

第 部門 鉛直循環流誘起堤体の酸素取り込み機能に関する実験的研究

大阪市立大学工学部 学生員 建部 祐哉  
 大阪市立大学大学院工学研究科 学生員 遠藤 徹  
 大阪市立大学大学院工学研究科 正会員 重松 孝昌

1. 緒言

大阪湾のように背後に大都市を抱える閉鎖性海域では、夏季になると底層で貧酸素水塊が発生する。貧酸素水塊は好気性水生生物の棲息環境にとって極めて深刻な問題である。貧酸素水塊の発生は、海域が富栄養化すること、静穏性の確保を目的とした鉛直構造物によって海水交換が抑制されること、夏季に形成する成層化によって鉛直混合が阻害されることなどさまざまな要因が挙げられる。著者らは、このような閉鎖性海域における底層の貧酸素化の改善を目的として鉛直循環流誘起堤体(図-1)の開発に取り組んでいる。本堤体は、波が遊水室に進入することによって遊水室内外で水位差が生じ、その結果、酸素を多く含んだ表層水が下部通水部から沖側底層へと輸送されることを期待するものである。本堤体のこのような鉛直循環流を誘起する機能については、遠藤ら<sup>1)</sup>によって既に検証されている。本研究では、鉛直循環流誘起堤体の酸素取り込み機能について検討した。

2. 再曝気現象を表す基礎式

流水中の溶存酸素  $C$  (mg/l) の収支は、Streeter & Phelps の式<sup>2)</sup>によると、以下のように定義される。

$$dC/dt = -k_1L + k_2(C_s - C) \quad \dots (1)$$

ここに、 $k_1$ : 脱酸素係数 (1/s),  $L$ : BOD 濃度 (mg/l),  $k_2$ : 再曝気係数 (1/s),  $C_s$ : 飽和溶存酸素濃度 (mg/l) である。式(1)の右辺第一項は、生物等による酸素消費に関する項であり本実験では無視することができる。また、右辺第二項は再曝気と呼ばれ、任意体積の水中における溶存酸素の回復程度を表しており、その回復速度は再曝気係数

$k_2$  によって定量的に評価することができる。式(1)中の  $C$  を初期溶存酸素濃度  $C_0$  と  $C_s$  で無次元化した  $C^* = (C - C_0)/(C_s - C_0)$  を用いて  $k_2$  に関する式に書き換えると

$$k_2 = -\ln(1 - C^*)/t \quad \dots (2)$$

となる。 $k_2$  は水温に依存するため、次式を用いて温度補正を行った。

$$k_{2(20)} = k_2/\theta^{t-20} \quad \dots (3)$$

ここで、 $t$ : 水温 (°C),  $k_{2(20)}$ : 20°C に補正した再曝気係数 (1/s),  $\theta$ : 温度指数係数であり、ここでは一般的に用いられている  $\theta = 1.024$  を用いた。また、気液界面からの気体輸送速度を表す物質移動係数  $K_L$  と再曝気係数  $k_{2(20)}$  には以下の関係がある。

$$K_L = k_{2(20)} V/A \quad \dots (4)$$

ここに  $A$ : 曝気面積 (m<sup>2</sup>),  $V$ : 曝気容積 (m<sup>3</sup>) である。

3. 実験概要

実験は、長さ 20.0m、幅 0.5m、高さ 0.5m の二次元造波水槽を用いて行った。実験装置の概要を図-2に示す。角野ら<sup>3)</sup>に倣って、堤体模型から約2波長(2.0m)沖の地点にビニール膜を設置することによって、曝気面積及び曝気容積を限定した。実験では、予め、亜硫酸ナトリウムと塩化コバルトを投入して曝気容積内を無酸素状態にした後、実験を開始した。溶存酸素の時間変化は、2台の溶存酸素計(YSI製)を遊水室の水底と、堤体から1波長離れた地点に設置して測定した。溶存酸素濃度の測定は、1.0Hzで曝気容積内の溶存酸素が回復し始めてから7.0時間とした。測定された溶存酸素濃度から  $K_L$  を求め、既往の研究で得られた各種構造物の  $K_L$  と比較した。

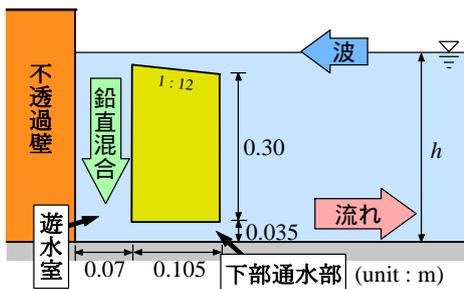


図-1 鉛直循環流誘起堤体の構造諸元

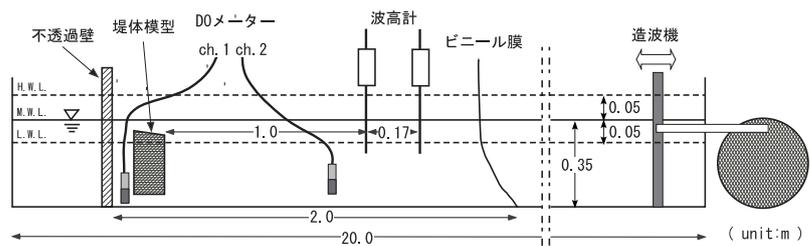


図-2 実験装置の概要

Yuya TATEBE, Toru ENDO, Takaaki SHIGEMATHU

また、堤体の沖側 1.0m と 1.17m の地点に容量式波高計 (KENEK 製) を設置して 50.0Hz で水面変動量を測定し、得られた波形データから入射分離推定法を用いて入射波高  $H$  と反射率  $K_r$  を求めた。波浪条件は、大阪湾の静穏時の実測波浪条件を基に、周期  $T = 0.75s$ 、波形勾配  $H/L = 0.02$  で一定とした。また、潮位の影響を考慮するために水深は  $h = 0.30$  から 0.40m を 0.01m 間隔に変化させた。

4. 実験結果

遊水室内および堤体から一波長沖で測定した溶存酸素濃度の時間変化にはほとんど相違がなかったため、遊水室内で測定したデータを用いて結果を示す。 $h = 0.30, 0.35, 0.40m$  の場合の無次元溶存酸素濃度の時間変化を図 - 3 に示す。 $h = 0.35m$  の場合の溶存酸素濃度の回復は、 $h = 0.30$  および  $0.40m$  の場合のそれよりも速いことがわかる。目視観察によれば、 $h = 0.35m$  の場合は堤体上部で砕波が発生して乱れが大きかったのに対して、 $h = 0.3, 0.4m$  の場合には乱れがほとんど発生していなかったことから、堤体上部における乱れと大気からの酸素輸送量との間には密接な関係があるのではないかと推察される。

図 - 4 に物質移動係数  $K_L$  と水深  $h$  との関係、および、反射率  $K_r$  と水深  $h$  との関係を示す。同図(a)によると、 $K_L$  は  $h = 0.35m$  で最大値を示し、 $h = 0.35m$  よりも水深が大きくなっても、小さくなっても  $K_L$  は減少することがわかる。また、 $h = 0.39m$  以上および  $h = 0.32m$  以下ではほぼ同じ値をとることもわかる。図 4 (b) の反射率  $K_r$  の実験結果を見ると、 $h = 0.35m$  で  $K_r$  は最小値をとり、水深が  $0.35m$  よりも大きくなっても小さくなっても反射率は高くなることわかる。すなわち、反射率と物質移動係数とは密接な関係があることがわかる。

5. 他の構造物の物質移動係数との比較

角野ら<sup>3)</sup>は、縦スリット堤や捨石堤を対象として  $K_L$  を求めている。本堤体の  $K_L$  と既往の研究による他の構造物の既往の研究の  $K_L$  を表 - 1 に示す。本堤体の  $h = 0.30$ ,

表 - 1  $K_L$  を用いた各種構造物の曝気機能の比較

Type	水深 $h$ (m)	周期 $T$ (s)	波形勾配 $H/L$	反射率 $K_r$	物質移動係数 $K_L (\times 10^{-5} \text{ m/s})$
鉛直循環流誘起堤体	0.30	0.75	0.02	0.96	0.36
	0.35	0.75	0.02	0.42	3.27
	0.40	0.75	0.02	0.92	0.64
静水状態	0.30	-	-	-	0.19
部分重複波	0.30	0.88	0.02	0.34	0.46
1/20斜面	0.30	1.20	0.02	-	10.00
縦スリット堤	0.30	0.88	0.02	0.33	1.07
捨石堤	0.30	0.88	0.02	0.29	1.56

0.40m での  $K_L$  は、部分重複波面下における  $K_L$  とほぼ等しい。 $h = 0.35m$  の場合の本堤体の  $K_L$  は、1/20 斜面の  $K_L$  の約 1/3 倍、縦スリット堤の 3 倍、捨石堤の 2 倍程度の大きな値を示している。斜面の  $K_L$  が大きい理由として、砕波によって発生する気泡を介しての酸素の取り込みが大きいのではないかと考えられる。本堤体は、今回の実験では遊水室内で砕波に伴う気泡が多少は発生していたが、水深 2m で行った大規模模型実験では大量の気泡が発生することが確認されており、曝気効果に及ぼすスケールの影響についても検討する必要があることがわかった。

6. 結言

本堤体の再曝気特性として以下が明らかとなった。

本堤体の酸素取り込み機能は水深に強く依存する  $K_L$  と反射率には密接な関係がある。

本堤体が最も効率的な酸素取り込み機能を有する場合、縦スリット堤の約 3 倍、捨石堤の約 2 倍の  $K_L$  を示すことが明らかになった。

参考文献

- 1) 遠藤ら(2005): 潮位変動が鉛直循環流誘起堤体の効果に及ぼす影響, 海洋開発論文集, 第 21 巻, pp.617-622.
- 2) Streeter, H. W. and Phelps, E. B.(1925): A study of the pollution and natural purification of the Ohio River, Public Health Bulletin, 146.
- 3) 角野ら(1994): 海岸構造物の曝気能に関する実験的再考察, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp.1036-1040.

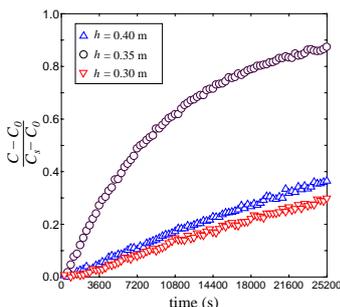
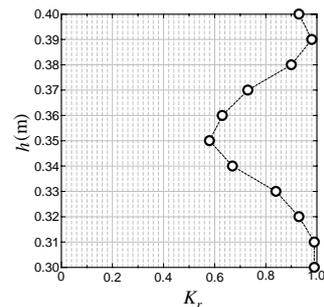
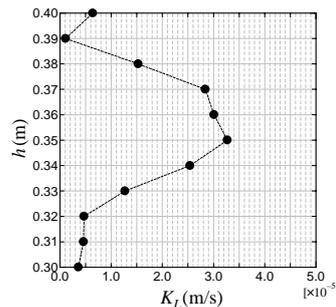


図 - 3 無次元溶存酸素濃度の経時変化



(a) 物質移動係数  $K_L$  (b) 反射率  $K_r$

図 - 4 水深別の  $K_L$  と反射率