

密度成層場における鉛直混合促進型護岸の効果と混合特性について

Performance of a Water Chamber Type Seawall for Vertical Mixing in a Density Stratified Field

佐伯信哉¹・中村孝幸²・岡田修平³

Shinya SAEKI, Takayuki NAKAMURA and Shuuhei OKADA

Performance of a water chamber type seawall that aims sea water mixing and diffusion in the vertical direction has been examined experimentally. Especially, effectiveness of the seawall in a density stratification field was focused extensively. The seawall is comprised of a row of curtain walls of different drafts and a submerged horizontal plate. The driving force of the functions is the piston mode wave resonance in the water chamber, which causes vortex flows and resultant vertical mixing and diffusion about the seawall. A wedge section of the front wall was adopted in order to induce the mean current along the vertical direction of the structure due to asymmetrically generated vortex flows at the mouth of the water chamber. It was seen that the proposed seawall with a front curtain wall of wedge-shaped lower end is most effective.

1. はじめに

閉鎖性の内湾域では、長年の汚濁負荷の増加や蓄積により富栄養化が進行し、特に水温成層が発達する夏季においては、水質の悪化が問題となっている。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貧酸素化対策や越波による水面上昇を利用した鉛直混合型護岸(遠藤・重松, 2007)なども提案されるに到っている。

本研究は、密度成層場が発達したときの閉鎖性内湾域において、未利用な常時の波エネルギーを活用し、水塊の鉛直混合を促進することによる環境改善型護岸の開発を目指すものである。既に著者ら(佐伯・中村, 2008)は、主に常時波浪が作用するときの一樣密度場における低反射式鉛直混合促進型護岸の効果について検討してきた。その際、遊水室の断面寸法や前面垂下版の断面形状に着目し、波浪制御効果ならびに鉛直混合特性などについて、実験および理論の両面から明らかにした。ここでは、密度成層場において堤体前面の垂下版形状に着目し、その混合効果および混合特性を検討する。さらに、堤体まわりの流速場についてPIV法より検討するとともに、鉛直通路における流速と堤体まわりの塩分濃度の関係についても明らかにする。最後に、密度成層の破壊メカニズムについて流況特性より考察する。

2. 実験概要

(1) 実験水槽

実験は、図-1に示す愛媛大学工学部環境建設工学科の長さ550cm、幅38cm、高さ52cmの2次元水槽を用いた。この

水槽の一端にはピストン型造波装置が、他端には、再反射を防ぐためにヘチマロンよりなる消波工を設置してある。

(2) 実験条件

a) 上層と下層の相対密度差および密度層厚

密度成層が発達した夏季の閉鎖性内湾をモデル化するにあたり、夏季における東京湾や大阪湾の表層と底層の塩分、水温の実測データ(全国海の再生プロジェクト)を参考に、表層と底層の相対密度差 $\Delta\rho/\rho_f=0.74\times 10^{-2}$ 、 1.48×10^{-2} 程度(ρ_f :表層の流体密度)を仮定した。実験では、上層に淡水、下層に塩水を用い、塩分濃度差を利用する密度成層場を実現した。上層と下層の層厚は、時空間的に変化することを考慮して、水底より塩水層厚 $h_s=10, 20\text{cm}$ の2種類とした。

b) 模型堤体

鉛直混合促進型護岸の模型堤体は、図-2に示すように、佐伯・中村(2008)による遊水室型構造に鉛直通路を設けたものとした。堤体前面の垂下版形状は、2種類の構造形式(TYPE 2;右下がりくさび形, TYPE 3;右上がりくさび形)を採用した。これは、垂下版形状による混合特性を比較検討するために採用した。また、現地状況の再現性の確認および提案する構造体との比較のため、TYPE 1(直立壁)による実験も併せ行った。想定した模型縮尺Sは、 $S=1/15$ 程度である。

c) 波条件および水深

波条件は、一般的な閉鎖性内湾域における常時波浪および造波特性より、入射波高 $H_m=2\text{cm}$ (現地量で $H_p=30\text{cm}$)、周期 $T_m=0.9\text{s}$ (現地量で $T_p=3.5\text{s}$)程度の規則波を用いた。水深 h は、 $h_m=33\text{cm}$ (現地量で $h_p=500\text{cm}$)で一定とした。

(3) 実験ケースおよび計測方法

表-1に全実験ケースの一覧を示す。表中における実験

1 正会員 博(工) (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
3 学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科

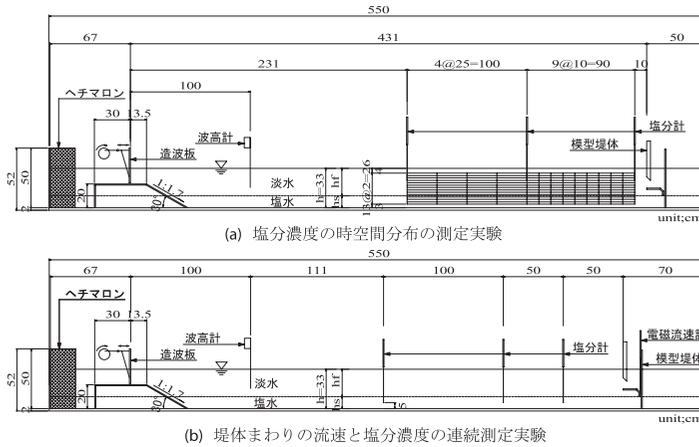


図-1 実験水槽の概要と計測機器配置図

種類の記号Sは、後述する塩分濃度の時空間分布の測定実験に対応し、記号Pは、堤体まわりの流速と塩分濃度の連続測定実験を示している。重複波高 H は、図-1に示す位置に模型堤体を配置したときに、別途一様密度場において造波し重複波の腹の位置で計測した結果である。

a) 塩分濃度の時空間分布の測定実験

塩分濃度は、3台の塩分濃度計により図-1 (a)に示す格子点（横断方向14測線×水深方向14点=196点）にて計測した。実験では、造波前に初期状態の塩分濃度を計測するとともに、造波開始後の作用波数 $t/T=100, 200, 400, 1000, 2000, 4000$ で一旦造波を停止して、空間的な塩分濃度の分布を計測した。なお、造波停止時間は約15分程度であるが、あらかじめ予備実験にて30分程度の造波停止状態では、ほとんど塩分濃度に変化がないことを確認している。水温は、塩分濃度の計測時に水温計にて鉛直分布を測定した。流体密度 ρ は、計測した塩分および水温を用いて、クヌーセンの式により求めた。また、

模型堤体による成層破壊のメカニズムを検討するため、上層の淡水をウラン溶液で着色し、その移流・拡散状況をビデオカメラにて撮影した。

b) 堤体まわりの流速と塩分濃度の連続測定実験

塩分濃度は、3台の塩分濃度計により図-1 (b)に示す測点（模型堤体前面より50cm, 100cm, 200cmで水底より5cm上方）にて計測した。造波前の塩分濃度は、各測点にて2cmピッチで鉛直分布を計測するとともに、造波後は上記測点に塩分濃度計を固定し、サンプリング周波数20Hzで60分間の連続計測を行った。堤体まわりの流況は、ビデオ撮影によりトレーサー法により可視化するとともに、PIV法により堤体まわりの流速場の状況を解析した。

表-1 実験ケース一覧表

実験種類	模型堤体 TYPE	塩分濃度 (%)	塩水層厚 h_s (cm)	淡水層厚 h_f (cm)	塩水密度 ρ_s (g/cm^3)	淡水密度 ρ_f (g/cm^3)	相対密度差 $\Delta \rho / \rho_f$ (10^{-2})	重複波高 H (cm)
S	10	10	23	1	1.0030	0.9958	0.72	2.8
				2	1.0031	0.9959	0.72	2.6
				3	1.0039	0.9966	0.73	2.8
	20	13	23	1	1.0037	0.9963	0.74	2.8
				2	1.0030	0.9958	0.72	2.6
				3	1.0040	0.9966	0.74	2.8
	20	10	23	1	1.0112	0.9965	1.48	2.8
				2	1.0104	0.9956	1.49	2.6
				3	1.0116	0.9968	1.48	2.8
P	10	10	23	1	1.0112	0.9966	1.46	2.8
				2	1.0109	0.9962	1.48	2.6
				3	1.0115	0.9968	1.47	2.8
	20	13	23	1	1.0043	0.9969	0.74	3.4
				2	1.0048	0.9970	0.78	3.0
				3	1.0054	0.9979	0.75	3.0
	20	10	23	1	1.0130	0.9978	1.52	5.8
				2	1.0123	0.9972	1.51	3.4
				3	1.0127	0.9977	1.50	5.8
20	13	23	1	1.0127	0.9977	1.50	5.8	
			2	1.0120	0.9972	1.48	3.4	
				3	1.0116	0.9967	1.49	3.0

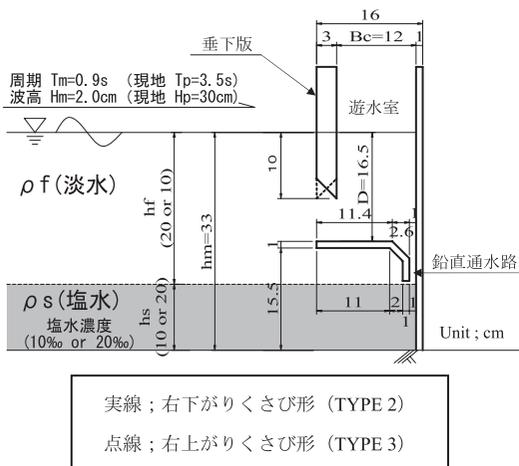


図-2 模型堤体構造図

実線：右下がりくさび形 (TYPE 2)
 点線：右上がりくさび形 (TYPE 3)

3. 結果および考察

(1) 二層成層場の混合状況

写真-1は、垂下版形状の異なる二つの堤体に対して、造波後 $t/T=66.7(t=60s)$ までのビデオ画像における代表的なスナップショットを示したものである。写真-1 (a) に示すTYPE 2 (右下がりくさび形) の堤体では、造波後 $t/T=11.1(t=10s)$ には遊水室内の水塊が鉛直通路を通過して鉛直下向きに輸送されていることが分かる。そして、鉛直通路よりの水塊は、没水水平版の下側に移流・拡散するとともに希釈混合され、密度界面に沿った内部波が冲向きへ伝達する状況が確認できる。なお、塩水層厚 $h_s=20cm$ と大きくした実験においても、垂下版開口部より密度界面に沿う冲向きのわずかな輸送が確認されたものの、遊水室内の水塊が鉛直通路より下向きに輸送されるとともに、ほぼ同様の傾向がみられた。また、没水水平版下側での混合速度は、いずれの塩水層厚においても上下層の密度差が小さいほど速くなることが確認された。

一方、TYPE 3 (右上がりくさび形) の堤体では、写真-1 (b) に見られるように、造波後 $t/T=11.1(t=10s)$ には遊水室内の水塊が垂下版に沿うジェット流により塩水層へ貫入していることが確認できる。密度界面では、このジェット流に伴う渦流れが駆動力となり、密度界面で碎波した内部波が冲向きへ伝達される。塩水層厚 $h_s=20cm$ とした実験においても同様の傾向がみられたが、密度界面と垂下版下端からの距離が近い場合、垂下版形状に沿ったジェット流の影響が強く、堤体前面における密度界面の乱れが早期に発現することが確認された。密度界面における混合速度は、いずれの塩水層厚においても、やはり上下層の密度差が小さいほど速くなることが認められた。

(2) 密度成層場における混合効果

図-3は、TYPE 1 (直立壁)、TYPE 2 (右下がりくさび形) 堤体およびTYPE 3 (右上がりくさび形) 堤体による流体密度の鉛直分布を、代表的な測点における時間変化で示したものである。ここでは、その代表例として初期相対密度差 $\Delta \rho / \rho_f = 1.48 \sim 1.51 \times 10^{-2}$ 、塩水層厚 $h_s=10cm$ とした場合で、堤体前面よりの距離 $x=-200cm(x/L=-1.68)$ における流体密度の鉛直分布を示す。縦軸は、水底からの距離 z を水深 h で除した無次元量 z/h で示し、横軸は相対密度 ρ / ρ_f で示してある。ここに ρ は、流体場における任意点の流体密度 (g/cm^3) であり、 ρ_f は実験開始前の水面より4cm下方で計測した流体密度 (g/cm^3) の平均値である。

TYPE 1 (直立壁) では、水面変動に伴う内部波により密度界面が鉛直混合を受け、やや塩水層厚 h_s が減少して

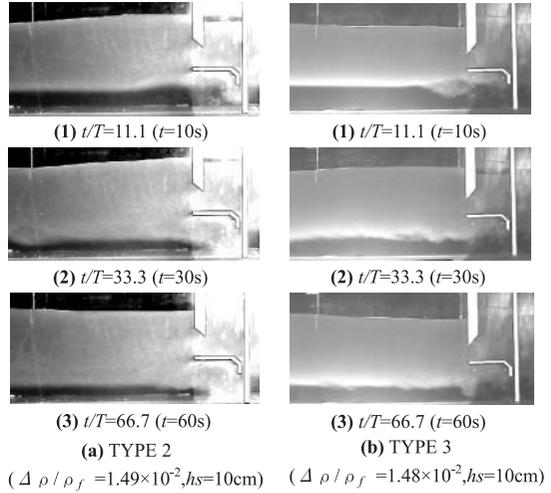


写真-1 堤体まわりの二層の混合状況

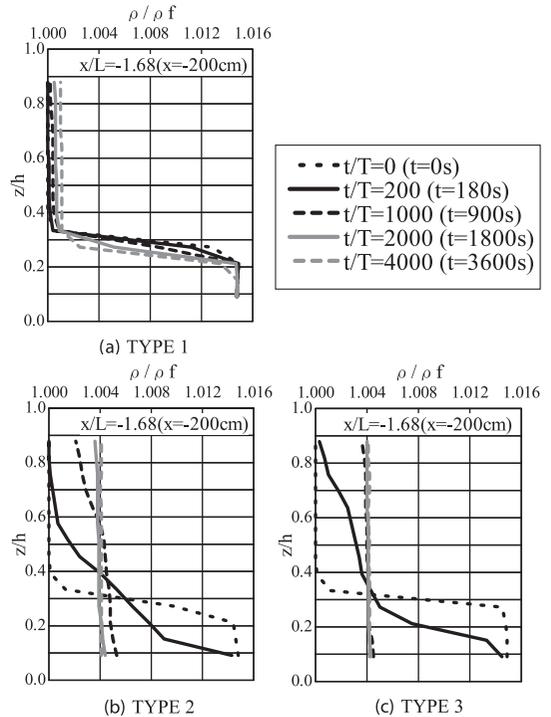


図-3 相対密度 ρ / ρ_f の鉛直分布

いるものの、4000波作用後 ($t=3600s$) も水底近傍の流体密度の変化はみられず、ほとんど鉛直混合が生じていないことが確認できる。図には示していないが、各時刻における横断方向の流体密度の鉛直分布は、ほとんど同様な傾向を示すなど場所的な変化も見られないことが確認されていることから、現地における状況をほぼ再現できているものと考えられる。

TYPE 2 (右下がりくさび形) の堤体では、造波後から

徐々に成層の混合が促進され、 $t/T=1000(t=900s)$ には、密度の鉛直分布は連続成層の状態へと変化し、 $t/T=2000(t=1800s)$ 経過後には、ほぼ完全な混合状態になっていることが分かる。

TYPE 3 (右上がりくさび形) の堤体では、やはり造波後から徐々に成層の混合が促進され、 $t/T=200(t=180s)$ 経過後より徐々に流体密度の鉛直分布は連続成層の状態へと変化し、 $t/T=1000(t=900s)$ にて、ほぼ完全な混合状態が確認される。

(3) 堤体まわりの流速場の特性

堤体まわりの平均流の流向特性を把握するため、ビデオ撮影した画像に基づき、PIV法による画像解析を行った。解析では、1/30秒間隔で連続する画像を取得して、数波を対象に平均処理を行った。

図-4は、TYPE 2 (右下がりくさび形) 堤体における造波開始後 $t/T=200(t=180s)$ の一周期平均流速の空間分布を示したものである。ここでは、その代表例として初期相対密度差 $\Delta\rho/\rho_f=1.51\times 10^{-2}$ 、塩水層厚 $h_s=10cm$ とした場合を示す。図より、鉛直通水路よりの鉛直下向きの平均流により没水平版の下側で時計回りの循環流が形成されることが確認できる。

TYPE 3 (右上がりくさび形) 堤体では、目視観測より垂下版下端よりのジェット流による密度の小さな表層水の塩水層への貫入および内部波の碎波に伴う鉛直混合の促進が観測されている。そこで、押波および引波時における半周期間の平均流速に着目した。図-5は、その結果の一例 (相対密度差 $\Delta\rho/\rho_f=1.49\times 10^{-2}$ 、塩水層厚 $h_s=10cm$)を示す。押波時には、水表面付近の水塊が垂下版前面に沿う流れにより没水平版の上面より遊水室内に流入する。また、引波時には垂下版形状に沿ったジェット流により水塊が輸送される。そして、一周期間を通して複雑な渦流れが形成され、引波時には塩水層への貫入するような流れ、押波時には密度界面を冲向きに向かう流れが見られる。

(4) 鉛直通水路の流速と底層の塩分濃度の関係

図-6は、堤体まわりの流速と塩分濃度の連続測定実験において、垂下版形状の違いによる鉛直通水路の流速と底層の塩分濃度の関係を検討したものである。塩分濃度は、水底より5cm上で、堤体前面より $x/L=-0.42(x=-50cm)$ 、 $x/L=-0.84(x=-100cm)$ 、 $x/L=-1.68(x=-200cm)$ の3箇所で計測している。各図において、経過時刻 $t/T=0\sim 666.7(t=0\sim 600s)$ における鉛直流速の時系列波形、2波の移動平均流速および別途実施した一様密度場 (淡水) における平均鉛直流速の結果も併せ示した。

TYPE 2 (右下がりくさび形) 堤体における塩分濃度の時間変化に着目すると、堤体に最も近い $x/L=-0.42$ の塩分濃度が最初に変動し、順次冲向きにその変動が伝播する

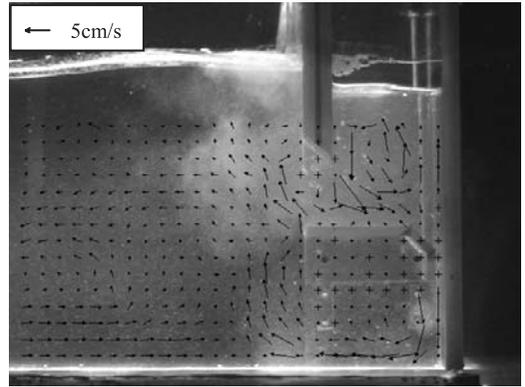
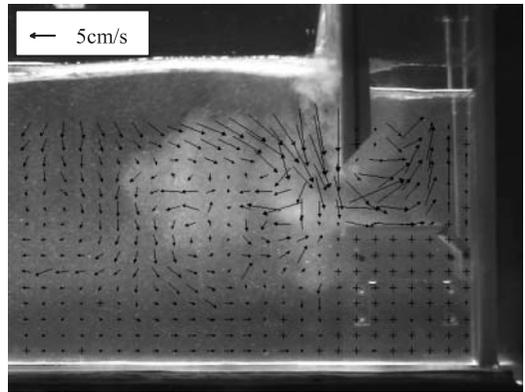
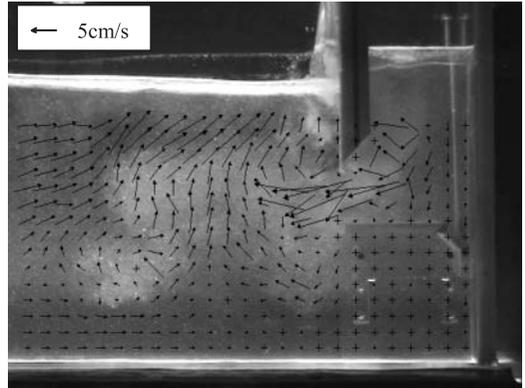


図-4 一周期平均流速の空間分布
($\Delta\rho/\rho_f=1.51\times 10^{-2}$, $h_s=10cm$, $t/T=200$, TYPE 2)



(a) 押波時の半周期間



(b) 引波時の半周期間

図-5 半周期間の平均流速の空間分布
($\Delta\rho/\rho_f=1.49\times 10^{-2}$, $h_s=10cm$, $t/T=200$, TYPE 3)

ことが確認できる。そして、流体の密度差が大きいほど造波の初期段階における希釈混合の継続時間が長く、その後ある濃度になるとなだらかな曲線で濃度低下が進行することを確認している。これは、没水平版の下側にて希釈混合された水塊が、密度界面に沿う冲向きの流れにより伝播することにより、上下層の混合を促進してい

くものと考えられる。

鉛直通路内における流速は、塩水層厚 $h_s=10\text{cm}$ の場合では、流体密度の差により造波直後はその流速振幅の絶対値が小さく、平均的には鉛直上向きの流速を示す。しかしながら、時間の経過に伴い堤体本来の機能が発揮され、流速振幅の絶対値が安定すると同時に鉛直下向きの平均流が生成され始めるものの、一様密度場における平均鉛直流速までは回復しない。そして、最終的に完全混合の状態に至っても、平均流速に変化がない。これは、閉じた系における実験であるため、腹節モードの水面波形が保存された状態であることが原因と考えている。

一方、TYPE 3 (右上がりくさび形) 堤体では、造波初期より特に堤体近傍にて、塩分濃度の激しい変動が見られる。これは、TYPE 2の(右下がりくさび形)とは鉛直混合の形態が異なり、垂下版からのジェット流による流体密度の小さい表層水の塩水層への貫入や渦流れによる混合の促進が支配的であることによると考えられる。

鉛直通路内における流速は、造波直後より流速振幅の絶対値が安定的になるとともに、鉛直通路内の密度差が大きいほど鉛直上向きの平均流が大きくなる傾向が認められた。

(5) 密度成層の破壊メカニズム

右下がりくさび形の堤体においては、密度成層場における造波の初期段階から、垂下版の構造特性により遊水室内への上層水塊の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、非対称な交番渦が発生する。そして、遊水室から流体密度の小さい上層水塊が鉛直通路を通して没水平版の下側に輸送されるとともに、没水平版の下側にて流体密度の大きい下層水塊と鉛直通路よりの渦流れにより希釈混合される。そして、波浪の継続とともに、没水平版の下側において時計回りの循環流が発生・拡大し、その外縁端では密度界面に沿う沖向き流れにより密度界面がせん断作用を受ける。その結果、密度界面に沿って鉛直混合が促進され、徐々に密度差が小さくなる。そして、成層構造は二層成層の状態から連続成層へと推移し、最終的には一様密度場が形成される。

一方、右上がりくさび形堤体においては、密度成層場における造波の初期段階から、垂下版の構造特性により遊水室内からの水塊流出が容易である反面、垂下版下端からの水塊流入が抑制されることにより、非対称な交番渦が発生する。そして、密度の小さい水塊が垂下版形状に沿ってジェット流が密度界面に作用し、上層水塊の塩水層への貫入が生じる。その際、沖向きへの内部波の生成や内部波の碎波により密度界面は鉛直混合が促進され、相対的に徐々に密度差が小さくなる。そして、成層構造は二層成層の状態から連続成層へと推移し、最終的

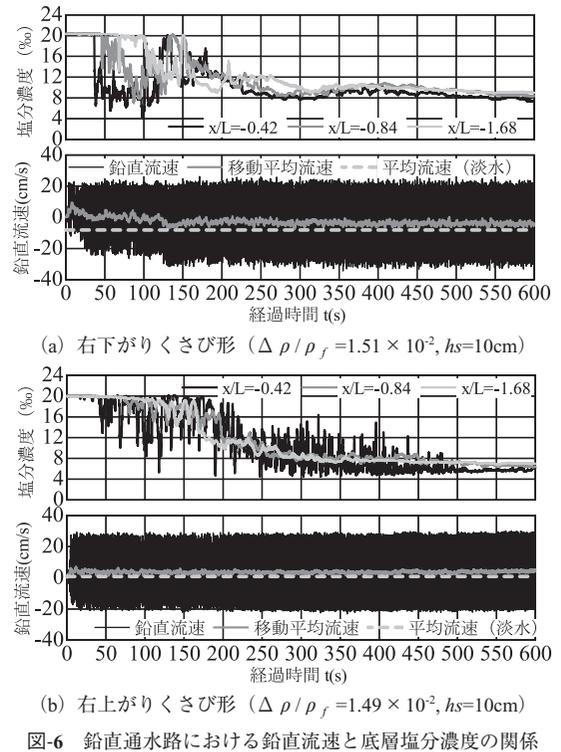


図-6 鉛直通路における鉛直流速と底層塩分濃度の関係

には一様密度場が形成される。

4. 結語

- (1) 提案する構造体は、密度成層場においても有意な混合効果が期待できるものと考えられる。
- (2) 堤体前面の垂下版形状により、二層の混合特性が異なる。
- (3) 右下がりくさび形の堤体では、遊水室内の水塊が鉛直通路を通して鉛直下向きに輸送され、没水平版の下側にて流体密度の大きい下層水塊と希釈混合される。そして、密度界面に沿う沖向き流れにより、密度界面がせん断作用を受け、水塊の鉛直混合が促進される。
- (4) 右上がりくさび形の堤体では、遊水室内よりの垂下版形状に沿うジェット流による上層水塊の塩水層への貫入により、水塊の鉛直混合が促進される。

参考文献

- 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.
- 佐伯信哉・中村孝幸 (2008) : 低反射型鉛直混合促進型護岸の効果と循環流の発生機構について, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.1236-1240.
- 国土交通省・海上保安庁: 全国海の再生プロジェクト, <http://www.kaiho.mlit.go.jp/info/saisei/index.html>