

# 海岸護岸による反射が戻り流れに及ぼす影響

浅野敏之\*・M. A. Lashteh Neshaei\*\*・Md. Azharul Hoque\*\*\*

## 1. はじめに

わが国の砂浜海岸は狭小なものが多く、背後には海岸護岸などの海岸保全施設が設置されていることが少なくない。こうした海岸では、暴浪時には強風による吹き寄せと set-up によって、波が護岸に達するようになる。このとき護岸から波や戻り流れに干渉効果が起こり、その結果、海底地形変化にも護岸の効果が顕著に出現する。護岸などの海岸構造物がない場合でも、浜崖の形成などによって反射性の海岸が形成されよう。このような状況は、大規模な海浜変形が生じる場合でもあり工学的に重要であるが、戻り流れの流速分布に及ぼす海岸の反射の効果に関する研究は、最近の Neshaei (1997), Rakha-Kamphuis (1997) によるもの以外にはほとんど無く、十分な理解が得られていない。

本研究は、暴浪時に波が護岸前面に達して進行波性から部分重複波性に変化したときの、砕波帯内の戻り流れの変化を実験的に調べたものである。さらに戻り流れの理論モデルを部分重複波に対して拡張し、実験結果との比較検討から護岸による反射が戻り流れの流速分布に与える影響を定量的に明らかにする。

## 2. 実験の概要

実験は、鹿児島大学工学部海洋土木工学科にある長さ 26 m, 幅 14 m, 深さ 1.2 m の平面水槽内に、コンクリートパネルで仕切ることにより幅 1.0 m の 2 次元水槽を製作し、その中で行った(図-1)。底面には勾配 1/20 の一様勾配斜面を網鉄筋とモルタル張りで製作した。容量式波高計を沖に 1 台、測定台車上に 2 台設置した。測定台車にはセンサー径 8 mm の電磁流速計プローブを取り付けた。

汀線および汀線から 1 m, 2 m 地点にコンクリート製の護岸模型を置き、部分反射の状態を形成した。実験波は周期・波高を変化させた規則波の全 3 ケースで、それぞれのケースに対して護岸模型を設置することにより反

射率を変化させた実験を行った(表-1)。測定範囲は、砕波帯よりやや沖側から砕波帯全域を対象とした。測点は岸沖方向に 8~15 断面をとり、それぞれの断面で水深方向に 5~10 点の流速を測定した。

## 3. 波高・平均水位に関する結果

図-2(a), (b)は、それぞれ護岸模型を設置しない場合、 $x=1$  m ( $x$ は、静水時汀線を原点とする沖向き水平座標)に設置した場合の波高分布を示したものである。砕波した波が渦を伴いながら斜面上を進行し、護岸で再反射される波の場を表現するには、最近活発に研究が進められている水表面粒子を直接追跡する数値シミュレーションも有力であろうが、普遍的な特性を得るには多くの計算結果の蓄積やそれを検証する実験結果が必要と思われる。ここでは最も簡単なモデル化として浅水変形・砕波を経て砕波減衰する岸への進行波と、この護岸設置点での波高に反射率を乗じて折り返した反射波の重畳を考えた。反射波は入射波と非線形干渉することなく、反

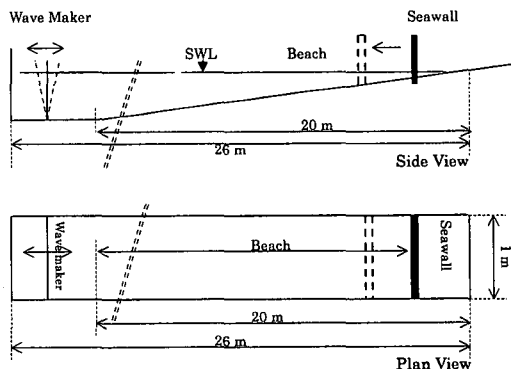


図-1 実験水槽

表-1 実験条件 ( $H_0$ : 沖波波高,  $L_0$ : 沖波波長,  $T$ : 周期,  $\tan\beta$ : 斜面勾配,  $h_b$ : 砕波水深,  $x_b$ : 砕波点位置)

	$H_0$ (cm)	$T$ (s)	$L_0$ (m)	$\frac{H_0}{L_0}$	$\frac{\tan\beta}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}}$	breaker index	$h_b$ (cm)	$X_b$ (m)
Case-1	10.0	2.0	6.24	0.016	0.395	spilling	12.3	2.46
Case-2	12.5	1.5	3.51	0.036	0.264	spilling	16.2	3.24
Case-3	15.0	1.0	1.56	0.096	0.161	spilling	20.0	4.00

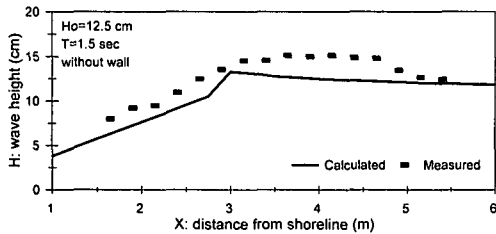
\* 正会員 工博 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科  
\*\* Ph.D. Assistant Professor, Guilan Univ., Iran  
\*\*\* 鹿児島大学大学院 工学研究科

射波のエネルギーフラックスが保存される形で沖へ進行すると仮定した。入射波と反射波の重畳波の碎波限界については、岩田・清野 (1983) が提案した部分重複波の碎波指標

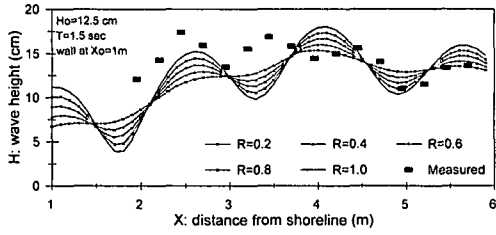
$$\frac{H_b}{L_b} = \left\{ 0.218 - 0.076 \left( \frac{1-R}{1+R} \right) \right\} \tanh \frac{2\pi h_b}{L_b} \dots (1)$$

を用いて判定した。ここに  $R$  は反射率である。これに加え、波高・水深比が 0.7 を越える場合には 0.7 となるよう波高を低減させる条件を課した。

渦を伴いながら護岸へ進行する波と護岸からの反射波が重なる波の場は複雑であり、護岸設置点での入射波と反射波の位相関係も非碎波重複波のようには明確な関係では結ばれない。ここでの簡単な波浪計算モデルでは

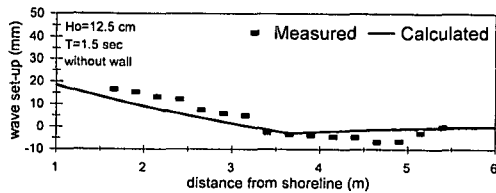


(a)

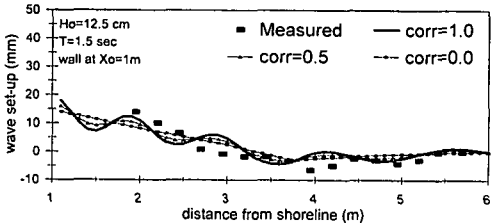


(b)

図-2 岸沖方向波高分布に関する実験値と計算値の比較



(a)

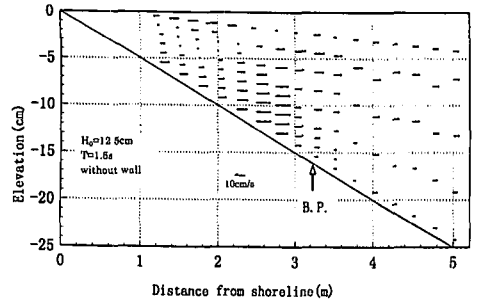


(b)

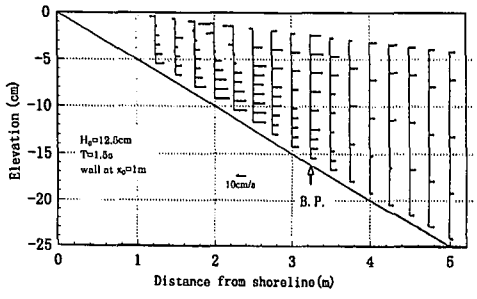
図-3 平均水位に関する実験値と計算値の比較

図-2(b) に示した程度の実験結果の再現でしかないが、部分重複波の示す波高の場所的な脈動や波高の概略の大きさは、実験値と計算値に共通するものがある。また、反射率  $R$  は 1 に近いものと判断できる。以下の計算においてはすべてのケースで  $R=0.9$  と置くことにする。

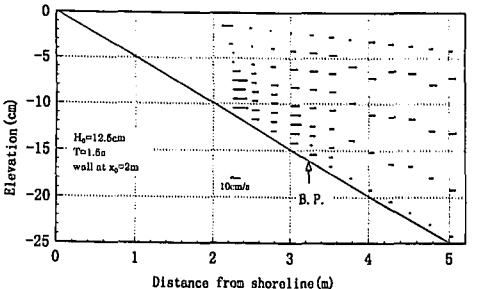
図-3 は set-up に関する実験値と計算値の比較を示したものである。図-2(b) に示した反射波による波高の脈動があると、図-3(b) に示す set-up の岸沖分布の計算値にも脈動が生じてくる。一方、実験値には脈動らしきものが窺えるものの計算値ほどには明確でない。図中のパラメータの corr は後述の式 (8) で示す入射波と反射波の位相の相関を示す。用いた波が規則波であるから入射波と反射波には護岸前面で折り返される位相関係が存在するはずであるが、入射する波が碎波後の波であるために位相関係が不明確になったと考えられる。なお、以下の計算では位相の相関はすべて 1 とした。



(a)



(b)



(c)

図-4 戻り流れの測定値の流速分布

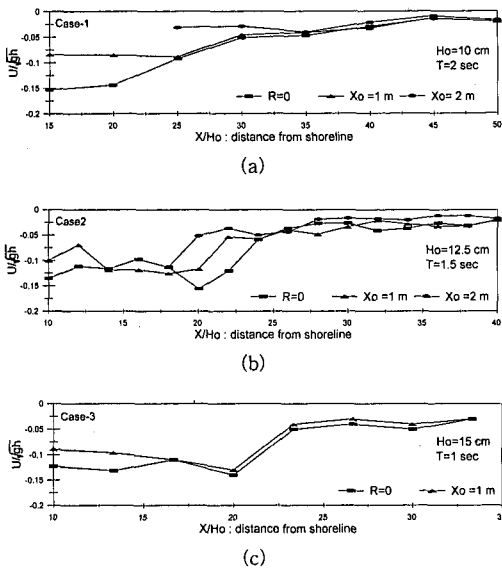


図-5 戻り流れ流速に及ぼす護岸の反射の効果

4. 戻り流れに関する測定結果

波峰レベル以下で測定された水平方向流速の時間平均値を戻り流れと定義し、その断面2次元分布を調べた。図-4(a)は護岸を設置しない場合(反射率R=0.0)、図-4(b), (c)はそれぞれ汀線から1m, 2m地点に護岸を設置した場合の結果である。両図より戻り流れの空間的構造が読み取れる。

図-5は本研究で行った3つの実験ケースについて、底面から0.8cmの高さにおける戻り流れ流速の岸沖方向分布を示したものである。護岸を設置すると戻り流れ流速が減少することが明確に読みとれる。護岸を2mの位置に置いた方が1mの位置より、全体の波の場が重複波性になり、波谷レベルより上部での砕波による流体塊の移送が弱まるため、戻り流れ流速がより小さくなる。

5. 戻り流れ理論への波の反射効果の取り込み

戻り流れの流速分布理論はいくつか提案されているが、その基本は砕波によって波谷レベルより上方で岸側に輸送される質量流束を評価し、その補償流としての波谷レベルより下方の戻り流れの流速分布を、砕波による乱れ応力のモデルと組み合わせて求めようとするものである。すなわち、戻り流れの流速分布には、砕波による乱れの大きさ・時空間分布の評価が直接に関連する。

Okayasu(1989)のモデルは、砕波帯における波から乱れへのエネルギー移行過程の中間に、エネルギーを一時的に保持する媒体として大規模組織渦を含めたエネルギー収支を考慮したものである。すなわち、戻り流れの

断面一様流成分  $U_m$  は、砕波による質量フラックス  $M_w$  と大規模組織渦による質量フラックス  $M_v$  の和の補償流として、次式で与えられる。

$$U_m = -\frac{1}{d_t}(M_w + M_v) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $d_t$ は底面から波谷レベルまでの深さである。本研究では以下に示すように、Okayasuのモデルに反射波の影響を組み込んだ。

まず、最初に部分重複波の下での波高の岸沖分布を以下のように与える。

$$\left. \begin{aligned} \eta_i &= A_i(x) \exp i[k(x-x_0) - \sigma_i t] \\ \eta_r &= A_r(x) \exp i[k(x-x_0) - \sigma_r t] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、添え字  $i, r$  はそれぞれ入射波、反射波を意味する。護岸によって沖方向に向きを変えた反射波は、護岸前面におけるエネルギーを保持すると考える。すなわち、 $A_r$ は護岸前面の入射波  $A_i(x_0)$  に反射率  $R$  を乗じたものを護岸前面から沖方へ進行させることによって求められる。また、反射波の影響は  $M_w$  には含むものの、大規模渦の場を変えないと考える。すなわち全体の質量フラックス  $M_t$  は

$$M_t = (M_w + M_v)_i - (M_w)_r \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。入射波に対する  $M_w, M_v$  は波高  $H$ 、水深  $h$ 、波速  $c$  より次式で与えられる。

$$(M_w)_i = \frac{1.6c}{\rho gh} \frac{\rho g A_i^2}{4}, \quad (M_v)_i = \frac{3}{8} \pi \frac{H^2}{L} c \dots\dots (5)$$

反射波に対する  $(M_w)_r$  は上式の  $(M_w)_i$  の  $A_i$  の代わりに  $A_r$  を代入することによって得られるとする。

wave setup  $\bar{\eta}$  は次式で記述される。

$$\frac{dS_{xx}}{dx} + \rho gh \frac{d\bar{\eta}}{dx} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

radiation stress  $S_{xx}$  は斜面上において微小区間ごとと一定水深の近似ができるとすると、

$$S_{xx} = \rho g \bar{\eta}^2 / 2 + \rho \int_{-h}^{\eta} (u_w^2 - w_w^2) dz \dots\dots\dots (7)$$

で求められる(Mei, 1989)。  $\eta = \eta_i + \eta_r, u_w = (u_w)_i + (u_w)_r$  などと入射波と反射波に分離すると、2乗項に両者のcross termが発生する。

式(3)を式(7)に代入すると

$$\begin{aligned} S_{xx} &= E_i \{2n - (1/2)\} + E_r \{2n - (1/2)\} \\ &\quad - \rho g C_{orr} A_i A_r \cos 2k(x-x_0) / 2 \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

となる。ここに

$$\begin{aligned} E_i &= \rho g A_i^2 / 2, \quad E_r = \rho g A_r^2 / 2 \\ 2n &= \left\{ 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right\} \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

で、 $C_{orr}$ は入射波と反射波の相関で両者に位相のずれがなく折り返されれば1となる。

戻り流れの鉛直分布の計算モデルは、砕波による Reynolds 応力  $\tau$  ならびに渦動粘性係数  $\nu_e$  の鉛直分布を仮定し、積分により戻り流れ流速  $U$  の鉛直分布を得るのが通例である。Okayasu(1989)は、次式のように底面からの高さ  $z'$  に比例して増加する渦動粘性係数  $\nu_e$  と、 $z'$  とともに線形的に変化する  $\tau$  を仮定した。

$$(a_r z' + \beta_r) = (a_\nu z' + \nu) \frac{\partial U}{\partial z'} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 $\nu$  は動粘性係数、 $a_r$ 、 $\beta_r$ 、 $a_\nu$  は  $z'$  に依存しない係数であるが砕波によるエネルギー逸散率  $D_B$  に関係づけられる。上式の解の骨格は、底面からの鉛直高さを  $z'$ 、波谷水深を  $d_i$  とすると次式で与えられる。

$$U(x) = a_1 \left( z' - \frac{d_i}{2} \right) + a_2 (a_3 + \log f_1(z'/d_i)) + U_m \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  は定数である。第1項は  $z' = d_i/2$  で0となる直線分布を持ち、第3項は波谷レベル以下で式(2)の大きさをもつ一様な戻り流れを示している。radiation stress の分布は、Okayasu (1989) モデルのようにエネルギー収支で記述しようとする限り、戻り流れの鉛直分布には直接関与しない。反射波の存在によって砕波位置が変化し砕波によるエネルギー減衰率  $D_B$  も異なることが予想されるが、乱れ構造の変化を測定していない現段階においては、反射波の効果は砕波点位置の変化を通じて間接的に考慮されるのみとする。したがって、護岸の反射の効果は、主要には式(2)の波によって岸方向に輸送される質量フラックスに表れ、式(11)の  $U_m$  項に大きく表れる。

Okayasu のモデルでは、砕波点より沖側では  $D_B$  は 0

となり、流速分布は Longuet-Higgins (1953) が導いた質量輸送速度と一致する。そのため、砕波点を挟んで戻り流れの流速値は不連続に変化することになる。質量の連続性から考えると、水平流速が急変するためには砕波点で砕波による鉛直方向のきわめて大きな流れが必要なことを意味し不自然である。規則波とはいえ砕波点は岸沖方向に変動しており、部分重複波状態ではその位置の変動が大きいことが観察された。そこで、Case-2 に対する計算では、 $x=250$  cm ですべての波が砕波するとし、それより沖方に向かうにつれ砕波率が線形的に低減し、 $x=450$  cm で 0 となる分布を仮定し、これを式(5)の  $M_w$ 、 $M_v$  の評価に導入した。

### 6. 戻り流れ流速に関する実験値と計算値の比較

図-6 は、戻り流れ流速の鉛直分布について実測値と理論モデルによる計算値の比較を示したものである。護岸による反射によって戻り流れが減少すること、その減少は護岸の位置を汀線から 1m より 2m とした方が大きいことが読み取れる。実験値と計算値の一致は  $x=250$  cm で特に良好であるが、他の点では分布の傾向が異なる様子も見られる。

図-7 は、底面から 0.8 cm の高さの戻り流れ流速の岸沖方向分布について同様な比較を行ったものである。図-6、7 より、反射性の増加とともに戻り流れの流速が減少すること、部分重複波に対する理論モデルが実測値を定量的にもかなりの程度でよく再現していることが読み取れる。

戻り流れの断面分布を高精度で再現するためには、斜

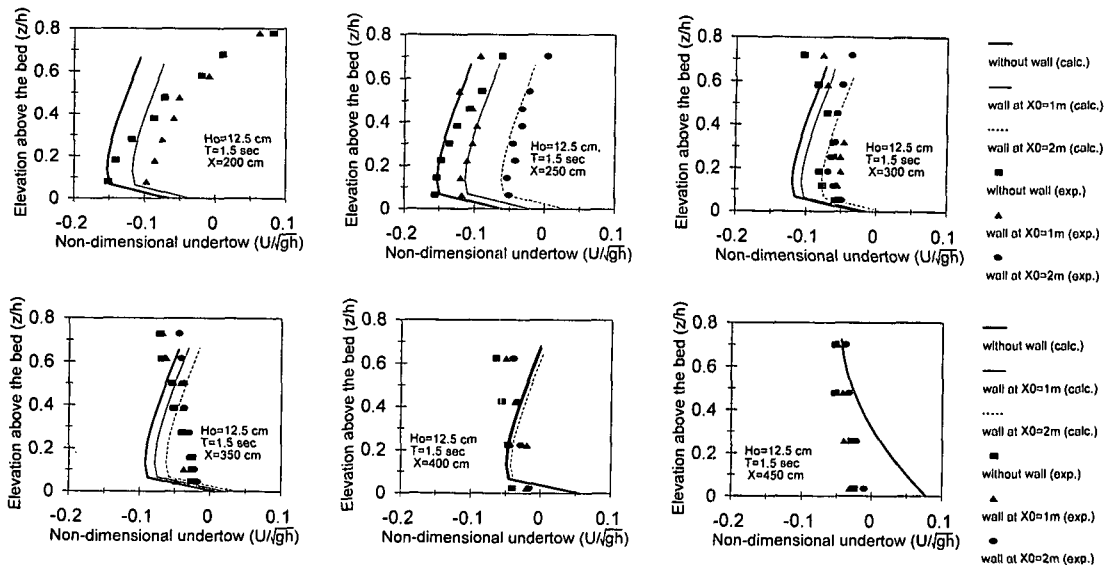
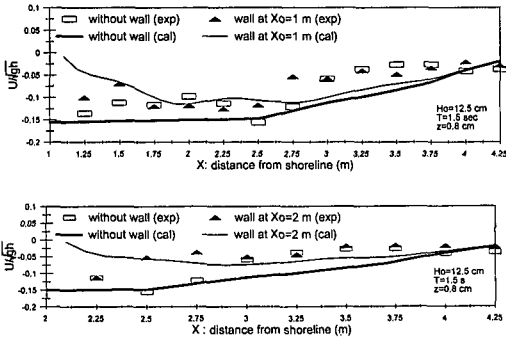
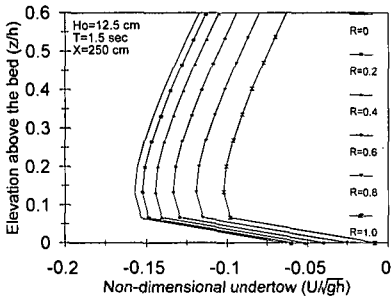


図-6 戻り流れの流速分布に関する実験値と計算値の比較 (Case-2)



図一七 戻り流れの岸沖分布に関する実験値と計算値の比較



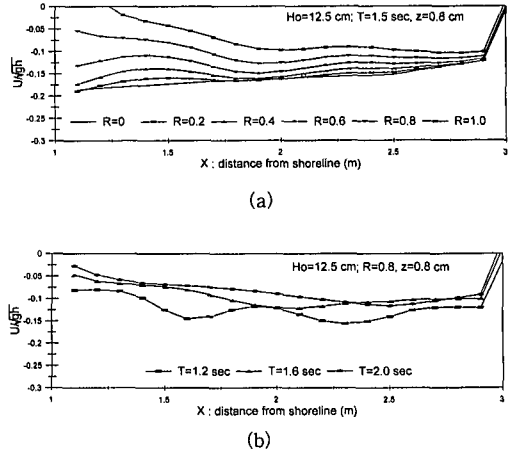
図一八 反射率が変化したときの戻り流れの流速分布の変化

面上の波の変形、渦や乱れの発生とその強度分布を包括した砕波帯の全体システムを明らかにする必要がある。反射波の影響を含むこの流速場の解明には長い道のりが必要と考える。ここで提案した計算モデルは、簡単なものではあるが、パラメータを系統的に変えた計算を行うことにより、本モデルの現象再現能力を検討することも意義あるものとする。以下、反射率や波の諸元を変化させた場合の戻り流れへの影響を調べた。図一八は反射率を変化させたときの戻り流れの鉛直分布の変化を示したものである。図一九は反射率ならびに波の周期を変化させたときの戻り流れの岸沖分布を图示したものである。図一九(b)より周期の長い波では戻り流れ流速が減少することがわかる。これに対応する実験結果は図一五で示したとおりであり、反射性の波の場合には周期が長いほど(波形勾配が小さいほど)、戻り流れ流速は小さくなっており、図一九(b)の計算結果と同じ特性が得られている。

## 7. 結 論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

(1) 護岸を設置すると反射波の効果により、戻り流れ流速は減少する。護岸の設置位置は、汀線から1mの地点より2mの地点とした方が、全体の波の場合より重



図一九 反射率・波の周期をパラメータとした戻り流れの岸沖分布の計算結果

複雑性となって、戻り流れ流速がより小さくなる。

(2) 本研究で提案した波の反射の効果を取り込んだ戻り流れの計算モデルは、鉛直分布・岸沖分布ともかなりの精度で実験結果を再現することがわかった。

今後の課題として、不規則波を用いた場合の護岸の反射の効果をはっきりとさせる必要がある。不規則波の場合には砕波率が岸沖方向に変化するため、図一六で示した戻り流れの鉛直構造の岸沖変化を、モデルに仮定を導入することなく滑らかに再現できるものと思われる。また、護岸前面の地形変化には戻り流れのみが寄与するものではないが、荒天時に波が護岸まで到達するようになった時の海浜変形という重要な課題は今後取り組むべき問題と言える。

本研究の一部は、著者の一人の M. A. L. Neshaei が日本学術振興会の外国人特別研究員として行ったものである。また実験に熱心に協力して頂いた本研究室の元学生である内田辰郎君に謝意を表します。

## 参 考 文 献

岩田好一朗・清野 博 (1983): 部分重複波の砕波限界に関する実験的研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 1-4.  
 Longuet-Higgins, M. S. (1953): Mass transport in water waves, Phil. Trans. Royal Soc. London, Vol.245, pp.535-581.  
 Mei, C. C. (1989): The applied dynamics of ocean surface waves, World Scientific, pp. 464-466, 740 p.  
 Neshaei, M. A. L. (1997): A semi-empirical model for beach profile evolution in front of a partially reflective structure, Proc. of 27 th IAHR Congr., pp. 31-36.  
 Okayasu, A. (1989): Characteristics of turbulence structure and undertow in the surf zone, Ph. D Theses, Univ. of Tokyo, 119 p.  
 Rakha, K. A. and J. W. Kamphuis (1997): Wave-induced currents in the vicinity of a seawall, Coastal Engrg., Vol. 30, pp. 23-52.