

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 592 June. 1987

複断面海岸における護岸越波流量に関する模型実験

高 山 知 司
古 川 正 美
立 石 義 博

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. 実験条件および実験方法	4
2.1 実験水路と実験波	4
2.2 斜面模型床と実験ケース	5
2.3 波と越波量の測定と解析法	6
3. 複合断面海岸における波の変形特性	7
3.1 スペクトルの変形	7
3.2 波高および水位上昇量の変化	9
3.3 周期の変化	13
3.4 長周期変化	14
4. 越波流量特性	15
5. 換算天端高係数の算定法の検討	18
5.1 リーフ海岸	18
5.2 複断面地形	19
6. あとがき	21
参考文献	23
主要記号集	23
付表一 1	24
付表一 2	27
付表一 3	29

Model Tests on Wave Overtopping Rate in Multi-sloped Beach

Tomotsuka TAKAYAMA*

Masami FURUKAWA**

Yoshihiro TATEISHI**

Synopsis

Sea walls or shore banks are constructed to prevent disasters in the rear area due to the attacks of storm waves. From the view point of only the disaster prevention, it is sufficient to construct the sea walls with sufficient height. However, the construction of the high sea walls not only damages the environment in the coastal zone but also constitutes barrier for the residents to enter the beach. Therefore, recently it is requested to develop new type structure or countermeasure which is good for the prevention of disaster and also harmonize with the coastal environment.

The present paper experimentally investigates the characteristics of wave overtopping rates and wave transformation in the multi-sloped beach, which represents submerged breakwater or artificial beach located in front of sea walls. The followings are main conclusions drawn from the experiments:

1) The distributions of the wave height and wave set-up on the reef shaped beach can be estimated by the empirical formula presented by one of the authors. However, the wave set-up is underestimated by the formula under the condition of very shallow water depth on the reef.

2) In the beach which change from steep to gentle, strong wave breaking takes place on the gentle slope near the point of slope inflection. The wave breaking induces large set-up there. However, the wave height gradually approaches to the height on uniform gentle slope.

3) In the coast which changes from gentle to steep onshoreward, breaking waves on the gentle slope cease breaking on the steep slope and when the waves propagate shallower area on the steep slope the waves begin to break and the wave height decreases according to the estimation curve of wave heights in the surf zone by Goda.

4) The empirical formula for the estimation of the relative crest height ratio is presented.

5) In the case of the bottom slope change from steep to gentle, the above ratio decreases gradually, but in the case of the bottom slope change from gentle to steep the ratio increases rapidly and after the ratio reaches maximum value, it decreases steeply.

*Chief of Wave Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

**Member of Wave Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

複断面海岸における護岸越波流量に関する模型実験

高山 知 司*、古川 正 美**、立石 義 博**

要 旨

海岸護岸や堤防は、高波浪の来襲に対して背後地を災害から防ぐために建設される。防災上の観点からだけで見ると、護岸等の天端高を高くして、高波浪が越波しないようにするだけで十分であるが、護岸や堤防の天端高を高くすることは、海岸に非常に高い壁を設置することであり、海岸環境を悪化させるとともに、海浜の利用を阻害してしまうことになる。そのため、近年においては、防災上の機能を十分に有しながら、なおかつ護岸や堤防の天端高を低くすることができる防護形式が要請されてきた。このような要請の中から、新たに面的防護方式という考えが導入されてきた。

面的防護方式の一形式として、人工リーフや養浜工法があり、これらの工法では、海岸は複断面地形となる。そこで、本研究では、護岸の越波量に着目して、海底勾配が急変する複断面地形に対して水理模型実験を実施し、護岸越波流量の特性を調べた。その結果、以下のような主要な結論を得た。

- 1) 同一越波流量に対する、複断面地形での天端高と一様勾配地形での天端高との比を換算天端高係数として定義し、この換算天端高係数を算定する経験式を提案した。
- 2) 海底勾配を急勾配に変化させる場合、護岸設置位置によっては、護岸天端高を高くしなければならない場合が生じる。
- 3) 護岸天端高を低くするためには、岸側海底勾配を沖側より緩やかにする。また、岸側海底勾配を急にしなければならない場合、護岸位置を勾配変曲点から少なくとも、沖波波高の30倍以上離す必要がある。

1. まえがき

海岸護岸や堤防は、高波浪の来襲に対して背後地を守るために建設される。防災上の観点からだけで見ると、護岸や堤防の天端高を高くし、高波浪が越波しない強固な護岸や堤防を建設すればよい。しかしながら、護岸や堤防の天端高を高くすることは、海岸線上に高い壁を築くことであり、これは海岸環境を悪化させるとともに、レクリエーションとして有効な海浜の利用を阻害してしまうことになる。

そのため、近年においては、防災上の機能を十分に有しながら、なおかつ、護岸や堤防の天端高が低くできる護岸や堤防の新しい形式が要請されてきた。また一方、海浜コンクリート構造の強固な護岸や堤防を建設すると、前面の海浜が侵食され易くなり、それに伴って護岸や堤防の前面が洗掘され、護岸や堤防が倒壊に至ることが指摘されてきた。そこで、護岸や堤防の前面に新たな構造物を建設し、護岸等の前面海浜の侵食を防ぐとともに、

この構造物によって侵入波高を抑え、護岸等の天端高を低減すると同時に、護岸等の倒壊を防ごうとする考えが導入された。この考えは、従来の海岸線上で防護する線的防護方式に対して、面的防護方式と呼ばれている。

面的防護方式の形体は、既に従来からも行われており、離岸堤を設置する方式はこの方式の典型的なものである。しかしながら、面的防護方式という新たな考え方の導入は、従来のものに加え、さらに新たな型式の護岸を積極的に取り入れていこうとする姿勢の現われであるといえる。

面的防護方式の自然版としては、南西諸島によく見られる天然のコーラルリーフがある。このようなリーフは非常に高い波高減衰効果があることが模型実験¹⁾および現地観測^{2),3)}によっても明らかにされている。天然のリーフの効果を人工的に創り出そうとする考えもある。

自然海浜の砂浜もまた、波高減衰効果が高いことが知られている。このような砂浜を人工的に創出し、海水浴場として砂浜を利用するとともに、防災機能も発揮させ

* 海洋水理部 波浪研究室長

** 海洋水理部 波浪研究室

る養浜工も面的防護方式の一つである。

このようなリーフや養浜工においては、海底勾配が急変する複断面地形となる。複断面地形に対する波の打上げ高さについては、Savilleの仮想勾配法⁹⁾があるが、越波についてはほとんど研究がなされていない。越波は、護岸地点の波高および平均水位の上昇量、サーフビート等によって大きく変化し、特に波高の変化の影響が強い。これは、平均水位の上昇量やサーフビートが波の変形に関係していることによっている。また、砕波波高は波高、水深および海底勾配に依存するため、複断面地形のように、海底勾配が急変する断面は、波の変形に大きく影響すると考えられる。特に、海底勾配急変部付近で砕波が起る場合には、複断面地形の影響が強く現れると予想される。

本研究では、護岸の越波量に着目して、海底勾配が急変する複断面海岸について、水理模型実験を実施し、護岸越波流量の変化特性を調べた。リーフ海岸は、リーフ前面で1/10程度の急勾配で、リーフ上で平坦になる海岸であるため、これも海底勾配が急変する複断面海岸と考えて、越波量を検討している。他の複断面地形としては、海底勾配が1/10急勾配から1/30の緩勾配に変化する場、その逆の場合について調べた。本資料では、越波流量そのものの変化特性を検討するのではなく、同一越波量を生じる場合における、一様勾配とみなした場合の天端高に対する天端高の比、つまり換算天端高係数で越波流量の変化特性を調べている。

2. 実験条件および実験方法

2.1 実験水路と実験波

図-1は、実験に用いた水路を示したものである。この水路は、当所大型水工実験場内にある長さ30m×幅5m×深さ1.2mの水路で、仕切り壁によって幅60cmと幅4.3mの二様水深水路に分けられている。本実験では幅60cmの水路を使用した。水路の一端には、幅5cmのピストン型造波板を有する造波機が設置されており、

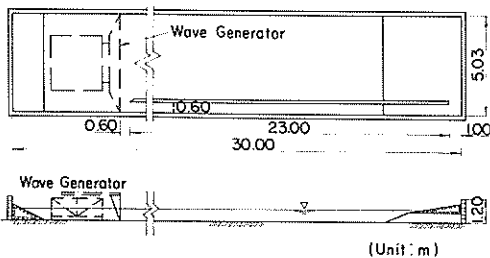


図-1 実験水路

他端には、消波用として碎石斜面が置かれている。造波機は規則波ばかりでなく、造波特性を考慮して、不規則な電圧信号を入力することによって任意のスペクトル形を持つ不規則波を発生させることが可能である。

実験波は、すべて不規則波とし、その諸元を表-1に示している。表-1の諸元は、目標とする実験波の諸元であって、護岸と造波板との多重反射によって、実際の入射波の諸元は表-1の値とは少し異なる。

表-1 目標とした実験波

WAVE	H_0 [cm]	T_0 [s]	H_0/L_0
1	10	2.31	0.012
2	15	2.83	
3	10	1.33	0.036
4	15	1.63	

表-1中の波1と2は波形勾配が0.012と小さいうねり性の波を対象にしており、波3と4は波形勾配が0.036と大きい風波を対象にしている。波1と3は有義波10cm、波2と4は15cmを目標にしている。

造波機で起こす不規則波のスペクトル形としては、式(1)で示されるブレットシュナイダー・光易型を目標とした。

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \times \exp[-1.03 (T_{1/3} f)^{-4}] \dots \dots \dots (1)$$

実験では表-1に示す同一の波の諸元に対して波速の異なる2種類の波を用いて行い、実際の入射波の諸元および越波流量はこの2種類の波の平均値として求めた。

図-2は、実際に実験に用いた入射不規則波のスペクトル形を示したものである。図中のスペクトルのピーク周期は波1で2.5s、波2で2.8s、波3で1.4s、波4で1.8sと、目標とした有義波周期に比較的近い値を示している。スペクトルの形状も式(1)に示した目標スペクトル形に比較的近いが、波の種類に関係なく、低周波側の $f = 0.05$ と0.12Hz付近にもスペクトルのピークがあらわれている。このスペクトルのピークは、実験水路の特性によるものと推測される。

実験水路の定常振動の固有振動数は、合田⁵⁾によると、以下のように算定される。ここで、図-3のような水路を考えると、この中に発生する定常振動は造波機と護岸を腹とする振動になる。波の伝播速度が各地点の水深に対応する長波の速度に等しいものとする、定常運動

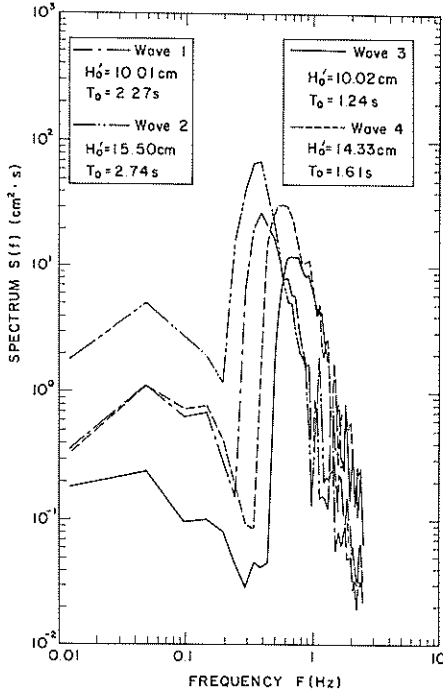


図-2 実験波のスペクトル

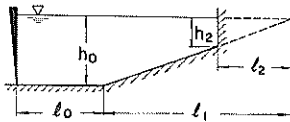


図-3 実験水路中の地形

の固有振動数は次式で与えられる。

$$f_m = \frac{m\sqrt{g h_0}}{2(l_0 + l')} \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

ここに、

$$l' = 2l' \left[1 - \sqrt{\frac{h_2}{h_0}} \right]$$

図-2で示されるスペクトルは、 $l_0 = 3.5 \text{ m}$ 、 $l_1 = 9.5 \text{ m}$ 、 $h_0 = 75 \text{ cm}$ 、 $h_2 = 0 \text{ cm}$ の状態にて測定されたものなので、固有振動数は、

$$f = 0.060, 0.120 \dots \quad [\text{Hz}]$$

となる。このように定常運動の固有周期は図-2の低周波側のピーク周波数に近く、図-2の長周期波のピークはこの定常振動によって起こったものと推測される。

2.2 斜面模型床と実験ケース

図-4(a)~(d)には、実験で用いた模型床を示す。模型床は木製で、斜面上には50cm間隔で陸上部や浅水域での波高測定のための検定箱が設けられている。図-4(a)~(c)は、勾配の異なる2種類の模型床を組み合わせた複断面地形を示し、図-4(d)は一様な1/10斜面地形を示す。

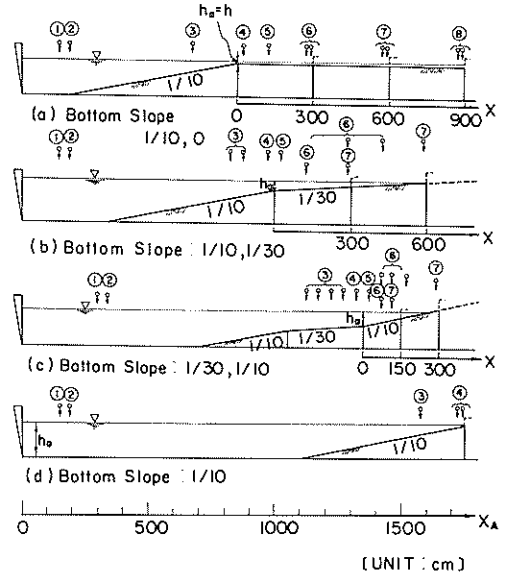


図-4 複断面模型床

海底地形の変化が護岸の越波流量に大きく影響を与える場合としては、海底勾配が急変する勾配変曲点の水深が波群中の最高波の碎波水深より浅くなっている場合だと考えられる。つまり、勾配変曲点の水深が深く、波群中のどの波でも碎波しない場合には、変曲点を通過後に碎波し始めるので、岸側の勾配上での波の碎波には沖側の勾配は影響を与えず、越波量は岸側の勾配で決まると推測される。

そこで、実験においては、図-4(a)~(c)の各複断面地形において、岸側の斜面上に直立護岸を設置し、沖側斜面上で入射波を碎波させるように配慮した。碎波水深としては、合田⁶⁾が提案した碎波指標を用いて、各波の波群中の最高波および有義波に対応する波が碎波する水深として求めた。最高波としては、実験中に起こす波の数から判断して、 $H_{\max} = 1.5 H_{1/3}$ として計算した。碎波指標から求めた碎波水深を表-2に示している。表中の $h_{b\max}$ は最高波の碎波水深で、 h_b は有義波高が碎波

表一 2 砕波水深

WAVE	i	h_b/H_0'	$h_{b\max}$ [cm]	$h_b 1/3$ [cm]
1	1/10	1.4	21	14
2			31.5	21
3		1.26	18.6	12.6
4			28.35	18.6
1	1/30	1.77	26.55	17.7
2			39.83	26.55
3		1.48	22.2	14.8
4			33.3	22.2

する水深を示している。実験条件としては、有義波高に対する砕波水深 h_b を考慮して、勾配変曲点での水深 h_a を設定した。

図一 4 (a)は、代表的な沖繩のリーフ地形を想定した複断面地形を示している。現地では、リーフの沖側で水深 20 m から 200 m、この水深から海岸はほぼ 1/10 勾配で立ち上がり、水深が 0 m から 5 m になったところで水平な礁原となる。この礁原の長さは 500 m から 2,000 m と非常に長くなっている。模型では、水路長さの制限のため、リーフ長さを最大 900 cm とした。直立護岸は、リーフ先端部から、300, 600, 900 cm の位置に設置し、水平床の長さは、300 cm の水平模型床を後に追加することによって設定した。また、リーフ上に模型護岸がある場合の越波量の減少効果の基準値として、平坦なリーフがない 1/10 一様勾配の場合についても実験を行っている。

図一 4 (b)は 1/10 の沖側急勾配から 1/30 の岸側緩勾配に海底が変化する場合を示し、図一 4 (c)は、図一 4 (b)の逆の場合で、1/30 の沖側緩勾配から 1/10 の岸側急勾配に変化する場合である。これらの図は、養浜工等によって海底地形が変えられた場合に相当する。

このような複断面地形における越波量を測定すると同時に、複断面地形上の波の変形を調べるために、複断面上での波高も測定した。波浪変形を調べる際には、護岸からの反射波を避けるために、護岸なしで実験を行ったが、リーフの場合には護岸を取り除くと背後から回り込んでくる波が発生するので、護岸を設置した状態でやっている。

波高計は全部で 7 台置いた。沖側の一様水深部には 2 台の波高計を 40 cm 間隔で設置した。この 2 台の波高計は入・反射波を分離して、入射波高を算定するのに用いた。他の 1～3 台を沖側斜面上、残り 2～4 台を陸側斜

面上に設置した。沖側から数えて①～⑦の波高計は図一 4 (a)～(c)に示すように配置した。護岸の設置位置によっては岸側斜面上の波高計位置を移動させている。波高計間隔は 50 cm を基準としているが、護岸位置によってはこれよりも広くとった場合もある。

表一 3 は実験条件を示す。表中 i_1 と i_2 はそれぞれ沖、岸側の斜面勾配、 h_0 は水路床の水深、 h_a は勾配変曲点の水深、 x は勾配変曲点から岸側方向を正とする水平座標で、 ∞ は護岸のない場合である。 h は護岸設置水深、 h_c は護岸天端高を示す。一様勾配における既存の実験効果を参照にして、無次元越波流量 $g/\sqrt{2gH_0^3}$ が 10^{-3} ～ 10^{-4} の範囲になるように、 h_c を 3 種類程度に変化させている。

2.3 波と越波量の測定と解析法

波の測定は容量式波高計を用いておこなった。波のデータは、いったん、アナログデータレコードに収録し、その後、A/D 変換をおこない、MT に収録して、当所の大型電子計算機 (Acos 1000 型) を用いて解析した。統計解析では、有義波高および有義波周期などのゼロアップクロス法で定義される波の諸元に加えて、FFT (Fast Fourier Transform) 解析によって波の周波数スペクトルを求めた。

実験においては、造波板と直立護岸との間で多重反射がおこり、実際の入射波高が目標値より増大する可能性がある。そこで、前記図一 4 (a)～(c)に示すように、造波機前面①、②の 2 台の波高計を、40 cm 間隔に設置し、これらの波高計による波形の同時記録を用いて、入・反射波の分離計算⁷⁾をおこない、入射波高を定めた。換算沖波波高は、この地点で求めた入射波高を一様水深部での浅水係数で除して求めた。

A/D 変換では、波形のサンプリング周期は 0.2 s として、1,024 個のデータを用いた。データ整理にあたっては、波高変化や、平均水位上昇など、すべて換算沖波波高 H_0' で除し無次元化した。

越波水量の集水方法は、図一 5 に示すように、直立護岸頂部に取り付けた鋼製の溝に、導水路先端の下面に取りつけた山形鋼をはめ込み、護岸天端を越えた水塊を、護岸背後に設置した集水箱に流し込んだ。越波水量によって大型と小型の集水箱 (大型 79 × 41 × 55 cm, 小型 40 × 40 × 20 cm) を使い分けた。越波量が非常に少ない場合には、メスシリンダー (2,000 ml) を用いて越波量を測定した。集水箱を用いた場合は、あらかじめ集水箱の底面積を求めておき、集水箱の水深を測定して、底面積にこれに乗ずることによって越波量を求めた。

実験で得られた越波量は、ストップウォッチで測定し

表-3 実験ケース

i_1	i_2	h_0 [cm]	h_a [cm]	Sea Wall Condition								
				X [cm]	h [cm]	X [cm]	h [cm]	X [cm]	h [cm]	h_c [cm]		
1/10	—	65	0	0	0	—	—	—	—	6		
		67.5	2.5		2.5					—	—	—
		70	5		5					—	—	—
	0	65	0	300	0	600	2.5	900	2.5	3		
		67.5	2.5		2.5					5	—	
		70	5		5					5	12.5	
1/10	1/30	70	5	300	-5	600	-15	∞	—	0		
		75	10		0		-10			—		
		80	15		5		-5			—		
		85	20		10		0			15		
1/30	1/10	55	10	150	-5	600	-20	∞	—	0		
		60	15		0		-15			—		
		65	20		5		-10			—		
		70	25		10		-5			22.5		

∞ は護岸なしの場合

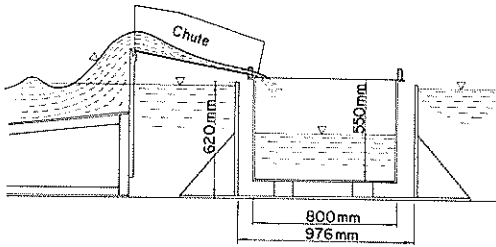


図-5 越波量の測定法

た測定時間と水路幅で除し、単位時間および単位幅当たりの越波流量 q に変換した。越波の測定時間は5分を基準にして行った。ただし、最初の1分間は波が定常になるまでの時間として、越波水が集水箱に流入しないようにした。上記越波測定時間には、定常になるまでの時間は含まれていない。また、波の測定時間中継続して集水するように努めたが、越波量が非常に多いケースでは集水箱からあふれる前に集水をうち切った。

単位幅、単位時間当たりの越波量 q の無次元量は、重力加速度 g と換算沖波波高 H_0' で定まる $\sqrt{2gH_0'^3}$ で除して求めた。

3. 複合断面海岸における波の変形特性

3.1 スペクトルの変形

図-6 (a)は、複合断面形状の中で、図-4 (a)に示すリーフ地形における波のスペクトル形の変化の一例を示したものである。この図で波は2、リーフ長さ x が900 cm、リーフ上静水深が5 cm、護岸天端高が3 cmの場合である。図中②~⑧は、前記図-4 (a)の波高計設置位置に相当し、図-6 (a)中に示してある。②は造波機前面でのスペクトルであり、③は1/10 斜面上水深22.5 cm、④~⑧はリーフ先端から25、125、590、890 cmの地点におけるスペクトルである。この図から、波が沖からリーフ奥へ進むにしたがって、入射波のピーク周波数付近におけるスペクトル値が低下すると同時に、スペクトルのピーク周波数が低周波側へ移行していく。また、低周波側のスペクトル値が増大する。

このことをさらに詳細にみると、1/10 斜面上にある③では、0.5 Hz 以上の高周波側で入射波に比べてエネルギーが増大している。この高周波数側でのエネルギー増大は、前記表-2に示したように、波2の有義波高に対する碎波水深 h_b と③の波高計の設置水深が近いこと、③の地点で多くの波が碎波し、碎波による乱れのため、高周波側でエネルギー密度が大きくなったと考えられる。③から④の地点にかけて、入射波のピ

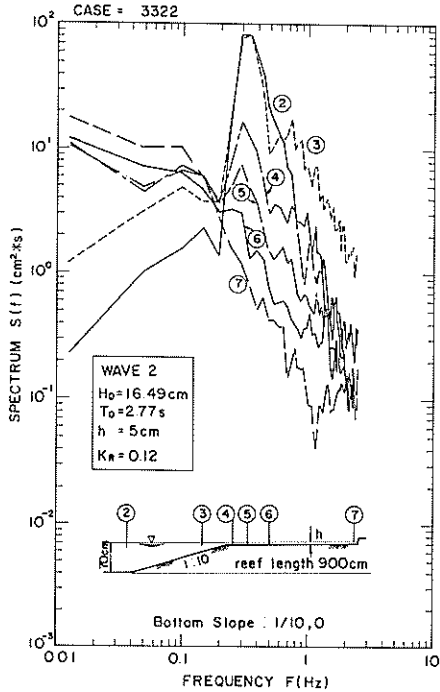


図-6(a) リーフ地形上のスペクトル

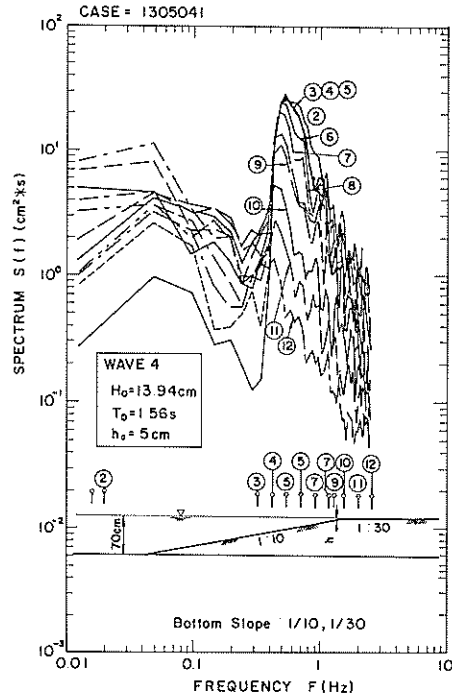


図-6(b) 急勾配と緩勾配断面地形上のスペクトル

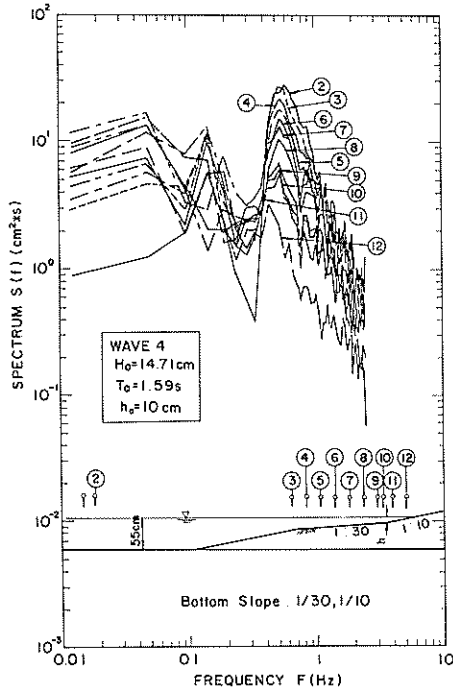
ーク周波数付近で急激なエネルギー低下が見られるが、これは、リーフ上の水深が浅いため、斜面上でほとんどの波が砕波し、リーフ上には砕波後の波が進入しているためである。さらに、リーフ奥に進むに従って、入射波のピーク周波数付近のエネルギーは減少し、①ではもはや、この周波数付近では明瞭なピークは存在しない。また、波がリーフ奥に進むに従って、高周波側のエネルギーも減少する。ただし、 $f > 2$ Hz 以上の高周波側では、ほとんどエネルギーの減少は現れない。護岸前面の⑦のスペクトルには、 $f = 1.17$ Hz 付近で、大きなエネルギーの低下が見られる。これは、直立護岸前面で重複波が生じ、護岸と波高計との距離が $f = 1.17$ Hz の成分波の $L/4$ 波長に等しくなって、重複波の節になっているためだと推測される。実際に計算を行ってみると、周波数 $f = 1.17$ Hz と水深 $h = 5$ cm より波長 $L = 57$ cm、 $L/4 = 14.25$ cm で護岸と波高計との距離 15 cm にほぼ近い値となっている。

砕波が起こるようになると、スペクトルのピーク周波数より高周波側ではスペクトルの減衰勾配は沖波の f^{-5} より緩勾配で、 f^{-3} 程度になることが報告されている。⁸⁾

本実験の場合、③の位置における $f > 1.7$ Hz の高周波側におけるスペクトルは、ほぼ f^{-2} で減少しており f^{-3} よ

り少し緩くなっている。さらに陸側に近づいても f^{-2} で減少する傾向は変わらないが、 f^{-2} で減衰する範囲が低周波数側に広がる。これは砕波によってスペクトルのピーク周波数が低周波側に移動するためである。 f^{-2} でスペクトルが低下する範囲は、④では、 $f > 0.5$ Hz、⑤では $f > 0.3$ Hz、⑥では $f > 0.3$ Hz、⑦では $f > 0.18$ Hz となる。そのため、測点が陸に近づくに従って、高周波側ではスペクトルが f^{-2} の線に平行に低下してゆくように見える。ただし、この傾向は $f > 2.0$ Hz では顕著でない。

図-6(b)は、沖側 1/10、岸側 1/30 の複断面地形における波 4 のスペクトル変化図を示したもので、直立護岸を設置しない場合のものである。②~⑩は波高測定点を示している。②は造波機前面、③~⑨は 1/10 斜面上で、③の水深は 32.5 cm、複断面変曲点の水深 h_a は 5 cm である。⑩~⑫は 1/30 斜面上にある。③~⑫はほぼ 50 cm 間隔で設置されている。この図から、③~⑤においてはスペクトルのピーク値はほとんど変化しておらず、このことはこの区間では、砕波によるエネルギー減衰が非常に少ないためと考えられる。③と⑤の測点の距離は約 1 m であるから、⑤の地点における水深は 22.5 cm となり、表-2 から有義波高に対する砕波水深は $h_b = 18.6$



図一 6(c) 緩勾配と急勾配断面地形上のスペクトル

cmであり、⑤の地点では有義波高に相当する波はまだ碎波していないことになる。⑥で碎波が顕著になり、ピーク値が減少し始める。⑥～⑨の間で、スペクトルのピーク値は⑥の0.5倍程度に低下する。⑨～⑩では、エネルギーの減衰率が⑥～⑨に比べ大きく、⑨～⑩でピーク値は⑨の0.5倍程度になり、⑥～⑨の区間における変化とほぼ同程度である。これは、水底勾配が1/10から1/30に変化していることによって起る。つまり、同一水深なら1/10勾配に比して、1/30勾配での碎波波高は低く、そのための、1/10勾配斜面上で碎波しなかった波が1/30斜面上で急激に碎波するためである。水深が浅くなるにつれて、入射波のピーク周波数付近のエネルギーは減少する。この減少は、②の測点における入射波スペクトルの低周波側減少曲線に沿ってスペクトルが低下している。そのため、各地点のスペクトルのピーク周波数は水深が浅くなるに従って低周波側へ移動する特徴を示している。また、水深が浅くなるにつれて、低周波側のエネルギー密度が大きくなっている。ただし、 $f \approx 0.05$ Hz付近のエネルギー増大は、前述のように、造波板と斜面の間での多重反射によるものが含まれていると考えられる。これら低周波数側でのエネルギー密度の増加はサーフビートの発生によって起こされ、岸

に近づくにつれサーフビートは大きくなることを示している。また、碎波が起こり始めると、高周波側でのスペクトルは、図一 6(a)と同様 f^{-2} で減少する。 f^{-2} で減少する範囲は低周波側へ移動し、⑫の最も岸側では、 $f > 0.3$ Hz で f^{-2} でスペクトルは低下する。その結果、岸に近づくに従って高周波側では f^{-2} の線に平行して、スペクトルの低下がみられる。

図一 6(c)は、沖側1/30、岸側1/10勾配の複断面地形における波4の場合のスペクトル形の変化を示したものである。この場合も直立護岸は設置していない。勾配の変曲点の水深 h_a は10 cmである。図一 6(b)と同様の特徴が見られる。複断面地形の水路床勾配の相違による影響としては、1/30勾配上の測点⑨と1/10勾配上の測点⑩では、入射波のピーク周波数付近におけるスペクトル値の差が小さいことである。これは、1/30勾配斜面上で碎波していた波が1/10勾配斜面上に進むと碎波しなくなり、そのため碎波によるエネルギー減衰が小さくなって、スペクトルの差が小さくなったものと考えられる。つまり、同一水深なら1/30勾配斜面上の波の碎波波高は、1/10勾配斜面上の碎波波高より小さく、そのため変曲点付近で碎波していた波が、1/10勾配斜面上に進むと碎波しなくなるためである。図一 6(c)には、 $f \approx 0.15$ Hz付近に顕著なスペクトルのピークが現われている。このピークが何によるものなのか明らかにできなかった。スペクトルのピーク周波数より大きな高周波側では、入射波の状態ではほぼ f^{-5} で減少しているのに対して、碎波するようになると f^{-2} で低下するようになる。 f^{-2} で低下する部分は、碎波が弱い場合にはピーク周波数よりかなり高い周波数部分のみであるが、碎波が強くなるとその部分はピーク周波数まで達する。その結果、水深が浅くなるに従って、ピーク周波数より高周波側ではスペクトルが f^{-2} に平行に低下するようになる。ただし、 $f > 2$ Hz では、スペクトルの低下は顕著でない。図一 6(a), (b)でも同じ現象が起こっており、碎波する場合のスペクトルのピーク周波数より高周波側では f^{-2} がエネルギーの平衡状態になるのではないかと考えられる。

3.2 波高および水位上昇量の変化

(1) リーフ地形の場合

複合断面地形の中のリーフ上の波の変形に関しては、いくつかの研究^{9), 10)}がなされている。著者の一人もリーフ上の波の変形¹¹⁾に関して水理模型実験を行い、波高の変化および水位上昇量を算定する実験式を求めている。また、沖縄総合事務局¹²⁾では、リーフにおける波浪の現地観測を行い、実験式の現地への適合性について検証を行った。その結果、波高の変化に対して上記実験式の実用

性を確認している。以下にその実験式を示すと、

$$\frac{H_{1/3}}{H_0'} = B \exp \left[-A \frac{x}{H_0'} \right] + a \frac{h + \bar{\eta}_\infty}{H_0'} \dots\dots\dots (3)$$

$$B = \frac{H_{1/3} \ x=0}{H_0'} - \frac{a(h + \bar{\eta}_\infty)}{H_0'} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 h はリーフ上の静水深
 $\bar{\eta}_\infty$ は $x = \infty$ での平均水位の上昇量
 A は減衰率 (= 0.05)
 a は比例定数 (= 0.33)

$H_{1/3} \ x = 0$ は合田の砕波帯内の波高略算式より求めたリーフ先端での有意波高

である。なお、上式はリーフ先端部からの距離 x が無限大となった地点での波高は一定との考えにもとづいた実験式である。この式は環礁が存在する場合についても適用可能とされている。上式中の比例定数 a は、リーフ奥での波高と水位上昇量の関係を示す値で、リーフ上に護岸を設置しない場合、 a の値は、模型実験によって $a = 0.33$ と求められている。今回の越波実験ではリーフ上に直立護岸を設置しているため、 a が多少大きくなると考えられる。図-7 はリーフの長さが 900 cm の場合における護岸前面での波高測点に対して、 $(h + \bar{\eta}_\infty)/H_0'$ と波高 $H_{1/3}/H_0'$ の平均的な関係を求めたもので、 $a = 0.454$ となった。この値は、著者らが護岸なしの場合に対して求めた $a = 0.33$ の約 1.4 倍になっており、護岸が完全反射すると仮定して、波のエネルギー合成から求めた波高に等しい。図中リーフ上水深 $h = 0$ cm の場合には、データのばらつきが見られるが、 $h = 2.5, 5$ cm は比較的良好一致している。また、波による相違はみられない。

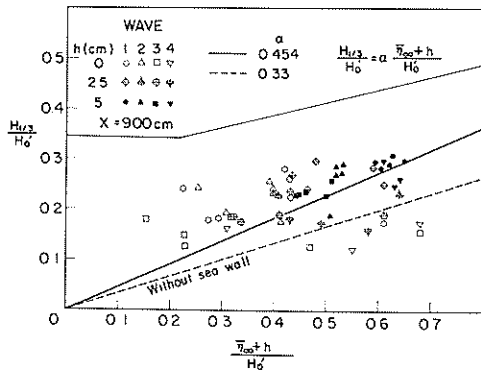


図-7 $H_{1/3}/H_0'$ と $(h + \bar{\eta}_\infty)/H_0'$ の関係

図-8 は、(3)式に護岸で波が完全反射するとして求め

た $a = 0.454$ を用いて求めた $H_{1/3}/H_0'$ の計算値と実験値を示した図である。横軸 x/H_0' は、リーフ先端部からの距離 x を沖波で無次元化したものである。リーフ上の先端部より沖側 ($x/H_0' < 0$) では、合田¹³⁾による次のような砕波変形の簡略式を用いた。

$$H_{1/3} \begin{cases} K_s H_0' & (h/L_0 \geq 0.2) \\ \min \{ \beta_0 H_0 + \beta_1 h, \beta_{\max}, K_s \} & (h/L_0 < 0.2) \end{cases} \dots\dots (5)$$

ここに、 K_s ：非線型性を考慮した浅水係数

$$\begin{aligned} \beta_0 &= 0.028 (H_0'/L_0)^{-0.38} \exp [20 \tan^{1.5} \theta] \\ \beta_1 &= 0.52 \exp [4.2 \tan \theta] \\ \beta_{\max} &= \max \{ 0.92, 0.32 (H_0'/L_0)^{-0.29} \exp [2.4 \tan \theta] \} \end{aligned}$$

$\min \{ \}$, $\max \{ \}$ はそれぞれ $\{ \}$ 内の最小値および最大値を示す。図から実験値と計算値は比較的良好一致している。 $x/H_0' = 50 \sim 60$ で実験値が多少大きくなっているが、これは護岸直前面での値であり、重複波のために大きくなったものと推定される。護岸天端高が大きく完全反射に近い場合に、波高が大きくなる傾向を示すが、それほど顕著でない。このことから、リーフ上に直立護岸を設置した場合でも、式(3)の a の値を $a = 0.454$ に増大させることによって、式(3)を用いてリーフ上の波高を推定することができることがわかった。

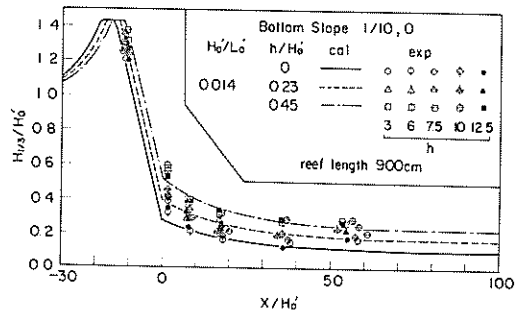


図-8 リーフにおける波高の変化

リーフ地形に関する水位上昇量は、式(4)にラディエーションストレスと平均水面勾配との釣合いを求めることによってリーフ上では、

$$\frac{\bar{\eta} + h}{H_0'} = \sqrt{C_0 - \frac{3}{8} \beta \left(\frac{H_{1/3}}{H_0'} \right)^2} \dots\dots (6)$$

ここに、

$$C_0 = \left(\frac{\bar{\eta}_{x=0} + h}{H_0'} \right)^2 + \frac{3}{8} \beta \left(\frac{H_{1/3}}{H_0'} \right)^2$$

となり、合田¹³⁾によると $\beta = 0.56$ となる。ここで、リーフ先端部 $x = 0$ における平均水位の上昇量 $\bar{\eta}_{x=0}$ は合田の求めた平均水位の算定図から求めればよい。

図-9は式(3)、(5)を用いて求めた平均水位について計算値と実験値を比較したものである。図からリーフ上の水深 h が大きい場合比較的良好に一致するものの、リーフ上の水深が非常に浅い $h = 0$ cmの場合、実験値が計算値の1.2倍程度大きくなる。この原因として図-7から a の値を求めたとき、 $h = 0$ の場合実験データに大きなばらつきがあり、 $(\bar{\eta}_x + h)/H_0'$ が小さいときは a が大きくなり、この値が大きくなると a が小さくなる傾向があったことも関係していると思われる。また、式(5)には、サーフビートによる影響項をはずしており、直立護岸を設置することによりサーフビートが増大し、その影響が現れたとも考えられる。

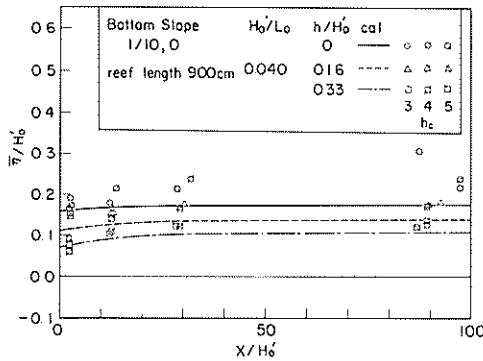
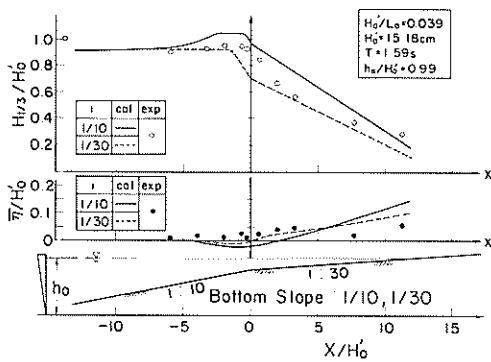


図-9 リーフ海岸における水位上昇量の変化



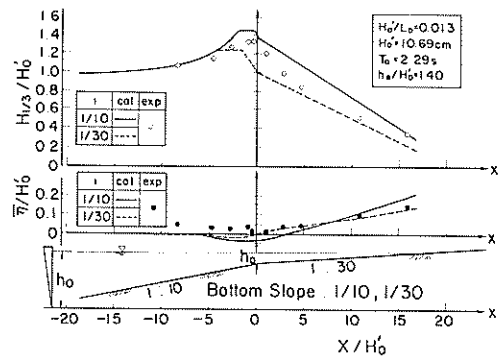
(a) 波1

(2) 複断面地形の場合

図-10は、沖側1/10と岸側1/30勾配斜面を組み合わせた複断面地形上における、有義波高 $H_{1/3}$ と平均水位上昇量 $\bar{\eta}$ の変化の例を示したものである。横軸が変曲点からの水平距離 x と沖波の比 x/H_0' を示し、縦軸に $\bar{\eta}/H_0'$ と $H_{1/3}/H_0'$ を示している。図-10(a)は有義波高が10.7 cmで、波形勾配が $H_0'/L_0 = 0.013$ と小さいうねり性の波の場合で、図-10(b)は有義波高が15.2 cmで、波形勾配が $H_0'/L_0 = 0.039$ と大きい風波の場合である。

図-10(a)および(b)の両図において、上の図が $H_{1/3}/H_0'$ の変化を示し、下の図が $\bar{\eta}/H_0'$ の変化を示している。図中の実線が、渡底勾配 i が1/10の一樣勾配とした場合、破線が1/30の一樣勾配として計算した値である。 $\bar{\eta}/H_0'$ の計算は、ラディエーションストレスとサーフビートを考慮して作成した数値計算法を用いて行い、 $H_{1/3}/H_0'$ の計算は式(5)の合田の砕波変形の略算式を用いた。1/10勾配一樣斜面について計算した $H_{1/3}/H_0'$ 、 $\bar{\eta}/H_0'$ の値を1/30勾配斜面においてプロットするときには、水深のみを合わせている。また、1/30勾配の一樣斜面として計算した値を1/10勾配上でプロットする場合も同様である。その結果、 $H_{1/3}/H_0'$ 、 $\bar{\eta}/H_0'$ の変化は、勾配の変曲点で連続している。

図-10(a)において $\bar{\eta}/H_0'$ の変化を見ると、沖側1/10勾配斜面上では、実験値の平均水位は計算値より0.05程度大きく、変曲点付近では、少し低下するが、1/10一樣勾配に対する計算値のように静水位以下になることはない。岸側1/30勾配斜面上では、実験値はほぼ1/30一樣勾配の計算値の線に沿って増大しており、計算値によく一致する。図-10(a)の場合、 $h_a/H_0' = 1.4$ と、比較的深いため、1/10斜面の影響は、1/30



(b) 波4

図-10 急勾配と緩勾配断面地形における波高および水位上昇量の変化

斜面の平均水位には、あまり影響しないようである。

$H_{1/3}/H_0'$ の変化を見ると、1/10 勾配斜面上では、 $H_{1/3}/H_0'$ が最も大きくなる箇所で、実験値が1/10 一様勾配の計算値より0.12 程度小さいけれども、傾向的には1/10 勾配の計算値に近い。1/30 勾配斜面上では、岸に近づくに従って、実験値の $H_{1/3}/H_0'$ は、1/30 一様勾配斜面の計算値に漸次近づく。このことから、沖側1/10 勾配斜面上で碎波していない波が1/30 勾配斜面上の先端部で碎波するようになり、波高減衰が大きくなったと推定される。つまり、これは、同一波形勾配の波での碎波水深は、海底勾配が緩やかなほど深くなるため、1/10 勾配斜面上で碎波しなかった波が1/30 勾配斜面先端部で碎波限界に達し、急激に碎波したことによっている。汀線付近では、実験値は1/30 勾配の計算値より大きな値を示し、1/10 勾配の計算値に近くなる。この原因については、明らかにできなかった。

図-10 (b)は波高が高く、波形勾配の大きい波4の場合である。この場合も図-10 (a)と同じ傾向を示し、1/10勾配斜面での実験による、平均水位の下降は顕著でない。また、1/30 勾配斜面上では実験値は、一様な1/30斜面の場合の計算値とよく一致する。波高は、1/10 勾配斜面上では、実験値が1/10 斜面に対する計算値より $H_{1/3}/H_0'$ の値にして0.05 程度低く、1/30 斜面に入ると、急激に波高が減少して、1/30 斜面上の計算値とよく一致するようになる。急勾配から緩勾配に海底が変化する場合には、急勾配の波高から、緩勾配の波高に突然落ちるのではなく、ある遷移領域があることを示している。

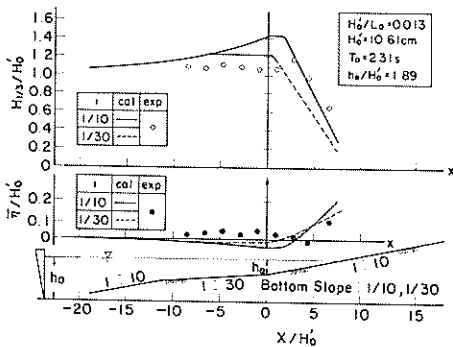
図-11 (a), (b)は、沖側1/30 と、岸側1/10 勾配斜面を組み合わせた複断面地形上における $H_{1/3}/H_0'$ と、 $\bar{\eta}/H_0'$ の変化を示した例で、図-11(a)は波形勾配の小

さいうねり性の波で、図-11(b)は波形勾配の大きい風波の場合である。

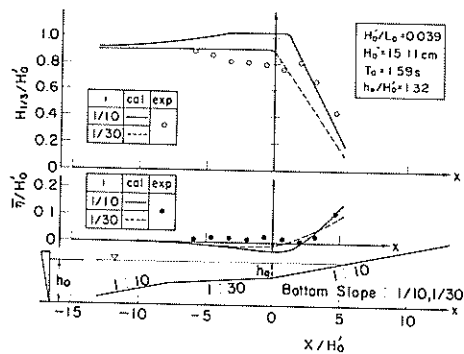
$\bar{\eta}/H_0'$ は、沖側1/30 勾配斜面上で0.05 程度、実験値が大きくなっている。岸側1/10 勾配斜面上では、変曲点に近い部分でも $\bar{\eta}/H_0'$ は、低下しつづけ、汀線付近で急激に大きくなる。しかし、汀線付近の水位上昇量は、1/10 勾配斜面における計算値には達しない。1/10 勾配斜面に進入してもなおかつ水位が低下し続けるのは、図-11(a)中の上図の $H_{1/3}/H_0'$ の変化でみられるように、1/10 勾配斜面に入射してもなおかつ波高が増大するためである。

$H_{1/3}/H_0'$ は、1/30 斜面上で、実験値が計算値より多少小さな値であるが、傾向は1/30 勾配斜面の計算値に近い。図-10 のように変曲点すぐ近傍での波高の変化はほとんどない。しかし、1/10 勾配斜面に進入すると、波高は1/10 斜面の線に達するまでは、増大をつづけ、1/10 斜面の線に達すると、1/10 勾配斜面の線に沿って $H_{1/3}/H_0'$ は低下する。これは、1/30 勾配斜面上の碎波波高が1/10の場合よりも小さく、そのため1/10の斜面に進入すると、1/30 勾配斜面で碎波していた波も、碎波しなくなり、水深が浅くなることによって、浅水変形だけで波高が増大し続け、1/10 勾配斜面の碎波曲線に達して初めて碎波することによって、配斜面の曲線に沿って下がることによる。

図-11(b)は、波高及び波形勾配の大きい波4の場合の平均水位の上昇量と、有義波高の変化を示したものである。図-11(b)における $\bar{\eta}/H_0'$ 及び $H_{1/3}/H_0'$ の変化は図-11(a)の場合と同様である。1/10 勾配斜面においては計算値が静水面下になっているのに対して、 $\bar{\eta}/H_0'$ の実験値は、静水面下に下がることはなく、そのため、実験値が計算値より、最大で0.05 高くなって



(a) 波1



(b) 波4

図-11 緩勾配と急勾配断面地形における波高および水位上昇量の変化

いる。また、1/10 勾配斜面に進入しても、変曲点近傍では、平均水位は低下し、 $x/H_0' = 2$ 以上になると、水位が上昇し始め、最終的には1/10 勾配に対する計算値に一致するようになる。1/30 勾配上で波高は、実験値が計算値より小さく、1/10 勾配斜面に侵入しても波高は減衰することなく、むしろ浅水変形で増大する。そして、波高が1/10 勾配斜面に対する計算値に一致したところから、この計算曲線に従って、波高は小さくなる。

3.3 周期の変化

図-12 は、波1に対するリーフ上の周期の分布を示した図で、横軸に x/H_0' 、縦軸には各測定の有義波周期 $T_{1/3}$ と沖波の有義波周期 $(T_{1/3})_0$ の比を取った。護岸はリーフ先端部から900 cmの場所に設置してある場合のものである。 $X/H_0' = 70 \sim 90$ の値は、護岸前面10~25 cmはなれた測点のものである。図より、 $X/H_0' < 0$ の1/10 勾配斜面上では $T_{1/3}$ の値は $(T_{1/3})_0$ にほぼ一致している。この位置の水深は15 cmと有義波高10 cmに比べて深く、この位置では碎波がほとんど起きていないと考えられる。リーフ先端部から奥では $T_{1/3}/(T_{1/3})_0$ の値は護岸天端高が低く、またリーフ上の水深が浅い場合に、1より大き

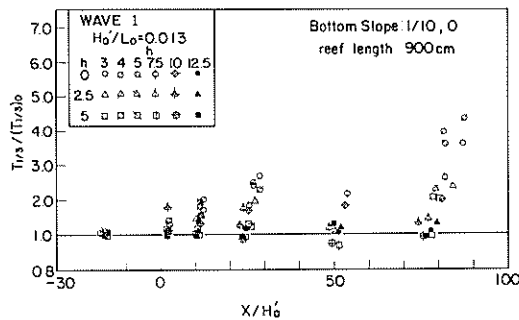


図-12 リーフ地形上における周期比

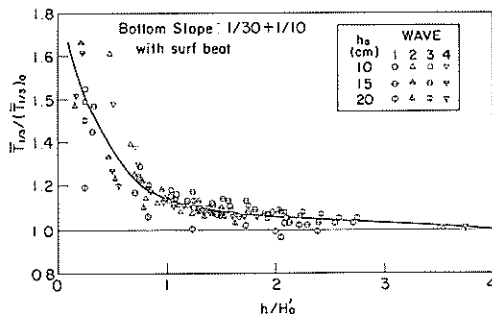


図-13(a) 複断面地形における周期比

くなる傾向があり、護岸天端高が高いと、周期の変化はほとんど生じていない。特にリーフ上の水深 h が0の場合周期増大が大きく $T_{1/3}/(T_{1/3})_0 = 4$ 程度になっている。 h が増すにつれ $T_{1/3}$ の増大は小さくなり、 $h = 5$ cmの場合、約2程度となる。また、同一水深の場合、護岸天端高が低いほど増加する。たとえば、 $h_c = 12.5$ cmの場合には、 $(T_{1/3})/(T_{1/3})_0 = 1$ であるのに対して、 $h_c = 5$ cmでは2程度、 $h_c = 3$ cmではリーフ奥で $(T_{1/3})/(T_{1/3})_0 = 4$ になる。この原因については、はっきりと言えないが、天端高が低いと越波が大きく、反射率が下がって、反射波による護岸前面波高のじょう乱が小さくなるためだと考えられる。

図-13(a)は、沖側1/30と岸側1/10勾配斜面を組み合わせた複断面地形における有義波周期の比 $T_{1/3}/(T_{1/3})_0$ を示したもので、横軸には、水深と換算沖波波高の比 h/H_0' である。図中の実線は周期の平均的な変化傾向を示したものである。この図によると、 $T_{1/3}$ は $h/H_0' = 0.5$ 付近では沖側測定点の1.2~1.6倍になっている。これら $T_{1/3}$ の増大は、サーフビートの増大および碎波後の bore 状の流れによるものと考えられる。 $h/H_0' = 0.7 \sim 2$ の区間に勾配の変曲点が存在するが、その影響ははっきりとは現れていない。このことから、 $T_{1/3}$ は海底地形の変曲点の影響を受けないと考えられる。

図-13(b)は、図-13(a)の時系列データに移動平均をかけ、サーフビートによる長周期成分を除去し、短周期成分について統計解析して求めた $T_{1/3}/(T_{1/3})_0$ を示す。移動平均は、入射波のスペクトル形の低周波側と高周波側の境界値を考慮して5秒間のデータを平均した。図-14には、時系列データから移動平均を取って求めた長周期変動の例を示している。図-13(b)の周期比は $h/H_0' = 1.5$ より沖側では、図-13(a)と比較してほとんど差がないが、 $h/H_0' = 0.5$ 付近では、1.1~1.3倍となって、図-13(a)の場合より小さくなってい

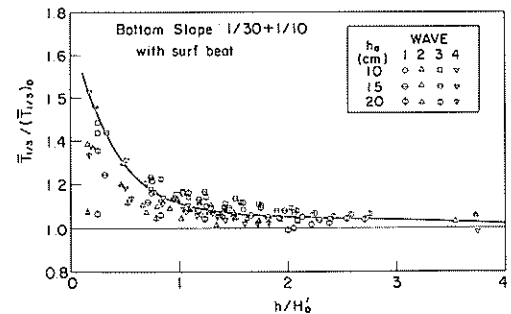


図-13(b) サーフビートを除いた場合の同期比

る。しかし、サーフビートのような長周期変動成分を取り除いてもなおかつ周期は増大することがわかる。図-6のスペクトルの変形において既に述べたように、水深が浅くなると、各地点のスペクトルはピーク周波数より高周波側では f^{-2} で低下し、各スペクトルのピーク周波数も低周波数側へ移動する。このことは、サーフビートのような長周期成分を取り除いたとしても、水深が浅くなり、砕波が起きると周期比が大きくなることを示している。

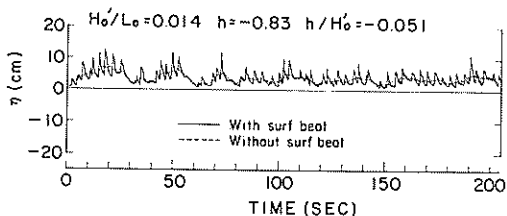


図-14 浅海部の波形およびサーフビートの波形の例

3.4 長周期変化

汀線付近で海面の変動を観測していると、数分程度の周期で海面がゆっくり変動しているのがわかる。このような長周期変動をMunk¹⁴⁾はサーフビートと名付けた。サーフビートの発生原因については、不明な点が多く、現象の見方によって変わる。サーフビートが斜面上の定常長波であるなら、沖波にこのような長周期波の成分が含まれていなければならない。また一方、サーフビートが波の非線型干渉によって生じるものであるなら、サーフビートのエネルギーは、入射波のエネルギー逸散と等しくならなければならない。

合田¹⁵⁾は、現地海岸でサーフビートを観測し、次のような関係式を求めている。

$$\frac{\zeta_{rms}}{(\zeta_{rms})_0} = \frac{0.04}{\sqrt{H_0'/L_0(1+h/H_0')}} \quad (7)$$

ここで、 ζ_{rms} はサーフビートのrms、 $(\zeta_{rms})_0$ は沖波のrms、 H_0' は換算沖波高、 L_0 は沖波の波長、 h は水深である。

ζ_{rms} としては、スペクトルの低周波数帯における波のスペクトルの積分値の平方根として求めている。本資料ではこの ζ_{rms} の計算におけるサーフビートの周波数帯の上限値 f_c として、前記図-2の入射波のスペクトル形状から判断し、表-4に示す値を用いた。合田は、今回用いたのと同じ水槽において不規則波の破波の実験を用い、水槽では、多重反射のため、サーフビートの振幅が平均で(7)式の値の1.7~2.1倍になっていることを明らかにしている。

表-4 サーフビートの上限周波数

Surf Beat	W	A	V	E
	1	2	3	4
f_c [Hz]	0.244	0.195	0.440	0.273

複断面地形上のサーフビートが、式(7)と一致するかどうか調べたのが図-15(a)~(c)である。図中、一点鎖線は、(7)式によるサーフビートの強さを示し、破線は、合田が実験値を用いて求めたサーフビートの強さを示している。破線で示した2本の線のうち上の線が、1/10勾配斜面で合田が求めた値で、式(7)の約2.1倍、下線が1/30勾配斜面での値で、式(7)の約1.7倍である。

図-15(a)は、リーフ上護岸前面におけるサーフビートを示したものである。リーフ上の水深は5cmの場合で、図から(7)式より大きなサーフビートを示すことがわかる。図からリーフ上の水深は一定であるため、横軸は波形勾配の影響だけになっている。波1と2が波形勾配 H_0'/L_0 が0.013、波3と4が0.039で、 H_0'/L_0 が大きい波で、サーフビートが強い傾向にあり、式(7)の傾向と一致する。式(7)と比較して見ると波形勾配が0.013で1.1~1.8倍、0.039で1.6~2.3倍になっている。同一波形勾配でも、波1と4が大きい。リーフの長さ x が長くなると、サーフビートが多少小さくなっている。また、図には示していないが、リーフ上の水深が小さく $h=0$ の場合、波1および2で式(7)の0.8~1.2倍、波3および4で1.0~1.5倍となっている。

図-15(b)は、沖側1/10勾配と岸側1/30勾配を組み合わせた複断面地形における、各測点のサーフビートの強さを示している。図から、汀線付近から陸上にかけてはサーフビートが減衰し、式(7)の約1~0.6倍になっている。このサーフビートの減衰は、陸上部で波形を測定しているために、みかけ上起こるものである。汀線付近から沖にかけては、海底勾配が1/10であるにもかかわらず、ほぼ1/30勾配斜面上の破線に一致して、減衰している。このことは、汀線から陸上部における斜面勾配が、サーフビートの振幅をおさえしていると推定される。波の種類によるサーフビートの相違は、顕著ではない。

図-15(c)は、1/30勾配と1/10勾配斜面模型を組み合わせた複断面地形における各測点のサーフビートの強さを示したもので、斜面の変曲点の水深は、 $h_a=10$ cmである。図より、各測点のサーフビート強さは、波形勾配の小さい波1および2で式(7)の1.4~1.9倍、波形勾配

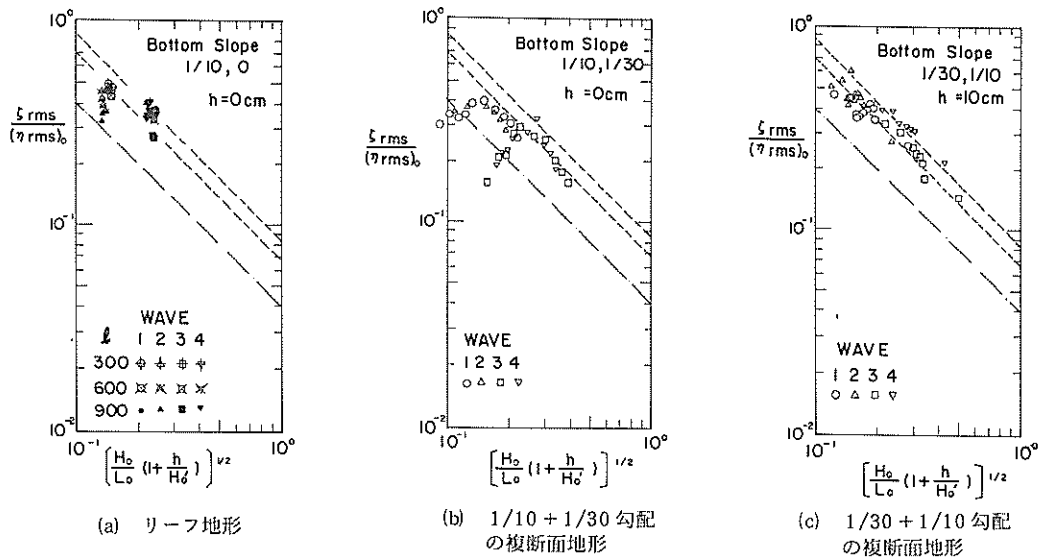


図-15 複断面地形におけるサーフビートの振幅比

配の大きい波3および4で1.4～2.3倍である。図-15(c)は、砕破点より岸側の斜面勾配が1/10勾配であるため、図-15(b)に比べ、サーフビートが大きくなったものと考えられる。

以上のように、サーフビートの強さは、合田の示した $[H_0/L_0(1+h/H_0')]$ に比例するだけでなく、汀線近傍における海底勾配にも関係しているように思われる。

4. 越波流量特性

実験で得られた越波流量 q は、まず $q/\sqrt{2gH_0'^3}$ の形に無次元化した。そして、各水深ごとに無次元越波流量を相対天端高 h_0/H_0' に対してプロットした。この際問

題となるのは、水路内に発生するサーフビートが現地観測したものより、護岸と造波板との間での多重反射によって大きくなることである。そのため、実験で用いた護岸設置水深と護岸天端高を補正する必要がある。補正は、サーフビートの増幅により平均水位が上昇するとして、護岸設置水深を大きく見積もり、それだけ天端高を小さく見積ることによっておこなった。表-5は合田が1/10および1/30一様勾配斜面上に直立護岸を設置した場合について、平均水位およびサーフビートの推定値と水深補正量を示したものである。

リーフ地形に対しては、現地でリーフ上のサーフビートを観測した例がないので、実験地が大きいか小さいか一概にはいえない。そこで、リーフ上でのサーフビート

表-5 合田による水深の補正量

水深	水底勾配 1/30						水底勾配 1/10								
	WAVE														
	1,		2		3,		4		1,		2		3,		4
h [cm]	$\bar{\eta}$ [cm]	ζ_{rms} [cm]	Δh [cm]	$\bar{\eta}$ [cm]	ζ_{rms} [cm]	Δh [cm]	$\bar{\eta}$ [cm]	ζ_{rms} [cm]	Δh [cm]	$\bar{\eta}$ [cm]	ζ_{rms} [cm]	Δh [cm]	$\bar{\eta}$ [cm]	ζ_{rms} [cm]	Δh [cm]
10.0	1.7	2.6	1.5	1.3	2.4	1.5	1.9	2.3	1.3	1.6	2.3	1.5	1.6	2.3	1.5
5.0	1.9	2.3	1.5	1.3	2.1	1.5	2.9	2.3	2.3	2.0	2.2	1.5	2.0	2.2	1.5
0.0	2.6	1.9	1.5	2.0	1.6	1.5	5.0	2.2	2.2	3.5	1.9	2.0	3.5	1.9	2.0
- 5.0	—	—	—	—	—	—	7.6	1.6	1.6	6.3	1.1	2.0	6.3	1.1	2.0

による水深補正量を次のようにした。リーフ長さ $x = 0$ の場合は、1/10 一様勾配と同じなので表-6 の補正量を用いた。リーフ奥での補正量は各リーフ長さにおける護岸前面の ζ_{rms} と表-5 の $\zeta_{rms\phi}$ の比を取って、 $x = 0$ の補正量に乗じた。その結果リーフ長さおよび水深による差は小さく、波による差だけになった。その結果を表-6 に示す。補正量は H_0' で無次元化している。

沖側 1/10 および沖側 1/30 の複断面地形およびその逆については、波の変形実験時に測定した波のデータから、護岸設置水深付近の ζ_{rms} および入射波の $\zeta_{rms\phi}$ を求め、 $\zeta_{rms\phi}$ を式(7)に代入して求めた (ζ_{rms})₀ と ζ_{rms} を用いて、両者の差 $\zeta_{rms} - (\zeta_{rms})_0$ として補正値を求めた。また、汀線より陸上部に護岸を設置した場合は、補正量は 0 とした。表-7 には、これらの補正量を示した。補正量は H_0' で無次元化している。

表-6 リーフ地形による補正量

X[cm]	h[cm]	WAVE			
		1	2	3	4
0	0	0.17	0.17	0.13	0.13
	2.5	0.13	0.13	0.1	0.1
	5	0.13	0.13	0.1	0.1
300	0				
600	2.5	0.11	0.09	0.06	0.06
900	5				

表-7 複断面地形における補正量

h[cm]	WAVE			
	1	2	3	4
0				
5	0.25	0.50	0.25	0.50
10				

補正を行った護岸天端高 h_c と護岸設置水深と $q/\sqrt{2gH_0'^3}$ の関係をプロットした例が図-16 と図-17 である。

図-16 は、リーフ地形における越波流量特性の一例を示したもので、リーフ長さと沖波の比 x/H_0' ごとに分類した。図中一点鎖線は、合田ら¹⁰⁾が作成した越波流量算定図から読み取った値で、破線はリーフ長さ $x = 0$ の場合における実験値で、実線はそれぞれのリーフ長さにお

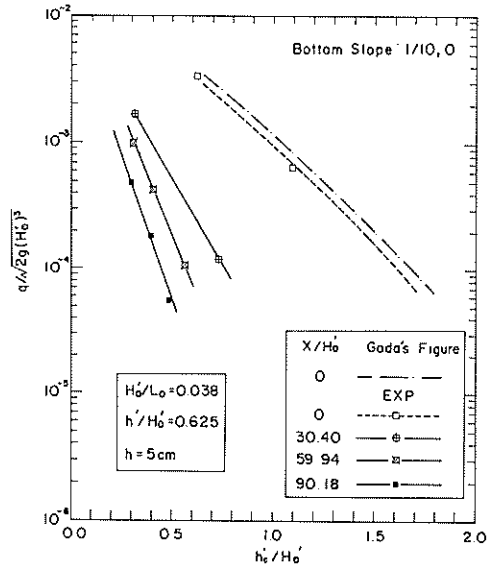
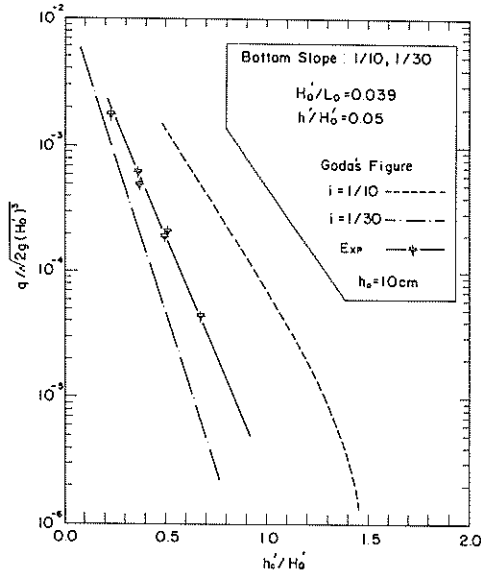


図-16 リーフ地形による越波流量図

ける実験値である。リーフ長さ $x = 0$ の場合には、1/10 一様勾配斜面となり、合田の算定図が利用できる。そこで、算定図から求めた値と実験値とを $x/H_0' = 0$ の場合について比較してみると、図-16 の点線と一点鎖線のように比較的よく一致した。図-16 に示す例の場合には両者の一致はよかったが、条件によっては差の大きい場合があった。そこで、リーフ長さによる越波流量低減効果を見るために用いるリーフ先端での無次元越波流量としては実験値を用いた。 x/H_0' が大きくなるほど無次元越波流量の曲線が下に位置しており越波流量が減少することがわかる。この傾向はリーフ水深が異なっても、また波の条件が変化しても同じであった。

図-17 は、沖側 1/10 勾配、岸側 1/30 勾配の複断面地形における越波流量特性の一例を示したものである。このとき斜面勾配の変曲点の水深は $h_a = 10$ cm の場合で、直立護岸は変曲点から岸側 $x = 300$ cm の 1/30 勾配斜面上にある。破線および一点鎖線は、護岸設置水深に対する算定図から読み取った値で、前者が海底勾配 $i = 1/10$ で後者が $i = 1/30$ の場合、実線が実験値を示している。無次元越波流量の実験値は、斜面勾配の影響を受け 1/10 と 1/30 勾配の算定値の中間にあるが、1/30 の一様勾配の曲線に近く、1/30 勾配の影響が強いことがわかる。しかし、実験条件によっては、1/30 勾配に対する無次元越波流量曲線よりも小さくなる場合も生じ、複合断面にすることによって大きな効果が見込まれる場合も生じた。

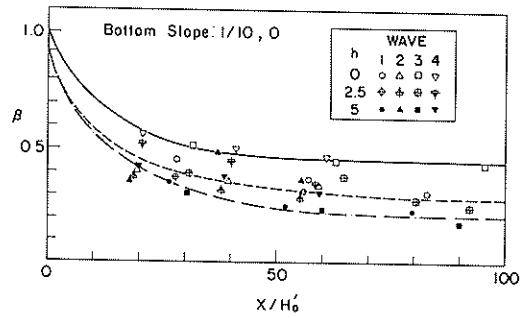


図一七 複断面地形における越波流量図

これら越波流量特性図から、同一無次元越波における護岸天端高の比を換算天端高係数 β として定義してとりまとめた。リーフ地形の場合には換算天端係数 β は、リーフ端に護岸がある場合の護岸天端高に対する、リーフ上の護岸天端高の比で β を定義した。複断面地形における換算天端係数 β は、沖側海底勾配がそのまま続くと仮定したときに、護岸の設置水深が同じ地点での護岸天端高に対する複断面地形に設置した護岸天端高の比を示している。そのため、1/10 勾配から1/30 勾配に変わる場合には一様な1/10 勾配の越波量を基準にし、逆の場合は1/30 勾配を基準にして β を求めている。換算天端高係数 β が1より大きい場合、複断面の影響で一様斜面より天端高を高くしなければならぬことを示し、1より小さい場合には、 β 倍だけ天端高を低くすることができることを示している。

天端高を推定するための無次元越波流量としては、 10^{-3} 、 5×10^{-4} 、 10^{-4} を基準としたが、換算天端高係数は、三者とも、ほぼ同じであったので、 β の値としては求めた β の3つの値を平均して求めた。

リーフ地形に対して、 β と x/H_0' をプロットしたのが図一八で、図からわかるように β の値は、リーフ先端部で急激に減小し、 $x/H_0' = 20$ 付近では、0.4~0.6程度に下がり、さらにリーフが長くなると、ゆるやかに減少する。リーフ上の水深が深くなると、 β の値は小さくなって、リーフ上の水深が深いほどリーフによる天端高低減効果がよいということになる。この理由として、



図一八 リーフ地形における β の値

図一九で示したように、リーフ上の水位上昇量は、リーフ上の水深が大きいほど小さいためと考えられる。この傾向から判断すると、リーフ上の水深が深くなればなるほど、 β が0に近づくことになるが、実際には β が小さくなるための限界の水深があると考えられる。例えば、リーフの水深が非常に深く、リーフ上の波が砕波しない場合には、リーフ上の波高は水深波長比で決まり、リーフ上ではどこでも波高が同じになって、 $\beta = 1$ に近づくことが予想される。つまり、リーフ水深が深くなればなるほど、 β が小さくなるという傾向には限界のリーフ水深があり、それ以上深くなると β の値は増大して1に近づくことと推定される。

図一十九は、沖側1/10 勾配、岸側1/30 勾配を組み合わせた複断面地形において、変曲点から直立護岸設置地点までの水平距離 x を H_0' で無次元化した値を横軸に、縦軸には、 β を示した。 $\beta = 1$ の場合、複断面地形の影響がないということの意味している。図から、 x/H_0' が大きくなると β の値は小さくなり、特に変曲点の水深が小さい場合に、 β の値は小さくなる傾向がある。これは、変曲点の水深が浅いと1/10 勾配斜面上でも波は砕波し、また、1/10 斜面で砕波しない波も1/30 斜面では砕波するようになり、急激に波高を減じるようになるためである。このことは、図一十の波高変化図からも類推できる。

図一二十は、沖側が1/30 勾配、陸側が1/10 勾配のとき β の値を示している。 $x/H_0' = 0$ のときに、 $\beta = 1$ であるから、 β は急激に大きくなって急勾配で低下する。この低下は、護岸が汀線付近から陸上部に存在するとき生じている。実験では x の値は2種類しか行っておらず、1つは護岸設置位置が1/10 勾配の水中部、他の一つは陸上部となっていた。そのため、陸上部の護岸で越波が生じなくて、一点しかプロットできない場合もあった。一般に、 h_a/H_0' が大きい場合に、 β の値が大き

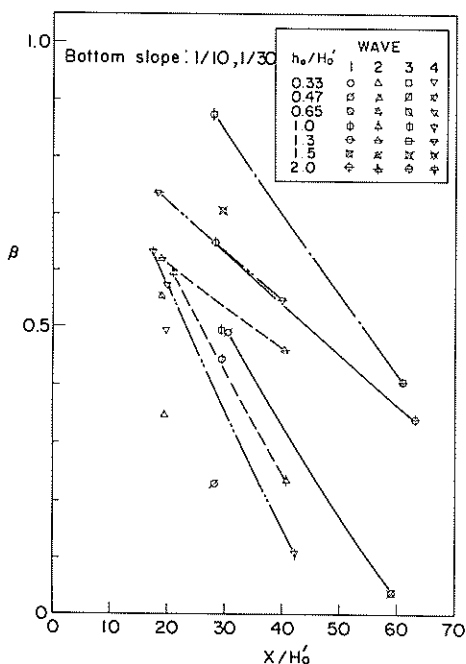


図-19 急勾配と緩勾配におけるβの値

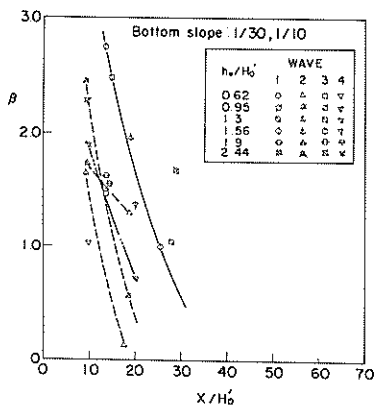


図-20 緩勾配と急勾配におけるβの値

なっているようである。

5. 換算天端高係数の算定法の検討

5.1 リーフ海岸

図-18 で示したように、海底が1/10 勾配から平坦になるリーフ地形における換算天端高係数βの変化は、図-8 に示したリーフ上の波高変化に非常に類似した傾向を示す。つまり、換算天端高係数はリーフ先端部付近

で急激に小さくなり、リーフ奥に進むにつれて、一定値に漸近する傾向を示す。そこで、式(3)で示されるリーフ上の波高変化推定式を参照にして、βの値が次式で推定できると仮定した。

$$\beta = \exp \left[-A_r \frac{x}{H_0'} \right] + B_r \frac{h + \bar{\zeta}_{x=\infty}}{H_{x=0}} \times \left\{ 1 - \exp \left[-A_r \frac{x}{H_0'} \right] \right\} \dots\dots(8)$$

ここに、 $H_{x=0}$: リーフ先端部での有義波高

$\bar{\zeta}_{x=\infty}$: リーフ奥での水位上昇量

A_r : 換算天端高係数の減衰率

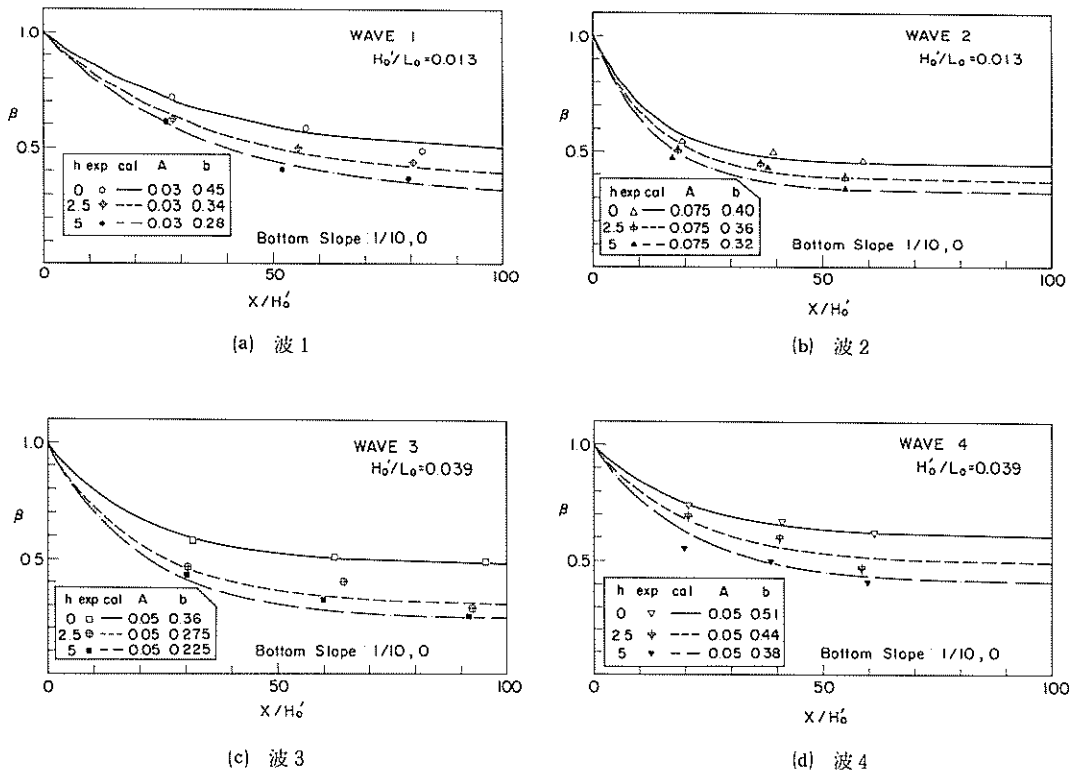
B_r : リーフ上の実水深に対する比例定数

式(8)は、 $x=0$ のリーフ先端で $\beta=1$ となり、先端部からリーフ奥に進むにつれて、βは急激に減少し、リーフ奥では $\beta = B_r(h + \bar{\zeta}_{x=\infty}) / H_{x=0} = 0$ と、一定値に近づく関数である。 A_r および B_r は実験値の変化を最もよく再現する値を用いることにした。 $H_{x=0}$ は合田によって与えられた式(5)の簡略式を用いて推定し、 $\bar{\zeta}_{x=\infty}$ については、模型実験で $x=9$ m地点での水位上昇を与えて、 A_r 、 B_r を算定した。

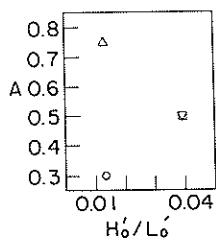
図-21 (a)~(b)は最適な A_r および B_r の値を用いて、βの変化を波の種類ごとに示したものである。図-21 (a)~(d)で示されているように、 A_r 、 B_r を変化させることによって、実験値のβの値の変化をかなりうまく表すことができる。しかし、 A_r の値は図-22 に示すように波の種類ごとに変化し、波1では $A_r = 0.03$ 、波2では $A_r = 0.075$ 、波3と波4では0.05となった。波3および4の A_r の値はリーフ上の波高変化の推定に用いたAの値と一致する。

一方、 B_r の値は、波の種類および h/H_0 の値によって変化することがわかった。図-23は、 B_r の値を $h/H_{x=0}$ に対してプロットした値である。 B_r の値は、 $h/H_{x=0}$ の値が大きくなるほど、つまり、リーフ上の水深がリーフ先端部での波高に比して大きくなるほど、小さくなり、ほぼ $h/H_{x=0}$ の値に対して線形的に減少する。 B_r の減少勾配は波の種類によらずほぼ一定で、 $dB_r/d(h/H_{x=0}) \approx -0.1$ 程度である。 $h/H_{x=0} = 0$ における B_r の値は、波形勾配が0.013の場合には0.43程度、波形勾配が0.039の場合には波高が大きくなるほど大きくなり、実験で $H_0' = 10$ cmの場合には $B_r = 0.37$ 、 $H_0' = 15$ cmの場合には $B_r = 0.53$ になる。

以上の結果、 A_r および B_r の値について、明確に決定できなかったが、 A_r の値としては、風波のような波形勾配の大きい、 $H_0/L_0 = 0.039$ 程度では $A_r = 0.05$ 波形勾配の小さいうねりのような場合、波高が大きいと、



図一 21 リーフ海岸における換算天端高の変化

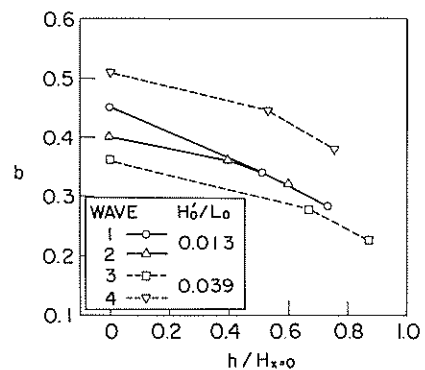


図一 22 波形勾配による A_r の変化

A の値を大きくし、小さいと小さくする必要がある。この A_r の値としては、図一 22 を参考にする。また、 B_r の値については、 $h/H_{x=0}$ の値が小さくなれば増大させて、図一 23 を参考にして決定する。

5.2 複断面地形

海底勾配が $1/10$ の急勾配から $1/30$ の緩勾配へ変化する場合、また、 $1/30$ の緩勾配から $1/10$ の急勾配へ変化する場合について越波実験を行い、換算天端高係数



図一 23 リーフ上の水深による B_r の変化

β として、沖勾配と同じ値の一樣勾配の地形に対して同じ水深に対応する天端高に対する複断面地形での天端高の比として定義して求めた。ただし、天端高の比は同一の無次元越波流量を生じるときの天端高で求めている。

その結果、図-19および20に示したように、急勾配から緩勾配に変わる場合には、換算天端高係数 β は漸次1より小さくなり、緩勾配から急勾配に変化するには、 β は1より急激に大きくなり、最大値をとってからは急激に減少し、汀線付近から陸上部に護岸がある場合には $\beta < 1$ になる傾向を示した。

一方、波高変化については、急勾配に変わる場合、図-10に示したように勾配が急変する変曲点付近で波高は急激に減少し、全域が緩勾配とした場合の波高に近づくことがわかった。また、緩勾配から急勾配へ変化する場合、図-11に示したように勾配の変曲点付近では緩勾配で砕波していた波は砕波しなくなるが、全域を急勾配としたときの砕波水深まで進行すると、再び砕波し始め、その波高は一樣急勾配斜面の波高に近いことがわかった。

このような、換算天端高係数の変化および複断面上の波高変化に配慮して、換算天端高係数 β が次式で与えられると仮定した。

$$\beta = \exp \left[-A_f \frac{x}{H_0'} \right] + \frac{H_0'}{H_{x=0}} \times \left\{ \beta_0 + \beta_1 B_f \left(\frac{h}{H_0'} + i/\sqrt{H_0'/L_0} \right) \right\} \times \left\{ 1 - \exp \left(-A_f \frac{x}{H_0'} \right) \right\} \dots \dots (9)$$

ここに、 x ：勾配変曲点から陸方向への水平距離

$H_{x=0}$ ：変曲点での有義波高

h ：護岸設置水深

A_f ：換算天端高係数の減衰率

L_0 ：沖波波長

B_f ：波高増大係数

β_0, β_1 ：岸側勾配斜面における合田の砕波変形の略算式で与えられる係数

式(9)において、 $\exp \left[-A_f x/H_0' \right]$ の項は沖側斜面から岸側斜面に波が進んだとき、波高が岸側斜面上の波高に近づいてゆくことを考慮して導入している。また、 $i/\sqrt{H_0'/L_0}$ の項は、サーフシミュリティパラメータと呼ばれ、汀線での波のうちあげ高に關係した項で、この項の値が大きくなれば、この値に比例してうちあげ高が増大する¹⁷⁾ことが知られている。図-10および11でわかるように、汀線付近の波高が少し増大しており、この波高増大が越波に影響するとして導入した。

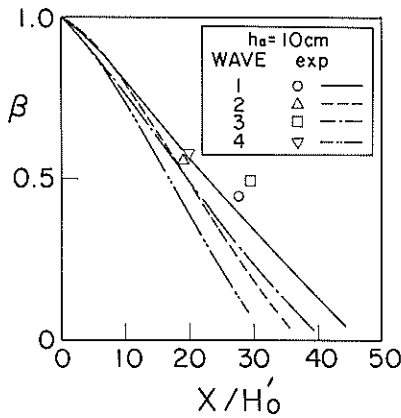
図-24(a)~(d)は、1/10の急勾配から1/30の緩勾配に変わる地形において、式(9)によって β の値を求め変曲点の水深ごとにプロットしたものである。縦軸に β の値、横軸に x/H_0' の値を示している。図-24(a)~(d)

はそれぞれ変曲点の水深が $h_a = 5, 10, 15, 20$ cmの場合である。図-24では $A_f = 0.1$ および $B_f = 1$ で計算している。 $A_f = 0.1$ とリーフの場合より大きくしたのは、岸側斜面が勾配をもつことによって波高減衰が大きくなると推定したからである。変曲点の水深が浅いと、 β の計算値は x/H_0' の増大とともにほぼ直線的に減少する。一方、水深が深く波高が小さい場合には、 x/H_0' が小さい場合はゆっくりと、 x/H_0' が大きくなると、直線的に減少する。実験値は、 x/H_0' の値を変えた多くの点で実験していないので、明確な判断はできないが、 x/H_0' の増大とともに減少しており、式(9)で求まる β の変化傾向と一致している。また、波高の小さい波1および3で β の値が大きくなる傾向も、計算値と実験値で一致している。このように、 β の全体的傾向を式(9)はよく表しているものの、 β の値については、実験値が計算値の2倍程度大きくなる場合がある。特に、実験値と計算値との差は、 $x/H_0' > 30$ となる汀線から陸上部にかけて大きくなる。

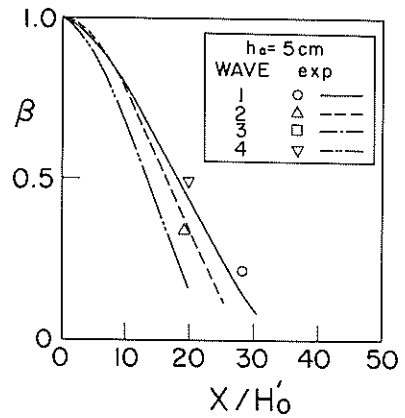
図-25(a)~(d)は、1/30の緩勾配から1/10の急勾配に変わる地形において、式(9)で β の値を計算し、変曲点の水深ごとにプロットしたものである。計算値がなるべく実験値に近い値になるように、 A_f および B_f の値を変化させて計算している。その結果、 $A_f = 0.1$ と図-24の値と一致し、 B_f の値については、変曲点の水深によって変化し、 $B_f = 1.5 \sim 2.0$ の値になった。

計算された β の値は、 x/H_0' の増大とともに急激に増大し、 $x/H_0' = 5 \sim 10$ の間で最大値をもち、 x/H_0' がさらに大きくなると、急激に低下する傾向を有する。 β の最大値は波の種類および変曲点の水深で異なる。変曲点の水深が10、20 cmの図-25(a)~(c)では B_f の値が1.5と小さく、そのため β の最大値は1.6~2.5となるが、変曲点の水深が15および20 cmの場合は $B_f = 2.0$ となり、 β の最大値は非常に大きく、2~5程度になった。変曲点での水深によって、 B_f の値の変化に一般的傾向はないようである。計算値は実験値の傾向をよく表してはいるが、 β の最大値が計算値のように大きくなるかどうかについては確認できなかった。

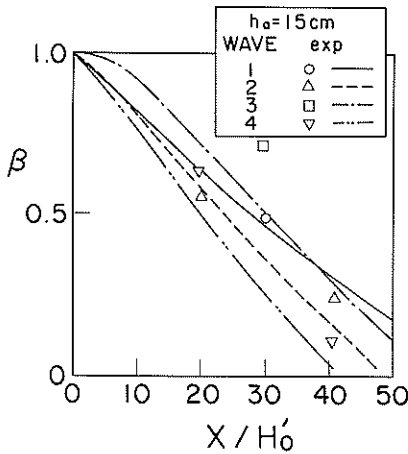
このように、緩勾配から急勾配に海底勾配を変化させることは、 $\beta > 1$ となって護岸天端高を高くしなければならず、得策ではないようである。ただし、この場合でも、汀線から陸側に護岸がある、 $x/H_0' > 20 \sim 30$ では、 $\beta < 1$ となって、護岸天端高は低くすることができる。以上の結果は緩勾配の海岸を急勾配にする場合には、 $x/H_0' > 30$ の陸上部に護岸を設置する必要があることを示している。



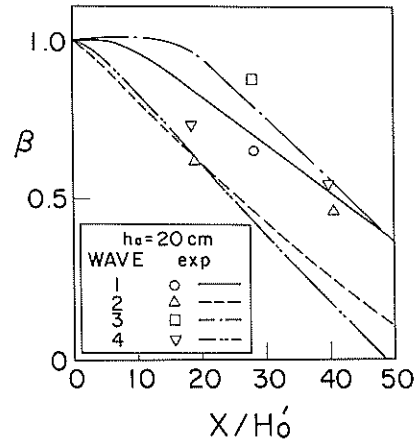
(a) $h_a = 5 \text{ cm}$



(b) $h_a = 10 \text{ cm}$



(c) $h_a = 15 \text{ cm}$



(d) $h_a = 20 \text{ cm}$

図-24 急勾配から緩勾配へ変化する地形の換算天端高係数

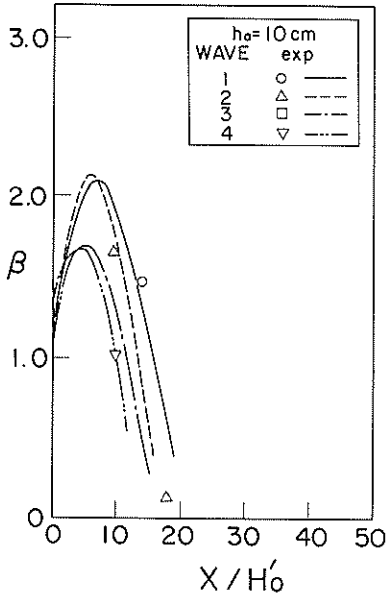
以上のように、複断面地形における換算天端高係数の算定法について検討して、式(9)のような推定式を提案したが、式(9)による換算天端高係数の計算値は、実験値の変化傾向をよく表しているものの、数値としては2倍程度異なる場合もあり、推定精度としてはまだ十分でない。しかし、式(9)によって、換算天端高係数の全体的傾向は十分把握することができる。換算天端高係数の変化傾向から、複断面地形について次のことがいえる。

1) 海底地形を緩勾配の地形に変化させると、護岸天端高を低下させることができる。ただし、勾配変曲点の水深は沖波波高の1.5倍以下がよい。

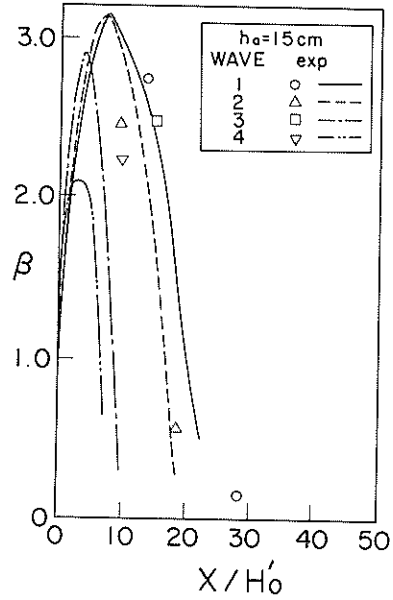
2) 海底地形を急勾配の地形に変化させると、護岸設置位置によっては天端高を高くしなければならない場合が生じるので、護岸は勾配の変曲点位置から十分に離し、陸上部に設置する。変曲点から護岸までの水平距離としては、沖波波高の30倍以上は離すことが重要である。

6. あとがき

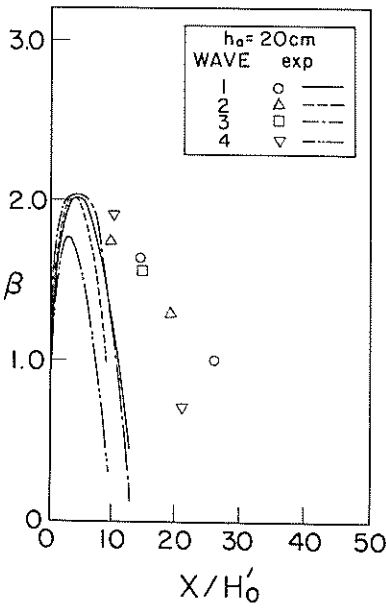
本研究では、海底勾配が変化する複断面海岸について水理模型実験を実施し、護岸越波流量の変化特性について調べた。その結果、得られた主要な結論は以下のとお



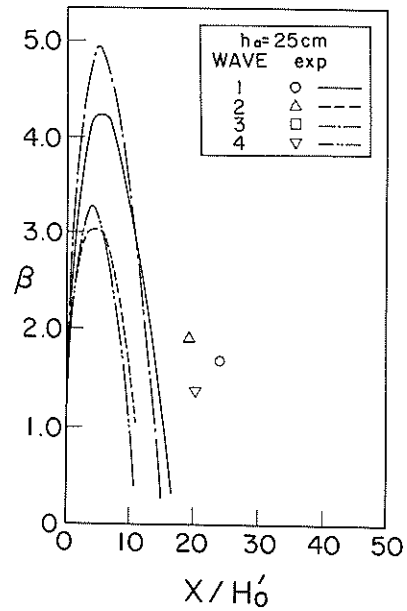
(a) $h_a = 10 \text{ cm}$



(b) $h_a = 15 \text{ cm}$



(c) $h_a = 20 \text{ cm}$



(d) $h_a = 25 \text{ cm}$

図-25 緩勾配から急勾配へ変化する地形の換算天端高係数

りである。

1) リーフ地形における波高分布および水位分布は、リーフ上に直立護岸がある場合でも、著者の1人が提案している算定式で推定できる。ただし、リーフ上の水

深が非常に浅い場合、水位上昇量については、計算値が少し小さい。

2) 海底勾配が急勾配から緩勾配に変化する地形では、変曲点付近の緩勾配上で強い砕波が起り、波高が急

激に低減して、全域を一様な緩勾配としたときの波高に近づく。また、平均水位の上昇量は緩勾配上で急激に増大するけれども、全域一様緩勾配としたときの水位上昇量と汀線付近では大きく変わらなかった。

- 3) 海底勾配が緩勾配から急勾配に変化する地形では、緩勾配で碎波していた波も碎波しなくなり、急勾配上の変曲点付近では波高が増大する。そして、全域急勾配とした碎波曲線の波高に近づくと、再び碎波し始める。平均水位の上昇量は、変曲点付近では増大せず、逆に下がる傾向にある。しかし、急勾配上で再び碎波し始めると、水位は上昇してゆく。
- 4) リーフ上の換算天端高係数は、リーフ先端部で急激に減少し、その後は緩やかに低下する。この変化は、リーフ上の波高変化とほぼ同じ傾向を示した。
- 5) リーフ上の換算天端高係数を算定する経験式、式(8)を提案した。式(8)中の係数 A_r および B_r を適切に選定すると、実験値と非常によく一致させることができるが、 A_r および B_r の値は波形勾配および波高によって変化し、その値を確定することはできなかった。
- 6) 海底勾配が急勾配から緩勾配あるいは緩勾配から急勾配に変化する複断地形における換算天端高係数を算定する経験式、式(9)を提案した。
- 7) 急勾配から緩勾配に変化する地形では、換算天端高係数は x/H_0' の増大とともに、1.0 からほぼ直線的に減少する。式(9)の係数 A_f および B_f を 0.1 および 1.0 とした計算値は、実験値の傾向をよく表していた。
- 8) 緩勾配から急勾配に変化する地形では、換算天端高係数は $x/H_0' < 20 \sim 30$ の変曲点寄りでは 1.0 より増大し、 $x/H_0' > 20 \sim 30$ の変曲点から離れた箇所では 1.0 より小さくなる傾向を示す。この傾向は式(9)から推定でき、実験値も同様の傾向を示している。
- 9) 養浜工等によって海底勾配に変化させる場合、岸側の海底勾配が急勾配にすると、護岸設置位置によっては護岸天端高を高くしなければならない場合が生じる。
- 10) 護岸天端高を低くするためには、岸側海底勾配を沖側海底勾配より緩やかにする。また、岸側海底勾配を急にしなければならない場合、護岸設置位置を勾配変曲点から少なくとも、沖波波高の 30 倍以上は離す必要がある。

最後に、本実験に当たっては、前波浪研究室員諸石一幸技官および波浪研究室員高山 優技官、本城 智技官に御協力していただいた。ここに深く感謝の意を表する次第である。

また、本研究室は、高山の指導の下に、古川がとりまとめた。実験およびデータ整理は古川と立石が行った。

(1987年3月31日受付)

参 考 文 献

- 1) 高山知司・神山豊・菊地治：リーフ上の波の変形に関する研究、港湾技研資料、No.278, 1977.
- 2) 江頭和彦・福田功・岸良安治・西村達郎：リーフによる波浪変形の現地観測、第32回海岸工学講演会論文集、1985, pp.90~94.
- 3) 河野二夫・永松一甫・喜屋武忠：リーフ上の波の変形に関する現地調査、第25回海岸工学講演会論文集、1978, pp.146~150.
- 4) Saville, T. Jr.: Wave run-up on composite slopes, *Proc. 6th Coastal Eng. Conf., ASCE*, 1958, pp.691~699.
- 5) 合田良実：浅海域における波浪の碎波変形、港湾技術研究所報告、第14巻、第3号、1975, pp.59~106.
- 6) 合田良実：碎波指標の整理について、土木学会論文集、第180号、1970, pp.39~49.
- 7) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地治：不規則波実験における入・射波の分離推定法、港湾技研資料、No.248, 1976, 24 p.
- 8) 水口優・荻部好伸・堀田新太郎：現地海浜における遡上波について、第30回海岸工学講演会論文集、1983, pp.109~113.
- 9) 河野二夫・津嘉山正光：リーフによる波の変形に関する研究、土木学会論文報告集、No.307, 1981, pp.27~38.
- 10) 佐藤道郎・羽田好勝・中江周作・吉松秀雄：ステップ型リーフ上での波の変形に関する実験的研究、第32回海岸工学講演会論文集、1985, pp.85~89.
- 11) 前出文献1)
- 12) 前出文献2)
- 13) 前出文献5)
- 14) Munk, W.H.: Surf beats, *Trans. Am. Geophys. Union*, Vol.30, 1948, pp.849~854.
- 15) 前出文献5)
- 16) 合田良実・岸良安治・神山豊：不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究、港湾技術研究所報告、第14巻、第4号、1975, pp.3~44.
- 17) Hunt, I.A.: Design of seawall and breakwaters, *Proc. ASCE*, Vol.94, No.W1, 1959, pp.72~92.

主 要 記 号 集

- A : 波高の減衰定数
 A_f : 複断面海岸の換算天端高の減衰定数
 A_r : リーフ海岸の換算天端高の減衰定数
 B_f : 複断面海岸の波高増大係数
 B_r : リーフ海岸の波高増大係数
 f : 周波数
 f_c : サーフビートの上限周波数

f_m : 水路の固有周波数
 g : 重力の加速度
 h : 護岸設置水深
 h_0 : 水路床の水深
 h_a : 複断面変曲点の水深
 h_b : 有義波高の碎波水深
 $h_{b\max}$: 最高波高の碎波水深
 h_c : 護岸天端高
 H_0 : 沖波波高
 H_0' : 換算沖波波高
 H_1 : 複断面変曲点における沖側勾配の波高
 $H_{1/3}$: 有義波高
 H_{\max} : 最高波高
 i : 海底勾配
 i_1 : 沖側の斜面勾配
 i_2 : 岸側の斜面勾配
 K_s : 非線型性を考慮した浅水係数
 L : 波長
 L_0 : 有義波周期に対する沖波波長
 m : 整数
 q : 越波流量
 $T_{1/3}$: 有義波周期
 $\bar{T}_{1/3}$: 平均有義波周期
 x : 複断面変曲点から岸側方向への水平距離
 X : リーフ長さ
 α : 比例定数
 β : 換算天端高係数
 β_0 : 碎波波高を推定するときの定数
 β_1 : 水深に比例する定数
 β_{\max} : 碎波波高を推定するときの定数
 $\bar{\eta}$: 平均水位の上昇量
 η_{rms} : サーフビートの rms
 η_{∞} : $\alpha = 0$ での平均水位の上昇量
 $\eta_{\text{rms}\phi}$: 沖波の rms
 $\tan \theta$: 水底勾配

付表一 リーフ地形による測定結果

i_1	i_2	α (cm)	h (cm)	h_c (cm)	H_0 (cm)	q (cm ³ /cm ² sec)
1/10	0	0	0	7.5	10.36	3.93
				10.0	10.69	1.32
				12.5	10.85	0.40
			2.5	7.5	11.09	5.57
				12.5	11.49	0.95
				15.0	11.58	0.47
		5	7.5	11.84	8.73	
			10.0	11.79	4.22	
			12.5	11.65	2.25	
			15.0	12.14	1.32	
			0	4.0	10.60	5.45
				6.0	10.85	1.53
	300	0		7.5	10.86	0.52
				10.0	10.64	0.072
				12.5	10.25	0.0086
			2.5	4.0	10.90	5.21
				7.5	11.37	0.69
				10.0	10.65	0.14
		5		12.5	10.97	0.05
			4.0	11.43	5.81	
			7.5	11.33	1.16	
			10.0	11.08	0.36	
			12.5	10.15	0.14	
			0	4.0	10.43	4.57
600	0		7.5	10.75	0.087	
			10.0	10.35	0.0064	
		2.5	4.0	10.41	2.92	
			7.5	10.74	0.13	
			10.0	10.79	0.018	
		5	4.0	11.30	3.61	
	900		7.5	11.34	0.24	
			10.0	11.55	0.087	
		0	3.0	10.17	9.86	
			4.0	10.86	2.97	
			7.5	10.71	0.013	

附表-1

i_1	i_2	x (cm)	h (cm)	h_c (cm)	H_0 (cm)	q (cm ³ /cm ² ·sec)
1/10	0	900	2.5	4.0	11.12	1.94
				6.5	11.19	0.40
				7.5	11.38	0.14
				10.0	11.78	0.016
			5	4.0	10.98	2.26
				7.0	11.16	0.12
				10.0	11.56	0.036
		0	0	7.5	14.69	19.34
				10.0	14.84	8.84
				12.5	14.64	4.64
				20.0	14.71	1.11
			2.5	7.5	15.34	25.69
				10.0	15.38	13.32
				12.5	16.34	8.77
				20.0	16.30	1.64
			5	7.5	16.14	30.42
				10.0	17.52	21.99
				12.5	16.77	11.83
				20.0	17.17	3.54
		300	0	7.5	15.26	2.58
				10.0	15.49	0.69
				12.5	14.97	0.13
2.5	7.5		16.49	3.60		
	10.0		16.08	0.81		
	12.5		15.73	0.34		
	12.5		16.14	0.40		
5	7.5	16.86	4.76			
	10.0	16.91	1.76			
	12.5	17.04	1.02			
600	0	6.0	15.08	5.91		
		7.5	15.20	1.57		
		10.0	15.43	0.30		
		12.5	15.54	0.074		
	2.5	6.0	15.92	5.41		
		10.0	15.66	0.27		

i_1	i_2	x (cm)	h (cm)	h_c (cm)	H_0 (cm)	q (cm ³ /cm ² ·sec)	
1/10	0	600	2.5	12.5	15.74	0.083	
				17.07	35.87		
			5	10.0	16.39	0.94	
				12.5	17.34	0.57	
		900	0	6.0	14.52	4.05	
				7.5	15.08	1.28	
				10.0	15.30	0.12	
				12.5	15.93	0.025	
			2.5	6.0	16.11	3.39	
				7.5	16.15	1.10	
				10.0	16.79	0.21	
				12.5	16.05	0.034	
			5	6.0	16.52	4.18	
				7.5	16.10	1.10	
				12.5	16.24	0.093	
		0	0	6.0	9.57	1.28	
				7.5	9.69	0.61	
				12.5	9.57	0.12	
			2.5	6.0	9.97	2.88	
				12.5	9.82	0.13	
				5	7.5	10.40	4.93
				12.5	10.53	0.98	
300	0	4.0	9.34	0.26			
		5.0	9.70	0.06			
		2.5	4.0	9.62	0.47		
		5.0	9.84	0.08			
	5	3.0	9.40	2.11			
		7.5	10.17	0.17			
		0	3.0	9.58	0.66		
		4.0	9.47	0.10			
600	0	3.0	9.75	0.93			
		4.0	9.73	0.23			
	2.5	3.0	9.75	0.93			
		4.0	9.73	0.23			

付表一 1

i_1	i_2	x (cm)	h (cm)	h_c (cm)	H_0 (cm)	q (cm ³ /cm ² ·sec)	
1/10	0	600	5	3.0	9.65	1.31	
				4.0	9.78	0.57	
				6.0	10.59	0.16	
		900	0	3.0	9.07	0.42	
				4.0	9.07	0.04	
				5.0	10.10	0.01	
			2.5	3.0	9.53	0.18	
				3.0	9.88	0.18	
				4.0	9.84	0.03	
		5	3.0	9.88	0.66		
			4.0	9.89	0.25		
			5.0	10.17	0.08		
		0	0	7.5	15.43	5.01	
				10.0	15.67	1.41	
				12.5	15.57	0.49	
			2.5	7.5	16.01	8.19	
				10.0	16.21	2.68	
				12.5	16.93	1.20	
			5	12.5	16.99	3.03	
				0	6.0	13.60	0.75
					6.0	13.85	0.71
		10.0	15.78		0.049		
		300	2.5	3.0	13.68	7.89	
				6.0	13.47	1.01	
10.0	13.95			0.11			
12.5	15.53			0.046			
12.5	14.24		0.02				
	5		3.0	14.01	8.21		
6.0		14.18	1.77				
10.0		16.48	0.48				
600	0	6.0	13.50	0.37			
		6.0	13.95	0.43			
	2.5	3.0	13.55	6.08			

i_1	i_2	x (cm)	h (cm)	h_c (cm)	H_0 (cm)	q (cm ³ /cm ² ·sec)
1/10	0	600	2.5	6.0	13.80	0.50
				12.5	15.73	0.014
			5	3.0	14.20	6.18
				6.0	14.24	1.09
		900	0	3.0	13.09	8.26
				6.0	13.13	0.14
			2.5	6.0	15.50	0.009
				10.0	15.50	0.009
		300	2.5	3.0	13.56	3.94
				6.0	14.29	0.27
			5	7.5	16.39	0.21
				10.0	16.69	0.031
600	5	3.0	13.99	3.94		
		6.0	13.89	0.47		
	7.5	15.81	0.26			
		10.0	16.24	0.069		

付表-2 1/10 勾配から1/30 勾配へ変わる地形における測定結果

i_1	i_2	x (cm)	h (cm)	h_c (cm)	H_0 (cm)	q (cm ³ /cm ² ·sec)	
1/30	1/10	300	- 5	1.0	10.76	2.54	
				2.0	10.62	1.53	
				3.0	10.74	0.5289	
				4.0	10.95	0.39	
				4.0	10.49	0.269	
				6.0	10.32	0.0549	
			0	4.0	10.73	3.69	
				6.0	10.26	1.07	
				6.0	9.94	0.6454	
				8.0	10.19	0.31	
				8.0	9.89	0.2779	
				10.5	9.92	0.0287	
			5	5.0	10.25	2.23	
				8.0	9.76	1.2729	
				10.0	10.03	0.36	
				10.0	9.82	0.4482	
				12.5	10.17	0.17	
				15.0	9.66	0.0575	
		10	7.5	10.39	2.15		
			10.0	10.69	2.15		
			12.5	10.64	2.08		
			15.0	10.79	2.06		
			600	- 10	0	10.51	0.0014
				- 5	0.0	10.27	0.75
		1.0			10.27	0.35	
		2.0			10.39	0.12	
		4.0			10.16	0.01	
		0		4.0	10.23	1.51	
			4.0	9.45	1.2191		
			6.0	10.30	0.35		
			6.0	9.64	0.2151		
			8.0	10.15	0.05		
			8.0	9.32	0.0401		
300	- 5	2.0	16.02	16.42			
		4.0	16.31	6.42			
		4.0	14.99	3.9921			
		4.0	15.82	2.89			

i_1	i_2	x (cm)	h (cm)	h_c (cm)	H_0 (cm)	q (cm ³ /cm ² ·sec)	
1/30	1/10	300	- 5	6.0	14.82	1.3076	
				8.0	15.13	0.4090	
				10.0	16.31	0.60	
				0	6.0	15.48	14.78
					8.0	16.07	7.442
					10.0	15.33	3.27
			10.5		16.45	3.2481	
			15.0	15.0	15.54	0.69	
				15.0	16.16	0.5839	
				5	10.0	15.61	4.54
					10.0	14.16	3.1755
			12.5		16.02	2.47	
			15.0		15.72	1.09	
			15.0	15.0	14.03	0.6499	
				20.0	13.96	0.1715	
				10	10.0	15.82	14.55
					12.5	15.86	7.86
			15.0		15.62	4.23	
		600	- 15	0	16.29	0.257	
				1.0	15.96	0.201	
				2.0	16.28	0.089	
				- 10	0	15.49	1.89
					1.0	15.53	0.84
					2.0	15.20	0.845
			2.0		16.14	0.8245	
			3.0	15.62	0.26		
			4.0	15.85	0.2006		
			6.0	15.92	0.0369		
			- 5	0	15.21	12.09	
				2.0	15.30	5.06	
				3.0	13.91	1.7569	
				4.0	15.07	2.00	
				4.0	13.98	1.0734	
6.0	15.35	0.69					
6.0	14.14	0.2856					
0	6.0	15.32		6.74			
	6.0	14.32		5.5571			

附表—2

i_1	i_2	x (cm)	h (cm)	h_c (cm)	H_0 (cm)	q (cm ³ /cm·sec)	
1/30	1/10	600	0	8.0	15.35	2.72	
				8.0	14.23	2.2569	
				10.0	15.20	1.21	
				10.0	14.11	0.8964	
		300	0	4.0	10.02	0.56	
				4.0	10.22	0.3227	
				6.0	10.07	0.10	
				6.0	10.31	0.0516	
				8.0	10.19	0.03	
				8.0	10.16	0.015	
			5	4.0	9.92	4.39	
				5.0	9.90	3.03	
				8.0	10.25	1.0082	
				10.0	9.99	0.24	
			10	10.0	10.25	0.3272	
				15.0	10.41	0.0527	
				5.0	10.69	11.53	
				7.5	10.70	6.14	
			600	0	3.0	9.91	0.79
					3.0	10.35	0.8784
					4.0	9.85	0.32
					4.0	9.13	0.4437
					6.0	9.69	0.04
			300	- 5	1.0	15.03	1.68
		2.0			15.34	0.78	
		3.0			15.19	0.3277	
		4.0			15.31	0.18	
		4.0			15.31	0.1255	
		6.0			15.08	0.0222	
		0		4.0	15.54	4.85	
				6.0	14.91	1.2863	
				6.0	15.26	1.67	
				8.0	15.23	0.51	
		8.0	14.84	0.5154			

i_1	i_2	x (cm)	h (cm)	h_c (cm)	H_0 (cm)	q (cm ³ /cm·sec)	
1/30	1/10	300	0	10.5	14.96	0.1121	
				5	5.0	15.39	6.94
				8.0	15.29	2.7877	
				10.0	15.08	1.03	
		10	10.0	14.73	1.2235		
			12.5	15.66	0.46		
			15.0	14.95	0.1563		
			7.5	15.99	12.30		
			10.0	16.35	7.17		
			12.5	16.41	3.68		
		600	- 5	0	15.14	1.47	
				1.0	14.72	0.78	
				2.0	15.02	0.26	
				4.0	14.74	0.04	
			0	4.0	14.92	3.51	
				4.0	15.33	5.1352	
				6.0	14.73	1.10	
				6.0	15.59	1.5059	
		8.0	14.79	0.29			
		8.0	15.17	0.4527			

付表-3 1/3 勾配から1/10 勾配へ変わる地形における測定結果

i_1	i_2	x (cm)	h (cm)	h_c (cm)	H_0 (cm)	q (cm ³ /cm ² ·sec)
1/30	1/10	150	- 5	6.0	10.35	0.1193
				8.0	11.07	0.1863
				10.0	10.78	0.0675
			0	10.0	11.12	2.080
				12.0	11.19	1.0981
				15.0	10.97	0.3854
			5	12.5	10.84	2.0865
				15.0	10.80	0.8381
				20.0	10.57	0.3227
		300	- 15	0	10.89	0.2196
				1.0	10.54	0.1138
				2.0	10.63	0.0252
			- 10	4.0	10.70	0.2062
				8.0	10.66	0.0471
				10.0	10.77	0.028
		- 15	8.0	10.38	0.3093	
			12.0	10.30	0.0583	
			14.0	10.47	0.0281	
		150	- 5	10.0	15.98	0.9782
				15.0	16.26	0.1785
				17.5	16.35	0.0931
			0	17.5	15.97	1.3121
				22.5	16.15	0.3675
				25.0	15.98	0.1277
5	15.0		15.65	3.3275		
	20.0		16.10	1.1025		
	- 20		0	16.84	0.4202	
1.0		16.53	0.2857			
2.0		16.73	0.0847			
300	- 15	1.0	15.79	3.0939		
		2.0	15.78	2.0868		
		4.0	16.51	0.3137		

i_1	i_2	x (cm)	h (cm)	h_c (cm)	H_0 (cm)	q (cm ³ /cm ² ·sec)	
1/30	1/10	300	- 10	8.0	16.49	0.5826	
				12.0	15.90	0.1345	
				14.0	16.08	0.0709	
			20.0	15.55	0.005		
				- 15	14.0	15.61	0.3765
					17.5	15.70	0.1255
			22.5		15.55	0.034	
			500	- 5	6.0	10.48	0.0130
					6.0	10.18	1.5104
		8.0			10.14	0.4841	
		10.0		10.03	0.1395		
				5	7.0	10.34	2.0505
					10.0	10.39	0.8529
		15.0	10.55		0.1883		
		300	- 10	1.0	10.22	0.0289	
				3.0	10.19	0.0023	
				- 15	3.0	10.15	0.0894
			4.0		10.14	0.0448	
			6.0		10.08	0.012	
			150	- 5	6.0	14.90	0.265
		8.0			15.44	0.0787	
		10.0			15.64	0.028	
		0		10.0	15.86	2.0303	
				12.0	15.95	1.0219	
15.0	15.77			0.3496			
5	10.0	15.23		4.001			
	12.0	15.15		1.7875			
	15.0	15.31		0.9143			
300	- 15	0	15.23	0.2054			
		1.0	14.87	0.0718			
		- 10	4.0	14.91	0.0885		
	6.0		15.01	0.0294			
	8.0		15.00	0.0085			

附表—3

i_1	i_2	x (cm)	h (cm)	h_e (cm)	H_0 (cm)	q (cm ³ /cm·sec)
1/30	1/10	300	- 15	6.0	14.97	0.5154
				8.0	14.98	0.1883
				10.0	14.95	0.0768

港 湾 技 研 資 料 No.592

1 9 8 7 · 6

編 集 兼 發 行 人 運 輸 省 港 湾 技 術 研 究 所

發 行 所 運 輸 省 港 湾 技 術 研 究 所
 橫 須 賀 市 長 瀬 3 丁 目 1 番 1 号

印 刷 所 日 青 工 業 株 式 會 社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.