

人工リーフ開口部の波浪場の数値計算

NUMERICAL ANALYSIS ON WAVE FIELD NEAR THE OPENING OF ARTIFICIAL REEFS

南 将人¹・真野 明²
Masato MINAMI, Akira MANO

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

²正会員 工博 東北大学大学院教授 工学研究科附属災害制御研究センター (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

Artificial reefs have been used to protect coastal erosion, and are now replacing detached breakwaters. Although constructions of the artificial reefs sometimes cause significant score around the reefs, the manuals for the design describe mainly on wave decay. An opening between artificial reefs shows typical scouring like a corn at the offshore of the middle of the opening. To estimate a topographic change, we need the distributions of water surface elevation and the bottoms currents.

In this research, we investigated the ability of a fully nonlinear Boussinesq model around an opening with the eddy viscosity model for wave breaking. This paper shows that the numerical results have good agreement with experiments wave surface distributions and bottoms currents.

Key Words : artificial reefs, opening, local scour, Boussinesq equation, wave breaking

1. はじめに

景観性を考慮して海岸保全施設の一つである人工リーフが離岸堤に代わって多用されている。この保全施設は、砂浜の景観を損なうことなく海岸侵食の防御あるいは堆砂効果促進として従来の離岸堤に代わって特に砂浜海岸保全として利用されており、今後も景観性・環境を考慮して利用が増加する事が考えられる。リーフはもともとサンゴ礁をまねて人工的に浅瀬を作り、天端上での砕波および天端面との海底摩擦による波浪低減効果を期待したものであり、天端面が静水面以下となっているために環境面での役割が大きい。リーフに関する研究は30年以前に潜堤を対象に始まり、水理模型実験によるリーフ前後の波高変化による波浪低減効果を示した研究事例として、田中¹⁾は広天端潜堤に対する天端高と波高減衰率の関係を示し、高山ら²⁾は、不規則波を用いてリーフ設置後の波高変化や水位上昇量の算定式を提案した。また、現地調査に基づく波高低減効果については河野ら³⁾、寺尾ら⁴⁾、等があり、リーフにおける波浪の変形について、実験式との照合・検討を行った。

また、長い砂浜海岸に単独で用いた場合には、リーフ背後(=岸側)での水位上昇や海水の滞留による海水汚染などが懸念され、これらの解決策として開口部を有する2基以上を並べる平面配置で使用される事例が多くある。例えば、新潟県糸魚川海岸(宇多, 森下, 早津⁵⁾、新潟西海岸(荘司, 中山, 滝口ら⁶⁾、柏崎海岸(清水, 今井, 寺田⁷⁾)などにリーフが設定され、波浪や地形変化などの現地観測が行われ、リーフ設置の効果が確認された。このような平面配置の場合には、特に開口部での戻り流れによる地形変化が顕著となり、人工リーフ周辺の地形変化に関しては実測に基づいた効果の調査事例は少ない。設置前後の深淺測量図を用いた地形変化の解析例(南ら^{8), 9)}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。このような漂砂移動量を算出するためには、人工リーフ周辺の波や流れ等が重要である。

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¹⁰⁾、地形変化を考慮した研究事例は少ない。今後開口部での戻り流れを弱くし、沈下や崩壊によってリーフの機能を損なわないように適切な開口幅や端部の処理を設定する必要がある。

本研究は、開口部周辺の地形変化を予測するために必要な波浪場と流れ場を数値計算で求めるために、Weiら¹¹⁾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その適用性を検討したものである。開口部周辺では水深変化による急激な波高増大や砕波を伴っており、またリーフ端部で急激な水深変化となっている。砕波によるエネルギー減衰に渦動粘性逸散モデルを組み込んだ「拡張型の強非線形ブシネスクモデル(FUNWAVE)」を用い、リーフ長(Lr)と開口幅(W)が4(=Lr/W)となるリーフ群の開口部周辺の水位変化と底面流速を算出し、水理実験と比較し、モデルの適用性について検討した。

2. 基礎式

(1) 拡張型の強非線形ブシネスク方程式

弱非線形・弱分散性を考慮し、浅海域における各種波浪変形を表現可能な計算モデルとしてブシネスク方程式がある。このモデルを拡張する事で、砕波や流れなどの影響を考慮する事ができ、波浪予測や海浜流の数値モデルとして広く利用されている。このモデルを深海域でも適用するために、Nwogu¹²⁾は鉛直方向の任意地点における水平流速と水面変動を従属変数に選ぶ事により「拡張型ブシネスク方程式」を誘導した。さらに、Weiらは、Nwoguのモデルに高次精度の差分スキームを適用して浅瀬上の波高解析により有効性を検証するとともに、高次の非線形項を含む形へと発展させ、「拡張型の強非線形ブシネスクモデル(FUNWAVE)」を開発した。

本研究では、このモデルの開口部を有する人工リーフ群への適用性を検討した。また、開口部では、水深の不連続性やリーフ斜面での急激な水深変化をともっており、場所的に砕波現象が異なっており、渦動粘性逸散を用いた砕波によるエネルギー減衰を組み込んだ砕波モデルを式中に組み込み、各種パラ

メータについて試行錯誤によって最適なパラメータを求めた。計算に用いた連続式(式(1))と運動方程式(非砕波時:式(2))を示す。砕波によるエネルギー減衰は、式(2)に運動量減衰項として加えた。連続の式

$$\eta_t + \nabla \cdot \{ (h + \eta) \overline{u_a} + (Z_a + 0.5(h - \eta)) \nabla (\nabla \cdot (\overline{hu_a})) + (0.5Z_a^2 - 1/6(h^2 - h\eta + \eta^2)) \nabla (\nabla \cdot \overline{u_a}) \} = 0 \quad (1)$$

運動方程式

$$\begin{aligned} \overline{u_{a,t}} + (\overline{u_a} \cdot \nabla) \overline{u_a} + g \nabla \eta + z_a \left\{ \frac{1}{2} Z_a \nabla (\nabla \cdot \overline{u_{a,t}}) + \nabla (\nabla \cdot (\overline{hu_{a,t}})) \right\} \\ + \nabla \left\{ \frac{1}{2} (Z_a^2 - \eta^2) (\overline{u_a} \cdot \nabla) (\nabla \cdot \overline{u_a}) + \frac{1}{2} [\nabla \cdot (\overline{hu_a}) + \eta \nabla \cdot \overline{u_a}]^2 \right\} \\ + \nabla \left\{ (Z_a - \eta) (\overline{u_a} \cdot \nabla) (\nabla \cdot (\overline{hu_a})) - \eta \left[\frac{1}{2} \eta \nabla \cdot \overline{u_{a,t}} + \nabla \cdot (\overline{hu_{a,t}}) \right] \right\} = 0 \quad (2) \end{aligned}$$

ここで、 η :水位、 h :水深、 $\overline{u_a}$:水深 Z_a での水平流速、 g :重力加速度、 t :時間微分を示す。また、開口部沖側肩部を原点とし波進行方向をX(+), 直角方向をYとした(図-1参照)。

連続式(1)、運動方程式(2)に含まれる時間微分の項に対してAdams-Bashforth-Moutonの予測子・修正子法で差分化を行った。予測子としてAdams-Bashforthの3次スキームを適用し、修正子としてAdams-Moutonの4次スキームを用いている。

数値計算方法は、時間ステップ毎に式(1)と(2)を用い、まず、運動方程式(2)で流速(u,v)の予測値を求めた(予測)。次に、連続の式(1)を繰り返して連続条件を満たすように流速と圧力を修正する(修正)、予測・修正子法を用いてタイムステップ毎に任意水深での水平流速と水位変化を時系列で算出した。また、数値計算を行う際、長時間の計算を行うため図-1に示すように、両側には2波長分のエネルギー減衰帯を設け、両側の境界位置で無反射条件とした。しかし、右側境界を無反射条件とした場

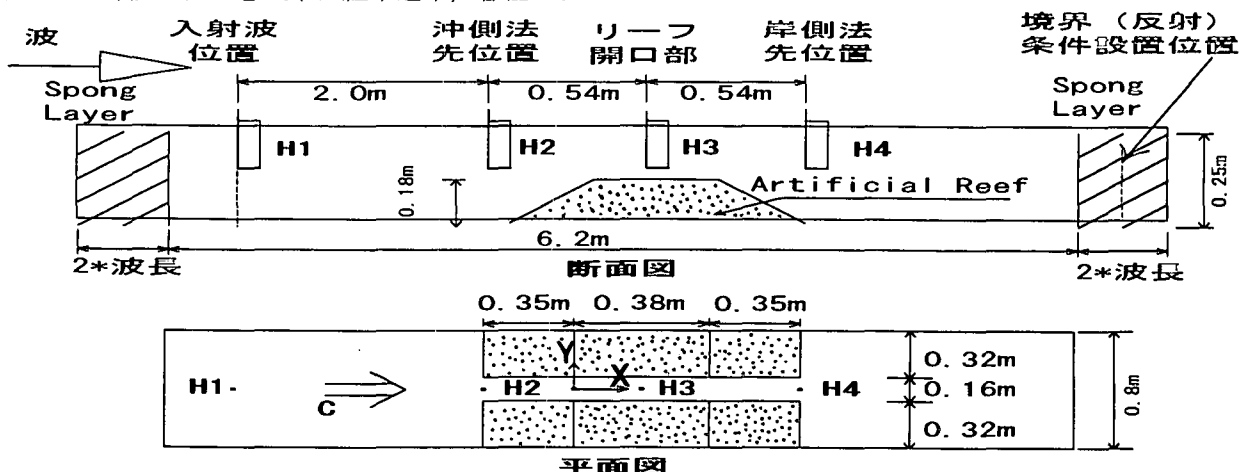


図-1 リーフ模型と測定位置図

合には、境界からの流体が徐々に流出して水位が下がるために、試行錯誤の結果、右側のエネルギー減衰帯の任意位置で水平流速ゼロ ($u=0$) とし、その位置を変化させる事で任意反射境界条件を設定した。

計算格子間隔は、 $\Delta x = \Delta y = 4\text{cm}$ (格子数276*21) とし、入射波の入力位置 (H_1) での水位変化は実験によって測定された水位変化を与えた。なお、その際実験で得られた水位の時系列変化 (200Hzサンプリング) を1000Hzに線形補間し、FFT法で周波数分解し、それぞれの周波数に対する造波ソースを求め、逆FFT法によって不規則波の造波ソースの時系列を作成して、入射波境界条件として入力した。

(2) 砕波モデル

リーフ周辺では急激な水深変化に伴う砕波現象が生じる。目視観測によれば、写真-1に示すように開口部とリーフ天端での砕波のタイミングがずれている。リーフ天端では水位上昇に伴って波速が早くなって開口部より早く砕波しており、開口部で楕円状に砕波している。砕波減衰に関しては砕波位置と時間の関数である渦動粘性 ν を用いた減衰モデルを用いた式(3)。ここで、 δ は経験的に1.2である。また、式中の係数 B は、式(4)で示されるようにエネルギー逸散の発生を制御するパラメータであり、Schäfferら¹³⁾の"roller"モデルの類推により、水位の加速度の関数 η_i^* のパラメータを用いる事により式(5)で定義される。沖¹⁴⁾ら研究結果によれば、砕波に関するパラメータ $\eta_i^{(I)}$ の係数は開口部を有しない場合0.35であるが、この係数を様々変化させて最も振幅や位相の再現性が良い係数を探した。

$$\nu = B\delta^2 \left| (h + \eta) \nabla \cdot M \right| \quad (3)$$

$$B = \frac{\eta_i^*}{\eta_i} - 1 \quad (\eta_i^* < \eta_i \leq 2\eta_i^*) \quad (4)$$

$$\eta_i^* = \eta_i^{(I)} + \frac{t - t_0}{T^*} (\eta_i^{(F)} - \eta_i^{(I)}) \quad (0 \leq t - t_0 < T^*) \quad (5)$$

上式で、 M : 単位幅当通過流量、 t_0 : 砕波が発生した時間、 T^* : 砕波が発生している時間、添字の(I)(F) : 砕波開始と終了時の水面上昇速度を表す。



写真-1 開口部周辺の砕波状況

3. 水理模型実験

(1) 水槽と人工リーフの形状

数値計算との水位および底面流速の比較のために用いた実験水槽は、長さ10.0m、幅0.8m、最大水深0.8mであり、水路の一部は両面アクリル製となっており、水路側面から水位変動等の観測が可能である。この水路の一端には、プランジャー型規則波造波装置が取り付けられている。この造波機直前には、波進行方向に対して直角方向5.0cm間隔で消波用ネットを設置して水路内の横波の発生を防いだ。また反対側の水路の端部には1:2の斜面に消波ブロックを設置して消波した。人工リーフ模型は、造波板から3.0m離れた地点に既往の研究事例を参考に幅38cm、堤長64cm、高さ17.5cm、法面勾配1:2の不透過性型(ベニヤ板)の模型を設置した。リーフ堤長は、長さ32cmを2基製作し、開口幅16cmとして水路の側壁に接するように配置した。この比は、人工リーフ群を用いた場合に汀線前進効果が見込まれる目安となっているリーフ長さ (L_r) と開口幅 (M) との比が $L_r/M=4$ となるように設定した。図-1に水槽諸元と模型設置位置を示す。

(2) 測定方法

測定は、水位変化と底面流速の2項目とした。

まず、水位の測定には、容量式波高計を4台用いて、入射波 (H_1)、リーフ沖側法先位置 (H_2)、開口部中央位置 (H_3)、リーフ岸側法先位置 (H_4) の計4箇所での水位変化を測定した。測定データは、造波と同時にA/D変換してパソコンに記録した。流速の測定には、Sontek社製の3次元超音波ドップラー流速計 (3-Dimensional Acoustic Doppler Velocimeter) を用いた。このセンサーは、トランスミッターから発信した超音波を、レーザースター端部から50mm端部における3mm立方 (27mm³) に集中させて、流体からの反射をレーザースターで受信する事で、3次元的に最高25Hzで流速3成分を測定する事ができる。水位測定位置と同じ場所の底面付近に設置し、静水状態から造波と共に測定・記録を行った。

(3) 実験波諸元

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て、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 |

4. 水位の比較結果

(1) 入射波の水位比較(H₁)

図-2に入射波の水位の比較結果を示す。図中の太い線は実験による水位変化を、細い線は計算結果を表している。これらを比較すると、第1波(図中a)の最低水位時に計算結果が小さくなっているものの、それ以降はほぼ実験値と計算値が一致している。ピーク水位時の比($\eta_{\max-\text{cal}}/\eta_{\max-\text{exp}}$)は、水位が正の場合で0.95、負で1.08とほぼ実験値と一致している。また、最高と最低水位の発生時期は一致しており実験値の水位変化を境界条件として入力できている。

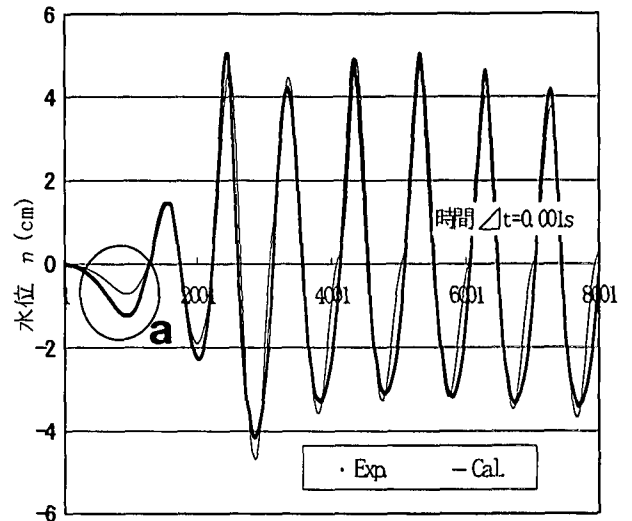


図-2 入射波の比較

(2) 開口部の水位比較(H₃)

図-3に開口部での水位の比較結果を示す。開口部を有している場合、目視観測によるとリーフ天端上での強制碎波に比べ開口部では水深が深いいため碎波の開始時期が遅れる。

実験結果(図中の太い線)を見ると、第3波以降の水面が上昇する際に腰掛部(図中b)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。最高水位および最低水位の計算値と実験値との比はそれぞれ0.75と1.03となり、最高水位はやや実験値に比べて小さくなっているのに対し、水位が下がった時はピークを再現できている。本計算モデルで用いた碎波によるエネルギー逸散量として、水位の加速度 η_t が $C_{bk}\sqrt{g(h+\eta)}$ より大きい時に(C_{bk} : 0.35(開口部を有しない場合), h : 水深, η : 水位)に碎波によってエネルギーが減衰するとしている。この C_{bk} の値を0.05~0.35と任意に変化させて試行錯誤の結果、前述の係数は $C_{bk}=0.15$ が最も適合性が良かった。碎波に関する係数を修正する事で、開口部周辺の水位変化の再現が可能であることが分かる。

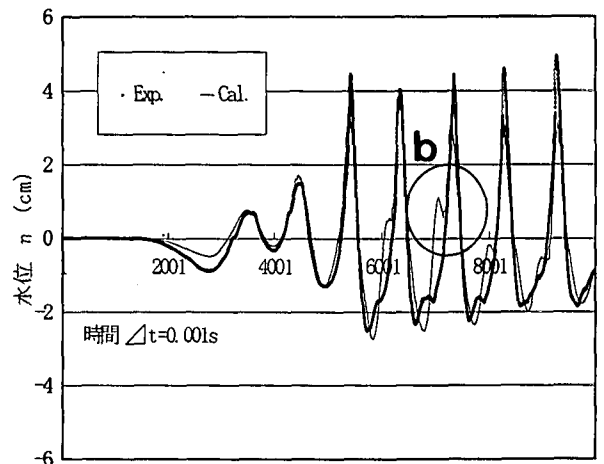


図-3 水位の比較(開口部中央位置)

(3) 岸側法先位置の水位比較(H₄)

図-4にリーフ岸側法先位置での水位の比較結果を示す。開口部中央での水位変化に生じていた水位上昇時の腰掛部の再現(図中c)と、水位のピークの発生時期が実験値とほぼ同時であり水位変化の再現性は良くモデルの適用性が高い。また、実験値の最高水位と最低水位の実験値の比は、水位が正側で1.08倍、負側時で1.1倍であった。

以上、開口部中央位置と開口部岸側法先位置における水位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。

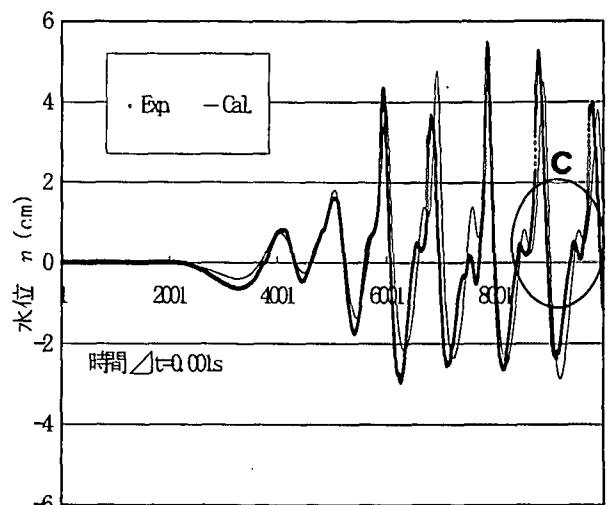


図-4 水位の比較(リーフ岸側法先位置)

5. 底面流速の比較結果

水位を用い、式(6)により底面流速を算出して実験結果と比較した。

$$\bar{u}_b = \bar{u}_\alpha + \frac{Z_\alpha^2 - h^2}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_\alpha}{\partial x} \right) + (Z_\alpha + h) \left(h \frac{\partial \bar{u}_\alpha}{\partial x} \right) \quad (6)$$

ここで、 \bar{u}_b : 底面流速、 Z_α : 任意の水深 (= 0.531h)、 \bar{u}_α : 高さ Z_α の流速、 h : 水深を示す。

(1) 流速の経時変化

リーフ沖側、開口部中央、そしてリーフ岸側における底面流速（実験時の測定位置は底面上約5mm）の測定結果を図-5に示す。静水状態からの造波に対し、平均底面流速は、最初は岸向きとなっているが徐々に沖向きとなっており開口部中央位置と岸側法先位置では平均流は沖向きとなっている。沖側法先位置では水面変動と同じく正負ほぼ同じ振幅で流れの向きが変動している。各位置における平均流速（10波目以降の平均）と水位変化を用いた長波の流速式 $C = \sqrt{g(h+H)}$ との比は、それぞれ0.007, 0.048, 0.037と開口部中央位置が最も高くなっている。

(2) リーフ沖側法先位置での流速比較

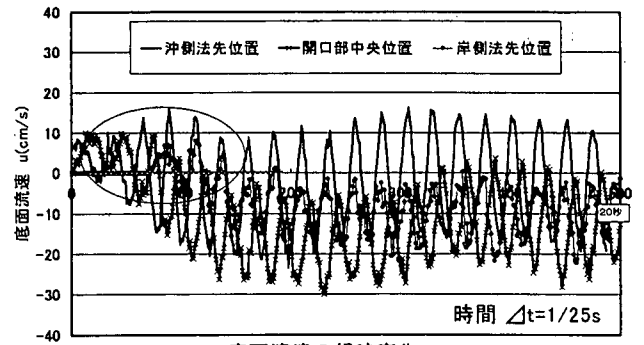
リーフ群開口部の沖側法先位置 (H_2) における底面流速と実験結果との比較結果を図-6に示す。流速の正負のピーク発生時期はほぼ一致している。プラス側におけるのピーク値の実験値と計算結果の比 $(u+\max)_{\text{exp}} / (u+\max)_{\text{cal}} = 0.8$ 、マイナス側では1.6であり、振幅では1.1となっており、ピークの発生時期と流速変動の振幅についてはほぼ再現されているものの、岸側(+)側にシフトした流速変動となっていた。

(3) リーフ開口中央での流速比較

開口部位置 (H_3) における比較結果を図-7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。

(4) リーフ開口岸側法先位置での流速比較

岸側法先位置 (H_4) における底面流速と実験結果との比較結果を図-8に示す。プラス側におけるのピーク値は、実験ではわずかながら沖向きとなり、計算では岸向きとなっていた。マイナス側では1.3であり、振幅はほぼ一致していた。また、ピークの発生時期と流速変動の振幅についてはほぼ再現されていた。



底面流速の経時変化
図-5 流速の測定結果

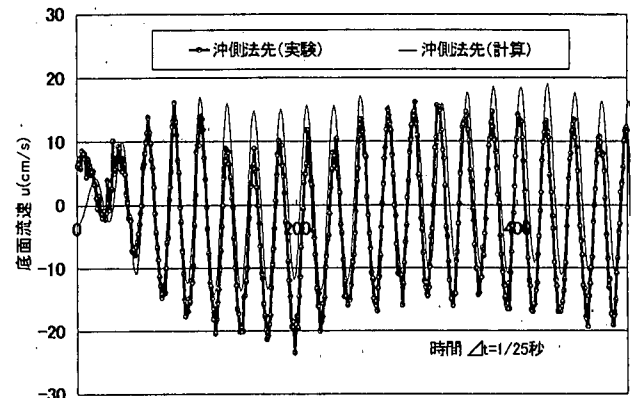


図-6 流速の比較結果（リーフ沖側）

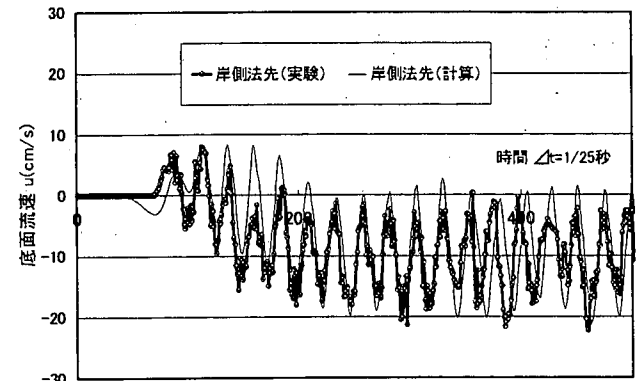


図-7 流速の比較結果（開口部中央）

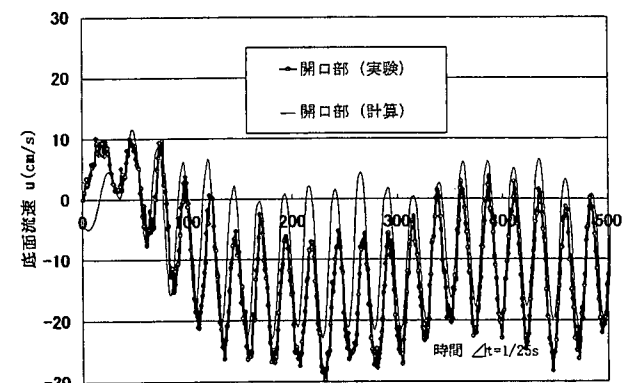


図-8 流速の比較結果（リーフ岸側）

6. 結論

開口部を有する人工リーフ周辺の水位および底面流速変化を対象として、「拡張型の強非線形ブシネスク方程式 (FUNWAVE)」を用いて数値計算をし、水理実験と比較した。

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 (H_3) での水位の比較結果より、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、水位プラス時の急激な水面変化と一時の緩やかな水位変化が再現された。
- 2) 人工リーフ岸側法先位置 (H_4) での比較結果より、最高水位時の実験値との比は1.08倍、最低水位時のそれは1.1倍となった。また水面変化の特徴が再現された。
- 3) 人工リーフの開口部中央と岸側法先位置における水位の振幅の再現性は ($=H_{cal}/H_{exp}$)、開口部中央で0.9、岸側法先位置で1.1であり、急激な水深変化を有する開口部でも比較的良好に水位を再現できた。
- 4) 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、計算結果でも再現された。
- 5) 開口部中央と岸側法先位置の底面流速振幅の平均 ($=U_{amp-cal}/U_{amp-exp}$) は、ほぼ実験値を再現していたが、平均流速がやや岸向きとなっていた。
- 6) 水位変動と平均底面流速の模型実験と数値計算結果の比較より、拡張型の強非線形ブシネスクモデルを用いると、人工リーフ開口部の水位と流速場を比較的良好に計算できる。

参考文献：

- 1) 田中則男：天端幅の広い潜堤の波浪減殺および砂浜安定効果について、海講, Vol. 23, pp. 152-157, 1976.
- 2) 高山知司, 神山豊, 菊地治：リーフ上の波の変形に関する研究, 港湾技術研究所資料, NO. 278, 1977.
- 3) 河野二夫, 永松一甫, 喜屋武忠：リーフ上の波の変形に関する現地調査, 海講, Vol. 25, pp. 146-150, 1978.
- 4) 寺尾健, 長谷川正, 奥村研一, 山本政光：リーフにおける波浪変形について, 海講, Vol. 28, pp. 133-138, 1981.
- 5) 宇多高明, 森下襄, 早津誠一：糸魚川海岸における人工リーフ周りの波, 流れ, 漂砂の現地観測, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 489-493, 1990.
- 6) 荘司喜博, 中山春雄, 滝口要之助, 高橋豊喜, 黒木敬司, 坂井隆行：新潟西海岸の潜堤設置による波, 流れ, および地形変化の観測, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 316-320, 1991.
- 7) 清水琢三, 今井澄夫, 寺田賢二：人工リーフ建設に伴う地形変化, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 546-550, 1993.
- 8) 南将人, 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.
- 9) 南将人, 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.
- 10) 海岸保全施設設計便覧2000年度版, 土木学会, 2000.12.
- 11) GE Wei, James T. Kirby, Stephan T. Grilli, and Ravishankar Subramanya：A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves, Part I. Highly nonlinear unsteady waves, J. Fluid Mech. Vol. 294, pp. 71-92, 1995.
- 12) Nwogu O.：Alternative form of Boussinesq equations for near shore wave propagation, J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 119, No. 6, pp. 618-638, 1993.
- 13) Schäffer, 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.
- 14) 沖和哉, 村上啓介, 間瀬肇：小水深人工リーフ天端上を通過する波の変形—数値計算モデルの検証—, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 41-45, 2002.