

波による渦流れを利用する 低反射式鉛直混合促進型護岸について

A LOW REFLECTIVE DIKE STRUCTURE WITH VERTICAL MIXING
FUNCTIONS BY THE USE OF WAVE INDUCED VORTEX FLOWS

佐伯信哉¹・中村孝幸²

Shinya SAEKI and Takayuki NAKAMURA

¹正会員 (株) 荒谷建設コンサルタント (〒790-0045 愛媛県松山市余戸中二丁目一番二号)

²正会員 工博 愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町三番)

In this study, a low reflective dike 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 low reflective dike was also examined.

Key Words : Wave dissipation, vertical mixing, semi-closed bay, piston mode wave resonance, water-chamber type dike structure

1. はじめに

東京湾や大阪湾などの閉鎖性内湾域では、沿岸背後地に大きな人口を集積する都市の形成により、生活排水の流入による富栄養化、沿岸開発に伴う干潟や藻場の消滅や直立護岸の建設による鉛直混合の阻害により、慢性的な水質汚濁の状態にある。これらの水域では、富栄養化による植物プランクトンの増殖に伴う酸素消費量の増大に対して、鉛直混合の阻害に伴う表層からの酸素供給量の低下により、底層は貧酸素化しやすい。貧酸素化は、底泥の栄養塩や硫化物の溶出を促進し、水生生物に多大なる影響をもたらす青潮や赤潮を引き起こす一因とも考えられている。そのため、底層の水質改善を目的とした電気的な動力による強制エアレーションやマイクロバブル発生装置による貧酸素化対策や、重複波による水面上昇を利用した鉛直混合型護岸¹⁾なども提案されるに到っている。

本研究は、このような内湾域の鉛直混合を促進する環境改善型護岸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。既に著者ら²⁾は、遊水室型透過式防波堤を対象として、遊水室前面の鉛直版をくさび形構造とすることにより、非対称な交番渦を発生させ、遊水室内

に設けた鉛直方向通水路内に一方向平均流が発生することを明らかにしている。ここでは、その原理を直立護岸に対して用いると共に、既設直立護岸を比較的容易に環境改善型護岸に改良できる構造体の開発を目指すものである。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、鉛直通水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

実験は、愛媛大学工学部の長さ30m×幅1m×高さ1.25mの2次元造波水槽を用いた。図-1に示すように、水路内には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てある。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を、もう一方の水路では模型堤体を設置して反射波および流速の計測を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る。

(2) 模型堤体

鉛直方向平均流を発生させる遊水室の構造は、著者らの従来の研究²⁾に基づき、没水平板に開口部を設ける構造を採用した。遊水室の構造諸元は、中村ら³⁾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、効果的な吃水深 d 、遊水室幅 B_c 、没水平板水深 D を選定した。想定した波条件は、閉鎖性内湾での常時波浪に相当する $T=3.0\text{s}$ 程度、波高 $H=10\sim 50\text{cm}$ 程度とした。図-2に示す各模型堤体の構造諸元を、表-1に一括して示す。

垂下版の形状は、著者ら²⁾によるくさび形構造を採用した。くさび形状の開口部は、出入する往復流において押波時と引波時における抵抗が異なるため、結果的にある特定の方向へ平均流を生成することが明らかにされている。図-2(a)に示す右下がりくさび形状は、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、鉛直通水路内に下向き平均流の生成を容易にし、図-2(b)に示す右上がりくさび形状は、鉛直通水路内に上向き平均流の生成を期待した。

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、図-1に示すように5台の容量式波高計を用いた。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、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⁴⁾を用いた。

b) 流速の計測

鉛直通水路における流速の計測は、図-2に示す鉛直通水路内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没水平板下側開口部に複数台設置し、水平および鉛直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 $h=64\text{cm}$ で一定とした。入射波の条件は、入射波高 $H=2, 6, 10\text{cm}$ （現地量で $H=10, 30, 50\text{cm}$ ）の3種類、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. 結果および考察

(1) 波浪制御効果

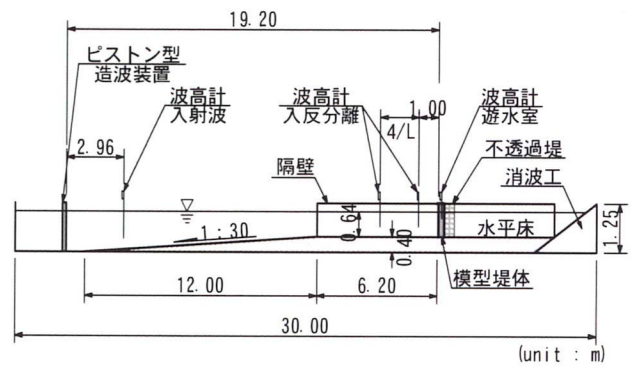
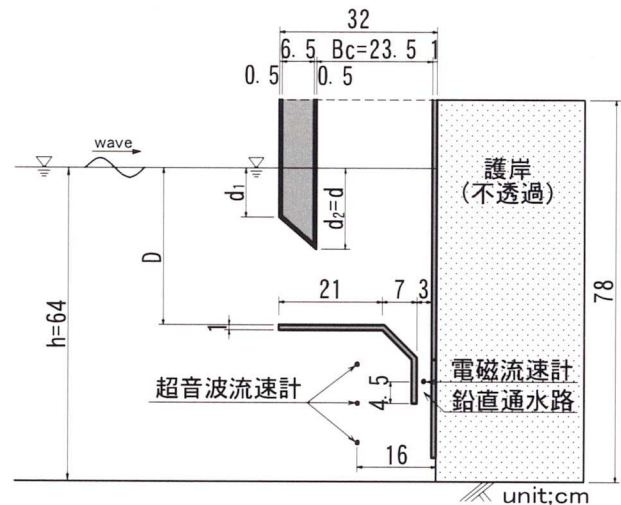
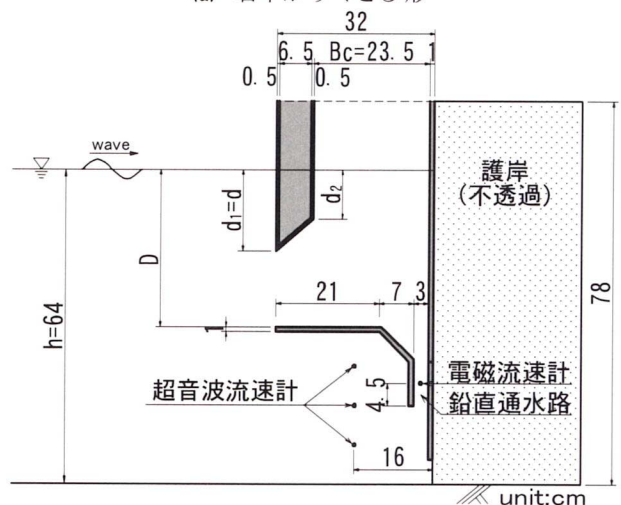


図-1 実験水槽および波高計配置図



(a) 右下がりくさび形



(b) 右上がりくさび形

図-2 模型堤体構造図

表-1 模型堤体の構造諸元

模型種別	垂下版形状	d_1 (cm)	d_2 (cm)	D (cm)	d/h	d/D	D/h
TYPE 1	右下がり ($d_1=d$)	5.0	11.5	23.0	0.18	0.50	0.36
TYPE 2		10.0	16.5	23.0	0.26	0.72	0.36
TYPE 3		13.2	19.7	23.0	0.31	0.86	0.36
TYPE 4		10.0	16.5	32.0	0.26	0.52	0.50
TYPE 5		13.2	19.7	40.0	0.31	0.49	0.63
TYPE 6	右上がり ($d_2=d$)	16.5	10.0	32.0	0.26	0.52	0.50
TYPE 7		24.5	18.0	32.0	0.38	0.77	0.50

a) 入射波周期 T による反射率 Cr の変動特性

図-3は、各模型堤体における反射率 Cr 、遊水室内波高増幅率 H_c/H (H_c ：遊水室内波高、 H ：入射波高)の周期 T に対する変化を示したものである。図中には、周期 T を表す無次元パラメータ $Lc/\sqrt{(d \cdot Bc)}$ (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)により整理し、反射率 Cr 、遊水室内波高増幅率 H_c/H の実験結果および中村ら⁵⁾による減衰波理論に基づく反射率の算定結果も併せ示してある。減衰波理論において算定に必要な線形抵抗係数 fc は、既往の研究成果および実験結果との整合性を考慮し、 $fc=0.20$ とした。

この図より、各構造体における反射率 Cr の実験結果と算定結果は、 $Lc/\sqrt{(d \cdot Bc)}=10 \sim 12$ (消波対象周期帯)において、極小値を呈するなど概ね良好な対応が見られる。さらに、いずれの堤体においても、消波対象周期帯に対して $Cr < 0.5$ となるなど有意な消波効果が確認される。

消波対象周期帯における反射波の低減メカニズムは、遊水室内におけるピストンモード波浪共振による H_c/H の増大と垂下版を介した遊水室内外の水面変動に有意な位相差が発生することにより、垂下版下端より発生する渦流れの増大によるエネルギー逸散が考えられる。しかしながら、消波対象周期帯前後では構造諸元に関係なく比較的高い反射率を示すことも確認できる。この理由としては、短周期側では遊水室内への水塊流入が少ないため、波高増幅率が小さく、垂下版下端からの渦流れによる反射波エネルギーの逸散量が小さいためと考えられる。

一方、長周期側では遊水室内におけるピストンモード波浪共振による波高増幅はみられるものの、垂下版の前後の水面変動に有意な位相差が発生しないことが原因と考えている。

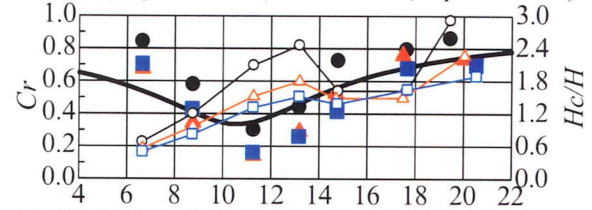
b) 反射率 Cr に及ぼす垂下版吃水深 d の効果

図-4は、反射率 Cr に及ぼす垂下版吃水深 d の効果を検討したものである。図中には、没水平版設置水深 $D=23\text{cm}$ 、垂下版形状を右下がりくさび形に固定し、垂下版吃水深 d を 11.5cm (TYPE 1, $d/D=0.50$)、 16.5cm (TYPE 2, $d/D=0.72$)、 19.7cm (TYPE 3, $d/D=0.86$) と変化させた場合の反射率を示している。

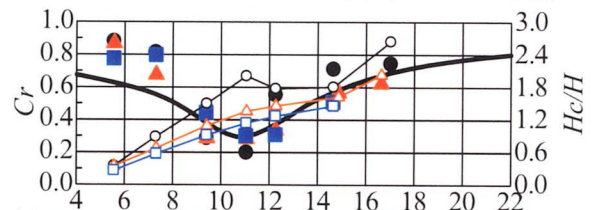
反射率 Cr の極小値は、算定結果および実験結果に関わらず、垂下版吃水深 d の増大に伴い長周期側に移行していることが確認できる。また、反射率 Cr の絶対値は、極小値近傍においては、垂下版吃水深 d の減少とともに、反射率は減少するものの、短周期側および長周期側における反射率の有意な差はみられない。

c) 反射率 Cr に及ぼす垂下版形状の効果

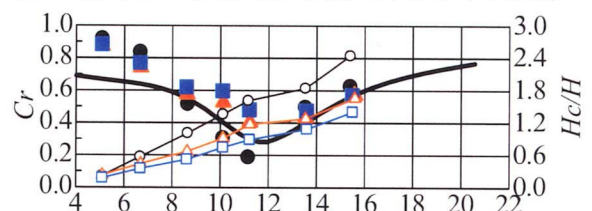
— $Cal Cr(fc=0.20)$
 ● $Cr(Exp:H=2\text{cm})$ ○ $H_c/H(Exp:H=2\text{cm})$
 ▲ $Cr(Exp:H=6\text{cm})$ △ $H_c/H(Exp:H=6\text{cm})$
 ■ $Cr(Exp:H=10\text{cm})$ □ $H_c/H(Exp:H=10\text{cm})$



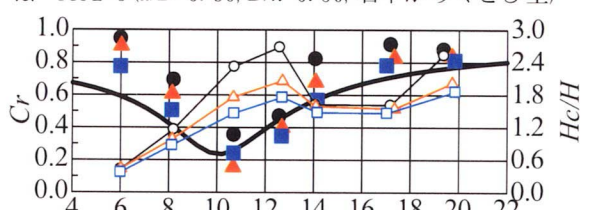
(a) TYPE 1 ($d/D=0.50$, $D/h=0.36$, 右下がりくさび型)



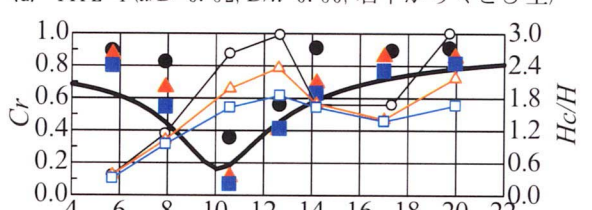
(b) TYPE 2 ($d/D=0.72$, $D/h=0.36$, 右下がりくさび型)



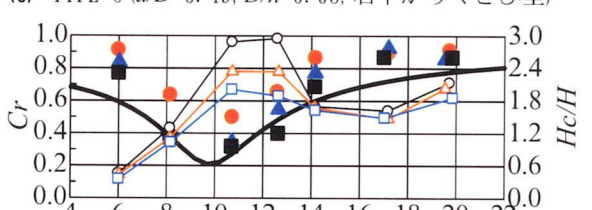
(c) TYPE 3 ($d/D=0.86$, $D/h=0.36$, 右下がりくさび型)



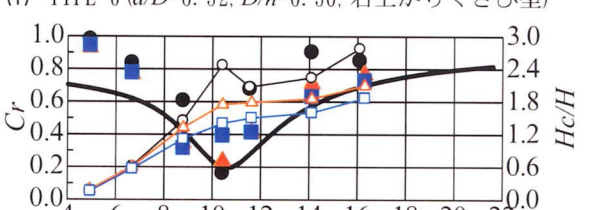
(d) TYPE 4 ($d/D=0.52$, $D/h=0.50$, 右下がりくさび型)



(e) TYPE 5 ($d/D=0.49$, $D/h=0.63$, 右下がりくさび型)



(f) TYPE 6 ($d/D=0.52$, $D/h=0.50$, 右上がりくさび型)



(g) TYPE 7 ($d/D=0.77$, $D/h=0.50$, 右上がりくさび型)

図-3 各模型堤体による反射率 Cr と波高増幅率 H_c/H

図-5は、反射率 Cr に及ぼす垂下版形状の効果を検討したものである。図中には、没水平版設置水深 $D=32\text{cm}$ 、垂下版吃水深 $d=16.5\text{cm}$ に固定し、垂下版形状を右下がりくさび形（TYPE 4）、右上がりくさび形（TYPE 6）とした場合の反射率を示している。

垂下版形状の違いによる反射率 Cr は、反射率の極小値近傍における $H=2\text{cm}$ の実験結果を除き、算定結果および実験結果にほとんど差はみられない。

d) 反射率 Cr に及ぼす没水平版設置水深 D の効果

図-6は、反射率 Cr に及ぼす没水平版設置水深 D による効果を検討したものである。図中には、垂下版形状を右下がりくさび形、垂下版吃水深 d と没水平版設置水深 D との比 $d/D \approx 0.5$ に固定し、 $D=23\text{cm}$ （TYPE 1）、 32cm （TYPE 4）、 40cm （TYPE 5）と変化させた場合の反射率を示している。

この図より反射率 Cr の絶対値は、入射波高 H による差異は認められるものの、入射波高を同一とした場合における反射率に有意な差はなく、垂下版吃水深 d と没水平版設置水深 D との比 d/D により概ね決定されることが明らかとなった。

e) 構造諸元の設定法

中村ら³⁾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 Lc に着目し、周期に関する無次元パラメータ $Lc/\sqrt{Bc \cdot d}$ 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-7は、反射率 Cr に対して各構造体における入射波高 $H=6\text{cm}$ の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、実験結果および算定結果とも、 $Lc/\sqrt{(d \cdot Bc)}=10 \sim 12$ 近傍で

反射率 Cr の極小値が出現し、概ね一律の曲線に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 の効果を考慮した仮想的な波長 Lc 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。

(2) 鉛直通水路における平均流の特性

図-8は、鉛直通水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 $T=3.0\text{s}$ 、 $H=30\text{cm}$ ）を示したものである。図中には、縦軸に鉛直通水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 ）を示してあり、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 1～5）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 6, 7）では、鉛直上向きの平均流速の発生が見られ、垂下版前面に作用する流体抵抗力の違いを利用することにより、鉛直通水路内に一方向平均流の生成が可能

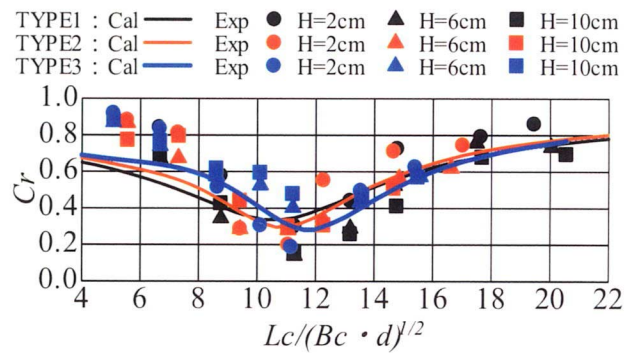


図-4 反射率 Cr に及ぼす垂下版吃水深 d の効果

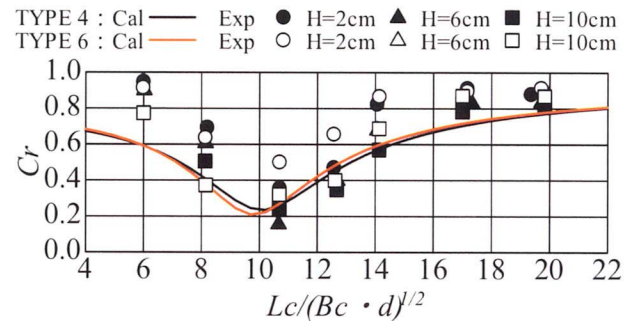


図-5 反射率 Cr に及ぼす垂下版形状の効果

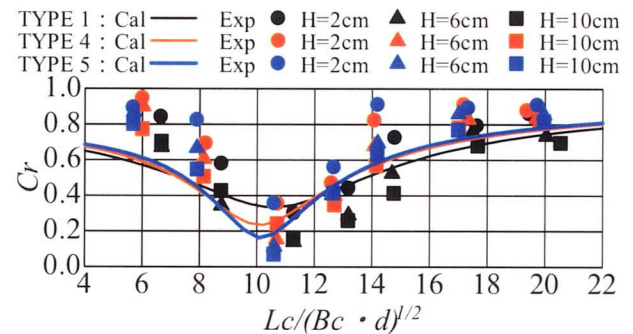


図-6 反射率 Cr に及ぼす没水平版設置水深 D の効果

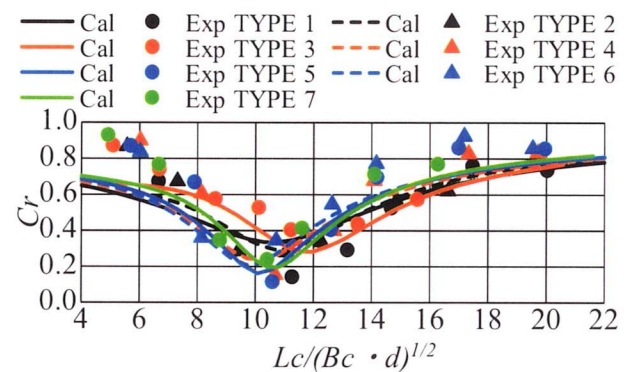


図-7 反射率 Cr に及ぼす周期パラメータの効果

である。

図-9は、各模型堤体による鉛直通水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^* （ $q^* = \bar{v} / \sqrt{gH}$ 、 $\bar{v}$ ：平均 g ：重力加速度、 H ：入射波高）、横軸を入射波周

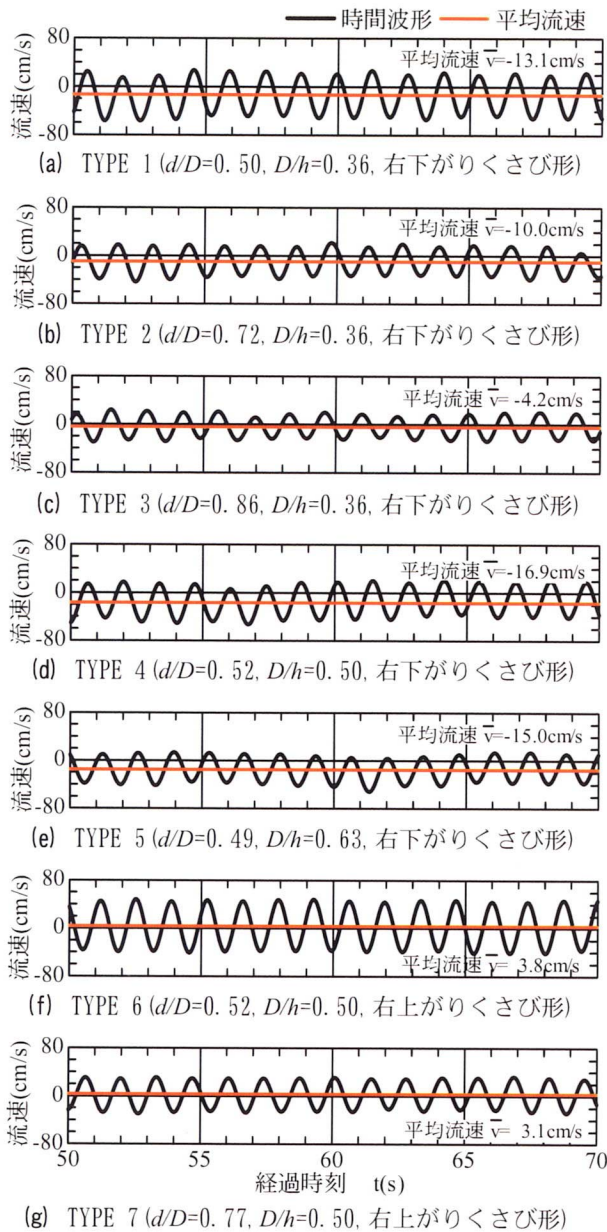


図-8 鉛直通水路で計測された鉛直流速の時間波形
の一例 ($T=1.35\text{sec}$)

期 T に関する無次元パラメータ $Lc/\sqrt{Bc \cdot d}$ 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 1~5) では、垂下板下端開口幅が狭いTYPE 3 ($d/D=0.857$) を除き、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、図-3に示した遊水室内波高増幅率 Hc/H の増大に伴い、 q^* が大きくなることが確認できる。また、垂下板吃水深 d と没水平版設置水深 D の比 $d/D \approx 0.5$ とした (TYPE 1, 4, 5) 場合は、 q^* の絶対値や方向に有意な差はみられない。

一方、右上がりくさび形状 (TYPE 6, 7) では、目標周期近傍では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従い平均流の生成方向

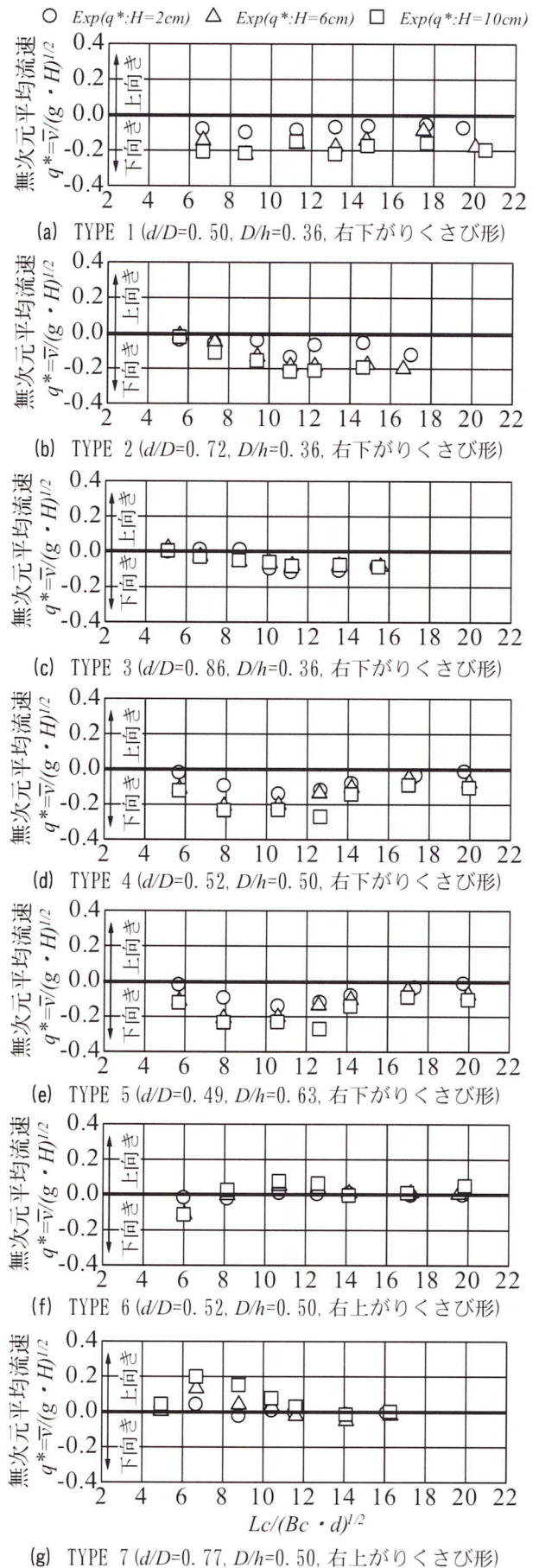


図-9 各堤体における q^* の実験結果

や絶対値は不安定となる。

(3) 堤体まわりの混合特性

各堤体まわりの水塊混合特性を把握するため、代表的な入射波周期 T 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示すのが、図-10である。解析に用いた条件は、撮影されたビデオ画像を1画像/30秒間隔で取得し、10波を対象波数として平均流速ベクトルを算出した。

図-10 (a) に示す右下がりくさび形形状の構造体では、鉛直通水路よりの一方向流により、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ことが確認できる。そして、この循環流の影響により下層では岸向き流れ、上層は沖向きの流れとなる。

図-10 (b) に示す右上がりくさび形形状の構造体では、鉛直通水路に向かう流れにより没水平版下面における循環流は形成されない。鉛直通水路を通過して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板形状に沿ったジェット流により底層に輸送されることが確認できる。

図中には示していないが、没水平版下側開口部における平均流の特性は、超音波流速計による計測結果からも確認しており、垂下版形状による混合特性の違いが認められた。しかしながら、密度成層場における混合効果は不明であり、鉛直通水路に発生する平均流の特性（平均流速や流速振幅）や垂下版下端からのジェット流による混合効果を含めた検討が、今後の検討課題である。

4. 結語

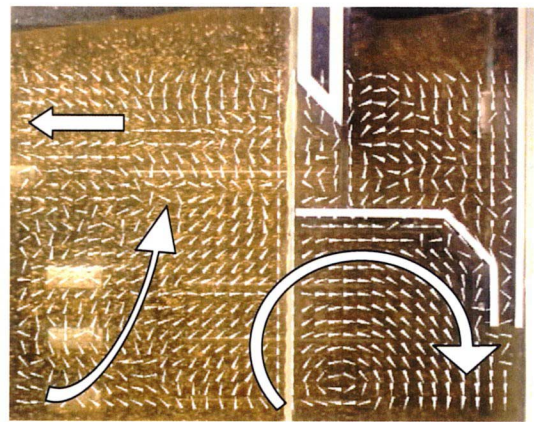
(1) 鉛直混合促進型護岸における反射率 Cr に対する実験結果と算定結果は、 $Lc/\sqrt{(d \cdot Bc)} = 10 \sim 12$ で極

小値を示すなど良好な対応がみられ、いずれの堤体も反射率 $Cr < 0.5$ となるなど有意な消波効果が確認される。

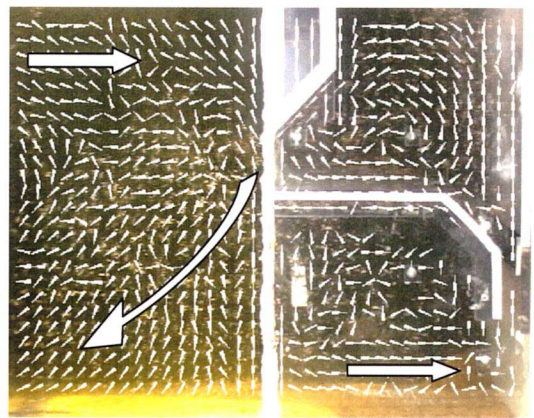
(2) 鉛直混合促進型護岸の効果的な断面は、遊水室内水深 D の効果を考慮した仮想的な波長 Lc を用いて、 $Lc/\sqrt{(d \cdot Bc)} = 10 \sim 12$ とすることで実現できる。

(3) 右下がりくさび形垂下版形状では、入射波周期 T および入射波波高 H にかかわらず、安定して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では、目標周期帯において、概ね鉛直上向きの平均流速の発生が見られる。

(4) 右下がりくさび形状の構造体では、鉛直通水路よりの一方向流により、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



(a) TYPE 1 ($T=1.55s$, $H=6cm$)



(b) TYPE 7 ($T=1.1s$, $H=6cm$)

図-10 堤体まわりの平均流の一例

流れにより輸送される。一方、右上がりくさび形状の構造体では、垂下板形状に沿ったジェット流により底層に輸送されるなど、垂下版の形状特性による堤体まわりの混合特性の違いがみられる。

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

- 1) 重松孝昌, 小田一紀, 池田憲造, 藤田孝: 底質環境の改善を目的とした鉛直循環流誘起堤体の開発, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 806-810, 2002.
- 2) 佐伯信哉, 中村孝幸: 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, 2007.
- 3) 中村孝幸, 神野充輝, 久保勝太: 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, 2002.
- 4) 合田良美, 鈴木康正, 岸良安治, 菊池治: 不規則波実験における入・反射波の分離法, 港湾技研資料, No. 248, pp. 3-24, 1976.
- 5) 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, 第13巻, pp. 177-182, 1997.