

大規模模型実験による鉛直循環流誘起堤体の効果の検討

環境水域工学分野

遠藤徹

1. 緒言

背後に大都市を抱えた閉鎖性の海域、特に、高度に有効利用されている湾奥部では、鉛直構造物に囲まれていることに加えて夏季に形成する成層化によって表層水と底層水の鉛直混合が阻害されるため底層が貧酸素化している。このような環境構造が底層生物の生息環境、さらには、湾スケールの生態系に悪影響を与えている。このような背景の下、本研究では、海域の有効利用を損ねることなく底層の貧酸素化を改善するための鉛直循環流誘起堤体の開発を行っている。本堤体は、図-1 に示すように、上部通水部・遊水室・下部通水部を有する構造となっており、波が遊水室へ進入することで遊水室内外に水位差が発生し、それに伴って酸素を豊富に含んだ表層水を下部通水部から堤体沖側の底層へ循環される仕組みになっている。

本堤体は、数値計算によって構造諸元が模索・提案され、水深が $h = 1.0\text{m}$ の中規模模型実験によってその効果が検証されている¹⁾。さらに、 $h = 0.15\text{m}$ の小規模模型実験によって密度成層場における有効性についても検証されている²⁾。その際、中規模模型実験では上部通水部での砕波および遊水室内での渦流にともなう気泡の発生が確認された。これに対して小規模模型実験ではそれらが確認されず、両者には縮尺効果の影響がみられた。本堤体の消波効果および鉛直循環流誘起堤体効果は上部通水部と遊水室内の非線形流体運動に依存しているため、本堤体の実用化

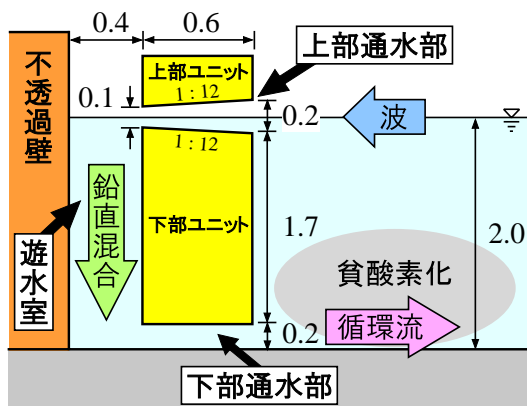


図-1 鉛直循環流誘起堤体の概念図

を図るためには、より大規模な模型実験により本堤体の有効性を確認しておく必要がある。

本研究では、まず $h = 2.0\text{m}$ の大規模模型実験によって本堤体の有効性を検討し、また、数値計算を行い実験結果と比較することで数値モデルの再現性を検討した。さらに、実海域で無視することができない潮位が本堤体の効果に及ぼす影響について検討した。

2. 鉛直循環流誘起堤体の大規模模型実験

2.1 実験概要

実験は、長さ 100m、幅 3.0m、高さ 3.0m の二次元造波水槽内に、図-1 に示す構造諸元の模型を設置して行った。水深は $h = 2.0\text{m}$ で一定とした。また、夏季の大阪湾の実測波浪に基づいて表-1 に示す 5 通りの波浪条件で実験を行った。実験では、反射率と堤体沖側の流速を測定した。反射率の測定には、2 台の容量式波高計 (KENEK 製) を堤体から沖側に 11.0m および 11.5m 離れた地点に設置し、得られた波形データを用いて入反射分離推定法により求めた。流速の測定には 3 台の鉛直二軸電磁流速計 (アレック電子製) を用いて下部通水部と堤体沖側の流速を測定した。データのサンプリング周波数は 50.0Hz とし、測定時間は造波板からの再反射波が影響するまでとした。

表-1 波浪条件および反射率 K_r の実験結果

	周期 $T(\text{sec})$	水深 $h(\text{m})$	波長 $L(\text{m})$	波高 $H(\text{cm})$	波形勾配 H/L	反射率 K_r
case1	1.34	2.0	2.80	5.6	0.02	0.38
case2	1.78	2.0	4.89	4.9	0.01	0.36
case3	1.78	2.0	4.89	9.8	0.02	0.50
case4	2.27	2.0	7.50	7.5	0.01	0.59
case5	2.27	2.0	7.50	15.0	0.02	0.50

2.2 実験結果

反射率 K_r の実験結果を、表-1 の最右欄に示す。case4 の K_r は 0.59 とやや高めの値を示しているが、その他の実験ケースでは $K_r = 0.36 \sim 0.50$ と低反射機能を有していることがわかる。case2 と case3 と同じ波浪条件で行った中規模模型実験の実験結果では $K_r = 0.36, 0.44$ であり、中規模模型実験とほぼ同様の結果が得られた。

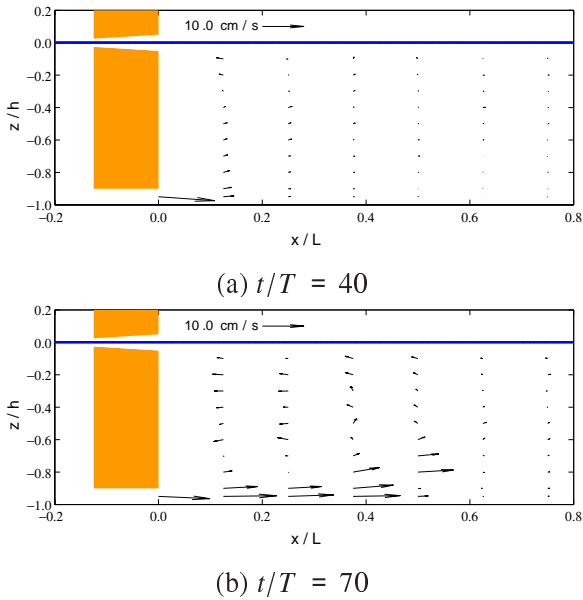


図-2 一周期平均流速ベクトル図

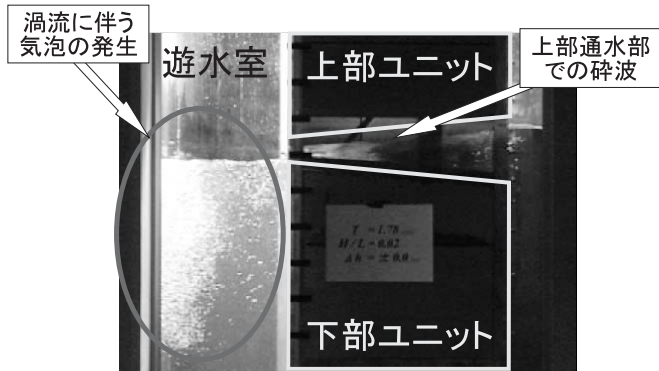


図-3 上部通水部および遊水室内の写真

図-2に、case3の一周期平均流速ベクトル図を示す。図-2によると、 $t/T = 40$ で下部通水部から底層冲向きの流れが発生し始め、30周期経過した $t/T = 70$ では下部通水部から発生する底層冲向きの流れが $x/L = 0.5$ の底層域まで影響している。一方、堤体沖側の上層においては岸向きの流れが発生しており、堤体沖側に貧酸素化の解消に効果的な鉛直循環流が形成されていることが確認できる。

図-3は実験中に撮影した上部通水部および遊水室の様子である。同図によると、上部通水部での砕波および遊水室内での大量の気泡が確認できる。このことから、中規模模型実験と同様の現象が確認された。このことから、本堤体は表層水を底層へ供給して貧酸素化を改善するだけでなく、上部通水部および遊水室内での曝機機能により、多くの酸素を底層域へ供給することができると思われる。

以上のことから、本実験スケールにおいても中規模模型実験と同様、本堤体の消波効果および鉛直循環流誘起効果が確認でき、本堤体の有効性が検証できた。

3. 数値モデルの再現性に関する検討

現地における本堤体の有効性を定量的に予測するためには、数値計算が不可欠である。そこで、Lin&Liuが開発した高次乱流モデルとVOF法を併用した二次元数値波動解析法³⁾を用いて数値計算を行い、大規模模型実験で得られた実験結果と数値計算の結果を比較して本数値モデルの再現性について検討した。

3.1 計算手法および計算条件

計算に用いた基礎方程式は、アンサンブル平均操作を施した連続の式とNavier-Stokes方程式で次式で表される。

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \tau_{ij} \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle u'_i u'_j \rangle}{\partial x_j} \quad (2)$$

ただし、 $\langle \tau_{ij} \rangle = \nu \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)$ (3)

ここに、 $\langle u_i \rangle$: x_i 方向の流速のアンサンブル平均値、 $\langle p \rangle$: 圧力のアンサンブル平均値、 t : 時間、 ρ : 流体の密度、 g_i : x_i 方向の重力加速度である。また、 $-\langle u_i u_j \rangle$ はレイノルズ応力を表しており、ここでは、高次乱流モデルを適用した。また、水表面の計算にはVOF法を用いた。

計算は鉛直二次元断面で行い、長さ $x = 20\text{m}$ 、高さ $z = 2.4\text{m}$ の計算領域の左端に堤体を設置した(図-4参照)。堤体の構造諸元は、大規模模型実験と同じものとした(図-1参照)。計算条件の詳細については表-2を参照されたい。波浪条件は、大規模模型実験で鉛直循環流が最も顕著に現れていた $T = 1.78\text{s}$ 、 $H/L = 0.02$ とした。

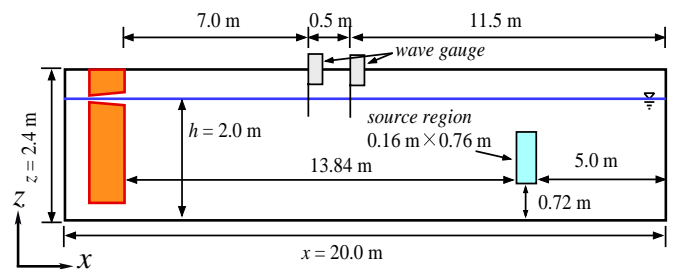


図-4 計算領域

表-2 計算条件

計算領域	$x = 20\text{m}$, $z = 2.4\text{m}$
境界条件	右端と上端: 開境界, 左端と下端: non-slip 条件
水深	$h = 2.0\text{m}$
波浪条件	$T = 1.78\text{s}$, $H = 9.8\text{cm}$
セル(x方向)	$x=0 \sim 15\text{m}$ では $\Delta x=4\text{cm}$, $x=15 \sim 20\text{m}$ では $\Delta x=2\text{cm}$
セル(z方向)	$z=0 \sim 1.4\text{m}$ では $\Delta z=4\text{cm}$, $z=1.4 \sim 2.4\text{m}$ では $\Delta z=2\text{cm}$

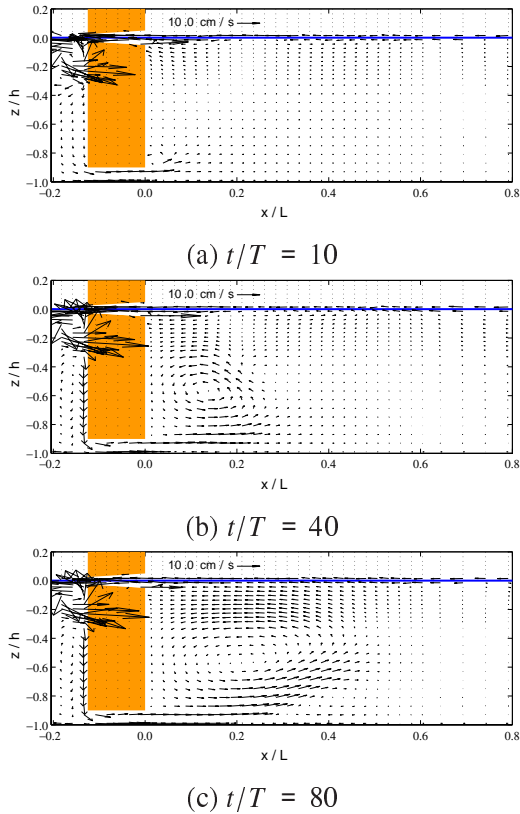


図-5 数値計算による一周期平均流速ベクトル図

3.2 計算結果と実験結果の比較

図-5に、本数値モデルによって計算された一周期平均流速ベクトル図を示す。同図によると、 $t/T = 10$ で下部通水部から堤体冲向きの流れが発生し始め、時間の経過とともに下部通水部から発生する底層冲向きの流れの影響範囲が広がっており、本数値モデルは堤体沖面部に形成される鉛直循環流を再現していることが確認できる。しかし、大規模模型実験では下部通水部から底層沖側の流れが発生し始めて30周期後には、その流れが $x/L = 0.5$ の底層部に到達していたのに対して、本数値モデルでは30周期経過しても $x/L = 0.3$ の底層部にまでしか到達しておらず、さらに40周期経過した $t/T = 80$ でようやく冲向きの流れが $x/L = 0.5$ の底層で発生している。

表-3に反射率 K_r と下部通水部における平均水平流速 \bar{u} の計算結果と実験結果を示す。反射率 K_r に関しては、計算結果では $K_r = 0.42$ 、実験結果では $K_r = 0.50$ であり計算結果のほうがやや低い値となっている。また、下部通水部平均水平流速 \bar{u} は、計算結果では $\bar{u} = 8.9\text{cm/s}$ で、実験結果では $\bar{u} = 11.5\text{cm/s}$ であり、反射率と同様、数値計算のほうが小さいという結果が得られた。この原因として、数値モデルでは上部通水部および遊水室内での気泡の影響を再現できないということが挙げられる。そのため、本数値モデルによって本堤体の効果の予測を行うためには、本数値モデルの再現精度をさらに把握しておく必要がある。

表-3 K_r と \bar{u} の計算結果と実験結果

	周期 $T(\text{s})$	水深 $h(\text{m})$	波高 $H(\text{cm})$	波形 勾配 H/L	反射率 K_r	下部通水部 平均水平流速 \bar{u}
計算結果	1.78	2.0	9.8	0.02	0.42	8.9
実験結果	1.78	2.0	9.8	0.02	0.50	11.5

以上のことから、本数値モデルは定性的な評価を行うには有効であるものの、定量的な評価を行うためにはさらなる検討が必要であることが明らかとなった。

4. 水深が本堤体の効果に及ぼす影響の検討

これまで、鉛直循環流誘起堤体の有効性の検討は水深が一定の下で行われてきた。本堤体は水面近傍に通水部を有した構造であるため、実用化を考えた場合には、潮位の変動によってその消波特性と鉛直循環流誘起効果が変化するのではないかと推察される。そこで、大規模模型実験により潮位の影響について検討した。

4.1 実験概要

実験は、大規模模型実験で用いた水槽と模型を用いて行った。実験水深は大阪湾湾奥部の夏季の潮位データを基に図-6に示す7通りとした。波浪条件は、大規模模型実験で鉛直循環流が最も顕著に現れていた $T = 1.78\text{s}$ 、 $H/L = 0.01, 0.02$ の2種類とした。以下、実験で求められた反射率 K_r と下部通水部平均水平流速 \bar{u} について検討した。

4.2 実験結果

図-7の(a)に反射率 K_r と水深 h の関係を、同図(b)に下部通水部平均水平流速 \bar{u} と水深 h の関係を示す。

同図(a)によると、 K_r は $h = 2.0\text{m}$ の時に極小値を示し、 h が上昇しても下降しても本堤体の反射率低減効果が低下していることがわかる。特に、 $h = 1.85 \sim 1.9\text{m}$ 、 $2.1 \sim 2.15\text{m}$ では、 $K_r = 0.8$ 以上と高い反射率を示している。

同図(b)によると、 \bar{u} も $h = 2.0\text{m}$ あたりで極大値をとり、 h が上昇しても下降しても \bar{u} は小さくなってお

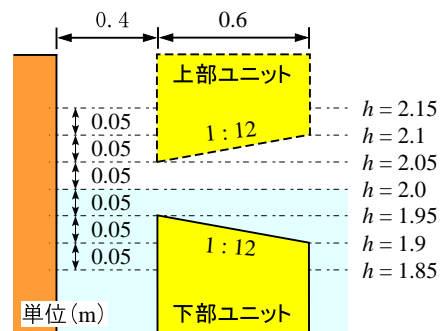
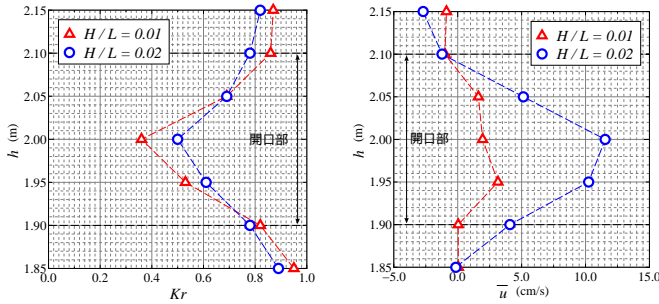


図-6 実験水深



(a) Kr と h の関係 (b) \bar{u} と h の関係

図-7 反射率 Kr および下部通水部水平平均流速 \bar{u} と水深 h の関係

り、本堤体の鉛直循環流誘起効果は低下すると考えられる。特に、 h が上部ユニットに達した場合 ($h = 2.1 \sim 2.15\text{m}$)、 \bar{u} は負の値を示しており、下部通水部から沖側底層水が遊水室内へ流入するようになっている。これは、本堤体に期待している循環流とは逆方向の流れであり、貧酸素化した底層水が表層に輸送される可能性がある。また、貧酸素化により劣化した底泥環境を改善するためには、酸素を含んだ表層水を底層域へ循環させ続けることが望ましい。そのため、この問題を解決するために上部通水部の構造諸元を再検討する必要があるといえる。

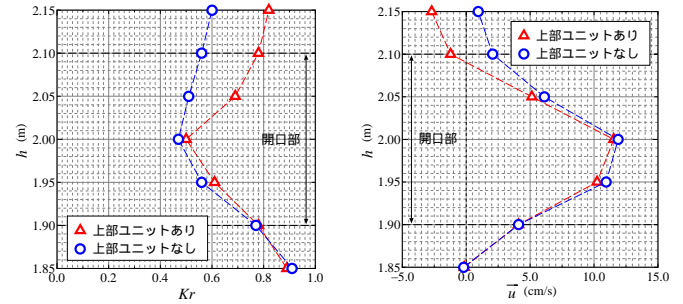
5. 上部ユニットを取り除いた場合の大規模模型実験

上記の実験結果から、水深が本堤体の上部ユニットよりも上に位置する場合には、本堤体に期待する機能が十分に発揮されないことが明らかとなった。上部ユニットによって波の遊水室内への進入が妨げられ、遊水室内よりも堤体沖側の水位のほうが高くなり本堤体に期待する循環流とは逆方向の流れが発生するようになると考えられる。そこで、上部ユニットを取り除いて実験を行った。実験方法および実験条件は、上記の潮位変動にともなう効果の検討で行った実験と同様である。

5.1 上部ユニットの有無による効果の比較

図-8 に波浪条件が $T = 1.78\text{s}$, $H/L = 0.02$ の時の上部ユニットがある場合とない場合の Kr と \bar{u} の実験結果を示す。同図 (a) は Kr と h の関係を、同図 (b) は \bar{u} と h の関係を示している。

同図から、水深が $h = 2.0\text{m}$ 以下では、いずれの構造諸元においても Kr および \bar{u} ともにほぼ同様の実験結果を示している。一方、水深が $h = 2.0\text{m}$ 以上では、上部ユニットがない場合には、上部ユニットがある場合よりも反射率は小さく、下部通水部水平平均流速は堤体沖向きの流れが大きくなるのがわかる。特に、水深が $h = 2.1\text{m}$ 以上になっても、下部通水部から沖側底層水が遊水室内へ流入しなくなり、底層水が



(a) Kr と h の関係 (b) \bar{u} と h の関係

図-8 上部ユニットの有無による効果の比較

表層に輸送されることは防止できることが明らかとなった。

以上のことから、本堤体は上部ユニットがある場合よりもない場合のほうが効果的であるということが明らかとなった。

6. 結言

- (1) 大規模模型実験を行って鉛直循環流誘起堤体の効果について検討した結果、本実験スケールにおいても本堤体の有効性が検証できた。
- (2) 実験結果と計算結果を比較した結果、本数値モデルは定量的な評価を行うためにはさらなる検討が必要であるものの、定性的な評価を行うには有効であることが明らかとなった。
- (3) 水位変動にともなう効果の検討を行った結果、本堤体の消波機能および鉛直循環流誘起機能は水位に強く依存し、水位が上部通水部の中央に位置する場合にそれらの機能が最も高くなることが明らかになった。また、平均水位が上部ユニットに達すると堤体沖側の底層水が下部通水部を通じて遊水室に流入するようになり、この問題を解消する為には上部通水部の構造諸元を再検討する必要がある。
- (4) 上部ユニットを取り除いて実験をした結果、消波機能および鉛直循環流誘起機能の水位依存性は解消できないものの、下部通水部を通じて沖側底層水が遊水室へ流入することはなくなった。

参考文献

- 1) 池田憲造 (2002): 鉛直循環流誘起堤体の開発に関する研究, 大阪市立大学大学院工学研究科土木工学研究科前期博士論文, 84p.
- 2) 重松孝昌・池田憲造・小田一紀・小池敏也・延廣玲子・遠藤徹・藤田孝・戸川進 (2003): 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, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.1206-1210.
- 3) Pengzhi Lin (1998): NUMERICAL MODELING OF BREAKING WAVES, PhD thesis, Cornell university, 282p.