

波浪エネルギーを利用した鉛直混合促進型護岸 の密度成層場における効果について

PERFORMANCE OF A SEAWALL WITH VERTICAL MIXING FUNCTIONS BY
THE USE OF WAVE ENERGY UNDER DENSITY STRATIFIED FIELD

佐伯信哉¹・岡田修平²・中村孝幸³

Shinya SAEKI, Syuuhei OKADA and Takayuki NAKAMURA

¹正会員 博(工) (株)荒谷建設コンサルタント (〒700-0976 岡山県岡山市北区辰巳20-109)

²学生会員 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)

³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 seawall that aims sea water mixing and diffusion along the vertical direction in a semi-enclosed bay under density stratification field, is intended for development through the use of wave energy as a driving force. A water chamber type seawall 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. It is confirmed that the proposed seawall is able to diffuse and mix the density stratification field.

Key Words : *Density stratification field, vertical mixing, semi-closed bay, piston mode wave resonance, water-chamber type seawall*

1. はじめに

東京湾や大阪湾などの半閉鎖性内湾域は、背後に巨大な人口を擁する都市の形成により、汚濁負荷の増加や蓄積に起因する富栄養化が進行している。特に、水温成層が発達する夏季においては、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、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、底生生物に壊滅的な被害をもたらすと同時に、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氣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¹⁾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半閉鎖性内湾域において、未利用状態にある常時の波浪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²⁾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て、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、密度成層場における流体密度の時空間特性に着目し、堤体による鉛直混合効果を検討する。さらに、堤体まわりの流速場について、PIV法による画像解析を介して把握するとともに、鉛直通水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とともに、鉛直通水路の流速特性に着目して、鉛直混合に及ぼす支配パラメータについて究明する。

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次元小型造波水槽を用いた。この水槽の一端には、造波装置が、その背後には消波材としてヘチマロンが設置してある。

(2) 実験条件

a) 上層と下層の相対密度差



図-1 実験水槽の概要と計測器配置図

成層化した海域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³⁾を参考にして、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。

b) 上層と下層の密度層厚

上層と下層の密度層厚は、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。これらの条件は、後述する模型堤体では、水底より16.5cmの位置に没水平版の上面が設置されているため、遊水室内における密度界面の有無による鉛直混合効果の比較ができることも考慮した。

c) 模型堤体

模型堤体は、図-2に示すように、佐伯ら²⁾による遊水室型構造に鉛直通路を設けた構造を採用した。模型堤体の基本形状 (TYPE 2) は、内湾域における一般的な常時波周期 ($T_p=3\sim 4\text{s}$) に対して有効となるように、佐伯ら²⁾による断面設定法 $Lc/\sqrt{(d\cdot Bc)}=10\sim 12$ (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) を用いて設計した。現地の状況の再現性の確認および基本形状との比較のため、直立壁 (TYPE 1) による実験も行った。さらに、鉛直通路内における平均流速および平均流速振幅の変化による鉛直混合効果を比較するため、垂下版の吃水深 d を変化させたTYPE 3, 4の模型堤体 (図-2) を採用した。想定した模型縮尺Sは、いずれも現地スケールの1/15程度とした。

d) 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 $H_i=2\text{cm}$ (現地量

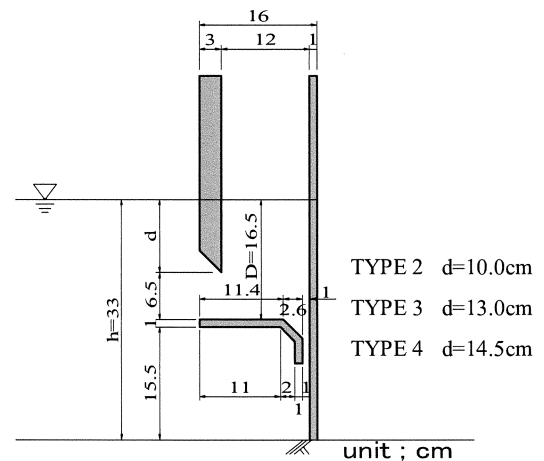


図-2 模型堤体構造図

で $H_p=30\text{cm}$), 周期 $T=0.9\text{s}$ (現地量で $T_p=3.5\text{s}$) 程度の規則波を用いた。

水深 h は、 $h=33\text{cm}$ (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は、全実験ケースをまとめたものである。表中における実験番号の頭文字Sは、a) 塩分濃度の時空間分布の測定実験に対応し、頭文字Pは、b) 堤体まわりの流速と塩分濃度の連続測定実験の実験条件を示している。重複波高 H は、図-1に示す位置に模型堤体を配置し、別途一様密度場 (淡水) において計測した結果を示している。

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) に示す測点 (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ハンディ水温計にて鉛直分布を測定した。流体密度は、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。

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分間連続で計測を行った。この際、TYPE 2~4の模型堤体については、1台の電磁流速計による計測を併せ行った。

堤体まわりの流況は、ビデオ撮影にて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。

3. 実験結果および考察

(1) 流体密度の時空間分布

図-3は、TYPE 1およびTYPE 2の堤体における流体密度の時空間分布の一例を示したものである。図では、縦軸に水底からの距離 z を水深 h で除した無次元量 z/h で示し、横軸は堤体前面から沖向きの距離 x を入射波長 L で除した無次元量 x/L 、バーチャートは、相対密度 ρ/ρ_f に対応している。

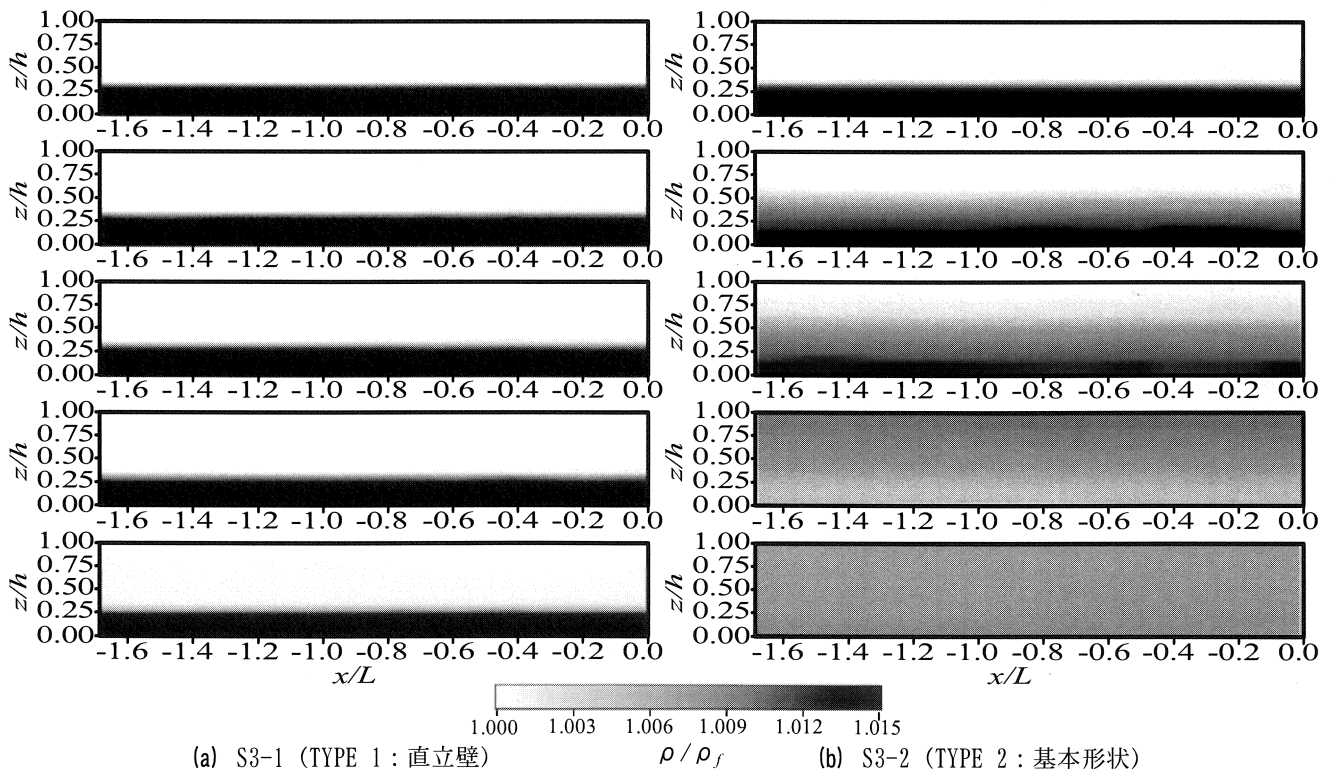


図-3 相対密度 ρ/ρ_f の時空間分布(各図上段より, $t/T=0$, $t/T=200$, $t/T=400$, $t/T=1000$, $t/T=2000$)

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 が減少している。図にはないが、 $t/T=4000$ 波($t=3600s$)作用後も混合には至らず、現地における状況を再現できているものと考えられる。

一方、TYPE 2の堤体では、 $t/T=400$ ($t=360s$)を経過すると明確な塩分躍層の存在が見られなくなり、徐々に連続成層へと移行し、 $t/T=2000$ ($t=1800s$)ではほぼ完全に上下層が混合して一様密度場となることが確認できる。TYPE 2堤体では、混合時間に若干の差はあるものの、上下層の相対密度差 ρ/ρ_f およ

表-1 実験ケース一覧表

実験 番号	模型 堤体 TYP E	塩分 (%)	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)
S1-1	1	10	10	23	1.0030	0.9958	0.72	2.8
S1-2	2				1.0031	0.9959	0.72	2.6
S2-1	1	20	10	13	1.0037	0.9963	0.74	2.8
S2-2	2		20		1.0030	0.9958	0.72	2.6
S3-1	1	20	10	23	1.0112	0.9965	1.48	2.8
S3-2	2				1.0104	0.9956	1.49	2.6
S3-3	3				1.0129	0.9978	1.51	2.8
S4-1	1		20	13	1.0112	0.9966	1.46	2.8
S4-2	2				1.0109	0.9962	1.48	2.6
P1-2	2	10	10	23	1.0043	0.9969	0.74	3.4
P2-2	2		20	13	1.0048	0.9970	0.78	3.4
P3-2	2	20	10	23	1.0123	0.9972	1.51	3.4
P3-3	3				1.0127	0.9977	1.50	6.1
P3-4	4				1.0127	0.9975	1.52	6.3
P4-2	2		20	13	1.0120	0.9972	1.48	3.4
P4-3	3				1.0121	0.9974	1.47	6.1

び塩水層厚 h_s に関わらず、ほぼ完全に上下層が混合して一様密度場となることを確認している。

(2) 鉛直通水路における流速の特性

図-4は、密度成層場および一様密度場に対して、鉛直通水路における流速の測定結果を比較したものである。図中の横軸は、密度成層場における結果（下添え字の s ）を示し、縦軸には一様密度場のそれ（下添え字の f ）を取り示した。

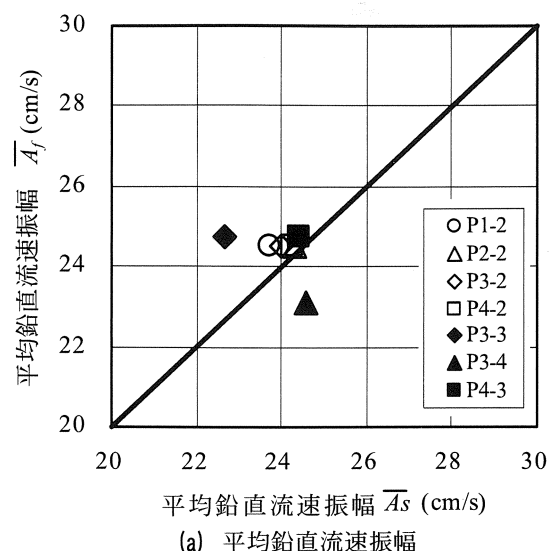
図-4 (a) は、鉛直通水路における平均鉛直流速振幅に着目したものである。本実験の範囲内ではあるが、佐伯ら²⁾による断面設定法により設計された堤体（図中の白抜きシンボル）を対象とすると、密度成層場で計測された平均流速振幅 $\bar{A}_s$ は、塩分濃度および塩水層厚に関わらず、一様密度場の平均流速振幅 $\bar{A}_f$ とほぼ同程度の絶対値を示すことが確認できる。すなわち、遊水室内におけるピストンモード波浪共振や渦流に伴う強い混合効果により、密度成層場においても、一様密度場とほぼ同様な流体密度条件が急速に形成されることにより、鉛直通水路においても、一様密度場とほぼ同等な平均鉛直流速振幅が出現するものと考えられる。

図-4 (b) は、鉛直通水路における無次元平均鉛直流速 q^* ($q^* = \bar{v} / \sqrt{gH}$, $\bar{v}$: 平均流速, g : 重力加速度, H : 波高) に着目したものである。図中において、点線で囲まれたシンボルは、塩水層厚 $h_s = 10\text{cm}$ に対応し、鉛直通水路の下端に塩水層の上面が位置する場合に相当する。

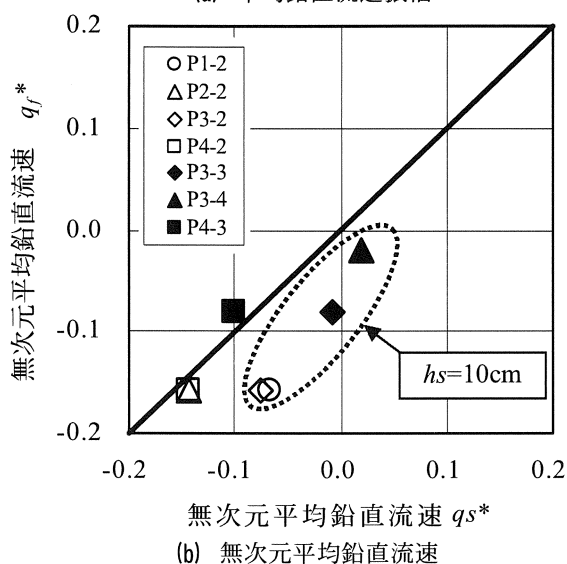
塩水層厚 $h_s = 20\text{cm}$ の場合、密度成層場の無次元平均鉛直流速 q_s^* と一様密度場における無次元平均鉛直流速 q_f^* の絶対値は、ほとんど同程度であることが分かる。一方、塩水層厚 $h_s = 10\text{cm}$ の場合では、密度成層場の無次元平均鉛直流速 q_s^* と一様密度場における無次元平均鉛直流速 q_f^* の絶対値は、大きく異なることが確認できる。TYPE 2の堤体 (P1-2, P3-2) では、上下層の密度差にかかわらず q_s^* は q_f^* に対して50%程度の低下が見てとれる。これは、鉛直通水路の下端が塩水層の上面に位置するため、鉛直通水路よりの水塊の流出が水塊の密度差により抵抗を受けるためと考えられる。鉛直通水路における平均鉛直流速の定量的な予測は、今後続く検討課題としたい。

(3) 鉛直通水路の流速と底層塩分濃度の関係

図-5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TYPE 2堤体による鉛直通水路で計測された流速の時間波形と底層で計測した塩分濃度の時系列を示したものである。図では、横軸に経過時刻を取り、縦軸に塩分濃度 (%) および鉛直流速 (cm/s) を示してある。塩分濃度は、水底より5cm上で、堤体前面より $x/L = -0.42$ ($x = -50\text{cm}$), $x/L = -0.84$ ($x = -100\text{cm}$), $x/L = -1.68$ ($x = -200\text{cm}$) の3箇所



(a) 平均鉛直流速振幅



(b) 無次元平均鉛直流速

図-4 密度成層場と一様密度場における鉛直通水路の流速特性の比較

で計測している。各図において、経過時刻 $t/T = 0 \sim 666.7$ ($t = 0 \sim 600\text{s}$) 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。

塩分濃度の時間変化に着目すると、すべての密度条件において堤体に最も近い $x/L = -0.42$ の塩分濃度が最初に変動し、順次沖向きにその変動が伝播することが確認できる。

鉛直通水路内における流速は、密度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、塩水層厚 $h_s = 10\text{cm}$ の場合では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、最終的に同一密度の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られる。

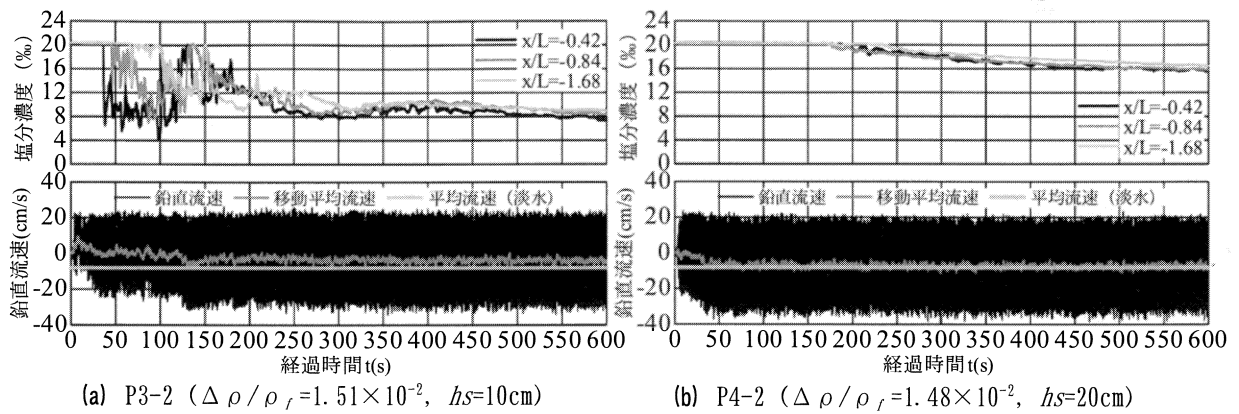


図-5 鉛直通路における鉛直流速と底層塩分濃度の関係

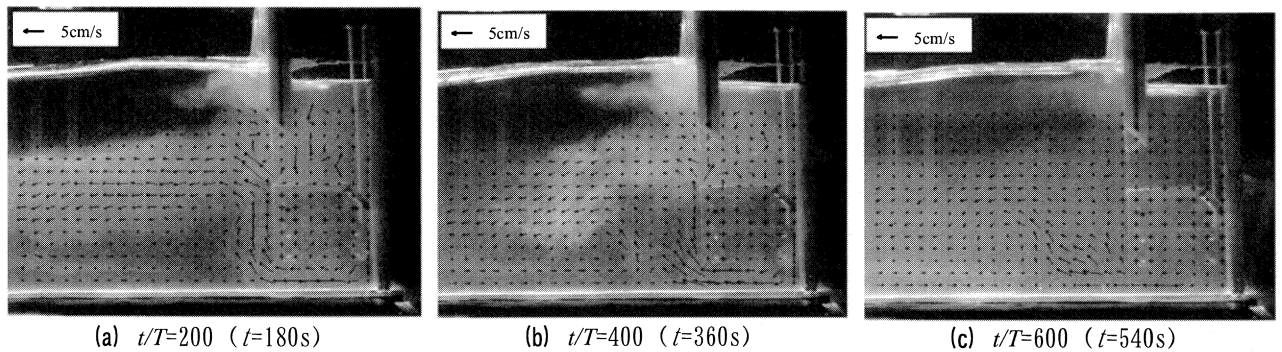


図-6 平均流速の時空間特性 (P3-2 : $\Delta \rho / \rho_f = 1.48 \times 10^{-2}$, $h_s = 20 \text{ cm}$, TYPE 2)

(4) 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-6は、作用波数の増加に伴う平均流速の空間分布の変化の一例（相対密度差 $\Delta \rho / \rho_f = 1.48 \times 10^{-2}$ 、塩水層厚 $h_s = 20 \text{ cm}$ ）を示したものである。作用する波数の増加とともに、没水平版の下側に形成される循環流の外縁端が次第に沖側へと移動することが分かる。造波初期では、図-6に示すように堤体前面に複雑な流速場が形成され、図-5に示す堤体近傍の塩分濃度の激しい変動に起因するものと考えられる。

また、図にはないが、 $t/T = 3000$ ($t = 2700 \text{ s}$) では密度成層は完全に破壊され、一様密度場と同様な流速の空間構造となることを確認している。

(5) 成層の破壊メカニズム

図-7は、TYPE 2堤体において没水平版以深に密度界面が存在する場合（実験では塩水層厚 $h_s = 10 \text{ cm}$ ）における成層の破壊メカニズムを模式的に示したものである。

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冲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、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。

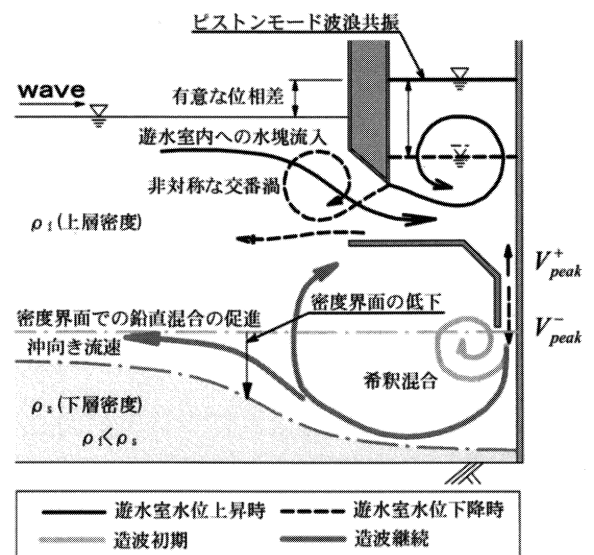


図-7 成層の破壊メカニズム ($h_s = 10 \text{ cm}$)

(6) 成層度パラメータによる成層安定度の検討

密度成層の安定・不安定の問題は、温度や塩分濃度差に起因する浮力差とそれに作用する外力との比による成層安定度パラメータ Ri (Richardson数) がよく用いられ、次式により定義される。

$$Ri = \frac{(\Delta\rho / \rho_f)gh}{U^2} \quad (1)$$

ここに、 ρ_f ; 基準流体密度 (g/cm^3)、 $\Delta\rho$; 上下層の密度差 ($\rho_s - \rho_f$) (g/cm^3)、 ρ_s ; 下層の流体密度 (g/cm^3)、 g ; 重力加速度 (cm/s^2)、 h ; 長さのスケール、 U ; 外力である。

図-7に示す密度成層に対して、鉛直通水路からの流速 V を考える。鉛直通水路における水塊の上下運動により密度界面が希釈混合を受け、その継続により拡大した循環流に伴う冲向き流れによる密度界面のせん断作用により鉛直混合を促進し、やがて密度成層を破壊する。これは、波が作用する初期段階で鉛直通水路における流速振幅および平均流速が定常となった状態で、ある流速以上でなければ上下層を混合出来ないものと考えられる。希釈混合は、鉛直下向き流速が最大となる時に最も水塊の混合を促進するものであるから、外力の項としては、平均流速振幅の下向き最大値 V_{peak}^- をとればよい。 V_{peak}^- には、平均流速の効果も含まれることは容易に分かる。

混合層厚は、淡水層厚 h_f であるから、式 (1) を次式のように書き改める。

$$Ri = \frac{(\Delta\rho / \rho_f)gh_f}{(V_{peak}^-)^2} \quad (2)$$

図-8は、式 (2) により算定した Ri と成層の安定性の結果との関係を示したものである。図では、式 (2) の分母を横軸にとり、分子を縦軸に示し、 $Ri=1.0$ より上側が成層安定、下側が不安定（鉛直混合）を示す。式 (2) 中の平均鉛直下向き流速振幅の最大値 V_{peak}^- は、塩分濃度の時空間分布の測定実験（実験番号の頭文字がS）では、鉛直通水路における流速を直接計測していないため、一様密度場において計測した値を用いた。その際、前述したように、密度成層場における鉛直通水路よりの平均流速は、塩水層厚 h_s により変わるため、 $h_s=10\text{cm}$ の場合は一様密度場で計測された平均流速の50%を用いて、 V_{peak}^- を補正した。

図-8より、S3-4 (TYPE 4堤体) 以外では密度成層は不安定となり、鉛直混合が促進されたことを示している。実験では、やはりS3-4ケースのみ密度成層が破壊されないことを確認している。

このことから、本実験の範囲内では式 (2) により成層安定度を検討することができるとともに、一様

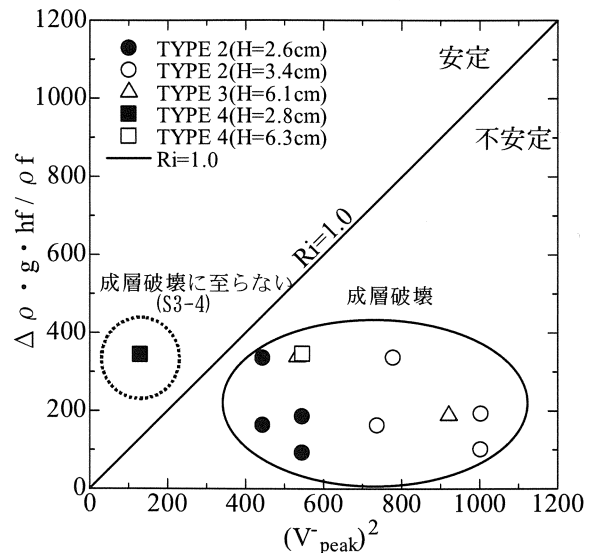


図-8 成層安定度パラメータ Ri による検討

密度場における鉛直通水路の鉛直流速を用いることにより、概ね妥当な結果が得られるものと考えている。しかしながら、成層が破壊されない実験状況が1ケースのみであったため、さらなるデータの積み重ねが今後の課題である。

4. 結語

(1) 佐伯ら²⁾による断面設定法で設計された鉛直混合促進型護岸は、上下層の相対密度差および塩水層厚に関わらず密度成層の破壊が確認され、成層化された海域でも有意な鉛直混合効果が期待できる。

(2) 成層の破壊メカニズムは、鉛直通水路の下端近傍で出入りする水塊により下層濃度が希釈されるとともに、希釈混合された水塊が内部波となり冲向きに伝播することにより上下層の混合が促進していくことによるものと考えられる。

(3) 鉛直混合効果は、成層安定度パラメータ Ri の導入により概ね判定できる。成層安定度に起因する外力としては、鉛直通水路における平均流速振幅の下向き最大値 V_{peak}^- をとればよい。

参考文献

- 1) 遠藤徹，重松孝昌：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. 1236-1240，2007。
- 2) 佐伯信哉，中村孝幸：低反射式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. 1236-1240，2008。
- 3) 全国海の再生プロジェクト ホームページ (<http://www.kaiho.mlit.go.jp/info/saisei/index.html>)。