

密度成層場における鉛直循環流誘起堤体の効果に関する研究

大阪市立大学大学院 正会員 重松孝昌
 関西国際空港(株) 正会員 池田憲造
 大阪市立大学大学院 学生員 延廣玲子
 大阪市立大学大学院 正会員 小田一紀

1. はじめに

夏期の閉鎖性内湾の底質環境を改善することを目的として、著者らは、鉛直循環流を誘起することができる堤体の開発を試みており、数値計算や実験による検証を通して、反射率や堤体前面に誘起される鉛直循環流などを勘案して、図-1に示すような構造を有する堤体を提案している¹⁾。しかし、その検討は均一密度場における効果の検討にとどまっている。そこで、本研究では、数値計算モデルによって、温度による成層が鉛直循環流誘起堤体の鉛直循環機能に及ぼす影響について検討した。

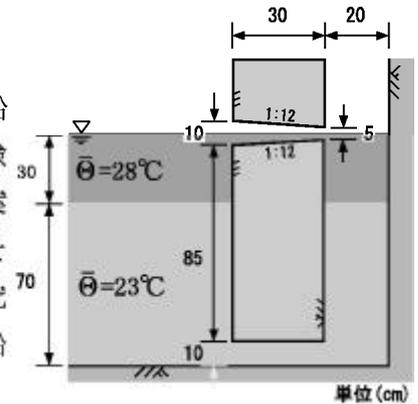


図-1 鉛直循環流誘起堤体

2. 計算手法

非圧縮性流体を対象とし、温度に起因する密度変化の影響は浮力項だけによって考慮することとすると、基礎方程式は以下のように表される。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u'_i u'_j} \right\} - g_i \beta (\bar{\theta} - \theta_0) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu}{Pr} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} - \overline{u'_j \theta'} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu}{Pr} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} - \frac{\nu_t}{Pr_t} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

ここに、 u_i ：流速の x_i 方向成分、 t ：時間、 θ ：水温、 ρ ：参照温度 θ_0 における流体密度、 g_i ：重力加速度、 ν ：粘性係数、 ν_t ：渦動粘性係数、 β ：体積膨張係数 (2.5×10^{-4})、 p_r ：プラントル数 (7.0)、 P_{rt} ：乱流プラントル数 (0.9) を表し、 $\bar{\quad}$ はアンサンブル平均量を、 $\overline{\quad}$ は平均量からの偏差を表す。式 (2) 中の $\overline{u'_i u'_j}$ はレイノルズ応力であり、レイノルズ応力の定式化に当たっては Lin & Liu のモデルを用いた。さらに、次式の乱れエネルギー (k) およびその散逸率 (ε) の輸送方程式を用いた。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} - \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon + G_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} G_k \quad (5)$$

ここに、 $G_k = -g_i \beta \overline{u'_i \theta'}$ 、 $C_{\varepsilon 1} = C_{\varepsilon 3} = 1.44$ 、 $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ 、 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

3. 計算条件

主な計算条件を表-1に示す。計算領域の右端は不透過とし図-1に示す鉛直循環流誘起堤体を設置した。計算領域左端は開境界条件とし、Sommerfeldの放射条件を適用した。また、source functionを用いて、周期

Keywords：鉛直循環，温度成層，環境修復技術，数値計算

連絡先：〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138 Tel.& Fax. 06-6605-2733

表-1 計算条件

計算領域	$x = 10\text{m}, z = 1.2\text{m}$
グリッドサイズ	$\Delta x = 2\text{cm} (0 \leq x \leq 8\text{m})$ $\Delta x = 2\text{cm} (8 \leq x \leq 10\text{m})$ $\Delta z = 2\text{cm} (0 \leq z \leq 0.7\text{m})$ $\Delta z = 1\text{cm} (0.7 \leq z \leq 1.2\text{m})$
波浪条件	$h = 1.0\text{m}, T = 1.25\text{s}, H = 5.0\text{cm}, H/L = 0.02$
初期水温分布	$\theta = 23^\circ\text{C} (0 \leq z \leq 0.7\text{m})$ $\theta = 28^\circ\text{C} (0.7 \leq z \leq 1.0\text{m})$

$T = 1.25\text{s}$ 、波高 $H = 5.0\text{cm}$ の三次のストークス波を作用させた。乱れエネルギー k およびエネルギー散逸率 ϵ の境界条件として、固体表面では壁関数法を、水表面では $\partial k/\partial n = \partial \epsilon/\partial n = 0$ (n :法線方向) を課した。以下には、垂直護岸と提案堤体(図-1)の前面における鉛直混合効果の比較、および温度成層を考慮した場合としない場合における提案堤体の鉛直混合効果の比較を行った結果を記す。

4. 計算結果

図-2 は、計算開始から 40 周期後の垂直護岸前面の温度分布の計算結果を示したものである。同図より、垂直護岸前面では 40 周期経過しても初期の温度成層が形成されたままとなっており、垂直護岸の前面では鉛直混合が生じないことがわかる。図-3 は、40 周期後の提案堤体前面の温度分布の計算結果を示したものである。上部通水部から遊水室内に堤体前面の表層水が流入し、それが遊水室内で混合した後、下部通水部より沖側へと噴出されている様子が判る。また、下部通水部から沖側に噴出された流体塊は、堤体直前ですぐに上層に浮上するのではなく、水底に沿って沖側に移流した後、上層に浮上するような傾向を示すことも判る。このことから、本研究で提案する鉛直循環流誘起堤体は、成層下においても表層水を底層部へと輸送する機能を有し、夏期の成層下した閉鎖性海域の底層環境の改善に有効であると期待できる。図-4 は、密度成層がある場合とない場合の提案堤体前面の平均流場を示したものである。いずれの場合にも、堤体前面の表層水は岸側に向かい、上部通水部から遊水室内に流入し、下部通水部から沖側へと流出していることが判る。表層水の岸側への移流速度は密度成層を考慮した場合の方がやや大きい、それ以外には大きな差異は見られない。また、図-5 は、密度成層がある場合とない場合における下部通水部から沖側への流出流量 (q) の時系列変化を示したものである。同図によれば、両者の q にもほとんど差異は見られず、提案堤体の鉛直循環機能に及ぼす温度成層の影響はほとんどないことがわかる。

5. 結論

本研究で提案する鉛直循環流誘起堤体は、ここで検討した波浪条件および温度成層条件の下では、成層下海域においても表層水を遊水室に取り込んで沖側底層部へ噴出する効果を有することが確認され、夏期の底質環境の改善に有効な技術であると期待できることが確認された。

参考文献 重松ら(2002)：鉛直循環流誘起消波護岸の開発に関する実験的検討，関西支部。

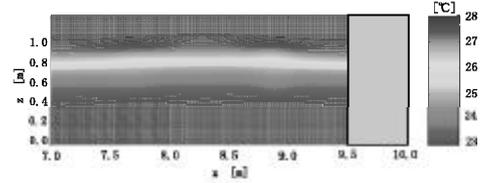


図-2 垂直護岸前面の水温分布

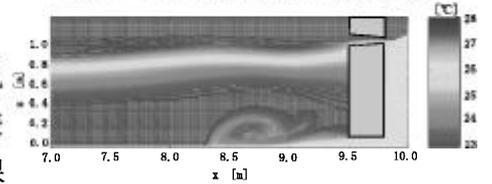
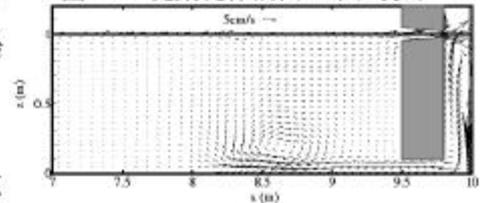
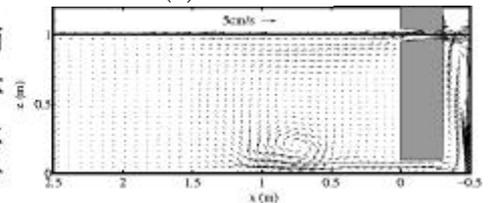


図-3 提案堤体前面の水温分布

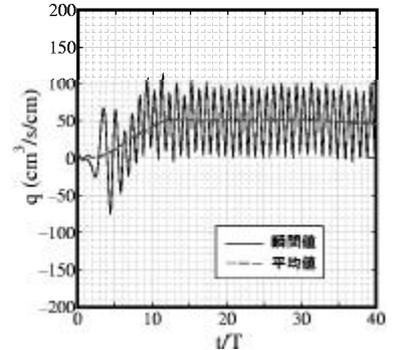


(a) 均一密度場

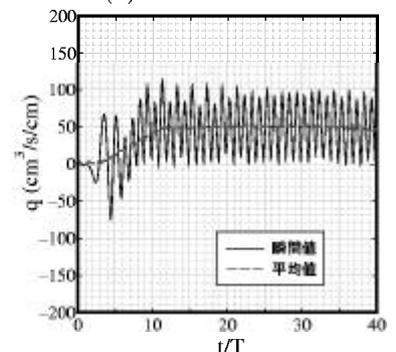


(b) 密度成層場

図-4 一周期平均流速ベクトル



(a) 均一密度場



(b) 密度成層場

図-5 下部通水部流出流量