

人工リーフ背後における海浜流と漂砂の制御

下園 武範*・鈴木 淳也*・佐藤 慎司**・磯部 雅彦***

人工リーフは背後に複雑な海浜流場を生じることが知られているが、それに関する研究の蓄積は乏しく未だ不明な点が多い。本研究では粒子追跡による画像計測システムを開発し、それを用いて様々な条件下で人工リーフ背後に生じる流れ場の空間構造を調べた。その結果、リーフ背後の流況は2つの支配的な循環流のバランスによって合理的に説明できることを示した。さらに得られた知見をもとに背後の流況改善を目的として2種類の改良型人工リーフを提案した。固定床および移動床実験でそれらの性能を検証した結果、両者ともに消波性能を損なうことなく背後の流況を改善し、堆砂効果を高めることができた。

1. 序 論

近年、波浪・漂砂制御構造物として人工リーフが導入される事例が急増している。人工リーフは十分な波浪低減効果を有するとともに、その没水性ゆえに海岸景観に対する阻害要因が少ない反面、堆砂効果という点では従来の離岸堤に劣る場合が多い。その原因のひとつはリーフでの碎波に伴って背後水域で平均水位が上昇し、周囲へ発散する強い流れに乗って砂が流出してしまうことである。宇多ら(1987)はリーフ背後に生じる海浜流をリーフの平面配置と関連付けて4つのパターンに分類し、移動床実験によってリーフ背後に1対の循環流が発達するパターンで堆砂効果が高いことを確認している。しかしながら、人工リーフの消波性能については豊富な研究例があるものの、漂砂制御に重要となる海浜流の特性には未だ不明な部分が多い。そこで本研究では、水理模型実験に基づいて様々な条件下でリーフ背後に生じる流れ場の構造を調べた上で、得られた知見をもとに安定した循環流を形成し得るようなリーフ断面・平面形状の開発を試みた。

2. リーフ形状の改良のための予備実験

(1) 流れ場の可視化実験の概要

リーフ周辺に生じる海浜流の空間構造を明らかにするために、平面造波水槽にリーフ模型を設置して背後の流況を可視化する実験を行った。予備実験で水槽内にリーフ模型を複数基設置したところ周辺の流況が非対称になるケースが多く見られたため、図-1に示すように薄い金属板で仕切られた領域に碎石で製作したリーフを左半分のみ設置した。図-1の背後水域は波が汀線に直角に入射する限りにおいて、沿岸方向に一定間隔で無数のリーフ模型を設置した場合と等価とみなすことができ

る。表-1に下線で示したリーフ諸元を基本として天端幅 B 、堤長 L 、天端水深 R 、開口幅 W 、離岸距離 Y および一樣水深部 ($h=0$ cm) における入射波高 H 、周期 T を変えながら背後の流況を次節に示す方法で可視化した。

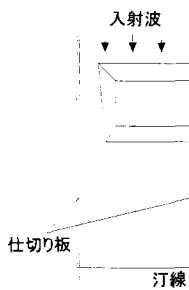


図-1 計測対象領域

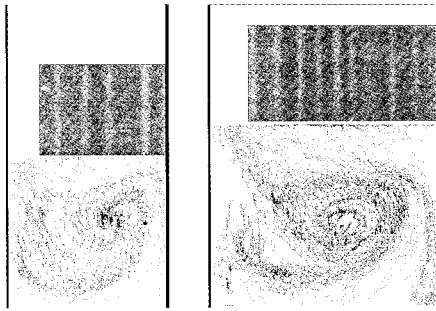
表-1 実験条件

B (cm)	30, <u>40</u> , 50
L (cm)	80, <u>100</u> , 120, 140, 160
R (cm)	<u>1</u> , 2
W (cm)	10, <u>30</u> , 50, 70, 90
Y (cm)	70, 80, <u>90</u> , 100
H (cm)	<u>3</u> , 4
T (cm)	0.8, <u>1.0</u> , 1.2, 1.5

(2) 流れの可視化

流況を詳細に議論するためには、高い解像度で流れ場を求める必要がある。ここではトレーサー粒子を対象領域に投入し、流れ場の様子を真上から撮影した連続画像を解析することで、Lagrange 的に各粒子を追跡する PTV に基づく計測手法を開発した。粒子比重については漂砂移動を考える上で重要な底層付近の流れを可視化するため 1.05 程度とし、表面波の存在する条件下で白色の底面から粒子像を分離するため赤色のプラスチック粒子を選定した。粒子径は流れへの追従性という観点からは小さいほど好ましいが、所定のビデオ解像度で広い範囲の情報を得るためにはある程度の大きさが必要となる。このようなことを勘案して、ここでは粒子径を 5 mm とした。撮影した映像を 30 fps でフルカラー連続画像に変換し、各画像の RGB 値から HSV 値(色相, 彩度, 明度)を算出し、色相および彩度に関値を設定することで背景から粒子像を分離している。背景が消去された画像上で各連結領域にラベルをつけ、それぞれの重心を粒子位置とした。粒子追跡法としては現在時刻の各粒子に次の時刻に認識された粒子のうち最も近いものを対応付け、そ

* 学生会員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻
** 正 会 員 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤学専攻
*** フェロー 工博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

図-2 流れの可視化画像の例(左 $Y=70$ cm, 右 $L=160$ cm)

の移動距離がある基準値より小さい場合にのみ採用するという簡単な方法をとった。この方法は撮影時間間隔が短く、領域内の粒子数が少ない場合には十分正しい対応付けを行うことができる。対象とする流れは規則波の下で定常状態にあると考えられることから、比較的長い時間にわたって領域外から少量ずつ粒子を投入しながら撮影を行った。図-2に以上の方法による粒子追跡結果の例を示す。図は投入した粒子の軌跡群を表し、軌跡の密度が薄い領域は底層で発散的な流れが形成されている箇所である。

(3) 改良型リーフ

今回の実験条件の範囲内では、リーフ背後の流れ場はリーフ上から背後水域にかけて発達し開口部へ向かう流れ(図-3中①)と、汀線付近で発達する①と逆回転の流れ(図-3中②)とのバランスによって決まることが分かった。以下では、前者を循環流Ⅰ、後者を循環流Ⅱと呼ぶことにする。なお、各パラメータと流況の関係は紙数の制限上ここでは触れないが、宇多ら(1987)が示した4つのパターンでは分類できないことが分かった。流れの向きから判断すると、循環流Ⅱは背後への堆砂を促し、逆に循環流Ⅰは背後の砂を開口部から堤外へと流出させるものと考えられる。したがって、リーフ背後の流況を安定化し堆砂効果を促すためには循環流Ⅰを抑制し、循環流Ⅱを発達させることが有効であると考えられる。循環Ⅱの大きさはリーフ天端を越えて背後水域に流入する水量に規定されることから、リーフ上での向岸流が後背域に達する前に沖側へ排水するような工夫が必要となる。ここでは図-4(a), (b)に示す2通りの方法を考えた。(a)溝型は天端上で沿岸方向に溝を設け、沿岸方向の流れを誘起することで背後水域への流入を低減する。一方の(b)パイプ型はリーフ下部に岸沖方向にパイプを埋設し、リーフ沖側と岸側の水位勾配を利用した排水による流況改善を狙ったものである。どちらのタイプも新たな循環流を引き起こすことによって、図-3の循環流Ⅰを弱めることを意図している。本研究ではこれら

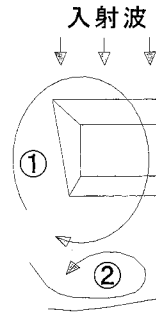


図-3 リーフ周辺の流況

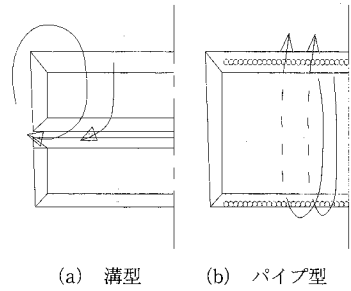


図-4 改良型リーフ

2つの改良型リーフの性能を検証するために、従来型と合わせて3通りのリーフについて固定床および移動床実験を行った。

3. 実験の概要

実験は図-5に示すように幅11 m, 長さ6 m, 勾配1/20の平面造波水槽に砕石で製作した人工リーフ模型を三基設置して行った。人工リーフ模型の平面諸元は堤長100 cm, 幅40 cm, 離岸距離100 cm, 設置間隔30 cm, 断面諸元については天端水深が1 cmになるよう天端高を岸側で4.7 cm, 沖側で6.7 cmに設定した。溝型として図-5(b)のようにリーフ中央で沿岸方向に幅10 cmのスリットを設け、パイプ型としては図-5(c)のようにリーフ内に内径19 mmのパイプを1段並べて埋設している。スリットやパイプは必ずしもリーフ全域にわたって設置する必要はないものと思われるが、ここではそのことも含めて検討するため沿岸方向に一様に配した。

固定床実験では各ケースについて周期1 s, 波高3 cmの規則波を汀線に直角に入射させ、リーフ周辺での波高,

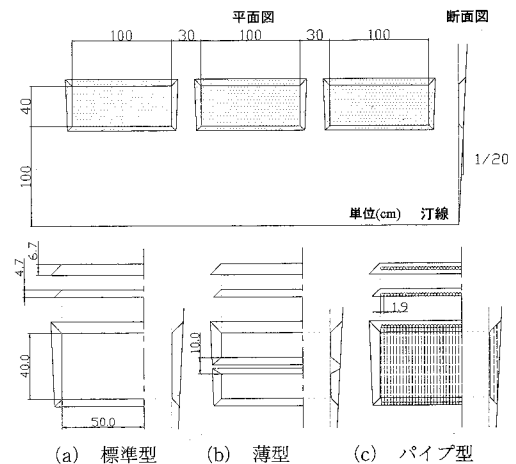


図-5 リーフ諸元

平均水位および平均流速の分布をそれぞれ容量式波高計, 電磁流速計を用いて計測し, さらに前述の方法で背後水域の流況を可視化した。

移動床実験については中央粒径 0.36 mm, 淘汰係数 1.35 の相馬珪砂を 4 cm の厚さで水槽内に敷き詰めて行った。固定床実験と同条件の波を作用させ, 30 分毎の地形変化の様子を写真撮影し, 3 時間後の地形をレーザー変位計で計測した。

4. 固定床実験の結果

(1) 中央リーフ周辺の波高分布

図-6 は各ケースでの中央リーフ周辺の波高分布を示している。すべてのケースで入射波はリーフ沖端で砕け, 開口部ではリーフ岸端よりもさらに岸側で砕波している。リーフ沖側および開口部で波高が大きいのはリーフ

沖側法面および側面での反射による重合のためである。溝型では堤体体積の減少による透過率の増大が危惧されたが, リーフ背後水域の波高分布に標準型との有意な差は見られない。その理由としては溝幅が十分小さく, 溝の存在が直接砕波減衰に影響しないことや岸側リーフ法面での反射などが考えられる。また, 溝上で波高が再び大きくなるのは開口部から溝内への回折波の侵入による影響が大きい。パイプ型については標準型と同じ天端形状を有することから, 全域で標準型とほぼ同一の波高分布を示している。

(2) 中央リーフ周辺の平均水位と底面流速場

図-7, 図-8 はリーフ周辺の水位変化および底面付近の流速場を示している。各ケースとも砕波点の位置に対応してその岸側では水位上昇, 沖側では水位低下が起きている。背後水域で平均水面が波打っているのはリー

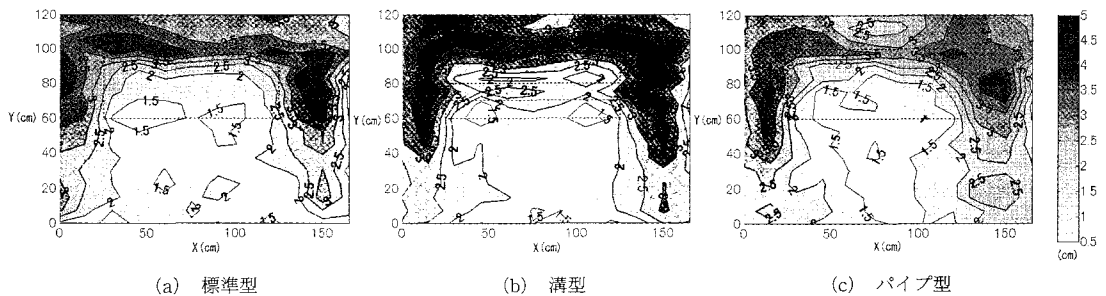


図-6 中央リーフ周辺の波高分布 (入射波高 $H=3.0$ cm, 周期 $T=1$ s)

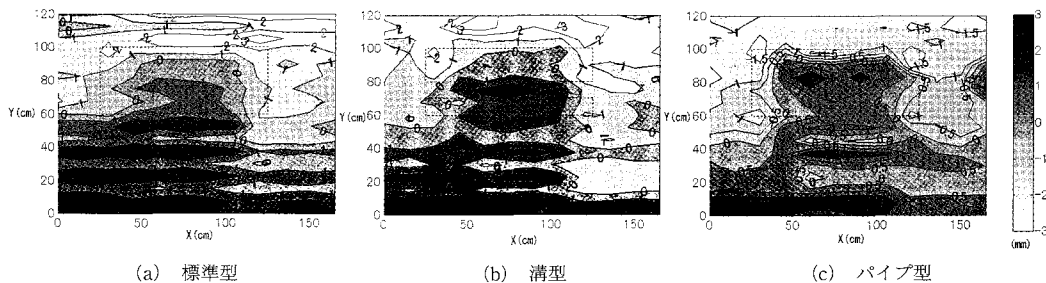


図-7 中央リーフ周辺の平均水位分布

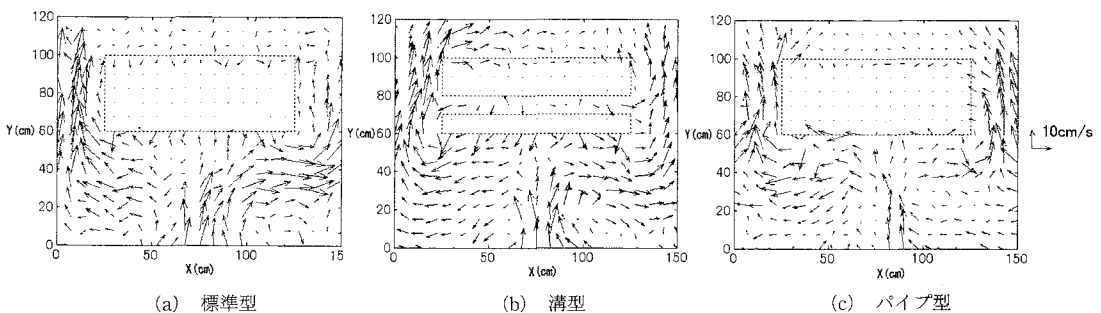


図-8 中央リーフ周辺の底面流速場

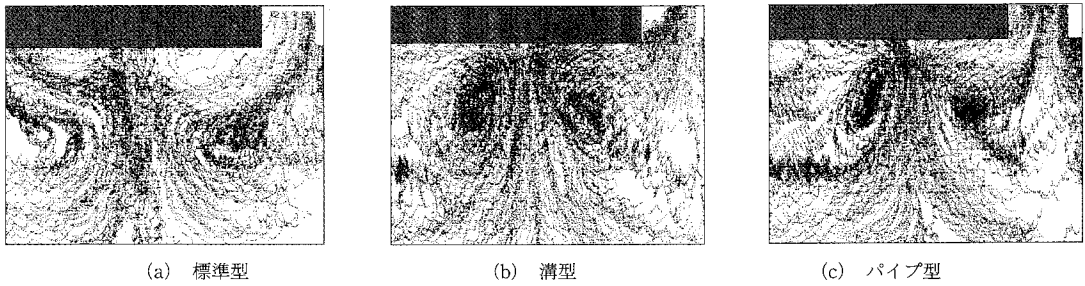


図-9 中央リーフ周辺の流況

フ透過波と開口部からの回折波の重合によるものと考えられる。標準型では背後水域で水位上昇量が大きく、開口部へと向かう強い流れが存在する。溝型では標準型と比べて溝上中央で大きな水位上昇が生じ、リーフ直背後の水位上昇量は低減している。それに対応するように溝内には開口部へ向かう流れが確認でき、背後水域では開口部へ向かう流れが弱まり、流況が安定化している。溝内を開口部へ向かう流れは溝中央部では見られず、両端に行くほど大きくなっている。

パイプ型でも同様にパイプによる排水効果によってリーフ直背後での水位上昇が抑制され、背後水域の流況が安定化している。パイプ内を沖に向かう流れは、染料による観測からリーフ中央部で大きく両端部ではほとんど確認できなかった。

(3) 中央リーフ背後の流況

図-9は中央リーフ背後水域で底面付近の流況を可視化したものである。標準型では背後水域に循環流IIが存在するがリーフ上からの循環流Iによって押しつぶされたような形となっている。このケースでは背後水域に投入した粒子はそのまま開口部へと向かい沖へと流出する。一方、溝型では溝の設置によってリーフ上からの岸向き質量流束が低減した結果、循環流IIがリーフ直背後にまで大きく発達し、安定した流況が形成されている。リーフ上に投入した粒子は溝を通して開口部へと抜け、リーフ沖側へ回り込んで再びリーフ上に達することから、意図した循環流の形成が確認された。このケースでは背後水域に投入した粒子のいくつかは循環流の中心に留まった。パイプ型についてはリーフ上では標準型と同じ大きさの流れが存在するものの、背後水域に達した瞬間にパイプを通して沖に排水されるため、溝型と同等の効果が得られている。

5. 人工リーフ周辺で発達する流れのメカニズム

これまで明らかにになった人工リーフ周辺の海浜流場の構造を支配するメカニズムを明らかにするため、数値

シミュレーションによる検討を行った。ここでは波浪モデルには非定常緩勾配方程式、砕波判定には波速流速比、砕波減衰モデルには Dibajnia・渡辺 (1987) を用いた。標準型および溝型の人工リーフ周辺の波浪場を求め、渡辺・塩崎 (1982) の方法に従ってラディエーション応力を評価し、平均水位変化を無視した外力項

$$R_x = \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$R_y = \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right) \dots\dots\dots (2)$$

を求め、それぞれ図-10 (a), (d) にベクトル場として表した。また、外力項を非発散成分（主に海浜流による摩擦力と釣り合う）と非回転成分（主に水位変化と釣り合う）に分離したものを図-10 (b), (e) および (c), (f) に示している。なお、図中でリーフ位置は点線で示しており、非発散成分は外力項の5倍のスケールで表示し

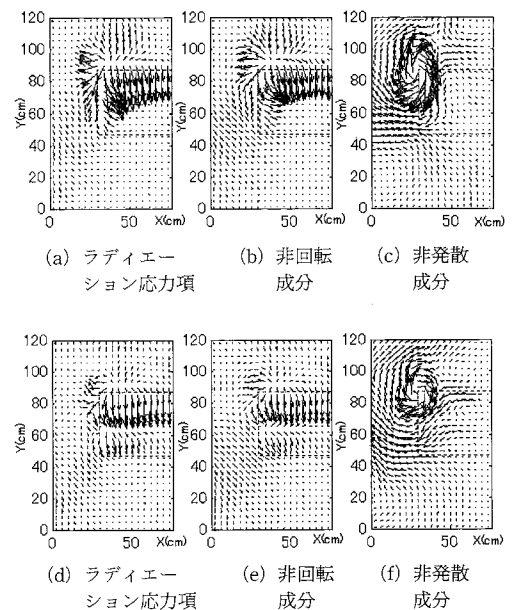


図-10 外力項とその非回転成分および非発散成分

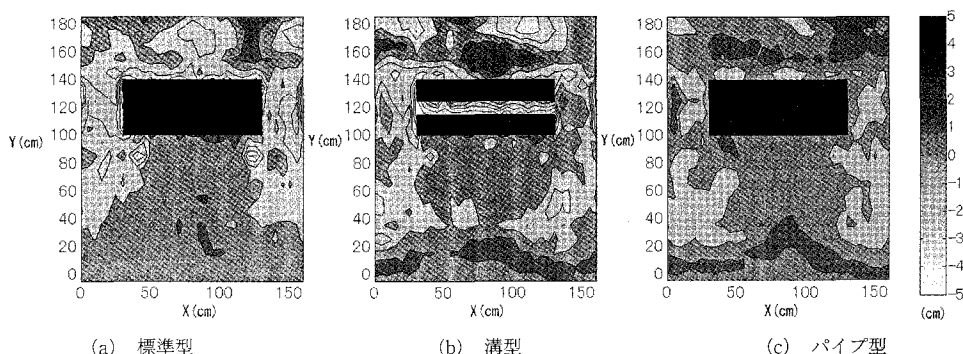


図-11 中央リーフ背後水域での地形変化量

ている。

外力項の大部分は非回転成分であり、すなわち水位変化として受け持たれる。一般的な人工リーフではリーフ沖側隅角部で波が集中し、岸向きかつ堤体内に向かって外力が大きい箇所が存在し、非回転成分だけで受け持つことができず非発散成分が生じる。換言すれば、平均水面の不連続を解消する代償としてリーフ端部に循環流Ⅰを生じる。循環流Ⅱについては開口部岸よりの領域で碎波による大きな外力が水位上昇を引き起こすが、リーフ岸側隅角部では外力が小さいため、この二つの領域の水位差を埋める代償として生じる。

一方、溝型では開口部から溝へ波が侵入することで沖側隅角部でのラディエーション応力の勾配が小さくなり、代償としての循環流Ⅰの規模も縮小される。同時に溝への波の侵入はリーフ直背後の水位上昇を低減し、結果として循環流Ⅱはリーフ岸側隅角部からリーフ直背後へと向きを変えることになり、その規模を大きくする。このような外力場の変化に加えて、溝の部分で水深が急増することによるエネルギー損失の存在や、摩擦力の急激な減少により溝の内部で図-7に示したような背後の水位上昇を緩和する流れが発達することも流況改善効果につながったものと考えられる。なお、パイプ型についてはリーフ岸側と沖側の水位勾配を利用した排水によってリーフ直背後の水位上昇が低減された結果、循環流Ⅱが安定化したと考えられる。

6. 移動床実験の結果

図-11は波を作用させた3時間後の中央リーフ背後水域の地形変化量を示したものである。標準型では開口部へ向かう強い流れの存在のため、汀線付近に顕著な堆積は見られない。これに対して溝型、パイプ型では汀線付近の堆積が大きく、左右対称な舌状砂州の形成が見ら

れる。溝型に比してパイプ型の砂州の方が沖に向かって伸びており、これはパイプによる排水効果により背後水域中央で沖向き流れが強められた結果であると考えられる。いずれのケースでも開口部背後では侵食を受けていることから、溝型およびパイプ型に見られる汀線付近の堆積は循環流Ⅱによって開口部背後の砂が集められたものと考えられる。また開口部の洗掘およびリーフ沖側の侵食は標準型および溝型で大きく、パイプ型では小さい。これはパイプ型では開口部を沖に向かう流量が低減された結果であると考えられる。なお、パイプ型ではパイプが砂で詰まることが危惧されたが、本実験ではそのようなことはなかった。

7. ま と め

本研究では人工リーフ背後の流況改善および堆砂効果向上を目的として、海浜流の可視化手法を開発し、様々な条件のリーフ周辺に生じる流れ場の構造を調べた。その結果、リーフ周辺の流況は2つの循環流のバランスで合理的に説明できることを示した。さらに得られた知見をもとに2種類の改良型人工リーフを提案し、固定床および移動床実験でそれらの性能を検証した結果、両者ともに消波性能を損なうことなく、背後の流況を改善し、堆砂効果を高めることができた。

参 考 文 献

- 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回海講論文集, pp. 337-341.
- 建設省河川局海岸課監修 (1992): 人工リーフの設計の手引き, (社) 全国海岸協会, p. 10.
- 渡辺 晃・塩崎正孝 (1982): 構造物周辺の波浪・海浜流速場について, 第29回海講論文集, pp. 110-114.
- Dibajnia Mohammad・渡辺 晃 (1987): 波浪場と海浜縦断地形変化の数値計算モデル, 第34回海講論文集, pp. 291-297.