

遊水部付消波工の防波堤への適用

水産庁開発課 正会員 中泉昌光
水産工学研究所 正会員 山本正昭

1. はじめに

遊水部付消波工というのは、消波工を防波堤直立部の前面を覆う従来タイプと異なり、直立部と適当な間隔を設けて設置された消波工の形式であり、離岸堤タイプ消波工あるいは分離式消波工とも呼ばれている。通常、防波堤直立部に先行して消波工を設置すると工事上の静穏度が確保ができて施工性にすぐれている。機能的には、著者らが護岸の越波実験から報告しているように、従来タイプにくらべ越波抑止効果が大きく、防波堤直立部の低天端化が図れる¹⁾。防波堤の安全性については、従来タイプと異なり直立部にかかるブロック荷重（ブロック自体の荷重と波力がブロックを介して伝達する荷重）を減らすことができる。また、影山ら²⁾や佐伯ら³⁾は、消波工の天端高が十分あれば従来の被覆タイプに比べてすぐれた波圧減殺効果があることを報告している。

しかしながら、これら波力に関する研究はいずれも規則波による結果を整理したものであり、不規則波による検討はなされていない。影山らの研究では、波の周期が大きい場合に天端が低いと衝撃波が発生することを指摘しているが、消波工の堤体条件（天端高と遊水部長さ）による波圧の差異について定量的なものが掘めていない。佐伯らの実験も周期が1.1秒より短い波浪条件について行われており、周期の長い高波浪が来襲するような波浪条件下でも適用できるかどうか検討する必要がある。

これら問題点を明らかにするために本研究では、はじめに周期の長いものも含めて規則波実験を行ない、各種波浪条件と消波工の堤体条件による波力の変化や遊水部の水位上昇量の波力に及ぼす影響を明らかにし、つぎに不規則波実験により不規則波力の特性を調べた。また遊水部を有する防波堤からの越波による伝達波の水利模型実験を実施し、不規則波による伝達率の検討を行なった。

2. 実験方法

2.1 波圧実験

長さ100m、幅1m、深さ1.5mの2次元不規則波造波水路内に水深20cmで長さ7.5mの水平床、さらに勾配1/30の斜面を造り、この水平床前端に消波工の前法先を合せて堤体模型（図-1）を設置した。想定縮尺は1/30である。

消波工の形状として、被覆タイプと遊水部タイプを2種類をとりあげた。このうち被覆タイプの天端高は+20cmとした。一方、遊水部タイプの天端高は、通常の被覆タイプの消波工の断面積より余り大きくならないように+5cm、+10cm、+15cm（規則波実験のみ）の3種類である。遊水部長さはその堤体設置水深における入射波長の0.05、0.1、0.2倍（規則波のみ）を目安として各波浪条件に対して定めた。波浪条件は、規則波では周期が1.64、2.19、2.74sとし、各周期について非碎波から碎波までの範囲にわたって7段階の波高をあてた。

不規則波実験では、有義波周期が1.94S（A波）、2.24S（B波）、2.62S（C波）について同一スペクトルを目標とした波列の異なる4つの波群を作成（A1～A4、B1～B4、C1～C4）し、それぞれ波高レベルを4段階にかえた。各波群中に含まれる波の数はA波は約33～35波、B波は約28～30波、C波は22～24波である。

消波工設置部の通過波高計測用に50cm間隔で6本（No.1～6）、沖側に2本（No.7,8）セットした。遊水部の水位変動は遊水部の中央付近に容量式波高計をセットして測定し数値フィルターにより平均水位上昇量を求めた。

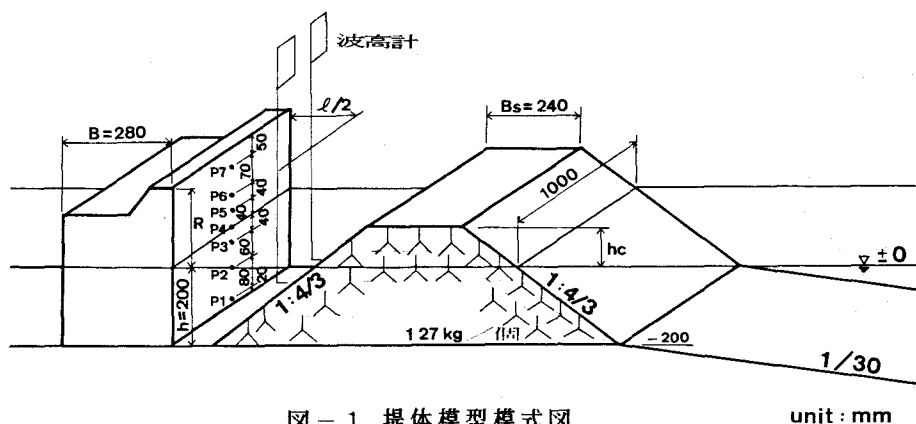


図-1 堤体模型模式図

unit: mm

波力の測定はサンプリング間隔 2 msec で取込み、フロッピーディスクに記録した。同時刻での各測点における波圧強度から内、外挿して直立部にかかる波圧分布をもとめ、鉛直方向に積分して同時波圧並びに同時波圧合力を算出し、最大値と、その前後時刻での波圧合力から 2 次曲線補間により極大値を計算し、これを改めて波力のピーク値とした。

不規則波実験では 1 波 1 波の識別を波圧合力のゼロアップクロス法により行ない、代表波力を求めるための統計処理において、ピーク値の数を入射波の波数に一致させ、ピーク値の数が波数よりも不足するときは、不足分だけピーク値としてゼロを加えて統計処理を行なった⁴⁾。

2. 2 伝達波実験

越波を生じることが前提となるため、消波工および直立堤の天端高は低くした。すなわち、消波工の天端高は +3.0cm、+5.0cm、直立部の天端高は +3.0cm、+5.0cm、+8.0cm、+10.0cm とかえ、常に直立部の天端を消波工の天端と同等もしくはそれ以上とした。他の実験条件は波圧の不規則波実験とはほぼ同じである。

堤内の伝達波高を測定するために、容量式波高計を直立部から堤内側へ 1.0m、及び 2.5m、4.0m と離れた 3 地点にそれぞれ 1 本ずつ設置した。計測はサンプリングタイム 50ms で 60 秒間取り込みゼロアップクロス法で波数だけ大きい波を抽出し伝達波高を算定した。

3. 実験結果及び考察

3. 1 規則波の波圧

(1) 波圧記録と遊水部の水位変動

遊水部タイプでは、遊水部の平均水位の上昇が起こると同時に、この水位の上昇の影響は直立部前面の波圧にも表われる。波圧記録のところで述べたように、波の谷がきてもほとんど負圧を示さないときもある。この水位上昇による波圧成分 Δp を、波圧記録に数値フィルターをかけて抽出してみた。図 2 の Δp は、一般に遊水部長さ、消波工の天端高、周期の別なく沖波波高 H_0 の増大につれ大きくなり、 h_c/H が小さい程大きく、最大で 0.2 $\rho g H$ 程度である。また、 $h_c/H \geq 0.4$ の範囲では、碎波条件の波に対しての $\Delta p / \rho g H$ が非碎波条件のそれよりも大きい値をとる。その平均水位の上昇による静水圧相当分と変動圧が直立部前面に働くものと考えられる。

(2) 入射波高と同時波圧合力

図 3 は被覆タイプと遊水部タイプの波圧合力（以降、単に波力と呼ぶ）および通過波高と沖波 H_0 の関係の例を示す。被覆タイプは消波工法先から 2 ～ 3 倍波高程度離れた地点、遊水部タイプは消波工法先から 1 ～ 2 倍波高程度離れた地点で碎波したときに最も大きな波力を示す。この関係から碎波波高 H を 0 ～ 2 H 沖区間の最高値を示す波高計の値とした。遊水部タイプの天端高 h_c が +5cm、遊水部長さ l が 0.05 L のときに被覆タイプよりも大きな波力を示すことがあるが、一般には被覆タイプよりも良い波圧減殺効果を示している。遊水部長さの波力

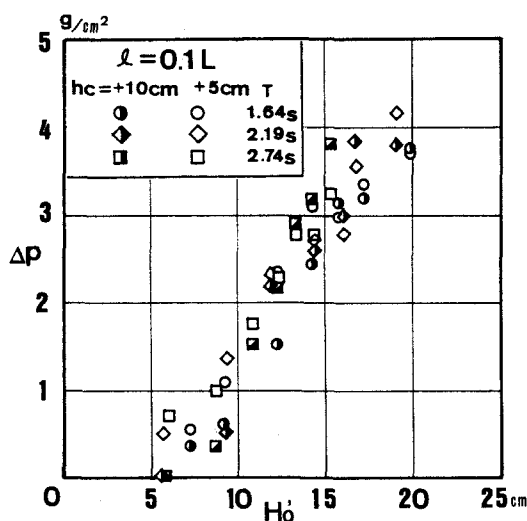


図-2 平均波圧強度と沖波波高

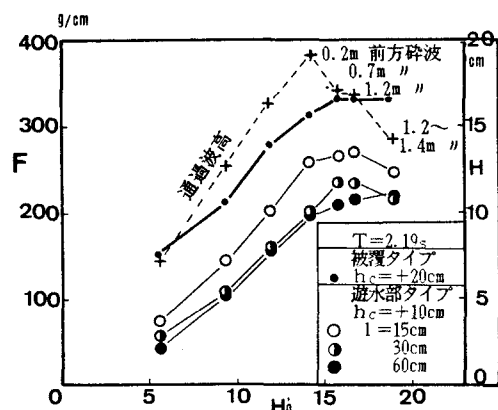
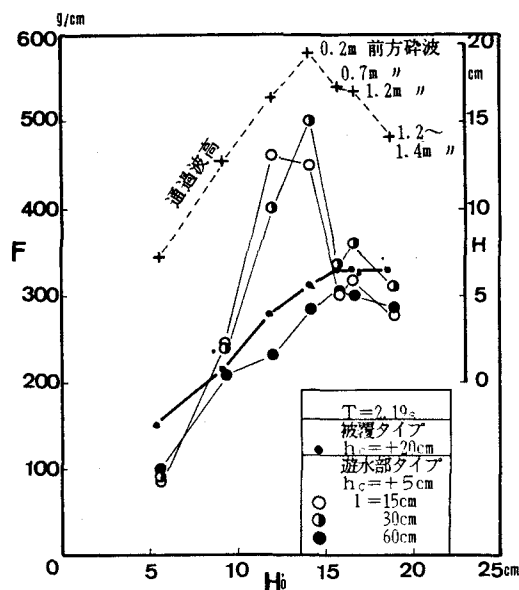


図-3 波力と沖波波高

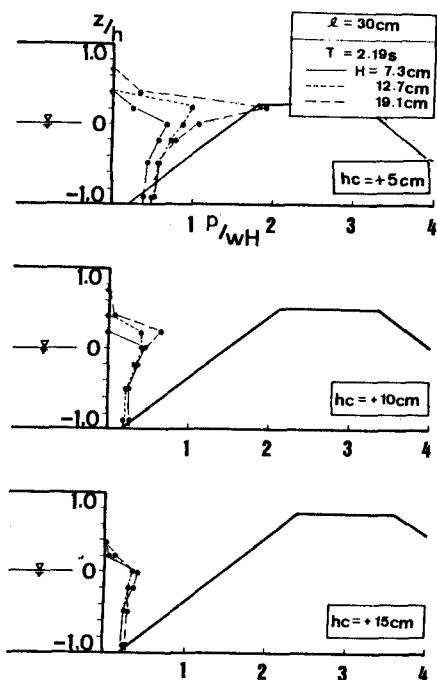


図-4 波圧分布 ($l = 30\text{cm}$)

に与える影響に注目すると、 $0.05L$ から $0.1L$ と長くすると波力の低減が見られるが、さらに $0.2L$ に長くしてもそれ程遊水部長さによる波力の変化が現われない。以降の解析には砕波後の波圧と思われるデータを除いた。

(3) 波圧分布と平均波圧強度

波圧分布の例として図4に $l = 30\text{cm}$ 、 $T = 2.19\text{s}$ の場合をあげた。 $hc = +5\text{cm}$ 、 $H = 12.7\text{cm}$ 、 19.1cm に対して静水面付近での波圧強度が大きく、砕波圧型の分布形を示すが、 $hc = +10\text{cm}$ 、 $+15\text{cm}$ と天端を高くするといずれの波高に対しても、重複波圧型の波圧分布に変化する。また、遊水部長さ l が 60cm と長いと、 $hc = +5\text{cm}$ の時にも、重複波圧型の波圧分布になる。

無次元平均波圧強度 $\bar{p}/wH$ (ただし $p = F/w(h + 0.5H)$) は、 l/L 、 hc/h 、 H/h と関係があるものと考えられる。この実験において h は一定であるため、 hc/h と H/h なるパラメータは、相対天端高として hc/H で表わし、 $l/L = 0.05$ 、 0.1 、 0.2 ごとに $\bar{p}/wH$ と hc/H の関係を調べたのが図5である。第2パラメータとして h/L 、 H/h の記号による区別を入れてある。図中の実曲線、点曲線は堤体を設置する前の状態での入射波の砕波の有無により分けたものである。波力に対して H/h の効果は、入射波が砕波か非砕波かといった形で現われている。無次元平均波圧強度は hc/H が小さくなる程大きく、 hc/H が 0.4 あたりから急に大きくなり、 $l = 0.05L$ のときには 1.0 以上になる。逆に hc/H が 0.8 以上からは、

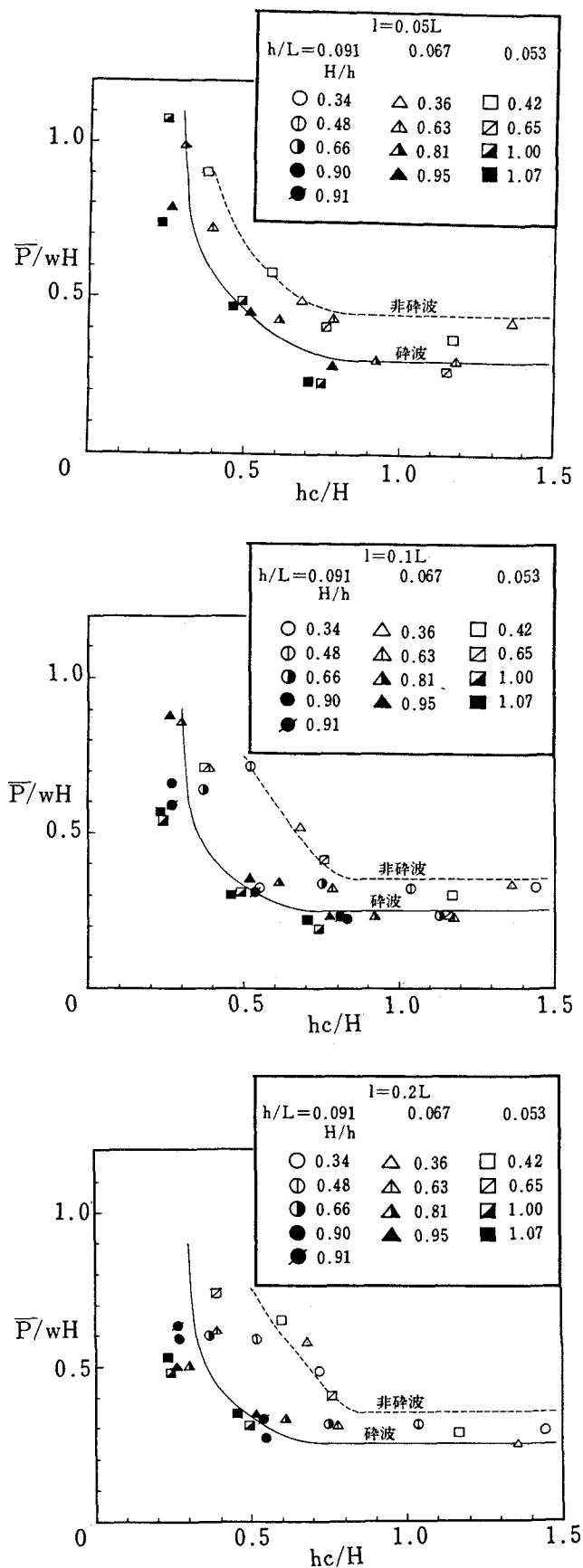


図-5 平均波圧強度と相対天端高

ほとんど無次元平均波圧は変化しない。

3. 2 不規則波の波圧

(1) 不規則波の特性

図6は、消波工設置位置直前の波高として波高計No. 2～5の計測値をプロットしたものである。図中の実線と破線は、 $h=20\text{cm}$ での不規則波の浅水変形の計算値である。この浅水変形計算は山本ら⁽⁵⁾が規則波の浅水変形をもとに作成したもので、沖で波高はレーリー分布するものと仮定し、各成分波を個々に浅水変形をさせ分布密度に従い加重を付けて重ね合せたものである。実験値と計算値を比較すると、砕波点以上の最大波高や1/10最大波高は、計算値より実験値が大きい。

(2) 不規則波力とその変動性

最大波力および有義波力の無次元平均波圧強度と消波工の相対天端高の関係を示したのが図7である。実線は4つの波群の最大波力の変動範囲であり、その上端のマークは4波群中の最大波力を示す。規則波力の場合と同様に遊水部長さ l が $0.05L_{1/3}$ では $0.1L_{1/3}$ にくらべてかなり大きな波力を示すと同時に、変動幅も遊水部長さが短い程大きい。遊水部長さ l が $0.05L_{1/3}$ と短いと、消波工の天端高 hc は $1.0H_{1/3}$ 以上高くして対処しなければならぬので被覆式より明らかに不利である。 $l=0.1L_{1/3}$ では、無次元平均波圧強度 $\bar{P}_{\max}/wH_{1/3}$ が $1.0wH_{1/3}$ 以下であるためには消波工の所要天端高は $0.7H_{1/3}$ である。

(3) 不規則波力の推定

沖波波高としてレーリー分布を仮定し、各区間波高(成分波)に対する規則波力の重み付き重ねあわせから不規則波力を算定し、有義波力、1/10最大波力、最大波力を統計処理した結果と、不規則波実験結果とを比較したものが図8である。このとき、区間波高に対する波力は規則波力の算定図(図5)を用い、波力算定のための波高は堤体位置が砕波以浅のときは堤体位置から2波高沖までの区間内での最高波高とし、砕波以深のときはその地点での波高を用いた。斜線がこの計算値により得られた範囲であり、実験値と比べると hc/H が0.3以上なら代表波力はほぼ良い推定がなされている。ただ、最大波力は低天端のときに計算値よりもかなり大きくなる。これは不規則波力の特性として、低天端の場合に単純に規則波力の重ねあわせでは推定出来ない不規則性、言い換えれば波群の違いによる著しい変動と強大な波力の発生する可能性があることを示している。

3. 3 不規則波の伝達率

(1) 伝達波の特性

図9に例としてあげたのが $hc=+3\text{ cm}$ 、 $R=+3\text{ cm}$ 、 $l=30\text{ cm}$ 、B1波、 $H_{1/3}=16.2\text{ cm}$ のときの堤内に設置した3本の波高計記録である。図中、数値フィルター後もあわせて描いてある。フィルター後の

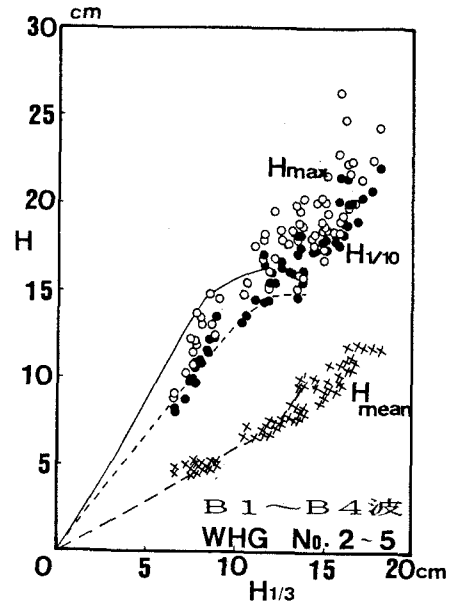


図-6 代表波高間の関係 (B波)

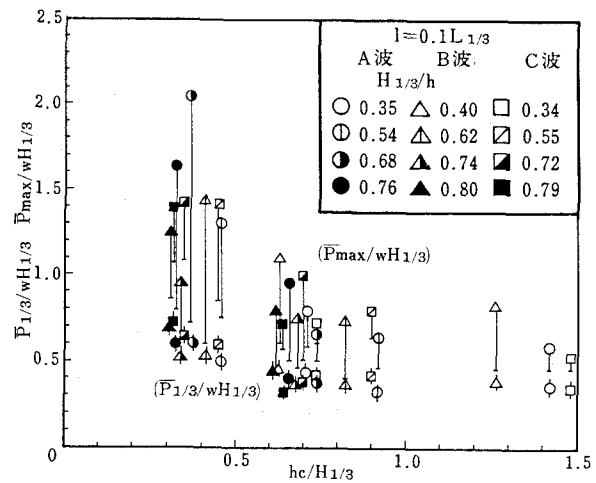


図-7 最大波圧強度と有義波圧強度の変動
($l=0.1L_{1/3}$)

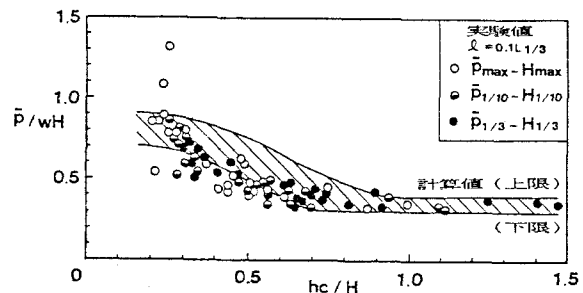


図-8 平均波圧強度の計算値と実測値
($l=0.1L_{1/3}$)

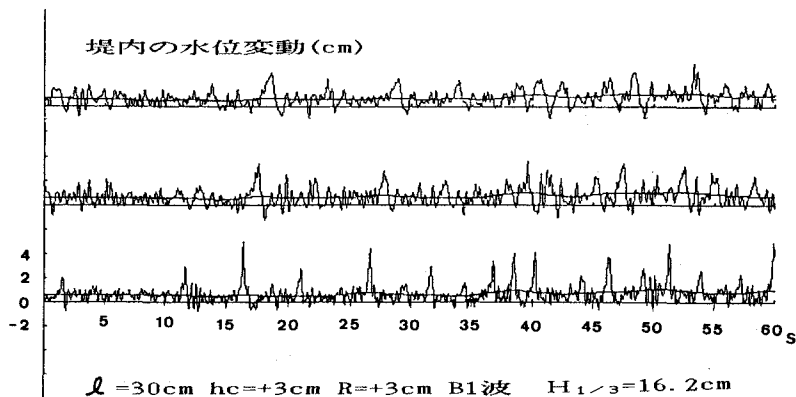


図-9 堤内の水位変動

変動曲線に注目すると、水塊の打ち込みにより堤内の水位が上昇し長周期波の上に擾乱波が乗っているのがわかる。この堤内の波高記録からスペクトル図を描くと図10のようになる。入射波のスペクトルは0.4Hzに集中が見られるが、伝達波のスペクトルは、入射波と同じピーク周波数のほかにその約0.5倍や2倍、3倍そして4倍周波数でピークが現われている。高い周波数のピークは水塊の打ち込みによる小さい擾乱波に相当し、低周波数のピークは長周期波に対応する。この傾向は他の条件においても同様であるが消波工や直立部の天端が高くなるとこれらスペクトルのピークはほぼ同程度の値を示していた。今回、長周期波成分がそれほど大きくなかったことから、伝達波高は長周期波成分を含めてゼロアップクロス法により定めた。

図11に入射波周期と伝達波周期の代表値の比を相対天端高をパラメータに図示してみた。伝達波の代表値間の関係は次のとおりである。

○ $R/H_{1/3} \leq 0.6$ ($hc:R=1:1 \sim 1:2$) の場合: $T_{1/3} = 0.2 \sim 0.4 T_{1/3}$, $T_{max} = 0.2 \sim 0.5 T_{1/3}$

○ $R/H_{1/3} > 0.6$ の場合: $T_{1/3} = 0.3 \sim 0.65 T_{1/3}$, $T_{max} = 0.3 \sim 1.0 T_{1/3}$

○ $H_{max} = H_{1/3}$, $H_{1/10} = 1.0 \sim 1.8 H_{1/3}$ と変動がかなり大きい。

(2) 波高伝達率

有義波高について伝達率と相対天端高の関係を表わしたのが図12である。消波工被覆タイプと比較するために谷本、大里⁽⁷⁾の実験データも合せてプロットしてある。ただし、谷本、大里の伝達波高の中には混成堤であるためにマウンドからの通過波高も多少とも含まれている点が遊水部タイプと異なる。この図から同一天端高を有する被覆タイプと遊水部タイプでは、遊水部タイプの方が、伝達率で0.1~0.16良好であることがわかる。遊水部長さによる伝達率の差は見られない。

有義波高と同様に、最大波高と1/10最大波高について伝達率と相対天端高の関係をプロットしたのが図13である。相対天端高0.3を境として、天端が高いと最大波や1/10最大波に対する伝達率が有義波高に関する伝達率よりも小さいが、相対天端高が0.3よりも低くなると逆

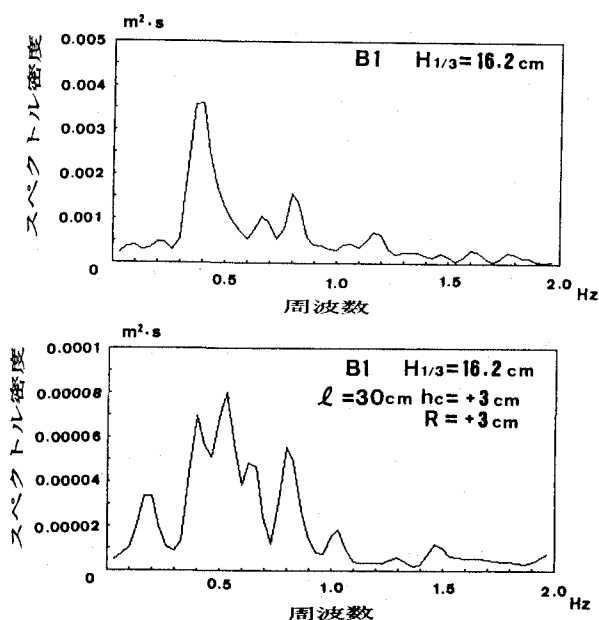


図-10 伝達波のスペクトル

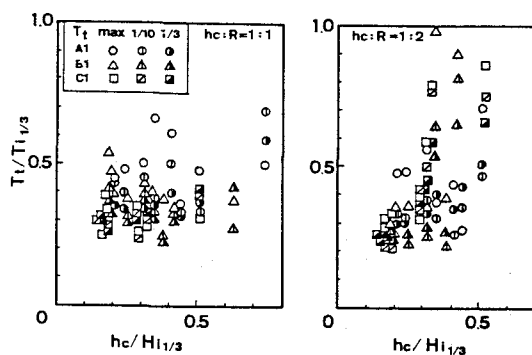


図-11 入射波と伝達波の周期比

転するという特徴がある。

4. まとめ

遊水部を有する消波工付防波堤に働く波力と越波の特性を調べたが、得られた結果を整理してみた。

(1) 波力に関しては、

○遊水部タイプは、消波工の天端高が $0.55H$ 以上、遊水部長さが $0.01L$ 以上あれば、被覆タイプよりも優れた波圧低減を期待できる。

○無次元平均波圧強度 p/wH は、無次元遊水部長さ l/L と相対天端高 h_c/H 、そして堤体設置予定位置が碎波以浅か以深により決り、その算定図が得られた。

○不規則波の波力は、この算定図を使って、 $1 \geq 0.1L_{1/3}$ 、相対天端高 $h_c/H_{max} > 0.3$ であれば h_c/H に対応する波圧をレイリー波高分布に応じて規則波波力の重ねあわせで推定できる。

○最大波力の平均波圧強度 $F_{max}/(h+0.5H_{1/3})$ が $1.0wH_{1/3}$ 以下であるための消波工の所要天端高は、 $1 \geq 0.1L_{1/3}$ のとき $0.7H_{1/3}$ である。

○直立部に働く波圧の中には遊水部の平均水位の上昇相当分の静水圧による静水圧相当分が含まれており、その大きさは、平均波圧強度で $0.1 \sim 0.2wH$ 程度である。

○代表波高について伝達率の算定図が得られ、同一天端高を有する被覆タイプより $10 \sim 16\%$ 小さい。

○伝達率について遊水部長さによる差異は認められなかった。

従って、遊水部付消波工は被覆タイプと比較すると施工性に優れており、越波防止或いは伝達波の低減には効果的であるが、天端高を低くできるにも拘わらず消波工の断面積はやや増大し、経済的には高くなるであろう。

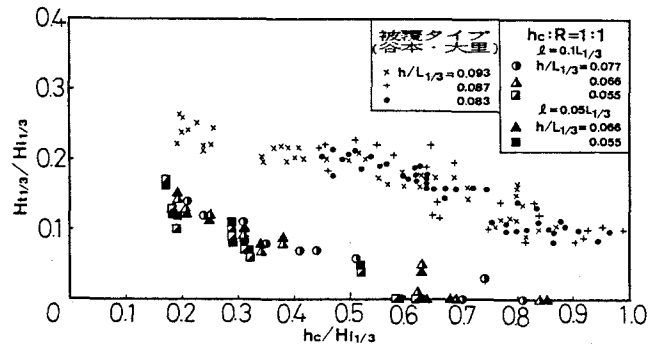


図-12 伝達率と相対天端高

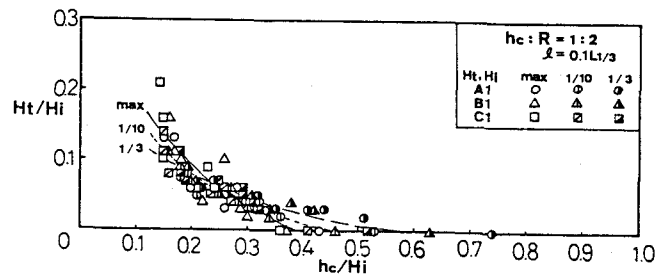
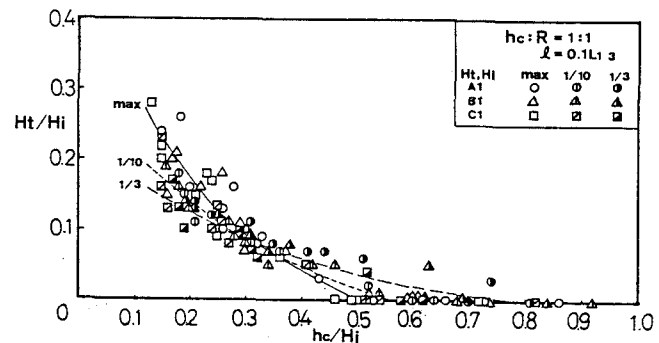


図-13 代表波別の伝達率と相対天端高

参考文献

- 1) 山本正昭・中山哲蔵・間辺本文：遊水部を有する消波工付護岸の越波に関する研究、水産工学研究所技報第7号、pp. 217～230、1986
- 2) 影山智将・山本正昭：離岸タイプ消波工の効果について、水産工学研究所技報第2号、pp. 51～66、1981
- 3) 佐伯浩・菊地秀明・京谷修：分離式防波堤の水理研究室機能と設計波圧について、第27回海岸工学講演会論文集、pp. 335～338、1980
- 4) 谷本勝利・高橋重雄・明瀬一行：防波堤直立部に働く不規則波力に関する実験的研究、港湾技術研究所報告Vo. 1. 23, No. 3, pp. 48～99、1984
- 5) 山本正昭：漁港内の水面変動予測に関する研究、水産工学研究所報告第6号、pp. 92～104、1985
- 6) 谷本勝利・大里睦男・高岡征二郎：不規則波による消波ブロック被覆堤の安定実験、第26回海岸工学講演会論文集、pp. 343～347、1979
- 7) 谷本勝利・大里睦男：消波ブロック被覆堤の不規則伝達波について、第26回海岸工学講演会論文集、pp. 309～313、1979