

1. 研究の背景・目的

著者らは、粒子群最適化法(Particle Swarm Optimization, 以下 PSO¹⁾)を改良して得られた SA-MDMS-PSO²⁾を参考にして、三軸圧縮試験から SYS Cam-clay model³⁾の発展則パラメータおよび初期過圧密、初期構造を推定する手法を提案し、パラメータが既知である解析結果の再現に成功した⁴⁾。文献 4)においては、SYS Cam-clay model における弾塑性パラメータを既知として、発展パラメータを推定したが、本報告ではすべてのパラメータを推定することを試みた。その際に、パラメータの推定範囲を変化させて、それが解の探索能力に及ぼす影響について検討した。なお、実際の実験結果を再現する前の検証として、パラメータが既知な解析結果を再現できるか否かについて検討した。

2. 本研究で用いた PSO の概要

PSO とは、鳥や魚の群れから着想を得た手法である。PSO では、多次元の関数空間上に位置ベクトルと速度ベクトルを持つ多数の粒子が、群全体の情報を共有しながらある目的関数の評価値が最良となる位置ベクトルの探索を行う。SA-MDMS-PSO における速度ベクトル $\mathbf{v}$ と位置ベクトル $\mathbf{x}$ の更新式は以下の通りである。

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + \mathbf{v}_i^{t+1}, \mathbf{v}_i^{t+1} = w\mathbf{v}_i^t + c_1r_1(\mathbf{pbest}_i^t - \mathbf{x}_i^t) + c_2r_2(\mathbf{lbest}^t - \mathbf{x}_i^t) \quad (式 1)$$

右が速度ベクトルの更新式、左が位置ベクトルの更新式である。ここに c_1, c_2, w は粒子群最適化法のパラメータである。 c_1, c_2, w は全て 0.9 とした。 r_1, r_2 は 0~1 の乱数が代入される。乱数については、粒子ごとに違うものを毎回与える。 $\mathbf{pbest}_i^t$ は、ある粒子自身が過去に得た目的関数の評価値が最良となった位置ベクトルである。 $\mathbf{lbest}^t$ は、粒子群をいくつかのグループに分けて、そのグループ内で目的関数の評価値が最良となった位置ベクトルを示す。何回か粒子の情報を更新した後に、グループの分け直しを何度もすることで、集団全体の情報を共有しながらも局所解に陥りやすい問題を避ける工夫をしている。

3. 対象とした問題と計算フローについて

本報告では、等方圧縮過程および非排水せん断過程を SYS Cam-clay model で計算した。初期の拘束圧は 20kPa で等方的である。非排水せん断過程における拘束圧は 100,300,500kPa の 3 つである。正解パラメータを表 1 に示す。本検討では、すべてのパラメータの推定を行った。まず、最初に 400, 800, 1600, 3200 パターンのパラメータセットを用意する。パラメータの取り得る範囲も表 1 に示すが、この範囲内の中で一様乱数を発生させて、パラメータセットを作成し、粒子を 80 個ずつ島に振り分けた(手順①)。広い方は、過去の研究において SYS Cam-clay model を用いて実施した計算結果を整理し、最大値と最小値を設定した。狭い方は、発展則パラメータについては、過去の粘性土を想定した SYS Cam-clay model の計算結果を整理し範囲を決定した。弾塑性パラメータについては、文献 5),6)などを参考に範囲を決定した。初期値については、過圧密比のみ範囲を狭くしたが、実際の問題を考えると土被り圧からある程度推定できると考え、正解値の 50~200%の範囲に設定した。

次に、作成したパラメータセットを用い、SYS Cam-clay model の計算を実施する(手順②)。そして、正解パラメータの計算結果と、粒子ごとに得られた計算結果の比較を行い、各々の粒子の評価を行う(手順③)。その後、 $\mathbf{pbest}_i^t, \mathbf{lbest}^t$ の更新を行い、式(2),(3)を用いて粒子の位置情報を更新する(手順④)。そして、手

表 1 正解パラメータとパラメータの範囲

	正解	範囲(広)	範囲(狭)
弾塑性パラメータ			
圧縮指数	0.200	0.05-0.30	0.15-0.25
膨潤指数	0.020	0.005-0.03	0.015-0.03
限界状態定数	1.200	1.0-2.0	1.2-1.3
NCL の切片 (98.1 kPa)	2.500	1.5-3.0	2.0-2.7
ポアソン比	0.300	0.1-0.4	0.25-0.4
発展則パラメータ			
正規圧密土化指数	6.000	0.01-30.0	1.0-30.0
構造劣化指数	0.600	0.01-10.0	0.01-1.0
$\ \mathbf{D}_s^p\ $ と $-D_p^p$ の比	0.300	0.10-1.0	0.1-0.9
回転硬化指数	0.100	0.01-10.0	0.01-1.0
回転硬化限界定数	1.000	0.01-1.0	0.01-1.0
初期値			
過圧密比	0.025	0.01-1.0	0.013-0.05
異方性	0.0	0.0-1.0	0.0-1.0
比体積	2.700	2.700±0.025	2.700±0.025

順②へ戻る．なお，手順④において式(3)を計算した際，速度ベクトルのノルムが 0.01 以下となる粒子が 80%を超えた場合に，局所解に陥ったと判定し，粒子を再配置する．再配置の方法は小林らとは異なるが，考え方を参考にして，全体の 25%を狭い範囲を探索する粒子，残りを広い範囲を探索する粒子に分けた²⁾．狭い範囲を探索する粒子については，粒子全体の過去に得た目的関数の評価値が最良となった位置ベクトル付近に粒子を再配置し，広い範囲を探索する粒子は手順①と同じ方法で粒子を再配置した．粒子の島へ再配置回数は，粒子の 400 個の場合は 800 回，粒子の数が 3200 個の場合は 100 回とし，粒子の数×島への再配置回数が同じになるようにした．島への再配置は粒子を 15 回更新するたびに実施した．また，粒子を再配置した際に $lbest^t$ はリセットした．なお，検討は各ケースで 30 回ずつ実施した．

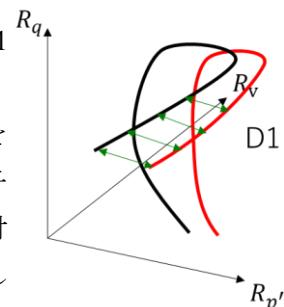


図1 粒子の評価方法
(赤：正解，黒：推定)

手順③について，詳しく説明する．図1に，正解パラメータの計算結果とある粒子の計算結果を示す．3つの軸 R_p', R_q, R_v を定義し，その空間内で推定結果と計算結果を評価する． R_p', R_q, R_v は以下の通り定義される．

$$R_{p'} = \frac{p' - p'_{\min}}{p'_{\max} - p'_{\min}}, R_q = \frac{q - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}}, R_v = \frac{v - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}} \quad (式2)$$

$p'_{\max}, p'_{\min}, q_{\max}, q_{\min}, v_{\max}, v_{\min}$ は，それぞれ正解値の三軸試験結果における最大および最小の平均有効応力 p' ，軸差応力 q ，比体積 v である．このように評価することで，実験が様々な条件で行われたり，供試体が異なっていたりしても，実験結果を同じ空間内で評価することができると考えた．なお，せん断ひずみ 0.1%ごとに， R_p', R_q, R_v 空間における正解と推定結果の距離の絶対値を計算し，それを平均化した値(D1)で粒子が評価される．D1 が 0 になれば，完全に正解パラメータと推定結果が一致することから，D1 が小さければ小さいほど，その粒子の評価が高くなる．また，D1 が 1.0×10^{-6} より小さいと，パラメータを少数第三位まで推定できることが分かっているので，その場合，計算を打ち切った．

4. パラメータ推定結果および結論

表2は D1 が 1.0×10^{-6} になった回数，つまりパラメータの推定ができた回数を示す．粒子数が多い方が推定できる可能性が高い．範囲が狭い方が，パラメータの推定ができた回数が多い．特に粒子数が多い場合に，範囲を推定する効果の高さが確認された．また，図2に粒子数が 1600 個の時の D1 と計算回数の関係を示す．図2より範囲が狭い場合の方がより速く推定できることが明らかである．圧縮指数や NCL の切片などは，液性限界の値からある程度推定することが可能である（文献 5)や 6)）．また，砂質土か粘性土かで，探索範囲を狭めることが可能となる．このことから粒度試験や液性限界試験といった物性試験も非常に重要な情報であることが，改めて確かめられた．なお，パラメータの推定については，最大でも 5 時間程度で完了する．

謝辞 本研究は独立行政法人環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20201004）により実施した．

参考文献

- 1) Kennedy, J. and Eberhart, R. C.: Particle swarm optimization, *Proc. of IEEE the International Conference on Neural Networks*, Vol. 4, pp.1942-1948, 1995. 2) 小林ら，停滞回避 PSO の提案と評価，情報処理学会研究報告，Vol.2014, pp.1-6, 2014. 3) Asaoka et al.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils. *Soils and Foundations* 42(5), 47-57, 2002. 4) 酒井崇之，中野正樹：粒子群最適化法による構成則パラメータ推定手法の提案と検討，令和3年度土木学会中部支部研究発表会，III-07, 2022. 5) 山内義明，三好千春：圧縮指数を推定する土質定数と問題点について，全地連「技術フォーラム」那覇，2010. 6) 田代ら：練り返し試料の圧縮曲線に及ぼす試料作製時の含水比の影響，地盤工学ジャーナル，Vol.5, No.1, pp81-87, 2010.

表2 探索結果のまとめ

粒子数	範囲	D1< 1.0×10^{-6} になった回数
400	広い	0
800	広い	4
1600	広い	6
3200	広い	10
400	狭い	3
800	狭い	7
1600	狭い	24
3200	狭い	25

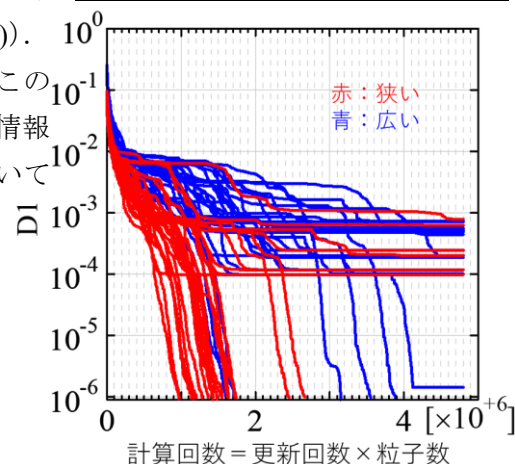


図2 D1 と計算回数の関係(粒子数 1600 個)