

人工リーフ周辺の流れ・漂砂についての検討

EXAMINATION OF NEARSHORE CURRENTS AND LITTORAL DRIFT AROUND ARTIFICIAL REEF

鷺見 浩一¹・和田 明²
Hirokazu SUMI and Akira WADA

¹学生員 工修 日本大学大学院 生産工学研究科 (〒275 千葉県習志野市泉町1-2-1)

²正会員 工博 日本大学大学院教授 生産工学研究科 (〒275 千葉県習志野市泉町1-2-1)

When installing an artificial reef on the shore, the general practice is to provide an opening width between breakwater bodies. The condition of the nearshore current and littoral drift varies depending on the setting of breakwater length and opening width. In this research, the nearshore current, littoral drift and wave height distribution at the time when the breakwater length and opening width were changed is discussed on the basis of experimental results. The wave height distribution was analyzed numerically. The results of calculations by the time-dependent mild slope equation agree with experimental results. The nearshore current is dependent upon the breakwater length and opening width, and the larger the opening width is reference to the breakwater length the more easily the circulating current is general. The topographic change is affected by flow patterns and deposition occurs on the front shore when circulating current is generated. It was also confirmed that the artificial reef is effective in controlling the littoral drift.

Key Words : artificial reef, nearshore current, littoral drift, wave height distribution

1. はじめに

海岸の環境保全と景観確保, 海洋レクリエーション空間の創出等の要請から, 天端面が水面下にある人工リーフの施工計画例が近年増加している。

人工リーフの設置目的としては大別すると海底を浅くして砕波を促進し, 入射波を減衰させる波浪の静穏化を実現するものと, 漂砂活動を規制し, 堤体背後域の砂の流出を防止して一定量の海浜を確保する海浜の安定化を実現することの2通りが挙げられる。後者の目的を達成するために, 海岸に複数の人工リーフを設置する際, 堤体間に開口部を設けて設置することが一般的である。このとき, 人工リーフの堤長と開口部の長さを変化させることで, 堤体上と開口部を透過した伝達波の波高変化から特徴的な海浜流が生じ, それに伴い海岸地形が変化することは宇多・小俣¹⁾, 宇多ほか²⁾の研究により知られている。しかし, 堤長と開口幅を変化させたときの流況パターンと海浜変化の関係等の水理特性の定性的な説明は十分とはいえない。

そこで本研究では, 複数の人工リーフを設置した場合, その堤長と開口幅が流れのパターンや循環流の形成, 海浜の安定化にどのような影響を与えるか基本的知見を得るため移動床実験を行った。合わせて, 人工リーフ周辺の平面波浪場を数値シミュレー

ションを行い推定した。さらに, 実験結果と計算結果から人工リーフの平面諸元の最適な配置を検討した。

2. 実験装置と実験方法

実験には, 平面造波水槽(長さ13.0m, 奥行き7.6m, 高さ0.5m)を用いた(図-1)。相似則としてはフルードの相似則を採用し, 歪みなしとした。縮尺は1/50とし, 海浜模型は中央粒径 $d_m=0.19\text{mm}$ のケイ砂を用い初期勾配 $i=1/15$ の斜面上に重量が3~4gの碎石を基礎マウンドとした人工リーフ模型を設置した。堤体の断面諸元は法面勾配 $S=1/3$, 天端幅 $B=1.0\text{m}$, 堤体高さ $d=14.0\text{cm}$, 天端水深 $R=6.0\text{cm}$ とした。平面諸元は図-2に示すように, 堤長 L_r と開口幅 W ならびに離岸距離 Y からなっている。実験の組み合わせは, 表-1に示すようにした。

作用波浪は, 入射波高 $H_I=6.0\text{cm}$, 周期 $T=1.13\text{s}$, 波向きは 0° (汀線直角方向)として5時間作用させた。測定項目は海浜流の流況, 海浜地形, 波高分布である。海浜流の流況は図-1に示すように, 沖側から法尻まで30cm間隔, 堤体背後では15cm間隔の正方格子において人工リーフ周辺の約350点となる測定点で, 電磁流速計を用いて静水面下約2cmの表層の流速を

表-1 実験ケース

ケースNo.	Lr (m)	W (m)	Y (m)
1	2.0	0.3	1.8
2	2.0	0.75	1.8
3	1.0	0.22	1.8
4	1.0	0.75	1.8
5	1.0	1.25	1.8

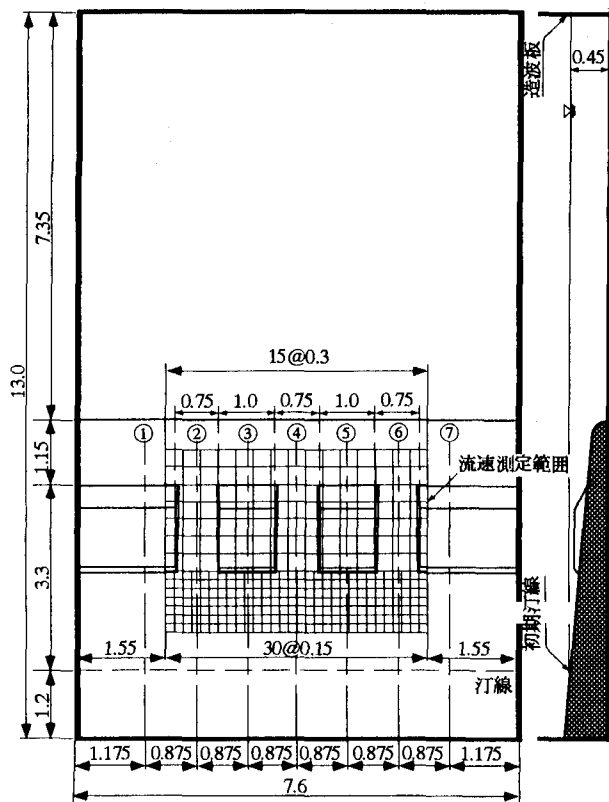


図-1 実験水槽 (単位:m)

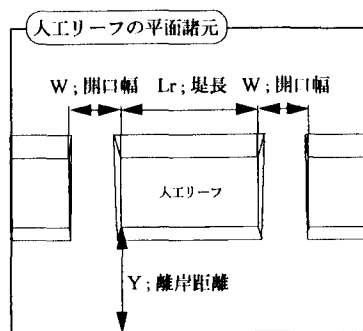


図-2 人工リーフの平面諸元

測定した。海浜地形・波高分布については各実験平面の組合わせに対し、汀線直角方向に測線を設け岸沖方向に10cm間隔で行った。流況・波高分布の計測は、それぞれ造波開始の約3.5, 4時間後から行った。

3. 波浪計算モデル

(1) 基礎方程式

人工リーフなどの没水型の海岸構造物を含む波浪場は、波の屈折、反射および砕波変形を含み、これらの変形過程をすべて考慮した計算方法を用いる必要がある。そこで、本研究では、浅海域でのこれらの各変形現象を包括的に評価することが可能である渡辺・丸山³⁾、丸山・鹿島⁴⁾による非定常緩勾配方程式を用いて数値シミュレーションを行うことにした。

静水面を原点とした右手系直行座標における砕波減衰項を付加した非定常緩勾配方程式は式(1)で与えられる。

$$\frac{\partial \bar{Q}}{\partial t} + C^2 \nabla \zeta + f_D \bar{Q} = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{n} \nabla(n\bar{Q}) = 0 \quad (1b)$$

ここに、 ζ は水面変動、 $\bar{Q} = (Q_x, Q_y)$ は線流量ベクトルである。 C を波速、 n を浅水度、波数を k 、水深を h としたとき、角周波数 σ は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma^2 &= gk \tanh kh, \quad C = \sigma/k \\ n &= (1/2)(1 + 2kh/\sinh 2kh) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(1a)の左辺第三項の砕波減衰係数 f_D は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} f_D &= \alpha_D \tan \beta \sqrt{\frac{g}{h} \left(\frac{\hat{Q}}{Q_r} - 1 \right)} \\ \hat{Q} &= \sqrt{\hat{Q}_x^2 + \hat{Q}_y^2}, \quad Q_r = r' \sqrt{gh^3} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここに、 $\hat{Q}_x$ 、 $\hat{Q}_y$ は線流量の振幅、 $\tan \beta$ は砕波点付近の海底勾配、 α_D 、 r' は定数でそれぞれ2.5、0.25に相当する。

(2) 砕波位置の決定

砕波位置の決定には、渡辺ら⁵⁾による波の重合場に対しても適用できるように整理された流速波速比を用いた。これは、微小振幅波理論と組み合わせた場合に、合田⁶⁾による砕波指標と同じ砕波水深を与えるように決められたものであり、この砕波指標を磯部⁷⁾により近似式で示したのが次式である。

$$\begin{aligned} (\hat{u}/C)_b &= 0.53 - 0.3 \exp \left\{ -3\sqrt{h_b/L_0} \right\} \\ &+ 5 \tan^{3/2} \beta \exp \left\{ -45 \left(\sqrt{h_b/L_0} - 0.1 \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $\hat{u}$ は静水位における水平流速振幅を表し、添字 b は砕波点における値を示す。実際の数値計算では砕波減衰項を含まない基礎式を用いて $\hat{u}/C$ を計算領域全体について算定し、この値が式(4)で示される砕波指標を越えた沖側端を砕波位置とした。

(3) 境界条件と計算手順

実験水槽あるいは港湾などの海洋の一部を想定して数値計算を行う場合、計算領域周辺の境界条件として谷本・小舟⁸⁾による任意反射率境界を適用する

ことができる。任意反射率境界は特性曲線法を用いた手法であり、時刻 t における境界上の点 (x_0, y_0) での線流量を式(5)～(7)で与えている。

$$Q_x^t(x_0, y_0) = A \cdot Q_x^{t-\tau}(x_0 - \Delta x, y_0) \quad (5)$$

$$A = \frac{1 - K_R}{\left\{ 1 + K_R^2 - 2K_R \cos(2k\Delta x \cos \alpha_n) \right\}^{1/2}} \quad (6)$$

$$\tan \sigma\tau = \frac{1 - K_R}{1 + K_R} \tan(k\Delta x \cos \alpha_n) \quad (7)$$

ここに、 K_R は反射率、 α_n は波が境界法線となす角である。境界上の線流量は Δx だけ内側の線流量に反射率によって決定する無次元係数 A を乗じたものとして求めることができる。また、沖側境界では計算領域内部からの反射波を外海に透過させるために式(5)を応用して計算を行う。

数値計算においては、空間差分間隔を $\Delta x, \Delta y$ として、線流量と水位変動の計算点を半格子ずらしたスタッガードメッシュを用い、計算時間ステップは時間間隔を $\Delta t/2$ 時間ずらして線流量と水位変動を交互に計算するleap-frog法を採用し、基礎式を離散化して行う。 Δt はCFL条件を満たす値として0.01sとした。

4. 人工リーフの水理特性

(1) 人工リーフ周辺の表層の流れ

図-3は水理実験の結果を示すもので、ケース1, 3, 4における人工リーフ周辺での表層の流速分布を示している。流速ベクトルはフロートを用いて流れが定常状態に達したことを確認した上で流速を測定し、10波を対象として一周期あたりの平均を求めた。

図-3(a)は比較的開口幅の狭いケース1の流速分布を示している。堤体上では入射波砕波後の岸向きの流れが生じ、堤体両端の開口部では沖向きの流れが発生している。堤体背後域では弱い岸沖方向の流れが生じた。図-3(b)は開口幅の狭いケース3の流速分布を示している。堤体上では沖向きの流れが発生し、背後域では向岸流と離岸流が不規則に生じ、不安定な循環流を形成している。図-3(c)は開口幅の比較的広いケース4の流速分布を示している。堤体上では入射波砕波後の岸向きの流れが生じ、背後域では岸向きの流れが発達し、開口部へと向かう1つの循環流を形成し、開口部では沖向きの流れとなっている。

本実験では底層の流れについて検討を行っていないが、表層付近の流れに着目すると、堤体沖側と開口部では堤長と開口幅に影響されことなく流況は沖向きとなるが、堤体より岸側では堤長と開口幅の設定により、表層流の流況パターンが異なってくる。

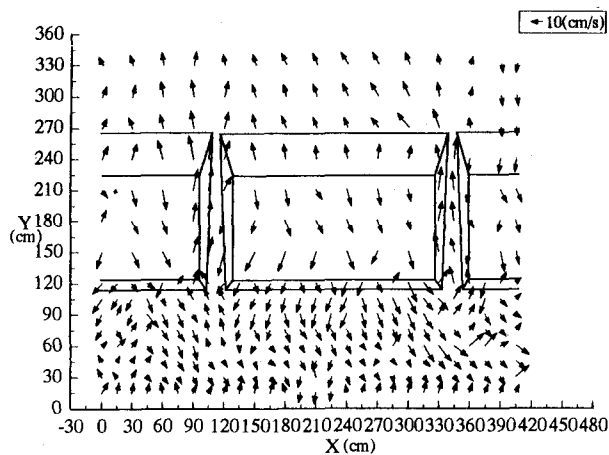


図-3(a) 人工リーフの表層の流速分布(ケース1)

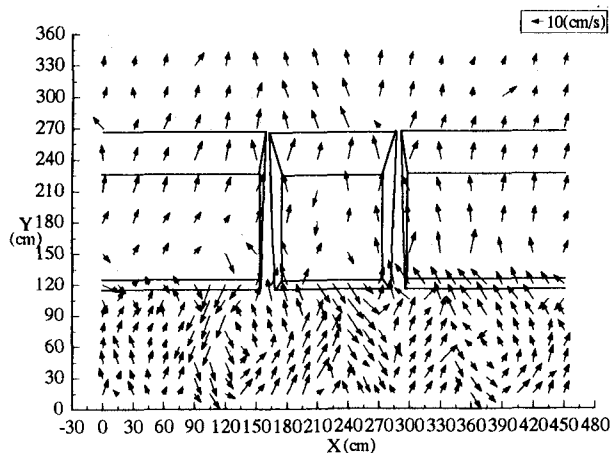


図-3(b) 人工リーフの表層の流速分布(ケース3)

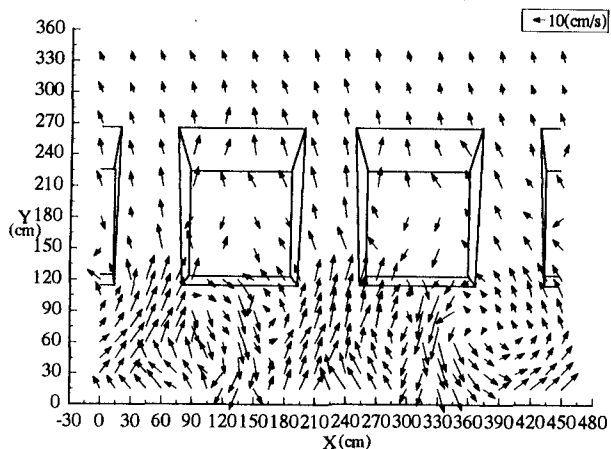


図-3(c) 人工リーフの表層の流速分布(ケース4)

ることがわかる。そこで、宇多・小俣¹⁾が示した図-4に今回の実験結果をプロットした。

図-4は堤長を開口幅で無次元化した L_r/W と堤長を離岸距離で無次元化した L_r/Y との関係を流況パターンについて示したものであり、既往の研究結果と比較してある。図中の白で示してある記号は宇多・小俣¹⁾の実験結果であり、黒で示してある記号は本研究の実験結果である。堤長 L_r に対して開口幅 W が小

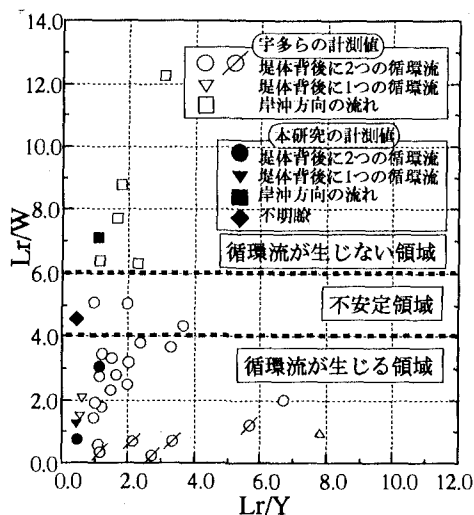


図-4 流況パターン発生区分

さくなり、連続堤のような形態に類似してくると、岸沖方向の流れが発達し循環流が発生しない傾向になる。1個あるいは、2個の循環流が発生するケースと、岸沖方向の流れが卓越するケースは宇多らとほぼ同様の結果を示している。

また、本研究で不明瞭な流況パターンを示したケース3(◆)の Lr/W の値が、1個あるいは、2個の循環流が発生するケース(●, ▼)と岸沖方向の流れが発生するケース(■)の中間値付近であることを考慮すると、人工リーフ周辺での表層の流れは Lr と W に支配されていると考えられる。

そこで、本研究の実験結果と宇多らの研究結果から、波が汀線に直角に入射したときの堤体背後域での表層の流況区分は3つの状態から成り、 $0 < Lr/W \leq 4$ では安定した循環流が発生する領域、 $4 < Lr/W \leq 6$ では不安定な循環流が発生する領域、 $6 < Lr/W$ では循環流が発生しない領域とすることができる。

(2) 波高分布

図-5は堤体背後に1つの循環流が発生するケース4の平面波浪場の計算結果を示している。計算領域は $9.0\text{m} \times 5.8\text{m} \times 45\text{cm}$ の実験水槽を想定し、人工リーフは移動床実験と同じ設計諸元を持つ堤体を地形データとして与えた。作用波浪条件も実験と同様にしている。

計算結果を見ると沖側から伝播した入射波は天端上で屈折変形を起こし、汀線に近づくにつれて減衰していることがわかる。堤体前面には反射波が形成されていることが確認でき、 $Y=700\text{cm}$ 付近から沖側では重複波が形成され、一定の波高値となっている。また、コンター線に短線が直交する箇所は波高の窪みを示している。

図-6は入射波砕波後の開口部とリーフ上の波高分布を岸沖方向に示している。この図から波の変形過程を見ると、入射波が天端上で砕波した後乱れ、再び砕波点を迎え減衰していることがわかる。このような現象は、人工リーフの形状と作用波浪条件が密

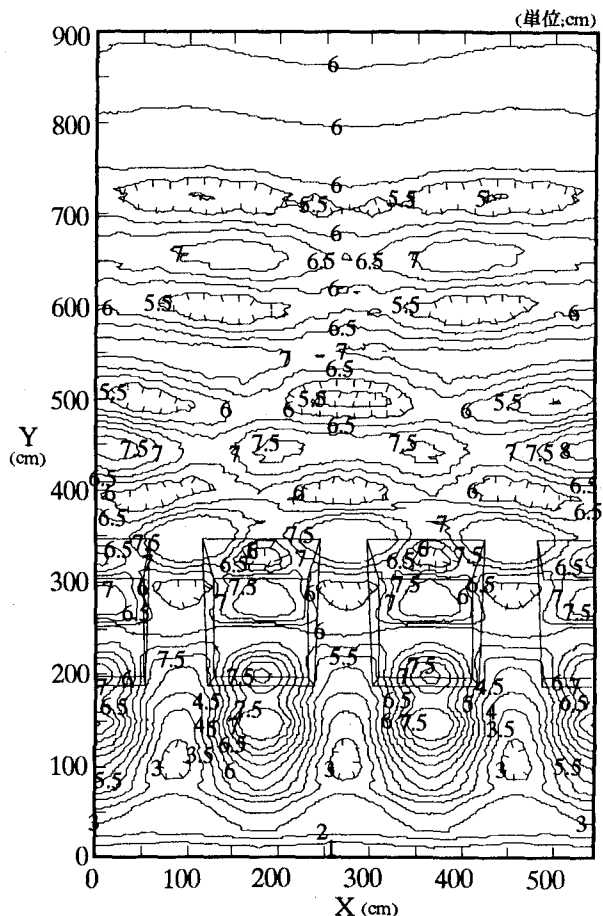


図-5 平面波浪場の計算結果(ケース4)

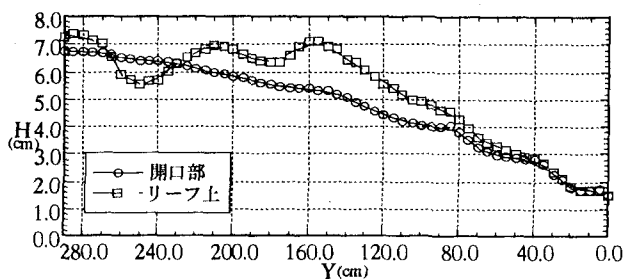


図-6 岸沖方向の波高分布(ケース4)

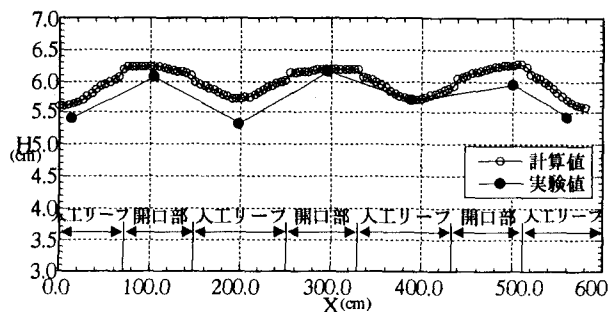


図-7 沿岸方向の波高分布(ケース4)

接に関係し、天端水深が浅く、波高が大きいほど起こりやすい。数値計算上は式(3)の Q_p が波の再生する限界を示す線流量となっている。

図-7は、図-5、図-6中の $Y=250\text{cm}$ 付近での波高分布を沿岸方向に示したものであり、実験値と比較して

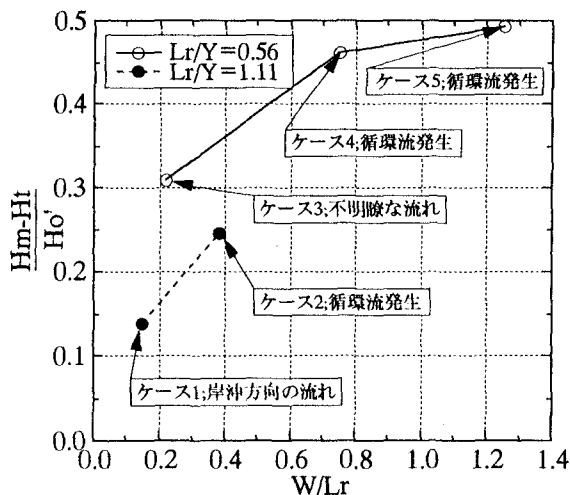


図-8 堤長と開口幅による透過波高の変化

ある。図から開口部では堤体上よりも大きい波高値を示していることがわかる。また、計算値と実験値はほぼ一致している。このように、リーフ上と開口部での波高の差が循環流の発生に関係しているとして、図-8では宇多・小俣¹⁾が採用した座標系を用いて、波高差と平面諸元の関係を示した。

図-8は人工リーフ開口部での波高 H_m と堤体背後域の透過波高 H_t との差を換算沖波波高で無次元化した無次元波高差 $(H_m-H_t)/H_o'$ と W/Lr の関係を堤長 Lr を離岸距離 Y で除した Lr/Y について示したものである。 W/Lr が大きき Lr/Y が小さいほど堤体上と開口部での波高差が大きくなることがわかる。また、 W/Lr が大きくなるほど循環流が発生しやすくなるが、図-3の流速分布図と合わせて検討するとわかる。

(3) 地形変化

人工リーフ周辺域の漂砂現象には、海浜流が関係していると考えられる。そこで、海浜流によって引き起こされる砂の移動を把握するために、造波開始5時間後の海浜地形より初期勾配からの海浜地形変化量の平面的な分布を求めて、図-9に示した。しかし、周知のように漂砂に関する実験では相似則が十分に確立されていないので、本研究では流体運動に重点を置きフルードの相似則に従った。この場合、地形変化に関しては相似則が完全には成立しないが、流れによる構造物周辺の地形変化を定性的に検討する上では、有益な資料と思われる。

図-9(a)は、岸沖方向の流れが発生する開口幅の比較的狭いケース1の地形変化量を示している。堤体背後で発生した向岸流と離岸流により、人工リーフの背後域では岸沖漂砂が生じ $X=0$ から300cm付近まで汀線近傍から $Y=100$ cm付近の砂が沿岸方向に侵食されている。図-9(b)は、人工リーフ背後域で2つの循環流が発生するケース2の地形変化量を示している。リーフ上での向岸流が背後域で開口部へと向かう循環流となっていることを考慮して、砂の収支を考えてみると、開口部付近の堆砂は汀線付近の砂が

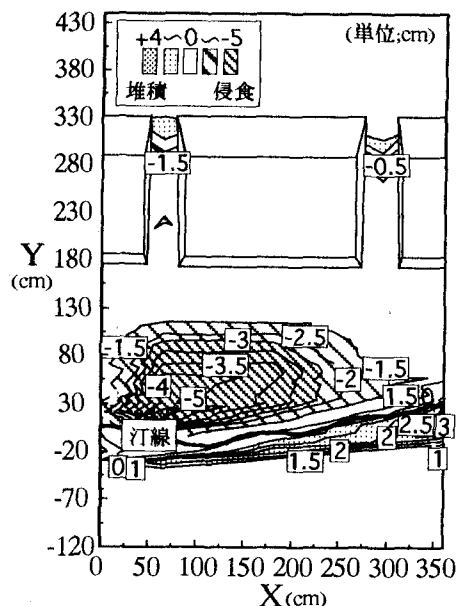


図-9(a) 人工リーフ周辺の地形変化(ケース1)

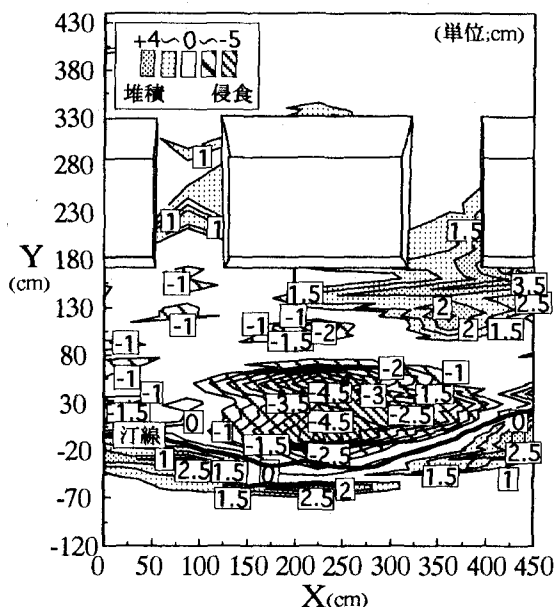


図-9(b) 人工リーフ周辺の地形変化(ケース2)

循環流により運ばれたものと考えられる。また、前浜上にも砂が堆積していることがわかる。図-9(c)は、人工リーフ背後域で向岸流と離岸流が不規則に起こり、不安定な循環流が発生していたケース3の地形変化量を示している。沿岸方向の $X=0$ から50cmまでは砂が堤体背後から汀線まで堆積しているが、 $X=50$ から350cmまでは砂が侵食されている。この沿岸方向の不均一な海浜形状には堤体背後での不規則な流れが関係していると考えられる。堤体法尻付近の堆砂は汀線付近の砂が循環流により運ばれたもので、人工リーフが砂の沖合いへの流出を防止していることがわかる。図-9(d)は、人工リーフ背後域で1つの循環流が発生するケース4の地形変化量を示している。堤体背後では堆砂が生じ、堤体法尻と汀

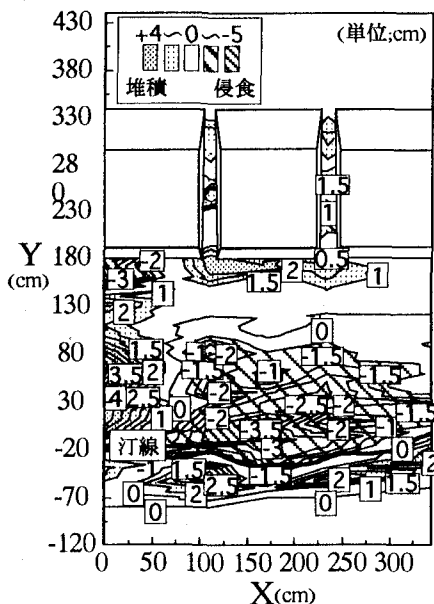


図-9(c) 人工リーフ周辺の地形変化(ケース3)

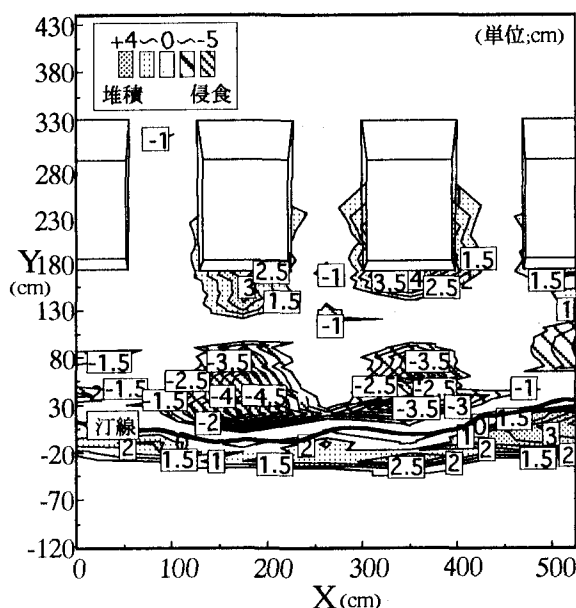


図-9(d) 人工リーフ周辺の地形変化(ケース4)

線の中間地点から汀線付近にかけては侵食されている。これは、砂の収支から考えて堤体背後の堆砂は、人工リーフ堤体が循環流により砂が沖合いに流出することを防いだ結果を示している。ステップが発達し前浜がのび、人工リーフによる漂砂制御効果が顕著に現れている。

しかし、図-3に示した流況図は表層での流速ベクトルを示している。波の運動に起因する平均流は、鉛直方向に分布を持ち、複雑な海底地形の下では上層と下層とで逆向きの流れが生じる場合も考えられる。本研究では下層の流れの測定を行っておらず、海底砂近傍での平均流を識見することは不可能である。しかしながら、砂が移動した平面的な分布を見ると表層での流れのパターンとの相互関係を確認することができる。また数値計算においては波の変形過程だけではなく、今後、3次元解析を行い流れの

鉛直分布を検討する必要があるが、図-5における人工リーフ背後域での波の平面分布と海底地形の形状が類似していることが確認できる。

海岸に人工リーフを設置するとき、開口幅が堤長の7~8割の長さを越えるときの土砂の移動については不明であり検討を加えなければならないが、開口幅を堤長の7から8割の長さに保つと砂の流出を防止できることがわかった。

5. 結論

(1) 表層の流れ

人工リーフ周辺で発生する特有の流れは、堤長と開口幅の長さの変化に依存し、堤長に対し開口幅が長くなるほど循環流が発生しやすくなる。また、開口幅が狭くなり連続堤のようになると弱い岸沖方向の流れが生じ、堤体背後は澱んだ状態となった。

(2) 波高分布

リーフ周辺の波高変化は、堤長と開口幅の長さの変化に影響されている。堤長に対して開口幅が大きいと、堤体上の波高と開口部での波高の差は大きいものとなり循環流が発生しやすくなる。非定常緩勾配方程式による計算結果と実験値はほぼ一致した。

(3) 地形変化

人工リーフ周辺の地形変化は、流況パターンに強く影響されている。循環流が生じず向岸流と離岸流が発生する場合には、沿岸方向の漂砂は見られず岸沖方向の漂砂が生じたが、汀線は前進した。循環流が発生する場合は、堤体と汀線の間付近が侵食され、その砂は堤体背後と前浜上に堆積した。また、砂の分布と表層の流れとの相互関係が確認できた。

参考文献

- 1) 宇多高明, 小俣篤: 人工リーフの設計法, 土木技術資料, Vol. 29/No. 12, pp. 26-31, 1987.
- 2) 宇多高明, 小俣篤: 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, 1987.
- 3) 渡辺晃, 丸山康樹: 屈折・回折・砕波減衰を含む波浪場の数値計算法, 第31回海講論文集, pp. 103-107, 1984.
- 4) 丸山康樹, 鹿島遼一: 砕波減衰を考慮した砕波帯内外の波浪場の数値計算法の提案とその適用, 電力中央研究所報告, 研究報告384041, 1985.
- 5) 渡辺晃, 原哲, 堀川清司: 重合した波浪場における砕波について, 第30回海講論文集, pp. 5-9, 1983.
- 6) 合田良実: 砕波指標の整理について, 土木学会論文報告集, 第180号, pp. 39-49, 1970.
- 7) 磯部雅彦: 放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・砕波変形の計算法, 第33回海講論文集, pp. 134-138, 1986.
- 8) 谷本勝利, 小舟浩治: 数値波動解析法による港内波高分布の計算, 第22回海講論文集, pp. 249-253, 1970.

(1997. 9. 30受付)