

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

村上 仁士*・細井 由彦**・合田 吉孝***

1. 緒 言

近年、種々の断面形状をもつ直立消波透過性防波堤が各所で施工されるようになり、時代の要請に合った省資源型の防波堤として今後ますます普及する傾向にある¹⁾。これは、防波堤前面の反射波を軽減させることにより、堤前面の水域を有効に利用し、周辺環境とくに海浜の変化を抑えるとともに、透過波は許しても港湾内外の海水の交流を促進して水域の水質保全をはかる、さらにはもっと積極的に魚礁としての効果²⁾も期待できるということによるものといえよう。

この種の防波堤に対する研究も主として反射率や透過率を求める実験に基づく水理学的研究が多く、消波機構、海水交流・交換機構を総合的に究明しようとしたものは、少なく、現段階ではやはり単純な断面形状をモデルとした水理・水質両面の基礎的研究が必要と考えられる。

このような観点から、単純な漸縮・漸拡部の組合せからなる縦型スリット壁を対象に選び、漸変部の長さや漸変角を適当に組合せることにより、消波特性のみならず海水交流・交換、エアレーション面からも有効な断面を原理的に求め、各種の応用に供しようとするものである。ここでは、まずその第1段階として、より単純なスリット幅が漸縮または漸拡する場合のみをとりあげ、消波特性および港内の濃度変化について種々の角度から考察を行う。

2. 理 論

2.1 反射率および透過率

(1) 漸縮スリットの場合

解析に先だち次のような仮定をおく。1) 波は堤に直角に入射する微小振幅長波である。2) 堤沿い方向に波は変化しない。3) 透過波は無限に進行する。4) 全領域の水深は一定である。

さて、図-1のように堤沿いの長さ $(D+B)$ の範囲を対象とし、領域を3分割して座標系を図のようにとる。

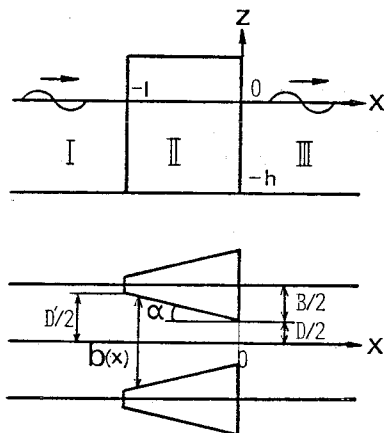


図-1 座標系および記号の説明

まず、領域IIについて考える。水位変動を η 、水平水粒子速度を u 、重力加速度を g とすると、運動方程式および連続式は次のように表わされる。

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

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

$$b = D - 2x \tan \alpha \quad \dots\dots\dots (3)$$

であるから、 $\gamma = 2 \tan \alpha$ とおき、さらに

$$b = D - \gamma x = \gamma X \quad \dots\dots\dots (4)$$

とおくと、(1)、(2) 式より次式が得られる。

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial X^2} + \frac{1}{X} \frac{\partial \eta}{\partial X} - \frac{1}{gh} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = 0 \quad \dots\dots (5)$$

いま、 $\eta(x, t)$ を

$$\eta(x, t) = f(x) e^{i \sigma t} \quad \dots\dots\dots (6)$$

とおき、 $(\sigma/c)X = \xi$ 、 $c = \sqrt{gh}$ とすれば、(5) 式は

$$\frac{\partial^2 f}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial f}{\partial \xi} + f = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。

一方、水粒子速度 u を $f(x)$ を用いて表現すれば、

$$u(x, t) = U(x) e^{i \sigma t} = -(g/i \sigma) (df/dx) e^{i \sigma t} \quad \dots\dots (8)$$

となる。ここに、 $i = \sqrt{-1}$ 、 $\sigma = 2\pi/T$ 、 T は周期である。

(7) 式により、 f の解が次式のように与えられる。

$$f_2 = K_1 H_0^{(1)}[\xi] + K_2 H_0^{(2)}[\xi] \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $H_0^{(1)}[\xi]$ 、 $H_0^{(2)}[\xi]$ は、それぞれ0次の第1種および第2種ハンケル関数であり、第1項が進行波、第2項が逆行波の成分を示すものである。 K_1 、 K_2 は後に境界条件より決定される複素係数である。

* 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

(9) 式はベッセルおよびノイマン関数を用いると

$$f_2 = (K_1 + K_2)J_0[k\{(D/\gamma) - x\}] + i(K_1 - K_2)N_0[k\{(D/\gamma) - x\}] \quad \dots\dots\dots(10)$$

と書きかえられる。ここに、 $k = 2\pi/L$ 、 L は波長である。

一方、(10) 式に対し、水粒子速度を表わす U_2 は、

$$U_2 = -(g/ic)(K_1 + K_2)J_1[k\{(D/\gamma) - x\}] - (g/c)(K_1 + K_2)N_1[k\{(D/\gamma) - x\}] \quad \dots\dots\dots(11)$$

となる。ここに、 J_1 、 N_1 は、1 次のベッセルおよびノイマン関数である。(9)~(11) 式で f_2 、 U_2 のように添字 2 をつけているが、これは領域の特性を示すもので、以下でも同様の表示法をとる。以上で領域 II の水位変動および水粒子速度が求められた。

領域 I および III については、連続式が

$$\partial\eta/\partial t + h\partial u/\partial x = 0 \quad \dots\dots\dots(12)$$

となるので、(1) 式と上式より次式が得られる。

$$d^2f/dx^2 + k^2f = 0 \quad \dots\dots\dots(13)$$

上式および (8) 式に基づき領域 I および III の解が以下のように与えられる。

$$f_1 = a_I e^{-ik(x+l)} + a_R e^{ik(x+l)} \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$U_1 = (g/c)\{a_I e^{-ik(x+l)} - a_R e^{ik(x+l)}\} \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$f_3 = a_T e^{-ikx} \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$U_3 = (g/c)a_T e^{-ikx} \quad \dots\dots\dots(17)$$

ここに、 a_I 、 a_R および a_T は、それぞれ入射、反射および透過波の振幅を複素表示したものである。

次に、境界条件はエネルギーおよび質量保存則より、

$$\eta_1 - \eta_2 = (C_A/2g)u_1|u_1|, \quad x = -l \quad \dots\dots\dots(18)$$

$$\eta_2 - \eta_3 = (C_B/2g)u_3|u_3|, \quad x = 0 \quad \dots\dots\dots(19)$$

$$(D+B)u_1 = D'u_2, \quad x = -l \quad \dots\dots\dots(20)$$

$$Du_2 = (D+B)u_3, \quad x = 0 \quad \dots\dots\dots(21)$$

となる。ここに、 C_A 、 C_B はエネルギー損失を表わす係数である。(18)、(19) 式の近似式として、断面急変部で圧力が連続とする次式³⁾

$$\eta_1 = \eta_2, \quad x = -l \quad \dots\dots\dots(22)$$

$$\eta_2 = \eta_3, \quad x = 0 \quad \dots\dots\dots(23)$$

をここでは用いることにする。

以上の (20)~(23) 式のもとで、未知量 a_R 、 K_1 、 K_2 および a_T を a_I との比で求め、それらの絶対値をとれば反射率 r_R および透過率 r_T が以下のように求められる。

$$r_R = \frac{\sqrt{(\beta\xi' + \mu'\delta)^2 + (\beta\mu' - \xi'\delta)^2}}{\beta^2 + \delta^2} \quad \dots\dots\dots(24)$$

$$r_T = \frac{|\nu|}{\sqrt{\beta^2 + \delta^2}} \quad \dots\dots\dots(25)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} \beta &= pD'(AM - IF) + pD(EL - HG) \\ \delta &= p^2(EF - AG) + DD'(IL - HM) \\ \xi' &= 2pD(EL - HG) - \beta \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(26)$$

$$\mu' = 2p^2(EF - AG) - \delta$$

$$\nu = 2pD(AL - HF)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} A &= J_0[kD/\gamma], \quad E = J_0[k\{l + (D/\gamma)\}] \\ F &= N_0[kD/\gamma], \quad G = N_0[k\{l + (D/\gamma)\}] \\ H &= J_1[kD/\gamma], \quad I = J_1[k\{l + (D/\gamma)\}] \\ L &= N_1[kD/\gamma], \quad M = N_1[k\{l + (D/\gamma)\}] \\ p &= D + B \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(27)$$

である。

(2) 漸拡スリットの場合

漸縮スリットの場合と同様の手法で、反射率 r_R および透過率 r_T を求めると以下の式を得る。

$$r_R = \frac{\sqrt{(\beta\xi'' + \mu'\delta)^2 + (\beta\mu' - \xi''\delta)^2}}{\beta^2 + \delta^2} \quad \dots\dots\dots(28)$$

$$r_T = \frac{|\lambda|}{\sqrt{\beta^2 + \delta^2}} \quad \dots\dots\dots(29)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} \xi'' &= 2pD'(AM - IF) - \beta \\ \lambda &= 2pD'(EM - IG) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(30)$$

であり、他の諸量は (26)、(27) 式に示したものである。

2.2 スリット堤による港内拡散

図-2 のように領域を分け、外海 I から濃度 c_0 をもつ波がスリット部を噴流状態で II に入り、この領域では場所的には一様な濃度 $c(t)$ となるとして、その後は透過波のみによる 1 次元の拡散により $c(x, t)$ となるという拡散モデルを考え、座標系を図のようにとる。

まず、領域 II について物質量の保存則をたてると

$$Q(c_0 - c_i) + K(\partial c/\partial x)|_{x=0} \cdot A_3 T = (dc_i/dt)S_2 h T \quad \dots\dots\dots(31)$$

となる。ここに、 Q は半周期 ($T/2$) 間にスリット部を流入する水量、 $A_3 = (D+B)h$ 、 K は 1 次元の拡散係数、 S_2 は領域 II の水表面積で、 $S_2 = (D+B)l_0$ 、 l_0 は噴流長、 T は周期である。

領域 III については 1 次元の拡散方程式が成立する。

$$\partial c/\partial t = K\partial^2 c/\partial x^2 \quad \dots\dots\dots(32)$$

(31)、(32) 式を解くにあたり初期条件および境界条件を次のように与える。

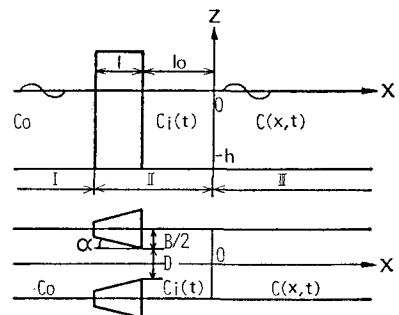


図-2 座標系および記号の説明

$$c(x, 0) = 0 \dots \dots \dots (33)$$

$$c(0, t) = c_i(t) \dots \dots \dots (34)$$

$$c(\infty, t) = \text{const.} \dots \dots \dots (35)$$

(31), (32) 式をラプラス変換すると次のように書ける.

$$(s + E')C_i(s) = (E'/s)c_0 + F'\{\partial C(0, s)/\partial x\} \dots (36)$$

$$d^2C(x, s)/dx^2 = (s/K)C(x, s) \dots \dots \dots (37)$$

ここに, $E' = Q/(A_3 T)$, $F' = KA_3/(S_2 h)$ である.

条件 (33)~(35) 式についてもラプラス変換を行い (37) 式の解にそれを適用すると次式が得られる.

$$C(x, s) = C_i(s)e^{-\sqrt{s/K}x} \dots \dots \dots (38)$$

上式より, $C(0, s)$ を求めた後に (36) 式にそれを代入すると, $C_i(s)$ が求まり, これをさらに (38) 式に代入すれば $C(x, s)$ が次式の形で得られる.

$$C(x, s) = \frac{E'c_0}{s(s + E' + F'\sqrt{s/K})} e^{-\sqrt{s/K}x} \dots \dots \dots (39)$$

上式を逆ラプラス変換して, 結局所要の $c(x, t)$ は次のように求められる.

$$\begin{aligned} c(x, t) = & (A'/a')[-e^{-a't}\{(x/\sqrt{K}) - a't\} \text{erfc}\{a'\sqrt{t}\} \\ & + x/(2\sqrt{Kt})\} + \text{erfc}\{x/(2\sqrt{Kt})\}] \\ & - (A'/b')[-e^{-b't}\{(x/\sqrt{K}) - b't\} \text{erfc}\{b'\sqrt{t}\} \\ & + x/(2\sqrt{Kt})\} + \text{erfc}\{x/(2\sqrt{Kt})\}] \dots \dots \dots (40) \end{aligned}$$

ただし,

$$\left. \begin{aligned} A' &= iE'c_0/L' \\ a' &= (1/2)\{(F'/\sqrt{K}) + L'\} \\ b' &= (1/2)\{(F'/\sqrt{K}) - L'\} \\ L' &= i\sqrt{4E' - (F'/\sqrt{K})^2} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (41)$$

である. ここに, $\text{erfc}(\)$ は, 誤差関数を $\text{erf}(\)$ と表わしたとき, $1 - \text{erf}(\)$ で与えられる.

3. 実験装置および方法

長さ 14.4m, 幅 20cm, 深さ 30cm の片面ガラス張り 1 次元造波水槽の造波板から約 10m の位置に, 単一板スリット用の厚さ 1mm の鉄板製または, 漸縮・漸拡スリット用にアクリル製モデルを設置した. 全実験を通じ水深および周期は一定としてそれぞれ $h = 15\text{cm}$, $T = 0.75\text{sec}$ のもとで実験を行った. 表-1 に本実験における実験諸元を示す. 表中, スリットの開口比を $\mu = D/(D+B)$, 堤幅を l で表わしている. ここでは示していないが, 用いた入射波の波形勾配 H/L は 0.014~0.047 の範囲である. モデルは, 図-1 に示した $(D+B)$ の範囲の開口部が 1 箇所としたもので, 入射方向に対しモデルの向きを正反対に変えることにより, 漸

表-1 実験諸元

No.	μ	l (cm)	D (cm)	B (cm)
1	0.0625	0	1.1	17.1
2	0.125	0	2.3	15.9
3	0.25	0	4.6	13.6
4	0.0625	9.4	1.1	17.1
5	0.125	9.4	2.3	15.9
6	0.25	9.4	4.6	13.6
7	0.0625	18.8	1.1	17.1
8	0.125	18.8	2.3	15.9
9	0.25	18.8	4.6	13.6

縮モデルまたは漸拡モデルと定義した.

反射率は, 水槽側面より撮影した波の挙動のビデオ録画をもとに解析して Healy の方法で求め, 透過率は, 容量式波高計より得た波高をもとに算出された.

一方, スリット堤による港内の濃度変化は次のようにして計測・解析された. すなわち, 開口部を締切り港内を約 500ppm の食塩水で同様濃度とした後, 波の到達直前に締切り板を取り除き, 港内の濃度減衰の様子をスリット幅最小部に設置した電導度計で測定し, あらかじめ作製した検定曲線により, 濃度の時間変化が算出された.

4. 反射・透過・エネルギー損失特性

図-3 は, 反射率 r_R および透過率 r_T に及ぼす開口比 μ の影響を調べたものである. 図中には, (24), (25) 式および (28), (29) 式の計算結果を $\phi = \phi = 0$ と表示した一点鎖線で示すとともに, (18), (19) 式について, それぞれ, $\eta_1 - \eta_2 = \phi u_1$, $\eta_2 - \eta_3 = \phi u_3$, さらに漸拡スリットの場合には, $\eta_1 - \eta_2 = \phi u_1$, $\eta_2 - \eta_3 = \phi u_3$ と仮定して一種のエネルギー損失係数 ϕ および ϕ を考慮した解の結果も併記している. また “漸縮スリット” の場合を G・C, “漸拡スリット” の場合を G・E と略称し, 以下

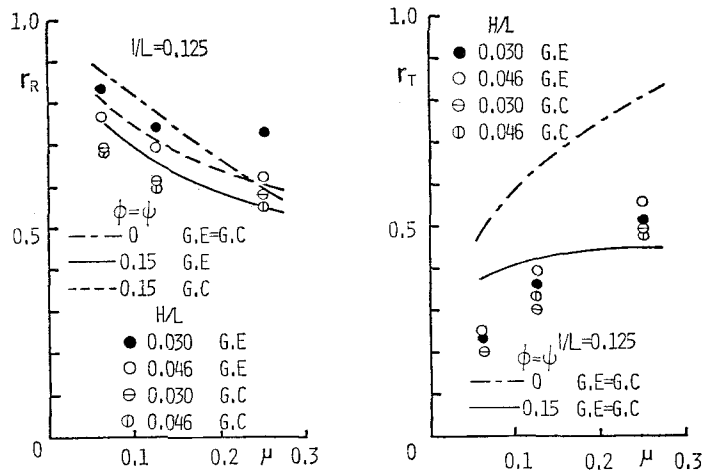


図-3 r_R と μ および r_T と μ との関係

でも同様の表示法をとることにしている。図から、開口幅が大きくなれば r_R は減少、 r_T は増大し、 r_R はエネルギー損失を考慮しない解でもある程度説明し得るが、 r_T については (25), (29) 式ともその値を過大に見積ることがわかる。種々の丸印で示した実験値をみると、漸縮の場合が、漸拡の場合よりも r_R および r_T ともに小さな値を示し、水路面では漸縮スリットの方が有効といえる。一方、 ϕ , ψ を考慮した解では実験値と逆の傾向を示し、現象を説明していないようにみえるが、これは未知係数を単に同一の値に仮定したことによるものであり、 ϕ , ψ の定量化は今後の問題として残されている。

図-4 は、 r_R , r_T に及ぼす堤幅の影響を調べたもので、実験値をみると r_R を極大にする l/L が存在することが示唆され、理論的にもそのことが首肯できる。一方 r_T については堤幅の影響も極めて小さいことがわかる。

図-5 は、 r_R , r_T に及ぼす漸変角 α の影響をみたもので、 α が大きくなるに伴い r_R は減少、 r_T は逆に増大する。 r_T で、 ϕ , ψ を考慮すると α を大きくすることにより、その値が $\phi = \psi = 0$ の場合よりもかなり小さくなることは興味深い。

図-6 は、入射波のエネルギーに対するスリット部で生ずる渦やそれに伴う乱れによって失われるエネルギーの割合 ε と開口幅との関係を実験値をもとに示したもので、 $\varepsilon = 1 - r_R^2 - r_T^2$ として計算された値である。漸拡の場合の ε の値は、本実験の開口比の範囲では大差はなく、0.3 程度であるが、漸縮の場合には、前者に比べその値自体大きく、しかも μ に伴いかなり大きく変化する傾向がみられる。またこの場合、 ε を最大にする μ が存在し、ここでは $\mu = 0.125$ のときに ε が最大となる。したがって、このときに乱れが最大となるはずである。

5. 海水交流特性

理論解 (41) 式から、港内の濃度変化を計算できるが、未知量の Q , K , l_0 などの評価を行っていないので、この式の結果については別の機会に報告し、今回は実験結果に基づいて海水交流特性を考察する。すなわち、港内

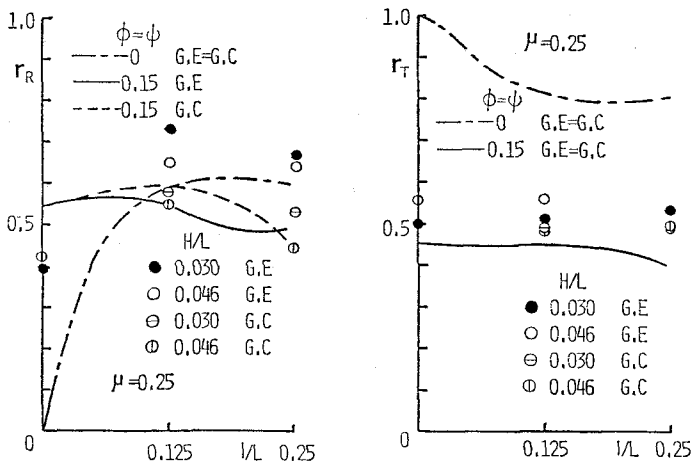


図-4 r_R と l/L および r_T と l/L の関係

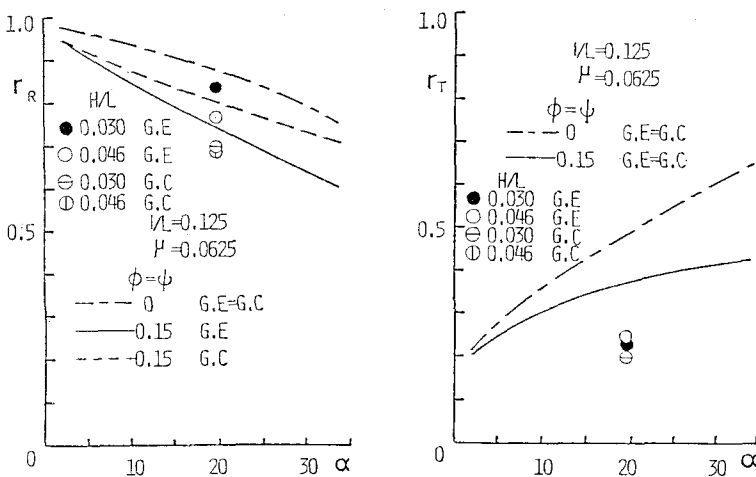


図-5 r_R と α および r_T と α の関係

を高濃度にして、侵入波による希釈特性をみる。

図-7 は、漸縮および漸拡スリットの最小部における濃度減衰曲線を示したものである。縦軸に、初期港内水の濃度 c_0 と第1波侵入時から任意の時刻 t における濃度 c_i との比、横軸には時刻 t を周期で無次元化してとっている。

スリット部から侵入した外海の濃度0の水塊により、スリット近傍の港内水は希釈され、半周期後の沖向き流速成分で港内水に入った外海水も一部流出し、再び流出した外海水の水塊の一部が港内に侵入して港内水を希釈する。こうした過程を繰り返しながら、スリット部近傍の水塊から徐々に港奥へと海水交換が促進されるわけである。ここには示していないが、スリット部の流速を測定して海水交流量を求めた結果、同じ開口幅であっても、漸縮の場合が漸拡に比べ海水交流量は大きくなることを見出し出している。ところで図-7をみると漸拡の場合が漸縮の場合に比べて、濃度の減衰が大きくなっている。すなわち、濃度の減衰は交流量のみによるものではない

く、交流量のうちの程度外海水と交換するかによるものであるといえよう⁵⁾。

濃度の減衰が大きい漸拡の場合が海水交換がよいといえるならば、防波堤の水理面からみて漸縮の場合が有効とした結果と水質面からみた結果とは全く逆の結果となり、漸縮および漸拡断面を適当に組合せることにより、この問題が解決されることを、上記の結果は示唆するものである。

6. あとがき

以上のような結果を得たが、濃度減衰実験における再現性にやや疑問があること、減衰曲線がある時間経過後再び増大する傾向(図-7)もみられ、実験上の制約による水槽末端での消波が完全でなく反射波の影響によりスリット部へ高濃度の水塊が返ってきたことなども考えられ、なお今後さらに多くの実験資料により定量的な海水交流特性の把握が必要である。また、波のエネルギー逸散率 ε は乱れの強さを表わすものと考え、漸縮の場合が拡散による希釈効果も大きくなると考えられるが、濃度の測定はスリット幅の最小部であるためか、この傾向もない。今後こうした点についても検討したい。

最後に、本研究にあたり実験に御協力をいただいた元学部学生伊原祐治君(現銭高組)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 尾島 勝 徳島大学助教授)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

- 1) たとえば、近藤俊郎・竹田英章: 消波構造物, 森北出版, 275 p., 1983.
- 2) 森平倫生・笹島 博・久保省吾: 多孔式の魚礁効果, 第26回海講演文集, pp. 348~352, 1979.
- 3) たとえば, Lamb, H.: Hydrodynamics, 6th ed., Dover,

- 4) 高 隆二・田川昌宏: Crenelled breakwater の拡散性, 第20回海講演文集, pp. 233~238, 1973.
- 5) 村上仁士・細井由彦: 単一板スリット壁における海水交流特性に関する考察, 第38回年講演概要集, 第2部, pp. 245~246, 1983.

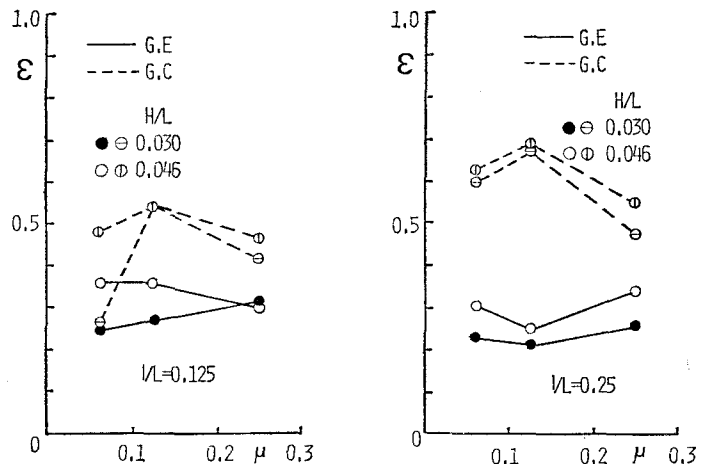


図-6 ε と μ との関係

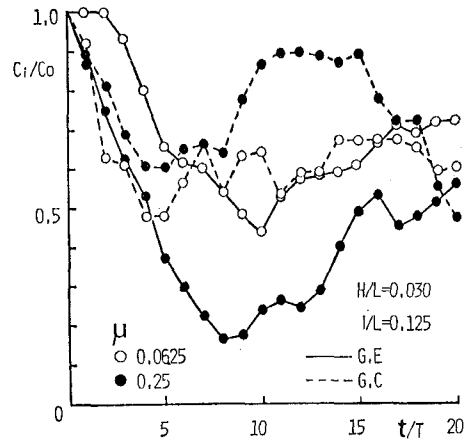


図-7 c_t/c_0 と t/T との関係