

波による鉛直板よりの渦の形成とエネルギー逸散

日 野 幹 雄*・山 崎 丈 夫**

1. 緒 言

海岸保全、港湾施設として波高や波圧を減少させる目的で消波工がよく使用される。今までの消波構造物の効果に対する研究は、実験室および試験工事などによって実験的な研究を行ない、資料を集積したものが数多く発表されているが、消波の複雑さのため種々の消波ブロックの形や積み方に対する効率の case study にならざるを得ない。したがって消波の機構などに関する考察が、海岸工学の今後に残されている大きな問題の一つであると思う。

消波の形式は大きく次の2つに分けられると思う。

(1) 消波工表面の摩擦抵抗により波のエネルギーを逸散させるもの。(2) 消波工内部の空隙を波が通過する際生じる渦や乱れ、または水流の相互干渉によってエネルギーを消費するもの。しかし実際の構造物において、消波作用は非常に多くの条件に支配されるため、(1)と(2)の割合、水理条件との関係等は、定量的にはもちろん定性的にも明らかにされていないことが多い。

著者らは単純な構造である鉛直板が水中にあるとき、波の反射率と透過率をポテンシャル理論で求めたが¹⁾、実験値はエネルギー逸散のため理論値と多少ずれている。本論文では、消波作用に大きな役割を果たしている渦の形態を明らかにする目的で、鉛直板の先端ではく離により発生する渦の動きと大きさを実験的に求め、理論的考察を試みた。

2. 実 験

(1) 実験装置

実験には、東京工業大学土木工学教室の造波水路を用いた。水路の長さは20 m、幅は40 cmで両端に消波装置を設けている。構造物としては、一定水路の底に、波の進行方向に直角に立てた高さ20 cm、幅40 cm、厚さ6 mmの鋼鉄製の板を用いた。入射波、反射波、透過波は抵抗線式波高計を用い、Healyの方法で解析した。板の上端ではく離により発生する渦を測定するために、板の中心部から上方に0.02 mmのタングステン線を4本張り、これと銅板陽極の間に直流高電圧をかけ、水の電気分解

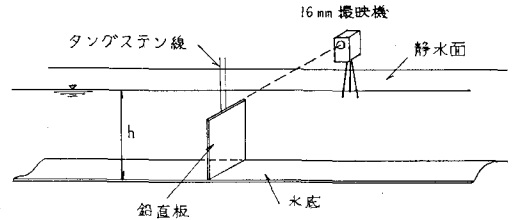


図-1

により水素気泡を連続的に発生させ、16 mm 撮影機を用いて観測した(図-1 参照)。撮影機の位置は板の上端の高さで、真横から毎秒12コマで撮影した。解析には film analyzer を用いた。

実験は周期 $T=2.05\sim 1.18$ 秒、水深 $h=30$ cm、入射波高 $H_I=0.65\sim 2.3$ cm、波形勾配は $1.9\times 10^{-3}\sim 1.3\times 10^{-2}$ の範囲で行なった。

(2) 渦の動き

進行波が鉛直板を通過する時、板の上端において流れは急転状態になるため、はく離が生じ渦が形成される。しかし流れは周期運動であり非定常なので、定常流中で発生するカルマン渦とは状態が多少異なる。渦の核の時

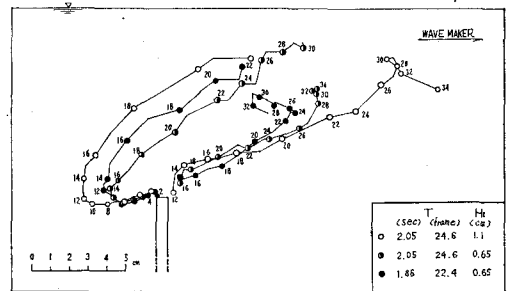


図-2 (1)

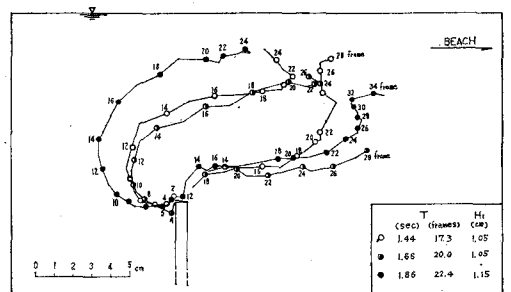


図-2 (2)

* 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科

**正会員 工修 兵庫県土木部

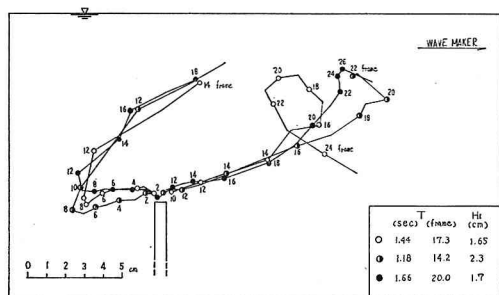


図-2 (3)

間の変化の一例を図-2 (1)~(3) に示す。また形や大きさの変化から、渦は発生から消滅まで (i) 発生期, (ii) 形成期, (iii) 渦対期, (iv) 消滅期の4段階に大別できる。板の上端で流速の水平方向の成分 u が発生するとともに離が生じ (写真-1), 約半周期の間に渦が大きく形成される (写真-2~4, 発生期)。その際渦は板から遠くまで離れてしまうことはなく, 最も遠くまで離れた時の板と渦の核との距離を A とすると, 図-3 に示すようにほぼ $A \propto H_I L / 2\pi$ (L は波長) の関係がある。

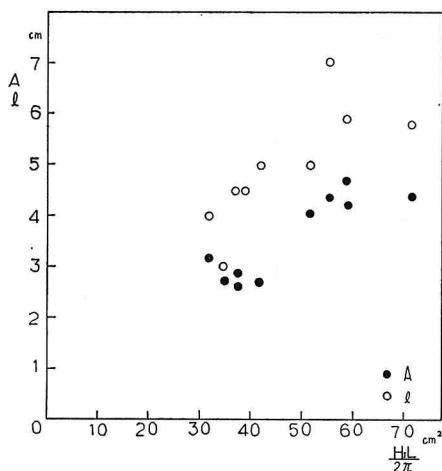


図-3

ここで $H_I L / 2\pi$ は, H_I の波高をもつ微小振幅波の水粒子の移動速度の水平成分

$$u = \frac{\pi H_I}{T} \cdot \frac{\cosh 2\pi(y+h)/L}{\sinh 2\pi h/L} \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t$$

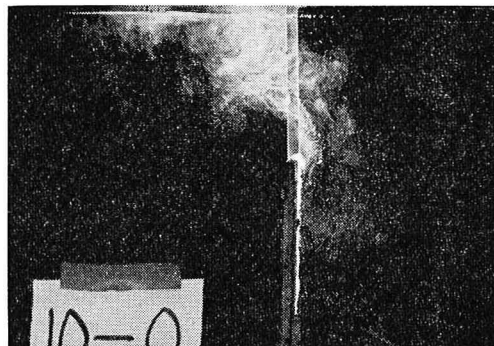
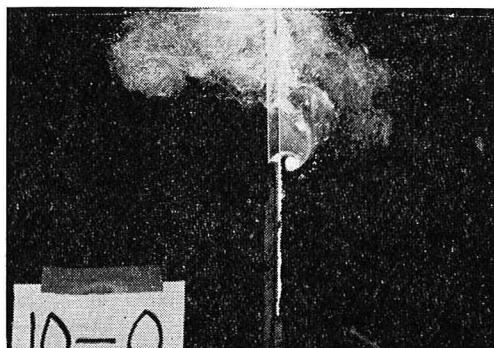
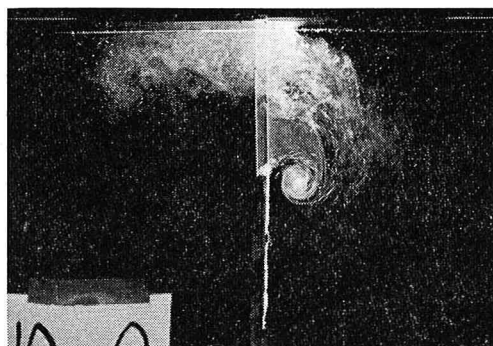
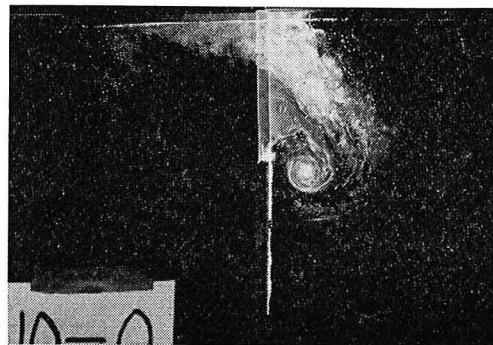
y : 静水面を原点にして鉛直上向きにとった距離

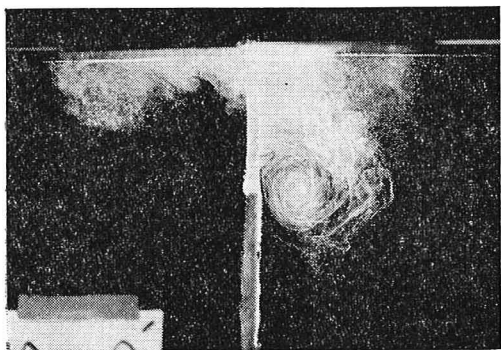
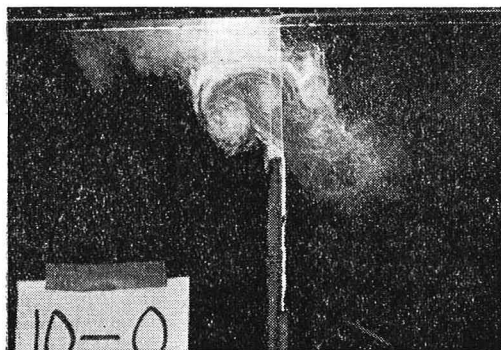
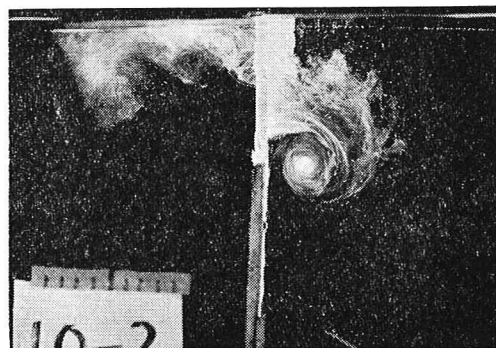
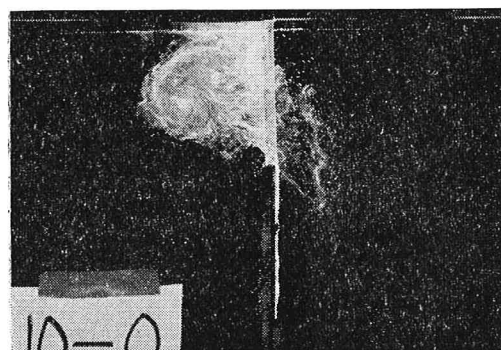
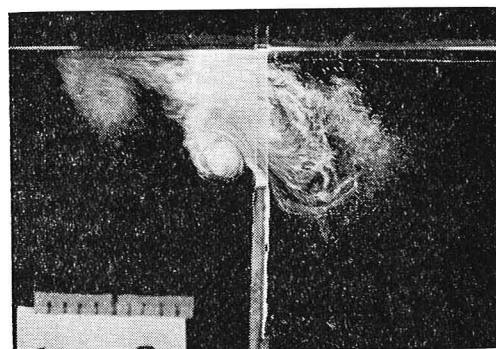
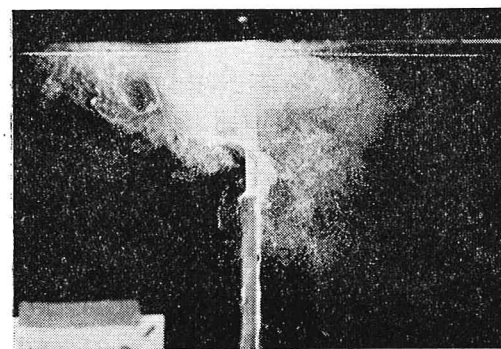
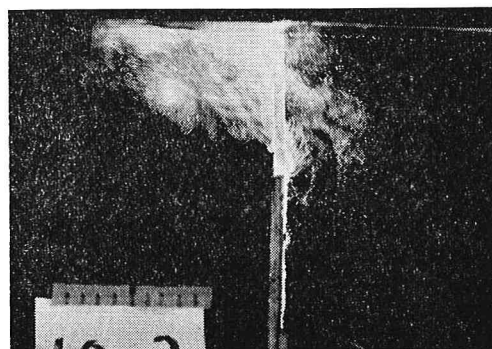
t : 時間

を t につき 0 から $T/2$ まで, y につき $-h$ から 0 まで積分した値で, 板がない場合半周期の間に 1 つの鉛直面を横切る単位幅当りの水の体積である。

渦が発生し始めてから半周後, 再び u がほぼ 0 となった時, 渦は円形の状態になっており, 板の近くに徐々に寄ってくる (写真-5, 形成期)。

さらに時間がたつて u の向きが変わり, その絶対値が大きくなるとともに, さっきとは逆の方向に新たなには

写真-1 case 1 $t=0.75$ sec写真-2 case 1 $t=0.5$ sec写真-3 case 1 $t=0.87$ sec写真-4 case 1 $t=1.08$ sec

写真-5 case 1 $t=1.17$ sec写真-9 case 2 $t=0.5$ sec写真-6 case 1 $t=15.8$ sec写真-10 case 2 $t=0.75$ sec写真-7 case 1 $t=1.92$ sec写真-11 case 2 $t=1.25$ sec写真-8 case 1 $t=2.08$ sec写真-12 case 2 $t=1.67$ sec

く離渦が形成される。しかし前にできた渦が消滅せずまだ残っているために、新旧2つの渦はほぼ対称の渦対となって、斜め上方に速い速度で移動する(写真-6, 7, 渦対期)。そして渦対は水面近くで形を崩し、数波長以内の所で消滅してしまう(写真-8, 消滅期)。写真の水面近くが白くなっているのは、発生した水素気泡が流れて行かず貯まっているためである。

このような渦の移動のパターンは、板が深い所であり、 T と H_I が小さい場合を除いては、他の条件を変えてもほとんど同じである(写真-9~12)。

写真の case 1 は $T=2.05$ 秒, $H_I=0.65$ cm, case 2 は $T=1.66$ 秒, $H_I=1.05$ cm で、どちらも水深 30 cm, 板の高さは 20 cm である。

水深が大きく、周期と入射波高が小さい時は、渦対が消滅する前に次の渦が発生するので、板より上方に渦列ができたような形になる。

渦対のできる方向は、板の上端が水面近くにある時は全て沖側であったが、板の高さが水深の 2/3 以下の場合には沖側と岸側とで半々ぐらいにできた。

3. 考 察

沖より入射波によって運ばれてきた波のエネルギーは、鉛直板の所で一部が反射し、一部は渦や乱流の発生により逸散され、残りは透過波となる。そのうち渦の形成に使われるエネルギーの一部は粘性せん断により熱に、他の一部は写真で見られるように、渦が分解することによりその運動エネルギーが乱流や流れに変わるであろう。今回の実験ではエネルギー逸散量の大部分が渦の運動エネルギーに変換されるものと考え、その大きさを次のような方法で見積ってみた。

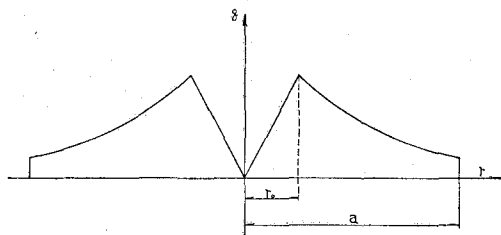


図-4 渦の速度分布

渦は非定常流によって生じるため、発生期における速度分布は明らかではないが、形成期および渦対期においては図-4 に示すようにランキン渦の状態であると考えてもそれほど無理ではない。すなわち、半径 r での円周方向の速度 q , および渦の強さ Γ (循環) は次のようになる。

$$0 \leq r \leq r_0 \quad q = \frac{\omega}{2} r \quad (1)$$

$$\Gamma = \omega \pi r_0^2 \quad (2)$$

$$r_0 \leq r$$

$$q = \frac{\omega}{2} \cdot \frac{r_0^2}{r} \quad (3)$$

$$\Gamma = \omega \pi r_0^2 \quad (4)$$

ここで、 ω は渦度、 r_0 は渦ありの領域と渦なしの領域の境界の半径。

いま渦の半径は有限で $r=a(>r_0)$ までしかなく、 $r>a$ では $q=0$ とすると、渦の単位幅あたりの運動エネルギー E は式 (1), (3) より次のようになる。

$$E = \frac{\rho}{2} \int_0^a 2 \pi r q^2 dr \\ = \frac{1}{16} \pi \rho \omega^2 r_0^4 \left(1 + 4 \ln \frac{a}{r_0} \right) \quad (5)$$

ここで、 ρ : 水の密度

このようなエネルギーを持った2つの渦が、図-5 に示すように l だけ離れて存在し、それぞれの渦の強さ Γ の大きさが同じで向きが逆だと、この渦対は2つの渦を結ぶ線に垂直の方向に一定速度

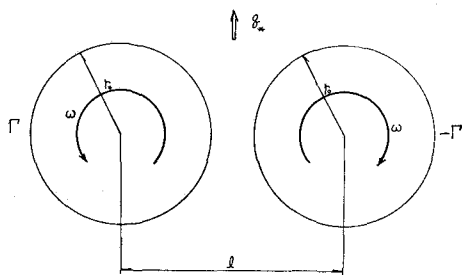


図-5

$$q_* = \frac{\Gamma}{2 \pi l} \quad (6)$$

で移動する。

水面が存在する場合は、水面を鏡とした鏡像を考えなくてはならない。たとえば2つの渦が水面に対して垂直に並んだ場合、渦対の中心から水面までの距離を b とすると、水面に近い渦の速度は

$$\frac{\Gamma}{4 \pi} \cdot \frac{4 b^2 - 2 b l - l^2}{b l (2 b - l)}$$

水面から遠い方の渦の速度は

$$\frac{\Gamma}{4 \pi} \cdot \frac{4 b^2 + 2 b l - l^2}{b l (2 b + l)}$$

となり²⁾、水面から遠い渦の方が速く進む。そして b と l は一定でなく、2つの渦を結ぶ線と水面の交角も変わるため、2つの渦はそれぞれ複雑な動き方をする。図-2 からわかるように、渦対は一定速度で平行に移動している場合が多いので、簡単のため渦対は式 (6) の q_* で動く仮定する。そして $l > r_0$ とすると式 (4), (5), (6) より渦対の運動エネルギー e は次のように求まる。

$$e = 2 E = \frac{\pi}{2} \rho q_*^2 l^2 \left(1 + 4 \ln \frac{a}{r_0} \right) \quad (7)$$

あるいは、

$$e = \frac{1}{8 \pi} \Gamma^2 \left(1 + 4 \ln \frac{a}{r_0} \right) \quad (8)$$

実験においては渦の速度分布は明らかでないので a と r_0 の大きさは明らかではない。しかし水面と水底が存在するため a は大きくても渦から水面までの距離を越すことはないであろう。そこで、 a を渦から水面までの距離と仮定する。また $r_0 = l/2$ と仮定する。渦対は流れの中に存在するので、 q_* は実験より解析された速度から流れの影響を引いて補正しなくてはならない。 l は実験解析より直接求まる。以上により式 (7) が計算できる。

一方、鉛直板によるエネルギー逸散は次のようになる。

微小振幅波理論では、波高 H 、群速度 C_G の波の進行方向に伝えられるエネルギーは、単位幅・単位時間あたり $1/8 \cdot \rho g H^2 C_G$ (g : 重力加速度) であるから、単位幅あたり、1 周期に逸散するエネルギーを P とすると、 P は次のようになる。

$$P = \left\{ 1 - \left(\frac{H_R}{H_I} \right)^2 - \left(\frac{H_T}{H_I} \right)^2 \right\} \cdot \frac{1}{2} \rho g H_I^2 C_G T \quad (9)$$

ここで、 H_R は反射波高、 H_T は透過波高で、 P は入射波のエネルギーから反射波と透過波のエネルギーを引

いたものである。 H_I, H_R, H_T は Healy の方法で求め、 C_G は水深と周期が与えられると求まる。

以上のようにして求めた P と式 (7) の e を比べてみると図-6 のようになった。当然のことではあるが、仮定が大きな割には P と e がほぼ等しく、エネルギー逸散量の大部分は渦の運動エネルギーに変換されているといえる。

一方、Roshko model では式 (6), (8) の Γ は

$$\Gamma = \epsilon \frac{u_s}{2f} \quad (10)$$

(ここで、 f は渦形成の周波数、 u_s は理論的に求まる板端のはく離速度、 $\epsilon \approx 0.5$ 実験係数) と表わすことができる。したがって、波のエネルギー逸散量 e は

$$e = \frac{1}{32\pi} (\epsilon T u_s)^2 \left(1 + 4 \ln \frac{a}{r_0} \right) \quad (11)$$

と表わすことができ、1つの実験係数 a/r_0 だけで計算できることになる。

またこのような場合は、抵抗係数を2とした時の板に働く力と板上端での流速との積を時間で積分した値に等しいことがわかっている¹⁾。よって渦によって逸散するエネルギーは、この2つの方法のいずれかにより計算することができる。

4. 結 論

鉛直板の上端で発生する渦を実験的に解析することにより次の結論が得られた。

(1) 1 周期の間に渦は沖側と岸側に2つでき、それらは渦対をなす。渦対は水面近くに移動し、板から数波長以内の所で分解・消滅する。

(2) 渦対の運動エネルギーの計算値は、反射率と透過率より求めたエネルギー逸散量によく一致した。

(3) 消波作用に渦が大きな役割をする構造物では、その抵抗係数を求めることにより、エネルギー逸散量を見積ることが可能である。

参 考 文 献

- 1) 日野幹雄・山崎丈夫：垂直板による波の反射率・透過率およびエネルギー損失，土木学会論文報告集，第190号 1971年6月。
- 2) L.M. Milne-Thomson: Theoretical Hydrodynamics, MacMillan, London, 1938.

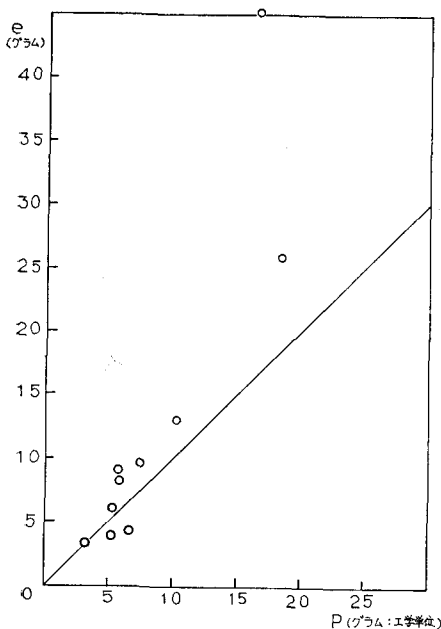


図-6 単位幅当りの入射波のエネルギーの逸散量：実験値 P (式(9))と渦対モデルによる計算値 e (式(7)あるいは(8))との比較