

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

重松 孝昌*・池田 憲造**・小田 一紀***・藤田 孝****

本論文は、底生生物の生存に致命的な影響を及ぼし、脆弱な生態系構造をもたらす夏季の貧酸素水塊の発生を防止・抑制するため、酸素の豊富な表層水を底層へと供給することによって底層部の水質環境の改善を図るだけでなく、これによって底質環境そのものを改善することを最終的な目的とするものである。ここでは、数値モデルを用いて鉛直循環流誘起堤体の構造諸元を模索し、効果的であると思われる断面に対して模型実験を行ってその効果を検証している。

1. 緒 言

背後に都市を抱える閉鎖性内湾の環境劣化は著しく、特に夏季の生物生息環境は劣悪な状況にあることが指摘されて久しい。その原因として、浅場の埋立、水域の有効利用のために築造された垂直人工構造物の増加、埋立による停滞性水域の拡大、大量の土砂採取を行った後に放置された海底巨大窪地の創出など、人為的な沿岸域環境の改変によってもたらされた貧酸素化現象を解消するための効果的な技術が未開発であることが挙げられる。

「自然再生」と称して環境修復事業が行われようとしているが、このような事業を進めるためには、まず、国民の合意が必要である。しかし、沿岸域の環境に対する国民の意識は決して高いと言える状態ではないこと、環境問題そのものが多面性を持つために問題意識を共有することが難しいなど、沿岸域の環境問題に対して多くの人の合意を得ることは困難である。それ故、沿岸域の環境修復としてどのような問題から解決の糸口を見出せばよいのかという判断が難しいのが実情である。しかし、上記の貧酸素化現象の解消という目標は、その目標の明快さと期待される効果が理解され易いという点において、比較的多くの人々の合意が得やすいと考えられる。このような観点から、貧酸素化現象の解消という課題を克服することを、沿岸域の環境修復の糸口として捉えることができると考えられる。

そこで本研究は、夏季の閉鎖性内湾の底層部の貧酸素構造を改善し、鉛直循環を誘起・促進する堤体を開発することを目的とする。特に、高度に有効利用されている水域に適用できるような直立式の鉛直循環流誘起堤体の開発を目指すものである。

2. 開発手順

従来、構造物の開発は、水理模型実験を行って所期の目的が達成できるような構造諸元を模索し、その結果を

基に構造諸元と波浪諸元を関係づけることができる数値・数値モデルを開発するという手順で進められてきた。堤体断面を試行錯誤的に模索する場合には、模型製作にかかる時間的、経済的負担は大きなものとなる。

一方、最近では、水面変動や乱流量を高精度で予測できる数値モデルがいくつか開発され、また、計算環境の向上によって、比較的短時間で複雑な境界条件を有する非線形波動現象の計算ができるようになってきた。そこで、構造物の開発に関わる時間的・経済的コストを考慮して、本研究では、数値モデルを用いて構造諸元を模索し、模型実験で検証するという手順を踏んだ。数値モデルとして Lin・Liu (1998) が開発した高次乱流モデルと VOF 法を併用したモデルを用い、代表的な波浪諸元において堤体前面で鉛直循環流が誘起されるような構造諸元を模索した。

3. 数値計算による堤体の提案

3.1 堤体の機能

夏季の底層環境の改善を目的として、小田ら (2001) は鉛直循環流促進堤を考案し、その効果を実験的に検討している。彼らの提案している堤体は、底層部の流体塊を上層部に輸送する「底層水揚水型鉛直循環流誘起堤体」と位置づけることができる。しかし、閉鎖性海域の底層環境そのものを改善するためには、上層部の酸素の豊富な水塊を底層部に輸送して貧酸素水塊を発生させにくくすること、更に、これによって底層の好気性微生物の活性を高めて底質環境そのものを改善する方が効果的であると推測される。本研究では、このような「表層水供給型鉛直循環流誘起堤体」の開発を目的とする。開発にあたり、波浪エネルギーを利用することと、空間の高度利用の観点から低反射・直立型の堤体を念頭に置いて堤体断面の提案を行った。

3.2 堤体断面の提案

小田ら (2001) は、水面近傍と底面近傍に通水用のパイプを水平に埋め込んだ堤体について、その鉛直循環流誘起機能を実験的に検討している。ここでは、それにならって、まず、図-1 に示すような水面近傍と底面近傍に

* 正会員 工博 大阪市立大学講師 大学院工学研究科都市系専攻
** 正会員 工修 関西国際空港(株)
*** 正会員 工博 大阪市立大学教授 大学院工学研究科都市系専攻
**** 正会員 工修 日立造船(株)技術本部技術研究部

水平な通水部を有する堤体を考案した。また、小松ら(1996)は、水面付近に斜面を有する構造物を提案し、斜面上を越流した水塊を集積して水位差を獲得し、これを利用して一方向流を作り、貧酸素化した底層部に溶存酸素の豊富な表層水を送り込むことを提案している。これに倣い、図-2に示すような水面部の通水部を斜面とした構造を有する堤体を考案した。これらの堤体に対して、夏季の閉鎖性内湾の代表的な波浪条件の下で、堤体前面に「表層水供給型」の鉛直循環流が誘起される構造諸元を模索した。

尚、数値モデルは二次元問題にしか対応していないので、通水部は水平スリット構造となっていることに注意されたい。計算領域および計算条件は、表-1を参照されたい。

3.3 計算結果

図-3は、前節で提案した堤体を対象として波浪場の計算を行ない、計算開始から40周期後にその近傍に形成される一周期平均流速ベクトルを示したものである。いずれの堤体も、堤体前面では、表層が岸向きで底層が沖向きの循環流が形成されていることがわかる。また、遊

表-1 計算条件

計算領域	$x=10\text{ cm}, z=1.2\text{ m}$
メッシュサイズ	$\Delta x=2\text{ cm}$ ($0 \leq x \leq 8\text{ m}$)
	$\Delta x=1\text{ cm}$ ($8 \leq x \leq 10\text{ m}$)
	$\Delta z=2\text{ cm}$ ($0 \leq z \leq 0.7\text{ m}$)
	$\Delta z=1\text{ cm}$ ($0.7 \leq z \leq 1.2\text{ m}$)
水深	$h=1.0\text{ m}$
波浪条件	$T=1.25\text{ 秒}, H_1=5.0\text{ cm}$

水室内での鉛直混合が非常に盛んであることがわかる。ただし、上部通水部が平行である Type-A の場合には、他の堤体と比較すると堤体前面に形成される循環流の規模は小さく、また、遊水室内の鉛直混合も弱い。すなわち、上部通水部を斜面構造とすれば、水平構造の場合よりも堤体前面に形成される循環流の規模や遊水室内における鉛直混合効果が期待できると言える。図-3(b)と(c)を比較すると、堤体前面に形成される循環流の位置や規模にはほとんど変化はなく、したがって、この程度の遊水室幅の変化では、堤体前面に形成される循環流にはほとんど影響が及ばない事がわかる。

図-3(b)と(d)を比較すると、Type-Cの場合と同様に、堤体前面に形成される循環流には大差は見られないが、下部通水部の流況が異なっていることがわかる。また、堤体幅が大きい Type-E の計算結果(図-3(d))を見ると、堤体前面の極近傍に循環流が形成されるようになっていることがわかる。

図-4は、下部通水部を通過して遊水部から堤体前面へと輸送される水量(以後、「下部通水部流量」と称す)の計算結果を示したものである。上部通水部が平行な Type-A の場合には下部通水部流量 q は $30\text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ 程度であるが、上部通水部が斜面構造である Type-B および Type-D は $q=50\text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ 程度である(Type-Cの下部通水部流量は、Type-Bとほぼ同じ計算結果であったので省略している)。すなわち、上部通水部が斜面構造である方が、下部通水部を通して遊水室内から堤体前面に噴出する流量が多くなること、すなわち、遊水室からより多くの水塊が底層部へと輸送されていることがわかる。

図-5は、堤体から1m沖側に離れた地点に中立パーティクルを $z=10, 30, 50, 70, 90\text{ cm}$ の地点に放出し、その輸送過程を追跡した結果である。同図より明らかにように、 $z=70\text{ cm}, 90\text{ cm}$ の位置に置かれた中立パーティクルは、上部通水部から遊水室内に流入し、遊水室内で鉛直混合されて下層部へと輸送され、更に、下部通水部を通して堤体沖側の水底部へと輸送されていることがわかる。すなわち、提案堤体は、表層水塊を遊水室に取り込んだ後に遊水室で底層へと輸送し、さらに、沖側底層部へと輸送する機能を有することが確認された。

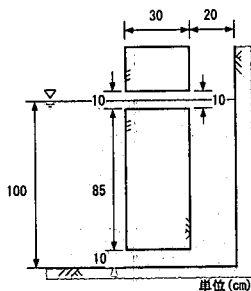


図-1 提案断面 (Type-A)

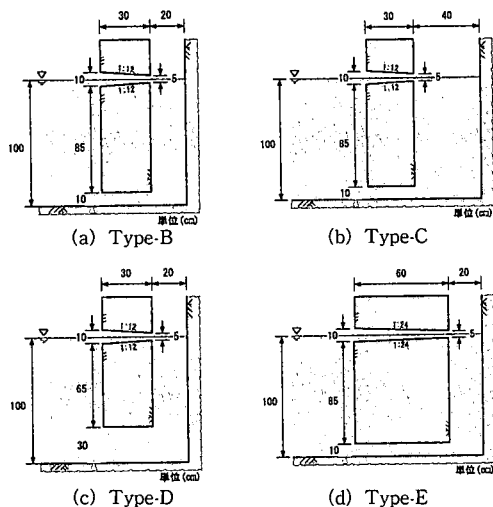
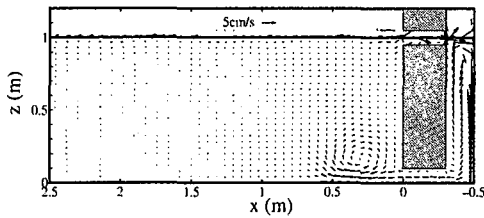
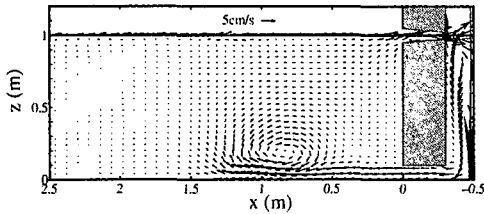


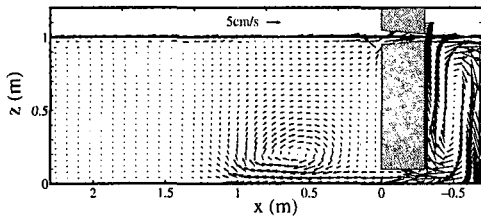
図-2 提案断面



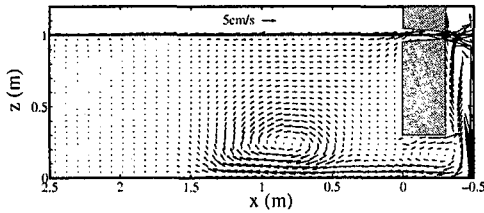
(a) Type-A



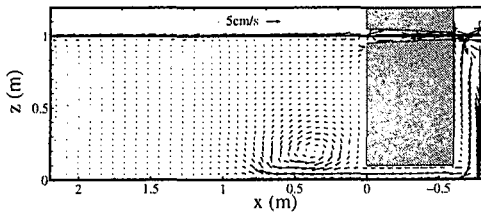
(b) Type-B



(c) Type-C



(d) Type-D

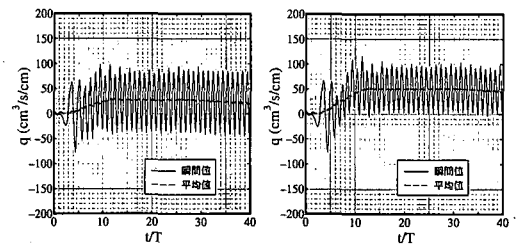


(e) Type-E

図-3 一周期平均流速ベクトル

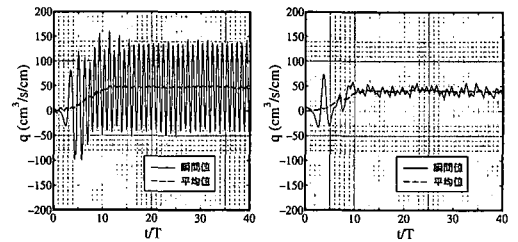
表-2 には、計算結果のデータから入・反射分離法を用いて各提案堤体の反射率を算定したものである。表-2 によれば、Type-A の反射率は $K_r=66\%$ と高くなっているが、そのほかの提案堤体の反射率は $30\% < K_r < 40\%$ 程度であり、実用に耐える程度の反射率特性を有する堤体であることがわかる。

以上の数値計算による結果から、水面付近に斜面構造



(a) Type-A

(b) Type-B



(c) Type-D

(d) Type-E

図-4 下部通水部流量

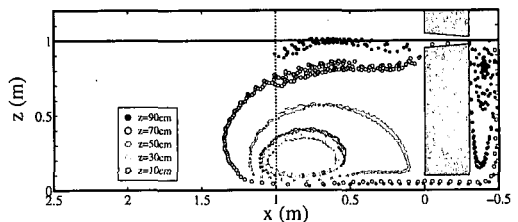


図-5 Particle trace による鉛直混合過程 (Type-B の場合)

表-2 反射率の計算結果

	Type-A	Type-B	Type-C	Type-D	Type-E
K_r	0.66	0.36	0.31	0.40	0.45

の上部通水部を有し、遊水室から沖側底層へと流体塊を放出する下部通水部を有する提案堤体 (Type-B~Type-E) は、所期の目的である「表層供給型」の鉛直循環流誘起堤体としての機能を有することが明らかになった。また、堤体前面に形成される循環流の特性、下部通水部流量、反射特性等を勘案すると、鉛直循環流を誘起する直立堤体の構造諸元として、堤体幅 $B=30$ cm、遊水室幅 $\ell=20\sim40$ cm、下部通水部高さ $D=10$ cm が効果的であると判断される。

4. 模型実験による検討

4.1 実験概要

前節で提案された鉛直循環流誘起堤体の特性を、模型実験によって検証した。実験は、長さ 50 m、幅 1 m、高さ 1.5 m の二次元造波水槽を用いて行った。水深は $h=$

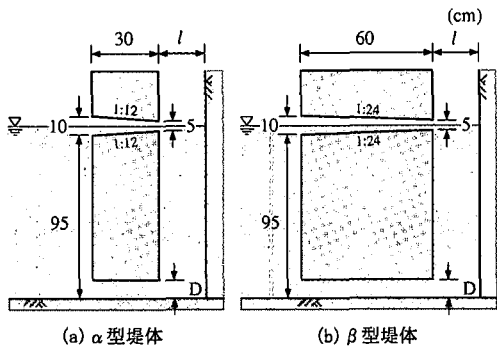


図-6 模型堤体

1.0 m で一定とし、造波機から約 35 m 離れた地点に図-6 に示すような模型堤体を設置した。図-6 において、 β 型模型とは前節の Type-E に相当する堤体幅 $B=60$ cm のもので、 α 型模型とは Type-B~Type-D に相当する堤体幅が $B=30$ cm のものである。実験条件を表-3 に示す。実験では、これらの堤体を設置した場合の反射率および一周期平均流速場、下部通水部流量を求めた。反射率の測定は容量式波高計を 2 台用いて入・反射分離法により求めた。堤体前面域の流速は電磁流速計を用いて測定し、50 周期分のデータより一周期平均流速を求めた。下部通水部流量は、堤体の沖側面の下部通水部出口において、鉛直方向に 1 cm 間隔で流速を測定して算出した。

4.2 実験結果

表-3 に、反射率 K_r の実験結果を示す。同表から、 α 型、 β 型のいずれの堤体も、比較的周期の短い $T=1.25$ 秒の波に対しては $K_r=40\%$ 前後の値を示すが、周期が長くなるとともに反射率が高くなる傾向を示すことがわかる。すなわち、提案堤体は周期依存性を有していることがわかる。

図-7 に、 $T=1.25$ 秒の場合の α 型堤体 ($\ell=20$ cm, $D=10$ cm) の前面に形成される一周期平均流速場の波形勾配 H/L による変化を示す。まず、同図より、堤体前面では、表層で岸向き、底層で沖向きの循環流が形成されており、前節における数値計算の予測どおり、 α 型堤体は所期の目的を果たすことが確認される。また、同図より、 $H/L=0.01$ の場合には堤体前面に形成される循環流の規模、速度ともに小さく、 $H/L=0.02$ および 0.03 の場合は、ともに $H/L=0.01$ の場合よりも大きくなっていることがわかる。このことより、堤体前面に形成される循環流は少なくとも波形勾配に依存することがわかる。このような傾向は、 β 型堤体にも見出された。また、循環流の規模は、波形勾配を一定として周期を変化させた場合には、 $T=1.25$ 秒の場合よりも $T=1.60$ 秒の場合の方が大きくなるが、 $T=1.90$ 秒になると α 型、 β 型

表-3 実験条件および実験結果

Case	Type	T [s]	H/L	ℓ [cm]	D [cm]	K_r	q [cm ³ /s/cm]
1	α	1.25	0.01	20	10	0.36	14.7
2			0.02	20	10	0.44	62.9
3			0.03	20	10	0.44	80.4
4			0.02	40	10	0.28	59.4
5			0.02	20	30	0.43	55.2
6		1.60	0.01	20	10	0.57	35.3
7			0.02	20	10	0.52	96.3
8			0.03	20	10	0.58	140.0
9		1.90	0.01	20	10	0.49	57.9
10			0.02	20	10	0.40	118.9
11	β	1.25	0.01	20	10	0.36	15.1
12			0.02	20	10	0.41	63.3
13			0.03	20	10	0.46	102.5
14			0.02	40	10	0.36	65.5
15			0.02	20	30	0.40	54.7
16		1.60	0.01	20	10	0.53	53.0
17			0.02	20	10	0.53	108.4
18			0.03	20	10	0.58	171.4
19		1.90	0.01	20	10	0.61	73.0
20			0.02	20	10	0.71	141.0

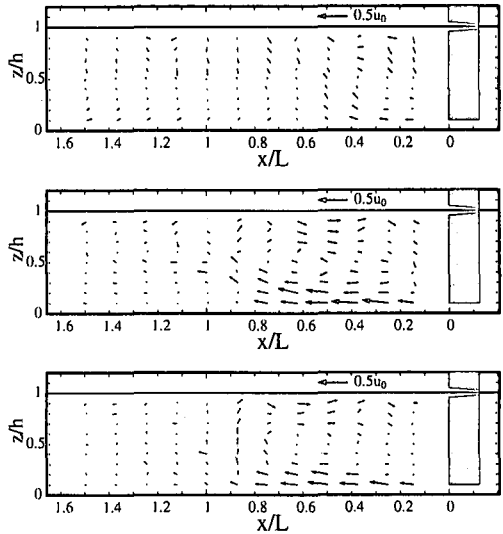


図-7 一周期平均流速ベクトル ($T=1.25$ 秒の場合)

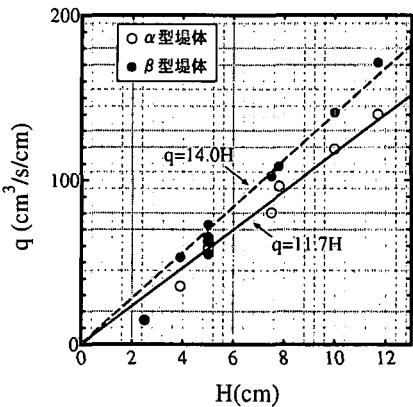


図-8 下部通水部流量の実験結果

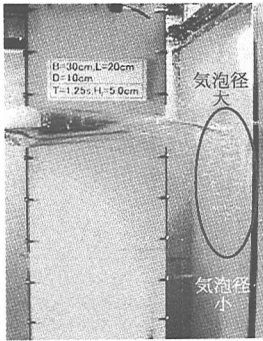


図-9 遊水室内の状況

のいずれの場合にも小さくなることが確認された。さらに、遊水室幅を変化させても循環流の規模にはほとんど変化は見られないこと、下部通水部高さが大きくなると循環流の規模が小さくなることなど、数値計算による予測と同様の傾向が確認された。

図-8 に、下部通水部流量 q の実験結果を示す。同図によれば、下部通水部流量 q と波高 H とは、ほぼ線形関係にあること、また、 H が同じであれば、 α 型の堤体よりも β 型の堤体の方が下部通水部流量は大きくなるのがわかる。また、表-3 より明らかなように、遊水室幅が下部通水部流量に及ぼす影響はほとんどないこと、下部通水部高さ D が高くなると下部通水部流量は 12~13% 程度減少することがわかる。

図-9 には、ビデオ撮影した遊水室内の状況を示す。これは、 α 型堤体 ($B=30$ cm)、遊水室幅 $\ell=20$ cm、下部通水部高さ $D=10$ cm、周期 $T=1.25$ 秒、波形勾配 $H/L=0.02$ の場合の状況である。同図には、遊水室内の不透過壁直前に比較的粒径の大きな気泡が数多く生成し

ていることが見て取れる。さらに、この大きな気泡が微細な気泡へと分裂して遊水室内の全水深にわたって分布し、下部通水部を通して沖側へと流出していく様が観察された。すなわち、この堤体は、表層水を底層部へと輸送するような鉛直循環機能だけでなく、エアレーション機能も有していると言える。

5. 結 言

本研究は、表層水を底層部へと輸送する鉛直循環流誘起堤体の開発を目的として行われた。数値モデルを用いた構造諸元の検討の後、模型実験によって数値計算による予測の検証を行った。その結果、本研究で用いた数値モデルは、堤体の特性を予測するのに非常に有用なモデルであることが確認された。また、数値モデルおよび模型実験の結果を総合的に判断すると、夏季の閉鎖性内湾の底層貧酸素化現象の解消として、水面付近に斜面構造の上部通水部を有し、堤体幅 $B=30$ cm、遊水室幅 $\ell=20\sim40$ cm、下部通水部高さ $D=10$ cm の構造諸元を有する堤体 (水深 1 m) が有力であると結論づけることができる。

参 考 文 献

- 小田一紀・重松孝昌・池田憲造・松永英郎・清水治生・藤川 孝 (2001): 鉛直循環流誘起型護岸前面における鉛直循環流の発生機構と構造特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 1296-1300.
- 小松利光・岡田知也・松永信博・植田 操・藤田和夫 (1996): 波浪エネルギーから位置エネルギーへの効率的な変換に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 551/II-37, pp. 89-99.
- Lin. and P. P.-L. Liu (1998): A numerical study of breaking waves in the surf zone, J. Fluid Mech., 359, pp. 239-264.