曝気護岸への予察

高　隆二*・木村　弘**・田川昌宏***

1. 緒　言

東京港の埋立計画[1]に際しては，曝気作用を通じて好気性分解を促進し，水質浄化を期待するため，護岸の曝気効果に関し，若干の検討を加えた。

曝気護岸の企画ならびに水理模型実験の依頼は東京都港湾局により行われた。

2. 理　論

(1) 水中への酸素溶解

河川の再曝気に準じて，水面を気膜と液膜に分けると[2]，主に液膜内の分子拡散に支配され，空中から水中に移動する酸素量は，

$$AK_L(c_s-c)$$

(A: 水の表面積，K_L: 酸素移動係数，c: 酸素濃度，c_s: 酸素飽和濃度) で与えられる。

酸素の静水中への溶解は分子拡散，流水中では乱れにより表面は絶えず更新されており，

$$K_L=C_1\sqrt{D_M r} \quad \cdots\cdots(1)$$

(C_1: 定数，D_M: 水中での酸素の分子拡散係数，r: 表面更新率) と表わされる[3]。表面から深さ λ 以浅では，主流とは異なり，表面張力 σ により乱れは減衰する。

水面の安定は，次元解析により，

$$\lambda\propto\sigma/\rho v_0^2 \quad \cdots\cdots(2)$$

(ρ: 水の密度，v_0: 深さ λ での鉛直変動流速)

水面からの深さ y における鉛直変動流速 v は，

$$v=v_0 y/\lambda \quad \cdots\cdots(3)$$

また，乱れの長さ l も

$$l\propto y$$

としてよいから，表面の交換に関する渦の存在時間 t は

$$t=\frac{1}{r}=\frac{l}{v}\propto\frac{\lambda}{v_0} \quad \cdots\cdots(5)$$

となる。

再曝気に関連する v_0 としては，周期の大きいものを支配的と見て，Kolmogoroff の消散 scale の渦の流速 scale に比例するとし，

$$v_0\propto(\nu E)^{1/4} \quad \cdots\cdots(6)$$

(ν: 水の動粘性係数，E: 単位質量当りのエネルギー消散率)

式 (3)，(6) を式 (5) に代入し，C_2 を定数として，

$$r=C_2\rho(\nu E)^{3/4}/\sigma \quad \cdots\cdots(7)$$

したがって，式 (1) は，

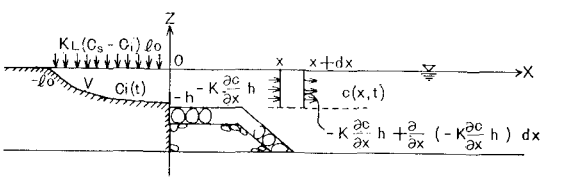
$$K_L=C'\left(\frac{\rho D_M}{\sigma}\right)^{1/2}(\nu E)^{3/8} \quad \cdots\cdots(8)$$

$$(C'=C_1\sqrt{C_2})$$

と書け，溶存酸素に関する相似律の表現と見ても良い。

(2) 拡散による酸素移動

図—1 のように座標を定め，二次元的に取扱う。軸 Z は，護岸沖側端を通り，岸側端までの距離を l_0 とする。



図—1　溶存酸素の拡散

エネルギーを消散する断面積 V，その溶存酸素 $c_i(t)$，波による水平拡散係数 K を用い，鉛直拡散は微弱であるとして無視する。

濃度の連続方程式，

a)　$-l_0\leqq x<0$

$$K_L(c_s-c_i)l_0=V\frac{dc_i}{dt}-K\left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)_{x=0}h$$

$$\therefore\quad \frac{dc_i}{dt}+Dc_i=Dc_s+E\left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)_{x=0}$$

$$D=\frac{K_L l_0}{V},\quad E=\frac{Kh}{V} \quad \cdots\cdots(9)$$

b)　$x\geqq 0$

$$\frac{\partial c}{\partial t}h\,dx=-K\frac{\partial c}{\partial x}h-\left\{-K\frac{\partial c}{\partial x}h+\frac{\partial}{\partial x}\times\left(-K\frac{\partial c}{\partial x}h\right)dx\right\}$$

$$\therefore\quad \frac{\partial c}{\partial t}=K\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \cdots\cdots(10)$$

* 正会員　工修　(株)日本港湾コンサルタント海岸水理部長
** 正会員　(株)日本港湾コンサルタント水理研究所
*** 正会員　工修　(株)日本港湾コンサルタント水理研究所

両式を，初期条件，

$$c(x,0)=0 \quad \cdots\cdots(11)$$

境界条件，

$$c(0,t)=c_i(t) \quad \cdots\cdots(12)$$

$$c(\infty,t)=0 \quad \cdots\cdots(13)$$

の下に解く。式 (10) に Laplace 変換，

$$C(s)=\int_0^\infty c(t)e^{-st}dt \quad \cdots\cdots(14)$$

を施し，式 (11) を参照して[4]，

$$sC=K\frac{d^2C}{dx^2}$$

その解は，

$$C(x,s)=A(s)e^{-\sqrt{s/k}x}+B(s)e^{\sqrt{s/k}x} \quad \cdots\cdots(15)$$

式 (12)，(13) を変換すると，

$$C(0,s)=C_i(s) \quad \cdots\cdots(16)$$

$$C(\infty,s)=0 \quad \cdots\cdots(17)$$

となる。式 (15) より

$$C(0,s)=A(s)+B(s)=C_i(s) \quad \cdots\cdots(18)$$

また，一般に s は複素数であるから，式 (17)，(18) より

$$A(s)=C_i(s), \quad B(s)=0$$

したがって，

$$C(x,s)=C_i(s)e^{-\sqrt{s/k}x} \quad \cdots\cdots(19)$$

と定まる。式 (9) を Laplace 変換して，

$$sC_i+DC_i=\frac{Dc_s}{s}+E\left(\frac{dc}{dx}\right)_{x=0}$$

式 (19) を微分した

$$C_x(0,s)=-\sqrt{\frac{s}{K}}C_i(s)$$

を代入し，

$$\left.\begin{aligned} C_i(s)&=\frac{Dc_s}{s(s+F\sqrt{s}+D)}\\ F&=\frac{E}{\sqrt{K}}\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(20)$$

と求まる。原空間に戻すために，部分分数に分解し，

$$\begin{aligned} F(s)&=\int_0^\infty f(t)e^{-st}dt=\frac{1}{s(s+F\sqrt{s}+D)}\\ &=\frac{1}{s(\sqrt{s}+a)(\sqrt{s}+b)}=\frac{A'}{s}+\frac{B'}{\sqrt{s}}\\ &\quad+\frac{C'}{\sqrt{s}+a}+\frac{D'}{\sqrt{s}+b} \quad \cdots\cdots(21)\end{aligned}$$

とおくと，

$$A'=\frac{1}{ab}, \quad B'=-\frac{a+b}{(ab)^2}, \quad C'=\frac{1}{(b-a)a^2},$$

$$D'=-\frac{1}{(b-a)b^2} \quad \cdots\cdots(22)$$

となる。式 (21) の逆変換[4]は，

$$\begin{aligned} f(t)&=A'+\frac{B'}{\sqrt{\pi t}}+C'\left\{\frac{1}{\sqrt{\pi t}}-ae^{a^2t}\operatorname{erfc}(a\sqrt{t})\right\}\\ &\quad+D'\left\{\frac{1}{\sqrt{\pi t}}-be^{b^2t}\operatorname{erfc}(b\sqrt{t})\right\}\end{aligned}$$

係数の関係 $B'+C'+D'=0$ を用い，

$$\begin{aligned} &=A'-C'ae^{a^2t}\operatorname{erfc}(a\sqrt{t})\\ &\quad-D'be^{b^2t}\operatorname{erfc}(b\sqrt{t}) \quad \cdots\cdots(23)\end{aligned}$$

となる。a, b は，$s+F\sqrt{s}+D=0$ の根であり，判別式により次の三通りに分かれる。

i)　$F^2-4D>0$

$$\sqrt{s}=-\alpha\pm\beta'$$

$$\alpha=\frac{F}{2}, \quad \beta'=\sqrt{\frac{F^2}{4}-D}$$

となり，

$$a=\alpha-\beta', \quad b=\alpha+\beta' \quad \cdots\cdots(24)$$

を式 (23) に代入すると，

$$\begin{aligned} f(t)&=\frac{1}{\alpha^2-\beta'^2}-\frac{e^{(\alpha-\beta')^2t}}{2\beta'(\alpha-\beta')}\operatorname{erfc}\{(\alpha-\beta')\sqrt{t}\}\\ &\quad+\frac{e^{(\alpha+\beta')^2t}}{2\beta'(\alpha+\beta')}\operatorname{erfc}\{(\alpha+\beta')\sqrt{t}\} \quad \cdots(25)\end{aligned}$$

式 (20) から，

$$c_i(t)=Dc_sf(t) \quad \cdots\cdots(26)$$

と定まる。

ii)　$F^2-4D=0$

$$\sqrt{s}=-\alpha$$

$$a=b=\alpha=\frac{F}{2}$$

であり，

$$\left.\begin{aligned} F(s)&=\frac{E'}{s}+\frac{F'}{\sqrt{s}}+\frac{G'}{\sqrt{s}+a}+\frac{H'}{(\sqrt{s}+a)^2}\\ E'&=\frac{1}{a^2}, \quad F'=-\frac{2}{a^3}, \quad G'=\frac{2}{a^3}, \quad H'=\frac{1}{a^2}\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(27)$$

となる。合成定理を用いて逆変換し

$$\begin{aligned} f(t)&=E'+\frac{F'}{\sqrt{\pi t}}+G'\left\{\frac{1}{\sqrt{\pi t}}-ae^{a^2t}\operatorname{erfc}(a\sqrt{t})\right\}\\ &\quad+H'\int_0^t\left\{\frac{1}{\sqrt{\pi(t-\tau)}}\right.\\ &\quad\left.-ae^{a^2(t-\tau)}\operatorname{erfc}(a\sqrt{t-\tau})\right\}\\ &\quad\times\left\{\frac{1}{\sqrt{\pi\tau}}-ae^{a^2\tau}\operatorname{erfc}(a\sqrt{\tau})\right\}d\tau\\ &=\frac{1}{\alpha^2}-\frac{2}{\alpha^2}e^{\alpha^2t}\operatorname{erfc}(\alpha\sqrt{t})\\ &\quad+\frac{1}{\alpha^2}\int_0^t\left\{\frac{1}{\sqrt{\pi(t-\tau)}}\right.\end{aligned}$$

$$-\alpha e^{\alpha^2(t-\tau)}\operatorname{erfc}(\alpha\sqrt{t-\tau})\Big\}$$
$$\times\left\{\frac{1}{\sqrt{\pi\tau}}-\alpha e^{\alpha^2\tau}\operatorname{erfc}(\alpha\sqrt{\tau})\right\}d\tau \quad \cdots(28)$$

を得る。

iii) $F^2-4D<0$

$$\sqrt{s}=-\alpha\pm i\beta$$
$$\alpha=\frac{F}{2},\quad \beta=\sqrt{D-\frac{F^2}{4}}$$

となり，

$$a=\alpha-i\beta,\quad b=\alpha+i\beta \quad \cdots\cdots(29)$$

である。式 (23) は，

$$f(t)=\frac{1}{\alpha^2+\beta^2}-\frac{(\beta-i\alpha)e^{(\alpha-i\beta)^2t}}{2\beta(\alpha^2+\beta^2)}\times\operatorname{erfc}\{(\alpha-i\beta)\sqrt{t}\}-\frac{(\beta+i\alpha)e^{(\alpha+i\beta)^2t}}{2\beta(\alpha^2+\beta^2)}\operatorname{erfc}\{(\alpha+i\beta)\sqrt{t}\} \quad \cdots\cdots(30)$$

ここで

$$I=\frac{\beta}{2\beta(\alpha^2+\beta^2)},\quad J=\frac{\alpha}{2\beta(\alpha^2+\beta^2)} \quad \cdots\cdots(31)$$

とおき，

$$\left.\begin{aligned}&e^{(\alpha\mp i\beta)^2t}=K(t)\mp iL(t)\\&K(t)=e^{(\alpha^2-\beta^2)t}\cos 2\alpha\beta t\\&L(t)=e^{(\alpha^2-\beta^2)t}\sin 2\alpha\beta t\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(32)$$

と書くと，

$$\left.\begin{aligned}&\operatorname{erfc}\{(\alpha\mp i\beta)\sqrt{t}\}=G(t)\mp iH(t)\\&G(t)=\operatorname{erf}(\alpha\sqrt{t})+\frac{2\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}}e^{-\alpha^2t}\times\int_0^\beta e^{y^2t}\sin 2\alpha yt\,dy\\&H(t)=\frac{2\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}}e^{-\alpha^2t}\int_0^\beta e^{y^2t}\cos 2\alpha yt\,dy\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(33)$$

となり，式 (31) は，

$$\begin{aligned}f(t)&=\frac{1}{\alpha^2+\beta^2}-2[\{IK(t)-JL(t)\}\{1-G(t)\}+\{IL(t)+JK(t)\}H(t)]\\&=\frac{1}{\alpha^2+\beta^2}-\frac{e^{(\alpha^2-\beta^2)t}}{\beta(\alpha^2+\beta^2)}\times\Big[(\beta\cos 2\alpha\beta t-\alpha\sin 2\alpha\beta t)\times\Big\{1-\operatorname{erf}(\alpha\sqrt{t})-\frac{2\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}}e^{-\alpha^2t}\times\int_0^\beta e^{y^2t}\sin 2\alpha yt\,dy\Big\}\\&\quad+(\beta\sin 2\alpha\beta t+\alpha\cos 2\alpha\beta t)\times\frac{2\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}}e^{-\alpha^2t}\int_0^\beta e^{y^2t}\cos 2\alpha yt\,dy\Big] \quad \cdots(34)\end{aligned}$$

式 (28)，(34) を式 (26) に代入し $c_i(t)$ を定めると，du Hamel の方法[5] により，

$$\begin{aligned}c(x,\ t)&=\int_0^t\frac{\partial}{\partial\tau}\left[\operatorname{erf}\left\{\frac{x}{\sqrt{4K(t-\tau)}}\right\}\right]c_i(\tau)d\tau\\&=\int_0^t\frac{x}{2\sqrt{\pi K(t-\tau)^3}}\exp\left\{\frac{-x^2}{4K(t-\tau)}\right\}c_i(\tau)d\tau \quad \cdots\cdots(35)\end{aligned}$$

と求まる。計算に際しては，部分積分により

$$=c_i(t)-\int_0^t\operatorname{erf}\left\{\frac{x}{\sqrt{4K(t-\tau)}}\right\}\frac{dc_i(\tau)}{d\tau}d\tau \quad \cdots\cdots(36)$$

を用いると便利である。

（3） 移流による酸素移動

波の惹起する流れにより，護岸に出入する流量を Q とすると，酸素の連続方程式は，

$$K_L(c_s-c_i)l_0=V\frac{dc_i}{dt}+Q(c_i-c_0)$$

(c_0: 護岸前面の酸素濃度)

$$\therefore\quad c_i=\frac{K_Ll_0c_s+Qc_0}{K_Ll_0+Q}\{1-e^{-(K_Ll_0+Q)t/V}\} \quad \cdots(37)$$

移流による沖への酸素供給量は，

$$Q(c_i-c_0)=Q\left\{\frac{(c_s-c_0)K_Ll_0}{K_Ll_0+Q}-\frac{K_Ll_0c_s+Qc_0}{K_Ll_0+Q}e^{-(K_Ll_0+Q)t/V}\right\} \quad \cdots\cdots(38)$$

で与えられ，平衡状態では，それぞれ

$$c_s-\frac{(c_s-c_0)Q}{K_Ll_0+Q},\quad \frac{QK_Ll_0(c_s-c_0)}{K_Ll_0+Q}$$

となる。

すなわち，曝気を盛んにし，移流により前面濃度を低く保つほど良い。

（4） 曝気距離

現実には，生物の呼吸や有機物の分解のため，水中では酸素を消費する。

平衡状態では，

a） 水面からの供給

$$K_L(c_s-c)=qh$$

(q: 単位体積単位時間当り酸素消費量)

濃度を一様とすると，酸素消費水深 h の関数となり，

$$c=c_s-\frac{qh}{K_L}$$

無酸素となる水深は，

$$h_0=\frac{K_Lc_s}{q} \quad \cdots\cdots(39)$$

となる。

b）護岸からの供給

拡散方程式

$$K\frac{d^2c}{dx^2}=q$$

を境界条件

$$K_Ll_0(c_s-c)_0=-K\left(\frac{dc}{dx}\right)_0h$$

および $c_l=0$ として解くと，

$$l=\frac{K}{q}\left[\frac{K_Ll_0}{Kh}(c_s-c_i)-\sqrt{\left\{\frac{K_Ll_0}{Kh}(c_s-c_i)\right\}^2-\frac{2qc_i}{K}}\right] \quad \cdots\cdots(40)$$

実数であるためには，

$$\left.\begin{aligned}&0\leqq c_i\leqq c_s+A-\sqrt{(c_s+A)^2-c_s^2}\\&0\leqq l\leqq\sqrt{\frac{K}{q}}(\sqrt{A+2c_s}-\sqrt{A})\\&A=\frac{K}{q}\left(\frac{qh}{K_Ll_0}\right)^2\end{aligned}\right\} \quad (41)$$

となり，曝気距離は，

$$0\leqq l\leqq\sqrt{\frac{2Kc_s}{q}} \quad \cdots\cdots(42)$$

で与えられる。常時の K_L, K, c_s は一般に小さく，わずかの q によっても曝気距離は著しく短縮する。

3. 実　　験

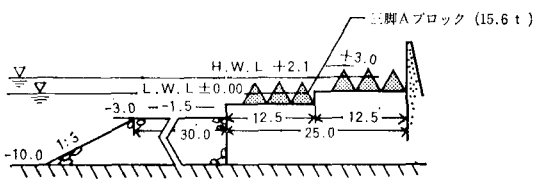
（1）目　　的

対象地点における常時の波（波高 0.4 m，周期 4 sec，出現率 10.7%）に関する曝気効果を明らかにするため，反射率，戻り流れ，溶存酸素濃度等を測定する。

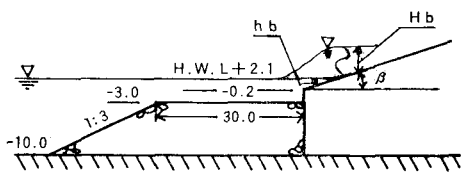
（2）測　　定

幅 0.8 m×高さ 1.0 m×長さ 30 m のフラップ型造波水路において護岸の基本的性質に関し検討を加え，図—2, 3 に示す模型（縮尺 1/25）を設置した。

脱酸素剤 Na_2SO_3 および，触媒塩化コバルトにより酸素濃度を低下させた後，酸素濃度をオキシテック—R（北沢産業製）にて測定した。



図—2　消波護岸（単位：m）



図—3　砕波護岸（単位：m）

酸素濃度を一様に保ち，測定時間を短縮するため，護岸沖側端には側面および底面を水槽に固定した薄いビニール膜を用いた。

消波護岸として，曝気水面積を大きく，また広範囲の水位変動に対しても消波機能を一様に保つため，高低潮に対応した水平床上に三脚ブロックを用いた。

砕波護岸は，常時の波を砕波させて活発な曝気作用を促し，戻り流れによる前面水の循環を誘起するため，滑面としている。

4. 結　　果

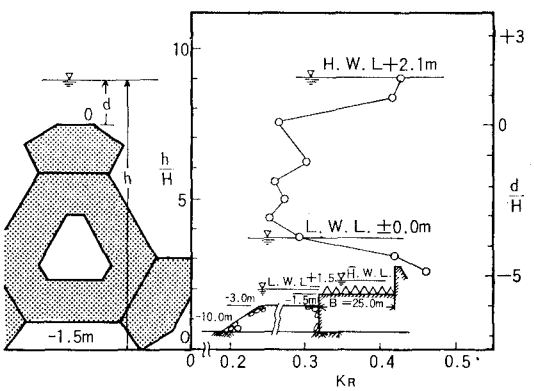
（1）反 射 率

a） 消 波 護 岸

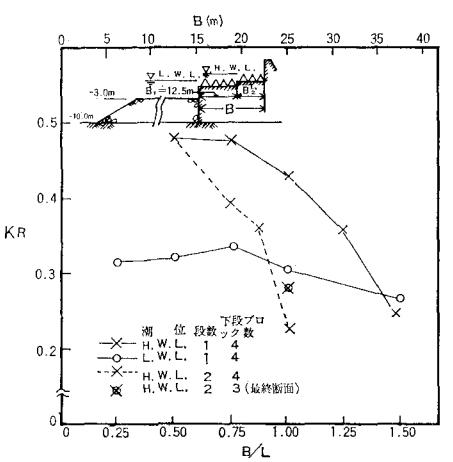
8列に並べた三脚 A ブロック天端上の水位 $d/H=0\sim-3.8$ に対する反射率は 0.25～0.3 でほぼ一定，その上下では急増する（図—4）。

L.W.L. では，$B/L=1/2$ でも十分であるのに対し，反射率の高い H.W.L. においては，$B/L=3/2$ で同程度となり，二段におくと効果的である（図—5）。

安定に関して検討した後，不安定な沖側ブロックを除



図—4　潮位の影響



図—5　天端幅の影響

き，最終形状を図—2とした（反射率を⊗で示す）。消波ブロックを取除くと，反射率は 0.70 (L.W.L.)，および 0.65 (H.W.L.) となる。

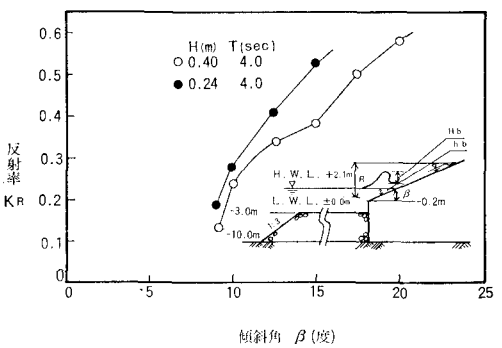
b) 砕波護岸

必ず砕波させるため，のり面沖側端の深さを $H/2$ とし，出現率 19.5% の波（波高 0.24 m，周期 4 sec）も加えた（表—1）。

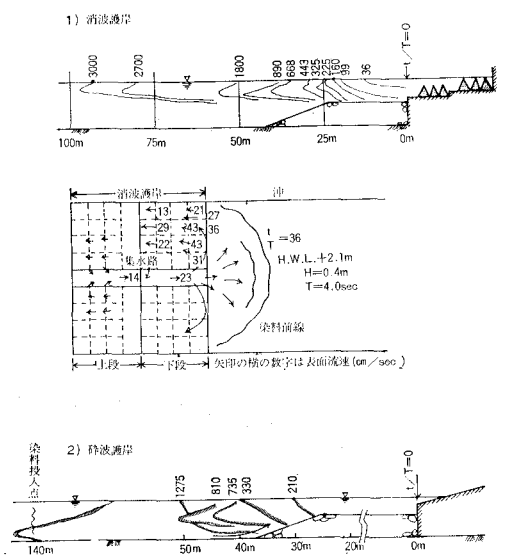
傾斜角の増加とともに反射率も増す（図—6）。

表—1　砕波護岸の反射率と染料前進速度 (H.W.L.)

波	傾斜角	Hb(m)	hb(m)	R(m)	K_R	染料前進速度（現地 cm/s）
	8° (1:7.1)	0.39	0.55	+2.7	0.13	2.4
H=0.4 m	10° (1:5.8)	0.44	0.48	+2.9	0.24	3.8
	12.5°(1:4.5)	0.53	0.46	+2.9	0.34	7.0
	15° (1:3.7)	0.42	0.63	+3.1	0.38	2.7
T=4.0 sec	17.5°(1:3.1)	崩れ波		+3.1	0.50	2.7
	20° (1:2.8)	崩れ波		+3.5	0.58	3.2
	8° (1:7.1)	0.25	0.48	+2.5	0.19	1.8
H=0.24 m	10° (1:5.8)	0.29	0.42	+2.7	0.28	2.9
T=4.0 sec	12.5°(1:4.5)	0.30	0.45	+2.7	0.41	3.2
	15° (1:3.7)	崩れ波		+2.9	0.53	1.6



図—6　傾斜角の影響



図—7　染料の前進（現地）

(2)　戻り流れ

波による拡散は弱いから，極力戻り流れを誘起するよう消波護岸において適当な間隔で集水路（幅員：全幅の 1/3 以下）を設けると，離岸流は集水路沖側端から半円状に拡がる。ただし，水路側壁を透過するため，噴流にまで成長はしない（図—7）。捨石マウンドより沖側でも，水平に拡散し鉛直下方へは拡がらない。砕波護岸表層の戻り流れは，下層で岸向きの補流を生じ傾斜角で 12.5° (1:4.5) で最も強い（図—7, 8）。戻り流れの運動量は小さいので，水中深く潜り沖向き，表層で岸向きの流れとなる自由落下水[6]への発達は期待できない。戻り流れの卓越距離は，おそらく消波護岸 20 m，砕波護岸 40 m 程度であろう（図—9）。

(3)　波の曝気効果

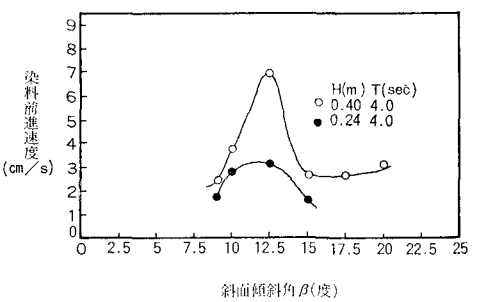
表面更新と関連する E として，表面において粘性により失われるエネルギーを採用すると，

浅海波では，

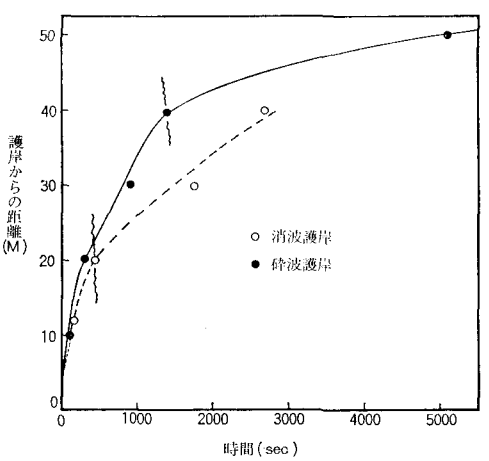
$$E=2\nu\left(\frac{\pi kH}{T}\right)^2(1+\coth^2 kh)$$

深海波ならば，

$$E=4\nu\left(\frac{2\pi^2}{T}\cdot\frac{H_0}{L_0}\right)^2 \qquad \cdots\cdots(43)$$



図—8　傾斜角と染料前進速度（現地）



図—9　染料の前進（現地）

となる。

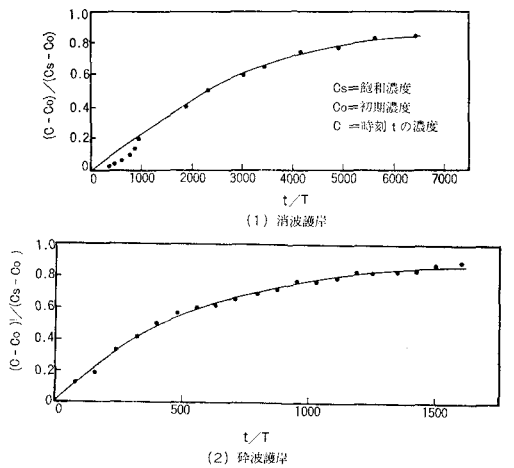
浅海波に関する再曝気係数 $k_2(=K_L/h)$ は一例として水粒子の水平最大流速の鉛直平均 U_{max} を用い，

$$k_2=0.043\,U_{max}^{1.25} \quad \cdots\cdots(44)$$

と導かれ[7]，また深海波に関しても若干知られている[8]。

(4) 酸素濃度

模型上で酸素濃度の時間的変化を測定した（**図—10**）。縮尺効果等に関する吟味を加えた後，現地における酸素濃度を算出し，**表—2, 3, 図—11, 12** にまとめた[9]。浅海波の側壁および海底摩擦による損失は，内部粘性に比して小さく，省略した。



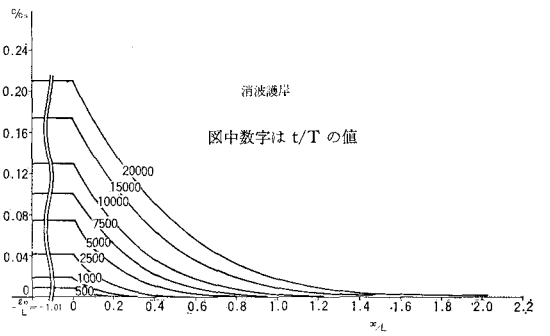
図—10　護岸の溶存酸素時間変化

表—2　曝気効果

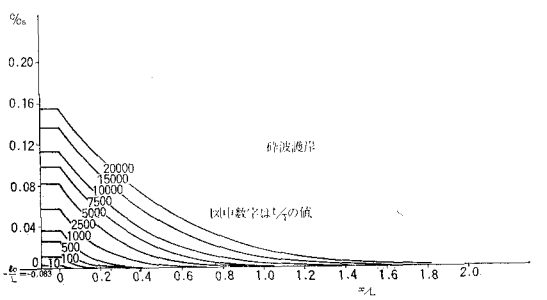
対　象	K_L (m/日)	E (m/sec^3)	$C'\times10^{-5}$
消波護岸	1.31	8.05×10^{-3}	2.67
砕波護岸	0.455	1.27	0.140
浅海波	0.0158	4.12×10^{-9}	0.666
深海波	2.10		2.94
	8.52		18.0
	18.2		49.1

5. 検　　討

実験水路の流れに関して得た $C'=3.21\times10^5$(m; 日単位) は，現地河川にも良く適合し，酸素移動に関し本質的かつ普遍的な定数と見られる[3]。E の一様でない消波護岸においても，ほぼこれに近く，上記の事実を裏付けている。砕波護岸においては，ビニール膜両側に多少水位差を生じ，エネルギー損失をきたしており，V も時間的に変動し定め難い。浅海波では，鉛直拡散は遅く，酸素分布も一様ではなく初期には溶存酸素は表面付近にの



図—11　溶存酸素濃度



図—12　溶存酸素濃度

表—3　溶　存　酸　素　濃　度

型式	条　件	t/T	Ci/Cs	C/Cs x/L=0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	浅海波 C/Cs (例)
消波護岸	$E=8.1\times10^{-3}$ (m·sec^{-3}) $C'=2.67\times10^5$ $K_L=1.51\times10^{-5}$ (m/sec)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		500	0.0095	0.0003	0.0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0030
		1,000	0.0181	0.0018	0.0001	0.0000	0	0	0	0	0	0	0	0.0060
		2,500	0.0412	0.0110	0.0020	0.0002	0.0000	0	0	0	0	0	0	0.0151
		5,000	0.0742	0.0307	0.0106	0.0030	0.0007	0.0001	0.0000	0	0	0	0	0.0302
		7,500	0.1029	0.0512	0.0226	0.0087	0.0029	0.0008	0.0002	0.0000	0	0	0	0.0453
		10,000	0.1284	0.0710	0.0360	0.0165	0.0068	0.0025	0.0008	0.0002	0.0001	0.0000	0	0.0604
		15,000	0.1726	0.1080	0.0639	0.0353	0.0183	0.0088	0.0039	0.0016	0.0006	0.0002	0.0001	0.0906
		20,000	0.2101	0.1422	0.0913	0.0560	0.0327	0.0181	0.0095	0.0047	0.0022	0.0010	0.0004	0.1207
砕波護岸	$E=1.27$ (m·sec^{-3}) $C'=2.67\times10^5$ $K_L=1.01\times10^{-4}$ (m/sec)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		500	0.0267	0.0012	0.0000	0	0	0	0	0	0	0	0	
		1,000	0.0377	0.0054	0.0003	0.0000	0	0	0	0	0	0	0	
		2,000	0.0590	0.0194	0.0043	0.0006	0.0001	0.0000	0	0	0	0	0	
		5,000	0.0821	0.0390	0.0153	0.0049	0.0012	0.0003	0.0000	0	0	0	0	
		7,500	0.0992	0.0548	0.0268	0.0114	0.0042	0.0013	0.0004	0.0001	0.0000	0	0	
		10,000	0.1132	0.0683	0.0377	0.0188	0.0084	0.0034	0.0012	0.0004	0.0001	0.0000	0	
		15,000	0.1360	0.0906	0.0572	0.0337	0.0186	0.0095	0.0045	0.0020	0.0008	0.0003	0.0001	
		20,000	0.1545	0.1098	0.0742	0.0479	0.0294	0.0171	0.0095	0.0049	0.0024	0.0011	0.0005	

み存在し，C' は測定上時間的に変わるであろう。深海波に関しては，一層の研究を要する。

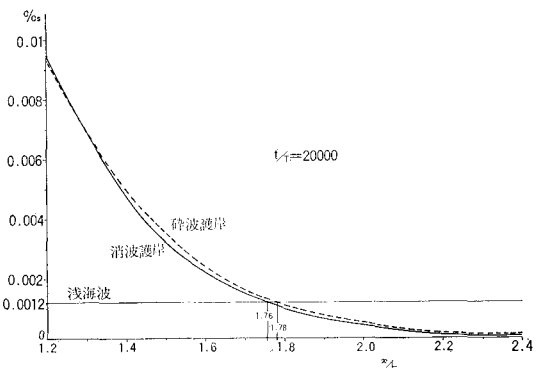
$K_R<0.3$ 程度とすれば，溶解速度は式（8）から，

$$K_L l_0 \propto \frac{l_0(1-K_R^2)}{(l_0 h)^{3/8}} \div \left(\frac{l_0^5}{h^3}\right)^{1/8}$$

となり，水深浅く，曝気面積は広いほど良い。反射率一定と対応する $h/H=4\sim8$ の範囲では，水位変化に伴う変動は $2^{3/8}=1.30$ 程度にすぎず，沈下を避けられない軟弱地盤上では，三脚 A ブロックは所期の機能を果たすものと見られる。通常の消波ブロックを用いた護岸では，恐らく表面更新に寄与しないエネルギー損失の存在ならびに l_0 の減少により，曝気効果を低減すると想定される。若干の酸素消費によっても，表層近くまで無気層となる海域では，曝気護岸の効果は著しい。

6. 結　　言

拡散計算に従がえば，曝気効果は無限遠まで及ぶ。しかし，波自体と同程度の作用を果たすのはわずか2波長弱に留まる（**図—13**）。



図—13　酸素濃度の比較

曝気効果は移流の存在に著しく左右され，戻り流れを鉛直，水平方向に集中し，沖に導くよう考案した消波護岸ならびに砕波護岸においては，運動量の不足から戻り流れによる水の循環あるいは成層の破壊は，必ずしも期待されるほどではない。沿い流れを誘起させる平面的配置は，曝気護岸に必須の要件である。

自然海浜において，砕波帯外への物質移動をもっぱら離岸流に依存している事実はきわめて示唆的である[10]。消波護岸において，約1日経過後酸素濃度および全酸素溶解量はそれぞれ波自体の 175 倍および 66.3 波長（1648 m）に相当する。

迅やかな移流を伴うと，消波護岸からの溶解速度 $K_L l_0 c_s$ は 83.1 波長（2065 m）に換算される。砕波護岸においても同様に，それぞれ 129 倍，44.6 波長（1 108 m）および 49.8 波長（1 238 m）と算定される。すなわち，曝気護岸は海面を 1～2 km 拡大したと等価であり，いずれも曝気護岸の有用性を物語っている。

参　考　文　献

1) 日本港湾コンサルタント：中央防波堤外側護岸調査設計報告書，1974.
2) Dobbins, W.E.: BOD and Oxygen Relationships in Streams, Proc. ASCE, SA 3, 1964.
3) 村上　健：河川における再曝気，第6回衛生工学研究討論会講演論文集，1970.
4) 近藤次郎：演算子法，培風館　1956.
5) 犬井鉄郎：偏微分方程式とその応用，コロナ社 1966.
6) 土木学会：水理公式集，昭和46年改訂版，1971.
7) 細井正延・井本久仁吉：溶存酸素量に及ぼす波浪の影響について，第28回年次学術講演会講演集，1973.
8) 松本順一郎・高橋克夫：自由水面からの酸素移動に関する予備的研究，第28回年次学術講演会講演集，1973.
9) 高　隆二・田川昌宏：Crenellated Breakwater の拡散性，第20回海岸工学講演会論文集，土木学会，1973.
10) 佐々木民雄・五十嵐元：沿岸海域の水質と底質に及ぼす波と風の影響に関する野外研究，第1回環境問題シンポジウム講演集，土木学会，1973.