

粗な斜面からの反射に関する実験的研究

室 田 明*

1. ま え が き

沿岸における波浪の各種変形のうちでも重要な課題である反射現象について流体力学的な取り扱いが始まったのは意外に最近のことで1951年に M. Miche が反射波の最大波形勾配に着目した論文を発表したのに始まり、1953年 J.J. Healy が反射率の実用的な算出法を開発して以来、Greslou-Mahe (1955)、岩垣 (1964) らがその方法によって反射率に関する多くの実験成果を発表している。

このような研究のすべてが反射率を反射波高と入射波高の比で定義しているのであるが、反射波高そのものを直接計測するのではなく、部分重複波の節と腹における振幅を測定して反射率を求めるものである。

その際、正弦的な微小振幅波の重合という仮定を設けるが、最近、合田¹⁾が指摘しているように直立壁からの完全反射の場合といえども有限振幅の重複波においては、その節の位置で2倍あるいは4倍の振動数で振動する成分が現われるために節における振幅は0とならず、そのため見掛け上、過小な反射率を与えてこの傾向は比水深が小さくなるほど著しい。

さらに斜面上で碎波せず整正な波形が送り返される場合はともかく、斜面勾配がゆるやかでその上で入射波が碎ける場合はかなり不規則な反射波形が現われるものとおもわれるから、そのような場合にも波高比で反射率を定義することはきわめて不適当である。一般に碎波後の反射波は波形が不規則で、入射波に関し位相差のみならず波長も変化するから、反射率としてできれば反射波と入射波のエネルギー比を採る方がのぞましい。そのためには反射波を直接観測する方法を開発しなければならない。

さらに波動エネルギーの比としての反射率がわかれば斜面上でおこなわれる碎波によるエネルギー逸散、あるいは打ち上げにともなう摩擦損失等の各種エネルギーの損失を定量的に表現できることになるので消波効率の算定等、海岸工学の広い分野に寄与しうる部分が大きいものと期待される。

われわれはこのような観点から、反射波を直接観測しうべき方法としてつぎのような考案をした。すなわち、

幅の広い造波水槽を縦方向(波の進行方向)に二分し、片側水路に反射体(斜面)をおき、他の側で波を自由に通過させて入射波を代表せしめる。反射体前面で発生する合成波形から入射波形を電気的に引算すれば見掛け上、反射波を抽出することができる。この方法によって不浸透滑面の斜面について反射率を計測した結果を前回の海岸工学講演会において発表した²⁾。

今回は棧型人工粗度をもつ粗な斜面について反射率を測定した結果について報告する。なお、本文においては斜面全面を粗面にした場合と、静水面より上、あるいは下の斜面部分のみを粗面とした場合についても実験を行ない興味ある結果を得たので併せ報告する。

なお、ここにいう反射率は(不規則反射波の波形解析がすんでいないので)慣例の波高比による定義に従うものとする。

2. 滑かな不浸透斜面の反射率の実験結果の要約と訂正

前回報告した標記の実験結果において、その後斜面傾斜角の測定に誤りを発見したのでそれらを訂正して図1~4に掲げ、かつ以下に述べる粗面反射の比較基準とするために滑面反射の実験結果をあらかじめつぎのように要約する。

(1) 観測された反射波形は斜面傾斜角 θ がほぼ 60° 以下になると波頂が二つに割れるような形でぐずれ始め、 θ が 20° 以下ではかなり不規則な波形を示す。

Micheの理論に

図-1 滑面反射率の実験 ($h/L=0.107$)

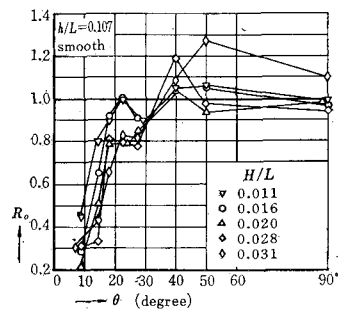
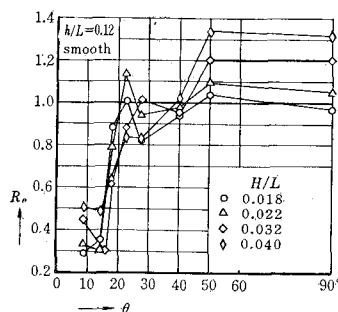


図-2 滑面反射率の実験 ($h/L=0.12$)



* 正会員 工博 大阪大学教授

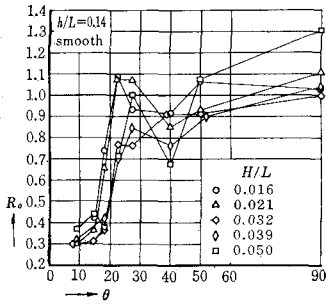
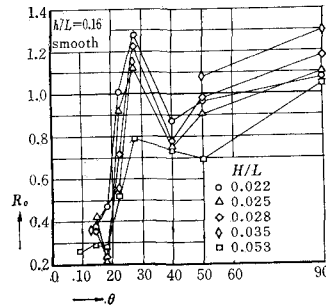
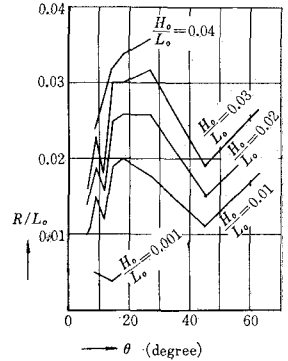
図-3 滑面反射率の実験 ($h/L=0.14$)図-4 滑面反射率の実験 ($h/L=0.16$)

図-6 遡上高との面勾配との関係 (岩垣・井上・大堀による)



よれば微小振幅の反射波についてその最大波形勾配 $(H_R/L_R)_{\max}$ は次式で与えられる。

$$\left(\frac{H_R}{L_R}\right)_{\max} = \sqrt{\frac{2\theta}{\pi}} \cdot \frac{\sin^2\theta}{\pi} \dots\dots\dots (1)$$

また滑面の反射率 R_0 は次式で示される。

$$R_0 = \frac{(H_R/L_R)_{\max}}{(H_I/L_I)} = \sqrt{\frac{2\theta}{\pi}} \cdot \frac{\sin^2\theta}{\pi} \cdot \frac{L_I}{H_I} \dots\dots (2)$$

ただし添字の I および R はおのおの入射波および反射波を示す。

$R_0 \leq 1.0$ であるから入射波の波形勾配 H_I/L_I を指定すれば式(2)の適用限界が自から定まり、たとえば、

$$H_I/L_I = 0.025 \quad \text{のとき} \quad \theta < 24^\circ$$

$$H_I/L_I = 0.054 \quad \text{のとき} \quad \theta < 32^\circ$$

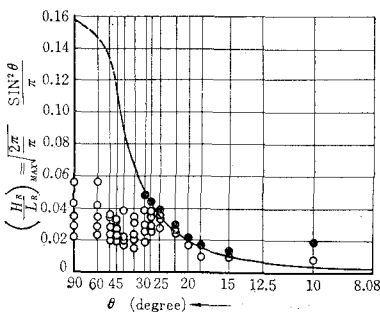
の範囲でのみ式(2)は有効である。

さて、観測した反射波について式(1)の妥当性を検討したところを図-5に示す。斜面傾斜角が極端に小さい場合 ($\theta < 15^\circ$) を除き微小振幅の仮定にもかかわらず式(1)の表現は十分満足しうるものであることがわかる。

(2) 図-1~4に共通して認められる特長はほぼ $20^\circ < \theta < 30^\circ$ の範囲で反射率が明瞭な極大値を示すことである。このような特異な極値が現われる理由は現在のところなお不明であるがこの傾斜角のあたりで斜面上の碎波が起こり始める限界であるところから、そうした臨界状態が反射率に関するこのような特異点に関連しているのではなかろうかと想像される。

図-5 反射波の最大波形勾配についての Miche の理論値との比較

(●は最大波形勾配の実験値を示す)



なお、岩垣ら³⁾によれば図-6に示すごとく周期波の遡上高についてもやはり $20^\circ \sim 30^\circ$ 付近で極大値をとることが認められており、このあたりの斜面傾斜角が反射のみに限らずかなり一般性をもった特異点であろうかと思われる。

(3) 前報でも述べたとおり図-1~4で反射率が1.0をこえることはきわめて不都合であり、計測技術を含め考えうるすべての原因を列挙して検照したのであるがまだ解明されていない。しかし、 $\theta > 60^\circ$ 程度に傾斜角が大きい場合には相対的に鉛直壁の完全反射とほとんど変わらぬ反射率を示すことは確実で、Greslou-Maheによればたとえば $H/L=0.05$ で $\theta=70^\circ$ の場合、 $R_0 \approx 0.8$ であると考えられるのに、われわれの方法によれば鉛直壁の場合とほとんど変わらない。Healyの方法による反射率の算定が見掛け上過小であるという前述の欠陥はわれわれの場合は除去されているのがわかる。

(4) 反射率におよぼす入射波の波形勾配の影響については、 $\theta > 45^\circ$ の範囲では系統的な傾向は認められず、むしろ無相関というべきであるが、 $\theta < 25^\circ$ の程度にゆるやかな斜面になって Miche の式の適用範囲に入れば式(2)の教えるとおりの反射率は入射波の波形勾配に反比例することが確認された。

3. 粗な斜面からの反射の実験方法

すでに述べたように粗面は棧型人工粗度による。すなわち断面 10×10 mm の桧材の棧を波の進行方向に直交すると 2×2 m の鋼板反射体にはりつけて粗面を形成し、棧間隔 s は 5 cm と 10 cm の2種とする。

静水深 h は 20 cm 一定とし特に steepness 0.016 の場合に限って 32.5 cm とした。

プランジャー型造波機により発生させられる実験波の諸元は波高 $H=2.48 \sim 7.90$ cm, 波長 $L=192 \sim 234$ cm, 比水深 h/L は 0.107, 0.14, 0.16 の3種, steepness H/L は 0.016~0.054 の範囲である。

斜面傾斜角は連続的に変えうるが

$\theta=90^\circ, 60^\circ, 50^\circ, 45^\circ, 40^\circ, 35^\circ, 30^\circ, 27.5^\circ, 25^\circ, 22.5^\circ, 20^\circ, 15^\circ, 12.5^\circ, 10^\circ$

の 14 種について実験を行なう。

4. 粗な斜面からの反射率に関する実験結果

比水深 $h/L=0.107$ で棧間隔 $s=5\text{ cm}$ および 10 cm のおのおの場合の実験値を図-7 (a) および図-7 (b) に、 $h/L=0.16$ で $s=5\text{ cm}$ および 10 cm のおのおの場合を図-8 (a), 図-8 (b) に示す。

これらの整理によれば $h/L=0.16$ の場合は $\theta < 60^\circ$ で θ の減少につれて反射率が急減し $h/L=0.107$ では $\theta < 40^\circ$ で R が急減する。

また図-7 (a), 図-7 (b) ではそれほど明瞭でないが図-8 (a), 図-8 (b) で $20^\circ < \theta < 30^\circ$ の範囲で滑面の場合と同様反射率が極値をとる傾向が認められるがその極値はもちろん滑面の場合ほど大きくはない。

棧間隔が 5 cm と 10 cm の場合の差違は $\theta > 45^\circ$ では反射率にほとんど差は認められないが傾斜角がゆるやかになるにつれて $s=5\text{ cm}$ の場合の方が 10 cm のそれにくらべ反射率がわずかに小さくなる傾向が認められる。

基準となるべき滑面の場合と比較するために粗面反射率を R , 滑面反射率を R_0 とし、 R/R_0 と θ の関係を示せば図-9, 10, 11 のごとくである (代表的なものとして $s=5\text{ cm}$ の場合のみを示す)。

$h/L=0.107$ の場合は R/R_0 は θ の減少につれてほぼ単調に減少するごとくであるが、 $h/L=0.14$ あるいは 0.16 の両方ともほぼ図-12 のような変化を示し、むしろこのような変化の方が一般的であろうと思われる。

図-12 に模式的に示したよ

うな R/R_0 の変化はつぎのようなエネルギー逸散機構によって説明されるだろう。すなわち、斜面上でまだ碎波が発生しないような θ の大きい範囲 (図の A の領域) では波動エネルギーの消耗は粗面摩擦によるであろうか

図-7 (a) 粗面反射率の実験値 ($h/L=0.107, s=5\text{ cm}$)

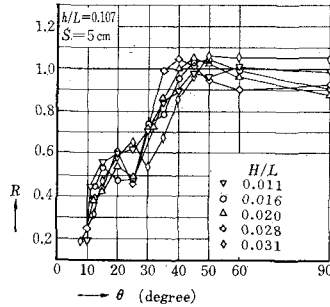


図-7 (b) 粗面反射率の実験値 ($h/L=0.107, s=10\text{ cm}$)

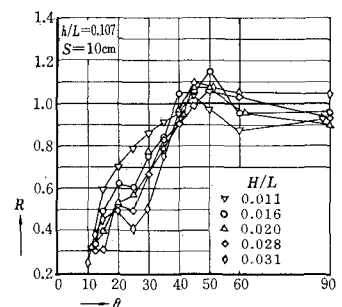


図-8 (a) 粗面反射率の実験値 ($h/L=0.16, s=5\text{ cm}$)

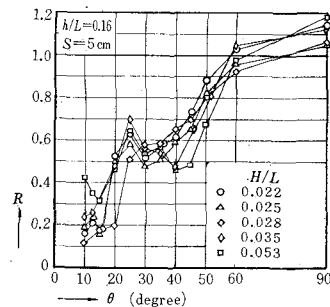


図-8 (b) 粗面反射率の実験値 ($h/L=0.16, s=10\text{ cm}$)

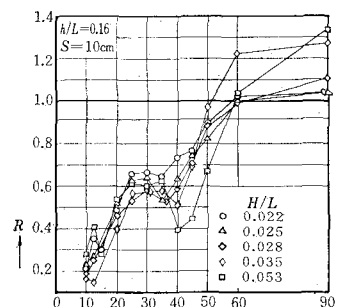


図-9 R/R_0 と θ との関係 ($h/L=0.107$)

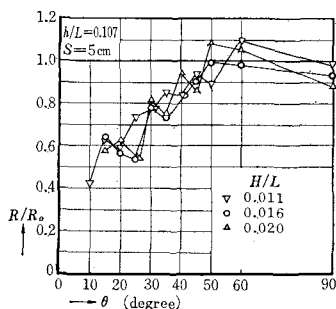


図-10 R/R_0 と θ との関係 ($h/L=0.14$)

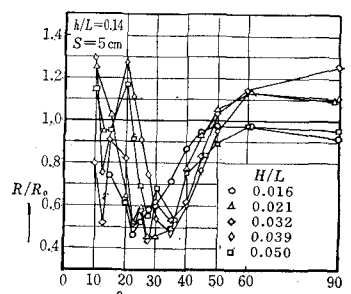


図-11 R/R_0 と θ との関係 ($h/L=0.16$)

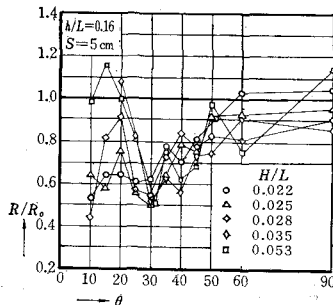
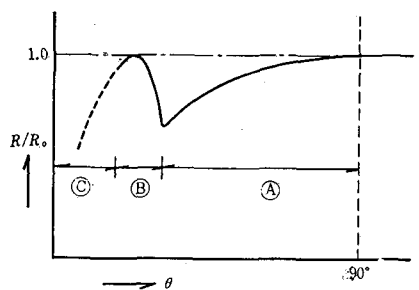


図-12 R/R_0 の変化の模式図



ら、 θ の減少につれて、すなわち棧抵抗を受ける斜面上が長くなるほど R/R_0 は漸次減少しよう。しかし $20^\circ < \theta < 30^\circ$ の付近 (図の B の領域) で斜面上に碎波が発生すれば碎波によって消費されるエネルギーの損失は摩

擦によるものよりもはるかに大きく、逸散エネルギーは斜面の粗滑に関係しなくなるはずであるから R/R_0 は 1.0 に近い値に遷移するだろう。いったん、碎波が発生した後では dry bed への打ち上げと引き波による粗面摩擦の影響が再び効いてくるので斜面がゆるやかになるにつれて図の C の領域では R/R_0 は再び減少の傾向を示すはずである。

以上の推論が正確で $20^\circ < \theta < 30^\circ$ 付近で R/R_0 の値が 1.0 に近づくという事実が一般的結論であるとするれば、この範囲の傾斜角をもつ斜面では少なくとも摩擦による波の減勢効果を期待するような工法、たとえば打ち上げ斜面をことさらに粗くするといった試みは有効ではないということができよう。

以上のように碎波が発生する限界勾配の付近を除いて斜面摩擦の効果がかなり顕著であることを確認したのであるが、普通いわれているように斜面上での打ち上げと引き波との往復運動の間に失われる摩擦損失が支配的なのであろうか、すなわち静水面より上の roughness のみが反射率の減少に寄与しているのかどうかを検照する必要があると考えてつぎのような実験を行なった。すなわち栈間隔 5 cm の棧型粗面について静水面から上だけ、あるいは下だけに棧をはりつけた斜面を作製しそのおのおのについて反射波形を観測して反射率を算出した。静水面から上だけに棧粗面を施した場合の反射率を R_u 、静水面から下だけに棧粗面を施した場合の反射率を R_L としそれらの実験値を図-13, 14 に示す。

R_u と R_L との比較をするために斜面全面を粗面としたときの反射率 R を用いて R_L/R および R_u/R を計算して図示すれば図-15 および 16 のごとくである。

実験値が散乱して定量的な結論はえがたいが、完全重複波が発生するような鉛直に近い斜面の場合は $R_u \cong R_L$ であるが、斜面が十分に緩やかな場合は R_L/R は 1.0 あるいはそれ以下であって、つまり静水面より下だけを粗面とした方が全面を粗面とした場合よりわずかながら消波効果がよい。 R_u/R については同じく緩勾配斜面ではその値は 1.0 より大きく静水面より上だけを粗面とすれば全面粗面の場合よりも消波効果がかなりの程度に減少することがわかった。

これは要するに反射率の減少、すなわち消波効率の面からいえば通常考えられているのとは逆に、静水面より上の roughness よりもむしろ静水面以下の roughness の方が有効に働くという結論になる。

あ と が き

図-13 $R_L \sim \theta$ の実験値

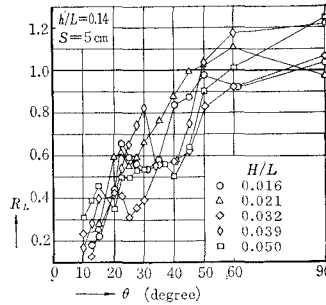


図-14 $R_u \sim \theta$ の実験値

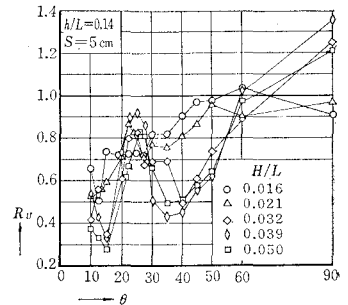


図-15 $R_L/R \sim \theta$

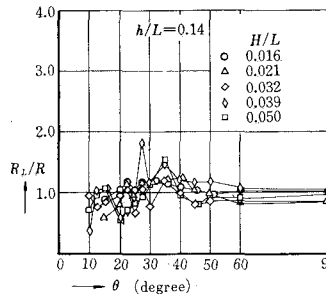
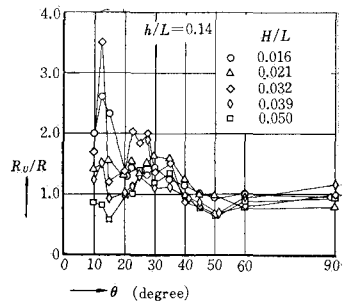


図-16 $R_u/R \sim \theta$



既往の反射に関する研究成果を整理したり、われわれ自身反射について実験を行なってみて感ずることは反射率といった概念が工学上それほど必要なのだろうかという疑念であった。実在するのは反射体前面の複雑な海面状態だけであって反射波そのものは(仮想的とはいわないまでも)思考モデルの一つではなからうか。すなわち浅水領域では入射と反射の複雑な非線型干渉が当然あるはずであるからたとえわれわれのような方法で反射波が分離抽出しえたといところで得られた反射波形はあくまでも nominal なもので反射波そのものではない。

見掛け上の反射波を追及したり、それから反射率を算出するよりも直接、反射体前面の合成海面状態そのものを追及の方が工学的により妥当なのではなからうか。研究の基本に関してかなり否定的な感想をのべてあとがきとし、今後はそうした面で資料の整理を試みるつもりである。

なお本研究に当ってコロラド州立大学の山田哲二君(実験当時の本学大学院生)、大学院生仙波惇君の熱心な協力をえた。さらにこの研究が文部省科学研究費、および一部は運輸省第三港湾建設局の委託調査費によるものであることを付記し謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 合田良実・柿崎秀作：有限振幅重複波ならびにその波圧に関する研究，港湾技術研究所報告，第5巻10号，昭41.6.
- 2) 室田 明・山田哲二：反射に関する基礎的研究，第13回海岸工学講演会講演集，昭41.12.
- 3) 岩垣雄一・井上雅夫・大堀晃一：のり面上の波の遡上機構に関する実験的研究，第13回海岸工学講演会講演集，昭41.12.