

# 透過波と反射波の低減を可能にするカーテン防波堤の 構造形式について

中村孝幸\*・神川裕美\*\*・河野 徹\*\*\*・横本一徳\*\*\*

## 1. はじめに

杭式防波堤であるカーテン防波堤は、軟弱地盤への建設が可能であることや、堤体下部を通しての海水交換機能が期待できるなどの利点がある。この形式の防波堤では、波動運動の卓越する水面付近のみをカーテン壁で遮断することから、効率よく透過波を低減できる特性があるが、このとき逆に反射波は増大し、周辺海域に大きな影響を及ぼすことになる。

本研究は、反射波災害などの防止を目的として、透過波のみならず反射波の低減も可能なカーテン防波堤の構造形式について究明する。具体的には、前後カーテン壁の間隔を上部矩形堤の幅程度とした異吃水の二重式カーテン壁構造を採用し、カーテン壁間でのピストンモードの波浪共振を利用して、カーテン壁下端部での渦流れの増大現象を誘起し、波浪エネルギー逸散を促進させ、結果的に透過・反射波の両者を減勢しようとするものである。ここでは、特に前面カーテン壁の吃水による透過・反射率やカーテン壁間での波浪共振の変動特性などを理論と実験の両面より検討し、透過・反射波の両者を効果的に減勢するために必要な前後カーテン壁の吃水条件等を明らかにする。また、透過・反射波の低減機構を究明するためカーテン下端部での渦流れの観測を行い、堤内波浪の増幅現象や透過・反射率の低減度との関係についても検討する。

## 2. 実験装置及び実験方法

### (1) 実験装置

実験は、長さ 28 m, 幅 1 m, 高さ 1.25 m の 2 次元造波水槽を用いて行った。実験に用いた堤体模型を図-1 に示す。後面壁の吃水  $d_2$  は、単一カーテン壁のときに有効な透過波の制御効果が得られる程度の吃水深 27.5 cm に固定してある。一方、前面壁の吃水  $d_1$  は、6 cm, 12 cm, 27.5 cm と後面壁と同じ吃水になるまで順次深くした。このとき、前後壁の間隔  $B$  は従来のカーテン防波堤で用

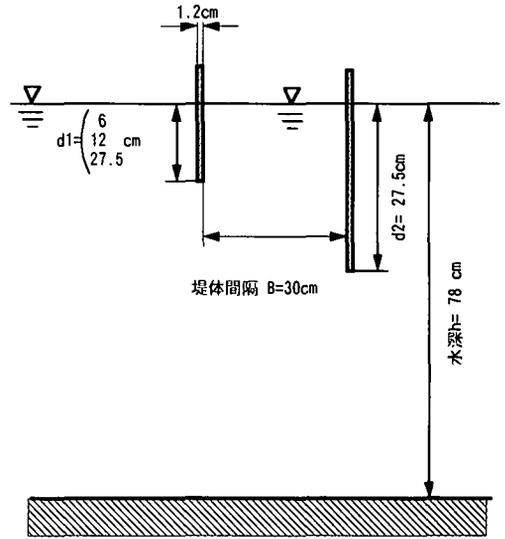


図-1 堤体模型

いられている上部矩形堤の幅を参照して、30 cm に固定してある。なお、ここで、想定した模型の縮尺は現地の 1/17 程度である。

実験では、上記のような各種の吃水深の組み合わせに対して、反射・透過率およびカーテン壁間の波高分布などを測定した。また、逸散現象と密接な関係を有すると考えられる、カーテン壁下端部付近での渦流れの観測のため、黒インクをトレーサとするトレーサ法により、流況の観測もビデオカメラで録画して行った。

### (2) 実験条件

実験に用いた水深  $h$  は 78 cm と一定にし、堤体模型に作用せしめた入射波は、波高  $H$  が 5 cm, 10 cm の 2 種類、周期  $T$  が 0.73~1.68 s の 12 種類である。また、比較のため、前面壁を取り除いた、単一カーテン壁による反射・透過率などを同様の波条件及び水深条件を採用して測定した。

## 3. 理論算定法について

本研究では、中村・井手 (1997) により展開されている減衰波理論を用いた。この算定法は、カーテン防波堤

\* 正会員 工博 愛媛大学工学部 環境建設工学科  
 \*\* 学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科  
 \*\*\* 正会員 復建調査設計(株) 沿岸開発部

のように隅角部を有する構造物を対象にして、鋭端部からの渦流れの発生に起因するエネルギー逸散を近似的に考慮する方法である。この算定法では、逸散が生じる減衰波領域および逸散の程度を表す線形減衰係数  $f_c$  の設定が必要になる。従来の研究では、渦流れの影響する領域として、減衰波領域が設定されており、カーテン防波堤の場合、カーテン壁の前後に波長の  $1/8$  の領域が採られている。

本研究では、二重式カーテン構造と内部に遊水室を有するため、減衰波領域の設定が問題になる。ここでは、煩雑さを避けるため、遊水室は無条件に減衰波領域とし、さらに前後カーテン壁の外側の  $1/8$  波長までの範囲を減衰波領域と仮定した。また、線形抵抗係数  $f_c$  については、中村・井出 (1997) および中村ら (1998) によりカーテン防波堤に対して推奨されている  $f_c=0.15$  を用いた。

#### 4. 透過波及び反射波の特性

##### (1) 前面壁の吃水深 $d_1$ による変化

図-2~図-4 は、それぞれ前面壁の吃水  $d_1$  が順次深くなり、後面壁のそれ  $d_2$  と同吃水になるまでの透過率  $C_t$  の周期による変化を示す。図中では、周期の無次元量として一定に保持した後面壁の吃水と波長の比  $d_2/L$  が用いてある。また、図-5~図-7 は、図-2~図-4 のケースに対応する反射率  $C_r$  の結果を同様に示す。これらの図中には、比較のため、前面壁を取り除いた単一カーテン壁に対する実験結果および両堤体形式に対する減衰波理論による算定結果についても併せ示してある。

図-2~図-4 より、透過率  $C_t$  は、実験結果・算定結果共に、前面壁の有無に関係なく、 $d_2/L$  が小さく長周期波になるにつれ増大することやその絶対値は両堤体形式でほとんど変化しないことなどが分かる。ただし、 $d_1/d_2=1$  と同吃水の条件下では、二重式カーテンの透過率  $C_t$  の方が単一カーテンのそれよりも多少低下する傾向も認められる。このように、二重式カーテンによる透過率は、前面壁の影響をそれほど有意に受けず、主に吃水の深い後面壁により左右されることが分かる。そして、このような、二重式カーテンの  $C_t$  は、概略的に減衰波理論により予測できるといえよう。

一方、二重式カーテンの反射率  $C_r$  は、図-5~図-7 に見られるように、単一カーテンのそれと異なり、前面壁の吃水に依存して、特定の  $d_2/L$  で一旦低下する特異な傾向を示す。そして、この  $C_r$  が一旦低下する条件は、実験値・算定値ともに、前面壁の吃水深に伴い長周期側に移行することも認められる。そして、このような反射率の特性は、概略的にはあるが、減衰波理論により推定できるようである。

図-8 は、このような二重式カーテンによる反射率の

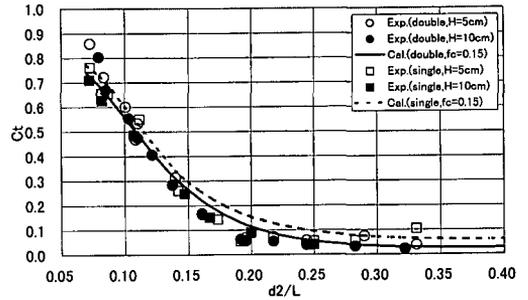


図-2 二重式カーテンと単一カーテンの透過率  $C_t$  の比較 ( $d_1/d_2=0.218$ ,  $d_2/h=0.353$ )

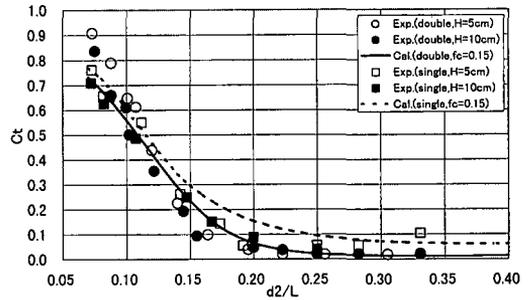


図-3 二重式カーテンと単一カーテンの透過率  $C_t$  の比較 ( $d_1/d_2=0.436$ ,  $d_2/h=0.353$ )

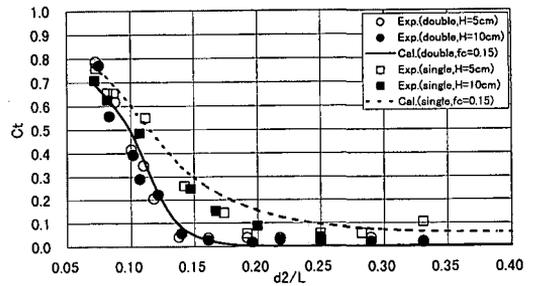


図-4 二重式カーテンと単一カーテンの透過率  $C_t$  の比較 ( $d_1/d_2=1$ ,  $d_2/h=0.353$ )

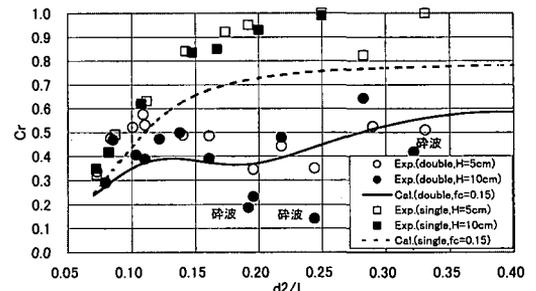


図-5 二重式カーテンと単一カーテンの透過率  $C_t$  の比較 ( $d_1/d_2=0.218$ ,  $d_2/h=0.353$ )

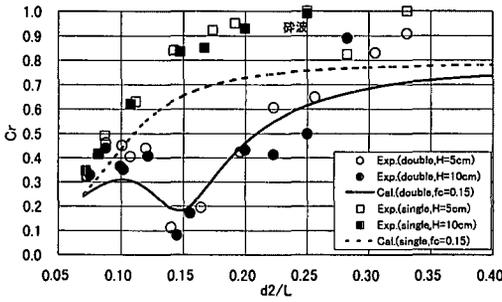


図-6 二重式カーテンと単一カーテンの透過率  $C_t$  の比較 ( $d_1/d_2=0.436$ ,  $d_2/h=0.353$ )

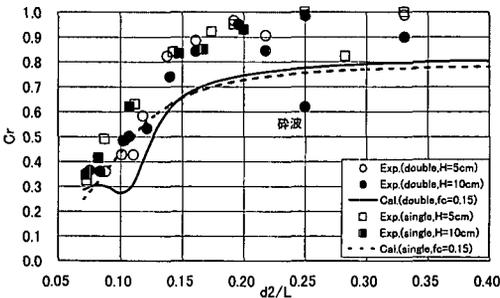


図-7 二重式カーテンと単一カーテンの透過率  $C_t$  の比較 ( $d_1/d_2=1$ ,  $d_2/h=0.353$ )

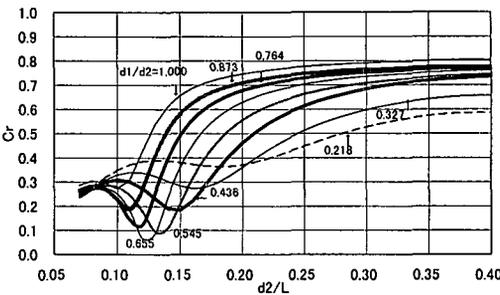


図-8 前面カーテン壁の吃水による反射率の変化 ( $d_2/h=0.353$ )

前面壁吃水深による変化を減衰波理論に基づきより詳細に検討した結果を示す。この図より、前面壁の吃水が深くなるにつれ、反射率が一旦低減ピークを示す  $d_2/L$  は、長周期側へ移行することや、反射率が比較的低くなる周期帯は、狭くなるなどが分かる。そして、反射波の低減に有効な前面壁の吃水としては、有効周期帯および反射率の絶対値の両者を考慮すると、ほぼ後面壁の吃水の半分程度にすればよいと考えられる。

(2) 波のエネルギー逸散

図-9~図-11は、二重式カーテンの前面壁の吃水を各種に変化させたときのエネルギー逸散率  $E_L (=1-C_r^2)$

$-C_r^2$ ) の実験結果および算定結果を示す。図中には、比較のため単一カーテンに対する結果も併せ示す。これらの図より、二重式カーテンの逸散率  $E_L$  は、単一カーテンのそれに比較して大きく増大することや、その傾向は前面壁の吃水深が後面壁のその半分程度のときに顕著になることなどが認められる。また、逸散率  $E_L$  は図-5~図-7に示す反射率  $C_r$  が一旦低減ピークを示す  $d_2/L$  の条件下で極大となっており、反射率の低下は何らかの逸散現象によるものであることが分かる。これについては後述したい。

以上の検討から、二重式カーテン防波堤では、後面壁

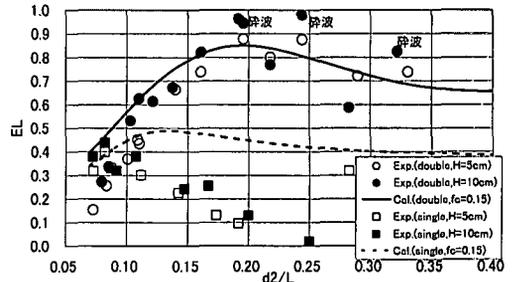


図-9 二重式カーテンと単一カーテンのエネルギー逸散率  $E_L$  の比較 ( $d_1/d_2=0.218$ ,  $d_2/h=0.353$ )

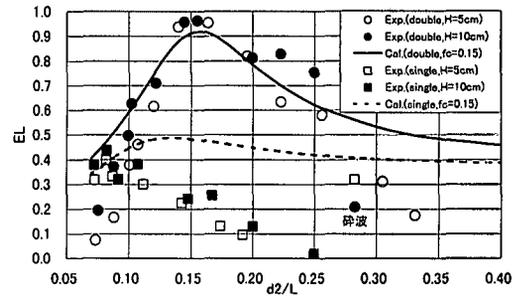


図-10 二重式カーテンと単一カーテンのエネルギー逸散率  $E_L$  の比較 ( $d_1/d_2=0.436$ ,  $d_2/h=0.353$ )

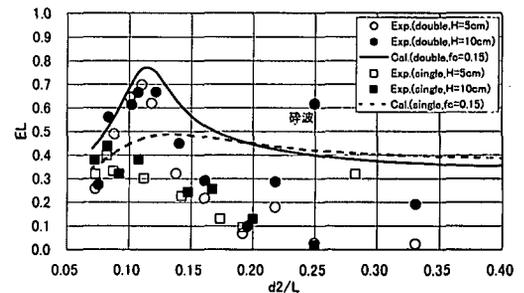


図-11 二重式カーテンと単一カーテンのエネルギー逸散率  $E_L$  の比較 ( $d_1/d_2=1$ ,  $d_2/h=0.353$ )

の吃水  $d_2$  を単一カーテン防波堤の場合と同程度に保ち、前面壁の吃水  $d_1$  を後面壁のその約半分程度にすると、単一カーテン防波堤の場合に比較して効果的に反射波が低減できることやその低下は逸散現象によるものであることが判明した。

### 5. 反射波の低減機構について

#### (1) 堤内波高の変化

上記した反射波の低減に関係する逸散現象としては、前面壁下端部よりの渦流れの発生が挙げられる。そして、逸散量が主に前面壁の吃水と波周期に依存することから、前後壁で挟まれた遊水室内の波浪共振現象と密接な関係を有するものと推測される。このような遊水室内の波浪共振現象と波のエネルギー逸散が関係することは、中村・森田 (1985) によっても指摘されている。

図-12 は、最も反射波の低減に有効と判定された  $d_1/d_2=0.436$  のときの、遊水室内の波高の空間的平均値  $H_c$  の  $d_2/L$  による変化を示す。ここで、堤内の平均波高  $H_c$  は、入射波高  $H$  で無次元化してある。なお、遊水室内の波面モードは、本実験で対象とした波条件の範囲内では、遊水室幅  $B$  が波長に比較して十分に小さいため、ほぼ波高が一様なピストンモードになっていたことを確認している。

図-12 より、堤内波高はやはり特定の  $d_2/L$  で極大値を示すことが確認できる。これはいわゆるピストンモードの波浪共振点に対応する。この共振点を示す  $d_2/L$  は、前面壁の吃水深に伴い  $d_2/L$  の小さい長周期側に移行することを確認しており、上記した反射率やエネルギー逸散率の動向と密接に関係していることが推定できる。

しかしながら、このピストンモードの共振点の  $d_2/L$  の条件と上記した反射率やエネルギー逸散率が極値を示す  $d_2/L$  の条件とは、図-6、図-10 と図-12 との比較から分かるように多少のずれがあり、堤内波高の極大=逸散率の極大の図式は必ずしも成立していない。これについては、二重式カーテンの前面壁の前後における水位変動の位相差が関係していると考えられる。

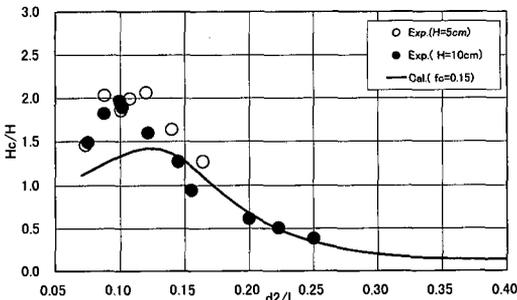


図-12 堤体内の平均波高 ( $d_1/d_2=0.436$ ,  $d_2/h=0.353$ )

#### (2) 水位変動の位相差

図-13 は、 $d_1/d_2=0.436$  のときの二重式カーテンの前面壁前後の水位変動の位相差  $\delta$  (堤外側を基準) を示す。図中には、実験結果及び算定結果の両者を示すが、両者共に  $d_2/L$  が增大して長周期波より短周期波になるにつれ、位相差は一旦増加し、100 度以上にもなることがわかる。

図-12 で堤内波高比が極大となる  $d_2/L=0.1$  付近では、水位変動の位相差  $\delta$  は比較的小さく、前面壁の前後で水面はほぼ同時に上下動することがわかる。一方、図-6、図-10 で反射率やエネルギー逸散率が極値を示す  $d_2/L=0.15$  付近では、位相差  $\delta$  は 90 度程度以上になり、前面壁の下端を通り水の出入が交互に生じることが推測できる。このような検討より、反射波の低減には、堤内波高のみならず前面壁前後の水位変動の位相差も関係することがわかる。

#### (3) 前面壁下端の水平流速

図-14 は、二重式カーテンの前面壁下端部での水平流速振幅  $U$  を、各種の吃水条件に対して、減衰波理論により算定した結果を示す。ここで水平流速  $U$  は、進行波による静水面位置での水平流速振幅 ( $=\pi H/T$ ) で無次元化してある。

この図より、無次元流速  $U^*$  は特定の  $d_2/L$  の条件下でピークを示し、この条件は反射率およびエネルギー逸散

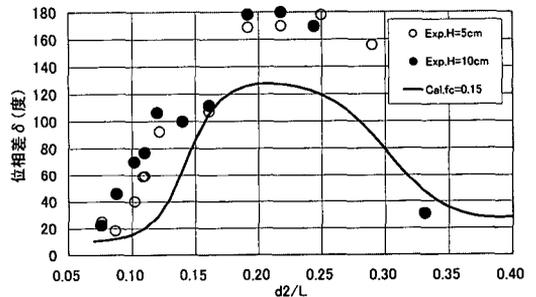


図-13 前面壁前後の水位変動の位相差 ( $d_1/d_2=0.436$ ,  $d_2/h=0.353$ )

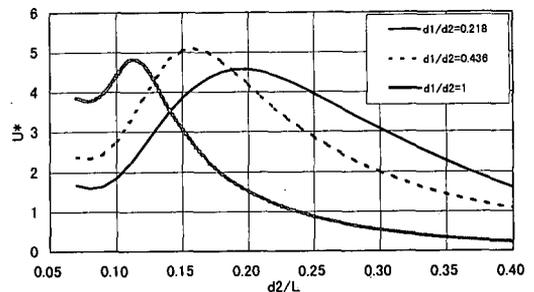


図-14 堤体下端部での水平流速の算定結果 ( $f_c=0.15$ )

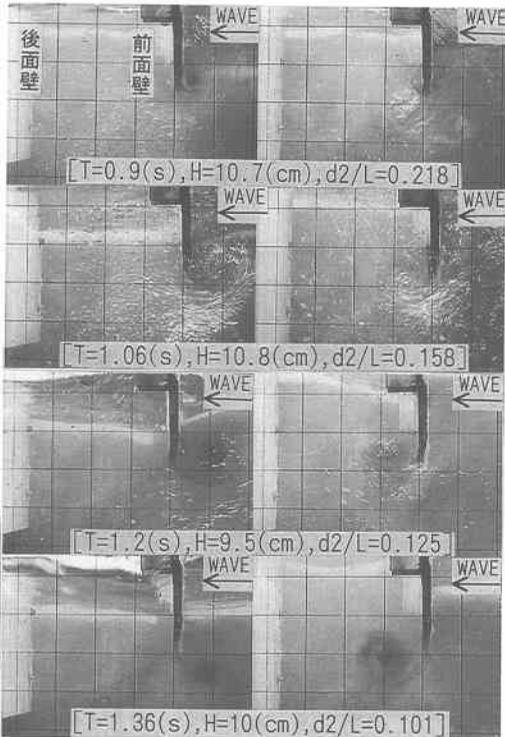


写真-1 周期による渦流れの変化

率が極値を示す条件にほぼ一致している。このことより、前面壁下端部の水平流速の絶対値は、堤内波高のみならず前面壁前後の水位変動の位相差に左右されることが分かる。そして、前面壁下端部の水平流速は、下端部よりの剝離渦の強度に密接に関係しており、水平流速が極大になるとにより大規模な渦流れが形成され、結果的に上記したようにエネルギー逸散も極大になったものと推測される。

#### (4) 流況の観測結果

写真-1は、入射波高  $H=10$  cm と固定して、各周期条件下において観測された前面壁下端部からの渦流れの状況の代表例を示す。写真では、渦が堤内に形成される順流時および反射側に形成される逆流時における結果をペアにして示す。これらの渦の規模に着目すると、長周期の条件になるにつれ一旦増大し、より長周期側では多少縮小する傾向が見られる。このように、渦流れの規模が極大になるのは、上記した反射波が一旦低減ピークを示す

周期条件 ( $d_2/L=0.15$ ,  $T=1.06$  s に相当) の付近であり、反射波の低減が大規模な渦流れの形成によるものであることが分る。そして、この条件下では図-14に見られるように、前面壁下端部で水平流速がピーク値を示すことから、大規模な渦流れの発達は、水平流速の極大化によるものと推測される。

このような検討結果より、反射波の低減機構を総括すると、①堤体内でのピストンモードの波浪共振の発生、②前面壁の前後での水面変動の位相差の増大、③前面壁下端部での渦流れの増大、④反射波エネルギーの逸散という過程を経ると推定される。そして、前面壁の吃水が深くなると、反射波が一旦低下する波周期が長周期側に移行するのは、ピストンモードで振動する水塊がほぼ前面壁の吃水で規定されることによると考えられる。

## 6. 結 語

(1) 二重式カーテン防波堤では、岸側の後面壁の吃水を単一カーテン防波堤の場合と同程度に深く保ち、前面壁の吃水を後面壁のその約半分程度に浅くすると、特に反射波が大幅に低減できる。

(2) 二重式カーテン防波堤による透過波の低減効果は、単一カーテン防波堤によるそれを多少上回る程度である。

(3) 二重式カーテン防波堤で特徴的な反射波の有意な低下は、前後壁間でのピストンモードの波浪共振に伴う前面壁下端部での渦流れの増大現象による。そして、エネルギー逸散率は、ほぼこの条件下で極大になり、9割程度にもなる。

(4) 減衰波理論を用いて、各種の条件下での二重式カーテン防波堤による透過・反射率がほぼ予測できる。

## 参 考 文 献

- 中村孝幸・井手善彦 (1997): 波の逸散現象を考慮した隅角物体まわりの波変形と作用波力の算定法, 海洋開発論文集, 第13巻, pp. 177-182.
- 中村孝幸・中村文彦・川部正司・井上温人・森本 暁・後藤大介 (1998): 重力式カーテン防波堤による波変形と作用波力に及ぼす上・下部工の影響について, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 781-785.
- 中村孝幸・森田知志 (1985): 複列カーテン防波堤の堤内共振を利用した波浪制御法について, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 525-529.