

護岸の曝気能比較に関する実験

堀江 毅*・細川 恭史**・三好 英一***

1. まえがき

護岸の機能として最も重視される点は、内陸域に対する高潮防護であるが、一方、前面海域の環境、景観、海岸線の利用などの面への配慮も要請されるようになってきている。護岸による消波現象は、大気から水中への酸素の溶解という曝気効果を伴う。ここでは、護岸の曝気効果についての実験方法の確立と解析方法の策定を試み、あわせていくつかの形状の護岸について曝気能の相互比較を行なった。

水中へのガスの溶解現象は、基本的には液相・気相での拡散現象として考えられる。溶解速度は、水表面付近での乱れの構造というミクロな現象と、水塊全体の平均流速や水深、波などの現象とに関連づけられる。しかし曝気機構の詳細については未解明な部分も残されており、特に波が砕け強く乱れている場や、大気から水中へ気泡が連行されている場などでは水理学的相似律が不明である。このため、曝気機構の実験に際しては、① 相似律、② 流れおよび拡散場での取り扱い、等に留意する必要がある。現実に近い条件で行ないたい時は、なるべく大きな実験装置を用いることが望ましい。大きな装置を用いると、曝気が行なわれ酸素が溶入してくる水域とそれ以外の水域との間に溶存酸素濃度の差が生じ、水域間の酸素の移動についても考慮を払う必要が生じる。

こうした事情から、進行波や重複波による水表面からの酸素溶解の研究や平均流速・水深などの水理量による河川の曝気能記述の研究などに比して、消波もしくは碎波による曝気特性の研究例^{1),2)}は少ない。

2. 実験装置および方法

(1) 実験装置

図-1 に示すような、幅 1m×高さ 2m×長さ 22m の二次元水路を用いた。この水路には、攪拌装置付の高水槽が付設され、弁を介してパイプにて通じている。一端からフラップ式造波機にて規則波を作用させることが

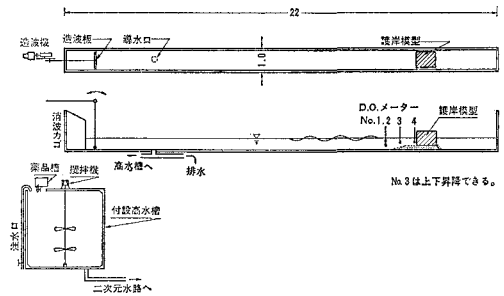


図-1 実験水路 (単位: m)

できる。

(2) 実験方法³⁾

付設高水槽にて、亜硫酸ナトリウムと塩化コバルトを用いて溶存酸素濃度を下げた脱酸素水を作成した。これ

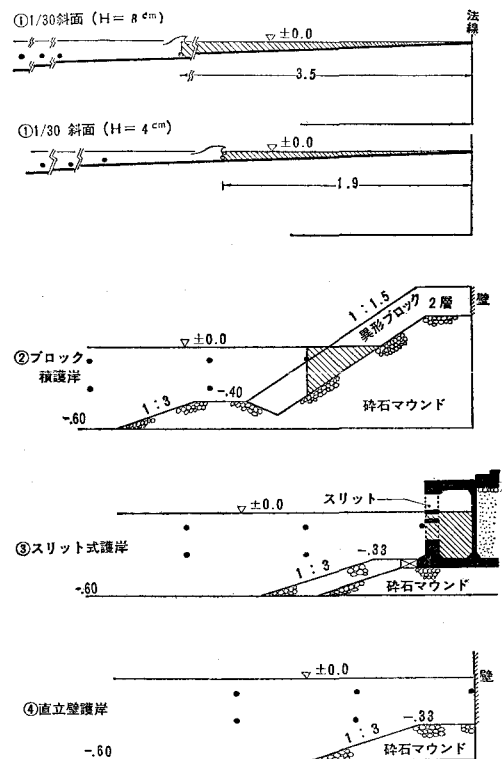


図-2 比較護岸の断面図 (単位: m)

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 海水浄化研究室長

** 正会員 運輸省港湾技術研究所 海水浄化研究室

*** 運輸省港湾技術研究所 海水浄化研究室

を静かに二次元水路に導き、実験供試水とした。水路他端に設置した護岸模型に規則波を作用させ、時間とともに水路内の溶存酸素濃度が徐々に回復する様子を4台の溶存酸素計を用いて測定した。溶存酸素計のセンサーは、消波が起り非常に乱れた曝気水域の他に、沖側にも半波長ごとに数点にわたって設置し、測定した。作用波の特性については、沖側に設置した2台の波高計による同時波高記録より、不規則波に対する入・反射波の分離推定法を用い、入射波高、反射率を算定した。実験終了後、水路内の水の一部を採水し、エアーポンプで曝気後飽和溶存酸素濃度を測定した。また、水温測定、染料による拡散状況の観察等も行なった。

ここで用いられた護岸模型は、図-2に示す4種のものである。すなわち、①自然海浜に擬した1/30勾配の斜面、②異形ブロックを2段積みした消波護岸、③遊水部を有する縦スリット式の直立消波護岸、④直立壁護岸、の4断面形である。模型縮尺は1/15とし、水深9m、卓越波周期4秒、波高0.6~1.2mの海岸を想定し、模型水深60cm、作用波周期1.03秒、波高4~8cmとした。

3. 解析方法

(1) 完全混合場での解析

酸素の溶解は、次式で表わされる。

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

ここで、 C は溶存酸素濃度 (mg/l)、 C_s は飽和溶存酸素濃度 (mg/l)、 t は時間 (h)、 k_2 は溶解速度を規定する係数 (1/h) である。 k_2 により曝気の効率が表わされることから、これを再曝気係数と呼ぶ。再曝気係数は、水表面付近での乱れのエネルギーと深く結びつけられ、逸散エネルギーの 0.408 乗⁴⁾もしくは 3/8 乗⁵⁾に比例するとの報告もある。

C_0 を初期濃度とし、 C^* を無次元溶存酸素濃度として $C^* = (C - C_0)/(C_s - C_0)$ で与えると、式 (1) は次のように解ける。

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

$(1 - C^*)$ の対数と t とをプロットした直線の傾きから、 k_2 が求められる。

(2) 一次元拡散場での解析

曝気域での溶存酸素濃度が回復し、水路内での濃度差が顕著になると、沖側への拡散の影響により濃度上昇が遅くなる。つまり式 (1) が成立せず、 k_2 が時間とともに減少してしまうことになる。そこで、水路を流れのない半無限一次元拡散場とし、波による往復流の効果も含めた拡散係数 (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。 x 軸は、護岸を原点として沖側へとり、曝気は原点にて生起しているとした。

境界 $x=0$ で、境界濃度 $C(0, t)$ の関数として酸素の溶解速度が与えられる半無限拡散場を解くことになる。ここでは拡散式の線型性を用いて次の如く考える。

$t=0$ のとき、原点 $x=0$ に M なる質量が集中している場合、拡散により距離 $x=x$ 、時刻 $t=t$ における濃度 C は、次式の如く Gauss の関数で表わされる。

$$C(x, t) = \frac{M}{\sqrt{4\pi Dt}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad \dots\dots\dots(3)$$

酸素の溶解の速度を w とすると、時刻 0 から時刻 t までに溶解した総酸素量についての拡散による上式の重ね合わせを考えれば、 $C(x, t)$ が表わされる。

$$C^*(x, t) = \int_0^t \frac{w}{\sqrt{4\pi D(t-t')}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4D(t-t')}\right) dt' \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$w = K \cdot (1 - C^*(0, t)) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$C^*(\infty, t) = 0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$C^*(x, 0) = 0 \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで濃度は、初期濃度 C_0 および飽和濃度 C_s を用いて無次元化してある。この積分方程式を解く。

1° $x=0$ についての解

$x=0$ での解を求める。式 (4) は、 $x=0$ では次式となる。

$$C^*(0, t) = \frac{K}{\sqrt{4\pi D}} \int_0^t \frac{(1 - C^*(0, t'))}{\sqrt{t-t'}} dt' \quad \dots\dots\dots(8)$$

$C^*(0, t)$ のラプラス変換を $Y(s)$ とし、ラプラス変換の合成に関する性質等を用いると、式 (8) は次の如くなる。

$$Y(s) = \frac{K}{\sqrt{4\pi D}} \left(\frac{1}{s} - Y(s) \right) \cdot \sqrt{\frac{\pi}{s}} \quad \dots\dots\dots(9)$$

これを $Y(s)$ について解き、原空間に戻せば C^* は次のように求まる。

$$C^*(0, t) = 1 + \exp(a^2 \cdot t) \cdot (\operatorname{erf}(a\sqrt{t}) - 1) \quad \dots\dots\dots(10)$$

ただし

$$a^2 = \frac{K^2}{4D}, \quad \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-\xi^2) d\xi$$

2° $x \neq 0$ についての解

式 (10) により、 K, D を用いて記述された境界濃度を用いて式 (4) を解く。

$$f_1(t') = 1 - C^*(0, t') \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$f_2(t-t') = \sqrt{\frac{D}{\pi(t-t')}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4D(t-t')}\right) \quad \dots\dots\dots(12)$$

とおき、 $f_1, f_2, C^*(x, t), C^*(0, t)$ のラプラス変換を $F_1, F_2, Y(s), Y_0(s)$ とすれば、式 (4) のラプラス変換は、次のようになる。

$$Y(s) = \frac{K}{2D} \cdot F_1(s) \cdot F_2(s) \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$F_1(s) = \frac{1}{s} - Y_0(s) \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$F_2(s) = \sqrt{\frac{D}{s}} \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{s}{D}} \cdot x\right) \quad \dots\dots\dots(15)$$

$Y(s)$ は式 (9) で定義され、式 (13) を整理すると、

$$Y(s) = \sqrt{\frac{K^2}{4D}} \cdot \frac{1}{s \left(\sqrt{s} + \sqrt{\frac{K^2}{4D}} \right)} \cdot \exp \left(-\sqrt{\frac{s}{D}} \cdot x \right) \quad \dots\dots\dots (16)$$

となり、結局次のような解が得られる。

$$C^*(x, t) = -\exp \left(\frac{Kx}{2D} \right) \cdot \exp \left(\frac{K^2 t}{4D} \right) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{K^2 t}{4D}} + \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad \dots\dots\dots (17)$$

ただし

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$$

式 (17) による C^* の分布を図示すると例えば 図-3 の如くなる。 C^* は、曝気点での曝気係数のみでなく、水路内の拡散係数 D によっても影響を受けることがわかる。

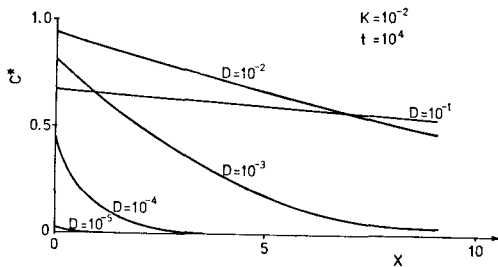


図-3 溶存酸素濃度の沖方向の分布曲線

4. 実験結果および考察

各実験ケース毎に、1～3時間(約7000～10000波)にわたって波を作用させた。

1/30 斜面では、進行してきた波が砕波限界水深で空気を巻き込みながら砕波し、非常に乱れた砕波域を形成している。この砕波と、砕波点で浅での水表面の乱れによって酸素の溶解が引き起こされている。水深が浅く水体積が小さいため、深さ方向の混合も良い。ブロック積護岸、スリット式護岸の両断面では、4 cm, 8 cm の波高では砕波しないまま護岸に波があたっている。ブロック積み護岸では異形ブロックに波があたり、空隙を乱れながら水が進入し往復すること、スリット式護岸ではスリット間隙を強い流れが往復すること、遊水部内の水が横さんから滝のように落下して沖へ流れることなどにより乱れが発生し、酸素の溶解が引き起こされていると思われる。一方、直立壁設置時には、反射による重複波の形成が見られ、腹の部分で水粒子の一部が水表面から跳ね上がる現象が観察される。跳上および直立壁部が水が濡らし落下することなどにより、水表面からの酸素溶解が引き起こされる。

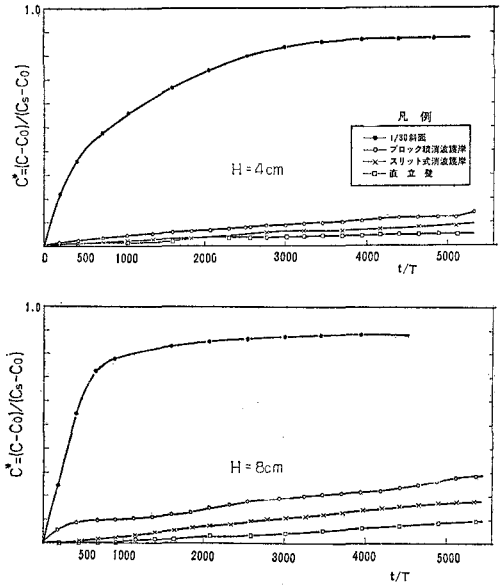


図-4 曝気点における無次元溶存酸素濃度の時間変化

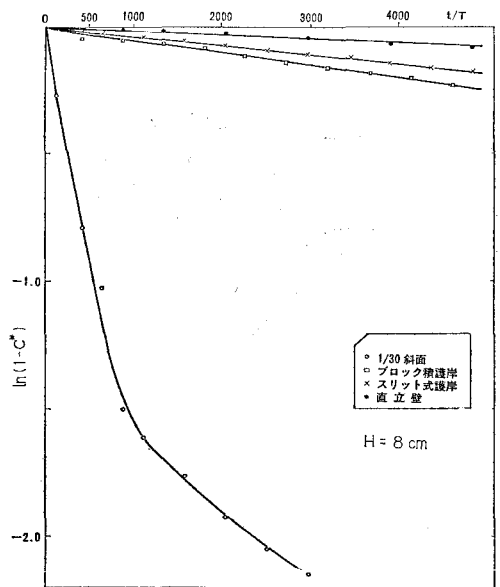


図-5 無次元酸素不足濃度と時間との関係例

曝気点での無次元溶存酸素濃度 (C^*) の回復を図-4 に示す。 $1-C^*$ の対数と時間との関係は、図-5 のようになり、 C^* の回復とともに直線からはずれることがわかる。図-4, 5 より、斜面での酸素溶解の大きなことがうかがえる。護岸前面での沖方向への酸素濃度分布例を図-6 に示す。図-6 では、波高 4 cm の波を 4000 波作用させた後の C^* の値を示してある。直立壁護岸は、酸素溶解とともに拡散も小さいようである。

式 (17) に C^* 実測値をあてはめ、 K , D を求めた結果を表-1 に示してある。ここで、 K , D はいずれも酸素

表-1 実験結果一欄表

ケース No.	護岸形状	入射波		反射率 K_R	単位幅当りの 逸散エネルギー		K の比	D の比	算定容入酸素量 W の比	
		周期 T	波高 H		E_d	比 E_d			$t/T=10$	$t/T=100$
1	1/30 斜面	1.03	0.043	0.07	1.84	22	220	50	30	40
2	1/30 斜面	1.03	0.081	0.04	6.55	78	370	100	100	120
3	ブロック積護岸	1.03	0.040	0.20	1.53	18	6	10	4	5
4	ブロック積護岸	1.03	0.080	0.17	6.21	74	17	10	13	15
5	ブロック積護岸	1.03	0.119	0.13	13.91	165	36	10	26	30
6	スリット式護岸	1.03	0.040	0.57	1.08	13	3	10	4	4
7	スリット式護岸	1.03	0.077	0.43	4.83	57	7	10	8	7
8	直立壁	1.03	0.025*	0.93	0.084	1	1	1	1	1
9	直立壁	1.03	0.053*	0.93	0.379	4.5	4	25	3	3

* 波高が不安定である。

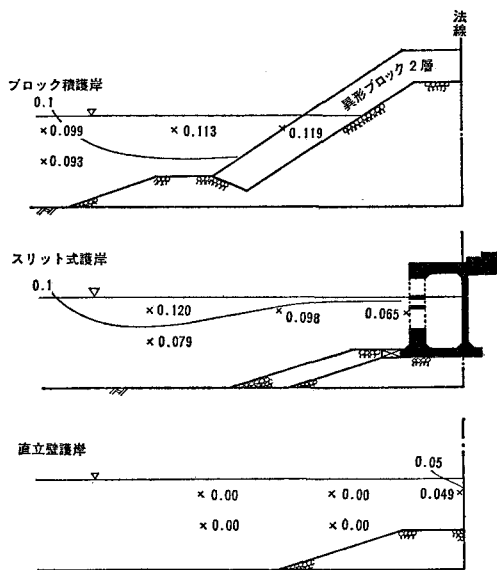


図-6 無次元酸素濃度の沖方向への分布測定例

酸素濃度回復の最も小さい直立壁護岸(波高 4 cm) ケースを基準とした相対比として示してある。直立壁護岸(波高 8 cm) のケースでは、重複波の腹の部分からの溶解が大きく、見かけ上 D が大きくなり、したがって K が過大に見積もられている。表-1 には、各護岸の入射波高(H)と反射率(K_R)、および次式で求めた一周期間の逸散エネルギー(E_d)をもかかげてある。

$$E_d = \frac{1}{8} \cdot \rho g H^2 (1 - (K_R)^2) \cdot n \cdot L \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここで、 ρ は水の比重、 g は重力加速度、 n は群速度と波速との比でここでは 0.5 とした。 L は波長である。

表-1 によれば、

1) スリット護岸、ブロック護岸の曝気係数(K)は、直立壁護岸と斜面との中間の値となり、直立壁護岸の 3 ~ 6 倍、斜面の 1/70 ~ 1/20 倍程度である。

2) 同一波高に対しては反射率の小さいケースが、反射率が類似のものは波高の大きいケースが、それぞれ高い K の値を示している。 E_d の比と K の比との関係を

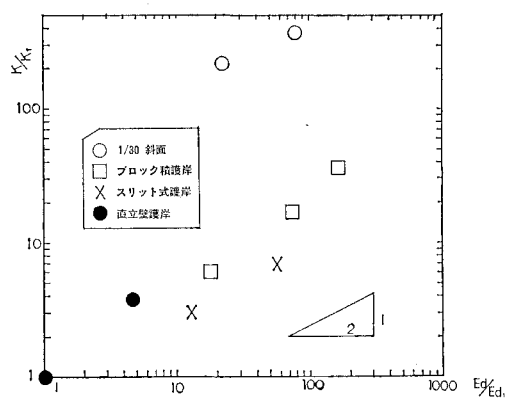


図-7 比曝気係数と比逸散エネルギーとの関係

図-7 に示す。消波機構の似ている護岸相互では、 K は E_d の 1 ~ 1/2 乗に比例して増加することがわかる。

3) 表-1 には、求められた K , D の値を用い、初期濃度 0 の水路内に 10 波もしくは 100 波の波が作用した時の、水路内への総溶解酸素量(W)の比を示してある。

$$W(t) = \int_0^{\infty} C^*(x, t) \cdot h(x) dx \quad \dots\dots\dots (19)$$

ここで h は水深である。

斜面海浜では、波の碎波後の乱れた区間が長く、波のエネルギーがよく消費されるため、高い溶解速度を有しているが、水深が浅い区間での溶解であるため、溶解量ではあまり大きくならず、スリット護岸、ブロック護岸の 7 ~ 15 倍にとどまっている。

5. 結 論

二次元水路を用いての護岸の曝気能を評価する実験法を策定し、4 種の護岸形状についての比較を試みた。その結果、以下のことがわかった。

1) 護岸の曝気能は、沖側への戻り流れなどの酸素輸送とも深く結びついている。

2) 護岸の曝気係数は、消波による波のエネルギーの逸散量に左右され、反射の小さいものほど効率が良い。

3) 各種消波護岸は、直立壁よりも酸素溶解能が大き

いが、斜面海浜よりも劣る。

参 考 文 献

- 1) 井本久仁吉・細井正延： 溶存酸素量に及ぼす波浪の影響及び海岸構造物との関連性について，名古屋工業大学学报，第29巻，pp. 447～453, 1977.
 - 2) 高 隆二・木村 弘・田川昌宏： 曝気護岸への予察，第21回海講講演集，pp. 273～279, 1974.
 - 3) 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. 312, 23 p., 1979.
 - 4) Krenkel, P. A. and G. T. Orlob: Turbulent diffusion and the reaeration coefficient, Proc. ASCE, Vol. 88, No. SA2, pp. 53～83, 1962.
 - 5) Dobbins, W. E.: BOD and oxygen relationships in streams, Proc. ASCE, Vol. 90, No. SA3, pp. 53～79, 1964.
-