

各種海岸構造物の曝気効果と再曝気係数の予測式

細井由彦*・村上仁士**・三井 宏***

1. 緒 言

近年、ウォーターフロントの高度利用が、重要な課題になりつつある。快適なレジャー、生物生産、工業利用のためには、良好な水質が求められる。一方、高度利用を進めると、それだけ水質悪化の原因も増加するという相反する問題が生ずる。したがって、海岸付近の水質保全対策はますます重要になり、より効率的な方策が求められるようになってきている。さらに今後の各種プロジェクトにおいては、エネルギー節約型、自然エネルギー利用型であることが、社会的にも要請されている。

このような中で、従来、主として防災面から開発、施工が行われてきた海岸構造物に、水質環境保全の効果も持たせようとする試みが、行われるようになってきた。その一つとして、海岸構造物周辺の碎波や、乱れの作用による、エアレーション効果にも注目されている。

エアレーションは、空気から水中への酸素の溶解と、その拡散をともなう現象であるため、純粋な力学的現象とは異り、実験データを得にくく、再現性も力学的現象ほど高くはない。このような理由から、各種構造物のエアレーション効果について検討した研究は、これまであまり行われておらず、行われていても、定性的な議論の範囲にとどまっているものがほとんどである。

構造物周辺のエアレーションに関する水の運動としては、波だけではなく、消波後の乱れも重要である。そのために、海岸工学の分野で一般的に行われているような、波の諸元による無次元化が行えず、実験結果を現地に適用する場合の相似則をいかに扱うかという問題が生ずる。エアレーション効果を現地で測定することは、ほとんど不可能に近く、このことがその問題の解決をより困難にしている。

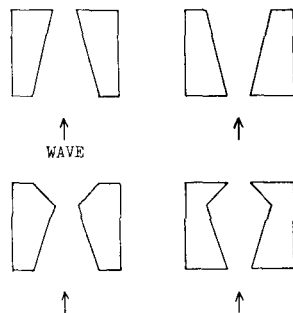
本研究では、各種の海岸構造物のエアレーション機能について、実験および従来報告されている結果をもとに、比較、検討を行った。つづいて、各種の形状の構造物を統一的に扱って、再曝気係数を定量的に予測する式

を導いた。さらに、異ったスケールで行われた種々の構造物の再曝気係数の実験値と予測値を比較することにより、導かれた式の検証を行った。

2. 海岸構造物周辺の再曝気に関するデータの収集

(1) 縦スリット式透過性防波堤

図一に示されるような、漸縮、漸拡、縮拡、拡縮の4型式について、それぞれ堤体幅、開口比等を変化させた、合計28種の開口部形状を有する透過性防波堤モデル¹⁾を使用した。実験は長さ14.4 m、幅0.2 mの造波水槽で行った。水深を15.0 cmにした水槽中に、防波堤モデルを設置し、水槽中の溶存酸素濃度を低下させた後、波をおこし、溶存酸素計により水槽内の酸素濃度の回復の様子を記録した。



図一 縦スリット式透過性防波堤モデル

(2) 透過ケーソン式防波堤および護岸

直立透過型ケーソンを、防波堤および護岸として使用して実験を行った。実験は長さ14.0 m、幅0.5 mの造波水槽において、水深30.0 cmで、(1)と同様の方法で行われた。

(3) パイプ積型透過性防波堤および護岸

内径16 mm、外径22 mm、長さ24 mmの塩化ビニル製のパイプを、水平に並べて積みあげた直立構造物を、防波堤および護岸として使用し、(2)と同じ水路で実験を行った。このパイプ中には、直径の位置にアルミ板が挿入されている。このアルミ板はパイプの中心軸に

* 正会員 工博 徳島大学工業短期大学部 助教授 土木工学科

** 正会員 工博 徳島大学工業短期大学部 教授 土木工学科

*** 正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科

沿って 90 度のひねりが加えられており、通過する水の混合を促進する工夫が行われている。

(4) ブロック積型透過性護岸

不透透斜面上に消波ブロックを 2 層被覆した、勾配 1:1 の斜面護岸を、(2) と同じ水槽中に設置して実験を行った。

(2), (3), (4) の実験については、すでに一部報告を行っている²⁾。

以上のほかに、堀江ら³⁾が行った、曲面スリットケーソン護岸のデータも使用して検討を行った。

使用した構造物モデル、実験条件等を整理して表—1 に示す。

表—1 使用したデータと実験条件

構造物モデル	実験水槽		入射波	
	水深 (cm)	幅 (cm)	H/L	H_0/L_0
縦スリット式透過性 防波堤 (28 種)	15.0	20.0	0.01 ~ 0.03	0.011 ~ 0.033
透過ケーソン式防波堤 (堤体幅 2 種)	30.0	50.0	0.010 ~ 0.047	0.007 ~ 0.045
透過ケーソン式護岸 (堤体幅 2 種)	30.0	50.0	0.012 ~ 0.065	0.008 ~ 0.063
パイプ積型透過性防 波堤 (堤体幅 2 種)	30.0	50.0	0.013 ~ 0.048	0.009 ~ 0.046
パイプ積型護岸 (堤体幅 2 種)	30.0	50.0	0.013 ~ 0.056	0.009 ~ 0.054
ブロック積型護岸 (1 種)	30.0	50.0	0.011 ~ 0.056	0.008 ~ 0.054
曲面スリットケーソン 護岸 (1 種) ³⁾	60.0	100.0	0.011 ~ 0.041	0.010 ~ 0.034

3. 各構造物の曝気効果

(1) 再曝気係数の算定方法に関する検討

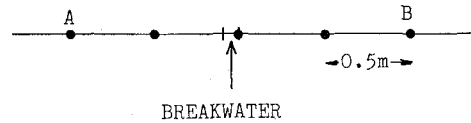
水槽内の溶存酸素濃度の変化は次式にしたがうと考えられる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + k_2(C_s - C) \quad \dots\dots\dots (1)$$

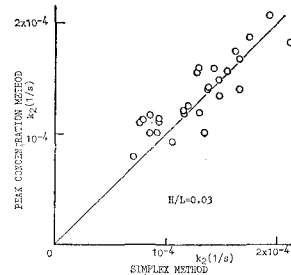
ここで C , C_s はそれぞれ溶存酸素濃度および飽和溶存酸素濃度, k_2 は再曝気係数, D は拡散係数で, x は水槽内岸沖方向にとっている。

縦スリット式透過性防波堤の実験においては、防波堤をはさんで岸沖方向 8 m にわたり、0.5 m 間隔で溶存酸素濃度の測定を行った。

溶存酸素濃度は防波堤付近でピークをもち、岸、沖両側に向かってなだらかに減少する山形を示した。式 (1) を差分化したものに、図—2 に示すように堤体付近 5 点の実測値を初期条件として、A, B 2 点の実測値を境界条件として与えて解を求めた。15 分ごとに 1 時間にわたる堤付近の濃度分布の実測値と計算値の差の自乗和を最小とするような、 k_2 と D の値を、シンプレックス法



図—2 計算に用いた点



図—3 再曝気係数の計算法の比較

により求めた。

一方、式 (1) で右辺第 1 項の拡散項を無視した式より、濃度分布のピーク値を示す防波堤部における濃度の時間変化を用いて k_2 を求めることも行った。

一部の場合について、上記の両法により求めた k_2 の値を比較したものが図—3 である。両者の間に大差は認められず、拡散項を無視しても、 k_2 の値を十分正しく見積もることができると考えられる。そこでここにおける縦スリット式透過堤の k_2 の計算には、拡散項を無視し、ピーク濃度変化を用いる方法を適用した。

その他の構造物の k_2 値は、すでに各論文で報告されているものを使用した。

(2) 縦スリット式透過性防波堤の曝気能

本実験で得られた縦スリット式透過性防波堤による再曝気係数と、入射波の波形勾配との関係を図—4 に示す。入射波の波長は全て同じであったので、入射波高が大きくなると、再曝気係数も大きくなる傾向にあると言える。開口部形状の違いによる曝気能への影響はあまり認められないが、同一形状の場合、堤体幅が大きい方が再曝気係数はやや大きくなるようである。

以上のような実験結果の特性と、曝気に最も影響をおよぼすのは乱れであることを考え合わせると、再曝気係数は、堤体部で逸散するエネルギーと関係があると予想される。そこで波の透過率および反射率の計測も行った $H/L=0.02, 0.03$ の場合の実験について、逸散エネルギー量と再曝気係数との関係を求めてみたものが図—5 である。ここで横軸は逸散エネルギーを、 $H/L=0.02$ のときの入射エネルギー ($H=1.5$ cm) で除したものである。これより再曝気係数は、開口部形状や入射波高に関係なく、逸散エネルギーで表示しうることが示唆される。堀江ら³⁾も同様のことを指摘している。

(3) 各種構造物の曝気能

表—1 の各構造物に対する実験における再曝気係数の

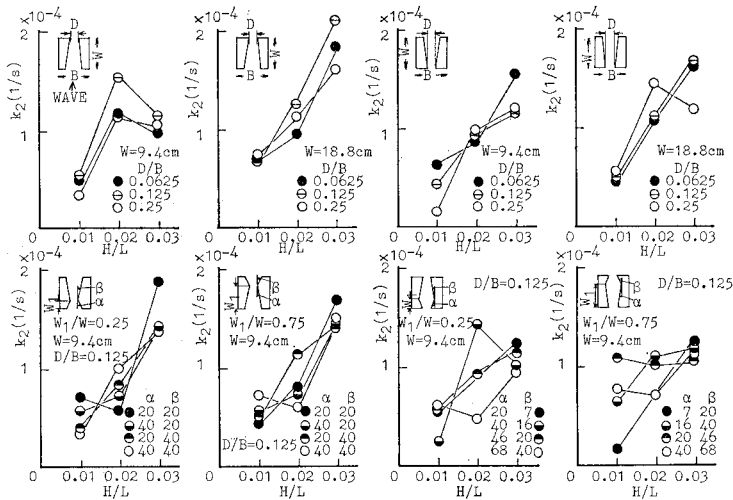


図-4 縦スリット式透過性防波堤の再曝気係数

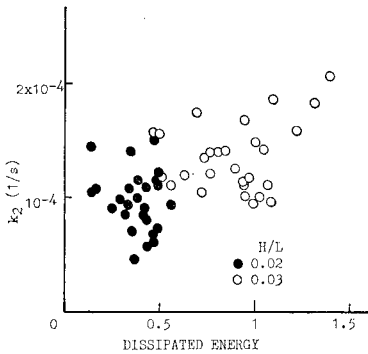


図-5 逸散エネルギーと再曝気係数との関係

値の分布を図-6に示す。それぞれに実験諸元が異なっているので厳密な比較は行えないが、縦スリット式透過堤や透過ケーソン式護岸、パイプ型護岸において、やや再曝気係数が大きくなる傾向にある。いずれの型式の構造物においても、堤体幅が大きい方が、再曝気係数は大きな値を示すことがわかる。これは堤体幅が大きい方が、消波域が広くなり、エネルギー逸散量が多くなるためであると考えられる。

4. 再曝気係数の予測式に関する理論的考察

これまでの検討により、消波による逸散エネルギーによって再曝気係数を表わすことが可能であるように考えられる。そこで消波にともなうエネルギー逸散を考慮した再曝気係数の予測式を導く。

再曝気について考察する場合には、一般に Danckwerts の表面更新モデル⁴⁾が利用される。すなわち水表面に存在する液相側エレメントに、気相側より酸素が分子拡散で輸送されつつ、酸素を吸収した液相側の水表面のエレメントは、乱流運動により、つぎつぎと液相本体のフレ

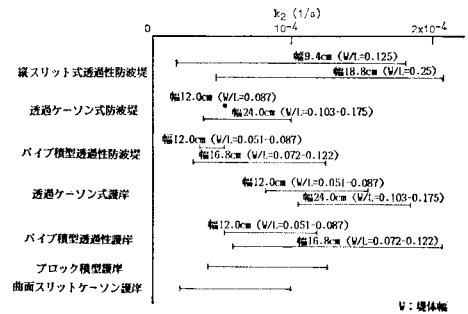


図-6 各種構造物の再曝気係数値

ッシュなエレメントと更新されると考える。

水表面にやってきたフレッシュな液相側エレメントへの酸素の輸送は次式で与えられる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} C &= C_L: t=0, y>0 \\ C &= C_L: t>0, y \rightarrow \infty \\ C &= C_S: t>0, y=0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで y は気液界面を原点として、界面に垂直に液相側を正とする。 t は対象とするエレメントが水面にやってきたときを 0 とする時間である。 C_L は液相本体の溶存酸素濃度である。

上式の解は

$$C = C_L + (C_S - C_L) \operatorname{erfc} \left(\frac{y}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

となり、酸素吸収速度 j は次式で与えられる。

$$j = \left[-D \frac{\partial C}{\partial y} \right]_{y=0} = \sqrt{\frac{D}{\pi t}} (C_S - C_L) \quad \dots\dots\dots (5)$$

上式は水面に滞在している年令が t であるエレメントの、瞬間的な酸素吸収速度を示している。Danckwerts

は、水面に存在するエレメントは、液相本体の乱れ的作用により、単位時間に単位水面面積当たり r の割合で、ランダムに更新されると考え、理論的考察により、水面に存在する液相エレメントの年令分布関数 $\phi(t)$ を次式で与えた。

$$\phi(t) = re^{-rt} \dots\dots\dots (6)$$

したがって式 (5), (6) より、任意の時間における水面からの酸素吸収速度は次式で与えられる。

$$J = \int_0^\infty \sqrt{\frac{D}{\pi t}} (C_S - C_L) r e^{-rt} dt = \sqrt{Dr} (C_S - C_L) \dots\dots\dots (7)$$

再曝気係数 k_2 は液本体濃度が C_L の場合、

$$\frac{dC_L}{dt} = k_2 (C_S - C_L) \dots\dots\dots (8)$$

で示されるように、曝気域の水量当りの吸収速度である。したがって式 (7), (8) を比較すると k_2 は次式で与えられる。

$$k_2 = \frac{\sqrt{Dr}}{h} \dots\dots\dots (9)$$

h は曝気域の水深である。

表面更新率 r が、再曝気係数におよぼす乱れ的作用を示しており、乱れが強くと、 r が大きくなるほど k_2 も大きくなる。そこで、時間の逆数の次元をもつ r を、消波にともなう逸散するエネルギーによって次式で与える。

$$r \sim (E_a/\nu)^{1/2} \dots\dots\dots (10)$$

ここで ν は動粘性係数、 E_a は消波により失われる、単位質量、単位時間あたりのエネルギー量 ($[L^2/T^3]$) である。

単位時間当りの入射波により運ばれてくるエネルギーを E_i 、そのうちの反射および透過するものを除いた、消波により逸散するエネルギーの割合を ε 、エネルギー逸散に関わる水の体積を V_a とすると、 E_a は次式で表わされる。

$$E_a = \frac{\varepsilon E_i}{\rho V_a} \dots\dots\dots (11)$$

ρ は水の密度である。

式 (9), (10), (11) より、 k_2 の予測式として次式を得る。

$$k_2 \sim D^{1/2} \left(\frac{\varepsilon E_i}{\rho \nu V_a} \right)^{1/4} \frac{1}{h} \dots\dots\dots (12)$$

沖波のエネルギーが失われることなく、直角に構造物のところまでやってくるとすると、単位時間あたりの入射エネルギーは

$$E_i = \frac{1}{8} B \rho g H_0^3 \times \frac{1}{2} \left(\frac{gT}{2\pi} \right) = \frac{\rho g^2 H_0^3 T B}{32\pi} \dots\dots (13)$$

で与えられるから、 k_2 は次式となる。

$$k_2 \sim (DgH_0)^{1/2} \left(\frac{\varepsilon TB}{\nu V_a} \right)^{1/4} \frac{1}{h} \dots\dots\dots (14)$$

ここで B は波の進行方向に直角な幅、 T は波の周期である。 H_0 は沖波波高である。

式 (14) は入射波高が大きいほど、また消波によるエネルギー逸散率が大きいほど、再曝気係数の値が大きくなることを示しており、先の実験結果に一致する。

5. 予測式の適用

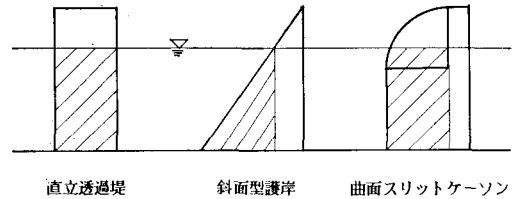
式 (12) あるいは式 (14) の係数値を本論文で使用した実験結果より与える。これらの式を適用するにあたっては、曝気に関わる水の体積 V_a を与える必要がある。これは消波による乱れの存在する部分の水の体積であるが、今後の扱いやすさを考慮して、直立透過堤においては、水面下の外回り体積で代表させることとする。すなわち、開口部形状により異なる堤内遊水部の存在は無視することにする。その他の形状の護岸については、図—7 に示すように V_a を決定した。

本論文でとりあげた全実験結果より回帰的に求めた係数値は 1.35×10^{-2} となった。すなわち再曝気係数は次式で与えられる。

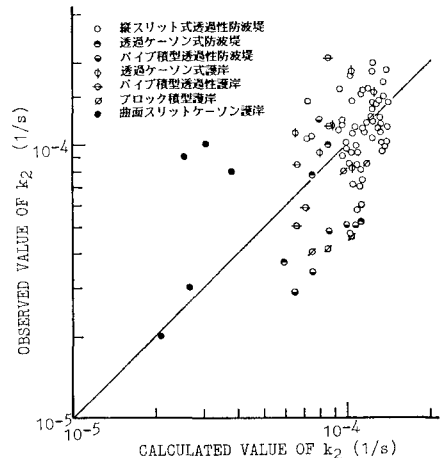
$$k_2 = 1.35 \times 10^{-2} D^{1/2} \left(\frac{\varepsilon E_i}{\rho \nu V_a} \right)^{1/4} \frac{1}{h}$$

$$k_2 = 1.35 \times 10^{-2} (DgH_0)^{1/2} \left(\frac{\varepsilon TB}{\nu V_a} \right)^{1/4} \frac{1}{h}$$

上式より求めた再曝気係数の計算値と実験値との比較を図—8 に示す。本図によれば、各種の海岸構造物による再曝気係数が、提案された式によりよく表わされてい



図—7 各種構造物における V_a のとり方



図—8 再曝気係数の計算値と実験値との比較

ることがわかる。ここで提案された式は理論的な考察から導かれたものであり、両辺の次元が一致しており、よって係数は無次元である。また使用された実験データは、表-1よりわかるように、水深 15 cm, 幅 20 cm から、水深 60 cm, 幅 1 m の水槽で行われた実験を含んでいる。したがって、ここで示された式はある程度のスケールアップに耐え得るものと考えられる。

式(14)で $\varepsilon=1$ (すべての入射エネルギーが逸散) とおくと、筆者らが先に 1/20 および 1/30 の緩斜面上の碎波による再曝気係数に対して導いた式に一致する⁵⁾。このときに得た係数の値は、巻き波に対して 0.184, 崩れ波に対して 0.144 であり、ここで得られたものより 1 オーダー大きくなっていた。堀江ら³⁾の実験においても、傾斜面(勾配 1/30)の再曝気係数は、他の消波構造物のものより 1 オーダー高い値を示していた。

したがってエアレーションのみから考えた場合には、傾斜面型護岸が最も有効であると言える。その理由として、傾斜面型護岸では、碎波を生じて気泡が多数発生すること、水深が浅くなり、乱れが底部まで達し、全水深的な混合が行われやすくなること、などが考えられる。

6. 結 言

本研究では、縦スリット式透過性防波堤による曝気に関する実験を行うとともに、すでに得られているその他の形の消波構造物における実験結果も加えて、各種の消波構造物による曝気に関する検討を行った。その結果、以下のような知見を得た。

(1) 入射波高が大きくなるほど、再曝気係数の値は大きくなる。

(2) 透過性防波堤においては、透過部の形状よりも、堤体幅の方が曝気に対して影響をおよぼしやすい。

(3) 消波による逸散エネルギーを考慮した再曝気係数の予測式は、各種の消波構造物および種々のスケールの実験に対して、よい予測結果を示した。

(4) 曝気効率の点では、傾斜面型護岸が他の消波構造物に比較して有利である。

最後に本研究を進める上で御協力いただいた元本学工学部学生、高田勉氏(現徳島市役所)に謝意を表する。また本研究の一部は、文部省科学研究費一般研究(B)(代表三井宏)の補助を受けて行われたことを付記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Murakami, H., Y. Hosoi and Y. Goda: Analysis of permeable breakwaters, Proc. 20th I.C.C.E., pp. 2104~2118, 1986.
- 2) 谷口徳男・安藤直文・真田 洋・三井 宏: 多目的防波構造物の通水抵抗特性および波による曝気特性, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 446~450, 1986.
- 3) 堀江 毅・細川恭史・三好英一・関根好幸: 構造物によるエアレーション効果比較模型実験, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 651~655, 1987.
- 4) Danckwerts, P. V.: Significance of liquid-film coefficients in gas absorption, Ind. and Eng. Chemistry, Vol. 43, p. 1460, 1951.
- 5) Hosoi, Y., H. Murakami and M. Oto: Reaeration by spilling breaker, Coastal Engineering in Japan, Vol. 27, pp. 97~108, 1984.