

1 正 会 員 (株)荒谷建設コンサルタント  
2 正 会 員 工博 愛媛大学大学院 理工学研究科

(図-1および表-1)は、著者らの中の一人(中村ら, 2002)による垂下版式ケーソンの効率的な断面設定法に基づき, 効率的な遊水室幅 $B$ , 垂下版吃水深 $d$ , 没水平版水深 $D$ を選定した。ここでの模型堤体の縮尺は, いずれも1/5程度とした。

## (2) 計測方法

### a) 波変形の計測

波変形の計測には, 5台の容量式波高計を用い, 図-2に示すように設置した。このうち, 入射波の測定用に2台(造波機前面と隔壁により2分した入射波検定用水路), 入・反射波の分離推定用に2台, 遊水室内のピストンモードの出現状況を検討するために遊水室内に1台の波高計を設置した。なお, 反射波の推定には, 入・反射波の分離推定法(合田ら, 1976)を用いた。

### b) 鉛直通水路における流速の計測

鉛直通水路における流速の計測は, 図-1に示す位置に電磁流速計を設置し, 鉛直流速の時間波形より10波程度を抽出し平均流速を算出した。

### c) 堤体まわりの流速の計測

堤体まわりの流速の計測は, 図-3に示すように堤体沖側(水深方向4箇所×横断方向17箇所)にドップラー式超音波流速計を設置し, 水平及び鉛直流速の時間波形より10波程度を抽出し平均流速を算出した。さらに, 堤体まわりの流況をビデオ撮影により可視化するとともに, PIV法により堤体まわりの循環流の発生状況やパターンについても解析した。

### d) 実験条件

実験で用いた水深 $h$ は,  $h=64\text{cm}$ で一定とした。入射波は, 入射波高 $H=6\text{cm}$ (現地量で $H=30\text{cm}$ ), 周期 $T=0.9\sim 2.3\text{s}$ (現地量で $T=2.0\sim 5.1\text{s}$ )の範囲内で7種類の規則波を用いた。

## 3. 数値計算の方法

### (1) 減衰波理論(DWM)

反射波の算定には, 線形ポテンシャル波動理論に基づく減衰波理論(中村ら, 1997)を用いた。理論算定では, 等価線形抵抗係数 $fc$ が必要となるが, 実験結果との整合性や従来の成果(佐伯ら, 2007)を参照して $fc=0.20$ を用いた。

### (2) VOF法

波浪制御効果及び鉛直混合効果の把握を目的として, VOF法(沿岸開発技術センター, 2001)を用いた数値シミュレーションを実施した。計算に用いた水路を図-4に, 計算条件を表-2に示す。計算は, 静水状態から20s間造波し, 疑似定常状態を再現した。

## 4. 結果および考察

### (1) 波浪制御効果

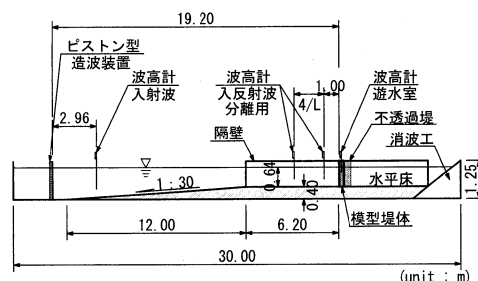


図-2 水理模型実験に用いた水路の概要

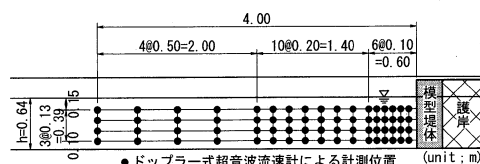


図-3 超音波流速計による流速の計測点

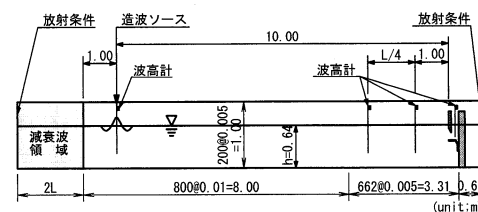


図-4 計算に用いた水路の概要

表-2 VOF法の計算条件

|            |                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 計算領域       | 長さ: $x=12.00+2L(\text{m})$<br>高さ: $z=1.00(\text{m})$                                                                                                                                                                                           |
| 格子間隔       | $x < 2L+8.00(\text{m})$ $\Delta x=1.0\text{cm}$<br>$2L+8.00(\text{m}) \leq x \leq 2L+11.31(\text{m})$ $\Delta x=0.5\text{cm}$<br>$x > 2L+11.31(\text{m})$ $\Delta x=1.0\text{cm}$<br>$0.00 \leq z \leq 1.00(\text{m})$ $\Delta z=0.5\text{cm}$ |
| 入射波条件(規則波) | $H=6(\text{cm})$<br>$T=0.90, 1.10, 1.35, 1.55, 1.70, 2.00, 2.30(\text{s})$                                                                                                                                                                     |
| 水深         | $0.64(\text{m})$                                                                                                                                                                                                                               |
| 造波ソース      | $x=2L+1.0(\text{m})$                                                                                                                                                                                                                           |
| 境界条件       | sommerfeldの放射条件(数値水路両端)<br>エネルギー減衰帯(数値水路左端より $2L$ )                                                                                                                                                                                            |
| 構造体設置位置    | 造波ソースより $10.00(\text{m})$                                                                                                                                                                                                                      |
| 移流項        | 中央差分と風上差分の割合 $\rightarrow 8:2$                                                                                                                                                                                                                 |
| VOF関数F     | フリー                                                                                                                                                                                                                                            |
| その他境界      | スリップ                                                                                                                                                                                                                                           |
| 気泡上昇速度     | $0.2(\text{m/s})$                                                                                                                                                                                                                              |
| 水滴落下速度     | フリー                                                                                                                                                                                                                                            |
| 造波時間       | 静止状態から $20(\text{sec})$                                                                                                                                                                                                                        |
| 時間差分間隔     | CFL条件および粘性項の安定条件から決まる<br>時間刻み幅に $0.2$ を乗じた時間                                                                                                                                                                                                   |
| サンプリング間隔   | $T/100$                                                                                                                                                                                                                                        |

図-5は, 各模型堤体による反射率 $Cr$ , 遊水室内波高増幅率 $Hc/H(Hc$ : 遊水室内波高)の周期による変化を示す。この際, 周期を表すパラメータとして,  $Lc/(Bc \cdot d)^{1/2}$  ( $Lc$ : 入射波周期 $T$ に対する遊水室内水深 $D$ における仮想的な波長,  $Bc$ : 遊水室幅,  $d$ : 垂下版吃水深)を用い,

$Cr$ については、減衰波理論及びVOF法に基づく算定結果と実験結果、 $H_c/H$ についてはVOF法による算定結果と実験結果を併せ示す。

TYPE 1~3の模型堤体の反射率 $Cr$ に着目すると、現地波周期 $T=3.0\sim 3.5$ s程度( $L_c/(Bc \cdot d)^{1/2}=9\sim 12$ 程度)で $Cr<0.5$ であるなど反射波の低減効果が確認できる。実験結果と算定結果の対応は、 $L_c/(Bc \cdot d)^{1/2}=10\sim 11$ 程度で極小値を示し、長周期側に移行するに従いやや反射率 $Cr$ が増大するなど良好であるが、短周期側で減衰波理論はやや反射率を過小評価する傾向にある。これは、等価線形抵抗係数 $fc$ を過大評価していることが原因と考えられる。

遊水室内の波高増幅率 $H_c/H$ に着目すると、反射率 $Cr$ が顕著に低減される周期付近から長周期側の広い範囲において $H_c/H>1$ となり、遊水室内のピストンモード波浪共振は、没水平版の背面側に開口部を設けてもやはり発生することが確認できる。また、実験結果とVOF法による算定結果の対応は、概ね良好である。

## (2) 効率的な構造断面の設定法

中村ら(2002)は、垂下版式ケーソンを対象に、ケーソン遊水室の水深に対応する波長 $L_c$ に着目し、周期に関する無次元パラメータ $L_c/(Bc \cdot d)^{1/2}$ を用いて、反射率 $Cr$ が概ね一律の曲線で近似できることを明らかにしている。

図-6は、反射率 $Cr$ に対して各堤体における実験結果と算定結果を再整理したものである。この図より、実験結果及び算定結果とも、 $L_c/(Bc \cdot d)^{1/2}=10\sim 11$ 近傍で反射率 $Cr$ の極小値が出現し、概ね一律の曲線で近似されることが確認できる。このように低反射式鉛直混合促進型護岸に対しても、周期 $T$ に関するパラメータとして、遊水室内水深 $D$ に対応する仮想的な波長 $L_c$ を導入することにより、効率的に構造諸元の設定が行えることが再確認できる。

## (3) 鉛直通路における平均流の特性

図-7は、鉛直通路内で電磁流速計により計測された流速の時間波形の一例(現地量で $T=3.0$ s,  $H=30$ cm)を示す。図中には、縦軸に鉛直通路内における鉛直流速 $v$ (cm/s)、横軸は造波開始からの経過時間 $t$ (s)を示しており、鉛直上向き方向を正の流速としてある。

鉛直流速に及ぼす垂下版の形状効果に着目すると、右下がりくさび形垂下版形状(TYPE 1)では、鉛直下向きの平均流速の発生が確認できる。一方、右上がりくさび形垂下版形状(TYPE 3)では、多少ではあるが、鉛直上向きの平均流速の発生が見られ、垂下版前後面に作用する流体抵抗力の違いを利用することにより、鉛直通路内に一方向平均流の生成が可能になることが分かる。

図-8は、各模型堤体による鉛直通路における平均流速の特性を示したものである。これらの図は、縦軸を無次元平均流速 $q^*$ ( $q^*=\bar{v}/\sqrt{gH}$ 、 $\bar{v}$ :鉛直通路における

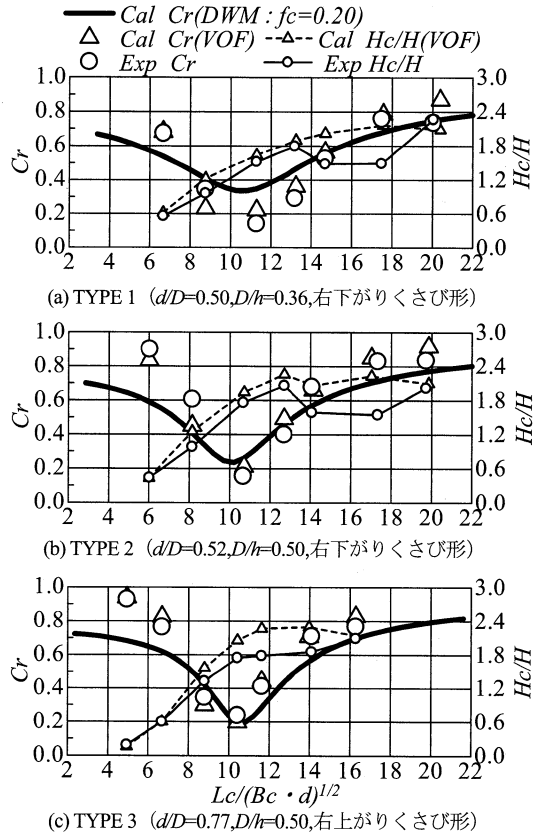


図-5 反射率 $Cr$ と波高増幅率 $H_c/H$

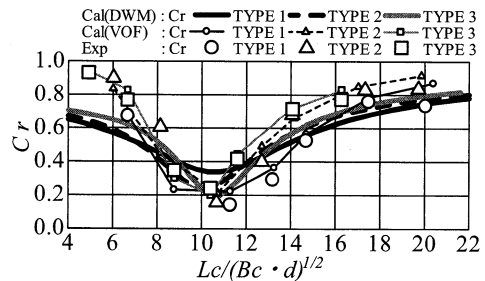


図-6 反射率 $Cr$ の再整理

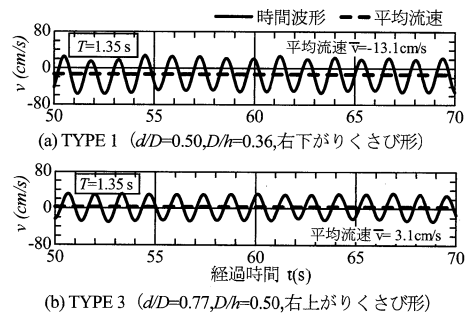


図-7 鉛直通路における鉛直流速の時間波形の一例

鉛直平均流速,  $g$ : 重力加速度,  $H$ : 入射波高), 横軸を入射波周期  $T$  に関する無次元パラメータ  $Lc/(Bc \cdot d)^{1/2}$  で整理してある。

まず,  $q^*$  に及ぼす垂下版形状の違いに着目する。右下がりくさび形状 (TYPE 1, 2) では, 入射波周期に関わらず安定的に鉛直下向きの平均流の生成が確認される。一方, 右上がりくさび形状 (TYPE 3) では, 目標周期近傍で鉛直上向きの平均流が発生するものの, 長周期側に移行するに伴い平均流の生成方向が不安定となる。

実験結果と VOF 法による計算結果の対応は, 平均流速の方向及びその絶対値を含めて良好である。

#### (4) 鉛直循環流の発生機構

各堤体まわりの鉛直循環流の発生機構を検討するため, 代表的な入射波条件において, PIV 法により平均流速ベクトルを算出した結果の一例を図-9に示す。画像解析では, 撮影されたビデオ画像を1画像1/30秒間隔で取得し, 10波を対象に平均流速ベクトルを算出した。

図-9(a)に示す右下がりくさび形状の構造体では, 鉛直通水路よりの下向きの一方向平均流により, 没水平版下面に時計回りの循環流が形成され, その外縁端では底層水が上向き流れにより輸送される。そして, この循環流の影響により下層では岸向きの流れ, 上層では沖向きの流れとなる。一方, 図-9(b)に示す右上がりくさび形状の構造体では, 鉛直通水路に向かう流れにより没水平版下面における明確な循環流は形成されない。鉛直通水路より遊水室内に輸送された底層水は, 遊水室内で混合され垂下版形状に沿った渦流れにより底層に輸送される。

#### (5) 鉛直循環流の特性

図-10は, 各模型堤体における鉛直循環流の特性を水理模型実験により検討したものである。図中には, 縦軸に無次元水深  $z/h$  を, 横軸には入射波波長  $L$  により無次元化した  $x/L$  を用い, 各計測点 (図-3) における水平及び鉛直平均流速 ( $\bar{U}$ ,  $\bar{V}$ ) を進行波による流速振幅に比例する量 ( $\pi H/T$ ) で除した無次元流速 ( $U^* = \bar{U}/(\pi H/T)$ ,  $V^* = \bar{V}/(\pi H/T)$ ) を用いて, 平均流速強度  $\bar{w}^* = (U^{*2} + V^{*2})^{1/2}$  を算出した。

直立護岸のときの空間的な平均流速強度は, 非常に小さいのに対し, 低反射式鉛直混合促進型護岸では垂下版形状に関わらず,  $x/L > -0.5$  の範囲で強い強度を示し, 混合効果が認められる。

右下がりくさび形状では,  $x/L > -0.5$  の範囲で水底から水表面におよぶ反時計回りの循環流が形成される。一方, 右上がりくさび形状では,  $x/L > -0.5$  の範囲にて没水平版設置水深を境界とする2層構造の循環流が形成され, 下層では垂下版下端から発生する渦流れにより, 反時計回りの循環流, 上層では時計回りの循環流が形成される。

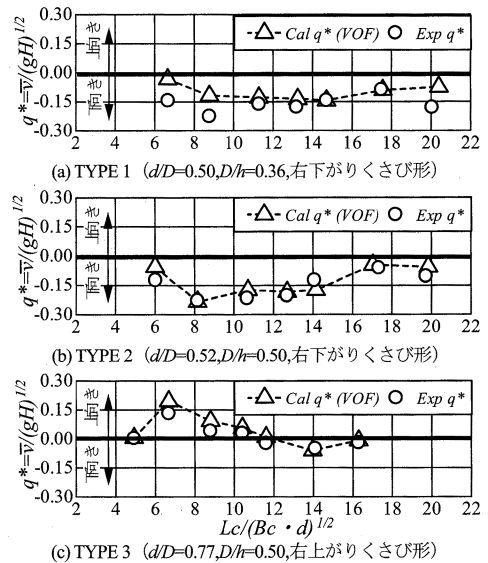


図-8 鉛直通水路における無次元鉛直流速  $q^*$

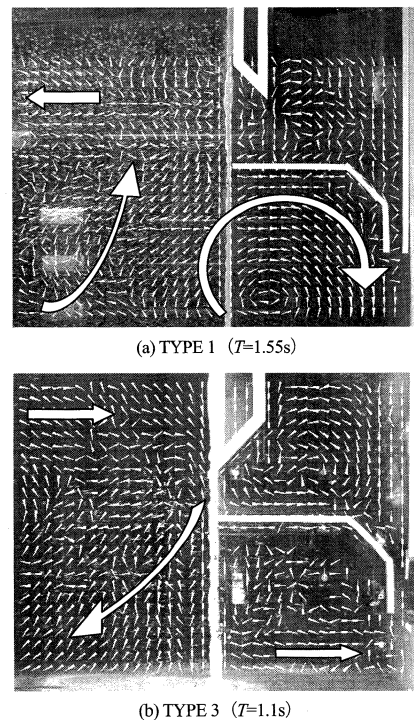
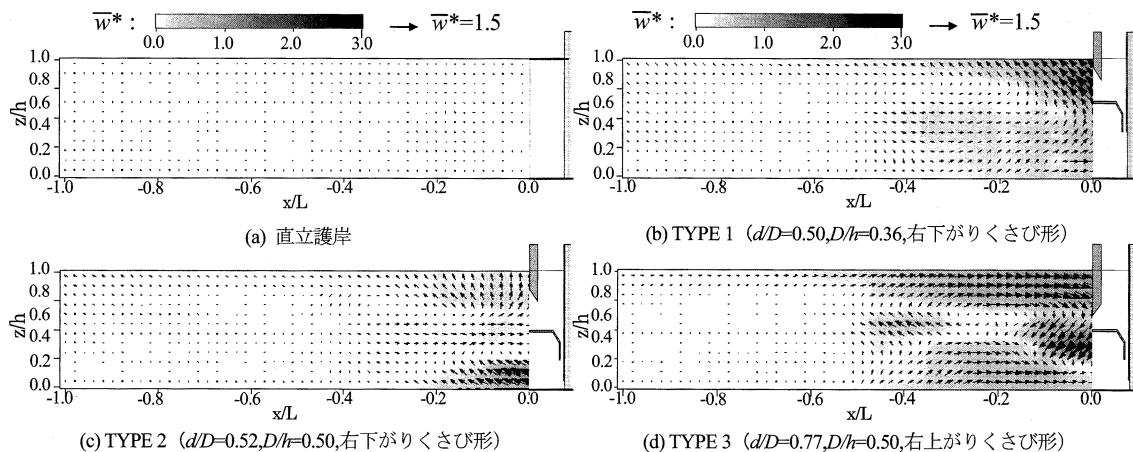
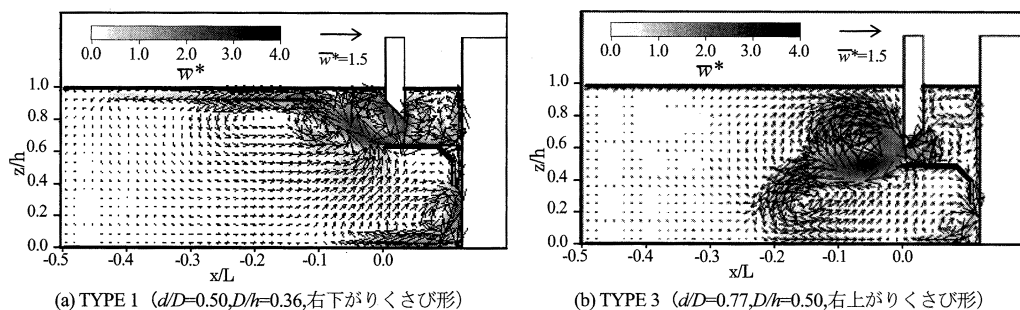


図-9 堤体まわりの平均流のパターン

図-11は, TYPE 1, 3における堤体まわりの平均流速強度の算定結果を示す。平均流速強度は, 特に垂下版近傍において, 実験と計算における空間分解能の違いによる差異はみられるものの, 概ね循環流の再現度は良好であり, 算定結果からも垂下版形状により生じられる鉛直循環流の特性が明らかとなった。

図-10 堤体まわりの平均流速強度 $\bar{w}^*$ の実験結果図-11 堤体まわりの平均流速強度 $\bar{w}^*$ の計算結果(VOF法)

このことから、右下がりくさび形状では、酸素の豊富な表層水が遊水室を介して底層へ輸送されることによる直接的な酸素供給が期待できる。一方右上がりくさび形状では、垂下版下端からの強い渦流れによる密度成層の破壊による貧酸素構造の改善が示唆される。今後は、より実際の密度成層が存在する場合を対象にして、さらに検討を進めていきたい。

## 5. 結語

(1) 本研究で提案した低反射式鉛直混合促進型護岸の波浪制御効果は、 $L_c/(Bc \cdot d)^{1/2} = 9 \sim 12$ 程度で  $Cr < 0.5$  となるなど反射波の低減効果が確認できる。

(2) 右下がりくさび形垂下版形状では、入射波周期にかかわらず、安定的に鉛直下向きの平均流速の発生がみられる。一方、右上がりくさび形形状では、目標周期帯において鉛直上向きの平均流速の発生が見られる。

(3) 右下がりくさび形形状では、没水平版下面に時計回りの循環流が形成され、その外縁端では底層水が上向きに輸送される。一方、右上がりくさび形形状の構造物では、表層水が垂下版形状に沿った渦流れにより底層に

輸送される。また、垂下版形状に関わらず、堤体前面より  $x/L > -0.5$  の範囲で強い混合効果が見られる。

本研究は、(独法) 科学技術振興機構の地域イノベーション創出総合支援事業「サイズ発掘試験」による成果の一部であることを付記する。

## 参考文献

- 沿岸開発技術センター (2001) : 数値波動水路の研究・開発, 沿岸開発技術ライブラリー, No.12.
- 遠藤徹・重松孝昌 (2007) : 密度成層場における VCF 堤体誘起流の挙動に関する実験, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 1236-1240.
- 合田良美・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.278, pp. 3-24.
- 佐伯信哉・中村孝幸 (2007) : 遊水室内の波浪共振を利用した鉛直混合促進型防波堤の開発, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 1241-1245.
- 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・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.