

浅海域における入・反射波の分離手法について

水 口 優*

1. はじめに

沿岸域における反射波の存在は時に重要である。その重要性は、護岸構造物の前面での洗掘の問題と関係して従来からも知られてきたところである。近年、沿岸海域制御構造物としていろいろなものが提案されているがそれらの構造物の反射特性も考えておく必要があろう。一方自然海岸においても、砕波帯内では、長周期波が無視できない大きさを持つばかりでなく、遡上域の地形変化の主要な外力となっている可能性のあることが指摘されている(加藤ら, 1989)。そしてその長周期波は非常に高い反射率を示し、岸沖方向に部分重複波構造をなす(例えば、水口ら, 1983)。また場合によっては、風波も高い反射率を示す(久保田ら, 1988)。

しかしながら、沿岸域のように水深が浅く、非線形性も強いような波の場での反射率の測定法にはいまだ確立された手法は無いのが現状であろう。そこで、本論文では、単一方向の波に対して現在提案されている中の4つの入・反射波分離の方法を取り上げ、それらの適用性について規則波を用いて実験的に検討を加えた。

2. 入・反射波の分離手法

2.1 微小振幅波理論と最小自乗法と波高計群

取り上げた反射率の測定法の第1は、波高計(以下水位計と呼ぶ)群によって得られたデータに微小振幅波理論解を最小自乗法を用いて当てはめることにより、該当周波数成分の入射波(高)と反射波を求めるもの(以下SLSMと呼ぶ)である。その考え方のあらましと結果は次のようである。

入・反射波の重なった場の水面波形 η は、入射波の進行方向に x 軸を取ると、次のように表される。

$$\eta = a_i \cos(kx - \sigma t + \varepsilon_i) + a_r \cos(kx + \sigma t + \varepsilon_r) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 σ は対象とする角周波数、 k は分散関係式より定まる波数、 a_i , a_r は入・反射波の振幅、 ε_i , ε_r はそれぞれの位相差である。用いる水位計の台数を n 台とし、そ

の j 番目の水位計での実測データにおいて対象とする角周波数のフーリエ級数の $\cos$, $\sin$ 成分 A_j , B_j を求め、それと(1)式から得られる $\cos \sigma t$, $\sin \sigma t$ の係数、 A_j^* , B_j^* との自乗誤差として次式が得られる。

$$E_R = \sum_{j=1}^n \{ (A_j^* - A_j)^2 + (B_j^* - B_j)^2 \} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

$$A_j^* = a_i \cos(kx_j + \varepsilon_i) + a_r \cos(kx_j + \varepsilon_r) \quad \dots\dots (3)$$

$$B_j^* = a_i \sin(kx_j + \varepsilon_i) - a_r \sin(kx_j + \varepsilon_r) \quad \dots\dots (4)$$

ここで、 x_j は j 番目の水位計の位置座標である。(2)式で与えられる誤差、 E_R を最小にするように、 a_i , a_r , ε_i , ε_r を定めるものとして次式を得る。

$$a_i = \frac{A_C^- \sin \varepsilon_r + A_S^+ \cos \varepsilon_r}{C_2 \sin(\varepsilon_i + \varepsilon_r) + S_2 \cos(\varepsilon_i + \varepsilon_r)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$a_r = \frac{A_C^+ \sin \varepsilon_i + A_S^- \cos \varepsilon_i}{C_2 \sin(\varepsilon_i + \varepsilon_r) + S_2 \cos(\varepsilon_i + \varepsilon_r)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\tan \varepsilon_i = -\frac{nA_S^- + A_S^+ C_2 - A_C^- S_2}{nA_C^+ - A_C^- C_2 - A_S^+ S_2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\tan \varepsilon_r = -\frac{nA_S^+ + A_S^- C_2 - A_C^+ S_2}{nA_C^- - A_C^+ C_2 - A_S^- S_2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし

$$A_C^+ = \Sigma (A_j \cos kx_j + B_j \sin kx_j) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$A_C^- = \Sigma (A_j \cos kx_j - B_j \sin kx_j) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$C_2 = \Sigma \cos 2kx_j \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$A_S^+ = \Sigma (A_j \sin kx_j + B_j \cos kx_j) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$A_S^- = \Sigma (A_j \sin kx_j - B_j \cos kx_j) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$B_2 = \Sigma \sin 2kx_j \quad \dots\dots\dots (14)$$

である。この場合の相対誤差(当てはまり具合)は、得られた結果(5)―(8)式を、(2)―(4)式に代入することにより、 $E_R / \Sigma (A_j^{*2} + B_j^{*2})$ で求まる。この方法は、今給黎・水口(1984)において用いられたものである。

このSLSMは基本的には従来の微小振幅波の重ね合わせによる方法(例えば、Goda and Suzuki, 1976)と同じであるが三本以上の水位計を用いることにより推定精度も得られるのが特徴である。これまでの経験では上記の相対誤差が 10^{-2} 以下であることが望ましいデータの条件である。なお、誤差の原因としては微小振幅波の範囲でも、電気的雑音、水深や水位計間隔の測定時の誤差、

水位計のキャリブレーション誤差, 規則波の場合には周期の設定誤差などが考えられる。有限振幅性の強い場合には, あくまでも対象とする周波数(一般に基本周波数)成分での入・反射波の分離を行っていることに注意する必要がある。そして, 得られる波高は実際の波高に比してかなり小さい値になることが予想される。不規則波の各周波数成分にこの方法を適用することもできるが, その場合は, 各成分が自由波であることが前提である。

2.2 長波理論と水位計と流速計

水位計と流速計の組合せのデータに対し, 長波理論を用いることにより入・反射波を分離しようとする現在までの試みをまとめると次のようになる。

a) 線形長波理論を用いる場合は, 入・反射波で水平流速 u の向きが逆になることから次のように分離される (Guza et al., 1984)。なお, 以下では添字 i, r はそれぞれ入・反射波の諸量であること意味するものとする。

$$\eta_i = \frac{1}{2} \left(\eta + \sqrt{\frac{d}{g}} u \right) \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\eta_r = \frac{1}{2} \left(\eta - \sqrt{\frac{d}{g}} u \right) \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここで, η, u は実測された水位, 流速変動であり, d は水深, g は重力の加速度である。この方法を以下 LL と略称する。

b) 久保田ら (1989) によって提案された疑似非線形長波理論を用いるもの (以下 QNL と略称) は, 浅海域での非線形性を考慮するために二次のオーダーで非線形長波理論の連続の式を満足するように LL を改良したもので, 結果は次のように与えられる。

$$\eta_i = \frac{1}{2} \left[\eta + u \sqrt{\frac{d}{g}} \cdot \frac{d}{d-\eta} \right] \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$\eta_r = \frac{1}{2} \left[\eta - u \sqrt{\frac{d}{g}} \cdot \frac{d}{d-\eta} \right] \quad \dots\dots\dots (18)$$

LL に比して, 水面形の峰での立ち上がりの鋭さに対して流速の立ち上がりの鈍い点を補正する形になっている。

c) Mizuguchi (1990) によって提案された方法で, 非線形長波理論そのものを満足させるものである。以下 NL と略称する。理論的には QNL をさらに改良したもので, 結果は次の式で与えられる。

$$c_i = \frac{u}{4} + \frac{c+c*}{2} \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$c_r = -\frac{u}{4} + \frac{c+c*}{2} \quad \dots\dots\dots (20)$$

ただし, $c = \sqrt{g(d+\eta)}$, $c* = \sqrt{gd}$ である。この方法は上記の補正効果という点では QNL より抑え目になっている。

部分重複波としてストークス流の展開を行ったもの (合田, 1968) もあるが, 結果の複雑なわりには, 浅海

域での適用範囲が狭いと思われるのでここでは取り上げなかった。

3. 実験

実験としては, 図-1 に示すように, 直立壁において越波がある場合の反射率の低下の問題を取り上げた。一様水深部に設けた直立壁の前面に, 分圧式(新容量式)水位計 (正豊工学製) を 50 cm 間隔で三台, そのうちの一台のすぐ横に径 5 mm の小型電磁流速計 (アレック電子製) を一台設置しデータを取得した。

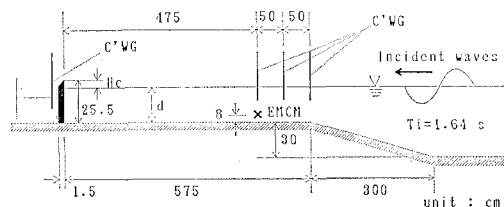
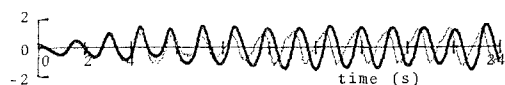


図-1 実験装置と計器の配置 (図中, C'WG は新容量式水位計, EMCM は電磁流速計を表す。水路幅は 80 cm である。)

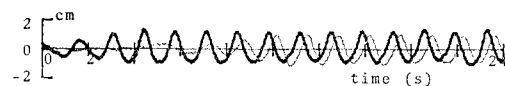
実験は周期 T が 1.64 s の規則波を用い, 直立壁前面の水深 d を 16.5, 18.5, 20.5, 22.5 cm と変えた。相対水深にして 0.0825 から 0.0979 とほぼ長波領域である。直立壁は耐水ベニヤ製で上端はほぼ 45° の鋭角をなすように細工した。その高さは, 25.5 cm で, 実験範囲としての天端高 H_c と水深 d の比は 0.113 から 0.545 である。入射波高 H は 2.5 cm から約 9.5 cm で, 波高・水深比にして 0.104 から 0.475 の範囲である。実験ケースは合計 24 である。データはサンプリング周波数 50 Hz で DR-2000 (TEAC 製) を用いて磁気テープに録音し, すべてパソコン (Sord M 343 SX II) で処理した。

4. 入・反射波の時系列

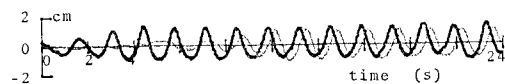
水位計と流速計の組合せのデータを用いる LL, NL, QNL による分離では, 結果として入・反射波の時系列が得られる。非線形性の程度の異なる 2 ケースについて生データと分離後の時系列の例を図-2, 3 に示す。図-2 (a), 3 (a) に示す生データを見ると, 波高の小さい場合も大きい場合も, 最初の数波は, 水面形と流速波形がきれいに対応し入射波成分のみであることがわかる。ついで反射波の影響が現れはじめ, それが定常に達する後半では, 図-2 に示すケース A では反射波の影響が現れると波高がやや大きくなり, 水面変動と流速変動に位相差が生じるという腹と節の中間部から腹よりの地点という特徴がよくでている。一方, 図-3 のケース B では, 入・反射波の峰が交互に現れ, それぞれで流速の向きは



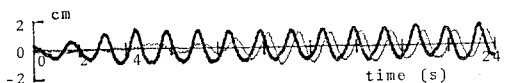
(a) 生データ (太線は水位変動 cm, 細線は流速変動 cm/s で流速の鉛直スケールは水位変動に比して 1/8 になっている.)



(b) LL による分離例 (太線は入射波, 細線は反射波で, $H_{il}=2.50$ cm, $H_{rl}=2.34$ cm である.)



(c) NL による分離例 (太線は入射波, 細線は反射波で, $H_{in}=2.51$ cm, $H_{rn}=2.34$ cm である.)



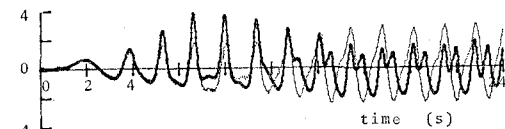
(d) QNL による分離例 (太線は入射波, 細線は反射波で, $H_{iq}=2.54$ cm, $H_{rq}=2.35$ cm である.)

図-2 長波理論に基づく分離の例 (ケース A, 波高の小さい場合で, $d=22.5$ cm である.)

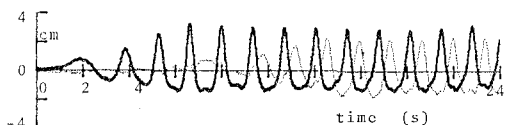
逆になっており, 長波の定常波の節の特徴がでている。

分離結果を見ると, 波高の小さいケース A では, どの方法を用いても入・反射波はきれいにかつ同じように分離されている。結果としての波高も 3 者間の差はほとんど無い。それに対し, 波高の大きいケース B の LL, NL では, 入射波が卓越する前半において, 入射波の峰の位置で反射波にスパイク状の突起が現れる。例えば, 図-3 (b) の 6.7 s 付近で見られる。現象論的には, 水位変動の峰の立ち上がりの鋭さに, 流速変動がついていかないために入射波成分が反射波にもれているということである。図-3 (d) の QNL ではそのもれはほとんどなく分離が良好であると言えよう。分離がうまくいっているかどうかという点では後半部の入・反射波が定常的に重なった部分 (ここでは反射波から入射波へのもれも有り得る。) での波谷部でもそのもれがなく, 波形がスムーズであることもポイントである。それらの点から, 最も妥当な分離結果を与えているのは QNL であると結論される。その他のケースにおいても全般的に最も良い分離結果を与えたものは QNL であった。

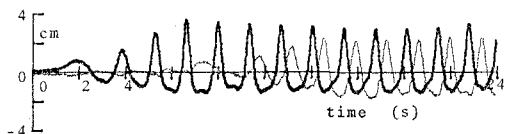
非線形長波理論を満たすという点ではより優れているはずの NL ではあるが, それによる分離結果は, 線形長



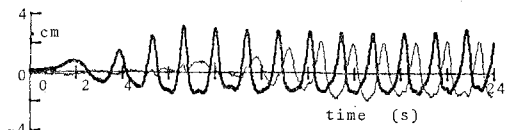
(a) 生データ (太線は水位変動, 細線は流速変動) 縦軸については, 図-2 (a) 参照。



(b) LL による分離例 (太線は入射波, 細線は反射波で, $H_{il}=5.23$ cm, $H_{rl}=4.75$ cm である.)



(c) NL による分離例 (太線は入射波, 細線は反射波で, $H_{in}=5.31$ cm, $H_{rn}=4.79$ cm である.)



(d) QNL による分離例 (太線は入射波, 細線は反射波で, $H_{iq}=5.59$ cm, $H_{rq}=4.92$ cm である.)

図-3 長波理論に基づく分離の例 (ケース B, 波高の大きい場合で, $d=20.5$ cm である.)

波によるものとほとんど変わらなかった。現実の波はそこで無視されている分散性などの考慮も必要ということであろうか。ただし, QNL も波高が大きくなると上記のもれが顕著になってくる。一つには流速計の追随性の問題もあるが, 波形のもれ方が非常に局所的であることから見て, その影響は小さいと判断される。なお, レーザー・ドップラー流速計との簡単な比較検定では実験範囲内では流速全振幅にして誤差は 5% 以内であった。

上記のもれの原因としては, 分離手法という面からは, 水平流速の鉛直分布や入・反射波の非線形干渉が無視されていること, 更には適用する理論の適合度といった問題が考えられよう。なお, SLISM による入・反射波の波高 H_{is} , H_{rs} はケース A で 2.61 cm と 2.41 cm と各長波理論に基づく分離結果とほぼ同じ値となったが, ケース B では予想どおり 4.76 cm と 4.50 cm でかなり小さな値となった。

5. 各手法の適用範囲とアーセル数

浅海域での波の非線形性は浅海アーセル数, $Ur (= gHT^2/d^2)$, によって表される. 横軸に浅海アーセル数, Ur_q , (波高として QNL による入射波高, H_{iq} を用いたもの), 縦軸に分離の結果としての入射波高の比を取ったものが図-4 である.

アーセル数が 20 以下であれば, 10% の範囲内では, どの分離法も一致してかつ正しい値を与えることが言えよう. アーセル数が 25 を越えると SLISM による推定値は急激に小さくなって, 適用に無理のあることがわかる. なお, 図中には明示していないが, 水深の小さいケースほど低下の度合は大きかった.

長波理論における非線形性は, 同様な基準ではアーセル数が 50 までは無視し得ることなどがわかる. さらに, 上記の分離結果の波形から見てもこの範囲では QNL によるものが絶対値としても信用できると言えよう. なお, 上記の分離の例のうち, ケース A のアーセル数 Ur_q は 13.2, ケース B で 35.1 である. 反射波についても図-

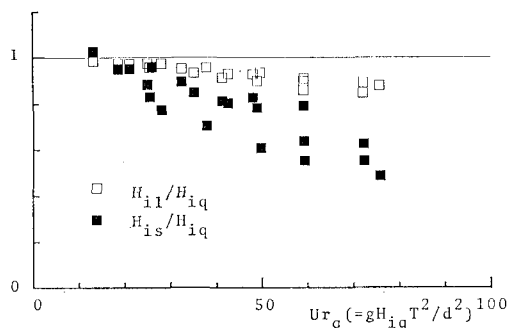


図-4 分離手法による入射波高の違い (H_{1l} , H_{1s} はそれぞれ LL および SLISM により分離された入射波高である. NL によるものは, LL によるものよりわずかに大きいだけで, 点としてはかなり重なり合うので省略した.)

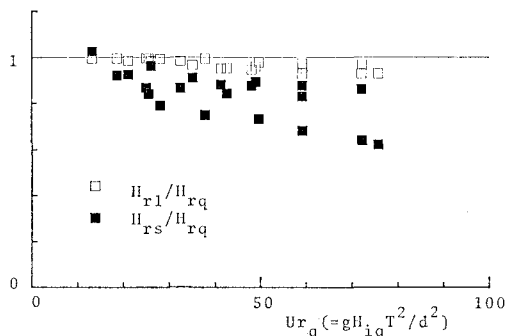


図-5 分離手法による反射波高の違い (H_{r1} , H_{rs} はそれぞれ LL および SLISM により分離された反射波高である. NL については図-4 と同じ理由で省略した.)

5 に示すように入射波とほぼ同様な結果となり, 今回のように反射率の高い場合には, 反射率そのものは SLISM によるものを除いては, ほぼ同様な値となった. なお, 今回の実験データでは, SLISM における相対誤差は $0.0021 - 0.056$ であった. 誤差が大きかったのは, ノイズの影響を受けやすい波高の小さいケースや (微小振幅波理論では波速に誤差が大きいためであろう) 波高の大きいケースであった.

6. 越波による反射率の低下

最後に越波のある場合の反射率を横軸に波高水深比 H_{iq}/d , パラメータとして天端高水深比 H_o/d をとって整理したものが図-6 である. なお, この結果は上記の入・反射波の分離に用いたデータが越波と反射率の関係を調べるための実験としては不適当であったため, 水位計と電磁流速計の組合せを直立壁から 390 cm の地点に置いて再実験を行った結果である. この時の流速計の設置高さは底面から 12 cm である. 実験条件は, 周期が 1.56 s と少し短い以外は上記の実験と同様でケース数は 21 である.

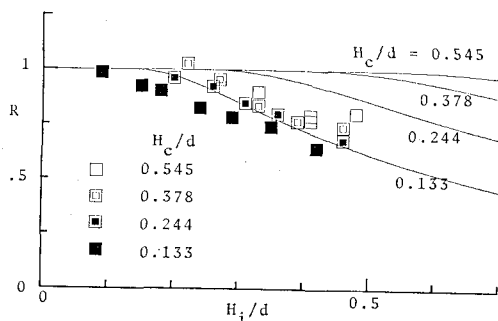


図-6 越波による反射率の低下 (QNL による分離結果に基づく.)

結果は, 水深が 16.5 cm ($H_o/d=0.545$) の場合を除いては, 波高が小さく越波が無い場合は反射率はほとんど 1 であり, 越波量が増えるにつれて反射率が下がるという傾向がきれいに現れている. QNL による反射率の測定法の妥当性の傍証である. なお, 水深が小さいケースで反射率が小さくなるのは伝播にともなう摩擦減衰によるものと考えられる. ちなみに往復する間での底面摩擦のみによる減衰率は, 摩擦係数を 0.01 として概算してみたところ 5-7% である (例えば, 堀川, 1973). 図中には比較のために, 微小振幅波理論を用いた簡単なモデルによる理論値も示す. モデルの基本的な仮定は以下のとおりである. 1) 入射波のエネルギー輸送量と反射波のエネルギー輸送量の差は, 越波によるエネルギー損失

に等しい。2) 越波時の波頂高は部分重複波としての波峰高に等しい。結果の式としては以下ようになる。ただし、 $\hat{h}$ は d によって無次元化された量である。

$$(1-R)(1+R)^2 = \frac{3[\hat{H}_i(1+R) - 2\hat{H}_0]^{1/2}}{2\sqrt{2} \cdot \hat{H}_i^3} \quad \dots(21)$$

ここで、 R は反射率である。実験結果とモデルとの一致も定性的には非常によい。定量的には先にも述べたように実験値における減衰の問題に加えて、越波開始の波高一つとっても有限振幅性が効くことは明らかで、モデルをその方向で改良するのが今後の課題である。その辺りの議論は、越波量そのものとの関係も含めて別の機会に譲る。

7. 結 論

浅海域で有限振幅性が無視できない場合の入・反射波の分離手法として水面波形と流速波形の組合せに、疑似非線形理論を用いるものが優れていることおよびその適用範囲としては、波高の算定値の誤差を 10% として、アーセル数 50 以下程度であることを実験的に示した。あわせて、越波による反射率の低下の定量的評価の可能性も示した。

謝 辞

実験は、90 年度卒業研究の学生であった三宅、塚田両

君が行ったものである。図面の作成に当たっては '91 年度卒業研究の学生の横山君の協力を得た。記して謝意を表する。本研究は文部省科学研究費（重点領域、代表者服部昌太郎）の補助を受けた。

参 考 文 献

- 今給黎 高・水口 優 (1984): 遡上波の振幅と反射率に関する研究, 第 39 回年講, 土木学会, II, pp. 333-334.
- 加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・磯上知良 (1989): 荒天時のバーム地形の侵食, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 354-358.
- 久保田進・水口 優・堀田新太郎・竹沢三雄 (1988): 急勾配前浜海岸における遡上波の現地観測, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 118-122.
- 久保田進・水口 優・堀田新太郎・竹沢三雄 (1989): 現地遡上域における反射波の特性, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 120-124.
- 堀川清司 (1973): 海岸工学, 東大出版会, 317 p.
- 水口 優・刈部好伸・堀田新太郎 (1983): 現地海浜における遡上波について, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 109-113.
- Goda, A. and Y. Abe (1968): Apparent coefficient of partial reflection of finite amplitude waves, Rep. of PHRI, Vol. 7, No. 3, pp. 3-58.
- Goda, A. and Y. Suzuki (1976): Estimation of incident and reflected waves in random wave experiment, Proc. 15th ICCE, Honolulu, pp. 828-845.
- Guza R. T., E. B. Thornton and R. A. Holman (1984): Swash on steep and shallow beaches, Proc. 19th ICCE, Houston, pp. 708-723.
- Mizuguchi, M. (1990): Note on a method to separate incident and reflected waves, CEJ, Vol. 33, No. 2, pp. 113-117.