

防波堤開口部における波のエネルギー損失に関する実験

岩 垣 雄 一*・村 上 仁 士**

1. 緒 言

防波堤開口部を通過して港湾内に侵入した波のエネルギーは、港湾内に蓄積されると同時に、一部は防波堤開口部から外海へ放射される。したがって、港湾内の波のエネルギーの授受は防波堤開口部を通して行なわれる。湾水振動を論議するには、波のエネルギーの授受に際しての防波堤開口部における水理特性、特に防波堤開口部で失なわれる波のエネルギー損失を定量的に求めておく必要がある。著者ら¹⁾は合成波を対象とし、湾水振動の実験を行なって、湾水の共振に伴う波の非線型効果を考察したが、また同時に防波堤開口部で失なわれる波のエネルギー損失の定量的な評価が重要であることを述べた。

本研究は、湾水振動を起こす場合に、防波堤開口部で失なわれる波のエネルギーを定量的に求める第1段階として、まず湾奥で波が反射しない場合、すなわち開口部を通過した波が無限に湾奥方向へ進行する場合について、最も単純なモデルを考え、数種の形状をした開口部で失なわれる波のエネルギーを実験的に求めたものである。

2. 理論的考察

林・服部²⁾は透過性多列パイルに関して理論的研究を行ない、透過率および反射率が実験値とよく一致することを示したが、ここでは、多列パイルに用いた解法と同様な方法を鉛直防波堤開口部に応用した。

(1) 透過率・反射率および防波堤開口部の流速

図-1 に示すような開口部モデルを考える。波は微小振幅波とし、入射波、反射波および透過波は位相のずれがないとすると次のようになる。

$$\eta_I = (H_I/2) \sin(\sigma t - kx) \quad (1)$$

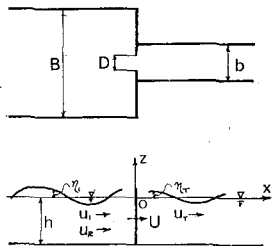


図-1 防波堤開口部の記号および座標

$$\begin{aligned} \eta_R &= (H_R/2) \sin(\sigma t + kx) \\ &= r_R (H_I/2) \sin(\sigma t + kx) \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta_T &= (H_T/2) \sin(\sigma t - kx) \\ &= r_T (H_I/2) \sin(\sigma t - kx) \quad (3) \end{aligned}$$

ここに、 H は波高、 $\sigma = 2\pi/T$ 、 $k = 2\pi/L$ 、 T および L はそれぞれ周期および波長であり、 r_R 、 r_T は反射率および透過率である。また添字 I 、 R および T はそれぞれ、入射波、反射波および透過波の特性を示す。

x 方向の水粒子速度 u を水深方向に積分して、平均値の $\bar{u}$ 、すなわち

$$\bar{u} = (1/h) \int_{-h}^0 u dz \quad (4)$$

を求めると、次のようになる。

$$\bar{u}_I = \eta_I (g/\sigma h) \tanh kh \quad (5)$$

$$\bar{u}_R = -\eta_R (g/\sigma h) \tanh kh \quad (6)$$

$$\bar{u}_T = \eta_T (g/\sigma h) \tanh kh \quad (7)$$

港湾内外の流量の連続性から、水面変動を無視すると、

$$B(\bar{u}_I h + \bar{u}_R h) = b \bar{u}_T h \quad (8)$$

防波堤前面での流量の連続性 $Bh(\bar{u}_I + \bar{u}_R) = C_0 D \cdot h \bar{U}$ と Bernoulli の定理を用いると

$$\bar{U} = C_0 \sqrt{2g(\eta_I + \eta_R - \eta_T)} / \sqrt{1 - (C_0 D/B)^2} \quad (9)$$

が得られ、港内側の流量の連続性から

$$C_0 D h \bar{U} = b h \bar{u}_T \quad (10)$$

と得る。ここに、 C_0 、 C_b はそれぞれ縮流係数および流速係数である。式 (5)、(6)、(7) および (8) から

$$\eta_R = \eta_I - (b/B) \eta_T \quad (11)$$

式 (9)、(10) を用いて

$$\bar{U}_T = \frac{C_0 \cdot C_b D \sqrt{2g(\eta_I + \eta_R - \eta_T)}}{b \sqrt{1 - (C_0 D/B)^2}} \quad (12)$$

が求められる。式 (7) を式 (12) に代入して $\bar{u}_T$ を消去し、 η_I として $H_I/2$ をとると、結局、透過率は次式になる。

$$\begin{aligned} r_T &= \frac{2\zeta kh}{\tanh kh} \frac{h}{H_I} \\ &\times \left\{ -(1+\lambda)\zeta + \sqrt{(1+\lambda)^2 \zeta^2 + \frac{2H_I}{h} \frac{\tanh kh}{kh}} \right\} \quad (13) \end{aligned}$$

ここに、

$$\zeta = CD/b \sqrt{1 - (D/B)^2} \quad (14)$$

$$\lambda = b/B \quad (15)$$

である。反射率は式 (11) から

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学科

$$r_R = 1 - \lambda r_T \quad \dots\dots\dots (16)$$

となる。

波が長波と仮定できる場合には、式(13)は簡単に

$$r_T = 2\zeta(h/H_I)\{- (1+\lambda)\zeta + \sqrt{(1+\lambda)^2\zeta^2 + 2(H_I/h)}\} \quad \dots\dots\dots (17)$$

となる。一方、防波堤開口部の最大平均流速は

$$\bar{U}_{\max} = \zeta' \sqrt{g\{2 - (1+\lambda)r_T\}H_I} \quad \dots\dots\dots (18)$$

で示され、無次元表示すれば、次式が得られる。

$$\bar{U}_{\max}/\sqrt{gh} = \zeta' \sqrt{2 - (1+\lambda)r_T}(H_I/h) \quad \dots\dots\dots (19)$$

ここに

$$\zeta' = (b/C_0D)\zeta \quad \dots\dots\dots (20)$$

である。

(2) エネルギー逸散率

微小振幅波理論によると、単位時間に単位幅を横切って輸送される波の平均エネルギーは次式で示される。

$$W = C_G E = n C E \quad \dots\dots\dots (21)$$

ここに、 $n = (1/2)\{1 + (2kh/\sinh 2kh)\}$

$$C = \sqrt{g/k} \tanh kh$$

$$E = (1/8)\rho g H^2$$

ρ , g はそれぞれ水の密度および重力加速度である。開口部内外にエネルギー保存則を適用し、開口部で消失する波のエネルギーを P とすると、

$$P = B W_I - B W_R - b W_T \quad \dots\dots\dots (22)$$

となり、式(21)から

$$P = (1/8) n c \rho g H_I^2 B \{1 - r_R^2 - (b/B) r_T^2\} \quad \dots\dots\dots (23)$$

を得る。ここで、エネルギー逸散率を ε と表わすと、

$$\varepsilon = 1 - r_R^2 - \lambda r_T^2 \quad \dots\dots\dots (24)$$

が求められる。また式(16)から

$$\varepsilon = \lambda r_T \{2 - (1+\lambda) r_T\} \quad \dots\dots\dots (25)$$

となり、エネルギー逸散率を透過率と λ で表わすことができる。

3. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

本実験は京都大学工学部土木工学教室の地下実験室に設置された、長さ約 30m、幅 50cm、高さ 70cm の

表—1 模型諸元

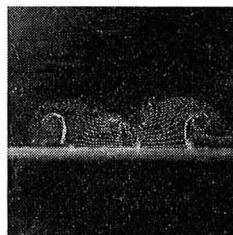
B (cm)	b (cm)	$\lambda = (b/B)$	D (cm)	D/B
50	50	1.0	10	0.2
50	50	1.0	5	0.1
50	10	0.2	10	0.2
50	10	0.2	5	0.1

両面ガラス張り造波水槽で行なった。造波機は水槽の一端に設置された合成波発生機による単一波を使用し、他端に消波工を設けて波の反射を防いだ。開口部模型は造波板から 17.5m の位置に置き、表—1 に示す 4 種類の模型について、波の周期が 1.8, 2.0, 2.55 および 2.83 sec の 4 種類、また各周期について波高を 3 種類変えた。水深はつねに 10cm とした。

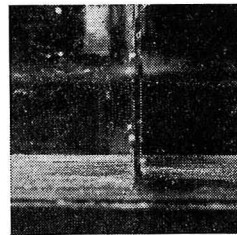
(2) 実験方法

波高は電気抵抗線式波高計を用いて測定し、入射波高および反射波高は Healy の方法により求めた。特に入射波高については、開口部から沖側 5.5m の位置においても波高を測定し、Healy の方法で求めた入射波高と比較して、それから得られる値の誤差を最小限にするように努めた。Healy の方法で求めた反射率は、有限振幅波の場合には過小に見積ることがあり、その補正方法について合田ら³⁾が示しているが、ここでも合田らの方法にしたがって反射率を補正した。一方、透過波高は開口部から岸側 2.0m の位置で測定した。

防波堤開口部の流速の測定方法は、次の要領で行なった。静水面下 1.0cm の位置に 0.1mm の白金線を張って陰極とし、陽極には銅板を用いて、パルス発生器から一定時間間隔 (20ms)、一定幅 (14ms) のパルスを与えると、水は電気分解されて水素気泡が発生する。この方法により、波の峯が開口部を通過する直前にパルスが発生させ、岸側にできた気泡列を撮影する。このとき、波の峯の流速はその前後の位相での流速に比し大きく、したがって気泡列間隔が大きくなり、波の峯の流速を求めることができる。写真—1 は開口部静水面下 1.0cm の位置で発生させた水素気泡列を撮影した一例を示したものである。上述の方法で撮影したフィルムをリーダー・プリンターで拡大し、開口部中心線上の最大値を読みとり、パルス発生周期で割って、流速を求め、それを開口部の平均流速とした。なお、開口部中心線上に白金線を張り、水平方向水粒子速度の鉛直分布を調べたものが写真—2 である。水粒子は水面から水底までほぼ一様な運動をしており、静水面下 1.0cm の値を開口部の流速と考えてさしつかえないことがわかる。



写真—1 水素気泡列
(水平分布)

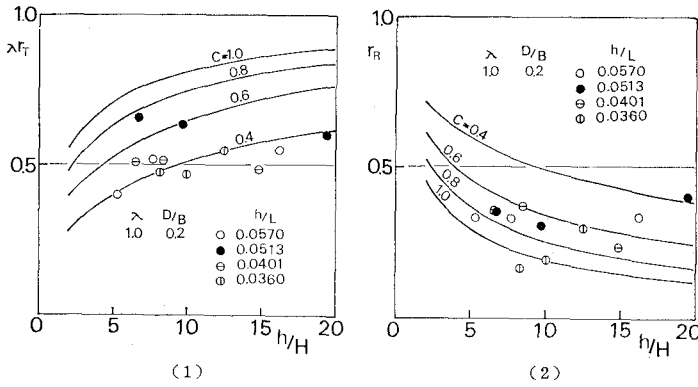
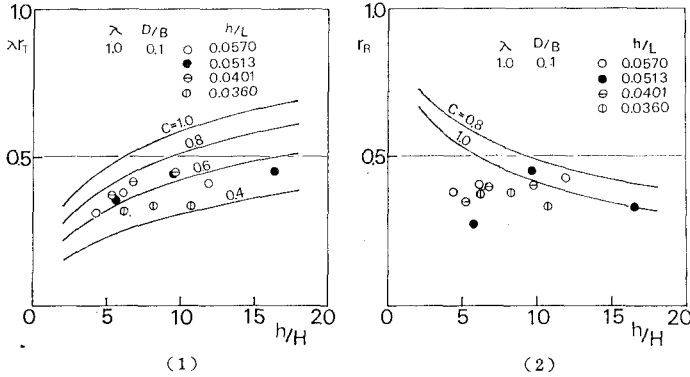
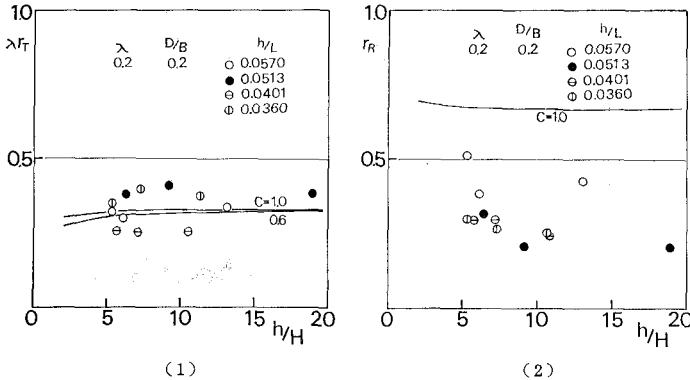
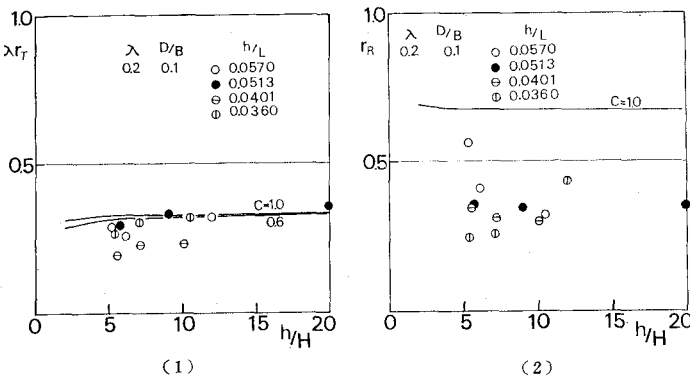


写真—2 水素気泡列
(鉛直分布)

4. 実験結果および考察

(1) 反射率・透過率

図—2～図—5 は波高変化による透過率および反射率の変化を示したものであり、図中には式(17)も併記している。透過率に関する厳密解式(13)と近似解式(17)の差異は h/L が 0.036～0.057 の範囲では 2% 以下になり、 h/L によって区別する必要がなく、したがって各図には 4 種類の周期について、それぞれ波高を 3 種類変化させ

図-2 波高変化と透過率および反射率の関係 ($\lambda=1.5$, $D/B=0.2$)図-3 波高変化と透過率および反射率の関係 ($\lambda=1.0$, $D/B=0.1$)図-4 波高変化と透過率および反射率の関係 ($\lambda=0.2$, $D/B=0.2$)図-5 波高変化と透過率および反射率の関係 ($\lambda=0.2$, $D/B=0.1$)

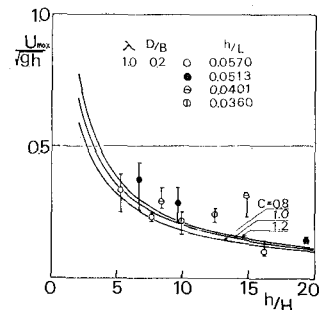
た値を同時にプロットした。

図-2 および図-3 は b/B (以下 λ で表わす) が 1.0, D/B がそれぞれ 0.2 および 0.1 の場合である。理論では h/H が大きくなるにつれて、透過率は大きく、逆に反射率は小さくなるが、実験値にはかなりのばらつきがあり、そのような傾向は顕著ではなく、透過率は D/B が 0.2 で 50%, 0.1 で 40% 程度、反射率はそれぞれ、30% および 40% 程度である。一方、流速係数 C は透過率に関して D/B が 0.2, 0.1 のとき、それぞれ 0.4 および 0.6, 反射率の場合にはそれぞれ 0.7 および 1.0 以上となり、各実験の透過率、反射率に関する C が一定でない。同実験では、当然、流速係数が同じでなければならぬにもかかわらず、大きく異なっているが、この原因については後述する。

図-4 および図-5 は、 λ が 0.2, D/B がそれぞれ 0.2 および 0.1 の場合である。理論では h/H の変化に対して、透過率および反射率の変化は小さい。また λ が 1.0 に比し 0.2 の場合には C の変化によって透過率および反射率の変化は小さくなる。実験値の透過率は D/B が 0.2 で 0.35, D/B が 0.1 で 0.3 程度、反射率はそれぞれ 0.3 および 0.35 程度である。理論値と実験値を比較すると、 D/B が 0.2, 0.1 の場合とも、透過率は C にあまり関係なく両者はほぼよく似た値をとるが、反射率については全く両者は相違している。

(2) 防波堤開口部の流速

図-6 は λ が 1.0, D/B が 0.2 の場合についての開口部の流速を求めたもの

図-6 開口部流速
($\lambda=1.0$, $D/B=0.2$)

で、縦軸には開口部の最大流速を長波の波速で割った無次元量、横軸には h/H をとっている。なお図中には式(19)も併記した。理論値と実験値を比較すると、その傾向はほぼ一致しているが、 C の変化による流速の変化が顕著でないため、この図だけから流速

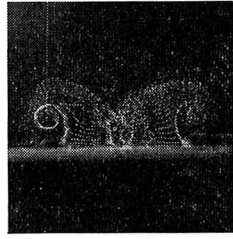


写真-3 開口部中心付近の乱れ

係数を決定することができない。開口部の流速測定法は、3. (2) で述べたが、波の峯がちょうど開口部に達した瞬間に撮影したにもかかわらず、波形勾配が小さいために、同一周期、同一波高の実験の測定値にもかなりのばらつきが生じた。また開口部には渦が発生し、開口部中心付近は乱れ(写真-3参照)、解析に誤差を含み精度は決して良いとはいえない。

5. エネルギー逸散率に関する考察

港湾内の波のエネルギーの逸散形態には 1) 内部粘性による逸散, 2) 港湾内での底面および護岸の消波工による逸散, 3) 防波堤開口部に発生する渦, 乱れなどによる逸散, 4) その他港湾内の水底への浸透による逸散, などが考えられる。ここであらかじめ 1) および 2) によるエネルギー逸散量を若干考察しておく。

微小振幅波による波高減衰は次式で示される⁴⁾。

$$\left. \begin{aligned} H/H_I &= \exp(-\alpha_i \cdot x/L) \\ \alpha_i &= [4\pi^2/(\beta L)(\sinh 2kh + 2kh)] \\ &\quad \times [(2k/\beta) \sinh 2kh] \\ \beta &= \sqrt{\pi/(\nu T)} \end{aligned} \right\} \dots\dots (26)$$

ここに、 x : 波の進行方向の距離, H_I : $x=0$ での波高, μ : 動粘性係数, である。いま $x=5.5\text{m}$ をとり, $T=1.8 \sim 2.83\text{sec}$, $h=10\text{cm}$ として計算した結果、内部粘性による波のエネルギー損失はたかだか、入射波のエネルギーに対して 0.02% で無視しうることがわかった。

底面および水槽壁面の摩擦による波高減衰式⁴⁾は

$$\left. \begin{aligned} H/H_I &= \exp(-\alpha_{(b+w)} \cdot x/L) \\ \alpha_{(b+w)} &= (1+\phi) \alpha_b, \\ \phi &= \sinh 2kh/(kB) \\ \alpha_b &= 4\pi^2/[\beta L(\sinh 2kh + 2kh)] \end{aligned} \right\} \dots\dots (27)$$

で表わされる。上述の例を用いて波のエネルギー損失を求めると、入射波のエネルギーに対して 5% 以下になる。

次に、防波堤開口部に発生する渦, 乱れその他による波のエネルギー損失について考察する。

図-7(1) および 図-7(2) はそれぞれ $\lambda=1.0$ および 0.2 の場合, D/B を 0.1 および 0.2 に変化させたときの透過率に対するエネルギー逸散率 (以下単に逸散率と呼ぶ) を示したもので、図中には式(24)も併記した。両

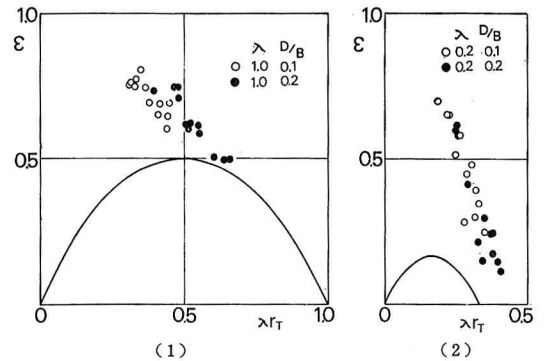


図-7 透過率とエネルギー逸散率の関係

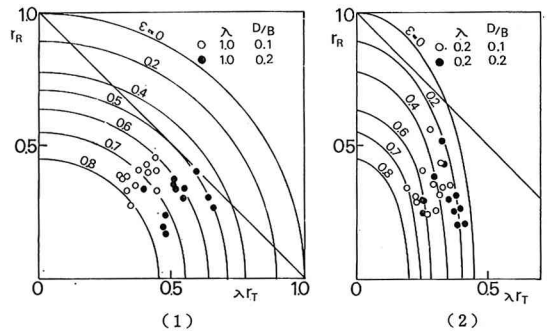


図-8 反射率, 透過率およびエネルギー逸散率の関係

図とも、実験値は理論値よりもはるかに大きい。理論では、 λ が 1.0 の場合、透過率が 50% のとき最大値をとり、逸散率 ϵ は 50% になるが、実験では最大 80% のエネルギーが逸散されている。 λ が 0.2 の場合、透過率が理論では 16.7% で ϵ は最大値 16.7% となるが、実験では 70% にもなっている。このように理論値と実験値は定性的な傾向が類似していながら、値は大きく異なっている。

図-8(1) および 図-8(2) はそれぞれ λ が 1.0 および 0.2 の場合について、透過率と反射率の関係を示したもので、図中の曲線群はエネルギー保存則から式(24)で与えられる逸散率である。一方図中の直線は式(16)を示している。

λ が 1.0 の場合、エネルギー損失がなければ、透過率、反射率および逸散率の関係は半径 1.0 の 1/4 円を描く。しかし、実験から得られた値は D/B が 0.1 では ϵ が 0.6~0.8, D/B が 0.2 の場合には、 ϵ は 0.5~0.75 にわたって点在しており、開口部で失われる波のエネルギーがいかに大きいかが理解される。一方、反射率と透過率との関係は式(16)で示されるが、実験値はこの式を満足していないようである。

λ が 0.2 の場合には、透過率、反射率および逸散率の関係は、 ϵ が 0 のとき長径 1.0, 短径 $1/\sqrt{5}$ の楕円を描くが、実験によれば、 D/B が 0.1 では ϵ は 0.2~0.7,

D/B が 0.2 では 0.1~0.6 になる。前述と同様式(16)はこの場合にも十分満足していない。したがって、式(19)を使って求めた式(13)(または式(17))および式(19)にもまだ問題が残され、4.(1)および4.(2)で述べた透過率と反射率および開口部の流速は定性的な傾向が理論と実験とで類似しているが、流速係数が異なる結果をまねいたものと思われる。

D/B が同じで λ が異なる場合に、開口部で失われる波のエネルギーの差異を調べてみる。図-9(1) および 図-9(2) はそれぞれ D/B が 0.1 および 0.2 の場合について、 λ を 1.0 および 0.2 に変化させたときの h/H と ε との関係を示したものである。両図とも λ が大きい方が、 ε は大きくなるのがわかる。すなわち、開口幅が等しい場合には、港湾幅が大きくなるほど、逸散率は大きい。

図-10(1) および 図-10(2) は、 λ が一定で D/B を変化させた場合の h/H による ε の変化を調べたもので、開口幅が小さくなるにつれて、逸散率は大きくなり、港湾幅が大きいほどその程度も大きくなるのがわかる。

6. 結 言

防波堤開口部で失われる波のエネルギー損失について実験を行なった結果、次のようなことがわかった。

内部粘性、底面摩擦による波のエネルギー損失が入射波のエネルギーの5%に満たないのに対し、防波堤開口部の渦、乱れなどによる波のエネルギー損失は最大80%にもなる。防波堤の開口幅が一定の場合には、港湾幅が大きくなるほどエネルギー逸散率は大きくなる。一方、港湾幅が一定の場合には、開口幅が小さくなるにつれてエネルギー逸散率は大きくなり、しかも港湾幅が大きいほどその程度も大きい。

なお若干の理論的考察を行なったが、理論と実験の結果にかなりの差異がみられ、定性的な傾向を見出すにとどまった。今後は、理論的な研究を進めると同時に、湾奥から反射波がある場合の開口部で失われる波のエネル

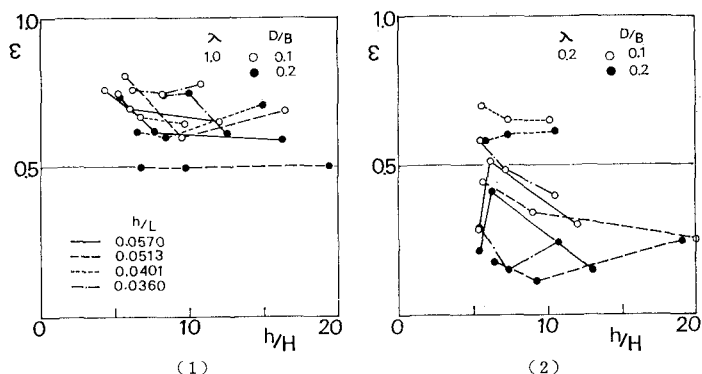


図-9 D/B の相違によるエネルギー逸散率の比較
(港湾幅が一定の場合)

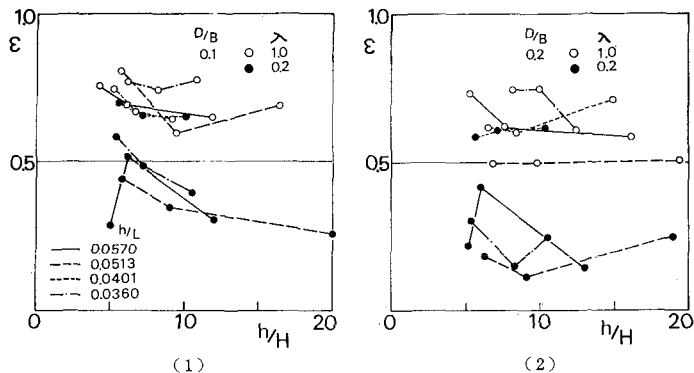


図-10 λ の相違によるエネルギー逸散率の比較
(開口幅が一定の場合)

ギー損失について研究を進めるつもりである。

最後に本研究は文部省科学研究費による研究の一部であることを付記するとともに、実験に協力していただいた当時学生の鶴飼増由君に深謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一・村上仁士：合成波による長方形港湾泊地の振動特性について、第18回海岸工学講演会論文集，pp. 235-239，1971。
- 2) 林 泰造・服部昌太郎：透過性鋼管防波堤とその基部洗掘，第15回海岸工学講演会講演集，pp. 292-296，1968。
- 3) 合田良実・阿部淑輝：有限振幅波の部分反射に伴う見かけの反射率について，港湾技術研究所報告，第7巻第3号，pp. 1-53，1968。
- 4) 岩垣雄一：波の変形論，土木学会水工学夏期研修会講義集，pp. 09-1~09-24，1967。