

消波工境界での水位差と反射について

高 橋 英 嗣*・水 口 優**

1. はじめに

現地海岸において波浪を制御するために多くの透過性構造物あるいは消波工が建設されていて、そこでの反射波や透過波の大きさを予測することは計画・設計上きわめて重要であり、今日まで数多くの理論的・実験的研究がなされて来た。しかしながら反射率・透過率の両者共に理論値と実験値の一致度は不十分であり、理論値は実験値に比べて過小に評価する傾向がある(例えば近藤・竹田, 1983; 榊山他, 1990)。

一般に消波工の反射率を理論的に求めるには消波工前面と消波工内のそれぞれの領域で波動解としての水位、水平流速を求めた後、これらを境界で連続的に接続して求める方法が取られる。しかしながら室内実験を行うと波が消波工境界に入射する際に水位の不連続が見られる。Huang・Chao (1992) は室内実験において境界での水位の不連続を確認し、その成因が境界での流速の急激な変化によるものと考察している。ただしその現象を考慮すると解析が困難になること、及ぼす影響が微小であるとして無視している。しかしながら、この水位の不連続(水位差)はかなり大きく、少なくとも室内実験において反射(・透過)に及ぼす影響を無視するには問題があると思われる。既往の研究で消波工の反射率の理論値と実験値の一致度が良くないのは水位差を考慮していないためであるとも考えられる。

こうした観点から本研究では基礎的な実験を行うことによって水位差の存在を確認し、水位差が反射率に及ぼす影響を検討する。あわせて消波工前面で部分重複波状態および消波工内で減衰しながら進行する波(減衰進行波)の radiation stress を評価して平均水位の変化を理論と室内実験により検討する。

2. 理論的解析

2.1 消波工内の波動解

消波工内の波の挙動は Madsen (1974) にならって損失項を負荷した線形長波方程式と連続の式を用いる。

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\frac{f_*}{\varepsilon} u \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{d}{\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 η , g , f_* , u , d , ε は水位、重力加速度、線形摩擦係数、断面平均水平流速、水深、空隙率を表す。(1)、(2)式から u を消去すると次式のような強制項付きの波動方程式を得る。

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - g d \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} = -f_* \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(3)式の水位解から進行波成分だけを取ると減衰進行波の水位が得られる。

$$\eta_d = \frac{H_d(0)}{2} e^{-ik_* x} e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$k_* = k \sqrt{1 - \frac{f_*}{\omega}} i \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、消波工境界が $x=0$ にあるものとする。 $H_d(0)$ は減衰進行波の境界での波高、 k , ω は(3)式の強制項を0と置いた時の波数、角周波数を表す。複素波数 k_* を摩擦が小さい($f_*/\omega \ll 1$)として1次オーダーまでテイラー展開すると減衰進行波の波高は(6)式ようになる。

$$\frac{H_d(x)}{H_d(0)} = e^{-f_* x / 2 \sqrt{g d}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

2.2 水位差を考慮した反射率 R

消波工前面を入射・反射波が伝播する場合の水位とそれに対する水平流速は線形長波理論から

$$\eta = \eta_i + \eta_r = \frac{H_i}{2} e^{-ikx} e^{i\omega t} + \frac{H_r}{2} e^{ikx} e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$u = u_i + u_r = \frac{\omega}{kd} (\eta_i - \eta_r) \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。 H は波高で添え字の i , r は入射、反射波成分を表す。消波工内の水位は(4)式で与えられ水平流速は

$$u_d = \varepsilon \frac{\omega}{k_* d} \eta_d \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。従来反射率を求めるために $x=0$ で水位と流量を連続的に接続していたが、以下のように水位差を水位の接続条件に考慮する。

$$\text{水位: } \eta_i + \eta_r = \eta_d + \Delta \eta \quad \dots\dots\dots (10)$$

* 工修 東亜建設工業(株) (前 中央大学大学院)
** 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

流量： $u_i + u_r = u_d$ (11)

(10), (11) 式から反射率 R , 境界での透過率 D (境界透過率) を求めると

$$R = \frac{H_r}{H_i} = \left| \frac{1 - \lambda + \alpha \lambda}{1 + \lambda} \right|$$
 (12)

$$D = \frac{H_d(0)}{H_i} = \left| \frac{2 - \alpha}{1 + \lambda} \right|$$
 (13)

$$\lambda = \frac{\epsilon}{\sqrt{1 - \frac{f_*^2}{\omega^2}}}$$
 (14)

$$\alpha = \frac{\Delta \eta}{H_i}$$
 (15)

となる。後述するように水位差 $\Delta \eta$ は入射波形と位相差を持つ可能性が高いが、ここでは近似的に同位相と仮定して扱った。

2.3 平均水位の変化

寛田・水口 (1997) にならって重複波状態の radiation stress から空間的に変動するものだけを取り出すと次のようになる。

$$S_{xx} = \frac{1}{8} \rho g H_i H_r \cos 2kx$$
 (16)

これを以下の平均運動量方程式 (17) に代入すると

$$\frac{d\bar{\eta}}{dx} = -\frac{1}{\rho g d} \frac{dS_{xx}}{dx}$$
 (17)

$$\bar{\eta}(x) = \bar{\eta}_m + \frac{1}{8d} H_i H_r \cos 2kx$$
 (18)

となり、消波工前面で定在波に伴う平均水位の変化が得られる。(18) 式は入射波の半波長で変動する。ここで $\bar{\eta}_m$ は空間平均した平均水位を表す。

減衰進行波の radiation stress は Sollitt・Cross (1972) にならって消波工内の速度ポテンシャルを求めた後、若干の計算をすることによって (19) 式が得られる。

$$S_{xx} = \left(\text{Re}(n_*) - \frac{1}{4} \right) \rho g H_d^2(x)$$
 (19)

$$n_* = \frac{1}{2} \left(1 + \lambda^2 \frac{2k_* d}{\sin 2k_* d} \right)$$
 (20)

(6), (17), (19) 式から

$$\bar{\eta}(x) = \bar{\eta}(0) + \frac{H_d^2(0)}{4d} \left(\text{Re}(n_*) - \frac{1}{4} \right) \times (1 - e^{-f_* x / \sqrt{gd}})$$
 (21)

となり、摩擦が小さい場合の消波工内の平均水位の上昇が得られる。ここで $\text{Re}(n_*)$ は n_* の実部である。

3. 実験概要と実験結果

3.1 実験概要

実験は図-1 に示すような、ピストン型造波装置を用いる長さ 40 m, 幅 0.3 m, 高さ 0.5 m の 2 次元断面水槽

で行った。波は規則波で実験条件は表-1 に示す通りである。消波工として六脚ブロック (1 個の質量が 0.23 kg, $\epsilon = 0.47$, 図中では block) を長さ 1.49 m, 高さ 0.35 m 以上に整積みにしたものと消波マット (サラン繊維製, $\epsilon = 0.96$, 図中では fiber) を長さ 2.5 m, 高さ 0.35 m 以上にした 2 種類を用いた。共に境界が直立になるように設置した。この他に消波工無しの場合を加え、実験は全 27 ケースを行った。水位の計測には新容量式波高計 (正豊工学製) を用いたが、六脚ブロック内の水位についてはサーボ式水位計 (計測技研製) を、それぞれ移動させて計測を行った。データのサンプリング周波数は 100 Hz である。なお、サーボ式水位計から得られた水位変動の時系列データは数値ローパスフィルターによりノイズを除去してから解析に用いた。

3.2 実験結果

水位変動の時系列データを波別解析法 (zero down-crossing) により個々の波を定義する。その中から造波後定常状態に達したと判断される所から連続する 5 波を取り出し、それらの波高、平均水位の平均を取って解析に用いた。

(a) 消波工内の波高減衰と線形摩擦係数

図-2 は消波工内の減衰進行波の波高分布の例を示したもので、実線で示すように (6) 式を当てはめて f_* を求めた。

(b) 消波工境界前後の空間波形と水位差の算出

規則波が消波工に入射している時間帯を 0.1 秒間隔で空間波形にしたものが図-3 である。次いで得られた空間波形を図-3 の実線に示すように消波工境界前・後の水位の測定値に多項式 (原則として 3 次関数) を当てはめて、消波工内、消波工前面から境界へ外挿した水位をそれぞれ読み取り、その差を水位差と定義する。波長スケールで見れば水位は明らかに不連続をなしている。な

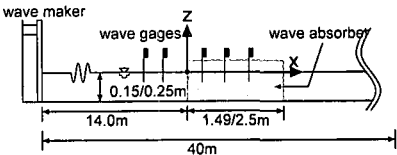


図-1 実験装置と座標系

表-1 実験条件

水深 d (m)	0.15	0.25
周期 T (s)	1.0, 1.4	1.4
造波波高 H (cm)	2.0, 3.0, 5.0	3.5, 5.0, 8.0
水位計の設置位置 x (m)	-13.0, -7.0, -0.9~0.0 (0.1 m 間隔), 0.09, 0.16, 0.25, 0.32, 0.39, 0.54, 0.69, 0.83, 0.98, 1.12	

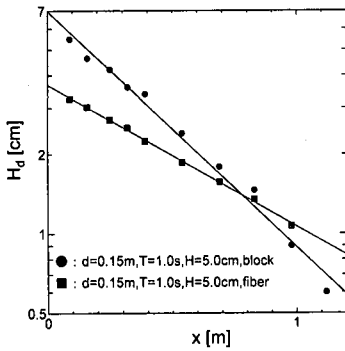


図-2 減衰進行波の波高分布

お外挿する際に当てはまり具合が悪い時間帯も存在したので、用いる点の数や関数の次数を替える等の補正を行って各時刻の水位差を求めた。

(c) 水位差の時系列

0.1秒間隔で得られた水位差の時系列にしたものが図-4で、前面の水位の方が消波工内よりも高い時を正としている。入射波とは消波工が無い状態での実験における $x=0$ の水位変動を示す。zero down-crossing 地点で水位差と入射波の位相関係を比較するとほぼ $T/4$ ずれているのが分かる。これは入射波形の時間微分と水位差の位相関係が等しいことになり、水位差と鉛直流速の関係を示唆するものである。水位差の発生因と定量的評価については4.で検討する。なお、六脚ブロックのケースにおいて負の水位差が大きく尖っているのはブロック内の水位が下降する時（例えば図-3(a)中の $t=22.6$ sに該当）に境界付近の水位の変化が大ききことによってあてはめの精度が悪くなり、過大に評価している可能性がある。

(d) 反射率、境界透過率と水位差

反射波は、消波工が有る場合の水位変動から消波工が無い場合の水位変動を差し引いたものとした。定在減衰波 (evanescent mode) や境界に生じる多少の乱れがあると思われたので、境界からほぼ水深分の距離だけ離れた地点 ($d=0.25$ m ならば、 $x=-0.3$ m、 $d=0.15$ m ならば $x=-0.2$ m) の入射波と反射波の波高比を取って反射率を求めた。これと水位差の時系列から得られる正の最大水位差 $\Delta \eta_{\max}$ を $\Delta \eta$ として α を求め、 α を考慮した (12) 式と $\alpha=0$ とおいた場合の (12) 式の値を実験の反射率と比較したのが図-5(a)である。式中に含まれる他の数値は実験値を用いた。 $\alpha=0$ とおくとかなり過小評価してしまうが α を考慮すると実験値により近い値になる。同様にして、境界透過率についても (13) 式と実験結果を比較したものが図-5(b)である。ここで消波工境界では選

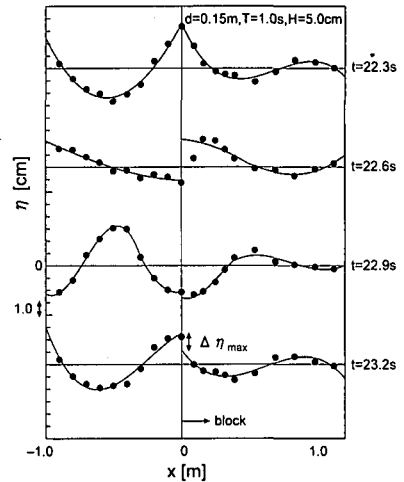


図-3(a) 消波工（六脚ブロック）境界付近の規則波の空間波形

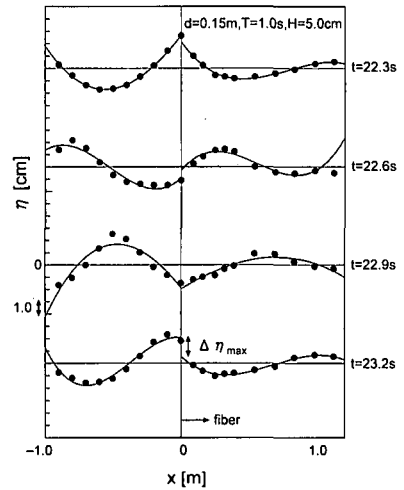


図-3(b) 消波工（消波マット）境界付近の規則波の空間波形

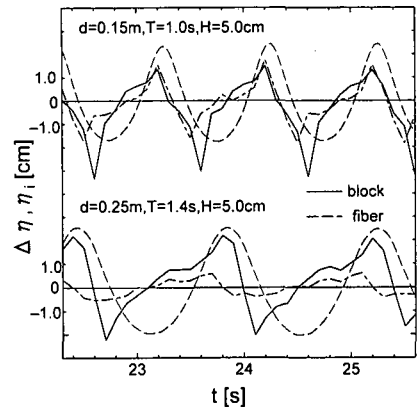


図-4 水位差と入射波（破線）の時系列データ

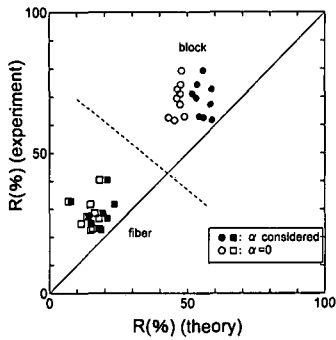


図-5(a) 反射率の理論値と実験値の比較

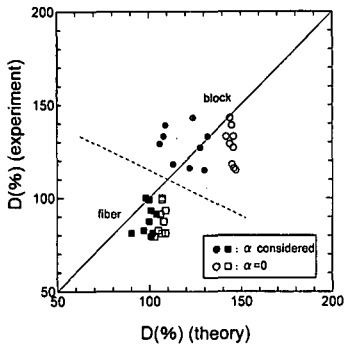


図-5(b) 境界透過率の理論値と実験値の比較

移領域を介して水位差が存在するので、実験値の減衰進行波の波高は六脚ブロックで $x=0.16$ m, 消波マットで $x=0.09$ m の波高を用いた。反射率と同様に α を考慮したものの方が一致が良い。

(e) 平均水位

消波構造物があると、その前面では部分重複波が形成されるが、その場合にも平均水位の変化が生じる。消波工内においても減衰進行波の波高が減衰すること (radiation stress の岸沖方向の変化) によって、平均水位が上昇し越波などの問題に影響することが考えられる。

図-6 は先に述べた 5 波の平均水位の平均値と初期静水位の平均値の差を平均水位の変動として求めたものである。図中の縦軸原点は初期静水位位置を表す。消波工が無い状態の入射波の平均水位を同様にして求めたところ、平均水位が低下していた。この水位低下の空間平均値を (18) 式の初期値とし、その $x=0$ の値を (21) 式の初期値として境界で両式を接続したものが図中の実線である。式中に含まれる各数値には実験値を用いた。当然の事ながら消波工前面での定在波の発生に伴う変動は反射率が高いほど大きい。消波工内で一致が良くないのは、実験において平均水位が十分に定常に達していなかった可能性があげられる。

消波工が無い場合の水位低下量については、室内で造

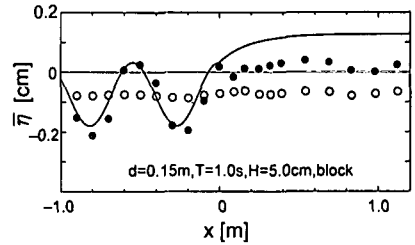
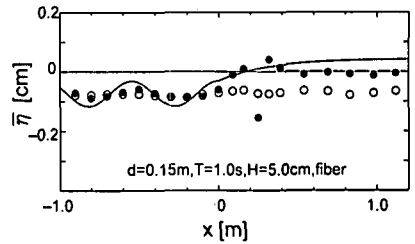
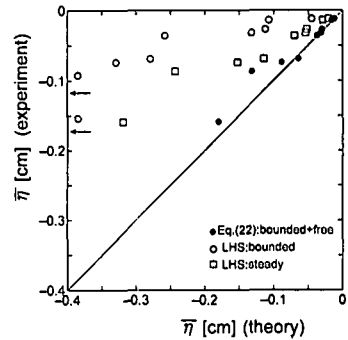
図-6(a) 平均水位の空間波形(六脚ブロック)
●: 消波工有り ○: 消波工無し図-6(b) 平均水位の空間波形(消波マット)
●: 消波工有り ○: 消波工無し

図-7 入射波の平均水位低下量の理論値と実験値の比較

波した場合(多重反射系が形成されるまでは)、その先端の立ちあがりを考えると規則波も長い波群であり、発生する長周期波による水位低下は (22) 式で表されることになる (Mizuguchi, 1995)。

$$\bar{\eta} = -\frac{1-n'}{c^2-c_0^2} \frac{S_{xx}}{\rho} \dots \dots \dots (22)$$

この解は波群に拘束される拘束波と波群の造波に伴って発生する自由波の和で表されている。ここで、 S_{xx} は入射波の radiation stress, c は長波の波速, c_0 は規則波の群速度, n' は c_0/c , ρ は流体密度を表す。(22) 式と入射波の平均水位を比較したものが図-7 である。図中には Longuet-Higgins・Stewart (1962) の拘束波解および定常解に基づく比較も示す。入射波の平均水位の低下量は (22) 式と良い一致を示す。

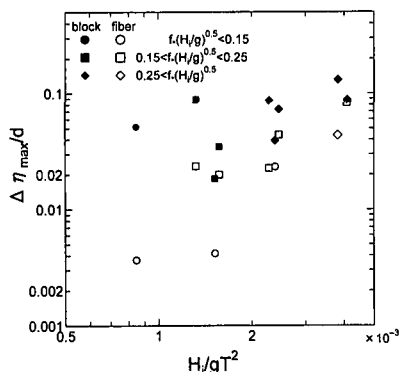


図-8 正の最大水位差と入射波パラメータの関係

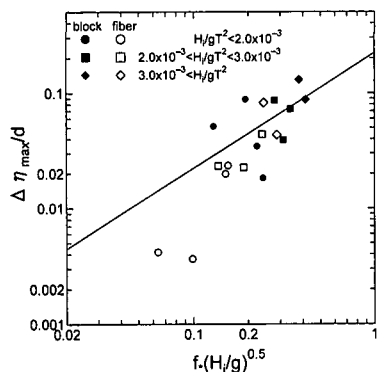


図-9 正の最大水位差と摩擦パラメータとの関係

4. 境界面での水位差に関する考察

現象として水位差が明らかに存在するもののそれを説明する理論の確立は難しく、ここでは水位差が起きる要因を拾い、次元解析することによって経験式を提案することにする。境界域での非定常な水位（水面）変動が消波工面のせん断摩擦を受けることによって消波工前面と消波工内での鉛直速度の差ができる事と消波工内への水の流（出）入が摩擦により制限を受けるという事があるため水位差が生じると考える。よって次のような諸量を含む関数 f で水位差が表されることになる。

$$\Delta\eta = f\left(g, f_*, \frac{\partial\eta_d}{\partial t}, u_d\right) \quad (23)$$

さらに境界域におけるナビエ・ストークスの運動方程式と連続の式のオーダリングを参考に (23) 式を整理することによって、以下の表現を得た。

$$\frac{\Delta\eta_{\max}}{d} = f\left(\frac{H_i}{gT^2}, f_*\sqrt{\frac{H_i}{g}}\right) \quad (24)$$

無次元水位差は入射波の波形勾配を表す入射波パラメータ H_i/gT^2 と摩擦を表す摩擦パラメータ $f_*\sqrt{H_i/g}$ で表されることになる。正の最大水位差と両パラメータとの関係を図-8、図-9に示す。図-8に示すように入射波

パラメータと正の最大水位差の関係は実験の範囲内では無相関であったが、摩擦パラメータとの関係は図-9のように摩擦パラメータが増加するにつれ、正の最大水位差も増加する傾向になった。図中に示すように原点を通る回帰直線を求めることにより水位差の経験式として (25) 式が得られた。なお、その際の相関係数は 0.72 であった。

$$\frac{\Delta\eta_{\max}}{d} = 0.22f_*\sqrt{\frac{H_i}{g}} \quad (25)$$

式中の f_* の値は既に述べたように波高減衰の実測値より得たものであり、 f_* 自体が消波工の性質および入射波諸量の関数になっている。

5. おわりに

消波工境界では遷移域を介して水位差が存在することを確認し、次いで従来の反射率の式に水位差を考慮した式を導き直し、実験結果により近い値を得る事が出来た。水位差の要因分析を行い、境界域でのナビエ・ストークス運動方程式をオーダリングすることによって取り出したパラメータを用いることにより、水位差の経験式の提案を試みた。また消波工前面、消波工内の平均水位の変化を理論と室内実験により検討した。以上のことから、基礎的なケースについては、入射波条件と消波工の諸量が与えられた時に水位差および反射率を精度良く予測する道ができたと言えるが、現地不規則波浪が作用する実スケールの消波工については水位差の存在の確認も含めてさらなる検討が必要である。

最後に、本研究の基礎を築き助言をいただいた山口英一氏（前中央大学大学院、現阿部建設）に謝意を表す。

参考文献

- 近藤俊郎・竹田英章 (1983): 消波構造物, 森北出版, p. 275.
- 榊山 勉・阿部宣行・鹿島遼一 (1990): ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形解析, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 554-558.
- 寛田博章・水口 俊 (1997): 波群の反射と長周期波, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 201-205.
- Huang, A. T. and Chao, A. T. (1992): Reflection and transmission of water wave by porous breakwater, J. WPCOE, 118 (5), ASCE, pp. 437-452.
- Longuet-Higgins, M. S. and Stewart, R. W. (1962): Radiation stress and mass Transport in gravity wave with application to "surf beat", JFM, Vol. 13, pp. 481-504.
- Madsen, O. S. (1974): Wave transmission through porous structures, Proc. ASCE, WW3, Vol. 100, pp. 169-188.
- Mizuguchi, M. (1995): Radiation stress approach to generation of long waves by a wave group in a flume, Coastal Eng. in Japan, Vol. 38, pp. 1-4.
- Sollitt, C. K. and Cross, R. H. (1972): Wave reflection and transmission at Permeable breakwater, Ralph M. Persons. Lab, MIT, Rept. No. 147, 235 p.