

複断面人工リーフの水理特性に関する実験的研究

Hydraulic Characteristics of Compound Artificial Barrier Reefs

平沢 充成* 谷野 賢二** 大村 高史***

Mitsunari HIRASAWA, Kenji YANO and Takashi OHMURA

堤端部に離岸堤部を有する複断面人工リーフ周辺の波高分布、表層流、底層流などの水理特性を3次元水理模型実験により調べた。波高分布については非定常緩勾配方程式を用いた数値計算を行い、人工リーフへの適用性を検討した。その結果、人工リーフに離岸堤部を設けることで循環流が発生しやすくなり、波高分布については数値計算と実験値が比較的よく一致することがわかった。

《人工リーフ；水理模型実験；数値モデル》

The characteristics of distribution of wave heights and wave-induced currents at the surface and bottom around artificial barrier reefs with exposed parts were examined by three dimensional model tests. A calculation method based on unsteady mild-slope equations was applied to estimate the distribution of wave heights around compound artificial barrier reefs. The circulation around the reef tends to occur due to the effect of exposed parts. There was generally good agreement between the estimated and experimental wave heights values.

Keywords : artificial barrier reef, hydraulic model experiment, numerical model.

1. はじめに

胆振海岸は北海道の中央南部に位置し、太平洋に面した延長約59kmの漂砂海岸である。この海岸は従前から海岸侵食や越波による災害が多発しており、これまでの護岸施設では災害の解消が困難であると判断されることや、従来型の離岸堤あるいは高天端な護岸を築造する場合には、景観上あるいは水辺へのアクセス上の問題が生じることから、人工リーフや緩傾斜護岸による災害対策が計画されている。ただし、この海岸の水深5～10mの領域はホッキ貝の漁場となっていることから、人工リーフによる対策を図る場合には、災害防止や海岸線の景観保持といった観点だけでなく、水産資源の維持増殖といった副次的機能や漁船の安全対策についても積極的に取り組んでいく必要がある。

本研究の対象としている複合型人工リーフ(以下、複

合型リーフと呼ぶ)は、これまでの人工リーフ(以下、従来型リーフと呼ぶ)の堤端部が離岸堤のように水面上に突出している構造物である(図-1参照)。これは、従来型の機能に加えて、堤端部が航路標識の役割を果たしてリーフ付近を航行する漁船の座礁を防止するとともに、

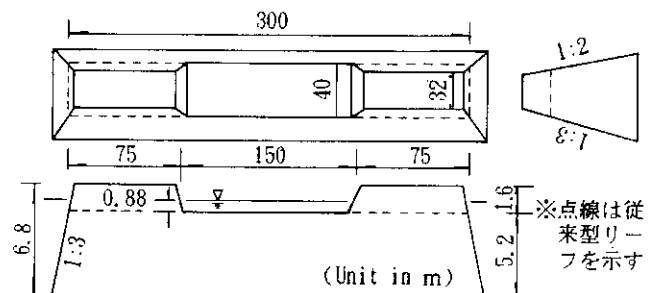


図-1 複合型人工リーフ構造図

*港湾研究室員 **同室副室長 ***前港湾研究室員 現函館開発建設部江差港湾建設事務所

堤幹部に岸方向の流れを集中させ、リーフの周囲に循環流を積極的に発生させることで、有用水産物の浮遊卵、浮遊幼生、孢子などの分散を抑制し、リーフ背後を水産物増殖の場として活用を図ることを目的として立案されたものである。このような複断面型の構造物が水産協調型として施工された例はこれまでにない(例えば、杜多¹⁾)が胆振海岸に計画されているような規模での施工例はない。谷野ら²⁾は、2次元水理模型実験により複合型リーフの堤幹部、堤端部の各部を対象として波浪減衰効果、堤沖側の反射波特性、堤内水位の上昇などの水理特性を検討し、堤幹部については2次元数値シミュレーションによる検討も行っているが、現地へ適用していくためには人工リーフの平面配置による波浪減衰効果、流況特性などについて検討しておく必要がある。また、胆振海岸では将来にわたり複数基の人工リーフの施工計画が策定されているが、地形条件の異なる海底面上に人工リーフを施工していく場合、事前にその効果を検討するため、異なる海底地形・波浪・構造物に対して波浪および流況分布を予測するモデルについても開発しておく必要がある。そこで、本研究では3次元水理模型実験により波浪減衰効果、流況特性といった複合型人工リーフの基本的な水理特性を平面場に対して調べ、さらに非定常緩勾配方程式³⁾による波浪分布の計算法の人工リーフへの適用性について検討を行った。

2. 波の変形

2. 1 実験方法

人工リーフを胆振海岸に施工した場合の代表的な波の変形特性を把握するため、平均潮位M.S.L.(T.P.+0.08m)に対して実験波として表-1に示す年最大波と中間的な波の2種類を選定した。波向は、入射角 $\theta_1=0^\circ$ (汀線に対し直角)とした。また、海底地形は現地の平均的な海底勾配で代表させ、沖側から現地換算T.P.-2.4mまでは1/90、それより岸側では1/12の一樣勾配とした。また、実験では人工リーフを複数配置した場合のリーフ周辺の一般的な波浪分布を調べるため、リーフ模型を3基設置することとした。設置条件は現地換算で堤脚水深T.P.-6.0m、開口幅150mとした。実験は長さ28m、幅23m、深さ1mの平面水槽に図-2に示す

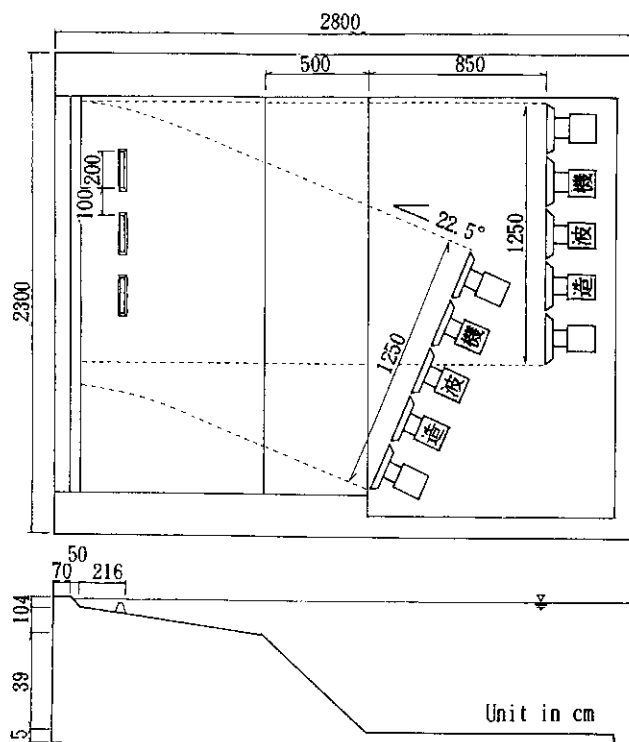


図-2 実験水槽

模型縮尺1/150のモルタル製地形模型を製作し、その上に導波板により幅12.5mの仮設水路を作成して行った。相似則はFroudeの相似則を採用し、ひずみなし条件で行った。造波機は、造波板幅2.5mのピストン型造波機を5基並べて使用した。また、人工リーフの模型は直径約1cmの碎石により作成した。

波高は電気容量式波高計を用いて波形記録を行い、A/D変換後、パソコンを用いてゼロアップクロス法により求めた。なお、測定する際には水位変化に伴う波高変化の影響を考慮するため、造波機始動後、水槽内が定常化した1分後より波形記録を開始した。実験波としては、規則波を用いた。

2. 2 数値モデルによる波の変形計算

人工リーフ設置後の波浪の影響を考える場合、災害防止という立場からはリーフ背後の伝達波が、小型船舶の安全航行や渡辺⁴⁾が指摘しているようにホッキ貝など、水産資源の育成の面からは反射波がそれぞれ問題になるものと考えられる。伝達波と反射波の両者を計算しうる波浪場の解析手法としては、先の非定常緩勾配方程式がある。谷野ら⁵⁾は1次元の微小振幅の波浪場に対してこの計算手法を適用し、伝達率および反射率について2次元水路による実験値と比較を行っている。その結果、反射率についてはリーフ沖側で碎波する場合以外のケースでは実験値と計算値がほぼ一致しており、伝達率についても相対天端幅(リーフ天端Bと沖波波長 L_0 の比)が小

表-1 実験波条件

波 浪	周 期 (sec)	換算沖波 波高 (m)	潮 位	(m)
年最大波	8.5	4.5	M.S.L.	T.P.+0.08
中間的な波	6.5	2.3		

さいケースを除いてほぼ一致している。またこの方法によれば、波浪の屈折、回折、反射、碎波変形が同時に取扱えることから、本研究では非定常緩勾配方程式を用いて波浪場の計算を行うこととした。波浪場の計算ルーチンを図-3に示す。非定常緩勾配方程式によると、碎波前の計算基礎式は次式で示される。

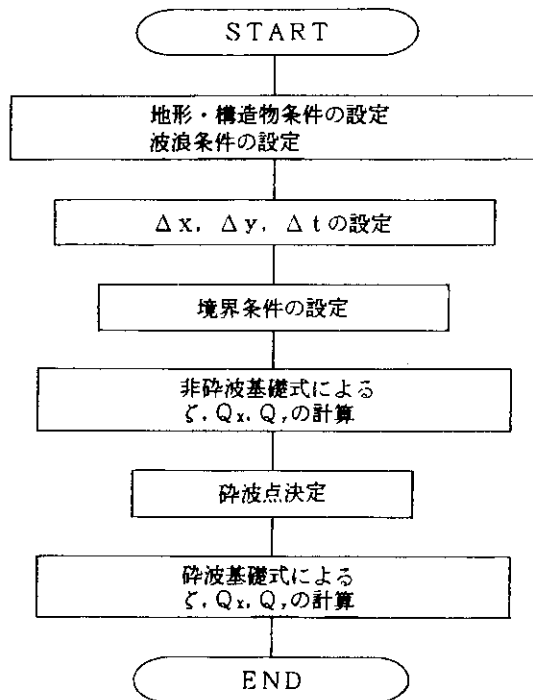


図-3 計算の手順

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + C^2 \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + C^2 \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{n} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (nQ_x) \frac{\partial}{\partial x} (nQ_x) + \frac{\partial}{\partial y} (nQ_y) \frac{\partial}{\partial y} (nQ_y) \right\} = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 x, y は水平面に設定した座標軸、 z は鉛直座標軸(上向き正)、 t は時間、 ζ は水面変位、 C は波速である。また、 Q_x, Q_y は x, y 軸方向の線流量、 n は群速度と波速の比であり、次式で与えられる。

$$Q_x = \int_{-h}^0 u \, dz, \quad Q_y = \int_{-h}^0 v \, dz \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad \dots\dots\dots(5)$$

ただし、 u, v は波動運動に伴う流速の x, y 成分を

示し、 h は水深、 k は波数を示す。上記の方程式により、碎波変形が生じないと仮定した場合の ζ, Q_x, Q_y を全計算領域について求めた後、碎波点を渡辺ら⁶⁾が行った方法に従い波峰下静水位流速 u_b とその方向への波峰の伝播速度 C' の比 u_b/C' と碎波点での波峰下静水位流速 u_b と波速 C_b 比 u_b/C_b が一致する位置より定めた。このように碎波点を決定し、波高分布の計算を式(1)、(2)に碎波減衰項を付加した次式により、再度、全計算領域について行った。

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + C^2 \frac{\partial \zeta}{\partial x} + f_D Q_x = 0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + C^2 \frac{\partial \zeta}{\partial y} + f_D Q_y = 0 \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで、

$$f_D = \alpha_D \tan \beta \sqrt{\frac{g}{h}} (\hat{Q}/Q_r - 1)$$

$$\hat{Q} = \sqrt{\hat{Q}_x^2 + \hat{Q}_y^2}$$

$$Q_r = r' \sqrt{g h^3}$$

上式において、 $\hat{Q}_x, \hat{Q}_y$ は線流量の振幅、 $\tan \beta$ は碎波点より岸側の各地点における海底勾配を示し、 α_D および r' はそれぞれ2.5、0.25⁷⁾とした。また、碎波帯外の領域および $\hat{Q} < Q_r$ となる波の再生領域では、 $f_D = 0$ とおくことで波の再生現象を考慮した。ただし α_D については、碎波に伴い計算上の反射波が発生する影響を抑えるため、最も沖側の碎波点については、碎波点から岸側に半波長の区切で α_D を連続的に増加させる方法を取っている。また、 $\tan \beta$ についてはリーフ沖側のり面で勾配1/3を与え、その他の領域においては現地の平均的な海底勾配である1/90を与えた。計算点の配置は空間に対してスタガードメッシュとし、時間に対する計算はleap-frog法を採用した。空間差分間隔 Δx (岸沖方向)はリーフ天端水深における入射波波長の約1/10の2.5mとし、 Δy (汀線方向)については使用パソコンのメモリー容量による制限から15mとした。また、時間差分間隔 Δt はクーラン条件を満足するように0.1secとした。計算領域および人工リーフの設置条件を図-4に示す。沖側入射境界および岸側境界には境界条件の取扱いを容易するため3メッシュ幅からなる仮想領域を接続し、ともに無反射性境界とした。側方境界についてはリーフが複数基設置された条件として計算を行うため、完全反射性境界として取扱った。計算の対象は複合型および従来型リーフとし、潮位M.S.L.に対して年最大波が襲来す

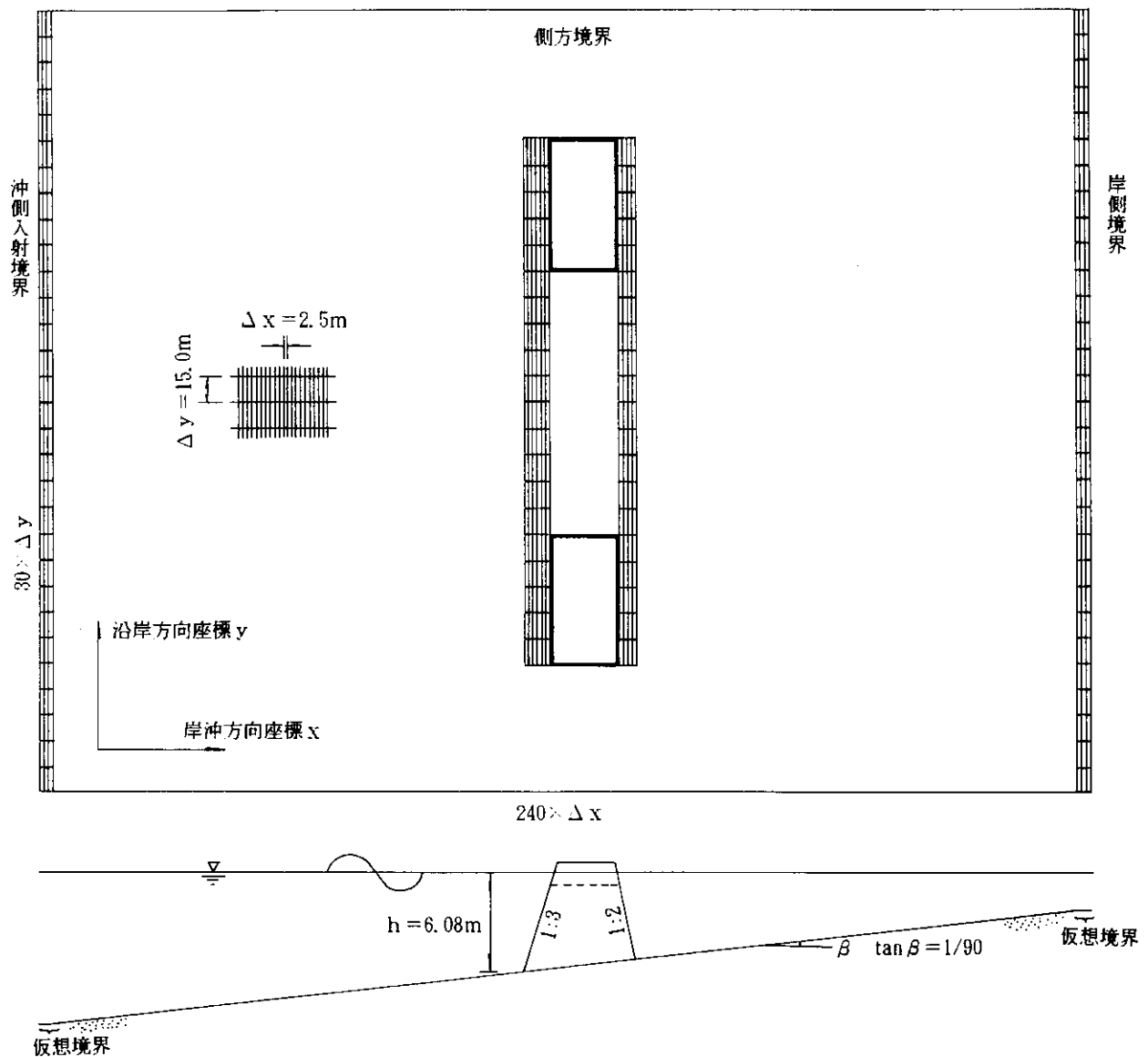


図-4 計算領域と人工リーフ設置条件

る条件で計算を行ったが、複合形リーフではその端部が水面上に突出するため反射性境界として取扱った。反射率は谷野⁹⁾の実験結果より、のり面勾配1/3の沖側境界および側方境界については0.25、のり面勾配1/2の岸側境界については0.3を与えた。

2. 3 実験結果と計算結果

図-6, 7は中間的な波および年最大波を作用させた場合の実験結果について、複合型リーフと従来型リーフの波高分布を比較したものである。測定点を図-5に示す。図によるとリーフ沖側についてはリーフ端部離岸堤部の影響により、その前面を中心として複合型リーフの方の波高が多少高くなっているが、その差は小さいことがわかる。これは、堤幹部に比べ反射率の高い離岸堤部についても反射率が0.15~0.3程度であることから⁹⁾から判断

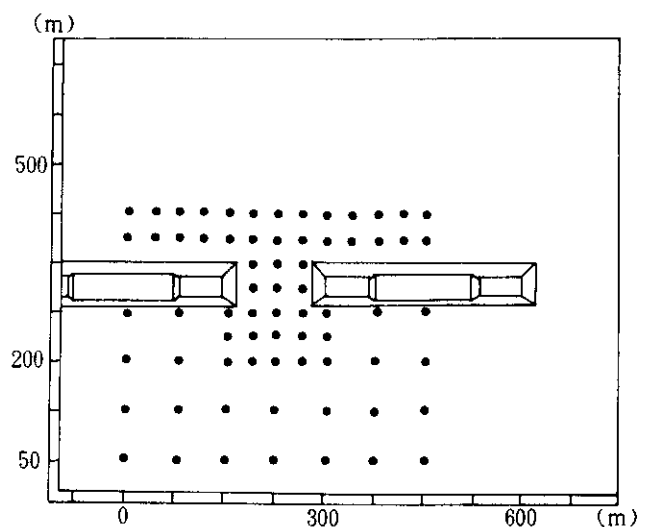


図-5 波高測定・計算点

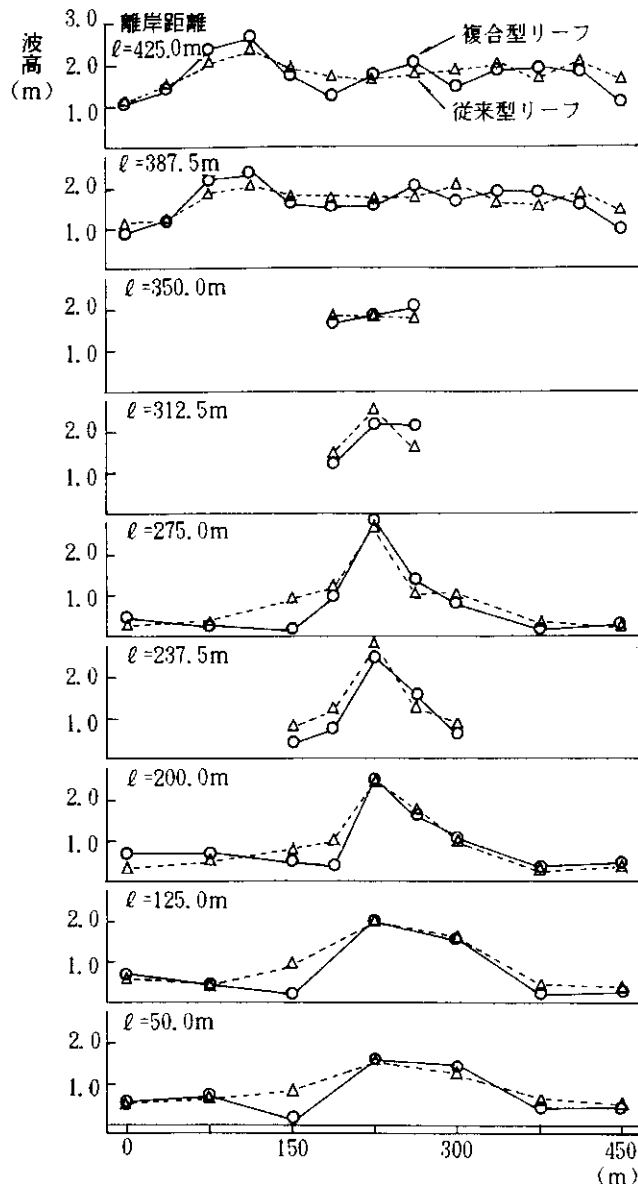


図-6 複合型リーフと従来型リーフの波高比較（中間的な波）

しても妥当な値であると考えられる。開口部については、両者の波高分布にほとんど差がないことがわかる。またリーフ背後については、離岸堤部の直背後で複合型リーフの波高が小さくなる傾向があるが、全体的な波高分布に大きな差は認められない。以上の結果より、従来型リーフの端部に本研究で検討したような離岸堤部を設けても、リーフ周辺の波高分布にはそれほど大きな影響は与えないと考えられる。

次に人工リーフを設置した波浪場について、非定常緩勾配方程式による計算の適応性について検討する。図-8, 9は、複合型および従来型リーフに対する計算結果と実験結果を比較したものである。比較地点は、図-5に示す点に等しい。計算結果は、計算領域全体で実験結

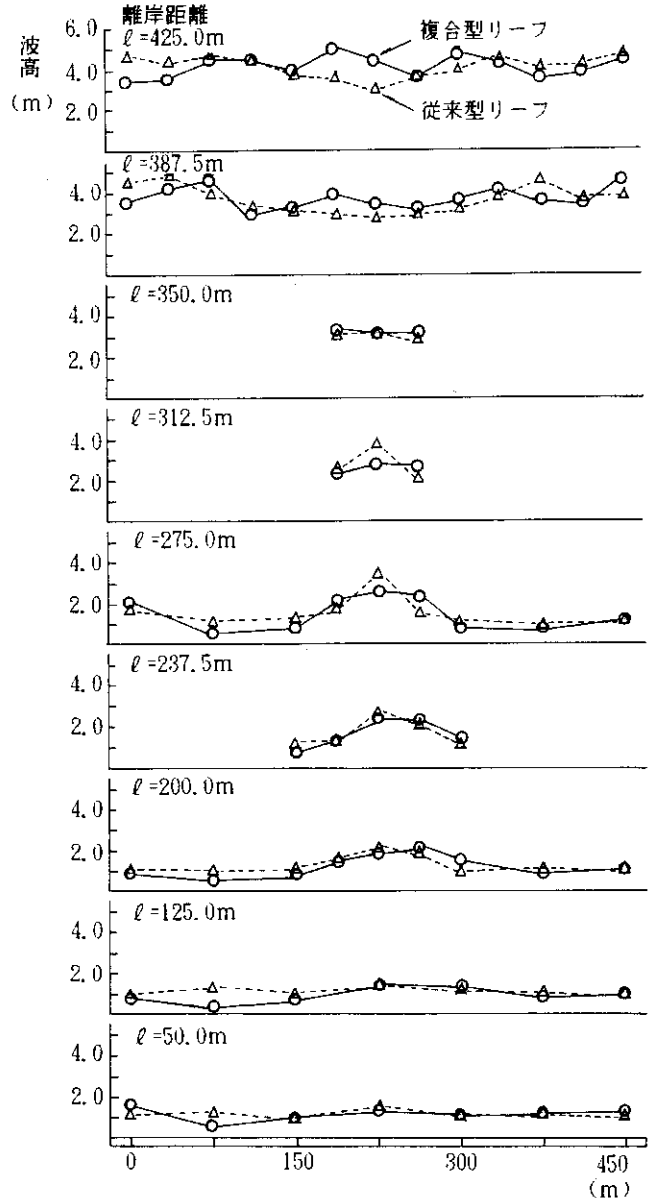


図-7 複合型リーフと従来型リーフの波高比較（年最大波）

果と比較的によく一致している。ただし、水理模型実験の場合は開口部背後の波高分布が左右非対称となっており、また開口部岸側における波高分布の一致度合いは他の領域に比べ低いようである。波高分布が非対称性を呈する原因としては、数値計算の場合、リーフが等間隔で無限に設置させた条件を想定しているのに対し、実験では3基のリーフを対象としているため、左右リーフの堤外側端部での回折波と開口部側端部での回折波が異なることが考えられる。また、開口部岸側領域での再現性が低い原因としては、Y軸方向のメッシュ間隔 Δy の制限によりリーフ側方ののり面を計算上、鉛直面として与えたことから、そこでの反射波の影響が実際の現象よりも大きく現われることや、海底勾配 $\tan \beta$ がリーフ沖側のり

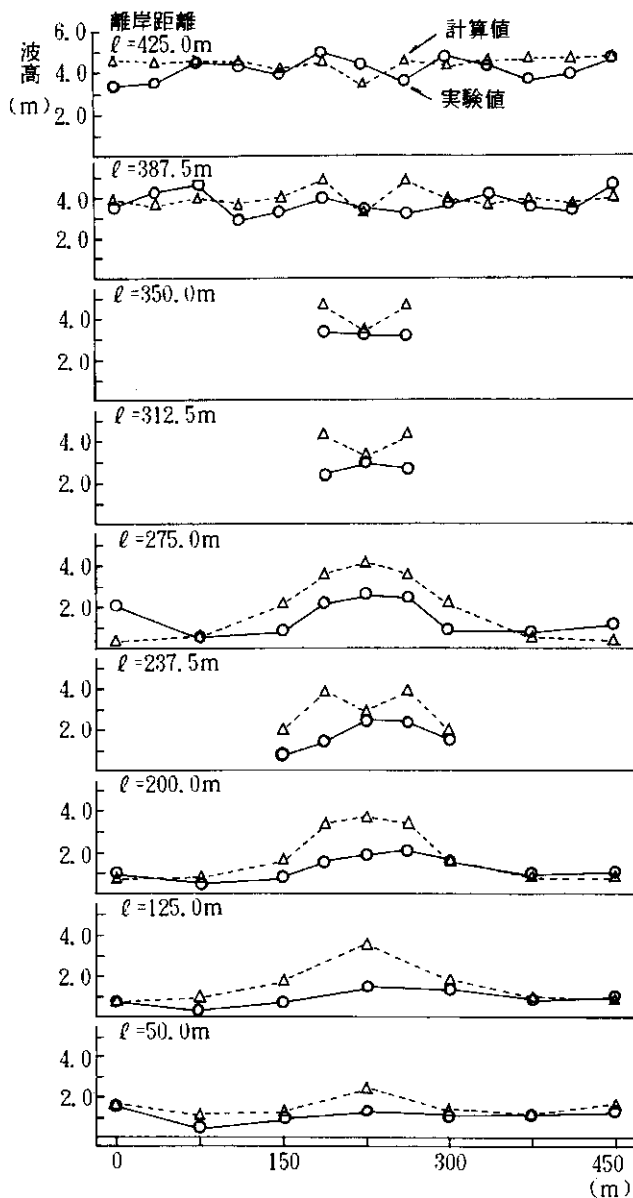


図-8 計算波高と実験波高の比較
(複合型リーフ)

面($\tan \beta = 1/3$)を除き $1/90$ と緩やかであるため、式(6)、(7)中の碎波減衰項の影響がそれに比例して小さくなり、相対的に浅水変形に伴う波高増加の影響が大きく現われることが考えられる。後者の影響については、今回の計算条件では碎波点が現地換算水深 9 m 付近と汀線からかなり離れた地点であり、対象領域が波の再生あるいは 2 段目以降の碎波領域となるため、 Q/Q_0 をパラメータとした波の碎波、再生の再現性も問題になっていると考えられる。また、今回の計算では碎波減衰項中の f_0 を $\tan \beta$ の関数として式(8)のように与えているが、人工リーフやバーが存在するような海域周辺では $\tan \beta > 0$ となる場合だけではなく、 $\tan \beta = 0$ (天端上など)、 $\tan \beta < 0$ (岸側のり面など)となる海底地形

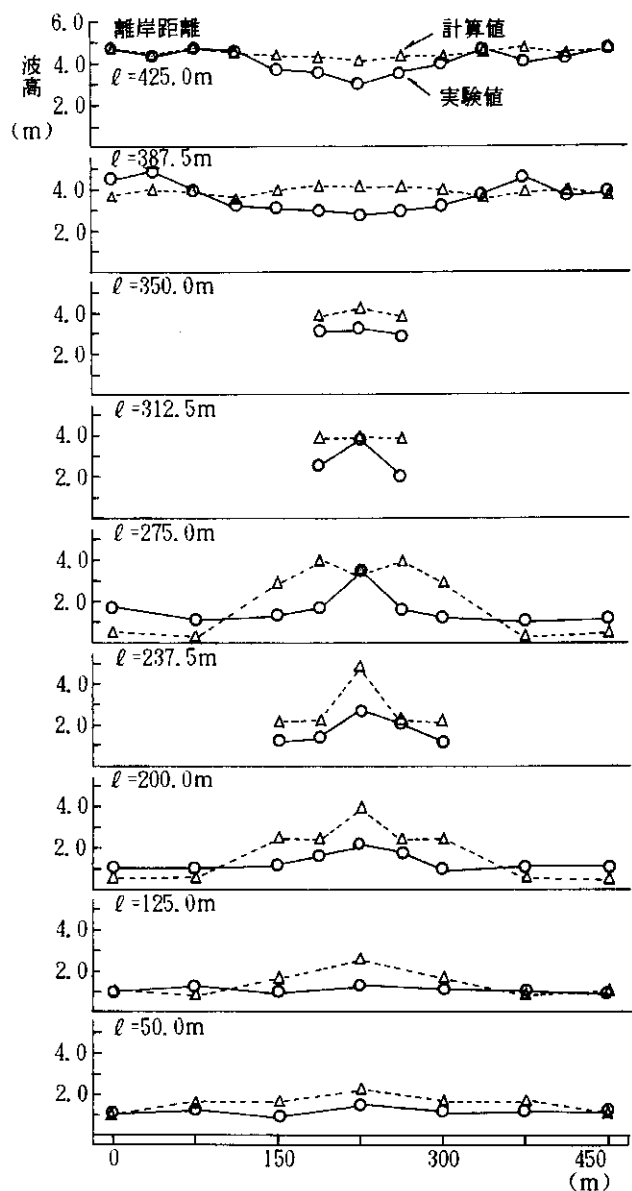


図-9 計算波高と実験波高の比較
(従来型リーフ)

条件も現われてくる。これらのことから、非定常緩勾配方程式による波高分布計算法を海底勾配 $1/100$ 程度の緩斜面や変断面に適用する場合については、碎波減衰項の取扱いをさらに検討する必要があると考える。

3. 海浜流の特性

3.1 実験方法

実験では複合型リーフ周辺の海浜流特性を調べるため、従来型リーフとともに表層と底層の 2 層を対象として流況測定を行った。ただし、表層流については主にその流況パターンを調べ、底層流については流速分布を調べた。実験条件および実験模型は、沖波の入射角を $\theta_i = 0, 22, 5^\circ$ の 2 波向とした以外は波の変形実験の場合と同様で

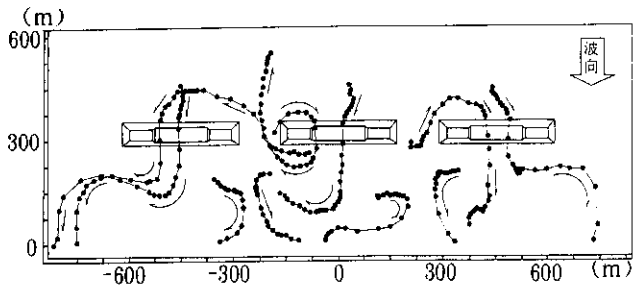


図-10.1 表層流況パターン（複合型，中間的な波，不規則波，入射角 0° ）

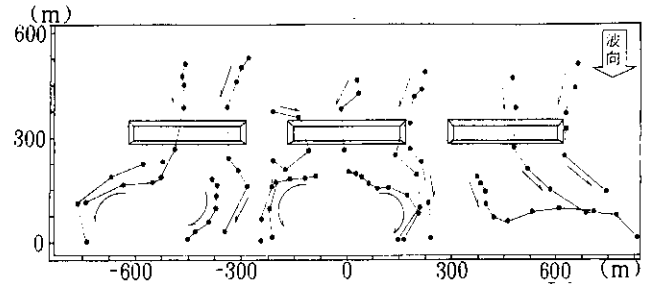


図-10.4 表層流況パターン（従来型，年最大波，不規則波，入射角 0° ）

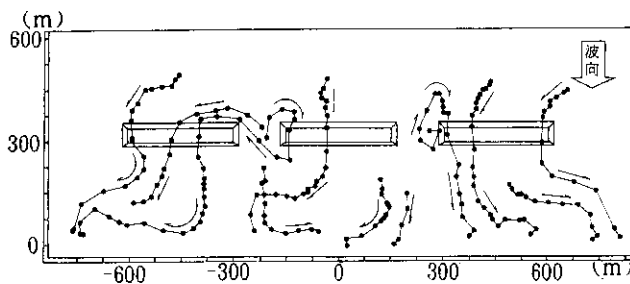


図-10.2 表層流況パターン（従来型，不規則波，入射角 0° ）

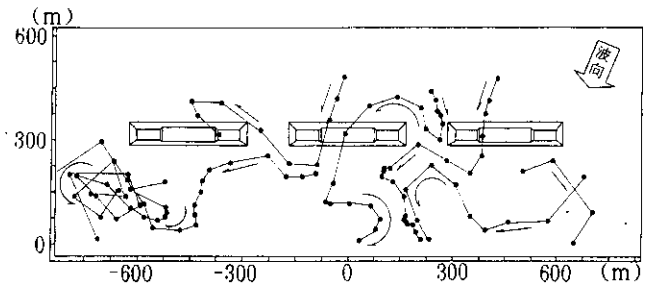


図-10.5 表層流況パターン（複合型，中間的な波，規則波，入射角 22.5° ）

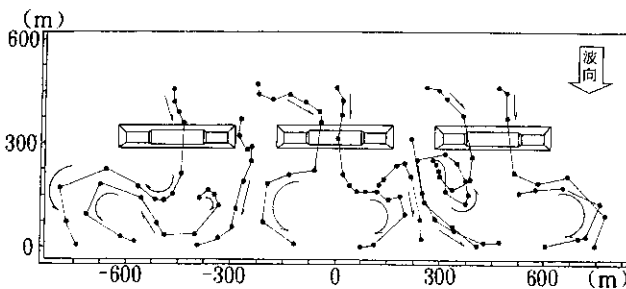


図-10.3 表層流況パターン（複合型，年最大波，不規則波，入射角 0° ）

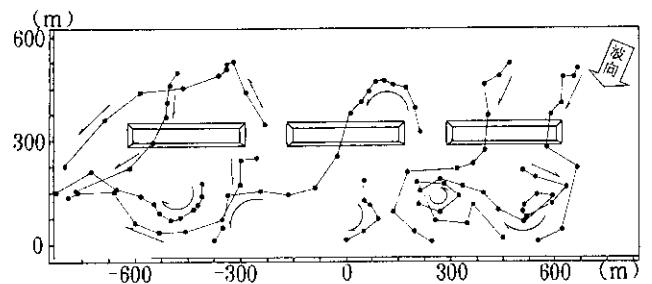


図-10.6 表層流況パターン（従来型，中間的な波，規則波，入射角 22.5° ）

ある。測定方法としては、表層流の場合、直径4cm、厚さ5mmの発泡スチロール製のフロートを水面に浮かべ、起波に伴う移動状況を35mmカメラにより10sec間隔で撮影して行った。各撮影時点のフロート位置は、地形模型上に引いた格子線を基準として求めた。実験波は、規則波と不規則波とした。底層流については直径3mm、比重1.08と水の比重よりやや重いトレーサーを現地スケールで75mあるいは37.5mのグリッド上に投入し、ビデオ撮影により追跡し、画像処理装置を用いて各地点の流速・流向を求めた。実験は規則波により行い、流速を求める際には規則波を用いたことによる規則的な振動の影響を考慮して処理を行った。

3. 2 実験結果

表層の流況実験結果を、図-10に示す。●は10secご

とのフロート位置を示す。中間的な波に対し入射角を $\theta_1 = 0^\circ$ とした場合、規則波、不規則波のいずれの波に対しても各リーフの背後に一对の循環流が形成された。リーフ背後の循環流については、宇多ら¹⁰⁾が汀線からの離岸距離、リーフ堤長、開口幅により流況パターンの発生分類を行っており、本実験の従来型リーフの設置条件とリーフ背後の循環流の形成パターンはそれに一致した。ただし3基のリーフの内、中央を除く2基のリーフ背後について比較すると、従来型リーフよりも複合型リーフの方が明瞭な循環流が形成されていることがわかる。また、リーフ上で向岸流、開口部で離岸流となる流れの発生パターンは一致しているが、複合型リーフの場合は両端の離岸堤部によりリーフ上での向岸流の発生範囲が制限されるため、リーフ端部の離岸堤部を中心とした比較

的径の大きな循環流の形成が明瞭に見られた。次に年最大波の場合は、不規則波ではリーフ背後に一对の循環流が形成されたが、規則波の場合には形成されなかった。この原因としては、規則波の場合、宇多らが示しているようにリーフ岸側位置での開口部の波高 H_m とリーフ背後の波高 H_t の差が小さくなっていたことがあげられる。また不規則波の場合、リーフ上における向岸流の発生は中間的な波の場合と同様であったが、開口部においても向岸流が発生したため、複合型リーフの離岸堤部を中心とした循環流は形成されなかった。入射角を $\theta_1=22.5^\circ$ とした場合の流況パターンについても $\theta_1=0^\circ$ の場合とほぼ同様であったが、リーフ背後に発生する循環流の中心は波の入射方向に変位しており、複合型リーフ周辺では隣接する離岸堤部を蛇行するような流れが見られた。

図-11は、底層流の流速分布である。中間的な波に対して $\theta_1=0^\circ$ とした場合、複合型・従来型リーフともその沖側で向岸流、開口部では離岸流が発生しており、リーフ背後では微弱な流れとなっている。年最大波の場合には複合型リーフ離岸堤部による影響がより明瞭に現

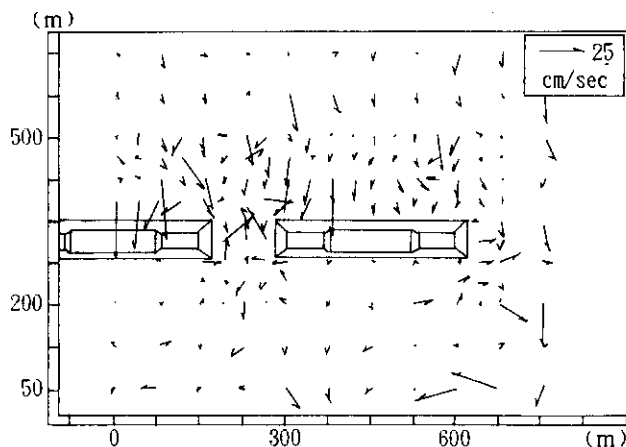


図-11.1 底層流速分布（複合型、中間的な波）

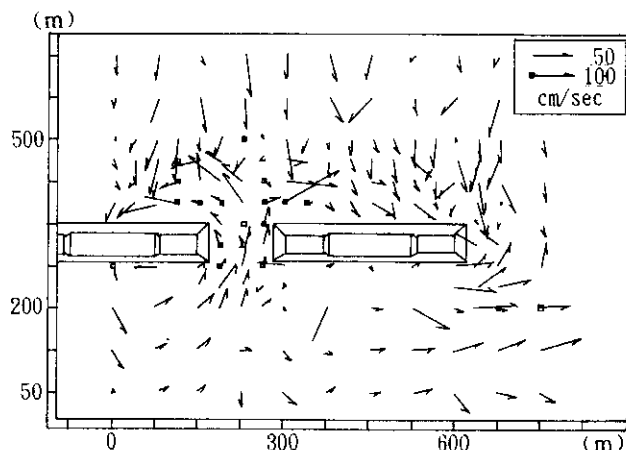


図-11.2 底層流速分布（複合型、年最大波）

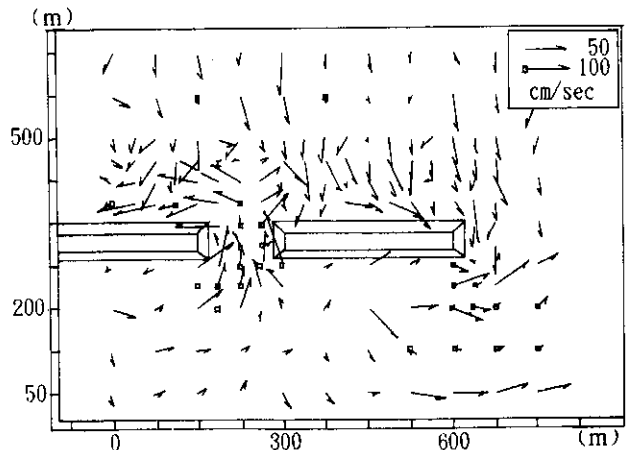


図-11.3 底層流速分布（従来型、年最大波）

われ、開口部側の離岸堤部を中心とした流れが発生している。また、両リーフの開口部のリーフ岸側位置の流れに着目すると、複合型リーフに比べ従来型リーフの流速が大きくなっている。この原因としては、従来型リーフの場合にはリーフ上全体で向岸流が発生するため複合型リーフよりもリーフ背後への水塊の流入量が多いが、水塊の流出部は両リーフとも同じ幅の開口部に限定されていることが考えられる。この結果より、開口部における海底の洗掘程度は従来型リーフの方が大きくなると考えられる。

4. おわりに

本研究で得られた主な結論は、次のとおりである。

- (1) 複合型リーフは従来型リーフに比べ、背後に一对の循環流が形成されやすく、また端部の離岸堤部を中心とする大きな循環流が形成されやすい。
- (2) 波高分布については従来型リーフに比べ、複合型リーフの離岸堤部背後で多少波高が小さくなるが、全体的には背後の静穏度に大差はない。

- (3) 非定常緩勾配方程式によりリーフ周辺の波高分布を計算し、計算結果は実験結果と比較的よく一致した。

また本研究より、非定常緩勾配方程式を用いた波高分布の計算法を人工リーフに適用する場合には、碎波減衰項の取扱いをより一般化しておく必要があり、またその結果を用いて海浜流の計算を行うことも人工リーフの設計あるいは配置計画に、不可欠であると考えられる。これらの点については、今後、さらに検討を行っていく所存である。

参考文献

- 1) 杜多 哲：消波循環流工周辺の流れの実験と現地観測，水産土木Vol.20, No.1, pp.65~74, 1984.

- 2) 谷野賢二・水野雄三：人工リーフによる波浪変形について，開発土木研究所月報，No438，pp.22～32，1989.
- 3) 渡辺 晃・丸山康樹：屈折・回折・碎波減衰を含む波浪場の数値解析法，第31回海講論文集，pp.103～107，1984.
- 4) 渡辺栄一：波浪によるホッキ貝の減耗に関する実験的研究，土木試験所月報No351，pp. 3～15，1982.
- 5) 上記2)に同じ.
- 6) 渡辺 晃・原 哲・堀川清司：重合した波浪場における碎波について，第30回海講論文集，pp. 5～9，1983.
- 7) 上記3)に同じ.
- 8) 谷野賢二・大村高史・平沢充成：2次元人工リーフの水理特性と周辺地形の変化について，第33回北海道開発局技術研究発表会(共通)，pp.53～58，1990.
- 9) 上記8)に同じ.
- 10) 宇多高明・小俣 篤・横山揚久：人工リーフ周辺に生じる海浜流と地形変化，第34回海講論文集，p p.337～341，1987.

*

*

*