

BEM-VOF結合解析法の構造物近傍 波動場への適用

AN APPLICATION OF A COMBINED METHOD OF BEM AND VOF
FOR SOLVING NON-LINEAR WAVE-STRUCTURE INTERACTIONS

鄺 曙光¹・山城 賢²・吉田 明德³・井ノ口 洋平⁴・入江 功⁵
Shuguang YAN, Masaru YAMASHIRO, Akinori YOSHIDA, Yohei INOKUCHI and Isao IRIE

¹正会員 博(工) 九州共立大学助手 土木工学科 (〒807-8585 北九州市八幡西区自由ヶ丘1-8)

²正会員 博(工) 九州大学助手 大学院工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

³正会員 工博 九州大学助教授 大学院工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁴正会員 工修 (株)戸田建設 名古屋支店 (〒812-8581 名古屋市東区泉1-22-22 (桜通ビル))

⁵正会員 工博 九州大学名誉教授 大学院工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

A numerical analysis model for solving non-linear wave-structure interactions, based on the coupling of a Boundary Element Method (BEM) which is applied to the region far from the structure where the fluid motion is less non-linear and a Volume Of Fluid (VOF) method which is applied to the region around the structure where the fluid motion is highly non-linear, is developed.

Two methods were combined under the principles of continuities of the velocity and the pressure. The validity of the method was checked comparing the numerical results with the experimental ones for surface oscillations around a submerged breakwater. Consequently, combined method can calculate wave field including wave breaking, with the same accuracy of VOF, and with much shorter CPU-time.

Key Words : BEM, VOF, numerical method, wave motion, non-linear interaction

1. まえがき

近年のコンピューターの急速な発達に伴い, CFD (数値流体力学) を海岸工学の分野に取り入れ, 数値シミュレーションにより構造物近傍の波動現象を解明しようとする研究が活発に行われている. 特に最近では, 多大な労力と費用を要する水理模型実験に代わり, 数値シミュレーションを構造物の設計に活用しようとする動きもある¹⁾.

数値シミュレーションにより, 構造物周辺海域の波動場について, 構造物のごく近傍で生じる碎波などの強非線形現象を含めて検討する場合, 現在のところVOF²⁾が一般的に利用されている. しかし, よく知られているように, VOFは全計算領域を多数の格子(セル)に分割し, 格子に配置した流速や圧力を時間発展的に求めていくため, 膨大な計算時間と計算機の記憶容量を必要とする. したがって, VOFでは広い海域や長い時間を対象とする計算は困難といえる. このことから, 著者ら^{3), 4), 5)}は, 碎波などの強非線形現象が生じる構造物のごく近傍のみをVOF

で計算し, 構造物からある程度離れた海域については, VOFに比べ精度が良く, 計算時間が格段に短くて済む境界要素法(BEM)を適用して, 両者の計算領域に双方向に波を伝播できる結合法を提案し, 微小振幅波の進行波と完全反射波を対象に, BEM-VOF結合解析法の妥当性を確認した. 本研究では, より実用的な問題として, 構造物近傍の複雑な波動場を対象に有限振幅波(第5次ストークス波)を用いて, 結合解析法の妥当性と適用性について実験結果との比較により検討するとともに, BEMおよびVOFの単独手法との比較により結合解析法の優位性について検討した.

2. 結合解析法の概略

(1) 結合解析法

BEM-VOF結合解析法では, 接続境界における流速と圧力の連続性をもとに, 図-1に示すようにBEMの計算領域とVOFの計算領域をある幅で重複させて結合する. このように, 計算領域をある幅を持った接

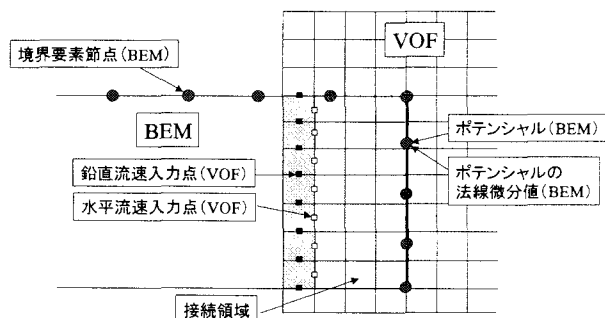


図-1 BEMとVOFの結合

接続領域を設けて重複させる理由は、VOFによる圧力の計算結果について検討をおこなった結果、入力境界付近における圧力は特に水表面で瞬間的に異常な値を示すことがあり不安定であること、入力境界から離れると圧力の異常の程度が小さくなり比較的安定することが分ったためである³⁾。このようなVOF領域における圧力の特性を考慮し、ある幅を持った接続領域を設定した。ただし、両者の計算領域を重ねる際には、図-1に示すようにBEMの仮想境界がVOF領域の水平流速算定点上に重なるように配置する。なお、BEMにおける境界要素の分割幅とVOFのセルの大きさは異なり、一般的にVOFのセルは境界要素に比べて小さく取る必要があるため、BEMとVOFとの算定位置は異なることになる。したがって、流速および圧力の受け渡しの際には、離散点における値をもとにスプライン補間法を用いて、所要の位置での値を算定する。

(2) 接続境界の処理

接続境界における処理については、VOFでは入力境界において、鉛直流速と水平流速が必要なため、BEM領域内のポテンシャルを求め、水平方向および鉛直方向の差分をとってVOFの入力値とする。一方、BEMでは、境界条件として、VOF領域内にある仮想境界上のポテンシャルとその法線微分値が必要なため、VOFで算定される圧力と流速からベルヌーイの圧力方程式をもとにポテンシャルを算定し、水平流速をポテンシャルの法線微分値とする。これにより双方向への波動の伝播が可能な結合解析法となる。具体的な処理については著者ら^{3), 4), 5)}の論文に詳しく説明している。

(3) 結合解析法の計算手順

計算手順については、基本的には、BEM領域を沖側に、VOF領域を岸側に配置することを考えているため、あるタイムステップにおいて、必然的にまずBEM領域の計算をおこない、その結果をVOFの入力値とすることになる。この手順では、BEMの計算における接続境界の境界値は、一つ前のタイムステップにおけるVOFの計算結果を用いることになる。したがって、沖から来襲する波についてはあまり問題にならないが、VOF領域からBEM領域に伝播する波（反射波）については、BEM領域とVOF領域で反射波の進

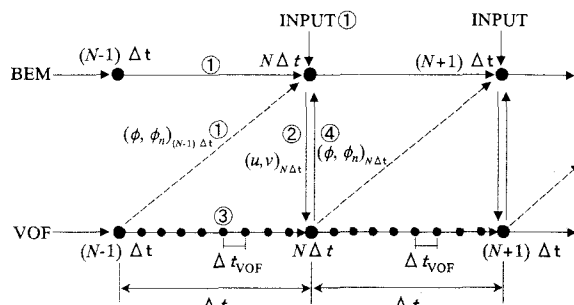


図-2 計算の手順

行に時間的なずれが生じる。そこで、反射波の進行をできるだけ正確に計算するために、同一タイムステップ中にBEMの計算を2回おこなうこととした。以下に具体的な計算手順について述べる。

図-2に結合解析法における時間発展の過程を示す。あるタイムステップ $N\Delta t$ における水面波形を求める際に、まずBEMの計算をおこなうが、ここでは従来通り、 $N\Delta t$ における造波境界での外力条件（図中の①）、 $(N-1)\Delta t$ におけるBEMの計算値（①）および $(N-1)\Delta t$ でVOFにより求めた圧力と流速から得られる境界条件（①）を用いる。そして、BEMの計算結果からVOF領域への入力値を求め（②）、VOF領域のタイムステップを更新する。この時、VOFでは計算の安定性と精度を確保するため、BEMより短いタイムステップ（ Δt_{VOF} ）で入力値を補間しながら、 $(N-1)\Delta t$ から $N\Delta t$ まで計算をおこなう（③）。その結果として $N\Delta t$ におけるVOF領域の圧力および流速が求められる。本来、 $N\Delta t$ におけるBEMの計算には、この圧力と流速が利用されるべきである。そこで、 $N\Delta t$ においてBEMの計算を再度おこなう。この時、BEMの条件としては、外力等は更新せず、 $N\Delta t$ における外力条件（図中の①）、 $(N-1)\Delta t$ におけるBEMの計算値（①）、そして $N\Delta t$ におけるVOFからの境界値（④）となる。以上の手順により、反射波伝播における時間的なずれを解消し、全領域の水面形状を決定する。

3. 有限振幅波の伝播

(1) 計算条件

本解析法を構造物近傍波動場へ適用する前に、有限振幅波の伝播について妥当性を確認するため、第5次ストークス波の進行波と完全反射波を対象に計算を行い理論値との比較を行った。計算領域は図-3

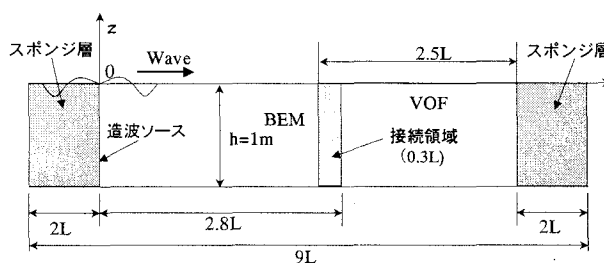


図-3 計算領域の設定

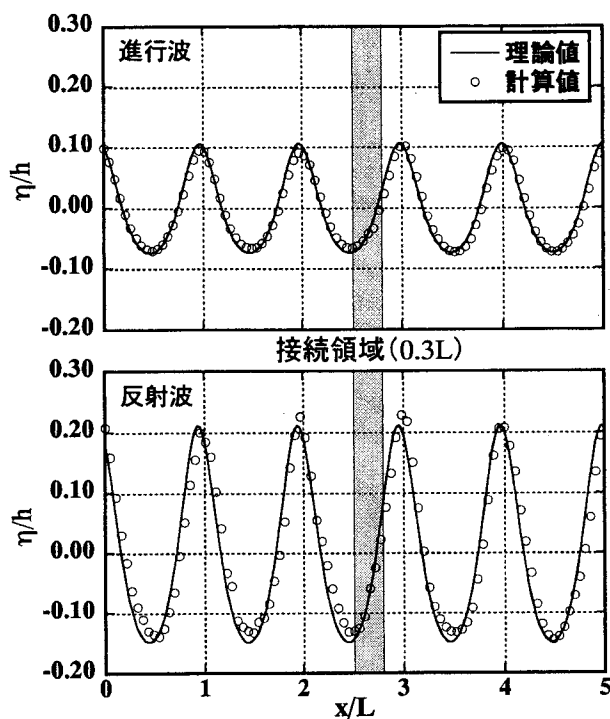


図-4 空間波形の比較

に示すように、BEMを沖側に、VOFを岸側に配置し、BEM領域では沖側に数値消波フィルター⁶⁾を、VOF領域では岸側に減衰帯⁷⁾を設置した。また、造波ソースをBEM領域のスポンジ層前面に設け入射波を発生させた。BEM領域の幅は $4.8L$ （スポンジ層幅 $2.0L$ 、 L は入射波の波長）とし、VOF領域の幅を $4.5L$ （減衰帯幅 $2.0L$ ）とした。接続領域の重複幅については、過去におこなった検討結果⁵⁾より、最適幅が存在し、 $0.2L \sim 0.3L$ 程度が最も適切な設定であることから $0.3L$ とした。水深 h を $1m$ とし、入射波は周期 $T=3.0s$ （ $kh=0.72$ ）、波高 $H=0.18m$ とした。計算時間は $30T$ であり、計算時間間隔はBEMを $0.015s$ とし、VOFは $0.0015s$ （BEMの $1/10$ ）とした。したがって、BEMの1ステップにつき、VOFは10ステップの計算を行う。BEMの沖側および岸側仮想境界と水面境界の要素数はそれぞれ10、192（ $L/\Delta x=40$ ）とし、VOFの水平方向と鉛直方向のセルの数はそれぞれ540（ $L/\Delta x=120$ ）、50（ $h/\Delta z=50$ ）と設定した。なお、進行波の計算についてはVOF領域端の減衰帯を機能させ、完全反射条件では造波ソースから $5.0L$ の位置（減衰帯前面）を壁面境界として取り扱っている。

(2) 計算精度の検証

図-4に $t=30T$ （計算終了時）における進行波と反射波の空間波形を示す。図中には、ストークス波の第5次近似解を併せて示している。図より進行波の計算値と理論値はよく一致しており、また、造波開始後30周期経過しても破綻することなく精度良く計算していることが認められる。反射波においては進行波に比べて、計算値と理論値に若干の差が見られるが、全体的に良く一致しており、このことから、本解析法は非線形波（第5次ストークス波）の進行

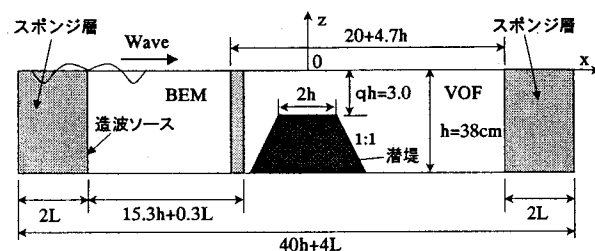


図-5 計算領域の設定

波のみではなく反射波についても十分に伝播することが可能であるといえる。

4. 構造物近傍波動場への適用

(1) 計算条件

構造物を対象とした場合の本解析法の適用性について検討する。対象とする構造物として、波浪制御、海域の有効利用、景観面において優れた波浪制御構造物であり、現地における適用事例が多数ある潜堤を選択した。潜堤は没水構造物であるため、潜堤上で碎波が生じやすく、また、波と潜堤との非線形干渉による高次の周波数成分波も発生し、潜堤背後の波動場は複雑となることが知られている。このため、碎波や非線形干渉効果に対する数値解析法の適用性を調べるには適した構造物である。

計算領域として、図-5に示すように、解析対象領域の両端にスポンジ層を設置し、また解析対象領域と沖側のスポンジ層の接続位置に造波ソースを設けた一定水深の2次元水槽を想定した。その水槽の中央に設置した潜堤に対し、 X の負の方向から波を入射させた。図中の B 、 qh 、 h はそれぞれ潜堤の天端幅、潜堤の天端水深、水槽の静水深である。計算領域の長さ、造波ソースの位置およびスポンジ層の幅はそれぞれ $40h$ 、 $x=-20h$ 、 $2L$ とした。入射波は $T=1.79s$ （ $kh=0.75$ ）の $H=4cm$ 、 $6cm$ の規則波とし、第5次ストークス波理論により与えた。計算時間は $30T$ とした。

なお、解析はBEM、VOFおよびBEM-VOF結合解析法の3手法でおこなった。十分な計算精度を得るために必要な計算時間間隔（タイムステップ）と要素の分割幅（VOFの場合セルのサイズ）は各解析法で異なるため、次のように設定した。BEMのみでは水面境界の要素数、左右の仮想境界の要素数および潜堤を含む底面境界の要素の数をそれぞれ200（ $L/\Delta x=23$ ）、5、115に設定し、タイムステップを $0.01s$ とした。なお、BEMの計算では、通常、底面境界は一定水深における鏡像の原理を用いて計算から除いているが、底面境界も全て境界要素で分割した場合に、計算がより安定していたため、潜堤を対象とする本計算では、一定水深の底面境界についても要素分割し計算に考慮することにした。VOFのみではBEMに比べてより細かい領域分割とタイムステップが必要となるため、水平方向のセルの長さ Δx を $L/\Delta x=80$ （ $\Delta x=3.42cm$ ）とし、鉛直方向のセルの長さ

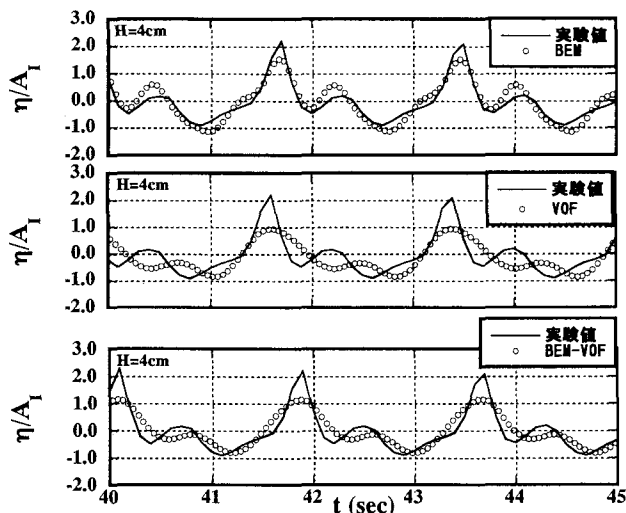


図-6 潜堤背後における水面変動の時間波形
($H=4\text{cm}$, $x/L=1.86$)

Δz を $h/\Delta z=20$ ($\Delta z=1.9\text{cm}$) として、全セルの数を 820×40 に設定し、タイムステップをBEMのタイムステップの1/10として 0.001s に設定した。BEM-VOF結合解析法では、図-5に示すように、BEMの計算領域を $15.3h+0.3L$ 、VOFの計算領域を $20h+4.7L$ に取っておこなった。接続領域の重複幅は $0.3L$ とした。また、BEM領域の水面の要素数は 120 ($L/\Delta S=30$) とし、仮想境界の要素数は 10 とした。VOF領域のセルの大きさはVOF単独の計算と同じに取り、セルの数を 460×40 とした。タイムステップはBEMを 0.01s とし、VOFをBEMのタイムステップの1/15とした。

(2) 計算精度の検証

入射波が単一周波数の規則波であっても波と潜堤の干渉によって、潜堤背後には、2倍および3倍の周波数成分の波が生じる。潜堤背後海域における波動場の特性量として、水面変動のパワースペクトル、パワースペクトルの積分量である波のパワー、各周波数成分の波高および平均水位上昇量などがあるが、ここでは、水面波形および各周波数成分波の振幅に着目して計算値と実験値を比較し、結合解析法の妥当性を検証する。なお、検証に用いた実験結果は、過去に九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻沿岸海洋工学研究室にて、潜堤を対象におこなわれた一連の実験結果⁸⁾の一部を参照した。

図-6に潜堤背後 ($x/L=1.86$) における水面変動の時間波形 (造波開始から $40 \sim 45\text{s}$) について実験値と計算値の比較を示す。なお、図に示す水面変動は入射波振幅で無次元化している。また、BEMおよびVOFそれぞれ単独での計算結果も示している。 $H=4\text{cm}$ のケースでは砕波を生じておらず、BEMによる計算結果が実験値と最も良く一致していることがわかる。一方、VOFによる計算結果は実験値に比べ波頂が小さく、全体的に差がみられる。BEM-VOF結合解析法による計算値は波頂部で実験値より小さいが、全体的には概ね一致しており、VOF単独による

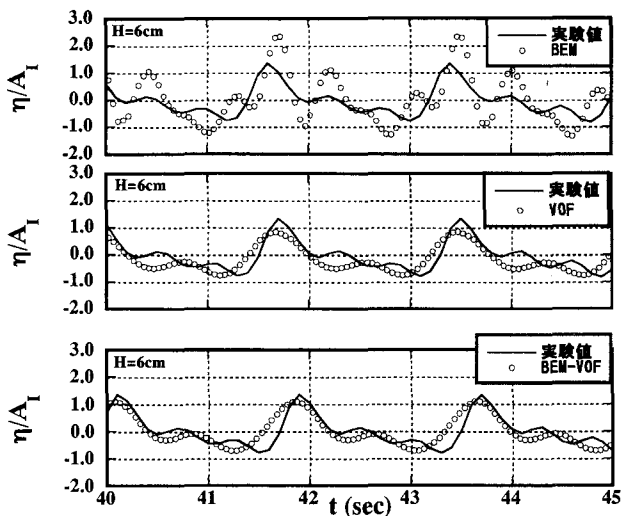


図-7 潜堤背後における水面変動の時間波形
($H=6\text{cm}$, $x/L=1.86$)

計算結果に比べ計算精度が良いことがわかる。

図-7に $H=6\text{cm}$ の場合の時間波形を示す。このケースは実験では潜堤上で砕波を生じており、加えて、波と潜堤との非線形干渉により潜堤背後には、2倍、3倍周波数の高次の成分波が生じている。図よりポテンシャル理論に基づくBEMでは妥当な結果が得られていないことがわかる。一方、VOFおよびBEM-VOF結合解析法による計算値は実験値と概ね一致しており、結合解析法はVOF単独による計算と同程度の結果を得ている。

より定量的な評価をおこなうため、水面変動の時系列からパワースペクトルを算定し、さらに各周波数成分の入射波に対する振幅比 (A/A_1) を求めた。

図-8に $H=4\text{cm}$ および 6cm における $x/L=1.86$ での各周波数成分波の振幅比を示す。実験値の変化をみると、前述のとおり、波と潜堤との非線形干渉により2倍周波数成分波および3倍周波数成分波が励起してい

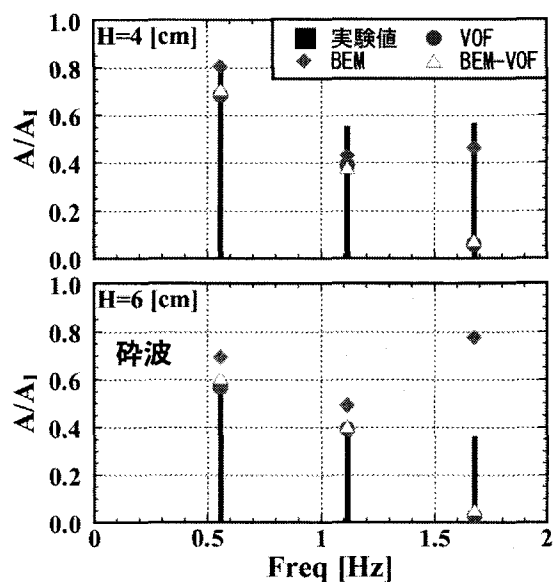


図-8 各周波数成分の振幅の比

ることがわかる。しかし、潜堤上で碎波が生じるようになると基本周波数成分波も含め各周波数成分の入射波に対する振幅比は減少している。これに対し、数値解析による結果をみると、波高が小さく碎波を生じない $H=4\text{cm}$ のケースについては、BEMによる計算結果が最も妥当といえる。しかしながら、碎波が生じる $H=6\text{cm}$ のケースでは、もはやBEMの強非線形ポテンシャルモデルとしての基本仮定が成立せず過大評価している。ここには示していないが、碎波が生じる他のケースでは、BEMによる計算は破綻してしまった。VOFによる計算では碎波が生じて計算は破綻せず結果を得ることができ、むしろ、波高が小さい場合に比べ碎波を生じている場合の方が基本周波数成分や2倍周波数成分の振幅は適切に表せている。ただし、3倍周波数成分については表せていない。これは、VOFの計算では短い波ほど伝播にともない減衰しやすいということが原因の1つと考えられる。したがって、より高周波数の成分波を表すためには、セルのサイズとタイムステップをさらに小さくする必要があると思われる。一方、本研究で提案した結合解析法は、VOFのみによる計算とほぼ同じ計算結果を与えていることから、最低限でもVOFによる計算精度は確保できているといえる。しかも、VOFの計算領域を小さくすることにより、波の減衰の程度が若干小さくなっている。

これらの計算は全て同一のコンピューターによりおこなっており、計算に要した時間について比較すると、BEMは圧倒的に計算時間が短く、30T間の計算

を約20分で終了した。これに対し、VOFでは約2時間30分を要し、結合解析法では約1時間であった。このことから、結合解析法ではVOF単独の計算に比べ格段に計算時間を短縮できるといえる。

(3) 3倍周波数成分に関する検討

3倍周波数成分に対するセルの幅が大きすぎることから、図-5の計算領域に対するBEM-VOF結合解析法の計算においてVOF領域のセルを細かく取って計算を行った。図-9に水平方向1波長あたりのセルの数が80 ($L/\Delta x=80$)、120 ($L/\Delta x=120$)、200 ($L/\Delta x=200$)とした場合について、潜堤背後 $x/L=1.86$ の位置における各周波数成分の入射波に対する振幅比 (A/A_I) の比較を示す。図中には、それぞれの計算結果と実験値を併せて示している。図より、いずれのケースにおいても3倍周波数成分が適切に表せていないが、セルを細かく取ると3倍周波数成分を含む全ての成分波の振幅が大きくなっていることがわかる。ところが、図-10に示すように、他の位置 ($x/L=1.67$) における各周波数成分の入射波に対する振幅比を調べたところ、3倍周波数成分を含む全ての周波数成分について、セル幅 $L/\Delta x=80$ 程度で実験値とほぼ一致していることがわかった。そこで、各周波数成分の振幅比の空間変動について調べた。図-11に潜堤背後の10点 ($x/L=0.817, 0.912,$

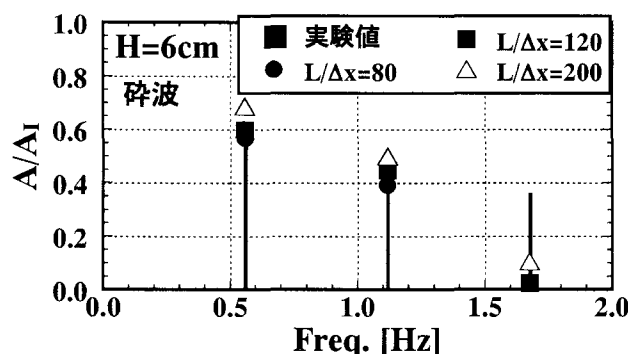


図-9 セル幅による各周波数成分の振幅の比較 ($x/L=1.86$)

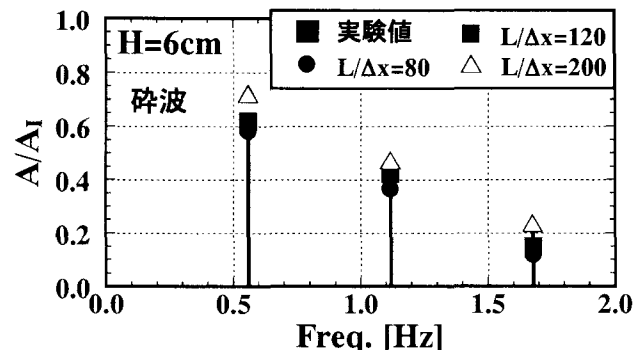


図-10 セル幅による各周波数成分の振幅の比較 ($x/L=1.67$)

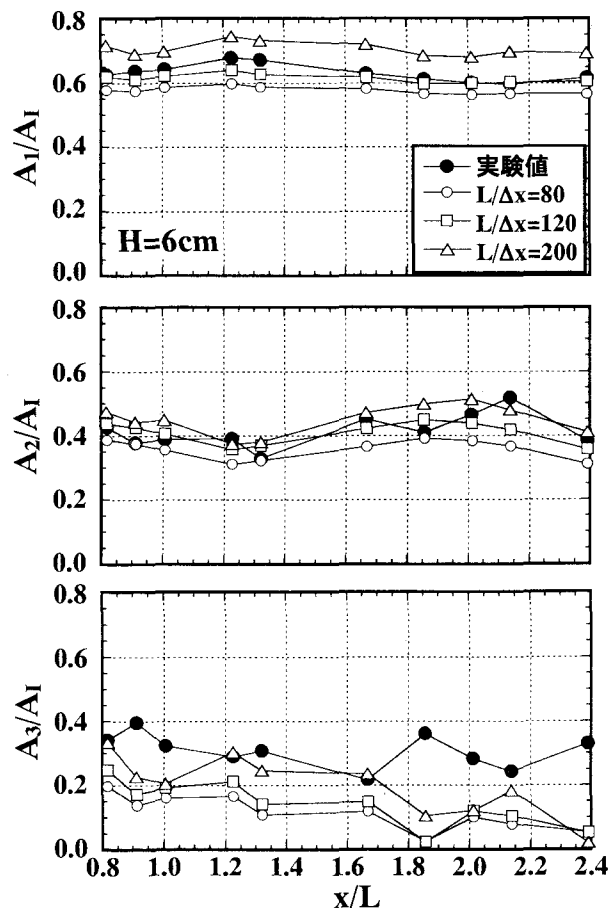


図-11 各周波数成分の振幅の空間分布 (上図：基本，中図：2倍，下図：3倍)

1.01, 1.23, 1.32, 1.67, 1.86, 2.01, 2.14, 2.39) について、水平方向1波長あたりのセルの数が80 ($L/\Delta x=80$), 120 ($L/\Delta x=120$), 200 ($L/\Delta x=200$) とした場合の各周波数成分の計算結果と実験値を併せて示す。図より、基本周波数成分と2倍周波数成分はいずれのケースについても計算値と実験値は概ね一致している。しかし、3倍周波数成分の振幅は空間的に大きく変化しており、全体的には、潜堤から離れるにつれ、振幅が減少している。また、セルを細かく取することで、各周波数成分の振幅は大きくなっているが、それにより、基本周波数成分については、実験値との差が逆に大きくなっている。本計算においては、砕波や渦にともなうエネルギー損失を考慮していないため、基本的には実験値より大きめの計算結果が得られる。したがって、セルを細かく取することで計算精度が向上し、実験値との差が大きくなったものと思われる。しかしながら、3倍周波数成分の振幅が空間的にこれほど大きく変動する原因については、現段階で不明であり、今後の検討が必要である。

4. あとがき

BEMとVOFの結合解析法は非線形波の進行波および反射波を十分に再現できることを確認した。さらに、潜堤を対象とした計算においてもVOFと同等の精度を持ち、かつ計算時間を格段に短縮できることから、

特に長時間の計算を必要とする不規則波を対象とする場合などにおいて、本結合解析法は従来の手法に比べ優れた解析法になり得るものと思われる。

参考文献

- 1) 例えば(財)沿岸開発技術研究センター(2001), 数値波動水路の研究・開発
- 2) Nichols, B. D., Hirt, C. W. and Hotchkiss, R. S.(1980), SOLA-VOF: A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries, Los Alamos Scientific Laboratory report LA-8355
- 3) 鄺曙光, 山城賢, 吉田明德, 鮎川慶一郎, 入江功: BEMとVOFを結合した波動場解析法の開発, 海洋開発論文集, 第19巻, pp. 83-88, 2003.
- 4) 鄺曙光, 山城賢, 吉田明德, 入江功: BEMとVOFを結合した波動場解析, 第50回海岸工学講演会論文集, pp. 11-15, 2003.
- 5) 鄺曙光: BEMとVOFを結合した断面2次元波動場解析法に関する研究, 九州大学学位論文, 2003.
- 6) 大山巧, 灘岡和夫: 非線形不規則波動場を対象とした数値波動水槽の開発, 土木学会論文集, No. 429, pp. 77-86, 1991.
- 7) 川崎浩司: 潜堤構造物による砕波変形と再生過程に関する基礎的研究, 名古屋大学学位論文, 1998.
- 8) 山城賢: 不規則波と構造物との非線形干渉解析法と潜堤背後の波動場特性に関する研究, 九州大学学位論文, 2000.