

没水水平版の消波特性と波分裂による波浪制御効果

小島 治幸*・井島 武士**・吉田 明徳***

1. はじめに

近年、沿岸域の広範囲かつ多様化している利用に対応できる消波構造物の開発が望まれている。特に、大水深の海域における有効な波浪制御効果を有しかつ経済的な構造物、また環境上さらに景観上にも優れた機能をもつ構造物が期待されている。これらの条件を備えた構造物として、海水交換率が高く常に水面下に隠れている没水水平版が考えられ、注目されつつある。

没水水平版が有する消波機能をまとめると次の3つが考えられる。(1) 水平版上下における流体運動の位相差に起因する干渉効果。(2) 水平版上の流体域における碎波および周辺での渦の発生等によるエネルギーの減衰効果。(3) 水平版上の浅水域において起こる波の分裂により通過波の周波数が広がり個々の波の作用が低下する効果。これらの機能は、入射波の波形勾配や波長と水平版の版長や没水深(版上水深)との相対的な大きさによって、互いに重畳した形で消波効果として現われる場合、あるいはある一つの機能が卓越した形で消波効果として現れる場合が考えられる。従って、これらの機能を独立に取り扱い、それぞれ個々の現象の把握と消波効果の定性的および定量的な理解が必要であると考えられる。

本研究は、現象的に複雑な碎波が起こらない場合の機能をまず理解することが先決であると考え、(1)の波と没水水平版の線形干渉効果と(3)の波が分裂することによる波長の低減効果について調べる。まず、線形の干渉効果については、井島ら(1970)や田淵ら(1981)、Patarapanichら(1989)が計算と実験により明らかにしているが、実際の設計に対しては十分とは言えない。特に、水平版が完全に没水している場合は、水面に固定されているときの消波特性とは大きく異なり、版上水深や版長等と入射波の波長との相対的な大きさにより消波特性は著しく変化する。ここでは、線形計算により、版長や没水深、版厚を変えて干渉効果による消波特性を明らかにするとともに、最適版長や没水深の選択の指標を示す。

次に、著者ら(1989a, b)がその現象について明らかにした、没水水平版による波の分裂とそれにとまう波長の短縮により波浪制御効果がどの程度あるかを、二次元水路実験と線形計算により解明する。この場合、波長を短縮することにより、構造物に作用する波力の軽減や長波長の波に対して遮断効果の低い透過性構造物においても効果的に消波できることが期待されることから、没水水平版と不透過壁あるいは直立透過壁とを組み合わせ、それら直立壁に及ぼす波力や長波長の波に対する透過性防波堤の波遮断機能の改善等について検討する。

2. 没水水平版の干渉効果による消波特性

没水水平版と波との線形干渉効果による消波特性を明らかにするため、版長(B)と没水深(h_s)および版の厚さ(D)をパラメーターとして、速度ポテンシャルが存在する2次元の流体運動における線形計算を行った。計算法はポテンシャル接続法の選点解法を用いており、詳細は吉田らの文献(1989)を参照されたい。

2.1 版長と没水深および版厚の影響

図-1は水平版の没水深を一定($h_s/h=0.15$)として版長を変えたときの通過率の変化を表し、図-2は版長を一定($B/h=2.00$)として没水深を変えたときの通過率を表している。特定の版長と没水深に対し、通過率が極小となる波長があり、波長がその値よりも大きくとも小さくとも通過率は急激に増大し、波長に対する版長が大きいところでは、不透過潜堤と類似の特性を示す。没水深が同じで版長が短くなるにしたがい、通過率が最小(K_{rmin})となる波長が短い方へ動き、全体的に通過率が大きくなる。また、版長が同じで没水深を大きくしていくと、 K_{rmin} となる波長はそれほど変化しないが、その値自体が急激に大きくなる。 h_s/h が小さく B/h がある程度以上大きくなると、通過率が零となる波長が2カ所現れ、通過率の曲線が折り返した形となり、消波効果としては好ましくない。以上の消波特性は版厚が非常に薄い場合で、版厚を変えたときの通過率の変化を図-3に示す。版厚が大きくなるにつれ通過率は大きくなり、特に通過率の極小となる点から短波長側 $K_T=1.0$ とな

* 正会員 Engr. 九州大学助手 工学部水工土木学科

** 正会員 工博 東和大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工博 九州大学助教授 工学部水工土木学科

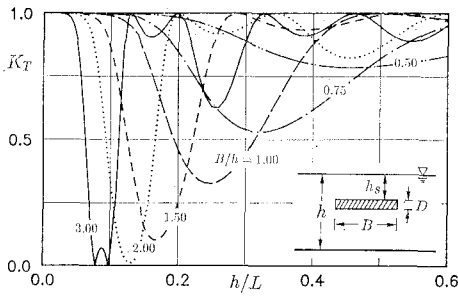


図-1 没水水平版の版長による通過率の変化 ($h_s/h=0.15$, $D/h=0.00$)

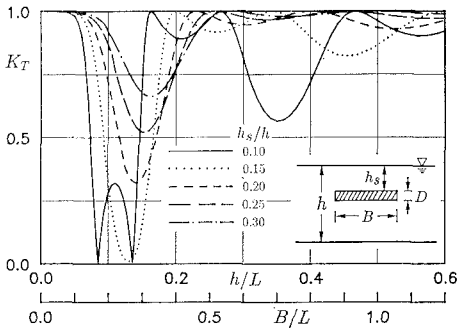


図-2 没水水平版の没水深による通過率の変化 ($B/h=2.00$, $D/h=0.00$)

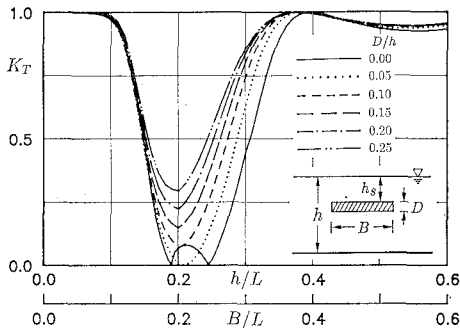


図-3 没水水平版の版厚による通過率の変化 ($B/h=1.00$, $h_s/h=0.10$)

ところでその傾向が強い。また、没水深が浅く版長が短いほど版厚による通過率の増大が顕著となる。従って、版厚は、消波効果からすると構造的に可能な限り薄くするのが望ましい。

2.2 最適断面の決定

上の結果より没水水平版の消波特性は、砕波等によるエネルギー損失がない場合、ある版長と没水深に対して特定範囲の波長の波を選択的に遮断し、それ以外の波長の波に対しては消波効果があまり期待できない。砕波によるエネルギー損失が起きる場合は、相対水深の変化によるこの傾向は緩和されると報告(田淵ら, 1987)されて

いるが、水平版の最適断面としては線形の干渉効果が最大のところを第1の選択とするのがよいと考える。よって最適断面を設計する場合、ある波長に対して、最小通過率となるような版長と没水深を選べば良いことになる。この最小通過率が1か所零となるところから $K_{Tmin}=0.5$ となるところまでの相対版長(B/L)と没水深(h_s/L)および相対水深(h/L)と最小通過率(K_{Tmin})との関係をまとめたものが図-4である。○は K_{Tmin} の計算値で、曲線は各々の K_{Tmin} を結んだものであり、直線は相対水深を表している。この図よりある特定の相対水深の波に対して、線形の干渉効果による各最小通過率を与える最適な版長と没水深を決めることができる。また、相対水深が小さいほど直線の傾きが緩やかでそれがおおきくなるにしたがい傾きが急となる傾向は、長波長の波に対しては版長の長さの変化が通過率に大きく効き、逆に短波長の波に対しては版長の変化よりも没水深の変化の方が通過率の変化に大きく影響を及ぼすことを示している。

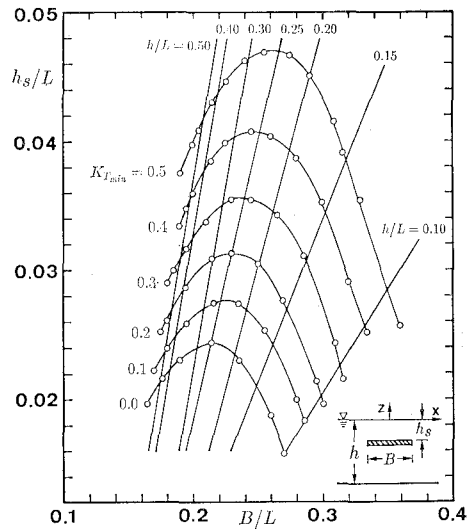


図-4 最小通過率を与える相対水深と相対版長、没水深の関係

3. 波分裂による波浪制御効果

3.1 水理実験の方法と条件

実験は、二次元造波水路(長さ 28 m, 幅 0.3 m, 高さ 0.5 m)を用い、水深 $h=0.35$ m をとして、図-5 に示すように水平版と直立不透過壁および縦スリット透過壁とを組み合わせ、版上水深が $h_s/h=0.25$ 、水平版長が $B/h=2.00$ を標準の大きさとして次に示す実験を行った。

(1) 不透過壁の実験は、入射波の波高を $H_0=2.8$ cm とし相対水深 (h/L) を 0.075 から 0.350 まで変えて、不

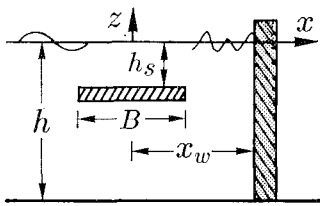


図-5 水平版と直立壁の概略図

透過壁の位置を水平版の後端から水路方向に x_w/h (x_w : 水平版中央からの距離) $=1.0 \sim 8.1$ まで変え、各位置における壁体に作用する波力を測定するとともに、水深の 0.3 倍間隔で水面変位を計測し波高の分布を求めた。波力、波高とも水平版上で起こる波の分裂により波形が乱れるため、ゼロアップクロス法により個々の波を決め、1/3 最大波を求めて波力および波高の大きさを定義した。また鉛直壁に作用する分裂波の波圧を調べるため、鉛直方向に 5 cm 間隔で設置した圧力計により波圧分布を測定した。

(2) 縦スリット透過壁の実験では、開口率 $\varepsilon=0.2$ で、壁体厚が $W/h=0.171, 0.340$ の 2 種類の壁体を用い、不透過壁と同様に壁体にかかる波力を測定し、さらに各々 3~4 本の容量式波高計を水平版の前面と壁体の後面に設置して水面変位を計測し、分離推定法を用いて入射波、反射波、通過波をそれぞれ分離させ全エネルギー比の平方根で定義した反射率($\overline{KR}$)と通過率($\overline{KT}$)を算定した。また、実際の海洋波に対応する不規則波の実験を行い、多成分入射波における波の分裂効果についても調べた。

実験では現象が造波開始後、定常状態に達したのち、水面変位と波力データについては、サンプル周波数 20 Hz で 10~15 秒間および 2048 個のデータを取得した。波圧のデータは、サンプル周波数を 100 Hz としてローパスフィルターをかけて取り込んだ。

3.2 実験結果と考察

a) 不透過壁との組み合わせ

図-6 は、直立不透過壁を x 方向に移動したときの各位置での壁体にかかる無次元波力 (F/F_s : F_s =完全重複波の波力) を、 x_w/L を横軸に取り表したものである。この場合、各相対水深における一番左側の点が、不透過壁が水平版後端 ($x_w/h=1.0$) に位置するときの波力を示している。この図より壁体に作用する波力の大きさは、水平版と直立壁との間隔が重要なパラメータになっている。すなわち、波力は、直立壁と水平版の間隔に対して変動しており、相対水深にかかわらずほぼ一定の x_w/L で増加減少していることがわかる。図-7 は、不透過壁体に作用する波力が極小 ((a) 図)、極大 ((b) 図) となるときの前面水域の波高分布の一例である。壁体が水面変動の共振点 (極大点) に位置するときは、水平版の前後

面での水面変動は基本波の波長のほぼ 1/4 ごとに波高の極大、極小が現れ、また水平版上ではその水深に対応する微小振幅波の波長のほぼ 1/4 ごとに極大、極小点が現れる。しかし、(a) 図によれば壁体の波力が極小点に位置する場合は、水平版と壁体間の水域ではこのような明確な傾向はみられなかった。水平版と不透過壁との最適距離に関しては、版長や没水深等を変えた場合の検討がさらに必要であるが、今回の結果によると波力が極小となる点は $x_w/L=0.6 \sim 0.7$ および $1.05 \sim 1.25$ で、水平版の後端からの距離としては、例えば、 $h/L=0.15$ では $0.45L$ と $0.99L$ 、 $h/L=0.20$ では $0.457L$ と $0.943L$ と基本波の波長のほぼ半分ごとに極小点が現れる結果となった。これは、田淵ら(1987)が碎波減衰を考慮にいたった線形計算で求めた最適距離の値とは異なる結果を示している。

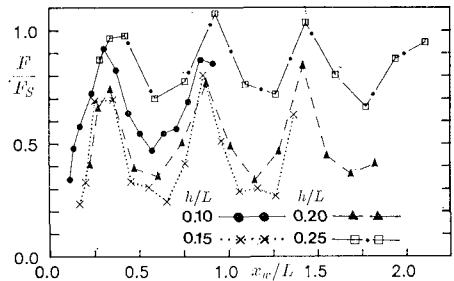
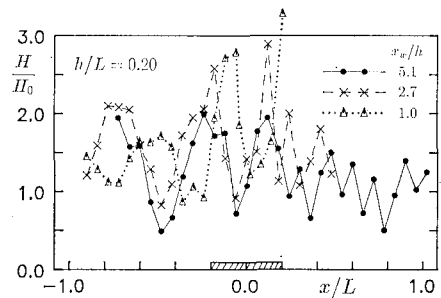
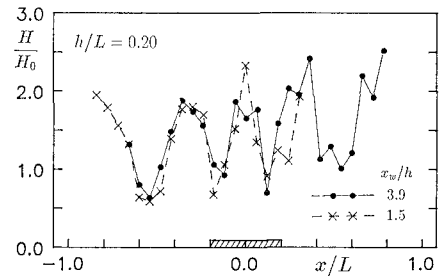


図-6 直立不透過壁に作用する波力の場所的変動



(a) 直立壁が波力の極小点に位置する場合



(b) 直立壁が波力の極大点に位置する場合

図-7 直立不透過壁前面の波高分布

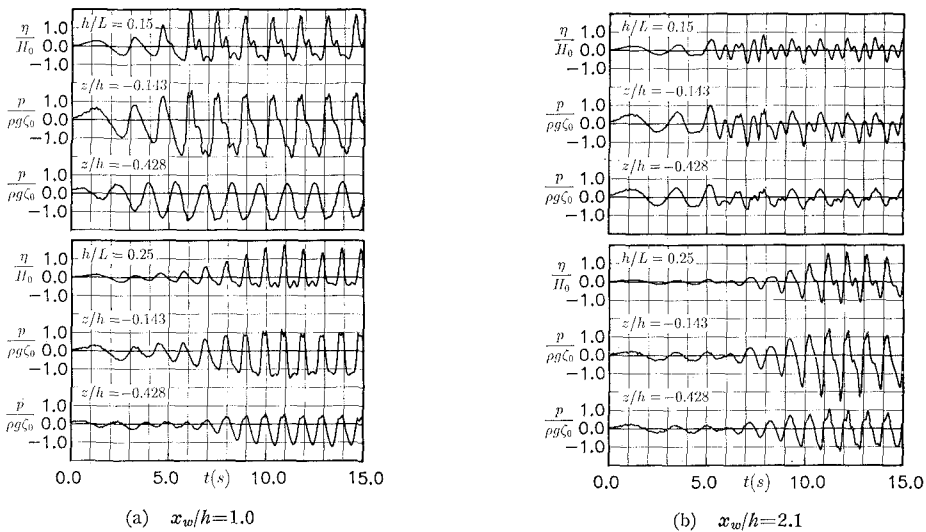


図-8 水面変位と波圧の時間波形

壁体の前面波高とそれにかかる波力を対比してみると、波力が極大となる位置に壁体がある場合、図-7(b)より波高は入射波高の $x_w/h=1.5$ では約2倍、 $x_w/h=3.9$ では2.5倍と完全重複波の波高よりも大きい、図-6に見られるように波力としては完全重複波の70~75%と小さく、また波力が極小となる位置においても同様のことが言えることから、波長短縮による波力の低減効果が現れていると考えられる。

次に、不透過壁が水平版の後端($x_w/h=1.0$)に位置する場合、波高が極大に近い値を示すにもかかわらず相対水深の小さいときの波力が極小値を示す。これは、水面変位と圧力の時間波形を表す図-8(a)の上の図が示すように、相対水深が小さいときは水平版の上の水域における波圧($z/h=-0.143$)と下の水域における波圧($z/h=-0.428$)の位相がほぼ逆位相となっているため、壁体に作用する全波力としては小さい値となるためである。この位相のずれは、相対水深が大きくなるにつれて小さくなり、この場合では、 $h/L=0.25$ よりも大きいところではみられなくなる。また、水平版の後端よりある程度以上はなれると、図-8(b)で見られるように位相のずれはなくなる。実験を行った範囲では、後端より波長の0.2倍ほどで位相のずれはほとんど見られなくなった。

各相対水深における波力の場所的な変化を平均してそれぞれの相対水深に図示したものが図-9で、○が平均的な波力、縦線は場所的な変化の最大値、最小値を表しており、 $h/L=0.15$ 付近で波力が最も弱まることから、これは、図-10に示す相対水深に対する不規則波における有義波周期の短縮傾向とよく対応しており、周期つまり波長の低減による波力の軽減効果が現れていると考えられる。また、没水水平版と不透過壁との距離を最

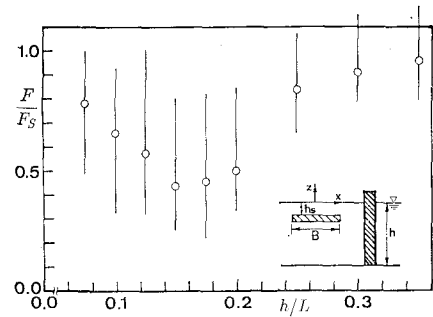


図-9 相対水深に対する不透過壁に作用する波力の変化

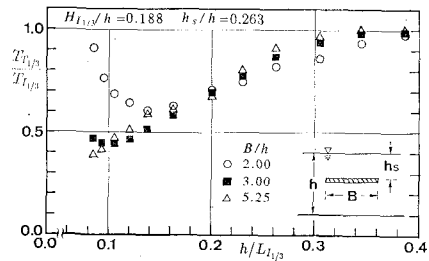
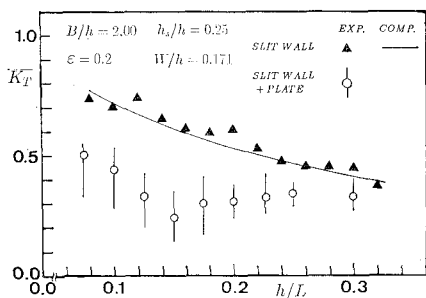


図-10 相対水深に対する通過波の周期の変化

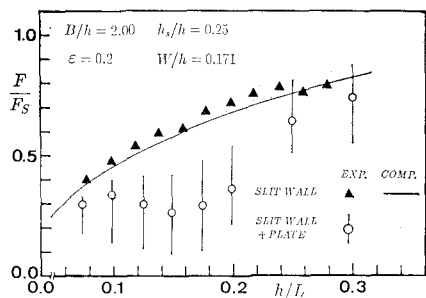
適に選べば、水平版上で碎波を起こすことなく長波長の波に対しても完全重複波の50%以下の波力に抑えることができる。

b) 縦スリット透過壁との組み合わせ

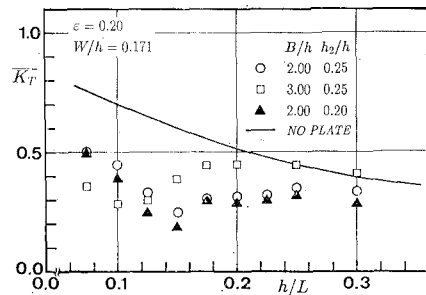
没水水平版の背後の直立壁が透過性となっても、紙面の関係で図は示せないが、透過壁を水路方向に移動したときの波力および通過率、反射率は場所的に変動する。波力と通過率は対応して変動し、反射率はそれとは逆の変動を示し、不透過壁の結果と比べると変動の大きさが



図—11 没水水平版と縦スリット壁における通過率の変化



図—12 縦スリット壁に作用する波力の変化

図—13 没水水平版と透過壁の組み合わせにおける B/h と h_s/h の違いによる通過率の変化

減少している。また、この場所的な変動は、有義波周期数付近に鋭尖なエネルギーのピークを持つ不規則波に対してはならされた形となり、規則波のような顕著な変動はみられない。

図—11 と 12 は、それぞれ、開口率 $\varepsilon=0.2$ 、壁厚 $W/h=0.171$ の透過壁と没水水平版が組合わさったときの平均および最大、最小値の通過率 ($\bar{K}_T$) と無次元波力 (F/F_s) を表している。図中の $\blacktriangle$ は没水水平版のない 1 列縦スリット壁のみの実験値を表しており、実線はその理論値である (小島ら, 1986)。通過率、波力とも没水水平版による波の制御効果が明確に現れており、この様に薄い透過壁でも水平版と組み合わせることにより十分な消波効果

が得られ、また作用波力が小さいことから直立堤体を構造的に小さくすることが可能であろう。

図—13 は、没水水平版の版長と設置水深の違いによる通過率の変化を示したもので、水平版の長さが長いほど相対水深の小さいところで通過率が減少するが、相対水深の大きいところでは逆に増大する傾向がみられた。また、没水深を小さくすると全体的に通過率が減少する。

4. あとがき

本研究によって、波と没水水平版の線形干渉効果による消波特性を明らかにし、最小通過率を与える相対水深と相対版長および没水深との関係を示した。また、没水水平版と透過壁あるいは不透過壁と組み合わせて用いた場合の波分裂による波浪制御効果を明らかにした。それによると、相対水深に対する波力や通過率の減少傾向は周期の短縮傾向と類似しており、周期の低下が最も大きく現われる相対水深付近で波力と通過率が極小を示した。最後に、ここに示した結果においては、水平版による波長低減の効果ばかりではなく波高の減衰効果も含まれていることはもちろんである。しかしここで用いた水平版の通過率特性は、 $h/L=0.1$ 以下および 0.25 以上では通過率が 1.0 近くなり、没水水平版による波高の減衰効果が小さいと思われる。特に $h/L=0.1$ 付近では、周期の低下が大きいことから波分裂にともなう波長低減による防波効果が大きいと考える。

参考文献

- 井島武士・尾崎重雄・江口 彦・小林 彰 (1970): 水平版による防波堤と岸壁に関する理論的研究, 第 17 回海岸工学講演会論文集, pp. 97~106.
- 小島治幸・井島武士・田口陽一・安永達朗 (1986): 縦スリット式防波堤の水理特性の算定法に関する研究, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 402~406.
- 小島治幸・井島武士 (1989a): 没水水平版による波の分裂と波浪制御に関する研究, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 529~530.
- 田淵幹修・滝川 清 (1981): 離岸潜堤の消波機構に関する一考察, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 367~371.
- 田淵幹修・木原 力・滝川 清・中島重旗 (1987): 水平版式防波堤の水理特性に関する研究, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 482~486.
- 吉田明徳・小島治幸・鶴本良博 (1989): ポテンシャル接続法の選点解法, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 474~478.
- Kojima, H., T. Iijima (1989b): An Experimental Study on Wave Decomposition by a Submerged Horizontal Plate, Memoirs of Faculty of Engineering, Kyushu Univ., Vol. 49, No. 4, pp. 195~212.
- Patarapanich, M., Hin-Fatt Cheong (1989): Reflection and Transmission Characteristics of Regular and Random Waves from a Submerged Horizontal Plate, Coastal, Engineering, Vol. 13, pp. 161~182.