

複合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は海水交流が可能であることから、水環境の保全機能を有した消波構造物として、その研究開発がおおいに期待されるところである。これら透過堤の水理特性については種々の研究が発表されているが、海水交流も含めた研究はわずかしが行われていない。

著者らは消波および海水交流の両面からみて有効な開口部形状を有する透過堤を開発する目的で、実験的および理論的に検討を行ってきた。これまでに開口部が単純な漸縮型や漸拡型をした縦型スリット式防波堤について、消波および海水交流特性を明らかにしてきた^{2),3)}。

本論文ではさらに、漸縮、漸拡の組合せからなる漸縮漸拡型および漸拡漸縮型の開口部形状を有する、複合漸変縦型スリット式防波堤をとりあげ、スリット部の形状と波の反射、透過および海水交流特性との関係を検討した。また先の論文³⁾でとりあげたモデルも合わせて比較し、水理、水質の両面から見て、いずれのタイプがより有効であるかを考察した。

2. 反射および透過率に関する理論的考察

対象とする全領域の水深を一定とし、波は堤に直角に入射する微小振幅長波であり、堤沿い方向には変化しないと仮定する。

図-1のように座標系をとり、領域を4つに分けて基礎式をたてる。縮拡型(C.E)における、領域IIおよびIIIに関する運動方程式、連続式はそれぞれつぎのようになる。

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

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

$$b = D - 2x \tan \alpha \quad (-l_1 \leq x \leq 0) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$b = D + 2x \tan \beta \quad (0 \leq x \leq l_2) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで η , u , g はそれぞれ水位変動、水平水粒子速度、重力加速度であり、その他の記号の意味は図-1中に示

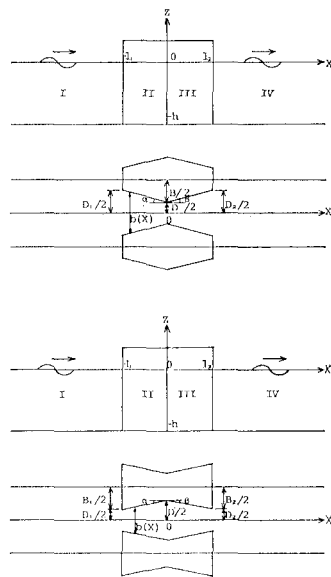


図-1 座 標 系

されている。

領域IおよびIVについては、連続式がつぎのようになる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

エネルギーおよび質量保存則より境界条件はつぎのようになる。

$x = -l_1$ において、

$$\eta_1 - \eta_2 = (C_A/g) \{ (D+B)/D_1 - 1 \} u_1 |u_1| \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$(D+B)u_1 = D_1 u_2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$x = 0$ において、

$$\eta_2 = \eta_3 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$u_2 = u_3 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$x = l_2$ において、

$$\eta_3 - \eta_4 = (C_B/g) \{ 1 - (D+B)/D_2 \} u_4 |u_4| \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$D_2 u_3 = (D+B)u_4 \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで添字はそれぞれの領域における量であることを示す。

以上の式を文献2)に示した方法で解くと、反射率 r_R 、および透過率 r_T がそれぞれつぎのように求められ

* 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

*** 正会員 工修 日建技術コンサルタンツ

る。

$$r_R = \frac{\sqrt{\{-1 + E_0 - G_0 + (\phi g/C)\}^2 + (E p + G m)^2}}{|1 + (\phi g/C)|} \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$r_T = \frac{\sqrt{(E's - G'r)^2 + (E't + G'q')^2}}{|1 + (\phi g/C)|} \quad \dots\dots\dots(13)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} o &= h'm - jn \\ p &= jm + h'n \\ q' &= \frac{(A_0 - F_n)A'a + (Ap + Fm)(A'b' + F')}{A'^2 a^2 + (A'b' + F')^2} \\ r &= \frac{((Ap + Fm)A'a - (A_0 - F_n)(A'b' + F'))}{A'^2 a^2 + (A'b' + F')^2} \\ s &= aq - b'r \\ t &= b'q + ar \\ h' &= (fd + eg')/(d^2 + e^2) \\ j &= (dg' - ef)/(d^2 + e^2) \\ m &= -2k/(k^2 + l^2) \\ n &= 2l/(k^2 + l^2) \\ k &= \{1 + (\phi g/C)\}(D_1 I j + D_1 M)/p - E h' \\ l &= -\{1 + (\phi g/C)\}D_1 I h'/p - E j - G \\ d &= -H'b'A - L'A - A'b'H - F'H \\ e &= H'aA + A'aH \\ f &= H'aF + A'aL \\ g' &= H'b'F + L'F + A'b'L + F'L \\ a &= \frac{\{1 + (\phi g/C)\}(D_2 E'M'/p - D_2 G'I'/p)}{\{1 + (\phi g/C)\}^2 D_2^2 I'^2/p^2 + E'^2} \\ b' &= \frac{-\{1 + (\phi g/C)\}^2 D_2^2 M'I'/p^2 - E'G'}{\{1 + (\phi g/C)\}^2 D_2^2 I'^2/p^2 + E'^2} \\ \phi &= C_A \{(D+B)/D_1 - 1\} |u_1|/g \\ \phi &= C_B \{1 - (D+B)/D_2\} |u_4|/g \\ C &= \sqrt{gh} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(14)$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} A &= J_0[kD/\gamma], \quad A' = J_0[kD/\gamma'] \\ E &= J_0[k(l_1 + D/\gamma)], \quad E' = J_0[k(l_2 + D/\gamma')] \\ F &= N_0[kD/\gamma], \quad F' = N_0[kD/\gamma'] \\ G &= N_0[k(l_1 + D/\gamma)], \quad G' = N_0[k(l_2 + D/\gamma')] \\ H &= J_1[kD/\gamma], \quad H' = J_1[kD/\gamma'] \\ I &= J_1[k(l_1 + D/\gamma)], \quad I' = J_1[k(l_2 + D/\gamma')] \\ L &= N_1[kD/\gamma], \quad L' = N_1[kD/\gamma'] \\ M &= N_1[k(l_1 + D/\gamma)], \quad M' = N_1[k(l_2 + D/\gamma')] \\ \gamma &= 2 \tan \alpha, \quad \gamma' = 2 \tan \beta \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(15)$$

ただし、 J_0, J_1, N_0, N_1 はそれぞれ 0 次および 1 次のベッセルおよびノイマン関数である。

拡縮型 (E.C.) の場合も同様に図—1 の座標系に対し次式を得る。

$$r_R = \frac{\sqrt{\{-1 + \hat{E}_0 - \hat{G}_0 + (\phi g/C)\}^2 + (\hat{E}p + \hat{G}m)^2}}{|1 + (\phi g/C)|} \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$r_T = \frac{\sqrt{(\hat{E}'s - \hat{G}'r)^2 + (\hat{E}'t + \hat{G}'q')^2}}{|1 + (\phi g/C)|} \quad \dots\dots\dots(17)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} A &= J_0[kD'/\gamma], \quad A' = J_0[kD'/\gamma'] \\ F &= N_0[kD'/\gamma], \quad F' = -N_0[kD'/\gamma'] \\ H &= -J_1[kD'/\gamma], \quad H' = -J_1[kD'/\gamma'] \\ I &= -J_1[k\{(D'/\gamma) - l_1\}], \quad I' = -J_1[k\{(D'/\gamma') - l_2\}] \\ L &= -N_1[kD'/\gamma], \quad L' = N_1[kD'/\gamma'] \\ M &= -N_1[k\{(D'/\gamma) - l_1\}], \quad M' = N_1[k\{(D'/\gamma') - l_2\}] \\ \hat{E} &= J_0[k\{(D'/\gamma) - l_1\}], \quad \hat{E}' = J_0[k\{(D'/\gamma') - l_2\}] \\ \hat{G} &= N_0[k\{(D'/\gamma) - l_1\}], \quad \hat{G}' = -N_0[k\{(D'/\gamma') - l_2\}] \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(18)$$

エネルギー損失率 ε は r_R, r_T より次式で求めた。

$$\varepsilon = 1 - r_R^2 - r_T^2 \quad \dots\dots\dots(19)$$

3. 実験装置および実験方法

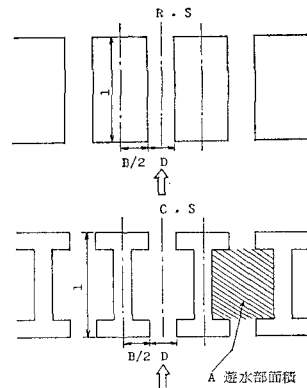
実験装置、実験方法は文献 2) に述べられているものと同様である。実験に用いた透過堤モデルは図—1 と図—2 に示された型式のものである。

透過堤形状を示す諸量を表—1 に示す。これらの各堤に対して、波形勾配が 0.020, 0.030, 0.045 の 3 種の波について実験を行った。

最小開口部の開口比 $D/(D+B)$ はいずれの場合も 0.125 とし、堤体幅 l/L (L : 入射波長) もすべて 0.125 とした。

遊水面積 A とは、堤前面から後面までの間の透過部の面積である。

拡散特性を調べる実験では、堤背面部を締切り、堤より外海側 2 m の区間に食塩を一樣濃度になるように攪拌して静置後、造波して波の到達直前に締切り板を取り除き、堤背面より 5 cm 岸側で、底から 1, 2.5, 4 cm



図—2 防波堤モデル

表-1 実験条件

No.	Type	$l_1/(l_1+l_2)$	α (度)	β (度)	A (cm ²)
1	C.E	0.25	20	20	
2		0.25	40	20	
3		0.25	20	40	
4		0.25	40	40	
5		0.75	20	20	
6		0.75	40	20	
7		0.75	20	40	
8		0.75	40	40	
11	E.C	0.25	20	7	30.08
12		0.25	40	16	40.42
13		0.25	46	20	45.12
14		0.25	68	40	77.08
15		0.75	7	20	30.08
16		0.75	16	40	40.42
17		0.75	20	46	45.12
18		0.75	40	68	77.08
20	R.S				21.62
30	C.S				77.08

の3点で塩分濃度を測定した。

4. 水理特性

図-3, 4 は波形勾配が 0.02 と 0.045 の場合の実験結果を、横軸に反射率、縦軸に透過率をとって整理したものである。エネルギー損失率は原点からの距離で見ることができ、原点に近いほど大きくなる。図中の番号は表-1 の実験番号を示す。

(1) 縮拡型の水理特性

図-3 の 3 と 4, 5 と 6, 7 と 8 や、図-4 の 1 と 2, 5 と 6, 7 と 8 の関係は、いずれも番号が大きい方が左上に位置している。このことより α が大きくなると反射率が減少し、透過率が増加する傾向にあることがわかる。これは最狭部の開口幅が等しくなるようにしたので、 α が大きくなると堤体前面の開口幅が広くなり、波の進行方向に直角な堤体前面面積が小さくなるためであると考えられる。

5~8 は 1~4 よりも原点寄りに分布していることから、 $l_1/(l_1+l_2)$ が 0.75 の場合の方が 0.25 の場合よりエネルギー損失率が大きいことがわかる。これはとくに波形勾配が小さいときに顕著である。図-5 はエネルギー損失率と $l_1/(l_1+l_2)$ の関係を示しているが、理論計算の結果は、 $l_1/(l_1+l_2)=0.5$ 付近で消波効果が劣る傾向にあることを示唆している。なお本論文では、理論計算を行う上で、損失係数値として $C_A=25$, $C_B=-15$ を与えた。

(2) 拡縮型の水理特性

遊水部面積の等しい堤番号の組み合わせは、(11, 15), (12, 16), (13, 17), (14, 18) であり、この順に面積が大きくなる。図-3, 4 より、遊水部面積が大きくな

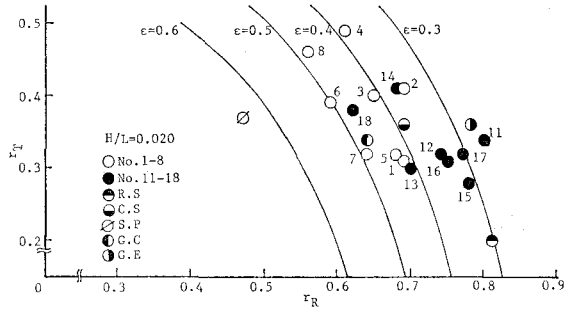


図-3 反射・透過率 (波形勾配 0.020)

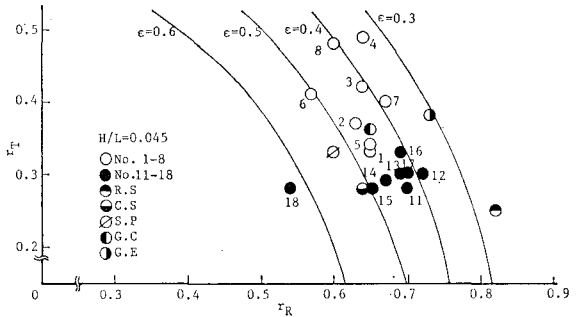


図-4 反射・透過率 (波形勾配 0.045)

るほどエネルギー損失率も大きくなるようであるが、これはおもに反射率の減少によるものであり、透過率は反射率ほど遊水部面積の影響を受けていない。

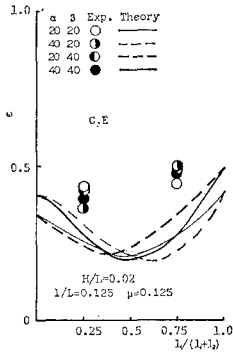
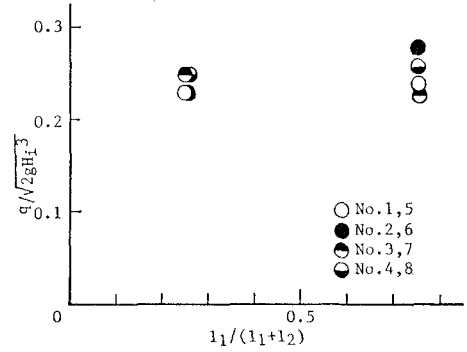
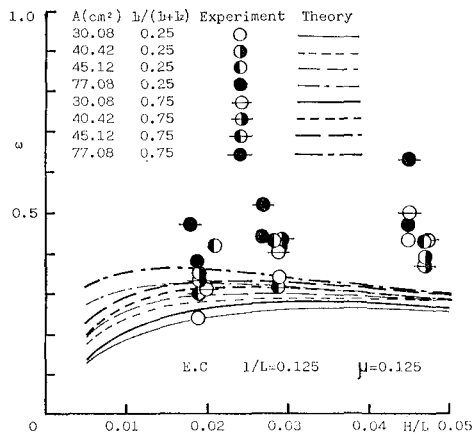
両図における描点の分布を比較すると、波形勾配が大きい方がエネルギー損失率が大きく、このタイプの防波堤は波形勾配が大きい波に有効なようである。図-6 はエネルギー損失率と波形勾配との関係であるが、理論計算結果は波形勾配の大きいところで実験結果から離れている。

(3) 各種タイプの比較

図-3, 4 中には前論文で発表したものも含め、その他のタイプの実験結果も示されている。いずれも最狭部の開口比は 0.125, 単一板を除いて l/L も 0.125 である。単一板 (S.P) とは厚みのない型式のものである。

R.S 型は各タイプの中で透過率は最小である反面、反射率が最大であり、エネルギー損失率は小さい。C.S 型は波形勾配が大きい場合に透過率が小さくなり、そのためエネルギー損失率が大きくなる。漸縮型 (G.C) は縮拡型と同程度の消波機能を有しているが、漸拡型 (G.E) はやや消波機能面で劣っている。単一板型は透過率は他のタイプと差がないが、反射率が小さいためエネルギー損失率が大きい。

以上を総括すると、縮拡型は透過率がやや大きく、拡縮型や漸拡型は反射率が大きい傾向にある。消波効果にすぐれているのは、単一板型や漸縮部が長く、漸縮角度

図—5 縮拵型のエネルギー損失率と $l_1/(l_1+l_2)$ の関係図—7 縮拵型の流量と $l_1/(l_1+l_2)$ の関係

図—6 拡縮型のエネルギー損失率と波形勾配の関係

の大きい縮拵型、遊水部面積が大きく漸縮部の長い拡縮型である。

5. 海水交流特性

堤の最小開口部で正逆プロベラ流速計を用いて測定した結果をもとに、堤沿い単位長さ当りの平均流量 q を次式より求めた。

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

$$= \frac{2Dh}{\pi(D+B)} V_{\max} \quad \dots\dots\dots(20)$$

ここに $V_{\max}$ は沖向きおよび岸向きの最大流速の平均値である。

(1) 縮拵型の交流特性

q を入射波高 H_0 で無次元化した $q/\sqrt{2gH_0^3}$ は、いずれの場合にも波形勾配が増加すると減少した。図—7 は $q/\sqrt{2gH_0^3}$ と $l_1/(l_1+l_2)$ の関係である。例外もあるがほぼ $l_1/(l_1+l_2)$ が大きくなると流量は増加する傾向にあった。本図では重った描点は横にずらせて描いている。

(2) 拡縮型の交流特性

流量と遊水部面積の関係を 図—8, 9 に示す。最小開口部が前後、両面にあるので、前面部（外海側）における測定によるものを図—8 に、後面部におけるものを図—9 に示す。波を対象としているので、前面部と後面部で必ずしも流量は等しくはならない。

前面部においては遊水部面積が大きくなるほど流量も増大している。また $l_1/(l_1+l_2)$ が 0.75 の方が 0.25 の場合よりも流量が大きい。

後面部においては、 $l_1/(l_1+l_2)$ が 0.25 のときは流量はほぼ一定であるが、それが 0.75 の場合は遊水部面積の増加にともなって増加している。また $l_1/(l_1+l_2)$ の大小関係と流量との関係は前面部と逆になっている。このことから、漸変部の長さが長い方の面において流量が大きくなると言える。

(3) 各種タイプの比較

図—8, 9 中には C.S 型, R.S 型もプロットしたが、これらの型式の流量も遊水部面積で整理すると、縮拵型と同傾向の分布上にある。

開口比 0.125, $l/L=0.125$, $H/L=0.02$ の場合、漸縮型では $q/\sqrt{2gH_0^3}=0.26$ 、漸拵型では $q/\sqrt{2gH_0^3}=0.19$ であった。したがって縮拵型や遊水部面積の大きい拡縮型は、比較的海水流量が大きい方であると言える。

6. 堤付近の拡散特性

外海を塩水で満たして波をおこした場合、堤内の塩分濃度変化は、重力効果により下部で濃く上部で薄い分布形を示すと考えられるが、堤付近で混合作用を受ければ鉛直方向に一様な分布に近づくであろう。そこで混合状態を評価するパラメータを次式で定義する。

$$K=(C_{\max}-C_{\min})/\bar{C} \quad \dots\dots\dots(21)$$

ここで $C_{\max}$, $C_{\min}$ はそれぞれ鉛直方向の塩分測定結果の最大値と最小値であり、 $\bar{C}$ は全測定値の平均値である。鉛直方向の混合は水平方向の混合と強い相関関係にあると考えられるから、 K の値が小さいほど堤付近の拡

表-2 K の計算結果

Type	K
1	1.46
2	1.76
3	1.51
4	1.10
5	1.56
6	1.47
7	1.58
8	0.92
C.E	
11	0.39
12	0.02
13	0.29
14	0.18
15	0.24
16	0.09
17	0.09
18	0.10
R.S	1.73
C.S	0.14
S.P	0.10
G.C	0.25
G.E	0.80

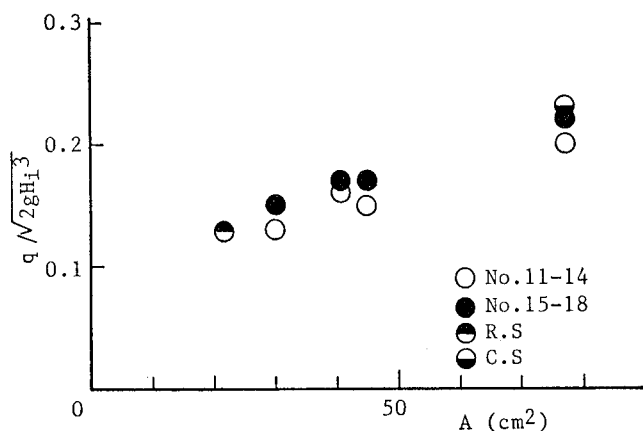


図-8 流量と遊水面積の関係 (前面部)

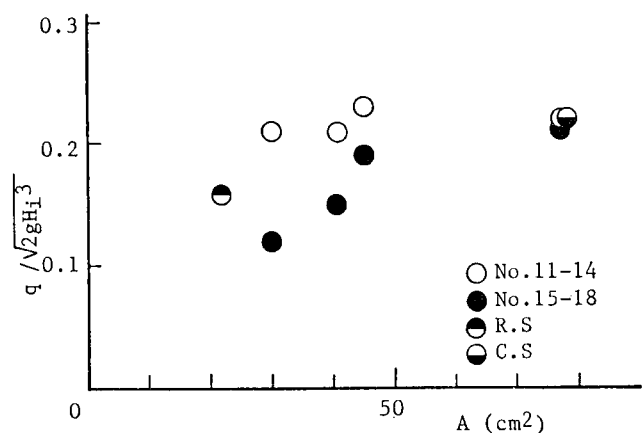


図-9 流量と遊水面積の関係 (後面部)

散能力は大きいと考えられる。

K の値がほぼ収束値に達する造波後 320 波目の結果が表-2 である。これより堤付近の拡散効果は、単一板型、C.S 型、拡縮型で大きく、縮拡型が最も小さいことがわかる。

7. 結 言

本研究では漸変縦型スリット式防波堤の水理特性、水質浄化特性について検討を行った。それぞれに一長一短があり、どのような点に重点をおくかによって選択され

るスリット形状は異ってくるが、全般的に見れば、遊水部面積を大きくとった拡縮型が、水理、水質両面においてすぐれていると考えられる。

今後さらに詳細な検討を進めるとともに、曝気能についても研究を行っていきたいと考えている。

本研究を進める上で御協力をいただいた元 本学工学部学生日下部彰氏 (現アイサワ工業) に感謝するとともに、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

- 1) 近藤俊郎・竹田英章: 消波構造物, 森北出版, 1983.
- 2) 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, 1984.
- 3) 村上仁士・細井由彦・合田吉孝: 漸変縦型スリット式防波堤の消波および海水交流特性, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 535~539, 1985.