

# 屈折効果を利用した縦型人工リーフシステムの特性について

合田良実<sup>1</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 工博 横浜国立大学 名譽教授 (株)エコー 顧問  
(〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

縦型人工リーフシステムは、細長い潜堤を汀線と直角に複数基を配置した新形式の人工リーフである。先端部および縦斜面による波の屈折作用によって天端上の波高を増大させ、波を効果的に碎かせて減衰させる機能を持つ。この新システムについては、これまでに小規模の室内模型実験および数值計算によってその特性を検討してきた。リーフシステム周辺の波高分布などが算定可能となり、これまでの横型人工リーフに対する優位性が例証された。しかし、これを実用化するにはさらに大規模の模型実験等が必要であるため、これまでの研究成果を取りまとめ、今後の開発の参考に供するものである。

**Key Words :** Artificial reefs, longitudinal reef system, wave attenuation, wave-induced currents, parabolic equation, refraction effects.

## 1. まえがき

わが国の海岸の多くは、恒常的な漂砂の供給不足に起因する海岸侵食に苦しめられている。このため、各地でいろいろな海岸保全対策を講じてきており、なかでも近年は離岸堤の施工事例が増えている。特に、1999年の海岸法の改正において離岸堤と砂浜が海岸保全施設として位置付けられたことにより、離岸堤がさらに数多く建設されるものと予想される。

もっとも、標準型の離岸堤は天端が海面上に現れているため、なぎさを散策する人々からは海の眺めを阻害するとして嫌われる。このため、最近は天端を海面下1~2mに抑え、幅を数十mに広げた人工リーフ（幅広潜堤）が好まれるようになっている。本論文では、以下に紹介する新形式の人工リーフと区別するために、これを横型人工リーフと呼ぶ。

横型人工リーフについては宇多ほか<sup>1)</sup>が提唱して以来、数多くの実験や現地観測が行われてきた。波浪減衰は天端上での碎波、リーフ透水層内の流体抵抗、天端表面の摩擦抵抗などによるもので、なかでも碎波減衰が主役である。大中・吉沢<sup>2)</sup>が神奈川県湯河原海岸の人工リーフで観測した事例では、当初の幅32mから幅70mに拡幅されたことによる波高伝達率の低下が1~2割程度と報告されている。

自然の岩礁地帯を観察すると、波は屈折しながら

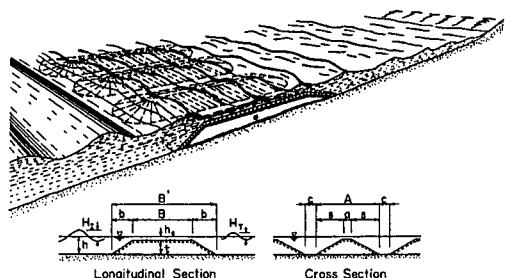


図-1 縦型人工リーフの概念図

岩礁上に寄り集まり、そこで効率よく碎波させられている。人工リーフにおいてもこうした波の屈折効果を利用することによって、碎波減衰機能をいつそう高めることが期待される。著者はこうした観点から縦型傾斜式離岸堤と称する形式の人工リーフを提唱し、いろいろ研究を行ってきた<sup>3)~8)</sup>。このリーフは図-1に示すように、潜堤を汀線と直角に複数基配置したシステムである。波は先端の半円球状の地形による屈折だけでなく、縦斜面によっても屈折し、天端上へ波高が集中する。このため、横型人工リーフよりも低い入射波高で碎波減衰が生じる。

本論文では、簡単のためにこれを縦型人工リーフシステムと呼ぶ。図中の記号に示すように、aは波

の進行方向から見た天端長,  $B$  は波の進行方向の天端幅,  $b$  は前後斜面の投影長,  $s$  は縦斜面の投影幅,  $c$  は海底面での潜堤間の間隙長,  $h_c$  は天端水深,  $h$  は水深,  $t$  は潜堤の高さである。

この縦型リーフは、通常の横型リーフに比べて反射率およびシステム背後の水位上昇が小さい特長がある。予備的実験<sup>3)</sup>では反射率が 5% 前後、水位上昇が波高の 0~4% の結果が得られている。また小型の舟が潜堤間を通航できるので、斜面や天端を利用した海藻・草の育成など水産協調型施設としても利用可能である。さらに、作業船も潜堤間の水域に係留できるので、天端被覆材の据付・補修なども容易であり、天端の一部を干潮面以上に高めることも可能である。

しかしながら、この縦型人工リーフを実際の海岸に適用するまでには、後述する模型縮尺のその他の諸問題を解決しなければならず、大規模模型実験が可能な組織に今後の開発を委ねざるを得ない。そのため、未だ検討不十分な項目が若干残るもの、これまでの成果をひとまとめ、今後の実用研究の参考に供する次第である。

## 2. 特殊形状の人工リーフに関する既往研究

波の屈折現象を利用して碎波を促進する試みとしては、今井ほかの研究<sup>9)</sup>がまず挙げられる。これは潜堤ではないが、クレセント型の没水水平板の背後で波高が高まることを数値計算と実験で確認しており、海域制御施設の開発研究の一つである。

次には、平沢ほか<sup>10)</sup>が横型人工リーフの左右約 1/4 を平均水面上に高めた複合型人工リーフについて研究した。これは、リーフの一部を干出させることで周辺を航行する漁船の座礁を予防するとともに、循環流を積極的に発生させて水産物増殖に役立てようとするものである。

武若・入江ほか<sup>11)~13)</sup>は直角三角形状の潜堤をテーカー型潜堤と呼び、波向、沿岸流、および海浜地形を制御する可能性を検討した。三角形の潜堤は、斜辺を冲側に置き、長辺を等深線に平行に配置する。

これに対して渡辺・磯部のグループ<sup>14), 15)</sup>は、三角形の斜辺を岸側に置き、波が潜堤上から出るときに全反射を起こすことで透過波が小さくなる効果を狙っている。

また鈴木ほか<sup>16)</sup>は、多数の三角形状の潜堤を沿岸に平行に配置し、フレネルレンズと類似の屈折機能を発揮させて波向を汀線に垂直に偏向させることを狙い、これをフレネル潜堤と呼んだ。

一方、中野ほか<sup>17), 18)</sup>は波を集中させてサーフィンに適した碎波条件を造り出すことを目的として、銳角の二等辺三角形状の潜堤を沖へ向けて配置することを検討しており、デルタ型リーフと称している。

このように、通常の横型人工リーフの性能を向上させる試みは数多くなされている。水理模型実験で水理特性を把握しつつ、数値解析で機能を確認するものが多い。ただし、平沢ほか<sup>10)</sup>の複合型人工リーフが北海道の胆振海岸を対象としたのを除くと、本論文で紹介する縦型人工リーフを含め、いずれも研究室での構想にとどまっている。

## 3. 縦型人工リーフ周辺の波浪変形の解析

### (1) 波動方程式の選択

人工リーフの性能検討では、まず最初にリーフ周辺の波浪変形を解析しなければならない。その結果を基にラディエーション応力を計算し、水位変化と海浜流を算出する。これまでの諸研究では、緩勾配方程式<sup>17)</sup>、放物型方程式<sup>10), 12)</sup>、強非線形・強分散性波動方程式<sup>15)</sup>、ブーシネスク方程式<sup>16)</sup>その他が使用されている。

波動方程式の選択に際しては、次のような要件を考慮する必要がある。

①波浪変形の予測精度が高く、水理模型実験との整合性がよいこと。

②複数の形状の性能比較が容易に行えるように、計算時間が少なくて済むこと。

③実際問題への対応を考慮し、不規則波の計算が可能であること。

④波の非線形性も取り込み可能のこと。

これらの要件を全て同時に満足させることはむずかしい。波動方程式の選択は、現時点では研究者の主観的判断に委ねられている。現象の再現性にもっとも優れているのはブーシネスク方程式と思われるけれども、平面地形に不規則波を作用させる場合には計算時間が非常に長くなり、一般的とはいえない。本研究では、平口・丸山<sup>19), 20)</sup>による以下の放物型方程式を基本に用いた。この方法は、斜め入射波による屈折効果を的確に表現できることが特長である

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \left\{ i \left( k_x + \frac{k_y^2}{2k_x} \right) - \frac{1}{2k_x c c_k} \frac{\partial}{\partial x} (k_x c c_k) \right\} \phi + \frac{i}{2k_x c c_k} \frac{\partial}{\partial y} \left( c c_k \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) - f_D \phi \quad (1)$$

ここに、 $\phi$  は速度ポテンシャル、 $k_x$ ,  $k_y$  は  $x$ ,  $y$  方向

の波数,  $c$  は波速,  $c_g$  は群速度,  $i$  は虚数である。また,  $f_D$  は碎波減衰を表す関数である。本研究では、人工リーフ上の波の減衰は碎波によるものが支配的であると判断し、リーフ透水層内のエネルギー減衰は無視している。

## (2) 波速・波数に対する非線形補正

放物型方程式による数値計算は、まず縦型潜堤が無限個並んでいるところへ波が正面から入射する場合を想定し、その1基を取りだした形を対象とした。2次元造波水路を用いてその中央に潜堤1基を縦に配置すると、水路両側壁が鏡面となるので無限個配列と同等となる。

縦型人工リーフは、潜堤中心間隔 ( $A+c$ =水路幅) 60cm, 天端長  $a=10\text{cm}$ , 底面間隔  $c=0\text{cm}$ , 天端幅  $B=100\text{cm}$ , 水深  $h=12\text{cm}$ , 天端水深  $h_c=2.0\text{cm}$ , 前後斜面の勾配 1/2, 縦斜面の勾配 1/2.5 を基本とし、波高 2.6~4.6cm, 周期 0.7~1.4s の波を対象とした。模型縮尺を 1/50 に想定すると、水深 5.0m, 天端幅 50m, 波高 1.3~2.4m, 周期 5~9s の条件に相当する。

人工リーフの模型はふるい目 20~30mm 通過の碎石を中詰めとして整形し、表面には波で崩されないように大きめの碎石を敷き並べた。

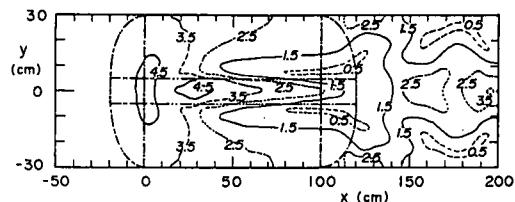
模型リーフに規則波を作用させて観察していると、リーフの天端上では水深が小さいにもかかわらず、波峰が大きな速度で前進する。特に、波が碎けるときには、縦斜面の上の波峰よりも前方に突出する。これは波速が水深だけではなくて波高の影響も受けているためである。微小振幅波の波速を計算に用いると屈折による波の集中効果が実験よりも過大に現れる。この波速  $c$  に対する非線形効果の補正法として、次の修正式を試行錯誤によって設定した<sup>4)</sup>。

$$c = \begin{cases} c_A \left[ 1 + \frac{3}{8} \left( \frac{H}{h} \right)^2 \right]^{1/2} & : H < 2h \\ c_A \left[ 1 + \frac{3}{8} \left( \frac{H}{h} \right) \right]^{1/2} & : H \geq 2h \end{cases} \quad (2)$$

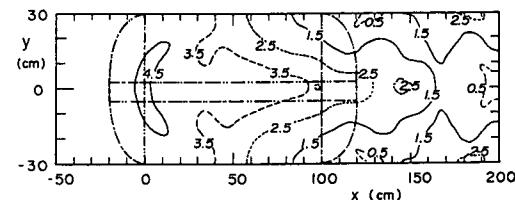
上式の  $c_A$  は微小振幅波理論による波速、 $H$  と  $h$  は各地点の波高と水深である。 $H < 2h$  の領域における関数形は 3 次近似ストークス波の波速式を採用し、係数の 3/8 は実験値と照合して設定した。

波数  $k_x$ ,  $k_y$  は微小振幅波の値を波速増大率で除することで非線形効果の補正とした。ただし、群速度については未補正のままとした。

式 (2) による波速の補正効果を示す数値計算の



(a) 非線形効果未補正の場合



(b) 非線形効果を補正した場合

図-2 縦型人工リーフ周辺の規則波の等波高線図(単位はcm) :  $h_c=2.0\text{cm}$ ,  $H_i=4.2\text{cm}$ ,  $T=0.747\text{s}$

例が図-2である。上段は未補正の場合で、等波高線(単位はcm)が局部的に大きく変化し、天端後端の両側に波高の極小部分が現れる。これに対して波速を式(2)で補正して計算すると下段のようになり、屈折による波の集中が過度に現れることがなく、水理実験で観測される傾向と合致する。なお、数値計算の格子間隔は、 $\Delta x = \Delta y = 2.5\text{cm}$ である。縦型リーフの天端先端は  $x = 0\text{cm}$ 、後端は  $x = 100\text{cm}$ に位置しており、 $y = \pm 30\text{cm}$ は水路側壁である。また、図中の  $x$ ,  $y$  座標は縮尺がやや異なっている。

## (3) 碎波減衰項の取り扱い

人工リーフの研究では、碎波による波エネルギーの減衰を的確に評価することがもつともむずかしい。一様斜面上での碎波でさえも基本的には実験で解明するほかはなく、最近の数値解析であっても実験データに依存するところが大きい。人工リーフのような急変地形での碎波限界および碎波後の波高減衰率については、模型実験の結果に合わせて碎波減衰項を設定せざるを得ない。これまでの諸研究においても統一的な表式は得られていない。

平口・丸山<sup>19)</sup>が放物型方程式を提案したときには地形変化が緩やかな場合を想定し、渡辺・丸山の研究<sup>20)</sup>を参照して碎波減衰関数  $f_D$  を次のように設定した。

$$f_D = \begin{cases} 0 & : \text{碎波帶外} \\ \frac{\alpha_D S_D}{2h} \left[ \left( \frac{H}{y h} \right) - 1 \right]^{1/2} & : \text{碎波帶内} \end{cases} \quad (3)$$

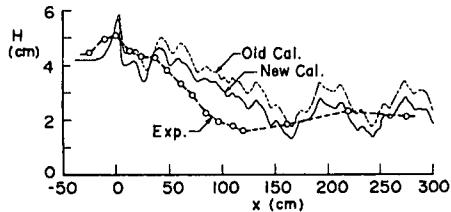


図-3 人工リーフ中心軸上の規則波の波高分布に及ぼす碎波減衰関数の影響： $h_c = 2.0\text{cm}$ ,  $H_i = 4.2\text{cm}$ ,  $T = 1.17\text{s}$

ここに、 $\alpha_D$ は碎波減衰係数、 $S_D$ は海底勾配、 $\gamma$ は碎波限界波高と水深との比率である。

この式(3)の関数を用いた計算値を実験結果と比べると、碎波直後の波高減衰の度合いが弱い傾向がある。このため、Dallyほか<sup>22)</sup>の考え方を参考し、次式のように修正した関数を採用した<sup>4)</sup>。

$$f_D = \begin{cases} 0 & : H < \gamma h \\ \frac{K}{2h} \left[ \left( \frac{H}{\gamma h} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} & : H \geq \gamma h \end{cases} \quad (4)$$

なお、式(3)中に現れる海底勾配 $S_D$ は、人工リーフのような急変地形については定義が困難であつて本来の意味を失っている。そこで係数 $\alpha_D$ と合わせて新しい係数 $K$ に一本化し、水理実験結果と比較的よく対応する値として $K = 0.125$ と定めた。この値は、Dallyほか<sup>21)</sup>が斜面および水平床上の碎波減衰に対して採択した $K = 0.15$ に近い。

さらに、碎波限界波高水深比 $\gamma$ についてこれまでの研究では一定値とする例が多い。しかし碎波限界は水深波長比によって変化するので、本研究では合田<sup>23)</sup>の碎波指標式を導入して次のように設定した。

$$\gamma = 0.17 \frac{L_0}{h} \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{1.5\pi h}{L_0} (1 + 15 \tan^{4/3} \theta) \right] \right\} \quad (5)$$

ここに $L_0$ は深海波長、 $\tan \theta$ は海底勾配である。人工リーフの天端上に対しては換算勾配の意味を持たせ、実験結果を参照して $\tan \theta = 1/30$ を標準として使用している。 $\gamma$ の絶対値としては $0.8 \sim 0.9$ である。二次元の矩形ステップ上の碎波限界である $\gamma \approx 0.6$ の値<sup>24)</sup>と比べて大きいのは、三次元地形の影響と考えられる。

こうした碎波減衰項の妥当性を水理実験結果で検証した例が図-3である。縦型人工リーフの天端中心軸沿いの波高分布の実験と数値計算結果を示している。図中のOld Cal.と記した細破線は式(3)，

New Cal.と記した細実線は式(4)の碎波減衰関数による結果である。波は規則波で、入射波高 $H_i = 4.2\text{cm}$ 、周期 $T = 1.17\text{s}$ である。なお、天端水深は $h_c = 2.0\text{cm}$ であり、数値計算では碎波限界指標として $\gamma = 1.1$ とやや大きめの値を式(3), (4)ともに使用した。二つの碎波減衰関数の差はあまり大きくなないが、式(4)のほうが実験値に近い結果を与えており、こうした結果から、以下ではすべて式(4)を用いて碎波減衰を評価している。

#### (4) 不規則波に対する計算

人工リーフによる波の変形は天端上の碎波による効果が大きく、周期の影響はやや小さい。このため、波のエネルギーの周波数帯域での広がりよりも個々の波高と水深との比率の頻度分布が大きな影響を持つ。したがって、不規則波に対しては波高の出現確率を考慮した重ね合わせ計算を行うのが順当である。具体的には、不規則入射波の波高がレーリー分布に従うと仮定し、不規則波群を出現確率が等しい波高区間に分割する。各区間の波高代表値は次式で選定される。

$$H_m = 0.706(H_{1/3})_j \left[ \ln \frac{2N}{2m-1} \right]^{1/2} \quad (6)$$

ここに $N$ は区間数、 $m$ は波高の大きい方からの区間番号である。本研究では $N = 30$ を使用している。

数値計算では各代表波高毎に規則波としての計算を行い、その結果を計算地点ごとにエネルギー合成する。たとえば、1/10最大波高であれば上位 $N/10$ の結果の2乗平均平方根値をとり、有義波高であれば上位 $N/3$ を平均する。

不規則波に対する縦型人工リーフの実験は、図-2, 3と同じ形状で2次元造波水路で行った。表-1は実験条件と波高伝達率の結果を示している。また、図-4はこのうちのCase BとEについて等波高比線の分布を実験と数値計算について示したものである。上段は実験結果、下段は数値計算である。この図に示すように、波高は空間的な変化が大きい。このため、リーフ背後の波高の代表値としては、リーフ背後の長さ $1.0 \sim 2.0\text{m}$ の範囲の有義波高の測定値・計算値の2乗平均平方根値を用い、この代表波高の入射波高に対する比で波高伝達率を定義した。

表-1では波高伝達率の計算値が実験値とほぼ一致しており、本研究で採択した数値計算法が妥当であることを示している。なお、Case Aで実験値が計算値よりも2割近く小さいのは、計算で無視したリーフ内部の流体抵抗および碎石表面の摩擦損失による影響と考えられる。

表-1 不規則波に対する縦型リーフの波高伝達率

Case	$h_c$ (cm)	$(H_{1/3})_I$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	$K_T$	Exper.	Comp.
A	4.0	2.58	0.96	0.729	0.927	
B	4.0	4.57	0.98	0.666	0.711	
C	2.0	3.64	0.83	0.482	0.437	
D	2.0	3.32	1.09	0.561	0.533	
E	2.0	3.72	1.27	0.557	0.539	

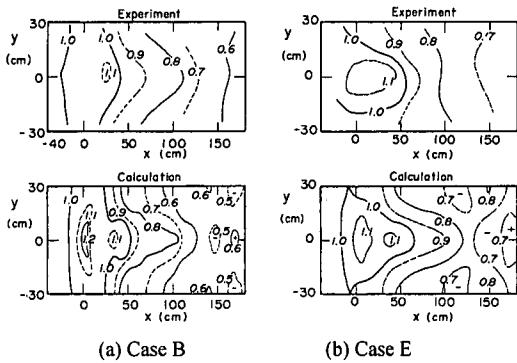


図-4 実験および計算による不規則波の等波高比線図

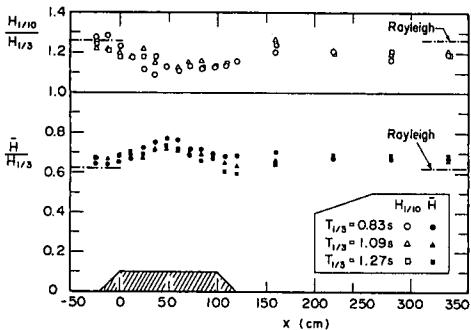


図-5 縦型リーフ中心軸上の波高比の変化

:  $h_c = 2.0\text{cm}$ ,  $(H_{1/3})_I = 3.3 \sim 3.7\text{cm}$

なお、不規則波では波高の大きな波ほど碎波減衰の影響を強く受けるため、波群中の波高分布が変化する。図-5は、縦型人工リーフの中心軸上の測点における波高比  $H_{1/10}/H_{1/3}$  と  $H_{1/3}/H$  の実験値を、Case C, D, Eについてまとめて表示したものである。リーフの天端上では波高分布の幅が狭まり、1/10最大波高  $H_{1/10}$ 、有義波高  $H_{1/3}$ 、および平均波高  $H$  の差が縮まって波高比が 1.0 に近づく。しかしリーフの背後では本来のレーリー分布の比率に戻っていく。波高区間の重ね合わせ方式による数値計算でもこうした傾向が認められたけれども、局所的な変動が大きいために実験値ほど明確ではなかった。

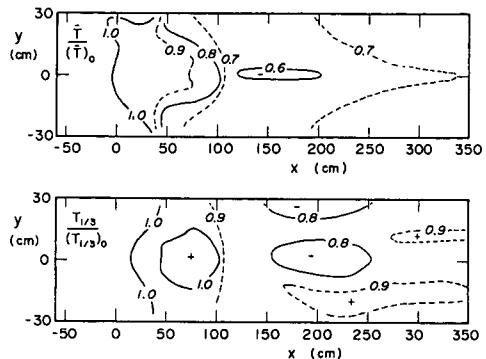


図-6 縦型リーフ周辺における周期の変化

:  $h_c = 2.0\text{cm}$ ,  $(H_{1/3})_I = 3.7\text{cm}$ ,  $T_{1/3} = 1.27\text{s}$

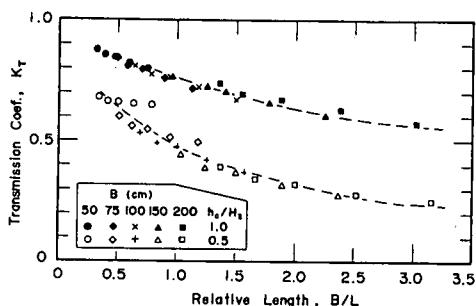


図-7 縦型リーフの波高伝達率  $K_T$  と相対天端幅  $B/L$  の関係 :  $(H_{1/3})_I = 4.0\text{cm}$ ,  $T_{1/3} = 0.7 \sim 1.4\text{s}$

### (5) 不規則波の周期変化

さらに、不規則波では代表周期もまた変化する。これは急変地形上で波の分裂が起きるためである。今回の数値計算では再現できないが、実験では明瞭に現れた。図-6は Case E の結果であり、上段は平均周期  $T$  の変化、下段は有義波周期  $T_{1/3}$  の変化を示す。人工リーフの背後では周期が短かくなっている。この変化は平均周期のほうが著しい。

### (6) 天端幅と波高伝達率の関係

縦型人工リーフは天端幅  $B$  が増すにつれて波浪減衰の度合が強まる。水理実験は  $B = 100\text{cm}$  のケースしか行っていないが、表-1や図-4に示すように数値計算はこうした実験結果を順当に再現していると判断されるので、数値計算に基づいて天端幅の効果を検討した。

縦型人工リーフの堤高は  $t = 10\text{cm}$  に固定し、水位を変えることで天端水深を  $h_c = 2.0\text{cm}$  と  $4.0\text{cm}$  の2種類とした。波は入射波高を  $(H_{1/3})_I = 4.0\text{cm}$  に固定し、周期を  $T_{1/3} = 0.7 \sim 1.4\text{s}$  の5通りとした。そして

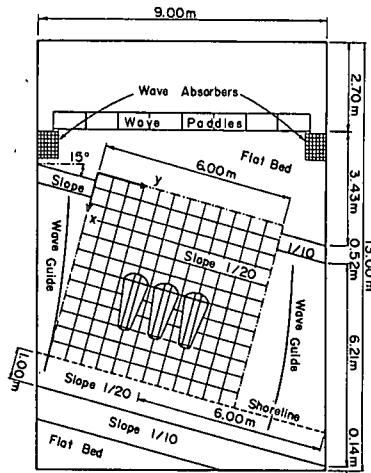


図-8 平面実験用の水槽とリーフ模型の配置

天端幅を  $B = 50\sim 200\text{cm}$  の範囲で 5 段階に設定した。波高伝達率は、リーフ後端から  $0.5\sim 1.5\text{m}$  の長さ  $1.0\text{m}$  の範囲の有義波高の 2 乗平均平方根値を用いて定義した。

波高伝達率の計算結果は、図-7 に示すとおりである。図中の  $L$  はリーフ設置水深における微小振幅波の波長である。波高伝達率  $K_T$  は天端幅および周期の絶対値にかかわりなく、相対天端水深  $h_c/H_t = 0.5$  および  $1.0$  の値ごとにそれぞれ 1 本の曲線にはほぼ乗っている。すなわち、縦型人工リーフの波浪減衰機能は相対天端水深  $h_c/H_t$  と相対天端幅  $B/L$  の二つのパラメータによって支配されるといえる。

#### 4. 複数基配置の縦型人工リーフの特性

##### (1) 平面模型実験水槽とリーフ模型

前節の検討によって、縦型リーフが無限個並んだところへ波が正面から入射する場合の波浪減衰機能は明らかになった。そこで、もう少し現実的な状況として、縦型リーフが 3 基配置されたところへ波がやや斜めから入射する状況を対象とし、平面造波水槽での水理実験と数値計算を行った<sup>6)</sup>。

実験水槽と模型リーフの配置は図-8 に示すとおりである。幅  $9.0\text{m}$ 、長さ  $13.0\text{m}$  の屋外水槽内に造波板と  $15^\circ$  の角度を付けて勾配  $1/20$  のモルタル斜面を法面長  $6.0\text{m}$  にわたって敷きならした。その先端は取り付けの関係で法面長  $0.5\text{m}$  の勾配  $1/10$  斜面とした。また、 $1/20$  勾配斜面の後端の岸側は勾配  $1/10$  のモルタル斜面とした。実験はすべて造波板前

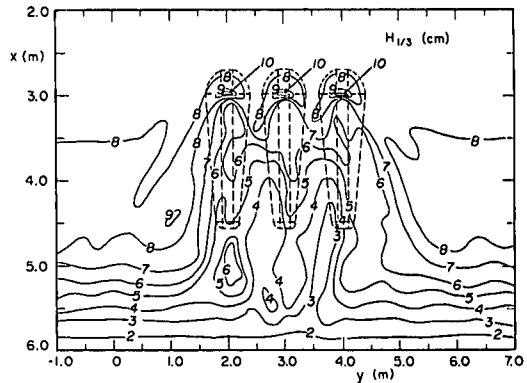


図-9 縦型リーフシステム周辺の不規則波Aの波高分布の計算結果: ( $H_{1/3}$ )<sub>i</sub> = 7.5cm,  $T_{1/3} = 1.2\text{s}$

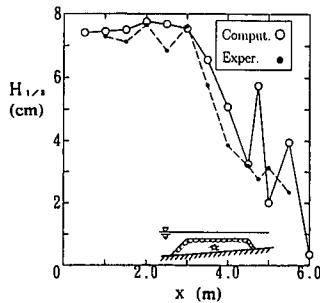
面の水平床部分の水深を  $0.3\text{m}$  に設定して行った。したがって、汀線は勾配  $1/20$  斜面と  $1/10$  斜面の接続部から造波板側へ  $1.0\text{m}$  下がった位置にある。水槽内の模型配置などについては、勾配  $1/20$  斜面を仮想的に延長して水平床と交差する線を  $x$  軸とし、それと直交する  $y$  軸を設定し、この直交座標で説明する。

縦型人工リーフの模型は 3 基とし、天端水深  $h_c = 3\text{cm}$ 、天端長  $a = 10\text{cm}$ 、天端幅  $B = 150\text{cm}$  とし、粒径  $30\sim 50\text{mm}$  の碎石で形作った。ただし、作業効率を上げるために内部には粒径  $100\sim 150\text{mm}$  の大型碎石も使用した。前後斜面の勾配は  $1/2$ 、縦斜面の勾配は  $1/2.5$  である。3 基のリーフは、頂部の前端を  $x = 3.0\text{m}$  (水深  $15\text{cm}$ ) の位置に揃えて設置した。人工リーフの底面の長さは設置斜面の勾配が  $1/20$  と急なために、前端と後端で異なり、前は  $A = a + 2s = 80\text{cm}$ 、後ろは  $A = 42\text{cm}$  となった。3 基のリーフは中心軸間隔を  $A + c = 100\text{cm}$  として設置した。

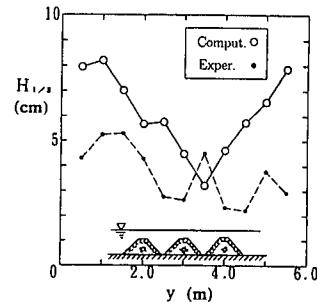
実験には、有義波高 ( $H_{1/3}$ )<sub>i</sub> =  $7.5\text{cm}$  で周期  $T_{1/3} = 1.2\text{s}$  の不規則波 A、および有義波高  $5.5\text{cm}$  で周期  $1.6\text{s}$  の不規則波 B の 2 種類を用い、数値計算も同じ条件で実行した。この 2 種類の波は、斜め斜面を持つ水槽内で発生させた波のうちで安定性に優っていたものである。なお、測定領域の両側の導波板は、発生波の屈折状況を観察しながら妥当と思われる位置に固定した。

##### (2) 波高分布

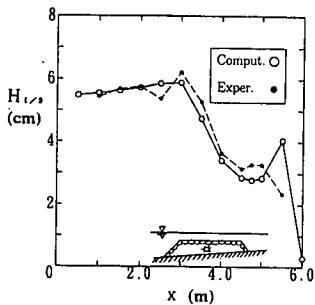
放物型方程式による不規則波の波高分布の計算は前節に述べた方法のままである。入射角として水深  $30\text{cm}$  の沖側境界で  $15^\circ$  を入力しただけである。なお、格子間隔は計算領域が広いことを考えて  $\Delta x = \Delta y = 0.1\text{m}$  とし、沿岸方向に 85 格子、岸沖方向に 60



(a) 不規則波A :  $(H_{1/3})_I = 7.5\text{cm}$ ,  $T_{1/3} = 1.2\text{s}$



(a) 不規則波A :  $(H_{1/3})_I = 7.5\text{cm}$ ,  $T_{1/3} = 1.2\text{s}$



(b) 不規則波B :  $(H_{1/3})_I = 5.5\text{cm}$ ,  $T_{1/3} = 1.6\text{s}$

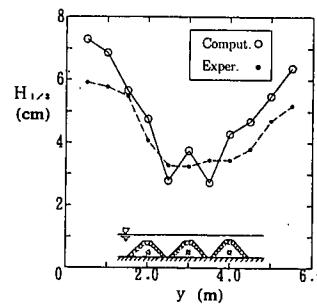
図-10 縦型リーフシステムの岸沖方向 ( $y = 2.5\text{m}$ ) の波高分布

格子を設定した。

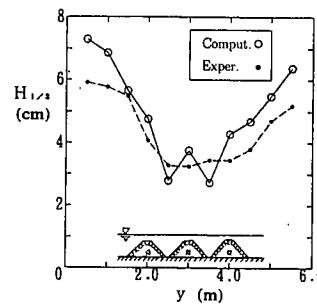
図-9は数値計算で得られた縦型リーフシステム周辺の波高分布の例であり、 $(H_{1/3})_I = 7.5\text{cm}$ ,  $T_{1/3} = 1.2\text{s}$ の場合である。リーフ先端部で波高が急増してから落ち込み、リーフシステム背後の波高が低減している状況が伺える。また、波は図の左上方から入射しており、リーフシステムの右側がやや静穏になっている。なお、図の縦軸は横軸よりも長く引き伸ばされているので注意されたい。

こうした波高の平面分布のうち、左から1番目と2番目のリーフの間の  $y = 2.5\text{m}$  の線に沿って岸沖方向の波高分布を実験と計算で比較したのが図-10である。上段が不規則波A、下段が不規則波Bであり、黒丸が実験、白丸が計算である。また、リーフシステム背後の  $x = 4.75\text{m}$  (リーフ頂部の後端から0.25m) の線上に沿って沿岸方向の波高分布を実験と計算で比較したのは図-11である。

縦型リーフ間の岸沖方向の波高分布は、図-10に見られるように実験値と計算結果がかなりよく一致している。沿岸方向の分布はリーフシステムの外側の計算値が過大であり、図-11(a)のケースで顕著



(a) 不規則波A :  $(H_{1/3})_I = 7.5\text{cm}$ ,  $T_{1/3} = 1.2\text{s}$



(b) 不規則波B :  $(H_{1/3})_I = 5.5\text{cm}$ ,  $T_{1/3} = 1.6\text{s}$

図-11 縦型リーフシステムの沿岸方向 ( $x = 4.75\text{m}$ ) の波高分布

に現れている。この差異は、式(4)の波高減衰関数の持つ問題点が、式(6)の波高重ね合わせ方式と組み合わせたことで顕在化したものと考えられる。

すなわち、規則波では  $H_b = \gamma h$  が限界波高となり、碎波帯内では水深の減少に応じて波高が減衰するとみなされる。不規則波の各波高区間にこの規則波の碎波の考え方を適用すると、ある限度以上の波高区間の波はすべて規則波の限界波高に揃ってしまう。このため、波高分布としては  $H = H_b$  の位置に確率密度が集中する形となる。実際の不規則波の碎波はこれとは異なり、著者のモデル<sup>25)</sup>で表されるように、碎波限界を超えた波はエネルギーの再配分によって波高の小さな波に再生され、波高分布が1個所に集中することがない。

この式(4)の問題点は規則波ではあまり目立たず、不規則波のときに顕著になる。一つの解決策としては、最初に碎波する限界波高と碎波後に減衰して到達する安定波高の二つの限界値を用い、何らかの遷移区間を導入する方式<sup>26)</sup>が考えられよう。今後の検討課題の一つである。

### (3) 海浜流と水位の分布

#### a) 流れと水位の計算の基本式と計算条件

海浜流の  $x$ ,  $y$  軸方向の断面平均流速  $U$ ,  $V$  より平均水位の上昇量  $\zeta$  は、沼野ほか<sup>27)</sup>を参考として大規模渦の効果を導入した岡安ほか<sup>28)</sup>による連続・運動方程式を数値解析して求めた。

入力は波動場の計算で得られた各格子点のラディエーション応力である。これは各地点の波高に基づいてエネルギー密度を算定し、同じく放物型方程式から得られる各地点の波向を導入してラディエーション応力の各成分を求めた。

計算は初期静止状態から開始し、ラディエーション応力は緩始動方式で与えた。すなわち、開始時は 0 とし、時間ステップ 400 回の時間をかけて所定の値になるよう直線的に増加させた。数値計算には差分法を用い、空間微分は中央差分、時間微分は前方差分である。空間格子は波浪場と同一の 0.1m 間隔の正方形で、時間ステップは  $\Delta t = 0.05\text{s}$  とした。

底面摩擦項は海浜流と底面水粒子速度との合成流速を用いて計算し、摩擦係数は  $C_f = 0.01$  を使用した。水平拡散項のうちの渦動粘性係数は Longuet-Higgins<sup>29)</sup>が導入した  $N = 0.016$  の無次元定数をそのまま用いた。

境界条件としては、水槽内に設置した導波板の位置で法線方向速度を 0 とする固定壁条件である。このため、長方形の計算領域の中で導波板に相当する格子位置で人为的に流速 0 の条件を設定することで処理した。

#### b) 海浜流と水位の計算結果

まず、図-12 は不規則波 A の場合の平均水位の計算結果である。この図は波高分布を表す図-9 に対応しており、波高が急増している縦型リーフの先端部分で局所的に水位が低下している。傾向としては縦型リーフの天端上で水位がやや低く、リーフの間の水域でやや高くなっている。またリーフシステムの背後でも水位が高めである。平均水位上昇量の空間分布としては物理現象を反映しているけれども、絶対値としては過小である。また、 $y = 5.0\text{m}$ 付近に平均水位が急変する個所が岸冲方向に伸びているのは、側方境界の設定の関係で数値水槽内に循環流が発生し、この個所に潮目のようなものが現れたためと思われる。

縦型リーフシステム周辺の海浜流の計算結果の例を図-13 に示す。リーフ上の強い岸向きの流れは流速が  $50\text{cm/s}$  を超えており、天端水深  $3\text{cm}$  に対する長波の波速  $54\text{cm/s}$  にまで達している。リーフシステムの周辺では数個の循環流が形成されているが、この多くは今回の数値計算に特有のものと思われ、

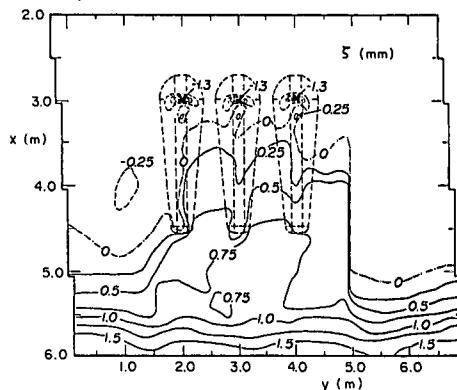


図-12 縦型リーフシステム周辺の不規則波 A による平均水位の計算結果 :  $(H_{1/3})_t = 7.5\text{cm}$ ,  $T_{1/3} = 1.2\text{s}$

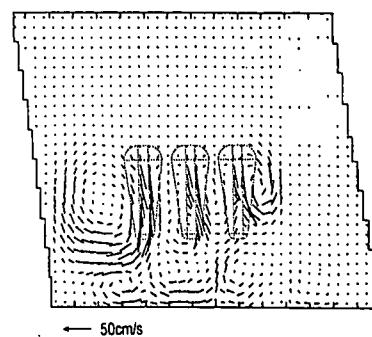


図-13 縦型リーフシステム周辺の不規則波 A による海浜流の計算結果 :  $(H_{1/3})_t = 7.5\text{cm}$ ,  $T_{1/3} = 1.2\text{s}$

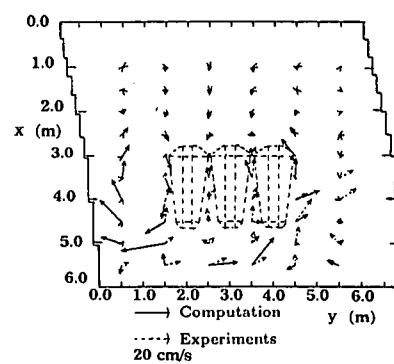
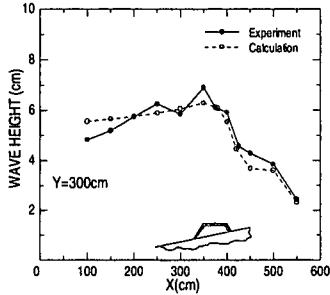


図-14 縦型リーフシステム周辺の海浜流の実験値と計算値の比較 :  $(H_{1/3})_t = 7.5\text{cm}$ ,  $T_{1/3} = 1.2\text{s}$

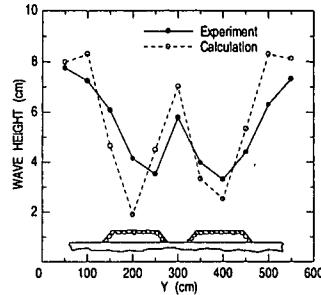
実験では確認されていない。

#### c) 海浜流の実験と数値計算の比較

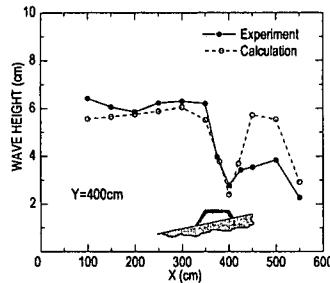
実験水槽内では 2 成分超音波流速計を用いて  $50\text{cm}$



(a)  $y = 3.0\text{m}$  の軸線上の波高分布



(a)  $x = 4.0\text{m}$  の線上的波高分布



(b)  $y = 4.0\text{m}$  の軸線上の波高分布

図-15 横型リーフシステムの岸沖方向の波高分布

: 不規則波B :  $(H_{1/3})_I = 5.5\text{cm}$ ,  $T_{1/3} = 1.6\text{s}$

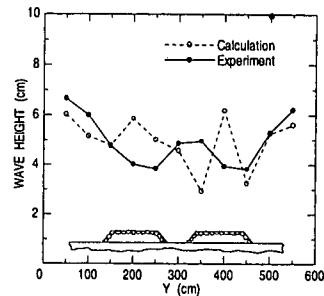
の格子間隔で平均流速を測定した。この結果を数値計算と比較した例を図-14に示す。不規則波Aのケースである。数値計算で予測されたリーフ上の強い流れは、目視でも確認された。ただし、波の谷のときに流速計のセンサー部が干出るために流速値を測定することができなかった。

リーフの間の水域には沖へ向かう離岸流があり、これは実験、計算ともに認められる。この流速については、次節の横型人工リーフとの比較のところで説明する。

## 5. 横型リーフと縦型リーフとの比較

### (1) 横型人工リーフ周辺の波高分布

先に図-8に示した造波水槽内に、縦型リーフ3基とほぼ同体積の横型リーフ2基を設置した。リーフは天端長  $a = 100\text{cm}$ 、天端幅  $B = 45\text{cm}$  であり、リーフ頂部の先端を  $x = 3.5\text{m}$  の位置に揃え、リーフ中心軸を  $y = 2.1\text{m}$  および  $3.9\text{m}$  に置いた<sup>7)</sup>。なお、水平床上であれば、リーフ1基の体積は次の式(7)で



(b)  $x = 4.5\text{m}$  の線上的波高分布

図-16 横型リーフシステムの沿岸方向の波高分布

: 不規則波A :  $(H_{1/3})_I = 7.5\text{cm}$ ,  $T_{1/3} = 1.2\text{s}$

概算できる。

$$V = t \left[ b \left( a + \frac{\pi}{3} s \right) + (a + s) B \right] \quad (7)$$

実験に使用したのは縦型人工リーフと同じく不規則波AおよびBである。この横型リーフシステム周辺の波高分布の実験値と計算結果の比較を図-15, 16に示す。前者は岸沖方向の波高分布であり、 $y = 3.0\text{m}$  は2基の横型リーフの間の軸線である。また、 $y = 4.0\text{m}$  はリーフ天端を横切る軸線である。後者の場合にリーフの背後で計算が実験値を上回っているのは、図-11に関連して述べた不規則波の碎波減衰の取り扱いに起因する見かけの現象である。なお、波高はいずれも有義波高である。

沿岸方向の分布は、図-16に示すように実験値と計算結果がほぼ一致している。 $x = 4.0\text{m}$  の線はリーフ頂部の後端から5cm 岸側であり、リーフの直背後で波高が急減し、リーフの間の水域およびリーフシステムの外側で波高が大きくなっている。 $x = 4.5\text{m}$  の線はリーフをはずれた水域であり、波高分

表-2 リーフ間の離岸流の最大値

$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	横型リーフ		縦型リーフ	
		実験値	計算値	実験値	計算値
5.5	1.6	8.5cm/s	13.2cm/s	8.3cm/s	10.5cm/s
7.5	1.2	12.0cm/s	28.5cm/s	11.4cm/s	15.0cm/s

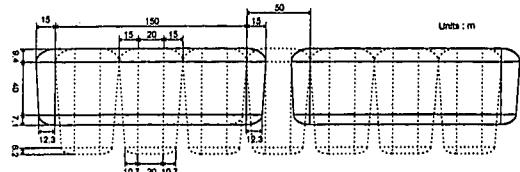


図-18 想定した現地海岸でのリーフの平面形状

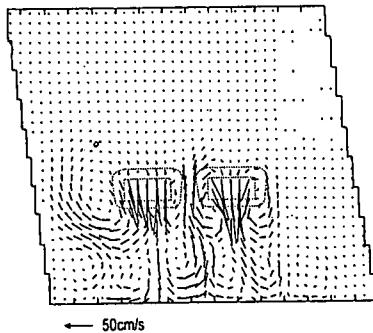


図-17 横型リーフシステム周辺の不規則波 A による海浜流の計算結果 :  $(H_{1/3})_t = 7.5\text{cm}$ ,  $T_{1/3} = 1.2\text{s}$

布がやや一様化している。

この図-15, 16の結果は、本研究で取り扱った放物型方程式に基づく不規則波の重ね合わせ方式によって、縦型人工リーフだけでなく、通常の横型人工リーフ周辺の波高分布を算定できることを例示している。

## (2) 横型および縦型人工リーフ周辺の海浜流

横型人工リーフシステム周辺の海浜流を計算した結果を図-17に示す。対象とした波は不規則波 A であり、縦型の場合の図-13に対応するものである。横型システムではリーフ上の岸向きの流れがリーフ中央に集中し、またリーフの間の水域を沖向きに流れる離岸流が強く現れている。

そこで、リーフ間の離岸流速について、実験および計算で得られた最大値を拾い出し、横型と縦型で比較してみた。表-2はその結果である。数値計算では横型リーフシステムのほうが縦型システムよりもかなり大きな流速となっている。ただし、実験結果では横型システムの離岸流がわずかに速い程度であり、計算のような顕著な差が得られなかった。一つの理由として、実験では 50cm 間隔で流速を測定したため、流速の最大値を確実には捕捉できなかつた可能性が考えられる。

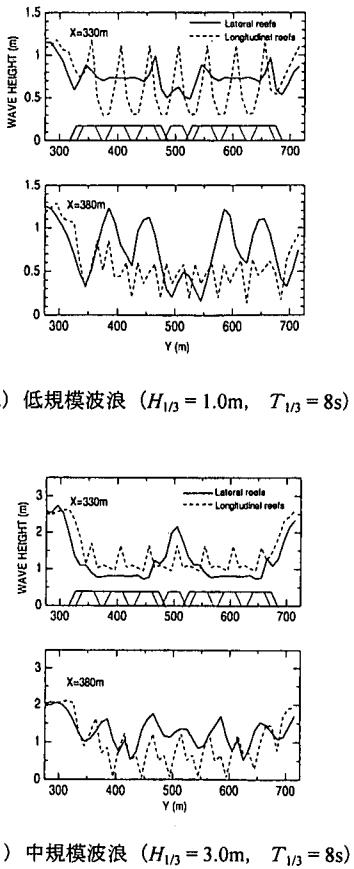
(3) 横型リーフと縦型リーフの波高減衰機能の比較  
以上はすべて模型規模での検討であった。特に、平面配置では実験水槽の制約から勾配 1/20 と現地海岸としては急斜面を使用せざるを得なかった。そこで、本研究の波浪変形計算プログラムを利用して現地規模で横型人工リーフシステムと縦型システムを比較してみた。

計算領域は沿岸方向 1000m、岸冲方向 445m、海底勾配は 1/50 でその沖側は水深 10m で一定とした。そして、水深 6.0m の地点から岸側に人工リーフを設置することを想定した。波は水深 10m 地点で 15 度の角度で入射するとした。

横型人工リーフは天端長  $a = 150\text{m}$  で天端幅  $B = 40\text{m}$  のものを、頂部で 50m の間隔で 2 基設置するとした。縦型リーフは天端長  $a = 20\text{m}$  で天端幅  $B = 65\text{m}$  のもの 7 基を連続させた。天端水深はいずれも  $h_c = 1.5\text{m}$ 、縦斜面の勾配は 3/10 とした。リーフの寸法を図-18に示す。リーフ先端の海底面での長さは横型システムで 380m、縦型システムで 350m である。

計算は、低規模波浪として有義波高 1.0m、周期 8s、および中規模波浪として有義波高 3.0m、周期 8s の 2 種類の波を対象とした。図-19はその結果であり、(a)は低規模波浪、(b)は中規模波浪に対する沿岸方向の波高分布を示している。それぞれ上段の  $x = 330\text{m}$  の位置はリーフ頂部の先端から 50m 岸側で水深 5.0m、下段の  $x = 380\text{m}$  はリーフシステムの背後で水深 4.0m の位置である。実線は横型リーフシステム、破線は縦型リーフシステムの波高分布を示している。

この計算結果では、リーフの上では横型リーフシステムのほうが波高がやや小さいが、リーフシステムの背後では縦型のほうが波高減衰の度合いが大きく、特に低規模波浪のときにその差が顕著である。すなわち、縦型リーフが波の屈折作用を利用して効果的に碎波させ、減衰させていることが明瞭である。



(a) 低規模波浪 ( $H_{1/3} = 1.0\text{m}$ ,  $T_{1/3} = 8\text{s}$ )

(b) 中規模波浪 ( $H_{1/3} = 3.0\text{m}$ ,  $T_{1/3} = 8\text{s}$ )

図-19 横型システムと縦型システムの  
沿岸方向の波高分布の比較

## 6. 今後の検討課題

最初に述べたように、縦型人工リーフシステムは通常の横型リースシステムに比べて水産協調型施設として利用可能であり、また施工性も優れている。本研究では詳細には検討しなかったけれども、リーフ背後の水位上昇が少ないので、リーフ周辺の海底砂地盤の洗掘などの問題も少ないと予測される。しかし、この縦型リーフシステムを実用化するには以下のようないくつかの問題を解決する必要がある。

- ①大縮尺模型による碎波減衰状況の確認
- ②移動床模型による侵食防止効果の確認
- ③天端形状の最適化
- ④表面被覆材の安定性の検討
- ⑤多方向不規則波に対する応答の検証

まず最初の問題は、碎波現象の縮尺効果の問題である。本研究は天端水深は  $h_c = 2.0 \sim 4.0\text{cm}$  の条件

で行っている。しかし、碎波に関しては一般に水深10cm以上でなければ水の表面張力の影響を受け、現象の忠実な再現が出来ないとされている。このことは、台形ステップ上の碎波限界を対象とした合田ら<sup>30)</sup>の実験でも確認されている。すなわち、勾配1/2の斜面に連なる水平床上の水深を3.75cm, 7.5cm, 15.0cmと変え、波高・周期をフルード則で相似させて実験を行ったところ、水深3.75cmでは碎波限界と水深の比率が明らかに小さく現れた。また、碎波後の波高低減の状況は水深7.5cmと15.0cmとで若干の差が見られた。したがって、急変地形上の碎波に関しても水深10cm以上を確保することが望ましいといえる。

人工リーフに関しては模型実験による検討が数多く行われているけれども、こうした碎波減衰の縮尺効果を考えるならば現象の再現性については疑惑が残る。本研究で取り上げた縦型人工リーフシステムを含め、かなり大縮尺の模型を用いて碎波現象を正しく再現し、碎波減衰閾数  $f_D$  を的確に評価しなければならない。

第2の移動床模型での検討は、人工リーフの主目的が海岸侵食の防止であるだけに欠かすことができない。特に、従来の横型リーフシステムと比べて縦型リーフシステムがどれだけの機能を発揮するかを確認する必要がある。

第3の天端形状は、縦型システムに固有のものである。平沢ほか<sup>10)</sup>はこれまでの横型人工リーフでは漁船が座礁する危険があるとして、リーフの両端を干出させた複合型システムを提案している。縦型システムではそれぞれのリーフの天端長が短いので、先端部の一部を干出させてもなぎさからの景観を妨げる度合いが少ない。また、海上工事の施工性にも問題はない。先端部を干出させることによって屈折作用が増大し、碎波減衰機能が高まることが期待される。

次の表面被覆材の安定性は人工リーフ設計に際しての大きな問題である。かなり大縮尺の模型実験で検討しなければならない。ただし、縦型システムではその1基を取り出した形を対象として2次元造波水路内で実験すればよいと思われる。

最後の多方向不規則波については、人工リーフが浅水深に設置されることが多く、来襲波は海底地形による屈折作用によって方向分散の度合いが小さくなっている。したがって、1方向不規則波の場合と大きな差がないと推測されるけれども、実験あるいは数値計算で確認しておくことが望ましい。なお、数値計算としてはブーシネスク方程式に基づく解法を使用し、沖側境界で多方向不規則波の水位・流速

の時系列を入力として与えることになるであろう。

## 7. むすび

本研究における主要な結論以下の3点である。

- 1) 縦型人工リーフシステムは、波の屈折効果を取り入れていることにより、従来の横型リーフシステムよりも波浪減衰機能が高い可能性がある。
  - 2) 本研究で用いた放物型方程式を波高重ね合わせ方式で不規則波に適用する解法は、横型人工リーフシステムにも適用可能である。ただし、最初に碎波する限界波高と碎波後の安定限界波高の二つを導入するなど改良が必要である。
  - 3) 放物型方程式を人工リーフシステムに適用する際には、波速に対する非線形効果を導入しないと波の屈折効果が過大に評価される。
- しかしながら、最初にお断りしたように本研究における検討は必ずしも十分でない。特に、海浜流の計算においては斜め入射波に対する側方境界の設定など不完全であり、今後改良すべき余地が残されている。ただし、人工リーフシステムの性能向上の一つの方向を示すものとして、あえてここに取りまとめた次第である。本論文を契機として、縦型人工リーフシステムに本格的に取り組んでいただける組織が現れることを期待して本稿を終える次第である。

**謝辞：**本論文で紹介した研究は、横浜国立大学工学部建設学科において1991年度から1996年度にかけて実施されたものである。学部の卒業研究として取り組んでもらった山田晶子、高橋真介、高橋栄司、吉崎龍太郎、原田智弘、および高木泰士の各位の協力に深く感謝する次第である。

## 参考文献

- 1) 宇多高明、田中茂信、筒井保博：人工リーフによる波浪と漂砂の制御、第31回海岸工学講演会論文集、pp.340-344、1984.
- 2) 大中 晋、吉沢央明：人工リーフの天端幅の違いによる波浪減衰効果および反射率に関する現地調査、海岸工学論文集、pp.641-645、1992.
- 3) 合田良実、山田晶子：屈折効果を利用した縦型傾斜式離岸堤の水理特性、海岸工学論文集、第39巻、pp.566-580、1992.
- 4) 合田良実、高橋真介、高橋栄司：放物型方程式による縦型傾斜式離岸周辺の波浪場の解析、海岸工学論文集、第41巻、pp.986-990、1994.
- 5) Goda, Y.: Wave damping characteristics of longitudinal reef system, *Advances in Coastal Structures and Breakwaters*, Clifford, J.E. ed., Thomas Telford Pub., London, pp.192-203, 1995
- 6) 合田良実、吉崎龍太郎、原田智弘：縦型傾斜式離岸堤システム周辺の波高分布と海浜流について、海岸工学論文集、第43巻、pp.121-125、1996.
- 7) 合田良実、高木泰士：人工リーフと縦型傾斜式離岸堤の水理特性の比較について、海洋開発論文集、Vol. 13, pp.31-36, 1997.
- 8) Goda, Y. and Takagi, H.: Lateral versus longitudinal artificial reef systems, *Proc. 26<sup>th</sup> Int. Conf. Coastal Engrg.*, pp.2152-3163, 1998.
- 9) 今井貢爾、秋山義信、池谷 賢、工藤君明、續 辰之介：クレセント型没水平板の集波効果に関する研究、第34回海岸工学講演会論文集、pp.487-491、1987.
- 10) 平沢充成、谷野賢二、水野雄三、渡邊康玄、大村高史：複合型人工リーフの水理特性について、海岸工学論文集、第37巻、pp.599-603、1990.
- 11) 武若 聰、入江 功、黒田 寛：テーパー型潜堤による波向制御、海岸工学論文集、第41巻、pp.726-730、1994.
- 12) 武若 聰、入江 功、辻 利徳：テーパー型潜堤を用いた沿岸流制御の試み、海岸工学論文集、第41巻、pp.731-735、1994.
- 13) 武若 聰、入江 功、山口 洋：テーパー型潜堤による海浜地形制御の試み、海岸工学論文集、第42巻、pp.706-710、1995.
- 14) 坪田勇人、磯部雅彦、渡辺 晃：潜堤を用いた波浪制御に関する研究、海岸工学論文集、第41巻、pp.641-645、1994.
- 15) 柿沼太郎、渡辺 晃、磯部雅彦：三角形潜堤周辺の碎波を伴う波、流れ場の非線形数値計算、海岸工学論文集、第44巻、pp.111-115、1997.
- 16) 鈴木康正、上原 功、富田康大、望月徳雄、平石哲也：フレネル潜堤による波向、波高変更効果に関する模型実験、海岸工学論文集、第42巻、pp.701-705、1995.
- 17) 中野 晋、三島豊秋、中野孝二、三井 宏：サーフィンに適するデルタ型リーフ周辺の波浪特性、海岸工学論文集、第41巻、pp.721-725、1994.
- 18) 中野 晋、高田康史、三島豊秋、三井 宏：サーフィン共存型潜堤およびリーフ周辺の波浪特性、海洋開発論文集、Vol. 13, pp.19-24, 1997.
- 19) 平口博丸、丸山康樹：斜め入射波に対する放物型方程式の適用性の拡張、第33回海岸工学講演会論文集、pp.114-118、1986.
- 20) 平口博丸、丸山康樹：斜め入射波に対する波浪変形計算法—新しい放物型方程式の提案—、電力中央研究所

- 報告, U86045, 23p., 1987.
- 21) 渡辺 晃, 丸山康樹: 屈折, 回折, 碎波減衰を含む波浪場の数値計算法, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.103-107, 1984.
  - 22) Dally, W.R., Dean, R.G., and Dalrymple, R.A.: Wave height variation across beaches of arbitrary profile, *J. Geophys. Res.*, Vol. 90, No. C6, pp.11,917-11,927, 1985.
  - 23) 合田良実: 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第12巻, 第3号, pp.31-69, 1973.
  - 24) 合田良実, 岡崎健一: 矩形ステップ上の非線形波浪干渉と碎波限界, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.46-50, 1998.
  - 25) 合田良実: 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号, pp.59-106, 1975.
  - 26) 権赫珉, 合田良実: バー型地形における不規則波の碎波変形について, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.101-105, 1995.
  - 27) 沼野祐二, 佐藤慎司, 柴山知也: 海浜変形シミュレーションにおける浮遊砂の移流過程とundertowの効果, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.395-398, 1989.
  - 28) 岡安章夫, 潰尾貴之, 柴山知也: 碎波による運動量輸送を考慮した海浜流の準3次元モデル, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.251-255, 1993.
  - 29) Longuet-Higgins, M.S.: Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, 2, *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, No. 33, pp.6790-6801, 1970.
  - 30) 合田良実, 森信耕太, 岡崎健一: 水平ステップ上の碎波限界に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.66-70, 1987.

(1999. 9. 3 受付)

## A LONGITUDINAL ARTIFICIAL REEF SYSTEM UTILIZING WAVE REFRACTION EFFECTS

Yoshimi GODA

A longitudinal, artificial reef system is composed of a number of long submerged mounds, which are placed in the nearshore zone with the orientation normal to the shoreline. Incoming waves are refracted by the heads and longitudinal side slopes of these reefs, and thus their heights are enhanced for intensive wave breaking. A series of small scale model tests and numerical computations have been carried out to confirm the performance of the new reef system, which is found to be superior to the conventional lateral system. Wave heights around the reef system can now be estimated through numerical analysis. The present paper summarizes the findings of these studies for the purpose of providing the basic data for future development of prototype reef systems.