

底版型潜堤の波浪減殺効果

入江 功*・信岡尚道**・小島治幸***・三原泰司****

1. はじめに

近年、海岸に対する社会的要請が高度化するにつれ、海岸の景観が益々重要視されるようになって来ている。これにともない海岸保全事業を実施する場合でも、離岸堤などは景観上の理由から設置が困難となって来ており、離岸堤の潜堤化や天端を広くした人工リーフ工法等が採用されはじめている。しかしこれらは、天端上での碎波により背後の平均水位が上昇するため 図-1 (a) に示すような海浜循環流が起こりやすい(宇多ら, 1988; 佐々木ら, 1990)。このような海浜流は、堤体を越えて流入するので砂を含まず、開口部では沖向きの流れで浮遊砂が堤体外へ流出するため、海浜の維持のためには必ずしも有効であるとは言えないものと思われる。

もし 図-1 (b) に示すように全く逆向きの循環流を起こすことができれば、開口部より砂が供給され堆砂傾向となることが期待され、海浜流を制御することによっても海浜の安定を促進することが可能であると考えられる。図-1(b) のような海浜流を発生させるには、波高は低減するが平均水位は上昇させないような波浪制御構

造物の開発が必要である。

本研究は、このような構造物の開発を目的とし、平均水位の上昇があまりないといわれている没水水平版を取り上げ、それを複数列並べた構造(以後、底版型潜堤と呼ぶ)にして、碎波を避けるため天端高をなるべく低く抑えたときの波浪減衰効果および平均水位上昇量を水理実験と理論計算により調べたものである。

2. 水理実験の概要

実験は、2次元造波水路(長さ 28m, 幅 0.3m, 高さ 0.5m)を用いた。この水路は反射波を吸収する機能を備えた造波装置および反射率 10% 以下の消波装置を有するため、多重反射の影響は小さい。水深 h を 35 cm とし、厚さ 5 mm のアクリル板による平板を造波板より約 11m 離して 図-2 に示すように 2 列に設置した。堤体の諸元は、天端高を D 、平板長を W_P 、平板間隔を S 、堤体全長を W_T 、そして $B=W_P+S$ を有効版長と定義した。実験では平板長 W_P を $1.5h \sim 3.5h$ 、天端高 D を $0.2h \sim 0.5h$ 、平板間隔 S を $0.25h \sim 1.76h$ ととり、これらを組み合わせた計 23 ケースについて消波特性を検討した。各ケースにおいて入射波高 H は 6.0 cm とし、相対水深 h/L を 0.06 から 0.40 まで 0.02 間隔の 18 種類に変化させた。また、波形勾配の効果を検討するため、 h/L を 0.06 から 0.14 までの 5 種類に対して波高を 4, 8, 10, 12 cm と変えた。

30 cm の間隔の容量式波高計 2 本 1 組を堤体の入射波側と通過波側にそれぞれ堤体から約 1.5 m 離して設置して、水面変動を測定し分離推定法を用いて入射波と反射

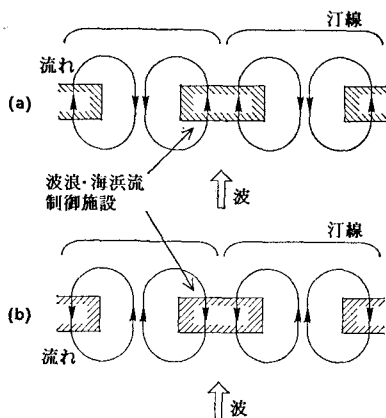


図-1 波浪・海浜流制御の2つの方法

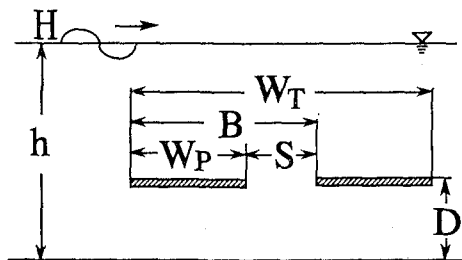


図-2 底版型潜堤の諸元

* 正会員 工博 九州大学教授 工学部水土木学科
 ** 学会員 九州大学大学院 工学研究科
 *** 正会員 工博 九州共立大学助教授 工学部土木工学科
 **** 学会員 九州大学大学院 工学研究科

波、通過波をそれぞれ分離させ基本周波数における通過率、反射率を算出した。

また、消波機構を把握するため、上の実験のうち興味ある結果の得られた2ケースについて染料を投入して底版型潜堤近傍の流況撮影と図-11に示すように両平版中央下の流速測定をした。さらに、同ケースで、波高6cmと10cm(碎波が発生)について波高計を用いて堤体付近4.8m区間における7cm間隔の70の測点で水面変位を測定し波高分布と平均水位の変化を求めた。

3. 波の通過率の理論計算

底版型潜堤の波の通過率を、ポテンシャル接続法を用いた線形理論計算により求めた。図-3に示す1～7の領域の速度ポテンシャルの未定係数を、図の鉛直境界面における連続条件から定めた。すなわち、境界面上に異なる Z の値の計算点(0.1h間隔の10個の選点、図中黒丸で示した)をとり、その計算点で隣合った領域の速度ポテンシャルが連続であるとして連立一次方程式を解くという吉田ら(1990)の開発した選点解法を用いた。

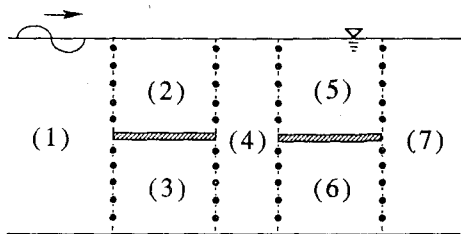


図-3 領域分割と計算点

4. 実験および計算の結果

(1) 波の減殺特性

a) 天端高 D による効果

図-4は、有効版長と平版間隔を一定($B/h=3.64$, $S/h=0.5$)として相対天端高 D/h を0.2($\diamond$), 0.3($\triangle$), 0.4($\square$), 0.5($\circ$)と変化したときの相対水深 h/L に対する通過率 K_T の結果を示したものである。図中には、ポテンシャル接続法による線形計算の結果も曲線で示している。この図より、天端高が大きいほど通過率 K_T が低下していることがわかる。特に通過率の極小値(極小通過率 K_{Tmin})付近の相対水深では、天端高によって通過率が大きく変化している。その中でも相対天端高 D/h が0.4と0.5での通過率の差が大きく現れている。碎波させないことを前提にしているため相対天端高 D/h を0.5より高くした実験はしていない。この実験範囲で最もよい消波効果を示したのは、 $D/h=0.5$ の時 $K_{Tmin}=0.61$ であった。理論値の通過率は、実験値のそれより大きめにしているものの相対

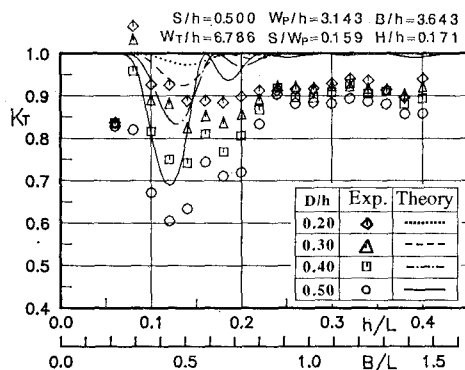


図-4 天端高 D による通過率の変化

水深に対する変動特性については実験値と理論値はよく一致している。

b) 有効版長 B による効果

図-5は、天端高と平版間隔を一定($D/h=0.5$, $S/h=0.5$)として相対有効版長 B/h を2.0($\triangle$), 3.0($\square$), 4.0($\circ$)と変化した結果である。有効版長が長くなるほど、相対水深の小さいつまり波長の長い波に対して極小通過率となっている。また極小通過率の値は、版長が長いほど小さくなっていることもわかる。また、入射波の波長に対する有効版長の相対的な長さが $B/L=0.45$ 付近で極小通過率が現れる。実験を行った範囲では、極小通過率が60%程度までの低下が見られた。この図に示したケースより天端高を低くした場合でも、通過率は上がるが同じ傾向を示した。

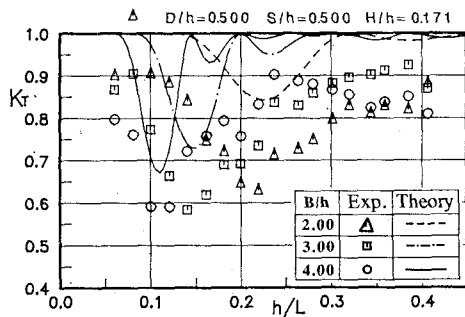


図-5 有効版長 B による通過率の変化

c) 平版間隔 S による効果

図-6は、堤体全長と天端高を一定($W_t/h=5.5$, $D/h=0.5$)にして相対平版間隔 S/h を0.50($\triangle$), 1.00($\square$), 1.25($\circ$)と変化した結果である。平版間隔を広げることにより通過率に2つの明確な極小値があらわれている。1つは相対水深 $h/L=0.15$ 前後であり、このピークにあたる波は平版間隔 S/h が小さいほど通過率が低下している。このピークは水平版が1枚の

ときでも、通過率はこの値より高いが起こりうるものである。もう一つのピークは相対水深 $h/L=0.23$ 前後であり、これにあたる波は平版間隔 S/h が大きいほど通過率が低下している。このような通過率特性は1枚の水平版では現われなかった傾向であり、複列平版特有のものといえる。また、潜堤を複列に並べた喜岡ら (1989) の研究でも似た傾向が現れている。ここでは示していないが平版長 W_P と平版間隔 S の比を一定にして平版長を長くしたケースでも、対応する波長は違いが同じような通過率の相対水深に対する変動曲線がみられた。

以上述べてきた実験値による通過率特性は理論値とも一致していることがわかる。しかし実験値は、理論値で見られるような2つの明瞭な谷の形にならず、平版間隔が広がると、あたかも消波効果に対する相対水深の変化帯域を広げた形となっており、特に相対水深の大きい方へ広がっている。

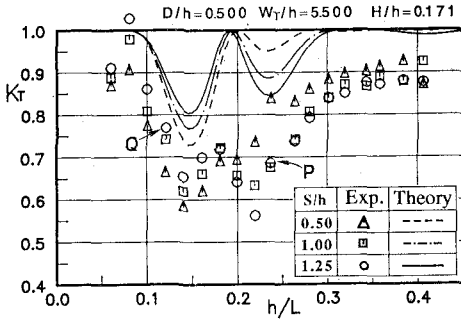


図-6 平版間隔 S による通過率の変化

d) 極小通過率の実験式

通過率特性の結果より、各堤体諸元と極小通過率とが1次の相関性を持つと仮定して重回帰分析により実験式をもとめた。堤体諸元と極小通過率との関係を見るため相対水深をパラメータとはせず堤体諸元のみをパラメータとした。また平版間隔を広げたとき2つの極小通過率があるがそのうち通過率の値が小さい方を用いた。この回帰分析により、実験範囲内における堤体諸元と極小通過率の関係を与える実験式として次式を得た。

$$K_{Tmin} = 1.25 - 0.98D/h - 0.047S/h - 0.049W_P/h \quad (1)$$

この式から求めた計算値と実験値との関係を示したものが図-7である。計算値と実験値は良く一致しており、相関性は96%であった。

e) 波形勾配の影響

図-8は、各相対水深に対する波の通過率と波形勾配との関係を示したものである。堤体諸元は $B/h=3.0$, $D/h=0.5$, $S/h=0.5$ とした。この図より $h/L=0.06$ 以外は波形勾配が大きいほど通過率が下がる傾向がみられる。波形勾配が大きいところでは、完全な碎波が起こ

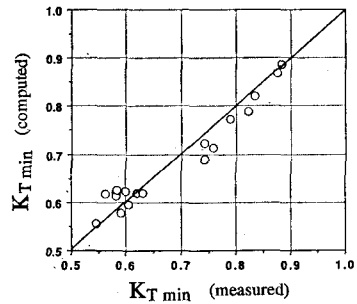


図-7 計算値(式(1)による)と実験値

る(図中の破線が実験で得られた碎波限界を示す)ことによる通過率の低減が考えられるが、碎波が起こる前から通過率が減少傾向にある。これは、碎波点近傍の波形勾配の大きい波に対しては、上で示した消波効果よりも有効な波浪減衰効果が得られることを示唆している。

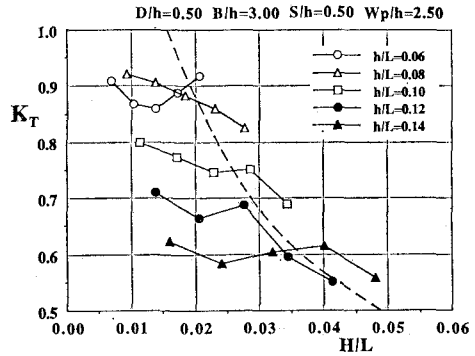


図-8 波形勾配 H/L による通過率の変化

(2) 波高分布と平均水位

図-9は、無次元平均水位 ζ_m/H , および基本周波数 $\zeta^{(1)}/\zeta_0$, 2倍周波数 $\zeta^{(2)}/\zeta_0$ の無次元振幅 (ζ_0 は入射波の振幅) の空間分布を示す。平均水位は、入射波側から堤体上にかけての空間では、基本波における入射波と堤体からの反射波とによってできる部分重複波の腹と節に対応して変動している。堤体の岸側では、若干の平均水位上昇がみられる。しかし、上昇量は最大でも入射波高の2%程度と非常に小さい値である。特に $H/h=0.285$ (図-9において●印)では堤体上で碎波が起こったにもかかわらず、水位上昇は小さく碎波しない場合と同程度である。また、他の相対水深の波や堤体諸元に対しても同様の結果が得られている。高山ら (1985) によって得られた潜堤等の場合は、碎波することにより潜堤背後での平均水位は入射波高の10%程度上昇すると報告されており、この結果と比較すると底版型潜堤は背後の平均水位の上昇を低く抑えながら有効な消波効果が得られる構造物であると言える。

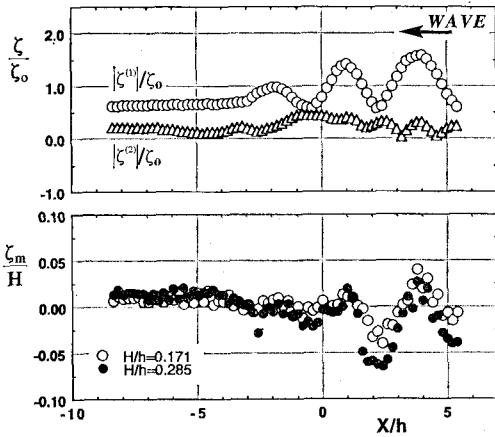


図-9 平均水位と成分波の振幅の空間分布

図-10 は各ケースの水位上昇を比較するため堤体背後約 2m 間の単位幅上昇水量を水平距離で除したそこの平均水位の平均値 $\bar{\zeta}_m$ を縦軸、相対水深を横軸にとったものである。これによると碎波が起こらない時の方(○および△印)が水位の上昇が小さく、また平板間隔が広い方(△と▲印)が上昇が小さくなる傾向が見られる。

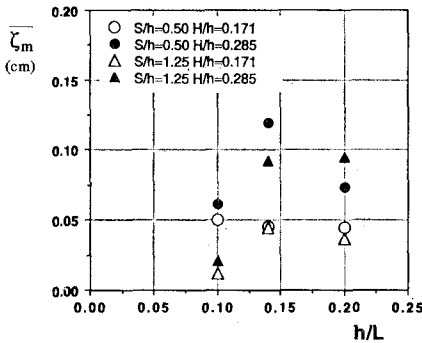


図-10 平均水位の上昇の平均値

5. 波の減殺に関する考察

これまでの実験および理論計算の結果より、底版型潜堤の波の減殺機構について考察してみる。図-4~6 に示した種々の堤体諸元に対する波の通過率と相対水深との関係において、実験値と線形理論による計算値とは傾向的に良い一致を示した。すなわち底版型潜堤による波の減殺は、波と平板との線形干渉(小島ら, 1990)が支配的要因であることが推定される。考えられる最も単純な波の減殺機構は図-11 に示すように、波の峰の通過時に開口部 BC を通じて下向きに流れを生じ逆に谷の通過時に上向きの流れが生じることによる波高の低減であろう。潜堤上の入射波高を H_i 、低減後の波高を H_r とすれば、流量の収支から次のような関係が考えられる。

$$H(1-K_T) \sim H(1-H_T/H_i) \sim$$

$$D(|(U_b-U_f)_{\max}| + |(U_b-U_f)_{\min}|)$$

ここに、 U_f と U_b はそれぞれ版 AB と版 CD の平板中央で測られた流速を表し、添字 max, min はそれぞれ波の峰および谷の通過時を示す。図-12 はこれらの関係に関する実験結果を示したものである。図中破線は、図-11 に示した流量の収支が十分成り立っている場合の関係を実験結果から推定したものである。実験結果はこの破線にはほぼ沿っていると思われるものと(Aグループ)、開口部 BC での上下の流量が大きいにもかかわらず波の減殺率が小さい場合(Bグループ)、開口部での上下の流量が著しく小さいにもかかわらず波の減殺率が大きい場合(Cグループ)があることがわかる。このうち U_f と U_b との位相関係は、AグループとBグループとはほぼ同じ特性を示す一方Cグループは全く異なった特性を示した。その代表例を図-12 の矢印のケースについて図示したのが図-13 (1), 13 (2) である。図中 U は、 (U_b-U_f) として求めたもので、図-11 の開口部 BC を通じて上下する流れに対応したものである。これらの P, Q 点に相当するケースを図-6 でもそれぞれ示しておいた。A, B グループの代表例を示す図-13 (1) では、 U_f , U_b が互いに全く逆位相となっているのに対し図-13 (2) ではほぼ同位相となっている。前者は2対の平板において、個々の平板の下の水塊が互いに逆位相で共振しており、その共振条件の満足度によってA, B グループに分けられたと思われる。

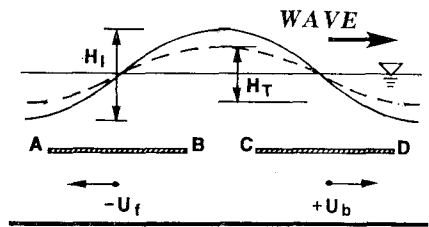


図-11 波の減殺機構の仮定図

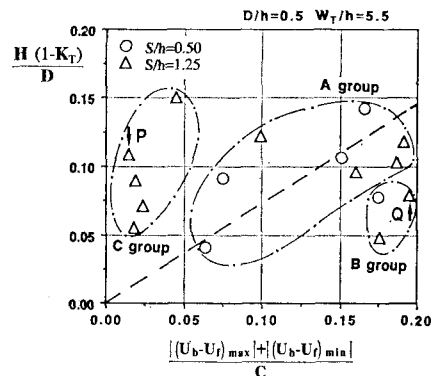


図-12 流量収支と波高低減

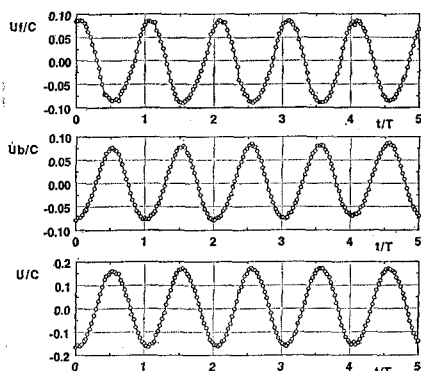
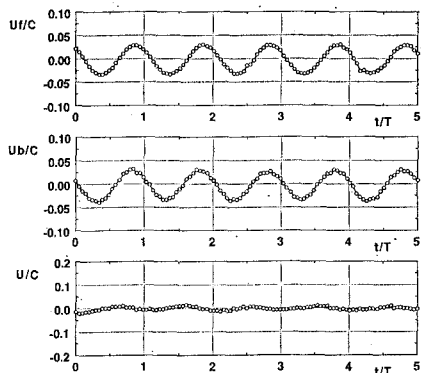
(1) $h/L=0.12$ (図-12中Q点)(2) $h/L=0.24$ (図-12中P点)

図-13(1)(2) 複列水平版下の水平流速とそれらの流速差
(開口部の上下流速)
($D/h=0.5$, $S/h=1.25$, $W_T/h=5.5$)

A, BグループとCグループの発生範囲は、図-6において $h/L \div 0.2$ を境にして、小さい場合にA, Bグループが卓越し、大きい場合にCグループが卓越するように思われた。Cグループは、その発生機構については説明するには到らなかったが、図-6において、同じ堤体全長に対し開口幅(平版間隔) S が増大するほど波の減殺率が增大するという傾向は興味深い。

6. ま と め

本研究により、底版型潜堤の波浪減殺効果の傾向を明

らかにした。それをまとめると以下のとおりである。

① 天端高は、通過率低下の最も大きな要因であり、天端高が高いほど波の減殺効果がある。水深の半分の高さで極小通過率を最大 55% まで小さくできた。

② 有効版長が長くなると波長の長い波で極小通過率があらわれ、最小通過率の値もさがる。 $S/h=0.5$ のとき有効版長と波長との比が 0.45 付近で通過率が極小になる。

③ 平版間隔を広げることは、通過率の低下する相対水深の変化帯域を広くする効果を示す。

④ 理論値と実験値の比較から主要な波の減殺効果は、波と水平版下の水塊との線形干渉によるものと考えられる。

⑤ 実験範囲内の堤体諸元と極小通過率の関係を実験式で示せた。

⑥ 波形勾配も通過率低下の要因の1つである。

⑦ 底版型潜堤は、堤体背後の平均水位の上昇が非常に小さいので、海岸の維持機能が優れているものと思われる。

しかし、海浜の安定を促進するような海浜循環流を発生させるためには、波高をどの程度低減すればよいか検討する必要がある。今後、数値計算や平面実験により研究を進める予定である。

参 考 文 献

- 宇多高明・小俣 篤・横山揚久(1988): 人工リーフの機能と設計法, 土木研究所資料, 第2696号, pp. 1-79.
- 喜岡 渉・松野忠幸・源川秀樹(1989): 複列配置した潜堤による波浪制御, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 549-553.
- 小島治幸・井島武士・吉田明徳(1990): 没水水平版の消波特性と波分裂による波浪制御効果, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 594-598.
- 佐々木幹夫・首藤 啓・竹下 彰(1990): 潜堤周辺の海浜流・海浜変形数値計算法の検討, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 404-408.
- 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.
- 吉田明徳・小島治幸・鶴本良博(1990): 波動境界値問題におけるポテンシャル接続法の遠点解法, 土木学会論文集, 第417号/II-13, pp. 310-319.