

渦流制御を利用する海水交換促進型防波堤の効果について

中村 孝幸*・大村 智宏**・大井 邦昭***

港湾, 漁港水域の水質・底質環境の改善を目的として, 新たな海水交換促進型防波堤の開発を行った。開発対象は, 異吃水2重壁式防波堤に没水平版を設けた工法である。本工法の消波機構および平均流の発生機構について解明するため, 水理模型実験および数値計算により検討を行った。この結果, ①2重壁式防波堤の遊水室内に没水平版を設置すると有意な大きさの沖向き平均流を生成すること, ②没水平版は押し波時に前面垂下版の下端から形成される渦の遊水室内への集積および周辺場に対する波動の影響の遮断を果たすこと, ③曝気が生じ前面垂下版の前方で鉛直混合されるため低層への酸素供給が有効であること等がわかった。

1. 緒 言

沿岸域での水産生物資源の生産性が低下しつつある今日, 魚介類の幼稚仔の生残率や藻場の成立に影響を与える水質・底質環境の保全および改善は, 喫緊かつ重点的に実施しなければならない情勢にある。水質・底質環境の保全, 改善を図る効率的かつ効果的な技術開発は必要不可欠であり, その手段のひとつとして海水交換の促進が挙げられる。このような背景のもと, 港湾, 漁港水域においても, 陸域からの流入汚濁負荷の削減を図るとともに, 海水交換型防波堤の整備が進められている(土木学会編, 2000)。

既に著者らは, 波浪を利用する海水交換工法として, 碎波あるいは越波による水位上昇を利用して導水する「多段型潜堤式海水導入工(大村ら, 1997)」や水面付近の波の質量輸送を用いて導水する「円孔式海水導入工(大村, 2002)」の研究開発を進め, 実際場での適用性を検討し, 整備に資してきた。いずれの工法も導水効率は優れた工法であるものの, 単純な構造であるとは言い難く, 高度な施工技術を要するといった短所がある。そこで, 新たな工法の開発を模索していたところ, 従来工法の導水原理とは全く異なる機構を発見した。

本研究では, 導水原理として上記したような遊水部と配水箇所との水位差を利用するのではなく, 渦流の制御により波の進行方向と逆向きの平均流を生成する方法を新たに提案する。具体的な構造体としては, 波動運動に伴い発生する交番渦の中で一方の影響がより強く現れるように渦流の制御を行うため, 図-1に示す異吃水2重壁式防波堤の遊水室内に水平版を入れたものである。ここでは, このような新規構造体を対象として, 波動運動に伴う一方向流の生成機構や平均通水量の実態などを水理模型実験と数値計算の両者により明らかにする。この際, 防波施設として重要である反射波・透過波の低減効

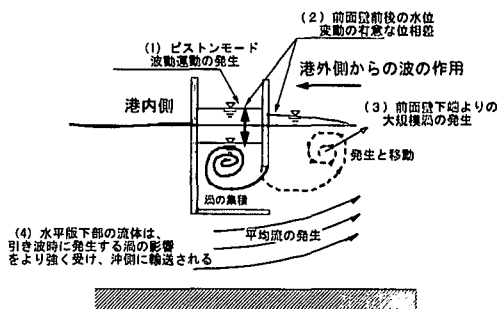


図-1 平均流発生機構および反射波・透過波低減機構

果についても同時に検討を行う。

2. 実験および計算の方法

(1) 水理模型実験

a) 堤体模型の構造諸元

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。この構造体は実用化を目的としていることから, 後面壁の通水部の開口率を34%と比較的大きくしている。次に, 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, 水平版を更に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, 波浪による導水機能の付加および透過波・反射波高のさらなる低減を目的としたからであり, 水平版長の影響を把握するため, 岸側に延長した構造も検討対象とした。

b) 実験条件

図-3に示す水産工学研究所の漁港水理実験棟迴流風洞付造波水路(長さ100.0m×幅1.0m×高さ1.5m)において, 水理模型実験を行った。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碎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勾配すりつけ部および水平床には, 厚さ2.0cmの鉄板を用いている。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

* 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 (独法)水産総合研究センター水産工学研究所
*** 学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科

の循環ができるようにし、堤体前後での水位差が生じないようにした。堤体模型は水平床上に設置している。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31.0 cm、長さ49.5 cmであり、水路に2基を並列設置した。

目標波は、入射波高 H が5.0 cm、10.0 cmの2種類、周期 T が1.0~1.95 s間の7種類の規則波である。水深 h は40.0 cm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。計測は、容量式波高計による水位変動および L 型電磁流速計による下部通水路の岸側開口部の流速である。

なお、模型縮尺は1/10~1/20程度を想定している。

(2) 数値計算

a) VOF法

VOF法(財団法人沿岸開発技術研究センター, 2001)の計算条件は次のとおりである。計算設定領域: 長さ

表-1 実験で用いた波条件

T (s)	目標 H (cm)	H_m (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

19.9 m×高さ0.6 m、空間メッシュサイズ: 水平方向 $\Delta x=0.010$ m、鉛直方向 $\Delta z=0.005$ mの等間隔格子。造波ソースは $x=7.50$ m地点に置いて造波を行い、 $x=0.00$ 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 $x=15.0$ m地点となるように配置し、水路端の19.9 m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目標波高、周期の組み合わせを用いた。静水状態から17 s間にわたり造波して、疑似定常状態を再現した。出力時間は0.014 sである。

ここで、反射率および透過率は、堤体設置有無の両計算結果より最後5周期分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2.4 m地点とした。

b) 減衰波理論

反射波・透過波の算定は、中村・井出(1997)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。ここで、線抵抗係数 f_c は従来の研究結果(中村ら, 1999)より $f_c=0.2$ とした。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にして、鋭角部よりの流れの剝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。本理論では極めて短時間で計算結果が得られることから、水理模型実験の構造諸元決定の事前検討時にも用いた。

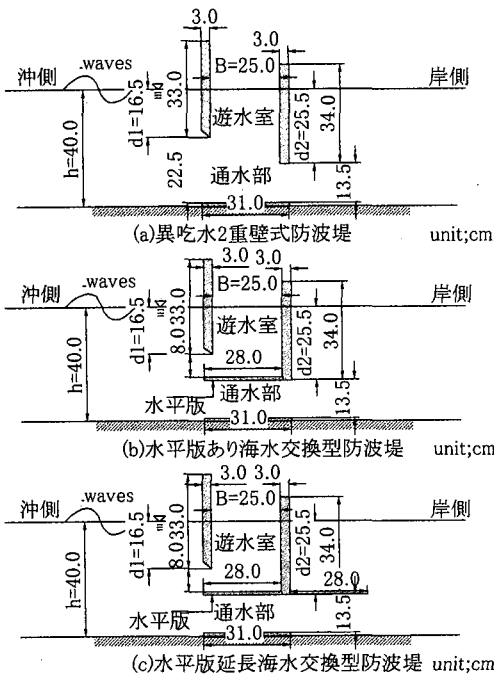


図-2 堤体模型の諸元

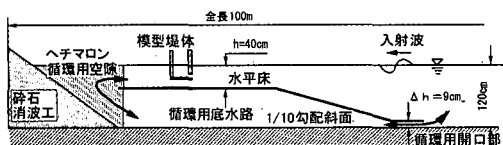


図-3 実験に用いた長水路

3. 結果および考察

(1) 波浪制御特性

異吃水2重壁式防波堤および水平版あり海水交換型防波堤の反射率 C_r 、透過率 C_t の水理模型実験結果および数値計算結果を図-4、図-5に示す。水理模型実験の反射率は入・反射波の分離推定法(合田ら, 1976)より求めた。図中において、水理模型実験結果はexp, 減衰波理論結果はDWM, VOF法の結果はVOFと表記している。

異吃水2重壁式防波堤では、反射率 C_r は、実験値、計算値ともに $L/B=7.8$ 付近で極小となることがわかる。この極小値は理論算定値 $C_r=0.06$ 、実験値 $C_r=0.22$ 程度であり、かつ、このとき $C_t=0.40$ となり、低反射率かつ低透過率となっている。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、カーテン壁付近で強い渦が形成されることによるものであり、後述する流速ベクトル図からもわかる。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以上となっており、 L/B の増加に比例して C_r 、 C_t ともに大きくなっている。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 ともに良好な一致がみられる。

水平版を設けると、反射率 C_r は理論算定結果、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。水平版を延長してもほぼ同様の反射率特性がみられる。一方、透過率 C_t は、すべての L/B の条件下において計算値、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、さらなる透過波の低減効果が認められる。

(2) 導水特性

図-6に各構造体の下部通水部における平均流量を示す。1波当たりを通して平均流量 Q を算定し、これを波の質量輸送量である峰の水塊量で無次元化している。

水平版がないと透過波に付随する岸向きへの流量を生じているが、水平版を設置することで冲向きの流れを発生させていることがわかる。水平版付きでは L/B が10以下では岸向きへの導水機能が見受けられるものの、ほぼすべての周期帯で冲向きの流れが発生する実験結果および計算結果が得られた。水理模型実験では、水平版の延長による導水効率の特性が L/B が10以上の長周期の条件で顕著であり、目標波高10cmの実験ではおよそ3～5割の導水量の増加が認められる。水平版があると波

周期が長くなるにしたがって導水効率が大きくなっており、最も効率がよい条件では進行する水塊量の5割以上の導水が沖側へ行われる結果となっている。これは先に示した波浪制御特性において、入射波のエネルギーフラックスの大きな長周期側においても低反射率・低透過率となっており、エネルギー逸散量と導水量とに密接な関連があるものと推測する。

なお、実際には通水路における流速は水深方向の任意地点において一定ではないことが目視から認められるとともに、VOF法の計算結果は断面方向で流速分布が変動している。 L 型電磁流速計の測定地点は底面から5.0cm、10.0cmの2地点であり、この計測値から算定した流量は従来の海水導入工の導水効率と比較して大きいこと、計算結果との相違があることから、より精度の高い

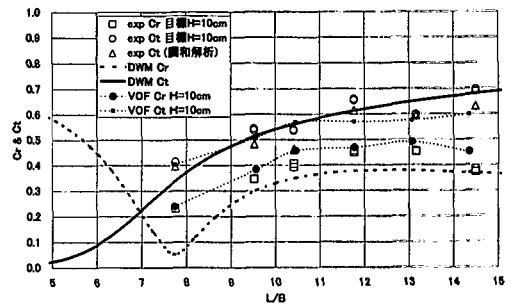


図-4 透過率および反射率 (異吃水2重壁式防波堤)

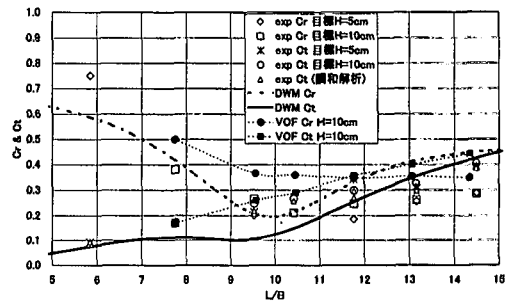


図-5 透過率および反射率 (水平版あり海水交換型防波堤)

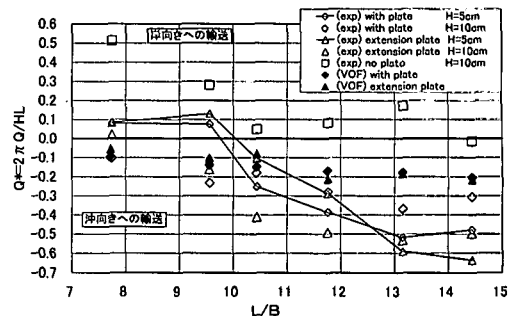
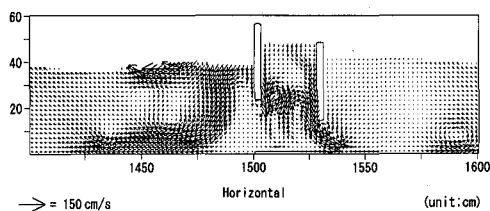
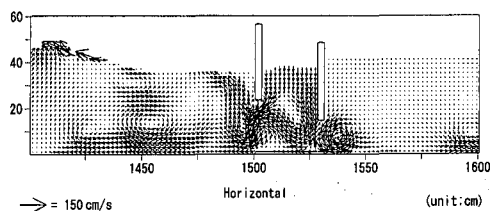
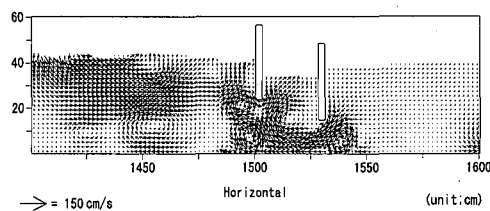
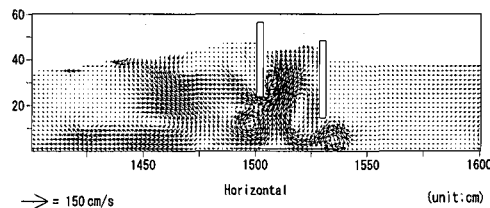
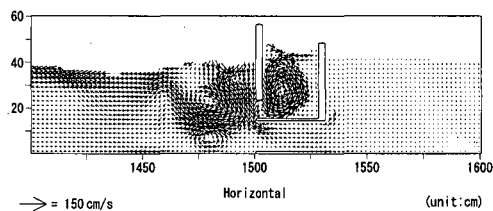
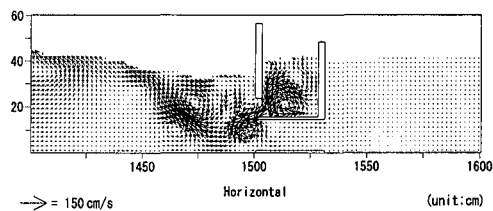
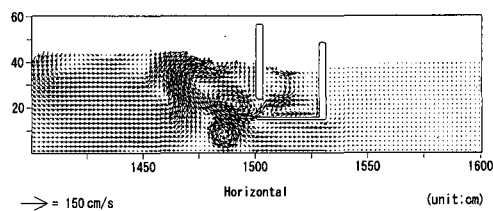
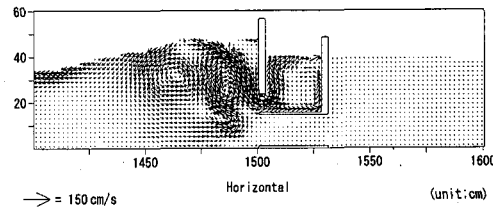


図-6 導水効率

(a) $t = 15.6 \text{ s}$ (b) $t = 15.6 \text{ s} + T/4$ (c) $t = 15.6 \text{ s} + 2T/4$ (d) $t = 15.6 \text{ s} + 3T/4$ 図-7 流速ベクトル(異吃水2重壁式防波堤, $H=10.0 \text{ cm}$, $T=1.4 \text{ s}$)(a) $t = 15.6 \text{ s}$ (b) $t = 15.6 \text{ s} + T/4$ (c) $t = 15.6 \text{ s} + 2T/4$ (d) $t = 15.6 \text{ s} + 3T/4$ 図-8 流速ベクトル(水平版あり海水交換型防波堤, $H=10.0 \text{ cm}$, $T=1.4 \text{ s}$)

流量算定法について今後、検討していく余地がある。

(3) 渦流の特性

各構造体のVOF法計算結果の一例を図-7～図-9に示す。いずれも波高 $H=10.0 \text{ cm}$ 、周期 $T=1.4 \text{ s}$ であり、造波後 15.6 s から $T/4$ 毎の流速ベクトルを表示している。

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が生じており、カーテン壁前後で複雑かつ大規模な渦流が発生していることがわかる。波動運動がこの複雑かつ大規模な渦流運動へと変換されることによって、先述した低透過率、低反射率になる機構であると考えられる。また、異吃水2重壁式防波堤と比較すると、水平版を設置することによって渦流の状況が異なることがわかる。水理模型実験で可視化した際、水平版を設けると

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確認されている。計算においても水理模型実験と対応した流況結果が得られたものと判断できる。やはり、没水平版を設置した場合においても、波動運動が複雑かつ大規模な渦流運動へと変換されることによって、反射波、透過波を大幅に低減させる機構になっていると考える。しかし、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に留意する必要がある。これは先に示した反射率において、計算結果が実験結果よりも大きめの値を示すケースがあることと密接な関係を有していると推測する。

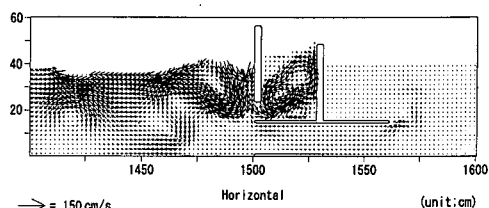
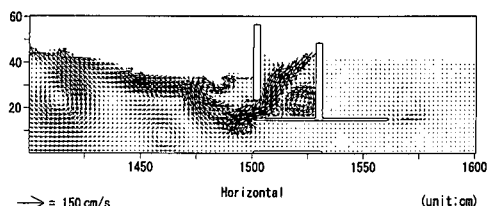
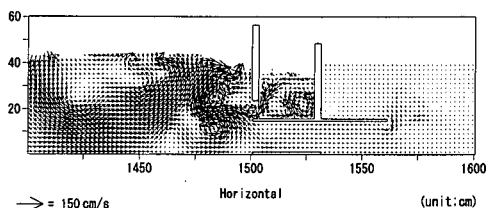
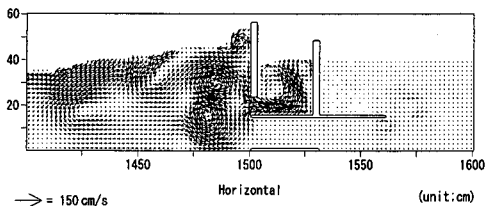
(a) $t = 15.6 \text{ s}$ (b) $t = 15.6 \text{ s} + T/4$ (c) $t = 15.6 \text{ s} + 2T/4$ (d) $t = 15.6 \text{ s} + 3T/4$

図-9 流速ベクトル (水平版延長海水交換型防波堤, $H=10.0 \text{ cm}$, $T=1.4 \text{ s}$)

平均流を生成する機構としては、水平版の存在により通水部の流体が引き波時に発生する渦の影響を強く受けて、ネットの輸送方向が沖側になることが計算結果から判断できる。この時、押し波時に発生する遊水室内の渦の影響は、水平版の設置により通水部の流体には無干渉な状態となっている。つまり、図-1に模式的に示した渦流の制御効果により導水が行われる機構であると考え

る。

4. 結 言

異吃水2重壁式防波堤の遊水室内に水平版を設けた構造体は、潮通し工としての機能ではなく、波浪を利用した海水交換促進型防波堤として有効であることがわかった。以下に主要な結果を記す。

(1) 没水平版を有する構造体では、没水平版がない場合と同様に遊水室内でのピストンモード波動運動を駆動力とする大規模な渦流の発生が見られる。没水平版は、渦流の制御効果を持つことから、結果的に冲向きの平均流を生成する吸出しポンプのような役割を果たす。

(2) 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。一方、堤体前面では逆流を発生させることができる。この際エアレーションが生じており、かつ大規模な渦の発生による鉛直混合が起こっていることもあり、酸素供給機能を有している。

(3) 没水平版を設置することによって発生する大規模な渦流れが波浪制御に寄与しており、反射波・透過波を大幅に低減できることが判明した。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こともわかった。

参 考 文 献

- 大村智宏・中山哲蔵・前川拓司 (1997): 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.
- 大村智宏 (2002): 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.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治 (1976): 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.
- 財団法人沿岸開発技術研究センター (2001): 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.
- 土木学会編 (2000): 海岸施設設計便覧 2000 年版, 582 p.
- 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, Vol. 13, pp. 177-182.
- 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.