

有効周期帯拡大のための異吃水三重式カーテン防波堤の消波特性と断面設定法

中村 孝幸*・中山 哲 厳**・河 野 徹***・久保田 二郎****

透過、反射波の低減が可能な杭式防波堤としては、異吃水の二重壁式防波堤や前面壁を傾斜版列とする二重式防波堤などがある。これらの防波堤は、主に瀬戸内海などの内海で卓越する比較的短周期の風波などを対象にしている。ここでは、外洋性の波浪で特長的なうねりなど比較的長周期の波に対しても制御効果が発揮できる杭式防波堤の開発を目的として異吃水三重壁式防波堤を提案し、その効果や断面設定法などを明らかにする。このとき、主に長周期の条件下での透過波の低減を目的とする没水平版の効果についても検討する。

1. はじめに

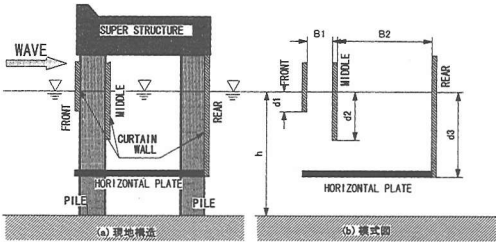
杭式防波堤であるカーテン防波堤は、軟弱地盤への建設が可能であることや、水面付近のみをカーテン壁で遮断することから効率よく透過波を低減できることおよび堤体下部を通しての海水交換機能を有するなどの利点を有する。また、透過波のみならず反射波の低減も可能な杭式防波堤として、異吃水の二重式カーテン防波堤など(中村・神川ら, 1999)が提案されている。しかしながら、従来において対象海域は、主に比較的短周期の風波などが卓越する瀬戸内海など内海に限定されていた。

ここでは、外洋性のうねりなど比較的長周期の波に対しても制御効果が発揮できる杭式防波堤の開発を目指す。具体的には従来の杭式の二重式カーテン防波堤を原型として、図一1に示すように前面カーテン壁を支える前杭の後側にもう一枚カーテン壁を付加することで構成される三重式カーテン防波堤を提案する。この構造は、遊水室が二つになることで、二重式カーテン防波堤で見られた特定の周期条件下での反射率の低下を異なる二つの周期条件下で実現し、より広範囲の周期帯で反射波を低減できるものと考えられる。また、透過波の低減には、図一1中に示すように遊水室内に水平版を設けると効果的であることが知られており(中村・高木ら, 2002)、この水平版の効果についても付随的に検討する。そして、三重式カーテン防波堤の消波効果に及ぼす各部材要素の影響を明らかにすると共に合理的な設計を可能にするため、構造断面の設定法についても考察する。

2. 実験装置および実験方法

説明の簡単化のため、各カーテン壁の名称を入射波方向から見て第一、第二、第三カーテン壁、また遊水室を第一、第二遊水室と呼ぶことにする。

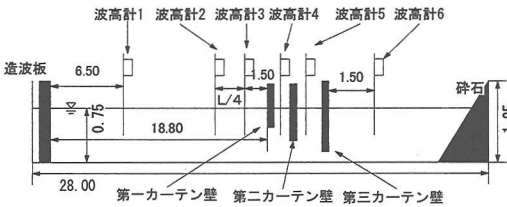
実験では、模型堤体の各カーテン壁の吃水深と遊水室



図一1 異吃水三重式カーテン防波堤

表一1 各ケースの寸法と水平版の有無

case	h	d_1	d_2	d_3	B_1	B_2	水平版
1	75	11	30	60	15	40	無し
2	75	20	30	60	15	40	無し
3	75	11	30	60	10	40	無し
4	75	11	46	60	15	40	無し
5	75	11	30	60	15	29	無し
6	75	11	30	60	15	40	無し
7	75	11	30	50	15	40	有り



図二2 実験水槽及び波高計設置位置 (Unit : m)

幅を図一1に示す記号を用いて表一1中の case 1~6 の 6 種類に変化させて行い、反射、透過率を測定した。また、水平版の効果を検討するため、図一1中の黒い太線で示すように水平版を第三カーテン壁の下端から第一カーテン壁の前面下部まで水平に設けた。このときの堤体の寸法は表一1中の case 7 のものに相当する。これらのケースで想定した模型の縮尺は、現地量の約 1/20 である。

Case 1 の寸法は、後述する中村・神野ら (2002) によ

* 正 会 員 工 博 愛媛大学助教授工学部環境建設工学科
** 正 会 員 工 修 (独法)水産工学研究センター水産工学研究所水理研究室長
*** 正 会 員 復建調査設計(株)総合技術部長
**** 学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科環境建設工学専攻

る垂下版式反射波低減工の遊水室幅と垂下版吃水深の設定法を参照にして求めた標準断面に相当する。case 2~6では、この case 1 を基本形状として、各カーテン壁の吃

水深と遊水室幅を各種に変化させ、それらの影響が検討できるように設定した。

模型堤体のカーテン壁と水平版には厚さ 1.2 cm の防水ベニヤ板を用い、剛性を高めるため鋼製フレームで補強・支持した。実験には、図-2 に示す 2 次元水槽を用い、計 6 本の波高計で、入射波、透過波、遊水室内および堤体反射側での水面変動などを測定した。このとき、反射率の推定には、入・反射波の分離推定法を用いた。実験時の水深 h は 75 cm と一定にし、模型堤体に作用させた入射波は波高 $H=10$ cm、周期 T は 0.8~2.6 秒の範囲の規則波である。

3. カーテン壁の組み合わせ効果

(1) 反射波の低減特性

図-3 は、堤体の第二遊水室の諸元を固定して、第一遊水室の諸元を各種に変化させたときの反射率 C_r の比較を、また図-4 は、逆に第一遊水室の諸元を固定して、第二遊水室の諸元を変化させたときの比較を示す。これらの図では、波周期による C_r の変化を検討したもので、固定量である第三カーテン壁の吃水深 d_3 を用いて、波長吃水比 L/d_3 (L : 波長) による変化で表してある。図中には、実験結果に加えて減衰波理論 (中村・井手, 1998) による算定結果についても示す。このとき算定に必要な線形抵抗係数 f_c は中村・神野ら (1999) に準じて 0.2 とした。

まず、これらの図から、三重式カーテン防波堤の反射率は、異なる二箇所の周期条件で極小となる変化を示すことや中村・神川 (1999) が紹介している従来の二重式カーテン防波堤と比較してより広範囲の周期帯で反射波が低減できることが分かる。

C_r に及ぼす第一カーテン壁の吃水深 d_1 と第一遊水室幅 B_1 の影響を検討した図-3 に着目すると、 L/d_3 の小さな短周期側に見られる反射率の極小値は、主に第一カーテン壁の吃水深 d_1 、第一遊水室幅 B_1 に依存しており、 d_1 、 B_1 のどちらか、あるいは両者が大きくなると、 C_r の第一極小値が現れる条件は長周期側に移行することや d_1 を深くすると C_r の絶対値が上昇する傾向にあることなどが実験・算定結果の両者から見て取れる。このとき、反射率の第二極小値およびその出現条件はほとんど変化しないことも確認できる。

一方、第二カーテン壁の吃水深 d_2 と第二遊水室幅 B_2 の影響を検討した図-4 では、主に長周期側に見られる C_r の第二極小値およびその極小条件が変化しており、これらは d_2 、 B_2 に依存していることが分かる。そして、やはり d_2 、 B_2 のどちらかあるいは両者が大きくなると C_r の極小条件は長周期側に移行する傾向などが実験結果・算定結果の両者に見られる。

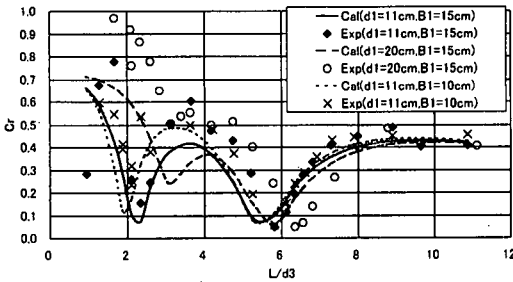


図-3 d_1 , B_1 を変化させたときの反射率 C_r
($d_2=30$ cm, $d_3=60$ cm, $B_2=40$ cm, $f_c=0.2$)

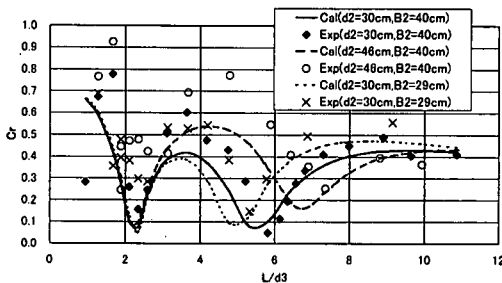


図-4 d_2 , B_2 を変化させたときの反射率 C_r
($d_1=11$ cm, $d_3=60$ cm, $B_1=15$ cm, $f_c=0.2$)

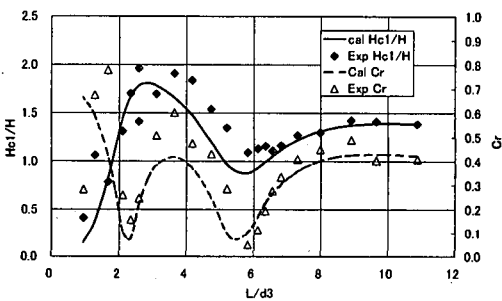


図-5 case 1 の反射率 C_r と第一遊水室の波高増幅度

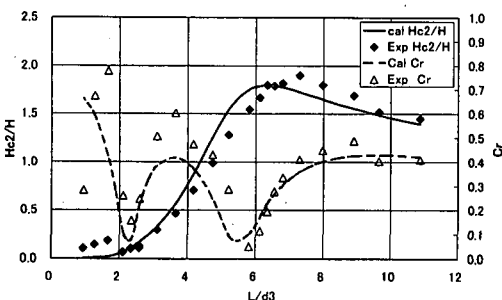


図-6 case 1 の反射率 C_r と第二遊水室の波高増幅度

(2) 反射波の逸散機構について

図-5, 6 は, 基本形状の堤体である case 1 を対象にして, 反射率 C_r と第一, 第二遊水室内の波高 H_{c1} , H_{c2} の波長吃水比 L/d_3 による変化を示す。図中には, 減衰波理論による算定結果についても併せ示す。ここで堤内波高 H_c は入射波高 H で無次元化してある。

これらの図から, 各遊水室の H_c は, 特定の L/d_3 で極大値を示すことが確認できる。これは中村・神川ら (1999) により異吃水二重式カーテン防波堤に対して確認されているピストンモードの波浪共振点に対応すると考えられる。事実, 図-5 に示す第一遊水室のピストンモードの波浪共振点は C_r の第一極小点に, 図-6 に示す第二遊水室のそれは C_r の第二極小点に近いことが分かる。厳密に両者が一致しないことは, カーテン壁の前後における水位変動の位相差の関係していることが中村・神川らによって指摘されている。

上述した各 case でこの波浪共振点を検討すると, 第一, 第二カーテン壁の吃水深が深くなるほど, また遊水室幅が増大するほど長周期側に移行することが確認されており, それは反射率に現れる極小値の動向と類似している。

このように, 三重式カーテン防波堤において反射率が極小となる条件が異なる 2 箇所の周期条件で現れるのは, ピストンモード波浪共振が二つの遊水室でそれぞれの諸元に応じて異なる周期条件で生じるためといえる。そして, 二つの遊水室での波浪共振の干渉は, 図-4, 5 に代表されるようにほとんど見られず, ほぼ個々の諸元に依拠して独立に発生するものと考えてよいようである。

(3) 透過波の低減特性

本研究では, 透過波についても反射波と同様に第一, 二遊水室の諸元との関係を検討しているが, 透過波は反射波と異なり主に第二, 第三カーテン壁の吃水深 d_2 , d_3 に依存することが確認されている。このため, ここではその結果のみを提示することにする。

図-7 は, 代表例として透過率 C_t に及ぼす d_2 , d_3 の影響を示すもので, 図中では遊水室幅を固定して d_2 , d_3 を変化させていることから, 波長遊水室幅比 $L/(B_1+B_2)$ を用いて周期変化を表してある。この図から, C_t は吃水深 d_2 , d_3 を深くすると低下することや, その傾向は特に d_3 により強く影響を受けやすいことが実験と理論から分かる。ただし, 透過率は, 遊水室幅の 9 倍程度以上の波長条件になるとやはり 5 割以上になるなど遮断効果は十分でない。そして, 透過波低減のため, 後方壁の下部開口長をさらに狭くすると, 透過堤の特長である海水交換機能が低下することや水平波力も増大しやすいなど注意する必要がある。

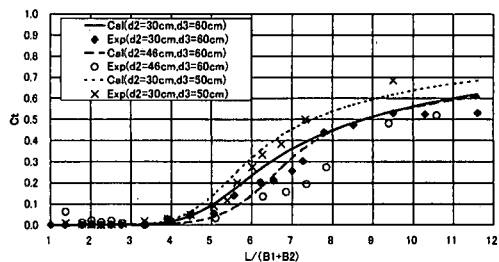


図-7 d_2 , d_3 を変化させたときの透過率 C_t
($d_1=11$ cm, $B_1=15$ cm, $B_2=40$ cm, $f_c=0.2$)

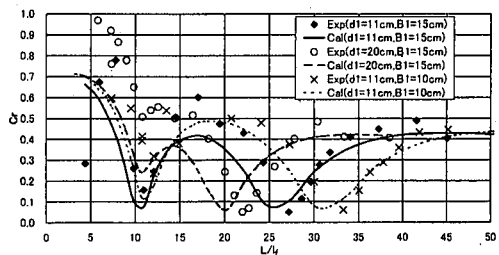


図-8 L/L_1 による反射率 C_r の変化
($d_2=30$ cm, $d_3=60$ cm, $B_2=40$ cm, $f_c=0.2$)

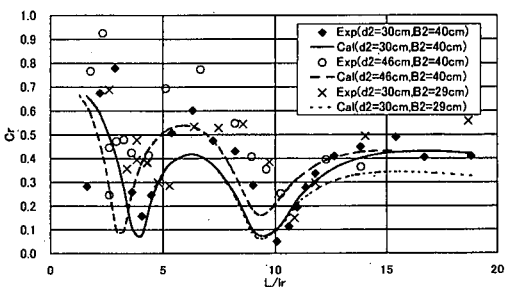


図-9 L/L_r による反射率 C_r の変化
($d_1=11$ cm, $d_3=60$ cm, $B_1=15$ cm, $f_c=0.2$)

(4) 吃水深 d と遊水室幅 B の設定法

ここでは case 1 の堤体寸法を設定するときに目安とした中村・神野ら (1999) による垂下版式反射波低減工に対する遊水室諸寸法の設定法の適用性を三重式カーテン防波堤に対して検討してみる。この方法は, 遊水室を構成する遊水室幅と鉛直版吃水深を個々に用いるのではなく, 遊水室幅と前面鉛直版の吃水深の積から求められる断面特性長を用いることに特徴がある。そして, 周期に関係する無次元量として, 断面特性長と波長の比 l_a/L が特定の値のとき, 垂下版式反射波低減工の反射率 C_r が極小値を示すことが報告されている。ここに断面特性長 l_a は次式の定義による。

$$l_a = \sqrt{B \cdot d} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 B :遊水室幅、 d :前面鉛直版の吃水深である。そして、不透過型の垂下版式反射波低減の場合、極小反射率は断面特性長 l_r と波長 L の比がほぼ $1:10$ のときに現れることが知られている。

図-8は、第二遊水室の d_2 , B_2 を固定したときの第一遊水室の諸元による C_r の変化を断面特性長 $l_r = \sqrt{d_1 \cdot B_1}$ を用いて再検討した結果を示す。また図-9は、第一遊水室の d_1 , B_1 を固定したときの第二遊水室の諸元による C_r の変化を断面特性長 $l_r = \sqrt{d_2 \cdot B_2}$ を用いて再整理した結果である。図中には、実験結果および算定結果の両者を示す。これらの断面特性長を用いた再検討結果から、反射率は B , d の寸法に関係なく、特定の L/l のとき極小となることが実験と理論により確認できる。その値は、 L/l_r , L/l_r の場合共に 10 程度であり、従来の垂下版式反射波低減の結果とはほぼ一致する。

このことから、消波対象波の波長を算出すれば、反射波の低減効果を考慮して堤体断面の各寸法を効率よく求めることができる。第三カーテン壁の吃水深 d_3 は、単一カーテン壁による透過波の低減効果と類似する傾向にあることから、単一カーテン壁のときに得られる透過波の制御効果を想定して設定すればよいと考えられる。

4. 透過波低減のための水平版の効果

(1) 水平版の有無による影響

図-10, 11は、水平版の有無による反射・透過率の影響を検討するため、case 1 ($d_3=60$ cm), case 6 ($d_3=50$ cm), case 7 ($d_3=50$ cm, 水平版有り) の、反射率 C_r と透過率 C_t に関する理論算定結果と実験結果を一括して示す。なお、横軸は遊水室幅が固定してあることから波長遊水室幅比 $L/(B_1+B_2)$ としてある。

反射率 C_r の結果を示す図-10から、水平版を設けると C_r が極小となる条件が長周期側に移行することがわかる。これは、水平版を設置することで遊水室内の水深が局所的に浅くなり、水深に対応して波長が短くなることから、結果的に遊水室内のピストンモードの波浪共振点が長周期側に移行するためと考えられる。実験結果と算定結果を比較すると、 C_r が極小となる条件は実験結果の方がより長周期側に移行するなどの差異が見られる。

透過率 C_t の結果を示す図-11に着目すると、 C_t は水平版を設けると、実験・算定結果の両者共に特に長周期側で有意に低下することが分かる。これは水平版により、版下部の流体の鉛直運動が抑制される効果によるものと考えられる。

以上の結果から、異吃水三重式カーテン防波堤の下部に背後壁の下端に一致するように水平版を設けると、特に透過波の低減効果が改善されることが分かる。また、反射波についてもより長周期の波に対して低減効果が現

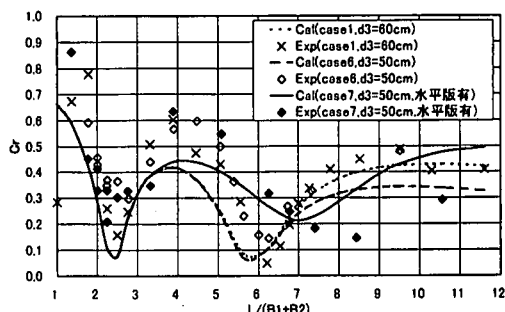


図-10 水平版の有無についての反射率 C_r の比較
($d_1=11$ cm, $d_2=30$ cm, $B_1=15$ cm, $B_2=40$ cm, $f_c=0.2$)

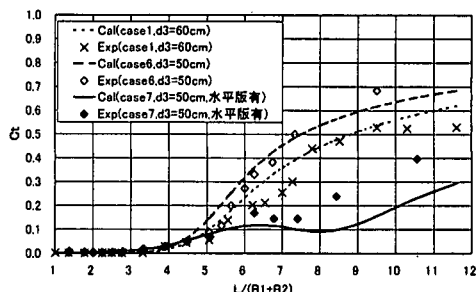


図-11 水平版の有無についての透過率 C_t の比較
($d_1=11$ cm, $d_2=30$ cm, $B_1=15$ cm, $B_2=40$ cm, $f_c=0.2$)

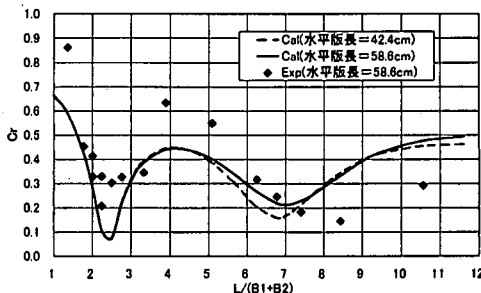


図-12 水平版長を変化させたときの反射率 C_r
($B_1=15$ cm, $B_2=40$ cm, $d_1=11$ cm, $d_2=40$ cm, $d_3=50$ cm, $f_c=0.2$)

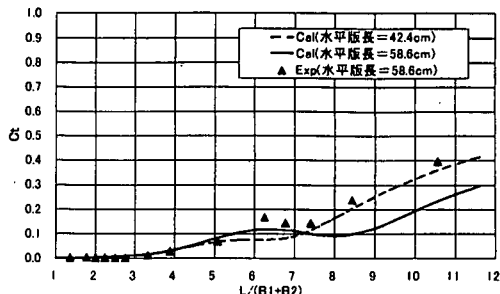


図-13 水平版長を変化させたときの透過率 C_t
($B_1=15$ cm, $B_2=40$ cm, $d_1=11$ cm, $d_2=40$ cm, $d_3=50$ cm, $f_c=0.2$)

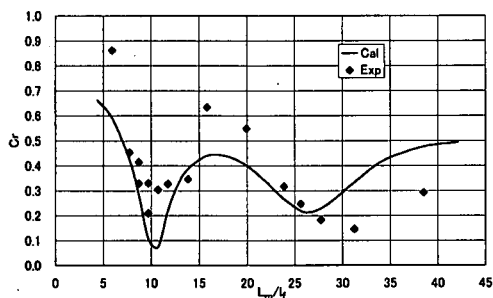


図-14 L_m/l_i による反射率 C_r の変化
($d_1=11$ cm, $d_2=30$ cm, $d_3=50$ cm, $B_1=15$ cm, $B_2=40$ cm, $f_c=0.2$)

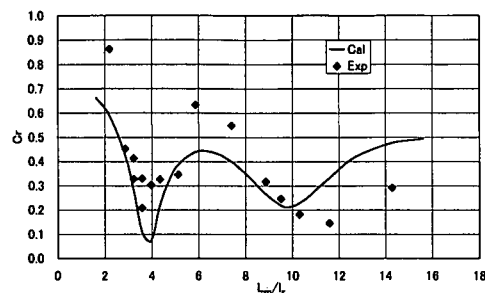


図-15 L_m/l_r による反射率 C_r の変化
($d_1=11$ cm, $d_2=30$ cm, $d_3=50$ cm, $B_1=15$ cm, $B_2=40$ cm, $f_c=0.2$)

れるようになる。このように、水平版を設けることは、後面壁である第三カーテン壁の吃水深 d_3 を深くする以上に透過波の遮断効果が期待でき、しかも吃水深を浅く保持できることから、海水交換機能の向上にもつながるものと考えられる。

(2) 水平版長の影響

図-12, 13 は、case 7 の堤体を基準にして、それぞれ C_r , C_t に及ぼす水平版長の影響を理論的に検討した結果を示す。検討では、水平版長を第二遊水室の下部のみとして短くしたときと前出の第一、二遊水室を覆うようにしたとき (case 7) の比較で示す。なお、これら図中には後者のときの実験結果も併せ示す。これらの図から、 C_r は水平版の長短による影響をさほど受けないものの、 C_t は水平版を短くすると長周期側で増大するなどその影響を受けやすいことなどが分かる。

(3) 水平版付き堤体の吃水深 d と遊水室幅 B の設定法

中村・神野ら (2002) は、ケーソン防波堤に組み込んだ垂下版式反射波低減工の遊水室幅 B 、垂下版吃水深 d の設定法として、マウンド上水深 (遊水室内水深) に対応する波長 L_m を用いることで対処できることを報告している。ここでは、同様の考え方に基づき、水平版上の水深に対応する波長 L_m を用いることで、上述した反射

波低減のための効果的な断面設定法が適用できるかを検討してみた。図-14, 15 はそれぞれ前後遊水室の断面特性長 l_i , l_r を用いて、前出の水平版付堤体に対する C_r の実験結果と算定結果を L_m/l_i の関数として再整理したものである。これらの図より、算定結果では前後遊水室に関係なく、 L_m/l_i がほぼ 10 付近で極小反射率が現れることが確認できる。そして、実験結果でもほぼ同様の傾向にあるが、第二遊水室の特性長に関する結果において多少の差が認められる。

以上の検討から、三重式カーテン防波堤の遊水室下部に水平版を設けるときでも、反射波低減に効果的な断面は、水平版上の水深に対応する波長と各遊水室の断面特性長の比がほぼ 10 程度となるように設定すればよいことなどが判明した。

5. 結 語

(1) 異吃水三重式カーテン防波堤では、沖側から見て第一および第二カーテン壁の吃水深と二つの遊水室幅に依存して、反射波が有意に低減する波周期は異なる二条件で現れる。また、透過波については、第二カーテン壁と第三カーテン壁の吃水深に依存して低下する傾向が見られ、特に第三カーテン壁の吃水深により強く影響を受ける。

(2) 反射波低減に効果的な断面は、個々の遊水室についてその前面壁の吃水深と遊水室幅の積の平方根を代表長に用いると、それと波長の関係を考えて比較的簡単に推定できる。

(3) 異吃水三重式カーテン防波堤の下部に第三カーテン壁の下端に一致するように水平版を設けると、それがない場合に比較して約半分程度に透過波高が低減できるなど長周期の波の制御に対して効果的である。このとき、反射波が低減する波周期はやはり長周期側に移行するなど、長周期の波の逸散に好都合である。

(4) 水平版があるときの効果的な断面設定は、版上水深に対応する波長を用いると、前出の水平版がないときの設定法がほぼそのまま利用できる。

参 考 文 献

- 中村孝幸・神川裕美・河野 徹・榎本一徳 (1999): 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, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 786-790.
- 中村孝幸・神野充輝・西川嘉明・小野塚孝 (1999): 渦流れの増大現象を利用した垂下版式の反射波低減工について, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 797-800.
- 中村孝幸・神野充輝・久保勝太 (2002): ケーソン防波堤に組み込んだ垂下版式反射波低減工の効果, 海洋開発論文集, 第 18 巻, pp. 311-315.
- 中村孝幸・高木伸雄・中山哲蔵・河野 徹 (2002): ピストンモードは波浪共振を利用する低反射・低透過構造の海水交換型防波堤の開発, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 661-665.