

Transient な波による反射の実験

椎 貝 博 美*・久 保 明 英**・山 口 清 一***

1. 序 論

本研究は、Transient な波を用い、このような波の反射特性を調べることを目的とするものである。ここで Transient な波とは、造波板を2, 3度運動させ、その後すぐ止めた場合に生ずる波のことであり、このような波を用いることの利点は、1) 実際の海岸の波は Transient な波の組合せによると思われる場合のあること、2) Transient な波はエネルギーフラックスの全量がわかるので、エネルギー反射率の算定が便利であること、3) 入射波と反射波の分離が容易なこと、4) 実験水路において造波板による波の再反射の影響が防げること、等があげられる。他方、このような波は数理的に扱いづらいことが一番の問題点である。さて、実験は次の2つの条件について反射率（透過率）の測定を行った。

1) 水路端に勾配を任意に変化できる反射板を置き、これに Transient な波をあて、そのエネルギー反射率を調べる。

2) 水深がなめらかに変化する水路を Transient な波が進行して行く場合のエネルギー透過率を調べる。

これに対し、結果を比較するものとしては、実験1に対しては、室田・山田の研究¹⁾、首藤の理論²⁾等があり、実験2に対しては、Lamb³⁾、Ippen⁴⁾、Miles⁵⁾、Fuchs⁶⁾らの理論がある。

さて、本実験では、“波の反射率”（または透過率）をエネルギーフラックスの反射率によって求めてみたわけであるが、これは次のような理由による。従来の反射率の算定は一般に、入射波、反射波の波高を調べ、その比、つまり波高の反射率によって定義している。このように定義した場合、反射波（透過波）が構造物によって碎波したり、水深の変化によって変形したりする場合には、これより直接エネルギー損失等を見積ることは困難になる。更に波高の反射率では反射率が1を越えることもあり、理論上は構わなくとも誤解を避けるために、合田の見かけの反射率の補正図表等の修正意見⁷⁾もある。しかし、

直接このような波によって、エネルギーフラックスで定義すれば、このような不便は一応解消されるものと思われる。

Transient な波のエネルギーフラックスは次のようにして求められる。つまり本実験においては波高計によって1点における波高 η が時間 t の関数として記録される。波高記録において、実質的に波高が生じていない時間 T_1 より波高が消えるまでの時間 T_2 まで、 η^2 を積分すると、

$$f = \int_{T_2}^{T_1} \eta^2 dt = \int_{T_2}^{T_1} \eta^2 (dt/dx) dx = \int_{X_2}^{X_1} \eta^2 / c dx$$

c : 波速 $\approx$ 群速度（長波の場合）

であるから、 $f c^2$ は波高で表わした単位幅、単位重量当りのエネルギーフラックスになる。また従来の反射率と対応させるため、

$$F = c^2 f / (X_1 - X_2)$$

($X_1 - X_2$ は水面変動が観測される区域の長さ)

で定義された F を用いると、 $\bar{H} = \sqrt{F}$ は一種の“平均波高”を表わすと考えられ、従来の波高による反射率の測定値と一応は比較できることになる。

また、実験2のなめらかに水深の変化する場合の透過率を本論文では、Boundary-Perturbation 法⁸⁾を用いて求めた。本実験では、水深の変化を

$$y = -h + \varepsilon h \tanh(mx/L) \quad \varepsilon \ll 1$$

h : 水深 L : 波長

で与えているので、波の速度ポテンシャルの底面での境界条件は近似的に次のようになる。

$$\left(\frac{\partial F}{\partial y} \right)_{y=-h+\varepsilon h \tanh(mx/L)} = 0$$

ここで、 F は求める速度ポテンシャルであり、上式を満足するような F は下式で与えられる。

$$F(x, y, t) = \phi(x, y - \varepsilon h \tanh(mx/L), t)$$

ただし、 $\phi(x, y, t)$ は一様水深中での波の速度ポテンシャルである。

2. 実験装置及び実験方法

(1) 実験装置

実験装置は図-1に示すようなものであり、 X と Y と

* 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 PSコンクリート

*** 学生会員 東京工業大学大学院

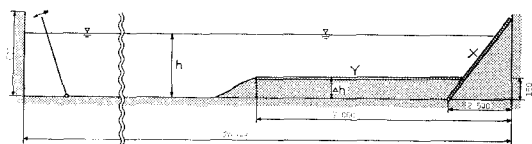


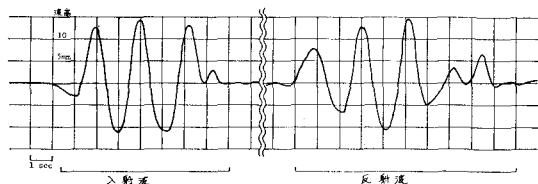
図-1 実験装置配置図 (単位 mm)

の2つの部分に分かれる。図中 X は実験 1 に対応するものであって、水路底でヒンジで固定された角度が自由に変えられる反射板である。この反射板はベニア板のペンキ仕上げであるため、滑面不浸透の斜面と見なされ得る。それに対し Y は実験 2 に対応し、底面の岸側を 15 cm 底上げし、その最前部は双曲線関数のなめらかに変化する斜面をとりつけてある。この斜面は 3 種類あり、それぞれ便宜上、次のように名づける。斜面が、 $\tanh(1/3 \cdot x)$ で表わされたもの……A型、 $\tanh(1/9 \cdot x)$ で表わされたもの……C型、直角断面をもつもの……L型。

なお、実験 1 を行う場合は、Y の部分は取り除かれる。また、造波板はフラップタイプのものであり、周期および波高が連続的に変化できるようになっている。波形、波速等の測定のための波高計には、容量式波高計を用いた。

(2) 実験方法

実験は、造波板を、2, 3 度動かし、Transient な波を作って行った。速度と群速度の比、 n は 0.85~0.99 の範囲で変化しているので波はほぼ長波に近いものである。波形の例を実験 1 における斜面角度 60° の場合のものを図-2 に示す。実験 1 に対しては斜面を、 $20^\circ \sim 60^\circ$ の間で変化させ、それぞれの角度に対し、相対水深 h/L を変化させて行った。また、室田・山田の研究で報告された、斜面の角度 30° 付近で、反射率が大きくなることを確かめるため、この付近の角度に対しては、細かく測定を行った。実験 2 に対しては前章で説明した 3 種類に対し、沖側水深とステップの高さの比 $\Delta h/h$ を、0.6, 0.5, 0.375 の 3 種類に変化させ、またそれぞれの $\Delta h/h$ に対し、幾種類かの周期について実験を行った。

図-2 実験波波形 (実験 1, 斜面角度 60°)

3. 実験結果

図-3, 図-4, 図-5 は実験 1 に対応するものである。これらはそれぞれ、エネルギーを波高の次元に直した反射率と斜面傾斜角の関係を $h/L=0.10, 0.08, 0.07$ に

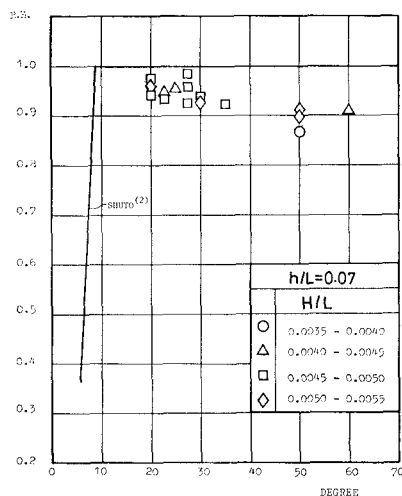


図-3 実験 1—斜面傾斜角と波高反射率の関係

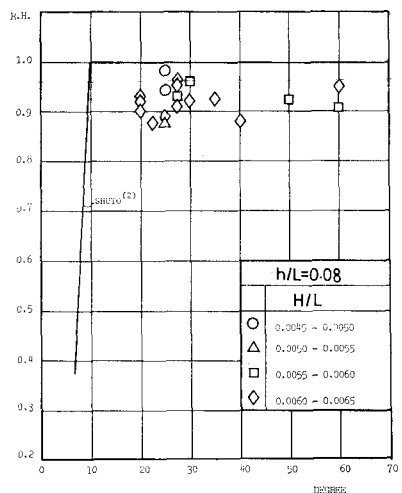


図-4 実験 1—斜面傾斜角と波高反射率の関係

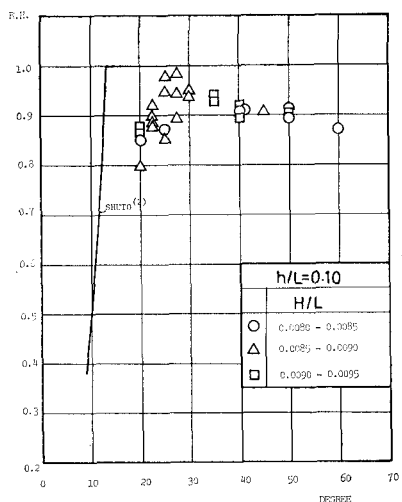
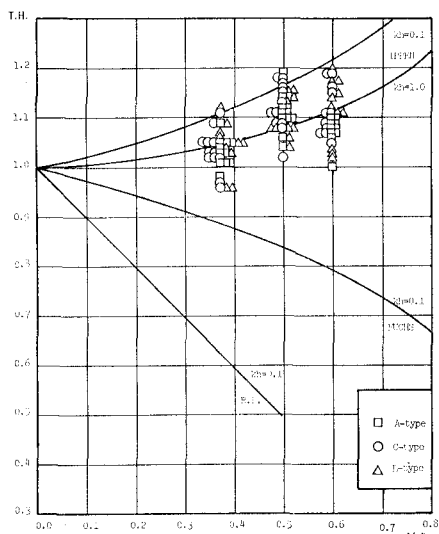
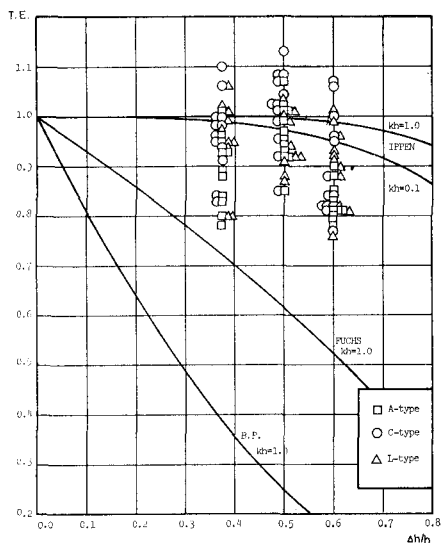


図-5 実験 1—斜面傾斜角と波高反射率の関係

図-6 実験2—波高透過率と $\Delta h/h$ の関係図-7 実験2—エネルギー透過率と $\Delta h/h$ の関係

ついて波形勾配をパラメーターとしてまとめたものである。なお、これらの実験において碎波を生じたものはなかった。

図-6、図-7 は実験2に対応するものであり、図-6 は“平均波高”の透過率と $\Delta h/h$ の関係を示し、図-7 はそれをエネルギーフラックスの透過率になおし、整理したものである。また図中の曲線はそれぞれ、Ippen, Fuchs, Boundary-Perturbation 法による理論解を示している。なお、Lamb の長波の解、Miles による解は、それぞれ Ippen の値とほぼ同じ値であったので図中には示していない。また図中の実験値は $\Delta h/h=0.6, 0.5, 0.375$ に対応しており、相対水深は $0.26 < kh (=2\pi h/L) < 0.94$ の範囲にある。なお $\Delta h/h=0.6$ の実験条件(沖側水深

25 cm, 岸側水深 10 cm) において透過波は2次波峰が現われ、かなり不規則なものとなった。

4. 結果の検討

(1) 実験1について

図-3~5 のように実験値は1を越えることはなく、室田・山田の研究と同様に $25^\circ \sim 30^\circ$ 付近で反射率が極大になるようである。しかしその後反射率は減少している。これに対し、室田・山田の研究では1を越える反射率が得られているが、これは波の非線型効果等の影響であると言われている。しかし本実験のような反射率の定義によれば、このような影響は除けるものと思われる。しかし、他方このような Transient な波による実験では、次のような困難が生じた。すなわち、Miche の理論、首藤の理論等により、斜面からの波の反射率には波形勾配、 H/L が大きく影響を及ぼす。ところが、Transient な波は波高が一定した波ではないため、この影響をはっきり検証し得ない。本実験では、一種の“平均波高”を用いて整理したのであるが、エネルギーフラックスを求める際にかかなり小さい波高のものまで含めて計算したため、自乗平均の効果があらわれて全体的にこれまでより小さく見積もられるのではないかと考えられる。事実、首藤の理論に対しても本実験の反射率はかなり小さい値を示している。ただし、このように波高の絶対値を見積もることは困難であるが、実験2のように波高の比だけを問題にする場合には、平均を求める積分区間を大体等しくなるようにとればこのような“平均波高”でも特に問題はないようである。

(2) 実験2について

図-6 に見られるように、Lamb に代表されるような Ippen, Miles の理論解が実験値と比較的良好一致し、Fuchs, Boundary-Perturbation 法の理論は実験値とは逆の傾向を示した。図-7 はエネルギーフラックスの反射率を示したものであるが、図-6 と比べると、水深の変化によるエネルギー損失(反射)の程度がはっきりしているのがよくわかる。ただし図-6 に比べて実験値はばらつきが大きくなっているが、これは次のような説明が考えられる。すなわち“エネルギー透過率”を求めるためには序論で示したように波速または群速度を知る必要がある。しかし Transient な波では、仮にいくつかの波に分解できるとしてそれぞれの波の波速はあまり一定ではなく、かつ何波もの波の波速を平均することもできないため測定誤差の影響がかなり大きく入りこむ可能性があるためだと思われる。

本実験の限りでは水深の変化のしかたが透過率に及ぼす影響は認められなかった。ただし、これは水深の変化する部分の長さが、一波長に比べて小さいような実験条件で行われたためであると思われる。また逆に、このよ

うな、波長に比べての水深の変化が比較的急激に起こる場合はすべて、直角断面の場合の Lamb や Miles らの理論で十分近似できると言えるようである。

以上のようにいろいろの問題点があるのにもかかわらず、Transient な波によってもこのような反射率の実験が比較的合理的に行える可能性がある。このような波をいくつかの波に分解することなく、一つの波として扱うことが可能であれば、この方法の実用性は非常に良いものとなる。

参 考 文 献

- 1) 室田 明・山田哲二: 反射に関する基礎的研究, 第13回海岸工学講演集, pp. 9-14, 1966.
- 2) Shuto, N: Standing waves in front of a sloping dike, Coast. Eng. in Japan, Vol. 15, pp. 13-23, 1972.
- 3) Lamb, H: Hydrodynamics (6th ed.), Cambridge Univ. Press, § 176, 1932.
- 4) Ippen, A.T.: Estuary and Coastline Hydrodynamics, McGraw-Hill, New-York, pp. 73-76, 1966.
- 5) Miles, J.W.: Surface wave scattering matrix for a shelf, Jour. Fluid Mech., Vol. 28, pp. 755-767, 1967.
- 6) Fuchs, R.A., J.W. Johnson, and J.R. Morison: The damping action of submerged breakwaters, Trans. A.G.U., Vol. 32, pp. 704-718, 1951.
- 7) Goda, Y., and Y. Abe: Apparent coefficient of partial reflection of finite amplitude waves, Report of P.H.R.I., Vol. 7, No. 3, pp. 3-53, 1968.
- 8) Shi-igai, H: Introduction of hydrodynamics boundary perturbation, 水理講演会論文集, 1975.