

# 人工リーフ周辺の底面流速の数値計算

## NUMERICAL ANALYSIS ON BOTTOM CURRENT NEAR THE OPENING OF ARTIFICIAL REEFS

小山内 和幸<sup>1</sup>・南 将人<sup>2</sup>

Kazuyuki OSANAI, Masato MINAMI

<sup>1</sup>学生会員 八戸高専 専攻科 建設環境工学専攻 (〒039-1192 青森県八戸市大字田面木字上野平16-1)

<sup>2</sup>正会員 八戸高専 建設環境工学科 助教授 (〒039-1192 青森県八戸市大字田面木字上野平16-1)

Artificial reefs have been used to protect coastal erosion, and are now replacing detached breakwaters. When we establish a submerged breakwater or an artificial reef, it is known that a topography change sometime causes scour around them. According to the analysis result using the bottom sounding carried out before and after construction, if it have the openings, the erosion generated in the center of opening or the offshore. The transmission wave to the shore side across the reefs changes as return flow, and is flowing out into the offshore field. It is important that evaluation of the flow strength near the bottom to predict geographical feature change due to the structure establishment. Moreover, the size of an undertow has a close relation to opening width. This research performed the numerical calculation of the flow distribution around the opening for the artificial reefs established at a certain spot, and considered the flow velocity distribution of the return flow around the opening.

**Key Words:** artificial reefs, local scour, Boussinesq equation, return flow, opening width

### 1. はじめに

従来の離岸堤に代わって人工リーフが多用されている。その理由として、波浪減衰効果や漁礁効果効果に加え、天端面が静水面以下となるため景観を損ねない等が挙げられる。また陸側の堆砂効果が高く、この保全施設は、レクリエーションの場としての海岸利用などで景観性・環境を考慮して、今後も利用の増加が予測される。

人工リーフを2基以上で用いた場合、設置前後の深淺測量図を用いた地形変化の解析例(南ら<sup>1)・2)</sup>によれば、開口部およびリーフ背後で局所洗掘現象が発生している事が知られている。特に開口部での戻り流れによる地形変化が顕著となっている。しかし、人工リーフ周辺の地形変化に関しては水位および底面流速の算出が重要であるが水深が急変する為に計算が困難であり、かつ、実測に基づいた効果の調査事例は少ないのが現状である。開口幅が広いと前述した様な効果が小さくなり、また幅が狭いと強い戻り流れにより局所洗掘が発生しやすくなり、設置後に各種の効果を発揮する為には、適切な開口幅の設定が重要であると考えられる。

現在、人工リーフの平面配置を設定する際の堤長と離岸距離さらに群堤の場合の開口部幅との関係は、リーフ背後に生じる流れのパターンで決められており<sup>3)</sup>、地形変化を考慮した研究事例は少ない。

本研究は、不透過型の人工リーフを対象として、開口部幅と平均戻り流れ強さ、および最大戻り流れとの関係を数値計算で求め、ストークスの質量輸送速度式と微小振幅波理論式と比較し、現地に設置されている人工リーフ群を対象に水位分布と平均流速分布を求めて構造物周辺の流れ分布特性を検討した。開口部周辺の波浪場と流れ場を数値計算で求めるために、まず始めにWeiら<sup>4)</sup>による拡張型の強非線形ブシネスクモデルを用いて水位と底面流速の時系列変化を算出し、水理模型実験との比較により、時系列変化と平面分布を比較して、その適用性を検討した。開口部周辺では水深変化による急激な波高増大や碎波を伴っており、またリーフ端部で急激な水深変化となっている。碎波によるエネルギー減衰に渦動粘性逸散モデル(Schafferら<sup>5)</sup>)を組み込んだ「拡張型の強非線形Boussinesq(FUNWAVE)」を用いた。そして、日本海側のある海岸の水深データを用いてこのモデルを適用し、開口部中央および端部に発生する流れ場の流況について検討した。

## 2. 波浪場の計算方法<sup>6)</sup>

### (1) 拡張型の強非線形ブシネスク方程式

水深が急変する構造物周辺の水位と底面流速を算出する為に、拡張型の強非線形Boussinesq方程式の適用性を水理模型実験と比較する事により検討した。以下に用いた連続式と運動方程式を示す。

$$\eta_t + \nabla \cdot \{ (h + \eta) [\bar{u}_\alpha + (Z_\alpha + 0.5(h - \eta)) \nabla (\nabla \cdot (\bar{h} u_\alpha))] + (0.5 Z_\alpha^2 - 1/6(h^2 - h\eta + \eta^2)) \nabla (\nabla \cdot \bar{u}_\alpha) \} = 0 \quad (1)$$

運動方程式

$$\begin{aligned} \bar{u}_{\alpha t} + (\bar{u}_\alpha \cdot \nabla) \bar{u}_\alpha + g \nabla \eta + z_\alpha \left\{ \frac{1}{2} Z_\alpha \nabla (\nabla \cdot \bar{u}_{\alpha t}) + \nabla (\nabla \cdot (\bar{h} u_\alpha)) \right\} \\ + \nabla \cdot \left\{ \frac{1}{2} (Z_\alpha^2 - \eta^2) (\bar{u}_\alpha \cdot \nabla) (\nabla \cdot \bar{u}_\alpha) + \frac{1}{2} [\nabla \cdot (\bar{h} u_\alpha) + \eta \nabla \cdot \bar{u}_\alpha]^2 \right\} \\ + \nabla \cdot \left\{ (Z_\alpha - \eta) (\bar{u}_\alpha \cdot \nabla) (\nabla \cdot (\bar{h} u_\alpha)) - \eta \left[ \frac{1}{2} \eta \nabla \cdot \bar{u}_{\alpha t} + \nabla \cdot (\bar{h} u_\alpha) \right] \right\} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $\eta$ :水位、 $h$ :水深、 $\bar{u}_\alpha$ :水深 $Z_\alpha$ での水平流速、 $g$ :重力加速度、 $t$ :時間微分を示す。

### (2) 実験概要

水槽と人工リーフの形状を図-1に示す。実験条件は、予備実験として水槽底面に砂を敷き詰め、砂の移動状況を目視観測して試行錯誤を繰り返し、開口部の砂が顕著に底質移動を生じた時の波浪諸元を用いた。実験条件を表-1に示す。

表-1 実験条件

|                 |                 |
|-----------------|-----------------|
| 入射波高(H) 8.8cm   | 周期(T) 0.9秒      |
| リーフ設置水深(D) 25cm | 波形勾配 (H/L) 0.08 |

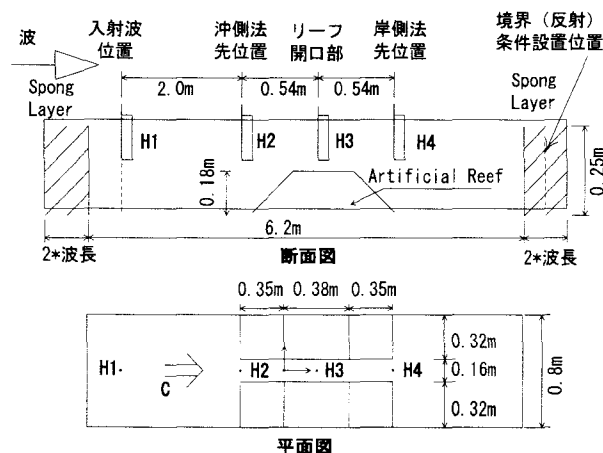


図-1 水槽と人工リーフの形状

### (3) 開口部中央の水位比較 ( $H_3$ )

図-2に開口部での水位の比較結果を示す。実験結果を見ると、第3波以降の水面が上昇する際に腰掛部（図中の○印）が生じ、水位が正の場合には急激な水位変化を、負の場合には緩やかな変化となっている。これに対し計算結果（図中の細い線）を見ると、前述の腰掛部の再現性は不十分であるものの、水位の正負における水位変化特性を再現できている。ピーク値を比較すると最高水位時で0.8倍、最低時で1.03倍となっている。

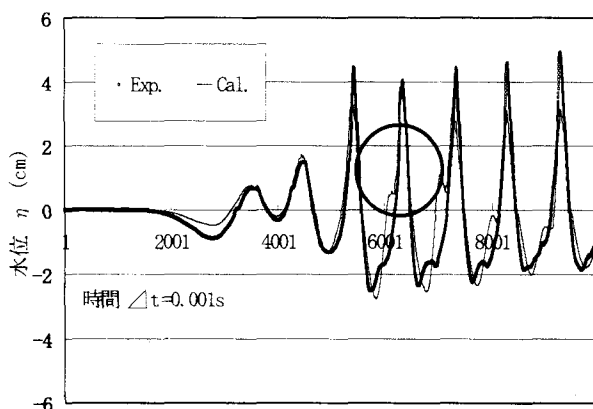


図-2 水位の比較（開口部中央）

### (4) リーフ開口中央での流速比較 ( $U_{b3}$ )

開口部位置 ( $H_3$ ) における比較結果を図-3に示す。流速の正負のピーク発生時期はほぼ一致している。この領域では、波の進行に関わらず常に沖側の流れとなっている。静止状態からの造波に対し、各波別毎の極値に差は見られるものの、流速の振幅の平均はほぼ一致しており、またピークの発生時期についてもほぼ再現されていた。以上、開口部中央位置における水位・流速の振幅と位相の比較より開口部を有する人工リーフ群周辺の水位・流速変化予測に、Weiらの「拡張型の強非線形Boussinesq方程式」が有効的であることが示された。

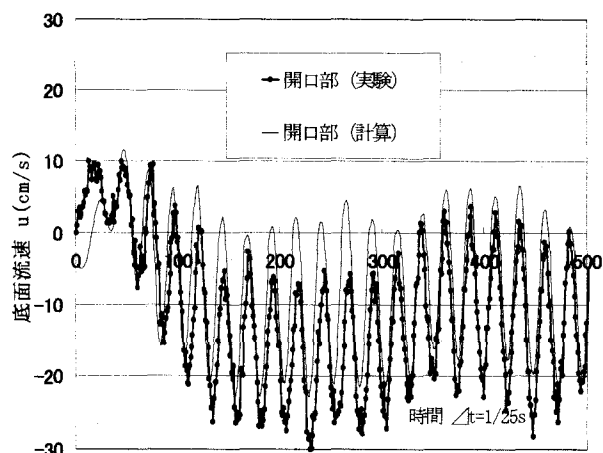


図-3 流速の比較結果（開口部中央）

図-4に開口部中央での碎波状況を示す。リーフ天端面に比べて開口部中央では碎波時期が遅れ「弓形状」となっている。開口部中央では波進行方向に対して垂直な方向からの影響を強く受けている事が分かる。

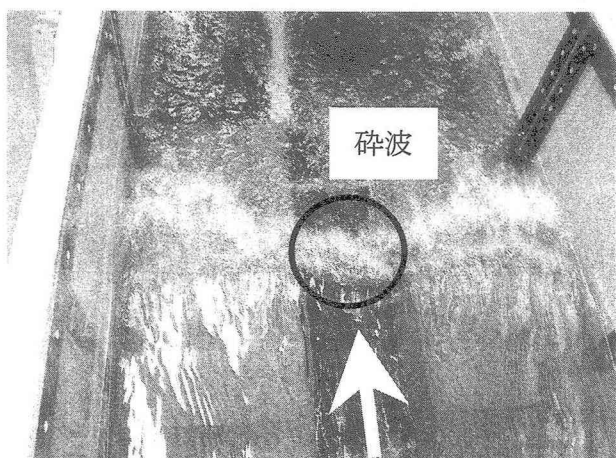


図-4 天端および開口部での碎波状況

### 3. 開口幅と底面流速

#### (1) 地形と波浪の数値条件

日本海側のある海岸に設置された人工リーフを対象とし、岸沖方向1400m、沿岸方向1000mを計算領域とした。この海岸には、堤長 $L_r$ /開口幅 $W=4$ の人工リーフ群が設置されている。計算格子間隔は $\Delta x=\Delta y=4\text{m}$ とし、格子数 $350\times 250$ の全87,500格子での水位および底面流速を時系列で算出した。沖側からの入射波諸元は、現地で観測された波浪データを用いて、設計時に海浜安定化の波浪諸元として使用された波高 $H=2.0\text{m}$ 、周期 $T=6.0$ 秒を設定した。波高の影響を調べるために、波高を0.5mピッチに $H=2.0\sim 4.0\text{m}$ の5段階に変化させ、また、堤長と開口幅比を $L_r/W=3, 4, 5$ とし、計15ケースの計算を行った。それ以外の主な諸元は、リーフ天端水深を2mとし、海底勾配を1/100とし、沖側境界での水深10mと設定した。なお、計算諸元の断面図を図-5に、開口幅と堤長の比 $L_r/W$ の概略を図-6に示す。

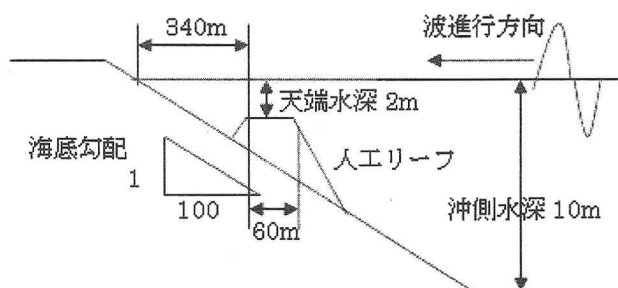


図-5 計算諸元（断面図）

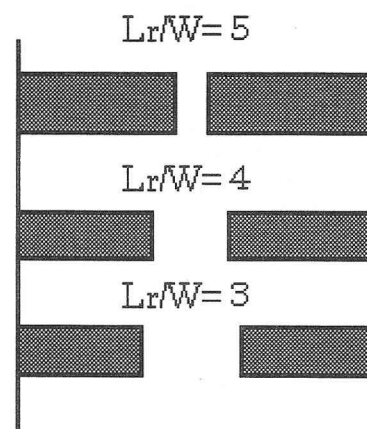


図-6 開口幅と堤長の比の概略

#### (2) 水位変化の計算結果

図-7に沖側境界での水位変化と開口部中央での水位変化の算定結果を示す。境界位置（図中の細い線）では、正弦波の水位変動が正確に入射されている事が確認できる。この図は $L_r/W=4$ 、 $H=3\text{m}$ での計算結果である。入射波高と比較して、人工リーフ天端での碎波が影響していることより開口部中央での波高（図中の太い線）は入射波高の2/3の波高となり、また、非線形性が現れて、水位の正負時に非対称となっている。後述する最大底面流速および平均流速は、開口部で一定の振幅となる後半の10波を対象に整理した。

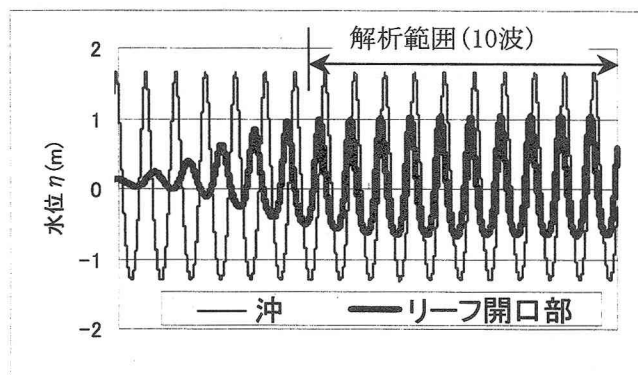


図-7 波高の時系列分布

#### (3) 開口部周辺の平均底面流速ベクトル分布

図-8にリーフ周辺の10波平均の底面流速ベクトル分布図を示す。この図において、波進行方向は図中の左から右であるが、平均流速は沖向きとなっており、開口部中央からの強い流れの影響でリーフ天端面から沖側法先にかけて流速ベクトルが様々な方向を有している。残りの14ケースにおいても同様の分布を示していた。南ら<sup>7)</sup>の底面付近における平均流速分布の測定結果によると、開口部からの戻り流れは中央から噴流状態となり、中央に向かうような流れがリーフ前面に発生しており、特に中央部での流況が再現されていた。

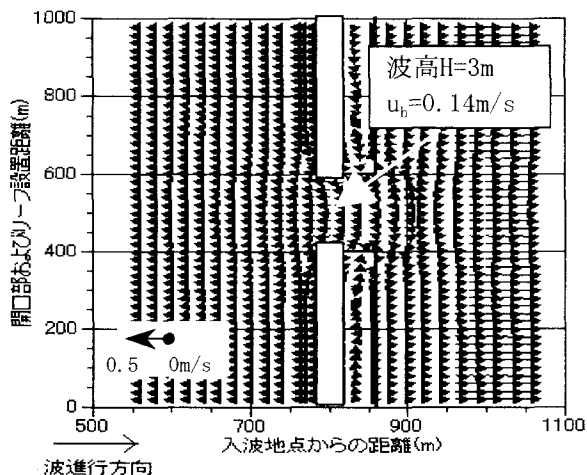


図-8 底面流速ベクトル分布

#### (4) 平均流速

10波平均による底面位置での平均底面流速を、ストークス波の質量輸送速度で無次元化した値を図-9に示す。ストークス波の質量輸送速度の式を示す。

$$U_{ave-the} = \frac{\pi^2 H^2}{2LT} \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^2 kh} \quad (3)$$

いずれの開口幅においても平均流速はストークスの式より小さくなっている。Lr/W=5の場合が0.94~0.98、同様にLr/W=4で0.89~0.93、Lr/W=3で0.84~0.89となり、開口幅が狭いものほどストークス式による質量輸送速度に近くなる。

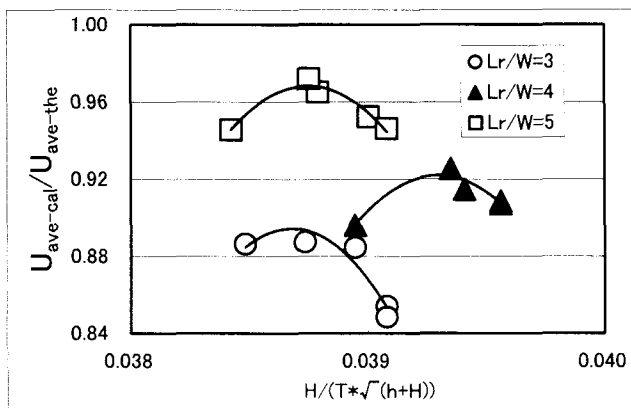


図-9 平均底面流速とストークス波理論との比較

#### (5) 最大流速

底面流速の経時変化より、開口部底面における最大流速の大きさは、開口幅が狭くなる程、大きくなっている。微小振幅波理論による底面での水平成分運動速度で無次元化した結果を図-10に示す。微小振幅波理論の水平成分運動速度を以下に示す。

$$U_{bmax-th} = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \quad (4)$$

平均流速と同様に、どの開口比においても微小振幅波理論より小さい値となっている。しかし、平均流速とは違い、開口比が大きいもの程微小振幅波理論に近づくわけではなく、海浜安定に有効とされる開口比4の場合には約0.94倍付近を分布しているのに対し、開口比3および5の場合には多少バラつきがあるものの0.96倍付近の分布が見られ若干大きい分布を示している。

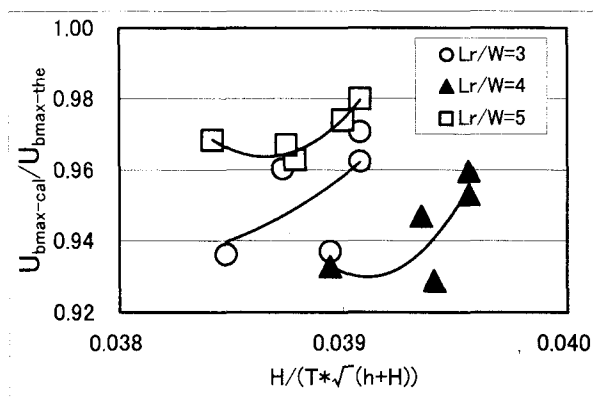


図-10 最大底面流速と微小振幅波理論との比較

### 4. 現地に設置された人工リーフ周辺の波浪場

#### (1) 水深分布と波浪諸元

人工リーフの全国実態調査の結果より日本海側のある海岸に設置されている人工リーフを対象に、波高および底面流速の計算を行った。

図-11に、人工リーフ設置前の水深分布図を示す。この海岸には堤長400m、開口幅100mを有する人工リーフが2基設置されている。このリーフ群の法線は、一直線とはならず「ハ」の字を有している、開口部中心部分の水深は約5mであり、開口部より沖側の等水深線はほぼリーフの法線形状と平行となっている。

この海岸に来襲した波浪諸元を整理した。全国港湾海洋波浪観測資料<sup>8)</sup>(NOWPHAS: 1日12回2時間毎)の資料を用い、深浅測量時期に相当する観測より、有義波高、周期、波向のデータを抜き出した。5年間分、約22,000回の観測結果より、観測期間中の最大有義波諸元は、冬季の12月26日4時に観測された、 $H_{1/3}=6.53m$ 、 $T_{1/3}=11.0s$ 、波向Nであった。この波向Nは、人工リーフ法線方向にほぼ直角となり、開口部ではほぼ岸沖方向と一致している。観測期間中、最大有義波が発生した月の波向変化を図-12に示す。

#### (2) 水位分布

波向N(法線直角方向に垂直)の場合の計算結果を図-13に示す。主な計算諸元は、格子間隔 $\Delta x = \Delta y = 5.0m$ 、 $T=11s$ 、 $\Delta t=0.01s$ (約1000分割)とした。

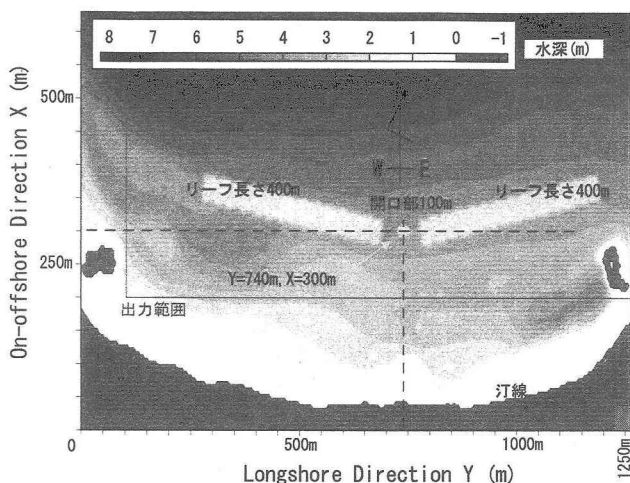


図-11 設置前の水深分布図

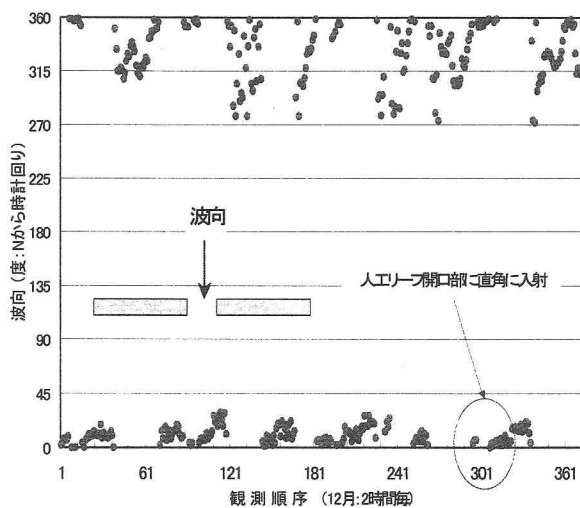


図-12 波向の観測結果

波向Nの場合には、リーフ背後で水位が減衰している。また人工リーフ開口部あるいは端部からの回折波の効果が見られる。なお、汀線付近では水深がゼロとなり遡上計算が必要であるが、波浪場に関する数値計算の条件と同様に、ある水深より浅い所の水深を一定として、流速ゼロの境界条件を設定した。

図-14は平均底面流のベクトル図を示す。なお、開口部周辺で水面変動がほぼ一定になってから10波相当の波数に関して計算を行った。

平均底面流速ベクトルより、開口部で沖側に向かう戻り流れが、そしてリーフの端部においては循環流が生じている。リーフの岸側ではリーフ法線に沿って流れが発生して開口部中央部に向かい、開口部中央から沖側に向かう流れはほぼ直線状に沖に向かって流れており、右側のリーフの沖側で戻り流れに向かう弱い流れが発生している。この海域で、リーフ設置前後に実施された深浅測量図を用いた地

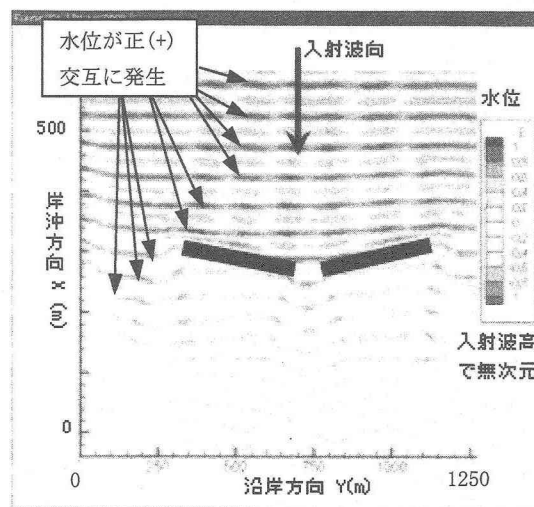


図-13 水位分布図

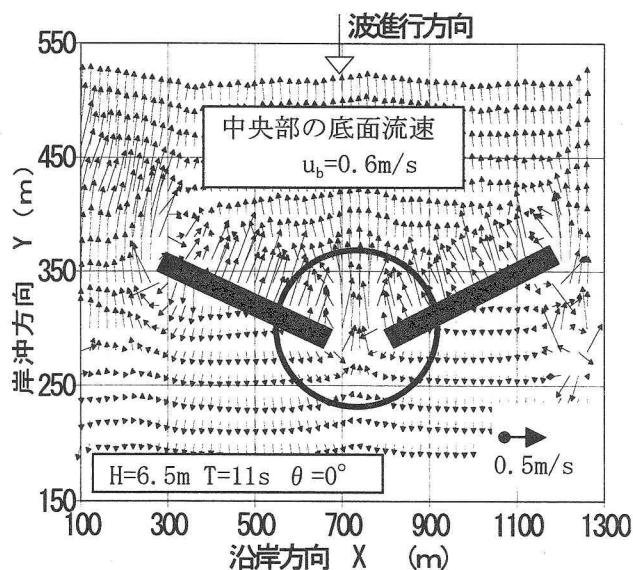


図-14 平均底面流速ベクトル図

形変化解析によれば、開口部中央では大きな侵食域が発生している。この解析結果と平均流速ベクトルを比較すると開口部中央に限らず、速度が速くなっている場所で侵食される傾向が見られた。

以上、現地に設置されている2基の人工リーフ群を対象に拡張型の強非線形ブシネスク方程式を用いて波浪変形計算を行った結果、平面2次元での波高減衰効果や開口部からの戻り流れが発生していた。

## 5. 結論

「拡張型の強非線形Boussinesq方程式」を用いて、開口部を有する人工リーフ周辺の波浪場を算出し、開口幅と底面流速との関係および現地に適用して人工リーフ周辺の流況の再現を行った。

本研究によって得られた結論を以下に列記する。

- 1) 開口部中央における水位と流速の比較結果より、水位上昇時の高周波成分の再現性は不十分であるもの、最高水位は実験値の0.8倍、最低水位のそれは1.03倍とほぼ一致している。また、開口部での平均底面流速での流れの向きは、波進行方向と逆(=沖側)となっており、計算でも再現された。
- 2) 水位と平均底面流速の模型実験と数値計算結果の比較より、拡張型の強非線形Boussinesq式を用いると、開口部周辺の波浪場を計算できる。
- 3) 人工リーフ群の開口部中央における底面での平均流速は、開口部幅が狭いほどストークス式による質量輸送速度に近くなった。しかし、いずれの開口比でもストークスの式より小さい値となった。
- 4) 海浜安定に有効とされる $L_r/W=4$ の底面における最大流速は、微小振幅波理論の底面における水平成分運動の約0.94倍となった。開口幅比が大きくなる程その値は小さくなっている。
- 5) 現地に設置されている2基の人工リーフ群の水深データと波浪データを用いて、その周辺の水位変化および開口部からの戻り流れを計算した結果、平面2次元での波高減衰効果と開口部中央からの冲向きの流れおよびリーフの端部に循環流が発生していた。

#### 参考文献：

- 1) 南將人, 真野明：人工リーフ・潜堤の施工事例調査, 海洋開発論文集, Vol. 17, pp. 229-234, 2001.
- 2) 南將人, 真野明：潜堤開口部周辺の地形変化に関する研究, 海講, 第48巻, pp. 951-955, 2001.
- 3) 海岸保全施設設計便覧2000年度版, 土木学会, 2000. 12.
- 4) GE Wei, James T. Kirby, Stephan T. Grilli, and Ravishankar Subramanya : A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves, Part1. Highly nonlinear unsteady waves, J. Fluid Mech. Vol. 294, pp. 71-92, 1995.
- 5) Schaffer, H. A., Madsen, P. A. and Deigaard, R. A. : A Boussinesq model for waves breaking in shallow water, Coastal Engineering, 20, pp. 185-202, 1993.
- 6) 南將人, 真野明：人工リーフ開口部の波浪場の数値計算, 海洋開発論文集, Vol. 19, pp. 207-212, 2003.
- 7) 南將人, 真野明：不透過型人工リーフ開口部周辺の底面流速に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 18, pp. 401-406, 2002.
- 8) (財)沿岸開発技術研究センター(1995-1999), 全国港湾海洋波浪観測資料(NOWPHAS).