

BEMとVOFの結合解析法の開発

九州大学大学院 学生員 〇井ノ口洋平
 九州共立大学大学院 正会員 エン 曙光
 九州大学大学院 正会員 山城 賢 吉田明德 入江 功

1. はじめに

水理実験等で実際の現象を観察すると、構造物のごく近い範囲では急激な波浪変形が生じるものの、構造物からある程度離れた海域では、ポテンシャル理論に基づく解析法で十分表現できるものと思われる。以上の観点から、著者らは図-1に示すように、全計算領域のうち構造物のごく近傍では、Direct Simulationの一手法で自由表面の解析に実績のあるVOF法を、構造物からある程度離れた領域では計算精度が良く計算時間が短くて済む境界要素法(BEM)を適用して、この両者を結合することで互いの欠点を補い、且つ、両者の利点を活かした数値解析モデルの開発を行っている^{1),2)}。本文では、有限振幅波の伝播や構造物近傍の波動場を対象に結合解析法の適用性について検討した結果を述べる。

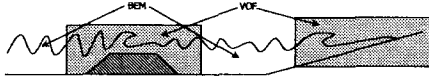


図-1 結合法の概念図

2. 数値解析法の概略

BEMは、計算精度が良く、計算対象領域の境界でのみ線分要素を配置して計算するため記憶容量や計算時間が少なく済む利点があり、潜堤上の波の分裂現象などを対象とした非線形波動解析法が開発されている。ただし、ポテンシャル理論に基づくため構造物近傍で生じる渦や砕波などの極めて非線形性の強い現象は原理的に再現できない。一方、VOF法は渦や砕波などの非線形性の強い現象でも計算が可能であるが、全計算領域で計算格子を配置して、流速、圧力、水面位置を時間発展的に計算するため、膨大な計算時間と記憶容量を必要とする。

この両者の結合については、図-2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る結合法を考えた。その概略は次のとおりである。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

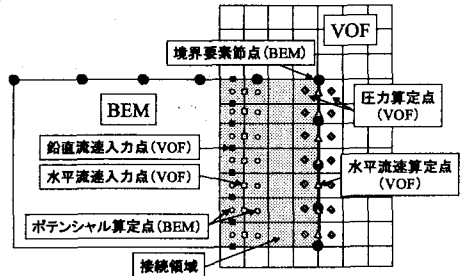


図-2 BEMとVOFの結合法

合解析法となる。なお、具体的な結合法についてはエンら^{1),2)}に詳しい。

3. 結合解析法の検証

3.1 有限振幅波の伝播

本解析法の有限振幅波への適用性を確認するため、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を、VOF領域では岸側に減衰帯を設置した。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。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 $0.015sec$ とし、VOFは $0.0015sec$ (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 ($L/\Delta S = 40$) とし、VOFの水平方向と鉛直方向のセルの数はそれぞれ542 ($L/\Delta x = 120$)、52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。

図-4に $t = 30T$ (計算終了時) における進行波と反射波

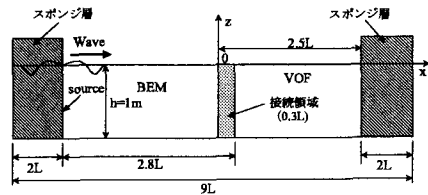


図-3 計算条件

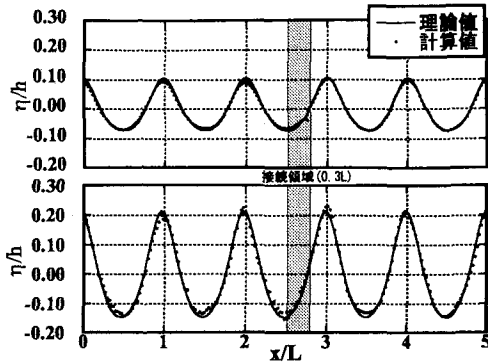


図-4 30Tにおける空間波形(上段:進行波, 下段:反射波)

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。

3.2 構造物近傍波動場への適用

潜堤を対象に本解析法の構造物近傍波動場への適用性について検証した。なお、検証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、潜堤を対象に行われた一連の実験結果の一部を参照した³⁾。計算領域は、実験条件に合わせて設定しており、図-5に示すように水槽の中央に設置した潜堤に対し、波を入射させた。入射波は $T = 1.79\text{sec}$ ($kh = 0.75$) の $H = 4\text{cm}$, 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。BEM領域の水面および仮想境界の要素数はそれぞれ120, 10に設定した。VOF領域のセルの大きさは水平方向のセルの長さを $\Delta x/L = 1/80$ ($\Delta x = 3.42\text{cm}$) とし、鉛直方向のセルの長さを $\Delta z/h = 1/20$ ($\Delta z = 1.9\text{cm}$) とし、セルの数を 460×40 に設定した。計算時間間隔はBEMを 0.01sec とし、VOFはBEMの $1/15$ とした。

潜堤背後では、波と潜堤との非線形干渉により基本周波数成分に加え、2倍、3倍の高次の周波数成分が生じることが知られている。そこで、潜堤背後における各周波数成分の振幅について計算値と実験値を比較し、結合解析法の妥当性を検証した。なお、実験では $H = 4\text{cm}$ では碎波は生じず、 $H = 6\text{cm}$ では碎波が生じている。図-6に各周波数成分の入射波に対する振幅比 (A/A_i) を示す。図にはBEMおよびVOFそれぞれ単独での計算結果も併せて示している。波高が小さく碎波を生じないケース ($H = 4\text{cm}$) 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、碎波が生じるケース ($H = 6\text{cm}$) では、もはやBEMでは基本仮定が成立せず特に3倍周波数成分について過大評価している。VOFおよび結合解

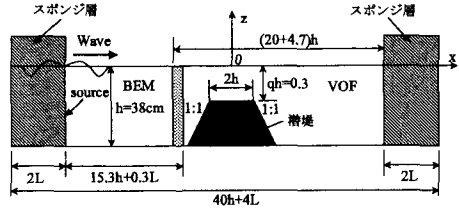


図-5 計算条件

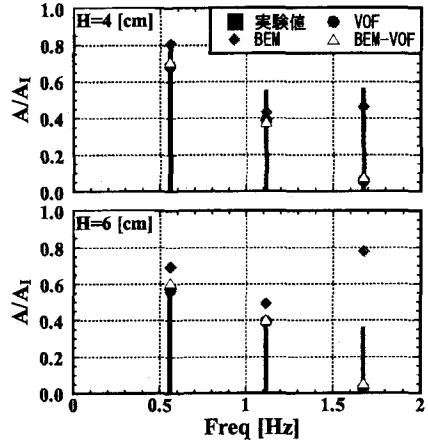


図-6 周波数成分の比較 ($x/h = 15.53$)

析法による計算では碎波が生じても破綻することなく計算でき、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。しかしながら、3倍周波数についてはほとんど表せていない。これはVOFでは短い波ほど進行するにつれて減衰するという問題に加え、3倍周波数成分に対するセルの幅が大きすぎるのが原因と思われる。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VOFによる計算精度は確保できているといえる。また、このケースについて計算に要した時間を比較するとBEMによる計算に比べVOFでは約9倍の時間を要したが、結合解析法ではBEMの約3倍であり、VOFによる計算に比べ結合解析法は計算時間をおよそ1/3に短縮できていた。

4. おわりに

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を示した。このことから、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

- エン曙光ら(2003):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, 土木学会, pp83-88.
- エン曙光ら(2003):BEMとVOFを結合した波動場解析, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.11-15.
- 山城賢(2000):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