

## 2次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D による 複数剛体を含む Bingham 流体の動的挙動解析

名古屋大学工学部 学生会員 ○ 高須 吉敬  
名古屋大学大学院工学研究科 正会員 川崎 浩司  
名古屋大学大学院工学研究科 学生会員 小木曾圭祐

### 1. はじめに

現在、巨大地震への危機感が高まり、沿岸域では津波や地盤の液状化による人的・物的被害が予想されている。これらの沿岸域災害に関する効果的な防災・減災対策を議論するためには、固相・気相・液相の相互作用を含む沿岸域の複雑な物理現象の解明が必須である。また、液状化地盤の挙動は非 Newton 流体である Bingham 流体として扱われる場合が多いことから、沿岸域の物理環境場を精緻に予測するためには、Newton 流体のみならず非 Newton 流体を同時に解析可能な数値モデルが必要とされている。著者らは、CIP (Constrained Interpolation Profile) 法と拡張 SMAC (Simplified Marker And Cell) 法を駆使しながら、Smagorinsky モデルに基づく乱流モデル LES (Large Eddy Simulation) を導入した 2次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D (Dynamic numerical model Of muLti-Phase flow with Hydrodynamic INteractions-2 Dimension version) を構築してきた (例えば、川崎ら, 2001)。同モデルの特長は複数剛体を含む圧縮性・非圧縮性流体場を高精度に解析ができるところにある。川崎・小木曾(2008)は、同モデルに Bingham 流体の構成則を考慮することによってその適用範囲を非 Newton 流体まで拡張し、フレッシュコンクリートを対象とした流動解析を行った。しかしながら、フレッシュコンクリートと骨材、液状化地盤と埋設構造物のような Bingham 流体と剛体が相互作用する流動場に対しては未だ検討されていない。

本研究では、2次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D を用いて、複数剛体を含む Bingham 流体の動的挙動解析を行うことにより、同モデルの有用性を検証する。

### 2. 2次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D の概要

2次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D の基礎方程式は、圧縮性粘性流体に対する質量保存式、Navier-Stokes 方程式、圧力方程式、異相間の割合を示す密度関数の移流方程式、バロトロピー流体に対する状態方程式から構成される。本モデルでは、時間分離解法により、質量保存式、Navier-Stokes 方程式、圧力方程式を移流段階と非移流段階に分割して計算を行う。そして、移流段階では CIP 法、非移流段階には拡張 SMAC 法を適用し、各物理量を算定する。また、複数剛体運動解析法として、まず固相を高粘性流体と考え、前述した流動解析を実施する。そして、得られた固相内部の圧力を用いて個々の剛体の重心における並進速度・回転速度を求め、剛体形状を保持するように固相に対してのみ相対的位置を修正する。

本研究で扱う Bingham 流体とは、図-1 に示すように、非 Newton 流体の一種であり、せん断応力がある降伏応力  $\tau_y$  を超えると Newton 流体のような変化特性を示す。このような降伏応力付近にみられる急激な変化を伴う物性をもつ流体を解析することは、計算の安定性上、困難であるといわれている。そのため、Bingham 流体の構成則をひずみ速度が極めて小さく粘性が大きい領域 ( $|S| \leq S_c$ ) と、それ以外の領域 ( $|S| > S_c$ ) に分割し、降伏応力点付近を滑らかに近似する bi-viscosity モデルを採用した。なお、降伏応力は式(1)に示される Mohr-Coulomb の破壊基準を考慮している。

$$\tau_y = c + p \tan \phi \quad (1)$$

$$\mu' = \begin{cases} \mu + \frac{\tau_y}{|S|} & |S| > S_c \\ \mu + \frac{\tau_y}{|S_c|} & |S| \leq S_c \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $c$  は粘着力、 $p$  は圧力、 $\phi$  は内部摩擦角である。

式(2)で表される擬似動粘性係数  $\mu'$  を Navier-Stokes 方程式の粘性係数に導入することで Bingham 流体の構成則を反映させた。ひずみ速度の境界値である  $S_c$  は式(3)で与えられ、式中の  $\mu$  は粘性係数、 $\beta$  は任意の定数で

ある。また、ひずみ速度の大きさ $|S|$ は式(4)のように表される。

$$S_c = \frac{\beta\tau_y}{\mu} \quad (3)$$

$$|S| = \sqrt{2\left\{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2\right\} + 4\left\{\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right)\right\}^2} \quad (4)$$

### 3. 計算結果および考察

2次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D を、複数剛体を含む Bingham 流体を対象とした流体塊崩壊問題に適用し、剛体を含まない Bingham 流体の場合と比較することで同モデルの有用性を確認する。

計算条件と Bingham 流体の物性値は表-1, 表-2 に示すとおりである。また、図-2, 図-3 にそれぞれ Bingham 流体のみ、複数剛体を含む Bingham 流体の流体塊崩壊問題に関する解析結果を示す。両図から、流体塊は計算開始と同時に崩れ、右方向へ伝播し、時刻  $t=1.000s$  で流体の先端が右壁近傍に達している様子が認められる。また、図-2 と図-3 を比較すると、時刻  $t=0.500s$  まではほとんど流体の挙動に差がないものの、時刻  $t=1.000s$  では剛体の影響で流体先端部の挙動が異なっていることが確認できる。さらに、図-3 をみると、流体塊先端部に設置された剛体が  $x$  軸方向に強く押し流されていることがわかる。このように、本モデルでは Bingham 流体と複数剛体の相互作用を含む動的挙動を再現可能であることが示された。

### 4. おわりに

本研究では、2次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D を用いて複数剛体を含む Bingham 流体の動的挙動解析を行い、モデルの有用性を確認した。今後は、水理模型実験との比較によりその精度を定量的に検証するとともに、更なる計算精度とモデルの汎用性の向上を目指す予定である。

最後に、本研究の一部は(独法)日本学術振興会・科学研究費補助金基盤研究(B)(研究代表者:名古屋大学・水谷法美, 課題番号:19360222)を受けていることを示し、深謝の意を表する。

#### 【参考文献】

- 1) 川崎浩司・大谷知樹・中辻啓二(2001): 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.1026-1030.
- 2) 川崎浩司・小木曾圭祐(2008): 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.36-40.

表-1 計算条件

計算領域	5.0m×5.0m
メッシュ数	100×100
計算ステップ間隔	0.0001s
流体塊の大きさ	2.25m×2.0m
物体の密度	1000.0kg/m <sup>3</sup>
重力加速度	9.80665m/s <sup>2</sup>

表-2 Bingham 流体の物性値

粘着力	900.0Pa
内部摩擦角	0.0degree
粘性係数	10.0Pa·s
密度	1000.0kg/m <sup>3</sup>
$\beta$	0.02

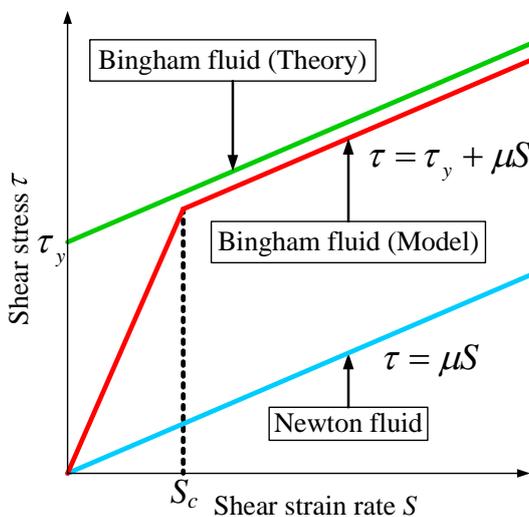


図-1 Bingham 流体の概念図

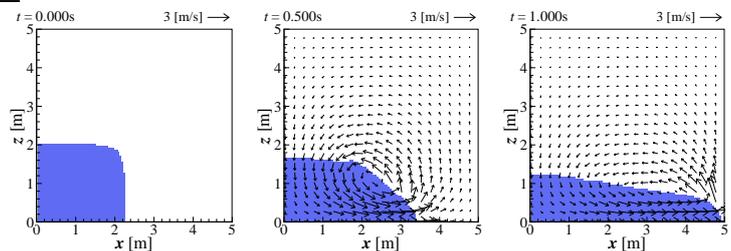


図-2 Bingham 流体を対象とした流体塊崩壊問題の解析結果

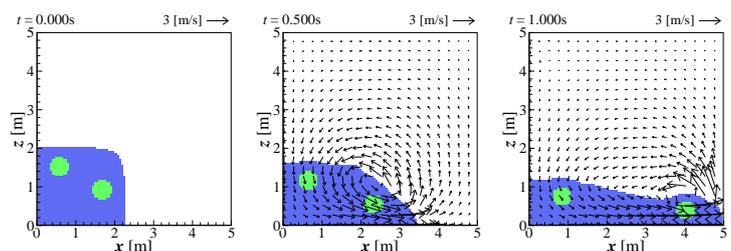


図-3 複数剛体を含む Bingham 流体の流体塊崩壊問題の解析結果