

オープンソース粒子法コードの改良および SPH 法による断層変位解析に関する検討

(株)大林組

正会員

○秋元 理仁 遠藤 学

日本原子力発電(株)

井垣 亮 奥谷 哲也 小川 勤

JIP テクノサイエンス(株)

正会員

戸田 圭彦 佐藤 一樹

1. はじめに

近年、粒子法の発展が目覚ましく、大変形領域を得意としていることから、断層変位の評価手法として粒子法を取り入れる動きがある。地盤工学分野においては、粒子法に類する手法の中でも比較的歴史の長い DEM の適用例が多い傾向にあり¹⁾、実績面で優位性があると言える。しかし、DEM はばね値と材料定数との関係が明確ではなく、ばね値の決定に試行錯誤が必要であるという課題を有している。

一方、粒子法の一つである SPH 法は、材料定数をそのまま使用できるという利点がある。地盤工学問題への適用例²⁾も存在し、断層変位評価手法として有力な手法であると考えられる。しかし、SPH 法は研究段階にあることから、断層変位に係る解析事例は少なく、今後事例および知見を集積していくことが望ましいと考えられる。

SPH 法の解析環境に目を向けた場合、一部の汎用コードにメッシュフリー法の一つとして採用されつつあるが、研究目的では各大学・研究機関の独自コードに頼っており、適した解析コードは少ないのが現状である。そのような中、近年計算力学分野においてオープンソースソフトウェア(以下、OSS)が盛んに用いられるようになってきた。OSS を研究用コードとして採用した場合、研究目的に合わせた修正が可能であるというメリットがある。

そこで、本研究では SPH 法による断層変位解析技術の素地を構築することを目的に、OSS をベースとした解析コードの作成を行った。さらに、砂層逆断層模型実験を対象とした弾塑性解析を実施し、解析コードの妥当性および断層変位問題への適用性について検討を行った。

2. 粒子法コード LIGGGHTS の固体 SPH 法への拡張

LIGGGHTS³⁾は米国サンディア国立研究所によって開発された分子動力学コード LAMMPS をベースに、個別要素法および SPH 法機能へ拡張させた粒子法 OSS である。SPH 法解析機能を有していることから、研究用コードのベースに選択した。

LIGGGHTS の SPH 法は流体解析用であるため、まずは地盤解析に適用できるよう、固体の SPH 法へ拡張した。LIGGGHTS の SPH 法解析フローを図-1 に示す。粒子の運動の計算には陽解法の一つである verlet 法が採用されている。LIGGGHTS の流体の運動方程式は次式で表される。

$$\mathbf{f}_i^T = -m_i \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_j}{\rho_j^2} + \frac{p_i}{\rho_i^2} \right) \cdot \nabla W(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) \quad (1)$$

ここに、 $\mathbf{f}_i$ は粒子 i の粒子間力ベクトル、 m_i は粒子 i の質量、 N は影響半径内の粒子個数、 p_i は粒子 i の圧力、 ρ_i は粒子 i の密度、 ∇ は勾配演算子、 W は平滑化関数、 $\mathbf{r}_i$ は粒子 i の位置ベクトルである。

一方、固体の運動方程式は粒子応力 $\boldsymbol{\sigma}$ を用いて、次式で表される。

$$\mathbf{f}_i^T = -m_i \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\boldsymbol{\sigma}_j}{\rho_j^2} + \frac{\boldsymbol{\sigma}_i}{\rho_i^2} \right) \cdot \nabla W(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) \quad (2)$$

したがって、式(1)を式(2)へと取り換えることで、SPH 法は固体の振る舞いとなる。

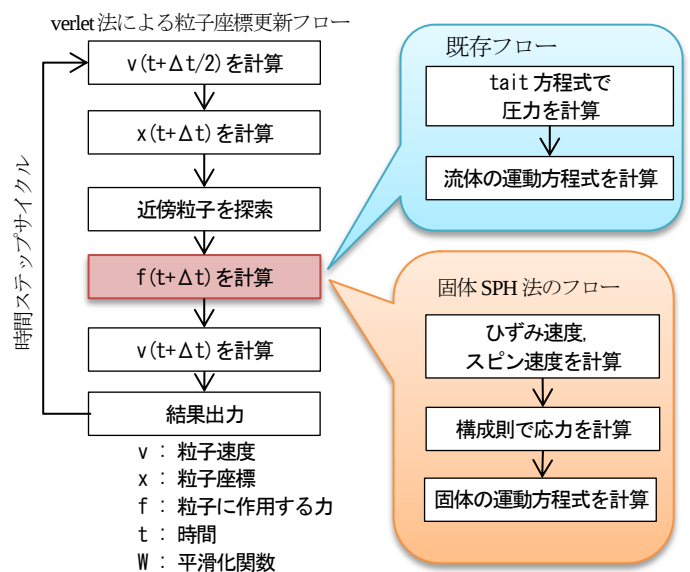


図-1 SPH法の解析フロー

キーワード SPH 法, オープンソースソフトウェア, Drucker-Prager, 断層変位

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 インターシティ B 棟 (株)大林組 原子力本部 TEL 03-5769-2736

なお, verlet 法アルゴリズムは次式で表される.

$$v(t + \Delta t/2) = v(t) + 0.5a(t)\Delta t \quad (3a)$$

$$x(t + \Delta t/2) = x(t) + v(t + \Delta t/2)\Delta t \quad (3b)$$

$$v(t + \Delta t) = v(t + \Delta t/2) - f(t + \Delta t)\Delta t/2m \quad (3c)$$

ここに, v は粒子速度, a は粒子加速度, x は粒子座標, t と Δt はそれぞれ時間と時間増分である.

LIGGGHTS のソースコードは C++によって記述されたオブジェクト指向プログラミングがなされている. 流体の運動方程式を計算するクラスを, 固体の運動方程式を計算するクラスへと置き換えることで実装した.

3. 弾塑性構成則の導入

地盤材料と取り扱うにあたり, 野々山他²⁾を参考に, Drucker-Prager 弾塑性構成則を導入した.

$$f = \sqrt{J_2} + \alpha I_1 - Y = 0 \quad (4)$$

ここに, J_2 は偏差応力テンソルの第二不変量, I_1 は応力テンソルの第一不変量, α および Y は材料定数である. また構成則に用いる客観性のある応力速度としてコーシー応力の Jaumann 速度を用いた. 応力速度は次式で表される.

$$\dot{\sigma} = \hat{\sigma} - \sigma\omega + \omega\sigma \quad (5)$$

$$\hat{\sigma} = D\dot{\epsilon} \quad (6)$$

ここに, $\dot{\sigma}$ は応力速度, $\hat{\sigma}$ は Jaumann 速度, σ は応力, D は弾性マトリクスまたは弾塑性マトリクス, $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度, ω はスピン速度である.

4. 砂層模型実験の再現解析

弾塑性 SPH 法拡張版 LIGGGHTS を用いて, 新井他¹⁾の実施した砂層模型実験の DEM による再現解析モデルを対象に, SPH 法による解析を実施した.

実験は, 砂箱に詰められた高さ 5cm の豊浦砂に対して, 逆断層を模擬した変位を高さ方向に 45 度の角度で 3.5cm 与えて行われている. SPH 法による解析モデルは, 砂箱を固定粒子とし, 豊浦砂を Drucker-Prager 弾塑性体としてモデル化した. 表-1 に解析に用いた材料定数を示す.

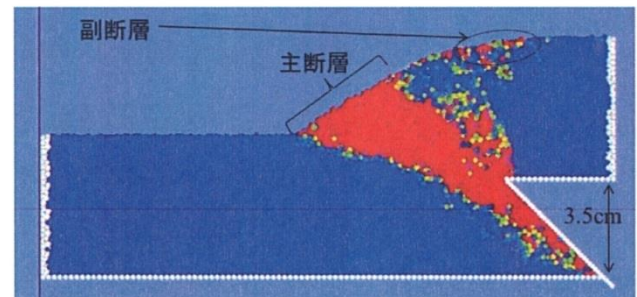
図-2 に解析結果を示す. SPH 法による解析結果は DEM 解析と概ね同じ傾向にあり, 実験において副断層が発生した付近にせん断ひずみが集中する点を再現することができている.

5. まとめ

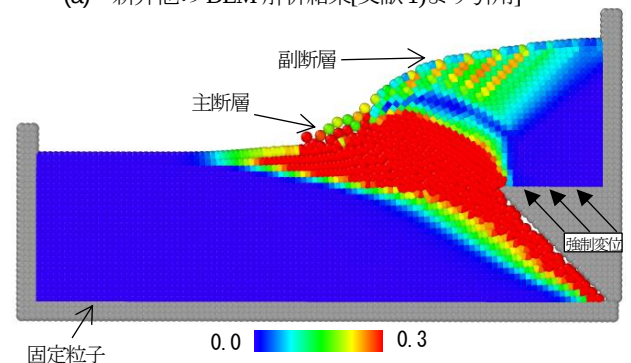
本研究では, オープンソース粒子法コード LIGGGHTS を固体 SPH 法解析用へと改良し, 地盤解析の SPH 法解

表-1 SPH 法解析に用いた材料定数

材料定数	入力値
密度 (kg/m ³)	2600
弾性係数(MPa)	120
ポアソン比	0.17
内部摩擦角(deg)	30.0
粘着力(kPa)	0.0



(a) 新井他¹⁾の DEM 解析結果[文献 1]より引用]



(b) SPH 法による解析結果

図-2 せん断ひずみコンター図

析が行える解析環境を構築した. さらに, 改良コードを用いて断層変位を対象とした SPH 法解析を実施した. 本検討で作成したコードは, 模型実験 (および DEM) の挙動を概ね再現することができており, 一定の妥当性が確認された. また, DEM のようなばね値に関する課題もなく, SPH 法を断層変位評価手法に適用するにあたって, 十分な優位性を示す結果が得られた. 今後は, SPH 法の実用化へ向け, さらに地盤工学の諸問題について解析事例の集積を図る予定である.

参考文献

- 1) 新井夏海, 高尾誠, 中瀬仁, 京谷孝史, 寺田賢二郎, 加藤準治: 個別要素法を用いた地震時における福断層の出現解析, 第 62 回理論応用力学講演会講演論文集, 2013.
- 2) 野々山栄人, 沢田和秀, 森口周二, 八島厚, 伊藤和也: SPH 法による実大規模斜面掘削実験の二次元再現解析, 地盤工学ジャーナル, Vol. 7, No. 4, pp. 543-555, 2012.
- 3) CFDEM@project: <http://www.cfdem.com/> または Github, CFDEMproject: <https://github.com/CFDEMproject>