

明石工業高等専門学校 学生会員 ○金子将己
明石工業高等専門学校 正 会 員 稲積真哉

1. はじめに

流動化処理土は、粘土やシルトの細粒分を十分に含む材料である泥状土と所定の力学的特性に安定させるための固化材から構成されることを原則とする湿式土質安定処理土である¹⁾。近年、この流動化処理土は擁壁裏の埋立てや地下空間の充填に、埋立て材または充填材として多用される傾向にある。しかしながら、流動化処理土の設計および施工においては、既往経験則のみに基づいているのが現状である。そこで、既往経験則に加え理論的知見をも考慮に入れることにより以下の点を実現できる。

- (1) 流動化処理土の適切な配合設計
- (2) 現場における圧送距離および充填性の把握
- (3) 機材の適切な選択

これらのことから、理論的知見を考慮に入れるは有用であるといえる。

本研究では、理論的知見として粒子法的一种である MPS 法に着目し、流動化処理土の流動解析を実施している。また、これを元に適用性の検討および流動性の評価を行っている。

2. Bi-viscosity モデルを適用した MPS 法

本研究では、解析対象として流動化処理土を取り扱っている。流動化処理土はビンガム流体として扱うことができ、そのため MPS 法をビンガム流体へ適用させる必要がある。しかしながら、ビンガム流体を数値解析において扱うことは降伏値以下での応力が不定となり解析を行うことができないことから近似モデルを用いる必要がある。そのため、近似モデルとして図 1 に表される Bi-viscosity モデルを採用している²⁾。そのため、流動時および不動時の支配方程式は式(1)、式(2)となる。

$$\frac{\partial \dot{u}}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \left(-\nabla P + \left(\eta + \frac{\tau_y}{\Pi} \right) \nabla^2 \dot{u} + 2\dot{\epsilon}_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\tau_y}{\Pi} \right) \right) + \dot{F} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \dot{u}}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \left(-\nabla P + \left(\eta + \frac{\tau_y}{\Pi_c} \right) \nabla^2 \dot{u} + 2\dot{\epsilon}_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\tau_y}{\Pi_c} \right) \right) + \dot{F} \quad (2)$$

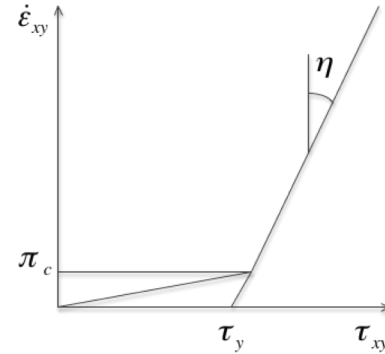


図 1 Bi-viscosity モデル

また、MPS 法では連続体を有限個の粒子に置き換え、粒子間相互モデルに式(3)で表される重み関数 w を利用する。これは、任意の粒子に作用する力はその粒子から一定範囲内に存在する粒子と相互作用するとしたものである。本解析では既往の研究より標準の重み関数よりも精度を向上できるとされている対数重みを用いている³⁾。

$$w(r) = \begin{cases} \log \left(\frac{r_e}{r} \right) & r \leq r_e \\ 0 & r_e > r \end{cases} \quad (3)$$

ここで r は粒子間距離 (m) , r_e は粒子間相互作用の及ぶ範囲の半径 (m) である。この重み関数 w を用い、流体の密度を評価する方法として粒子数密度を用いる。粒子数密度は式(4)から求める。

$$\langle n \rangle_i = \sum_{j \neq i} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \quad (4)$$

ここで n_i は粒子 i の粒子数密度、 $\vec{r}_i$ は粒子 i の位置ベクトル、 $\vec{r}_j$ は粒子 j の位置ベクトルである。非圧縮性流体においては、密度は一定であり、粒子数密度も一定である。そのため、粒子の初期配置における粒子数密度を粒子数密度の基準値として n^0 とする。

MPS 法では式(8)の右辺の第 1 項、第 2 項において離散化が行われる。これらの離散化である粒子法の勾配モデル・ラプラシアンモデルは、粒子 i のある物理量を ϕ とすると、式(10)の重み関数 w を用い式(5)、式(6)となる。

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{d}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{\phi_j - \phi_i}{|r_j - r_i|^2} (\dot{r}_j - \dot{r}_i) w(|\dot{r}_j - \dot{r}_i|) \quad (5)$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{\lambda n_0} \sum_{j \neq i} (\phi_j - \phi_i) w(|\dot{r}_j - \dot{r}_i|) \quad (6)$$

ここで $\langle \rangle_i$ は粒子 i において粒子モデルを用い $\langle \rangle$ 内の近似を表す。 d は次元数を表す。 λ は変数分布の分散と解析解を一致させるための係数であり式(7)で表される。

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} [w(|\dot{r}_j - \dot{r}_i|) |\dot{r}_j - \dot{r}_i|^2]}{\sum_{j \neq i} [w(|\dot{r}_j - \dot{r}_i|)]} \quad (7)$$

式(12)や式(13)に表される勾配モデル・ラプラスアンモデルという微分演算子の離散化が MPS 法の特徴である⁴⁾。

3. 粒子法による妥当性および流動性評価

本研究では、流動性試験として 2 種類の流動化処理土においてフロー試験を実施し、画像解析により流動挙動を把握している。そのため、粒子法に基づく解析をフロー断面で行い、比較を行う。また、得られた流動挙動から流動性評価を行う。解析パラメータとしては、塑性粘度は回転粘度計 (B 型粘度計) により測定を行い、比重に関しては試験を実施した。降伏値に関しては、本研究では逆解析的に算出している。パラメータの値は表 1 に示す。粒子間距離は 0.002m であり、時間間隔は 0.0003s である。

図 2、図 3 に画像解析結果および粒子法に基づく解析結果による流動化処理土の流動挙動を示す。図 2、図 3 より各流動挙動から解析結果が画像解析結果とよく合致したのとなっていることが分かる。このことから、粒子法を用いた解析の妥当性があることが確認されている。

また、流動化処理土 A と流動化処理土 B においては、流動化処理土 B が流動性において優れていることが明らかである。このことから、流動化処理土 B は高い充填性および施工性が見込まれる。

そして、粒子法に基づく各解析結果および解析パラメータから、流動性の差異は塑性粘度および比重が影響していることが明らかである。

5. おわりに

本研究では、粒子法に基づく流動化処理土の流動解析を実施し、本手法の妥当性を確認した。また、粒子法に基づく解析結果より、流動性に影響を与える要因は塑性粘度および比重であることが明らかとなった。今後は、

施工における実問題での解析を実施し、充填性や圧送距離等に関しての定量的把握を行う必要がある。

【参考文献】

- 1) 独立行政法人土木事務所：流動化処理土利用技術マニュアル (第 2 版)，独立行政法人土木事務所，2007.
- 2) 浦野真次，根本浩史：流動解析手法を用いたフレッシュコンクリートの施工性に関する研究，清水建設研究報告，第 90 号，2013.
- 3) 林 侑希，豊谷 純，角田和彦：圧力安定化粒子法による水柱崩壊シミュレーション，日本大学生産工学部第 46 回学術講演会，pp.307-308，2013.
- 4) 越塚誠一，柴田和也，室谷浩平：粒子法入門（流体シミュレーションの基礎から並列計算と可視化まで），丸善出版株式会社，2014.

表 1 解析パラメータの値

	流動化処理土 A	流動化処理土 B
比重	1.302	1.224
塑性粘度 (Pa・s)	2.349	1.209
降伏値 (Pa)	2	3

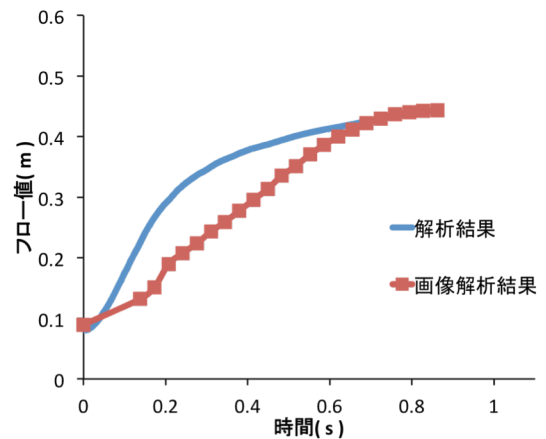


図 2 流動化処理土 A の流動挙動

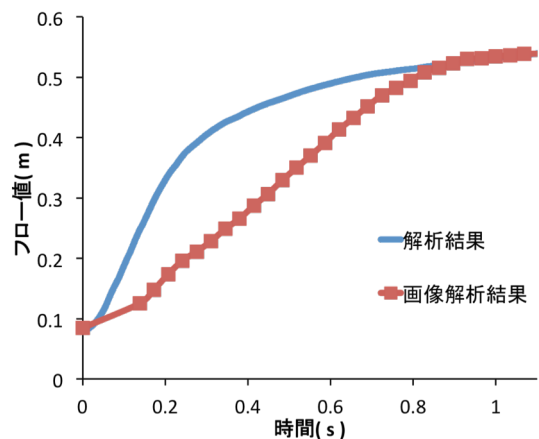


図 3 流動化処理土 B の流動挙動