

下部通水式海水交換型防波堤の波浪制御効果 に及ぼす通水路の影響について

STUDIES ON THE WAVE ENERGY DISSIPATION EFFECTS OF A MODIFIED
CURTAIN-WALL TYPE SEAWATER EXCHANGEABLE BREAKWATER

大村智宏¹・中村孝幸²・大井邦昭³・中山哲巖⁴

Yoshihiro OHMURA, Takayuki NAKAMURA, Kuniaki OOI and Akiyoshi NAKAYAMA

¹正会員 独立行政法人水産総合研究センター 水産工学研究所水産土木工学部
(〒314-0421 茨城県鹿島郡波崎町海老台)

²正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

³学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

⁴正会員 工修 独立行政法人水産総合研究センター 水産工学研究所水産土木工学部
(〒314-0421 茨城県鹿島郡波崎町海老台)

The seawater exchangeable breakwaters may be useful to exchange the seawater and supply oxygen for improvement and preservation of seawater and sediment quality. In this study, we propose a modified curtain-wall type seawater exchangeable breakwater and examine its performance by physical model tests and numerical simulations. Both the damping wave model and the volume of fluid method are employed in numerical simulations. The main feature of a modified breakwater is to place a submerged horizontal plate in the water chamber, which plays an important role to reduce both the reflected and transmitted waves for the wide range of wave frequency. It is also found out that the modified breakwater can cause aeration and vertical mixing by wave actions.

Key Words : *Modified curtain-wall breakwater, seawater exchangeable breakwater, submerged horizontal plate, piston mode wave oscillation, physical model test, damping wave model, VOF method*

1. はじめに

内湾をはじめ沿岸域での水産生物の生産性が低下しつつある今日において、水産生物の生息環境である水質・底質の保全、改善を図る効率的かつ効果的な技術の開発は必要不可欠である。その手段のひとつとして、海水交換工法は有効な工学的アプローチであると考えられる。著者らは波浪を利用した海水交換工法として、砕波に伴う wave set-up あるいは越波によって水位上昇を生じさせて導水する「多段型潜堤式海水導入工¹⁾」や、波の質量輸送を用いて導水する「円孔式海水導入工²⁾」を研究開発し、その整備に資してきた。

近年、社会資本整備における整備コストの縮減および費用対効果の観点から、複雑な構造形式や施工方法を採用することなく、より簡便でかつ効果的な工法が必要とされるようになってきている。そこで、この度、新たな海水交換型防波堤として、潮汐や潮流による堤体内外の流動を阻害しないカーテン式防波堤に着目した。カーテン式防波堤

は、設計波高が 2 m 程度を上限として内湾等によく用いられてきた防波堤である。通常、このような波浪条件では従来の機構の波浪を利用した海水交換工法を用いることは難しい。また、これまでに開発した波浪を利用する海水交換工法は、潮位の影響を大きく受けるため、工夫をしなければならぬことが短所である。

一般に、カーテン式防波堤は、通水部での開口率を上げて海水交換量の増大をはかると透過率が大きくなることや、反射率も他の防波堤と比較して大きいことに課題がある。波浪制御機能を改良したカーテン式防波堤としては、異吃水 2 重壁式防波堤³⁾がある。この防波堤はピストンモードの波浪共振を利用して透過・反射波を効果的に低減している。さらに、遊水室内下部に水平版(没水平版)を設けて通水部を設ける工法は、水平版の効果により透過波のみならず反射波の低減に対しても有効であることが一部判明している⁴⁾。

そこで、本研究では、施工可能な構造形式の開発を目的に、異吃水 2 重壁式防波堤を基本構造と

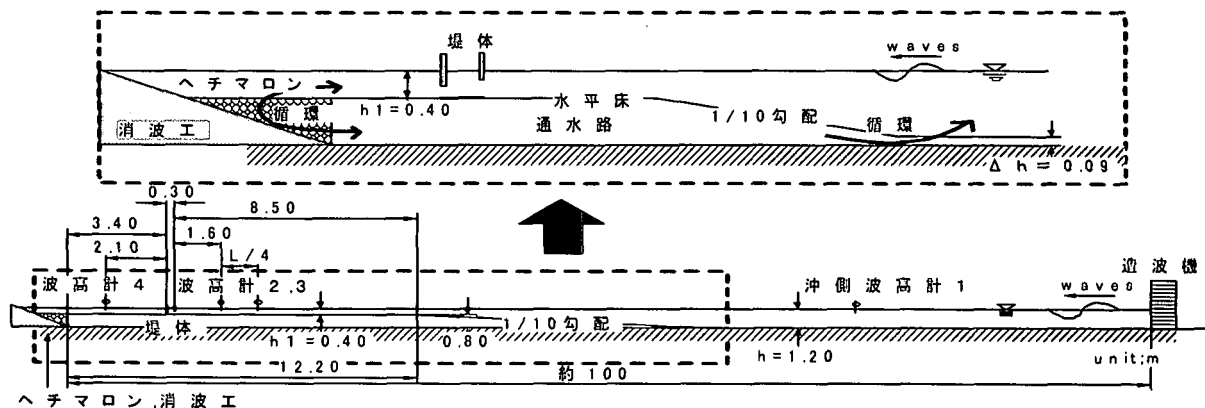


図-1 実験水槽および配置位置

表-1 波条件各種の実験条件

T(s)	目標H(cm)	Hin(cm)	波長L(cm)	L/B	L/4(cm)
1.00	5.0	4.99	146.3	5.85	36.0
1.20	5.0	4.70	193.5	7.74	42.0
1.20	10.0	9.28	193.5	7.74	42.0
1.40	5.0	4.23	239.1	9.56	59.0
1.40	10.0	8.52	239.1	9.56	59.0
1.50	10.0	9.46	261.4	10.46	65.0
1.65	5.0	4.36	294.3	11.77	73.0
1.65	10.0	8.88	294.3	11.77	73.0
1.80	5.0	3.72	326.7	13.07	82.0
1.80	10.0	7.58	326.7	13.07	82.0
1.95	5.0	3.93	358.7	14.35	90.0
1.95	10.0	8.33	358.7	14.35	90.0

して、これに水平版を付加した構造体に関する波浪制御効果の把握を行った。このため、断面2次元水理模型実験と減衰波理論およびVOF法の数値計算を実施した。

2. 水理模型実験の方法

(1) 実験条件

水理模型実験水槽は、図-1に示す水産工学研究所の漁港水理実験棟還流風洞付造波水路(長さ100.0m×幅1.0m×高さ1.5m)を用いた。この水槽の一端には反射波吸収制御式ピストン型造波装置が、他端には再反射波を防ぐための砕石消波工およびヘチマロンよりなる消波工を設置している。また、1/10勾配のすりつけ部および水平床には、厚さ2.0cmの鉄板をもちいている。本すりつけ部法先に約9.0cmの通水部を設けて、水平床下で水の循環ができるようにした。堤体模型および容量式波高計は、この水平床上に設置した。

入射目標波は、波高Hが5.0cm、10.0cmの2種類、周期Tが1.0~1.95s間の7種類の規則波である。水深hは40.0cmとした。表-1に各種の実験条件を一括して示す。表中にはH、Tとあわせて波長Lおよび無次元量として用いた波長Lと遊水室幅Bの比L/B、入・反射波の分離のための2波高計間の距離として用いたL/4を示している。

(2) 堤体模型の構造諸元

ここでは、海水交換型防波堤の基本構造として、遊水室内のピストンモード波動運動に起因する反射波の低減効果を期待した図-2(a)に示す異吃水2重壁式構造の堤体を用いた。この構造体は後面壁の通水部の開口率が34%と比較的大きいものとしている。次に、基本構造に改良を加えて、遊水室内に水平版を入れて下部を通水部とした構造(図-2(b))と、水平版を岸側に延長した構造(図-2(c))を用いた。水平版を設置したのは、透過・反射波高のさらなる低減を目的としたから

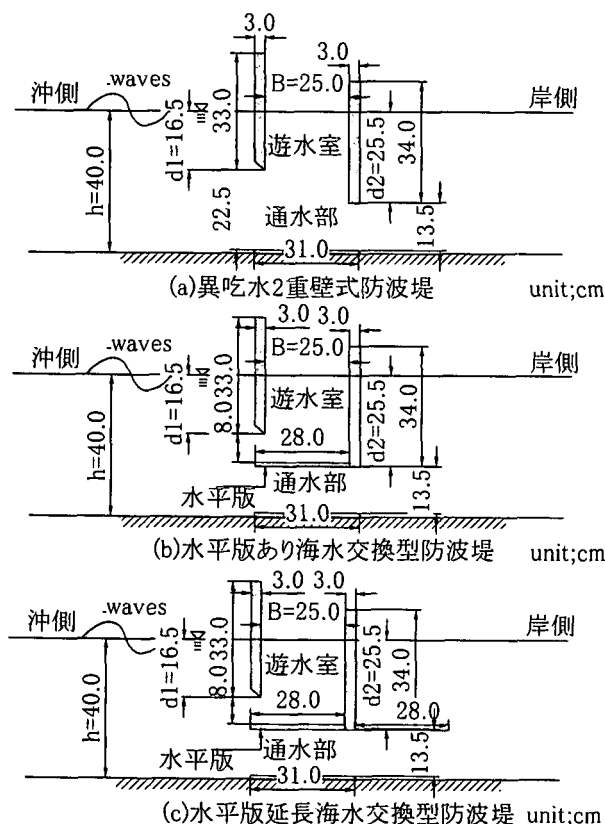


図-2 堤体模型諸元

であり、水平版を岸側に延長した構造も検討対象とした。いずれの堤体模型も上から見た1基あたりの外郭寸法は、幅31.0cm、長さ49.5cmであり、水路に2基を並列設置した。

ここで、想定した堤体模型の縮尺は1/10~1/20程度である。

(3) 計測方法

本実験は4台の容量式波高計を用いて、水位変動を測定した。波高計1は沖での波を、波高計2, 3は堤体前面での波を、波高計4は堤体模型後方での波を測定するために用いた(図-1)。ここで、反射率については、波高計2, 3の計測値を用いて入・反射波の分離推定法⁵⁾により求めた。透過率については、水路に堤体を設置しない状態における入射波高と、堤体設置時の波高計4による透過波高の比で定義した。

3. 数値計算の方法

(1) 減衰波理論

本研究では垂下版式防波堤による波変形の算定には、中村・井出⁶⁾により展開されている線形ポテンシャル波動理論に基づく減衰波理論を用いた。この算定法は、カーテン防波堤など隅角部を有する構造物を対象として、鋭角部よりの流れの剥離や渦流れの発生現象によるエネルギー逸散を近似的に考慮する方法で、線形減衰を有する流体を想定している。ここで、線抵抗係数は0.2とした。

(2) VOF法

Navier-Stokesの方程式により自由水面を有する流体を直接解く方法として、VOF (Volume of Fluid) 法がある。この方法は、Hirtらの研究グループによって開発されたものであり、派生したさまざまなバージョンがソースプログラムでも公開されている⁷⁾。ここでは、CADMAS-SURF⁸⁾を用いて計算を行った。

計算条件は次のとおりである。計算設定領域：長さ19.9m×高さ0.6m、空間メッシュサイズ：水平方向 $\Delta x=0.010\text{m}$ 、鉛直方向 $\Delta z=0.005\text{m}$ の等間隔格子。造波ソースは $x=7.50\text{m}$ 地点に置いて造波を行い、 $x=0.00\text{m}$ 地点でSommerfeldの放射条件を設け、そこから2波長分のエネルギー減衰帯を設けた。これにより、堤体からの反射波を吸収する無反射造波装置を実現した。また、堤体は堤体前面が $x=15.0\text{m}$ 地点となるように配置し、水路端の19.9m地点で無反射境界となるように放射条件を課した。CFL条件および粘性項の安定条件から定まる時間ステップに掛ける安全率 $\alpha=0.2$ とし、差分法にDONOR-0.2、F値フリー、その他の境界はスリップ条件とした。計算における模型諸元は水理模型実験のそれと前面壁エッジ部を

除いて同一にし、作用波の条件も水理模型実験での波高、周期の組み合わせを原則的にそのまま用いた。算定では、静水状態から17s間にわたり造波して擬定常状態を再現した。このとき、サンプリングタイムは0.014sとした。

反射率 C_r および透過率 C_t は、堤体設置有無の両計算結果において最後より5周期分の算定結果のエネルギー比から算出した。これは、一般に渦を伴う現象においては、1周期毎に同様の現象が生じないためである。反射率、透過率の算定位置は、堤体前後2.4m地点としている。

4. 結果および考察

(1) 波浪制御特性

異吃水2重壁式防波堤、水平版あり海水交換型防波堤、水平版延長海水交換型防波堤の3構造体の反射率 C_r 、透過率 C_t の水理模型実験結果を、各条件における数値計算結果とあわせて図-3~図-5に示す。図中では周期に関するパラメータに波長堤体幅比 L/B を用いている。また、波動成分が渦流等のエネルギーに変換されるエネルギー逸散量 $E_L (=1-C_r^2-C_t^2)$ を、目標波高10cmでの実験結果、計算値ともに各構造体別に図-6~図-8に示す。ここで、水理模型実験結果はexp、減衰波理論の結果はDWM、VOF法の計算結果はVOFとして表している。

a) 異吃水2重壁式防波堤

図-3より、反射率 C_r は減衰波理論結果、実験結果ともに $L/B=7.8$ 付近で極小となることがわかる。この極小値の理論算定値は $C_r=0.06$ 、実験値 $C_r=0.22$ 程度であり、かつ、このとき $C_t=0.40$ となっており、低反射率かつ低透過率である。これは C_r が極小となる条件下で遊水室内のピストンモード波浪共振が発生し、前面カーテン壁下部付近に強い渦が形成されることによる。このことは、図-6より C_r が極小となる条件下においてエネルギー逸散量が、減衰波理論値 $E_L=0.9$ 、実験値 $E_L=0.78$ となるなど、入射波エネルギーの多くが渦流の形成に費やされていることからわかる。

しかしながら、透過率 C_t は、 $L/B>9.3$ の長周期側において実験値、計算値ともに0.5以上となっている。かつ、本構造体では、 L/B の増加に比例して反射率 C_r 、透過率 C_t ともに大きくなっている。これにより、本構造体は浮消波堤と同様に通水機能は満足されるものの、防波堤としての効果は十分ではないと判断される。

なお、実験結果とVOF法の計算結果を比較すると、反射率 C_r 、透過率 C_t ともに定性的な傾向のみならず、エネルギー逸散量もあわせて定量的な一致がみられ、VOF法の適用が有効であることがわかる。

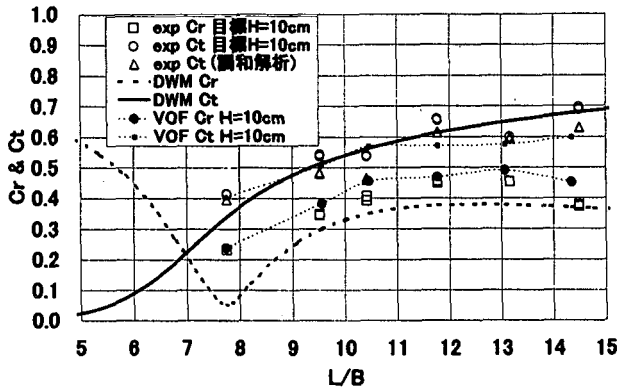


図-3 反射率、透過率(異吃水2重壁式防波堤)

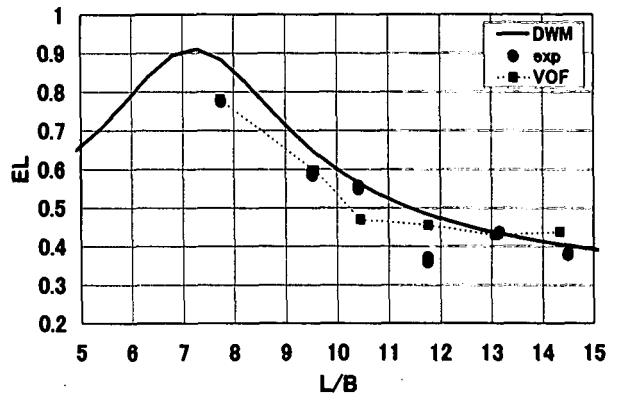


図-6 エネルギー逸散量(異吃水2重壁式防波堤)

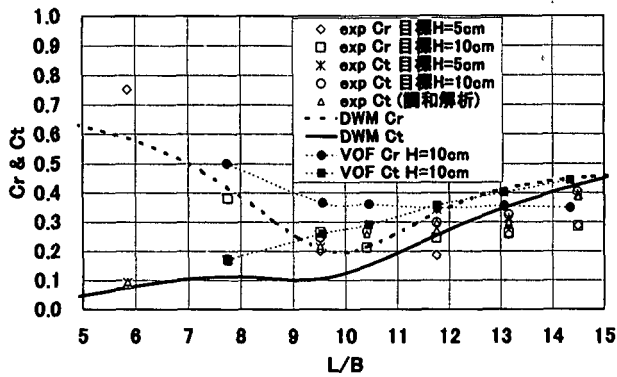


図-4 反射率、透過率(水平版あり防波堤)

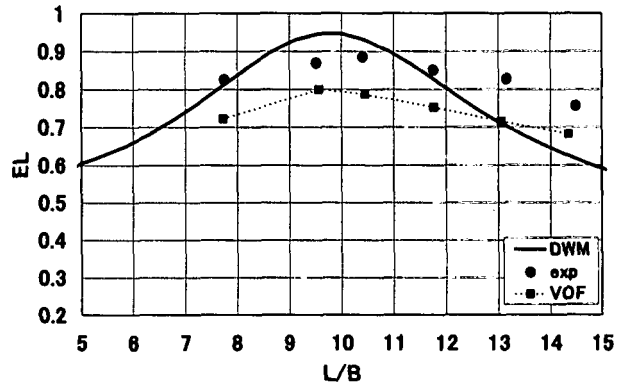


図-7 エネルギー逸散量(水平版あり防波堤)

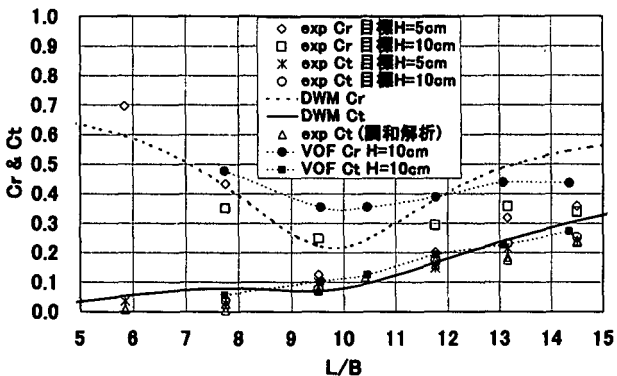


図-5 反射率、透過率(水平版延長防波堤)

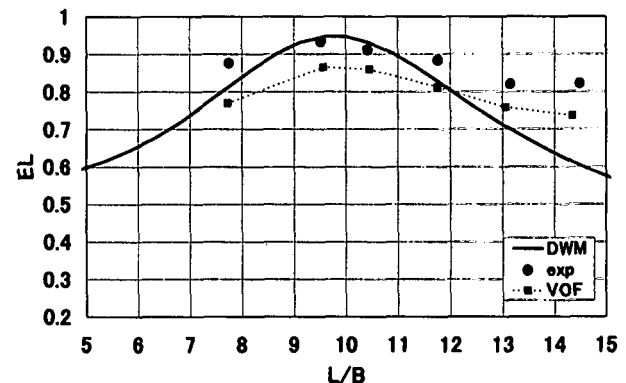


図-8 エネルギー逸散量(水平版延長防波堤)

b) 没水平版を設置した場合

図-4より水平版あり防波堤の場合、反射率 C_r は減衰波理論算定結果、実験結果ともに極小値を示す条件は $L/B = 10 \sim 10.5$ 程度となっており、異吃水2重壁式防波堤と比較して、長周期側に移行していることが認められる。このとき、極小値はともに $C_r = 0.20$ 程度である。水平版延長防波堤においても、図-5に示すように、ほぼ同様の反射率特性がみられる。

一方、透過率 C_t は、図-4にみられるように水平版を設けると、すべての L/B の条件下において理論算定値、実験値ともに $C_t < 0.5$ となる。これは、水平版を設けることで流体の鉛直運動が拘束されるためと考えられる。さらに、水平版を延長した場合、より大きな面積で水粒子運動を拘束

することとなり、図-5に示すように L/B の大きな比較的長周期の条件下のみならず、 $L/B < 10.0$ の比較的短周期側での条件下でも $C_t < 0.1$ となり、さらなる透過波の低減効果が認められる。このことは、図-7、図-8に示す水平版を設置した際のエネルギー逸散量からもわかる。特に、実験値においてその傾向は顕著であり、ほぼすべての L/B の条件下で大きなエネルギー逸散量となっている。エネルギー逸散量は最大9割程度にもなり、ほとんどの波エネルギーが渦流等へ効率的に変換されている。

以上の検討より、水平版を設けることで透過率 C_t は、水平版を設置しない場合と比較して理論算定結果、実験結果ともに5割以上と大幅に低減することが可能であり、かつ、水平版を延長する

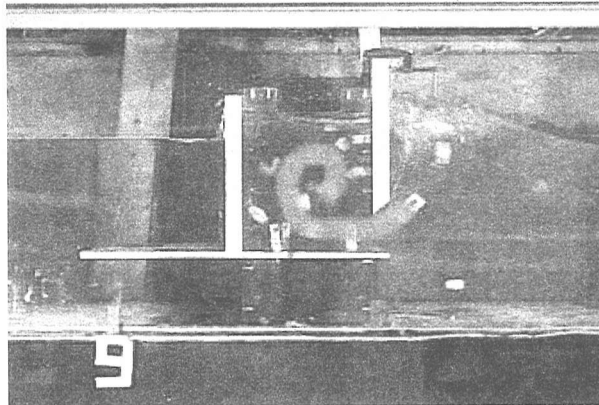
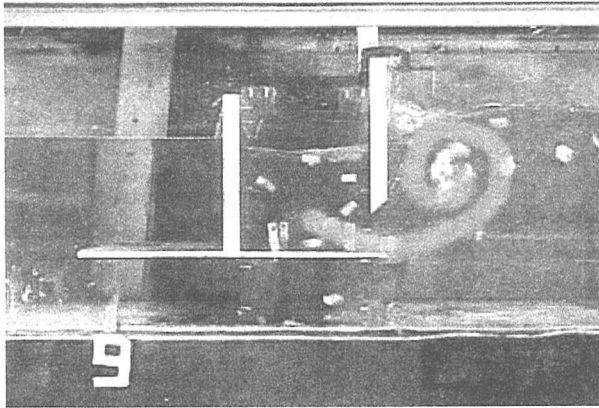


写真-1 没水平版を設置した場合の渦流運動

ことで低減効果はさらに高まることが判明した。
 このように、遊水室内に背後壁開口部に一致するように水平版を設置して通水部を設けると、反射波の低減効果を損なうことなく、効果をさらに増大させるとともに、しかも透過波についても大きく低減することが可能になるなど、波浪制御効果の改善方法として有効な構造体になることがわかった。

実験結果とVOF法の計算結果を比較すると、透過率 C_t については水平版あり防波堤、水平版延長防波堤ともに定性的な傾向のみならず、定量的な一致がみられ、VOF法の有効性がわかる。しかし、反射率 C_r は定性的な傾向は表現しているものの、計算結果が実験結果よりも大きい値となっており、定量的な一致は不十分である。これは、渦流によって曝気が生じる際のエネルギー逸散を計算において考慮していないことがひとつの要因として挙げられる。また、水平版を設けると異吃水2重壁式防波堤とは異なる渦流現象となることから、本計算の格子サイズで現象を捉えきれていないことが考えられる。

(2) 可視化実験

異吃水2重壁式防波堤では、遊水室内のピストンモード波浪共振で前面カーテン壁前後に渦流が発生することは、従来の研究でもわかっていたことである。しかし、写真-1に示すように没水平

版を設置することにより、①遊水室内の流体の鉛直運動が拘束され、押し波時に発生する大規模な渦流を1方向回転渦として制御すること、②これに対応して逆回転する渦流が堤体前面で発生しており、鉛直混合が激しく生じていること、③前面壁前後で曝気が生じていることが、今回の実験ではじめて明らかとなった。

やはり、没水平版を設置することにより、波浪エネルギーが大規模な渦へと変換されて、反射波、透過波を大幅に低減させる機構となっていると考ええる。副次的な効果として、曝気機能をも有することがわかった。

(3) VOF法による計算上の課題

本研究では、VOF法をあわせ用いて各種構造体の検討を行っている。本計算手法は適切に条件設定を行うと、多くの現象を精度よく再現できることが各種検討結果から明らかとなっている。しかしながら、試行錯誤によって、条件設定の再検討を余儀なくされる場合もみられる。

本論文に掲載している計算結果は、波高、水位、流速、エネルギー等の諸量の時系列データ等を検討した結果、現象に対する再現性に信頼性が高いと判断されたもののみを抽出している。例えば、計算条件で波高を5.0cmに設定した場合、構造物を設置することなく進行波の変形に着目した検討においても、ただか17s間で顕著な水位変化が見られた計算例もあり、これらの結果は破棄している。これまでの知見を踏まえているものの、現段階では、何故、不具合が生じたのか不明である。

したがって、今後、渦流現象を定量的に把握することを目的として、格子サイズ等をさらに検討していく必要がある。

5. 下部通水路高の効果

前章まで、実用化を目的とした図-2に示す3構造体について、検討方法および結果を記述した。つづいて、異吃水2重壁式防波堤、水平版あり海水交換型防波堤について、図-9のように下部通水路高を水深の12.5%と狭くした場合の実験結果ならびに減衰波理論算定結果を参考までに示す。

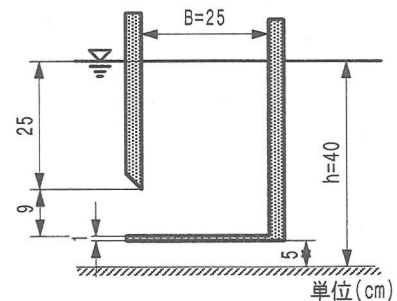


図-9 堤体模型諸元

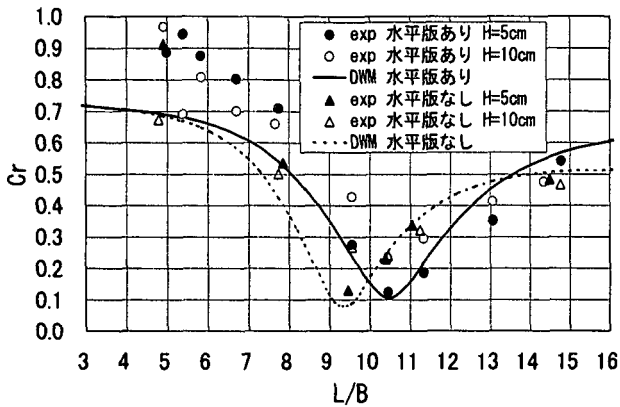


図-10 反射率

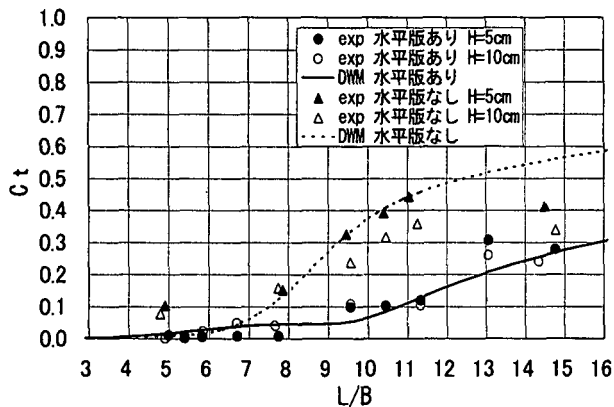


図-11 透過率

図-10、図-11に、反射率 C_r および透過率 C_t の数理模型実験結果、理論計算結果を示す。反射率 C_r は、異吃水2重壁式防波堤、水平版あり海水交換型防波堤ともに、波長遊水室幅比 L/B による変化が大きいことがわかる、図-2の構造体と比較すると、反射率が極小となる周期はほぼ同じではある。この極小値は、異吃水2重壁式防波堤、水平版あり海水交換型防波堤ともに実験結果でおよそ1割の反射率であり、より低反射率を実現している。喫水が深いにもかかわらず反射率を小さく抑えることができるのは、ピストンモード波動共振による効果であり、シングルカーテンにはない興味深い現象である。透過率については、下部通路高を狭くしたことによって、波動エネルギーの伝達が小さくなっている。特に、 $L/B < 11$ 程度では、透過率を小さく抑えることができ、水平版あり海水交換型防波堤は1割以下の極めて小さい透過率を実現している。

本構造体は、低反射率を実現する周期帯が限定されており、実海域での防波堤としては実用的ではないといえる。

6. まとめ

本研究により、下部通水式海水交換型防波堤の

波浪制御特性をつかむことができた。主要な結果は以下のとおりである。

- ①基本構造とした異吃水2重壁式防波堤では、遊水室内のピストンモード波浪共振によって、前面カーテン壁前後に渦流が発生する。没水平版を設置することにより遊水室内の流体の鉛直運動が拘束されることから、押し波時に発生する大規模な渦流を1方向回転渦として制御することができる。また、堤体前面では逆流を発生させることができる。
- ②没水平版を設置することによって発生する大規模な渦が波浪エネルギーの逸散に寄与しており、反射・透過波を大幅に低減できることが判明した。そして、没水平版を岸側に延長すると、さらに透過波の低減が可能になるなど、没水平版の設置は、波浪制御に有効である。これら波浪制御効果は、減衰波理論およびVOF法によりほぼ推定できる。
- ③没水平版を設置した構造体では、前面壁前後で曝気がみられた。水理模型実験で曝気効果を生じることから、実際場では曝気機能を有する構造体であるといえる。また、大規模な渦の発生による鉛直混合が生じていることから、本構造体は海底面およびその直上水への酸素供給が行われ、底質・水質の良好な環境に資するものと考えられる。

参考文献

- 1) 大村智宏, 中山哲蔵, 前川拓司: 潮位差が大きい漁港での波浪エネルギーによる海水交換の検討, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.986-990, 1997.
- 2) 大村智宏: 円孔式海水導入工の開発研究, 日本水産工学会, 水産工学, 第39巻第2号, pp.131-138, 2002.
- 3) 中村孝幸, 神野充輝, 西川嘉明, 小野塚孝: 渦流れの増大現象を利用した垂下板式の反射波低減工について, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.796-800, 1999.
- 4) 中村孝幸, 高木伸雄, 中山哲蔵, 河野 徹: ピストンモード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, 2002.
- 5) 合田良実, 鈴木康正, 岸良安治, 菊池 治: 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, pp.3-24, 1976.
- 6) 中村孝幸, 井手善彦: 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, Vol. 13, pp.177-182, 1997.
- 7) たとえば, Martin D. Torrey, Lawrence D. Cloutman, Raymond C. Mjolsness and C. W. Hirt: NASA-VOF2D: A Computer Program for Incompressible Flows with Free Surfaces, Los Alamos National Laboratory, LA-10612-MS, 1985.
- 8) 財団法人沿岸開発技術研究センター: 数値波動水路の研究・開発 (CADMAS-SURF), 沿岸開発技術ライブラリー, No. 12, 2001.