

広天端幅潜堤の波浪低減効果に関する不規則波実験

高山 知司*・永井 紀彦**・関口 忠志***

1. ま え が き

離岸堤による波浪の低減効果は天端高によって大きく変化し、天端高が高い離岸堤ほど波浪の低減効果が大きいことはよく知られた事実である。しかし、波浪の低減効果のみを期待して、海岸に天端の高い離岸堤を設置すると、海岸の景観を損うばかりでなく、海水交換を悪くし、背後水域の水質を悪化させる場合もある。また、海岸防災上からは、波高の低い常時の波は波高を低減させる必要性は少なく、台風期などの異常時における高波高のみを低減させればよいと考えられる。

一方、離岸堤の天端高を静水面下に抑えた潜堤の場合、海面下にあるため、景観を損う恐れは少なく、また、海水交換にも都合がよい。さらに、潜堤の天端水深に対応した高波高のみを砕波させるため、海岸防災上においても好都合である。その上、潜堤は漁場造成のための漁礁としての機能も考えられる。このような機能を有する潜堤は、近年のように良質な海岸環境の整備が重要な課題となってきた時代においては、今後、重要な海岸構造物として建設が進められてゆくものと期待される。しかし、潜堤の設計にあたっては、防波効果や海岸保全効果などについて十分把握しておかなければならないとともに、潜堤による小型漁船の座礁などの対策も考えておく必要がある。

潜堤に関する防波効果の実験は、ほとんどが規則波によって行なわれており^{1)~3)}、不規則波による実験はほとんどない。また、潜堤背後の地形変化を小さく抑えるためには、潜堤の天端幅を広くとって、天端上で波を砕波させるのがよいと考えられる。そこで、本報告では、比較的天端幅の広い潜堤に関して不規則波を用いた実験を行ない、天端幅や天端水深による波浪の低減効果を調べている。

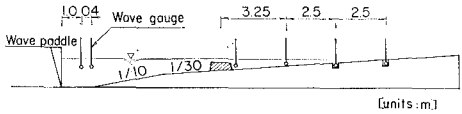
2. 実験条件と実験ケース

(1) 実験水路と波高計の配置

実験は、長さ 30 m、幅 5.0 m、深さ 1.2 m の水路を仕切壁で仕切って作った、幅 0.6 m の水路で行なった。本水路には、造波板幅 5.0 m のピストン型不規則波造波機が設置されている。不規則波造波信号は、ピストン型造波機の造波効率および本造波機の運動特性を考慮して、発生波が Bretschneider・光易型のスペクトルを持つように、ミニコンピュータを用いて作成した。

模型床は木製で、水路床から 35 cm の高さまでの先端部は 1/10 勾配とし、それより背後は 1/30 勾配の一樣斜面とした。ただし、模型床の勾配急変部付近で砕波が生じないように、水深は十分深くとした。模型潜堤は、480 g のテトラポッド模型の 3 層積み構造とした。

波高計は、図一に示すように潜堤より沖合いに 2 台、潜堤背後に 4 台用いた。沖合いの波高計 2 台は、入反射波分離して入射波高の測定に用い、潜堤背後の 4 台は、潜堤による波高変化を調べるために、潜堤直背後と汀線およびその中間の 2 点に設置した。



図一 模型断面と波高計の配置

(2) 実験ケース

実験に用いた不規則波の沖波波高 H_0 および周期 T_0 は、表一に示す値を目標とした。しかし、実際に発生した波は、波の非線型性や反射波の影響などで表一の値よりは若干高くなっている。実験では、各不規則波に関して 2 種類の波連を用いて行ない、実験結果はその平均値で整理した。

表一 実験不規則波の目標諸元

WAVE	H_0 (cm)	T_0 (sec)	H_0/L_0
1	10	2.31	0.012
2	10	1.33	0.036
3	15	1.63	0.036

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部 波浪研究室長
** 正会員 運輸省港湾局 建設課
*** 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部 波浪研究室

模型潜堤の天端幅 B は, 30, 60 および 90 cm の 3 種類とし, 各天端幅に対して天端水深を 0, 2.2, 5.0, 10 cm に変えて実験した。模型潜堤がある場合とない場合とを比較するために, 潜堤がない場合についても実験を行なった。

3. 潜堤による波の変形

(1) スペクトル形状の変化

天端水深 $h_{RT}=0$ cm で, 天端幅 $B=60$ cm の場合の潜堤による波浪スペクトルの変化を図-2 に示す。図中の太線が潜堤がある場合のスペクトルで, 細線が潜堤がない場合のスペクトルである。

図-2 からわかるように, 潜堤より沖合いの水深 $h=55.5$ cm の地点では, 潜堤があってもなくても波のスペクトルはほとんど変化がない。このことは, 潜堤としては天端高が高い $h_{RT}=0$ cm の場合であっても, 潜堤による反射波が非常に小さいことを示している。

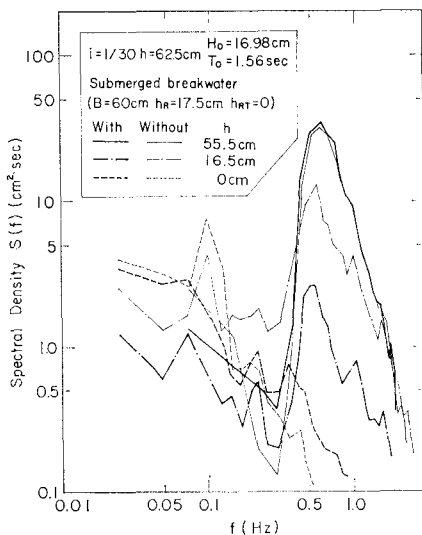


図-2 潜堤によるスペクトル形状の変化

潜堤直背後の水深 $h=16$ cm の地点では, 潜堤がない場合にはスペクトルのピーク周波数付近で碎波によって波のエネルギーが減少し, $f \leq 0.4$ Hz の長周期側で波のエネルギーが増大している。これに対し, 潜堤がある場合には, ピーク周波数を含む $f \geq 0.4$ Hz の短周期側で波のエネルギーが全体に大きく低下し, $f \leq 0.4$ Hz の長周期側でも波のエネルギーがわずかに低下している。このように, 潜堤によって波のエネルギーはかなり減衰されることがわかる。 $f=0.6$ Hz 付近に現われるスペクトルのピークは, 潜堤がない場合, 沖合いのものとほぼ同周波数に現われているが, 潜堤がある場合には低周波数側に少し移動しているようである。

$h=0$ cm の汀線における波のスペクトルは, 潜堤があ

ってもなくても周波数が高くなるに従って波のエネルギーが低下する傾向を示している。ただし, 周波数が $f \geq 0.2$ Hz では潜堤がある場合の波のエネルギーが大きい。

潜堤がない場合の $h=16.5$ cm および 0 cm において, $f=0.1$ Hz 付近に顕著なピークが現われている。このピークが本水路に特有な現象によるものか, 波の非線型性によるものか明らかにはできなかった。

図-2 は, 潜堤の天端幅が $B=60$ cm, 天端が静水面にある場合のものであるが, 他の条件の場合にも波スペクトルの変化傾向は図-2 とほぼ同じ傾向を示していた。

(2) 潜堤背後の波高変化と平均水位の上昇量

図-3 は, 潜堤背後の有義波高の変化と平均水位の上昇量を潜堤の天端幅毎に示した図である。図中の実線は合田⁴⁾によって提案された一様斜面における碎波変形を示したものである。潜堤を設置しない場合の波高は, $h/H_0 > 1.0$ では合田の碎波変形の曲線から推定される波高より少し小さい傾向にあったが, 波高変化の傾向は碎波変形曲線と同じであった。

図-3 からわかるように, 潜堤によって急激に波高が減少したあとは, 水深が浅くなっても, つまり h/H_0 が小さくなくても, 合田の碎波変形曲線で推定される波高に近くなるまでは, 波高変化はわずかに起こらない。この傾向は天端水深および天端幅によって変わらない。そして, 波高が碎波変形の曲線に近づいたのちは h/H_0 が小さくなるに従って波高はこの碎波変形曲線に沿って低下してゆく。このような波高変化については, 潜堤によって波高減衰した波は, 潜堤背後では比較的水深が深いため, 整形しながら碎波することなく伝わるが, 模型床勾配によって水深が浅くなってくると, 水深や模型床勾配に対応した波から碎波し始め, 一様斜面上の碎波変形と同じ波高変化を示すようになるためだと考えることができる。

潜堤で碎波したのち再び碎波によって大きな波高低下が起こるまでの波高変化は, わずかではあるが, 潜堤の天端水深によってその傾向が異なる。つまり, 潜堤の天端水深が深く, 潜堤による波高低減効果が比較的小さい場合には, h/H_0 が小さくなるほど波高は少しずつ低下するが, 天端水深が少し浅くなると波高変化はほとんどなくなり, さらに天端水深が減少すると, 波高は h/H_0 が小さくなるほどわずかながら増大する傾向にある。この原因としては, 潜堤の天端水深が深いと潜堤による波高減衰が小さいため, 潜堤背後の水深が模型床勾配で少し浅くなってくると再び碎波が起こり始め, 波高がわずかに減少するが, 一方, 潜堤の天端水深が浅いと, 潜堤による波高減衰が大きく, 潜堤背後の水深が比較的浅くならないと碎波が起きないため, 浅水変形による波高増大が支配的になるためだと考えられる。

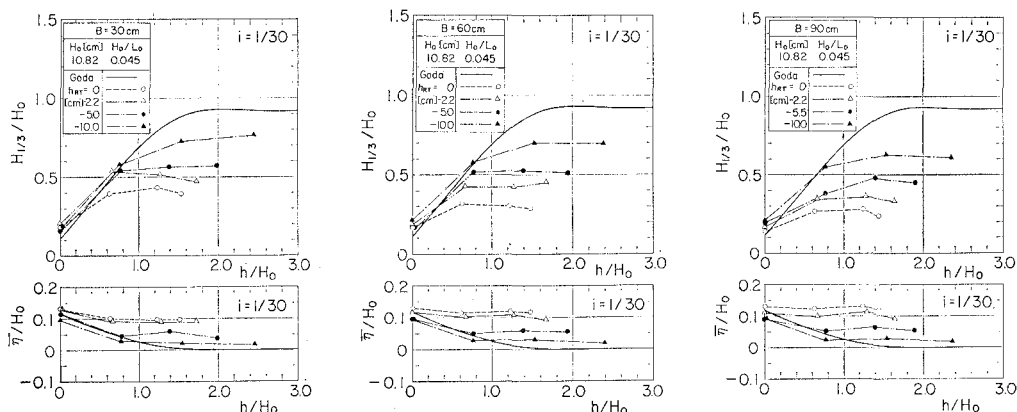


図-3 潜堤背後の波高変化と平均水位上昇量

以上のように、潜堤の天端水深が浅いほど潜堤のない場合に比べて波高減衰が大きく、また、波高減衰が大きいほど波高減衰の範囲も広い。天端幅については、天端幅が広いほど波高減衰が大きくなっているようであるが、これについては後で詳細に述べる。

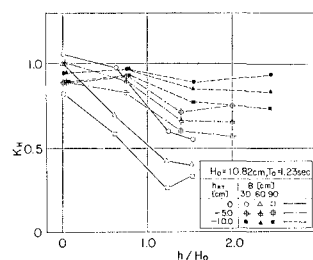
潜堤背後の平均水位上昇量は、潜堤の直背後では潜堤の天端水深が浅いほど大きい。天端水深が深い、 $h_{RT} = 10$ cm の場合には合田による平均水位の上昇量曲線に近い。潜堤背後の平均水位の上昇量の変化は波高変化と逆対応している。つまり、波高の変化があまりない潜堤直背後近付では平均水位上昇量の変化が少なく、平均水位の上昇量は潜堤直背後の値とほぼ同じであり、水深が浅くなり波高が大きく減衰するようになると、平均水位は上昇してくる。この変化は、ラディエーションストレスによる平均水位の上昇量の傾向と同じである。潜堤直背後の平均水位の上昇量は、潜堤による波高減衰に伴うラディエーションストレスの変化ばかりでなく、潜堤の天端高そのものの影響も受けていると推測される。

(3) 潜堤がない場合との波高の比較

潜堤がない場合の波高に対する潜堤がある場合の波高の比を潜堤の影響係数 K_H として定義し、 K_H の変化を潜堤の背後において調べたのが図-4である。

海岸構造物に対する波高の減衰効果は、一般に、構造物直前の入射波高に対する構造物直後の波高との比である波透過率 K_T で表わされることが多い。しかし、透過率で波高減衰効果を見る場合、透過率には潜堤前面での波高の履歴が影響する場合がある。つまり、構造物前面で碎波を起こしている場合と碎波しない場合とでは、同じ有義波の諸元の波でも透過率が異なる。また、本実験では模型床が一樣水深ではなく一樣勾配斜面であるため、上記の K_H で波高減衰効果を見ることにした。

以上のように定義すると、 $K_H = 1$ となる地点では潜堤による波高低減効果がなく、潜堤がない場合と同じ波高になることを示している。図-4 でわかるように、潜


 図-4 潜堤背後の影響係数 K_H の変化

堤背後での K_H の値は、潜堤の天端水深が浅くなるほど、天端幅が広がるほど小さくなる。波が進行して水深波高比 h/H_0 が小さくなると潜堤による波高の低減効果は薄れ、 K_H の値は h_{RT} および B の値にかかわらず 1.0 に近づく。 K_H の値が 1.0 に近づいてしまうと、 h/H_0 がさらに小さくなくても K_H の変化は小さく、 $K_H = 1.0$ のまわ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、潜堤から離れるに従ってつまり、水深が浅くなるにつれて潜堤による波高低下の効果は薄れ、潜堤がない場合の一樣斜面上の波に近づき、最終的には一樣斜面の波のように変化することを示している。

3. 潜堤背後の波高の推定法と潜堤直背後の波高

(1) 潜堤背後の波高の推定法の提案

2.(2) および (3) で述べたように、潜堤によって波高が急激に低減されたあとは、相対水深 h/H_0 が小さくなくても波はその波高を変化させることなく潜堤から遠ざかってゆくが、波高が一樣斜面の碎波変形曲線に対応する波高とほぼ同じになる地点からは、 h/H_0 が小さくなるに従ってこの曲線に沿って波高が減少することがわかった。そこで、このような波高変化特性から潜堤背後における有義波高を次のように推定できると考える。

まず、潜堤直背後における有義波高を、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。そして、潜堤背後の波高は潜堤直背後の波高に水深に対応した浅水係数を乗じて算定する。浅水係数の計算に必要な周期としては入射波の有義波周期を用いる。これは、潜堤の直背後における波スペクトルのピーク周期が入射波のピーク周期より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設定した。さらに、潜堤背後の水深については、潜堤による平均水位の上昇量を考慮することを考えたが、平均水位の上昇量は $\eta/H_0=0.1$ 程度であり、水深に比して小さいので波高算定の第一次近似としては無視できると考えた。このようにして推定した潜堤背後の波高が、一様斜面に対する碎波変形から求まる波高と一致する地点より浅い区域では、一様斜面の碎波変形によって算定する。

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、潜堤直背後における波高を推定することができなくてはならない。そこで、次節以降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 K_H の変化

図-3 および 図-4 に示したように、潜堤直背後の波高は潜堤天端水深によって大きく変化する。潜堤の相対天端水深 h_{RT}/H_0 による潜堤直背後での影響係数 K_H の変化を示したのが 図-5 である。

潜堤の天端水深が十分深く、潜堤の天端上で碎波が起らない場合を考えると、潜堤によって波は変形するが碎波を起こさないで波のエネルギー減衰はほとんどなく、潜堤直背後では潜堤がない場合とほぼ同じ波高になり、 $K_H \approx 1.0$ となるはずである。ただし、潜堤による反射や潜堤を構成する消波ブロック内でのエネルギー損失が生じるけれども、それによる波高減衰は小さいと推測される。

図-5 においても、 K_H は上述の傾向を示し、 h_{RT}/H_0 が小さくなるに従って $K_H=1.0$ 近づいている。しかし、 h_{RT}/H_0 に対する K_H の変化は h_{RT}/H_0 の変化に対して線型ではなく、 h_{RT}/H_0 が小さくなるに従って、つまり、天端水深が深くなるに従ってその勾配は若干小さくなる。たとえば、 $B=50\text{cm}$ で wave 2 の場合、 $0 \geq h_{RT}/H_0 > -0.5$ では、 K_H の変化勾配は -0.54 である

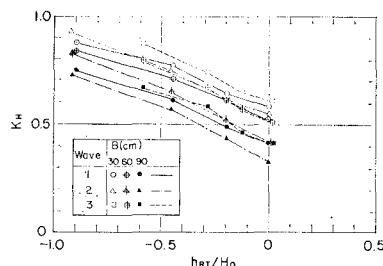


図-5 潜堤天端水深による潜堤直背後の波高変化

が、 $-0. \geq h_{RT}/H_0 > -1.0$ では -0.33 となっている。しかし、本実験の範囲では、 K_H が h_{RT}/H_0 に対して線型関係にあるとみなして K_H と h_{RT}/H_0 の平均的な関係を求めても K_H の値として 0.03 程度の誤差である。

K_H の値は天端幅によって変化しているが、 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。 h_{RT}/H_0 に対する K_H の変化勾配を、沖波波高が同じで、波形勾配が異なる wave 1 と wave 2 の場合について比較してみると、 $-1.0 \leq h_{RT}/H_0 \leq -0.5$ の範囲でわずかに異なっている。このことは、天端水深が深い場合に波形勾配が K_H の変化にわずかではあるが影響していることを示している。

(3) 潜堤天端幅による潜堤直背後での K_H の変化

図-4 および 図-5 に関して述べたように、潜堤直背後での影響係数 K_H は潜堤の天端幅によっても変化する。図-6 は潜堤の相対天端幅 B/L_0 に対する K_H の変化を示したものである。

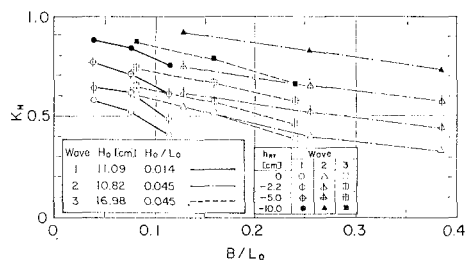


図-6 潜堤天端幅による潜堤直背後の波高変化

図-6 に示すように、 K_H の値は、波形勾配の大きい $H_0/L_0=0.045$ 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 $H_0/L_0=0.014$ の波では B/L_0 の増大に伴って K_H の減少勾配は急になる傾向を示す。同じ波条件なら B/L_0 に対する K_H の勾配は天端水深が変化してもほとんど変化しない。つまり、 B/L_0 の増大に伴う K_H の変化曲線は天端水深によって平行移動するだけである。また、波形勾配が同じでも波高が異なると、 B/L_0 の増大に対する K_H の勾配は変化する。これは、相対天端水深 h_{RT}/H_0 が異なることによる。一方、波形勾配が同じである wave 1 と wave 2 において相対天端水深が同じになる K_H の値を比較すると、 B/L_0 が大きくなっても K_H の値が少し増大するか、ほぼ同じである。このことから K_H の値の変化は、相対天端幅 B/L_0 および相対天端水深 h_{RT}/H_0 に主に依存し、波形勾配によっては大きく変化しない。

(4) 潜堤直背後の K_H の算定

3.(2) で述べたように、 K_H の変化は相対水深 h_{RT}/H_0 と線型関係になく、 h_{RT}/H_0 が小さくなるほど K_H の変化勾配は減少する傾向を示す。しかし、本実験の範囲においては K_H と h_{RT}/H_0 とが線型関係にあるとして K_H

の値を算定しても誤差は小さい。

次に 3.(3) で述べたように K_H は、波形勾配の大きい $H_0/L_0=0.045$ 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 $H_0/L_0=0.014$ 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が、本実験の範囲では K_H の値は B/L_0 に対して直線的に変化するとしても大きな差はない。さらに、波形勾配は h_{RT}/H_0 および B/L_0 に対する K_H の変化に少し影響しているようであるが、その影響はわずかである。

そこで、 K_H は h_{RT}/H_0 、 B/L_0 および H_0/L_0 とそれぞれ線型関係にあるとして実験データを用いて最小自乗法で各係数を設定すると次式のようにになった。

$$K_H = -0.92 \frac{B}{L_0} - 0.42 \frac{h_{RT}}{H_0} + 3.8 \frac{H_0}{L_0} + 0.51 \quad \dots\dots\dots (1)$$

潜堤直背後の K_H について式 (1) による算定値 K_H (CAL) と実験値 K_H (MES) とを比較したのが 図-7 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致し、相関係数も $\gamma=0.973$ と非常に高い。また、図-7 において、計算値と実験値のずれが特定の傾向を示すこともない。本実験の範囲においては、式 (1) で潜堤直背後の K_H が算定できることがわかった。

式 (1) において、 H_0/L_0 の係数が大きい、 H_0/L_0 は本実験の範囲では 0.014~0.045 と小さく、 H_0/L_0 の値

が K_H の値に与える変化は 0.05~0.17 の範囲である。また、 B/L_0 および h_{RT}/H_0 が K_H の値に与える変化は、本実験の範囲では 0.4 となって、天端幅および天端水深の影響が大きいことがわかる。

潜堤直背後の波高が潜堤なしの場合の碎波変形および式 (1) で算定される K_H を用いて設定できると、3.(1) に述べた方法によって潜堤背後の各地点における波高が算定できることになる。

4. あとがき

勾配 1/30 の一様斜面上に模型潜堤を設置して不規則波を作用させ、潜堤背後の有義波高の変化特性を検討した。その結果、潜堤によって有義波高が急激に低下したあとは、有義波高は潜堤背後の水深変化にかかわらずほとんど変化しないで伝わり、潜堤なしの場合の碎波変形曲線から推定される波高に近くなると、この碎波曲線に沿って波高が低下することが判明した。そこで、このような波高変化特性から潜堤背後の波高を推定する方法を提案した。この方法によると、潜堤直背後の波高を推定する必要があり、その算定法として式 (1) を実験値から求めた。

本結論は勾配 1/30 の一様斜面における実験結果から導いたものであり、他の勾配の斜面でも同じ結論が得られるか検討する必要がある。さらに、本報告では、潜堤背後の波高変化のみについてしか検討していないが、潜堤背後に護岸を設置した場合の越波量の変化などが今後の課題として残されている。これらについても今後模型実験によって検討してゆきたいと考えている。

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) 田中則男： 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 22 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： 潜堤の消波効果および天端幅の影響，第 24 回海岸工学講演会論文集，1979，pp. 303~307.
- 4) 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 卷，第 2 号，1975，pp. 59~106.

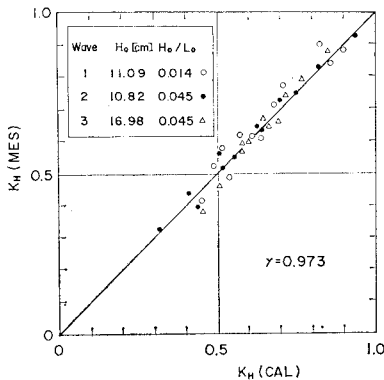


図-7 潜堤直背後における K_H の算定値と実験値の比較