

漸変縦型スリット式防波堤の消波および海水交流特性

村上仁士*・細井由彦**・合田吉孝***

1. 緒 言

直立式透過性防波堤の普及に伴い、透過部の開口形状や遊水部、隔室の諸元を巧みに変え、反射波や透過波を最小限に抑えようとする試みが各所で行われている。本来この種の防波堤は透過性という点から、堤内外の海水交流も期待できるものである。しかしながら、波浪による堤周辺の水質環境の変化や、堤での海水交流・交換機構とその効果を定量的に評価した研究は数少ないのが現状である^{1)~4)}。

著者らは、透過堤の消波特性のみならず、海水交流・交換、エアレーションといった水質面からも、有効な開口形状を原的に求め、各種の透過堤に応用しようとする意図で、縦型の漸拡および漸縮スリット部をもつ防波堤の諸特性を調べてきた^{4),5)}。

本研究は、この一環をなすもので、前論文⁵⁾と同様、最も単純な開口形状をした漸拡または漸縮スリットモデルが用いられる。しかし、反射・透過率の理論計算では、非線形な境界条件のもとに解を求め、前データにさらに新しい実験データを加えて得た実験値と比較して、解の妥当性を検討した。さらに前論文では、防波堤の海水交換特性について十分論じえなかったが、ここではボックスモデルを用いることにより比較的容易に波による堤内外の海水交換率を求めることができ、堤近傍域の拡散係数をも評価しうることを示した。

2. 理 論

2.1 反射率および透過率

(1) 漸拡スリット堤

全領域の水深は一定として、座標系を図-1のようにとり、領域を外海、堤内部、透過波領域の3つに分ける。波は堤に直角に入射する微小振幅長波、堤沿い方向に波は変化しないと仮定して、堤沿いの長さ $(D+B)$ の範囲を考え各領域に基礎方程式をたてる。

まず、領域Ⅱの運動方程式および連続式は水位変動を

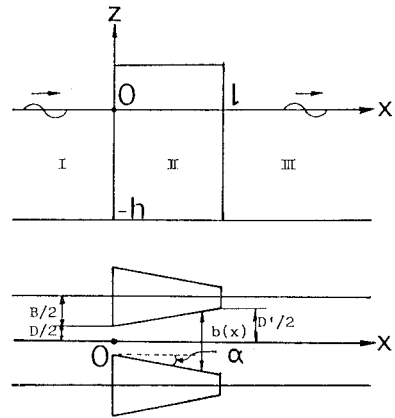


図-1 座標系および記号の説明

η , 水平水粒子速度を u , 重力加速度を g とすると,

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + (h/b) \frac{\partial (bu)}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

領域ⅠおよびⅢに対し、運動方程式は(1)式と同じで、連続式は次のようになる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

これらの式を、次に示す領域の境界条件で解けばよい。

$$\eta_1 - \eta_2 = (C_A/g) \{ [(D+B)/D] - 1 \} u_1 |u_1|, \quad x=0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\eta_2 - \eta_3 = (C_B/g) \{ 1 - (D+B)/D' \} u_3 |u_3|, \quad x=l \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$(D+B)u_1 = Du_2, \quad x=0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$D'u_2 = (D+B)u_3, \quad x=l \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 C_A , C_B はエネルギー損失を表わす係数である。

解法は、前論文⁵⁾と同様の方法を用いると反射率 r_R および透過率 r_T が以下のように求められる。

$$r_R = \frac{\sqrt{(\beta\xi + \delta\rho)^2 + (\beta\rho - \delta\xi)^2}}{\beta^2 + \delta^2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$r_T = \frac{\sqrt{(\beta\xi + \delta\hat{\rho})^2 + (\beta\hat{\rho} + \delta\xi)^2}}{\beta^2 + \delta^2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし、

$$\xi = \beta + S$$

$$\rho = \delta + \hat{U}$$

* 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 徳島大学工業短期大学部助教授 土木工学科
 *** 学生会員 徳島大学大学院工学研究科 建設工学専攻

$$\begin{aligned}
 S &= (2D/p)(GH - E\hat{L}) \\
 \hat{U} &= (2D/p)(l'H - j'\hat{L}) \\
 \beta &= A\hat{L} - f'G + h'E - j'E \\
 \delta &= -AG - f'l' \\
 \zeta &= (2D'/p)(EM - l'G) \\
 \hat{\gamma} &= (2D'/p)(j'M - l'I) \\
 \phi &= (C_A/g)[\{(D+B)/D\} - 1]|u_1| \\
 \phi &= (C_B/g)[1 - (D+B)/D']|u_3| \\
 f' &= \{1 + (\phi g/c)\}(DH/p) \\
 h' &= \{1 + (\phi g/c)\}(D\hat{L}/p) \\
 j' &= \{1 + (\phi g/c)\}(D'I/p) \\
 l' &= -\{1 + (\phi g/c)\}(D'M/p) \\
 c &= \sqrt{gh}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

ここに、

$$\begin{aligned}
 A &= J_0[kD/\gamma], & E &= J_0[k\{l + (D/\gamma)\}] \\
 F &= N_0[kD/\gamma], & G &= N_0[k\{l + (D/\gamma)\}] \\
 H &= J_1[kD/\gamma], & I &= J_1[k\{l + (D/\gamma)\}] \\
 \hat{L} &= N_1[kD/\gamma], & M &= N_1[k\{l + (D/\gamma)\}] \\
 \gamma &= 2 \tan \alpha, & p &= D+B, & k &= 2\pi/L
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

である。ただし、 J_0, N_0 は、0 次のベッセルおよびノイマン関数、 J_1, N_1 は、1 次のそれらである。 α は漸変角、 L は波長である。

(4)~(7) 式では添字を付して領域を示しているが、(4)、(5) 式でそれぞれ $\eta_1 = \eta_2, \eta_2 = \eta_3$ とおけば、前論文²⁾と同じ解が得られる。

(2) 漸縮スリット堤

上述した漸拡スリット堤と同様の手法を用いると、反射率 r_R および透過率 r_T が次のように求められる。

$$r_R = \frac{\sqrt{(\beta'\xi' + \delta'\rho')^2 + (\beta'\rho' + \delta'\xi')^2}}{\beta'^2 + \delta'^2} \tag{12}$$

$$r_T = \frac{\sqrt{(\beta'\lambda + \delta'\mu')^2 + (\beta'\mu' + \delta'\lambda')^2}}{\beta'^2 + \delta'^2} \tag{13}$$

ただし、

$$\begin{aligned}
 \xi' &= \beta' + \delta' \\
 \rho' &= \delta' + U' \\
 \beta' &= f''F - l''E + h''A + j''G \\
 \delta' &= -f''l'' - EF - h''j'' + AG \\
 S' &= (2D'/p)(AM - FI) \\
 U' &= (2D'/p)(l''DI - j''D'M) \\
 \lambda &= (2D/p)(FH - A\hat{L}) \\
 \mu' &= (2D/p)(j''\hat{L} - l''H) \\
 f'' &= \{1 + (\phi g/c)\}(D'I/p) \\
 j'' &= \{1 + (\phi g/c)\}(DH/p) \\
 h'' &= -\{1 + (\phi g/c)\}(D'M/p) \\
 l'' &= \{1 + (\phi g/c)\}(D\hat{L}/p)
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

であり、他の諸量は (10)、(11) 式に示したものと同一

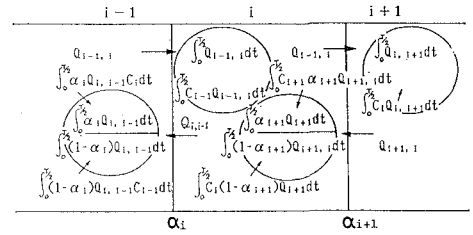


図-2 ボックスモデル

である。

2.2 堤の海水交換率および拡散係数

水域を適切なボックスに分割し、ボックスごとの物質量の保存則に基づき、堤内外の海水交換を評価する。

図-2 に示す記号を用い、添字は領域を表わすことにして、まずボックス i における物質量の保存則を考える。

1 周期間 T のうちに $i-1$ より i へ流入する流入量は、流量 Q または流速 u および断面積 A を使って表わすと、

$$\begin{aligned}
 \int_0^{T/2} Q_{i-1,i} dt &= \int_0^{T/2} u_{i-1,i} A_{i-1,i} dt \\
 &= A_{i-1,i} U_{i-1,i} T/p
 \end{aligned}$$

となる。ただし、 $u = U \sin(2\pi t/T)$ である。

このとき流入する物質量は、濃度を C で表わすと、

$$\begin{aligned}
 \int_0^{T/2} C_{i-1} Q_{i-1,i} dt &\approx C_{i-1} \int_0^{T/2} u_{i-1,i} A_{i-1,i} dt \\
 &= A_{i-1,i} U_{i-1,i} C_{i-1} T/p
 \end{aligned}$$

となり、第2式で C_{i-1} が積分記号の前にでるのは、物質濃度は1波ごとに一様濃度となるというボックスモデルの仮定によるものである。

一方、 i より $i+1$ へ流出する物質量は

$$\int_0^{T/2} C_i Q_{i,i+1} dt$$

である。

ひきつづき、次の $T/2$ 時間に、先に i へ流入した水塊が i で α だけ交換して $i-1$ へ返ってくるとする。

このとき、 i より $i-1$ へ流出する物質量は

$$\int_0^{T/2} C_i \alpha Q_{i,i-1} dt + \int_0^{T/2} C_{i-1} (1-\alpha) Q_{i,i-1} dt$$

となり、 $i+1$ より i へ流入する物質量は

$$\begin{aligned}
 \int_0^{T/2} C_{i+1} \alpha Q_{i+1,i} dt \\
 + \int_0^{T/2} C_i (1-\alpha) Q_{i+1,i} dt
 \end{aligned}$$

となる。

したがって、ボックスの容積を V 、1 周期間の濃度の増分を ΔC とすれば、次式が成立する。

$$\begin{aligned}
 V_i \Delta C_i &= \int_0^{T/2} C_{i-1} Q_{i-1,i} dt - \int_0^{T/2} C_i Q_{i,i-1} dt \\
 &\quad - \int_0^{T/2} C_{i-1} (1-\alpha) Q_{i,i-1} dt \\
 &\quad - \int_0^{T/2} C_i Q_{i,i+1} dt
 \end{aligned}$$

$$+ \int_0^{T/2} C_{i+1} \alpha_{i+1} Q_{i+1,i} dt \\ + \int_0^{T/2} C_i (1 - \alpha_{i+1}) Q_{i+1,i} dt \dots\dots\dots (15)$$

また、流量の連続性より、 $Q_{i-1,i} = Q_{i,i-1}$ および $Q_{i,i-1} = Q_{i+1,i}$ となる。これらの関係から、(15) 式は次のように整理できる。

$$V_i \Delta C_i = \int_0^{T/2} \{ (C_{i-1} - C_i) \alpha_i Q_{i-1,i} \\ + (C_{i+1} - C_i) \alpha_{i+1} Q_{i,i+1} \} dt \dots\dots\dots (16)$$

ここで、

$$\int_0^{T/2} C_j \alpha_j Q_j dt / \int_0^{T/2} Q_j dt = \bar{\alpha}_j \bar{C}_j \dots\dots\dots (17)$$

とおき、さらに

$$\left. \begin{aligned} \int_0^{T/2} Q_{i-1,i} dt &= A_{i-1,i} U_{i-1,i} T / \pi = \hat{Q}_{i-1} \\ \int_0^{T/2} Q_{i,i+1} dt &= A_{i,i+1} U_{i,i+1} T / \pi = \hat{Q}_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

と表示すると、(16) 式は結局次のようになる。

$$V_i \Delta C_i = \hat{Q}_i \bar{\alpha}_{i+1} (\bar{C}_{i+1} - \bar{C}_i) \\ - \hat{Q}_{i-1} \bar{\alpha}_i (\bar{C}_i - \bar{C}_{i-1}) \dots\dots\dots (19)$$

さて、ここで図-3 のように、防波堤を含む外海領域を領域 0 として、港内を n 個のボックスに分割する。

各ボックスは (19) 式が成立するはずであり、したがって各ボックスに適用した (19) 式を加え合せると

$$\sum_{i=1}^n V_i \Delta C_i = \hat{Q}_0 \bar{\alpha}_1 (\bar{C}_0 - \bar{C}_1) + \hat{Q}_n \bar{\alpha}_{n+1} (\bar{C}_{n+1} - \bar{C}_n) \dots\dots\dots (20)$$

を得る。もし、 n を十分大きくとると、 $\bar{C}_{n+1} \approx \bar{C}_n$ となり、領域 0-1 間の海水交換率 $\bar{\alpha}_1$ は次式で求められる。

$$\bar{\alpha}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i \Delta C_i)}{\hat{Q}_0 (\bar{C}_0 - \bar{C}_1)} \dots\dots\dots (21)$$

ボックス 1 の長さは、波動によって生ずるスリット部での噴流の及ぶ範囲程度で、領域 1-2 間の濃度変化は短時間では変化しないことを考慮すれば、 $\bar{\alpha}_1$ は近似的に次式で計算できる。

$$\bar{\alpha}_1 = \frac{V_1 \Delta C_1}{A_{0,1} U_{0,1} (C_0 - \bar{C}_1)} \dots\dots\dots (22)$$

ここに、 $U_{0,1}$ は領域 0-1 間の境界における流速の最大値、 $A_{0,1}$ は境界開口断面積、 ΔC_1 はボックス 1 における 1 周期間の濃度変化、 $\bar{C}_1$ はそこでの半周期間の平均濃度、 C_0 は外洋の濃度で、外洋の濃度変化は微小として $\bar{C}_0 \approx C_0$ であるとしてもよい。

ところで、ボックス 1 では、1 次元的に物質が拡散されるとすると、次式が成立する。

$$\partial C / \partial t = K_x \partial^2 C / \partial x^2 \dots\dots\dots (23)$$

これを時間ステップ ΔT を 1 周期、距離間隔 ΔL をボックス長にとり、差分表示を行うと次のようになる。

$$V (C_i^{m+1} - C_i^m) \\ = \{ V \Delta T / (\Delta L)^2 \} \{ K_{x,i+1}^m (C_{i+1}^m - C_i^m) \\ - K_{x,i}^m (C_i^m - C_{i-1}^m) \} \dots\dots\dots (24)$$

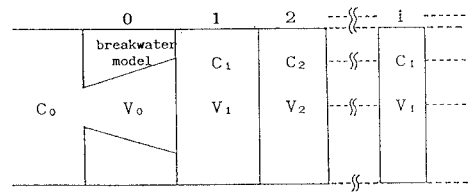


図-3 モデルにおけるボックスの分割方法

ここに、 K_x は拡散係数、 m は波動による流向が岸向となる任意の時刻、 $m+1$ は m より 1 周期後の時刻を示す、(24) 式と (19) 式を比較すると次の関係があることがわかる。

$$\bar{\alpha} \hat{Q} = K_x V \Delta T / (\Delta L)^2 \dots\dots\dots (25)$$

また、ボックス 1 では、 $V_1 = A_{1,2} \Delta L$ 、 $\hat{Q}_0 = A_{0,1} U_{0,1} \Delta T / \pi$ であり、これらを上式に代入すれば、ボックス 1 における拡散係数 K_{x1} は次式のように求められる。

$$K_{x1} = (A_{0,1} / A_{1,2}) \bar{\alpha}_1 U_{0,1} \Delta L / \pi \dots\dots\dots (26)$$

ここに、 $A_{1,2}$ は領域 1-2 境界の断面積である。

3. 実験装置および方法

前論文⁵⁾と同じ水槽および堤防モデルを用いて、反射・透過および海水交流に関する実験を行った。反射・透過実験に関する実験方法は前回同様である。図-4 は海水交流実験の装置を示したもので、正逆プロベラ流速計 (SV-3W 篠塚製作所製) を堤背面開口部、電導度計 (TOA CG201 PL ELECTRODE) を 3 点に設置し、堤背面部を締切り、堤より外海側 2m の区間に食塩を一樣濃度となるように攪拌して静置した。次に造波して、波の到達直前に締切り板を取り除き、濃度および流速を測定した。海水交流に関する実験諸元は表-1 に示した。ここで、 μ はスリット部の開口比 $D / (D+B)$ であり、漸変角 α はすべて 19° である。 l/L は相対堤防幅で $l/L=0$ とは単一スリット壁を意味している。

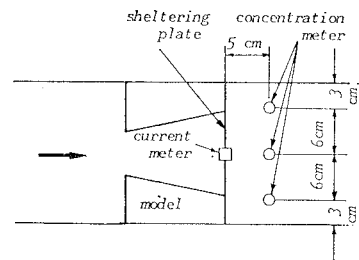


図-4 実験装置の配置

4. 反射・透過・エネルギー損失特性

漸拡 (G.E) および漸縮 (G.C) スリット堤の反射率 r_R 、透過率 r_T およびエネルギー損失率 $\epsilon = 1 - r_R^2 - r_T^2$ と相対堤体幅 l/L との関係をそれぞれ、図-5~図-7

表-1 実験諸元

実験 条件	$T=0.75 \text{ sec}$ $h=15 \text{ cm}$ $L=75 \text{ cm}$ $h/L=0.20$	
	μ	H/L
	0.0625	0.03
		0.125 0.0
	0.125	0.03
		0.25 0.125 0.0
	0.25	0.03
		0.25 0.125 0.0

に示した。ここで線表示したものは、(8)、(9) 式および (12)、(13) 式において、 $C_A=20$ 、 $C_B=-3$ として求められた理論計算値である。実験値は丸印が前回⁹⁾、角印が今回のものである。これらの図から、理論では長波と仮定しているにもかかわらず、理論計算結果はほぼ実現象を説明できることがわかる。

r_R および r_T ともに漸縮の場合が漸拡の場合に比べて値は小さく、 ε は逆に前者が大きくなり、水理面では漸縮スリットの方が波の抑制効果は大きいといえる。また、図-5 の r_R について両図をみると、漸拡の場合 l/L が大きくなるに伴い r_R の値は増大するが、漸縮の場合には l/L のある値で極大値をとる。したがって、いずれの形状にしても l/L の選択を誤まれば、 r_R の値は大きくなることに注意を要する。 r_T については両タイプとも l/L の影響は大きいものではない。

ε については、漸拡の場合 l/L が大きくなるに伴いその値は減少するが、漸縮の場合、 l/L の影響は顕著でない。

5. 海水交流特性

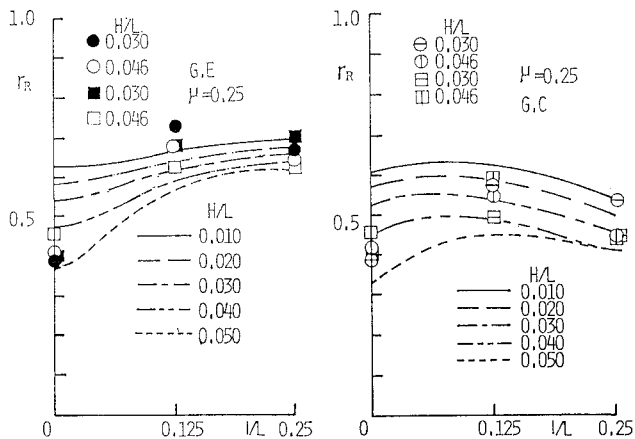
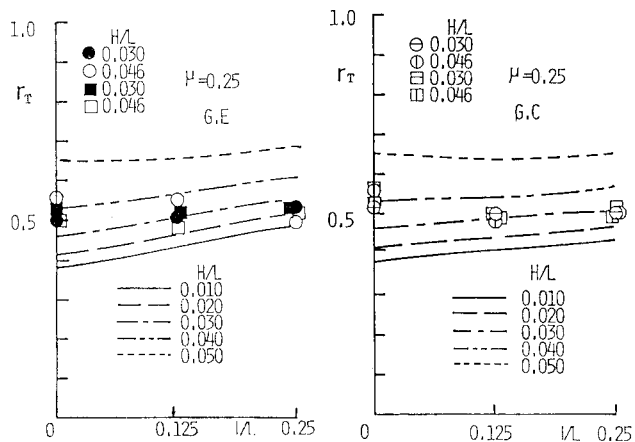
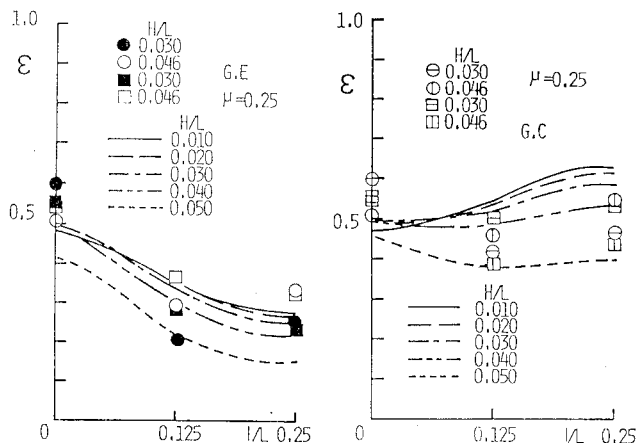
堤の最小開口部で測定した流速をもとに堤沿い単位長さ当りの平均交流量を次式で求めた。

$$q = \frac{4}{T} \int_0^{T/4} \frac{Dh}{D+B} V_{\max} \cos \omega t$$

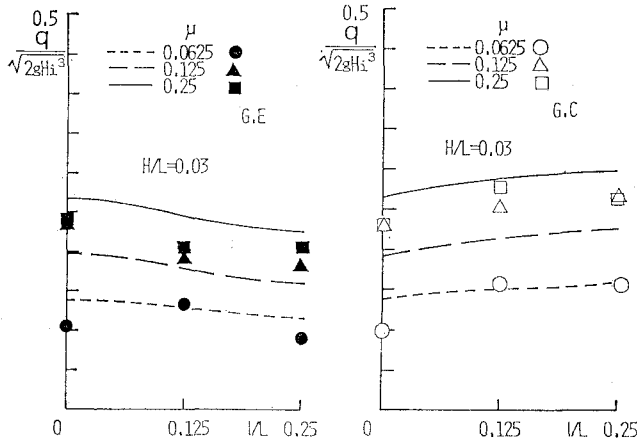
$$= \frac{2Dh}{\pi(D+B)} V_{\max} \dots\dots\dots (27)$$

ここに、 $V_{\max}$ は冲向および岸向の最大流速の平均値である。

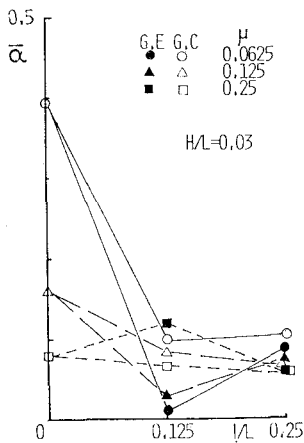
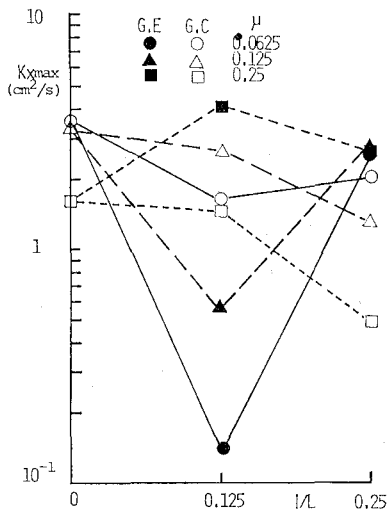
図-8 は交流量 q を入射波高 H_i を用いて無次元表示したもので、図中の線表示は理論計算値である。漸拡の場合、 l/L が大きくなるに伴い交流量は減少し、漸縮の場

図-5 r_R と l/L との関係図-6 r_T と l/L との関係図-7 ε と l/L との関係

合には逆に増大する。また、本実験の範囲内では開口幅が大きい方が交流量は大きくなるが、同じ開口幅でも漸縮の場合が漸拡の場合よりも交流量は大きいといえる。


 図-8 $q/\sqrt{2gHt^3}$ と l/L との関係

次に海水交換率をみておこう。図-9 は、(22) 式により、1 波ごとの交換率 $\bar{\alpha}_1$ を求め、それらを 20 波につ


 図-9 α と l/L との関係

 図-10 $K_{x\max}$ と l/L との関係

いて平均した交換率 $\bar{\alpha}$ と l/L との関係を示したものである。漸拡の場合の $l/L=0.125$ 以外は開口幅が小さい方が $\bar{\alpha}$ は大きな値をとるようであるが、漸拡、漸縮の場合とも交換率には大差がみられず、その値は 10% 程度である。単一板スリット $l/L=0$ の $\mu=0.0625$ の場合の値のみ交換率は 40% にも達しているが、この原因については明らかでない。

図-10 に、(26) 式より 1 波ごとの拡散係数を求め、その最大値 $K_{x\max}$ について示した。これからも $K_{x\max}$ に及ぼす漸拡、漸縮および l/L の影響は見い出せない。図から、本実験の場合、 $K_{x\max}$ は $0.1 \sim 4 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度といえよう。

6. 結 言

漸拡および漸縮スリット式防波堤の反射率、透過率およびエネルギー損失率を理論的に求めることができることを示し、水理学的には漸縮スリット式が有効であることがわかった。また、海水流量も理論的に計算でき、堤内外の海水交換率および拡散係数を評価しうることを論じた。その結果、海水流量は漸縮タイプが漸拡のそれに比べて大きくなるが、海水交換率は約 10%、拡散係数の最大値は $0.1 \sim 4 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度となり、両者の顕著な差異を明確にするまでには至らなかった。

今後は、漸拡・漸縮部を適切に組合せることにより、水理、水質両面から有効な開口形状を見い出すことが必要である。

最後に、本研究にあたり実験に御協力いただいた元学部学生田中英幸君（現正和設計）に感謝の意を表するとともに、本研究は文部省科学研究費自然災害特別研究（代表者 岩垣雄一 京都大学教授）による研究の一部であることを付記し謝意を表する。

参 考 文 献

- たとえば、近藤俊郎・竹田英章：消波構造物，森北出版，275 p.，1983.
- 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，pp. 233～238，1973.
- 松本輝寿・永井康平・武智雅敏：直立消波透過型防波堤の波浪および通水特性に関する実験的研究，第 23 回海岸工学講演会論文集，pp. 112～116，1976.
- 村上仁士・細井由彦：漸変縦型スリット式防波堤の海水交流特性，第 36 回土木学会中四年講，pp. 141～142，1984.
- 村上仁士・細井由彦・合田吉孝：漸縮および漸拡縦型スリット式防波堤の消波および海水交流特性，第 31 回海岸工学講演会論文集，pp. 497～501，1985.