

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

名古屋大学 正会員 酒井 崇之
 名古屋大学 フェロー会員 中野 正樹

1. 研究の背景・目的

昨今、土構造物に対しても性能設計が重要視されており、有限要素法等による詳細な解析が実施されている。解析を実施する際のパラメータは、土質試験結果から推定されることが多い。しかしその推定方法は技術者によって異なり、経験の少ない技術者か熟練者によっても異なることが予想される。そこで、本研究では、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⁾という方法を参考にして、SYS Cam-clay model³⁾の材料定数および初期値を推定する手法を提案する。本報告では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。

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

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + \mathbf{v}_i^{t+1} \quad (式 2)$$

式(1)が速度ベクトルの更新式、式(2)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。 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、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通常の PSO の弱点である局所解に陥りやすい問題を避ける工夫をしている。また、本研究では、小林らを参考に、粒子の速さがある一定の値を下回った場合に、再度粒子を配置し直すという改良を施した²⁾。

3. 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 で等方的であるとし、初期の異方性はないものとした。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、紙幅の都合上、構造が壊れにくく過圧密が解消しやすい粘土に近い特性を持つ材料に対する検討のみを示す。この正解パラメータに対し、弾塑性パラメータと比体積は既知とし、発展則パラメータと初期過圧密比、初期構造の程度の推定を行った。なお、初期過圧密比と初期構造はどちらかが決まれば、もう片方は算出できる。まず、最初に

材料の種類	粘土	範囲
既知のパラメータ		
圧縮指数	0.200	-
膨潤指数	0.030	-
限界状態定数	1.200	-
NCL の切片 (98.1 kPa)	2.000	-
ポアソン比	0.300	-
比体積	3.500	-
推定するパラメータ		
正規圧密土化指数	2.300	0.01-30.0
構造劣化指数	0.400	0.01-10.0
$\ \mathbf{D}_p^p\ $ と $-D_p^p$ の比	0.300	0.10-1.00
回転硬化指数	0.100	0.01-10.0
回転硬化限界定数	1.000	0.01-1.00
初期過圧密比	0.05	0.001-1.00

粒子の数だけ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た(手順①)。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。

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。せん断ひずみ0.1%ごとに、拘束圧で正規化した

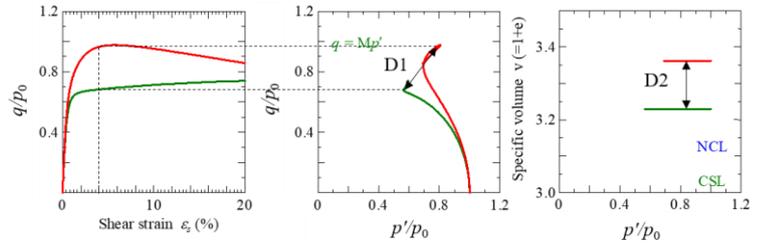


図1 粒子の評価方法 (赤：正解, 緑：推定)

p' - q 空間における正解の計算結果と粒子の計算結果の距離の絶対値を計算し、それを平均化した(D1)。また、等方圧縮過程における圧縮量の違いも考慮しており、等方圧縮後の正解の計算結果と粒子の計算結果の比体積の差の絶対値を取った(D2)。つまり、D1 と D2 の和を目的関数とし、これが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 と D2 の和が小さければ小さいほど、その粒子の評価が高くなる。D1+D2 が 1.0×10^{-6} より小さくなった場合、推定パラメータの小数点第4位を四捨五入すると、正解と完全に一致するので、D1+D2 が 1.0×10^{-6} より小さくなったら計算を打ち切った。

4. パラメータ推定結果

本検討では、グループの数のみ比較し、他は全て同一とした。なお、グループの数が1の時は、PSO とほぼ同じである。グループの数は1, 5, 10, 20, 40, 80 初期粒子は400個とし、 c_1, c_2, w は全て0.9、グループを分け直す回数は300回、パラメータの更新は9000回行った。図2は、更新回数とその時の最も良い粒子の成績(D1 と D2 の和)を示す。グループの数が1つの場合が最も成績が悪いことから、グループ分けの効果が示された。ただし、グループの数と収束性の相関は見られない。本検討では、グループの数が10個と40個のケースで推定が完了した。グループの数が40個の時のパラメータの推移を表2に示す。また、図3にD1+D2が0.208, 10^{-3} の時、正解値の時の計算結果を示す。見た目では、D1+D2が 10^{-3} の時にほとんど一致している。D1+D2が 10^{-4} の時に推定値は、ほぼ正解と一致しているが、少数第三位まで一致させる場合、D1+D2が 10^{-6} よりも小さくなる必要がある。なお、1ケースあたりの計算時間は、CPUにIntel Core i9-10850K 3.60GHzを搭載したPCでおよそ4時間程度である。

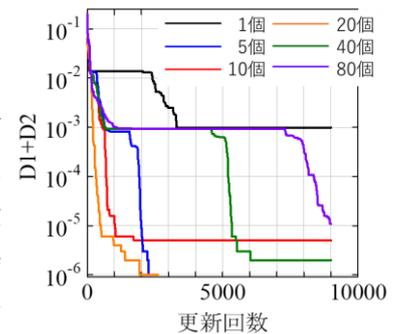


図2 全体の中で最も良い成績だった粒子の成績の推移

表2 パラメータの推移(島の数40個, 小数点第四位を四捨五入)

D1+D2	0.208	0.098	0.011	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
正規圧密土化指数	11.08	7.877	2.158	2.307	2.300	2.300	2.300
構造劣化指数	0.308	0.010	0.372	0.403	0.400	0.400	0.400
$\ D_p^p\ $ と $-D_p^p$ の比	0.494	0.873	0.240	0.296	0.300	0.300	0.300
回転硬化指数	7.999	6.985	0.057	0.103	0.101	0.100	0.100
回転硬化限界定数	0.437	0.010	0.736	0.978	0.991	0.997	1.000
初期過圧密比	0.055	0.051	0.486	0.500	0.500	0.500	0.500

見た目では、D1+D2が 10^{-3} の時にほとんど一致している。D1+D2が 10^{-4} の時に推定値は、ほぼ正解と一致しているが、少数第三位まで一致させる場合、D1+D2が 10^{-6} よりも小さくなる必要がある。なお、1ケースあたりの計算時間は、CPUにIntel Core i9-10850K 3.60GHzを搭載したPCでおよそ4時間程度である。

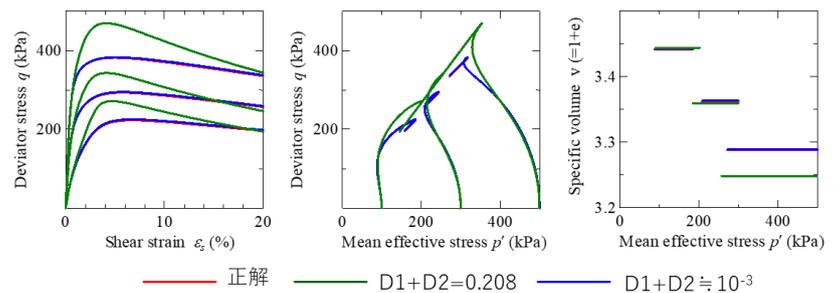


図3 得られたパラメータにおける非排水三軸圧縮試験の計算結果

5. 結論

本報告では、SA-MDMS-PSOを用いたパラメータ推定方法を検討し、非常に有効な方法であることを示した。今後は異なる実験結果からの推定や、実際の実験結果を使った推定を実施する予定である。

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, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K., Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils. Soils and Foundations 42(5), 47-57, 2002.