

MPS 法による地盤構造物の弾塑性変形解析に関する基礎的研究

大成建設株式会社 (元 長岡技術科学大学) 正会員 ○八木啓介
長岡技術科学大学 正会員 磯部公一, 大塚 悟

1. はじめに

地盤構造物の性能規定化に向けて、地震および水害による地盤構造物の崩壊メカニズムを明らかにし、限界状態・残留変位量を適切に解析できる手法の構築が強く求められている。本研究では、大変形問題に有効な解析手法として注目される粒子法の MPS 法¹⁾により、地盤構造物の弾塑性変形から破壊挙動までを記述する数値解析手法の構築を行う。MPS 法を用いた地盤変形解析は五十里ら²⁾によって弾塑性モデルが提案されている。本稿では、五十里らの提案する弾塑性解析アルゴリズムを一部変更した MPS 法による弾塑性動的解析コードを構築し、単純せん断試験シミュレーションの解析事例を報告する。

2. MPS法に基づく弾塑性動的解析^{1),2)}

2.1 弾性体動的計算アルゴリズム¹⁾

MPS 法の弾性動的解析手法は越塚ら¹⁾によって定式化されている。弾塑性計算では、五十里らによる連続体力学で一般的に用いられる弾塑性解析手法を導入している。本研究ではこれを一部変更して解析コードを構築した。次にその計算方法の概略について示す。

弾塑性体の粒子*i*における運動方程式は以下の式のように表せる。

$$\rho_i \frac{D\mathbf{r}_i}{Dt} = \frac{\partial \sigma_i}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{K}_i = \text{div} \boldsymbol{\sigma}_i + \mathbf{K}_i \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 \mathbf{r} : 速度ベクトル, ρ : 密度, $\boldsymbol{\sigma}$: 応力テンソル, \mathbf{K} : 外力ベクトルである。指標*i*は粒子*i*において、という意味である。粒子間のひずみテンソルは粒子座標位置から計算される粒子間距離ベクトル \mathbf{r}_{ij} と剛体回転成分を除去した粒子間変位ベクトル \mathbf{u}_{ij} のテンソル積から計算する。なお、ひずみテンソルは対称テンソルとして次式で定義する。

$$[\boldsymbol{\varepsilon}]_{ij} = \frac{1}{2} \frac{(\mathbf{u}_{ij} \otimes \mathbf{r}_{ij} + \mathbf{r}_{ij} \otimes \mathbf{u}_{ij})}{|\mathbf{r}_{ij}| |\mathbf{r}_{ij}^0|} \dots\dots\dots (2)$$

粒子*i*における応力の発散は MPS 法の発散モデルを用いて以下の式で計算する。

$$\text{div} \boldsymbol{\sigma}_i = \frac{2d}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{[\boldsymbol{\sigma}]_{ij} \cdot \mathbf{r}_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}| |\mathbf{r}_{ij}^0|} w_{ij}^0 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、*d*は次元数、 n^0 は粒子数密度、*w*は重み関数である。重み関数は、粒子間距離の関数であり、以下の式で表される。

$$w^0(|\mathbf{r}_{ij}^0|) = \begin{cases} \frac{r_e}{|\mathbf{r}_{ij}^0|} - 1 & (0 < |\mathbf{r}_{ij}^0| < r_e) \\ 0 & (r_e \leq |\mathbf{r}_{ij}^0|) \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

$$n_i^0 = \sum_{j \neq i} w^0(|\mathbf{r}_{ij}^0|) \dots\dots\dots (5)$$

r_e (影響半径) は計算パラメータであり、これにより着目粒子*i*から影響半径内に位置する近傍粒子を決定し、重み関数を計算する。本解析では、 $r_e = 3.1l^0$ と設定した。粒子数密度は、初期の粒子配置における着目粒子*i*の全ての近傍粒子の重み関数の総和である。

粒子間にせん断力が作用するとトルクが発生するので角運動量保存則が保存されない。角運動量を保存させるためには、このトルクを打ち消すように付加的にトルクを与える。最後に Verlet 法による時間積分を行い位置座標、速度、角速度および回転角を更新する。さらに、本解析では吉田ら³⁾の手法に基づいて減衰項の導入を行っている。

2.2 弾塑性体動的計算アルゴリズム²⁾

弾塑性モデルでは、降伏関数 *f* に Drucker-Prager 型を用いる。塑性ひずみ増分は流れ則より(6)式から求められる。

$$\{d\varepsilon_p\} = d\lambda \left\{ \frac{\partial g}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

$d\lambda$ は (6)の式から与えられる。

$$d\lambda = \frac{\left\{ \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right\}^T [D]^e \{d\varepsilon\}}{\left\{ \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right\}^T [D]^e \left\{ \frac{\partial g}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right\}} \dots\dots\dots (7)$$

これらより塑性ひずみ増分および塑性ひずみが求められる。弾性ひずみは全ひずみと塑性ひずみと差から求める。

$$[\boldsymbol{\varepsilon}]_i^e = [\boldsymbol{\varepsilon}]_{ij} - [\boldsymbol{\varepsilon}]_{ij}^p \dots\dots\dots (8)$$

弾塑性解析では、ひずみに弾性ひずみを用いて前に示

キーワード 粒子法 弾塑性 せん断

連絡先 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1 長岡技術科学大学 環境・建設系 環境防災研究室

した弾性解析の計算を行う。なお、弾性状態より弾塑性状態に移行する際には線形補完による応力補正を行い、粒子間の応力が尖点に達した際には尖点に応力が留まる応力補正を行う。

3. 単純せん断試験シミュレーション⁴⁾

野々山らによる検討方法⁴⁾を参考に単純せん断試験シミュレーションを行った。解析粒子モデル(粒子数729, 初期の粒子間距離 l_0 0.003 m)を図-1に示す。図における青い粒子を解析領域とし、周囲に配置した仮想領域(緑色の粒子)に境界条件として強制変位速度を与えて単純せん断を行った。地盤材料を想定して、表-1に示す解析パラメータを用いた。なお、地盤の強度定数については複数のケースで解析を行った。

解析結果は解析領域中心に位置する粒子の値を抽出した。図-2に粘着力 c が変化したとき、図-3に内部摩擦角 ϕ が変化したときのせん断応力～せん断ひずみ関係を示す。これらより、各粒子間のせん断応力～せん断ひずみ関係が弾性領域では理論値と一致しており、降伏後は強度定数によって異なるせん断応力～せん断ひずみ関係を示した。

図-2では設定した粘着力 c に従った降伏点で弾塑性状態に移行していることがわかる。図-3では降伏後にせん断応力が変化するという結果になっており、これは降伏関数の傾きに沿って変化したものであると考えられる。また、このことから体積変化が生じていることが推測される。これは、粒子の回転の自由度を与えており、その回転角を考慮した変位量を用いている影響であると考えられる。

4. まとめ

MPS法の弾塑性動的解析コードを構築し、単純せん断試験をシミュレーションした。その結果、解析結果はほぼ理論解と近似することを明らかとした。今後も地盤構造物の大変形解析手法構築のために更なる検討を行う予定である。

5. 謝辞

本研究を行うに当たって、岐阜大学 森口周二博士、野々山栄人博士には粒子法に関する有益なご助言を頂いた。ここに記して、謝意を表する。

<参考文献>

- 1) 越塚誠一：計算レクチャーシリーズ 5 粒子法，丸善，2005.
- 2) 五十里ら：斜面崩壊誘発型津波の数値解析のための流体-弾塑性体ハイブリッド粒子法の開発，土木学会論文集 B2, Vol.B2-65, No.1, pp.46-50, 2009.
- 3) 吉田ら：MPS 法を用いた地震応答解析のための基礎検討，

土木学会論文集 A, Vol. 66.No.2, pp.206-218, 2010.

- 4) 野々山ら：SPH法を用いた粘土材料の単純せん断解析，地盤工学研究発表会発表講演集2008, pp.307-308, 2008.

【せん断速度分布】

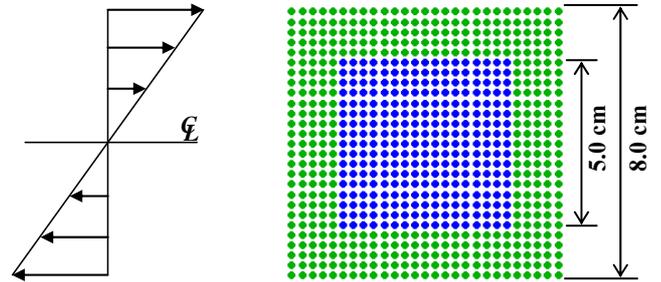


図-1 解析粒子モデル

表-1 解析に用いた物性値

弾性係数 E [kPa]	2000
ポアソン比 ν	0.35
粘着力 c [kPa]	0.0 ~ 15
内部摩擦角 ϕ [deg]	0.0 ~ 15
粒子の密度 ρ [kg/m ³]	1600
減衰比 h	0.01

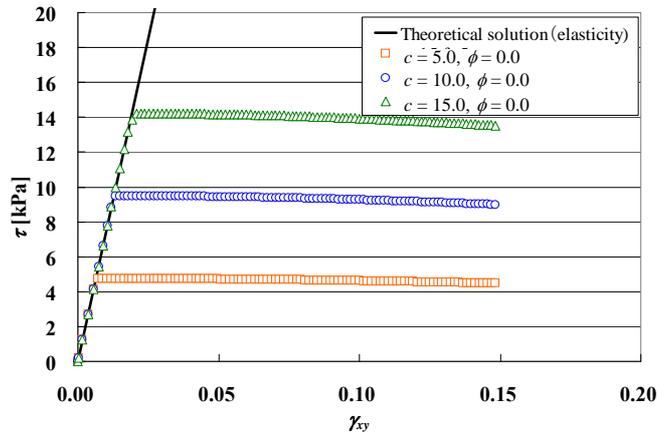


図-2 せん断応力～せん断ひずみ関係

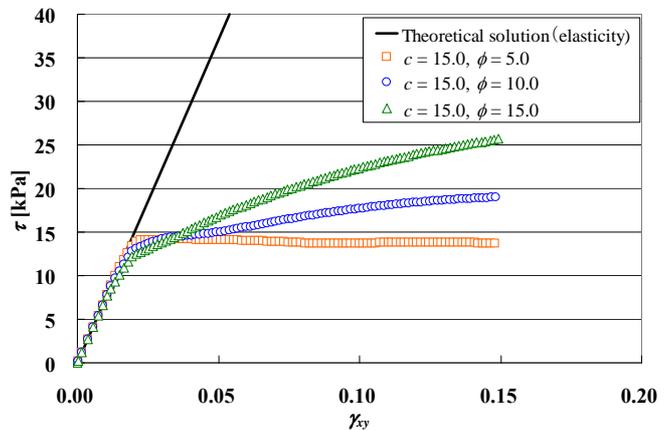


図-3 せん断応力～せん断ひずみ関係