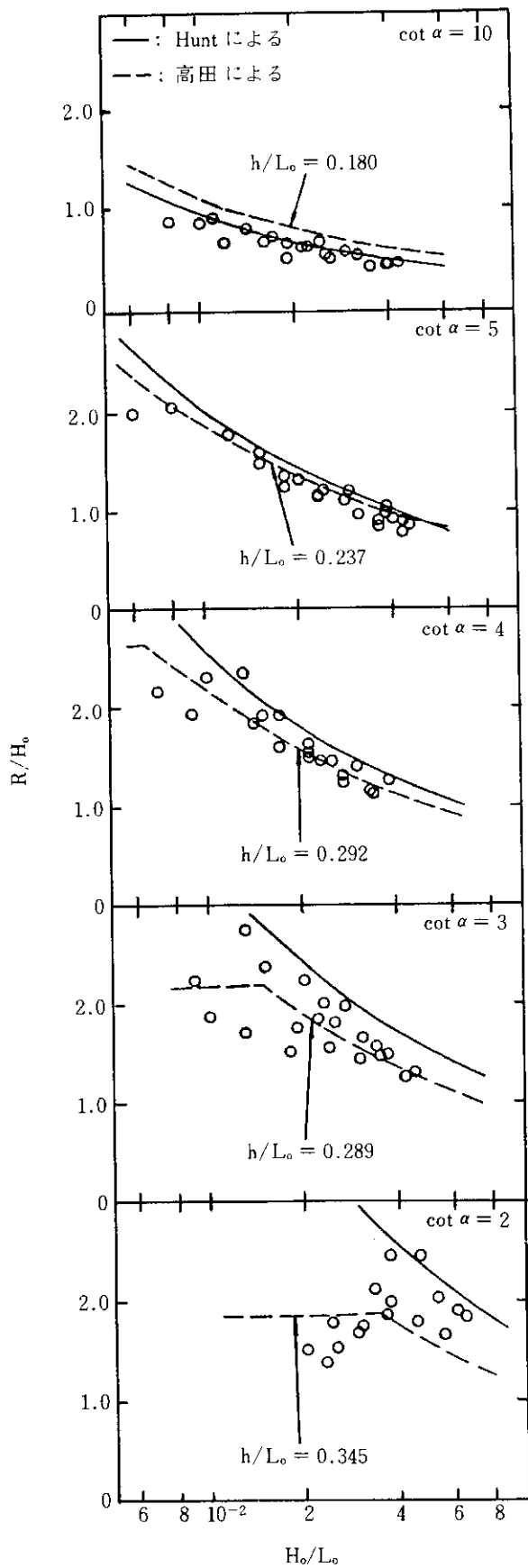


図-10 打上げ高の実験結果と Hunt および高田の式の比較

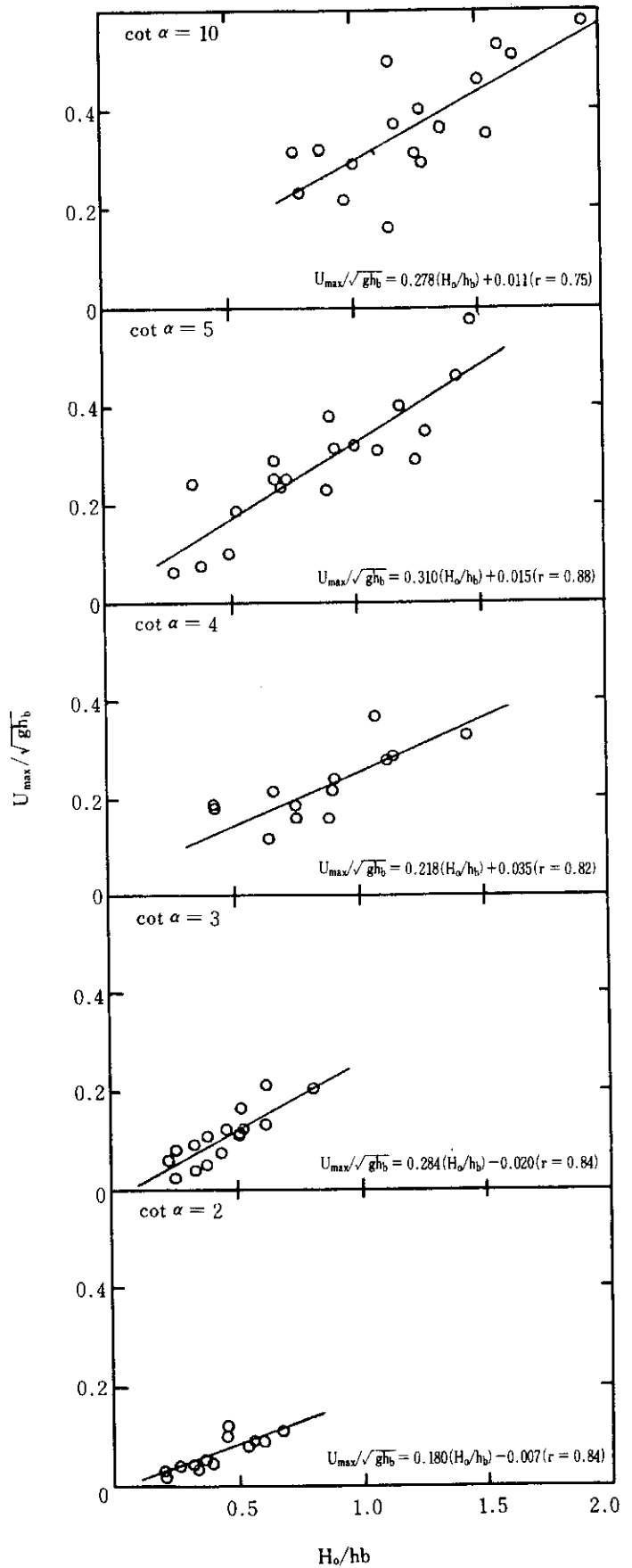


図-11 底層流速の実験値とその回帰直線

の方が実験結果により近いという傾向がある。この勾配では式(2)の適用限界 ($\cot \alpha < 8$) を越えており、その意味では式(2)の曲線が実験結果と離れているのは当然の結果といえよう。実験結果は式(1)の曲線のやや下方を曲線に沿う形で分布しており、定性的にはほぼ一致しているようなので概略の値はつかめると思われるが、定量的には多少問題が残る。

続いて勾配 1 : 5 では式(1)より式(2)の曲線が実験結果に近く、式(2)で定性的にはほぼ一致しているといえる。勾配 1 : 4 と 1 : 3 では、式(2)の曲線が定性的にも定量的にもほぼ実験値と対応している反面、式(1)の曲線は定性的に対応しているが、定量的に対応しているとはいえず、式(1)の適用範囲外では実験結果との相違がみられる。

勾配 1 : 2 ではデータのばらつきが大きい、 $\alpha < \alpha_c$ の領域 ($H_0/L_0 > 0.035$) においては、式(1)および(2)の曲線に定性的に一致しているようである。また、 $\alpha \geq \alpha_c$ の領域 ($H_0/L_0 \leq 0.035$) では著しくデータがばらついており、その分布状況と式(2)の曲線との傾向が類似しているとはいえない。勾配 1 : 3 の $\alpha \geq \alpha_c$ の領域 ($H_0/L_0 \leq 0.015$) でも同様の傾向がみられ、計算上では碎波以深領域において実験結果と式(2)の計算結果の不一致が認められる。この原因については、今後の検討を待たねばならない。

2.4 底層の流れ

図-11 は、横軸に沖波波高と碎波水深の比 (H_0/h_b) を、縦軸に底層の最大流速と碎波水深に対する長波の流速との比 ($U_{\max}/\sqrt{gh_b}$) をそれぞれとり、実験結果をまとめて勾配別にプロットしたものである。実験結果をまとめる際のパラメータは試行錯誤的に数種類設定し、それらの関係を調べたところ図に示す関係が最も簡単で、比較的实验結果の傾向と類似していると判断されたので、このパラメータを用いて実験結果の考察を進めてみる。なお、図中の直線は、 $U_{\max}/\sqrt{gh_b}$ を H_0/h_b の一次関数と仮定して異常と思われるデータを除いた実験結果をもとに、最小自乗法で求めた係数を使って描いたものである。

各勾配における回帰直線と実験結果の相関係数 (r) は 0.75~0.88 の範囲にあり、比較的高い相関性があるといえる。特に、1 : 5 以上の勾配については相関係数が 0.8 以上で高い相関関係がある。

しかし、このような簡単な式で碎波中の一水深における流速を網羅しているとはいえ、新たなパラメータの導入、式の改良などが必要であると考えられる。また、勾配の変化と最小自乗法により求めた回帰直線の係数の変化との関係を見いだすことができず、このような問題

も含めて今後の検討が必要である。

3. まとめ

造波機の起波特性を知るために、予備的に測定を行った通過波および急勾配斜面上で波が起こす諸現象のうち、波の変形、打上げ高、底層の流れを取扱った実験結果について、次のような結論を得た。

- (1) 周期が小さなケースにおいて、振幅ダイヤル値が小さな領域では、振幅ダイヤル値の増加とともに波高が大きくなる直線的な関係を、振幅ダイヤル値が大きな領域では、振幅ダイヤル値が増加しても波高があまり大きくならない曲線的な関係を示し、周期や水深が大きくなるとその傾向は弱くなる。
- (2) 勾配 1 : 10 では、碎波前の波の浅水係数は首藤による浅水係数曲線とほぼ対応しているが、今回の実験条件において、それより急な勾配ではほとんどの波が碎波していた。
- (3) 沖波と碎波水深の関係で各勾配に共通していえるのは、沖波波高が一定の場合、周期が小さくなると碎波水深も小さくなるということで、勾配の変化による沖波と碎波水深の傾向の変化は同一沖波の場合、勾配が急になるとより深い水深で碎波が起き、同一沖波波高、同一水深の場合、勾配が急になるとより小さな周期で碎波が起きる。波高計またはビデオによる解析結果において定性的な傾向は類似していたが、定量的には相違が認められた。
- (4) 各勾配の沖波と碎波波高の関係について、波高計を用いた観測結果から、勾配の変化による傾向の変化を見いだすことはできない。ビデオを用いた観測結果からは、勾配の変化による沖波と碎波波高の傾向の変化をつかむことができた。その傾向は、同一沖波の場合、勾配が急になると碎波波高はより大きくなり、同一沖波波高、碎波波高の場合、勾配が急になるとより小さな周期の波で碎波する。また、沖波と碎波波高の関係について全般的に次のようなことがいえる。
沖波波高が一定の場合、周期が小さくなると碎波波高も小さくなる。
- (5) 勾配の変化による沖波と打上げ高について、おおむね次のことがいえる。
勾配 1 : 10 においては、Hunt の提案する式の計算結果とほぼ一致するが、それより急な勾配においては実験結果と計算結果の相違がみられる。1 : 10 より急な勾配における実験結果は、高田の提案する式の計算結果とよく一致するが、計算上の碎波以深領域 ($\alpha \geq \alpha_c$) では、実験結果と計算結果の不一致が認められた。

(6) 碎波水深と底層流速の関係について、次のようなことがいえる。

無次元量 $U_{\max}/\sqrt{gh_b}$ と H_o/h_b を用い、最小自乗法で回帰直線を求めたところ、相関係数 0.75~0.88 の比較的高い相関関係があり、それは 1:10 より急な勾配に強い。また、勾配の変化と最小自乗法より求めた回帰直線の係数の変化の傾向を見いだすことができず、今後の検討が必要である。

あ と が き

碎波現象は、沖波の諸元、海底勾配などが微妙に作用し合う複雑な現象であり、特に急勾配斜面では水深の変化が急なこと、斜面からの反射波や戻り流れが無視できなくなることから、波の変形過程により複雑性を増して行く。今回は急勾配斜面上で繰り広げられるさまざまな現象のうち、波の変形、打上げ高、底層の流れの3項目を取りあげてその実験値を検討した。その結果、沖波と勾配の変化に対する碎波水深、碎波波高、打上げ高、底層の流れの変化について概略の傾向が得られたと考えている。今後は、ビデオまたは波高計を用いたときのデー

タの適否の検討や2つのデータの併用でより確実なデータが得られるか否かの検討を行い、それらから得られたデータを用いて碎波および波の打上げ現象に関する定性的、かつ定量的な傾向の把握を行っていかうと考えている。

参 考 文 献

- 1) 土木試験所：昭和 62 年度 急勾配斜面模型実験報告書，1984. 3.
- 2) 合田良実・鈴木康正・岸良康治・菊池 治：不規則波実験における入・反射分離推定法，港湾技術研究所資料 No. 248, 1976.
- 3) 土木学会：水理公式集，pp. 499-500, 1983. 1.
- 4) 合田良実：碎波指標の整理について，土木学会論文報告集 第 180 号，pp. 39-49, 1970.
- 5) Hunt, I. A: Design of Seawall and Breakwaters, Proc. ASCE. Vol. 85, No. WW 3, pp. 123-152, 1959.
- 6) 高田 彰：波の遡上，越波及び反射の関連性について，土木学会論文報告集 第 182 号，pp. 19-30, 1970.

*

*

*