

粒子群最適化法による構成則パラメータ推定に効果的な土質力学試験組み合わせの考察

逆解析 構成式 三軸試験

名古屋大学 国際会員 ○酒井 崇之 中野 正樹

1. はじめに

土の力学挙動を構成則で表現するパラメータの推定には、たいいてい三軸圧縮試験や標準圧密試験などで得た力学挙動に対し、試行錯誤しながら手作業でパラメータを変化させて入力し、得られた数値シミュレーションの結果を比較し、力学挙動をよりよく適合するようにして行われる。しかし、多くの研究で再現の度合いにおいては、定量的に評価していないことが多い。また、パラメータを推定する際、どの試験をいくつやるのかについて、客観的根拠がない。そこで、本研究では、粒子群最適化法(PSO¹⁾)を改良した DMS-PSO²⁾を用い、解析対象となる試験結果と、計算結果の差を定量化した目的関数を最小化するアルゴリズムを構築し、構成則のパラメータの推定を行う。その際に、パラメータの推定に効果的な実験の組み合わせと数についても考察を行った。なお、構成則による計算結果をターゲットとなる試験結果と見做して、本手法によるブラインドテストを実施し、正解となるパラメータが得られるかどうかで検証を行う。

2. ターゲットに関して

本報では、修正 Cam-clay model³⁾および SYS Cam-clay model⁴⁾のパラメータの推定を試みる。推定するパラメータと正解パラメータを表1, 2に示す。修正 Cam-clay model では繰返し正規圧密粘土を、SYS Cam-clay model は自然堆積粘土のような骨格構造を有する粘土を表現している。検討ケースを表3, 4に示す。図1は修正 Cam-clay model における対象となる結果を示す。修正 Cam-Clay model では拘束圧の異なる三軸圧縮試験CUを対象とした。図2はSYS Cam-clay model における対象となる結果を示す。SYS Cam-Clay model では、三軸圧縮試験CUと三軸伸張試験CUEを対象とした。Case 4~7は拘束圧を変えたり、CUとCUEを組み合わせたりした。Case 8~12は異なる拘束圧のCUとCUEを組み合わせる3種類の実験を実施したケースとなる。

表1 修正 Cam-clay model の正解パラメータと推定範囲

	正解	推定範囲
圧縮指数 λ	0.210	0.177-0.380
膨潤指数 κ	0.035	0.026-0.069
限界状態数 M	1.500	1.45-1.55
NCL の切片 (98.1 kPa) N	2.400	-
ポアソン比 ν	0.300	0.01-0.49
比体積 v	2.734	2.734±0.025

表2 SYS Cam-clay model の正解パラメータと推定範囲

	正解	推定範囲
正規圧密土化指数 m	10.00	1.0-30.0
構造劣化指数 a	0.450	0.01-1.0
$\ D_s^p\ $ と $-D_v^p$ の比 C_s	0.300	0.1-0.9
回転硬化指数 br	0.010	0.01-1.0
回転硬化限界定数 m_b	1.000	0.01-1.0
過圧密 R	0.025	0.013-0.05
異方性 ζ	0.10	0.0-1.0
比体積 v	3.090	3.090±0.025

※弾塑性パラメータは表1の正解と同じで固定値とした。

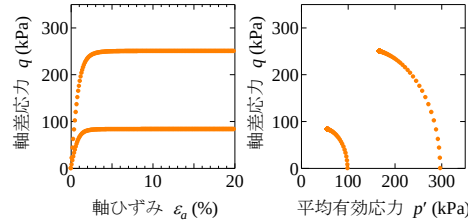


図1 修正 Cam-clay model パラメータの推定での対象となる三軸試験結果

表3 対象実験 (修正 Cam-clay model)

Case	対象試験
1	C $\bar{U}$ (100 kPa)
2	C $\bar{U}$ (300 kPa)
3	C $\bar{U}$ (100, 300 kPa)

表4 対象実験 (SYS Cam-clay model)

Case	対象試験
4	C $\bar{U}$ (100, 500 kPa)
5	C $\bar{U}$ (100 kPa), C $\bar{U}E$ (100 kPa)
6	C $\bar{U}$ (500 kPa), C $\bar{U}E$ (500 kPa)
7	C $\bar{U}$ (100 kPa), C $\bar{U}E$ (500 kPa)
8	C $\bar{U}$ (100, 300, 500 kPa)
9	C $\bar{U}$ (100, 500 kPa), C $\bar{U}E$ (100 kPa)
10	C $\bar{U}$ (100, 300 kPa), C $\bar{U}E$ (300 kPa)
11	C $\bar{U}$ (100, 500 kPa), C $\bar{U}E$ (500 kPa)
12	C $\bar{U}$ (300, 500 kPa), C $\bar{U}E$ (500 kPa)

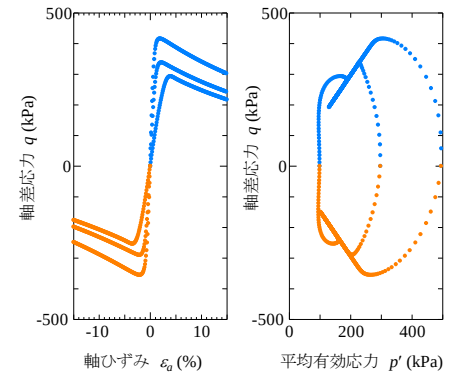


図2 SYS Cam-clay model パラメータの推定での対象となる三軸試験結果

3. 目的関数と DMS-PSO による目的関数最小化アルゴリズム

2. で示したターゲットとなる試験結果に対し、後述する DMS-PSO によるブラインドテストを実施し、正解パラメータが推定できるかどうか検討した。本報では、ターゲットと推定結果の差を定量化して、それを最小化することで、パラメータの推定を行う。図3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_k^p , R_k^q , R_k^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_k^p , R_k^q , R_k^v は以下の通り定義される。

$$R_k^p = \frac{p' - p'_{kTmin}}{p'_{kTmax} - p'_{kTmin}}, R_k^q = \frac{q - q_{kTmin}}{q_{kTmax} - q_{kTmin}}, R_k^v = \frac{v - v_{kTmin}}{v_{kTmax} - v_{kTmin}} \quad (式1)$$

p'_{kTmax} , p'_{kTmin} , q_{kTmax} , q_{kTmin} , v_{kTmax} , v_{kTmin} は、それぞれ k 番目のターゲット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。せん断ひずみ

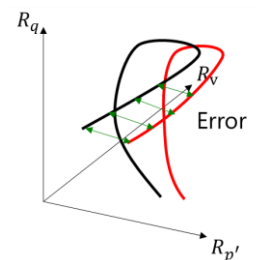


図3 目的関数の図化 (赤: 正解, 黒: 推定)

0.1%ごとに R_k^p , R_k^q , R_k^r 空間におけるターゲット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 $Error$ が目的関数となる。 $Error$ が0になれば、完全にターゲットと推定結果が一致する。また、 $Error$ が 1.0×10^{-6} より小さいと、正解の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ため、 $Error < 1.0 \times 10^{-6}$ であれば推定完了とした。

$Error$ を最小化するアルゴリズムとして、DMS-PSOを用いた。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。DMS-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。

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + \mathbf{v}_i^{t+1}, \quad \mathbf{v}_i^{t+1} = w\mathbf{v}_i^t + c_1r_1(\mathbf{pbest}_i^t - \mathbf{x}_i^t) + c_2r_2(\mathbf{lbest}_i^t - \mathbf{x}_i^t) \quad (式2)$$

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 $Error$ が最少となった時の位置ベクトルである。 $\mathbf{lbest}_i^t$ 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 $Error$ が最少となった時の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。なお、パラメータの推定範囲は、物性試験や既往の研究を参考に設定した(表1,2)。アルゴリズムの計算手順の詳細については、文献5)を参考されたい。

4. Cam-clay modelのパラメータ推定

ここでは、粒子数を400個、グループの数を40個として計算を実施した。推定を100回行い、推定成功回数($Error < 1.0 \times 10^{-6}$ となる回数)をNs, 推定成功までの位置更新回数の平均Av., その標準偏差Std.を表5に示す。今回いずれのケースも100回推定することができた。そして、ターゲットを2つにする(Case 3)と、1つの場合よりも、Av.やStd.が小さい。すなわち、速く、安定な推定が可能であることを示している。

5. SYS Cam-clay modelのパラメータ推定

ここでは、粒子数を1500個、グループの数を30個として計算を実施した。4章と同様に推定を100回行った。推定成功回数($Error < 1.0 \times 10^{-6}$ となる回数)をNs, 推定成功までの位置更新回数の平均Av., その標準偏差Std.を表6に示す。また、 $Error$ と位置更新回数の関係を図4に示す。図4に示す通り、実験が2つの場合、Case 5のように $Error$ が 10^{-4} あたりで停滞してしまう場合が多い。一方、実験を3つ実施すると、 $Error < 1.0 \times 10^{-6}$ となる。そして、実験を3種類以上実施しないと、推定成功回数が100回中100回にならないことがわかる。また、Case 8に比べて、Case 9~11はAv.やStd.が小さく、図4からも $Error < 1.0 \times 10^{-6}$ となる位置更新回数はCase 9ではあまりばらつきがないが、Case 8は大きくばらついている。つまり、実験の組み合わせによっては、速く安定した推定が可能であることがわかった。

本検討では、圧密降伏応力がおおよそ300kPaとなるように値を設定した。Case 9~11は過圧密状態(拘束圧100kPa)と正規圧密状態(拘束圧500kPa)において実験を行っている。一方、Case 12はすべての実験が正規圧密状態で実験を行ったため、過圧密 R や正規圧密土化指数 m の推定が難しく、推定に失敗した場合もあった。また、Case 8のようにすべて圧縮試験を実施した場合よりも、伸長試験を実施したCase 9~11の方が、探索がしやすい。今回、初期の異方性を設定したため、異なる方向に载荷するような異方性を評価可能な試験の組み合わせの方が、パラメータの推定がしやすいことがわかった。

6. おわりに

DMS-PSOを用いたパラメータ推定においては、少なくともCam-clay modelは2つの実験を、SYS Cam-clay modelは3つの実験を実施したほうが良い。特に、SYS Cam-clay modelでは、複数の拘束圧における圧縮試験および、伸長試験を1つ実施すると安定した推定が可能である。今後は、実際の実験を用いたパラメータ推定も実施していく予定である。

参考文献：1) Kennedy J, Eberhart R (1995) Particle swarm optimization. In: Proceedings of ICNN'95 - international conference on neural networks. IEEE, New York, US, pp 1942-1948. 2) Liang JJ, Suganthan PN (2005) Dynamic multi-swarm particle swarm optimizer. In: Proceedings 2005 IEEE Swarm Intelligence Symposium. IEEE, New York, US, pp 124-129 3) Roscoe KH, Burland JB (1968) On the generalized stress-strain behaviour of wet clay. Cambridge University Press, Cambridge, UK 4) Asaoka A, Noda T, Yamada E, Kaneda K, Nakano M (2002) An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils. Soils Found 42:47-57. 5) 酒井崇之, 中野正樹：粒子群最適化法による土の構成則のパラメータの自動的な推定方法の提案, 第35回中部地盤工学シンポジウム, pp.79-86, 2023.

表5 Cam-clay modelの推定結果

Case	Ns	Av.	Std.
1	100	493.6	75.6
2	100	532.8	109.2
3	100	278.1	14.1

表6 SYS Cam-clay modelの推定結果

Case	Ns	Av.	Std.
4	22	-	-
5	75	-	-
6	3	-	-
7	12	-	-
8	100	3915.3	1356.5
9	100	1465.2	198.5
10	100	1316.9	142.4
11	100	1655.8	270.7
12	99	-	-

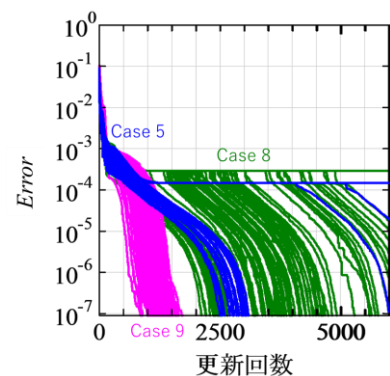


図4 Errorと位置更新回数の関係