

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL. 27

NO. 4

DEC. 1988

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I.)

第27巻 第4号 (Vol. 27, No. 4) 1988年12月 (Dec. 1988)

## 目 次 (CONTENTS)

1. The Allowable Ship Motions for Cargo Handling at Wharves  
..... Shigeru UEDA and Satoru SHIRAISHI ... 3  
(港湾荷役における係岸船舶の許容動揺量.....上田 茂・白石 悟)
2. 広天端幅潜堤による波浪変形と護岸越波流量の低減効果  
..... 高山知司・池田直太 ... 63  
(Wave Transformation behind a Broad Submerged Breakwater and  
Effects of the Breakwater on Wave Over-topping  
..... Tomotsuka TAKAYAMA and Naota IKEDA)
3. 津波防波堤開口部潜堤の安定性に関する実験的研究  
..... 谷本勝利・木村克俊・宮崎啓司 ... 93  
(Study on Stability of Submerged Dike at the Opening Section  
of Tsunami Protection Breakwaters  
..... Katsutoshi TANIMOTO, Katsutoshi KIMURA and Keiji MIYAZAKI)
4. 数値シミュレーションによる不同沈下の予測とその空港舗装設計への適用  
..... 土田 孝・小野憲治 ...123  
(Evaluation of Differential Settlements with Numerical Simulation  
and Its Application to Airport Pavement Design  
..... Takashi TSUCHIDA and Kenji ONO)
5. 生石灰杭工法によって改良された地盤の特性  
..... 田中洋行・戸引 勲 ...201  
(Properties of Soils Treated by the Quick Lime Pile Method  
..... Hiroyuki TANAKA and Isao TOBIKI)

## 2. 広天端幅潜堤による波浪変形と護岸越波流量の低減効果

高山知司\*・池田直太\*\*

### 要 旨

潜堤は、高波浪の来襲に対しては天端上で波を砕波させて波高を低減させるが、波高の小さな波の来襲に対しては波を砕波させることなく通過させる。このように潜堤は波高の選択効果があるため、防災や海浜の安定に対して効果が大きいと考えられる。また、潜堤は常時水面下に没しているため、景観を悪化させることがないと同時に、海水交換を阻害することが少ない。そこで、このように防災上、また、海岸環境の保全に優れていると考えられる潜堤を対象にして、潜堤背後の波浪変形および護岸越波流量について実験を行った。ただし、潜堤としては、天端上で波が砕波するように、広天端幅潜堤を採用した。広天端幅潜堤に関する模型実験結果およびそれに対する考察によって得られた結論を要約すると以下の通りである。

- 1) 潜堤上で砕波した波は、波高が大きく低減し、小さな波になって伝達する。伝達した波はほとんど波高を変化させることなく伝播するが、水深が浅くなると、再砕波によって再び波高が減少する。この波高の減少は、一様勾配斜面に対する合田の波浪変形計算で算定することができる。
- 2) 伝達波の波高は、潜堤がない場合に対するある場合の比、つまり潜堤の波高影響係数で表し、相対天端水深  $h_{RT}/H_0'$ 、相対天端幅  $B/L_0$  および波形勾配  $H_0'/L_0$  に対して線形的に変化すると仮定して、経験式を求めた。
- 3) 潜堤上での砕波による水位上昇量に関しても  $h_{RT}/H_0'$ 、 $B/L_0$  および  $H_0'/L_0$  に対して線形関係にあるとして経験式を求めた。
- 4) サーフビートのような長周期水面変動は、潜堤を設置することによって小さくなる。
- 5) 潜堤による護岸越波流量の低減効果は、護岸の脚堤水深によって変化し、脚堤水深が伝達波高より浅いと、ほとんど効果がないことが判明した。
- 6) 潜堤背後の波浪変化および水位上昇量の特徴を考慮して、潜堤背後の直立護岸に対する越波流量を算定する方法を提案した。この方法によって推定した越波流量と実験値とを比較すると、越波流量が小さい場合に実験値より推定値が小さくなり、越波流量が大きいと逆に推定値が大きくなる傾向をしめした。そこで、実験値から越波流量の推定値を補正する式を求めた。

キーワード：広天端幅潜堤、伝達波、越波、不規則波、水理模型実験

\* 水工部 波浪研究室長  
\*\* 水工部 波浪研究室

## 2. Wave Transformation behind a Broad Submerged Breakwater and Effects of the Breakwater on Wave Over-Topping

Tomotsuka TAKAYAMA\*

Naota IKEDA\*\*

### Synopsis

A submerged breakwater transforms large incident waves to small waves due to its inducement of their breaking over it and it transmits small incident waves without their large transformation. Therefore, the submerged breakwater seems useful for the prevention of disasters caused by the attack of storm waves and for the possibility of stabilization of sandy beach. The breakwater is also beneficial for the preservation of coastal environment because the breakwater does not strongly work as an obstacle to sea water exchange. The experiments on thus useful submerged breakwater are performed to investigate the characteristics of wave transformation behind the breakwater and the effects of the breakwater on wave over-topping over a vertical sea wall. The main conclusions are given below.

- 1) The incident random waves break over the submerged breakwater and are transformed to small waves. The significant height of the transmitted waves keeps almost constant until their re-breaking takes place in the nearshore area of small water depth. The decrease of the wave height due to the re-breaking can be estimated by the estimation method proposed by Goda for uniform slope beach.
- 2) The empirical formula for the estimation of the transmitted wave height is presented under the assumption that the transmitted wave height linearly varies to the values of the relative depth  $h_{RT}/H_0'$  above the submerged breakwater, the relative width  $B/L_0$  of the breakwater and the wave steepness  $H_0'/L_0$ .
- 3) The wave set-up induced by the breaking waves over the submerged breakwater is also presented under the assumption of linearity to  $h_{RT}/H_0'$ ,  $B/L_0$  and  $H_0'/L_0$ .
- 4) The undulations like surfbeats are attenuated by the submerged breakwater, compared to the undulations without the breakwater.
- 5) The wave over-topping for a vertical wall behind the submerged breakwater depends upon the water depth at the wall. The submerged breakwater is no more effective on the wave over-topping for the case of the water depth shallower than the transmitted wave height.
- 6) The estimation method for the wave over-topping rate is proposed by taking the wave transformation and the wave set-up behind the submerged breakwater into consideration. The estimated over-topping rates is modified as the results of the comparison between the estimated and experimental wave over-topping rates. The experimental rates widely scatter around the modified estimation line, especially, for the case of small over-topping rates.

**Key Words:** Broad submerged breakwater, Wave transmission, Wave over-topping, Random waves, Hydraulic model tests

---

\* Chief of Wave Laboratory, Hydraulic Engineering Division

\*\* Member of Wave Laboratory, Hydraulic Engineering Division

## 目 次

要 旨	63
1. ま え が き	67
2. 実験条件および実験方法	67
2.1 実験水路と造波装置	67
2.2 模型斜面と護岸および潜堤模型	68
2.3 実験波の条件	69
2.4 波高計の配置と実験ケース	70
3. 潜堤による波の変形	72
3.1 波のスペクトル形の変化	72
3.2 潜堤背後の波高および平均水位の上昇量の変化特性	74
3.3 潜堤背後の波高の推定法	80
3.4 潜堤による平均水位の上昇量	83
3.5 潜堤背後の長周期水位変動	84
4. 潜堤による護岸越波流量の低減効果	85
4.1 潜堤による護岸越波流量の変化	85
4.2 潜堤の護岸天端高さの低減効果	87
4.3 潜堤設置における護岸越波流量の推定法とその精度	88
5. あ と が き	91
参 考 文 献	91
記 号 一 覧 表	92

## 1. まえがき

台風や移動性低気圧、冬季の季節風によって起こされた高波が護岸や海岸堤防を乗り越えて背後地に侵入し、家屋の倒壊や浸水等を起こす被害がしばしば起きている。特に、高潮を伴って来襲した高波によって多くの人命や財産が失われた昭和34年の伊勢湾台風による大災害は、台風による未曾有の大災害として記録されており、設計波を設定する場合の仮想台風として今日でもしばしば用いられている。このような高波の来襲による被害を未然に防止するためには、海岸汀線付近に天端の高い護岸や海岸堤防を築くことが経済的で、早期に対応ができる確実な防災対策として実施されてきた。しかし、このような護岸や海岸堤防の建設は、防災上非常に有効ではあったが、陸と海とを隔てる高い壁を築くことになって、海浜を憩いの場として利用することを困難にしまった。また、このような護岸や堤防の建設は、前面海浜の喪失を促進し、護岸等の堤脚が洗掘されて、最終的には護岸や海岸堤防の倒壊を招く恐れがあることが指摘されてきている。

このような状況の下に、海浜をレクリエーションの場として認識し、海岸環境を悪化させることのない防災対策施設の建設が要望されるようになり、新たに考えだされたのが面的防護方式である。面的防護方式とは、複数の施設を空間的な広がりを持って配置し、各施設の防災機能をより有効的に発揮させることによって、総合的な防災施設として、高潮、高波、海岸侵食等の災害から人命、財産を防護するとともに、海岸空間の面的な利用の促進、海岸環境の保全を図る方式である。つまり、面的防護方式とは、天端の高い護岸や海岸堤防のみの単一施設で防護するのではなく、複数の海岸施設、あるいは単一施設であっても空間的な広がりを持つ施設で災害を防止するとともに、海浜の持つレクリエーション的な機能を促進させ、海浜の有効利用を図る方式である。

面的防護方式の一形態として、潜堤による防護方式がある。潜堤は離岸堤の一形態であるが、通常の離岸堤と異なり、常時海面下に没していることをその特徴としている。そのため、景観を変化させることがなく、海岸環境の保全上有効な施設である。また、海面下にあるため、流れを阻害することが少なく、海水交換の面においても有効な施設である。さらには、離岸堤のように海面から突き出ていると、どのような波も減殺するけれども、潜堤の場合、波高の低い波に対しては波をそのまま通過させ、波高が大きくなると、その天端上で砕波させ、波高を減衰させると言ったように、伝達波高の選択

効果を有しており、防災上も有効な施設と考えられる。このような潜堤の有効性に着目して、潜堤の波浪減殺効果、つまり、伝達波高に関する研究が過去にいくつか行われている<sup>1)~4)</sup>。しかし、潜堤の波浪減殺効果が離岸堤に比べて低いこともあって、建設された例が非常に少ない。また、過去においては防災対策としての機能が最優先され、景観や海岸環境の保全があまり重要視されなかったことや、潜堤が海面下にあるため、漁船等が座礁する恐れがあるなどといったことも潜堤の建設事例が少ない原因である。しかし、既に述べたように、防災に加えて景観や海岸環境の保全が重要視され、また、水産協調型の施設の開発が検討されるようになってきており、近年においては、潜堤の有効性が見直されている。特に、建設経費が相対的に高くても、景観や海岸環境の保持に有効な施設は建設していこうとする気運のある今日においては、潜堤の持つ機能の活用が重要となってきている。

そこで、本研究においては、潜堤を設置した場合の潜堤背後の波浪変形および護岸の越波流量について実験的な検討を行った。潜堤の天端幅が狭い場合、波が潜堤の直背後で砕波し、潜堤背後の堤脚部を洗掘させ、潜堤を崩壊させる可能性があるため、本研究では、潜堤の天端幅を広くとって、砕波が潜堤の天端上で起きるような広天端幅のものを対象にした。実験においては、潜堤の天端水深および天端幅を変えるとともに、潜堤背後の護岸条件を変えて実験した。実験結果をもとにして、潜堤背後の護岸の越波流量の算定方式についても検討している。

## 2. 実験条件および実験方法

### 2.1 実験水路と造波装置

図-1は実験に用いた水路を示している。この水路は、当所の大型水工実験場内に設置している長さ30m、幅5m、深さ1.2mの水路で、仕切壁によって幅0.6mと4.3mの2つの水路に分けられている。本実験は、越波に関する断面実験を対象にしているため、実験には幅0.6mの小水路を用いた。水路の後端には、消波用として碎石斜面を設置しており、他端には幅5mの造波板を有するピストン型の不規則波造波装置を設置している。

本不規則波造波装置は、6kwのミニャモータによる電動駆動で、不規則な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造波することができる。ただし、造波機は入力信号の周波数によって造波板の運動特性が異なるため、入力信号の作成に当たっては、予め周波数に対する造波板の運動特性を調べ、これ

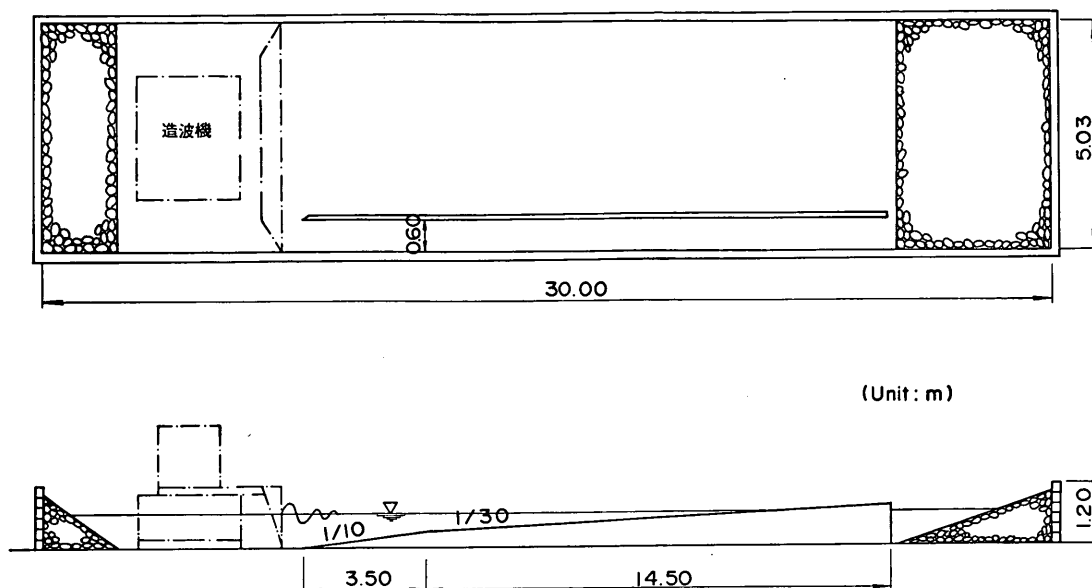


図-1 実験に用いた水路

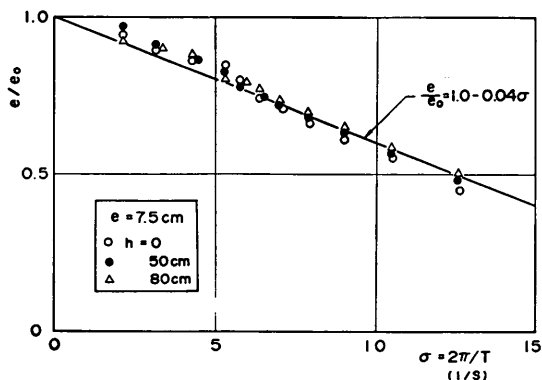


図-2 造波板の運動特性

を考慮して入力信号を作成した。運動特性を検定した結果を 図-2 に示す。図中の縦軸は、一定の電圧を入力したときの静的な造波板の変位  $e_0$  に対する同じ電圧で周期運動させたときの造波板の運動振幅  $e$  との比を示している。また、横軸は造波板の運動角周波数  $\sigma (=2\pi/T, T$  は造波板の運動周期) を示している。さらに、図中の白丸は水を水路に入れない状態、黒丸は造波板の前面水深が 50cm、三角印は 80cm の場合の実験値である。造波板の角周波数応答は、造波板前面の水深によってほとんど変化せず、高周波になるに従って一様に運動振幅が小さくなっている。この図をもとにして、造波板の運動の

周波数応答関数を次式のように表すことができる。

$$e/e_0 = 1.0 - 0.04\sigma \dots\dots\dots(1)$$

造波機への入力信号は、式(1)で示される応答関数を考慮して、周波数によって造波板の運動振幅が小さくなればそれだけ増幅させた。

## 2.2 模型斜面と護岸および潜堤模型

模型床は木製の一様斜面とした。全延長を目標とする 1/30 あるいは 1/20 勾配の斜面とすると、斜面長が非常に長くなり、30m と限られた水路内に設置することができなくなる。そこで、水路床から 35cm の高さまでの斜面先端部は 1/10 勾配斜面とし、それより背後を 1/30 あるいは 1/20 勾配斜面で接続した。ただし、1/10 勾配斜面上で碎波が起きると、碎波波高が模型床の勾配の影響を受けるため、1/30 あるいは 1/20 一様勾配の場合とは条件が異なってくる。そこで、1/10 勾配上で碎波が起きないように、勾配変曲点での水深を少なくとも 28cm は保つようにした。

水深の浅い汀線付近でも、波高計が設置でき、検定が容易なように模型斜面に波高検定用のブリキの小さな箱を埋め込んだ。使用しない検定用の箱には蓋をして、波の変形に影響を与えないようにした。

越波実験に用いた護岸は木製の直立板で製作した。模型護岸はその天端高さを変化できる構造にしている。越波した水量は、図-3 に示すように、射水板を通して集

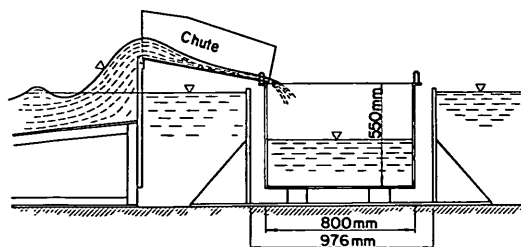


図-3 護岸模型と集水箱



写真-1 潜堤模型

水箱に落とした。

潜堤模型としては、480g（模型縮尺を1/30に想定すると、現地で約13tの重さのものに対応）の消波ブロック（テトラポット）模型の3層整積みとした。潜堤模型を写真-1に示す。潜堤としては広天端幅潜堤を考え、天端幅を30、60と90cmの3種類に変えた。ただし、天端高は17.5cmと一定にし、潜堤両側の斜面勾配は2:1である。波高の大きい波が潜堤の天端上で碎ける場合に、模型消波ブロックが移動して、潜堤に変形が生じたので、潜堤模型が変形しないように模型消波ブロックを相互にシリコンシーラントでくっつけている。

2.3 実験波の条件

実験波の沖波条件としては、波形勾配が0.012程度のうねり性の波と0.036程度の風波に分けて、それぞれについて有義波高10および15cmの波を目標とした。目標とした沖波の諸元を表-1に示す。各波に対して異なる2種類の波群を用いて実験を行い、2種類の波群に対する平均値として、越波流量および波高等の諸量を求めた。

潜堤を設置しない状態において、沖側水深62.5cmにおける入射波の周波数スペクトルを図-4に示す。図中

表-1 目標波の諸元

Wave	$H_0$ (cm)	$T_0$ (cm)	$H_0/L_0$
1	10	2.31	0.012
2	15	2.83	
3	10	1.33	0.036
4	15	1.63	

の太い線が実験における入射波のスペクトルで、細い線が目標とした Bretschneider・光易型の周波数スペクトルを示している。Bretschneider・光易型のスペクトル形としては次式で与えられるものを用いた。

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

ここに、 $S(f)$  は波の周波数スペクトル、 $f$  は周波数である。式(2)の有義波高  $H_{1/3}$  と有義波周期  $T_{1/3}$  としては、実験から求める値を用いている。

図-4に示すように、低周波部分を除けば実測スペクトルは目標スペクトルとよく一致している。しかし、目標とする有義波の波高と周期を用いて、式(2)から造波信号を作成し、これによって造波した波の有義波周期は目標有義波周期より10%程度小さくなる傾向がある。この原因として、合田<sup>9)</sup>は、式(2)の原式ではスペクトルのピーク周期  $T_p$  で表されているのを

$$T_p = 1.05 T_{1/3} \dots \dots \dots (3)$$

の関係を用いて、原式を変形しているためだと述べている。式(3)の関係式は光易が博多湾における観測値や風波の実験値を参照して求めたもので、無次元フェッチの小さい領域での推定値である。合田は、水理実験に用いるべき目標スペクトルとして次式のようなスペクトルを提案している。

$$S(f) = 0.25 (H_{1/3})^2 (T_{1/3})^{-4} f^{-5} \times \exp[-0.75 (T_{1/3} f)^{-4}] \dots \dots \dots (4)$$

式(4)によると

$$T_p = 1.14 T_{1/3} \dots \dots \dots (5)$$

となって、ピーク周期が式(3)のものより8%程度長くなる。その結果、実測有義波周期が目標有義波周期に一致するようになる。

図-4に示したように、実験から求めた有義波の諸元を用いる限りでは、これによって計算したスペクトルは



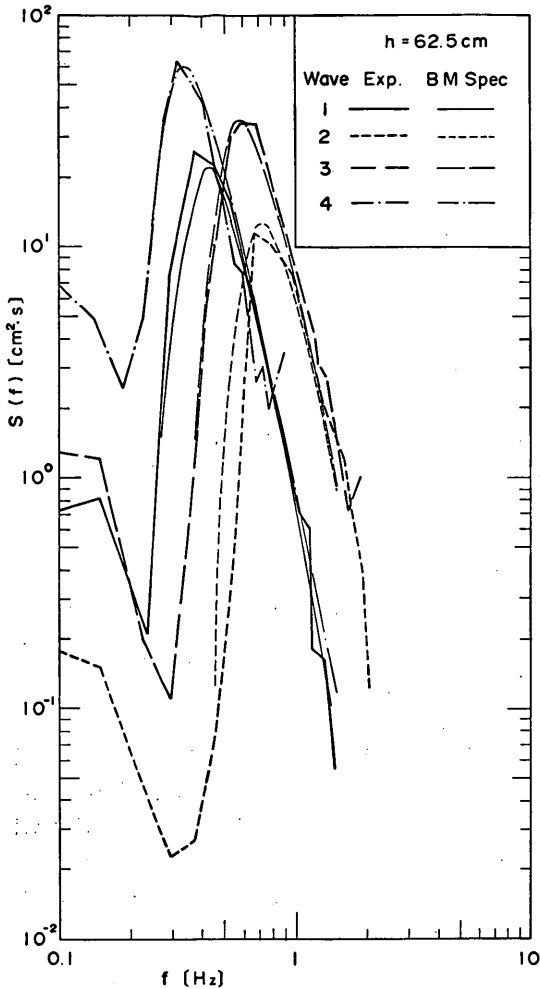


図-4 入射波のスペクトル

実験で得られた入射波のスペクトルとよく一致することおよび既に式(2)のスペクトルを用いて実験を行ってきた

いたので、本実験では、スペクトル形を変更することはしなかった。

## 2.4 波高計の配置と実験ケース

### (1) 波浪変形実験

潜堤による波浪の変形特性を調べるために、図-5に示すように波高計を配置した。波高計は容量式のもを6本用い、沖側に40cm間隔に2本、潜堤背後に4本設置した。沖側の2本の波高計は、入・反射波を分離し<sup>6)</sup>、入射波の波高を検定するとともに、潜堤の反射率を測定するのに用いた。潜堤背後の4本の波高計は、潜堤直背後と汀線( $h=0$ cm)の位置に2本、その中間に2本設置した。実験においては、模型潜堤を移動させるのが困難であったので、模型潜堤の位置および天端高は一定とし、潜堤の天端水深を変化させるときは、実験水位を変化させることによって調整した。その結果、汀線の位置が潜堤天端水深によって変化するので、水深が変わるごとに汀線の位置に波高計を移動した。その影響で、潜堤直背後と汀線との間の波高計も移動させている。図-5は、潜堤の天端水深が5cmの場合の波高計設置状況を示したものである。

潜堤による波浪変形の実験では、表-1に示す目標実験波のうち、波2を除いた3種類の実験波を用いた。また、潜堤の天端幅は30, 60および90cmの3種類で、天端水深は0, 2.2, 5, 10cmの4種類に変化させた。また、潜堤を設置しない状態でも実験を行った。これらをまとめると、実験ケースは表-2に示すようになる。

表-1に示す目標実験波は、潜堤を設置しない状態で検定を行い、造波信号の振幅を調整した。ただし、造波信号の出力調整は、水深65cmで行い、水深が変化しても波高は大きく変化しないとして、水深に関係なく、同一の造波信号を用いた。表-3は、水深による入射波高の変化を示したものである。潜堤の天端幅を変えると、波高が少し変化するけれども、その変化は表-3に示す

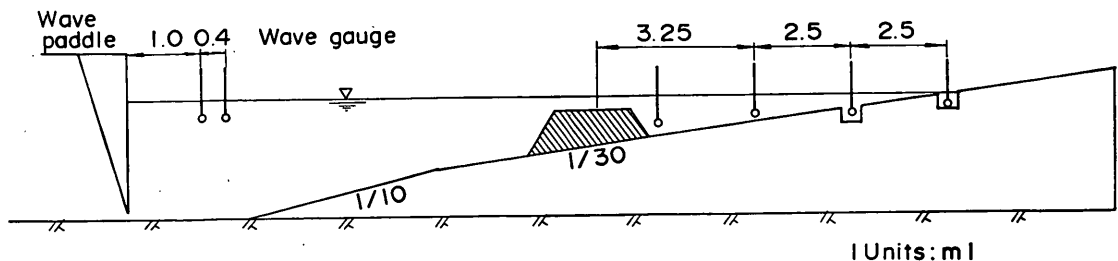


図-5 波浪変形実験における波高計の配置

表-2 波浪変形実験ケース

bottom slope $i=1/30$			
Water depth at W. P. $h_0$ (cm)	submerged breakwater		
	water depth $h_{sb}$ (cm)	water depth above S. B. $h_{RR}$ (cm)	Breadth $B$ (cm)
62.5	17.5	0	30
64.7	19.7	2.2	
67.5	22.5	5.0	
72.5	27.5	10.0	
62.5	17.5	0	60
64.7	19.7	2.2	
67.5	22.5	5.0	
72.5	27.5	10.0	
62.5	17.5	0	90
64.7	19.7	2.2	
67.5	22.5	5.0	
72.5	27.5	10.0	
62.5	without submerged breakwater		
64.7			
67.5			
72.5			

波高の  $\pm 0.5\text{cm}$  の範囲であったので、表-3 には天端の影響を無視した平均値で示している。表-3 でわかるように、水深が深くなるに連れて波高が少しずつ増大している。これは、ピストン型造波機の造波効率を示す式(6)

からわかるように相対水深  $h/L$  が大きくなると、造波効率が増大するためである。

$$H/2e = 4\sinh^2(2\pi h/L) / \{4\pi h/L + \sinh(4\pi h/L)\} \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 $h$  は水深、 $L$  は起こされた成分波の波長である。しかし、本実験における水深変化で生じる波高の変化は、2cm以内で、それほど大きな変化ではない。

(2) 越波実験

図-6 に越波実験の場合の波高計の配置を示す。波浪変形実験の場合と同じように容量式波高計を6本用い、造波板付近に2本、潜堤直前に1本、潜堤背後に0.2m間隔に2本、護岸前面に1本設置した。造波機前面の波高計2本は入・反射波分離によって、実際の入射波高を推定するのに用いた。潜堤背後の2本の波高計は護岸に入射する波を検定するために設置したが、全ての実験ケースに設置したのではなく、限られた実験ケースのみに設置した。

表-4 に越波実験における実験ケースを示す。越波実験では、表-1 に示した目標実験波の全てについて行った。潜堤天端幅については、30, 60 および 90cm の3種類に加えて、潜堤がない場合についても潜堤を設置した場合との比較のために行った。斜面勾配については、1/30の場合を主に行い、一部1/20についても行った。潜堤天端水深は0から10cmまで4段階に変え、また、同一潜堤天端水深に対して護岸水深は3段階に変えた。さらに、同じ護岸水深で、護岸天端高さは4~8cmまで、2cm毎に3段階変化させた。一部のケースについては護岸天端高さを4~12cmの5段階に変えている。実験ケースは全部で672ケースに及ぶ。

表-3 実験水深による波高変化

Water depth at W. P. $h_0$ (cm)	Water depth above S. B. $h_{RR}$ (cm)	significant wave heights and periods					
		wave 1		wave 3		wave 4	
		$H_0$ (cm)	$T_0$ (s)	$H_0$ (cm)	$T_0$ (s)	$H_0$ (cm)	$T_0$ (s)
62.5	0	10.5	2.23	10.6	1.23	16.4	1.56
64.7	2.2	10.7	2.24	10.6	1.25	16.6	1.56
67.5	5.0	11.2	2.28	10.8	1.23	17.2	1.57
72.5	10.0	11.9	2.26	11.2	1.23	17.7	1.56
average		11.1	2.25	10.8	1.24	17.0	1.56

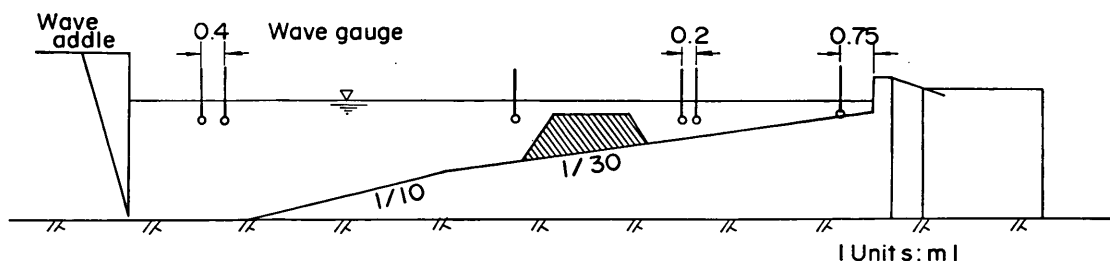


図-6 越波実験における波高計の配置

表-4 越波実験ケース

B(cm)	i	submerged breakwater		sea wall				
		$h_{SB}$ (cm)	$h_{RT}$ (cm)	$h$ (cm)	$h_C$ (cm)			
0 30 60 90	1/30	17.5	0	0	4	10	6	4 6 8 10 12
					8			
					5		4	
				6				
				8				
				20.0	2.5		10	
		6						
		8						
		2.5	4					
			6					
			8					
		22.5	5.0	10	5	10	4	4 6 8 10 12
6								
8								
15	4							
	6							
	8							

27.5	10	15	4	4 6 8
			6	
			8	
		0	4	
			6	
			8	
1/20	17.5	0	0	4 6 8

### 3. 潜堤による波の変形

#### 3.1 波のスペクトル形の変化

図-7 は、目標波高が15cmで、波形勾配が0.036の波-4における波のスペクトルの変化を示している。図-7(a)は潜堤がない場合のスペクトル変化を示し、図-7(b), (c)は天端が静水面上にある  $h_{RT}=0$ cmにおいて、天端幅がそれぞれ  $B=90$ と  $60$ cmの場合のものである。また、図-7(d)は天端水深が入射波高の約1/3となる  $h_{RT}=5$ cmで、 $B=60$ cmの場合のものである。

潜堤がない図-7(a)の場合、潜堤直背後に対応する  $h/H_0'=0.98$ の地点では、砕波の影響で入射波のスペクトルピーク ( $f=0.6H_z$ )を中心にした  $f=0.45\sim 1.5H_z$ の区間の波エネルギーが減衰し、また一方、長周期側の  $f<0.3H_z$ では逆にエネルギーが増大している。さらに水深が浅くなると、長周期側の波のエネルギーはあまり変化しないのに対して、 $1.5H_z > f > 0.4H_z$ での波のエ

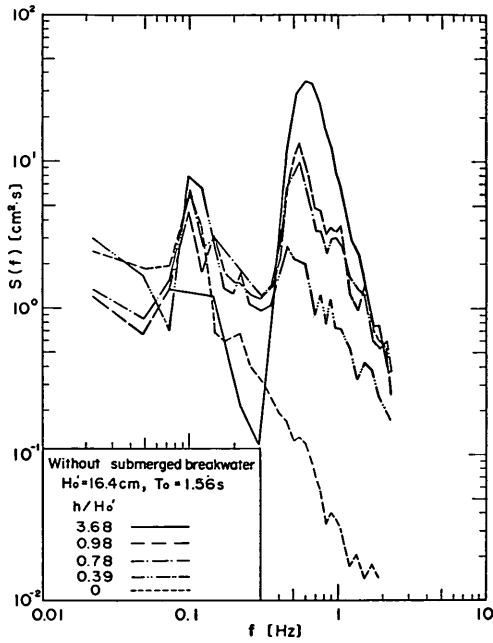


図-7(a) 波-4 のスペクトルの変化  
(潜堤がない場合)

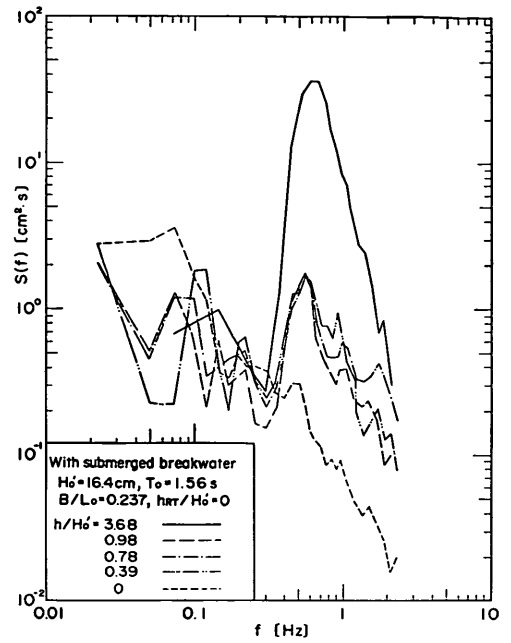


図-7(b) 波-4 のスペクトルの変化  
( $B = 90 \text{ cm}$ ,  $h_{RT} = 0 \text{ cm}$ )

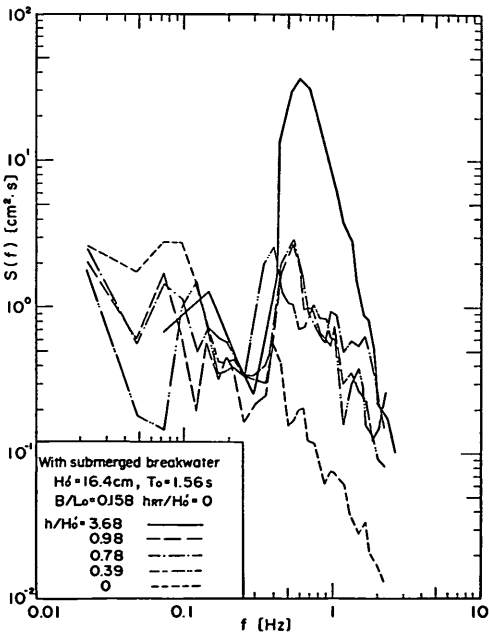


図-7(c) 波-4 のスペクトルの変化  
( $B = 60 \text{ cm}$ ,  $h_{RT} = 0 \text{ cm}$ )

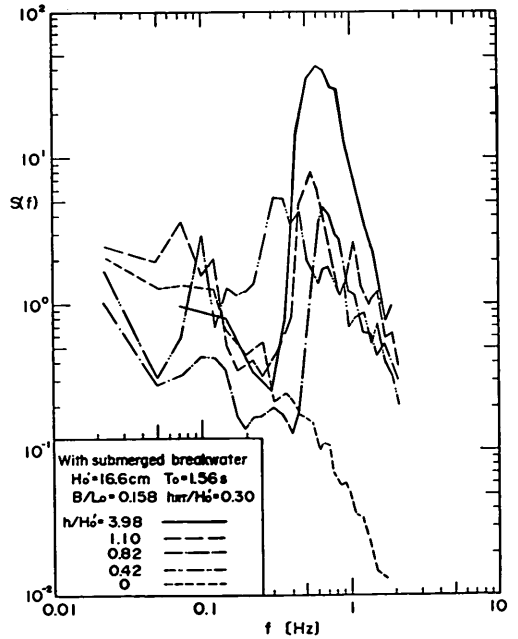


図-7(d) 波-4 のスペクトルの変化  
( $B = 60 \text{ cm}$ ,  $h_{RT} = 5 \text{ cm}$ )

エネルギーは大きく低下している。特に、入射波のスペクトルピーク付近の波のエネルギー減衰は著しい。 $f > 1.5 \text{ Hz}$  の高周波数側では、 $h/H_0' > 0.78$  においては波のスペクトルはほとんど変化しないが、これより浅くなると減衰するようになる。

低周波側の波のエネルギーは、砕波が起きると急激に増大するが、一旦増大すると、さらに水深が浅くなってもそれほど大きくはならない。一方、入射波のスペクトルのピーク周波数付近における波のエネルギーは砕波によって急激に低下する。そのため、スペクトルのピーク周波数  $f_p$  は、 $h/H_0' = 3.68$  で  $f_p = 0.6 \text{ Hz}$ 、 $h/H_0' = 0.98$  で  $f_p = 0.55 \text{ Hz}$ 、 $h/H_0' = 0.39$  で  $f_p = 0.4 \text{ Hz}$  といったように、水深が浅くなるに従って、低周波側へ移動し、そして、汀線付近では、周波数が高くなるほど波のエネルギーは一様に低下するようになる。ただし、 $h/H_0' = 0$  では水路床が露出する場合があります、測定したスペクトルにはこの水路床の露出の影響が含まれている。

砕波が起こるようになると、低周波側の  $f = 0.1 \text{ Hz}$  で明瞭なピークが現れているが、このピークの発生原因については水路内での水面変動の固有周期による増幅とも考えられるが、高次の振動モードになるため、このように明瞭なピークが起こるとは考えられず、この原因については明らかにすることができなかった。

$h_{RT}/H_0' = 0$  の場合の 図-7(b), (c) では、潜堤より沖側の  $h/H_0' = 3.68$  の地点におけるスペクトルは、潜堤がない場合の 図-7(a) のスペクトルと非常によく一致している。このことは、潜堤としては天端の高い  $h_{RT}/H_0' = 0$  の場合でも潜堤からの反射が非常に小さいことを示している。この場合の反射率を求めてみると、 $B = 60 \text{ cm}$  であっても、 $90 \text{ cm}$  であっても、ほとんど変わらず、 $K_R = 0.15$  と非常に小さかった。潜堤直背後の  $h/H_0' = 0.98$  では、潜堤がない場合のピーク周波数  $f = 0.55 \text{ Hz}$  におけるスペクトルの値は、潜堤がない場合  $S(f) = 14 \text{ cm}^2 \text{ s}$  であったのに対し、潜堤がある場合には、 $B = 90 \text{ cm}$  で  $S(f) = 1.8 \text{ cm}^2 \text{ s}$ 、 $B = 60 \text{ cm}$  で  $S(f) = 3.1 \text{ cm}^2 \text{ s}$  となって、潜堤天端上での砕波によって、波のエネルギーが急激に低下しているのがわかる。また、砕波による波のエネルギーの低下は潜堤の天端幅が広いほど大きい。高周波側におけるスペクトルのピーク周波数は潜堤の有無によってほとんど変化しない。また、低周波側での波のエネルギーは、潜堤がない場合ほどには大きくはならず、潜堤がない場合の  $1/3$  程度である。潜堤から離れた  $h/H_0' = 0.78, 0.39$  では、潜堤直背後での波のスペクトルとほとんど変わらない。このことは、潜堤背後の  $h/H_0' > 0.39$  の区間では波はほとんど変形しない

ことを示している。一方、 $h/H_0' = 0$  の汀線での波のスペクトルは、潜堤がない場合より少し大きくなっているが、スペクトルの形状は潜堤がない場合と非常によく類似している。このことから、水深が非常に浅い地点では  $f < 0.3 \text{ Hz}$  の長周期の水面変動を除けば、潜堤がない場合と似たような水面変動をすることを示している。また、潜堤を設置することによって、波高を低下させるだけではなくて、サーフビートのような長周期の水面変動も小さくする効果があることがわかる。

天端水深が  $h_{RT}/H_0' = 0.30$  と、入射波高の約  $1/3$  になっている 図-7(d) の場合、潜堤の天端上で波は砕波するが、天端水深が沖波波高の  $1/3$  程度であるため、潜堤直背後での波のスペクトルは、 図-7(c) ほどには低下しない。 $f = 0.55 \text{ Hz}$  におけるスペクトルのピーク値は、 $h_{RT}/H_0' = 0$  では  $S(f) = 5.1 \text{ cm}^2 \text{ s}$  であったけれども、 $h_{RT}/H_0' = 0.3$  では  $S(f) = 8.3 \text{ cm}^2 \text{ s}$  となる。これは天端水深が深いだけ、伝達波高が大きくなっていることによる。さらに水深が浅い地点では、高周波側のスペクトルのピーク値は少しずつつきがる。しかし、ピーク周波数は水深によって異なり、 $h/H_0' = 0.78$  では約  $0.65 \text{ Hz}$ 、 $h/H_0' = 0.39$  では約  $0.35 \text{ Hz}$  に現れている。このように、水深によってスペクトルのピーク周波数がなぜ変動するのか、その原因は明らかにできなかった。汀線付近では  $h_{RT}/H_0' = 0$  の場合と同様に、潜堤が無い場合の汀線付近のスペクトル形と類似の形を示し、高周波になるに従ってスペクトルは一様に低下している。

### 3.2 潜堤背後の波高および平均水位の上昇量の変化特性

3.1 の潜堤背後の波のスペクトル変化から水深の浅い汀線付近においては、潜堤を設置してもしなくてもほぼ同じような波高となることが推測できる。そこで、潜堤を設置することによって、潜堤背後で波高および平均水位が水深によってどのように変化するかを調べてみた。

図-8~10 は、それぞれ波-1, 3, 4 について、潜堤背後の有義波高の変化を示したものである。これらの図には、平均水位の変化も合わせて示してある。各図の(ア)は潜堤がない場合、(b)~(d)は潜堤の天端幅がそれぞれ 30, 60, 90 cm の場合である。図中の実線は、合田<sup>7)</sup>の砕波変形理論によって求めた有義波高の変化と平均水位の上昇量を示している。沖波波高は前述のように水深の変化によって少し変化するけれども、その変化は小さいとして、各水深に対する沖波波高の平均値を用いて、砕波変形および平均水位の上昇量を計算している。それぞれの図中の上側の図は有義波の波高  $H_{1/3}/H_0'$ 、下側の図は、平均水位の上昇量  $\bar{\eta}/H_0'$  の変化を水深と沖波

広天端幅潜堤による波浪变形と護岸越波流量の低減効果

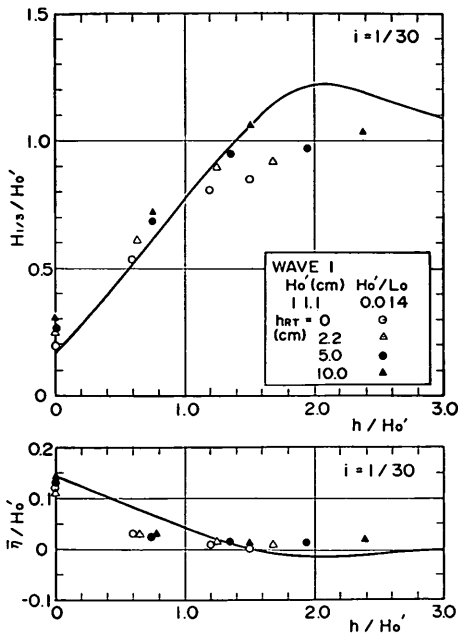


図-8(a) 波-1の場合の波高変化と平均水位の上昇量  
(潜堤なしの場合)

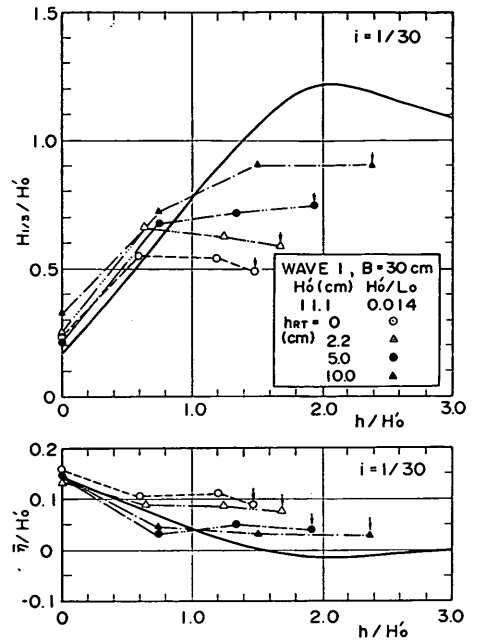


図-8(b) 波-1の場合の波高変化と平均水位の上昇量  
( $B=30$ cm)

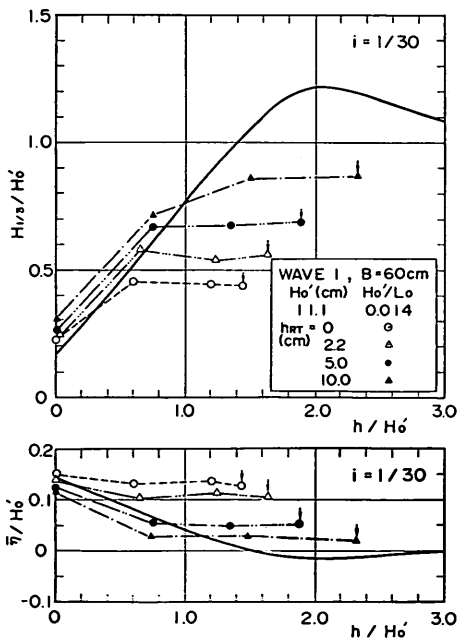


図-8(c) 波-1の場合の波高変化と平均水位の上昇量  
( $B=60$ cm)

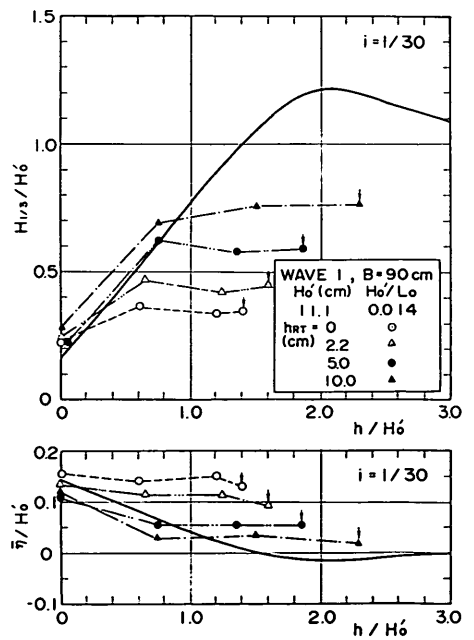


図-8(d) 波-1の場合の波高変化と平均水位の上昇量  
( $B=90$ cm)

波高との比  $h/H_0'$  に対して示している。潜堤が設置されていない場合の 図-8~10 の(a)においては、潜堤が設置されている場合と対比するのが容易なように、潜堤天端水深  $h_{RT}$  の値を示している。

波-1で、潜堤のない 図-8(a) では、砕波によって波高が急激に減衰している  $h/H_0' < 1.2$  においては、実験で求めた波高変化は合田の砕波変形理論曲線によく一致しているが、 $h/H_0' > 1.2$  では、実験値は理論値より小さくなっている。特に、波高が最も高くなると予想される  $h/H_0' = 2$  付近では、実験値より  $H_{1/3}/H_0'$  の値にして 0.2 程度小さくなっている。平均水位の上昇量は、 $h/H_0' = 2$  付近で理論曲線で示されるような水位の set-down は実験値には現れておらず、ほぼ静水位に近い値を示している。水位の set-up が起こっている  $h/H_0' < 1.2$  では、実験から求めた平均水位の上昇量は、理論計算値ほどには上昇しておらず、少し小さい。特に、 $h/H_0' = 0.8$  付近で差が大きく、 $\bar{\eta}/H_0'$  の値にして、0.05程度の差がある。潜堤を設置した 図-8(b)~(d) では、潜堤の天端上で波高が急激に減衰するために、↓印で示す潜堤直背後の波高は、潜堤がない場合の理論曲線よりかなり小さくなっている。この潜堤直背後の波高は、潜堤天端水深が浅いほど大きく低下しており、理論曲線の波高と比較して、 $B=30\text{cm}$  の 図-8(b) の場合、 $H_{1/3}/H_0'$  は  $h_{RT}/H_0' = 0$  ( $h_{RT}=0\text{cm}$ ) では約 0.5、 $h_{RT}/H_0' = 0.2$  ( $h_{RT}=2.2\text{cm}$ ) では約 0.55、 $h_{RT}/H_0' = 0.45$  ( $h_{RT}=5\text{cm}$ ) では約 0.62、 $h_{RT}/H_0' = 0.9$  ( $h_{RT}=10\text{cm}$ ) では約 0.78 になっている。このような波高の減少は、潜堤天端幅が広がるほど大きい。例えば、 $h_{RT}/H_0' = 0.45$  ( $h_{RT}=5\text{cm}$ ) では  $B=30\text{cm}$  で前述のように、約 0.62であったものが、図-8(c) の  $B=60\text{cm}$  では約 0.52、図-8(d) の  $B=90\text{cm}$  では約 0.4 に下がる。潜堤の天端上で砕波して、波高が急激に低下した波は、その波高を大きく変化させることなく、進行するが、ある水深に達すると、再び砕波し、波高が下がり始める。その波高の変化は潜堤がない場合の一樣勾配斜面における砕波変形の理論曲線にほぼ沿って起こる。潜堤を設置した場合に一樣斜面に対する理論曲線より波高がわずかに大きくなる傾向を示している。これは、潜堤によって平均水位が上昇するために砕波波高が大きくなり、その結果、有義波波高も大きくなったものと考えられる。しかし、この波高増大はわずかであり、平均水位の上昇量が与える影響は比較的小さい。再砕波で波高が低下し始める地点は、伝達波高が大きいほど水深が深い。これは、海底勾配が同じなら、砕波波高がほぼ水深に比例するためである。

潜堤背後の波高は再砕波が起こるまでは、大きな変化

はないと述べたけれども、詳細に調べてみると、天端水深が深く、伝達波高の大きい波は波の進行にともなって少しずつ減少し、天端水深が浅く、伝達波高が小さい波では進行とともに少しずつ波高が増大している。このような波高変化の原因としては、伝達波高が大きい場合には、波群中には大きな波高も含まれているため、波の進行に伴って水深が浅くなると、大きな波から砕波するようになって、波高が少しずつ減少するけれども、伝達波高が小さいと波群中に含まれる大きな波の波高も相対的に小さくなり、水深が浅くなっても砕波はほとんど起こらず、浅水変形による波高変化が顕著になるためだと推測される。

一方、潜堤背後の平均水位は、潜堤上の砕波によって急激に上昇し、再砕波が起こる地点まではほとんど変化しない。この平均水位の上昇量は、潜堤の天端水深が浅く、天端上で砕波が強いほど大きくなる。潜堤直背後の平均水位の上昇量をみてみると、図-8(b)の  $B=30\text{cm}$  の場合、 $h_{RT}/H_0' = 0$  ( $h_{RT}=0\text{cm}$ ) では  $\bar{\eta}/H_0' = 0.09$ 、 $h_{RT}/H_0' = 0.2$  ( $h_{RT}=2.2\text{cm}$ ) では  $\bar{\eta}/H_0' = 0.08$ 、 $h_{RT}/H_0' = 0.45$  ( $h_{RT}=5\text{cm}$ ) では  $\bar{\eta}/H_0' = 0.04$ 、 $h_{RT}/H_0' = 0.9$  ( $h_{RT}=10\text{cm}$ ) では  $\bar{\eta}/H_0' = 0.03$  である。再砕波し始めると、再び平均水位が上昇し始め、汀線付近では、潜堤がない場合の理論値とほぼ一致する。しかし、図-8(c)および(d)では、汀線付近の平均水位の上昇量は、天端水深が深いほど、つまり、伝達波高が大きいと、理論値より少し小さくなる傾向を示す。潜堤がある場合、このように汀線付近の平均水位の上昇量が潜堤がない場合の理論値に近くなる理由としては、次のように考えることができる。

合田<sup>7)</sup>が示しているように、潜堤のない一樣勾配斜面では、汀線付近の平均水位の上昇量は波形勾配が小さいほど大きくなる。その結果、潜堤背後の波高は、潜堤上で波高が減少するので、波形勾配は小さくなり、平均水位の上昇量は増大することになる。しかし、伝達波高自体は減少しているので、それだけ平均水位の上昇量は小さくなる。これを式で表わすと、次式のようなになる。

$$\bar{\eta}/H_0' = \frac{\bar{\eta}_s}{H_0'} + \frac{\bar{\eta}_s'}{H_{s0}} \frac{H_{s0}}{H_0'} \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 $\bar{\eta}_s$ は潜堤上の砕波で生じた平均水位の上昇量、 $\bar{\eta}_s'$ は潜堤背後の再砕波で生じた平均水位の上昇量、 $H_{s0}$ は伝達波の波高である。 $B=90\text{cm}$  の 図-8(d) において  $h_{RT}/H_0' = 0.45$  ( $h_{RT}=5\text{cm}$ ) の場合について概算してみる。ただし、簡単な計算を行うために、 $H_{s0}$ は潜堤直背後の波高に等しいと仮定する。図-8(d)を用いて、 $\bar{\eta}_s/H_0' = 0.05$ 、 $H_{s0}/H_0' = 0.5$  となり、 $\bar{\eta}_s/H_{s0}$  を

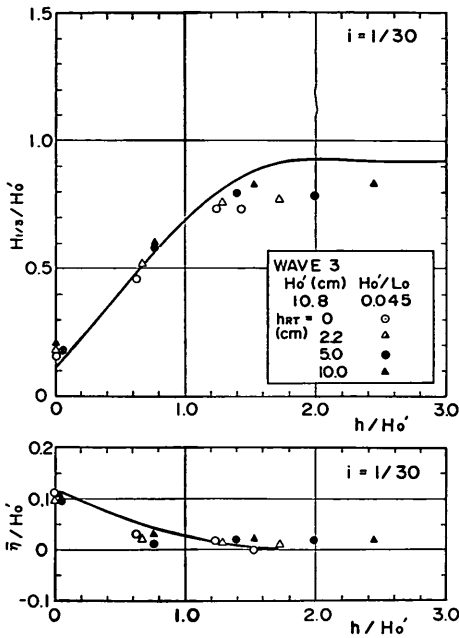


図-9(a) 波-3の場合の波高変化と平均水位の上昇量 (潜堤なしの場合)

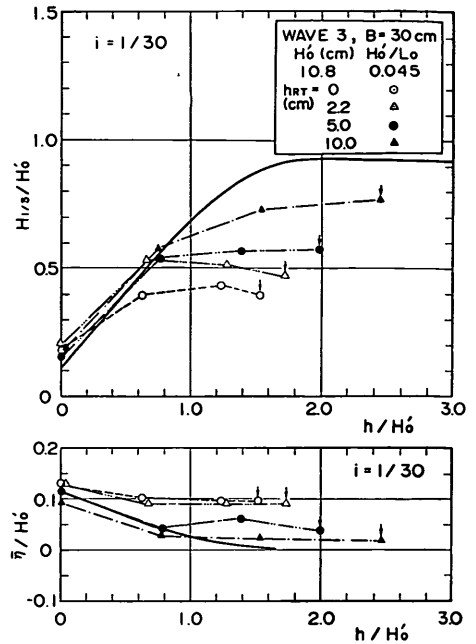


図-9(b) 波-3の場合の波高変化と平均水位の上昇量 ( $B=30$ cm)

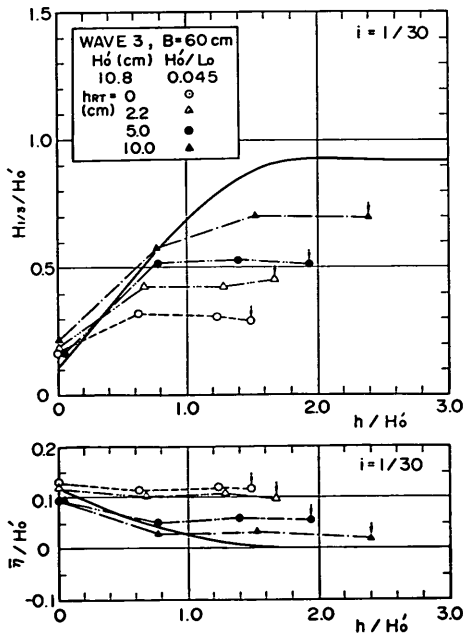


図-9(c) 波-3の場合の波高変化と平均水位の上昇量 ( $B=60$ cm)

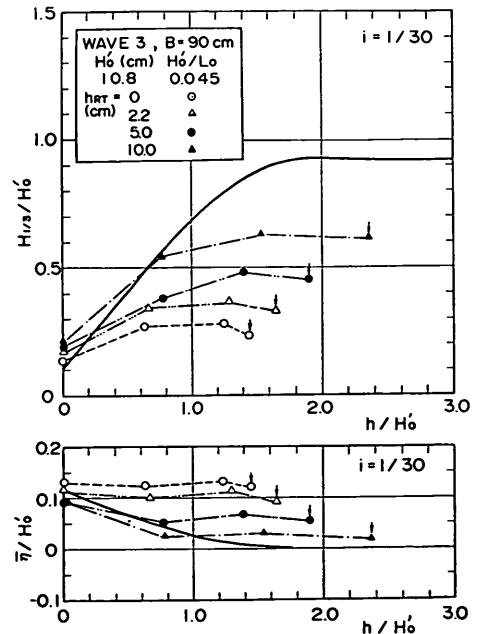


図-9(d) 波-3の場合の波高変化と平均水位の上昇量 ( $B=90$ cm)



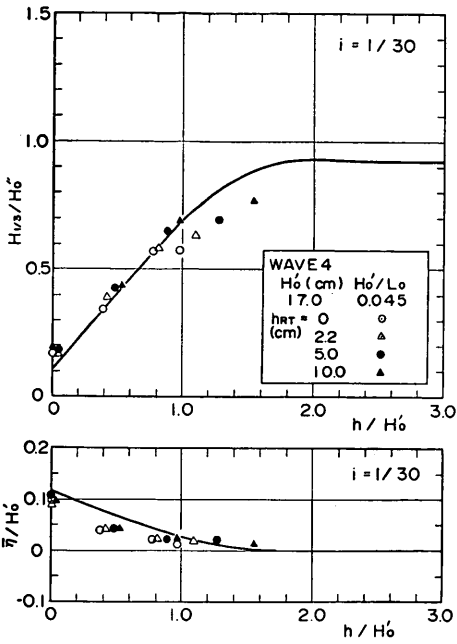


図-10(a) 波-4の場合の波高変化と平均水位の上昇量  
(潜堤なしの場合)

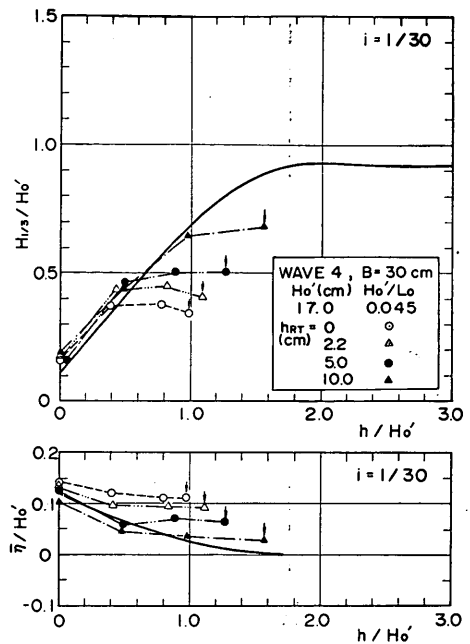


図-10(b) 波-4の場合の波高変化と平均水位の上昇量  
( $B=30\text{cm}$ )

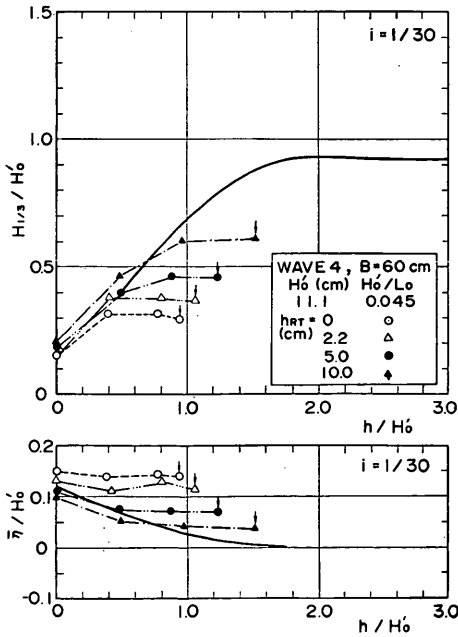


図-10(c) 波-4の場合の波高変化と平均水位の上昇量  
( $B=60\text{cm}$ )

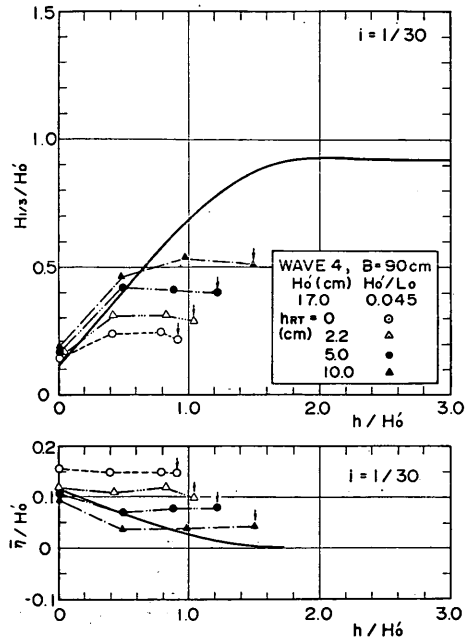


図-10(d) 波-4の場合の波高変化と平均水位の上昇量  
( $B=90\text{cm}$ )

合田が示した図から求めると、 $\bar{\eta}_s/H_{s0}=0.16$  となつて、  
 $\bar{\eta}/H_0'=0.05+0.16\times 0.5=0.13$   
 となる。また、 $h_{RR}/H_0'=0.2$  について計算してみると、  
 $\bar{\eta}/H_0'=0.1+0.17\times 0.4=0.17$   
 となる。これらの値を実験値と比較してみると、計算値は、実験値より0.02~0.03だけ大きく推定しているが、平均水位の上昇の傾向はよく表している。

図-9 および 10 は、波形勾配が  $H_0'/L_0=0.036$  と、比較的大きいため、波高変化の理論曲線には顕著な波高のピークが現れておらず、また、平均水位の変化においても、図-8 のように水位の set-down は起こっていない。潜堤がない図-9 および 10 の(a)において、図-9(a)では、砕波の影響のあまり大きくない  $h/H_0'=2.0$  付近で実験値が計算値より約 0.1~0.15 小さく、砕波の影響の強い  $h/H_0'<1.2$  では理論曲線に沿って減少し、その値も理論値によく一致する。一方、図-10(a)の場合入射波高が大きいため、波高が既に砕波で低下し始めている地点での実験値しかないが、この場合でも砕波の影響の比較的小さい  $h/H_0'=1.2\sim 1.3$  では実験値は理論値より0.1程度小さく、砕波の影響の強い  $h/H_0'<1.1$  では、実験値は理論値によく一致している。図-9(a)における平均水位の上昇量は  $h/H_0'=0.8$  付近で実験値より0.02程度小さくなっているものの、比較的良好一致している。図-10(a)では、平均水位の上昇量は上昇量の小さい  $h/H_0'>1.0$  では実験値と理論値が一致するが、上昇量が大きくなる  $h/H_0'<1.0$  では実験値は理論値より小さい傾向がある。

潜堤を設置した場合の図-9 および 図-10(b)~(d)における波高変化および平均水位の上昇量の変化は、図-8 で示した波形勾配の小さい  $H_0'/L_0=0.012$  の場合とほぼ同じ傾向を示す。そこで、波高および平均水位の変化についてとりまとめると、以下ようになる。

#### 波高変化について

- (a) 潜堤天端上で砕波によって急激に波高を低下させた波はほぼ砕波後の波高を保ちながら進行し、ある水深に達すると、再び砕波し始める。
- (b) 再砕波し始めると、波高は潜堤がない一様勾配斜面に対する砕波変形理論曲線に沿って変化する。その結果、再砕波後の波高変化には、潜堤設置の影響がほとんど現れない。
- (c) 潜堤直背後の波高は、潜堤天端水深が浅いほど、また、潜堤の天端幅が広いほど小さくなる。
- (d) 潜堤直背後の波高が  $H_{1/3}/H_0'>0.6$  になる場合には、再砕波し始めるまでは波の進行にともなって波高が僅かに減少するのに対して、 $H_{1/3}/H_0'<0.5$

では、波の進行にともなって波高が僅かに増大する傾向を示す。この原因として、潜堤直背後の波高が大きい波では、その波群中に含まれる波高の大きな波が徐々に砕波して波高が低下するのに対して、波高の小さい波ではその中に含まれる大きな波の波高は相対的に小さいので、砕波は起こらず、その結果、浅水変形による波高増大が顕著になるためだと考えられる。

#### 平均水位の変化について

- (a) 潜堤上で砕波する波の影響で潜堤背後の平均水位は上昇する。上昇した平均水位は再砕波が起こるまではほとんど変化せず、再砕波し始めてから再び上昇し始める。このような平均水位の上昇は、波高変化にともなうラジエーションストレスによって生じる。
- (b) 波高変化によって平均水位の上昇が起こるため、砕波によって波高が減少すればするほど平均水位は大きく上昇する。その結果、潜堤の天端水深が浅いほど、また、潜堤の天端幅が広いほど、平均水位の上昇量は大きくなる。
- (c) 再砕波にともなう平均水位の増大は図-8 に関して述べたように砕波後の波の波形勾配を用いてある程度推定することができる。このことは、潜堤によって上昇した平均水位を静水位とみなし、そこへ波高の低下した潜堤直背後波が入射するとして、再砕波による平均水位の上昇量を推定することができることを示している。

構造物による波高の低減効果は、構造物前面の波高に対する背後の波高の比で定義される波高伝達率で一般に表される。しかし、斜面上に設置してある構造物の場合、構造物前面で波が砕波するかしないかによって伝達率が異なる可能性がある。砕波の影響の少ない図-9 の波-3の場合と潜堤前面で既に砕波が起きている図-10 の波-4の場合に関して、 $h_{RR}/H_0'=0$  で、 $B/L_0$  の値がほぼ同じになる波-3の  $B=60\text{cm}$ 、波-4の  $B=90\text{cm}$  について伝達率を比較してみると、波-3の場合0.38、波-4の場合0.31となつて、前面で砕波している波の場合が伝達率は小さくなっている。そのため、潜堤の波高低減効果を調べるに当たっては、潜堤がない場合の波高に対する潜堤を設置した場合の波高の比で表すのが都合がよいと考える。

そこで、この波高比を潜堤の波高影響係数  $K_H$  として定義し、 $K_H$  の変化を示したのが、図-11 である。図-11(a), (b), (c) はそれぞれ波-1, 3, 4の場合に対応している。図-11 でわかるように、潜堤背後での  $K_H$  の値は、潜堤の天端水深が浅くなるほど、また、天端幅

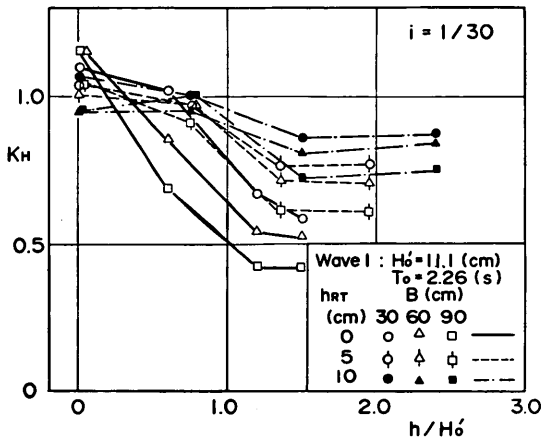


図-11(a) 潜堤影響係数の変化  
(波-1 の場合)

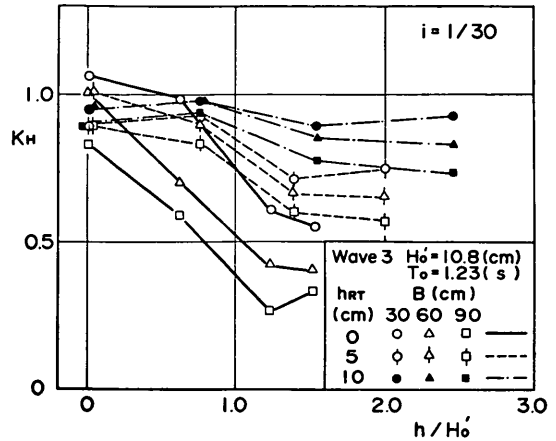


図-11(b) 潜堤影響係数の変化  
(波-3 の場合)

が広がるほど小さくなる。水深波高比  $h/H_0'$  が小さくなると、 $K_H$  の値は大きくなって、1.0 に近づき、潜堤による波高の低減効果は薄れる。 $K_H$  の値が、1.0 に近づいてしまうと、 $h_{RT}/H_0'$  がさらに小さくなくても、つまり、水深がさらに浅くなっても、 $K_H$  の値は大きく変化せずに、1.0 の周りをばらつくだけである。このことは、前述のように、潜堤によって急激に波高が減少させられるが、潜堤から離れるにしたがって、つまり、水深が浅くなるにしたがって、潜堤による波高の低減効果は薄れ、潜堤がない場合の一樣斜面上における波の変化にほぼ等しくなることを示している。ただし、潜堤上で碎波した波によって潜堤背後の平均水位は上昇しており、これが再碎波に影響するので、潜堤の影響が全くないとは考えることはできない。

### 3.3 潜堤背後の波高の推定法

#### (1) 潜堤背後の波高の推定に対する考え方

3.2 で述べたように、潜堤によって波高が急激に低減した波はその波高を大きく変化させることなく進むが、その波高に対応した水深に達すると、再び碎波し始める。再碎波後の波高変化は、潜堤による伝達波が一樣斜面に入射してきたと考えた場合の波高変化とほぼ同じになる。潜堤背後の波高変化のこのような特性から、潜堤背後の波高をつぎのようにして推定できると考える。

まず、潜堤直背後の波高を、潜堤の天端水深および天端幅の関数として実験値から求める。また、潜堤直背後の水位上昇量を実験値から推定する。そして、潜堤直背後の水深に潜堤による水位上昇量を加えた水深において、潜堤によって低下した波高が生じる沖波の条件を求

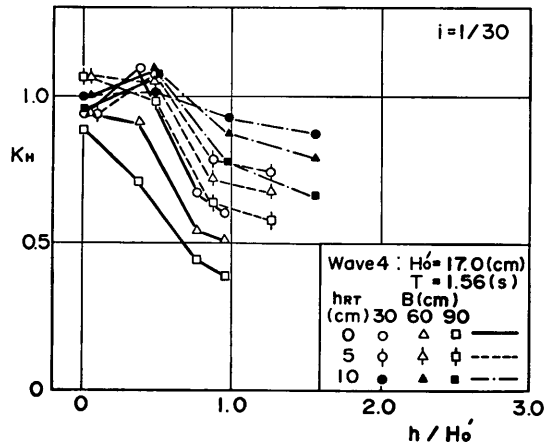


図-11(c) 潜堤影響係数の変化  
(波-4 の場合)

める。沖波波高としては、水位上昇量を加えた水深での浅水係数で潜堤直背後の波高を除いて求める。浅水係数の算定に用いる波の周期としては、3.1 で示したように、潜堤直背後の波のスペクトルのピーク周期は入射波のスペクトルのピーク周期より少し長周期側にずれるけれども、そのずれはわずかであることから、入射波の有義周期を用いればよいと考える。このようにして、設定した沖波の、一樣斜面上での変形が潜堤背後の波の波高変化に一致すると仮定して求める。ただし、この計算に用いる水深としては、潜堤による水位上昇量を加えた水深

とする。

以上のような方法で潜堤背後の波高を算定するためには、潜堤直背後の波高をまず算定しなければならない。そこで、以下においては、潜堤直背後の波高の算定法について検討する。

(2) 潜堤天端水深による潜堤直背後での波高影響係数の変化

3.2 で述べたように、潜堤直背後の波高は潜堤の天端水深によって大きく変化する。図-12 は、潜堤の相対天端水深  $h_{RT}/H_0'$  による潜堤直背後での波高影響係数  $K_H$  の変化を示したものである。

潜堤の天端水深が十分深く、天端上で碎波が起こらない場合を考えると、潜堤による反射は小さく、また、潜堤を構成している消波ブロックによるエネルギー損失は非常に小さいと考えられるので、潜堤上で波が変形したとしても潜堤を通過すれば、潜堤がない場合とほぼ同じ波高になると考えられ、 $K_H=1$  に近い値になると推測される。図-12 もこの傾向を示しており、相対天端水深が大きくなるほど、 $K_H$  は 1.0 に近づいている。天端幅の狭い、 $B=30\text{cm}$  では、 $h_{RT}/H_0'=0.9$  程度になると、 $K_H>0.85$  になり、潜堤による波高減衰効果は小さくなる。潜堤によって  $K_H<0.8$  にするためには、天端水深を  $h_{RT}/H_0'<0.5$  にする必要がある。 $h_{RT}/H_0'$  に対する  $K_H$  の変化勾配は、 $h_{RT}/H_0'$  が小さくなるほどやや急になっている。例えば、 $B=60\text{cm}$  で波-2の場合、 $K_H$  の変化勾配は  $0<h_{RT}/H_0'<0.5$  では 0.54、 $0.5<h_{RT}/H_0'<1.0$  では 0.33 となる。しかし、本実験の範囲では、 $K_H$  の変化勾配が変化しないとして、 $h_{RT}/H_0'$  との平均的な関係から  $K_H$  の値を推定しても、実験値との差は 0.03 程度である。このことから、 $K_H$  が  $h_{RT}/H_0'$  と線形関係にあるとみなすことができる。

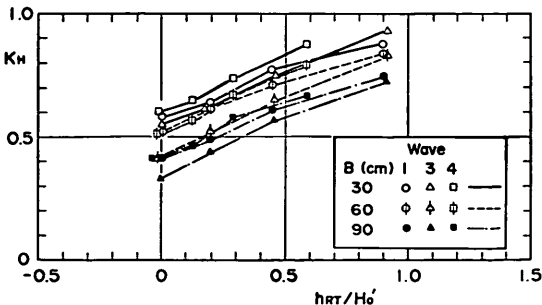


図-12 潜堤天端水深  $h_{RT}/H_0'$  に対する潜堤直背後の影響係数  $K_H$  の変化

$K_H$  は天端幅によっても変化しているが、 $h_{RT}/H_0'$  に対する  $K_H$  の変化勾配は天端幅に関係なくほぼ同じである。沖波波高がほぼ同じで、波形勾配の異なる波-1と波-3の場合を比較してみると、波形勾配が小さい波-1の場合が大きくなっている。これは、沖波波高が同じで波形勾配が小さいと波長が長くなり、波長に対する相対的な天端幅は波形勾配が小さいほど小さくなるためだと考えられる。しかし、 $K_H$  の変化勾配に関する限りでは、波形勾配の影響は僅かで、 $0.5<h_{RT}/H_0'<1.0$  の範囲で少し異なる程度である。

(3) 潜堤天端幅による潜堤直背後での波高影響係数の変化

既に述べたように、潜堤直背後での波高影響係数  $K_H$  は潜堤の天端幅によっても変化する。図-13 は潜堤の相対天端幅  $B/L_0$  に対する潜堤直背後での  $K_H$  の変化を示したものである。図-13 に示すように、 $K_H$  の値は、 $B/L_0$  が大きくなればなるほど小さくなる。このような傾向は、永井等<sup>9)</sup>の規則波による潜堤伝達波の実験でも示されている。このような潜堤天端幅による波高低下の発生原因として、潜堤を構成しているブロックの粗度によるエネルギー損失が考えられるが、このエネルギー損失で潜堤天端幅による波高低下を説明するには、摩擦係数として1程度の値を用いなければならない。通常摩擦係数としては 0.1 以下であることを考えると、摩擦によるエネルギー損失だけでは説明できない。著者の一人<sup>9)</sup>が行った平坦なリーフ上における波の変形実験によると、水深の浅いリーフ上に波が入射すると、リーフ先端部での碎波によって波高は急激に減衰し、沖波波高の約20倍程度リーフ先端から離れると、リーフ上の波高はほぼ一定値になる。潜堤の場合はこのリーフの幅が狭い場合に対応すると考えられる。波-1 および 3 の場合に

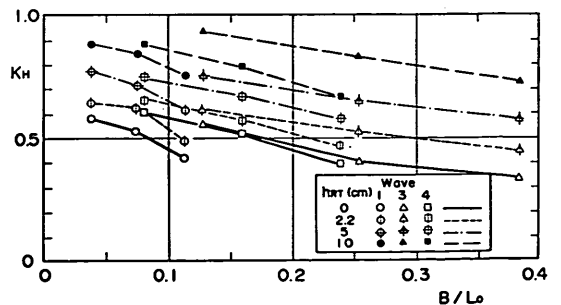


図-13 潜堤天端幅  $B/L_0$  に対する潜堤直背後の影響係数  $K_H$  の変化

は、波高が 10cm 程度であるので、天端幅が約 200cm あれば一定の波高になるが、天端幅が 90cm 以下では波高がまだ減衰してゆく途中になる。天端幅が短い場合、波高低下が十分に起きない状態で潜堤を通過して背後の水深の深い場所に進入するので波高の大きい状態のまま波が再生成されてしまうことになり、潜堤通過後の波高が高くなると考えられる。つまり、砕波によって波高の低下が完了するのにある距離を波が進行しなければならないが、天端幅が狭いと、波高減衰が完了する前に波が潜堤を通過することになって、これによって天端幅が波高変化に大きく影響すると推測される。

リーフ上の波の変形から推測すると、潜堤上では波は潜堤天端幅に対して指数関数的に減少することになるが、図-13 に示すように、 $K_H$  の値は  $B/L_0$  の増大に対して、波形勾配の小さい  $H_0/L_0=0.012$  の波を除けば、ほぼ直線的に減少している。これは、急激な波高減衰は沖波波高の数倍以内の部分で起き、それよりも離れると、波高減衰の勾配は小さくなり、ほぼ直線的になることによると考えられる。 $H_0/L_0=0.012$  の波-1 で  $K_H$  の変化勾配は、 $B/L_0$  が大きくなると急になる傾向を示すのは、 $K_H$  を潜堤がない場合の波高に対する潜堤がある場合の波高比として定義しているため、波形勾配の小さい波では波形勾配の大きい波に比して浅水変形によって潜堤がない場合に波高が増大するためである。波形勾配の大きい  $H_0/L_0=0.036$  では図-9 および 10 に示すように浅水変形による波高の増大はほとんどないために、 $K_H$  は  $B/L_0$  の増大とともに直線的に低下することになる。

同一の波形勾配を持つ波-3 と 4 を比較してみると、波高の大きい波-4 の  $K_H$  の変化勾配は波-3 より少し急になっている。このことは、 $K_H$  の変化勾配には、リーフ上における波の変形と同様に潜堤の場合も潜堤の天端幅と波高の比が影響していると思われる。しかし、 $B/L_0$  に対する  $K_H$  の変化勾配の変化は僅かであり、この影響は小さいものと考えられる。 $B/L_0$  に対する  $K_H$  の変化勾配は、同一の波条件では天端水深によらず同じ値を示し、天端水深に関係しないことがわかる。

(4) 潜堤直背後の波高影響係数の算定法

3.3(2) で述べたように、 $K_H$  の変化は潜堤の相対天端水深  $h_{RT}/H_0'$  が大きくなるほど、 $K_H$  の変化勾配は減少する傾向にあり、 $h_{RT}/H_0'$  と厳密には線形ではない。しかし、本実験の範囲内においては、 $K_H$  と  $h_{RT}/H_0'$  とが線形関係にあるとして  $K_H$  の値を算定してもその誤差は小さい。

また、3.3(3) で述べたように  $K_H$  は、波形勾配の大

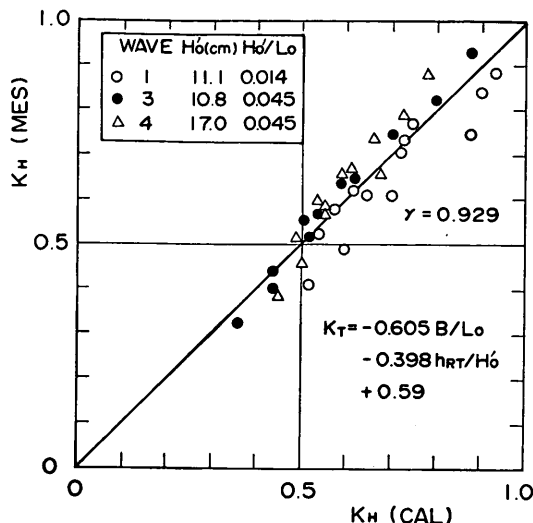


図-14 波形勾配を考慮しない場合の潜堤影響係数の推定精度

きい  $H_0/L_0=0.036$  の波では  $B/L_0$  の増大に伴ってほぼ直線的に減少し、波形勾配の小さい  $H_0'/L_0=0.012$  の波では  $B/L_0$  が大きくなるに従って、 $K_H$  の減少勾配が急になる傾向を示す。しかし、第一次近似として  $K_H$  が  $B/L_0$  と直線関係にあると考えても大きな差はないと推定される。そこで、 $K_H$  が  $h_{RT}/H_0'$  と  $B/L_0$  に対して線形関係にあるとして、最小二乗法で  $K_H$  の式を求めると

$$K_H = -0.61B/L_0 + 0.40h_{RT}/H_0' + 0.59 \dots\dots(8)$$

となった。式(8)を用いて計算した  $K_H(cal)$  と実験値  $K_H(mes)$  とを比較したのが図-14 である。この図でわかるように式(8)は比較的よい相関を与えるが、波形勾配の小さい波-1 に対する計算値は実験値より大きく、また、波形勾配の大きい波に対する計算値は実験値より小さくなる傾向を示している。 $K_H$  には波形勾配も関係していることは既に述べたが、図-14 にもはっきり現れている。そこで、潜堤直背後の  $K_H$  が  $h_{RT}/H_0'$ 、 $B/L_0$  および  $H_0'/L_0$  とそれぞれ線形関係に在るとして、最小自乗法を用いて関係式を求めると次式のようにになった。

$$K_H = -0.92B/L_0 + 0.42h_{RT}/H_0' + 3.8H_0'/L_0 + 0.51 \dots\dots(9)$$

潜堤直背後の  $K_H$  の推定式(9)を用いて計算した  $K_H(cal)$  と実験値  $K_H(mes)$  を比較したのが図-15 である。この図からわかるように、計算値は実験値とよく一

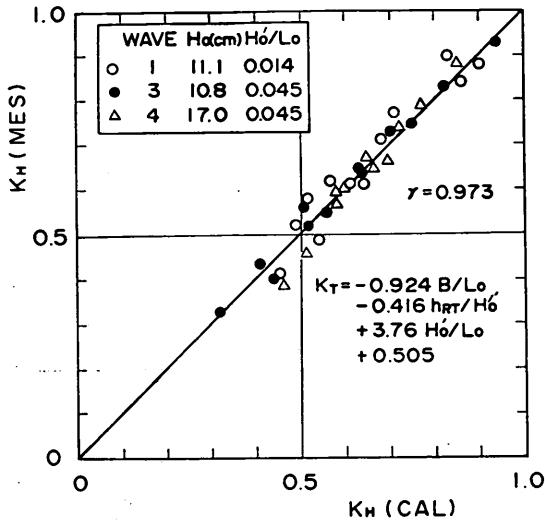


図-15 波形勾配を考慮した場合の潜堤影響係数の推定精度

致し、相関係数も  $r=0.973$  と比較的高い。また、図-15 においては図-14 のように計算値と実験値が特定の傾向でずれることもなく、 $45^\circ$  の実線の周りにばらついている。その結果、本実験の範囲では、式(9)で潜堤直背後の  $K_H$  が算定できることがわかった。

式(9)において、 $H_0'/L_0$  の係数が大きく与えられているが、本実験の範囲では  $H_0'/L_0=0.014\sim 0.045$  であるので、 $K_H$  の値に与える  $H_0'/L_0$  の影響は  $0.05\sim 0.17$  である。 $H_0'/L_0$  が与える影響に比較して、 $B/L_0$  や  $h_{RT}/H_0'$  が与える影響は  $0\sim 0.4$  となって大きい。

### 3.4 潜堤による平均水位の上昇量

3.2 で述べたように、潜堤上で波が砕波することによって潜堤背後では大きく平均水位が上昇する。この平均水位の上昇量は、潜堤天端水深が小さいほど砕波による波高減衰が増大するため、大きくなる。図-16は、潜堤上での砕波による平均水位の上昇量  $\bar{\eta}/H_0'$  と潜堤天端水深  $h_{RT}/H_0'$  との関係を示したものである。平均水位の上昇量は、潜堤の天端水深が浅いほど大きくなっているが、 $h_{RT}/H_0' > 0.5$  では天端水深の減少に対する平均水位の増大勾配は小さく、 $h_{RT}/H_0' < 0.5$  になると天端水深の減少に伴って、急激に増大している。図-16 に示す平均水位の増大傾向は、図-16 における  $h_{RT}/H_0'$  を  $h/H_0'$  としてみたときの、図-8~10(a) に示すような一様勾配における平均水位の上昇量の増大傾向とよく類似している。しかし、潜堤による平均水位の上昇量は、一様勾配斜面において  $h_{RT}$  に等しい  $h$  での平均水位

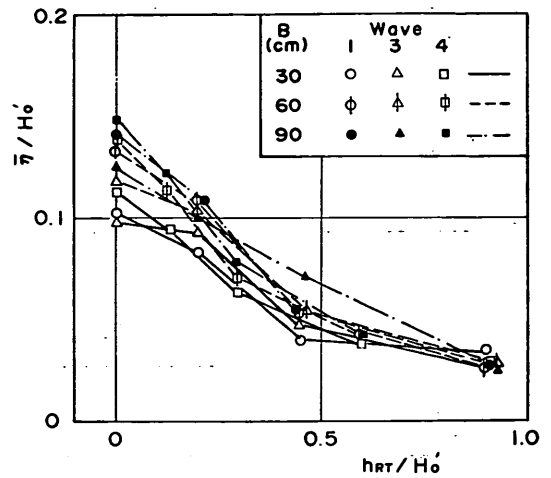


図-16 潜堤天端水深  $h_{RT}/H_0'$  に対する平均水位の上昇量  $\bar{\eta}/H_0'$  の変化

の上昇量より大きくなる。これは、一様勾配斜面では砕波によって波高が徐々に減衰するのに対して、潜堤上では波が急激に砕波するためラジエーションストレスが大きくなることによる。そのため、一様勾配斜面における計算結果をそのまま適用することができないので、平均水位の上昇量を実験結果から算定することにした。

平均水位の上昇量は、 $h_{RT}/H_0'$  に対して連続的に変化すると考えられるが、ここでは、図-16 に示した  $\bar{\eta}/H_0'$  の変化から  $h_{RT}/H_0'$  の値が  $0.5$  より大きい場合と小さい場合に分けて、それぞれについて直線で近似することにした。平均水位の上昇量は、図-17 に示すように  $B/L_0$  の増大によって少し増加するが、その変化は  $h_{RT}/H_0'$  の値による変化より小さい。そこで、平均水位の上昇量が  $h_{RT}/H_0'$  の値ばかりでなく  $B/L_0$  や  $H_0'/L_0$  にも関係し、これらの無次元量とそれぞれ直線関係にあると仮

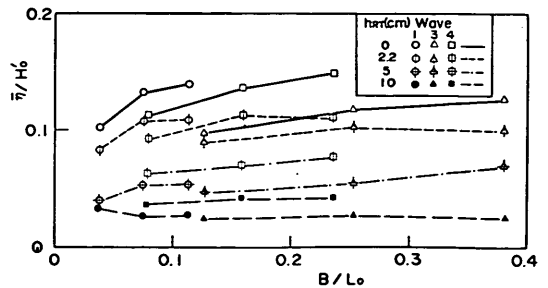


図-17 潜堤天端幅  $B/L_0$  に対する平均水位の上昇量  $\bar{\eta}/H_0'$  の変化

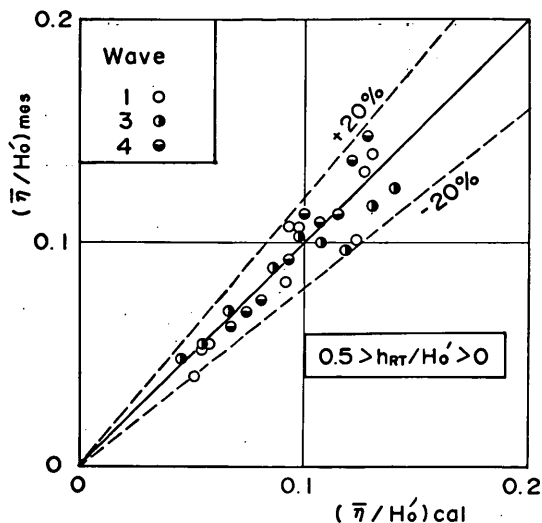


図-18(a) 平均水位上昇量に対する推定精度  $0 < h_{RT}/H_0' < 0.5$

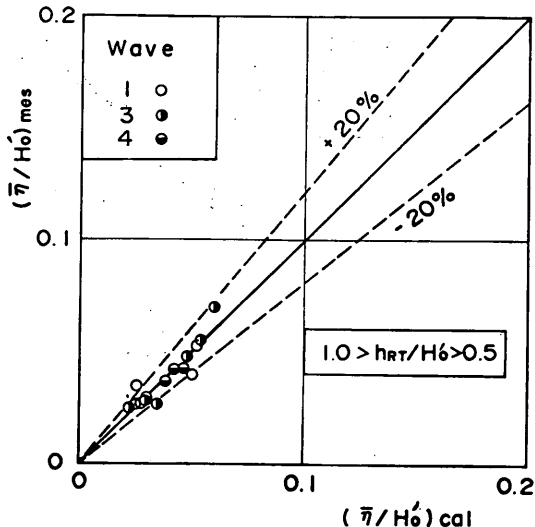


図-18(b) 平均水位上昇量に対する推定精度  $0.5 < h_{RT}/H_0'$

定して、最小自乗法で関係を求めた。その結果、次式のようにになった。

$0 < h_{RT}/H_0' < 0.5$  の場合

$$\bar{\eta}/H_0' = 0.085B/L_0 + 0.16h_{RT}/H_0' - 0.38H_0'/L_0 + 0.125 \dots \dots \dots (10)$$

$h_{RT}/H_0' > 0.5$  の場合

$$\bar{\eta}/H_0' = 0.048B/L_0 + 0.056h_{RT}/H_0' - 0.21H_0'/L_0 + 0.076 \dots \dots \dots (11)$$

この式の推定精度を調べるために、式(10)および(11)で計算される平均水位の上昇量と実験値との比較を行った。図-18(a)は  $h_{RT}/H_0' < 0.5$  の場合、(b)は  $h_{RT}/H_0' > 0.5$  の場合の比較図である。図-18に示すように、計算値と実験値の関係はほぼ45°の線の周りにばらついており、20%の誤差を許容するなら、実験値はほぼすべてこの許容範囲内にある。後述の越波流量の推定に利用するには、実用上この程度の推定精度で十分だと考える。しかし、式(10)と(11)はそれぞれ独立に求めているため、 $h_{RT}/H_0' = 0.5$  で式(10)と(11)は連続しないので、後述の越波流量の推定に用いる式としては、次式で算定する。

$$\bar{\eta}/H_0' = \max \{ \bar{\eta}_1/H_0', \bar{\eta}_2/H_0' \} \dots \dots \dots (12)$$

ここに、 $\max \{ a, b \}$  は  $a, b$  の内大きい方の値、

$$\bar{\eta}_1/H_0' = 0.085B/L_0 + 0.16h_{RT}/H_0' - 0.38H_0'/L_0 + 0.125$$

$$\bar{\eta}_2/H_0' = 0.048B/L_0 + 0.056h_{RT}/H_0' - 0.21H_0'/L_0 + 0.076 \dots \dots \dots (13)$$

である。

### 3.5 潜堤背後の長周期水位変動

潜堤は、その天端上で波を碎波させ、波高を減少させる効果が在り、潜堤背後の海底地形の大きな変動を抑えるのにも有効に働くと考えられる。しかしながら、潜堤上で碎波した波は、潜堤背後の長周期水位変動を増幅させる可能性が在り、波高が低減するからといってすぐ潜堤背後の海浜の変動を減少させることに結びつくことにはならない。そこで、潜堤背後の長周期水位変動について検討を行った。

田中<sup>2)</sup>は、潜堤背後の地形変動に関して規則波による実験を行い、短周期波に対しては潜堤の砂浜安定効果は大きい、長周期の波に対しては天端幅が相当広くないとその効果が現れないと述べている。この実験結果は、潜堤背後の海底地形変動には潜堤による波高減衰効果だけではなく、波形勾配に関わる現象が大きく影響していることを示している。波形勾配に関係する現象として、サーフビートのような長周期波の現象がある。サーフビートは、不規則な波群の波が来襲する場合に、波高の大きな波が続いて来襲すると、水位の上昇が大きくなり、

小さい波では水位が小さくなるため、波高の包絡分布に従う水位変動が、空間的な波高変化に随伴して海岸に襲来し、これが長周期波となって海岸で反射され、定常波になったものと考えられている。このように考えると、田中が行ったような規則波に関してはサーフビートのような長周期波は発生しないことになるが、砕波そのものは非常に不安定な現象であり、少しの条件で砕波の状態が変化するため、このような変化で生じた波が、海岸と潜堤との間での多重反射によって増幅されることが考えられる。水位上昇そのものは波高の0.1倍程度であり、長周期の水位変動にしても、平均水位の変動と同程度と考えられるため、記録紙上には現れにくいと推測される。このように考えると、規則波の場合でも長周期の水位変動が現れている可能性がある。このような長周期波が潜堤によって低減されていれば、潜堤背後の海浜を潜堤がない場合より大きく変動させることはないと推定される。そこで、潜堤を設置した場合としない場合について長周期波の強さを比較した。

図-19は、潜堤直背後における長周期波の水位変動の二乗平均  $\zeta_{rms}$  の変化を示したものである。長周期波としては、沖波におけるスペクトル特性から判断して、沖波有義波周期の概ね2.3倍より長い周期の波としてい

る。図-19の縦軸の  $(\zeta_{rms})_0$  は、沖波の水位変動の二乗平均である。また、横軸は合田がサーフビートの解析に用いたものを採用している。図中の破線は1/30の一様勾配での実験において、合田<sup>7)</sup>が求めた次式の関係式を図示したものである。

$$\zeta_{rms}/(\zeta_{rms})_0 = 0.068 / \sqrt{(1+h/H_0')(H_0'/L_0)} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $H_0'$  は換算沖波波高、 $L_0$  は沖波波長、 $h$  は測点での静水深である。潜堤がない場合の長周期波の実験値が、白丸で示してある。潜堤がない場合の長周期波の  $\zeta_{rms}$  は、破線の式(4)より少し小さいが、その変化は破線に沿って減少している。潜堤を設置すると、天端水深が浅い  $h_{RT}/H_0' < 0.2$  では、長周期の変動量は潜堤がない場合に比して小さくなる。特に、波形勾配の大きい  $H_0'/L_0 = 0.036$  の場合には、長周期の変動量が小さくなる。例えば、 $h_{RT}/H_0' = 0$  の場合、 $H_0'/L_0 = 0.036$  では、潜堤がない場合の約1/2になるのに対して、 $H_0'/L_0 = 0.012$  では1/1.1程度である。長周期変動量の変化は、潜堤がある場合でも、式(4)の線にはほぼ平行になっており、式(4)の係数を  $h_{RT}/H_0'$  の値毎に変化させることによって表すことができそうである。 $h_{RT}/H_0'$  が大きくなると、 $\zeta_{rms}/(\zeta_{rms})_0$  の値は、潜堤がない場合に近づき、 $h_{RT}/H_0' > 0.5$  ではほぼ潜堤がない場合に一致する。以上のように、潜堤を設置することによって、長周期の水位変動は増幅されることはなく、かえって小さくなることがわかった。このことは、潜堤を設置することによって、波高を小さくすると同時に、水位の長周期変動も低下させ、背後の海浜を安定させる可能性が強いことを示唆している。

#### 4. 潜堤による護岸越波流量の低減効果

##### 4.1 潜堤による護岸越波流量の変化

図-20(a)~(c)は、護岸天端高さによる無次元越波流量の変化を示したものである。図中の白丸は潜堤を設置しない場合、黒丸は潜堤を設置した場合の越波流量を示している。これらの3図ともに、潜堤天端水深  $h_{RT}$  が5cmの場合であるが、図-20(a)は波-1で、波形勾配が小さい場合、図-20(b)と(c)はそれぞれ波-3と4で、波形勾配が0.036と大きい場合である。

3図ともに、潜堤の有無にかかわらず、護岸天端高さが高くなればなるほど、越波流量は減少する。護岸の設置水深が浅くなると、潜堤がない場合には、入射波高が砕波によって大きく減衰するため、越波流量が急激に減少するのに対して、潜堤が設置されている場合には、潜

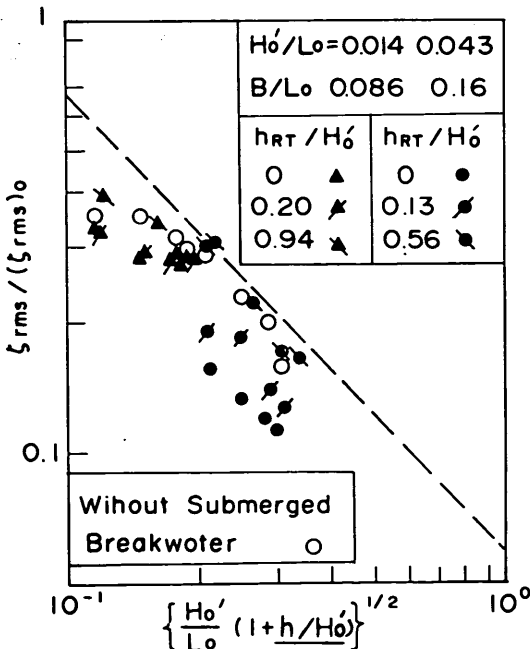


図-19 潜堤の設置による長周期水面変動の特性



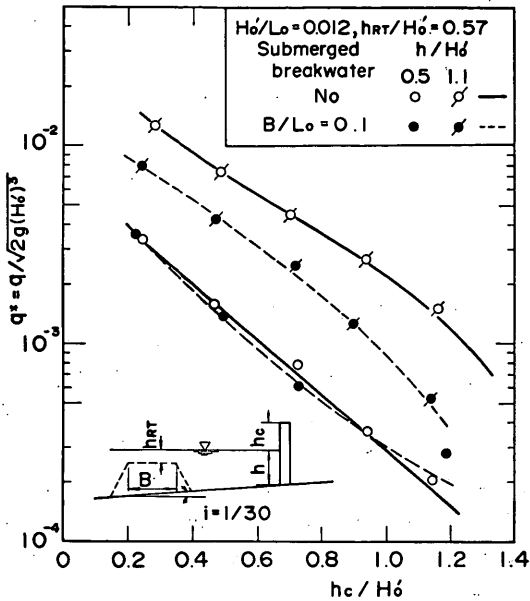


図-20(a) 潜堤設置位置による越波流量の変化 (波-1 の場合)

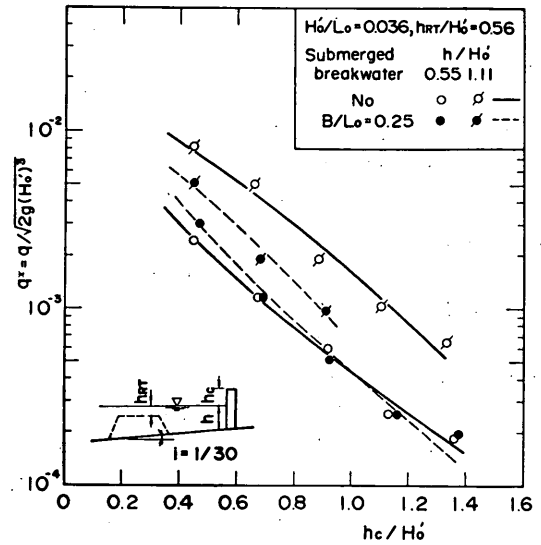


図-20(b) 潜堤設置位置による越波流量の変化 (波-3 の場合)

堤上において既に砕波しているため、水深が浅くなることによる波高の変化は小さく、護岸設置水深が浅くなくても越波流量はあまり減少しない。例えば、図-20(c)の場合、護岸設置水深が  $h/H_0' = 0.76$  から 0.39 に変化すると、越波流量は潜堤がない場合には  $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$  に減少するのに対して潜堤があると  $\frac{3}{4} \sim \frac{1}{2}$  にしか減少しない。

潜堤を設置することによる越波流量の変化をみると、 $h/H_0' > 0.5$  では、潜堤を設置することによって越波流量は急激に減少している。例えば、越波流量は、潜堤がない場合に比較して、図-20(a)では約  $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ 、図-20(b)では約  $\frac{1}{2}$ 、図-20(c)では約  $\frac{1}{3}$  に減少する。一方、護岸設置水深が浅い  $h/H_0' < 0.5$  の場合には、潜堤の有無によって護岸越波流量はほとんど変化しない。また天端高さによる越波流量の減少も、図-20(c)の場合に、潜堤があると急勾配で減少するけれども、図-20(a)および(d)ではほとんど変わらない。潜堤設置によるこのような越波流量の変化傾向は、前述の潜堤による波高変化から次のように定性的に説明できる。潜堤背後の水深の深い場所に護岸がある場合には、潜堤天端上で砕波して、波高が低下した波がそのまま進入してくるので、潜堤がない場合に比較して波高がかなり小さくなり、越波流量が減少する。一方、護岸の設置水深が浅いと、護岸に達する前に、潜堤上で砕波した波が再び砕波し始め、再

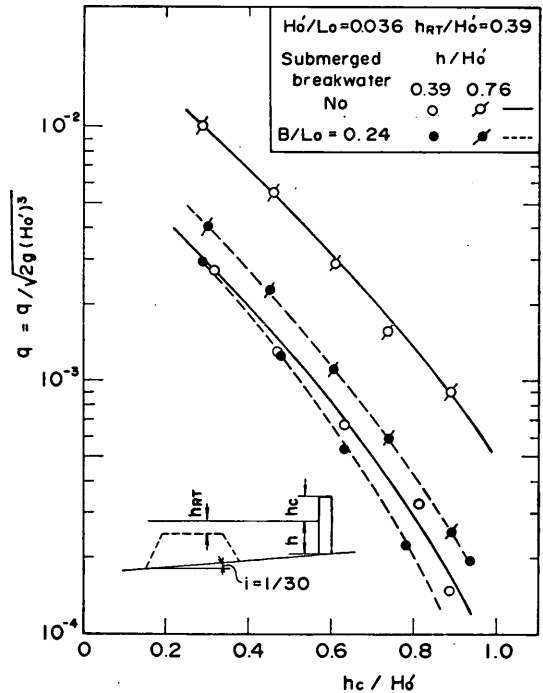


図-20(c) 潜堤設置位置による越波流量の変化 (波-4 の場合)

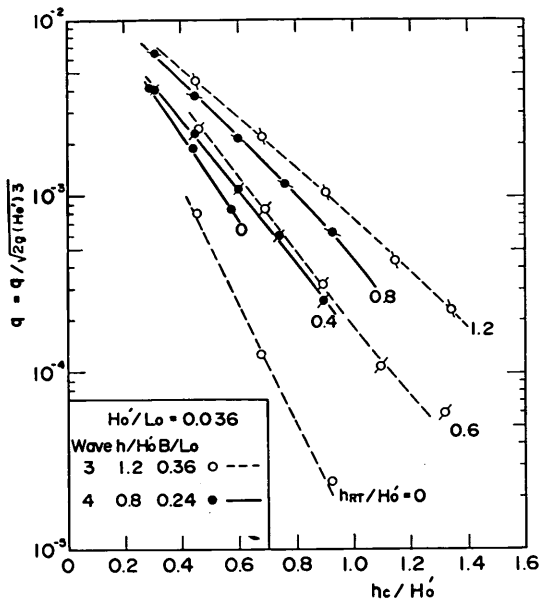


図-21 潜堤天端水深による越波流量の変化

砕波し始めると、既に述べたように波高は潜堤がない場合とあまり変わらず、また、平均水位の上昇量も潜堤がない場合とあまり変わらないため、越波流量は潜堤がない場合と同じような値になる。

このように潜堤による波高変化と護岸の設置水深との関係から越波流量の変化が説明できるが、護岸の設置水深が深い場合には、潜堤がない場合に比べて潜堤があると、潜堤上での砕波によって平均水位が上昇するので、波高が減少したほどには越波流量が下がらないと考えられる。

図-21 は波形勾配の大きい波-3と4について潜堤天端水深をパラメータにして、護岸天端高さに対する越波流量の変化を示したものである。この場合、潜堤天端幅はどちらも  $B=90\text{cm}$  である。この図によると、潜堤天端水深が浅くなればなるほど越波流量は低減する。これは、式(9)で示すように、天端水深が浅いと伝達波高が小さくなるためである。また、天端水深が浅いほど、護岸天端高さに対する越波流量の低減勾配は大きくなる。特に、波-3の場合に顕著になる。天端水深が浅くなると、波-4の越波流量が波-3より大きい傾向を示す。例えば、 $h_{RT}/H_0' = 0$  の場合、 $hc/H_0' = 0.5$  では波-4の無次元越波流量は波-3の約3倍、また波-3の  $h_{RT}/H_0' = 0.6$  と波-4の  $h_{RT}/H_0' = 0.4$  とはほぼ同じ無次元越波流量である。このように潜堤天端水深が浅いと、波高の大きい波-4の無次元越波流量がなぜ大きくなるか、波-3と

波-4で同じ相対天端水深になる  $h_{RT}/H_0' = 0$  場合を例にとって検討してみる。波-3と4では、 $h_{RT}/H_0'$  と  $H_0'/L_0$  は両者とも同じで、波-3の場合の  $B/L_0$  が大きいために、式(9)からは波-3の場合の相対水位上昇は  $\bar{\eta}/H_0$  は波-4の場合より大きくなる。このように、水位上昇からだけ考えると、波-3の場合が無次元越波流量は大きくなってよいと考えられる。一方、式(9)の伝達波の波高を考えると、 $K_H$  の値は波-4で0.42、波-3で0.31となっており、波-4の場合が波-3の場合より大きくなり、伝達波高に対する護岸設置水深の比は波-4で1.9、波-3で3.8となっており、波-3と波-4とは大きく異なる。伝達波高に対する護岸設置水深のこの差の影響は大きく、波-4の場合には護岸水深が丁度伝達波がほぼ再砕波する地点に対応し、越波流量が大きい地点に護岸があることになるのに対して、波-3では護岸水深が伝達波高に対して深く、越波流量がそれほど大きくない地点に護岸があることになる。このことから、図-21における波-3と4の無次元越波流量の差は伝達波高に対する護岸設置水深の比の影響だと推定される。

#### 4.2 潜堤の護岸天端高さの低減効果

4.1 で得られた結果から越波に対する潜堤の効果を判定するためには、潜堤背後の伝達波高  $H_T$  と護岸設置水深  $h$  の比が重要になることが推測された。そこで、潜堤直背後の伝達波高に対する護岸設置水深との比を横軸にとって、同一越波流量に関して潜堤がない場合とある場合の護岸天端高さの比  $\beta$  (換算天端高係数) の変化を示したのが図-22である。図中の破線は、平均的な変化曲線として目安のため入れたものである。

この図でわかるように、護岸設置水深と伝達波高との比が  $h/H_T < 1.0$  では、 $\beta$  の値は、潜堤の天端水深が静水面と等しい  $h_{RT}/H_0' = 0$  の場合に1.0を大きく越える場合が数点あるが、他のほとんどの実験値は  $\beta = 1.0$

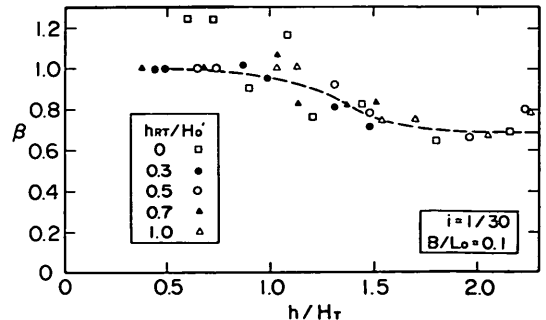


図-22 護岸設置水深による天端高さ低減係数の変化

付近にプロットされている。 $h/H_T < 1.0$  の範囲では、 $\beta = 1.0$  とみなすことができる。このことは、 $h/H_T < 1.0$  では、潜堤を設置してもしなくても越波流量はほとんど変化しないことを示している。 $h_{RT}/H_0' = 0$  の場合に  $\beta$  が 1.0 を越える場合があるのは、後述のように、潜堤と護岸との多重反射の影響による長周期水位変動の増大のためではないかと考える。

1.0  $< h/H_T < 1.5$  の範囲では、護岸設置水深が深くなるほど、つまり、 $h/H_T$  が大きくなるほど  $\beta$  の値は小さくなる。そして、 $h/H_T > 1.5$  では、 $\beta$  の値は約 0.7 の一定値になる。

以上のことから、潜堤を護岸の前面に設置して越波流量を低減させようとする場合、護岸設置水深が潜堤による伝達波高以上なくては潜堤による越波流量低減効果は現れない。潜堤による越波流量低減効果を最大限に発揮させるためには、護岸水深が伝達波高の 1.5 倍以上なくてはならない。この場合、潜堤を設置することによって、潜堤を設置しない状態における必要護岸天端高さの 0.7 倍の天端高さですむことになる。しかし、潜堤の設置は越波流量を低減する効果だけではなく、潜堤背後の海浜を安定させる効果もあるので、潜堤の設置にはこの効果も考慮する必要がある。

### 4.3 潜堤設置における護岸越波流量の推定とその精度

3.4, 3.5, 4.1 および 4.2 で検討した結果によると、潜堤は、その背後の波高を低下させることと、平均水位を上昇させることによって背後の護岸越波流量と密接に関係しているが、潜堤それ自体が護岸前面にあることによる護岸越波流量への影響は少ない、つまり、護岸越波流量には、潜堤と護岸との間での波の多重反射による影響は小さいと推測される。そこで、潜堤による波高変化および平均水位の上昇量と、護岸越波とをそれぞれ分けて考え、護岸越波流量を次のような順序で求めることができると仮定した。

(1) 式(9)によって、まず、潜堤直背後の伝達波高  $H_T$  を算定する。

(2) 次に、式(12)によって、潜堤上で碎波した波による平均水位の上昇量  $\bar{\eta}$  を算定する。

(3) 潜堤上で碎波した波によって起こされた平均水位の上昇量  $\bar{\eta}$  だけ、潜堤背後の平均水位が一様に上昇すると仮定する。この仮定によって、護岸の設置水深は  $h + \bar{\eta}$  とし、護岸天端高さは  $h_c - \bar{\eta}$  とする。

(4) 潜堤背後の水位の上昇量を考慮して、潜堤直背後での浅水係数  $K_S$  を合田の算定図より求める。このときの波高は潜堤伝達波高  $H_T$  を用い、波の周期は潜堤に

よって変化しないと仮定する。このようにして求めた  $K_S$  で  $H_T$  を除して、潜堤がないとしたときに潜堤直背後で  $H_T$  の波高になる沖波波高  $H_{T_0}$  を求める。

$$H_{T_0} = H_T / K_S \dots\dots\dots (15)$$

(5) 沖波波高  $H_{T_0}$ 、護岸設置水深  $h + \bar{\eta}$ 、護岸天端高さ  $h_c - \bar{\eta}$  および波形勾配  $H_{T_0}/L_0$  を用いて、潜堤がない条件での越波流量を求め、この越波流量が潜堤を設置したときの護岸越波流量とする。

(1)~(5)に示した順序で求めた越波流量を沖波波高  $H_0'$  で無次元化した

$$q^*_{cal} = \sqrt{q_{cal} / 2gH_0'^3} \dots\dots\dots (16)$$

と実験から求めた無次元越波流量を  $q^*_{mos}$  で表して比較を行った。ただし、この越波流量の算定に当たっては、合田<sup>9)</sup>の越波流量算定図を参照して、著者ら<sup>10)</sup>が求めた護岸越波流量算定式を用いた。この算定式は、図-23に示してある。斜面勾配  $1/30$  に関してこの比較を行ったのが図-24である。図-24(a)は潜堤天端幅が 30cm、(b)は 60cm、(c)は 90cm の場合である。

図-24(a)および(b)の場合、無次元越波流量が大きくなれば上記の手法で求めた計算値が実験値より大きくなる傾向があり、また、無次元越波流量が小さくなれば計算値が実験値より小さくなる傾向がある。図-24(c)ではバラツキは大きいけれども、計算値と実験値は比較的よく一致している。

これらの図において、実験値が特に計算値より大きくなるのは、潜堤天端水深が浅い  $h_{RT} = 0\text{cm}$  の場合である。図-24(a)および(b)の場合、 $h_{RT} = 0\text{cm}$  では計算値より実験値は10倍以上大きくなっている。この傾向は、図-25の斜面勾配  $1/20$  の場合にも現れている。この図では2オーダー程度実験値が計算値より大きくなっている。このように潜堤天端水深が非常に浅くなった場合、実験の越波流量が増大する原因としては、(1)~(5)に示した計算法では考慮していない、潜堤と護岸との間での波の多重反射によるものと思われる。潜堤の反射率について既に述べたように、入射波の有義波周期程度では 0.2 以下であり、この程度の反射率では実験値が示すほどの越波流量の増大は考えられない。このような越波流量の増大を起こしたのは、潜堤からの反射率が大きくなると推測される長周期の波の多重反射による増大のためと考えている。しかし、これについては実験によって十分な確認ができなかった。

図-24(a)~(c)から計算値と実験値の平均的な関係式を求めると以下のようになった。ただし、 $h_{RT} = 0\text{cm}$

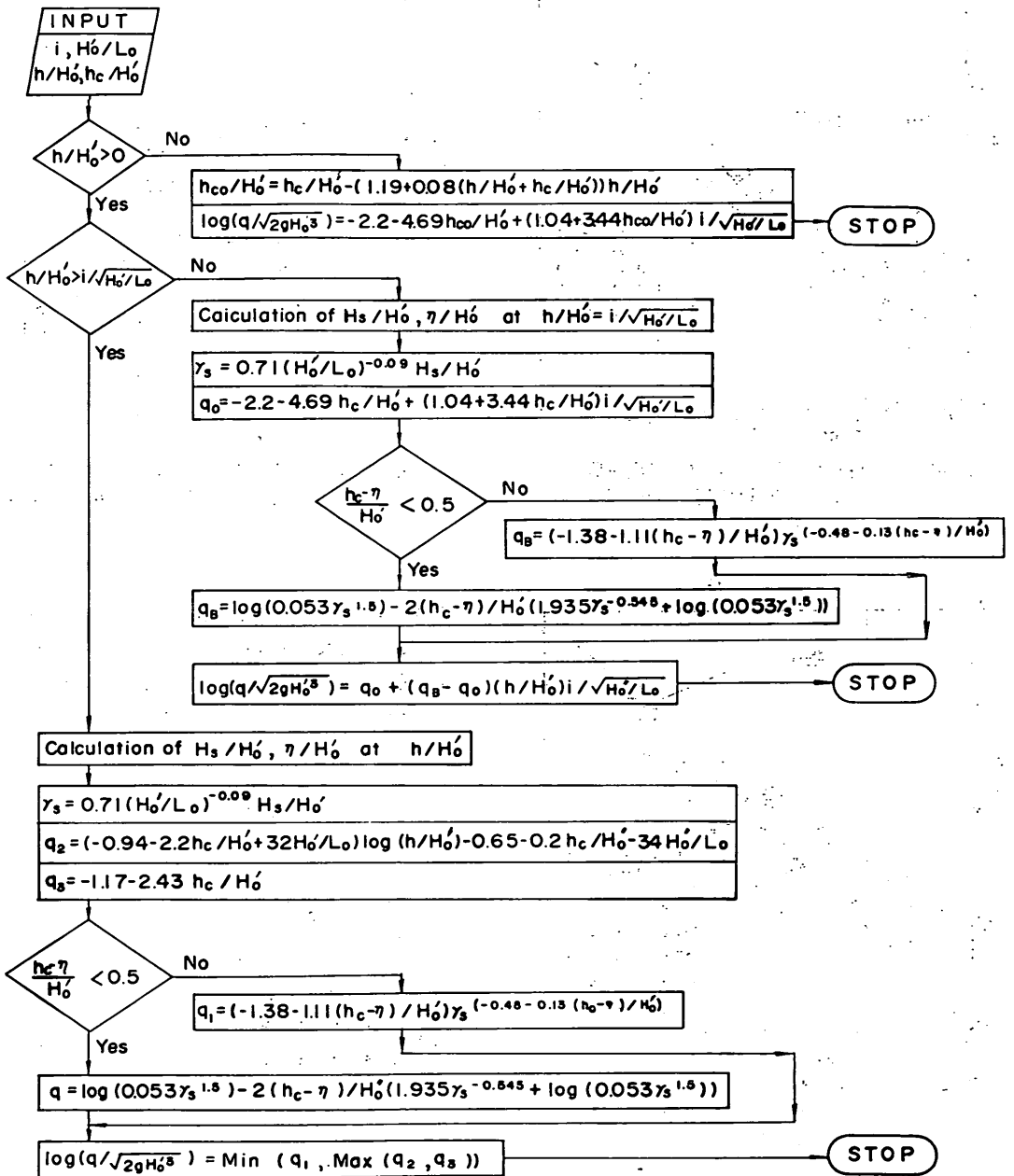


図-23 直立護岸に対する越波流量算定フローチャート

の場合については、上記の理由から計算値と実験値の関係式を求める際には除外している。

a) 図-24(a)の場合

$$q^*_{mes} = 0.31 (q^*_{cal})^{0.79} \dots\dots\dots (17)$$

b) 図-24(b)の場合

$$q^*_{mes} = 0.30 (q^*_{cal})^{0.81} \dots\dots\dots (18)$$

c) 図-24(c)の場合

$$q^*_{mes} = q^*_{cal} \dots\dots\dots (19)$$

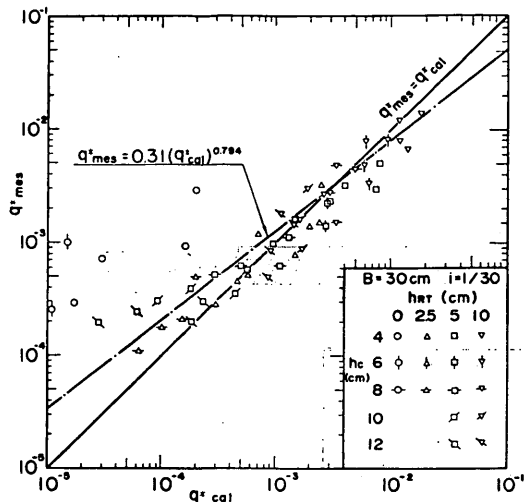


図-24 (a) 斜面勾配 1/30 における潜堤設置による越波流量算定手法の推定精度 (B=30cm)

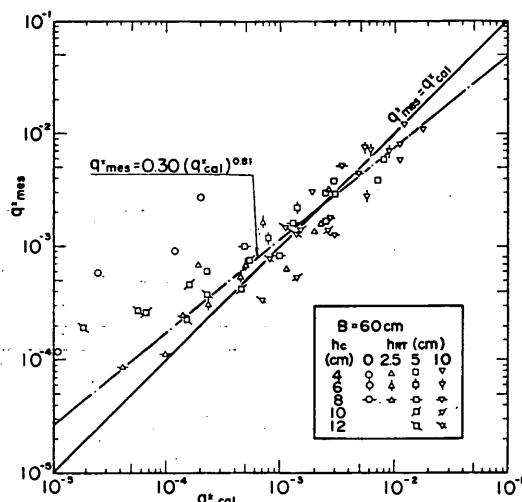


図-24 (b) 斜面勾配 1/30 における潜堤設置による越波流量算定手法の推定精度 (B=60cm)

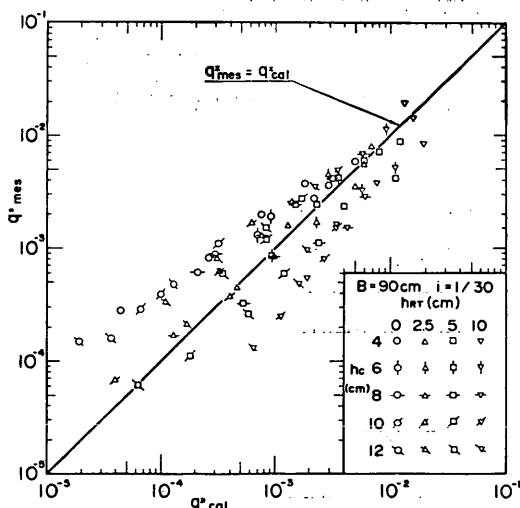


図-24 (c) 斜面勾配 1/30 における潜堤設置による越波流量算定手法の推定精度 (B=90cm)

式(7)~(9)の間には大きな差がなく、補正は安全側に行うのがよいことなどを考慮して、潜堤を設置した場合の越波流量としては、(1)~(5)の手法で求めた越波流量に対して、次式のような補正を行うことにした。

$$q^{*est} = 0.30 (q^{*cal})^{0.81} \dots\dots\dots (20)$$

ここに、 $q^{*est}$  は 潜堤を設置したときの無次元越波流量

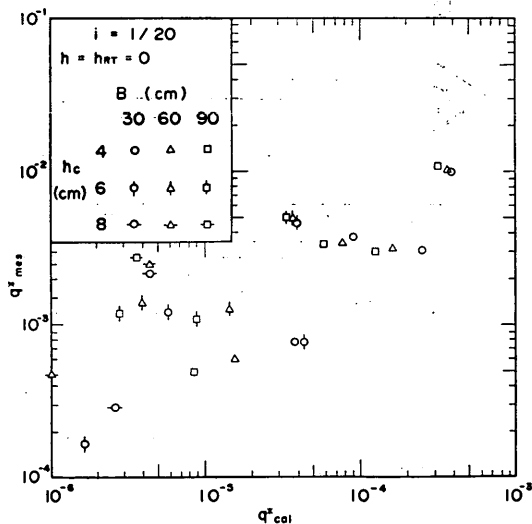


図-25 斜面勾配 1/20 における潜堤設置による越波流量算定手法の推定精度 (hrr=0cm)

式(7)~(9)で推定された越波流量は実験値との比較では以下のような推定誤差を含んでいる。

$q^{*cal} = 10^{-2}$  では、 $q^{*cal}$  の 0.8~1.5 倍

$q^{*cal} = 10^{-3}$  では、 $q^{*cal}$  の 0.4~2 倍

$q^{*cal} = 10^{-4}$  では、 $q^{*cal}$  の 0.2~3 倍

このような推定誤差の範囲があることや無次元越波流量が小さい場合に実験値が大きくなる傾向があること、

の推定値である。ただし、式(10)のような補正をしても、潜堤の天端水深がほとんど0のような場合には、さらに大きくなる可能性があることに注意する必要がある。

潜堤を設置すると、潜堤上での砕波によって潜堤背後の平均水位が増大し、あたかも静水深が増大したようになる。そのため、護岸の天端高さが低い場合、潜堤を設置することによってかえって越波流量が増大する場合があるので十分な検討が必要である。また、潜堤を断続的に配置した場合、潜堤の開口部を通して水塊が流れ出し、本実験で算定したほどには平均水位が増大しないことも考えられる。

## 5. あとがき

潜堤を設置した場合に潜堤背後における波高の変化や平均水位上昇量あるいは長周期の水面変動について実験的考察を行うとともに、潜堤背後の護岸に関して、越波実験を行い、越波流量の推定法を検討した。その結果、得られた結論は以下の通りである。

- (1) 潜堤上での砕波によって波高は大きく低減し、小さな波高となって潜堤背後に伝達する。伝達した波はほとんど波高を変化させることなく伝播するが、水深が浅くなると、再砕波を起し、波高が再び減少する。再砕波による波高の変化は合田の提案した砕波変形の波高算定図にほぼ一致する。
- (2) 潜堤による伝達波高は、潜堤がある場合とない場合の波高比  $K_H$  (潜堤の影響係数) として表し、潜堤の相対天端幅  $B/L_0$ 、潜堤の相対天端水深  $h_{RT}/H_0'$  と沖波の波形勾配  $H_0'/L_0$  の関数として、式(9)のような経験式を提案した。
- (3) 潜堤上での砕波によって潜堤背後では平均水位が大きく増大する。潜堤背後では、再砕波するまでは波高の変化がほとんどないので、平均水位の上昇量も潜堤直背後の値をそのまま保つ。そして、再砕波し始めると、平均水位が増大し始める。再砕波による平均水位の増大は、伝達波高が大きいほど砕波による波高変化が大きいため平均水位の上昇も大きい。
- (4) 潜堤上での砕波による平均水位の上昇量として、潜堤直背後での上昇量で表し、式(10)のような経験式を求めた。平均水位上昇量は、相対天端水深  $h_{RT}/H_0'$  の値によって変化する傾向が異なるので、 $h_{RT}/H_0' < 0.5$  と  $h_{RT}/H_0' > 0.5$  に分けてそれぞれ算定式を求め、最終的に式(10)を提案した。
- (5) 潜堤背後における長周期の水面変動は、潜堤がない場合より小さくなる。特に、波形勾配が大きい場合に小さくなる傾向がある。

(6) 潜堤を設置することによって越波流量を低減させることができるが、潜堤の越波流量低減効果は護岸の設置水深と伝達波高との比  $h/H_T$  によって変化する。 $h/H_T < 1.0$  の場合には、潜堤がない場合とほとんど変わらず、潜堤の越波流量低減効果は小さい。護岸の相対設置水深が深くなると、潜堤の越波流量低減効果は大きくなり、 $h/H_T > 1.5$  では、潜堤がない場合の直立護岸の天端高さの約0.7倍まで低減できる。

(7) 潜堤背後の波高や平均水位の変化の特性から潜堤を設置した場合の越波流量の推定方法を提案した。この方法によって推定した越波流量と、実験値とを比較すると、無次元越波流量が小さい場合に推定値が実験値より小さくなり、無次元越波流量が大きくなると逆に推定値が大きくなる傾向を示した。実験値と推定値とを比較して、推定値を補正する式を求めた。

以上のような結論が得られたが、越波に関する模型実験では、本文中でも述べたように、一般に越波流量が非常に大きくバラツク傾向がある。特に、越波流量が小さいと大きくばらつくので、越波流量推定式を適用するに当ってはこのことを考慮しておくことが重要である。

本研究においては、高山が全般的な指導と取りまとめを行い、池田が実験と実験結果の整理を行ったことを付記する。

最後に、本研究を遂行するに当って、元波浪研究室員永井紀彦技官(第二港湾建設局, 横浜調査設計事務所次長)および関口忠志技官(第一港湾建設局, 富山港工事事務所), 高山優技官(第四港湾建設局, 大分港工事事務所)には実験の一部とそのデータ解析を行って頂いた。また、波浪研究室員立石義博技官には実験を手伝って頂いた。ここに記して、感謝の意を表する次第である。  
(1988年9月30日受付)

## 参考文献

- 1) 中村充・白石英彦・佐々木泰男: 潜堤による消波について, 第13回海岸工学講演会講演集, 1966, pp. 76~79.
- 2) 田中則夫: 天端幅の広い潜堤の波浪減殺および砂浜安定効果について, 第23回海岸工学講演会論文集, 1976, pp. 152~157.
- 3) 永井莊七郎・倉田克彦・長谷川恵一: 潜堤の消波効果に及ぼす天端幅の影響, 第23回海岸工学講演会論文集, 1976, pp. 303~307.
- 4) 高山知司・永井紀彦・関口忠志: 広天端幅潜堤の波浪低減効果に関する不規則波実験, 第32回海岸工学

- 講演会論文集, 1985, pp. 545~549.
- 5) 合田良実: 数値シミュレーションによる波浪の標準スペクトルと統計的性質, 第34回海岸工学講演会論文集, 1987, pp. 131~135.
  - 6) 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・反射の分離推定法, 港湾技研資料 No.248, 1976, 24p.
  - 7) 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.
  - 8) 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, 32p.
  - 9) 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.
  - 10) 高山知司・永井紀彦・西田一彦: 各種消波工による越波流量の減少効果, 港湾技術研究所報告, 第21巻, 第2号, 1982, pp. 151~205.

- $f$  : 周波数
- $H$  : 波高
- $H_T$  : 伝達波高
- $H_0'$  : 換算沖波波高
- $H_{1/3}$  : 有義波高
- $h$  : 水深
- $h_{RT}$  : 潜堤の天端上水深
- $hc$  : 護岸天端高
- $K_H$  : 潜堤の影響係数
- $K_S$  : 浅水係数
- $L$  : 波の波長
- $q^*$  : 無次元越波流量
- $q^*_{mes}$  : 実験で求めた無次元越波流量
- $q^*_{cal}$  : 計算で求めた無次元越波流量
- $q^*_{est}$  : 推定無次元越波流量
- $S(f)$  : 波の周波数スペクトル
- $T_{1/3}$  : 有義波周期
- $T_p$  : ピーク周波数
- $\beta$  : 換算天端高係数
- $\zeta_{rms}$  : 長周期波の水面変動の二乗平均
- $\sigma$  : 角周波数

### 記号一覧表

- $B$  : 潜堤天端幅
- $e$  : 造波板の運動振幅