

# 垂下板式低反射護岸の鉛直混合効果に関する研究

## VORTEX INDUCED LARGE-SCALE CIRCULATION AND MIXING ABOUT A CURTAIN-WALLED REFLECTION DISSIPATER IN WAVES

小野正順<sup>1</sup>・中村孝幸<sup>2</sup>・高木伸雄<sup>3</sup>・中山哲蔵<sup>4</sup>

Masanobu ONO, Takayuki NAKAMURA, Nobuo TAKAGI and Akiyoshi NAKAYAMA

<sup>1</sup>正会員 工博 高知工業高等専門学校助教授 建設システム工学科 (〒783-8508 高知県南国市物部200-1)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>正会員 農博 水産庁水産工学研究所 水産土木工学部長 (〒314-0421 茨城県鹿島郡波崎町海老台)

<sup>4</sup>正会員 工修 水産庁水産工学研究所 水産土木工学部水理研究室長 (〒314-0421 茨城県鹿島郡波崎町海老台)

The water pollution in the harbor is one of the most crucial topics today. A permeable breakwater and a seawater exchange breakwater have been developed in order to settle the water pollution problems in a harbor. Recently, a new procedure for improving seawater property using vertical mixing is proposed.

In this study, we investigate the characteristics of vortex induced large-scale circulation and mixing around a curtain-walled reflection dissipater. The mechanism of vortex appearance around a curtain-walled reflection dissipater is investigated through a numerical simulation and hydraulic experiment.

**Key Words :** curtain-walled reflection dissipater, water pollution in a harbor, large-scale circulation, vertical mixing

### 1. はじめに

近年、我が国では浅海域の埋立や生活排水・工場排水による水質汚濁により浅海域の環境悪化が顕在化してきている。バブル全盛期にウォーターフロント開発のために建設された海岸・海洋構造物は、沿岸域に閉鎖性水域・停滞水域を生じさせ、そのことがさらに浅海域の水質環境の悪化を促進している。

古くから港湾や漁港内の水質は問題となっており、国土交通省により環境と共生する港湾を目指したエコポート事業などが行われてきている。そのため透過性防波堤や海水交換型防波堤などの開発が行われ、港内水と港外水の交換により港内水の水質改善が行われている。最近では、護岸前面に鉛直循環流を発生させることで水質改善を行える構造物などが提案されてきている<sup>1)</sup>。

本研究では、鉛直板を有する低反射構造の護岸を用いて、港内水を鉛直混合させることで港内水の自然浄化を促進させる事を考える。さらに、海水交換型防波堤と併用することで、港内に流入させた港外水と港内水を効率よく混合することができ、海水交換型防波堤の海水交換能力の向上が期待できる。また、本低反射護岸は、従来のスリットケーソンなどの空隙が水面上に現れる構造で

はないため、船舶などが安全に着岸できる利点を有する。

このような観点より本研究では、垂下板式低反射護岸前面に形成される鉛直循環流の特性について実験的に検討を行った。また、2次元非圧縮性流体のNavier-Stokes方程式と連続の式を基礎方程式とし、自由表面解析モデルにVOF法を用いた数値計算を行い詳細な流況データより、垂下板端部で発生する剥離渦と垂下板前面で形成される鉛直循環流との関係について検討を行った。

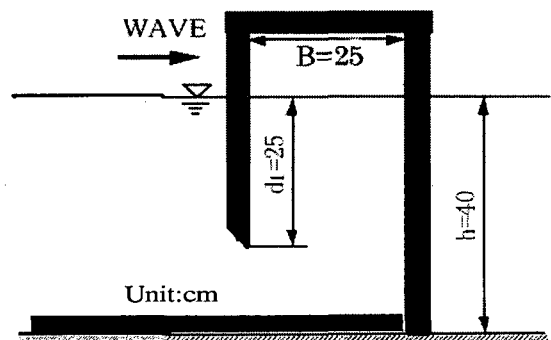


図-1 垂下板式低反射護岸断面図

## 2. 垂下板式低反射護岸の反射率の特性

垂下板式低反射護岸の反射率特性は、著者ら<sup>2)</sup>によって既に明らかにされており、図-2にその特性を示す。図中の計算結果は隅角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できる減衰波理論による計算結果である。 $B/L=0.10$ で遊水室内で波浪共振を生じ、反射率が極小値を示す。この波条件よりも長周期あるいは短周期の条件になるほど反射率は大きくなり、ほぼ0.5-0.7程度の反射率を示す。

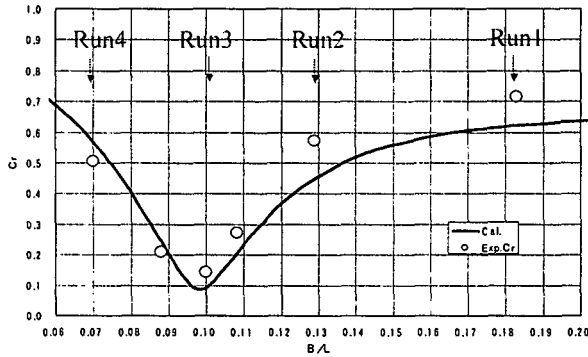


図-2 垂下板式低反射護岸の反射率特性

## 3. 垂下板式低反射護岸前面の流況特性に関する実験

### (1) 実験装置

実験に用いた水槽は、愛媛大学工学部環境建設工学科の長さ25m、幅1m、高さ1.25mの2次元造波水槽である。本実験で用いた垂下板式低反射護岸は、図-1に断面図を示すように前面を垂下板、後面を不透過の鉛直板とした重力式護岸である。実験縮尺は1/12とし、堤体の遊水室幅25cm、垂下板喫水深25cmは一定とした。また、水深も40cmと一定である。

### (2) 実験方法

垂下板周辺の流れの状況を把握するため、護岸前面の平均流速と流況を計測した。平均流速は、電磁流速計 (VM-201H: ケネック製) を用いて計測した。流速の計測位置は図-3に示すように、波向き方向 (水平方向) に垂下板前面を  $x=0\text{cm}$  とし、 $x=-10, 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 85, 105\text{cm}$  の10地点で計測し、鉛直方向には底面から5, 10, 15, 20, 30 cmの5地点で計測した。流速の計測は約2分間行い、時間平均流速は流れの状態がほぼ定常となった40-80sの間のデータについて入射波周期の整数倍で時間平均を取った。

流況は、実験中に投入したトレーサーを追跡することで計測した。トレーサーには家庭用のスポンジを1cm四方の大きさに切ったものを用いた。流況は水槽側方からビデオカメラにより撮影し、トレーサーを粒子追跡することにより解析を行った。

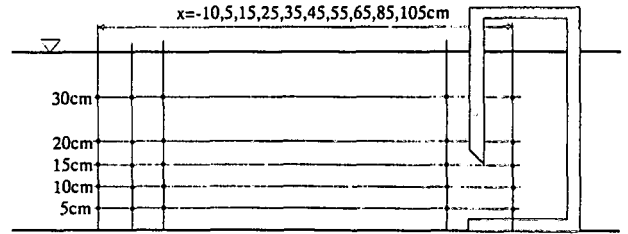


図-3 流速計の設置位置

### (3) 実験条件

実験に用いた波条件は、図-2に示す低反射護岸の反射率特性を参考として、図中に示す0.96, 1.20, 1.45, 1.95sの4つの波条件を決定した。また波高は、6cm程度の一定とした。

## 4. 垂下板式低反射護岸前面の流況の数値計算

垂下板式低反射護岸前面の流況の数値計算は、「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会」で開発された数値波動水路 (CADMAS-SURF) を用いた<sup>3)</sup>。この方法は2次元非圧縮性流体のNavier-Stokes方程式と連続の式を基礎方程式とし、自由表面解析モデルにVOF法を用いて計算している。空間メッシュの大きさは2cm、時間差分間隔は0.01sで計算を行った。

## 5. 垂下板式低反射護岸前面の流況特性

### (1) 垂下板式低反射護岸前面の流況特性

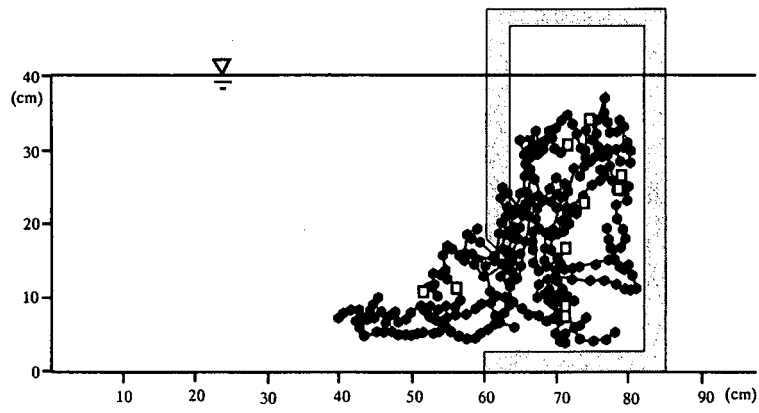
図-4はトレーサーによる垂下板前面の流況図を示す。トレーサーは最初の位置を□で示し1/8周期ごとに追跡している。トレーサーは、垂下板と鉛直板の間の遊水室内に投入している。

最も短周期の条件の実験結果は図(a)である。護岸前面で鉛直循環流が発生しておらず、遊水部に投入されたトレーサーは、垂下板下側の開口部から漏れ出るような流況となる。この条件で反射率は $Cr=0.7$ であり、来襲波のエネルギーは垂下板前面で反射され、遊水室内にはほとんど波動運動は伝達されていない。

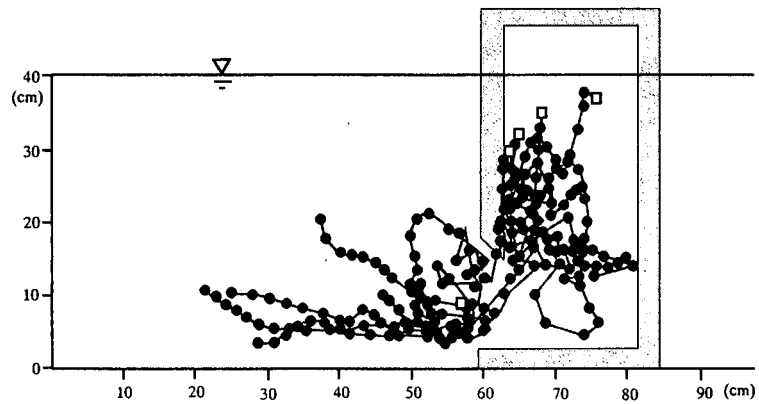
図(b)は反射率が $Cr=0.5-6$ の条件である。垂下板の下端部で直径10cm程度の循環流が形成されている。また、海底付近では沖向きの流れが存在する。これは遊水室内で上下する流体運動が、垂下板下側の開口部から沖向きに吐き出されているものと考えられる。

図(c)は遊水室内の波浪共振点の波条件での実験結果である。寄せ波時に遊水室内にできる反時計回りの剥離渦とピストンモードの波浪共振によって遊水室内のトレーサーは回転しながら上下運動する。

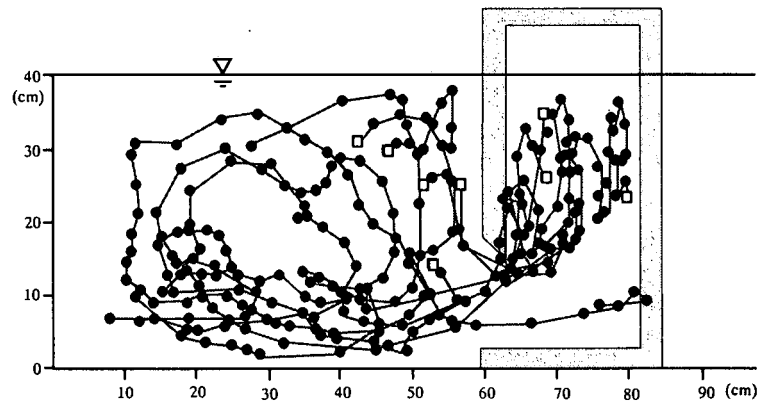
垂下板前面の流れは、次に示す経過をたどる。垂下板前面の水塊が寄せ波時に剥離渦の形成と同



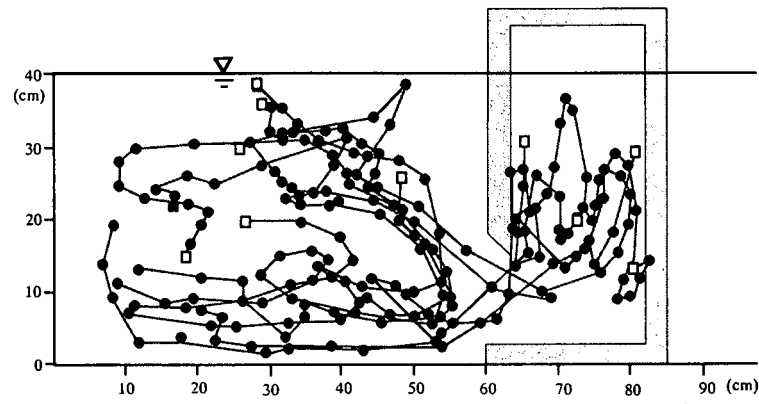
(a)  $T=0.96s$



(b)  $T=1.20s$



(c)  $T=1.45s$



(d)  $T=1.95s$

図-4 垂下板式低反射護岸前面の流況

時に遊水室内に取り込まれる。引き波時には、遊水室内から水塊が垂下板下側の開口部より沖方向に吐き出される。これらの行程が半周期ごとに繰り返されることで、垂下板前面では時計回りの大きな鉛直循環流が形成される。この循環流の駆動力は遊水室内のピストンモードの上下運動であり、循環流の流量もそれによって決まると考えられる。この循環流の大きさは垂下板前面から約50cm程度であり、入射波波長の約1/3程度である。

図(d)は遊水室内の波浪共振点よりも長周期波側の波条件での実験結果である。循環流は上で示した同様の過程により発生する。循環流の大きさは長周期

の波条件になるに従って沖方向に広がり、図(c)の条件と同様に入射波波長の約1/3程度の大きさである。

## (2) 垂下板式低反射護岸前面の平均流場の特性

図-5はトレーサー実験と同じ波条件での平均流場を平均流の流速ベクトルで示している。

図(a)は最も短周期波の条件の実験結果を示す。所々で変な流速が出ているが、組織的な流れは形成されていない。

図(b)は波浪共振点より短周期波の条件での実験結果を示す。トレーサー実験で見られた海底付近における沖向きの流れが計測されている。補償流として水面付近では岸向きの流れとなっている。垂下板下側の開口部は水深の約1/3であるため、開口部から流出する海底付近の沖向き流れの方が流速は大きい。流速ベクトルの方向に着目すると流速が小さいながらも時計回りの循環流が形成されている。

図(c)は遊水室内の波浪共振条件での実験結果を示す。垂下板前面に明確な時計回りの鉛直循環流が形成されていることがわかる。循環流の中心は垂下板の下端部の位置で、やはり海底付近の沖向き流れの流速の方が大きい。

図(d)は最も長周期の条件での実験結果を示す。図(c)の条件と同様に垂下板前面に明確な時計回りの鉛直循環流が形成されている。これは遊水室内の波浪共振点周辺とそれよりも長周期の波条件では、垂下板を波が通り抜け背後の鉛直板が反射源となるため、遊水室内のピストンモードの上下振動が大きく、循環流の駆動力が大きくなり、垂下板前面に鉛直循環流が形成されると考えられる。

## (3) 垂下板式低反射護岸前面の平均流場の実験結果と計算結果の比較

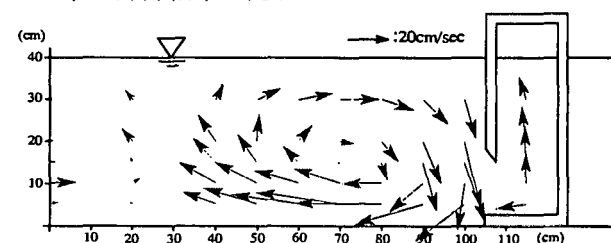


図-6 垂下板式低反射護岸前面の平均流場の実験結果 ( $T=1.96s$ )

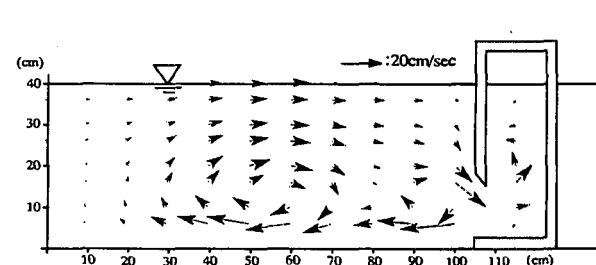
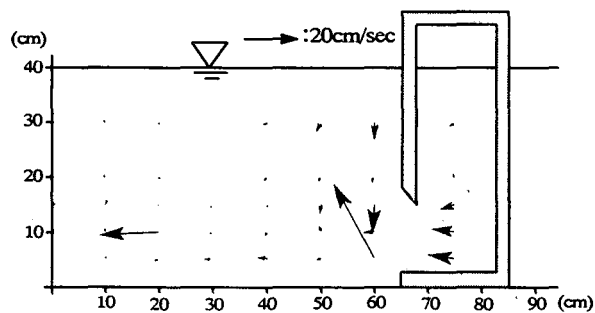
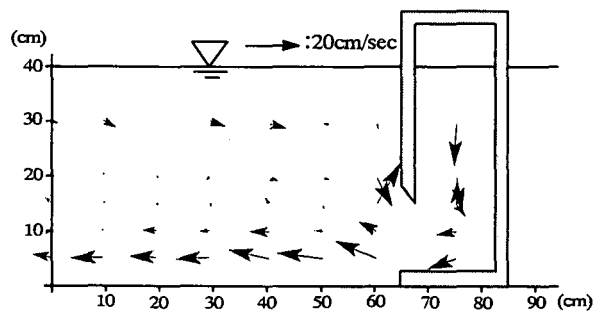


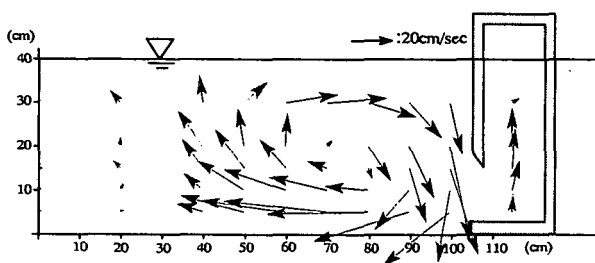
図-7 垂下板式低反射護岸前面の平均流場の計算結果 ( $T=1.96s$ )



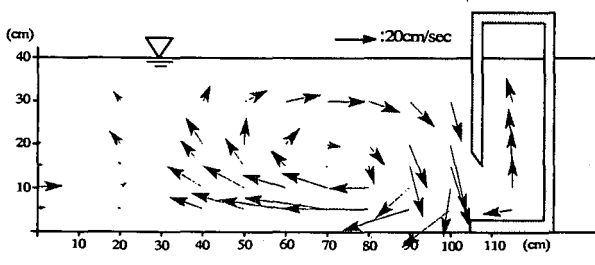
(a)  $T=0.96s$



(b)  $T=1.20s$



(c)  $T=1.45s$



(d)  $T=1.95s$

図-5 垂下板式低反射護岸前面の平均流場

図-6, 7は $T=1.95s$ の場合における垂下板式低反射護岸前面の平均流場の実験結果と計算結果の比較を示す。実験結果の方が、垂下板前面で生じる時計回りの鉛直循環流の中心位置が高く、循環流の流速が大きくなっている。これは実験結果の方が循環流の循環量が大きく、循環量の大きさは遊水室内の波浪共振と関係しているため、計算結果が遊水室内の波浪共振現象を過小評価しているものと考えられる。しかしながら、垂下板前面に時計回りの鉛直循環流が形成されており、定性的には実験結果を良く再現しているものと考えた。したがって、計算結果を用いて流速場の時間変化について考察を行った。

#### (4) 垂下板式低反射護岸前面の流速場の特性

図-8~13は $T=1.95s$ の場合における垂下板式低反射護岸前面の流速場の時間変化を示す。図-8は引き波時( $t=14.8s$ )の位相での流速場であり、図-9は引き波時最大( $t=15.1s$ )、図-10は転流時( $t=15.7s$ )の位相での流速場である。引き波時の3枚の図面を見ると、 $x=50-70cm$ の位置において時計回りの剥離渦が存在していることがわかる。渦の流速と引き波時の流速が重なり合って、海底面付近では水平流速流れが強まり、海底から15-20cmの位置での水平流速は弱められている。転流時の図-10を見ると剥離渦の存在が明らかである。

次に図-11~13は寄せ波時( $t=16.0s$ )、寄せ波時最大( $t=16.3s$ )、転流時( $t=16.6s$ )の位相での流速場をそれぞれ示す。寄せ波時においても $x=50-70cm$ の位置には引き波時に形成された剥離渦が残った状態になっている。引き波時には寄せ波時と反対で、海底付近の水平流速は弱められ、海底から15-20cmの位置での水平流速は強められる。以上の結果として、垂下板前面には時計回りの鉛直循環流が形成される。転流時の計算結果である図-10, 13より引き波時に形成される剥離渦の中心や渦径は図-7の平均

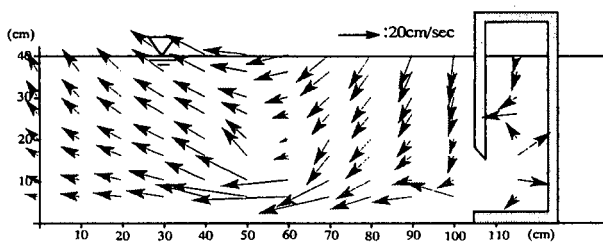


図-8 垂下板式低反射護岸前面の流速場の計算結果( $t=14.8s$ :引き波時)

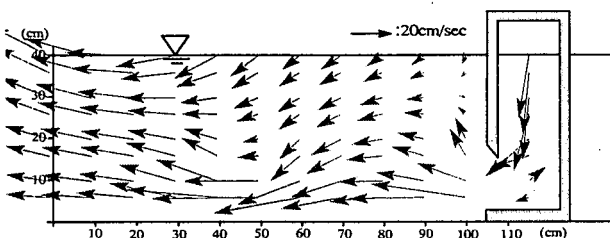


図-9 垂下板式低反射護岸前面の流速場の計算結果( $t=15.1s$ :引き波時最大)

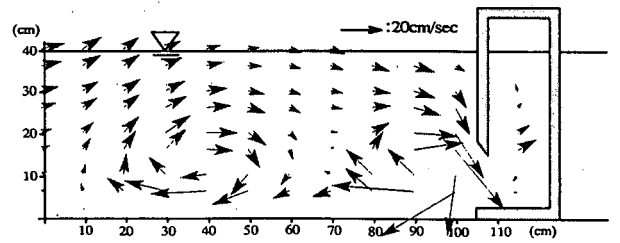


図-10 垂下板式低反射護岸前面の流速場の計算結果( $t=15.7s$ :転流時)

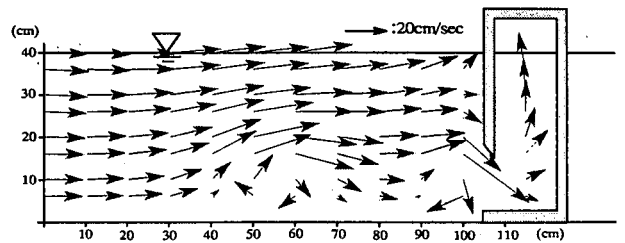


図-11 垂下板式低反射護岸前面の流速場の計算結果( $t=16.0s$ :寄せ波時)

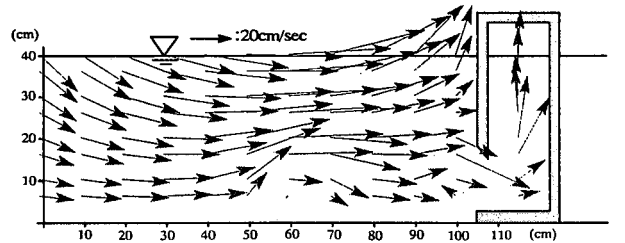


図-12 垂下板式低反射護岸前面の流速場の計算結果( $t=16.3s$ :寄せ波時最大)

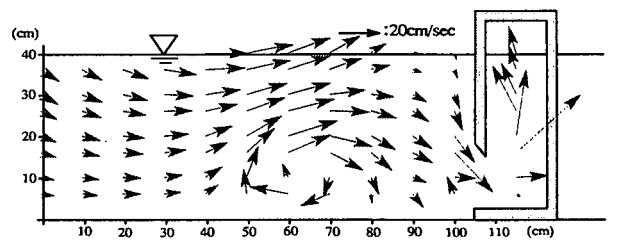


図-13 垂下板式低反射護岸前面の流速場の計算結果( $t=16.6s$ :転流時)

流場の渦と似ていることから、剥離渦の存在が鉛直循環流を引き起こしているものと考えられる。

#### 4. 結論

①トレーサー実験及び流速実験結果から垂下板式低反射護岸前面の平均的な水の流れは、垂下板前面の水面近くの水が遊水室内に取り込まれ、遊水室内の水塊が垂下板下側の開口部から海底付近に冲向きに吐き出されている様子が分かる。この水の流れが循環流の発生源と考えられる。この鉛直循環流は、遊水室幅の約8倍以上の波

長の波条件に対して時計回りの循環流を発生し、長周期の波条件になるに従って流速が大きくなり、その影響範囲も広い範囲に及ぶ。一方、短周期の条件では垂下板前面で波が反射するため、遊水室内の水面変動はほとんどなくそのため鉛直循環流が発生しない。

②平均流速場の実験結果より、垂下板前面の循環流が閉じた形になっており、その沖側に反時計回りの循環流は明確には生じていない。鉛直循環流の影響範囲を垂下板前面の循環流の範囲と定義すると、垂下板前面からほぼ波長の1/4の範囲となる。

③2次元非圧縮性流体のNavier-Stokes方程式と連続の式を基礎方程式とし、自由表面解析モデルにVOF法を用いた平均流速場の計算結果と実験結果の比較すると、計算結果が循環流の大きさを過小評価する傾向を示すが、時計回りの循環流は再現できている。

④垂下板端部で形成される剥離渦は長周期の条件になる程大きく、垂下板前面に形成され

る剥離渦は時計回りで海底付近の冲向きの循環流と同じ方向を示し、循環流の流速を助長している。さらにその剥離渦が冲向き流れに流されるため、循環流も沖方向にその影響範囲を広げる。一方、短周期の波条件では剥離渦が小さいため、垂下板下側の開口部からの冲向き流れしか生じないことがわかった。

#### 参考文献

- 1) 小田一紀, 重松孝昌, 池田憲造, 松永英郎, 清水治生, 藤田 孝: 鉛直循環流誘起型護岸前面における鉛直循環流の発生機構と構造特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.1296-1300, 2001.
- 2) 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.
- 3) 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会: 数値波動水路 (CADMAS-SURF) の研究開発, 沿岸開発技術研究センター, 296p., 2001.