

潜堤背後の平均水位と長周期変動に関する実験的研究

喜岡 渉*・松野 忠幸**・岡本 正由***・佐藤 公己****

1. はじめに

潜堤による波浪の低減効果については、すでに数多くの研究がなされており、不規則波実験による検討も行なわれている(高山ら, 1985; 井上ら, 1987). 一方, 潜堤による砂浜安定効果については, 田中(1976)による2次元移動床実験のほか, いくつかの3次元移動床実験による検討も行なわれているが, 波浪低減効果に比べると潜堤の天端幅や天端上水深の及ぼす影響などが十分に明らかではない.

潜堤による海浜安定工法を検討するに当たっては, 潜堤背後の波高減衰とそれに伴う平均水位や平均流速の変動のみならず, 長周期水位変動とそれに対応する流速成分の変動特性を明らかにしておく必要がある. このうち長周期変動については, 高山・池田(1988)により潜堤直背後の特性が明らかにされたにすぎず, 潜堤によってその増幅が抑制されるのかどうかという本質的な問題も含めて不明点が多い. 本研究では, 断面形状の異なる4種類の潜堤にそれぞれ諸元の異なる4種類の不規則波を作用させて, 潜堤背後の水位変動と流速のそれぞれの長周期変動について実験的に比較検討した.

2. 実験装置および方法

実験は中部電力技術研究所所有の長さ74m, 幅1.0m, 深さ1.8mの反射波吸収制御付き2次元造波水槽を用いて行った. 模型床はモルタル製で, 造波板から51mを水深60cmの一樣水深部とし, そこから1/20の勾配斜面を設置した. 潜堤模型は透過堤で, 木製の枠の中に粒径2~3cmの碎石を詰めて表面を金網で覆い潜堤の変形を防ぐ構造とした. 設置位置は潜堤沖側法肩が斜面上で水深が25cmとなる位置とし, 形状は天端上水深 $R=5\text{cm}$, 8cm の2種類, 天端幅 $B=20\text{cm}$, 70cm の2種類とすることで合計4種類設定した.

波高計は一樣水深部で入反射分離用に2本, 潜堤沖側法肩に1本, 潜堤岸側法先から20cm間隔で9本の合

計12本設置し, 各点の水位変動を記録した. 流速測定には2成分電磁流速計を用い, 潜堤沖側法先に1本, 潜堤上に1本, 潜堤岸側法先から80cm間隔で3本を台車に取り付け合計5本用いた. この台車を40cmずつ移動させることによって, 40cm間隔で6ヶ所測定した. また, 潜堤背後の流速については, それぞれの位置で上段(静止水面下3cm), 中段, 下段(底面上2cm)の位置の測定も行った. なお, 水位変動, 流速ともにデータのサンプリング間隔は1/20秒とした.

実験に用いた不規則波は Bretschneider・光易型の周波数スペクトル形を持ち, 表-1に示すような4種類の有義波周期と有義波高の組合せと一致するような波とした. 表中には, 波群特性を表す指標として, 斜面直前における波群係数 G , F を示す. また, ここで示したケースとは別に, $T=1\text{sec}$, $H_0=12\text{cm}$ の規則波を造波させることによって伝播に伴い変調する波を発生させた実験も行った.

表-1 実験波の諸元

	$T(\text{s})$	$H_0(\text{cm})$	H_0/L_0	GF
Case 1	1.2	7.5	0.035	0.889
Case 2	1.4	10.0		0.955
Case 3	1.6	7.5	0.020	0.816
Case 4	2.0	10.0		0.793

長周期変動は, スペクトル形状から判断してピーク周波数 f_p の2.2~2.5倍以上の波として定義し, 数値フィルターを用いて抽出した.

3. 潜堤による波高減衰と平均水位, 平均流速の変化

図-1は天端上水深 $R=5\text{cm}$ の潜堤を設置したときの潜堤直背後の波高減衰効果を示したもので, 相対天端幅 $B/L_0=0$ のプロット点は潜堤を設置していないときの同一地点における測定結果を示す. 相対天端幅 B/L_0 の増大に伴う波高減少の度合は, 波形勾配の小さいCase 3, 4の方が大きくなる傾向を示す. 潜堤によって急激

* 正員 Ph. D. 名古屋工業大学助教授 社会開発工学科

** 正員 工 修 NTT 東海支社

*** 正員 中部電力(株)技術研究所

**** 正員 工 修 中電工事(株)

に波高が低減したあとは、高山ら (1985) が明らかにしているように、水深が浅くなっても波高変化はわずかしかなじないが、さらに水深が減少して波高が潜堤のない場合の波高変化曲線に交わるようになる付近からは、潜堤のない場合の波高変化とほぼ一致して減少する傾向を示した。

一方、平均水位は、潜堤の沖側法肩付近で急激に上昇したあと岸側法先水近まで上昇し続けるが、その後はほぼ一定の値をとり、汀線付近では潜堤のない場合の上昇量の変化とほぼ一致するようになった。図-2 は $R=5$ cm の潜堤を設置したときの B/L_0 に対する潜堤直背後の平均水位上昇量を示したものである。図-1 に示した波高減衰率の大きい潜堤ほど、その背後での平均水位の上昇量が大きくなる傾向が見られる。また、 $R=8$ cm の潜堤と比べると上昇量は大きく、図-2 の結果は $R=8$ cm の結果をほぼ平行移動させた変化傾向を示すものになっている。

図-3 と 図-4 は、実験 Case 4 ($T=2.0$ sec) における水平および鉛直方向の平均流速を、それぞれ潜堤のない場合と $R=5$ cm, $B=70$ cm の潜堤を設置した場合とで比較したものである。流速の符号は岸向きおよび鉛直上向きを正とした。潜堤によって沖向きの水平方向の平均流速は潜堤付近で逆に増幅されるが、潜堤背後ではその値は急激に小さくなっている。鉛直方向の平均流速については潜堤によって上向きの値がいくぶん抑制される傾向がある。図-5 に示すように、潜堤直背後の水平方向平均流速は B/L_0 が大きくかつ R/H_0 が大きいケースにおいて特に増幅される傾向がある。また、潜堤背後の $h=9$ cm の地点においては、潜堤設置により流速値は急激に減少するものの、 B/L_0 を大きくすると岸向き流速が沖向き流速に変わる傾向が見られる。 $R=8$ cm の潜堤設置時の水平方向の平均流速は波高減衰および平均水位上昇量の結果と異なり、 $R=5$ cm の結果を平均移動させたものとはならず、潜堤直背後の流速値は波高の小さい Case 1, 3 では B/L_0 の増加に伴って岸向きの値に転じ、 $h=9$ cm の地点では全てのケースで B/L_0 の増加に伴い岸向きの値に変わる傾向が見られた。

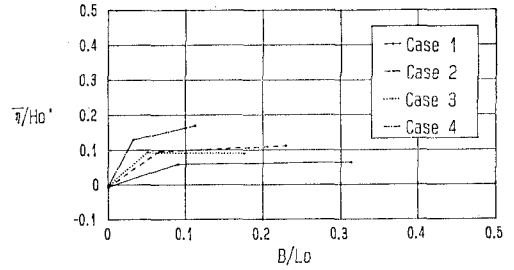
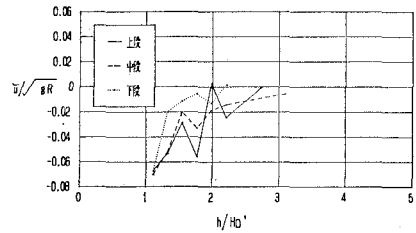
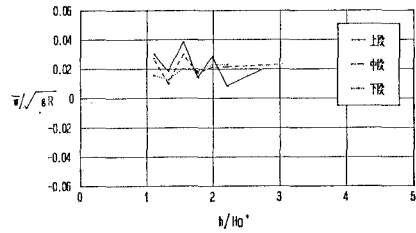


図-2 潜堤 ($R=5$ cm) 直背後の平均水位上昇量

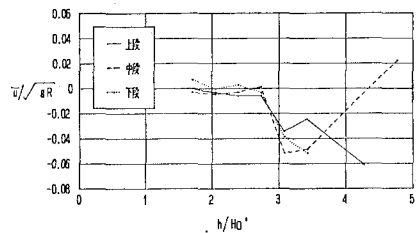


(a) 水平方向の平均流速

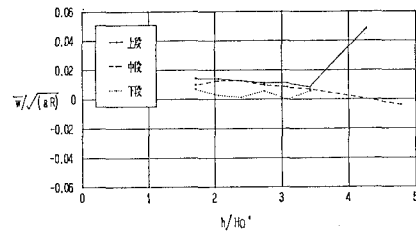


(b) 鉛直方向の平均流速

図-3 潜堤がない時の平均流速の変化 ($T=2.0$ sec)



(a) 水平方向の平均流速



(b) 鉛直方向の平均流速

図-4 潜堤 ($R=5$ cm, $B=70$ cm) 設置時の平均流速の変化 ($T=2.0$ sec)

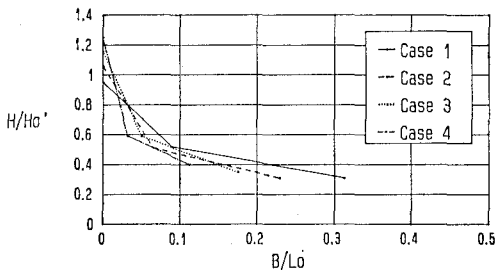
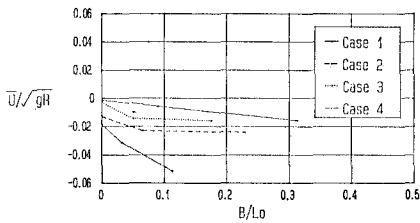
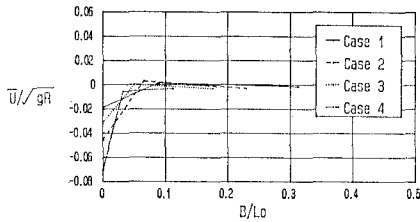


図-1 潜堤 ($R=5$ cm) 直背後の波高変化



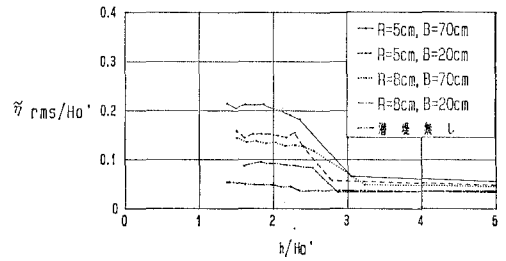
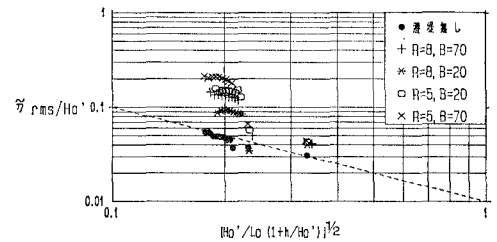
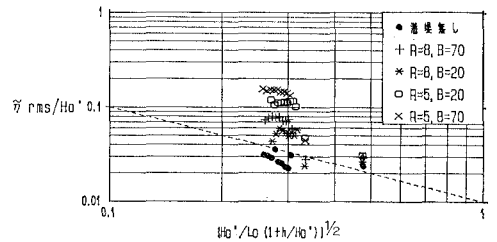
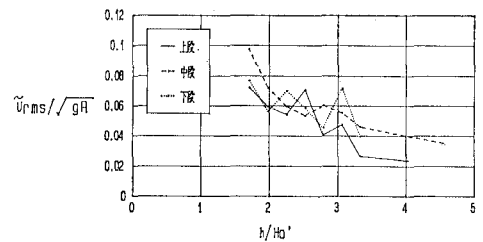
(a) 潜堤直背後

(b) $h=9\text{ cm}$ 図-5 潜堤 ($R=5\text{ cm}$) 背後の水平方向平均流速 (中段)

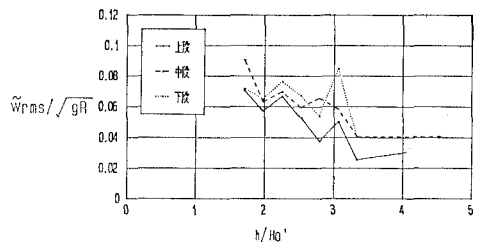
4. 潜堤背後の長周期水位変動と長周期流速変動

図-6 は水深の減少に伴う長周期水位変動を Case 4 について比較したものである。潜堤を設置すると潜堤上付近から長周期水位変動が増幅されはじめ、潜堤直背後付近まで増加し続け、それより浅い水深ではほぼ一定値をとるようになる。その増幅量は潜堤の形状によって差があり、波高減衰効果の大きな形状の潜堤ほどより長周期水位変動を増幅させる傾向が見られる。また、潜堤背後の平均水位の上昇率と同様に、長周期水位変動は潜堤の天端幅を広げることよりも天端水深を小さくすることによる影響によってより増幅される傾向にある。

図-7 は図-6 の結果を整理し直したもので、図中の破線は合田 (1975) によって提案されたサーフビートの経験式を示す。図からわかるように、潜堤がない場合の水位変動は合田式とはほぼ同じ値をとるが、潜堤を設置すると合田式の値よりも変動量が大きくなり、 $R=5\text{ cm}$, $B=70\text{ cm}$ の潜堤では入射波高の 0.2 倍程度まで増加している。図-8 は図-7 に比べて波形勾配の大きな波を作用させたときの結果で、潜堤による長周期水位変動の増幅傾向はほぼ同様のものとなっているが、同一形状の潜堤での増幅量はいくぶん小さくなっている。なお、こうした長周期波の増幅特性に及ぼす副次的な長周期波 (造波機によって不可避免的に発生する自由長波) の影響や多重反射系の影響を検討するために、入射波として波形勾配の大きい規則波を発生させることによって、変調する波 (この場合、形成される波群は規則的な波) を用いた実験を行った。その結果、長周期水位変動に及ぼす潜堤形状の影響については、図-7 および、図-8 に示し

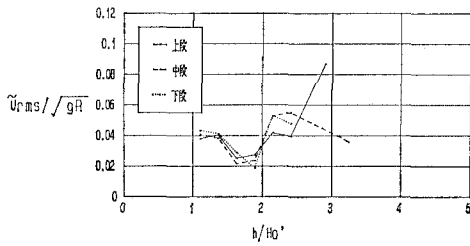
図-6 長周期水位変動の変化特性 ($T=2.0\text{ sec}$)図-7 潜堤設置による長周期水位変動の変化 ($T=2.0\text{ sec}$)図-8 潜堤設置による長周期水位変動の変化 ($T=1.4\text{ sec}$)

(a) 水平方向の長周期流速変動

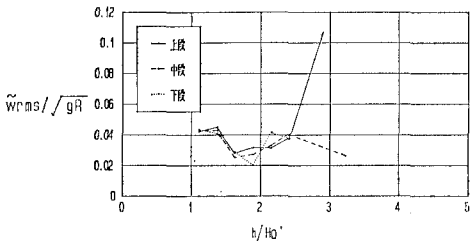


(b) 鉛直方向の長周期流速変動

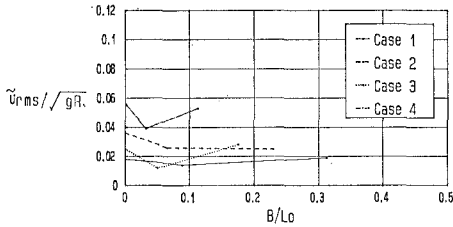
図-9 潜堤がない時の長周期流速変動の変化 ($T=2.0\text{ sec}$)



(a) 水平方向の長周期流速変動



(b) 鉛直方向の長周期流速変動

 図-10 潜堤 ($R=5$ cm, $B=70$ cm) 設置時の長周期流速変動の変化 ($T=2.0$ sec)


(a) 潜堤直背後

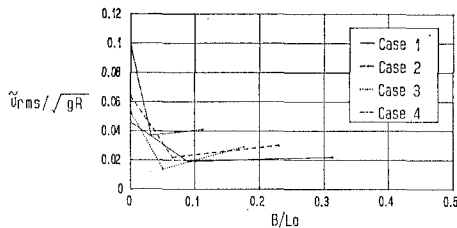

 (b) $h=9$ cm

 図-11 潜堤 ($R=5$ cm) 背後の水平方向長周期流速変動 (中段)

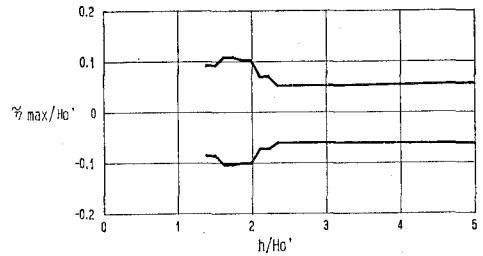
と再び増加傾向を示す。こうした変動傾向は、波高低減効果の大きい潜堤ほど顕著に現れており、長周期流速変動に及ぼす潜堤形状の影響も大きいことがわかる。

図-11 は $R=5$ cm の潜堤を設置したときの水平方向の長周期流速変動の測定結果を B/L_0 について整理したものである。潜堤を設置することによって潜堤直背後および $h=9$ cm の地点ともに変動量は小さくなっているが、潜堤の幅を広げると波形勾配の小さい Case 3, 4 の波ではかえって増大する傾向が見られる。また、 $R=8$ cm の潜堤を設置することによる水平方向の長周期流速の変化と比べると、Case 3, 4 では $R=8$ cm の潜堤による低減率の方がかえって大きくなっている。

5. 潜堤背後の長周期水位変動の増幅機構

不規則波群の波群長が非常に長いときには長周期水位変動に及ぼす非定常項の影響は相対的に小さくなることから、潜堤設置による長周期水位変動の増幅は平均水位の上昇量の増大によって説明される。しかしながら、長周期水位変動の周期 $T_{1/3}$ は潜堤背後で $T_{1/3}=4\sim10$ sec であり、非定常項は無視し得ないと考えられることから、ここでは潜堤背後の長周期水位変動も radiation stress の変化特性によって評価できるものとして Symonds・Bowen (1984) と同様な計算モデルを用いて長周期水位変動の増幅機構を検討した。

図-12 は長周期水位変動の最大変位を結んで包絡波形を描いたものである。図から、(a) の一様勾配斜面においては碎波帯にわたって長周期水位変動が増幅され



(a) 潜堤がない時

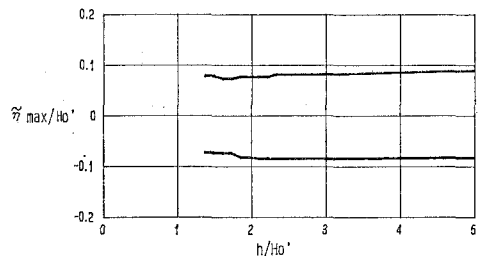

 (b) 潜堤 ($R=5$ cm, $B=70$ cm) 設置時

 図-12 長周期水位変動の包絡波形の比較 ($T=2.0$ sec)

た傾向と同じものであった。

図-9 と 図-10 は、水深の減少に伴う長周期流速変動の変化の様子を示すもので、それぞれ潜堤設置前と設置後についての結果を示す。潜堤がない場合、水平および鉛直方向の流速変動は各測定地点における測定水深にかかわらず汀線に近づくに従ってほぼ単調に増加していく傾向にある。一方、潜堤を設置すると、長周期流速変動は水平および鉛直方向成分ともに天端上でピーク値をとった後、潜堤背後で急激に減少するが、汀線に近づく

ているのに対して、(b)の潜堤設置時においては潜堤前後ではほぼ一定値をとっていることがわかる。図の(b)の結果は、増幅は主として潜堤天端上で生じる砕波によって生じ、砕波によって拘束を解かれた長周期波は岸および沖向きに伝播してゆくことを示唆している。そこで、Symonds・Bowen (1984)に従って図-13に示すような計算モデルを考える。すなわち、(I)の一樣勾配斜面では波群中の波高の一番大きな波が砕波限界(ここでは $H_0=0.78h$ とした)を越してから一番小さな波が砕波限界に達する間の radiation stress の変動によって長周期波を励起させる forcing が生じ、(II)の潜堤設置時には同様な forcing が潜堤沖側法面から法肩にかけて生じるものとする。なお、潜堤法面においても波群を構成する個々の波は微小振幅波理論による浅水係数を用いることによって算定できるものとした。

図-14に計算モデルの Case I, II としてそれぞれ図-12の(a), (b)の実験条件を想定したときの計算結果を示す。ただし、計算には $T=10$ sec, $H_0=10$ cmの波と周期と波高がわずかに異なる二成分波を与えた。図の結果は波高比 $\delta=0.2$ の二成分波を用いたときのもので、入射波群の周波数 f_0 を変化させたときの汀線に

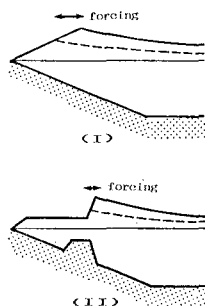


図-13 計算モデル

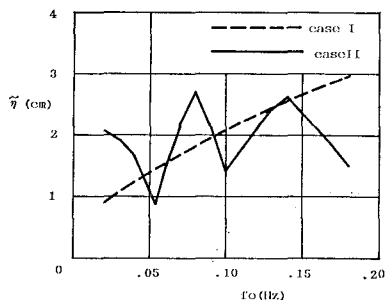


図-14 汀線における長周期水位変動の計算結果

おける長周期波の振幅を示している。図から、潜堤のない一樣斜面の場合には f_0 の値が大きくなるにしたがって長周期波の振幅は単調に増加する傾向にあるが、潜堤を設置すると潜堤によって弱い共振が生じることがわかる。こうした共振現象は潜堤背後の長周期波を増幅させる原因と考えられるが、共振による増幅率は小さいこともあって実験結果のスペクトル形状などからはその影響は明らかではなかった。なお、実験結果における長周期波の増幅傾向が計算結果に比べてより著しく現れている原因としては、計算モデルにおいては潜堤からの個々の短周期波の反射の影響が無視されていることなどの解析上の問題点も残されているが、潜堤設置時の方が砕波時の振幅変動 δ がより大きくなることや、砕波後も波群性がある程度維持される、すなわち forcing の領域がより広くなることが考えられる。

6. おわりに

潜堤による海浜安定効果に密接に関連する平均水位の上昇量、平均流速、長周期水位変動および長周期流速変動を勾配 1/20 の一樣斜面上に断面形状の異なる潜堤を設置して調べた。その結果、これらの水理量のうち、潜堤背後の長周期の水位変動と流速変動については潜堤のない場合と比べてかえって増幅される傾向にあり、特に天端上水深の小さいケースではその傾向が強くなることがわかった。潜堤による長周期水位変動の増幅については潜堤付近での砕波によって励起された長周期波が汀線との間で弱い共振を起こすことが原因の一つと考えられるが、増幅機構の解明については今後の課題として残されている。

参考文献

- 井上雅夫・島田広昭・田中幸雄 (1987): 不規則波による潜堤の波高伝達率, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 507-511.
- 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号, pp. 59-106.
- 高山知司・永井紀彦・関口忠志 (1985): 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, pp. 545-549.
- 高山知司・池田直太 (1988): 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, 港湾技術研究所報告, 第27巻, 第4号, pp. 63-92.
- 田中則男 (1976): 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, pp. 152-157.
- Symonds, G. and Bowen, A. J. (1984): Interaction of nearshore bars with incoming wave groups, J. Geophys. Res., Vol. 89, No. C2, pp. 1953-1959.