

構造物によるエアレーション効果比較模型実験

堀江 毅*・細川 恭史**・三好 英一***・関根 好幸***

1. ま え が き

沿岸海域では水生生物の諸活動が沖合深海域に比べて活発であり、有機物の分解、油濁等の汚染物の分解、病原菌などの死滅、微細濁り粒子の物理的・生物的捕捉などといった海水の自浄作用による水質浄化の高い能力を有している。こうした沿岸海域の高い生物活性を支える重要な因子として、水中の溶存酸素濃度を維持するための大気中からの酸素の溶解があげられる。そこで、沿岸部での酸素溶解作用に着目し、各種護岸構造物の曝気能を比較評価しようとする試みがなされてきている。筆者らは、既に直立消波護岸について水理特性とともに曝気能についても検討した水理模型実験例を報告している^{1),2),3)}。ここでは、一様勾配の傾斜面と2種の異なる消波形式の構造物について実施した水理模型実験の結果を報告する。

2. 実験の概略

実験は、長さ22m、幅1m、高さ2mの片面一部強化ガラス張りの鋼性二次元水路内に比較検討する各構造物模型を設置し、水路底からの水深を60cmとして、周期および波高を変えた数種の規則波を作用させ、計12ケースを行った。実験に供した模型は、自然海浜に模した1/30一様勾配の傾斜面と、図-1に示す(a)曲面スリットケーソン堤、(b)消波ブロック積護岸堤の3種で、縮尺は1/15とした。表-1に実験ケースごとの作用波の諸元を示す。

実験では、各ケースごとに次の3項目を測定した。①実験開始前に薬品により水路内水を貧酸素状態とした後、作用波をかけ始め、溶存酸素濃度の回復状況を、図-2に示す位置に設置した6台のDOメータにより、8～23箇所の測点での経時変化として測定した。波は80～200分間作用させ、その間5～20分間隔で測定を続けた。②実験終了直前には、曝気点付近に染料を投入し、

その拡がりぐあいを35mmカラーフィルムに10秒毎で撮影した。また、③沖側および岸側模型前面に2台ずつ設置した2組の波高計により波形記録をとった。

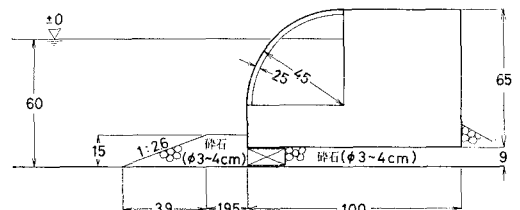
3. 実験結果

(1) 溶存酸素濃度の回復状況

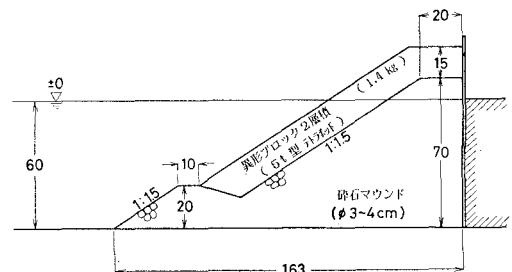
図-3に溶存酸素濃度の回復状況の一例を示す。図中 C^* は、実測濃度 C に対し、初期濃度 C_0 、飽和濃度 C_s を用いて

$$C^* = \frac{C - C_0}{C_s - C_0} \dots\dots\dots (1)$$

と無次元化した値である。傾斜面模型では、碎波点およびそれより岸側の地点での溶存酸素濃度の上昇が急激であり、他の2種の消波構造物模型でも、構造物近傍の非常に乱れた地点で急激な溶存酸素濃度の上昇がみられる。これらの地点では、酸素の活発な溶解が生起していると思われる、これを曝気点と称す。護岸の構造形式の違



(a) 曲面スリットケーソン堤模型
(開口率: 30%)



(b) 消波ブロック積護岸堤模型

図-1 消波構造物模型断面 (単位: cm)

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部海水浄化研究室 長

** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 水工部高潮津波研究室 長

*** 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部海水浄化研究室

表-1 実験ケースと作用波の諸元および実験結果

模型形状	ケース	周期 T (s)	換算沖波 波高 H_0 (cm)	水深60 cmでの 波高 H (cm)	曝気点 での波 高 H_b (cm)	換算沖波 波長 L_0 (m)	水深60 cmでの 波長 L (m)	曝気点 での波 長 L_b (m)	曝気点 での水 深 h_b (cm)	反射率* K_r	模型単位幅当 り作用波1周 期間の入射波 エネルギー E (J/m)	模型単位幅当 り作用波1周 期間のエネルギー 散逸 E_a (J/m)	エネルギー 散逸率 E_a/E	再曝気 係数 k_2 ($\times 10^{-4}$ /s)
1/30傾斜面 自然海浜	C-1	1.03	3.5	3.3	4.1	1.66	1.63	0.80	5.0	0.03	1.6	1.5	0.94	5
	C-2		4.8	4.6	5.3			0.93	6.7	0.07	3.1	2.9	0.94	7
	C-3		6.9	6.6	7.1			1.10	9.0	0.05	6.7	6.0	0.90	11
	C-4	1.55	3.7	3.3	5.5	3.74	3.13	1.35	6.7	0.03	4.9	4.7	0.96	6
	C-5		7.3	6.6	8.8			1.80	11	0.07	16.7	16.0	0.96	10
曲面スリット ケーソン堤	C-6	1.03	3.5	3.3	3.3	1.66	1.63	1.63	60	0.38	2.1	1.0	0.48	0.2
	C-7		4.8	4.6	4.6					0.27	4.1	2.1	0.51	0.9
	C-8		6.9	6.6	6.6					0.23	8.5	4.4	0.52	1.0
	C-9	1.55	3.7	3.3	3.3	3.74	3.13	3.13	60	0.29	4.1	2.7	0.66	0.3
	C-10		7.3	6.6	6.6					0.18	16.4	11.4	0.70	0.8
消波ブロック 積造岸堤	C-11	1.03	6.9	6.6	6.6	1.66	1.63	1.63	60	0.26	8.5	4.4	0.52	0.9
	C-12	1.55	7.3	6.6	6.6	3.74	3.13	3.13	60	0.25	16.4	11.0	0.67	0.7

* 反射率は沖側に設置した2台の波高計の波形記録により算出した値である。

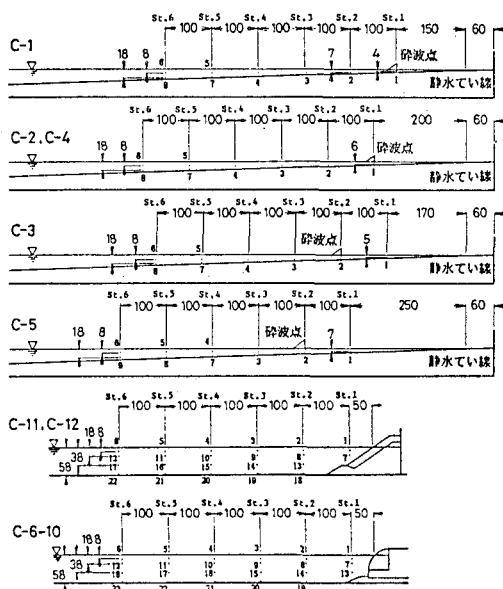


図-2 溶存酸素濃度測定位置 (単位: cm)

いによる溶存酸素濃度上昇のようすの差異を比較すると、傾斜面模型では、他の2種の消波構造物に比べて、実験開始直後の濃度上昇速度が速い。

(2) 染料の拡がりぐあい

曝気点に投入した過マンガン酸カリウム溶液の赤色着色部分の先端が拡がってゆくようすの一例を図-4に示す。曲面スリットケーソン堤模型では、相対的に沖方向への拡がり速く鉛直方向の混合も良い。これに対し、消波ブロック積造岸堤模型では、鉛直方向の混合はなく沖方向への拡がり速くは表層のみで、その速度も相対的に遅い。傾斜面模型では、水深が浅いため鉛直方向の混合の

相対比較は困難であるが、沖方向への拡がり速くは曲面スリットケーソン堤模型に比べて遅い。

ここでは示していないが、実測濃度分布より得られた溶存酸素の沖方向への運搬の状況も、染料の拡がりぐあいと同じ傾向がみられ、拡がりの速いケースでは、沖合の溶存酸素濃度の回復も速い。

(3) 各構造物での波の反射率

波形記録から入・反射波の分離計算⁴⁾を行い、反射率を求めた結果を表-1中に示す。ここで、曲面スリットケーソン堤に関しては、今回実験に供した模型の断面諸元に対して実験水深 ($h=60$ cm) が、消波効果の高くなる最適水深⁵⁾に近いので、かなり低い反射率となっている。

4. 結果の考察

(1) 再曝気に関する解析法

まず、完全混合場とした場合の曝気点での酸素の溶解は、次式で表わされる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = k_2(C_s - C) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 k_2 は、再曝気係数と呼ばれ、溶解による濃度上昇を規定し、この値が大きいほど急速に濃度が回復する。式(1)を用いて式(2)を解くと、次の関係式が求まる。

$$k_2 \cdot t = \ln(1 - C^*) \quad \dots\dots\dots (3)$$

したがって、 $-\ln(1 - C^*)$ の値を時間 t に対してプロットすれば、その傾きが k_2 の値となる。

しかし、水路などで沖方向への溶存酸素濃度分布があると、厳密には式(2)が成立せず、沖方向への溶存酸素の拡散を考慮して次式の関係を考えることになる。

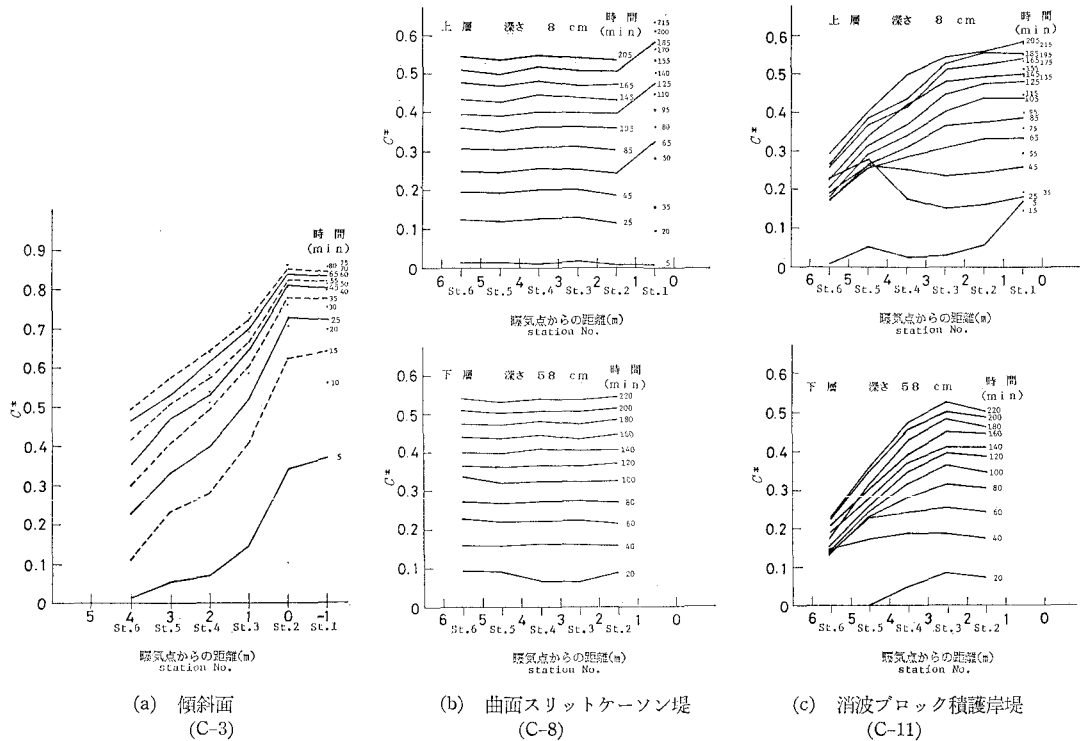


図-3 溶存酸素濃度回復状況

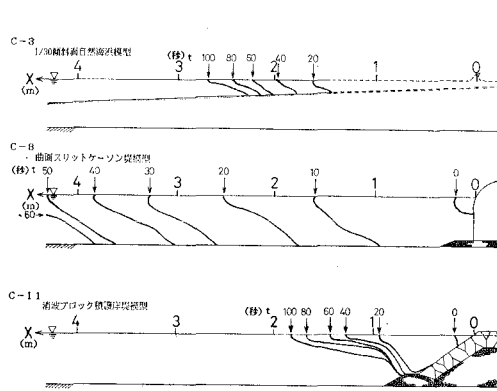


図-4 曝気点に投入した染料の拡がりぐあい

$$\frac{\partial C}{\partial t} = k_2(C_s - C) - D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 D_x は、沖方向への拡散係数、 x は、沖方向への曝気点からの距離である。

さらに、水路を流れのない半無限次元拡散場とし、波による往復流の効果をも含めた拡散係数 D を水路内で一定として、溶存酸素濃度 $C(x, t)$ の分布を考えると、次の解析解が得られる。

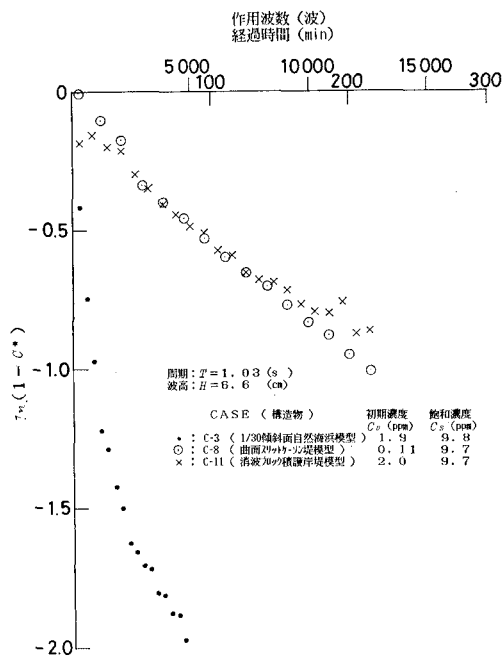
$$C^*(x, t) = -\exp\left(\frac{K}{2D}x + \frac{K^2}{4D}t\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} + \sqrt{\frac{K^2}{4D}t}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\therefore \operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x), \quad K = k_2 \cdot h_b$$

(2) 再曝気係数の検討

まず、式 (2) に基いて k_2 値を算定する。図-5 に式 (3) のプロットの一例を示すが、時間経過に伴い傾きが緩くなる傾向がうかがえる。ここでは、実験開始直後のデータについて求めた k_2 を表-1 中に示す。図-5 および表-1 中の k_2 より、次のような特徴が読みとれる。
①同一周期の作用波については、波高が高くなるほど k_2 は大きくなる。同一波高の作用波に対して、周期の違いによる k_2 の差異は顕著でない。
②傾斜面模型の k_2 は、他の2消波構造物の k_2 に比べ1オーダー高い。
③いずれの作用波に対しても、曲面スリットゲートン堤模型の k_2 が、消波ブロック積護岸堤模型の k_2 よりやや大きい。

つぎに、式 (4) の D_x を染料投入後約20秒間での拡がり面積より見積り、また、二次偏微分値を曝気点から沖側へ3番目の断面までの各断面の C^* の鉛直平均値と各断面間距離とから差分値として求め、 k_2 の概略値を推算した。さらに、式 (5) の解のパラメータ D および k_2

図-5 経過時間に対する $-\ln(1-C^*)$

の値を C の実測値より求めた。これらの値と式 (2) より算定した k_2 との比較を表-2に示す。これより、式 (2) より算定した k_2 より、式 (4)、式 (5) により算定した k_2 は、1~2 オーダ大きく評価される。ここで、図-6に、C-3 について各解析法による k_2 の実験開始からの経過時間に対する変化を示す。また、図-6中には、次の式による k_2 の算定値も示している。

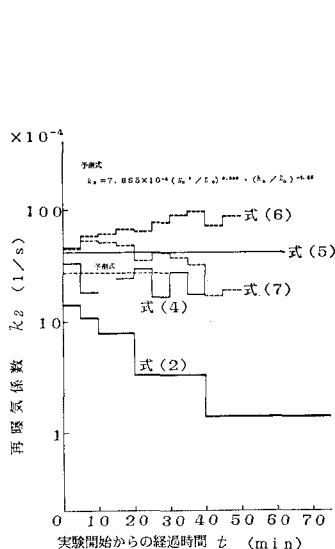


図-6 各解析法による再曝気係数の比較 (C-3)

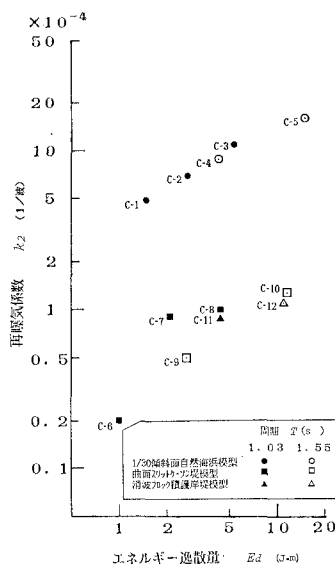


図-7 エネルギー逸散率と再曝気係数の関係

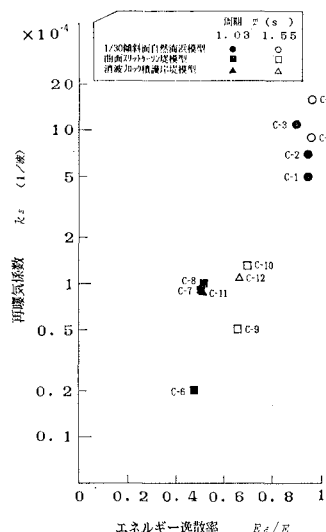


図-8 エネルギー逸散率と再曝気係数の関係

[水路内全体の溶存酸素量の増加速度]

$$= k_2 \cdot [\text{曝気域の溶存酸素不足量}] \dots\dots\dots (6)$$

[曝気域の溶存酸素量の増加速度]

$$= k_2 \cdot [\text{曝気域の溶存酸素不足量}] \dots\dots\dots (7)$$

ここで、傾斜面模型での曝気域は、碎波帯内である。さらには、沖方向での濃度差のある範囲の溶存酸素量の増加速度が、曝気域の溶存酸素不足量に比例するとして求めた、崩れ波碎波に対する k_2 の予測式が提案されており⁶⁾ この式による値も示している。図-6からも、実験開始直後の微小時間範囲について解析を行えば、 k_2 に対する拡散項の影響は無視し得ると考えられる。

(3) エネルギー逸散と再曝気係数の関係

周期・波高および反射率の加味されたエネルギー逸散量 E_d と k_2 の関係を両対数グラフにプロットすると、図-7のようになる。すなわち、傾斜面模型では、諸元の異なる5種の波に対する k_2 値はほぼ同一直線上に並び、その傾きは0.5程度となる。また、他の2消波構造物模型のプロットも、傾き0.6~0.7程度の別の直線として表わされる。さらに、各作用波の入射波のエネルギー E で E_d を除したエネルギー逸散率 E_d/E と k_2 との関係を図-8に示すと、同一周期の波に対しては、 E_d/E が大きくなると、 k_2 も大きくなる傾向がうかがえる。

5. まとめ

傾斜面および曲面スリットケーソン堤と消波ブロック積護岸堤について、曝気能に関する比較模型実験を行った。この結果、拡散項を省略した式より算定した再曝気係数 k_2 は、傾斜面の値に比べて2消波構造物の値は、

表-2 各解析法による k_2 値の比較

模型形状	ケース	式(2)より k_2 ($\times 10^{-4}$ /s)	式(4)より概算			式(5)より	
			D_x (cm^2 /s)	$\partial^2 C^* / \partial x^2$ ($\times 10^{-4}$ /cm 2)	k_2 ($\times 10^{-4}$ /s)	D (cm^2 /s)	k_2 ($\times 10^{-4}$ /s)
1/30傾斜面 自然海浜	C-3	11	86	10	33	70	45
	C-5	10	82	32	76	43	17
曲面スリット ケーソン堤	C-8	1.0	600	—	—	1500	36
	C-10	0.8	800	—	—	—	—
消波ブロック 積護岸堤	C-11	0.9	110	7.6	20	1320	16
	C-12	0.7	120	1.7	6	4100	26

1 オーダ低く評価された。しかし、曲面スリットケーソン堤は、傾斜面・消波ブロック積護岸堤に比べて、沖方向・鉛直方向ともによく拡散が行われる。このため、見掛上 k_2 値が過小に評価されたと考えられる。ただし、拡散項を省略した式より k_2 を算定する方法においても、実験開始直後のより微小な時間範囲について解析を行うことにより、 k_2 値を過小評価することはされられると考えられる。これより、拡散項を省略した式より k_2 を算定する方法では、曝気点での溶存酸素濃度の上昇速度を測定することで容易に k_2 値が算定できる点を考慮すると、他の解析方法に比べて、近似的な予測方法としては

妥当であると考えられる。

護岸前面海域の水質改善効果を維持するための溶存酸素濃度を左右する因子としては、曝気能に係る護岸における消波による波のエネルギー逸散、曝気点で生じた溶入酸素を沖方向および水深方向へ運搬する能力があげられる。この点において、今回実験を行った範囲内では、曲面スリットケーソン堤は、護岸前面海域の水質改善面からも好ましい構造物といえる。

参 考 文 献

- 1) 細川恭史・三好英一・菊地 治： 直立消波護岸の水利特性および曝気能実験，港湾技研資料 No. 132, 1979.
- 2) 堀江 毅・細川恭史・三好英一： 護岸形状による曝気能の比較，第 13 回日本水質汚濁研究会年次学術講演会講演集，pp. 139~140, 1979.
- 3) 堀江 毅・細川恭史・三好英一： 護岸の曝気能比較に関する実験，第 27 回海岸工学講演会論文集，pp. 527~531, 1980.
- 4) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治： 不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料 No. 248, 1976.
- 5) 谷本勝利・原中祐人・富田英治・和泉田芳和・鈴木論司： 曲面スリットケーソンの水利特性に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第 19 巻，第 4 号，pp. 3~53, 1980.
- 6) 細井由彦・村上仁士・大東正男： 崩れ波砕波による再曝気に関する研究，第 30 回海岸工学講演会論文集，pp. 551~555, 1983.