

面的防御工法における岸沖方向漂砂移動制御機能に関する実験的研究

出口 一郎*・橋本 敏和**・朴 相吉***

1. ま え が き

近年、越波あるいは海岸侵食等に対する海岸防災のみならず、親水性海岸の造成という海岸利用の見地からも面的防御工法が注目を集めている。面的防御工法とは、来襲波を構造物によって直接遮閉する従来の防災工法とは異なり、海面下に面的な広がりを持つリーフ状の構造物を設置し、その法肩部で高波浪を強制的に碎波させることによって浅水域の波高及び波の打ち上げ高を低減させ、海岸防災を図ろうとする工法である。

その中でも、すでにいくつかの施工例があり、さらに現在いくつかの海岸で計画されている工法として、潜堤とその背後に施工された人工養浜から構成される人工リーフがある。自然海浜での養浜砂の挙動¹⁾、あるいは潜堤背後の二次元海浜断面変形²⁾に対しては、すでにいくつかの研究が行なわれてはいるが、現在のところ上述した人工リーフの計画断面、諸元等を決定できるほど定量的な成果は得られていない。

本研究は、この潜堤及びその背後に施工された人工養浜によって構成される人工リーフをとり上げ、まず人工リーフ周辺での碎波条件、リーフ上での波浪変形予測法等について検討を加え、ついで二次元移動床実験結果に基づいてリーフ上の侵食域の推定法及び、侵食防止と海浜利用の両面から最適と思われる人工リーフの法先水深、天端高、潜堤天端幅等に対して検討を加えることを目的としている。

2. 人工リーフ上の波浪変形予測について

まず人工リーフ周辺及びリーフ上の波浪変形に関する実験を行ない、リーフ周辺での碎波条件及び段波モデルに基づく碎波後の波浪変形予測法のリーフ上での波浪変形への適用性等について検討する。

(1) 人工リーフ上での波浪変形に対する二次元固定床実験

実験に使用した水槽は、フラップ型造波装置を持つ、

長さ 30 m、幅 70 cm、高さ 95 cm の片面ガラス張り鋼製水槽で、水槽内に設置された高さ 30 cm の水平床上に勾配 1/30 の模型海浜及び 図-1 に示す 耐水合板で作成した人工リーフ模型を設置し、所定の波浪を造波させて人工リーフ周辺の波浪変形、碎波位置等の測定を行なった。

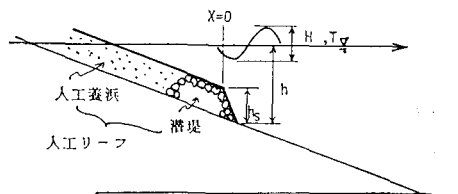


図-1 人工リーフ模型

人工リーフ模型の先端部法先水深 h は 10 cm とし、リーフ高さ h_s は $h_s/h=0.25, 0.55$ および 0.75 の 3 種類とした。また、人工リーフの勾配は既往の研究成果³⁾を参考に 1/30 とし、潜堤の沖側法勾配は 1/2 とした。

実験波は、周期 $T=0.8$ s, 1.1 s および 1.4 s の 3 種類の波浪に対して人工リーフ法先における波高 H_i が $H_i/h=0.5, 0.75$ および 0.9 となるような波浪を用いた。このうち、 $H_i/h=0.5$ および 0.75 の場合に対しては、碎波前と碎波後の波浪が入射するそれぞれ 2 種類の波浪を用いたことから、実験ケースは約 40 ケースとなる。

各ケースにおける水位変動の測定は 6 台の容量式波高計を用い、人工リーフ上汀線付近から約 6 m 沖までの間を 5~10 cm 間隔に行ない、測定された波形記録はサンプリング間隔 1/20 s で離散化し、平均水位、波高及び入射分離法による反射率の計算を行なった。碎波点位置は目視観測によって決定したが、その結果はほぼ波高分布において最高波高を示す地点と一致した。

(2) 人工リーフ周辺で生ずる碎波に対する碎波条件式について

人工リーフ周辺での波浪変形予測を行なうにあたっては、まず入射波の碎波条件を明らかにする必要がある。ここでは、従来の波浪変形予測モデルにおいてよく用い

* 正会員 工博 大阪大学工学部助教授

** 正会員 工修 大林組

*** 学生員 工修 大阪大学大学院工学研究科

られている合田の碎波条件式⁴⁾

$$\frac{H_b}{L_0} = A \left[1 - \exp \left\{ -1.5 \frac{\pi h_b}{L_0} (1 + 15i^{1/3}) \right\} \right] \dots (1)$$

を適用する．ここに H_b , h_b は碎波波高と水深, L_0 は沖波波長, i は海底勾配で, A は $0.12 \sim 0.18$ の値をとる定数である．(1) 式は一様勾配斜面上での碎波条件式として提案されたものであることから, 人工リーフ周辺で生ずる碎波に適用するにあたり, 先に述べた実験によって測定された H_b および h_b を用いて (1) 式から A の値を逆算し, それがリーフの形状によっていかなる変化を示すかということについて検討した．ただし, 入射波がリーフ沖側法面上で碎波する場合も (1) 式中の $i=1/30$ とした．その結果, A の値は入射波の波形勾配にはほとんど影響をうけず, 人工リーフより沖側で碎波する場合はほぼ 0.18 程度の値を示した．さらに, 人工リーフ上で碎波する場合は 図-2 に示すように h_s/h の増加に伴って増加し, h/L_0 の増加に伴って若干減少する傾向を示すことが明らかになった．

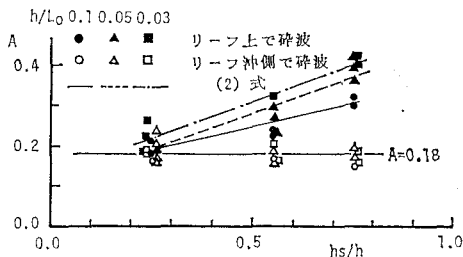


図-2 h_s/h による A の変化

図-2 より, リーフ上で碎波する場合の A に対して, $A = a(h_s/h) + b$ と表わし, 最小 2 乗法によって a および b と h/L_0 の関係を求めると図中に示す次式が得られる．

$$A = \left\{ -2.18 \left(\frac{h}{L_0} \right) + 0.45 \right\} \times \frac{h_s}{h} + \left\{ 0.107 + 0.210 \left(\frac{h}{L_0} \right) \right\} \dots (2)$$

ただし, $0.25 \leq h_s/h \leq 0.75$, $0.03 \leq h/L_0 \leq 0.10$

なお, 沖側水平床部で測定された反射率は $h_s/h \leq 0.55$ の場合は 10% 以下, $h_s/h = 0.75$ の場合も高々 15% であった．

(3) 波浪変形予測モデルの適用性について

つぎに, 従来碎波を含む浅海波の波浪変形の予測に用いられている波浪変形計算法の人工リーフ上の波浪変形への適用性について検討する．本研究においては, 碎波帯外では首藤の非線形長波理論に基づく波高変化⁵⁾の計算を行ない, 碎波点の判定には (1), (2) 式を用い, 碎波帯内では岩垣⁶⁾らのエネルギー逸散量を考慮したエネルギー保存則を用いた波高の計算を行ない, さらに水深方向に積分し時間平均をとった運動量保存則から計算さ

れる平均水位変動量とそれを考慮した波高計算を両者が収束するまで繰り返し行なった．ただし, この場合も人工リーフ沖側法勾配は便宜上 $1/30$ とし, リーフ先端部の水深急変部の波高変化を精度よく計算するため, 上述の方程式を計算する場合の差分間隔は, リーフ沖側法面上では $L_0/800$, その他の領域においては $L_0/400$ 程度に細かくとった．また, 平均水位変動量を計算する場合の radiation 応力は, 線形理論から計算される値を低減させて用いた⁷⁾．

図-3~5 は $T=1.1$ s の場合 ($h/L_0 \doteq 0.05$) の H_i/h

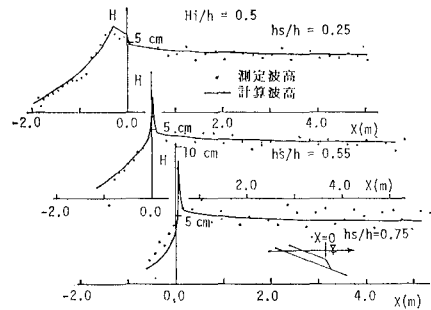


図-3 人工リーフ周辺の波浪変形 ($H_i/h=0.5$)

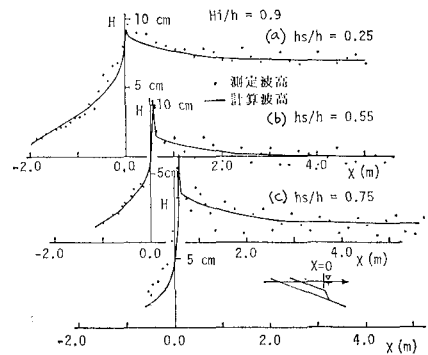


図-4 人工リーフ周辺の波浪変形 ($H_i/h=0.9$)

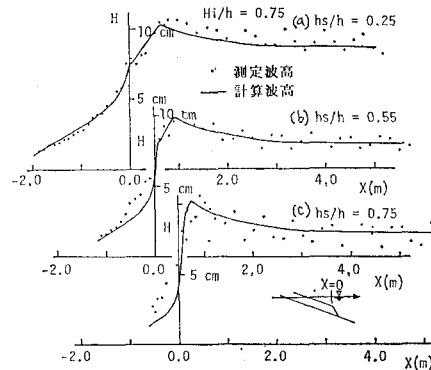


図-5 人工リーフ周辺の波浪変形 ($H_i/h=0.75$)

$h=0.5, 0.9$ (リーフ上で碎波) および 0.75 (リーフ沖側で碎波) の3ケースの実測波高と計算波高の比較を示したものであり、それぞれの図 (a) (b) (c) は $h_s/h=0.25, 0.55$ および 0.75 の場合を示している。

図 (a) に示す $h_s/h=0.25$ の場合は、 H_i/h にかかわらずリーフ上の実測波高は計算値とよい一致を示している。図 (b) に示す $h_s/h=0.55$ の場合も、リーフ上で碎波する場合は実測波高と計算波高はよい対応を示しているが、リーフ沖側で碎波する場合 (図-5) は、リーフ先端付近で計算波高の方が実測波高よりも大きな減衰を示す。図 (c) に示す $h_s/h=0.75$ とリーフ高が高い場合は、入射波高が増加し、碎波位置が沖側に移るにつれてリーフ上での計算波高は実測波高よりも大きな減衰を示し、計算の精度が低下してくる。しかし、いずれの場合も計算される碎波点と実測波高分布において最高波高を示す地点はほぼ一致している。

以上でいくつかの例を示したように、人工リーフ周辺での碎波限界の判定に対しては、人工リーフ上で強制碎波する場合も含めて (1) および (2) 式で表わされること、リーフ上で強制碎波が生じた場合でもリーフ高さが低い ($h_s/h \leq 0.55$) 場合、あるいは入射波高が大きくない ($H_i/h \leq 0.75$) 場合のリーフ上の波高分布は十分な精度で予測できることが明らかになった。しかし、リーフ沖側で碎波する場合のように、碎波帯内に水深急変部が存在する場合においては、一様勾配上の碎波によるエネルギー逸散率の表現を直接準用することには問題があるように思われる。

3. 人工リーフの断面変形及び侵食域の推定方法について

二次元移動床実験を行ない、人工リーフの侵食防止効果、断面変形の様子等を明らかにし、ついで人工リーフ上の侵食領域の推定法、侵食範囲に及ぼす人工リーフ先端水深、リーフ高さについて検討する。

(1) 人工リーフの断面変形に関する二次元移動床実験

実験は、2で述べた固定床実験と同じ水槽を用いて行ない、図-1に示す水平床上に1/10および1/30の一様勾配海浜を設置し、その上に沖側法面だけを耐水合板で作成し、その岸側に $d_{50}=0.3\text{ mm}$ の川砂をしきつめて人工リーフ模型を作成した。実験波は、先に述べた一様海浜勾配 $i=1/10$ および $1/30$ の人工リーフを設置していない自然海浜が侵食型の変形を示す $T=1.1\text{ s}$ 、沖波波高 $H_0=13.1\text{ cm}$ の波浪を用いた。リーフ先端水深は自然海浜の碎波帯内、碎波点付近及び碎波帯外をカバーする領域、リーフ高さは $i=1/10$ の場合は少なくともリーフ設置時の汀線が自然海浜の汀線より前進する範囲

($h_s/h \geq 0.7$) の13ケース、 $i=1/30$ の場合は $h_s/h \geq 0.5$ の範囲の6ケース及び人工リーフを設置していない $i=1/10, 1/30$ の自然海浜の変形に関する2ケースである。

実験は所定の位置に人工リーフ模型を設置し、抵抗式砂面計で人工リーフの初期地形を測定した後実験波を入射させ、造波開始後それぞれ 0.5 hr 、 1 hr および 2 hr 後に岸沖方向 5 cm 間隔で測定すると同時に、人工リーフ沖側法面を越えて沖側に流出した砂量の測定を行なった。また、造波開始後 0.5 hr 以内にリーフ上岸沖方向 10 cm 間隔に水位変動の測定も行なっている。

(2) 人工リーフの断面変形と養浜砂の流出量

図-6に $i=1/10$ の自然海浜の断面変形、図-7~9に $i=1/10$ 、 $h_s/h=0.7$ の場合のリーフ法先水深の異なる3ケースの人工リーフの断面変形を示す。

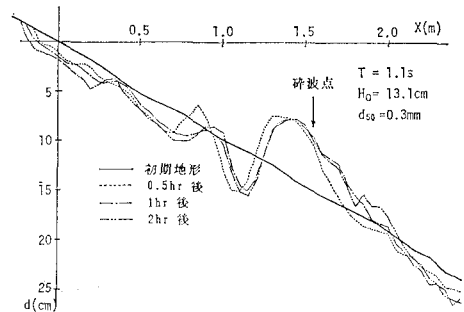


図-6 自然海浜の断面変形

まず図-6に示す自然海浜は造波開始 0.5 hr 後から汀線が後退し、碎波水付近にバーが形成される侵食型の断面変形を示している。これに対して図-7に示す碎波帯内に人工リーフを設置した場合は、人工リーフ全域が侵食をうけ、全く侵食防止機能を果たしていない。

図-8および図-9に示すように、人工リーフの設置位置を沖側に移動させるにつれて、造波開始 1 hr 経過しても汀線付近は全く侵食されず安定な海浜がされ、その領域は設置水深が沖側に移動するにつれて増加する。

一方、図-10は図-9に示す人工リーフと同一の法先水深ではあるが、リーフ高さを高く ($h_s/h=0.85$) した場合の断面変形を示したものである。この場合は図-9に示す $h_s/h=0.7$ の場合とは異なり造波開始 1 hr 後には汀線付近が大きく侵食をうけ、汀線が後退している。

しかし、いずれにしろ侵食性の波浪が入射していることから、リーフ先端部付近では大きく侵食をうけ、リーフ沖側法面を越えて沖側に土砂が流出する。以上述べた傾向は他のすべてのケースにおいても共通にみられた。

図-11は $i=1/10$ の場合の人工リーフ沖側法面を越えて、造波開始 0.5 hr 間に沖側に流出した土砂量 Q を人工リーフの初期体積量 V で無次元化して示したものである。図の横軸は人工リーフ法先の比水深 h/L_0 をと

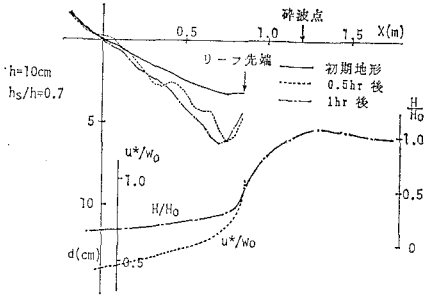


図-7 人工リーフの断面変形 ($h/L_0=0.053$, $h_s/h=0.7$)

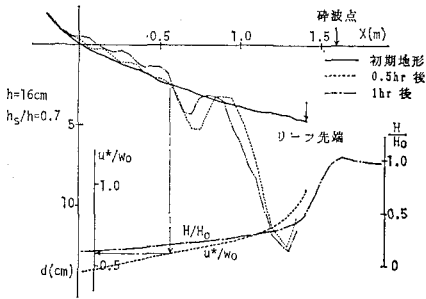


図-8 人工リーフの断面変形 ($h/L_0=0.085$, $h_s/h=0.7$)

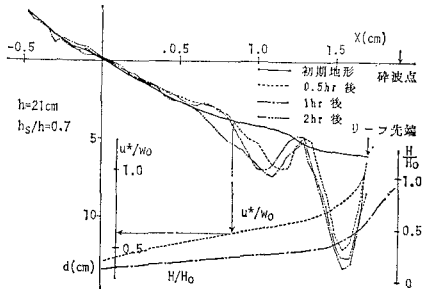


図-9 人工リーフの断面変形 ($h/L_0=0.111$, $h/h_s=0.7$)

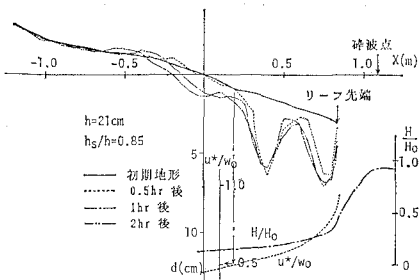


図-10 人工リーフの断面変形 ($h/L_0=0.111$, $h/h=0.85$)

って示してあるが、同図より人工リーフの設置位置が深くなればなるほど Q/V は小さくなり、またリーフ高さ h_s/h が 0.7 から 0.85 に増加すると逆に Q/V が増加す

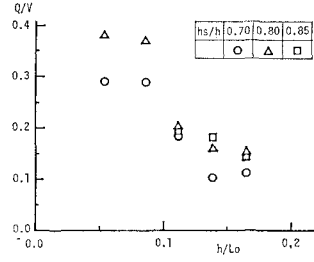


図-11 人工養浜砂の流出量

る傾向が明確に表われている。

(3) 人工リーフ上の侵食域の推定法について

ここでは、図-8～10 に数例を示したリーフ上で生ずる侵食域の大きさの推定方法について検討する。

自然海浜において生じている net の岸沖方向漂砂移動の移動方向（堆積型か侵食型か）の判定に対しては、すでに数多くの研究が行なわれており、入射波の沖波条件、海岸条件等を用いたいくつかの判定式が提案されている。しかし、人工リーフ上の波浪は自然海浜とは異なった浅水変形をうけていることから、沖波条件を用いて表現されている大部分の従来の判定式は人工リーフ上の底質移動には適用されない。一方、一般に有意な底質の浮遊が生じた場合に離岸方向の net の漂砂移動が顕著になり、また、底質の浮遊限界あるいは浮遊砂量は u_*/w_0 (u_* : 摩擦速度, w_0 : 底質の沈降速度) によって決定されることはよく知られており、実験的に確認もされている。そこで、これらの図に示される人工リーフ上の侵食域が u_*/w_0 のいかなる値に対応しているかということについて検討した。ただし、先に述べた実験結果に基づき、砕波帯内に人工リーフを設置した 5 ケースについては、検討の対象から除外した。

u_* の計算は、Jonsson が提案した摩擦係数 f_w を用いた次式に基づいて行なった。

$$u_* = \sqrt{f_w/2} \cdot u_{bm} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに u_{bm} は底部における最大水粒子速度で、ここでは平均水位変動量 $\bar{\eta}$ を考慮した線形長波理論に基づく

$$u_{bm} = \sqrt{g(d+\bar{\eta})} \times (H/2) \quad \dots\dots\dots (4)$$

から計算した。ここに d は水深で H および $\bar{\eta}$ は 2. で述べた方法で計算された値を用いた。また、 f_w に対しては Swart⁸⁾ が提案した近似式

$$f_w = \exp \left\{ -5.977 + 5.213 \left(\frac{am}{k_s} \right)^{-0.194} \right\} \quad \dots\dots (5)$$

を使用した。ここに $am = \sqrt{g(h+\bar{\eta})} \times (HT/4\pi)$ で、 k_s については $k_s = 2 \times d_{90}^{0.9}$ とした。ただし、本実験に使用した底質砂の d_{90} は 0.5 mm で、 w_0 の計算には Rubey の式を用いた。

図-8～10 には、2. で述べた方法で計算された波高お

よび上述の方法で計算された u_*/w_0 の岸沖方向分布もそれぞれ破線と一点鎖線で示してある。

これらの図から、図中矢印で示してあるように、各ケースにおける顕著な侵食域に対応する $(u_*/w_0)_{cr}$ を読み取った。リーフ設置水深に対する $(u_*/w_0)_{cr}$ の値を示したのが図-12である。侵食域の決定方法には若干の任意性は残るものの $h_s/h \leq 0.7$ の場合の $(u_*/w_0)_{cr}$ は 0.6, $0.8 \leq h_s/h \leq 0.85$ の場合の $(u_*/w_0)_{cr}$ は 0.5 程度の値をとれば、侵食領域に対する危険側の推定が行なえるものと思われる。

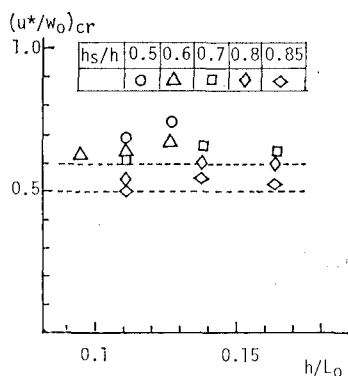


図-12 侵食限界の $(u_*/w_0)_{cr}$

図-13 はこれらの $(u_*/w_0)_{cr}$ を用いて推定される侵食領域の長さ $X_{cal.}$ と実測された侵食域の長さ $X_{mea.}$ の比較をそれぞれ人工リーフの長さ(初期汀線からリーフ沖側法肩までの長さ) X_0 で無次元化して示したものである。

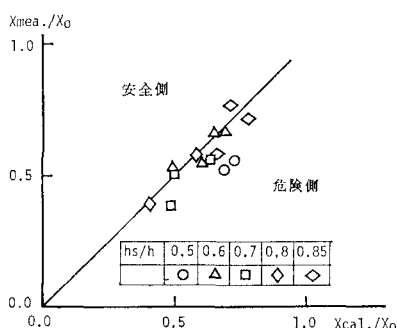


図-13 侵食領域長さの比較

図中に示す直線の右下の領域は推定される侵食域の長さが危険側の推定値であることを示す。したがって、図-13 より明らかなように先に示した $(u_*/w_0)_{cr}$ から推定されるリーフ上での侵食領域は、若干危険側の推定値を与えていることがわかる。

以上で考察したように、人工リーフ上の波浪変形モデ

ル及び線形理論から計算される u_*/w_0 の値を用いて、人工リーフ上の侵食域の推定が可能であることがわかった。しかし、(3) 式の摩擦速度、すなわち u_*/w_0 には、碎波の乱れが底質移動に及ぼす影響は考慮されていない。

一方、このような侵食領域の大きさは、人工リーフ先端の潜堤の天端幅を決定する重要な factor となるが、そこでは強制碎波によって生ずる乱れによる底質移動が重要な役割をはたしているものと推定される。したがって、人工リーフ上の底質の流出に対して有効な潜堤の天端幅を決定するためには、底質の移動しやすさとそれに対する碎波によって生ずる乱れの相対的な強さの無次元表示が必要となる。現在さらにそうした点について研究を継続中である。

4. おわりに

潜堤とその背後に施工された人工養浜から構成される人工リーフ上の碎波変形を含む波浪変形予測法を提案し、その適用性及び問題点等を明らかにした。さらに、その結果を用いて人工リーフ上の侵食領域の推定法に対して検討を加えた。今後そうした結果の現地海岸への適用性等に対する検討を加えることによって、人工リーフの最適形状設計法の確立を図るつもりである。

最後に本研究を行なうにあたり、有益な指導及び助言をいただいた大阪大学工学部榎木亨教授に深甚の謝意を表するものである。

参考文献

- 1) 砂村継夫：養浜工法，砂浜決壊の防止工法とその適用性に関する研究，文部省科学研員・自然災害科学特別研究(代表者尾崎晃) 成果 No. A-59-1, pp. 75~91, 1984.
- 2) 田中則男：天端幅の広い潜堤の波浪減殺および砂浜安定効果について，第23回海岸工学講演会論文集，pp. 152~157, 1976.
- 3) 運輸省港湾局，人工海浜建設技術開発ワーキンググループ：人工海浜の建設技術マニュアル，p. 110, 昭和54年3月
- 4) 合田良実：碎波指標の整理について，土木学会論文報告集，第180号，pp. 3949, 1970.
- 5) 首藤伸夫：非線型長波の変形，第21回海岸工学講演会論文集，pp. 57~63, 1974.
- 6) 岩垣雄一・間瀬 肇・田中 剛：浅海域における不規則波の波高変化に関する研究，京大防災研年報第24号 B-2, 1981.
- 7) Sawaragi, T., I. Deguchi and K. Kim: Energy loss and wave set up due breaking waves, Tech. Rept. of the Osaka Univ., Vol. 34, No. 1779, pp. 329~338, 1984.
- 8) Swart, D. H.: Offshore sediment transport equilibrium beach profiles, Delft Univ. Tech. Diss., Delft Hydr. Lab. Publ., 131, 1974.
- 9) Kamphuis, J. W.: Friction factor under oscillatory waves, Proc. ASCE, Jour. of W.H.O. Div. 101, No. ww2, pp. 135~144, 1975.