

流体衝撃力を受ける構造解析に適した SPH-FEM 連成シミュレータの開発

九州大学大学院 学生会員 ○ 林 高德
九州大学大学院 正会員 浅井 光輝

1. はじめに

近年、世界各地で相次ぐ震災、あるいは温暖化による暴風雨の大型化などの異常気象から、沿岸地域では津波、高潮・暴波浪などに対する防災の重要性が再検討されている。我が国においては、国土が狭く島国であることから沿岸地域の開発を積極的に行っている。構造設計の観点からの安全かつ安心な沿岸構造物の創造するためには、津波だけでなく高潮・暴波浪などに対する水害対策を念頭に置き、構造問題と流体問題を同時に解く新規の流体-構造連成シミュレータの開発が求められている。そこで本研究では、流体と構造が複雑に関連し合う現象を解析可能なツールとして、流体領域には、メッシュフリー解析法の一つである粒子型解法 SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) に着目し、構造領域には、大変形有限要素法 FEM (Finite Element Method) を用いた異種解法の連成を行っている。その初期段階として、簡単なモデルについて検証を行った。

2. 解析手法の概要

本研究において、図 - 1 に示す解析手法を用いている。流体と構造が複雑に作用する構造非線形問題においては、特定の解析手法では数値解析を精度よく行えないことがある。本研究ではそのような問題に対して、流体の碎波や飛沫などの大変形問題に有効な SPH 法を用い、構造解析には広範囲で有効な大変形 FEM を採用した連成解析手法を開発した。以下、簡単に SPH、異種解法の連成方法について概説する。

(1) SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)

SPH 法は、格子を必要としない粒子型解法の一つであり、粒子上 (計算点) に解くべき物理量を与える。SPH 法の詳細は文献[1]に委ねる。本研究では、高精度な非圧縮性粘性流体解析を実施するため、SPH 法の中でも圧力をポアソン方程式で解く半陰的な SMAC-SPH 法で Navier-Stokes 方程式を解く。また、より効率よく高精度に解析を行うために境界条件の扱い方が重要であり図 - 2 に示すような mirror boundary (Ghost particle) 条件を用いる。粒子法は計算回数が総粒子数 N の N 乗回になるため、この境界条件を採用することで大幅な解析時間の削減を図ることが可能となる。

Ghost particle (mirror boundary) 条件は、境界粒子層は一層で配置する。流体粒子が境界粒子から一定の距離になると、境界粒子を軸とした対象面に仮想粒子を配置することで、鉛直方向の影響を打ち消し、水平方向成分に対して移動させる手法である。

(図 - 3 を参照)



図 - 1 解析手法の概要

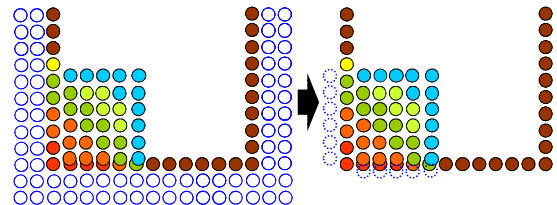


図 - 2 mirror boundary の概略

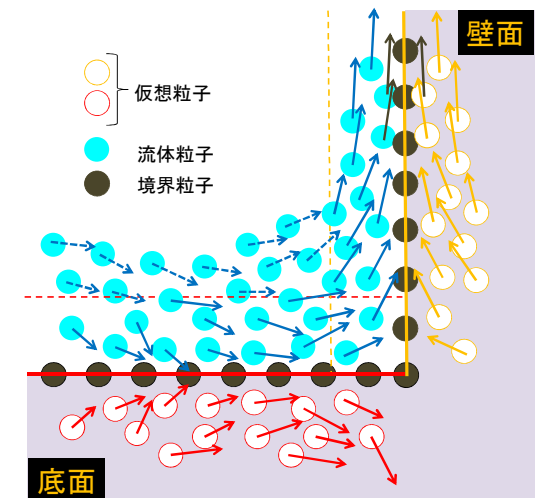


図 - 3 Ghost boundary の詳細

(2) 異種解法の連成方法

図 - 4 に示すように、SPH 法の境界粒子上に FEM の要素境界面を配置する。各要素には平均した物理量を受け渡している。式 - 1 には、圧力 p の平均化を示す。

$$\begin{aligned} p_{\textcircled{1}} &= (p_1 + p_2 + p_3)/3 \\ p_{\textcircled{2}} &= (p_4 + p_5 + p_6)/3 \\ p_{\textcircled{3}} &= (p_7 + p_8 + p_9)/3 \end{aligned} \quad (\text{式-1})$$

なお、連成時の時間積分としては時差式解法を用い、構造の変形に伴う境界の移動を流体解析にフィードバックする双方向連成ツールを開発した。なお、両手法の時間刻み Δt については、FEM において陽的な時間積分法を用いた場合、次式に示す Courant 条件が必要となる。

$$\Delta t \leq \frac{\ell_e}{c} \quad (\text{式-2})$$

ここで、 ℓ_e は要素の長さであり、 c は弾性波速度である。上の条件式 (式-2) から明らかなように、最小時間増分は弾性波速度に反比例するため、流体領域に比べ固体領域の時間ステップを細かく設定する必要がある。本研究では、流体領域については SPH 法を採用していることから、完全には同じ条件を設定するわけではないが、固体問題を陽的 FEM で解析すれば最小時間増分は固体問題に依存することが予想される。そこで、ニューマーク β 法による陰解法を採用し、時間ステップは SPH 法により決定した値をそのまま使用することにした。

3. 解析例 (ダムブレイク)

右壁面を FEM として、水柱崩壊の解析例を図 - 5 に示す。カラーコンターは圧力である。流体粒子の貫通もなく、定性的には表現できている。また、右壁面付近を拡大したものが図 - 6 であり、SPH - FEM 間、双方向への物理量の伝達がうまく行えていることが分かる。

4. おわりに

SPH と大変形 FEM の異種連成手法の確立における基礎的な段階として可能性を示すことができた。図 - 7 に示す通り、本論文では SPH から FEM に物理量を伝達する手法の確立を行った。今後は、双方向の強連成解析ツールへの精度の向上に努めたい。また、3 次元解析ツールへと発展させ、より実用的なツールへととの拡張を図る予定である。

参考文献

- 1) 酒井 譲, ほか 2 名: SPH 法による非圧縮性粘性流体解析手法の研究, 日本機械学会論文集 B 編, 70 巻 666 号, pp.47-54, 2004

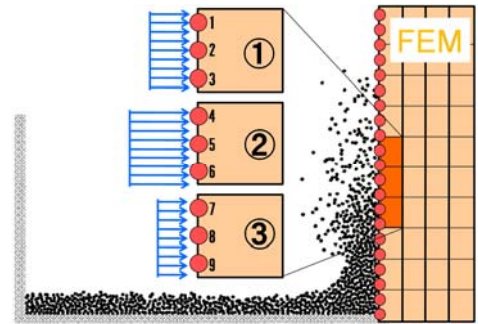


図 - 4 SPH から FEM への物理量の受け渡し

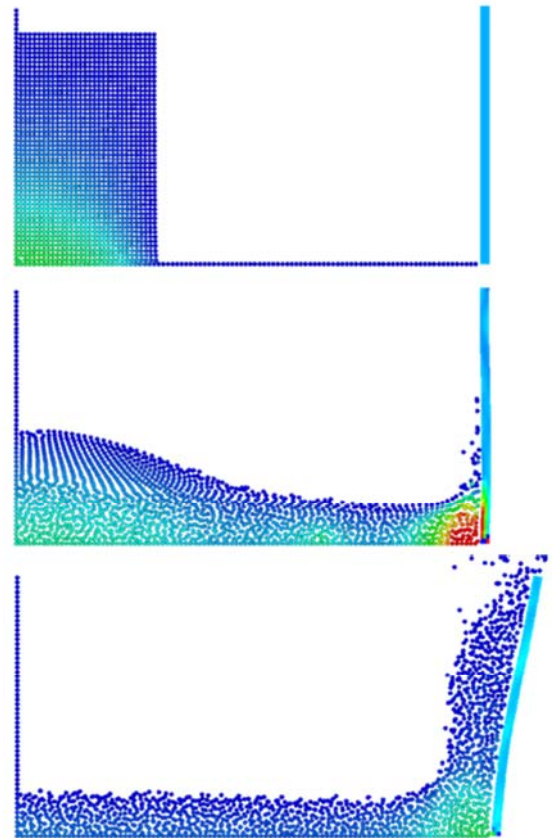


図 - 5 ダムブレイクの解析例



図 - 6 右壁面付近の詳細



図 - 7 解析手法の概要