

SPH 法を用いた流体衝撃力の評価と検証に関する基礎研究

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
九州大学大学院 正会員 園田 佳巨

1. 緒言

近年, 人工島, メガフロートなどの沿岸地域の開発が積極的に行われており, 流体と構造物が複雑に相互作用する問題に対しても性能照査型の設計を行う機会が多くなることが予想される. しかし, 構造設計の観点から, 沿岸構造物に関する詳細な設計指針は存在せず, 安全かつ安心な沿岸構造物の創造のためには, 津波・高潮・暴波浪などの水害対策を念頭に置いた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, 構造には FEM, 流体には SPH を用いる異種解法の連成シミュレータの構築を最終目標とし, 本研究では, その基礎検討段階として, SPH (陽解法) の流体力評価の精度検証を行った.

2. SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)

SPH 法は主に圧縮性流体の数値解析手法として発展してきた. 節点どうしのつながりが要素や格子により明確に与えられている FEM などと違い, そのようなものは存在しない. 粒子上 (計算点) に解くべき物理量を与え, 着目している粒子近傍に位置する粒子における値を用いて, それらに関する重み付き平均をとることで物理量の評価を行う. Monaghan⁽¹⁾らは SPH 法をベースとして状態方程式により疑似的に非圧縮性流体を解析する方法を提案している. ここでは簡単に SPH 法について概説する. SPH 法の基本式は式 (1) に示す.

$$f(x_i) = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W(x_i - x_j, h) \quad (1)$$

f は任意点における物理量で, m は質量, ρ は密度, W は重み関数, そして h は影響半径を表す. N は総粒子数である. ここで, Lagrange 記述の Navier-Stokes 方程式は式 (2) のように記すことができる,

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P + \vec{g} + \vec{\Theta} \quad (2)$$

$\vec{v}$ は速度, t は時間, P は圧力, $\vec{g}$ は重力加速度, $\vec{\Theta}$ は拡散項である. SPH 法は拡散項の取り扱いについて色々な方法があるが本研究においては人工粘性を用いた方法を

採用した. 人工粘性 Π を考慮した上で式 (2) を, 粒子離散化すると,

$$\frac{d\vec{v}_i}{dt} = -\sum_j^N m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \vec{\nabla}_i W_{ij} + \vec{g} \quad (3)$$

と表すことができる.

ここで式 (3) の独立変数は $\vec{v}$ と P であるが Monaghan らは状態方程式を用いて P を計算し, 陽的に式 (3) を解くことを考案している. 状態方程式は式 (4) に示す.

$$P = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (4)$$

B , γ は係数, ρ_0 は初期密度で 1000 kg/m^3 とした.

また, SPH 法の重要かつ課題となる点として一つ目に密度の更新がある. 密度は, 連続の式 (5) を満たして更新される.

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_j^N m_j \vec{v}_{ij} \cdot \vec{\nabla}_i W_{ij} \quad (5)$$

しかしながら, このままの状態では計算すると圧力振動が起ることが分かっており, その圧力振動を抑制するために状態方程式を使わずに圧力のポアソン方程式を解いて式 (3) を半陰的に解く MPS 法や, SMAC-SPH 法などが考案されている. 本研究においては, 陽解法の SPH 法を用い, 下式 (6), (7) に記す 30 時間ステップ毎に密度の平滑化を行う Shpard Filter を用いて圧力振動の抑制を図る.

$$\rho_i^{\text{new}} = \sum_j^N \rho_j \tilde{W}_{ij} \frac{m_j}{\rho_j} = \sum_j^N m_j \tilde{W}_{ij} \quad (6)$$

ここで, $\tilde{W}_{ij}$ は

$$\tilde{W}_{ij} = \frac{W_{ij}}{\sum_j^N W_{ij} \frac{m_j}{\rho_j}} \quad (7)$$

二つ目の SPH 法の重要な点としては流体粒子と固定粒子の境界条件である. 本研究では, Dynamic Boundary Condition (Crespo et al, 2007; Dalrymple and Kino, 2000) を用いている.

3. 実験

防衛大学校で実施した砂防えん堤モデルの荷重・変位

計測実験の清水放流時の実験データを解析の比較対照とし、SPH 法による流体力評価の精度検証を行う。図-1 に実験装置の概観を示す。清水は堰を取り外すことで流下させるものとし、分力計、圧力計の測定装置が取り付けられた堰止め板の流体力を計測した。図-2 には分力計、圧力計の配置図を示す。



図-1 実験装置の概観

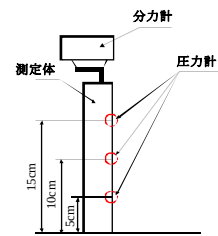


図-2 分圧計の配置

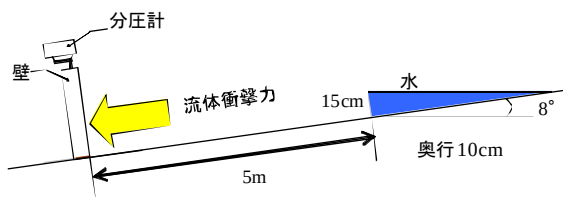


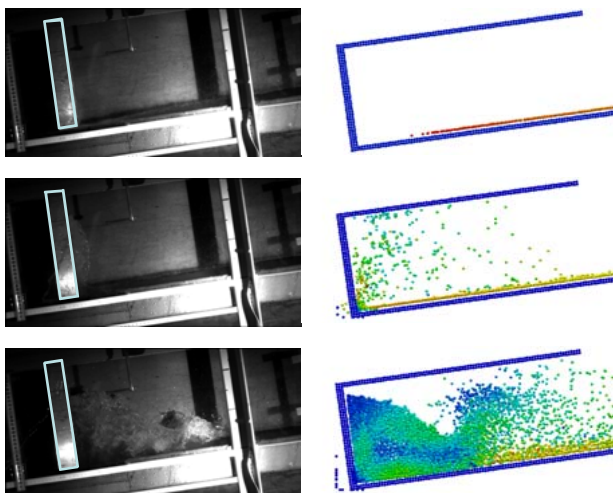
図-3 実験装置のモデル化

4. 解析条件

実験装置を図-3 のように、粒子間隔 1cm, 3 次元で粒子化した。総粒子数 28,548, 流体粒子数 9,419 で、解析時間は 10 秒、可変時間ステップを用い、時間増分は ($\Delta t = 1.0 \times 10^{-3}$) としている。分圧計については床から 5cm, 10cm, 15cm の固定粒子の圧力を時間ステップ毎に計測することとした。なお、数値解析には SPH 法のオープンソースソフトウェア SPHysics⁽²⁾を用いている。

5. 解析結果

5.1 可視化比較



i) 実験結果

ii) 解析結果

図-4 実験・解析結果の検討

図-4 には、実験結果と解析結果の水の流れの様子を比較している。壁に当たる瞬間、解析結果と実験結果の差

が大きくみられる。この理由としては、粒子離散化した粒子数が十分でないことが考えられる。しかしながら、流れの碎波、飛沫などの複雑な表面トポロジーの変化が定性的に表現されており、粒子法による解析の特徴が確認できる。

5.2 圧力計比較

分力計、圧力計の実験データをもとに解析値との比較を行った。ここでは、底面から 5cm, 10cm, 15cm の位置に取り付けられた圧力計と解析結果との比較を図-5 に示す。ただし 3 次元解析であるため、解析結果の圧力については奥行き方向の圧力の平均を用いている。また、清水が堰止め板に到達しはじめてから約 2 秒間の計測値・計算値を比較した。

図-5 に示すように、実験結果と比べると清水が堰止め板に到達するまでの時間は解析値が遅れた。これは、人工粘性を含むアルゴリズムで計算しているためと思われる。また SPH 法による解析値は圧力の指導抑制アルゴリズムを導入しているにも関わらず、圧力の微小振動が見られる。また、流体が壁に衝突する際に、水粒子が壁に貫入する現象がみられ、結果として貫入粒子の影響で近傍の固定粒子の圧力が小さくなる現象が生じていた。

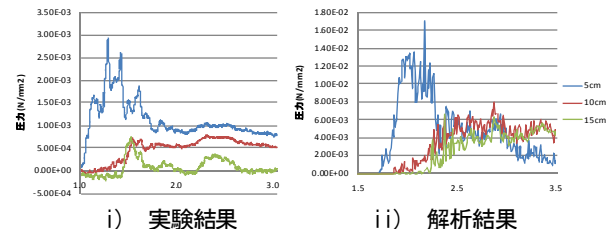


図-5 圧力結果の比較

6. 結言

SPH 法により、実験と類似した流れの特徴が得られていることを確認した。しかし、流体力の見積もりについては、いまだ問題点が残されていることを確認した。こうした SPH 法による諸問題は、これまでに指摘されている事項であり、本研究では採用していない圧力振動抑制アルゴリズム、および境界処理法などを用いる必要がある。圧力振動においては、今後 Moving Least Square のアルゴリズムを導入して検討を行い、境界条件については仮想粒子の配置や反力を与える境界条件を導入して検討する予定である。

参考文献

- 1) Monaghan J.J. : Simulating free surface flow with SPH, Journal of Computational Physics, 110, pp.399-406, 1994
- 2) SPHysics : <http://wiki.manchester.ac.uk/sphysics>