

複合型人工リーフの水理特性について

平沢 充成*・谷野 賢二*・水野 雄三*
渡邊 康玄**・大村 高史***

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 59 km 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。ただし本海岸の水深 5~10 m の海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からだけではなく、漁船の安全操業の確保や、水産資源の維持増殖といった副次的機能についても積極的に取り込む必要がある。

本研究の対象となっている複合型人工リーフ（以下、複合型と呼ぶ）は、従来型的人工リーフ（以下、従来型と呼ぶ）の堤端部が離岸堤タイプとなる構造（図-1 参照）であり、従来型の機能に加えて、リーフ付近を航行する漁船の座礁防止や堤幹部に岸方向の流れを集中させ堤周囲に循環流を積極的に発生させることで、有用水産生物の浮遊卵、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。このような構造物が水産協調型として施工された例はこれまでも見られる（例えば、杜多，1984）が、胆振海岸のように大規模で多目的となる施工例はない。本研究では波浪減衰効果，流況

特性といった複合型の基本的な水理特性を 3 次元水理模型実験により調べるとともに，一般的な海底地形・波浪・構造物条件に対する波浪変形・流況を予測する数値モデルについても検討を行った。

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. + 0.08 m) に対し実験波として 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 $\theta_I=0^\circ$ （汀線に直角）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 T.P. -2.4 m までは 1/90，それより岸側では 1/12 の一様勾配とした。また実験では人工リーフを複数配置する場合のリーフ周辺の一般的な波高分布を調べるためリーフ模型を 3 基設置した。設置条件は堤脚水深 T.P. -6.0 m，開口幅 150 m とした。実験は長さ 28 m，幅 23 m，深さ 1 m の平面水槽に 図-2 に示す模型縮尺 1/150 のモルタル地形模

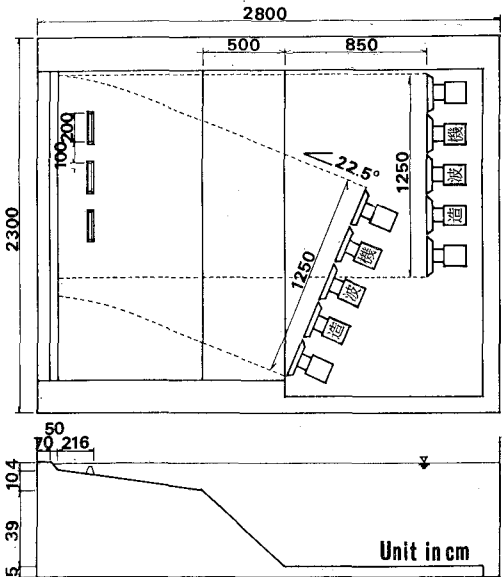


図-2 実験水槽

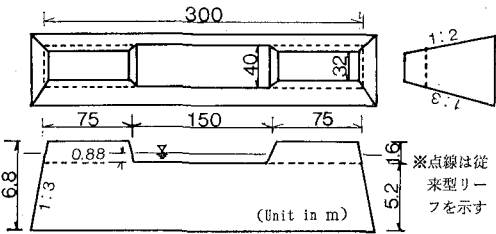


図-1 複合型人工リーフ構造図

* 正会員 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室
** 正会員 北海道開発局開発土木研究所河川研究室
*** 北海道開発局江差港湾建設事務所

表一1 実験波条件

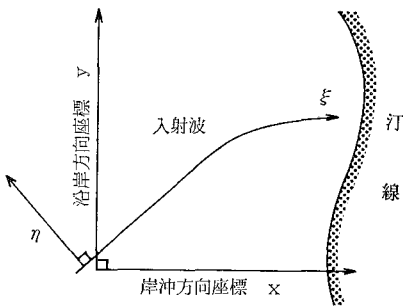
波 浪	周期(sec)	換算沖波波高(m)	潮 位	(m)
年最大波	8.5	4.5	M. S. L.	T. P.+0.08
中間的な波	6.5	2.3		

型を作成して行った。相似則としては Froude の相似則を採用し、歪みなしとした。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。リーフ模型は直径約 1 cm の碎石により作成した。

波高については、電気容量式波高計を用いて波形の計測を行い、ゼロアップクロス法により求めた。なお測定では水位上昇に伴う波高変化を考慮するため、造波機始動後、水槽内が定常化する 1 分後より記録を行った。実験波は規則波とした。

2.2 数値モデルによる波の変形計算

波の変形を考える場合、災害防止面からはリーフ背後の伝達波が、前述の副次的機能からは小型船舶の動揺やホッキ貝の減耗（渡辺，1982）を助長する反射波がそれぞれ問題になると考えられる。これらを満足する波の変形の解析手法としては渡辺ら（1984）により提案された非定常緩勾配方程式である。谷野ら（1989）は 1 次元の微小振幅の波浪場に対しこの手法を適用し、2 次元水路による実測値と反射率について比較を行い、リーフ沖側で碎波する場合以外はほぼ実測値と一致するという結果を得ている。ここで反射波の影響はリーフに対し波が直角に入射する場合に最大になると考えられることから、反射波は上記の計算法により検討を行えばよいと考えられる。しかしリーフ背後の波浪場を対象とする場合には、リーフ上を通過する伝達波とともにリーフ端部からの回折波の影響についても考慮する必要があるため、平面 2 次元の波浪場に拡張した数値モデルにより計算を行う必要がある。このような数値計算法は他にいくつか提案されているが、本研究では計算時間の短縮化を図るため式（1）に示す磯部（1986）の放物型方程式を用いた計算法により解析を行った。図一3 に計算座標系を示す。



図一3 計算座標系

$$\frac{1}{Gh_{\xi}} \frac{1}{h_{\eta}} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(G \frac{h_{\xi}}{h_{\eta}} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right) + 2ik_{\xi} \frac{1}{h_{\xi}} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + \left\{ \frac{i}{Gh_{\eta}} \frac{1}{h_{\xi}} \frac{\partial (k_{\xi} Gh_{\eta})}{\partial \xi} + (k^2 + k_{\xi}^2) + i \frac{\omega}{G} f_D \right\} \phi = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$f_D = \begin{cases} 0 & (\gamma \leq \gamma_b) \\ \alpha_D \sqrt{\frac{g}{d}} \sqrt{\frac{\gamma - \gamma_r}{\gamma_s - \gamma_r}} f_D(kd) \tan \beta & (\gamma > \gamma_b) \end{cases}$$
$$\gamma = k\sqrt{2E}/\tanh(kd)$$
$$\gamma_b = 0.53 - 0.3 \exp \{ -3\sqrt{d_b/L_0} \}$$
$$+ 5 \tan^{3/2} \beta \exp \{ -45\sqrt{d_b/L_0} - 0.1 \}^2 \} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 ϕ は水面変動の複素振幅、 (h_{ξ}, h_{η}) は直交曲線座標 (ξ, η) のスケールファクター、 $G=c c_g$ (c : 波速、 c_g : 群速度)、 k は波数、 ω は角振動数、 i は虚数単位、 f_D は碎波減衰項、 d は水深、 L_0 は沖波波長、 $\tan \beta$ は海底勾配、 E はエネルギー、下付き添字の b は碎波点における値を表す。碎波減衰項の係数 α_D については、碎波により計算上の反射波が発生することを防ぐため、碎波点を中心に半波長の区間で α_D を連続的に増加させているが、2 次元水路による実験結果を基に $\alpha_D = 1.6$ として計算を行った。

2.3 実験結果と計算結果

図一4 は複合型と従来型周辺の波高分布を比較するため、中間的な波について同じ測点での後者に対する前者の波高比率を示したものである。これによると複合型ではリーフ端部の離岸堤部前面と開口部から沖側にかけての領域で 10~20% 程度の波高増大が生じるが、リーフ背後においては最大 80% 程度の波高減少もみられ、広い静穏域が確保されていることが分かる。

次に人工リーフを設置した波浪場について、放物型方程式による計算の適応性について検討する。実験値との比較は複合型を対象に行った。図一5 はリーフ背後のある離岸距離における沿岸方向の波高分布について、実験結果と比較したものである。比較範囲は図一4 の点線内の領域である。図中の実験値は左右非対称となっているが、これは数値計算がリーフ 2 基を対象としているのに対して、実験ではリーフを 3 基設置しているためリーフ端部からの回折波の影響が非対称になるためと考えられる。しかしその程度は低く、放物型方程式を用いた計算法は、複合型の背後の波浪場を良く再現できると考えられる。

3. 海浜流の特性

3.1 実験方法

海浜流は表層と底層の 2 層を対象に測定を行い、前者

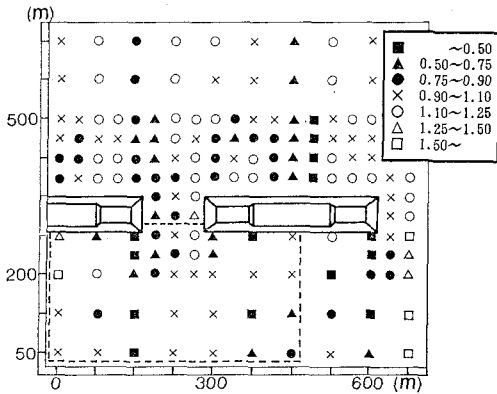


図-4 従来型に対する複合型の波高比率

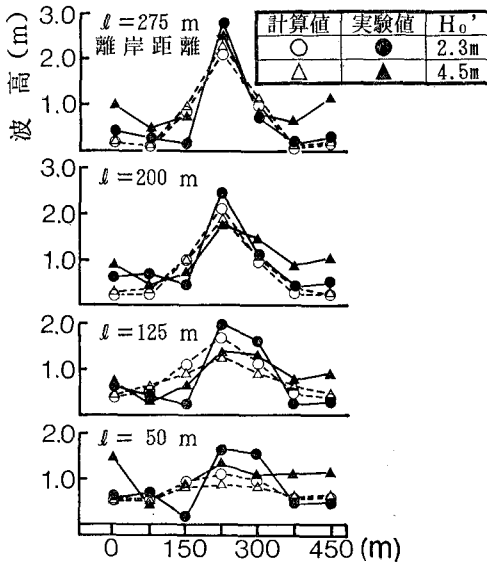


図-5 波高分布の比較

は流況パターン、後者では流速の平面分布を求めた。実験条件および実験模型は、入射角を2波向 ($\theta_I=0^\circ$, 22.5°) とした以外、波の変形実験の場合と同様である。表層の流況パターンの測定は直径 4 cm、厚さ 5 mm の円形フロートを使用し、35 mm カメラにより 10 秒間隔で撮影して行った。その場合、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である。底層流は直径 3 mm、比重 1.08 のトレーサーを波高測定値と同地点に投入し、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。実験波は規則波とした。

3.2 数値モデルによる海浜流の計算

海浜流は鉛直方向に一樣な流れを仮定し、2.3 で示した放物型方程式による波高分布の計算結果から radiation stress の分布を求め、これを外力として海浜流の場

を次の平均流に関する連続式、運動方程式より計算した。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U(h+\zeta)}{\partial x} + \frac{\partial V(h+\zeta)}{\partial y} = 0 \dots (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + F_x - M_x + R_x \\ + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \dots (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + F_y - M_y + R_y \\ + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0 \dots (5) \end{aligned}$$

ここに、 U 、 V は直交座標系 (x , y) の平均水深流速成分、 ζ は平均水位の上昇量、 h は静水深、 F_x 、 F_y は摩擦項、 M_x 、 M_y は水平拡散項、 R_x 、 R_y は radiation stress 項を表す。計算法の詳細は本間・堀川 (1985) の文献を参照されたい。

3.3 実験結果と計算結果

a) 実験結果

図-6 は表層の流況実験結果を抜粋したものである。●は10秒毎のフロート位置を示す。 $\theta_I=0^\circ$ 、中間的な波の場合、規則波、不規則波とも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 (1987) が離岸距離、リーフの堤長、開口幅により流況パターンの発生区分を行っており、本実験の従来型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。ただし左右のリーフの背後を比較すると、従来型よりも複合型の方が明瞭な循環流が形成されていることが分かる。またリーフ上で向岸流、開口部で離岸流という流れの発生パターンは両リーフで一致しているが、複合型で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、リーフ端部を中心とする比較的径の大きな循環流の形成が明瞭に見られる。次に年最大波の場合、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、規則波の場合には認められなかった。この原因としては、リーフ岸端位置での開口部の波高 H_m とリーフ背後の波高 H_l の差が小さいことが考えられる (宇多ら, 1987)。また不規則波の場合、リーフ上の向岸流の発生は中間的な波の場合と同様であったが、開口部でも向岸流が発生し、複合型の離岸堤部を中心とする循環流は形成されなかった。 $\theta_I=22.5^\circ$ の場合の流況パターンは $\theta_I=0^\circ$ 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、複合型の周辺ではリーフ両端の離岸堤部を蛇行するような流れがみられる。

図-7 は底層の流速分布図である。波浪条件が $\theta_I=0^\circ$ で中間的な波の場合、複合型・従来型ともリーフ前面で向岸流、開口部では離岸流が発生しており、リーフ

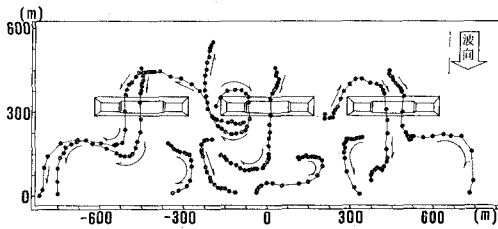


図-6(a) 表層流況パターン (複合型, 中間的な波, 不規則波, 入射角 0°)

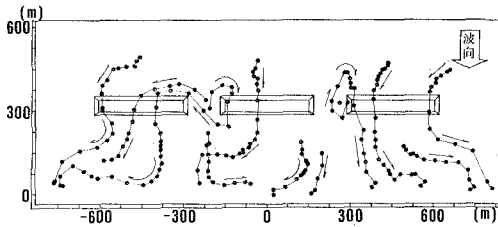


図-6(b) 表層流況パターン (従来型, 中間的な波, 不規則波, 入射角 0°)

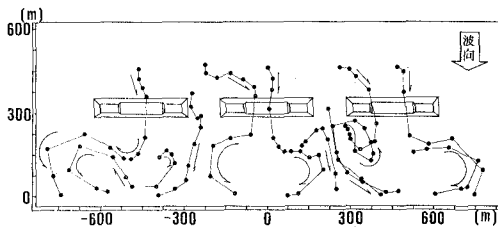


図-6(c) 表層流況パターン (複合型, 年最大波, 不規則波, 入射角 0°)

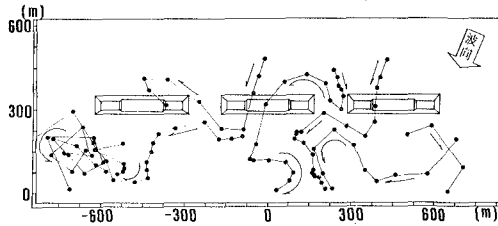


図-6(d) 表層流況パターン (複合型, 中間的な波, 規則波, 入射角 22.5°)

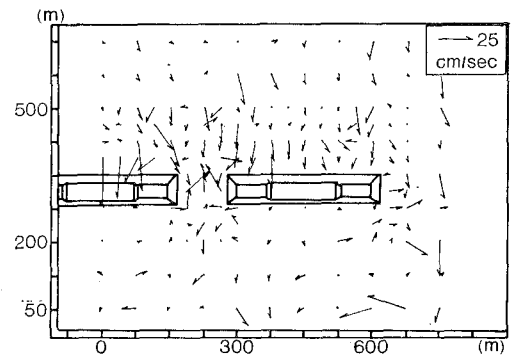


図-7(a) 底層流速分布 (複合型, 中間的な波)

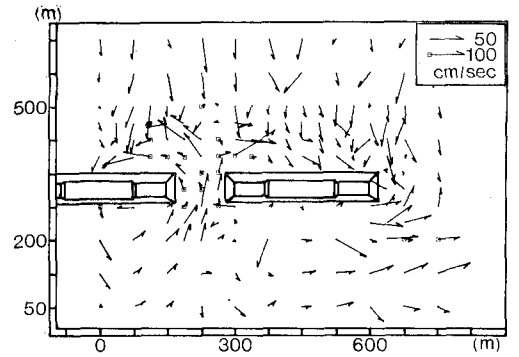


図-7(b) 底層流速分布 (複合型, 年最大波)

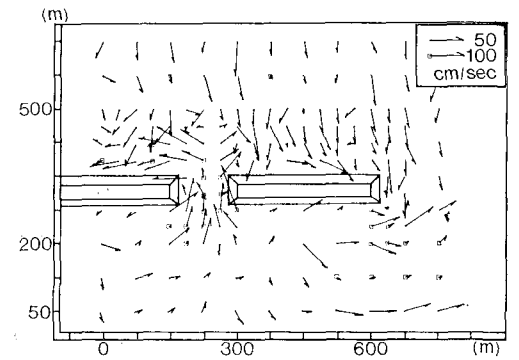


図-7(c) 底層流速分布 (従来型, 年最大波)

背後では微弱な流れとなっている。年最大波の場合は複合型の離岸堤部の影響が強調され、開口部側の離岸堤部を中心とする流れがみられる。また両リーフの開口部リーフ岸側位置の流れに着目すると、複合型に比べ従来型の流速が大きいことが分かる。この原因として従来型の場合、リーフ上全体で向岸流が発生するため複合型に比べ背後への水塊の流入量が多いが、水塊の流出部は開口部に限定されていることが考えられる。これより開口部の洗掘程度は、従来型の方が大きくなると予測される。 $\theta_I=22.5^\circ$ の場合は複合型のみ実験を行い、年最大波で

リーフ前面に沿岸方向の流れがみられたが、全体の流況パターンは $\theta_I=0^\circ$ の場合とほぼ同様であった。

b) 計算結果との比較

図-8 は数値計算による複合型の $\theta_I=0^\circ$ の場合の流速ベクトル図である。リーフ背後においては、模型実験による底層流の流況パターンを比較的よく再現している。しかしながら開口部とリーフ側方の再現性は低くなっており、リーフ前面の反射波を無視して波浪場の計算を行った影響が現れたものと考えられる。

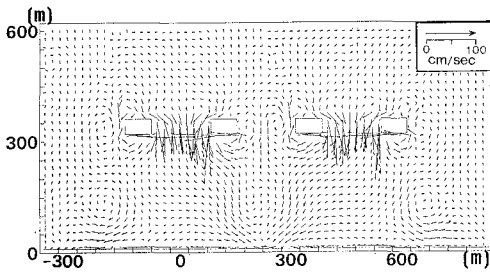


図-8(a) 海浜流の計算結果 (複合型, 中間的な波)

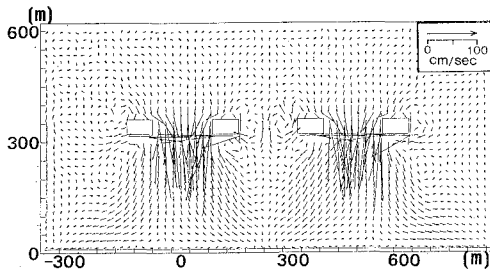


図-8(b) 海浜流の計算結果 (複合型, 年最大波)

4. おわりに

本研究では, ①複合型リーフは従来型リーフに比べ, 背後の一对の循環流が形成されやすく静穏域も広がるため, 胆振海岸における海岸侵食や越波防止に効果が現

れると考えられること, ②リーフ両端を離岸堤タイプにすることで漁船の安全航行の確保が図られ, 中間的な波程度の波浪場での離岸堤部を中心とする大きな循環流の形成により水産物増殖面での効果も期待されること, ③複合型リーフ背後の波浪場は放物型方程式により良く再現され, 流れの計算も比較的实验結果と一致することなどを示した. しかしながら流れの計算の再現範囲をリーフ前面を含む領域まで拡張する場合, リーフ前面の反射波の影響が無視できなくなるため, 今後は反射波の影響も考慮した数値モデルによる検討を行う必要があると考える.

参考文献

- 磯部雅彦 (1986): 放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・碎波変形の計算法, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 134~138.
- 宇多高明・小俣 篤・横山揚久 (1987): 人工リーフ周辺に生じる海浜流と地形変化, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 337~341.
- 本間 仁・堀川清司 (1985): 海岸環境工学, 東京大学出版会, 582 p.
- 杜多 哲 (1984): 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.
- 谷野賢二・水野雄三 (1989): 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 No. 438, pp. 22~32.
- 渡辺 晃・丸山康樹 (1984): 屈折・回折・碎波減衰を含む波浪場の数値解析法, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 103~107.
- 渡辺栄一 (1982): 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 No. 351, pp. 3~15.