

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

Development of a Vertical Mixing Enhancement Breakwater using Piston Mode Wave Resonance in the Water Chamber

佐伯信哉¹・中村孝幸²

Shinya SAEKI, Takayuki NAKAMURA

In this study, an offshore facility that aims sea water mixing and diffusion along the vertical direction in a semi-closed bay is intended for development through the use of wave energy as a driving force. A water chamber type dike comprised of a row of vertical walls of different drafts and a submerged horizontal plate was proposed as a typical structure in order to be able to utilize piston mode wave resonances and resultant vortex generations for the effective vertical mixing. Especially, a wedge section of the front wall was adopted to induce the mean current along the vertical direction of the structure as a resultant effect of asymmetrically generated vortex flows at the mouth of the water chamber. Additional function of the structure as a breakwater was also examined.

1. はじめに

閉鎖性内湾では、夏季には水温成層が発達し、鉛直混合が阻害されることにより底層が貧酸素化しやすい。貧酸素化は、底泥の栄養塩や硫化物の溶出を促進し、時として青潮や爆発的な植物プランクトンの増殖（赤潮）を引き起こす要因と考えられている。そのため、海水交換型防波堤や透過堤により港内外水の交換による港内水質の改善を目的とした施設の建設が行われている。また、底層の水質改善を目的とした電気的な動力による曝気装置やマイクロバブル発生装置による貧酸素化対策の実証実験（山本ら、2006）、重複波による水面上昇を利用した鉛直循環流誘起型護岸（小田ら、2001）なども提案されるに到っている。

本研究では、やはりこのような内湾域の水質改善を目的として、鉛直混合を促進する海洋施設の開発を目指すもので、原動力として自然エネルギーである波エネルギーを活用する。すでに著者らの一人は（中村ら、2003）、水面付近のみを遮断する鉛直版（垂下版）と没水平板を組み合わせた遊水室型堤体を対象にして、遊水室内のピストンモード波浪共振およびそれに伴う強い渦流れの発生により有意な平均流の生成が可能となることなどを明らかにしている。ここでは、やはり同様の原理を利用して、海域の鉛直混合を促進する施設の開発を進める。具体的には、遊水室前面の鉛直版をくさび形構造として、非対称な交番渦を発生させ、結果的に遊水室内に設けた鉛直方向の通路内の一方向平均流を引き起こすものである。この構造体では、強い渦流れの生成を伴うことから、波エネルギーの消散による消波効果も期待でき、上

記した通路での平均流の特性と合わせて、消波効果についても明らかにする。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

実験には、愛媛大学工学部の長さ 30 m × 幅 1 m × 高さ 1.25 m の 2 次元造波水槽を用いた。水路内には、図-1 に示すように 1 : 30 勾配の斜面が設置されており、それに滑らかに接続するように水平床が設けられている。水平床部では、水路幅をほぼ 2 分するように隔壁を設け、一方の水路では入射波が、もう一方の水路に模型堤体を設置して反射・透過波および流速の計測が同時に行えるようにした。水路の一端には、ピストン式造波機が設置されており、他端には下部透過型のヘチマロンと碎石斜面で構成される消波工が設置してあり、平均流の発生による堤体前後の水位差がなるべく生じないように水路構造にしてある。

(2) 模型堤体

堤体断面の設定に当たっては、閉鎖性内湾での常時波浪を想定して、周期 $T=3$ s 程度、波高 $H=10 \sim 50$ cm 程度の比較的穏やかな波条件を対象とした。そして、図-2 に示すように、鉛直下方に通路を持つ遊水室型堤体を原型として、鉛直方向への平均流を生成できる遊水室の構造を予備実験で検討した。このとき、遊水室の構造諸元は、著者らの従来の研究（中村ら、2005）による遊水室幅 B_c と垂下版の吃水深の設定法に基づき決定した。この結果の代表例は図-2(a) に示す TYPE1 の模型堤体であり、これを基本構造とした。なお、透過性構造としたのは、浮体式構造にも拡張できるようにと考慮したものである。

図-2 に示す各構造断面の諸元を表-1 に一括して示す。図-2(a) に示す模型堤体は、右下がりくさび形の垂下版

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

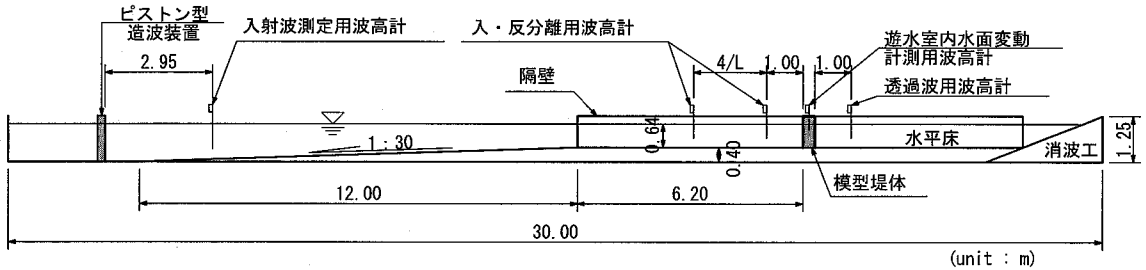


図-1 実験水路の概要

構造とすることにより、遊水室内への水塊流入を容易にするとともに、垂下版下端からの水塊流出を抑制することにより非対称な交番渦を発生させ、下向きの平均流を鉛直通水路に発生させることを目標とした。このタイプの堤体では、さらに、垂下版の吃水深 d の影響 (TYPE3, TYPE4) についても併せて検討した。一方、図-2(b)に示す堤体では、右上がりくさび形の垂下版構造を採用しており、TYPE1とは逆に、上向きの平均流を鉛直通水路に発生させることを目標とした。ここでの模型堤体の縮尺は、いずれも 1/5 程度とした。

(3) 計測方法

a) 波変形の計測

波変形の計測には、6台の容量式波高計を用い、図-1に示すように設置した。このうち、2台を入射波の測定 (造波機前面と入射波検定用水路)、2台を入・反射波の分離用、模型堤体の透過側に透過波測定用に1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) 流速の計測

鉛直通水路の流速の計測は、図-2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。堤体下部における平均的な流速の測定には、ドップラー式超音波流速計を図-2に示すように没水平板下側開口部に設置し、水平流速の時間波形より平均流速を算出した。

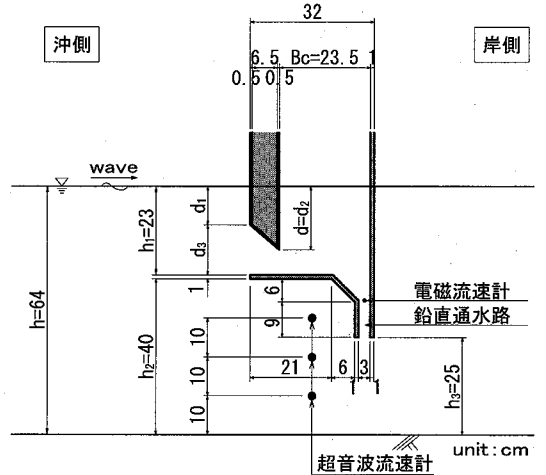
(4) 実験条件

実験で用いた水深は、水深 $h=64$ cm で一定とした。入射波は、入射波高 $H=2$ cm, 6 cm, 10 cm (現地量で $H=10$ cm, 30 cm, 50 cm) の3種類、周期 $T=0.9 \sim 2.3$ s (現地量で $T=2.0 \sim 5.1$ s) の範囲内で7種類の規則波を用いた。

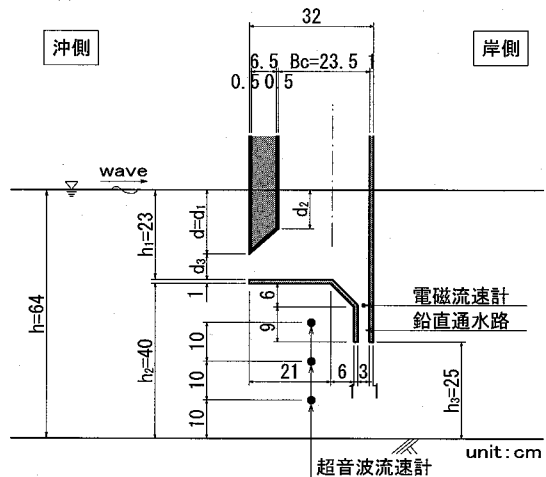
3. 結果および考察

(1) 波浪制御効果

図-3は、各模型堤体による反射率 Cr 、透過率 Ct 、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。図中では、周期を表すパラメータとして、 L/Bc (波長遊水室幅比) を用い、 Cr 、 Ct につい



(a) TYPE1, TYPE3, TYPE4 (右下がりくさび形)



(b) TYPE2 (右上がりくさび形)

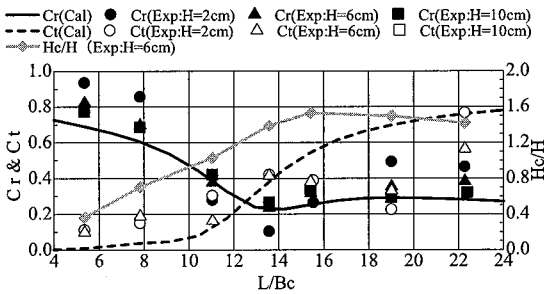
図-2 実験に用いた模型堤体の構造図 (縮尺 $S=1/5$)

表-1 模型堤体の構造諸元

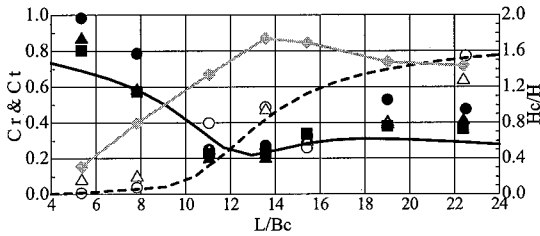
形状	d_1 (cm)	d_2 (cm)	d_3 (cm)	h_1 (cm)	h_2 (cm)	h_3 (cm)	d_1/h_1	d_2/h_1	h_1/h
TYPE1	10.0	16.5	13.0	23.0	40.0	25.0	0.43	0.72	0.36
TYPE2	16.5	10.0	6.5				0.72	0.43	
TYPE3	5.0	11.5	18.0				0.22	0.50	
TYPE4	13.2	19.7	9.8				0.57	0.86	

ては、減衰波理論に基づく算定結果（中村・井手，1997）についても併せ示してある。理論算定では、等価線形抵抗係数 f_c が必要となるが、実験結果との整合性を考慮して $f_c = 0.15$ を用いた。

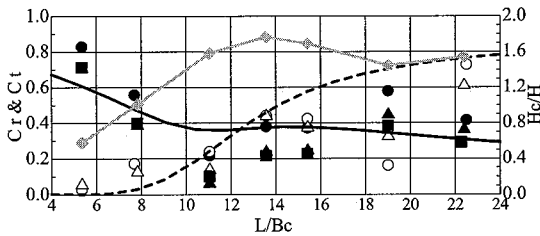
TYPE1～3の模型堤体の反射率 Cr に着目すると、実験結果と算定結果の対応は概ね良好であり、現地波周期 $T=3.0 \sim 3.5$ s 程度 ($L/Bc=11.0 \sim 13.5$ 程度) 近傍で極小値を呈し、長周期側に移行するに従いやや増大するものの、 $Cr < 0.4$ であるなど反射波の低減効果が確認できる。一方、TYPE4の模型堤体の反射率 Cr の実験結果は、対象波に対して $Cr > 0.4$ となるなど、反射波の低減効果が不十分である。このとき算定結果は、実



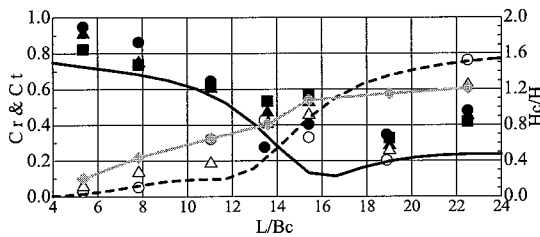
(a) TYPE1 (右下がりくさび形; $d/h_f=0.72$)



(b) TYPE2 (右上がりくさび形; $d/h_f=0.72$)



(c) TYPE3 (右下がりくさび形; $d/h_f=0.50$)



(d) TYPE4 (右下がりくさび形; $d/h_f=0.86$)

図-3 各模型堤体による波浪制御効果

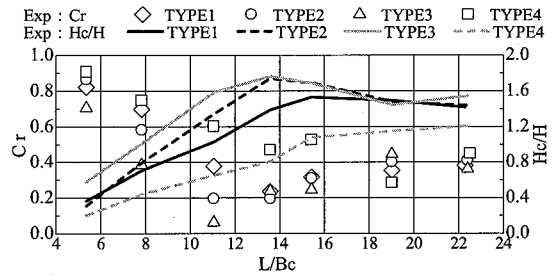


図-4 Cr と Hc/H の実験結果 ($H=6$ cm)

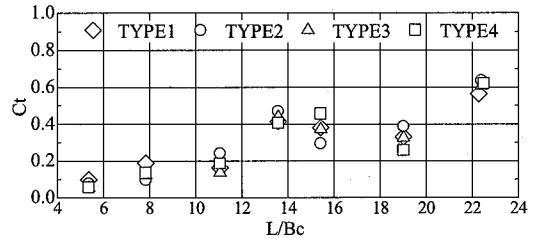


図-5 Ct の実験結果 ($H=6$ cm)

験結果を下回るなどの相違が見られるが、これは、遊水室内における波高増幅率を過大に見積もり、垂下版下端よりの渦流れによるエネルギーロスが過大評価することによるものと考えられる。

透過率 Ct に着目すると、実験結果と算定結果の対応は概ね良好であり、目標周期に対しては $Ct=0.2 \sim 0.4$ 程度である。

遊水室内の波高増幅率 Hc/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 $Hc/H > 1$ となり、遊水室内のビストンモード波浪共振は、没水平板に開口部を設けても発生することが確認できる。

図-4は、反射率 Cr および遊水室内波高増幅率 Hc/H を入射波高 $H=6$ cm に対して再整理したものである。いずれの構造形式に対しても、反射率 Cr は遊水室内の波高増幅率 Hc/H と密接に関係し、 Hc/H の増大に伴い Cr が低減されることが確認できる。これは、遊水室内の波高増大に伴い、垂下版下端から冲向きに発生する渦流れが増大することによるものと考えられる。

図-5は、透過率 Ct を入射波高 $H=6$ cm に対して再整理したものである。 Ct は、構造形式に関わらず同一周期に対しては、ほぼ同程度であることが確認でき、垂下版の構造よりも、没水平板の設置位置と構造物の設置水深の関係に依存しているものと考えている。

(2) 鉛直通水路内に発生する平均流の特性

図-6は、鉛直通水路内で電磁流速計により計測された流速時間波形の一例 ($T=1.35$ s, $H=6$ cm) を示す。

まず、鉛直流速に及ぼす垂下版のくさび形状の違いに着目する。右下がりくさび形垂下版 (TYPE1) では下

向き平均流速が発生し、右上がりくさび形(TYPE2)では上向き平均流速が発生していることが確認できる。このことから、垂下版くさび形状の設置方向により、鉛直通路内の平均流速の方向が変化することが認められる。

つぎに、右下がりくさび形状の垂下版(TYPE1, 3, 4)に固定したときの吃水深の影響に着目すると、垂下版吃水深が浅くなるに従い、流速振幅の絶対値が大きくなるがわかる。これは、図-3に示した遊水室内波高増幅率に起因するものと考えられる。しかしながら、平均流速に関して大差は見られない。

図-7は、各模型堤体による鉛直通路における平均流速 v を重力加速度 g と入射波高 H の積の平方根で除した無次元流速 q^* ($q^*=v/(gH)^{1/2}$) および遊水室内平均水位 WLc の L/Bc による変化で示す。

垂下版のくさび形状の違いによる無次元平均流速に着目すると、右下がりくさび形垂下版(TYPE1)では、概ねどの周期帯に対しても下向き平均流速が発生する。しかしながら、右上がりくさび形(TYPE2)では、短周期側では上向き平均流速が発生しているものの、長周期側に移行するに伴い、下向き平均流速に転じており特定方向への流速生成がなされない。

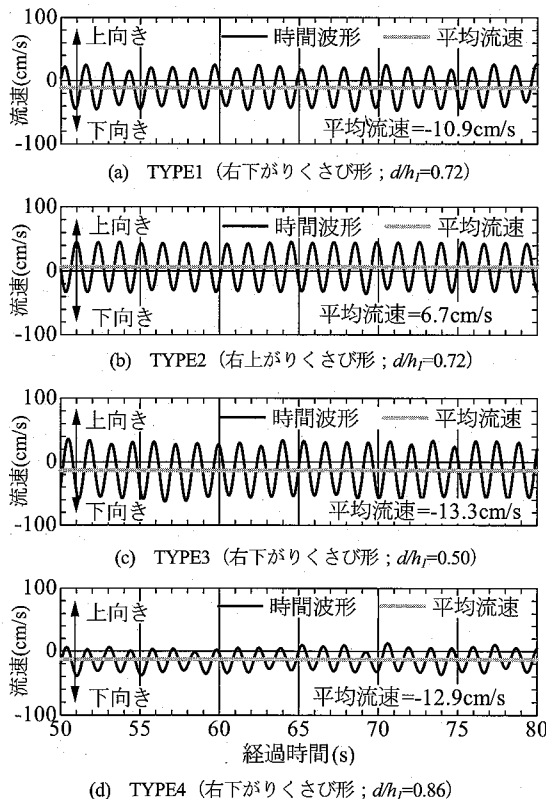


図-6 電磁流速計により計測された鉛直流速の時間波形の一例 ($T=1.35s$, $H=6cm$)

右下がりくさび形状の垂下版(TYPE1, 3, 4)に固定して、吃水深の影響に着目すると、垂下版吃水深に関係なく安定的に下向き平均流速が発生している。特に、垂下版吃水深を浅くしたTYPE3の場合では、短周期側より安定した下向き平均流速が生成される。垂下版吃水深を深くした場合(TYPE1, TYPE4)は、本実験の範囲内ではどの周期帯に対しても、遊水室内に反時計回りの一方向流の形成が確認された。そのため、遊水室内の水位下降に伴う下向き流速が一方向流れに添加され、下向き流速成分が小さくなることが要因であると考えられ

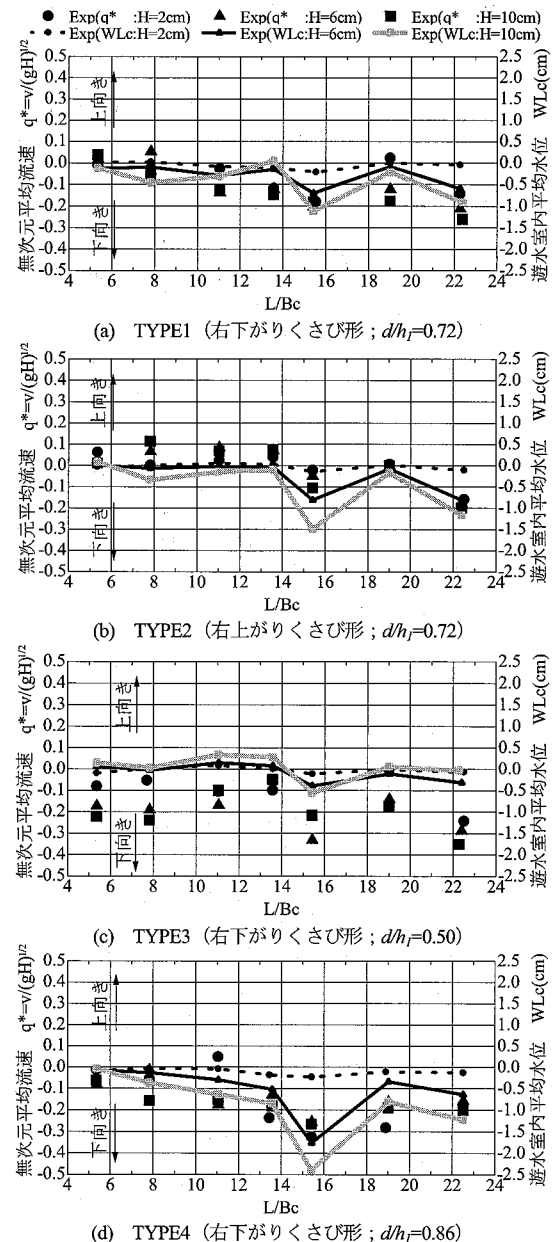


図-7 q^* と WLc の実験結果

る。一方、垂下版吃水を浅くした場合 (TYPE3) は、遊水室内に一方向流れは形成されない。そのため、水位下降時は垂下版下端から冲向き方向の渦流が形成されるだけであり、右下がり垂下版形状の効果も含め下向き流速は阻害されにくいことが要因と考えている。

図-3 および図-7 より、遊水室内の平均水位 WLC の下降量と波高増幅率 Hc/H が大きくなる条件下で下向き平均流速が大きくなり、鉛直混合が促進されることが示唆される。

(3) 堤体まわりの流況

鉛直方向平均流の発生機構を検討するために、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、没水平板下側開口部に設置したドップラー式超音波速計による流速データを解析した。図-8 は、右下がりくさび形垂下版における堤体まわりの流況を模式的に示したものである。著者らの既往の研究成果 (中村ら, 2003) に加え、垂下版を右下がりくさび形構造にすることにより、

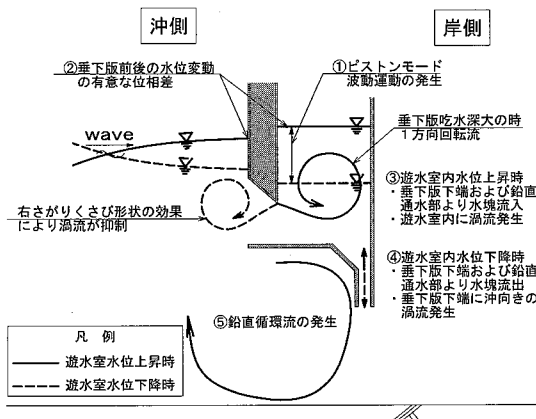


図-8 堤体まわりの流況の模式図 (TYPE1, 3, 4)

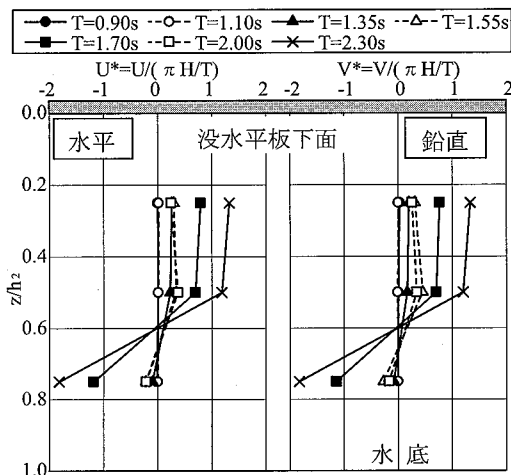


図-9 無次元流速の鉛直分布の一例 (TYPE1)

遊水室内への水塊流入を容易にすると共に、垂下版下端からの水塊流出を抑制することにより、非対称な交番渦が発生する。結果的に、鉛直通路に下向きの流速が発生し、没水平板下側開口部に時計回りの循環流が生じ、鉛直混合が促進されるものと推測される。

図-9 は、没水平板下側開口部における 1 周期当たりの無次元平均流速の鉛直分布の一例を示す。縦軸は、没水平板下面よりの水深 h_2 と没水平板下面からの距離 z で無次元化した z/h_2 をとり、横軸は 1 周期当たりの平均流速 (U : 水平, V : 鉛直) を入射波の諸元で無次元化し、波向き方向および鉛直上向きを正としてある。この図より、水底で冲向き、没水平板下面で岸向きの平均流が発生し、有意な鉛直循環流が形成されることが分かる。しかしながら、鉛直循環流の発生に伴う水塊の混合範囲については不明であり、今後に続く研究課題としたい。

4. 結 語

- (1) 本研究で提案した鉛直混合促進型防波堤の波浪変形特性は、前面垂下版の形状に関わらず概ね同一な透過特性を示す。また、没水平板に開口部を設けても遊水室内でのピストンモード波浪共振が発生し、渦流れによる有効な反射波の低減効果が期待できる。
- (2) 右下がりくさび形の垂下版型式の構造体では、作用波の条件にかかわらず鉛直下向きの平均流が安定的に発生する。一方、右上がりくさび形の垂下版構造の構造体は、目標周期帯では鉛直上向きの平均流が発生するものの、周期条件により鉛直平均流の向きが変化するなど、特定の方向への平均流の生成が見られない。本研究は、(独立) 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「シーズ発掘試験」による成果の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 小田一紀・重松孝昌・池田憲造・松永英郎・清水治生・藤田孝 (2001): 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.
- 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.
- 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・大村智宏・大井邦明 (2003): 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, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 806-810.
- 中村孝幸・小野塚孝・加藤孝輔・神野充輝 (2005): 垂下版式低反射工の遊水室内における波浪共振の特性と支配パラメータについて, 海洋開発論文集, 第 21 巻, pp. 535-540.
- 山本 潤・佐伯信哉・足立有平・田中 仁 (2006): 浦ノ内湾でのマイクロバブル発生装置の水質改善効果検証試験, 海洋開発論文集, 第 22 巻, pp. 643-648.