1407 粒子法によるダム崩壊における衝撃圧力に関する研究

A Study of Impact Pressure by Particle Method for Dam Breaking

○ 日比茂幸 (防衛大学校) 藪下和樹 (防衛大学校)

Shigeyuki HIBI, National Defense Academy, 1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka, Kanagawa

Kazuki YABUSHITA, National Defense Academy, 1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka, Kanagawa

Key Words: Particle Method, MPS, Dam Breaking, Impact Pressure

1. 緒言

近年, 流体力学や構造力学の分野における数値シミュレーションを行う方法として, メッシュレス法の一つとして粒子法が注目されている。粒子法は, 流体力学の分野においては, 流体が分離や合体をするなどして自由表面が複雑に変化する問題など, 従来の方法では取り扱いの難しいシミュレーションを行うことが出来るのが特徴である。MPS法は, 越塚ら¹⁾によって開発された粒子法の一つであり, 非圧縮性流れを解く解法として提案されたが, 最近では弾性体の問題にも応用されている。

一方, このような粒子法による流体挙動のシミュレーション結果を, 実際の構造設計に用いようとする場合には, 一般に流体の運動によって生じる圧力値が必要になることが多い。現状の計算機の性能を考えると, 3次元問題など大規模な計算を行う場合, 粒子数を十分に取ることができないため, 相対的に少ない粒子数で解析対象をモデル化することになる。このため相対的に少ない粒子数でモデル化した場合でも, 正確な圧力値を得られることが求められる。しかし, 流体の飛沫が壁面に衝突するような場合, オリジナルのMPS法では飛沫を表す水粒子が壁に衝突したときに, 壁粒子が自由表面と判定されしまい圧力が生じないため, 正確な圧力値を求めることができないという問題点がある。また, MPS法から得られる圧力値は, 不自然な振動をすることが知られている。このため, 末吉・内藤²⁾や筆者ら³⁾によってこの圧力値の振動を抑える方法が提案されている。著者らが従来提案した方法は, ある粒子の周りに均一に他の粒子が存在するという仮定に基づいていたが, 実際の計算モデルでは, 自由表面付近の粒子や壁などの境界付近ではこの仮定が成り立たない場合があると考えられる。そのため新たに少ない粒子でも相対的に精度良く計算できる発散モデルを提案し⁶⁾, 少ない粒子でも妥当な圧力が得られる事を確認している。本研究ではこの方法をさらに検証するため, ダム崩壊の実験を行い, シミュレーションから得られる壁面に生じる圧力値との比較を行う。

2. MPS法と圧力計算について

2.1 MPS法について

非圧縮性流体の解法であるMPS法では, 連続の式とNavier-Stokes(N-S)方程式を基礎方程式として考えている。離散化には, N-S方程式中に現れる微分演算子であるラプラシアンと勾配を重み関数などを使って, 粒子間の相互作用に置き換えることで定式化を行っている。

粒子数密度 (Particle Number Density)

非圧縮性を表す密度一定の条件を, MPS法では密度 ρ そのものを使わずに, 次式で定義される時々刻々の粒子数密度 n_i が, 初期粒子配列の粒子数密度 n^0 になるように ρ を n_i に置き換えている。

$$n_i = \sum_{j \neq i} w(r_{ij}) \quad (1)$$

自由表面の判定

自由表面にある粒子の判定については, 式(1)に従って粒子数密度を計算すると, 対象としている粒子 i が自由表面付近にある場合とない場合を比べると, 影響半径内にある粒子数が相対的に少ないため, 粒子数密度の値も小さくなる。この性質を利用して, 次式を満たす場合に粒子 i が自由表面上にあると判定する。

$$n_i \leq \beta \times n^0 \quad (2)$$

ここで β は定数である。自由表面上にあると判定された粒子は, 粒子 i の持つ圧力を $P_i = 0$ として与え, 次項の圧力に関するポアソンの方程式における境界条件となる。

MPS法による圧力評価方法

粒子数密度が一定値 n^0 になるという条件と陰的なN-S方程式の圧力項を組み合わせると以下のポアソン方程式が得られる。この方程式を解くことにより, 流体中での圧力が求められる。

$$\nabla^2 P_i = -\frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{n_i - n^0}{n^0} \quad (3)$$

2.2 発散に関する離散式を導入した後処理としての圧力評価方法

発散を離散化する方法は、近藤、越塚や岡による弾性体や構造物の解析に関する計算モデル⁴⁾や、Yoon, Koshizuka による流体解析の計算モデルとして ALE 法的な粒子法の解析例の中で見られる⁵⁾。本研究では通常の MPS 法によって計算・出力される時々刻々の各粒子が持つ速度および位置情報などを元に、後処理として圧力のポアソンの方程式を、次式のような発散の離散式を用いて解き直すことで、より安定した圧力値を計算する事を提案している。

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_i^{(n)} = \frac{2}{n^0} \sum_{j \neq i} \left(\mathbf{u}_j^{(n-1)} - \mathbf{u}_i^{(n-1)} \right) \cdot \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}^2} w(r_{ij}) \quad (4)$$

ここで注目すべき点は、粒子の位置に関しては時刻 n の値、粒子の速度 $\mathbf{u}_i$ に関しては時刻 $n-1$ の値を用いて離散化を行う点である。

3. ダム崩壊の実験と数値計算との比較

本計算方法の妥当性を検討するため、Fig.1に示すように、水面高さ $H=300\text{mm}$ のダム崩壊の実験を行い、得られた壁面の衝撃圧力値と数値計算の比較を行った。実験時の圧力測定には、右壁面の底面 40mm の位置に取り付けられた直径 8mm の圧力センサーを用いた。

Fig. 1: Dimensions of Dam Breaking Experiment

Fig. 2: Time history of pressure on the right side wall

Fig.2に、実験値とオリジナルの MPS 法および本計算手法により解析した圧力の時刻歴を示す。なお数値計算結果には、圧力測定箇所に対応する壁粒子の圧力値に対し

て ± 0.05 秒の時間平均を取ったものを示している。図より、オリジナルの MPS 法は実験値に比べて圧力値が少な目になっていることがわかる。これは水塊が壁面に衝突後、流塊が膜状に壁面を遡上する際に、オリジナルの MPS 法では自由表面すなわち圧力 0 とみなされる水粒子が多く、相対的に圧力計算に寄与する粒子が少なくなるためだと考えられる。また全体にはオリジナルの MPS 法に比べて本計算手法の方が実験値に近い変動をしているものの、圧力のピーク値に関してはどちらも、うまく推定できていないことがわかる。

4. 結言

1. 本研究では、速度の発散に関して提案した離散化式を用いて、少数の水粒子が壁面に衝突した場合でも壁面に生じる圧力値を従来よりもより正確に求めることができるかどうか、ダム崩壊の実験値と比較を行い検討を行った。
2. 本計算手法の方がオリジナルの MPS 法よりも比較的良好な圧力の推定値を求めることが出来たが、ピーク値に関しては今後の検討課題だと思われる。

謝辞 本研究で使われたプログラムは、東京大学 越塚誠一教授により公開されたソースコード¹⁾を元に改造されたものである。著者らは越塚先生のオープンソースポリシーに心から感謝の意を表すものである。

参考文献

- 1) 越塚誠一: 粒子法, 丸善, 2005.
- 2) Sueyoshi, M. and Naito, S. : A Numerical Study of Violent Free Surface Problems with Particle Method for Marine Engineering, Preprints of the 8th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Vol.2, 2003, pp.330-339.
- 3) 日比茂幸, 藪下和樹: MPS 法の不自然な圧力振動に関する研究, 関西造船協会論文集, 241 号, 2004, pp.125-131.
- 4) 近藤佳隆, 越塚誠一, 岡芳明: 非均質粒子モデルによる弾性体構造物計算における精度の向上, 計算工学講演会論文集 Vol.5, 2000, pp.257-258.
- 5) Yoon, H. Y., Koshizuka, S. and Oka Y. : A Particle-Gridless Hybrid Method for Incompressible Flows, Int. J. Numer. Methods in Fluids, 30, 1999, pp.407-424.
- 6) 日比茂幸, 藪下和樹: 改良 MPS 法による圧力評価に関する研究, 防衛大学校理工学研究報告, 46 巻 1 号, 2008, pp.61-68.